

気候変動及びダム堆砂進行を考慮した
多目的ダムの長期的利水機能評価

2022 年

小 島 裕 之

気候変動及びダム堆砂進行を考慮した多目的ダムの長期的利水機能評価

目 次

1. 序論.....	1
1.1 気候変動による利水への影響.....	1
1.2 貯水池内堆砂進行の現状と今後の課題.....	2
1.3 将来の利水需要変化に関わる現状認識.....	3
1.4 ダム再生ビジョンを踏まえた今後の課題.....	4
1.5 本論文の適用範囲.....	5
1.6 本論文の目的と構成.....	8
参考文献.....	11
2. 多目的ダムの利水機能評価に関わる既往検討を踏まえた課題整理.....	12
2.1 概説.....	12
2.2 気候変動が水需給及びダム貯水池内堆砂進行に与える影響に関わる既往検討.....	12
2.2.1 気候変動が水需要に与える影響に関わる既往検討.....	12
2.2.2 気候変動が水供給に与える影響に関わる既往検討.....	13
2.2.3 気候変動がダム貯水池内堆砂進行に与える影響に関わる既往検討.....	15
2.3 水需要の変化を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討.....	16
2.4 水供給の変化及び堆砂進行を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討.....	16
2.4.1 水供給の変化を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討事例.....	16
2.4.2 水供給の変化及び堆砂進行を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討事例... ..	17
2.5 ダムの利水機能変化の評価方法に関わる既往検討.....	19
2.6 ダムの利水機能変化を踏まえた適応策に関わる既往検討.....	20
2.6.1 ダム操作に着目した適応策検討事例.....	20
2.6.2 容量配分の見直しに着目した適応策検討事例.....	21
2.7 結語.....	22
参考文献.....	24

3. 気候変動と堆砂進行がダムの利水機能に与える影響の検討.....	26
3.1 概説.....	26
3.2 検討方法.....	26
3.3 個別ダムを対象とした影響検討.....	28
3.3.1 検討対象ダムの概要.....	28
3.3.2 将来流況及び将来堆砂量・堆砂形状の予測手法.....	29
3.3.3 将来の流況・堆砂量予測.....	31
3.3.4 気候変動によるダム利水機能への影響評価.....	33
3.3.5 個別ダムを対象とした影響検討のまとめ.....	45
3.4 複数ダムから構成されるダム群を対象とした影響検討.....	45
3.4.1 検討対象ダム群の概要.....	45
3.4.2 検討対象ダム群の将来流況.....	47
3.4.3 気候変動及び貯水池内堆砂進行による検討対象ダム群の利水機能への影響評価.....	57
3.4.4 複数ダムから構成されるダム群を対象とした影響検討のまとめ.....	63
3.5 結語.....	64
参考文献.....	65
4. 気候変動がダムの利水機能に与える影響の評価指標の検討.....	66
4.1 概説.....	66
4.2 検討方法.....	66
4.3 利水機能変化指標の検討.....	67
4.3.1 検討対象ダムの概要.....	67
4.3.2 将来流況の予測手法.....	67
4.3.3 利水計算方法.....	68
4.3.4 気候変動に伴う流況変化に関わる指標.....	69
4.3.5 堆砂進行に伴う容量損失に関わる指標.....	74
4.4 結語.....	76
参考文献.....	76
5. 気候変動と堆砂進行がダムの治水・利水機能に与える影響の全国的評価.....	77
5.1 概説.....	77
5.2 検討方法.....	77

5.3 将来流況・ダム堆砂進行の予測手法	78
5.3.1 将来流況の予測手法	78
5.3.2 ダム堆砂進行の予測手法.....	79
5.4 気候変動がダム機能に及ぼす影響の指標化	80
5.4.1 ダムの気候変動影響に関する指標	80
5.4.2 ダムの現有機能に関する指標	81
5.5 ダム地点における気候変動影響	85
5.5.1 ダム地点流況に対する気候変動影響	85
5.5.2 ダムの治水・利水機能に対する気候変動影響.....	89
5.5.3 ダム堆砂進行に対する気候変動影響	92
5.6 気候変動による影響を受けるダムの類型化	93
5.6.1 気候変動影響に着目したダム類型	93
5.6.2 治水機能への影響に着目したダム類型化	94
5.6.3 利水機能への影響に着目したダム類型化	97
5.6.4 治水機能及び利水機能への影響に着目したダム類型化	100
5.7 結語	104
参考文献.....	105
6. 気候変動と堆砂進行がダムの利水機能に与える影響の緩和手法の検討	106
6.1 概説	106
6.2 検討方法.....	106
6.3 ダムの弾力的管理による影響緩和に関する検討	107
6.3.1 対策案の設定	107
6.3.2 検討対象ダムの概要	107
6.3.3 将来流況の予測手法	107
6.3.4 検討ケース	108
6.3.5 評価方法	109
6.3.6 検討結果	109
6.3.7 検討結果を踏まえたダムの類型化指標の設定（ダムの再類型化）	120
6.4 ダムの利水機能維持に資する導水貯留の検討	127
6.4.1 対策案の設定	127
6.4.2 検討対象ダム群の概要	128
6.4.3 将来流況の予測手法	129
6.4.4 検討ケース及び対策規模の設定	130

6.4.5 対策案の効果検討.....	131
6.4.6 他の対策案との有効性比較.....	137
6.5 利水需要の調整効果に関する検討.....	141
6.5.1 検討対象ダムの概要.....	141
6.5.2 将来流況の予測手法.....	141
6.5.3 利水需要変化の想定.....	141
6.5.4 検討ケース.....	142
6.5.5 評価方法.....	142
6.5.6 検討結果.....	143
6.6 結語.....	156
参考文献.....	158
7. 結論.....	159
謝 辞.....	165

【図目次】

図 1.1	MRI-AGCM3.2S (RCP8.5 scenario) による現在気候 (1979-2003) に対する 将来気候 (2075-2099) の年間降水量比 (左図) と年間総流量比 (右図) ³⁾	1
図 1.2	将来気候の予測 (無降水日数の変化, 最深積雪の変化) ⁴⁾	2
図 1.3	ダムの利水容量の推移 (筆者ら作成)	2
図 1.4	気候変動下の事前放流が貯水池内堆砂形状に与える影響 ⁷⁾	3
図 1.5	全国を対象としたム利水容量と人口あたりダム利水容量 (筆者ら作成)	3
図 1.6	ダム利水容量と人口あたりダム利水容量 (筆者ら作成)	4
図 1.7	世界の水需要予測 (地域別) : 基本シナリオ, 2000-2050 年 ⁹⁾	4
図 1.8	ダム再生の発展・加速に向けた方策 ¹⁰⁾	5
図 1.9	気候変動による水資源への影響 ¹¹⁾	6
図 1.10	水資源管理にかかる気候変動リスクへの適応策 ¹²⁾	6
図 1.11	本研究のフロー	10
図 2.1	温暖化による年間需要量の変化 (左図) 及び一日最大需要量の変化 (右図) ¹⁾	12
図 2.2	日本全体におけるセクター別用水量の推計結果 (左: パターン①, 中: 最大, 右: 最小) ²⁾	13
図 2.3	都道府県別における水需給ギャップの推計結果 ²⁾	13
図 2.4	月流量の変化 (左上: 現在気候実験に対する近未来気候実験の変化比率, 右下: 現在気候実験に対する 21 世紀末気候実験の変化比率) ³⁾	14
図 2.5	日本列島全域の 10 年確率渇水流量の変化 ³⁾	14
図 2.6	現在気候に対する各気候の土砂生産量の増加率 ⁵⁾	15
図 2.7	M ダムの将来の堆砂進行予測結果 ⁶⁾	15
図 2.8	地球温暖化の水資源システムへの影響 ⁷⁾	16
図 2.9	吉野川流域早明浦ダム貯水量の年間推移 (左図: 現在気候(1979~2003 年), 右図: 将来気候(2075~2099 年)) ^{10) 11)}	17
図 2.10	最上川流域白川ダム貯水量の年間推移 (左図: 現在気候(1979~2003 年), 右図: 将来気候(2075~2099 年)) ^{10) 11)}	17
図 2.11	現在気候と将来気候における有効貯水量と渇水被害総額の関係 ¹²⁾	18
図 2.12	気候変動適応策としてのダム堆砂対策 ¹⁴⁾ (原典: Climate Change Analysis for Supply of Water (Morris 2017 ¹³⁾))	18
図 2.13	発電運用に影響を及ぼす要因 ¹⁵⁾	19
図 2.14	有効放流量と 99%信頼区間の流入量の変動係数の関係 (流れ込み式, キャリーオーバー貯水池を対象した図) ¹⁸⁾	20
図 2.15	確率確保容量曲線 (左図: 現在気候実験期間, 右図: 21 世紀末気候実験期間) ^{26) 27)}	21
図 2.16	各適応策実施時における年渇水被害値の分布 ^{26) 27)}	21
図 3.1	3 章の検討フロー	27
図 3.2	利水機能評価における将来流況の予測手法.....	29
図 3.3	将来堆砂量の予測手法.....	30

図 3.4	将来の貯水池内堆砂形状の予測手法	31
図 3.5	A ダム地点日平均流入量時系列	31
図 3.6	B ダム地点日平均流入量時系列	31
図 3.7	将来における堆砂率 (A ダム)	32
図 3.8	将来における堆砂率 (B ダム)	32
図 3.9	A ダムパンク日数	35
図 3.10	B ダムパンク日数	35
図 3.11	A ダム利水被害度	35
図 3.12	B ダム利水被害度	35
図 3.13	A ダム貯水位変動曲線 (堆砂率 0%条件)	36
図 3.14	A ダム貯水位変動曲線 (堆砂率 30%条件)	36
図 3.15	B ダム貯水位変動曲線 (堆砂率 0%条件)	36
図 3.16	B ダム貯水位変動曲線 (堆砂率 30%条件)	36
図 3.17	A ダム利水計算 現在流況【計画容量】	37
図 3.18	A ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 10%】	37
図 3.19	A ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 20%】	38
図 3.20	A ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 30%】	38
図 3.21	A ダム利水計算 将来流況【計画容量】	39
図 3.22	A ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 10%】	39
図 3.23	A ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 20%】	40
図 3.24	A ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 30%】	40
図 3.25	B ダム利水計算 現在流況【計画容量】	41
図 3.26	B ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 10%】	41
図 3.27	B ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 20%】	42
図 3.28	B ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 30%】	42
図 3.29	B ダム利水計算 将来流況【計画容量】	43
図 3.30	B ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 10%】	43
図 3.31	B ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 20%】	44
図 3.32	B ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 30%】	44
図 3.33	検討対象ダム群の概要	46
図 3.34	実績流況及び補正前後の計算流況 (上図 : a ダム, 下図 : c ダム)	48
図 3.35	補正後の計算流況 (上図 : a ダム, 下図 : c ダム)	48
図 3.36	補正後の計算流況による流況曲線 (a ダム)	49
図 3.37	補正後の計算流況による流況曲線 (c ダム)	49
図 3.38	補正後の計算流況より求めた年間総流入量	49
図 3.39	補正後の計算流況より求めた洪水期 (6/1~9/30) における総流入量	49
図 3.40	実績流況及び補正前後の計算流況 (a ダム)	50
図 3.41	実績流況及び補正前後の計算流況 (c ダム)	51
図 3.42	補正後の計算流況 (1950~1979 年)	52

図 3.43	補正後の計算流況（1980～2009年）	53
図 3.44	補正後の計算流況（2010～2039年）	54
図 3.45	補正後の計算流況（2040～2069年）	55
図 3.46	補正後の計算流況（2070～2099年）	56
図 3.47	気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の利水機能への影響評価結果 ...	58
図 3.48	気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の利水機能への影響評価結果 ...	59
図 3.49	気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の利水機能への影響評価結果 ...	60
図 3.50	気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の無効放流量（2000年～2049年）	61
図 3.51	気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の無効放流量（2050年～2099年）	62
図 4.1	4章の検討フロー	66
図 4.2	利水機能評価における将来流況の予測手法（再掲）	68
図 4.3	気候変動に伴う流況変化に関わる指標の概要（n=185の例）	69
図 4.4	個別ダムによる流況変化指標の検証（手法1（全期間））	71
図 4.5	個別ダムによる流況変化指標の検証（手法2（1～9月））	72
図 4.6	個別ダムによる流況変化指標の検証（手法3（4～9月））	73
図 4.7	個別ダムによる堆砂進行に伴う容量損失に関わる指標の検証	75
図 5.1	5章の検討フロー	77
図 5.2	利水機能評価における将来流況の予測手法（再掲）	78
図 5.3	ダム堆砂進行の予測手法（再掲）	79
図 5.4	現在気候及び将来気候における利水補給の概念図	81
図 5.5	ダム貯水池の弾力的管理の概念図	83
図 5.6	治水・利水利用の観点からの弾力的管理の実施可能性指標（概念図）	84
図 5.7	気候変動係数（半旬）の時系列（1）	86
図 5.8	気候変動係数（半旬）の時系列（2）	87
図 5.9	気候変動係数（半旬）の時系列（3）	88
図 5.10	治水機能変化指数と年間総流量比からの分類	89
図 5.11	利水機能変化指数と年間総流量比からの分類	90
図 5.12	治水機能変化指標と利水機能変化指標からの分類	91
図 5.13	現在及び将来の相当治水雨量	92
図 5.14	現在及び将来の有効容量内堆砂率	92
図 5.15	治水機能への影響に着目したダムの類型化①	95
図 5.16	治水機能への影響に着目したダムの類型化②	95
図 5.17	ダムの治水機能への影響に着目した類型マップ	96
図 5.18	利水機能への影響に着目したダムの類型化①	98
図 5.19	利水機能への影響に着目したダムの類型化②	98
図 5.20	ダムの利水機能への影響に着目した類型マップ	99
図 5.21	ダムの治水・利水類型に応じた類型化マトリクス	100

図 5.22	ダムの治水機能及び利水機能への影響に着目した類型マップ	101
図 6.1	6章の検討フロー	106
図 6.2	利水機能評価における将来流況の予測手法（再掲）	108
図 6.3	利水適応策を実施した場合の利水計算結果（A ダムの結果）	110
図 6.4	利水適応策を実施した場合の利水計算結果（B ダムの結果）	111
図 6.5	A ダム検討結果(ケース 0 の貯水変動曲線)	112
図 6.6	A ダム検討結果(ケース 1 の貯水変動曲線)	112
図 6.7	A ダム検討結果(ケース 2-1 の貯水変動曲線)	113
図 6.8	A ダム検討結果(ケース 2-2 の貯水変動曲線)	113
図 6.9	A ダム検討結果(ケース 2-3 の貯水変動曲線)	113
図 6.10	A ダム検討結果(ケース 3-1 の貯水変動曲線)	114
図 6.11	A ダム検討結果(ケース 3-2 の貯水変動曲線)	114
図 6.12	A ダム検討結果(ケース 3-3 の貯水変動曲線)	114
図 6.13	A ダム検討結果(ケース 4-1 の貯水変動曲線)	115
図 6.14	A ダム検討結果(ケース 4-2 の貯水変動曲線)	115
図 6.15	A ダム検討結果(ケース 4-3 の貯水変動曲線)	115
図 6.16	B ダム検討結果(ケース 0 の貯水変動曲線)	116
図 6.17	B ダム検討結果(ケース 1 の貯水変動曲線)	116
図 6.18	B ダム検討結果(ケース 2-1 の貯水変動曲線)	117
図 6.19	B ダム検討結果(ケース 2-2 の貯水変動曲線)	117
図 6.20	B ダム検討結果(ケース 2-3 の貯水変動曲線)	117
図 6.21	B ダム検討結果(ケース 3-1 の貯水変動曲線)	118
図 6.22	B ダム検討結果(ケース 3-2 の貯水変動曲線)	118
図 6.23	B ダム検討結果(ケース 3-3 の貯水変動曲線)	118
図 6.24	B ダム検討結果(ケース 4-1 の貯水変動曲線)	119
図 6.25	B ダム検討結果(ケース 4-2 の貯水変動曲線)	119
図 6.26	B ダム検討結果(ケース 4-3 の貯水変動曲線)	119
図 6.27	将来気候条件における貯水位上昇量とパンク日数の関係（A ダム）	120
図 6.28	将来気候条件における貯水位上昇量とパンク日数の関係（B ダム）	120
図 6.29	$Q_{sup(n=185)}$ 及び $Q'_{sup(n=185)}$ の概念図	121
図 6.30	利水上対策実施すべき容量の指標の概念図	122
図 6.31	気候変動及び貯水池内堆砂進行により利水機能に影響がもたらされる ダムの類型 の再検討結果	123
図 6.32	利水上対策実施すべき容量の指標の概念図	124
図 6.33	気候変動及び貯水池内堆砂進行により利水機能に影響がもたらされる ダムの類型 の再検討結果（治水影響を考慮した結果）	126
図 6.34	対策案（河道外貯留）の概要	127
図 6.35	検討対象ダム群の概要	128
図 6.36	対策案の概要（e ダム嵩上げ規模）	130

図 6.37	対策案（河道外貯留）の効果（K ダム群パンク日数）	131
図 6.38	対策案（河道外貯留）の効果（下流基準頭首工での不足量）	131
図 6.39	対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線①（新規確保容量：3,000 万 m ³ ）	133
図 6.40	対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線②（新規確保容量：3,000 万 m ³ ）	133
図 6.41	対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線（新規確保容量：1,000 万 m ³ のケース）	134
図 6.42	対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線（新規確保容量：2,000 万 m ³ のケース）	135
図 6.43	対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線（新規確保容量：3,000 万 m ³ のケース）	136
図 6.44	対策案の概要（嵩上げイメージ）（左図：e ダム，右図：a ダム）	137
図 6.45	ダムの利水機能回復のためのハード対策の選定フロー	139
図 6.46	河道外貯留施設整備（トンネル延長）と浚渫費用の関係図	140
図 6.47	既設ダムの嵩上げを伴う河道外貯留のメリット	140
図 6.48	利水需要調整の概念図	142
図 6.49	利水需要調整効果（K ダム群パンク日数__case1-1,case1-2,case1-3 の結果）	145
図 6.50	利水需要調整効果(K ダム群パンク日数__case1-1,case1-2,case2-1,case2-2 の結果)	145
図 6.51	利水需要調整効果(K ダム群パンク日数__case1-1,case1-2,case2-3,case2-4 の結果)	145
図 6.52	利水需要調整効果(K ダム群パンク日数__case1-1,case1-2,case2-5,case2-6 の結果)	145
図 6.53	利水需要調整効果（K ダム群パンク日数__case1-1,case1-2,case3 の結果）	145
図 6.54	温暖化影響検討ケースによる貯水量変動曲線(1)（case1-1,case1-2,case1-3 の結果）	146
図 6.55	適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(2)（case1-1,case1-2,case2-1 の結果）	147
図 6.56	適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(3)（case1-1,case1-2,case2-2 の結果）	148
図 6.57	適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(4)（case1-1,case1-2,case2-3 の結果）	149
図 6.58	適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(5)（case1-1,case1-2,case2-4 の結果）	150
図 6.59	適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(6)（case1-1,case1-2,case2-5 の結果）	151
図 6.60	適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(7)（case1-1,case1-2,case2-6 の結果）	152

図 6.61	社会減影響検討ケースによる貯水量変動曲線(8) (case1-1,case1-2,case3 の結果)	153
図 6.62	かんがい期における 4 ダム合計制限容量 (平均値) とパンク日数の関係	154
図 6.63	かんがい期における上流 2 ダム合計流入量 (平均値) とパンク日数の関係	154
図 6.64	かんがい期における上流 2 ダム合計流入量 (平均値) の各年値	155
図 7.1	気候変動及び堆砂進行による多目的ダムの利水機能変化への影響と対応策	161
図 7.2	本研究で設定した評価指標を用いた長期的利水機能評価案 (上図: A ダム, 下図: B ダム)	163
図 7.3	気候変動下においてダムの利水機能低下への備えから各主体が実施すべき事項	164

【表目次】

表 1.1	既設ダムの有効活用の事例 ¹³⁾	7
表 2.1	既往検討を踏まえた本研究における課題設定	23
表 3.1	検討対象ダムの諸元.....	28
表 3.2	検討ケース	33
表 3.3	取水制限率の設定概要.....	33
表 3.4	ダムの利水機能への影響分析結果 (A ダム)	34
表 3.5	ダムの利水機能への影響分析結果 (B ダム)	34
表 3.6	検討対象ダム群の諸元.....	46
表 4.1	検討対象ダムの概要.....	67
表 4.2	取水制限率の設定概要.....	68
表 4.3	各ダムの利水計算結果及び流況変化指標.....	70
表 5.1	近年の主な豪雨災害による最大 24 時間降水量	82
表 5.2	2019 年台風 19 号豪雨における主な事前放流実施ダムの貯水位低下量	84
表 5.3	治水機能変化指数と年間総流量比からの分類 (該当ダム数)	89
表 5.4	利水機能変化指数と年間総流量比からの分類 (該当ダム数)	90
表 5.5	治水機能変化指標と利水機能変化指標からの分類 (該当ダム数)	91
表 5.6	気候変動影響に着目したダム類型と類型化指標.....	93
表 5.7	治水機能への影響に着目したダムの類型化 (該当ダム数)	94
表 5.8	利水機能への影響に着目したダムの類型化 (該当ダム数)	97
表 5.9	ダムの治水機能及び利水機能への気候変動影響に着目したダムの類型化.....	100
表 5.10	ダムの類型化に関わる各種指標の算出値 (1)	102
表 5.11	ダムの類型化に関わる各種指標の算出値 (2)	103
表 6.1	検討対象ダムの諸元.....	107
表 6.2	検討ケース一覧.....	108
表 6.3	取水制限率の設定概要.....	109
表 6.4	利水適応策を実施した場合の利水計算結果の概要 (A ダム)	110
表 6.5	利水適応策を実施した場合の利水計算結果の概要 (B ダム)	111
表 6.6	気候変動及び貯水池内堆砂進行により利水機能に影響がもたらされる ダムの類型 の再検討結果	123
表 6.7	気候変動及び貯水池内堆砂進行により利水機能に影響がもたらされる ダムの類型 の再検討結果 (治水影響を考慮した結果)	126
表 6.8	b ダム～e ダム間の導水, e ダム～K ダム群水系間の補給ルール	127
表 6.9	検討対象ダム群の諸元.....	129
表 6.10	検討ケース	130
表 6.11	対策案 (河道外貯留) の効果.....	132
表 6.12	各対策案及び検討結果 (対策費用 [単位: 億円])	138
表 6.13	各対策費用の内訳 [単位: 億円]	139
表 6.14	利水需要の将来予測.....	141

表 6.15 検討ケース一覧.....	142
---------------------	-----

1. 序論

1.1 気候変動による利水への影響

気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書 (IPCC/AR5) では、過去 100 年程度の間に関測された気候変動について、CO₂ 濃度の上昇、大気と海洋の温度上昇、海面水位の上昇、雪水の減少などの明瞭な傾向に基づき「気候システムの温暖化には疑う余地がない」と結論している¹⁾。

このような背景から、国内においても気候変動対策が進みつつあり、気候変動の影響による被害を最小化あるいは回避し、持続可能な社会を構築するために、気候変動研究の更なる推進とその成果の社会実装に取り組むべく、気候モデルの開発・発展、具体的な地域での適応策計画に気候モデルの知見を反映する研究が進められている²⁾。

Sato³⁾は、気象庁気象研究所の超高解像度大気モデル MRI-AGCM3.2S により計算された現在気候実験 (1979~2003 年) と 21 世紀末気候実験 (2075~2099 年) の気候推計情報から、全国の降水量比と年間総流量比を求めており (図 1.1)、これによると、北海道を除く各地域で将来気候における年間降水量及び年間総流量は減少する予測結果が得られており、今後の利水 (生活用水、農業用水、工業用水、発電用水等) への影響が懸念される。

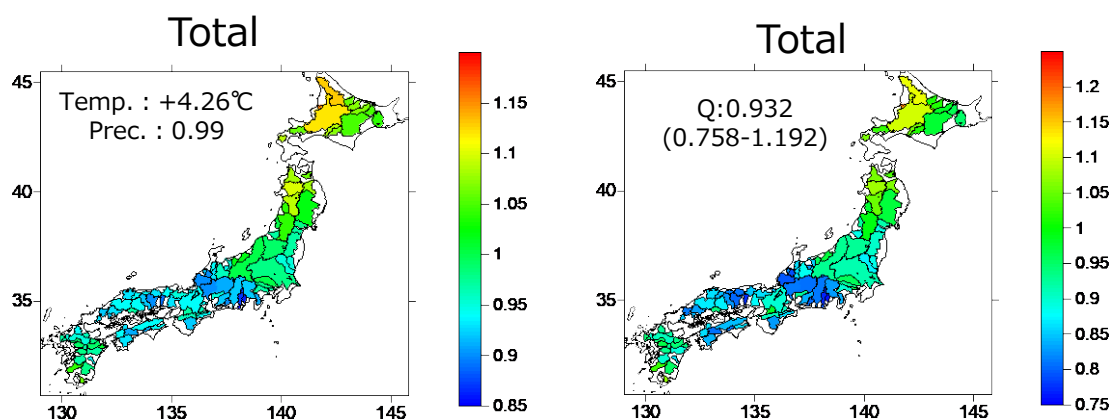
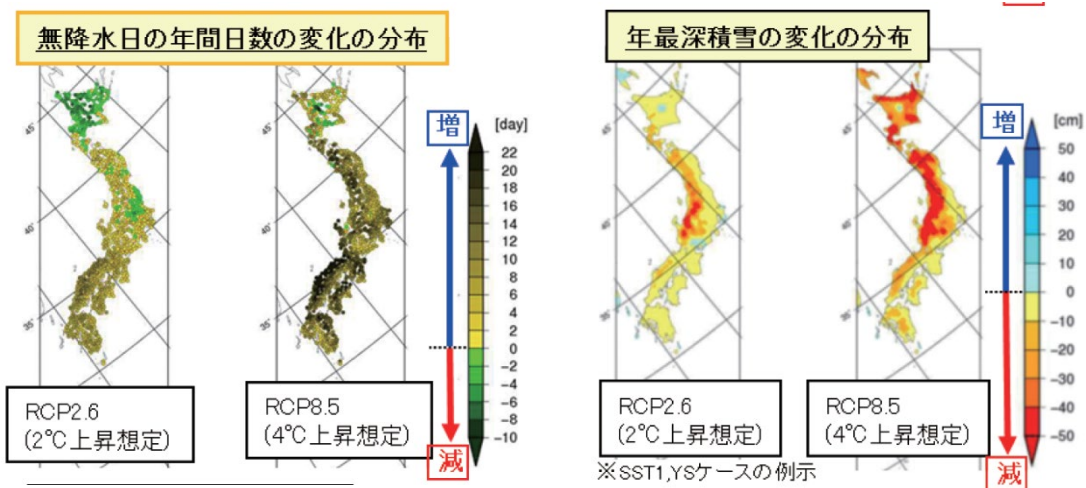


図 1.1 MRI-AGCM3.2S (RCP8.5 scenario) による現在気候 (1979-2003) に対する将来気候 (2075-2099) の年間降水量比 (左図) と年間総流量比 (右図)³⁾

また、地球温暖化などの気候変動により、年間無降水日数の増加や年間最深積雪の減少も予測されており、これにより、河川への流出量が減少し、下流において必要な流量が確保しにくくなることが想定されている。さらに、河川の源流域において積雪量が減少することで、融雪期に生じる最大流量が減少するとともに、気温の上昇に伴い流出量のピークが現在より早まり、春先の農業用水の需要期における河川流量が減少する可能性がある等、将来の渇水リスクが高まることが懸念されている⁴⁾ (図 1.2)。

以上から、極端な降雨減少による洪水被害に多くの関心が払われているが、今後の気候変動を鑑みると、長期間の給水制限が実施されるような渇水被害にも注意を向けるべきと考えられる。



- (注) 1. 1984 ~ 2004 年平均に対する 2080 ~ 2100 年平均の差。
 2. 気候モデルにおける日降水量が 1.0mm 未満の日を「無降水日」と定義している。
 3. SST 1 : 海面水温の将来変化の空間パターン, YS : 全球気候モデルにおける積雲対流スキーム

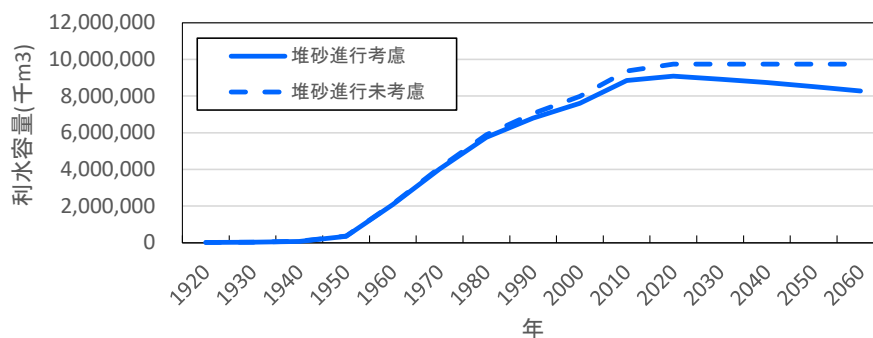
図 1.2 将来気候の予測（無降水日数の変化，最深積雪の変化）⁴⁾

1.2 貯水池内堆砂進行の現状と今後の課題

戦後の社会経済の発展の中で、特に高度経済成長期における水需給の逼迫等を契機とし、水資源開発が行われ、渇水被害の軽減が図られてきた。令和 2 年 3 月末までに、国土交通省、独立行政法人水資源機構及び都道府県により全国で 570 のダムが整備されており、国民の生命・財産を守り持続的な経済発展に寄与するなど、その果たしている役割は大きい⁴⁾。

将来の気候変動影響への適応策の一つとして、ダムの役割が期待される⁵⁾が、ダムが長期的に機能を発揮する上での最重要課題は、貯水池内の土砂堆積問題といわれている。

利水容量を有する国内の 1187 基のダムの利水容量の推移（将来については、堆砂進行による容量損失を考慮）を整理すると、図 1.3 のとおりとなり、現状以上の堆砂対策を実施しない場合には、現在（2020 年代）の利水容量をピークとして、利水容量の減少が想定される。



注 1) 対象ダムは国内の利水容量を有する 1187 基のダムとし、洪水期の利水容量から作成

注 2) ダム竣工後の利水容量内堆砂速度は、国土交通省・(独)水資源機構管理の 104 基のダムの堆砂進行速度の平均値をもとに、外挿計算により算出

図 1.3 ダムの利水容量の推移（筆者ら作成）

他方で、気候変動の影響下において、ダム容量の有効活用方策の一つとして、洪水発生が予測される場合に利水容量等を放流して治水容量として一時的に活用する事前放流が注目を浴びている⁶⁾。事前放流は従前の洪水時の貯水位（以下、迎洪水位）よりも貯水位を低下させて洪水調節容量を確保する操作であるため、これに伴う貯水池内土砂移動の発生が想定される。

筆者ら⁷⁾は、モデルダムに対して事前放流の実施を考慮した河床変動計算を行い、事前放流が貯水池内土砂移動に与える影響に関する検討を実施している。この結果、ある種のダムでは、事前放流により貯水池内土砂がダム直上流の底部標高付近まで移動し、これにより、利水容量内の堆砂進行が早まる可能性を確認している。

これに加え、今後、気候変動に伴う流況変化による流入土砂量の増加、さらにダム堆砂進行による有効貯水量の減少によるダムの治水・利水機能の低下が懸念される。

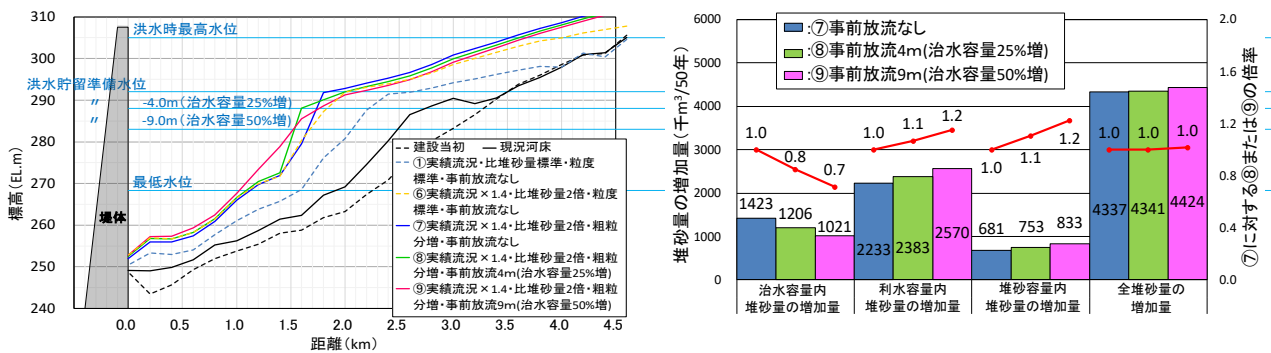


図 1.4 気候変動下の事前放流が貯水池内堆砂形状に与える影響⁷⁾

1.3 将来の利水需要変化に関わる現状認識

国内的には将来の人口減少の可能性が指摘されているものの、前述のとおり、ダム貯水池内堆砂進行が進展するものと考えられる。堆砂進行を考慮した人口あたりダム利水容量を整理すると、図 1.5 に示すとおりであり、全国的にみると、将来人口の減少に伴い、人口あたりダム利水容量は増加することが想定されるものの、関東では、人口あたりダム利水容量は、やや減少に転じる可能性がある（沖縄も同様の結果となる）。ただし、気候変動による「河川流量変化」及び「河川流況変化」も予想されることから、ダムに求められる利水容量はより増大することも考えられる。

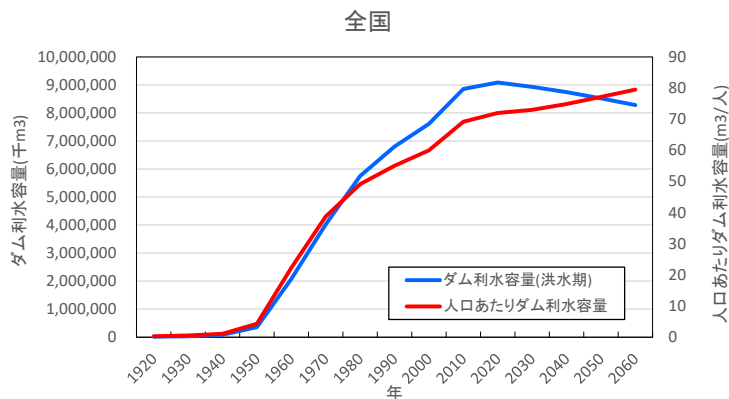
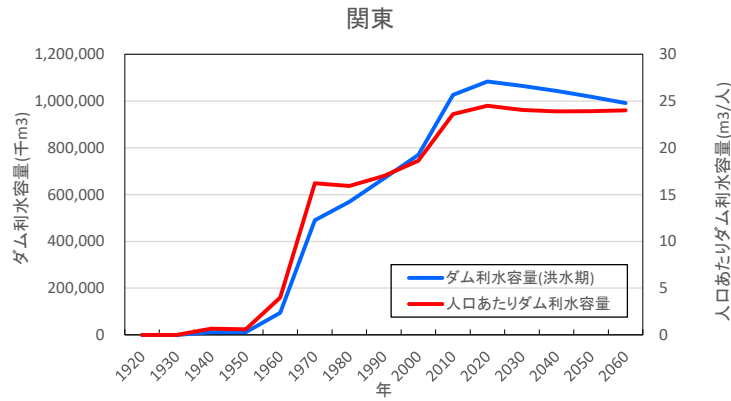


図 1.5 全国を対象としたム利水容量と人口あたりダム利水容量（筆者ら作成）



注) 図 1.5, 図 1.6 とともに, 将来人口は国立環境研究所 日本版 SSP 開発チーム 日本版 SSP (shared socio-economic pathways) の日本 SSP5⁹⁾によった. その他の条件は図 1.3 と同様.

図 1.6 ダム利水容量と人口あたりダム利水容量 (筆者ら作成)

加えて, 世界的には将来の人口増加が予想されており, 世界の水需要は, 製造業, 火力発電, 生活用水などに起因する需要増により, 2050 年までに 55%程度の増加が見込まれている⁹⁾. このことから, 食糧の多くを輸入に依存する我が国では, 食糧自給率の維持向上, さらには食糧の戦略的な輸出戦略などの観点から, かんがい水の重要性の増大, このような観点を踏まえたダム運用検討が今後重要になることも考えられる.

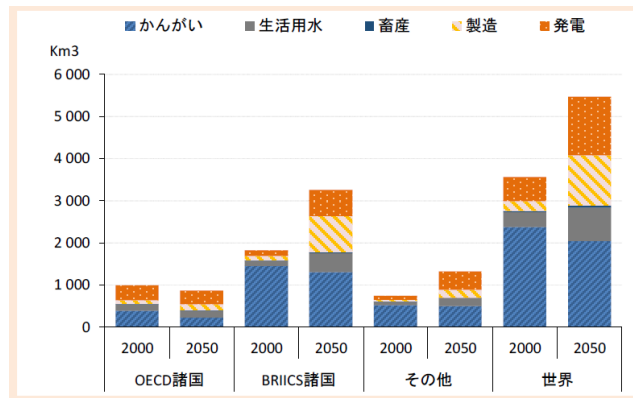


図 1.7 世界の水需要予測 (地域別): 基本シナリオ, 2000-2050 年⁹⁾

1.4 ダム再生ビジョンを踏まえた今後の課題

頻発する洪水・渇水の被害軽減や再生可能エネルギー導入に向けた既設ダムの有効活用の方策を示す「ダム再生ビジョン」¹⁰⁾が 2017 年に国土交通省から示された. 当該ビジョンでは, ダムの長寿命化, 施設能力の最大発揮のための柔軟で信頼性のある運用, 高機能化のための施設改良などの既設ダムの有効活用を加速するための方策がとりまとめられている (図 1.8). こうした背景のもと, 対策必要性の高いダムのスクリーニングが始まっているものの, 治水対策を中心とした対策検討が行われているのが現状であり, 今後は, これを利水対策にも進めていく必要性が考えられる.



図 1.8 ダム再生の発展・加速に向けた方策¹⁰⁾

1.5 本論文の適用範囲

温暖化による気温上昇、水温上昇、海面上昇等は、濁水の発生、水質の悪化、河川流出量の減少、融雪の流出時期の早まりなどの影響を及ぼすものと予想される。この結果、水管理に関して、図 1.9 に示すような諸変化が生じるものと考えられる。国民の社会生活を維持し、良質な水資源を常に確保するためには、これらの影響が顕在化する前に的確に把握し、適切に対処することが求められる。本論文では、利水に着目し、まず、供給面での変化についての検討を実施する。

また、上記で示した水資源管理に関わる気候変動リスクへの対応としては、図 1.10 に示す対策が考えられる。近年における財政状況等の社会情勢、気候変動の影響の顕在化を踏まえると、表 1.1 に示すソフト・ハード対策の両面から既設ダムを有効活用することの重要性が高まっているものと考えられる。このため、本論文では、水利用の合理化、既存ストックの活用による供給、管理面における順応的対応に関わる検討についても実施する。

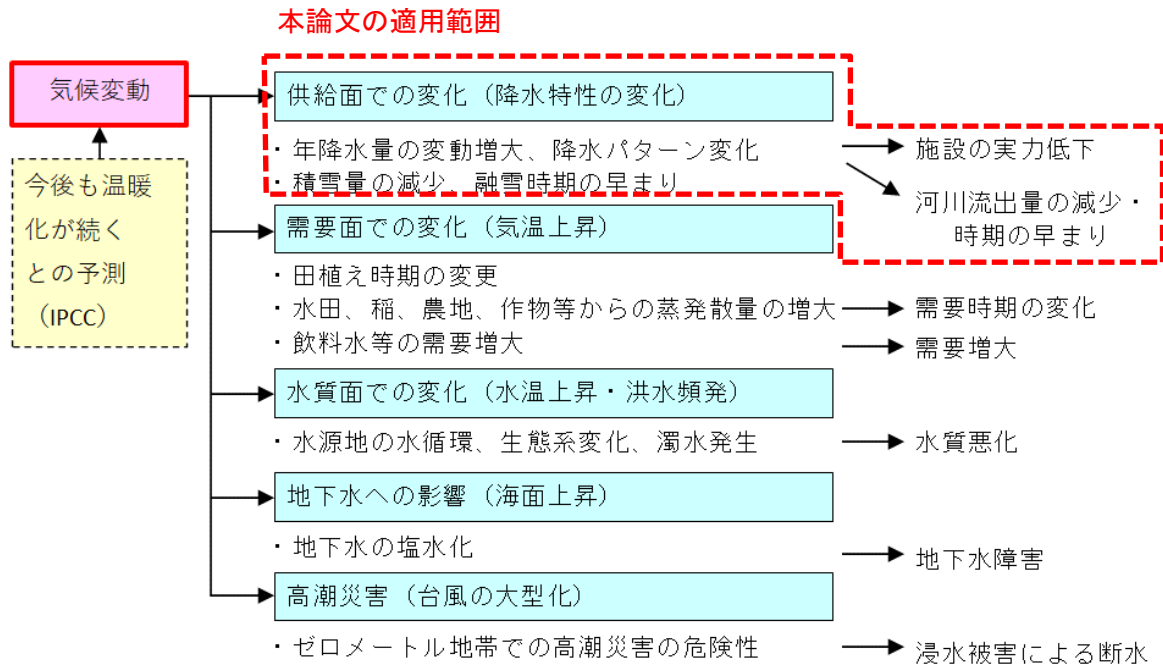


図 1.9 気候変動による水資源への影響¹¹⁾

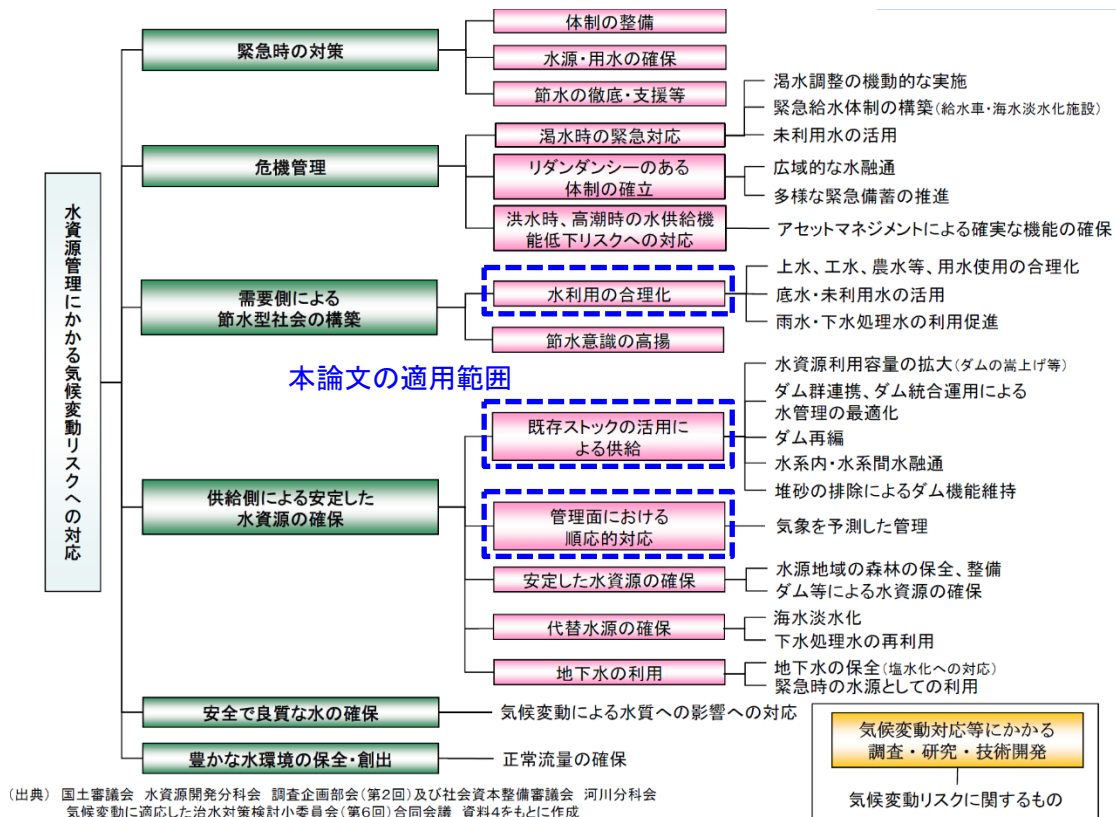
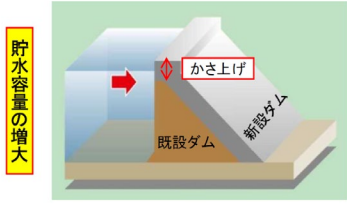
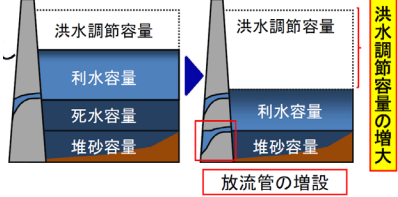
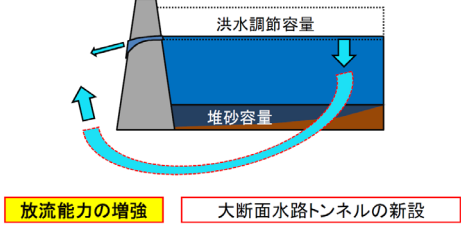
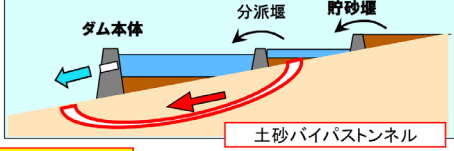
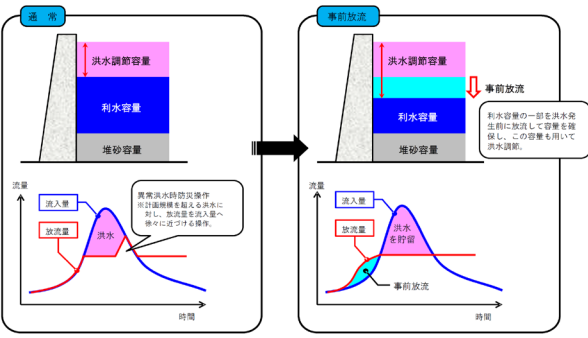
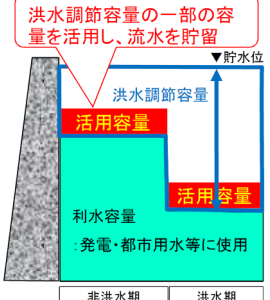


図 1.10 水資源管理にかかると気候変動リスクへの適応策¹²⁾

表 1.1 既設ダムの有効活用の事例¹³⁾

対策種別	対策概要	イメージ図
ダムの ハード対策	既存ダムの嵩上げによる貯水容量の拡大	
	放流管の設置によって死水容量を減らすことによる有効貯水容量の増大	
	放流管やトンネル式洪水吐きの設置による洪水時の放流能力の増大	
	分派堰及び土砂バイパストンネルの設置による排砂施設の新設	
ダムの ソフト対策	降雨予測等により水位の回復可能な範囲で、洪水の発生前に利水容量の一部を放流（事前放流）し、洪水調節容量を計画規模以上に確保	
	洪水調節に支障を及ぼさない範囲で、洪水調節容量の一部に流水を貯留し、これを活用することによりダム下流の河川環境等を保全（弾力的管理）	

1.6 本論文の目的と構成

以上を踏まえると、今後、気候変動に伴う流況変化、ダム堆砂進行に伴う貯水池容量の減少が予想される。このことから、これらの複合影響による将来のダムの利水機能変化を全国ベースで評価するための予測手法を構築すること、さらに、ダムの利水機能を維持するための、利水対策特有の適応策の立案が求められているといえる。本研究は上記を踏まえ、以下の検討を実施した。

第2章では、気候変動が水需給・貯水池内堆砂進行に与える影響に関わる既往研究、ダムの利水機能評価に関わる既往研究、ダムの利水機能変化の評価方法・適応策に関わる既往研究について整理を行った上で、現状の研究課題の抽出を行った。この結果、ダムの利水機能を全国ベースで評価するためには、国内の多目的ダムの評価に適用可能な指標設定が重要であること、ダムの施設改造を伴う合理的対策の立案が必要であることを把握した。

第3章では、個別ダム、及び複数ダムからなる多目的ダム群を検討対象に気候変動に伴う流況変動やダム堆砂進行の複合影響を考慮した利水機能変化に関する詳細検討を行い、洪水期（水位低下操作の実施時期）においてダムの利水機能が低下することを明らかにするとともに、将来気候では、連続する複数年における洪水期において、ダムの利水機能低下が発生する可能性があることを確認した。また、将来、非洪水期における無効放流（融雪出水時期の早期化による無効放流）が相対的に増大することを明らかにし、これを有効に捕捉可能な利水機能向上策の立案が重要であることを示した。

第4章では、第3章の結果を受けて、気候変動下において、利水対策の必要性の高いダムをスクリーニングするため、国内のどの程度のダムで利水機能の低下が生じるか把握することが重要であるとの認識に立ち、ダムの利水機能低下を定量評価可能な指標の提案を行うとともに、当該評価指標の妥当性検討を行った。この結果、現在気候の185日流況に着目し、評価期間をかんがい期とする流況変化に関わる指標がダムの利水機能低下を説明し得る指標であることを示した。

第5章では、第3章、第4章の検討結果をもとに、将来、国内のどの程度のダムで利水機能の変化が生じるかの予測を試みるためにダムの類型化を実施した。また、多目的ダムの利水機能の維持・向上を図る上では、ダムの治水・利水容量の最適配分が行われることが重要であるとの認識に立ち、将来におけるダムの治水・利水機能の変化に関わる類型化についても実施した。この結果、将来における流況変化及び貯水池内堆砂進行に伴い、国内の多くのダムにおいて、適応策としてのダムの弾力的管理のみではダム機能の維持が困難であることを明らかにした。

第6章では、第5章の結果を受けて、気候変動下において、利水需要者及び供給者（利水ダム）の適応策が求められるとの認識に立ち、ソフト・ハード対策両面から当該手法に関する検討を実施した。この結果、異なる水系のダムに小規模な導水施設を用いて貯留を行う河道外貯留が無効放流の合理的補足に資する対策であり、利水被害軽減に有効であることを示した。また、利水需要を前進または平準化することが利水被害軽減に有効な方策であることを明らかにした。さらに、対策検討の結果から、第4章で定義したダムの利水機能低下に関する定量的評価指標の再設定を行うとともに、ダム類型の再定義を行った。これにより、弾力的管理によって利水機能低下の緩和が可能と想定されるダム、弾力的管理では利水機能低下の緩和が難しく施設増強が必要と想定されるダムの割合と地域特性を明らかにした。

第7章では、本研究の主要な結論をとりまとめるとともに、気候変動下においてダム水利機能低下への備えの観点から、水利供給者（ダム管理者）、水利需要者（かんがい需要者）、研究者が今後実施すべき取り組みの提言を行った。

上記について研究フローを整理すると、次頁に示すとおりとなる。研究方法の骨子は、個別ダムを対象としたケーススタディに基づく評価指標の設定〔ミクロの視点からの検討〕（第3章の内容）、設定した評価指標を用いた全国ベースでの水利機能変化の割合・傾向の把握〔マクロの視点からの検討〕（第5章の内容）、個別ダムを対象としたケーススタディに基づく水利機能向上策の立案〔ミクロの視点からの検討〕（第6章の内容）からなるものである。

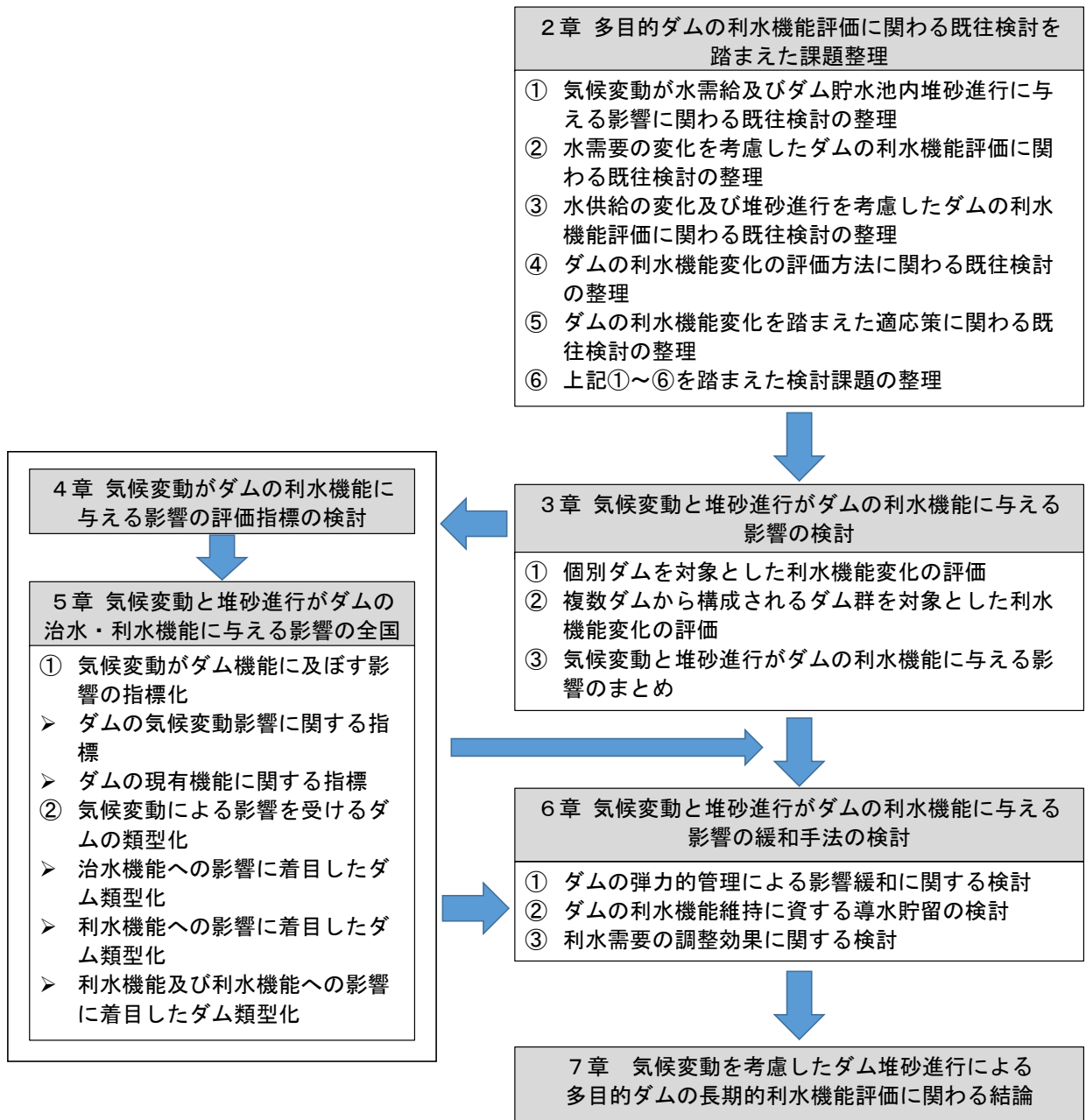


図 1.11 本研究のフロー

参考文献

- 1) 国立環境研究所 地球環境研究センター：IPCC 第 5 次評価報告書のポイントを読む-執筆に参加した国立環境研究所研究者が解説-, 2015.
- 2) 例えば, 文部科学省 統合的気候モデル高度化研究プログラム
- 3) Yoshinobu Sato: Climate change impact on river discharge in Japan using a MRI-AGCM3.2S, Proceedings of 20th Congress of the Asia Pacific Division of the International Association for Hydro Environment Engineering & Research (IAHR-APD 2016), 8 pages (USB), 2016.
- 4) 内閣官房水循環政策本部事務局：令和元年度 水循環施策（水循環白書），2020.
- 5) 土木学会地球温暖化特別委員会：地球温暖化に挑む土木工学，土木学会地球温暖化対策特別委員会報告書，2009.
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局：事前放流ガイドライン，2020.
- 7) 小島裕之，永谷言，久保裕基，孫夢霞，川村育男，角哲也：気候変動下における事前放流が貯水池内堆砂進行特性に与える影響，水工学論文集 65， I_853-858，2020.
- 8) <https://adaptation-platform.nies.go.jp/socioeconomic/population.html>
- 9) 国土交通省 水管理・国土保全局水資源部：令和 2 年版日本の水資源の現況，2021.
- 10) 国土交通省水管理・国土保全局：ダム再生ビジョン，2017.
- 11) 国土審議会水資源開発分科会調査企画部会：第 5 回配布資料，2008 年 8 月 1 日に一部加筆
- 12) 国土審議会水資源開発分科会調査企画部会：今後の水資源政策のあり方について 中間とりまとめ，2014 年 4 月 11 日に一部加筆
- 13) 第 1 回ダム再生ビジョン検討会（平成 29 年 1 月 25 日開催）配布資料（資料 2-1 ダム再生を取り巻く現状と課題）に一部加筆

2. 多目的ダムの利水機能評価に関わる既往検討を踏まえた課題整理

2.1 概説

本章では、将来の流況変化やダム貯水池内堆砂進行などの気候変動影響を考慮した場合におけるダムの利水機能評価に関わる先行研究をレビューするとともに、現状の研究課題の抽出を行う。

2.2 気候変動が水需給及びダム貯水池内堆砂進行に与える影響に関わる既往検討

2.2.1 気候変動が水需要に与える影響に関わる既往検討

角ら¹⁾は、国内の12の都道府県を対象に気温と水需要量（上水道給水量）の関係について分析するとともに、3つの都市を対象に温暖化後の気温分布及び水需要量のシナリオ分析を行った。その結果、気温と水需要量の関係はいずれの地域でも2次関数で対応付けられること、及び、地域によって、①水使用変化量の気温勾配、②水需要量の最小値、③水需要量の最小値を与える気温に差があること明らかにした。さらに、平均気温が3℃上昇した場合の水需要量の増加率は、年間需要量で1.2～3.2%、一日最大需要量で2.2～6.8%であることを示した。

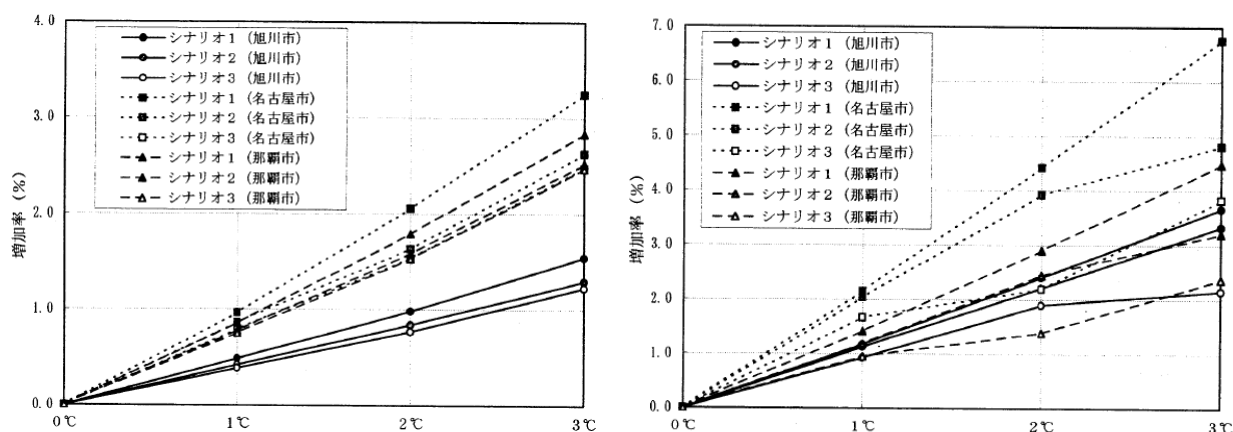


図 2.1 温暖化による年間需要量の変化（左図）及び一日最大需要量の変化（右図）¹⁾

大西ら²⁾は、人口動態や経済の成長の度合い、また耕地面積の変化や水道の普及率等の推移をもとに、2050年までのセクター別（農業用水、工業用水、生活用水）の水需要の推計を行うとともに、アメダスと超高解像度全球大気モデル並びに「日本の水資源」に記載されている年間の水資源賦存量を用いることによって将来の水資源賦存量を都道府県ごとに推計した。

この結果、パターン①（社会経済の条件及び各セクターの条件は現状のまま踏襲）、最小需要シナリオでは、2050年時点での用水量が減少する可能性を示した。一方で、最大需要シナリオでは、2050年時点での用水量が2000年時点と同等なる可能性を示した。これに、将来の水供給量を加味した水需給ギャップについての推計も実施しており、2050年の最大需要シナリオに基づく、関東圏、大阪府、香川県、宮城県、愛知県、福岡県等で水需給ギャップが著しくなる傾向を示した。

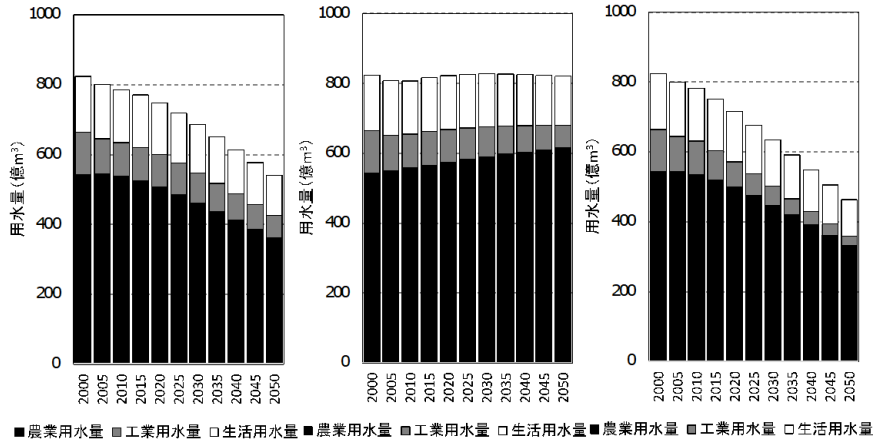


図 2.2 日本全体におけるセクター別用水量の推計結果
(左：パターン①，中：最大，右：最小)²⁾

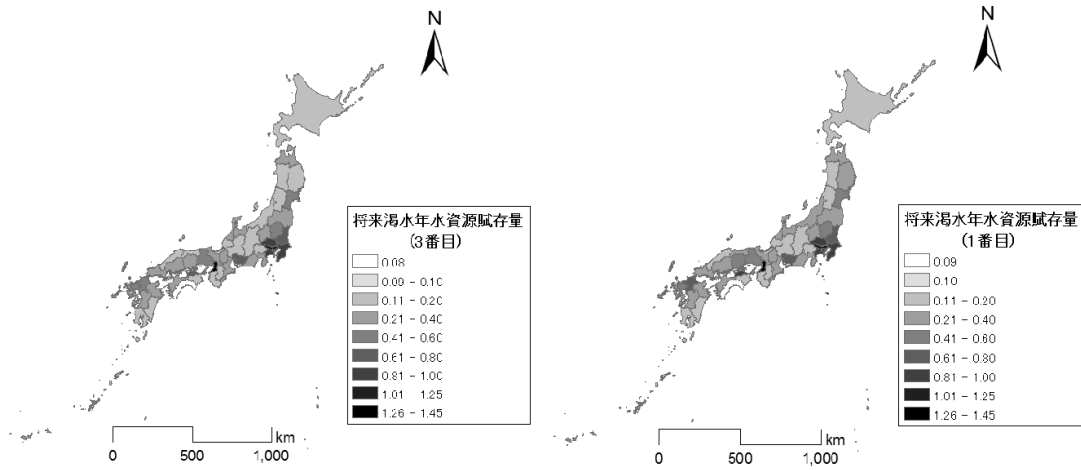


図 2.3 都道府県別における水需給ギャップの推計結果²⁾

2.2.2 気候変動が水供給に与える影響に関わる既往検討

立川ら³⁾は、気象庁気象研究所の超高解像度大気モデルMRI-AGCM3.1Sにより計算された現在気候実験（1979～2003年）、近未来気候実験（2015～2039年）、21世紀末気候実験（2075～2099年）の気候推計情報を用い、日本列島全域を対象とする分布型流出モデルを構築した上で、将来の河川流量変化の分析を行っている。この結果、21世紀末実験では、北海道や東北の積雪域で温暖化の進行に伴い1月から3月における流量の増加傾向を示した（図 2.4）。また、10年確率の渇水流量の変化比率より、21世紀末実験では、西日本における渇水流量の減少、北海道・東北地方北部・中部地方の一部における渇水流量の増加を示した（図 2.5）。

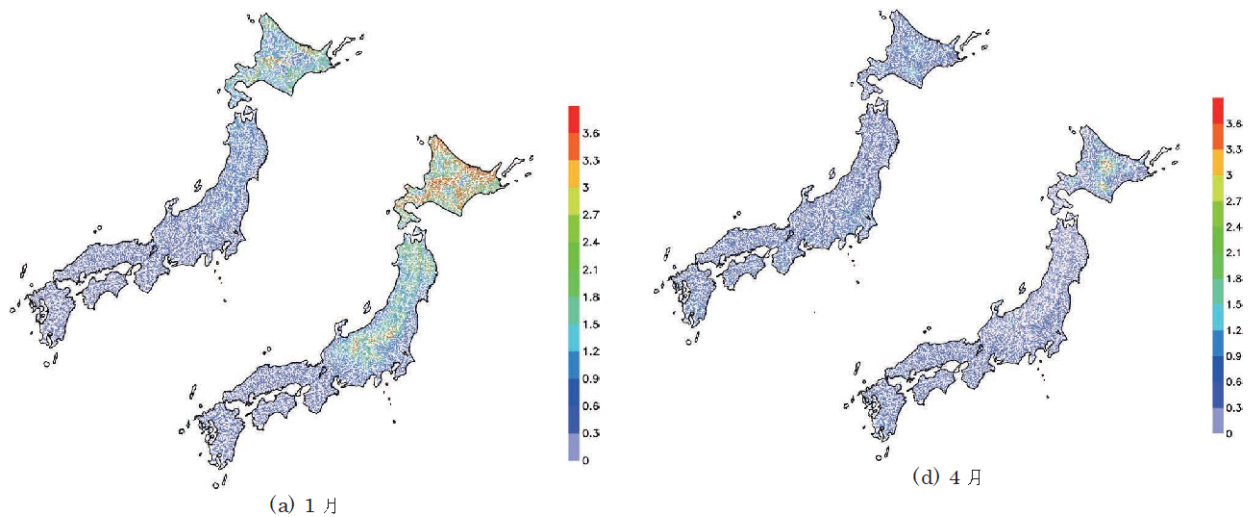


図 2.4 月流量の変化（左上：現在気候実験に対する近未来気候実験の変化比率，右下：現在気候実験に対する 21 世紀末気候実験の変化比率）³⁾

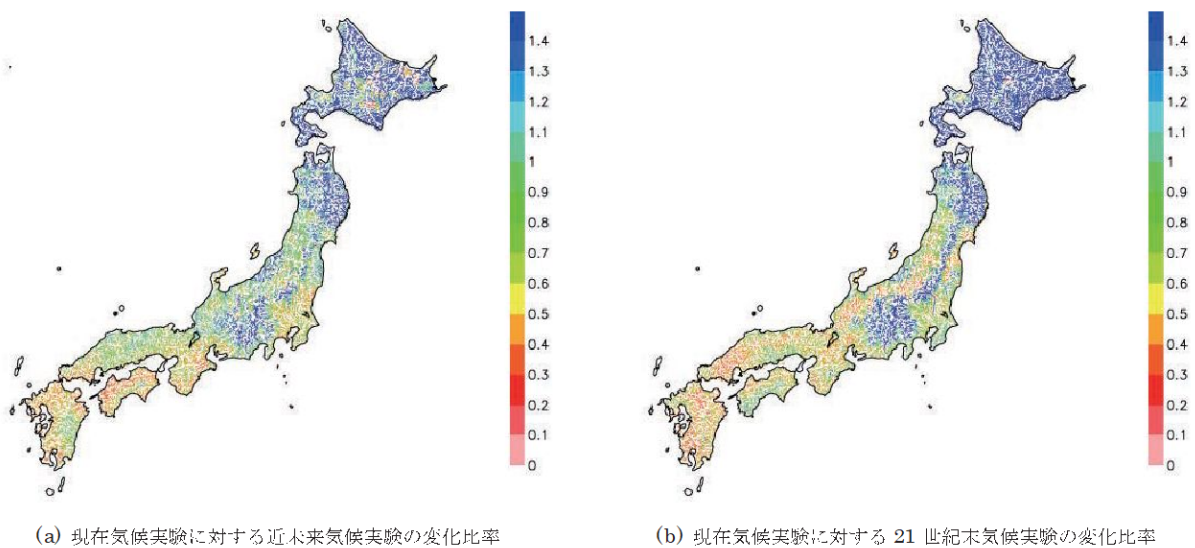


図 2.5 日本列島全域の 10 年確率洪水流量の変化³⁾

Sato⁴⁾は、気象庁気象研究所の超高解像度大気モデル MRI-AGCM3.2S により計算された現在気候実験（1979～2003 年）と 21 世紀末気候実験（2075～2099 年）の気候推計情報から、全国の降水量比を算定するとともに、全国 109 一級水系流量予測モデルを構築した上で、年間総流量比を求めている（図 1.1）。これによると、北海道を除く各地域で将来気候における年間降水量及び年間総流量は減少する予測結果が得られており、今後の利水（生活用水，農業用水，工業用水，発電用水等）への影響が懸念される。

2.2.3 気候変動がダム貯水池内堆砂進行に与える影響に関わる既往検討

秋本ら⁵⁾は、斜面崩壊リスクモデルを利用した土砂生産量モデルを構築し、この条件に数値気候モデルによる降雨量を用いることで、気候変動に対する日本列島の土砂生産量を求めている。

この結果、中間気候（2050年に対応）、将来気候（2100年に対応）では、A1BシナリオのMIROC、A2シナリオのRCMともに、国内のいずれの地域でも土砂生産量が増加することを示した。また、地域別では、北海道の増加率が他の地域に比べ高いこと、東北地方、関東地方においては他の地域に比べ、増加率が低いことを示し、この原因について、地形条件、地質条件が地球温暖化による降雨パターンの変化に反応しやすいか否かの違いを挙げている。

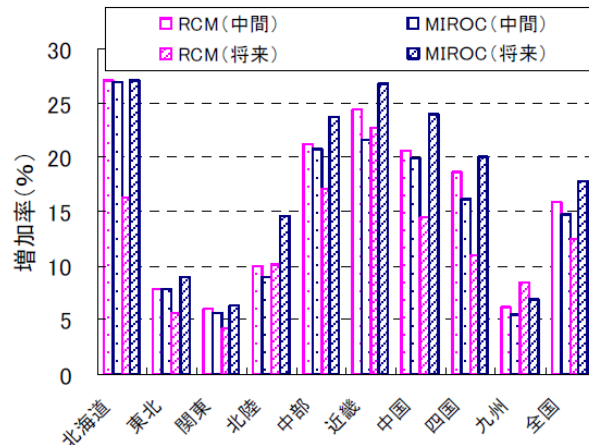


図 2.6 現在気候に対する各気候の土砂生産量の増加率⁵⁾

河田ら⁶⁾は、中央構造線近傍に位置する M ダムをモデルに、数値計算によって、降雨の点から地球温暖化が将来の堆砂進行にどのような影響を及ぼすかの検討を実施している。

具体的には、年降水量が毎年一定の割合で増加しながら、50年後に現在の1.55倍に達するものと仮定して、各年の降水量の値を求め、それを入力値として将来の堆砂量の計算を行い、Mダム地点については、15%程度、堆砂の進行が加速するとの結果を示している。

また、課題として、温暖化による気温の上昇が、凍結融解作用による土砂の生成活動を鈍らせ、堆砂の進行を抑える可能性があるため、降雨以外の温暖化の影響を考慮する点、気候変動が進行した場合の河道外での土砂の生成過程を考慮する点を挙げている。

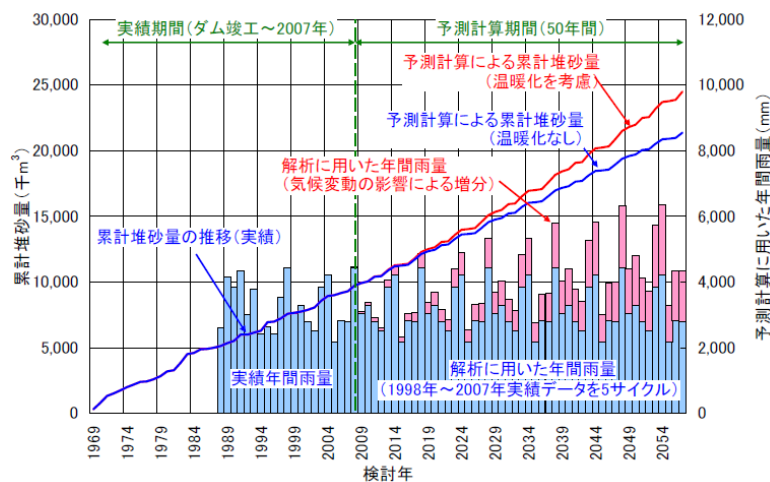


図 2.7 M ダムの将来の堆砂進行予測結果⁶⁾

2.3 水需要の変化を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討

清水ら⁷⁾は、地球温暖化による水資源システムへの影響（図 2.8）のうち、水需要量の変化について、全国の水文条件が異なる地域の需要量データを基にシナリオを作成し、地球温暖化が水資源管理に与える影響について考察を行っている。その結果、地球温暖化による水需要変化が水資源開発施設の利水安全度の低下を招くこと、水需要の発生形態（利用形態）の違いによって利水安全度への影響度合いが異なることを示し、今後の水資源管理を考えていく上では、施設対応だけでなく水利用も含めた水資源システムにおける総合的対応が必要になることを述べている。清水らの研究は、気候変動に伴う水需要量の変化を想定しているものの、気候変動に伴う流況変化やダム貯水池内の堆砂進行は考慮されておらず、この点に研究課題を有すると考えられる。

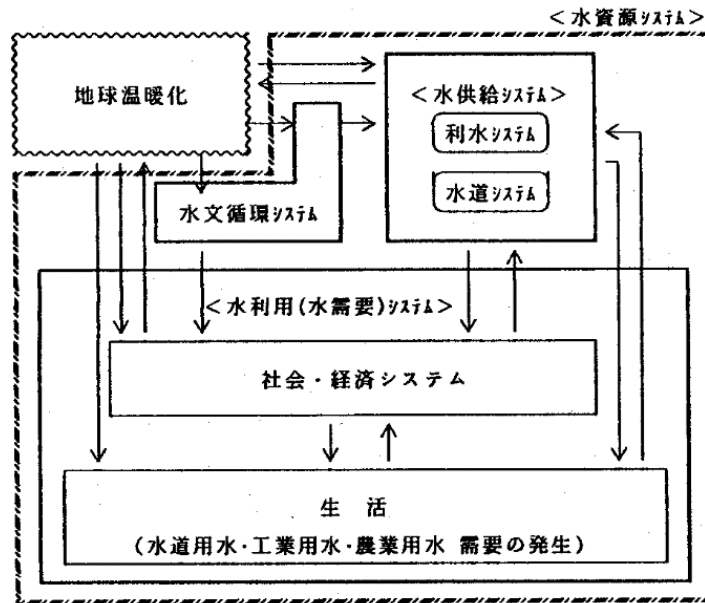


図 2.8 地球温暖化の水資源システムへの影響⁷⁾

入江ら⁸⁾は、愛媛県松山市を対象に、人口変動（人口減少＋世帯構成変化）の影響と気候変動の影響に着目し、人口変動による水需要変化が渇水時のダム運用に及ぼす影響の評価を行っている。その結果、2006年時点に対し、2036年の総家庭用水需要量は5.0%減少し、これに伴い、渇水年のダム貯水量は2.5%増加することを明らかにした。さらに、2036年における人口変動と気候変動の影響を比較すると、両者の影響はほぼ打ち消し合う結果となることを示した。ただし、人口変動と気候変動の影響について、より詳細に定量的な比較を行うことが課題としている。

2.4 水供給の変化及び堆砂進行を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討

2.4.1 水供給の変化を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討事例

猪俣ら⁹⁾は、積雪・融雪が発生しないダムを有する流域と積雪・融雪が発生するダムを有する流域を対象として、複数の気候変動シナリオを用いて予測の不確実性を考慮し、気候変動がダムの利水補給に与える影響について検討を行っている。その結果、積雪・融雪が発生しないダム、積雪・融雪が発生するダムともに、将来気候において利水補給が困難になることを確認し、特に積雪・融雪が発生するダムの方で利水補給が困難になる傾向を確認するとともに、予測の不確実性が大きいことを示した。猪俣らの研究により、積雪・融雪の発生有無と将来気候におけるダム

利水機能変化の関係についての知見が得られたが、さらに、地域毎の検討・特性分析の実施が研究課題として考えられる。

鈴木ら^{10) 11)}は、吉野川流域と最上川流域を対象に、ダム貯水池群の操作や大規模取水などの人為的な流況調整を加味し、将来の河川流況の変化がダム貯水池の利水運用に及ぼす影響について分析を行っている。その結果、将来気候下では夏季以降のダム貯水量が低下する傾向を示すとともに、最上川流域のダムを対象とした操作計算では、融雪時期の早期化の影響により、初夏に貯水量が減少する可能性が増加する傾向を示している。また、夏期の水位制限の存在により、多くの年では融雪時期の早期化の影響は限定的であることを示している。

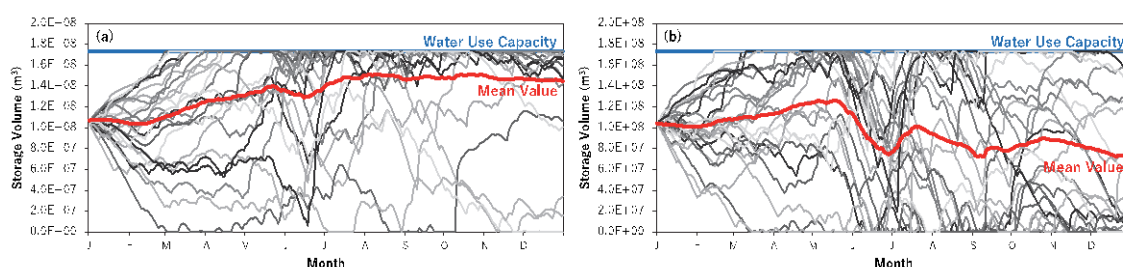


図 2.9 吉野川流域早明浦ダム貯水量の年間推移

(左図：現在気候(1979～2003年)、右図：将来気候(2075～2099年))^{10) 11)}

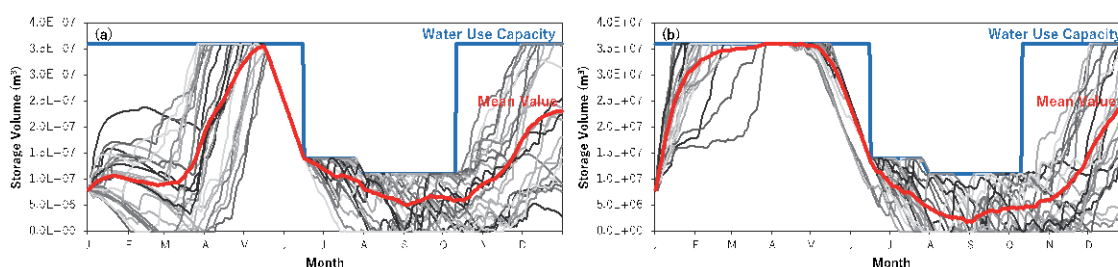
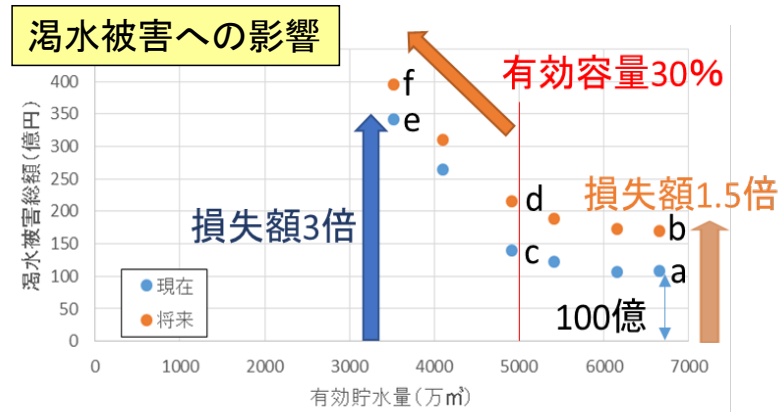


図 2.10 最上川流域白川ダム貯水量の年間推移

(左図：現在気候(1979～2003年)、右図：将来気候(2075～2099年))^{10) 11)}

2.4.2 水供給の変化及び堆砂進行を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討事例

角ら¹²⁾は、木曾川水系牧尾ダムを検討対象として、ダム堆砂の進行と気候変動の複合的影響を考慮し、これらの長期的な影響について、貯水池の運用水位、有効・無効放流量、発生電力量などの観点から総合的に評価を行っている。その結果、発電量については、堆砂や気候条件によって大きく変化することは無いものの、用水供給では堆砂進行による有効貯水量の減少・温暖化による夏期流入量の減少により多大な損失が出る可能性があることを明らかにし、特にダムの有効貯水量の減少率が30%を切ってから顕著に損失が発生することを示している(図 2.11)。角らの研究において、ダムの有効貯水量の減少率30%を閾値とした利水被害拡大が指摘されているが、当該傾向に関する普遍性の検証、さらに複数ダムで統合運用を実施しているダム群を対象とした検証が研究課題と考えられる。



気候変動および堆砂進行による渇水被害影響

図 2.11 現在気候と将来気候における有効貯水量と渇水被害総額の関係¹²⁾

図 2.12 は G.Morris¹³⁾が提案した図式であり、これによると、気候変動によって 1)年間総流入量 (MAR) が変化し、さらに、2)その変動 (Cv) が増大することが考えられる。一方で、3)降雨強度の変化によって年間土砂流入量 (MAS) が変化することが考えられる。気候変動による渇水のリスクの増大にダム堆砂の影響が加わって、将来的に貯水量が減少してしまうと、気候変動の影響による流量変動がますます調整できなくなってしまうことになる。そこで G.Morris は、その適応策として、土砂管理を行って堆砂進行を遅らせたり、嵩上げなどを行って貯水容量を増やしたりするハード対策を提案しており、それでも難しい場合には、発電運用の工夫や灌漑用水網の効率向上などによって水供給量の最適化を行うソフト対策が必要であることを指摘している。最終的には、こうしたハード、ソフトの適応策の効果について、経済性を踏まえて総合的に評価する必要があるものと考えられる。

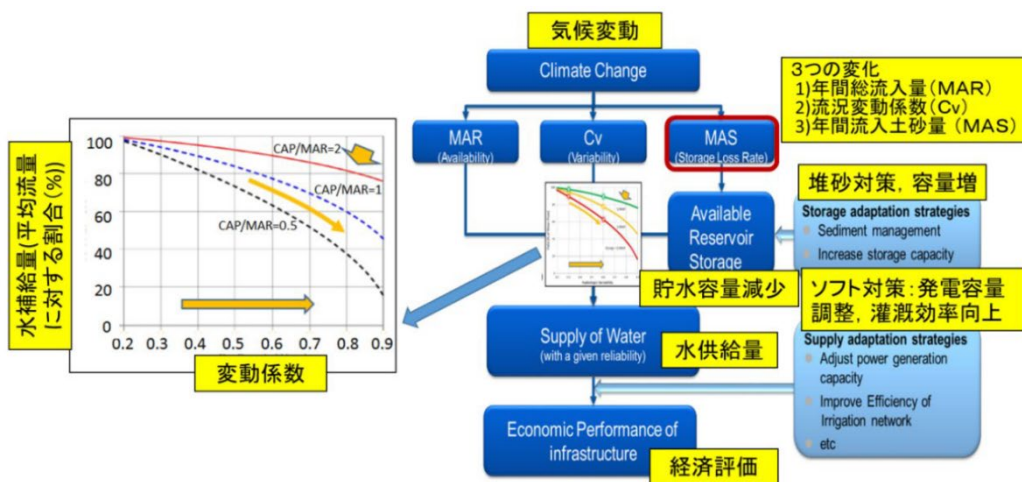


図 2.12 気候変動適応策としてのダム堆砂対策¹⁴⁾

(原典 : Climate Change Analysis for Supply of Water (Morris 2017¹³⁾)

2.5 ダムの利水機能変化の評価方法に関わる既往検討

奥村ら¹⁵⁾は、電源開発（株）が所有・管理する貯水池式発電所の長期間の運用実績を分析し、堆砂進行の影響を抽出するとともに、堆砂がさらに進行した場合についてシミュレーションを行っている（図 2.13）。その結果、貯水池の有効貯水容量内において堆砂が進行し、発電運用における水使用率の低下を示すとともに、貯水池式発電所における水使用率を、貯水池地点の流況、有効貯水容量、最大発電使用水量を用い評価する式を提案している。さらに、これに基づく将来予測結果によると、紀伊南部、四国南部などの梅雨や台風などによる出水が貯水池流入水量に及ぼす影響が大きい地域において、水使用率への堆砂進行の影響が大きいことを示している。奥村らの研究において、発電運用に関わる水使用率の評価式が提案されているが、これを多目的の利水運用に関わる評価式にまで拡張を図ることが研究課題として考えられる。

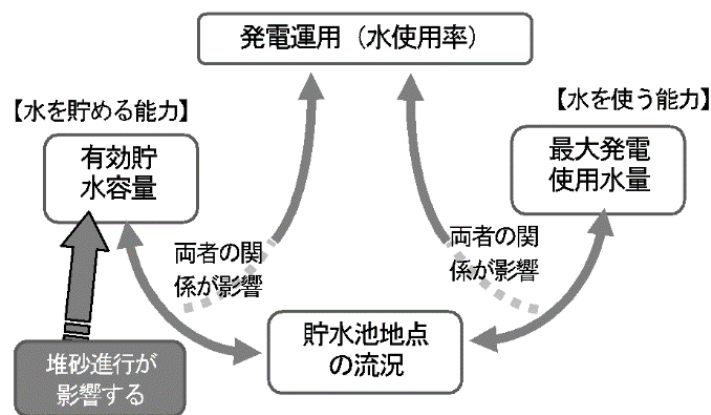


図 2.13 発電運用に影響を及ぼす要因¹⁵⁾

McMahon *et al.*¹⁶⁾は、給水に必要な貯水池容量を推定するためのシンプルかつ的確な計算手法を紹介している。これは、Gould-Dincer アプローチと呼ばれるもので、RESCON (reservoir conservation) プロジェクト¹⁷⁾で採用された計算手法であり、McMahon *et al.*は、貯水池流入量の確率分布の考え方の違いにより、Gould-Dincer Normal (G-DN)、Gould-Dincer Gamma (G-DG)、Gould-Dincer Lognormal (G-DLN) に区別している。

このうち、Gould-Dincer Normal (G-DN) は下式のように表される。

$$C = z_p^2 / 4(1 - \alpha)^2 \times C_v^2 \mu \quad (1)$$

ここに、 C は給水に必要な貯水池容量、 z_p は流入量に関する非超過確率 100 $p\%$ での標準化変量、 α は流入量に対する有効放流量の割合、 C_v は貯水池への年間流入量の変動係数、 μ は年間平均流入量である。

Gould-Dincer アプローチはいくつかの制限に基づいた計算手法である。すなわち、必要な貯水池容量は複数年の干ばつの想定に基づいて決定され、目標とする年間平均給水量は一定であり、

貯水池からの蒸発は考慮せず、キャリーオーバー貯水池（非制限水位方式）のみに適している。

Gould-Dincer アプローチに基づく、下図に示されるような有効放流量、流況、貯水池容量の関係が導出される。すなわち、河川流量の変動係数が大きくなると、有効放流量が減少し、その減少は貯水池容量が小さくなるとさらに助長される。ここで、河川流量の変動係数の増大を気候変動による流況変化、貯水池容量の減少を堆砂進行による容量損失と考えると、将来におけるダムの利水機能低下を示唆するものと考えられる。

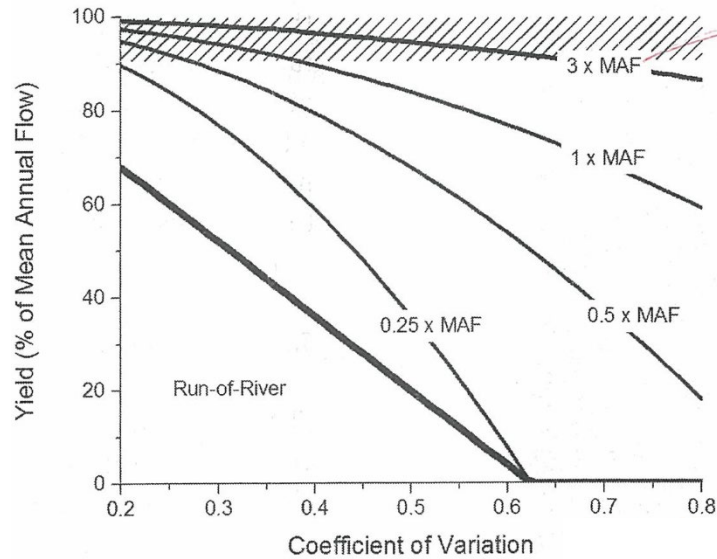


図 2.14 有効放流量と 99%信頼区間の流入量の変動係数の関係
(流れ込み式、キャリーオーバー貯水池を対象した図) ¹⁸⁾

2.6 ダムの利水機能変化を踏まえた適応策に関わる既往検討

2.6.1 ダム操作に着目した適応策検討事例

ダムの最適操作の決定に関わる代表的な方法として、動的計画法による貯水池操作 ^{19) 20)}があり、これを活用した利水操作に関わる検討事例として、野原ら ^{21) 22)}、得津ら ^{23) 24)}の研究がみられる。これらの研究では、動的計画法と中長期アンサンブル（概ね 1 ヶ月先まで）の降水予測情報を活用したダム利水操作の利用可能性について評価が行われたものであり、誤差の比較的小さいアンサンブル予測を用いることで、合理的な利水操作が行われる可能性を示している。

川村ら ²⁵⁾は、積雪地域である豊平川流域の利水環境に着目し、将来の流出状況の変化と利水への影響を推定し、それに対する対応策としてダム運用方法について検討を行っている。その結果、現況期間（1981～2000年）と将来期間（2081～2100年）の比較から、単体でのダム操作では将来のダム貯水量が不足することを示すとともに、その対応策としてダムの連携による放流操作が有効であることを動的計画法により示している。

2.6.2 容量配分の見直しに着目した適応策検討事例

野原ら^{26) 27)}は、吉野川流域や最上川流域を対象に、将来の河川流量の変化がダム利水操作に及ぼす影響を分析した上で、将来気候下での適応策の方向性の分析を行っている。その結果、吉野川流域では、特に夏季の流量の低下に伴い早明浦ダムの平均貯水量が低下するとともに、年渴水被害値が増大する可能性を示した。また、適応策として、①発電容量の利水目的利用、②治水容量の利水目的利用、③節水技術の進展や水需要の見直し等による基準点における確保流量の15%低減の3つを想定した結果、ダム貯水池の容量再配分や弾力的操作の導入による利水操作の増大によっても渴水被害値は多少減少するが、水需要を抑制する効果の方が大きくなることを示した。

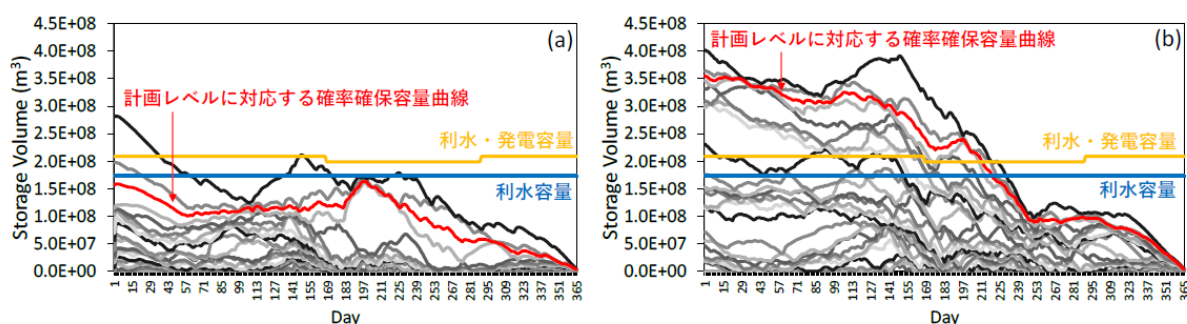


図 2.15 確率確保容量曲線（左図：現在気候実験期間，右図：21 世紀末気候実験期間）^{26) 27)}

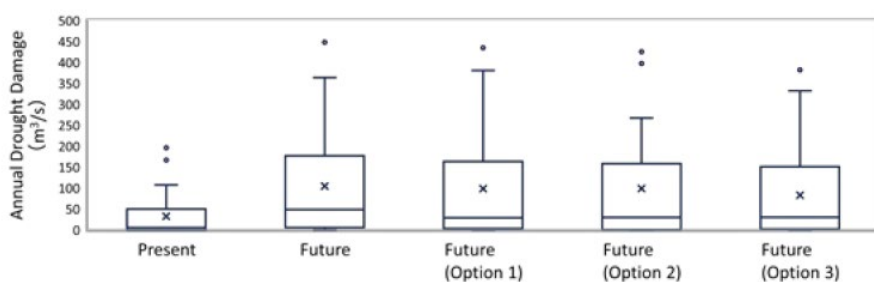


図 2.16 各適応策実施時における年渴水被害値の分布^{26) 27)}

吉村ら²⁸⁾は、紀の川を対象に、複数の GCM アウトプットを活用し、多目的ダムでの洪水渴水の同時のリスクの増大や、利水から洪水調節への容量再配分に焦点をあてて、トレードオフ関係の検証を行っている。その結果、ダム容量の再配分は超過洪水の回避、被害軽減に寄与することを示すとともに、利水と渴水のトレードオフについては、半数以上のアウトプットでトレードオフなしに再配分できる余地があり、トレードオフが必要なアウトプットや双方のリスクが増大するアウトプットよりも多いことを明らかにした。また、一部の GCM で 2050 年と 2100 年とで傾向が異なることから、今後の気候変化の動向が変化することも考えられると述べている。

2.7 結語

本章では、多目的ダムの利水機能評価に関わる既往研究の整理を行った。主な研究成果及び研究課題を整理すると以下のとおりとなる。

(1) 気候変動が水需給及びダム貯水池内堆砂進行に与える影響に関わる既往検討のまとめ

将来における水需要の想定は特定しにくい状況であり、複数のシナリオが考えられる。ただし、将来における世界的な人口増大を前提とすると、安全側のシナリオを想定しておくことが重要であると考えられる。また、水供給に関連する流況変化については、将来気候において極端化・長期渇水の発生が予測されており、ダムの利水機能にとっては厳しい条件となることから、これを考慮したダムの機能評価実施が求められる。一方で、貯水池内堆砂進行については、気候変動によって土砂生産量や土砂移動量が増大傾向になることが推定されており、これを考慮したダムの機能評価実施が求められる。

(2) 水需要の変化を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討のまとめ

水需要の変化については、上述のとおりシナリオ設定が困難な状況が考えられるが、いくつかの研究実施例がみられる。ただし、利水需要のうち、多くの割合を占めるかんがい水の水需要変化のシナリオを想定した研究例は少ないため、この実施が課題と考えられる。

(3) 水供給の変化及び堆砂進行を考慮したダムの利水機能評価に関わる既往検討のまとめ

近年、複数の研究例が認められ、気候変動による流況変化や堆砂進行に伴いダムの利水機能の低下が示唆されている。現状では、単独ダムを対象とした少数の研究事例しかないため、より検討事例を増やして利水機能変化の一般化を図ること、複数ダムからなるダム群を対象とした研究を実施し、単独ダムでの結果との差異または同一性を確認すること、複数の気候変動シナリオに基づき研究実施を図ること等が今後の課題として考えられる。

(4) ダムの利水機能変化の評価方法に関わる既往検討のまとめ

発電ダムを対象とした評価方法は提案されているものの、利水需要のうち、多くの割合を占めるかんがい水等に着目した多目的ダムを対象とした評価方法は認められない。このため、当該手法の立案が求められるものと考えられる。

(5) ダムの利水機能変化を踏まえた適応策に関わる既往検討のまとめ

ダムの操作面からの検討事例が複数認められるものの、ダムの施設改造を伴うハード面からの合理的な対応策は認められない。さらに、ダム地点における流況変化と堆砂進行の複合影響を考慮した状態での、水需要者側からの適応策についての検討事例は認められない。このため、これらの研究実施が課題として考えられる。

(6) 研究目的の整理

既往研究を踏まえ、改めて本研究の目的を整理すると、以下のとおりとなる。

- 気候変動に伴うダムの利水機能変化を全国ベースで評価するための、ダムの利水機能変化を予測する手法を明らかにする
- ダムの利水機能を維持するための、利水対策特有の適応策を立案する

(7) 既往研究を踏まえた本研究での課題設定

既往研究を踏まえ、気候変動及びダム堆砂進行を考慮した多目的ダムの長期的利水機能評価に関わる検討課題を整理すると表 2.1 に示すとおりとなる。本研究は、表 2.1 に示す検討課題を明らかにする観点から実施したものである。

表 2.1 既往検討を踏まえた本研究における課題設定

項目		既往検討の現状	本研究における反映や課題設定
気候変動影響	気候変動が水需要に与える影響	● 将来における水需要の想定は特定しにくい状況であり、複数のシナリオが考えられる。	● 将来において水需要が減少することも否定し得ないが、明確なシナリオ設定が困難であるため、水需要については将来においても現状と同等であることを基本と考える。
	気候変動が水供給に与える影響	● 将来気候における流況の極端化・長期渇水の発生が予測されており、ダムの利水機能にとっては厳しい条件となることが考えられる。	● 気候変動に関する最新の長期予測モデル及びダム地点の流出解析結果を使用し、将来におけるダム地点流量の分析を行う。
	気候変動がダム貯水池内堆砂進行に与える影響	● 気候変動によって土砂生産量や土砂移動量が増大傾向になることが推定されている。	● 気候変動に伴う貯水池内流入土砂量の詳細分析は本研究の主題ではないため避けるが、本研究では Q-Qs 関係式によって流況変化による流入土砂量の増分の検討を概略的に行う。
ダムの利水機能評価	水需要の変化を考慮したダムの利水機能評価	● 利水需要変化を考慮した研究実施例はいくつかみられるものの、国内の利水需要の多くを占めるかんがい水の水需要変化のシナリオを想定した研究例は少ない。	● 前述のとおり、水需要については将来においても現状と同等であることを基本とするが、かんがい水の水需要変化を考慮した検討についても実施する。
	水供給の変化を考慮したダムの利水機能評価	● 単独ダムを対象とした少数の研究事例により、気候変動による流況変化や堆砂進行に伴うダムの利水機能の低下が示唆されている。	● 流況特性の異なる単独ダム、複数ダムよりなるダム群を対象に、気候変動による流況変化や堆砂進行に伴うダムの利水機能変化について分析を行う。
	堆砂進行を考慮したダムの利水機能評価		
ダムの利水機能変化の評価方法		● 発電ダムを対象とした評価方法は提案されているものの、多目的ダムを対象とした利水機能変化の評価方法は認められない。	● 多目的ダムを対象とした利水機能変化に関わる評価方法を立案する。 ● 上記評価方法をもとに、多目的ダムの利水機能変化に関わる全国的な分類を行う。
ダムの利水機能変化を踏まえた適応策に関わる既往検討		● ダムの操作面からの検討事例が複数認められるものの、ダムの施設改造を伴うハード面からの合理的な対応策は認められない。	● 既往研究ではみられないダムの弾力的管理を前提とした適応策検討を実施するとともに、ダムの施設改造を伴うハード面からの対応策についても検討を実施する。

参考文献

- 1) 角哲也, 安達孝実, 清水康生: 地球温暖化が水需要に及ぼす影響に関する考察, 環境工学研究論文集 33 巻, 1996.
- 2) 大西暁生, 佐藤嘉展, 佐尾博志: 全国都道府県別における将来水需給ギャップの把握, 土木学会論文集 G (環境) 71 巻 5 号 I_369-I_382, 2015.
- 3) 立川康人, 滝野晶平, 藤岡優子, 萬和明, キムスンミン, 椎葉充晴: 気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予測, 土木学会論文集 B1 (水工学) 67 巻 (2011) 1 号, 2011.
- 4) Yoshinobu Sato: Climate change impact on river discharge in Japan using a MRI-AGCM3.2S, Proceedings of 20th Congress of the Asia Pacific Division of the International Association for Hydro Environment Engineering & Research (IAHR-APD 2016), 8 pages (USB), 2016.
- 5) 秋本嗣美, 川越清樹, 風間聡: 数値気候モデルを用いた土砂生産量予測, 水工学論文集, 第 53 巻, 2009 年.
- 6) 河田暢亮, 鹿野久米豊, 吉野秀樹, 山元未来, 竹林洋史, 藤田正治: 気候変動の貯水池堆砂への影響に関わる一考察, 2011 年砂防学会研究発表会概要集, P84-P85, 2011.
- 7) 清水康生, 杉山裕, 蔵重俊夫, 横江義之: 地球温暖化による水需要変化が水資源管理に与える影響についての考察, 地球環境シンポジウム講演集 1 巻, 246-253, 1993.
- 8) 入江政安, 戸井博彬, 津田守正, 西田修三: 渇水時のダム運用への人口変動に伴う水需要変化の影響予測, 土木学会論文集 G (環境) 73 巻 5 号, 2017.
- 9) 猪股広典, 川崎将生: 気候変動がダムの利水運用に与える影響の検討, ダム技術(354), 37-48, 2016.
- 10) 鈴木俊亮・野原大督・堀智晴・佐藤嘉展: ダム貯水池群の利水運用に対する気候変動の影響に関する基礎的分析, 水文・水資源学会 2017 年度研究発表会要旨集, 2017.
- 11) 鈴木俊亮, 野原大督, 堀智晴, 佐藤嘉展: 将来の河川流量の変化がダム貯水池の利水運用に与える潜在的影響に関する一考察, 土木学会論文集 B1 (水工学) 74 巻 5 号, 2018.
- 12) 角哲也, 寺田和暉, 竹門康弘, 佐藤嘉展: 牧尾ダムの水資源管理に対するダム堆砂および気候変動の長期的影響, 京都大学防災研究所年報, 第 57 号 B, 2014.
- 13) Morris,G.L. : Improving the reservoir conservation (RESCON) software for screening sediment management option, IHA World Hydropower Congress, Addis Ababa, 2017.
- 14) 一般社団法人ダム工学会「ダム堆砂」に関する検討会: ダム堆砂対策の促進に向けて (提言), 2020 年 3 月
- 15) 奥村裕史, 角哲也: 貯水池式水力発電所ダム湖における堆砂進行が発電運用に及ぼす影響, 土木学会論文集 B1 (水工学) 69 巻 4 号, 2013.
- 16) Thomas A.McMahon, Geoffrey G.S.Pegram, Richard M.Vogel, Murray C.Peel : Review of Gould-Dincer reservoir storage-yield-reliability estimates, Advances in Water Resources, Volume 30, Issue 9, Pages 1873-1882, 2007.
- 17) The World Bank : Reservoir Conservation Volume I . The RESCON Approach, 2003.
- 18) George Annandale : Quenching the Thirst—Sustainable Water Supply and Climate Change, 2013.

- 19) 竹内邦良：貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作手法，土木学会論文報告集，第 222 号，pp.93-103，1974.
- 20) 高棹琢馬，池淵周一，小尻利治：水量制御からみたダム群のシステム設計に関する DP 論的研究，土木学会論文報告集，第 241 号，pp.39-50，1975.
- 21) 野原大督・堀智晴：現業アンサンブル降水予測情報を活用したダム利水操作とその効果の比較，水文・水資源学会 2014 年度研究発表会要旨集，2014.
- 22) 野原大督・堀智晴・佐藤嘉展：現業中長期アンサンブル降水予測情報を考慮した実時間ダム利水操作に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_1315-I_1320, 2017.
- 23) 得津萌佳・野原大督・堀智晴：アンサンブル水文予測情報を考慮したダム利水操作の効果分析手法の検討，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, I_1213-I_1218, 2016.
- 24) 得津萌佳・野原大督・堀智晴：アンサンブル水文予測情報のダム長期操作への利用性に関する検討，水文・水資源学会 2016 年度研究発表会要旨集，2016.
- 25) 川村一人，中津川誠，杉原幸樹：気候変動による利水への影響を踏まえたダム貯水池群の最適操作に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学）68 卷 4 号，2012.
- 26) 野原大督，鈴木俊亮，佐藤嘉展：将来の河川流量変化に伴うダム利水操作への影響の評価と適応策に関する基礎的検討，土木学会論文集 B1（水工学）74 卷 5 号，2018.
- 27) 野原大督・鈴木俊亮・佐藤嘉展：ダム利水運用に対する気候変動の影響の評価と適応策に関する基礎的検討，水文・水資源学会 2018 年度研究発表会要旨集，2018.
- 28) 吉村耕平，小池俊雄：気候変化の適応策としてのダムの治水・利水容量の再配分に関する考察-紀の川流域を例として，土木学会論文集 B1（水工学）71 卷 4 号，2015.

3. 気候変動と堆砂進行がダムの利水機能に与える影響の検討

3.1 概説

近年、気候変動の影響が顕在化しつつあり、極端な降雨現象による洪水被害¹⁾や長期間の給水制限が実施されるような渇水被害²⁾が発生していることから、その対策が課題となっている。こうした中で、ダムは、既存施設の運用変更や改良により、外力の増大に的確に対応できる可能性を有しており、気候変動影響への適応策の一つとして、その役割が期待されている³⁾。

一方で、ダムが長期的に機能を発揮する上での最重要課題は、貯水池内の土砂堆積問題といわれており、気候変動に伴う流況変化による流入土砂量の増加、さらに貯水池内堆砂進行による有効貯水量の減少によるダムの治水・利水機能の低下が懸念されている。

こうした背景のもと、2017年に国土交通省より示された「ダム再生ビジョン」では、ダムの長期安定的な活用の観点から治水・利水機能の維持向上の重要性が示されており⁴⁾、対策必要性の高いダムのスクリーニングが始まっている。しかし、現状では、治水対策を中心とした対策検討にとどまっている。

このような背景から、気候変動に伴う流況変化やダム堆砂進行の複合影響に伴う将来のダム機能変化を予測する手法が求められている。

本章では上記を踏まえ、気候変動に伴うダムの流況変化及び将来の堆砂進行を予測した上で、これらがダムの利水機能に与える影響について検討する。

3.2 検討方法

気候変動と堆砂進行がダムの利水機能に与える影響については、個別ダムにおける影響結果と複数ダムから構成されるダム群における影響結果に差異が生じることも考えられることから、それぞれを対象として検討を実施した。

検討においては、検討対象ダムまたはダム群を選定した上で、これらの実運用をモデルとした利水計算モデルを構築した。次に、検討対象ダムまたはダム群におけるダム地点の将来流況予測を行った上で、これらの将来の利水機能変化について、貯水池内堆砂進行の影響も考慮した個別ダム毎の定量評価を実施した。最後に、個別ダムにおける検討結果と複数ダムから構成されるダム群における検討結果の相違点・共通点を考察した。

本章における検討フローは、図 3.1 に示すとおりである。

3.3 個別ダムを対象とした利水機能変化の評価

- 3.3.1 検討対象ダムの選定
- 3.3.2 検討対象ダムの将来流況の予測
- 3.3.3 検討対象ダムの将来堆砂量・将来堆砂形状の予測
- 3.3.4 利水計算に基づく検討対象ダムの利水機能変化の評価
 - ① 将来の流況変化を考慮したケース
 - ② 将来の堆砂進行を考慮したケース
 - ③ 上記①と②の複合影響を考慮したケース



3.4 複数ダムから構成されるダム群を対象とした利水機能変化の評価

- 3.4.1 検討対象ダム群の選定
- 3.4.2 検討対象ダム群の将来流況の予測
- 3.4.3 検討対象ダム群の将来堆砂量・将来堆砂形状の設定
- 3.4.4 利水計算に基づく検討対象ダム群の利水機能変化の評価
 - ① 将来の流況変化を考慮したケース
 - ② 将来の堆砂進行を考慮したケース
 - ③ 上記①と②の複合影響を考慮したケース



3.5 気候変動と堆砂進行がダムの利水機能に与える影響のまとめ

図 3.1 3章の検討フロー

3.3 個別ダムを対象とした影響検討

3.3.1 検討対象ダムの概要

検討対象とするダムは、以下の特徴を有するダムとした。

- ・将来、年間を通じて流入量が減少するダムと、年の一定時期のみ流入量が減少するダム
- ・将来の気候変動影響が異なる様相を呈するダム
- ・現在、利水補給が年間を通して行われているダム
- ・将来、堆砂進行が顕著となるダム

上記選定方針のもと選定した検討対象ダム以下のとおりである。

全国のダムの将来流況の整理の結果より、年間を通じて流入量が減少する A ダムと、これとは逆に年の一定時期（洪水期）のみ流入量が減少する B ダムを検討対象ダムとした（表 3.1）。なお、「5. 気候変動と堆砂進行がダムの治水・利水機能に与える影響の全国的評価」で示すが、A ダムは B-2 類型（気候変動の結果、流量は減少するものの、有効容量は十分と評価されるダム）に、B ダムは C-1 類型（気候変動の結果、十分な利水機能は期待できないものの、貯水池運用の工夫により影響緩和を図ることが可能なダム）に分類され、それぞれ異なる特徴を有するダムである。

ここで、A ダム、B ダムともに利水補給が年間を通じて行われており、表 3.1 に示すとおり、将来の堆砂進行が比較的顕著となることが想定される（両ダムの将来の堆砂進行の予測結果は「3.3.3 将来の流況・堆砂量予測」に示す）。

なお、B ダムの有効容量に対する利水容量の割合は、A ダムのそれに比べ小さいため、本研究における利水機能評価では、B ダムの非洪水期利水容量を有効容量とみなすこととした。

表 3.1 検討対象ダムの諸元

ダム名	Aダム	Bダム
ダム位置	中国地方	北海道
目的	洪水調節、かんがい、工業用水、発電	洪水調節、不特定利水、上水道
総流量比 (将来総流量/現在総流量)	0.83	0.97
ダム類型(利水類型)	B-2	C-1
有効貯水容量	17,200千m ³	14,100千m ³
利水容量	10/21~6/30 : 15,600千m ³ 7/1-7/31 : 14,700千m ³ 8/1-8/31 : 10,400千m ³ 9/1-9/30 : 1,400千m ³ 10/1-10/20 : 12,100千m ³	10/1~6/30 : 3,800千m ³ 7/1~9/30 : 2,200千m ³
全堆砂率 [※]	4.5%	6.7%
有効容量内堆砂率 [※]	2.5%	5.0%
利水容量内堆砂率 [※]	1.1%	27.1%
堆砂容量内堆砂率 [※]	17.8%	26.1%

※ 2014年時点

3.3.2 将来流況及び将来堆砂量・堆砂形状の予測手法

(1) 将来流況の予測手法

気候変動予測では、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM3.2S) による現在気候 (1979-2003 年) と将来気候 (2075-2099 年) における気温・降水量変化⁵⁾⁶⁾を利用した。温室効果ガスの排出シナリオは高位参照シナリオ RCP8.5、海面水温は CMIP5 の SST アンサンブル平均を用いた。

次に、SVAT モデルから蒸発散量と融雪量を算出し、これらを分布型流出モデル Hydro-BEAM に組み込むことにより、積雪地帯の積雪・融雪過程も考慮した全国 109 水系の日平均河川流量をそれぞれ求めた。日平均河川流量は、タイムステップ 10 分 (出力 1 時間) で計算した 24 時間の流量を平均したものである。詳細は Kojiri⁷⁾、Sato⁸⁾を参照されたい。

さらに、全球大気モデルや流出モデルに含まれるバイアスを排除し、将来の気候変動の影響をより明確に評価することを目的として、利水機能評価においては図 3.2 に示す手法で将来流況を設定した。

なお、本来はダム毎に貯留と補給の操作を実施するため、将来気候における河川流況にはこれらの影響を加味する必要がある。しかし、本検討の目的であるダム機能における気候変動影響の大局的見地からの分析は、これらのダム操作の影響を考慮せずとも果たせると判断し、得られたデータにより評価可能な簡便な方法を設定して分析を行った。

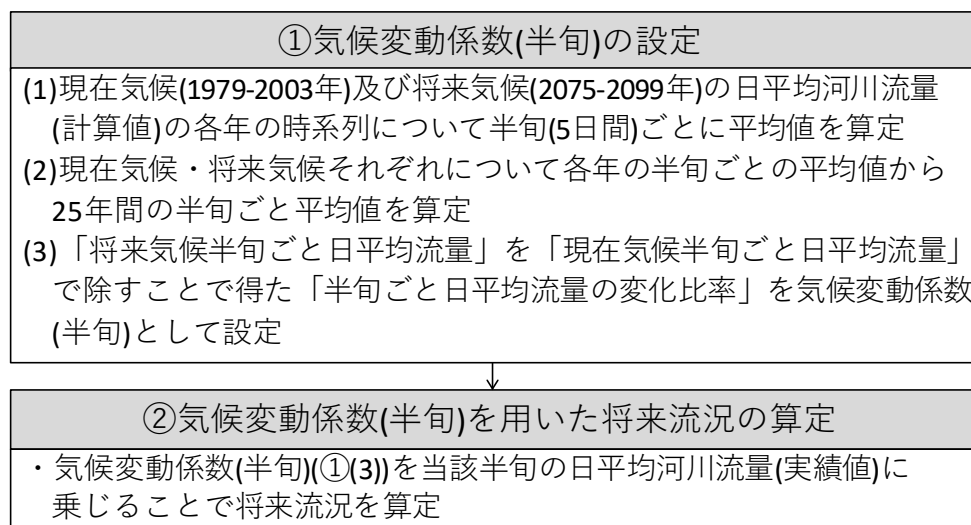


図 3.2 利水機能評価における将来流況の予測手法

(2) 将来堆砂量・堆砂形状の予測手法

1) 将来堆砂量の予測手法

将来の貯水池内堆砂量は、流況変化予測と整合を図り、21世紀末の状態を想定することとし、流況変化に伴う堆砂速度の増加等も考慮して、以下を想定した。

将来流況ケース

本研究で用いる将来気候の予測期間が2075-2099年であることを踏まえ、将来における堆砂量について、2075年までは実績堆砂速度と同様の速度で堆砂進行するものとし、2075年以降は流況変化に伴う流入土砂量の変化をQ-Qs式に基づき算定する(図3.3)。

将来流況(前倒し)ケース

気候変動予測による将来気候が、2075年より前倒しで生起することも想定し、堆砂進行上厳しい条件として、将来予想される流況変化に伴う流入土砂量の変化が現時点から生じるものとして算定する。

実績流況ケース

将来流況ケース、将来流況(前倒し)ケースの対照ケースとして、将来においてもダム完成後～現在までの実績堆砂速度と同様の速度で堆砂進行するものとして算定する。

なお、本研究では、将来堆砂量の概略的な予測を目的としたことから、Q-Qs式のQは日平均流量を与え、Qsに対する流量の影響を考慮するため、βの値はやや大きく目と考えられる3.0と仮定した。ただし、より精緻な堆砂量予測の上では、時間流量を用いた検討等の必要性も考えられるため、これについては今後の課題とする。



図 3.3 将来堆砂量の予測手法

2) 将来堆砂形状の予測手法

将来における貯水池内堆砂形状は、今後の堆砂が実績ベースで進行するものとし、堆砂実績を参考に、各容量（治水・利水・堆砂容量）内の堆砂比率が今後も継続するものとして堆砂形状を考慮した（図 3.4）。なお、堆砂容量が満砂した場合には、その後の堆砂は有効容量内の治水・利水容量内で進行することになることから、このときの治水・利水容量内の堆砂比率は、治水・利水容量比（＝治水容量：利水容量）と同等となるものと仮定し、これを考慮することとした。

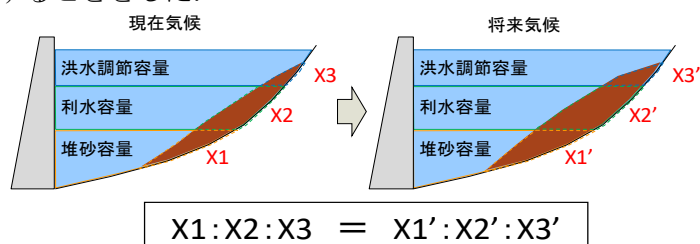


図 3.4 将来の貯水池内堆砂形状の予測手法

3.3.3 将来の流況・堆砂量予測

(1) 検討対象ダムの将来流況

「3.3.2 (1) 将来流況の予測手法」により算定した将来における A ダム、B ダムのダム地点日平均流入量時系列を図 3.5、図 3.6 に示す。図 3.5 より、A ダムでは冬期の一部を除き年間を通して将来流量が減少する。一方、図 3.6 より、B ダムでは春期～秋期にかけて将来流量が減少するものの、冬期～春期にかけては将来流量が増加する。いずれの流入量時系列についても将来流況では、かんがい需要により利水補給量が増大する春期～夏期に流量が減少する傾向のため、ダムの利水機能が低下することが予察される。

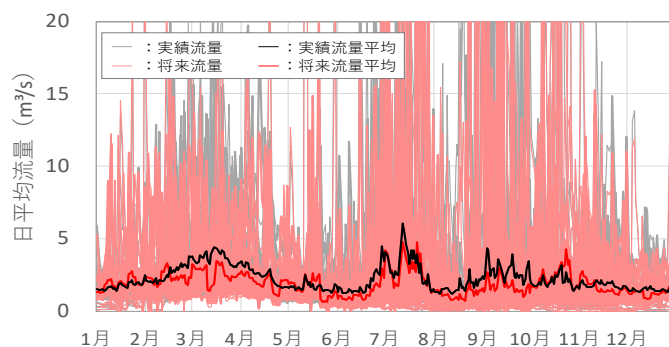


図 3.5 A ダム地点日平均流入量時系列

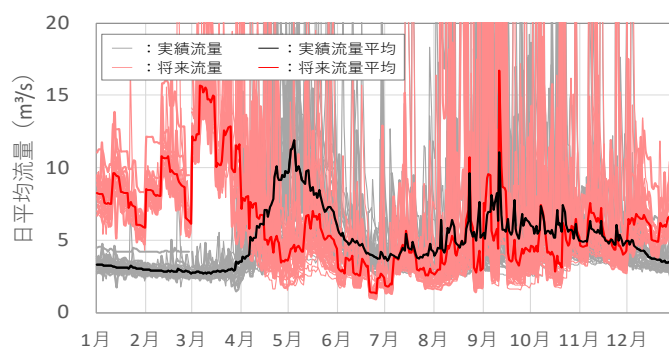


図 3.6 B ダム地点日平均流入量時系列

(2) 検討対象ダム将来堆砂量

「3.3.3 (2) 検討対象ダム将来堆砂量」により算定した将来における A ダム、B ダムの堆砂量を図 3.7、図 3.8 に示す。

図 3.7、図 3.8 より、A ダム、B ダムともに 2099 年の全堆砂率は、実績流況ケースに対し、将来流況ケースで 1%程度、将来流況（前倒し）ケースで 5%程度増加し、気候変動の影響がみられる。また、最も堆砂進行する将来流況（前倒し）ケースで 2099 年の A ダムの全堆砂率は 16%程度、有効容量内堆砂率は 8%程度であり、B ダムのそれは各々 22%程度、16%程度である。なお、将来総流量が減少する A ダムで将来の堆砂進行速度が増加する理由は、気象極端化により大規模洪水が増加し、大規模土砂流入現象が増えた結果である。

なお、本研究では Q-Qs 関係は日流量を対象に概略的に設定したものである。特に大規模洪水時の土砂流入量については、Q-Qs 関係の影響を大きく受けると想定されることから、上記の結果の評価については留意が必要である。

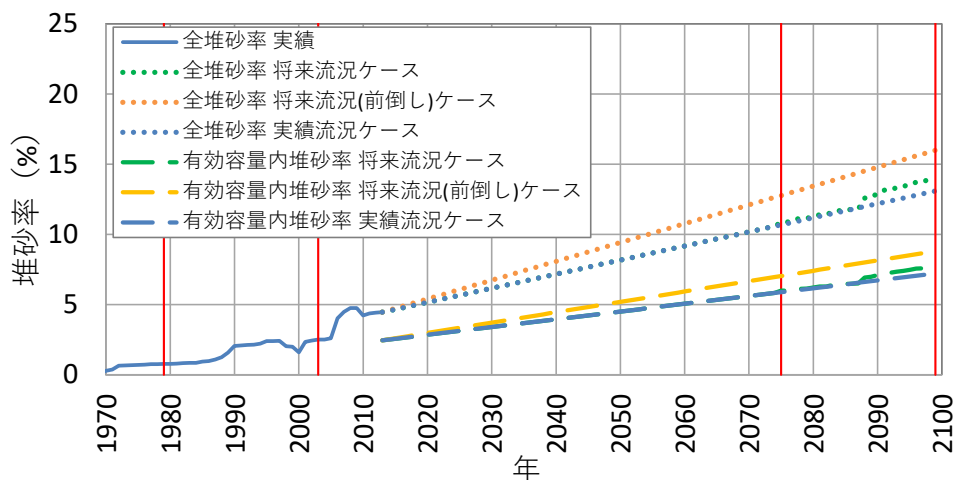


図 3.7 将来における堆砂率 (A ダム)

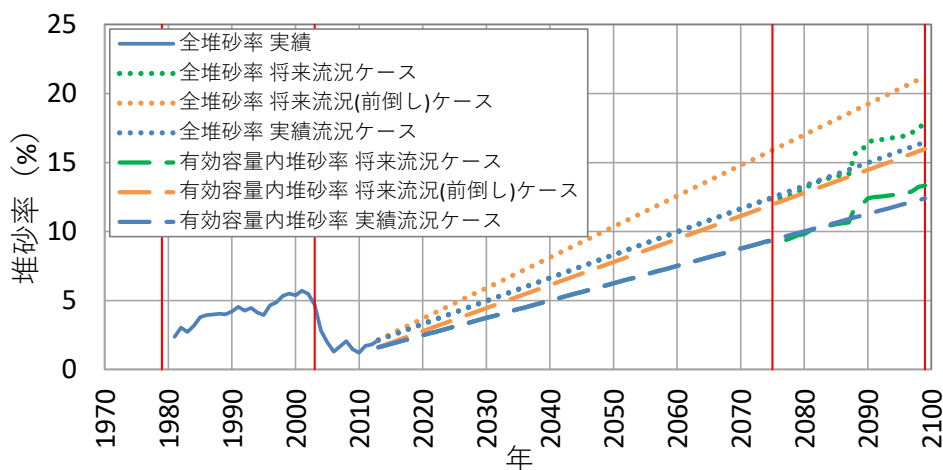


図 3.8 将来における堆砂率 (B ダム)

3.3.4 気候変動によるダム利水機能への影響評価

(1) 検討ケース

本研究で想定する現在流況は、Aダムで1968-2015年（48年間）、Bダムで1989-2014年（26年間）とした。

将来の有効容量内堆砂率は、堆砂進行速度が大きいBダムの結果を踏まえ、実績流況ケースから10%、将来流況（前倒し）ケースから20%、大規模洪水の頻発等により堆砂進行がさらに極端化する事態も想定した30%の3ケースを設定する。なお、Aダムについても比較の観点から上記3ケースを設定する。また、現在流況のケースについても、比較対照の観点から、将来流況のケースと同様に、Aダム、Bダムともに計画容量に比べ10～30%の堆砂率上昇を考慮したケースを設定する。

以上により設定した検討ケースを整理すると、表3.2に示すとおりとなる。

表 3.2 検討ケース

Case	流況	有効容量内堆砂率
1-1	現在流況	0%
1-2		10%
1-3		20%
1-4		30%
2-1	将来流況	0%
2-2		10%
2-3		20%
2-4		30%

(2) 利水計算手法及び評価方法

利水計算は、各ダムの利水補給ルールを参考に構築した利水計算モデルにより行い、河川流の流下や取水還元の時間差を考慮して半旬計算を実施した。

利水計算にあたっては、貯水率低下とともに取水量を制限する条件を設けることとし、他ダムの実績⁹⁾を参考に設定した取水制限率を考慮した（表3.3）。

評価は、パンク日数（貯水位が最低水位まで低下する日数と定義）、利水被害度（取水制限率（%）×取水制限実施日数（day）と定義）により行い、各ダムの評価期間における年平均値により行った。

表 3.3 取水制限率の設定概要

有効容量内貯水率 (%)	取水制限率 (%)
～40	0
40～30	10
30～25	20
25～	30

(3) 利水機能への影響分析

1) パンク日数及び利水被害度からの分析

各ダムのパンク日数と利水被害度の評価期間における年平均値を図 3.9～図 3.12 に示す。

図 3.9, 図 3.10 より, A ダム, B ダムともに, 将来流況ではパンク日数が増加し, 利水機能が低下する。B ダムでは, 年間総流入量が増加するにも関わらず利水機能が低下するが, この原因として, かんがい期における流量の減少が考えられる (図 3.6)。また, A ダム, B ダムともに, 堆砂進行に伴いパンク日数が増加し, 堆砂率 30%を境界にしてパンク日数が急増する傾向がみてとれる。このような傾向は既往研究¹⁰⁾においても認められていることから, ダムによらずに生じる傾向と考えられる。流況変化と堆砂進行の複合影響は, それぞれの影響の足し合わせによって説明できるものと考えられる。

図 3.11, 図 3.12 から, 将来流況及び堆砂進行に伴う利水被害度の増加がみられ, 両事象による利水機能の低下がみてとれる。なお, A ダムでは堆砂率 30%を境界とした利水機能の急激な低下が認められないが, これは今回の計算ではパンク時の取水制限率を 30%で頭打ちにしていることに起因するものと考えられる。一方, B ダムでは堆砂率 30%を境界とした利水機能の急激な低下が認められるが, これは後述するように, 堆砂率 30%条件では利水容量の大幅低下が生じるためと考えられる。

表 3.4 ダムの利水機能への影響分析結果 (A ダム)

	現在流況				将来流況			
	1-1 計画H-V	1-2 10%進行 H-V(現況)	1-3 20%進行 H-V(現況)	1-4 30%進行 H-V(現況)	2-1 計画H-V	2-2 10%進行 H-V(現況)	2-3 20%進行 H-V(現況)	2-4 30%進行 H-V(現況)
パンク回数 (回/年)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4
パンク日数 (日/年)	1.7	1.7	2.0	3.2	3.2	3.8	4.1	5.6
取水制限率 (%・日/年)	1,026.0	1,112.5	1,185.4	1,267.7	1,209.4	1,318.8	1,397.9	1,486.5
取水制限率 (% ² ・日/年)	26,343.8	29,104.2	31,437.5	33,947.9	31,239.6	34,937.5	37,354.2	40,031.3

表 3.5 ダムの利水機能への影響分析結果 (B ダム)

	現在流況				将来流況			
	1-1 計画H-V	1-2 10%進行 H-V(現況)	1-3 20%進行 H-V(現況)	1-4 30%進行 H-V(現況)	2-1 計画H-V	2-2 10%進行 H-V(現況)	2-3 20%進行 H-V(現況)	2-4 30%進行 H-V(現況)
パンク回数 (回/年)	0.0	0.0	0.0	1.0	1.8	1.8	1.8	1.2
パンク日数 (日/年)	0.0	0.0	0.0	93.0	33.2	31.3	28.8	109.8
取水制限率 (%・日/年)	334.6	3,013.5	5,769.2	11,010.0	2,088.5	3,760.4	6,383.1	11,010.0
取水制限率 (% ² ・日/年)	7,192.3	89,338.5	119,861.5	330,300.0	59,946.2	111,580.8	144,961.5	330,300.0

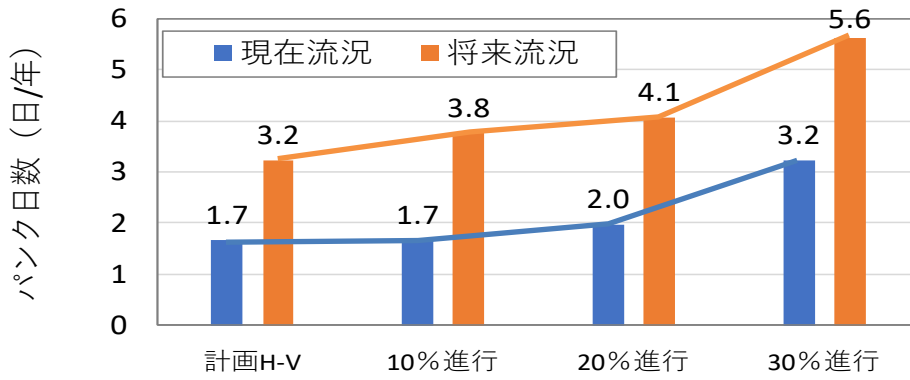


図 3.9 A ダムパンク日数

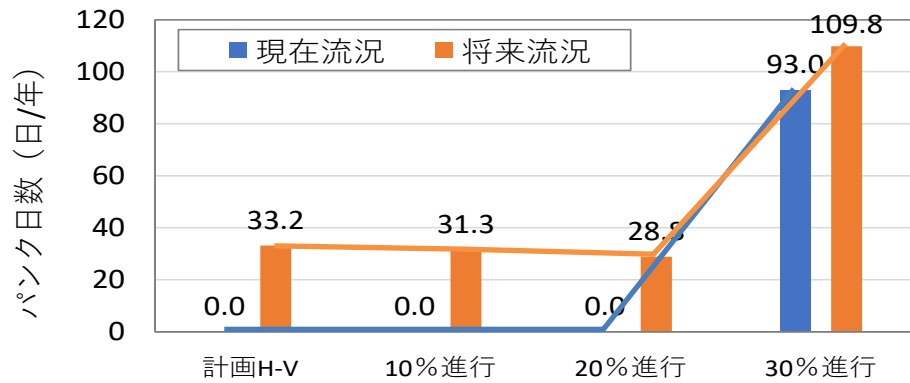


図 3.10 B ダムパンク日数

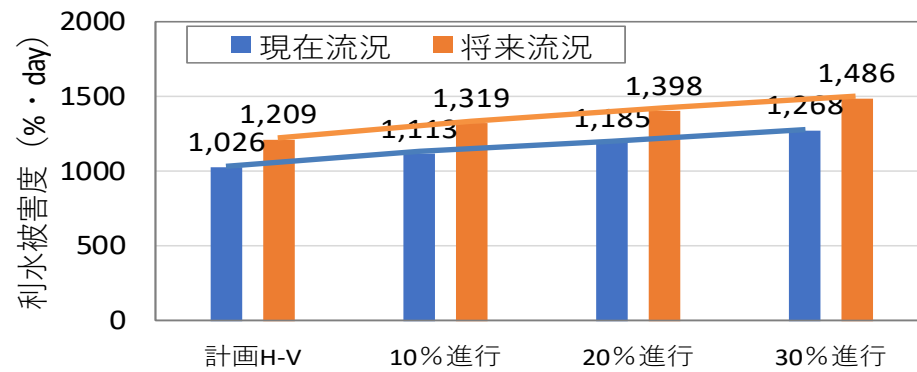


図 3.11 A ダム利水被害度

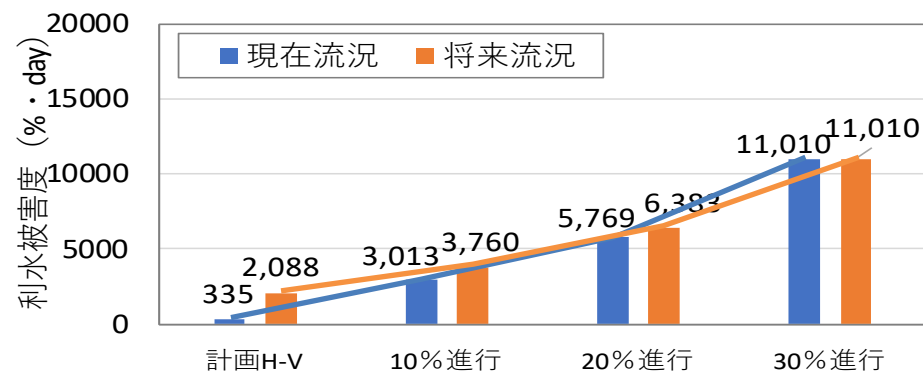


図 3.12 B ダム利水被害度

2) 貯水位変動からの分析

各ダム現在の及び将来流況において、比較的大規模な渇水が発生した年の貯水位変動曲線を図 3.13～図 3.16 に示す。

図 3.13, 図 3.14 より, A ダムの将来流況条件では, かんがい期における流量減少に起因し, 貯水位低下が現況より前倒しで生じ, 貯水位回復することなくパンクが生じる可能性がある。また, 堆砂進行による容量減少に伴い, この傾向が顕著になる。

図 3.15, 図 3.16 より, B ダムにおいても, A ダムと同様の傾向が認められる。B ダムでは, 堆砂進行による容量減少に伴い, 取水制限が常態的に生じる。さらに, 洪水期には, 堆砂により利水容量がゼロになり, 貯留効果が得られないことを確認した。

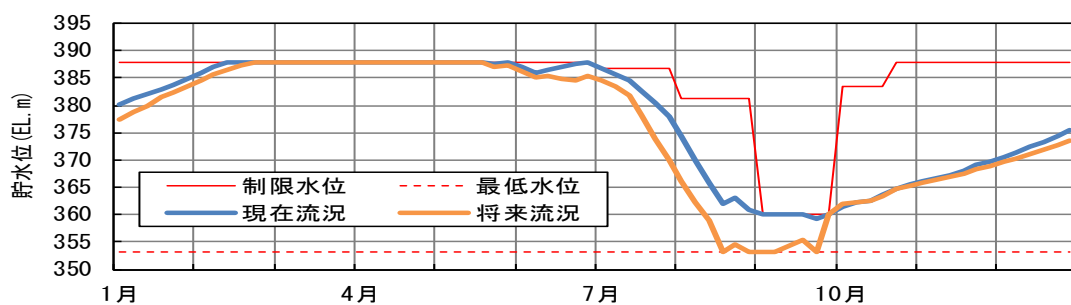


図 3.13 A ダム貯水位変動曲線 (堆砂率 0%条件)

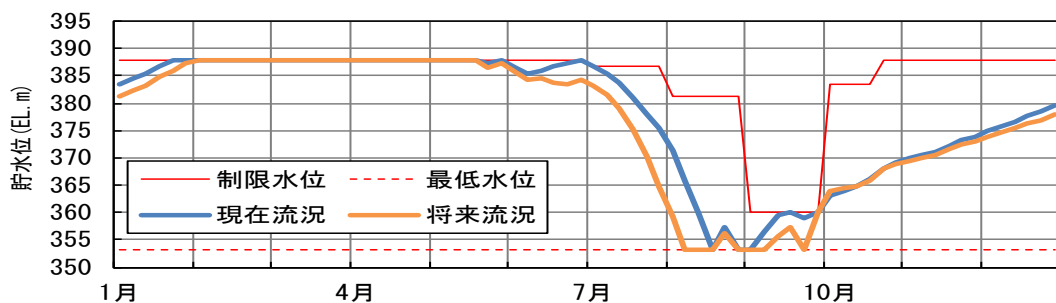


図 3.14 A ダム貯水位変動曲線 (堆砂率 30%条件)

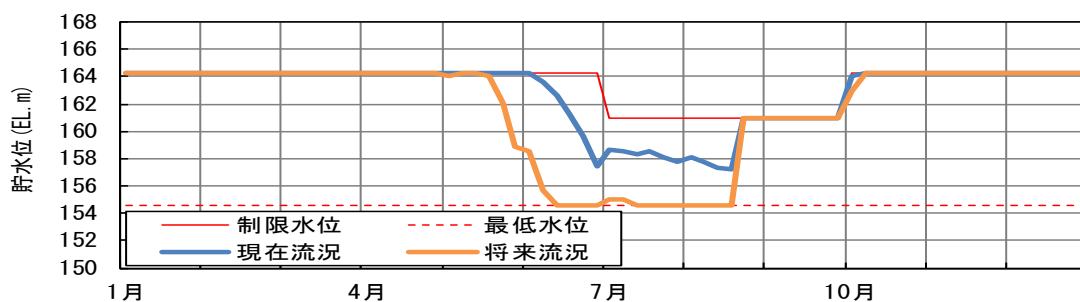


図 3.15 B ダム貯水位変動曲線 (堆砂率 0%条件)

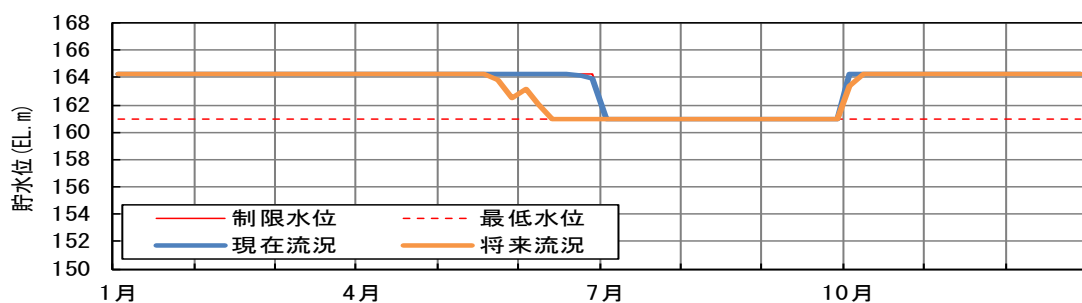


図 3.16 B ダム貯水位変動曲線 (堆砂率 30%条件)

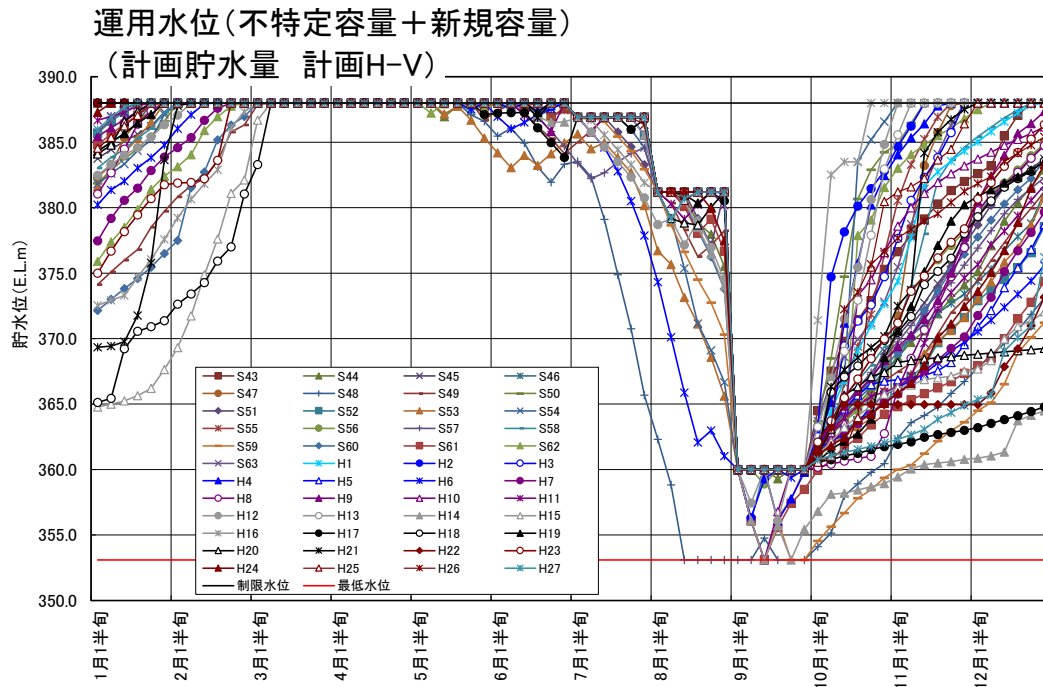


図 3.17 A ダム利水計算 現在流況【計画容量】

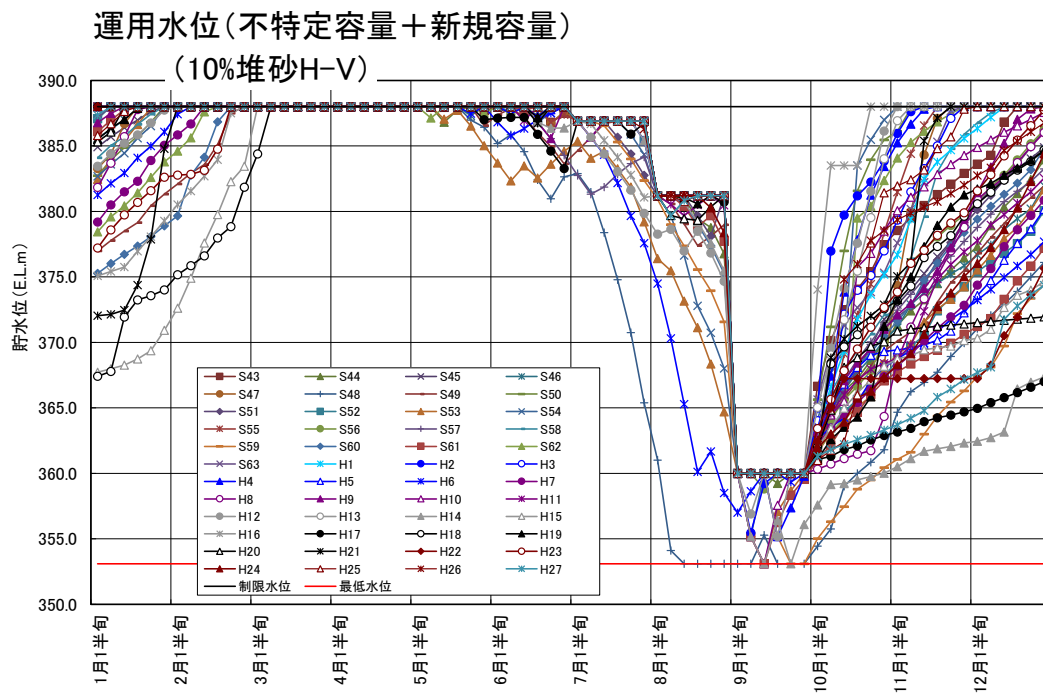


図 3.18 A ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 10%】

運用水位(不特定容量+新規容量)

(20%堆砂H-V)

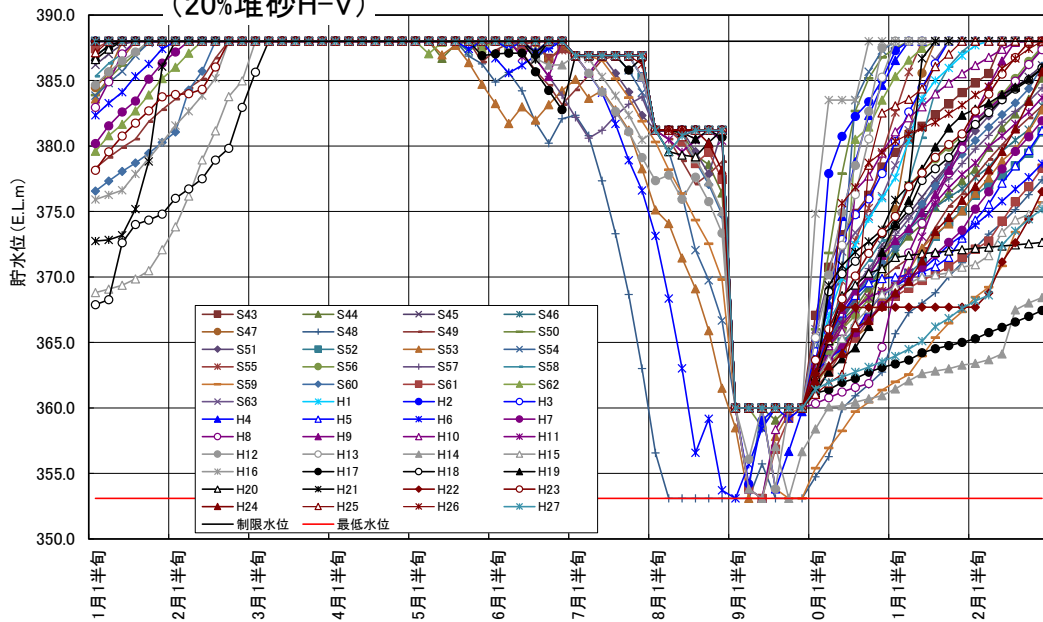


図 3.19 A ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 20%】

運用水位(不特定容量+新規容量)

(30%堆砂H-V)

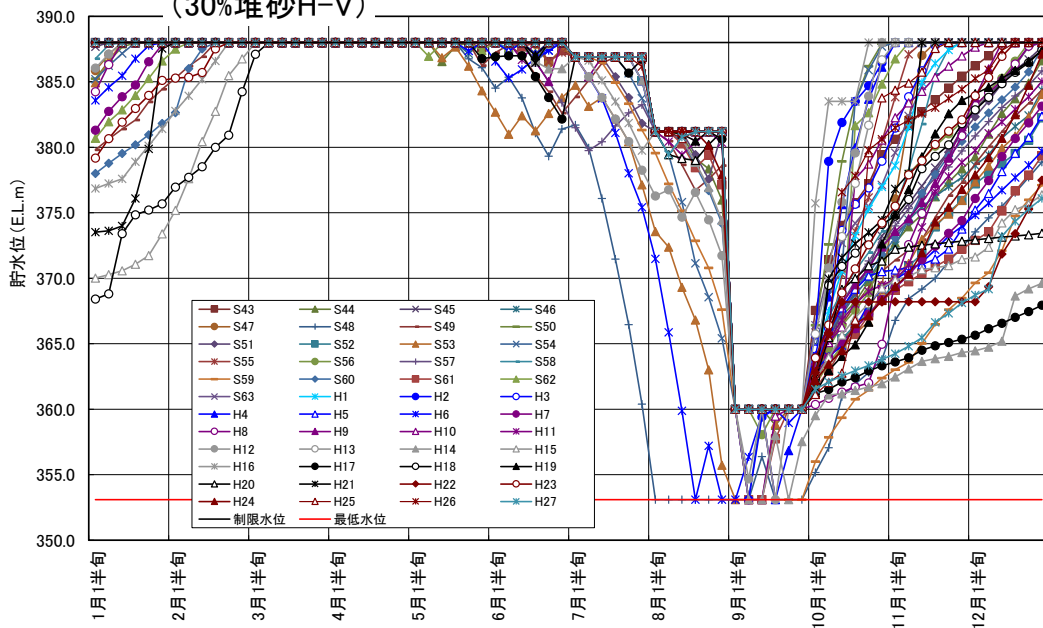


図 3.20 A ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 30%】

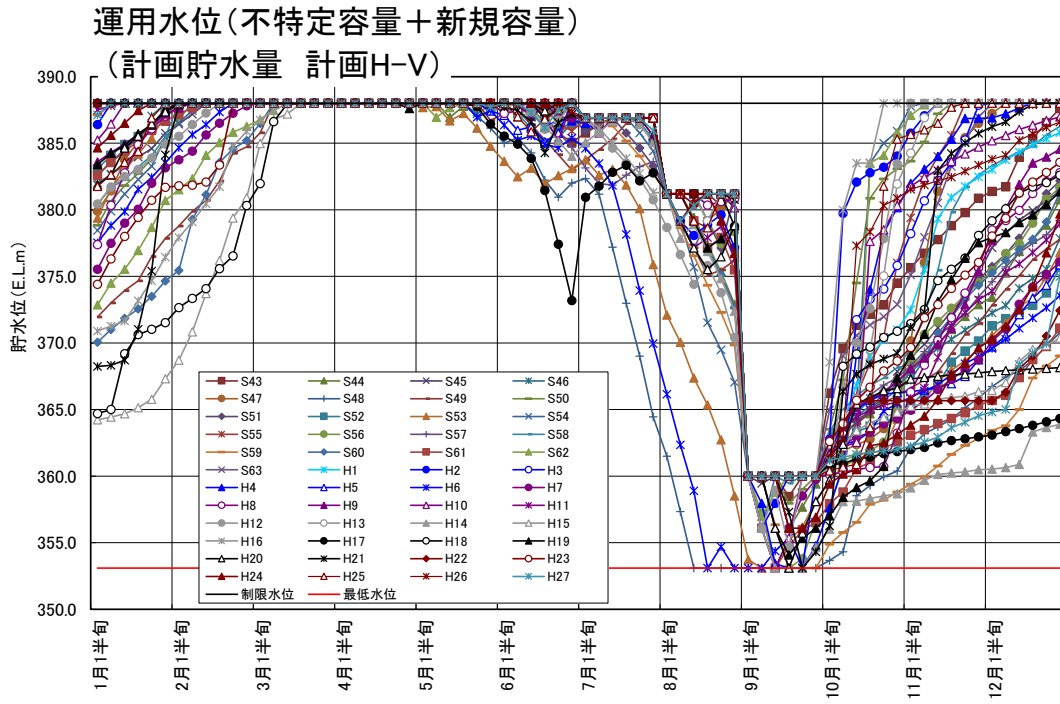


図 3.21 A ダム利水計算 将来流況【計画容量】

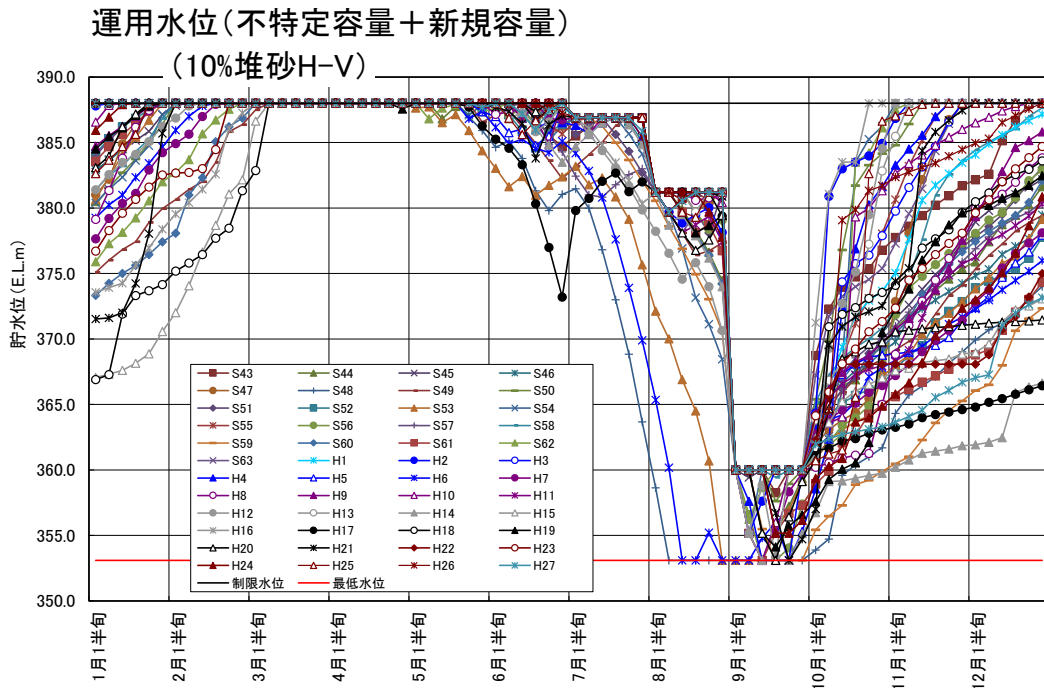


図 3.22 A ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 10%】

運用水位(不特定容量+新規容量)

(20%堆砂H-V)

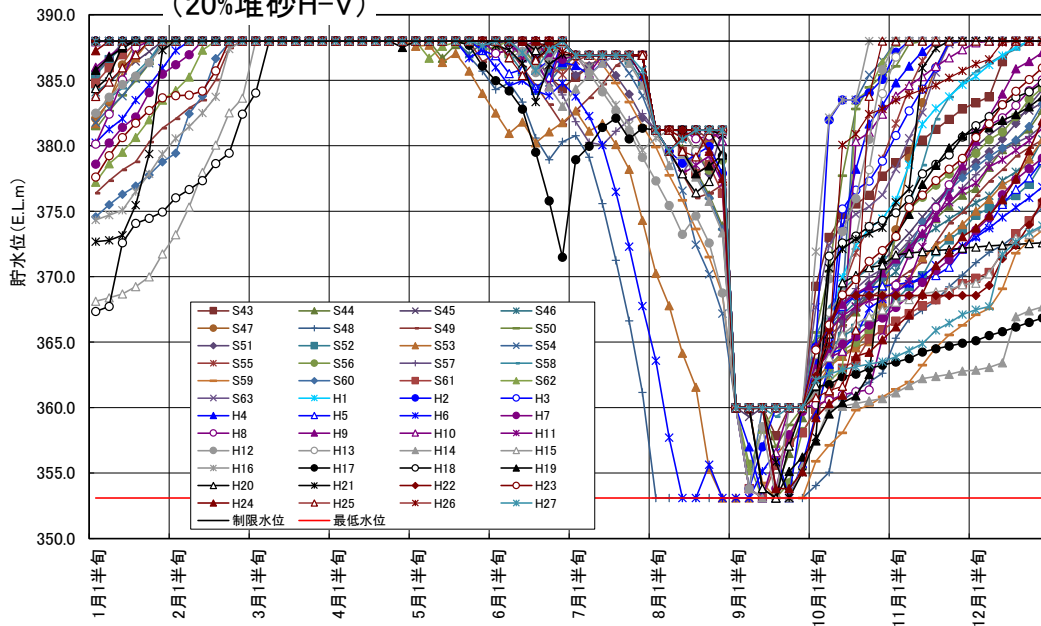


図 3.23 A ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 20%】

運用水位(不特定容量+新規容量)

(30%堆砂H-V)

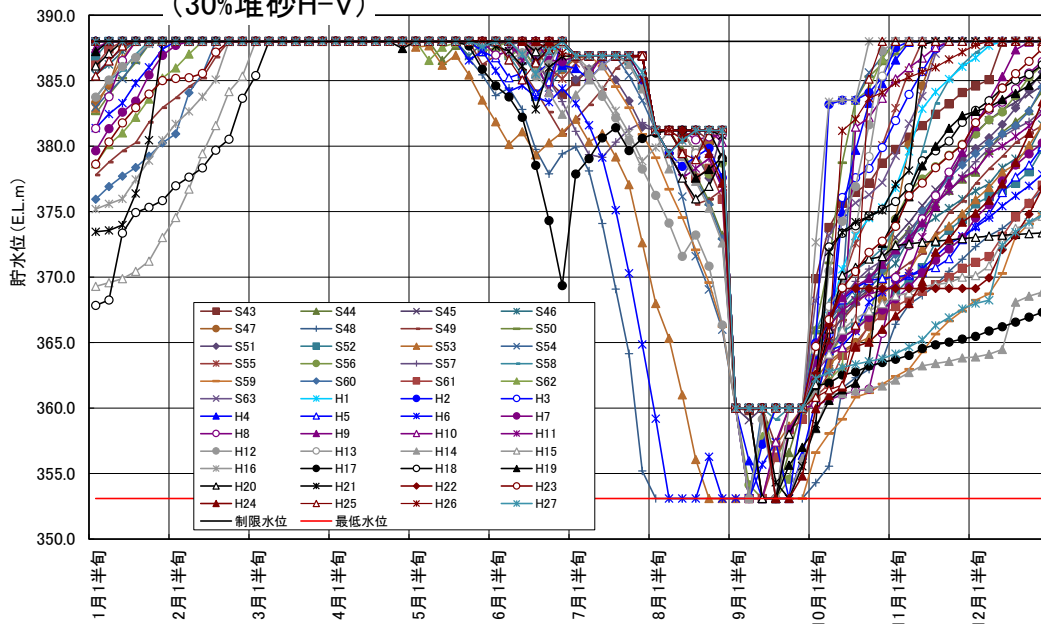


図 3.24 A ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 30%】

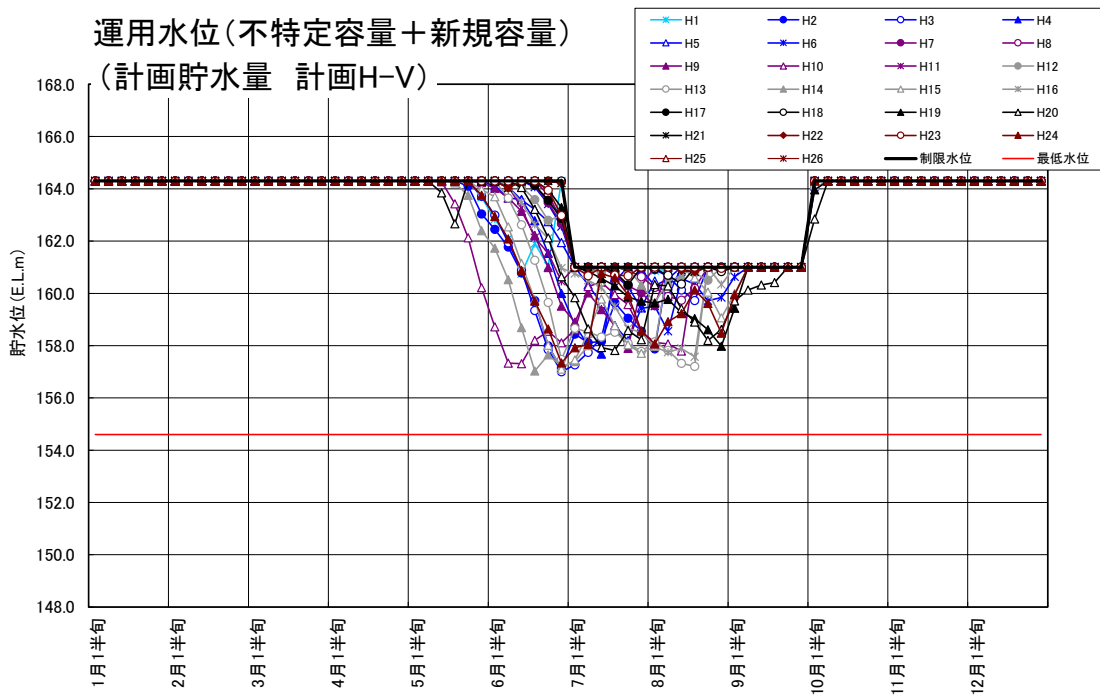


図 3.25 B ダム利水計算 現在流況【計画容量】

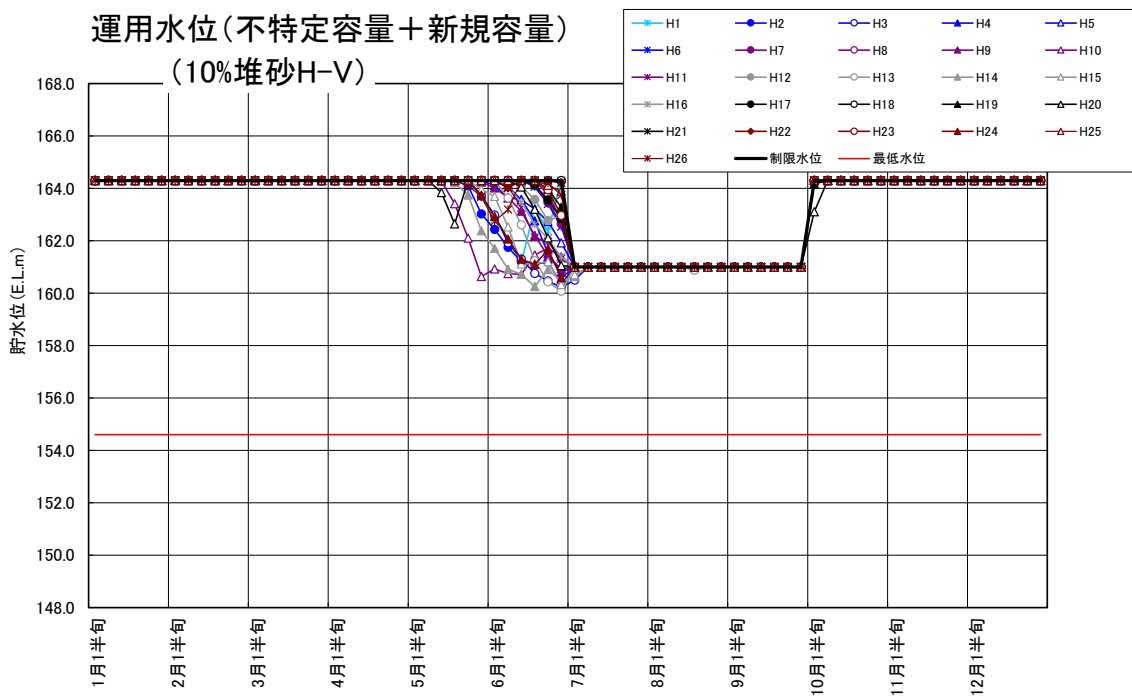


図 3.26 B ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 10%】

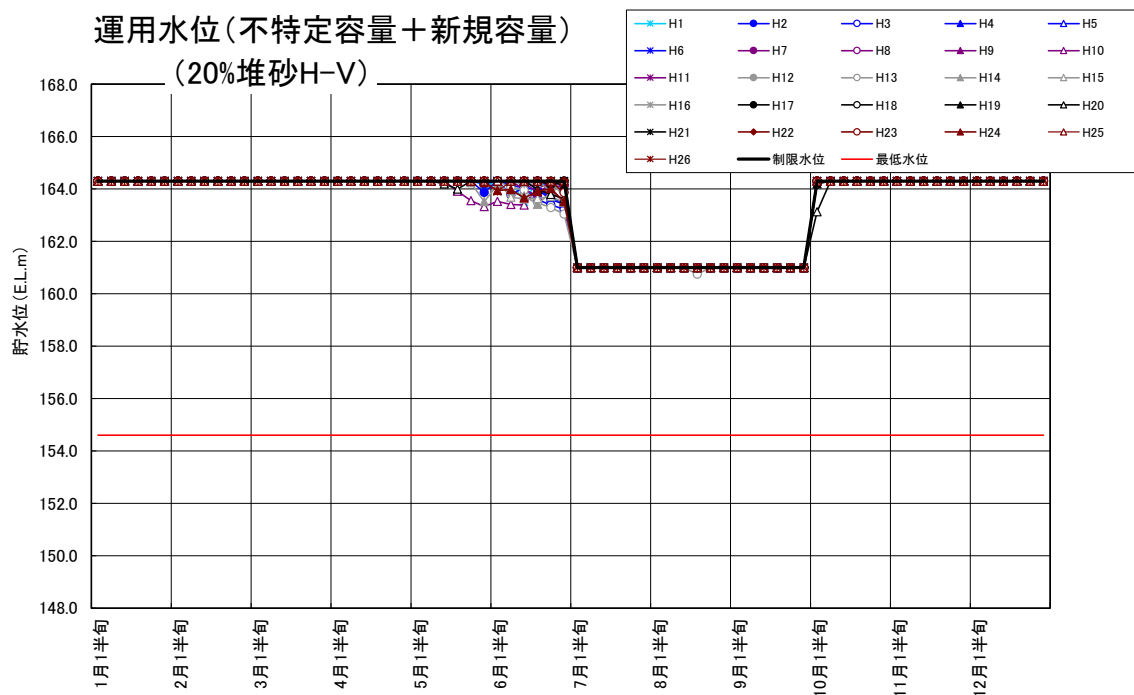


図 3.27 B ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 20%】

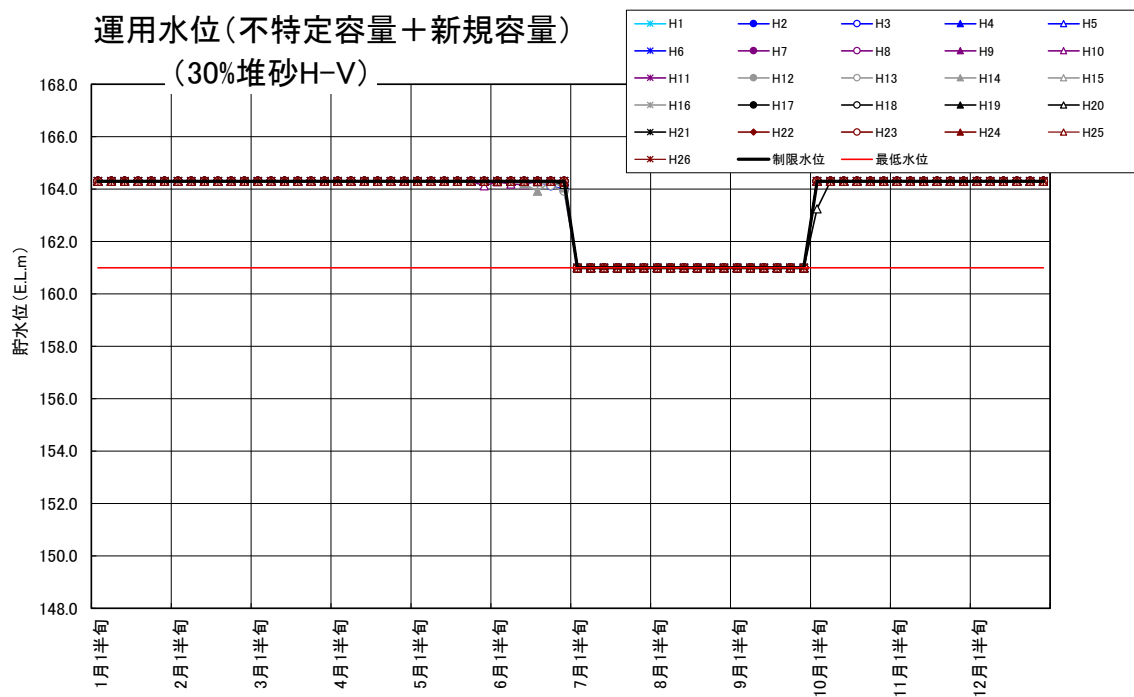


図 3.28 B ダム利水計算 現在流況【有効容量内堆砂率 30%】

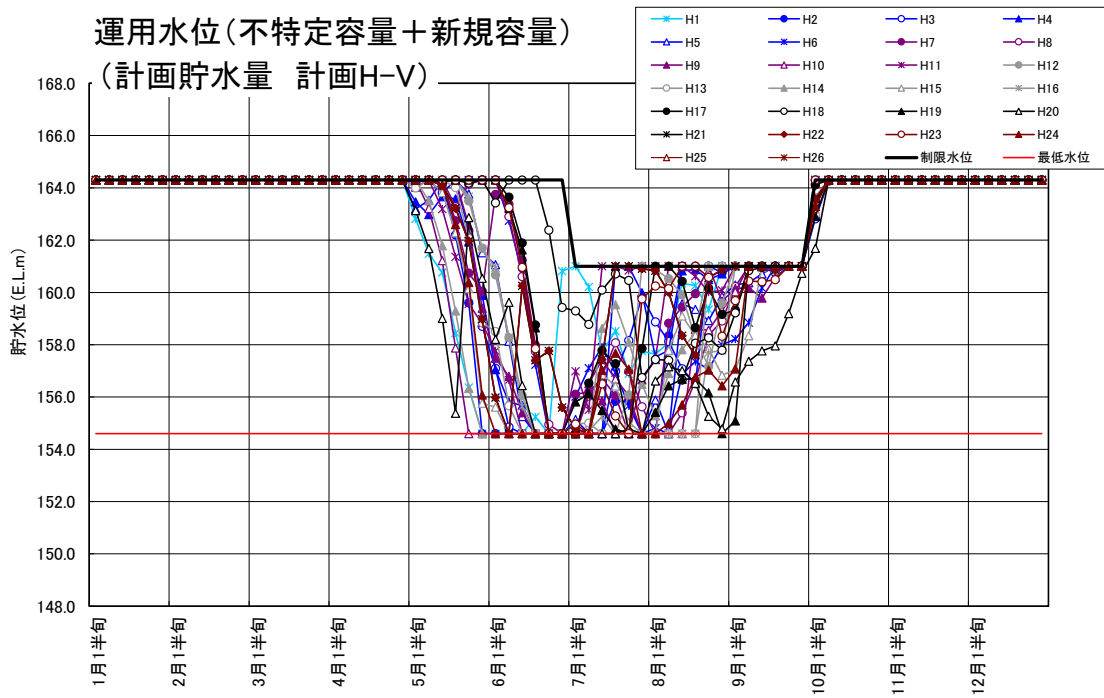


図 3.29 B ダム利水計算 将来流況【計画容量】

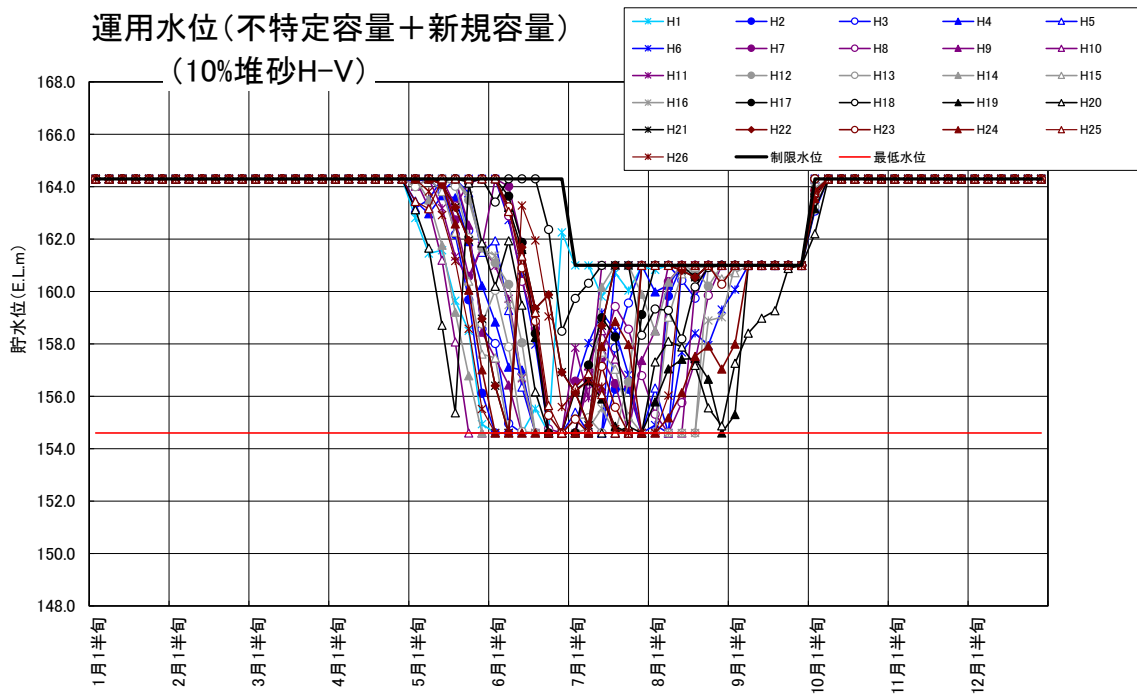


図 3.30 B ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 10%】

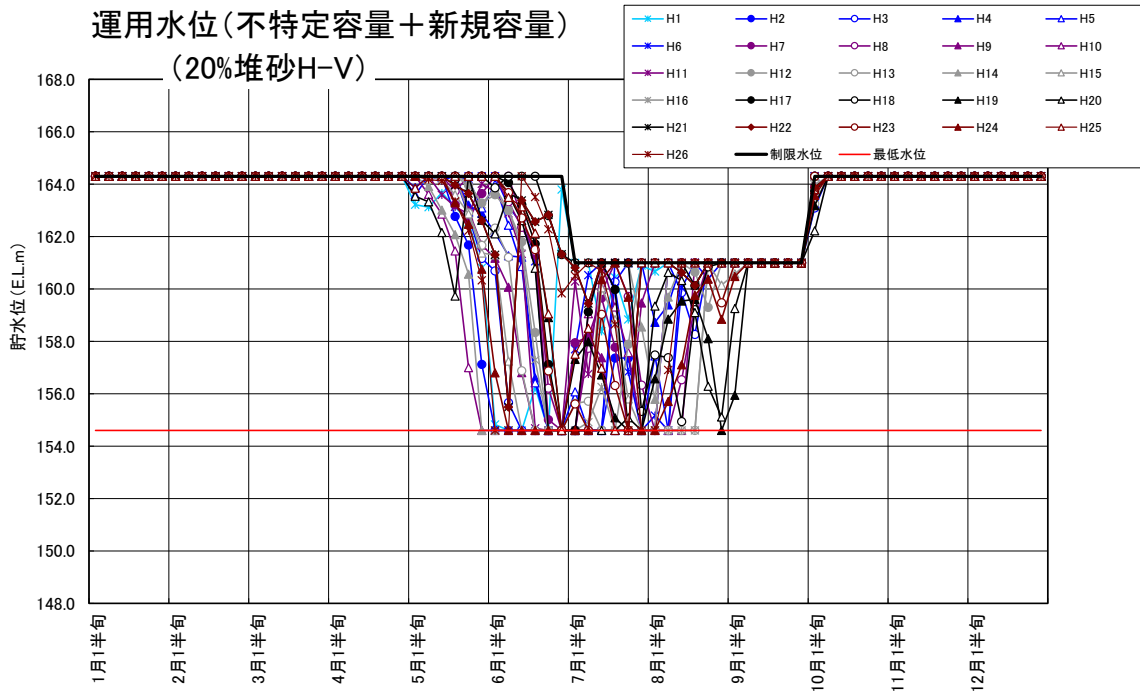


図 3.31 B ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 20%】

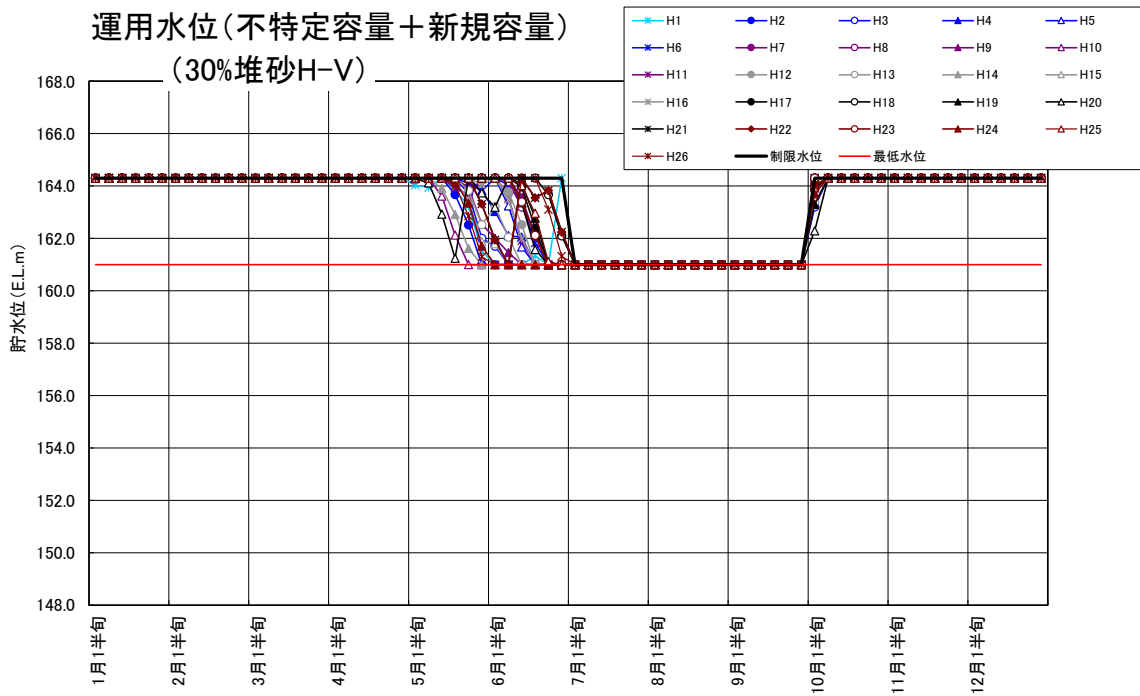


図 3.32 B ダム利水計算 将来流況【有効容量内堆砂率 30%】

3.3.5 個別ダムを対象とした影響検討のまとめ

本節で得られた結論は以下のとおりである。

■ 流況変化の影響

- 1) 将来の流況変化により、特に制限水位まで水位低下操作を実施する洪水期においてダムの利水機能が低下する傾向を確認した。洪水期においてダムの利水機能が低下するのは、日本においては洪水期と、利水需要が高まるかんがい期の期間が一致しているためと考えられる。
- 2) 冬期～春期に総流量が増加しても、流況変化によりかんがい期における流量が減少すると利水機能が低下する可能性がある。

■ 堆砂進行の影響

- 1) 堆砂進行により有効容量の減少が進むと、特に制限水位まで水位低下操作を実施する洪水期においてダムの利水機能が低下する傾向を確認した。
- 2) 既往研究¹⁰⁾で確認されているように、堆砂率 30%を境界に利水機能低下が顕著になる傾向を確認し、当現象がダムによらずに生じる可能性が示唆された。

■ 流況変化と堆砂進行の複合影響

- 1) 流況変化と堆砂進行の複合影響（それぞれの影響の足し合わせ）により、利水機能低下が増大する傾向を確認した。

今後の課題は以下のとおりである。

- 1) 将来堆砂量の予測手法の精度向上や堆砂進行速度の地域特性の分析を行う。
- 2) ダム地点の流況予測において、上流にダムがある場合におけるダムの流量調節効果は考慮していないため、これを考慮する。
- 3) 気候変動予測の不確実性も想定されることから、複数の全球大気モデル、温室効果ガス排出シナリオ、流出モデルによる影響評価を実施する。

3.4 複数ダムから構成されるダム群を対象とした影響検討

3.4.1 検討対象ダム群の概要

検討対象ダム群は、関東地方に位置する4基の多目的ダムからなるKダム群とした。Kダム群の概要及びダム群を構成するa～dダムの諸元は図3.33、表3.6に示すとおりである。「5. 気候変動と堆砂進行がダムの治水・利水機能に与える影響の全国的評価」で示すが、bダムはB-2類型（気候変動の結果、流量は減少するものの、有効容量は十分と評価されるダム）に、cダム・dダムはC-2類型（気候変動の結果、十分な利水機能は期待できず、かつ貯水池運用の工夫によっても影響緩和が難しいダム）に分類され、ダム群としては将来、利水機能低下が想定される。

Kダム群は統合運用されており、下流の基準頭首工に向けて連携して利水補給を実施している。Kダム群近傍では古くから電力ダム開発が進められている特徴を有している。なお、Kダム群のbダム・dダム間では双方の貯水池容量を有効に活用するため、トンネルによるダム間導水が実施されているが、本検討では簡易なモデルとするため当該導水は考慮しないこととした。

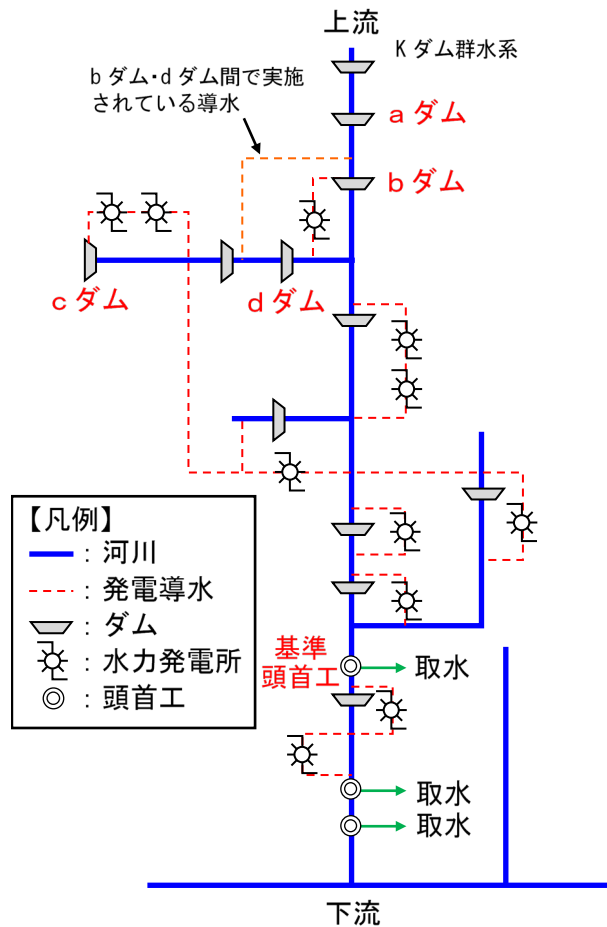


図 3.33 検討対象ダム群の概要

表 3.6 検討対象ダム群の諸元

ダム名	aダム	bダム	cダム	dダム	eダム
ダムの目的 ^{※1}	FNAWI	FNP	FNP	FNAWI	FNAWP
ダム型式 ^{※2}	G	G	A	A	G
竣工年	2012年	1956年	1966年	1983年	1990年
ダム高(m)	119.0	112.0	117.0	140.0	70.0
集水面積(km ²)	102	271	179	324	21
総貯水容量(千m ³)	75,000	55,000	87,600	83,000	6,100
有効貯水容量(千m ³)	72,000	46,000	73,100	76,000	5,330
洪水期利水容量(千m ³)	42,000	11,200	48,600	40,000	2,100
非洪水期利水容量(千m ³)	72,000	32,000	73,100	76,000	4,100
堆砂容量(千m ³)	3,000	9,000	14,500	7,000	770
堆砂率(堆砂量/総貯水容量)(%) ^{※3}	0.6	6.4	6.3	8.4	6.7
堆砂率(堆砂量/堆砂容量)(%) ^{※3}	14.5	38.9	38.0	100.1	53.0
貯水池回転率 ^{※4}	1.6	6.2	3.0	2.1	6.5
洪水期間	6/15~9/30	6/15~9/30	6/15~9/30	7/1~9/30	6/16~10/10
ダム類型(利水類型) ^{※5}	—	B-2	C-2	C-2	

※1 F: 洪水調節, N: 不特定用水, 河川維持用水, A: かんがい用水, W: 上水道用水, I: 工業用水, P: 発電

※2 G: 重力式コンクリートダム, A: アーチ式コンクリートダム

※3 2018年度末時点

※4 データが得られた下記期間の貯水池年回転率の平均値

aダム: 2013・2015~2019年, bダム: 2010・2013・2015~2019年, c・dダム: 2010~2019年, eダム: 2011~2019年

aダム: 2013・2015~2019年, bダム: 2010・2013・2015~2019年, c・dダム: 2010~2019年

※5 aダムは、比較的近年完成のダムのため、ダム類型を行うためのデータが不足

3.4.2 検討対象ダム群の将来流況

(1) 将来流況の予測手法

気候変動予測では、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM3.2S) による 150 年連続ラン (計算期間: 1950~2099 年) における気温・降水量変化を利用した。なお、150 年連続ランのアンサンブル数は 1 つのみであり、温室効果ガスの排出シナリオは高位参照シナリオ RCP8.5、海面水温は CMIP5 の SST アンサンブル平均である。次に、全球大気モデルから算出される蒸発散量、融雪量、地上到達降雨量を分布型流出モデル Hydro-BEAM に組み込み、検討対象ダム群のうち上流に位置する a ダム・c ダムの積雪・融雪過程も考慮した日平均河川流量をそれぞれ求めた。日平均河川流量は、タイムステップ 10 分 (出力 1 時間) で計算した 24 時間の流量を平均したものである。詳細は Kojiri⁷⁾、Sato⁸⁾を参照されたい。

利水機能評価においては、全球大気モデルや流出モデルに含まれるバイアスを排除し、気候変動による流況変化の影響をより明確に評価することを目的として、計算流況の補正を実施した。具体的には、後述するように利水補給では平水流量以下の流量の影響が大きいことを確認しているため、本検討では平水流量に着目し、(2)式により流況補正を行った。補正係数 α は、a ダム、c ダムそれぞれで検討した結果、両ダム地点とも $\alpha=0.47$ となった。なお、補正係数 α の設定期間はダムの建設年を考慮し、a ダムは 2015~2019 年、c ダムは 2010~2019 年とした。なお、計算流況の低水領域におけるより精度の高いバイアス補正については、今後の課題とする。

$$\text{計算流況 (補正後)} = \text{計算流況 (補正前)} \times \alpha \quad (2)$$

ここに、 α : 補正係数 ($=Q_{185}/Q'_{185}$)
 Q_{185} : 実績流況の平水流量の平均値
 Q'_{185} : 計算流況の平水流量の平均値

(2) 検討対象ダム群の将来流況

図 3.34 に a ダム及び c ダムの実績流況、補正前後の計算流況を示す。図 3.34 より、a ダム・c ダムともに、12~2 月は計算流量に比べて補正前後とも実績流量の方が若干大きく、5~6 月は計算流量に比べて補正前後とも実績流量の方が若干小さいものの、夏期の流量は実績値と計算値が概ね同程度である。ここで、後述するように、ダムの利水機能評価では、洪水期における貯水位低下時期の影響が大きいことを確認している。前述の補正方法により当該時期の流量補正ができていないものと判断し、本検討で作成した計算流量 (補正後) を利水検討に用いることとした。なお、現時点では流域の涵養効果等の詳細な流出過程が十分考慮できていないと想定されるが、これらの精度向上については今後の課題とする。

計算流況を 20 年ピッチで整理すると図 3.35 に示すとおりであり、1~3 月の冬期の流入量に増加が明確な増加がみられる他は、現在気候から将来気候にかけての流況の明瞭な変化は認められない。さらに詳細に分析するため、図 3.39 には、ダムの利水機能評価に影響が大きいと考えられる洪水期 (6/1~9/30) における総流入量を整理した結果を示す。図 3.39 の

中には 10 年毎の平均値を横線で示した結果も併記した。図 3.39 より，2060 年頃から洪水期の流量が低減する傾向がみてとれ，ダムの利水機能への影響が想定される。

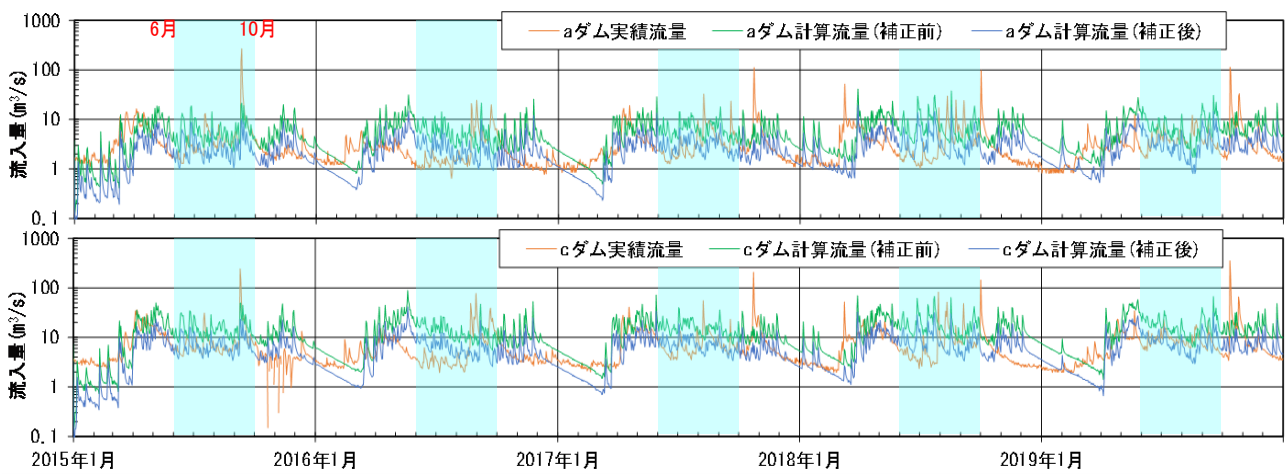


図 3.34 実績流況及び補正前後の計算流況（上図：a ダム，下図：c ダム）

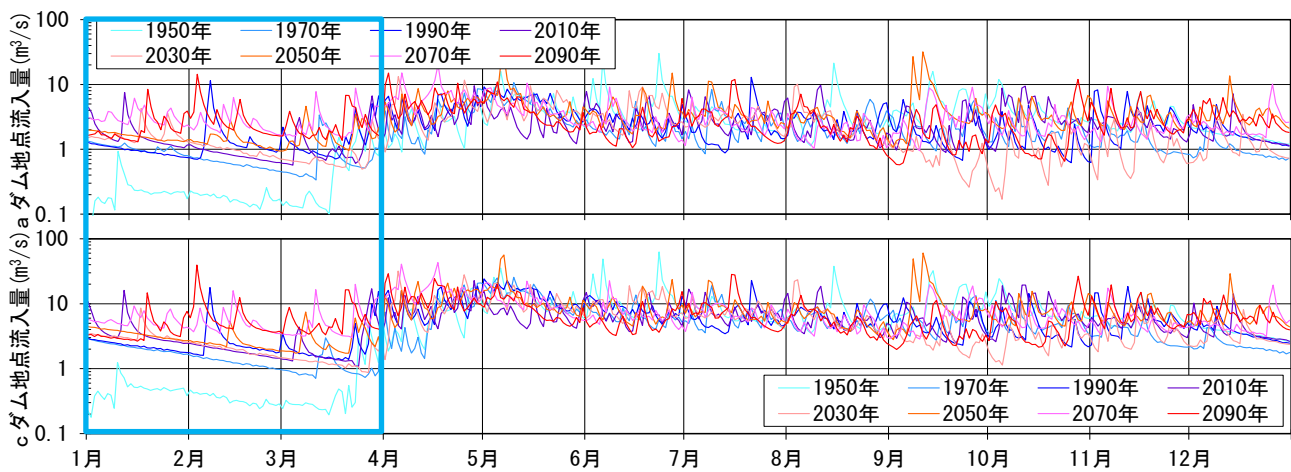


図 3.35 補正後の計算流況（上図：a ダム，下図：c ダム）

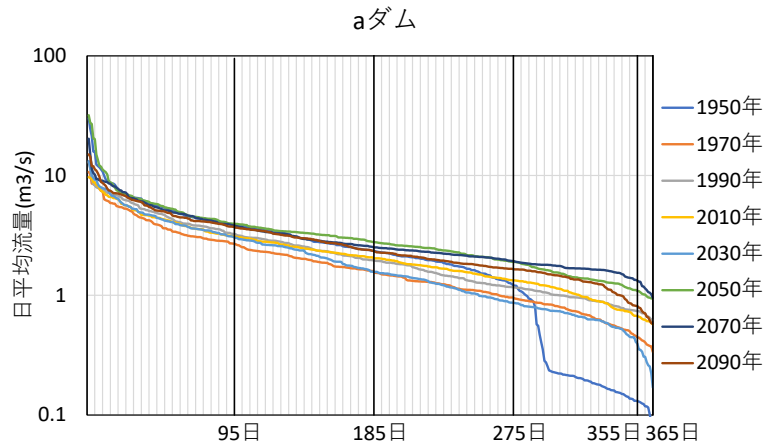


図 3.36 補正後の計算流況による流況曲線 (a ダム)

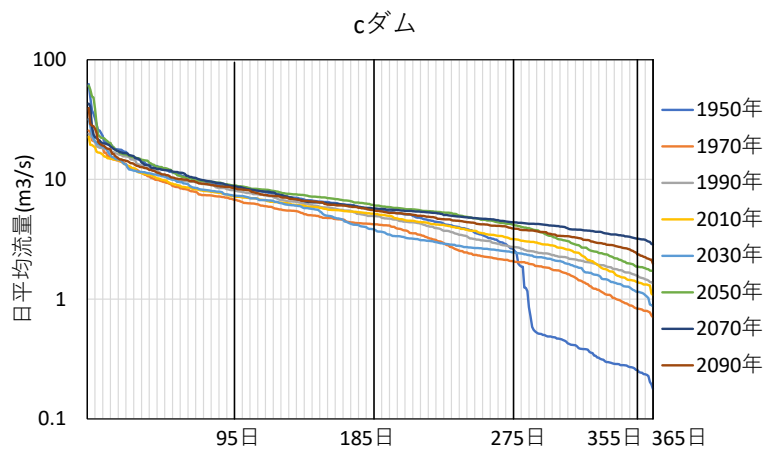


図 3.37 補正後の計算流況による流況曲線 (c ダム)

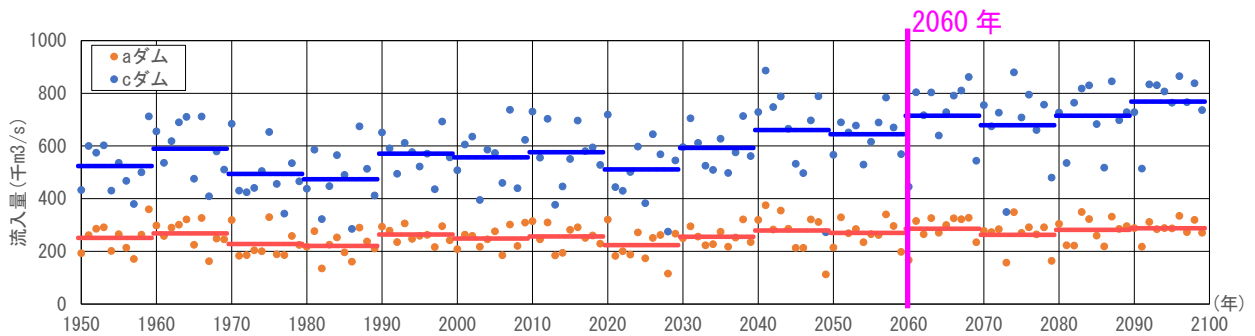


図 3.38 補正後の計算流況より求めた年間総流入量

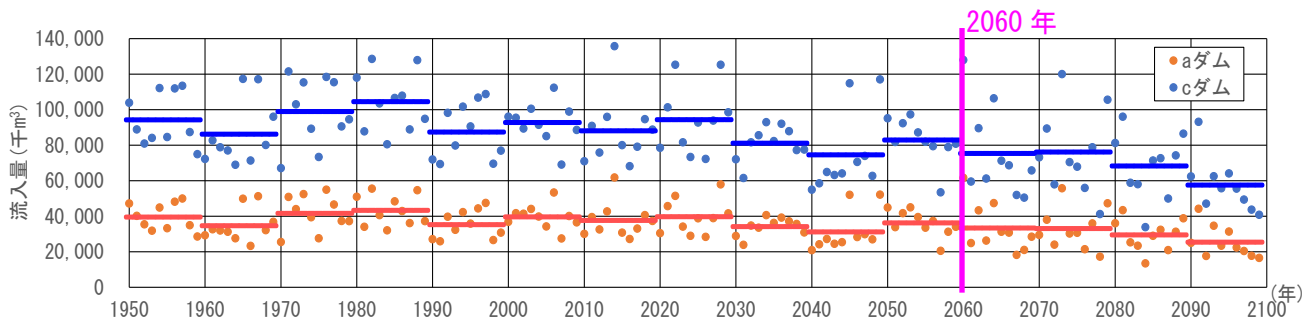


図 3.39 補正後の計算流況より求めた洪水期 (6/1~9/30) における総流入量

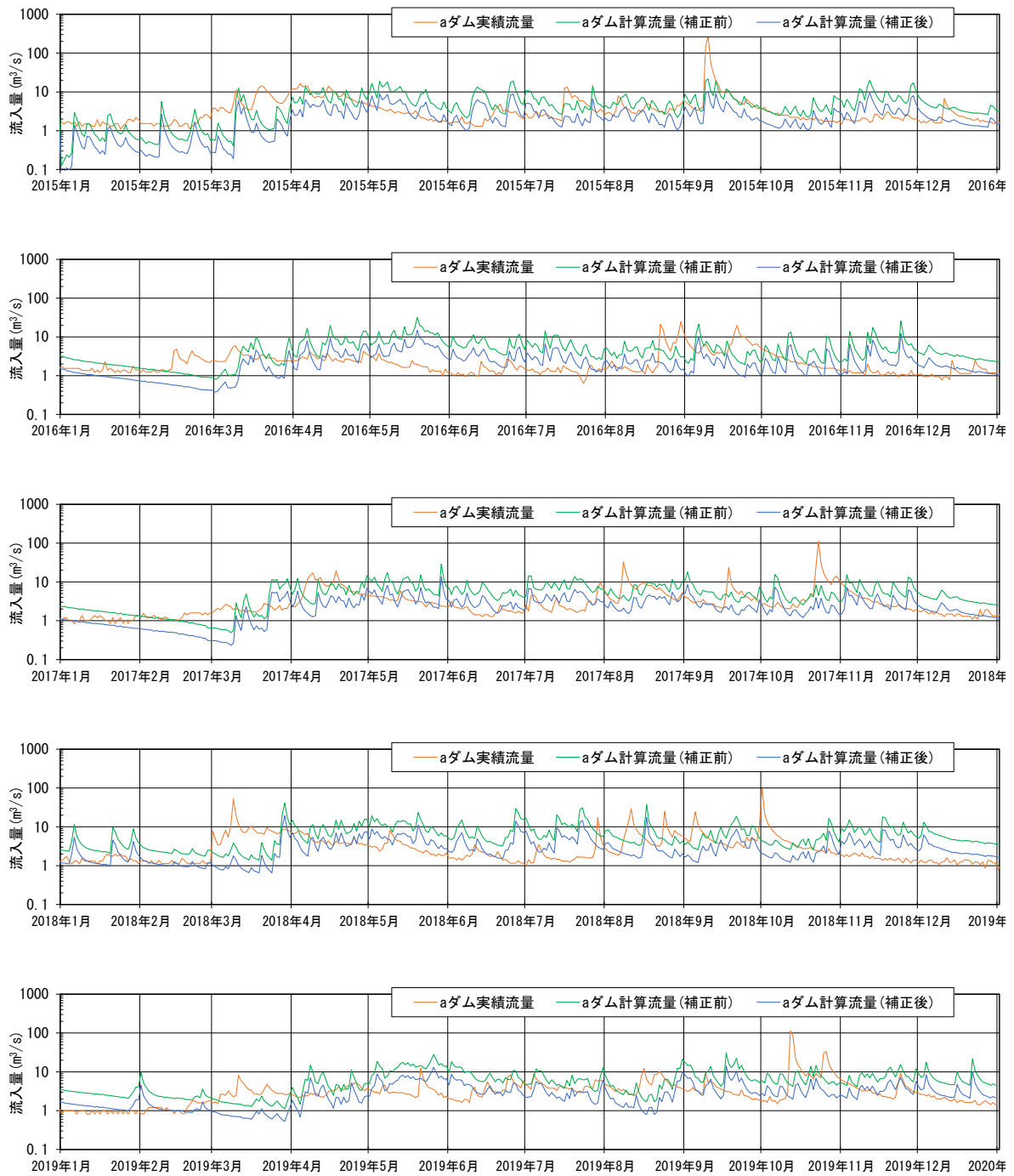


図 3.40 実績流況及び補正前後の計算流況 (aダム)

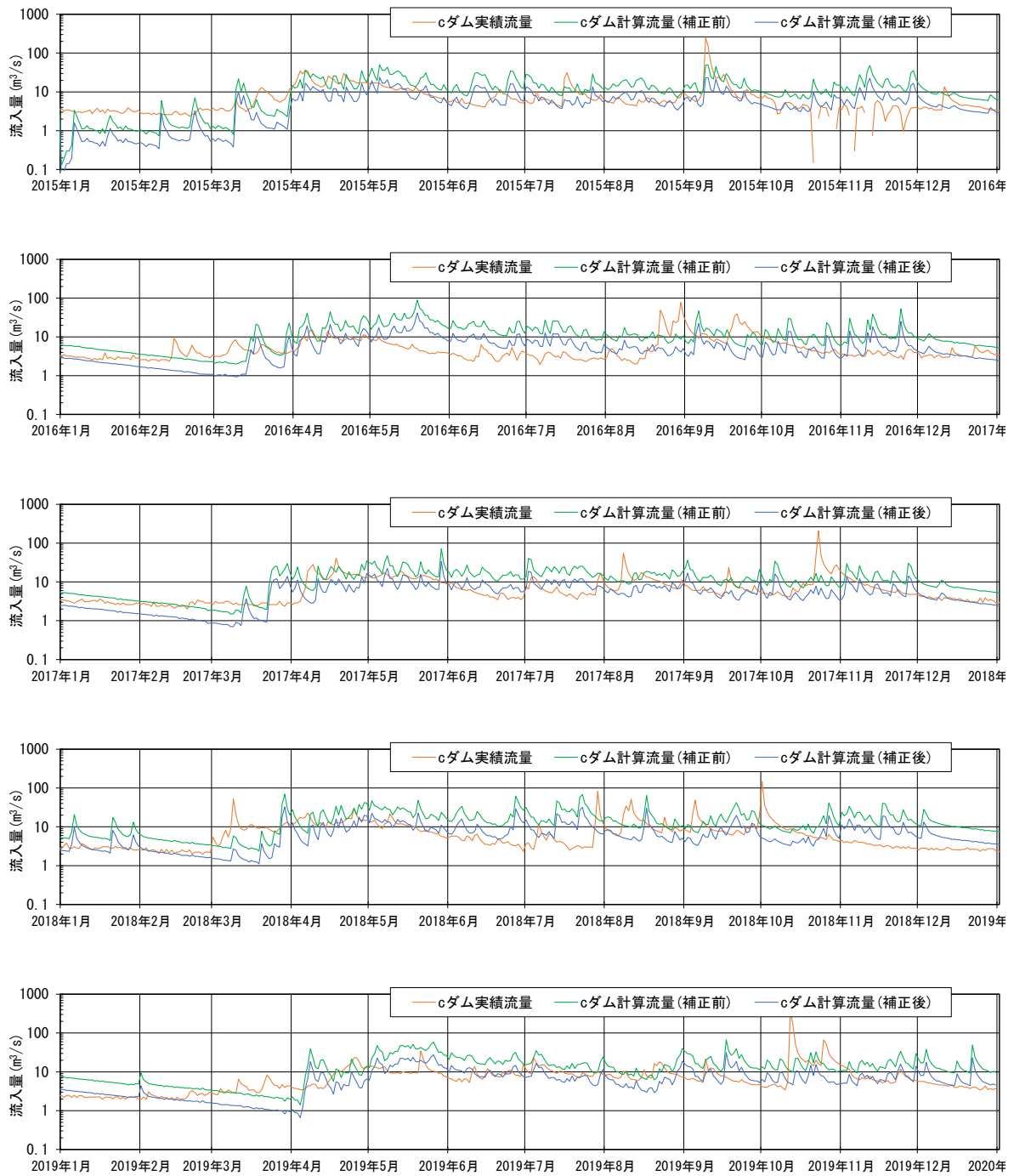


図 3.41 実績流況及び補正前後の計算流況 (cダム)

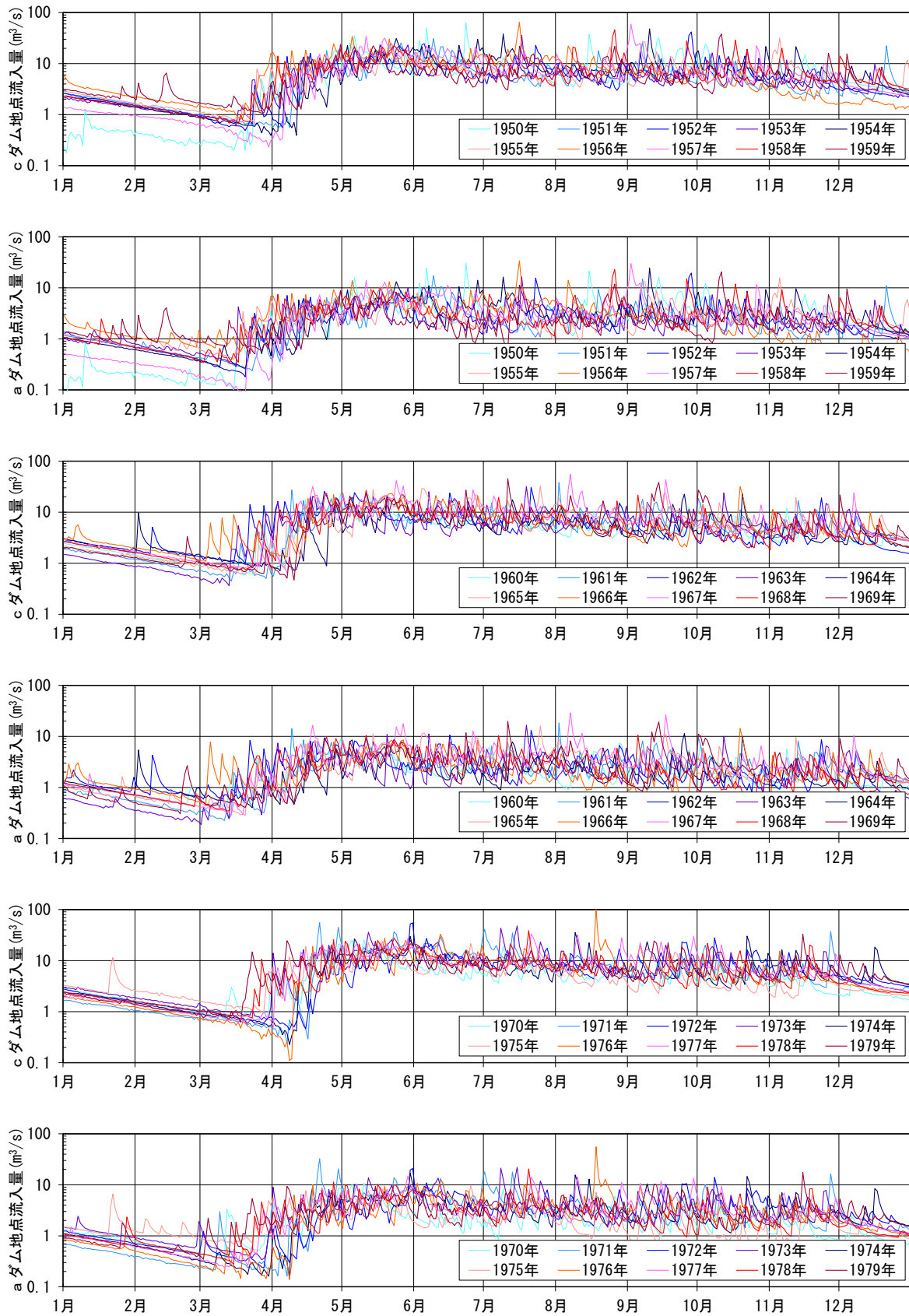


図 3.42 補正後の計算流況 (1950~1979年)

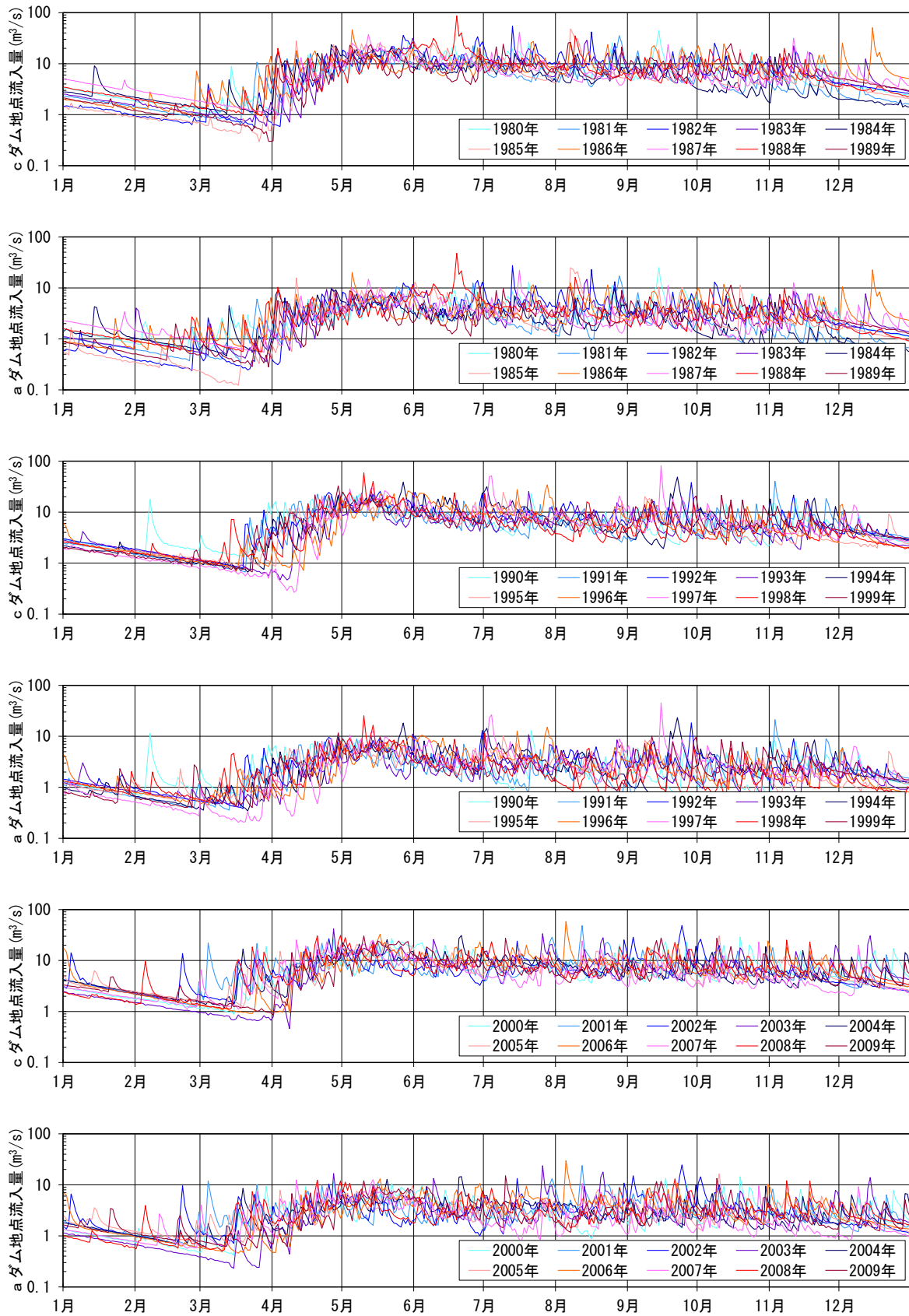


図 3.43 補正後の計算流況 (1980~2009年)

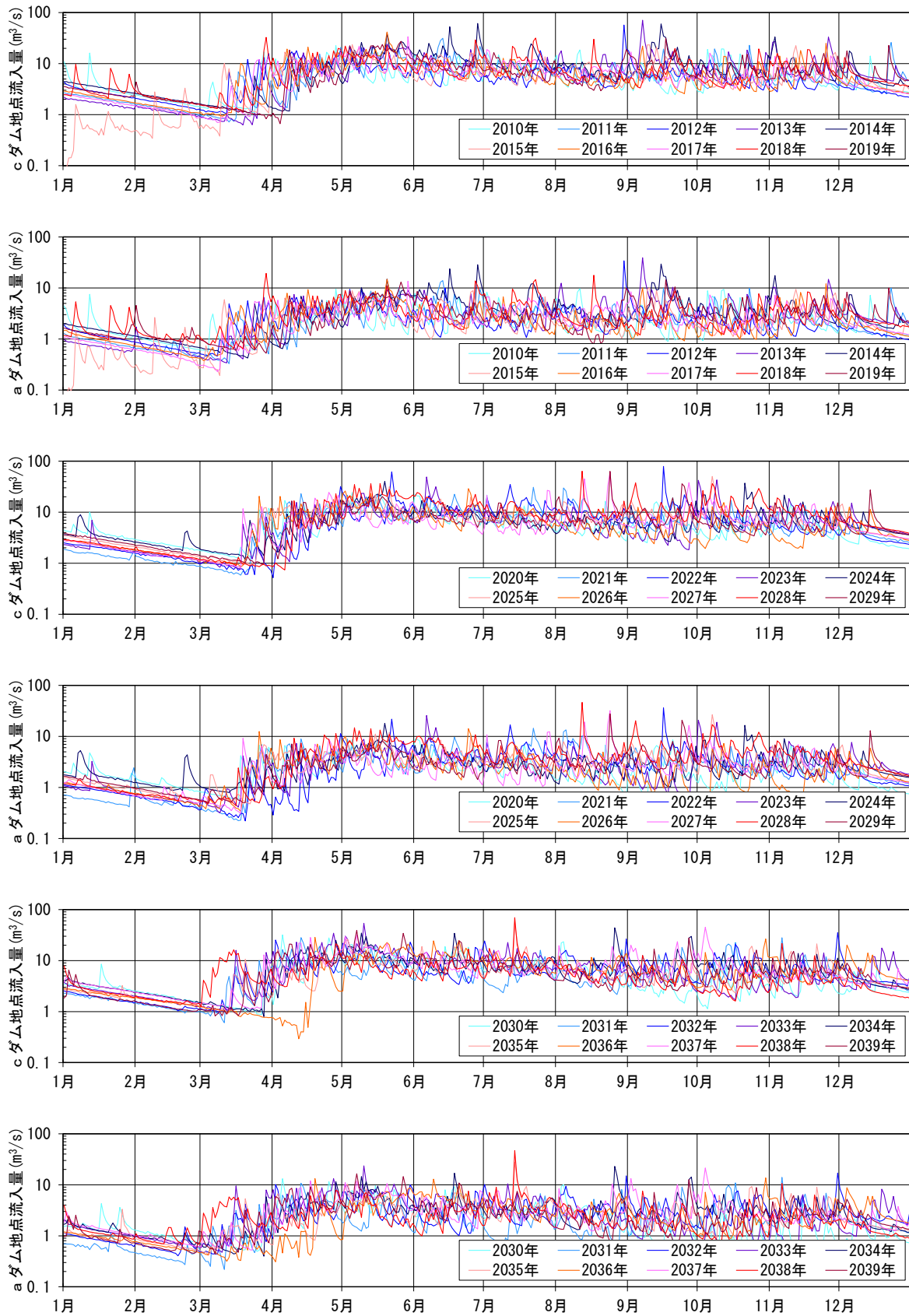


図 3.44 補正後の計算流況 (2010~2039 年)

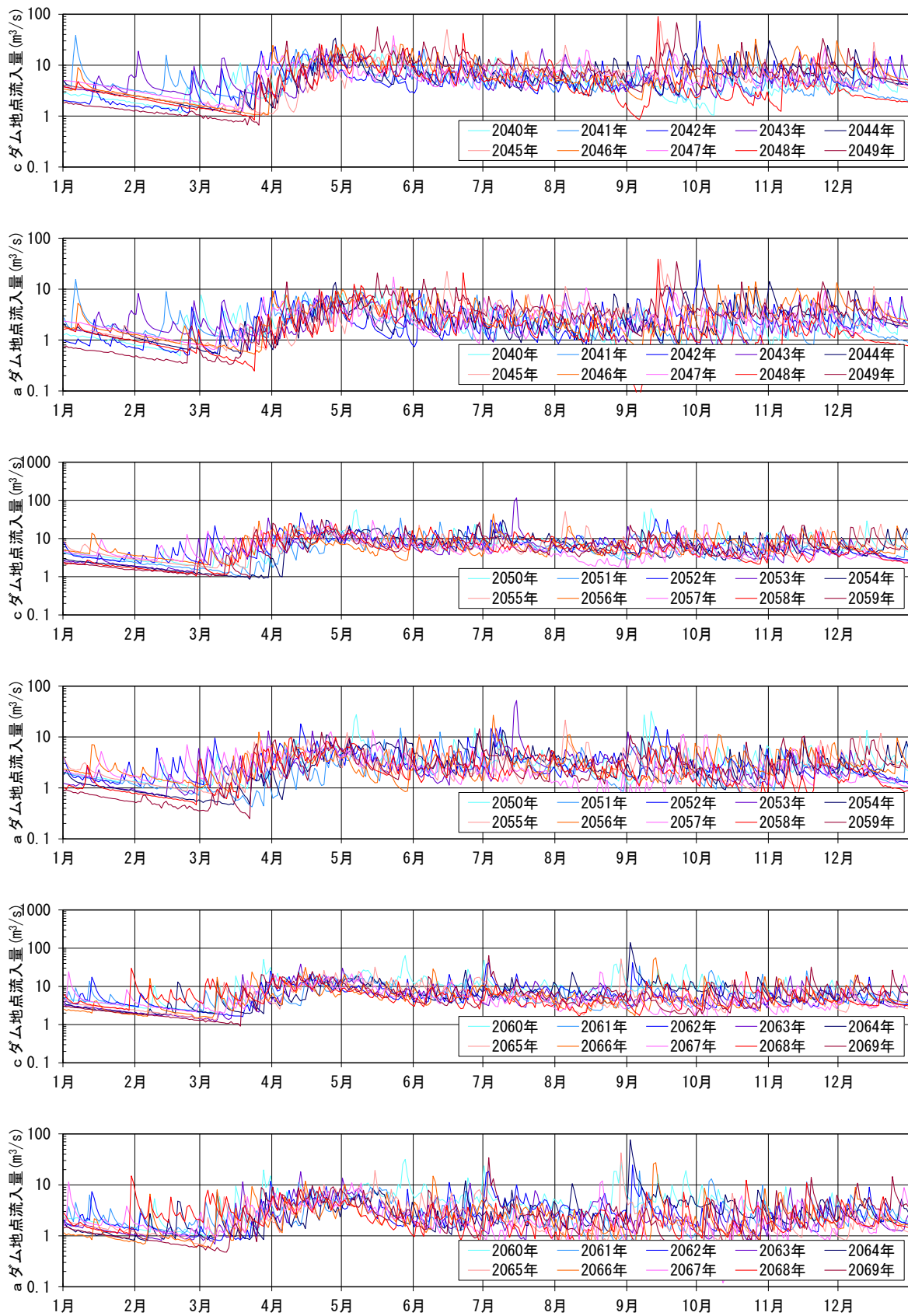


図 3.45 補正後の計算流況 (2040~2069年)

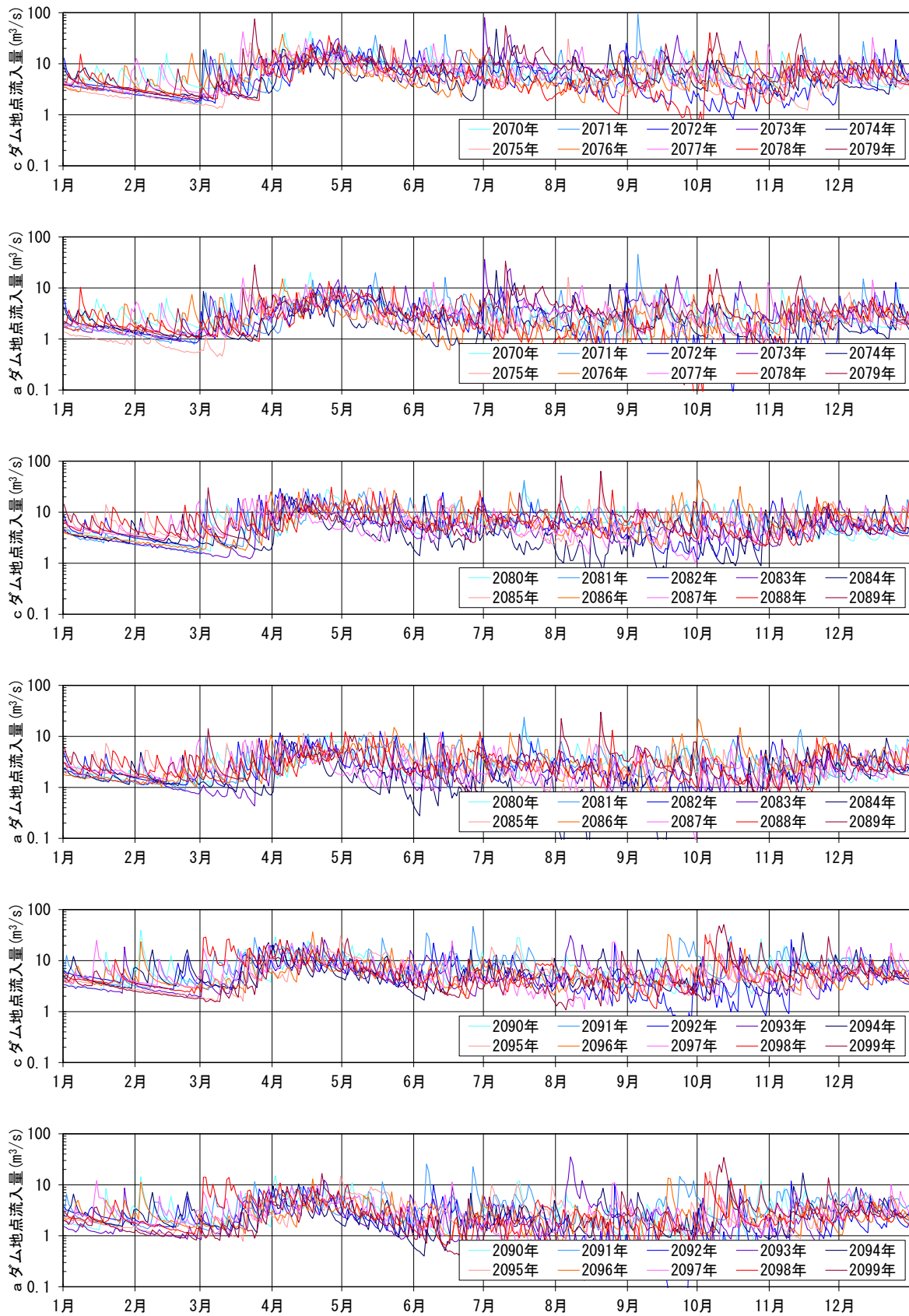


図 3.46 補正後の計算流況 (2070~2099年)

3.4.3 気候変動及び貯水池内堆砂進行による検討対象ダム群の利水機能への影響評価

(1) 検討ケース及び評価期間

K ダム群の利水機能への影響検討においては、ダムの有効容量を計画容量としたケースの他、将来の堆砂進行により計画容量対して30%の容量損失を考慮したケース、さらに、将来の流況変化により貯水池内流入土砂量が増大することを想定し、計画容量に対して50%の容量損失を考慮したケースを設定した。なお、流況変化を踏まえたダム貯水池内堆砂進行速度の定量的評価の実施は今後の課題とする。評価期間は、a ダム～d ダムともに、K ダム群の整備が概ね完了した時期である21世紀に着目することとし、2000～2099年（100年間）とした。

(2) 利水計算手法及び評価方法

利水計算は、K ダム群の利水補給ルールを参考に構築した利水計算モデルにより実施した。利水機能への影響評価は、パンク日数（貯水量がゼロとなる（＝貯水位が最低水位まで低下する）日数と定義）、及び下流基準頭首工における流量により行った。

(3) 利水機能への影響分析

2000～2099年におけるK ダム群のパンク日数を10年毎に合計した結果を図3.47に示す。図3.47より、有効容量内堆砂率が30%までであれば、パンク日数の顕著な増大はみられないが、有効容量内堆砂率が50%となると、パンク日数が顕著に増大している。さらに、パンク日数が2060年以降に増大する傾向が認められ、将来の流況変化及び貯水池内堆砂進行により、ダムの利水機能低下が懸念される。

2000～2099年におけるK ダム群合計の貯水量変動曲線を図3.48、図3.49に示す。図3.48、図3.49より、有効容量内堆砂率が50%のケースに着目すると、2031年の洪水期においてK ダム群のパンクが発生し、それ以降2099年までに断続的にパンクの発生がみられる。特に、2067～2068年の洪水期、2096～2099年の洪水期にはパンクが生じており、いわゆる複数年渇水が今世紀末に生じる可能性を示唆している。また、2084年には、有効容量内堆砂率が0%、30%、50%のいずれのケースとも、K ダム群にパンクが発生している。当該年の貯水量変動曲線をみると、いずれのケースでも非洪水期において貯水量が制限容量まで回復しておらず、その後の洪水期においてダムのパンクが発生している。このため、ダムの利水機能の向上策としては、単年ではなく、渇水が生じる前年などからの複数年スパンでの対応が求められるものと考えられる。

また、2000～2099年におけるK ダム群合計の無効放流量を図3.50、図3.51に示す。図3.50、図3.51より、各年ともに有効容量内堆砂率が10%、30%、50%と大きくなるにしたがい、貯水容量が減少することによって無効放流量が増大する傾向が確認できる。経年変化をみると、2060年頃から無効放流量が減少するとともに、洪水期に比べて非洪水期（斜線部）の無効放流量が相対的に増大する傾向がみてとれる。これは、前述したように2060年頃から洪水期における流量が減少するとともに、融雪出水の早期化に起因し、非洪水期の流量が増大することが原因と考えられる。対策工を検討する視点からは、渇水年（無効放流が皆無の

年)の前後では無効放流が発生していることから、これらを補足し、貯留しておくことが有効であると考えられる。

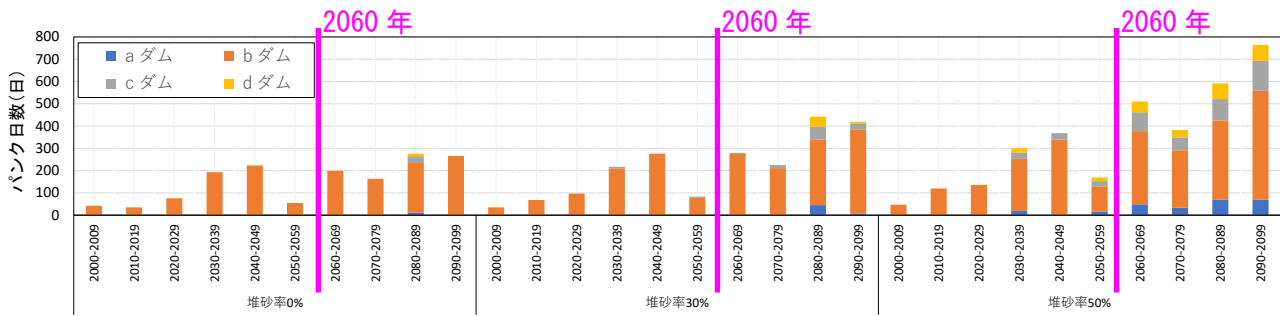


図 3.47 気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の利水機能への影響評価結果 (K ダム群のパンク日数 (10 年毎の合計値))

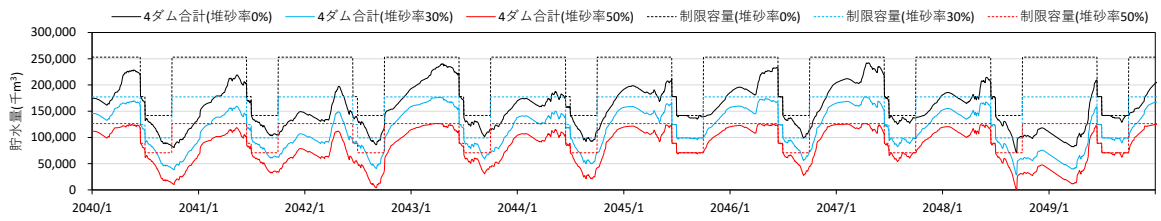
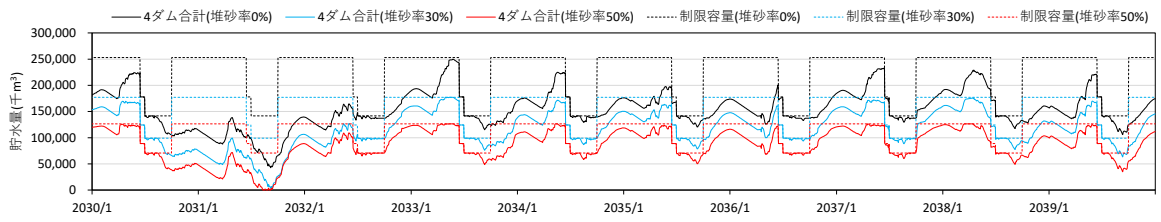
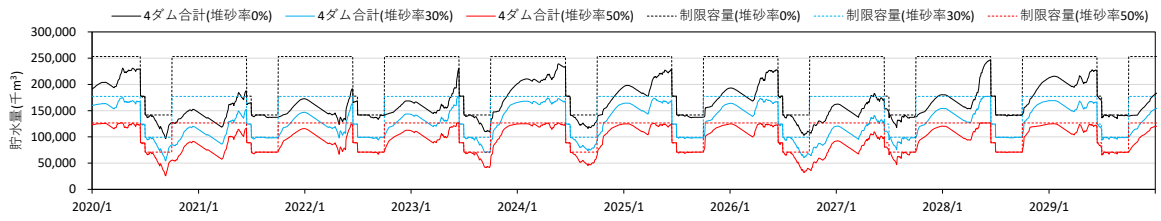
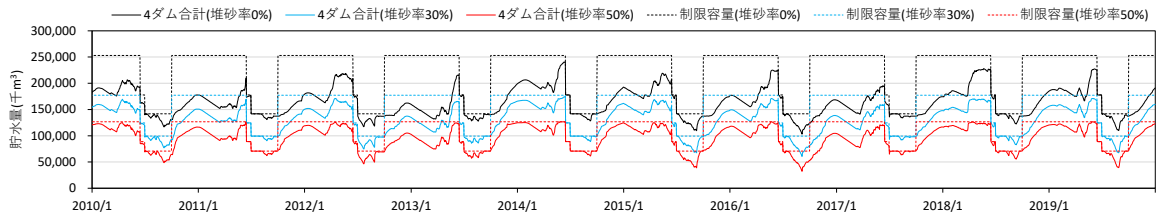
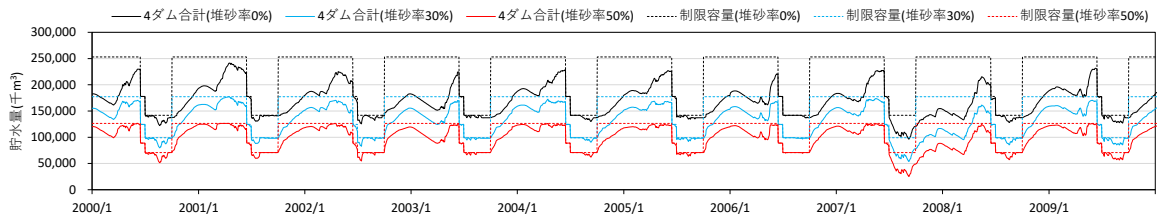


図 3.48 気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の利水機能への影響評価結果
(K ダム群合計の貯水量変動曲線 2000 年～2049 年)

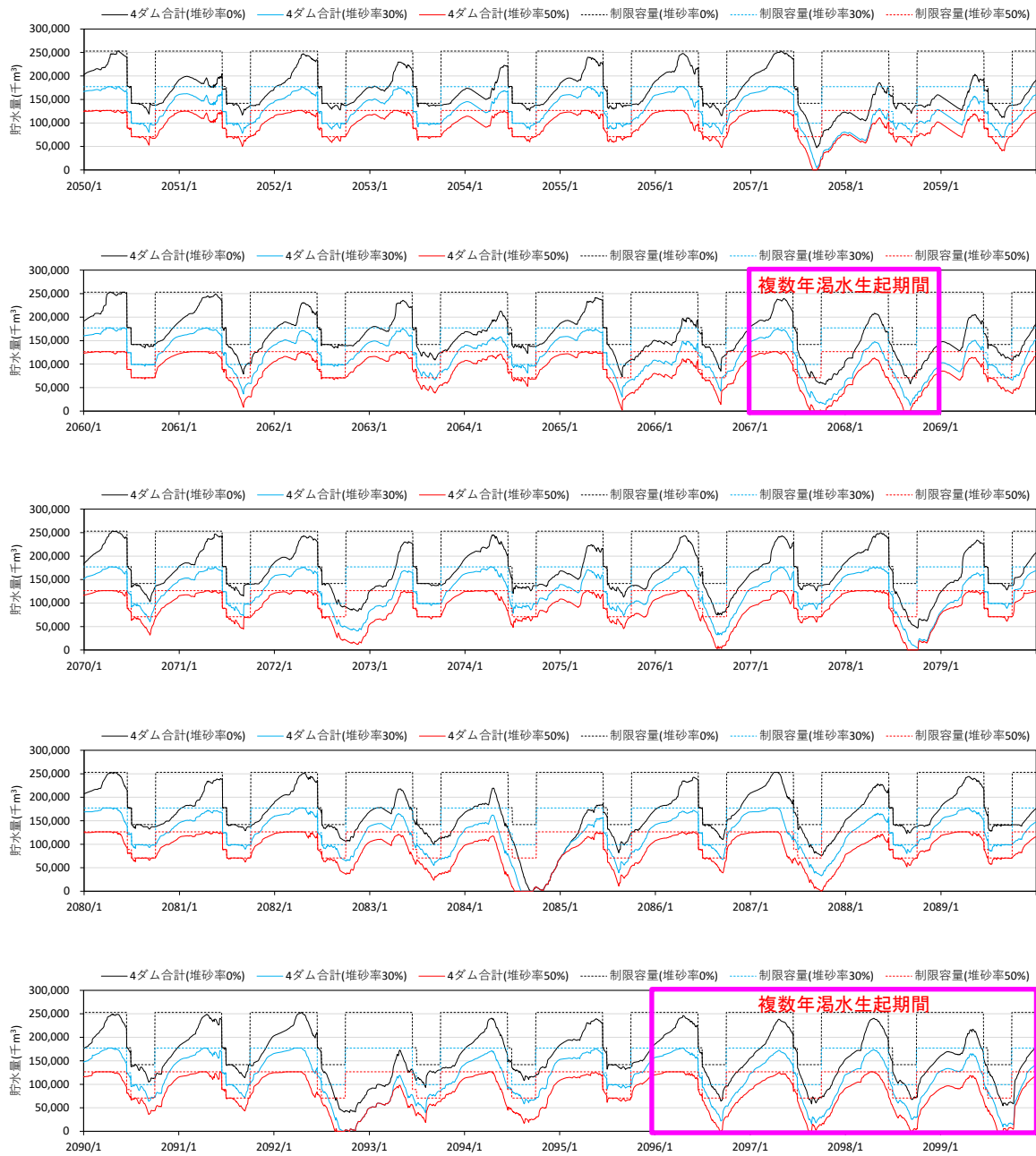


図 3.49 気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の利水機能への影響評価結果
(K ダム群合計の貯水量変動曲線 2050 年～2099 年)



図 3.50 気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の無効放流量（2000 年～2049 年）
 （塗り潰し：洪水期（6/15～9/30），斜線：非洪水期（左記以外の期間））



図 3.51 気候変動及び貯水池内堆砂進行による K ダム群の無効放流量（2050 年～2099 年）
 （塗り潰し：洪水期（6/15～9/30），斜線：非洪水期（左記以外の期間））

3.4.4 複数ダムから構成されるダム群を対象とした影響検討のまとめ

本節で得られた結論は以下のとおりである。

■ 流況変化の影響

1) 関東地方に位置する K ダム群を対象に、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM3.2S) による 150 年連続ラン (計算期間：1950～2099 年) に基づく将来流況を整理した結果、2060 年以降から、温暖化に伴う融雪出水の早期化に起因し、冬期から春期にかけて河川流量が増加する一方で、春期から夏期にかけての河川流量が減少する傾向を確認した。

■ 渇水被害の発生傾向

- 1) 上記の流況変化の結果、K ダム群におけるパンク日数は 2060 年頃から増大する傾向が認められた。なお、パンクが発生する期間は、個別ダムでの検討結果と同様に、制限水位まで水位低下操作を実施する洪水期であった。
- 2) 堆砂が進行したケースでは、連続する複数年における洪水期において、貯水池のパンク、あるいは、最低水位付近までの貯水位低下がみられる年があり、将来において複数年渇水が発生する可能性が示唆された。
- 3) 個別ダムを対象とした検討結果と同様に、有効容量内堆砂率が 30% を超過すると、ダムのパンク日数が顕著に増大する傾向が認められた。

■ 無効放流の発生傾向

- 1) 無効放流が発生する時期は、2060 年頃までは、洪水期 (制限水位まで水位低下操作を実施する期間) が主である。
- 2) 2060 年頃からは、洪水期に比べて非洪水期における無効放流量 (融雪出水の無効放流) が相対的に増大する傾向がみてとれた。これは、前述のとおり、将来気候における河川流況変化によるものと考えられる。
- 3) 2060 年頃から無効放流量そのものが減少傾向となり、これによりダムの利水機能低下を生起させる。
- 4) 各年ともに有効容量内堆砂率が 10%、30%、50% と大きくなるにしたがい、貯水容量が減少することによって貯水できない無効放流量が増大する。

今後の課題は以下のとおりである。

- 1) 気候変動予測の不確実性も想定されることから、複数の全球大気モデル、温室効果ガス排出シナリオ、流出モデルによる影響評価を実施する。
- 2) 利水検討に用いた計算流量の低水領域におけるより精度の高いバイアス補正を実施する。
- 3) 流況変化に加え、ダム貯水池内堆砂進行速度の予測も実施し、将来におけるダムの利水機能低下について、より定量的な予測を実施する。

3.5 結語

本章で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 将来の流況変化及び堆砂進行により、制限水位まで水位低下操作を実施する洪水期においてダムの利水機能が低下する傾向を確認した。
- 2) 既往研究⁷⁾で確認されているように、有効容量内堆砂率 30%を境界に利水機能低下が顕著になる傾向を確認し、当現象がダムによらずに生じる可能性が示唆された。
- 3) 関東地方に位置する Kダム群を対象とした検討の結果、Kダム群におけるパンク日数は 2060 年頃から増大する傾向が認められた。
- 4) 将来気候においては、連続する複数年における洪水期において、貯水池のパンク、あるいは、最低水位付近までの貯水位低下がみられる年があり、将来において複数年渇水が発生する可能性が示唆された。
- 5) 無効放流が発生する時期は、2060 年頃までは、洪水期（制限水位まで水位低下操作を実施する期間）が主である。2060 年頃からは、洪水期に比べて非洪水期における無効放流量（融雪出水の無効放流）が相対的に増大する傾向がみてとれた。

以上を踏まえ、下記について確認することが重要であるとの認識に立ち、次章以降でこれらを明らかにするための検討を実施する。

- 1) 実ダムをモデルとした検討により、気候変動に伴う流況変化及び堆砂進行によって、多目的ダムの利水機能が低下する可能性が示唆されたため、危機管理の観点から、これを全国的に展開し、将来において全国のどの程度の多目的ダムで利水機能の低下が生じるかを確認する。
- 2) 将来において全国の多目的ダムの一定数で、ダムの利水機能が低下することが考えられるため、これらの多目的ダムの利水機能を回復させるための適応策を立案する。この際、流況変化や堆砂進行によって生じることが想定される無効放流を有効活用する視点を取り入れる。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：水害レポート 2017, 2017.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局水資源部：平成 29 年版日本の水資源の現況, 2017.
- 3) 土木学会地球温暖化特別委員会：地球温暖化に挑む土木工学, 土木学会地球温暖化対策特別委員会報告書, 2009.
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局：ダム再生ビジョン, 2017.
- 5) Mizuta, R., Oouchi, K., Yoshimura, H., Noda, A., Katayama, K., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Kawai, H. and Nakawaga. M.: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model, J. Meteorol. Society Japan 84, pp.165–185, 2006.
- 6) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A.: Classification of CMIP5 Future Climate Responses by the Tropical Sea Surface Temperature Changes, SOLA 10: pp.167-171, 2014.
- 7) Kojiri, T. (2006): Hydrological river basin assessment model(Hydro-BEAM). In: Watershed Models (ed. by V. P. Singh & D. K. Frevent), 613-626. Taylor & Francis, CRC Press: Florida.
- 8) Sato, Y., Kojiri, T., Michihiro, Y., Suzuki, Y. and Nakakita, E.,(2013): Assessment of climate change impact on river discharge using the super-high resolution MRI-AGCM. Hydrol. Process. 27: 3264-3279.
- 9) 利根川水系農業水利協議会群馬県支部：渇水対応マニュアル, 1998.
- 10) 寺田和暉, 角哲也, 竹門康弘, 佐藤嘉展：気候変動を考慮したダム堆砂進行による牧尾ダムの長期的便益評価, 京都大学防災研究所年報, 第 58 号, pp.470-484, 2015.

4. 気候変動がダムの利水機能に与える影響の評価指標の検討

4.1 概説

「3. 気候変動と堆砂進行がダムの利水機能に与える影響の検討」より、将来気候において、国内ダムの利水機能が低下する可能性が考えられる。今後、国民の社会・経済活動を安定的に継続する上では、ダムの利水機能を維持・向上させることが求められるものと考えられるが、その際、気候変動下において、国内のどの程度のダムで利水機能の低下が生じるか、定量的に把握することが必要になる。

このような背景から、気候変動に伴う流況変化やダム堆砂進行の複合影響に伴う将来のダム機能変化を予測する手法が求められている。しかしながら、現時点では、気候変動とダムの機能を関連付けた評価方法は確立されておらず、適切な評価指標を設定し、対策の必要性や対策効果の高いダムを選定していくことが課題となっている。

本章では上記を踏まえ、現在気候及び将来気候におけるダムの利水機能変化に関わる検討結果を踏まえ、対策の必要性の高いダムをスクリーニングするための評価指標を検討するものである。

4.2 検討方法

本章における検討は、図 4.1 に示すフローにより実施した。

ダムの気候変動影響による利水機能変化に関する評価指標として、流況変化に関わる評価指標を設定し、その上で検討対象ダムの利水計算結果に基づき、設定した評価指標がダムの利水機能の低下度合いを示す指標として妥当であるか、検討を実施した。

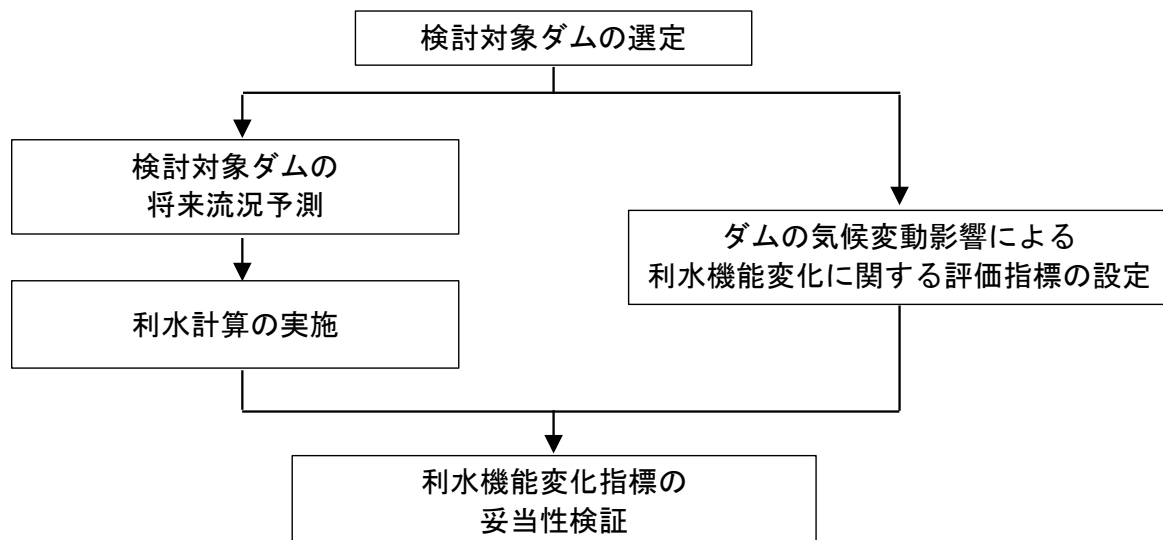


図 4.1 4章の検討フロー

4.3 利水機能変化指標の検討

4.3.1 検討対象ダムの概要

検討対象ダムは、将来の流況変化傾向が異なる複数のダムを抽出することとし、表 4.1 に示す 4 ダムを選定した。なお、C・D ダムは統合的運用が行われているため、便宜上、同一ダムとして扱うこととした。

表 4.1 検討対象ダムの概要

ダム名	Aダム	Bダム	C・Dダム
ダム位置	中国地方	北海道	九州地方
目的	洪水調節、かんがい、工業用水、発電	洪水調節、上水道、不特定利水	洪水調節、かんがい、上水道、工業用水、不特定用水
総流量比 (将来総流量/現在総流量)	0.83	0.97	0.93
有効貯水容量(千 m^3)	17,200	14,100	40,000
利水容量 (千 m^3)	10/21~6/30: 15,600 7/1-7/31: 14,700 8/1-8/31: 10,400 9/1-9/30: 1,400 10/1-10/20: 12,100	10/1~6/30: 3,800 7/1~9/30: 2,200	1/1~12/31: 33,000

4.3.2 将来流況の予測手法

将来流況の予測手法は、「3.3.2 (1) 将来流況の予測手法」と同様とした。

具体的には、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM3.2S) による現在気候 (1979-2003 年) と将来気候 (2075-2099 年) における気温・降水量変化¹⁾²⁾を利用した。温室効果ガスの排出シナリオは高位参照シナリオ RCP8.5、海面水温は CMIP5 の SST アンサンブル平均を用いた。

次に、SVAT モデルから蒸発散量と融雪量を算出し、これらを分布型流出モデル Hydro-BEAM に組み込むことにより、積雪地帯の積雪・融雪過程も考慮した全国 109 水系の日平均河川流量をそれぞれ求めた。日平均河川流量は、タイムステップ 10 分 (出力 1 時間) で計算した 24 時間の流量を平均したものである。詳細は Kojiri³⁾、Sato⁴⁾を参照されたい。

さらに、全球大気モデルや流出モデルに含まれるバイアスを排除し、将来の気候変動の影響をより明確に評価することを目的として、利水機能評価においては図 4.2 に示す手法で将来流況を設定した。

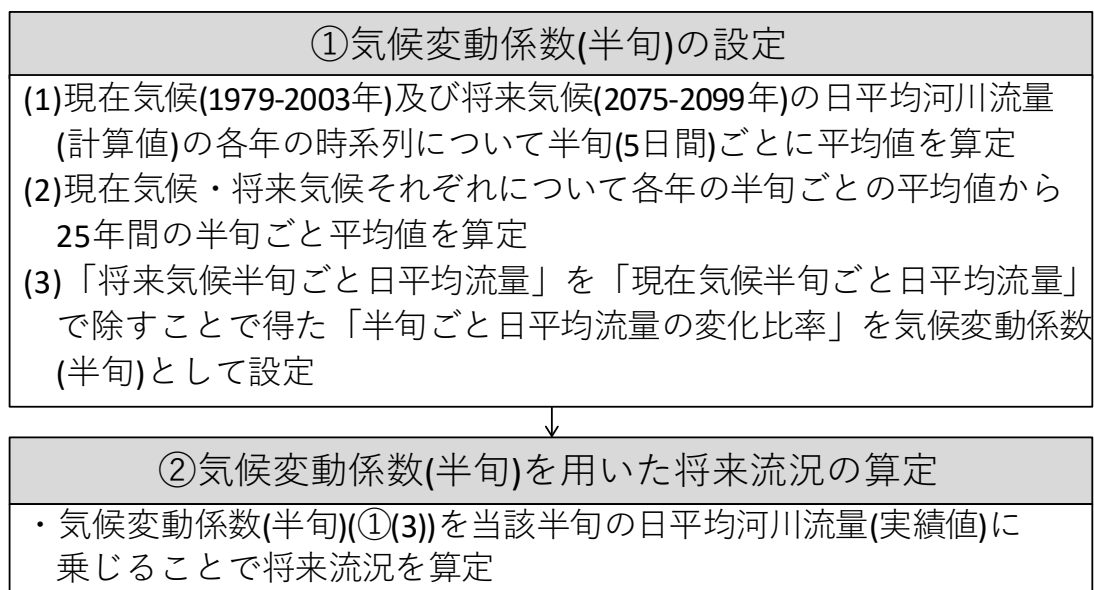


図 4.2 利水機能評価における将来流況の予測手法（再掲）

4.3.3 利水計算方法

Aダム、Bダム、C・Dダムともに現在及び将来流況について、利水計算を実施した。

現在流況は、Aダムで1968-2015年（48年間）、Bダムで1989-2014年（26年間）、C・Dダムで1993-2014年（22年間）とした。なお、ここでは流況変化の影響を評価することを目的としているため、堆砂進行は未考慮とした。

利水計算は、各ダムの利水補給ルールを参考に構築した利水計算モデルにより行い、河川流の流下や取水還元的时间差を考慮して半旬計算を実施した。利水計算にあたっては、貯水率低下とともに取水量を制限する条件を設けることとし、他ダムの実績⁵⁾を参考に設定した取水制限率を考慮した（表 4.2）。

表 4.2 取水制限率の設定概要

有効容量内貯水率（%）	～25	25～30	30～40	40～
取水制限率	30	20	10	0

4.3.4 気候変動に伴う流況変化に関わる指標

(1) 気候変動に伴う流況変化に関わる指標の設定

気候変動に伴う流況変化に関わる指標 (C_Q) として、現在気候の n 日流量 ($n=185$ (平水流量), $n=275$ (低水流量), $n=355$ (渇水流量) の 3 ケースを想定) を下回る流量の現在と将来の変化比率により設定することとし、下式により定義した。

$$C_Q = Q'_{SUP} / Q_{SUP} \quad (3)$$

ここで、 Q_{SUP} は現在気候で必要となる利水補給量、 Q'_{SUP} は将来気候で必要となる利水補給量と仮定する。 $C_Q > 1.0$ の場合には、気候変動によって現状より利水容量が不足する傾向に推移すると評価される。

なお、気候変動に伴う流況変化に関わる指標 (C_Q) については、通年で評価する場合を手法 1、1~9 月 (冬期~かんがい期を想定) に着目して評価する場合を手法 2、4~9 月 (かんがい期を想定) にのみ着目して評価する場合を手法 3 とした (図 4.3)。

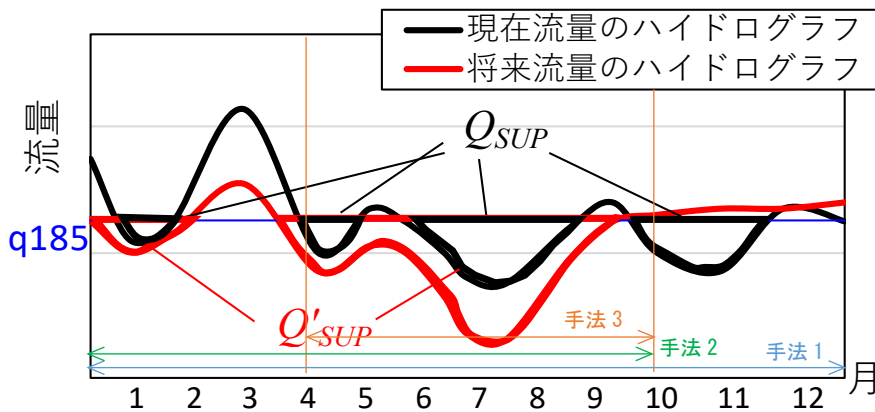


図 4.3 気候変動に伴う流況変化に関わる指標の概要 ($n=185$ の例)

(2) 利水機能の低下度合いに関わる指標

利水機能の低下度合いは、利水被害度 (取水制限率(%)×取水制限実施日数(day))と定義) を用い、下式により定義する利水機能低下度の各ダムの評価期間における年平均値により表すものとした。

$$\text{利水機能低下度} = \frac{\text{将来の利水被害度}}{\text{現況の利水被害度}} \quad (4)$$

(3) 気候変動に伴う流況変化に関わる指標の妥当性検証

利水計算結果を表 4.3 に、流況変化指標と利水機能低下度の関係を表 4.3、図 4.4 に整理した。

表 4.3、図 4.4 より、 $n=185$ とした場合、手法 1 及び手法 2 では流況変化指標と利水機能低下度に正の相関は認められないが、手法 3 では両者に正の相関が認められる。このため、かんがい期に着目した手法 3 の妥当性が認められるものと評価される。

手法 3 に着目し、基準流量 ($n=185$ (平水流量), $n=275$ (低水流量), $n=355$ (渇水流量) の 3 ケース) の差異についてみると、いずれの設定流量であっても流況変化指標と利水機能低下度に正の相関が認められる。

このため、いずれの指標を用いることも考えられるが、本研究では利水補給は平水流量を下回る期間に実施されることを想定することとし、手法 3 の $n=185$ (平水流量) のケースを評価指標として採用することとする。

なお、検討対象ダム数を増やし、上記傾向の検証を行うことを今後の課題とする。

表 4.3 各ダムの利水計算結果及び流況変化指標

		Aダム	Bダム	C・Dダム	
利水被害度 (%・day)	①現在流況	1026	335	471	
	②将来流況	1209	2088	1540	
利水機能低下度	②/①	1.18	6.24	3.27	
流況変化指標	手法① (全期間)	$n=185$ (平水流量)	1.36	1.02	1.19
		$n=275$ (低水流量)	1.68	2.16	1.84
		$n=355$ (渇水流量)	3.99	31.29	8.96
	手法② (1~9月)	$n=185$ (平水流量)	1.50	1.01	1.21
		$n=275$ (低水流量)	1.99	2.07	1.78
		$n=355$ (渇水流量)	4.33	30.15	7.85
	手法③ (4~9月)	$n=185$ (平水流量)	1.55	3.52	1.86
		$n=275$ (低水流量)	2.15	16.00	3.05
		$n=355$ (渇水流量)	4.99	484.00	10.26

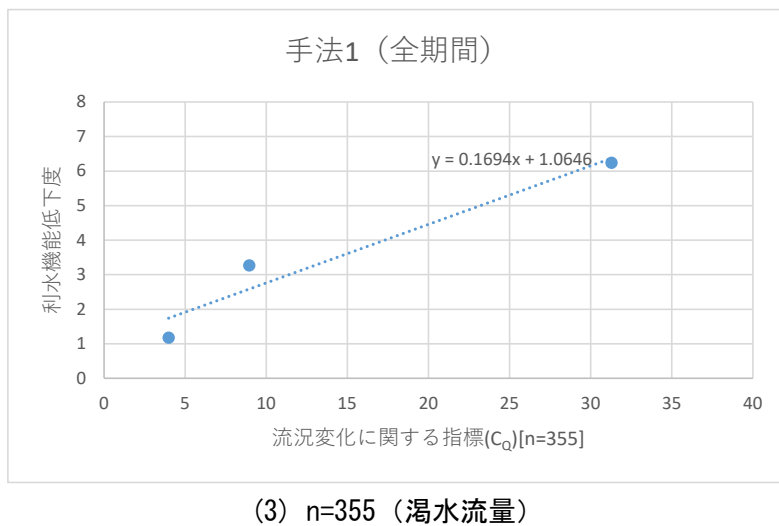
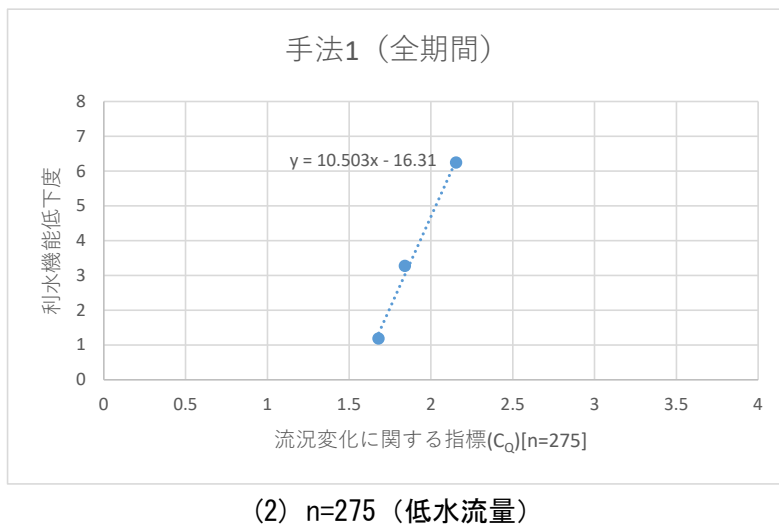
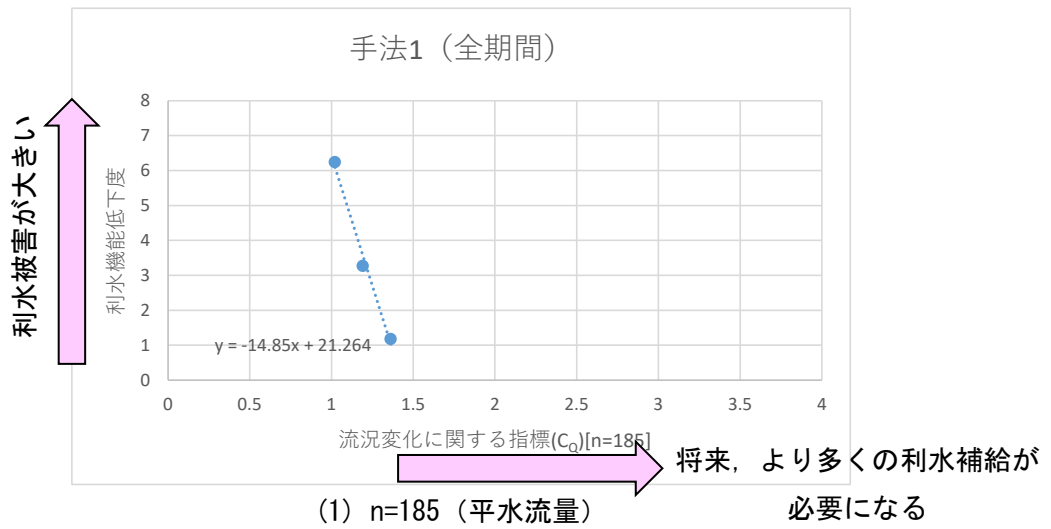


図 4.4 個別ダムによる流況変化指標の検証 (手法 1 (全期間))

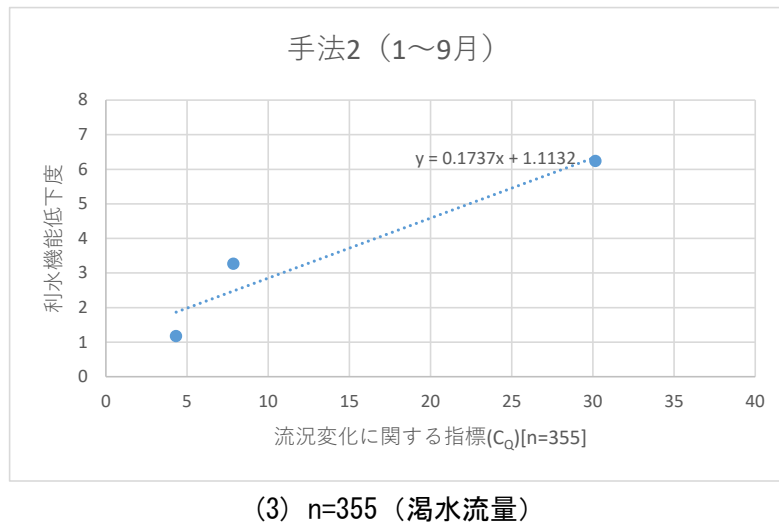
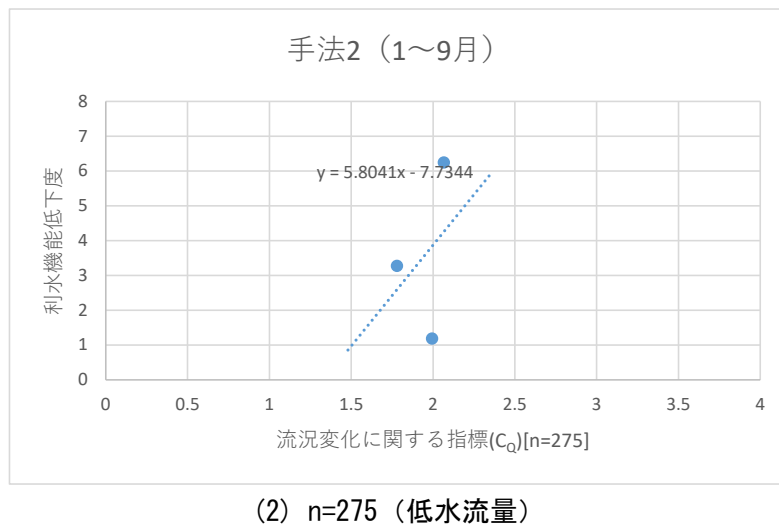
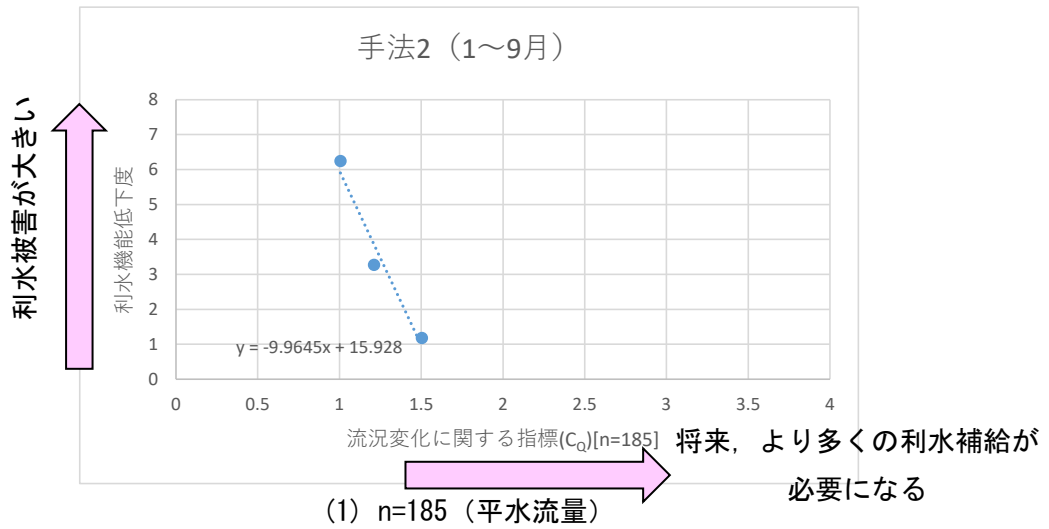


図 4.5 個別ダムによる流況変化指標の検証 (手法2 (1~9月))

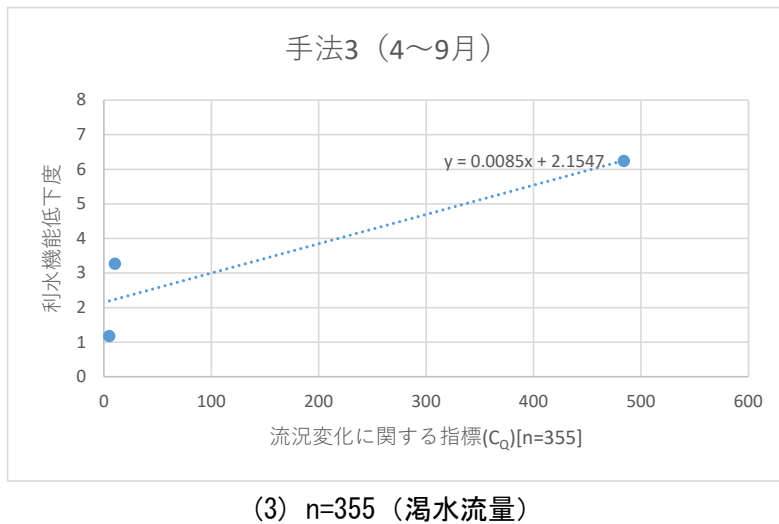
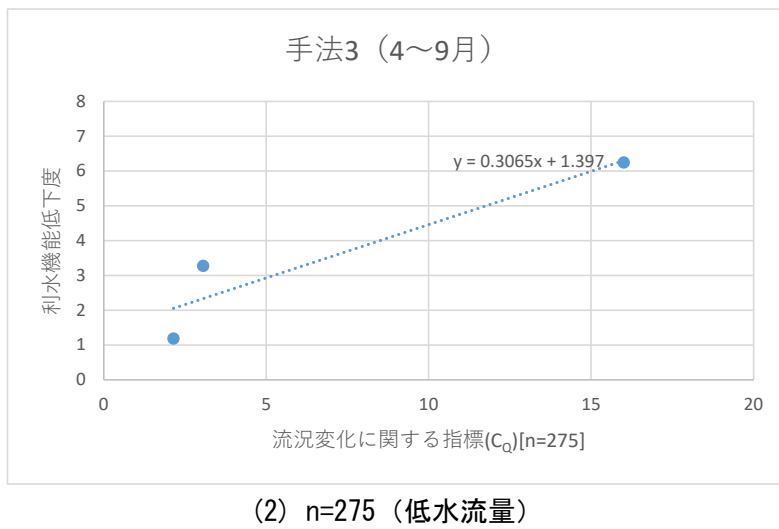
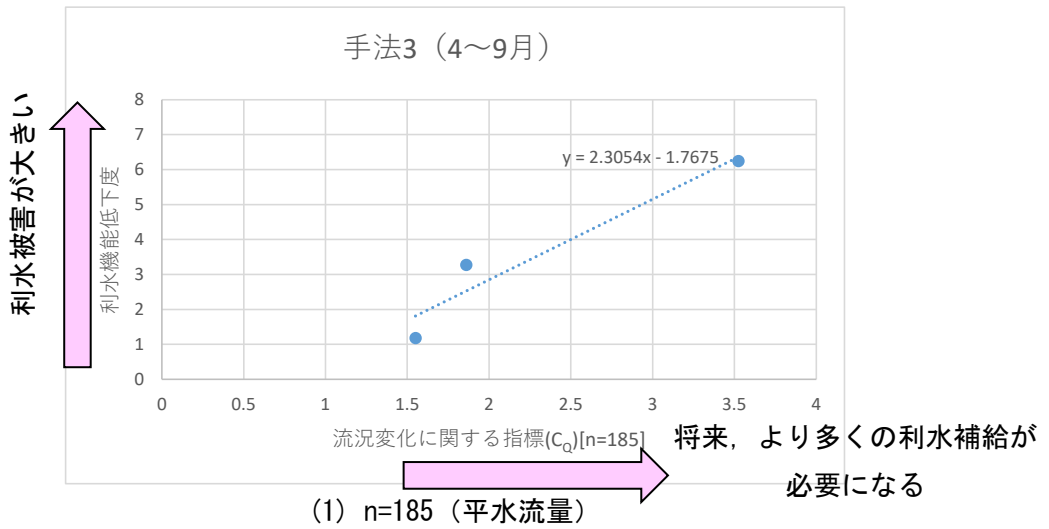


図 4.6 個別ダムによる流況変化指標の検証 (手法3 (4~9月))

4.3.5 堆砂進行に伴う容量損失に関わる指標

堆砂進行に伴う容量損失に関わる指標について検討を行う上では、前述した Gould-Dincer アプローチ⁶⁾が参考になると考える。Gould-Dincer アプローチのうち、Gould-Dincer Normal (G-DN) は下式のように表される。

$$C = z_p^2 / 4(1 - \alpha)^2 \times Cv^2 \mu \quad (5)$$

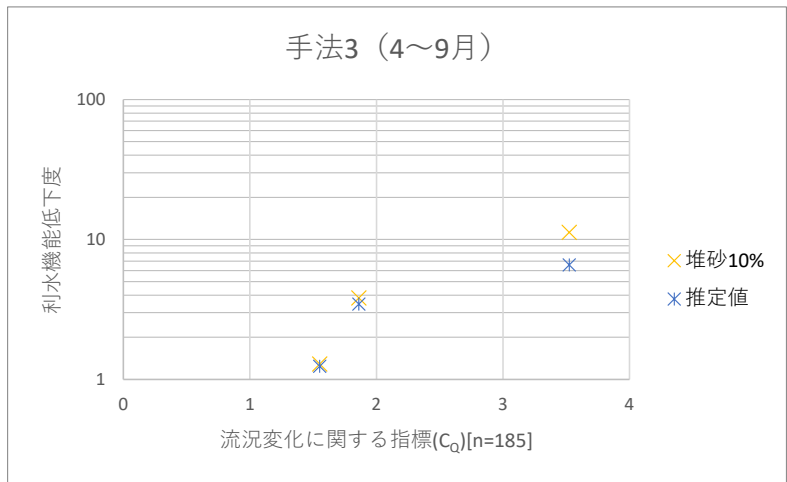
ここに、 C は給水に必要な貯水池容量、 z_p は流入量に関する非超過確率 100 p%での標準化変量、 α は流入量に対する有効放流量の割合、 Cv は貯水池への年間流入量の変動係数、 μ は年間平均流入量である。

ここで、 α (=利水機能変化に関わる指標と考える) について、(5)式を書き換えると(6)式のとおりとなる。一方で、「 C は給水に必要な貯水池容量」であり、堆砂進行に伴う容量損失の影響に関わる指標と考えることが可能である。そのため、(6)式より、堆砂進行に伴う容量損失に関わる変化について、現在気候と将来気候の容量損失の変化比率の 0.5 乗で考慮することが考えられる。

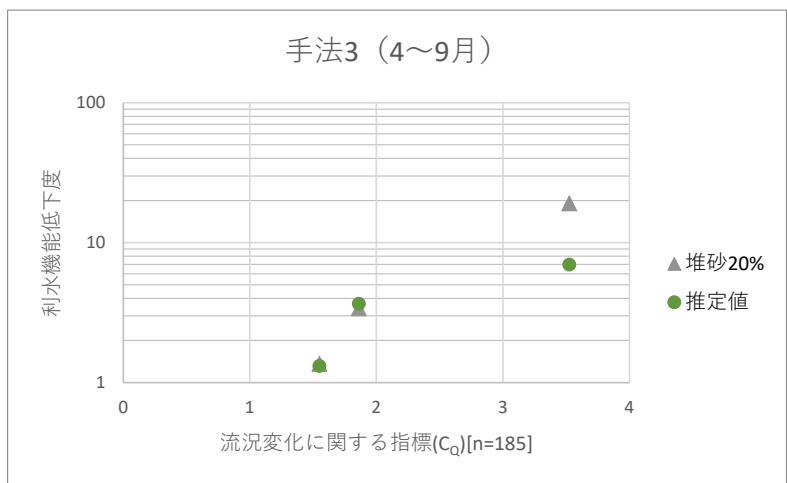
$$(1 - \alpha) = 1 / 2 \times z_p \times Cv \times \sqrt{\mu} \times 1 / \sqrt{C} \quad (6)$$

堆砂進行に伴う容量損失を上記により考慮した場合の利水機能低下度の推定値及び計算値の比較結果を図 4.7 に示す。図 4.7 より、流況変化に関する指標と堆砂率が大きくなる場合（有効容量内堆砂率が 30%程度以上の場合）を除いて、上記による推定値は概ね計算値と同様の傾向を示す。流況変化と堆砂進行の複合影響が大きくなる場合には、今回設定した指標では危険側の推定値となることに留意が必要となる。

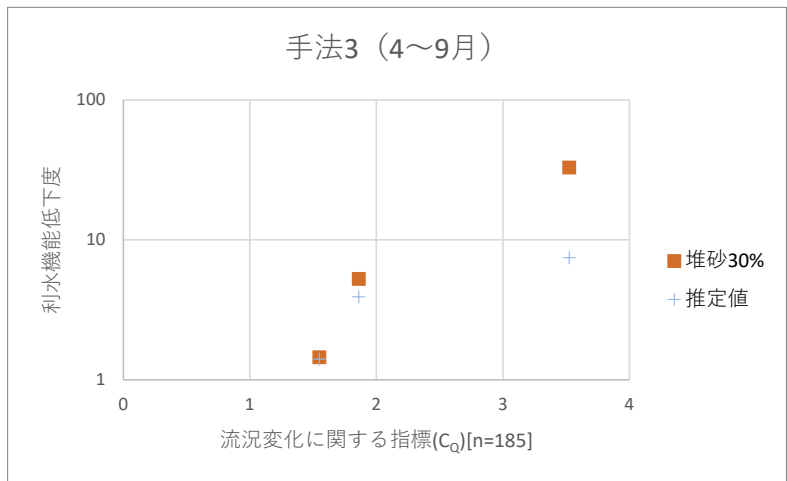
ただし、Gould-Dincer アプローチは、キャリーオーバー貯水池（非制限制限水位方式）のみに適するものとされているため、制限水位運用が多くのダムで実施されている国内の多目的ダムでそのまま適用する上での吟味も必要であるため、上記に示した説明変数の設定の妥当性について検証を行うことが今後の課題として考えられる。



(1) 有効容量内堆砂率 10%



(2) 有効容量内堆砂率 20%



(3) 有効容量内堆砂率 30%

図 4.7 個別ダムによる堆砂進行に伴う容量損失に関わる指標の検証

4.4 結語

既存ダムを活用した気候変動への適応策の検討に向け、気候変動がダムの治水機能や利水機能に及ぼす影響を適切に評価し、ダム再生の対策に反映させていくことが求められている。さらに、長期的なダム機能の評価では、堆砂進行による有効容量の減少も重要な要素である。

そこで、本章では、気候変動に伴う各ダムの流況変化と堆砂進行の予測結果を踏まえ、対策の必要性の高いダムをスクリーニングするための評価指標の提案を行うとともに、利水影響指標については個別ダムでの利水計算に基づき妥当性検討を行った。

具体的には、流況変化から簡易に設定される利水機能評価指標（所定の流量を下回る現在気候流量積算値と将来気候流量積算値の比率）を設定し、この妥当性について、異なる地域特性を有する複数の個別ダムによる利水計算に基づき行った。この結果、利水機能変化指標（かんがい期（4～9月）における現在気候の185日流量を下回る現在気候流量積算値と将来気候流量積算値の比率） >1 の場合には気候変動によって現状よりダムの利水容量が不足する傾向が認められ、設定した指標の妥当性を確認した。

また、堆砂進行に伴う容量損失を上記指標に考慮する上では、現在気候と将来気候の容量損失の変化比率の0.5乗で考慮することが考えられる。ただし、当該指標については、キャリアオーバー貯水池（非制限制限水位方式）のみに適するものとされている⁹⁾ため、制限水位運用が多くのダムで実施されている国内の多目的ダムでそのまま適用することについては研究課題が残る。

次章では、本章で検討した利水機能評価指標を用いて、将来において全国のどの程度の多目的ダムで利水機能の低下が生じるかを確認することとする。

参考文献

- 1) Mizuta, R., Oouchi, K., Yoshimura, H., Noda, A., Katayama, K., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Kawai, H. and Nakawaga, M.: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model, J. Meteorol. Society Japan 84, pp.165–185, 2006.
- 2) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A.: Classification of CMIP5 Future Climate Responses by the Tropical Sea Surface Temperature Changes, SOLA 10: pp.167-171, 2014.
- 3) Kojiri, T. (2006): Hydrological river basin assessment model(Hydro-BEAM). In: Watershed Models (ed. by V. P. Singh & D. K. Frevent), 613-626. Taylor & Francis, CRC Press: Florida.
- 4) Sato, Y., Kojiri, T., Michihiro, Y., Suzuki, Y. and Nakakita, E.,(2013): Assessment of climate change impact on river discharge using the super-high resolution MRI-AGCM. Hydrol. Process. 27: 3264-3279.
- 5) 利根川水系農業水利協議会群馬県支部：渇水対応マニュアル，1998.
- 6) Thomas A.McMahon, Geoffrey G.S.Pegram, Richard M.Vogel, Murray C.Peel : Review of Gould–Dincer reservoir storage–yield–reliability estimates, Advances in Water Resources, Volume 30, Issue 9, Pages 1873-1882, 2007.

5. 気候変動と堆砂進行がダムの治水・利水機能に与える影響の全国的評価

5.1 概説

「3. 気候変動と堆砂進行がダムの利水機能に与える影響の検討」より、将来気候において、国内ダムの利水機能が低下する可能性が考えられる。今後、国民の社会・経済活動を安定的に継続する上では、ダムの利水機能を維持・向上させることが求められるものと考えられるが、その際、気候変動下において、国内のどの程度のダムで利水機能の低下が生じるか、定量的に把握することが必要になる。

このような背景から、「4. 気候変動がダムの利水機能に与える影響の評価指標の検討」では、利水機能保全対策の必要性の高いダムをスクリーニングするための評価指標の検討を行った。

本章では、「4. 気候変動がダムの利水機能に与える影響の評価指標の検討」の結果を踏まえ、提案した利水機能変化指標から全国のダムを類型化し、将来において対策必要性の想定されるダムの割合を定量的に確認することとする。なお、ダムの対策必要性の判断においては、利水機能変化の側面のみならず、治水機能変化の側面からも整理する必要があると考え、後者に関わる評価指標も設定の上、ダムの分類を試みた。

5.2 検討方法

本章における検討は、図 5.1 に示すフローにより実施した。

対象とするダムは、国土交通省と(独)水資源機構が管理する全国の 103 基の多目的ダムとした。これらのダムはいずれも治水容量と利水容量を併せ持つ多目的ダムである。

気候変動が及ぼす影響は、ダムの治水機能と利水機能で評価軸が異なることから、それぞれで評価指標の設定及び類型化を行った。

また、対策の必要性の高いダムのスクリーニングにあたっては、気候変動がもたらすダム機能の変化とともに、ダムの現有機能も併せて評価することが重要であることから、双方の評価指標を設定した。

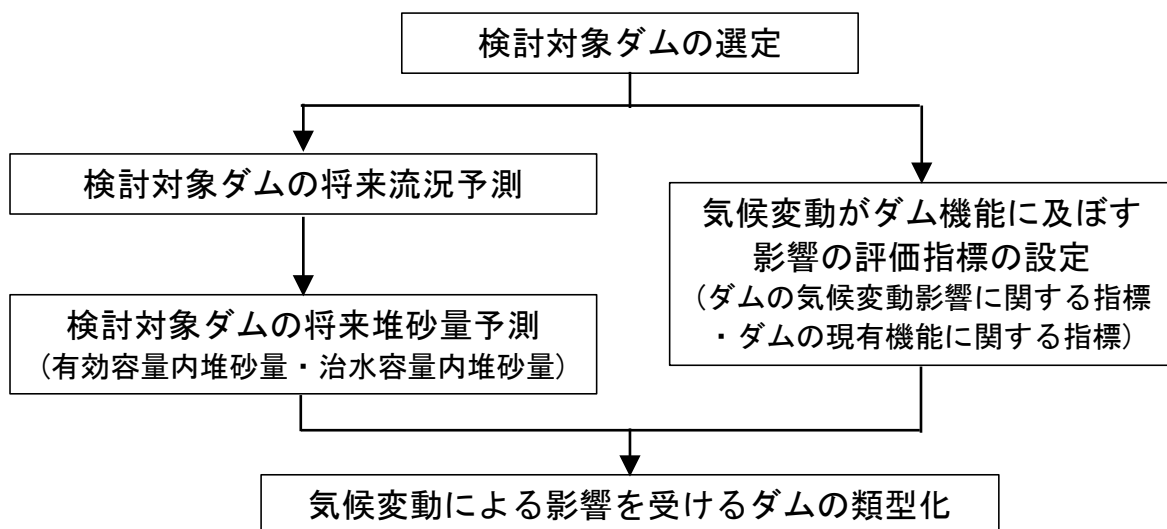


図 5.1 5章の検討フロー

5.3 将来流況・ダム堆砂進行の予測手法

5.3.1 将来流況の予測手法

将来流況の予測手法は、「3.3.2 (1) 将来流況の予測手法」と同様とした。

具体的には、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM3.2S) による現在気候 (1979-2003 年) と将来気候 (2075-2099 年) における気温・降水量変化¹⁾²⁾を利用した。温室効果ガスの排出シナリオは高位参照シナリオ RCP8.5, 海面水温は CMIP5 の SST アンサンブル平均を用いた。

次に、SVAT モデルから蒸発散量と融雪量を算出し、これらを分布型流出モデル Hydro-BEAM に組み込むことにより、積雪地帯の積雪・融雪過程も考慮した全国 109 水系の日平均河川流量をそれぞれ求めた。日平均河川流量は、タイムステップ 10 分 (出力 1 時間) で計算した 24 時間の流量を平均したものである。詳細は Kojiri³⁾, Sato⁴⁾を参照されたい。

さらに、全球大気モデルや流出モデルに含まれるバイアスを排除し、将来の気候変動の影響をより明確に評価することを目的として、利水機能評価においては図 5.2 に示す手法で将来流況を設定した。

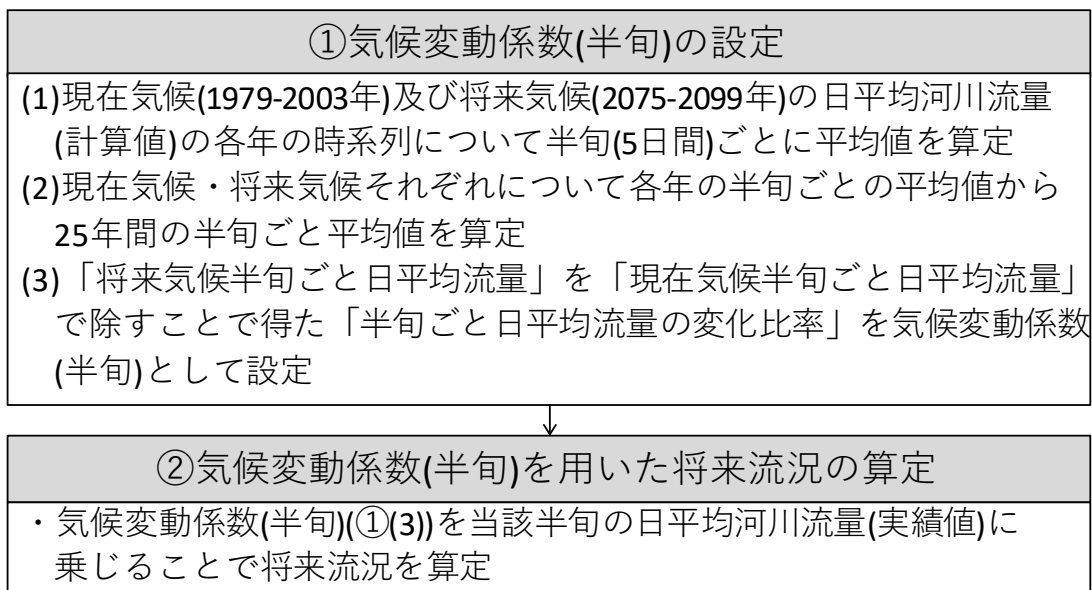


図 5.2 利水機能評価における将来流況の予測手法 (再掲)

5.3.2 ダム堆砂進行の予測手法

ダム堆砂進行の予測手法は、「3.3.2 (2) 将来堆砂量・堆砂形状の予測手法」における「将来流況ケース」と同様とした。

具体的には、将来の貯水池内堆砂量は、流況変化予測と整合を図り、21世紀末の状態を想定することとした。将来堆砂量の予測手法は、将来気候の予測期間が2075-2099年であることを踏まえ、2075年までは実績堆砂速度と同様の速度で堆砂進行するものとし、2075年以降は流況変化に伴う堆砂速度の増加等も考慮して流況変化に伴う流入土砂量の変化をQ-Qs式に基づき算定した(図5.3)。

将来における貯水池内堆砂形状は、今後の堆砂が実績ベースで進行するものとし、堆砂実績を参考に、各容量(治水・利水・堆砂容量)内の堆砂比率が今後も継続するものとして堆砂形状を考慮した。なお、堆砂容量が満砂した場合には、その後の堆砂は有効容量内の治水・利水容量内で進行することになることから、このときの治水・利水容量内の堆砂比率は、治水・利水容量比(=治水容量:利水容量)と同等となるものと仮定し、これを考慮することとした。

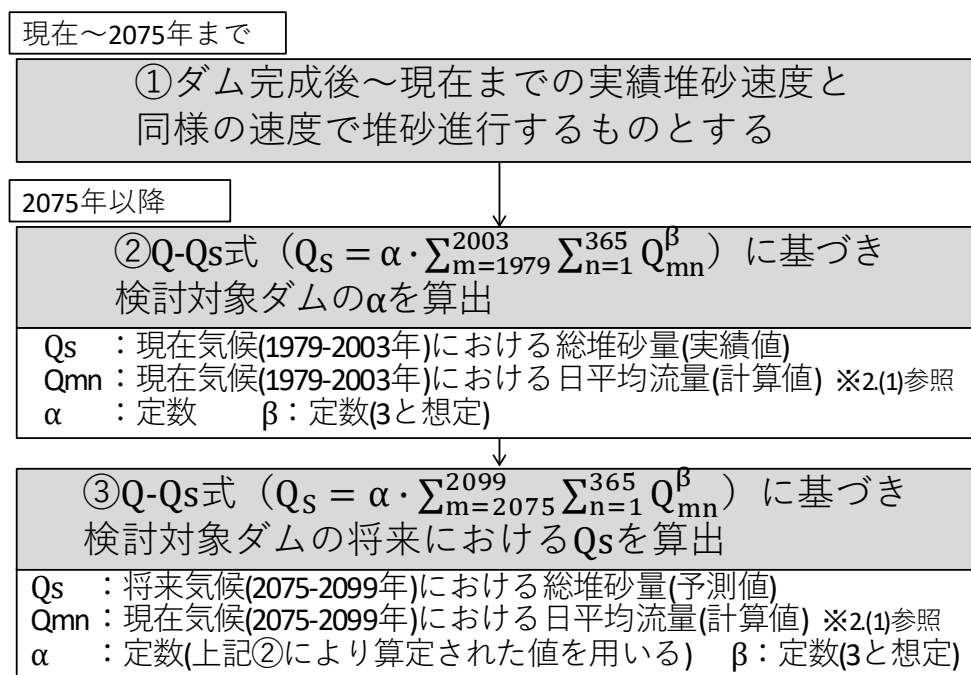


図 5.3 ダム堆砂進行の予測手法 (再掲)

5.4 気候変動がダム機能に及ぼす影響の指標化

5.4.1 ダムの気候変動影響に関する指標

(1) ダムの治水機能変化に関する指標

ダムの治水機能は、梅雨や台風等に起因して発生する大規模な出水をダム貯水池に貯留し、これにより下流河川の洪水被害を最小化することにある。

本検討では、大規模な出水に対する洪水調節に必要な時間は 24 時間程度と想定し、式(7)に示すように現在気候における最大日平均流量 (q_{max}) と将来気候における最大日平均流量 (q'_{max}) の変化比率を気候変動によるダムの治水機能変化に関する指標として設定した。

$$\text{治水機能変化指標} = \frac{q'_{max}}{q_{max}} \quad (7)$$

ここで、治水機能変化指標 > 1 の場合には、気候変動によって現状より治水容量が不足する傾向に推移すると想定した。

一方、治水機能変化指標 ≤ 1 の場合には、気候変動によって現状より治水容量が不足することではなく、治水機能は改善する傾向に推移すると評価される。

(2) ダムの利水機能変化に関する指標

ダムの利水機能は、発電・農業・水道等に対し適時に適量の補給を行うことにある。その求められる諸量はダム毎に異なるが、ダムの利水計画では一般的に 10 年に 1 回程度の渇水に耐えられるように利水安全度が設定されている。

本検討では、「4. 気候変動がダムの利水機能に与える影響の評価指標の検討」の結果を踏まえ、現在気候の平水流量（年間を通じて 185 日は流れている流量）が各下流河川の農業用水、都市用水、工業用水に加えて河川の正常な機能を維持するために必要な流量であると想定し、これを維持することが現在から将来に渡るダムの利水機能と仮定し、ダム地点流入量がこれを下回る場合にはダムから下流河川に利水補給が行われるものと想定した（図 5.4 の Q_{sup} , Q'_{sup} 参照）。

そこで、式(8)(9)に示すように現在気候における平水流量 (q_{185}) を基準として、現在気候において必要となる利水補給量 (Q_{sup}) と将来気候において必要となる利水補給量 (Q'_{sup}) の変化比率を気候変動によるダムの利水機能変化に関する指標として設定した。

なお、前章で、ダムの利水機能変化に関する指標に堆砂進行に伴う容量損失を考慮する手法を確認したが、多目的ダムへの適応について課題が残っていることから、ここでは、次項に示す有効容量内堆砂率によってダムの利水機能変化に対する堆砂進行の影響を考慮することとした。

$$\text{利水機能変化指標} = \frac{Q'_{sup}}{Q_{sup}} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Q_{sup} = q_{185} \times (365 - 185) - \sum_{i=185}^{365} q_i \\ Q'_{sup} = q_{185} \times (365 - n) - \sum_{i=n}^{365} q'_i \end{cases} \quad (9)$$

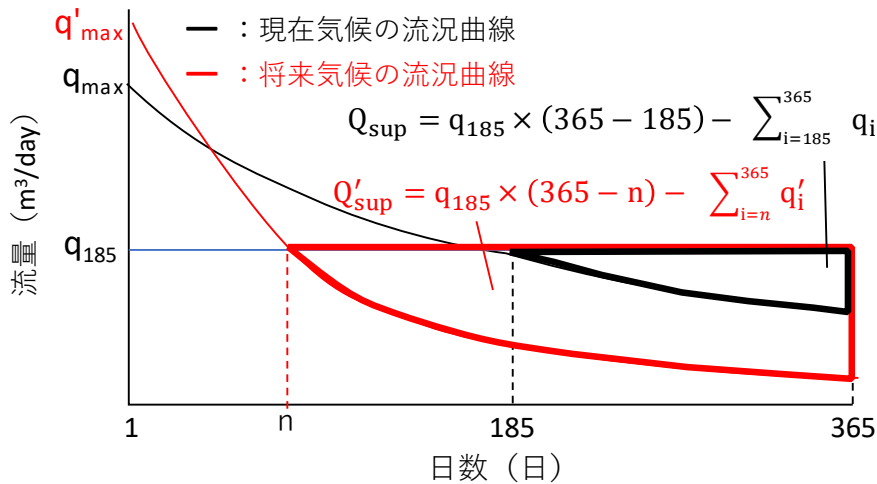


図 5.4 現在気候及び将来気候における利水補給の概念図

ここで、利水機能変化指標 > 1 の場合には、気候変動によって現状より利水容量が不足する傾向に推移すると想定した。

一方、利水機能変化指標 ≤ 1 の場合には、気候変動によって現状より利水容量が不足することはない、利水機能は改善する傾向に推移すると評価される。

なお、ダムの利水機能評価をより厳密に行う上では、ダム毎に利水計算の実施や節水率の検討が必要であるが、本検討は全国的な傾向を把握することが目的であるため、上記のような統一的指標の設定を試みたものである。

5.4.2 ダムの現有機能に関する指標

(1) ダムの治水耐力に関する指標

気候変動により河川流況が変化し、貯水池への流入量が増加した場合であっても、現有の治水耐力が十分であれば、直ちに治水機能上の所要の安全度の低下が生じるものではない。

このことから、気候変動が治水機能に与える影響の評価にあたっては、ダムの治水耐力に関する指標を設定することとし、その指標として式(10)に示す相当治水雨量を設定した。相当治水雨量は、治水容量が満水となる際の流域面積における平均降雨量といえ、この値が大きい程、ダムの治水耐力が大きいと考えられる。

$$\text{治水耐力指標} = \text{相当治水雨量}(\text{mm}) = \frac{\text{治水容量}(\text{km}^3)}{\text{流域面積}(\text{km}^2)} \quad (10)$$

ここで、豪雨による降雨のピークが1日程度と仮定し、近年の主な豪雨災害⁵⁾による最大24時間降水量を整理すると、地域による影響はみられず最大で600mm程度である(表5.1)。

青木ら⁶⁾は、平成16年7月新潟・福島豪雨、福井豪雨の降雨波形による15ダムを対象とした流出計算及び洪水調節計算の結果、洪水ピークカット率が0.5以下の場合、降水量の1/4程度がダム貯水池に貯留されることを示している。

これを参考に流域雨量の1/4がダム貯水池に貯留されるものと仮定すると、相当治水雨量が150mm程度(=600mm程度×1/4)を上回っているダムでは現状で相対的に大きな治水耐力を有しているものと考えられる。

このため、相当治水雨量>150mmのダムでは気候変動により治水機能に影響が生じてもその度合いは小さいと想定し、相当治水雨量≤150mmのダムでは気候変動により治水機能に影響が生じる場合には何らかの対応が必要なレベルであると想定した。

表 5.1 近年の主な豪雨災害による最大24時間降水量

発生年	災害名	最大24時間降水量
2011年	平成23年7月新潟・福島豪雨	527.0 mm
2012年	平成24年7月九州北部豪雨	507.5 mm
2015年	平成27年9月関東・東北豪雨	551.0 mm
2017年	平成29年7月九州北部豪雨	545.5 mm

(2) ダムの治水耐力に関する指標

「3. 気候変動と堆砂進行がダムの治水機能に与える影響の検討」における検討によって、有効貯水容量内堆砂率が10%程度までであれば治水機能の低下度合いは軽微である可能性が示唆されたため、ダムの治水耐力に関する指標として有効貯水容量内堆砂率を設定し(式(11))、10%を判定指標とした。

$$\text{治水耐力指標} = \text{有効貯水容量内堆砂率}(\%) \quad (11)$$

(3) ダムの貯水池運用に関する指標

気候変動によりダムの治水機能や治水機能に影響が生じる場合であっても、洪水が予測されるときに所定の貯水位より水位を低下させ治水容量を増大させたり、下流への補給が必要な時期に所定の貯水位より水位を上昇させて治水容量を増大させるダム貯水池の弾力的管理と呼ばれる運用が可能であれば、気候変動による影響を軽減することが可能である(図5.5)。ここでは、治水・治水利用の観点から、上記の弾力的管理の実施可能性に関する指標を設定する。

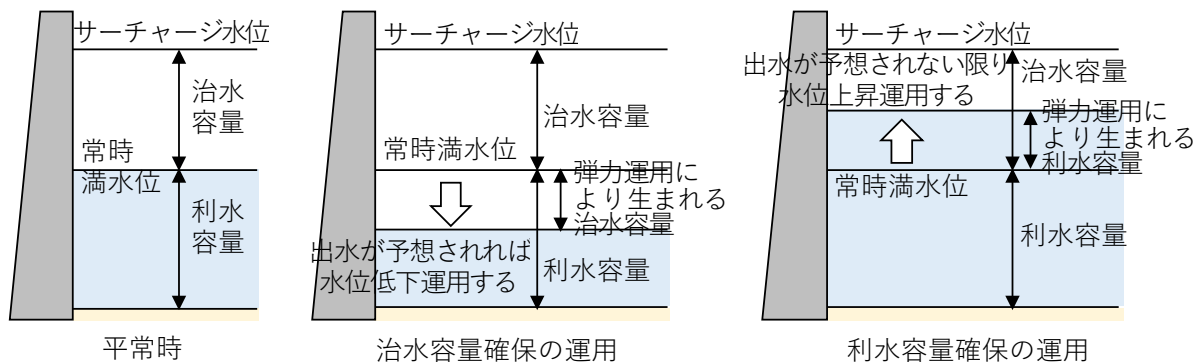


図 5.5 ダム貯水池の弾力的管理の概念図

1) 治水利用の観点からの弾力的管理の実施可能性指標

治水利用の観点からの弾力的管理の目標性能は、将来の堆砂進行による治水容量損失分を事前放流により回復できるか否かで判断することとし、判定については、治水容量内堆砂量を集水面積で除した相当雨量換算値により行うこととする。ここで、表 5.2 に示す近年の国内での豪雨発生時における事前放流実施ダムの洪水調節容量の確保量（令和元年東日本台風における草木ダムの水位低下量が相当雨量評価で約 50 mm 強）を参考に、事前放流により相当雨量 50 mm に相当する洪水調節容量の増加が可能と仮定し、将来の堆砂量が相当雨量換算で 50mm を下回っている場合には、弾力的管理により治水利用上、一定程度の影響緩和が可能と判断する。ただし、事前放流可能量として仮定した相当雨量 50 mm については、流域面積やダム規模、放流設備諸元等の個別ダムの条件により異なるため、今後精査が必要である。

また、事前放流は、洪水発生が予測される場合に利水事業者に支障を与えない範囲で制限水位以下の利水容量等を放流して洪水調節容量として一時的に活用する方策であることから、治水容量内堆砂量＝事前放流量の目標値が、堆砂進行後の利水容量を下回っていることが求められる。

以上より、治水利用の観点からの弾力的管理の実施可能性指標として以下の(12)式、(13)式を設定する（図 5.6）。

$$\text{将来の治水容量内堆砂量（相当雨量換算）} \leq 50\text{mm} \quad (12)$$

$$\text{将来の利水容量} - \text{将来の治水容量内堆砂量（相当雨量換算）} \geq 0\text{mm} \quad (13)$$

ここで、(12)式は、治水容量内の堆砂進行が弾力的管理でカバーできる規模かのチェックに用いる指標、(13)式は、実際にその貯水池内に弾力的管理を行うだけの容量があるかどうかのチェックに用いる指標であり、治水利用の観点から弾力的管理を行う上では、両式をともに満足する必要がある。

表 5.2 2019 年台風 19 号豪雨における主な事前放流実施ダムの貯水位低下量

ダム名	(a) 流域面積 [km ²]	(b) 事前放流量 [× 10 ³ m ³]	(c) 相当貯水容量 (b)/(a) [mm]
草木ダム	254	15,000	59
宮ヶ瀬ダム	214	5,000	23
大川ダム	826	5,890	7

2) 利水利用の観点からの弾力的管理の実施可能性指標

利水利用の観点からの弾力的管理の目標性能は、将来の堆砂進行による利水容量損失分を弾力的管理により水位上昇して容量確保（出水予想時には事前放流により制限水位まで低下）できるか否かで判断することとし、判定については、利水容量内堆砂量を集水面積で除した相当雨量換算値により行うこととする。ここで、弾力的管理により確保できる容量は「5.4.2 (3) 2) 利水利用の観点からの弾力的管理の実施可能性指標」での想定と同様に、相当雨量換算で 50mm と想定する。ただし、前述のとおり、事前放流可能量として仮定した相当雨量 50 mm については、流域面積やダム規模、放流設備諸元等の個別ダムの条件により異なるため、今後精査が必要である。

また、水位上昇は従前のサーチャージ水位を上回らない範囲で実施できるものと想定し、利水容量内堆砂量＝弾力的管理（水位上昇量）の目標値が、堆砂進行後の治水容量を下回っていることが求められる。

以上より、利水利用の観点からの弾力的管理の実施可能性指標として以下を設定する（図 5.6）。

$$\text{将来の利水容量内堆砂量（相当雨量換算）} \leq 50\text{mm} \quad (14)$$

$$\text{将来の治水容量} - \text{将来の利水容量内堆砂量（相当雨量換算）} \geq 0\text{mm} \quad (15)$$

ここで、(14)式は、利水容量内の堆砂進行が弾力的管理でカバーできる規模かのチェックに用いる指標、(15)式は、実際にその貯水池内に弾力的管理を行うだけの容量があるかどうかのチェックに用いる指標であり、利水利用の観点から弾力的管理を行う上では、両式をともに満足する必要がある。

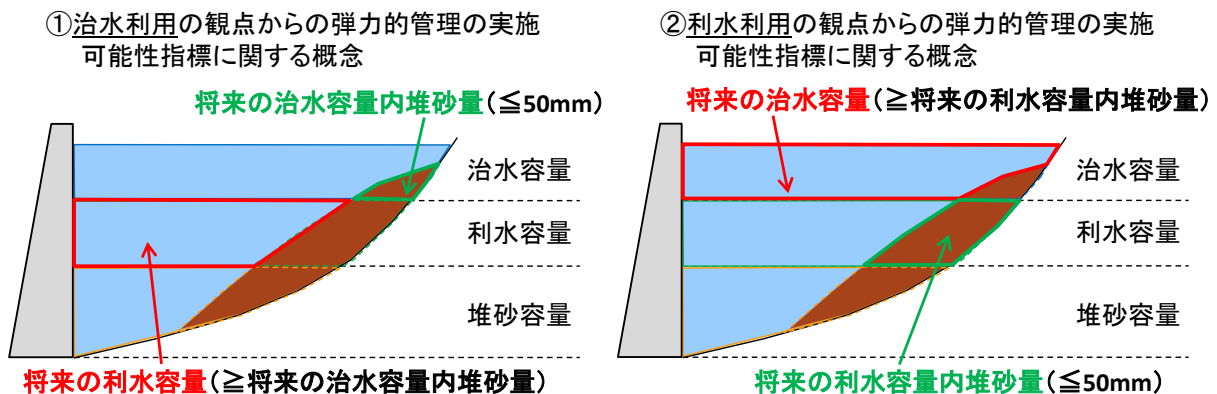


図 5.6 治水・利水利用の観点からの弾力的管理の実施可能性指標（概念図）

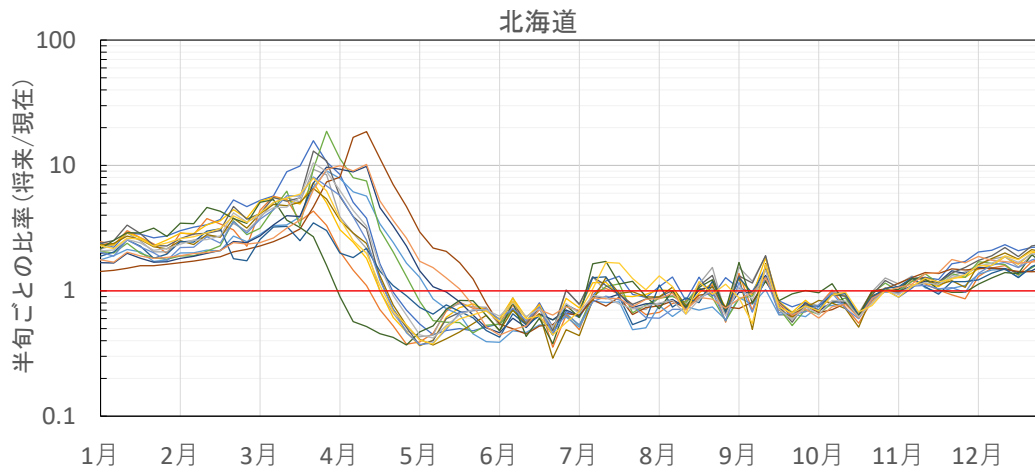
5.5 ダム地点における気候変動影響

5.5.1 ダム地点流況に対する気候変動影響

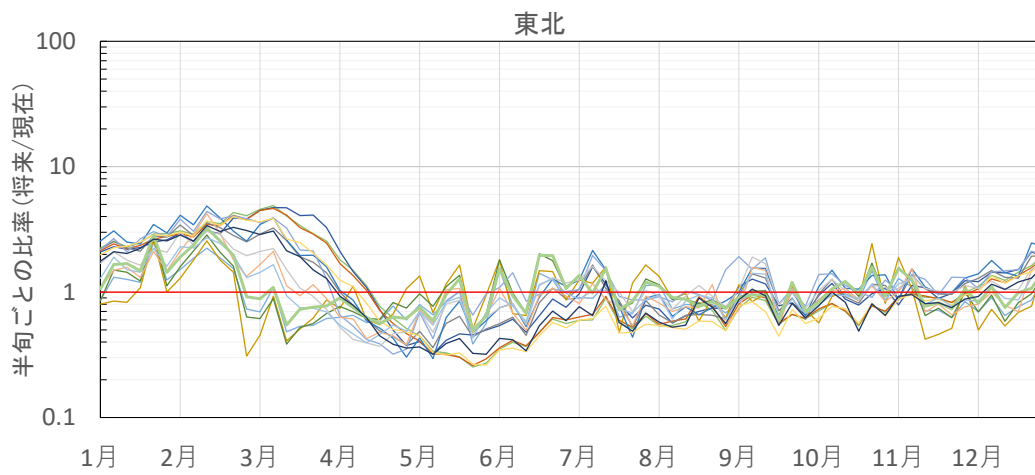
「5.3.1 将来流況の予測手法」により算定した気候変動係数（半旬）の時系列を地域毎に整理した結果を図 5.7 に示す。

図 5.7 より、12～4 月頃に北海道・東北・関東・北陸及び一部の中部地方で将来流量の増大傾向が認められ、特に北海道で顕著となる。4～10 月頃には全地域で将来流量の増大時期がある一方で、全体的傾向として将来流量の減少傾向が認められる。

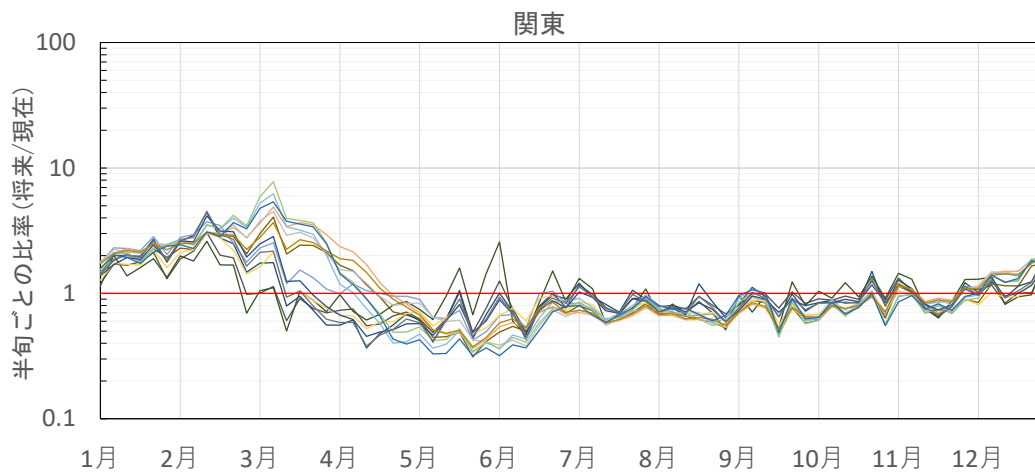
このため、気候変動によるダム利水機能への影響は、全国的に生じる可能性が推察される。



(a) 北海道 (ダム地点数=16)

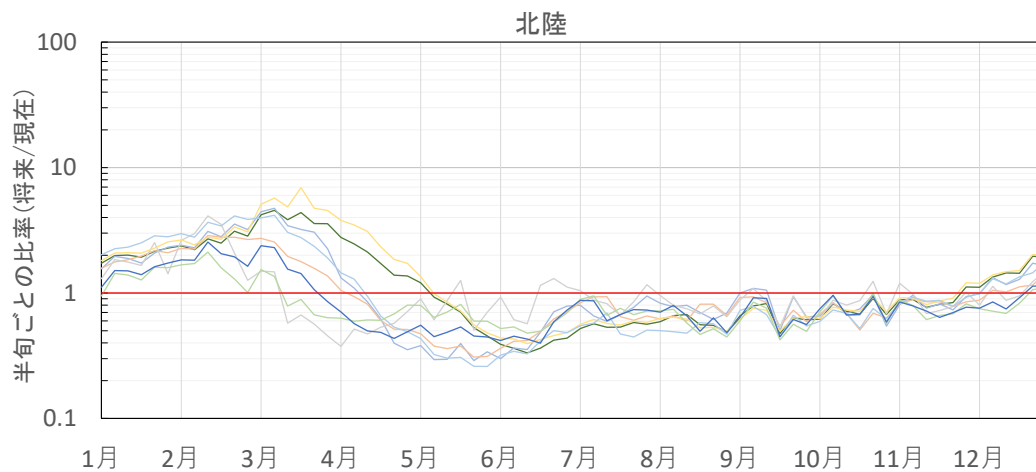


(b) 東北地方 (ダム地点数=16)

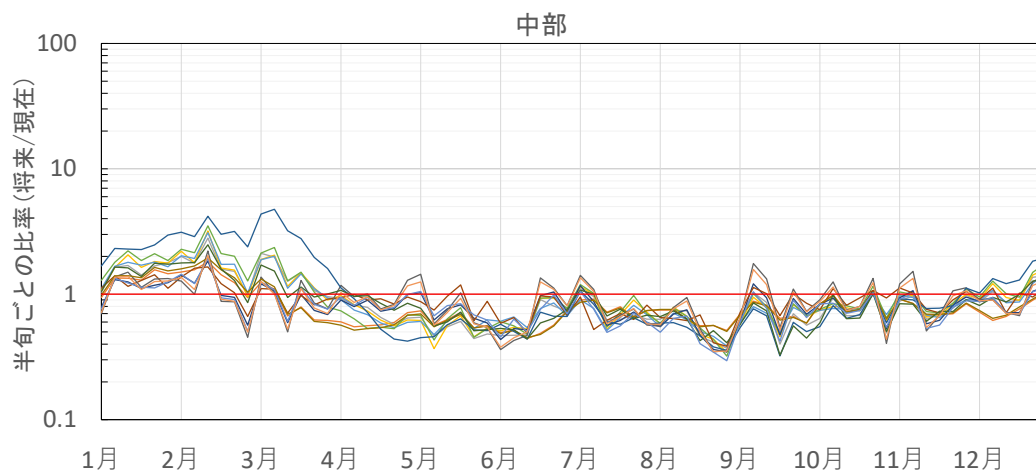


(c) 関東地方 (ダム地点数=15)

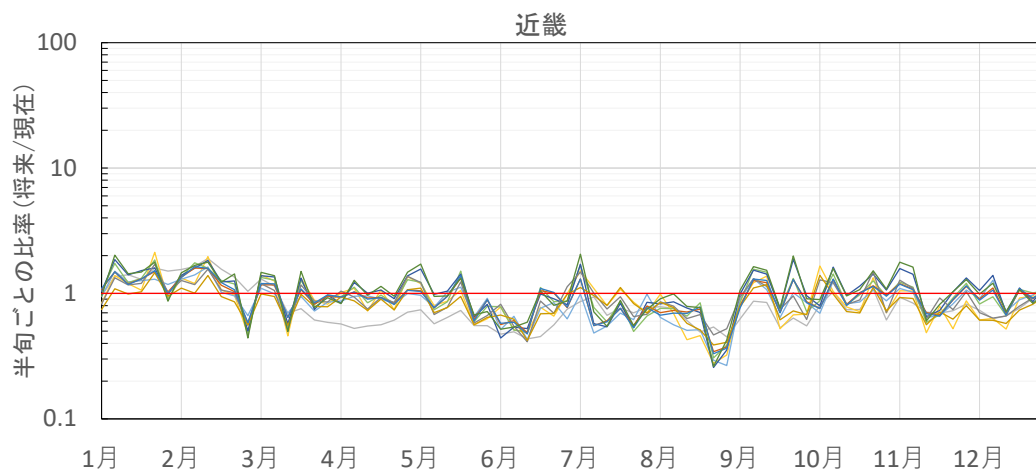
図 5.7 気候変動係数 (半旬) の時系列 (1)



(d) 北陸地方 (ダム地点数=8)

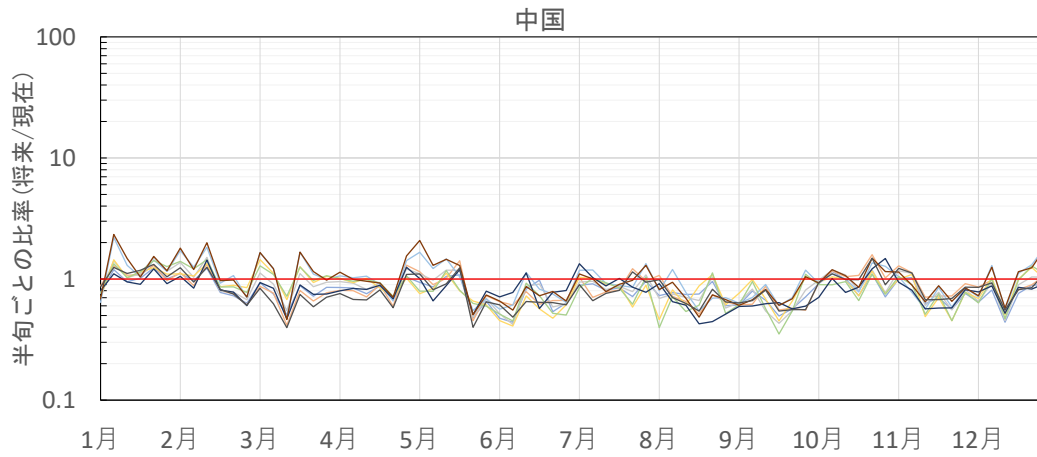


(e) 中部地方 (ダム地点数=13)

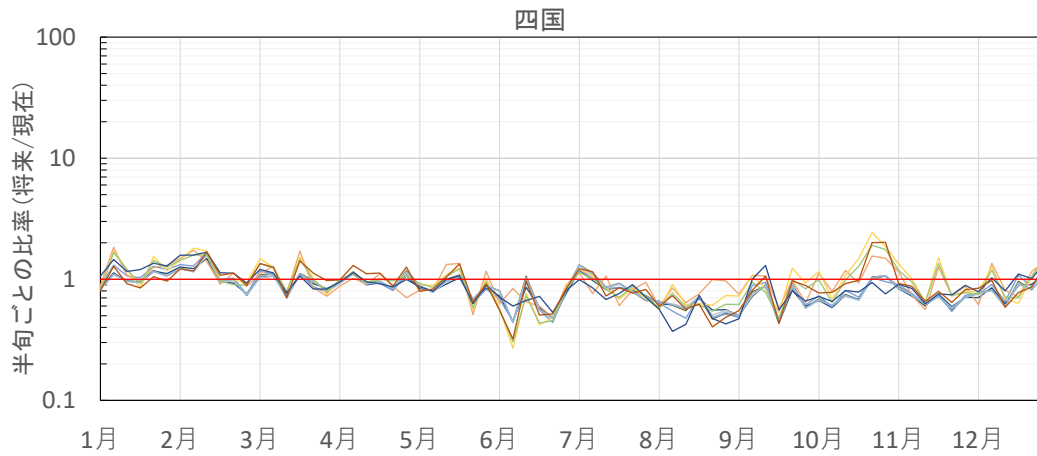


(f) 近畿地方 (ダム地点数=10)

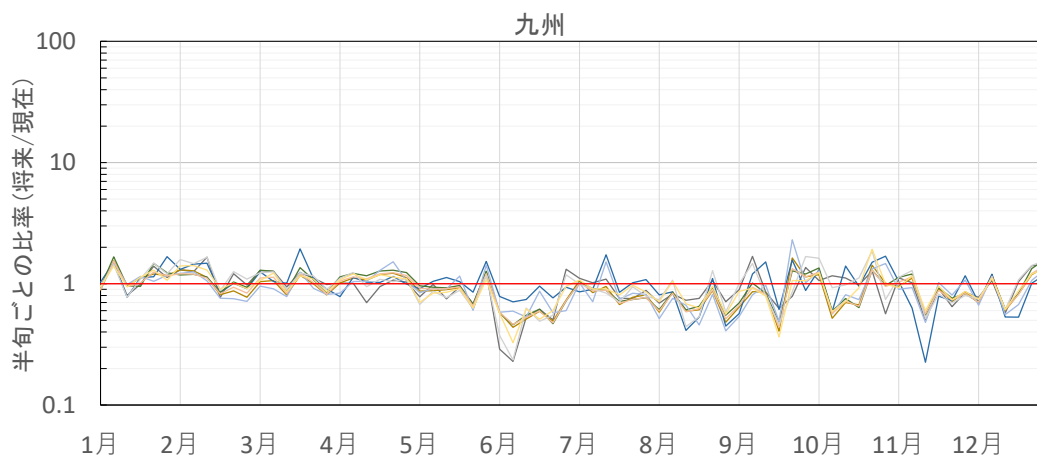
図 5.8 気候変動係数 (半旬) の時系列 (2)



(g) 中国地方 (ダム地点数=9)



(h) 四国地方 (ダム地点数=11)



(i) 九州地方 (ダム地点数=8)

図 5.9 気候変動係数 (半旬) の時系列 (3)

5.5.2 ダムの治水・利水機能に対する気候変動影響

(1) 治水機能変化指数と年間総流量比からの整理

「5.4.1 (1) ダムの治水機能変化に関する指標」で定義した治水機能変化指標と、現在気候（1979-2003年）と将来気候（2075-2099年）の総流量比率について、地域別に整理を行った結果を図5.10、表5.3に示す。

図5.10、表5.3より、中部・四国地方の各1ダムを除く全てのダムで治水機能変化指標の増大傾向が認められ、特に東北地方で顕著となる。また、将来において年間総流量が減少する場合であっても、治水機能変化指標が増大するダムが多く認められ、これらのダムでは渇水と大規模洪水の発生が推察される。

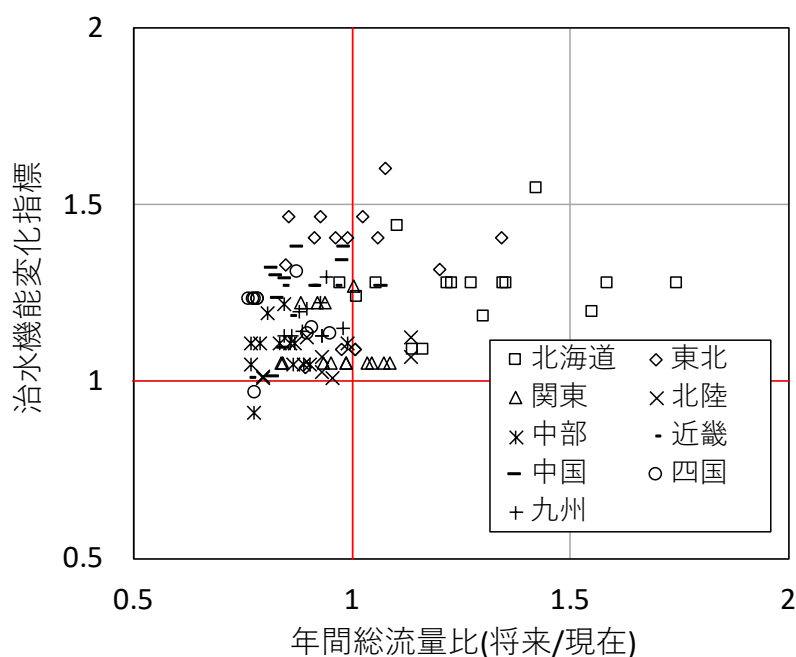


図 5.10 治水機能変化指数と年間総流量比からの分類

表 5.3 治水機能変化指数と年間総流量比からの分類（該当ダム数）

地域	該当ダム数				計
	治水機能指標>1 年間総流量比>1	治水機能指標>1 年間総流量比≤1	治水機能指標≤1 年間総流量比>1	治水機能指標≤1 年間総流量比≤1	
北海道	15 (94%)	1 (6%)	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)
東北	7 (44%)	8 (50%)	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)
関東	5 (31%)	10 (63%)	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)
北陸	2 (25%)	6 (75%)	0 (0%)	0 (0%)	8 (100%)
中部	0 (0%)	12 (92%)	0 (0%)	1 (8%)	13 (100%)
近畿	2 (20%)	8 (80%)	0 (0%)	0 (0%)	10 (100%)
中国	0 (0%)	9 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	9 (100%)
四国	0 (0%)	9 (82%)	0 (0%)	1 (9%)	11 (100%)
九州	0 (0%)	9 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	9 (100%)
全国	31 (29%)	72 (67%)	0 (0%)	2 (2%)	108 (100%)

※上表中の()は該当割合を示す

(2) 利水機能変化指数と年間総流量比からの整理

「5.4.1 (2) ダムの利水機能変化に関する指標」で定義した利水機能変化指標と、現在気候（1979-2003年）と将来気候（2075-2099年）の総流量比率について、地域別に整理を行った結果を図5.11、表5.4に示す。

図5.11、表5.4より、北海道の2ダムを除く全てのダムで利水機能変化指標の増大傾向が認められる。北海道の多くのダムでは、将来において、利水機能変化指標が増大する一方で年間総流量も増大するため、渇水対策としてダム貯水池利用の工夫が有効であると考えられる。

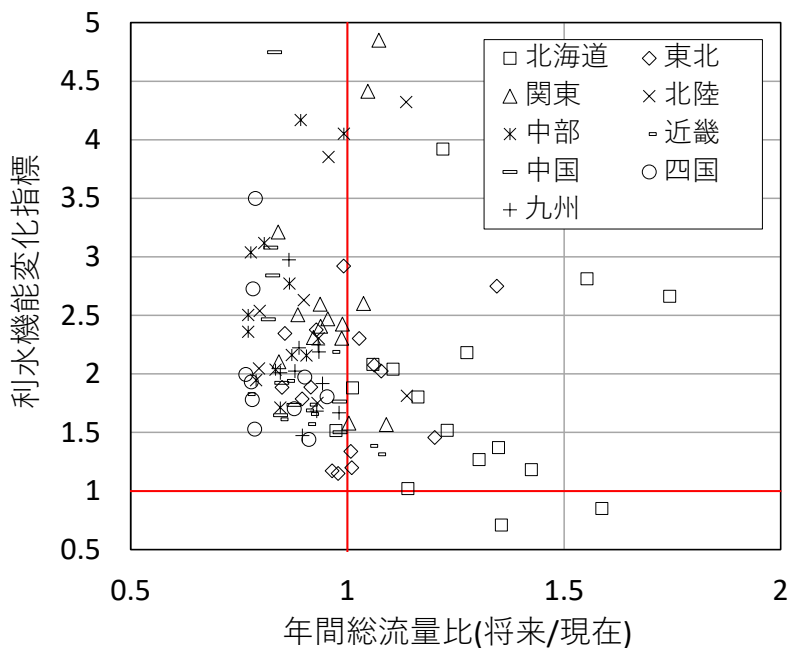


図 5.11 利水機能変化指数と年間総流量比からの分類

表 5.4 利水機能変化指数と年間総流量比からの分類（該当ダム数）

地域	該当ダム数				計
	利水機能指標>1 年間総流量比>1	利水機能指標>1 年間総流量比≤1	利水機能指標≤1 年間総流量比>1	利水機能指標≤1 年間総流量比≤1	
北海道	13 (81%)	1 (6%)	2 (13%)	0 (0%)	16 (100%)
東北	7 (44%)	8 (50%)	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)
関東	5 (31%)	10 (63%)	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)
北陸	2 (25%)	6 (75%)	0 (0%)	0 (0%)	8 (100%)
中部	0 (0%)	13 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	13 (100%)
近畿	2 (20%)	8 (80%)	0 (0%)	0 (0%)	10 (100%)
中国	0 (0%)	9 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	9 (100%)
四国	0 (0%)	10 (91%)	0 (0%)	0 (0%)	11 (100%)
九州	0 (0%)	9 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	9 (100%)
全国	29 (27%)	74 (69%)	2 (2%)	0 (0%)	108 (100%)

※上表中の()は該当割合を示す

(3) 治水機能変化指標と利水機能変化指数からの整理

地域別に治水機能変化指標と利水機能変化指標の観点から影響分類を行った結果を図5.12、表5.5に示す。

将来において治水機能と利水機能のいずれにも影響が生じる可能性のあるダム（治水機能変化指標 >1 ，利水機能変化指標 >1 ）は全ダムの約94%である。治水機能のみ影響が生じる可能性のあるダム（治水機能変化指標 >1 ，利水機能変化指標 ≤ 1 ）は全ダムの約2%であり，該当ダムは北海道のダムである。利水機能のみ影響が生じる可能性のあるダム（治水機能変化指標 ≤ 1 ，利水機能変化指標 >1 ）は全ダムの約2%であり，該当ダムは中部地方及び四国地方のダムである。

以降では、「5.4.2 ダムの現有機能に関する指標」で設定したダムの現行機能も考慮したダム類型を行う。

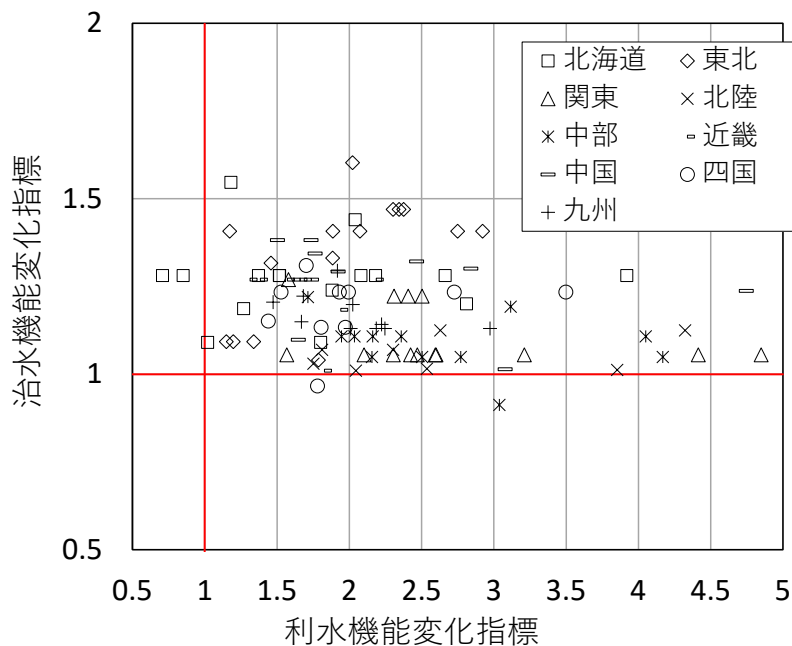


図 5.12 治水機能変化指標と利水機能変化指標からの分類

表 5.5 治水機能変化指標と利水機能変化指標からの分類（該当ダム数）

地域	該当ダム数				計
	治水機能指標 >1 利水機能指標 >1	治水機能指標 >1 利水機能指標 ≤ 1	治水機能指標 ≤ 1 利水機能指標 >1	治水機能指標 ≤ 1 利水機能指標 ≤ 1	
北海道	14 (88%)	2 (13%)	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)
東北	15 (94%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)
関東	15 (94%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	16 (100%)
北陸	8 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	8 (100%)
中部	12 (92%)	0 (0%)	1 (8%)	0 (0%)	13 (100%)
近畿	10 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	10 (100%)
中国	9 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	9 (100%)
四国	9 (82%)	0 (0%)	1 (9%)	0 (0%)	11 (100%)
九州	9 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	9 (100%)
全国	101 (94%)	2 (2%)	2 (2%)	0 (0%)	108 (100%)

※上表中の()は該当割合を示す

5.5.3 ダム堆砂進行に対する気候変動影響

「5.3.2 ダム堆砂進行の予測手法」により算定した今後の堆砂進行を考慮した将来（2099年時点）の相当治水雨量と現在の相当治水雨量を図 5.13 に、同様の手法により算定した将来の有効容量内堆砂率と現在の有効容量内堆砂率を図 5.14 に示す。

図 5.13 より、有効容量内における堆砂進行の結果、将来において相当治水雨量が減少するダムが認められる。特に、現在の相当治水雨量が小さなダム（100mm 程度以下のダム）で、将来の相当治水雨量が減少する場合には、ダムの治水機能の深刻な低下が懸念される。また、図 5.14 より、現状では多くのダムで有効容量堆砂率が 10%以下であるが、将来にはダムの利水機能への影響が懸念される堆砂率 10%を上回るダムが多く認められるようになる。

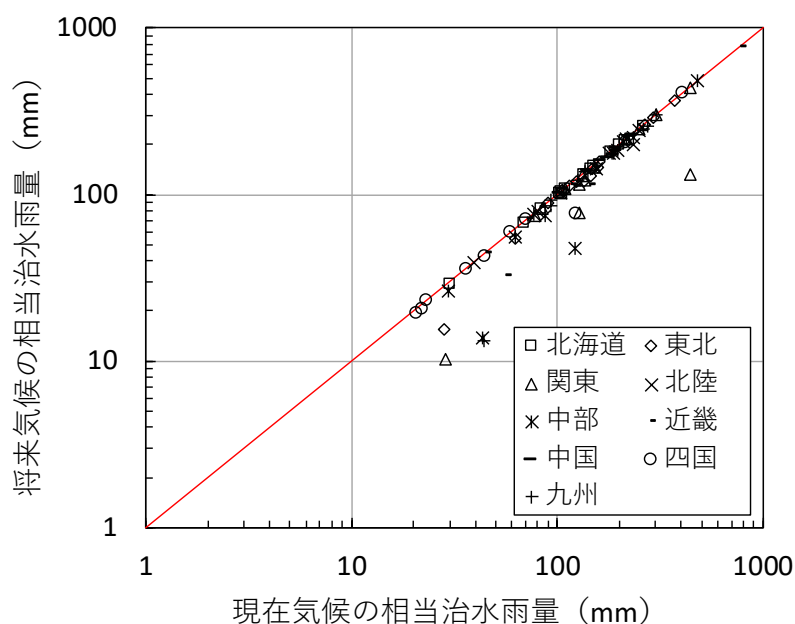


図 5.13 現在及び将来の相当治水雨量

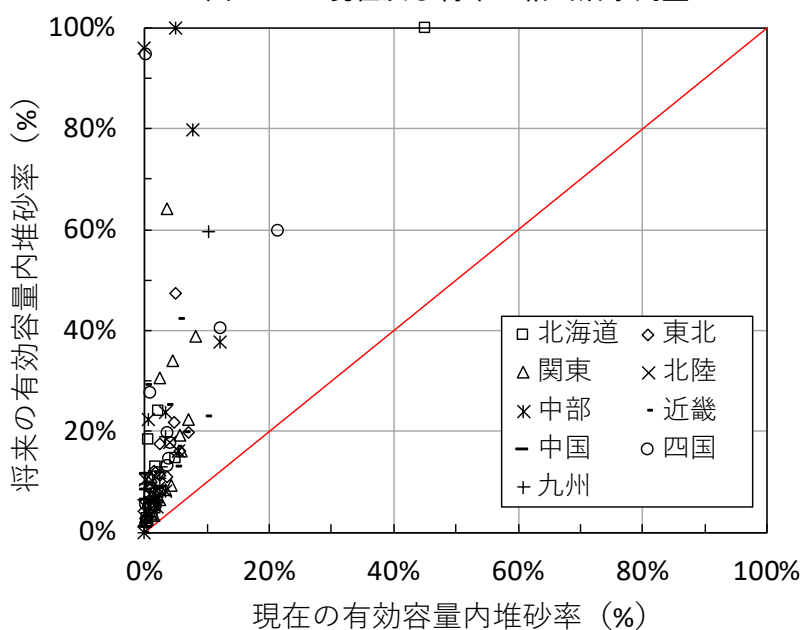


図 5.14 現在及び将来の有効容量内堆砂率

5.6 気候変動による影響を受けるダムの類型化

5.6.1 気候変動影響に着目したダム類型

気候変動に伴うダムの治水機能への影響について、「5.4.1 ダムの気候変動影響に関する指標」で述べた指標により、「気候変動が生じて、十分な治水機能が期待できるダム」(タイプⅠ)、「気候変動の結果、最大流量は小さくなるものの、治水容量は不足する傾向となるダム」(タイプⅡ-1)、「気候変動の結果、最大流量は大きくなるものの、治水容量は十分と評価されるダム」(タイプⅡ-2)、「気候変動の結果、十分な治水機能は期待できないダム」(タイプⅢ)に分類した。さらに後者について、「5.4.2 ダムの現有機能に関する指標」で述べた指標により「気候変動の結果、十分な治水機能は期待できないものの、貯水池運用の工夫により影響緩和を図ることが可能なダム」(タイプⅢ-1)、「気候変動の結果、十分な治水機能は期待できず、かつ貯水池運用の工夫によっても影響緩和が難しいダム」(タイプⅢ-2)に分類した。

また、気候変動に伴うダムの利水機能への影響について、「5.4.1 ダムの気候変動影響に関する指標」で述べた指標により、「気候変動が生じて、十分な利水機能が期待できるダム」(タイプA)、「気候変動の結果、流量は増加するものの、有効容量は不足する傾向となるダム」(タイプB-1)、「気候変動の結果、流量は減少するものの、有効容量は十分と評価されるダム」(タイプB-2)、「気候変動の結果、十分な利水機能は期待できないダム」(タイプC)に分類した。さらに後者について、「5.4.2 ダムの現有機能に関する指標」で述べた指標により「気候変動の結果、十分な利水機能は期待できないものの、貯水池運用の工夫により影響緩和を図ることが可能なダム」(タイプC-1)、「気候変動の結果、十分な利水機能は期待できず、かつ貯水池運用の工夫によっても影響緩和が難しいダム」(タイプC-2)に分類した。

以上について一覧表に整理したものを表 5.6 に示す。

表 5.6 気候変動影響に着目したダム類型と類型化指標

	分類	概要	類型化指標
治水類型	Ⅰ	気候変動が生じて、十分な治水機能が期待できる	治水機能変化指標 ≤ 1 かつ 将来の相当治水雨量 $> 150\text{mm}$
	Ⅱ-1	気候変動の結果、最大流量は小さくなるものの、治水容量は不足する傾向となる	治水機能変化指標 ≤ 1 かつ 将来の相当治水雨量 $\leq 150\text{mm}$
	Ⅱ-2	気候変動の結果、最大流量は大きくなるものの、治水容量は十分と評価される	治水機能変化指標 > 1 かつ 将来の相当治水雨量 $> 150\text{mm}$
	Ⅲ-1	気候変動の結果、十分な治水機能は期待できないものの、貯水池運用の工夫により影響緩和を図ることが可能	治水機能変化指標 > 1 かつ 将来の治水容量内堆砂量(相当雨量換算) $\leq 50\text{mm}$ かつ 将来の利水容量-将来の治水容量内堆砂量(相当雨量換算) $\geq 0\text{mm}$
	Ⅲ-2	気候変動の結果、十分な治水機能は期待できず、かつ貯水池運用の工夫によっても影響緩和が難しい	治水機能変化指標 > 1 かつ 将来の治水容量内堆砂量(相当雨量換算) $> 50\text{mm}$ または 将来の利水容量-将来の治水容量内堆砂量(相当雨量換算) $< 0\text{mm}$
利水類型	A	気候変動が生じて、十分な利水機能が期待できる	利水機能変化指標 ≤ 1 かつ 将来の有効容量内堆砂率 $\leq 10\%$
	B-1	気候変動の結果、流量は増加するものの、有効容量は不足する傾向となる	利水機能変化指標 ≤ 1 かつ 将来の有効容量内堆砂率 $> 10\%$
	B-2	気候変動の結果、流量は減少するものの、有効容量は十分と評価される	利水機能変化指標 > 1 かつ 将来の有効容量内堆砂率 $\leq 10\%$
	C-1	気候変動の結果、十分な利水機能は期待できないものの、貯水池運用の工夫により影響緩和を図ることが可能	利水機能変化指標 > 1 かつ 将来の利水容量内堆砂量(相当雨量換算) $\leq 50\text{mm}$ かつ 将来の治水容量-将来の利水容量内堆砂量(相当雨量換算) $\geq 0\text{mm}$
	C-2	気候変動の結果、十分な利水機能は期待できず、かつ貯水池運用の工夫によっても影響緩和が難しい	利水機能変化指標 > 1 かつ 将来の利水容量内堆砂量(相当雨量換算) $> 50\text{mm}$ または 将来の治水容量-将来の利水容量内堆砂量(相当雨量換算) $< 0\text{mm}$

5.6.2 治水機能への影響に着目したダム類型化

表 5.7, 図 5.15, 図 5.16, 図 5.17 には治水機能への影響に着目したダム類型を示す。

これらの結果から、気候変動により治水機能上の問題が生じないと判断されるダム（Ⅰ類型）はゼロである。将来の最大日平均流量は低下するものの、将来における相当治水雨量が 150mm 以下のダム（Ⅱ-1 類型）は全ダムの約 2% である。将来の最大日平均流量が増加し治水容量の不足が生じる可能性があるものの、将来における相当治水雨量が 150mm 以上のダム（Ⅱ-2 類型）は 34% である。これらのダムでは、将来気候におけるダムの治水機能への影響は相対的に小さいと考えられる。

一方で、将来の最大日平均流量が増加し治水容量の不足が生じる可能性があり、かつ将来における相当治水雨量が 150mm 以下のダム（Ⅲ類型）は全ダムの約 64% である。これらのダムについて、貯水池運用の工夫によっても気候変動の影響の軽減が難しいダム（タイプⅢ-2）に分類されるものは、全ダムの約 17% である。これらのダムでは、将来気候におけるダムの治水機能への影響が相対的に大きいと考えられる。当該類型に相当するダムを地域別に確認すると、特に中部地方のダムが多く該当する。

表 5.7 治水機能への影響に着目したダムの類型化（該当ダム数）

地域	該当ダム数					計
	Ⅰ	Ⅱ-1	Ⅱ-2	Ⅲ-1	Ⅲ-2	
北海道	0(0%)	0(0%)	5(31%)	10(63%)	1(6%)	16(100%)
東北	0(0%)	0(0%)	4(27%)	8(53%)	3(20%)	15(100%)
関東	0(0%)	0(0%)	4(29%)	7(50%)	3(21%)	14(100%)
北陸	0(0%)	0(0%)	3(38%)	4(50%)	1(13%)	8(100%)
中部	0(0%)	1(8%)	6(46%)	2(15%)	4(31%)	13(100%)
近畿	0(0%)	0(0%)	1(10%)	7(70%)	2(20%)	10(100%)
中国	0(0%)	0(0%)	7(78%)	2(22%)	0(0%)	9(100%)
四国	0(0%)	1(10%)	2(20%)	6(60%)	1(10%)	10(100%)
九州	0(0%)	0(0%)	3(38%)	3(38%)	2(25%)	8(100%)
全国	0(0%)	2(2%)	35(34%)	49(48%)	17(17%)	103(100%)

※上表中の()は該当割合を示す

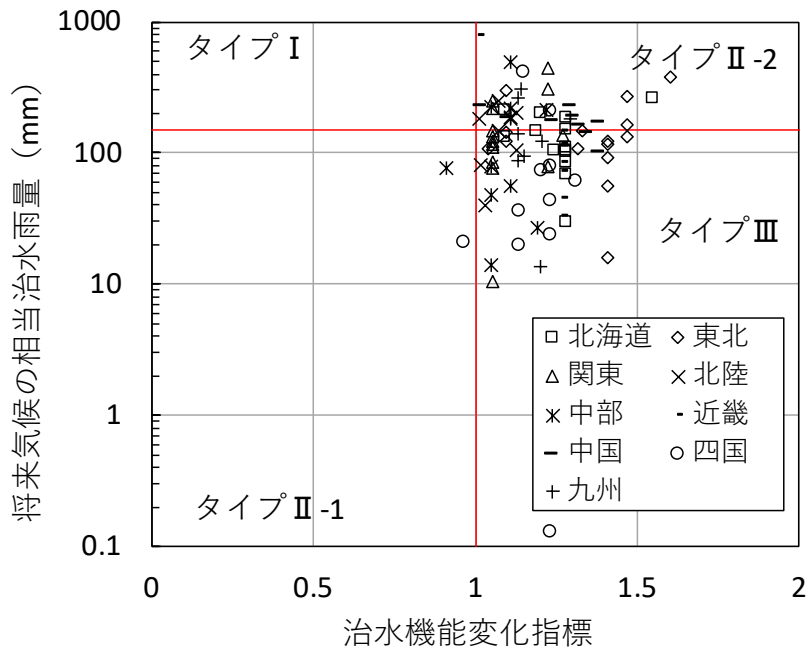


図 5.15 治水機能への影響に着目したダムの類型化①

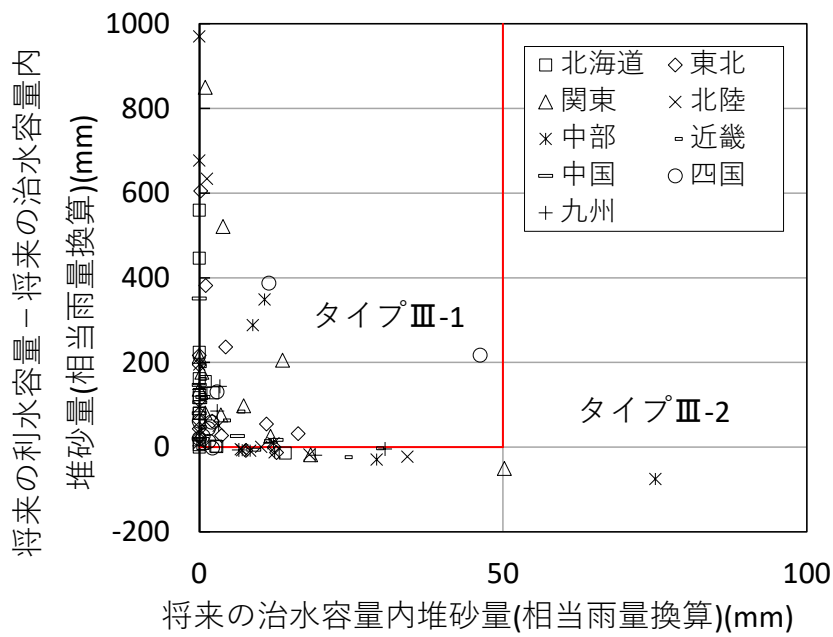
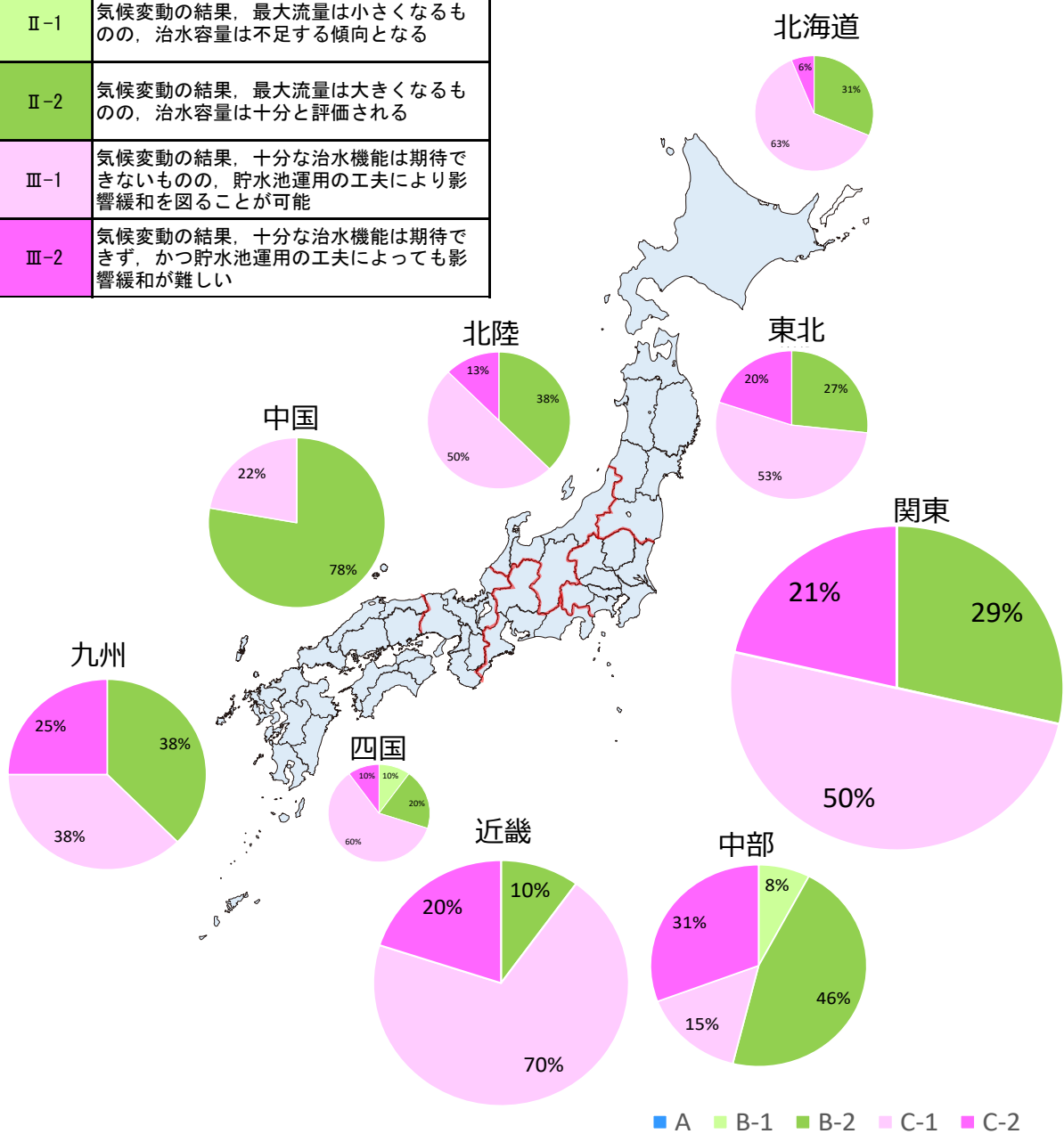


図 5.16 治水機能への影響に着目したダムの類型化②

分類	概要
I	気候変動が生じて、十分な治水機能が期待できる
II-1	気候変動の結果、最大流量は小さくなるものの、治水容量は不足する傾向となる
II-2	気候変動の結果、最大流量は大きくなるものの、治水容量は十分と評価される
III-1	気候変動の結果、十分な治水機能は期待できないものの、貯水池運用の工夫により影響緩和を図ることが可能
III-2	気候変動の結果、十分な治水機能は期待できず、かつ貯水池運用の工夫によっても影響緩和が難しい



注) 円グラフの大きさは各地域の人口規模に応じたもの

図 5.17 ダムの治水機能への影響に着目した類型マップ

5.6.3 利水機能への影響に着目したダム類型化

表 5.8, 図 5.18, 図 5.19, 図 5.20 には利水機能への影響に着目したダム類型を示す。

これらの結果から、利水機能上の問題が生じないと判断されるダム (A 類型) は北海道で 2 ダム認められる。将来において下流河川への利水補給量の低下が想定されるものの、将来における有効容量内堆砂量が 10%以上のダム (B-1 類型) はゼロである。将来において下流河川への利水補給量の増加が想定されるものの、将来における有効容量内堆砂量が 10%以下のダム (B-II 類型) は全ダムの 46%である。これらのダムでは、将来気候におけるダムの利水機能への影響は相対的に小さいと考えられる。

一方で、将来において下流河川への利水補給量の増加が想定され、かつ将来における有効容量内堆砂量が 10%以上のダム (C 類型) は全ダムの約 52%である。これらのダムについて、貯水池運用の工夫によっても気候変動の影響の軽減が難しいダム (タイプ C-2) に分類されるものは、全ダムの約 20%である。これらのダムでは、将来気候におけるダムの利水機能への影響が相対的に大きいと考えられる。当該類型に相当するダムを地域別に確認すると、特に関東地方、中部地方、四国地方のダムが多く該当する。

表 5.8 利水機能への影響に着目したダムの類型化 (該当ダム数)

地域	該当ダム数					
	A	B-1	B-2	C-1	C-2	計
北海道	2(13%)	0(0%)	8(50%)	3(19%)	3(19%)	16(100%)
東北	0(0%)	0(0%)	6(40%)	9(60%)	0(0%)	15(100%)
関東	0(0%)	0(0%)	6(43%)	3(21%)	5(36%)	14(100%)
北陸	0(0%)	0(0%)	6(75%)	1(13%)	1(13%)	8(100%)
中部	0(0%)	0(0%)	4(31%)	4(31%)	5(38%)	13(100%)
近畿	0(0%)	0(0%)	2(20%)	6(60%)	2(20%)	10(100%)
中国	0(0%)	0(0%)	8(89%)	1(11%)	0(0%)	9(100%)
四国	0(0%)	0(0%)	2(20%)	4(40%)	4(40%)	10(100%)
九州	0(0%)	0(0%)	5(63%)	2(25%)	1(13%)	8(100%)
全国	2(2%)	0(0%)	47(46%)	33(32%)	21(20%)	103(100%)

※上表中の()は該当割合を示す

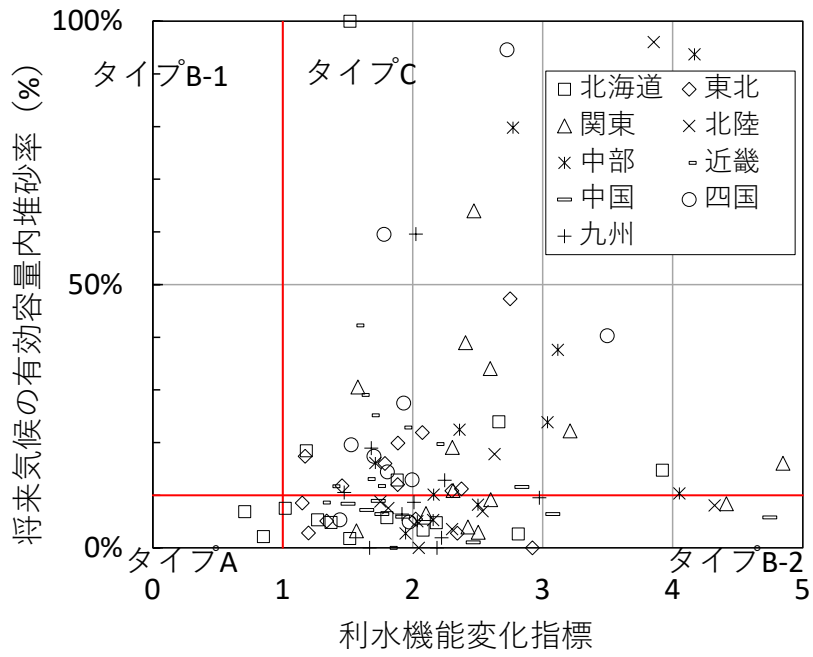


図 5.18 利水機能への影響に着目したダムの類型化①

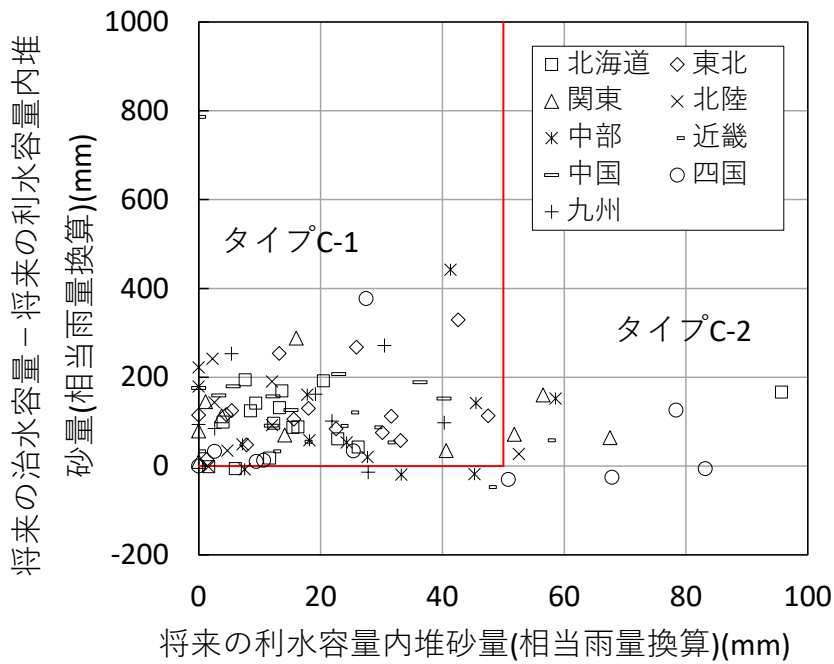
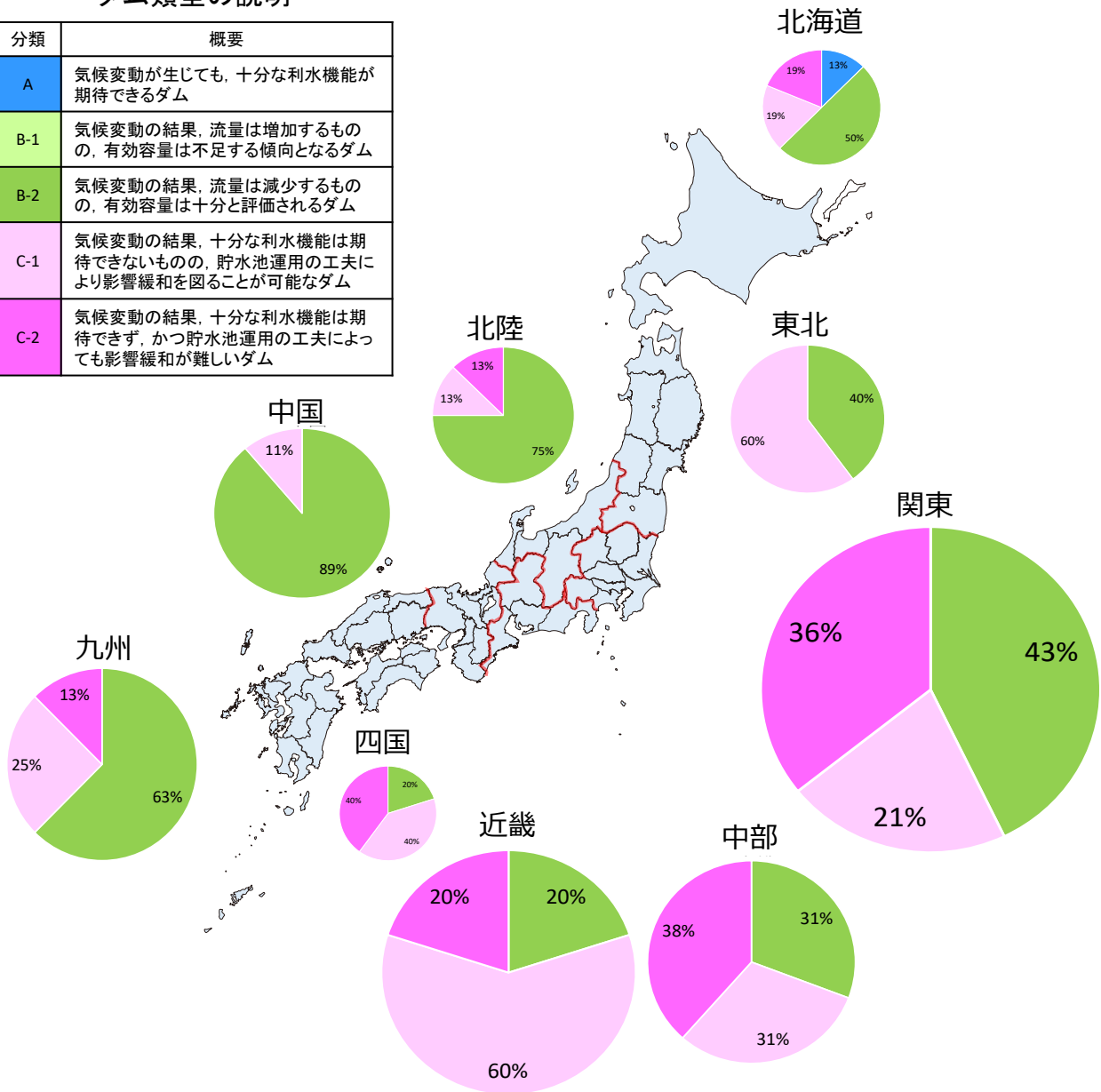


図 5.19 利水機能への影響に着目したダムの類型化②

ダム類型の説明

分類	概要
A	気候変動が生じてても、十分な利水機能が期待できるダム
B-1	気候変動の結果、流量は増加するものの、有効容量は不足する傾向となるダム
B-2	気候変動の結果、流量は減少するものの、有効容量は十分と評価されるダム
C-1	気候変動の結果、十分な利水機能は期待できないものの、貯水池運用の工夫により影響緩和を図ることが可能なダム
C-2	気候変動の結果、十分な利水機能は期待できず、かつ貯水池運用の工夫によっても影響緩和が難しいダム



注) 円グラフの大きさは各地域の人口規模に応じたもの

図 5.20 ダムの利水機能への影響に着目した類型マップ

5.6.4 治水機能及び利水機能への影響に着目したダム類型化

表 5.9, 図 5.22 には, 治水機能への影響に着目したダム類型と利水機能への影響に着目したダム類型のマトリクスを示す. ここで, 両類型の持つ影響度合いを加味して, 以下のとおりの分類を行うこととする.

		利水類型				
		A	B-1	B-2	C-1	C-2
治水類型	I					
	II-1					
	II-2					
	III-1					
	III-2					

■: ダムの利水・治水機能への影響は軽微

■: ダムの利水・治水機能への影響を弾力的管理で賄える可能性

■: ダムの利水・治水機能への影響を弾力的管理で賄うのみでは不十分となる可能性(ハード対策が必要となる可能性あり)

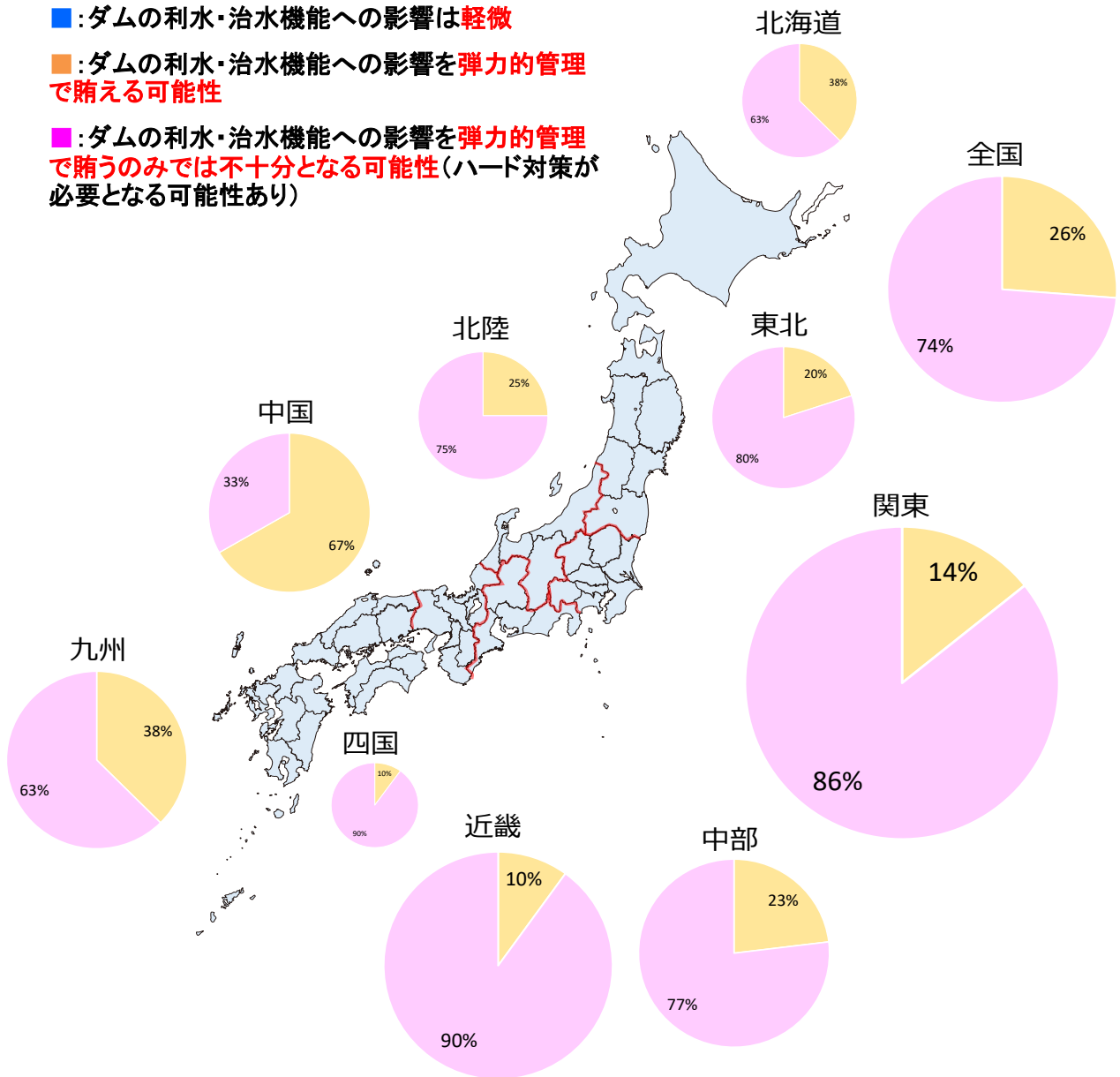
図 5.21 ダムの治水・利水類型に応じた類型化マトリクス

以上の分類によると, 気候変動及び堆砂進行に伴うダムの治水及び利水機能への影響は軽微と判断されるダムはゼロとなり, 全てのダムで治水・利水上何らかの影響を受ける可能性を有する. その一方で, 全ダムの約 26% (表 5.9 のオレンジ色ハッチング) は, 気候変動及び堆砂進行に伴うダムの治水・利水機能への影響に対して弾力的管理の実施が考えられる. また, 全ダムの約 74% (表 5.9 の桃色ハッチング) は, 気候変動及び堆砂進行に伴うダムの治水・利水機能への影響に対して上述したダムの弾力的管理では不十分となり, ダム嵩上げ等のハード対策を主とした適応策の実施が考えられる. ただし, 貯水池内の浚渫などを実施し, 堆砂進行に伴う有効容量の損失を緩和することで, 上記結果は変わり得ることに留意が必要となる.

表 5.9 ダムの治水機能及び利水機能への気候変動影響に着目したダムの類型化

地域	該当ダム数																計
	A				B-1・B-2				C-1				C-2				
	I	II-1・II-2	III-1	III-2	I	II-1・II-2	III-1	III-2	I	II-1・II-2	III-1	III-2	I	II-1・II-2	III-1	III-2	
北海道	0(0%)	0(0%)	2(13%)	0(0%)	0(0%)	4(25%)	4(25%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	3(19%)	0(0%)	0(0%)	1(6%)	1(6%)	1(6%)	16(100%)
東北	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	3(20%)	3(20%)	0(0%)	0(0%)	1(7%)	5(33%)	3(20%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	15(100%)
関東	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	2(14%)	4(29%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(7%)	2(14%)	0(0%)	2(14%)	2(14%)	1(7%)	14(100%)
北陸	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	2(25%)	4(50%)	0(0%)	0(0%)	1(13%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(13%)	8(100%)
中部	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	3(23%)	1(8%)	0(0%)	0(0%)	2(15%)	0(0%)	2(15%)	0(0%)	2(15%)	1(8%)	2(15%)	13(100%)
近畿	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(10%)	1(10%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	4(40%)	2(20%)	0(0%)	0(0%)	2(20%)	0(0%)	10(100%)
中国	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	6(67%)	2(22%)	0(0%)	0(0%)	1(11%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	9(100%)
四国	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(10%)	1(10%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	3(30%)	1(10%)	0(0%)	2(20%)	2(20%)	0(0%)	10(100%)
九州	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	3(38%)	1(13%)	1(13%)	0(0%)	0(0%)	2(25%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(13%)	8(100%)
全国	0(0%)	0(0%)	2(2%)	0(0%)	0(0%)	25(24%)	21(20%)	1(1%)	0(0%)	5(5%)	18(17%)	10(10%)	0(0%)	7(7%)	8(8%)	6(6%)	103(100%)

- : ダムの利水・治水機能への影響は**軽微**
- : ダムの利水・治水機能への影響を**弾力的管理**で賄える**可能性**
- : ダムの利水・治水機能への影響を**弾力的管理**で賄うのみでは**不十分となる可能性**(ハード対策が必要となる可能性あり)



注) 円グラフの大きさは各地域の人口規模に応じたもの

図 5.22 ダムの治水機能及び利水機能への影響に着目した類型マップ

表 5.10 ダムの類型化に関わる各種指標の算出値 (1)

地域	ダム名	流域面積 (km ²)	有効貯水容量 (千m ³)	治水容量 (洪水期) (千m ³)	現在の有効容量内堆砂率	将来の有効容量内堆砂率	現在の相当治水雨量 (mm)	将来の相当治水雨量 (mm)	将来の治水容量内堆砂量(相当雨量換算)	将来の治水容量内堆砂量(相当雨量換算)	将来の治水容量 - 将来の治水容量内堆砂	年間総流量比	治水機能変化指数	治水機能変化指標	治水類型	利水類型	
北海道	HK_Aダム	331	96,300	48,600	1.6%	5.3%	147	144	2	13	128	131	1.09	1.19	1.27	III-1	B-2
北海道	HK_Bダム	113	14,100	11,900	5.0%	14.8%	105	102	3	15	1	87	0.97	1.28	3.92	III-1	C-1
北海道	HK_Cダム	470	130,420	51,400	1.1%	4.8%	109	108	1	12	155	96	1.08	1.28	2.18	III-1	B-2
北海道	HK_Dダム	151	81,800	10,400	1.7%	4.8%	69	69	0	26	446	43	1.05	1.28	1.37	III-1	B-2
北海道	HK_Eダム	118	42,000	25,000	0.8%	5.7%	212	212	0	20	124	192	0.94	1.09	1.80	II-2	B-2
北海道	HK_Fダム	124	35,800	25,000	0.4%	2.6%	202	202	0	8	79	194	0.96	1.20	2.81	II-2	B-2
北海道	HK_Gダム	592	88,000	80,000	1.8%	7.5%	135	132	3	9	2	124	1.00	1.09	1.02	III-1	B-2
北海道	HK_Hダム	292	54,700	30,000	0.6%	2.1%	103	103	0	4	81	99	0.79	1.28	0.85	III-1	A
北海道	HK_Iダム	1,662	85,000	50,000	2.3%	24.0%	30	29	1	12	9	18	1.09	1.28	2.66	III-1	C-1
北海道	HK_Jダム	104	78,600	19,000	0.4%	1.8%	183	183	0	14	559	169	0.93	1.28	1.52	II-2	B-2
北海道	HK_Kダム	1,215	17,200	17,200	0.0%	142.4%	14	0	14	6	-14	-6	1.01	1.44	2.04	III-2	C-2
北海道	HK_Lダム	115	14,500	12,000	1.8%	12.9%	104	104	0	16	5	88	1.03	1.24	1.88	III-1	C-1
北海道	HK_Mダム	134	37,100	20,200	1.2%	3.4%	151	151	0	9	117	141	0.95	1.28	2.08	II-2	B-2
北海道	HK_Nダム	239	79,000	20,000	1.0%	6.9%	84	84	0	23	224	61	1.06	1.28	0.71	III-1	A
北海道	HK_Oダム	126	206	0	45.1%	100.0%	0	0	0	2	0	-2	1.04	1.28	1.82	III-1	C-2
北海道	HK_Pダム	42	21,800	11,000	0.7%	18.4%	262	262	0	96	161	166	1.12	1.55	1.18	III-2	C-2
東北	TH_Aダム	195	39,300	21,000	5.6%	16.1%	108	105	2	30	61	75	0.86	1.04	1.79	III-1	C-1
東北	TH_Bダム	231	98,000	37,000	2.5%	11.2%	160	160	0	48	217	113	0.90	1.47	2.38	III-2	C-1
東北	TH_Cダム	287	229,000	107,000	1.3%	5.5%	373	372	1	43	381	329	0.98	1.60	2.02	III-2	B-2
東北	TH_Dダム	240	58,000	38,000	1.6%	12.0%	158	147	11	18	54	129	0.89	1.33	1.88	III-1	C-1
東北	TH_Eダム	635	45,000	40,000	4.8%	21.9%	63	55	8	8	-8	47	0.99	1.41	2.07	III-2	C-1
東北	TH_Fダム	226	36,000	28,000	0.7%	5.1%	124	120	4	5	27	116	0.93	1.09	1.34	III-1	B-2
東北	TH_Gダム	1,196	35,500	33,900	5.0%	47.3%	28	16	13	1	-13	14	1.05	1.41	2.75	III-2	C-1
東北	TH_Hダム	237	99,500	35,000	0.9%	8.6%	148	144	4	32	237	112	0.96	1.09	1.15	III-1	B-2
東北	TH_Iダム	226	43,100	24,000	1.8%	11.8%	106	106	0	23	62	84	1.09	1.32	1.46	III-1	C-1
東北	TH_Jダム	740	101,800	84,500	-0.0%	0.0%	114	114	0	0	23	114	0.89	1.41	2.92	III-1	B-2
東北	TH_Kダム	583	93,710	77,810	2.4%	17.4%	133	121	12	16	-1	105	0.99	1.41	1.17	III-2	C-1
東北	TH_Lダム	205	41,000	30,000	3.7%	10.9%	146	130	16	5	32	125	0.90	1.47	2.30	III-1	C-1
東北	TH_Mダム	210	35,000	19,000	7.0%	19.9%	90	90	0	33	43	57	0.89	1.41	1.89	III-1	C-1
東北	TH_Nダム	160	148,000	47,000	0.5%	2.8%	294	294	0	26	605	268	0.99	1.09	1.20	III-2	B-2
東北	TH_Oダム	101	48,000	27,000	0.3%	2.8%	267	267	0	13	194	254	0.90	1.47	2.34	III-2	B-2
関東	KT_Aダム	52	56,000	23,000	1.2%	10.9%	446	442	4	114	521	327	0.90	1.22	2.31	III-2	C-2
関東	KT_Bダム	494	14,140	14,140	3.7%	64.0%	29	10	18	0	-18	10	0.80	1.05	2.47	III-2	C-1
関東	KT_Cダム	323	120,000	35,000	4.6%	34.1%	108	108	0	127	137	-18	0.90	1.05	2.60	III-1	C-2
関東	KT_Dダム	101	183,000	45,000	2.4%	30.5%	444	133	310	241	810	-107	0.96	1.27	1.58	III-2	C-2
関東	KT_Eダム	271	46,000	34,800	4.3%	9.2%	128	117	12	4	26	113	0.92	1.05	2.60	III-1	B-2
関東	KT_Fダム	179	73,100	24,500	6.0%	16.1%	137	123	14	52	205	71	0.91	1.05	4.85	III-1	C-2
関東	KT_Gダム	111	20,000	9,400	3.4%	8.4%	85	84	1	14	81	70	0.92	1.05	4.41	III-1	B-2
関東	KT_Hダム	254	50,500	20,000	7.1%	22.2%	79	75	4	41	76	35	0.82	1.05	3.21	III-1	C-1
関東	KT_Iダム	138	35,890	21,200	1.6%	3.3%	153	146	7	1	98	145	0.85	1.05	1.57	III-1	B-2
関東	KT_Jダム	60	85,000	13,000	1.0%	4.0%	216	216	0	57	1,141	160	0.81	1.05	2.42	III-2	B-2
関東	KT_Kダム	169	21,800	21,800	8.2%	39.0%	129	79	50	0	-50	79	0.86	1.22	2.41	III-2	C-1
関東	KT_Lダム	109	58,000	33,000	0.2%	3.0%	304	304	0	16	214	288	0.87	1.22	2.50	III-2	B-2
関東	KT_Mダム	144	76,000	36,000	5.7%	19.1%	250	249	0	100	177	149	0.91	1.05	2.30	III-2	C-2
関東	KT_Nダム	167	175,800	22,100	2.4%	6.5%	132	131	1	68	850	64	0.84	1.05	2.10	III-1	B-2
北陸	HR_Aダム	618	12,700	11,200	0.0%	96.1%	18	0	18	2	-17	-2	0.85	1.01	3.85	III-2	C-2
北陸	HR_Bダム	76	19,800	18,000	4.1%	17.8%	236	202	34	12	-23	190	0.84	1.12	2.63	III-2	C-1
北陸	HR_Cダム	70	17,800	17,500	1.2%	3.6%	251	244	7	2	-5	242	0.87	1.07	2.30	III-2	B-2
北陸	HR_Dダム	826	44,500	32,400	2.2%	8.8%	39	39	0	5	10	35	0.85	1.03	1.75	III-1	B-2
北陸	HR_Eダム	193	28,900	20,000	2.0%	8.1%	104	104	0	12	34	92	0.89	1.12	4.32	III-1	B-2
北陸	HR_Fダム	113	19,100	17,600	1.0%	7.6%	156	145	10	3	0	143	0.88	1.07	1.81	III-1	B-2
北陸	HR_Gダム	185	223,000	33,000	0.0%	0.0%	179	179	0	0	1,030	179	0.77	1.01	2.05	III-2	B-2
北陸	HR_Hダム	247	190,000	20,000	2.0%	7.0%	81	80	1	53	634	27	0.76	1.02	2.54	III-1	B-2

表 5.11 ダムの類型化に関わる各種指標の算出値 (2)

地域	ダム名	流域面積 (km ²)	有効貯水 容量 (千m ³)	治水容量 (洪水期) (千m ³)	現在の 有効容量内 堆砂率	将来の 有効容量内 堆砂率	現在の 相当治水雨量 (mm)	将来の 相当治水雨量 (mm)	将来の治水容 量内堆砂量(相 当雨量換算)	将来の治水容 量内堆砂量(相 当雨量換算)	将来の治水容 量 - 将来の治 水容量内堆砂	将来の治水容 量 - 将来の治 水容量内堆砂	年間 総流量比	治水機能 変化指数	利水機能 変化指標	治水類型	利水類型
中部	CB_Aダム	471	30,000	29,600	0.5%	22.4%	63	56	7	7	-7	49	0.77	1.11	2.36	III-2	C-1
中部	CB_Bダム	2,409	38,390	20,170	5.0%	100.0%	8	0	8	8	-8	-8	0.80	1.11	5.63	III-2	C-2
中部	CB_Cダム	288	37,100	35,300	7.8%	79.8%	123	47	75	28	-75	20	0.79	1.05	2.77	III-2	C-1
中部	CB_Dダム	534	68,000	47,000	3.4%	23.9%	88	76	12	18	9	58	0.79	0.91	3.04	III-1	C-1
中部	CB_Eダム	311	20,745	13,400	-7.5%	93.7%	43	14	29	33	-29	-19	0.83	1.05	4.17	III-2	C-2
中部	CB_Fダム	505	65,000	15,000	12.1%	37.6%	30	27	3	45	51	-19	0.80	1.19	3.12	III-1	C-2
中部	CB_Gダム	81	29,400	17,000	5.4%	16.1%	210	210	0	59	95	152	0.86	1.22	1.71	III-2	C-2
中部	CB_Hダム	55	12,900	12,900	0.0%	5.3%	235	222	12	0	-12	222	0.86	1.05	2.16	III-2	B-2
中部	CB_Iダム	255	380,400	123,000	0.2%	2.8%	483	483	0	41	970	442	0.77	1.11	1.94	III-2	B-2
中部	CB_Jダム	55	55,000	12,000	0.2%	10.4%	218	218	0	104	677	114	0.88	1.11	4.05	III-2	C-2
中部	CB_Kダム	265	150,000	50,000	2.0%	5.1%	189	178	11	18	349	160	0.80	1.11	2.04	III-2	B-2
中部	CB_Lダム	136	40,400	10,500	3.4%	8.2%	77	77	0	24	195	53	0.77	1.05	2.50	III-1	B-2
中部	CB_Mダム	82	44,000	16,000	1.3%	10.1%	196	187	9	46	288	141	0.84	1.11	2.16	III-2	C-1
近畿	KK_Aダム	97	95,000	76,400	0.0%	0.0%	786	786	0	0	191	786	0.77	1.01	1.83	III-2	B-2
近畿	KK_Bダム	115	30,800	17,500	1.8%	11.8%	152	146	6	25	84	121	0.87	1.27	1.74	III-1	C-1
近畿	KK_Cダム	83	17,300	0	10.1%	22.9%	0	0	0	48	161	-48	0.85	1.18	1.94	III-1	C-2
近畿	KK_Dダム	285	49,200	35,400	6.7%	19.7%	124	114	11	23	14	90	0.92	1.27	2.19	III-1	C-1
近畿	KK_Eダム	136	14,300	6,150	2.4%	11.7%	45	45	0	12	48	33	0.95	1.27	1.38	III-1	C-1
近畿	KK_Fダム	100	23,800	8,400	5.2%	13.1%	84	84	0	31	123	53	0.89	1.27	1.66	III-1	C-1
近畿	KK_Gダム	352	20,000	20,000	5.6%	42.3%	57	33	24	0	-24	33	0.89	1.27	1.57	III-2	C-1
近畿	KK_Hダム	290	58,000	42,000	0.4%	29.1%	145	116	29	29	-3	87	0.81	1.27	1.61	III-2	C-1
近畿	KK_Iダム	76	18,400	9,000	3.9%	25.2%	119	115	4	57	63	58	0.89	1.27	1.69	III-1	C-2
近畿	KK_Jダム	75	15,400	5,400	2.3%	8.6%	72	72	0	17	116	54	0.97	1.27	1.31	III-1	B-2
中国	CG_Aダム	253	79,000	41,000	0.1%	1.1%	162	162	0	3	147	159	0.79	1.32	2.47	III-2	B-2
中国	CG_Bダム	85	17,200	16,500	2.5%	7.2%	194	185	9	6	-9	179	0.83	1.10	1.65	III-2	B-2
中国	CG_Cダム	308	41,100	31,500	2.4%	8.9%	102	102	0	12	19	91	0.85	1.38	1.74	III-1	B-2
中国	CG_Dダム	32	19,600	7,200	1.5%	5.9%	225	225	0	36	351	189	0.82	1.29	1.92	III-2	B-2
中国	CG_Eダム	242	57,000	34,000	-0.1%	6.4%	141	141	0	15	80	126	0.94	1.34	1.76	III-1	B-2
中国	CG_Fダム	301	106,000	58,000	0.5%	11.6%	193	192	1	40	119	152	0.83	1.30	2.84	III-2	C-1
中国	CG_Gダム	217	78,100	50,000	0.3%	6.4%	230	230	0	23	106	207	0.79	1.01	3.08	III-2	B-2
中国	CG_Hダム	217	47,700	38,000	0.3%	8.4%	175	169	6	12	26	157	0.93	1.38	1.50	III-2	B-2
中国	CG_Iダム	214	46,600	40,200	-0.0%	5.8%	188	175	13	0	17	175	0.79	1.24	4.75	III-2	B-2
四国	SK_Aダム	215	11,700	5,000	3.9%	19.6%	23	23	0	11	21	13	0.81	1.23	1.53	III-1	C-1
四国	SK_Bダム	417	289,000	90,000	3.9%	13.0%	216	204	11	78	387	126	0.80	1.23	1.99	III-2	C-2
四国	SK_Dダム	1,904	4,400	4,400	0.5%	94.6%	2	0	2	0	-2	0	0.80	1.23	2.73	III-2	C-1
四国	SK_Eダム	21	12,000	8,600	0.4%	5.3%	408	405	3	27	131	377	0.90	1.15	1.44	III-2	B-2
四国	SK_Fダム	101	47,600	12,500	1.2%	27.5%	124	77	46	83	217	-6	0.80	1.23	1.93	III-1	C-2
四国	SK_Gダム	168	12,700	3,500	4.0%	14.5%	21	19	1	9	44	10	0.89	1.13	1.80	III-1	C-1
四国	SK_Hダム	171	29,600	7,600	12.5%	40.3%	45	43	2	68	59	-25	0.81	1.23	3.50	III-1	C-2
四国	SK_Iダム	456	29,800	16,500	2.0%	4.9%	36	36	1	3	26	33	0.86	1.13	1.97	III-1	B-2
四国	SK_Jダム	494	43,497	10,960	21.6%	59.5%	22	21	2	51	13	-30	0.86	0.97	1.78	III-1	C-2
四国	SK_Kダム	73	10,600	4,300	4.4%	17.4%	59	59	0	25	61	34	0.86	1.31	1.70	III-1	C-1
九州	KS_Aダム	34	11,800	6,200	1.7%	6.4%	184	181	3	19	144	161	0.91	1.29	1.92	III-2	B-2
九州	KS_Bダム	491	47,100	45,800	0.2%	9.5%	93	87	7	3	-7	84	0.88	1.13	2.97	III-2	B-2
九州	KS_Cダム	805	77,500	75,000	-2.5%	0.0%	93	93	0	0	3	93	0.97	1.15	1.67	III-1	B-2
九州	KS_Dダム	27	41,500	8,000	0.4%	1.9%	302	302	0	31	1,234	271	0.88	1.14	2.22	III-2	B-2
九州	KS_Eダム	359	35,200	15,800	10.3%	59.6%	44	13	31	28	-4	-14	0.89	1.20	2.02	III-2	C-2
九州	KS_Fダム	185	52,300	51,300	1.7%	8.7%	277	258	19	5	-19	253	0.87	1.13	2.01	III-2	B-2
九州	KS_Gダム	51	16,000	7,000	2.7%	12.9%	137	137	0	40	136	97	0.91	1.13	2.25	III-1	C-1
九州	KS_Hダム	89	21,000	11,200	2.5%	10.5%	126	123	3	22	85	101	0.92	1.21	1.47	III-1	C-1

5.7 結語

本章では、気候変動に伴う各ダムの流況変化と堆砂進行の予測結果と、前章で検討した対策の必要性の高いダムをスクリーニングするために設定した評価指標をもとに、国内ダムの治水・利水機能変化に関わる類型化を行った。なお、本研究は、気候変動及び堆砂進行がダムの利水機能へ与える影響に着目したものであるが、本章で治水機能への影響にも着目した理由は、本章冒頭でも記載したとおり、ダムの利水機能回復・向上の必要性を検討する上では、気候変動による利水影響のみならず、治水影響も加味しなければ、ダムに真に求められる利水機能向上度合いが把握できないと考えたからである。

本章で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 将来の最大日平均流量が増加し治水容量に不足が生じる可能性があり、かつ将来における相当治水雨量が 50mm 以下のダム（Ⅲ類型）は全ダムの約 64%である。これらのダムについて、貯水池運用の工夫によっても気候変動の影響の軽減が難しいダム（Ⅲ-2 類型）に分類されるものは、全ダムの約 17%である。これらのダムでは、将来気候におけるダムの治水機能への影響が相対的に大きいと考えられる。当該類型に相当するダムを地域別に確認すると、特に中部地方のダムが多く該当する。
- 2) 将来において下流河川への利水補給量の増加が想定され、かつ将来における有効容量内堆砂量が 10%以上のダム（C 類型）は全ダムの約 52%である。これらのダムについて、貯水池運用の工夫によっても気候変動の影響の軽減が難しいダム（C-2 類型）に分類されるものは、全ダムの約 20%である。これらのダムでは、将来気候におけるダムの利水機能への影響が相対的に大きいと考えられる。当該類型に相当するダムを地域別に確認すると、特に関東地方、中部地方、四国地方のダムが多く該当する。
- 3) 気候変動影響評価の結果、2099 年時点では、全ダムの約 24%は、気候変動及び堆砂進行に伴うダムの治水及び利水機能への影響が、既設ダムの耐力の中で生じるものと判断され、これらの影響は軽微と判断される。
- 4) 全ダムの約 26%は、気候変動及び堆砂進行に伴うダムの治水・利水機能への影響は、貯水池運用の工夫によって影響緩和を図ることができるものと考えられることから、これらの影響に対して弾力的管理の実施が考えられる。
- 5) 全ダムの約 74%は、気候変動及び堆砂進行に伴うダムの治水・利水機能への影響に対して上述したダムの弾力的管理では不十分となり、ダム嵩上げ等のハード対策を主とした適応策の実施が考えられる。ただし、貯水池内の浚渫などを実施し、堆砂進行に伴う有効容量の損失を緩和することで、上記結果は変わり得ることに留意が必要となる。

以上を踏まえると、下記事項について研究課題が設定されるため、次章において検討を加えることとする。

- 1) 近年、気候変動に伴う治水面でのダム施設の機能増強の必要性について認識されてきているところであるが、本章での検討により、今後、利水面においてもダム施設の機能増強（操作面での対応、ダム嵩上げ等のハード対策を伴う対応）が、一定数のダムで求められる可能性があることを示した。このため、ダムの利水機能向上策について、ソフト・ハード両面から具体的な対応策を設定し、その効果について検討を行うこととする。

- 2) 本章では、利水機能変化に与える堆砂進行の影響について、有効容量内堆砂率で考慮したが、全国的なダムの類型化をより精度良く行うために、これとは別の指標を設定することが必要であると考えられる。このため、次章においてこの点について検討を加えることとする。

参考文献

- 1) Mizuta, R., Oouchi, K., Yoshimura, H., Noda, A., Katayama, K., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Kawai, H. and Nakawaga, M.: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model, J. Meteorol. Society Japan 84, pp.165–185, 2006.
- 2) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A.: Classification of CMIP5 Future Climate Responses by the Tropical Sea Surface Temperature Changes, SOLA 10: pp.167-171, 2014.
- 3) Kojiri, T. (2006): Hydrological river basin assessment model(Hydro-BEAM). In: Watershed Models (ed. by V. P. Singh & D. K. Frevent), 613-626. Taylor & Francis, CRC Press: Florida.
- 4) Sato, Y., Kojiri, T., Michihiro, Y., Suzuki, Y. and Nakakita, E.,(2013): Assessment of climate change impact on river discharge using the super-high resolution MRI-AGCM. Hydrol. Process. 27: 3264-3279.
- 5) 気象庁ホームページ : http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index_1989.html
- 6) 青木雄二郎, 角哲也 : 既設ダムの治水容量の再評価に関する基礎的研究, 平成 18 年度土木学会関西支部年次学術講演会, II-12, 2006.
- 7) 国土交通省河川局河川環境課 : ダムの弾力的管理試験の手引き(案), 2003.

6. 気候変動と堆砂進行がダムの利水機能に与える影響の緩和手法の検討

6.1 概説

「5. 気候変動と堆砂進行がダムの治水・利水機能に与える影響の全国的評価」より、将来において下流河川への利水補給量の増加が想定され、かつ将来における有効容量内堆砂量が 10% 以上のダム（C 類型）は全ダムの約 52%であることを確認した。また、これらの多くのダムで治水機能の低下も懸念される。

このような背景から、今後、ダムの治水機能への負担をかけない利水機能の維持・向上が求められるものと考えられる。

このため、本章では、気候変動下において、利水需要者及び供給者（利水ダム）の適応策が求められるとの認識に立ち、ソフト・ハード対策両面から当該手法に関する検討を実施する。

6.2 検討方法

本章における検討は、図 6.1 に示すフローにより実施した。

検討対象ダムは、「3. 気候変動と堆砂進行がダムの利水機能に与える影響の検討」で選定したダム及びダム群とし、将来流況の予測手法についても同様とした。

これらのダムを対象として、将来堆砂量を複数ケース設定した上で、実運用をモデルとした利水計算モデルにより、「ダムの弾力的管理による影響緩和に関する検討」、「ダムの利水機能維持に資する導水貯留の検討」、「将来の利水需要の調整効果」について検討を実施した。

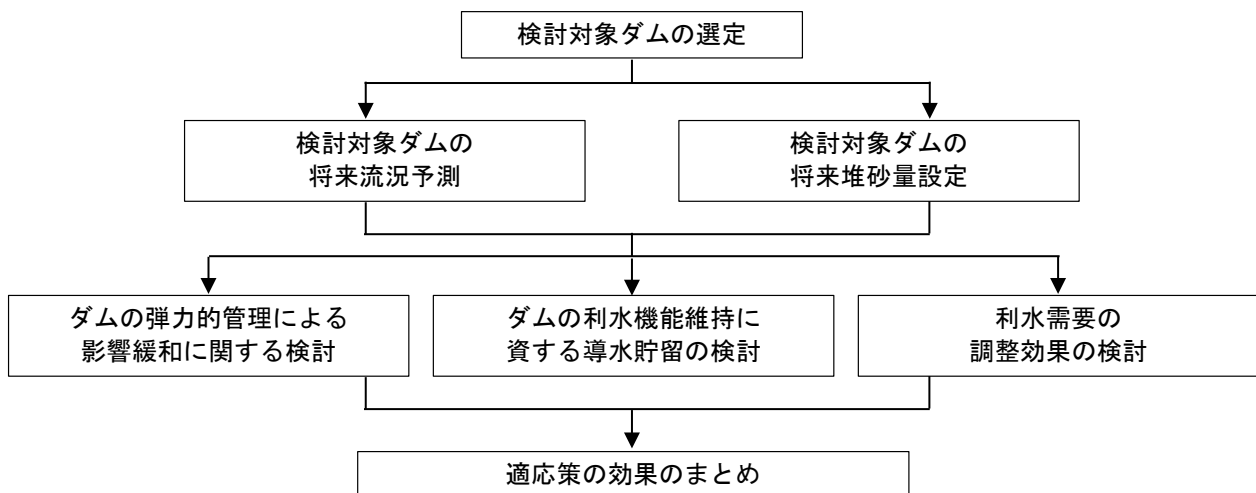


図 6.1 6章の検討フロー

6.3 ダムの弾力的管理による影響緩和に関する検討

6.3.1 対策案の設定

対策手法として、制限水位より水位を上昇させておき（利水容量を見かけ上増やしておき）、出水が想定される場合に事前放流により水位を低下させる操作（弾力的管理）を想定する。

6.3.2 検討対象ダムの概要

検討対象ダムは、表 6.1 に示すとおり、Aダム（B-2 類型：気候変動の結果、流量は減少するものの、有効容量は十分と評価されるダム）、Bダム（C-1 類型：気候変動の結果、十分な利水機能は期待できないものの、貯水池運用の工夫により影響緩和を図ることが可能なダム）とした（「5. 気候変動と堆砂進行がダムの治水・利水機能に与える影響の全国的評価」での分類結果より）。なお、Bダムの有効容量に対する利水容量の割合は、Aダムのそれに比べ小さいため、本研究における利水機能評価では、Bダムの非洪水期利水容量を有効容量とみなした。

表 6.1 検討対象ダムの諸元

ダム名	Aダム	Bダム
ダム位置	中国地方	北海道
目的	洪水調節、かんがい、工業用水、発電	洪水調節、不特定利水、上水道
総流量比 (将来総流量/現在総流量)	0.83	0.97
ダム類型(利水類型)	B-2	C-1
有効貯水容量	17,200千m ³	14,100千m ³
利水容量	10/21~6/30: 15,600千m ³ 7/1-7/31: 14,700千m ³ 8/1-8/31: 10,400千m ³ 9/1-9/30: 1,400千m ³ 10/1-10/20: 12,100千m ³	10/1~6/30: 3,800千m ³ 7/1~9/30: 2,200千m ³
全堆砂率 [※]	4.5%	6.7%
有効容量内堆砂率 [※]	2.5%	5.0%
利水容量内堆砂率 [※]	1.1%	27.1%
堆砂容量内堆砂率 [※]	17.8%	26.1%

※ 2014年時点

6.3.3 将来流況の予測手法

将来流況の予測手法は、「3.3.2 (1) 将来流況の予測手法」と同様とした。

具体的には、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデル（MRI-AGCM3.2S）による現在気候（1979-2003年）と将来気候（2075-2099年）における気温・降水量変化¹⁾²⁾を利用した。温室効果ガスの排出シナリオは高位参照シナリオ RCP8.5、海面水温は CMIP5 の SST アンサンブル平均を用いた。

次に、SVAT モデルから蒸発散量と融雪量を算出し、これらを分布型流出モデル Hydro-BEAM に組み込むことにより、積雪地帯の積雪・融雪過程も考慮した全国 109 水系の日平均河川流量をそれぞれ求めた。日平均河川流量は、タイムステップ 10 分（出力 1 時間）で計算した 24 時間の流量を平均したものである。詳細は Kojiri³⁾、Sato⁴⁾を参照されたい。

さらに、全球大気モデルや流出モデルに含まれるバイアスを排除し、将来の気候変動の影響をより明確に評価することを目的として、利水機能評価においては図 5.2 に示す手法で将来流況を設定した。

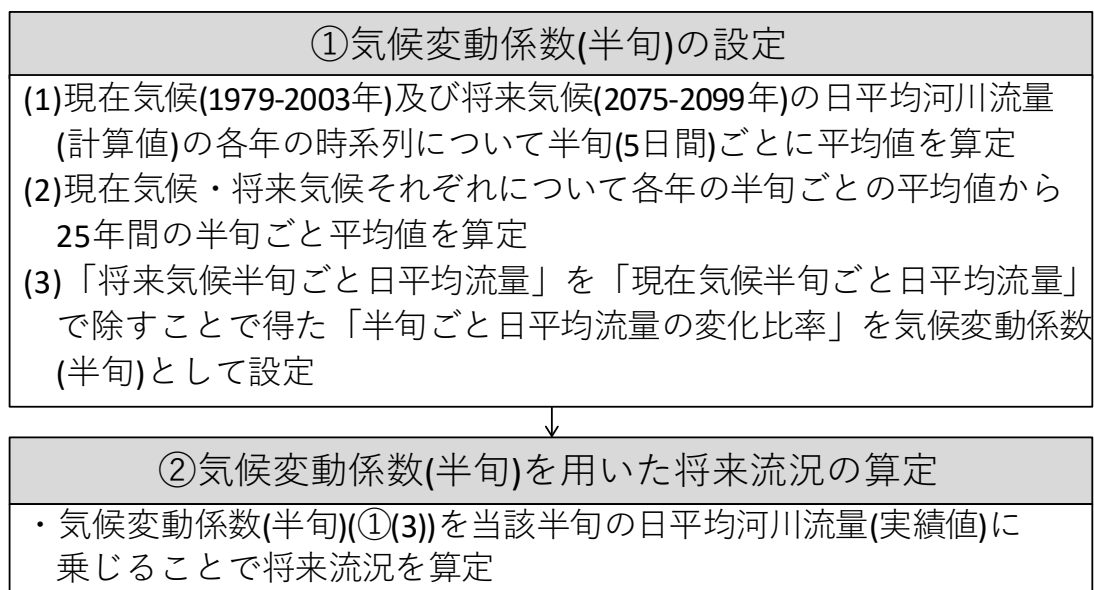


図 6.2 利水機能評価における将来流況の予測手法（再掲）

6.3.4 検討ケース

A ダム、B ダムともに将来流況において有効容量内堆砂率 30%の条件で、貯水位を+1.0m、+3.0m、+5.0m とした場合の効果検討を行う。貯水位上昇期間は、通年、洪水期、非洪水期とした。なお、水位を上昇させたことで、治水容量が目減りすることから、当該対策では、出水時の事前放流の実施が前提となる。検討ケースを整理すると、表 6.2 に示すとおりである。

表 6.2 検討ケース一覧

概要	対策期間	貯水位上昇量 (m)	貯水位上昇量（相当雨量換算）(mm)	
			A ダム	B ダム
将来流況＋有効容量内堆砂率 30%＋対策（貯水位上昇）実施	通年	+1.0m	7	5
		+3.0m	21	16
		+5.0m	36	29
	洪水期 (かんがい期)	+1.0m	6	4
		+3.0m	18	12
		+5.0m	30	23
	非洪水期	+1.0m	7	5
		+3.0m	21	16
		+5.0m	36	29

6.3.5 評価方法

利水計算は、各ダムの利水補給ルールを参考に構築した利水計算モデルにより行い、河川流の流下や取水還元の時間差を考慮して半旬計算を実施した。

利水計算にあたっては、貯水率低下とともに取水量を制限する条件を設けることとし、他ダムの実績を参考に設定した取水制限率を考慮した（表 3.3）。

評価は、パンク日数（貯水位が最低水位まで低下する日数と定義）、利水被害度（取水制限率（%）×取水制限実施日数（day）と定義）により行い、各ダムの評価期間における年平均値により行った。

表 6.3 取水制限率の設定概要

有効容量内貯水率 (%)	取水制限率 (%)
～40	0
40～30	10
30～25	20
25～	30

6.3.6 検討結果

利水適応策を実施した場合の利水計算結果を次頁以降に示す。

これらの結果より、Aダム、Bダムともに、貯水位の上昇期間を通年とした場合と洪水期とした場合はほぼ同等の効果であり、計画時と同等の利水能力を確保するためには、3m～5m程度（相応雨量ベースで～30mm程度）貯水位を上昇させた運用が必要と評価される。

一方、非洪水期のみ貯水位を上昇させた場合には、ほとんど利水機能の向上は見込めないと考えられる。

以上より、洪水期（かんがい期）に現行運用よりも数 m 貯水位を上昇させた運用を実施し、洪水時には事前放流（場合によっては予備放流）により、洪水調節容量を確保する運用が有効となる可能性があると考えられる。

なお、出水の後に、渇水が到来する事態では、貯水位回復や下流河川への十分な利水補給は期待できないことが、本手法の適用における課題と考えられる。

表 6.4 利水適応策を実施した場合の利水計算結果の概要 (A ダム)

項目	建設時	無対策	通年貯水位上昇			洪水期貯水位上昇			非洪水期貯水位上昇		
	ケース0	ケース1	ケース2-1 (△H1.0m)	ケース2-2 (△H3.0m)	ケース2-3 (△H5.0m)	ケース3-1 (△H1.0m)	ケース3-2 (△H3.0m)	ケース3-3 (△H5.0m)	ケース4-1 (△H1.0m)	ケース4-2 (△H3.0m)	ケース4-3 (△H5.0m)
パンク日数 (日/年)	1.7	4.7	3.4	2.7	1.9	3.5	3.0	2.5	4.6	4.4	4.4
利水被害度 (千%・日/年)	1.3	1.8	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.4	1.7	1.8	2.0
利水被害度 (千% ² ・日/年)	44.0	80.7	65.8	60.0	52.9	65.2	58.6	52.0	78.4	79.4	83.1

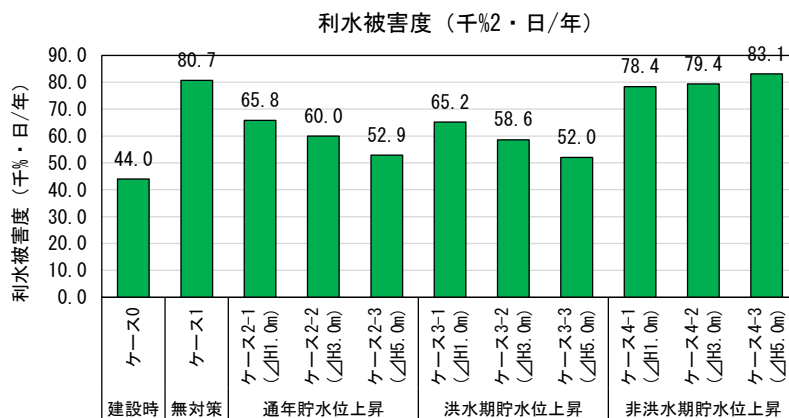
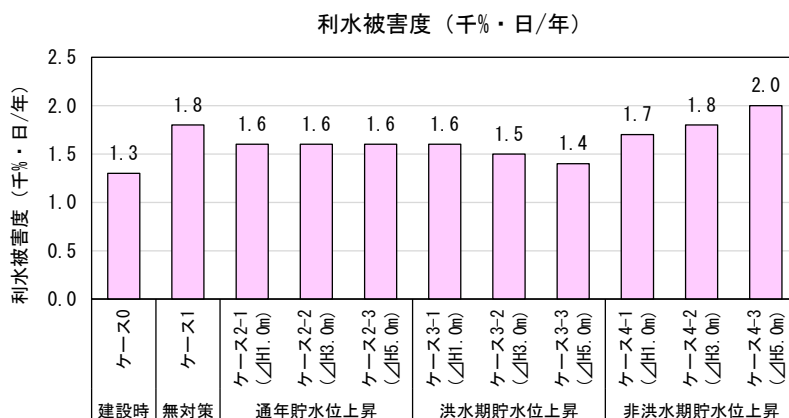
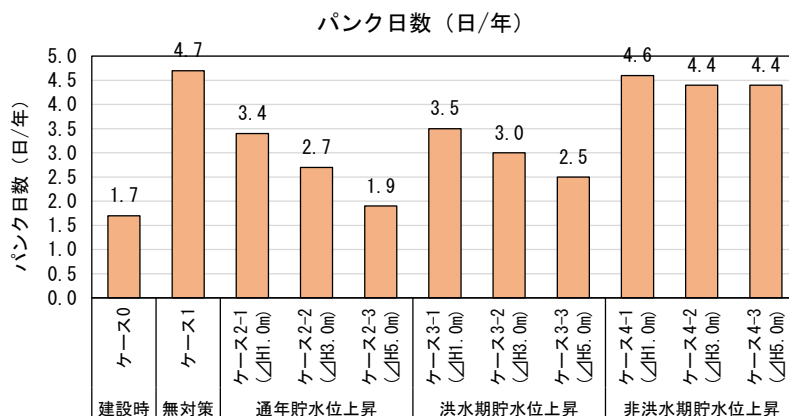


図 6.3 利水適応策を実施した場合の利水計算結果 (A ダムの結果)

(上図：パンク日数，中図：利水被害度(千%・日/年)，下図：利水被害度(千%²・日/年))

表 6.5 利水適応策を実施した場合の利水計算結果の概要 (B ダム)

項目	建設時	無対策	通年貯水位上昇			洪水期貯水位上昇			非洪水期貯水位上昇		
	ケース0	ケース1	ケース2-1 (△H1.0m)	ケース2-2 (△H3.0m)	ケース2-3 (△H5.0m)	ケース3-1 (△H1.0m)	ケース3-2 (△H3.0m)	ケース3-3 (△H5.0m)	ケース4-1 (△H1.0m)	ケース4-2 (△H3.0m)	ケース4-3 (△H5.0m)
パンク日数 (日/年)	0.0	119.0	42.3	28.1	21.2	45.7	34.7	32.8	115.5	109.8	102.8
利水被害度 (千%・日/年)	334.6	20,500.4	19,835.4	8,771.5	6,694.2	20,419.6	17,032.7	15,602.3	19,916.2	12,219.2	11,321.5
利水被害度 (千% ² ・日/年)	7,192.3	1,564,050.0	1,477,600.0	753,507.7	586,780.8	1,553,550.0	1,113,250.0	996,438.5	1,488,100.0	1,191,476.9	1,108,338.5

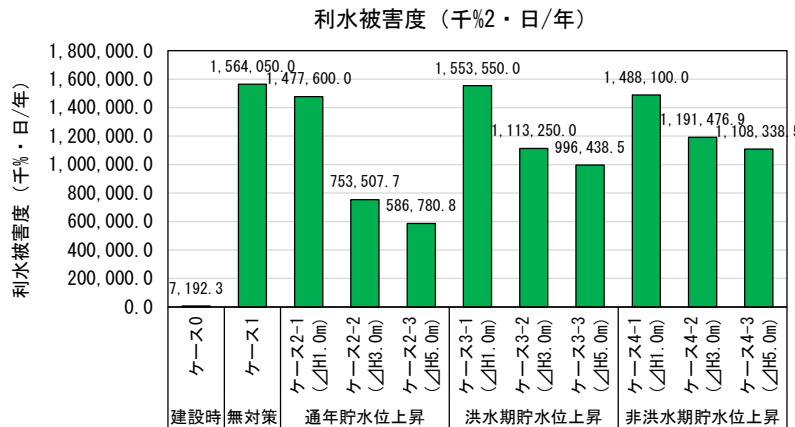
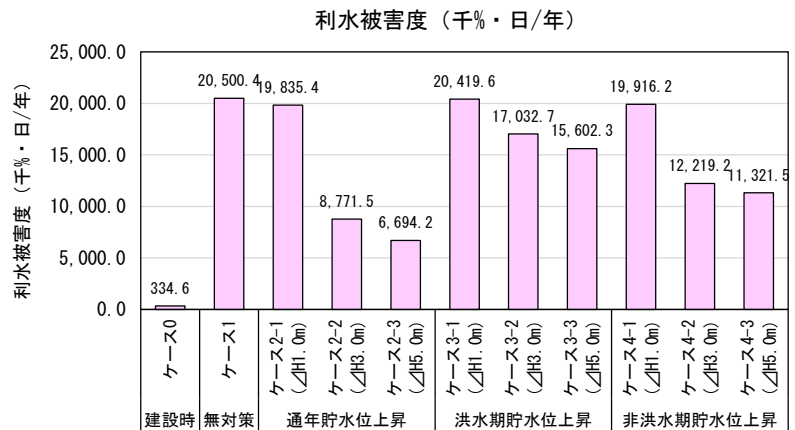
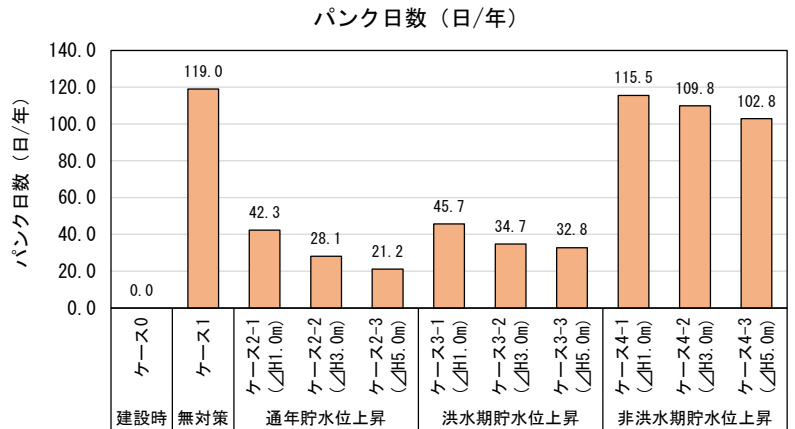


図 6.4 利水適応策を実施した場合の利水計算結果 (B ダムの結果)

(上図：パンク日数，中図：利水被害度(千%・日/年)，下図：利水被害度(千%²・日/年))

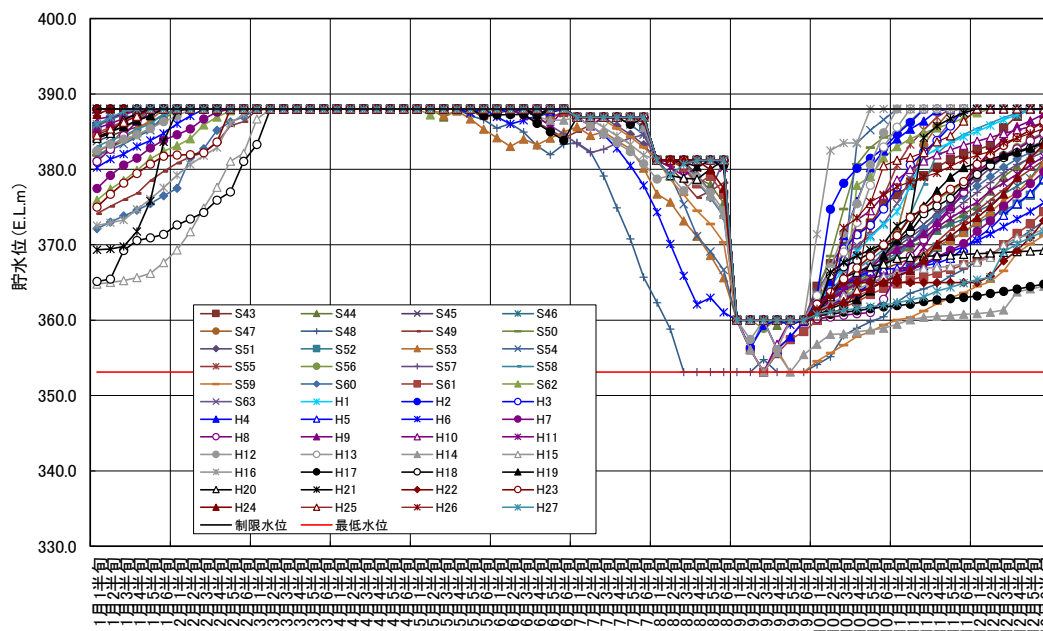


図 6.5 A ダム検討結果(ケース 0 の貯水変動曲線)

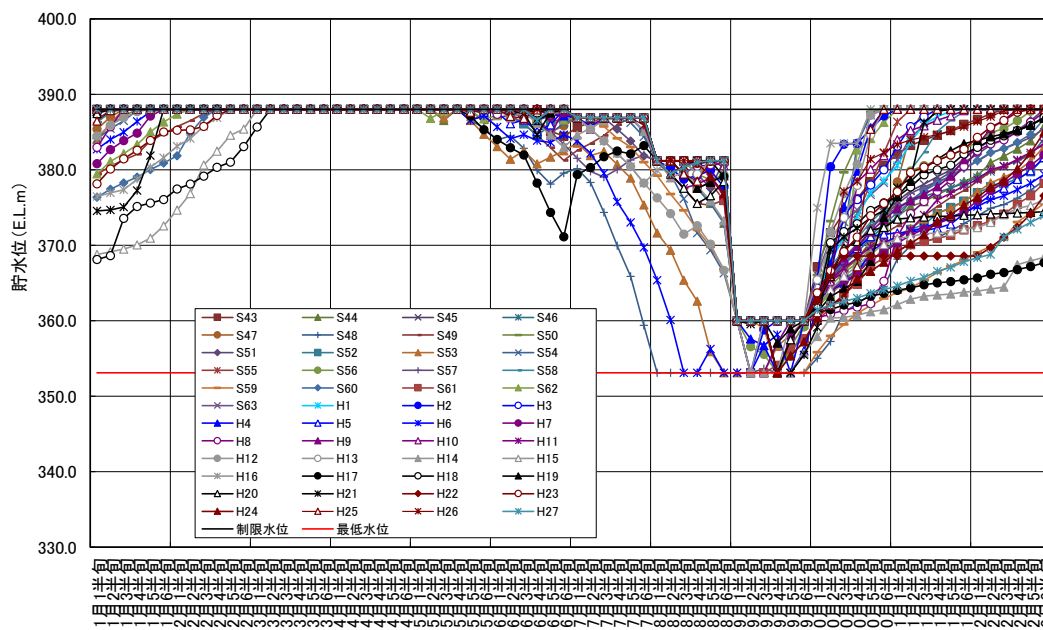


図 6.6 A ダム検討結果(ケース 1 の貯水変動曲線)

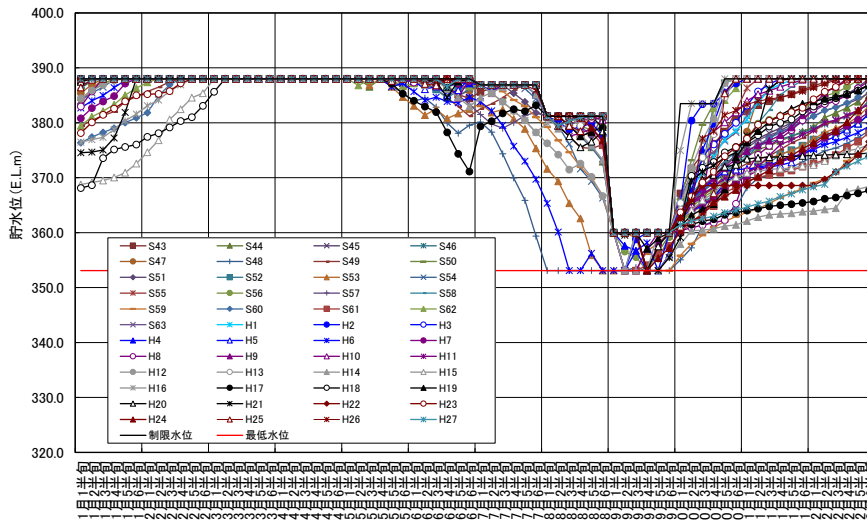


図 6.7 A ダム検討結果(ケース 2-1 の貯水変動曲線)

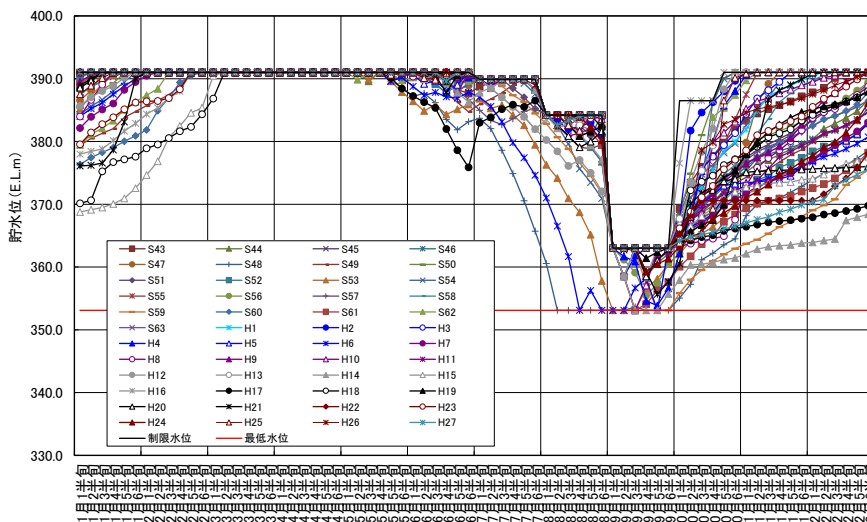


図 6.8 A ダム検討結果(ケース 2-2 の貯水変動曲線)

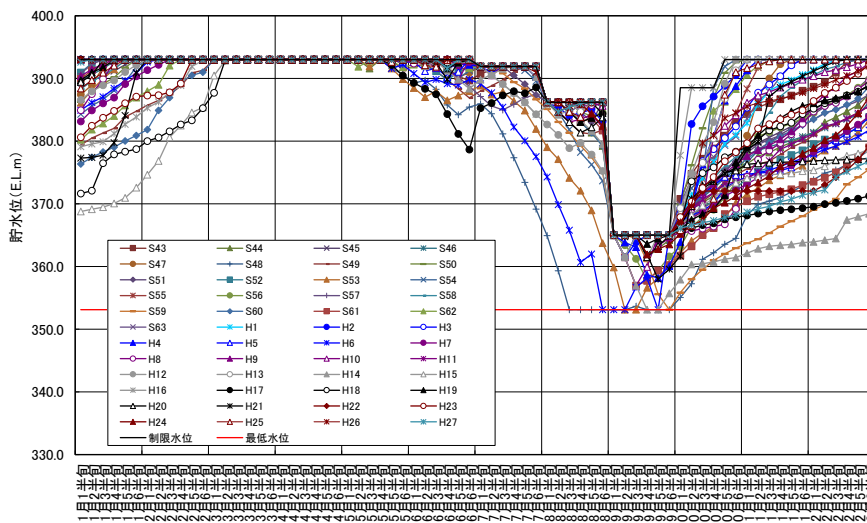


図 6.9 A ダム検討結果(ケース 2-3 の貯水変動曲線)

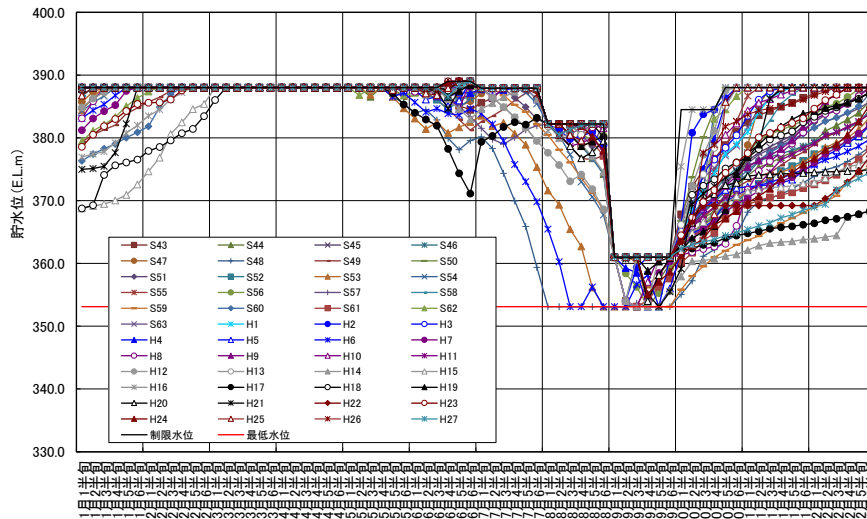


図 6.10 A ダム検討結果(ケース 3-1 の貯水変動曲線)

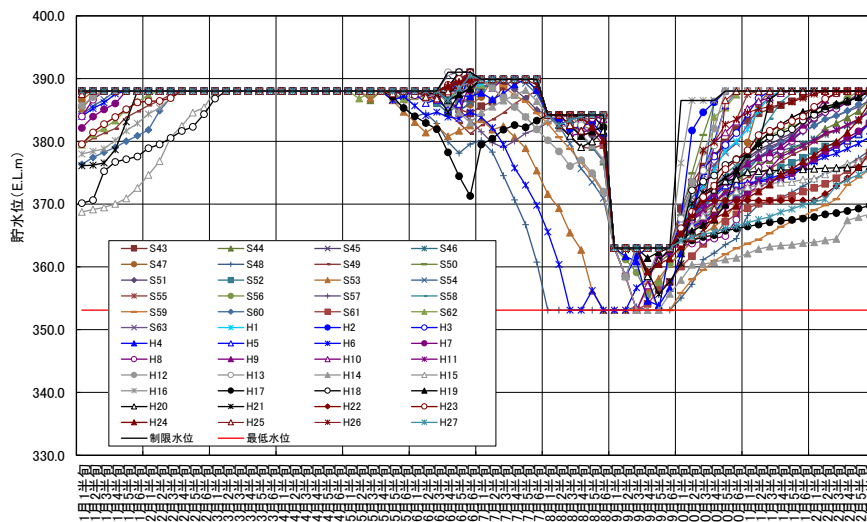


図 6.11 A ダム検討結果(ケース 3-2 の貯水変動曲線)

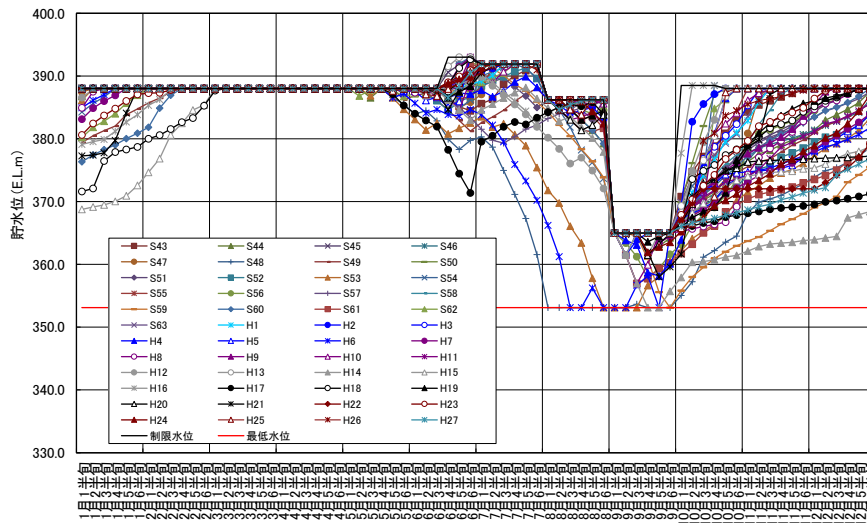


図 6.12 A ダム検討結果(ケース 3-3 の貯水変動曲線)

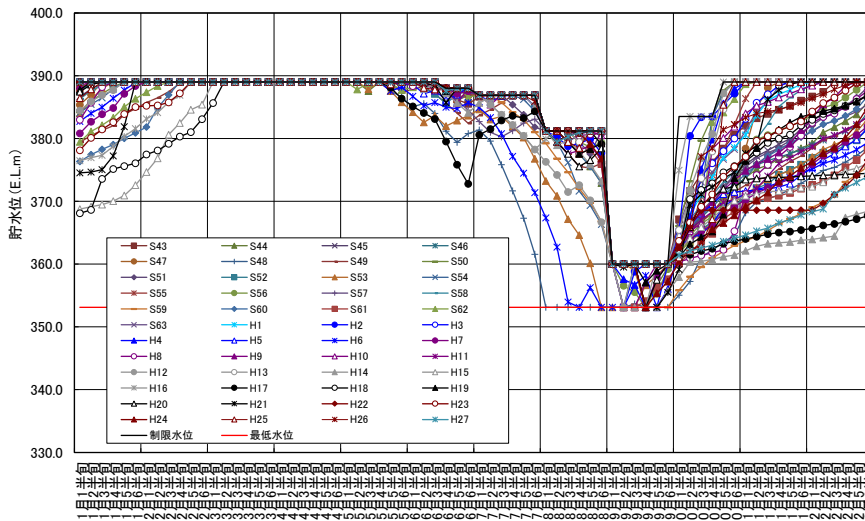


図 6.13 A ダム検討結果(ケース 4-1 の貯水変動曲線)

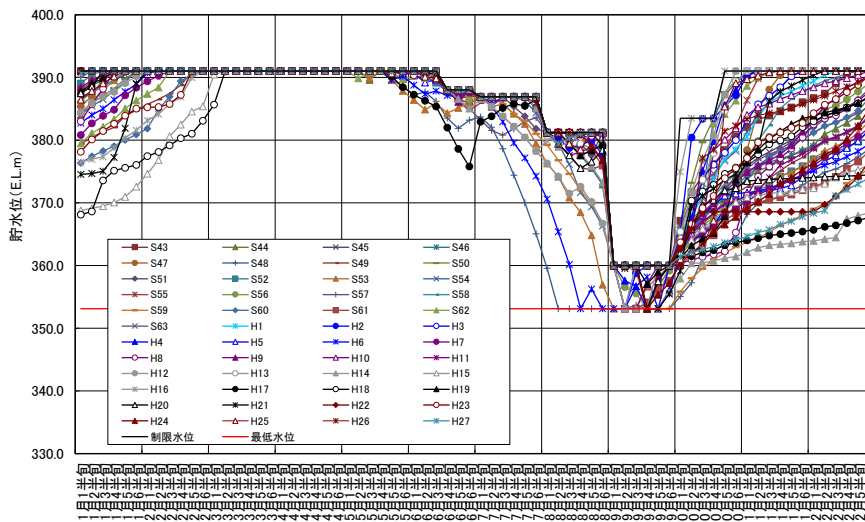


図 6.14 A ダム検討結果(ケース 4-2 の貯水変動曲線)

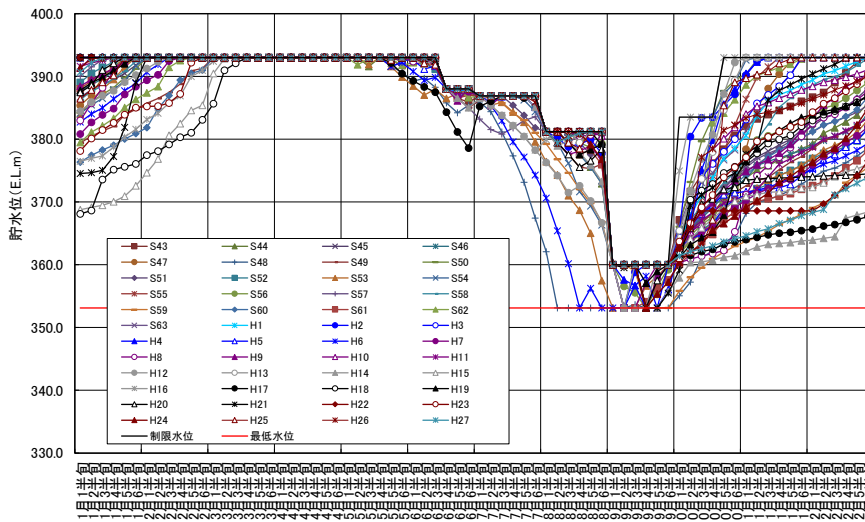


図 6.15 A ダム検討結果(ケース 4-3 の貯水変動曲線)

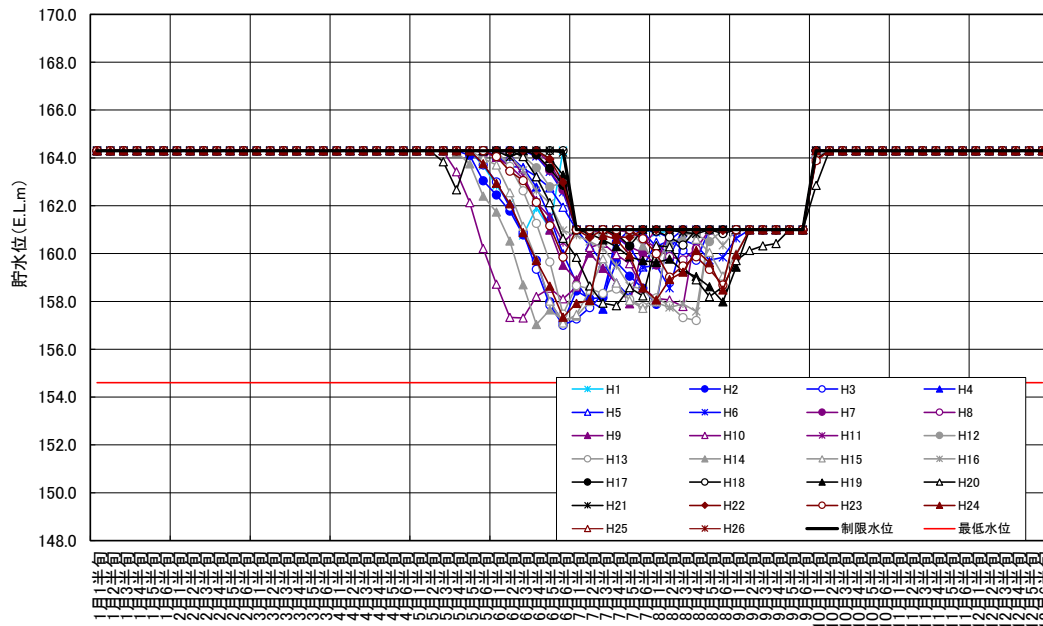


図 6.16 B ダム検討結果(ケース 0 の貯水変動曲線)

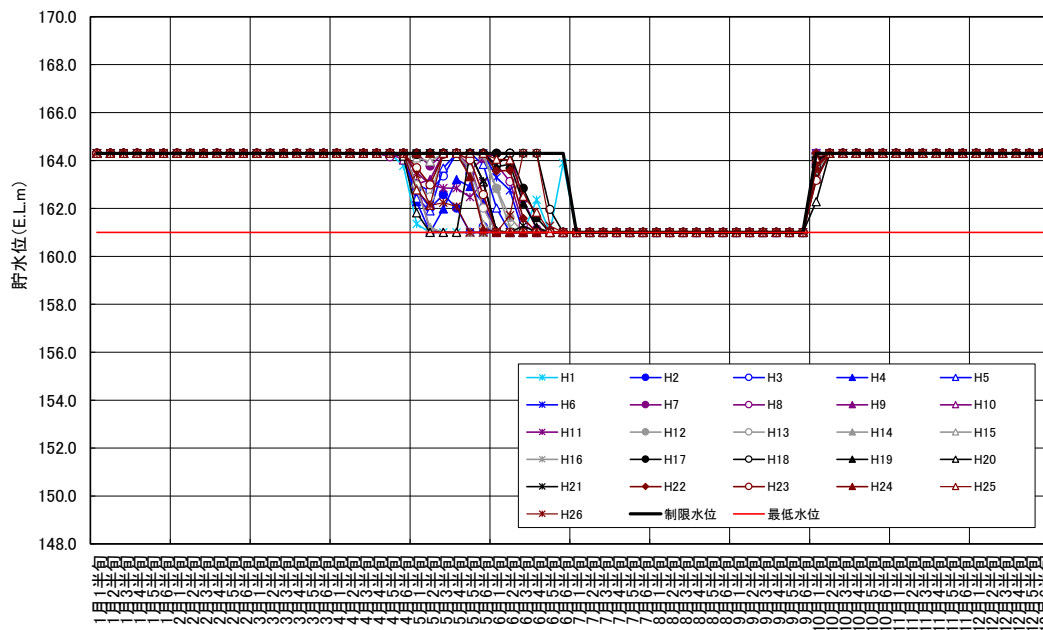


図 6.17 B ダム検討結果(ケース 1 の貯水変動曲線)

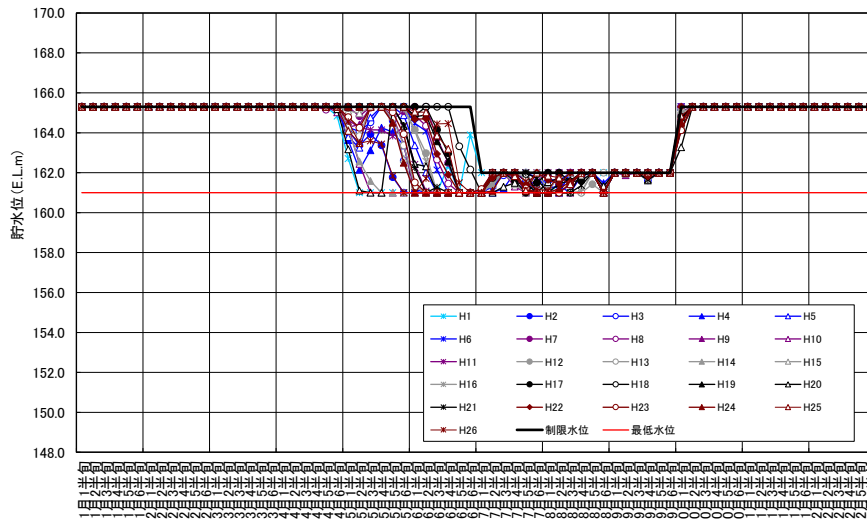


図 6.18 B ダム検討結果(ケース 2-1 の貯水変動曲線)

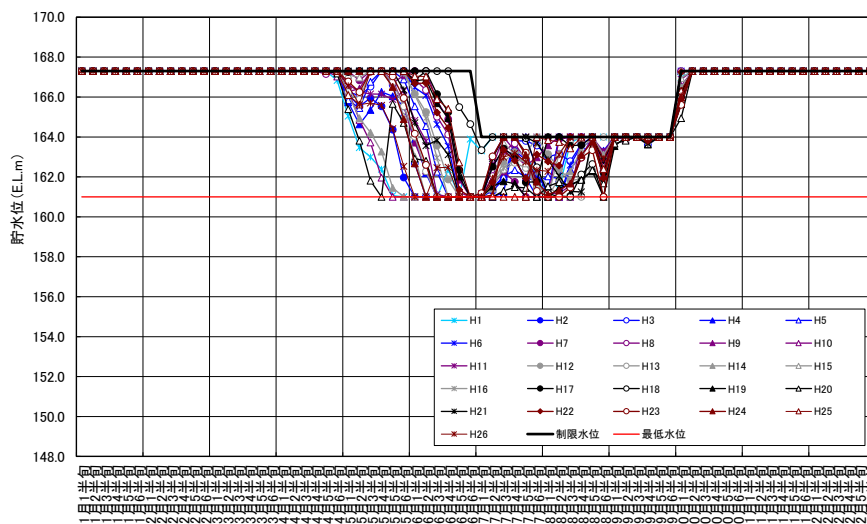


図 6.19 B ダム検討結果(ケース 2-2 の貯水変動曲線)

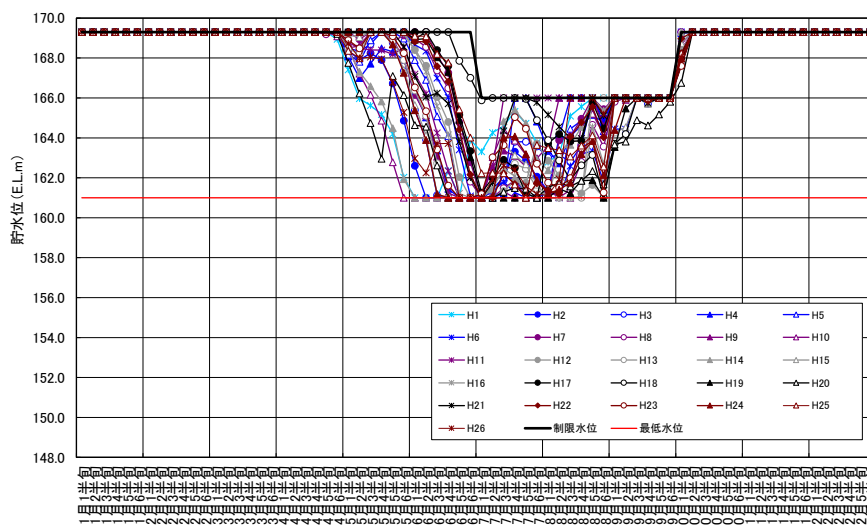


図 6.20 B ダム検討結果(ケース 2-3 の貯水変動曲線)

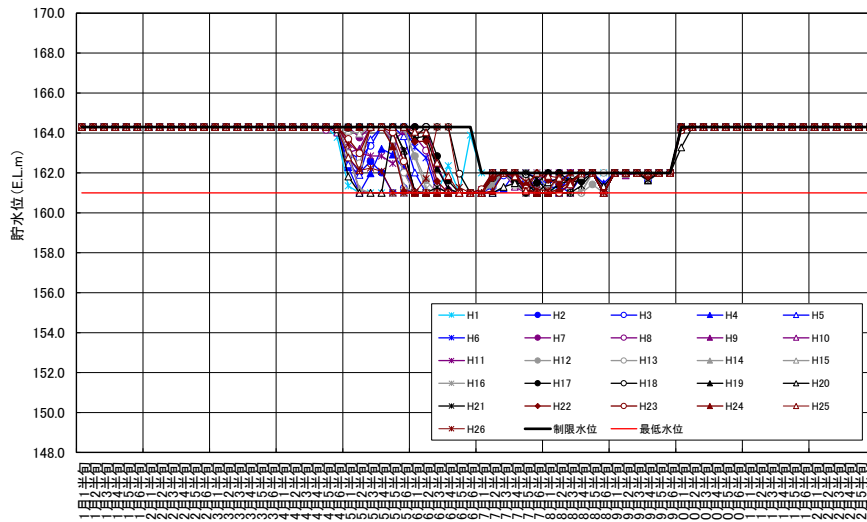


図 6.21 B ダム検討結果(ケース 3-1 の貯水変動曲線)

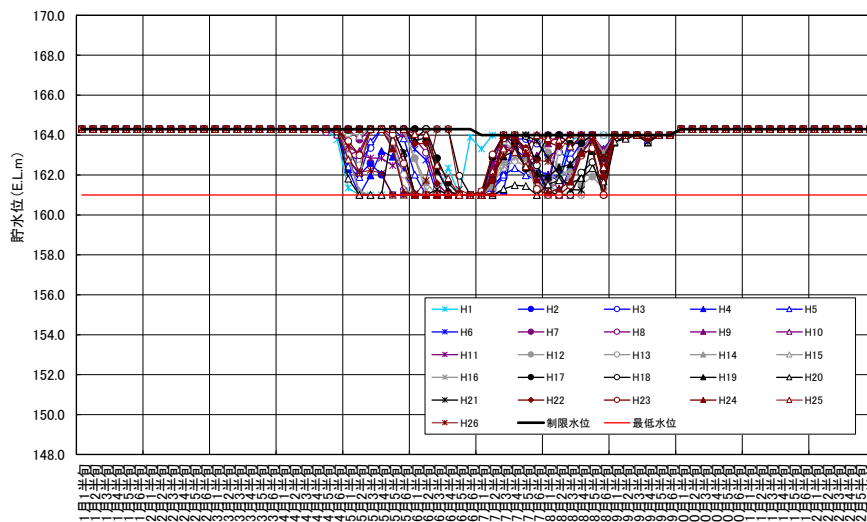


図 6.22 B ダム検討結果(ケース 3-2 の貯水変動曲線)

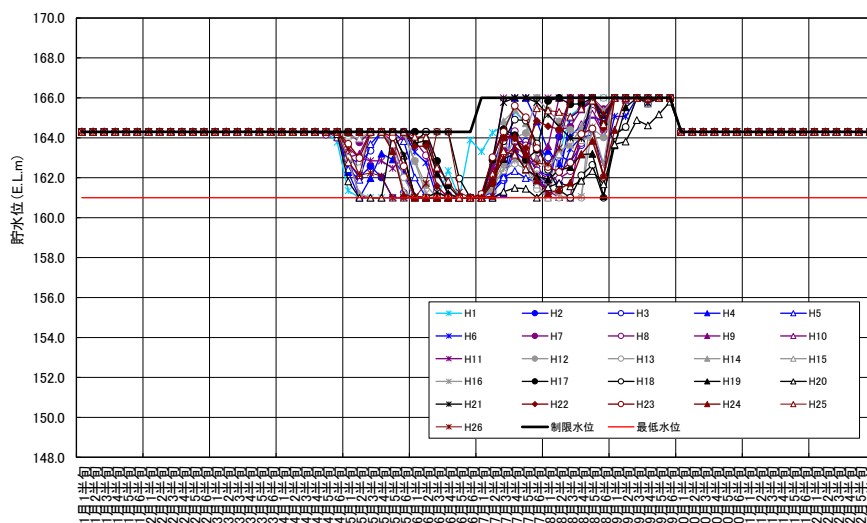


図 6.23 B ダム検討結果(ケース 3-3 の貯水変動曲線)

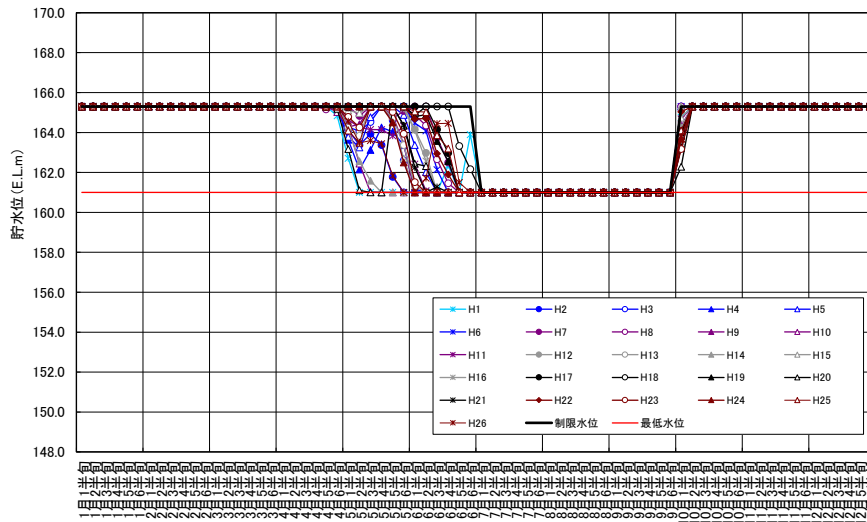


図 6.24 B ダム検討結果(ケース 4-1 の貯水変動曲線)

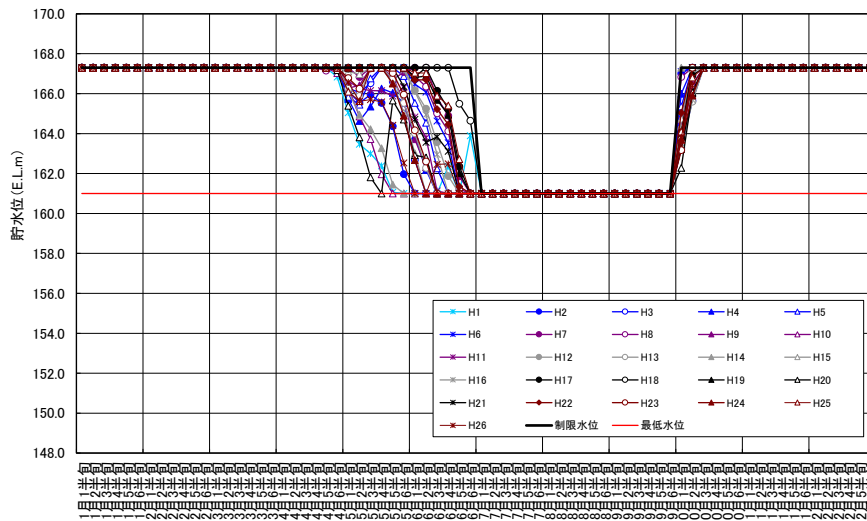


図 6.25 B ダム検討結果(ケース 4-2 の貯水変動曲線)

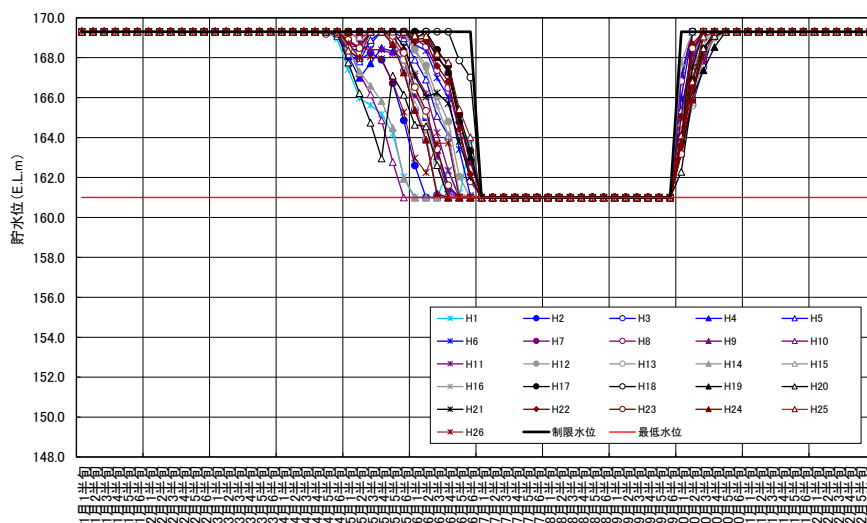


図 6.26 B ダム検討結果(ケース 4-3 の貯水変動曲線)

6.3.7 検討結果を踏まえたダムの類型化指標の設定（ダムの再類型化）

(1) 評価指標の設定

A ダム, B ダムを対象とした通年貯水位上昇, 洪水期貯水位上昇, 非洪水期貯水位上昇の検討結果から, 貯水位上昇量を相当雨量換算し, パンク日数との関係を整理した結果を図 6.27, 図 6.28 に示す.

図 6.27, 図 6.28 はそれぞれ A ダム, B ダムの結果であり, これらの図中には, 建設時条件 (現在気候流量かつ有効容量内堆砂率 0%) のパンク日数を赤線で示している. 洪水期に貯水位を上昇させたケース (オレンジ線) に着目すると, A ダムでは相当雨量換算で約 50mm の容量を確保した場合, B ダムでは相当雨量換算で約 70mm 確保した場合には, それぞれ建設時の条件と同等のパンク日数となり, ダムの利水機能が回復することが推察される.

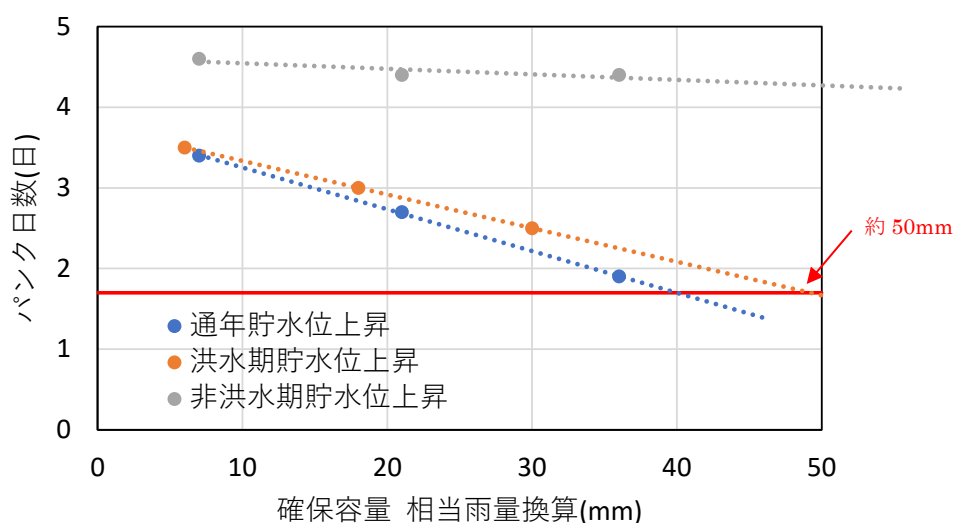


図 6.27 将来気候条件における貯水位上昇量とパンク日数の関係 (A ダム)

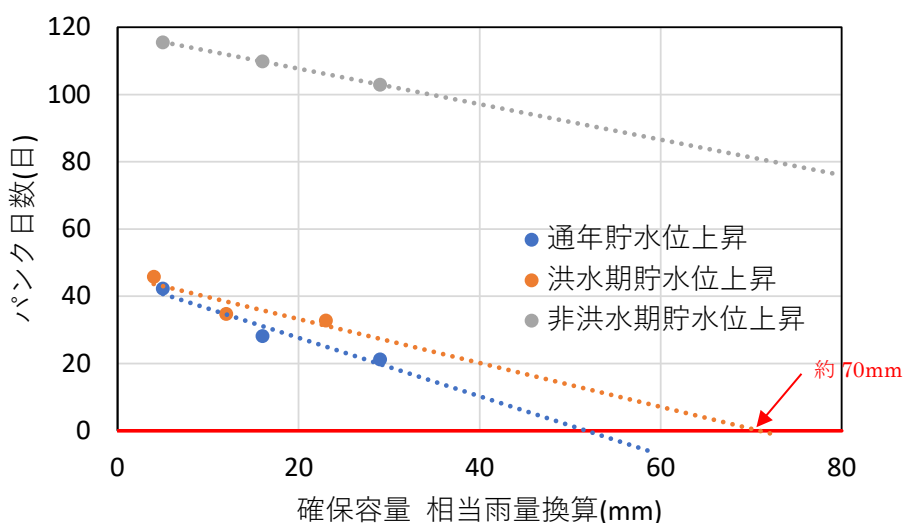


図 6.28 将来気候条件における貯水位上昇量とパンク日数の関係 (B ダム)

ここで、建設時条件と同じレベルの利水機能を確保するために、将来気候条件において対策実施すべき容量（相当雨量換算）を下記のとおり想定する。

将来気候条件において利水上対策実施すべき容量の想定値（相当雨量換算）

$$= (Q'_{sup(n=185)} - Q_{sup(n=185)}) + \text{洪水期の利水容量内堆砂量 (相当雨量換算)} \quad (16)$$

ここに、

$Q_{sup(n=185)}$ は、現在気候流況の185日流量（平水流量）を下回る4月～9月における流量の積算値（図 6.29）

$Q'_{sup(n=185)}$ は、現在気候流況の185日流量（平水流量）を下回る、将来気候流況の4月～9月における流量の積算値（図 6.29）

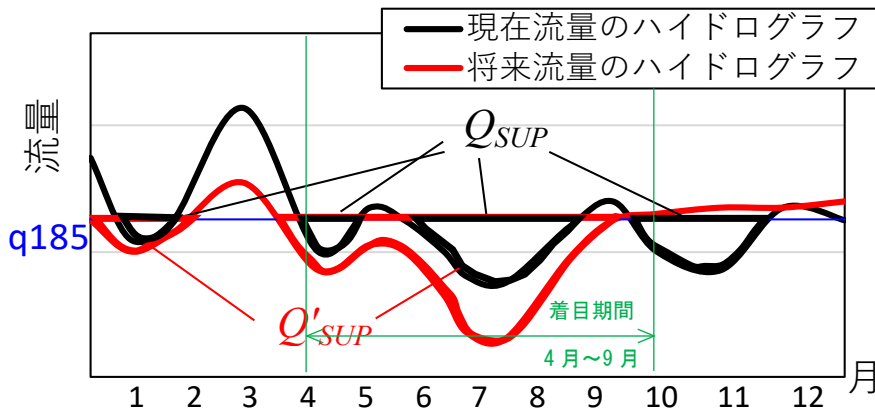


図 6.29 $Q_{sup(n=185)}$ 及び $Q'_{sup(n=185)}$ の概念図

すると、建設時条件と同じレベルの利水機能を確保するために、A ダム及びB ダムで将来気候条件において対策実施すべき容量（相当雨量換算）は下記のとおりとなり、利水計算により推定される必要容量（A ダムで約 50mm, B ダムで約 70mm）に比べるとやや上振れするものの、利水計算を伴わない簡便な推定手法としては、概ね妥当であると考えられる。

A ダムで将来気候条件において利水上対策実施すべき容量の想定値（相当雨量換算）

$$\begin{aligned} &= (Q'_{sup(n=185)} - Q_{sup(n=185)}) + \text{洪水期の利水容量内堆砂量 (相当雨量換算)} \\ &= 29\text{mm} + 31\text{mm} = 60\text{mm} \end{aligned}$$

B ダムで将来気候条件において利水上対策実施すべき容量の想定値（相当雨量換算）

$$\begin{aligned} &= (Q'_{sup(n=185)} - Q_{sup(n=185)}) + \text{洪水期の利水容量内堆砂量 (相当雨量換算)} \\ &= 66\text{mm} + 20\text{mm} = 86\text{mm} \end{aligned}$$

(2) 利水機能に影響がもたらされるダムの再類型化

以上の検討結果を踏まえ、「4. 気候変動がダムの利水機能に与える影響の評価指標の検討」で定義した気候変動及び貯水池内堆砂進行により利水機能に影響がもたらされるダムのタイプの再定義を行う。ここでは、以下の指標 1, 指標 2 によりダムのタイプを行う (図 6.30)。

すなわち、指標 1 は、流況変化及び貯水池内堆砂進行に対してダム建設時点の利水容量を回復するために必要となる容量が弾力的管理 (常時は貯水位を上昇させておき、出水が想定される場合に事前放流により所定の水位まで水位低下させる操作) の実施可能レベルであるかを判断するものである。なお、事前放流可能量として仮定した相当雨量 50 mm については、流域面積やダム規模、放流設備諸元等の個別ダムの条件により異なるため、今後精査が必要である。

また、指標 2 は、水位上昇は従前のサーチャージ水位を上回らない範囲で実施できるものと想定したものであり、弾力的管理で確保する利水容量 (ダム建設時点の容量を回復するために必要となる容量) が、堆砂進行後の治水容量を下回っていることを判断する指標である。

■指標 1 (想定される損失容量に対する弾力的管理の実施可能性指標)

将来気候条件において利水上対策実施すべき容量の想定値 (相当雨量換算)

$$= (Q'_{sup(n=185)} - Q_{sup(n=185)}) + \text{洪水期の利水容量内堆砂量 (相当雨量換算)} \leq 50\text{mm} \quad (17)$$

■指標 2 (ダムの安全性の観点からの弾力的管理の実施可能性指標)

将来の治水容量

$$- \text{将来気候条件において利水上対策実施すべき容量の想定値 (相当雨量換算)} \geq 0\text{mm} \quad (18)$$

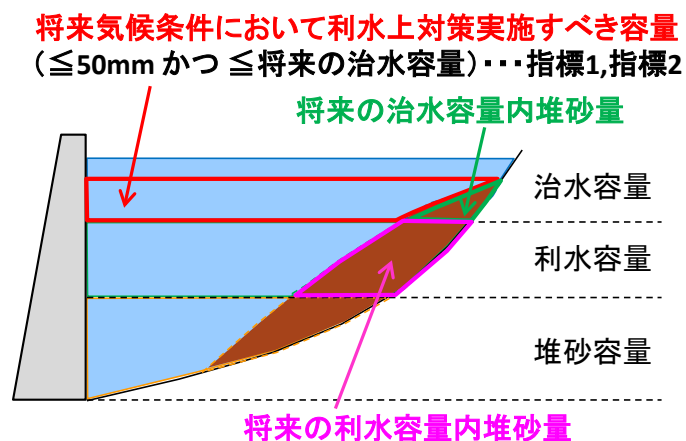


図 6.30 利水上対策実施すべき容量の指標の概念図

上記の指標を踏まえ、全国の国土交通省・(独)水資源機構が所管するダムの再類型化を行った結果は、図 6.31、表 6.6 に示すとおりとなる。これによると、全ダムの 37%では将来 (2099 年時点を想定) において弾力的管理によりダムの利水機能の低下を緩和させる可能性を有する (I 型)。一方で、残りの 63%のダムでは弾力的管理によっても流況変化及び堆砂進行による容量損失分の回復が難しいものと考えられる (II 型)。地域的な傾向を確認すると、北海道では I 型の割合が多い、一方で、関東・北陸・中部・四国地方では II 型の割合が多い。

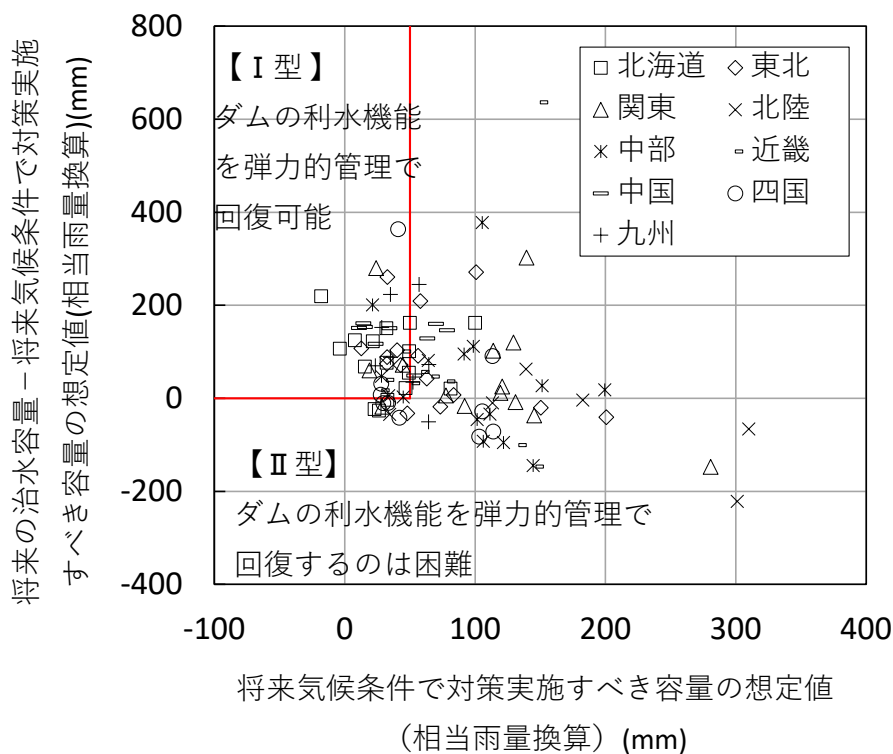


図 6.31 気候変動及び貯水池内堆砂進行により利水機能に影響がもたらされる
ダムの種類の再検討結果

表 6.6 気候変動及び貯水池内堆砂進行により利水機能に影響がもたらされる
ダムの種類の再検討結果

地域	該当ダム数		
	I型	II型	計
北海道	10(63%)	6(38%)	16(100%)
東北	6(40%)	9(60%)	15(100%)
関東	3(21%)	11(79%)	14(100%)
北陸	1(13%)	7(88%)	8(100%)
中部	3(23%)	10(77%)	13(100%)
近畿	3(30%)	7(70%)	10(100%)
中国	5(56%)	4(44%)	9(100%)
四国	3(30%)	7(70%)	10(100%)
九州	4(50%)	4(50%)	8(100%)
全国	38(37%)	65(63%)	103(100%)

(3) 治水機能への影響も加味したダムの再類型化

さらにここでは、ダムの治水機能を優先確保する観点から、将来における治水容量内の堆砂進行分は、利水運用上の弾力的管理より優先して回復させることを前提とした検討を行う（図 6.32）。

すなわち、前述した「流況変化及び貯水池内堆砂進行に対してダム建設時点の利水容量を回復するために必要となる容量」に、「将来（2099年時点）における治水容量内の堆砂量」を加えた容量を弾力的管理（出水が想定される場合に事前放流により所定の水位まで水位低下させる操作）すべき容量として考えることとし、この容量が事前放流可能量として仮定した相当雨量 50 mm 以下であるかを判定指標（以下、指標 1β）とする。なお、前述のとおり、事前放流可能量として仮定した相当雨量 50 mm については、流域面積やダム規模、放流設備諸元等の個別ダムの条件により異なるため、今後精査が必要である。

指標 2 については、前述と同様であり、利水機能確保の観点からの水位上昇は従前のサーチャージ水位を上回らない範囲で実施できるものと想定したものであり、弾力的管理で確保する利水容量（ダム建設時点の容量を回復するために必要となる容量）が、堆砂進行後の治水容量を下回っていることを判断する指標である。

■指標 1β（想定される損失容量に対する弾力的管理の実施可能性指標）

将来気候条件において利水上対策実施すべき容量の想定値（相当雨量換算）

+ 将来気候条件において利水上対策実施すべき容量の想定値（相当雨量換算）

= $(Q'_{sup(n=185)} - Q_{sup(n=185)})$ + 洪水期の利水容量内堆砂量（相当雨量換算）

+ 将来における治水容量内堆砂量（相当雨量換算） ≤ 50mm (19)

■指標 2（ダムの安全性の観点からの弾力的管理の実施可能性指標）

将来の治水容量

- 将来気候条件において利水上対策実施すべき容量の想定値（相当雨量換算） ≥ 0mm (20)

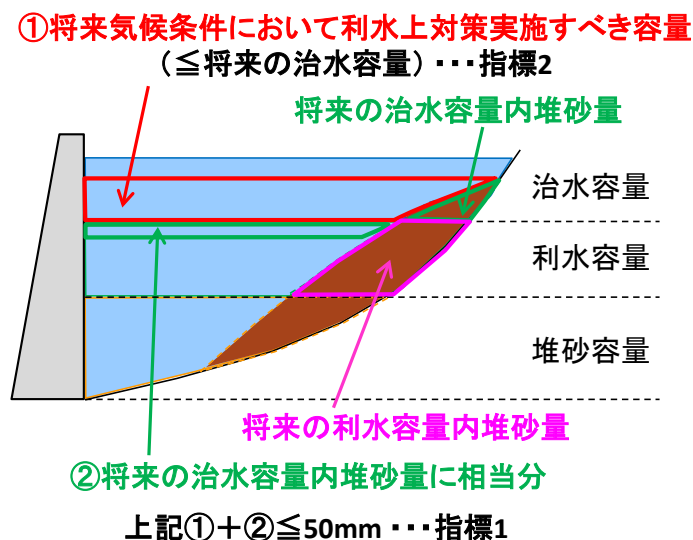


図 6.32 利水上対策実施すべき容量の指標の概念図

上記の指標を踏まえ、全国の国土交通省・(独)水資源機構が所管するダム再類型化を行った結果は、図 6.33、表 6.7 に示すとおりとなる。これによると、全ダムの 32%では将来(2099年時点を想定)において弾力的管理によりダムの利水機能の低下を緩和させる可能性を有する(I型)。一方で、残りの 68%のダムでは弾力的管理によっても流況変化及び堆砂進行による容量損失分の回復が難しいものと考えられる(II型)。ここで、治水容量内の堆砂進行分を弾力的管理により水位低下させない場合は、それぞれ、全ダムの 37%(I型)、63%(II型)であることから、堆砂進行分の治水機能回復を優先させた場合にも、弾力的管理の効果(効果発現が認められるダム数)が大きく変わることはないものと考えられる。

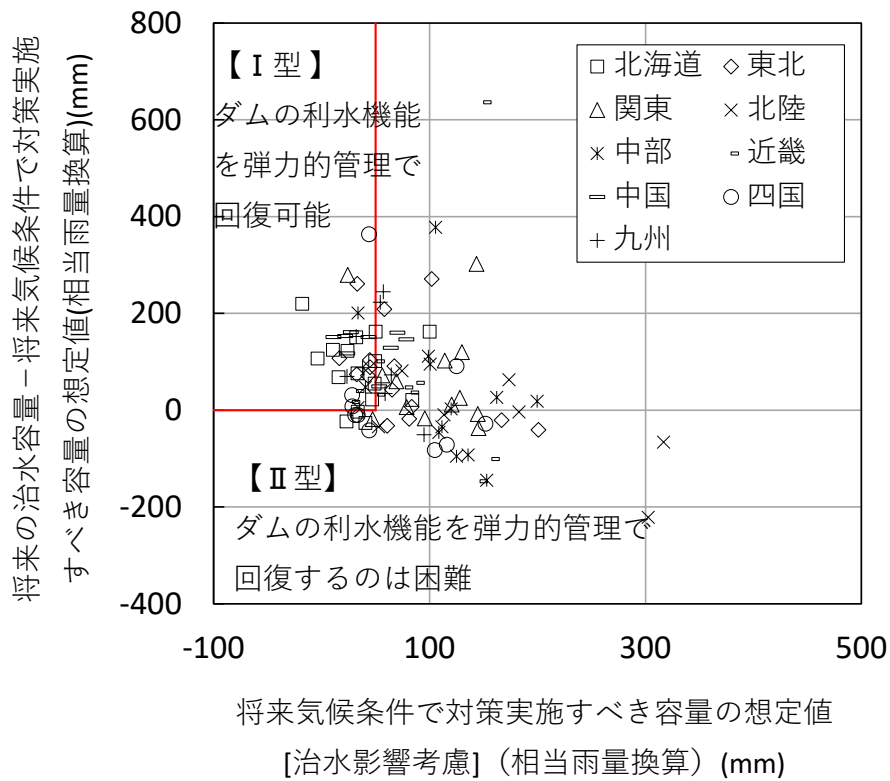


図 6.33 気候変動及び貯水池内堆砂進行により利水機能に影響がもたらされるダムのタイプの再検討結果（治水影響を考慮した結果）

表 6.7 気候変動及び貯水池内堆砂進行により利水機能に影響がもたらされるダムのタイプの再検討結果（治水影響を考慮した結果）

地域	該当ダム数		
	I型	II型	計
北海道	10(63%)	6(38%)	16(100%)
東北	6(40%)	9(60%)	15(100%)
関東	1(7%)	13(93%)	14(100%)
北陸	1(13%)	7(88%)	8(100%)
中部	2(15%)	11(85%)	13(100%)
近畿	2(20%)	8(80%)	10(100%)
中国	5(56%)	4(44%)	9(100%)
四国	3(30%)	7(70%)	10(100%)
九州	3(38%)	5(63%)	8(100%)
全国	33(32%)	70(68%)	103(100%)

6.4 ダムの利水機能維持に資する導水貯留の検討

6.4.1 対策案の設定

本検討では、対策案として、「同一水系内のダムの嵩上げ」、「貯水池内掘削」など従来より考えられてきた方法ではなく、ダムの利水機能回復に資する対策方法の立案・有用性の確認を行う。

具体的には、図 6.34、表 6.8 に示すとおり、K ダム群の水系とは異なる N 川水系に位置する e ダム（ダムの目的に発電も有する）を嵩上げするとともに、b ダム～e ダム間、e ダム～K ダム群水系間を導水施設により連携する。これにより、b ダムから e ダムに向けて年間通して小流量を導水し、e ダム（嵩上げダム）に貯留する（本対策を「河道外貯留」と呼ぶ）。その上で、K ダム群がパンクしそうな状況においては、e ダムの貯留水を、e ダム～K ダム群水系間の導水施設により流下させ、K ダム群下流の基準頭首工に向けて利水補給を実施する対策を想定した。

本検討で設定した「河道外貯留」は、利水補給対象の水系とは異なる水系に位置するダムを活用した対策である点に新規性を有する。また、嵩上げ対象とする e ダムは目的に発電を有するため、当該ダムの嵩上げにより発電能力の向上が図られる可能性も有する。

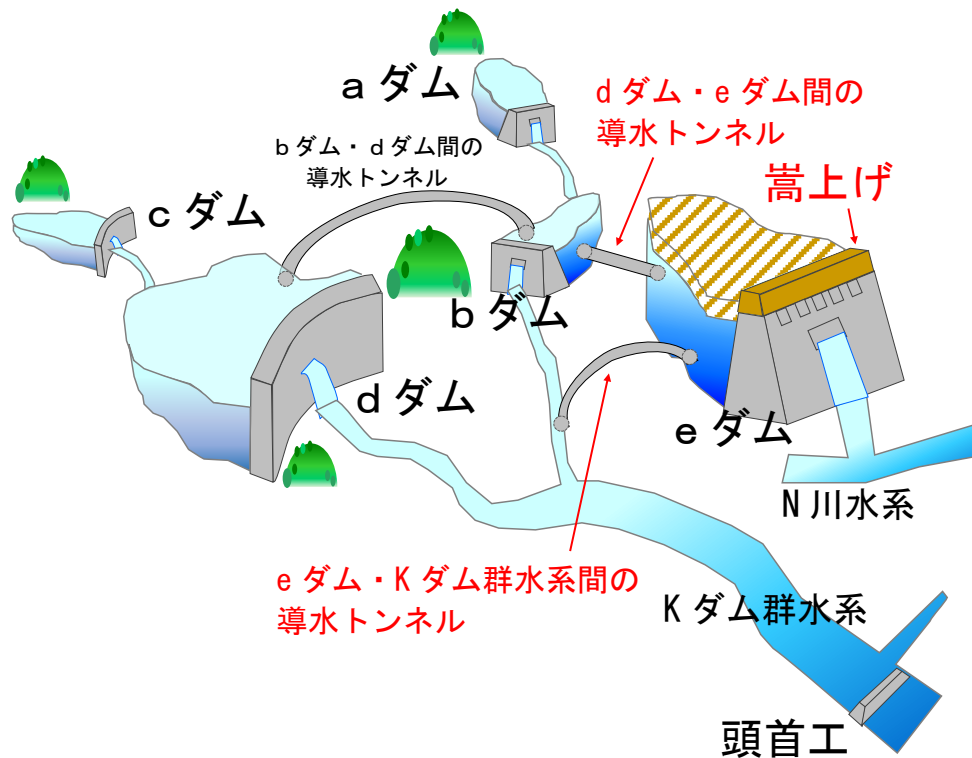


図 6.34 対策案（河道外貯留）の概要

表 6.8 b ダム～e ダム間の導水，e ダム～K ダム群水系間の補給ルール

種別	補給ルール
d・e ダム間の導水ルール	下流基準頭首工地点流量が確保量を上回る場合に限り $1\text{m}^3/\text{s}$ を上限に d ダムから e ダムに導水する。 合計導水量は e ダムの新規確保容量を上限とする。
e ダムからの補給ルール	K ダム群の合計貯水量が 100千 m^3 を下回り、かつ下流基準頭首工地点流量が確保量を下回る場合に限り代替補給を実施する。

6.4.2 検討対象ダム群の概要

検討対象ダム群は、関東地方に位置する4基の多目的ダムからなるKダム群とした。Kダム群の概要及びKダム群を構成するa～dダムの諸元は図3.33、表3.6に示すとおりである。Kダム群は統合運用されており、下流の基準頭首工に向けて連携して利水補給を実施している。Kダム群近傍では古くから電力ダム開発が進められている特徴を有している。なお、対策検討においては、Kダム群のbダム・dダム間に設置されている導水トンネルの活用を考慮した。

本節では、後述するように、Kダム群の水系とは異なるN川水系に位置するeダムを渇水時に活用することの有効性について検討を行う。このため、eダムの位置、諸元についても図3.33、表3.6に付記した。

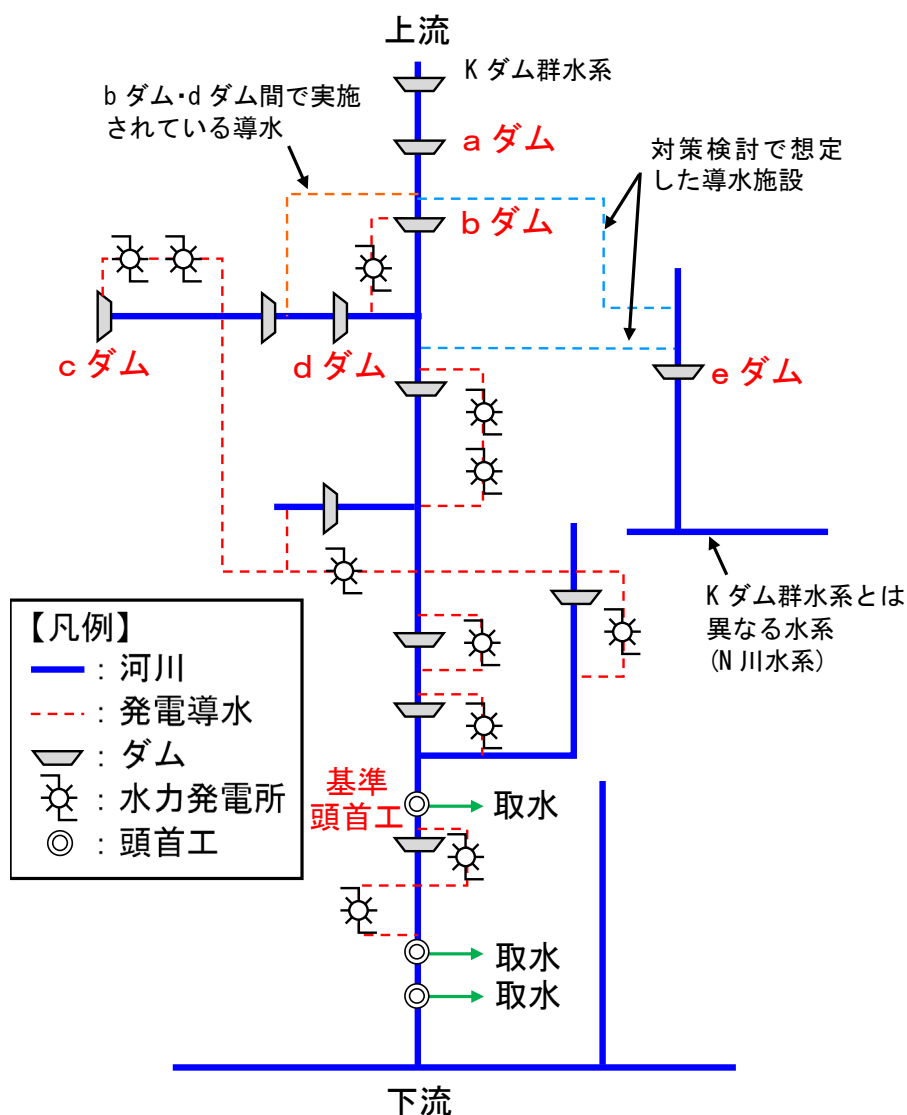


図 6.35 検討対象ダム群の概要

表 6.9 検討対象ダム群の諸元

ダム名	aダム	bダム	cダム	dダム	eダム
ダムの目的 ^{※1}	FNAWI	FNP	FNP	FNAWI	FNAWP
ダム型式 ^{※2}	G	G	A	A	G
竣工年	2012年	1956年	1966年	1983年	1990年
ダム高(m)	119.0	112.0	117.0	140.0	70.0
集水面積(km ²)	102	271	179	324	21
総貯水容量(千m ³)	75,000	55,000	87,600	83,000	6,100
有効貯水容量(千m ³)	72,000	46,000	73,100	76,000	5,330
洪水期利水容量(千m ³)	42,000	11,200	48,600	40,000	2,100
非洪水期利水容量(千m ³)	72,000	32,000	73,100	76,000	4,100
堆砂容量(千m ³)	3,000	9,000	14,500	7,000	770
堆砂率(堆砂量/総貯水容量)(%) ^{※3}	0.6	6.4	6.3	8.4	6.7
堆砂率(堆砂量/堆砂容量)(%) ^{※3}	14.5	38.9	38.0	100.1	53.0
貯水池回転率 ^{※4}	1.6	6.2	3.0	2.1	6.5
洪水期間	6/15~9/30	6/15~9/30	6/15~9/30	7/1~9/30	6/16~10/10

※1 F:洪水調節, N:不特定用水, 河川維持用水, A:かんがい用水, W:上水道用水, I:工業用水, P:発電

※2 G:重力式コンクリートダム, A:アーチ式コンクリートダム

※3 2018年度末時点

※4 データが得られた下記期間の貯水池年回転率の平均値

aダム:2013・2015~2019年, bダム:2010・2013・2015~2019年, c・dダム:2010~2019年, eダム:2011~2019年

6.4.3 将来流況の予測手法

将来流況の予測手法は、「3.3.2 (1) 将来流況の予測手法」と同様とした。

具体的には、気候変動予測では、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM3.2S) による 150 年連続ラン (計算期間: 1950~2099 年) における気温・降水量変化を利用した。なお、150 年連続ランのアンサンブル数は 1 つのみであり、温室効果ガスの排出シナリオは高位参照シナリオ RCP8.5、海面水温は CMIP5 の SST アンサンブル平均である。次に、全球大気モデルから算出される蒸発散量、融雪量、地上到達降雨量を分布型流出モデル Hydro-BEAM に組み込み、検討対象ダム群のうち上流に位置する a ダム・c ダムの積雪・融雪過程も考慮した日平均河川流量をそれぞれ求めた。日平均河川流量は、タイムステップ 10 分 (出力 1 時間) で計算した 24 時間の流量を平均したものである。詳細は Kojiri³⁾、Sato⁴⁾を参照されたい。

利水機能評価においては、全球大気モデルや流出モデルに含まれるバイアスを排除し、気候変動による流況変化の影響をより明確に評価することを目的として、計算流況の補正を実施した。具体的には、「4. 気候変動がダムの利水機能に与える影響の評価指標の検討」において利水補給では平水流量以下の流量の影響が大きいことを確認しているため、本検討では平水流量に着目し、(21)式により流況補正を行った。補正係数 α は、a ダム、c ダムそれぞれで検討した結果、両ダム地点とも $\alpha=0.47$ となった。なお、補正係数 α の設定期間はダムの建設年を考慮し、a ダムは 2015~2019 年、c ダムは 2010~2019 年とした。なお、計算流況の低水領域におけるより精度の高いバイアス補正については、今後の課題とする。

$$\text{計算流況 (補正後)} = \text{計算流況 (補正前)} \times \alpha \quad (21)$$

ここに、 α : 補正係数 (= Q_{185}/Q'_{185})

Q_{185} : 実績流況の平水流量の平均値

Q'_{185} : 計算流況の平水流量の平均値

6.4.4 検討ケース及び対策規模の設定

検討ケースは対策効果をより明瞭に確認するため、前章での検討でダム水利機能の大幅低下がみられた有効容量内堆砂率を 50%としたケースとした。本検討で設定した「河道外貯留」により得られる新規容量は、10,000 千 m³、20,000 千 m³、30,000 千 m³ の 3 ケースとした。上記嵩上げ規模は、e ダム（既設ダム）の構造等を考慮して、実現性の観点を加味して設定したものである。検討ケースを整理すると、表 6.10 に示すとおりとなる。

表 6.10 検討ケース

検討ケース	有効容量内堆砂率	新規確保容量※	e ダム嵩上げ高
ケース 1	50%	10,000 千 m ³	23m (ダム高 93m)
ケース 2		20,000 千 m ³	38m (ダム高 108m)
ケース 3		30,000 千 m ³	48m (ダム高 118m)

注 1) 新規確保容量の全量を K ダム群がパンクした場合の水利補給に活用する。

注 2) 上表中の () は嵩上げ後の e ダムのダム高を示す。

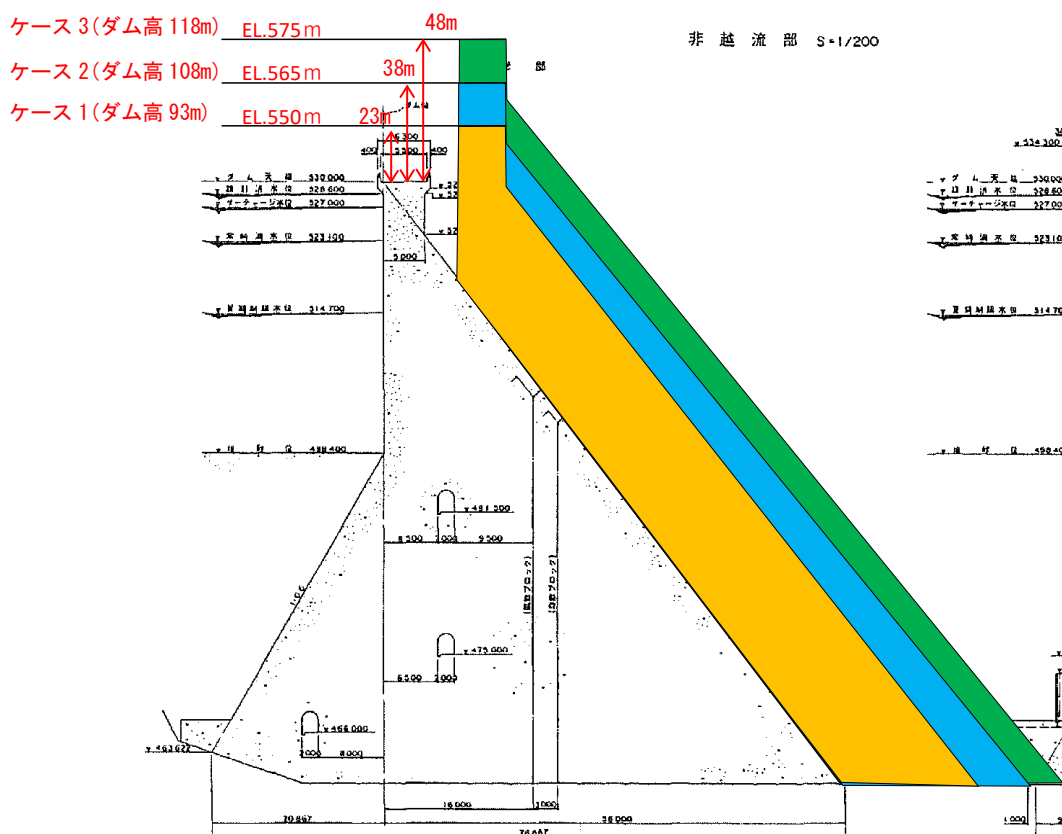


図 6.36 対策案の概要 (e ダム嵩上げ規模)

6.4.5 対策案の効果検討

(1) 対策案の効果

対策未実施ケースと河道外貯留（最大貯留量 10,000 千 m³, 20,000 千 m³, 30,000 千 m³）による対策実施ケースの利水計算結果を図 6.41～図 6.43 に、K ダム群のパンク日数，下流基準頭首工での不足量を整理した結果を図 6.37，図 6.38，表 6.11 に示す。

図 6.37，図 6.38，表 6.11 より，2000～2099 年を評価期間とした場合の，K ダム群のパンク日数は，有効容量内堆砂率 50%の対策未実施ケースの 255 日に対して，10,000 千 m³新規容量確保ケースでは 170 日（33%減），20,000 千 m³新規容量確保ケースでは 102 日（60%減），30,000 千 m³新規容量確保ケースでは 56 日（78%減）となる。

また，2000～2099 年を評価期間とした場合の，基準頭首工での不足量は，有効容量内堆砂率 50%の対策未実施ケースの約 270,000 千 m³ 日に対して，10,000 千 m³新規容量確保ケースでは約 185,000 千 m³（31%減），20,000 千 m³新規容量確保ケースでは約 117,000 千 m³（56%減），30,000 千 m³新規容量確保ケースでは約 78,000 千 m³（71%減）となる。

以上より，本検討で立案した対策案の一定の有効性が確認できた。ただし，評価期間を 10 年ピッチで確認した場合の 2080～2089 年においては，他の評価期間に比べて対策実施後の渇水被害（K ダム群パンク日数・下流基準頭首工での不足量）の低減度合いが限定的なものになっている。ここで，図 6.43 の貯水量変動曲線を確認すると，河道外貯留量そのものは回復している状況が認められるため，上記期間のような深刻な渇水年への対応として，本手法（新規確保容量の増大）の効果が否定されるものではないと考えられる。

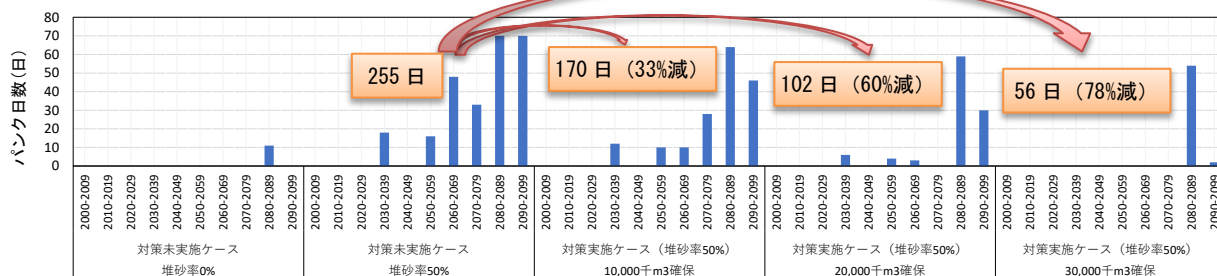


図 6.37 対策案（河道外貯留）の効果（K ダム群パンク日数）

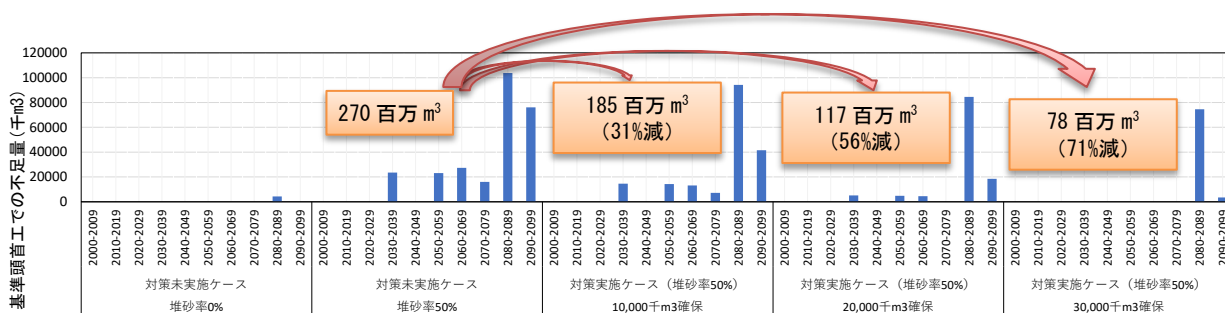


図 6.38 対策案（河道外貯留）の効果（下流基準頭首工での不足量）

表 6.11 対策案（河道外貯留）の効果

		対策未実施ケース		対策実施ケース（堆砂率50%）		
		堆砂率0%	堆砂率50%	10,000千m3確保	20,000千m3確保	30,000千m3確保
Aダム群 パンク日数 (日)	2000-2009年	0	0	0 (-%減)	0 (-%減)	0 (-%減)
	2010-2019年	0	0	0 (-%減)	0 (-%減)	0 (-%減)
	2020-2029年	0	0	0 (-%減)	0 (-%減)	0 (-%減)
	2030-2039年	0	18	12 (33%減)	6 (67%減)	0 (100%減)
	2040-2049年	0	0	0 (-%減)	0 (-%減)	0 (-%減)
	2050-2059年	0	16	10 (38%減)	4 (75%減)	0 (100%減)
	2060-2069年	0	48	10 (79%減)	3 (94%減)	0 (100%減)
	2070-2079年	0	33	28 (15%減)	0 (100%減)	0 (100%減)
	2080-2089年	11	70	64 (9%減)	59 (16%減)	54 (23%減)
	2090-2099年	0	70	46 (34%減)	30 (57%減)	2 (97%減)
	2000-2099年	11	255	170 (33%減)	102 (60%減)	56 (78%減)
基準頭首工 での不足量 (千m3)	2000-2009年	0	0	0 (-%減)	0 (-%減)	0 (-%減)
	2010-2019年	0	0	0 (-%減)	0 (-%減)	0 (-%減)
	2020-2029年	0	0	0 (-%減)	0 (-%減)	0 (-%減)
	2030-2039年	0	23,479	14,554 (38%減)	5,101 (78%減)	0 (100%減)
	2040-2049年	0	0	0 (-%減)	0 (-%減)	0 (-%減)
	2050-2059年	0	23,088	14,227 (38%減)	4,807 (79%減)	0 (100%減)
	2060-2069年	0	27,336	13,145 (52%減)	4,495 (84%減)	0 (100%減)
	2070-2079年	0	15,986	7,140 (55%減)	0 (100%減)	0 (100%減)
	2080-2089年	4,245	103,775	94,196 (9%減)	84,574 (19%減)	74,574 (28%減)
	2090-2099年	0	76112	41,572 (45%減)	18,485 (76%減)	3,504 (95%減)
2090-2099年	4,245	269,776	184,835 (31%減)	117,462 (56%減)	78,078 (71%減)	

注) 上表中の () は対策未実施ケース(堆砂率50%) のパンク日数または不足量に対する低減率を示す。

(2) 対策案の効果発現要因の確認

対策実施ケース（新規確保容量：3,000 万 m³ のケース）の貯水量変動曲線（図 6.39 の①～⑦）より、以下の傾向が確認できる。

- ① 前年以前からの貯留により河道外貯留量が満水の状況。
- ② K ダム群の合計貯水量が 100 千 m³ となり、e ダムより代替補給を実施。対策未実施ケースとは異なり K ダム群のパンクを回避（K ダム群合計貯水量は 100 千 m³）。
- ③ K ダム群及び e ダムもパンクしている状況。
- ④ e ダムに向けて K ダム群からの導水が実施されている状況。
- ⑤ 下流基準頭首工での流量に余裕がないため、e ダムに向けた K ダム群からの導水は実施されていない状況。
- ⑥ e ダムに向けて K ダム群からの導水が実施されている状況。
- ⑦ 河道外貯留量が満水の状況。

以上より、対策実施ケースの効果は図 6.39 中の②期間に現れており、この期間において e ダム（河道外貯留施設）から代替補給が行われ、K ダム群のパンクが回避されている。なお、e ダムもパンクすると、利水補給実施は困難となるが（図 6.39 中の③）、e ダムの嵩上げ高がより高ければ、引き続き e ダムにより下流に向けて K ダム群の代替補給が実施可能になる。

対策実施ケースの特徴的な貯水量変動傾向を確認した結果、図 6.39、図 6.40 に示すとおり、河道外貯留の効果発現要因は、下記と考えられる。

- 洪水期制限水位に向けた水位低下操作時の無効放流を事前貯留として活用する（図 6.39 中の青囲み(A)）
- 制限水位（非洪水期）における無効放流を事前貯留として活用する（図 6.40 中の青囲み(B)）

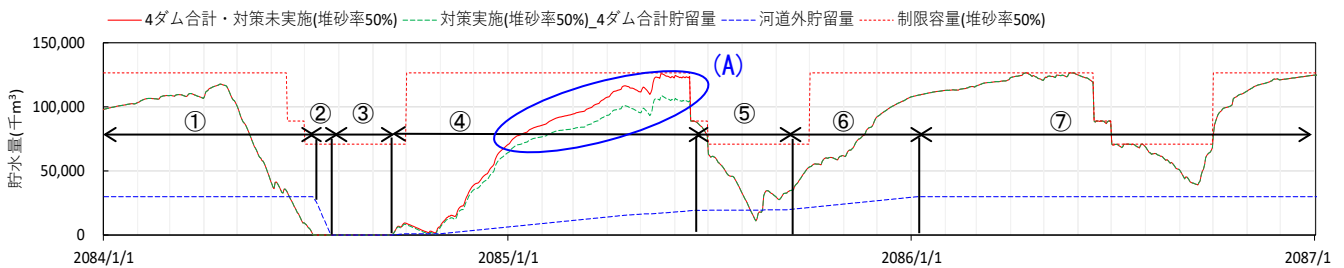


図 6.39 対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線①
（新規確保容量：3,000 万 m³）

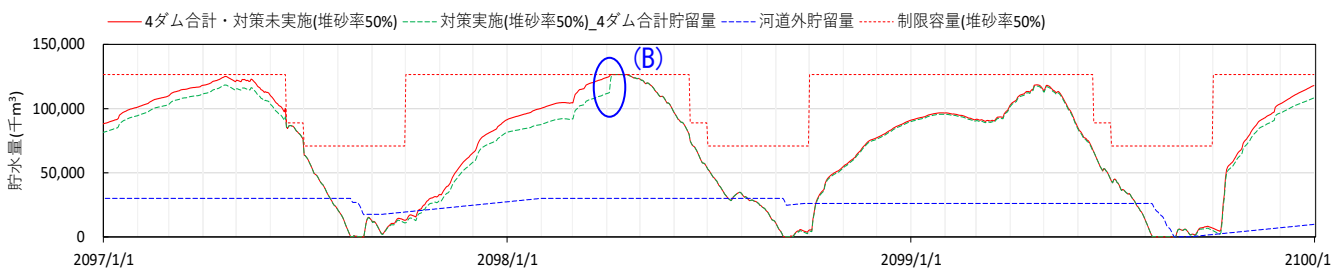


図 6.40 対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線②
（新規確保容量：3,000 万 m³）

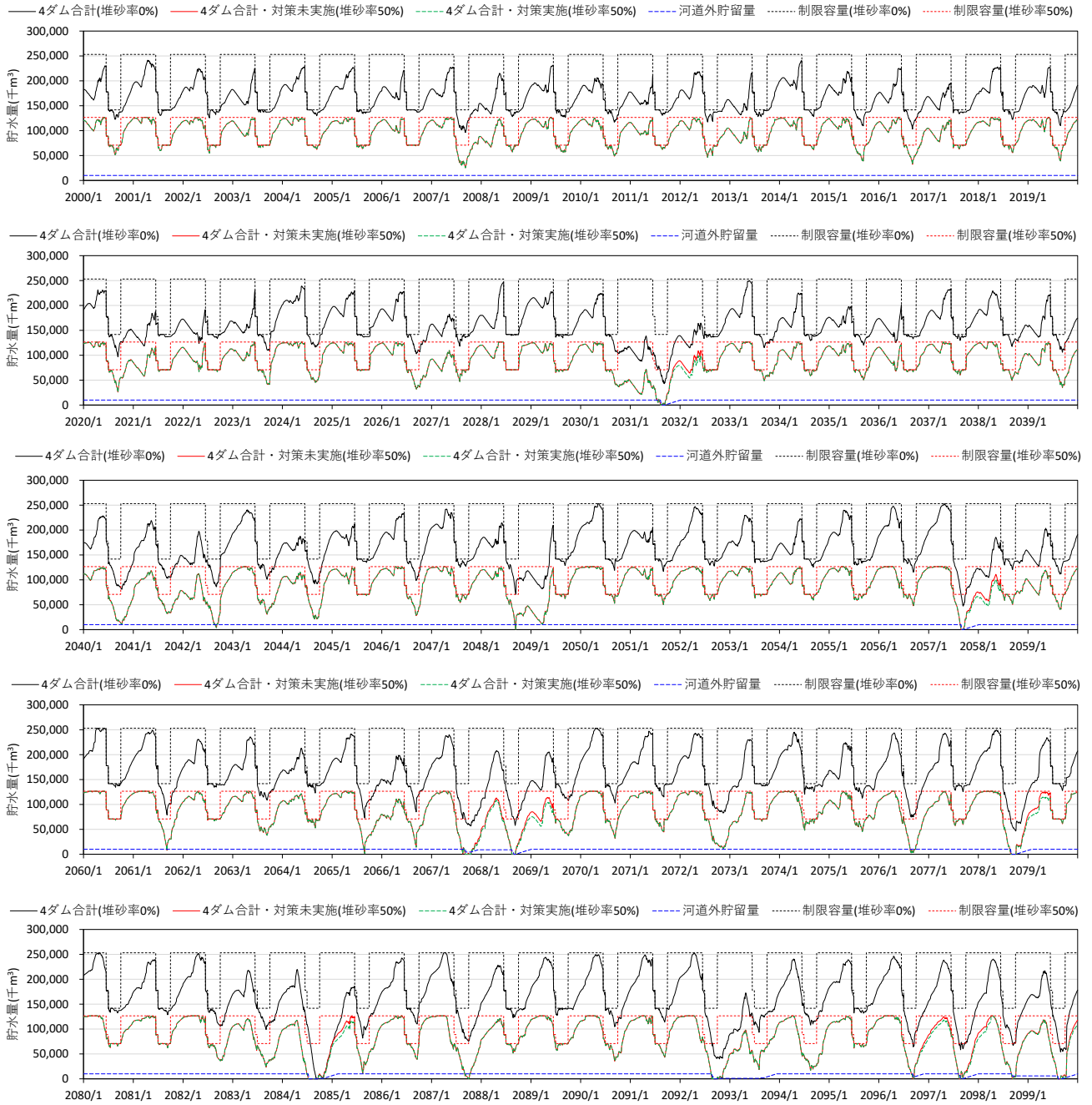


図 6.41 対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線
 （新規確保容量：1,000 万 m³ のケース）

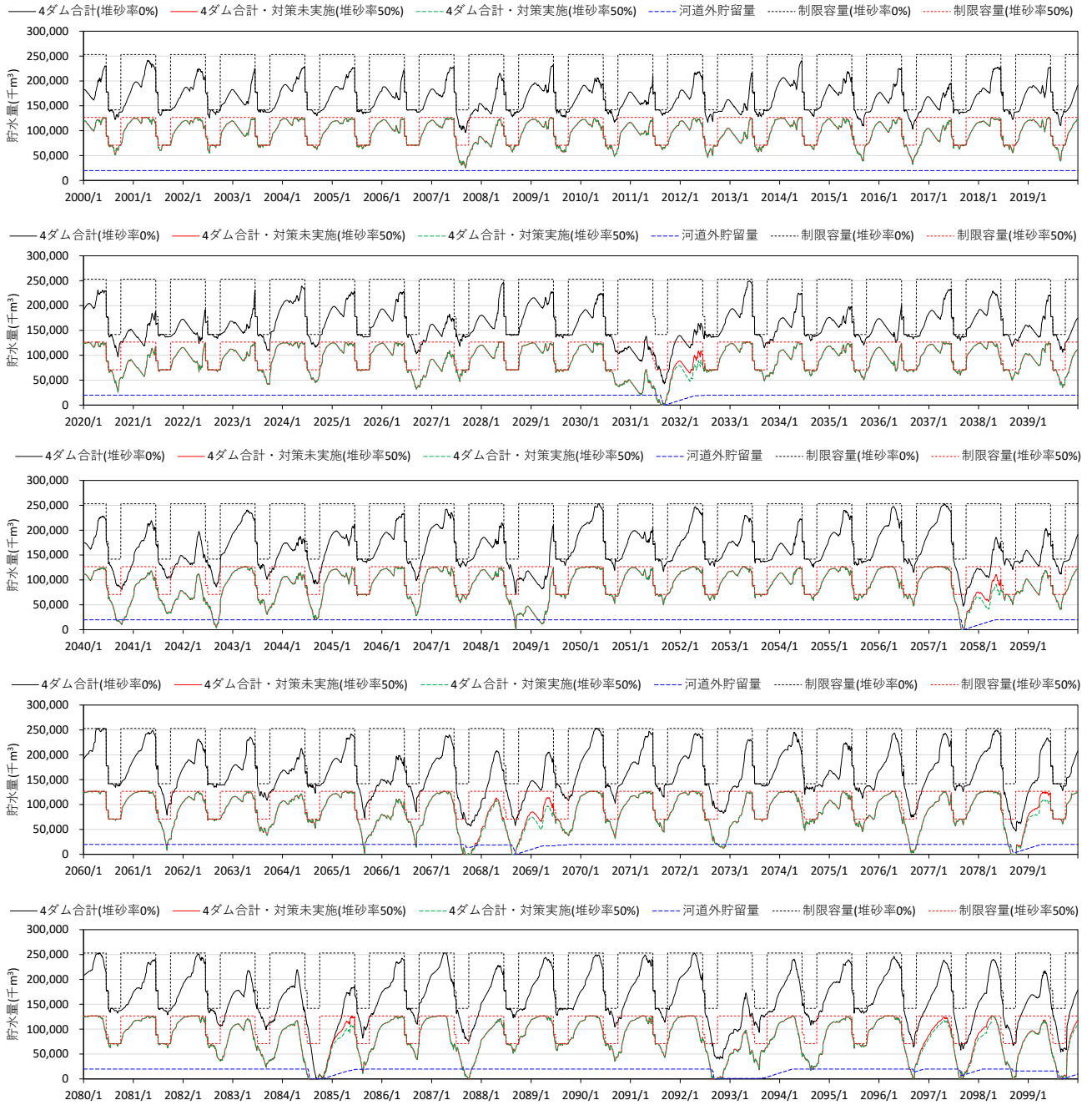


図 6.42 対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線
 （新規確保容量：2,000 万 m³ のケース）

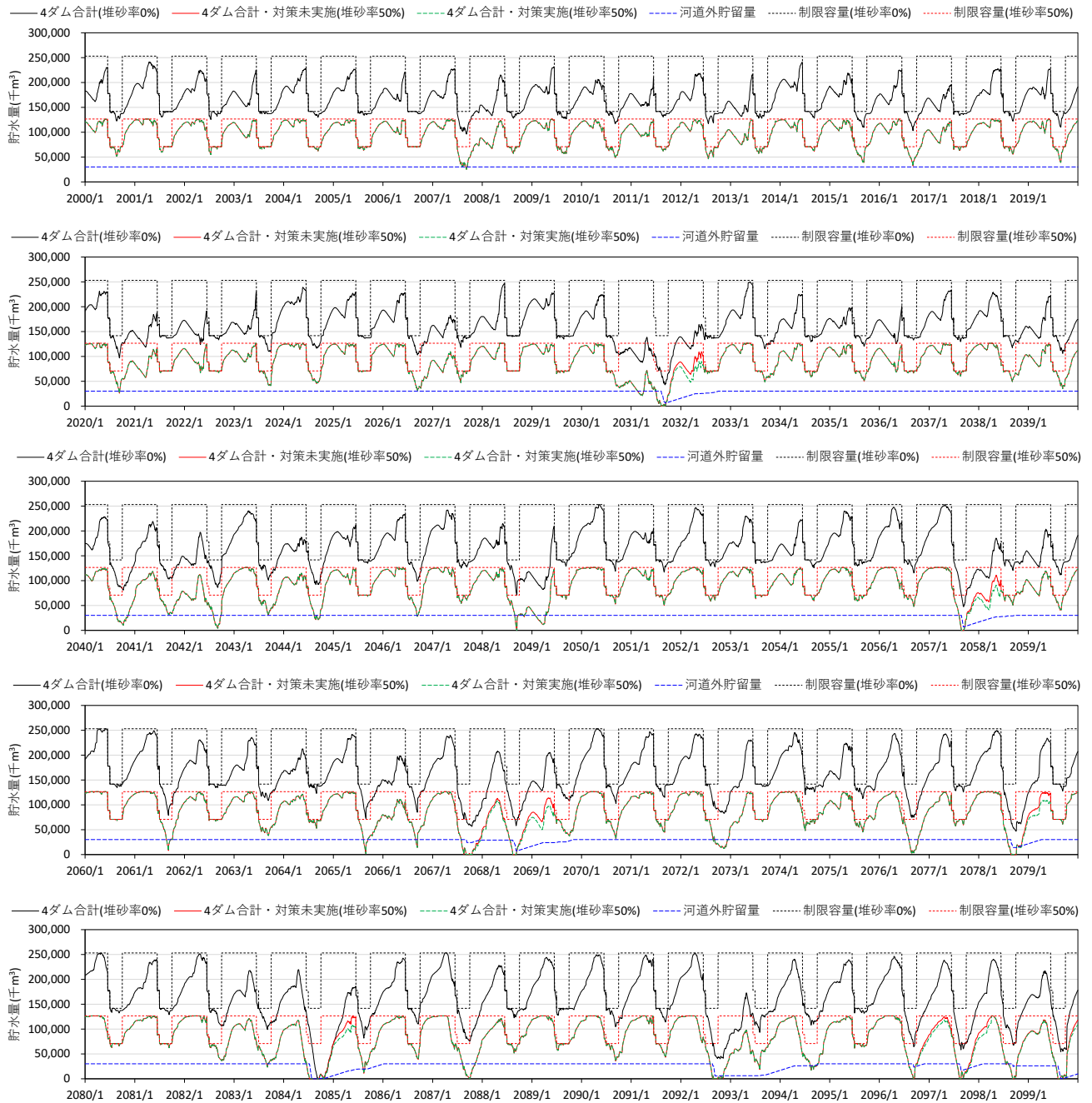


図 6.43 対策未実施ケースと対策実施（河道外貯留）ケースによる貯水量変動曲線
 （新規確保容量：3,000 万 m³ のケース）

6.4.6 他の対策案との有効性比較

(1) 他の対策案の想定

前項までは、対策案として「異なる水系に位置するダムの高上げ」を想定した。本項では、当該対策の得失を確認するため、ダムの貯水池容量を増大させる対応として従来より考えられてきた「同一水系内のダムの高上げ」、「貯水池内掘削」を採用した場合の費用について概略検討を行い、これらと「異なる水系に位置するダムの高上げ」の費用の比較を行う。

上記のうち、「同一水系内のダムの高上げ」については下記理由から、aダムを高上げ対象とした。

- 我が国においては、現段階では、アーチ式コンクリートダムの高上げは技術的難度が高いと想定される。このため、当該ダム型式のcダム・dダムの高上げは困難であると想定した。
- bダム上流域には、インフラ施設が多数立地しており、移転に伴う補償費が莫大になると考えられる。また、bダムを高上げすることで、aダム下流側に背水影響が発生し、aダムの構造安定上の影響が考えられる。このため、bダムの高上げは困難であると想定した。

高上げ方法については、①経済性の観点から高上げボリュームを極力少なくするとともに、②既設ダムの運用への影響を最小化する観点から、既設ダムよりやや下流側（数 m 程度下流側）にダム軸を据える同軸高上げを想定した（図 6.44）。

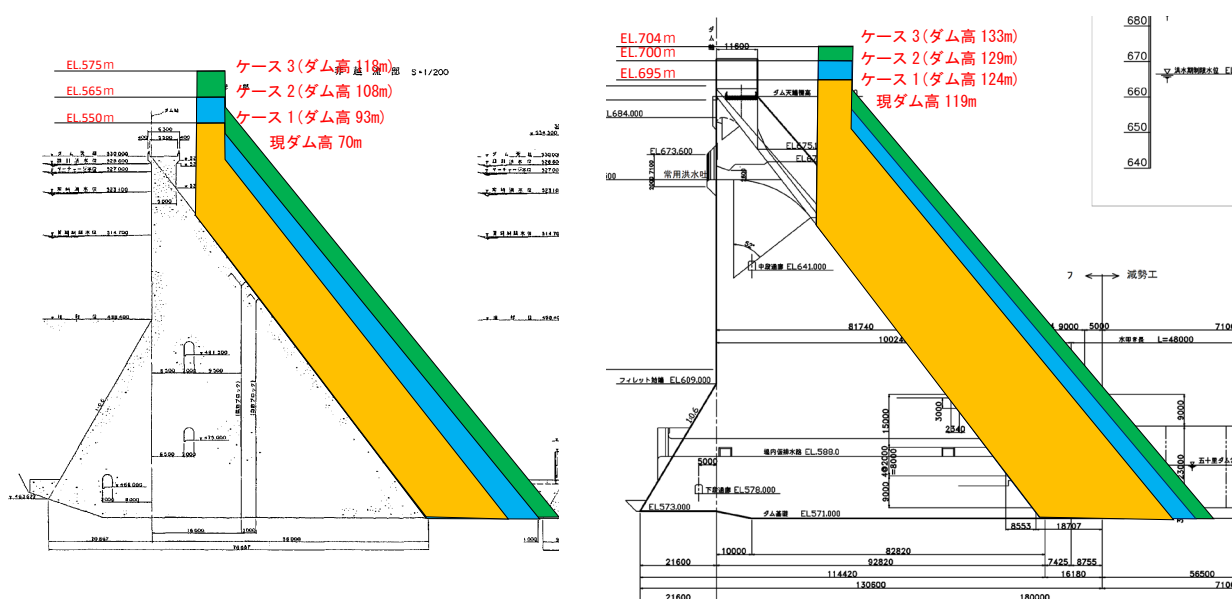


図 6.44 対策案の概要（嵩上げイメージ）（左図：eダム、右図：aダム）

(2) 各対策案の比較結果

「異なる水系に位置するダムの高上げ（前項までの検討で想定した対策案）」、「同一水系内のダムの高上げ」、「貯水池内掘削」について、新規確保容量として 10,000 千 m³（Case1 シリーズ）、20,000 千 m³（Case2 シリーズ）、30,000 千 m³（Case3 シリーズ）の 3 ケースを想定した。

これらのケースについて、対策費用を概略的に求めた結果は表 6.12 に示すとおりであり、Case1～3 シリーズともに、対策費用（表 6.12 の①）は概ね同等となる。ここで、e ダムは、前述のとおり、ダムの目的に発電を有する。このため、当該ダムの高上げ（K ダム群水系への利水補給のための新規容量確保）により、貯水位が上昇し、これにより、有効落差の増大に伴う水力発電電力量の増大をもたらさせる可能性がある。この発電電力量の増大（売電価値、表 6.12 の②）も加味した実質の対策費用（表 6.12 の③）を確認すると、e ダム高上げのメリットが生じる可能性が認められる。

表 6.12 各対策案及び検討結果（対策費用 [単位：億円]）

ケース	対策案	新規確保容量	①対策費用 (建設費)	②便益 (増電に伴う増収)	③実質の対策費用 (①-②)
Case1-1	e ダム高上げ (河道外貯留)	10,000 千 m ³	395	7	388
Case1-2	a ダム高上げ		392	—	392
Case1-3	a～d ダム浚渫		1,000	—	1,000
Case2-1	e ダム高上げ (河道外貯留)	20,000 千 m ³	688	11	677
Case2-2	a ダム高上げ		752	—	752
Case2-3	a～d ダム浚渫		2,000	—	2,000
Case3-1	e ダム高上げ (河道外貯留)	30,000 千 m ³	974	14	960
Case3-2	a ダム高上げ		1,054	—	1,054
Case3-3	a～d ダム浚渫		3,000	—	3,000

注) e ダム高上げによる増電収益の算出は下記により行った。

手順①：e ダムの現行の年間可能発生電力量（3,456MWh）を高上げ高見合いで有効落差が増大するものとして、高上げ後の年間発電電力量を算出。

手順②：売電価格として 29 円（FIT 単価を参考に設定）、売電期間として 20 年を想定。

表 6.13 各対策費用の内訳 [単位：億円]

ケース	対策案	嵩上げ費用 または浚渫費用	導水施設費用	補償費用	合計
Case1-1	e ダム嵩上げ	248	99	48	395
Case1-2	a ダム嵩上げ	284	—	108	392
Case1-3	a~d ダム浚渫	1,000			1,000
Case2-1	e ダム嵩上げ	510	99	79	688
Case2-2	a ダム嵩上げ	644	—	108	752
Case2-3	a~d ダム浚渫	1,000			2,000
Case3-1	e ダム嵩上げ	769	99	106	974
Case3-2	a ダム嵩上げ	936	—	118	1,054
Case3-3	a~d ダム浚渫	1,000			3,000

注) 工事単価：嵩上げコンクリート=10 万円/m³，浚渫=1 万円/m³，導水路=50 万円/m
付替道路=300 万円/m，家屋移転=100,000 万円/戸

(3) ダムの利水機能回復のためのハード対策の選定フロー

これまでの検討によって、ダムの機能回復策として、水系外における河道外貯留を選定することの一定のメリットが見出された。これを踏まえ、ダムの利水機能回復のためのハード対策の選定フローを整理すると、図 6.45 に示すとおりとなる。なお、図 6.45 に示す「河道外貯留施設整備費用>浚渫費用」の条件を簡便に判定する指標として、図 6.46 が考えられる。

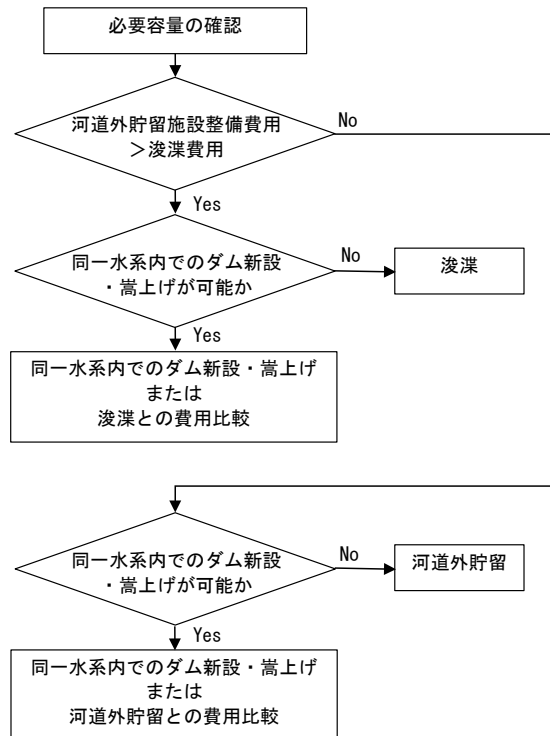


図 6.45 ダムの利水機能回復のためのハード対策の選定フロー

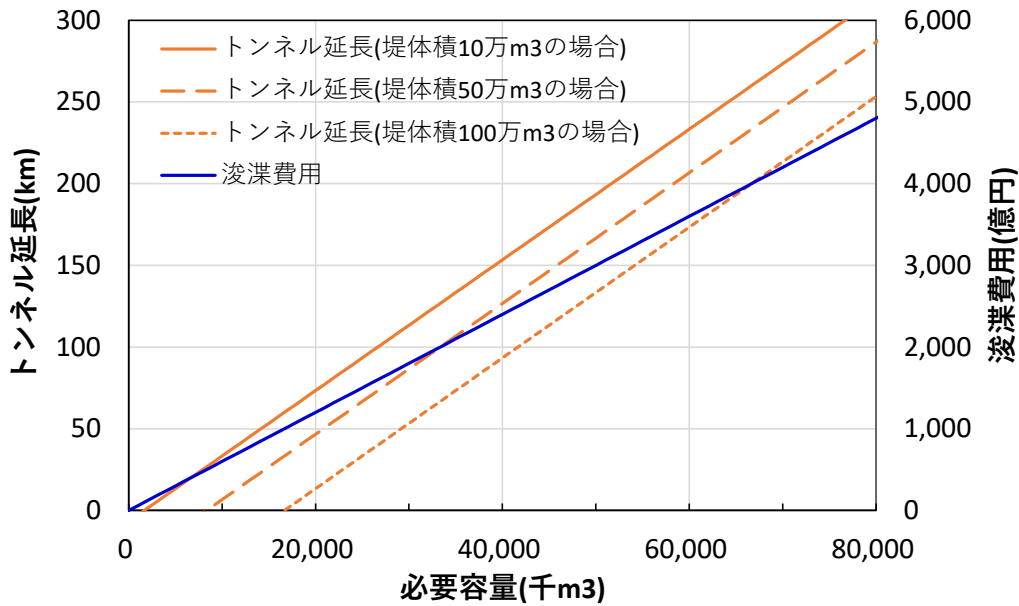


図 6.46 河道外貯留施設整備（トンネル延長）と浚渫費用の関係図

(4) 既設ダムの嵩上げを伴う河道外貯留に関する考察

本検討で想定した既設ダム（ダムの目的に発電を有する）の嵩上げによる河道外貯留によって、利水安全度の向上（利水利用上のメリット①）が図られるとともに、有効落差の増大が生じることで発電電力量の増大効果（電力利用上のメリット）が得られる可能性が見出された。また、河道外に新規容量を確保したことによって、本検討で対象とした e ダムが位置する水系に渇水が生じた場合の代替補給機能（利水利用上のメリット②）、さらに、既設ダム群（本検討では K ダム群）で事前放流を行いこれが空振りに終わった場合にも、利水代替補給を実施できる可能性があり、より積極的に迎洪水対応を図ることができる可能性がある（治水利用上のメリット）。これらを整理すると、以下に示すとおりであり、複数のメリットが生まれる可能性がある。

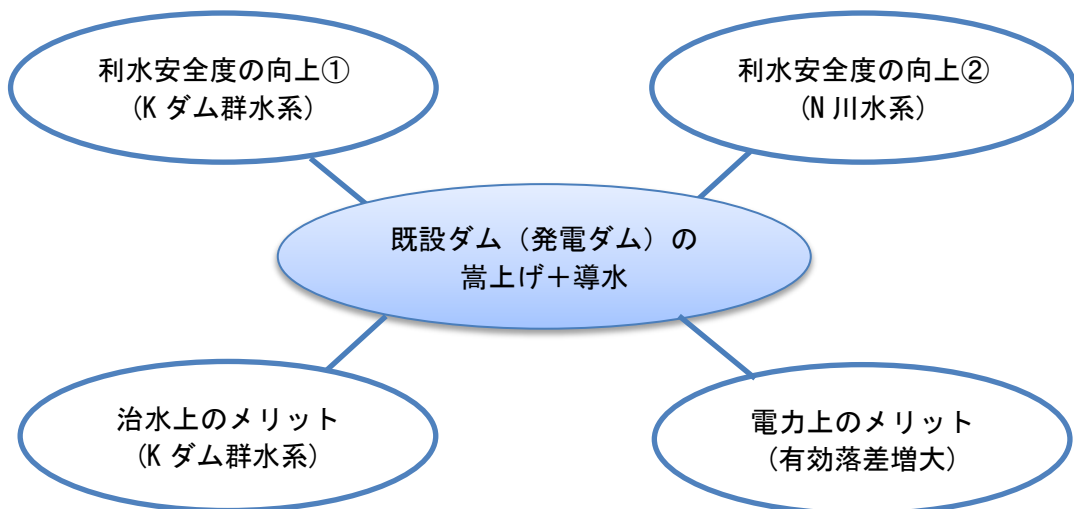


図 6.47 既設ダムの嵩上げを伴う河道外貯留のメリット

6.5 利水需要の調整効果に関する検討

6.5.1 検討対象ダムの概要

検討対象ダムは、「6.5 利水需要の調整効果に関する検討」で検討対象とした K ダム群とした（詳細は前節参照のこと）。

6.5.2 将来流況の予測手法

将来流況の予測手法は、「6.4.3 将来流況の予測手法」と同様とした（詳細は前節参照のこと）。

6.5.3 利水需要変化の想定

国内では利水需要量のうち半量以上を農業用水が占める⁵⁾ため、将来の利水需要変化を考慮する上では、農業用水の需要変化を想定することが重要と考えられる。ここで、将来の需要変化は、需要量の変化と需要期間の変化の両面での生起が想定される。文献調査⁶⁾等より、農業用水の将来変化予測について整理すると表 6.14 のとおり種々であり、将来の確定的なシナリオ設定は困難であると考えられる。このため、これらの将来変化の違いによる影響把握を行うことが重要であると考え、次項において条件設定した。

表 6.14 利水需要の将来予測

項目	将来変化予測	根拠	備考
需要量	増大	温暖化に伴い蒸発散量が増大することで水需要量が増大	物理的なシナリオ
	低下	国内の人口減少に伴い農地面積が減少	
需要期間	前進	温暖化に伴いかんがい始期が前進する	
	後進	米の出穂期の高温を回避するため田植時期が遅くなる	
	分散化	多品種栽培や経営面積の大規模化に伴い水需要時期が分散する	

6.5.4 検討ケース

前項での整理結果を踏まえ、検討ケースとして表 6.15 に示すケースを設定した。温暖化影響検討ケースは流況変化・堆砂進行・減水深増大に伴う水需要量増の条件である。また、適応策効果検討ケースは作付け期間のスライド等に伴う水需要期間を変化させた条件であり（図 6.48）、社会減影響検討ケースは将来の人口減少に伴う水需要減の条件である。

- ①温暖化影響検討ケース： 流況変化・堆砂進行・減水深増大に伴う水需要量増の条件
- ②適応策効果検討ケース： 作付け期間のスライドに伴う水需要期間を変化させた条件
- ③社会減影響検討ケース： 将来の人口減少に伴う水需要減の条件

表 6.15 検討ケース一覧

検討 ケース	温暖化影響 検討ケース			適応策効果 検討ケース						社会減影響 検討ケース
	Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3	Case 2-1	Case 2-2	Case 2-3	Case 2-4	Case 2-5	Case 2-6	Case 3
流況変化	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
堆砂進行*	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
需要量変化	×	×	20%増	×	×	×	×	×	×	30%減
需要期間変化	×	×	×	1ヵ月 前進	2ヵ月 前進	1ヵ月 後進	2ヵ月 後進	1ヵ月前進 かつ後進 (分散化)	2ヵ月前進 かつ後進 (分散化)	×

*堆砂進行考慮ケースは有効容量内堆砂率 50%とした

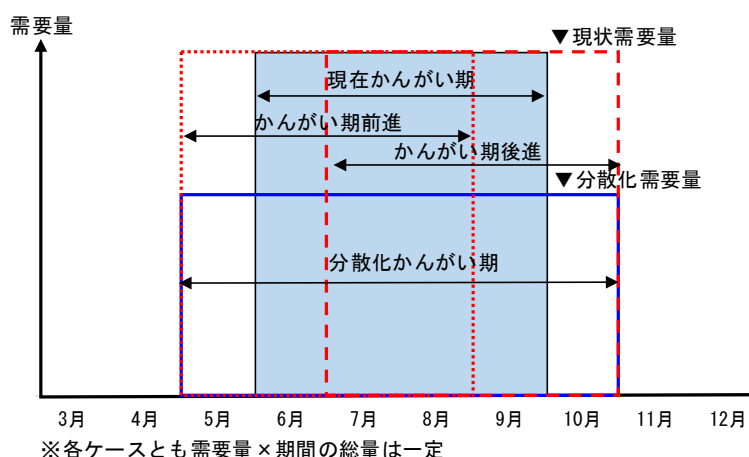


図 6.48 利水需要調整の概念図

6.5.5 評価方法

利水計算は、各ダムの利水補給ルールを参考に構築した利水計算モデルにより行い、河川流の流下や取水還元の時間差を考慮して半月計算を実施した。また、結果比較におけるバイアスを排除する目的で、実ダムでは考慮されている取水制限（貯水率低下とともに取水量を制限する条件）は設けないものとした。

評価は、評価期間におけるパンク日数（貯水位が最低水位まで低下する日数と定義）により行った。

6.5.6 検討結果

各検討ケースについてのパンク日数を図 6.49～図 6.53 に、貯水位変動曲線を図 6.54～図 6.61 に示す。これらの結果をもとに、以下に、利水需要の調整効果に関する検討結果について整理する。

(1) 需要量変化の効果分析

需要量変化ケースについてみると、温暖化が進行し、仮にかんがい需要量が 20%増加した場合には、堆砂が進行したダムにおいては、十分な利水機能が確保できないことがわかる。一方、将来の人口減少などにともない、仮に需要量が 30%減少した場合には、堆砂進行（有効容量内堆砂率 50%）の容量損失をカバーできるほどの結果となる。

(2) 需要時期変化の効果分析

適応策検討ケースについてみると、需要時期を前進させることの効果が確認できる。なお、1 ヶ月前進に比べて、2 ヶ月前進のケースの方がより効果的であることがわかる。また、需要時期を分散化させた場合にも、同様の効果が確認できる。一方で、需要時期を 1 ヶ月後進または 2 ヶ月後進させた場合には、パンク日数は増大傾向となり、需要時期の調整効果はみられない。

(3) 需要時期変化の効果に関する考察

適応策検討ケースの結果について、流量の影響、貯水容量の影響のどちらに起因するものであるのか、考察を加える。

図 6.62 には、かんがい期における検討対象 4 ダムの合計制限容量の平均値と、4 ダム群のパンク日数の関係を示すが、これをみると、4 ダム合計容量とパンク日数には一定の反比例関係（4 ダム合計容量が大きくなるとパンク日数が減少する傾向）が認められる。すなわち、需要時期をスライドさせることは、洪水期制限水位の期間との重複期間を減少させ、かんがい需要期のダム容量をできる限り大きくすることで、ダムのパンクを防ぐ効果があるものと考えられる。

また、図 6.63 には、かんがい期における上流 2 ダムの合計流入量の平均値と、4 ダム群のパンク日数の関係を示すが、これをみると、特にパンクが顕著に発生する「需要時期 1 ヶ月後進」「需要時期 2 ヶ月後進」のケースで、流入量とパンク日数の間に一定の反比例関係（上流 2 ダムの合計流入量が大きくなるとパンク日数が減少する傾向）が認められる。

さらに、図 6.64 には、かんがい期における上流 2 ダムの合計流入量（平均値）の各年値を示すが、特にパンクが顕著に発生する「需要時期 1 ヶ月後進」「需要時期 2 ヶ月後進」のケースで、2060 年以降に流入量が減少傾向にあることがみてとれる。

以上を整理すると、利水需要時期をスライドさせ、洪水期（洪水期制限水位により貯水位を低下させる時期）とずらし、利水容量を極力大きくすることで、パンク日数を減らすことに繋がる。また、パンク発生と流況にも一定の関係があり、今回の検討対象ダム群では、気候変動により将来の融雪出水時期が早まることが考えられるため、需要時期を前倒しするこ

とで流況悪化（これに伴うパンク発生の助長）はみられないものの、需要時期を後倒しすることによる流況悪化（これに伴うパンク発生の助長）が認められた。

(4) 今後の課題

かんがい需要により利水需要量の増大する期間（概ね4～9月）と、制限水位運用による貯水位低下時期との重複期間をさけることが効果的である。このため、需要時期調整に関する今後の課題としては、これを可能とするための、将来的な水利権変更に向けた利水需要期間スライド実施に資する基礎研究実施が考えられる。

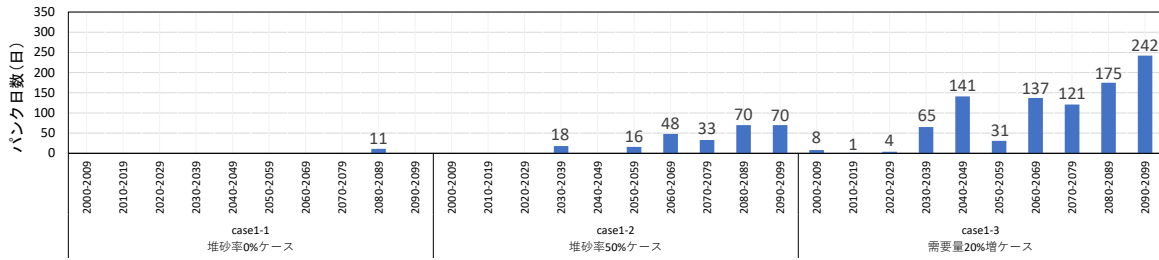


図 6.49 利水需要調整効果 (K ダム群パンク日数_case1-1,case1-2,case1-3 の結果)

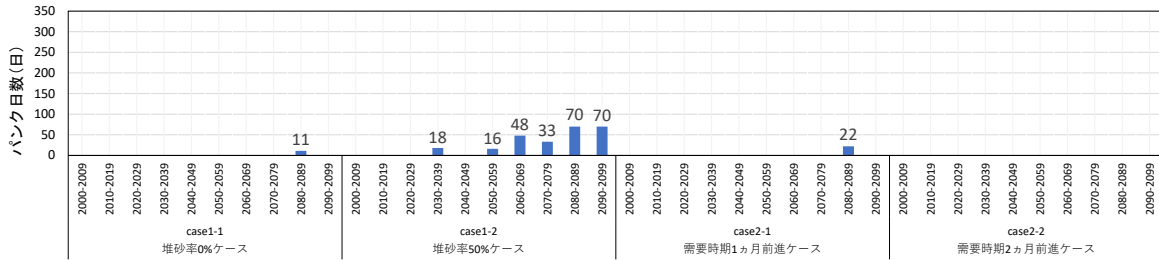


図 6.50 利水需要調整効果 (K ダム群パンク日数_case1-1,case1-2,case2-1,case2-2 の結果)

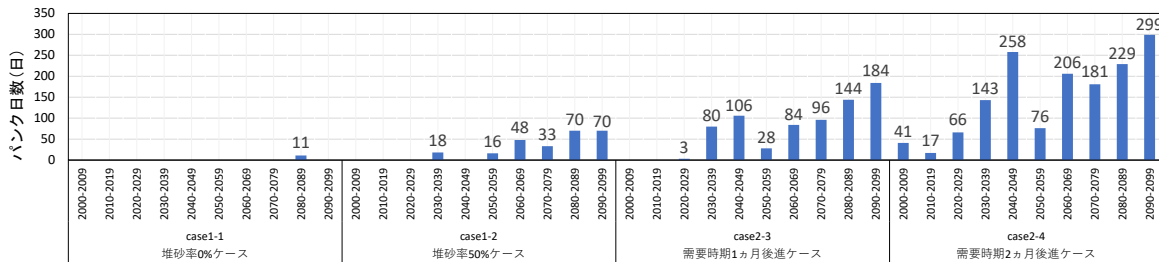


図 6.51 利水需要調整効果 (K ダム群パンク日数_case1-1,case1-2,case2-3,case2-4 の結果)

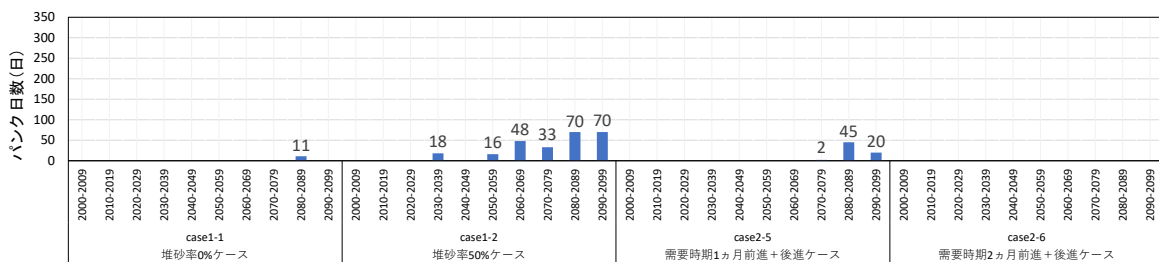


図 6.52 利水需要調整効果 (K ダム群パンク日数_case1-1,case1-2,case2-5,case2-6 の結果)

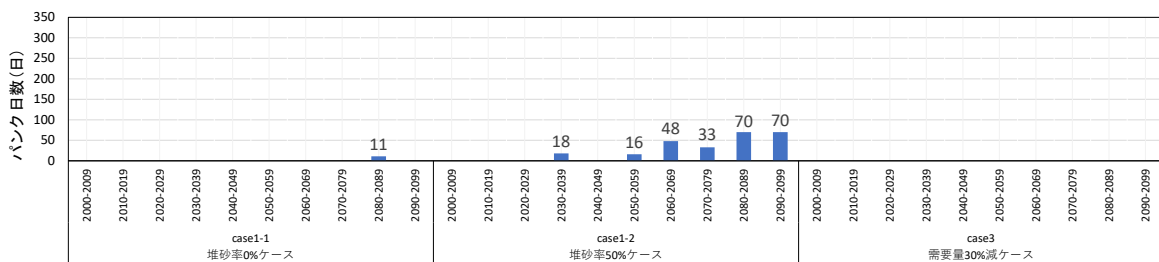


図 6.53 利水需要調整効果 (K ダム群パンク日数_case1-1,case1-2,case3 の結果)

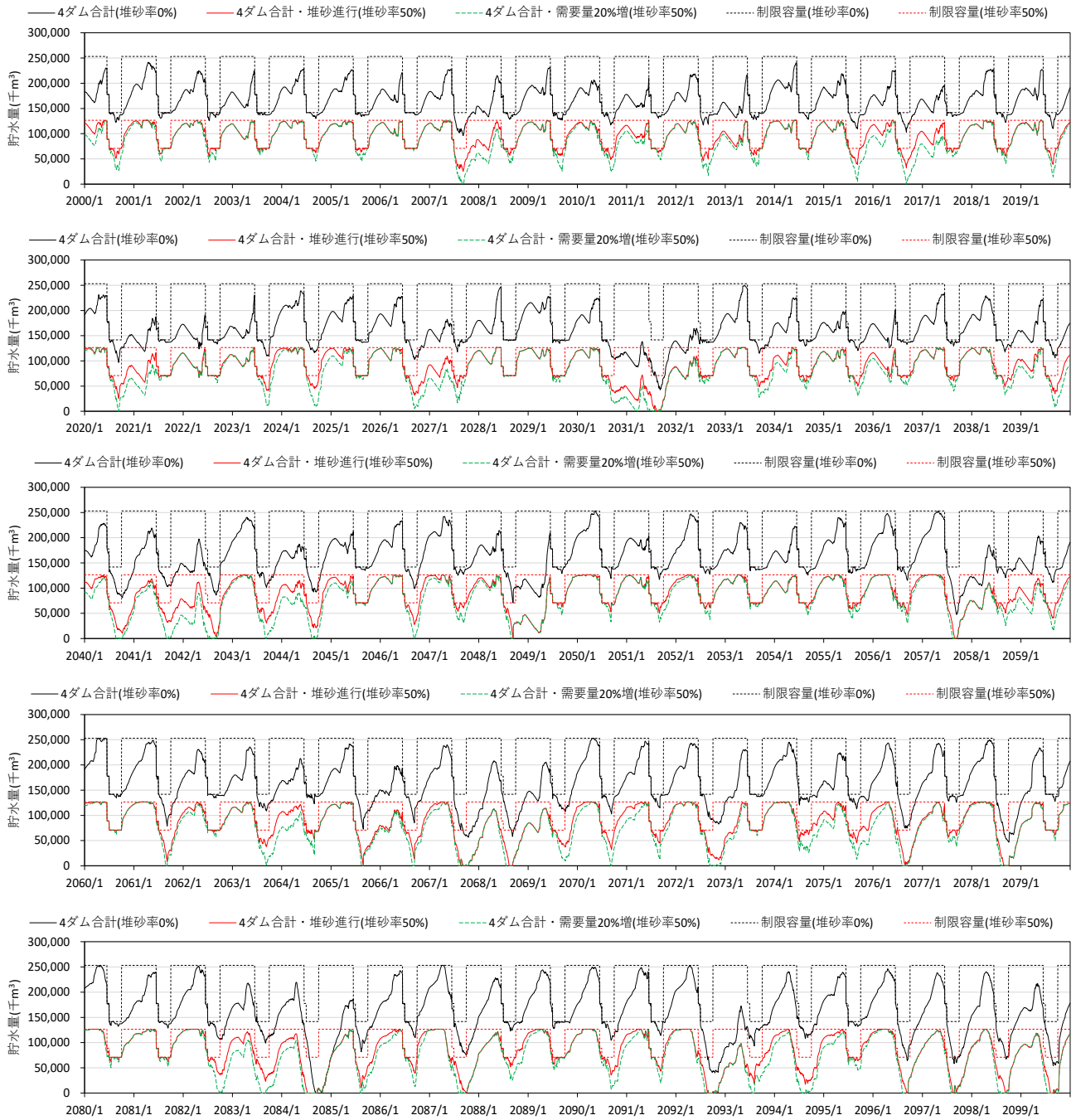


図 6.54 温暖化影響検討ケースによる貯水量変動曲線(1)
(case1-1,case1-2,case1-3 の結果)

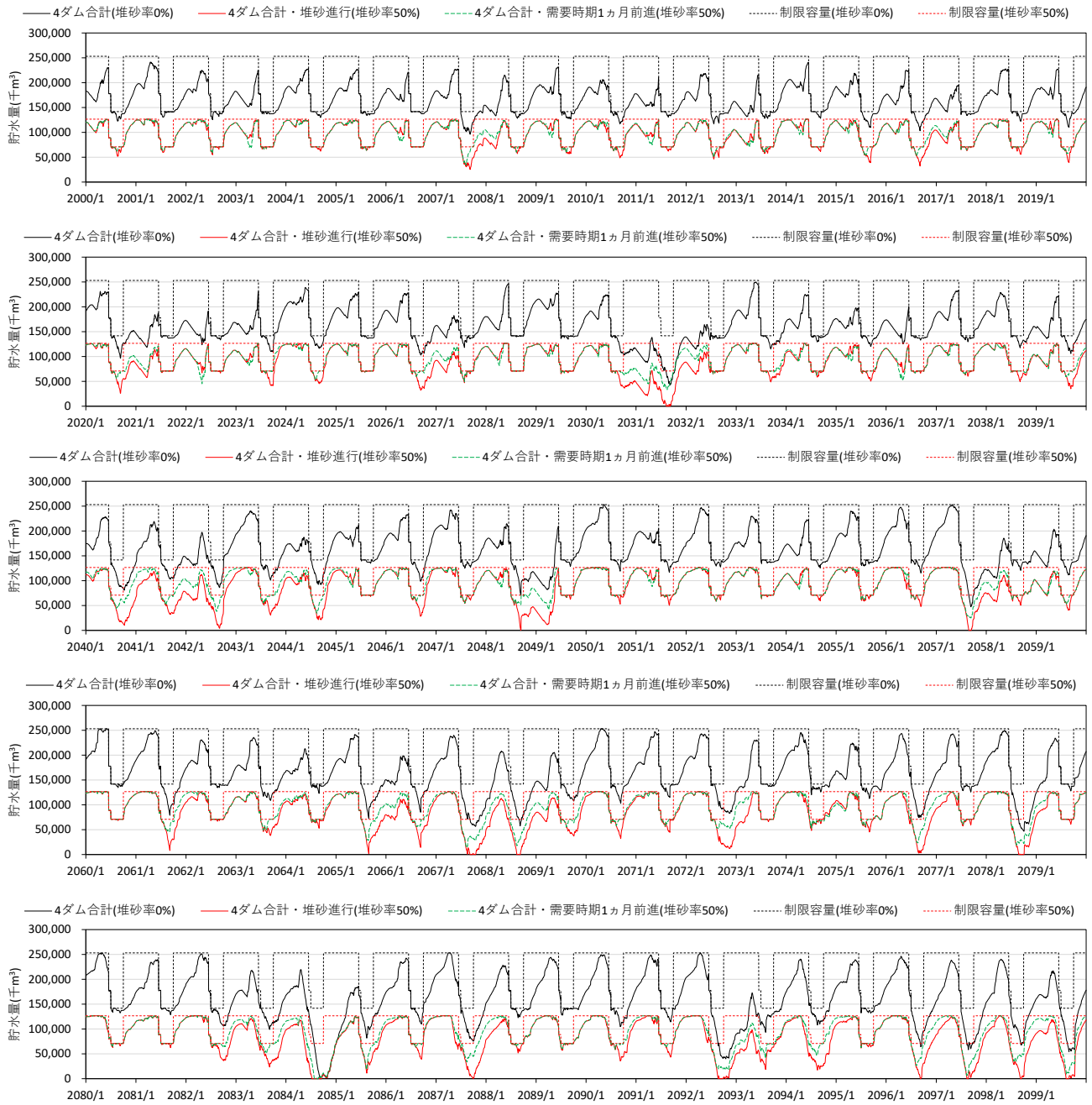


図 6.55 適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(2)
(case1-1,case1-2,case2-1 の結果)

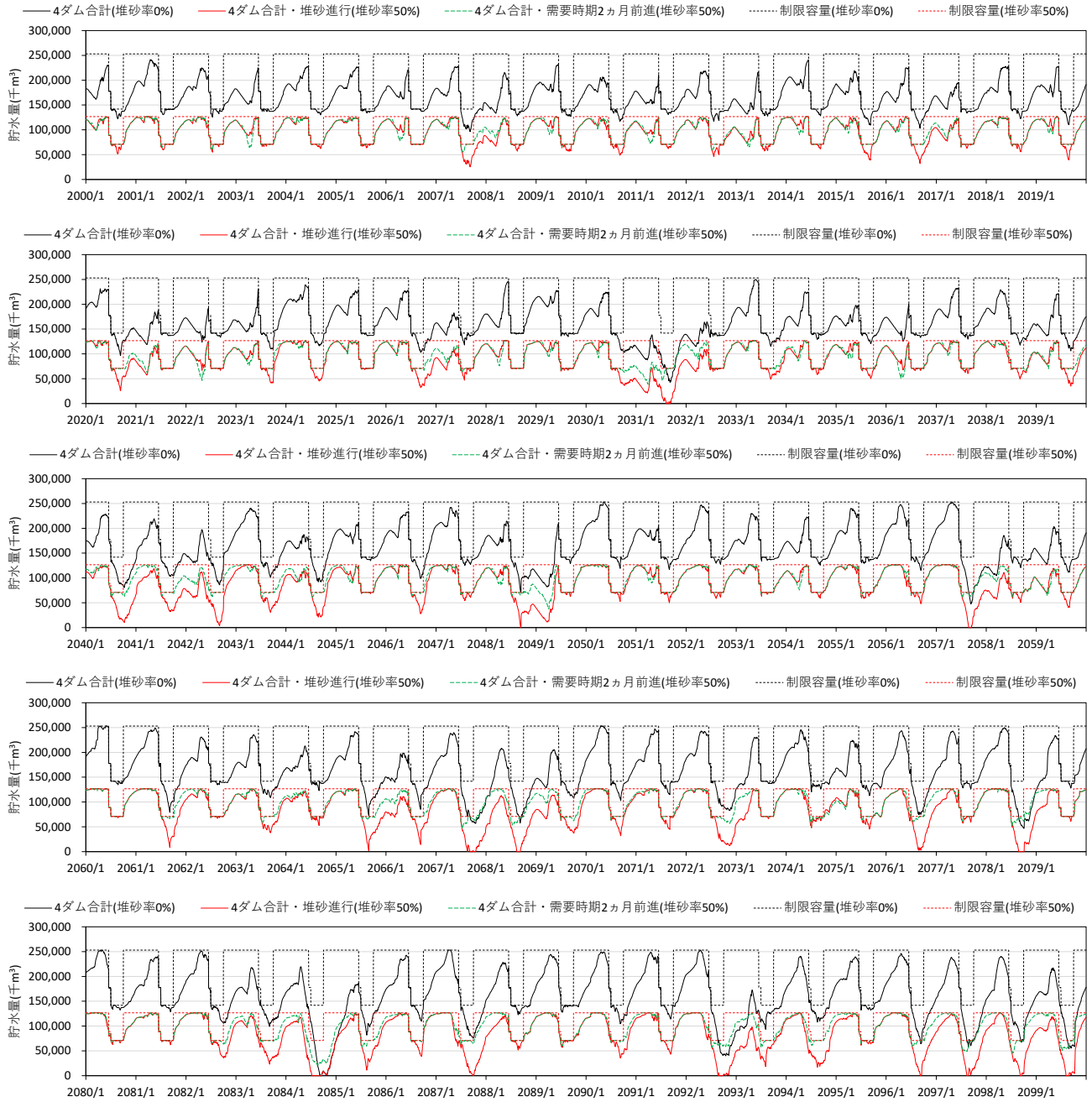


図 6.56 適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(3)
(case1-1,case1-2,case2-2 の結果)

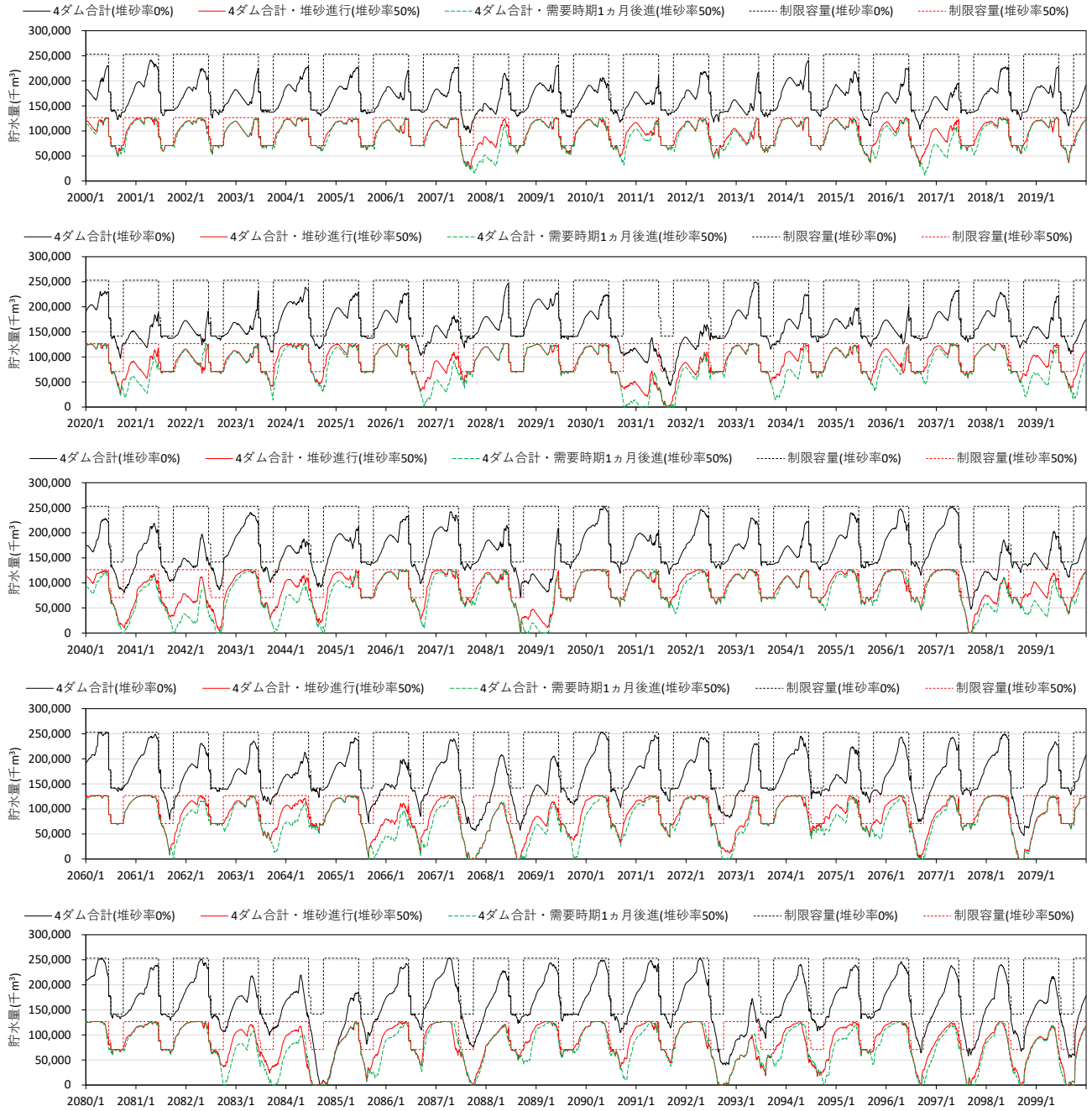


図 6.57 適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(4)
(case1-1,case1-2,case2-3 の結果)

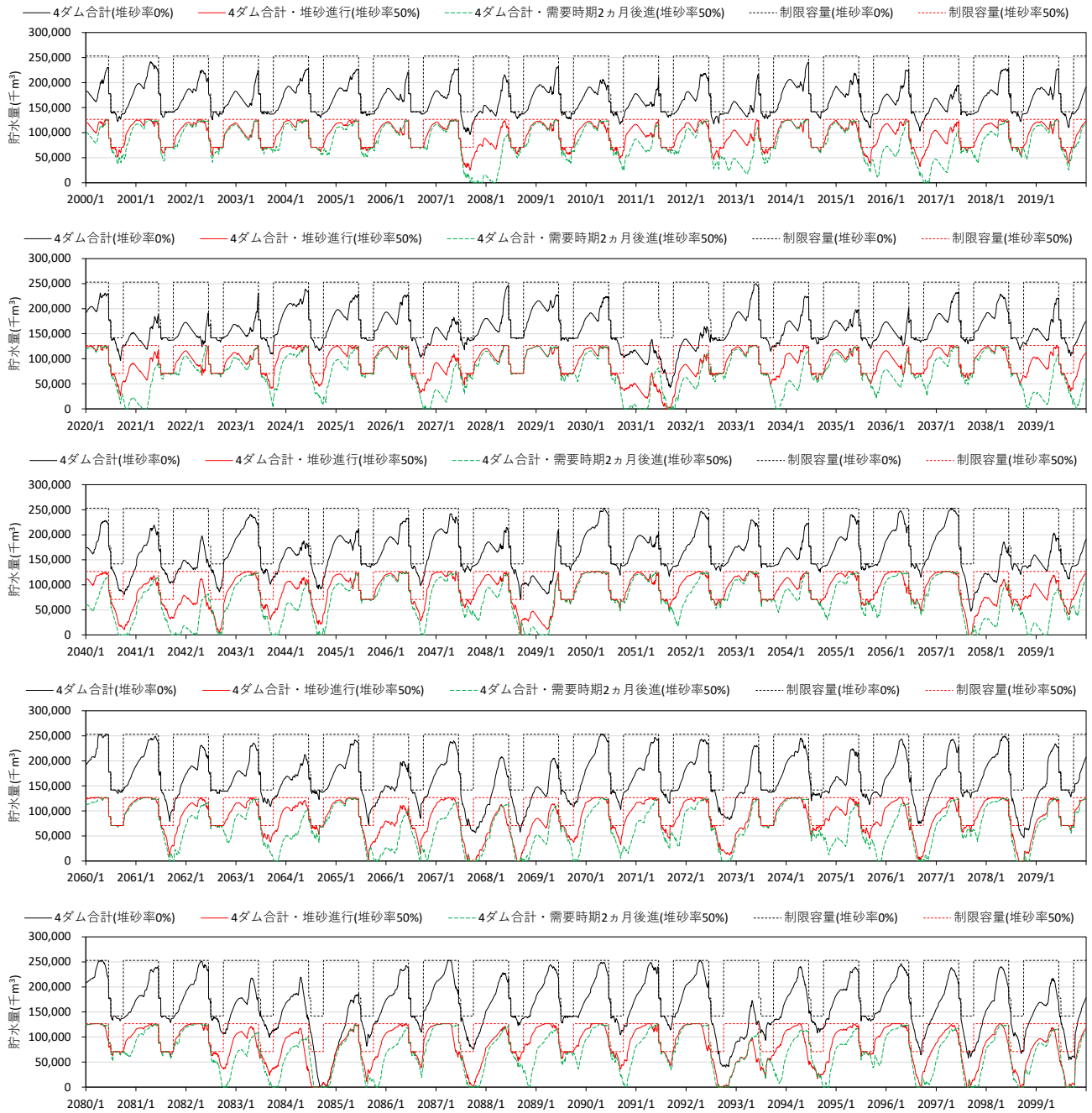


図 6.58 適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(5)
(case1-1,case1-2,case2-4 の結果)

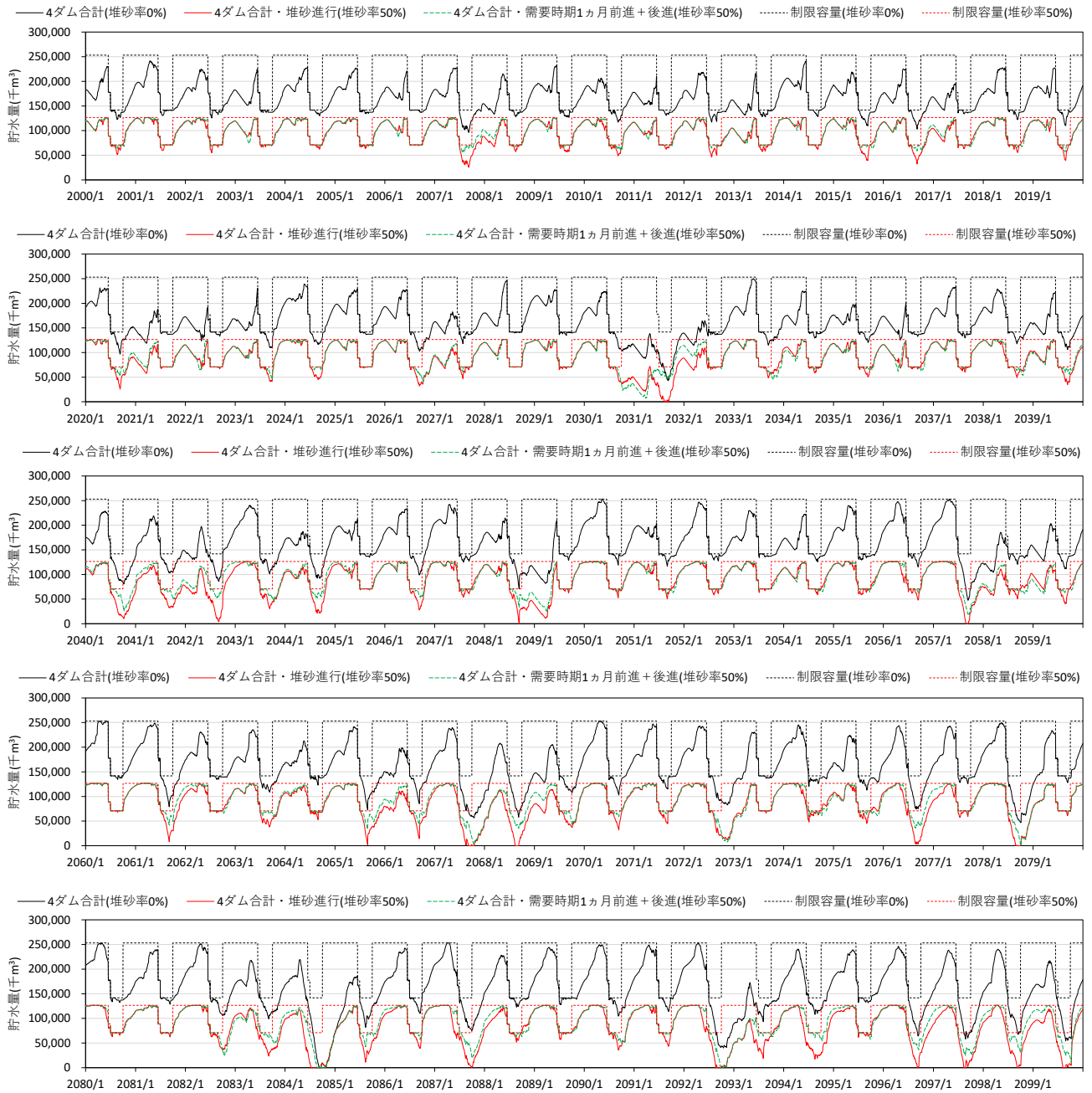


図 6.59 適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(6)
(case1-1,case1-2,case2-5 の結果)

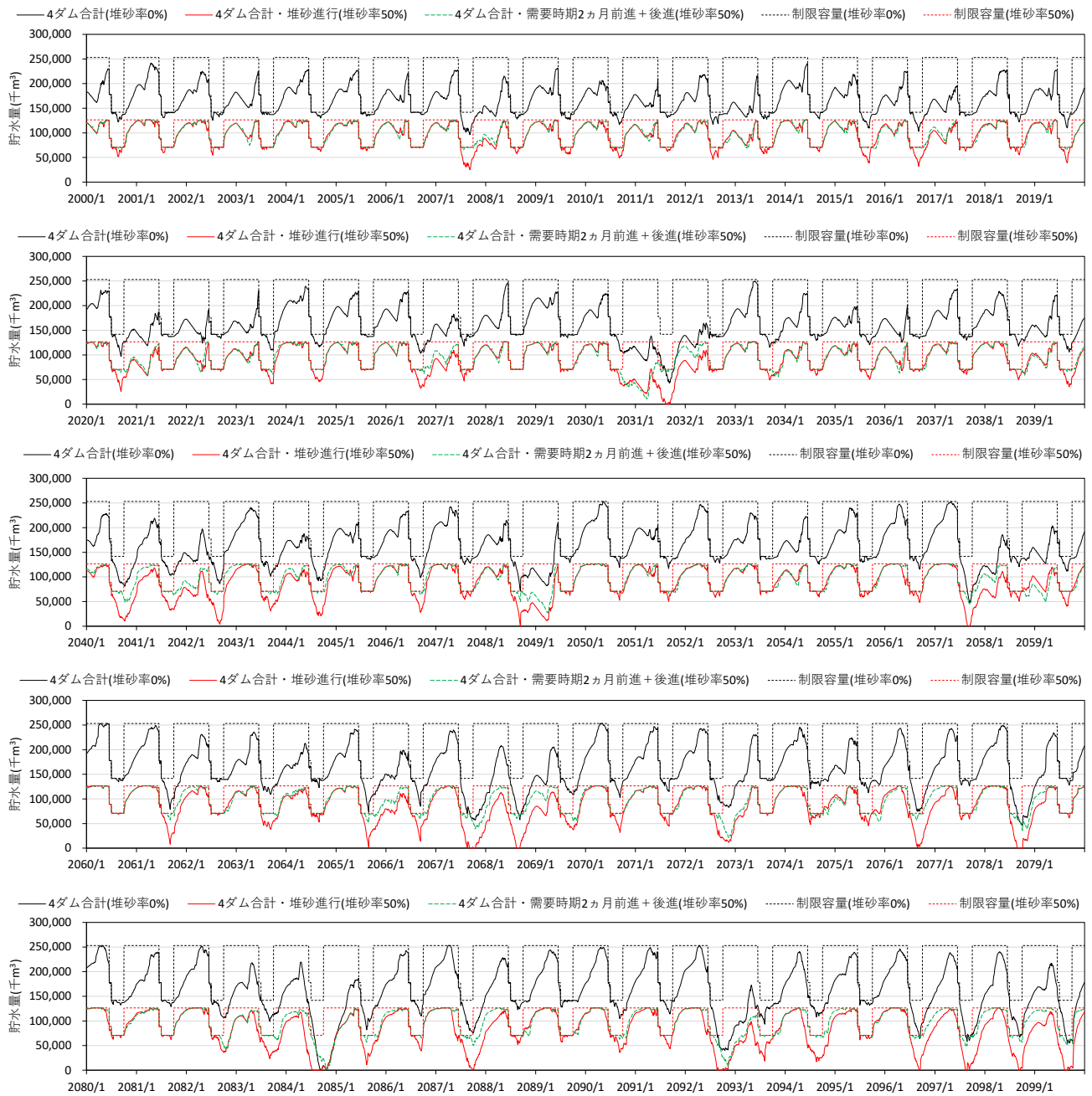


図 6.60 適応策効果検討ケースによる貯水量変動曲線(7)
(case1-1,case1-2,case2-6 の結果)

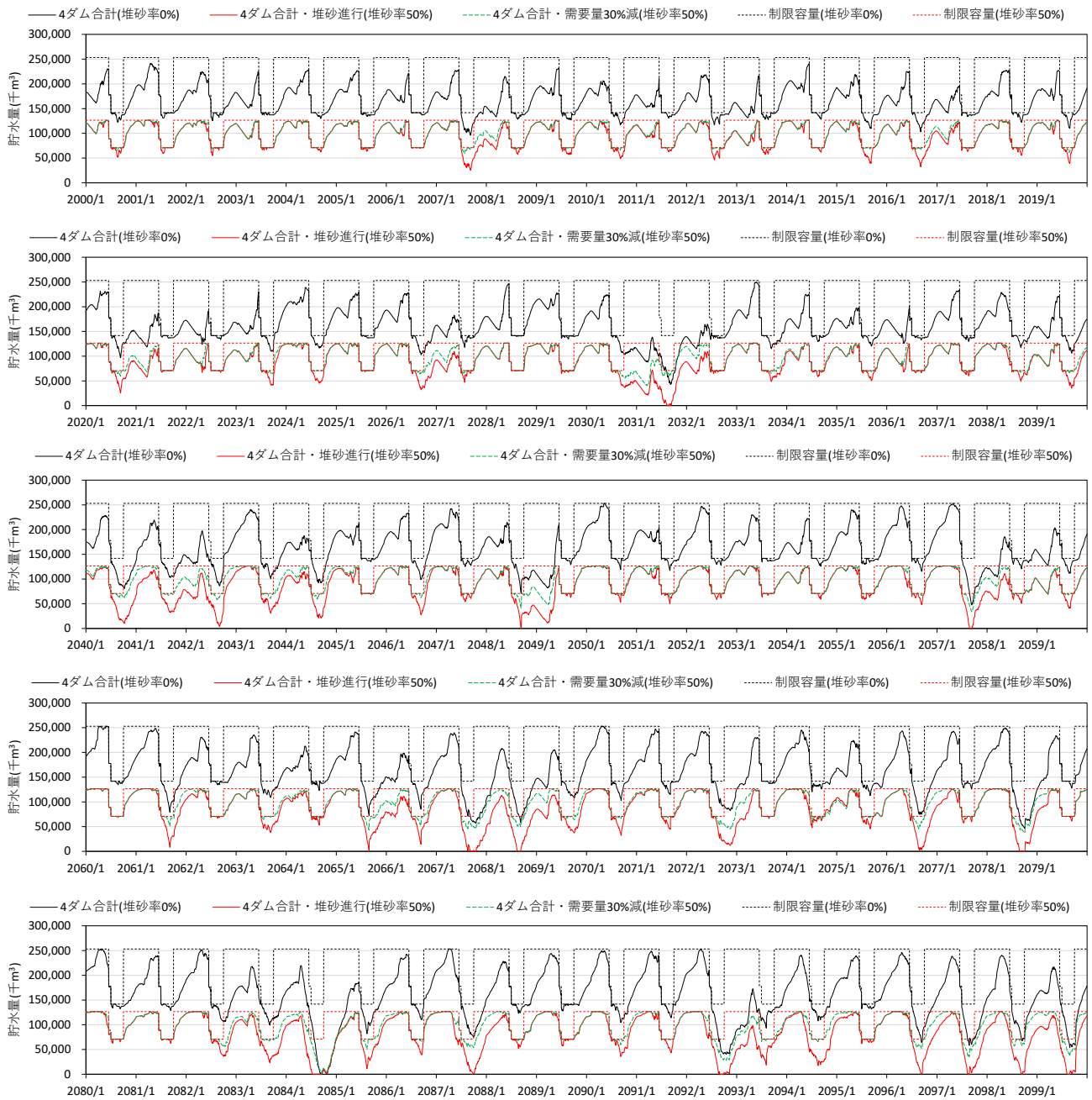


図 6.61 社会減影響検討ケースによる貯水量変動曲線(8)
(case1-1,case1-2,case3 の結果)

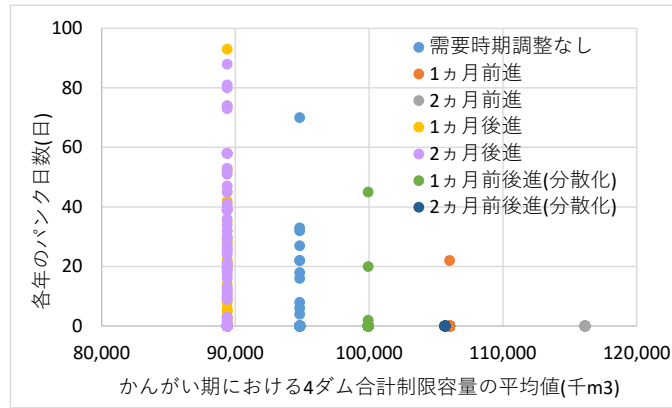


図 6.62 かんがい期における4ダム合計制限容量（平均値）とパンク日数の関係

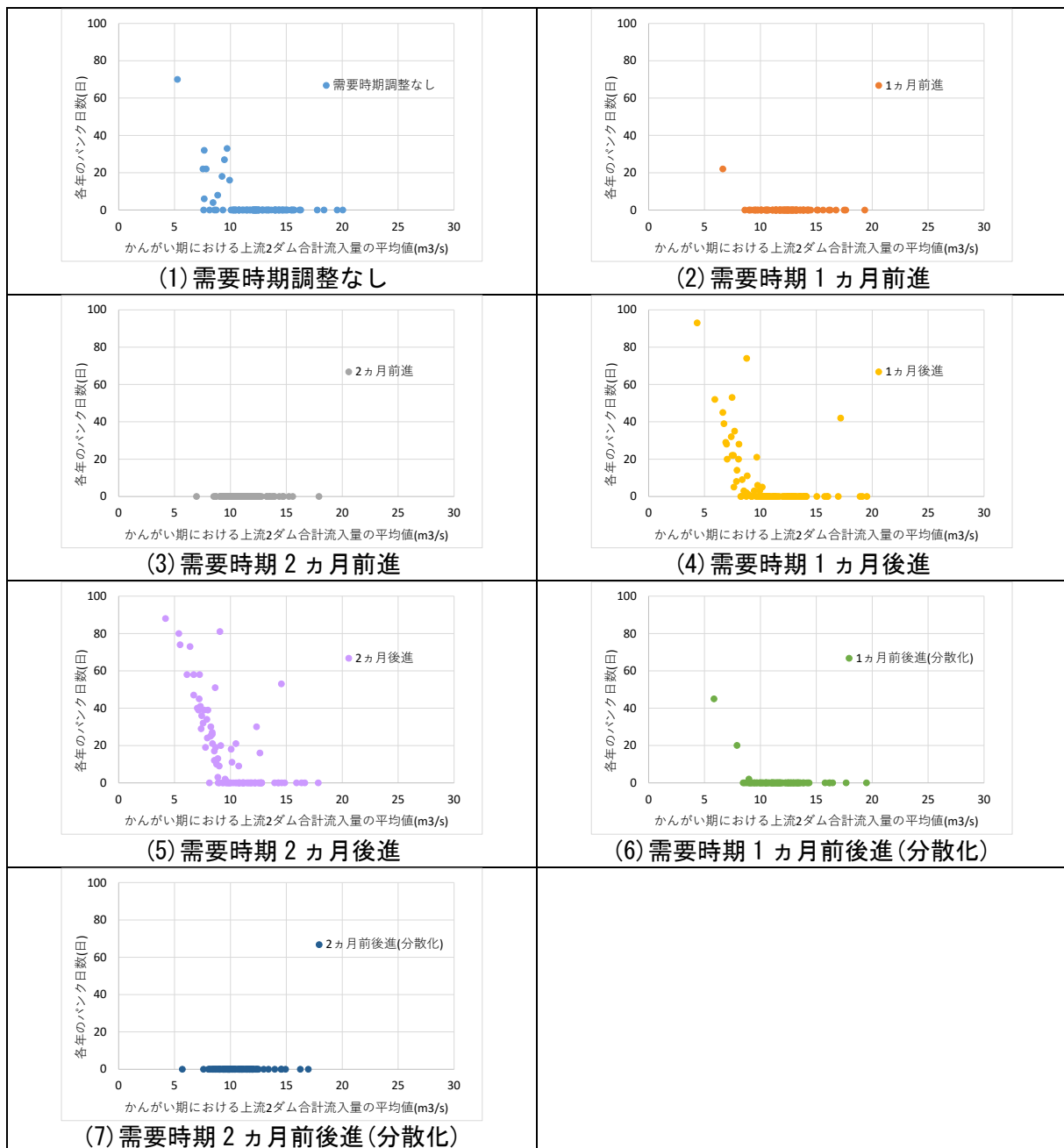


図 6.63 かんがい期における上流2ダム合計流入量（平均値）とパンク日数の関係

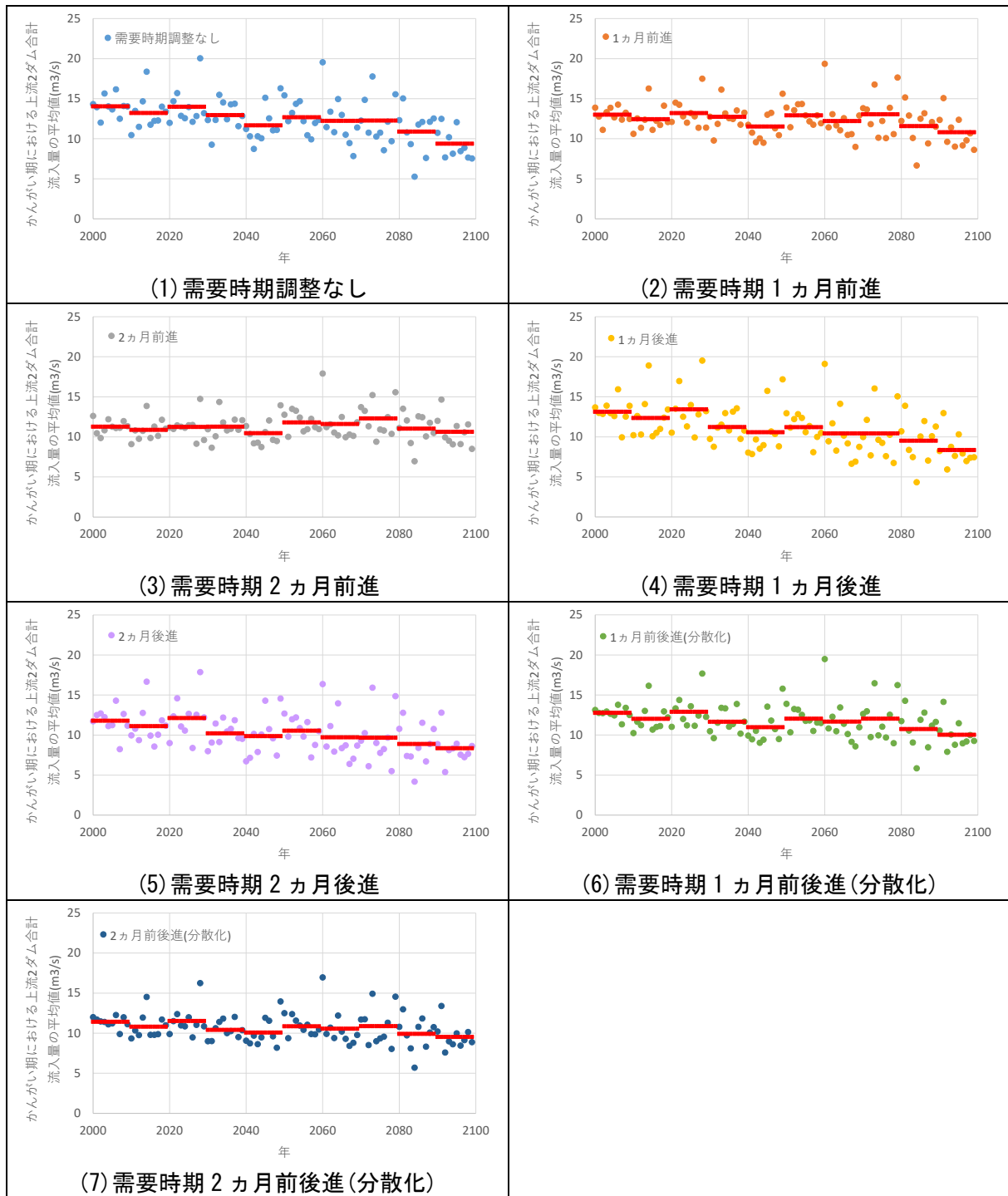


図 6.64 かんがい期における上流2ダム合計流入量(平均値)の各年値

6.6 結語

前章における気候変動と堆砂進行がダムの治水・利水機能に与える全国的評価によって、今後、ダムの治水機能へ負担をかけない利水機能の維持・向上が求められるダムが増大するものと考えられた。

このため、本章では、気候変動下において、利水需要者及び供給者（利水ダム）の適応策が求められるとの認識に立ち、ソフト・ハード対策両面から当該手法に関する検討を実施した。

本章で得られた結論及び課題は以下のとおりである。

(1) 供給者サイドのソフト対策に関する評価

- 1) 将来気候において、出水時の事前放流の実施を前提として、現状より貯水位を 3～5m 程度（相当雨量ベースで～30mm 程度）上昇させる操作が可能となれば、気候変動下においても利水機能低下を一定程度防ぐことが可能となる。ただし、事前放流によって貯水低下操作を実施した後に、渇水が発生し、上述の貯水位上昇操作が実施不可能となるような事態では、当該対策は有効とはならないことも想定される。
- 2) 将来において想定される損失容量に対する弾力的管理の実施可能性指標として、「185 日流況（平水流況）に着目した現在気候流況及び将来気候流況の差分」、「堆砂進行後の洪水期の利水容量内堆砂量」の合算値を用いることの妥当性が認められた。
- 3) 上記指標に着目して、全国のダムの類型化を行ったところ、全ダムの 37%では将来（2099 年時点を想定）において弾力的管理によりダムの利水機能の低下を緩和させる可能性を有する一方で、残りの 63%のダムでは弾力的管理によっても流況変化及び堆砂進行による容量損失分の回復が難しいものと考えられた。

(2) 供給者サイドのハード対策に関する評価

- 1) 堆砂により貯水容量が減少する一方で、冬期から融雪出水期に流入量が増加し、貯水できない無効放流が発生する。また、洪水期制限水位方式を採用しているダムでは、洪水期に常時満水位から水位を低下させるため、この時期に需要量以上の放流が行われる。これらの無効放流分を新規確保した貯水池に貯留できれば、利水安全度低下を防ぐことができる可能性がある。
- 2) 上記の対策手法として、治水目的の貯留とは異なるため、利水補給対象水系とは異なる水系に新規貯水池を設け、比較的小規模な導水施設によって当該貯水池に向けて導水・貯留を行うことも考えられる。また、新規貯水池を既設発電ダムの嵩上げによって確保するならば、利水安全度の向上に加え、嵩上げに伴う発電電力量の増大（電力上のメリット）、導水元ダムの事前放流時の空振りへの備え（治水上のメリット）も得られる可能性がある。
- 3) 以上より、流域全体さらには隣接流域も含め利水容量のストックとして活用可能なダム、新規サイトや施設増強可能な既存施設を見出し、無効放流の貯留により、長期渇水に向けた事前対応を図ることが求められる。

(3) 需要者サイドの需要調整に関する評価

- 1)特に夏期に貯水位を制限水位まで低下させるようなダムでは、ダムの利水機能への影響は、洪水期における利水需要量の増減や分散化が大きく寄与する。
- 2)さらに、将来の流況変化及び堆砂進行により、ダムの利水機能が低下するが、将来の利水需要量が現状の30%程度低減した場合には、ダムの利水機能は現状と同等程度を維持可能であることを確認した。
- 3)このため、今後、ダム再生検討を合理的に進める上では、将来の利水需要変化の研究を進め、治水・利水両面からダム容量の最適化を図ることの重要性が示唆された。

(4) ダムの再類型化

- 1)流況変化に関わる指標と堆砂進行に関わる指標の足し合わせによって設定した指標により、全国の国土交通省・(独)水資源機構が所管するダムの再類型化を行った結果、全ダムの37%では将来(2099年時点を想定)において弾力的管理によりダムの利水機能の低下を緩和させる可能性を有する(I型)。
- 2)一方で、残りの63%のダムでは弾力的管理によっても流況変化及び堆砂進行による容量損失分の回復が難しいものと考えられる(II型)。
- 3)地域的な傾向を確認すると、北海道ではI型の割合が多い、一方で、関東・北陸・中部・四国地方ではII型の割合が多い。

今後の課題は以下のとおりである。

- 1)気候変動予測の不確実性も想定されることから、複数の全球大気モデル、温室効果ガス排出シナリオ、流出モデルによる影響評価を実施し、将来気候におけるダムの利水機能の変化幅を把握する。
- 2)利水検討に用いた計算流量の低水領域におけるより精度の高いバイアス補正を実施する。
- 3)気候変動下における流況変化に加え、ダム貯水池内堆砂進行速度の予測も実施し、将来におけるダムの利水機能低下について、より定量的な予測を実施する。
- 4)気象予測精度、ダム貯水池への流入量予測精度を向上させ、ダムの利水機能の増強に一定程度有効であると考えられる弾力的管理の実現性向上を図る。
- 5)渇水がもたらす経済的影響の評価手法を構築し、ダムの利水機能の増強に関わるコストと得られるベネフィットの関係を比較可能となるようにする。

参考文献

- 1) Mizuta, R., Oouchi, K., Yoshimura, H., Noda, A., Katayama, K., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Kawai, H. and Nakawaga, M.: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model, *J. Meteorol. Society Japan* 84, pp.165–185, 2006.
- 2) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A.: Classification of CMIP5 Future Climate Responses by the Tropical Sea Surface Temperature Changes, *SOLA 10*: pp.167-171, 2014.
- 3) Kojiri, T. (2006): Hydrological river basin assessment model(Hydro-BEAM). In: *Watershed Models* (ed. by V. P. Singh & D. K. Frevent), 613-626. Taylor & Francis, CRC Press: Florida.
- 4) Sato, Y., Kojiri, T., Michihiro, Y., Suzuki, Y. and Naka-kita, E.,(2013): Assessment of climate change impact on river discharge using the super-high resolution MRI-AGCM. *Hydrol. Process.* 27: 3264-3279.
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局水資源部：農業用水の取水・利用の特徴，2019.11.
- 6) 例えば，農林水産省農村振興局：食料・農業・農村政策審議会 農業農村振興整備部会報告 農業水利について，2013.

7. 結論

本論文では、今後、気候変動に伴う流況変化、堆砂進行に伴う貯水池容量の減少が予想される中、治水対策を中心としたダム再生事業に加え、利水対策も重要視すべきではないかというスタンスのもと、検討を開始した。本研究により、今後、多目的ダムの利水機能の低下が想定される結果となり、その適応策についての検討についても実施した。本研究で得られた結論は以下に示すとおりである。なお、研究の前提において、将来の水需要の増減について未考慮としたことは、今後の課題である。

2章では、将来の流況変化やダム貯水池内堆砂進行などの気候変動影響を考慮した場合におけるダムの利水機能評価に関わる先行研究をレビューした上で、現状の研究課題の抽出を行った。この結果、将来のダムの利水機能の変化及び対策必要ダムをスクリーニングする上で有効な手法と考えられる「簡易な評価手法」は認められないことを把握した。また、ダムの利水機能変化を踏まえた適応策に関わる既往検討については、ダムの操作面からの検討事例が複数認められるものの、ダムのハード面からの合理的な対応策は認められないことを確認した。このため、これらの研究課題の解決が必要であるとの認識のもと、本研究を開始することとした。

3章では、個別ダム、及び複数ダムからなる多目的ダム群を検討対象に気候変動に伴う流況変化やダム堆砂進行の複合影響を考慮した利水機能変化に関する詳細検討を行った。この結果、将来の流況変化及び堆砂進行により、制限水位まで水位低下操作を実施する洪水期においてダムの利水機能が低下する傾向を確認した。特に、有効容量内堆砂率 30%を境界に利水機能低下が顕著になる傾向を確認し、当現象がダムによらずに生じる可能性が示唆された。また、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM3.2S) による 150 年連続ラン (計算期間: 1950 ~ 2099 年) に基づく将来流況を整理した結果、2060 年以降から、温暖化に伴う融雪出水の早期化に起因し、冬期から春期にかけて河川流量が増加する一方で、春期から夏期にかけての河川流量が減少する傾向を確認した。上記の流況変化の結果、本研究で対象としたダム群におけるパンク日数は 2060 年頃から増大する傾向が認められた。さらに、将来気候においては、連続する複数年における洪水期において、貯水池のパンク、あるいは、最低水位付近までの貯水位低下がみられる年があり、将来において複数年渇水が発生する可能性が示唆された。なお、無効放流が発生する時期は、2060 年頃までは、洪水期 (制限水位まで水位低下操作を実施する期間) が主である。2060 年頃からは、洪水期に比べて非洪水期における無効放流量 (融雪出水の無効放流) が相対的に増大する傾向がみてとれた。これは、前述のとおり、将来気候における河川流況変化によるものと考えられた。

4章では、3章の結果を受けて、将来の気候変動に伴う流況変化によって生じる将来のダム機能変化を予測することが重要であるとの認識に立ち、利水機能評価指標の立案を行うとともに、当該評価指標の妥当性検討を行った。具体的には、流況変化から簡易に設定される利水機能評価指標 (所定の流量を下回る現在気候流量積算値と将来気候流量積算値の比率) を設定し、この妥当性について、異なる地域特性を有する複数の個別ダムによる利水計算に基づき確認した。この結果、利水機能変化指標 (かんがい期 (4~9 月) における現在気候の 185 日流量を下回る現在気候流量積算値と将来気候流量積算値の比率) > 1 の場合には気候変動によって現状よりダムの利水容量が不足する傾向が認められ、設定した指標の妥当性を確認した。

5章では、3章、4章の検討結果をもとに、将来において国内のどの程度のダムで利水機能の変化が生じるかの予測を試みるため、ダムの類型化を実施した。なお、多目的ダムの利水機能の維持・向上を図る上では、ダムの治水・利水容量の最適配分が行われることが重要であるとの認識に立ち、将来におけるダムの治水・利水機能の変化に関わる類型化についても実施した。この結果、2099年時点で、将来において下流河川への利水補給量の増加が想定され、かつ有効容量内堆砂量が10%以上のダムは全ダムの約52%であり、これらのダムについて、貯水池運用の工夫によっても気候変動の影響の軽減が難しいダムに分類されるものは、全ダムの約20%であることを確認した。また、当該類型に相当するダムを地域別に確認すると、特に関東地方、中部地方、四国地方のダムが多く該当することを確認した。利水類型のみならず、治水類型も考慮した結果、全ダムの約26%は、気候変動及び堆砂進行に伴うダムの治水・利水機能への影響は、貯水池運用の工夫によって影響緩和を図ることができるものと考えられ、これらの影響に対して弾力的管理の実施が考えられた。一方、全ダムの約74%は、気候変動及び堆砂進行に伴うダムの治水・利水機能への影響に対して上述したダムの弾力的管理では不十分となり、ダム嵩上げ等のハード対策を主とした適応策の実施が考えられた。ただし、貯水池内の浚渫などを実施し、堆砂進行に伴う有効容量の損失を緩和することで、上記結果は変わり得ることに留意が必要となる。

6章では、5章の結果を受けて、気候変動下において、利水需要者及び供給者（利水ダム）の適応策が求められるとの認識に立ち、ソフト・ハード対策両面から当該手法に関する検討を実施した。この結果、事前放流の実施を前提として、現状より貯水位を3～5m程度（相当雨量ベースで～30mm程度）上昇させる操作が可能となれば、将来気候において利水機能低下を一定程度防ぐことが可能となることを確認した。将来において想定される損失容量に対する弾力的管理の実施可能性指標として、「185日流況（平水流況）に着目した現在気候流況及び将来気候流況の差分」、「堆砂進行後の洪水期の利水容量内堆砂量」の合算値を用いることの妥当性が認められた。上記指標に着目して、全国のダムの類型化を行ったところ、全ダムの37%では将来（2099年時点を想定）において弾力的管理によりダムの利水機能の低下を緩和させる可能性を有する一方で、残りの63%のダムでは弾力的管理によっても流況変化及び堆砂進行による容量損失分の回復が難しいものと考えられた。ただし、当該対策は出水後に渇水が発生する事態では当該対策は有効とはならないことも想定されるため、抜本的な解決策ではなく、補助的対策であると考えられる。一方で、堆砂により貯水容量が減少する一方で、冬期から融雪出水期に流入量が増加し、貯水できない無効放流が発生するとともに、洪水期制限水位方式を採用しているダムでは、洪水期に常時満水位から水位を低下させるため、この時期に需要量以上の放流が行われるため、これらの無効放流分を新規確保した貯水池に貯留できれば、利水安全度低下を防ぐことができる可能性がある。この対応として、治水目的の貯留とは異なるため、利水補給対象水系とは異なる水系に新規貯水池を設け、比較的小規模な導水施設によって当該貯水池に向けて導水・貯留を行うことも考えられた。また、新規貯水池を既設発電ダムの嵩上げによって確保するならば、利水安全度の向上に加え、嵩上げに伴う発電電力量の増大（電力上のメリット）、導水元ダムの事前放流時の空振りへの備え（治水上のメリット）も得られる可能性があることを示した。なお、需要側の対策となるが、ダムの利水機能への影響は、貯水位を制限水位まで低下する洪水期における利水需要量の増減や分散化が大きく寄与することも確認した。

以上より、将来のダムの利水機能低下を防ぐためには、堆砂対策を進めるとともに、流域全体で利水容量のストックとして活用可能なダムや新規サイトを見出し、無効放流の貯留により、長期渇水に向けた事前対応を図ることが求められるものと考えられる。また、今後、ダム再生検討を合理的に進める上では、将来の利水需要変化の研究を進め、治水・利水両面からダム容量の最適化を図ることの重要性が示唆される（図 7.1）。

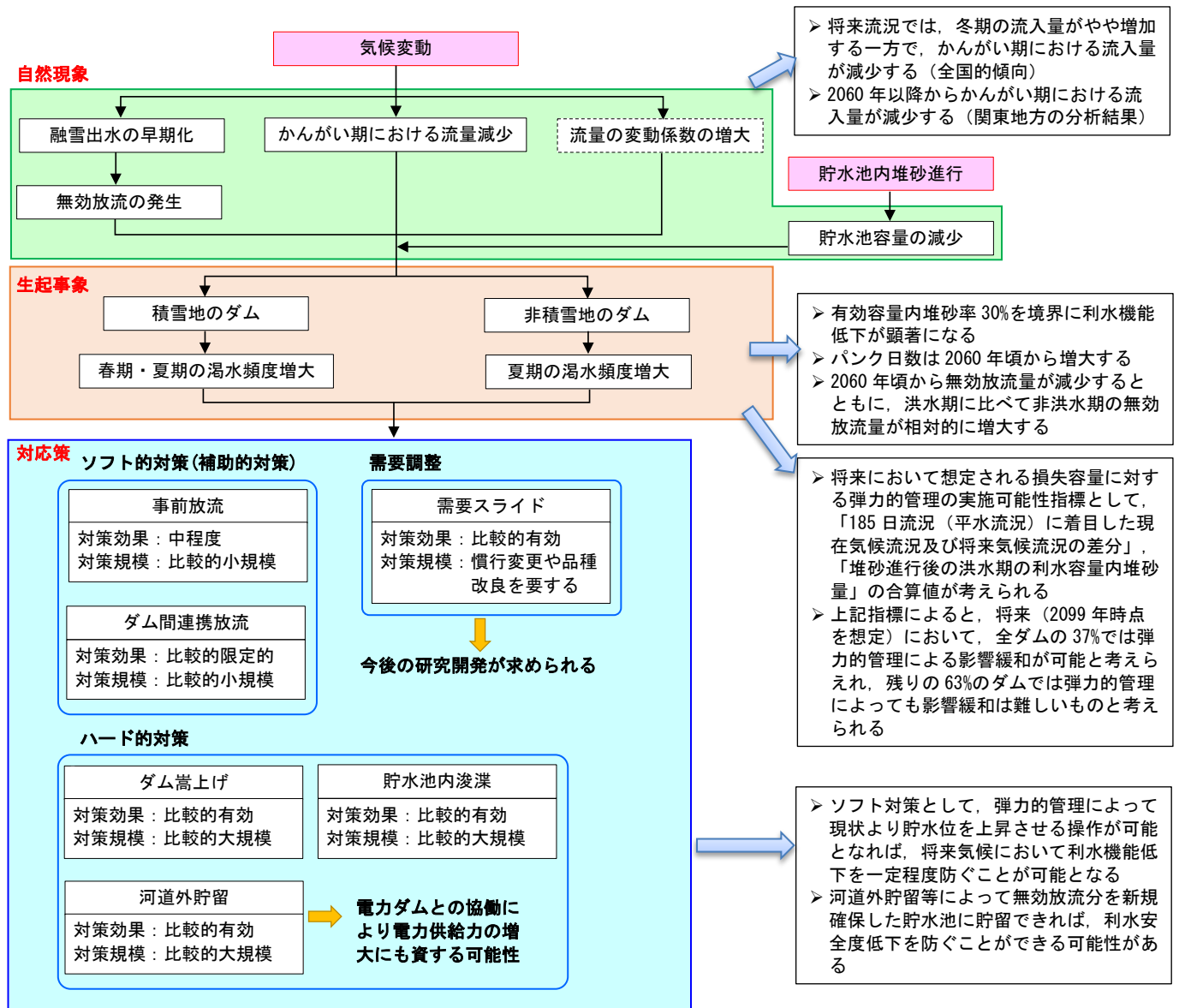


図 7.1 気候変動及び堆砂進行による多目的ダムの利水機能変化への影響と対応策

最後に、気候変動下及びダム貯水池内堆砂が進行する中で、将来のダムの利水機能低下に対する備えを図る観点から、各主体が実施すべき事項を以下にとりまとめる。

■利水供給者（ダム管理者）が実施すべき事項

- 本研究では、将来、利水上の観点から必要となるダム容量を「河川流況」及び「貯水池内堆砂量」を用いて簡易に推定することを示した（なお、後者については、前者の河川流況から簡易に推定することが可能と考えられる）。これを用い、対策立案の観点から、将来のいつの時点で、どの程度のダム容量が利水上、不足するか事前把握することが求められる（評価例を図 7.2 に示す）。
- 上記の不足を現行施設のソフト面での対応（ダム弾力的管理による貯水位上昇操作）で対応可能か、確認することが求められる。
- 従前は実施されてこなかった、ダム弾力的管理による貯水位上昇操作が、利水機能向上の観点から一定程度有効であることが明らかになったため、これを実施できるよう取り組みを行うべきである。
- 利水需要の多くを占めるかんがい需要時期を、夏期制限水位まで貯水位低下させる洪水期とずらすことがダムの利水機能保全上、有効であるため、これを実施可能となるような弾力的な水利権設定（ex. 気象予測・流況予測を踏まえた可変的水利権設定）に関わる制度設計を行うべきである。
- ソフト面での対応で対応が困難と予想される場合には、嵩上げ等のハード面での利水機能増強策を検討すべきである。この際、本研究で示した流域外導水等も含めた総合的な評価を実施すべきである。なお、貯水池内堆砂進行をコントロールし、将来の利水機能低下を極力緩和させることも重要である。

■利水需要者（主にかんがい需要者）が実施すべき事項

- 気候変動下においては、利水供給者（ダム管理者）の対応だけでは、利水供給を満足に実施し得ない状況も想定される。このため、これへの対応として、気象予測・流況予測を踏まえたかんがい時期のスライドの有効性を認識するとともに、これの実施の心構えを行っておくべきである。

■上記に関する研究者

- 気候変動下における流況変化に加え、ダム貯水池内堆砂進行速度の予測も実施し、将来におけるダムの利水機能低下について、より定量的な予測を実施する。
- 気象予測精度、ダム貯水池への流入量予測精度を向上させ、ダムの利水機能の増強に一定程度有効であると考えられる弾力的管理の実現性向上を図る。
- 渇水がもたらす経済的影響の評価手法を構築し、ダムの利水機能の増強に関わるコストと得られるベネフィットの関係を比較可能となるようにする。

以上を模式的に表したものを図 7.3 に示す。

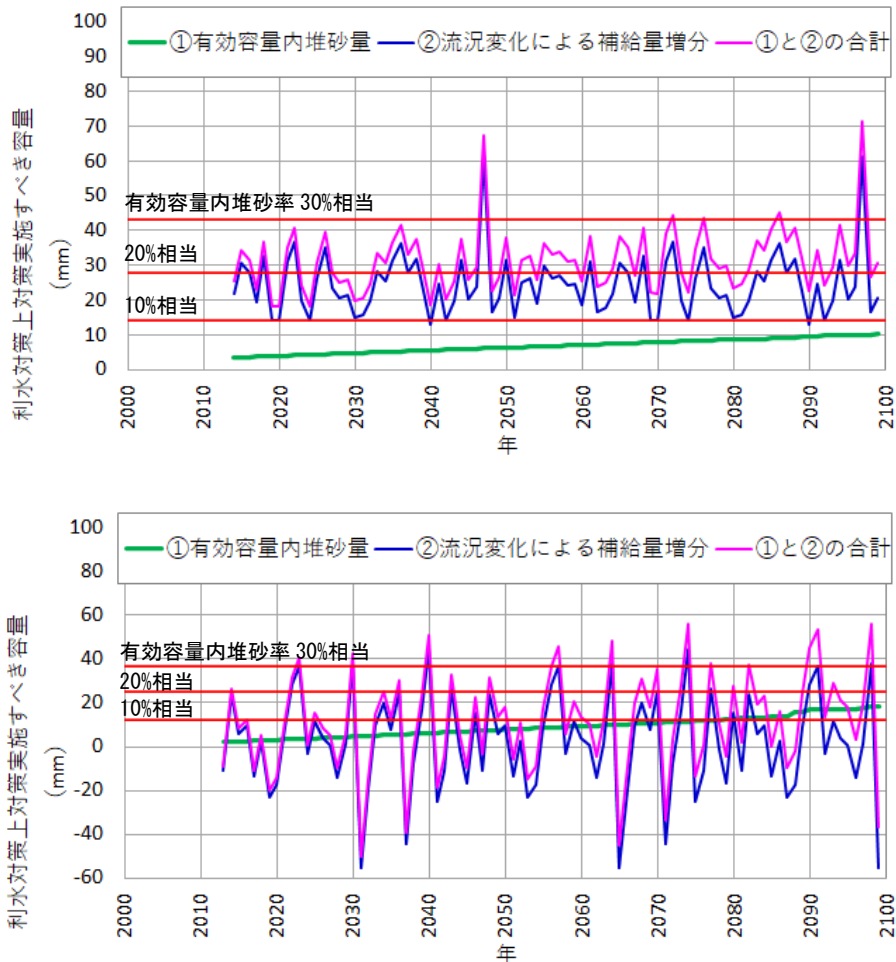


図 7.2 本研究で設定した評価指標を用いた長期的利水機能評価案
(上図：A ダム，下図：B ダム)

【長期的利水機能評価案】

(1) 検討対象ダム

「3.3 個別ダムを対象とした影響検討」で対象としたAダム（中国地方），Bダム（北海道）。

(2) 将来流況の予測手法

「3.3 個別ダムを対象とした影響検討」で示した「気候変動係数（半旬）」を用いた。
ただし，Aダムについては1968年～2017年の実績流量に，Bダムについては1981年～2014年の実績流量に各ダムの「気候変動係数（半旬）」を掛け合わせることで算定。

(3) 将来堆砂量・堆砂形状の予測手法

「3.3 個別ダムを対象とした影響検討」で示した「将来流況ケース」を用いた。

(4) 評価方法

「6.3.7 検討結果を踏まえたダムの類型化指標の設定（ダムの再類型化）」で示した「将来気候条件において利水上対策実施すべき容量の想定値（相当雨量換算）」を用いた。

(5) 評価結果

有効容量内堆砂率 30%を閾値として考えた場合，Aダム・Bダムともに，流況変化のみの影響では当該閾値を下回る年もあるが，堆砂進行影響も加味した場合には，当該閾値を超過する年が認められる（＝気候変動及びダム堆砂進行の複合影響）。なお，Bダム（北海道）では，将来流況が改善され，年によっては現状よりもダムの利水機能が向上する可能性も有する。

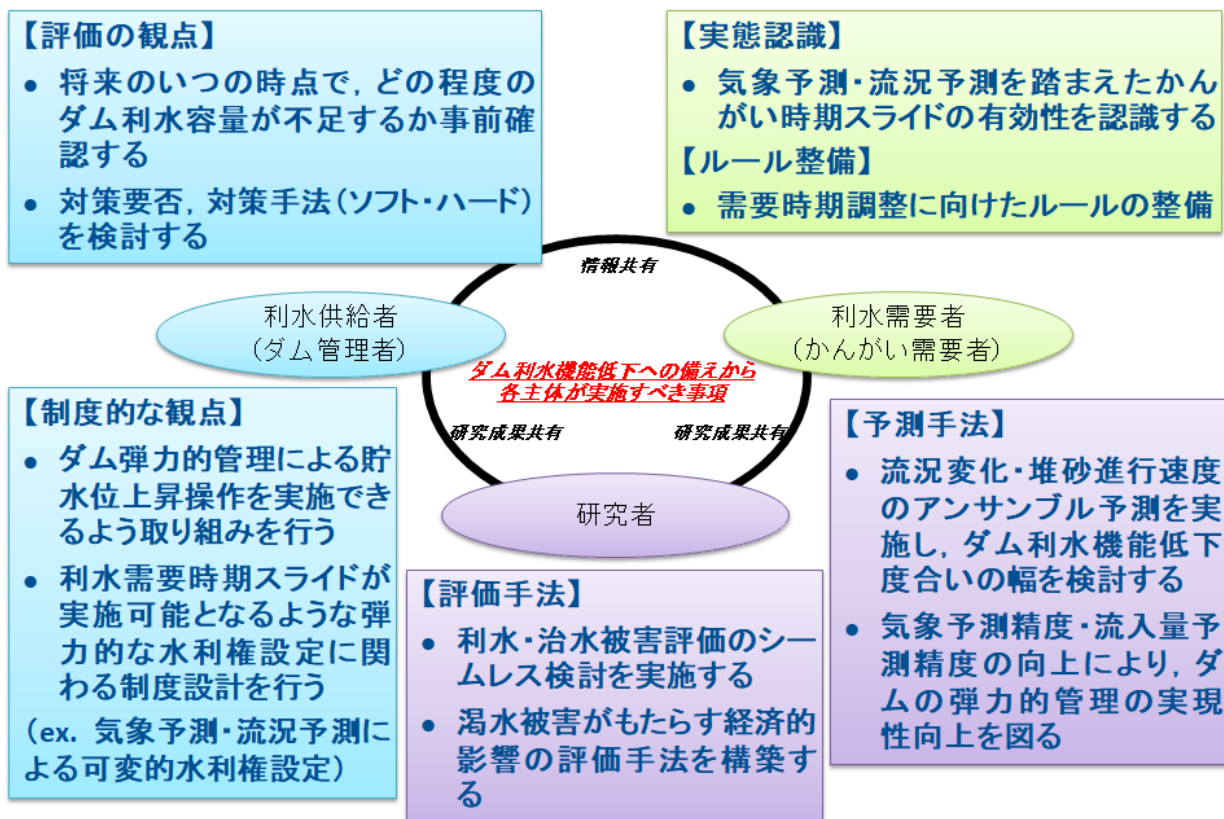


図 7.3 気候変動下においてダムの利水機能低下への備えから各主体が実施すべき事項

謝 辞

本研究を遂行し、学位論文を取りまとめるにあたり、多くの方々のご支援とご指導を賜りました。

はじめに、指導教官である京都大学防災研究所 角 哲也 教授には、本研究の実施の機会を与えて戴くとともに、研究の細部に渡り多くのご指導を賜りました。私の未熟な研究報告に対して、暖かいご助言を下さり、折に触れて進むべき方向をご教示戴きました。研究を通して、ダム工学分野の第一人者であられる角先生のお考えを伺うなかで、「ダムの能力と限界の両面を正しく社会に発信していかなければならない」という思想に強く感銘を受けました。本研究は、この思想の一部でも具現化できたという思いのもとで遂行できたものと考えます。ここに改めて、京都大学防災研究所 角 哲也 教授に、心より深甚の謝意を表します。

京都大学防災研究所 竹門 康弘 准教授、京都大学防災研究所 Kantoush, Sameh Ahmed 准教授には、副査として数々のご助言を戴くとともに、研究期間を通じて、心温まる激励を賜りました。自らは気付かなかった角度から幾多のご指摘を賜ったことは、これまで研究活動に未熟であった私の貴重な財産となりました。心より感謝の意を表します。

愛媛大学大学院 農学研究科 佐藤 嘉展 准教授には、将来流量資料を提供して戴くとともに、本研究のもととなった投稿論文の査読をして戴き、貴重なご助言を賜りました。ここに記して深謝の意を表します。

本研究活動のきっかけを作って戴いた株式会社建設技術研究所 執行役員 石田 裕哉 氏には、公私共にサポートを賜りました。同 大阪本社ダム部 永谷 言 博士、同 東京本社水理センター 川村 育男 博士には、研究実施にあたり、日頃より有益な議論の時間を作って戴くとともに、多大なるご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

本研究は、株式会社建設技術研究所 国土文化研究所に2018年～2020年に設けられた「ダム再生研究会」における議論の成果が数多く詰まっています。研究会メンバーの一人一人の顔が目に浮かびますが、とりわけ、東京工業大学 池田 駿介 名誉教授、日本国土開発株式会社 常務執行役員 上阪 恒雄 氏、株式会社建設技術研究所 国土文化研究所 前所長 加納 敏行 氏には、広く大きな視点からの貴重なご指導を賜りました。ここに記して感謝致します。

著者が本研究活動中に在籍した株式会社建設技術研究所 東京本社ダム部、同 大阪本社ダム部の皆様には、論文作成や日常業務の遂行において、多大なるサポートを戴きました。心より御礼申し上げます。

本研究を通して、「ダムの能力と限界の両面を正しく社会に発信していくこと」の重要性を認識するとともに、そのための研究課題がまだ多く残っているとの思いを得ました。これらの解決の一翼を担えるよう、今後も微力ながら研究活動に努めていく所存です。

最後に、お世話になった全ての皆様方に、心より感謝致します。

本研究の一部は、文部科学省委託事業統合的気候モデル高度化研究プログラムの支援を受けて実施されました。