

SOMマップの組み合わせによる梅雨期集中豪雨をもたらす 大気場の発生頻度の将来変化解析

Analyses on the Future Change of the Occurrence Frequency of Atmosphere Causing Heavy Rainfall in Baiu Season by Combining SOM Maps

中北英一・小坂田ゆかり⁽¹⁾

Eiichi NAKAKITA and Yukari OSAKADA⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Recently a lot of attentions are paid to climate change and many studies on it have been reported. From the aspect of disaster prevention, the relationship between climate change and heavy rainfall has become increasingly important so we analyzed the future change of the occurrence frequency of atmosphere causing heavy rainfall in Baiu season using SOM (Self-Organizing Map). We first analyzed the future change of the frequency of heavy rainfall events during Baiu season using NHRCM05, and then the frequency of atmospheric patterns causing the heavy rainfall events using the huge ensemble data; d4PDF20. We found that specific atmospheric patterns that cause heavy rainfall events and they have the characteristics of strong water vapor flux along the periphery of the protruding subtropical anticyclone in common. In addition, the occurrence frequency of a specific atmospheric pattern that especially causes much heavy rainfall events increases in future climate.

キーワード: 気候変動, 梅雨豪雨, 大気場, SOM

Keywords: climate change, Baiu-heavy rainfall, atmospheric pattern, SOM

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年, 梅雨期の集中豪雨による河川氾濫や土砂災害による災害が頻発しており, 2014 年 8 月の福知山豪雨や広島豪雨, 2016 年 6 月の熊本豪雨などはまだ記憶に新しい. このような梅雨豪雨は, 100km 程度の長さで 10~20km の幅を持つメソ β スケールの現象であり, 6 時間~半日程度継続するという特徴を持つ. そして, 土砂災害や流域面積が 100km² オーダーまでの流域面積を持つ中小河川に外水及び内水氾濫といった影響を及ぼす危険性がある. 一方で, 世界各国の経済成長に伴う CO₂ などの温室効果ガス排出

量の増加により地球温暖化が進行していると指摘されている. 2013 年の IPCC 第 5 次評価報告書 (IPCC, 2013)によると, 人間活動に伴う温室効果ガス排出量増加による地球温暖化は疑う余地がないと言われており, その影響は単なる気温上昇のみならず大気循環場や降水特性にも変化を及ぼす. 社会一般が近年あまり経験してこなかった規模や形態の豪雨災害が発生するたびに, 豪雨災害への地球温暖化の影響にますます注意が払われるようになり, 地球温暖化による梅雨前線やそれに付随する極端降水に関する研究が精力的に進められるようになった.

これまで, 地球温暖化の梅雨への影響評価研究はマクロやメソ α など大規模なスケールからの検討が

多く、小さなメソ β スケールからの分析は少ない。梅雨前線はアジアモンスーンなど大規模な現象と密接に関わり形成されるが、集中豪雨自体はメソ β スケールで生じている現象である。そのため、梅雨期集中豪雨の将来変化予測を行う場合もメソ β を含むマルチスケールから評価を行うことが重要である。

そこで本研究では、次章から詳細に述べる既往研究の問題点を整理すると共に、まず、高解像度領域気候モデル NHRCM05 を用いてメソ β スケールから梅雨豪雨の将来変化解析を行う。そして、大量のアンサンブル情報である d4PDF20 を用いて、マクロスケールから、抽出した梅雨豪雨をもたらす大気場の発生頻度の将来変化を統計的に解析することを目的とする。大気場の分析手法としては SOM というクラスター分類法を用い、集中豪雨をもたらす大気場パターンの抽出・分類を行う。そして、現在気候及び将来気候における大気場特性の違いと、集中豪雨をもたらす大気場パターンの発生頻度の将来変化予測を行うことを目的とする。

2. 気候モデルの概要と既往研究

2.1 気候モデルについて

現在、気候変動の研究には全球気候モデル(GCM)が広く用いられている。我が国では、2007 年度から開始された「気候変動予測革新プログラム」(以下、革新)および 2012 年度から開始された「気候変動リスク情報創生プログラム」(以下、創生)において、様々なモデルが開発されている(文部科学省, 2015)。

全球気候モデルは、気象庁・気象研究所で大気大循環モデル MRI 系が開発されており、水平解像度が約 20km である AGCM20 と約 60km の AGCM60 の 2 種類がある(Mizuta et al. 2012, など)。実験は現在気候 25 年(1979-2003)と将来気候 25 年(2075-2099)の 2 つについて、それぞれの条件で海面水温・海氷密接度・海氷厚・温室効果気体・オゾン・エアロゾル等の境界条件を与えて行われた。現在気候実験では、海面水温(以下、SST)・海氷密接度・海氷厚については観測の値を用いて現実に近い条件で実験を行うことにより、現在の気候を再現しており、SST については年々変動を含んだ観測値の月平均値を使用している。将来気候実験では、現在気候実験で用いた値と、IPCC の報告書のために提出された各機関の大気海洋結合モデル(AOGCM)実験結果のモデル平均値を用いて、将来の温暖化シナリオに基づいて実験し、推定値を作成している。そして全球気候モデルにおいては、温暖化予測の信頼性・不確実性を定量化し、より統計的評価の高い予測情報を得るために、気候モデルの設定を変えた複数の実験が行われてい

る(アンサンブル実験)。また、革新と創生では、使用された IPCC のモデルが異なり、それぞれ第 3 次結合モデル相互比較プロジェクト(以下、CMIP3)と第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト(以下、CMIP5)に参加した AOGCM を用いている。また、将来の温暖化シナリオも革新と創生で異なる。革新では温室効果ガス排出シナリオ(SRES シナリオ)のうち、すべてのエネルギー源のバランスを重視しながら高い経済成長を実現し、大気中の温室効果ガス濃度が将来気候において現在気候の約 2 倍まで増加すると仮定した A1B シナリオを採用している。一方創生では、将来温室効果ガスをどのような濃度に安定化させるかという考え方に基づく RCP シナリオを用いている。RCP シナリオでは、将来予測される多様な放射強制力の経路の中から、RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 の 4 シナリオが選択されている。それぞれ RCP の後につく数値は放射強制力の目安であり、この数値が大きいほど将来気候における放射強制力が大きく、気温上昇が大きいシナリオであることを意味する。創生では RCP8.5 シナリオが採用されており、これは将来気候において気温が約 4℃ 上昇する将来シナリオである。

これらの全球気候モデルは台風など大きなスケールの現象はよく表現できるが、梅雨豪雨のようなメソ β スケールの現象の再現は困難である。そこで、AGCM20 のネスティングにより水平解像度 5km の高解像度領域気候モデル NHRCM05 (以下、RCM05)が開発された。革新では、A1B シナリオによる SST で 1 時系列のみ計算されているのに対し、創生では CMIP5 の結果を用いて SST の将来変化パターンを 3 種類にクラスター分類し、それぞれを平均したもの(cluster1,2,3)と全てを平均したものの 4 種類の SST を用い、RCP8.5 に基づきアンサンブル計算が行われている。計算期間は革新では現在気候(1979-2003)と将来気候(2075-2099)の各 25 年について、創生では現在(1980-2000)と将来(2076-2096)の各 20 年について、1 年毎のタイムスライスで行っている。この RCM05 の開発により、梅雨豪雨のようなメソ β スケールの現象まで表現できるようになり、影響評価が可能となった。

このように、高解像度領域気候モデルが開発され、集中豪雨のような小さなメソ β スケールの現象が表現可能になった。一方で、これまで行われてきた CMIP の実験や、環境省が 2014 年に作成した「全球気候変動予測データ」や「地域気候変動予測データ」(環境省, 2014)では、予測計算のアンサンブル数が 10 程度(革新 RCM05 では 1 時系列のみ)と少ないため、台風や集中豪雨などの発生頻度の低い極端現象の不確実性を十分に評価できない。そこで創生

において、確率密度分布の裾野に当たる極端現象の再現と将来変化について、確率的に、かつ高精度に評価することを目的として、これまでにない大量(最大 100 アンサンブル)のアンサンブルデータである、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」(d4PDF: database for Policy Decision making for Future climate change)が作成された(Mizuta et al., 2016). これにより、気候変動に伴う自然現象の将来変化とその不確実性、および将来想定される最悪シナリオに基づく気象災害規模を評価し、社会基盤や経済活動へ与える影響評価のための情報を創出することが可能となった. d4PDF は RCP8.5 の将来シナリオに基づき計算され、水平解像度が 60km と 20km のものがある(以下、それぞれ d4PDF60 と d4PDF20). d4PDF60 では、過去実験(1951-2011)に関して 100 メンバー、RCP8.5 の 4 度上昇将来実験(2051-2111)に関して 90 メンバーの計算が行われている. そして、d4PDF20 では過去実験で 50 メンバー、4 度上昇将来実験で 60 メンバーの計算が行われている.

2.2 既往研究について

これまで上記の気候モデルを用いた気候変動の梅雨豪雨に対する影響に関しては、日本で様々な研究が進められてきたが、その中の多くは AGCM60 や AGCM20 を用いた大規模スケールからの分析である. 例えば岡田ら(2015)では、創生 AGCM60 および AGCM20 の降水量や水蒸気フラックスを用いて梅雨期の極端現象と大気場の関係を解析し、将来気候の 7 月において西太平洋高気圧の強化が著しく、これにより日本海側の水蒸気フラックスの流入が増加することを示した. そして、将来気候では梅雨明けを迎えた 8 月でも北日本域において梅雨前線の停滞が持続していることが示されている.

一方で、高解像度の RCM05 を用いて小さなスケールから梅雨豪雨を評価した例もいくつか存在する. Kanada et al. (2012)では、革新 RCM05 を用いて梅雨前線および降水の詳細な将来変化を推定しており、将来気候において、7 月上旬と 8 月上旬において日雨量の増加だけでなく、日雨量 100mm 以上の大雨がもたらす降水の総雨量に対する割合も増加することが示されている. 中でも、特に西日本において 7 月上旬に降水量が有意に増加することが示されている. さらに、革新 AGCM60 のアンサンブル情報を用いて 6~7 月平均降水量の将来変化の不確実性を調べ、Fig.1 に示すように、7 月上旬に日雨量の有意な増加傾向が見られることを示した. 革新で出力された AGCM と RCM 両方において、将来気候では梅雨前線の北上の遅延と 7 月上旬における日雨量の増加傾

向が示されており、非常に優位性が高い変化であると言える.

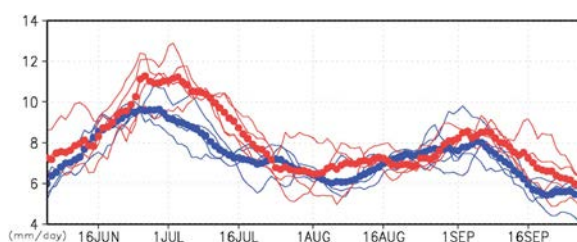


Fig.1 The blue (red) lines show the daily precipitation in present (future) climate calculated by KAKUSHIN AGCM60 ensembles and the dot lines show average of ensembles (Kanada et al., 2012).

また、中北・宮宅ら(2012)では、上記の Kanada et al. (2012)で示された、革新の気候モデルを用いた定量的な解析結果である夏期降水量の増加が、梅雨前線に伴う集中豪雨による変化であるかどうかを検証するため、革新 RCM05 の降雨出力から直接、目視により梅雨豪雨事例のみを抽出した. 梅雨豪雨の判定基準は、日降水量等の簡易的な指標ではなく、詳細な基準を設定している. その豪雨判定基準に基づき梅雨豪雨を抽出した結果、将来気候では現在気候と比較して梅雨前線に伴う集中豪雨について 5%有意な増加が見られた. 旬別の発生頻度は、7 月上旬と 8 月上旬において有意に増加していた. また地域別では、近畿・東海・関東甲信・東北の 4 地域において集中豪雨が 5%有意に増加していた. このことは、これまであまり集中豪雨の発生頻度が高くなかった中日本や東日本の太平洋側で集中豪雨の発生頻度が増加する可能性が高いことを示している. また、日本海側では現在ほとんど梅雨豪雨が発生していないが、8 月上旬で頻度が増加しており、上記の全国的な 8 月上旬での発生頻度の増加は日本海側での集中豪雨発生頻度の増加によるものと考えられる. このように中北・宮宅ら(2012)では梅雨豪雨を降雨出力から直接捉えて将来変化予測を行ったが、他に降雨出力から直接梅雨豪雨を評価した研究はない. また、革新 RCM05 では現在と将来共に 1 アンサンブルのみの出力であるため、統計的優位性という意味では充分ではないという問題がある.

そこで中北・草野ら(2016)では、中北・宮宅ら(2012)で行われた、集中豪雨の生起頻度の変化から将来変化を評価するという観点を活かし、かつ統計的評価が行える大量アンサンブルデータである d4PDF60 を用いて、大規模スケールである大気場から集中豪雨を捉える試みを行っている. SOM というクラスター分類法を用い、中北・宮宅ら(2012)で抽出された集中

豪雨が日本海側で多く発生している際に特徴的な大気場パターンを抽出している。その大気場パターンは、1)西に張り出した太平洋高気圧と、2)その西縁に沿って日本海側に吹き込む水蒸気フラックス、という特徴を持つ。そして、d4PDF60の6,7,8月各月平均値を用いて、その大気場パターンの発生頻度が将来気候において有意に増加することを示している。これは、将来日本海側で集中豪雨が増加するという結果と整合的であり、梅雨豪雨を大気場という観点から捉えて、その発生頻度に関して統計的に評価することに成功したと言える。しかし、革新RCM05とd4PDFは採用している将来シナリオがそれぞれA1BとRCP8.5で異なる。RCM05とd4PDFを用いて梅雨豪雨を大気場観点から捉えて統計評価を行うためには、同じ将来シナリオに基づいていることがより望ましい。

2.3 本研究の流れ

これらの既往研究を踏まえ、本研究の目的と流れを整理する。本研究では、革新RCM05とd4PDF60という異なる将来シナリオに基づく気候モデルを用いて解析を行っていた中北・草野ら(2016)の研究を進展させ、同じ将来シナリオに基づき、メソβとマクロのマルチスケールから、梅雨豪雨に関してより詳細な将来変化解析を行うことを目的とする。研究の流れとしては、まず中北・宮宅ら(2012)と同様の手法で、RCP8.5シナリオに基づく創生RCM05の降雨出力から梅雨豪雨事例を抽出する。そして、その抽出した梅雨豪雨を大気場の観点から統計的に評価するため、中北・草野ら(2016)で採用されたSOMを用いて、抽出した梅雨豪雨と大気場を対応させ、豪雨をもたらす大気場の発生頻度の解析を行う。ここでは、より時間空間解像度の高いd4PDF20の旬平均値データを用いて、より詳細な将来解析を行うことを試みる。

すなわち、本研究では、RCP8.5シナリオに基づき、創生RCM05の降雨出力から梅雨豪雨事例を抽出して将来変化予測(メソβスケール)を行い、d4PDF20の旬平均値を用いて、集中豪雨をもたらす大気場の発生頻度の将来変化予測(マクロスケール)を行うことを目的とする。

3. 創生RCM05を用いた集中豪雨の将来変化解析

3.1 集中豪雨の定義

まず、創生RCM05の降雨出力画像から直接、梅雨前線に伴う集中豪雨のみを目視により抽出する。抽出の判定基準としては、中北・宮宅ら(2012)で示された30分降水量および3時間降水量に基づく詳細な基

準を参考にした。その基準を以下に示す。

1) 30分降水量

- ◆ 50mm/hr以上の雨域が同じ地域に2時間以上停滞する場合。
- ◆ 50mm/hr以上の雨域が同じ地域に2時間以内に2個以上出現する場合。

2) 3時間降水量

- ◆ 150mm以上の雨域が出現した場合。
- ◆ 100mm~150mmの雨域が出現し、その雨域が同じ地域に3時間以上停滞する場合。

3) 梅雨前線の確認

- ◆ 地表面における相当温位の水平勾配が大きいこと。

上記の1)~3)の全てを満たすものを梅雨前線に伴う集中豪雨と定義した。ただし、相当温位を用いた梅雨前線の確認は、30分降水量と3時間降水量で梅雨前線と確認できなかった場合についてのみ行うものとする。

3.2 解析の流れ

解析期間は、創生RCM05で出力されている現在気候(1981-2000)と将来気候(2077-2096)の各20年における梅雨期とする。梅雨期は通常、6月~7月である。しかし、8月上旬に梅雨の戻りや、梅雨明けがなく8月まで梅雨前線により雨が降り続く可能性があるため、解析期間は各20年における6~8月とする。

抽出の流れとしては、まず30分降水量画像を用いて梅雨前線に伴う集中豪雨の候補を抽出する。次に、30分降水量で候補に挙げた事例が3時間降水量の基準を満たしているか確認する。最後に相当温位分布を用いて、梅雨前線に伴うものであるかどうかの確認を行う。

3.3 集中豪雨の抽出結果と頻度解析

現在気候と比較して、将来気候の集中豪雨発生頻度が増加しているのか、有意性の検定を行った。なお、ここでは、個別に災害をもたらすという観点から見た集中豪雨の頻度分析を行う。すなわち、同一の気象原因によってもたらされた集中豪雨であっても、それが複数の地域に集中豪雨災害をもたらすならば別々の集中豪雨災害として捉えられるため、別々の集中豪雨として数える。

Fig.2はひと月を10日ごとに区切った旬別の集中豪雨の発生頻度分布である。図中で赤色を付けた範囲では、現在気候と比較して将来気候において5%有意で集中豪雨の発生頻度が増加傾向にあることを意味しており、将来気候の7月上旬と8月上旬で集中豪雨の頻度が有意に増加することが示されている。この結果は、中北・宮宅ら(2012)において革新RCM05か

ら抽出された集中豪雨発生頻度の将来変化と同様の傾向を示しており、有意性の高い結果であると言える。

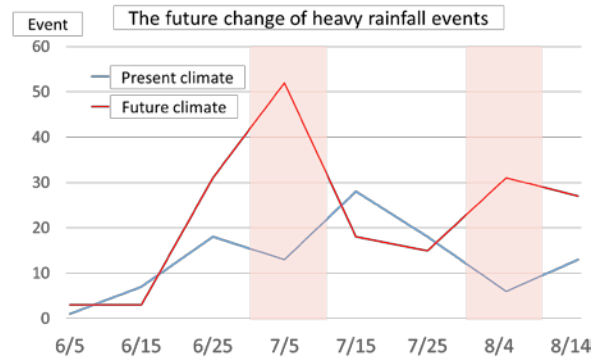


Fig.2 The future change of the frequency of heavy rainfall events in Baiu season from SOUSEI RCM05 data. The red zone means 5% significant increasing.

次に、ここで創生RCM05から抽出した豪雨事例の結果を用いて、これらの豪雨が発生している際の特徴的な大気場を抽出し、その大気場パターンの発生頻度に関して将来変化解析を行う。しかし、RCM05の降雨出力からの集中豪雨の抽出は目視による抽出であるため主観性が残る。さらにd4PDF20のような大量のアンサンブルデータを評価するには時間がかかるという問題がある。そこで、中北・草野ら(2016)で取り入れられたSOM手法を用いる。SOMについては次章で述べる。

4. SOMを用いた大気場の分類

4.1 SOMとは

SOM (Self-Organizing Map; 自己組織化マップ)とはT. Kohonen(1998)によって提唱されたニューラルネットワークであり、複雑な多次元データを特徴毎に集めて低次元（通常は二次元平面）のマップ上に視覚的に分類することができるクラスター分類法の1つである。SOMは、Fig.3に示すように、入力データから成る入力層と出力データを算出する競合層から成り立つ。

入力層は n 個の入力ベクトルによって構成され、競合層は入力ベクトルと同じ次元を持つ参照ベクトルが割り当てられたノードで構成される。ノードの数はマップの大きさによって決定し、例えば 10×10 の二次元マップの場合は100個のノードで競合層が構成される。各入力ベクトルが持つ特徴は、次に示すSOMアルゴリズムによる学習後、SOMマップ上の参照ベクトルによって仮想的に表現される。つまりSOMは、入力ベクトルが持ついくつかの代表的な特徴を抽出

し、それらの特徴をSOMマップ上で表現する手法である。そして、入力ベクトルの特徴を表現した参照ベクトルは、SOMマップ上での距離が互いに近いものほど似ており、距離が遠いものほど互いに異なるという性質がある。

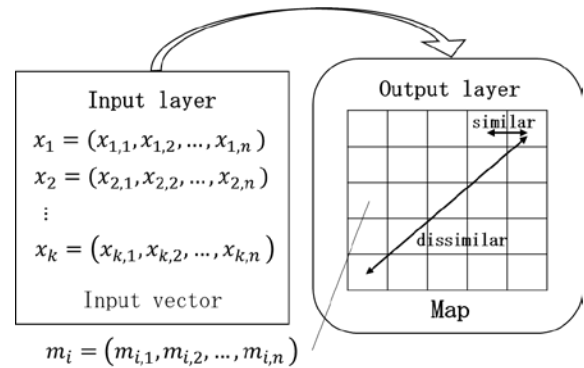


Fig.3 Input layer(left) and output layer(right) of SOM. m_i ($i=1,2,\dots,l$) are reference vectors, x_j ($j=1,2,\dots,k$) are input vectors, l is the number of the SOM map nodes, k is the number of input vectors, and n is the dimension of input vectors.

SOMアルゴリズムの計算過程は、入力ベクトルの正規化と参照ベクトルの初期化の後、下記に示すアルゴリズムに基づいて行われる。各ノードが持つ参照ベクトルの初期値には乱数または主成分分析などで特徴的なパターンをあらかじめ強調した値を与える。まず、ある入力ベクトルの値が与えられると、競合層である二次元マップ上のノードに割り当てられている全ての参照ベクトル m_i と比較され、両者のユークリッド距離が最小になるノード c （勝者ノード）が探索される。次に、各ノードの参照ベクトルは、次式に示される近傍関数にしたがって修正される。

$$m_i(t+1) = m_i(t) + h_{ci}(t, \|r_c - r_i\|) [x - m_i(t)] \quad (4.1.1)$$

$$h_{ci}(t, \|r_c - r_i\|) = \alpha(t) \cdot \exp \left[-\frac{\|r_c - r_i\|^2}{2\sigma^2(t)} \right] \quad (4.1.2)$$

ここで、 t は学習回数、 r_c 、 r_i はそれぞれ勝者ノード c と任意のノード i の位置ベクトルを表す。本研究では、近傍関数に対して式(4.1.2)のように勝者ノード位置を中心としたガウス分布を与えている。 α は学習率係数($0 < \alpha < 1$)で、 σ は近傍半径、すなわち近傍関数によって修正されるノード集合の半径を意味する。 α と σ は総学習回数を T として、学習回数とともに小さくなるように次式で設定する。

$$\alpha(t) = \alpha(0) \frac{T-t}{T} \quad (4.1.3)$$

$$\sigma(t+1) = 1 + (\sigma(t) - 1) \frac{T-t}{T} \quad (4.1.4)$$

以上のような近傍関数の特性から、勝者ノードに近いノードの参照ベクトルほど修正量は大きくなるように学習が行われ、その修正の程度は学習回数とともに小さくなる。

この一連の操作を繰り返すことによって、最終的には入力ベクトルの特徴がマップ上の各ノードの参照ベクトルで表現され、マップ上の位置的に近いノードは互いに類似した特徴を持ち、反対に遠いノード同士は互いに異なる性質を持つように組織化される。よって、学習後にマップ上のある領域に存在するノードを選択すれば、類似した特徴を持つ入力ベクトルをユークリッド距離の計算で抽出することができる。

4.2 SOMを用いた集中豪雨時の大気場抽出に関する既往研究

本節では、SOMを用いて大気場を分類し、集中豪雨の原因となる大気場を抽出した既往研究として、Ohba et al. (2014)と中北・草野ら(2016)の概要について述べる。

Ohba et al. (2014)は、JRA-55再解析データを用いて、梅雨期における日本域の豪雨と関連の深い気象パターンをSOMによって抽出した。解析のためのデータはJRA-55の日平均データの大気場と、雨量計観測から得た日降水量データをもとに作成されたAPHRODITEを使用している。大気場指標としては850hPaの東西風、南北風、相当温位、200hPa気圧面高度で、日平均値と1958～2011年の54年平均との偏差を用いている。その大気場に対して、SOMを用いてクラスター分類を行い、分類された日の降水量から豪雨イベントと関連性が深いクラスターを抽出している。Fig.4に示すように、12×12の二次元SOMマップを作成してその上に大気場を分類し、豪雨と関連性が高い大気場パターンを7つ抽出している。そして、それぞれのパターンにおいて、豪雨と関連が深い地域が異なることを示した。

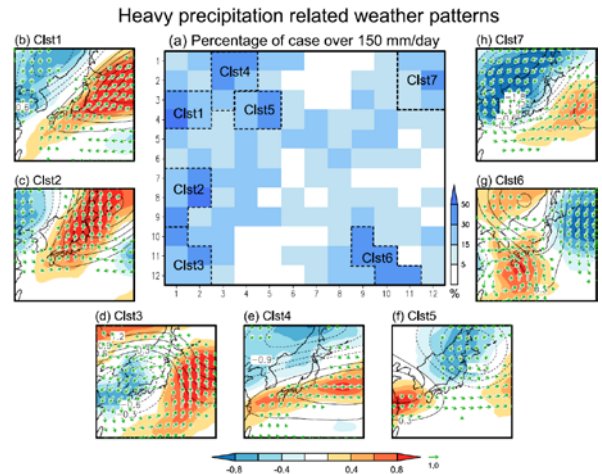


Fig.4 (a) Frequency (percentage) of days for maximum local precipitation to exceed 150mm/day at each node. The black dashed lines denote the seven clusters of SOM nodes that are most strongly associated with heavy rainfall. (b)-(h) Examples of patterns in the seven clusters extracted from the 12×12 SOM nonlinear classification as heavy precipitation-related weather pattern. Daily-mean 850-hPa EPT (red and blue shading), 200-hPa GH (black contour), and 850-hPa wind (green vectors) anomalies for June-July during 1958-2011 (Ohba et al., 2014).

また、中北・草野ら(2016)では、革新RCM05とd4PDF60を用い、集中豪雨をもたらす大気場の発生頻度の将来変化予測を行っている。大気場指標としては水蒸気フラックス及び海面更正気圧の6,7,8月各月平均値を用いている。手順としては革新RCM05の大気場指標を60kmにアップスケールしたデータを用いてSOMマップを作成する。そしてそのマップ上にd4PDF60を分類することで、大気場の発生頻度を統計的に評価している。

Fig.5に、作成した10×10の二次元SOMマップと、その上にプロットされたd4PDF60データの将来気候と現在気候の数の差を示す。暖色(寒色)のノードが、将来(現在)気候のデータがより多くプロットされ、その大気場の発生頻度は将来(現在)気候の方が多いいことを示す。また、○がついたノードは5%有意な差を示したことを意味している。

その上で、将来気候において特に発生頻度が増加するクラスターを3つ抽出した(Fig.5に示す①～③)。そして、それらのエリアに含まれるノードは全て、日本の南東の海上で海面更正気圧が高い大気場を示しており、水蒸気フラックスはエリア①～③のノード全てで西日本に南西からの水蒸気フラックスが流入している特徴を示した。特にエリア①とエリア③

のノードは強い水蒸気フラックスを示しており、この大気場パターンの発生頻度が将来気候において有意に増加することを示している。Fig.6 にエリア③の大気場パターンを示す。そして、この Fig.6 に示す、西に張り出した太平洋高気圧と、その西縁に沿って日本海側に吹き込む水蒸気フラックスという特徴を持つ大気場は、中北・宮宅ら(2012)で抽出された集中豪雨が、現在集中豪雨がほとんど発生しない日本海側で発生していた際の多くの大気場と類似していたことも示されている。革新 RCM05 と d4PDF60 では将来シナリオが異なるが、概ね整合的な結果が統計的にも示されているといえる。

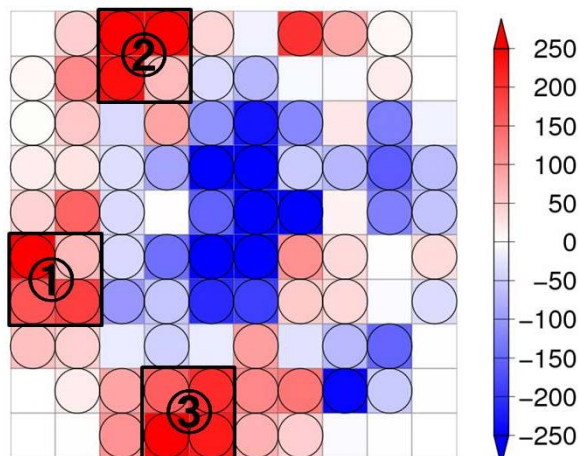


Fig.5 The difference of the number of d4PDF60 data plotted on each node (Future - Present). The nodes in warm (cold) color indicate the increase in future (present) climate. The nodes with ○ have 5% significant differences (Nakakita et al., 2016).

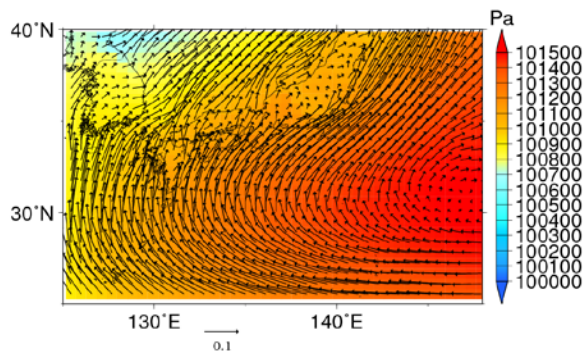


Fig.6 One of the atmospheric patterns at cluster three of Fig.4.3. SLP (shading; Pa) and vapor flux at surface (vector; $\text{kgkg}^{-1}\text{ms}^{-1}$) (Nakakita et al., 2016).

本研究では、中北・草野ら(2016)の流れを引き継ぎ、まず、より空間解像度の高い d4PDF20 のデータを用いて詳細な大気場の将来変化予測を行う。次に、将来シナリオを同一のものとして集中豪雨と大気場の

評価を行うため、3章で創生 RCM05 から抽出した集中豪雨事例を用い、集中豪雨をもたらした際の大気場と対応させて、大気場の将来変化予測を行っていく。

4.3 d4PDF20 を用いた解析

まず、d4PDF60 よりも空間解像度が高く、同じくアンサンブル実験が多数計算されている d4PDF20 を用いて解析を行った。中北・草野ら(2016)で、革新 AGCM20 の海面更正気圧及び可降水量フラックスの 7,8 月各月平均値を用いて作成された SOM マップを用いて、d4PDF20 を分類した。解析期間は現在気候(1951-2010)で 50 メンバーと将来気候(2051-2110)で 90 メンバーの 7,8 月各月平均値なので、大気場の数としては現在気候で 60 年×50 メンバー×2 ヶ月の 6,000 個、将来気候は 60 年×90 メンバー×2 ヶ月の 10,800 個である。Fig.7 に、10×10 の二次元 SOM マップの上に分類された d4PDF20 の将来気候と現在気候の数の差を示す。現在気候と将来気候では分類される大気場の数が異なるので、どちらも大気場の合計が同じになるように、現在気候の大気場の数に(10,800 個/6,000 個)を乗じて正規化している。

Fig.5 と同様に、暖色(寒色)のノードが、将来(現在)気候のデータがより多く分類され、その大気場の発生頻度が将来(現在)気候の方が多いことを示す。また、○がついたノードは 5% 有意な差を示したことを意味している。Fig.5 の d4PDF60 の結果と比較すると、○の数がやや少ないが、これは d4PDF20 のアンサンブル数が d4PDF60 よりも少ないことが要因だと考えられる。

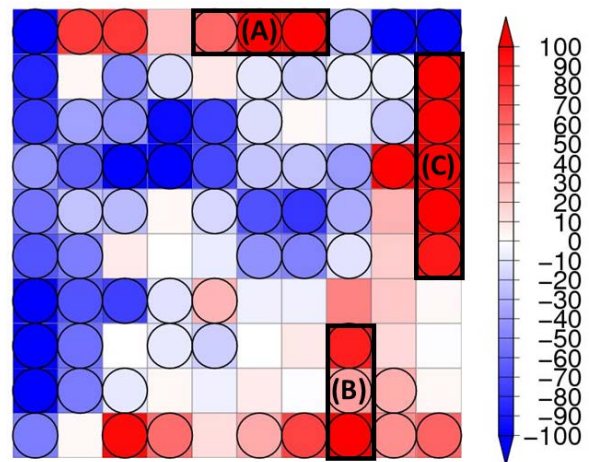


Fig.7 The difference of the number of d4PDF20 data plotted on each node (Future - Present). The nodes in warm (cold) color indicate the increase in future (present) climate. The nodes with ○ have 5% significant differences.

d4PDF20 を分類した SOM マップの中から、将来気候において特に発生頻度が増加する大気場パターンを 3 つ抽出した (Fig.7 の(A)~(C)). このうち(B)と(C)の大気場においては、Fig.8 に示すように、西に張り出した太平洋高気圧と南西からの水蒸気フラックスが流入してくるという特徴を持っており、d4PDF60 の結果と同様であった。一方で、クラスター(A)に関しては Fig.9 に示すように、太平洋高気圧の張り出しが弱く、水蒸気フラックスも南東から流入しているパターンを示していた。この大気場パターンは、60km 解像度データを用いた場合は、SOM マップ上で上手く表現されず、将来気候においても有意な増加が出なかったパターンである。このことから、空間解像度を高めたことにより、より様々なパターンの大気場が抽出されるようになったと言える。

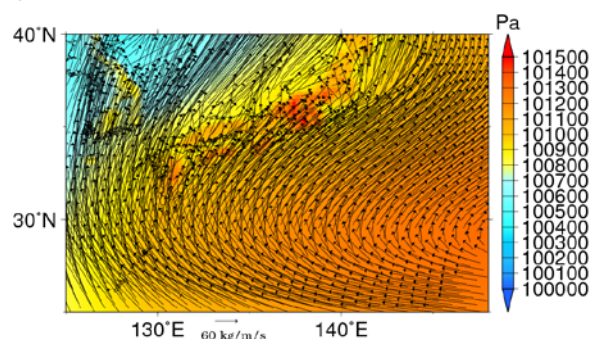


Fig.8 One of the atmospheric patterns at cluster C of Fig.4.5. SLP (shading; Pa) and precipitable water flux (vector; kgms^{-1}).

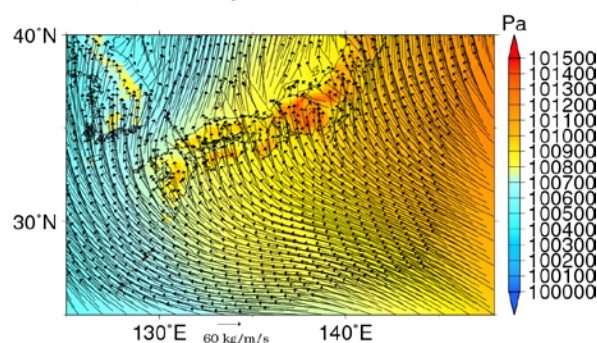


Fig.9 One of the atmospheric patterns at cluster A of Fig.4.5. SLP (shading; Pa) and precipitable water flux (vector; kgms^{-1}).

5. SOMマップの組み合わせによる大気場の分類

5.1 SOM マップの組み合わせ

このように、これまで SOM を用いて、入力データを複数の変数から構成される多変数データとして扱い、SOM 二次元マップを作成してきた。しかし、複数の変数を入れた多次元入力データを用いた際の

SOM の問題点として、入力ベクトルが SOM マップ上に分類される際に計算されるユークリッド距離に関して、複数ある変数の中の特変数に関する距離が極端に小さい場合、他の変数に関する距離が大きくてもそのノードに分類されてしまうという問題がある。つまり、特変数のみが分類された SOM マップノードのパターンと類似し、他の変数に関しては類似しない場合がある。

本研究では集中豪雨と大気場の対応付けが重要であり、大気場の特徴を SOM マップ上で正確に表現する必要がある。そこで、この問題点を解決するため、Fig.10 に示すように、分析に用いる複数の大気場指標の変数それぞれに関して SOM マップを作成し、変数毎に各 SOM マップ上の最も似ているノードに分類されるよう SOM の改良を行った。

改良前と改良後の手法の比較を行うため、創生 AGCM20 を用いて、改良前と改良後の SOM で大気場指標の分類を行った。その結果、Fig.11 に示すように、改良前よりも、入力データがマップ上に分類される際に計算されるユークリッド距離が大幅に減少し分散も小さくなった。すなわち、全ての入力データに対して一様に、SOM の出力値と類似させることに成功した。

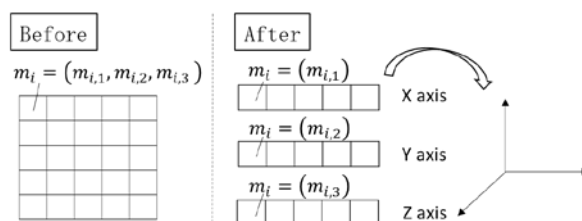


Fig.10 Left shows a standard 2 dimensional SOM map, and right shows 1 dimensional SOM map each variables after improved, in case the number of variables for SOM is three.

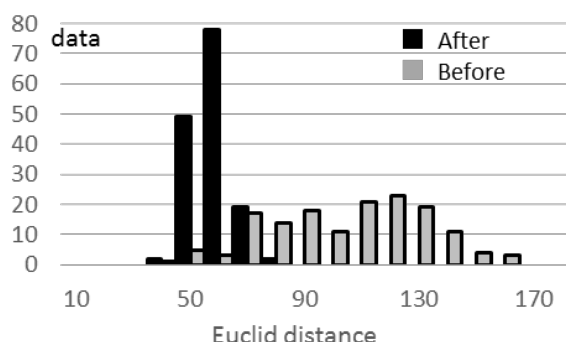


Fig.11 The comparison of Euclid distances which are calculated when the input data are classified on a SOM node with SOM method before improved and after improved.

5.2 改良後 SOM を用いた大気場の解析

この改良した SOM を用いて、d4PDF20 の大気場指標の分類を行った。ここでは豪雨と大気場の対応をさらに高めるために、月平均値ではなく 6~8 月における旬平均値を用いた。SOM マップの作成には創生 AGCM20 の 6~8 月旬平均値を用い、大気場指標としては水蒸気フラックスと海面更正気圧を用いた。解析領域は、太平洋高気圧の西への張り出しや、北偏・南偏といった変化をより見やすくするため、Fig.12 に示すように、東経 120~150 度、北緯 20~50 度の範囲とした。

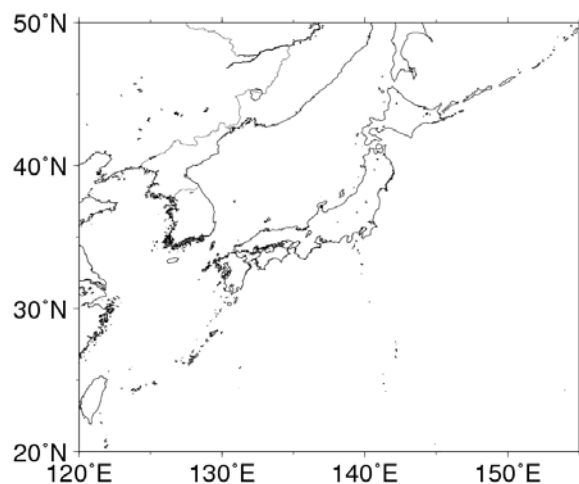


Fig.12 Calculation area of improved SOM.

本来であれば、集中豪雨の抽出に用いた創生 RCM05 を用いて SOM マップを作成することが最も望ましいが、創生 RCM05 は計算領域が狭く Fig.12 に示す領域の端の方は出力されていないため、創生 RCM05 を用いることができない。そこで本研究では、中北・草野ら(2016)で示された、RCM05 を 20km スケールにアップスケールしたものと AGCM20 の大気場が、SOM でほぼ同じ大気場と判断されて同じノードに分類されるという結果に基づき、創生 RCM05 と境界値を共有する創生 AGCM20 を用いて SOM マップを作成した。つまり、RCM05 で集中豪雨が発生した日時の大気場を AGCM20 の同じ日時の大気場と置き換えることができるため、集中豪雨が発生した日時の AGCM20 が分類された SOM マップ上のノードを確認することで、集中豪雨をもたらす特徴的な大気場を抽出することができる。

この仮定に基づき、創生 AGCM20 を用いて Fig.12 に示す解析領域で、水蒸気フラックスと海面更正気圧それぞれに関して 50 ノードの一次元 SOM マップを作成し、2つの一次元 SOM マップを x 軸と y 軸に見立て、2つの SOM マップを組み合わせた二次元の SOM マップを作成した。

Fig.13 に、創生 AGCM20 で作った SOM マップに創生 AGCM20 を分類したものを示す。このマップは、横軸が水蒸気フラックスの一次元 SOM マップ、縦軸が海面更正気圧の一次元 SOM マップであり、それぞれを x 軸と y 軸に対応させて 1 つのデータを分類している。赤丸が将来気候、青丸が現在気候のデータを示している。各軸の隣にそれぞれ 3 つずつ示した大気場の図は、50 個あるノードのうち 3 つを例に並べたものである。

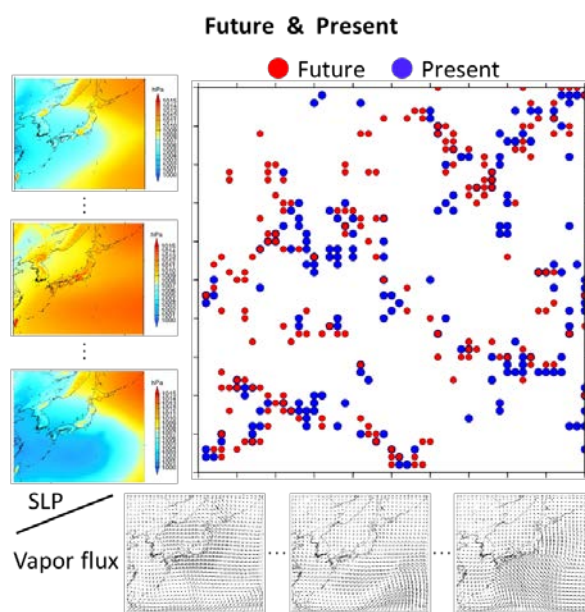


Fig.13 Combination of SOM maps. The X axis corresponds a SOM map of vapor flux, and Y axis corresponds a SOM map of SLP. The red (blue) plots shows future (present) climate data.

3 章において、創生 RCM05 から抽出した集中豪雨が 1 回でも発生した旬の創生 AGCM20 のみを色づけした図を Fig.14 に、集中豪雨が 3 回以上発生した旬のみを色付けした図を Fig.15 に示す。また、この SOM マップ上に分類された d4PDF20 の将来気候と現在気候の差を Fig.16 に示す。現在気候と将来気候における大気場の数は、現在気候で 60 年×50 メンバー×3 ヶ月×3 旬の 27,000 個、将来気候で 60 年×90 メンバー×3 ヶ月×3 旬の 48,600 個であり分類される大気場の数が異なるため、現在気候の大気場の数に(48,600 個/27,000 個)を乗じて正規化している。Fig.14~15 では赤色(青色)が将来(現在)気候を、Fig.16 では暖色(寒色)が将来(現在)気候で発生頻度が多いことを示している。Fig.14 で、特に豪雨が発生した際の大気場が集中して分類されていた箇所を①~⑤で示しており、これは Fig.15 および Fig.16 の①~⑤と対応している。Fig.16 から、クラスター①、③、④の大気場は将来気候において発生頻度が増加し、

クラスター②の大気場は現在気候でより発生頻度が高く、クラスター⑤の大気場は暖色と寒色のノードが混在していることから、現在気候と将来気候の両方で同程度に発生していることがわかる。さらに Fig.15 からは、クラスター①~⑤の中でも特にクラスター④の大気場で集中豪雨の頻度が高いことがわかる。

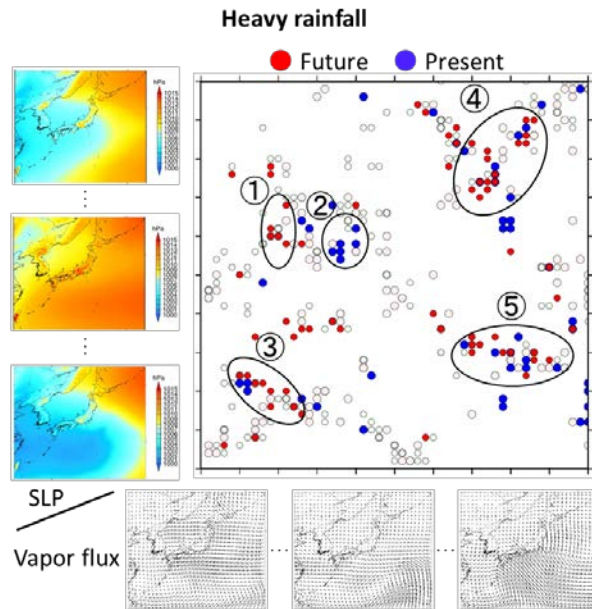


Fig.14 Only the data which have the heavy rainfall events are colored on Fig.5.4 SOM map.

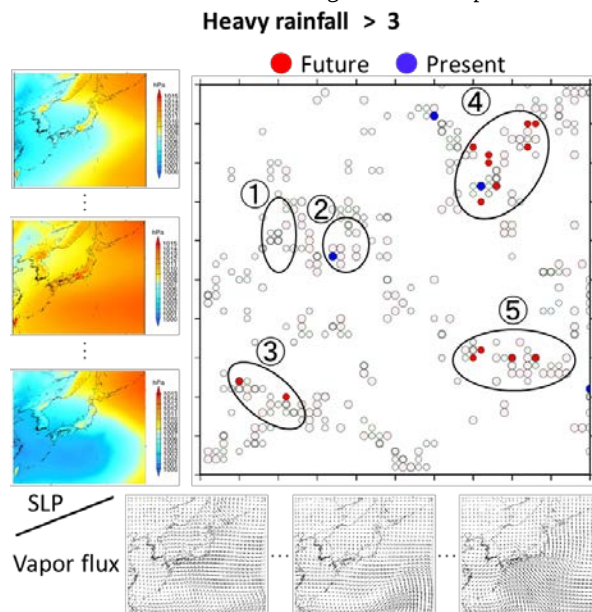


Fig.15 Only the data which have more than three heavy rainfall events are colored on Fig.5.4 SOM map.

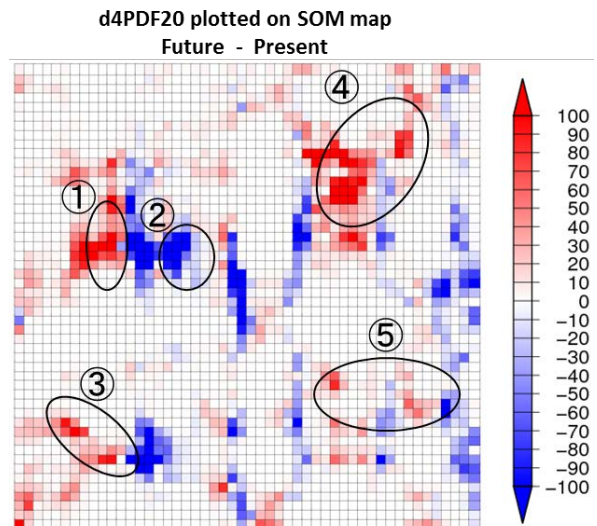


Fig.16 The difference of the number of d4PDF20 data plotted on each SOM nodes (Future - Present). The nodes in warm (cold) color shows the increase in future (present) climate. The number of ①~⑤ correspond the numbers of Fig.5.5.

次に、豪雨を多くもたらす大気場として抽出されたクラスター①~⑤の大気場の特徴について詳しく述べる。Fig.17 に、上から順にクラスター①~⑤の特徴的な大気場を 1 つずつ示す。

クラスター①の大気場の特徴は、日本全域を覆うほど大きく張り出した太平洋高気圧と、その高気圧に沿って日本海側に吹き込む強い水蒸気フラックスである。一方クラスター②の大気場の特徴は、日本全域を覆うほど大きく張り出した太平洋高気圧という特徴はクラスター①と類似しているが、水蒸気フラックスが弱い。また、クラスター②の大気場は、日本海から大陸付近において海面気圧の南北傾度が小さく、水蒸気フラックスが日本海側へ流入せず大陸側へと流れている。Fig.16 から、クラスター①の大気場は将来気候で、クラスター②の大気場は現在気候で発生頻度が多くなっており、このことから、将来気候においては海面気圧の分布が類似していても水蒸気フラックスが強い大気場の発生頻度が増加することがわかる。

クラスター③の大気場は、太平洋高気圧が日本の東海上に位置しており、東日本付近を覆う程度に西に張り出している。そして、クラスター①と同様に、日本海側に水蒸気フラックスが強く吹き込む分布となっている。そして、この大気場も Fig.16 から、将来気候において発生頻度が増加することがわかる。

続いて、クラスター④の大気場は、太平洋高気圧日本の南海上に位置しており大きく西に張り出した分布となっている。そして、高気圧に沿って強い水

蒸気フラックスが西日本や日本海側へ南西から流入している。クラスター⑤の大気場も、水蒸気フラックスに関してはクラスター④と同様の傾向を示しているが、クラスター④の大気場の方が日本付近における海面気圧の南北傾度が大きい。また、クラスター④は集中豪雨と大気場の対応付けにより、特に集中豪雨を頻発させる大気場として抽出されたが、Ninomiya (2000) では、1991 年 6 月に発生した梅雨豪雨をもたらした際の大気場の特徴として、梅雨前線に乾燥した冷氣を供給する、シベリアに存在する低気圧の存在が示されている。クラスター④の大気場に見られる気圧の南北傾度と朝鮮半島北側の低圧部は Ninomiya (2000) で示された梅雨豪雨をもたらす際の大気場の特徴として整合的である。また、榎本ら(2014)でも、2013 年に日本海側で集中豪雨を多発させた際、日本付近の海面気圧の南北傾度が大きく、暖湿気が流入しやすい環境場であったことが示されている。実際に、クラスター④の大気場は南北の気圧傾度が大きいいため、日本海側に吹き込んだ強い水蒸気フラックスが大陸側へ逸れることなく日本の日本海側に吹き付けている。これは、3 章で得た、日本海側で集中豪雨が増加するという結果とも整合的である。そして Fig.16 を見ると、クラスター④はほとんどのノードで将来気候において発生頻度が増加している。一方で、クラスター⑤では暖色と寒色のノードが混在しており、色も薄いことから、クラスター⑤の大気場は発生頻度がクラスター④と比べて少なく、また現在気候と将来気候では同程度に発生していることがわかる。このことから、太平洋高気圧が日本の南海上に位置し、水蒸気フラックスが南西から日本に流入する大気場の時、現在気候においても将来気候においても集中豪雨は発生しやすいが、特に将来気候では、張り出した高気圧の南北傾度が大きい大気場の発生頻度が増加し、集中豪雨を頻発させる可能性が高いことがわかる。

このように、集中豪雨をもたらす可能性のある大気場パターンを複数抽出することができ、さらに、d4PDF20 を用いた解析によって特に集中豪雨を頻発させる大気場の発生頻度が将来気候において顕著に増加することが明らかになった。これは、創生 RCM05 から抽出した集中豪雨が将来気候において有意に増加するという結果と矛盾せず、集中豪雨というメソ β スケールの現象を大気場という大規模スケールから捉え、統計的有意性を高めた上で評価することができたと言える。

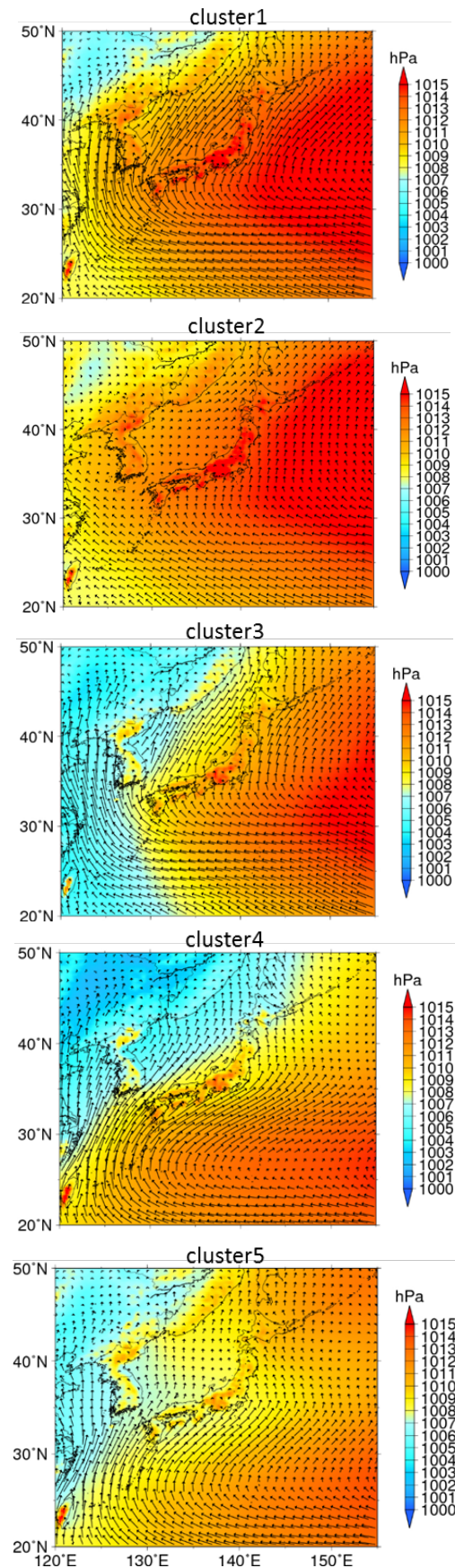


Fig.17 One of the atmospheric patterns at cluster①~⑤ from top to bottom. SLP (shading; hPa) and vapor flux (vector; $\text{kg kg}^{-1} \text{ms}^{-1}$).

5.3 考察

3章で抽出した集中豪雨は、将来気候の7月上旬と8月上旬において特に有意な増加傾向が見られた。d4PDF20の現在気候と将来気候において、この2つの時期の大気場がそれぞれ5つのうちのどのクラスターに分類されたか、あるいは各クラスター以外のノードに分類されたかをFig.18に示す。

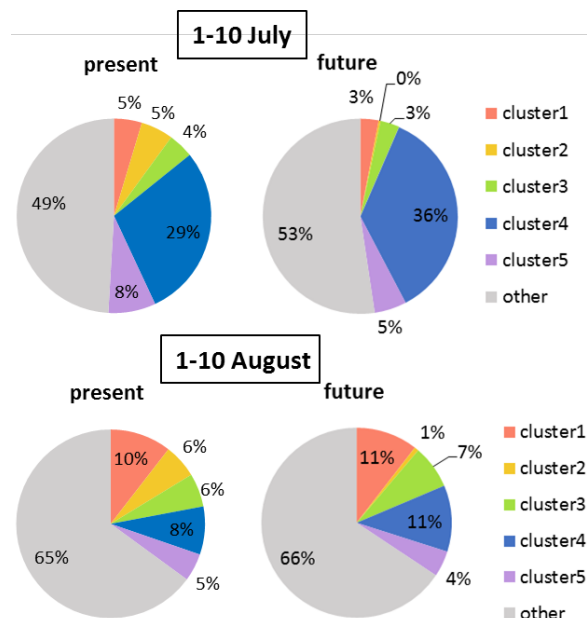


Fig.18 The percentage about which clusters on SOM map the data for the beginning of July and August of d4PDF20 are calssified into. There are 6 categories, cluster 1~5 and other nodes, upper shows 1-10 July, below shows 1-10 August. Left shows present and right shows future climate.

7月上旬に関しては、将来気候においてクラスター④の大気場の発生割合が増加しており、5つのクラスターのうちクラスター④が占める割合も増加している。このことは、将来気候において集中豪雨を

もたらす大気場はほぼ一意的に決定され、クラスター④の大気場の発生頻度の増加により集中豪雨が増加していることが示唆される。一方で8月上旬の大気場は、将来気候においてクラスター②の発生割合が減少していることを除いては、現在気候と将来気候は概ね同様の傾向を示している。5つのクラスター以外のノードに分類されているものが7月上旬と比較して多く、クラスター④の大気場の発生割合は3%増加しているが、クラスター①、③、④は現在・将来気候ともに、割合に大きな差はなくそれぞれ同程度に分類されている。このことから、8月上旬に発生する集中豪雨に関しては複数のタイプの大気場によってもたらされる可能性が高く、将来気候における集中豪雨の増加は、ある特定の大気場の発生頻度の増加によるものというよりは、温暖化による大気中の水蒸気量の増加等の、他の条件によるものである可能性が示唆される。しかし、今回はまだ集中豪雨をもたらす必要条件としての大気場の解析を行ったにとどまっているため、十分条件としての環境場を含めてより詳細な解析が必要である。

次に、Fig.19に創生 AGCM20の現在気候と将来気候における6月中旬から8月中旬までの、海面更正気圧と水蒸気フラックスの25年平均気候値を示す。全体的な特徴としては、現在気候においては6月中旬から7月上旬にかけて太平洋高気圧の西への張り出しが強くなり、高気圧に沿って南方から豊富な水蒸気が日本域に供給されていることが見て取れる。7月中旬になると太平洋高気圧の張り出しが少し弱まり、8月に入ると日本全域を太平洋高気圧が覆い盛夏を迎える。将来気候においては、現在気候と比べて6月の太平洋高気圧の張り出しが弱い。7月上旬・中旬においては西に大きく張り出した太平洋高気圧と、南西からの水蒸気フラックスが顕著である。7月下旬以降は太平洋高気圧が弱まり顕著な西への張り出しは見られなくなる。

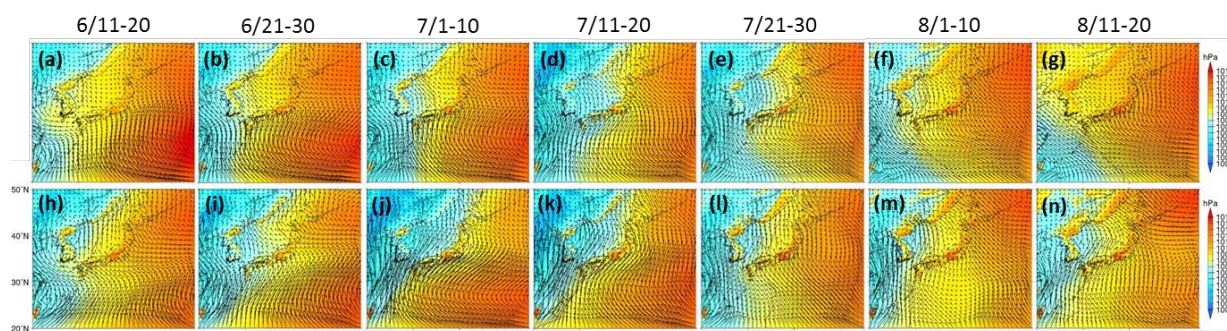


Fig.19 SLP (shading; hPa) and vapor flux (vector; $\text{kgkg}^{-1}\text{ms}^{-1}$) for the periods (a) 11-20 June, (b) 21-30 June, (c) 1-10 July, (d) 11-20 July, (e) 21-30 July, (f) 1-10 August, (g) 11-20 August averaged over 25 years of the present climate experiments (1979-2003) of SOUSEI AGCM20. (h)-(n): Same as (a)-(g) but averaged over 25 years of the future climate experiments (2075-2099).

そして、創生 RCM05 で集中豪雨が有意に増加した将来気候の 7 月上旬と 8 月上旬の気候値に着目してみる。7 月上旬の気候値は、太平洋高気圧が西に大きく張り出し、日本付近における海面気圧の南北傾度が大きく、水蒸気フラックスが日本域に流入しやすいという、集中豪雨を多くもたらす特徴的な大気場であるクラスター④の特徴を顕著に有していることがわかる。このことは、Fig.18 上図で示した、d4PDF20 における将来気候の 7 月上旬の大気場の多くがクラスター④に分類されていたこととも整合的であり、RCP8.5 シナリオでは将来気候の 7 月上旬において集中豪雨を多くもたらす大気場の発生頻度が非常に多いことを示している。

一方、7 月上旬と同様に創生 RCM05 において集中豪雨の有意な増加が見られた将来気候の 8 月上旬の気候値は、太平洋高気圧の張り出しが弱く、SOM で抽出された 5 つの集中豪雨をもたらす大気場の特徴をどれも有していない。また Fig.18 下図で示した d4PDF20 に関しても、将来気候における 8 月上旬の大気場は SOM マップ上の複数のクラスターに同程度に分類されている。これらのことから、8 月上旬に集中豪雨をもたらす大気場は一意的には決定することができないと言える。しかし今回、創生 AGCM20 や d4PDF20 のデータに関しては、台風が発生した際の大気場も含めて旬平均値を作成している。そのため、d4PDF20 の 8 月上旬の大気場が複数のクラスターに分類されたことや創生 AGCM20 の気候値が集中豪雨をもたらす大気場の特徴を持たなかった要因としては台風の影響も考えられるため、大気場の解析に関しては台風の影響を考慮した解析も進める必要がある。

上述したように、RCP8.5 シナリオ下での将来気候における 7 月上旬の大気場に関しては、日本列島付近で気圧の南北傾度が大きく、南西からの水蒸気フラックスが日本域に流入しやすいという特徴を持つ大気場の発生頻度が非常に多い。このことは Fig.5.20 に示すように、Hanafusa et al. (2013) で示された、将来気候の夏期において北日本や日本海、オホーツク海付近で気圧の負偏差が生じる一方で、フィリピン近海では気圧が上昇するため、日本付近で気圧の南北傾度が増大し、西から日本域に風が流入しやすくなるという結果と一部整合的である。しかし、Hanafusa et al. (2013) では月あるいは旬別での解析は行われていない。Lee et al. (2014) でも 6~8 月の北半球夏期において日本付近で気圧の南北傾度が大きくなることが示されているが、同様に月あるいは旬別での解析は行われていない。Kusunoki (2017) では将来気候の 6 月において、太平洋高気圧の南偏、つまりフィリピン付近における高気圧偏差と日本付近にお

ける低気圧偏差により、フィリピン海付近での気圧の南北傾度の増大を指摘している。これは Fig.19 の (a), (b), (h), (i) で示す、将来気候における日本の南海上での太平洋高気圧張り出しの弱化と整合的である。将来気候の 7 月上旬において集中豪雨を多くもたらすクラスター④の特徴を持つ大気場の発生頻度が増加する要因として、Kusunoki (2017) で示された、6 月におけるフィリピン海付近での南北の気圧傾度を保ったまま太平洋高気圧が発達したことが推測されるが、本研究ではまだ時間推移を考慮した大気場の解析は行うことができておらず、これらの既往研究だけでは将来気候における 7 月上旬の大気場に関する説明を十分にすることはできない。そのため今後は、複数の既往研究で示された、将来気候における日本付近での南北の気圧傾度の増大を維持したまま、太平洋高気圧が発達するのかどうかを含めて、現在気候と将来気候における大気場に関して時間推移も考慮したより詳細な解析を行い、大気場の将来変化を細かく解析していく必要がある。

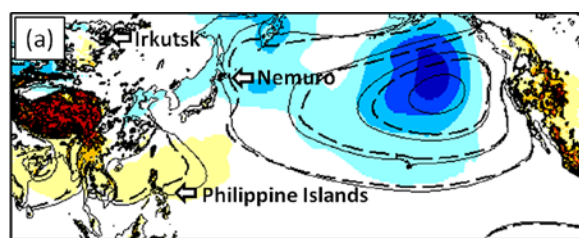


Fig.20 The difference of sea level pressure between the present and future climate (shading) in August derived by AGCM20. Solid and dash contours are sea level pressure in the present and future climate respectively (Hanafusa et al., 2013).

6. まとめと今後の課題

6.1 本研究のまとめ

本研究では、RCP8.5 の将来シナリオに基づき、気候変動に伴う梅雨期集中豪雨の将来変化を統計的に評価するために、大規模な現象である大気場から集中豪雨を捉え、その大気場の発生頻度の将来変化を解析から梅雨期集中豪雨の将来変化を推定することを試みた。まず、創生 RCM05 の降雨出力から梅雨豪雨を抽出して将来変化予測を行った。そして、創生 RCM05 から得た集中豪雨の原因となる大気場を、客観的なクラスター分類法の 1 つである SOM を利用して抽出し、d4PDF20 の大気場を分類することで梅雨豪雨をもたらす特徴的な大気場の発生頻度の将来変化予測を行った。この時、集中豪雨と大気場の対応を高めるために SOM の改良を行った。SOM マップ

を各変数毎に作成して組み合わせることにより、より正確に SOM マップ上で入力データとしての大気場を表現することが可能になり、豪雨と大気場との対応を高めることに成功した。

創生 RCM05 からの集中豪雨の抽出に関しては、先行研究である中北・宮宅ら(2012)の集中豪雨指標を参考にした。降雨出力から直接目視により梅雨豪雨のみを抽出した結果、将来気候の7月上旬と8月上旬において有意に集中豪雨の発生頻度が増加することが明らかになった。これは革新 RCM05 から梅雨豪雨を抽出した既往研究の結果と整合的であった。

そして、創生 RCM05 から得た集中豪雨をもたらす特徴的な大気場の抽出に関しては、大気場指標として海面更正気圧と水蒸気フラックスを用いた。創生 AGCM20 の6~8月旬平均値を用いて変数毎に SOM マップを作成し、創生 RCM05 から抽出した集中豪雨が発生した旬の大気場が SOM マップ上のどのような大気場を示すノードに分類されるかを確認した。その結果、集中豪雨が発生した時の大気場の特徴として、西に張り出した太平洋高気圧とその西縁に沿って日本域に流入する水蒸気フラックスという特徴が抽出された。さらに、その特徴を持つ大気場の中でも、少しずつ異なる特徴を持つ大気場が大きく分けて5つ抽出された。

1つ目の大気場の特徴は、日本全域を覆うほど大きく張り出した太平洋高気圧に沿って強い水蒸気フラックスが日本海側にまで大きく流入するパターンである。d4PDF20 を分類した結果、将来気候においてこの大気場の発生頻度は顕著に増加することが示された。

2つ目の大気場の特徴としては、1つめの大気場と同様に太平洋高気圧が日本全体を覆うほど大きく西に張り出しているが、南北の気圧傾度が小さい。また、流入する水蒸気フラックスが弱いという特徴を持つ。この大気場でも現在気候において集中豪雨が発生していたが、大気場の発生頻度としては将来気候において増加は見られなかった。これらクラスター①と②の2つの大気場の特徴から、類似した太平洋高気圧の分布を示していたとしても、将来気候においては南北の気圧傾度が大きくなり、水蒸気フラックスも強化されるため、日本海側においてより陸域に西から水蒸気フラックスが流入しやすい大気場の発生頻度が増加することが示された。

3つ目の大気場の特徴も1つ目の大気場の特徴と類似しているが、太平洋高気圧が日本全域を覆うほどは張り出しておらず、東日本付近まで張り出しているパターンである。そして水蒸気フラックスは強く日本付近に流入している。この大気場に関しても

集中豪雨が多く発生しており、かつ、将来気候において発生頻度が増加することが示された。

続いて4つ目の大気場の特徴は、これまでの3つの大気場と比較して、大きく西に張り出した太平洋高気圧が日本の南海上に存在しており、日本列島付近において南北の気圧傾度が大きい。そして高気圧の北西縁に沿って西日本に強く吹きつけ、日本海側にも流入する強い水蒸気フラックスが見られる。この大気場パターンは、特に集中豪雨が頻発する大気場として抽出され、かつ将来気候において顕著に発生頻度が増加することが示された。

最後に5つ目の大気場は、4つ目の大気場の特徴と類似しているが、日本付近における南北の気圧傾度が小さい。これにより、日本海側に流入した水蒸気フラックスが大陸側へ流れてしまい、日本海側の陸域には強く吹き付けていない。一方で太平洋側では南西からの強い水蒸気フラックスが陸域へ流入している。この大気場も集中豪雨をもたらすが、現在気候と将来気候共に同程度に発生しており、発生頻度に関して将来気候における顕著な増減は見られなかった。

また、創生 RCM05 から抽出した集中豪雨が将来気候において特に有意に増加していた7月上旬と8月上旬に関して、将来気候における大気場の解析を行った。その結果、d4PDF20 の現在・将来気候ともに、7月上旬の大気場の多くはクラスター④に分類されていたが、将来気候の場合はクラスター④の大気場の発生割合が増加しており、他のクラスターの発生割合は減少していた。かつ、創生 AGCM20 の25年平均気候値で見た場合でも将来気候の7月上旬の大気場はクラスター④の大気場の特徴を有していた。このことから、RCP8.5 シナリオでの将来気候においては、7月上旬に集中豪雨を多くもたらす大気場の発生頻度が増加し、豪雨をもたらす大気場パターンもほぼ一意的に決定されると言える。

一方で8月上旬のd4PDF20の大気場は現在・将来気候の間で、SOM マップ上の分類されたクラスターに大きな差異は見られなかった。また大気場が特に多く分類された特定のクラスターもなかった。創生 AGCM20 の25年平均気候値で見た場合でも、集中豪雨をもたらす5つの特徴的な大気場のいずれの特徴も見られなかった。これらのことから、8月上旬に関しては、集中豪雨をもたらす大気場を一意的に決定することはできず、複数のタイプの大気場によってもたらされる可能性が高いと言える。また、ある特定の気場の発生割合が増加することにより集中豪雨が増加するというよりは、他の条件の変化により集中豪雨が増加することが示唆されたが、これに関しては、今後より詳細な解析が必要である。

6.2 今後検討すべき課題

本研究では先行研究を踏まえて、メソ β スケールの現象である集中豪雨を大気場という観点から捉え、大量アンサンブルデータの d4PDF20 を用いることによって統計的有意性を高めて将来変化予測を行うことを試みた。また、独自で SOM 手法の改良を行い、課題であった集中豪雨と大気場の対応を高めることに成功した。改良した SOM を用いて RCP8.5 シナリオに基づく解析を行った結果、集中豪雨をもたらす特徴的な大気場を複数抽出することができ、またそれら大気場の多くが将来気候において発生頻度が顕著に増加することを示した。このことから、手法の改良により、より明確かつ正確に集中豪雨をもたらす大気場を抽出することが可能になり、また集中豪雨の将来変化を大気場の観点から捉えて統計的に評価することができたと言える。

一方で、本研究では、創生 RCM05 から抽出した集中豪雨を日本全域で議論しており、地域毎では議論を行っていない。今後の課題としては、地域毎に集中豪雨の将来変化予測を行うとともに、今回抽出された 5 つの大気場に関しても、地域毎に集中豪雨と大気場の関連を詳細に解析する必要がある。また、今回は 7 月上旬と 8 月上旬の大気場に関してクラスター別に分類された割合を解析しただけにとどまっており、6~8 月の旬に関して太平洋高気圧や水蒸気フラックスの時間推移を考慮していない。将来気候の 7 月上旬気候値において特に集中豪雨を多くもたらす大気場の特徴が発現する理由を含めて、現在気候・将来気候ともに、6~8 月における太平洋高気圧の張り出しから衰弱までといった時間推移を含めた解析を行うことが重要である。台風の影響に関しても大気場の解析では考慮しきれていないため、台風の影響を除去した梅雨期の大気場として解析を進める必要がある。また今回は、集中豪雨を大気場の観点からとらえ、集中豪雨をもたらす必要条件としての大気場の解析を行ったが、同じ大気場の特徴を有していても集中豪雨が発生しない場合もあるため、集中豪雨をもたらす十分条件としての環境場も明らかにすることも今後の課題の一つである。

謝 辞

本研究は文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラムの協力のもと、気象庁気象研究所開発の気候モデル出力を利用して行いました。また、創生プログラムのもとで作成された、地球温暖化対策に資する気候再現・予測実験データベース (d4PDF) を使用しました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 榎本剛・水田亮・森正人・宮坂貴文・遠藤浩和・松枝未遠(2014): 研究集会「異常気象と気候システム変動のメカニズムと予測可能性の報告」, 研究会報告書,
http://www.mri-jma.go.jp/Dep/cl/member/hendou/paper/paper_others_9.pdf, (2017.5.25 参照).
- 岡田靖子・竹見哲也・石川裕彦・楠昌司・水田亮 (2015): 地球温暖化予測における梅雨期の降水および大気場の変化, 京都大学防災研究所年報, 第 58 号 B, pp. 157-161.
- 環境省(2014): 日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について, 報道発表資料, <http://www.env.go.jp/press/files/jp/24576.pdf>, (2017.5.23 参照).
- 中北英一・草野晴香・峠嘉哉・KIM Sunmin (2016): AGCM アンサンブルを用いた梅雨期集中豪雨の大気場特性の出現頻度に関する将来変化, 京都大学防災研究所年報, 第 59 号 B, pp. 239-248.
- 中北英一・宮宅敏哉・Kim Kyoungjun・木島梨沙子 (2012): 気候変動に伴う梅雨期の集中豪雨の将来変化に関する領域気候モデルを用いた基礎的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 68, No.4, p. I_427-I_432.
- 文部科学省(2015): 気候変動リスク情報創生プログラム: 影響評価のための気候モデルデータの利用.
- Hanafusa, M., H. Sasaki, A. Murata, and K. Kurihara (2013): Projection of Changes in Future Surface Wind around Japan Using a Non-hydrostatic Regional Climate Model, SOLA, Vol.9, pp. 23-26.
- IPCC (2013): Fifth Assessment Report.
- Kanada, S., M. Nakano, and T. Kato (2012): Projections of future changes in precipitation and the vertical structure of the frontal zone during the Baiu season in the vicinity of Japan using a 5-km-mesh regional climate model, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol.90A, pp. 65-86.
- Kohonen, T. (1998): The self-organizing map, Neurocomputing, 21, pp.1-6.
- Kusunoki, S. (2017): Future changes in precipitation over East Asia projected by the global atmospheric model MRI-AGCM3.2, Climate Dynamics, pp. 1-17.
- Lee, J. Y., Wang, B. (2014): Future change of global monsoon in the CMIP5, Climate Dynamics, Vol. 42, pp. 101-119.
- Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi,

- H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita, and M. Kimoto (2016): Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models, *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo., T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh (2012): Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, pp. 253-258.
- Ninomiya, K. (2000): Large- and Meso- α -scale Characteristics of Meiyu/ Baiu Front Associated with Intense Rainfalls in 1-10 July 1991, *Journal of the Meteorological of Japan*, Vol. 78, No. 2, pp. 141-157.
- Ohba, M., S. Kadokura, Y. Yoshida, D. Nohara, and Y. Toyoda (2014): Anomalous Weather Patterns in Relation to Heavy Precipitation Events in Japan during the Baiu Season, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 16, pp. 688-701.

(論文受理日 : 2017年6月13日)