

作物収量算定モデルの高精度化と
気候変動が農業生産に与える影響の
定量的分析に関する研究

辰己賢一

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	3
第2章	メッシュ気候値の再現性比較	5
2.1	既往の研究	5
2.2	気候値データの概要	8
2.2.1	ERA-40 再解析データ	8
2.2.2	CRU TS 2.1	9
2.2.3	JRA-25 再解析データ	9
2.2.4	GPCP 降水量データ	9
2.2.5	CMAP 降水量データ	10
2.2.6	CMIP3 マルチ気候モデルデータ	10
2.3	気候値の再現性評価手法	11
2.3.1	気候平年値の再現性評価	12
2.3.2	気候値の季節内変動における再現性の評価	14
2.4	気候値再現性の統計学的解析	46
2.4.1	バイアスの標準偏差	46
2.4.2	バイアスの平均絶対誤差	47
2.4.3	時系列で見た気候値の再現性	48
	気温の再現性	48
	降水量の再現性	51
2.4.4	空間的な比較で見た気候値の再現性	54
2.5	気候値の再現性誤差解析	57
2.5.1	時間的な比較で見た気候値の再現性	57
	気温の再現性	57
	降水量の再現性	58

2.5.2	空間で見た気候値の再現性	60
2.6	結語	87
第3章	全球規模の農業収量算定モデルの開発	89
3.1	既往の研究	89
3.2	モデルの概要	90
3.2.1	参考作物蒸発散の推定	91
3.2.2	作物ごとの温度要件を満たすエリアの算定	93
3.3	水分・土壌環境の制約がない場合における作物収量の算定	100
3.4	水分制約を考慮した収量の算定	105
3.4.1	作物蒸発散量の算定	105
3.4.2	土壌中の水収支	109
3.5	土壌による制限	113
3.5.1	土壌単位による制限	113
3.5.2	土壌フェイズによる制限	116
3.5.3	土性による制限	118
3.5.4	傾斜による制限	118
3.6	機械化効率の勘案	121
3.7	結語	121
第4章	現在気候下におけるモデルの試行と収量再現性	123
4.1	現在気候下におけるモデルの試行と再現性評価結果	123
4.1.1	気候入力データ	123
4.1.2	作物収量の空間分布再現性	124
4.2	地域別に見る作物ごと収量計算値と統計値の比較	135
4.3	収量の統計的誤差解析	143
4.4	結語	156
第5章	気候変動が農業生産に及ぼす影響	157
5.1	既往の研究と気候変動影響評価実験	157
5.1.1	WCRP-CMIP3の概要	159
5.1.2	A1シナリオ	159
5.1.3	A2シナリオ	160
5.1.4	B1シナリオ	160
5.2	気候シナリオの作成と影響評価手法	160
5.2.1	気候シナリオの作成	160

5.2.2	気候変動が作物生産に与える影響と不確実性の評価手法	163
5.3	各シナリオにおける将来の生産量変化と不確実性	163
5.4	気候変動がグリッド上の平均収量に与える影響	181
5.5	結語	191
第 6 章	気温と降水の空間解像度が農業収量算定結果に与える影響	193
6.1	既往の研究	193
6.1.1	研究エリア	194
6.1.2	全球 20kmGCM の概要	194
6.1.3	入力データと計算方法	195
6.2	CRU TS 2.1 と MRI-GCM20 の気候値の比較	196
6.3	気候値の不確実性が作物収量・収穫面積算定結果に与える影響	197
6.3.1	収量の再現性	199
6.3.2	入力データの空間解像度が収量結果に与える影響	201
6.4	結語	203
第 7 章	結論	205
	参考文献	209
	謝辞	221

目次

2.1	CRU TS 2.1 の年平均降水量 (1979-1999 年)	16
2.2	JRA-25 の年平均降水量 (1979-1999 年)	16
2.3	ERA-40 の年平均降水量 (1979-1999 年)	17
2.4	CMAP の年平均降水量 (1979-1999 年)	17
2.5	GPCP の年平均降水量 (1979-1999 年)	18
2.6	JRA-25 の層状性年平均降水量 (1979-1999 年)	18
2.7	JRA-25 の対流性年平均降水量 (1979-1999 年)	19
2.8	ERA-40 の大規模凝結による降水量 (1979-1999 年)	19
2.9	ERA-40 の対流性年平均降水量 (1979-1999 年)	20
2.10	最低気温の月別平年値 (1979-1999 年)	21
2.10	(続き) 最低気温の月別平年値 (1979-1999 年)	22
2.10	(続き) 最低気温の月別平年値 (1979-1999 年)	23
2.10	(続き) 最低気温の月別平年値 (1979-1999 年)	24
2.11	平均気温の月別平年値 (1979-1999 年)	25
2.11	(続き) 平均気温の月別平年値 (1979-1999 年)	26
2.11	(続き) 平均気温の月別平年値 (1979-1999 年)	27
2.11	(続き) 平均気温の月別平年値 (1979-1999 年)	28
2.12	最高気温の月別平年値 (1979-1999 年)	29
2.12	(続き) 最高気温の月別平年値 (1979-1999 年)	30
2.12	(続き) 最高気温の月別平年値 (1979-1999 年)	31
2.12	(続き) 最高気温の月別平年値 (1979-1999 年)	32
2.13	全雲量の月別平年値 (1979-1999 年)	33
2.13	(続き) 全雲量の月別平年値 (1979-1999 年)	34
2.13	(続き) 全雲量の月別平年値 (1979-1999 年)	35
2.13	(続き) 全雲量の月別平年値 (1979-1999 年)	36
2.14	降水量の月別平年値 (1979-1999 年)	37

2.14	(続き) 降水量の月別平年値 (1979-1999 年)	38
2.14	(続き) 降水量の月別平年値 (1979-1999 年)	39
2.14	(続き) 降水量の月別平年値 (1979-1999 年)	40
2.15	CRU TS 2.1 と JRA の全雲量の差の平年値 (1979-1999 年)(%)	41
2.16	1979-1999 年における降水頻度分布 (CRU の月最大降水量に対する割合 を横軸に示す)	42
2.16	(続き) 1979-1999 年における降水頻度分布	43
2.16	(続き) 1979-1999 年における降水頻度分布	44
2.16	(続き) 1979-1999 年における降水頻度分布	45
2.17	標準化された気温値 (左列) と各データセットと NNDC の気温差 (右列)	65
2.17	(続き) 標準化された気温値 (左列) と各データセットと NNDC の気温 差 (右列)	66
2.17	(続き) 標準化された気温値 (左列) と各データセットと NNDC の気温 差 (右列)	67
2.18	標準化された降水量 (左列) と各データセットと NNDC の降水量差 (右 列)	68
2.18	(続き) 標準化された降水量 (左列) と各データセットと NNDC の降水 量差 (右列)	69
2.18	(続き) 標準化された降水量 (左列) と各データセットと NNDC の降水 量差 (右列)	70
2.19	NNDC を基準とした気温の相関係数	71
2.20	NNDC を基準とした降水量の相関係数	72
2.21	NNDC を基準とした気温の RMSE	73
2.22	NNDC を基準とした降水量の RMSE	74
2.23	対象データと NNDC の降水量差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率 (%) (右列)	75
2.23	(続き) 対象データと NNDC の降水量差 (mm) (左列) と NNDC との降 水量差率 (%) (右列)	76
2.24	月別の対象データと NNDC の気温差の標準偏差 (°C) (左列) と平均絶 対誤差 (°C) (右列)	77
2.24	(続き) 月別の対象データと NNDC の気温差の標準偏差 (°C) (左列) と 平均絶対誤差 (°C) (右列)	78
2.24	(続き) 月別の対象データと NNDC の気温差の標準偏差 (°C) (左列) と 平均絶対誤差 (°C) (右列)	79

2.25	月別の対象データと NNDC の降水量差率の標準偏差 (%) (左列) と平均絶対誤差 (%) (右列)	80
2.25	(続き) 月別の対象データと NNDC の降水量差率の標準偏差 (%) (左列) と平均絶対誤差 (%) (右列)	81
2.25	(続き) 月別の対象データと NNDC の降水量差率の標準偏差 (%) (左列) と平均絶対誤差 (%) (右列)	82
2.26	対象データと NNDC 間の降水量差の標準偏差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率の標準偏差 (%) (右列)	83
2.26	(続き) 対象データと NNDC 間の降水量差の標準偏差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率の標準偏差 (%) (右列)	84
2.27	対象データと NNDC 間の降水量差の平均絶対誤差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率の平均絶対誤差 (%) (右列)	85
2.27	(続き) 対象データと NNDC 間の降水量差の平均絶対誤差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率の平均絶対誤差 (%) (右列)	86
3.1	作物収量算定モデルのフローチャート	91
3.2	温度気候区分	94
3.3	LAI と最大生長速度に対する割合	102
3.4	土性に関する制約条件	118
3.5	傾斜分類	119
4.1	コムギの収量再現結果 (1961-2000 年平均)	127
4.2	コメの収量再現結果 (1961-2000 年平均)	128
4.3	トウモロコシの収量再現結果 (1961-2000 年平均)	129
4.4	ソルガムの収量再現結果 (1961-2000 年平均)	130
4.5	ジャガイモの収量再現結果 (1961-2000 年平均)	131
4.6	サツマイモの収量再現結果 (1961-2000 年平均)	132
4.7	キャッサバの収量再現結果 (1961-2000 年平均)	133
4.8	ダイズの収量再現結果 (1961-2000 年平均)	134
4.9	各作物の収量再現結果と FAO による統計値との比較 (1961-2000 年)	138
4.9	(続き) 各作物の収量再現結果と FAO による統計値との比較 (1961-2000 年)	139
4.10	各作物収量再現結果と FAO による統計値との比較 (1961-2000 年平均, サークルの大きさは収穫面積を表す)	140

4.10	(続き)各作物収量再現結果とFAOによる統計値との比較(1961-2000年平均,サークルの大きさは収穫面積を表す)	141
4.11	各地域におけるコムギの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)	147
4.12	各地域におけるコメの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)	148
4.13	各地域におけるトウモロコシの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)	149
4.14	各地域におけるソルガムの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)	150
4.15	各地域におけるジャガイモの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)	151
4.16	各地域におけるサツマイモの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)	152
4.17	各地域におけるキャッサバの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)	153
4.18	各地域におけるダイズの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)	154
5.1	地域別に見るコムギの生産量の変化率	169
5.2	地域別に見るコメの生産量の変化率	170
5.3	地域別に見るトウモロコシの生産量の変化率	171
5.4	地域別に見るソルガムの生産量の変化率	172
5.5	地域別に見るジャガイモの生産量の変化率	173
5.6	地域別に見るサツマイモの生産量の変化率	174
5.7	地域別に見るキャッサバの生産量の変化率	175
5.8	地域別に見るダイズの生産量の変化率	176
5.9	近未来および将来におけるコムギの潜在収量変化率(1980-1999年平均比)	183
5.10	近未来および将来におけるコメの潜在収量変化率(1980-1999年平均比)	184
5.11	近未来および将来におけるトウモロコシの潜在収量変化率(1980-1999年平均比)	185
5.12	近未来および将来におけるソルガムの潜在収量変化率(1980-1999年平均比)	186
5.13	近未来および将来におけるジャガイモの潜在収量変化率(1980-1999年平均比)	187
5.14	近未来および将来におけるサツマイモの潜在収量変化率(1980-1999年平均比)	188

5.15	近未来および将来におけるキャッサバの潜在収量変化率（1980-1999 年平均比）	189
5.16	近未来および将来におけるダイズの潜在収量変化率（1980-1999 年平均比）	190
6.1	ハンガリーにおける標準化された収量と収穫面積（上段:トウモロコシ，下段:冬コムギ，左列：収量，右列：収穫面積）	200
6.2	ルーマニアにおける標準化された収量と収穫面積（上段:トウモロコシ，下段:冬コムギ，左列：収量，右列：収穫面積）	200
6.3	1979-1999 年における平均収量に見る解像度の違い（上段：トウモロコシ，下段：冬コムギ）	202
6.4	1979-1999 年における収量と収穫面積の計算値と統計値	202

表目次

2.1	地域ごとの平年値（1979-1999年）	14
2.2	地域ごとの平年値（1979-1999年）	15
2.3	各地域における月別および年平均気温（°C）	62
2.4	各地域における月別（mm/month）および年降水量（mm/year）	63
2.5	各地域における月別および年降水量のPPD（%）	64
3.1	気候区分	93
3.2	温度プロファイル区分	94
3.3	冬コムギの生長に必要な温度要件	95
3.4	春コムギの生長に必要な温度要件	95
3.5	コムギ（亜熱帯）の生長に必要な温度要件	96
3.6	コムギ（熱帯）の生長に必要な温度要件	96
3.7	コメ（インディカ種，灌漑）の生長に必要な温度要件	96
3.8	コメ（インディカ種，乾燥地）の生長に必要な温度要件	97
3.9	コメ（ジャポニカ，灌漑）の生長に必要な温度要件	97
3.10	トウモロコシ，ソルガム（低地）の生長に必要な温度要件	97
3.11	トウモロコシ，ソルガム（高地）の生長に必要な温度要件	98
3.12	トウモロコシ（亜熱帯）の生長に必要な温度要件	98
3.13	トウモロコシ（温帯）の生長に必要な温度要件	98
3.14	ジャガイモの生長に必要な温度要件	99
3.15	キャッサバの生長に必要な温度要件	99
3.16	サツマイモの生長に必要な温度要件	99
3.17	ダイズ（熱帯）の生長に必要な温度要件	100
3.18	ダイズ（亜熱帯）の生長に必要な温度要件	100
3.19	バイオマスと収量の算定に必要な作物パラメータ	104
3.20	作物データ	106
3.21	収穫減少係数	106

3.22	土壌タイプと TEW, REW	108
3.23	土壌単位による制約 (天水栽培)	115
3.24	土壌単位による制約 (灌漑)	116
3.25	土壌フェイズによる制約条件 (天水栽培)	117
3.26	土壌フェイズによる制約条件 (灌漑)	117
3.27	傾斜分類による制約	119
4.1	CRU TS 2.1 の仕様	124
4.2	図 4.10 で示すコムギ, コメ, トウモロコシ, ソルガムの決定係数	140
4.3	図 4.10 で示すジャガイモ, サツマイモ, キャッサバ, ダイズの決定係数	141
4.4	収量算定結果と統計値の相関係数 (1961-2000 年)	142
4.5	収量算定値の統計値との差率の標準偏差 (%)	155
4.6	収量算定値の統計値との差率の平均絶対誤差 (%)	155
5.1	計算に用いた GCM モデルと気候シナリオ	162
5.2	コムギの $A_{CP}, P_{CP<0}, SD_{CP}$	177
5.3	コメの $A_{CP}, P_{CP<0}, SD_{CP}$	177
5.4	トウモロコシの $A_{CP}, P_{CP<0}, SD_{CP}$	178
5.5	ソルガムの $A_{CP}, P_{CP<0}, SD_{CP}$	178
5.6	ジャガイモの $A_{CP}, P_{CP<0}, SD_{CP}$	179
5.7	サツマイモの $A_{CP}, P_{CP<0}, SD_{CP}$	179
5.8	キャッサバの $A_{CP}, P_{CP<0}, SD_{CP}$	180
5.9	ダイズの $A_{CP}, P_{CP<0}, SD_{CP}$	180
6.1	本章で使用したデータ	195
6.2	ルーマニア, ハンガリーにおける各月ごとの気候値統計量 (1979-1999 年)	197
6.3	CRU TS 2.1 と MRI-GCM20-0.5 を使った収量値に関する統計量 (1979-1999)	198
6.4	国単位で総計された CRU TS 2.1 と MRI-GCM20-0.5 を使ったハンガリーとルーマニアにおける平均収量 (1979-1999 年)	199
6.5	計算結果と統計値との自由度調整済み決定係数	199
6.6	MRI-GCM20-0.5 と MRI-GCM20-0.25 を使ったトウモロコシの国別収量 (1979-1999 年)	203
6.7	MRI-GCM20-0.5 と MRI-GCM20-0.25 を使った冬コムギの国別収量 (1979-1999 年)	203

第 1 章

序論

1.1 研究の背景と目的

世界の人口は 2010 年 10 月現在の国連推計で 69 億人となっており、2011 年中にも 70 億人を超えると見られている。また、人口増加に加えて所得や生活水準の向上は食料需要を刺激し、2009 年の世界の栄養不足人口は 10 億 2,000 万人に及んでいる。FAO の研究レポート [1] によると、人口 3 割増で食料需要は 6 割増やす必要があり、特に人口増加の激しい発展途上国では、2050 年までに 10 億 600 万 t から 19 億 1,400 万 t に 90% 増やさなければならないことが報告されている。

増大する人口のための食料需要の必要性の増大は、現在において農業生産に利用されている土地を最大限に利用するか、あるいは新たな農地確保のために土地を開拓することにより地球の天然資源を脅かす。その影響は顕著に現れており、土壌の浸食、塩化、砂漠化、水不足、森林の減少、都市拡大などにより耕作地は失われている。21 世紀において、我々は地球の温暖化と気候変動という新たな環境脅威にさらされており、それは多くの発展途上国において潜在的な生産性を低下させる要因となるだけでなく、土地や水の生態系に元に戻らないダメージを引き起こす可能性がある。世界の発展途上国や人口密度の高い地域、雨水栽培地域などにおける過放牧や森林破壊、適当でない土地利用は、問題を悪化させる。

世界の水総使用量の約 70% は農業用水に利用されており、高度な灌漑システムに依存するインドや中国では 90% 近くが農業用水に利用されている。すでに 30 の発展途上国では水不足に直面しており、2050 年までにこの数は発展途上国の大部分である 55 の国まで増加すると予測されている。この水不足と耕作可能エリアの退廃は、作物生産量を増やすのに最も深刻な障害となっており、より効率的な水利用による生産がカギとなる。

1970 年代の緑の革命で始まり、1980 年代の情報革命、1990 年代の遺伝革命に代表される、ここ 30 年の科学的および技術的な発展は、食料及び農業生産の持続可能性のあり

方を変える前例がない機会を提示してきた。40 年前、世界は深刻な食料不足に直面したが、国際的な研究努力によって、科学者は主要農作物の多収量品種を開発することを可能にし、その危機は回避された。緑の革命は、土壌が肥沃で水が豊富である場所においては最も効果的であった。そしてそれは肥料と殺虫剤の大量使用を引き起こした。

世界の農業生産は年間 2.2% 増加しており、1961-2005 年における生産量増加要因の 77% は耕作収量の拡大で、14% は耕地の増大であると考えられている。穀物生産増加の 3 割以上は、鉱物質肥料の使用によるものである。先進国における肥料の量が 3,000 万 t から 2 倍になった際、発展途上国では 400 万 t の低い値が約 20 倍になった。また、世界の作物生産に使われている土地は 15 億ヘクタールであり、そのうち発展途上国が 9 億 6000 万ヘクタールを占める。さらに、過去 30 年間に於いて、世界の作物生産エリアは年間 500 万ヘクタールずつ増えており、そのうちラテンアメリカの国々が 35% を占めている [2]。

近年の情報革命は、相互的にグローバルな農業マネジメントシステムを促進させることができる。例えば、過去において、ローカルな作物種や農業技術、資源管理に関する科学者の知識は、組み入れられてこなかった。さらに、農業研究における成果や世界のあらゆる地域における農業マネジメントに関する知識・経験が普及するまでには相当な時間が必要であった。現代においては、インターネット技術によりこれらのことは瞬時に行うことができるようになった。バイオテクノロジーは、土壌の毒性や干ばつ、害虫・疾病に抵抗する手段となり、作物の栄養価を増大させることができる革新的な作物種を開発するための新しいツールを提供することが可能となった。同時に、環境学的リスクや食の安全における質問に対しても、遺伝子工学とバイオテクノロジーの分野が役に立つことが予想される。GIS (Geographic Information System) や自然資源の適正な管理、情報革命、バイオテクノロジー、ゲノミクスの進歩は、既存のアプローチ手法を変えるのではなく、相互に補完し合って向上させることが必要である。また、農民・農家、研究者、政策決定者、消費者などすべてを巻き込んで資源の有効的な活用に関して議論を行うことが重要となっている [2]。

人類の一次的欲求のために土地で作ることができる農作物は、気候、地形、土壌特性を含む環境因子によって制限される。そしてまたこれらの生産は、土地の保有権、市場、研究機関、農業政策のような政治的要因、人口統計、社会経済、文化などにも左右される。また、21 世紀における食料安全保障、食料需給の見通しを立てる際に、例えば土地利用、水消費、森林保護など的一部分だけ扱うのではなく、より複雑で相互に関連するコンポーネントを考慮していかなければならないことは明らかである。これらの問題に対しては、天然資源の持続可能な管理を行うために連結した総合的システムで扱う必要がある。同様に、持続可能な農業資源の利用は、正しい農業に関する知識に基づいて行われなければならない。しかしながら、我々は将来の土地利用変化や農業生産の見通しについて、確実性のある指標を持たない。例えば、将来においてどのような農業技術が利用可能となり、ど

の程度まで作物に適用可能となるのかについては明確ではない。また、どの程度新しい遺伝的作物種が開発されるのかもわからない。さらに、気候変動が農作物の栽培エリアや生産性にどの程度影響を与えるのかについてはさまざまな研究が行われているが、不確実性を有していることは明らかである。しかしながら、将来におけるそのような重要な変化に関連した一連の仮定に基づいたシナリオアプローチ手法は、不確実性に直面する際において政策決定や意思決定の評価を行うことを可能にする。それぞれの国は、土地や水、気候資源を評価し、正しい知識に基づいた政策や効果的な調査を通して、持続可能な農作物生産に必要な科学と技術知識のベストミックスを目指す統合システムを作成することを最優先しなければならない。

こうした状況に鑑み、食料生産、作物栽培適地の変化が今後も続くのか、将来の食料生産性がどのように推移するのかを考えていくためには、理論的な推察と経験的なパラメータを用い、作物生産算定モデルを高い精度で構築する必要がある。そのためには、農業生産に大きく関係がある気候や地形、土壌の環境などの特性を考慮した環境論的手法による包括的な生産推計を行わなければならない。

本研究の目的は、近年整備されつつある気候、地形、土壌そして作物の農事暦情報、灌漑に着目し、地球温暖化に伴う気候変動が将来の食料生産に与える影響を分析・評価することを可能とする農業収量算定モデルの開発と高精度化、それにより地球温暖化による農業収量の将来変動について定量的に評価することである。

1.2 本論文の構成

次章以下の本論文の構成は以下のとおりである。

第2章において、1979-1999年まで21年間の複数の気候データを用いて、グリッドデータがどの程度の気候値再現性を有しているのかについて統計的な誤差解析手法を用いて検証する。再現性の検証対象としたデータは、Climate Research Units(CRU)が提供している再解析データ(CRU TS 2.1)、European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF)が提供している再解析データ(ERA-40)、気象庁と電力中央研究所の共同研究成果として公開されている再解析データ(JRA-25)、アメリカ大気海洋局の気候予測センターが公開している世界降水量データ(CMAP)、全球降水気候値プロジェクトデータ(GPCP)、第3次結合モデル相互比較プロジェクトにおいて世界各国の研究機関で発表された複数の気候モデルによる出力値(CMIP3)である。

第3章では、より現実的な農作物収量を算定するため、全球を対象に開発された物理法則と作物ごとの栽培期間や気温・水分要件、植え付け期・収穫期などの国別・グリッドごとの最新データセットを含む経験的なパラメータに基づく農業収量算定モデルの構築手法を示す。

第4章では、3章で開発された農業収量算定モデルを現在期間（1961-2000年）の40年間の観測に基づいて得られた気候値データを適用し、コムギ、コメ、トウモロコシ、ソルガム、ジャガイモ、サツマイモ、キャッサバ、ダイズの8種の作物の収量を地域別・グリッドごとに算定し、FAOによる統計量や栽培エリアとの比較によって収量の再現性を評価し、モデルのパフォーマンスを検証する。

第5章では、第3次結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP3）の複数の気候モデルによるSRES A1B, A2, B1シナリオに基づく気候出力値を用いて現在期間（1980-1999年）から近未来期間（2040-2059年）、将来期間（2080-2099年）に向けての複数作物の収量の変化を分析することにより、気候変動が農業生産に与える影響を全球規模で分析する。

第6章では、第3章の農業収量算定モデルを狭い国土を有する農業国において適用し、その再現性の精度を検証する。計算対象とする国は、世界有数のトウモロコシおよびコムギの生産国であるハンガリーとルーマニアとし、入力データにはCRU TS 2.1と超高解像度全球大気モデルの出力量を用い、異なる空間解像度で実施された作物収量値における気温と降水の不確実性と気候入力値の空間平均の影響を調べる。

最後に第7章で結論を述べる。

第 2 章

メッシュ気候値の再現性比較

モデルを用いた各種広域評価を行う際は，そのモデルの精密化が重要な課題となる．一方，モデルから得られる出力値の不確実性にはモデル自体が有する不確実性とともに入力データの不確実性が含まれることから，実際にモデルを用いた研究を行う際は，より精密な入力データを使用することが望まれる．本章では，近年インターネットの普及などによって簡単に利用可能となっている各種グリッドデータを収集・整理した後，再現性に関する評価を行う．さらに，各グリッドデータの長所・短所を明らかにし，次章で取り上げる農業収量算定モデルの入力に使用するデータにはどのグリッドデータが適切であるのかについて分析した結果を示す．

2.1 既往の研究

温室効果ガス濃度の増加による地球規模での気温の上昇に加え，降水分布の変化も気候変動がもたらす重要な特性であると言われている．また，気温の増加は，大気中の保水容量を $7\%/^{\circ}\text{C}$ の割合で増加させ，水文におけるさまざまなサイクルを変化させる要因となっている．特に，降雨量，降雨頻度，降雨強度，降雨の持続時間，降水タイプなどの降水特性およびその極値に影響を与えることが知られている [3]．降水の変化パターンは空間的・季節的に気温変化より変動性が激しく，例えば，北緯 10-30N の陸上における降水量は 1900 年から 1950 年にかけて大幅に増加しているが，1970 年代以降は減少に転じている [4]．また，1900 年から 2005 年では，北アメリカおよび南アメリカの東側 [5][6]，北ヨーロッパ [7] と中央アジア以北 [8]，オーストラリアの大部分 [9] では，有意に降水量が増加している．一方，サヘル地域 [10]，地中海東部 [11]，南アフリカ [12]，南アジア [13] の一部では乾燥が激しくなっている．また，南アフリカ [14]，メキシコ中央部 [15]，スイス [16][17]，日本 [18]，カナダ [19]，アメリカの北東部 [20] では，豪雨イベントの数は増えているが，総降水量は減少する傾向にある．中国では 1950 年代から現在において降水

量の長期的なトレンドは明瞭となっていないが、中国北部では乾燥したエリアが有意に増えている [21]。同じ大陸の異なる地域で傾向が異なるのに加え、同一地域の近くにおいても観測された降水量のトレンドが異なったりすることがある。これは、特に地形の影響を受けやすい場所で見受けられる。それゆえ、正確で空間的に均一な降水量データは気候変動下における降水特性の変化を評価するためには重要となる。しかしながら、実際の観測では長期間に渡り同一の地点で観測することは困難なことが多く、また、標高や観測機器の違い、測定技術の差などが気象値の誤差などに強い影響を与える [22]。

大気の再解析データは空間的あるいは時間的な連続性を有することから気候研究などにおいて幅広く使われている [23][24]。ヨーロッパ中期気象予報センター (ECMWF)[25] とアメリカ環境予測センター (NCEP)/アメリカ大気研究センター (NCAR)[26] は、2つの全球再解析プロジェクトを担っている。NCEP/NCAR は主に2つの再解析データを有している。それらは NCEP-1 Reanalysis, NCEP-2 Reanalysis と呼ばれており、NCEP-2 は NCEP-1 と同じ入力データと水平・鉛直解像度を有しているが NCEP-1 で既知となっている物理プロセスに関するエラーを修正している [27][28]。

上記の再解析プロジェクトは、良く似た入力データを同化して得られたものではあるが、ECMWF と NCEP/NCAR の再解析システムは、モデルの構造、物理パラメタリゼーション、水平・鉛直解像度、入力データの同化手法の点で異なり、結果として、地表面要素においてそれらの間の気候値には偏差が存在する [29]。地表面における各種観測データと比較して、再解析データは時間的・空間的により連続性があるが、これらのデータは必然的にバイアスを有する。例えば、ECMWF 40+ Year Reanalysis (ERA-40) は降水についての解析は行われていない。モデルによる診断的な降水量が雲内におけるパラメタライズされた微物理過程によって生み出されており、雲は対流もしくは大規模過程による過飽和で形成されるとしている [30]。このため、再解析で得られる降水は、強くモデルに依存し、気温よりも大きな問題を含む [31]。再解析データにおける降水量値は、再解析データの中で最も信頼しづらい予報パラメータのうちの一つである。なぜなら、大気の水サイクルに影響を与える重要な物理メカニズムの全てにおいて予報モデルの技術が低いためである [32]。例えば、NCEP-1 では、夏における過大評価された降水や蒸発が陸域において算定されており [28][33]、NCEP-2 で改善されたものの、いくつかのバイアス・エラーは残っているままである。

再解析データに加えて、降水評価は衛星や雨量観測からも得られる。NOAA 気象予報センターは、雨量計やいくつかの衛星を利用して得られた降水量と NCEP/NCAR の再解析データからのデータをマージし、CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP) と呼ばれる半旬あるいは月ごとの全球降水量データを提供している [34]。The Global Precipitation Climatology Project (全球降水気候計画, GPCP) は、衛星と観測された値を合わせて得られた全球降水量データである。CMAP と GPCP は、良く似た空間的・時間的な範囲・特

徴を有しているが、異なる手法によって提供されているものであり、降水量算定のために使われているデータの種類も異なっている [35]。CMAP の衛星観測に基づいて得られた降水評価は、機械走査型マイクロ波放射映像センサ (SSM/I)、赤外線による GOES の降水指数 (GPI)、外向き長波放射 (OLR) による降水指数 (OPI)、マイクロ波探測装置 (MSU) からのデータが使われている。GPCP は、気温/水蒸気量の鉛直プロファイルを得ることができるサウンダである TIROS 実用大気垂直分布観測装置 (TOVS) と大気赤外サウンダ (AIRS) からのデータが利用されている [35][36][37]。

異なる衛星データをベースとして得られた CMAP と GPCP データは必然的にバイアスが生じる。例えば、SSM/I データは 1987 年 6 月から利用できるようになったが、それ以前では、MSU による短波放射データのみが利用され、そのデータは海洋上のみであった [38]。加えて、静止衛星からの赤外線データに容易にアクセスできるアーカイブは 1986 年に利用可能となった [39]。それ以前では、OPI 技術を使った評価は、極軌道衛星からの OLR に基づいて行われていた [34]。GPCP は地表面の雨量データのみ考慮されているが、CMAP は海洋上の個別の環礁雨量計観測値も使用されている。環礁におけるデータは熱帯海洋上における雨量の算定に影響を与え、海洋上における不自然な降雨の減少傾向を明らかにした。CMAP と GPCP は、南アメリカの熱帯エリアなどの陸域において良く似た結果となっている [41]。そしてまた、海域における GPCP の値は CMAP よりも再現性が高い [40]。

ERA-40 と NCEP 再解析データの降水量に関する様々な評価が全球規模あるいは大陸規模で行われている。1988-1995 年における NCEP-1 再解析と GPCP の降水量データを比較した結果では、大きな規模の特徴としては両データセットは良く似た傾向を示しているが、地域スケールでは相当な差があることを Janowiak *et al.* (1998) は示した [31]。北極における N80 グリッドスケールの ERA-40 降水量と T62 ガウシアン格子の NCEP-1 データの 1979-1988 年を評価した結果、Serreze and Hurst (2000)[42] は、両方のモデルが年平均降水量の主要な空間的特徴および季節サイクルの一般的な様相を再現していることを示した。また、彼らは、いくつかの顕著なエラーを発見し、ERA-40 の降水量が優れているという結論を出した。しかしながら、ERA-40 は、地表面フラックスや降水に影響を与え、衛星観測機器の変化に応じて気温や湿度の解析手法が変わる島の地点の代表性に欠けており、データ自体に制約がある [25]。地域単位では、ERA-40 は、熱帯地域において GPCP に比べて一貫して降水を過大評価する傾向があり、ERA-40 の降雨量が有するエラーに関する研究はアマゾン川流域を除いてあまり行われていない [43][44]。アイスランドにおける ERA-40 の降水値は、ERA-40 が季節的な降雨の年変動をよく再現できているが、粗い解像度がエラーの要因となっていることを示した [45]。さらにカナダのマッケンジー川における ERA-40 の降水量のバイアスは、高い変動性を示した [29]。

小出 [46] は、気象庁と (財) 電力中央研究所の共同プロジェクトの成果である再解析

データ Japanese 25- year Reanalysis (JRA-25) のプロダクト特性を調べた．その結果，各再解析プロダクト (ERA-40, NCEP-1, NCEP-2) と比較して，月平均降水量と GPCP との全球の面積加重空間相関について，明瞭な差をつけて精度を有していることを示し，一方，アマゾン域の降水量が過小評価され，特に乾季の終わりから雨季の始まる 11 月～1 月に最もその傾向が顕著となることを示した [46] ．

以上，既往研究では各種データセットの再現性の評価が数多く実施されている．しかしながら，全球規模での多くのデータセットに対して，より真の気候値を示していると考えられる大陸上の地上観測点を基準とした再現性の評価や誤差の解析については十分に行われていないのが現状である．これらの先行研究を踏まえつつ，本章では，農業収量算定モデルの入力データに用いる複数の再解析データや観測に基づいて作成・提供されている各種グリッドデータの気候値の相対的な再現性を評価するとともに，全球の地上観測点の気候値との比較を行い，結果を分析する．

2.2 気候値データの概要

本研究では，欧州中期予報センター (ECMWF) の再解析データ (ERA-40) ，気象庁と (財) 電力中央研究所の再解析データ (JRA-25) ，気候研究ユニット (CRU) から提供されている複数の地上気象観測網を元に作成された気候値データ (CRU TS 2.1) ，地表の雨量計や衛星データから見積もられた全球的な降水量データ (GPCP, CMAP) ，第 3 次結合モデル総合比較プロジェクト (CMIP3) において世界各国の研究機関で開発された複数の気候モデルによる実験結果の 5 種類のグリッドデータを用い，月最高気温，月平均気温，月最低気温，月平均雲量，月平均降水量・年降水量について全地球スケールでの時空間的な再現性を調査する．本小節以降で使用するデータセットについての仕様を述べる．また，GPCP, CMAP データは降水量のみが収録されており，ERA-40 では月最低気温・最高気温は収録されていない．

2.2.1 ERA-40 再解析データ

ECMWF re-analysis 40 years (ERA-40, 以下，ERA) は，ヨーロッパ中期気象予報センターによって作成された再解析データで，1957 年 9 月から 2002 年 8 月までの期間について様々な観測データを高度なデータ同化技術を用いて解析された大気データセットであり，ECMWF の WEB サイト [47] からダウンロードすることができる．降水量は，降雨と降雪の出力からなり，対流性，大規模スケールの降水量を合わせたものが総降水量値となり，月単位の地表面降水データとして提供されている．地表面水平解像度は N80 (約 125km) で，鉛直層数は 60 である．ERA-40 の目的は，広範囲の観測システムを最

適に利用する大気の客観解析値を生成することである。ECMWF の気象予報システムの比較的新しいバージョンは、収録期間全体を通して使われている [48]。対流パラメタリゼーションは Tiedtke (1989)[49]、大規模凝結スキームは Tiedtke(1993)[50] によるものである。GPCP と比較して、ERA-40 の降水量は熱帯の海域上において過大評価されている。一方、亜熱帯地域に関しては、気候学的な平均値だけでなく月々の変動性もよく一致している [48]。フランスのアルプス地方での ERA-40 の降水量は、月単位の地域的な平均を見た際、非常に再現性が高い。しかしながら、個々の観測地点で見たときには実際とモデル間の地形の不一致により、再現性が悪い [51]。これは、グリッドにおける平均値と各地点のポイントデータとのスケールの問題によるところがある。ERA-40 のデータについての詳細および概観については、ERA-40 プロジェクト [52] を参照されたい。

2.2.2 CRU TS 2.1

Climate Research Unit Global 0.5° Monthly Time Series, Version 2.1 (CRU TS 2.1, 以下, CRU) は、Climatic Research Unit (CRU) によって提供されており、全球 0.5 度 × 0.5 度の水平解像度を持つ、1901 年から 2002 年までの過去の観測に基づいて得られた月単位の気候データが収録されている [53]。ただし、南極大陸を除く陸域のみデータ値が入っており、複数の変数（雲量、日内気温格差、霜日頻度、降水量、日最低気温、日平均気温、日最高気温、水蒸気圧、雨日頻度）が整備され、公開されている。

2.2.3 JRA-25 再解析データ

Japanese Re-Analysis 25 years (JRA-25, 以下, JRA) は気象庁と(財)電力中央研究所によって提供されている 1979-2004 年における気候再解析データである。データ同化手法には 3 次元変分法が採用されており、全球予報モデル分解能は T106L40 である。なお、格子系は収録カテゴリーにより異なり、本研究では主として気温、降水量を使用するため陸面解析値を用いた。陸面解析値が収録されているデータの格子系は T106 ガウス格子 (320×160) である [54][55]。

2.2.4 GPCP 降水量データ

Global Precipitation Climatology Project (以下, GPCP) は World Climate Research Program (WCRP) とそれに関連した Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) のプロジェクトの一部であり、空間的・時間的な全球降水パターンについての研究のために集積し提供することを目的としたものである。GPCP が提供するデータは多種類の衛星データと地上観測データを組み合わせたものである。初期の GPCP Version1 (GPCP-1)

データ [37] と比較して、GPCP Version 2 (GPCP-2) データは TOVS(TIROS Operational Vertical Sounder : TRIOS 実用垂直分布測定器)と AIRS(Atmospheric Infrared Sounder : 大気赤外サウンダ), OLR, SSM/I を組み合わせ、Global Historical Climate Network(GHCN) と Climate Assessment and Monitoring System (CAMS) の地上観測の雨量データを組み合わせられて作成されている。また、地上観測の雨量データはデータ検査の後、Legates(1987) [56] の手法を用い、空間内挿した後に衛星データと組み合わせている。収録されている期間は 1979 年から現在までであり、水平解像度は 2.5 度 × 2.5 度である [36]。

2.2.5 CMAP 降水量データ

Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (以下、CMAP) は、CPC の Web サイトから入手することができ、観測機器と衛星観測、NCEP 再解析値をマージして得られた CMAP-1、NCEP 再解析値を考慮しない CMAP-2 の 2 種類のデータが存在する。CMAP のマージ手法は、Xie and Arkin(1997)[34] で述べられている。要約すれば、その手法は次の 2 ステップを採用している。最尤法を使って衛星データを線形結合することによって確率的誤差を減少させている。ここで線形結合係数は、個々のデータソースがもつ誤差の二乗に反比例するように設定している。次に、全球の陸域では、確率的誤差はデータソースと地上観測データを比較することによって、時間ごと、グリッドごとに定義される。バイアスは、Reynolds の手法 [57] を使い、2 番目のステップ時に適用することによって減少させている。なお、1979 年からの月平均の日降水量 (mm/day) が収録されており、水平解像度は 2.5 度 × 2.5 度である。本研究では GPI, OPI, SSM/I, MSU に NCEP/NCAR の再解析データを合わせることによって得られた CMAP-1 データを利用する。

2.2.6 CMIP3 マルチ気候モデルデータ

Phase 3 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP3) のデータは、PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) により WEB 上で公開されており [58]、様々な研究の基礎データとして利用されている。これらの気候モデルの水平解像度は数 100km 程度で、公開されているモデルは 24 種類あり、モデルによって異なる解像度を持つ。本章では、20 世紀再現実験データ (20C3M) のうち、いわゆる平年値期間である 1979-1999 年を用い、24 モデルのアンサンブル平均 (以下、CMIP3) を比較の対象として用いた。なお、24 のモデルについての詳細は表 5.1 を参照されたい。

2.3 気候値の再現性評価手法

本節以下では、CRU TS 2.1, JRA-25, ERA-40, CMAP, GPCP, CMIP3 のバイアス特性を評価する。解析対象期間は、1979-1999 年の 21 年間とし、対象とする気象要素は農業生産分野で必要性が高いと考えられる 5 要素（降水量、月平均気温、月最高気温、月最低気温、月平均雲量）とし、気温については気温減率（0.0065 °C/m）による標高補正を行った。

本研究では国連による地域分類を参考として、世界を 22 の地域に分け、それぞれの地域において再現性を評価する。なお、CRU は陸域部分の情報のみ収録（海域は Missing 値）されているため、各グリッドが属する地域ごとに各気象要素値を導出した。JRA の海陸判定については、本データに付属されている情報を利用した。CMIP3 気候モデルについては、格子点ごとに陸面割合に関する情報が含まれているため、これを利用した。

異なるデータソースを持つ各データセット間の適切な比較のためには、グリッドスケールを統一する必要がある。本研究では、ERA-40 の N80 グリッドを基準とするため、CRU TS 2.1, JRA-25, GPCP, CMAP, CMIP3 のデータを N80 グリッドスケールへとリグリッドした。リグリッドは単純な逆距離加重法（以下、IDW）を用いる [59]。これは解析対象としているデータがすでにグリッドデータであり、適当な補間手法であると考えられるためである。補間の際は、最も近い 5 点の気候値を N80 スケールにおける新しい値を計算するために使用した。IDW の重み係数は次式で示される。

$$w(d) = 1/d^p \quad (2.1)$$

ここで d はサンプリングされていない位置と近傍値間の距離、 p はユーザーが決定する出力係数で、サンプリングされていない点からの距離が大きいほど重みは減少するとし、 p が大きいほど、補間ポイントに最も近い値が大きな影響を与えることとなる。IDW を使ったサンプリングされていない補間位置における気候値は、以下の推計式によって計算される。

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i/d_i^p)}{\sum_{i=1}^N (1/d_i^p)} \quad (2.2)$$

ここで、 Z は、サンプリングされていない位置における気候値、 Z_i はグリッド i における既知の気候値、 N は補間に使われる既知の点の数である。本研究では $p = 1$ とした。

以上から、各地域に属するグリッドデータから気候値を算出し、単純平均することに

よって各地域の気候値を求めた。

2.3.1 気候平年値の再現性評価

表 2.1 に世界の各地域における最低気温，平均気温，最高気温の平年値（1979-1999 年）を示す．表 2.2 に降水量，雲量の平年値（1979-1999 年）を示す．なお，表に示す平年値は 1979-1999 年の各年における月平均値を単純平均して，年平均値を求め，得られた累年の年平均値を単純平均して求めた．表 2.1, 表 2.2 より，CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 間には，バイアスがあることがわかる．平均気温平年値は，すべての地域において比較的類似した値が得られ，各データセットの値には大きな差はなかった．また，再解析値（JRA, ERA），CRU と比較して CMIP3 はアフリカにおいてやや小さい値となったが，年平均気温値にみる CMIP3 と再解析値および CRU との相関係数は全地域において 0.69 以上となり，相関係数の有意性が全地域において得られる結果となった ($p < 0.01$)．また，カリブ地域における CRU の平均気温平年値は 22.0°C となり，JRA (25.8°C)，ERA (26.0°C)，CMIP3 (25.7°C) と比較して 3°C 以上低くなった（表 2.1 網掛け）．一方，JRA の最高気温平年値は日本を除いて，CRU および CMIP3 の平年値を下回っており，最低気温平年値は全地域において CRU，CMIP3 の平年値を上回る結果となっている．つまり，JRA における気温較差は CRU, ERA と比べて小さいことがわかる．また，カリブおよびポリネシアにおける CRU の最低気温平年値は JRA, CMIP3 に比べてそれぞれ 6°C ， 3°C 以上低くなっている．他の地域においても，CRU と他のデータソースとの最低気温平年値の偏差は大きい．このことは，CRU TS 2.1 のデータセットが作成される際において，陸域に占める気温の日較差（DTR）の観測点の割合が他の収録要素と比較して相対的に少ないものによると考えられる [53]．しかしながら，CRU の月平均最低気温と JRA, CMIP3 の月平均最低気温のどちらが地上観測データと比較して再現性が高く，偏差が小さいかについてこの段階では不明であるため調べていく必要がある．最高気温および最低気温の情報は，例えば農業分野では作物の生長などに大きな影響を与えることから，JRA の気温較差が相対的に小さく，逆に CRU の気温較差が相対的に大きくなった本結果は，作物収量算定モデルなどの入力値に再解析データ，CRU, CMIP3 などのグリッドデータを用いる際，その出力値にはバイアスや不確実性が存在することを認識しておくことが重要であることを示す．ただし，どのデータセットがより実際の気温に近いのかどうかについてはこの結果だけでは判断できないことから，地上観測点との比較を詳細に実施していくことが必要となってくる．また，年平均最高気温値の CRU および JRA と CMIP3 の相関係数は，中央アフリカで 0.48 と低い値となったが，ポリネシア（同 0.59）を除く残りの地域では $R > 0.8$ となり，相関は高く，CMIP3 と CRU, JRA の年最高気温の値には有意な相関があると言える ($p < 0.01$)．

次に、年降水量の平年値に目を向ける。図 2.1-図 2.5 は、CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP の 1979-1999 年における気候学的な年平均降水量 (mm/month) を比較した図である。図より空間分布にみる全体的な特徴は各データに共通点がある。すなわち、西太平洋に位置する南太平洋収束帯やインドネシア付近からインド洋にかけての領域で降水量が多く、太平洋上の 10°N 付近に位置する降水帯である熱帯収束帯にも降水量が多く見られる。熱帯域では、JRA, CMAP に比べて、ERA の降水量は多い。例えば、南太平洋の収束帯では、300mm/month を超える領域は限られているのに対し、ERA では、本領域の幅広いところで 300mm/month を超えていることがわかる。この熱帯域での ERA の過大評価は、Troccoli and Kallberg (2004) [43]、久保田ら (2004) [60] で指摘されており、モデルにおける水蒸気スキームの問題点に関連があるとされている。また、同地域における GPCP の降水量は JRA, CMAP に比べて少ない。一方、40°S 以南、40°N 以北の中・高緯度地域においては、マイクロ波などの衛星観測データから降水のリトリバルを行うアルゴリズムの影響を受けるため、その推定値・解析値の違いが大きい。本エリアの降水に関し、地上データの補正を行っている GPCP は CMAP に比べ大きめに降水を算定していることがわかる。次に、JRA の南アメリカ北部の陸域における年平均降水量は他のデータソースと比べて過小評価されていることがわかる (図 2.2, 表 2.2)。表 2.2 の年降水量平年値を見ると、ポリネシアでは ERA が CRU, JRA, CMAP, GPCP, CMIP3 と比べて 2,000mm 以上過大に評価していることがわかる (表 2.2 網掛け)。JRA と ERA のこの地域における対流性降水量 (図 2.7, 図 2.9) を見ると、JRA の方が局所的に大きな値と取っているものの大陸全体としては大きな差異はなく、JRA におけるこの地域での対流性降水量は全降水量とほぼ同じ大きさである (図 2.2, 図 2.6, 図 2.7)。一方、ERA では熱帯で大量の大規模凝結による降水量があるために (図 2.8)、全降水量で他のデータを大きく上回る値になっていることがわかる。しかし、中・高緯度では ERA の降水量は大規模凝結によるものがほとんどであり (図 2.8, 図 2.9)、CMAP データによく対応している。また、東南アジアや南アメリカにおいても、ERA の大規模凝結による降水量があるため、他のデータと比較して過大評価される結果となっている (表 2.2 網掛け)。一方、日本の東側に位置するストームトラックに伴う降水量の極大域 (160mm/month 以上) の領域を見ると、ERA は JRA, CMAP, GPCP と比べて小さく、日本の陸域における年降水量平年値を見ても ERA の降水量が最も小さくなっていることがわかる。また、アメリカフロリダ州では JRA において年平均降水量 160mm/month 以上の値が示されており (図 2.2)、CRU, ERA, CMAP, GPCP に比べて過大評価となっている。

表 2.1 地域ごとの平年値 (1979-1999 年)

Region	Min temperature [°C]			Surface temperature [°C]				Max temperature [°C]		
	CRU	JRA	CMIP3	CRU	JRA	ERA	CMIP3	CRU	JRA	CMIP3
North America (北アメリカ)	-10.1	-5.4	-7.0	-4.5	-4.2	-4.5	-4.9	1.1	-3.0	0.2
Eastern Europe (東ヨーロッパ)	4.0	6.8	5.3	8.4	8.3	8.2	7.8	12.7	9.7	12.2
Northern Europe (北ヨーロッパ)	-0.7	3.1	0.2	3.1	4.0	4.2	1.5	6.9	4.9	5.0
Southern Europe (南ヨーロッパ)	7.6	11.5	10.7	12.5	13.1	13.3	13.2	17.4	14.9	17.1
Western Europe (西ヨーロッパ)	5.4	9.2	7.3	9.4	10.5	10.4	9.4	13.5	12.0	12.9
Russian (ロシア)	-10.9	-5.8	-9.8	-6.1	-4.6	-5.2	-7.0	-1.2	-3.5	-2.8
Caribbean (カリブ)	17.5	25.1	24.0	22.0	25.8	26.0	25.7	26.5	26.4	27.0
Central America (中央アメリカ)	14.4	18.3	16.4	21.5	20.3	21.3	20.7	28.6	22.5	25.9
South America (南アメリカ)	15.9	19.1	16.6	21.5	21.2	21.0	21.2	27.0	23.1	26.4
Oceania (オセアニア)	14.6	17.8	16.0	21.3	20.5	21.7	21.5	28.0	23.0	26.6
Polynesia (ポリネシア)	19.1	22.8	22.2	24.5	23.7	24.4	24.5	30.0	24.7	26.8
Eastern Africa (東アフリカ)	17.3	20.2	17.3	23.3	22.9	23.0	22.3	29.4	25.2	27.5
Central Africa (中央アフリカ)	18.3	22.3	19.3	24.5	24.6	24.1	23.9	30.8	26.9	29.3
Northern Africa (北アフリカ)	16.4	20.0	15.2	23.7	23.1	23.1	22.2	30.9	26.3	29.2
Southern Africa (南アフリカ)	11.9	16.1	13.1	19.5	19.0	19.7	19.0	27.1	21.9	24.9
Western Africa (西アフリカ)	20.7	24.1	19.6	27.5	26.8	26.8	25.9	34.3	29.9	32.8
Western Asia (西アジア)	15.1	18.2	13.6	21.2	21.4	21.7	20.5	27.3	24.1	26.9
Southeast Asia (東南アジア)	20.5	23.3	21.6	25.2	24.5	25.5	24.7	30.0	25.8	27.7
South Asia (南アジア)	13.8	16.9	12.9	20.2	19.4	20.2	19.5	26.7	21.9	26.1
East Asia (東アジア)	-0.6	3.3	-1.5	5.6	5.4	5.3	3.5	11.8	7.7	9.1
Central Asia (中央アジア)	1.8	6.5	3.6	7.6	8.4	7.7	8.2	13.5	10.3	14.0
Japan (日本)	6.3	12.8	10.0	10.4	13.8	14.2	11.3	14.6	14.8	14.6

2.3.2 気候値の季節内変動における再現性の評価

図 2.10 に、地域ごとの最低気温の月別平年値、図 2.11 に平均気温の月別平年値、図 2.12 に最高気温の月別平年値をそれぞれ示す。また、図 2.13 に地域ごとの全雲量の月別平年値を、図 2.14 に降水量の月別平年値をそれぞれ示す。図 2.11 の平均気温の月別平年値を見ると、CRU および JRA, ERA と比較して、CMIP3 の各モデルによる出力値にはばらつきが見られるが、各メンバーによるアンサンブル月平均気温の季節変動の再現性は概ね良好である。一方、カリブにおいては CRU の月平均気温は全月において、JRA, ERA, CMIP3 と比較して、3 以上低い結果を示した(図 2.11(g))。これは、カリブ域に属する陸域のグリッド数が他の地域に比べて相対的に少ないことやハリケーンなどによる極端気象、熱帯低気圧の発生、SST の不確実性など予測にバイアスを生じさせる要因が他の地域に比べて大きいことが原因と考えられる。また、本地域において CMIP3 と JRA, ERA の間には大きな差がない。以上のことから、本地域におけるより正確な地上観測値と CRU や再解析値あるいはアンサンブル平均値との詳細な比較検討が必要である。最高気温、最

表 2.2 地域ごとの平年値 (1979-1999 年)

Region	Precipitation [mm]						Cloud cover [%]			
	CRU	JRA	ERA	CMAp	GPCP	CMIP3	CRU	JRA	ERA	CMIP3
North America	534	548	486	490	576	630	62	50	65	64
Eastern Europe	593	668	554	594	759	678	65	47	63	63
Northern Europe	835	746	788	771	1046	807	70	54	73	74
Southern Europe	768	594	551	639	810	698	54	36	49	52
Western Europe	852	716	683	832	1045	936	67	45	63	67
Russian	430	494	475	423	566	509	70	55	75	70
Caribbean	1386	1628	1578	1036	1337	914	52	45	55	48
Central America	1063	1168	1132	881	1165	1008	53	48	50	49
South America	1493	1207	1767	1439	1576	1317	65	48	62	54
Oceania	530	495	364	517	472	596	40	30	34	36
Polynesia	2785	2777	5046	2584	2820	2587	71	78	89	74
Eastern Africa	875	879	879	894	920	1057	53	42	52	48
Central Africa	1175	1303	1558	1234	1201	1391	59	56	59	56
Northern Africa	180	274	164	206	223	233	36	25	25	24
Southern Africa	375	437	271	390	423	623	37	26	28	33
Western Africa	570	659	643	686	712	626	43	39	38	38
Western Asia	219	306	184	198	241	224	32	23	26	25
Southeast Asia	2306	2374	3109	2124	2347	2238	65	65	74	69
South Asia	716	804	700	691	801	595	40	33	35	32
East Asia	537	663	561	542	622	740	50	41	53	51
Central Asia	268	360	276	248	338	326	51	40	48	44
Japan	1617	1358	1285	1774	1928	1484	70	51	67	66

低気温の月別平年値では、平均気温の月別平年値に比べて、各データ間の偏差は大きな傾向があるが、季節変動の再現性は良く似ている結果となった(図 2.10, 図 2.11, 図 2.12)。また、最高/最低気温の年平年値に示すような傾向が月別の最高/最低気温の平年値でも得られ、CRU と JRA の月別の平年値の間に CMIP3 のアンサンブル平均値を含む傾向がほとんどの地域で見られた(図 2.10, 図 2.12)。また、月ごとの最高/最低気温の較差は一部の地域を除き、CRU が最も大きい結果となった。月別の雲量を地域ごとに見ると、特に北アメリカ、ヨーロッパ、ロシアにおいて JRA の雲量は CRU, ERA, CMIP3 と比較して全月で 10% 以上低く算定されていることがわかる(図 2.13(a)-(f))。図 2.15 に 1 月、5 月、9 月における CRU と JRA の全雲量の平年値(1979-1999 年)の差を示す。アフリカ赤道域、南アジア、東南アジア、南アメリカの一部を除き、ほとんど領域で JRA の雲量は CRU に比べて過小評価されていることがわかる。再解析モデルの大陸上の雲量が少ないことは小池ら [61] によって指摘されている。さらに、CRU では北アメリカ、ヨーロッパ、アジアにおいて雲量観測は各地域で数百点はあり、DTR の観測点数も他の地域に比べて相対的に大きいことから、JRA が見積もっている雲量は、CRU, ERA と比べて過小評

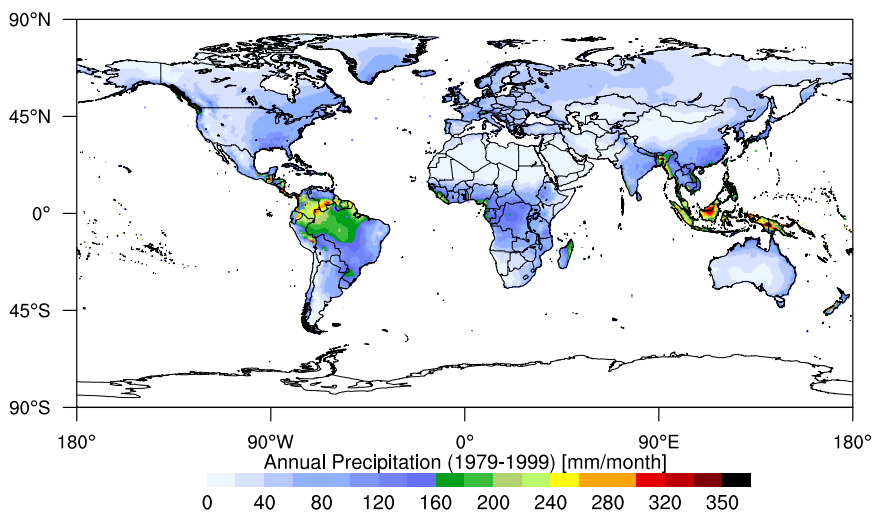


図 2.1 CRU TS 2.1 の年平均降水量 (1979-1999 年)

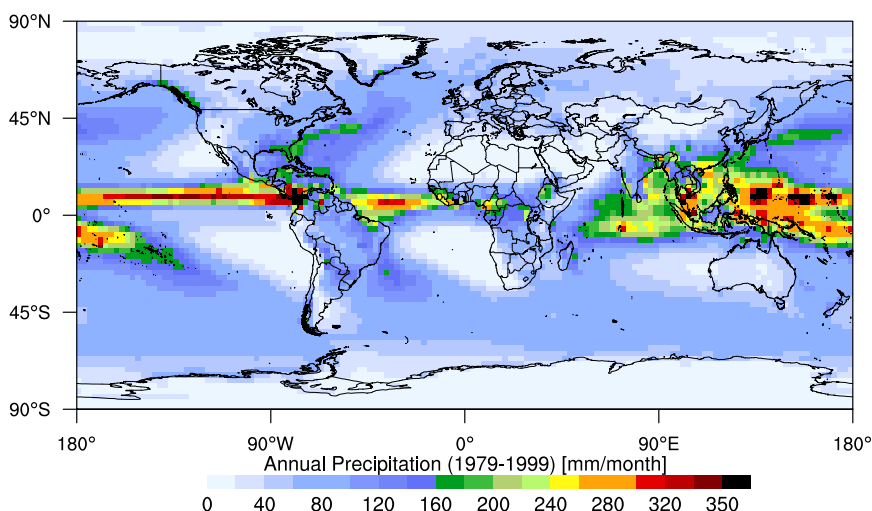


図 2.2 JRA-25 の年平均降水量 (1979-1999 年)

価されている可能性が考えられる。

降水量の季節変動 (図 2.14) を見ると、ヨーロッパでは、東ヨーロッパおよび南ヨーロッパの夏期を除いて、GPCP の月別の降水量平年値は CRU, JRA, ERA, CMAP, CMIP3 と比較してやや過大評価されていることがわかる。カリブ域においては 6 月から 10 月にかけて ERA, JRA の降水量は他のデータソースと比較して過大評価されている。また、ERA の過大評価は表 2.2 に示す雲量の過大評価と相関が高く、ERA のデータセットに限るが、この地域における雲量が他のデータソースと比較して相対的に大きいことが、降水量の過大評価をもたらしている可能性が高いと考えられる。ポリネシアおよび東南アジア

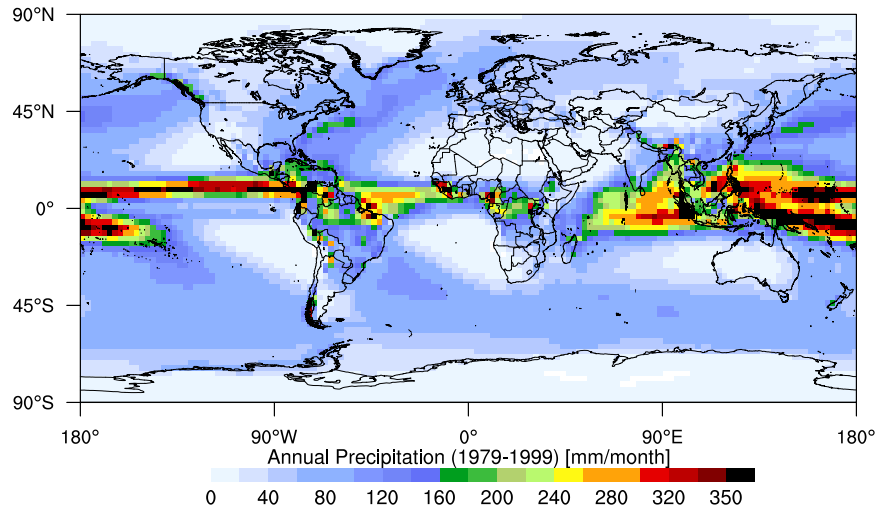


図 2.3 ERA-40 の年平均降水量 (1979-1999 年)

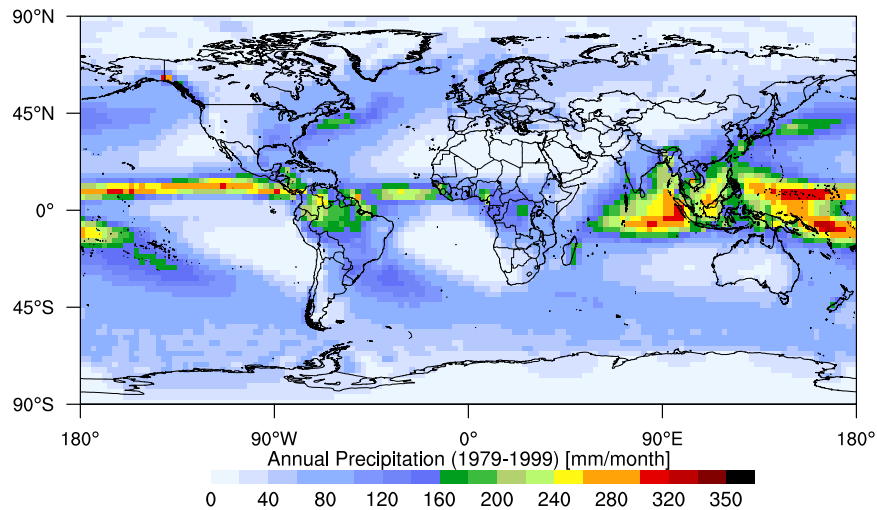


図 2.4 CMAP の年平均降水量 (1979-1999 年)

では ERA の月降水量は他と比較して全月で 20% 以上大きい結果となり，年降水量平年値の過大評価とも整合的である（図 2.14(k)(r)，表 2.2）。同地域における年平均雲量の平年値（表 2.2）を見ても，雲量の値は他のデータソースと比べて大きいことから，雲量の過大評価が降水の過大評価に結び付いていると言える。南アメリカでは ERA の降水量が過大評価されており（図 2.14(i)），一方，JRA では年降水量と同様，各月で他のデータソースと比較して降水量は過小評価されており，本結果は大野木 [62] の結果と整合的である。アジアでは JRA の雲量が過小評価される傾向があり，特に日本や東アジアでは全月において JRA の雲量は他のデータソースを下回っている。一方，JRA の年降水量，月別の降

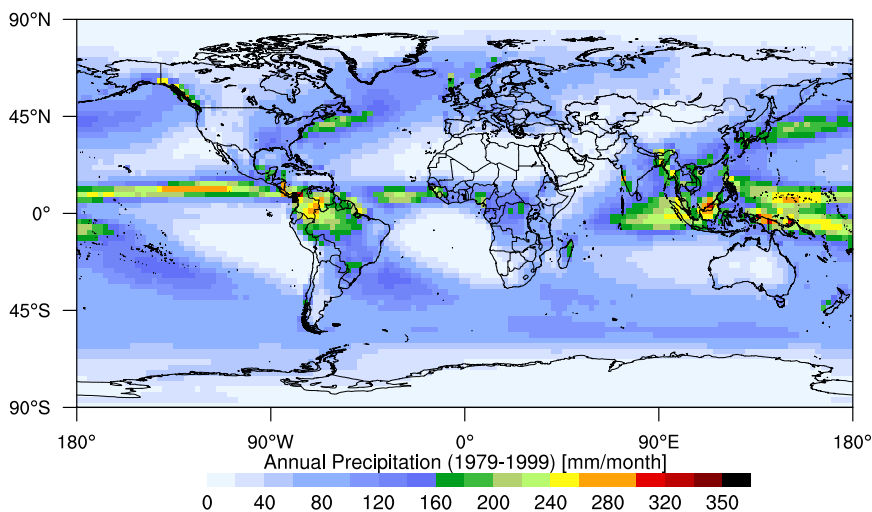


図 2.5 GPCP の年平均降水量 (1979-1999 年)

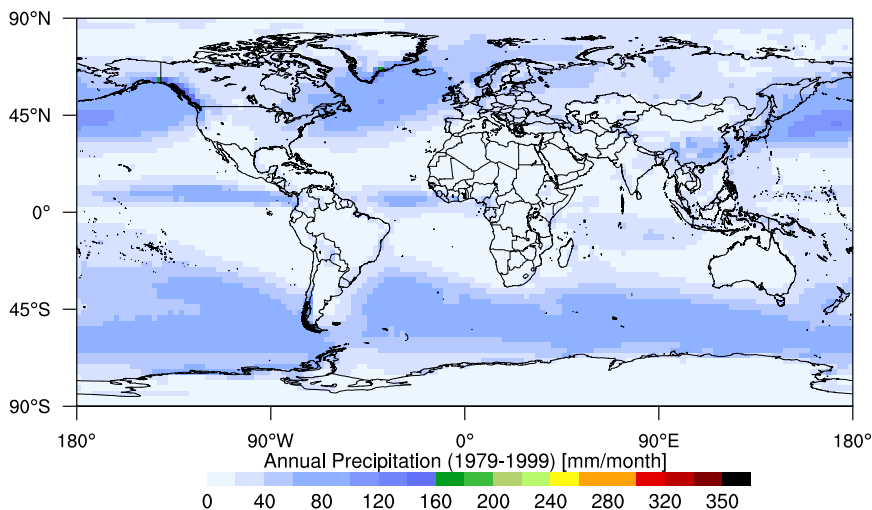


図 2.6 JRA-25 の層状性年平均降水量 (1979-1999 年)

水量は東南アジアを除いて ERA と比べ過小評価となっており、この地域における JRA の雲量と降水量の間には有意な相関はないことが見てとれる。西アジアにおける 8 月の月降水量 (図 2.14(q)) を見ると、CMIP3 出力値間のばらつきが非常に大きいことがわかる。特に、CNRM-CM3 モデルの 8 月の平均降水量は 79mm、同様に MRI-CGCM2.3.2 モデルは 59mm と他のモデル出力値と比べて突出して高い値となっており、本地域において特に夏期における GCM 出力値間には大きな不確実性があることが読み取れる。また、南アジア (図 2.14(s)) では 6 月から 8 月の夏期において CMIP3 の降水量は他のデータソースと比較して平均 27% 低い値となった。この夏期における CMIP3 降水量の過小評価傾向

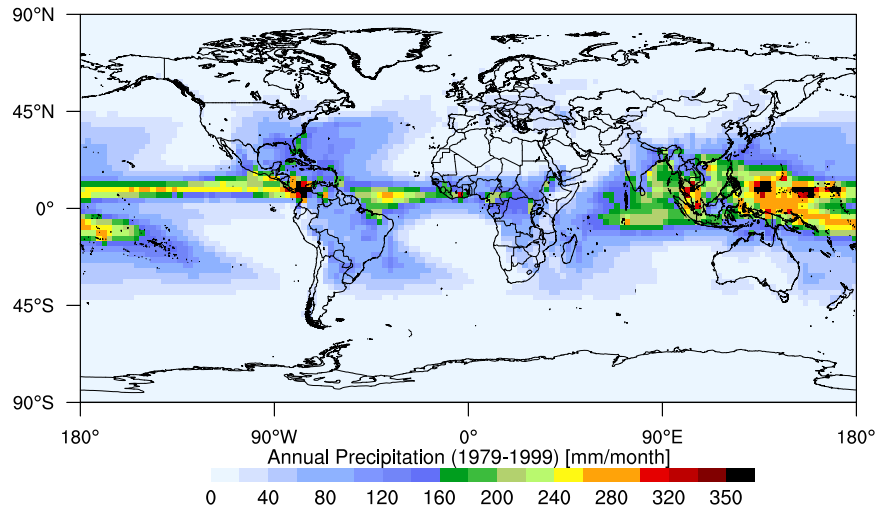


図 2.7 JRA-25 の対流性年平均降水量 (1979-1999 年)

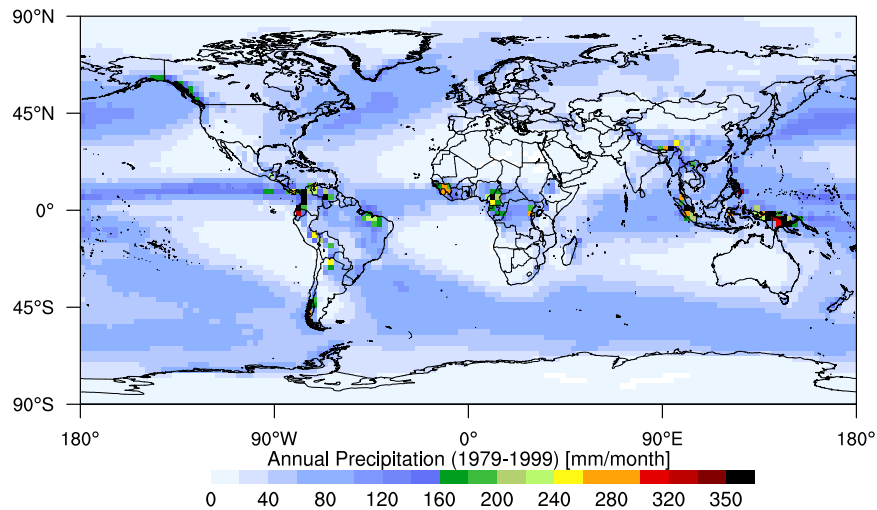


図 2.8 ERA-40 の大規模凝結による降水量 (1979-1999 年)

は、CNRM-CM3 を除く全モデルで表現されており、CRU の降水量値の半分以下の値を示すモデルが複数あることがわかる。さらに、IPSL-CM4 モデルの降水量値は全月を通してほぼ一定となっており、季節変動の再現性が著しく低いことがわかる。北アメリカにおける CMIP3 の月平均降水量平年値は全月において他のデータソースと比べて大きい。これは GISS-EH モデルの出力値が冬期において著しく高い結果となっており、このことが CMIP3 の複数モデルによるアンサンブル平均の値を釣り上げている要因となっている。アンサンブル平均を採用するという方法論には、多くの地域で一定に有効性が認められるが、一部のかけ離れた値を示すモデルがあると、アンサンブル平均に大きな負の影響を与

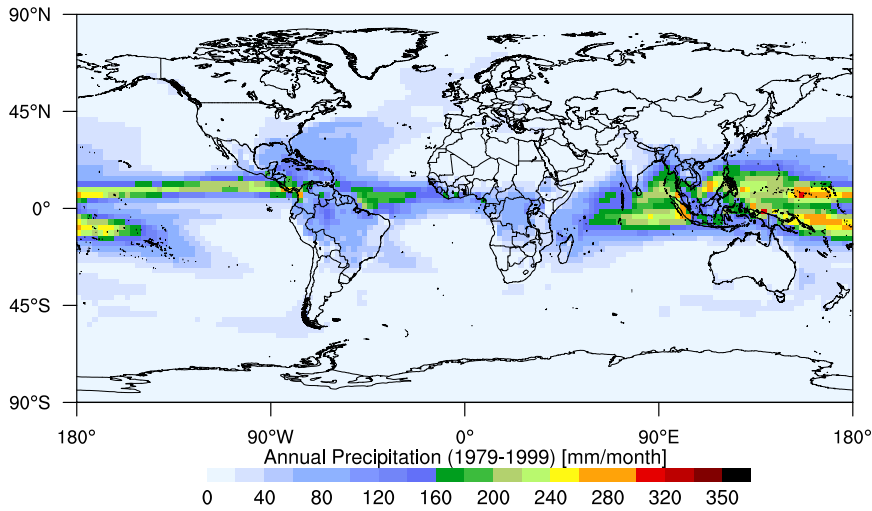
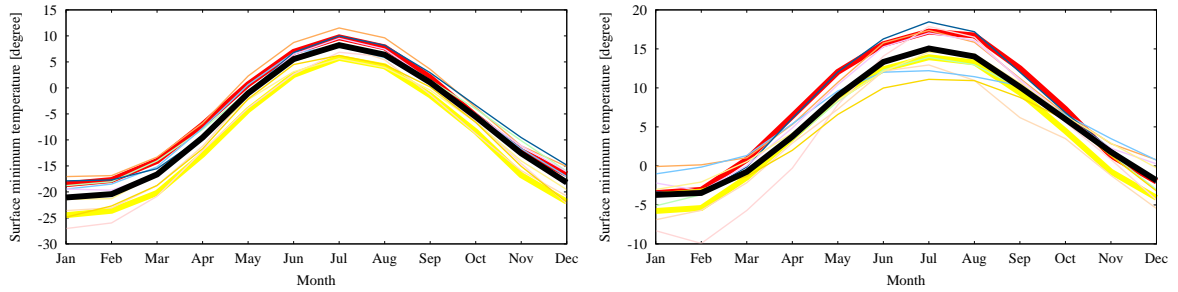


図 2.9 ERA-40 の対流性年平均降水量 (1979-1999 年)

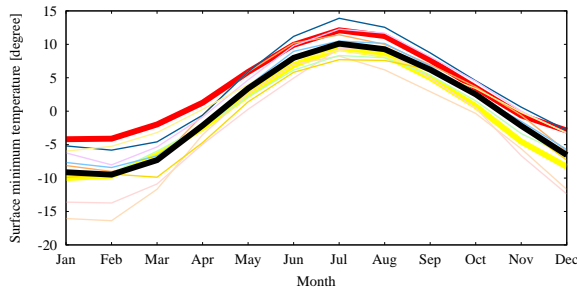
えることも考慮する必要がある。

図 2.16 に 1979-1999 年における降水頻度分布を示す。なお、分布図の間隔として、CRU の最大月降水量値に対する 10, 50, 90% の分布割合を定義している。北アメリカでは、特に ERA, CMAP の強降水の割合が小さく、弱降水の再現数が多い結果となり、CRU と比較した場合における ERA, CMAP の月別および年降水量平年値の過小評価の要因となっていると考えられる。ヨーロッパでは、GPCP の強降水の再現数が目立っており、先に指摘したヨーロッパにおける GPCP の他のデータと比較した際の過大評価の要因となっている。東南アジアでは、ERA で強降水の発生頻度が特に高く、年および月別降水量平年値(表 2.2, 図 2.16(r))における ERA の過大評価につながっている。一方、JRA でも同様に強降水の発生頻度は高いが、年降水量の平年値は CRU と比べて大きく変わらない。ポリネシアにおける ERA の強降水の再現数が他のデータソースと比べて極めて大きいことは、表 2.2 に示した年降水量、月別降水量の過大評価と整合的であると言え、熱帯域での大量の大規模凝結による降水量が過大に評価されていると考えられる。東アジアでは、弱降水に関しては全データにおいて過小評価となっている一方、強降水に関しては、CMIP3 の 24 モデルのうち 14 のモデルで過大となっており、なおかつ、強降水が全く再現できていない CMIP3 モデルもあり、両極端の降水イベントについての再現性に課題が残る結果となっている。また、JRA, GPCP で強降水の再現数は過大となっており、両極端の降水イベントについて、CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 でばらつきが生じる結果となった。西アジアでは、JRA と GPCP における強降水の再現数が CRU に比べて非常に大きい。このことは、JRA の本地域での対流性降水、GPCP の大規模凝結による降水量が CRU と比較して過大評価されていることと相関があると考えられる。

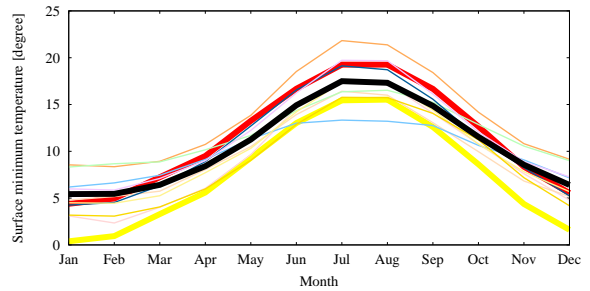


(a) 北アメリカ

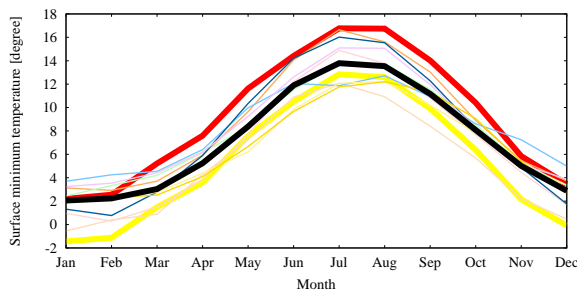
(b) 東ヨーロッパ



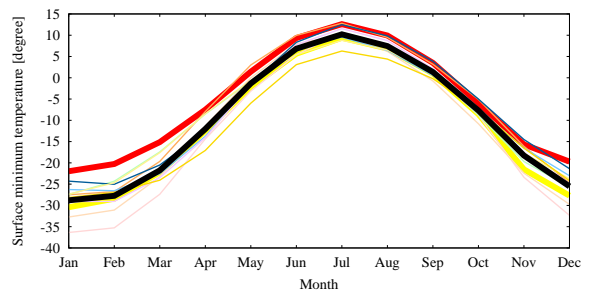
(c) 北ヨーロッパ



(d) 南ヨーロッパ



(e) 西ヨーロッパ



(f) ロシア

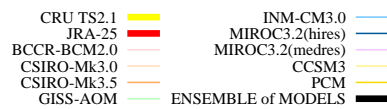
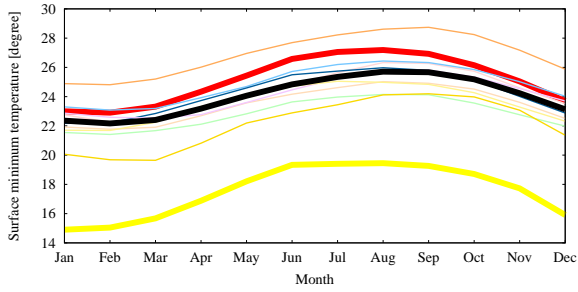
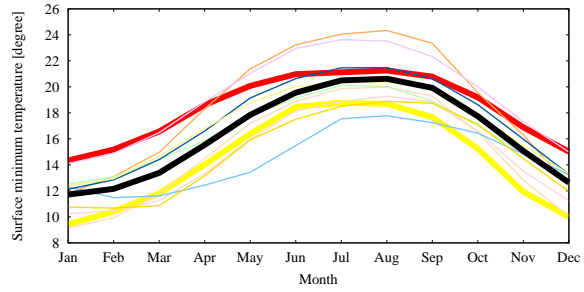


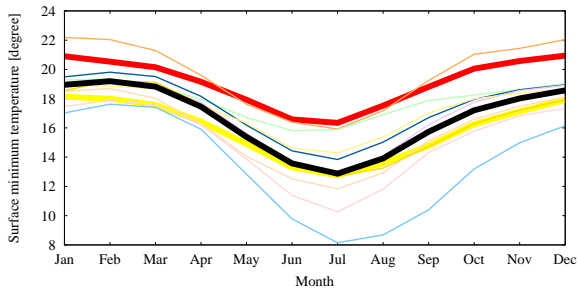
図 2.10 最低気温の月別平年値 (1979-1999 年)



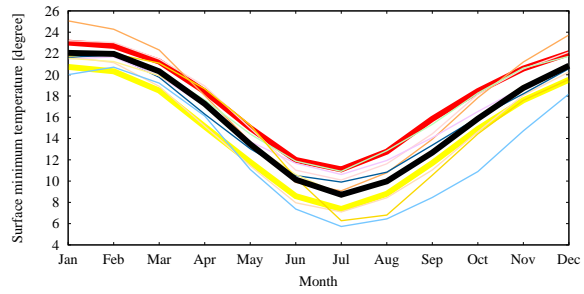
(g) カリブ



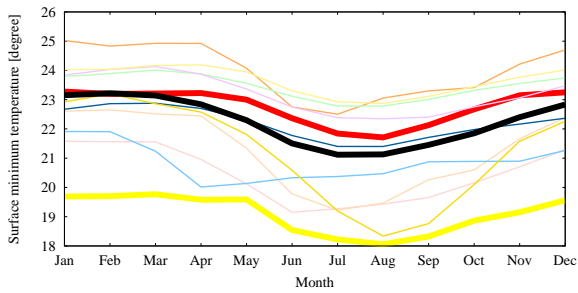
(h) 中央アメリカ



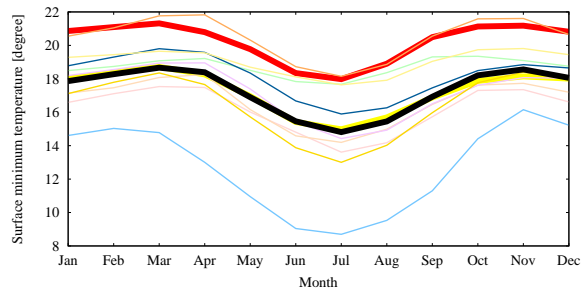
(i) 南アメリカ



(j) オセアニア



(k) ポリネシア



(l) 東アフリカ

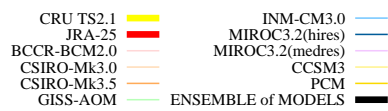
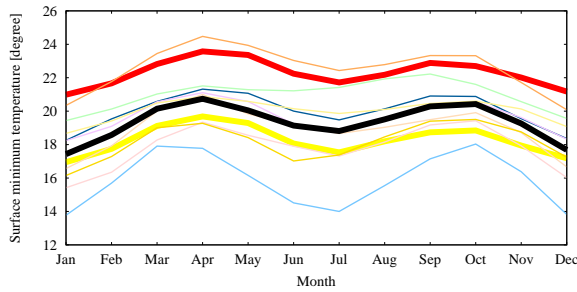
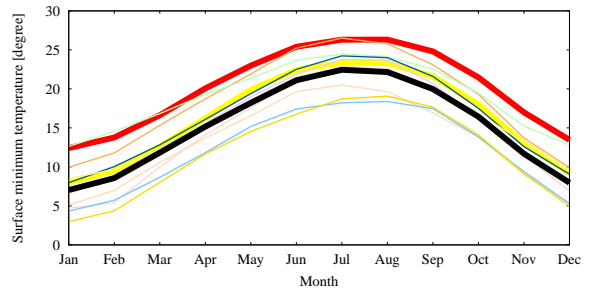


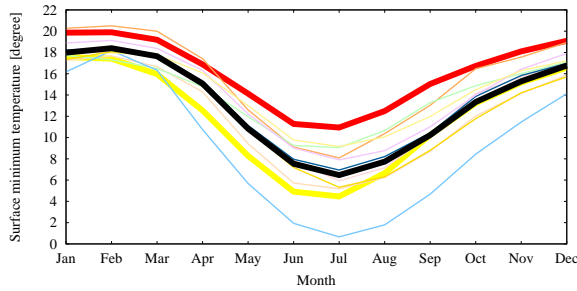
図 2.10 (続き) 最低気温の月別平年値 (1979-1999 年)



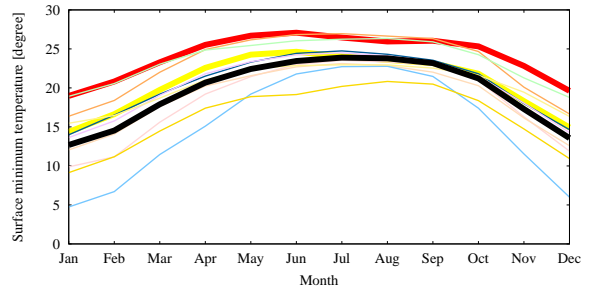
(m) 中央アフリカ



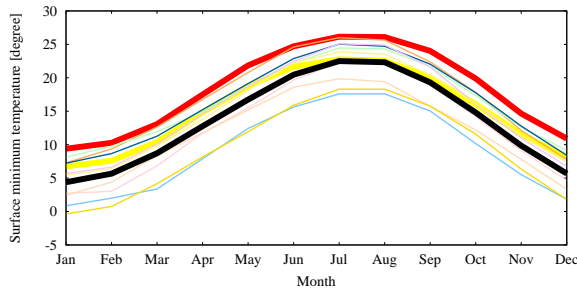
(n) 北アフリカ



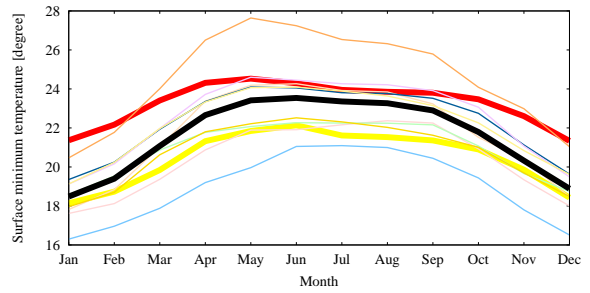
(o) 南アフリカ



(p) 西アフリカ



(q) 西アジア



(r) 東南アジア

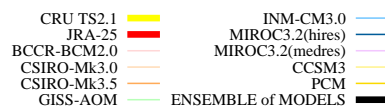
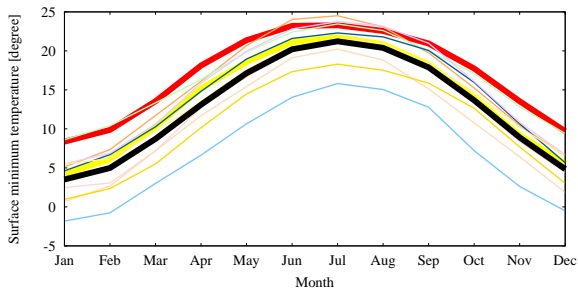
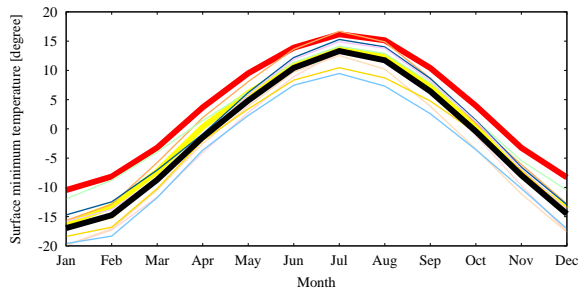


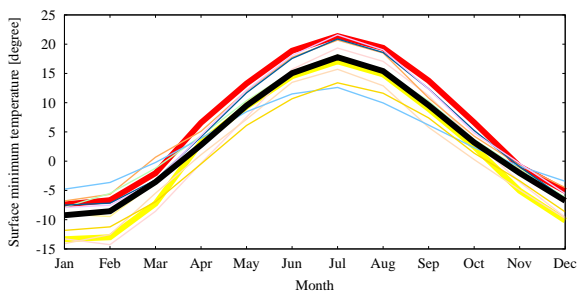
図 2.10 (続き) 最低気温の月別平年値 (1979-1999 年)



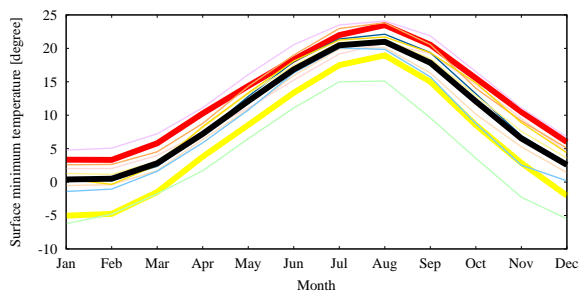
(s) 南アジア



(t) 東アジア



(u) 中央アジア



(v) 日本

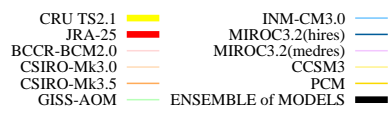


図 2.10 (続き) 最低気温の月別平年値 (1979-1999 年)

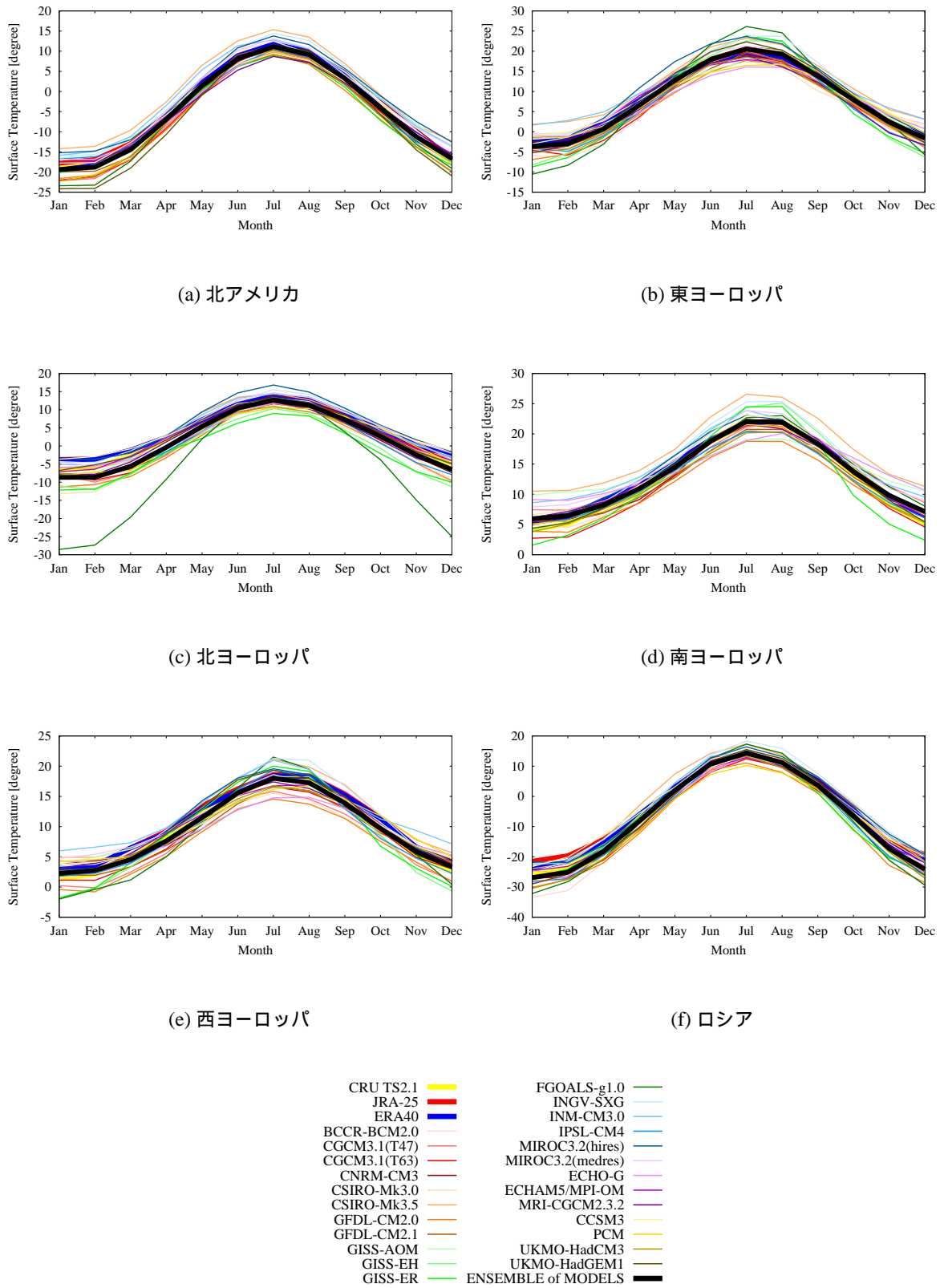
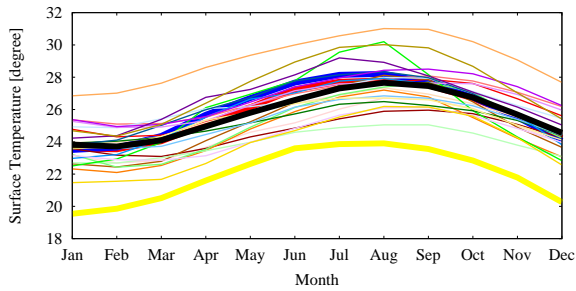
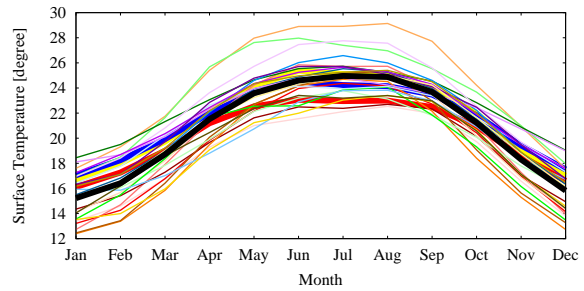


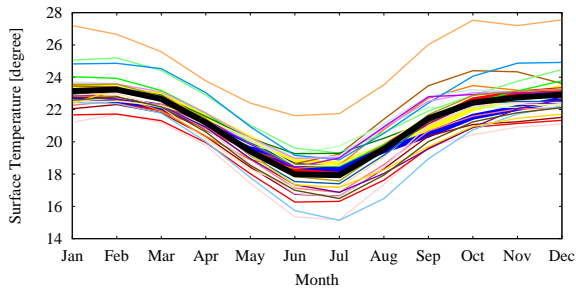
図 2.11 平均気温の月別平年値 (1979-1999 年)



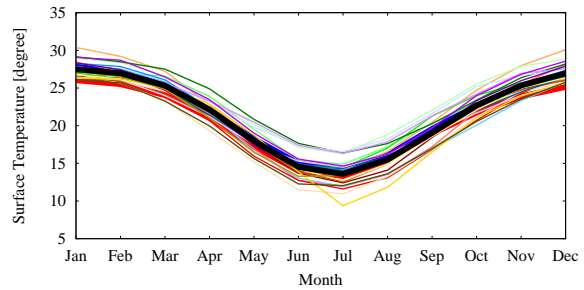
(g) カリブ



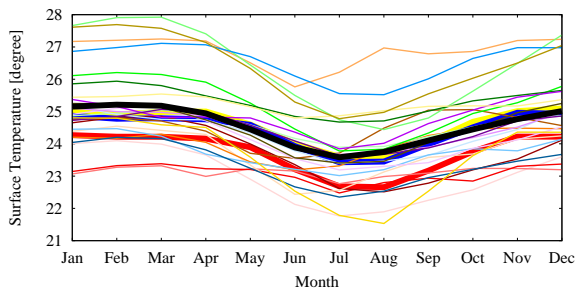
(h) 中央アメリカ



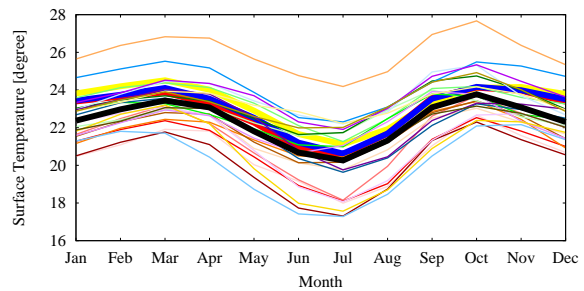
(i) 南アメリカ



(j) オセアニア



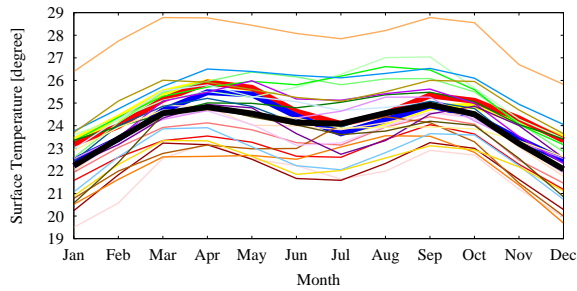
(k) ポリネシア



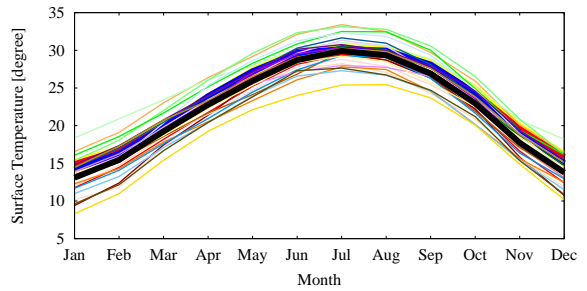
(l) 東アフリカ

- | | |
|--------------|--------------------|
| CRU TS2.1 | FGOALS-g1.0 |
| JRA-25 | INGV-SXG |
| ERA40 | INM-CM3.0 |
| BCCR-BCM2.0 | IPSL-CM4 |
| CGCM3.1(T47) | MIROC3.2(hires) |
| CGCM3.1(T63) | MIROC3.2(medres) |
| CNRM-CM3 | ECHO-G |
| CSIRO-Mk3.0 | ECHAM5/MPI-OM |
| CSIRO-Mk3.5 | MRI-CGCM2.3.2 |
| GFDL-CM2.0 | CCSM3 |
| GFDL-CM2.1 | PCM |
| GISS-AOM | UKMO-HadCM3 |
| GISS-EH | UKMO-HadGEM1 |
| GISS-ER | ENSEMBLE of MODELS |

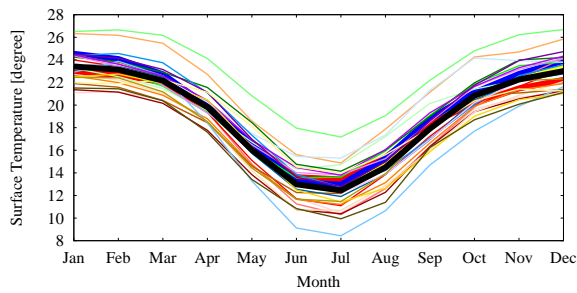
図 2.11 (続き) 平均気温の月別平年値 (1979-1999 年)



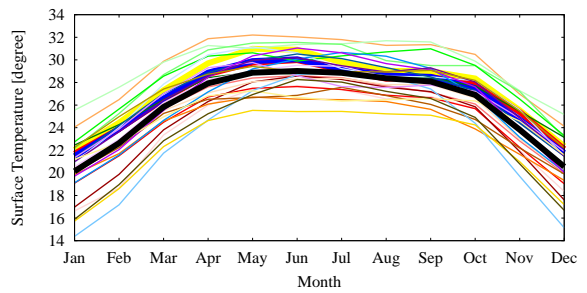
(m) 中央アフリカ



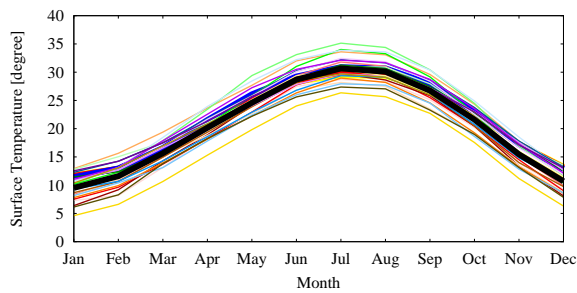
(n) 北アフリカ



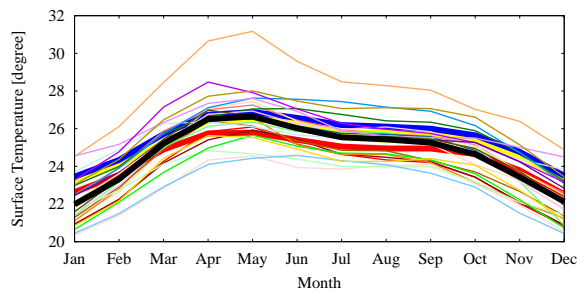
(o) 南アフリカ



(p) 西アフリカ



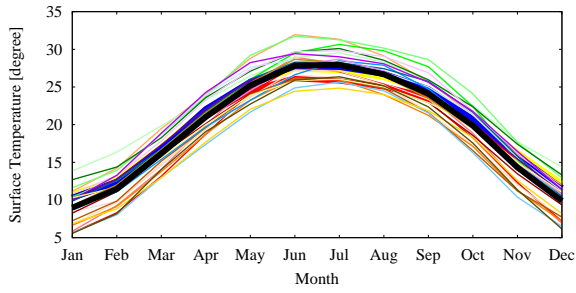
(q) 西アジア



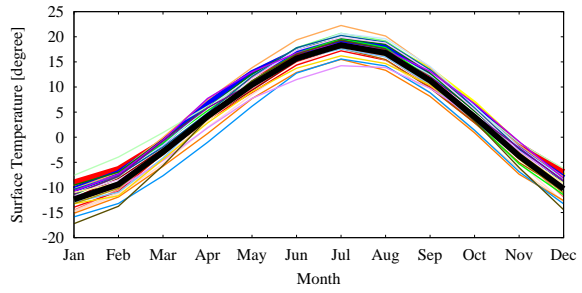
(r) 東南アジア

- | | | | |
|--------------|---|--------------------|---|
| CRU TS2.1 | ■ | FGOALS-g1.0 | — |
| JRA-25 | ■ | INGV-SXG | — |
| ERA40 | ■ | INM-CM3.0 | — |
| BCCR-BCM2.0 | ■ | IPSL-CM4 | — |
| CGCM3.1(T47) | ■ | MIROC3.2(hires) | — |
| CGCM3.1(T63) | ■ | MIROC3.2(medres) | — |
| CNRM-CM3 | ■ | ECHO-G | — |
| CSIRO-Mk3.0 | ■ | ECHAM5/MPI-OM | — |
| CSIRO-Mk3.5 | ■ | MRI-CGCM2.3.2 | — |
| GFDL-CM2.0 | ■ | CCSM3 | — |
| GFDL-CM2.1 | ■ | PCM | — |
| GISS-AOM | ■ | UKMO-HadCM3 | — |
| GISS-EH | ■ | UKMO-HadGEM1 | — |
| GISS-ER | ■ | ENSEMBLE of MODELS | ■ |

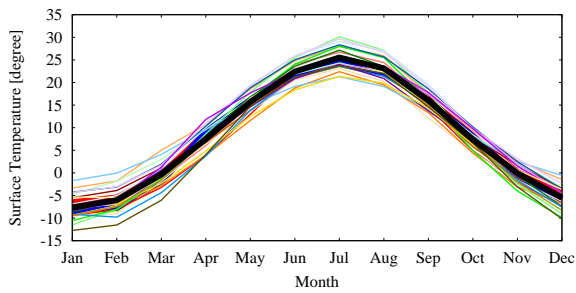
図 2.11 (続き) 平均気温の月別平年値 (1979-1999 年)



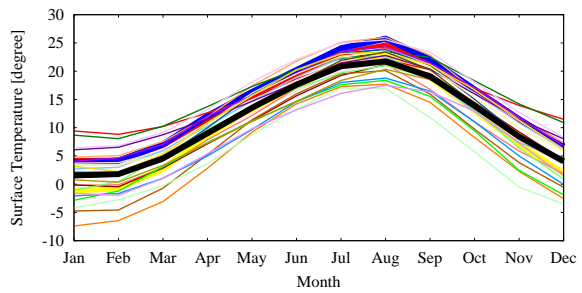
(s) 南アジア



(t) 東アジア



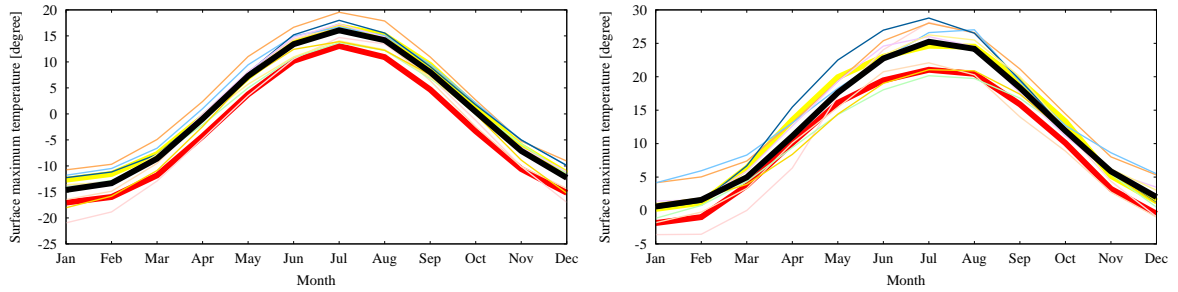
(u) 中央アジア



(v) 日本

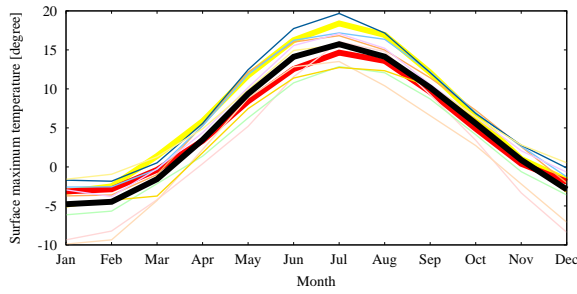
- | | |
|--------------|--------------------|
| CRU TS2.1 | FGOALS-g1.0 |
| JRA-25 | INGV-SXG |
| ERA40 | INM-CM3.0 |
| BCCR-BCM2.0 | IPSL-CM4 |
| CGCM3.1(T47) | MIROC3.2(hires) |
| CGCM3.1(T63) | MIROC3.2(medres) |
| CNRM-CM3 | ECHO-G |
| CSIRO-Mk3.0 | ECHAM5/MPI-OM |
| CSIRO-Mk3.5 | MRI-CGCM2.3.2 |
| GFDL-CM2.0 | CCSM3 |
| GFDL-CM2.1 | PCM |
| GISS-AOM | UKMO-HadCM3 |
| GISS-EH | UKMO-HadGEM1 |
| GISS-ER | ENSEMBLE of MODELS |

図 2.11 (続き) 平均気温の月別平年値 (1979-1999 年)

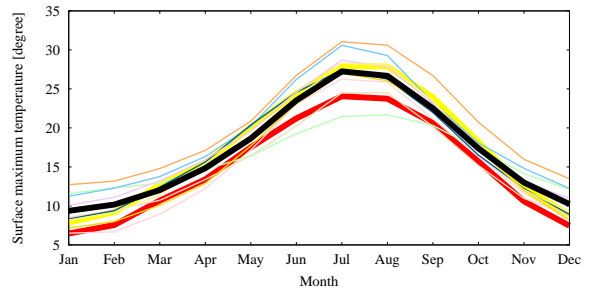


(a) 北アメリカ

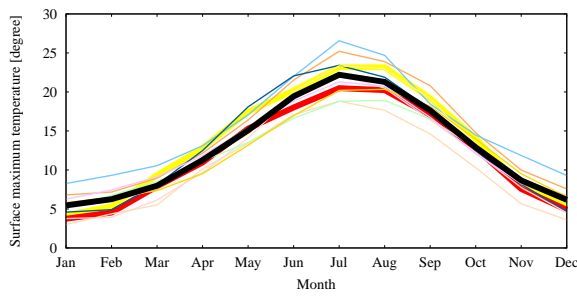
(b) 東ヨーロッパ



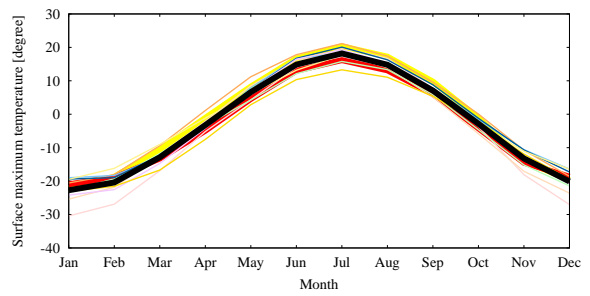
(c) 北ヨーロッパ



(d) 南ヨーロッパ



(e) 西ヨーロッパ



(f) ロシア

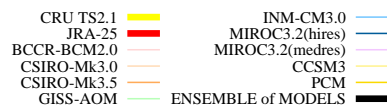
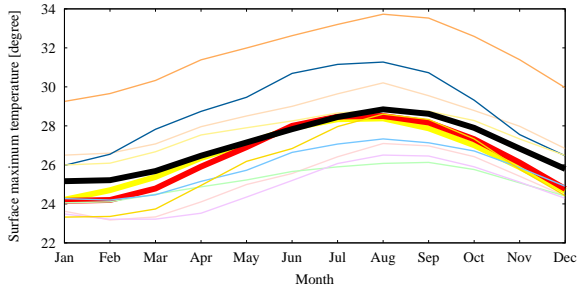
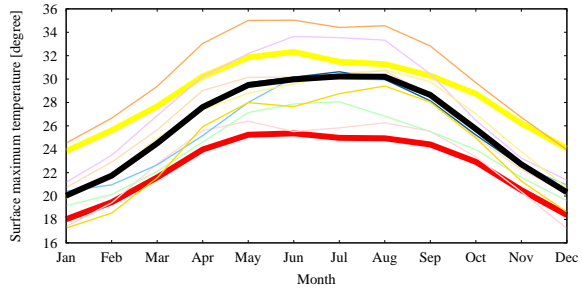


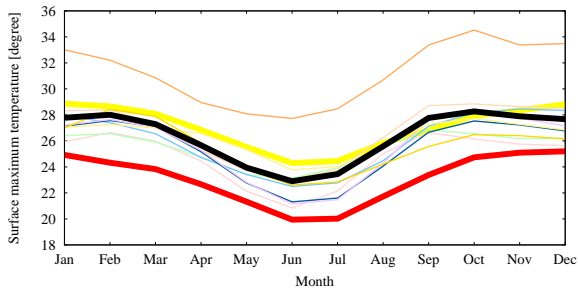
図 2.12 最高気温の月別平年値 (1979-1999 年)



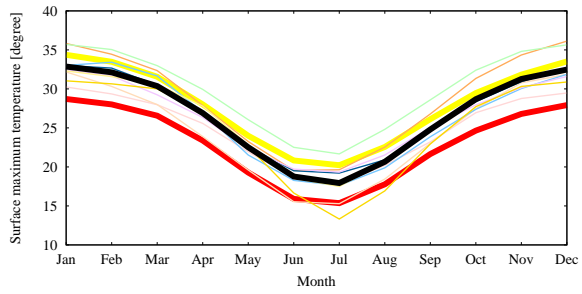
(g) カリブ



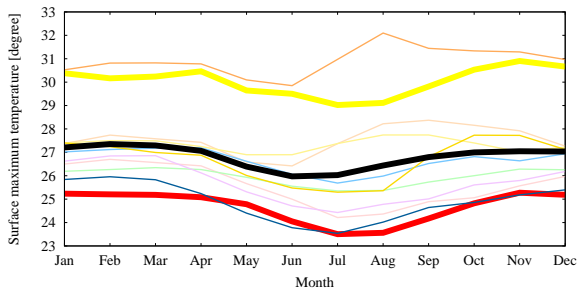
(h) 中央アメリカ



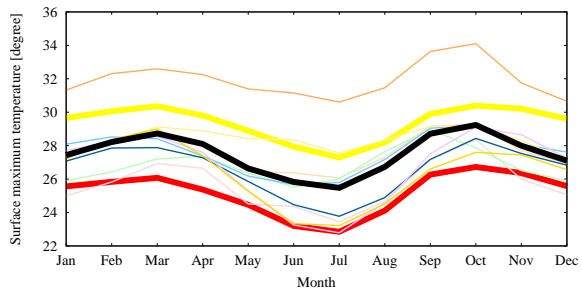
(i) 南アメリカ



(j) オセアニア



(k) ポリネシア



(l) 東アフリカ

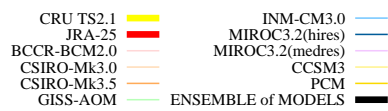
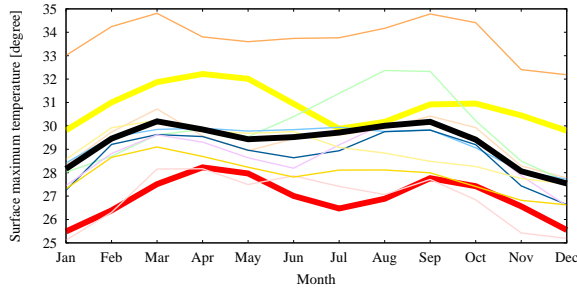
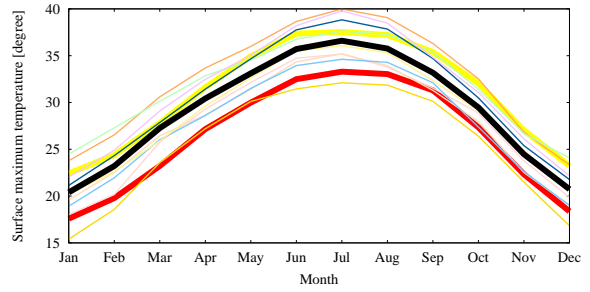


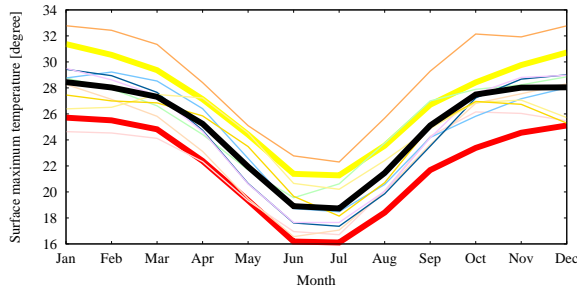
図 2.12 (続き) 最高気温の月別平年値 (1979-1999 年)



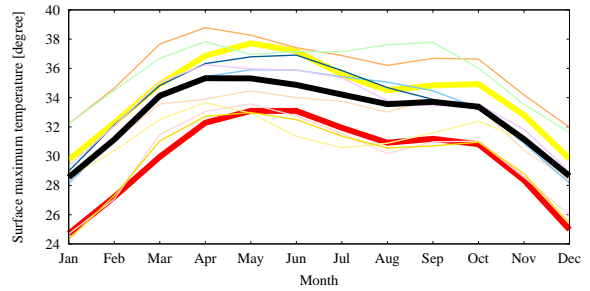
(m) 中央アフリカ



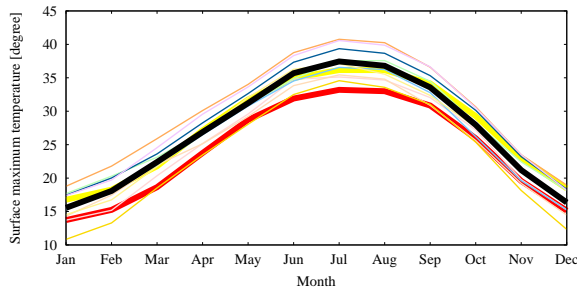
(n) 北アフリカ



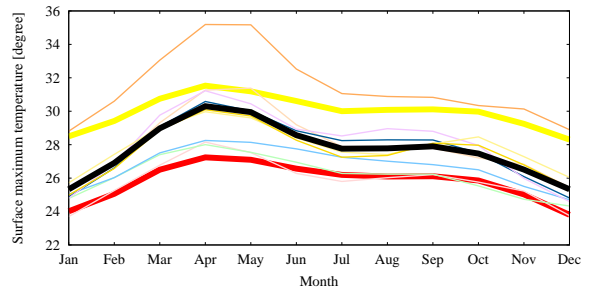
(o) 南アフリカ



(p) 西アフリカ



(q) 西アジア



(r) 東南アジア

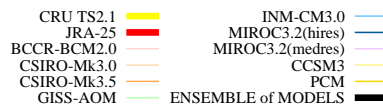
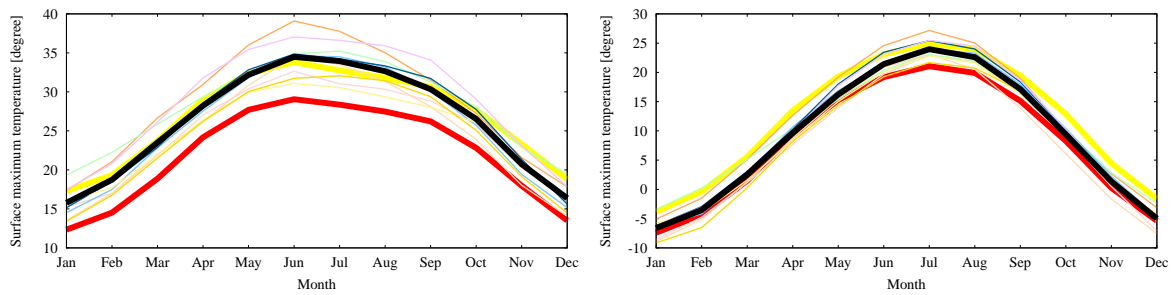
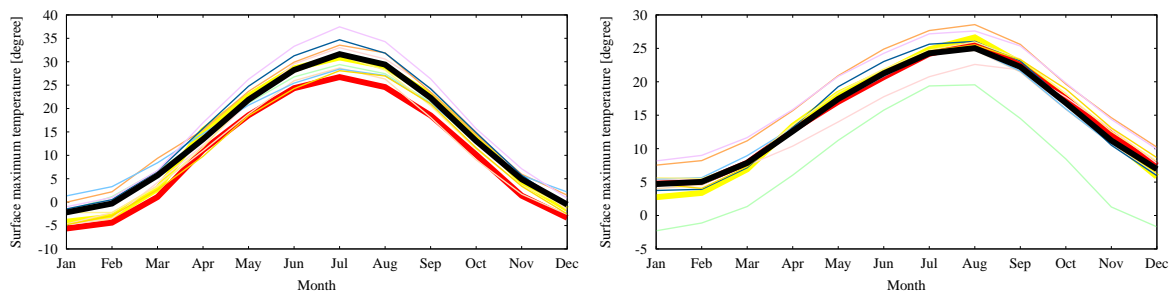


図 2.12 (続き) 最高気温の月別平年値 (1979-1999 年)



(s) 南アジア

(t) 東アジア



(u) 中央アジア

(v) 日本

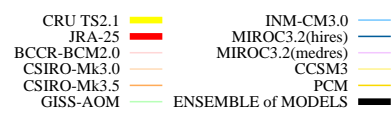


図 2.12 (続き) 最高気温の月別平年値 (1979-1999 年)

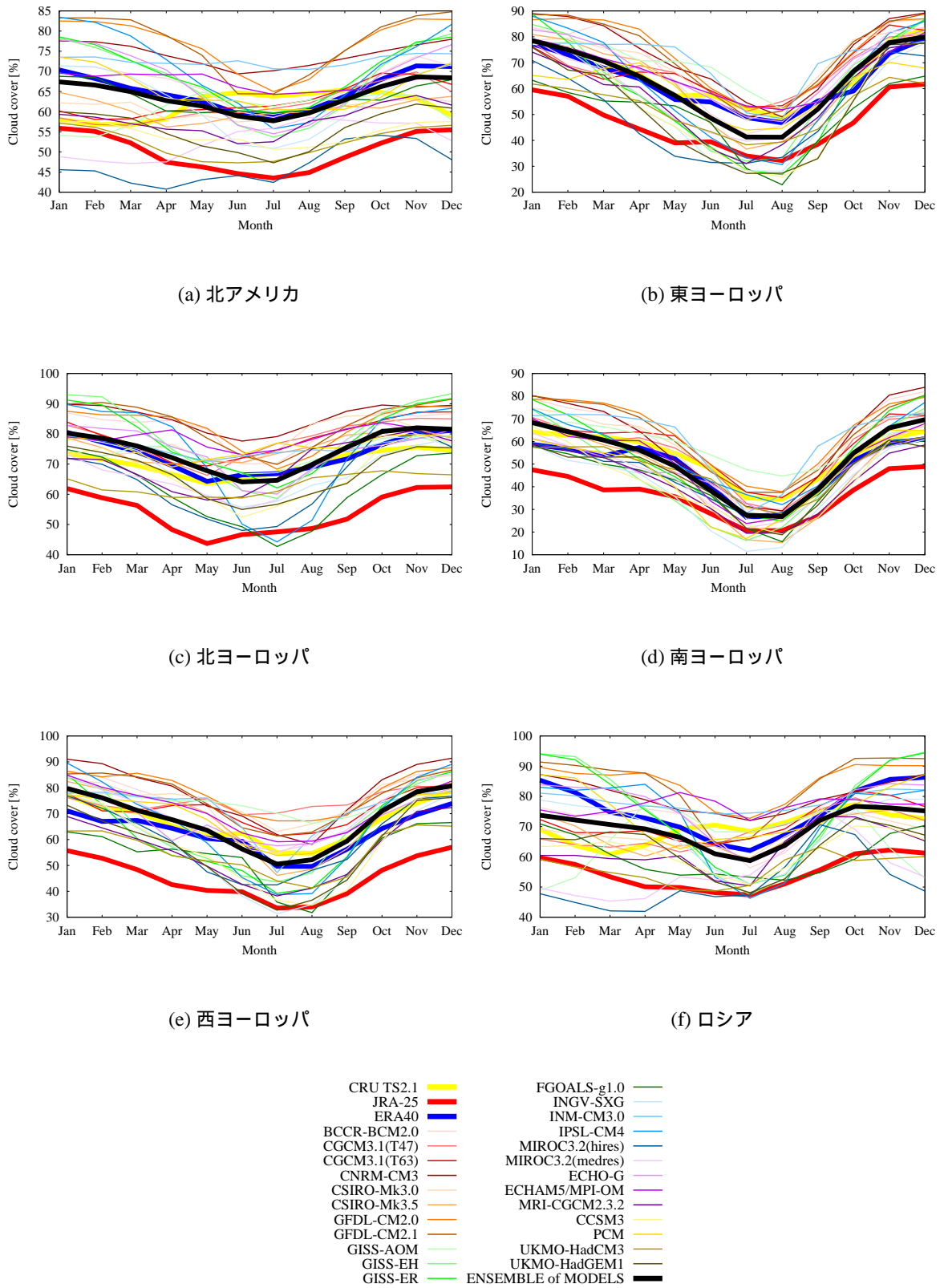
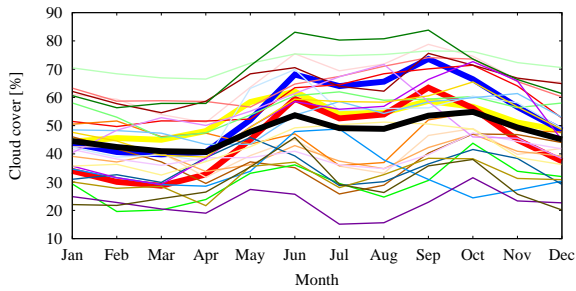
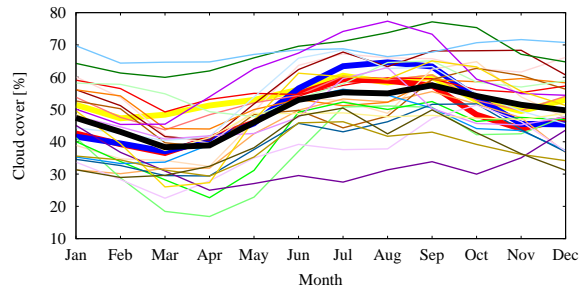


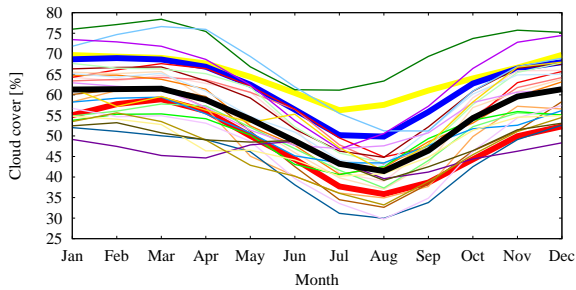
図 2.13 全雲量の月別平年値 (1979-1999年)



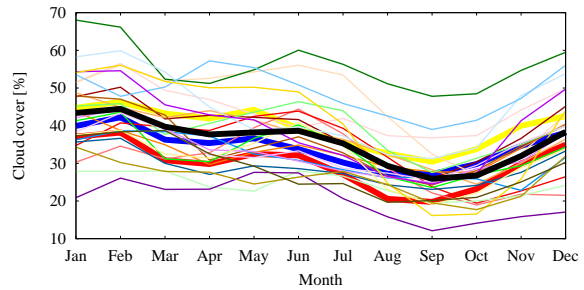
(g) カリブ



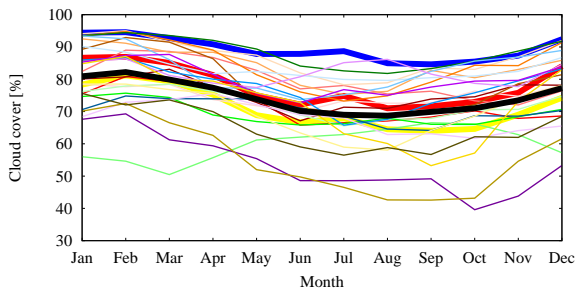
(h) 中央アメリカ



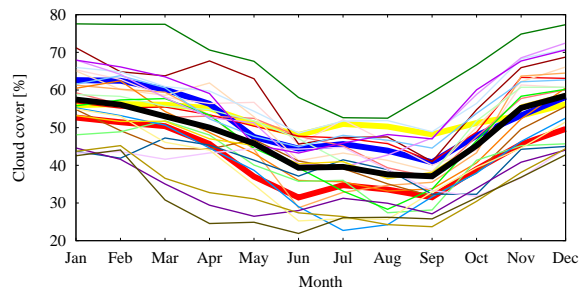
(i) 南アメリカ



(j) オセアニア



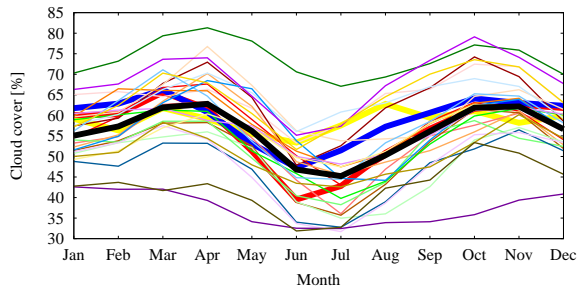
(k) ポリネシア



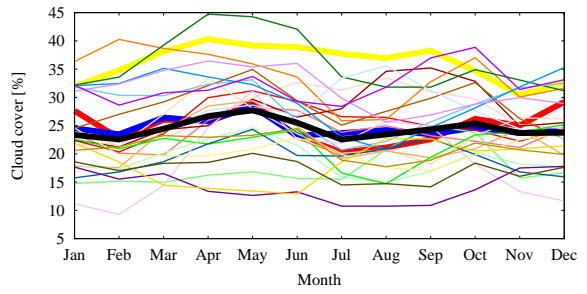
(l) 東アフリカ

- | | |
|--------------|--------------------|
| CRU TS2.1 | FGOALS-g1.0 |
| JRA-25 | INGV-SXG |
| ERA40 | INM-CM3.0 |
| BCCR-BCM2.0 | IPSL-CM4 |
| CGCM3.1(T47) | MIROC3.2(hires) |
| CGCM3.1(T63) | MIROC3.2(medres) |
| CNRM-CM3 | ECHO-G |
| CSIRO-Mk3.0 | ECHAM5/MPI-OM |
| CSIRO-Mk3.5 | MRI-CGCM2.3.2 |
| GFDL-CM2.0 | CCSM3 |
| GFDL-CM2.1 | PCM |
| GISS-AOM | UKMO-HadCM3 |
| GISS-EH | UKMO-HadGEM1 |
| GISS-ER | ENSEMBLE of MODELS |

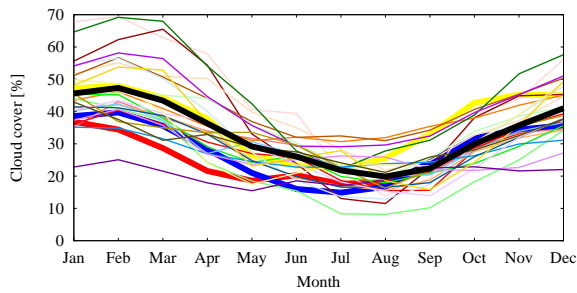
図 2.13 (続き) 全雲量の月別平年値 (1979-1999 年)



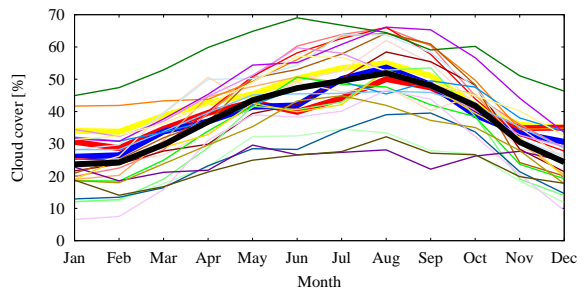
(m) 中央アフリカ



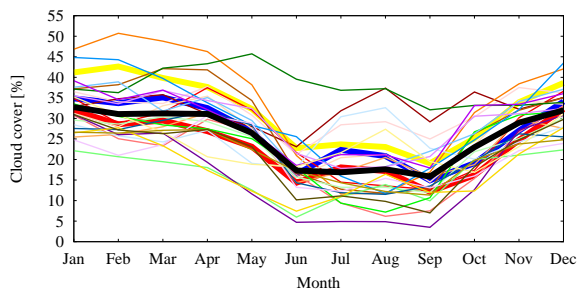
(n) 北アフリカ



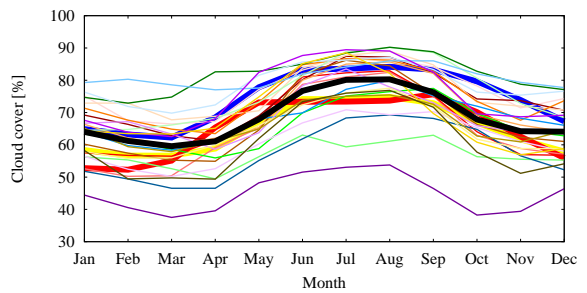
(o) 南アフリカ



(p) 西アフリカ



(q) 西アジア



(r) 東南アジア

- | | |
|--------------|--------------------|
| CRU TS2.1 | FGOALS-g1.0 |
| JRA-25 | INGV-SXG |
| ERA40 | INM-CM3.0 |
| BCCR-BCM2.0 | IPSL-CM4 |
| CGCM3.1(T47) | MIROC3.2(hires) |
| CGCM3.1(T63) | MIROC3.2(medres) |
| CNRM-CM3 | ECHO-G |
| CSIRO-Mk3.0 | ECHAM5/MPI-OM |
| CSIRO-Mk3.5 | MRI-CGCM2.3.2 |
| GFDL-CM2.0 | CCSM3 |
| GFDL-CM2.1 | PCM |
| GISS-AOM | UKMO-HadCM3 |
| GISS-EH | UKMO-HadGEM1 |
| GISS-ER | ENSEMBLE of MODELS |

図 2.13 (続き) 全雲量の月別平年値 (1979-1999年)

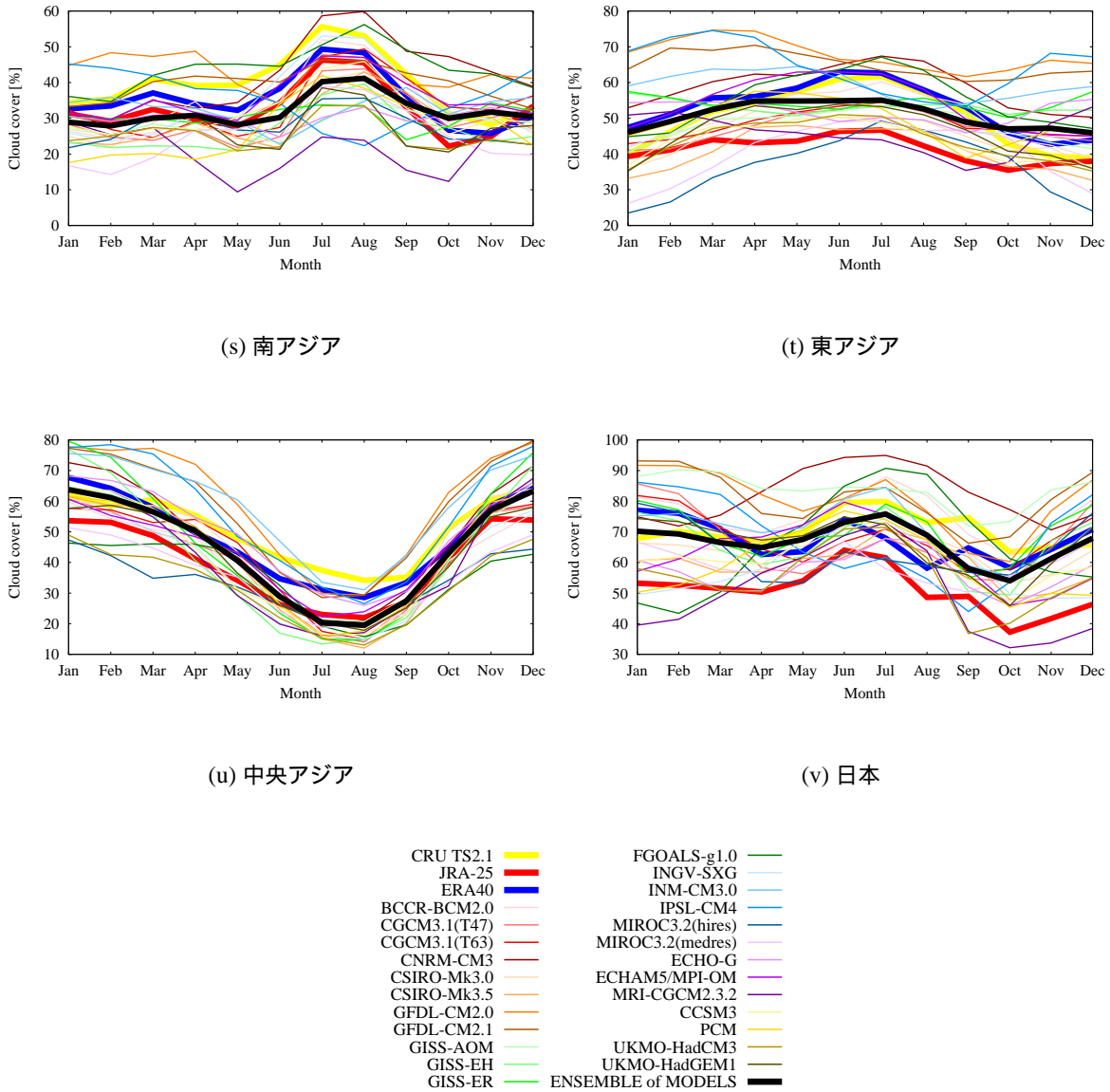
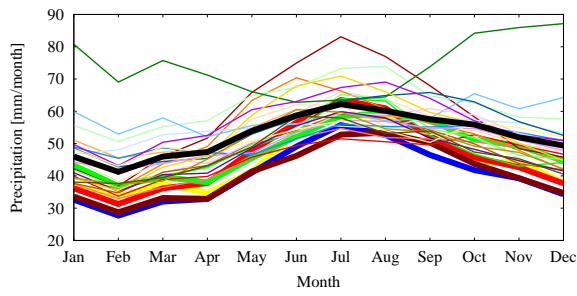
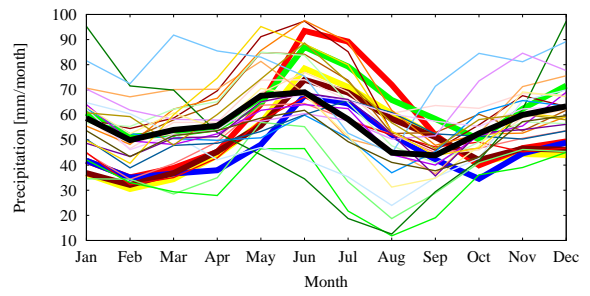


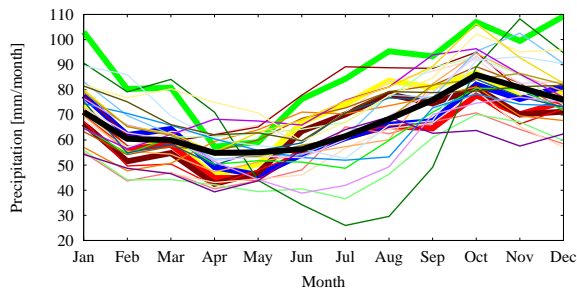
図 2.13 (続き) 全雲量の月別平年値 (1979-1999 年)



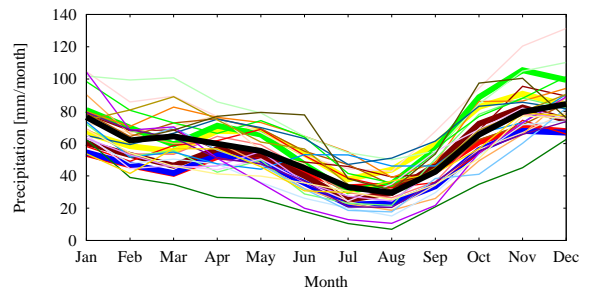
(a) 北アメリカ



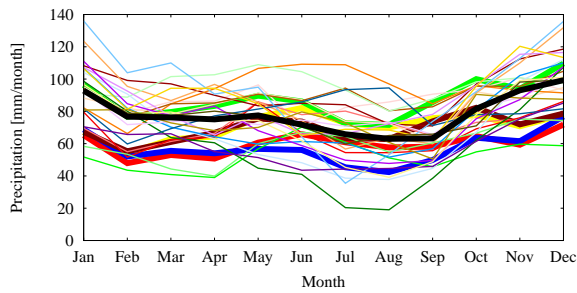
(b) 東ヨーロッパ



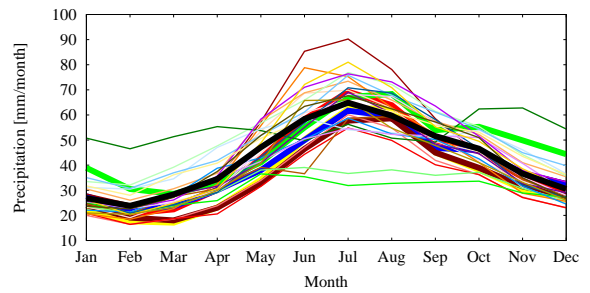
(c) 北ヨーロッパ



(d) 南ヨーロッパ



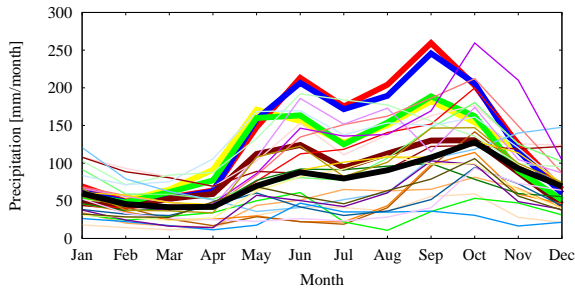
(e) 西ヨーロッパ



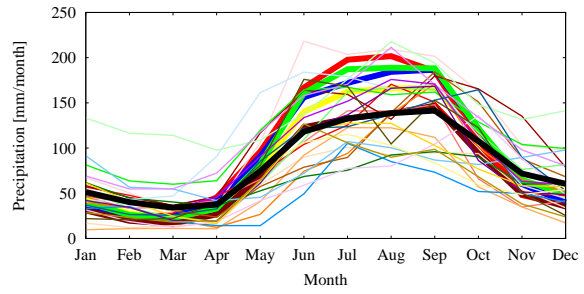
(f) ロシア

- | | | | |
|--------------|---|--------------------|---|
| CRU TS.2.1 | ■ | GISS-ER | — |
| JRA-25 | ■ | FGOALS-g1.0 | — |
| ERA40 | ■ | INGV-SXG | — |
| CMAP | ■ | INM-CM3.0 | — |
| GPCP | ■ | IPSL-CM4 | — |
| BCCR-BCM2.0 | ■ | MIROC3.2(hires) | — |
| CGCM3.1(T47) | ■ | MIROC3.2(medres) | — |
| CGCM3.1(T63) | ■ | ECHO-G | — |
| CNRM-CM3 | ■ | ECHAM5/MPI-OM | — |
| CSIRO-Mk3.0 | ■ | MRI-CGCM2.3.2 | — |
| CSIRO-Mk3.5 | ■ | CCSM3 | ■ |
| GFDL-CM2.0 | ■ | PCM | ■ |
| GFDL-CM2.1 | ■ | UKMO-HadCM3 | ■ |
| GISS-AOM | ■ | UKMO-HadGEM1 | ■ |
| GISS-EH | ■ | ENSEMBLE of MODELS | ■ |

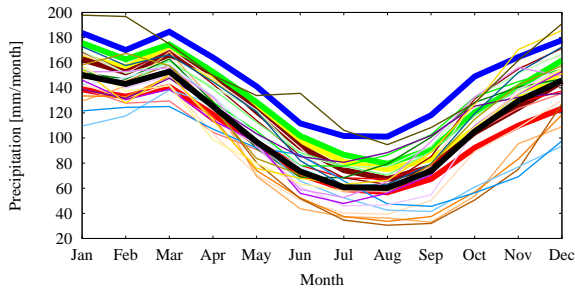
図 2.14 降水量の月別平年値 (1979-1999 年)



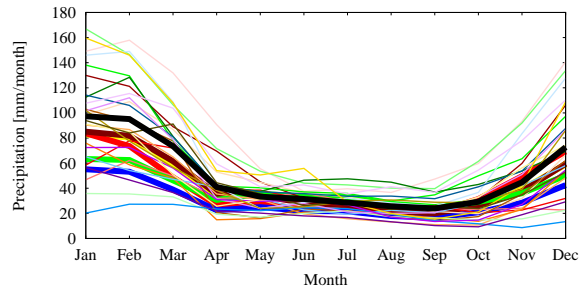
(g) カリブ



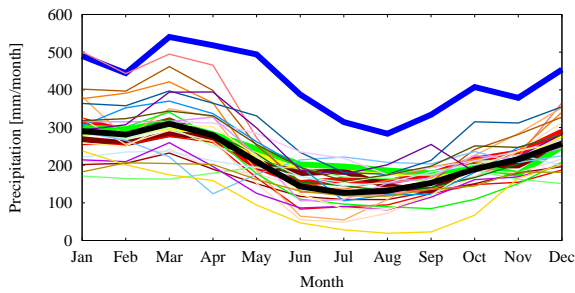
(h) 中央アメリカ



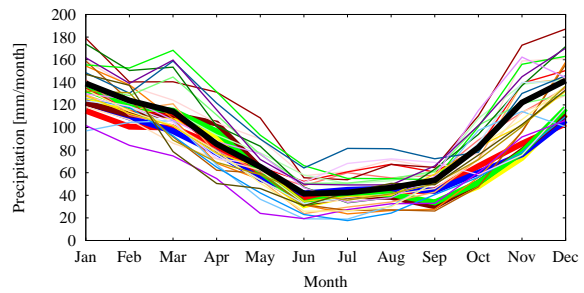
(i) 南アメリカ



(j) オセアニア



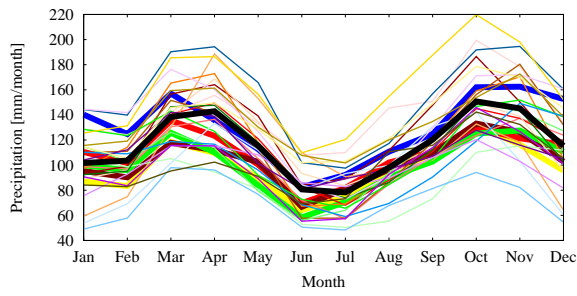
(k) ポリネシア



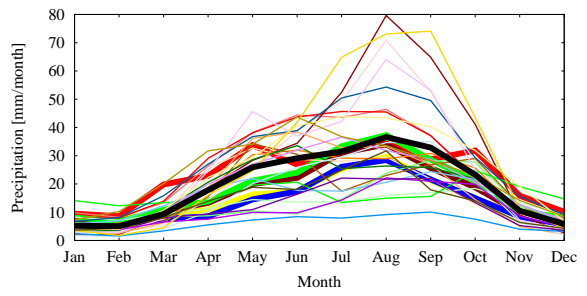
(l) 東アフリカ

- | | | | |
|--------------|---|--------------------|---|
| CRU TS2.1 | ■ | GISS-ER | — |
| JRA-25 | ■ | FGOALS-g1.0 | — |
| ERA40 | ■ | INGV-SXG | — |
| CMAP | ■ | INM-CM3.0 | — |
| GPCP | ■ | IPSL-CM4 | — |
| BCCR-BCM2.0 | ■ | MIROC3.2(hires) | — |
| CGCM3.1(T47) | ■ | MIROC3.2(medres) | — |
| CGCM3.1(T63) | ■ | ECHO-G | — |
| CNRM-CM3 | ■ | ECHAM5/MPI-OM | — |
| CSIRO-Mk3.0 | ■ | MRI-CGCM2.3.2 | — |
| CSIRO-Mk3.5 | ■ | CCSM3 | — |
| GFDL-CM2.0 | ■ | PCM | — |
| GFDL-CM2.1 | ■ | UKMO-HadCM3 | — |
| GISS-AOM | ■ | UKMO-HadGEM1 | — |
| GISS-EH | ■ | ENSEMBLE of MODELS | ■ |

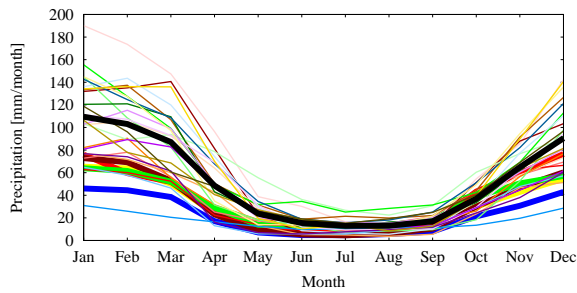
図 2.14 (続き) 降水量の月別平年値 (1979-1999 年)



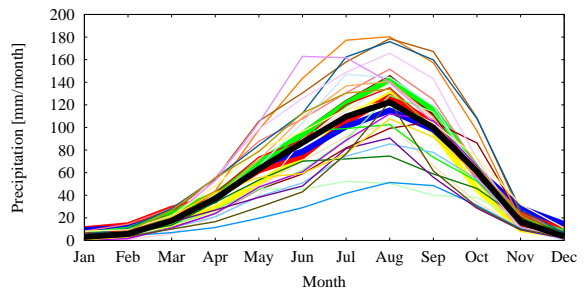
(m) 中央アフリカ



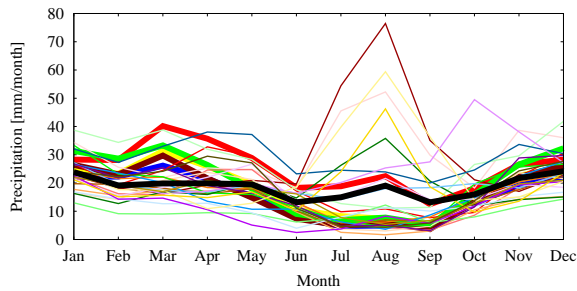
(n) 北アフリカ



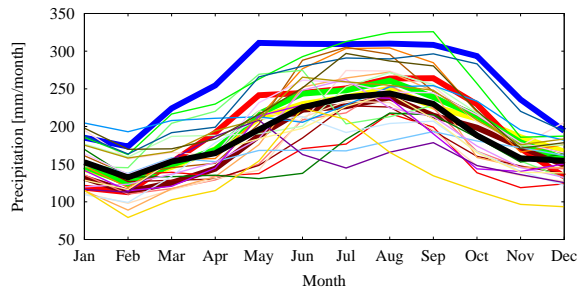
(o) 南アフリカ



(p) 西アフリカ



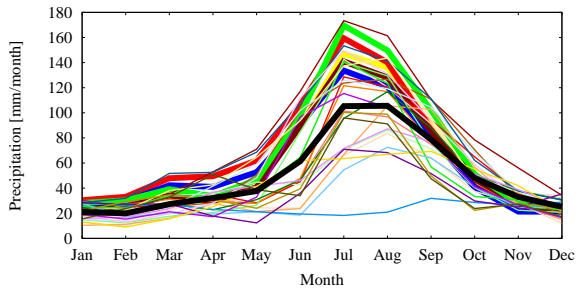
(q) 西アジア



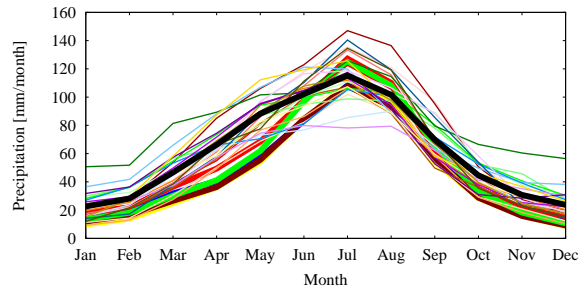
(r) 東南アジア

- | | | | |
|--------------|---|--------------------|---|
| CRU TS2.1 | ■ | GISS-ER | — |
| JRA-25 | ■ | FGOALS-g1.0 | — |
| ERA40 | ■ | INGV-SXG | — |
| CMAp | ■ | INM-CM3.0 | — |
| GPCP | ■ | IPSL-CM4 | — |
| BCCR-BCM2.0 | ■ | MIROC3.2(hires) | — |
| CGCM3.1(T47) | ■ | MIROC3.2(medres) | — |
| CGCM3.1(T63) | ■ | ECHO-G | — |
| CNRM-CM3 | ■ | ECHAM5/MPI-OM | — |
| CSIRO-Mk3.0 | ■ | MRI-CGCM2.3.2 | — |
| CSIRO-Mk3.5 | ■ | CCSM3 | — |
| GFDL-CM2.0 | ■ | PCM | — |
| GFDL-CM2.1 | ■ | UKMO-HadCM3 | — |
| GISS-AOM | ■ | UKMO-HadGEM1 | — |
| GISS-EH | ■ | ENSEMBLE of MODELS | ■ |

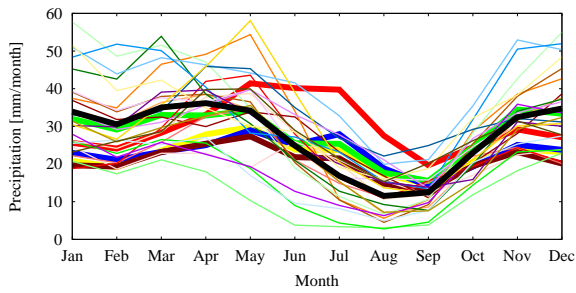
図 2.14 (続き) 降水量の月別平年値 (1979-1999 年)



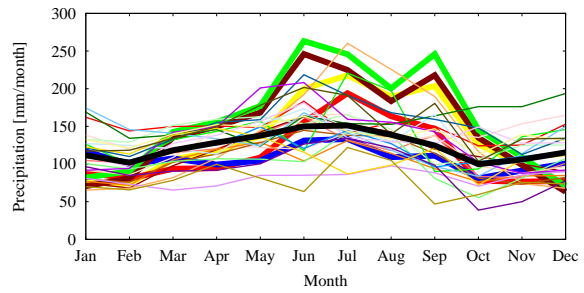
(s) 南アジア



(t) 東アジア



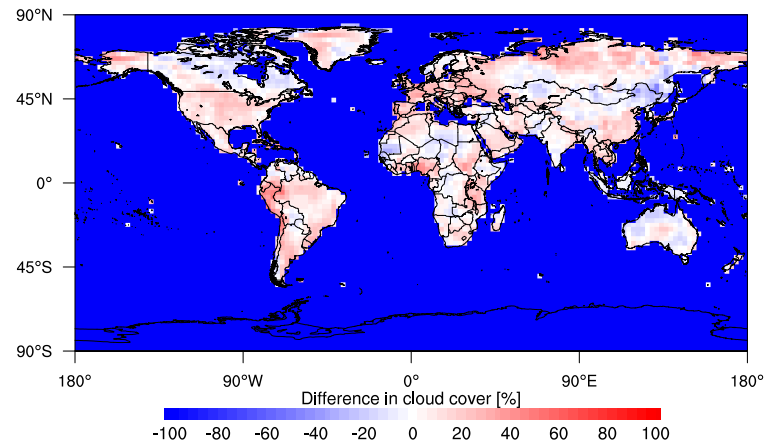
(u) 中央アジア



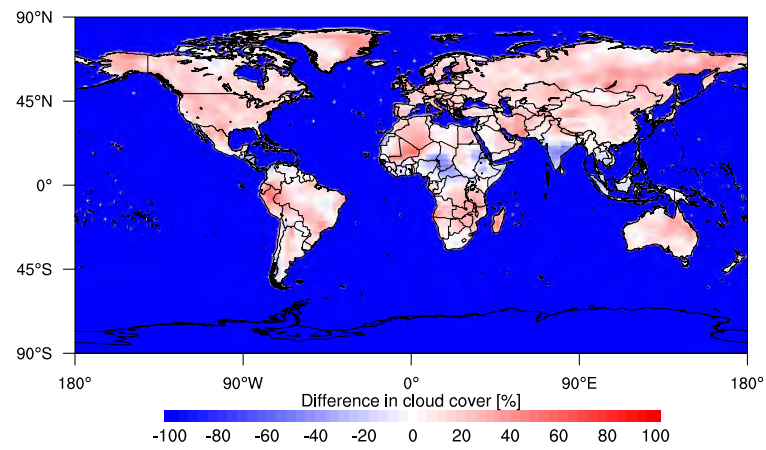
(v) 日本

- | | | | |
|--------------|---|--------------------|---|
| CRU TS2.1 | ■ | GISS-ER | — |
| JRA-25 | ■ | FGOALS-g1.0 | — |
| ERA40 | ■ | INGV-SXG | — |
| CMAP | ■ | INM-CM3.0 | — |
| GPCP | ■ | IPSL-CM4 | — |
| BCCR-BCM2.0 | ■ | MIROC3.2(hires) | — |
| CGCM3.1(T47) | ■ | MIROC3.2(medres) | — |
| CGCM3.1(T63) | ■ | ECHO-G | — |
| CNRM-CM3 | ■ | ECHAM5/MPI-OM | — |
| CSIRO-Mk3.0 | ■ | MRI-CGCM2.3.2 | — |
| CSIRO-Mk3.5 | ■ | CCSM3 | — |
| GFDL-CM2.0 | ■ | PCM | — |
| GFDL-CM2.1 | ■ | UKMO-HadCM3 | — |
| GISS-AOM | ■ | UKMO-HadGEM1 | — |
| GISS-EH | ■ | ENSEMBLE of MODELS | — |

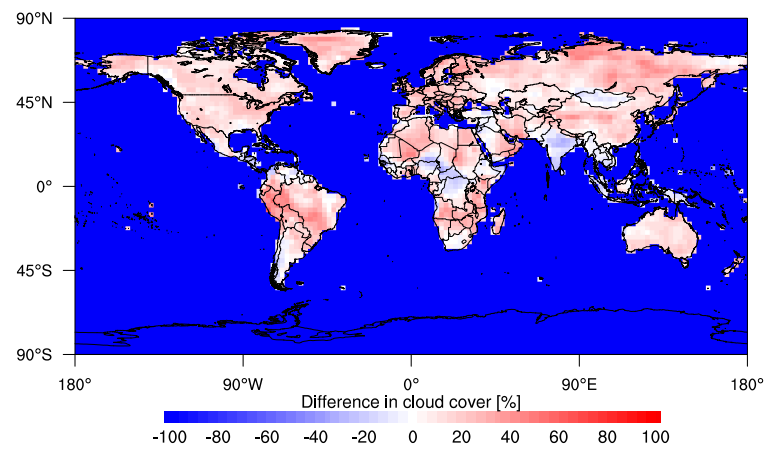
図 2.14 (続き) 降水量の月別平年値 (1979-1999 年)



(a) 1月

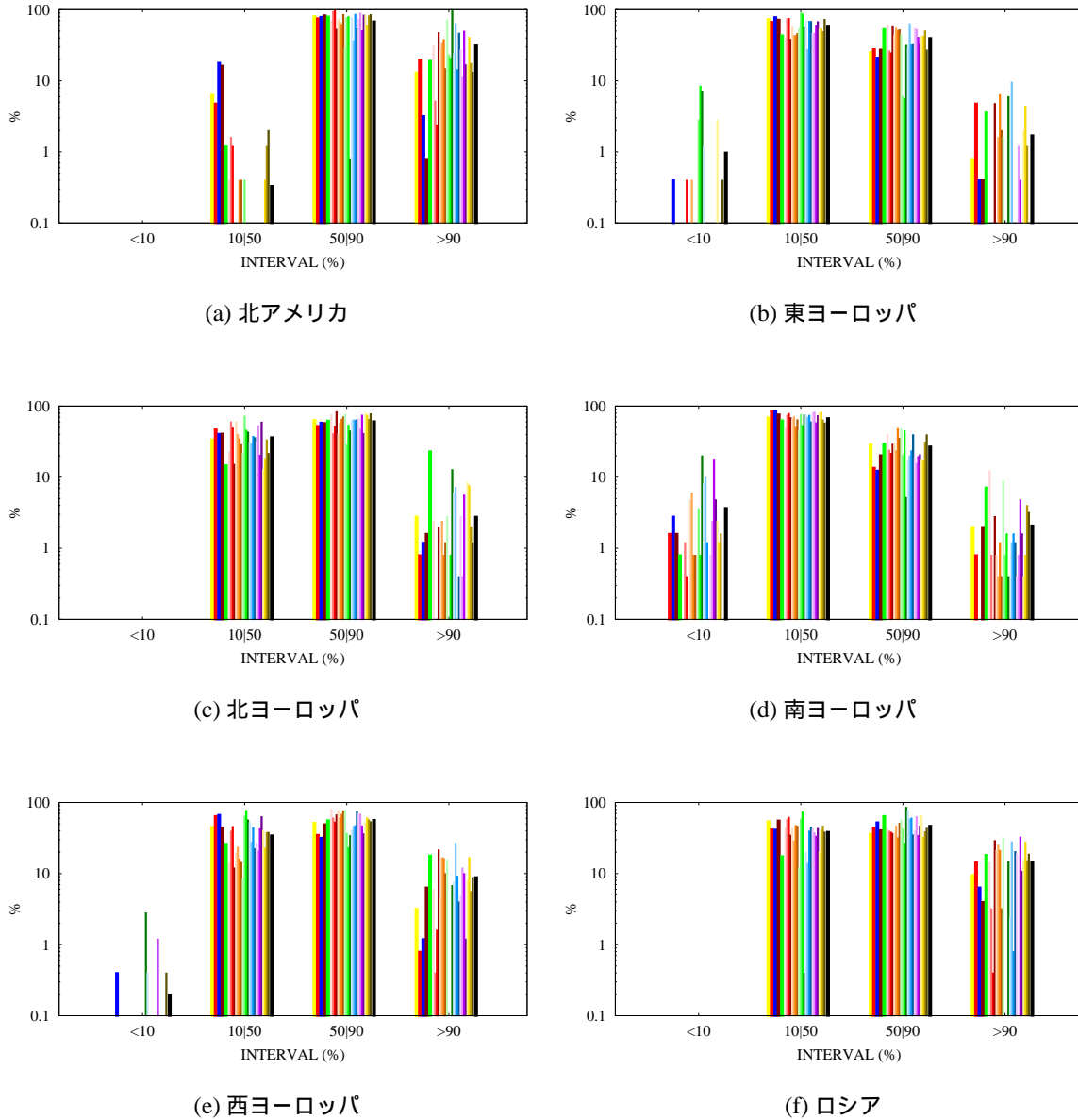


(b) 5月



(c) 9月

図 2.15 CRU TS 2.1 と JRA の全雲量の差の平年値 (1979-1999 年)(%)



- | | |
|--------------|------------------|
| CRU TS 2.1 | FGOALS-g1.0 |
| JRA-25 | INGV-SXG |
| ERA40 | INM-CM3.0 |
| CMAp | IPSL-CM4 |
| GPCP | MIROC3.2(hires) |
| BCCR-BCM2.0 | MIROC3.2(medres) |
| CGCM3.1(T47) | ECHO-G |
| CGCM3.1(T63) | ECHAM5/MPI-OM |
| CNRM-CM3 | MRI-CGCM2.3.2 |
| CSIRO-Mk3.0 | CCSM3 |
| CSIRO-Mk3.5 | PCM |
| GFDL-CM2.0 | UKMO-HadCM3 |
| GFDL-CM2.1 | UKMO-HadGEM1 |
| GISS-AOM | ENSEMBLE of GCM |
| GISS-EM | |

図 2.16 1979-1999 年における降水頻度分布 (CRU の月最大降水量に対する割合を横軸に示す)

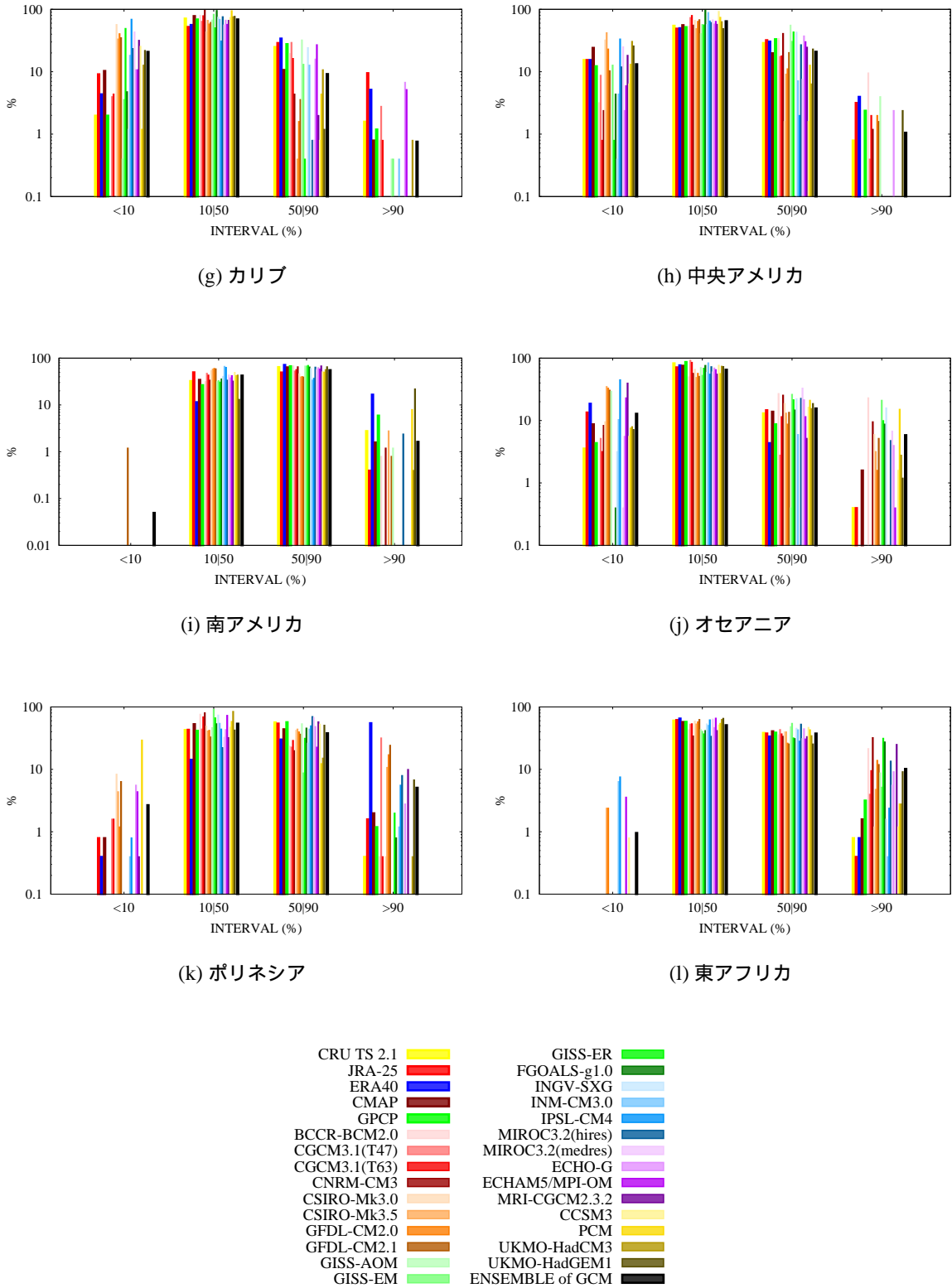
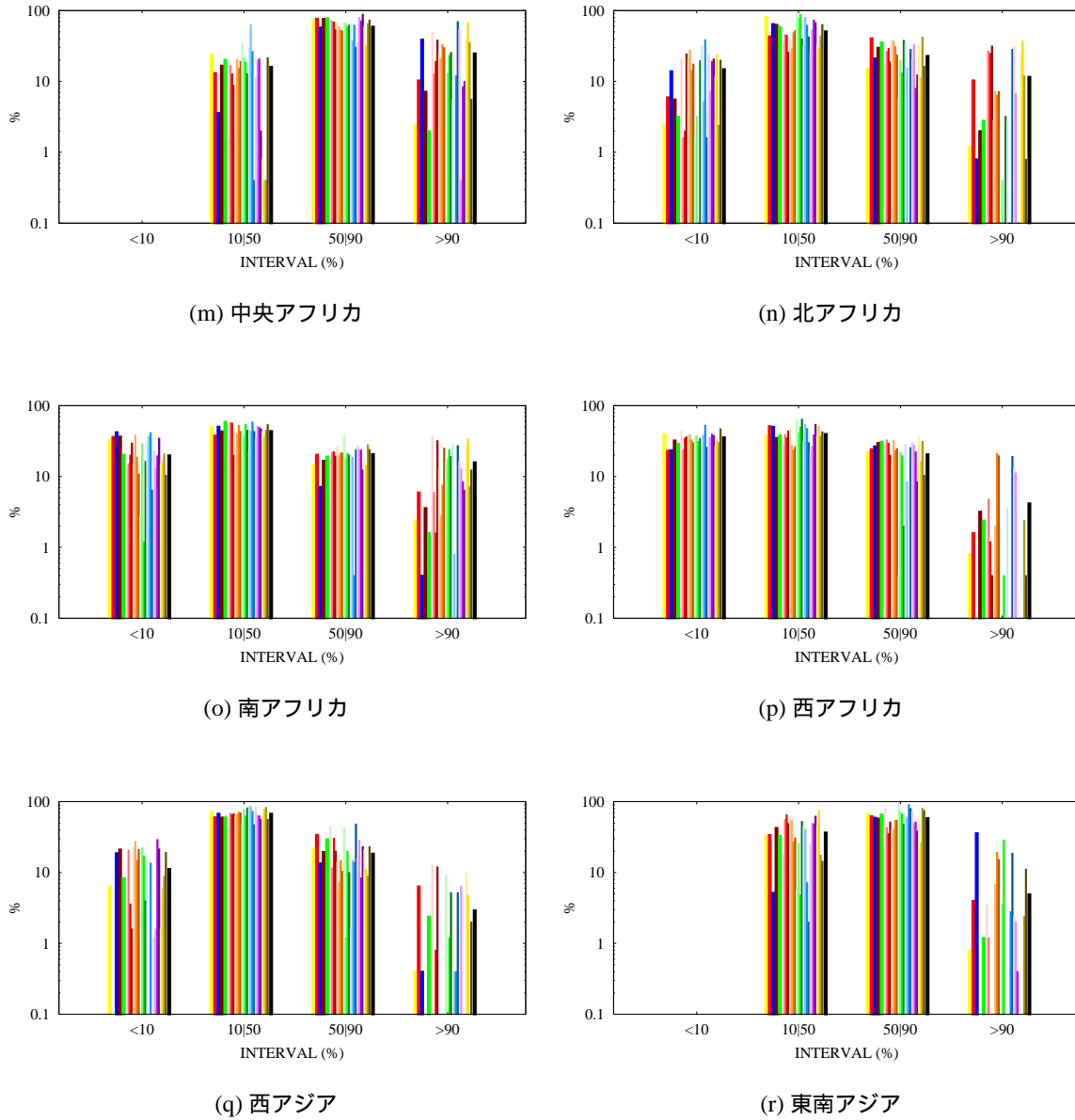


図 2.16 (続き) 1979-1999 年における降水頻度分布



- | | |
|--------------|------------------|
| CRU TS 2.1 | GISS-ER |
| JRA-25 | FGOALS-g1.0 |
| ERA40 | INGV-SXG |
| CMAP | INM-CM3.0 |
| GPCP | IPSL-CM4 |
| BCCR-BCM2.0 | MIROC3.2(hires) |
| CGCM3.1(T47) | MIROC3.2(medres) |
| CGCM3.1(T63) | ECHO-G |
| CNRM-CM3 | ECHAM5/MPI-OM |
| CSIRO-Mk3.0 | MRI-CGCM2.3.2 |
| CSIRO-Mk3.5 | CCSM3 |
| GFDL-CM2.0 | PCM |
| GFDL-CM2.1 | UKMO-HadCM3 |
| GISS-AOM | UKMO-HadGEM1 |
| GISS-EM | ENSEMBLE of GCM |

図 2.16 (続き) 1979-1999 年における降水頻度分布

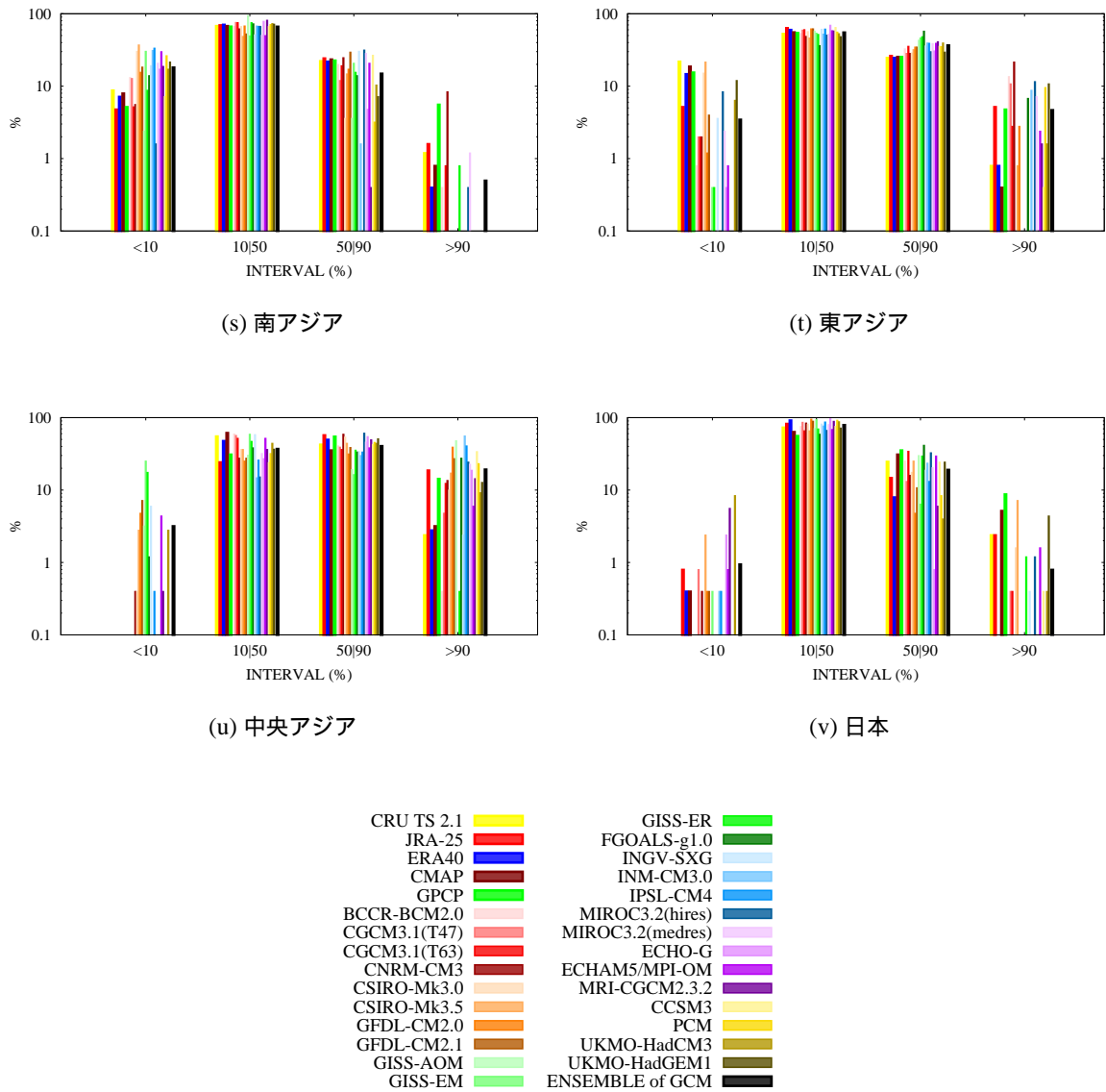


図 2.16 (続き) 1979-1999 年における降水頻度分布

2.4 気候値再現性の統計学的解析

前節に示したように CRU TS 2.1, JRA-25, ERA-40, CMAP, GPCP, CMIP3 データの気候値には時・空間的にばらつきがあり, それぞれ固有の特徴を有していることがわかった。地球上の多くの地点・地域についての再解析値や地上観測点や衛星から得られるデータ, GCM 出力値の再現性についての調査はまだ不十分であり, 多くの課題が残されている。グリッドデータとして利用することができる気候値データが実際の気候値をどれだけ正確に再現しているのか, 全球規模の学術的研究利用のための実用に耐えうるものであるのかについて, よりその詳細を把握するためには, 世界の地上観測点から得られる気候値と比較しないことには難しい。このため本研究では, 米国海洋大気庁 (NOAA) の下部組織である米国気候データセンター (National Climatic Data Center) が提供する気象データベース (National Climate Data Online, 以下 NNDC) を利用し [63], NNDC から得られるデータを基準とした統計誤差解析手法により CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP および CMIP3 の再現性を試みる。なお, NNDC から取得した各地点におけるデータの中で 1979-1999 年における各月の降水量, 気温が欠測なく収録されており, かつ無償で入手可能である地点数は, 北アメリカ 125 地点, アジア 108 地点, 南アメリカ 62 地点, ヨーロッパ (ロシアを含む) 133 地点, アフリカ 75 地点, 中東 18 地点, 中央アメリカ 1 地点, オセアニア・太平洋諸島 83 地点, カリブ 3 地点の全世界合計 608 地点であった。本節以降では, この 608 地点の気候値データを基準とし, 各グリッドデータセットに空間補間などの処理を行わず, 各地点上の最近傍点におけるグリッド値を使い, CRU TS 2.1, JRA-25, ERA-40, CMAP, GPCP, CMIP3 の再現性を評価する。なお, NNDC のデータセットは, 北アメリカ, アジア, 南アメリカ, ヨーロッパ, アフリカ, 中東, 中央アメリカ, オセアニア・太平洋諸島, カリブの各領域ごとに分類されてデータが提供されているため, 本研究では次小節以降, 標準化された気候値, バイアス (グリッドデータの値と NNDC の値の差), NNDC との差率, バイアスおよび NNDC との差率の標準偏差, バイアスおよび NNDC との差率の平均絶対誤差の指標を用い, 地域ごとに再現性を評価することとした。

2.4.1 バイアスの標準偏差

標準偏差は, データセットにおける内在するデータの一貫性を評価するために使われる。一貫性が高ければ標準偏差は低くなり, 一貫性がなくばらつきが大きければ標準偏差は高くなる。それは平均値からの偏差の程度を表現することでもある。これをシミュレーションデータと観測データ間の差に対して適用すると, シミュレーションの初期・境界条件や観測値の不確実性のために生じる確率的な誤差を推測することも可能となる。本研究

では，NNDC と CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP および CMIP3 の時間的・空間的なバイアスの標準偏差を計算するため，次式を用いる．

$$SDB = \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (\Phi'_i - \bar{\Phi}')^2} \quad (2.3)$$

ここに，

$$\bar{\Phi}' = (1/n) \sum_{i=1}^n \Phi'_i \quad (2.4)$$

であり， Φ_i は，月平均気温および月降水量， Φ'_i は CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP および CMIP3 と NNDC とのバイアス， $\bar{\Phi}'$ はバイアスの平均である．再現性の評価対象とするデータと NNDC とのバイアスを評価するため，気候要素の差つまり CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP および CMIP3 それぞれの気候値から NNDC の気候値を引いたもの（以下，PD）と NNDC との差率（PPD=(PD/NNDC) × 100%，以下 PPD）の 2 種をバイアスとして取り，それぞれの標準偏差（以下，SD-PD, SD-PPD）を算出することにより，NNDC を基準とした CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP および CMIP3 の一致性を評価する．

2.4.2 バイアスの平均絶対誤差

バイアスは正と負の値を取りうるため，統計期間内の値を全て足した際などに相殺されることがある．このため，符号を考えずに絶対誤差の平均を算出することは，真のバイアスを得るよりよい手法であると考えられる [64]．本研究では，CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP および CMIP3 と NNDC とのバイアスの平均絶対誤差を求めるため以下の式を用いる．

$$MMB = (1/n) \sum_{i=1}^n |\Phi'_i| \quad (2.5)$$

式 (2.3), (2.5) に示す PD と PPD の平均絶対誤差，つまり PD の MMB（以下，MM-PD），PPD の MMB（以下，MM-PPD）を求めることにより，NNDC と他のデータ間のバイアスの平均絶対誤差を評価する．また，NNDC を基準データとして各データにおける再現性の評価には，相関係数および RMSE(平均二乗誤差) も用いる．全期間（1979-1999 年）における各年ごとの月別平均値を用いて各対象データごとに算出した．RMSE の計算においては，NNDC の変動幅を用いて各気候要素ごとに次式で規格化した．

$$RMSE(i, m) = \frac{\sqrt{\frac{1}{12} \sum_{n=1}^{12} (V(i, m, n) - V_0(i, n))^2}}{\sigma_0(i)} \quad (2.6)$$

ここに, $RMSE(i, m)$: 要素 i , データ m の平均二乗誤差, $V(i, m, n)$: 要素 i におけるデータ m の n 月平均値, $V_0(i, m)$: 要素 i における基準データの n 月平均値, $\sigma_0(i)$: 基準データの標準偏差である.

2.4.3 時系列で見た気候値の再現性

NNDC を基準データとして再解析値や地上観測点・衛星データなどから整備されたグリッドデータ, GCM 出力値の気候値再現性がどの程度の精度を有しているのかを調べるため, 対象期間 (1979-1999 年) における気温および降水量の時間的な変動性を調べる. 表 2.3 に NNDC で定義されている各地域の 1979-1999 年における月別および年平均気温平年値を示し, 表 2.4 に同様に月別および年降水量を示す. 表 2.5 に月別および年降水量の NNDC との差率 (PPD) を示す.

気温の再現性

図 2.17 に各地域における標準化された気温と気温差 (PD) を示す. 標準化された気温を見ると, 全地域において NNDC と比較して全てのデータセットは良く似た変動性を示しており, 季節を問わず変動性には大きな差異がなく, 統計的なばらつきは小さいと言える. 地域別に見ると, 北アメリカでは, 1979-1999 年における年平均気温平年値は NNDC, CRU, JRA, ERA, CMIP3 でそれぞれ 4.8, 4.4, 3.6, 4.0, 3.7 °C となった. これは北アメリカにおいて再解析値, CRU, CMIP3 が NNDC の気温平年値に対して 0.4~1.1 度過小評価されていることを示すものである (表 2.3 網掛け). また, 表 2.3 に示す各データセットの月別の平均気温と月別の NNDC から得られた気温値との差 (PD) の絶対値を見ると, 1 月, 11 月, 12 月を除いては CRU が他のデータソースと比較して最も小さく, 1 月, 11 月, 12 月では CMIP3 が最も小さい結果となった (表 2.3 網掛け). また, 月ごとの PD (図 2.17(b)) から, CMIP3 の一部の期間を除く全データセットが全月において NNDC の気温を下回っていることがわかる. また, PD の値は JRA, ERA では特に夏期 (7-9 月) の平均でそれぞれ -1.7, -1.0 °C と他の季節に比べて絶対量は相対的に大きい (表 2.3 網掛け). 一方, CRU の PD の値は全月で -0.3~-0.7 °C の値に収まっていることがわかる. このことは図 2.17(b) から読み取れ, CRU の振幅は他のデータソースと比較して小さく, 冬期の一部を除く全期間を通じて NNDC つまり地上観測点の値と比較して最も近い値を持つ

ていることがわかる。

ヨーロッパにおける年平均気温平年値は NNDC, CRU, JRA, ERA, CMIP3 でそれぞれ 1.1, 0.8, 1.1, 0.9, -0.9 °C となり, CMIP3 の平均気温が NNDC に比べて 2.0 °C 低い結果となった(表 2.3 網掛け)。季節ごと PD の値を見ると, JRA では冬期(1-3月)の平均で 0.9 °C と最も絶対値が大きく, 4-6月では -0.1 °C と最も絶対値が小さい。また, 夏期(7-9月)の平均で PD は -0.8 °C となり, 1-3月の正のバイアスとは逆のセンスになっていることがわかる(表 2.3)。つまり, JRA では夏期の気温の再現値は NNDC に比べて過小評価であり, 一方冬期では過大評価となっていることがわかる。図 2.17(d) より, CRU に比べて JRA, ERA, CMIP3 では PD の月々の振幅量が大きく, 特に ERA に比べて JRA, CMIP3 ではその傾向が顕著となった。

カリブでは, CRU の各月における PD の値は全月において他のデータソースに比べて相対的に小さい結果となった(表 2.3, 図 2.17(f))。このことは, 前節で示した CRU の過小評価が地上観測値と比べても同様であることを示すものである。一方, ERA の季節ごとの PD 値は 1-3月平均が -0.1 °C, 4-6月の平均が 0.0 °C, 7-9月の平均が -0.1 °C, 10-12月の平均が -0.1 °C とほとんど NNDC との差がない結果となった。しかしながら, 図 2.17(f) を見ると, 1979-1983年において, 過大評価の傾向を有しており, 特に 1981年1月では NNDC に比べて 2.6 °C の過大評価となっている。一方, 1984-1996年付近まで PD 値は負の値を取っており, 1996年以降の PD 値は 0 に近づいていることがわかる。つまり, 統計期間(1979-1999年)における各月の気温平年値を見ると, NNDC に対してバイアスがほとんどない状況が見てとれるが, 時系列でみると, 正のバイアスが卓越している期間, 負のバイアスが卓越している期間が見てとれ, それらのバイアスが相殺されて, 月平均値の結果の再現性が高くなっている。本傾向は JRA でも見られる。

南アメリカでは, 1979-1999年における平均気温平年値は NNDC, CRU, JRA, ERA, CMIP3 でそれぞれ 18.9, 18.8, 17.5, 17.7, 18.5 °C となり, CRU, JRA, ERA, CMIP3 は NNDC に対して過小評価されていることがわかる(表 2.3)。また, CRU における PD の絶対値は JRA, ERA, CMIP3 に比べて小さく, JRA, ERA では一部の期間以外は PD の値は負となっており, 気温値が過小評価されていることがわかる(図 2.17(j))。また, CMIP3 の季節ごとの PD 値を見ると, 1-3月の平均が 0.1 °C, 4-6月平均が -0.3 °C, 7-9月平均が -0.9 °C, 10-12月平均が -0.7 °C と, 夏期から冬期において PD の絶対値が大きくなっていることがわかる。以上のことから, 南アメリカでの気温の再現性は CRU が最も優れており(表 2.3 網掛け), JRA, ERA は過小評価傾向が顕著であり, CMIP3 は夏期から冬期にかけての再現性が低く, JRA, ERA, CMIP3 は CRU と比較して, PD 値の月々の変動が大きい(図 2.17(j))。

オセアニアでは CRU, JRA, ERA, CMIP3 の年平均気温平年値の PD 値はそれぞれ -0.2, 0.5, 0.0, 0.0 °C となり, 各データセットの NNDC と比較した年平均気温平年値の再現性

は高いと言える。月別に見ると JRA では6月から8月の冬期において、PD 値は正のバイアス、つまり月平均気温が過大に評価されている一方、それ以外の期間については負のバイアスを取り、気温値が過小評価されていることがわかる。本傾向は ERA においても同様である。CRU の1981年の月平均気温値は NNDC に比べて大幅に過小評価されている傾向が強いが、それ以外の期間については、PD の絶対値は他のデータソースと比べて低く、季節を問わず、NNDC との対応は良いと言える（図 2.17(l)）。

アフリカでは、CMIP3 の月別の平均気温は各月において NNDC と比較して低く、年平均では 0.9°C 過小評価されており、他のデータソースと比較して PD の絶対値は大きいことがわかる（表 2.3）。また、CRU の PD 値は全月において 0.2°C を超えない範囲に収まっており（表 2.3 網掛け）、図 2.17(n) を見ると、PD の変動幅が他のデータソースと比較して最も小さいことがわかり、この地域における気温値の再現性は CRU が最も高くなっていることがわかる。

中東では CRU, JRA, ERA, CMIP3 の年平均気温平年値の PD はそれぞれ -1.2 , -1.7 , -1.5 , -2.1°C となり、図 2.17(p) より年々変動を見ても、NNDC と比較して過小評価されていることがわかる。再解析値ごとでみると、JRA では4-6月平均の PD 値が -2.1°C 、7-9月が -1.8°C となっており、10-12月の -1.4°C 、1-3月の -1.5°C と比べて PD の絶対値は相対的に大きく、春期から夏期において NNDC との対応が悪くなっている。一方、ERA では7-9月の PD 値は -1.1°C であり他の季節に比べて絶対量は相対的に小さく、夏期における NNDC との対応はそれ以外の季節に比べて良いと言える。CMIP3 では10-12月の PD 値が -3.0°C であり、1-3月の -2.3°C 、4-6月の -1.9°C 、7-9月の -1.1°C と比べてその絶対値が大きく、特に冬期において NNDC と比較した際の過小評価の程度は他のデータソースと比べて顕著となった。以上から、中東における気温値は NNDC と比べて全データソースで過小評価される傾向にあるが、CRU の気温値は PD の絶対値・変動幅ともに最も小さく、再現性が優れていることがわかる（表 2.3 網掛け、図 2.17(p)）。

アジアにおける年平均気温は NNDC, CRU, JRA, ERA, CMIP3 でそれぞれ 15.0 , 14.7 , 13.8 , 14.0 , 13.1°C となり、CMIP3 の平均気温が NNDC に比べて 1.9°C 低い結果となった。季節ごとの PD 値を見ると、JRA では7-9月平均で -1.8°C と最も大きく、1-3月平均では -0.4°C と最も小さい。また、ERA においては4-6月、7-9月の PD 値は -1.1 となり、絶対値は10-3月平均と比較して 0.3°C 大きい結果となり、JRA, ERA が特に夏期において過小評価されている傾向がわかる。一方、CRU では全月において NNDC との PD の絶対量は 0.5°C を超えず、図 2.17(r) から JRA, ERA, CMIP3 と比較して最も NNDC との対応が良いことがわかる。

NNDC と他のデータソースの月平均気温の相関係数と RMSE で見てみる（図 2.19, 2.21）と、CRU では中央アメリカを除く全地域で相関係数は 0.93 以上となり、NNDC の気温値との相関は他のデータソースと比較して最も高い結果となった。図 2.19 より南ア

アメリカ北部，アフリカ赤道域，東南アジア，オーストラリア沿岸部における相関係数は全データセットで 0.9 未満を示しており，北アメリカや東南アジアを除くアジア域，ヨーロッパ，ロシア，オーストラリア内陸部などと比べると相対的に相関係数は低くなっている．また，図 2.21 を見ると，全データセットで南アメリカ北部，アフリカ，中央アメリカ，北アメリカ西部で RMSE は 1.0 を超える地点が多く，他の地域と比較して相対的に誤差が大きいことがわかった．これは全データセットで同様の傾向である．以上のことから NNDC の気温値と比較した際，各データセットの気温値との相関は全ての地域において有意 ($p < 0.01$) であり，気温の季節変動は総じて良好に再現できている結果となったが，特に南アメリカ北部，アフリカ，東南アジアにおける赤道域付近では相対的に相関係数が低く，RMSE の値も大きいことがわかった．これは，エルニーニョ・ENSO などの大気海洋相互作用，赤道域の積雲対流活動・ITCZ などこの地域における熱帯気象のマルチスケール相互作用を再現することが現時点で難しいことを示していると言える．

降水量の再現性

図 2.18 に各地域における標準化された降水量と降水量の差 (PD) を示す．1979-1999 年の北アメリカにおける年降水量平年値は NNDC, CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 でそれぞれ 937.2, 889.3, 1038.0, 857.7, 854.8, 958.3, 951.2mm であった (表 2.4)．北アメリカの CRU, ERA, CMAP の年降水量平年値は，NNDC と比較して過小評価されている一方，JRA, GPCP, CMIP3 では過大評価されていることがわかる．PPD の値を見ると，JRA では 5 月から 8 月にかけて各月で 15% を超えており (表 2.5)，他の月と比べて NNDC との差率が相対的に高い．ERA では 3 月，4 月，9 月，10 月に PPD の絶対値は 10% を超えていることがわかる．また，CMAP では 3 月，4 月，10 月，11 月，12 月の PPD の絶対値が他の月と比べて相対的に高く，GPCP では 1 月，2 月における PPD の値が 13.3, 13.5% と他の月より相対的に高くなっている．また，表 2.4，表 2.5 より JRA は夏期の再現性が低く，GPCP は冬期における再現性が低い．また，CMAP, ERA は年間を通して月降水量を過小評価する傾向にある．また，CRU は各月において特徴的なバイアスは見られないが，月降水量は NNDC に比べて過小評価されている．以上のことから，北アメリカにおいては 4 月から 11 月にかけては，GPCP が最も NNDC に近い値を取っており，12 月から 3 月にかけては JRA-25 が最も再現性が良いことがわかる (表 2.5 網掛け)．

ヨーロッパにおける年降水量平年値は NNDC, CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 でそれぞれ 761.6, 668.8, 624.9, 611.5, 601.8, 785.9, 669.0mm となり，対応する PPD の値はそれぞれ -12.2, -17.9, -19.7, -21.0, 3.2, -12.2% となった (表 2.4，表 2.5)．図 2.18(d) より全データソースは PD の振幅が大きく，また，GPCP を除く全データでは PPD の値は全月で負の値を取るが，その絶対値は冬期が最も大きく，冬期から夏期にかけて PPD の絶対値は低くなり，夏期が最も小さく，夏期から冬期にかけて絶対値が大きくなる傾向が

見られる。本結果からは、6月から8月にかけてCRUのPPDの絶対値は他のデータソースと比べてより小さく、9月から4月ではGPCPのPPDが最も小さい結果となった(表2.5 網掛け)。特にGPCP以外の再解析値(JRA, ERA), CMAPおよびCMIP3の月降水量は、NNDCに比べて大きく過小評価する傾向が強いため、本地域における各種グリッドデータの再現性には課題が残る。また、JRAのPDを見ると1988年以降、パフォーマンスが大幅に向上していることがわかる。これは1987年途中から利用可能となったDMSP(米国軍事気象衛星計画)衛星のマイクロ波センサーSSM/Iの可降水量リトリーバルを同化することによって、降水量の精度が改善したためであると考えられる。

カリブでは、CRU, JRA, ERAの各月および年降水量は、NNDCの降水量値を大幅に上回っており(表2.4 網掛け)、また、他の地域に比べて相対的に振幅量が非常に大きいことからこの地域での降水量推定の困難さが見てとれる(表2.4, 表2.5, 図2.18(f))。一方、CMAP, GPCPの各月降水量にはばらつきがあるものの、CRU, JRA, ERAと比較するとPPDの値は小さく、年降水量で見るとPPDの値はCMAPで-4.1%、GPCPが-2.8%となっている。これは、GPCP, CMAPの熱帯域での降水量評価がCRUや再解析値を上回っていることを示すものであり、衛星観測と地上観測を組み合わせた格子点データの有効性が確認できる領域であると言える。

南アメリカにおける年降水量のPPDはCRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIPそれぞれ-0.7, 10.1, 35.5, 4.3, 18.8, -8.3%となり、ERAが最も年降水量を過大評価しており、年々変動を見ても過大評価の傾向が他のデータソースと比較して顕著である(表2.5, 図2.18(j))。南アメリカは全地域を通して、データソース間のPDおよびPPDのばらつきが大きいことから、降水量の再現が難しい地域のひとつであると考えられる。JRAでは、4月から7月にかけては降水を過小評価、それ以外の月では降水を過大評価しており、年平均では過大評価となっている。このことは前節で示した南アメリカにおけるJRAの降水量の過小評価と反対の結果を示しているが、NNDCの観測点にはアマゾン流域における観測点がほとんどない。これは、この流域における正確な観測値の入手が困難であることが要因であると考えられる。したがって、南アメリカにおけるJRAは特にアマゾン流域において降水量が過小評価されているのであり、それ以外の地域では年間で見ただけ、降水を過大評価する傾向が出ていると考えられる。GPCPでは全月においてPPDは正の値であり月降水量の過大評価が顕著であるが、特に7月ではPPDの値は40.7%となっており、NNDCに対して降水量が非常に大きく見積もられている。CMIP3の7月から9月におけるPPDはそれぞれ0.5, 4.6, 0.8%と少し過大評価されているものの、他の月ではPPDは負の値をとっており、年降水量は過小評価されている。これは、JRA, ERAの再解析値が降雨量を過大評価する傾向が出ているのとは反対の傾向であることがわかる。PPDの絶対値で見ると、1月, 2月はCMAPが最もNNDCに近い値を取っており、3月はCRU, 4月はJRA, 5月から8月はCRU, 9月はCMIP3, 10月から12月はCRUが最も

再現性が高く、年降水量で見た PPD の絶対値は CRU が最も小さい結果となった（表 2.5 網掛け）。

オセアニアでは、CRU を除く全データソースで、各月における PPD は負の値を取っており（表 2.5 網掛け）、JRA, ERA, CMAP, CMIP3 では 6 月から 8 月における PPD の負の値は最も大きく、逆に、GPCP では冬期（12-2 月）、春期（3-5 月）は夏期（6-8 月）に比べて相対的に PPD の負の値が大きくなった。図 2.18(l) より、JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 では NNDC より小さい降水量となっている。一方、CRU における PPD の絶対値は全月で最も小さくなった（表 2.5 網掛け）。また、他のデータソースと比較して CRU における PD の振幅の幅は最も小さいことから、CRU データの一貫性・再現性が高い結果となった。

アフリカにおける年降水量の PPD は CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 それぞれ 0.8, -0.4, -13.0, -6.0, -2.4, -2.4% となり、CRU を除き過小評価となっており（表 2.5 網掛け）、特に ERA, JRA では PD の振幅の変動幅が大きい（図 2.18(n)）。ERA の各月ごとの降水量平年値の PPD を見ると、4 月から 9 月における絶対値が最も大きく、この季節における ERA の再現性が低いことがわかる。CMAP, GPCP では 7-9 月平均は正の偏差（それぞれ 3.1, 8.5%）、つまり NNDC に対して降水量が過大になっており、それ以外のほとんどの月では負の偏差つまり降水量が過小評価されている。各月における PPD の絶対値は 1 月から 4 月、9 月、10 月は CRU が最も小さく、5 月から 7 月、11 月、12 月は CMIP3、8 月は JRA が最も小さい（表 2.5 網掛け）。また、PD の月々の振幅は CRU が最も小さく、他の再解析値と比較すると調査対象期間では最もばらつきが少なく、再現性は最も安定していると言える。

中東における年降水量平年値は NNDC, CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 でそれぞれ 305.4, 332.2, 335.0, 196.7, 224.4, 264.2, 217.2mm となり、PPD は 8.8, 9.7, -35.6, -26.5, -13.5, -28.9% となった（表 2.4, 表 2.5）。JRA では夏期（7-9 月）における PPD は -48.8% となり降水量は大きく過小評価されている。一方、春期（4-6 月）における PPD は 41.4% と降水量の大幅な過大評価となり、季節ごとに PPD の正負が大きく異なる結果となった。また、標準化された降水量（図 2.18(o)）を見ると NNDC と比較して、振幅が大きい。つまりばらつきが大きいため、NNDC の変動性と月々の変動量の傾向を精度よく再現できているとは言えない結果になった。また、1979 年 10 月、1981 年 1 月の PD は ERA, CMAP, CMIP3 でいずれも -90% より小さな値を取っており、このような特定の期間における著しく大きな NNDC との差異が統計期間における年降水量平年値あるいは月別降水量平年値の NNDC との比較において再現性を低下させている可能性がある。また、他の地域に比べて相対的に PPD の値が大きいのは、この地域における NNDC の降水量が相対的に小さいことも一因である。

アジアにおける年降水量平年値は NNDC, CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 でそ

それぞれ 1160.1, 1198.3, 1290.9, 1057.9, 1163.4, 1209.2, 1157.1mm (表 2.4) であり, 年降水量平年値における PPD の値は 3.3, 11.3, -8.8, 0.3, 4.2, -0.3% となった (表 2.5). このことから, 年降水量平年値でみると JRA が最も過大評価しており, ERA の年降水量が最も過小評価される結果となった (表 2.4 網掛け). JRA では特に 4 月から 8 月にかけて PPD の値は 18.0% 以上の値を取っており, NNDC に比べて大きく降水量を見積もっていることがわかる (図 2.18(r)). 一方, ERA は 9 月から 2 月にかけての PPD の負の絶対値が他のデータソースに比べて最も大きく, NNDC と比較して降水量を小さく見積もっていることがわかる. CMAP は春期 (4-6 月) に PPD が 5% 以上となっており降水量は過大評価されているが, 9 月から 12 月の過小評価により相殺されることにより, 全データソースの中で最も年降水量の PPD が低くなっている. また, GPCP は 3 月から 6 月における PPD の値は 10% 以上となっており, 他の月と比較して相対的に高くなっている. 図 2.18(q) から NNDC と比較して変動成分が大きく, 各季節によってばらつきがあることがわかる. CMIP3 は 7 月~11 月にかけて PPD は負の値を取り, それ以外の月では正の値を取っており, 過大評価する季節と過小評価する季節の 2 つに傾向が分かれていることがわかる. 以上のことから, アジアでは CRU と CMAP の月降水量が比較的 NNDC に近い再現性があり, JRA, ERA は季節によって大幅に NNDC との降水量バイアスが生じていることが明らかとなった.

降水量の NNDC と各データソースの相関係数および RMSE (図 2.20, 図 2.22) を見ると, CRU では東アジア, ヨーロッパ, ロシア, 北アメリカにおいて R が 0.95 を超える地点があるが, 他のデータソースではほとんど見当たらないことがわかる. また, CMIP3 では有意な相関 (危険度 10% で, $R > 0.31$) を示す地点が少なく, 他のデータソースと比べて NNDC との相関が低い. RMSE を見ると, CRU, CMAP, GPCP と比べて JRA, ERA, CMIP3 は相対的に RMSE が大きくなっている地点が多く, モデルによる降水量推定の見積もりの難しさが見てとれる.

2.4.4 空間的な比較で見た気候値の再現性

1979-1999 年における CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 の空間的な再現性を評価するため, CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 と NNDC 間の降水量バイアス (PD) と NNDC との降水量差率 (PPD) を各地点ごとにプロットした図を図 2.23 に示す.

図 2.23(c) より, 北アメリカでは, アラスカ湾沿岸域およびケベック州を含むそれより以東以外の全域において, JRA の PD は正の値を取っており, NNDC に比べて降水量は過大評価されていることがわかる. 一方, ERA では, 西部で PD は正であるが, 東部では負の領域が広がっていることがわかる. つまり, ERA と JRA を比べると, 特に北アメリカの西部では降水量はともに過大評価されているが, 東部では ERA は過小評価,

JRA は過大評価の傾向があることがわかる。このことは、北アメリカ西部のロッキー山脈などの比較的標高が高い領域において、JRA, ERA の降水量が過大評価されていることを示している。平坦なエリアより複雑地形を有する場所において再解析データは降水量を過大評価することがわかる。また、GPCP では JRA 同様北アメリカのほぼ全域で降水量を過大評価する結果となっている（図 2.23(i)）。CMIP3 ではミシシッピ川流域では降水量が過小評価となっており、それ以外の領域では過大評価されている傾向が見取れる。CMAP および CRU では目立った特徴は見られなかった。北アメリカの各点を対象とした PD の負の最大値・正の最大値をそれぞれ見ると、CRU で-3001.3, 480.2mm, JRA で-2959.2, 1980.4mm, ERA で-3062.4, 743.7mm, CMAP で-2553.5, 595.1mm, GPCP で-2007.5, 683.9mm, CMIP3 で-3419.2, 1369.5mm となった。負の最大値はアラスカ山脈北部に位置する地点であり、非常に大きな偏差が認められ、各データセット間に差は見られない。一方、正の最大値では、JRA での値は CRU の 5 倍近くになっており、CMIP3 の値も CRU の 3 倍程度の値を取っている。このことから、JRA, CMIP3 は他のデータセットと比較して、NNDC に対してより過大な降水量を評価している地点を有していることがわかった。同様に、PPD の北アメリカにおける最小値と最大値を求めると、CRU は-56, 66% である一方、JRA では-78, 160%, ERA では-85, 178%, CMAP では-82, 129%, GPCP では-54, 111%, CMIP3 では-81, 324% となり、CRU はデータセットの中で最も最小値と最大値の幅が小さく、JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 と比較して極端な NNDC との偏差を取っていないことがわかる。一方、CMIP3 の PPD は最大 324% であり、より少ない地上降水量の地点において、降水量を過大評価する傾向が見られることがわかる。

ヨーロッパではバルカン半島で顕著な降水の過小評価が見られる（図 2.23）。グレートブリテン島では、CRU, GPCP で PD は正の値を取る一方、JRA, ERA, CMAP では負の値を取り、各データセット間で傾向に差異がある。また、ロシアでは JRA, ERA, GPCP において幅広い領域で降水を過大評価していることがわかる。PPD で見ると、バルカン半島では全データセットにおいて-90% 前後の値を取っており、大きな差は見られない。また、JRA, ERA, GPCP ではロシアにおいて正の値が卓越する地点が相対的に多く、本結果は PD の傾向と同様である。

カリブでは、特に JRA と ERA の降水量が NNDC と比べて大きいことがわかる（図 2.23）。このことは、前節の図 2.7, 図 2.9 より、この地域における対流性の降雨がかかっている一方、他のデータセットではカリブ以南に降雨帯が集中していることに起因していると考えられる。

南アメリカを見ると、アンデス山脈最北部において全てのデータセットは降水量を過大に見積もっていることがわかる（図 2.23）。一方、アマゾン盆地一帯であるセルバでは GPCP を除いて PD が負の値を取っている領域が大きいことがわかる。また、ブラジルのトカンチンス川流域で JRA, ERA で降水が過小評価となっている。アルゼンチンの

最南端部では PD は全データセットで正の値を取るが、パンパ地方一帯では、各データセット間でばらつきが大きいことがわかる。PD の負の最大値、正の最大値は CRU で-667.5, 446.4mm, JRA で-1638.6, 2884.9mm, ERA で-1140.8, 5959.4mm, CMAP で-871.7, 1421.3mm, GPCP で-566.8, 1742.8mm, CMIP3 で-1017.1, 2153.0mm となり、JRA では最も負の最大値が大きく、降水量を過小評価する程度が最も大きいことがわかる。一方、正の最大値は ERA で得られ、オリエンタル山脈やリャノにおいて他のデータソースと比較して過剰に降水を算定していることがわかる。PD の最小値と最大値のレンジ幅は CRU が最も小さく、本地域において NNDC に最も近い値を取っているのは CRU であることが明らかとなった。また、PPD の南アメリカにおける各点の値を見ると、最大となる正の値は CRU が 61%、JRA が 351%、ERA が 743%、CMAP が 197%、GPCP が 261%、CMIP3 が 349% となり、CRU が最も小さい値を取った。また同様に最大となる負の値は CRU が-76% と最も小さい結果となり、本地域において CRU の NNDC と比較した際の再現性は JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 に比べ最も高いと言える。

オセアニアでは、JRA のミクロネシア諸島での過剰な降水量が他のデータソースに比べて顕著となっている。一方、GPCP では同様の地域における PD の値は負となっており、JRA と GPCP で正反対の結果となっていることがわかる(図 2.23)。オーストラリア東部沿岸部では、CRU を除く JRA, ERA, GPCP, CMAP, CMIP3 全データセットにおいて PD は負の値となっており、この地域での降水量は NNDC に比べて少ないことがわかる。オセアニアにおける PD の正負の最大値を見ると、CRU で-814.4, 647.9mm, JRA で-1398.7, 717.0mm, ERA で-1253.5, 1210.0mm, CMAP で-1012.5, 397.8mm, GPCP で-1456.3, 887.8mm, CMIP3 で-1322.2, 493.8mm である。JRA, ERA は正負の差が大きく、再現性の低い地点が存在することを示している。これに比べ、CRU, CMAP では正負差の絶対値が 1,500mm 前後であり、JRA, ERA, GPCP, CMIP3 と比較して、この領域における再現性は良好であるといえる。

アフリカでは、特に JRA, ERA でベナン湾沿岸部で PD の値が大きく、また、ベナン湾沿岸部を除くサハラ砂漠以南チャド湖以西の領域では、CRU, JRA, ERA で PD は負の値、CMAP, GPCP では正の値を取っており、CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP 間で降水の傾向が異なっていることがわかる(図 2.23)。また、PPD の最大となる負の値は、CRU が-34% と最も小さく、降水が過小評価されている地点において全データセットの中で NNDC と最も近い値を取っている。一方、最大となる正の値は CMAP が 173% と最も小さくなり、最大と最小の差は、CMAP が 240% で最も小さい結果となった。

アジアでは、東南アジア一帯および中国南部で JRA の降水量の過大な見積もりが他のデータソースに比べて際立っていることがわかる(図 2.23(c))。また、CRU を除く全データセットではインド南端部で PD は 1,000mm 以上となっており、このエリアでの降水の過大評価が目立つ。また、ERA, JRA の日本における降水量は他のデータソースと比較

して、PD の絶対値が大きく、降水量が過小評価されていることがわかる。日本における JRA の降水量の過小評価は道広ら (2009) [65] と整合的である。

2.5 気候値の再現性誤差解析

ここでは 2.4.1, 2.4.2 小節で示した SDB と MMB を使った誤差解析を行い、気温・降水量値の再現性についての評価を行う。

2.5.1 時間的な比較で見た気候値の再現性

気温の再現性

図 2.24 に月別の気温バイアスの標準偏差 (SD-PD) と気温バイアスの平均絶対誤差 (MM-PD) を示す。

北アメリカでは、1月の SD-PD の値は CMIP3 を除く全データセットで他の月より高く、NNDC の 1 月における年々変動を精度よく再現できていないことがわかる (図 2.24(a))。また MM-PD の値を見ると、6 月から 11 月の JRA における値は他のデータセットより大きく、また CMIP3 を除いては全月で他を上回っている。このことから、JRA の本地域における月別の平均気温平年値の偏差と同様、統計期間の各月における NNDC との平均絶対誤差が大きい (図 2.24(b))。

ヨーロッパにおける SD-PD の値は夏期に比べて冬期において高く、NNDC とのバイアスの各月におけるばらつきは冬期が相対的に大きいことがわかる。また、MM-PD の値を見ると、平均絶対誤差は CRU, JRA, CMIP3 では夏期に比べて冬期に大きくなる傾向があることがわかる (図 2.24(c)(d))。

カリブでは、MM-PD の値は CRU が JRA, ERA と比較して相対的に高く、このことは、CRU の月別の気温平年値が JRA, ERA と比較して低く、NNDC との偏差量が大きい表 2.3 の結果と整合的であると言える。一方、SD-PD の値を見ると、CRU の値は 6 月と 7 月を除いて他のデータソースより低くなっており、本結果は、NNDC との絶対的な誤差の量としては CRU が最も大きいものの、NNDC の各月における年々変動の追従性では CRU が最も優れていることを示すものである (図 2.24(e)(f))。

中央アメリカは対象とした観測点が 1 点のみであり、信頼性に欠ける点があるが、CRU の MM-PD の値は各月で 3.5°C 以上と大きく、JRA, ERA と比較すると 2.0°C 以上平均絶対誤差が大きくなっている (図 2.24(h))。

南アメリカでは、JRA, ERA の MM-PD の値は他の地域と比べても相対的に大きく、この地域における再解析データの気温再現性は高くない。一方、CRU の MM-PD の値は全月で 0.3 を下回っており、各月における NNDC と比べた際の再現性は他のデータソース

より高いことがわかる (図 2.24(j)).

オセアニアにおける MM-PD を見ると, JRA では冬期に比べて夏期において NNDC との絶対平均誤差が大きくなる傾向が見てとれる. また, CRU の MM-PD は各月におけるばらつきが比較的少なく, 絶対誤差平均は約 0.2°C であり, 安定して再現できていることがわかる (図 2.24(l)).

アフリカでは, CRU, ERA に比較して JRA の SD-PD の値は大きく, JRA の気温値と NNDC の気温値の差のばらつきが大きく, 再現性に課題があることがわかる. 同様に, MM-PD の値を見ても, JRA, CMIP3 の値は相対的に大きく, NNDC との絶対的な誤差が存在していることがわかる. また, CRU は SD-PD, MM-PD とともに一部の月を除き最も値が小さく, 追従性・一貫性・再現性の全てにおいて優れた結果を有していることがわかる (図 2.24(m)(n)).

中東における MM-PD を見ると, JRA では夏期において 2.0°C を超える絶対平均誤差があり, この地域における JRA の気温の再現性は他のデータソースと比較して低いと言える. 一方, ERA, CRU の MM-PD は JRA と比較すると相対的に小さな値を冬期を除いて取っているが, 他の地域と比べると相対的に絶対誤差の量が多いことがわかる (図 2.24(p)).

アジアでは, CMIP3 を除く全データで SD-PD の値は 0.4°C を下回っており, 各月の年々変動に見る NNDC とのバイアスは小さい (図 2.24(q)). 一方, MM-PD を見ると, JRA では特に夏期において値が 1.0°C を上回っており, ERA, CRU と比較して値が大きく, NNDC との絶対誤差の量が多いと言える. また, CRU は全月で MM-PD の値は 0.5°C 未満であり, 他のデータセットと比較して再現性が良い (図 2.24(r)).

降水量の再現性

図 2.25 に各データセットの NNDC との降水量差率の標準偏差 (SD-PPD) と NNDC との降水量差率の平均絶対誤差 (MM-PPD) を示す.

北アメリカにおける CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 の SD-PPD の各月の値の平均は 7, 11, 8, 8, 7, 12% で, MM-PPD は 6, 14, 9, 10, 7, 11% となり, CRU がデータの一貫性, 再現性の点で最も優れているといえる. また, JRA では特に 5-9 月にかけて MM-PPD の平均は 27% と高い. 図 2.25(a) より 1 月および 10 月の SD-PD の値は全データソースで相対的に高い. これは北アメリカにおける 1 月と 10 月が降水量が多いことが要因であると考えられる.

ヨーロッパにおける SD-PPD および MM-PPD は夏期に比べ冬期で相対的に高いことがわかる. また SD-PPD の平均は CMAP が 8% で最も低い値となっているが, MM-PPD では冬期で 20% と最も高い結果となっている (図 2.25(c)(d)). このことは, データの一貫性・ばらつきの点では CMAP が最も NNDC を再現できているが, NNDC との定量的

な比較においては、もっとも平均絶対誤差が大きいことを示している。特に冬期における CMAP の MM-PPD の値が大きくなっており、CMAP のヨーロッパにおける冬期降水量の定量的な値は改善が必要であると考えられる。

カリブでは他の地域と比較して、SD-PPD、MM-PPD とともにその絶対値は大きい。また、JRA、ERA と比べ、CRU、CMAP、GPCP、CMIP3 の年平均 SD-PPD、MD-PPD は低く、特に CMAP、GPCP の MD-PPD は CRU を下回っており、MM-PPD の値も各月で 20~80% 内にあり、再現性は各月で比較的良好である（図 2.25(e)(f)）。しかしながら、他の地域と比較すると相対的に平均絶対誤差の量は大きい。

南アメリカにおける SD-PPD の年平均は CRU、JRA、ERA、CMAP、GPCP、CMIP3 でそれぞれ 10、19、26、13、14、17%、MM-PPD はそれぞれ 8、22、44、11、22、17% となっており、CRU がそれぞれの指標において最も低く、次に CMAP の SD-PPD、MM-PPD が低い。ERA の MM-PPD を見ると全月で 30% を超えており、NNDC との降水量の絶対誤差が他のデータソースと比較して突出して高いことがわかる（図 2.25(i)(j)）。

オセアニアでは CRU、JRA、ERA、CMAP、GPCP、CMIP3 の SD-PPD の平均はそれぞれ 7、10、9、8、8、13%、MD-PPD は 5、15、16、12、16、18% となり、CRU、CMAP の順で値が低い。また、CRU の MM-PPD は各月で 5% 前後で安定しており、本地域における CRU の再現性は高く、データのばらつきも非常に小さいことがわかる（図 2.25(k)(l)）。

アフリカでは、CRU、JRA、ERA、CMAP、GPCP、CMIP3 の SD-PPD はそれぞれ 9、22、17、12、12、16% となり、MM-PPD は 7、19、15、12、11、14% となり、CRU がいずれにおいても最も低い値を取っていることがわかる。また、JRA では夏期において SD-PPD、MM-PPD はともに他のデータソースを大きく上回っており、JRA の夏期における降水量は NNDC との絶対誤差が大きかつデータの一貫性が低いことが読み取れる（図 2.25(m)(n)）。

中東では、夏期において降水量が少ない分、PPD の値は非常に大きくなる傾向がある。例えば、1991 年 7 月のある地点では NNDC の降水量が 0.2mm/month なのに対して、ERA では 8.6mm/month が示されていることなどが SD-PPD、MM-PPD の ERA が極端に大きくなっている要因である。ただし、SD-PPD、MM-PPD では極端に NNDC との値がかい離したデータセットは見られない（図 2.25(o)(p)）。

アジアでは、SD-PPD の年平均値は CRU、JRA、ERA、CMAP、GPCP、CMIP3 でそれぞれ 9、12、10、10、10、14%、MM-PPD は 8、18、11、9、11、13% で、それぞれにおいて CRU が最も低くなっている。また、7-9 月の SD-PPD の平均はそれぞれ 11、15、11、12、12、13%、MM-PPD は 9、22、10、9、10、11% となり、特に JRA では夏期における NNDC との降水量の差が大きいことがわかる（図 2.25(q)(r)）。これは、NNDC に比べて降水量が過小評価されているのではなく過大評価されていることによる（表 2.4）。

2.5.2 空間で見た気候値の再現性

図 2.26 に対象データと NNDC の降水量差の標準偏差 (SD-PD) と NNDC との降水量差率の標準偏差 (SD-PPD) を各地点ごとにプロットした図を示す。図 2.27 に対象データと NNDC の降水量差の平均絶対誤差 (MM-PD) と NNDC との降水量差率の平均絶対誤差 (MM-PPD) を示す。

北アメリカでは全データソースにおいて、アラスカ山脈近辺を除いて、東部（五大湖以南、ミシシッピ川流域）では SD-PD の値はそれ以外の領域に比べて値が大きい。一方、SD-PPD では西部が東部より大きく、逆のパターンとなっていることがわかる。これはグレートプレーンズ以西では東部と比較して年降水量が少ないことに起因している。また、MM-PD, MM-PPD は SD-PD, SD-PPD と同じパターンを有している。すなわち、MM-PD は東部で大きく、MM-PPD は西部で大きい。また、MM-PPD のレンジ幅は CRU が最も小さく、北アメリカの全領域で CRU の再現性が他のデータソースと比較して高いことがわかる。

ヨーロッパ（ロシアを含む）における SD-PD のレンジ幅は CRU が 6.0~3764.1mm, JRA が 36.7~3801.3mm, ERA が 34.5~3719.6mm, CMAP が 16.1~3759.9mm, GPCP が 20.8~3693.2mm, CMIP3 が 326.9~3742.4mm となり、また、SD-PPD のレンジ幅はそれぞれ 1.8~99.6%, 4.1~151.1%, 5.1~96.8%, 4.9~97.5%, 5.6~72.3%, 5.4~100.1% となった。SD-PD の最大値はすべてバルカン半島の地点で示されており、最少は CRU の 6.0mm でありロシアの北東地点で得られたものである。また、SD-PD の 20mm 以下の値を示す地点が CRU では最も多く、特にロシアにおいて NNDC との偏差のばらつきが最も小さいことがわかる。SD-PPD で見ても、10% 以下の地点が他のデータソースと比較して多い。MM-PD では CRU を除いてヨーロッパでは 50mm を上回っている。MM-PPD を見ると、CRU, CMAP で北ヨーロッパ、ロシアでの再現性が優れていることがわかる。さらに CRU では東ヨーロッパ、イギリス東部で MM-PPD は 10% を下回っており、NNDC との偏差割合のばらつき、定量的な再現性とも CRU が最も良好であることがわかる。

南アメリカでは、年間における SD-PD の最小値は、CRU, JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 それぞれ、17.3, 46.2, 39.8, 26.5, 46.0, 8.7mm で最大値は 373.2, 860.1, 1538.7, 710.0, 512.5, 523.9mm となり、レンジ幅は CRU が最も小さいことがわかる。また、CRU を除く SD-PPD ではアンデス山脈北部、パンパでの値が大きく、複雑地形を有する地点では NNDC との偏差割合のばらつきが相対的に大きいことがわかる。また、アンデス山脈北部は降水量が多く、SD-PD, SD-PPD の値が大きいことから、この地域における JRA, ERA, CMAP, GPCP, CMIP3 の値と NNDC とのバイアスのばらつきが大きくデータの一貫性に欠ける。南アメリカにおける CRU の SD-PPD は最大で 46% であり、空間分布で

見て他のデータソースと比較しても偏差割合のばらつきが少ない。また、MM-PPDで見ると、CRUでは20%以下の値を示す地点が他のデータソースと比較して多く、CRUの南アメリカにおける降水量の定量的な再現性は最も高いといえる。

オセアニアでは、SD-PDの値が、CRU、CMAPの領域全体でJRA、ERA、GPCP、CMIP3より小さく、同様の傾向はSD-PPDでも見られる。また、MM-PD、MM-PPDを見ても、CRU、CMAPと比較して相対的にJRA、ERA、GPCPでの値は大きく、本地域におけるデータの一貫性、再現性はCRU、CMAPが優れていることがわかる。

アフリカにおけるSD-PDの値は、CRU、CMAP、GPCPに比べてJRA、ERAでは200-1500mmの値を全域で示しており、NNDCとの降水量値の差のばらつきが大きいことがわかる。また、SD-PPDでは30%未満を示す地点がCRUで最も多いことがわかる。MM-PDのレンジはCRU、JRA、ERA、CMAP、GPCP、CMIP3でそれぞれ17.5~497.4mm、11.0~2563.6mm、15.7~2102.6mm、13.2~2140.8mm、10.1~1937.7mm、14.7~1962.7mmとなり、最小値は各データセット間で大きな差はないが、最大値はCRUが他より1500mm以上小さい。この最小値は、アフリカ大陸の東部に位置するマダガスカル島・レコニオンで得られている。MM-PPDの最大値はMM-PDの最大値が見られる地点とは異なり、エジプト北部で見られる。この地点は降水量が比較的少ないため、PPDの値が大きくなったと考えられる。また、CRUは全域でMM-PPDの値が40%以下の地点が最も多く、NNDCとの降水量差率の平均絶対誤差が小さい地点が多く、空間的に見た際の再現性は高いと言える。

アジアではモンゴルなどの比較的降雨量の少ない領域ではSD-PDが小さい。一方、熱帯収束帯に位置するカリマンタン島・カロリン諸島ではアジアの中でSD-PDの値は相対的に大きい。つまり、熱帯収束帯における対流性降雨による各データセットのNNDCとの偏差のばらつきは大きく、一貫して定量的に精度よく再現することが難しいことがわかる。また、JRAでのマレー半島におけるSD-PPDは50~200%の値をしめしており、他のデータソースに比べ一貫性がなくばらつきが大きいことがわかる。また、MD-PD、MM-PPDの空間分布傾向はSD-PD、SD-PPDと同じであり、マレー半島、カリマンタン島、カロリン諸島におけるMM-PDの値は他の地点と比べて相対的に大きい。アジア全域では、MM-PD、MM-PPDともにJRA、ERA、CMIP3では暖色系のマーカーつまり、NNDCとの差の絶対誤差、NNDCとの差率の絶対誤差が大きい地点が多く、また、JRA、ERAの空間分布におけるMM-PD、MM-PPDの値はよく似ている。また、CRUでは他のデータソースと比べてMM-PPDが10%未満の地点が最も多く、特に中国沿岸部でその地点が多いことがわかる。

表 2.3 各地域における月別および年平均気温 (°C)

Region		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Average
北アメリカ	NNDC	-7.8	-6.0	-1.3	5.0	-1.3	16.3	19.2	18.4	13.9	7.3	-0.1	-5.7	4.8
	CRU TS 2.1	-8.5	-6.5	-1.7	4.5	-1.7	15.9	18.9	17.9	13.4	6.8	-0.7	-6.1	4.4
	JRA-25	-8.2	-6.7	-2.4	3.6	-2.4	14.9	17.7	16.6	12.2	5.7	-1.3	-6.1	3.6
	ERA-40	-8.5	-6.7	-2.1	4.2	-2.1	15.4	18.2	17.3	12.9	6.5	-0.8	-6.0	4.0
	CMIP3	-8.2	-7.1	-2.9	3.3	-2.9	15.0	17.9	17.0	12.4	6.1	-0.5	-5.8	3.7
ヨーロッパ (ロシアを含む)	NNDC	-10.8	-9.3	-5.0	0.7	-5.0	12.7	15.6	14.3	9.7	3.2	-4.7	-8.8	1.1
	CRU TS 2.1	-11.6	-9.8	-5.3	0.5	-5.4	12.7	15.8	14.4	9.7	2.8	-5.3	-9.5	0.8
	JRA-25	-9.5	-8.3	-4.7	0.6	-4.7	12.2	14.9	13.4	8.8	2.3	-4.4	-7.6	1.1
	ERA-40	-10.5	-9.0	-4.8	0.6	-4.9	12.2	15.0	13.7	9.1	2.8	-4.7	-8.3	0.9
	CMIP3	-13.0	-12.1	-7.8	-1.5	-7.9	11.6	14.4	12.8	7.8	1.2	-6.0	-10.8	-0.9
カリブ	NNDC	24.0	24.2	24.6	25.7	24.1	28.1	28.5	28.5	28.1	27.3	26.4	24.8	26.2
	CRU TS 2.1	22.5	22.8	23.4	24.5	23.0	26.9	27.3	27.5	27.0	26.0	24.9	23.2	24.9
	JRA-25	24.1	24.1	24.3	25.3	23.9	27.3	27.9	27.9	27.7	27.0	26.0	24.7	25.9
	ERA-40	24.1	24.2	24.6	25.7	24.1	27.8	28.3	28.4	28.0	27.2	26.2	24.7	26.1
	CMIP3	23.9	23.7	23.8	24.6	23.4	26.4	27.0	27.4	27.3	26.8	25.8	24.7	25.4
中央アメリカ	NNDC	24.4	24.6	25.1	25.8	23.8	26.1	25.7	25.9	26.1	25.8	25.4	24.5	25.3
	CRU TS 2.1	20.9	21.3	22.2	22.8	21.0	22.5	22.5	22.6	22.2	21.7	21.3	21.0	21.8
	JRA-25	23.8	24.3	25.1	26.1	23.8	25.1	24.8	24.8	24.7	24.4	24.2	23.9	24.6
	ERA-40	26.5	27.0	27.5	27.9	26.0	26.7	26.5	26.3	26.1	25.9	26.0	26.3	26.6
	CMIP3	25.0	25.4	26.1	26.6	24.7	25.8	25.6	25.8	26.0	25.8	25.5	25.2	25.6
南アメリカ	NNDC	23.4	22.6	21.5	18.7	20.0	13.7	13.7	15.0	16.2	18.9	20.7	22.6	18.9
	CRU TS 2.1	23.1	22.4	21.3	18.6	19.8	13.8	13.7	15.0	16.3	18.7	20.4	22.4	18.8
	JRA-25	21.8	20.9	19.9	17.4	18.5	12.6	12.4	13.6	15.1	17.6	19.4	21.1	17.5
	ERA-40	22.0	21.3	20.1	17.4	18.7	12.7	12.5	13.8	15.3	17.6	19.3	21.2	17.7
	CMIP3	23.2	23.0	21.5	18.5	20.0	13.1	12.8	13.8	15.7	17.9	20.1	22.0	18.5
オセアニア	NNDC	25.3	25.1	23.9	21.4	23.9	16.3	15.5	16.5	18.6	20.8	22.8	24.3	21.2
	CRU TS 2.1	25.1	24.9	23.7	21.1	23.7	16.0	15.2	16.3	18.3	20.5	22.6	24.1	21.0
	JRA-25	24.0	24.0	23.1	21.1	23.1	16.5	15.8	16.8	18.6	20.4	22.0	23.1	20.7
	ERA-40	24.8	24.7	23.6	21.5	23.7	16.8	16.0	17.0	18.8	20.7	22.5	23.9	21.2
	CMIP3	25.2	25.2	24.1	21.8	24.1	16.3	15.4	16.3	18.4	20.7	22.8	24.3	21.2
アフリカ	NNDC	20.8	22.1	23.8	24.7	24.1	24.6	24.0	24.3	24.9	24.6	22.7	21.1	23.5
	CRU TS 2.1	21.0	22.2	23.8	24.7	24.1	24.6	24.1	24.3	24.9	24.6	22.8	21.2	23.5
	JRA-25	20.6	21.7	23.2	24.3	23.6	24.4	23.9	24.1	24.8	24.4	22.6	20.8	23.2
	ERA-40	20.6	21.7	23.4	24.4	23.7	24.6	24.0	24.3	24.9	24.4	22.5	20.7	23.3
	CMIP3	19.8	21.2	23.0	23.9	23.4	23.7	23.5	23.7	24.1	23.6	21.7	20.0	22.6
中東	NNDC	12.5	14.2	17.6	22.4	17.9	30.7	31.9	31.4	29.2	24.9	19.2	14.1	22.2
	CRU TS 2.1	11.3	12.9	16.5	21.4	16.8	29.6	30.6	30.3	28.1	23.7	18.0	12.6	21.0
	JRA-25	11.4	12.7	15.7	20.2	16.0	28.5	29.8	29.5	27.7	23.5	17.8	12.8	20.5
	ERA-40	10.8	12.4	15.9	20.7	16.2	29.2	30.7	30.4	28.0	23.6	17.7	12.2	20.7
	CMIP3	9.7	11.8	15.8	20.0	16.1	29.2	31.2	30.6	27.5	22.4	16.0	10.8	20.1
アジア	NNDC	4.9	6.7	11.0	16.8	10.9	23.7	25.1	24.4	21.3	16.7	11.3	6.6	15.0
	CRU TS 2.1	4.8	6.5	10.6	16.4	10.6	23.2	24.6	24.1	21.0	16.6	11.1	6.4	14.7
	JRA-25	5.0	6.4	10.0	15.1	9.9	21.7	23.1	22.5	19.7	15.5	10.5	6.3	13.8
	ERA-40	4.3	5.9	9.9	15.6	9.9	22.6	24.0	23.4	20.2	15.7	10.4	5.8	14.0
	CMIP3	3.4	5.1	9.4	14.2	9.3	21.8	23.5	22.6	19.3	14.5	9.4	4.8	13.1

表 2.4 各地域における月別 (mm/month) および年降水量 (mm/year)

Region		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
北アメリカ	NNDC	69.0	57.9	69.1	68.5	78.4	86.1	91.4	90.7	89.3	84.2	80.2	72.4	937.2
	CRU TS 2.1	66.7	55.6	65.1	64.2	75.6	82.8	87.9	87.9	84.6	75.9	75.2	67.8	889.3
	JRA-25	70.1	57.0	66.8	70.8	90.7	108.3	118.5	111.1	98.0	87.5	84.6	74.6	1038.0
	ERA-40	63.8	53.0	61.0	60.9	70.7	81.6	87.9	83.6	79.0	73.5	74.9	67.8	857.7
	CMAP	62.9	53.3	61.5	61.9	73.4	82.0	84.3	84.0	81.7	74.4	70.0	65.4	854.8
	GPCP	78.2	65.7	73.7	68.8	77.8	86.9	90.5	89.5	87.2	80.4	80.9	78.7	958.3
	CMIP3	74.1	64.3	72.0	74.5	82.8	86.0	87.1	81.7	79.5	82.0	83.5	83.7	951.2
ヨーロッパ (ロシアを含む)	NNDC	64.4	55.1	52.2	48.6	54.1	60.4	65.7	70.3	67.0	73.3	77.4	73.1	761.6
	CRU TS 2.1	51.2	40.9	43.2	43.3	51.6	59.9	66.3	71.0	63.5	61.6	59.5	56.8	668.8
	JRA-25	47.8	39.5	40.4	41.6	49.1	57.0	62.9	63.6	56.0	59.0	55.1	52.9	624.9
	ERA-40	50.7	41.5	42.1	42.3	45.3	50.3	55.9	57.7	52.5	59.2	57.6	56.4	611.5
	CMAP	46.7	37.4	37.8	39.7	47.0	54.9	60.4	63.0	56.2	56.1	52.1	50.5	601.8
	GPCP	67.8	54.2	53.1	50.9	56.8	64.8	70.8	75.7	69.5	75.1	74.4	72.8	785.9
	CMIP3	53.6	44.7	47.3	47.1	53.5	57.4	61.4	60.4	59.0	64.0	61.7	58.9	669.0
カリブ	NNDC	58.6	56.2	69.7	70.9	99.7	134.1	92.0	127.3	150.1	157.5	77.2	68.9	1162.2
	CRU TS 2.1	55.2	65.7	116.4	146.7	221.5	150.3	142.7	169.0	205.1	191.9	117.2	57.0	1638.7
	JRA-25	58.5	48.0	54.2	55.0	168.7	245.8	181.8	228.2	289.5	240.9	152.7	51.4	1774.7
	ERA-40	79.2	65.1	74.0	88.6	192.5	220.5	202.3	217.2	260.0	258.7	172.0	77.9	1908.0
	CMAP	46.5	46.0	46.4	50.1	117.3	127.9	105.9	117.7	151.9	143.7	109.2	52.1	1114.7
	GPCP	53.6	48.7	61.3	74.9	124.9	122.2	91.8	109.1	144.7	155.6	91.1	51.7	1129.6
	CMIP3	71.5	53.2	46.9	45.0	74.8	91.1	87.4	101.5	125.0	154.5	116.4	85.7	1053.0
中央アメリカ	NNDC	252.4	184.6	206.4	214.0	376.9	328.3	373.9	308.3	215.3	270.9	307.9	396.4	3435.3
	CRU TS 2.1	127.1	92.4	85.4	158.9	363.5	279.7	289.0	290.2	294.7	376.0	262.6	245.4	2864.9
	JRA-25	33.4	25.6	21.0	67.9	256.7	369.9	349.8	358.3	393.4	371.8	200.0	79.9	2527.7
	ERA-40	20.5	14.1	32.5	131.6	348.2	512.7	687.3	653.8	633.1	492.8	212.3	63.7	3802.6
	CMAP	101.2	68.9	88.6	135.7	300.3	284.1	277.7	300.9	299.3	290.1	195.4	155.7	2497.9
	GPCP	97.7	84.5	101.6	189.6	385.9	352.4	330.0	380.1	413.4	460.5	294.8	177.8	3268.3
	CMIP3	30.2	21.0	27.5	48.5	138.1	234.6	234.7	220.3	231.2	216.7	129.9	56.9	1589.6
南アメリカ	NNDC	93.5	89.3	94.1	108.6	97.5	92.6	79.3	77.6	78.3	101.8	98.1	88.2	1098.9
	CRU TS 2.1	90.4	87.8	94.6	103.3	99.9	92.7	82.4	77.4	81.0	99.5	94.9	87.1	1091.0
	JRA-25	117.7	103.1	114.0	107.3	94.7	82.7	76.5	78.1	90.1	115.6	117.4	113.0	1210.2
	ERA-40	124.0	114.4	126.4	136.3	124.8	110.6	107.4	110.1	117.7	152.2	139.5	125.5	1488.9
	CMAP	94.4	88.9	97.2	113.0	101.8	97.0	90.2	81.5	82.4	104.2	103.5	92.3	1146.4
	GPCP	98.6	97.9	110.7	126.3	117.2	120.3	111.6	99.4	95.2	116.1	112.7	100.0	1306.0
	CMIP3	90.1	82.1	90.0	80.1	84.1	84.8	79.7	81.2	78.9	88.2	82.9	85.1	1007.2
オセアニア	NNDC	131.6	123.2	119.0	97.6	92.4	84.1	84.5	74.6	64.3	70.3	79.6	104.8	1126.0
	CRU TS 2.1	132.0	120.3	119.8	97.2	90.6	81.7	82.1	74.2	66.4	70.9	80.4	104.3	1119.9
	JRA-25	124.2	115.9	104.6	81.6	75.3	64.8	60.9	56.4	53.4	62.8	80.7	104.0	984.6
	ERA-40	109.5	105.0	98.8	79.0	72.5	66.6	64.7	58.5	52.8	57.7	68.7	88.6	922.4
	CMAP	126.9	119.5	109.9	88.8	82.4	70.3	68.5	60.3	54.3	62.9	76.1	100.5	1020.4
	GPCP	105.3	96.8	92.5	77.1	76.4	71.9	71.2	64.6	58.9	63.8	69.3	84.6	932.4
	CMIP3	116.7	115.2	108.2	83.5	77.9	72.5	67.7	61.0	54.3	57.7	67.5	92.0	974.2
アフリカ	NNDC	139.2	124.6	93.3	80.8	73.2	82.5	100.8	108.6	78.6	60.8	87.2	115.9	1145.5
	CRU TS 2.1	138.6	126.5	96.3	81.5	74.6	79.4	99.3	111.3	80.6	61.6	85.1	119.3	1154.1
	JRA-25	125.1	113.3	95.1	78.2	84.1	81.3	101.8	109.3	87.3	71.9	86.6	107.3	1141.3
	ERA-40	126.1	113.5	86.8	64.4	64.1	62.4	78.3	88.2	67.4	55.5	81.1	108.3	996.1
	CMAP	119.4	108.5	87.8	80.8	74.6	77.8	102.6	113.0	81.4	56.5	72.9	101.4	1076.7
	GPCP	126.9	112.0	93.5	78.2	72.3	81.4	108.3	118.0	85.9	59.0	75.8	107.1	1118.4
	CMIP3	129.2	112.5	91.9	75.5	73.3	82.8	101.2	103.7	82.1	61.8	87.6	116.7	1118.3
中東	NNDC	40.1	33.7	35.0	27.5	20.8	12.6	25.1	16.6	11.0	23.8	24.3	34.9	305.4
	CRU TS 2.1	42.4	35.1	41.3	30.7	22.8	11.3	24.6	20.3	14.2	24.8	25.7	39.0	332.2
	JRA-25	39.1	36.1	40.7	36.1	30.4	18.5	8.9	9.2	6.9	33.2	33.9	42.0	335.0
	ERA-40	29.1	27.8	29.1	21.7	13.6	4.0	0.8	1.2	2.3	17.9	17.6	31.6	196.7
	CMAP	30.0	27.5	33.1	22.9	13.7	5.5	10.7	12.8	3.4	15.2	21.2	28.4	224.4
	GPCP	35.4	33.5	36.8	27.5	14.8	5.6	16.8	14.4	5.2	16.8	23.5	33.9	264.2
	CMIP3	23.7	20.0	19.2	19.9	16.4	12.1	16.4	18.1	13.1	13.8	18.6	25.9	217.2
アジア	NNDC	61.4	54.5	61.6	73.5	97.3	121.3	152.8	142.4	124.8	95.8	97.3	77.4	1160.1
	CRU TS 2.1	62.6	57.5	65.8	78.1	102.4	127.9	156.0	151.4	124.8	99.8	98.0	74.0	1198.3
	JRA-25	55.7	54.1	67.5	90.7	124.2	150.9	180.3	178.4	135.4	100.6	87.4	65.7	1290.9
	ERA-40	51.5	51.6	61.0	72.8	98.6	113.8	138.0	133.7	107.7	87.4	80.7	61.1	1057.9
	CMAP	61.1	55.0	63.8	77.7	102.5	127.6	147.0	146.8	118.7	96.3	93.8	73.1	1163.4
	GPCP	62.5	56.5	68.6	82.2	107.5	135.6	158.4	152.7	124.8	97.0	92.9	70.5	1209.2
	CMIP3	70.4	59.6	69.1	80.7	101.4	122.9	140.7	136.0	115.3	94.1	87.5	79.4	1157.1

表 2.5 各地域における月別および年降水量の PPD (%)

Region		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
北アメリカ	CRU TS 2.1	-3.3	-4.0	-5.8	-6.3	-3.6	-3.8	-3.8	-3.1	-5.3	-9.9	-6.2	-6.4	-5.1
	JRA-25	1.6	-1.6	-3.3	3.4	15.7	25.8	29.6	22.5	9.7	3.9	5.5	3.0	10.8
	ERA-40	-7.5	-8.5	-11.7	-11.1	-9.8	-5.2	-3.8	-7.8	-11.5	-12.7	-6.6	-6.4	-8.5
	CMAP	-8.8	-7.9	-11.0	-9.6	-6.4	-4.8	-7.8	-7.4	-8.5	-11.6	-12.7	-9.7	-8.8
	GPCP	13.3	13.5	6.7	0.4	-0.8	0.9	-1.0	-1.3	-2.4	-4.5	0.9	8.7	2.3
	CMIP3	7.4	11.1	4.2	8.8	5.6	-0.1	-4.7	-9.9	-11.0	-2.6	4.1	15.6	1.5
ヨーロッパ(ロシアを含む)	CRU TS 2.1	-20.5	-25.8	-17.2	-10.9	-4.6	-0.8	0.9	1.0	-5.2	-16.0	-23.1	-22.3	-12.2
	JRA-25	-25.8	-28.3	-22.6	-14.4	-9.2	-5.6	-4.3	-9.5	-16.4	-19.5	-28.8	-27.6	-17.9
	ERA-40	-21.3	-24.7	-19.3	-13.0	-16.3	-16.7	-14.9	-17.9	-21.6	-19.2	-25.6	-22.8	-19.7
	CMAP	-27.5	-32.1	-27.6	-18.3	-13.1	-9.1	-8.1	-10.4	-16.1	-23.5	-32.7	-30.9	-21.0
	GPCP	5.3	-1.6	1.7	4.7	5.0	7.3	7.8	7.7	3.7	2.5	-3.9	-0.4	3.2
	CMIP3	-16.8	-18.9	-9.4	-3.1	-1.1	-5.0	-6.5	-14.1	-11.9	-12.7	-20.3	-19.4	-12.2
カリブ	CRU TS 2.1	-5.8	16.9	67.0	106.9	122.2	12.1	55.1	32.8	36.6	21.8	51.8	-17.3	41.0
	JRA-25	-0.2	-14.6	-22.2	-22.4	69.2	83.3	97.6	79.3	92.9	53.0	97.8	-25.4	52.7
	ERA-40	35.2	15.8	6.2	25.0	93.1	64.4	119.9	70.6	73.2	64.3	122.8	13.1	64.2
	CMAP	-20.6	-18.1	-33.4	-29.3	17.7	-4.6	15.1	-7.5	1.2	-8.8	41.5	-24.4	-4.1
	GPCP	-8.5	-13.3	-12.1	5.6	25.3	-8.9	-0.2	-14.3	-3.6	-1.2	18.0	-25.0	-2.8
	CMIP3	22.0	-5.3	-32.7	-36.5	-25.0	-32.1	-5.0	-20.3	-16.7	-1.9	50.8	24.4	-9.4
中央アメリカ	CRU TS 2.1	-49.6	-49.9	-58.6	-25.7	-3.6	-14.8	-22.7	-5.9	36.9	38.8	-14.7	-38.1	-16.6
	JRA-25	-86.8	-86.1	-89.8	-68.3	-31.9	12.7	-6.4	16.2	82.7	37.2	-35.0	-79.8	-26.4
	ERA-40	-91.9	-92.4	-84.3	-38.5	-7.6	56.2	83.8	112.1	194.1	81.9	-31.0	-83.9	10.7
	CMAP	-59.9	-62.7	-57.1	-36.6	-20.3	-13.5	-25.7	-2.4	39.0	7.1	-36.5	-60.7	-27.3
	GPCP	-61.3	-54.2	-50.8	-11.4	2.4	7.3	-11.7	23.3	92.0	70.0	-4.3	-55.1	-4.9
	CMIP3	-88.0	-88.6	-86.7	-77.3	-63.4	-28.5	-37.2	-28.5	7.4	-20.0	-57.8	-85.6	-53.7
南アメリカ	CRU TS 2.1	-3.3	-1.7	0.5	-4.9	2.5	0.1	3.9	-0.3	3.4	-2.3	-3.3	-1.2	-0.7
	JRA-25	25.9	15.5	21.1	-1.2	-2.9	-10.7	-3.5	0.6	15.1	13.6	19.7	28.1	10.1
	ERA-40	32.6	28.1	34.3	25.5	28.0	19.4	35.4	41.9	50.3	49.5	42.2	42.3	35.5
	CMAP	1.0	-0.4	3.3	4.1	4.4	4.8	13.7	5.0	5.2	2.4	5.5	4.6	4.3
	GPCP	5.5	9.6	17.6	16.3	20.2	29.9	40.7	28.1	21.6	14.0	14.9	13.4	18.8
	CMIP3	-3.6	-8.1	-4.4	-26.2	-13.7	-8.4	0.5	4.6	0.8	-13.4	-15.5	-3.5	-8.3
オセアニア	CRU TS 2.1	0.3	-2.4	0.7	-0.4	-1.9	-2.9	-2.8	-0.5	3.3	0.9	1.0	-0.5	-0.5
	JRA-25	-5.6	-5.9	-12.1	-16.4	-18.5	-22.9	-27.9	-24.4	-17.0	-10.7	1.4	-0.8	-12.6
	ERA-40	-16.8	-14.8	-17.0	-19.1	-21.5	-20.8	-23.4	-21.6	-17.9	-17.9	-13.7	-15.5	-18.1
	CMAP	-3.6	-3.0	-7.6	-9.0	-10.8	-16.4	-18.9	-19.2	-15.6	-10.5	-4.4	-4.1	-9.4
	GPCP	-20.0	-21.4	-22.3	-21.0	-17.3	-14.5	-15.7	-13.4	-8.4	-9.2	-12.9	-19.3	-17.2
	CMIP3	-11.3	-6.5	-9.1	-14.4	-15.7	-13.8	-19.9	-18.2	-15.6	-17.9	-15.2	-12.2	-13.5
アフリカ	CRU TS 2.1	-0.4	1.5	3.2	0.9	1.9	-3.8	-1.5	2.5	2.5	1.3	-2.4	2.9	0.8
	JRA-25	-10.1	-9.1	1.9	-3.2	14.9	-1.5	1.0	0.6	11.1	18.3	-0.7	-7.4	-0.4
	ERA-40	-9.4	-8.9	-7.0	-20.3	-12.4	-24.4	-22.3	-18.8	-14.2	-8.7	-7.0	-6.6	-13.0
	CMAP	-14.2	-12.9	-5.9	0.0	1.9	-5.7	1.8	4.1	3.6	-7.1	-16.4	-12.5	-6.0
	GPCP	-8.8	-10.1	0.2	-3.2	-1.2	-1.3	7.4	8.7	9.3	-3.0	-13.1	-7.6	-2.4
	CMIP3	-7.2	-9.7	-1.5	-6.6	0.1	0.4	0.4	-4.5	4.5	1.6	0.5	0.7	-2.4
中東	CRU TS 2.1	5.7	4.2	18.0	11.6	9.6	-10.3	-2.0	22.3	29.1	4.2	5.8	11.7	8.8
	JRA-25	-2.5	7.1	16.3	31.3	46.2	46.8	-64.5	-44.6	-37.3	39.5	39.5	20.3	9.7
	ERA-40	-27.4	-17.5	-16.9	-21.1	-34.6	-68.3	-96.8	-92.8	-79.1	-24.8	-27.6	-9.5	-35.6
	CMAP	-25.2	-18.4	-5.4	-16.7	-34.1	-56.3	-57.4	-22.9	-69.1	-36.1	-12.8	-18.6	-26.5
	GPCP	-11.7	-0.6	5.1	0.0	-28.8	-55.6	-33.1	-13.3	-52.7	-29.4	-3.3	-2.9	-13.5
	CMIP3	-40.9	-40.7	-45.1	-27.6	-21.2	-4.0	-34.7	9.0	19.1	-42.0	-23.5	-25.8	-28.9
アジア	CRU TS 2.1	2.0	5.5	6.8	6.3	5.2	5.4	2.1	6.3	0.0	4.2	0.7	-4.4	3.3
	JRA-25	-9.3	-0.7	9.6	23.4	27.6	24.4	18.0	25.3	8.5	5.0	-10.2	-15.1	11.3
	ERA-40	-16.1	-5.3	-1.0	-1.0	1.3	-6.2	-9.7	-6.1	-13.7	-8.8	-17.1	-21.1	-8.8
	CMAP	-0.5	0.9	3.6	5.7	5.3	5.2	-3.8	3.1	-4.9	0.5	-3.6	-5.6	0.3
	GPCP	1.8	3.7	11.4	11.8	10.5	11.8	3.7	7.2	0.0	1.3	-4.5	-8.9	4.2
	CMIP3	14.7	9.4	12.2	9.8	4.2	1.3	-7.9	-4.5	-7.6	-1.8	-10.1	2.6	-0.3

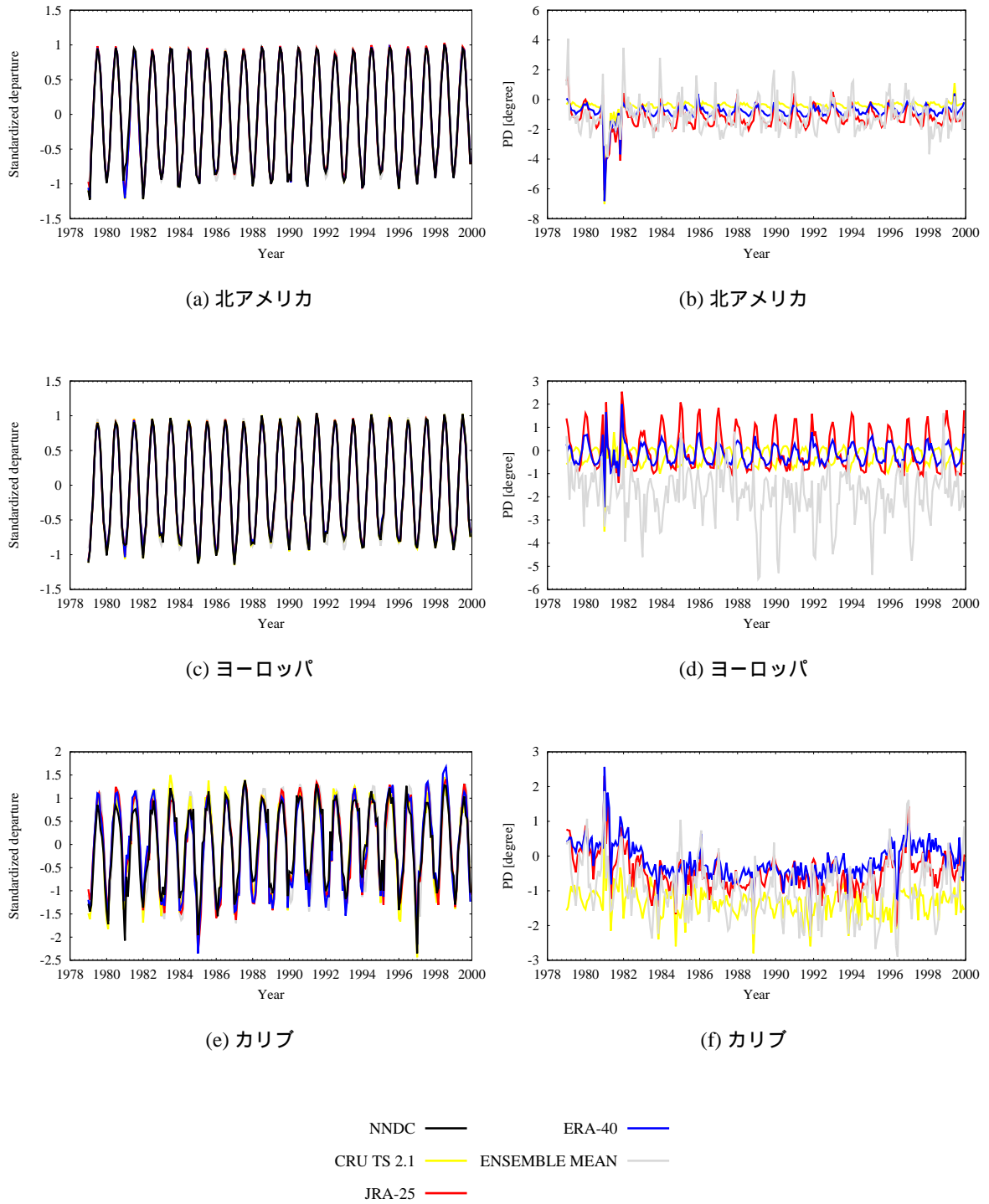
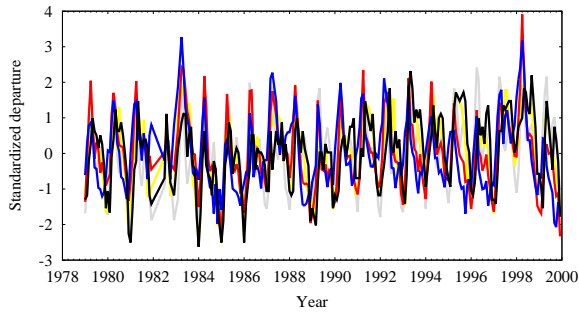
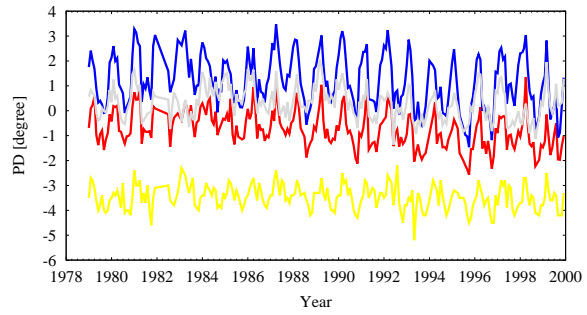


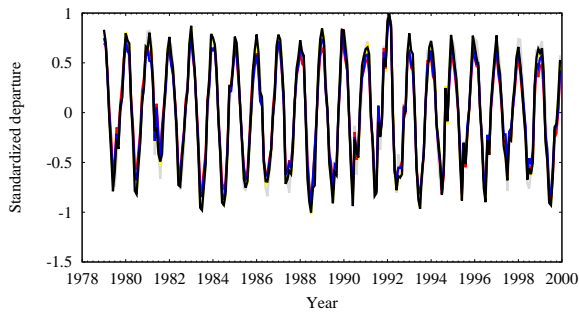
図 2.17 標準化された気温値（左列）と各データセットと NNDC の気温差（右列）



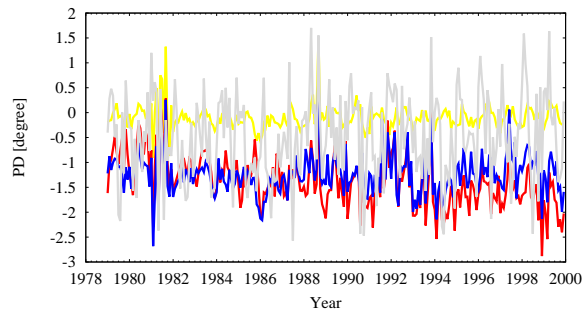
(g) 中央アメリカ



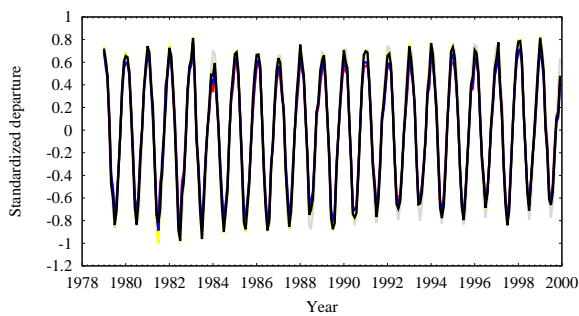
(h) 中央アメリカ



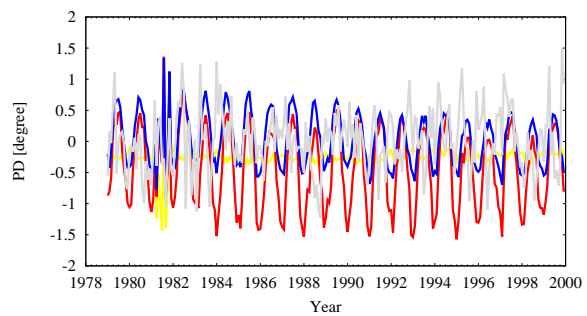
(i) 南アメリカ



(j) 南アメリカ



(k) オセアニア



(l) オセアニア

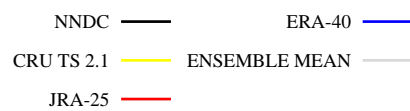


図 2.17 (続き) 標準化された気温値 (左列) と各データセットと NNDC の気温差 (右列)

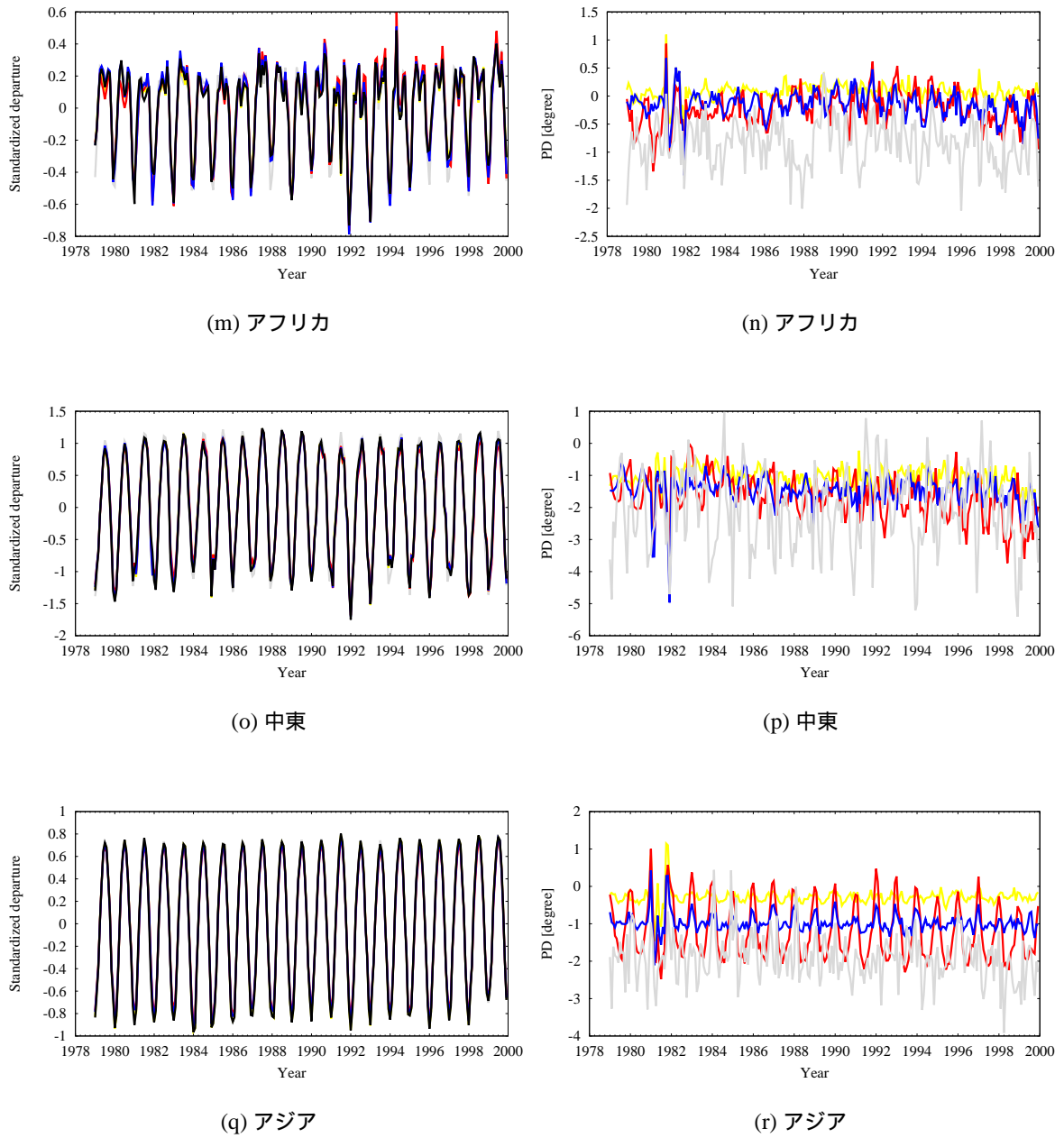


図 2.17 (続き) 標準化された気温値 (左列) と各データセットと NNDC の気温差 (右列)

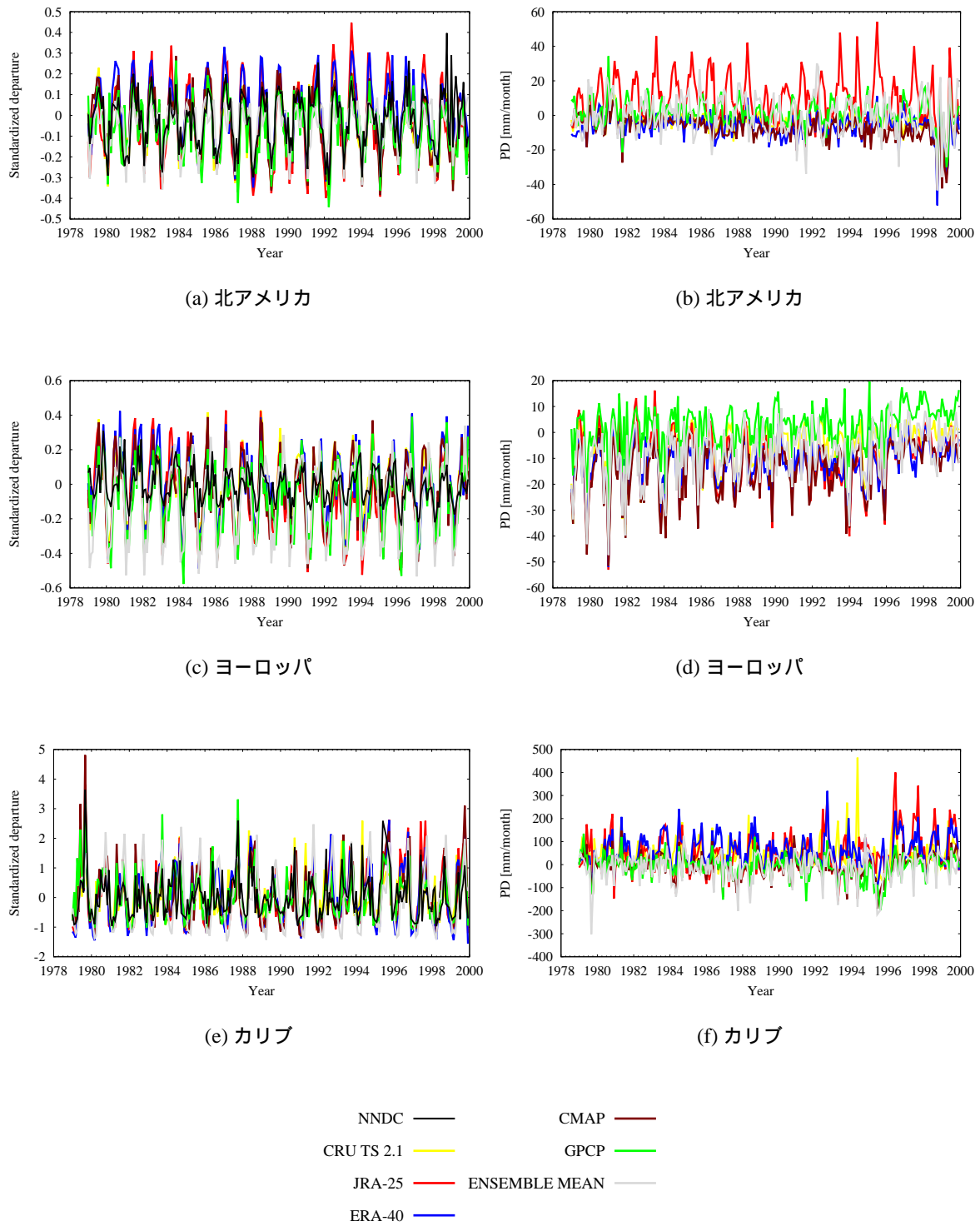


図 2.18 標準化された降水量（左列）と各データセットと NNDC の降水量差（右列）

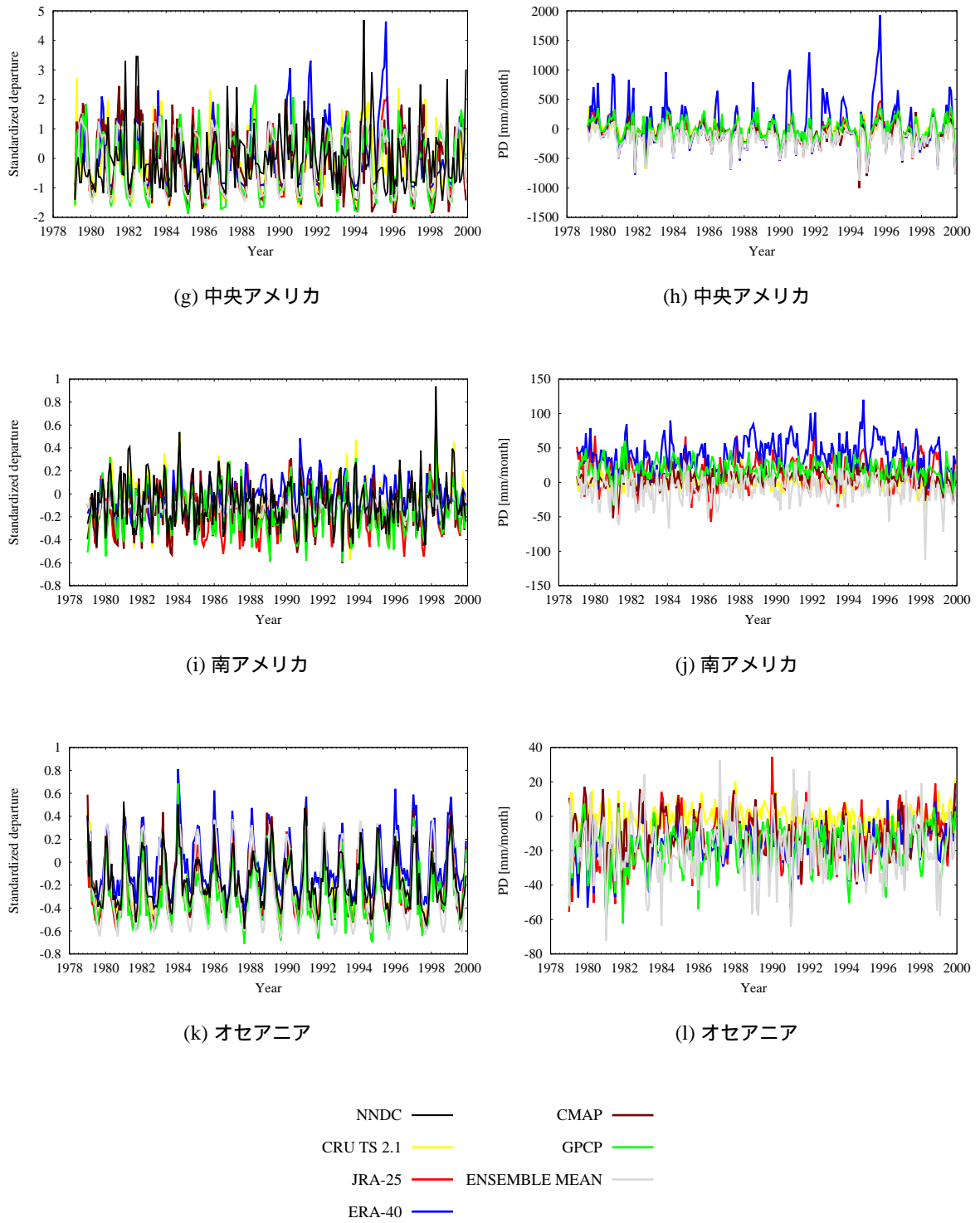


図 2.18 (続き) 標準化された降水量 (左列) と各データセットと NNDC の降水量差 (右列)

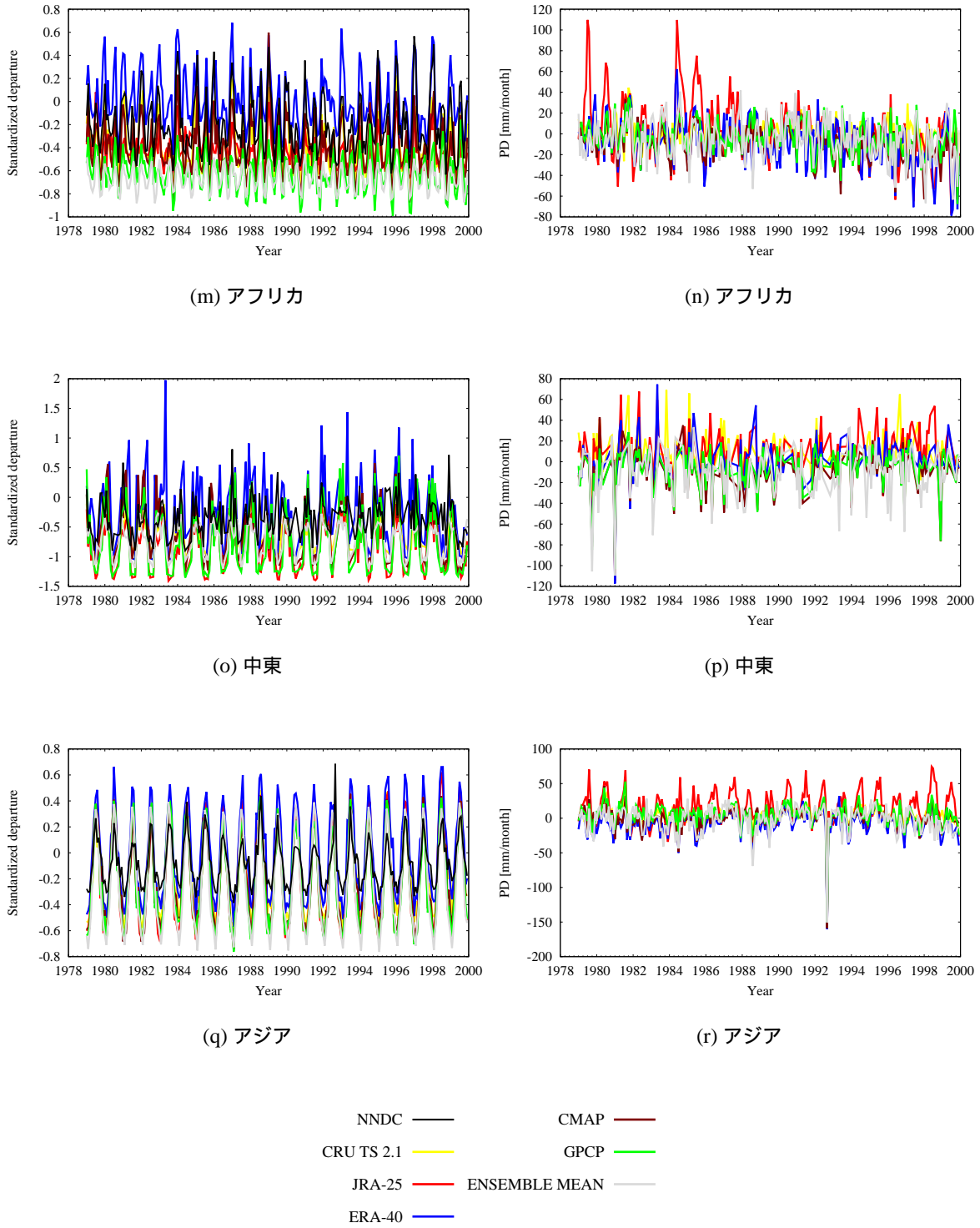


図 2.18 (続き) 標準化された降水量 (左列) と各データセットと NNDC の降水量差 (右列)

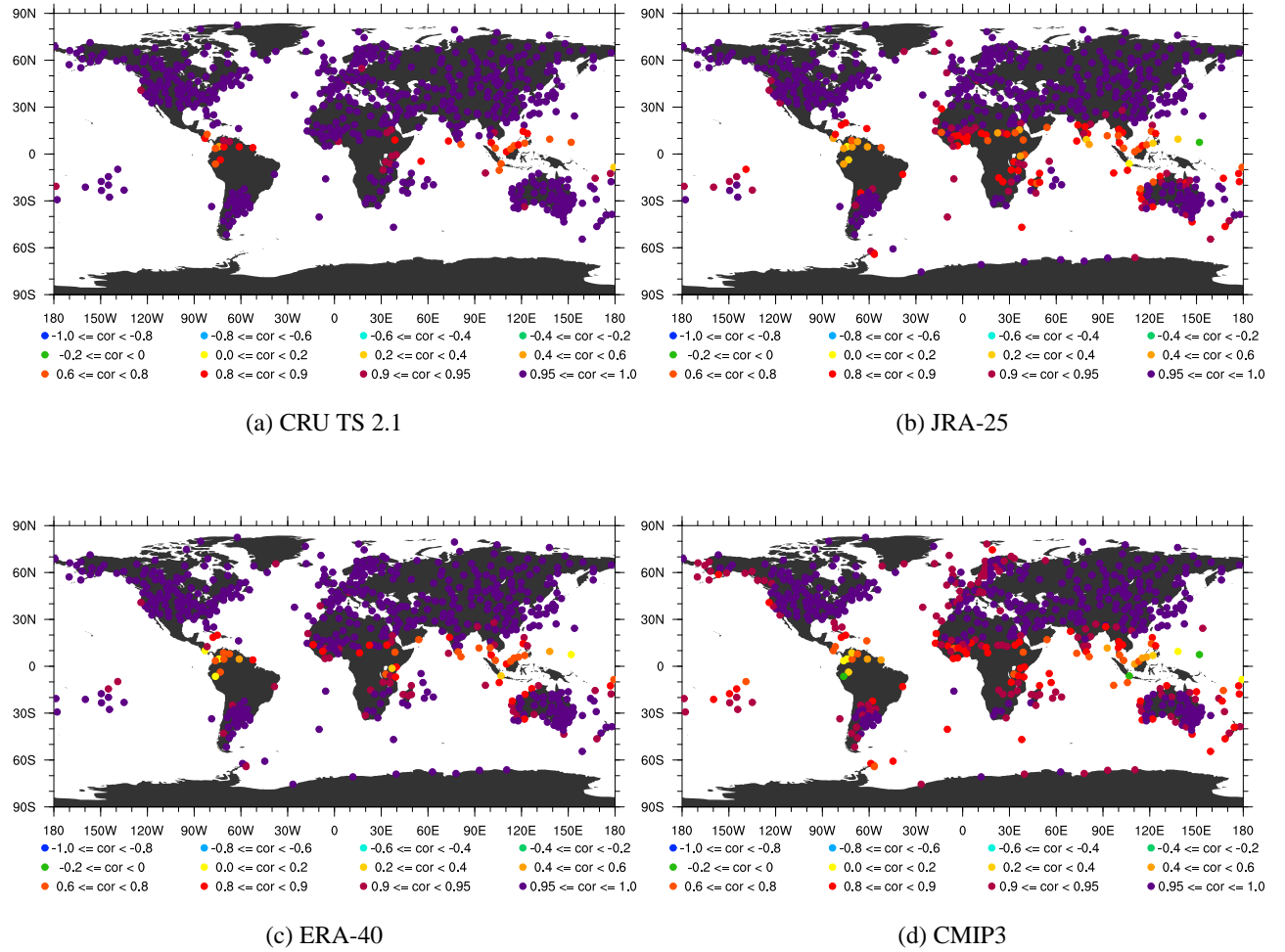


図 2.19 NNDC を基準とした気温の相関係数

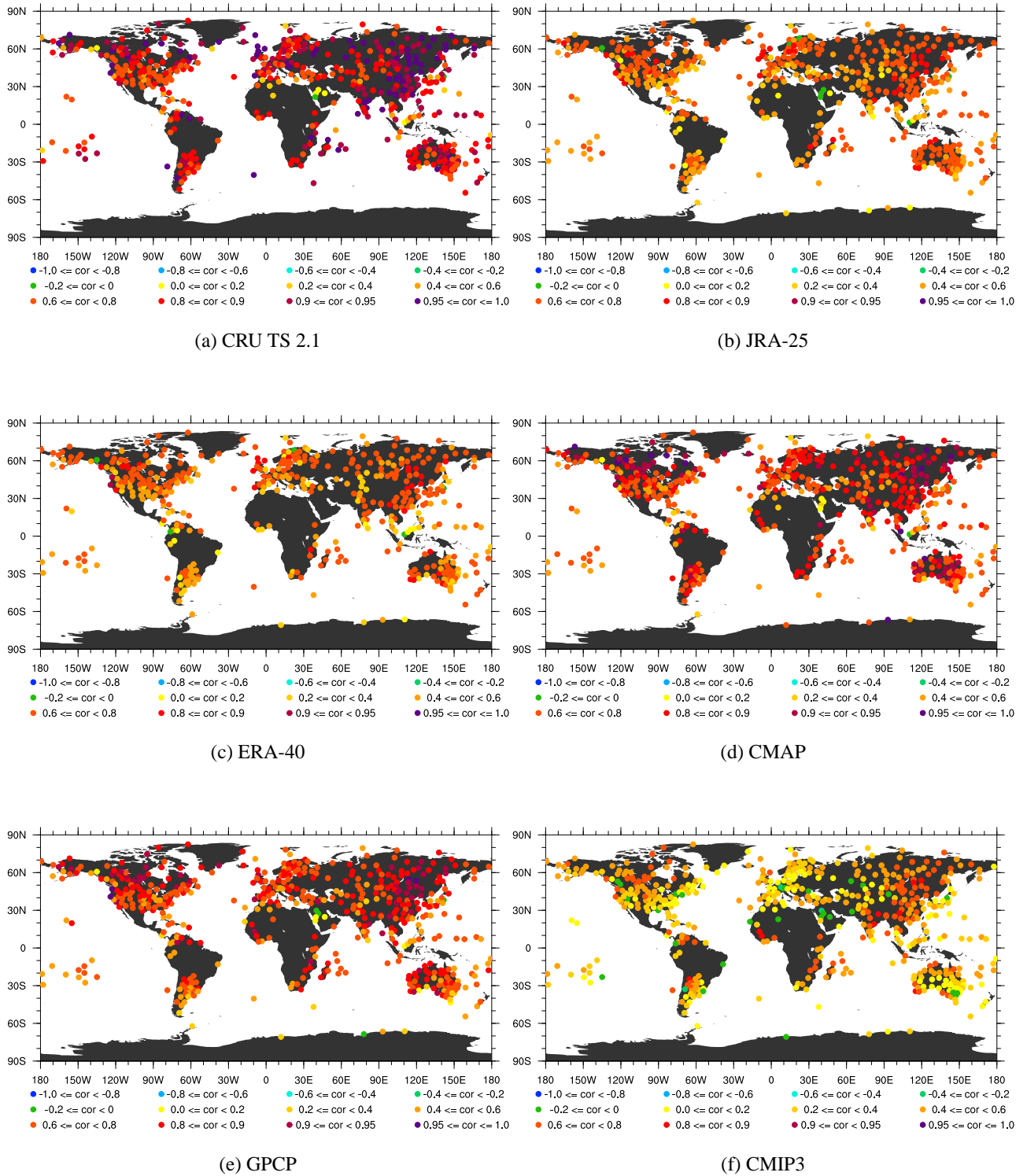


図 2.20 NNDC を基準とした降水量の相関係数

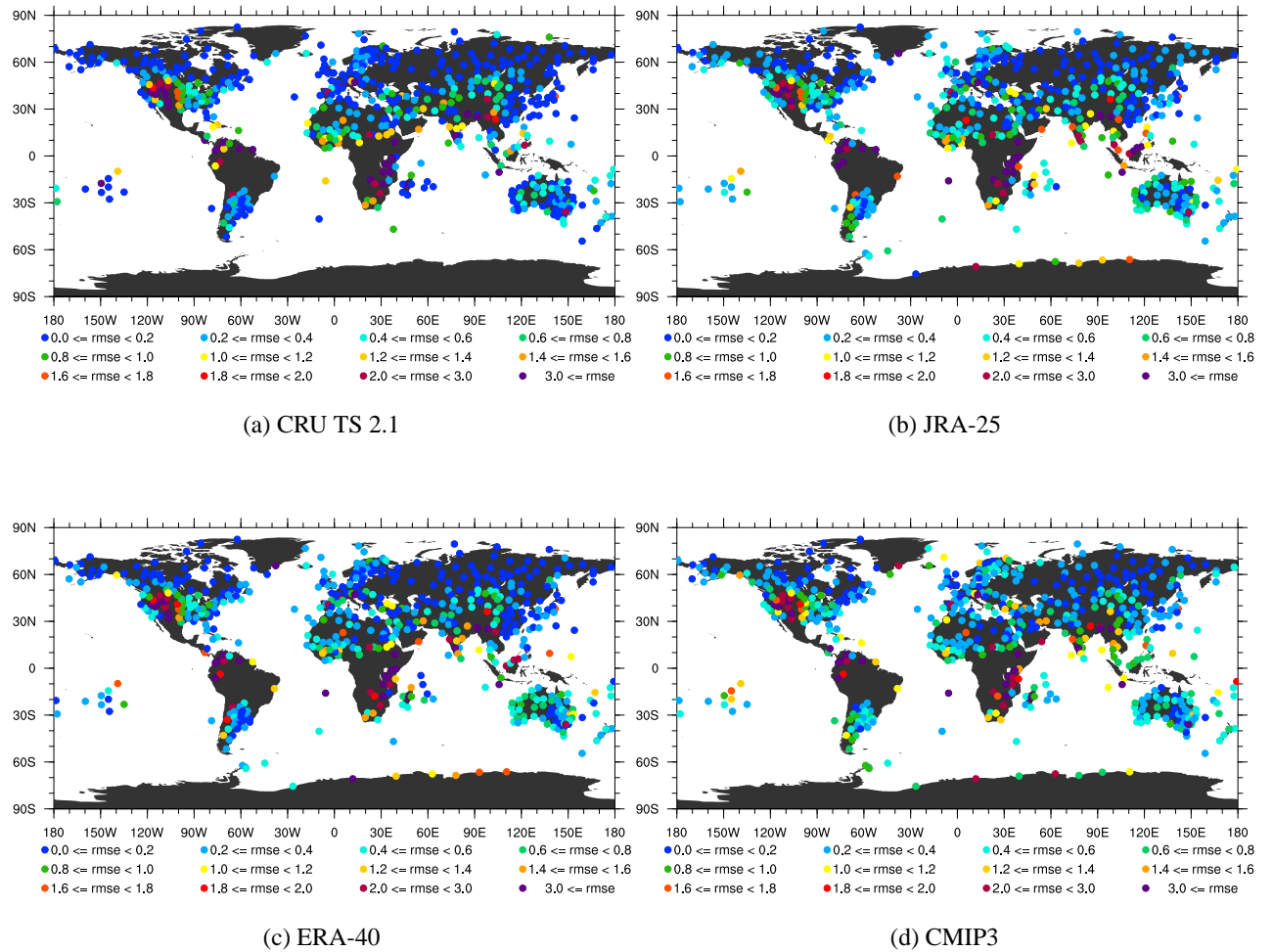


図 2.21 NDC を基準とした気温の RMSE

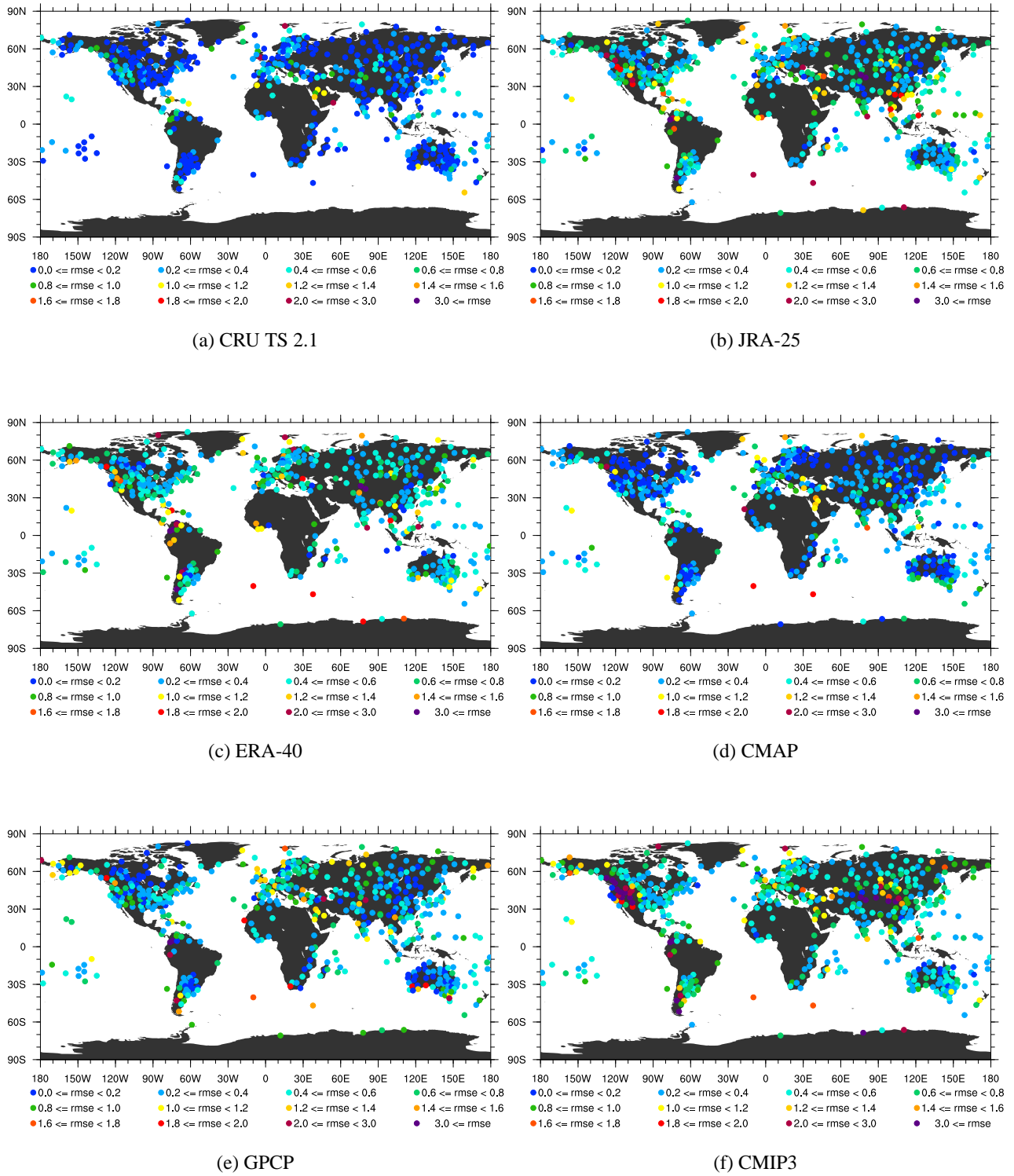
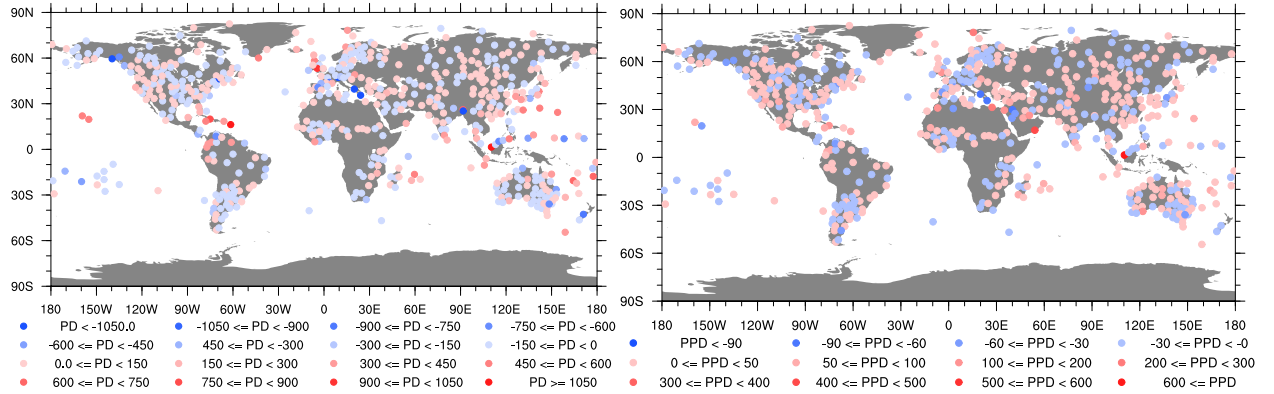
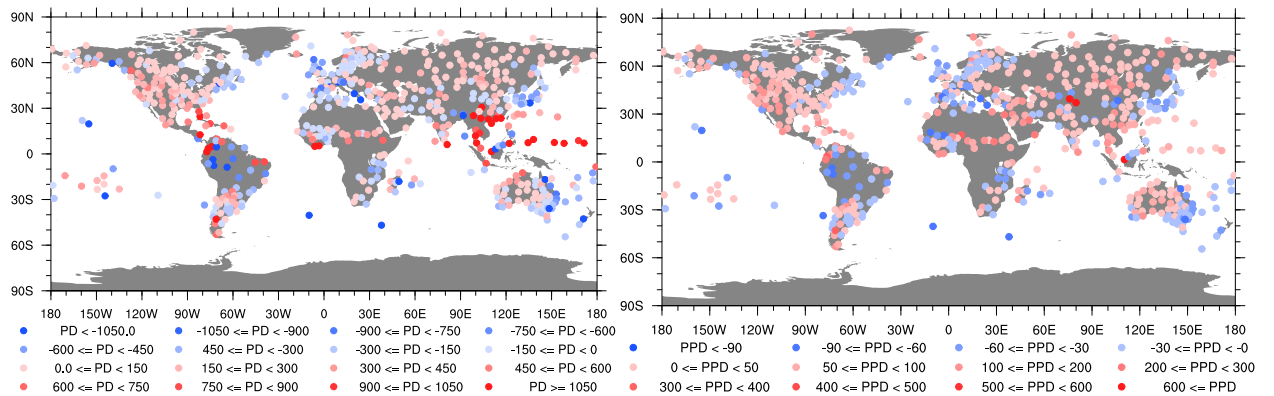


図 2.22 NNDC を基準とした降水量の RMSE



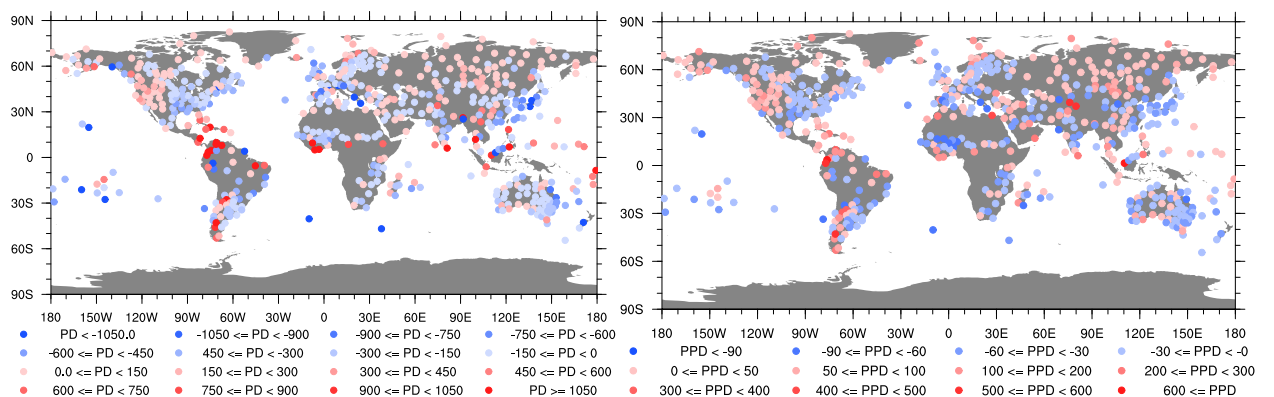
(a) CRU TS 2.1

(b) CRU TS 2.1



(c) JRA-25

(d) JRA-25



(e) ERA-40

(f) ERA-40

図 2.23 対象データと NNDC の降水量差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率 (%) (右列)

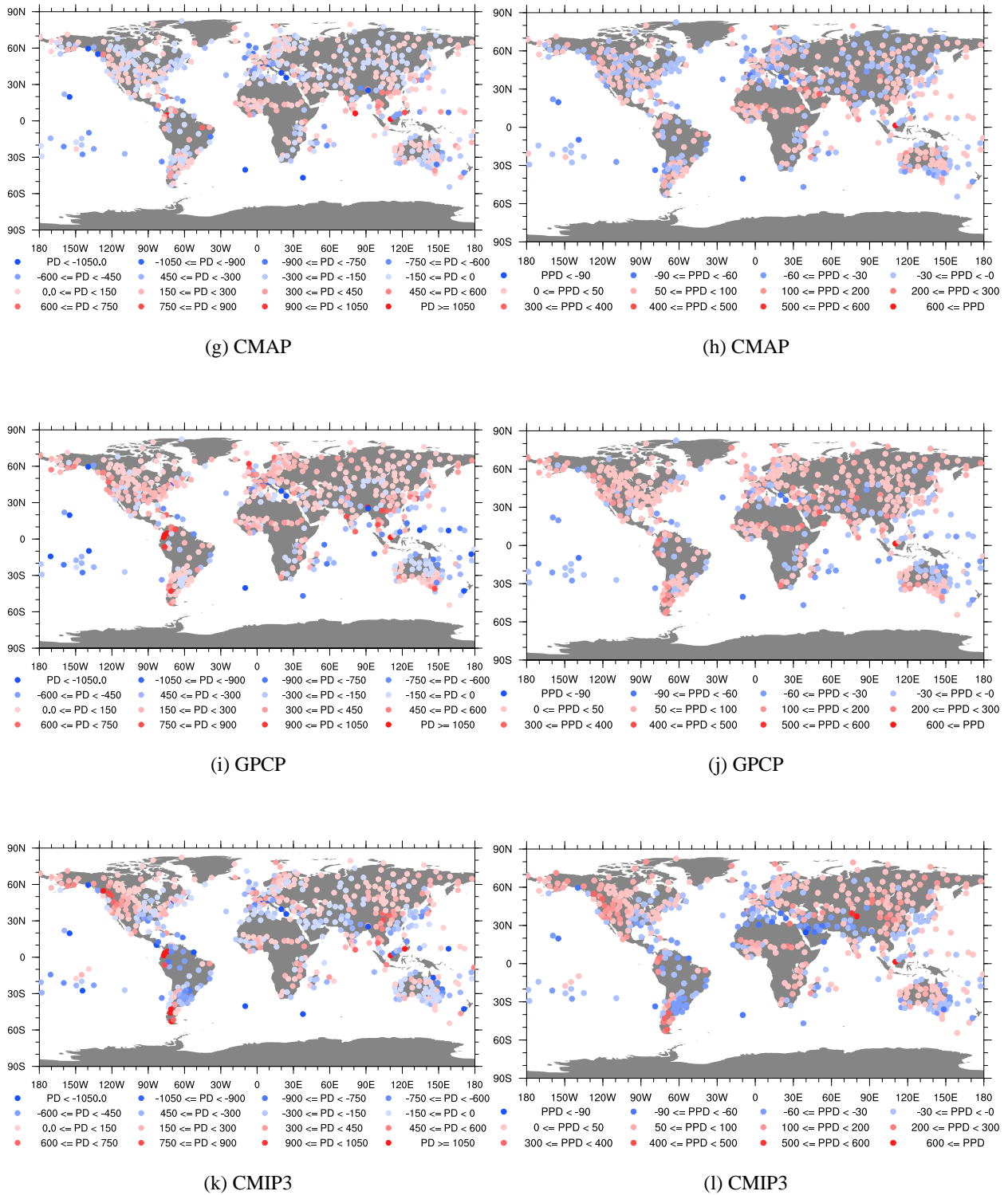


図 2.23 (続き) 対象データと NNDC の降水量差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率 (%) (右列)

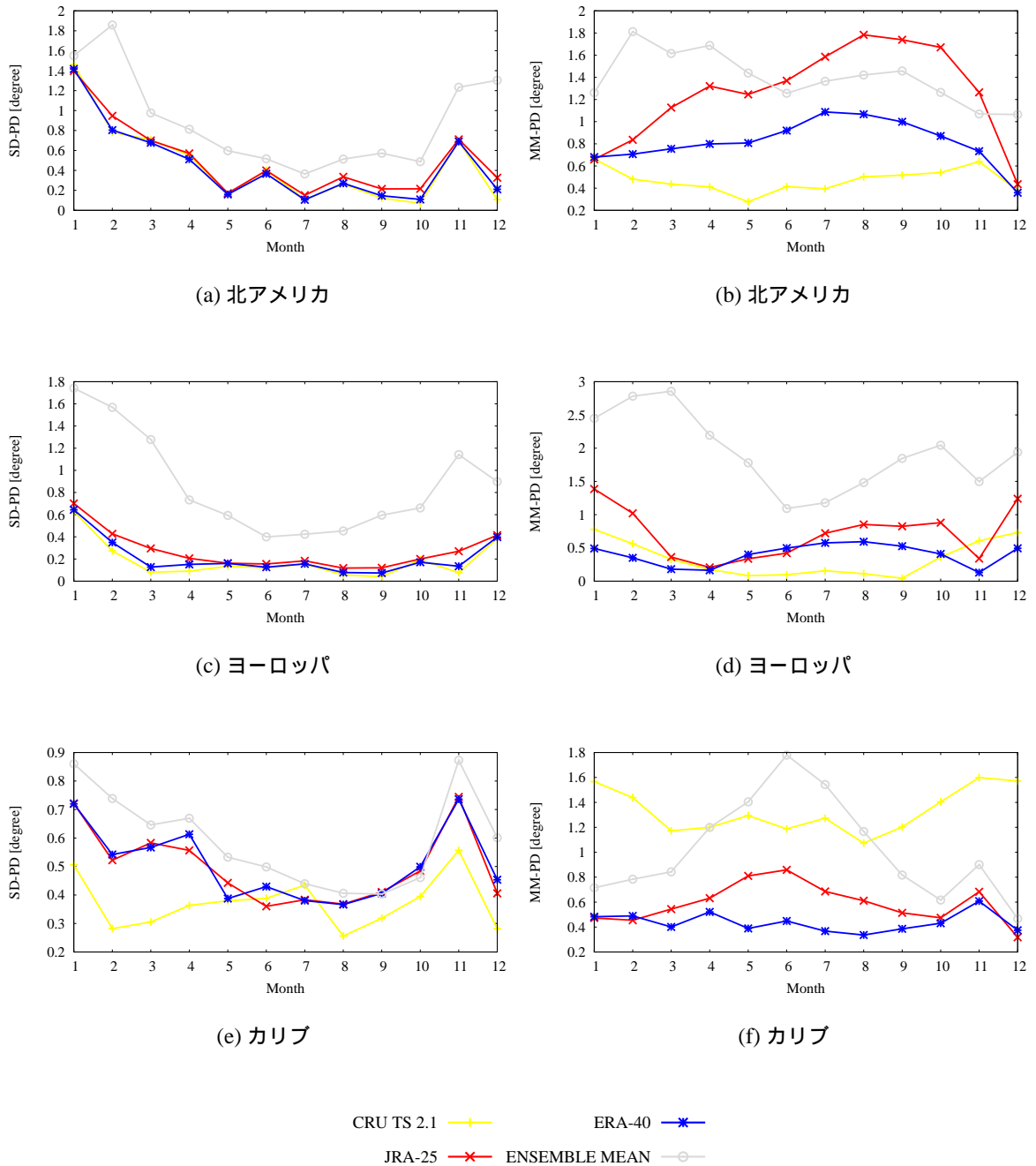
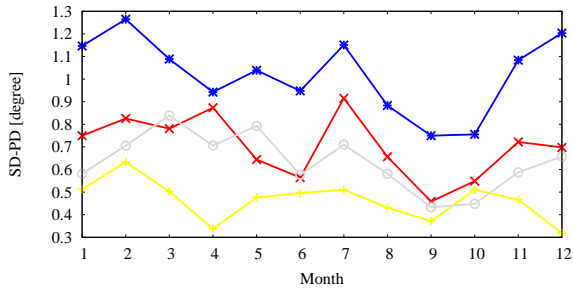
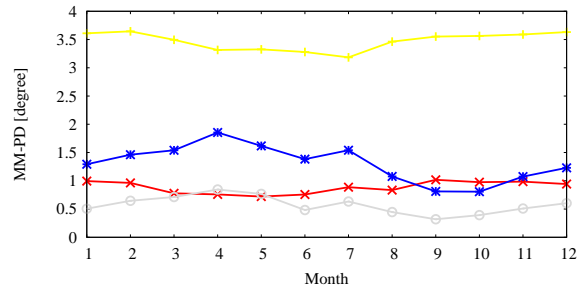


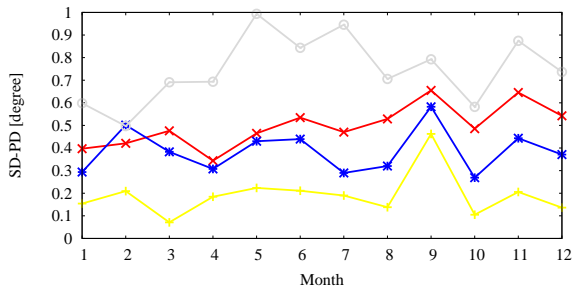
図 2.24 月別の対象データと NNDC の気温差の標準偏差 (°C) (左列) と平均絶対誤差 (°C) (右列)



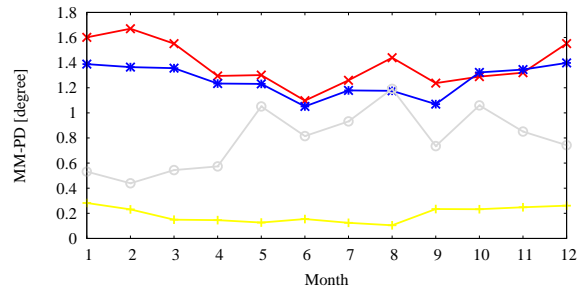
(g) 中央アメリカ



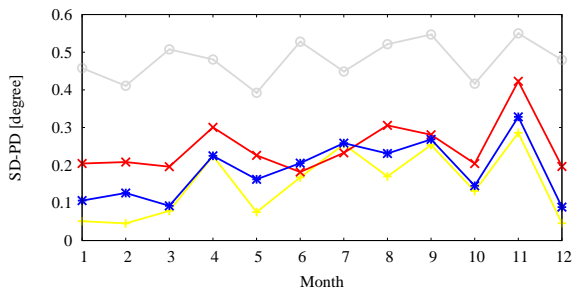
(h) 中央アメリカ



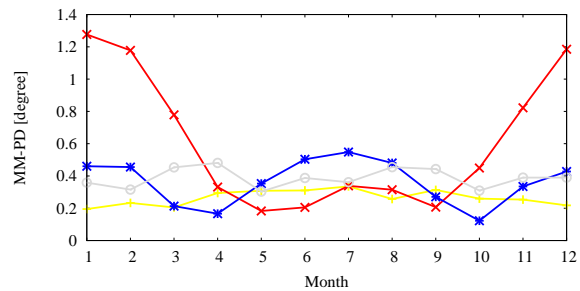
(i) 南アメリカ



(j) 南アメリカ



(k) オセアニア



(l) オセアニア

CRU TS 2.1 —+— ERA-40 —*—
 JRA-25 —x— ENSEMBLE MEAN —o—

図 2.24 (続き) 月別の対象データと NNDC の気温差の標準偏差 ($^{\circ}\text{C}$) (左列) と平均絶対誤差 ($^{\circ}\text{C}$) (右列)

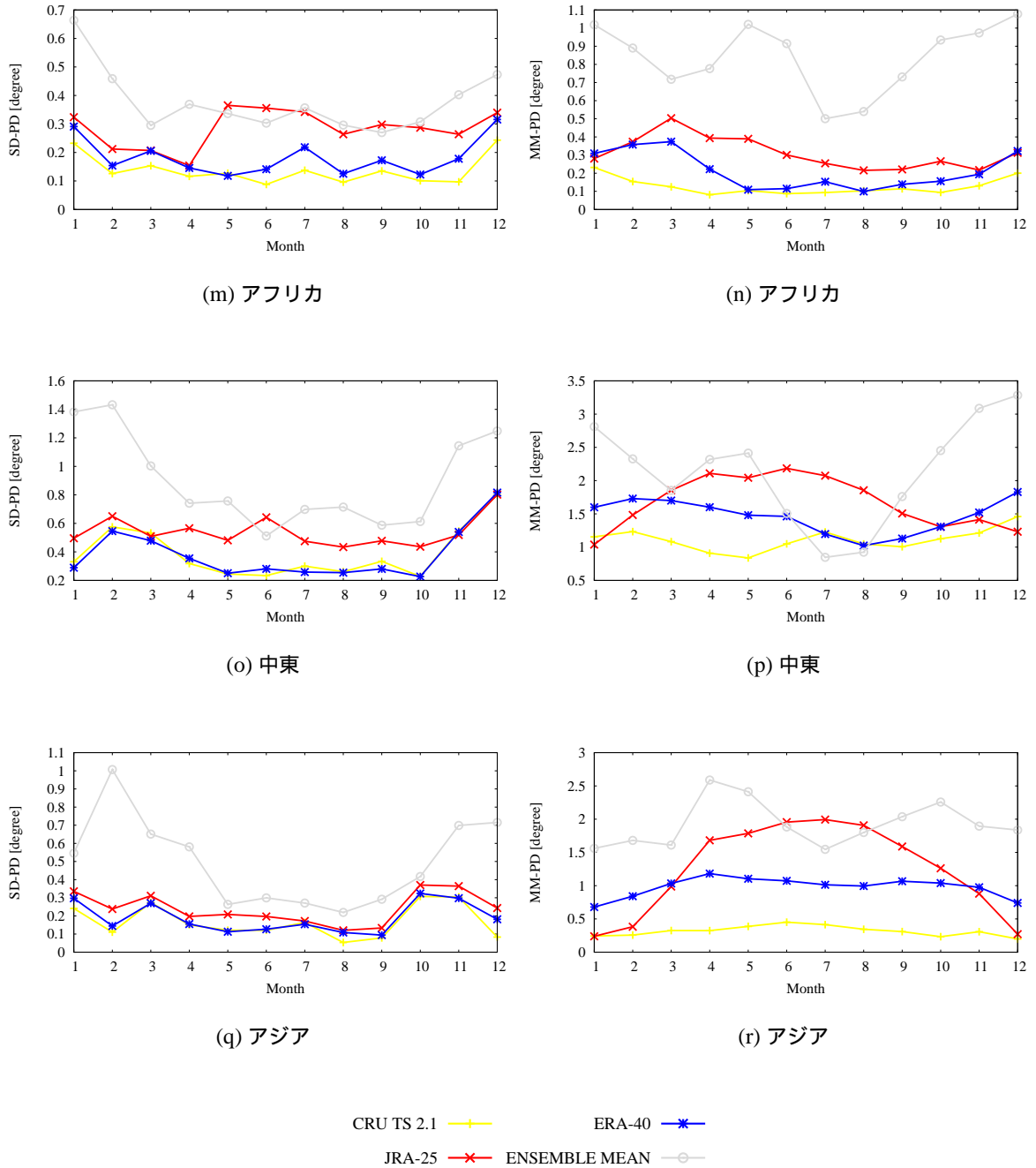


図 2.24 (続き) 月別の対象データと NNDC の気温差の標準偏差 (°C) (左列) と平均絶対誤差 (°C) (右列)

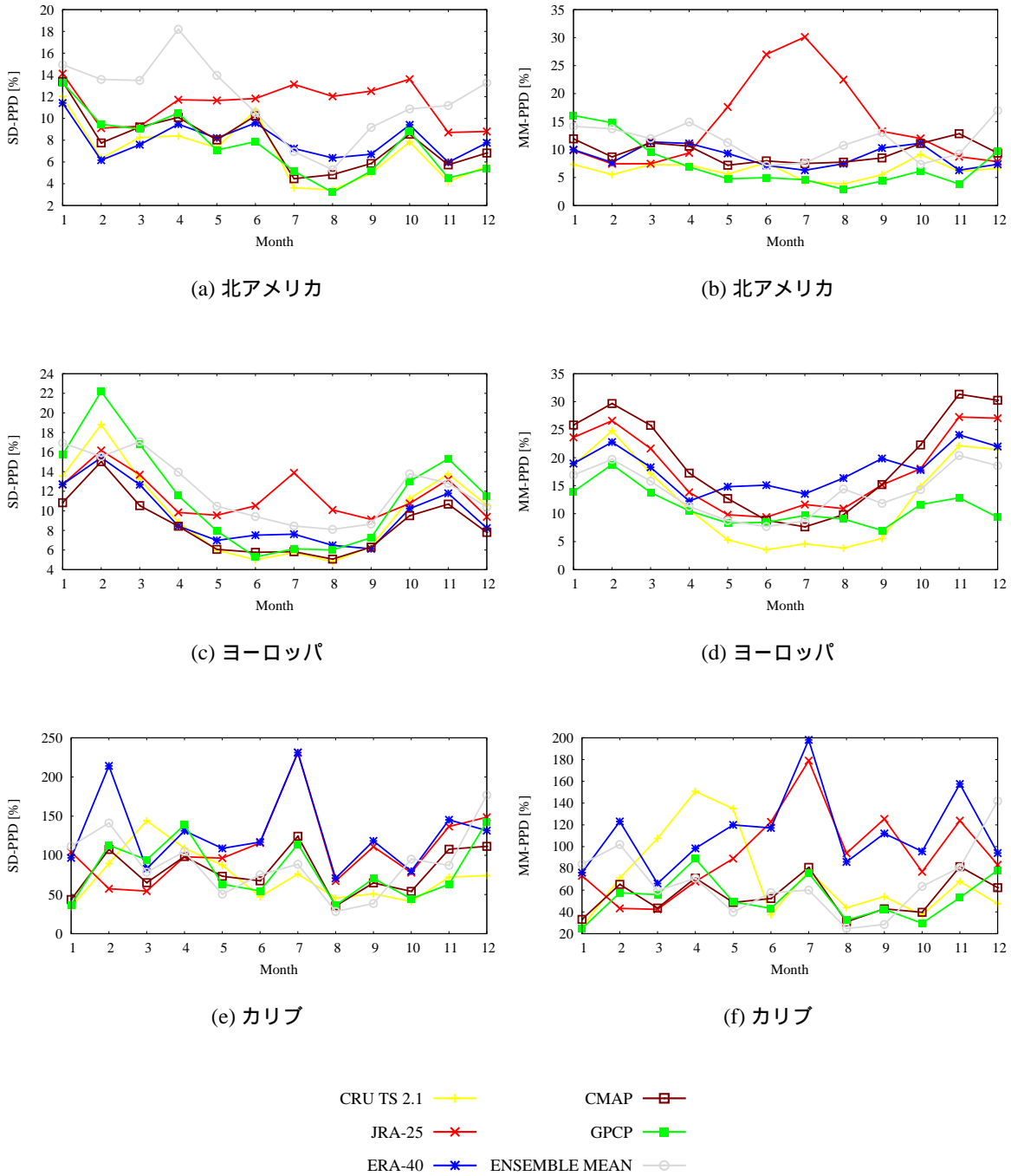
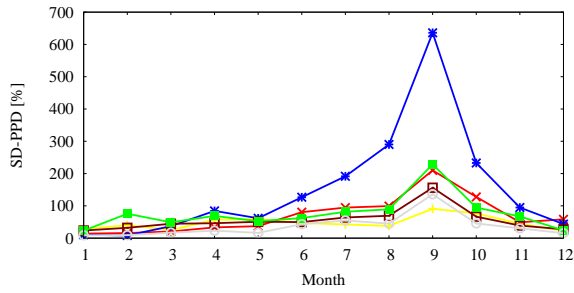
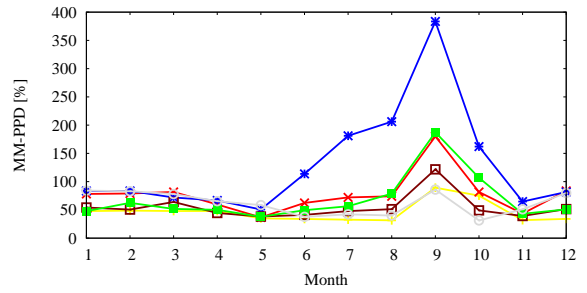


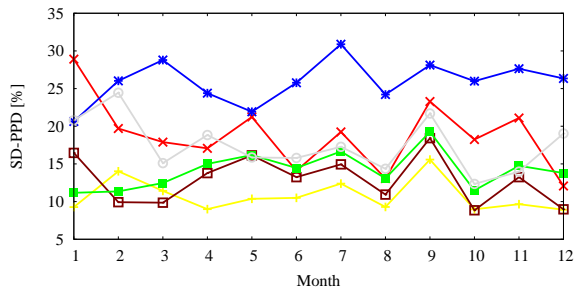
図 2.25 月別の対象データと NNDC の降水量差率の標準偏差 (%) (左列) と平均絶対誤差 (%) (右列)



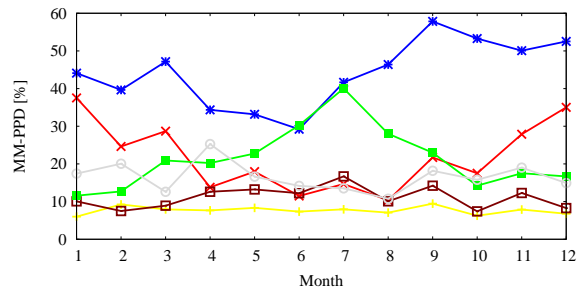
(g) 中央アメリカ



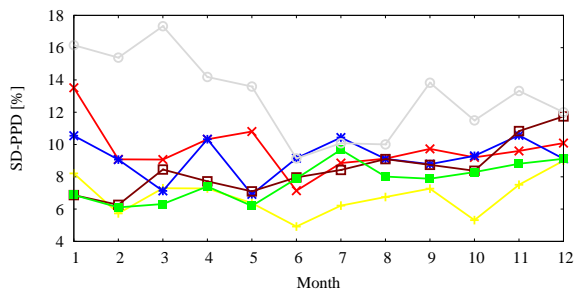
(h) 中央アメリカ



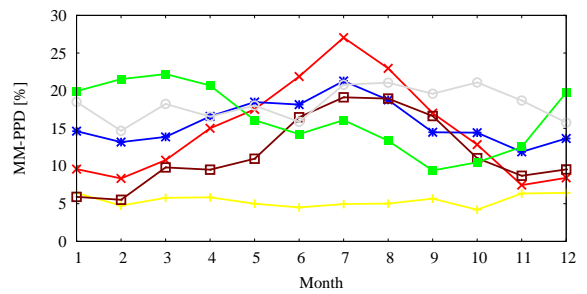
(i) 南アメリカ



(j) 南アメリカ



(k) オセアニア



(l) オセアニア

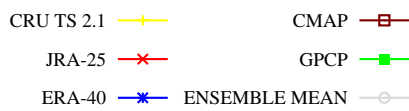


図 2.25 (続き) 月別の対象データと NNDC の降水量差率の標準偏差 (%) (左列) と平均絶対誤差 (%) (右列)

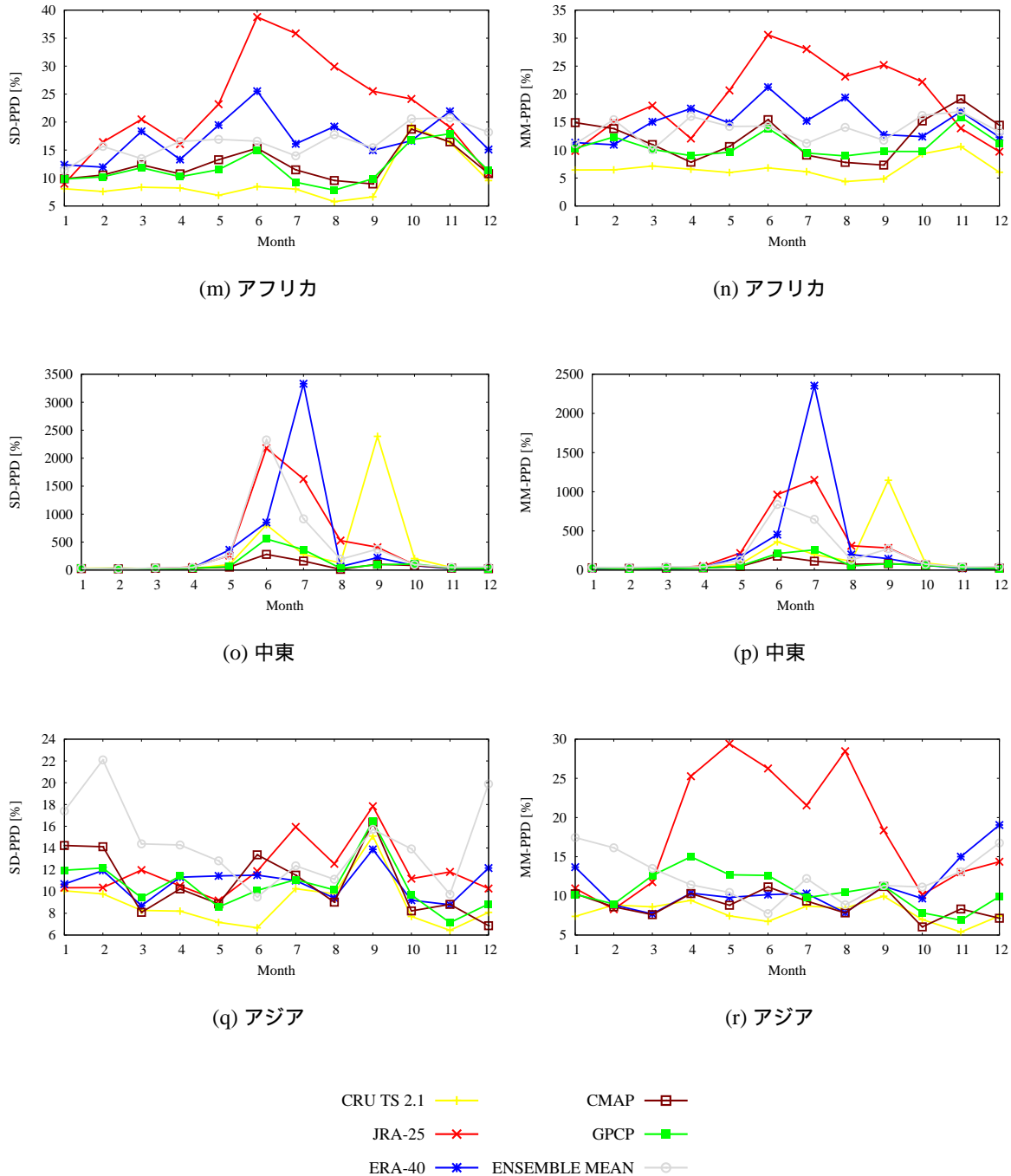
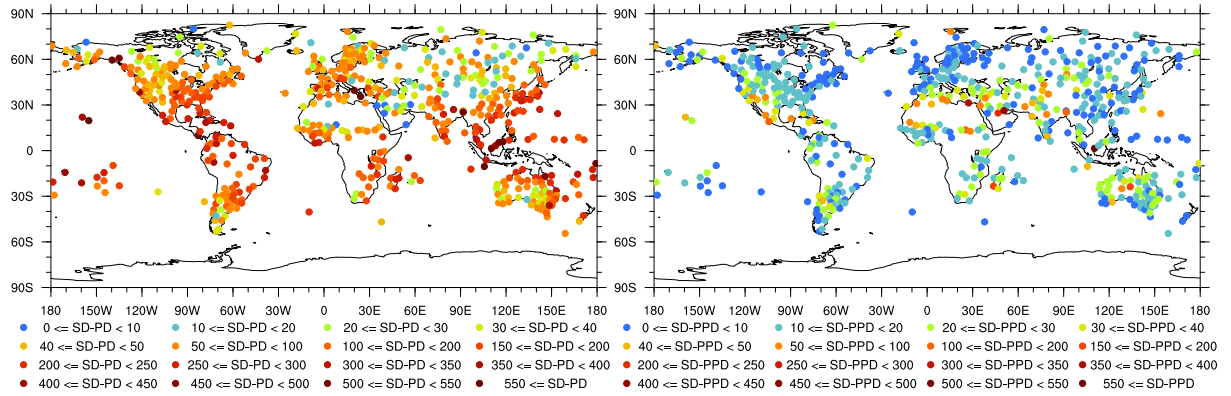
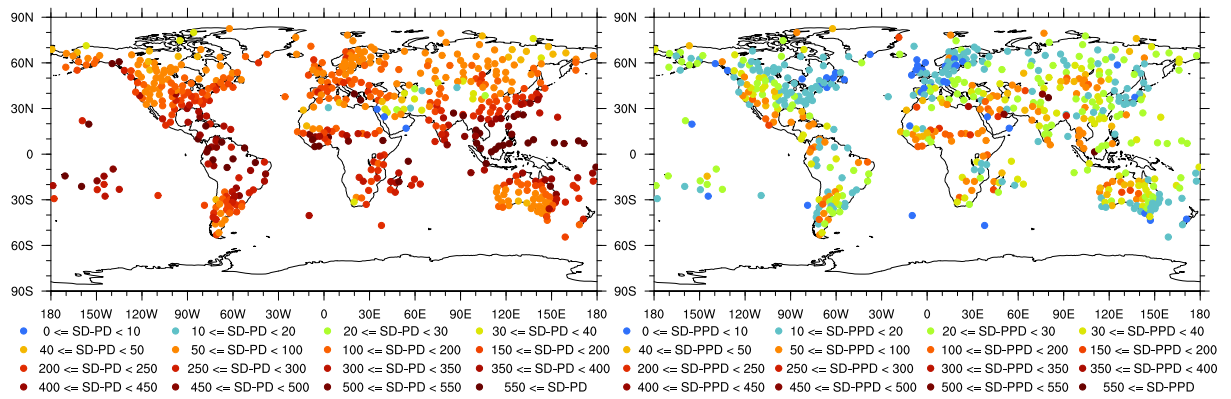


図 2.25 (続き) 月別の対象データと NNDC の降水量差率の標準偏差 (%) (左列) と平均絶対誤差 (%) (右列)



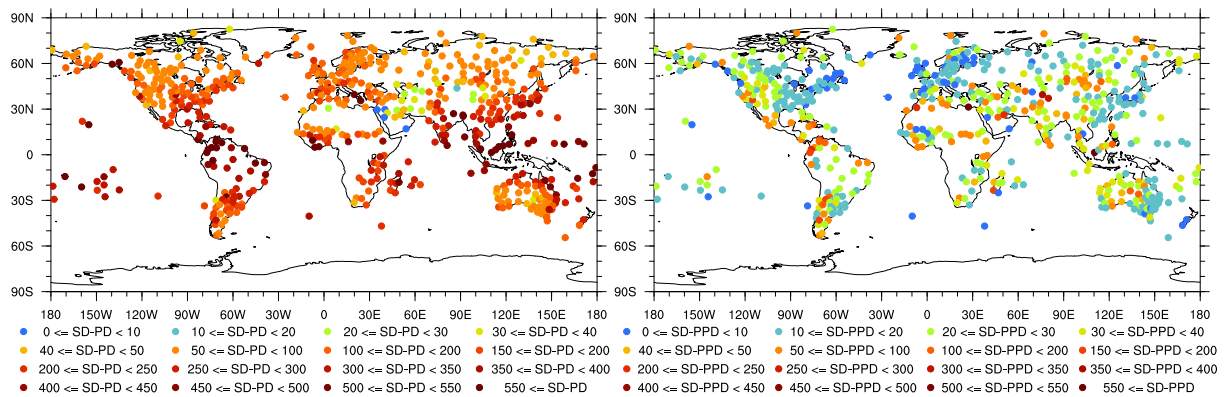
(a) CRU TS 2.1

(b) CRU TS 2.1



(c) JRA-25

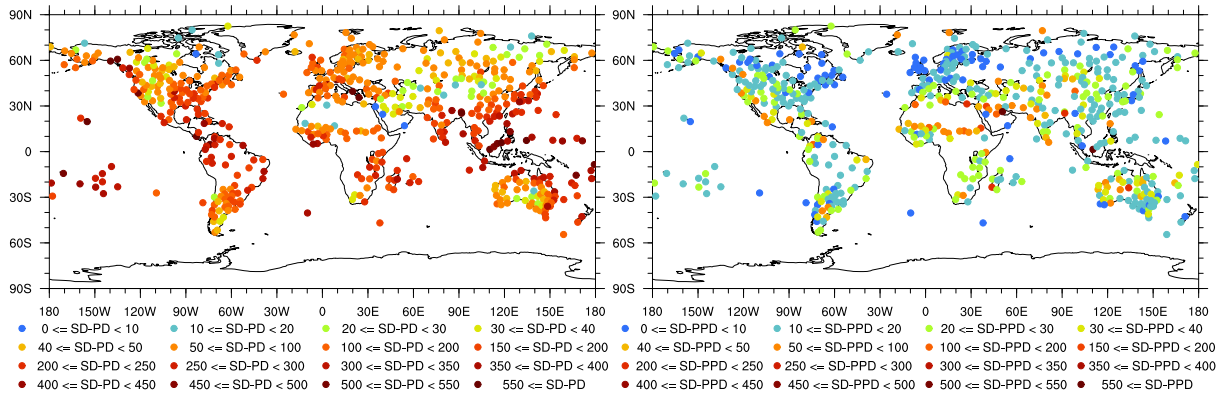
(d) JRA-25



(e) ERA-40

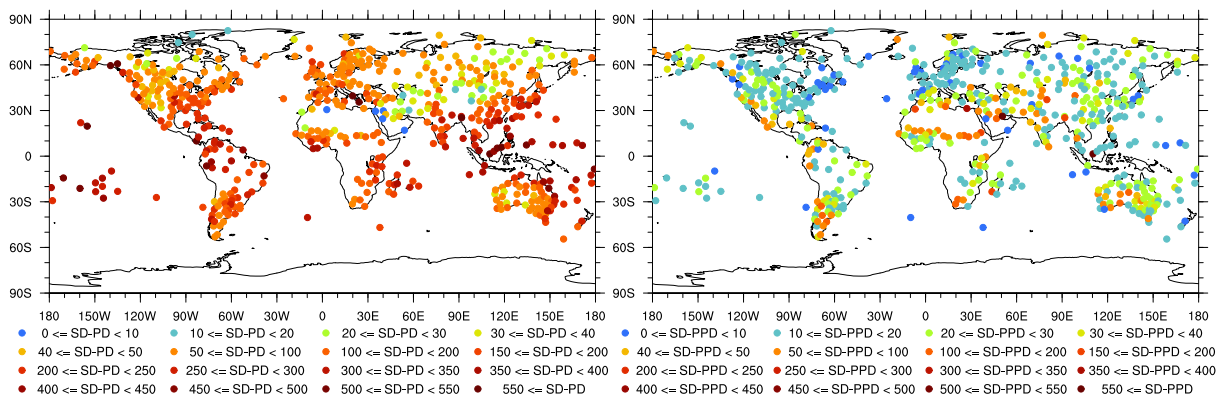
(f) ERA-40

図 2.26 対象データと NNDC 間の降水量差の標準偏差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率の標準偏差 (%) (右列)



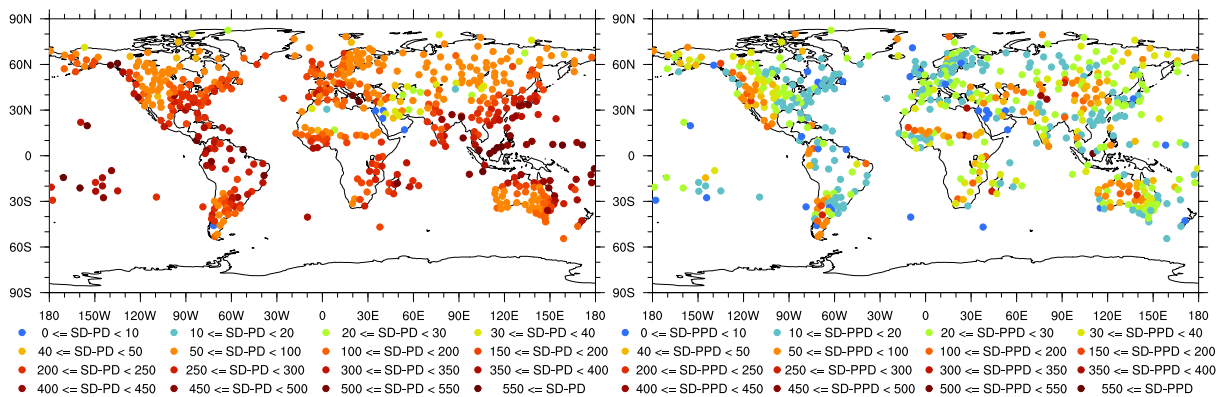
(g) CMAP

(h) CMAP



(i) GPCP

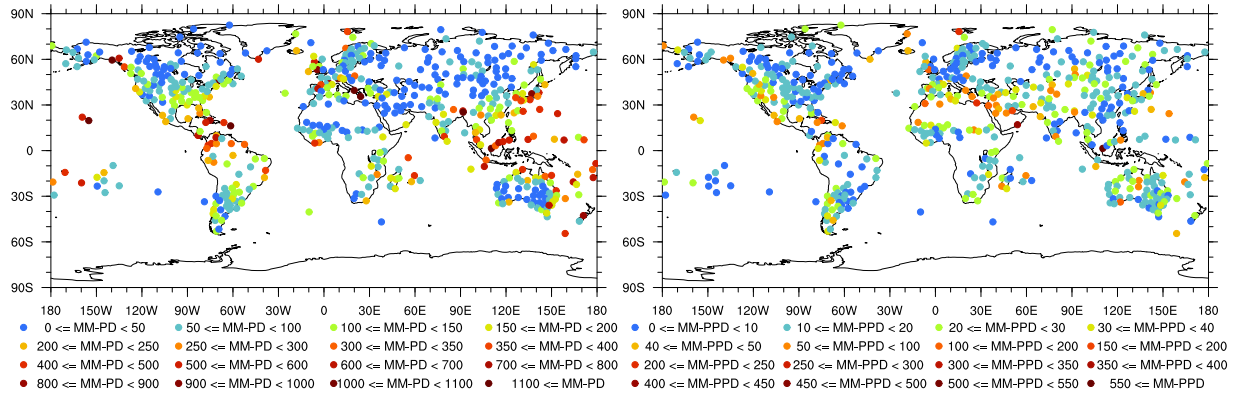
(j) GPCP



(k) CMIP3

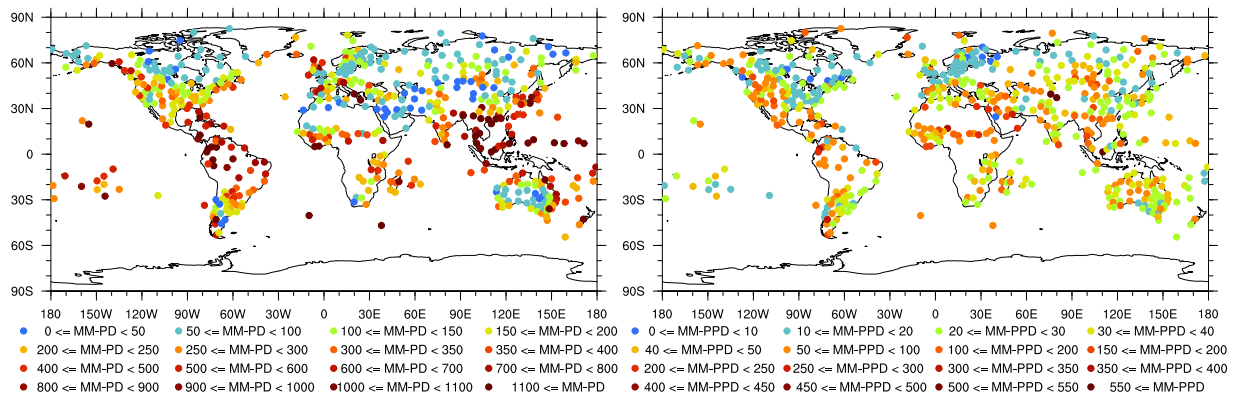
(l) CMIP3

図 2.26 (続き) 対象データと NNDC 間の降水量差の標準偏差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率の標準偏差 (%) (右列)



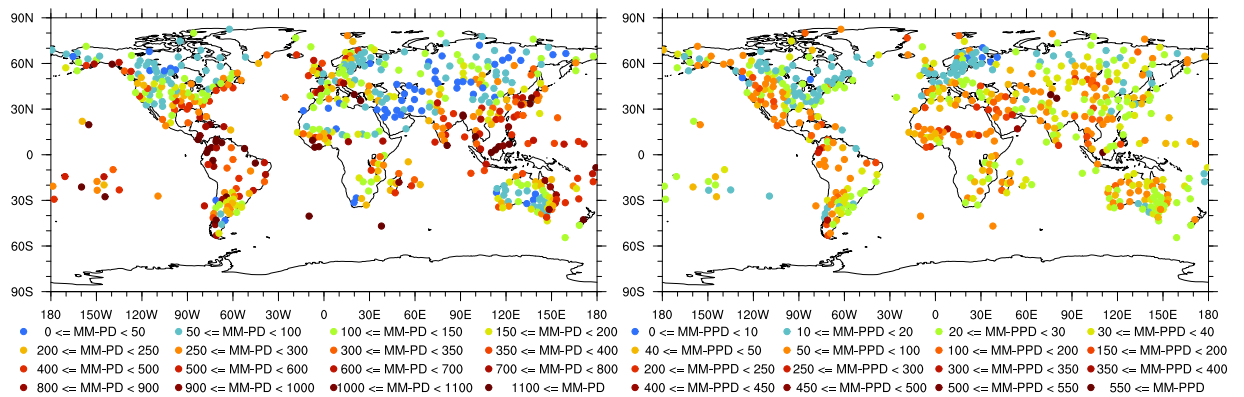
(a) CRU TS 2.1

(b) CRU TS 2.1



(c) JRA=25

(d) JRA=25



(e) ERA-40

(f) ERA-40

図 2.27 対象データと NNDC 間の降水量差の平均絶対誤差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率の平均絶対誤差 (%) (右列)

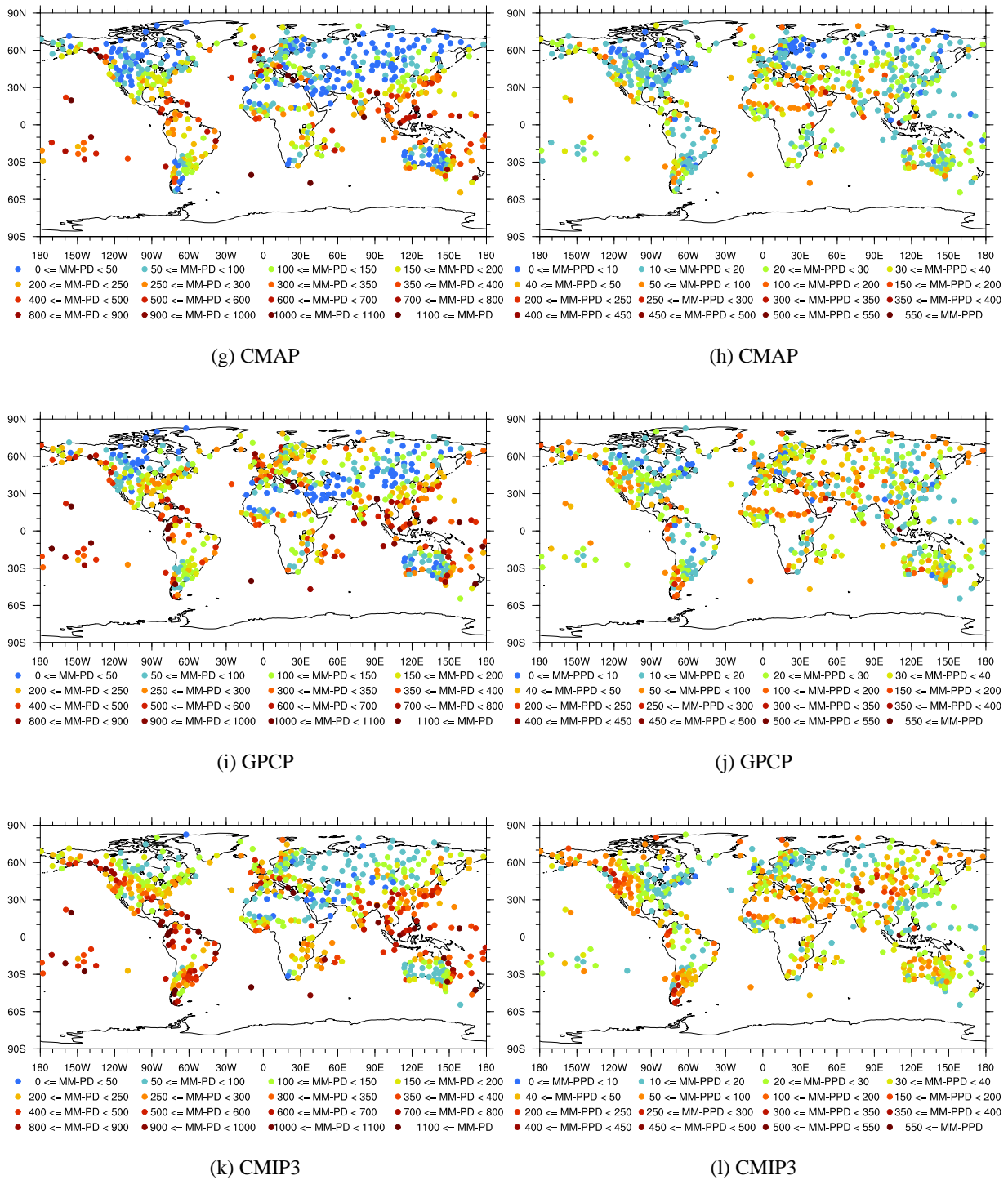


図 2.27 (続き) 対象データと NNDC 間の降水量差の平均絶対誤差 (mm) (左列) と NNDC との降水量差率の平均絶対誤差 (%) (右列)

2.6 結語

本章では、NNDC を基準として、CRU TS 2.1, JRA-25, ERA-40, CMAP, GPCP, CMIP3 の各グリッドデータの再現性を評価し、以下の結果を得た。

- 気温
 - ・北アメリカ：CRU が最も NNDC との絶対誤差が小さく、その差の絶対値は全月で 0.7°C を下回っている。一方、JRA, ERA, CMIP は CRU と比較して全月で平均絶対誤差が大きく、再現性が悪い。
 - ・ヨーロッパ：NNDC との各月の気温差の振幅は CRU が最も小さく、平均絶対誤差は各月で 1°C を超えない。
 - ・カリブ：全データセットは NNDC に比べて月平均気温および年平均気温に比べて低く、過小評価された。その中においても、ERA-40 は最も NNDC との絶対誤差量が小さい。また、CRU は最も絶対誤差が大きく、気温を過小評価する傾向が強い。
 - ・南アメリカ：各月の気温値は NNDC に対して過小評価される傾向にあるが、NNDC との気温差、ばらつきとも CRU が最も小さく、時空間分布の再現性に優れている。
 - ・オセアニア：JRA では、冬期において NNDC との平均絶対誤差が大きい。CRU の月平均気温値と NNDC の値は他のデータソースと比べて最も低く、季節を問わず NNDC との対応は良い。
 - ・アフリカ：CRU が最も NNDC との差が各月で小さく、絶対誤差および NNDC との差の変動幅ともに他のデータソースに比べて小さく、時空間分布の再現性が最も優れている。
 - ・中東：全データソースは気温平年値を過小評価している。CRU の気温値は NNDC との差の絶対誤差、振幅ともに最も小さく、時空間分布の再現性に優れている。
 - ・アジア：JRA, ERA の夏期の気温は NNDC に対して大幅に過小評価されている。CRU の気温値は全月にわたり NNDC との絶対誤差平均は 0.5°C を超えず、JRA, ERA, CMIP3 と比較して、時空間分布に見る再現性も優れている。
- 降水量
 - ・北アメリカ：4 月から 11 月にかけて GPCP は NNDC 降水量との差が最も小さく、JRA は夏期の再現性が低く、CMAP, ERA は月降水量を全月で過小評価する傾向がある。12 月から 3 月にかけては JRA-25 の降水量値が最も絶対誤差が小さく、また、空間分布に見る NNDC との差の絶対誤差は北アメリカ東部と比較して標高

の高い西部において大きい傾向が全てのデータセットで見られる。

・ヨーロッパ：CMAP は最も NNDC 降水量との差の標準偏差が小さいが、差率の絶対誤差は最も大きい。また、全データセットは夏期に比べて冬期において降水量差率の絶対誤差が大きくなる。GPCP は 1-4 月、9-12 月において最も NNDC との差率が小さく、6-8 月は CRU が最も小さい。

・カリブ：他の地域と比較して、降水量差率の標準偏差、平均絶対誤差とも値が大きく、降水量の再現が難しい地域である。CRU, JRA, ERA と比較して CMAP, GPCP の平均絶対誤差は小さく、CMAP と GPCP の比較的再現性は良好である。6-10 月は ERA, JRA の降水量は過大評価となっている。

・南アメリカ：NNDC との降水量の差は CRU が最も小さく、再現性に優れている。一方、降水量差率の平均絶対誤差は ERA が全月で 30% を超えており、また、降水量を過大評価していることから、他のデータソースと比較して突出して再現性が悪い。

・オセアニア：CRU の NNDC との降水量差率の絶対誤差は各月で 5% 前後で安定しており、本地域における時空間分布の再現性は CRU が最も高く、NNDC との値のばらつきは非常に小さい。

・アフリカ：JRA では夏期において降水量差率の標準偏差、平均絶対誤差とも他のデータソースを大きく上回っており、また変動幅が大きい。CRU はいずれの指標においても最も優れた再現性を示した。

・アジア：夏期において JRA の降水量が過大である。また、NNDC との降水量差率の標準偏差、絶対誤差とも CRU が最も低く、空間に見る誤差は他のデータソースと比較して相対的に小さい。

降水量の平均値や季節変動は、CMIP3 マルチ気候モデルごとに大きな差があり、現実の季節変動を全く再現できておらず相関のないモデルがあることが確認された。一方、それらのモデルを平均化することで、気温、雲量、降水量の平均値および季節変動は他のデータソースと同じく現実的な値に近づくことがわかった。したがって、CMIP3 気候モデルを用いた解析には複数モデルを用いたアンサンブル平均が有効であることが示唆された。近年急速に整備が進む各種グリッドデータには、特徴的なバイアスがあり、本章で行った複数のグリッドデータによる再現性結果を考慮した上で、研究に活かしていくことが重要である。そのためにも、全球規模の複数の気候値データセットを集積し、その特徴をより丹念に調べていくことが、これらのデータを使った幅広い分野における研究にとって重要な意義をもつものと考えられる。

第 3 章

全球規模の農業収量算定モデルの開発

農作物の収量算定に必要なモデルとして、過去の気象状況と収量の関係などから統計的に導く統計モデルと、作物の生育や生長過程のメカニズムから導くプロセスモデルなどがある。本章では、月最低・平均・最高気温・月降水量・月可能蒸発散・作物ごとの蒸発散量、放射などの気候データと土壌環境、灌漑情報、地形、植え付け期、収穫期、機械化効率を入力とし、作物の生長・動向を理論的な推察と経験的なパラメータを用いることによって評価した農業収量算定モデルについて解説する。特に、世界の食料需給にとって大変重要と考えられる、コムギ・ジャガイモ・キャッサバ・ダイズ・コメ・サツマイモ・トウモロコシ・ソルガムの 8 種の作物を取り扱い、作物収量算定モデルで使用するパラメータとその収量推計方法を示す。

3.1 既往の研究

作物生産性算定モデルは現在までいくつか作成され、発表されている。そのうち代表的なものとして、FAO (1978) による農業生態学的土地分類プロジェクトがあげられる [66]。このプロジェクトでは、ある年次での気候条件・土壌条件の下での各作物の潜在生長を、理論的かつ生物学的な方法を用いて算定し、さらにその算定された潜在的生長に対して、気候・土壌条件による各種制約を、各作物に対する温度特性・土壌特性などに関する研究によって得られた経験的な数値を用いることによって加えることにより、最終的な作物生産性を推測するものである。Leemans *et al.*(1993)[67] は、同様の手法を取りながらさらに改良を加えた作物生産性算定モデルを開発している。

米国農務省 (1980) が開発した EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) モデルは、ある土地での作物の生産性を算定する際、その土地における気候や土壌および地形の

情報や、作物の生長に関する性質を細かく入力し、農家が実際に予定している植え付けや収穫の時期、肥料・灌漑・病害予防・防虫・排水・輪作などの方式や回数・量・時期などを設定し、その土地で作物はどのように生長していくのかを、日単位で計算するモデルである。その結果、当該作物はその年にどれだけの生産性をあげることができ、生産に必要な費用がいくらかかるのか等の情報を得ることができる。またその時、土壌の浸食・劣化などのプロセスもモデル化されており、次の年の耕作はその新しい環境下で、再び計算されていくものである [68]。Stehfest *et al.* (2007)[69] は、主要穀物の植え付け期を考慮した作物収量を全球レベルでモデル計算し、計算結果と統計値が高い相関を持つことを示した。一方、土地利用・植え付け期・灌漑情報のデータ精度、作物管理や作物生長過程に関する作物パラメータ、入力データの時間・空間解像度に代表される不確実性が計算結果に大きな影響を与える可能性があることを指摘した。Semenov *et al.* (1995)[70] は、AFRCWHEAT3S を用い、気温と降水量の平均値および分散値を変化させることによって、コムギの収量に与える影響を感度分析した。その結果、気候の変動特性が平均気候の変化より収量に大きな影響を与えることを示した。Liu *et al.* (2007)[71] は、GEPIC モデルを用いてコムギの収量再現計算を全球レベルで行い、水生産性と収量に高い相関があることを示した。

以上、過去に開発されてきた作物の潜在生産性の予測モデリング手法と得られた結果は、研究者によって差がある。特に、将来の農業生産に重点を置いた研究が多いが、よりたくさんの作物種に対して現在の収量および栽培地域をモデルによって正確に表現し、それをもとに将来の予測を行った研究は必ずしも十分とは言えない。モデルによる予測の限界については、議論のあるところではあるが、そのことを含めてモデルを用いた予測結果をもとに議論するという意味では、少なくとも作物収量を推定し予測することは不可欠なものとなっている。本研究では、FAO(1995)、Fischer(2000)らによる農作物潜在性収量算定モデル [66][72] をベースに、より現実的な農作物収量を算定するため生育期間中の栽培期間と気温・降水用件、植え付け期、収穫期・栽培期間に対する国別・グリッドごとの最新のデータセットを用いて改良を施し、より現実の収量の再現性向上を図り、灌漑の影響を考慮した全球農作物収量算定モデルを構築する [73]。

3.2 モデルの概要

本研究で開発された作物収量算定モデルは、気温、降水量、放射量、土壌の性質、地形環境、技術発展のデータを取り入れて、それに対する作物の生長・動向のモデル化による収量算定計算を行った後、出力として作物の収量を算出するものである。モデル計算はGIS（地理情報システム）上で行われ、これにより地球環境と土地生産の関係に関する空間的な考察と検討が可能となる。本研究で構築された収量算定モデルによる収量計算まで

の流れを図 3.1 に示す．次小節以下で，作物収量算定モデルで使用する主なパラメータとその推計方法についての説明を行う．

3.2.1 参考作物蒸発散の推定

作物別の収量を算定するに先立ち，まず，その算定において重要なファクターとなる参考作物蒸発散の算定を行う．参考作物蒸発散は，後に説明する作物別の蒸発散を算定する際に必要となる．FAO のガイドライン [74] によると，参考作物蒸発散の算定には，熱収支と Dalton 型の空気力学的手法を組み合わせる Penman-Monteith 法 [75] や，月平均気温と可照時間の関数として解く Thornthwaite 法 [76] などがある．本研究では，Penman-Monteith 法によって参考作物蒸発散を求める．参考作物蒸発散を求める基礎式は次式で示される．

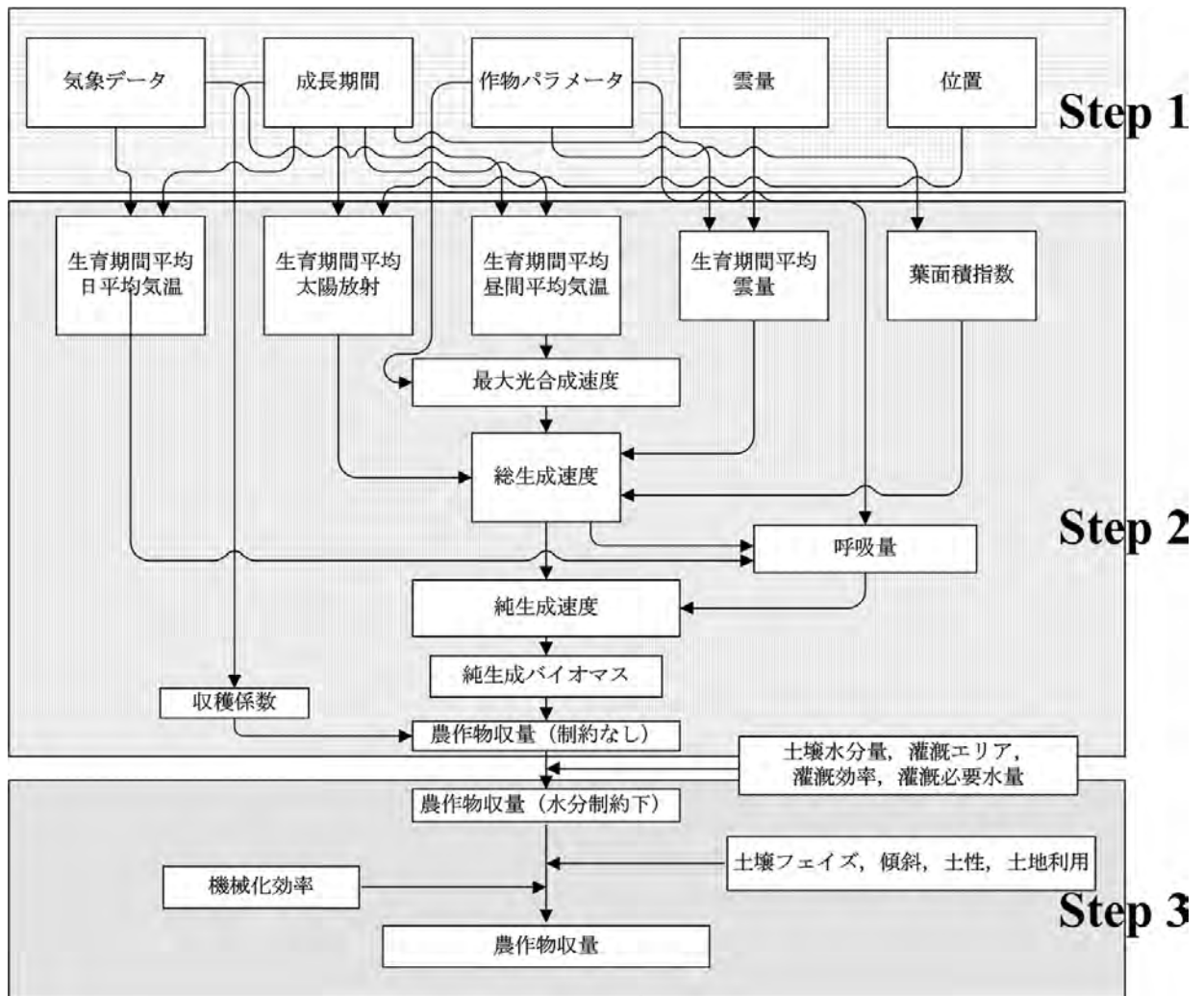


図 3.1 作物収量算定モデルのフローチャート

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (3.1)$$

ここに, ET_0 は参考作物蒸発散 (mm day^{-1}), R_n は作物表面での純放射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), G は熱流速密度 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), T は高度 2m での日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$), e_s は飽和蒸気圧 (kPa), e_a は実蒸気圧 (kPa), u_2 は高度 2m での風速 (m s^{-1}), Δ は飽和蒸気圧曲線の接線勾配 ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) で次式で示される.

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (3.2)$$

乾湿計係数 γ は,

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (3.3)$$

ここで, P は大気圧 (kPa) である. さらに, 純放射量 R_n は

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (3.4)$$

で示される. ここで, R_{ns} は内向き純短波放射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), R_{nl} は外向き純長波放射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$) である. また,

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (3.5)$$

$$R_s = 0.16 \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (3.6)$$

$$R_a = \frac{1440}{\pi} G_{sc} d_r \{ \omega_s \sin(\psi) \sin(\delta) + \cos(\psi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \} \quad (3.7)$$

ここで, $\alpha (=0.23)$ はアルベド, T_{max} は月平均日最高気温 ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} は月平均日最低気温 ($^{\circ}\text{C}$), R_s は太陽による入射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), R_a は地球外放射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), G_{sc} は太陽定数 ($=0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$), d_r は地球と太陽の相対距離の逆数 (rad), ω_s は, 日没時の角度 (rad), ψ は緯度 (rad), δ は偏角 (rad) である. d_r, δ, ω_s はそれぞれ次式により算定される.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (3.8)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (3.9)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\psi) \tan(\delta)) \quad (3.10)$$

ここで、 J は 1 月 1 日を 1 日とする積算日数である。さらに、 R_{nl} は次式で示される。

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (3.11)$$

ここに、 σ はステファンボルツマン定数 ($=4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)、 $T_{max,K}$ は月平均日最高気温 (K)、 $T_{min,K}$ は月平均日最低気温 (K)、 e_a は実蒸気圧 (kPa)、 R_{so} は晴天時における太陽放射 ($=0.75 + 2 \times 10^{-5} z$) R_a 、 z は高度 (m) である。

3.2.2 作物ごとの温度要件を満たすエリアの算定

光合成は作物の生長には欠かせない生化学反応であり、気温と放射は光合成速度に影響を与える。また、光合成の生化学的そして物理的な反応の程度・割合は、作物にとって最適な温度要件と気温や放射、大気構成によってさまざまである。本研究では、作物の生長に適した気温要件を兼ね備えた地理的条件を定義するため、次に示す気温要件を定義した。

1. 気候区分

本研究では、気候を熱帯、亜熱帯、温帯、亜寒帯に区分した。それぞれの定義を表 3.1 以下に示す。

表 3.1 気候区分

熱帯 Tr	全月で標高補正された月平均気温が 18 °C 以上
亜熱帯 STr	夏季降水 (STr SR) (北半球: 4-9 月の降水量 >10-3 月の降水量, 南半球: 10-3 月の降水量 >4-9 月の降水量) 冬季降水 (STr WR) (北半球: 10-3 月の降水量 >4-9 月の降水量, 南半球: 4-9 月の降水量 >10-3 月の降水量)
1 か月以上 18 °C 未満かつ 5 °C 以上の月がある	
温帯 Te	海洋性温帯 Te(Oc) 季節的に 20 °C を下回る 亜大陸性温帯 Te(SCo) 季節的に 20-35 °C 大陸性温帯 Te(Co) 季節的に 35 °C を上回る
少なくとも 1 か月以上月平均 気温が 5 °C を下回り、4 か月 以上 10 °C を超える月がある	
亜寒帯 B	海洋性亜寒帯 Bo(Oc) 季節的に 20 °C を下回る 亜大陸性亜寒帯 Bo(SCo) 季節的に 20-35 °C 大陸性亜寒帯 Bo(Co) 季節的に 35 °C を上回る
少なくとも 1 か月以上月平均 気温が 5 °C を下回り、1 か月 以上かつ 3 か月以下の間 10 °C を上回る	
極 Arc	全月で平均気温が 10 度を下回る

CRU TS 2.1 の地上気温データを使った 1961-1990 年の月別の平均気温平年値で区分された温度気候区分を図 3.2 に示す。

2. 作物ごとの生長に必要な温度要件

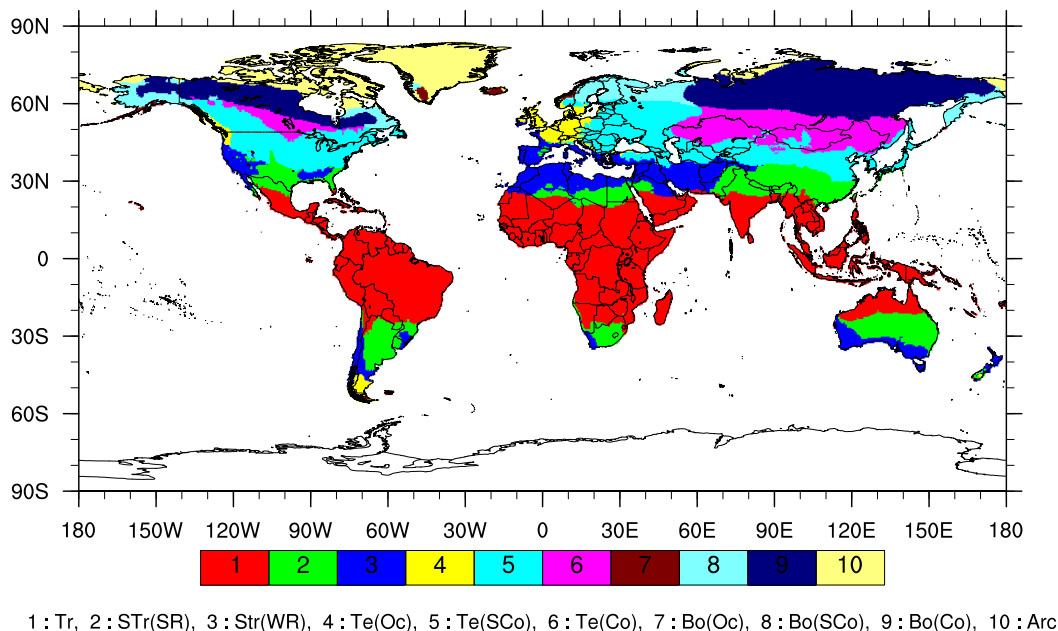


図 3.2 温度気候区分

作物が生長できる温度用件を定義する際、従来この条件は全ての作物に対して一律 5 以上と設定するのが一般的であった (FAO, 1978) [66]。この値は、穀物と草の生長が始まる平均的な閾値であるという仮説によるものである。しかし、作物にはそれぞれ栽培に適した気温が異なっており、熱帯域においてはこの 5 という仮定は適切ではないと考えられる。本研究では、表 3.2 に示す温度プロファイル区分を定義し、表 3.3-表 3.18 に示す条件を満たす期間を各作物の生長に適した気温を兼ね備えた期間であるとし、これを満たす場所を水分の条件を考慮しない仮定の下で作物が生長をすすめることができるものとした。表中の最適 (Optimal) 用件を満たさないが、それに準ずる用件 (Sub-optimal) を満たすエリアについては、最終的に収量値が得られた際、0.8 を乗ずることとした。

表 3.2 温度プロファイル区分

気温 (°C)	<-5	-5-0	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	>30
トータル生長期間	L9	L8	L7	L6	L5	L4	L3	L2	L1
冬から夏の生長期間	L9a	L8a	L7a	L6a	L5a	L4a	L3a	L2a	L1a
夏から冬の生長期間	L9b	L8b	L7b	L6b	L5b	L4b	L3b	L2b	L1b

表 3.3 冬コムギの生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
	Climates: B, Te, STR (WR+SR)	Climates: B, Te, STR (WR+SR)
	$L6a < 0.667 * Lb$	$L6a < 0.500 * Lb$
	$L6a + L5a > 0.167 * Lb$	$L6a + L5a > 0.084 * Lb$
	$L2a + L2b < 0.333 * Lb$	$L2a + L2b < 0.333 * Lb$
$L = 30 + 90/35 + 105$	$L1a + L1b = 0$	$L1a + L1b = 0$
	$L2b + L3b + L4b + L5b < 0.500 * Lb$	$L2b + L3b + L4b + L5b < 0.500 * Lb$
$L = 40 + 120/45 + 135$	$L3b + L4b + L5b + L6b > La$	$L3b + L4b + L5b + L6b > La$
	$TSgc > 1200$	$TSgc > 1300$
	no permafrost	no permafrost
	$LGP_{t=5} < 365$	$LGP_{t=5} < 365$
	dormancy required	dormancy required

$TSgc$: 温度要件を満たす期間における気温の積算

$LGP_{t=5}$: 5 °C を超える日平均気温の日数

表 3.4 春コムギの生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
	Climates: B, Te, STR (WR+SR)	Climates: B, Te, STR (WR+SR)
	$L6a < 0.333 * L$	$L6a < 0.333 * L$
	$L6a + L5a > 0.167 * Lb$	$L6a + L5a > 0.167 * Lb$
	$L2a + L2b < 0.333 * Lb$	$L2a + L2b < 0.333 * Lb$
$L = 105/120/135/150$	$L1a + L1b = 0$	$L1a + L1b = 0$
	$L2b + L3b + L4b + L5b < 0.500 * Lb$	$L2b + L3b + L4b + L5b < 0.500 * Lb$
	$TSgc > 1400$	$TSgc > 1800$
	no permafrost	no permafrost
	$LGP_{t=5} < 365$	$LGP_{t=5} < 365$

表 3.5 コムギ（亜熱帯）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 105/120/135/150$	Climates: STr (WR + SR)	Climates: STr (WR + SR)
	$L6a < 0.333 * L$	$L6a < 0.167 * L$
	$L6 + L5 + L4 > 0.167 * Lb$	$L6 + L5 + L4 > 0.333 * Lb$
	$L2a + L2b < 0.500 * Lb$	$L2a + L2b < 0.500 * Lb$
	$L1a + L1b = 0$	$L1a + L1b = 0$
	$TSgc > 1500$	$TSgc > 1800$
	$LGP_{t=5} = 365$	$LGP_{t=5} = 365$

表 3.6 コムギ（熱帯）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 100/130/160/190$	Climates: Tr	Climates: Tr
	$L6a < 0.333 * L$	$L6a < 0.167 * L$
	$L6 + L5 + L4 > 0.167 * Lb$	$L6 + L5 + L4 > 0.333 * Lb$
	$L2a + L2b < 0.500 * Lb$	$L2a + L2b < 0.500 * Lb$
	$L1a + L1b = 0$	$L1a + L1b = 0$
	$TSgc > 1600$	$TSgc > 2000$
	$LGP_{t=5} = 365$	$LGP_{t=5} = 365$

表 3.7 コメ（インディカ種，灌漑）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 105/120/135/150$	Climates: Tr, STr (SR+WR)	Climates: Tr, STr (SR+WR)
	$L5 = L6 = 0$	$L6 = L5 = L4 = 0$
	$L3 + L2 + L1 > 0.833 * L$	$L3 + L2 + L1 = 1.000 * L$
	$L4a < 0.167 * L$	$L1 < 0.667 * L$
	$L4b < 0.167 * L$	$TSgc > 3000$
	$TSgc > 2400$	

表 3.8 コメ（インディカ種，乾燥地）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 105/120/135$	Climates: Tr	Climates: Tr
	$L5 = L6 = 0$	$L6 = L5 = L4 = 0$
	$L3 + L2 + L1 > 0.833 * L$	$L3 + L2 + L1 = 1.000 * L$
	$L4a < 0.167 * L$	$L1 < 0.667 * L$
	$L4b < 0.167 * L$	$TSgc > 3000$
	$TSgc > 2400$	

表 3.9 コメ（ジャポニカ，灌漑）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 105/120/135/150$	Climates: Tr, STR (SR+WR), Te	Climates: Tr, STR (SR+WR), Te
	$L5a + L4a < 0.400 * L$	$L5a + L4a < 0.400 * L$
	$L4 > 0$	$L2a + L2b < 0.667 * L$
	$L2a + L2b < 0.667 * L$	$L1a + L1b < 0.200 * L$
	$L1a + L1b < 0.200 * L$	$L4b + L5b < 0.250 * L$
	$4b + L5b < 0.250 * L$	$L6 = 0$
	$L6 = 0$	$TSgc > 2200$
	$TSgc > 1800$	

表 3.10 トウモロコシ，ソルガム（低地）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 90/105/120/135$	Climates: Tr	Climates: Tr
	$L4a + L4b < 0.167 * L$	$L4 = 0$
	$TSgc > 2200$	$TSgc > 2500$

表 3.11 トウモロコシ，ソルガム（高地）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 105/180/300$	Climates: Tr	Climates: Tr
	$L1 = 0$	$L1 = 0$
	$L2 = 0$	$L2 = 0$
	$L5 < 0.500 * L$	$L5 < 0.333 * L$
	$L6 = 0$	$L6 = 0$
	$L3a + L3b < 0.333L$	$L3a + L3b < 0.333 * L$
	$TSgc > 2200$	$TSgc > 2500$

表 3.12 トウモロコシ（亜熱帯）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 105/120/135/150/165/180$	Climates: STr (SR+WR), Te	Climates: STr (SR+WR), Te
	$L5a + L5b < 0.200 * L$	$L5 < 0.200 * L$
	$L6 = 0$	$L6 = 0$
	$TSgc > 1900$	$TSgc > 2400$

表 3.13 トウモロコシ（温帯）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 105/120/135/150/165/180$	Climates: STr (SR+WR), Te	Climates: STr (SR+WR), Te
	$L5 < 0.667 * L$	$L5 < 0.667 * L$
	$L6 = 0$	$L6 = 0$
	$TSgc > 1700$	$TSgc > 1900$
	no permafrost	no permafrost

表 3.14 ジャガイモの生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 90/120/150/180$	Climates: B, Te, STr, Tr	Climates: B, Te, STr, Tr
	$L6a < 0.333 * L$	$L6a < 0.333 * L$
	$L6b < 0.167 * L$	$L6b < 0.167 * L$
	$L2 < 0.333 * L$	$L2 < 0.333 * L$
	$L1 = 0$	$L1 = 0$
	$L6 + L5 + L4 > 0.400 * L$	$L6 + L5 + L4 > 0.400 * L$
	$TSgc > 1200$	$TSgc > 1500$
	no permafrost	no permafrost

表 3.15 キャッサバの生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 12\text{months}$	Climates: Tr	Climates: Tr
	$L4 < 0.333 * L$	$L4 < 0.167 * L$
	$L1 < 0.667 * L$	$L1 < 0.667 * L$
	$L5 = L6 = 0$	$L5 = L6 = 0$
	$TSgc > 6500$	$TSgc > 7500$

表 3.16 サツマイモの生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 150/180/210$	Climates: Tr, STr (SR)	Climates: Tr, STr (SR)
	$L4 < 0.333 * L$	$L4 < 0.333 * L$
	$L5 = L6 = 0$	$L5 = L6 = 0$
	$L1 < 0.500 * L$	$L1 < 0.500 * L$
	$TSgc > 3500$	$TSgc > 4000$

表 3.17 ダイズ（熱帯）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 90/105/120$	Climates: Tr	Climates: Tr
	$L4a + L4b < 0.500 * L$	$L4 < 0.333 * L$
	$L5 = L6 = 0$	$L5 = L6 = 0$
	$TSgc > 2100$	$TSgc > 2400$

表 3.18 ダイズ（亜熱帯）の生長に必要な温度要件

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
$L = 105/120/135$	Climates:STr(SR+WR), Te	Climates:STr(SR+WR), Te
	$L5 = 0$	$L5 = 0$
	$L3 + L4 > 0.333 * L$	$L6 = 0$
	$L1 < 0.333 * L$	$L3 + L4 > 0.333 * L$
	$TSgc > 1700$	$L1 < 0.333 * L$
		$TSgc > 2000$

以上により計算された作物ごとの生長に必要な温度要件を満たす日数が表 3.3-表 3.18 に示す作物ごとの複数の生長期間（Growth Cycle）の全てを満たさない場合は栽培に向かないとして、そのグリッド上における収量を 0 とする。

3.3 水分・土壌環境の制約がない場合における作物収量の算定

作物の生長に関して、純バイオマス生成を光合成過程による総バイオマス生成と呼吸過程によるバイオマス損失の差と定義すると、バイオマス生成に関して一般的に次式で示すことができる。

$$B_n = B_g - R \quad (3.12)$$

ここに、 B_n ：純バイオマス生成（kg/ha）、 B_g ：総バイオマス生成（kg/ha）、 R ：呼吸損失（kg/ha）である。また、バイオマス生成速度に関しては次式であらわされる。

$$b_n = b_g - r \quad (3.13)$$

ここに、 b_n ：純バイオマス生成速度 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)、 b_g ：総バイオマス生成速度 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)、 r ：呼吸損失速度 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$) である。

作物が十分生長して、最も葉が地面を覆ったときに到達する純バイオマス生成速度の最大値を b_{nm} とすると、全体の生長サイクルにおける純生成速度の平均値は $0.5 \times b_{nm}$ であらわされる。その時、各作物が成熟して収穫に適するまでの期間、標準生長期間 N 日間での作物の純バイオマス生成 B_n は次式で示される。

$$B_n = 0.5b_{nm} \times N \quad (3.14)$$

なお、標準生長期間（植え付けから収穫までの合計日数）に関するデータは、Sacks *et al.* (2010)[77] を使用した。本データは 19 の作物種に対して水平解像度 5 分と 0.5 度メッシュで公開されており、本研究では外挿によって全球の各グリッドごとに標準生長期間が定義されている 0.5 度の水平解像度を持つデータを用いた。各グリッドにおける標準生長期間を表 3.19 に示す作物パラメータ [74] に記載されている生長期間にあてはめ、作物ごとに最も近い生長期間の値に位置する作物パラメータを適用することとした。 b_{gm} (b_{nm} が得られるときの b_g) を求めるには、葉面積当たりの光合成速度 P_m を用いる。表 3.19 より、十分な光を与えたときの P_m は、算定する作物種と、その生長期間中の日平均気温を用いて、決定することができる。標準作物、すなわち $P_m=20$ ($\text{kg ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$) で葉面積指数 (Leaf Area Index, LAI) LAI=5 の作物における、 b_{gm} は次式であらわされる。

$$b_{gm} = F \times b_0 + (1 - f) \times b_c \quad (3.15)$$

ここに、 F ：雲量 (%), b_0 ：曇日における標準作物の総バイオマス生成速度 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)、 b_c ：快晴時における標準作物の日総バイオマス生成速度 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$) である。De Wit ら (1965)[78] によって、 $P_m=20$ の環境下における b_c 、 b_0 は既知である。

P_m が 20 以上のとき、 b_{gm} は次式で示される。

$$b_{gm} = F(0.8 + 0.01P_m)b_0 + (1 - F)(0.5 + 0.025P_m)b_c \quad (3.16)$$

一方、 P_m が 20 より小さいときは次式となる。

$$b_{gm} = F(0.5 + 0.025P_m)b_0 + (1 - F)(0.05P_m)b_c \quad (3.17)$$

ただし、地表表面積あたりの葉面積を示す葉面積指数が 5 以上の作物はこの光合成の能力最大時の b_{gm} を用いてその作物の b_{gm} とすることが出来るが、LAI が 5 以下の作物に関しては図 3.3 によって示される割合をかけたものになる。つまり、LAI が 5 以上の時は葉

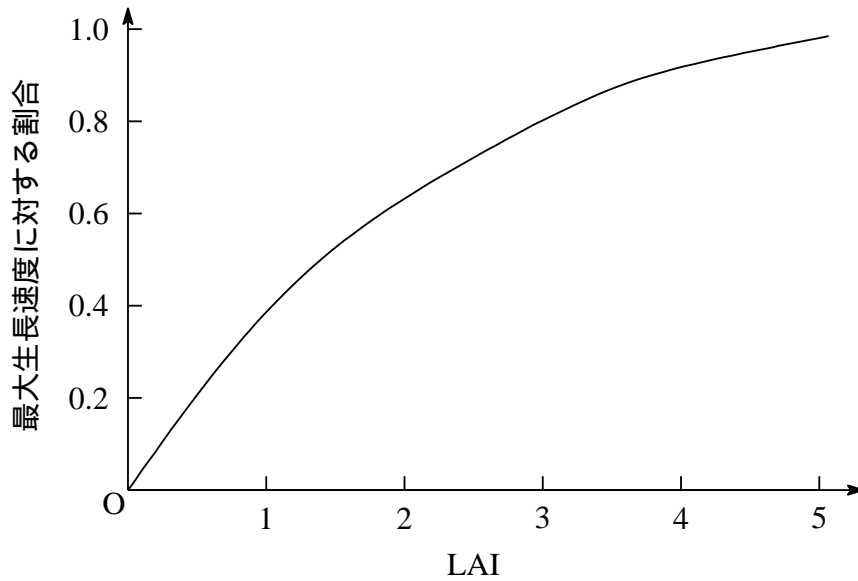


図 3.3 LAI と最大生長速度に対する割合

冠がほぼ完全に地面を覆うことになり，光合成に利用可能な太陽放射をすべて利用できるが，LAI が 5 未満の時には葉冠が地面を覆い切れずに光が漏れることになり，地表面積あたりの葉の最大の光合成能力が，地表面あたりの作物の最大光合成能力とはならないからである．

b_n が最大となるときの呼吸による損失速度 r_m は次式で示される．

$$r_m = kb_{gm} + c_t B_{nm} \quad (3.18)$$

ここに， k ：生長を行うためにエネルギーを得るための呼吸に比例する定数 (-)， c ：細胞維持のエネルギーを得るための呼吸に比例する定数 (-)， B_{nm} ：最大時での純バイオマス生成 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$) である．FAO(1998)[74]によると，すべての作物，温度において $k = 0.28$ である．また， c_t は温度に依存し，次式であらわされる．

$$c_t = \begin{cases} 0.0283(0.0044 + 0.0019T + 0.0010T^2) & \text{(鞘を持つ作物)} \\ 0.0108(0.0044 + 0.0019T + 0.0010T^2) & \text{(鞘を持たない作物)} \end{cases} \quad (3.19)$$

B_{nm} は，最終純バイオマスの半分であるから，標準作物生長期間 N 日の作物における純バイオマス生成 B_{nm} は次式で示される

$$B_{nm} = 0.25b_{nm} \times N \quad (3.20)$$

式 (3.18),(3.19),(3.20) より，

$$b_{nm} = 0.72b_{gm}/(1 + 0.25c_t N) \quad (3.21)$$

したがって、最終的に標準作物生长期間 N 日の作物における純バイオマス生成 B_n は、次式となる。

$$B_n = 0.36b_{gm}/(1/N + 0.25c_t) \quad (3.22)$$

ただし、LAI が 5 以下の時は図 3.3 の LAI に対して与えられる割合を式 (3.22) にかけたものが B_n となる。最終的に、温度・放射用件のみを考慮した作物の潜在収量 Y_p は次式となる。

$$Y_p = H_i \times B_n \quad (3.23)$$

ここに、 Y_p ：潜在収量 (kg ha^{-1})、 H_i ：収穫係数である。

表 3.19 バイオマスと収量の算定に必要な作物パラメータ

Crops	Growth cycle (GC)	Adapt-ability group	High Input		Intermediate Inputs		Low Inputs		Dependence of Rate of Leaf Photosynthesis(Pm) on Temperature(Deg C)									
			Hi	Max.LAI	Hi	Max.LAI	Hi	Max.LAI	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
Wheat(winter)	30+90days	C3/I	0.45	4.5	0.35	3.5	0.25	2.5	5	15	25	25	20	10	0	0	0	
Wheat (winter)	35+105 days	C3/I	0.45	5	0.35	3.8	0.25	2.5	5	15	25	25	20	10	0	0	0	
Wheat (winter)	40+120 days	C3/I	0.5	5.5	0.4	4	0.3	2.5	5	15	25	25	20	10	0	0	0	
Wheat (winter)	45+135 days	C3/I	0.5	5.5	0.4	4	0.3	2.5	5	15	25	25	20	10	0	0	0	
Wheat (spring)	105 days	C3/I	0.4	3.5	0.3	2.6	0.2	1.8	5	15	20	20	15	5	0	0	0	
Wheat (spring)	120 days	C3/I	0.4	4	0.3	3	0.2	2	5	15	20	20	15	5	0	0	0	
Wheat (spring)	135 days	C3/I	0.4	4.5	0.3	3.4	0.2	2.3	5	15	20	20	15	5	0	0	0	
Wheat (spring)	150 days	C3/I	0.4	5	0.3	3.8	0.2	2.5	5	15	20	20	15	5	0	0	0	
Wheat (sub-tropics)	105 days	C3/I	0.45	4	0.35	3	0.25	2	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
Wheat (sub-tropics)	120 days	C3/I	0.45	4.5	0.35	3.3	0.25	2	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
Wheat (sub-tropics)	135 days	C3/I	0.45	5	0.35	3.8	0.25	2.5	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
Wheat (sub-tropics)	150 days	C3/I	0.45	5	0.35	3.8	0.25	2.5	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
Wheat (tropics)	100 days	C3/I	0.4	3.5	0.3	2.6	0.2	1.8	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
Wheat (tropics)	130 days	C3/I	0.4	4.5	0.3	3.4	0.2	2.3	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
Wheat (tropics)	160 days	C3/I	0.4	5	0.3	3.8	0.2	2.5	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
Wheat (tropics)	190 days	C3/I	0.4	5	0.3	3.8	0.2	2.5	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
Japonica Rice (wetland)	105 days	C3/II	0.4	5	0.35	3.7	0.3	2.5	0	5	15	30	35	35	30	5	0	
Japonica Rice (wetland)	120 days	C3/II	0.4	5	0.35	4	0.3	2.5	0	5	15	30	35	35	30	5	0	
Japonica Rice (wetland)	135 days	C3/II	0.4	5.5	0.35	4.3	0.3	3	0	5	15	30	35	35	30	5	0	
Japonica Rice (wetland)	150 days	C3/II	0.4	6	0.35	4.5	0.3	3	0	5	15	30	35	35	30	5	0	
Indica Rice (wetland)	105 days	C3/II	0.45	5	0.38	3.8	0.3	2.5	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Indica Rice (wetland)	120 days	C3/II	0.45	5.5	0.38	4	0.3	2.5	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Indica Rice (wetland)	135 days	C3/II	0.45	6	0.38	4.5	0.3	3	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Indica Rice (wetland)	150 days	C3/II	0.45	6.5	0.38	4.8	0.3	3	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Rice (dryland)	105 days	C3/II	0.3	3.5	0.23	2.6	0.15	1.8	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Rice (dryland)	120 days	C3/II	0.3	4	0.23	3	0.15	2	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Rice (dryland)	135 days	C3/II	0.3	4.5	0.23	3.4	0.15	2.3	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Maize (grain) (lowland)	90 days	C4/III	0.4	3	0.3	2.3	0.2	1.5	0	0	5	45	65	65	65	45	5	
Maize (grain) (lowland)	105 days	C4/III	0.4	3.5	0.3	2.8	0.2	2	0	0	5	45	65	65	65	45	5	
Maize (grain) (lowland)	120 days	C4/III	0.45	4	0.35	3.3	0.25	2.5	0	0	5	45	65	65	65	45	5	
Maize (grain) (lowland)	135 days	C4/III	0.45	4.5	0.35	3.3	0.25	2.5	0	0	5	45	65	65	65	45	5	
Maize (grain) (highland)	105 days	C4/IV	0.35	3.5	0.25	2.5	0.15	1.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (grain) (highland)	180 days	C4/IV	0.35	4	0.27	3	0.2	2	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (grain) (highland)	300 days	C4/IV	0.35	4	0.27	3	0.2	2	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (grain) (sub-tropics)	105 days	C4/IV	0.4	3	0.3	2.3	0.2	1.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (grain) (sub-tropics)	120 days	C4/IV	0.4	3.5	0.3	2.5	0.2	2	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (grain) (sub-tropics)	135 days	C4/IV	0.45	4	0.33	3	0.2	2	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (grain) (sub-tropics)	150 days	C4/IV	0.45	4.5	0.33	3.5	0.2	2.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (grain) (sub-tropics)	165 days	C4/IV	0.45	5	0.35	3.8	0.25	2.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (grain) (sub-tropics)	180 days	C4/IV	0.45	5.5	0.35	4.3	0.25	3	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (silage)	105 days	C4/IV	0.6	6	0.5	4.5	0.4	3	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (silage)	120 days	C4/IV	0.6	6	0.5	4.5	0.4	3	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (silage)	135 days	C4/IV	0.6	6	0.5	4.5	0.4	3	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (silage)	150 days	C4/IV	0.65	6.5	0.55	5	0.45	3.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (silage)	165 days	C4/IV	0.65	6.5	0.55	5	0.45	3.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Maize (silage)	180 days	C4/IV	0.65	7	0.55	5.5	0.45	4	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Sorghum (lowland)	90 days	C4/III	0.35	3.5	0.25	2.5	0.15	1.5	0	0	5	45	65	65	65	45	5	
Sorghum (lowland)	105 days	C4/III	0.35	4	0.25	3	0.15	2	0	0	5	45	65	65	65	45	5	
Sorghum (lowland)	120 days	C4/III	0.35	4.5	0.25	3.3	0.15	2	0	0	5	45	65	65	65	45	5	
Sorghum (lowland)	135 days	C4/III	0.35	4.5	0.25	3.3	0.15	2	0	0	5	45	65	65	65	45	5	
Sorghum (highland)	105 days	C4/IV	0.2	3.5	0.16	2.5	0.12	1.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Sorghum (highland)	180 days	C4/IV	0.2	4	0.16	3	0.12	2	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
Sorghum (highland)	300 days	C4/IV	0.2	4	0.16	3	0.12	2	0	5	40	50	50	50	40	5	0	
White Potato	90 days	C3/I	0.6	3.5	0.45	2.8	0.3	2	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
White Potato	120 days	C3/I	0.6	4.5	0.45	3.2	0.3	2	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
White Potato	150 days	C3/I	0.6	5	0.45	3.7	0.3	2.5	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
White Potato	180 days	C3/I	0.6	5.5	0.45	4	0.3	2.5	5	15	25	25	20	15	5	0	0	
Cassava	* 365 days	C3/II	0.5	3	0.4	2.3	0.3	1.5	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Sweet Potato	120 days	C3/II	0.55	4	0.42	3	0.3	2	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Sweet Potato	150 days	C3/II	0.55	4	0.42	3	0.3	2	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Sweet Potato	180 days	C3/II	0.55	4.5	0.42	3.5	0.3	2.5	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Soybean (tropics)	90 days	C3/II	0.3	3	0.23	2.3	0.15	1.5	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Soybean (tropics)	105 days	C3/II	0.3	3.5	0.23	2.7	0.15	1.8	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Soybean (tropics)	120 days	C3/II	0.3	4	0.23	3	0.15	2	0	0	15	30	35	35	30	5	0	
Soybean (sub-tropics)	105 days	C3/II	0.3	3.5	0.23	2.7	0.15	1.8	0	5	15	30	35	35	30	5	0	
Soybean (sub-tropics)	120 days	C3/II	0.3	4	0.23	3	0.15	2	0	5	15	30	35	35	30	5	0	
Soybean (sub-tropics)	135 days	C3/II	0.3	4	0.23	3	0.15	2	0	5	15	30	35	35	30	5	0	

Note: lowland: 標高 1400m 未満, highland: 標高 1400m 以上

3.4 水分制約を考慮した収量の算定

3.4.1 作物蒸発散量の算定

前節で示した温度・放射要件のみしか考慮しなかった場合に加え，水分制限を考慮した作物収量を算定するため，まず，参考作物における蒸発散量 ET_0 に，作物の生長に関する係数 K_c を乗ずることにより作物ごとの蒸発散量を算定する．つまり，ある作物の蒸発散量は次式で定義される．

$$ET_a = K_c \times ET_0 \quad (3.24)$$

ここに， ET_a ：作物ごとの蒸発散量 (mm day^{-1})， K_c ：作物係数 (-)， ET_0 ：参考作物蒸発散 (mm day^{-1}) である．作物係数は，参考作物の蒸発散量を 1 とした場合のある作物の蒸発散との比として与えられ，作物種や作物の生育状態，土壤の水分量，湿度，風速等の気候条件によって異なる値を持つ． K_c は，利用可能な土中水分量に依存する水ストレス係数 K_s と作物の気孔からの水分放出である蒸散効率 K_{cb} の積と土壤からの蒸発効率 K_e の和であらわすことができ，次式で示される．

$$K_c = K_s K_{cb} + K_e \quad (3.25)$$

蒸散効率 K_{cb} は，作物種や作物の生長に伴い変化するため，本研究では作物の生長をその生長段階に応じて，それぞれ initial stage，vegetative stage，reproductive stage，maturation stage の 4 段階に分類した．以下に各生長期間について説明する．

- initial stage $K_{cb_{ini}}$
種が植えられ，土壤表面の約 10 % が作物によっておおわれるまでの期間．蒸散の効果は小さく，土壤からの蒸発の割合が大きい．
- vegetative stage
土壤表面が作物によって覆われる割合が全体の 10 % から 100 % に生長していくまでの期間．作物の生長にともない，作物の高さ，根の深さ，蒸散効率も増加し，この段階の最後に蒸散効率は最大値に達する．
- reproductive stage $K_{cb_{mid}}$
土壤が作物によって 100 % 覆われ，作物の高さ，根の深さ，蒸散効率が最大に保たれている期間．作物の蒸発散活動が最も活発な期間である．
- maturation stage $K_{cb_{end}}$
十分に生長した状態を始まりとする，収穫されるまでの期間．落ち葉等の影響を受け蒸散効率は最大値より減少する．

表 3.20 に作物の標準状態における $K_{cb_{ini}}$, $K_{cb_{mid}}$, $K_{cb_{end}}$, 作物種ごとの標準生長期間における各ステージの割合, 作物の最大となる根の深さ, 水不足係数, 最大の作物高さを示す. 表 3.21 に作物ごとの収穫減少係数を示す.

表 3.20 作物データ

Crop	$K_{cb_{ini}}$	$K_{cb_{mid}}$	$K_{cb_{end}}$	Length of Crop Stage (% of growth cycle)				Maximum Root Depth (m)	Depletion Fraction p_{table}	Maximum Crop Height (m)
				d1	d2	d3	d4			
冬コムギ	0.15	1.10	0.15-0.3	10	20	45	25	1.0-1.5	0.55	1
春コムギ	0.15-0.5	1.10	0.15-0.3	10	30	35	25	1.5-1.8	0.55	1
コメ	1.00	1.15	0.70-0.45	10	30	30	30	0.5-1.0	0.20	1
トウモロコシ	0.15	1.15	0.50,0.15	15	30	35	20	1.0-1.7	0.55	2
ソルガム	0.15	0.95-1.05	0.35	10	25	40	25	1.0-2.0	0.55	1-2
ジャガイモ	0.15	1.10	0.65	20	25	35	20	0.4-0.6	0.35	0.6
サツマイモ	0.15	1.10	0.55	20	25	35	20	1.0-1.5	0.65	0.4
キャッサバ - year 1	0.15	0.70	0.20					0.5-0.8	0.35	1.0
キャッサバ - year 2	0.15	1.00	0.45					0.7-1.0	0.40	1.5
ダイズ	0.15	1.10	0.30	15	20	45	20	0.6-1.3	0.50	0.5-1.0

表 3.21 収穫減少係数

作物名	収穫減少係数				
	k_1^y	k_2^y	k_3^y	k_4^y	k_0^y
冬コムギ	0.20	0.60	0.75	0.50	1.05
春コムギ	0.20	0.65	0.80	0.55	1.15
コメ (灌漑)	1.00	2.00	2.50	1.00	2.00
コメ (乾燥地)	0.40	0.90	1.50	0.50	1.25
トウモロコシ	0.40	0.90	1.50	0.50	1.25
ソルガム	0.20	0.60	0.90	0.50	0.90
ジャガイモ	0.50	0.80	0.80	0.70	1.10
サツマイモ	0.50	0.80	0.80	0.70	1.00
キャッサバ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ダイズ	0.20	0.80	1.00	0.80	0.85

蒸散効率 K_{cb} は, 表 3.20 より, その地点における風速と最低湿度に応じて次式で調整される.

$$K_{cb} = K_{cb(tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (3.26)$$

ここに, K_{cb} : 補正後の蒸散効率 (-), $K_{cb(tab)} := K_{cb_{ini}}$ or $K_{cb_{mid}}$, u_2 : 高度 2m における風速 (m s^{-1}), RH_{min} : 最低湿度 (%), h : 作物の最大高さである. 次に, initial,

reproductive, maturation の各ステージにおける蒸散効率 K_{cb} 値を算定する．

- initial stage

$$K_{cb} = K_{cb_{ini}} \quad (3.27)$$

- reproductive stage

$$K_{cb} = K_{cb_{mid}} \quad (3.28)$$

- vegetative stage 又は maturation stage

$$K_{cb_i} = K_{cb_{prev}} + \left[\frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{cb_{next}} - K_{cb_{prev}}) \quad (3.29)$$

ここに, K_{cb_i} : i 日における K_{cb} 値, L_{stage} : 各ステージにおける期間の長さ, $\sum(L_{prev})$: 前のステージまでの期間の長さの総和である．蒸散効率 K_e は, 次式で示される．

$$K_e = \min(K_r(K_{c_{max}} - K_{cb}), f_{ew} \times K_{c_{max}}) \quad (3.30)$$

ここで, K_e : 蒸散係数 (-), K_r : 土壌表層からの蒸発により水分が減少する割合 (-), $K_{c_{max}}$: 最大作物係数, f_{ew} : 作物がないところでの土壌が湿っている面積率である． $K_{c_{max}}$ は, 生長期間における K_c の最大値で, 次式で示される．

$$K_{c_{max}} = \max \left(\left\{ 1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right) \quad (3.31)$$

また, f_{ew} は, 次式で与えられる．

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (3.32)$$

ここに, f_c : 作物によって土壌が覆われている割合 (-), f_w : 降雨や灌漑によって湿っている土壌の割合 (-) である． f_c は次式で与えられる．

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{c_{min}}}{K_{c_{max}} - K_{c_{min}}} \right)^{(1+0.5h)} \quad (3.33)$$

$K_{c_{min}}$ は, 乾燥して荒れた土壌での作物効率と定義され, 本研究では initial stage における K_{cb} 値を使用する． f_w は, 本来, 灌漑の種類によってその値は異なるとされている [74] が, 本研究では降水の場合は 1, Döll *et al.* (2000,2002), Siebert *et al.* (2005)[79][80][119] の灌漑マップのうち先進国の灌漑エリアでは 1, 途上国では 0.5 を一律に採用した．なお,

先進国と途上国による分類は世界銀行の定義による [83]。また，土壌表層からの蒸発による水分が減少する割合（蒸発減少係数）は次式によって与えられる。

$$K_r = \begin{cases} \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} & D_{e,i-1} > REW \\ 1 & D_{e,i-1} \leq REW \end{cases} \quad (3.34)$$

ここに， $D_{e,i-1}$ ：前日における表層からの累計蒸発深さ（mm）， TEW ： K_r が 0 に達するまでの蒸発可能水分量の合計（mm）， REW ： $K_r = 1$ の時における蒸発可能水分量の合計（mm）である。

大雨や灌漑後の表層における土中水分量は野外容水量であり，蒸発によって使われる水の量はゼロである仮定される。乾燥プロセスの段階では，土の表面は湿ったままで，大気と接触することによる土からの蒸発は，土の表面におけるエネルギー効率のみによって制約される最大の比率で生じると仮定することができる。この段階では， $K_r = 1$ であり，この乾燥段階の終わりにおける累計の蒸発水分量が REW である。つまり，乾燥段階において表層から制限なしに蒸発することができる最大の水分量のことを言う。次の段階，つまり $D_e > REW$ では，土の表面は乾いており，表層からの蒸発は，表層部分に残っている水の量に比例する。最終的に，乾燥プロセスの最初から K_r が 0 となったときまでの累計蒸発水分量が TEW である。 TEW ， REW は野外容水量やしおれ点での土壌水分量などに依存し，一律の値をとらないが，本研究では表 3.22 に示すように FAO のガイドライン [74] に基づき各土壌タイプについて一律に設定した。しおれ点とは，土壌水分がある限界点に達すると，たとえ植物を水蒸気飽和の空気中においても，しおれは永久に回復しなくなる限界点のことを言う。なお，全球の土壌分類データは FAO(1995)[84] の世界土壌図を用いた。

表 3.22 土壌タイプと TEW , REW

土壌タイプ	土壌特性 ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$)	蒸発可能水分量	
		REW	TEW
Sand	0.08	4.5	9.0
Loamy sand	0.09	6.0	11.5
Sandy loam	0.13	8.0	17.5
Loam	0.155	9.0	19.0
Silt loam	0.16	9.5	21.5
Silt	0.19	9.5	24.5
Silt clay loam	0.155	9.5	24.5
Silty clay	0.16	10.0	25.0
Clay	0.16	10.0	25.5

θ_{FC} : 野外容水量での土中水分量 (m^3m^{-3})

θ_{WP} : しおれ点での土中水分量 (m^3m^{-3})

さらに、 i 日における土壌表層からの累計蒸発量 D_e は、次式であらわされる。

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (3.35)$$

ここに、 $D_{e,i}$: i 日における累計蒸発量 (mm), RO_i : i 日における土壌表面からの流出量 (mm), $D_{e,i-1}$: 前日における累計蒸発量 (mm), $T_{ew,i}$: i 日での、作物がなく湿った土壌表面部分からの蒸散量 (mm), $DP_{e,i}$: i 日での表層から下層への浸透量 (mm), I_i : 灌漑した水量 (mm), E_i : i 日における蒸発量 (mm) である。灌漑水量 I_i は、灌漑必要水量算定モデルからの出力値を使用する。蒸発量 E_i は式 (3.30) の K_e と参考作物蒸発散量の積で求められる。

$$E_i = K_e \times ET_0 \quad (3.36)$$

T_{ew} については、蒸発土壌表面からの蒸散量は小さく無視できるとし、本研究では 0 とする。表層から深層への浸透量 $DP_{e,i}$ は、次式で示される。

$$DP_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_w} - D_{e,i-1} \quad DP_{e,i} \geq 0 \quad (3.37)$$

ここまでで、 K_{cb} , K_e を導出した。次に、 K_s の定式化と灌漑必要水量 I_i の算定手法を述べる。

3.4.2 土壌中の水収支

ここでは、作物蒸発散や気候条件、前日の土壌の水分量、作物の生育状況を入力として、土壌中の水収支式に基づいて、土壌中の水分量の算定を行い、作物を生長させるために必要な灌漑水量を日別で算定する。土壌水分の有用性は、作物が生長するための水分を保有するための土壌能力に依存する。豪雨や灌漑の結果、土中水分が飽和水量に達すれば土や水は流出する。土壌への水分の供給がなくなれば、根群域にある水分量は、作物による水分の吸収によって減少していく。水分の吸収が進行するにつれ、土中に残っている水分は、土の粒子に保たれ、作物が吸収していくことは困難になる。最終的に、作物が土中に残る水分を利用することができなくなり、しおれ点に達した時、作物からの水分の吸収力はゼロになる。飽和水量を超える水分量は重力により、徐々に流出し、また、作物の根はしおれ点より下にある水分を吸収することができない。このため、根群域における土壌中の利用可能な全水分量は、飽和水量としおれ点での水分量との差であらわされる。

$$TAW = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (3.38)$$

ここに、 TAW : 根群域における総利用可能土中水分量 (mm), Z_r : 根の深さ (m) で本研究では標準生長期間中において最大の根の深さ (表 3.20) まで線形に生長すると仮定した、さらに、作物が根群域から利用できる土中水分量 RAW (mm) は次式で示される。

$$RAW = pTAW \quad (3.39)$$

ここに、 p : TAW に占める RAW の割合で、土中水分量の不足状態における耐性を示す係数であり、次式で示される。

$$p = p_{table} + 0.04(5 - ET_a) \quad (3.40)$$

作物別の ET_0 が 5mm の際の p 値 (p_{table}) を表 3.20 に示す。 p が大きい作物は、多少土壌が乾燥していても、土壌中から水分を得る能力が高い作物だといえる。逆に、 p が小さい作物は、乾燥に弱い作物といえる。さらに、水ストレス係数 K_s は次式で示される。

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \quad (3.41)$$

一方、根群域での土中水分消失量は下式によって求められる。

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{a,i} + DP_i \quad (3.42)$$

ここに、 $D_{r,i}$: i 日における根群域での土中水分消失量 (mm) , $D_{r,i-1}$: $i-1$ 日における根群域での土中水分消失量 (mm) , P_i : i 日における降水量 (mm) , RO_i : i 日における流出量 (mm) , I_i : i 日の灌漑量 (mm) , CR_i : i 日における毛管現象による上昇量 (mm) , $ET_{a,i}$: i 日の蒸発散量 (mm) , DP_i : i 日における深層への浸透量 (mm) である。 CR_i の算定については、FAO(1977)[82] の手法に従う。

流出量 RO_i は、湿潤な時期において、土壌中水分量が土壌における最大水分量を超えると、土壌からの流出があり、土壌水分量が最大水分量に達しない時には流出はなく、水分はすべて土壌に貯留されるとし、以下の式で示される。

$$RO_i = \begin{cases} 0 & (P_i - R_{s,i} < PET_i) \\ 0 & (P_i - R_s \geq PET_i, SM_i < FC) \\ \max(SM_i + P_i + R_{s,i} - PET_i - FC, 0) & (P_i - R_{s,i} \geq PET_i, SM_i \geq FC) \end{cases} \quad (3.43)$$

ここに $R_{s,i}$: i 日における融雪による水分補充量 (mm) , PET_i : i 日における可能蒸発散量 (mm) で、導出は Penman/FAO24 式 [82] による。 SM_i : i 日における土中水分量 (mm) , FC : 野外容水量 (mm) で、Reynolds *et al.* (2000) が作成したデータを用いる [85]。また、土壌水分量 SM は、降水量が可能蒸発散を上回るとき、最大水分量まで増加し、可能蒸発散量を下回るとき、水分欠損量の関数になるとした。

$$\frac{dSM}{dt} = \begin{cases} P_i - R_{s,i} - PET_i & P_i - R_{s,i} \geq PET_i \\ -a \times SM_i(PET_i - P_i + R_{s,i}) & P_i - R_{s,i} < PET_i \end{cases} \quad (3.44)$$

ここに、係数 a は FC に依存する水分継続関数の傾きで、次式で示される。

$$a = \frac{\ln(FC)}{(1.1282FC)^{1.2756}} \quad (3.45)$$

融雪による水分補充量 R_s と積雪量 SP については、日平均気温が -1.0°C 以下の場合には降水がすべて降雪になるとし、また、融雪は日平均気温が -1.0°C 超で起こるとした。

$$\begin{cases} dSP/dt = P_i, R_{s,i} = 0 & T \leq -1.0 \\ dSP/dt = P_i, R_{s,i} = K \{T - (-1.0)\} & T > -1.0, SP > 0 \\ dSP/dt = R_{s,i} = 0 & T > -1.0, SP = 0 \end{cases} \quad (3.46)$$

ここで、 K は気温 1°C あたりに融雪する割合を示し、風速や放射などの融雪に影響を及ぼす気候要因により決定される。Vorosmarty *et al.* (1989)[86] は、 K について、 $2 \leq K \leq 7$ ($\text{mm day}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) としており、本研究では、 $K=4.5$ ($\text{mm day}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) とした。

土壌水分量が TAW を超えるときに深層への浸透が起こる。深部浸透による根群域の水分消失量 $DP_{r,i}$ (mm) は、次式で示される。

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ET_{a,i} - D_{r,i-1} \quad \text{ただし} \quad DP_i \geq 0 \quad (3.47)$$

適切な灌漑という観点から考えると、過剰に水分を加えると深層への浸透が起こる。一方で、作物の生長が阻害されないには、式 (3.42) より得られる D_r が、式 (3.39) で求められる RAW を上回らないことが必要である。本研究では、農作物の生長に有効利用される水量と灌漑必要水量の比である灌漑水有効利用係数 I_{eff} を使い、土壌に過剰な水を供給しないということを想定して、作物の生長期間中における灌漑量 I を、次式のように設定した。

$$I_i = \begin{cases} D_{r,i}/I_{eff} & D_{r,i} > RAW \\ 0 & D_{r,i} \leq RAW \end{cases} \quad (3.48)$$

ここに、 I_{eff} : 灌漑水有効利用係数である。灌漑水有効利用係数は、各国の灌漑設備によって値が異なり、そのデータの収集は容易ではないため、本研究では、Döll *et al.*(2002)[80] の灌漑効率データを用いた。

以上のプロセスにより、日単位で灌漑必要水量を算定する。本研究では、天水栽培と灌漑を利用した栽培それぞれについて収量の計算を行う。なお、二期作や二毛作の扱いは、Portmann *et al.* (2010)[87] による各グリッド上における農事暦データを用いた。また、天水栽培では、 I_i は常にゼロであるとして、計算を実施する。さらに、 I_i が、作物栽培に供給可能な水資源量（ここでは、流出量とする）を超過した場合は、そのグリッド上における水資源のみでは作物の栽培がまかなえない、つまり作物に水ストレスが生じている状態として生長期間に数えないこととした。また、作物の生長期間外において、灌漑はないも

のと仮定した。さらに，Döll *et al.*(2002)[80] による灌漑が行われているグリッド以外の点では灌漑は行われないものとする。

本研究では，温度条件とともに水分条件を加えた，作物の生長に適した気温と水分入手性を兼ね備えた期間を定義する。Sacks *et al.*(2010)[77] で示されている各作物ごとの植付け日の30日前の日から計算をスタートし，各日にちごとに生長期間を満たしているか判定し，その合計日数が標準生育期間を満たしているか調べた。同様に，植え付け日の30日前から30日後までの各日を栽培の始まりとして計算を実施し，最も長い生長期間を得ることができた日をその作物の本研究における植え付け日であるとした。また，標準生育期間は植付け期と収穫期に分け [77]，生長期間が植え付け期を満たさない場合は収穫に必要な温度・放射・水分の要件を満たしていないグリッドであるとした。なお，下記の2つの条件を満たした場合は生長期間として算定せず，また，作物がしおれ始め（しおれ点に到達）てから3日間連続で利用可能な土中水分を確保できない場合は，しおれが回復しないとし生育期間はそこで終了とする。

- $RAW < D_r \leq TAW$

不足している土中の水分量が，その土壌においてすぐに利用可能な水の量を上回っており，作物に水ストレスが生じている状態

- $ET_a < 0.5 ET_0$

作物ごとの蒸発散量が，参考作物蒸発散量の半分を満たさない。これは，作物が発芽から結実までの生長・形態変化をしていく中で必要と思われるだけの作物ごとの蒸発散量とその頻度が得られる確率を考慮して用いられる経験的な条件

次に，最終的に温度・放射・水分条件を考慮した作物収量を算定する。上記までで決定された各グリッドにおける作物の植え付け日から収穫日（生育期間）までを4段階の生長ステージごとにわけ（表 3.20）。各ステージごとの参考作物蒸発散の和 TET_{0k} は次式で与えられる。

$$TET_{0k} = \sum K_{cbj} ET_{0j} \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (3.49)$$

さらに全生長ステージにおける参考作物蒸発散の和 TET_0 を次式で定義する。

$$TET_0 = \sum_{j=1}^{d1+d2+d3+d4} K_{cbj} ET_{0j} \quad (3.50)$$

同様に，各生長ステージごとの実蒸発散量の和は次式で与えられる。

$$TET_{ak} = \sum ET_{aj} \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (3.51)$$

同様に，全生長ステージにおける実蒸発散量の和は次式で与えられる．

$$TET_a = \sum_{j=1}^{d1+d2+d3+d4} K_{cbj} ET_{a_j} \quad (3.52)$$

次に，乗数 f_0, f_1 を次式で定義する．

$$f_0 = 1 - k_0^y \left(1 - \frac{TET_a}{TET_0} \right) \quad (3.53)$$

$$f_1 = \prod_{k=1}^4 \left(1 - k_k^y \left(1 - \frac{TET_{a_k}}{TET_{0_k}} \right) \right) \quad (3.54)$$

ここに k_0^y, k_k^y は表 3.21 に示す収穫減少係数である．温度・放射および水分条件を満たす作物ごとの生長期間 GP が標準生長期間 N より短い場合，作物は完全に生長できずに収穫量は減少するはずである．したがって，最終的に水分制限下での作物収量 Y_a は次式で示される．

$$Y_a = \min(f_0, f_1) Y_p \times GP/N \quad (3.55)$$

3.5 土壌による制限

前節までで，土壌による制約がない条件下，つまり気温と水分による制約下における作物収量を求めた．ここでは，実際に予期される収量を算定・検討するために，土壌環境による制限を行う．

本研究では，土壌単位と土壌のフェイズによる制約に，世界デジタル土壌図 (FAO/UNESCO, 1995) [84] を用いる．本データは世界全域の土壌を生成，形態，分布に関する現在の知識と，食料生産のための土壌資源の意義に基づいて 26 種類の土壌単位とそれを細分化した 106 の単位に分類した水平解像度 5 分メッシュのラスターデータマップである．

3.5.1 土壌単位による制限

106 の土壌単位による制約を行う．各土壌単位の性質に関する，各作物との相性は過去に多くの研究がなされている．本研究では，表に示す Fischer *et al.* (2002)[2] の研究結果を用いることとする．表 3.23, 表 3.24 に記述されている数字 1 は，適地をあらわすので制限なし，2 は最適ではないが耕作は可能であることを意味するので 0.5 を乗ずる．3 は，50 % が適地で残りの 50 % が耕作可であるので，0.75 を乗ずる．4 は適地でないので 0 を乗ずる．5 は，50 % が栽培適地で 50 % が栽培に適さない土地なので 0.5 を乗ずる．6 の

場合は、50 %が耕作可能で50 %が適地でないので、0.25 を乗ずるものとする。なお表中の略字は、wh: コムギ、wr: コメ(灌漑)、dr: コメ(乾燥地)、mz: トウモロコシ、sg: ソルガム、wp: ジャガイモ、ca: キャッサバ、sp: サツマイモ、sy: ダイズである。

表 3.23 土壌単位による制約 (天水栽培)

Soil		Crops									
Unit	Code	wh	wr	dr	mz	sg	wp	ca	sp	sy	
G	1	6	1	6	4	6	4	4	4	4	
Ge	2	6	1	6	4	6	4	4	4	4	
Gc	3	6	1	6	4	6	4	4	4	4	
Gd	4	6	1	6	4	6	4	4	4	4	
Gm	5	6	1	6	4	6	4	4	4	4	
Gh	6	6	1	6	4	6	4	4	4	4	
Gp	7	4	6	4	4	4	4	4	4	4	
Gx	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
R	9	1	2	1	1	1	1	1	1	1	
Re	10	1	2	1	1	1	1	1	1	1	
Rc	11	1	3	3	3	1	2	6	3	3	
Rd	12	1	2	1	1	1	1	1	1	1	
Rx	13	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
I	14	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Q	15	6	4	4	2	2	3	2	6	2	
Qc	16	6	4	4	2	2	3	2	6	2	
Ql	17	6	4	4	2	2	3	2	6	2	
Qf	18	4	4	4	6	6	6	6	6	6	
Qa	19	4	4	4	4	4	4	6	4	4	
E	20	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
U	21	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
T	22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
To	23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Tm	24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Th	25	2	3	2	3	3	3	3	3	3	
Tv	26	4	4	4	4	6	6	2	6	4	
V	27	1	1	4	1	1	2	2	2	3	
Vp	28	1	1	4	1	1	2	2	2	3	
Vc	29	1	1	4	1	1	2	2	2	3	
Z	30	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Zo	31	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Zm	32	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Zt	33	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Zg	34	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
S	35	6	4	4	4	4	4	4	4	4	
So	36	6	4	4	4	4	4	4	4	4	
Sm	37	6	4	4	4	6	4	4	4	4	
Sg	38	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Y	39	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Yh	40	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Yk	41	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Yy	42	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Yl	43	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Yt	44	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
X	45	1	4	4	1	1	4	4	4	2	
Xh	46	1	4	4	1	1	4	4	4	2	
Xk	47	1	4	4	3	1	4	4	4	3	
Xy	48	6	4	4	4	6	4	4	4	4	
Xl	49	1	4	4	1	1	4	4	4	1	
K	50	1	2	4	1	1	1	6	1	1	
Kh	51	1	2	4	1	1	1	6	1	1	
Kk	52	1	3	4	3	1	2	6	3	3	
Kl	53	1	1	4	1	1	1	2	1	1	
C	54	1	2	4	1	1	1	6	1	1	
Ch	55	1	2	4	1	1	1	6	1	1	
Ck	56	1	3	4	3	1	2	6	3	3	
Cl	57	1	1	4	1	1	1	6	1	1	
Cg	58	1	2	4	1	1	1	2	1	1	
H	59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Hh	60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Hc	61	1	3	3	3	1	2	6	3	3	
Hl	62	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Hg	63	6	1	1	6	6	4	4	6	6	
M	64	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Mo	65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Mg	66	6	1	1	6	6	4	4	6	3	
B	67	1	1	1	1	1	1	2	1	1	
Be	68	1	1	1	1	1	1	2	1	1	
Bd	69	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Bh	70	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Bg	71	1	1	1	1	1	2	2	1	1	
Bx	72	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Bk	73	1	3	3	3	1	2	6	3	3	
Bc	74	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Bv	75	1	1	1	1	1	2	2	2	3	
Bf	76	2	6	2	2	2	6	6	6	2	
L	77	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Lo	78	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Lc	79	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Lk	80	1	3	3	3	1	2	2	3	3	
Lv	81	1	1	3	1	1	2	2	2	3	
Lf	82	3	6	3	3	3	6	6	6	3	
La	83	1	2	1	1	1	2	1	2	1	
Lp	84	6	2	6	6	6	6	6	6	6	
Lg	85	6	1	6	6	6	6	4	6	6	
D	86	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
De	87	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dd	88	2	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dg	89	6	1	6	6	6	4	6	4	6	
P	90	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Po	91	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Pl	92	2	4	2	2	2	3	2	2	2	
Pf	93	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Ph	94	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Pp	95	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Pg	96	4	2	2	4	4	4	4	4	4	
W	97	2	1	2	2	2	2	6	2	2	
We	98	2	1	2	2	2	2	6	2	2	
Wd	99	6	1	6	6	6	6	6	6	6	
Wm	100	2	1	2	2	2	2	6	2	2	
Wh	101	6	1	2	2	6	6	6	6	2	
Ws	102	4	6	6	4	4	4	4	4	4	
Wx	103	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
A	104	3	1	1	3	1	3	1	3	3	
Ao	105	3	1	1	3	1	3	1	3	3	
Af	106	3	6	1	3	1	3	1	3	3	
Ah	107	3	1	1	3	1	3	1	3	3	
Ap	108	6	3	5	6	5	6	5	6	6	
Ag	109	4	1	4	4	4	4	4	4	4	
N	110	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Ne	111	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Nd	112	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Nh	113	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
F	114	2	2	1	2	3	2	3	2	2	
Fo	115	2	2	1	2	3	2	3	2	2	
Fx	116	2	2	1	2	3	2	3	2	2	
Fr	117	3	3	1	3	1	3	1	3	3	
Fh	118	3	3	1	3	1	3	1	3	3	
Fa	119	4	4	6	6	2	4	6	6	6	
Fp	120	6	2	5	6	6	6	6	6	6	
O	121	4	6	4	4	4	4	4	4	4	
Oe	122	4	6	4	4	4	4	4	4	4	
Od	123	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Ox	124	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
IA	125	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
IB	126	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
IC	127	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
ID	128	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
IE	129	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
IF	130	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
J	146	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Je	147	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Jc	148	1	3	3	3	1	3	3	3	3	
Jd	149	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Jt	150	4	6	4	4	4	4	4	4	4	

Note: 1 = 100% S1, 2 = 100% S2, 3 = 50% S1, 50% S2,
4 = 100% NS, 5 = 50% S1 50% NS, 6 = 50% S2, 50% NS

表 3.24 土壌単位による制約（灌漑）

Soil		Crops									
Unit	Text.	Code	wh	wr	dr	mz	sg	wp	ca	sp	sy
R	1	9	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Re	1	10	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Rc	1	11	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Rd	1	12	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Rx	1	13	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Q	all	15	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Qc	all	16	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Ql	all	17	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Qf	all	18	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Qa	all	19	4	4	4	4	4	4	4	4	4
E	1	20	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Tv	all	26	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Yy	all	42	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Yl	all	43	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Xy	all	48	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Xl	all	49	4	4	4	4	4	4	4	4	4
K	1	50	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Kh	1	51	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Kk	all	52	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Kl	all	53	4	4	4	4	4	4	4	4	4
C	1	54	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Ch	1	55	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Ck	all	56	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cl	all	57	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cg	1	58	1	3	1	1	1	1	1	1	1
H	1	59	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Hh	1	60	1	3	1	1	1	1	1	1	1
He	1	61	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Hl	1	62	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Hg	1	63	1	3	1	1	1	1	1	1	1
M	1	64	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Mo	1	65	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Mg	1	66	1	3	1	1	1	1	1	1	1
B	1	67	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Be	1	68	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Bd	1	69	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Bh	1	70	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Bg	1	71	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Bx	1	72	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Bk	all	73	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Bc	1	74	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Bv	1	75	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Bf	1	76	1	3	1	1	1	1	1	1	1
D	1	86	1	3	1	1	1	1	1	1	1
De	1	87	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Dd	1	88	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Dg	1	89	1	3	1	1	1	1	1	1	1
P	all	90	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Po	all	91	4	4	4	4	4	4	4	4	4
all	all	92	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Pf	all	93	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Ph	all	94	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Pp	all	95	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Pg	all	96	4	4	4	4	4	4	4	4	4
A	all	104	3	1	1	3	1	3	1	3	3
Ao	all	105	3	1	1	3	1	3	1	3	3
Af	all	106	3	6	1	3	1	3	1	3	3
Ah	all	107	3	1	1	3	1	3	1	3	3
Ap	all	108	6	3	5	6	5	6	5	6	6
Ag	all	109	4	1	4	4	4	4	4	4	4
N	all	110	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Ne	all	111	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Nd	all	112	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Nh	all	113	3	2	3	3	3	3	3	3	3
F	all	114	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Fo	all	115	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Fx	all	116	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Fr	all	117	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Fh	all	118	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Fa	all	119	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Fp	all	120	3	2	3	3	3	3	3	3	3
J	1	146	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Je	1	147	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Jc	1	148	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Jd	1	149	1	3	1	1	1	1	1	1	1
Jt	1	150	1	3	1	1	1	1	1	1	1

Note: 1 = 100% S1, 2 = 100% S2, 3 = 50% S1, 50% S2,

4 = 100% NS, 5 = 50% S1 50% NS, 6 = 50% S2, 50% NS

3.5.2 土壌フェイズによる制限

土壌フェイズは、土地利用やその管理において重要なパラメータとなるが、土壌単位の分類では判定基準とならなかった特徴に基づいた副分類である。世界土壌図では、土壌のフェイズを stony, lithic, petric, petrocalcic, petrogypsic, petroferric, phreatic, fragipan, duripan, saline, sodic, shifting, rock deb, outcrops, dunes, salt/fls, lakes, ice caps の 18 種類に分類している。この情報は、マップ区域面積内の支配土壌単位にのみ与えられる。本研究では、その各々に対応した作物別の割引率を表 3.25, 表 3.26 に示すルールを用いて適用する。なお、表中の数字に対応して乗ずる制約係数の値は土壌単位の場合と同じルール

を適用する。

表 3.25 土壌フェイズによる制約条件（天水栽培）

Soil Phase	Crops									
	wh	wr	dr	mz	sg	wp	ca	sp	sy	
STONY	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
LITHIC	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
PETRIC	3	1	6	1	1	1	3	3	3	3
PETROCALCIC	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6
PETROGYPSIC	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6
PETROFERRIC	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
PHREATIC	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FRAGIPAN	8	3	3	3	3	3	3	3	3	3
DURIPAN	9	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SALINE	10	6	4	4	6	6	4	4	4	4
SODIC	11	3	3	4	3	3	4	4	4	4
SHIFTING	12	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ROCK DEB	13	4	4	4	4	4	4	4	4	4
OUTCROPS	14	4	4	4	4	4	4	4	4	4
DUNES	15	4	4	4	4	4	4	4	4	4
SALT/FLS	16	4	4	4	4	4	4	4	4	4
LAKES	17	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ICE CAPS	18	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Note: 1 = 100% S1, 2 = 100% S2, 3 = 50% S1 and 50% S2, 4 = 100% NS,
5 = 50% S1 and 50% NS, 6 = 50% S2 and 50% NS

表 3.26 土壌フェイズによる制約条件（灌漑）

Soil Phase	Crops									
	wh	wr	dr	mz	sg	wp	ca	sp	sy	
STONY	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
LITHIC	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
PETRIC	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6
PETROCALCIC	4	6	2	6	6	6	6	6	6	6
PETROGYPSIC	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
PETROFERRIC	6	6	2	6	6	6	6	6	6	6
PHREATIC	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FRAGIPAN	8	6	2	6	6	6	6	6	6	6
DURIPAN	9	6	2	6	6	6	6	6	6	6
SALINE	10	6	4	4	6	6	4	4	4	4
SODIC	11	2	3	4	2	2	4	4	4	4
SHIFTING	12	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ROCK DEB	13	4	4	4	4	4	4	4	4	4
OUTCROPS	14	4	4	4	4	4	4	4	4	4
DUNES	15	4	4	4	4	4	4	4	4	4
SALT/FLS	16	4	4	4	4	4	4	4	4	4
LAKES	17	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ICE CAPS	18	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Note : 1 = 100% S1, 2 = 100% S2, 3 = 50% S1 and 50% S2, 4 = 100% NS,
5 = 50% S1 and 50% NS, 6 = 50% S2 and 50% NS

3.5.3 土性による制限

土性は土（2ミクロン以下）、シルト（2-50ミクロン）、砂（50-2000ミクロン）の比率によって分類され、他の性質が組み合わさって、土壌構造、粘度、間隙率、陽イオン交換能力に直接的に影響を与える。本研究では土壌単位とともに記載されている土性に関するデータを用いて、図3.4に示す各グリッドにおける制約乗数を適用する。

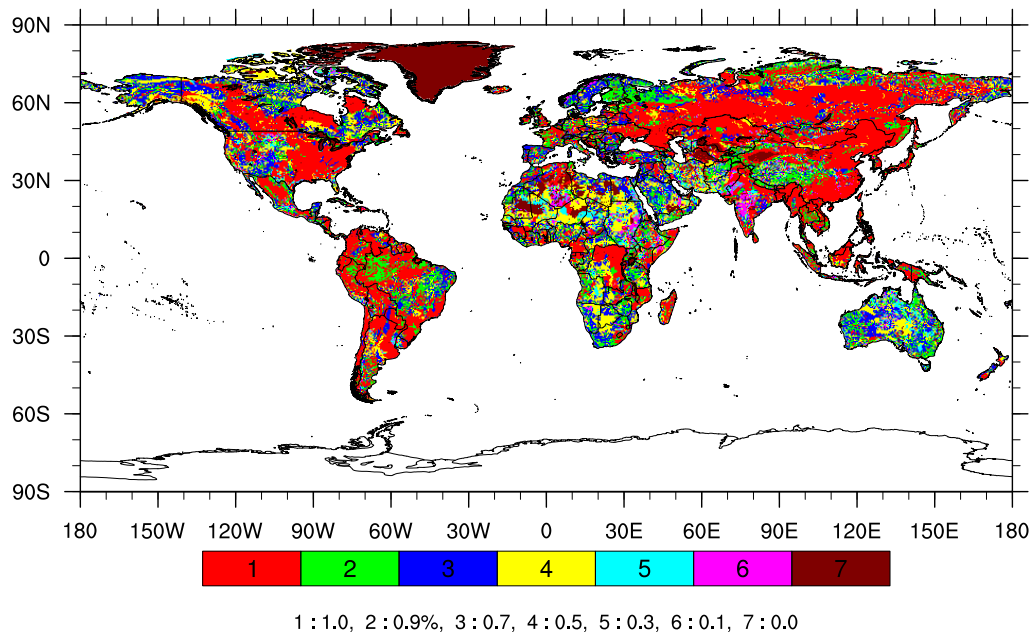


図3.4 土性に関する制約条件

3.5.4 傾斜による制限

本研究では、標高データに GTOPO30[88] を使用し、傾斜を図3.5に示す7段階に分類する。傾斜の算定手法は、Kircho(1973, 1991)[89][90]による微分幾何学の原則を使って計算した。傾斜は作物の栽培方法や排水、水の表面流出、土壌侵食、農作業のしやすさなどに大きな影響を与える。さらに、土壌侵食や作物・土壌管理は降雨量と降雨強度に大きく依存することから、本研究では、傾斜と降雨強度の両方を考慮に入れ、制限を加える。年降雨量と降雨強度の関係を説明するために、フーリエ指数 F_m を用いる。 F_m は次式で示される。

$$F_m = 12 \sum_{i=1}^{12} \frac{Pr_i^2}{Pr_y} \quad (3.56)$$

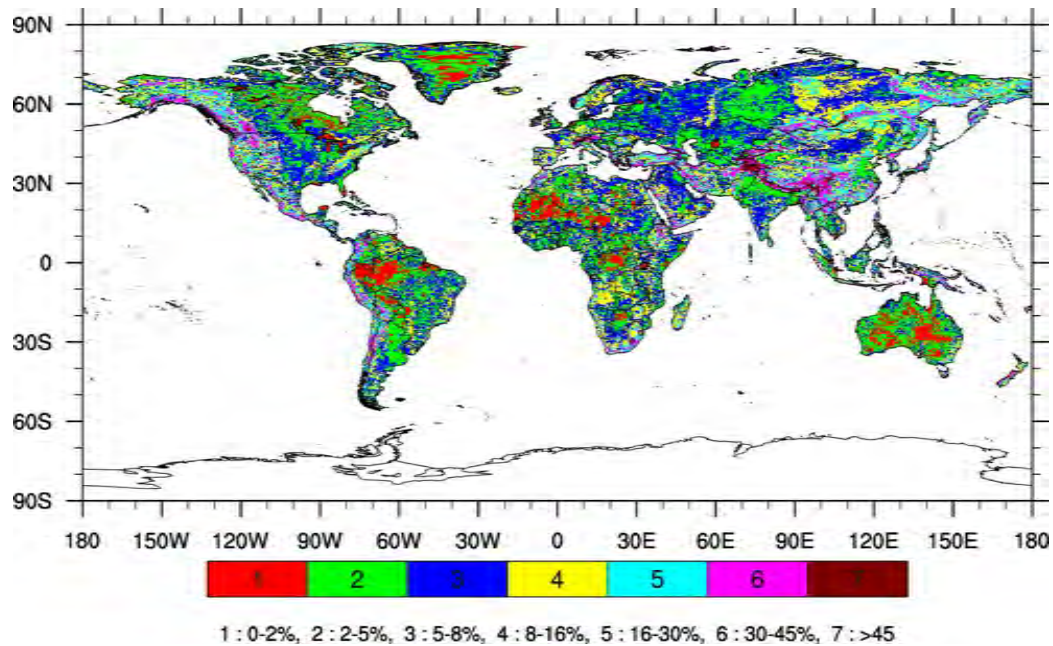


図 3.5 傾斜分類

ここに, Pr_i : i 月の降水量 (mm/month), Pr_y : 年降水量 (mm/year) である. 本研究では, F_m を $F_m < 1300, 1300 - 1800, 1800 - 2200, 2200 - 2500, 2500 - 2700$, そして, $F_m > 2700$ の 6 分類に区別した. 各入力程度に応じた傾斜による制限を表 3.27 に示すルールを用いて適用する. 表中において S1 は適地ということで制限なし. S2 は最適ではないが耕作できるということで 0.5 をかける. 以下, S1/S2 は 0.75 を乗じ, S2/N は 0.25 を乗じる. N は適地でないということで 0 をかけることとする.

表 3.27 傾斜分類による制約

(a) $F_m < 1300$

傾斜分類	0-2%	2-5%	5-8%	8-16%	16-30%	30-45%	> 45%
Annuals 1 ^{*1}	S1	S1	S1	S1/S2	S2	N	N
Annuals 2 ^{*2}	S1	S1	S1	S1/S2	S2	N	N
Rice	S1	S1/S2	S2	N	N	N	N
Cassava	S1	S1	S1	S2	S2/N	N	N

*1 コムギ

*2 トウモロコシ, ソルガム, ジャガイモ, サツマイモ, ダイズ

(b) $1300 \leq F_m < 1800$

傾斜分類	0-2 %	2-5%	5-8%	8-16%	16-30%	30-45%	>45%
Annual 1	S1	S1	S1	S1/S2	S2/N	N	N
Annual 2	S1	S1	S1	S1/S2	S2/N	N	N
Rice	S1	S1/S2	S2	N	N	N	N
Cassava	S1	S1	S1	S2	S2/N	N	N

(c) $1800 \leq F_m < 2200$

傾斜分類	0-2 %	2-5%	5-8%	8-16%	16-30%	30-45%	> 45%
Annual 1	S1	S1	S1	S1/S2/N	N	N	N
Annual 2	S1	S1	S1	S1/S2/N	N	N	N
Rice	S1	S1/S2	S2	N	N	N	N
Cassava	S1	S1	S1	S2/N	N	N	N

(b) $2200 \leq F_m < 2700$

傾斜分類	0-2 %	2-5%	5-8%	8-16%	16-30%	30-45%	> 45%
Annual 1	S1	S1	S1	S2/N	N	N	N
Annual 2	S1	S1	S1	S2/N	N	N	N
Rice	S1	S1/S2	S2	N	N	N	N
Cassava	S1	S1	S1	N	N	N	N

(b) $2500 \leq F_m < 2700$

傾斜分類	0-2 %	2-5%	5-8%	8-16%	16-30%	30-45%	> 45%
Annual 1	S1	S1	S1	S2/N	N	N	N
Annual 2	S1	S1	S1	S2/N	N	N	N
Rice	S1	S1/S2	S2	N	N	N	N
Cassava	S1	S1	S1	N	N	N	N

(b) $2700 \leq F_m$

傾斜分類	0-2 %	2-5%	5-8%	8-16%	16-30%	30-45%	> 45%
Annual 1	S1	S1	S1/S2	S2/N	N	N	N
Annual 2	S1	S1	S1/S2	S2/N	N	N	N
Rice	S1	S1/S2	S2/N	N	N	N	N
Cassava	S1	S1	S1/S2	N	N	N	N

3.6 機械化効率の勘案

本モデルでは、農業技術および機械化効率の向上による単収の増加を考慮するため、FAOSTAT[91]のトラクター台数データと収穫面積データを用いる。トラクター台数を収穫面積で除した値の1960-1969年の平均を1とした各年における耕地面積あたりのトラクター台数(台/ha)の比を国ごとに時系列値で求め、温度・放射および水分条件、土壌制約下で求められた各年の作物収量値に乗ずることで、機械化効率を勘案した収量を推計した。

以上のサブモジュールによる割引率を乗じた値が温度・放射、水分、土壌、灌漑、技術発展を考慮したときの作物収量値となる。

3.7 結語

本章では、FAO(1978)、Fischer *et al.*(2000)[66][72]の農業生産性算定モデルに、現状の植え付け期、収穫期、栽培期間のグリッドデータを使用し、なおかつ、灌漑や機械化効率に関する情報を考慮することにより、より理論的な推察をベースとして、潜在的な収量値ではなく、より現実の収量を精度よく再現するモデルを開発した。これにより、実際の収量の制限計算や温暖化による農業生産への影響の評価を現実的に行うことが可能となる。今後は、さらに栽培作物品種の変更や栽培期間の変更、土壌侵食・劣化プロセスなどにも対応できる動的モデルの構築、全球植生モデルや窒素循環モデルなどと組み合わせた統合的な農作物収量算定モデルへの拡張を行っていく予定である。

第 4 章

現在気候下におけるモデルの試行と収量再現性

地球温暖化が農業生産に与える影響をより高い確度を持って調べるためには、不適切なモデル、つまり実態とかけ離れたモデルを使うことは意味をなさない。本章では、農業収量算定モデルの妥当性を検証するため、現在期間（1961-1990年）を対象に観測に基づいて得られているグリッドデータ気候値をモデル入力値として用い、モデル出力値として得られた各年における収量の値を実測値つまりFAOによって公開されている収量値と比較することによって、モデルの適用妥当性を検証（現況再現）し、収量の再現性を評価する。

4.1 現在気候下におけるモデルの試行と再現性評価結果

地球温暖化は、農業生産にどのような影響を与えるのか。このテーマに対して、信頼性の高い知見を得るには、現実における作物の栽培エリアと収量値が農業収量算定モデルで精度よく算定される必要がある。本研究では、3章で開発された農業収量算定モデルを1961-2000年の40年間に渡る観測に基づいて得られた気候値データを用いて適用し、長期間に渡る複数の作物の収量を地域別・グリッドごとに算定し、FAOSTAT[91]によって公開されている収量の統計量や既往の研究によって得られている栽培エリアなどと比較することにその再現性の評価を試み、本モデルの有用性を検証する。

4.1.1 気候入力データ

本研究では、2章で示した地上気候値の再現性の結果、CRU TS 2.1[53]が総合的に最も優れた現在気候再現性を有していると判断し、農業収量算定モデルの入力気候データとして使用することとした。CRU TS 2.1は水平解像度が全球0.5度、1901-2002年までの月

単位の気候データであり，表 4.1 に示す変数が収録されている．ここでは，CRU TS 2.1 の変数のうち，雲量，日内気温格差，降水量，日最低気温，日平均気温，日最高気温，水蒸気圧を用いる．これらの気候データは，スプライン補間によって日別データに変換した．また，標高 [88]・土壌タイプ [84]，灌漑率データ [79]，農事暦データ [77] は最短距離法を適用することにより，モデル入力に用いる全データを水平解像度 0.5 度に統一した．

表 4.1 CRU TS 2.1 の仕様

空間エリア	水平解像度	時間範囲	時間解像度	要素
全球	0.5 度 × 0.5 度	1901-2002 年	1 ヶ月	雲量，日内気温格差，霜日頻度，降水量，日最低気温 日平均気温，日最高気温，水蒸気圧，雨日頻度

4.1.2 作物収量の空間分布再現性

図 4.1-4.8 に本研究で開発されたモデルから得られた各作物ごとの全球収量算定結果を示す．なお，図で示す収量は 1961-2000 年間における平均収量であり，二期作・二毛作で得られた収量は作物ごとに収量値を合計した．農事暦については Sacks *et al.*(2010)[77] を参照されたい．

図 4.1 にコムギの全球収量図を示す．本研究では，主として秋に播いて次の初夏に収穫する冬コムギと，春に播いて夏の終わりから秋にかけて収穫する春コムギを取り扱い，それらを合わせた結果である．本モデルを使った再現結果では，世界のコムギ生産量の 7 割弱を占める EU（欧州連合），中国，インド，アメリカ，ロシアの穀倉地帯をよく再現していることがわかる．北アメリカでは，カナダのプレーリー州，アメリカの中西部，ロッキー山脈の東側とプレーリーの間を南北に広がる台地状のグレートプレーンズで比較的高い収量を得られていることがわかる．また，南アメリカのパンパ，チリ南部などでも推定値域と実際の耕作地域がほぼ一致しており，Leff *et al.*(2004)[92] に示されている栽培エリアとも整合的である．また，インダス川中流域に属するパンジャブ地方では，インド北部において収量が認められるが，穀倉地帯であるパキスタンパンジャブ州一帯では生産性が再現できなかった（図 4.1(c)）．本エリアはパキスタン最大の灌漑面積を有しており，灌漑への依存が高い．しかしながら，灌漑水路の侵食や施設の老朽化，過剰な漏水などにより灌漑施設の維持管理に支障を来たす悪循環に陥っている．また，灌漑に必要な水量に対する水路用水の供給は 50% 程度であり，残りは地下水に依存している [93]．このような現状下で，灌漑効率や灌漑面積などの詳細で正しい情報を得ることは難しいことから，本モデルではパンジャブ州における灌漑栽培を良好に再現することができなかったと考えられる．アフリカは全球の収穫面積の 13% を占めているが，その割合は他の地域に比べると

小さく、農業に適したエリアはとても狭い。本研究では、モロッコ、アルジェリア、リビアおよびチュニジアの地中海沿岸に沿って収量が見られる。中東の主要な栽培作物はコムギであり、本研究ではトルコ国内の広い領域で収量が再現された。オーストラリアの南西部、アデレードを中心としたコムギの生産地帯も実際の栽培エリアとの対応が良い。

コメの収量算定結果(図 4.2)を見ると、世界の生産量の 90% 以上の生産量を占めるアジアでは、ガンジス川中・下流域の氾濫原、インドシナ半島の全域、中国の華中・華南および華北の一部にわたる広いエリアで生産性を確認することができる。また、東南アジアでも同様にインドネシア、ベトナム、タイ、フィリピンなど広いエリアで収量が示される結果となった。また、ミシシッピ川下流域に高い収量を示すエリアが見られることがわかる。これらの結果は *Leff et al.*(2004)[92], *Stehfest et al.*(2007)[69] の収量再現計算結果と概ね整合的である。また、南アメリカのトカンチンス川流域におけるコメの収量も算定されており、実際の栽培エリアを再現できていることがわかる。アフリカではギニアからリベリアにおける栽培地域が再現できている。以上のことから、本モデルでは現在におけるコメの栽培エリアを良好に再現できていると言える。

トウモロコシの収量図(図 4.3)では、アメリカ合衆国のコーンベルト地帯におけるとりわけミシシッピ川の中・下流域やその東西一帯で高い収量を示していることがわかる。南アメリカでは、アンデス山脈のペルー以北、コロンビアの高地より西のエリア、アルゼンチンのパンパー帯に広がっていることがわかる。また、ブラジル南東部における高地を中心として収量が見られることがわかる。また、中国の遼寧を含む省渤海周辺で高い収量値を示している。また、中国の華中・華南、雲南省の南部、インド、ブラジル、アルゼンチン、ヨーロッパの幅広いエリアで生産性が見られており、アフリカのナイジェリア、スーダン南部でも広く収量が得られていることがわかる。これらの結果は *Leff et al.*(2004)[92] が示す栽培エリアマップと概ね整合的であることから、本モデルにおけるトウモロコシの収量空間分布は良好な再現性を有していることがわかる。

モデル計算より得られたソルガムの生産分布(図 4.4)を見ると、世界の生産量第 1 位であるナイジェリアにおいて国土の広い領域で生産性が認められる。また、アメリカのコーンベルト地帯やアルゼンチンのパンパ地方で高い収量が再現された。同様にメキシコ北東部のタマウリパス州において収量が見られ、USDA/JAWF (1994)[94] の作物栽培エリアと整合的である。また、インド、スーダンといった主要な生産国でも再現性が認められている。ヨーロッパでは、フランスで高い収量が再現されていることがわかる。アフリカのサヘル地域は、降水量が少ないが、乾燥に強い作物であるソルガムの収量が緯度に沿って広がっている様子が再現できていることがわかる。以上のことから、本結果は現実のソルガム栽培分布を良好に再現しており、本研究におけるモデルの再現性が高いことがわかる。

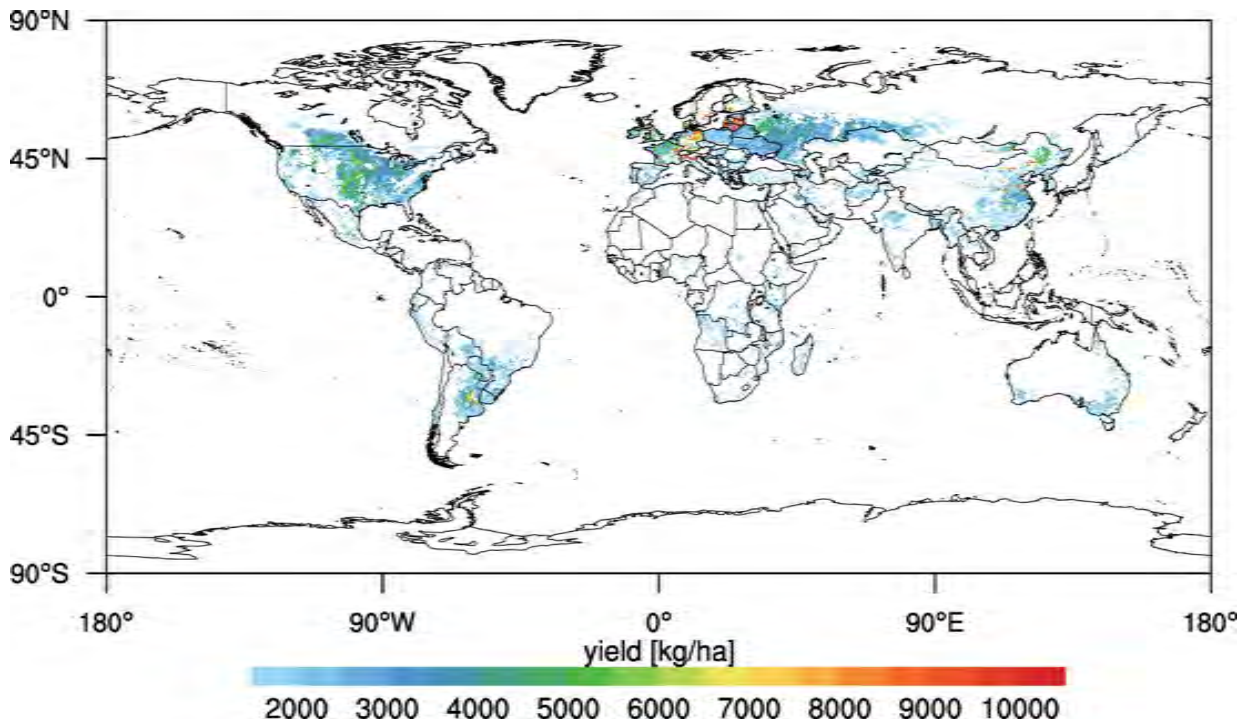
ジャガイモの生産地帯(図 4.5)を見ると、南アメリカではペルーからボリビアにおけるアンデス一帯で収量が見られる。中国の華南・華北およびインド全域で生産分布が見ら

れ、ロシア西部とりわけカザフスタンとの国境付近やウクライナなどの東ヨーロッパにかけて一帯に生産エリアが再現されていることがわかる。また、ドイツ、フランス、ポーランドなど世界の生産量上位10位までに入るヨーロッパの国々で栽培分布が再現されており、本研究の再現結果は実際の栽培分布と比較して良好なものとなった。

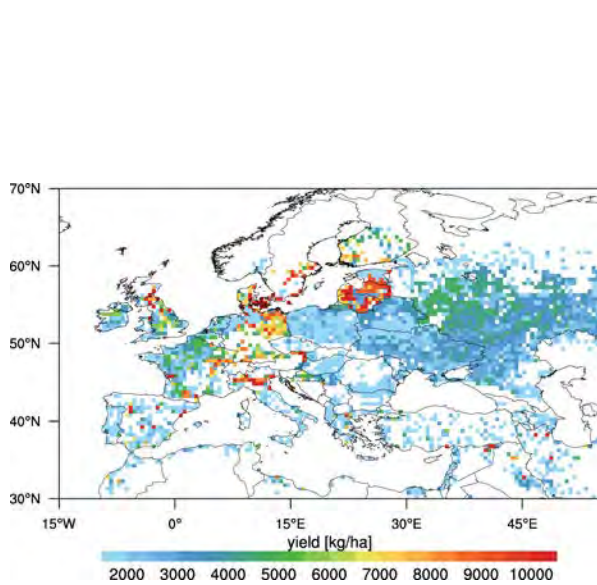
サツマイモは、ジャガイモ同様に南アメリカではペルーからボリビアにおけるアンデス一帯で収量が見られる。世界の生産量の75%を中国が占めており、本研究では中国や2008年現在世界の生産量第2位であるナイジェリア、同7位のインドの広いエリアで生産性が再現されていることがわかる。また、アメリカの主要なサツマイモ生産州であるノースカロライナ州やルイジアナ州で生産性が見られるが、それ以外のコーンベルト地帯でも収量が再現された(図4.6)。アメリカにおけるサツマイモの栽培面積は1997年の米国農務省総計で見ると3万5,200haとなっており、他の主要穀物などと比べると大変狭い。本研究ではアメリカ東部の広い領域で収量が再現されていることから、本研究結果はこの地域において収量を示すエリアが過大に評価されており、あまり良好な推測結果とはいえない。

キャッサバの栽培分布結果では、世界第1位の生産量を誇るナイジェリアを含むギニア湾沿岸域で栽培が見られ、世界第2位、3位を占めるブラジル、タイにおいても収量が再現されており、インドでの高い収率が再現されている(図4.7)。南アメリカのシングー川の上流域において収量が得られているが、この地方は流域全体がキャッサバの栽培域となっていることから[92]、やや栽培エリアを過小評価する結果となった。アフリカでは、モザンビーク、タンザニア、アンゴラ、ザンビアで収量が見られ、水分の制限された地域での乾燥に強い作物の栽培が再現できていることがわかる。熱帯・亜熱帯地域でしか主として栽培されていない作物であり、収量分布の再現性は良いといえる。

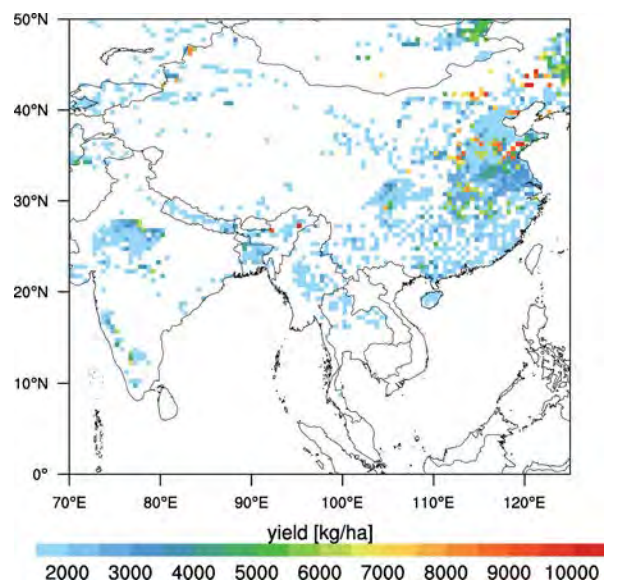
ダイズの収量再現結果(図4.8)を見ると、アメリカ東部特に南東部フロリダ半島からニューヨークにかけての生産地帯をよく示していることがわかる。このエリアはトウモロコシの主要な生産エリアよりも降水量が多く温かい気候であり、ダイズより遅れて植え付けが行われ(5月から6月)、収穫時月はトウモロコシと同じで10月から11月にかけてである。また、ブラジル・アルゼンチンの生産地帯もよく示している。この2つのダイズの生産地帯は多収地域であり、その収率の再現も本図からよく示されていることがわかる。南アメリカでは、ブラジルのマトグロッソ州からアルゼンチンのコルトバ州付近にかけて高い収量が見られる。また、中国やインドにおける収量エリアも良好に再現できており、インドにおける低収率もよく再現できている。また、ナイジェリアや東ヨーロッパ諸国における生産性も良好に再現されていることがわかる。一方、世界の生産量第7位であるカナダにおいて、本研究ではほとんど栽培エリアが再現されておらず、本研究で使った各パラメータについてさらなる改良が必要であることが明らかとなった。



(a) 全球

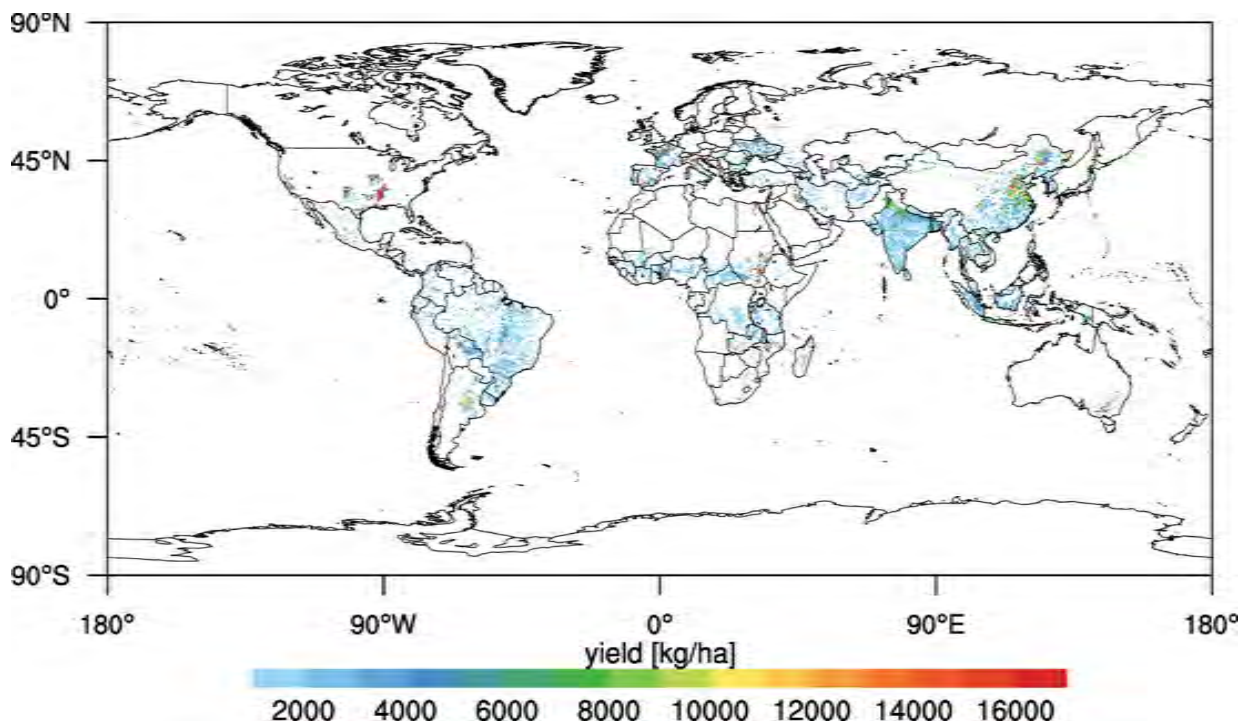


(b) ヨーロッパ

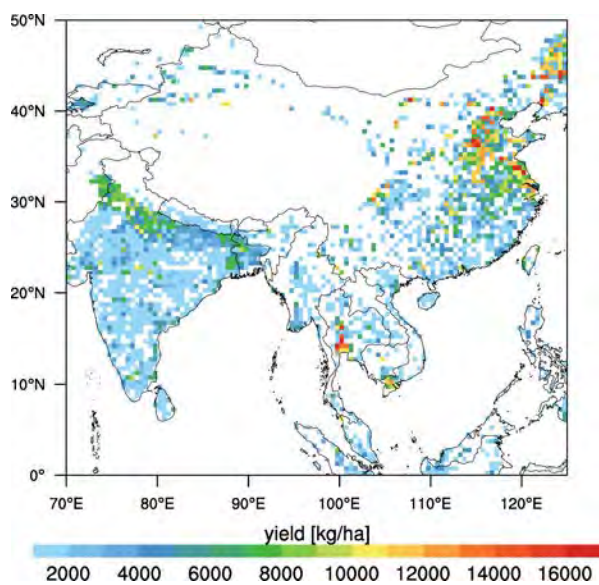


(c) 東アジア

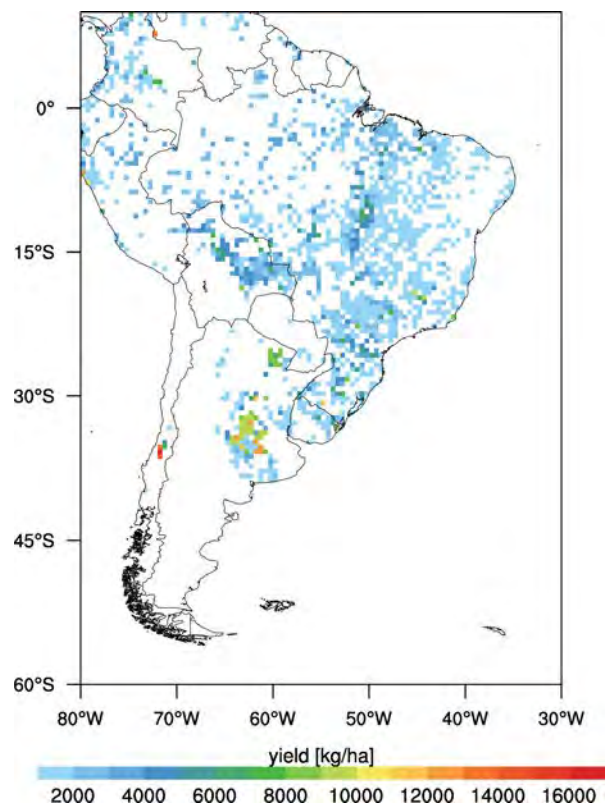
図 4.1 コムギの収量再現結果 (1961-2000 年平均)



(a) 全球

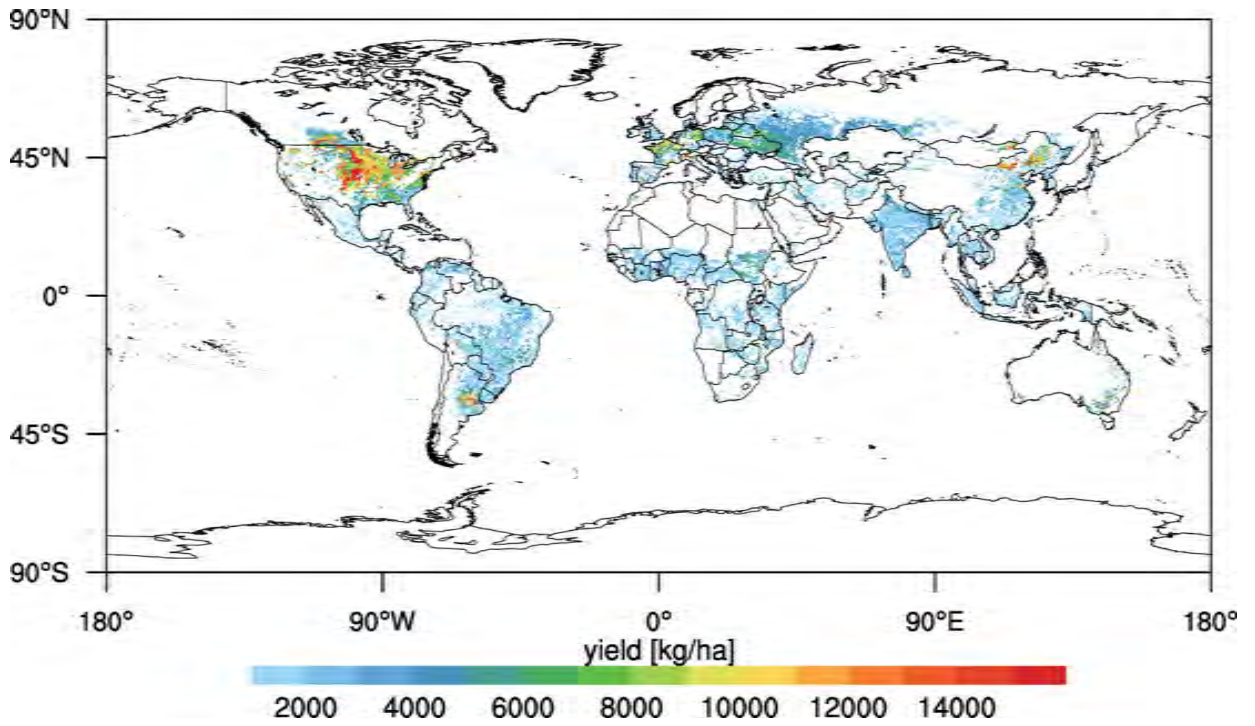


(b) 東アジア

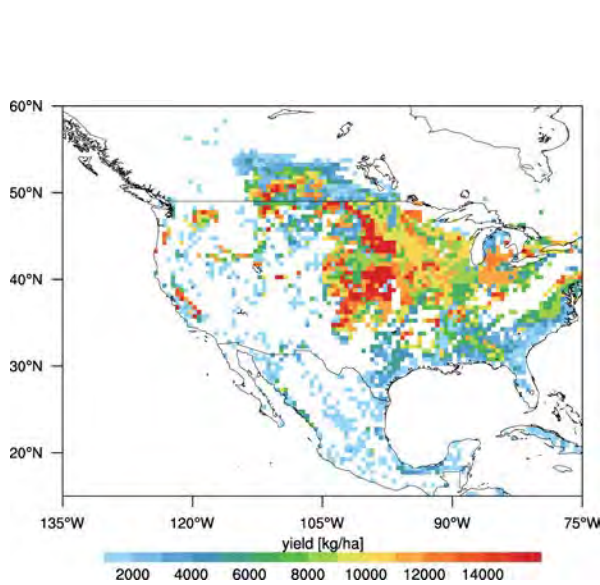


(c) 南アメリカ

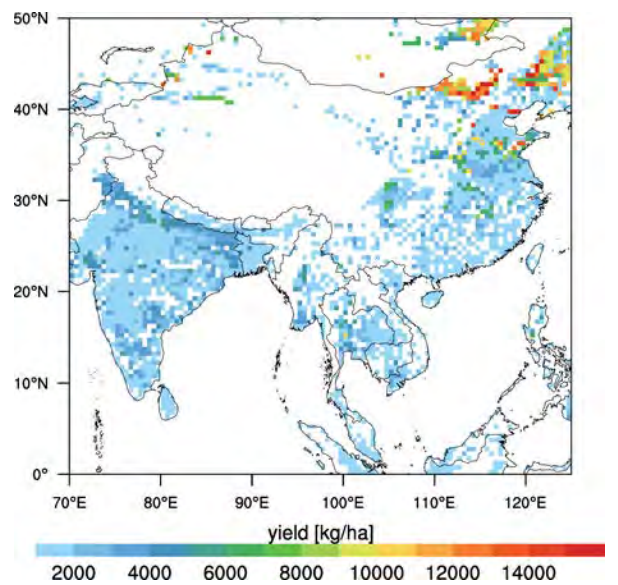
図 4.2 コメの収量再現結果 (1961-2000 年平均)



(a) 全球

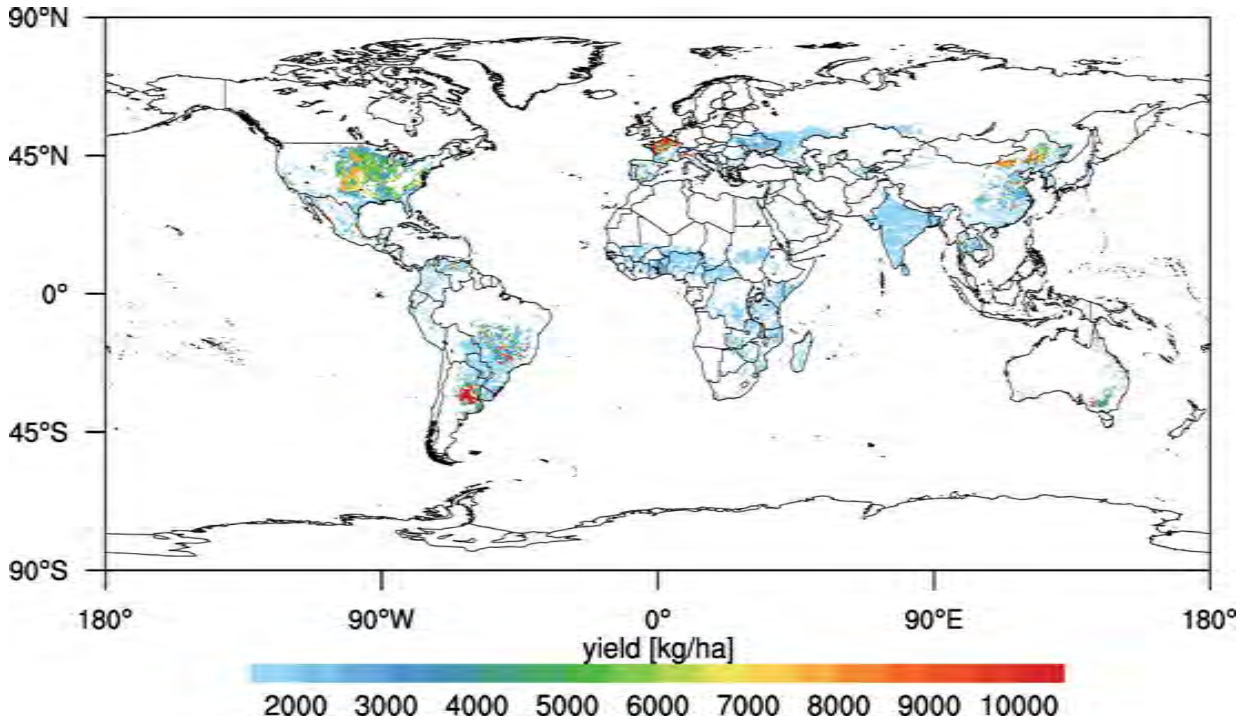


(b) 北アメリカ

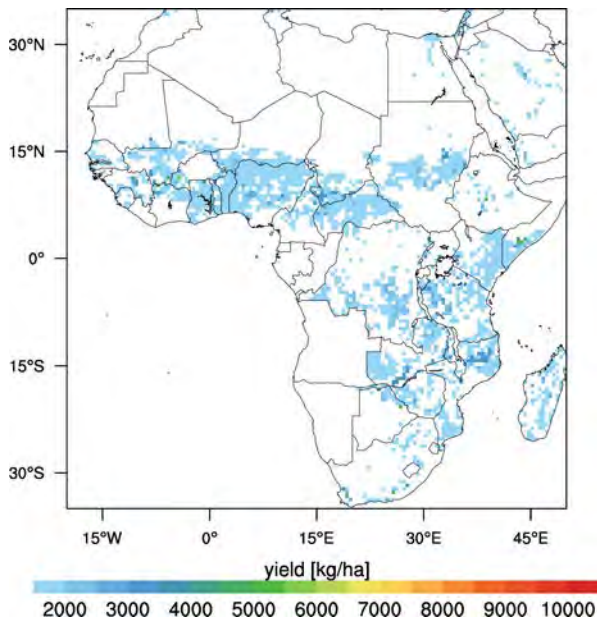


(c) 東アジア

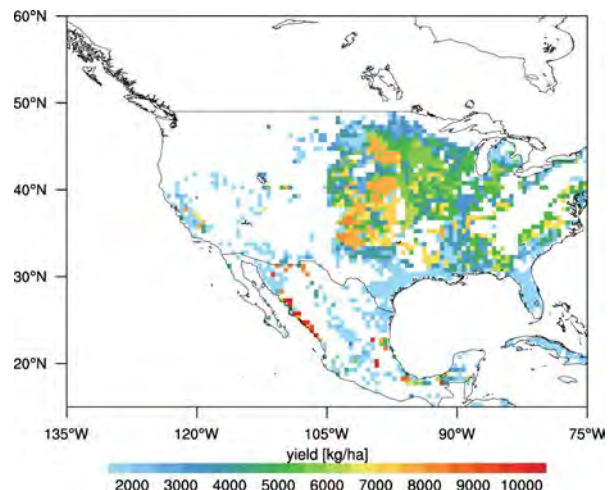
図 4.3 トウモロコシの収量再現結果 (1961-2000 年平均)



(a) 全球

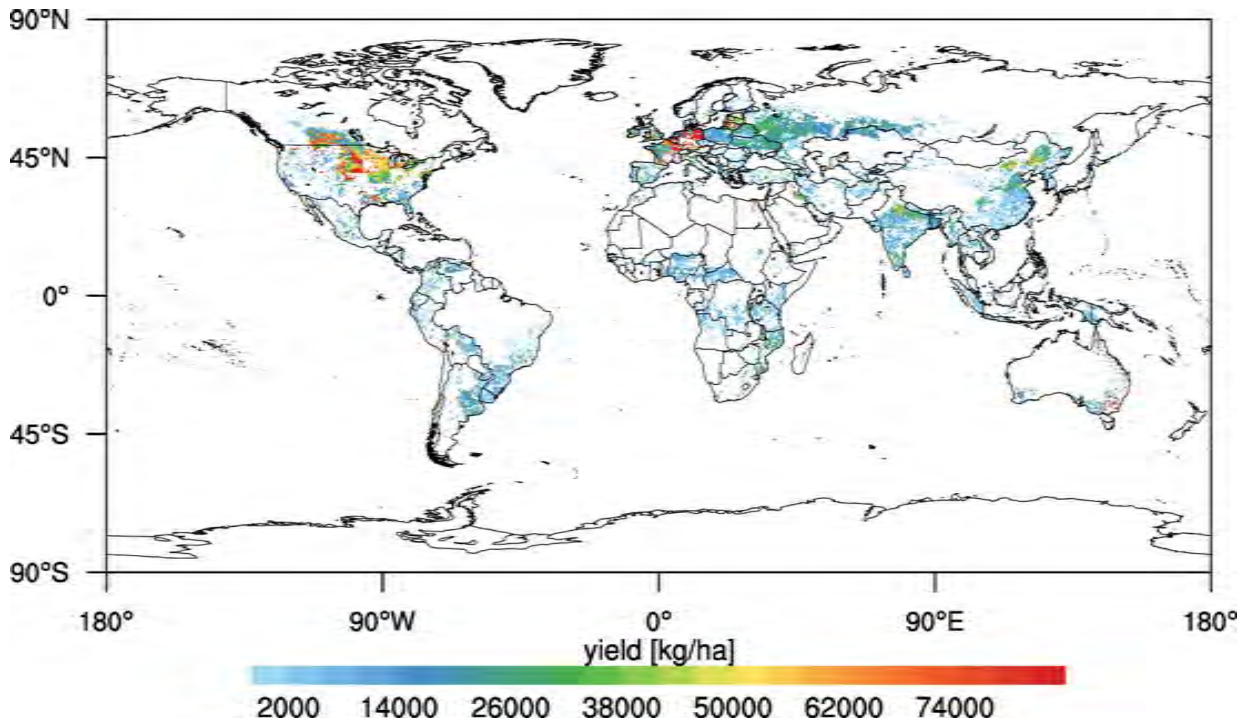


(b) アフリカ

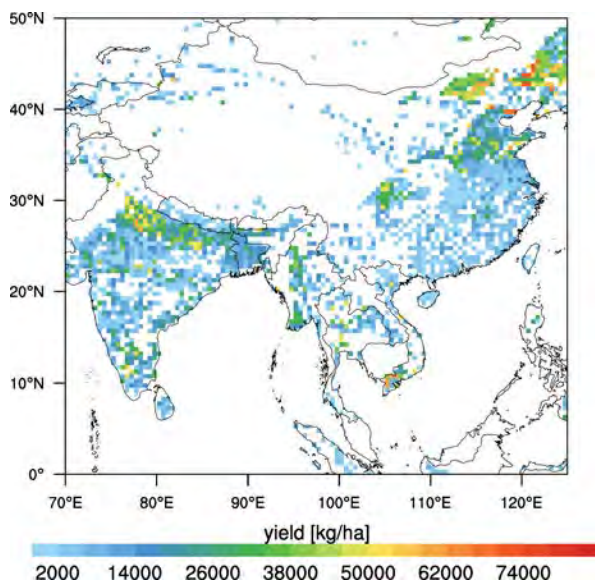


(c) 北アメリカ

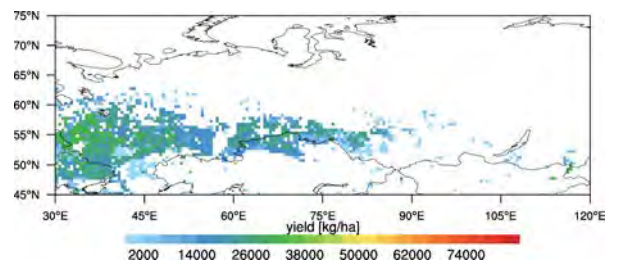
図4.4 ソルガムの収量再現結果 (1961-2000年平均)



(a) 全球

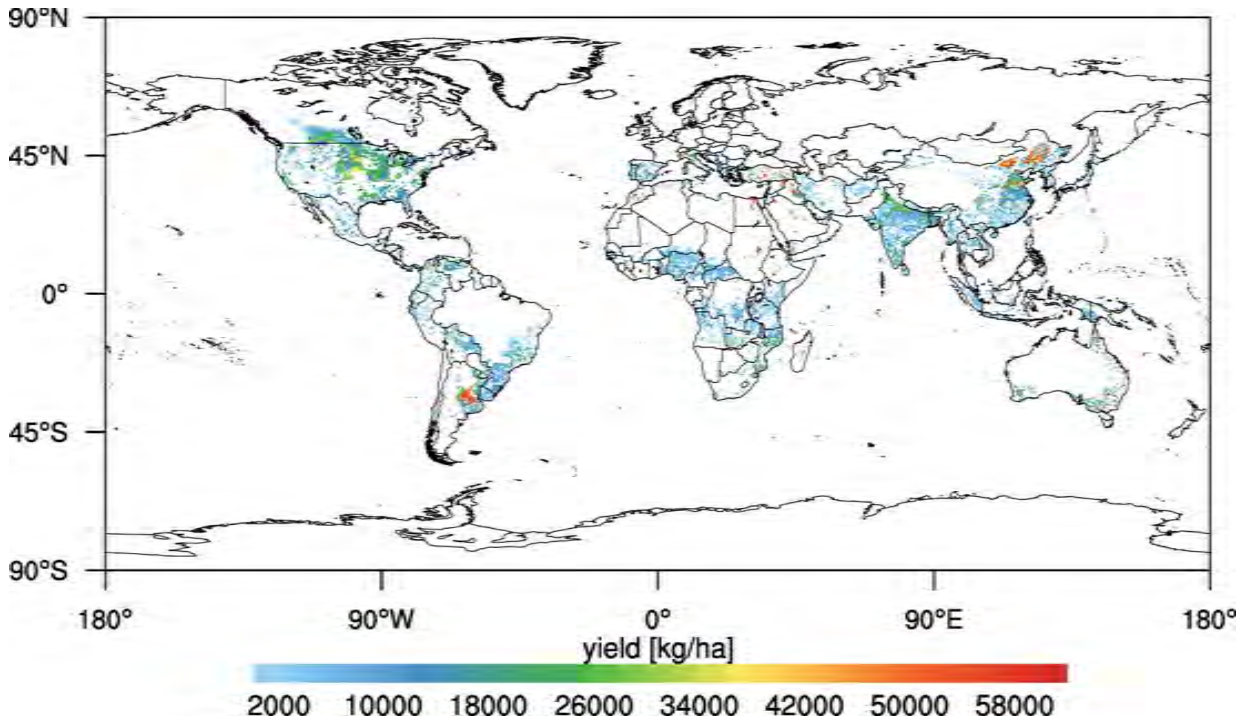


(b) 東アジア

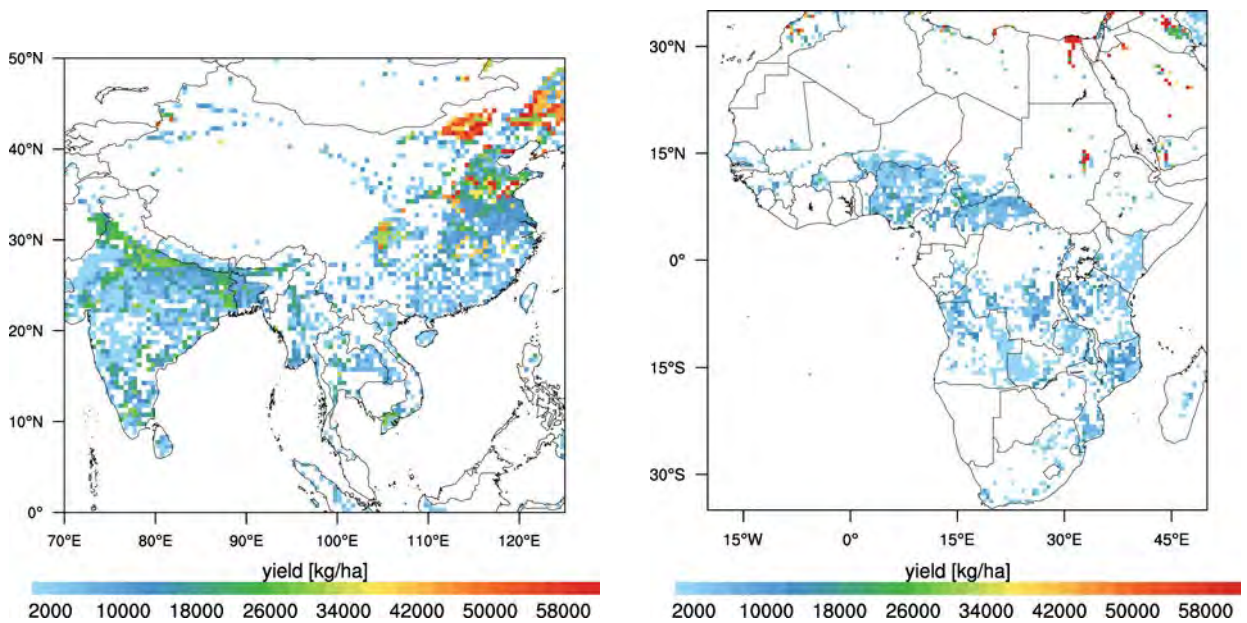


(c) ロシア

図 4.5 ジャガイモの収量再現結果 (1961-2000 年平均)



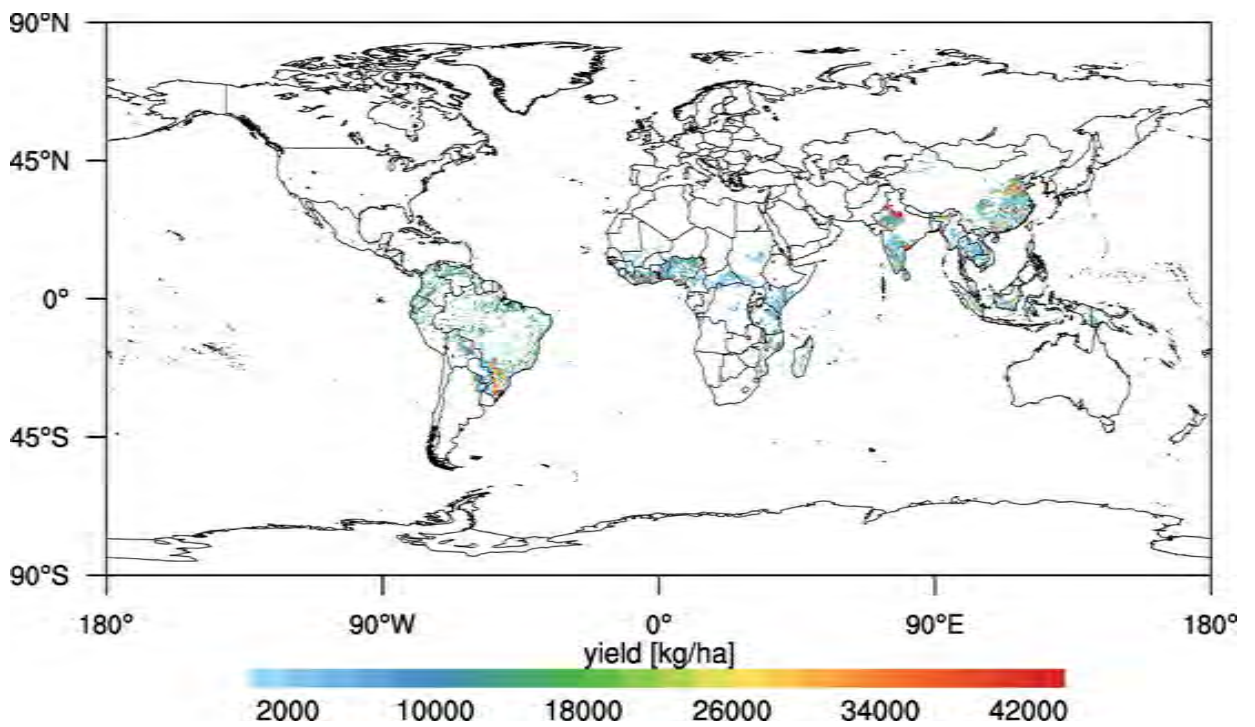
(a) 全球



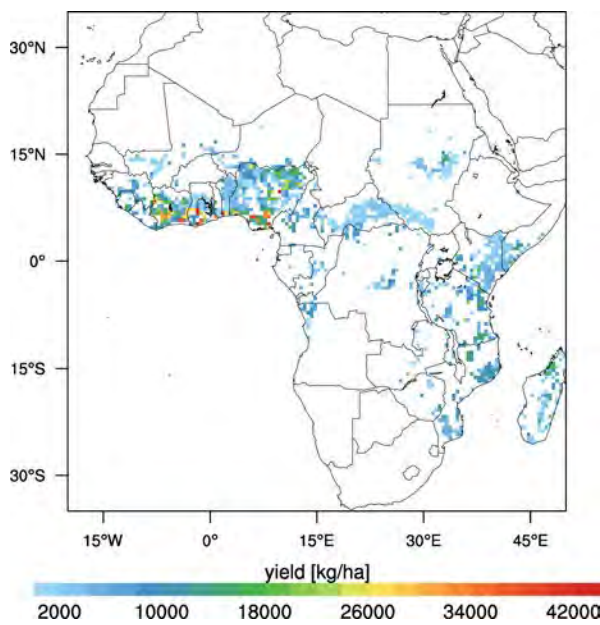
(b) 東アジア

(c) アフリカ

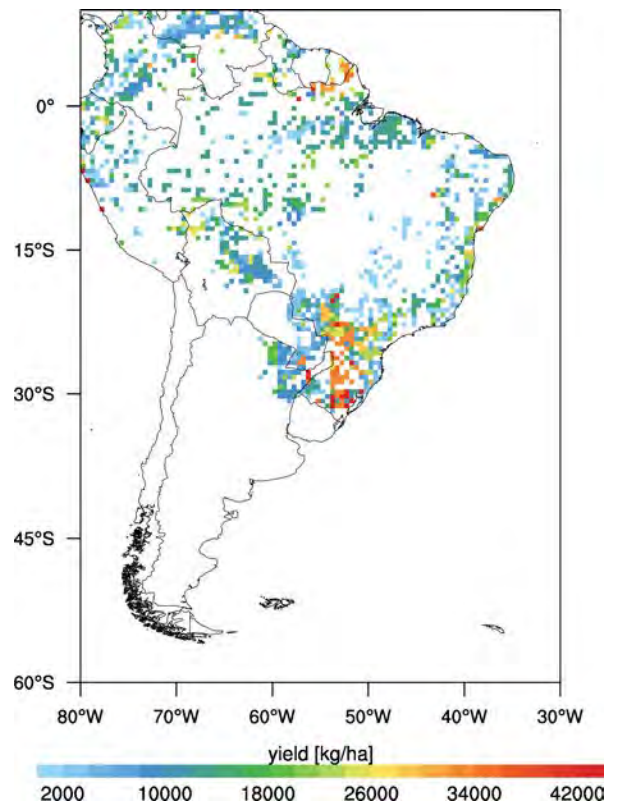
図 4.6 サツマイモの収量再現結果 (1961-2000 年平均)



(a) 全球

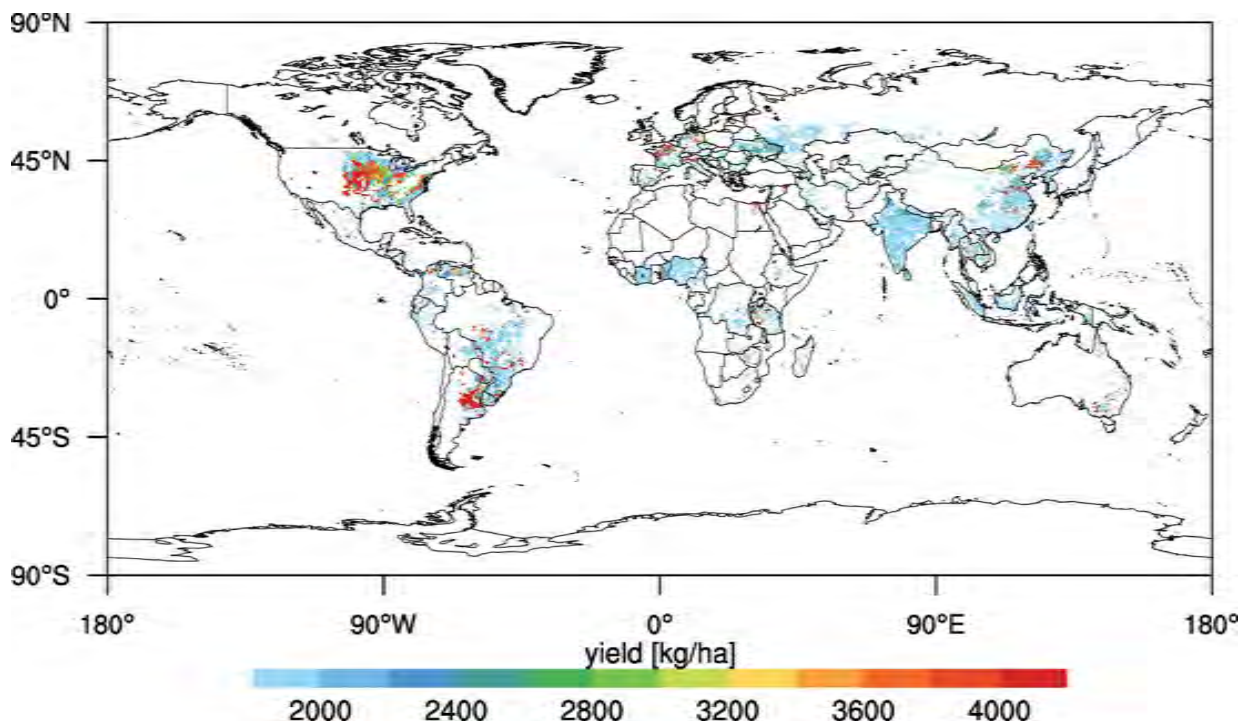


(b) アフリカ

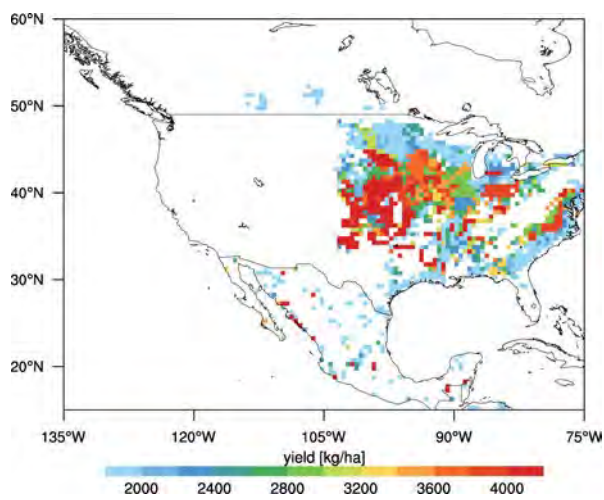


(c) 南アメリカ

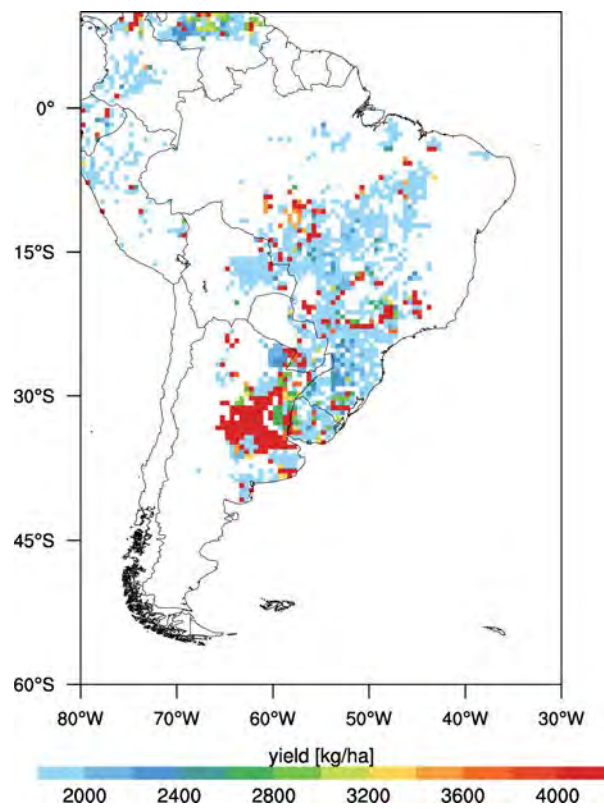
図 4.7 キャッサバの収量再現結果 (1961-2000 年平均)



(a) 全球



(b) 北アメリカ



(c) 南アメリカ

図 4.8 ダイズの収量再現結果 (1961-2000 年平均)

4.2 地域別に見る作物ごと収量計算値と統計値の比較

図 4.9 に、各作物における 1961-2000 年の各年の計算値と FAO による統計値のプロット図を示す。図 4.9(a) より、コムギの年々の収量値は各地域においてばらつきがあるものの、収量値との大幅な偏差は生じておらず、ほぼ 1:1 に対応していることがわかる。しかしながら、コムギの主要な生産地帯である西ヨーロッパにおいては、他の地域と比較してやや偏差量が大きくなっている年があることがわかる。例えば、1976 年ヨーロッパでは干ばつにより最悪の凶年となり、FAO の統計値によると [91]、西ヨーロッパでのコムギの収量は 3,900kg/ha と 1970 年代で最も低い収量となり生産量も大きく減った。本モデル計算に使用した入力データでは、CRU の月気候値をスプライン補間によって日気温に変換して使用しているため、1976 年に襲った大干ばつなどに代表される極端な気象事象を再現できない。それに加え、本研究において計算された農業収量算定モデルの水平解像度は 0.5 度であるため、極端気象によるものと思われる農作物生産への影響をモデル内で陽に取り込むことができなかつたため、現実における収量と計算収量値の偏差が大きくなったものと考えられる。計算結果と統計値のコムギ収量の相関係数（表 4.4）を見ると、ヨーロッパ平均で 0.66、東アジアで 0.98、南アジアで 0.93、北アメリカで 0.81 と高く、t 検定では 90% の信頼区間で 0.30 以上で有意な相関が得られることから、主要生産国における年々の収量再現性は良好であると言える。一方、ロシアや北ヨーロッパ、オセアニアでは有意な相関が得られなかつた ($p > 0.1$)。

コメの収量再現結果もコムギと同様に各地域ごとに統計値とのばらつきが見られるが、概ね 1:1 のラインに位置しており、収量再現結果は良好であると言える。年々変動の相関係数を見ると、世界の主要な生産国である東南アジアで 0.97、南アジアで 0.95、東アジアで 0.94 と相関が高く、アジアにおける収量再現結果は、統計値との偏差量および年々変動の再現性ともに良好であると言える。一方、アフリカでは危険度 10% で有意な相関が得られず、日本においても負の相関係数となり、必ずしも全ての地域において有意な相関が得られたわけではない。

トウモロコシの収量再現値と統計値との相関は、カリブ、東アフリカ、中央アフリカ、南アフリカ、西アフリカ、南アジアを除いて危険率 10% で有意な相関が得られ ($p < 0.1$)、主要生産地域である北アメリカ、東アジア、南アメリカでは 0.9 を超える高い相関係数となった。

図 4.9(d) を見ると、ソルガムの収量再現結果は、他の作物に比べてばらつきが大きく、特に南ヨーロッパ、西ヨーロッパにおける統計値との偏差が目立つ。しかしながら、これらの地域における相関係数は 0.6 以上となり、他の地域と比べて相対的に高い相関を有している。ヨーロッパにおける収量は他の地域に比べて比較的大きいが、例えば収穫面積は

北アメリカやアフリカなどの主要生産域と比べると50分の1程度である。このため、本モデルでの水平解像度ではその生産域を陽に再現しきれていないことから、年々変動の相関には有意性があるが、統計値との偏差量には差が出る結果となったと考えられる。

ジャガイモの各地域における収量再現結果を見ると、統計値との大きくかけ離れた年や地域はなく、ほぼ1:1に対応していることがわかる。一方、相関係数を見ると、北アメリカ、南・西ヨーロッパ、南アジアでは相関係数が0.7を超え、年々変動の再現性は高いと言える。一方、東アジアやロシアでは、有意な相関が得られず($p > 0.1$)、各地域ごとに相関係数のばらつきが大きくなった。各地域ごとの作物パラメータの精度を高め、収量の年々変動の精度を高めていく必要がある作物のひとつである。

サツマイモの生産地域は中国に集中しており、その生産量は2008年現在、世界の75%を超える[91]。東アジアにおける収量再現結果と統計値との相関係数は0.93と非常に高い。収量の値は、全地域の5番目の大きさであるが、収穫面積の1961-1999年平均は730万ヘクタールと2番目に大きい収穫面積を有する東アフリカに比較して約7倍である。その東アフリカにおける相関係数は0.13と低く、統計的に有意とは言えない結果となった($p > 0.1$)。2007年におけるアフリカのサツマイモの生産量は1970年の3倍になっているが、例えば東アフリカに見る収量の値は1970年で4,668kg/haであるが、1990年代の平均は4,229kg/haと下がっている。このことから、生産量は単収の増加によるものよりは収穫面積の増大によるものであることがわかる。本研究では、土地利用の大幅な変化をモデルで考慮しておらず、収穫面積の大幅な増加を再現できていない。また、アフリカにおける収量の変化は気候によるものに比べて、経済的な援助や農業技術の発展などに寄与することが多いため[95]、本モデルではこれらの要因を陽にモデルに組み込むことができず、相関係数の低さにつながったのではないかと考えられる。

南アジアにおけるキャッサバの収量は1960年代と比較して1990年代は2倍以上となっており[91]、近年急激に収量値がこの地域では高くなっている。本研究で使用したパラメータは、気候値の変動や機械化効率による技術発展の効果が考慮されているが、年々の農業技術発展による収量増大の効果は必ずしもトラクターの台数のみで説明できるわけではなく、人口増加、土地利用の変化、経済の発展、技術移転、灌漑技術の発達などの情報がきめ細かく考慮されていないことが偏差が大きい要因となったと考えられる。しかしながら、南アジアにおける相関係数は0.93と高く、年々の収量変動は追従できているが、その絶対量が大きいことがわかる。アフリカでは西アフリカで相関係数が0.32となり、やや低い値となったが、南アメリカを除く全域において有意な相関が得られていることがわかる。

図4.9(h)を見ると、おおよそ各地域における年々収量の値はFAO統計量と比較して1:1に近いことがわかる。しかしながら、南ヨーロッパでは偏差のばらつきが大きいことが見てとれる。南ヨーロッパにおけるダイズの収量再現結果は、FAO統計量を見ると1980年

代後半からこの地域では急激に収量が増大しており，この年々の収量増大を考慮した適切なモデル内におけるパラメタリングに課題を残す結果となった．ダイズの収量再現結果と統計値との相関係数は，北アメリカで 0.89，南アメリカで 0.95，東アジアで 0.94 と主要生産国における収量の年々変動の再現性は高いと言える．

図 4.10 に，1961-2000 年のモデル計算で得られた平均収量と FAO 統計値の平均収量を地域ごとに示す．なお図中に示す円は，計算より得られた各地域における収穫面積の大きさを表し，円が大きいほどその地域における収穫面積が広いことを示す．収穫面積は，計算で得られた各グリッド上における収量値に，Portman *et al.*(2010)[87] による各グリッドにおける天水栽培および灌漑それぞれにおける収穫面積データを乗じて求めた．また，表 4.2, 表 4.3 に対象期間における各地域ごとの平均収量値と統計値から得られた決定係数，収穫面積で重みづけされた決定係数，生産量で重みづけされた決定係数をそれぞれ示す．本研究で得られた決定係数は，0.8 以上と高く，対象期間の平均収量の各地域における再現性は高いと言える．しかしながら，トウモロコシでは，収穫面積および生産量で重みづけされた決定係数は，重みづけがないものに比べて，値が低くなっていることがわかる．これは，高収量地域である北アメリカや収穫面積が大きい西ヨーロッパや東アジアにおいて，統計値と計算結果の偏差が他の地域に比べて大きいため，結果として小さくなったと考えられる．また，ソルガムでは，生産量で重みづけされた決定係数は他の決定係数より小さく，低収量地域に比べて高収量地域における統計値との偏差が大きく，ソルガムの収量再現結果は，高い収量地域での再現性に課題を残す結果となった．ジャガイモの収量再現における決定係数では，世界有数の収穫面積を有する東ヨーロッパ，ロシアにおける再現性が高く，このため収穫面積で重みづけされた決定係数は他の 2 つの決定係数より高くなった．ダイズでは，高収量でありかつ広い収穫面積を有する北アメリカにおける統計値との偏差が大きいため，収穫面積および生産量で重みづけされた決定係数が，重みづけを考えない決定係数に比べて小さくなった．

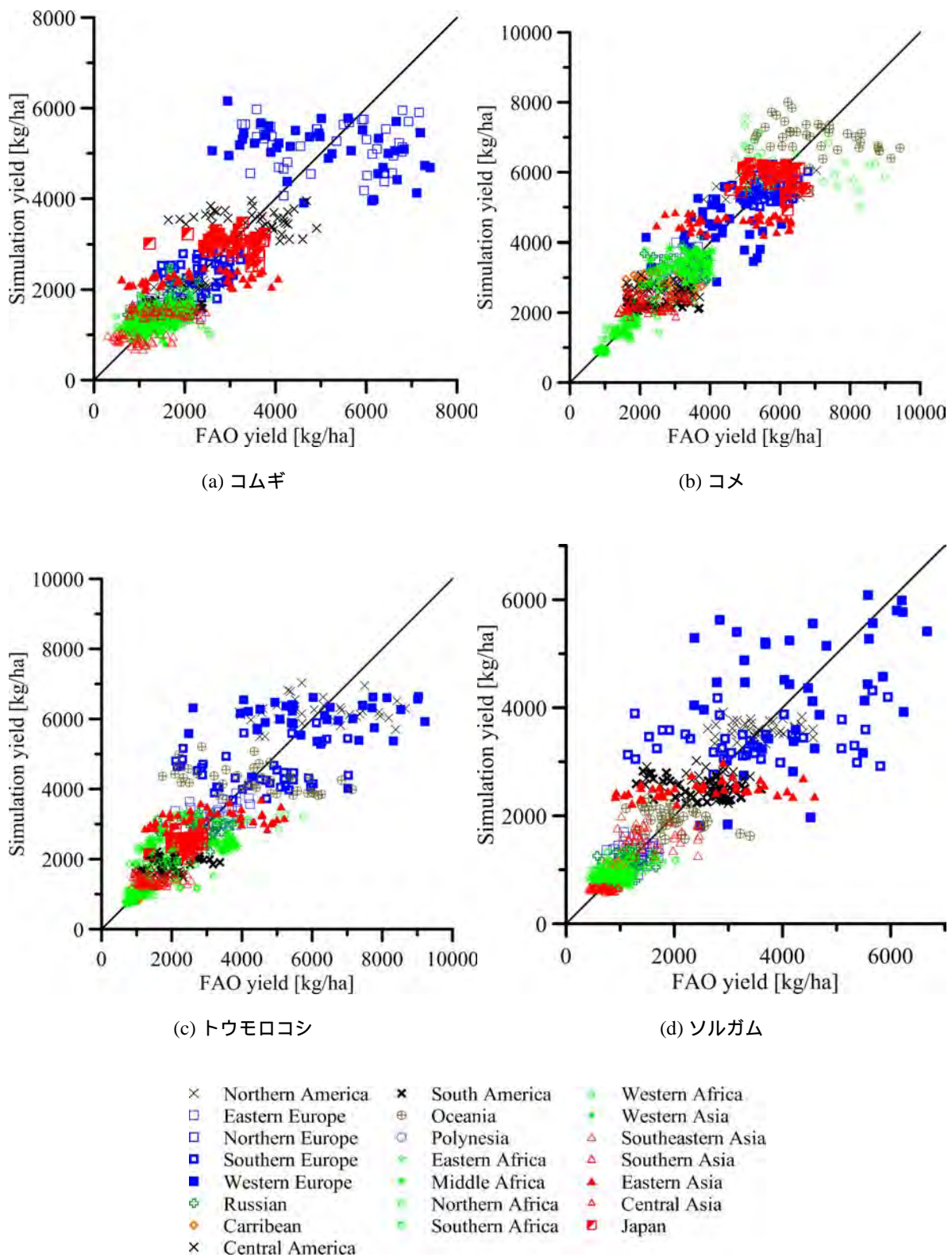


図 4.9 各作物の収量再現結果と FAO による統計値との比較 (1961-2000 年)

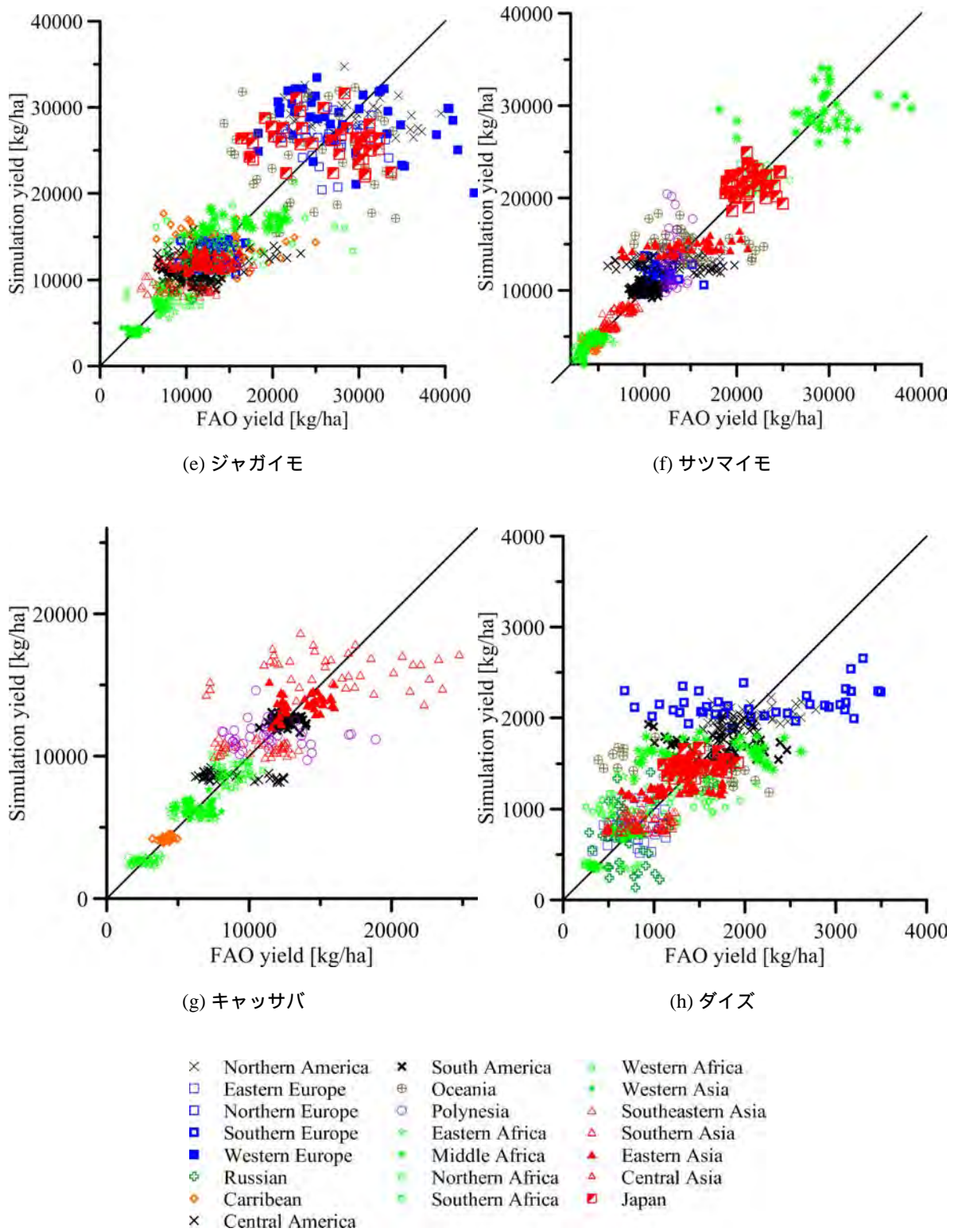


図 4.9 (続き) 各作物の収量再現結果と FAO による統計値との比較 (1961-2000 年)

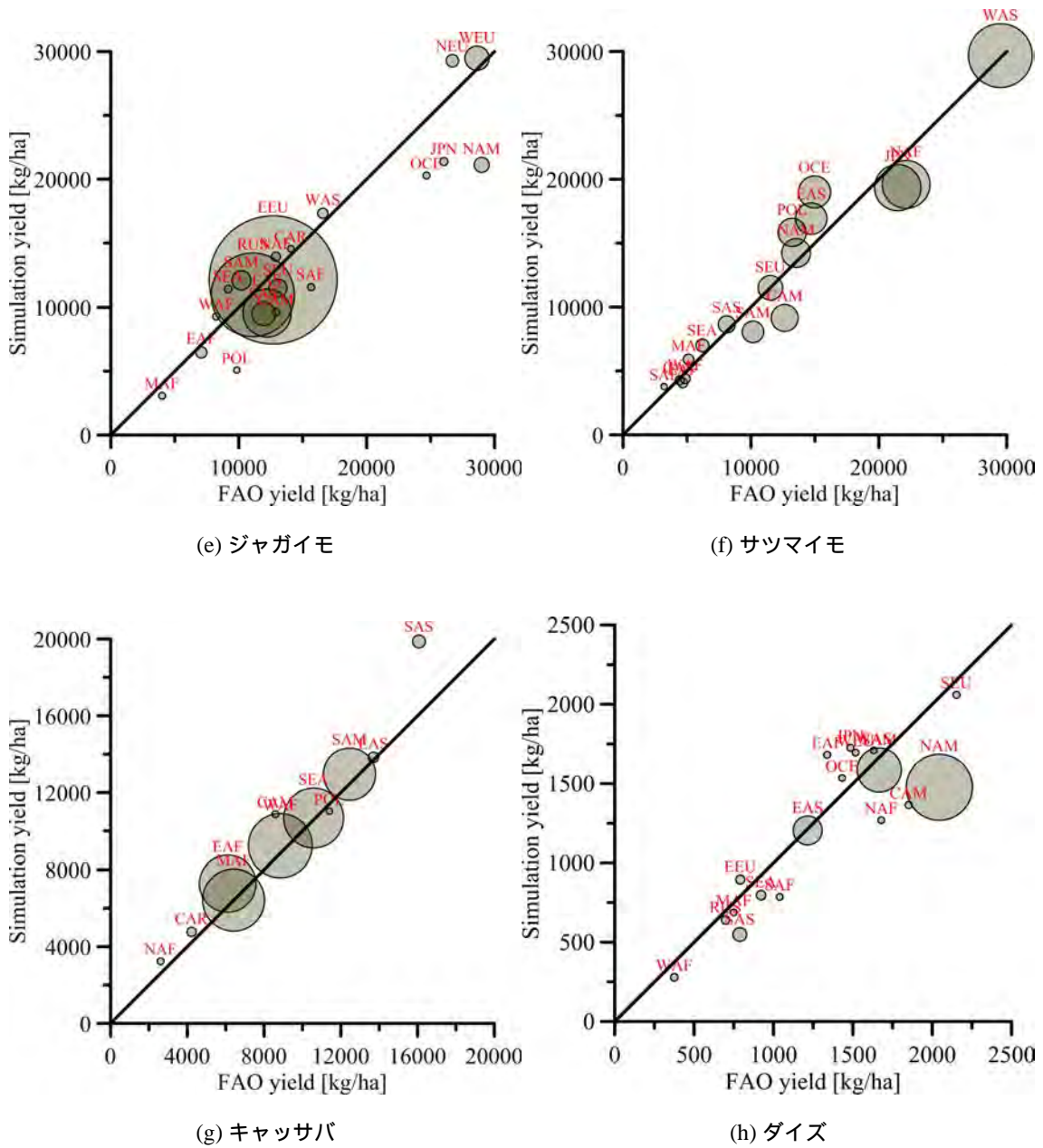


図 4.10 (続き) 各作物収量再現結果と FAO による統計値との比較 (1961-2000 年平均, サークルの大きさは収穫面積を表す)

表 4.3 図 4.10 で示すジャガイモ, サツマイモ, キャッサバ, ダイズの決定係数

	R^2	R^2 weighted for area	R^2 weighted for production
ジャガイモ	0.853	0.933	0.877
サツマイモ	0.928	0.902	0.896
キャッサバ	0.932	0.944	0.911
ダイズ	0.672	0.554	0.569

表 4.4 収量算定結果と統計値の相関係数 (1961-2000 年)

	コムギ	コメ	トウモロコシ	ソルガム	ジャガイモ	サツマイモ	キャッサバ	ダイズ
北アメリカ	0.81	0.52	0.93	0.32	0.92	0.64	-	0.89
東ヨーロッパ	0.82	0.22	0.38	0.15	0.24	-	-	0.20
北ヨーロッパ	0.08	-	-	-	0.06	-	-	-
南ヨーロッパ	0.82	0.28	0.66	0.79	0.75	0.44	-	0.83
西ヨーロッパ	0.92	0.62	0.87	0.68	0.86	-	-	-
ロシア	0.21	-0.03	0.34	0.24	-0.08	-	-	0.29
カリブ	-	-0.50	0.18	0.23	-0.37	0.06	0.40	-
中央アメリカ	0.86	0.76	0.93	0.68	0.97	0.94	0.85	-0.03
南アメリカ	0.86	0.95	0.97	0.83	0.92	-0.01	-0.01	0.95
オセアニア	-0.33	-0.38	0.64	-0.17	0.19	-0.28	-	0.76
ポリネシア	-	-	-	-	0.03	0.12	0.78	-
東アフリカ	0.26	-0.19	-0.10	0.08	-0.31	0.13	0.93	0.14
中央アフリカ	0.15	-0.11	0.21	0.22	-0.04	0.25	0.68	0.08
北アフリカ	0.82	0.13	0.90	0.68	-0.06	-0.10	0.94	-
南アフリカ	0.67	0.22	0.07	0.59	0.76	0.50	-	0.80
西アフリカ	0.26	-0.01	0.03	0.14	0.18	0.45	0.32	0.84
西アジア	0.76	0.17	0.94	0.12	0.90	0.39	-	0.92
東南アジア	0.97	0.97	0.93	0.66	0.91	-0.32	0.96	0.87
南アジア	0.93	0.95	-0.14	0.78	0.95	0.05	0.93	0.90
東アジア	0.98	0.94	0.90	0.92	0.11	0.93	0.30	0.94
中央アジア	-	-	-	-	-	-	-	-
日本	0.31	-0.24	0.43	-	0.51	0.12	-	0.78

4.3 収量の統計的誤差解析

図 4.11-図 4.18 に各作物における，第 2 章で再現性評価に用いた指標である計算値と統計値との収量差率 (PPD) の時系列 (1961-2000 年) を示す．表 4.5 に各地域における PPD の標準偏差 (SD-PPD)，表 4.6 に PPD の平均絶対誤差 (MM-PPD) を示す．

図 4.11 よりコムギの世界第 1 位の生産量を誇るヨーロッパを見ると，特に北ヨーロッパで PPD の値が時系列で右肩下がりの特徴を有していることがわかる．北ヨーロッパにおける収量は 1960 年代には 3,585kg/ha であったが，1990 年代には 6,486kg/ha と約 1.8 倍になっている [91]．この農業技術の発展や機械化効率の向上，肥料投入による単収の増大など気候変動以外の要因に伴う急激な収量の増加分を，モデル内において精度良くパラメタライズされていないことが，右肩下がり PPD グラフになっている要因であると考えられる．北ヨーロッパにおける収量の年々変動を精度よく表現できなかったことから，作物パラメータおよび農業技術に関する影響を詳細に考慮したモデルのさらなる改良が必要である．一方，西ヨーロッパでは 1960 年代前半を除いては，PPD の値は $\pm 20\%$ 以内に収まっており，表 4.5 より，PPD の標準偏差は 11.65% とヨーロッパの他の地域と比較して低く，また PPD の平均絶対誤差は 9.49% と低い値を取っており，年々の収量再現結果は統計値と比較してばらつきが少なく，また，その偏差も小さいことがわかる．世界第 2 位のコムギ生産量を誇る中国が属する東アジアでは，1980 年より前では統計値とのばらつきが大きいですが，1980 年以降では，1990 年代後半を除いて PPD の値は $\pm 10\%$ 以内に収まっており，PPD の標準偏差は 10.54% と他の地域に比べて最も低い値となり，PPD の平均絶対誤差も同様に 8.08% と他の地域に比べて最も小さい．以上のことから，東アジアにおける年々の統計値と比較した偏差のばらつきは小さく，再現性は良好であると言える．一方，アフリカでは PPD の標準偏差は北アフリカを除いて 20% を超えており，また，PPD の平均絶対誤差も南アフリカで 26.61% と他の地域と比較して高い．主に 1980 年以降の計算結果は，統計値に比べて収量を過小評価する傾向がうかがえる．これは，各国・各地域における農業技術の発展，肥料の投入などによる収量の増加傾向をモデル内でパラメタリングできていないことに起因している．各国・各地域における収量増加の要因となるパラメータには不確実性が高いため，より科学的で正確な情報に基づいたパラメタリングが必要であることがわかる．

コメの統計誤差 (表 4.5, 表 4.6) を見ると，世界のコメの生産量の 90% 以上を占めるアジア域において，東南アジア，南アジア，東アジアで PPD の標準偏差はそれぞれ 7.84, 7.48, 12.00% であり，同じく平均絶対誤差は 5.72, 10.07, 11.50% となり，他の地域に比べて相対的に小さい結果となった．しかしながら，東アジアでは，緑の革命以降の急激な収量の増大を再現しきれず，1980 年ごろまでは PPD は正の値，つまり計算結果が過

大評価されており、一方 1980 年以降では PPD の値は負の値、つまり計算結果が過小評価されていることがわかる (図 4.12(d)). 東南アジアでは、1950 年から見れば、コメの生産量は約 4.5 倍にまで増大し、その間、収穫面積は約 1.8 倍になり、収量は約 2.5 倍に増加した。この収量の増加は近代品種の普及とそれに伴う肥料の増投、灌漑面積の増大が寄与した。また、アジア地域においてもつばら 1960 年から 2000 年にかけて収量が増大しており、南アジアにおける収穫面積の増大は東南アジアより緩慢であり、収量の増大についても全般的に東南アジアのそれには劣っている [96]。しかしながら、南アジア・東南アジアの再現性の指標となる統計量は東アジアより優れている。このことは、東アジア域における緑の革命による化学肥料や農薬の増投、灌漑効率の向上、農業技術の発展などに伴う収量の急激な向上をモデルで再現しきれておらず、一層精度良く収量の年々変動を再現するためには、アジアで広大な面積を有する東アジアにおける、収量増大の要因となる因子を適切にモデルに組み込んでいくことが必要となることを示している。

トウモロコシの統計誤差を見ると、世界第 1 位の生産量である米国が属する北アメリカにおいて、PPD の標準偏差は 8.80%、絶対平均は 7.06% と他地域に比べて相対的に低い (表 4.5, 表 4.6)。一方、2007 年における世界の生産量第 6 位であるメキシコが属する中央アメリカにおける PPD の標準偏差と平均絶対誤差は北アメリカや南アメリカと比較して大きい。これは、モデルの入力値に用いた CRU TS2.1 の 1961-2000 年における 9 月および 10 月の降水量の標準偏差は、アメリカ大陸の中で特に中央アメリカにおいて大きく、メキシコにおけるトウモロコシの収穫時期である 9-10 月の降水量は、収量に大きく影響を及ぼすため、本研究において収量の年々偏差が相対的に大きくなった可能性が高い。また、東アジアでは 1990 年以降、PPD は負の値となっており、収量の計算結果が過小評価となっていることがわかる (図 4.13)。

ソルガムの統計誤差に見る再現性では、世界第 1 位の生産量を誇るナイジェリアが属する西アフリカでは、対象期間において PPD の標準偏差は 19.26% で、平均絶対誤差は 14.61% となり、年々の PPD は $\pm 40\%$ 以下で推移しており、統計値と計算値の差は一定の範囲内に収束していると言える。一方、1975 年より前では PPD のばらつきが 1975 年以降に比べて大きい。これは 1975 年以前における収量の統計値は、それ以降と比較すると収量の絶対量が小さいとともに、年々の値に大きく幅があることに起因する [91]。この統計値の年々変動分を必ずしもモデルで追従することは現時点では難しく、この結果、特に 1960 年代～1970 年代後半は、計算結果の統計誤差が大きくなった要因であると考えられる。また、アフリカにおける有数のソルガム生産国であるエチオピア、スーダンが属する東アフリカにおける PPD の標準偏差は 12.84%、平均絶対誤差は 10.39% と西アフリカに比べて再現性は良いと言える。図 4.14(c) を見ると、東アフリカにおける PPD の値は 0 付近で推移している。

ジャガイモの 2007 年における全世界の生産量は約 2 億 9,000 万 t で、生産量を国別に

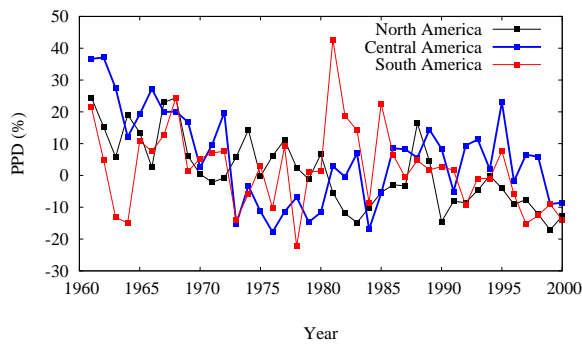
みると中国が 5,500 万 t, ロシア 3,100 万 t, インド 2,200 万 t, アメリカ 2,100 万 t と続く [91]。東アジアにおける計算値と統計値の収量差率は対象期間内において $\pm 30\%$ の範囲内で推移しており, その平均絶対誤差は 12.02% と他の地域に比べて最も値が小さく, また, PPD の標準偏差は 14.72% で同様に他の地域と比べて最も小さく, 計算値と統計値のばらつきが最も小さくかつ再現性が他の地域に比べて高いことが示された。ロシアにおける PPD は, 1962 年で 37.4%, 1973 年, 1976 年, 1979 年では -30% に近い値を取っていることがわかる。一方, これに対応する年における統計値の標準化された値 (図略) を見ると, 1962 年では -2.58, 1973 年, 1976 年, 1979 年では正の値をとっており, 1962 年の統計値は対象期間平均より低く, 1973 年, 1976 年, 1979 年では対象期間平均より大きい。つまり, 計算結果はこれらの年における大きなばらつきに対して, 年々変動を再現しきれないため, その結果 PPD に見る統計値と計算値の差のばらつきが大きくなったと考えられる。

2008 年におけるサツマイモの全世界生産量の 76% は中国である [91]。図 4.16(d) の東アジアにおける PPD を見ると, 1973 年から 1980 年にかけて -10% 前後の値となっており, 計算結果は統計値と比較して過小評価されていることがわかる。しかしながら, 全体としては $\pm 20\%$ の範囲内で推移しており, PPD の標準偏差は 9.46%, 絶対誤差平均は 7.70% と他の地域と比べて最も小さく, 緑の革命後期 1970 年代においては, 計算値は過小評価されているが, それ以外の期間については収量の再現性には一定の精度が保たれていることがわかった。

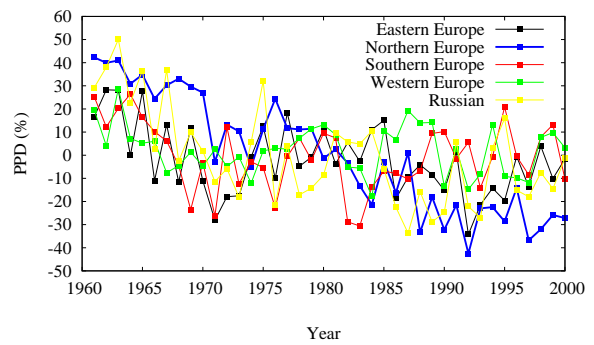
2008 年におけるキャッサバ生産量の世界第 1 位はナイジェリアで, 第 2 位はブラジル [91] であり, その世界生産量に占める割合はそれぞれ 18.7%, 12.5% である。ナイジェリアが属する西アフリカでの収量統計値の標準化された収量を見ると, 1980 年以前では負, 以降では正の傾向が顕著となっており, この年を境界として収量が増加していることがわかる (図略)。一方, 図 4.17(b) より収量差率の値は 1980 年代以前では 30% を最大として正の値, 以降では -15% を最小として負の値を取っており, 統計値の傾向が PPD の傾向に強く影響されていることがうかがえる。また, 収量差率の平均絶対誤差は表 4.6 より 8.94% となっており, 対象期間内における統計量誤差は大きくないが, 技術発展等に伴う収量増大の再現性に課題を残す結果となった。図 4.17(a) を見ると, 南アメリカでの収量差率は全対象期間において $\pm 20\%$ の範囲で推移しており, PPD の標準偏差は表 4.5 より 7.07%, 同様に平均絶対誤差は 5.88% と世界の他の地域に比べてその値は低くなり (表 4.6), 本地域における統計値と計算値の統計誤差は非常に小さく再現性は良好なものとなった。

ダイズ生産量の世界第 1 位はアメリカ, 第 2 位はブラジル, 第 3 位はアルゼンチン (2008 年) [91] であり, この 3 カ国で世界のダイズ生産量の 60% 強を占める。北アメリカでは 1960 年代において, 図 4.18(a) より, 計算結果は統計値に比べて過大評価する結果

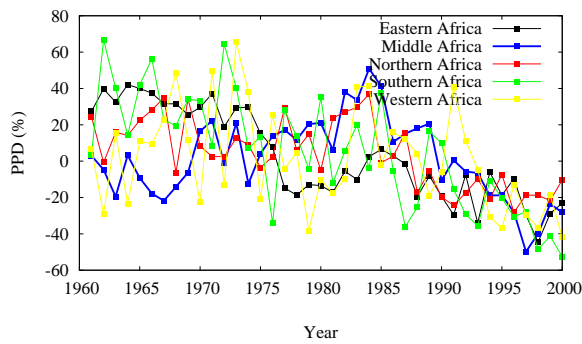
となり、1980年代後半から2000年にかけてはPPDの値は負の値を取り、計算値が過小評価されていることがわかる。また、収量差率の平均絶対誤差は8.56%であり、北アメリカにおけるコムギ、コメ、トウモロコシと同レベルの統計誤差となった。一方、南アメリカでは、1960年代でのFAO統計値に見る低収量を計算結果では過大に評価されていることがわかる。また、本地域においては年々収量が増加する傾向にあるが[91]、PPDを見ると、1980年代中ごろ以降はPPDの値が負となっており、本モデルで再現された収量値は統計量の年々増大を再現しきれていない。しかしながら、1968年を除いてPPDの値は±20%以内に収まっている。収量の増加傾向の要因となった因子を適切にモデル内に組み込んでいくことが今後の課題であることがわかった。



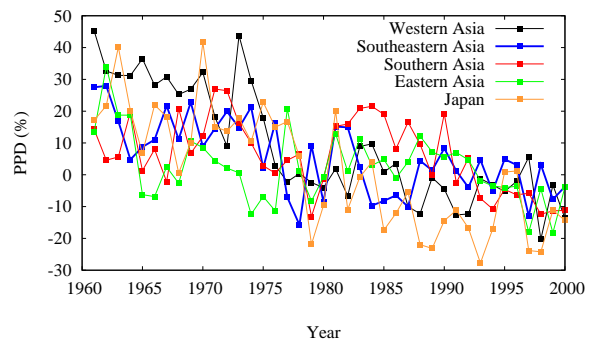
(a) 北アメリカ，中央アメリカ，南アメリカ



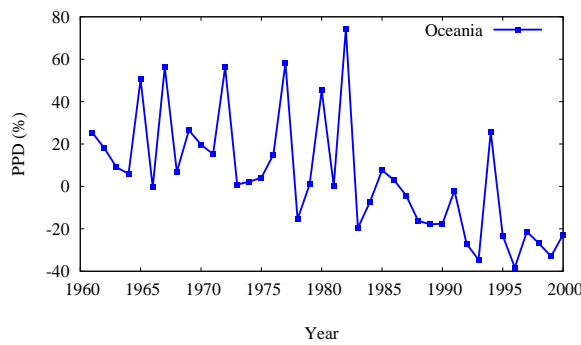
(b) ヨーロッパ，ロシア



(c) アフリカ

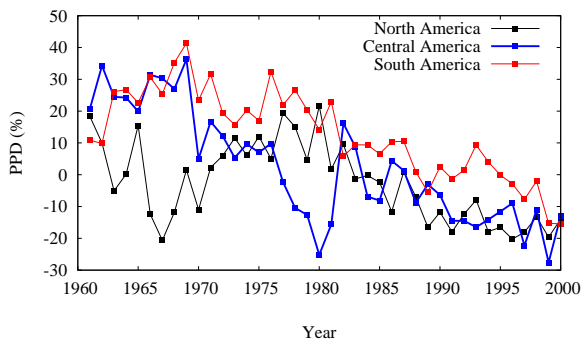


(d) アジア

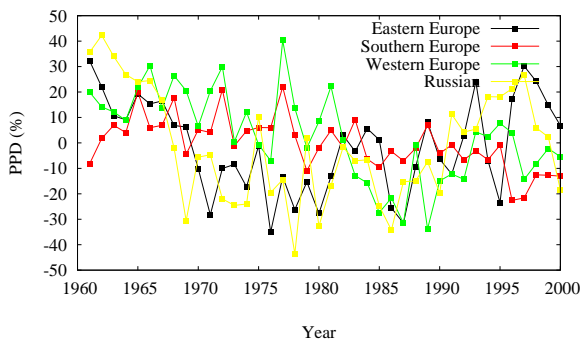


(e) オセアニア

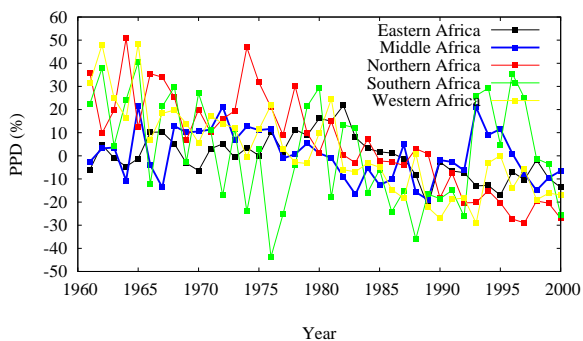
図 4.11 各地域におけるコムギの収量計算値と FAO による統計値の収量差率 (%)



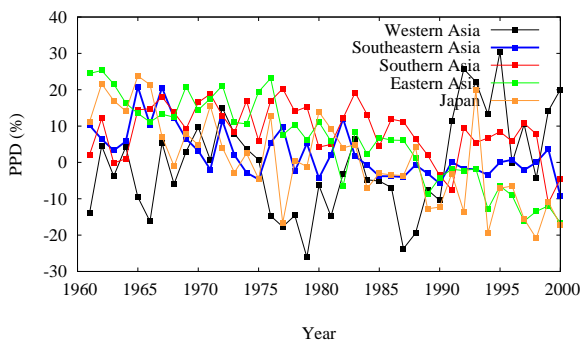
(a) 北アメリカ, 中央アメリカ, 南アメリカ



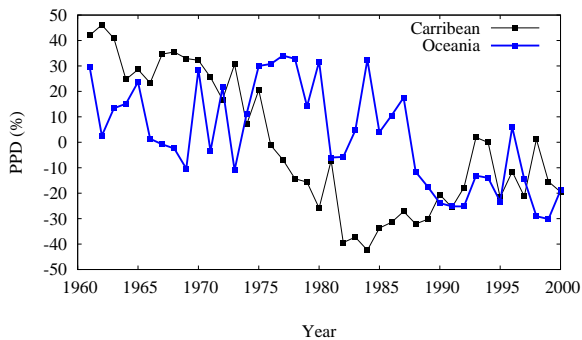
(b) ヨーロッパ, ロシア



(c) アフリカ

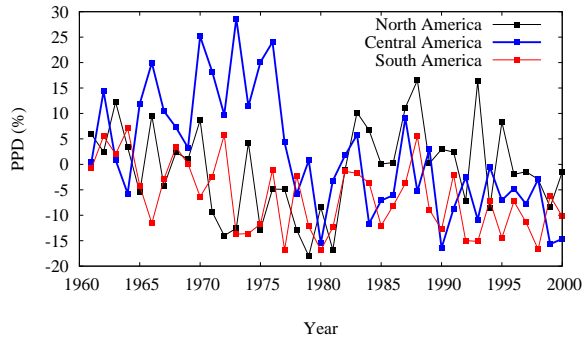


(d) アジア

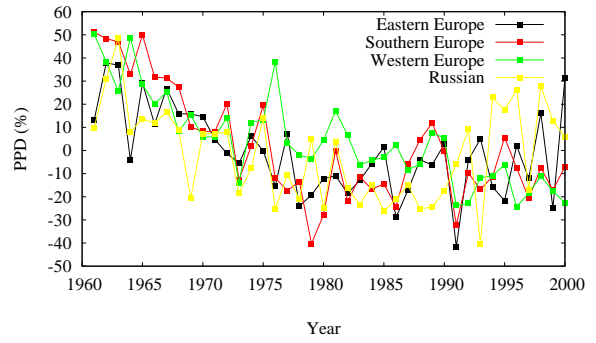


(e) カリブ, オセアニア

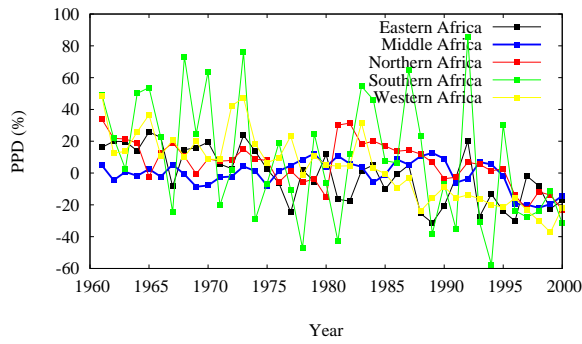
図 4.12 各地域におけるコメの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)



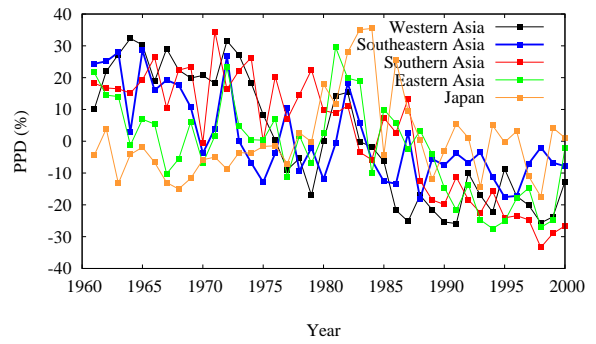
(a) 北アメリカ, 中央アメリカ, 南アメリカ



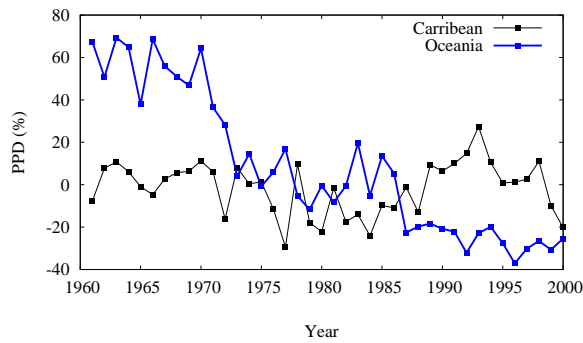
(b) ヨーロッパ, ロシア



(c) アフリカ

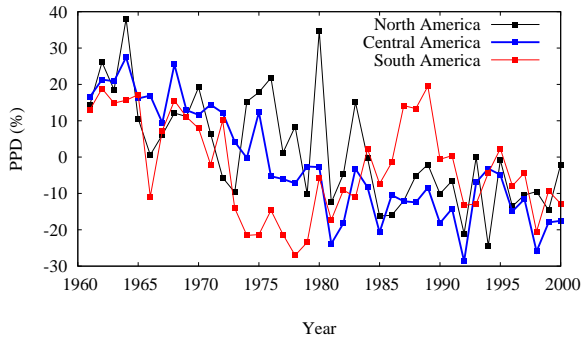


(d) アジア

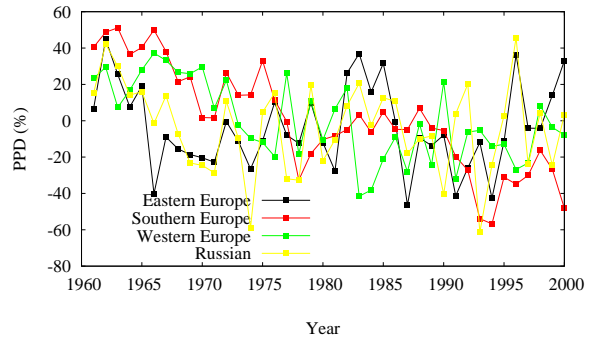


(e) カリブ, オセアニア

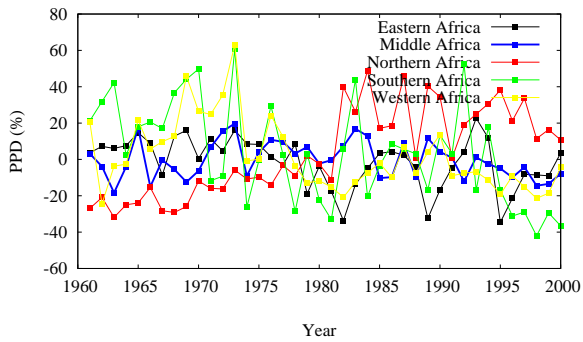
図 4.13 各地域におけるトウモロコシの収量計算値とFAOによる統計値の収量差率(%)



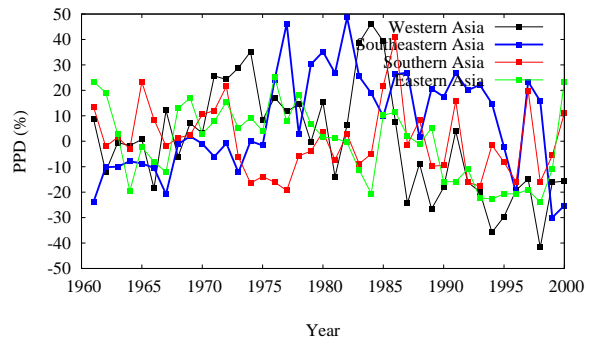
(a) 北アメリカ, 中央アメリカ, 南アメリカ



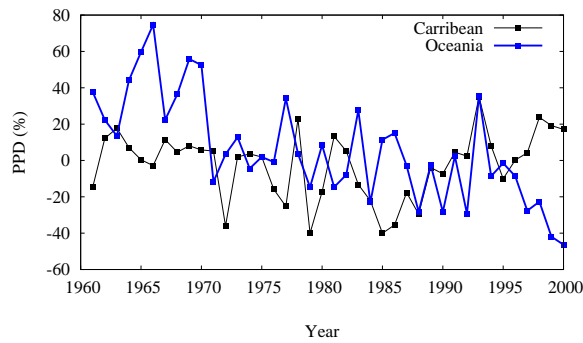
(b) ヨーロッパ, ロシア



(c) アフリカ

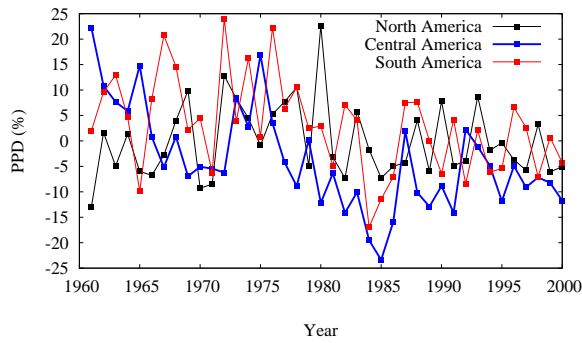


(d) アジア

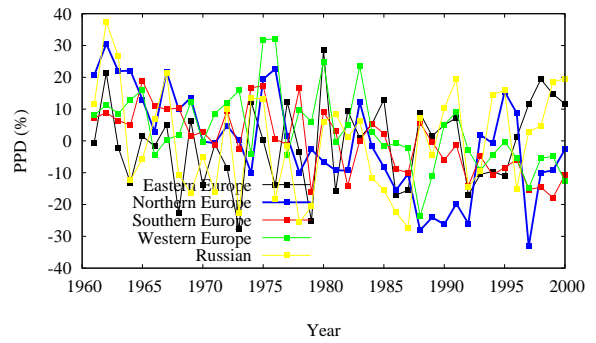


(e) カリブ, オセアニア

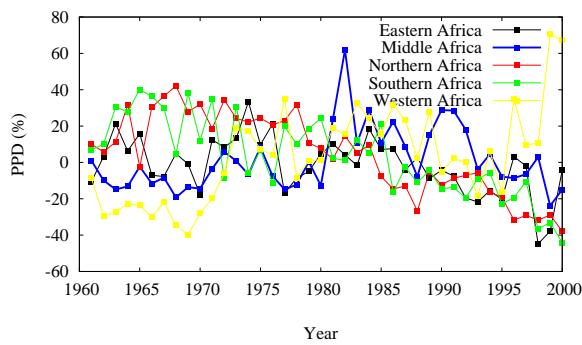
図 4.14 各地域におけるソルガムの収量計算値と FAO による統計値の収量差率 (%)



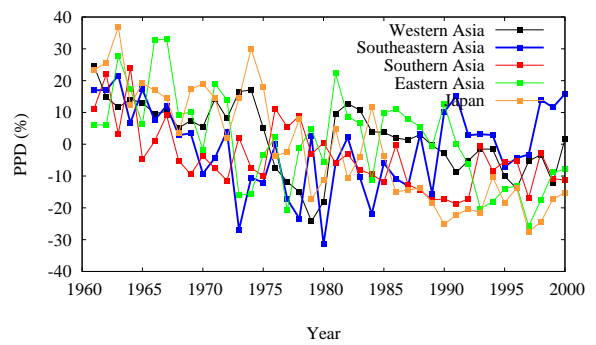
(a) 北アメリカ, 中央アメリカ, 南アメリカ



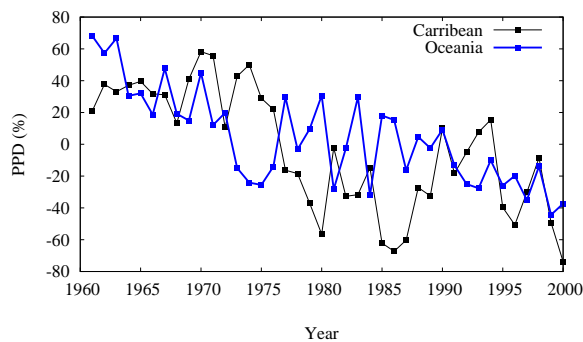
(b) ヨーロッパ, ロシア



(c) アフリカ



(d) アジア



(e) カリブ, オセアニア

図 4.15 各地域におけるジャガイモの収量計算値と FAO による統計値の収量差率 (%)

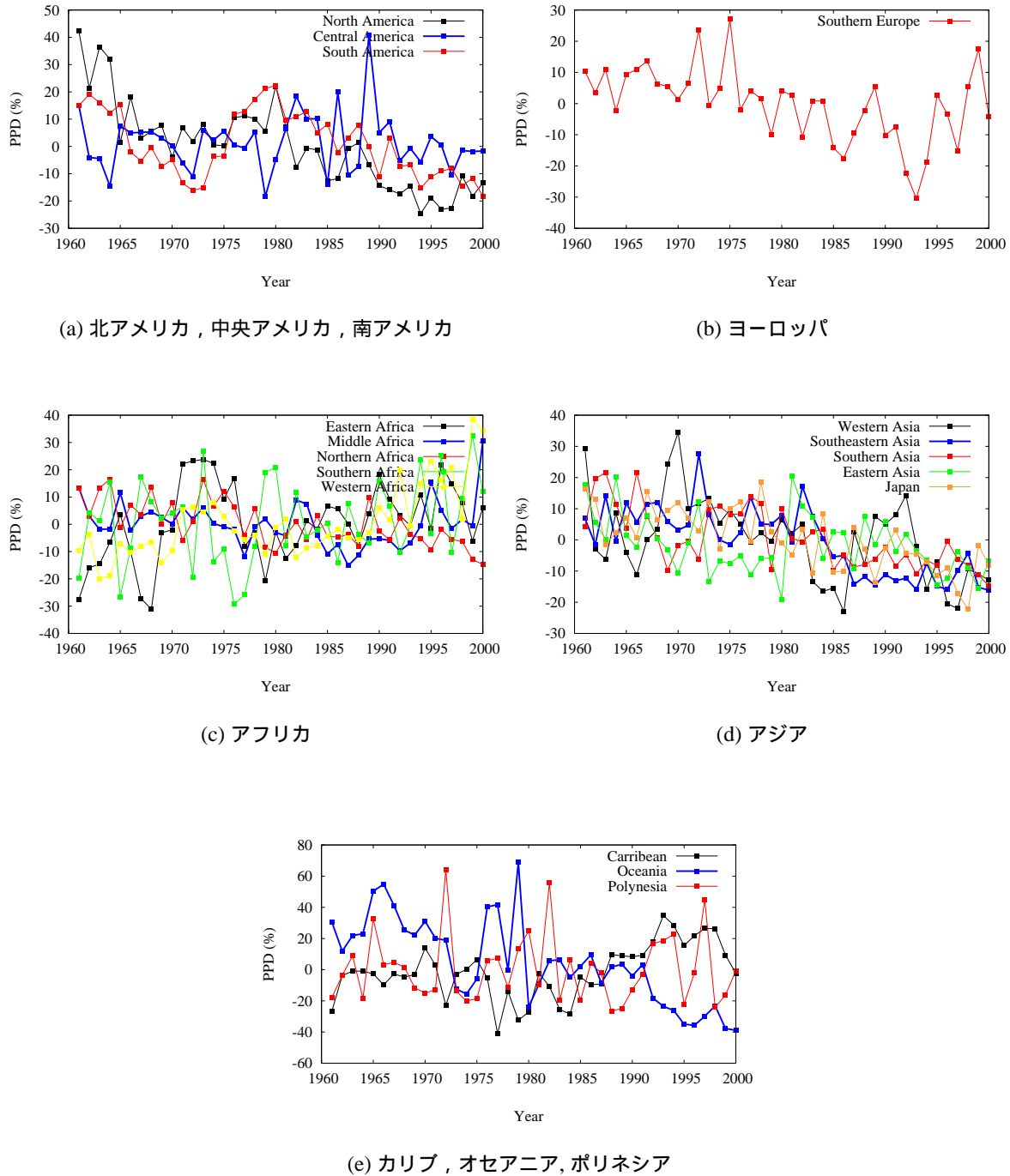
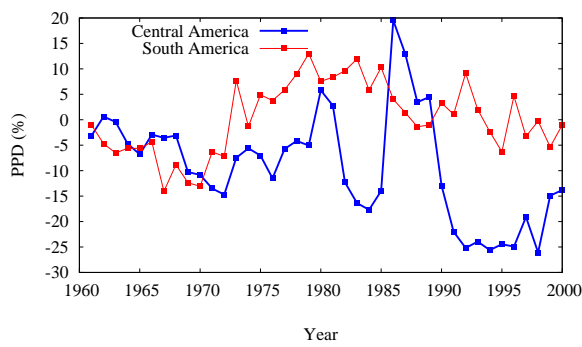
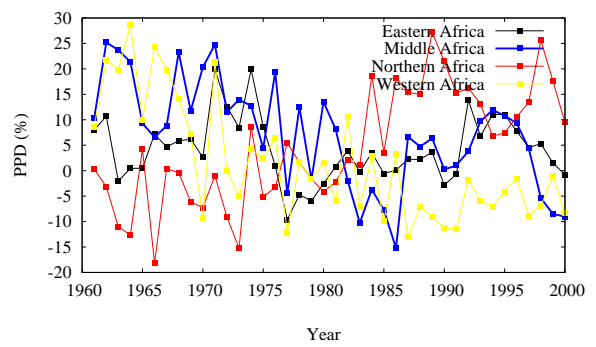


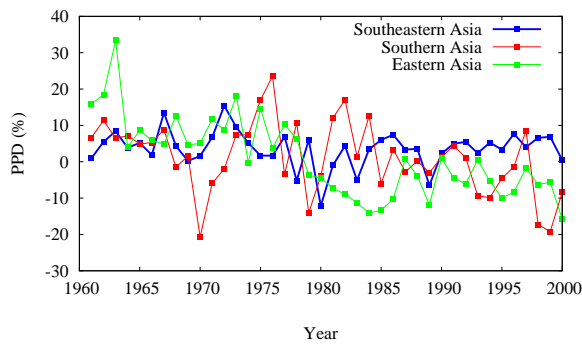
図 4.16 各地域におけるサツマイモの収量計算値と FAO による統計値の収量差率 (%)



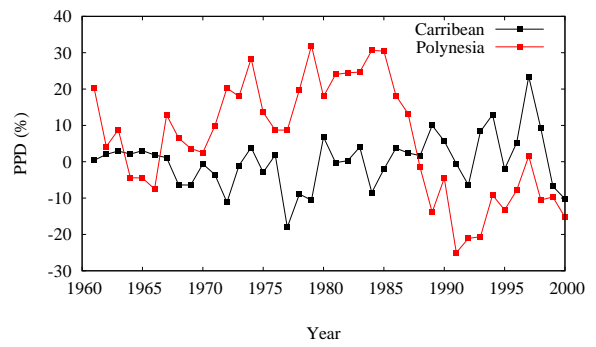
(a) 中央アメリカ, 南アメリカ



(b) アフリカ

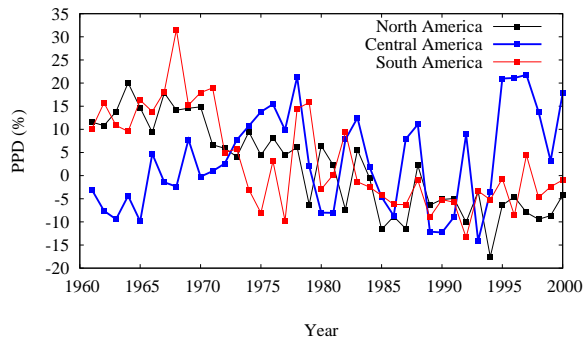


(c) アジア

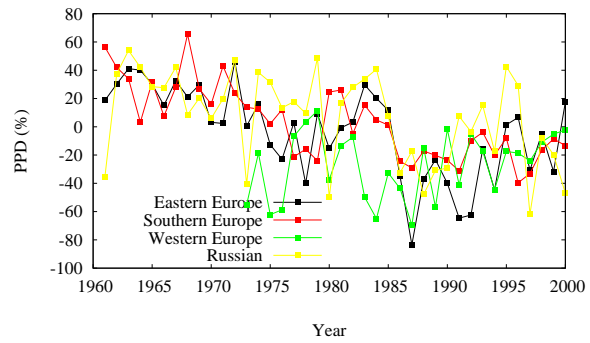


(d) カリブ, ポリネシア

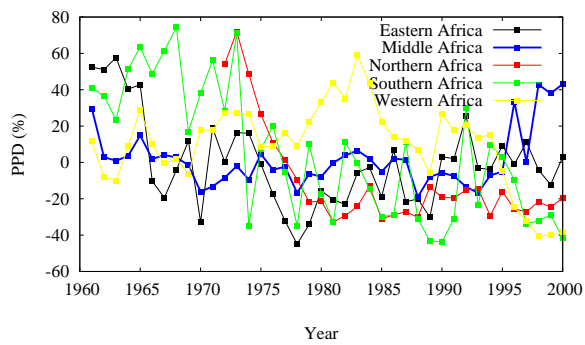
図 4.17 各地域におけるキャッサバの収量計算値と FAO による統計値の収量差率 (%)



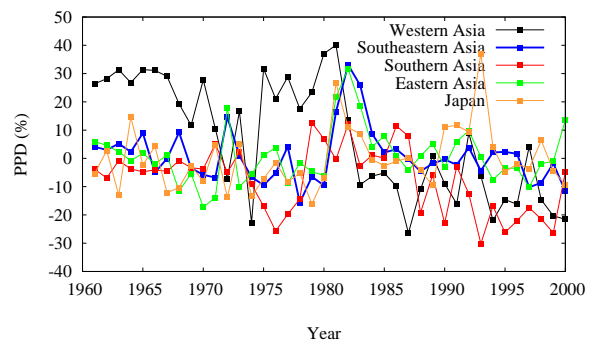
(a) 北アメリカ, 中央アメリカ, 南アメリカ



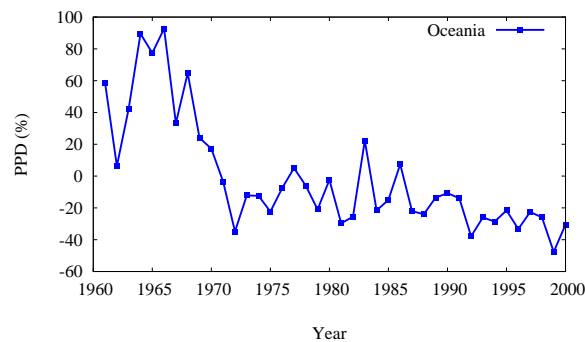
(b) ヨーロッパ, ロシア



(c) アフリカ



(d) アジア



(e) オセアニア

図 4.18 各地域におけるダイズの収量計算値と FAO による統計値の収量差率 (%)

表 4.5 収量算定値の統計値との差率の標準偏差 (%)

	コムギ	コメ	トウモロコシ	ソルガム	ジャガイモ	サツマイモ	キャッサバ	ダイズ
北アメリカ	11.27	12.45	8.80	15.03	7.32	16.07	-	9.66
東ヨーロッパ	16.24	18.91	21.45	27.08	13.70	-	-	31.98
北ヨーロッパ	29.87	-	-	-	16.74	-	-	-
南ヨーロッパ	14.75	10.81	35.25	37.80	10.40	12.31	-	43.49
西ヨーロッパ	11.65	20.25	27.52	24.22	14.58	-	-	-
ロシア	27.64	24.66	23.90	25.96	17.77	-	-	40.85
カリブ	-	32.82	12.31	17.94	47.22	18.57	7.97	-
中央アメリカ	14.43	17.58	11.92	15.17	9.82	10.69	10.74	10.51
南アメリカ	12.99	13.81	6.98	13.60	9.23	11.89	7.07	10.38
オセアニア	28.00	20.01	33.79	28.70	29.60	27.40	-	35.75
ポリネシア	-	-	-	-	16.34	21.75	15.84	-
東アフリカ	31.08	9.73	17.25	12.84	15.58	14.73	7.25	38.50
中央アフリカ	22.31	10.93	9.03	10.06	17.15	8.39	10.34	15.57
北アフリカ	18.71	21.11	13.93	23.97	22.21	8.18	11.21	-
南アフリカ	31.44	22.62	38.28	27.58	21.49	15.28	-	35.93
西アフリカ	27.55	18.83	21.31	19.26	25.86	13.06	11.29	22.64
西アジア	26.05	14.72	22.37	26.72	11.42	15.15	-	25.46
東南アジア	13.65	7.84	16.15	27.18	12.90	11.61	5.25	11.83
南アジア	11.41	7.48	18.96	13.63	10.10	9.65	9.88	11.43
東アジア	10.54	12.00	14.74	14.68	14.72	9.46	10.69	9.81
中央アジア	-	-	-	-	-	-	-	-
日本	18.31	12.22	12.78	-	17.65	9.61	-	10.84

表 4.6 収量算定値の統計値との差率の平均絶対誤差 (%)

	コムギ	コメ	トウモロコシ	ソルガム	ジャガイモ	サツマイモ	キャッサバ	ダイズ
北アメリカ	8.97	10.77	7.06	12.13	6.04	12.31	-	8.56
東ヨーロッパ	12.61	15.39	15.76	20.52	10.77	-	-	25.31
北ヨーロッパ	24.01	-	-	-	13.11	-	-	-
南ヨーロッパ	11.78	8.15	23.99	27.47	8.44	9.14	-	28.36
西ヨーロッパ	9.49	15.82	18.02	20.21	10.57	-	-	-
ロシア	19.07	19.23	18.30	19.52	14.41	-	-	36.33
カリブ	-	26.56	9.82	13.78	37.58	13.72	5.60	-
中央アメリカ	12.53	14.96	9.57	13.19	8.69	7.71	11.59	9.11
南アメリカ	9.96	15.37	7.91	11.94	7.64	10.28	5.88	8.53
オセアニア	21.37	17.05	27.74	22.52	24.86	22.18	-	27.83
ポリネシア	-	-	-	-	50.83	16.55	14.30	-
東アフリカ	25.69	7.53	14.48	10.39	11.81	11.45	6.18	23.66
中央アフリカ	18.14	9.06	7.01	8.44	12.98	5.93	10.46	10.36
北アフリカ	15.84	17.72	12.52	20.47	19.37	6.78	9.49	-
南アフリカ	26.61	19.52	32.21	22.67	17.80	12.39	-	30.76
西アフリカ	22.59	14.98	17.51	14.61	20.45	9.67	8.94	20.41
西アジア	19.91	11.36	19.08	19.61	9.63	10.88	-	23.06
東南アジア	12.08	5.72	12.15	21.54	10.56	9.20	5.43	7.43
南アジア	10.69	10.07	16.87	10.75	8.96	7.93	7.84	10.47
東アジア	8.08	11.50	11.76	12.30	12.02	7.70	8.54	7.04
中央アジア	-	-	-	-	-	-	-	-
日本	15.65	10.07	8.99	-	15.57	7.82	-	8.14

4.4 結語

本章では、3章で示した農業収量算定モデルを1961-2000年の期間に適用し、各作物の収量の再現性を調べ、モデルの有用性を評価した。その結果、作物ごとの空間分布は現在の栽培地域を良好に再現できていることがわかった。また、年々の収量再現値は統計値に比べて大きくかけ離れた事例はなく、概ね1:1に対応することがわかった。主要穀物に見る相関係数では、コムギの収量再現における相関係数はヨーロッパで0.53、東アジアで0.98、南アジアで0.93、北アメリカで0.81と高く、コムギの収量再現結果は統計値の年々変化を良く再現できていることがわかる。また、コメの収量結果では、東南アジアでの相関係数は0.97、南アジアで0.95、東アジアで0.94と高く、特に世界の生産量の多くを占めるアジア域での統計値との偏差は小さく、年々変動の再現性は良好となった。一方、信頼区間90%で有意な相関が得られなかった地域や作物も多数存在することから、今後は技術発展や土地利用の変化などを考慮した年々変動をより高い精度で再現できるモデルの構築が必要となることがわかった。また、計算期間(1961-1990年)を地域ごとに平均化し、各地域ごとの収量値と統計値を用いた決定係数では、収穫面積や生産量での重みづけのありなしに関わらず、決定係数は0.8を超えており、年々変動の再現にはまだ改善しなければならないことがあるが、地域ごとの収量平年値に見るモデルの再現性は非常に高いと言える。

第 5 章

気候変動が農業生産に及ぼす影響

地球温暖化の影響で気温や降水特性の変化が顕著になってきていると言われている。IPCC 第 4 次評価報告書は、21 世紀半ば及び後期までの予測に基づいた極端な気象及び気象現象の変化による寒冷環境での農作物収量の増加、温暖環境での収量減少、土壌の浸食・浸水などによる耕作不能化を指摘している。本章の目的は、物理法則に従って将来の気象現象や気候要素が再現された世界気候研究計画 (World Climate Research Programme, WCRP) の第 3 次結合モデル相互比較プロジェクト (Phase 3 of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP3) の複数の気候モデルによる SRES A1B, A2, B1 シナリオに基づいて計算された出力値を農作物収量算定モデルの入力値に用い、近未来 (2040-2059 年)、将来 (2080-2099 年) における各作物の収量・生産量の現在 (1980-1999 年) からの変化を見積もることである。

5.1 既往の研究と気候変動影響評価実験

本章では温暖化影響評価を目的に CMIP3[58] に基づく将来気候推定値を用い、2040-2059 年、2080-2099 年の全球の農業収量を算定し、将来予測を試みる。「非定常な海面温度 (SST) により計算される各期間内の GCM 出力は基本的には非定常である」[97] ため、本研究では農業収量算定モデルにより得られた各将来期間 (2040-2059 年、2080-2099 年) ごとの収量予測値の平均を用いて、1980-1999 年における平均収量と比較することにより、現在からの変動を推定する。以上のプロセスによって、温暖化が農業生産に与える影響などの将来変動予測を行うことが目的である。

本研究に先立ち、先行研究をレビューする。Takahashi *et al.* (1997)[98] は、アジアにおける全球気温が 2°C から 5°C 上昇すると、中国におけるコムギの生産量は 6 割、トウモロコシは 4 割減少するなど、アジアの穀物生産が大きな打撃を受けることになると推定した。Matthews *et al.*(1997)[99] は、1990 年比で CO₂ 濃度が 2 倍、地球の平均気温が 0°C、

1°C, 2°C, 4°C 上昇するとしたシナリオ下で, アジアでのコメの生産量が平均で 4.4% 減少することを示した。Masutomi *et al.* (2009)[100] は, SRES A1B(18GCM), A2(14GCM), B1(17GCM) の合計 49 の GCM 出力を用いて, GCM 出力の不確実性を評価するとともに将来気候がアジア域におけるコメの収量に与える影響を評価した。その結果, CO₂ 濃度の増加による施肥効果がコメの収量を増加させる方向に働くが, 2081-2090 年の平均の収量は, 1991-2000 年平均に比べ減少することを示した。Tan *et al.*(2003)[101] は, 作物ごとの植え付け期と収穫期を考慮した作物収量モデル EPIC を用いて主要穀物の収量計算を全球レベルで行い, モデルの有用性を示すとともに, 温暖化が多くの国で農作物生産に悪影響を与える可能性があることを示した。Hitz *et al.*(2004)[102] は, 将来において高緯度では作物の栽培に適した条件が得られやすく, 低緯度では作物栽培に適した期間が短くなる結果, 先進国と発展途上国の間の作物生産における不均衡が増大することを示した。また, 気温上昇が農作物に与える影響は不確実性が大きい, 平均気温が 3°C~4°C 以上上昇すると作物生産にとって悪影響があることを複数の研究者の見解が一致していることを示した。Boudeau *et al.*(2007)[103] は, LPJmL を用いて炭素と水循環が農業に与える影響の調査および主要穀物の収量算定を全球レベルで行い, 熱帯性の国々では収量が過大評価され, 冷涼な国々では過小評価される傾向を示した。また, 灌漑に関する情報が計算結果に与える不確実性の要因となることを指摘した。Lobell *et al.*(2007)[104] は, 日内気温較差と平均気温の将来変化が作物収量に与える影響を 11 の GCM モデルを用いて調べ, 日内気温較差の将来変化が与える作物収量への影響は平均気温の将来変化に比べて小さいことを示した。Parry *et al.*(2004)[105] は, A1FI, A2, B1, B2 シナリオ下での主要穀物の収量変化を全球レベルで予測した。その結果, CO₂ 施肥効果のあるなしに関わらず, 全球平均で穀物の生産量は減少することを示し, B1 と B2 シナリオ下では, 先進国と発展途上国の将来の収量差が A1FI, A2 シナリオと比較し小さいことを示した。Tatsumi *et al.*(2011) は, 世界の主要作物 8 種の収量再現計算と A1B シナリオでの将来の収量予測をモデル計算により全球レベルで行った。その結果, 温暖化による気温の上昇により, 現在栽培適地とされている場所において生産性が減少し, カナダや北ヨーロッパ, 中国東北部などの現在冷涼な気候の土地が作物栽培に適したものとなる可能性が高いことを示した。

以上の既往研究が示すように, 将来の温暖化が農業生産に与える影響に関する研究は数多く行われている。一方, 各種モデルの入力値として用いられる将来気候値は, 各研究機関によって作成されており, GCM モデルに採用している物理過程, 初期値・境界値がそれぞれ異なることが多く, 将来の社会シナリオごとに予想される CO₂ 濃度や気候値の傾向が異なる。既往の研究は, 気候モデル出力値を利用したものが多いが, 入力値として利用されている GCM モデル出力の数や社会シナリオの数は現状では十分とは言えず, 将来の気候が農業生産に与える影響予測結果の不確実性については十分な議論がなされていないのが現状である。したがって, 本章では SRES A1B, A2, B1 シナリオ下において

CMIP3 による最大 24 の気候モデル出力値（3 シナリオで合計 65 のモデル結果）を用いて、気候変動が農業収量に与える影響を推定し、結果を分析する。

5.1.1 WCRP-CMIP3 の概要

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第 4 次報告書では、第 3 次結合モデル相互比較プロジェクト（以下、CMIP3）において、世界中の研究機関によって開発された複数の気候モデルによる実験結果が用いられている。また、CMIP3 の複数の GCM による実験結果は PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) の Web サイトで公開されているため、研究目的であれば自由に利用することができる。IPCC(2007)[4] では、これら気候モデルの全球平均値で 21 世紀末は 20 世紀と比較して、大気中の温室効果ガス濃度が 2000 年の値で一定ならば気温上昇は 0.6℃、エネルギー源のバランス重視が前提とされ、地域間格差を解消する立場を取る A1B シナリオ化で気温は 2.8℃ 上昇するとされている。

CMIP3 マルチ気候モデルのうち PCMDI によって公開されているモデルは 24 種類あり、モデルによっては複数のアンサンブルランを実施している。各モデルの水平格子間隔は数 100-450km 程度であるため、全球規模での議論を行う際には、力学的あるいは統計的なダウンスケーリングによって時空間的な詳細化がおこなわれることが多い。

5.1.2 A1 シナリオ

A1 シナリオは、「高成長社会シナリオ」をイメージしており、マーケットの利点を活用して、世界中がさらに経済成長を遂げ、教育、技術、そして社会制度に大きな革新が生じるシナリオである [107]。過去 100 年間の平均経済成長率年約 3% が、今後 100 年間も続くとし、2050 年の一人当たり所得は世界平均で 2 万ドルを超える。とくに発展途上国の成長がめざましく、南北の格差が急速に縮まる。これにより途上国の出生率は下がり、世界人口は 2050 年の 90 億人から 2100 年には 70 億人に下がる。平均寿命は伸び、核家族化が進む。急速な経済の拡大は、大量のエネルギー資源を必要とし、資源開発や新エネルギー開発への投資が加速する。途上国の食生活が肉食嗜好に急速にシフトし、集約的農業に移行する。先進国から途上国への技術移転も進み、途上国の技術革新や自動車保有が早まる。環境問題の解決はマーケットによって大きく影響を受け、環境保全というよりも環境管理や創造の観点から解決が図られる。A1 シナリオは、エネルギー・システムにおける技術革新の選択肢が異なる 4 つのグループにさらに分かれる。石炭のクリーン利用技術の大幅な革新を仮定したシナリオ (A1C)、石油と天然ガス関連の技術革新が顕著なシナリオ (A1G)、新エネルギーの大幅な技術革新を見込んだシナリオ (A1T)、そしてこれら

の技術革新がバランスして生じるシナリオ (A1B) である。

5.1.3 A2 シナリオ

A2 シナリオは、「多元化社会シナリオ」とでも呼べるものである [107]。世界の各地域が固有の文化を重んじ、多様な社会構造や政治構造を構築していくことによって、世界の経済や政治がブロック化していくことを仮定している。このような社会では、国や地域間に常に緊張関係が生じ、国際的な貿易や人の移動、技術の移転が制限される。このため経済発展は遅れ、一人当たりの所得も 2050 年で 7,000 ドル程度と伸び悩む。途上国の出生率は下がらず、来世紀末の人口は 150 億人に達してしまう。地域間の自然資源や資産の格差は、地域間の所得格差をますます拡大させる。資源の少ない地域では技術開発への投資が加速されるが、経済成長が低めであるため一般的に技術革新は遅れ気味となる。環境への関心は相対的に低く、地域的な環境問題の深刻化のみが環境対策の動機づけとなる。

5.1.4 B1 シナリオ

B1 は「持続発展型社会シナリオ」と呼ぶのがふさわしい [107]。環境や社会への高い関心に基づいて、地球公共財としての環境の保全と経済の発展を地球規模で両立し、バランスのとれた経済発展を図るシナリオである。資源利用の効率化 (脱物質化)、社会制度、環境保護に集中的に投資が起こる。資源利用の効率化は、資源の供給側面を重視する高成長社会シナリオと違い、資源の需要面に集中して生じる。また、廃棄物の減量化やリサイクルが進み、資源利用の効率化やリサイクルの活性化によって環境産業の市場が急速に拡大し、これが経済成長の持続に大きく貢献する。経済成長率は高成長シナリオより低くはなるが、2050 年の一人当たり所得は 1 万 3,000 ドルに達する。発展途上国では、先進国からの先端技術の移転が進み、クリーン技術が普及し、これに伴い、教育やキャパシティビルディングも大きく進展する。このため、いわゆるショートカットと呼ばれる発展パターンに乗って、途上国の公害対策が著しく進展する。公共交通システムが整備され、都市構造はコンパクト化し、低投入・低負荷型農業が普及する。自然保護を推進することにより農産物価格は相対的に高いが、肉食への食生活へのシフトは抑えられる。

5.2 気候シナリオの作成と影響評価手法

5.2.1 気候シナリオの作成

本研究では、モデルの入力値に用いる現在気候値には CRU TS 2.1 を、将来気候値として 5.1 節に示した A1B, A2, B1 の 3 シナリオによる将来気候値を採用する。GCM 気

候モデル出力値と過去に得られた観測気候値の間には系統的なバイアスがあることから、1961-1990年の各年について、月平均値がCRU TS 2.1による値と一致するようにマルチ気候モデルの出力値に補正を施した。すなわち、月平均気温値についてはベースライン期間(1961-1990年)のCRU TS 2.1と気候モデル出力の月平均値の差分(気候変化値)を気候モデル出力値に加算することにより作成した[100]。また、気温以外の物理量については、気候モデル出力値がベースライン期間の気候モデル出力の平均値以上の場合は、ベースライン期間のCRU TS 2.1と気候モデル出力の平均値の差分、未満の場合は、その比を気候モデル出力値にそれぞれ加算・乗算することにより作成した(式(5.1),(5.2))。入力に用いた月別の気候データは、スプライン補間によって日別データに変換した。また、標高[88]・土壌タイプ[84]、灌漑率データ[79]、農事暦データ[77]は最短距離法を適用することにより、モデル入力に用いる全データを水平解像度0.5度に統一した。

$$Temp'_{yr,mo} = Temp_{yr,mo} + (CRUTemp_{61-90,mo} - Temp_{61-90,mo}) \quad (5.1)$$

$$Var'_{yr,mo} = \begin{cases} Var_{yr,mo} + (CRUVar_{61-90,mo} - Var_{61-90,mo}) & \text{if } Var_{yr,mo} \geq Var_{61-90,mo} \\ Var_{yr,mo} \times \frac{CRUVar_{61-90,mo}}{Var_{61-90,mo}} & \text{if } Var_{yr,mo} < Var_{61-90,mo} \end{cases} \quad (5.2)$$

ここに、 $Temp$ は GCM の月最高・平均・最低気温の出力値、 Var は、月降水量、月放射量、風速など気温以外の気候要素値を示す。' の添え字がついた変数は、気候シナリオにおける気候値を示す。サフィックスの 61-90 は、1961-1990 年間ににおける平均を示し、 $CRUTemp_{61-90,mo}$ 、 $CRUVar_{61-90,mo}$ は、それぞれ 1961-1990 年における月別の気温平年値、気温以外の気候値の月別平年値を示す。また、前節で述べたとおり、CMIP3 マルチ気候モデル出力値はモデルごとに解像度が異なり、低解像度(大気部分で約 100-450km)である。さらに農業収量算定モデルを使った将来影響評価に使用する入力データとしては解像度が粗く不十分である。したがって、本研究では、気温に関してはスプライン補間、降水量に関しては距離の逆 2 乗則による $1/r^2$ 重みづけ補間を用いる。その補間された GCM 出力値の水平解像度は 0.5 度 \times 0.5 度である。本研究では A1B シナリオとして 24 のモデル、A2 シナリオでは 19 のモデル、B1 シナリオでは 22 のモデルを使用した。表 5.1 に本研究で使用したモデル名を A1B, A2, B1 のシナリオごとに示す。将来の機械化効率率は、村井ら [108] による耕地面積あたりトラクター台数と 1 人当たり GDP の回帰式から、将来の耕地面積あたりトラクター台数を算出し、3.6 節で示した方法により勘案する。CO₂ の施肥効果は、Masutomi *et al.*(2009)[100] で示されている各シナリオごとおよび年

代ごとの係数を乗ずる。なお、将来における土地利用および灌漑エリアは不確実性が高いため、本研究では現在から変化しないものとした。

以上により入力データを整備した上で、農業収量算定モデルを使用し、近未来 2040-2059 年、将来 2080-2099 年におけるコムギ・コメ・トウモロコシ・ソルガム・ジャガイモ・サツマイモ・キャッサバ・ダイズの収量を算定し、気候変動がコメの収量に与える影響を評価した。

表 5.1 計算に用いた GCM モデルと気候シナリオ

研究機関	GCM Model Name	SRES シナリオ		
		A1B	A2	B1
Bjerknes Centre for Climate Research	BCCR-BCM2.0, Norway	○	○	○
National Center for Atmospheric Research & Analysis	CCSM3, USA	○	○	○
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	CGCM3.1(T47), Canada	○	○	○
Canadian Centre for Climate Modelling	CGCM3.1(T63), Canada	○		○
Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques	CNRM-CM3, France	○	○	○
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	CSIRO-Mk3.0, Australia	○	○	○
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	CSIRO-Mk3.5, Australia	○	○	○
Max Planck Institute for Meteorology				
Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological	ECHAM5/MPI-OM, Germany	○	○	○
Research Institute of KMA, and Model and Data group.	ECHO-G, Germany/Korea	○	○	○
LASG/Institute of Atmospheric Physics	FGOALS-g1.0, China	○		○
US Dept. of Commerce/NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-CM2.0, USA	○	○	○
US Dept. of Commerce/NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-CM2.1, USA	○	○	○
NASA/Goddard Institute for Space Studies	GISS-AOM, USA	○		○
NASA/Goddard Institute for Space Studies	GISS-EH, USA	○		
NASA/Goddard Institute for Space Studies	GISS-ER, USA	○	○	○
Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia	INGV-SXG, Italy	○	○	
Institute for Numerical Mathematics	INM-CM3.0, Russia	○	○	○
Institut Pierre Simon Laplace	IPSL-CM4, France	○	○	○
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	MIROC3.2(hires), Japan	○		○
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	MIROC3.2(medres), Japan	○	○	○
Meteorological Research Institute	MRI-CGCM2.3.2, Japan	○	○	○
National Center for Atmospheric Research	PCM, USA	○	○	○
Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office	UKMO-HadCM3, UK	○	○	○
Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office	UKMO-HadGEM1, UK	○	○	○

5.2.2 気候変動が作物生産に与える影響と不確実性の評価手法

気候変動の農作物生産量に与える影響を定量的に評価するため、以下の式に示す指標を定義する [100] .

$$CP_{p,m} = \frac{PR_{p,m} - PR_{1990s,m}}{PR_{1990s,m}} \times 100 \quad (5.3)$$

$$AC_{P_p} = \frac{1}{n} \sum_{model} CP_{p,m} \quad (5.4)$$

$$SD_{CP_p} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left\{ \left(\sum_m CP_{p,m}^2 \right) - \frac{1}{n} \left(\sum_m CP_{p,m} \right)^2 \right\}} \quad (5.5)$$

$$P_{CP<0} = \frac{NUM_m(CP_{p,m} < 0)}{n} \times 100 \quad (5.6)$$

$$PR_{p,m} = \int_{ca} Y_{i,p,m} dA \quad (5.7)$$

ここに、 $CP_{p,m}$: 現在 (1980-1999 年) から近未来 (2040-2059 年)、将来 (2080-2099 年) における生産量変化率 (%), AC_{P_p} : 各気候シナリオ下におけるモデルごとの生産量変化率の平均 (%), SD_{CP_p} : 各シミュレーション期間におけるモデルごとの生産量変化率の標準偏差, $P_{CP<0}$: 各シミュレーション期間においてモデル別の生産量変化率が負になる割合 (%), $PR_{p,m}$: 各シミュレーション期間におけるモデルごとの生産量 (kg) を示し、 $Y_{i,p,m}$: 各グリッド上における収量 (kg/ha) を Portmann *et al.*(2010)[87] による各グリッドにおける収穫面積値を乗じた値を各地域ごとに積分することによって得る。n: 計算に使われた各シナリオ下における GCM モデルの数であり、SRES A1B, A2, B1 でそれぞれ 24, 19, 22 である。なお、各シミュレーション期間はそれぞれ現在 1980-1999 年、近未来 2040-2059 年、将来 2089-2099 年である。なお、サフィックス p: 現在、近未来、将来の各期間、m: 計算に使用した各モデル、ca: (current crop area, 現在の栽培エリア) である。

5.3 各シナリオにおける将来の生産量変化と不確実性

表 5.1 に示した CMIP3 マルチ気候モデル出力値を用いて、近未来および将来における各作物の生産量を SRES A1B, A2, B1 各シナリオ下で推定し、現在の作物生産量からの変化を求める。ただし、将来の土地利用の変化は不確実性が高いため考慮しないものとする。

る。図 5.1-5.8 に A1B, A2, B1 シナリオにおける近未来, 将来の生産量変化率を各作物ごとに示す。なお, 図は最小値, 25 パーセンタイル, 中央値, 75 パーセンタイル, 最大値を表示した箱髭図である。また, 表 5.2-5.9 は, 各地域ごとの生産量変化率の平均 A_{CP} , 全モデル数に占める生産量変化率が負となる割合 $P_{CP<0}$, 各モデルによる生産量変化率の標準偏差 SD_{CP} を示したものである。

コムギの地球全体の GCM 平均に見る生産量は近未来の A1B で 7.2%, A2 で 7.0%, B1 で 6.7% 減少し, 将来の A1B で 9.8%, A2 で 10.3%, B1 で 7.8% 減少すると算定された。地域別に見ると, ロシアでは A1B シナリオ下での近未来における A_{CP} は 15.1% となり, 95% の信頼区間は $15.1 \pm 6.78\%$ となった。同様に将来における A_{CP} は 23.9%, 95% 信頼区間は $23.9 \pm 10.22\%$ である。また, $P_{CP<0}$ は近未来, 将来でそれぞれ 12.5%, 8.3% であり, ロシアでは, A1B シナリオ下での気温の上昇・降水量の増加によって生産量の大幅な増加が見込まれることがわかった。ロシアにおける生産量の近未来, 将来の増加予測は A2, B1 シナリオ下においても同様のことが言える。一方, 現在の主要な生産国である東アジアでは, 近未来における A1B, A2, B1 それぞれにおける生産量変化率は 2.4%, 2.7%, 1.3% と微増であり, 将来ではそれぞれ 1.6%, 0.6%, 0.8% となり, 近未来と比較して増加率が小さくなる。また, $P_{CP<0}$ の値は, 近未来の各シナリオの平均が 32.7%, 将来で 44.0% となり, 生産量変化率のモデル平均は微増となっているが, 減少する確率が将来では 40% を超えていることから, この地域における将来の生産量の増減についてはどちらの傾向が有意であるかを判断することが難しいことがわかる。しかしながら, 東アジアにおける近未来, 将来における生産量の微増傾向は Lobell *et al.*(2008)[109] の中国での 2030 年における生産量の微増を示す結果と同じ傾向を示している。南アジアでは, 気温の上昇によって A2 シナリオの将来では, -18.1% の生産量減少を示す結果となり, 他のシナリオにおいても生産量は大きく減少することを示す結果となった。また, 近未来, 将来ともに生産量が減少する割合は 80% を超え, この地域における生産量の減少傾向を示す本研究結果は, Parry *et al.* (2004), Lobell *et al.*(2008)[105][109] と同様の傾向を示している。世界最大の生産量を誇るヨーロッパでは, $P_{CP<0}$ を見ると, 近未来, 将来における B1 での北ヨーロッパを除いて, 50% 以上の確率で将来の生産量減少を示す結果となり, この地域では温暖化によって, 生産量の減少が将来の食料需給に大きな影響を与える可能性が示唆される結果となった。特にヨーロッパの最大のコムギ生産国であるフランスが属する西ヨーロッパでは, 将来における A_{CP} はシナリオ平均で -11.5% を示しており, 同様に $P_{CP<0}$ は 90% を超えている。また, SD_{CP} は 9.8% となり, 他の地域に比べて相対的に低く, 各モデルによる計算結果には大きなばらつきはなく, 将来における生産量減少の結果がほとんどモデルで示されていることがわかる。この近未来, 将来におけるヨーロッパでの生産量減少の傾向は, Parry *et al.*(2004)[105] における A1FI, A2a, A2b, A2c, B1a, B2a において CO₂ の施肥効果がないとした場合における収量の減少を示す結果と整

合的であるが、CO₂の施肥効果を考慮した場合は、大幅に収量が増加すると予想していることから、本結果との一致を見ない。主要生産域において、ロシアでのGCM気候モデル間における生産量変化率の標準偏差(SD_{CP})は、近未来のA1B, A2, B1シナリオでそれぞれ16.0%, 12.5%, 14.1%となり、将来がそれぞれ24.2%, 30.1%, 14.2%となり、他の地域に比べて相対的に高く、また、近未来に比べて将来の生産量変化率はより大きな不確実性を持っていることを示す結果となった。これはロシアでのGCM気候値が各モデル間で大きなばらつきを持っていることに要因があると考えられる[106]。また、 A_{CP} の地域間標準偏差を出すとA1B, A2, B1で近未来が10.1%, 9.4%, 7.6%となり、将来が14.8%, 16.1%, 11.4%となり、近未来と比べて将来は、各地域間における生産量変化率のばらつきが大きくなることがわかった。

コメの地球全体のGCM平均に見る生産量は近未来のA1Bで1.6%, A2で0.3%, B1で0.6%減少し、将来ではA1Bで2.5%, A2で3.2%, B1で1.8%減少すると算定された。特に、世界の90%以上の生産量を有するアジアを見ると、東アジアでは近未来、将来とも全シナリオ下において大きな変化は見られない。これは中国において現在高い収率を有している華南が収量減少傾向となる一方、華北エリアにおいて収量増加により生産量が保たれるためである。近未来においてほぼ生産量の増減がない結果は、Lobell *et al.*(2008)[109]と整合的である。また、南アジアや東南アジアでは近未来で1.2~2.3%、将来で2.4~5.4%の生産量減少が見られ、Masutomi *et al.*(2009)[100], Lobell *et al.*(2008)[109]の結果と整合的である。気温上昇の恩恵を最も被るエリアは、現在は冷涼な気候のために稲作に適していない領域が広がっている東ヨーロッパやロシアである。また、西ヨーロッパでも生産量の将来における増大が顕著となることがわかった。各シナリオ下における全モデル出力結果に占める生産量が減少する割合を見ると、主産地であるアジアでは、近未来、将来とも全シナリオで平均すると6割以上の確率で生産量が減少し、近未来に比べて将来ではその傾向が顕著となる。また、アジア域における収量変化率のモデル間標準偏差は他の地域に比べて相対的に低く、アジアにおける生産量変化率のモデル間のばらつきは小さいことがわかる。 A_{CP} の地域間の標準偏差は近未来のA1Bで8.9%, A2で8.4%, B1で6.9%、将来のA1Bで13.9%, A2で15.6%, B1で11.0%となり、環境を重視した持続可能な経済成長と地域格差の縮小を仮定したB1シナリオ下では生産量変化率の地域間格差は最も小さい結果となった。また、近未来に比べて将来では地域間の平均生産量変化率の偏差が大きくなり、将来は生産量の地域間格差が広がることが懸念される結果となった。

トウモロコシの世界生産量は、近未来の全シナリオ平均で7.6%、将来で同10.2%増加する。特に、東アジアにおける生産量の増加による寄与が大きい。現在の主要生産域で特に生産量の大きい増加を示すのは、東アジアにおける近未来のA1Bシナリオ下でGCM平均で9.3%、A2シナリオ下で8.4%、B1シナリオ下で6.3%の増加となり、将来でそれぞれ12.0, 14.8, 8.8%の生産量増加となった。本結果は、中国において2030年の生産

量がモデル間平均で7%前後減少するとした、Lobell *et al.*(2008)[109]の結果とは逆の傾向を示すものである。南アジアの A_{CP} は、近未来、将来ともに負を示しており、Lobell *et al.*(2008)[109]と同じ傾向を示した。北アメリカにおける近未来の A_{CP} は、A1B, A2, B1 シナリオでそれぞれ-1.0, -1.5, -0.8%で、将来はそれぞれ-1.7, -2.5, -1.2%と微減する結果となり、その割合は50%を超える結果となった。ロシアでは将来で15%以上の増加を示した。また、南アメリカでも北アメリカと同様に生産量は近未来、将来とも微減を示す結果となったが、北アメリカ、南アメリカとも SD_{CP} の値を見ると、モデル間の出力値には大きなばらつきはなく、比較的不確実性は小さいと言える。ヨーロッパでは全域において、近未来、将来とも収量が増加する結果となり、西ヨーロッパでは、近未来においてA1B, A2, B1 シナリオそれぞれ12.0, 14.1, 12.6%、将来で16.6, 15.0, 18.8%生産量増加することが予測された。以上のことから、トウモロコシは現在の主要生産域での生産量の減少は微小な幅にとどまり、温暖化による大幅な生産量の減少を防ぐことができる作物の一つであると考えられる。また、 SD_{CP} の全地域間の標準偏差を見ると、近未来、将来ともにB1シナリオが他のシナリオと比べて最も小さくなった。生産量の絶対的な地域差を考えない場合、B1シナリオでは将来における生産量変化量のばらつきが最も小さくなり、かつ、より長期的な食料需給に関する見通しを立てやすいシナリオであることが示唆される結果となった。

ソルガムは穀物としての生産面積では、2008年でコムギ、コメ、トウモロコシ、オオムギについて世界第5位である[91]。北アメリカでは近未来で4.0~6.4%、将来で6.1~11.6%生産量が減少し、全モデルに占める生産量減少を示す割合は80%を超える。西アフリカでは、近未来で0.9~2.3%、将来で3.7~6.6%増加する結果となった。このことから、北アメリカでは将来において急速に生産量が減少する一方、西アフリカでは生産量は将来において緩やかに増加する傾向となることがわかった。また、世界第3位の生産量を有するインドが属する南アジアでは、近未来において2.1~3.3%生産量は減少し、将来では4.1~6.7%の減少を示す結果となった。Lobell *et al.*(2008)[109]の南アジアにおける2030年の生産量変化では、各モデル間でばらつきがあり、平均ではほとんど変化がない結果となっていることから、本研究の結果はそれに比べると、生産量の減少を強く示す結果となっていることがわかる。またロシアでは将来におけるA1Bシナリオ下で64.7%の生産量増加を示すなど、現在において比較的冷涼な地域において、大幅に生産量を増やす可能性が高いことがわかった。しかしながら、 SD_{CP} の値は58.2%と他の地域に比べて突出して高く、将来予測に際する不確実性が大きい地域の一つである。現在の世界の1,2位の生産量を示す西アフリカと北アメリカにおいて、B1シナリオ下では他のシナリオと比較して生産量変化率の差が広がらないことを示す結果となり、他のシナリオでは西アフリカでの生産量の増加率と北アメリカでの生産量の減少率の差が拡大することがわかった。

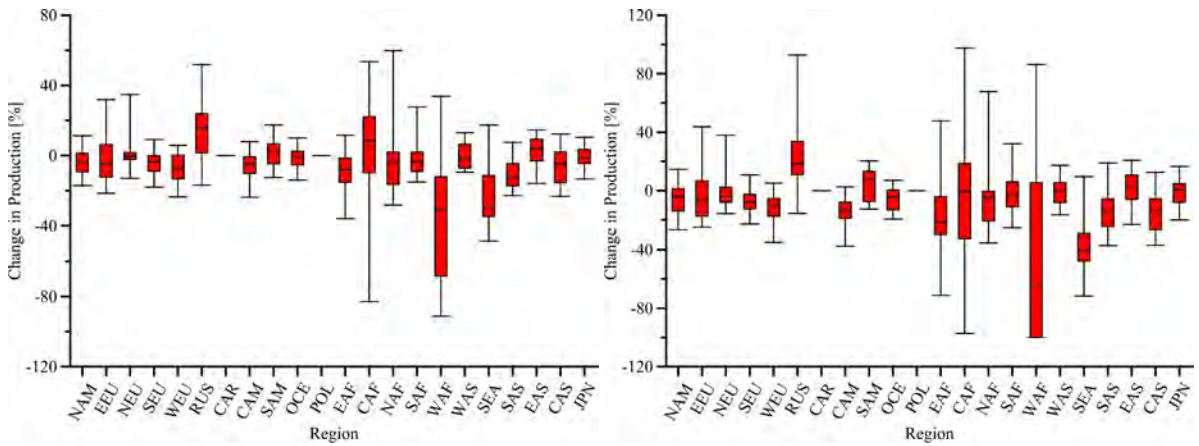
ジャガイモのGCM平均に見る世界生産量は近未来のA1Bシナリオで14.4%、A2で

12.9% ,B1 で 10.1% 増加し ,将来では A1B シナリオで 22.8% ,A2 で 23.4% ,B1 で 13.0% 増加する結果となった . 2005 年の世界第 1 位の生産量を誇る中国が属する東アジア域においては , 近未来 , 将来の各シナリオとも一桁台の生産量増加にとどまるのに対し , ロシアでは 20% 以上の伸びを示す結果となり , 世界平均で見るとロシアでの生産量の大幅な増加が大きく寄与する結果となった . しかしながら , 図 5.5, 表 5.6 を見ると , ロシアにおける生産量増加率のモデル間の偏差は , 他の主要生産域と比較してそのばらつきは大変大きく , ロシアにおける生産量変化率予測の不確実性が顕著となった . 南アジアでは近未来 , 将来ともに全シナリオ下において生産量は減少する結果となり , 特に将来において $P_{CP<0}$ は 100% つまり , 本研究では , 100% の確率で生産量の減少を示す結果となった . A_{CP} の地域間標準偏差は近未来では A1B シナリオで 8.9% , A2 シナリオで 7.3% , B1 シナリオで 6.5% となり , 将来ではそれぞれ 14.1% , 16.4% , 9.5% となった . このことから , ジャガイモ将来生産量の見通しについて , B1 シナリオ下では地域間の生産量変化率の偏差が最も小さく , 特にアフリカ域とそれ以外の主要生産域における変化率の格差を最も小さくできる可能性が高いことがわかった .

サツマイモの 7 割以上は中国で生産されている . 東アジアでの A_{CP} を見ると , 近未来 , 将来の全シナリオにおいて正の値を示している (図 5.6, 表 5.7) . この結果は , Lobell *et al.*(2008)[109] と同じ傾向である . 現在の中国内における四川省 , 山東省 , 河南省では収量の減少に伴い , 生産量が減少する一方 , それを補う形で華北において生産量が増加する可能性が示唆される . また , 東アジアにおける SD_{CP} を見ると , 近未来 , 将来ともに A1B , A2 シナリオに比べて B1 シナリオの値が最も小さい結果となり , B1 シナリオ下での生産量算定結果が最もモデル間の収量変化率のばらつきが小さく , 不確実性が低くなることがわかった . 一方 , 全地域において近未来に比べて将来における SD_{CP} の値は大きく , 近未来に比べて将来推計の不確実性がより大きくなることが明瞭になった .

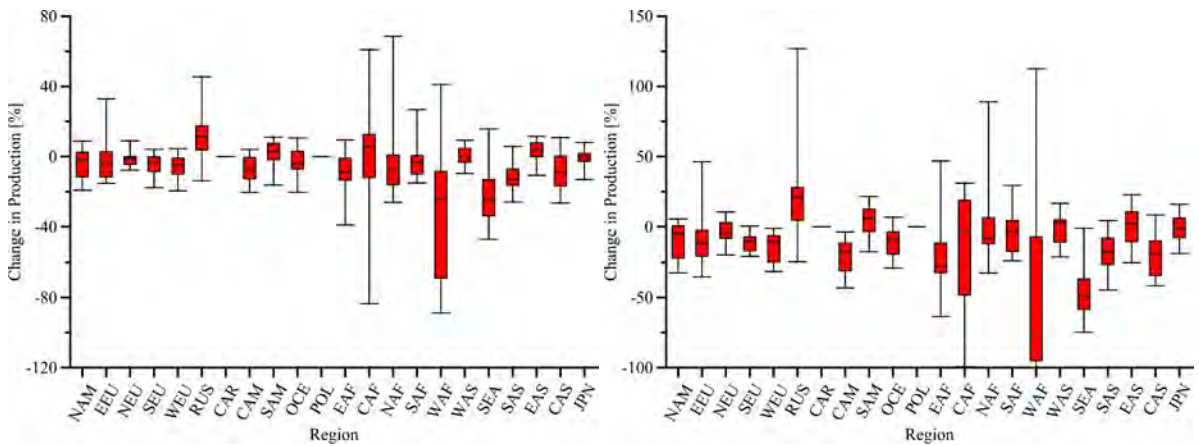
キャッサバは , 熱帯・亜熱帯で広く栽培されており , 乾燥地でも生育可能であると言われていることから , これまで農地とされなかった場所での栽培ができ , 温暖化問題の解決への期待が大きい作物であると言われている . しかしながら , 本研究では 40 数年間の飛躍的な生産増の現状が近未来 , 将来においては続かず , アフリカ , アジア (東アジアを除く) , 南アメリカなど現在において主要な生産域において生産量が減少する結果となった . このことは , 本研究で定義したキャッサバが生長することができる温度・水分要件が温暖化によって満たされなくなったためと考えられるが , 本当に温暖化によってマイナスの影響が大きい作物種であるのかどうか , より一層モデルパラメータの改良やモデルの検証が必要であることが明らかとなった . 南アメリカでの生産量の減少は , Lobell *et al.*(2008)[109] でのブラジルにおける 2030 年の約 5% の生産量減少結果と整合的である . 東南アジアにおける生産量減少傾向も同様に Lobell *et al.*(2008)[109] の結果と整合的である .

ダイズの生産量は近未来の全シナリオ平均で 2.8%、将来で 4.1% の減少を示す。北アメリカでは、近未来、将来の各シナリオ下で生産量の増減に大きな特徴は見られないが、世界第 2 位、3 位の生産量を有するブラジルおよびアルゼンチンが属する南アメリカでは近未来で 3.4~4.4%、将来で 5.1~10.4% の減少を示し、その全モデルに占める減少割合は全てのシナリオにおいて 80% を超えるものとなり、南アメリカでの生産量減少結果は Lobell *et al.* (2008)[109] が示した結果と同じ傾向である。南アメリカでは生産量が減少する一方、東アジアでは、近未来、将来において生産量の増加が見込まれ、ダイズの需給において東アジアが果たす役割が大きくなることが示唆される。Lobell *et al.*(2008)[109] は中国において 2030 年の生産量は増える予測をしていることから、本研究結果はこの結果と整合的となった。



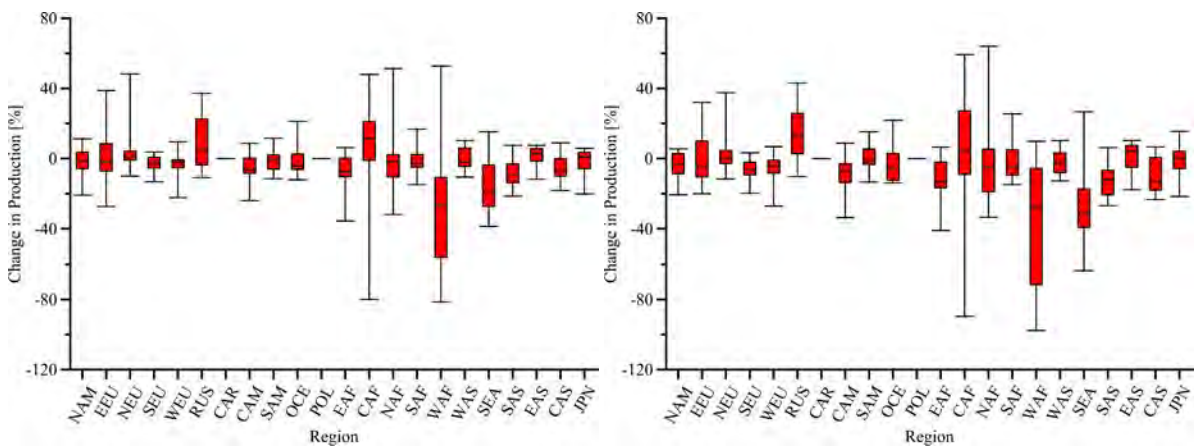
(a) A1B, 近未来

(b) A1B, 将来



(c) A2, 近未来

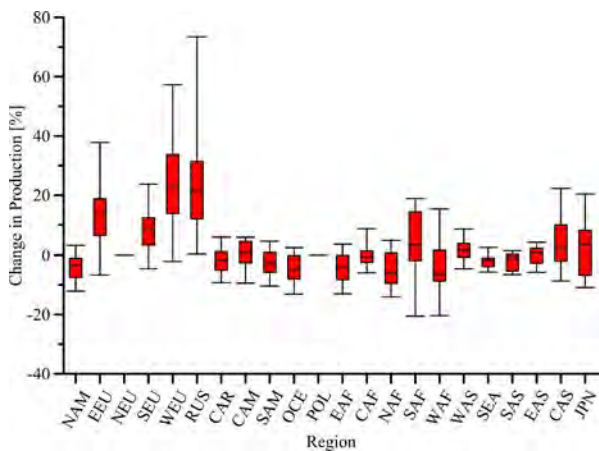
(d) A2, 将来



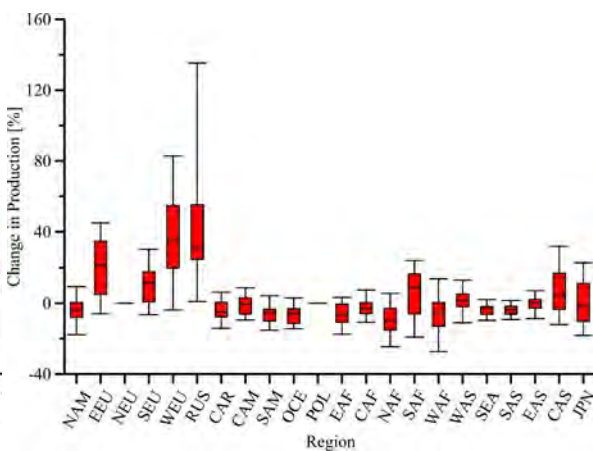
(e) B1, 近未来

(f) B1, 将来

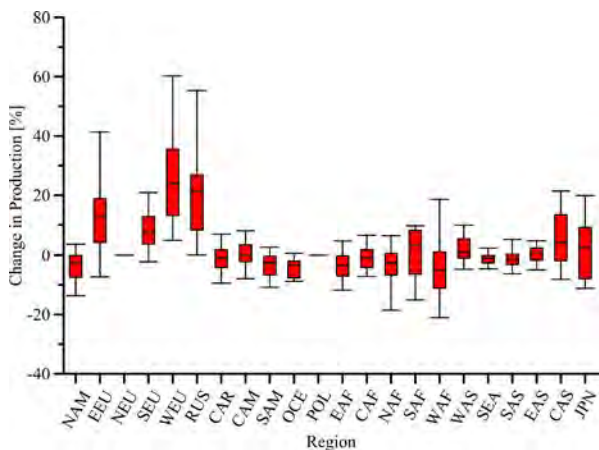
図 5.1 地域別に見るコムギの生産量の変化率



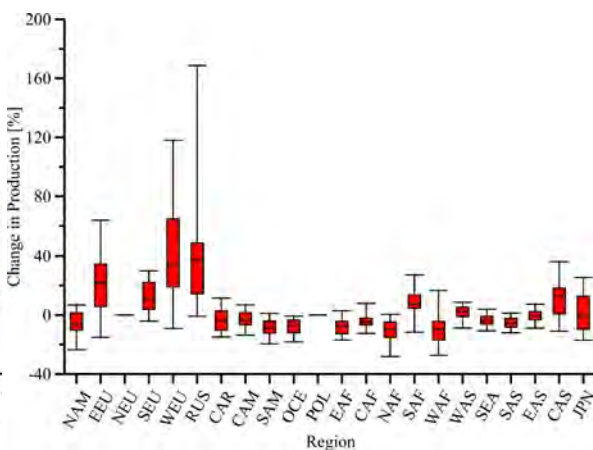
(a) A1B, 近未来



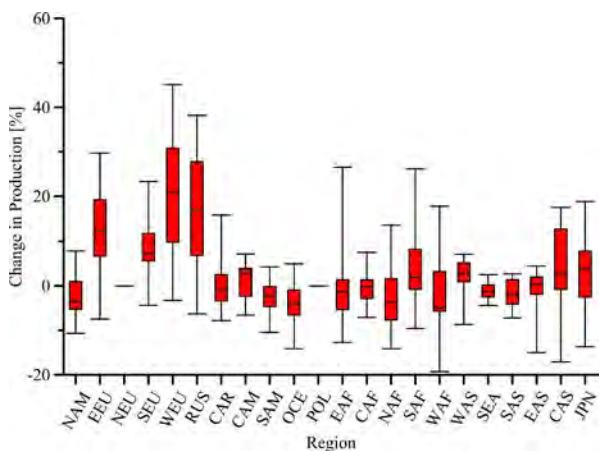
(b) A1B, 将来



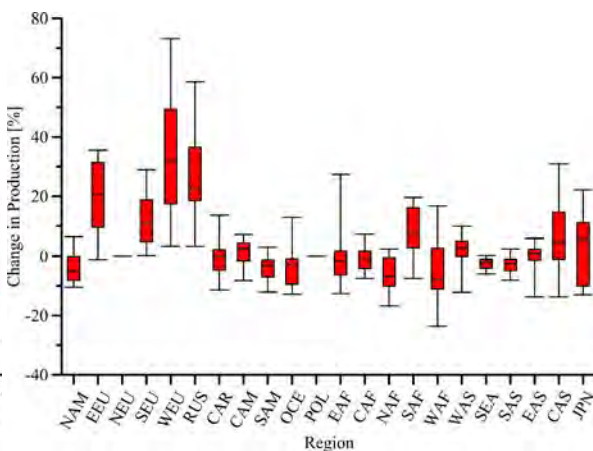
(c) A2, 近未来



(d) A2, 将来

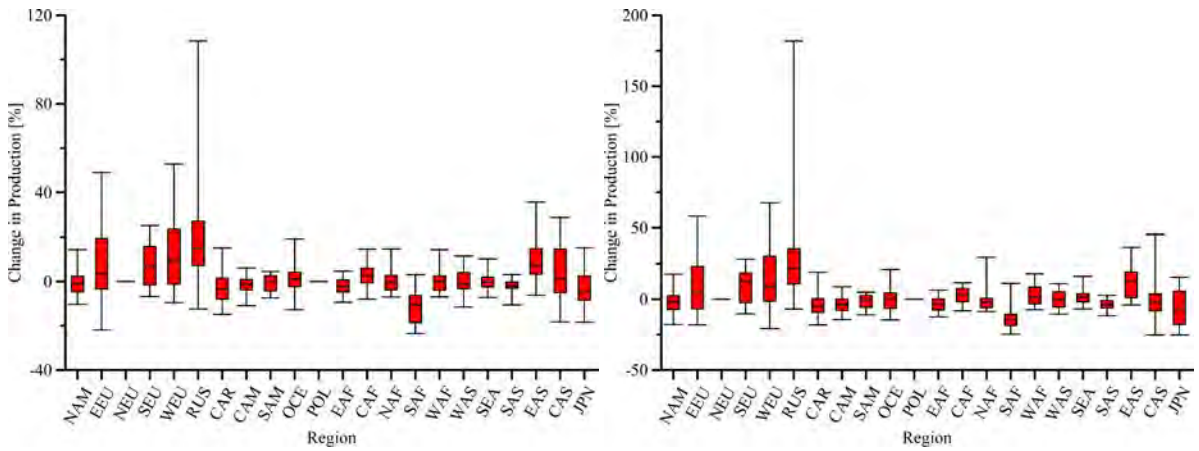


(e) B1, 近未来



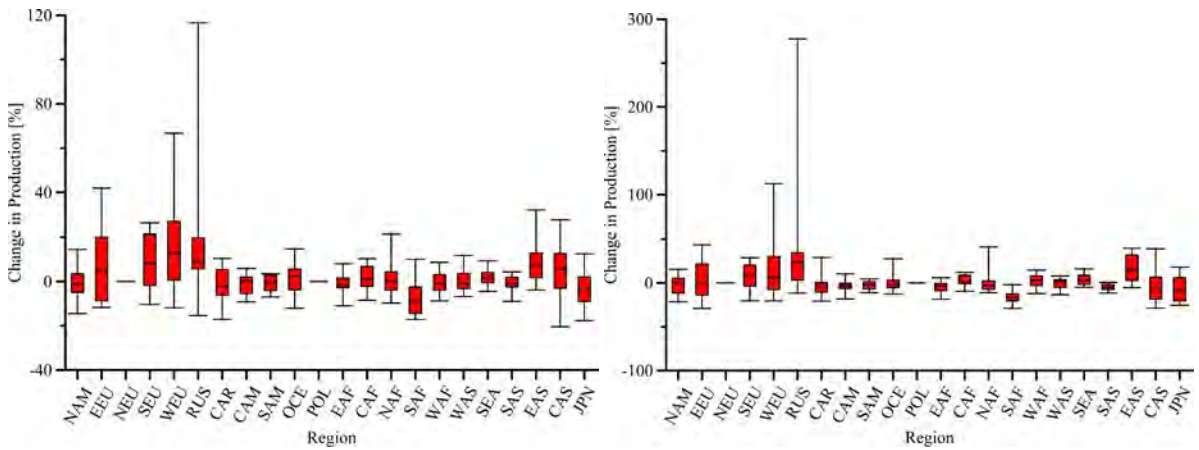
(f) B1, 将来

図 5.2 地域別に見るコメの生産量の変化率



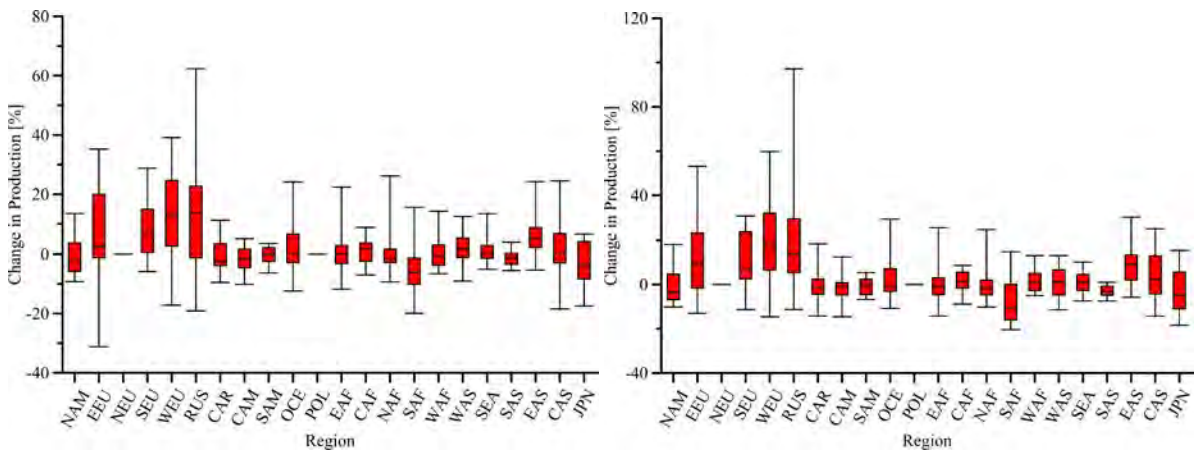
(a) A1B, 近未来

(b) A1B, 将来



(c) A2, 近未来

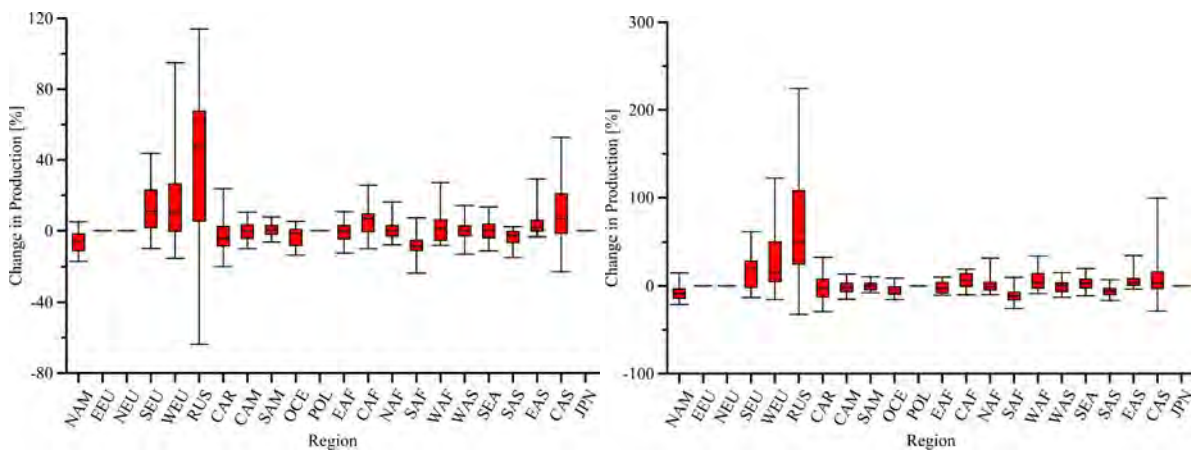
(d) A2, 将来



(e) B1, 近未来

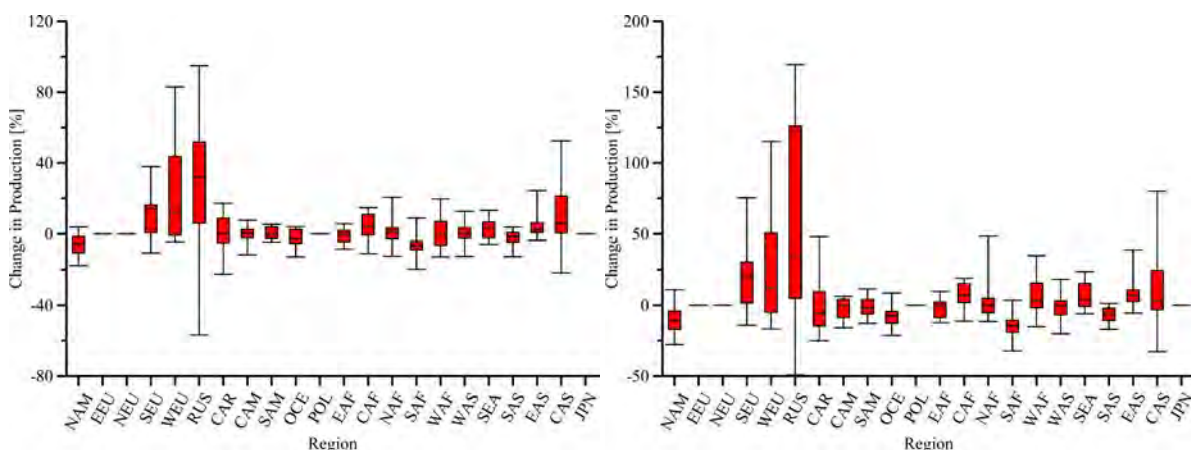
(f) B1, 将来

図 5.3 地域別に見るトウモロコシの生産量の変化率



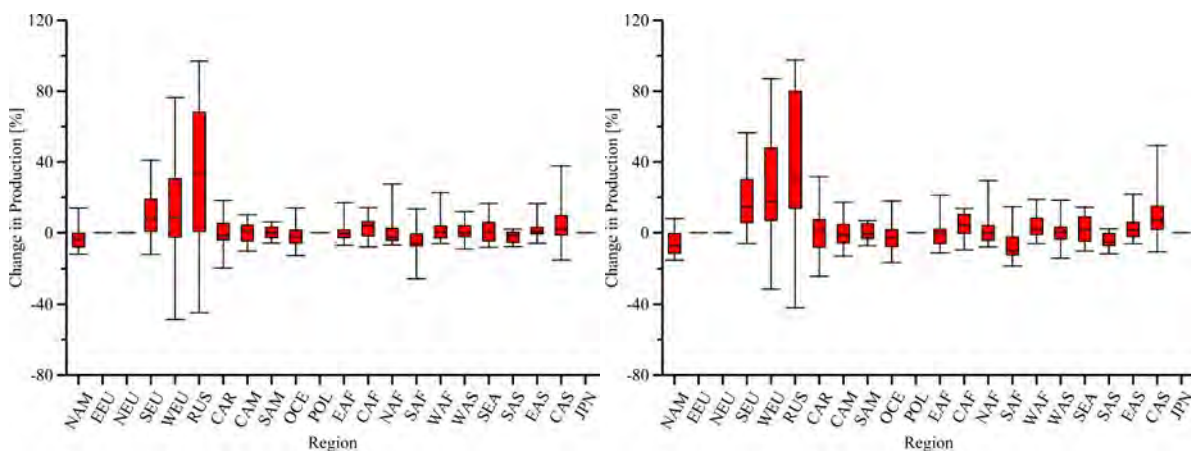
(a) A1B, 近未来

(b) A1B, 将来



(c) A2, 近未来

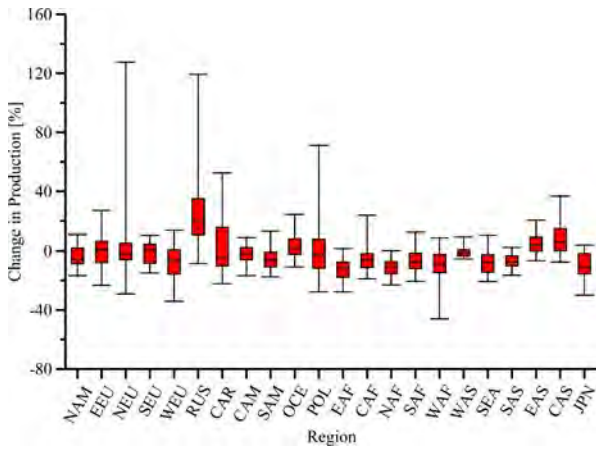
(d) A2, 将来



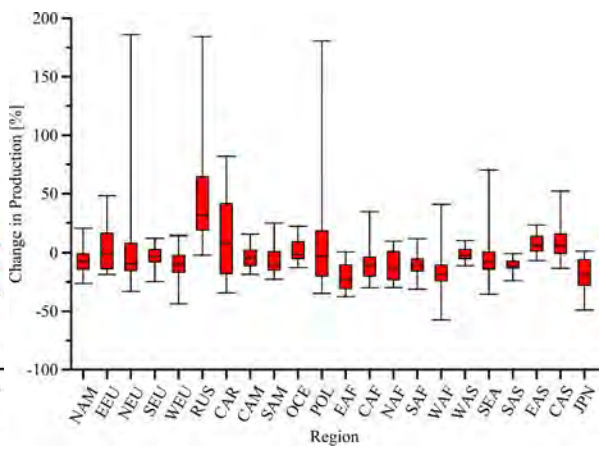
(e) B1, 近未来

(f) B1, 将来

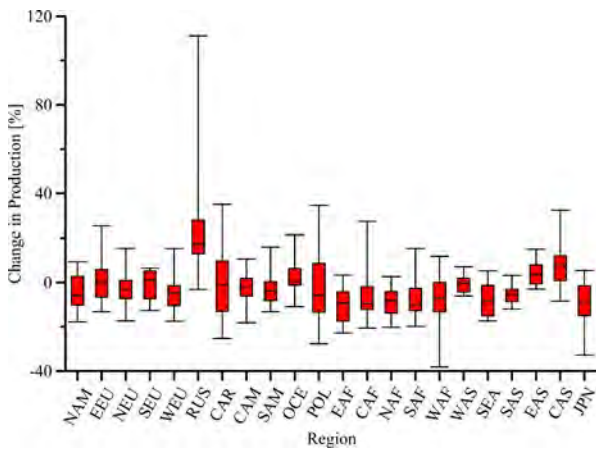
図 5.4 地域別に見るソルガムの生産量の変化率



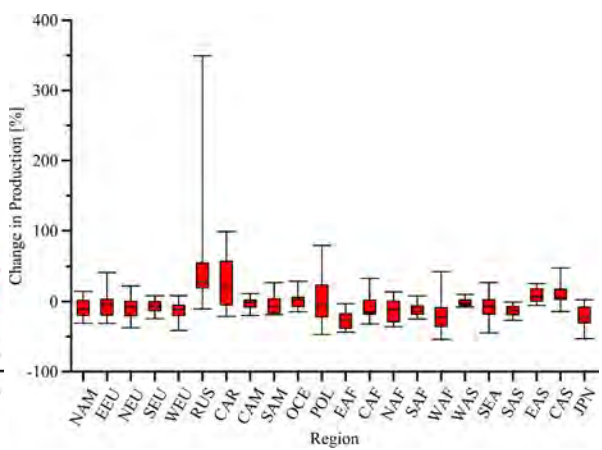
(a) A1B, 近未来



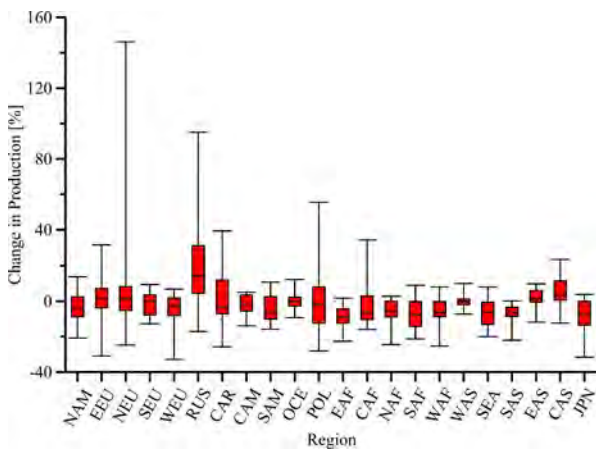
(b) A1B, 将来



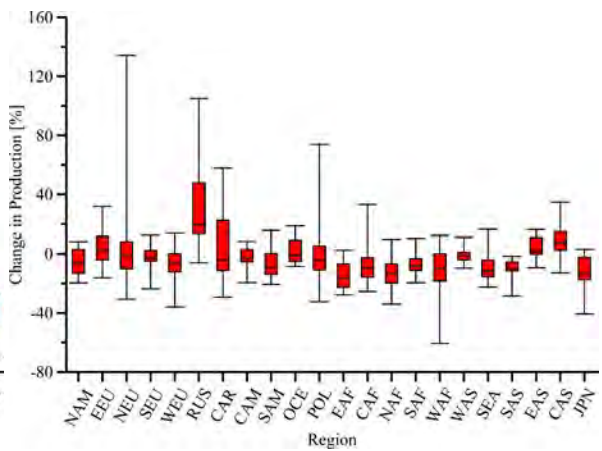
(c) A2, 近未来



(d) A2, 将来



(e) B1, 近未来



(f) B1, 将来

図 5.5 地域別に見るジャガイモの生産量の変化率

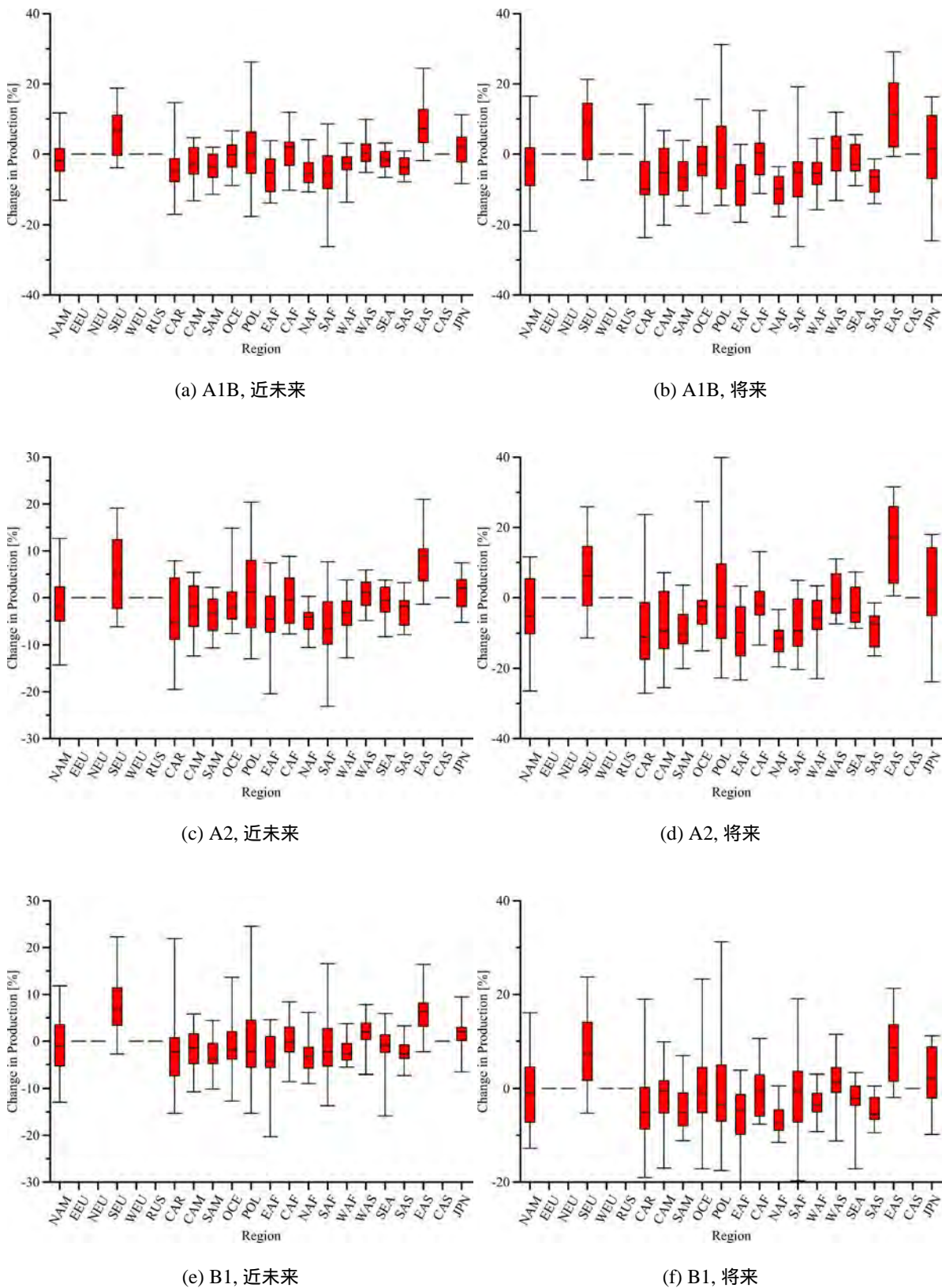
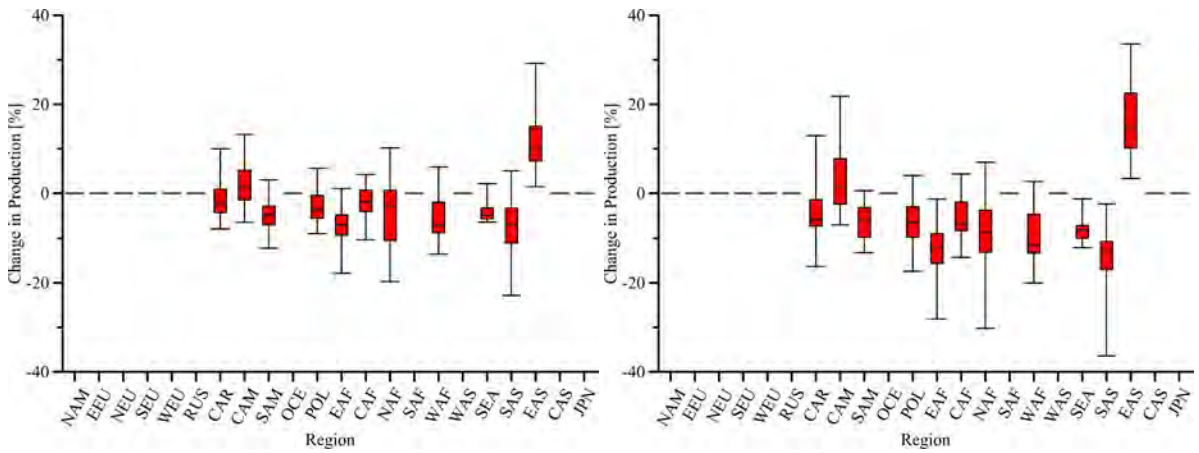
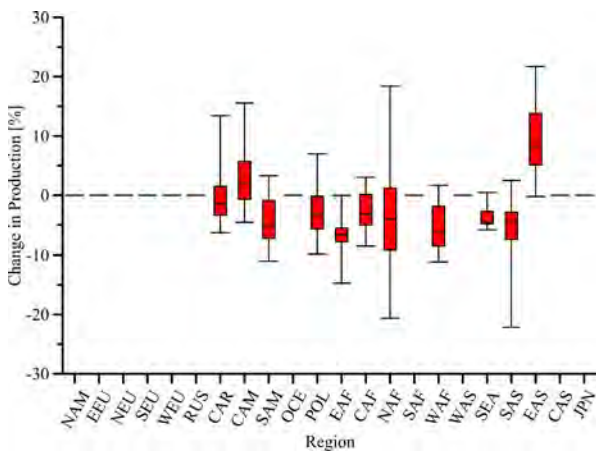


図 5.6 地域別に見るサツマイモの生産量の変化率

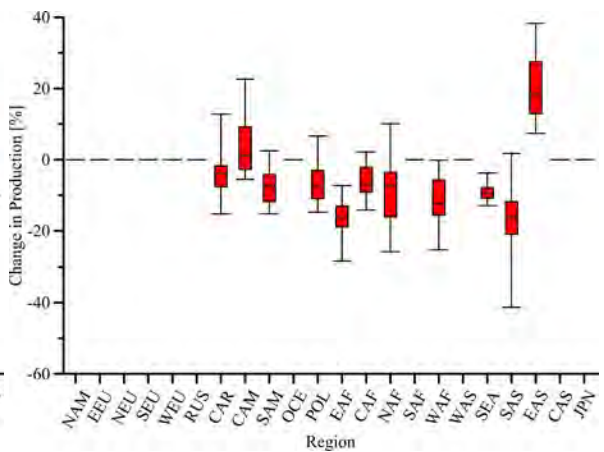


(a) A1B, 近未来

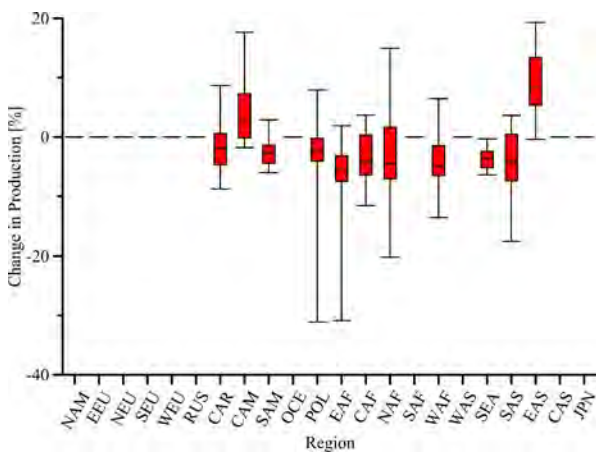
(b) A1B, 将来



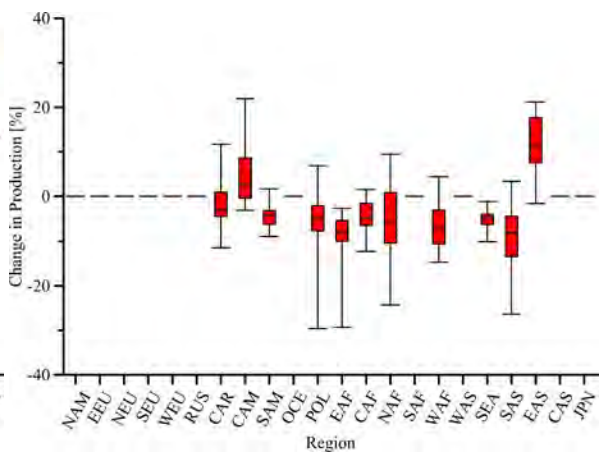
(c) A2, 近未来



(d) A2, 将来

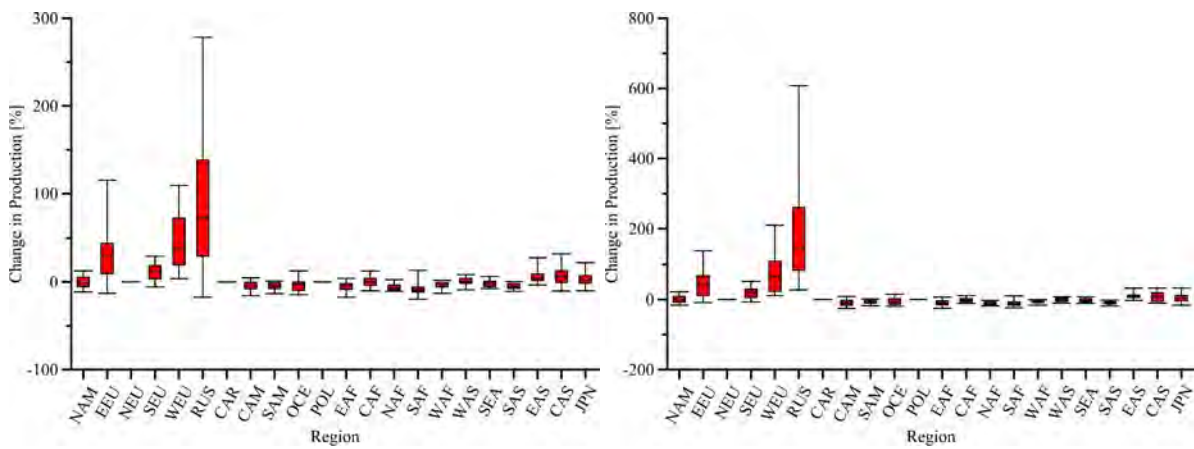


(e) B1, 近未来



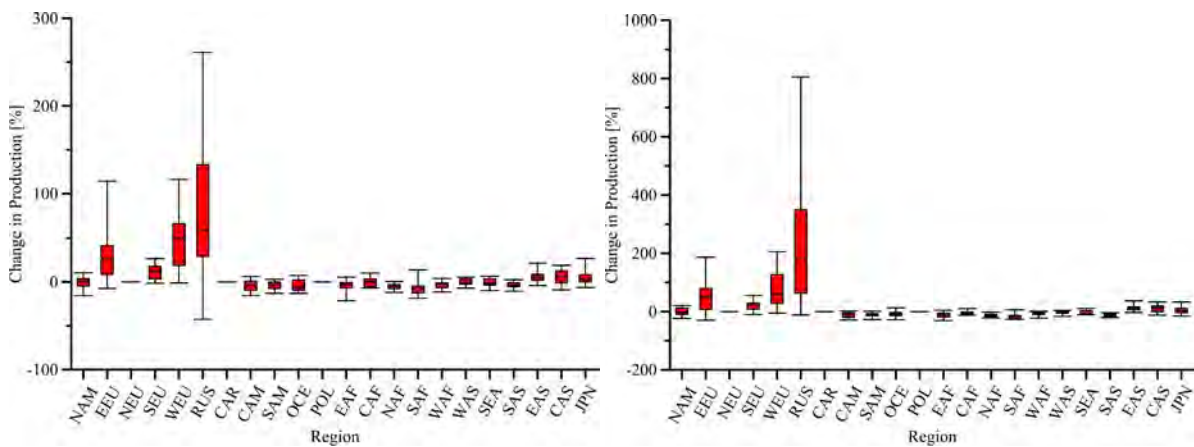
(f) B1, 将来

図 5.7 地域別に見るキャッサバの生産量の変化率



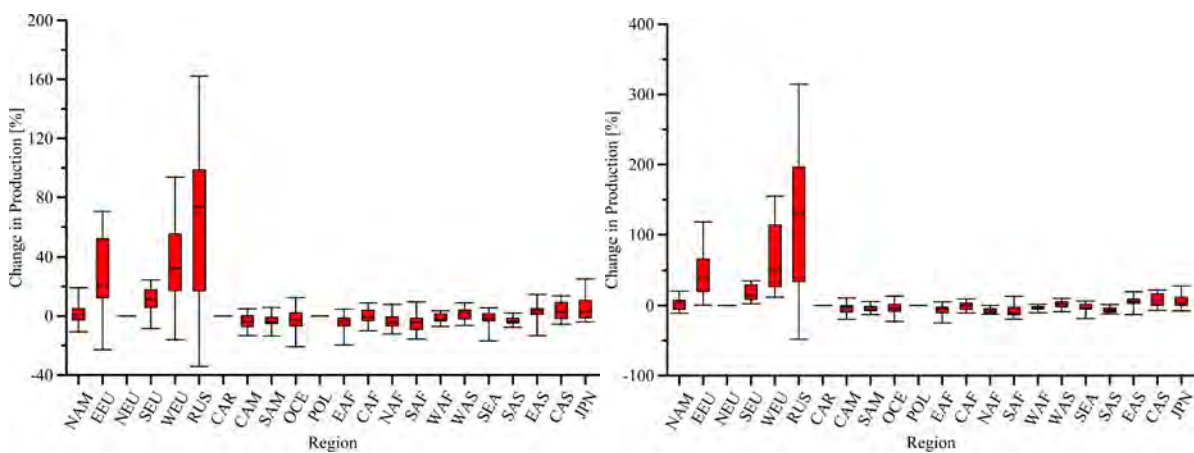
(a) A1B, 近未来

(b) A1B, 将来



(c) A2, 近未来

(d) A2, 将来



(e) B1, 近未来

(f) B1, 将来

図 5.8 地域別に見るダイズの生産量の変化率

表 5.2 コムギの ACP , $PCP<0$, $SDCP$

	近未来									将来								
	A1B			A2			B1			A1B			A2			B1		
	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$
北アメリカ	-3.9	62.5	6.6	-3.7	68.4	7.5	-2.3	66.7	7.6	-5.8	70.8	9.2	-9.0	73.7	12.3	-4.1	61.9	7.3
東ヨーロッパ	-2.0	62.5	12.8	-2.2	68.4	11.5	-1.2	61.9	13.8	-2.8	58.3	17.4	-9.9	84.2	18.0	-0.4	52.4	13.1
北ヨーロッパ	0.9	58.3	8.5	-0.9	78.9	4.3	3.0	33.3	11.7	-1.6	66.7	10.5	-3.4	68.4	7.8	1.5	47.6	9.7
南ヨーロッパ	-4.9	79.2	6.5	-4.5	78.9	5.6	-3.8	76.2	5.1	-7.8	91.7	7.0	-10.9	94.7	6.1	-7.0	90.5	6.4
西ヨーロッパ	-7.7	75.0	8.6	-6.0	84.2	6.1	-3.8	81.0	7.7	-11.5	91.7	9.8	-13.3	100.0	9.5	-7.5	90.5	9.8
ロシア	15.1	12.5	16.0	11.0	15.8	12.5	8.3	33.3	14.1	23.9	8.3	24.2	22.1	15.8	30.1	13.7	19.0	14.2
カリブ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
中央アメリカ	-6.4	83.3	8.1	-7.6	78.9	7.4	-6.4	76.2	8.1	-14.3	87.5	10.1	-20.0	100.0	11.4	-9.2	90.5	9.6
南アメリカ	1.1	41.7	7.6	1.8	31.6	7.3	-1.8	57.1	6.3	4.4	29.2	10.1	4.9	31.6	11.0	0.2	52.4	7.6
オセアニア	-0.7	58.3	5.9	-3.0	57.9	7.9	-1.6	66.7	7.1	-5.6	75.0	7.7	-10.7	89.5	9.4	-4.4	76.2	9.8
ポリネシア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
東アフリカ	-9.7	83.3	12.1	-10.1	84.2	12.0	-8.1	76.2	9.9	-16.8	83.3	25.2	-21.8	89.5	22.1	-13.0	90.5	12.3
中央アフリカ	4.8	29.2	28.3	0.1	42.1	28.8	6.2	28.6	26.0	-4.7	50.0	38.4	-16.6	52.6	39.2	3.0	33.3	31.5
北アフリカ	-4.7	66.7	17.3	-4.4	63.2	20.6	-2.7	61.9	17.0	-6.3	79.2	20.2	-1.6	68.4	25.8	-5.2	66.7	21.5
南アフリカ	-1.2	66.7	10.8	-2.2	68.4	11.3	-1.3	61.9	8.0	-1.1	70.8	13.8	-3.4	63.2	14.0	-0.8	66.7	11.7
西アフリカ	-33.8	83.3	35.4	-33.6	89.5	34.2	-26.9	85.7	33.8	-48.8	75.0	53.7	-50.0	84.2	59.4	-39.5	85.7	35.8
西アジア	-0.7	62.5	6.9	-0.1	57.9	5.4	-0.7	57.1	6.1	-1.1	50.0	9.0	-1.1	47.4	9.7	-1.9	57.1	7.1
東南アジア	-23.2	91.7	17.2	-22.1	89.5	15.8	-16.0	85.7	15.5	-35.4	87.5	20.0	-44.9	100.0	18.5	-28.1	95.2	18.1
南アジア	-10.8	83.3	8.7	-11.5	94.7	7.4	-9.2	90.5	7.4	-14.4	91.7	12.8	-18.1	94.7	12.5	-13.3	95.2	9.2
東アジア	2.4	33.3	7.8	2.7	26.3	6.6	1.3	38.1	5.7	1.6	41.7	11.5	0.6	47.4	13.2	0.8	42.9	8.1
中央アジア	-6.7	75.0	10.2	-8.5	73.7	10.6	-6.0	81.0	7.2	-15.7	91.7	12.3	-18.9	89.5	14.2	-9.1	71.4	9.7
日本	-0.5	58.3	6.0	-1.1	63.2	5.0	-1.4	42.9	6.8	-0.4	45.8	8.1	-1.0	52.6	8.6	-1.2	47.6	7.6

表 5.3 コメの ACP , $PCP<0$, $SDCP$

	近未来									将来								
	A1B			A2			B1			A1B			A2			B1		
	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$
北アメリカ	-3.9	83.3	4.4	-4.3	84.2	4.8	-3.1	71.4	4.7	-4.7	75.0	6.8	-6.2	73.7	9.2	-4.0	81.0	4.9
東ヨーロッパ	13.8	4.2	10.2	13.1	10.5	11.9	12.4	9.5	9.7	20.4	8.3	14.7	20.5	21.1	20.8	19.1	4.8	12.1
北ヨーロッパ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
南ヨーロッパ	8.2	12.5	7.2	8.0	21.1	6.8	8.5	4.8	6.1	11.3	20.8	10.4	12.5	21.1	11.4	11.4	0.0	7.9
西ヨーロッパ	24.7	4.2	13.9	24.9	0.0	14.9	20.3	4.8	12.2	37.6	4.2	22.3	40.6	5.3	31.7	33.3	0.0	19.0
ロシア	25.3	0.0	18.7	20.1	0.0	15.1	17.0	4.8	12.1	39.6	0.0	29.3	41.9	5.3	38.2	26.9	0.0	14.9
カリブ	-2.0	75.0	4.1	-0.9	57.9	4.2	-0.3	57.1	5.1	-3.6	75.0	5.4	-3.2	63.2	7.5	-1.2	52.4	5.7
中央アメリカ	0.4	41.7	4.4	0.0	52.6	4.1	1.3	38.1	4.1	-1.0	54.2	5.4	-2.9	73.7	6.1	1.1	33.3	4.8
南アメリカ	-2.6	70.8	4.1	-3.3	78.9	4.0	-2.9	81.0	3.9	-6.2	87.5	5.0	-8.4	89.5	5.9	-4.5	95.2	4.2
オセアニア	-4.6	79.2	4.3	-4.5	94.7	3.1	-4.1	85.7	4.4	-6.6	87.5	5.4	-7.4	100.0	4.9	-4.2	81.0	6.5
ポリネシア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
東アフリカ	-3.8	79.2	4.6	-3.5	78.9	4.9	-1.2	66.7	7.7	-6.1	79.2	5.6	-7.5	94.7	5.8	-1.6	71.4	8.4
中央アフリカ	-0.2	62.5	3.6	-1.0	57.9	4.0	-0.5	61.9	3.2	-2.7	70.8	4.2	-3.9	78.9	5.2	-1.4	71.4	3.9
北アフリカ	-4.8	75.0	5.4	-3.4	73.7	6.1	-2.8	66.7	7.2	-8.7	83.3	8.4	-10.5	94.7	7.3	-6.8	85.7	5.5
南アフリカ	3.2	45.8	10.4	0.9	42.1	7.5	4.0	28.6	7.8	5.9	33.3	12.6	7.1	21.1	9.5	7.2	23.8	8.6
西アフリカ	-4.1	70.8	9.2	-4.5	73.7	8.9	-2.9	76.2	9.3	-6.5	75.0	10.0	-9.4	84.2	10.7	-5.4	71.4	9.7
西アジア	1.8	41.7	3.6	2.0	42.1	4.1	2.0	23.8	4.1	1.6	37.5	5.6	1.8	26.3	4.7	2.5	28.6	4.7
東南アジア	-2.1	91.7	1.9	-1.2	78.9	2.0	-1.3	76.2	1.8	-3.5	91.7	2.9	-3.8	84.2	3.9	-2.4	95.2	1.8
南アジア	-2.3	70.8	2.8	-1.2	73.7	2.9	-1.5	61.9	3.0	-3.8	95.8	2.7	-5.4	94.7	3.5	-2.8	85.7	2.8
東アジア	0.1	41.7	3.0	0.4	42.1	2.7	-0.4	42.9	4.0	0.2	45.8	3.7	0.0	52.6	4.1	0.1	38.1	4.3
中央アジア	3.8	37.5	8.5	5.6	31.6	7.9	3.5	28.6	8.4	6.0	41.7	11.6	10.3	21.1	11.4	5.7	33.3	10.8
日本	1.8	41.7	8.2	2.2	31.6	9.1	1.9	38.1	8.2	0.8	54.2	12.4	1.0	52.6	13.7	1.7	47.6	10.7

表 5.6 ジャガイモの ACP , $PCP<0$, $SDCP$

	近未来									将来								
	A1B			A2			B1			A1B			A2			B1		
	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$
北アメリカ	-4.4	70.8	6.6	-4.6	73.7	7.6	-4.0	71.4	8.8	-6.9	83.3	10.0	-9.0	73.7	12.5	-6.1	71.4	8.6
東ヨーロッパ	1.2	41.7	12.4	1.5	47.4	10.7	2.0	38.1	13.4	1.7	54.2	18.3	-5.0	68.4	18.8	3.9	42.9	12.4
北ヨーロッパ	3.2	66.7	28.5	-1.6	63.2	8.1	6.1	42.9	33.6	0.7	70.8	41.4	-9.5	73.7	15.4	3.5	52.4	32.3
南ヨーロッパ	-1.2	50.0	7.3	-1.2	47.4	6.7	-0.6	47.6	6.7	-3.9	70.8	9.1	-6.8	78.9	8.5	-3.2	66.7	8.5
西ヨーロッパ	-7.3	66.7	10.6	-5.3	84.2	7.6	-4.5	61.9	9.2	-11.4	83.3	14.1	-13.7	89.5	12.7	-8.0	76.2	13.0
ロシア	29.8	4.2	28.6	23.0	5.3	24.2	19.2	14.3	24.3	46.0	8.3	46.1	49.5	5.3	75.9	28.1	9.5	25.8
カリブ	2.0	58.3	19.1	1.2	52.6	16.0	1.5	61.9	15.0	13.3	37.5	33.5	26.3	26.3	34.9	6.2	52.4	22.2
中央アメリカ	-2.2	66.7	6.3	-2.1	63.2	6.8	-2.8	71.4	6.1	-3.6	70.8	8.8	-3.1	68.4	8.0	-2.9	66.7	6.8
南アメリカ	-5.0	79.2	7.5	-3.2	73.7	7.7	-5.2	76.2	7.8	-5.9	75.0	12.1	-4.1	68.4	13.3	-6.6	76.2	10.1
オセアニア	3.6	29.2	8.7	2.1	42.1	8.1	0.4	47.6	5.6	2.2	58.3	10.2	0.5	42.1	10.4	1.5	57.1	8.0
ポリネシア	-0.3	58.3	19.3	-1.6	63.2	15.4	-1.4	61.9	16.9	9.8	66.7	47.0	3.4	52.6	33.5	-0.9	66.7	22.6
東アフリカ	-12.1	91.7	7.4	-10.2	84.2	8.1	-9.7	90.5	6.7	-20.9	95.8	11.4	-26.6	100.0	12.7	-14.8	90.5	9.0
中央アフリカ	-5.8	87.5	9.0	-5.8	84.2	10.8	-2.7	66.7	12.3	-9.2	79.2	15.7	-7.9	68.4	16.6	-7.5	81.0	13.5
北アフリカ	-11.2	95.8	5.8	-8.6	89.5	6.4	-7.0	76.2	8.2	-12.4	75.0	12.0	-13.1	73.7	16.0	-12.3	81.0	10.5
南アフリカ	-6.6	79.2	7.8	-7.1	78.9	8.2	-7.0	81.0	8.1	-10.1	95.8	8.2	-12.3	94.7	8.2	-7.7	90.5	6.6
西アフリカ	-9.1	87.5	10.8	-7.4	73.7	11.4	-5.6	81.0	7.7	-17.7	91.7	19.8	-19.6	89.5	21.5	-11.7	76.2	16.2
西アジア	-0.7	62.5	3.9	-0.4	52.6	3.7	0.0	52.4	4.0	-1.1	58.3	5.3	-1.4	68.4	5.0	-1.4	66.7	4.9
東南アジア	-7.8	87.5	7.5	-7.5	84.2	7.3	-6.9	81.0	7.2	-3.5	75.0	21.1	-6.6	63.2	16.7	-9.6	85.7	9.5
南アジア	-6.9	91.7	4.8	-5.3	84.2	3.9	-6.9	95.2	4.6	-11.0	100.0	5.4	-13.0	100.0	7.2	-9.5	100.0	5.7
東アジア	4.6	25.0	6.2	4.2	31.6	5.3	1.6	38.1	5.2	7.1	16.7	8.0	8.9	21.1	10.0	3.4	33.3	6.8
中央アジア	7.8	20.8	9.7	8.7	15.8	10.2	5.0	14.3	7.9	8.7	29.2	14.2	10.3	21.1	15.6	8.2	19.0	9.8
日本	-10.3	83.3	8.4	-8.8	84.2	9.3	-8.8	81.0	9.0	-17.5	87.5	12.8	-19.8	94.7	14.0	-12.3	85.7	11.0

表 5.7 サツマイモの ACP , $PCP<0$, $SDCP$

	近未来									将来								
	A1B			A2			B1			A1B			A2			B1		
	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$
北アメリカ	-2.0	70.8	5.6	-1.8	68.4	6.6	-1.2	61.9	6.6	-2.7	70.8	8.7	-3.9	52.6	10.9	-1.7	66.7	7.1
東ヨーロッパ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
北ヨーロッパ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
南ヨーロッパ	5.8	33.3	6.9	5.8	31.6	8.0	7.1	14.3	6.2	7.3	29.2	8.7	6.5	31.6	10.2	8.1	9.5	7.9
西ヨーロッパ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ロシア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
カリブ	-4.4	79.2	6.8	-3.8	73.7	7.5	-2.2	76.2	7.7	-7.9	83.3	9.2	-7.8	78.9	13.5	-3.7	76.2	9.0
中央アメリカ	-2.6	62.5	5.0	-2.4	63.2	5.4	-2.3	66.7	4.4	-5.3	70.8	7.6	-7.3	68.4	9.5	-2.7	61.9	6.9
南アメリカ	-3.7	79.2	3.7	-3.5	78.9	3.9	-2.8	81.0	3.5	-6.3	91.7	4.9	-8.8	89.5	6.0	-4.3	81.0	4.7
オセアニア	-0.3	50.0	4.1	-1.0	68.4	4.9	-0.9	66.7	6.3	-2.0	70.8	6.7	-2.6	89.5	8.7	-0.1	57.1	8.3
ポリネシア	0.7	50.0	9.4	0.9	42.1	8.4	-0.6	61.9	8.6	0.6	50.0	11.8	-0.1	52.6	15.1	-1.1	57.1	10.1
東アフリカ	-5.1	83.3	5.0	-4.1	73.7	6.2	-3.7	71.4	5.5	-8.4	87.5	6.5	-10.0	84.2	8.2	-5.5	85.7	5.9
中央アフリカ	0.7	41.7	5.4	-0.1	52.6	4.9	0.1	52.4	4.0	-0.9	45.8	5.7	-1.7	63.2	5.8	-0.9	52.4	4.7
北アフリカ	-5.3	95.8	3.4	-4.9	94.7	3.0	-3.2	85.7	3.8	-10.0	100.0	4.1	-12.0	100.0	4.4	-7.0	95.2	3.3
南アフリカ	-5.8	79.2	7.7	-6.0	84.2	7.2	-1.5	61.9	7.6	-6.4	91.7	8.6	-8.2	78.9	7.7	-2.1	57.1	9.0
西アフリカ	-3.2	91.7	3.4	-3.4	84.2	3.8	-2.2	85.7	2.4	-5.5	95.8	4.3	-6.0	78.9	6.1	-3.5	90.5	3.0
西アジア	1.0	41.7	4.2	0.7	36.8	3.3	1.5	23.8	3.8	0.4	45.8	6.4	1.1	52.6	5.9	1.5	38.1	4.8
東南アジア	-1.4	66.7	2.7	-0.6	52.6	3.3	-1.3	61.9	4.3	-1.7	66.7	4.2	-2.0	57.9	5.5	-2.5	71.4	4.3
南アジア	-3.5	95.8	2.6	-2.6	84.2	3.0	-2.5	85.7	2.5	-7.1	100.0	3.4	-8.5	100.0	4.8	-4.6	90.5	2.9
東アジア	8.4	12.5	6.9	7.9	10.5	5.8	6.0	14.3	4.8	11.7	8.3	9.3	14.4	0.0	10.7	8.4	14.3	6.9
中央アジア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
日本	0.7	37.5	5.2	1.3	31.6	3.7	1.1	23.8	4.0	0.2	45.8	10.6	1.6	47.4	11.4	1.9	33.3	6.8

表 5.8 キャッサバの ACP , $PCP<0$, $SDCP$

	近未来									将来								
	A1B			A2			B1			A1B			A2			B1		
	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$
北アメリカ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
東ヨーロッパ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
北ヨーロッパ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
南ヨーロッパ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
西ヨーロッパ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ロシア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
カリブ	-1.8	70.8	3.9	-0.4	63.2	4.6	-2.2	71.4	3.9	-4.3	83.3	5.8	-3.8	84.2	6.0	-2.4	76.2	4.8
中央アメリカ	2.0	33.3	4.8	2.8	36.8	5.0	3.3	28.6	5.0	2.7	45.8	6.6	3.5	47.4	7.7	3.6	33.3	5.8
南アメリカ	-4.6	91.7	3.4	-4.3	89.5	3.8	-2.9	95.2	2.2	-6.4	95.8	3.6	-7.5	94.7	4.7	-4.6	90.5	2.8
オセアニア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ポリネシア	-3.0	79.2	3.7	-2.9	78.9	3.9	-3.5	85.7	7.2	-6.8	95.8	4.9	-7.0	94.7	5.2	-5.9	90.5	7.0
東アフリカ	-7.0	95.8	3.9	-6.5	100.0	3.0	-6.4	95.2	6.2	-12.3	100.0	5.7	-16.0	100.0	5.2	-8.9	100.0	5.5
中央アフリカ	-2.0	75.0	3.6	-2.8	73.7	3.3	-3.4	71.4	3.9	-5.3	87.5	4.5	-6.1	78.9	5.2	-5.1	90.5	3.7
北アフリカ	-4.3	70.8	8.7	-3.9	63.2	9.3	-3.1	66.7	8.0	-9.7	91.7	8.2	-8.5	78.9	10.3	-5.6	76.2	8.6
南アフリカ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
西アフリカ	-5.7	83.3	4.9	-5.0	89.5	3.9	-4.3	90.5	4.2	-10.2	95.8	5.5	-11.3	100.0	6.6	-6.6	81.0	5.3
西アジア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
東南アジア	-4.5	95.8	1.9	-3.9	94.7	1.5	-3.7	100.0	1.8	-8.0	100.0	2.7	-9.2	100.0	2.5	-5.4	100.0	2.3
南アジア	-7.1	91.7	6.1	-5.6	84.2	5.6	-4.9	76.2	5.1	-14.7	100.0	8.0	-16.9	94.7	9.8	-9.1	90.5	6.6
東アジア	10.9	0.0	5.8	9.7	5.3	6.0	8.8	4.8	5.4	16.2	0.0	7.0	19.5	0.0	8.6	11.6	4.8	6.2
中央アジア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
日本	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 5.9 ダイズの ACP , $PCP<0$, $SDCP$

	近未来									将来								
	A1B			A2			B1			A1B			A2			B1		
	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$	ACP	$PCP<0$	$SDCP$
北アメリカ	-0.2	54.2	6.4	-0.6	42.1	7.3	0.7	47.6	7.1	0.8	50.0	10.8	-0.9	52.6	13.5	0.7	47.6	7.8
東ヨーロッパ	30.8	4.2	26.5	30.0	10.5	29.6	26.6	14.3	24.8	48.0	8.3	38.5	48.2	15.8	52.2	45.0	0.0	31.8
北ヨーロッパ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
南ヨーロッパ	11.9	12.5	9.8	11.6	21.1	9.3	11.0	4.8	8.1	18.9	12.5	15.9	21.2	15.8	17.8	17.2	0.0	10.4
西ヨーロッパ	46.1	0.0	31.9	50.0	5.3	33.7	35.2	4.8	28.3	72.4	0.0	50.3	74.0	10.5	58.9	63.0	0.0	43.9
ロシア	92.0	8.3	76.2	81.2	10.5	75.8	59.1	14.3	54.4	184.0	0.0	145.5	232.4	5.3	211.9	114.6	9.5	90.8
カリブ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
中央アメリカ	-4.5	79.2	5.5	-4.5	73.7	5.7	-3.8	76.2	4.9	-9.0	87.5	8.7	-11.4	94.7	8.9	-5.3	85.7	7.4
南アメリカ	-4.4	87.5	3.7	-4.1	84.2	4.1	-3.4	85.7	4.1	-7.7	87.5	5.3	-10.4	89.5	6.9	-5.1	85.7	4.8
オセアニア	-3.6	79.2	6.7	-3.6	73.7	6.1	-3.0	66.7	7.0	-6.0	75.0	8.6	-8.6	84.2	9.6	-4.4	71.4	8.2
ポリネシア	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
東アフリカ	-5.4	87.5	5.5	-4.1	84.2	6.2	-4.2	85.7	5.4	-9.0	87.5	7.9	-12.0	84.2	9.5	-6.8	90.5	7.0
中央アフリカ	0.1	45.8	5.5	-0.5	52.6	5.1	-0.1	57.1	4.8	-2.8	66.7	5.8	-4.5	89.5	5.4	-1.6	57.1	5.3
北アフリカ	-6.0	91.7	3.8	-5.5	94.7	3.8	-3.8	81.0	4.6	-11.4	100.0	4.9	-13.4	100.0	5.3	-7.7	95.2	4.0
南アフリカ	-8.0	91.7	6.6	-7.5	89.5	7.7	-5.4	90.5	6.6	-11.9	91.7	7.7	-15.9	94.7	7.8	-8.4	85.7	8.0
西アフリカ	-3.4	83.3	3.5	-3.4	78.9	4.2	-1.6	71.4	2.7	-6.2	100.0	4.2	-6.9	94.7	5.7	-3.6	90.5	3.1
西アジア	0.8	45.8	3.8	0.0	57.9	3.7	1.2	38.1	3.8	-0.4	54.2	5.3	-1.6	52.6	5.3	0.9	42.9	4.9
東南アジア	-2.1	75.0	3.5	-0.8	63.2	4.6	-1.7	61.9	4.9	-2.7	66.7	5.2	-3.1	63.2	7.5	-3.2	71.4	5.4
南アジア	-4.7	95.8	3.1	-3.8	89.5	3.3	-3.1	90.5	2.4	-9.6	100.0	4.3	-11.7	100.0	4.9	-6.3	95.2	3.4
東アジア	5.8	16.7	6.7	5.4	10.5	5.8	3.0	14.3	5.2	9.8	8.3	8.4	11.8	10.5	10.3	5.3	14.3	7.0
中央アジア	6.3	25.0	9.2	5.5	26.3	7.4	2.8	42.9	5.9	7.0	41.7	11.9	9.9	21.1	12.5	7.3	23.8	8.8
日本	3.4	37.5	7.4	4.6	21.1	7.8	4.3	33.3	7.5	3.9	41.7	11.9	4.3	47.4	12.0	4.9	23.8	8.5

5.4 気候変動がグリッド上の平均収量に与える影響

本節では、現在の土地利用および将来の土地利用変化などを考慮せず、気候学的な見地から将来において、各作物の栽培適地が将来どのように遷移するのかを調べることを目的とする。つまり 3.1 小節における Step3 中の水分制約のところまでを考慮し、それ以降の制約条件を課さない環境下で、現在 (1980-1999 年) における収量を算定し、さらに近未来 (2040-2059 年)、将来 (2080-2099 年) の収量を求め、現在の収量値との差率を各グリッドごとに求めた。本プロセスによって得られた各作物ごとの収量変化率の全球マップを図 5.9-図 5.16 に示す。

結果を見ると、コムギでは、全シナリオにおいて近未来、未来ともアメリカ、南アメリカ (アルゼンチン南部を除く)、アフリカ、アジアでは軒並み収量の減少が見られる。つまり、地球全体のコムギの収量減少の多くを、現在の多収地帯が担うこととなる。アメリカでは他の減収が予測される地域に比べて、収量の減少率は低く推定されるが、適作地が北の方向にシフトし、それにより五大湖北西部に位置する春コムギの生産地帯が五大湖の北側をとりまくようになる。その結果、アメリカの幅広い地域で収量が減少する一方、カナダでは将来の収量増を予測を示す結果となった。また、ロシアでは幅広い領域で収量の増加が予測される結果となり、最も温暖化の恩恵を受けることが予測される結果となった。シナリオ別にみると、将来における収量変化率の差が最も小幅にとどまるのは、B1 シナリオであることがわかった。

コメの主産地である東南アジアでは近未来、将来ともに全シナリオ下の幅広い領域で収量の減少が予想される結果となり、また、最大の生産国である中国を含む東アジアの華中では収量が減少する一方、耕作限界が北部に伸びることによって華北では収量が増加する。また、現在は冷涼な気候のために稲作には適していないと考えられている東ヨーロッパ平原やロシアおよびカナダ南部では大幅な収量の増加が予想され、これらの地域では気温上昇の恩恵を被る可能性が高い。

トウモロコシの収量変化を見ると、収量の増加は高緯度地方で起こっており、低緯度地方では減少傾向を示す変化が顕著となっていることがわかる。このことは、北半球では栽培に適した耕作エリアが全体的に帯のようにして高緯度に移動することを示している。その結果、中国の華南やアメリカのコーンベルト地帯では収量は減少し、ロシアやカナダなどでは収量が大幅に増加する。

ソルガムの収量変化を見ると、アメリカ合衆国中央部におけるコーンベルト地帯の西側では収量の増加が、東側では減少のコントラストが明瞭にみとれる。また、中国東北部では大幅に収量が増加することが予想される。また、ナイジェリアを含むアフリカでは赤道付近では収量が増加する領域も見られるが、全体としては減少するエリアが幅広く見ら

れることがわかる。またそのコントラストは A1B, A2 シナリオに比べて B1 では緩やかなものとなっており、アフリカにおける気候学的な見地からみた将来の収量の増減差は B1 シナリオで最も小さく抑えられると考えられる。また、南アジア一帯では収量の減少が予想される一方、ヨーロッパやロシアでは広範囲にわたって温暖化による収量の増加が見込まれる。

ジャガイモでは、主要生産国のひとつであるポーランドで、A2 シナリオ下の近未来は国内において収量の増加を示す領域が広がっているが、将来では全域において収量の減少を示す。一方、B1 シナリオでは近未来が示す増収の割合に比べ、将来に示す増収の割合の方が高く、A2 と B1 シナリオにおけるポーランドでの増減率の結果は反対となっていることがわかる。このことは、A1B および A2 と比較して気温・降水量の変化がより緩やかな B1 シナリオでは収量の増加が見込まれるが、A1B, A2 シナリオではポーランド国内における気候学的な環境は栽培には適さなくなる可能性があることが示唆される結果である。また、中国東北部・ロシアでは、将来において一層収量を増加させることが明らかとなる一方、現在における主要な生産域である南アジアでは幅広い領域で収量の減少が予想される結果となり、この地域での高温化がジャガイモの栽培に適さなくなる可能性が高いことが明らかとなった。

サツマイモでは、中国の東北部で収量増を示す領域が現れ、現在栽培に適さない環境であると考えられるカナダにおいても、将来の温暖化による気温上昇により栽培適地となる可能性が高いことが明らかとなった。

キャッサバは、ブラジル、ナイジェリア、インドネシアの主要生産国で収量が減少することが顕著となり、中国では華南・華北の東部において幅広く収量増が見込まれる結果となった。

ダイズの主要生産国であるアメリカ、ブラジルの現在の生産域では収量の減少が予測される一方、アメリカとカナダの国境付近やヨーロッパ、ロシアおよび中国の東北部が栽培に適したエリアとなり、大幅な収量の増加が見込まれる結果となった。

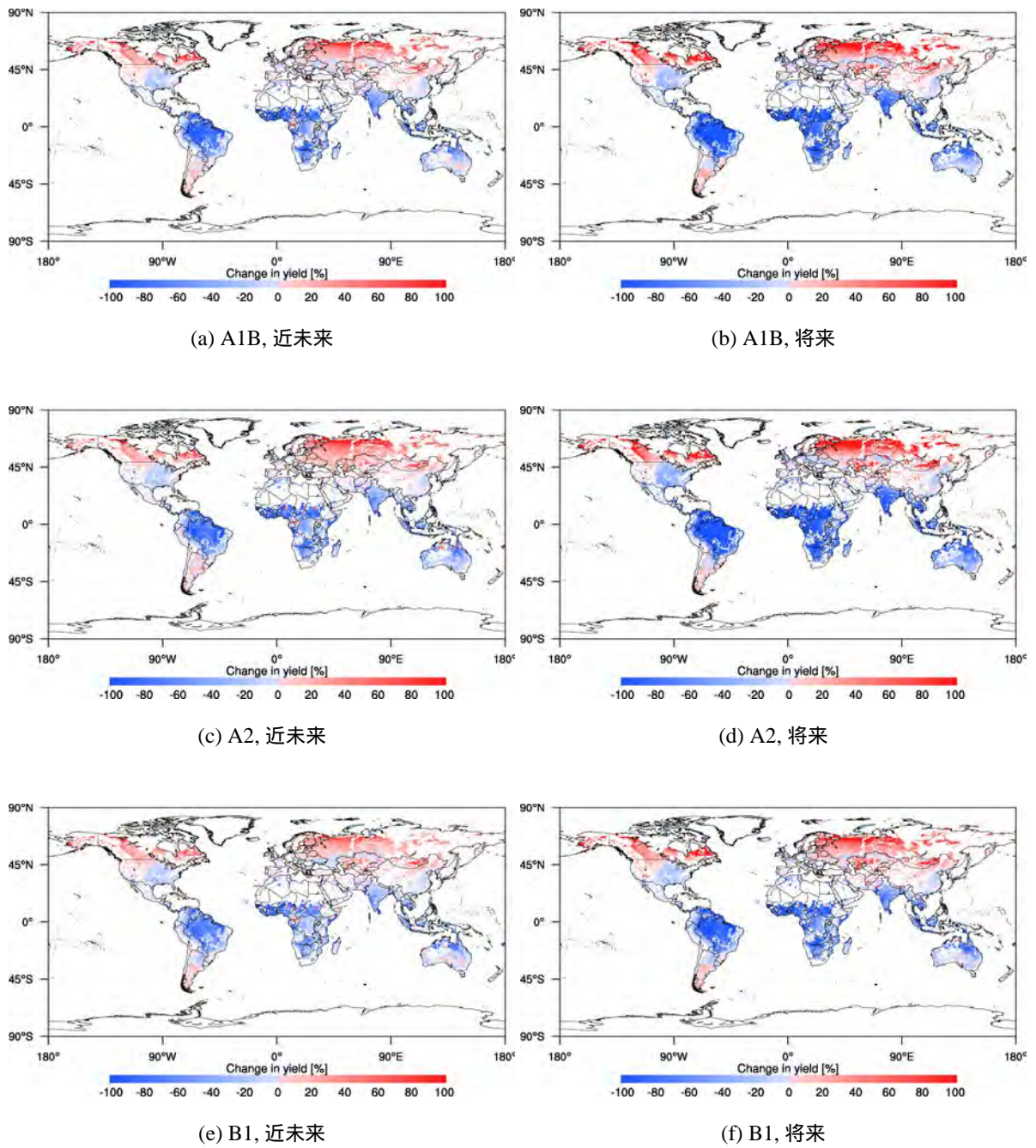


図 5.9 近未来および将来におけるコムギの潜在収量変化率 (1980-1999 年平均比)

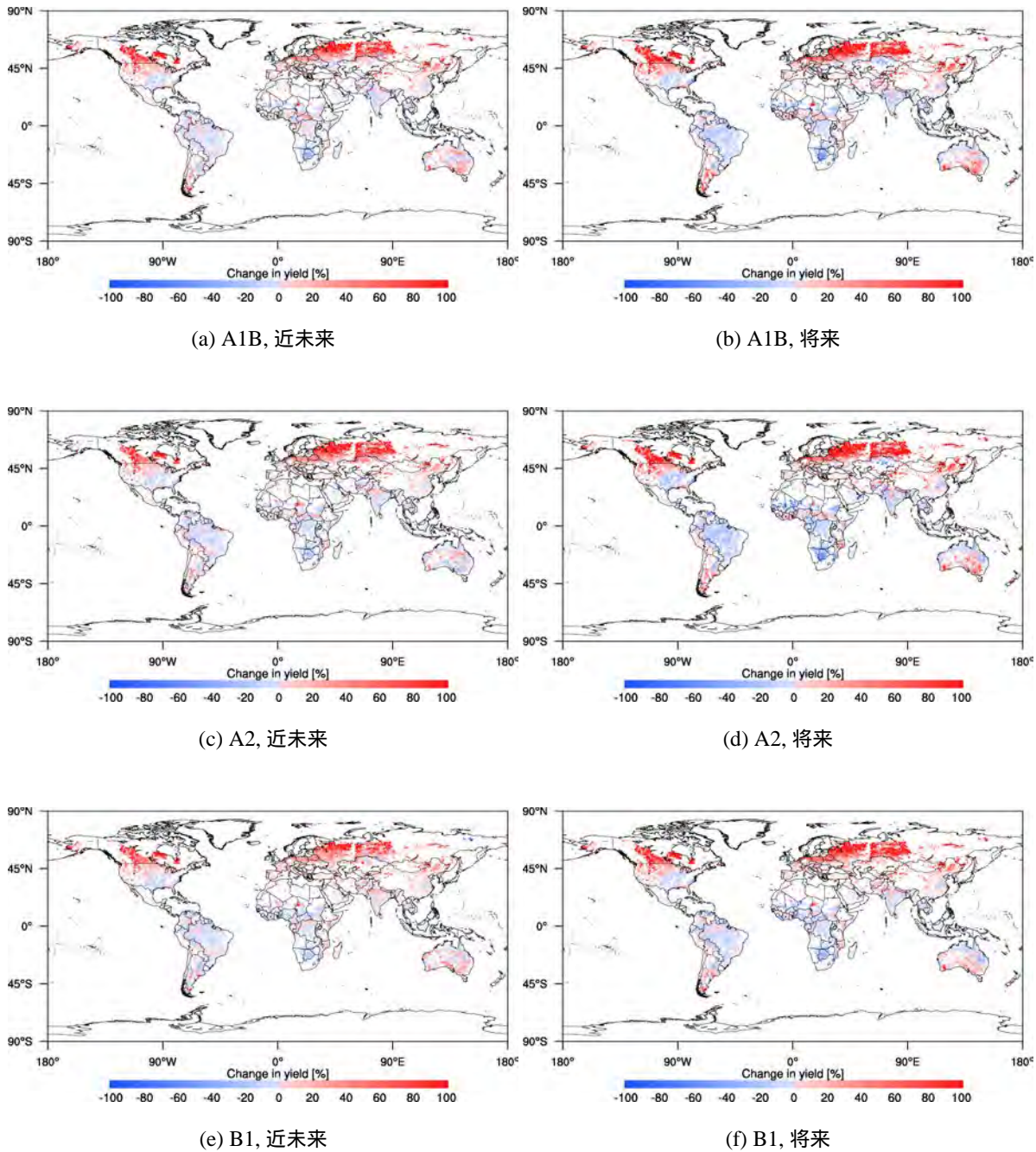


図 5.10 近未来および将来におけるコメの潜在収量変化率（1980-1999 年平均比）

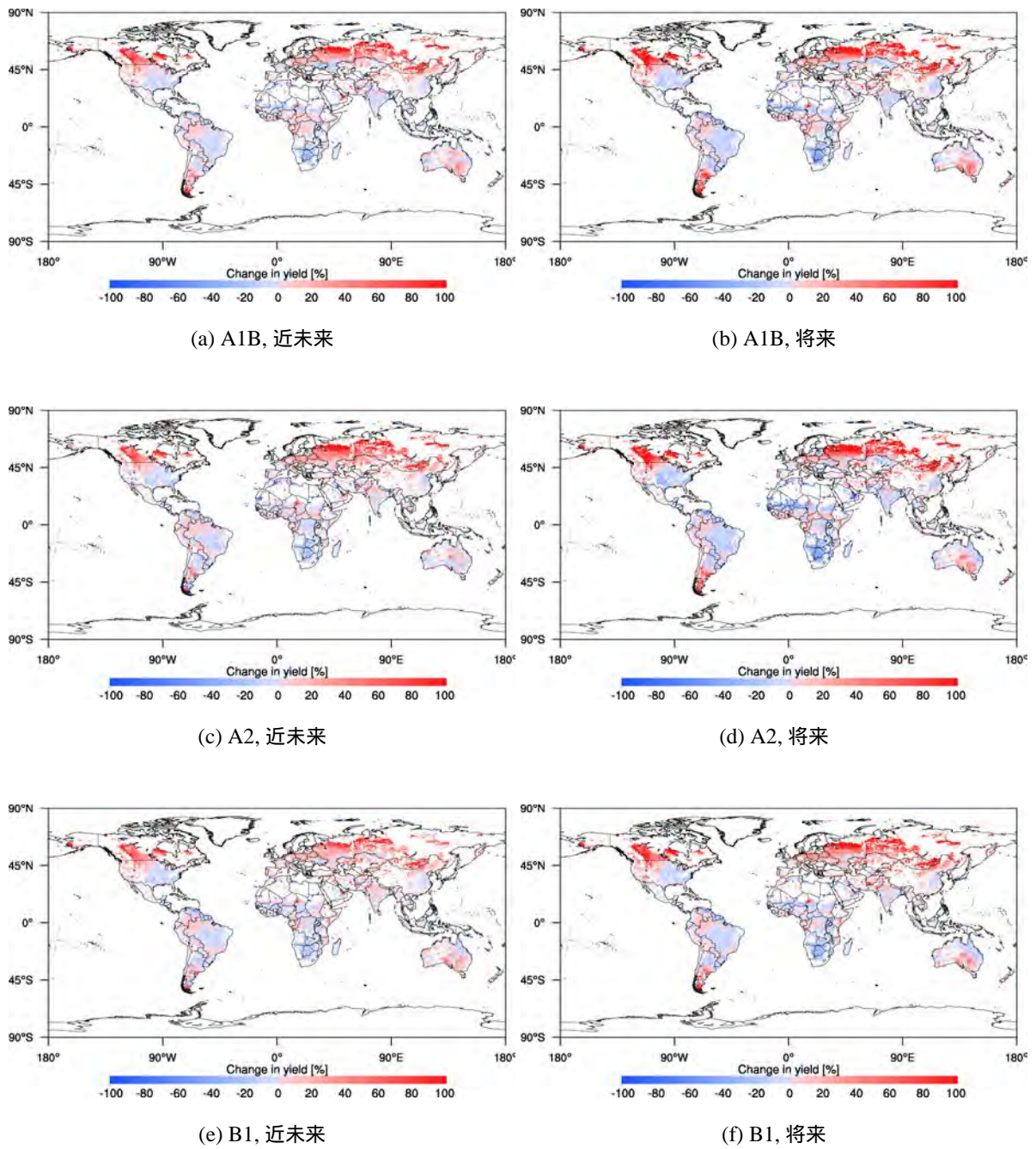


図 5.11 近未来および将来におけるトウモロコシの潜在収量変化率 (1980-1999 年平均比)

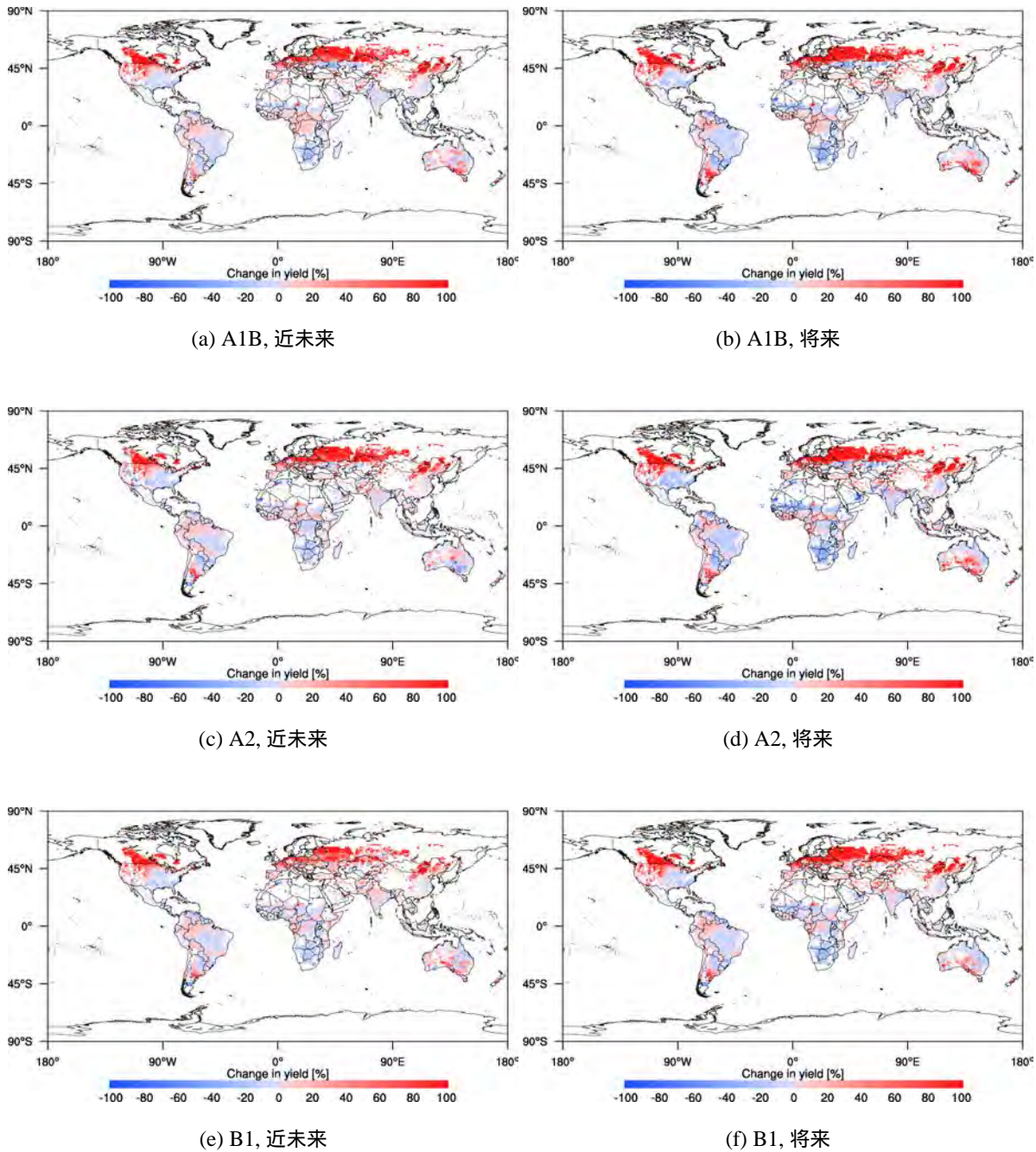


図 5.12 近未来および将来におけるソルガムの潜在収量変化率（1980-1999 年平均比）

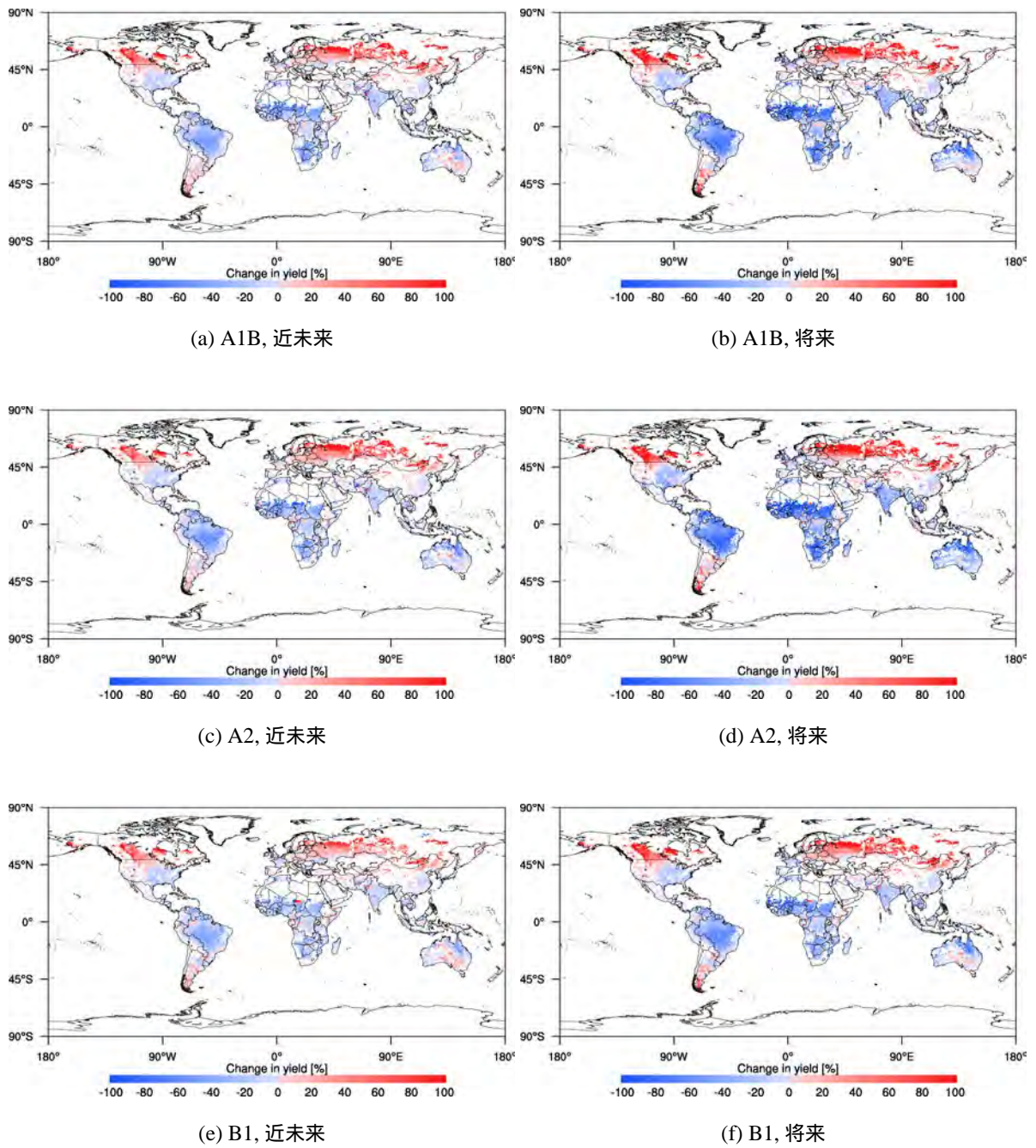


図 5.13 近未来および将来におけるジャガイモの潜在収量変化率 (1980-1999 年平均比)

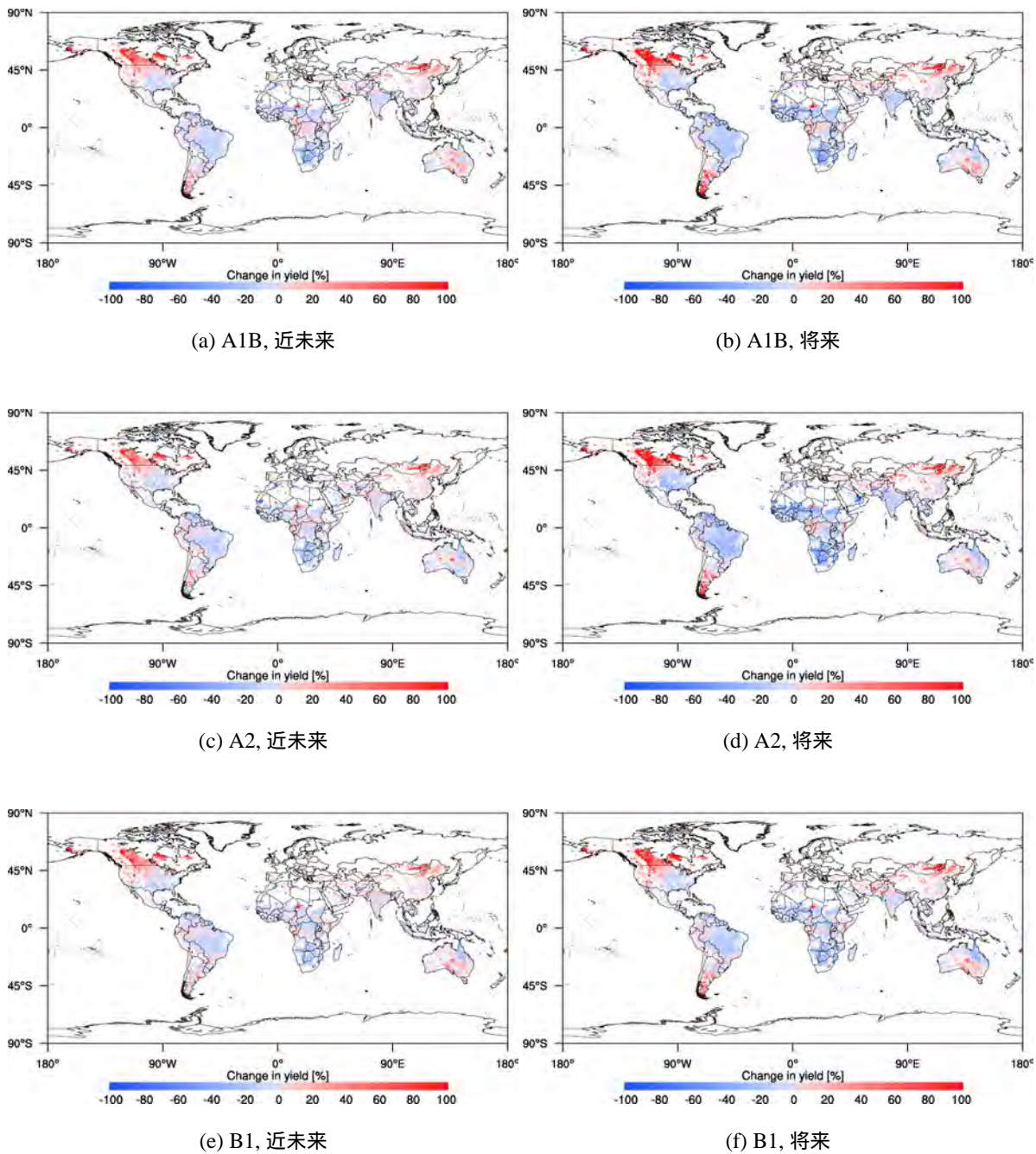


図 5.14 近未来および将来におけるサツマイモの潜在収量変化率 (1980-1999 年平均比)

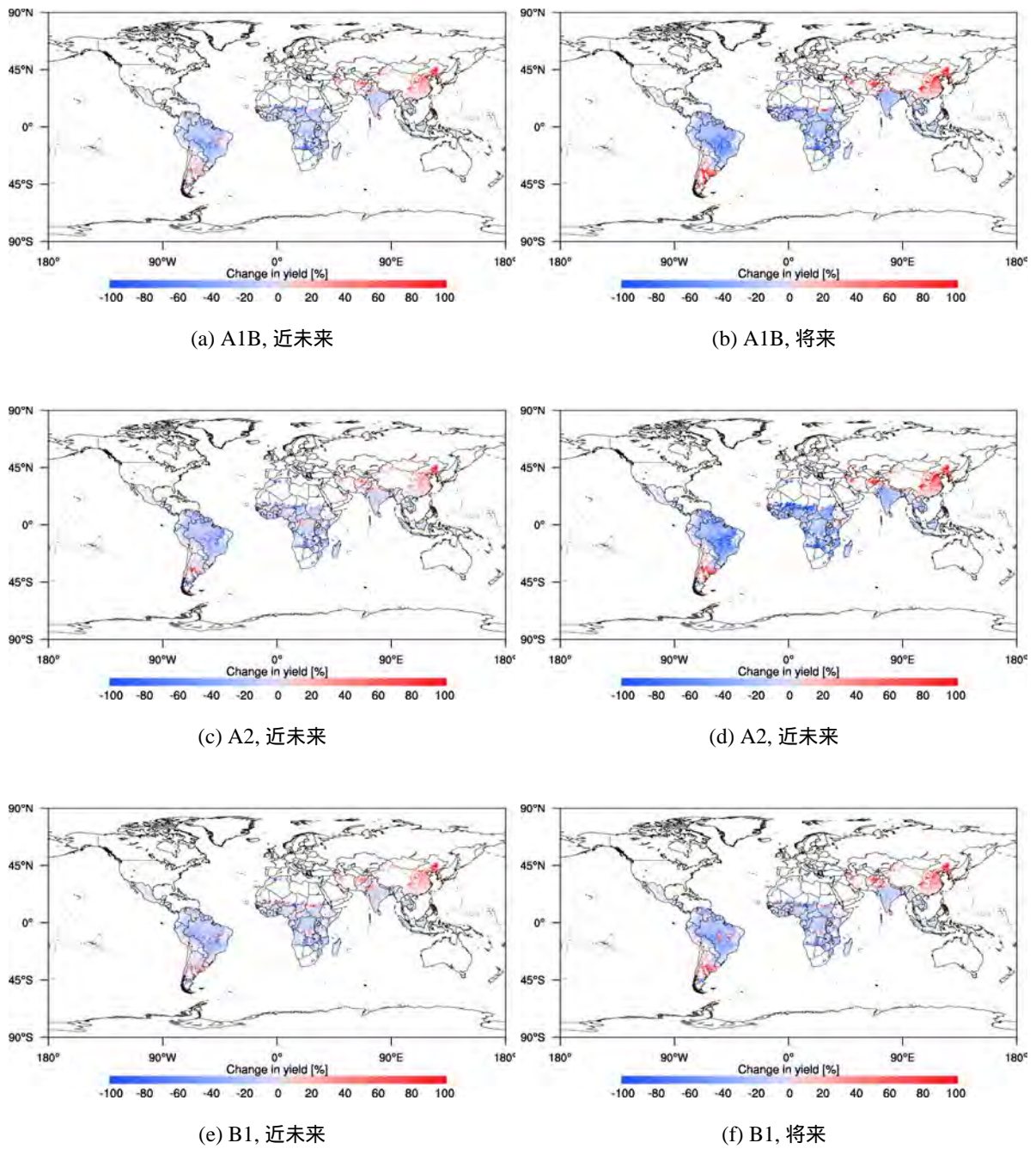
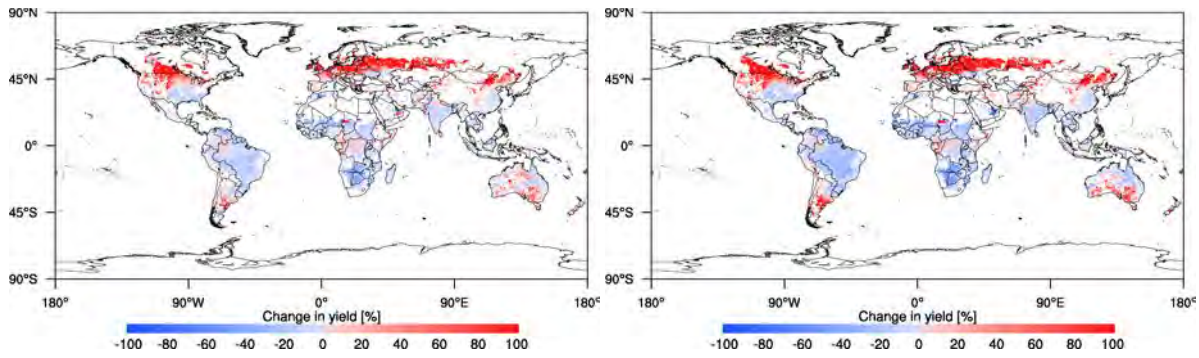
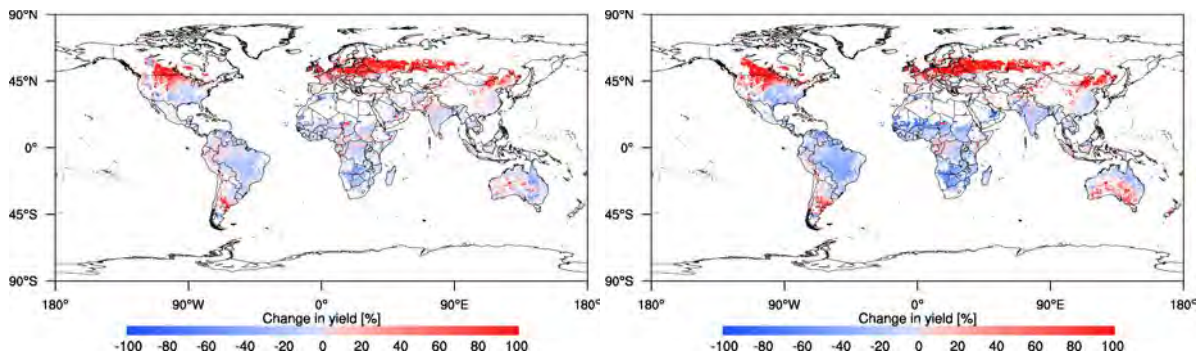


図 5.15 近未来および将来におけるキャッサバの潜在収量変化率 (1980-1999 年平均比)



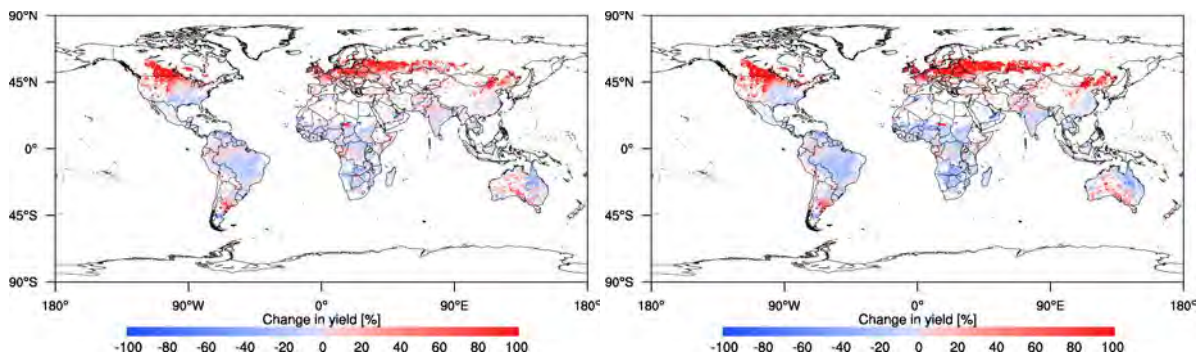
(a) A1B, 近未来

(b) A1B, 将来



(c) A2, 近未来

(d) A2, 近未来



(e) B1, 近未来

(f) B1, 将来

図 5.16 近未来および将来におけるダイズの潜在収量変化率（1980-1999年平均比）

5.5 結語

本章では、SRES A1B, A2, B1 シナリオ下における複数の GCM モデル気候値を用いて、近未来（2040-2059 年）、将来（2080-2099 年）の生産量および収量予測を農業収量算定モデルを用いて行った。その結果、コムギでは現在の主要生産地域である東アジアでは生産量に大きな変化はないものの、南アジアやヨーロッパでは大幅に生産量が減少することが予測された。また、コメでは、世界全体で 1.8~3.2% 生産量が減少することが示された。トウモロコシは、特に東アジアにおいて生産量が増加することが示され、北アメリカや南アメリカでは生産量は減少するものの、その幅は小さいことからトウモロコシは温暖化による利益を受ける作物の一つであると考えられる。ソルガムは北アメリカで将来 6.1~11.6% 生産量が減少し、アジアでも減少傾向が強くなる。ジャガイモの生産量は将来ロシアにおいて急激に増加することが予測される一方、ロシアにおける生産量増加率のモデル間偏差は、他の主要生産域に比べて大きく、収量予測は不確実性が高い。キャッサバおよびダイズの世界生産量は、近未来、将来において軒並み減少することが予想される。また、東アジアにおけるダイズの世界生産量は近未来、将来において大幅な増加が見込まれ、中国が食糧需給に与える役割が大きくなることを示唆する結果となった。

各シナリオにおける地域ごとの生産量変化率のばらつきを見ると、環境を重視した持続可能な経済成長と地域間格差の縮小を仮定した B1 シナリオでは、近未来および将来における地域間の生産量変化率の標準偏差が最も小さくなった。また、気候学的見地からみた近未来、将来における収量は、低緯度地域では総じて減少傾向にある一方、カナダやロシアなどの現在において気温が低く、作物の栽培に適していない土地が将来において作物の主要な生産エリアになる可能性が高いことが示された。

第 6 章

気温と降水の空間解像度が農業収量算定結果に与える影響

前章までに、全球スケールでの作物の収量および生産量の推定および将来推計予測を実施した。その結果、農業収量算定モデルの入力に用いるデータの種類や解像度によって結果にはばらつき、つまり不確実性が生じることが明らかとなった。しかしながら、水平解像度が粗い場合は狭い国土を有する農業国において、その再現性には一定の精度が保たれるのか、入力値に用いるデータの解像度の違いが結果に及ぼす程度はどのようなのであろうか。本節ではこの点について検討する。計算対象とする国は、世界有数のコムギおよびトウモロコシの生産国であるハンガリーとルーマニアである。なお、入力に用いるデータは温暖化影響評価を目的に気象庁・気象研究所により開発された超高解像度全球大気モデルにより計算された現在（1979-1999年）の全球の気候値を用いて、これらの国における収量の算定と計算時の水平解像度が収量算定結果に与える影響の評価を行う。

6.1 既往の研究

本論に入る前に関連する既往研究をレビューする。Tan and Shibasaki (2003)[101] は、GIS ベースの Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) モデルを用いて、2000 年における穀物収量の予測を全球規模で実施し、計算結果を国レベルで FAO の統計値との比較を行い、一部の国を除いて統計値と計算値の良好な結果を示した。また、2050 年までの穀物の収量予測を試みた。Stehfest *et al.* (2007)[69] は、主要穀物の植え付け期を考慮した作物収量を全球レベルでモデル計算し、計算結果と統計値が高い相関を持つことを示した。一方、土地利用・植え付け期・灌漑情報のデータ精度、作物管理や作物生長過程に関する作物パラメータ、入力データの時間・空間解像度に代表される不確実性が計算結果に大きな影響を与える可能性があることを指摘した。Bouman (1994)[110];

Nonhebel (1994)[111]; Pachepsky and Acock (1998)[112]; Soltani *et al.* (2004)[113]; Fodor and Kovacs (2005)[114]; は、気候値や土壌、農業管理技術に関する不確実性を評価する研究を行った。Mearns *et al.* (1997)[115]; Semenov and Porter (1995)[116] は、農業モデルが気温や降水の変動成分および入力値の空間スケールの影響を受けやすいことを示した。Hansen *et al.* (2004)[117]; Challinor *et al.* (2004)[120]; Nemecek *et al.* (1996)[121]; Thornton *et al.* (1997)[122]; Vossen and Rijks. (1995)[123]; Yun (2003)[124] は、農業気候学上の作物収量モデルを用いて、作物の生長における気候の影響や収量を予測を地域および大陸スケールで行った。Hansen and Jones (2000)[125] は、農業収量の予測は、気候や土壌、管理条件の影響を定量化する際のモデル能力や適切な空間スケールでシミュレーションを行う統合システム的な能力に強く依存することを示した。Wit *et al.* (2005)[126] は、WORLD FOOD STUDIES (WOFOST) 農業モデルを用いて、ドイツとフランスにおける冬コムギとトウモロコシの収量算定を行い、降水と放射の入力値がもつ不確実性の効果を評価した。その結果、同一の気候値を入力データと用い、10km の水平解像度で実施した計算結果と 50km の水平解像度で実施した結果には線形の関係があり、高解像度化が必ずしもメリットが大きくないことを示した。また、算定結果を個々のグリッドや狭い領域単位で評価するよりは、より大きい領域で平均化して評価した方が、降水および放射の入力値がもつ不確実性の影響が小さくなることを示した。

以上の既往研究を踏まえ、本研究の目的を以下のとおり設定する：1) 異なる空間解像度（水平解像度 0.25 度および 0.5 度）で実施された作物収量計算における気温と降水の不確実性の影響を定量化、2) モデル出力における気候入力値（気温、降水量）の空間平均の影響の評価。

6.1.1 研究エリア

研究エリアは、ハンガリーとルーマニアである。これらの国々は比較的小さい国土面積であり、モデルの空間解像度が計算結果に与える影響を調べるのに都合が良い。さらに、両国では冬コムギとトウモロコシの生産が活発に行われており、栽培のほとんどが灌漑ではなく天水栽培で行われていることから、本研究の目的に合致した対象エリアであると考えた。

6.1.2 全球 20kmGCM の概要

21 世紀気候変動予測革新プログラム [118] では、気象庁現業数値予報モデル(GSM0103) が、水平解像度を TL959 (約 20km の格子間隔)、鉛直層数を 60 層(上端 0.1 hPa) と高解像度化され、これを用いて検証用として現在気候(1979-2003 年)、温暖化影響評価のた

めに近未来気候 (2015-2039 年), 将来気候 (2075-2099 年) の 3 期間について実験が行われている。SST (海表面温度)・海水密度は現在気候については, 英国ハドレーセンター (Hadley Centre) が提供する HadISST を用いており, 海氷厚については年々変動を含まない月平均気候値が使用されている。SST は将来実験において現在気候実験で用いた値と IPCC 第 4 次報告書のために提出された CMIP3 の 18 モデルのアンサンブル平均を用いて作成されている。二酸化炭素濃度は, 現在気候実験では観測値, 将来実験においては A1B シナリオに従った濃度を用いており, 濃度は全球で一様な値を年ごとに変化させている。IPCC の Special Report on Emissions Scenarios によると A1B シナリオはグローバル化によって経済が成長し, 化石・非化石燃料をバランスよく消費するというもので, 世紀末において地球平均気温は 2.5 °C 上昇し, CO₂ 濃度は現在の 380ppm から 720ppm まで上昇するとされている。

6.1.3 入力データと計算方法

本章では, ハンガリーおよびルーマニアにおける冬コムギとトウモロコシの収量を算定し, 収量と収穫面積算定結果に気温と降水量の不確実性が与える影響を評価するため, Tatsumi *et al.* (2011) の iGAEZ モデル (improved Global Agro-Ecological Zones model) を使用する。iGAEZ モデルは, 日平均気温, 日最高・最低気温, 降水量, 蒸気圧, 放射を入力値として用いる。詳細は Tatsumi *et al.* (2011)[73] ならびに本論文 3 章を参照されたい。

本研究で使用する気候値および静的データを表 6.1 に示す。本研究では, 気候値以外の標高・土壌環境などの静的データは全て最短距離法により 0.25, 0.5 度の空間解像度によりサンプリングする。

表 6.1 本章で使用したデータ

Data set	Data name	Spatial reference	Source
Observed Climate	CRU TS 2.1	0.5×0.5 degree lat/lon	Mitchell <i>et al.</i> , (2005)[53]
GCM Climate	MRI-GCM20	0.1875×0.1875 degree lat/lon	Kitoh <i>et al.</i> , (2009)[118]
Soil type	Digital Soil Map of the World	5×5 minute lat/lon	FAO, (1995) [84]
Elevation	ASTER GDEM	1×1 second lat/lon	http://www.ersdac.or.jp/GDEM/J/index.html
Irrigated Area	Global Map of Irrigated Area	5×5 minute lat/lon	Siebert <i>et al.</i> , (2005)[119]
Cultivated Area	Major Crop Dataset	5×5 minute lat/lon	Leff <i>et al.</i> , (2004) [92]
Crop Calendar	MIRCA2000	5×5 minute lat/lon	Portmann <i>et al.</i> , (2010)[87], Sacks <i>et al.</i> , (2010)[77]

気象庁・気象研究所によって開発された全球 20kmGCM(MRI-GCM20) は 0.1875 のオリジナル解像度を持つ。本研究では, 観測気候値として CRU TS 2.1 を用い, MRI-GCM20 のオリジナルデータは, 最接近傍法によって 0.25 度の空間解像度を持つデータセット

(以降, MRI-GCM20-0.25) と CRU TS 2.1 の持つ 0.5 度のグリッドボックス内の全ての MRI-GCM20 グリッドポイントの値を平均することによって作成された 0.5 度の空間解像度データセット(以降, MRI-GCM20-0.5) の 2 種を作成する。

数値実験の具体的手順は大筋以下のとおりである。

1. MRI-GCM20 および CRU TS 2.1 の 1979-1999 年における月別の平均気温と月降水量を算出する。
2. CRU TS 2.1 と MRI-GCM20-0.5 を使った収量算定計算を実施する。
3. MRI-GCM20-0.25 を使った水平解像度 0.25 度の収量算定計算を実施する。

1 によって, 各気候値を使った際における収量・収穫面積算定結果の差の原因を説明するための情報を得ることができる。また, 2 を実施することにより, iGAEZ モデルにおける気温と降水量の入力値の不確実性の影響を評価することができる。最後に 3 を実施することによって, 気候値を平均化しアップスケーリングすることによって, シミュレーション結果におけるグリッド内の変動性および精度を含めた計算結果に与える影響を評価することが可能となる。

本研究で対象とした計算期間は 1979-1999 年の 21 年間である。また, シミュレーションで得られた収量および収穫面積の国単位での算定結果の精度を評価するため, 統計値には FAO (FAOSTAST,2005) [91] が提供しているデータを利用した。

6.2 CRU TS 2.1 と MRI-GCM20 の気候値の比較

ハンガリー, ルーマニアにおける CRU TS2.1 と MRI-GCM20 の気温および降水量に関する月別統計値を表 6.2 に示す。表より, MRI-GCM20 が持つ気温の値は, 両国において 7 月から 10 月において CRU TS 2.1 より高い値となっていることがわかる。一方, 2 月から 6 月では, $0.32 \sim 2.64 \text{ }^{\circ}\text{C}$, MRI-GCM20 の気温値は CRU TS 2.1 と比較して低い値となっている。さらに, 両気候値の差の標準偏差は 8 月が最も大きくなっていることがわかる。月別の総降水量を見ると, MRI-GCM20 ではハンガリーの 9 月から 11 月およびルーマニアの 8 月, 9 月を除いては, CRU TS 2.1 と比較して全月において大きな値となっていることがわかる。また, MRI-GCM20 の 6 月における降水量は 100mm を超えており, これは CRU TS 2.1 の 2 倍近くの値であることがわかる。以上のように, GCM の現在気候の 21 年間の統計値を観測に基づいて得られている気候値と比較した際, その偏差は決して小さいものではなく, モデル計算を行う際に用いる入力気候値を取り扱う際には, これらの気候値がもつ不確実性を十分に認識することが必要である。

表 6.2 ルーマニア，ハンガリーにおける各月ごとの気候値統計量（1979-1999年）

Month	Hungary			Romania			Hungary			Romania		
	Temperature (°C)			Temperature (°C)			Precipitation (mm/month)			Precipitation (mm/month)		
	CRU TS 2.1 ^a	MRI GCM-20 ^b	St. dev. diff ^c	CRU TS 2.1 ^a	MRI GCM-20 ^b	St. dev. diff ^c	CRU TS 2.1 ^d	MRI GCM-20 ^e	St. dev. diff ^f	CRU TS 2.1 ^d	MRI GCM-20 ^e	St. dev. diff ^f
1	-0.2	0.16	0.37	-1.94	-1.52	0.75	22.3	43.7	4.93	29.9	45.1	20.98
2	1.44	0.74	0.39	-0.50	-1.15	0.87	27.7	37.2	5.85	29.7	48.5	17.23
3	5.85	3.21	0.40	3.70	1.90	0.90	23.4	52.7	4.72	30.4	70.0	25.82
4	10.7	9.85	0.30	9.25	8.24	0.88	50.0	64.9	9.99	54.1	81.5	27.40
5	15.80	15.48	0.45	14.42	13.95	0.93	58.6	80.4	8.10	73.5	97.4	30.23
6	19.32	18.67	0.47	18.43	17.92	0.87	67.3	113.8	14.89	85.4	134.0	36.18
7	21.06	21.51	0.54	20.15	20.89	0.97	64.7	74.5	16.42	77.3	92.2	30.71
8	21.08	22.12	0.57	19.77	21.29	1.19	54.0	55.8	12.56	64.1	61.1	25.86
9	16.02	16.78	0.34	14.72	15.68	1.00	59.7	43.3	8.26	59.0	54.6	17.29
10	10.7	11.55	0.23	10.00	10.39	0.88	54.9	53.1	7.57	50.0	59.7	20.5
11	4.79	4.29	0.30	3.57	3.33	0.71	55.0	54.7	7.64	43.6	59.7	21.25
12	-0.25	0.17	0.29	-1.47	-1.10	0.81	45.1	53.6	9.45	49.1	54.8	17.63

^a Average temperature using CRU TS 2.1, averaged over all grids in Hungary or Romania

^b Average temperature using MRI-GCM20-0.5, averaged over all grids in Hungary or Romania

^c Standard deviation of the differences between CRU TS 2.1 and MRI-GCM20-0.5 evaluated from the daily values in averaged temperature of all grids in Hungary or Romania

^d Total precipitation using CRU TS 2.1, averaged over all grids in Hungary or Romania

^e Total precipitation using MRI-GCM20-0.5, averaged over all grids in Hungary or Romania

^f Standard deviation of the differences between CRU TS 2.1 and MRI-GCM20-0.5 evaluated from the daily values in total precipitation of all grids in Hungary or Romania

6.3 気候値の不確実性が作物収量・収穫面積算定結果に与える影響

本節では，CRU TS 2.1 と MRI-GCM20-0.5 のデータを使い，気温と放射のみの制約を受けて算定された作物収量と，それに加えて水分による制限を考慮して算定された作物収量を比較することによって，計算結果に気候値の不確実性が与える影響を評価する．表 6.3 に，CRU TS 2.1 と MRI-GCM20-0.5 を使った計算グリッドごとの収量値に関する統計量を示す．CRU TS 2.1 の気温と放射制約下で算定された収量は，MRI-GCM20-0.5 を使った結果に比べてトウモロコシで 49kg/ha 低い結果となった．ヨーロッパにおけるトウモロコシは 4 月に植え付けが行われ，収穫までの期間は 120-170 日程度である (Portmann *et al.* (2010) [87])．MRI-GCM20 による平均気温は，この期間で CRU TS 2.1 よりも高いことから，生長に必要な積算温度（植え付け期から収穫期までの積算）は MRI-GCM20 のほうがわずかに大きい．結果として，作物の生育に必要な気温要件が MRI-GCM20 の方が優れているため，MRI-GCM20 による気温と放射による制約下での収量は，CRU TS 2.1 によるものを上回る結果となった．一方，MRI-GCM20-0.5 を使って水分制約下の条件で算定された収量は，CRU TS 2.1 を使って得られた収量に比べ 419kg/ha 大きくなっ

た。これは、ハンガリーおよびルーマニアにおけるトウモロコシの栽培期間において、MRI-GCM20-0.5 の降水量が CRU TS 2.1 を大幅に上回っていることが要因である。

ヨーロッパにおいて冬コムギは一般に 9 月から 10 月にかけて植え付けが行われ、収穫までの栽培期間は 240-300 日間である (Portmann *et al.* (2010) [87])。CRU TS 2.1 を使った気温と放射制約下で得られた収量は、MRI-GCM20-0.5 に比べて大きい。これは、栽培期間における積算温度が CRU TS 2.1 の方が大きいことに起因する。トウモロコシに関し、降水量値の不確実性の効果は、冬コムギと比較して大きい。両気候値によって得られた収量差の標準偏差および RMSE は、冬コムギでは両国において水分制約下での値は気温放射制約下での値と比較して 1.5 倍程度であるのに対して、トウモロコシでは約 3 倍になっていることからわかる。両国における降水量の不確実性は、表 6.2 に示すとおり 5 月から 8 月にかけて高く、この期間はトウモロコシの栽培期間に重なることから、トウモロコシでは冬コムギと比較して降水の不確実性の影響を強く受ける結果となった。

表 6.3 CRU TS 2.1 と MRI-GCM20-0.5 を使った収量値に関する統計量 (1979-1999)

Simulation results (kg/ha)	Maize		Winter-wheat	
	Constraint-free yield	Moisture-limited yield	Constraint-free yield	Moisture-limited yield
CRU TS 2.1 ^a	3211	2624	3290	2411
MRI-GCM20-0.5 ^a	3260	3043	2911	2664
Differences (kg/ha) ^b	-49	-419	379	-253
Standard Deviation ^c	132.8	412.1	230.3	386.4
RMSE ^d	133.9	420.3	228.4	393.1

^a Yield averaged over all 0.5 degree grids.

^b CRU TS 2.1 minus MRI-GCM20-0.5

^c Standard deviation of the differences in yield of all 0.5 degree grids.

^d RMSE of the differences in yield of all 0.5 degree grids.

表 6.4 に CRU TS 2.1 と MRI-GCM20-0.5 を使った国単位で総計した平均収量に関する統計量を示す。水分制約下での収量差 (CRU TS 2.1 - MRI-GCM20-0.5) は、ハンガリーで 721 kg/ha、ルーマニアで 242kg/ha となった。また、RMSE は表 6.3 に示す 420.3kg/ha からハンガリーで 320.4kg/ha、ルーマニアで 330.7kg/ha と減少したことがわかる。さらに、標準偏差は 421.1kg/ha から 276.1kg/ha (ハンガリー)、290.8kg/ha (ルーマニア) と減少している。冬コムギでは、同様に RMSE で 393.1kg/ha から 289.8kg/ha (ハンガリー)、327.2kg/ha (ルーマニア) に減少、標準偏差は 386.4kg/ha から同じくそれぞれ 274.4kg/ha、318.8kg/ha に減少している。これらの結果は収量を推計する領域を広げる、つまり各グリッドの値を集約して空間平均化することにより収量値のばらつきが低減し、気温と降水量値の不確実性の影響を低減させる効果があることが示唆される結果となった。このことは、0.5 度グリッドごとの値を使った算定よりも、国単位などの大きなスケールに集約して得られた収量値の方が扱うメリットが大きいことを示しているかもしれない。

表 6.4 国単位で総計された CRU TS 2.1 と MRI-GCM20-0.5 を使ったハンガリーとルーマニアにおける平均収量（1979-1999 年）

	Hungary		Romania	
	Maize (kg/ha)	Winter-wheat (kg/ha)	Maize (kg/ha)	Winter-wheat (kg/ha)
CRU TS 2.1 ^a	3752 / 2871	4252 / 3316	2801 / 2488	2564 / 2198
MRI-GCM20-0.5 ^a	3798 / 3592	3813 / 3508	2894 / 2730	2503 / 2359
Standard deviation ^b	98.2 / 276.1	163.4 / 274.4	102.9 / 290.8	180.4 / 318.8
RMSE ^c	99.7 / 320.4	170.1 / 289.8	108.3 / 330.7	177.9 / 327.2

^a Average crop yields (left: constraint-free, right: moisture-limited)

^b Standard deviation of the differences in yield (left: constraint-free, right: moisture-limited)

^c RMSE of the differences in yield (left: constraint-free, right: moisture-limited)

6.3.1 収量の再現性

表 6.5 に 1979-1999 年における FAO 統計値と CRU TS 2.1 および JRA-25 を用いて得られた計算結果との自由度調整済み決定係数 R^2 を示す。図 6.1, 図 6.2 に対象期間の標準偏差で規格化した収量・収穫面積偏差の時系列変動を示す。収量の決定係数は、トウモロコシと冬コムギにおいて両国ともに 0.5 以上あり、また 5% の有意水準で有意な相関が得られる結果となった。一方、収穫面積に関する決定係数の平均は、0.39 と低く、特にルーマニアにおけるトウモロコシの収穫面積の決定係数は CRU TS 2.1 を使ったケースで 0.05 となり、5% の有意水準で統計的に有意でない結果となった。このことから、本モデルが実施された 0.5 度の水平解像度では、国土面積が小さい国に対し一定の精度で収穫面積を再現することが難しいことが示される結果となった。しかしながら、偏差の時系列変動を見ると、FAO 統計値の時系列トレンドをおおむね追従しており、特に小さい国においては収量および収穫面積の時系列変動の再現性が高くなる可能性がある。また、CRU TS 2.1 と JRA-25 の各再解析間それぞれの結果では大きな差は生まれず、再解析値の気候値には不確実性やバイアスが存在するものの、今回の計算条件においてはその影響は小さいと言える。

表 6.5 計算結果と統計値との自由度調整済み決定係数

	トウモロコシ				冬コムギ			
	収量		収穫面積		収量		収穫面積	
	CRU TS 2.1	JRA-25	CRU TS 2.1	JRA-25	CRU TS 2.1	JRA-25	CRU TS 2.1	JRA-25
ハンガリー	0.55	0.52	0.62	0.30	0.72	0.71	0.32	0.34
ルーマニア	0.61	0.59	0.05	0.34	0.66	0.51	0.66	0.50

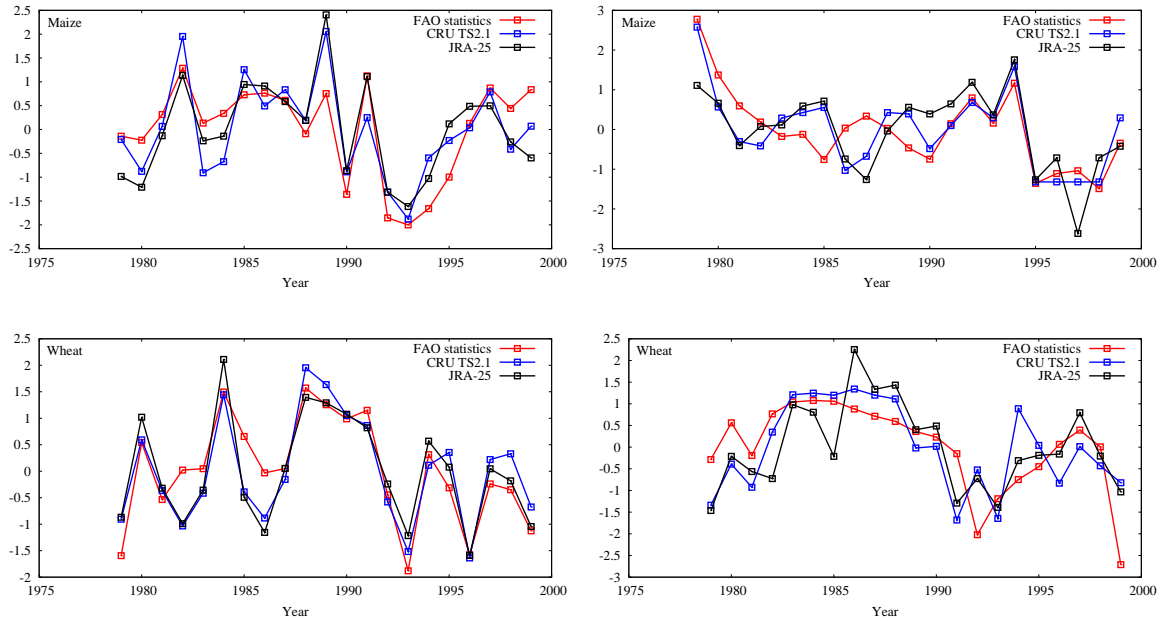


図 6.1 ハンガリーにおける標準化された収量と収穫面積（上段: トウモロコシ, 下段: 冬コムギ, 左列: 収量, 右列: 収穫面積）

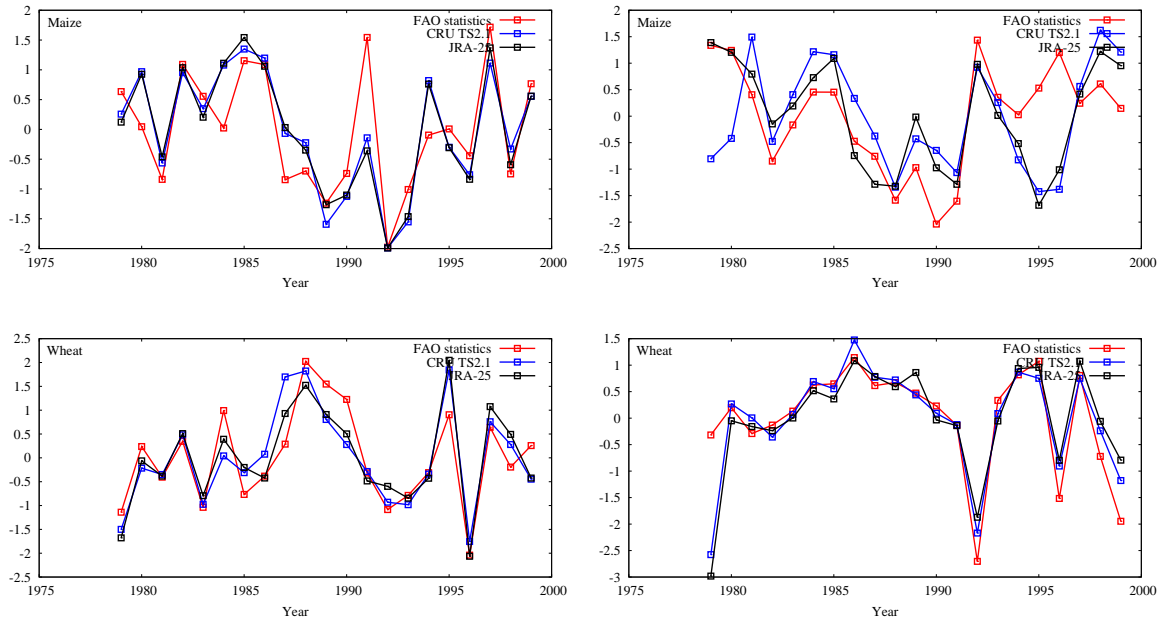


図 6.2 ルーマニアにおける標準化された収量と収穫面積（上段: トウモロコシ, 下段: 冬コムギ, 左列: 収量, 右列: 収穫面積）

6.3.2 入力データの空間解像度が収量結果に与える影響

図 6.3 にトウモロコシ，冬コムギのハンガリーおよびルーマニア域における 1979-1999 年の平均収量図を示す．図を見ると，0.5 度の水平解像度（MRI-GCM20-0.5）を使った再現結果と比較して，0.25 度の水平解像度（MRI-GCM20-0.25）を使った収量結果の方が，一つ一つのグリッドサイズが小さくなっているのに加え，収量 3,000kg/ha を超えるグリッドが明らかに増えている様子が見て取れる．0.5 度の水平解像度ではルーマニアおよびハンガリー国内の両作物において 3,000kg/ha 以上の平均収量を示すグリッドはそれぞれ 112 点，45 点（国内に有する総グリッド数）中いずれもゼロである．一方，0.25 度の水平解像度データセットを使った計算結果では，ハンガリーはトウモロコシで 32 点（177 点中），冬コムギで 26 点（177 点中）あり，ルーマニアではトウモロコシで 20 点（441 点中），冬コムギで 6 点（441 点中）平均収量が 3,000kg/ha を超えているグリッド点が存在していることがわかる．このことから，図 6.4 に示すとおり，両作物とも両国において収量が増加しており，一方で収穫面積が減少していることがわかる．この結果，0.25 度の高解像度を実施した計算では，1979-1999 年の平均において収量・収穫面積とも FAO の統計量に近くなっていることがわかる．表 6.6，表 6.7 に，1979-1999 年の MRI-GCM20-0.5，MRI-GCM20-0.25 を使って得られた平均収量および FAO 統計量との収量差率を示す．これを見ると，MRI-GCM20-0.25 データを使った高解像度計算では，MRI-GCM20-0.5 を使った結果と比較して，FAO との収量差率で見るとハンガリーのトウモロコシ-45% から-15% と 30% 改善していることがわかる．同様に収穫面積の差率は 91% から 32% へと大幅に減少しており，FAO の統計量に近くなっていることがわかる．この傾向はルーマニアでも同様である．一方，冬コムギではハンガリーで FAO 統計値との差率が収量で 9%，収穫面積で 35% 改善し，ルーマニアでは収量差率の絶対量で 11%（-22% から 11%），収穫面積で 23% の改善が見られ，計算結果の精度が向上していることがわかる．

以上の結果から，今回対象とした比較的狭い国土面積を持つルーマニアおよびハンガリーでは，粗い解像度の計算では，入力値のグリッド情報の補間処理によって平均化された結果，実質的に出力値となるグリッド収量も平均化されたこととなり，収穫面積においても現実を反映しづらくなる可能性がある．このことは，比較的小さい空間スケールを対象とした計算において，粗い解像度データを使用した際，気候・標高・土地利用に関する情報を陽に表現することが難しく，その結果，地点地点の情報が欠落してしまい，計算結果に必ずしも良い影響を与えない可能性があることが示唆される．加えて，入力データに高い解像度を有するデータを使えば，モデルのパラメータにおいてより経験的に優れた設定が可能になることや局所的な気候再現性が高まる結果，得られる計算結果が観測値や統計値と比較して精度が向上する可能性を持っていることが示される結果となった．このた

め、計算対象域のサイズや特徴、一方で計算資源を考慮した上で、最適な条件で収量の再現計算を実施していくことが望まれる。

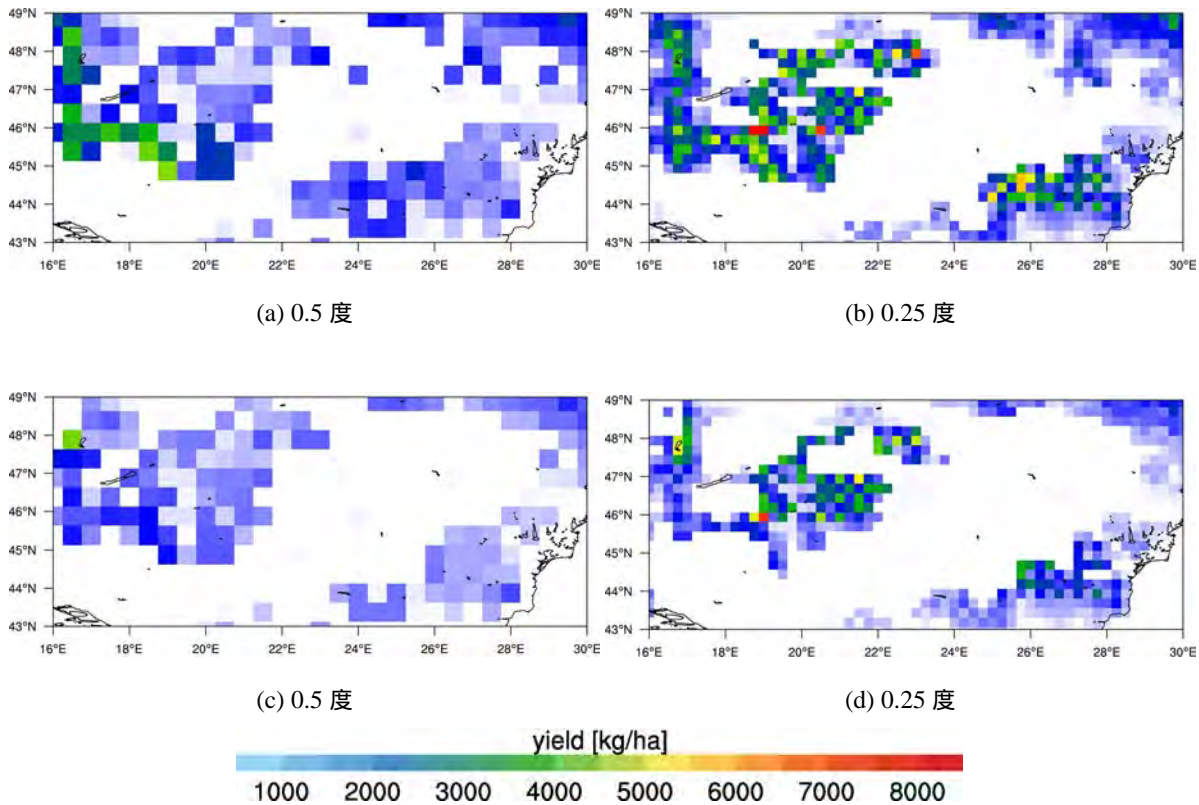


図 6.3 1979-1999 年における平均収量に見る解像度の違い (上段: トウモロコシ, 下段: 冬コムギ)

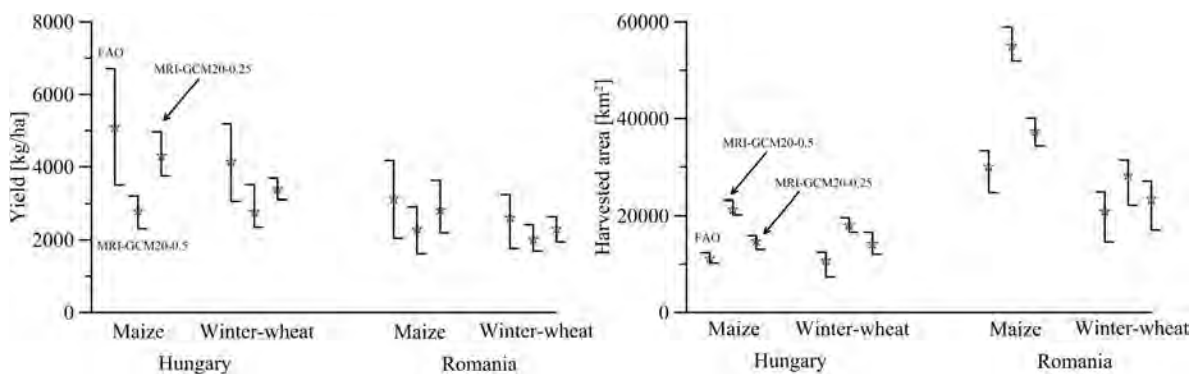


図 6.4 1979-1999 年における収量と収穫面積の計算値と統計値

表 6.6 MRI-GCM20-0.5 と MRI-GCM20-0.25 を使ったトウモロコシの国別収量 (1979-1999 年)

		Hungary		Romania	
		Yield (kg/ha)	Harvested Area (km ²)	Yield (kg/ha)	Harvested Area (km ²)
Average	MRI-GCM20-0.5	2794	21257	2294	55020
	MRI-GCM20-0.25	4302	14728	2818	37260
PVD ¹ (%)	MRI-GCM20-0.5	-45	91	-26	83
	MRI-GCM20-0.25	-15	32	-9	24

¹ PVD (the percentage of the relative variable differences) = [(simulated- observed) / observed] × 100%

表 6.7 MRI-GCM20-0.5 と MRI-GCM20-0.25 を使った冬コムギの国別収量 (1979-1999 年)

		Hungary		Romania	
		Yield (kg/ha)	Harvested Area (km ²)	Yield (kg/ha)	Harvested Area (km ²)
Average	MRI-GCM20-0.5	2992	17980	2016	28146
	MRI-GCM20-0.25	3378	14173	2301	23334
PVD ¹ (%)	MRI-GCM20-0.5	-27	67	-22	34
	MRI-GCM20-0.25	-18	32	11	11

¹ PVD (the percentage of the relative variable differences) = [(simulated- observed) / observed] × 100%

6.4 結語

本節では、iGAEZ モデルで利用される気候値の中で気温と降水量の不確実性の影響評価と、比較的小さな国土面積を持つハンガリーとルーマニアを対象として、空間解像度が計算結果に与える影響を評価した。結論は以下のとおりである。

- CRU TS 2.1 および MRI-GCM20-0.5 を入力データとして得られた水分制約条件下での収量差の標準偏差および RMSE は、冬コムギでは水分制約を受けない気温放射のみの制約条件下での値と比較して 1.5 倍であった。一方、トウモロコシでは約 3 倍になり、降水量の値の不確実性の影響は冬コムギと比較してトウモロコシで大きくなった。
- 上記の主な理由は、5 月から 8 月にかけて対象期間における降水量差の標準偏差は相対的に高く、この期間がトウモロコシの収穫期間に重なることから、トウモロコシの収量値の不確実性が冬コムギと比較して大きくなったためである。
- 収量推計を行うスケールは水平グリッド単位で行うよりも、各グリッドにおける収量値を空間平均して、国単位のスケールで評価した方が、収量値の RMSE および標準偏差が減少する。つまり、気温と降水量値の不確実性の影響を低減させる効果

がある。

- CRU TS 2.1 および JRA-25 を使った計算結果の統計値との決定係数は、収量については 0.5 以上と統計的に有意である値が得られたが、収穫面積に関する決定係数の平均は 0.39 と低く、一部のケースで統計的に有意でない結果となった。このことは 0.5 度の解像度では、国土面積が小さい国を対象とした計算では現実を精度よく再現することが難しい可能性があることを示唆するものである。
- 0.5 度と 0.25 度の解像度でそれぞれ行った収量計算の結果を比較すると、入力に使用する計算データおよび計算時における解像度を高めた場合、ハンガリーおよびルーマニア両国において、収量値および収穫面積の値は統計値と比較して再現性が高くなることがわかった。これは 0.5 度のデータを作成する際、グリッド内に存在するデータを平均化することにより、例えば降水量の値などが小さくなり平滑化されたことによって、気候値の再現精度が低下したものによると考えられる。また、同一データから得た 0.5 度と 0.25 度の計算結果には有意な線形関係は得られず、高解像度を実施する必要性を唱える研究結果 [126] とは異なる結論を得ることとなった。

第7章

結論

本論文では、気温・降水量・放射などの気候データと土壌環境、灌漑情報、地形、作物ごとの植え付け期、収穫期、機械化効率、作物ごとの特性を入力値とし、作物の生長・動向を理論的な推察と最新の経験的なパラメータによって評価した農業収量モデルの開発を行い、現在における全球スケールでの収量の再現、あるいは気候変動が農業生産に与える影響をより高い精度で算定する手法を提案した。

これにより世界の人口が70億人を超える昨今において、食料需要の増加に応じて、主として気候学的な見地から作物の増産が可能かどうか、今後の生活様式や土地利用を改善していく必要性を考えることができるような、食料収量算定モデルの試行と将来予測の枠組みの基礎を開発することを試みた。これに加えて様々な気候値グリッドデータセットに対して、その再現性評価を試みることによって、モデルの入力に使う気候値が持つ不確実性の詳細を明らかにし、グリッドデータセットが持つ固有の特徴を調べた。本研究のようにモデルに利用するデータセットの再現性・不確実性、開発されたモデルにより得られた出力値の統計量との比較による妥当性の検討、気候変動が農業生産に与える影響の定量的評価、モデル入力値の空間解像度が計算結果に与える影響などの一連の過程を一つ一つ丁寧に扱うことで、より信頼性の高い結果を得ることによって将来の農業生産を考えることができる。本論文で得た具体的な結論について、各章ごとに以下に記す。

第2章では農業収量算定モデルの開発に先立ち、CRU TS 2.1, JRA-25, ERA-40, CMAP, GPCP, CMIP3の各気候値グリッドデータを収集・整理し、統計的誤差解析手法によって再現性に関する評価を行い、各グリッドデータの時空間的な特徴を調べた。地上観測データとして採用したNNDCのデータと比較では、北アメリカ、ヨーロッパ、南アメリカ、オセアニア、アフリカ、中東、アジアでは、CRU TS 2.1の気温値が最も時系列で見た際のNNDCとの偏差量が小さく、また月々変動の振幅が小さくなり、再現性に優れているという結果を得た。一方、カリブでは全データセットにおいて気温は過小評価され、その中でもCRU TS 2.1は最も平均絶対誤差が大きくなった。また、季節ごとに見た際、再解

析値データである JRA-25, ERA-40 では北アメリカの夏期において他の季節より気温が過小評価される傾向が強く、南アメリカでは全月を通して過小評価傾向が顕著となった。また、アジアでは特に夏期において JRA, ERA の気温は過小評価される傾向が明らかとなった。これらの傾向は、例えば 2.3.2 小節で解析したような各地域におけるグリッド平均で見た場合、各データセット間にはほとんど差が得られないが、NNDC 観測点を使った点と点の比較をすることにより明瞭となった結果である。一方、降水量で見ると、北アメリカでは冬期を除いて GPCP の降水量値が最も再現性が高く、JRA-25 は夏期の降水量を最大で 30% 以上、過大に算定していることがわかった。また、空間分布に見る再現性では NNDC との絶対平均誤差は全データセットでアメリカ東部の平坦なエリアより標高が高く複雑地形を有する西部において降水量を過大評価する傾向があることがわかった。なお、山岳域の降水量の過小評価は、世界の全地域において同様の傾向を示した。ヨーロッパにおいて、夏期（6-8 月）では、CRU が最も NNDC との差率が小さく、それ以外の月では GPCP が最も再現性に優れる結果となった。カリブでは、再解析データの降水量値の再現性が悪く、CMAP と GPCP の月および年降水量値の再現性は比較的良好となった。アフリカでは CRU が NNDC との差率の標準偏差、差率の平均絶対誤差の両方の指標において優れたパフォーマンスを示した。アジアでは、夏期における JRA の降水量が過大となり、NNDC との降水量の差率の標準偏差、平均絶対誤差ともに CRU が全月において最も低い値を取った。南アメリカでは NNDC との降水量差は全期間を通して CRU が最も小さく、再現性に優れている。一方、ERA の NNDC との差率の平均絶対誤差は全月で 30% を超え、再現性が悪い。各地域における CMIP3 マルチ気候モデルの出力値を見ると、特に降水量においてモデルごとに大きなばらつきがある。しかし、それらをアンサンブル平均することで、降水量値やその季節的な変動は他のデータソースと同様の傾向を示し、複数モデルを利用したアンサンブル平均が有効であることが示された。

第 3 章では、CRU TS 2.1 の気候値と現状の植え付け期、収穫期、栽培期間、栽培作物種の空間データを使用し、なおかつ灌漑農業地域における作物の蒸発散に着目し、また、灌漑技術情報を加味した灌漑必要水量推計モデル、機械化効率に関する情報を農業収量算定モデルに組み込むことによって、理論的な推察をベースとした、より現実的な収量値を精度よく再現するためのモデルを開発した。今後は動的に栽培作物品種や栽培期間の自動最適化や土壌の浸食・劣化プロセス、経済的な支援策などを考慮した動的モデルの構築、植生モデルや窒素の循環などを考慮した統合的な農業収量算定モデルへの拡張を図っていききたい。

第 4 章では、第 3 章で開発された農業収量算定モデルを 1961-2000 年の期間に適用し、コムギ・コメ・トウモロコシ・ソルガム・ジャガイモ・サツマイモ・キャッサバ・ダイズの 8 種類の作物の収量の再現性を調べ、モデルの有用性を評価した。その結果、作物ごとの栽培空間分布は現実の栽培エリアを良好に再現できており、また年々の収量再現値は統

計値に比べて概ね 1:1 のラインに近づく対応をしていることがわかった。主要穀物に見る統計値と計算結果の相関係数では、コムギではヨーロッパで 0.53, 東アジアで 0.98, 南アジアで 0.93, 北アメリカで 0.81 と高く、またコメでは東南アジアで 0.97, 南アジアで 0.95, 東アジアで 0.94 となった。トウモロコシでは、北アメリカで 0.93, 東アジアで 0.90 となり世界の主たる生産域における収量再現値は統計値と有意な相関があることを確認することができた ($p < 0.01$)。一方、有意な相関が得られなかった地域や作物種も存在することから、今後は技術発展や土地利用の変化などの正確な情報をモデル内に組み込むことで年々変動を一層高い精度で再現できるモデルのさらなる改良が必要であることも明らかとなった。

第 5 章では、CMIP3 マルチ気候モデルの SRES A1B, A2, B1 シナリオにおける複数の出力値を用いて、近未来 (2040-2059 年)、未来 (2080-2099 年) の作物生産量・収量予測を行った。その結果、コムギでは現在の主要生産域である東アジアで生産量に大きな変化はないものの、南アジアやヨーロッパでは大幅に生産量が減少することが予測された。また、コメの生産量は世界で 1.8~3.2% 減少することが示される一方、A1B, A2 シナリオに比べ、環境を重視した循環型社会を目指す B1 シナリオでは、近未来・将来における生産量変化率の地域間の差を最も小さく抑えることができることがわかった。トウモロコシは、東アジアにおいて生産量が増加する予想が示され、温暖化による食料生産の観点における負の影響をあまり受けない作物種の一つであると考えられる。ジャガイモの生産量はロシアにおいて大幅に増加することが示されたが、モデル間のばらつきが大きく、不確実性が高い。また、キャッサバ・ダイズの生産量は将来において軒並み減少することが予想された。

環境を重視した B1 シナリオでは、現状と比較した際の近未来・将来の地域間の生産量変化率の偏差が最も小さくなり、特に先進国と発展途上国間の生産量格差の拡大を抑えることができるシナリオであることがわかった。また、気候学的に見た際、近未来および将来における作物の収量は低緯度地域では減少傾向となる一方、現在は比較的寒冷な土地であるカナダやロシアにおいては、作物の主要な生産エリアになりえる可能性が高いことが示された。

第 6 章では、農業収量算定モデルの入力データとして利用される気温と降水量が持つ不確実性が収量に与える影響の評価と、計算の空間解像度が結果に与える影響を、比較的小さな農地面積と国土面積を有するハンガリーとルーマニアを対象として計算を行った (1979-1999 年)。なお、対象作物は冬コムギとトウモロコシである。気象研究所が開発した全球気候モデルによる温暖化影響評価実験の現在気候出力値を 0.5 度と 0.25 度に補間して行った収量計算の結果を比較すると、高解像度計算ではハンガリーおよびルーマニア両国の両方の作物において収量および収穫面積の値は統計値と比較して、低解像度 (0.5 度) より優れた再現性を示した。このことから、より小さなスケールを対象とした収量の

算定には高解像度の計算が有効である可能性が示された。また、同一データから得られた異なる空間解像度の計算結果には有意な相関は得られず、高解像度データを使った高解像度の計算の必要性を確認することができた。

本研究では、現実の作物収量再現性の向上を目指し、そのモデルの構築については、計算資源やデータの時空間解像度の制約を考慮し、作物生長過程における現象の物理的な特性を損なわない程度に単純化している点が多い。したがって、ここで提示したモデルにはより詳細な作物の水・物質収集の過程や生長過程などの研究成果が必ずしも十分に反映されていない点もあると考えられる。本研究についてのご意見・批判を賜る機会が得られること、それによって将来における耕地拡大や食料増産の必要性に関する議論が深まることを望むとともに、本研究の成果が気候変動と農業生産に関わる実務者・研究者の方々の一助となり、世界の食料問題の解決に少しでも貢献できれば幸いである。

参考文献

- [1] High-Level Expert Forum: How to Feed the World in 2050 : www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum
- [2] Fischer, G., Velthuizen, H., Shah, M., Nachtergaele, F.: Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century. Methodology and Results. IIASA RR-02-02. International Institute for Applied Systems Analysis, LaxenburgLuxemburg, 2002.
- [3] Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M. and Parsons, D.B.: The changing character of precipitation, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), pp. 1205-1217, doi:10.1175/BAMS-84-9-1205, 2003.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007), Summary for policymakers, in Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon *et al.*, pp. 15-16, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- [5] Liebmann, B., Carolina, V. S., Carvalho, L. M. V., Barros, V. R., Baez, J., Bidegain, M., Camilloni, I. A., Hoerling, M. P. and Allured, D.: An observed trend in central South American precipitation, *Journal of Climate*, 17(22), pp. 4357-4367, doi:10.1175/3205.1, 2004.
- [6] Rusticucci, M. and Penalba, O.: Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over southern South America and their relationship with surface temperature, *Climate Research*, 16(1), pp. 1-15, doi:10.3354/cr016001, 2000.
- [7] van der Schrier, G., Briffa, K. R., Jones, P. D. and Osborn, T. J.: Summer moisture variability across Europe, *Journal of Climate*, 19(12), pp. 2818-2834, doi:10.1175/JCLI3734.1, 2006.
- [8] Qian, W., Hu, Q. Zhu, Y. and Lee, D.K.: Centennial-scale dry-wet variations in east Asia, *Climate Dynamics*, 21(1), pp. 77-89, doi:10.1007/s00382-003-0319-3, 2003.
- [9] Jones, D., Collins, D., Nicholls, N., Phan, J. and Della-Marta, P.: A new tool for tracking Australia's climate variability and change, *Bulletin of the Australian Meteorological and*

Oceanographic Society, 17, pp. 65-69, 2004.

- [10] Dai, A., Lamb, P. J., Trenberth, K. E., Hulme, M., Jones, P. D. and Xie, P.: The recent Sahel drought is real, *International Journal of Climatology*, 24(11), pp. 1323-1331, doi:10.1002/joc.1083, 2004.
- [11] Kostopoulou, E. and Jones, P. D.: Assessment of climate extremes in the Eastern Mediterranean, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 89(1-4), pp. 69-85, doi:10.1007/s00703-005-0122-2, 2005.
- [12] Fauchereau, N., Trzaska, S., Rouault, M. and Richard, Y.: Rainfall variability and changes in Southern Africa during the 20th century in the global warming context, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 29(2), pp. 139-154, doi:10.1023/A:1023630924100, 2003.
- [13] Manton, M. J., *et al.*: Trends in extreme daily rainfall and temperature in southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998, *International Journal of Climatology*, 21(3), pp. 269-284, doi:10.1002:joc.610, 2001.
- [14] Easterling, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Y., Karl, T. R., Kunkel, K. E. and Ambenje, P.: Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), pp. 417-425, doi:10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2, 2000.
- [15] Jauregui, E. and Romales, E.: Urban effects on convective precipitation in Mexico City, *Atmospheric Environment*, 30, pp. 3383-3389, doi:10.1016/1352-2310(96)00041-6, 1996.
- [16] Frei, C. and Schär, C.: Detection of probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region, *Journal of Climate*, 14(7), pp. 1568-1584, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1568:DPOTIR>2.0.CO;2, 2001.
- [17] Schmidli, J. and Frei, C.: Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century, *International Journal of Climatology*, 25(6), pp. 753-771, doi:10.1002/joc.1179, 2005.
- [18] Fujibe, F., Yamazaki, N. and Kobayashi, K.: Long-term changes of heavy precipitation and dry weather in Japan (1901-2004), *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84(6), pp. 1033-1046, doi:10.2151/jmsj.84.1033, 2006.
- [19] Zhang, X., Hogg, W. D. and Mekis, E.: Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation events over Canada, *Journal of Climate*, 14(9), pp. 1923-1936, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1923:SATCOH>2.0.CO;2, 2001.
- [20] Groisman, P. Y., Knight, R. W. and Karl, T. R.: Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: Trends in the 20th century, *Bul-*

- letin of the American Meteorological Society*, 82(2), pp. 219-246, doi:10.1175/1520-0477(2001)082<0219:HPAHSI>2.3.CO;2, 2001.
- [21] Zou, X., Zhai, P. and Zhang, Q.: Variations in droughts over China:1951-2003, *Geophysical Research Letters*, 32, L04707, doi:10.1029/2004GL021853, 2005.
- [22] Legates, D. R.: Global and terrestrial precipitation: A comparative assessment of existing climatologies, *International Journal of Climatology*, 15(3), pp. 237-258, doi:10.1002/joc.3370150302, 1995.
- [23] Betts, A. K.: Understanding hydrometeorology using global models, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(11), pp. 1673-1688, doi:10.1175/BAMS-85-11-1673, 2004.
- [24] Phillips, T. J., Potter, G. L., Williamson, D. L., Cederwall, R. T., Boyle, J. S., Fiorino, M., Hnilo, J. J., Olson, J. G., Xie, S. and Yio, J. J.: The CCM3-ARM Parameterization Testbed (CAPT): Evaluating Climate Models in a Weather Forecasting Framework, Available at <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/73412.pdf>
- [25] Simmons, A. J. and Gibson, J. K.: The ERA-40 project plan, ERA-40 Proj. Rep. 1, 63 pp., Eur. Cent. for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, U. K, 2000.
- [26] Kalnay, E., and Coauthors.: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), pp. 437-471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2, 1996.
- [27] Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J. J., Fiorino, M. and Potter, G. L.: NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(11), pp. 1631-1643, doi:10.1175/BAMS-83-11-1631(2002)083<1631:NAR>2.3.CO;2, 2002.
- [28] Roads, J.: The NCEP-NCAR, NCEP-DOE, and TRMM tropical atmosphere hydrologic cycles, *Journal of Hydrometeorology*, 4(5), pp. 826-840, doi:10.1175/1525-7541(2003)004<0826:TNNATT>2.0.CO;2, 2003.
- [29] Betts, A. K., Ball, J. H. and Viterbo, P.: Evaluation of the ERA-40 surface water budget and surface temperature for the Mackenzie River Basin, *J. Hydrometeorol.*, 4(6), pp. 1194-1211, doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1194:EOTESW>2.0.CO;2, 2003.
- [30] Källberg, P.: The precipitation in ERA-40, report, pp. 48-52, Available at <http://www.wcrp-climate.org/documents/gpcpworkshop2003.pdf>
- [31] Janowiak, J. E., Gruber, A., Kondragunta, C. R., Livezey, R. E. and Huffman, G. J.: A comparison of the NCEP-NCAR reanalysis precipitation and the GPCP rain gauge-satellite combined dataset with observational error considerations, *Journal of Climate*, 11(11), pp. 2960-2979, doi:10.1175/1520-0442(1998)011<2960:ACOTNN>2.0.CO;2,

1998.

- [32] Zolina, O., Kapala, A., Simmer, C. and Gulev, S.: Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: A comparative assessment, *Global and Planetary Change*, 44(1-4), pp. 129-161, doi:10.1016/j.gloplacha.2004.06.009, 2004.
- [33] Trenberth, K. E. and Guillemot, C. J.: Evaluation of the atmospheric moisture and hydrological cycle in the NCEP/NCAR reanalyses, *Climate Dynamics*, 14(3), pp. 213-231, doi:10.1007/s003820050219, 1998.
- [34] Xie, P., and Arkin, P. A.: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates and numerical model outputs, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(11), pp. 2539-2558, doi:10.1175/1520-0477(1997)078<2539:GPAYMA>2.0.CO;2, 1997.
- [35] Huffman, G. J. and Bolvin, D. T.: GPCP version 2 combined precipitation data set documentation, report, 37 pp., Lab. for Atmos. NASA Goddard Space Flight Cent, Greenbelt, Md.
- [36] Adler, R. F., *et al.*: The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present), *Journal of Hydrometeorology*, 4(6), pp. 1147-1167, doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2, 2003.
- [37] Huffman, G. J., Adler, R. F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B. and Schneider, U.: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(1), pp. 5-20, doi:10.1175/1520-0477(1997)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2, 1997.
- [38] Spencer, R. W.: Global oceanic precipitation from the MSU during 1979-91 and comparisons to other climatologies, *Journal of Climate*, 6(7), pp. 1301-1326, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1301:GOPFTM>2.0.CO;2, 1993.
- [39] Gruber, A. and Levizzani, V.: Assessment of global precipitation products, Rep. 128, 55 pp., World Climate Research Programme, Geneva, Switzerland, 2008.
- [40] Yin, X., Gruber, A. and Arkin, P.: Comparison of the GPCP and CMAP merged gauge-satellite monthly precipitation products for the period 1979-2001, *Journal of Hydrometeorology*, 5(6), pp. 1207-1222, doi:10.1175/JHM-392.1, 2004.
- [41] Juárez, R. I. N., Li, W., Fu, R., Fernandes, K. and Cardoso, A. d. O.: Comparison of precipitation datasets over the tropical South American and African continents, *Journal of Hydrometeorology*, 10, pp. 289-299, doi:10.1175/2008JHM1023.1, 2008.
- [42] Serreze, M. C. and Hurst, C. M.: Representation of mean Arctic precipitation from NCEP-NCAR and ERA reanalysis, *Journal of Climate*, 13(1), pp. 182-201, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<0182:ROMAPF>2.0.CO;2, 2000.

- [43] Troccoli, A. and Källberg, P.: Precipitation correction in the ERA-40 reanalysis, ERA-40 Proj. Rep. 13, 10 pp., Eur. Cent. for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, U. K.
- [44] Fernandes, K., Fu, R. and Betts, A. K.: How well does the ERA40 surface water budget compare to observations in the Amazon River basin?, *Journal of Geophysical Research*, 113, D11117, doi:10.1029/2007JD009220, 2008.
- [45] Crochet, P.: Comparison between ERA-40 derived precipitation and measured precipitation in Iceland, report, 62 pp., Verdurstofa Islands, Reykjavik.
- [46] 小出 寛: JRA-25 長期再解析正式版と JCDAS の提供開始について, <http://www.dpac.dpri.kyoto-u.ac.jp/mukou/meeting/Report/06/koide.pdf>
- [47] <http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/index.html>
- [48] Betts, A.K. and Beljaars, A.C.M.: ECMWF ISLSCP-II nearsurface dataset from ERA-40, ERA-40 Proj. Rep. 8, 33 pp., Eur. Cent. for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, U. K.
- [49] Tiedtke, M.: A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models, *Monthly Weather Review*, 117, pp. 1779-1800, 1989.
- [50] Tiedtke, M.: Representation of Clouds in Large-Scale Models, *Monthly Weather Review*, 121, pp. 3040-3061, 1993.
- [51] Martin, E.: Validation of alpine snow in ERA-40, *ERA-40 Proj. Rep.*, 14, 21 pp., Eur. Cent. for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, U.K., 2004.
- [52] ECMWF: <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY23r4/>
- [53] Mitchell T. D. and Jones. P. D.: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25, pp. 693-712, 2005.
- [54] Onogi, K., H. Koide, Sakamoto, M., Kobayashi, S., Tsutsui, J., Hatsushika, H. T. Matsumoto, H., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kato, K., Ose, T., Kadokura S. and Wada, K.: JRA-25; Japanese 25-year Reanalysis — progress and status —. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, pp. 3259-3268, 2005.
- [55] Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji N. and Taira R.: The JRA-25 Reanalysis, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85, pp. 369-432, 2007.
- [56] Legates D.R.: A Climatology of Global Precipitation. *Publications in Climatology (Thornthwaite Associates and University of Delaware)*, 40, 85 pp., 1987.
- [57] Reynolds, R.W.: A real-time global sea surface temperature analysis, *Journal of*

- Climate*, 1(1), pp. 75-87, doi:10.1175/1520-0442(1988)001<0075:ASTGSS>2.0.CO;2, 1988.
- [58] Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E.: The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: a new era in climate change research, *Bulletin American Meteorological Society*, 88, pp. 1383-1394, 2007.
- [59] Legates, D. R., and Willmott C. J.: Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation, *International Journal of Climatology*, 10(2), pp. 111-127, doi:10.1002/joc.3370100202, 1990.
- [60] 久保田拓志, 岩嶋樹也: 全球的降水量極値の長期変動に関する解析 - NCEP と ECMWF 再解析データの検討 -, 京都大学防災研究所年報, 第 47 号 B, pp. 365-377, 2004.
- [61] 小池 俊: 地球水循環インフォマティクスの確率, 科学研究費補助金データベース, <http://scfdb.tokyo.jst.go.jp/pdf/20031560/2005/200315602005pp.pdf>
- [62] 大野木 和敏: 気候のための長期再解析 JRA-25, <http://wwwsoc.nii.ac.jp/msj/kyoikuhukyu/resume/Onogi.pdf>
- [63] NNDC CLIMATE DATA ONLINE.: <http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo>
- [64] Willmott, C.J., and Matsuura, K.: Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance, *Climate Research*, 30(1), pp. 79-82, doi:10.3354/cr030079, 2005.
- [65] 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖: CMIP3 マルチ気候モデルにおける日本の気候の再現性比較, 京都大学防災研究所年報, 第 53 号 B, pp. 699-706, 2009.
- [66] FAO.: Report on the agro-ecological zones project. Vol. 1. Methodology and results in Africa. World Soil Resources Report, Rome 48, pp. 150-164, 1978.
- [67] Leemans, R. and Solomon, A. M.: Modeling the potential change in yield and distribution of the earth's crops under a warmed climate, *In Climate Research*, 3, pp. 79-96, 1993.
- [68] Williams, J.R.: The EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. United State Department of Agriculture, *Agricultural Research Service. Technological Bulletin*, No. 1768. Springfield, VA, USA, 1995.
- [69] Stehfest, E., Heistermann, M., Priess, J.A., Ojima, D.S. and Alcamo, J.: Simulation of global crop production with the ecosystem model DayCent, *Ecological Modelling*, 209, pp. 203-219, 2007.
- [70] Semenov, M.A. and Porter, J.R.: Climatic variability and the modelling of crop yields, *Agricultural and Forest Meteorology*, 73, pp. 265-283, 1995.
- [71] Liu, J., Williams, J.R., Zehnder, A.J.B. and Yang, H.: GEPIC-modelling wheat yield and

- crop water reproductivity with high resolution on a global scale, *Agricultural Systems*, 94, pp. 478-493, 2007.
- [72] Fischer, G., Velthuisen, H. and Nachtergaele, F.: Global Agro-Ecological Zones Assessment: Methodology and Results. Interim report. Luxemburg, Austria: International Institute for Systems Analysis (IIASA), and Rome: FAO, 2000.
- [73] Tatsumi, K., Yamashiki, Y., Rovert, V.S., Takara, K., Matsuoka, Y., Takahashi, K., Maruyama, K. and Kawahara, N.: Estimation of potential changes in cereals production under climate change scenarios, *Hydrological Processes*, 25, pp. 2715-2725, doi: 10.1002/hyp.8012, 2011.
- [74] FAO.: Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 56: 2-300, 1998.
- [75] Monteith, J.L.: Evaporation and Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press Cambridge, 19, pp. 205-234, 1965.
- [76] Thornthwaite, C.W.: An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review*, 37, pp. 55-94, 1948.
- [77] Sacks, W.J., Deryng, D., Foley J.A. and Ramankutty, N.: Crop planting dates: an analysis of global patterns, *Global Ecology and Biogeography*, 19, pp. 607-620, 2010.
- [78] Wit, C.T. de.: Photosynthesis of leaf canopies, *Agricultural Research Reports, Pudoc, Wageningen*. 663, pp. 57-88, 1965.
- [79] Döll, P. and Siebert, S.: A digital map of irrigated areas, *International Commission on Irrigation and Drainage*, 49(2): pp. 55-66, 2000.
- [80] Döll, P., Siebert, S.: Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resources Research*, 38(4): 8.1-8-10. DOI: 10.1029/2000WR900130, 2002.
- [81] Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J.M., Frenken, K. and Feick, S.: Development and validation of the global map of irrigation areas, *Hydrological and Earth System Sciences*, 9, pp. 535-547, 2005.
- [82] Doorenbos, J. and Pruitt, W.O.: Crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper No.24, (rev.) FAO, Rome, Italy, 144p, 1977.
- [83] The World Bank. World Development Indicators, <http://www.worldbank.org>
- [84] FAO.: The Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties, Version 3.5, United Nations Food and Agriculture Organization, CD-ROM, 1995.
- [85] Reynolds, C.A., Jakson, T.J. and Rawls, W.J.: Estimating soil water holding capacities by linking food and agriculture organization soil map of the world with global soil profile databases and continuous pedo-transfer Functions. *Water Resources Research*, 36, pp. 3653-3662, 2000.

- [86] Vorosmarty, C.J., Berrien, M., Grace, A.L. and Gildea, M.P.: Continental scale models of water balance and fluvial transport: An Application to South America, *Global Biogeochemical Cycles*, 3(3), pp. 241-265, 1998.
- [87] Portman, F.T., Siebert, S. and Döll, P.: MIRCA2000-Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling, *Global Biogeochemical cycles*, 24: GB1011. DOI: 10.1029/2008GB003435, 2010.
- [88] USGS.: GTOPO30. United States Geological Survey, Available at <http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html>.
- [89] Krcho, J.: Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory, *Acta Geographica Universitatis Cmenianae Geographica Physica*, 1, pp. 7-233, 1973.
- [90] Krcho, J.: Georelief as a subsystem of landscape and the influence of morphometric parameters of georelief on spatial differentiation of landscapeecological processes, *Ecology /CSFR/* 10, pp. 115-157, 1991.
- [91] FAO.: FAOSTATS. Food and agriculture organization, Rome. Available at <http://faostat.fao.org>, 2005.
- [92] Leff, B., Ramankutty, N. and Foley, J.A.: Geographic distribution of major crops across the world, *Global Biogeochemical cycles*, 18:GB1009, doi:10.1029/2003GB002108, 2004.
- [93] 国際協力銀行：パキスタンの発展に向けて,
http://www.jica.go.jp/publication/archives/jbic/pdf/pakistan_j.pdf
- [94] United States Department of Agriculture/Joint Agricultural Weather Facility.: Major world crop area and climatic profiles, Vol. 664, U.S. Department of Commerce, Springfield, VA, 1994.
- [95] 農林中金総合研究所: 変貌するアフリカ・中東の食料需給,
<http://www.nochuri.co.jp/report/pdf/n1107re1.pdf>
- [96] 内閣府 経済社会総合研究所：東アジアの食糧・農業問題,
<http://www.esri.go.jp/jp/tie/ea/ea2.pdf>
- [97] 中北英一他: 流域圏を総合した災害環境変動評価研究, 21 世紀気候変動予測革新プログラム 平成 19 年度研究成果報告書, pp. 135-136, 2008.
- [98] Takahashi, K, Harasawa, H, Matsuoka, Y.: Climate change impact on global crop production, *Journal of Global Environmental Engineering*, 3, pp. 145-161 1997.
- [99] Matthews, R.B., Kropff, M.J., Horie, T. and Bachelet, D.: Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation, *Agriculture*

- tural Systems*, 54(3), pp. 399-425, 1997.
- [100] Masutomi, Y., Takahashi, K., Harasawa, H. and Matsuoka, Y.: Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131, pp. 281-291, 2009.
- [101] Tan, G. and Shibasaki R.: Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration, *Ecological Modelling*, 168, pp. 357-370, 2003.
- [102] Hitz, S. and Smith, J.: Estimating global impacts from climate change, *Global Environmental Change*, 14, pp. 201-218, 2004.
- [103] Boudeau, A., Smith, P.C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W. and Gerten, D.: Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance, *Global Change Biology*, 13, pp. 679-706, 2007.
- [104] Lobell, D.B.: Changes in diurnal temperature range and national cereal yields, *Agricultural and Forest Meteorology*, 145 (3-4), pp. 229-238, 2007.
- [105] Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. and Fischer, G.: Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios, *Global Environmental Change*, 14, pp. 53-67, 2004.
- [106] 辰己賢一, 山敷庸亮, 寶 馨: 米のグローバルな収量算定モデルの再現性評価と気候変動影響予測, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 67, No. 5, pp. 81-90, 2011.
- [107] 森田恒幸: IPCC 排出シナリオ (SRES) に関するサーベイ,
<http://www.env.go.jp/earth/report/h13-01/h13-01-5.pdf>
- [108] 村井啓朗, 高橋潔, 増井利彦, 原沢英夫, 松岡譲: 適応策を考慮した上での温暖化が農作物潜在生産性に及ぼす影響の評価, 環境システム研究論文集, Vol. 33, pp. 97-104, 2005.
- [109] Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P., Naylor, R.L.: Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030, *Science*, 319, 607(2008), doi: 10.1126/science.1152339.
- [110] Boumann, B.A.M.: A framework to deal with uncertainty in soil and management parameters in crop yields simulation: a case study for rice. *Agricultural Systems*, 48(3), pp. 361-384, 1994.
- [111] Nonhebel, S.: The effects of use of average instead of daily weather data in crop growth simulation models, *Agricultural Systems*, 44(4), pp. 377-396, 1994.
- [112] Pachepsky, Y. and Acock, B.: Stochastic imaging of soil parameters to assess variability and uncertainty of crop yield estimates, *Geoderma*, 85(2-3), pp. 213-229, 1998.

- [113] Soltani, A., Meinke, H. and de Voli, P.: Assessing linear interpolation to generate daily radiation and temperature data for use in crop simulations, *European Journal of Agronomy*, 21(2), pp. 133-148, 2004.
- [114] Fodor, N. and Kovacs, G.J.: Sensitivity of crop models to the inaccuracy of meteorological observations, *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(1-3), pp. 53-57, 2005.
- [115] Mearns, L.O., Rosenzweig, C. and Goldberg, R.: Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty, *Climate Change*, 35(4), pp. 367-396, 1997.
- [116] Semenov, M.A. and Porter, J.R.: Non-linearity in climate change impact assessments, *Journal of Biogeography*, 22(4-5), pp. 597-600, 1995.
- [117] Hansen, J.W., Potgieter, A. and Tippet, M.K.: Using a general circulation model to forecast regional wheat yields in northeast Australia, *Agricultural and Forest Meteorology*, 127 (1-2), pp. 77-92, 2004.
- [118] Kitoh, A., Ose, T., Kurihara, K., Kusunoki, S., Sugi, M. and KAKUSHIN Team-3 Modeling Group.: Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments, *Hydrological Research Letters*, 3, pp. 49-53. DOI: 10.3178/HRL.3.49, 2009.
- [119] Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J.M., Frenken, K. and Feick, S.: Development and validation of the global map of irrigation areas, *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, pp. 535-547, 2005.
- [120] Challinor, A.J., Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Slingo, J.M. and Grimes, D.I.F.: Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops, *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1-2), pp. 99-120, 2004.
- [121] Nemecek, T., Derron, J.O., Roth, O. and Fischlin, A.: Adaptation of a crop-growth model and its extension by a tuber size function for use in a seed potato forecasting system, *Agricultural Systems*, 52 (4), pp. 419-437, 1996.
- [122] Thornton, P.K., Bowen, W.T., Ravelo, A.C., Wilkens, P.W., Farmer, G., Brock, J. and Brink, J.E.: Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modelling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology*. 83(1-2), pp. 95-112, 1997.
- [123] Vossen, P. and Rijks, D.: Early Crop Yield Assessment of the E.U. Countries: the System Implemented by the Joint Research Centre, EUR 16318. Publication of the Office for Official Publications of the E.C., Luxembourg, 1995.
- [124] Yun, J.I.: Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and

crop-growth modeling, *Agricultural Systems*, 77 (1), pp. 23-38, 2003.

- [125] Hansen, J.W. and Jones, J.W.: Scaling-up crop models for climate variability applications, *Agricultural Systems*, 65 (1), pp. 43-72, 2000.
- [126] Wit, A.J.W., Boogaard, H.L. and Diepen van CA.: Spatial resolution of precipitation and radiation: The effect on regional crop yield forecasts, *Agricultural and Forest Meteorology*, 135, pp. 156-168, 2005.

謝辞

本論文は、京都大学大学院環境工学専攻の修士課程時において実施してきた研究成果をさらに発展させ、その一部をまとめたものです。私がこのような形で博士論文をまとめることができるとは夢にも思っておりませんでした。このような機会を与えてくださった京都大学防災研究所の寶 馨教授には心より感謝いたします。

本研究の端緒を開き、私が学生をしている時から、親切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜り、私を導いてくださった京都大学防災研究所の山敷庸亮准教授には最大限の感謝をいたします。先生と議論をすることによって、私の中には常に新たなやる気が芽生え、貴重な経験を得ることができました。これらの経験は私の人生において決して忘れることのないものです。

京都大学工学研究科の松岡 讓教授は、私が修士の学生をしている時の指導教官で、本論文の基礎となる数多くの知識やツール、多大なご助言を頂きました。当時は振り返り、反省することばかりの今日ですが、先生の下で研究活動に携わることができたことは私の人生においてかけがえのない財産となっております。今の私があるのは先生のおかげといっても過言ではありません。ここに感謝の意を表します。

防災研究所の石川裕彦教授、竹見哲也准教授、堀口光章助教には、気候に関する数多くの議論をさせて頂き、本論文を仕上げるにあたり多大なご助言・支援を頂きました。他にも色々ご教授頂いた先生方は数多くありますが、特に京都大学防災研究所の多くの先生方に感謝いたします。また、ともに学んで励ましあい、啓発されることの多かった大泉 伝さんに感謝いたします。有益な示唆と情報、活力を与えてくれた寶研究室の各位、防災研究所技術室に御礼申し上げます。

両親や親せきには学位論文を仕上げるにあたり、常に応援・励ましをして頂き、助けてもらいました。最後になりますが、あらゆる面において著者を支えてくれた妻 裕子に一言感謝を述べてしめくりとしたいと思います。ありがとうございました。