

近年の台風及び豪雨を踏まえた  
水力発電設備保守運用技術に関する調査報告書

2024年8月

土木学会 エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会

近年の台風及び豪雨を踏まえた

水力発電設備保守運用技術に関する調査・研究分科会

## 委員構成（所属は委員当時のもの）

職名	氏名	所属	期間
主査	豊田 康嗣	(一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 気象・流体科学研究部門	2021/7 ~ 2024/8
委員	村田 浩一	北海道電力(株) 水力部土木グループ	2021/7 ~ 2022/6
委員	和泉 康平	北海道電力(株) 水力部土木グループ	2022/7 ~ 2024/8
委員	清野 則和	東北電力(株) 発電販売カンパニー 水力部(水力土木)	2021/7 ~ 2022/6
委員	鈴木 健	東北電力(株) 再生可能エネルギーカンパニー 水力部(水力土木)	2022/7 ~ 2024/6
委員	大友 裕隆	東北電力(株) 再生可能エネルギーカンパニー 水力部(水力土木)	2024/7 ~ 2024/8
委員	新妻 秀樹	電源開発(株) 技術開発部 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 陸上風力事業部 建設室 建設タスク	2021/7 ~ 2023/3 2023/4 ~ 2024/8
委員	寺田 義和	中部電力(株) 再生可能エネルギーカンパニー 水力事業部 運営・技術グループ	2021/7 ~ 2022/7
委員	三沢 剛	中部電力(株) 再生可能エネルギーカンパニー 水力事業部 運営・技術グループ	2022/7 ~ 2024/8
委員	大坪 祐介	関西電力(株) 再生可能エネルギー事業本部 水力エンジニアリングセンター 国内水力グループ	2021/7 ~ 2024/8
委員	佐々木 勝教	四国電力(株) 再生可能エネルギー部 土木グループ	2021/7 ~ 2024/8
委員	清田 雅樹	九州電力(株) 土木建築本部 土木建築技術センター ダム技術グループ 水力発電本部 水力開発総合事務所 技術部 土木建築第3グループ	2021/7 ~ 2024/6 2024/7 ~ 2024/8
委員	山田 朋人	北海道大学大学院 工学研究院 土木工学部門 教授	2021/7 ~ 2024/8

続き

職名	氏名	所属	期間
委員兼幹事	岸本 秀真	東京電力ホールディングス(株) 技術戦略ユニット 土木・建築統括室 土木・建築エンジニアリングセンター 地圏土木技術グループ	2021/7 ~ 2023/6
委員兼幹事	川上 洵	東京電力ホールディングス(株) 技術戦略ユニット 土木・建築統括室 土木・建築エンジニアリングセンター 地圏土木技術グループ	2023/7 ~ 2024/8
委員兼幹事	新井 涼允	(一財)電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 気象・流体科学研究部門	2021/7 ~ 2024/8
オブザーバー	山田 安秀	新技術・エネルギー小委員会 委員長 (清水建設(株) 執行役員 コーポレート企画室(環境・エネルギー担当))	2021/7 ~ 2024/8
オブザーバー	澄川 洋平	新技術・エネルギー小委員会 委員 (東京電力ホールディングス(株) 技術戦略ユニット 土木・建築統括室 土木・建築人材開発センター 土木グループ)	2021/7 ~ 2022/6
オブザーバー	増田 雅之	新技術・エネルギー小委員会 委員 (東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 技術開発部 環境・エネルギーエリア スペシャリスト)	2022/7 ~ 2024/8
オブザーバー	尾林 孝平	電気事業連合会 立地電源環境部	2023/4 ~ 2024/3

## 活動実績

	開催日	場所	内容
第1回	2021/7/16	電力中央研究所会議室+Web 開催	・分科会方向性に関する意見交換.
第2回	2022/11/11	電力中央研究所会議室+Web 開催	・豪雨災害被災事例のアンケート結果の確認. ・委員の山田教授より「気候変動下の水災害リスク」についてご講演.
第3回	2021/12/1	電力中央研究所会議室+Web 開催	・豪雨災害被災事例の報告会.
第4回	2022/1/28	土木学会講堂+Web 開催	・掲載すべき豪雨災害事例に関する議論. ・治水協力に関する議論.
土木学会講演会	2022/1/28	Web 開催	・タイトル:「気候・豪雨予測に関する新技術と利水ダムの運用に関する講演会」 ・講演者:山田朋人(北海道大学), 牛尾知雄(大阪大学), 高島賢二(電力土木技術協会) ・参加者:421名.
第5回	2022/5/20	電力中央研究所会議室+Web 開催	・予防保全事例に関する議論. ・治水協力課題に関する議論.
第6回	2022/7/28	電力中央研究所会議室+Web 開催	・治水協力事例に関する議論. ・掲載する予防保全策に関する議論.
第7回	2022/10/21	北海道電力本店+Web 開催	・新桂沢ダム, 雨竜ダム, 藻岩発電所等の視察. ・分科会成果の取りまとめ方針について議論. ・治水協力の取りまとめ方について議論.
第8回	2023/1/16	電力中央研究所会議室+Web 開催	・治水協力の取りまとめ方について議論.
第9回	2023/4/6	電力中央研究所会議室+Web 開催	・治水協力の取りまとめ方について議論. ・報告書全体の執筆方針について議論.
第10回	2023/5/11	電力中央研究所会議室+Web 開催	・報告書全体の執筆方針について議論. ・国土交通省石川室長・田中企画専門官より「ハイブリッドダム」に関する講演会.
第11回	2023/7/14	安房川第二発電所+Web 開催	・屋久島電工安房川第二発電所の視察. ・報告書の4章の取りまとめ方について議論.

続き

	開催日	場所	内容
第 12 回	2023/12/7	電力中央研究所会議 室+Web 開催	・ 報告書転載許諾対応について議論. ・ 分科会の延長と最終報告会について議論.
第 13 回	2024/6/26	電力中央研究所会議 室+Web 開催	・ 最終報告会について議論.

## 執筆担当

執筆担当箇所	氏名	所属
1章	杉本 聡一郎	(一財)電力中央研究所
2章		
2.1	清田 雅樹	九州電力(株)
2.2	岸本 秀真	東京電力ホールディングス(株)
2.3	新妻 秀樹	電源開発(株)
2.4	鈴木 健	東北電力(株)
同上	新妻 秀樹	電源開発(株)
2.5	大坪 祐介	関西電力(株)
2.6	和泉 康平	北海道電力(株)
2.7	大坪 祐介	関西電力(株)
2.8	清田 雅樹	九州電力(株)
2.9	新井 涼允	(一財)電力中央研究所
3章		
3.1.1.1	岸本 秀真	東京電力ホールディングス(株)
3.1.1.2	三沢 剛	中部電力(株)
3.1.1.3	佐々木 勝教	四国電力(株)
3.1.1.4	鈴木 健	東北電力(株)
3.1.1.5	鈴木 健	東北電力(株)
3.1.2.1	佐々木 勝教	四国電力(株)
3.1.2.2	佐々木 勝教	四国電力(株)
3.1.2.3	岸本 秀真	東京電力ホールディングス(株)
3.1.2.4	三沢 剛	中部電力(株)
3.1.2.5	三沢 剛	中部電力(株)
コラム1	新井 涼允	(一財)電力中央研究所
3.2	佐藤 隆宏	(一財)電力中央研究所
コラム2	清田 雅樹	九州電力(株)
コラム3	角田 恵	(株)Dshift
3.3	新井 涼允	(一財)電力中央研究所
コラム4	新妻 秀樹	電源開発(株)

続き

執筆担当箇所	氏名	所属
4章		
4.1	佐々木 勝教	四国電力(株)
4.2	三沢 剛	中部電力(株)
同上	大坪 祐介	関西電力(株)
4.3.1	岸本 秀真	東京電力ホールディングス(株)
4.3.2	新井 涼允	(一財)電力中央研究所
4.3.3	岸本 秀真	東京電力ホールディングス(株)
4.3.4	鈴木 健	東北電力(株)
5章	山田 朋人	北海道大学

## はじめに

CO2 増加による地球温暖化が懸念されはじめたのは 1980 年代後半からです。1989 年 1 月に開催された気象庁・気候問題懇談会の報告において、2030 年における気候変化予測を基にした環境変化項目の一つに「降水量の増加とパターンの変化」や「大型で強い台風の増加」があげられており、様々なインフラ設備に大きな影響を及ぼすことが示唆されました。それから 35 年の月日が経過し、毎年のように全国各地で洪水や土砂崩壊による被害が相次いでいます。今後も豪雨や洪水による被害がさらに拡大するのではないかという懸念は増えつづけています。

国土交通省では、平成 30 年 7 月豪雨に関連した「異常豪雨の頻発化に備えたダム  
の洪水調整機能に関する検討会」の提言を踏まえ、利水容量の治水活用による洪水調整機能の強化を進めるとしており、水力発電施設もその対象とされました。発電所の防災・保全のみならず、流域全体の安全の一旦を担うことが大きく期待されています。一方で、地球温暖化の原因とされている CO2 排出を抑制していくためにも、純国産の再生可能エネルギーである水力発電の役割はこれまで以上に大きくなります。エネルギー確保と防災・減災を同時に両立していくことが、水力発電の社会的使命であると断言できます。

本調査は、近年の激甚化する台風・豪雨災害を受けて得られた知見・課題を共有し、今後の強靱な施設形成や流域全体の防災・減災を両立させるための課題・対策の整理を目的としております。調査を通じて、様々な豪雨事象と被災事例とともに、数々の予防保全策が施されてきたことを明らかにしました。これは、地球温暖化に対して適応している姿ともみることができ、水力発電施設以外にも大いに参考になるものと思われます。さらに、研究を重ねてダム運用の高度化やダム再生を上手く組み合わせていき、気候変動の影響にも粘り強く適応できる技術を社会実装していくためにも、土木学会の役割は大きいものと思われます。エネルギー確保と防災・減災を両立させ、レジリエントでサステナブルな社会構築に寄与すべく、本報告書がその一旦を担うことを期待いたします。

2024 年 8 月

公益社団法人 土木学会

エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会

近年の台風及び豪雨を踏まえた

水力発電設備保守運用技術に関する調査・研究分科会

主査 豊田康嗣

## 目次

1 近年の豪雨	6
1.1 豪雨・大雨の定義と特徴	6
1.2 大雨・豪雨の発生に関する経年変化	10
1.3 台風による大雨・豪雨	17
1.4 線状降水帯	22
2 豪雨による水力設備の被災事例	31
2.1 2005年9月 台風14号 耳川水系(九州電力)	31
2.2 2010年9月 台風9号 須川発電所上野川取水堰(東京電力)	34
2.3 2011年7月 台風6号 平鍋ダム(電源開発)	37
2.4 2011年7月 新潟・福島豪雨 阿賀野川水系(東北電力, 電源開発)	40
2.4.1 豪雨の概要	40
2.4.2 東北電力管内の設備被災事例と対策	41
2.4.3 電源開発管内の設備被災事例と対策	43
2.5 2011年8月 台風12号(紀伊半島豪雨) 長殿発電所(関西電力)	46
2.6 2016年8月 北海道豪雨 富村発電所・右左府発電所(北海道電力)	50
2.6.1 豪雨の概要	50
2.6.2 富村発電所の被害状況と復旧	50
2.6.3 右左府発電所沙流川取水堰の被害状況と復旧	51
2.7 2017年6月 前線性豪雨 黒部川水系(関西電力)	52
2.8 2017年7月 九州北部豪雨 夜明ダム(九州電力)	55
2.9 海外の事例	58
2.9.1 Oroville ダムにおけるメイン放水路の損傷事例	58
2.9.2 Edenville ダムおよび Sanford ダムの決壊事例	60
巻末 水力発電所被災事例一覧	62
3 豪雨被災軽減のための取り組み	71
3.1 予防保全の取り組み	71
3.1.1 電気設備自然災害等ワーキンググループ検討の取り組み	71
3.1.1.1 ダムの通水能力評価(200年確率洪水流量に対する評価)	72

3.1.1.2	取水口遠制化・自動化・回線二重化	74
3.1.1.3	リスクコミュニケーション	75
3.1.1.4	制御機器嵩上げ	76
3.1.1.5	水密扉・止水板・防水壁	76
3.1.2	その他取り組み事例	77
3.1.2.1	発電所設備の地中化	77
3.1.2.2	ダム洪水吐きの放流方式の変更	78
3.1.2.3	ダムゲート電源・動力の多重化	79
3.1.2.4	取水口自動断水装置	80
3.1.2.5	緊急時通信網の整備	81
コラム1	浸水シミュレーションについて	82
3.2	土砂対策の取り組み	85
3.2.1	ダム貯水池	85
3.2.2	取水口	90
3.2.3	沈砂池	90
コラム2	ダム上流域森林の重要性	92
コラム3	ダムの事前放流時におけるダム下流への危害防止策の強化について	94
3.3	降雨出水予測技術	98
3.3.1	降雨予測技術	98
3.3.1.1	数値予報の概要	98
3.3.1.2	数値予報の高度化手法	103
3.3.1.3	数値予報の降水精度	103
3.3.2	流出解析技術	109
3.3.2.1	集中型モデル	109
3.3.2.2	分布型モデル	110
3.3.2.3	機械学習による洪水予測	112
3.3.3	降雨出水予測システム	116
コラム4	降雨出水予測技術の活用事例	121
4	豪雨に関連した利水ダムの運用	124
4.1	利水ダムの特徴と分類	124

4.1.1	利水ダムに関する河川法の規定	124
4.1.2	河川の従前の機能の維持	125
4.1.3	河川の従前の機能の維持のための措置をとらなければならないダム	128
4.1.4	ダムの種類	131
4.2	利水ダムの運用	132
4.2.1	ダムの操作規程	132
4.2.2	標準操作規程	133
4.2.2.1	洪水及び洪水時	134
4.2.3	第1類のダムの操作方法	135
4.2.4	第2類及び第3類のダムの操作方法	142
4.2.5	第4類のダムの操作方法	142
4.3	利水ダム運用に関わる近年の取組み	143
4.3.1	概要	143
4.3.2	事前放流の取組み	145
4.3.2.1	事前放流の概要・経緯	145
4.3.2.2	事前放流の方法	145
4.3.2.3	事前放流の流れ	149
4.3.2.4	降雨予測精度の影響について	150
4.3.3	ダム再生の取組み	152
4.3.3.1	ダム再生の概要・経緯	152
4.3.3.2	ダム再生の取組み	153
4.3.3.3	ダム再生事業の事例	155
4.3.4	運用高度化の取組み	157
4.3.4.1	運用高度化の概要	157
4.3.4.2	洪水後期放流の工夫	157
4.3.4.3	非洪水期の弾力的運用	158
4.3.4.4	AIによる出水予測と運用高度化	158
5	気候変動を踏まえた今後の治水計画に関するリスクベースの考え方と最新の取組み	160
5.1	はじめに	160

5.2 気候変動を踏まえた治水計画の検討.....	165
5.3 アンサンブル手法による気候変動予測 .....	168
5.4 計画降雨量の将来予測 .....	170
5.5 アンサンブル気候データの導入による総合的リスク評価.....	173
5.6 日々の防災への適用（鈴木ら，2023） .....	179
5.7 アンサンブル気候データを用いた利水ダムにおける洪水被害低減手法の 効果検証（松本ら，2021） .....	183
5.8 まとめ.....	189
総論 .....	190

## 1 近年の豪雨

### 1.1 豪雨・大雨の定義と特徴

気象庁では雨の強さに関連する用語を定義しており、1 時間降水量の程度に応じて以下のように定めている。

- ・ やや強い雨 : 10mm 以上 20mm 未満
- ・ 強い雨 : 20mm 以上 30mm 未満
- ・ 激しい雨 : 30mm 以上 50mm 未満
- ・ 非常に激しい雨 : 50mm 以上 80mm 未満
- ・ 猛烈な雨 : 80mm 以上

「激しい雨」以上のカテゴリに該当する雨は、災害が発生する恐れがある天気概況として「大雨」として定義される。また、「豪雨」は、著しい災害が発生した顕著な大雨現象を指し、「〇〇豪雨」など、過去に命名された大雨災害の名称（例：令和2年7月豪雨）、もしくは地域的に定着している災害の名称（例：東海豪雨）を引用する形で用いる。豪雨に関連する用語として、前線や低気圧等の影響や雨を降らせやすい地形の効果によって、積乱雲が同じ場所で次々と発生・発達を繰り返すことにより（数十キロ程度の）狭い地域に100ミリから数百ミリ程度の雨量をもたらす雨が「集中豪雨」と呼ばれる。この集中豪雨という言葉はマスメディアで使用され始めたもので、気象学的に明確な定義がなされたものではないが、気象庁が発表する報道発表資料や予報解説資料等に用いられている。

大雨のうち、急に強く降り、数十分の短時間に狭い範囲で数十ミリ程度の総雨量をもたらす雨は特に、「局地的大雨」と定義されている。2008年7月28日に兵庫県神戸市の都賀川で発生した水難事故では、近畿地方中部で大雨をもたらした降水域からの冷氣外出流によって、この降水域から離れた箇所でも局地的大雨が発生し（草開ら, 2011）、河川が急に増水した。また、この事故の翌週の8月5日には、下水道管内の急な増水による事故が東京都豊島区雑司ヶ谷にて発生した。この事例では、寿命が1時間に満たない孤立した積乱雲が首都圏で多数発生し（石原, 2012）、その一つが事故地点周辺に発生していた。関連した用語として、歴代1位または2位の記録を参考に、数年に一度しか発生しないような短時間の大雨を気象庁では「記録的短時間大雨」と呼んでいる。

図 1.1-1 は、局地的大雨と集中豪雨のそれぞれにおいて、積乱雲の動きの特徴をレーダ解析雨量の時系列で示したものである。両者には雨の降り方に明確な違

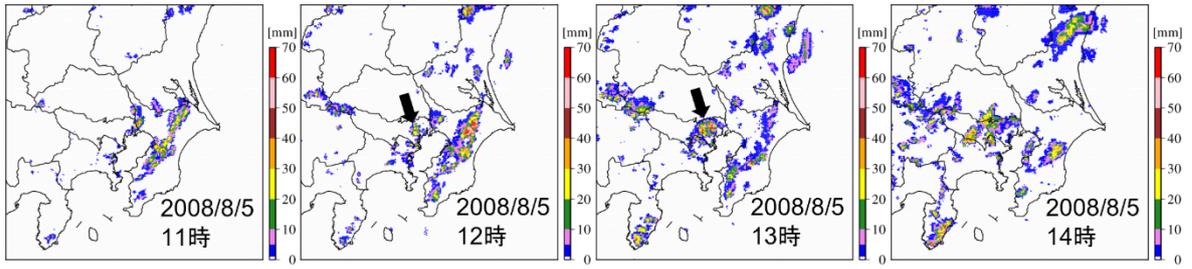
いがある。最近、「ゲリラ豪雨」という言葉が広く使われるようになった。気象庁においても局地的大雨や集中豪雨等を表すものとして定義されている。ただし、使用を控える用語と位置づけられている。

大気現象は、寿命・周期に対応する時間スケールに応じた水平方向の広がり（水平スケール）を有しており（Orlanski, 1975）、時空間スケールがある程度対応している（図 1.1-2）。また、ある大気現象はより小さなスケールを有した激しい現象を内包しており、スケール階層構造として知られている。例えば、台風や低気圧等はマクロ  $\beta$  スケール～メソ  $\alpha$  スケールのスケールを有し、複数の積乱雲で構成されている。これらメソ  $\alpha$  スケールの気象場は「総観場」と呼ばれることもある。豪雨・豪雪、雷雨、および竜巻等は総観場の中で発生し、逆に、総観場は大雨や豪雨の発生要因として整理されることもある。

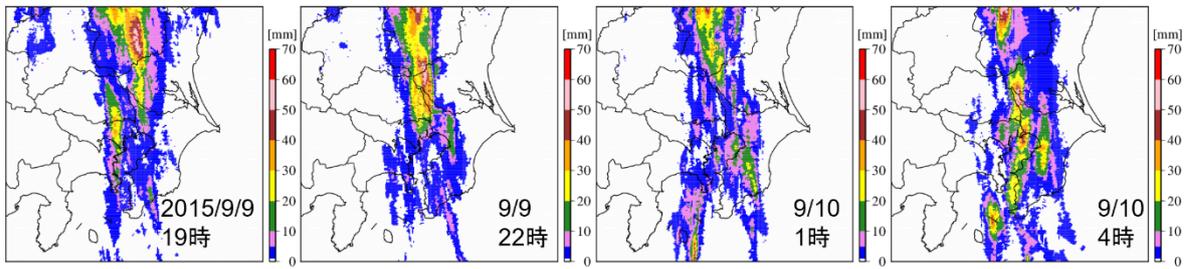
ここで、図 1.1-2 中に見られる「線状降水帯」もゲリラ豪雨とともに世の中に浸透している用語である。九州で発生する線状の地形性降水を対象とした研究で使い始められ、書籍では、多くの集中豪雨をもたらす準定常な降水システムとして使用された（吉崎 & 加藤, 2007）のが最初である。次々と発生する発達した積乱雲が列をなし、組織化した積乱雲群によって数時間にわたるほぼ同じ場所を通過または停滞することでこの降水帯が作り出されるもので、長さ 50～300km、幅 20～50km で線状に伸びる強い降水域を指す。専門家の間では様々な定義が使われているが、気象庁では現在、10 分先、20 分先、30 分先のいずれかにおいて以下の基準を満たす場合に「顕著な大雨に関する気象情報」として発表している。

- ・前 3 時間積算降水量 (5km メッシュ) が 100mm 以上の分布域の面積が 500km<sup>2</sup> 以上。
- ・その形状が線状（長軸・短軸比が 2.5 以上）。
- ・領域内の前 3 時間積算降水量の最大値が 150mm 以上。
- ・領域内の土砂キキクル（大雨警報（土砂災害）の危険度分布）において土砂災害警戒情報の基準を超過（かつ大雨特別警報の土壌雨量指数基準値への到達割合が 8 割以上）、または洪水キキクル（洪水警報の危険度分布）において警報基準を大きく超過した基準を超過。

以上のように、雨の強さをはじめとした降り方には時間に応じた特徴があり、また大気現象自体も時空間スケールに応じて異なる様相で発生する。そのため、着目すべき時空間スケールや対応する現象を明確にした上で、雨の降り方や現象の発生傾向およびメカニズムを評価する必要がある。



豊島区内では12時頃に発生した積乱雲が13時にかけて強まり(矢印部)、移動後消滅した。



太平洋側から湿った空気が流れ込み、南北方向に強い降水域が長時間形成された。

図 1.1-1 局地的大雨と集中豪雨における降雨域の変化.

上：2008年8月5日東京都豊島区の局地的大雨，下：平成27年9月関東・東北豪雨.

水平スケール	1ヶ月	1日	1時間	1分	1秒
10000km	定常波 プラネタリー波	超長波 潮汐波 フロッキング 赤道波			マクロ α- スケール
2000km		長波 傾圧波 低気圧 高気圧			マクロ β- スケール
200km		前線 台風 熱帯低気圧			メソ α- スケール
20km			線状降水帯 豪雪 スコールライン マルチセル 内部波 山岳波		メソ β- スケール
2km			(雷雨)セル 対流 内部重力波 晴天乱流		メソ γ- スケール
200m			竜巻 短い重力波 積乱雲		マイクロ α- スケール
20m				つむじ風 サーマル	マイクロ β- スケール
					マイクロ γ- スケール プリューム 乱流 粗度

図 1.1-2 各大気現象が有する時空間スケール.

## 参考文献

- Orlanski, I., 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56, 527–530.
- 石原正仁, 2012. 2008年雑司ヶ谷大雨当日における積乱雲群の振舞いと局地的大雨の直前予測—3次元レーダーデータによる積乱雲群の統計解析—. *天気*, 59, 549-561.
- 草開浩, 小山芳太, 金森恒雄, 瀬古弘, 2011. 2008年7月28日近畿地方を南西進した線状降水帯と都賀川での大雨について. *天気*, 58, 395-412.
- 吉崎正憲, 加藤輝之, 2007. 豪雨・豪雪の気象学. 朝倉書店.

## 1.2 大雨・豪雨の発生に関する経年変化

大規模な災害の発生有無に応じて各年度の火災保険等による保険金支払い額は変動するが、風、大雨、雹（ひょう）、大雪に伴う被害を中心にその支払い額は、ここ10年程度で増加傾向にあると指摘されている（日本損害保険協会, 2021）。過去の主な風水災等による保険金の支払い状況では、2010年度以降に発生した事象がトップ10のうち7事象を占めており（表1.2-1）、支払い額が1000億円を超える事象が2015年以降ほぼ毎年発生している（日本損害保険協会, 2023）。実際の被害額は支払い額の数倍であると考え、近年において1事例あたり1兆円を超える大規模な被害も珍しくなくなってきた。また、このような大規模災害は台風に伴う場合が大半であり、全国規模で被害をもたらすことも少なくないことも分かる。このような状況から、近年において全国的に台風や大雨・豪雨による災害が頻発化し、かつそれが激甚化していることがうかがえる。

全国のアメダスの観測データ（1976年～2022年）を用いた大雨（※）の統計的調査（気象庁, 2023a）では、1980年頃と比較して、約1.8倍～2.1倍に発生頻度が有意に増加しており（※1時間降水量80mm以上、3時間降水量150mm以上、日降水量300mm以上等の強い雨）、より強度の強い雨ほど増加率が高まっている（図1.2-1）。

一方、大雨の強さの長期的変動は大雨の程度に大きく依存せず、増加率として4%/10年程度であり（藤部, 2014）、飽和水蒸気量の増加率と同程度であると指摘されている（Fujibe, 2013）。これは気温の経年変化（図1.2-2）に対し、データ分析期間におけるクラジウス・クラペイロン式（CC式）に基づく水蒸気量の変化を議論したものである。CC式は水の相変化に関する熱力学の理論から導かれたものあり、飽和水蒸気圧が気温によって定まり、気温上昇とともに指数関数的に増加することが示されている。降雨強度の気温に対する変化率については、クラジウス・クラペイロン式に基づいて理論的には6～7%/K程度（CC率）である（Trenberthら, 2003）が、水の相変化に伴う潜熱放出量の増加や雲内の上昇気流に伴う水蒸気の局所化といった熱力学的効果により、降雨強度の変化率がCC率を上回りうることで単独の積乱雲を対象とした数値実験によって示唆されている（中北ら, 2020）。雲物理的效果を考慮した研究により、より精緻なメカニズムが解明されることが期待されている。

いずれにしても気温の長期変化に応じて短時間強雨の頻度、強さともに増加していることが示唆されている。水蒸気量の輸送という観点では海面水温の上昇傾

向（気象庁, 2023b, 図 1.2-3）も影響していると考えられている（加藤, 2022a）. 解析雨量を用いた分析によれば, 集中豪雨の発生は関東地方よりも西の太平洋側で多い一方, 海上からの下層（高度 1km 程度以下）水蒸気の流入が山岳による遮蔽効果で生じにくい長野県や, 岡山県・香川県といった瀬戸内地方ではほとんど見られない（図 1.2-4, 津口 & 加藤, 2014, 加藤, 2020）. このように, 集中豪雨の発生には地域性が見られるが, 概ね全国的に事例が抽出されている.

レーダ観測データを用いた雨量解析やそれを基とした記録的短時間大雨情報の発表, 地方自治体による観測データの共有等, 気象庁における観測体制の強化, および雨量データの質が高まっていることが, 特に短時間強雨の発生回数が増加していると認識される一因であるといえる. しかし, アメダス雨量の分析によれば, 梅雨期での集中豪雨が顕著に増加している（図 1.2-5, 加藤, 2022b）ことが根本的な原因であると指摘されている（加藤, 2022a）.

表 1.2-1 主な風水災等による保険金の支払い状況.

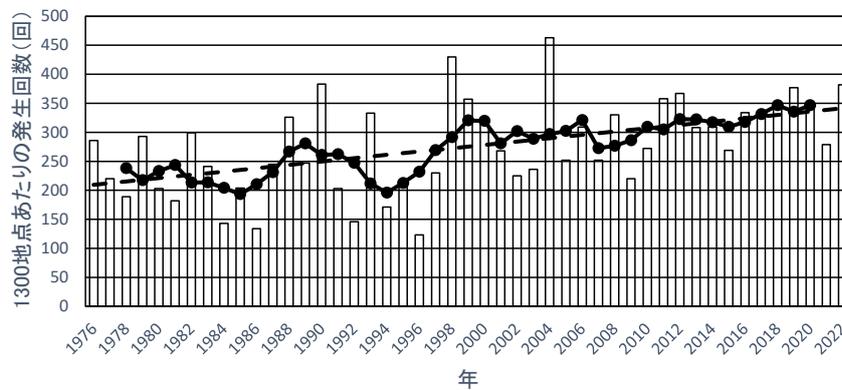
日本損害保険協会による調査結果を基に作成.

	災害名	発生日月	被害地域	主な総観場	支払件数 (件) (注2)	支払保険金 (億円) (注2、注3)
1位	平成30年台風第21号	2018年9月3日 ～5日	大阪・京都・ 兵庫等	台風	857,284	10,678
2位	令和元年台風第19号 (※令和元年東日本台風)	2019年10月6日 ～13日	東日本を中心	台風 低気圧 気圧の谷	295,186	5,826
3位	平成3年台風第19号	1991年9月26日 ～28日	全国	台風 停滞前線	607,324	5,680
4位	令和元年台風第15号 (※令和元年房総半島台風)	2019年9月5日 ～10日	関東を中心	台風	383,585	4,656
5位	平成16年台風第18号	2004年9月4日 ～8日	全国	台風 停滞前線	427,954	3,874
6位	平成26年2月雪害（発達した低 気圧による大雪・暴風雪）	2014年2月	関東を中心	低気圧	326,591	3,224
7位	平成11年台風第18号	1999年9月21日 ～25日	熊本・山口・ 福岡等	台風 停滞前線	306,359	3,147
8位	平成30年台風第24号	2018年9月28日 ～10月1日	東京・神奈 川・静岡等	台風 停滞前線	412,707	3,061
9位	平成30年7月豪雨	2018年6月28日 ～7月8日	岡山・広島・ 愛媛等	停滞前線 台風	55,320	1,956
10位	平成27年台風第24号	2015年8月24日 ～26日	全国	台風 停滞前線	225,523	1,642

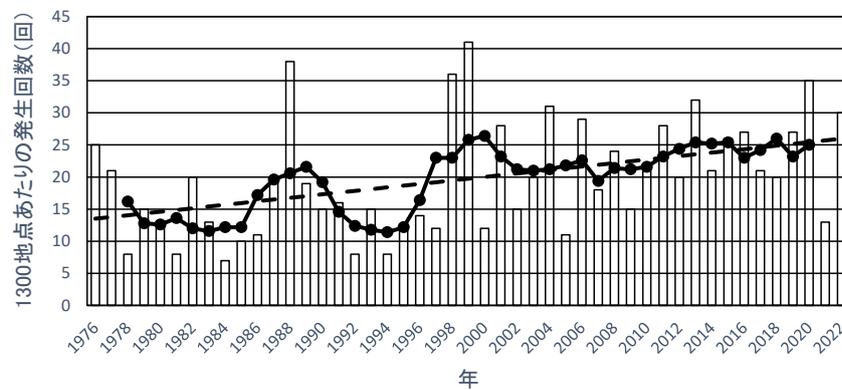
(注1) 気象庁が名称を定めた現象を含む事象には「※」を付加した。

(注2) 一般社団法人日本損害保険協会調べ（2023年3月末現在）による見込み。

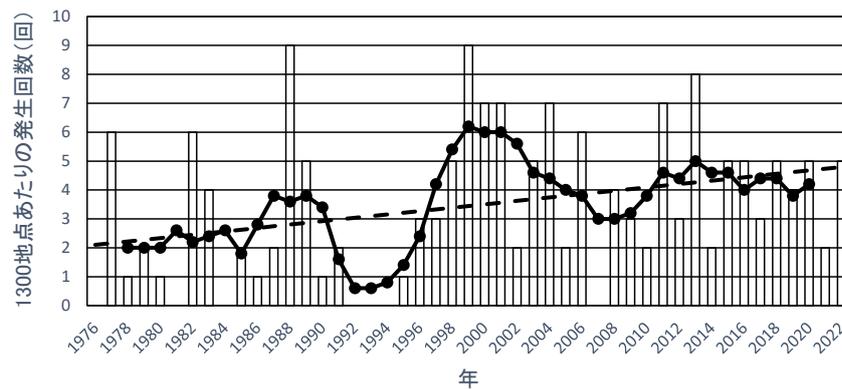
(注3) 火災保険、新種保険（傷害保険を含む）、車両保険（商品車を含む）、海上保険の総額の見込み。



(1 時間降水量 : 50mm)



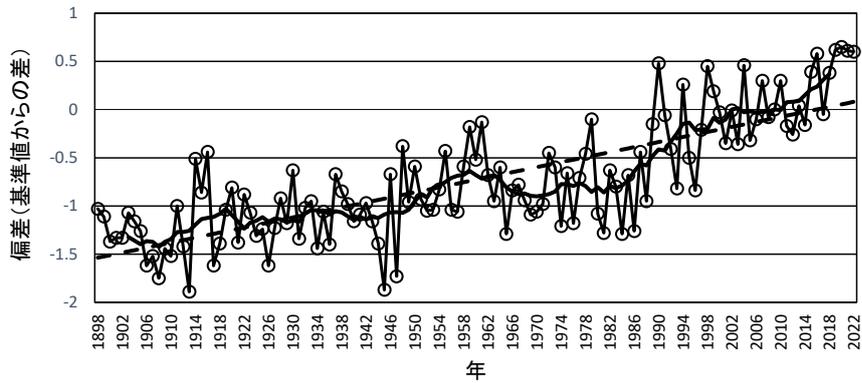
(1 時間降水量 : 80mm)



(1 時間降水量 : 100mm)

棒グラフは、全国のアメダス観測値を 1300 地点あたりに換算した値で年毎に年間発生回数を示したものであり、折れ線は 5 年移動平均値、直線は平均的な変化傾向を示したものである。

図 1.2-1 大雨の年間発生回数の経年変化例（気象庁の報告に基づき作成）。



1898 年以降観測を継続している気象観測所のうち、都市化による影響が小さく、特定の地域に偏らないように選定された 15 地点（網走、根室、寿都、山形、石巻、伏木、飯田、銚子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬、石垣島）の月平均気温データを使用し、1991 年から 2020 年の 30 年間の平均値を基準に偏差を算定した。太線は 11 年移動平均値、直線は平均的な変化傾向を示したものである。

図 1.2-2 わが国の年平均気温の長期変動（気象庁の報告に基づき作成）。

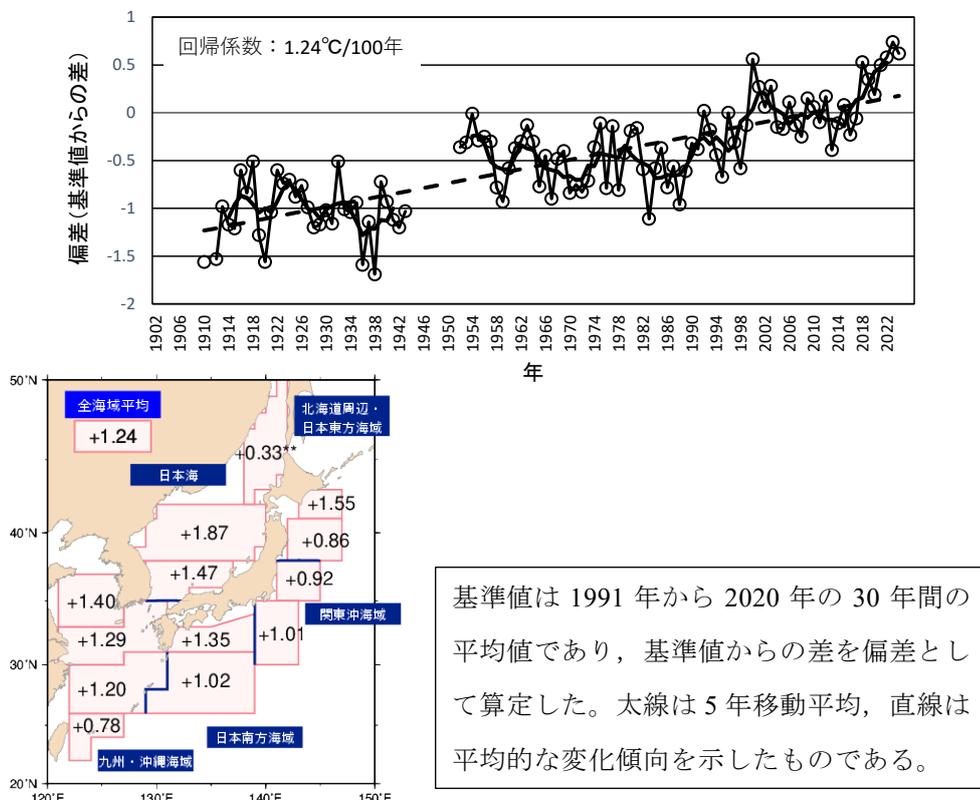
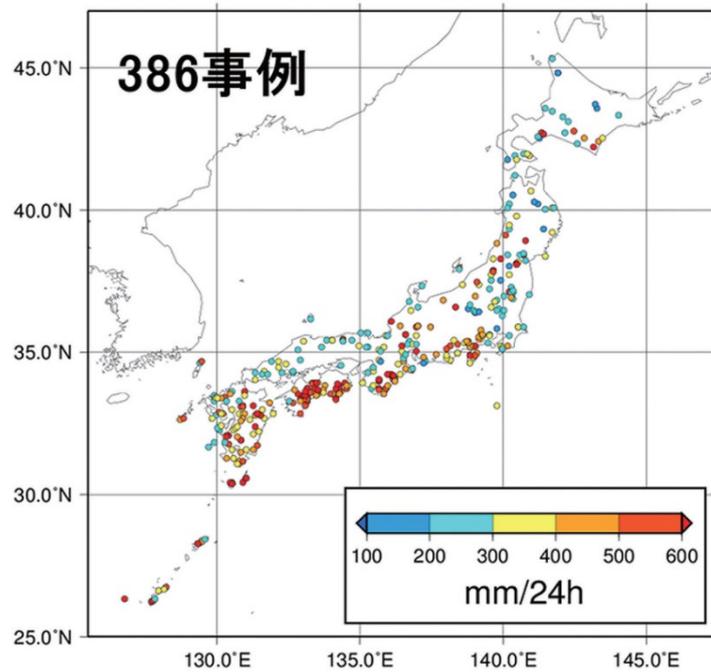
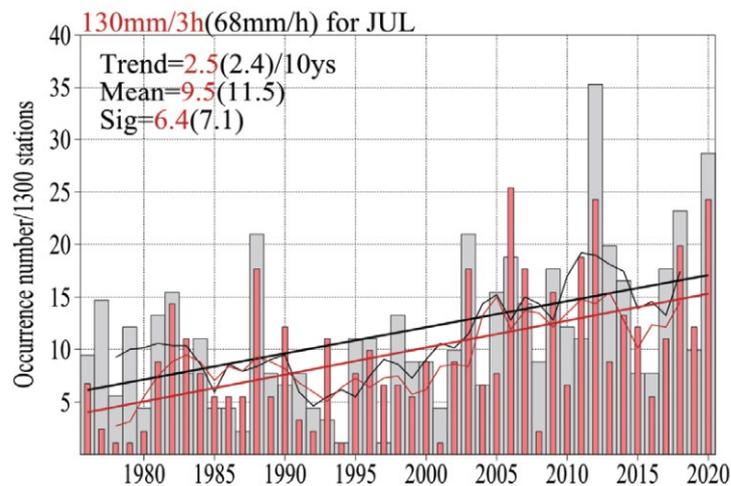


図 1.2-3 日本近海の海面水温に見られる傾向（左：偏差の経年変化（気象庁の報告に基づき作成），右：各海域における上昇率（ $^{\circ}\text{C}/100$  年）（気象庁により作成））。



前24時間積算降水量（カラー）の最大であった箇所をプロットした。

図 1.2-4 1995年～2009年の暖候期（4月～11月）に抽出された集中豪雨の発生箇所（津口 & 加藤(2014)より転載）



1976年～2020年の各年7月におけるアメダス降水量データを用いて集中豪雨（3時間降水量が130mm以上、赤色／桃色）と短時間強雨（1時間降水量が68mm以上、黒色／灰色）を抽出し、1300地点あたりの発生数（縦軸）に換算した。折れ線は5年移動平均、直線は平均的な変化傾向（「Trend」）を示す。「Mean」は年平均回数、「Sig.」は標準偏差を表す。

図 1.2-5 集中豪雨と短時間強雨の年間発生回数の経年変化（加藤(2022b)より転載）

## 参考文献

- Fujibe, F., 2013. Clausius-Clapeyron-like relationship in multidecadal changes of extreme short-term precipitation and temperature in Japan. *Atmos. Sci. Lett.*, 14, 127-132.
- Kato, T., 2020. Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “senjokousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 485-509.
- Trenberth, K. E., A. Dai, R. M. Rasmussen, D. B. Parsons, 2003. The changing character of precipitation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 1205-1218.
- 加藤輝之, 2022a. 集中豪雨と線状降水帯. 気象学ライブラリー3, 朝倉書店.
- 加藤輝之, 2022b. アメダス3時間積算降水量でみた集中豪雨事例発生頻度の過去45年間の経年変化. *天気*, 69, 247-252.
- 気象庁, 2023a. 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化.  
([https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme\\_p.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html))
- 気象庁, 2023b. 海面水温の長期変化傾向(日本近海).  
([https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a\\_1/japan\\_warm/japan\\_warm.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html))
- 津口裕茂, 加藤輝之, 2014. 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析. *天気*, 61, 187-200.
- 中北英一, 橋本郷志, 小坂田ゆかり, 2020. 気候変動に伴う大気安定化と水蒸気浸潤がゲリラ豪雨の特性に及ぼす影響. *京都大学防災研究所年報*, 第63号B, 241-271.
- 日本損害保険協会, 2021. 火災保険における保険金等支払いと収支の状況等. 金融庁・第一回火災保険水災料率に関する有識者懇談会.  
(<https://www.fsa.go.jp/singi/suisai/siryou/20210625/02.pdf>)
- 日本損害保険協会, 2023. 自然災害での支払額.  
(<https://www.sonpo.or.jp/report/statistics/disaster/index.html>)

### 1.3 台風による大雨・豪雨

台風に起因する降雨には、台風本体による直接的なものと間接的に影響したものがあある。台風中心の眼をとりまく壁雲では、積乱雲の発生・発達過程が最も活発であり、台風の強度が強い時には雨量が特に多い。壁雲の外側に位置するスパイラルバンドと呼ばれる螺旋状の降水帯でも激しい雨が観測されている。一方、台風から離れた箇所でも湿った空気塊が流入し、地形による強制上昇や停滞前線を刺激すること等により大雨になる。台風の遠隔的な影響に関連する現象として、熱帯低気圧から 1,000km ほど離れた位置にメソスケールのレインバンドが発生・停滞する現象が北米大陸で観測されており、PRE (Predecessor Rain Event) と呼ばれている (北島, 2012)。2000 年に発生した東海豪雨は、PRE に類似したメカニズムで発生したという指摘がある (北島, 2013)。

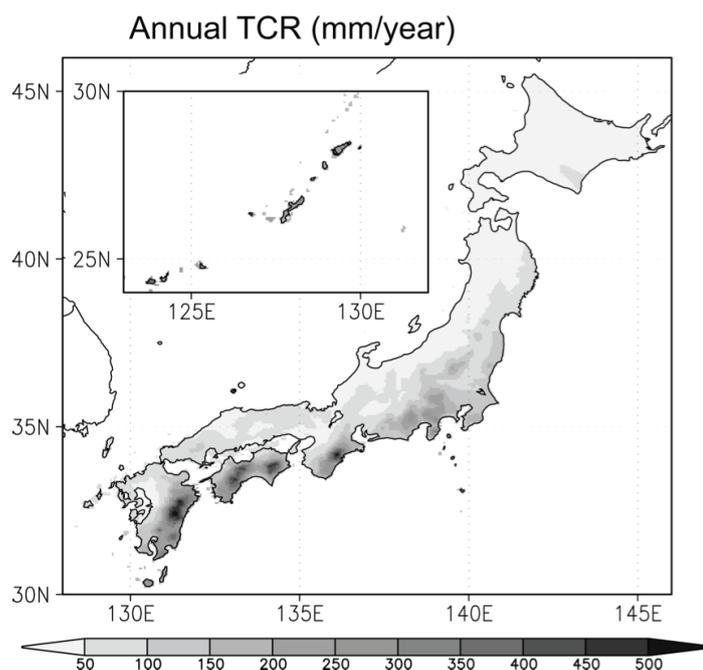
長期間の解析雨量を用いた分析では、九州東部、四国南部、および紀伊半島といった地形・斜面が南東方向や南方向に開いた地域において台風による降水量の増加度合が顕著であることが示されている (図 1.3-1)。つまり、台風時の大雨・豪雨は地形による影響を受けやすく、日本海側は太平洋側に比べてその度合は小さい。平成 23 年 (2011 年) 台風第 12 号による総降雨量 (図 1.3-2) では、台風の北上速度が非常に遅く、地形影響が長時間継続した結果、紀伊半島の広範囲で 1,000mm を超え、中には日本の平均的な年降水量 (1,700mm 程度) を超える雨が数日で降った箇所もあり、大規模な土砂災害・河川氾濫が発生した。

わが国における風水害の主要な要因 (総観場) は台風である (表 1.2-1)。以下、台風の発生強度・発生頻度の経年変化における顕著な傾向について整理する。

わが国が含まれる北西太平洋域や南シナ海で発生する台風の位置や強度に関するデータは、気象庁や米国の合同台風情報センター (JTWC) で公開されている。台風の階級は、表 1.3-1 に示す基準で分類されており、気象庁では 10 分平均の風速推定値、JTWC では 1 分平均値が用いられている。最近聞くことの多い「スーパー台風」は、気象庁による「猛烈な台風」を超える強度を有する。

気象庁のデータ (1951 年～2022 年) によれば、台風の発生数、接近数、および上陸数は年々変わっている (図 1.3-3)。発生数については 10 年規模程度の変化があるように見えるが、中長期的な視点での顕著な増加・減少傾向は見られない。最近の研究成果に対するレビューにおいても、発生や強度における顕著な変化傾向や、強度に対する海面水温や気候変動の有意な影響を断言することは難しく、不確実性が大きいと纏められている (Knuston et al. 2010)。

「猛烈な台風」の発生数については、基とするデータに応じて傾向が大きく変わり、気象庁のデータは減少傾向、JTWCのデータでは10年規模変動の範囲内にあるように見える(図1.3-4)。同一海域を監視した結果でのこのような違いは、ドボラック(Dvorak)法等の静止気象衛星データを用いた強度推定法の違いにあると指摘されている(坪木, 2020)。ドボラック法では、あらかじめ統計的に求めた雲パターンと強度(中心気圧・最大地上風速)との間の経験的關係を基に、衛星観測から把握される雲分布から強度を推定する。なお、1988年に米軍による航空機観測が終了して以来、特別観測以外で890hPaを下回る中心気圧がデータ上ないため、推定された強度の不確実性も懸念されている(Kamahori et al., 2006, 坪木, 2020)。今後、台風に関する質の高いデータを蓄積すること、および風速推定方法の精緻化が極めて重要である。



APHRODITE 日降水量データ (APHRO\_JP, 水平解像度 0.05 度) を用いて、各格子点に台風が接近した(ベストトラックにおける中心位置から 8 度以内となる) 場合の降水量を積算した上で、その積算値と同月の月平均降水量との差を台風降水量と定義した。図は 1981 年~2010 年の 30 年間の平均値をプロットしたものである。

図 1.3-1 台風年降水量 (mm/yr) の分布 (釜堀 & 荒川(2017) より転載)。

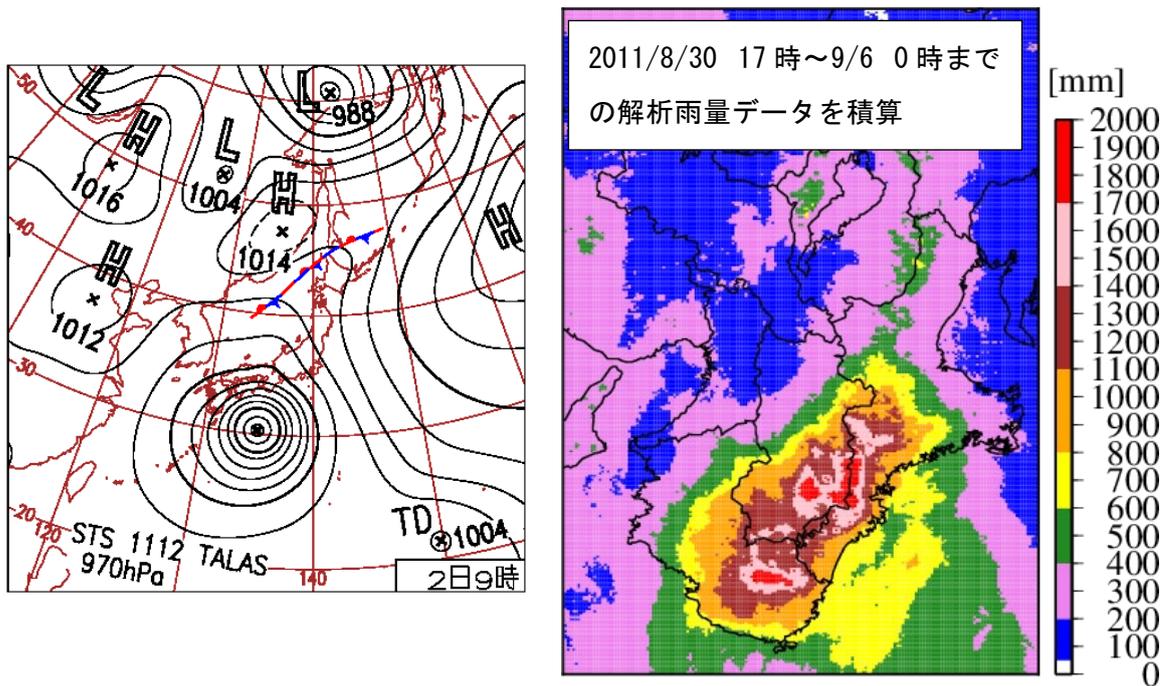


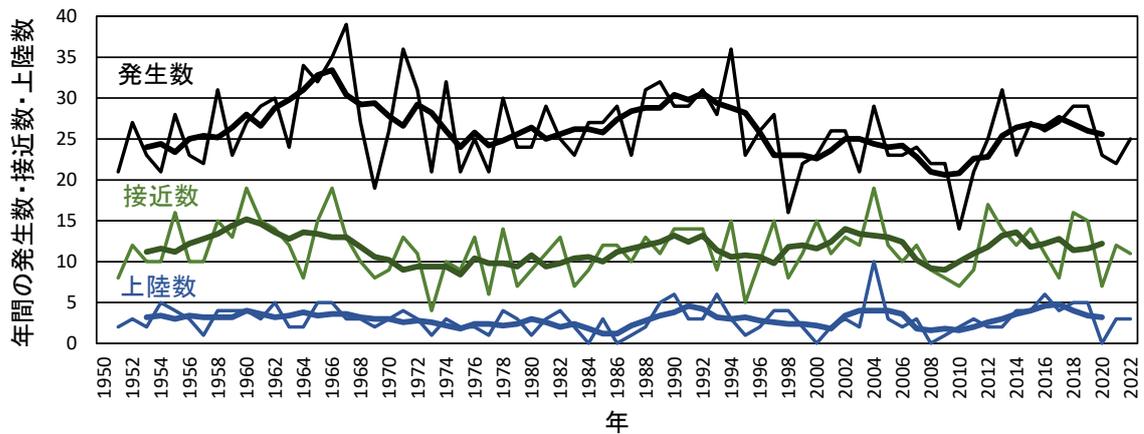
図 1.3-2 2011 年台風第 12 号通過時の天気図と総降水量 (mm) 分布.

表 1.3-1 台風の強さおよび熱帯低気圧の強さに関する階級分類 (上 : 気象庁, 下 : JTWC).

台風の階級	10分平均風速	1分平均風速 (換算値) (10分平均風速 ÷ 0.88)
強い	風速 ≥ 34 ノット (風速 ≥ 17.5m/s)	風速 ≥ 19.9m/s
非常に強い	64 ノット ≤ 風速 < 85 ノット (32.9m/s ≤ 風速 < 43.7m/s)	37.4m/s ≤ 風速 < 49.7m/s
猛烈な	風速 ≥ 105 ノット (風速 ≥ 54.0m/s)	風速 ≥ 61.4m/s

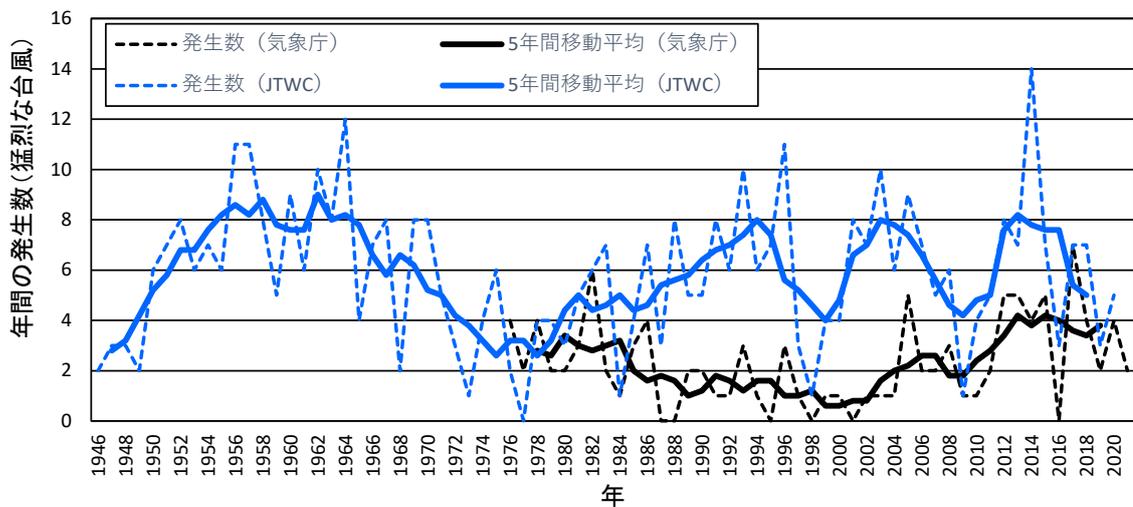
熱帯低気圧の階級	10分平均風速 (換算値) (10分平均風速 × 0.88)	1分平均風速
Tropical Depression	風速 < 15.4m/s	風速 < 34 ノット (風速 < 17.5m/s)
Tropical Storm	15.4m/s ≤ 風速 < 29.0m/s	34 ノット ≤ 風速 < 64 ノット (17.5m/s ≤ 風速 < 32.9m/s)
Typhoon	29.0m/s ≤ 風速 < 58.8m/s	64 ノット ≤ 風速 < 130 ノット (32.9m/s ≤ 風速 < 66.9m/s)
Super Typhoon	風速 ≥ 58.8m/s	風速 ≥ 130 ノット (風速 ≥ 66.9m/s)

気象庁は 10 分平均風速, JTWC は 1 分平均風速を使用している.



台風が中心が国内のいずれかの気象官署等から 300km 以内に入った場合を「接近」と判定し、台風が中心が北海道、本州、四国、九州の海岸線に達した場合を「上陸」と定義する。太線は 5 年移動平均値を表す。

図 1.3-3 年間の台風の発生数・接近数・上陸数の経年変化。



気象庁のデータに対しては現在公開されている 1977 年から 2022 年，JTWC のデータに対しては 1946 年から 2021 年までを分析した。点線の発生数に対し，各実線は 5 年移動平均を示す。

図 1.3-4 「猛烈な台風」の発生数の経年変化（黒：気象庁，青：JTWC）

### 参考文献

Kamahori, H., Yamazaki, N., Mannoji, N., Takahashi, K., 2006. Variability in intense tropical cyclone days in the western North Pacific. SOLA, 2, 104-107.

Knuston, T., McBride, J.L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J.P., Srivastava, A.K., Sugi, M., 2010. Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience*, 3, 157-163.

釜堀弘隆, 荒川理, 2017. 日本における台風降水量の分布. 日本気象学会 2017 年春季大会講演予稿集, A309, 237.

北畠尚子, 2012. PRE (Predecessor Rain Event). *天気*, 59, 171-172.

北畠尚子, 2013. 台風の温帯低気圧化. *気象研究ノート* 第 226 号, 127-148.

坪木和久, 2020. 激甚気象はなぜ起こる. 新潮選書.

## 1.4 線状降水帯

数百ミリの大雨になるには発達した積乱雲が次々と発生・通過する必要がある。積乱雲はしばしば線状に並んでおり、わが国で発生する集中豪雨の多くは、この線状の積乱雲群によって起こっている。2004年以降2022年までに気象庁が命名した豪雨事例（表 1.4-1）を見ると、豪雨事象はほぼ毎年発生し、台風による直接的影響を受けていなかった事例のほとんどが、7月の梅雨期を中心に形成された停滞前線（梅雨前線や秋雨前線）に起因して発生していたことが分かる。これら事例ではいずれも線状降水帯が発生しており、大雨・豪雨の発生頻度・強度を検討する上でこの線状降水帯の特徴を把握するための研究が進められている。

2007年7月九州北部豪雨事例（図 1.4-1）では、6時間積算降水量に見られる集中豪雨域の西側（図中の点線円部）を中心に次々と雨域が発生し、急発達して豪雨域の走向に沿って移動することで同じ地域に大雨をもたらした。その発生は5分間毎のレーダ雨量を用いてようやく把握できる。つまり、線状降水帯自体は図 1.1-2 に示すように比較的大きなスケールを有するものであるが、小さな時空間スケールを有する個々の積乱雲の発生・発達が線状降水帯の形成の根本的な要因であり、スケール階層構造が見られる。

線状降水帯は、山や島などの地形が直接的に影響しないものと、地形性豪雨の一形態となるものに大別される。そのうち前者に対し、例えば図 1.4-1 の事象では、積乱雲群は大気の中層における流れ（ステアリングフロー）に沿って風下側に移動しており、集中豪雨域の風上側後方にて新たな雨域が発生・発達している。このような形態のことを「バックビルディング（back-building）」という。この形態では、暖湿な水蒸気を含む大気下層の流れの向きがステアリングフローの風向と同じくしており、発達した積乱雲（群）からその後方に流出した冷たく乾いた風と収束することで暖湿流が上昇し、新たな積乱雲が生成され、この形態が持続するものである（図 1.4-2）。下層インフローが降雨帯やステアリングフローの走向に対して垂直側にある場合にも線状降水帯が発生しやすくなり、バックビルディングの派生型として「バックアンドサイドビルディング（back-and-side-building）」型の豪雨と呼ばれている（瀬古, 2010）。

図 1.4-2 では、「スコールライン」型が線状降水系の形成の一形態として示されている。スコールラインは、雷や突風を伴う激しい現象であるが、災害に繋がる集中豪雨にはならないことが多い。主要な寒冷前線等から離れて出現し、長さ数十～百キロ程度にわたって形成された積乱雲群の走向に直交する方向に積乱雲が

速く移動するため、1 か所でもたらされる大雨の継続時間は長くないからである。しかし、例えば、暖気塊と冷氣塊の境に局地的に停滞する前線が形成され、複数の積乱雲が前線上で同時に発生した場合には線状降水帯が形成されることがあり、2013年10月16日の伊豆大島での大雨はこの形態によるとされている（加藤, 2022）。米国におけるスコールラインの形態分類（Blustein & Jain, 1985）では、1) 破線型、2) バックビルディング型、3) 破面型、4) 埋込み型、の4形態が提示されている。線状降水帯の形態もこの分類に基づいて説明することができ、多くはバックビルディング型と破面型（瀬古（2010）ではスコールライン型と定義）で発生している（加藤, 2022）。

地形性の線状降水帯は、梅雨期に九州地方西岸域でしばしば発生することが知られている。五島列島、長崎半島、鹿児島県の甕島（こしきじま）等から伸びる線状降水帯がよく知られ、それぞれ五島ライン、長崎ライン、甕島ライン等と呼ばれている（図 1.4-3）。風上側に次々と積乱雲が発生するという点で、バックビルディング型の形成形態が表われているといえる。それぞれの島は 500m 程度の標高を有しており、平坦地形を仮定した数値シミュレーション結果を基に、線状降水帯の発生に対する地形効果が確認されている（Yoshizaki et al., 2000）。また、メソβスケール擾乱の接近に伴い、下層の非常に湿った南西風が甕島周辺で地形走向に直交する方向に変わって山岳の影響が大きくなることや、線状降水帯の発生には標高に応じたフルード数を超える、すなわち山越えする風速が必要であること等、発生メカニズム（吉崎 & 加藤, 2007）に関する知見が蓄積されている。

梅雨期の線状降水帯の発生に関連する降水システムとして、梅雨前線上で発生する小低気圧（通常の温帯低気圧よりも小規模で 1000km 程度以下の水平スケールを有する低気圧を指す）やクラウド・クラスター（直径 100~300km 程度の楕円形にまとまった積雲対流の塊を指す）が挙げられる。例えば、1982年7月23日に長崎市に大水害を引き起こした集中豪雨では、クラウド・クラスター規模の擾乱についてもそれぞれ東に移動しつつ、その一方で西側に新たなクラスターが形成され、次々と入れ替わる状況が長時間維持された（二宮, 2021）。上記の地形性の長崎ラインとは異なる発生メカニズムを有していると考えられるが、その明確な説明にはさらなる研究を要する。

表 1.4-2 によれば、地域によって差はあるが、集中豪雨事例のうち約 4~6 割で線状降水帯が発生したと報告されている（Kato, 2020, 加藤, 2022）。その走向は、地形と下層水蒸気の流入方向を決める気圧配置の影響を強く受けており、下層イ

ンフローの方向に対して時計回りに回転した方向に組織化される (図 1.4-4). 集中豪雨は台風や熱帯低気圧本体の周辺で一番多く発生しており, 本体から離れた遠隔でも発生数が多い (表 1.4-2). 一方, 線状降水帯の場合, 発生割合は最も低く, 停滞前線全体の 2/3 を超えている. 総観場に応じた発生のしやすさは月別の発生数・発生割合に影響し, 集中豪雨の発生数は 8 月と 9 月が多く, 線状降水帯の発生割合は 5 月・6 月に高い.

こうした過去の線状降水帯の発生事例の解析から, 線状降水帯が発生しやすい気象条件が提案されている. 具体的には, 高度 500m 以上の相当温位が高く, 上空大気が湿っていること, 大規模スケールでは上空の上昇気流場となっており, メソスケールでは鉛直シアがあること, が必要であるとされている (Kato, 2020). こうした条件を表現する 500m 高度の水蒸気フラックス量等の 6 指標が, 気象庁による予報業務で利用されている (加藤, 2022).

線状降水帯の発生に関わるものとして, 最後に「大気の河 (Atmospheric River)」(「大気の川」と呼ばれることもある) について述べる. これは中緯度で発生する総観規模の水蒸気輸送帯を指す. 高水蒸気帯の幅は 500~100km、長さは数千 km にわたることもあり, 梅雨期に中国大陸から日本付近にかけた対流圏中層に形成される高水蒸気域として知られる湿舌とは空間スケールが異なる. 図 1.4-5 で示す事例では, 非常に湿った空気塊が日本のはるか南海上から関東・東北地方に流れ込んでおり, 茨城県常総市にて鬼怒川が決壊する等の大規模な水害につながった. 後にこの事例は「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨」と命名された. 日降水量が上位 1 パーセントイルに入る大雨事象の発生総数に対する大気の河の発生頻度について, 気象再解析データ等を用いた解析 (山田 & 釜江, 2022) では, 西日本太平洋側で春季に 60~90%, 夏季に 30~70% であり, 東北地方日本海側や北海道南部等の北日本でも強い降水と大気の河が関係している (図 1.4-6). 大雨・豪雨に対する総観規模の現象の関与が示唆されているため, 今後, 大気の河の発生やその際の水蒸気量について, 気候学的な変動や線状降水帯の発生と関連させた解析が期待される.

表 1.4-1 2004 年～2022 年に気象庁が命名した豪雨事例の概要.

主な発生箇所	豪雨の冠名	発生年月日	主な総観場・環境場
新潟県・福島県会津地方	平成16年7月新潟・福島豪雨	2004年7月12日～14日	梅雨前線
福井県	平成16年7月福井豪雨	2004年7月17日～18日	梅雨前線
長野県・鹿児島県等	平成18年7月豪雨	2006年7月15日～24日	梅雨前線
愛知県等	平成20年8月末豪雨	2008年8月26日～31日	停滞前線の南側
広島県・山口県・福岡県等	平成21年7月中国・九州北部豪雨	2009年7月19日～26日	梅雨前線
新潟県・福島県会津地方	平成23年7月新潟・福島豪雨	2011年7月27日～30日	梅雨前線の南側
福岡県・熊本県等	平成24年7月九州北部豪雨	2012年7月11日～14日	梅雨前線
広島県等、西日本から東日本の広い範囲	平成26年8月豪雨	2014年8月15日～20日	停滞前線の南側
関東地方・東北地方	平成27年9月関東・東北豪雨	2015年9月7日～11日	台風起因の暖湿気流
福岡県・大分県等、西日本	平成29年7月九州北部豪雨	2017年7月15日～16日	梅雨前線
西日本を中心に全国	平成30年7月豪雨	2018年6月28日～7月8日	梅雨前線
千葉県等	令和元年房総半島台風による大雨、暴風等	2019年9月7日～10日	台風
静岡県・新潟県、関東甲信越・東北地方	令和元年東日本台風による大雨、暴風等	2019年10月10日～13日	台風
熊本県等の西日本から東日本、東北地方の広い範囲	令和2年7月豪雨	2020年7月4日～7日等	梅雨前線

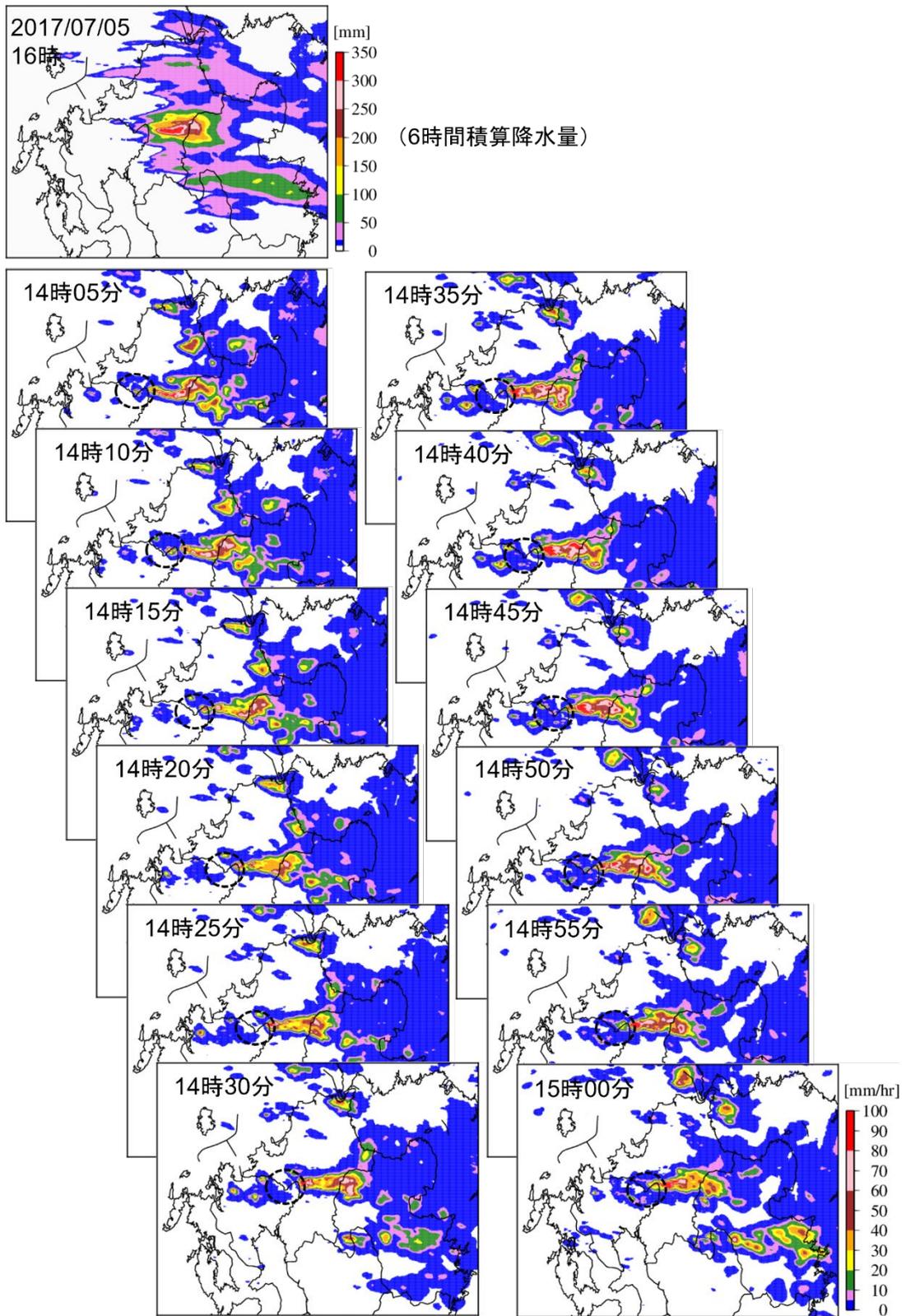
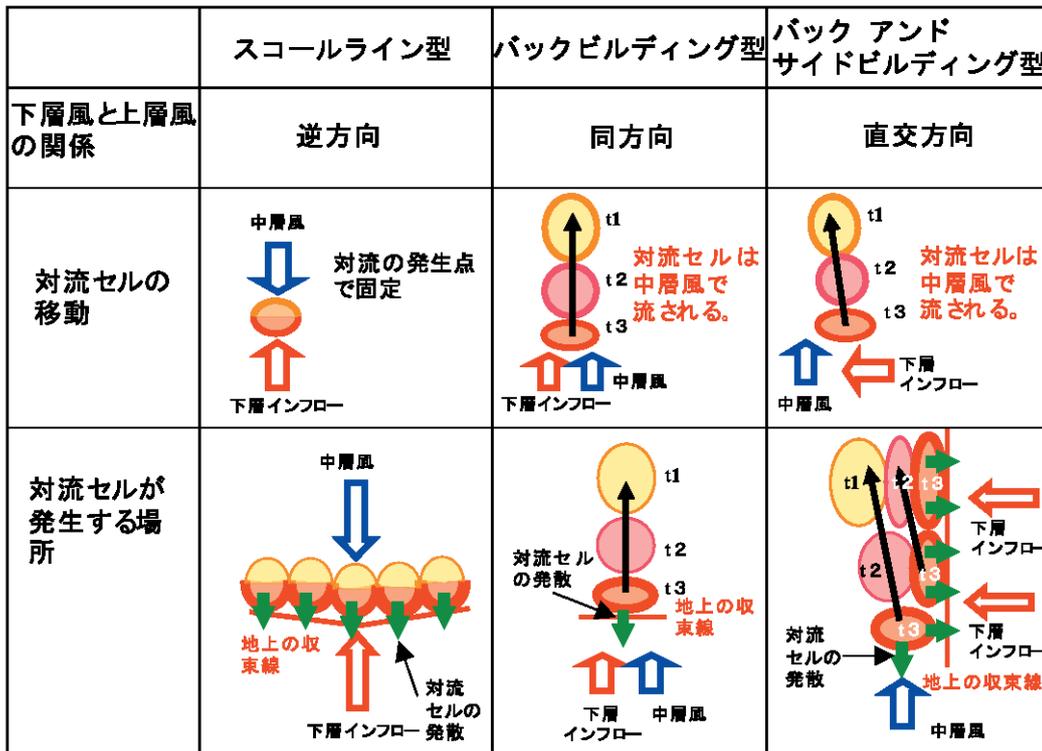


図 1.4-1 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における 6 時間積算降水量と降水量分布の時系列（気象庁高解像度ナウキャストの 5 分毎のデータを使用）。



丸と黒い矢印は、対流セルとその移動を示す。対流セルの色は、新しいものを赤く、古いものは黄色として配色した。緑の矢印は対流セルからの外出流、赤と青の矢印は下層インフローと中層ステリングフローの風向を示す。t1～t3は各対流セルの発生時刻を示す。

図 1. 4-2 線状降水帯の形態と対流セルの動きに関する模式図（瀬古(2010)より転載）。

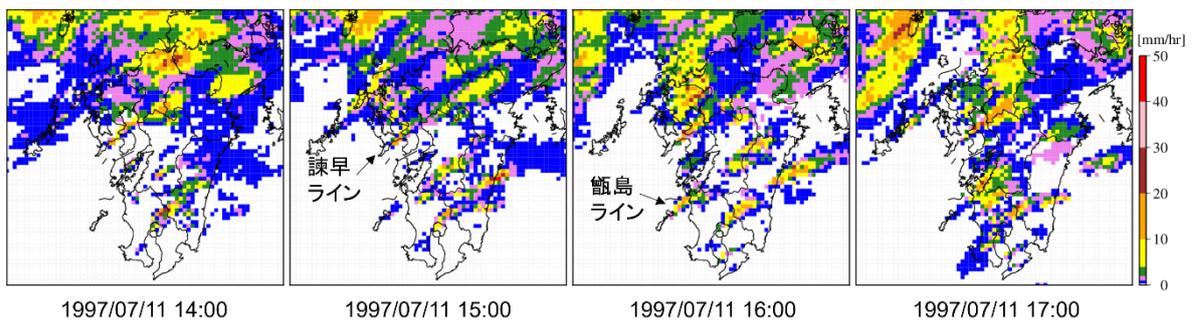


図 1. 4-3 地形性線状降水帯の例（解析雨量データによる 1 時間降水量分布）。

表 1.4-2 Kato (2020) による集中豪雨事例と線状降水帯事例の総観場別分類.

総観場：擾乱との距離関係	集中豪雨 事例数：A	線状降水帯 事例数：B	割合 B/ (A+B)
低気圧：500km以内	97	45	46
寒冷前線：200km以内	43	31	72
停滞前線：500km以内	159	108	68
台風・熱帯低気圧本体：500km以内	229	75	33
台風・熱帯低気圧遠隔： 300~1500km以内	124	76	61
上記以外	63	23	37
合計	715	358	50

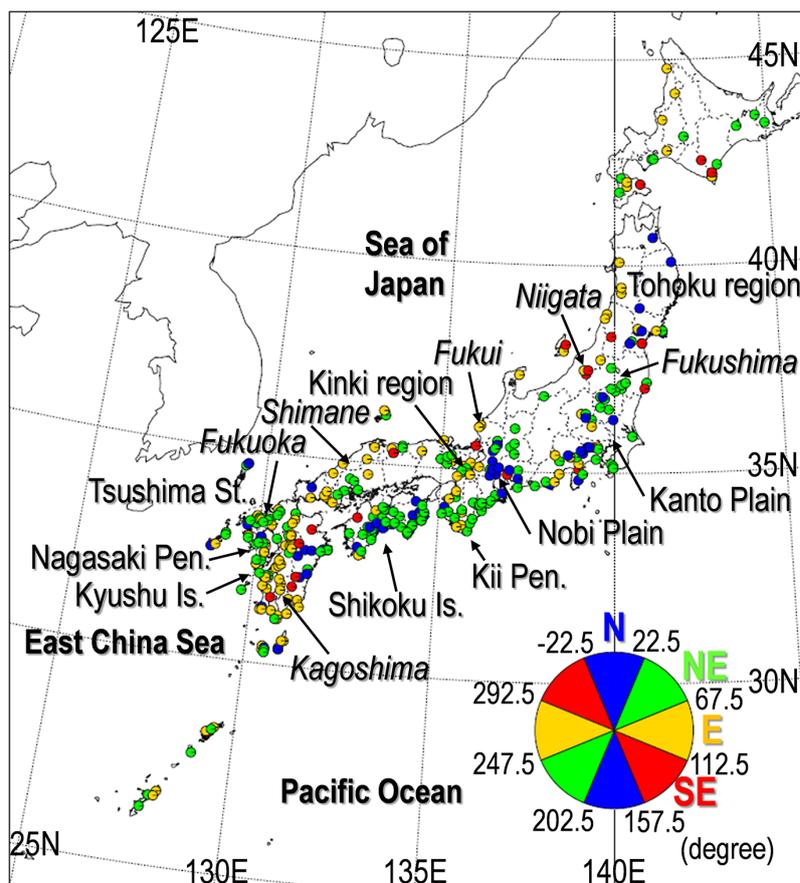


図 1.4-4 線状降水帯の発生箇所とその走向（カラー）（Kato (2020) より転載）.

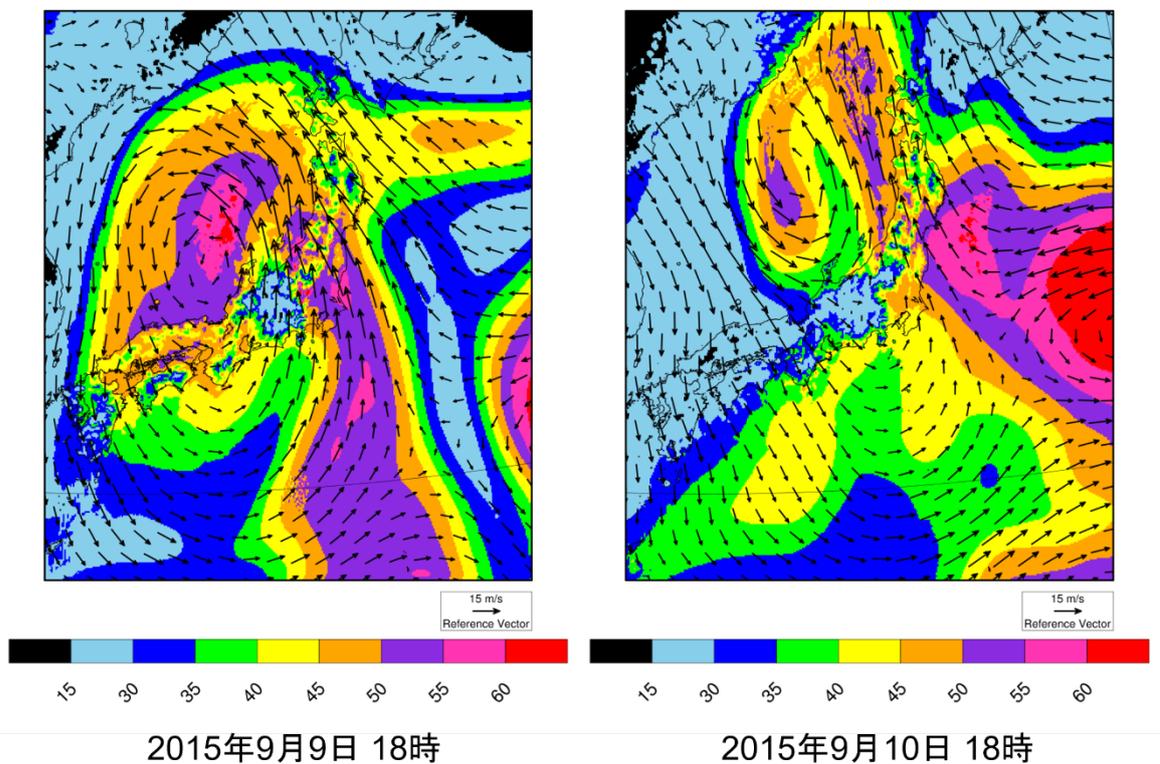


図 1.4-5 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨時の数値気象モデルにより解析された可降水量（鉛直積算水蒸気量）（ $\text{kg}/\text{m}^2$ ）と 700hPa 風速ベクトル。

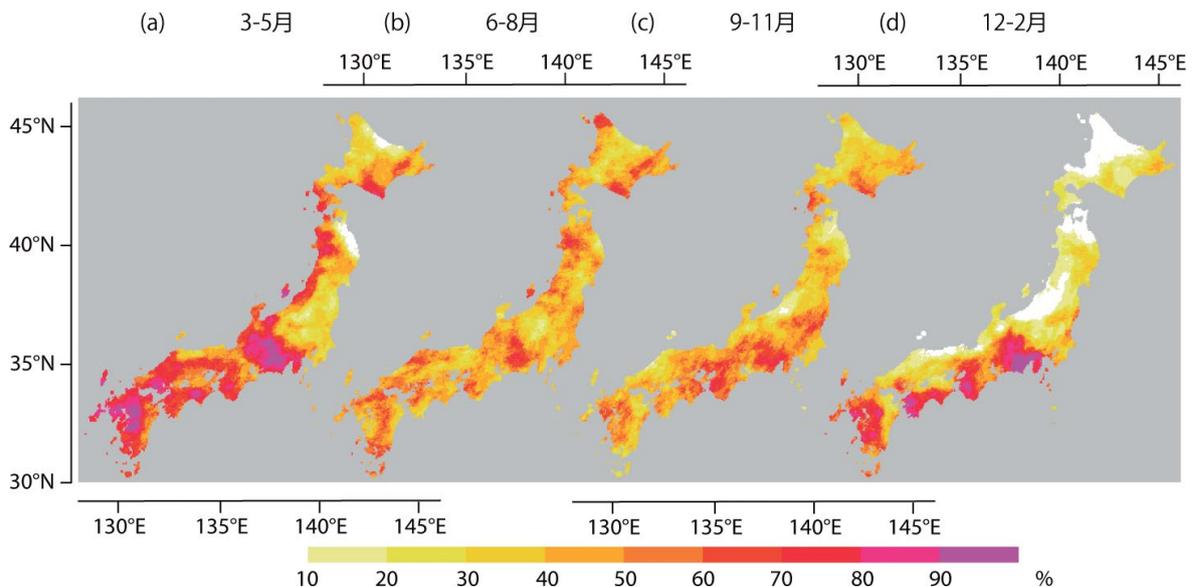


図 1.4-6 大気の河を伴う 2 日以上継続する降水（上位 1 パーセントイル）の発生頻度（%）（山田 & 釜江(2022) より転載）。

## 参考文献

- Bluestein, H.B., Jain, M.H., 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.*, 42, 1711–1732.
- Kato, T., 2020. Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “senjokousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 485-509.
- Yoshizaki, M., Kato, T., Tanaka, Y., Takayama, H., Shoji, Y., Seko, H., Arao, K., Manabe, K., X-BAIU-98 Observation Group, 2000. Analytical and numerical study of the 26 June 1998 orographic rainband observed in western Kyushu, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 78, 835-856.
- 加藤輝之, 2022. 集中豪雨と線状降水帯. 気象学ライブラリー3, 朝倉書店.
- 瀬古弘, 2010. 中緯度のメソβスケール線状降水系の形態と維持機構に関する研究. 気象庁研究時報, 62, 1-74.
- 二宮洗三, 2021. 1982年7月23–24日の九州豪雨を伴った梅雨前線低気圧の事例解析 第Ⅱ部: 手気圧内の小規模循環系・降水系. 天気, 69, 575-590.
- 山田将喜, 釜江洋一, 2022. 日本で発生する相対的に強い降水に占める大気の流れの割合. 天気, 69, 609-619.
- 吉崎正憲, 加藤輝之, 2007. 豪雨・豪雪の気象学. 応用気象学シリーズ4, 朝倉書店.

## 2 豪雨による水力設備の被災事例

本章では、至近 20 年程度で発生した豪雨による国内外の水力発電設備の被災事例と、その後の恒久対策を紹介する。なお、巻末には 2005 年以降の水力発電所被災事例一覧を記載している。

### 2.1 2005 年 9 月 台風 14 号 耳川水系(九州電力)

2005 年 9 月に発生した台風 14 号は、宮崎県耳川流域で約 700mm (2 日間) の記録的豪雨となり、耳川水系の広範囲で未曾有の災害が発生した。約 500 箇所の斜面崩壊、家屋 424 戸の浸水災害、九州電力の 4 水力発電所が浸水により発電不能、3 ダムで越水した (図 2.1-1, 図 2.1-2)。



図 2.1-1 斜面崩壊の状況.

図 2.1-2 諸塚村中心部での浸水の状況.

浸水被害は、記録的豪雨に加え、斜面崩壊により河川に土砂が流入したことで河川水位を上昇させたことが原因であった。災害直後は二次災害防止に向け、ダム堆積土砂の除去など応急対策をしながら浸水した発電所の復旧作業を実施した。この時九州電力はダム単体での対策では不十分であり、河川整備や山地保全を含む流域全体での対策が不可欠と判断し、宮崎県、学識者などに繰り返し流域全体での対策の必要性を提案した。

河川管理者である宮崎県は、学術機関や九州電力などを含めた検討会を 2006 年 3 月に設置し、河川整備計画の見直しと流域関係者と連携する総合土砂管理に取り組むこととした。また、総合土砂管理に関する具体的な取り組み内容や役割分担などについては、流域住民や九州電力を含む関係者と議論を重ね、「総合土砂管理計画」を 2011 年 10 月に策定した。九州電力はダムを改造して水や土砂を流しやすくするとともに、ダム通砂運用を行うことにより、浸水被害の低減に資することを提



図 2.1-3 総合土砂管理計画の取組み概要.

表 2.1-1 流域関係者の役割分担とダム通砂事業の内訳.

領域	事業名	担当	領域	事業名	担当
山地	森林・林道整備	県 流域自治体	河道	河川整備	県
	治山・砂防	県		その他 (環境保全支援等)	県 流域自治体 森林組合
ダム	ダム通砂他	九州電力	河口 海岸	河口・海岸保全	県
項目	内 容				
ダム改造・通砂運用	<ul style="list-style-type: none"> <li>洪水時に上流から流入する水や土砂が流れやすくなるようダムの中央部を切り下げ</li> <li>出水時のダム運用を変更し，通砂機能を向上</li> </ul>				
土砂移動	<ul style="list-style-type: none"> <li>通砂時にダムから一挙に土砂が流下するのを防ぐため，安全，環境上影響のある土砂を通砂前に安全な場所へ移動</li> </ul>				
護岸補強	<ul style="list-style-type: none"> <li>通砂時に影響を受ける池周辺護岸を補強</li> </ul>				
モニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>河川の形状や水質及び動植物等への影響把握</li> </ul>				

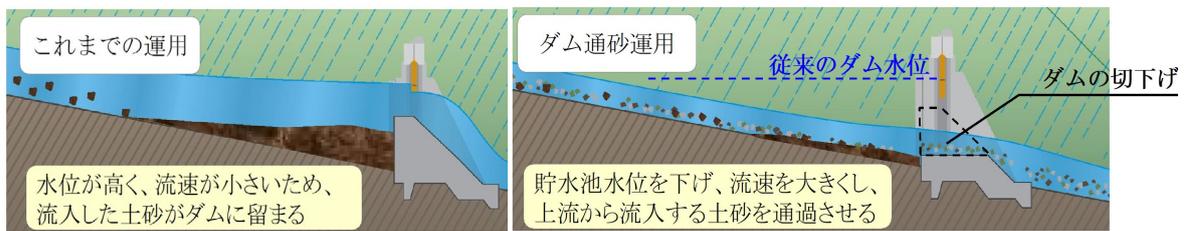


図 2.1-4 ダム通砂運用の概要.

案し、関係者の理解を得る対応を行った（図 2.1-3，表 2.1-1，図 2.1-4）。

宮崎県は、総合土砂管理に関する取組みを継続的に評価・改善する仕組みを構築し、流域関係者で議論を定期的に行っている。また、地域との協議・対話の回数は、災害以後延べ 300 回を越え、その間河川に稚魚を放流するイベントや地域広報誌への掲載など様々な活動を行いながら、工事・調査・ダム通砂運用に関する説明会や現場見学会も数多く行っている。

地域との対話を通じ、ダムの放流情報を知りたい、カメラ映像を見たいというような地域のニーズを踏まえ、ダム通砂運用時にはリアルタイムで情報発信する仕組みを構築しており、結果としてダム通砂運用に関し、地域住民から概ね理解を得るまでに至った。更に平時からダムや発電所設備への関心や理解を深めるための対応を行い、危機の際の迅速な避難に繋がられるよう、地域住民とリスクコミュニケーションを継続的にしている。このリスクコミュニケーションの取組みについては、水力発電所がある他水系でも計画的に行っており、着実に水平展開されている。

最後に耳川では災害直後、地域からの厳しい声が多かったが、次第に軟化し、現在では九州電力の取組みに対して概ね理解を得るまでに至った。地域住民を含む流域関係者が一同に会し、流域全体の問題を前向きに議論する場合は、地域住民の理解や信頼関係の醸成に非常に有効である。

## 2.2 2010年9月 台風9号 須川発電所上野川取水堰(東京電力)

台風9号は、9月8日の午前11時過ぎに福井県敦賀市付近に上陸後、岐阜県を通過し、午後3時には静岡県付近で熱帯低気圧に変わり、その後、東海上へ抜けた。上陸地点が北陸となった観測史上初の台風であり、台風上陸前から停滞前線を刺激した影響で、東海・関東地方などを中心に大雨となった。

被災した須川発電所上野川取水堰が位置する静岡県駿東郡小川町では、1日の降雨量が490mmを記録し、日降雨量として当時の観測史上最大であった。本降雨の影響により、取水堰下流基礎部の洗堀が発生した他、左岸側法面の崩落、護岸・護床工の流出が発生し、堰の安定性に影響を受ける被害となったが、幸いにも堰本体が崩壊することはなかった。

被災後に図2.2-1の洪水痕跡から流量を推定したところ、洪水流量は $129\text{m}^3/\text{s}$ となり、設計洪水流量( $37\text{m}^3/\text{s}$ )を大きく上回っていたことが確認された。これは、当該地点近傍の水文データを用いて算出した200年確率洪水流量を上回るものである。

被災した取水堰は、翌年の出水期前(2011年6月)までに取水堰の安全性を確保するよう原型復旧を基本とした“仮復旧対策”を実施した。また、既往最大流量 $129\text{m}^3/\text{s}$ を当該地点の設計洪水流量としたうえで、翌年の渇水期(2011年11月)より現行基準(河川砂防技術基準等)に基づく恒久対策を実施した。なお、この恒久対策は度重なる出水や降雪の影響により竣工までに2年を要した。



図2.2-1 最大水位(越流の痕跡状況より).

仮復旧対策の全景は図 2.2-2 に示す通り、取水堰基礎部の洗堀箇所を中心に、コンクリート充填を実施、取水堰基礎部の安定化を図った。その後、見直した設計洪水流量が流下した場合においても取水堰ならびに地山の安定が保たれるよう、取水堰上下流に護岸を構築するとともに、下流には水叩きにコンクリートとフトン管を併用した洗堀防止対策を実施した。

恒久対策方法は表 2.2-1 に示す 3 案について検討を行い、現場周辺状況・施工性・工事期間等を総合的に判断し、仮復旧した取水堰の下流に新たに取水堰を設ける「下流新設案」とした。取水堰の設置概要は、図 2.2-3、図 2.2-4 の通り、仮復旧時の水叩き範囲ならびに新設取水堰の掘削等を考慮し、極力仮復旧した取水堰に近接させることとした。なお、取水堰の新設に伴い、水叩き、護岸等の付帯設備も新たに構築した。



図 2.2-2 仮復旧対策全景.

表 2.2-1 恒久対策案比較表.

	腹付け案	下流新設案	同位置新設案
検討ケース			
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>堰堤下部の地盤改良が必要</li> <li>施工期間中は上流に堆積する土砂撤去が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取水・排砂設備の位置変更が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設撤去により周辺地山の安定性が損なわれる可能性がある</li> <li>施工期間中は上流に堆積する土砂撤去が必要</li> </ul>
工期	13ヶ月	8ヶ月	11ヶ月

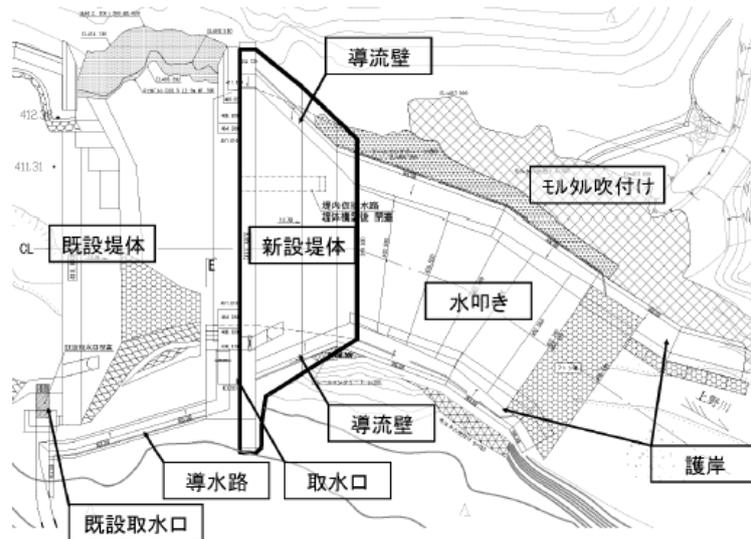


図 2.2-4 恒久対策平面図.

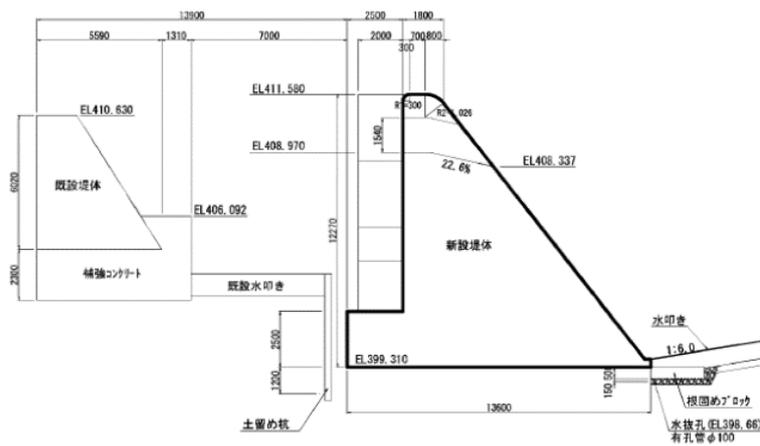


図 2.2-5 恒久対策断面図.

参考文献

君島真二，菅野文雄，清水博文，2014. 平成 22 年度台風 9 号による水力発電所土木設備の被害と復旧. 電力土木, 370, 30-34.

牧野博幸，村口英之，青木亮介，2014. 須川発電所上野川取水堰復旧工事の設計・施工. 電力土木, 370, 35-39.

### 2.3 2011年7月 台風6号 平鍋ダム(電源開発)

2011年台風6号は7月16日に中心気圧935hPa、最大風速50m/sの超大型で非常に強い勢力に発達し、7月19日に四国地方に接近した。台風はその後徳島県南部に上陸し、関東の南東海上で北に向きを変え、7月24日に三陸沖で温帯低気圧となった。高知県安芸郡馬路村魚梁瀬では当時の国内観測史上最大となる日降水量851.5mmを記録し、周辺地域に激しい豪雨をもたらした。魚梁瀬より約20km南に位置する平鍋ダム(図2.3-1,2)では、時間最大雨量57mm/h、累計雨量1,067mmを記録し、最大流入量が洪水量1,000m<sup>3</sup>/sを上回る1,847m<sup>3</sup>/sであった。

7月19日18時30分過ぎ、平鍋ダムの約500m上流右岸の支沢(平鍋大谷:図2.3-3)では、図2.3-4に示す大規模な深層崩壊が発生し、崩壊した土砂(約19万m<sup>3</sup>)は土石流となり、渓岸侵食を伴いながら最終的に約32万m<sup>3</sup>の土砂がダム調整池内に流入した。この時のダム水位は、満水位より85cm低い標高であったが、大量の土砂が調整池内に流入したことで段波が発生し、その波はダムを越流した。ダムを越流した波はダム天端より約2mの高さに達し、十数秒越流した。



図 2.3-1 平鍋ダム位置図.



図 2.3-2 平鍋ダム全景(被災前).



図 2.3-3 平鍋大谷平面図.

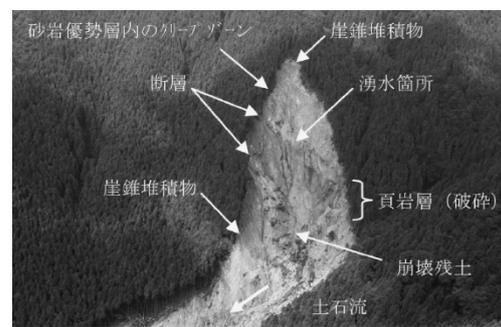


図 2.3-4 崩壊箇所の全景.

この越流により、洪水吐ゲートの制御機器が浸水し、ゲート動作が機能不全となった(図2.3-5)。ダムの越流によって、洪水吐ゲートが機能不全となったため、今回の事象、すなわちダム堤頂より約2mの高さで十数秒に亘って越流しても洪

水吐ゲートが動作機能を損なわないよう対策を講じることとした。ただし、被災時のダム水位は満水位より 85cm 低かったため、満水位時に再発することを想定し、設計水位標高は堤頂+3m 程度とした。

被災後の調査により、ゲート動作の機能不全は電動機および機側盤が浸水し、絶縁抵抗が低下したことが原因と推定され、対策は水密性の確保に重点を置いた。

図 2.3-6 に電動機の改造状況、図 2.3-7 に機側盤の改造状況を示す。

電動機は、保護カバーを囲むように遮光板を設置して温度上昇を抑え、保護カバーの水密性を高めるために閉塞構造を強化した。また、高速回転するシャフト部は完全に閉塞できないため、底部に水溜り部を設けるとともに自然排水可能な排水孔を設けた。機側盤は、機側盤を囲むように遮光板を設置して盤内の温度上昇を抑え、浸水防止のため換気孔を塞ぐとともに、扉の締付を強化し、ケーブル引き込み部の水密性を向上させた。また、盤内の機器レイアウトを上部に変更し、被災前の機側盤を 90 度回転させ、上流側に導流板を設けることで、水流に対する抵抗力を向上させた（秦野ら, 2012）。



図 2.3-5 設備被害状況.

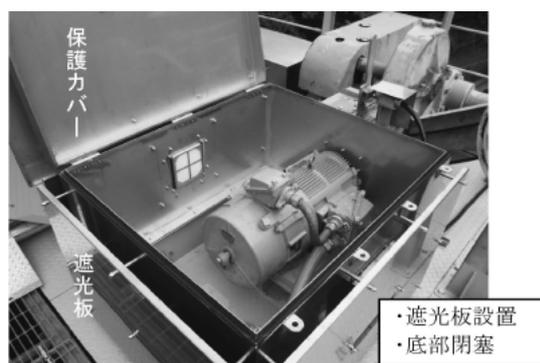


図 2.3-6 電動機の改造状況.

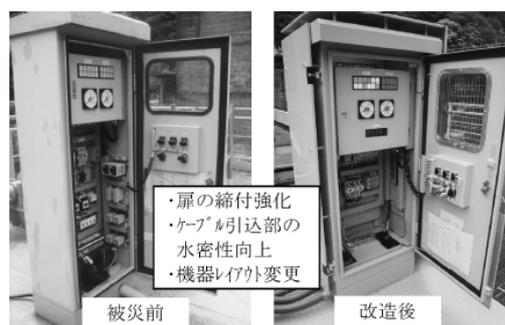
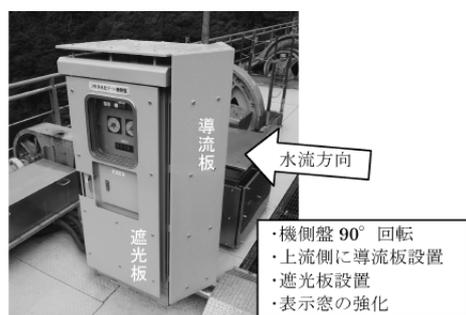


図 2.3-7 機側盤の改造状況.

## 参考文献

秦野輝儀, 中山義紀, 斉藤文彦, 2012. 土石流の流入に起因する平鍋ダムの越流

現象. 電力土木, 362, 44-47.

## 2.4 2011年7月 新潟・福島豪雨 阿賀野川水系(東北電力, 電源開発)

### 2.4.1 豪雨の概要

平成23年7月新潟・福島豪雨(以下、「豪雨」という.)は、7月26日未明より、新潟県上空付近に停滞していた前線に、南の太平洋高気圧からの暖かく湿った空気と北のオホーツク海高気圧から冷たく湿った空気が流れ込み、前線活動が活発化した。このため、7月27日から30日にかけて、新潟県中越地方から福島県会津地方を中心に多量の雨を降らせた。阿賀野川水系只見川流域の福島県南会津郡只見町の只見雨量観測所では、累計雨量が711.5mm(72時間雨量700.0mm:表2.4.1-1)、時間最大雨量で69.5mmを記録した。これは、平年の7月降水量の2倍以上であり、再現期間460年に相当する降雨量となっている。この豪雨により、図2.4.1-1に示す東北電力(株)阿賀野川水系の11地点の利水ダムのうち7地点で流入量が既往最大を記録し、9地点で設計洪水量を上回る出水となった。また、電源開発(株)の管理する6地点の利水ダムでは、全地点で流入量が既往最大を記録し、うち4地点は設計洪水量を上回る出水となった(表2.4.1-2)。

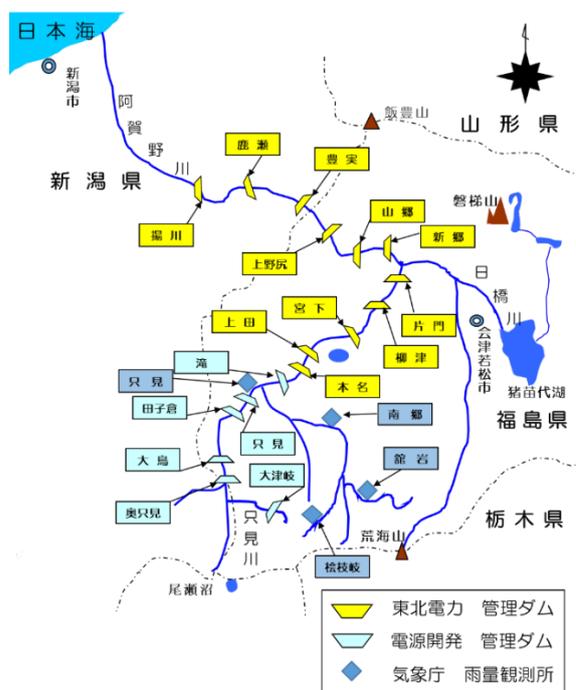


図2.4.1-1 発電所位置図。

表2.4.1-1 72時間雨量最大値。

近傍のアメダス地点	72時間雨量最大値 (mm)	
	新潟・福島豪雨	既往最大
只見	700.0 2012/7/30 04:30	378 2004/7/14 13:20
南郷	293.0 2012/7/30 05:30	216 1978/6/28 15:00
館岩	278.5 2012/7/30 06:20	242 1982/9/13 09:00
松枝岐	295.0 2012/7/29 22:30	245 1982/9/13 09:00

\*72時間雨量最大値は毎10分値より算出  
\*只見、館岩は欠測を含む値(↓マーク)  
\*下段は72時間の起日時

表2.4.1-2 各ダムの最大流入量※。

ダム名	設計洪水量 (m <sup>3</sup> /s)	既往最大 流入量 (m <sup>3</sup> /s)	新潟・福島豪雨
			最大流入量 <sup>*</sup> (m <sup>3</sup> /s)
電源開発(株)	大津岐	140	47
	奥只見	1,500	2,072
	大島	2,200	1,432
	田子倉	2,200	1,904
	只見	6,000	805
	滝	5,100	3,200
東北電力(株)	本名	5,400	4,620
	上田	5,900	5,700
	宮下	6,000	6,290
	柳津	6,200	6,580
	片門	6,300	6,800
	新郷	6,500	7,420
	山郷	6,500	7,540
	上野尻	6,800	7,570
	豊実	7,500	7,260
	鹿瀬	7,800	7,320
	揚川	9,400	6,840

\*太字: 設計洪水量を上回る出水

## 2.4.2 東北電力管内の設備被災事例と対策

この豪雨に伴う出水により 21 の発電所（総出力：約 100 万 kW）が停止し、ダム・発電所の護岸損壊、放水路ゲート、流木除けの損壊・流出、取水口・放水路への多量の土砂堆積、水車発電機の浸水等が発生し（図 2.4.2-1～3）、これまでにない甚大な被害を受けた。また、家屋の浸水、J R 只見線の落橋および国道 252 号線の橋の流出等の東北電力設備以外においても、大きな被害を受けた。

護岸の復旧（17 箇所）、放水路ゲート・流木除けの復旧（6 箇所）、堆積土砂の除去（約 8 万 m<sup>3</sup>）、発電所建屋内の土砂・汚泥除去（7 発電所）等を実施し（図 2.4.2-4～6）、全ての復旧が完了したのは 2015 年 6 月 1 日であった。

この豪雨により甚大な被害が発生したことを踏まえて、ハード面の対策としてダム下流減勢工の機能向上およびダム調整池内の堆砂対策、ソフト面の対策としてダム情報の公表等の対策を実施している。

ダム下流減勢工の機能向上については、本名ダム下流域において護岸の崩壊、護岸からの越水による農地浸水などの被害が発生したことから、この豪雨による出水と同規模の洪水流量においても被害が生じない対策を検討した。対策検討は、水理模型実験で減勢工（導流壁）の設置位置や形状について組合せや規模を変更しながら行った。減勢工の設置により流れの方向が河川の左岸側から中央部に變化し、表面流速も局所的な高速流の個所が低減すること、下流では中位な流速に



図 2.4.2-1

ダム下流護岸損壊状況.



図 2.4.2-2

放水路土砂堆積状況.



図 2.4.2-3

水車発電機浸水状況.



図 2.4.2-4

ダム下流護岸復旧状況.



図 2.4.2-5

放水路土砂除去状況.



図 2.4.2-6

水車発電機復旧状況.

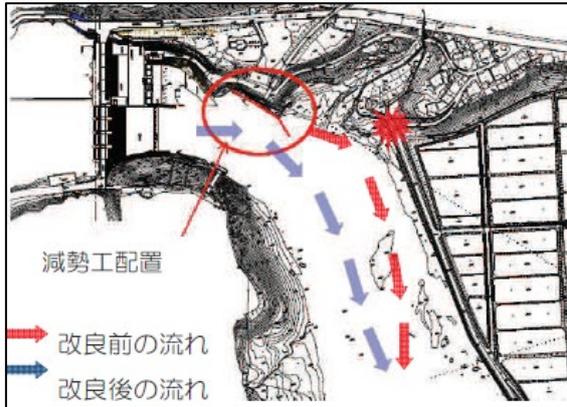


図 2.4.2-7 流水状況比較.

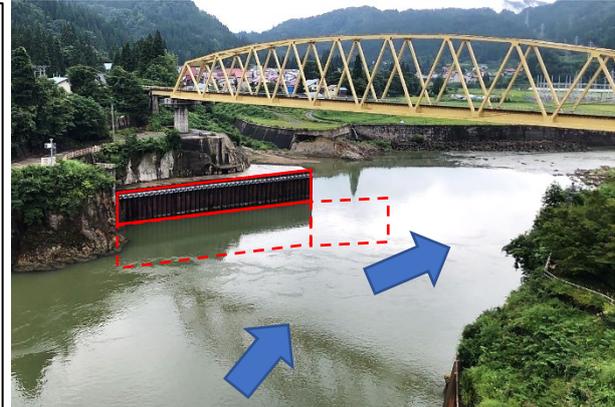


図 2.4.2-8 減勢工設置状況.

変化することを確認したことから、ダム下流約 200 m に護岸兼用構造の導流壁(延長 62m)と水流部に鋼管杭による溺堤構造の導流壁(延長 30m)を設置することとした。

この豪雨により、只見川流域においてダム調整池内に大量の土砂の流入があり、特に本名ダムでは、約 140 万  $m^3$  の堆砂量の増加が確認された。このため緊急対策として、支川合流部などの陸上から掘削が可能な範囲について重機による掘削を実施し、その後、本格的に浚渫を開始し 2022 年現在も継続して行っている。

ダム情報の公表については、流域自治体などからタイムリーなダム情報の提供や、雨量や河川水位等の情報提供の要望があったことを踏まえて、自社のホームページにより、阿賀野川水系の 11 ダムの情報を 2013 年 6 月 1 日より発信している。



図 2.4.2-9 ホームページ画面(ダム情報).

### 2.4.3 電源開発管内の設備被災事例と対策

この豪雨により、電源開発株が管理する6地点の水力発電所（総出力：約134万kW）では、管理用道路や発電設備など多くの設備が被災した。ダム・発電所にアクセスする管理用道路は、水力発電所6地点のうち5地点で被災し、奥只見発電所および大鳥発電所地点の被害が特に大きかった。奥只見・大鳥地点では図2.4.3-1に示す約11kmの区間で、図2.4.3-2に示すような周辺地山の崩壊や沢からの土砂流入による道路の埋没があり、道路自体の崩壊・流出が複数箇所が発生した。また、発電所への代替経路は無く、全線が通行不能となった。

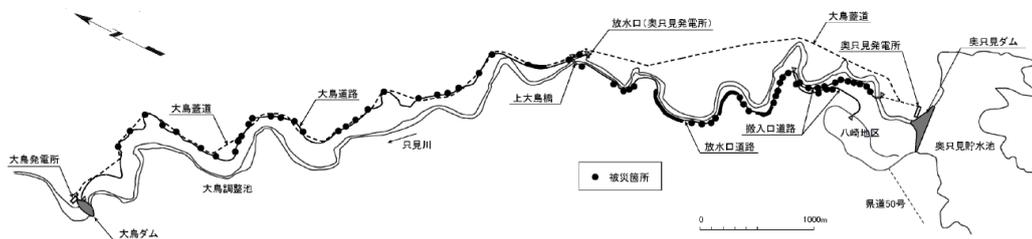


図 2.4.3-1 奥只見発電所・大鳥発電所の管理用道路と被災箇所.

管理用道路の復旧では、冬期（11月～翌6月中旬）は積雪および周辺に生息する希少動物の営巣への配慮から工事が制限され、2011年9月から10月に発電所へ車両・バイクが通行可能となるよう仮復旧を行い、発電所保守管理への影響を最小限とした。なお、図2.4.3-3に示す管理用道路の本復旧は仮復旧翌年から順次行い、2014年度に完了した（松本ら, 2012）。



図 2.4.3-2 管理用道路被害状況  
(奥只見発電所).



図 2.4.3-3 管理用道路復旧状況  
(奥只見発電所).

一方、滝発電所では、**図 2.4.3-4** に示すように洪水吐ゲート（扉体・戸当り）が漂流物の衝突により損傷、管理設備（取水口網場・橋梁・測水所）の流出、発電所下流護岸の損傷、発電所冠水による予備電源を含む全ての電源喪失等の被害を受けた。また、発電機停止と同時に発電放流が停止したことで、洪水吐ゲートからの放流水が発電所放水口方向にかけて旋回流が形成され、ドラフトから放水庭の区間に大量の土砂が堆積した（**図 2.4.3-5**）。

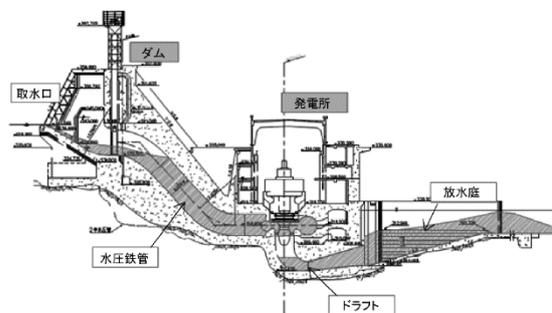
滝発電所で被災した設備は、早期発電再開を目標とし、原形復旧することを基本とした。復旧工事は、ダム監査廊および発電所内の排水、発電所内の各機器の点検・更新、ゲート類の補修および取放水口の土砂排除、発電機の分解点検の順で実施した。また、同等の出水における再発防止策として発電所電源の冠水対策をあわせて実施した。

取放水口の土砂排除に当たり、取水口から発電機の区間は、サンドポンプを使用して堆積土砂を吸引することで除去を行った。ドラフトから放水庭の区間は、放水口付近に支障物の存在が明らかとなり、**図 2.4.3-6** に示すように放水口直下流に鋼矢板による仮締切を設置し、ドラフト内部を排水したうえで小型重機により土砂排除を実施した。

また、発電所の電源喪失原因は、**図 2.4.3-7** に示すように発電所敷地以上に達した河川水が屋外開閉所のケーブルダクト貫通口からケーブルトンネルを通じて流入し、発電所内の系統電源関連機器が浸水したことが原因であった。したがって、発電所の冠水対策は、①ケーブルダクト貫通口へのウレタン系樹脂材の挿入、②ケーブルトンネルと発電所の仕切り扉を防水扉化、③系統電源関連機器を上部階へ移設、④ダム用予備電源をダム天端標高へ移設することを実施した（竹内 & 小林, 2016）。



**図 2.4.3-4** 滝発電所下流の被害状況。



**図 2.4.3-5** 放水口土砂流入状況。



図 2.4.3-6 放水口土砂排除施工状況.

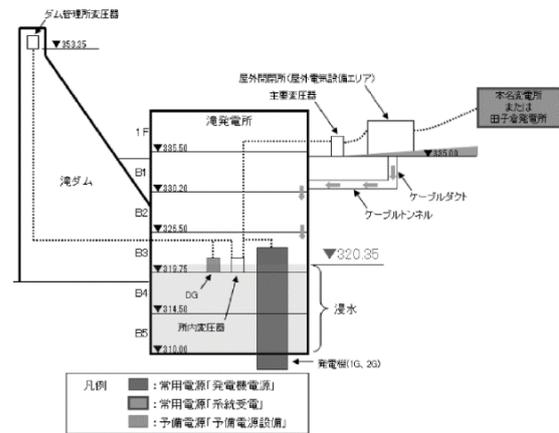


図 2.4.3-7 滝発電所冠水状況.

### 参考文献

松本匡司, 熊谷騰, 山元未来, 2012. 平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨による水力発電所被害とその復旧状況. 電力土木, 362, 48-51.

竹内剛, 小林弘尚, 2016. 平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨により被災した滝発電所災害復旧工事の概要. 電力土木, 381, 36-39.

## 2.5 2011年8月 台風12号(紀伊半島豪雨) 長殿発電所(関西電力)

2011年8月25日に発生した台風12号は大型で動きが遅く、日本の広い範囲で雨が長時間継続し、西日本から北日本の山沿いを中心に大雨となった。特に降水量が多かった紀伊半島では、総降水量が広い範囲で1,000mmを、一部の地域では2,000mmを超え、後に「紀伊半島大水害」と呼ばれる甚大な被害が発生した記録的な大雨となった。

この水害において、関西電力管内では延べ196,000件もの停電が発生した他、多岐にわたる設備に被害が生じた。水力発電所については、関西電力奈良支店、和歌山支店で所管(当時の組織呼称・体系による)されていた30発電所のうち17発電所が被害を受け、特に壊滅的な被害を受けたのが奈良県南部の十津川村に位置する長殿発電所である。被害状況を図2.5-1に示す。発電所建屋、変電設備等の地上構造物は跡形もなく損壊、送電鉄塔も大きく変形していることが分かる。ここまで被害が大きくなった要因は、記録的な豪雨による大出水というだけでなく、図2.5-2に示すように山間の斜面崩壊により大量の土砂が河川に流入し段波(山津波)が発生したことによるものと推定されている(土居ら, 2013)。

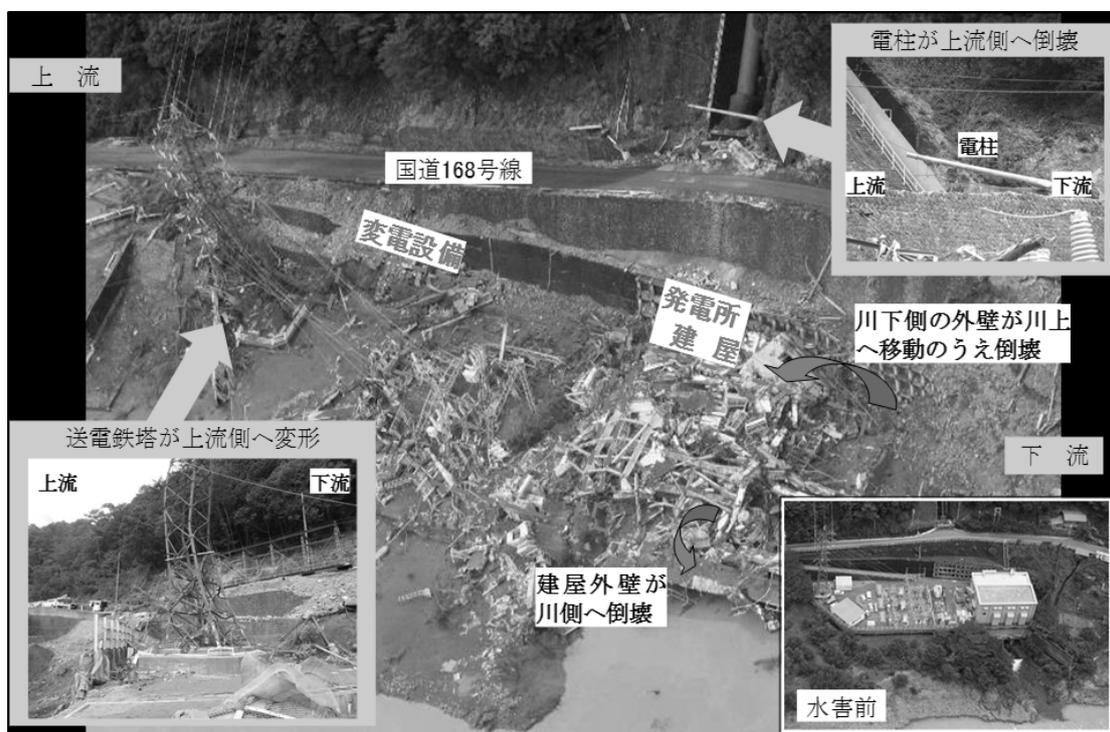


図2.5-1 長殿発電所の被害状況.

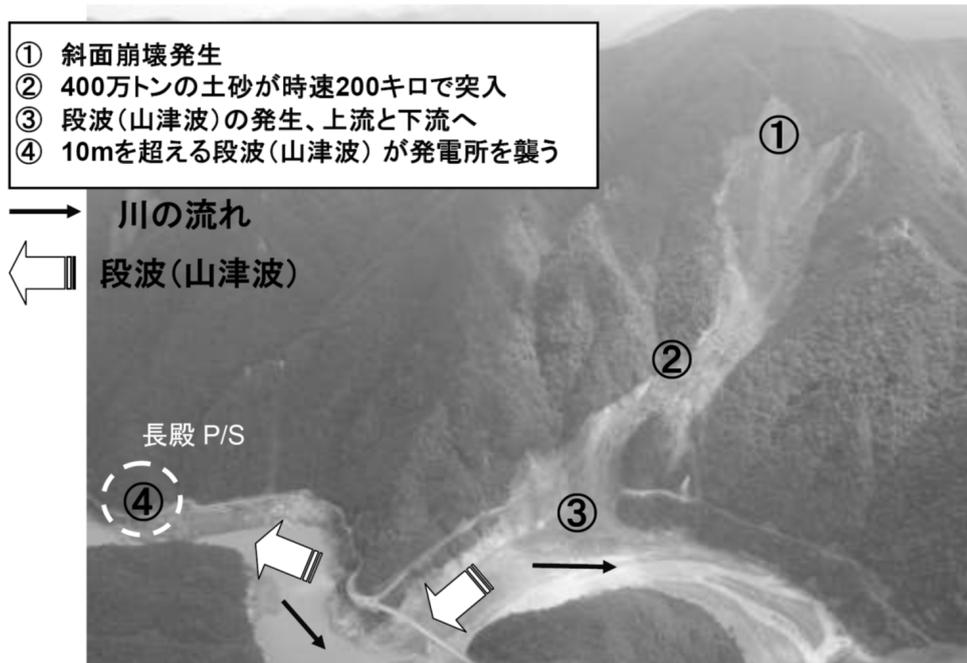


図 2.5-2 被害状況.

台風 12 号により多数の斜面崩壊が発生したことで、長殿発電所上下流 5km の区間では約 20 万  $m^3$  の土砂が河床に堆積しており、出水前と比べ河床高が大きく上昇した。そこで、発電所の復旧にあたっては、河床高の将来予測を行い、発電所敷地高を約 4m 嵩上げすることとしている。また、放水口についても将来河床に埋没されないよう、周囲の土留壁を設けた放水庭構造に改良し、発電放水位を既設より 2.5m 上昇させることとした (図 2.5-3)。

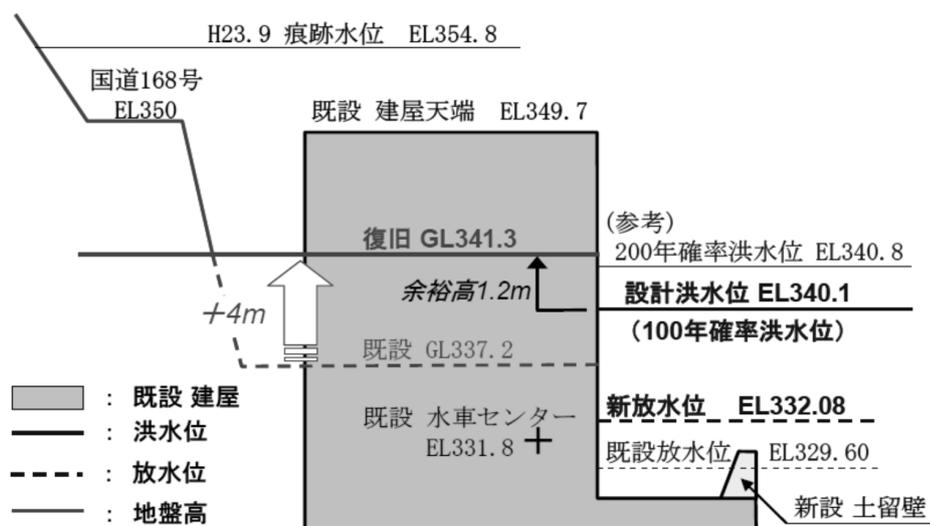


図 2.5-3 復旧基本計画.

加えて、長殿発電所地域には地滑り地点が見られ、将来的にも斜面崩壊による発電所への影響が考えられた。具体的には、台風12号において損壊の主要因となった段波の発生や、土砂ダムのバックウォーターによる10m以上の浸水が想定された。このような想定に対して敷地のかさ上げ等の対策は合理的ではないと判断し、長殿発電所の復旧においては「水害による被害は浸水レベルに留め、水車発電機・建屋は損壊させず、メンテナンスの範疇で普及できるものとする」というコンセプトに基づく減災設計を行っている（土井ら, 2020）。

主な減災対策として、段波に対しては地上構造物を最小限にとどめ、建屋を含めた発電設備は地下に配置する半地下式の発電所としている。次に土砂ダムのバックウォーターに対しては浸水を許容することとしている。これは、バックウォーターによる浸水状態は長時間継続すると想定され、発電所内部への浸水を防ぐとなれば建物の内外に生じる大きな水圧差に耐える構造とする必要があり、これは稀頻度の水害に対して過度な設計となると判断されたためである。

長殿発電所の復旧工事についてはすでに完了し（図2.5-4）、2018年6月から運転を再開している。本被災事例は豪雨に伴う斜面崩壊が引き起こした段波という想定外の外力により発生したものである。復旧にあたっては将来の河床変動に加え、段波を含む斜面災害による影響も考慮した減災設計というコンセプトが採用されており、近年激甚化する自然災害リスクへの対応の方向性を示す一つの事例であると思われる。



図 2.5-4 発電所全景（復旧後）。

## 参考文献

- 土居裕幸，村元茂則，室田高志，2013. 長殿発電所災害復旧に関する技術検討.  
電力土木，367，73-77.
- 土井喜則，内海貴人，新谷昌弘，2020. 紀伊半島大水害被災水力発電所の復旧～  
長殿発電所復旧報告～. 電力土木，406，14-18.

## 2.6 2016年8月 北海道豪雨 富村発電所・右左府発電所(北海道電力)

### 2.6.1 豪雨の概要

2016年8月16日～30日にかけて、観測史上初めて4つの台風(7, 9, 10, 11号)が北海道に連続して上陸・接近し、記録的かつ急激な大雨により、北海道電力(株)が所有する全56水力発電所のうち、最大19発電所が発電停止となった。また、この期間において、北海道電力(株)管内全27のダム地点のうち、時間最大降雨強度30mmを超えたダムが9地点、年間降雨量のおよそ半分の400mmを超えたダムが11地点となった(表2.6.1-1)。特に、道東太平洋側を中心に豪雨の影響が大きく、新得水力センター管内十勝川水系富村発電所、日高水力センター管内沙流川水系右左府発電所、沙流川取水堰で大きな被害が発生した。

表 2.6.1-1 ダム地点における降雨量.

時間最大降雨強度	15～20mm	20～30mm	30mm～
	4地点	14地点	9地点
累計雨量	200～300mm	300～400mm	400mm～
	6地点	9地点	11地点



図 2.6.1-1 被害設備位置図.

### 2.6.2 富村発電所の被害状況と復旧

富村ダム調整池には約2万 $m^3$ の流木、約50万 $m^3$ の土砂(過去5カ年の年間平均土砂量の約8倍)が流入した。これに伴い、取水口前面に大量の土砂・流木が押し寄せ、取水口スクリーンが損傷した(図2.6.2-1)。また、スクリーンが損傷したことにより、導水路内に大量の土砂(高さ最大約75cm、堆積量約7千 $m^3$ )が堆積した(図2.6.2-2)。



図 2.6.2-1 取水口スクリーン損傷状況. 図 2.6.2-2 導水路土砂堆積状況.

導水路内の土砂処理工事は、図 2.6.2-3 に示すとおり、富村ダム取水口から下流に向かう A 班、作業横坑から上流・下流に向かう B 班、C 班の 3 班体制により実施した。各班ともに、水路内では旋回可能なミニバックホウ (0.07m<sup>3</sup>) 1 台で堆積土砂を掘削し、ダンプトラックで導水路内の仮置場へ運搬した。仮置場に運搬された土砂は、高含水泥土改良材を混合し、固化させることで、土捨場へ運搬し、作業効率化を図った。この結果、富村発電所は、2018 年 3 月 26 日 (573 日振り) に発電を開始した。

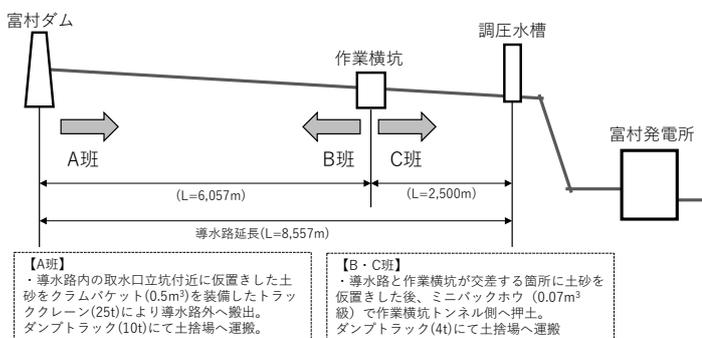


図 2.6.2-3 富村発電所模式図と土砂処理作業体制。

### 2.6.3 右左府発電所沙流川取水堰の被害状況と復旧

右左府発電所沙流川取水堰では、取水堰下流右岸護岸の流出、下流左岸護岸の倒壊、監視カメラ、下流警報設備が流出した。また、取水堰左岸側の国道 274 号線 (札幌と帯広を結ぶ幹線道路) が流出した。

取水堰下流右岸護岸は「練石積護岸」から「重力式護岸」に変更し、護岸の構築を行う等、冬期間も継続して復旧工事を実施した結果、2017 年 4 月 25 日から取水を再開した。また、国道 274 号線は 2017 年 10 月 28 日に開通した。



図 2.6.3-1 沙流川取水堰被災状況。



図 2.6.3-2 沙流川取水堰復旧状況。

## 2.7 2017年6月 前線性豪雨 黒部川水系(関西電力)

富山県に位置する黒部川は豊富な水量と急流河川という特徴から水力電源の宝庫とされ、現在は関西電力が保有する12発電所、約90万kWの設備が稼働している(図2.7-1)。本事例は黒部川中流域に位置する出し平ダムから上流約3kmに位置する猫又地区と呼ばれる地点における被災事例である。

猫又地区には、左岸側に黒部川第二発電所および新黒部川第二発電所が設置されていることから、右岸側に種々の工事用資機材ヤードと作業員用の合宿所、そして黒部川における唯一の交通手段である黒部峡谷鉄道(株)の猫又駅が併設されている。一方で、上流には大規模な崩壊地を抱える支流が複数存在し、更に下流には狭窄部や湾曲部があることで堆砂による河床上昇が問題となっており、過去から発電所周辺護岸のかさ上げ等の出水対策(図2.7-2)が実施されている(小松原ら, 2018)。

被災した2017年6月末~7月上旬にかけては、梅雨前線が北陸付近に停滞

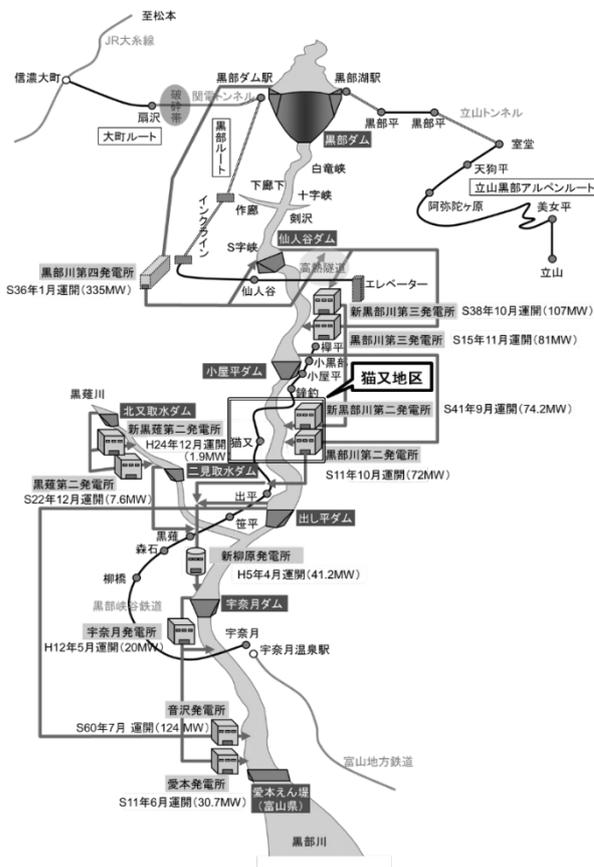


図 2.7-1 黒部川水系の概要図。

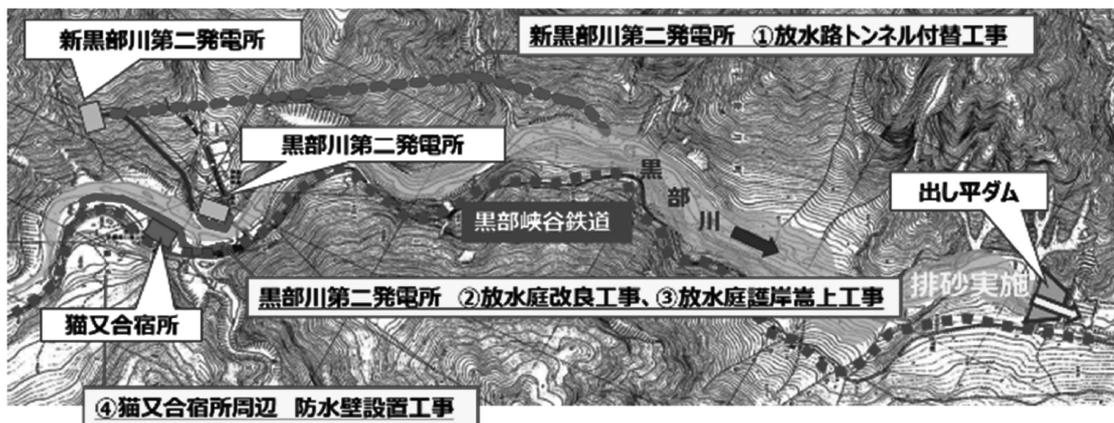


図 2.7-2 猫又地区の出水対策の概要。

し、この前線にむかって湿った空気が流れ込み、7月3日以降は台風3号に伴う湿った空気の影響も加わり、梅雨前線の活動が活発となった。黒部川水系では非常に激しい雨が断続的に降り、6月30日の降り始めから7月5日の降り終わりまでの累計雨量が黒部ダムで511mm、仙人谷ダムで689mm、小屋平で706mm、出し平ダムで675mmに達した。この大雨により、猫又地区をはじめとして、各所で土砂災害が多数発生した。当時、猫又地区においては出水対策として黒部川第二発電所の護岸かさ上げ工事を施工中であったが、出水ピーク時に工事未完了部分から放水庭内に土砂が流入、堆積し、発電不能となった。さらに、河床上昇により右岸側に位置する資機材ヤード、合宿所、猫又駅が減水過程において浸水することとなった（図2.7-3）。



図 2.7-3 被害状況

（左：護岸嵩上げ工事未完成部分，右：資機材ヤード，合宿周辺）。

出水時における出し平ダム（猫又地区下流約3km）のハイドログラフのイメージを図2.2.7-3に示す。この出水では最初の3日間に400~700m<sup>3</sup>/s程度のピークが3回発生した後、最大ピークの1,074m<sup>3</sup>/sおよび988m<sup>3</sup>/sのピークが発生した。本被災事例は、これまでに経験したことがない複数回のピークという特徴が主な要因となっている。具体的には、増水と減水を繰り返す過程で通常の出水よりも河床上昇が促進され、最終的に浸水という結果に至っている。出水前後の測量結果からは、猫又地区に約20万m<sup>3</sup>の土砂が堆積し、河床が約2m上昇していることが確認された。

この猫又地区における出水被害の復旧は、被災したことにより中断した出水対策計画の見直しも含めて行われた（古谷ら，2021）。計画の主な見直しとしては、河床の上昇を助長する複数回ピークを繰り返す波形を持つ出水を想定に加えることとしている。その結果、従前の設備対策の設計見直し（護岸かさ上げ高さの見直し等）に加え、河床低下を目的とした継続的な河床掘削計画を含めた複合的な

対策が立案，実施されている．2023年3月現在では，設備対策はすべて完了（図2.7-4）し，毎年の河床掘削工事が継続されている．

昨今，気候変動の影響による降雨の特徴変化や，河川における総合土砂管理が議論されている．本事象は，これまでに経験のない特徴を持つ出水により引き起こされた災害に対して，土砂管理も含めた複合的な対策を実施しているものであり，その知見はこれからの水力発電設備の保守運用における確実な豪雨災害対策に資するものであると思われる．

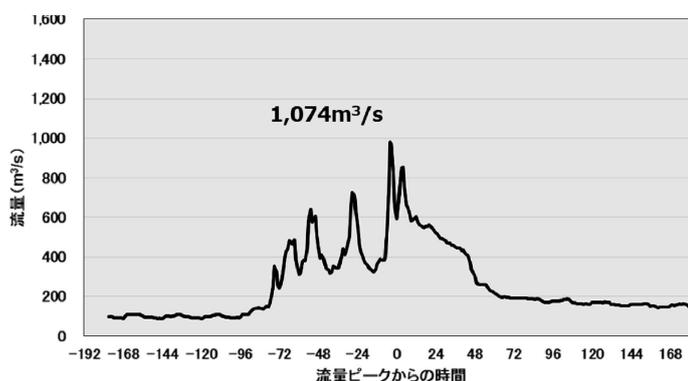


図 2.7-3 出し平ダム ハイドログラフ.



図 2.7-4 猫又地区の現況.

(左：黒部川第二発電所全景，右：資機材ヤード，合宿周辺を下流から望む).

### 参考文献

小松原良次，福本芳朝，寺田匡徳，2018. 黒部川水系猫又地区における堆砂対策. 電力土木，395，23-27.

古谷卓也，大下栄次，大矢尚人，2021. 黒部川水系猫又地区における出水対策工事の概要. 電力土木，416，17-21.

## 2.8 2017年7月 九州北部豪雨 夜明ダム(九州電力)

2017年7月に発生した九州北部豪雨は、7月5日～6日の2日間で7月の月降水量の平年値を上回る記録的な大雨に見舞われ、福岡県や大分県などで河川の氾濫や土砂災害が多発し甚大な被害が発生した。また、気象庁が設置している雨量観測所では、7月5日～6日の累計雨量が、福岡県の朝倉観測所で586mm(7月の平年値:354.1mm)、夜明ダム上流に位置する大分県の日田観測所で402.5mm(7月の平年値:333.4mm)といずれも観測史上最大の大雨を観測した。

今回の大雨は、梅雨前線に向かって温かく湿った空気が流れ込み、積乱雲が次々にできる「線状降水帯」の発生が原因であり、発生から10時間近く九州北部に停滞し続け、大雨をもたらした。

この九州北部豪雨の影響により、ダム護岸が損壊すると共に洪水吐ゲート操作設備(予備発電機、遠方操作盤、電源・制御ケーブル)及びダム管理所が損壊した。

このため、ダムの洪水吐ゲートが制御操作できない状態となり、上下流の安全を確保するため補助エンジン及び外部電源(非常用低圧発電機車)を用いて洪水吐ゲートを全開した。

事象発生以降、ダム護岸の復旧、洪水吐ゲート操作設備及びダム管理所等の復旧を進め、崩壊した護岸復旧の河川法検査合格後、発電を再開した。

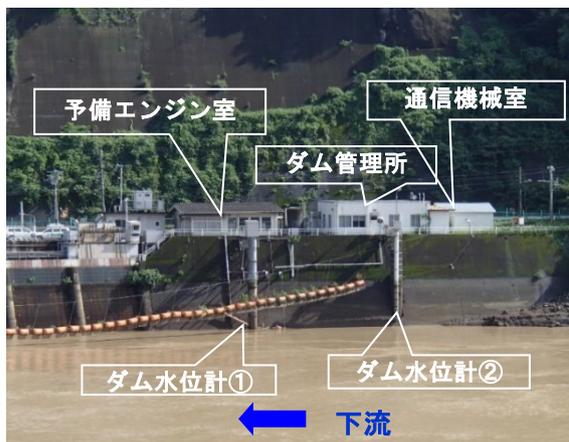


図 2.8-1 損壊前の状況.



2.8-2 損壊直後の状況.

ダム管理所等の損壊原因は、調査結果を踏まえると表 2.8-1 の要因が複合して発生したものと推定した。また、復旧計画は表 2.8-2 に示すとおりである。

表 2.8-1 損壊原因の推定と影響度合.

考えられる原因 (要因)		評価結果	影響 度合
素 因	① 地形・地質	・今回、損壊した箇所は盛土部であったことから強度が不足したものと想定	大
	② 構造物	・過去の点検結果、大きな異常が無かったこと、損壊したコンクリート片にも劣化等が確認されていないことから、護岸躯体は健全であったと想定 ・護岸が岩着していたかは不明 ・ダム管理所が上載荷重として影響	中
誘 因	③ 雨水等の浸透	・崩壊前の時間雨量が約 50mm/h と大きかったこと、道路側からのヒューム管からクラックにより漏水が発生していたものと考えられることから、雨水浸透により地下水位上昇が影響したものと想定	大
	④河川水位低下による残留間隙水圧	・水位低下直後に設備が損壊していること、水位低下速度が早かったことから水位低下による残留間隙水圧が影響したものと想定	大
	⑤流速増による護岸末端の洗掘	・過去の潜水調査にて、洗掘されていないことを確認しており、影響は限定的と想定	小
	⑥流木衝突による損傷	・損壊前の動画記録にて、流木がほぼ流れていないことから影響は限定的と想定	中

表 2.8-2 復旧計画.

	ダム管理所	予備エンジン室	護岸 (ダム管理所前面)
現状の配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>ダム状況を確認しながらの操作，運用上の利便性及び道路からのアクセスの利便性から上流右岸側に配置</li> <li>但し，国道と隣接しているため管理所への車両衝突により機能不全に陥るリスクあり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>予備エンジンは停電時にダム派遣者が迅速に起動し，管理所の電源を確保するため，ダム管理所と隣接して建屋を配置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現護岸は，水衝部とならないよう取水口に沿った位置に配置</li> </ul>
配置計画	仮復旧 ①遠方操作機能復帰時：取水口付近 ②遠隔操作機能復帰時：下流右岸側	移設するダム管理所と隣接して配置 〔仮設発電機(自動起動)で対応〕	現護岸と同じ線形
	本復旧 右岸下流に新設	同左 (予備エンジン設置)	
概要図			

ダム下流右岸に設置したダム管理所を含め全ての復旧工事は，2022年3月に無事完了し，運用を開始した。今回の夜明ダム管理所損壊事象を踏まえ，他地点のダム管理所，建物基礎及び周辺施設を一斉点検し，所定の安全性を確保できない設備については，護岸の補強・基礎地盤の改良・ダム管理所の移設など設備の重要度に応じ順次補強対策を実施しており，事象の水平展開を図っている。

## 2.9 海外の事例

本節では海外ダムにおける近年の豪雨に伴う被災事例を紹介する。具体的には、米国の Oroville ダムにおけるメイン放水路の損傷と、米国の Edenville ダムおよび Sanford ダムの決壊事例について以下に紹介する。

### 2.9.1 Oroville ダムにおけるメイン放水路の損傷事例

Oroville ダムは北カリフォルニアのフェザー川に位置するアースダムである。1968年に完成し、貯水容量が約43億 $\text{m}^3$ 、ダム高が約230mであり、米国で最も高いダムである。主にフェザー川の洪水調節と水道水としてロサンゼルス以南の州全体に配水するという役割を担っており、加えて水力発電や親水等の補助的機能を有する(Hollinsら,2018)。Orovilleダムの放流設備として、メイン放水路(通常時最大放流量:4,250 $\text{m}^3/\text{s}$ 程度)、ゲート無緊急放水路(推定される最大放流量:11,330~16,990 $\text{m}^3/\text{s}$ 程度)、発電放流設備(396 $\text{m}^3/\text{s}$ 程度)、その他放水システム(水位低下時のみ発動し、最大放流量:68 $\text{m}^3/\text{s}$ 程度)の4つが存在した(図2.9-1)。なお、ゲート無緊急放水路は、放水路底部がコンクリートなどで覆われておらず、地面に水が直接流下する設計となっていた。

カリフォルニアにおける地中海性気候は、冬に降水が多く、夏に乾燥する特徴がある。冬の降水は貯水池における貯水量確保、土壌の湿潤、高山域における降雪をもたらし、重要な水資源となっている。2017年2月7日にOrovilleダムにおいて確認されたメイン放水路の損傷は、大気の河(Atmospheric river)によっても



図 2.9-1 放流設備位置の概要 (Reproduced from Hollins et al. (2018) under license CC-BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)).

たらされたものであった (Allen ら, 2019). Allen ら (2019) によると, カリフォルニア沿岸において 2016 年 10 月 1 日から 2017 年 9 月 30 日の 1 年間に, 大気河川が 67 日間にわたって発生したと報告される. これは平年の 3 倍に相当する期間である. Oroville ダム流域では, 2017 年 2 月 2 日~11 日にかけて, 大気河川が 2 回発生しており, これが持続的な豪雨と大規模出水をもたらした. この期間における Oroville ダム流域内の雨量計について, 多いもので 630 ~ 690 mm 程度を記録した (Allen ら, 2019).

以下, Oroville ダムのメイン放水路の損傷について, その概要を述べる. 2017 年 2 月の初旬において, 高いダム流入量に伴う水位上昇を制御するため, メイン放水路を利用し始めた. 2 月 7 日における放水時に, 放水路底部コンクリートが侵食し, 放水路幅半分程度の大きさの穴が開き, 水が流出していることをダム捜査員が発見した. この時点において, これまで一度も使用したことのないゲート無緊急放水路の使用が検討された. 2 月 8 日~9 日において, メイン放水路の流下試験を実施したところ, 放水路底部の穴の大きさが拡大してしまった. 一方, その間においてもダム水位は上昇を続けた. さらに損傷する可能性のあるメイン放水路を使用するか, 水位がゲート無緊急放水路高まで上昇するのを許容し, ゲート無緊急放水路を使用するかを選択に迫られた. ここで, 流量を制限してメイン放水路を利用する選択をしたものの, 水位上昇は抑えられず, ゲート無緊急放水路から水が越流した. 最終的に, メイン放水路からの放流量を若干増加させ, ゲート無緊急放水路からの越流を制御することにより, ダム決壊等の大惨事は免れた.

### 2.9.2 Edenville ダムおよび Sanford ダムの決壊事例

Edenville ダムは、ミシガン州中部のティタバワッシー川とタバコ川の合流点にあるアースダムであり、ダム高は 16m、貯水容量は 0.817 億 m<sup>3</sup> である。水力発電と洪水調節のために 1924 年に建設された。Sanford ダムは Edenville ダムの約 16km 下流に位置するアースダムであり、貯水容量は 0.171 億 m<sup>3</sup> である。水力発電と洪水調節のために 1925 年に建設された。

本事例は 2020 年 5 月 19 日に発生した豪雨に伴うダム決壊ではあるが、実際の豪雨規模は再現期間 25 年 ~ 50 年程度であった。直接的な要因は、Edenville ダムの強度であると報告されている (France ら, 2022)。本事例は、豪雨に伴い Edenville ダム水位の上昇、堤体一部で静的液状化によりダムが決壊、決壊した水が Sanford ダムに流下、Sanford ダムから越水し決壊という流れにより構成される。すなわち、Edenville ダムの堤体強度不足により引き起こされたものである。Edenville ダムの堤体は、粘土コアを含まない粗粒砂が主体であり、長期使用により破壊されやすい特徴を有していた。また、堤体内部の乾燥密度およびせん断強度は低く、かつ下流側の勾配が急であった。これらの主な原因は、Terzaghi によって開拓された現代の地盤工学的手法が広く受け入れられる前に設計され、かつアースフィルの圧縮に対する品質管理評価法が提案される前に建設されたことであると報告されている (France ら, 2022)。これらダム決壊に伴い、大規模な洪水が発生し、1 万人以上の地域住民が避難した。幸い、死傷者は報告されていない。

## 参考文献

- Allen B.W., Benjamin, J.M., Gottas, D.J., Neiman, P.J., 2019. Winter Storm Conditions Leading to Excessive Runoff above California's Oroville Dam during January and February 2017. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(1), 55–70.
- Hollins, L.X., Eisenberg, D.A., Seager, T.P., 2018. Risk and Resilience at the Oroville Dam. *Infrastructures*, 3(4), 49.
- France, J.W., Alvi, I.A., Miller, A.C., Williams, J.L., Higinbotham, S., 2022. Investigation of Failures of Edenville and Sanford Dams. Independent Forensic Team, FINAL REPORT.

## 巻末 水力発電所被災事例一覧

以下に、近年発生した大規模出水、貯水池段波、土石流・土砂流入、斜面崩壊・地すべりに関連した水力発電所被災事例一覧を整理した。

### 大規模出水に関連した被災事例

発生時期	電力会社	豪雨イベント	豪雨の特徴	被災箇所	被災の概要
2005年 9月	九州	14号台風	台風の進行速度が遅く山間部に停滞し、長期間降雨が継続(2日間で700mm)激甚災害に指定	耳川水系 7発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>斜面崩壊(約500か所)、浸水災害(家屋424戸)が流域の広範囲で発生</li> <li>既往最大の流入量がありダムの放流能力を超過し、洪水吐ゲートを越水</li> <li>大量の土砂・流木の流入し、調整池内に堆砂、護岸の一部損壊</li> </ul>
2009年 8月	関西	台風9号(兵庫県西・北部豪雨)	四国、兵庫県等の一部の地域では記録的な大雨となり、激甚災害として指定	朝来管内 発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>朝来管内の各発電所において取・放水路への土砂流入堆積、防水壁、ゲート、えん堤等の設備損傷、浸水等、甚大な被害が発生した。</li> </ul>
2010年 9月	東京	台風9号	静岡県、神奈川県各所で当時観測史上1位の日雨量490mmを観測し、激甚災害として指定	神奈川・ 静岡県内 10発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>取水堰護床工、左岸護岸流出</li> <li>取水堰基礎部が洗堀</li> <li>取水堰堤体一部損傷</li> <li>ゲート自動制御盤浸水</li> <li>ゴム引布製起伏ゲートのゴム部が流水により貫通、破損</li> <li>水路内部への土砂流入・堆積</li> <li>護岸損傷</li> <li>アクセス林道通行不能</li> <li>静岡県管理の河川内構造物が多数損壊</li> </ul>
2010年 9月	東京	台風9号	台風により200年確率洪水流量を超える流量が流下		
2010年 9月	東京	台風9号			



大規模出水に関連した被災事例 続き

発生時期	電力会社	豪雨イベント	豪雨の特徴	被災箇所	被災の概要
2011年 7月	電発	平成23年7月 新潟・福島豪雨	北からの冷たい空気と南からの温かく湿った空気がぶつかり、活発な雨雲が断続的に発生 激甚災害に指定	大津岐発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>豪雨による洗堀、周辺地山の法面崩壊に伴う土砂流入等が原因で、以下の被害が発生 <ul style="list-style-type: none"> <li>取水ダム管理用道路の損壊</li> <li>発電所放水口や取水ダムへの土砂流入</li> </ul> </li> </ul>
			AMeDAS 只見観測所にて 累計雨量 711.5mm (72時間降水量 700.0mm) 時間最大雨量 69.5mm	只見発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>流水及び大量の流木流下が原因で、以下の被害が発生 <ul style="list-style-type: none"> <li>調整池護岸の洗堀</li> </ul> </li> </ul>
2011年 8月	電発	台風12号 (紀伊半島豪雨)	只見川流域の電発6地点のうち4地点(滝, 奥只見, 大鳥, 田子倉)で設計洪水量を超過	池原ダム 風屋ダム	<ul style="list-style-type: none"> <li>洪水量到達前までに目安水位まで水位低下し、空き容量を確保することで下流の洪水軽減被害を図ったが、下流(和歌山県南部)で甚大な被害(土石流, 浸水被害等)が発生</li> <li>流域関係者からダム操作に対する疑問・見直しの要請があり、ダム操作に関する技術検討会を設置</li> </ul>
			熊野川流域の累計雨量 1,311mm ダム下流で計画高水流量以上の洪水が発生	和歌山管内発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>和歌山管内の各発電所において取・放水路への土砂流入堆積, 防水壁, ゲート, えん堤等の設備損傷, 浸水等, 甚大な被害が発生した.</li> </ul>

大規模出水に関連した被災事例 続き

発生時期	電力会社	豪雨イベント	豪雨の特徴	被災箇所	被災の概要
2015年 9月	東京	平成27年関東・東北豪雨	日本海側に台風18号が変化した低気圧があり、日本の東の海上に台風17号が北上低気圧に向かって発達した積乱雲が次々に流れ込み、線状降水帯が長期間停滞激甚災害に指定  累計雨量： 今市 747.5mm 五十里 627mm	鬼怒川発電所 逆川調整池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ アクセスルートの損壊による通行不能</li> <li>・ 電源喪失</li> <li>・ 上流側擁壁損壊による溪流からの流入水制御不能</li> <li>・ 自由越流式余水吐の流木による通水阻害</li> </ul>
				道谷原発電所 遅沢水路橋	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水路橋橋脚に倒木や土石が引っ掛かり、河道の通水を阻害</li> <li>・ 水位上昇により水路橋上部を越流、護岸流出及び家屋浸水</li> </ul>
2016年 8月	電発	① 台風7号 11号 9号 ② 台風10号	① 短期間で3つの連続した台風 ぬかびら源泉郷雨量観測所での総雨量 480.5mm 激甚災害に指定 ② 札幌川ダム地点雨量観測所で、降り始めからの雨量 507mm 激甚災害に指定	糠平ダム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 十勝川流域において甚大な洪水被害（浸水、堤防決壊等）が発生</li> </ul>
2016年 8月	東北	台風10号	気象庁統計開始以降、東北地方太平洋側に上陸（岩手県大船渡市）した初の台風 激甚災害に指定  1時間 降水量： 宮古 80.0 mm, 岩泉 70.5 mm, 3時間 降水量： 岩泉 138.0 mm	青森県・岩手県の17発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水車発電機等機器浸水 3 発電所</li> <li>・ 取水設備・排砂設備の流出・破損・浸水 4 発電所</li> <li>・ 護岸、アクセス道路の破損等多数</li> </ul>

### 大規模出水に関連した被災事例 続き

発生時期	電力会社	豪雨イベント	豪雨の特徴	被災箇所	被災の概要
2017年 6月	関西	前線性 降雨	梅雨前線の 停滞による 長期的な豪雨 これに伴い 三山波形の 出水が発生	出し平ダム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 背水域に位置する黒部川第二発電所および上流ヤードが浸水</li> <li>・ 発電所機器の浸水</li> <li>・ ヤード護岸の一部流出、合宿施設の浸水</li> <li>・ 工所用資機材、重機の流出</li> </ul>
2017年 7月	九州	九州北部 豪雨	梅雨前線が 停滞し、長 期間大雨が 継続 激甚災害に 指定	夜明発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大雨による調整池護岸が損壊し、その上部にあったゲート制御するダム管理所が倒壊（一時ダムゲート操作不能）</li> </ul>
2018年 7月	四国	西日本 豪雨	被災前の4日 間に発電所 上流で 1200mm 超の 降雨（伊尾木 川発電所上流 の伊尾木川 ダムでは既往 最大流量を 記録） 激甚災害に 指定	伊尾木川 発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 発電所が浸水</li> </ul>
2019年 10月	東京	台風 19号	台風上陸前 から活発な雨 雲が断続的に 発生し、関東 甲信越、静岡 県、新潟県、 東北地方の 各地で観測史 上1位を更新 する降水量を 観測 激甚災害に 指定  日雨量： 上石堂 557mm  被災設備 10km 上流で 最大流入量 3217m <sup>3</sup> /s と 既往最大流量 を 1000m <sup>3</sup> /s 以上上回って いることを 確認	塩川発電所 取水堰・ 放水口	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 取水堰下流護岸損壊，護床工流失，エプロン洗堀</li> <li>・ 放水口導流壁損壊，上流護岸流失</li> </ul>

## 大規模出水に関連した被災事例 続き

発生時期	電力会社	豪雨イベント	豪雨の特徴	被災箇所	被災の概要
2019年 10月	東北	台風 19号	東北地方では福島県、宮城県を中心に記録的な大雨。宮城県筆甫で降り始めから607.5mmなど激甚災害に指定	岩手県・ 宮城県・ 山形県・ 新潟県・ 福島県の 92発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水車発電機等機器浸水 16 発電所</li> <li>・ 取水設備・排砂設備、放水設備の破損、浸水 多数</li> <li>・ 護岸、アクセス道路の破損等多数</li> </ul>
2020年 7月	東北	梅雨前線	梅雨前線が東北地方に停滞し7月28日を中心に山形県で記録的な大雨。山形県鶴岡市荒沢で総雨量が267mm	上郷ダム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 溪流ロープが切断し集塵船が流出、下流の橋梁を損傷</li> </ul>

## 貯水池段波に関連した被災事例

発生時期	電力会社	豪雨イベント	豪雨の特徴	被災箇所	被災の概要
2011年 7月	電発	台風6号	周辺地域の累計雨量1,000mm超	平鍋ダム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 30万m<sup>3</sup>を超える土石流が調整池内に流れ込み、段波がダムを越流</li> <li>・ 洪水吐ゲートの制御機器（機側盤、電動機）が浸水、機能不全</li> </ul>
2011年 8月	関西	台風 12号 (紀伊半 島豪雨)	台風が大型で動きが遅かったため長時間にわたり広い範囲で豪雨となり、激甚災害に指定	長殿 発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 発電所下流の山腹斜面において大規模な深層崩壊が発生し、増水した河川に土砂ダムを形成</li> <li>・ これにより発生した段波が上流に向けて遡上し、発電所地点まで到達したことにより発電所設備を損壊</li> </ul>

### 土石流・土砂流入に関連した被災事例

発生時期	電力会社	豪雨イベント	豪雨の特徴	被災箇所	被災の概要
2016年 8月	北海道	平成28年8月 北海道豪雨災害	<p>8月17日～23日の1週間に3個の台風が北海道に上陸し、道東を中心に大雨により河川の氾濫や土砂災害が発生</p> <p>8月29日から前線に伴う降雨があり、その後、台風第10号が北海道に接近し、各地で記録的な大雨が発生</p> <p>激甚災害に指定</p> <p>総雨量： 466mm (年間平均の1/2雨量) 最大流入量： 362m<sup>3</sup>/s (既往第3位) 鉄砲水： 30分間で164m<sup>3</sup>/s増加</p>	富村ダム	<ul style="list-style-type: none"> <li>調整池に鉄砲水とともに大量の流木が流入</li> <li>発電所取水口のスクリーン水位差増大によりスクリーンが損壊</li> <li>水路内に大量の土砂・流木が流入</li> </ul>
2017年 10月	関西	台風21号	<p>超大型の台風が強い勢力を保ったまま上陸したことにより豪雨となった</p> <p>激甚災害に指定</p>	成発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電所背面の溪流から降雨に伴う土石流が発電所敷地内に流入</li> <li>発電所機器の浸水、土砂による埋没</li> <li>土石流の発生後、発電所内にて社員が臨時巡視を実施している際に発電所扉が破損し、流入した土砂により社員が負傷</li> <li>土石流が発生した溪流は土石流特別警戒区域に指定されていた</li> </ul>

### 斜面崩壊・地すべりに関連した被災事例

発生時期	電力会社	豪雨イベント	豪雨の特徴	被災箇所	被災の概要
2013年 9月	関西	台風 18号	大型の台風で、特別警報が運用開始後初めて適用された豪雨激甚災害に指定	栢生発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>導水路山側の斜面崩壊に伴い、導水路暗渠・開渠が約30mに渡り損壊</li> </ul>
2015年 9月	東京	平成27 年関東・ 東北豪雨	<p>日本海側に台風18号が変化した低気圧があり、日本の東の海上に台風17号が北上低気圧に向かって発達した積乱雲が次々に流れ込み、線状降水帯が長期間停滞激甚災害に指定</p> <p>累計雨量： 今市 747.5mm 五十里 627mm</p>	鬼怒川 発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下発電機室に雨水および土砂が流入し、発電機、配電盤が水没</li> <li>発電所北西側斜面が崩壊し、発電所構内開閉器、鉄構などの設備や鉄塔が損壊</li> </ul>

斜面崩壊・地すべりに関連した被災事例 続き

発生時期	電力会社	豪雨イベント	豪雨の特徴	被災箇所	被災の概要
2016年 8月	北海道	平成28年8月 北海道豪雨災害	<p>8月17日～23日の1週間に3個の台風が北海道に上陸し、道東を中心に大雨により河川の氾濫や土砂災害が発生</p> <p>8月29日から前線に伴う降雨があり、その後、台風第10号が北海道に接近し、各地で記録的な大雨が発生</p> <p>激甚災害に指定</p> <p>総雨量： 466mm (年間平均の1/2雨量) 最大流入量： 362m<sup>3</sup>/s (既往第3位) 鉄砲水： 30分間で 164m<sup>3</sup>/s 増加</p>	奥新冠発電所 溪流 取水設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>各取水設備へのアクセス路である国道、林道の路盤流出および崩落、橋梁損壊により通行不可</li> <li>国道は2週間で仮復旧し通行可能となったが、林道は路盤流出が著しく、橋梁も3か所損壊したため、ルートの変更、橋梁の架け替えにより本復旧まで2年を要した</li> <li>各アクセス路が通行可能（仮復旧）となるまでの間はヘリコプターにより各取水設備の確認を実施</li> <li>8か所ある溪流取水設備は全ての取水堰、取水口前面で大量の土砂および流木の堆積を確認（ゲート操作不能）</li> <li>重機および人力による土砂処理を実施。一部動作不能となった電動モーター他機器の復旧を行い、全取水設備の取水再開に約1年を要した</li> <li>大量の流木や土砂の堆積により流水が堰周辺に廻り、取水堰周辺保安柵やパンザマスト等の付属設備が損傷</li> </ul>
2020年 7月	東北	梅雨前線	<p>梅雨前線が東北地方に停滞し7月28日を中心に山形県で記録的な大雨 山形県鶴岡市荒沢で総雨量が267mm</p>	柳沢発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>沈砂池対岸の岩盤が崩落し、除塵機・排砂門・同上屋が損壊</li> <li>発電所近傍の地滑りにより、構内敷地・土留め擁壁、アクセス道路、送電設備等が変形</li> </ul>

### 3 豪雨被災軽減のための取り組み

#### 3.1 予防保全の取り組み

近年の被災事例や今後発生しうる豪雨を踏まえ、発電への影響並びに周辺地域へ影響を与えうる事象を防止または抑制する取り組みを実施した事例がある。本節ではそれら事例を紹介する。

##### 3.1.1 電気設備自然災害等ワーキンググループ検討の取り組み

今後可能性の指摘される種々の自然災害等を広く対象として現在の電気設備及び電力システムの耐性を評価し、自然災害に強い電気設備及び電力システムの在り方について検討を行うことを目的とし、経済産業省を主体とした「電気設備自然災害等ワーキンググループ」が2014年より計17回(2022年度時点)開催されている。本検討のうち、水力発電設備の豪雨に対する検討事例を紹介する。各事例の詳細は下記URL及び表3.1.1-1を参照されたい。

#### 参考資料

経済産業省 産業構造審議会 保安分科会 電力安全小委員会 電気設備自然災害等ワーキンググループ

引用(2023/9/5 確認): [https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan\\_shohi/denryoku\\_anzen/denki\\_setsubi/index.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/denki_setsubi/index.html)

表 3. 1. 1-1 紹介事例の引用元.

本報告書の紹介事例	引用元
3. 1. 1. 1 ダムの通水能力評価	2014 年 1 月 22 日 第 1 回 2014 年 2 月 18 日 第 2 回 2014 年 5 月 14 日 第 5 回
3. 1. 1. 2 取水口遠制化・自動化・回線二重化	2014 年 4 月 15 日 第 3 回 2014 年 5 月 14 日 第 5 回 2014 年 6 月 24 日 第 7 回
3. 1. 1. 3 リスクコミュニケーション	2017 年 3 月 6 日～3 月 10 日 第 11 回
3. 1. 1. 4 制御機器嵩上げ	2021 年 9 月 6 日 第 13 回
3. 1. 1. 5 水密扉・止水板・防水壁	2021 年 9 月 6 日 第 13 回

### 3. 1. 1. 1 ダムの通水能力評価(200 年確率洪水流量に対する評価)

洪水が堤体を越流することを想定した場合にダムの安定性への影響が大きいフィルダム（土砂や岩石を盛り立てたダム）を対象として耐性を有するか検討がなされた。最近のデータも考慮した 200 年に 1 回発生すると推定される洪水量（200 年確率洪水流量）を検討の対象としている。

検討フローは図 3. 1. 1. 1-1 の通りである。フェーズIでは 200 年確率洪水流量とダムの設計洪水流量を比較している。現行ダムの設計洪水流量は、河川管理施設等構造令（1976 年）に基づき次の①～③のうちいずれか最大の流量を採用することになっているが、フィルダムにあたってはこの流量の 1.2 倍が採用される。

- ① ダム地点において超過確率 200 年に 1 回の割合で発生が予測される流量
- ② ダム地点の既往最大洪水の流量
- ③ ダム地点に発生すると客観的に認められる洪水の流量

①は 200 年確率洪水流量と同義である。したがって、近年のダムは 200 年確率洪

水流量を包括した設計となっているが、建設年代が古いダムはその限りではない。

フェーズIIでは、200年確率洪水流量発生時にその全量をダム下流に流下する能力を有しているかを確認している。図 3.1.1.1-2 に検討事例を示す。ここでは200年確率洪水流量流下時に洪水吐ゲート位置での越流水面が洪水吐ゲート下端未満であること、貯水位がダム天端より低くなることからダムは流下能力を有すると評価している。

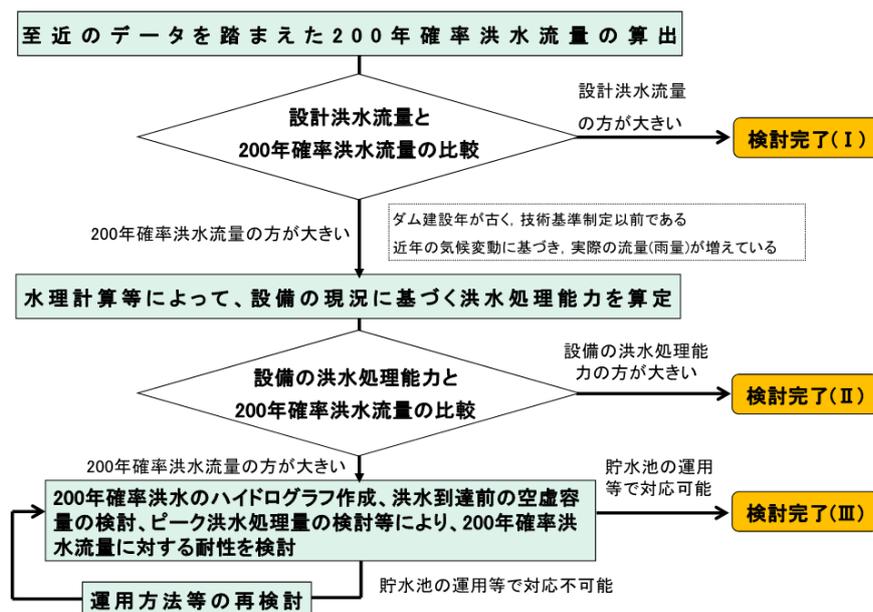


図 3.1.1.1-1 ダムの通水能力評価検討フロー。

フェーズIIでは定常的に200年確率洪水流量がダムに流入すると仮定しているが、実際には雨量は時間的に変化する。また、ダムも貯留能力を有している。フェーズIIIではこれらを考慮し、時間的に変化する降雨量とダムの運用方法を踏まえたより詳細な検討を実施している。図 3.1.1.1-3 に検討事例を示す。本ダムは200年確率洪水流量  $188.7\text{m}^3/\text{s}$  に対して放流設備容量が  $52.2\text{m}^3/\text{s}$  であるため全量を流下できずにフェーズIIではNGとなるが、もともとダムへの貯留も併用する設計となっている。ダムへの流入水を一部放流しつつダムに貯留を行った結果、200年確率洪水流量発生時でも貯水位は設計洪水位を下回ることを確認している。また、貯留と放流を組み合わせることにより、最大放流量も放流設備容量  $52.3\text{m}^3/\text{s}$  を下回る。仮にフェーズIIIでNGと判定された場合、ダム運用を見直すこととしているが、検討当時は全ダムでフェーズIIIまでのいずれかで洪水処理能力の範囲内であることを確認している。

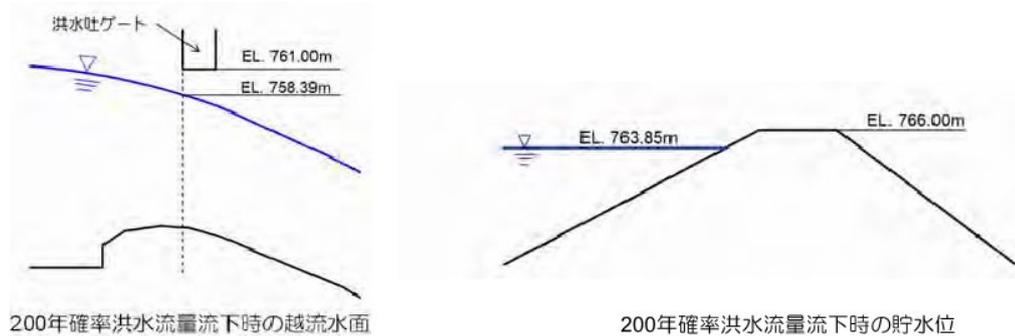


図 3.1.1.1-2 ダムの洪水処理能力検討例.

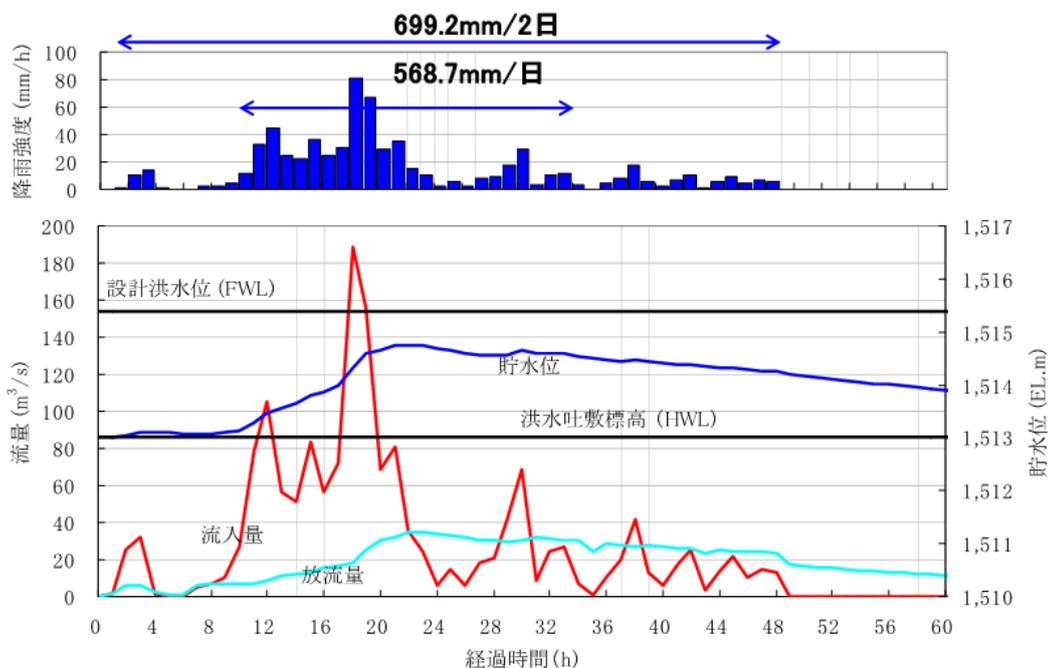


図 3.1.1.1-3 降雨量の時間変化とダムの運用を踏まえた検討事例.

### 3.1.1.2 取水口遠制化・自動化・回線二重化

水力発電所の取水ダム（えん堤）では、その規模に応じて、取水設備（主には取水口制水ゲート）の遠隔制御が行われている。

遠隔制御対象設備については、現地の操作盤と遠方に位置する遠隔制御箇所からの操作を可能としており、通常は遠隔制御箇所からの操作が基本とされている。

これらの設備に対しては、制御システムを二重化するとともに、通信・制御回線を2ルート化し、遠隔制御に万全が期されている。

一方、遠隔制御を行わない比較的小規模な取水えん堤の取水設備では、電源が

確保できる場合には、現地での自動制御が基本とされている。

また、通信・制御回線は2ルート化されていないケースがほとんどであるが、あらかじめプログラムされた取水停止・開始制御を遠隔制御箇所から起動できる機能を具備しているため、豪雨が予想される場合などにおいては、土砂流入防止の観点から、人為的に取水停止措置をとる場合などに活用されている。

なお、いずれの設備も、遠隔制御箇所において常時状態監視が可能である。

### 3.1.1.3 リスクコミュニケーション

利水ダムを管理する電力各社は、気象提供情報や最新の降雨出水予測技術等を活用しながら、適切なダム管理に努めている。また、ダムからの放流に際しては、法令で定められたサイレン吹鳴による一般への周知に加え、ダム下流河川の状況に応じ、河川パトロールや放流表示盤の設置、ダム情報に係るテレホンサービス等を行っている事例がある。

近年、アウトドアブームが高まる中、キャンプ等での水辺の利用者が増加する一方、毎年発生する豪雨による災害は激甚化の傾向にある。このような状況を踏まえ、電力各社では、ダム流域の自治体、住民、警察・消防、漁業関係者等を対象として災害を未然に防止するための対話活動を実施している事例もある。



図 3.1.1.3-1 ダム管理に係る対話活動状況。

### 3.1.1.4 制御機器嵩上げ

屋外機器を制御する回路が浸水すると、機器が制御不能に陥る。また、電力ケーブルと機器との接続部等の高電圧が印加された充電部が浸水すると、地絡事故が発生し、状況によっては電力供給が停止する。そのため、浸水被害や浸水想定を踏まえて制御機器や機械基礎の嵩上げ(図 3.1.1.4-1, 2)を行っている。



図 3.1.1.4-1 制御機器嵩上げ.



図 3.1.1.4-2 機器基礎嵩上げ.

### 3.1.1.5 水密扉・止水板・防水壁

発電所の建屋には、発電設備の制御、保護等を行うための機器が設置されており、機器が水没し使用不能となれば、発電所機能が喪失する。一般的に既設の制御室建物の嵩上げは困難であるため、浸水経路となる建物入口扉の水密化(図 3.1.1.5-1)や、制御ケーブル引出口(建物開口部)の止水対策を行っている。

発電所建屋の機器搬入口や地下変電所の機器搬入口など、防水扉等での水密化が困難な場合は、止水板を設置(図 3.1.1.5-2)している箇所もある。

建物の水密化が困難な場合や機器嵩上げが構造上困難な場合、防水壁の方が費用効果の高い場合には、設備の周囲に防水壁を設置(図 3.1.1.5-3)し、水密化を行う場合がある。

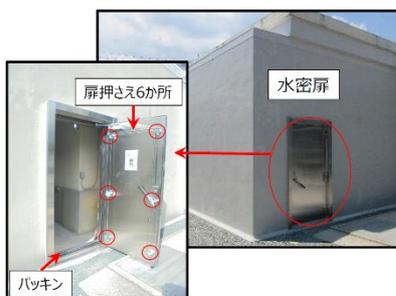


図 3.1.1.5-1 水密扉.



図 3.1.1.5-2 止水板.

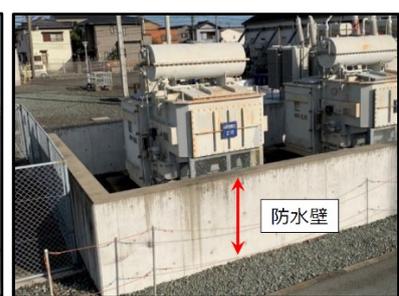


図 3.1.1.5-3 防水壁.

### 3.1.2 その他取り組み事例

3.1.1「電気設備自然災害等ワーキンググループ」の検討事例以外にも予防保全策を講じた事例を紹介する。

#### 3.1.2.1 発電所設備の地中化

四国電力(株)分水第一発電所（高知県のいの町）は、建設当初から発電所背後斜面における地すべりに起因した設備異常が生じ、監視や変状対策を継続しながら運転してきた。発電開始後70年以上を経過し、水車、発電機など主要な発電設備の更新時期を迎えたことから、近年の突発的、局所的な豪雨発生等の気象変化を踏まえ、地すべりによる設備損壊リスクを回避することを目的とし、発電所設備を地中化するため新たに地下発電所を建設した（図3.1.2.1-1, 2）。本工事は、2013年に発電所進入トンネルの掘削を開始し、2015年に発電所空洞の掘削が完了。その後、水圧鉄管や発電設備等の設置工事を経て2017年に竣工し、運転を開始している（図3.1.2.1-34）。



図 3.1.2.1-1 工事前の発電所全景。

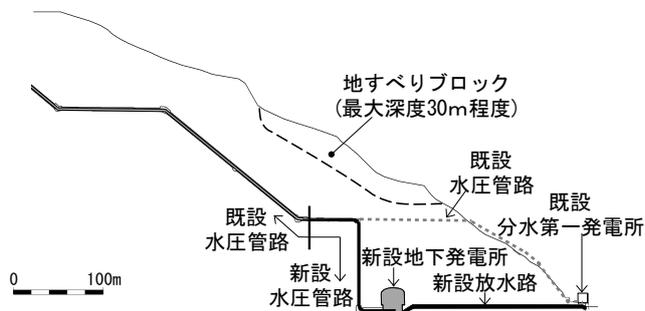


図 3.1.2.1-2 計画概要（断面図）。

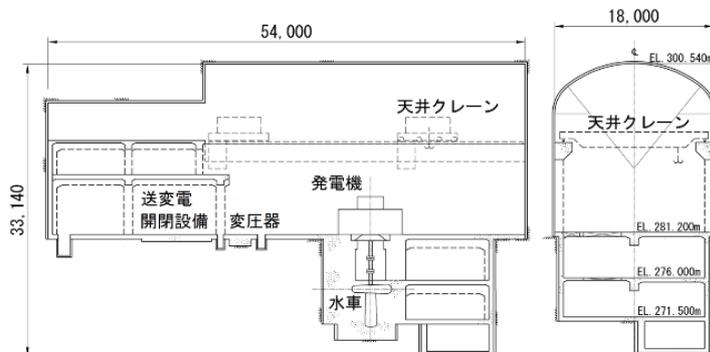


図 3.1.2.1-3 地下発電所空洞の計画図。

（左：縦断図，右：横断図）



図 3.1.2.1-4 工事状況。

（発電所空洞掘削）

## 参考文献

長井和樹，加地貴，山野上守，2014. 分水第一発電所改良工事の調査・計画. 電力土木，369，27-31.

### 3.1.2.2 ダム洪水吐きの放流方式の変更

四国電力(株)切越発電所明谷ダム（徳島県つるぎ町）は，1931年に建設後，大規模な出水による大量の土砂流入が継続し，調整池の有効貯水容量が建設当時の38千 $m^3$ から2014年時点で約15千 $m^3$ と大きく減少した．また，当ダムの流域面積は約14 $km^2$ と小さく，堆砂の進行に伴う有効貯水容量の減少も相まって，降雨発生から放流開始までの時間が非常に短くなるなど，出水時の対応という面で細心の注意と多大な労力を要する状況にあった（図3.1.2.2-1）．そこで，洪水に対する安全性を十分に確保しながら，ダム管理業務の省力化を図るため，2015～2017年にかけてダムの洪水吐きをゲート放流から自然越流方式に変更（ゲートレス化）する工事を実施した（図3.1.2.2-2，図3.1.2.2-3）．



図3.1.2.2-1 工事前における明谷ダム調整池の状況。  
（左：1940年代，右：2014年時点）



図3.1.2.2-2 工事前の明谷ダム.



図3.1.2.2-3 工事後の明谷ダム.

## 参考文献

川野裕知，木岡浩一，壬生和也，2018. 切越発電所明谷ダム改良工事の計画・設計および施工. 電力土木, 394, 27-32.

### 3.1.2.3 ダムゲート電源・動力の多重化

ダム洪水吐ゲートは通常，電動の動力で開閉操作を制御している．手動でも操作可能であるが開閉に長時間を要する場合が多い．したがって，仮に停電時や常用動力の不具合発生時の場合でも迅速に操作できるよう原則ダム近傍の管理所に予備電源を設置するとともに，ゲート近傍に予備動力を設置している．予備電源及び動力は定期的に点検を実施しているが，洪水時に万が一不動作になるリスクや，ダム周辺護岸の損壊により管理所が流出するリスクを鑑み，更に予備の電源や動力を確保している事例がある．

ここではその事例をいくつか紹介する．図 3.1.2.3-1，図 3.1.2.3-2 はゲートに隣接して可搬式電源を設置し，予備動力を作動させる方式である．図 3.1.2.3-3 は可搬式の動力をゲート開閉装置に接続する方式である．図 3.1.2.3-4 は可搬式の動力を手動操作ハンドルに接続することで開閉操作を行う方式である．



図 3.1.2.3-1 可搬式電源.

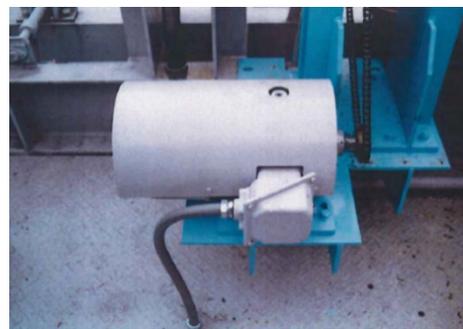


図 3.1.2.3-2 予備動力.



図 3.1.2.3-3 可搬式動力.



図 3.1.2.3-4 可搬式ゲート開閉装置.

### 3.1.2.4 取水口自動断水装置

流れ込み式発電所における小規模な取水えん堤では、公衆保安確保を大前提としたうえで、効率的な運用を図るべく自動制御化に取り組んでいる（図3.1.2.4-1）。



図 3.1.2.4-1 取水えん堤イメージ。

自動制御は、河川流量の増減水に対応するため「取水制御」と「えん堤制御」を各々で行い連動させることを基本としており、えん堤規模・設備構成・制御対象ゲート数などにより、必要な制御を組み合わせて運用されている（図

3.1.2.4-2）。取水制御では、水路水位を監視し許可取水量を超過しないよう取水口ゲートなどを制御し、えん堤制御では、えん堤水位を所定の位置で維持するよう取水口・排砂ゲートなどを制御している。

この自動制御には、導水路への土砂流入防止の観点から、所定の流量に到達した時点で、自動で取水停止する機能が具備されていることが多い。なお、取水停止する流量は、任意で設定変更が可能であるため、降水量や土砂流出の傾向により、チューニングしながら運用されているところである。また、一部では、自然災害に対応する機能として、導水路損壊などが第三者に多大な影響を与える可能性がある地点においては、一定以上の震度・加速度を検知した場合に、自動で取水を遮断する機能が具備されていることも確認した。

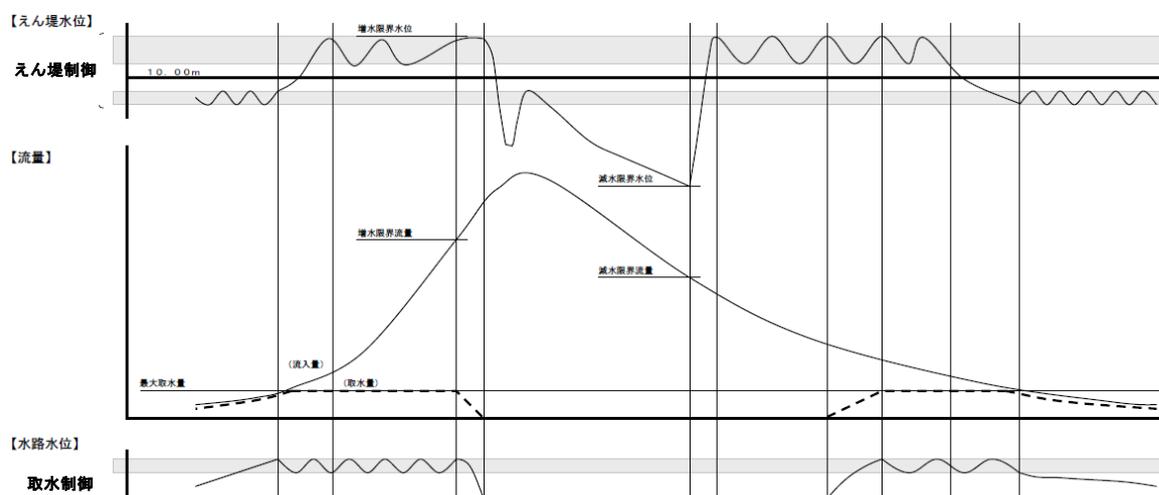


図 3.1.2.4-2 自動制御移行イメージ。

### 3.1.2.5 緊急時通信網の整備

水力発電設備の保守においては、保守要員に配布する通信機器（スマートフォンなど）や専用回線による有線電話などの通信網が整備されており、日常保守に活用されているが、通信回線遮断時などの緊急時に備えた通信設備として、無線および衛生電話設備を、設備保守を管轄する事業場に配備されている事例がある。

無線には、事業場に備え付ける固定局の他、車両に搭載した車載無線と任意の場所に携行することが出来る移動無線がそれぞれ数台配備されている（図3.1.2.5-1）。これらの無線は、定期的な交信テストにより機能の健全性を確認すると共に、定期的な取り扱い訓練により、操作手順を定着化させている。また、緊急時以外においても、山間部などの通信回線が十分に整備されていない地域やキャリア回線網域外における活動時には、移動無線を携行することで、現場と管轄事業場との連携のためにも活用されている。特に、台風や豪雨などの厳しい気象経過後の現場確認時においては、通信回線や連絡経路が土砂崩落等により、遮断されていることも少なくないため、これら無線による連絡体制の整備は、現地状況の早期共有に寄与しているようである。加えて、現場と管轄事業場の双方で連絡が可能なため、状況に応じた判断の確実性が増し、出向者の安全確保の向上にも繋がっていることも確認した。なお、無線機のほか、衛星電話設備も同様に配備しており、無線が混在する状況下においても、通信手段が確保できるよう備えられているところである（図3.1.2.5-2）。



図 3.1.2.5-1 移動無線と固定局の例.



図 3.1.2.5-2 衛生電話設備.

## コラム1 浸水シミュレーションについて

2016年に発生した熊本地震では電気設備について大小様々な被害が発生し、電気設備および電力システムの在り方について問題を投げかけるものとなった。この熊本地震を契機として、電力各社は水力発電設備（ヘッドタンク・水圧管路等）の公衆災害リスクの評価に、特に注力するようになった。しかしながら、電気事業便覧（2015年版）によると日本における水力発電所数は1,702であり、ヘッドタンク・水圧管路箇所の合計はさらに多い。よって、それぞれの電力会社が相当数の対象箇所を抱えていることが予想される。そのため、個別地点における詳細検討の前に、公衆災害リスクが相対的に高い地点を抽出し、対策を講ずべき設備の優先順位付けを実施することが必要である。以上より、電力中央研究所では水力発電設備損壊時における公衆災害リスクに応じた迅速な優先順位付けに資するため、公衆災害リスクを迅速かつ定量的に評価可能な浸水解析手法（以降、浸水シミュレーション）を構築した。

電力会社の実務担当者が膨大な地点を解析することを想定し、ノートPCでも迅速かつ合理的に浸水解析可能な手法を採用した（Araiら, 2018）。本浸水解析プログラムの特徴として、国土地理院が作成の10m解像度標高データを用いて全国各地の解析が可能であることと、流出量や流出時間等の少ない諸条件を与えるだけで浸水規模を定量的に解析可能であることが挙げられる。解析の流れとして、入力した緯度経度から対象領域の抽出した後、設定した計算条件に応じて解析が実施される（図 C1-1）。また、公衆災害リスクの高い場所が一目でわかりやすいように、浸水範囲等の解析結果を地図上（国土地理院地図、国土地理院空撮写真等）に表示するシステムも構築した（図 C1-2）。

本浸水解析プログラムを検証するために、2015年9月9日に茨城県常総市にて発生した鬼怒川氾濫を対象とした解析を実施した（Araiら, 2018）。図 C1-3 に実際の浸水域と解析結果の比較を示した。図 C1-3 より、浸水範囲の規模を良好に再現していることが確認される。一方解析において、南方に伸びる浸水の先端部の形状が若干異なることも確認される。実際の浸水範囲には小さな農業用水路が南北に亘って設置されている。しかしながら解析で利用した10m解像度標高データでは、農業用水路の影響を正確に反映できなかったと考えられる。その結果として、浸水先端部において若干の相違をもたらしたと推測される。

最近では5m解像度の標高データが日本の多くの地域をカバーされるようになってきている。もし対象地域に5m解像度の標高データが存在すれば、5m解像度に

て浸水解析をすることも可能な状況である。

### 参考文献

Arai, R., Ota, K., Toyoda, Y., Sato, T., 2018. Development of a system for practical prediction of flood and debris flow throughout Japan. EPiC Series in Engineering, 3, 45–53.



図 C1-1 浸水シミュレーションの解析イメージ図.

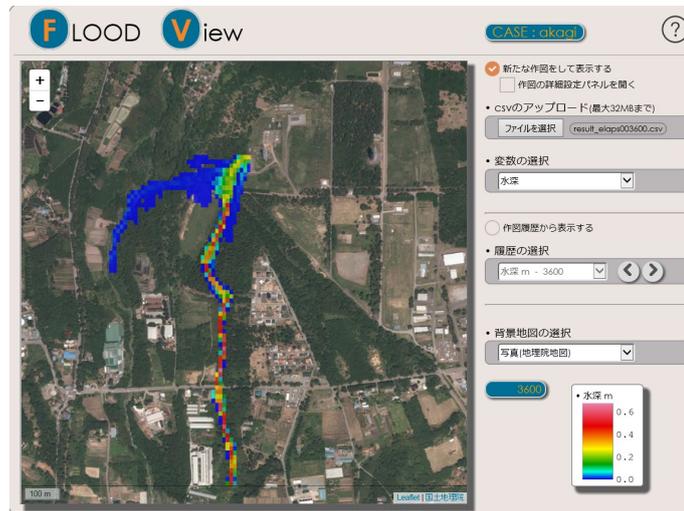


図 C1-2 浸水シミュレーションの結果表示システム.

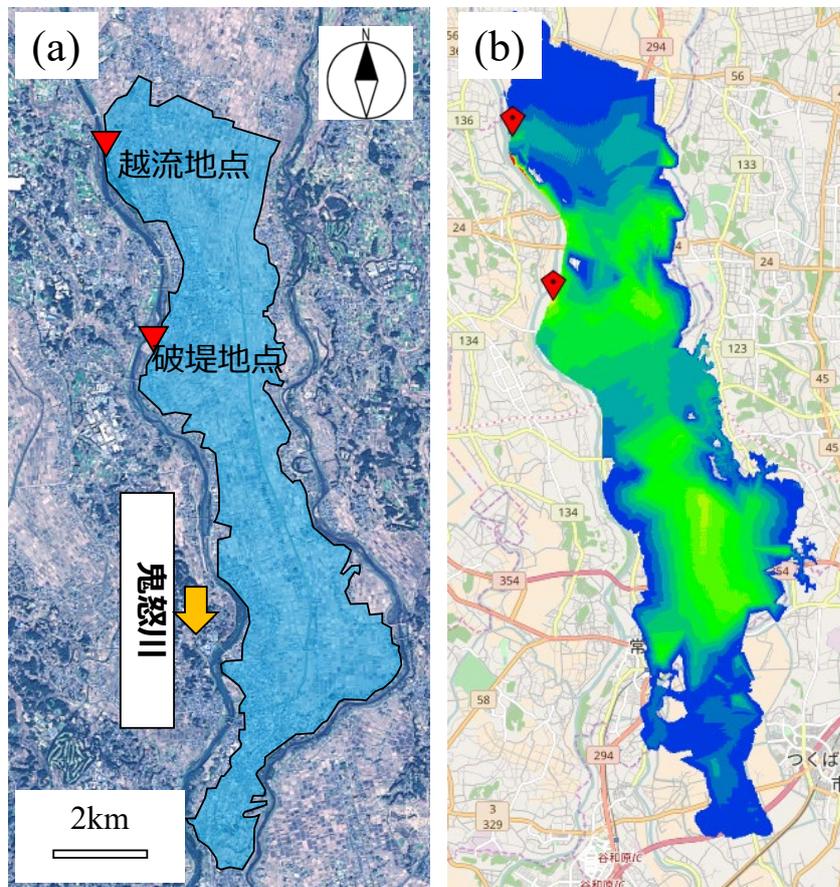


図 C1-3 2015 年 9 月 9 日における鬼怒川氾濫を対象とした浸水シミュレーションの検証結果. (a)実際の浸水範囲, (b)計算による浸水範囲.

### 3.2 土砂対策の取り組み

豪雨によって生産される土砂は、ダム貯水池の堆砂や取水障害、ダム・堰や水車の摩耗・損傷などを引き起こすことがある。本節では、水力発電に係わるダム貯水池、取水口、沈砂池における土砂対策事例を紹介する。

#### 3.2.1 ダム貯水池

ダム貯水池の堆砂対策技術を大別すると、図 3.2.1-1 に示すように、①貯水池への流入土砂の軽減技術、②貯水池へ流入する土砂を通過させる技術、③貯水池に堆積した土砂を排除する技術に分けられる。ここでは、水力発電事業者が主体的に実施している②、③の技術概要について紹介する。なお、国土交通省により、

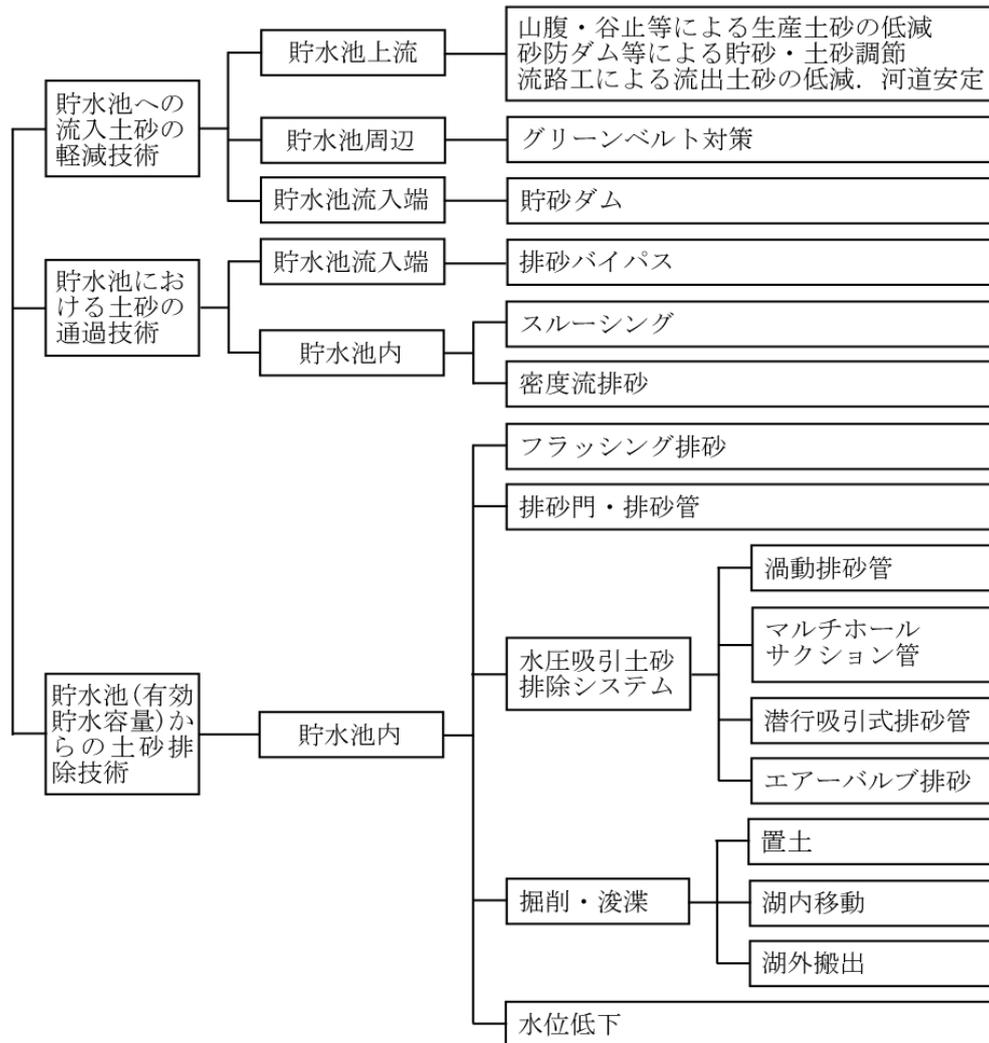


図 3.2.1-1 ダム貯水池の堆砂対策技術。

貯水池土砂管理のための調査・観測方法や堆砂対策の実施判断の基本的な考え方、堆砂対策工法の概略選定が体系的にとりまとめられている(国土交通省, 2018)。

はじめに、②貯水池へ流入する土砂を通過させる技術について、排砂バイパスは、ダム貯水池を迂回するトンネルや水路であり、非洪水時には清澄な水をバイパスを使用せずに貯水池に直接流入させ、洪水時には多量の土砂を含んだ濁水の一部あるいは全てをバイパスに迂回させてダム貯水池への土砂や濁水の流入を防ぐ。関西電力・旭ダム(揚水発電所下部ダム)では排砂バイパスによる運用が1998年より実施されている(土居ら, 2009)。なお、排砂バイパスは、既設ダムへの新たな採用も可能であること、貯水位を下げずに運用可能であること、ダム下流の河川環境や土砂濃度をダム建設前と同じように維持できることなどの利点がある。一方、他の堆砂対策に比べて初期投資が大きいこと、対象粒径や土砂濃度に応じた摩耗対策や維持管理が必要となること、疎通能力以上の洪水時にはダム貯水池への土砂流入が避けられないこと、対象粒径や地形条件に制約があることなどの課題もある。

スルーシング(通砂運用)は、ダムの低標高部に設けた排砂路や排砂門を用いて貯水池水位を低くすることで流入土砂の貯水池内捕捉率を低減させ、流入土砂の全てをそのまま下流に流下させることを基本とする。関西電力・出し平ダムでは、大型の排砂路を用いて、下流の国土交通省・宇奈月ダムと洪水時に連携通砂が実施されている(林ら, 2008)。九州電力が7つのダム・発電所を有する耳川水系では、流域に関係する地域—行政—民間の連携により、総合的な土砂管理が進められている。このうち、山須原ダム、西郷ダム及び大内原ダムでは、環境影響の予測・評価を行いながら(吉村ら, 2018)、3ダム連携通砂運用が2022年度より実施されている。それに先立ち、山須原ダム、西郷ダムでは、ダム高さを部分的に切り下げるダム改造工事が実施され(角ら, 2016)、ゲート扉体や戸当たり、戸溝、越流部の摩耗対策として、供用期間を踏まえた摩耗量を評価したうえで、ステンレス鋼材やダクタルフォームが使用されている(松田ら, 2014)(川上ら, 2019)。電源開発・瀬戸石ダムでは、約60年間の運用期間中の堆砂率が10%程度と低いものの、調整池周辺で出水時の浸水・冠水リスクを抱えていた。このため、出水中にダム水位を下げ流入してくる土砂と調整池内に堆積している土砂を洪水吐からダム下流へ流下させるスルーシング運用が2018年より実施されている(奥村ら, 2021)。

密度流排砂は、洪水時に微細粒子で構成される高濃度濁水がダム貯水池の中層

や底面に沿って密度流として流れることを利用したもので、その貯水位を下げないことを基本として、高濃度濁度がダム堤体に達するタイミングにあわせて中・低標高部の排出口から放流して土砂の堆積を抑制するものである。我が国での適用事例は少ないが、関西電力・出し平ダム（白音包&角,2006）、中部電力・畑薙第一ダム・畑薙第二ダム・井川ダム（後藤&木下,2020）などにおいて検討されている。

次に、③貯水池に堆積した土砂を排除する技術について、フラッシング排砂は、降雨出水のタイミングに合わせてダムの低標高部に設けた大型排砂ゲートによって貯水位を下げ、既に堆積した土砂を含めて排出するものである。排砂効率（=土砂排出量／排砂使用水量）をあげるためには、掃流力の大きな自然河川状態を継続でき、さらに、排砂後に貯水位を容易に回復できる流量を確保する必要がある（角,2000）。関西電力・出し平ダムと国土交通省・宇奈月ダムの連携排砂は、最上流部の黒部ダムの貯水量を利用したわが国の代表事例である。

排砂門や排砂管について、中部電力・井川ダムなどの利水ダムでは、貯水位を下げずにこれらを運用し、局所的な排砂を行っている。大規模貯水池において高水位を維持した状態で底層放流した場合、底層放流設備呑口部周辺の底泥付近の流速ならびに底泥の侵食速度は小さく、フラッシング排砂に比べて、高濃度の濁水が長時間ダム下流に流出する可能性は低いことが明らかにされている（後藤ら,2019）。摩耗やゲートが閉まらない事態等を懸念し開かずの扉になっている地点も多いが、堆砂が進んでいる地点では方針を転換する事例も見られる。

水圧吸引土砂排除システムは、貯水池の上下流水位差という低コストなエネルギーを利用して土砂を吸引し、吸水口からの水によって堆積土砂を流動化させて湖外に排出するものである。貯水位運用に与える影響が小さく、土砂量や土砂濃度をコントロールすることができる一方、流木や塵芥による閉塞障害、粘着性土砂や大礫に対する排砂効率、吸引動作のモニタリングなどの課題がある。マルチホールサクション管（岡野,2006）、潜行吸引式排砂管（櫻井&箱石,2011）、エアバルブ排砂（泉谷ら,2009）などが実規模を含めて検討中である。

掘削・浚渫について、バックホウやグラブ船などの機械を用いて堆積土砂を除去するもので、大矢らによって、各種掘削機械や浚渫船、各種運搬システムの特徴とダム堆砂への適用性が整理されている（大矢ら,2002）。掘削・浚渫は、土砂搬送と搬出土砂の管理（土捨場の確保を含む）という課題を有しているが、置土と湖内移動はこれらの解決を図る手段と言える。

置土は、貯水池の堆積土砂をダム下流河川に人工的に置き土し、洪水時の放流やフラッシュ放流で土砂を掃流させて河床や底質環境の改善を図るもので、国土交通省ダムが中心であるが水力発電ダムでも実施されている。土砂還元量については、年平均ダム堆積土砂量の0.1～10%に相当する年間数百から数万 m<sup>3</sup>（池淵, 2009）の規模で行われることが多かったが、置土の効果や影響が明らかになりつつある近年は大規模に実施されることも多くなりつつある。国土交通省・長安口ダムでは現在、0.075～100mmの砂礫が年間10～30万 m<sup>3</sup>の規模で置き土されており（白川ら, 2016）、将来的にはベルトコンベアで約9kmを搬送する管理型堆砂計画に移行する予定である。なお、ベルトコンベアを利用した土砂搬送に関しては、東京電力・高瀬ダム・七倉ダム、国土交通省・大町ダムの再編による洪水調節方式の見直し及び恒久的な堆砂対策において、約11kmの土砂輸送トンネルが計画されている。

湖内移動は、有効貯水容量に影響しない領域等に堆積土砂を移動するものである。浚渫土砂の搬送距離と土砂搬送能力が課題であるが、特殊エジェクターを用いたポンプシステムが開発され、天然凝集剤と汚濁防止膜による濁水の拡散を抑制しながら、水深3～15mの塵芥混じりの砂質土と礫を約70m<sup>3</sup>/hで約400m移動した事例がある（天明ら, 2013）。

水位低下は、自然の力を利用した湖内移動の一種で、洪水時に調整池の水位を下げ、流入土砂を死水域内に流下させる。洪水規模と水位低下量に応じて土砂を引き込める場所・深さが異なる（反町ら, 2016）が、土砂移動費用の削減が可能である一方、減電が生じる場合もあるので、費用対効果を踏まえ、洪水規模に応じた最適な水位低下量の選定が必要である。

## 参考文献

- 国土交通省 水管理・保全局 河川環境課, 2018. ダム貯水池土砂管理の手引き(案). 土居裕幸, 岡崎和樹, 野尻慶介, 2009. 旭ダムバイパスにおける排砂の効果. 電力土木. No.341, 38-42.
- 林久一, 太田耕一, 喜田伸明, 2008. 出し平・宇奈月ダム連携排砂・通砂における環境調査の概要. 電力土木, No.334, 30-34.
- 吉村健, 新屋裕生, 角哲也, 鬼倉徳雄, 2018. 3ダム連携のダム通砂による環境影響の予測. 大ダム, No.244, 46-54.
- 角哲也, 吉村健, 朝崎勝之, 加来睦宏, 柏井条介, 佐藤隆宏, 2016. 耳川水系ダ

- ム群における通砂を目的とするダム改造と運用検討. 大ダム, No.234, 21-28.
- 松田智行, 藤原洋一郎, 山崎崇正, 2014. 西郷ダム改造工事におけるコンクリート一体化処理・堤体摩耗対策. 電力土木, No.374, 86-90.
- 川上馨詞, 金岡正輝, 佐藤英一, 2019. 通砂機能を有する大型洪水吐ゲート設備の設計と施工. 電力土木, No.402, 55-59.
- 奥村裕史, 恩田千早, 角哲也, 2021. 瀬戸石ダムにおけるスルーシング運用による土砂管理. 大ダム, No.255, 43-49.
- 白音包力舉, 角哲也, 2006. 密度流排出を用いた黒部川連携排砂の高度化に関する研究. 河川技術論文集, 第12巻, 265-270.
- 後藤孝臣, 木下博道, 2020. 連携密度流排砂を想定した数値解析によるダム放流操作の考察. 電力土木, No.408, 26-30.
- 角哲也, 2000. ダム貯水池のフラッシング排砂における排砂効率. ダム工学, Vol.10, No.3, 211-221.
- 後藤孝臣, 木下博道, 河島宏治, 2019. 高水位を維持したダム貯水池での底層放流による土砂輸送現象の解明. 電力土木, No.402, 11-20.
- 岡野眞久, 2006. ダム貯水池流砂技術の堆砂対策への適用に関する研究. 京都大学学位論文.
- 櫻井寿之, 箱石憲昭, 2011. 大規模実験による潜行吸引式排砂管の開発. 河川技術論文集, 第17巻, 311-316.
- 泉谷隆志, 櫻井寿之, 箱石憲昭, 2009. エアーバルブ排砂設備の運用に向けた排砂特性に関する研究. 土木学会年次学術講演会, 第64回, II-027, 53-54.
- 大矢通弘, 角哲也, 嘉門雅史, 2002. ダム堆砂の性状把握とその利用法. ダム工学, Vol.12, No.3, 174-187.
- 池淵周一編著, 2009. ダムと環境の科学 I. ダム下流生態系. 京都大学学術出版会, 209-219.
- 白川豪人, 武藏由育, 出水重光, 2016. 土砂還元によるダム下流河川の河床環境変化の実例. 大ダム, No.237, 79-89.
- 天明敏行, 中村雄二, 加来睦宏, 山上裕也, 角哲也, 2013. 特殊エジェクター工法によるダム堆砂の湖内移動. ダム工学, Vol.23, No.3, 199-206
- 反町尚希, 橋本淳, 佐藤隆宏, 2016. 洪水に伴うダム調整池における堆砂進行の再現解析. 大ダム, No.236, 18-22.

### 3.2.2 取水口

土砂流入が卓越する河川では、取水口付近に土砂が堆積し、取水障害を引き起こすことがある。堤高の低いダムや堰堤では、出水時に排砂門を開操作し、取水口前面での土砂堆積が抑制されるよう運用する地点も多い。また、排砂を促進するため、排砂門上流の流下方向に溺堤を設けることもある。しかしながら、取水口の位置によっては排砂門や溺堤が効果的に機能しないことも多い。

排砂路や溺堤の形状や大きさ等については、従来、移動床模型実験によって確認していたが、近年は三次元河床変動解析によって非定常流況を考慮して堰堤取水口付近に土砂が堆積しにくい構造を評価することができる(太田ら, 2023)。

海外の河川の利水用取水口では、取水口付近に複数の没水型ベーン工が設置され、取水口や導水路への土砂流入量の軽減が図られている(太田&佐藤, 2022)。

#### 参考文献

太田一行, 後藤孝臣, 竹中慶, 坂本晶子, 2023. 取水口堆砂軽減のための排砂促進手法—三次元河床変動解析による合理的設計—, 河川技術論文集, 第29巻.  
太田一行, 佐藤隆宏, 2022. 取水口土砂流入制御用ベーン工の特性把握と水力発電への適用性に関する水理的考察—海外の火力・原子力発電所における既往事例の調査—, 電力中央研究所報告, SS22006.

### 3.2.3 沈砂池

取水口からの流入土砂は、一部は導水路内に沈殿して流積を狭め、一部は鉄管・水車に侵入して摩耗・損傷をもたらす。これを防ぐために、水路式発電所では取水口付近に沈砂池を設け、流水中の土砂を沈殿させている。

沈砂池は、平均流速  $0.3\text{m/s}$  前後になるように幅を定め、長さ  $L$  は平均流速  $U$  と水深  $h$  と砂の最小粒径の沈降速度  $w_f$  を用いて  $L=Uh/w_f$  で算定されるが、実際にはその導かれた長さ  $L$  の2倍以上とするのが好ましいとされる(千秋, 1967)。一方、沈砂池の堆積土砂の排除が課題のひとつであり、様々な手法が適用されている。

沈砂池底面に整流板や溺堤を設置することで、堆積土砂を排砂門から効率的に排除できるようにしている地点は多い。整流板や溺堤の大きさや配置は経験的に決められることも多いが、3次元流体解析や3次元河床変動解析によって検討され、現地検証された事例もある(熊谷ら, 2022)。

渦動排砂管はポンプを使わずに自然の力を利用する水圧吸引土砂排除システム

のひとつであり、管の一部に狭いスリットを設け、これを通して管内に水と砂礫を吸引し、旋回流を利用して堆積土砂を排出するものである(千田, 1979)。中国電力・奥津第二発電所では、取水口沈砂池にスリット式渦動排砂管に混気型ジェットポンプを組み合わせ、排砂範囲の拡大が図られている(今岡ら, 2003)。

東京電力・内山発電所では、沈砂池入口部に設置されている余水門を出水中に0.5m程度開き、沈砂池入口部の土砂堆積と沈砂池への土砂流入を防いでいるものの、依然、沈砂池入口の除塵機スクリーン近傍に多くの土砂が堆積していた。そこで、沈砂池入口部の一部区間(余水門から沈砂池除塵機スクリーンまで)を、底面に鋼板スラブ(幅30cmのスリットを1箇所設置)を設置する二階建て構造に改造し、効率的に土砂を排除できるようにしている(恒川ら, 2016)。

## 参考文献

- 千秋信一, 1967. 発電水力演習, 学献社.
- 熊谷洋, 藤田和幸, 太田一行, 2022. 3次元流体解析による水槽堆積土砂排出に関する研究. 電力土木, No.422, 31-36.
- 千田実, 1979. 堆砂の防止軽減に関する研究(その1). 電力土木, No.159, 55-67.
- 今岡安則, 金元高志, 朝日宏, 2003. 奥津第二発電所における効率的な流入土砂対策. 電力土木, No.303, 30-34.
- 恒川明伸, 菅野文雄, 牧野博幸, 2016. 内山発電所における土砂排除方法の効率化を目的とした沈砂池改良. 電力土木, No.382, 40-44.

## コラム2 ダム上流域森林の重要性

ダム上流域は、森林保全・管理や治水・砂防を推進することにより、ダムへの流入土砂や流木の抑制効果が期待されている。

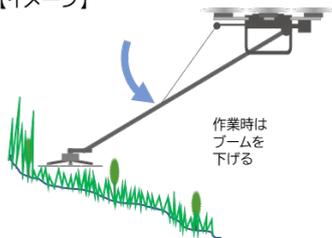
しかしながら、森林保全・管理一つを取り上げてもそれぞれの流域で様々な課題がある。その一例として、林業の担い手不足により、森林保全・管理が行き届かず、近年の集中豪雨も相まって森林斜面の崩壊が頻発化し、その対応に追われる森林所有者や流域自治体も疲弊するといった悪循環を招いている。

一方九州電力グループでは、特定地域の水源涵養林を100年以上に亘り保全・管理してきた実績があり、現在九州電力の水力発電所・ダムを設置している流域自治体等にその実績を生かした様々な提案（図 C2-1～5）を行っている。

### 【下刈ドローン(2024年度実用化予定)】

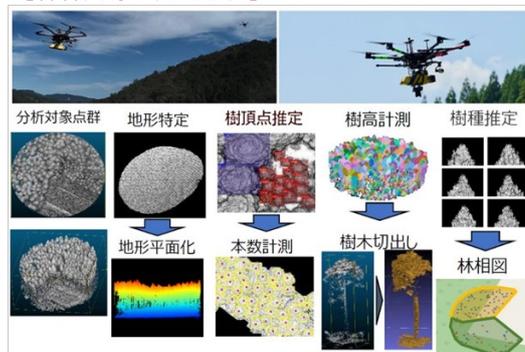
※特許出願中

【イメージ】



過酷で危険な下刈作業を、作業者に代わりドローンが行います。下刈作業の効率化に貢献。

### 【森林資源の見える化】

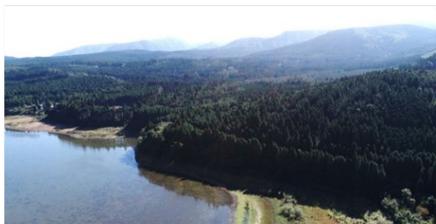


森林の資源量などを、ドローンによる写真、レーザー測量、AIによる分析で可視化します。森林管理の効率化や山間部の防災・減災に貢献。

図 C2-1 下刈作業の効率化.

図 C2-2 森林管理の効率化.

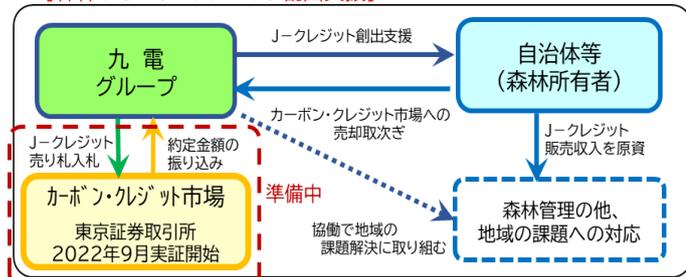
### 【FSC®認証木材の販売】(FSC®C018956)



九州電力社有林ではFSC®認証※を取得し、環境に配慮した木材を販売しています。公共建物等へのFSC®認証木材活用により、SDGsの達成などに貢献。

※環境に配慮した森林管理を認証する国際的な制度

### 【森林からのJ-クレジット創出支援】



森林からのJ-クレジット創出に向け、国への各種申請手続きを全面的にご支援します。

創出されたJ-クレジットは、九電グループが森林所有者さまに代わって売却するサービスを準備中です。

図 C2-3 環境に配慮した木材供給.

図 C2-4 森林からのJ-クレジット創出支援.



**【森林所有者の意向調査確認(自治体さま向け)】**

森林経営管理制度の「森林所有者への意向確認」を自治体さまに代わり調査します。所有者が不明な場合でも、電気事業における用地業務の豊富な経験を活かし、所有者を探索することも可能です。

**【森林管理に係る計画作成】**

経営管理権集積計画(経営管理に必要な間伐等の計画)や、森林経営計画(森林の施業及び保護を作成する計画)の作成業務等を請け負います。

図 C2-5 森林管理の業務支援.

今後は、ダム上流域の森林の恩恵を受けている上流域の方々から下流域の方々まで流域一体となって協働する森林保全・管理の取組みが重要になると考えられる。この森林保全・管理の取組みを通じ、流域住民の広い繋がりや新たなネットワークが構築され、林業を含めた流域産業の活性化、流域自治体の収益向上等まで発展していくことが期待される。更にはダムへの流入土砂や流木が抑制されることにより、長期間水力発電所が安定的に運転できることやダムの健全性を維持し続けることにも繋がると考えられる。

### コラム3 ダムの事前放流時におけるダム下流への危害防止策の強化について

治水の計画規模や河川（河道）・ダム等の施設能力を上回る洪水の発生時におけるダム下流河川の沿川における洪水被害の防止・軽減を目的とするダムの事前放流については、「既存ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針」（既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議，2019）に基づき，既存ダムの有効貯水容量を洪水調節に最大限活用できるよう事前放流ガイドライン（国土交通省，2021）が策定され運用されている。この結果，ピーク流量を低減し，沿川の浸水被害を軽減する効果を発揮したなどが報告されており，成果が得られている。

事前放流の実施に際し，増水に伴うダム下流への危害防止ため，ダムの操作規則やダム操作規程等に基づき洪水吐等のゲートからの放流開始前に，警報車（河川パトロール車）にて下流河川内の釣り人等の立入者一人ひとりに対して注意喚起を実施している。（Kawaguchi ら，2022）

図 C3-1 に現状の注意喚起方法の概念を示す。ダムから放流の前に，ダム下流の沿川を河川パトロール車が走行し，河川入川者を発見する都度，河川外への退避を呼びかける。ダム下流の注意喚起対象範囲は，長いダムでは数十 km に及ぶが，多くのダムでは1台の河川パトロール車で対応している。このため上流より順次下流に向け走行しながら注意喚起を実施する河川パトロール車は特定の場所に留まることはできず，例えば河川パトロール車通過後に河川内に入った入川者へのタイムリーな注意喚起は困難であり，現状方法での課題と言える。これは通常の放流と異なり降雨が観測されていないタイミングで実施する可能性の高い事前放流時において，釣り人等は河川が増水し水位が上昇するとの意識は低く，危険度はより増すと言える。ダムの事前放流を持続させるためにも放流実施に際し，現状以上の危害防止を実現する注意喚起の実施が望まれる。

図 C3-2 に事前放流に適した注意喚起方法の概念を示す。常時，固定カメラにより撮影した画像を AI で解析し，河川入川者を検知すれば注意喚起を自動で実施するシステムである。設備は固定されるため常時監視し，入川者が河川外に退避するまで繰り返し注意喚起が可能である。河川パトロール車による一過性の注意喚起からの転換が図れ，事前放流時の釣り人等への危害防止を実現する強化方策として期待できる。

図 C3-3 に実務適用した AI を活用した注意喚起システムの設置状況写真を，図 C3-4 に設置システムの概略構成を示す（角田，2022）。システムでは，web カメラでの撮影画像保存，AI 画像解析・判定，スピーカーによる注意喚起，関係箇所へ

の通知、監視映像 web 画面提供などを自動実施する。当該箇所へのシステム設置は 1 箇所であったため、解析用サーバー、セキュリティ・ネットワーク機器等、必要となる各種機器は、現地に設置する BOX に全て格納する分散処理型（エッジ処理型）とした。なお注意喚起対象範囲が数 km に及びシステムを複数設置する場合、コスト削減、可用性等の観点から、注意喚起対象箇所にはスピーカー、web カメラと通信機器等の設置に留め、各所のカメラから伝送される撮影画像を一括で AI 画像解析等を実施する、集中サーバー型あるいはクラウド型によるシステム構成も有効となる。入川者の AI 画像解析による検出には、撮影した釣り人等の画像を用いた各種アルゴリズムの検討・検証・比較等を行った結果、検出の精度・速度やシステム構築の観点から YOLO (You Look Only Onse の略称であり、最近よく利用されるリアルタイム物体検出アルゴリズム) を採用した。

今回、ダム of 事前放流時におけるダム下流への危害防止強化策となる、AI の画像解析を用いた自動注意喚起システムを報告した。河川に常設する当システムにより入川者へのタイムリーな注意喚起の実施を可能とし、ダム of 事前放流の際の危害防止強化に寄与する方策として期待できる。

## 参考文献

- 既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議，2019，既存ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針。
- 国土交通省 水管理・国土保全局，2020，事前放流ガイドライン。
- 角田恵，2022，AI 技術やドローン等の提供によりお客さまの DX を推進，近畿情報通信協議会，19，13-18。
- M. Kawaguchi, M. Sumida, T. Domasu and S. Hibi, 2022, Application of digital transformation in the civil engineering of hydropower projects, HYDROPOWER & DAMS, Vol. 29 - Issue 1.

**現状**

河川パトロール車でダムから下流まで移動して入川者の有無把握・注意喚起実施

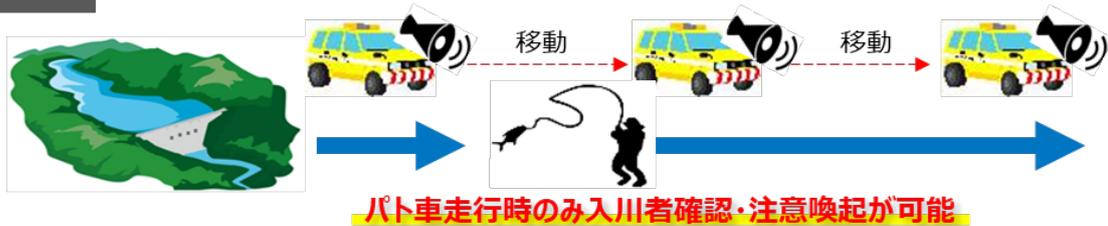


図 C3-1 現状のダム下流河川への注意喚起方法.

**システム  
導入後**

固定カメラとAIにより河川全域を常時監視して入川者の有無把握・注意喚起実施



図 C3-2 事前放流に適したダム下流河川への注意喚起方法.

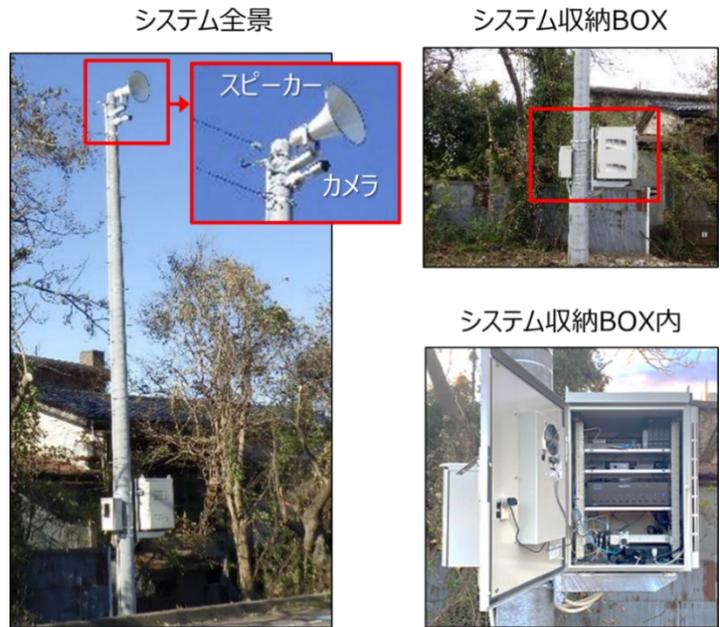


図 C3-3 AI を活用した自動注意喚起システム設置状況.

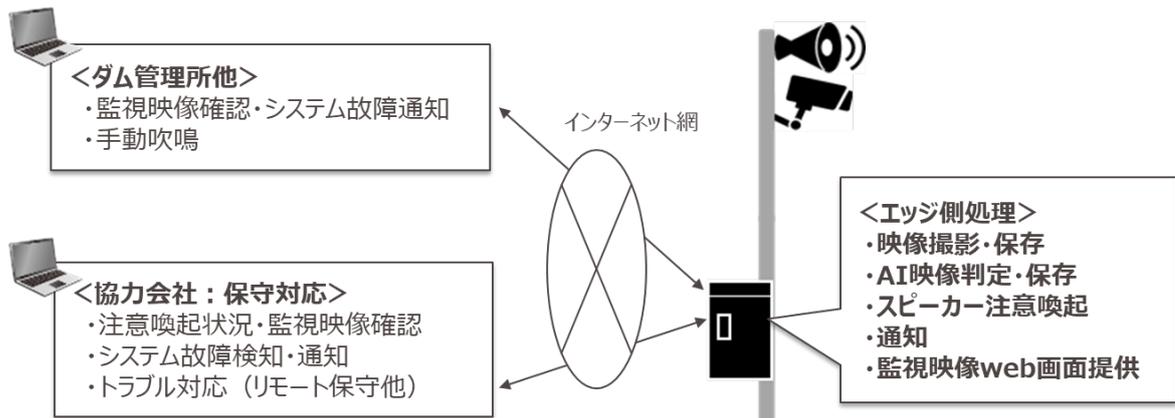


図 C3-4 AI を活用した注意喚起システムの概略構成.

## 3.3 降雨出水予測技術

### 3.3.1 降雨予測技術

気象予測手法は大きく3つに分類することができる(二宮, 1993)。1つ目は物理法則に直接的に基づく予測であり、数値予報と呼ばれる。2つ目は気象の現象論的知識に基づく予測であり、総観的予測(天気図等を用いた予測)や統計的予測と呼ばれる。3つ目は運動学的補外に基づく予測であり、雨の移動・発達の情報に基づいて予測するものである。ここでは、これまで出水予測において数多く適用されてきた数値予報について、その要点を述べる。

#### 3.3.1.1 数値予報の概要

数値予報とは大気現象を支配する物理法則の方程式をコンピュータで解き、予測する方法である。数値予報モデルで考慮される過程の概念図を図3.3.1.1-1に示した。実際にコンピュータで解かれる基礎方程式は、運動方程式、連続の式、熱力学方程式、水蒸気の方程式、および気体の状態方程式となる。

数値予報モデルの精度に影響する項目として、力学過程、物理過程、分解能、初期条件、境界条件等がある。この中で、力学過程とは基礎方程式をどのような座標系を用いて、どのように離散化を行い、どのように時間積分をするかという、数値予報モデルの基礎構造をなす部分である。座標系の具体例を図3.3.1.1-2に示した。同じ基礎方程式を用いた数値予報モデルであっても、その基本構造の中身は同じとは限らず、それぞれの数値予報モデルによって特徴がある。次に物理過程とは、数値モデル解像度で表現されないスケールの現象の効果を物理量によってコントロールし、その影響を格子スケールに取り入れることを意味する。物理過程の概念図を図3.3.1.1-3に示した。例えば、数個の格子にわたる広がりを持つほど積乱雲等も存在しうるものの、現在の数値予報モデルで設定される格子間隔よりも小さい雲の方が多い。しかしながら、このような小さい雲であっても放射量に影響を及ぼす重要な要素であり、かつ降水粒子の生成や降水をもたらすものであるため、数値予報モデルの精度にとって重要である。すなわち、格子平均の物理量により直接表現できない効果を何らかの形で表現する必要がある。物理過程の重要な要素として、雲微物理、積雲対流、乱流・境界層がある。まず、雲微物理について述べる。大気中の水は、水蒸気、雲水、雨、雲氷、雪、あられなど様々な形で存在している(図3.3.1.1-4)。このようなカテゴリーに分類し、

相変化を考慮することによって、カテゴリ毎の量を予測し、雲の発達・衰弱を正確に表現しようとするのが雲微物理である。次に、積雲対流について述べる。積雲や積乱雲の水平スケールは概ね 10km 以下である。よって、数値予測モデルの解像度がこれよりも粗い場合は、格子平均した積雲や積乱雲の効果をパラメタライズする必要がある。これを積雲対流パラメタリゼーションと呼ぶ(図 3.3.1.1-5)。すなわち、積雲対流パラメタリゼーションでは格子内に存在する様々な積雲が引き起こす対流現象やエントレインメント(周囲の空気の取り込み)等の効果を格子点の情報から算定し、その効果を格子点へ反映させている。気象庁の現業数値予報モデルでは、全球モデル(Global Spectral Model: GSM, 水平解像度約 20km)とメソモデル(Mesoscale Model: MSM, 水平解像度約 5km)には積雲対流パラメタリゼーションが適用される。一方で、水平解像度が概ね 2km 以下かつ雲微物理過程を含むモデルには積雲対流モデルは不要となり、これを雲解像モデルと呼ぶ(図 3.3.1.1-6)。気象庁の現業数値予報モデルでは、局地モデル(Local Forecast Model: LFM, 水平解像度約 5km)がそれにあたる。なお、水平解像度 2km でもスケールの小さな積雲や浅い対流は表現できない。また深い対流についても上昇流のコアを正しく表現するには、250m 程度の水平解像度が必要と報告されている(Bryan ら, 2003)。以上より、雲解像モデルは積雲対流パラメタリゼーションのような格子点内の現象を推定する必要がないものの、対象とする現象のスケールに合わせて解像度を設定する必要がある。また、気象庁の数値予報モデルの積雲対流に関する GSM, MSM, および LFM の傾向をそれぞれ記載する(気象庁気象予報部, 2018)。まず GSM, は大気安定度がそれほど低くない段階から積雲対流が発生するものとして成層を安定化するため、弱い降水を広めに予想する傾向がある。次に MSM は、地形や収束などの強制力が強い時に強い降水を集中させる傾向がある。最後に LFM は、格子スケールでの積雲対流発生に必要な強制上昇とその扱いが十分ではないため、降水発生が遅れる場合がある。続いて、乱流・境界層について述べる。大気中には積雲対流よりもスケールの小さな渦が多数存在する(図 3.3.1.1-7)。これらは大気中の運動量、温度、および水蒸気の輸送を担っており、境界層(地上から 1~2km の範囲に位置する地表面の影響を大気層)の構造を決める主要な要素になっている。これらのスケールは一般の気象予測モデルの格子間隔よりはるかに小さいため、乱流クロージャモデル等によりパラメタライズされるのが普通である。

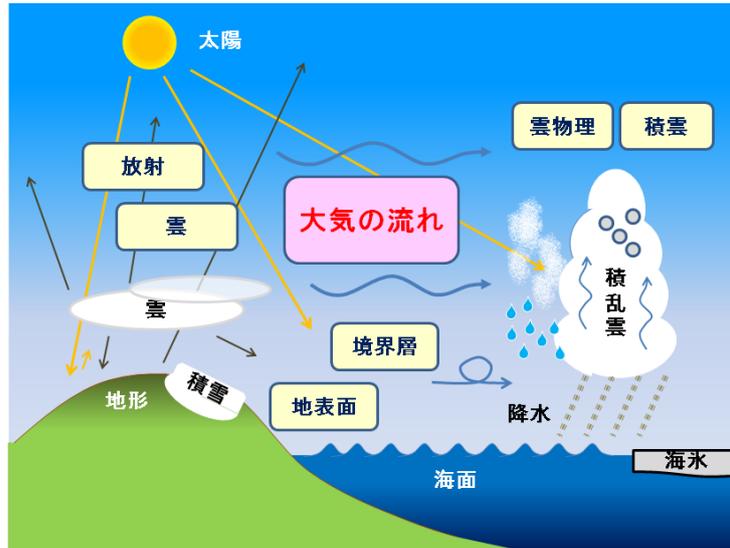


図 3.3.1.1-1 数値予報モデルで考慮される過程の概念図(気象庁予報部, 2018).

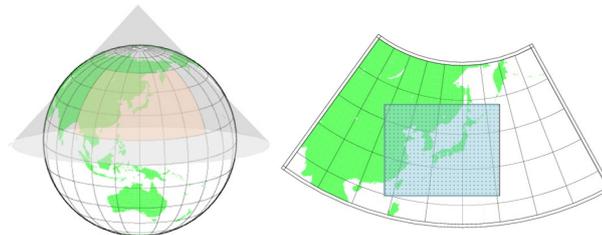


図 3.3.1.1-2 数値予報モデル座標系の具体例(気象庁予報部, 2018).

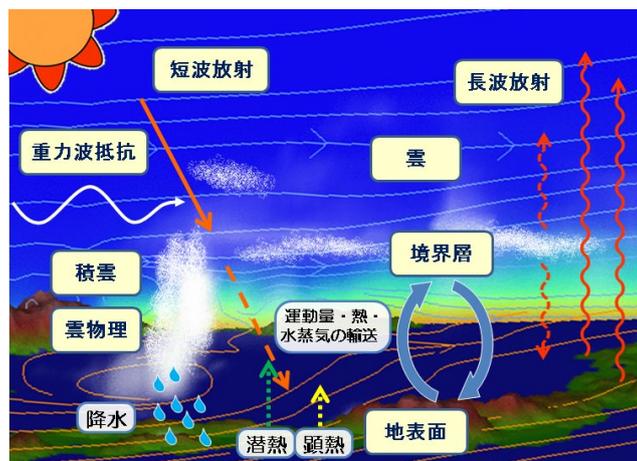


図 3.3.1.1-3 数値予報モデルにおける物理過程の概念図(気象庁予報部, 2018).

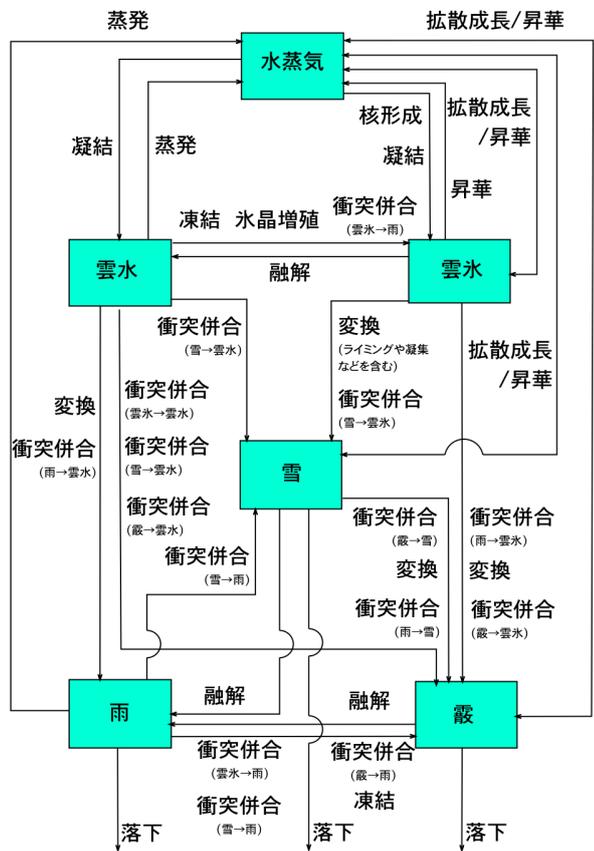


図 3.3.1.1-4 数値予報モデルにおける雲微物理過程の概念図(気象庁予報部, 2018).

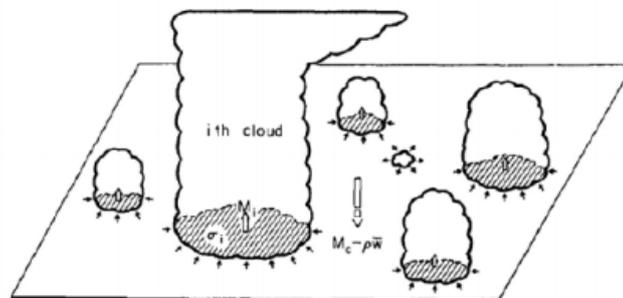


図 3.3.1.1-5 数値予報モデルにおける代表的な積雲対流パラメタリゼーション(荒川-シュートバート法)の概念図.

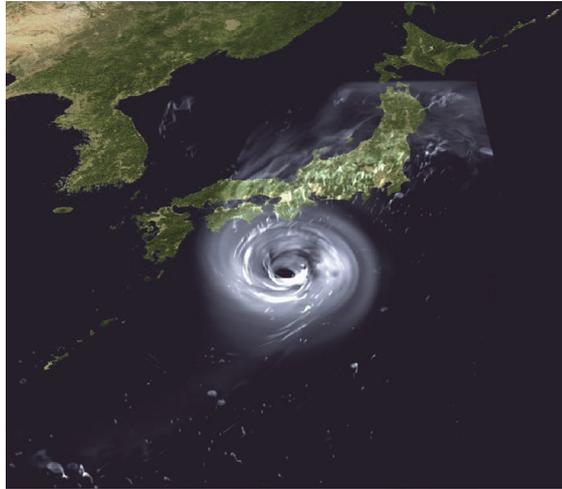


図 3.3.1.1-6 数値予報モデルにおける雲解像モデルのイメージ図(坪木 (2015)より転載).

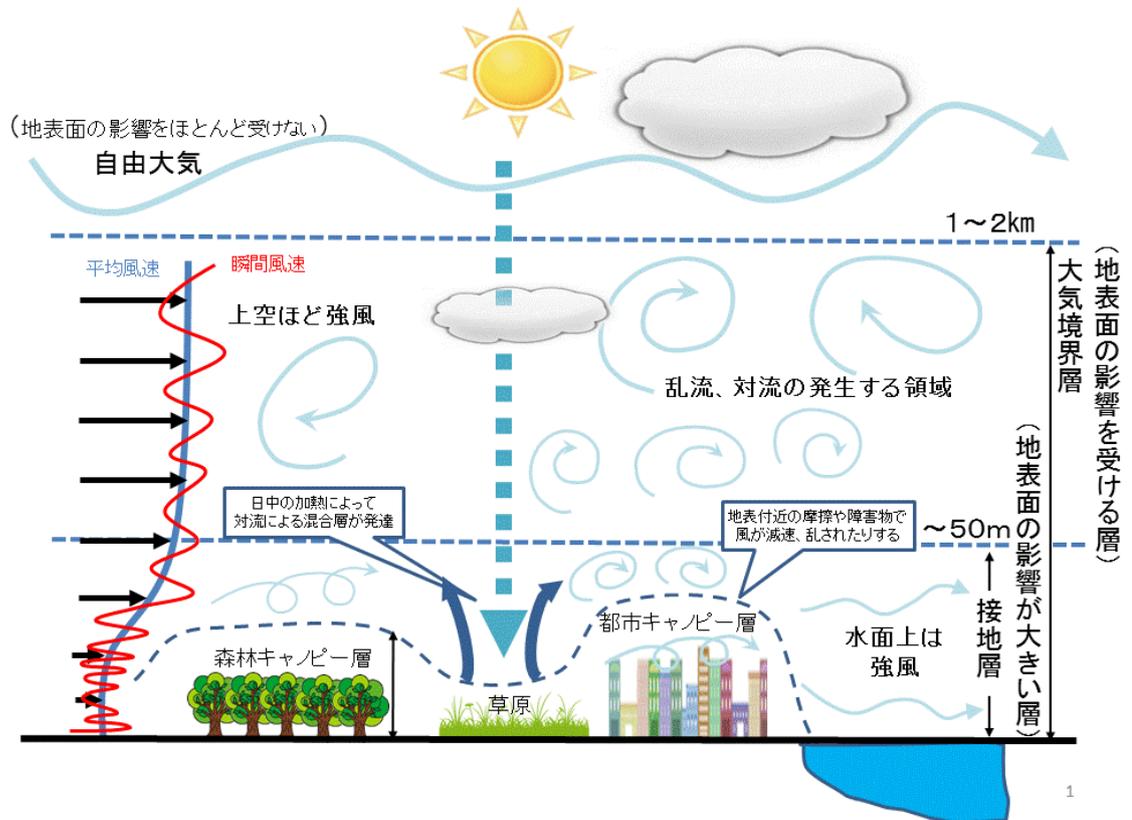


図 3.3.1.1-7 数値予報モデルにおける乱流・境界層のイメージ図.

### 3.3.1.2 数値予報の高度化手法

数値予報モデルの代表的な高度化手法として、データ同化とアンサンブル予報を紹介する。まずデータ同化について述べる。数値モデルによる気象予測は初期値問題であり、メソスケール（2~2,000km）現象の予測において初期値の精度は決定的に重要である。利用できる観測の数は限られているので、通常、前の時間の予報結果を第一推定値として、それを観測で修正して初期値を作る作業が行われる。観測データを数値モデルに取り込む作業をデータ同化と呼ぶ。データ同化の対象となる観測データとして、近年のメソスケールの気象予測を大きく改善したものとして、ドップラーレーダによる動径風速と GPS (GNSS) による可降水量データが報告されている（斉藤&鈴木, 2016）。次に、アンサンブル予報について述べる。数値モデルの初期値には不可避の解析誤差が含まれ、その誤差は時間の経過とともに増大する。これは、「初期値の小さな差が時間とともに増大する」という大気の運動にある「カオス」的な振る舞いによる。初期値などの計算条件をわずかに変えた多数の数値予測を実施してばらつきの程度から予測の誤差を見積もるとともに最も起こりやすい現象を予報する手法があり、これをアンサンブル予報と呼ぶ。アンサンブル予報には多くのメリットがあり、例えば、単独予測よりも統計的に精度が向上すること、予測の信頼度情報が得られること、最悪の場合どの程度の現象が生じるか（サイドストーリー）を想定できること、確率予報により意思決定を可能にすること等が挙げられる。

### 3.3.1.3 数値予報の降水精度

利水ダムの運用において必要とされるリードタイムを考慮すれば、GSM や MSM の活用が想定される。加えて、利水ダムにおいて事前放流を実施する場合に GSM と MSM の活用が明記される。よって、数値予報研修テキスト（気象庁気象予報部, 2018）を基にそれら降水精度を以下に整理した。

降水の検証には様々なものがあるが、代表的なものとして図 3.3.1.3-1 に示すように、予報あり実況ありを「的中 (FO)」, 予報あり実況なしを「空振り (FX)」, 予報なし実況ありを「見逃し (XO)」とした場合、

$$TS = FO / (FO + FX + XO) \quad (3.3.1.3-1)$$

と表されるスレットスコア (TS) がある。スレットスコアは 0~1 の値をとり、1 に近いほど良い予報となる。GSM と MSM の 3~39 時間先予測を実施した場合に

おける降水強度ごとのスレットスコア(TS)を図 3.3.1.3-2 に示した。図 3.3.1.3-2 より、降水強度が増加すると極端に精度が低下する傾向を示した。ただしその一方で、GSM より MSM の方が良好な精度を有することも明らかとなった。

以降、MSM の予測精度の経時変化に着目した。図 3.3.1.3-3 は、10mm/3h 以上の降水イベントを対象に MSM により 3~15 時間先予測を実施した場合のスレットスコアの経時変化を表す。図 3.3.1.3-3 によると、5 年間においてスレットスコアが 0.1 弱程度改善されている傾向を示した。次に、見逃し率(MS)は以下のように表現される。

$$MS = XO / (FO + XO) \quad (3.3.1.3-2)$$

見逃し率は 0~1 の値をとり、0 に近いほど良い予報となる。図 3.3.1.3-4 は、10 mm/3h 以上の降水イベントを対象に MSM により 3~15 時間先予測を実施した場合の見逃し率の経時変化を表す。図 3.3.1.3-4 によると、5 年間において見逃し率が 0.2 弱程度改善されている傾向を示した。次に、空振り率 (FAR) は以下のように表現される。

$$FAR = FX / (FO + FX) \quad (3.3.1.3-3)$$

空振り率は 0~1 の値をとり、0 に近いほど良い予報となる。図 3.3.1.3-5 は、10 mm/3h 以上の降水イベントを対象に MSM により 3~15 時間先予測を実施した場合の空振り率の経時変化を表す。図 3.3.1.3-5 によると、空振り率については 5 年間において改善があまりない結果となった。以上をまとめると、MSM の 3~15 時間先予測精度について、急激な改善を望むのは難しいかもしれないが、年々若干の改善がなされている状況にあると考えられる。

次に、気象庁により公開されている台風予報の精度検証結果（引用（2023/4/19 確認）：[https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ\\_kensho/typ\\_hyoka\\_top.html](https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ_kensho/typ_hyoka_top.html)）について整理する。台風予報の進路と中心気圧の年平均誤差の経時変化を図 3.3.1.3-6 と図 3.3.1.3-7 にそれぞれ示した。台風進路は長期的に見れば精度が改善されている（図 3.3.1.3-6）。また、利水ダムの事前放流の実施判断は 72 時間先の降雨予測情報を活用する方針が示されている（国交省, 2020）。しかしながら、最新の予報を活用したとしても 72 時間先の中心位置は平均 200km 程度の誤差が存在した（図 3.3.1.3-7）。また、台風の中心気圧の予報は、長期的に見ても改善が難しい

状況となっている（図 3.3.1.3-7）。中澤（2019）は、台風予報精度を向上させるために、積雲対流、乱流、境界層、雲物理、熱帯大循環、海洋力学、放射、大気海洋相互作用などの相互関連を正確に理解する必要があることを指摘している。加えて、近年増加傾向にある急発達する台風を正確に予報することは難しいと言及している（中澤, 2019）。その一方、24 時間先の中心位置は 100km 以内の誤差に収束していることも確認した（図 3.3.1.3-6）。よって、24 時間先予測の状況を参照しながら、その継続や中止を判断することは事前放流を合理的に改善する方法の 1 つになると考えられる。

次に、気象庁により公開されている線状降水帯の予報（引用（2023/4/19 確認）：[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/senjokousuitai\\_ooame.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/senjokousuitai_ooame.html)）について整理する。気象庁としての線状降水帯予報の結論を先に述べると、「現在の観測、予想技術では、いつどこで線状降水帯が発生し、どのくらいの期間継続するのかを、事前に正確に予想することはできない」としている。その理由として、線状降水帯の発生メカニズムに未解明な点があること、線状降水帯周辺の大気の 3 次元分布が正確にわかっていないこと、および予想のための数値予報モデルに課題があることを挙げている。特に、線状降水帯に対する数値予報モデルの課題については、Oizumi ら（2018）が指摘している。Oizumi ら（2018）は 2014 年 8 月に広島市において発生したバックビルディング型の線状降水帯を対象に、気象モデルの水平解像度を 5km, 2km, 500m, 250m に設定したときの再現実験を実施した。その結果、水平解像度が 5km において線状降水帯が現れず、2km において線状降水帯が発生したものの位置のずれが確認された。一方、水平解像度が 500m と 250m の場合には、線状降水帯の位置と強度を再現することができた。さらに、積乱雲のサイズの再現と、バックビルディング形成に重要な積乱雲に伴うか交流や下層冷気の対流の再現が、水平解像度が 500m と 250m の場合において良好だったことを示した。以上より、事前放流において活用される GSM と MSM の水平解像度はそれぞれ 20km と 5km であることから、事前放流において線状降水帯を取り扱うことは難しい状況にあるといえる。言い換えれば、事前放流の実施中に線状降水帯の発生が判明した時点で、予測降雨量を過信しないことが肝要であると考えられる。

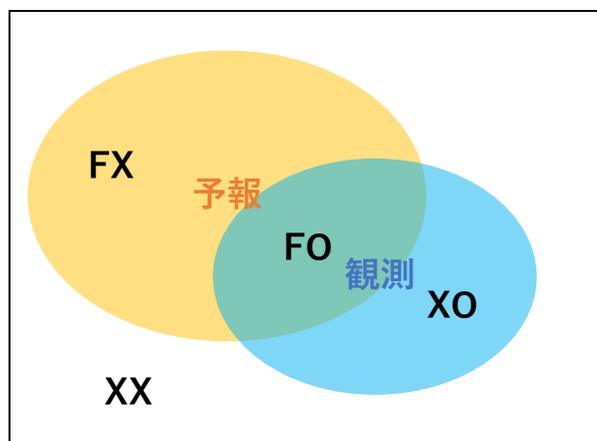


図 3. 3. 1. 3-1 数値予報の検証スコアの概念図.

FO: 予報あり実況あり(的中), FX: 予報あり実況なし(空振り), XO: 予報なし実況あり(見逃し), XX: 予報なし実況なし.

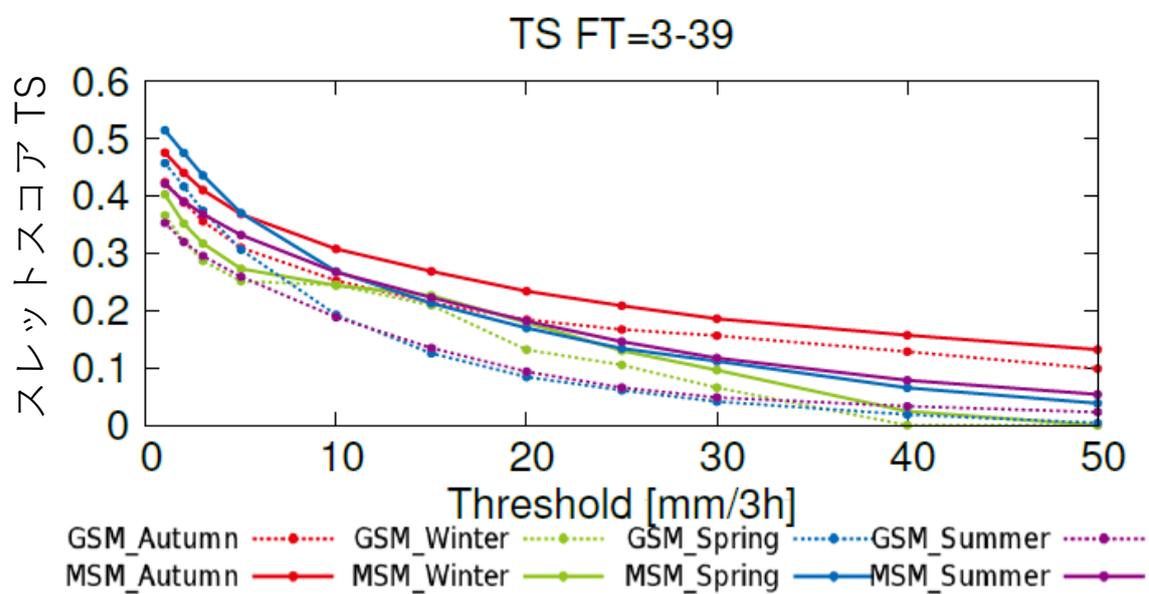


図 3. 3. 1. 3-2 GSM と MSM の 3~39 時間先予測を実施した場合における降水強度ごとのスレットスコア(気象庁予報部, 2018).

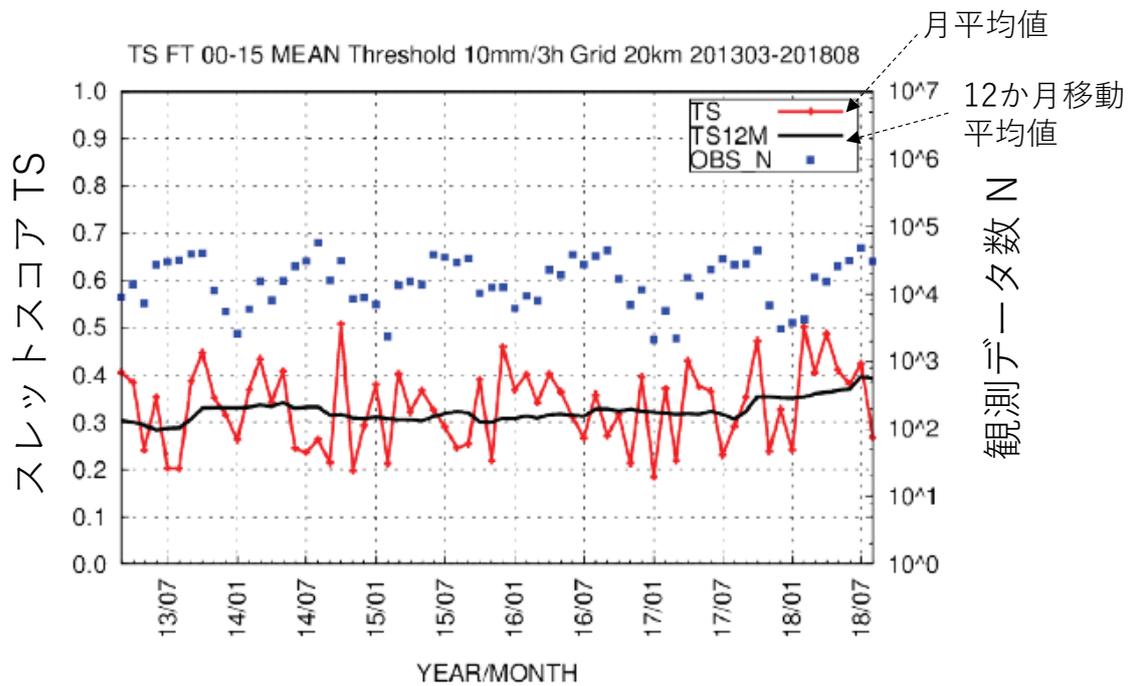


図 3. 3. 1. 3-3 10mm/3h 以上の降水イベントを対象に MSM により 3~15 時間先予測を実施した場合のスロットスコアの経時変化(気象庁予報部, 2018).

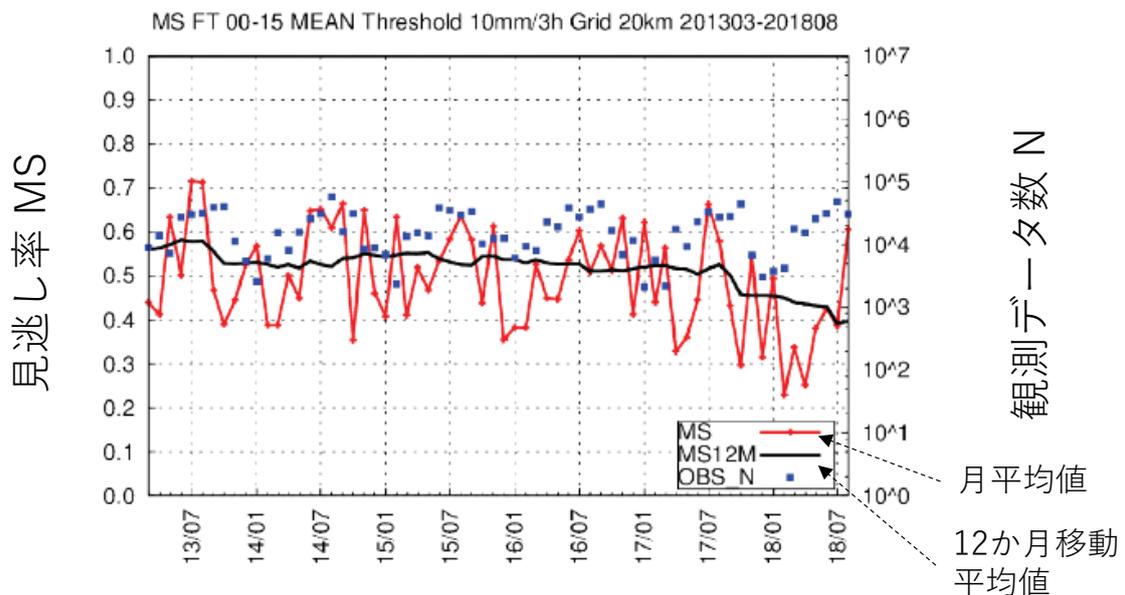


図 3. 3. 1. 3-4 10mm/3h 以上の降水イベントを対象に MSM により 3~15 時間先予測を実施した場合の見逃し率の経時変化(気象庁予報部, 2018).

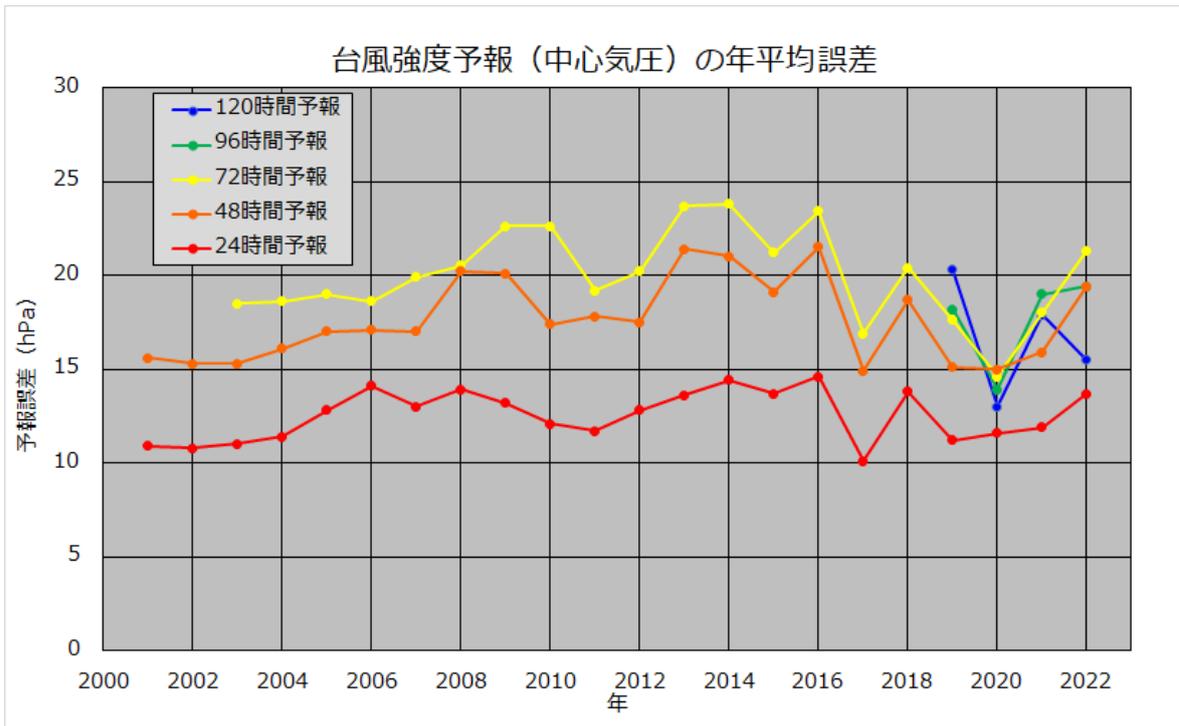


図 3.3.1.3-7 台風予報による中心気圧の年平均誤差の経時変化(引用 2023/9/5

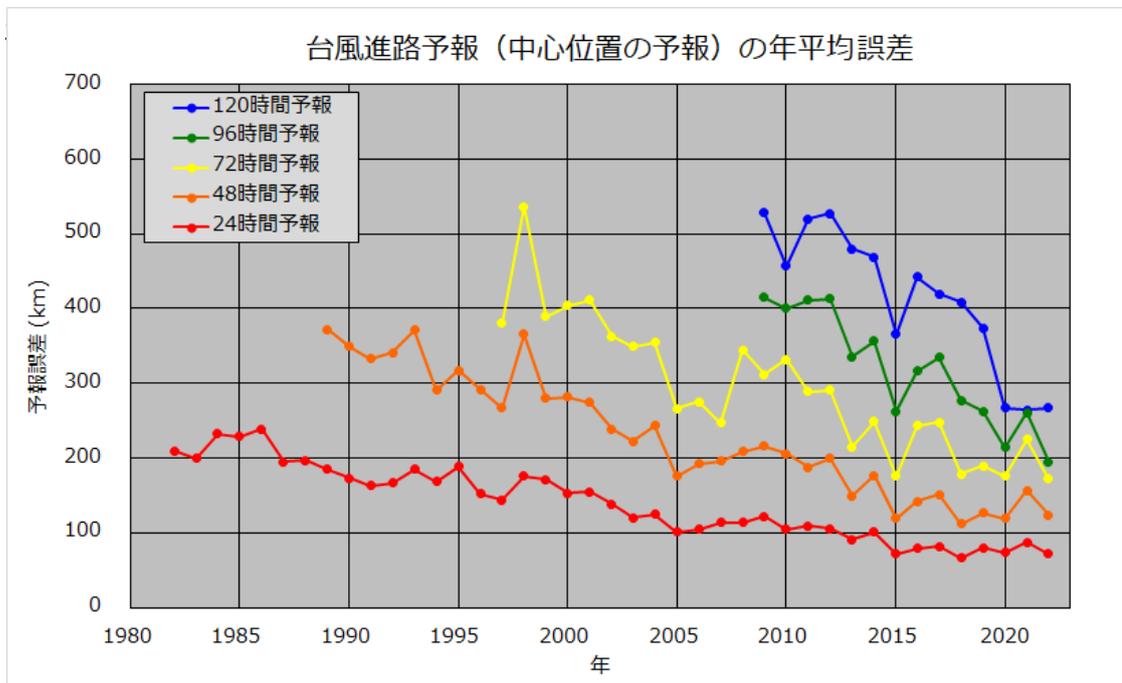


図 3.3.1.3-6 台風予報による進路の年平均誤差の経時変化(引用 2023/9/5 確認) : [https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ\\_kensho/typ\\_hyoka\\_top.html](https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ_kensho/typ_hyoka_top.html) .

### 3.3.2 流出解析技術

流出解析とは、降水量を入力値として河川流量を出力することであり、それを関数体系化したものを流出解析モデルと呼ぶ。また、流出解析は、年間スケール等を対象とする長期流出解析と一雨程度を対象とする短期流出解析に区分される。短期流出解析はさらにピーク流量のみを求めるモデルと、洪水ハイドログラフを求めるモデルに分けられる。本書籍では降雨出水予測を対象としているため、以下では主に短期流出解析かつハイドログラフを求めるモデルに着目する。

流出解析モデルは対象とする観点に応じて、様々な分類がなされる。例えば、河川流量を出力する関数に着目した場合、可能な限り多くの水文過程を正確に表現しようとする物理モデルと、数学的に表現しようとする概念モデルに分類される。また、モデルのパラメータや水文過程等の空間状態に着目した場合、流域内において均一とする集中型モデルと、空間分布を考慮する分布型モデルに分類される。以下ではまず、これまで洪水予測に用いられてきた集中型モデルおよび分布型モデルについて、それぞれいくつか紹介する。さらに、機械学習を洪水予測に活用する研究が近年盛んに実施されるようになってきた。よって、機械学習を活用した研究についてもいくつか紹介する。

#### 3.3.2.1 集中型モデル

代表的な集中型モデルとして木村（1961）の貯留関数法と菅原（1972）のタンクモデルを以下にそれぞれ紹介する。

##### 貯留関数法

河川流出量を  $Q$  (mm/h)、流域貯留量を  $S$  (mm) としたとき、両者の関係は以下のように表現される。

$$S = kQ^p \quad (3.3.2.1-1)$$

ここで、 $k$  と  $p$  は係数である。すなわち、 $S$  は  $Q$  のべき乗関係であることを表している。図 3.3.2.1-1 は、下部に流出孔が設けられたタンクに貯留された水が流出する様を示しているが、この流出量をベルヌイにより表せば、タンク内水深は流出量のべき乗関係であることを確認することができる。このように、3.3.2.1-1 式は簡易であるものの、水の流れの本質をとらえている。次に、 $S$  は連続式を用い

て以下のように表される。

$$\frac{dS}{dt} = r_e(t - T_L) - Q \quad (3.3.2.1-2)$$

ここで、 $t$ : 時間(h),  $r_e(t)$ : 有効降雨強度(mm/h),  $T_L$ : 遅滞時間(h)である。 $r_e$ は地表に達する降雨の内、洪水流出成分 (i.e., 直接流出成分) になる降雨を表す。 $r_e$ の求め方は水理公式集等に記載される。また、洪水時の $S$ と $Q$ の関係を時刻ごとに1つのグラフにプロットしていくと、流出の上昇期と下降期において異なる経路をたどり、ループを描く。すなわち、1つの $S$ に対し2つの $Q$ を持ちうる二価関数となり、3.3.2-1式を満たさない。よって、木村(1961)は $T_L$ を導入することにより、このループの問題を解消した。以上より、 $k$ ,  $p$ ,  $T_L$ がパラメータとなるが、その求め方は水理公式集(土木学会, 1999)等に記載される。

日本では、貯留関数法の適用によって多くの河川の治水計画が実施されている。

### タンクモデル

タンクモデルは1950年代において菅原らによって提案された。様々なモデル構造が提案されているものの、最終的に図3.3.2.1-2に示すように4段タンクモデルが完成した。各タンクには流出孔が設けられており、その孔からの流出量 $q_i$ は、タンクの貯留高 $S_i$ と流出孔の高さ $h_i$ の差の線形関係により表現される。また、河川流出量 $Q$ は $q_i$ の総和により表現される。これにより、貯留量に対する流出量の非線形関係を表現することができる。加えて、降雨は最上段のタンクに貯留され、タンク底部に設けられた浸透孔から、下段のタンクに水が浸透するモデル構造となっている。このモデル化は降雨に対する流出遅れの表現を可能とする。

タンクモデルは長期流出、短期流出ともに良好な性能を発揮することから、国内のみならず海外においても応用されていった。1974年に流出解析モデルの国際比較コンテストが世界気象機関(WMO)にて実施され、最良と評価された。ただし、貯留関数法と比較し、同定すべきパラメータが多い点に注意する必要がある。

#### 3.3.2.2 分布型モデル

ここでは分布型モデルとしてHYDREEMS (HYDrological Evaluation with Evapotranspiration Modeling System; 豊田ら, 2006)とRRIモデル (Rainfall-Runoff-Inundation Model; 佐山&岩見, 2014)を以下にそれぞれ紹介する。

## HYDREEMS

HYDREEMS は各計算メッシュにタンクを配置した分布型流出モデルであり、河川の流れをキネマティックウェイブ法、表面・中間・地下水流出を3段タンクモデルによって解析する（図 3.3.2.2-1）。HYDREEMS の特徴として、大きく3つ挙げられる。特徴の1つ目は、多様な水文過程を精緻にモデル化している点である。HYDREEMS では水収支だけではなく、熱・放射収支についても解析する（図 3.3.2.2-2）。よって、蒸発散および積雪・融雪過程を精緻に解析することが可能である。例えば、蒸発散の解析は、地域に応じた植生の季節変化や葉面に付着した雨水の蒸発（i.e., 降雨遮断蒸発）を考慮する。融雪の解析は、5つの融雪成分(放射, 顕熱, 潜熱, 雨水熱, 地中熱)を考慮する。特徴の2つ目は、計算メッシュごとの水の流下方向（i.e., 落水線）データが、日本全域において整備されている点である。現状では1kmと250mの落水線データを整備しており、計算対象の緯度経度を指定することにより、対象流域を抽出することができる。微地形等の影響により、実際の落水線との不一致が見られる場合には、落水線を修正するツールも別途完備されている。特徴の3つ目は、入力データがほぼ完備されている点である。例えば、HYDREEMS の駆動に必要な入力気象データは、近傍の気象官署やアメダス地点データから、自動的に整備されるシステムになっている。また、日本全域の地質データも整備されており、地質に応じた地下水流出パラメータが与えられるようになっている。

HYDREEMS は長期流出、短期流出ともに適用することが可能であり、これまで日本各地の流域を対象に数多く適用されてきた(玉井ら,2013; 兵頭ら,2018; 新井ら,2020)。加えて、気象予測データを入力値とすることで出水予測も可能であり、特に宮崎県耳川水系においてHYDREEMSを活用したリアルタイム出水予測システムは九州電力により現在運用されている(兵頭ら,2018)。

## RRI モデル

RRI モデルは降雨流出と洪水氾濫を一体的に解析する。そのため、対象流域を河道と陸域に分離して取り扱う。すなわち、河道から陸域へ水が流出することにより、洪水氾濫の解析がスタートする。加えて、洪水氾濫が進行し、陸域水位の方が河道水位よりも高くなった場合、陸域から河道への水の流入も考慮される。このような河道と陸域間の水のやり取りは、越流公式に基づいて計算される。流れの計算は、河道において一次元、陸域において平面二次元の拡散波近似法が適

用される。通常の氾濫モデルは破堤地点からの氾濫量を入力条件として、氾濫原における浸水挙動を詳細に解析する。一方、RRI モデルは、降雨流出モデルとしての機能も有するため、平野部における鉛直浸透流、山岳域における側方浸透流、ダムの影響など、従来の氾濫モデルでは考慮されてこなかった水文過程や流水制御の過程を簡潔に表現している。また、RRI モデルは計算の高速化のため、その数値計算アルゴリズムに時間ステップの自動調整や並列化が施されている。RRI モデルの入力データは、標高データ、河道断面データ、土地利用・土壌分布データ、降雨・可能蒸発散データ等である。これらを整備することができれば、国内外問わず適用が可能である。

RRI モデルは短期流出について洪水氾濫も含めて解析できるため、出水予測の目的で国内外問わず、適用されている。例えば、タイ・チャオプラヤ川流域におけるリアルタイム氾濫予測システムや（佐山&岩見, 2014）、日本全国一体を対象としたリアルタイム氾濫予測システムの試み（近者ら, 2019）がなされている。

### 3.3.2.3 機械学習による洪水予測

最近 10 年間に土木学会論文集 B1（水工学）に掲載された機械学習を用いた洪水予測に関する論文数を調査し、その結果を図 3.3.2.3-1 に示した。図 3.3.2.3-1 によると、2016 年以降、論文数が増加傾向になることが分かる。ここで、近年の論文数増加傾向の起点となった研究は、一言ら（2016）と一言&桜庭（2017）の研究である。これらは洪水予測における機械学習の可能性を高めたものと考えられる。よって両研究の概要を以下に紹介する。

一言ら（2016）は、深層学習を用いた人工ニューラルネットワーク（Artificial Neural Network: ANN）による河川水位予測手法を開発した。ここで ANN とは、神経細胞をコンピュータ上でモデル化し、それをネットワークしたものである。ANN の基本構造は入力層、中間層、出力層から構成される（図 3.3.2.3-2）。そして、深層学習とは、複数の中間層を用いた ANN により学習を行う手法である。一言ら（2016）は、入力値を対象流域内の時刻水位、水位変化量、時刻雨量として 6 時間先までの水位を予測する深層学習モデルを開発した。洪水時を対象に検証した結果、深層学習モデルは分布型モデルよりも良好な精度を示した。一言&桜庭（2017）はこの研究を発展させ、深層学習モデルと流出モデルを組み合わせた水位予測手法（ハイブリッドモデル）を構築した。ハイブリッドモデルの入力値は、流域内の時刻水位、水位変化量、貯留量変化量である。この貯留量変化量

に対し、流出モデルによる計算値を割り当てることにより、流出モデルの効果を  
取り入れた。洪水時を対象に検証した結果、ハイブリッドモデルは深層学習モデ  
ルの性能を上回り、特に大規模洪水時において精度向上が見られた。

上記では水位予測の事例を紹介したが、目的変数を変えれば流量の予測も可能  
である。また、機械学習の手法は学習データの量が重要である。もし対象流域に  
十分な学習データがあれば、上記のように機械学習の手法は流出モデルの性能を  
凌駕できるかもしれない。

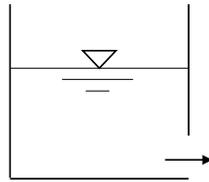


図 3.3.2.1-1 貯留関数法のイメージ図.

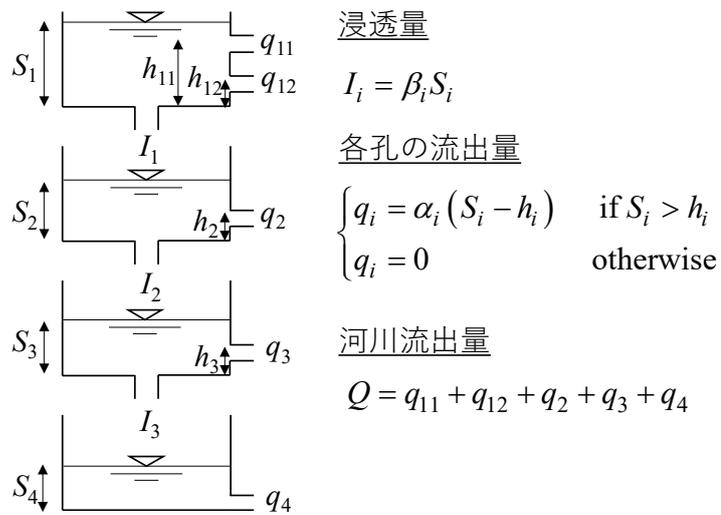


図 3.3.2.1-2 タンクモデルのイメージ図.

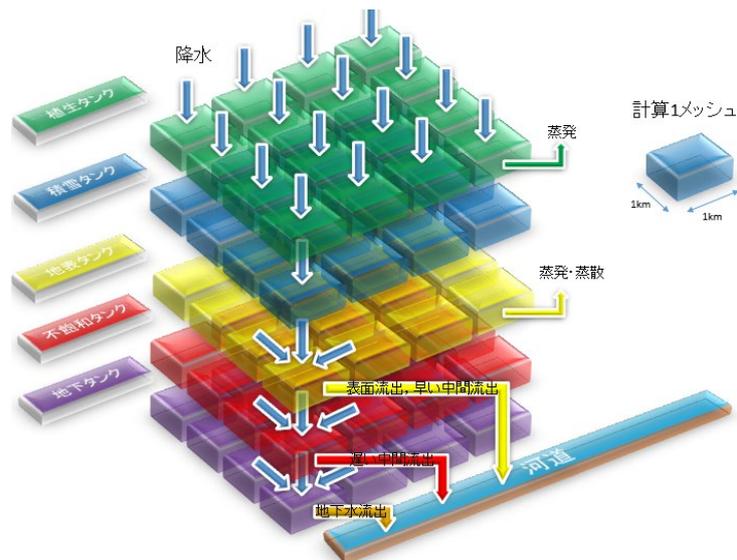


図 3.3.2.2-1 HYDREEMS のモデル構造.

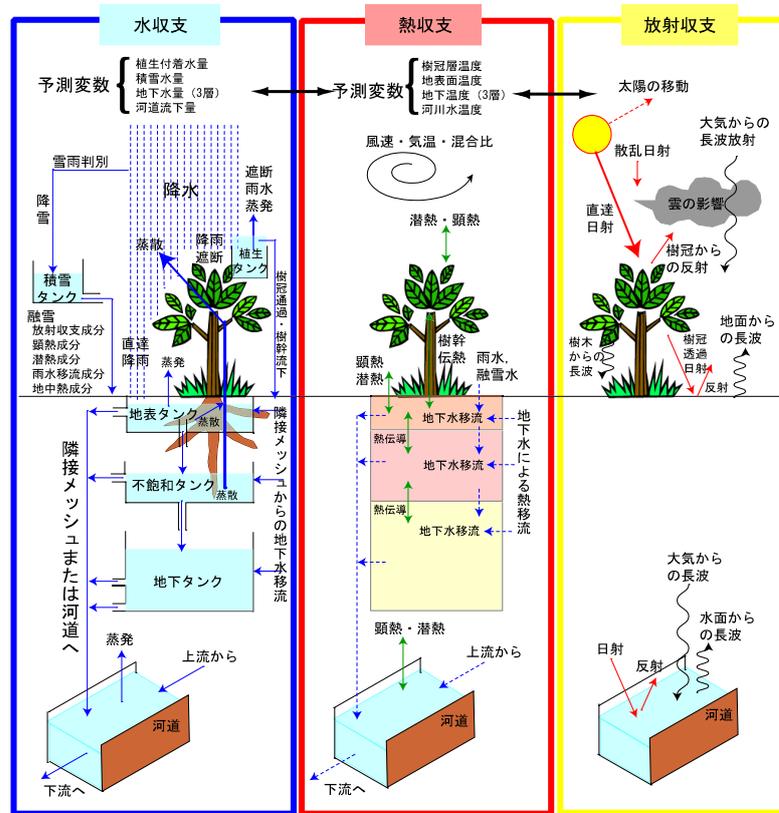


図 3.3.2.2-2 HYDREEMS において考慮される水収支，熱収支，および放射収支の概念図.

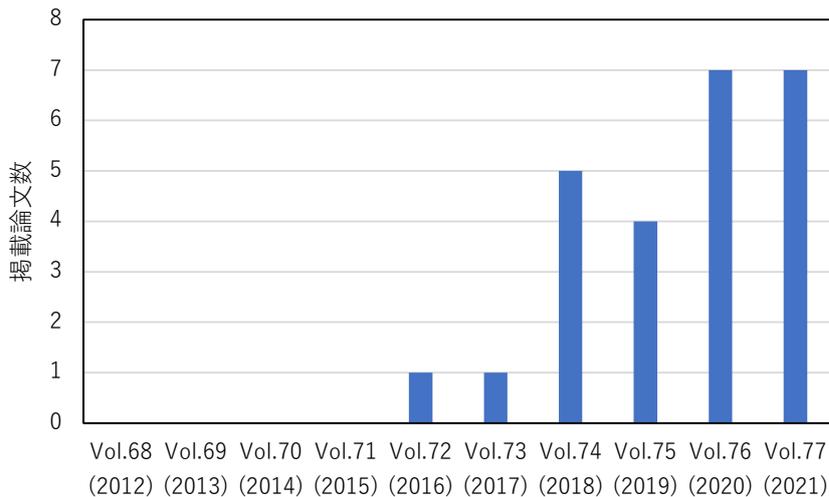


図 3.3.2.3-1 最近 10 年間に土木学会論文集 B1(水工学)に掲載された機械学習を用いた洪水予測に関する論文数.

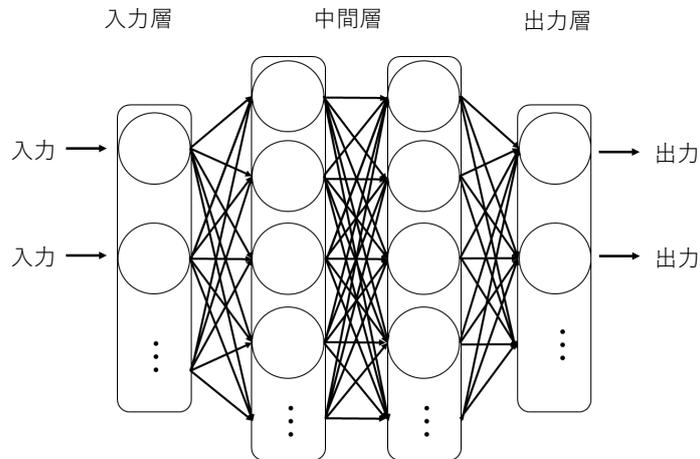


図 3.3.2.3-2 ANN の構造

### 3.3.3 降雨出水予測システム

降雨出水予測システムは、3.3.2 項において説明した流出解析モデルに、3.3.1 項において説明した降雨予測モデルによる予測降水量データを入力することにより構築することができる。最近の降雨出水予測システムを調査し、表 3.3.3-1 にまとめた。なお、表 3.3.3-1 にまとめられた流出解析モデルは全て分布型モデルであった。表 3.3.3-1 より、降雨出水予測システムは、リアルタイム運用されているものと、過去イベントの検証がメインでありリアルタイム運用されていないものに区分することができる。九州電力の耳川水系における水力発電ダムでは、台風による大規模出水時においてダム通砂が実施されている（兵頭ら, 2018）。このダム通砂の判断のために、NuWFAS（電力中央研究所の気象予測システム）とHYDREEMS を活用したリアルタイム降雨出水予測システムが導入されている（兵頭ら, 2018）。また、日本全域の洪水氾濫をリアルタイムで予測するために、気象庁の降水短時間予報と RRI モデルを組み合わせたシステムも導入されている（近者ら, 2019）。ただし、計算負荷の観点から、予測時間は 1 時間となっている（近者ら, 2019）。表 3.3.3-1 においてリアルタイム運用されていない降雨出水システムについては、利水ダムにおけるアンサンブル降雨予測の活用方法を検討するために利用されていた。例えば、野原ら（2020）は利水ダムを想定した仮想ダム流域において、51 メンバからなる ECMWF アンサンブル予報に基づくそれぞれの出水量情報から、事前放流の意思決定プロセスを提案した。具体的には、各時

刻上位 3 位の出水量予測値をトレースし, そのピーク流量が基準流量(洪水流量)を超過した場合に事前放流の実施が判断される. 加えて, 出水量予測値の総流量が下位 1~5 位のメンバを対象とし, 貯水量が回復可能な事前放流量の総量を算出した上で, 事前放流量が決まる仕組みとなっている. このように, 利水ダム的事前放流を効果的に実施するために, 最近ではアンサンブル降雨予測データの活用が積極的に検討されている状況にある.

表 3. 3. 3-1 最近の降雨出水予測システム.

降雨予測モデル	流出解析モデル	対象流域	予測時間	文献	リアルタイム運用
NuWFAS	HYDREEMS	耳川水系 (884.1km <sup>2</sup> )	72 時間	兵頭ら(2018)	○
降水短時間予報	RRI	日本全域	1 時間	近者(2019)	○
降水短時間予報	RRI	兵庫県全域	6 時間	近者(2021)	○
wrf に局所アンサンブル変換カルマンフィルタを導入したアンサンブル降雨(牛山ら, 2018)	WEB-DHM-4cs	生坂ダム (2263km <sup>2</sup> ), 高瀬ダム (131km <sup>2</sup> )	48 時間	玉川ら(2021)	
wrf に局所アンサンブル変換カルマンフィルタを導入したアンサンブル降雨(牛山ら, 2018)	WEB-DHM-S	畑薙第一ダム (317km <sup>2</sup> )	39 時間	小池ら(2021)	
週間アンサンブル予報(51 メンバ), 1 か月アンサンブル予報(50 メンバ)	Hydro-BEAM	早明浦ダム (472km <sup>2</sup> )	8 日間(週間アンサンブル予報), 33 日間(1 か月アンサンブル予報)	野原ら(2017)	
ECMWF 中期アンサンブル予報(51 メンバ)	Hydro-BEAM	仮想ダム流域 (616km <sup>2</sup> )	15 日先	野原ら(2020)	

## 参考文献

- Bryan, G.H., Wyngaard, J.C, Michael-Fritsch, J., 2003. Resolution Requirements for the Simulation of Deep Moist Convection. *Monthly Weather Review* 131(10), 2394–2416.
- Oizumi, T., Saito, K., Ito, J., Kuroda, T., Duc, L., 2018. Ultra-high-resolution numerical weather prediction with a large domain using the K Computer: A case study of the Izu Oshima Heavy Rainfall event on October 15-16, 2013, *J. Meteor. Soc. Japan*, 96, 25-54.
- 新井涼允, 豊田康嗣, 大庭雅道, 佐藤隆宏, 風間聡, 2020. 庄川流域を対象とした融雪出水に対する気候変動の影響. *土木学会論文集 G(環境)*, 76(5), I\_109–I\_119.
- 気象庁予報部, 2018. 平成30年度数値予報 研修テキスト 「第10世代数値解析予報システムと数値予報の基礎知識」(数値予報課). 数値予報解説資料(51).
- 木村俊晃, 1961. 貯留関数による洪水流出追跡法. 建設省土木研究所.
- 近者敦彦, 関本大晟, 阿部紫織, 岩崎貴志, 崔国慶, 小島広宜, 中村要介, 佐山敬洋, 2019. 降雨流出氾濫一体解析を用いた全国ベースでの氾濫予測の試み. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 75(2), I\_1321–I\_1326.
- 近者敦彦, 関本大晟, 橋本舜也, 豊島靖, 升水義浩, 村上悦生, 川村布由子, 崔国慶, 小島広宜, 関正造, 柴田良一, 阿山佳樹, 平塚康嗣, 佐山敬洋, 2021. 兵庫県全域リアルタイム氾濫予測システムの構築. *河川技術論文集*, 27, 69–74.
- 国土交通省, 2021. 事前放流ガイドライン.
- 小池俊雄, 中村茂, Cho-Thanda, N., 牛山朋來, Rasmy, M., 玉川勝徳, 伊藤弘之, 池内幸司, 生駒栄司, 喜連川優, 2021. 発電ダムの洪水調節と発電操作支援システム. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 77(2), I\_79–I\_84.
- 佐山敬洋, 岩見洋, 2014. 降雨流出氾濫(RRI)モデルの開発と応用. *土木技術資料*, 平成26年6月号, 18–21.
- 斉藤和雄, 鈴木修, 2016. 気象学の新潮流 メソ気象の監視と予測—集中豪雨・竜巻災害を減らすために. 朝倉書店.
- 菅原正巳, 1972. 流出解析法 水文学講座7. 共立出版.
- 玉井典, 佐々木勝教, 馬越唯好, 白鳥実, 豊田康嗣, 2013. 森林の土壌保水力を考慮した高精度な流出解析手法を用いた林相変化に関する降雨流出解析. *土木学会論文集 G(環境)*, 69(5), I\_151–I\_159.
- 玉川勝徳, Rasmy, M., Asif, N., 牛山朋來, 中村茂, Cho-Thanda, N., Abdul, M., 大沼克弘, 小池俊雄, 2021. 犀川流域におけるダム流入量のアンサンブル予測手法

- の検討. 土木学会論文集 B1 (水工学), 77(2), I\_61-I\_66.
- 坪木和久, 2015. 高解像度ダウンスケーリングによる将来台風の強度予測. 日本風工学会誌, 40 (4), 380-390.
- 豊田康嗣, 小林卓也, 下垣久, 2006. 森林域における蒸発散過程を考慮した流出解析モデルの開発. 電力中央研究所報告, N05003.
- 土木学会, 1999. 水理公式集 平成 11 年版. 土木学会.
- 中澤哲夫, 2019. 台風予測の最前線. 成山堂書店.
- 二宮洗三, 1993. 気象の短期予測. 地学雑誌, 101(6), 471-484.
- 野原大督, 堀智晴, 佐藤嘉展, 2017. 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), 73(4), I\_1315-I\_1320.
- 野原大督, 木谷和大, 道広有理, 角哲也, 2020. 利水ダムにおける事前放流の意思決定への ECMWF 中期アンサンブル予報の利用性の分析. 土木学会論文集 B1 (水工学), 76(2), I\_829-I\_834.
- 野原大督, 木谷和大, 道広有理, 角哲也, 2020. 利水ダムにおける事前放流の意思決定への ECMWF 中期アンサンブル予報の利用性の分析. 土木学会論文集 B1 (水工学), 76(2), I\_829-I\_834.
- 一言正之, 桜庭雅明, 2017. 深層ニューラルネットワークと分布型モデルを組み合わせたハイブリッド河川水位予測手法. 土木学会論文集 B1 (水工学), 73(1), 22-33.
- 一言正之, 桜庭雅明, 清雄一, 2016. 深層学習を用いた河川水位予測手法の開発. 土木学会論文集 B1 (水工学), 72(4), I\_187-I\_192.
- 兵頭拓, 小川信行, 新屋裕生, 2018. 耳川水系ダム通砂運用時における出水予測の概要. 電力土木 / 電力土木技術協会 編 (393), 40-44.

#### コラム 4 降雨出水予測技術の活用事例

気象庁の他、気象に係る多くの関係者の尽力により、気象予測精度は日々向上している。その一例として、**図 C4-1** は台風進路予報（中心位置の予報）の年平均誤差が年々小さくなっていることを示している（引用（2023/9/5 確認）：[https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ\\_kensho/typ\\_hyoka\\_top.html](https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ_kensho/typ_hyoka_top.html)）。そして、予測技術の精度向上に伴い、ダム操作において予測の活用事例が多く見られるようになってきている。

電源開発では、2011年に発生した紀伊半島大水害を受けて社内有志者会議を立ち上げ、降雨予測情報を活用した水位低下開始基準（**図 C4-2**）を設定し、基準合致時には、2段階でダム水位を低下させ、洪水到達前に空き容量を確保する運用を開始・継続している（松原ら, 2013; 2016）。確保した空き容量を活用した放流量低減方法は、**図 C4-3** に示す通り、洪水時に実施する遅らせ操作の「遅らせ時間」を延伸することによって、流入ピーク時の放流量を低減させるというものである。

また、国交省では、記録的豪雨災害となった令和元年台風19号を契機に、本来治水機能を有しない利水ダムにおいても治水協定を締結し、事前放流を行う取り組みを進めている（国土交通省, 2021）。事前放流の実施判断は3日前から行うことを基本とし、予測情報としては、気象庁GSM/MSMガイダンスを用いる。利水ダムは水資源利用のために貯水するものであり、治水対策で容量を活用するには、低下させた貯水位が降雨により回復することが前提となり、取り組みの要はやはり予測精度といえる。

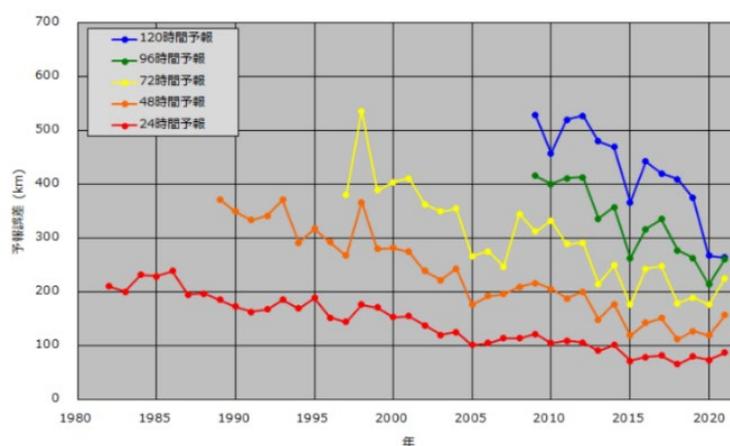


図 C4-1 台風進路予報の年平均誤差. (引用（2023/9/5 確認）：

[https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ\\_kensho/typ\\_hyoka\\_top.html](https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ_kensho/typ_hyoka_top.html))

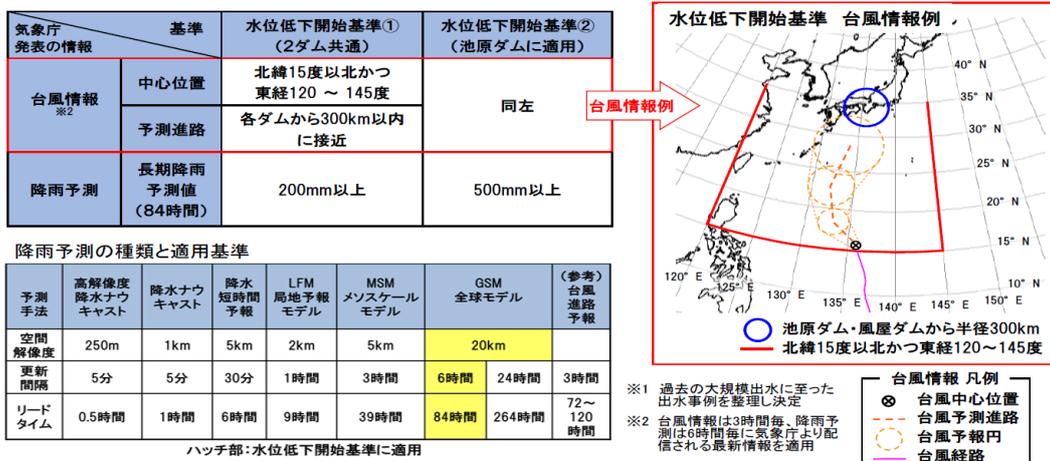


図 C4-2 新宮川水系における水位低下開始基準。

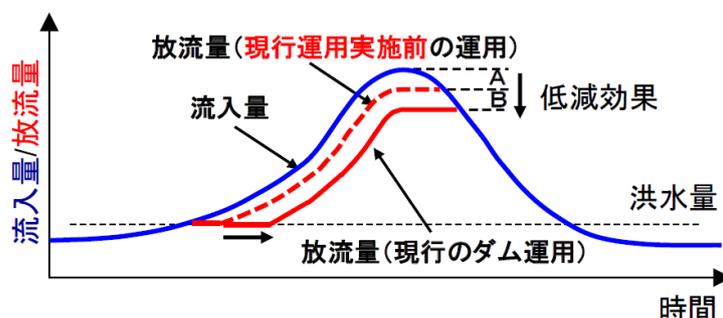


図 C4-3 放流量低減効果のイメージ。

予測技術の高度化により、リードタイムがさらに長く、精度が向上することは、治水安全度を高めるだけでなく、出水が予測されない期間において高水位運用を行う等、利水（kWh 増）の面でも既存設備の能力を最大限活かすことに資する。

現在、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）では、大規模洪水時に流域の既設ダム(群)の有限な貯水容量を最大限活用する仕組みの構築を目標として、ダム操作に使用する「長時間・高解像度・高信頼性の降雨予測（15日先までの長時間アンサンブル降雨予測）」と、これを活用する「最適なダム事前放流技術」を開発中である。このような長時間・高解像度・高信頼性の降雨予測が実装されれば、これまでは洪水吐ゲートから放流しなければ間に合わなかった水位低下が、時間をかけて発電放流で行えるようになる等、利水面への貢献も大いに期待される。

電気事業者、またそこで働く土木技術者として、流域の安全・安心のための「守

り（治水）」はもちろん、「攻め（利水）」に関しても、日々進化する予測技術を最大限活かせるよう、引続き知恵を絞っていききたい。

#### 参考文献

国土交通省，2021．事前放流ガイドライン．

松原隆之，笠原覚，嶋田善多，中北英一，土田和稔，高田望，2013．台風情報と全球数値予報モデル（GSM）によるダム運用の改善に関する基礎検討．土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.69，No.4，I\_367- I\_372．

松原隆之，梶啓介，池口幸宏，中北英一，土田和稔，2016．気象庁降雨予測（GSM）と台風情報を活用した発電専用ダムの運用高度化手法の実証．土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.72，No.4，I\_1195- I\_1200．

## 4 豪雨に関連した利水ダムの運用

### 4.1 利水ダムの特徴と分類

#### 4.1.1 利水ダムに関する河川法の規定

河川法上のダムは、基礎地盤から越流頂までの高さが 15m 以上の堰を指し、河川法第 3 条第 2 項に係る河川管理施設におけるダム（いわゆる治水ダム）と、第 26 条第 1 項の許可を受けて設置するダム（いわゆる利水ダム）に区分される。治水ダムは、洪水による河川災害の防除をその設置目的の一つとしているのに対し、利水ダムは、河川の流水を占用し、発電、かんがい、水道、工業用水など専ら水の利用を設置の目的としている。なお、1 つのダムにおいて、洪水調節、発電、水道など複数の目的を有するものは多目的ダムと呼ばれている（引用（2023/9/5 確認）：<https://www.mlit.go.jp/river/damc/card/pdf/01-knowledge-g1-02.pdf>）。

ダムは、我々の社会に無くてはならない重要な物であるが、その反面、ダムの設置により河川の状態が変化し、洪水時においては、これまでその河川が持っていた洪水調節機能の減殺、貯水池末端の堆砂による河床の上昇などへの影響が懸念される。利水ダムは、当初の設置目的を最大限に発揮することを目標に運用されるが、あまりにも利水に偏った運用になり過ぎてしまうと、出水時において洪水初期の流水を貯留し、洪水ピーク時に流入量以上の放流を行って河川流量の増

表 4.1.1-1 ダムに関する特則（河川法の関係条文）。

条文	見出し
第 44 条	河川の従前の機能の維持
第 45 条	水位、流量等の観測
第 46 条	ダムの操作状況の通報等
第 47 条	ダムの操作規程
第 48 条	危害防止のための措置
第 49 条	記録の作成等
第 50 条	管理主任技術者の設置
第 51 条	兼用工作物であるダムについての特則

加を招いたり、ダム放流量を急激に増やして下流の河川水位を急激に上昇させるなどの発生原因となる恐れも十分に考えられる。

このため、河川法では、ダムの設置、操作に起因した人工的な災害の発生を防止するための措置をはじめ利水ダムの設置者がとらなければならない措置として、第44条から51条に至る『ダムに関する特則』が定められている（表4.1.1-1）（ダムの管理例規集，2021）。

#### 参考文献

一般財団法人ダム水源地環境整備センター，2021．ダムの管理例規集（令和3年版）。

### 4.1.2 河川の従前の機能の維持

河川の従前の機能の維持（第44条）は、『ダムに関する特則』の中でも特徴のあるものであり、危害防止のための措置（第48条）と並んでダム災害を防止するためにダム設置者に課せられた重要な義務の一つである。

ダム設置による洪水時の災害発生の危険性を増大させる恐れのあるマイナス面の変化には次のようなものがあり、これらマイナス面の変化を対象とし、河川の従前の機能の維持の規定がある。

#### (1) 河道の貯留機能の減少

ダムが設置される以前の河道は、常時流水を疎通させているため、洪水発生の際、河川水位が上昇する間、流水を河道に貯留する機能を有している。ところが、利水ダムが設置されることにより、その設置目的の性質上、豊水時には可能な限り水を貯めるような運用が行われることから、洪水時には池が満水の状態で洪水のピークを迎えてしまう恐れがある。

このように、満水に近い状態にあるダムでは、貯水池となった河道区間において流水を貯留する機能が減少している。

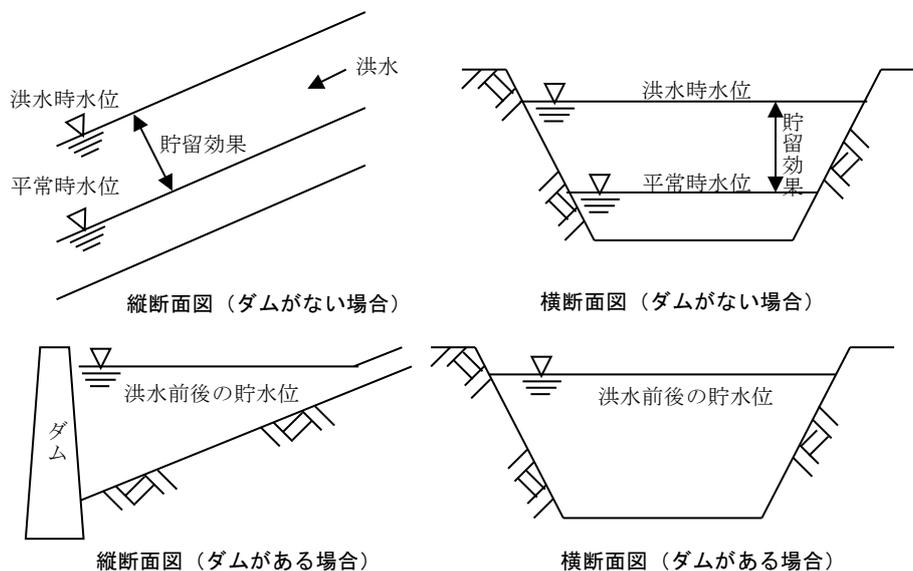


図 4.1.2-1 河道の貯留機能のイメージ（ダム築造前後）.

## (2) 洪水伝播速度の増大

ダムが設置される以前において、貯水池の上流端からダム地点までの間の河道を洪水が流下する速度は、河川の勾配、河川の横断形状および河床の状況等により定まり、洪水の伝播速度は近似的に

$$\begin{aligned}
 (\text{伝播速度}) &= \sqrt{(\text{重力加速度}) \times (\text{水深})} \\
 &= \sqrt{g \cdot h}
 \end{aligned}$$

で表わされ、ダムが設置されるような山間部の河道では毎時 10~20km 程度である。

これに対し、ダムが設置された場合、貯水池上流端に流入した洪水がダム地点にまで到達する速度はダム設置前より数倍速くなる。

この現象は、貯水池内を波が伝播するのと同様のものであり、これが洪水伝播速度の増大と呼ばれている。

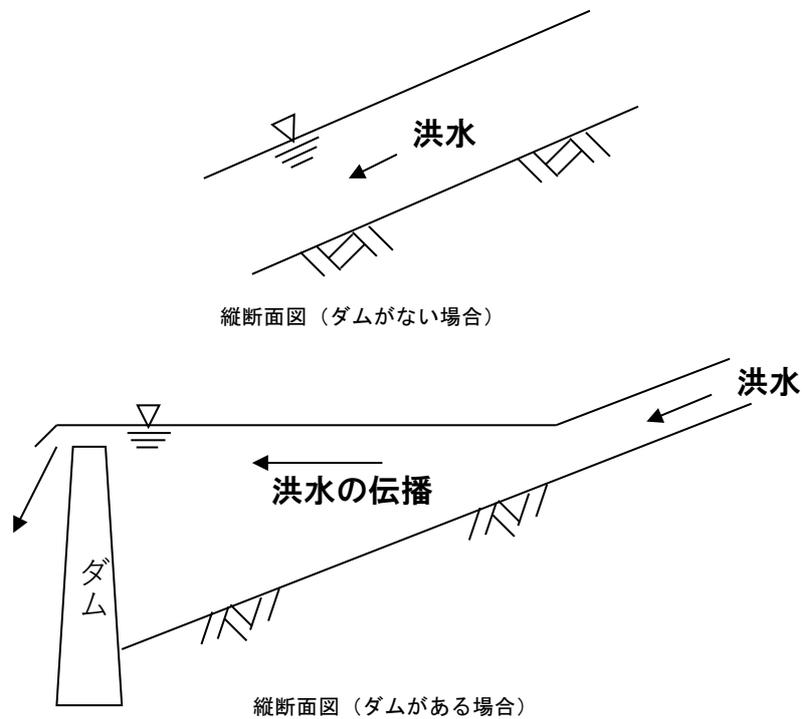


図 4. 1. 2-2 洪水伝播速度の増大のイメージ (ダム築造前後).

### (3) 貯水池における背水・背砂の影響

上流の河道を流下した洪水が貯水池上流端の水面に流入する際、背水による河川水位の上昇がみられる。また、背水が生じる付近では、流水によって上流域から運ばれてきた土砂が掃流力の低減した水域に入って堆積する

背砂によって上昇した河床の上に背水が重なると、次第に背水の規模が大きくなる。これがダムの貯水池による背水、背砂の影響と言われている。

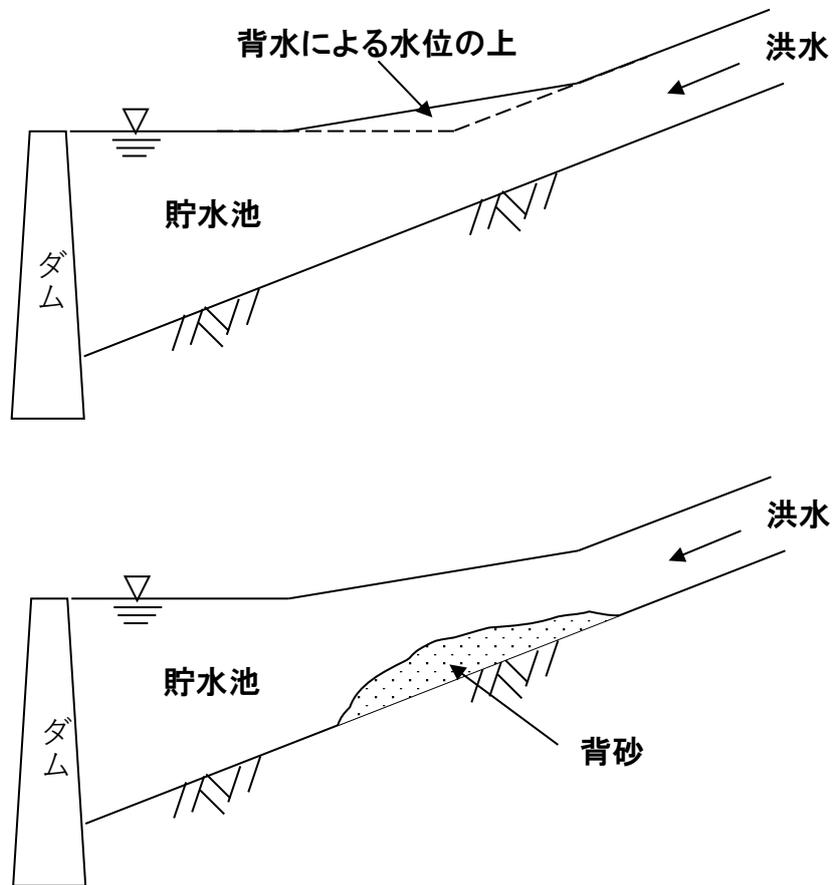


図 4.1.2-3 貯水池における背水・背砂の影響イメージ。

#### 4.1.3 河川の従前の機能の維持のための措置をとらなければならないダム

ダムの設置者は、河川法第 44 条の中で、「ダムの設置により河川の状態が変化し、洪水時における従前の当該河川の機能が減殺されることとなる（4.1.2 で列記した(1)～(3)の）場合においては、河川管理者の指示に従い、当該機能を維持するために必要な施設を設け、またはこれに代わるべき措置をとらなければならない」と規定され、河川法施行令において、次のように定められている。

- ① 洪水吐ゲートを有するダムで、当該ダムに係る湛水区間の総延長（湛水区

間内に在する湛水前の河川の延長の総和) が 10km 以上であるもの

- ② 河川に沿って 30km 以内の間隔で在する 2 以上のダムに係る湛水区間の総延長の和が 15km 以上である場合、当該 2 以上のダムのうち洪水吐ゲートを有するもの
- ③ ①・②以外のダムで、基礎地盤から越流頂までの高さが 15m 以上のもの

上記①や②に該当するダムは、主に、河道の貯留機能の減少と洪水伝播速度の増大の影響が大きいとみて限定されたものである。また、③については、①・②には該当しないものの、河川法第 26 条第 1 項の許可を受けて設置されているいわゆる「ハイダム」全てが対象となることを示している。

なお、①および②に該当するダムの設置に伴い、下流の洪水流量が著しく増加し、災害が発生するおそれがある場合においては、河川管理者が当該ダムの設置者に対し、サーチャージ方式<sup>※1</sup>、制限水位方式<sup>※2</sup>、予備放流方式<sup>※3</sup>のいずれか 1 以上の方式により当該増加流量を調節することができると認められる容量を確保するよう指示を行うこととなっている。洪水調節の面からは、サーチャージ方式、制限水位方式、予備放流方式の順に望ましいとされているが、利水者側の立場としては、なるべく貯留水の有効利用を図る観点から、その逆の順で考えるのが通常である。このため、ダムの設置許可にあたっては、河川管理者と十分な協議が必要である。

また、ダムの設置により減殺される河川の従前の機能の一つである背水、背砂の影響への対処のために河川管理者から指示を受けることがある。具体的には、背砂を除去するための河川の浚渫や貯水池末端の自然排砂を促進する放流、背水を防ぐための堤防の新設・改築、低地の盛土等が挙げられる。

※ 1 洪水調節のための容量を常に確保しておく方式

※ 2 洪水期のみ制限水位を設け、その水位以上に湛水しない方式

※ 3 具体の洪水のたびごとに、それに先立ってダムから放流を行い、洪水調節のための容量を確保する方式

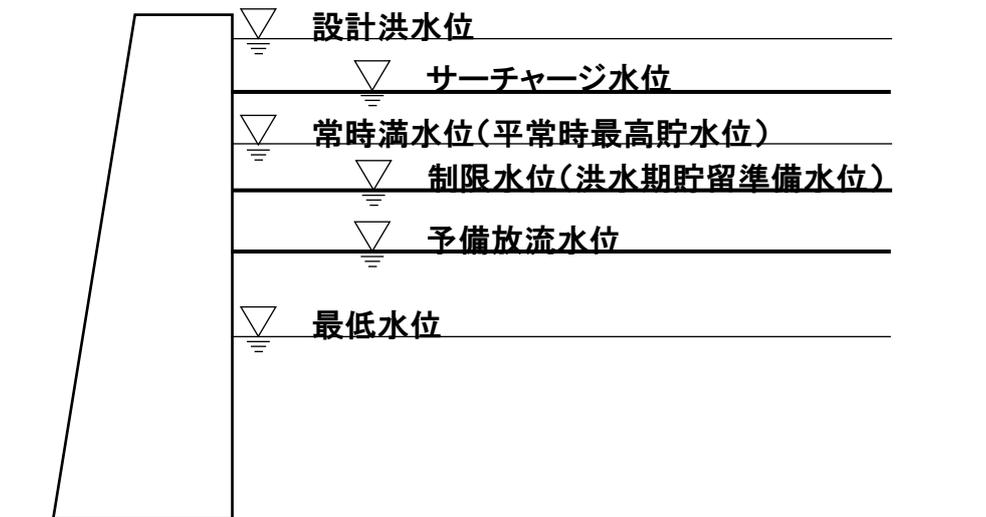


図 4.1.3-1 ダム運用水位の位置関係イメージ.

#### 4.1.4 ダムの種類

河川法における『ダムに関する特則』の規定の運用上、河川法第26条第1項の許可を受けて設置するダムで、基礎地盤から越流頂までの高さが15m以上のものは、表4.1.4-1のように分類される。

表 4.1.4-1 ダムの種類の分類.

類 型	内 容		
第1類	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ その設置に伴い下流の洪水流量が著しく増加するダム</li> <li>■ それによって生ずる災害を防止するため当該増加流量を調節することができると認められる容量を確保して洪水に対処する必要があるもの</li> </ul> <p>※実際の運用上における貯水池の規模からは以下のように分類.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 4.1.3 の①および②に該当するダム</li> <li>・ 水利使用条件等で河川管理上、洪水に関しての従前の機能維持を指示したダムなど</li> </ul>		
第2類	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 堆砂によりその上流の河床が上昇したダム</li> <li>■ 設置者が貯水池の敷地としての権原を取得した土地の広さが十分でないダムで、洪水時に、その水位上昇によって生ずる災害を防止するための貯水池の水位を予備放流として洪水に対処する必要があるもの</li> </ul> <p>※河川法施行令に規定する上流における河床または水位の上昇により災害が発生するおそれがある場合における措置について指示されるダムに相当.</p>		
第3類	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 貯水池の容量に比して洪水吐の放流能力が大きいダム</li> <li>■ 洪水吐ゲートの操作方法が複雑であるダムで、貯水池の水位を予備放流水位として洪水に対処することが災害防止上適切と認められるもの</li> </ul> <p>※洪水吐ゲートを有するダムで、以下のいずれかに該当するもの.</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水系最下流のダム</li> <li>・ 下流に住家、耕地等が開けているダム</li> <li>・ 洪水吐ゲートの門数が3門以上であるダム</li> <li>・ 計画洪水流量が1,000m<sup>3</sup>/s以上であるダム</li> </ul> </td> <td style="vertical-align: middle; padding-left: 10px;">} 予備放流で 洪水に対処</td> </tr> </table>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水系最下流のダム</li> <li>・ 下流に住家、耕地等が開けているダム</li> <li>・ 洪水吐ゲートの門数が3門以上であるダム</li> <li>・ 計画洪水流量が1,000m<sup>3</sup>/s以上であるダム</li> </ul>	} 予備放流で 洪水に対処
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水系最下流のダム</li> <li>・ 下流に住家、耕地等が開けているダム</li> <li>・ 洪水吐ゲートの門数が3門以上であるダム</li> <li>・ 計画洪水流量が1,000m<sup>3</sup>/s以上であるダム</li> </ul>	} 予備放流で 洪水に対処		
第4類	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 貯水池の水位を常時満水位として洪水に対処しても災害の発生の防止上支障のないダム</li> </ul> <p>※洪水吐ゲート等の放流設備を有するダムは操作規程を適用。 洪水吐ゲートが無いダムや洪水時に放流設備を操作しないダムは、ダム管理主任技術者の設置や、他の管理に関する規定を準用。</p>		

## 4.2 利水ダムの運用

### 4.2.1 ダムの操作規程

表 4.1.1-1（ダムに関する特則）のうち，河川法第 47 条において，ダムの操作は操作規程に従って行わなければならないことが定められている（河川法研究会，2006）．なお，ダムの操作規程には，以下の事項について定め，河川管理者の承認を受けなければならないとされている．

- ① 貯留及び放流の方法に関する事項
- ② ダム及びダムを操作するため必要な機械，器具等の点検及び整備に関する事項
- ③ ダムを操作するため必要な気象及び水象の観測に関する事項
- ④ 放流の際にとるべき措置に関する事項
- ⑤ その他ダムの操作の方法に関し必要な事項

これらの事項は，河川管理施設であるダムの操作規則（河川法第 14 条）に定めのある事項とほぼ同一の内容であるが，操作規則においては，「操作の基準となる水位，流量等に関する事項」が定められているのに対し，操作規程にはこの定めがないことが特筆すべき点である．

水位については，河川管理施設であるダムには，サーチャージ水位，制限水位，予備放流水位等操作の基準となる水位が設けられるのが一般的なのに対し，許可工作物であるダムでは，原則的には満水位のみが設けられる．

また，流量については，河川管理施設であるダムでは流量を基準として洪水調節のための操作を行うが，許可工作物であるダムでは，原則として，貯水池が満水位に達した後，流入量に等しい量の流水を放流すれば足りるので，特に操作の基準となる流量を定める必要がない．

しかし，許可工作物であるダムであっても，4.1.3（河川の従前の機能の維持のための措置をとらなければならないダム）において説明したように，河川の従前の機能維持の要請等によって，予備放流を行い，または洪水時に特別の操作を行う必要があるダムにおいては，河川管理施設であるダムと同様に操作規程において，放流の規則，洪水時における放流及び貯留の仕方，操作の基準となる水位，流量等の測定の方法，洪水警戒時にとるべき措置等を定めなければならない．

加えて、「放流」とはダムからの放流を指すが、利水ダムにおける貯水池からの取水もダムからの放流と同様の効果を生じさせる点で、ダム操作に大きな影響を及ぼすことがある場合は、取水の方法等を定める必要がある。

なお、操作規程は、主として洪水時における管理の適正を図るものであるとの観点から、従前より洪水吐ゲートを有するダムについて適用されており、河川法第44条のダムのすべてに適用を受けるものではないとされている。

補足として、洪水吐ゲートのないダムであっても、いわゆる利水放流管や貯水池内に設けられた取水施設から多量の用水が発電用等のために取水され、再び下流の河道に放水還元される等、洪水期以外においても河川管理に及ぼす影響が大きい場合には、これらの施設の操作・管理について必要に応じて水利権許可にあたり、その取水規程や管理規程の作成を義務づけられる。

#### 4.2.2 標準操作規程

標準操作規程は、ダムの操作および管理の具体的方法について標準となるものを定めたもので、「ダムに関する特則」に定めるところにより河川法第47条の規定に基づき操作規程（4.2.1ダムの操作規程）を作成する場合の基本となるものである。

この規程によるダムの操作とは、ダムの洪水吐ゲート若しくは排砂ゲート等から放流すること及び放流に伴う管理上の操作をいう。

なお、平常時のダムによる貯留や、貯水池からの取水については、水利使用規則及びこれに基づく取水規程で規定されている。

また、標準操作規程は、次の条件を備えるダムを想定して、これに関する操作規程の標準が記載されている。

- ① 一級河川に設置されるダムとする。
- ② もっぱら発電の用に供されるダムとする。
- ③ 第1類のダムで、その設置に伴う下流の洪水流量の増加を予備放流方式により調節することとされているものとする。
- ④ 予備放流水位は、原則として年間を通して一定とし、洪水ごとに洪水警戒時において貯水池水位を所定の水位まで低下させるものとする。
- ⑤ 他の河川から取水した流水を直接貯水池に注水する1の集水施設を有するものとする。

#### 4.2.2.1 洪水及び洪水時

標準操作規程において、当該ダム「洪水及び洪水時」を定義するものであり、貯水池への流入量の大きさとその継続時間で規定している。

通常、洪水とは、梅雨期等において河川が一時的に増水する状態を指しているが、本条はこれらの洪水のうち、ダム下流地域全域の民有地の耕作その他に一般災害が生じない最大限の流量に対応するダム地点の流量（通常、最大無害放流量という。）を考えているが、この量の決定は、既往の洪水資料をもとに流量と被害との関係を分析することにより行う。

また、洪水時においては、操作規定に定める「洪水時における措置」を適切に運用することにより、ダムの設置及び操作によって、河川の従前の機能が減殺されないよう努めている。

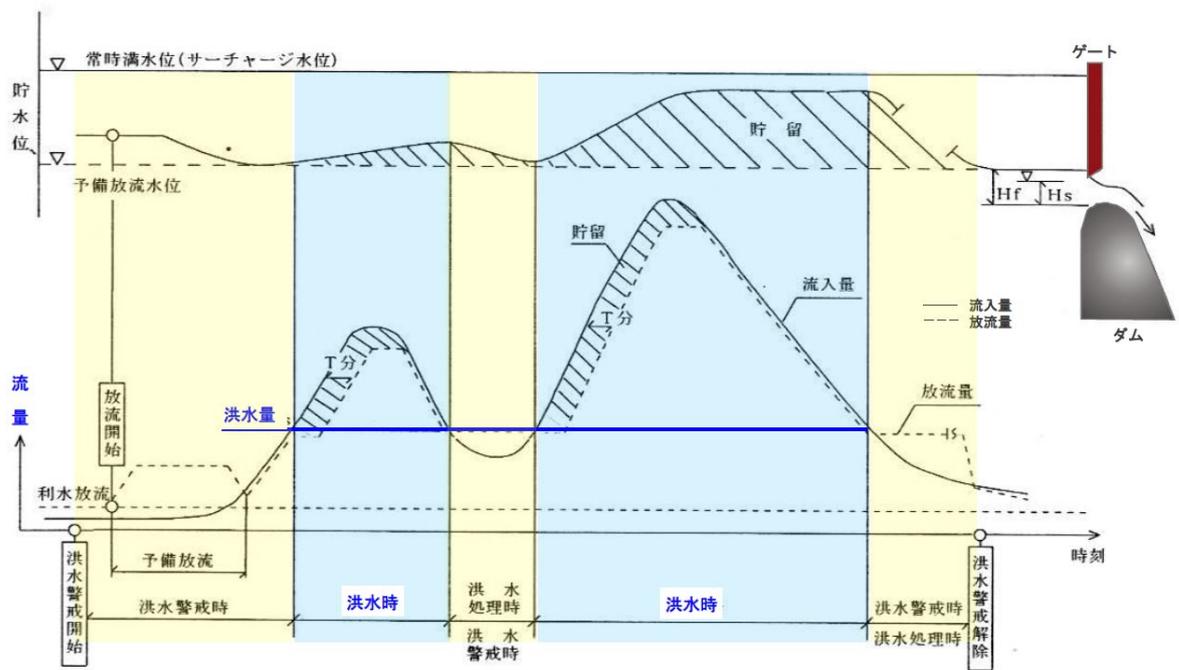


図 4.2.2.1-1 出水時における体制の説明図(ダム水源地環境整備センター(2021)より転載. 国交省の資料に基づいて作成されたもの).

### 4.2.3 第1類のダムの操作方法

標準操作規程では、洪水時において行わなければならない事項について規定されており、洪水時の全期間を通じて流入量が増加している間において遅らせ放流が可能なダムを想定した運用方法の標準が記載されている。

洪水時に至った時における貯水位が予備放流水位であるとき及び予備放流水位以下であるときにわけて、それぞれについて貯留及び放流の方法を定めている。また、貯水池からの放流は、下流における水位変動による危害防止上定められている放流の開始及び放流量の増減の方法どおり放流できないときでも、その方法に沿わない範囲が最小限度になるように注意して下流河川の水位の変動が急激にならないように放流操作することを規定している。

#### (1) 洪水時に至ったときの貯水位が予備放流水位に等しい場合の放流操作

次の順序によりそれぞれ次に掲げる流量の流水を貯水池から放流する。

- ① 洪水時に至った時以後 T 分間においては洪水量（最大無害放流量）
- ② ①に規定する時間が経過した時から流入量がピーク流量に達するまでの間においては、当該時刻の T 分前の流入量に相当する流量（おくらせ操作）
- ③ 流入量がピーク流量に達したあとピーク流量時の放流量に等しくなるまでの間においては、ピーク流量時の放流量に相当する流量
- ④ 流入量がピーク流量時の放流量に等しくなった時から流入量が洪水量に減少するまでの間においては、流入量に相当する流量

さらに、2山目の洪水を想定して以下の放流操作が規定されている。

- ⑤ ④に規定する場合において流入量が再び増加を始めたときから T 分間においては、増加を始めた時の放流量
- ⑥ ⑤に規定する時間が経過した時以後においては、②（おくらせ操作）、③及び④の順序で、それぞれ各号の規定による放流量

上記①～⑥の操作の過程を図示すると図 4.2.3-1 に示すようになる。また、流入量が洪水量を下回り、そのあと 2 山（又は 3 山等）洪水の生じるおそれがないと見極めがついたあとは、下流に急激な水位変動が生じない範囲で貯水池からの放流をしながら必要に応じて流水を貯留する。

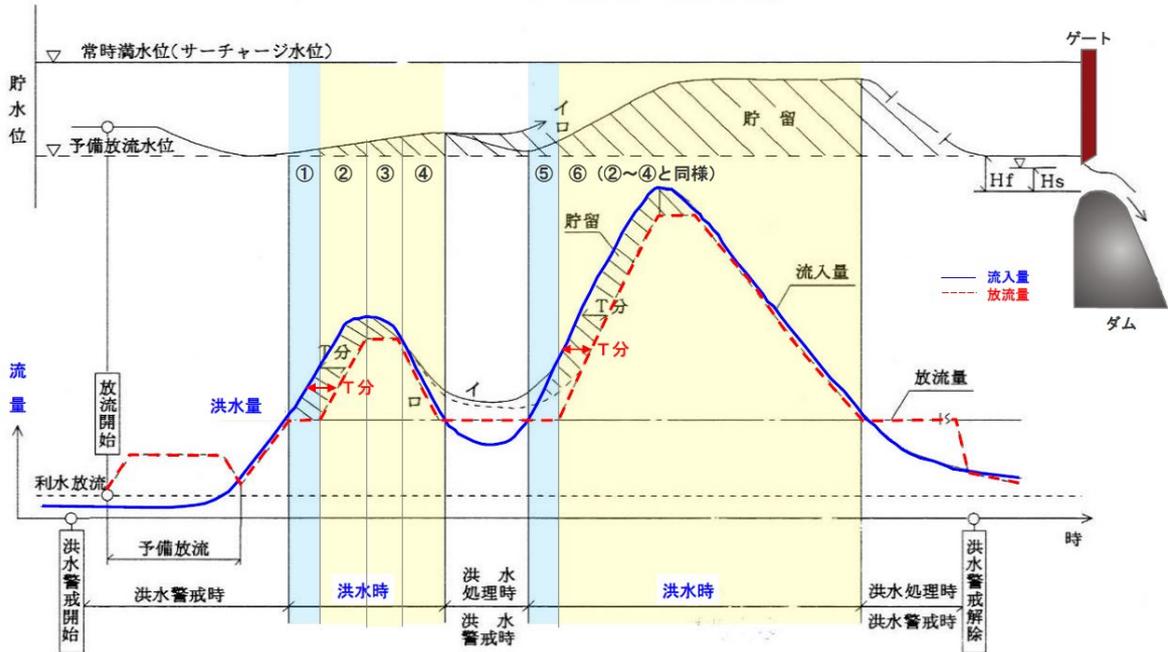


図 4.2.3-1 (1) おくらせ操作 (本則方式) に関するダム操作方法 (ダム水源地環境整備センター (2021) より転載。国交省の資料に基づいて作成されたもの)。

## (2) 洪水時に至ったときの貯水位が予備放流水位を下まわっている場合の放流操作

貯水池の水位が予備放流水位より下にあるときは、放流により下流河川に急激な水位変動が生じない範囲で、予備放流水位まで貯水池に流水を貯留し、貯水池の水位が予備放流水位と等しくなった時以後、4.2.3 (1) ⑥に規定する時間が経過するまでの間においては、4.2.3 (1) の規定に従って貯水池からの放流を行う。

## (3) 計画洪水波形より求められた予備放流水位が、洪水量（無害流量）をフリーフローで放流することができる水位を下まわるダムでの放流操作

図 4.2.3-2 のとおり、洪水吐の位置が高いため計画上の波形より求められた予備放流水位  $H_f$  が、無害流量をフリーフローで流すことができる水位  $H_s$  を下まわるダムの場合、予備放流水位は  $H_s$  となる。

次の順序によりそれぞれ次に掲げる流量の流水を貯水池から放流する。

- ① 洪水時に至った時から流入量がピーク流量となった時を経て流入量が放流量と等しくなるまでの間は、ダムのすべての洪水吐ゲートを全開とした時の放流量（洪水吐ゲートが全開の状態経過）（自然調節）  
(注)ダムの構造上等の理由により、予備放流容量が十分確保できない場合は、「流入量が放流量と等しくなるまで」は「洪水時が経過するまで」とすることができる。
- ② 流入量が放流量と等しくなったときから、洪水量に減少するまでの間は、流入量に相当する流量（貯水位を一定に維持）
- ③ ②の場合において流入量が再び増加を始めた場合には、その時以後 T 分間の間は、増加を始めた時の放流量（①の操作を行った結果、貯水位が上昇し、洪水吐ゲートの放流可能量が増加して遅らせ操作が可能な状態を示す。）
- ④ ③に規定する時間が経過した時からダムのすべての洪水吐ゲートが全開となるまでの間は T 分前に生じた流入量に相当する流量
- ⑤ すべての洪水吐ゲートが全開状態に入ったとき以後は、①以下の順序でそれぞれ各号の規定による放流量（自然調節）
- ⑥ ④の場合においてダムのすべての洪水吐ゲートが全開に至らないで最大時に達した時は、流入量が放流量に等しくなるまでの間は、最大時における放流量
- ⑦ ⑥に規定する時間が経過した時以後は②の規定による放流量

上記①～⑦の操作の過程を図示すると図 4. 2. 3-3 に示すようになる。

また、①(注)に示すダムは、計画上の波形について①～⑦に示す操作を行った場合、容量が不足するダムである。このようなダムについては、洪水時の全期間を通じてすべての洪水吐ゲートを全開状態にして自然調節を行う。

なお、操作の過程を図示すると図 4. 2. 3-4 に示すようになる。

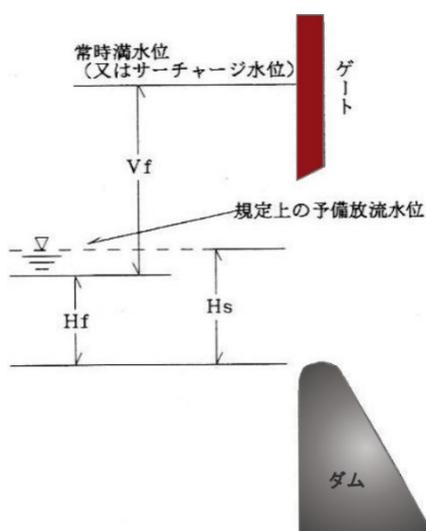


図 4. 2. 3-2 計画洪水波形の予備放流水位が無害流量放流時の水位を下回る場合のイメージ(ダム水源地環境整備センター(2021)より転載. 国交省の資料に基づいて作成されたもの).

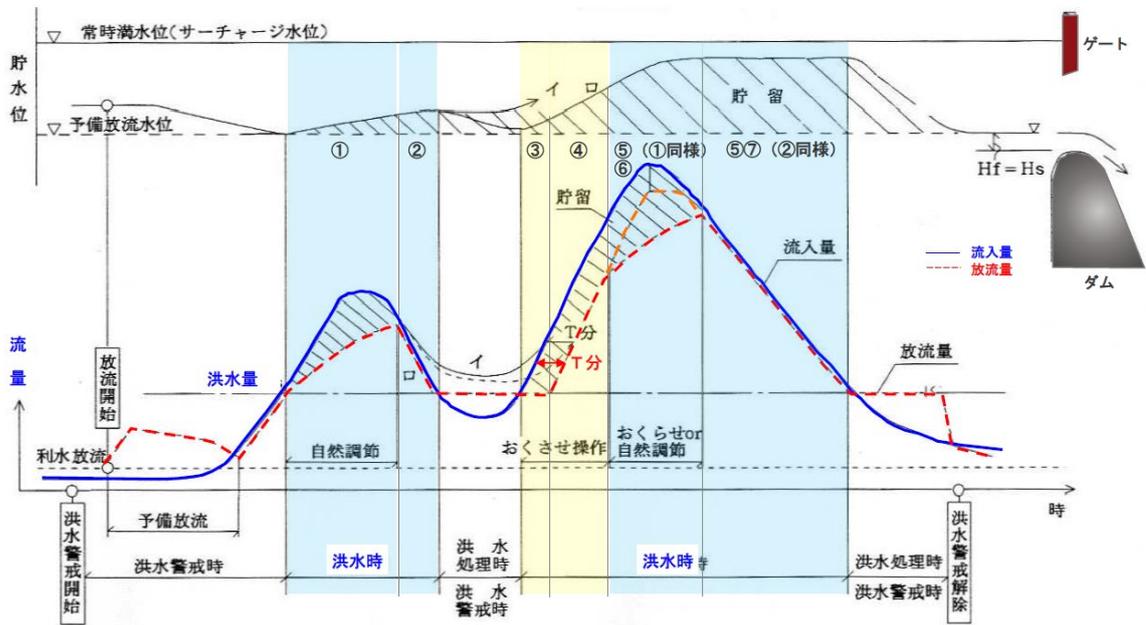


図 4.2.3-3 (2) 自然調節～おくらせ操作 (A方式) に関するダム操作方法 (ダム水源地環境整備センター(2021)より転載. 国交省の資料に基づいて作成されたもの).

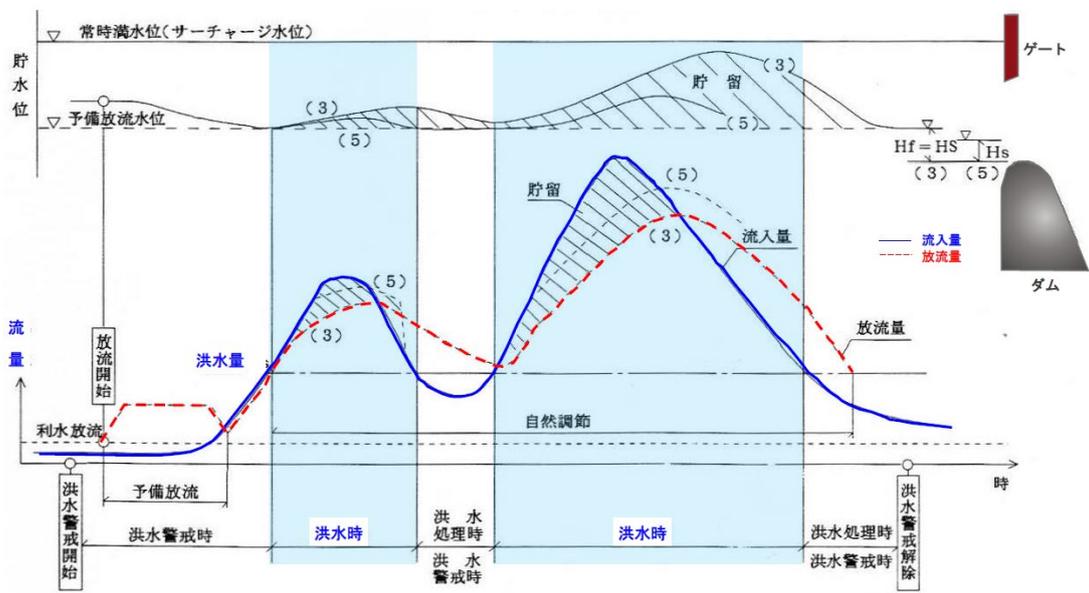


図 4.2.3-4 (3) 自然調節方式および (5) 自然調節方式に関するダム操作方法 (ダム水源地環境整備センター(2021)より転載. 国交省の資料に基づいて作成されたもの).

(4) 洪水量に対して洪水吐ゲートの放流能力が小さいが、計算上の予備放流量により洪水量に対処可能なダム放流操作

対象となるダムは、次に示す条件を備えたものを想定している。

- ・ 図 4. 2. 3-2 における予備放流水位  $H_f$  が  $H_s$  水位よりも高い
- ・ 洪水吐ゲートの放流能力が小さく、完全な遅らせ操作は不可能
- ・ 完全遅らせ操作が不可能であるために生ずる予備放流量の増加分は確保可能

次の順序によりそれぞれ次に掲げる流量の流水を貯水池から放流する。

- ① 洪水時に至った時以後 T 分間においては洪水量（最大無害放流量）
- ② ①に規定する時間が経過した時からダムのすべての洪水吐ゲートが全開となるまでの間は T 分前に生じた流入量に相当する流量
- ③ すべての洪水吐ゲートが全開となったときから、流入量がピーク流量になった時を経て流入量と放流量が等しくなるまでの間は、すべてのゲートを全開とした時の放流量
- ④ ③に規定する時間が経過した時から洪水時が経過するまでの間は、流入量に相当する流量

さらに、2 山目の洪水を想定して以下の放流操作が規定されている。

- ⑤ ②の場合において、ダムのすべての洪水吐ゲートが全開に至らないで流入量がピーク流量に達した時は流入量と放流量が等しくなるまでの間は流入量がピーク流量時の放流量
- ⑥ ⑤に規定する時間が経過した時以後は④の規定による放流量
- ⑦ ④に場合において、流入量が再び増加を始めた時は、その時以後 T 分間は増加を始めた時の放流量
- ⑧ ⑦に規定する時間が経過した時以後は①以下の順序でそれぞれ各号の規定による放流量

上記①～⑧の操作の過程を図示すると図 4. 2. 3-5 に示すようになる。

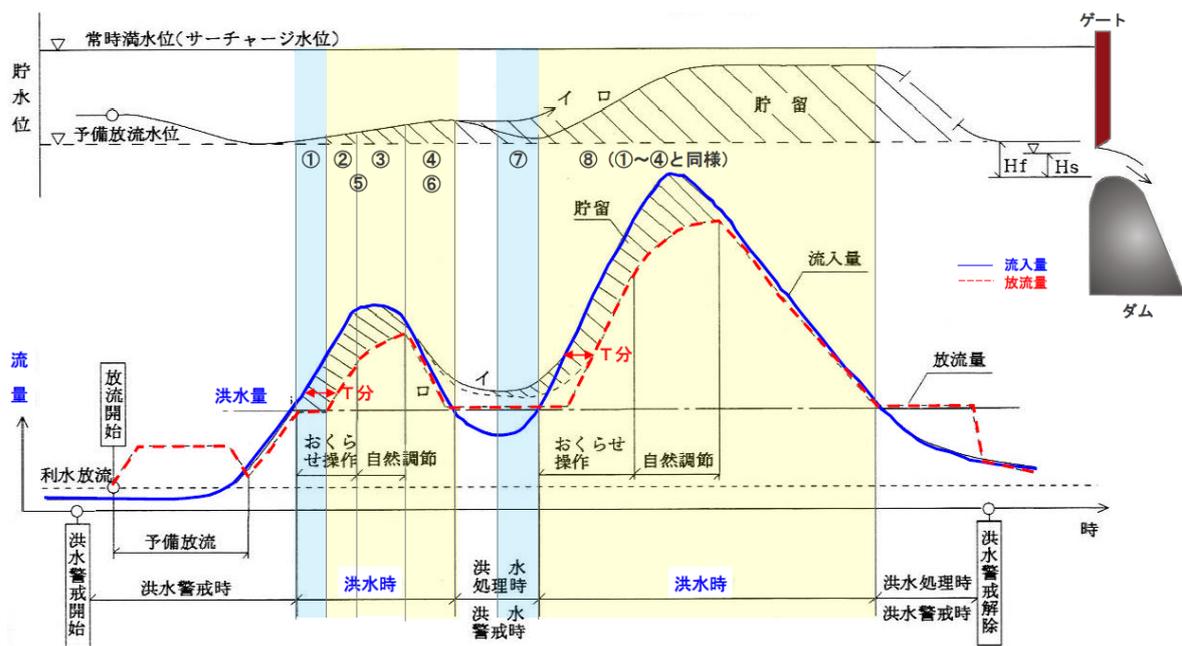


図 4. 2. 3-5 (4) おくらせ操作～自然調節 (B方式) に関するダム操作方法(ダム水源地環境整備センター(2021)より転載. 国交省の資料に基づいて作成されたもの)

#### 4.2.4 第2類及び第3類のダムの操作方法

4.2.3（洪水時における措置）の第1類ダムの操作方法に準じて操作規程を定めることとされている。

洪水時において予備放流水位を維持するように洪水吐ゲートの操作を行い、すべての洪水吐ゲートが全開となったとき以後はその状態で経過するダムについては、次の順序によりそれぞれ次に掲げる流量の流水を貯水池から放流すること。次の順序によりそれぞれ次に掲げる流量の流水を貯水池から放流する。

- ① 洪水時に至った時から、すべての洪水吐ゲートが全開となるまでの間は、流入量の相当する流量
- ② ①に規定する時間が経過した時から流入量がピーク流量となった時を経て洪水時が経過するまでの間は、ダムのすべての洪水吐ゲートを全開としたときの放流量

この場合の操作の過程を図示すると図4.2.3-4に示すようになる。

#### 4.2.5 第4類のダムの操作方法

洪水時において貯水池の水位を常時満水位として対処しても災害の発生の防止上支障のないダムとして分類されているが、洪水吐ゲート等の放流設備を有するダムでは、4.2.3 第1類ダムの操作方法に準じて操作規程を定めることとされている。

#### 参考文献

一般財団法人ダム水源地環境整備センター，2021．ダムの管理例規集（令和3年版）．

河川法研究会，2006．改訂版〔逐条解説〕河川法解説．

## 4.3 利水ダム運用に関わる近年の取組み

### 4.3.1 概要

近年、2018年7月の西日本豪雨、2019年10月の東日本台風（台風19号）、2020年7月熊本豪雨等、全国各地で記録的な豪雨が発生している。2018年7月の西日本豪雨では、国土交通省所管ダムで洪水調節を行った213ダムのうち8ダムで異常洪水時防災操作<sup>※1</sup>に移行した。また、2019元年10月の東日本台風においても、洪水調節を行った146ダムのうち6ダムで異常洪水時防災操作に移行した。今後、気候変動の影響による異常豪雨の頻発化が懸念される中、ダムの施設能力を上回る洪水の発生頻度の更なる増加が予想される。

このような状況の中、国土交通省は、気候変動による外力の増大に対して、流域全体で備える総合的な水災害対策をより一層推進していくことが重要であるとしている。この対策の1つとして、堤防のかさ上げ等の河道改修もあるが、制約が多く、長い年月も必要であることから、ダムの洪水調節機能を強化し、洪水を貯留して、下流河道への洪水の流下を抑制する方策に着目した。また、ダムは施設能力を上回るような洪水が発生した場合であっても、下流河川のピークの発生時刻を遅らせることで避難時間の確保に寄与したり、氾濫する水量を低減させることで災害リスクを小さくできる可能性も有している。

一方、政府として2050年カーボンニュートラル（脱炭素社会の実現）を宣言するとともに、2030年度に温室効果ガスの排出量を2013年度比で46%削減するという新たな目標を掲げており、再生可能エネルギーを最大限導入する取り組みが進められている。

以上を踏まえて、国土交通省では「ダム再生ビジョン検討会（引用（2023/9/5 確認）：[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/dam\\_saisei\\_vision/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/dam_saisei_vision/index.html)）」「異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会（引用（2023/9/5 確認）：[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/chousetsu\\_kentoukai/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chousetsu_kentoukai/index.html)）」「ダムの洪水調節に関する検討会（引用（2023/9/5 確認）：[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/damchousetsu\\_kentoukai/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/damchousetsu_kentoukai/index.html)）」といった検討会にて、ダムの有する機能を最大限に発揮させる方策が検討された。

また、近年では、治水・利水両方の機能を有する多目的ダムにおいて気象予測技術の進展によるダム運用の高度化、最新の土木技術を活用したダム改造等により、治水機能の確保・向上と水力発電を両立するダム運用を目指した「ハイブリ

ッドダム」の取り組みも進められている。本節ではこれら取り組みのうち既設利水ダムの運用に関する「事前放流」「ダム再生」「運用高度化」について解説する。

※1 ダムの能力を超えるような大雨によりダムが満水となり、ダム上流から流入する水を調節することなくそのまま下流側に通過させる操作。

## 4.3.2 事前放流の取り組み

### 4.3.2.1 事前放流の概要・経緯

国土交通省は台風の接近等により大雨となることが予想される場合、河川の水量が増える前に、利水を目的として貯められている水をダムから放流し、一時的にダムの水位を低下させて、洪水をダムに貯められるようにする「事前放流」の取り組みを、利水者の協力のもと推進することとした（図 4.3.2-1）。

全国の利水ダムにおいて、統一した考え方の下で事前放流を実施するため、事前放流の開始基準（基準降雨量、予測降雨量）、貯水位低下量の設定方法、事前放流の中止基準等の基本的事項を定める「事前放流ガイドライン」を2020年4月に策定した（国土交通省, 2021）。その後、全国各水系では、事前放流ガイドラインに基づき、河川管理者、ダム管理者、関係利水者との協議の場において具体的な検討を行い、「治水協定」を締結し、事前放流の運用を開始している。

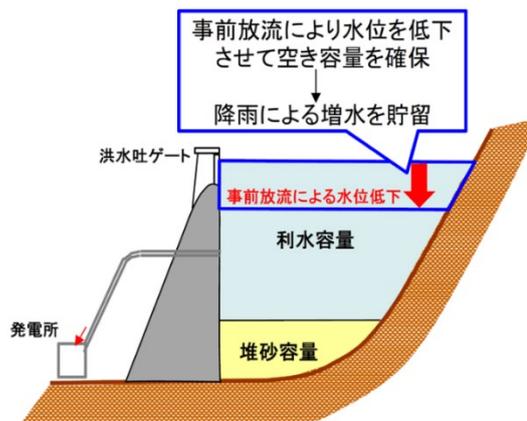


図 4.3.2-1 利水ダムにおける事前放流(引用(2023/9/5 確認) : <https://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/2021kannai/pdf/te19.pdf>)

### 4.3.2.2 事前放流の方法

事前放流は、「事前放流ガイドライン」(国土交通省, 2021)に基づき実施される。

#### ① 事前放流の実施判断

各ダムにおいて、気象庁から配信される降雨予測に基づく「予測降雨量(a)」が「基準降雨量(b)」以上である場合に、事前放流の実施判断を行う。事前放流の実施判断は3日前から行うことを基本とする。

#### (a) 予測降雨量

- ・ 予測降雨量は、気象庁の全球モデル(GSM)による数値予報(84時間先までの予測)に基づく時間累計雨量を用いることを基本とする。
- ・ 気象庁のメソモデル(MSM)による数値予報(39時間先までの予測)に基づく時間累計雨量も併せて行い、2種類の予測降雨量のいずれか大きいもの

が基準降雨量以上であるかどうかを確認する。

(b) 基準降雨量

- ・ 基準降雨量は、ダム下流の河川における現況の流下能力に相当する規模の洪水を設定し算定することを基本とする。

② 貯水位低下量の設定

ダム上流域における予測降雨量が流出してダム貯水池に流入する総量(c)を算定して、洪水時の放流等のダムから放流する総量(d)を減じるとともに、予測時点で空き容量(e)がある場合にはこれも減じた上で確保容量(f)を算出する。この確保容量をダムの貯水位に換算して貯水位低下量(g)とする (図 4.3.2-2~3)。

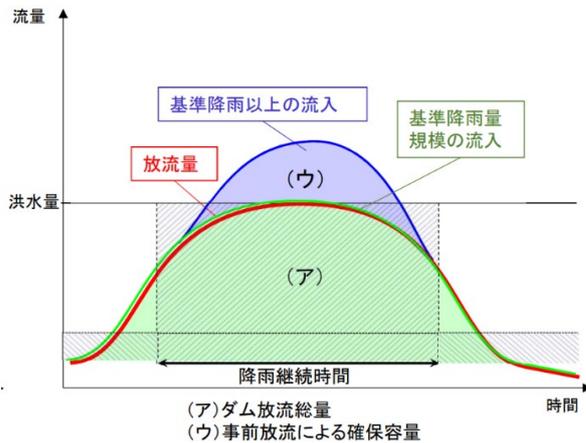


図 4.3.2-2 利水ダムの放流総量と確保容量の概念図(国土交通省, 2021)。

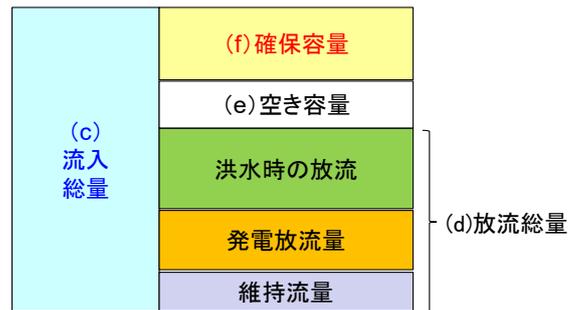


図 4.3.2-3 流入総量に対する各容量の位置付け(国土交通省, 2021)。

(c) 流入総量

- ・ 流出モデル等による洪水流出解析
  - 予測降雨量を入力値として貯留関数法や分布型流出モデル等により流出計算し、流入量を予測する (図 4.3.2-4)。
- ・ 簡易式を用いた流出量
  - 予測降雨量に流域面積と流出係数 (図 4.3.2-5) を乗じて、流入量を予測する。

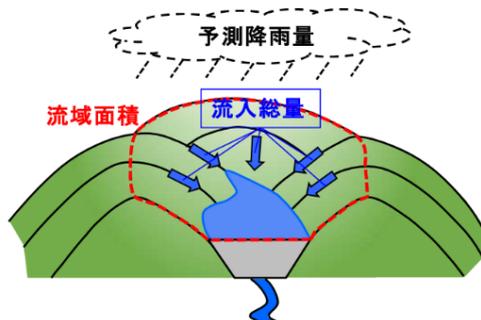


図 4.3.2-4 流入総量のイメージ図(国土交通省, 2021).

地形の状態	Fp
急しゅんな山地	0.75~0.90
三紀層山地	0.70~0.80
起伏のある土地および樹林地	0.50~0.75
平らな耕地	0.45~0.60
灌漑中の水田	0.70~0.80
山地河川	0.75~0.85
平地小河川	0.45~0.75
流域の半ば以上が平地である大河川	0.50~0.75

図 4.3.2-5 流出係数(国土交通省, 2021).

(d) 放流総量

- ・ 洪水時の放流（操作規程に規定された洪水量等を仮定する）の時間累積量，河川維持放流，利水補給等のための放流（発電放流量）等の合計（図 4.3.2-3）.

(e) 空き容量

- ・ 予測時点の空き容量（常時満水位～現水位までの容量）（図 4.3.2-3）.

(f) 確保容量

- ・ 流入総量から放流総量と空き容量を減じたもの（図 4.3.2-3）.

(g) 貯水位低下量

ダム貯水位－容量曲線式を用いて確保容量を水位に変換し，貯水位低下量を算定する.

③ 事前放流時の最大放流量

ダム下流の河川における流下能力，下流河川利用者の安全確保，放流設備の放流能力，堤体及び貯水池法面の安定を確保できる水位低下速度等を考慮して設定する.

④ 事前放流の中止基準

- ① 流入量が操作規則・施設管理規程・操作規程に規定されている洪水時における洪水量等に等しくなった場合には，洪水時における措置（洪水時の操作）

に移行する。

- ② 確保容量が確保された状態になり，それ以上貯水位を低下させる必要がなくなった場合には，事前放流操作を中止し，貯水位の維持に努める。
- ③ 予測降雨量が当初の予測降雨量から変化し，事前放流の実施判断基準（予測降雨量＞基準降雨量）に該当しなくなった場合には，事前放流操作を中止する。
- ④ 流入量が操作規則・施設管理規程・操作規程に規定されている洪水量等に至らずに最大となった場合には，事前放流操作を中止する。
- ⑤ ①～④にかかわらず，気象・水象その他の状況により，事前放流操作を中止する必要が生じた場合。

### 4.3.2.3 事前放流の流れ

事前放流の流れについてハイドログラフを用いて示す（図 4.3.2-6）。

- ① 事前放流開始
  - ・ 3日先までの予測降雨量が基準降雨量を超過したため、事前放流の開始を判断する。
  - ・ 事前放流に必要な確保容量を算出し、貯水位低下量を設定（下図は、貯水位低下量を発電運用上の最低水位（LWL）に設定した例で表現している）。
- ② 事前放流操作
  - ・ 事前放流を開始して洪水量まで増加させた後、洪水量一定操作を行う。
  - ・ 事前放流時は放流量 > 流入量となるため、ダム水位は低下する。
- ③ 事前放流終了（⇒洪水調節開始）
  - ・ 流入量が洪水量に達したため事前放流を終了し、洪水調節を開始する。
- ④ 洪水調節操作
  - ・ 事前放流により貯水容量を確保しているため、事前放流をしない場合と比較して、最大放流量を小さくすることができ、下流河川の被害低減に貢献する。

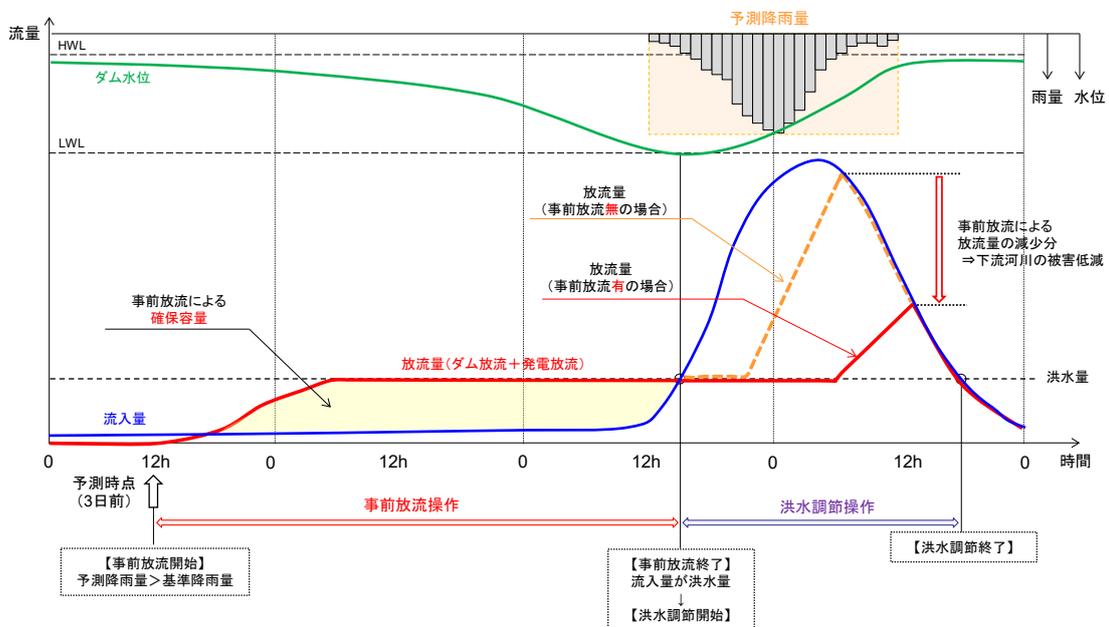


図 4.3.2-6 事前放流のハイドログラフの例。

#### 4.3.2.4 降雨予測精度の影響について

4.3.2.2 において記載した通り、予測降雨量として気象庁の GSM および MSM が用いられ、それらの情報を基に 3 日前から事前放流が判断される。これに対し、本報告書では 3.3.1 において数値予報の予測精度について整理しているが、ここではその予測精度について以下に要約し、事前放流への影響を考察する。

##### (1) GSM と MSM の予測精度

GSM と MSM の予測精度は降水強度が強いイベントになればなるほど、極端に精度が低下する傾向を示した(図 3.3.1.3-2)。ただしその一方で、GSM より MSM の方が良好な精度を有することも明らかとなった(図 3.3.1.3-2)。また、過去 5 年の予測精度の経時変化を調査したところ、1~2 年で大幅な精度向上を期待するのは難しいかもしれないが、年々若干の精度向上がなされている状況にある(図 3.3.1.3-3~5)。

##### (2) 台風の予測精度

台風進路の精度は 20 年以上の長期間でみると大きく改善されていることが判明した(図 3.3.1.3-6)。しかしながら、台風の中心位置については、最新の予報結果に基づく 72 時間先の誤差が平均 200km 程度である一方、24 時間先の中心位置は 100km 以内の誤差に収束している(図 3.3.1.3-6)。よって、24 時間先予測も活用することによりその継続や中止を判断することは、事前放流を合理的に改善する方法の 1 つになると考えられる。

##### (3) 線状降水帯の予測精度

気象庁によると、現在の技術ではいつどこで線状降水帯が発生し、どのくらいの期間が継続するのかを、事前に正確に予想することはできないとされている(引用(2023/4/19 確認): [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/senjoukou\\_suitai\\_oame.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/senjoukou_suitai_oame.html))。言い換えれば、事前放流を実施中に線状降水帯が発生した段階で、予測降雨量の情報を過信しすぎないことが肝要であると考えられる。また、今後の技術開発が期待される。

以上にまとめた通り、事前放流に用いられる予測降雨量については、極端な降

雨ほど精度が低いこと、3日先の台風予測に誤差があること、線状降水帯の予測の信頼性が低いこと等の課題がある。一方、これらの予測精度は年々若干ながら改善されている状況にある。今後、全国の利水ダム流域においてダムサイトの特性に応じた予測降雨量の検証を実施していくことも必要であると考えている。

#### 参考文献

国土交通省，2021．事前放流ガイドライン．

### 4.3.3 ダム再生の取り組み

#### 4.3.3.1 ダム再生の概要・経緯

近年、我が国の厳しい財政状況や生産年齢人口の減少等の状況の中、トータルコストを縮減しつつ、既存ストックを有効活用することが重要である。ダムは、適切に施工、維持管理されているものであれば、半永久的に使用できることから、既設ダムを長期にわたって有効かつ持続的に活用することが必要である。

国土交通省の所管ダムでは、弾力的な運用やダム堤体のかさ上げ等、ダムを有効活用する事例や知見が蓄積されてきている。既存ダムの有効活用は、利水容量を洪水調節容量に活用する等の運用改善による新たな効果の発揮、堤体のわずかなかさ上げによる貯水容量の増加、短期間で経済的に完成させることによる効果の早期発現等、様々な特徴を有している（図4.3.3-1）。

このような状況の中、国土交通省は、社会全体の生産性向上につながるストック効果の高い社会資本の整備・活用等を加速することを目的とし、「生産性革命プロジェクト」の一つとして「ダム再生～地域経済を支える利水・治水能力の早期向上～」を選定した。その後、有識者からなる「ダム再生ビジョン検討会」を3回にわたり開催し、関係機関から意見を聴取し、既設ダムを有効活用するダム再生をより一層推進する方策を示す「ダム再生ビジョン」を取りまとめた。

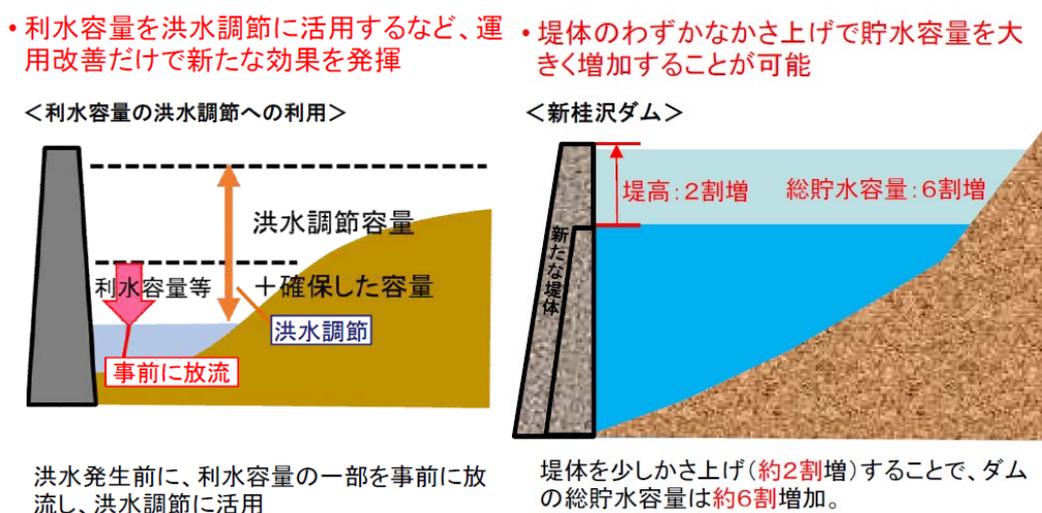


図 4.3.3-1 既設ダムの有効活用例.

(引用 (2023/9/5 確認) : [https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet\\_jirei/dam/pdf/saisei\\_r4.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/dam/pdf/saisei_r4.pdf))

### 4.3.3.2 ダム再生の取り組み

#### (1) 容量振替による洪水調節機能の増強

利水容量の一部を洪水調節容量に振り替えて活用することにより、治水機能の強化を図るものである。佐久間ダム（電源開発）や雨竜第1・第2ダム（北海道電力）等の利水ダムにおいて、発電容量の一部を治水容量へ振り替えることにより、治水機能を新たに備えるダム再生事業を進めている（図4.3.3-2）。

#### (2) 堤体かさ上げ等による貯水容量の増大

堤体かさ上げや貯水池内の堆砂掘削により、既存の貯水池周辺への影響をできる限り小さくしつつ貯水容量を増大させるものである。貯水池の地形は下部より上部の方が広がりを持っており、堤体のわずかなかさ上げでも貯水容量を大きく増加させることが可能である。堤体かさ上げに併せて発電能力を増強することで、複数目的の効果的なダム再生事業を進めている。

#### (3) 放流能力の増強

大水深で堤体を大口径で削孔して放流管を増設するような高度な施工技術を活用し、放流設備の増設や低位放流管の新設等により放流能力を増強させるものである。鶴田ダム（国土交通省九州地方整備局）においては、2011年2月からダムを運用しながら大水深で放流管の増設を行うことにより、死水容量を減らし、洪水調節容量を増大させる事業を進め、2018年10月31日に竣工した。

#### (4) 河川環境の改善・堆砂対策

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、フラッシュ放流<sup>※1</sup>を行う「弾力的管理」によるダム下流の河川環境の保全を実施している。また、土砂バイパス施設の設置、建設時の仮排水路を利用したバイパス水路による堆積土砂の対策を実施している。大町ダム等再編事業では、高瀬ダム（東京電力）において、確保した洪水調節容量と発電容量を維持するため、貯水池内の堆積土砂を輸送するバイパストンネルを整備し、恒久的な堆砂対策を図る事業を進めている。

※1：一時的に人工の小規模洪水を起こし、水質の正常化や流砂の連続性確保を図



### 4.3.3.3 ダム再生事業の事例

#### (1) 雨竜川ダム再生事業（北海道開発局・北海道電力）

北海道石狩川水系雨竜川は、これまでの洪水（1955年7月、1981年8月、2014年8月洪水等）において、幌加内市街地上流で計画高水位を超過し、家屋、ソバ畑、道路等の浸水被害が発生している（図4.3.3.3-1；写真4.3.3.3-1～4）。

このような状況を踏まえ、北海道開発局は雨竜川の浸水被害の早期解消を目的として、北海道電力所有の雨竜第1ダムおよび雨竜第2ダムを有効活用し、新たに洪水調節機能を付加させる「雨竜川ダム再生事業」を立案し、2017年7月に雨竜川河川整備計画に取り入れた。



図 4.3.3.3-1 雨竜川位置図.



写真 4.3.3.3-1 ソバ畑の冠水  
(2014年8月洪水).



写真 4.3.3.3-2 国道 275 号線冠水



写真 4.3.3.3-3 雨竜第 1 ダム.



写真 4.3.3.3-4 雨竜第 2 ダム.

雨竜川ダム再生事業は、雨竜第1ダム・雨竜第2ダムの発電容量①を洪水調節容量①(2,250万 $m^3$ )に振り替えるとともに、雨竜第2ダムを3.8mかさ上げして新たに洪水調節容量③(250万 $m^3$ )を確保し、合計2,500万 $m^3$ の洪水調節容量により治水機能の強化を図る事業である。

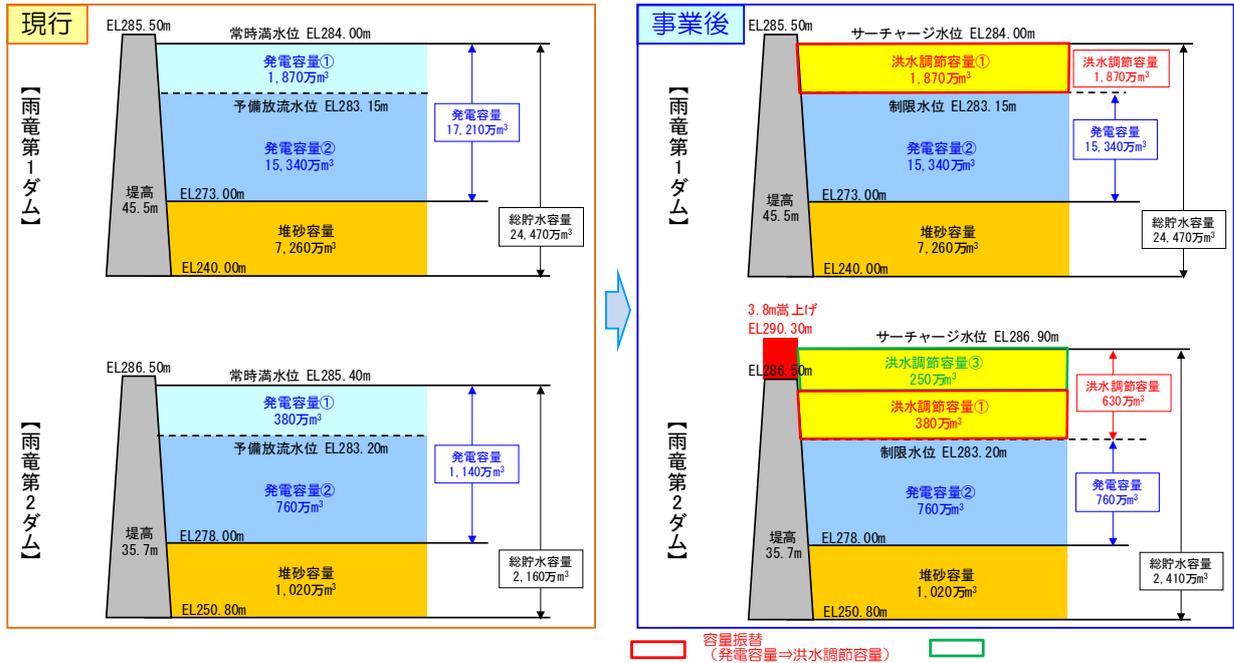


図 4.3.3.3-2 貯水池容量配分図.

## (2) 雨竜発電所について

雨竜第2ダムの貯水池である宇津内湖は、雨竜第1ダムの貯水池である朱鞠内湖と連絡水路でつながっており、両ダムの水位差を利用して最大59.5 $m^3/s$ を導水している。

朱鞠内湖では、本川プトカマベツ川や支川の流入量、連絡水路の導水量、朱鞠内発電所からの揚水量を利用して、雨竜発電所へ導水し、最大51,000kWを発電した後、天塩川に放流している。

また、かんがい期(5月1日～8月31日)においては、雨竜第1ダムから雨竜川へ最大9.73 $m^3/s$ の放流をしており、その放流水を利用して、朱鞠内発電所にて1,120kWを発電している。

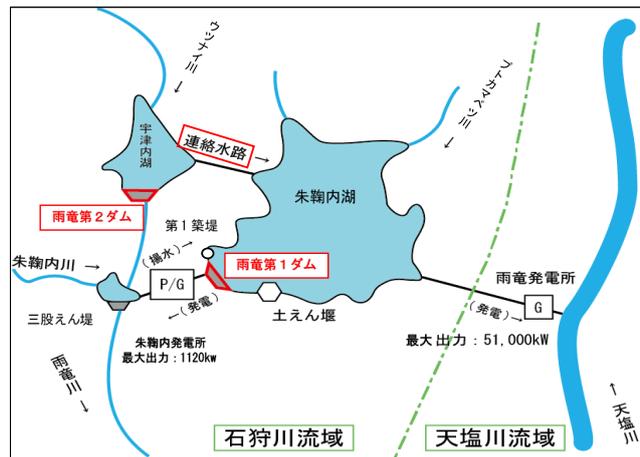


図 4.3.3.3-3 雨竜発電所水系図.

#### 4.3.4 運用高度化の取り組み

##### 4.3.4.1 運用高度化の概要

近年の水害の頻発化・激甚化を踏まえ、緊急時には既存ダムの有効貯水容量を洪水調節に最大限活用できるよう、政府において「既存ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針（2019年12月12日）」が策定され、治水等多目的ダムにおいては、洪水になる前にダムの利水容量から放流して洪水を貯留するための容量を確保することとし、また、利水ダムにおいても前述（4.3.2 事前放流の取り組み）のとおり、事前放流の取り組みを実施しているところである。

一方、政府として2050年カーボンニュートラル（脱炭素社会の実現）を宣言するとともに、2030年度に温室効果ガスの排出量を2013年度比で46%削減するという新たな目標を掲げており、再生可能エネルギーを最大限導入する取り組みを進めていく必要があることから、既存治水等多目的ダムの有効貯水容量を再生可能エネルギーの創出に最大限活用できるよう、平常時にはダムの洪水調節に支障を及ぼさない範囲で洪水調節容量に流水を貯留することとして、これを活用した水力発電を推進していくこととしている（引用（2023/9/5 確認）：[https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/dam5/pdf/danryokukanri\\_chisui.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam5/pdf/danryokukanri_chisui.pdf)）。

国土交通省では、「ハイブリッドダム」の取り組みのひとつとして、ダムの洪水調節に支障を及ぼさない範囲で洪水調節容量に流水を貯留する弾力的管理のもと、洪水後期放流の工夫、非洪水期の弾力的運用を試行している（引用（2023/9/5 確認）：<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001587070.pdf>）。

また、利水ダムにおいては、近年めざましい進歩を遂げているAI技術を活用した出水予測等の取り組みが進められている。

##### 4.3.4.2 洪水後期放流の工夫

洪水調節によって洪水調節容量内に貯留した水は、これまでは次の洪水に備えて洪水吐ゲート＋発電放流で放流し、制限水位まで速やかに水位低下していたが、気象予測の精度向上を活用し、次の洪水が見込まれないときはできる限り発電放流のみで緩やかに放流することにより、従来、無効放流となっていた水を最大限発電に活用できる運用としたものである（図 4.3.4.2-1）。

#### 4.3.4.3 非洪水期の弾力的運用

これまでは、非洪水期であっても洪水調節容量内での貯留を行っていなかったが、気象予測の精度向上を活用し、まとまった降雨が予測されない期間に、洪水調節容量の一部に流水を貯留し、発電に活用できる運用としたものである。この運用により、水を多く発電に使えるだけでなく、高落差による増電も期待できる。

#### 4.3.4.4 AIによる出水予測と運用高度化

北陸電力では、JFE エンジニアリングが開発した AI エンジンを活用し、ダム流域における過去の降水量とダムへの流入量等の実績データを学習させるとともに、北陸電力の予測ノウハウを融合させた「ダム最適運用システム」を開発した（引用（2023/9/5 確認）：<https://www.rikuden.co.jp/press/attach/22101901.pdf>）。

ダム最適運用システムは、ダムの上流域の降雨実績と降雨予測から数時間後にダムへ流れてくる水を予測する「流入量予測 AI」と、その結果を基にダム地点においてゲート放流するか発電使用するかを提案する「ダム最適運用 AI」で構成されており、33 時間先までの降雨量、ダムへの流入量の予測を示し、それに基づくダムのゲートからの放流量とその操作タイミングを操作員へ提案するものである。このシステムにより、同一水系の複数ダムの運用を最適化し、流水を効率的に最大限活用する運用を行うことで、より高い増電効果が得られることを確認している。

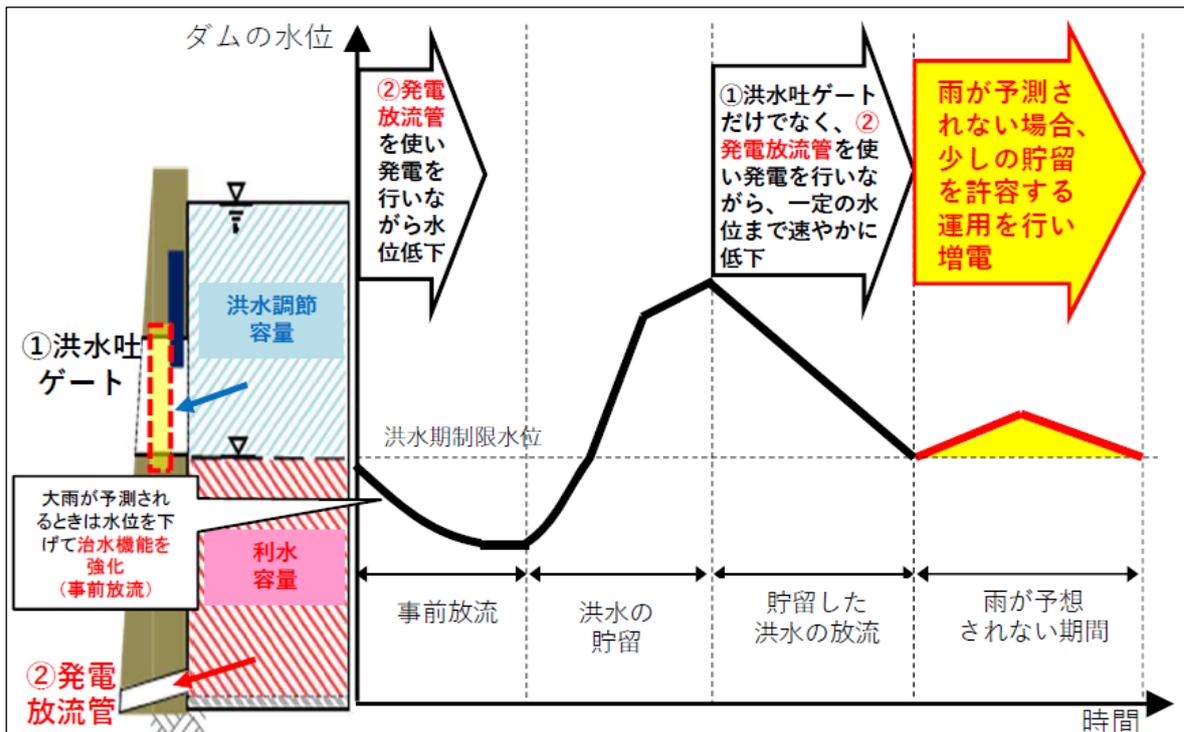


図 4.3.4.2-1 運用高度化のイメージ。

(引用および一部編集 (2023/9/5 確認) : <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001587070.pdf>)

## 5 気候変動を踏まえた今後の治水計画に関するリスクベースの考え方と最新の取り組み

近年の記録的な豪雨は人命や社会資本に甚大な被害を発生させており、気候変動の影響に伴う豪雨の更なる激甚化が危惧されている。このような状況において、気候変動の影響を含めた治水対策の実施、ならびにその裏付けとしての最新科学の積極的な利活用が進められている。中でも、合計数千年に亘る膨大な気候シミュレーションデータ（以降、アンサンブル気候データ）が整備され、このデータを活用した洪水被害とその発生確率の定量化が実現した。これらのリスク情報を活用した過去の観測実績を中心としつつも物理的に発生し得る事象を含めた風水害への適応が進められている。本章では、その研究の枠組みを紹介するとともに、関連する風水害分野におけるアンサンブル気候データの適用事例やダム運用への効果的な活用方法に関して述べる。

### 5.1 はじめに

世界各地で記録的な豪雨に伴う洪水・土砂災害が頻発している。国連の専門機関である気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC）は、21世紀において地球全体の平均気温が産業革命以前と比較して、今世紀半ばに2°C上昇する可能性を示すとともに、中緯度に位置する多くの陸域では降水量が増加するという予測結果を発表している（IPCC (AR6), 2021）。同状況を踏まえ、先進諸国においては、地球温暖化に伴う気候変動への適応策の議論・社会実装が推進されている（国土交通省北海道開発局, 2019; 千葉ら, 2019; 戸村ら, 2019）。

我が国においても、多発する豪雨により洪水・土砂災害が増加している。図 5.1-1 は第二次世界大戦後から現在までの風水害による死者数と経済被害額の変遷を示す。同図より、これまで推進されてきた治水整備により死者数ならびに被害額は減少傾向にあるが、概ね直近20年間ではその傾向は見られず、年間数十名程度の死者数が常態化している。その主な要因として、治水計画の設計外力となる降雨量（計画降雨量）を上回る豪雨が近年、頻発傾向にあることが挙げられる。例えば、2020年東日本台風（台風 Hagibis）がもたらした大雨によって、関東地方における一級河川18のうち7つの河川において計画（基本方針）を上回る降雨量もたらされ、国の管理河川のうち12箇所、県の管理河川の128箇所ですべて堤防が決壊するという事態に至った（国土交通省, 2019）。気象庁は、2018年西日本豪雨に

対して、地球温暖化の影響による降雨量の増大を明言し、さらに2020年7月豪雨においても同様の見解を示している（気象庁異常気象分析検討会, 2018; 2020）。

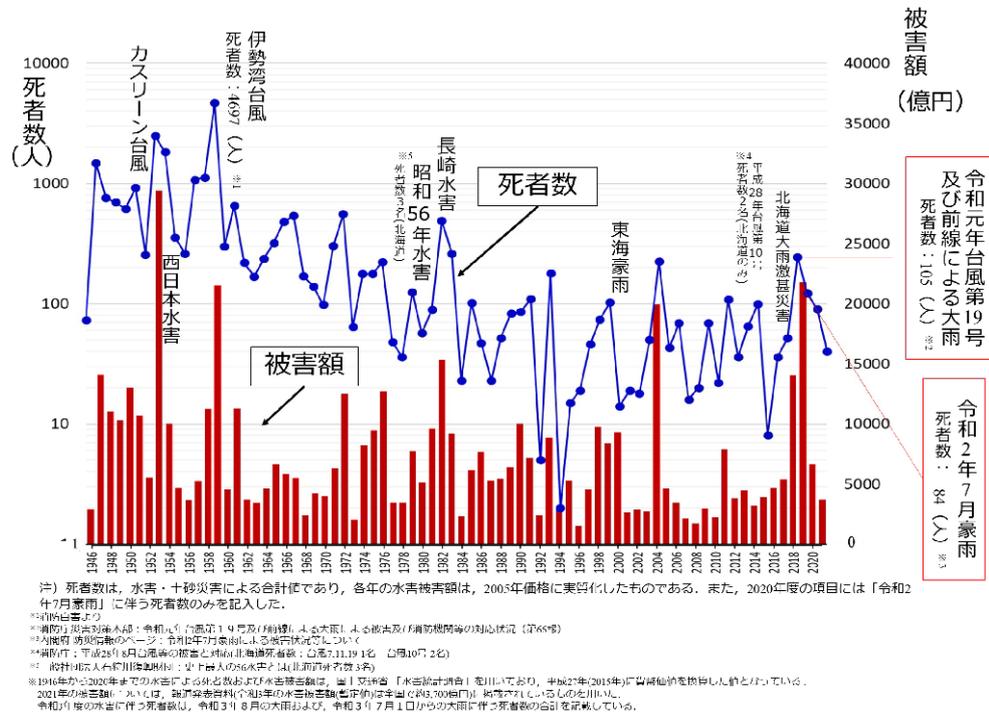


図 5.1-1 日本の洪水・土砂災害による死者数と被害額の変遷。  
(広田ら(2021)より転載)

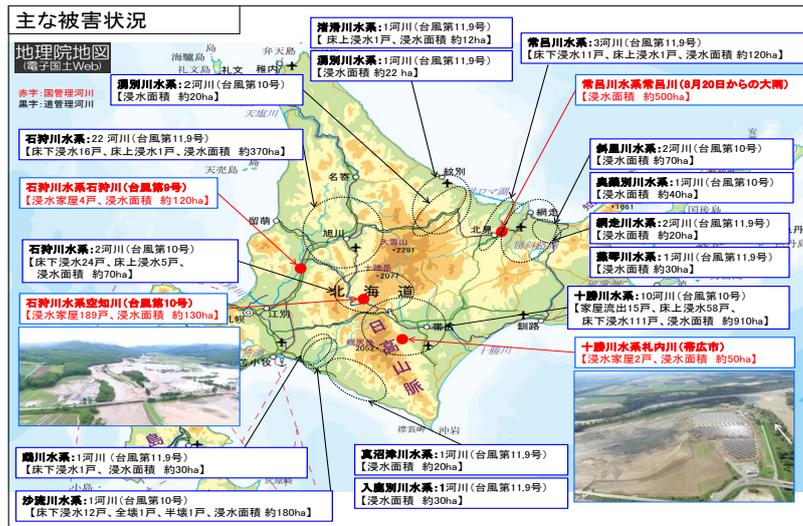


図 5.1-2 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害による被害状況。  
(平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会資料(国土交通省北海道開発局, 2017)を引用)

北海道地方においては、2016年8月に発生した大雨により、全道各地に甚大な被害が発生した（図5.1-2）。この災害では、3つの台風が1週間の間に北海道に上陸し、これらに続く台風第10号（台風Lionrock）の北海道への最接近によって、北海道の各地で記録的大雨となり、河川の氾濫、土砂崩れ、道路や橋梁の流出、さらには、当該地域の主力産業である農業にも甚大な被害が発生した。河川の被害としては、空知川、札内川など9河川において堤防が決壊、79の河川において氾濫が発生した（土木学会2016年8月北海道豪雨災害調査団,2017）。

北海道の主力産業である農業への被災事例としては、浸水による作物や土壌の流出、上流からの土砂の流入等がある。当該豪雨により、40,285haの農地が被災し、北海道全体の被害総額は2,803億円に上った。この被害総額は、昭和56年8月の水害による被害総額2,705億円を上回り過去最大規模である（土木学会2016年8月北海道豪雨災害調査団,2017）。なお、2016年北海道豪雨災害による農業被害合計額は約543億円であり、そのうち水害によるものは約247億円を占める（国土交通省北海道開発局,2019;小林ら,2019）。河川からの氾濫流は、農作物に被害を与え収量の減少を招くだけでなく、圃場の土壌流亡も引き起こした。流出した栄養分の豊かな土壌は、農家により何十年もかけて耕されたものであり、地力を回復するためには長い時間を要する（鶴木ら,2014）。浸水により土壌が流亡した圃場においては、翌年の作付に間に合わず不作付地となった場合、農家の収益に影響を与える。これらの水害による間接的な被害を考慮することが今後の流域管理において重要となる。小林ら（2019）は当該豪雨災害に伴う農作物への被害などの直接被害に対して、ヒアリング調査を基に間接被害を体系化し、間接被害の総額が約389億円に上ることを示した。間接被害のうち、産業連関分析による「関連産業への経済的な影響」は約358億円となり、間接被害全体の約9割を占め、水害による直接被害額の約1.4倍であった。当該の豪雨災害に伴う北海道における農作物の収量減は、農作物の国内への供給量に影響を及ぼし、経済損失をもたらした。例えば、当該災害により、北海道産が主たる秋ニンジンの卸売数量は落ち込み、9月中旬以降価格が2015年度の2倍となる状況が発生した。

上述した我が国の現状を鑑みると、近年における降雨の激甚化ならびに気候変動に伴う豪雨の頻発傾向を考慮した洪水対策の策定は喫緊の課題である。これまでの治水計画は、過去の降雨量や流量などの水文資料に基づき策定されてきた。一方で、過去の観測値は気候システムにおいて偶然性をもって実現したものであ

る。これまでの気候下において発生し得る可能性のある降雨事例を物理的根拠に基づいて把握することは、発生確率は低いが災害の要因となる低頻度極端現象の閾値を推定する上で重要である。さらに、気候変動の影響により、その閾値は変化していくため、その変化を推定するために、気候モデルによる将来予測を取り入れる必要があると言える。本研究では、20世紀中盤から今世紀末を対象とした数千年間分に亘る膨大な気候シミュレーションに基づき、大規模洪水の発生やこれに伴う被害を“リスク”として治水計画に組み込む手法論を構築している。本稿では、その枠組みを紹介するとともに関連する取り組みへの適用の一例を示す。

## 参考文献

Intergovernmental Panel on Climate Change: Sixth Assessment Report, 2021.

広田知良ら：北海道の最新農業気象気候変動に対する営農技術最前線，北海道協同組合通信社，温暖化予測の近年の進展，ニューカントリー2021年秋季臨時増刊号，2021.

国土交通省北海道開発局，北海道，北海道大学 監修：気候変動を踏まえた新しい洪水リスク解析（執筆・監修），一般財団法人 北海道河川財団，pp.42-66，2019.  
千葉学，戸村翔，山本太郎，植村郁彦，舛屋繁和，吉田隆年，大村宣明，岡部博一，佐々木博文，小林彩佳，星野剛，山田朋人，中津川誠：オランダの治水分野における気候変動適応策の検討・実施状況に関する調査報告（第2報）、河川技術論文集，Vol. 25，pp.49-54，2019.

戸村翔，舛屋繁和，植村郁彦，吉田隆年，大村宣明，千葉学，山本太郎，岡部博一，佐々木博文，小林彩佳，星野剛，山田朋人，中津川誠：Floris モデルを用いた将来気候下における大規模水害時の死者数推定，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.75，I\_1357-I\_1362，2019.

国土交通省：台風19号による被災状況と今後の対応について，2019.

気象庁異常気象分析検討会：「平成30年7月豪雨」及び7月中旬以降の記録的な高温の特徴と要因について，2018.

気象庁異常気象分析検討会：令和2年7月の記録的大雨や日照不足の特徴とその要因について～異常気象分析検討会の分析結果の概要～，2020.

土木学会2016年8月北海道豪雨災害調査団：2016年8月北海道豪雨災害調査団報告書，2017.

国土交通省北海道開発局：北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術

検討会 第2回資料, 2019

小林彩佳, 君沢竜也, 平出渉, 吉田隆年, 千葉学, 佐々木博文, 岡部博一: 洪水による農業被害に伴う波及被害額の算定手法の検討, 土木学会河川技術論文集, Vol. 25, 2019.

鵜木啓二, 中村和正, 古橋山雅之, 高須賀俊之: 気象庁データから算出した北海道全域の降雨係数, 農業農村工学会論文集, pp.315-320, 2014.

国土交通省北海道開発局: 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会, 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方, 2017.

## 5.2 気候変動を踏まえた治水計画の検討

2016年8月北海道大雨激甚災害の直後、国土交通省北海道開発局と北海道は、当該災害の検証と、過去経験のない豪雨ならびに将来の洪水リスクを検討するため、有識者会議を開催した(国土交通省北海道開発局, 2017). 同有識者会議では、気候変動の影響が現実のものとなったと認識し、気候変動による影響の科学的予測を行い、具体的なリスク評価に基づく洪水対策を実装すべきとの提言を取りまとめた. 2017年度には、著者らの研究グループが実施した、アンサンブル気候データ d4PDF (Database for Policy Decision-Making for Future Climate Change) (Mizuta et al., 2016) を地域気候モデルにより高解像度化(力学的ダウンスケーリング)した結果に基づく気候変動影響予測ならびに洪水リスク評価が開始された(山田・星野ら, 2018; Yamada, 2019). それらのデータを活用し、北海道開発局と北海道では、北海道地方における気候変動の影響(降雨量, 洪水流量の変化)によるリスクの変化を検討する委員会を立ち上げ(引用(2023/8/20 確認): [https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa\\_kei/splaat000000vdyw.html](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000000vdyw.html)), 十勝川流域, 常呂川流域を対象にリスク分析しつつ評価手法を検討した. d4PDF は, 文部科学省の一連の研究プロジェクト(SOUSEI(引用(2023/8/20 確認): <http://www.jamstec.go.jp/sousei/index.html>), TOUGOU(引用(2023/8/20 確認): <http://www.jamstec.go.jp/tougou/index.html>), SI-CAT(引用(2023/8/20 確認): <https://www.restec.or.jp/si-cat/index.html>), DIAS(引用(2023/8/20 確認): <https://diasjp.net/>), SENTAN(引用(2023/8/20 確認): <https://www.jamstec.go.jp/sentan/>))やJAMSTECの地球シミュレータ特別推進課題によって作成・利活用されている膨大な気候シミュレーションによる合計数千年に及ぶ大量のアンサンブル気候データベースである. これにより, 過去気候や気候変動が進行した際の気候条件下(将来気候)における膨大なデータに基づき災害につながる低頻度の気象現象の発生頻度やその強度を評価することが可能となった. 2023年度には「気候変動予測先端研究プログラム」(SENTAN)が開始され, 全国を一律に評価可能な高解像度大量アンサンブルデータセットの開発が始まり, 著者は同プロジェクトの領域課題3「日本域における気候変動予測の高度化」サブ課題ii「地域・流域の適応策推進に向けた気候変動予測情報の創出・極端現象メカニズムの解明」のサブ課題代表として参画している(引用(2023/8/20 確認): <https://www.jamstec.go.jp/sentan/>).

2018年には、北海道での一連の技術検討を受けて、国土交通省本省は、日本全国を対象として気候変動の影響を加味した治水計画の在り方を議論する技術検討

会（引用（2023/8/20 確認）：[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/chisui\\_kentoukai/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/index.html)）を立ち上げ、地域気候モデルにより、新たに整備されたアンサンブル気候データを用いた分析や、気候変動を踏まえた治水計画の具体的手法が議論され、2019年10月に「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言（引用（2023/8/20 確認）：[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/chisui\\_kentoukai/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/index.html)）が公表された。同提言には、気候変動を考慮した治水計画へ見直すにあたり、計画において想定する外力を全球平均気温が産業革命前に対して2°C上昇した場合を想定した降雨量とするとともに、過去に経験したことのない雨の降り方も考慮した上で、治水対策の検討の前提となる基本高水を設定すべきとの提言が示され、全国各地域における将来2°C上昇時における降雨量の変化倍率の平均値が示された（2021年4月の改訂版において確定値が公表）。北海道開発局と北海道における検討会（引用（2023/8/20 確認）：[https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa\\_kei/splaat000001offi.html](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000001offi.html)）では2016年8月北海道大雨激甚災害の被災地域における河川（十勝川、常呂川）を対象とし、大量アンサンブルデータに基づく気候変動を踏まえた治水計画の検討を行い、2021年12月、常呂川の河川整備計画は気候変動を踏まえた洪水リスク評価手法が導入されたものへと変更された。本州における複数河川（球磨川、五ヶ瀬川、新宮川）においても上記の国土交通省本省での検討をベースとして河川整備基本方針が変更された。2022年9月には阿武隈川及び十勝川の河川整備基本方針が変更され、現在では全国の他流域においても同様の検討が推進されつつある。一方で、2021年11月1日には「特定都市河川浸水被害対策法等の一部を改正する法律」（いわゆる流域治水関連法）が全面施行され（引用（2023/8/20 確認）：[https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo02\\_hh\\_000030.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo02_hh_000030.html)）、河川を中心とした流域全体で国や流域自治体、企業・住民等あらゆるステークホルダーが協働して取り組む治水対策へ向かう途上である。なお、著者らの気候変動予測に基づく洪水リスク評価に係る一連の研究成果は、我が国の今後の治水計画策定への知見として活用されるとともに、気候変動枠組条約（UNFCCC）定例会合において代表的防災研究として紹介された（Yamada, 2019）。

## 参考文献

- 国土交通省北海道開発局: 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会, 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方, 2017.
- Ryo Mizuta, Akihiko Murata, and Masayoshi Ishii: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, pp.1383-1393, 2016.
- 山田朋人, 星野剛ら: 北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化, *土木学会河川技術論文集*, Vol. 24, pp.391-396, 2018.
- Yamada, T.J: Adaptation Measures for Extreme Floods Using Huge Ensemble of High-Resolution Climate Model Simulation in Japan. Summary Report on the Eleventh Meeting of the Research Dialogue 2019, 28–30, UNFCCC Bonn Climate Change Conference, Bonn, Germany (19 June 2019).

### 5.3 アンサンブル手法による気候変動予測

気象現象は任意の境界条件の下で異なる頻度で発生するとして理解するものであり、気候システムにとっての主たる境界条件は海面水温である。60km 解像度の d4PDF の過去実験は、これまで観測された海面水温を底面境界条件として気象庁・同庁気象研究所によって開発されている全球気候モデルに与え、かつ摂動を加えた複数の初期条件によるアンサンブル計算によって構成される。具体的には 60 年間×50 通りの初期摂動の計 3,000 年相当分の気候データである。一方、将来実験は全球平均気温が産業革命前に対して、2°C および 4°C 上昇した気候場を想定している。当然ながら将来気候下における海面水温の観測データは存在しない。そのため、第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP5) に登録されている世界各国の 6 つの全球スケールの大気海洋結合モデル(うち 2 つは日本のモデル)が予測する将来の海面水温を底面境界条件として気候モデルに用いるとともに、摂動を与えた複数の初期条件からアンサンブルデータとして作成されたものである。2°C あるいは 4°C 上昇実験は 6 種類の海面水温の予測結果を境界条件とした将来 60 年間に亘る数値計算を 9 回あるいは 15 回分実施した結果を格納している。このため、2°C 上昇実験は 3,240 年間分、4°C 上昇実験は 5,400 年間分の計算結果をもつ。さらに得られた 60km 解像度のデータセットを側方境界条件とし、領域気候モデルを用いて東アジア域を対象に力学的ダウンスケーリングを実施した空間解像度 20km のデータセットが存在する。水平解像度 60km 及び 20km の d4PDF は DIAS 上で利用可能である。上記に加え、地形性降雨をはじめとする局所性の高い降雨現象を高精度で表現可能な 5km の空間解像度でのデータも利用可能となってきた (図 5.3-1)。

なお、北海道内の複数流域、関東地方の利根川流域や九州地方の筑後川流域において、5km 解像度の d4PDF を用いた年最大降雨量や時間雨量それぞれの出現頻度は実測データとの高い整合性が確認されている (山田・星野ら, 2018; Yamada, 2019)。さらに、上述の「気候変動予測先端研究プログラム」において日本全国を 5km 解像度に力学的ダウンスケーリングを実施したデータセットの開発が進んでおり、全国的な極端降水の再現性向上及び近年の豪雨災害の一つの特徴でもある線状降水帯の検出が可能となった (Kawase et al.)。北海道地域を対象とする 5km 解像度のデータセットは気候予測データセット 2022 として DIAS 上で公開されており (引用 (2023/8/20 確認) : <https://diasjp.net/ds2022/>)、日本全国のデータについても順次公開予定である。

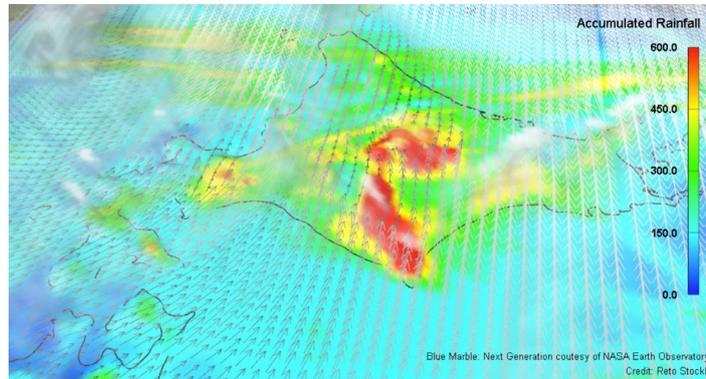


図 5.3-1 全球平均気温が4°C上昇した際、十勝川流域に大雨をもたらす事例(山田 & 清水(2021)より転載)。

※当該事例では、台風が太平洋側から東北地方北部を通過し日本海に抜けた。なお、この台風は、2016年台風10号と類似した経路を辿った。

#### 参考文献

- 山田朋人, 星野剛ら: 北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化, 土木学会河川技術論文集, Vol. 24, pp.391-396, 2018.
- 山田朋人, 清水康行: 気候変動を踏まえた豪雨・洪水氾濫リスクの考え方, 日本流体力学会, ながれ, 第40巻, 第1号, p.20, 図-1, 2021.
- Yamada, T.J: Adaptation Measures for Extreme Floods Using Huge Ensemble of High-Resolution Climate Model Simulation in Japan. Summary Report on the Eleventh Meeting of the Research Dialogue 2019, 28–30, UNFCCC Bonn Climate Change Conference, Bonn, Germany (19 June 2019).
- Hiroaki Kawase, Masaya Nosaka, Shunichi I. Watanabe, Koudai Yamamoto, Tomoya Shimura, Yukari Naka, Y.-H. Wu, Hiroki Okachi, Tsuyoshi Hoshino, Rui. Ito, Shiori Sugimoto, Chieko Suzuki, Shin Fukui, Tetsuya Takemi, Youichi Ishikawa, Nobuto Mori, Eiichi Nakakita, Tomohito J. Yamada, Akihiko Murata, Tosiya Nakaegawa, and Izuru Takayabu; Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario, Journal of Geophysical Research-Atmosphere (Accepted).

## 5.4 計画降雨量の将来予測

現行の治水計画において、設計外力である計画降雨量は、確率・統計学の理論に基づき算定される。我が国では、過去数十年間分の降雨観測により得られたデータに基づき、対象流域における年最大降雨量の頻度を統計解析することで計画降雨量が推定される。具体的には、これらの観測値を用い、対象流域における年最大降雨量の規模とその生起確率の関係（確率分布）を推定する。この年最大降雨量の確率分布において、目標とする安全度相当の年超過確率のクオンタイル値が計画降雨量である。ここで、当該分布の年超過確率  $p$  に相当する降雨量（確率雨量）は、1年間に当該の確率雨量以上の降雨が発生する確率が  $p$  であるということの意味する。なお、推定確率分布における年超過確率の逆数は、確率年として定義されている。例えば、100年確率降雨量は1年間でその降雨量値を超過する雨量が発生する確率が  $1/100$  であることを意味する。我が国の一級河川流域では、100年から200年程度の確率年が計画確率年として採用されることが多い。一方、多様な降雨現象をもたらす気候システムの自由度は、膨大な大きさを有している。その膨大な気候システムの自由度に対して、過去の豪雨への精緻な分析を経て蓄積されてきた気候システムへの認識は、情報量としては限定的となる。このため、これまで採用してきた年最大降雨量の確率分布は不確実性を有する。アンサンブル気候データは、過去の観測情報と併用することで、気候システムへの理解を促進させ、過去の観測情報により規定された計画降雨量の不確実性の定量化を実現させる。具体的には、アンサンブル気候データの導入により、気候システムの自由度を考慮した上で、災害の要因となる低頻度極端現象のとり得る範囲（有界性（boundedness））を信頼区間・予測区間として評価し、その治水計画への導入が可能となった。ここで、確率雨量を始めとした、標本から求めた統計的推定値の振れ幅は、信頼区間として数学上定義されている。例えば、95%信頼区間は、推定統計量の頻度分布の95%を含むものである。これにより、過去の観測情報のみでは、想定外として扱われるような激甚豪雨の発生確率が定量化可能となる。ここで、十勝川流域における確率雨量の信頼区間を考慮した、年最大降雨量の頻度解析結果を図5.4-1に示す。同図中において黒点は年最大流域平均72時間降雨量の観測値である。一方、青色の範囲は過去気候、赤色の範囲は将来気候（4℃上昇時）における確率雨量の信頼区間である。過去・将来気候に関してはアンサンブル気候データから観測値の総数と同じ数だけ、年最大降雨量の計算値をサンプリングするという物理的なモンテカルロ法により、信頼区間を構成した。

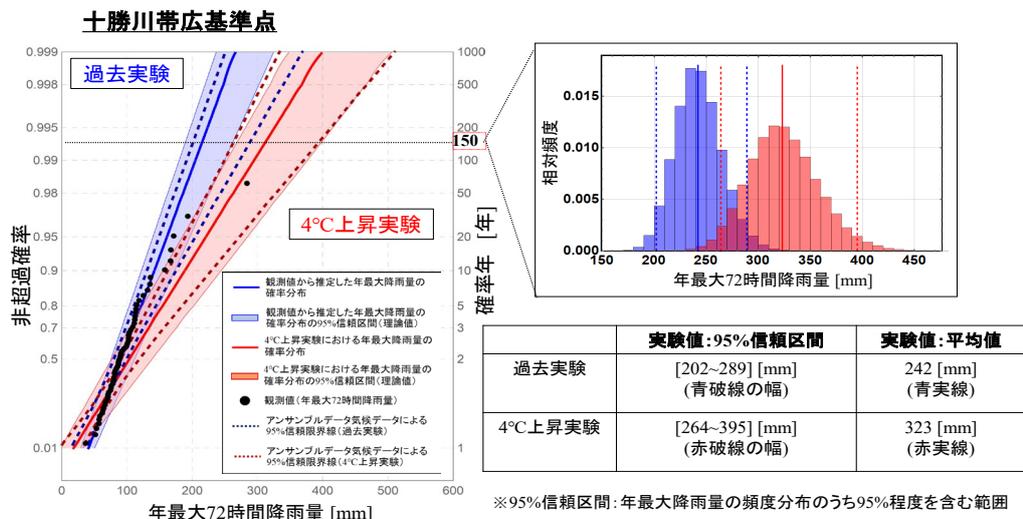


図 5.4-1 十勝川流域における確率年最大 72 時間 (3 日間) 降雨量のと  
りうる幅.

なお、両区間の重複する紫色の範囲の存在は、全球平均気温が 4℃も異なる両気候においても、頻度は異なるが同規模の大雨事象は物理的に発生し得ることを意味する。

なお、アンサンブル気候データに基づく確率評価の結果は、数理統計理論によっても支持され、その科学的妥当性を担保する研究成果が得られている (Shimizu et al., 2020). 本研究では、想定した年最大降雨量の確率分布の下で発生しうる降雨量の統計的閾値の導出を可能とする確率限界法検定 (森口, 1995) を採用し、これに基づく信頼区間を構成した. 図 5.4-1 中の点線の範囲は、同理論に基づく信頼区間の幅である. 同図より、過去気候・将来気候の双方において、アンサンブル気候データによる信頼区間と確率限界法検定による信頼区間の適合度が非常に良いことが分かる. 物理的モンテカルロ計算および確率限界法検定からそれぞれ独立に構成した信頼区間の一致は、本検討の数理的な妥当性を支持するものである.

現況の河川整備で設定されている降雨量は確率論における期待値 (平均値) であり、想定以上の雨が降る確率は理論上常に存在する. したがって、信頼区間の幅をリスクとして治水計画に組み込むとともに、気候モデルによる将来予測結果を見据え、幅を保持しつつ将来の洪水リスクを評価することが後悔の少ない意思決定に寄与すると考える.

## 参考文献

Shimizu, K., Yamada, T., Yamada, T.J.: Uncertainty Evaluation in Hydrological Frequency Analysis Based on Confidence Interval and Prediction Interval. *Water*, Vol. 12, 2554, 2020.

森口繁一: 確率表現関数の検定について—Kolmogorov-Smirnov 検定を考え直す—, pp.233-244, *日本統計学誌*, Vol. 25, 1995.

## 5.5 アンサンブル気候データの導入による総合的リスク評価

アンサンブル気候データを活用することで前述の確率雨量の評価だけでなく、洪水被害のパターンや規模を左右する降雨の時空間的なパターンを大量の豪雨事例群から考慮することが可能となる。これは物理的に起こり得たもののこれまでに生じていない降雨パターンにおける洪水の被害推定を可能とするものであり、従来の観測データとの組み合わせにより地域の有する洪水の危険性を多角的に評価可能となることを意味する。

地上気温と極端な 1 時間降雨強度の関係は概ね気温と飽和水蒸気圧の関係式 (Clausius-Clapeyron 式,  $1^{\circ}\text{C}$ あたり大気中に含むうる水蒸気量は約 7%増加, 以降 C-C 関係) に従い,  $1^{\circ}\text{C}$ の気温上昇に対して降雨強度は約 7%強化される。図 5.5-1 に示すように気温と降雨強度の関係は観測値およびアンサンブル気候データの過去実験,  $4^{\circ}\text{C}$ 上昇時の将来実験の両者において概ね C-C 関係に従う。このように気候条件によらず気温と降雨強度の関係は概ね理論に従うことから, 気温の上昇に伴い大雨のリスクが上昇することがわかる。また, 強制的に上昇流が引き起こされる山岳域などでは C-C 関係を上回る倍率で降雨強度の増大を示す地域も存在することから, 高解像度の地域気候モデル計算に基づく詳細な分析が大雨リスクの評価においては重要となる。

治水計画で対象とするような流域平均の降雨量の大きいイベントの時空間的な降雨の特徴の変化を考える。図 5.5-2 より, 将来の気候条件下における極端降雨は流域全体かつ 72 時間降雨量を対象にした場合で 1.3 倍程度大きいことがわかる。この倍率は C-C 関係から  $4^{\circ}\text{C}$ 気温が上昇した場合の大気を含むうる水蒸気量の倍率 1.3 倍とおおよそ一致する。一方で, 短時間かつ小面積の降雨に着目すると降雨量の変化倍率は最大で 1.7 倍程度まで達する。これは将来気候において降雨はより時空間的に集中化することを意味する結果であり, それにより河川のピーク流量の増大や土砂災害の危険性の増大などが想定されることから, 流域全体での降雨量の増大と合わせて降雨パターンの変化を考慮した適応策の必要性が示唆される。

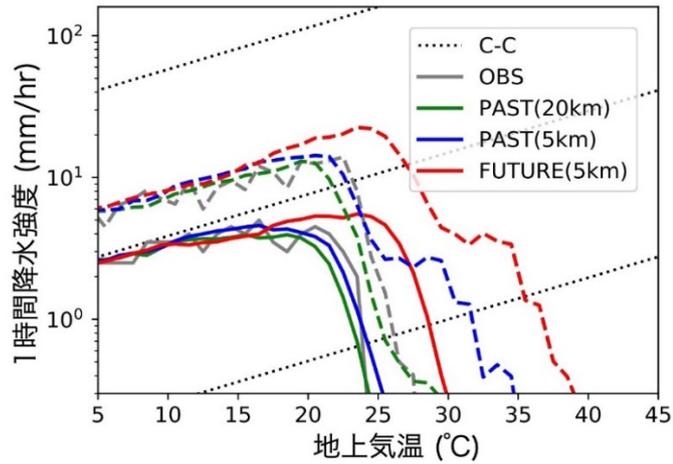


図 5.5-1 1 時間降雨強度と地上気温との関係.

(実線, 破線, 点線はそれぞれ同気温帯 (1°C 間隔) における 99 パーセントイル降雨強度, 同 99.9 パーセントイル降雨強度, C-C 関係の傾きを表す. 実線と破線の色は観測 (灰色), 20km 解像度の過去実験 (緑色), 5km 解像度の過去実験 (青色), 5km 解像度の過去実験 (赤色) を表す.) (Reproduced from Yamada, T et al. (2021) under license CC-BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>))

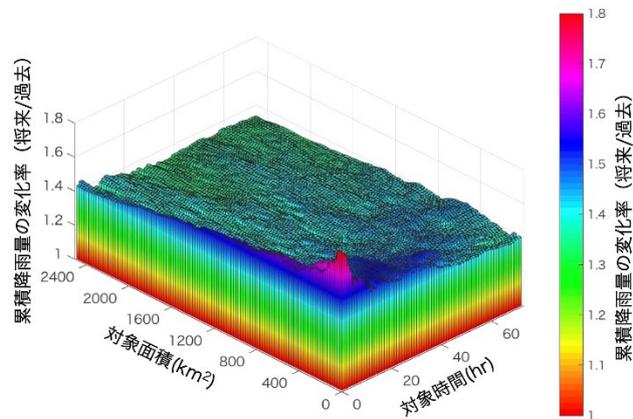


図 5.5-2 十勝川帯広基準地点上流域の極端降雨(山田 & 清水 (2021) より転載).

(d4PDF 過去実験, 将来実験それぞれの上位 1%) の時空間特性. 流域全体かつ 72 時間は 1.3 倍程度の降雨量, 短時間・局所的な降雨の倍率はより高い (最大 1.7 倍程度).

アンサンブル気候データに含まれる大量の大雨イベントを降雨流出・河道追跡モデルに与えることで, 降雨の時空間的な特徴を反映した洪水の被害想定が可能

となる。図 5.5-3 に年最大流域平均 3 日降雨量に対するピーク流量の関係を示す。この図から観測データのみからも流域平均雨量の増加とともにピーク流量の取り得る幅も増加することが示唆されるが、過去実験の結果からより明瞭にその特徴を確認することができる。さらには、4°C 上昇実験からはその幅の特徴が踏襲されながら、より大きな降雨量の範囲まで及んでいる。ここでは流出パラメータは同一のものを採用していることから、同程度の降雨量に対するピーク流量の差異は降雨の時空間分布に依存する。観測実績の最大のピーク流量は 2016 年 8 月の台風 10 号時であり、同降雨イベントはピーク流量が大きくなりやすい特徴を有していたことが示唆される。同様の解析を全国の流域に適用することによって、降雨の時空間特性を踏まえ、ピーク流量や洪水リスクを議論することが可能となる。

過去実験、2°C 上昇実験、4°C 上昇実験それぞれにおける農地の氾濫リスクの確率評価を行った一例を図 5.5-4 に示す。これは各実験において全てのアンサンブルメンバーの降雨波形群（過去実験：3,000 イベント；4°C 上昇実験：3,240 イベント；4°C 上昇実験：5,400 イベント）を流出モデルに与え、次元不定流計算、破堤、その後の 2 次元氾濫計算を経て得られた結果である。過去実験においても、音更町および士幌町、池田町等において毎年 1/100 以上の確率で浸水する農地が存在する。4°C 上昇実験においては、上記に加えて上士幌町、芽室町、幕別町、豊頃町、本別町、浦幌町においても毎年 1/10 以上の確率で浸水する農地が存在する。すなわち、気候変動により気温が 4°C 上昇すると、特に下流部を中心に十勝川流域の広い範囲で、農地の浸水確率が高くなる。また、同図より下流部を中心に、洪水時に堤外地の流速が大きくなる可能性がみられ、土壌流出の危険性が定量情報として示された。この結果は、過去実験・将来実験それぞれにおける降雨波形全てに関する一年あたりの生起確率情報であり、これにより対象流域が今後直面する洪水被害の可能性がリスクとして定量的に議論可能となった。

全ての降雨波形群について破堤による浸水深、流速、水位上昇率による想定死者数の算定が実現し、図 5.5-5 に示す発生頻度 (Frequency) と死者数 (Number of fatalities) との関係を表す F-N カーブが描かれる。これを時間軸上に延長することで、今後のハード・ソフト対策により将来を見越した適応策を議論するバックキャストの構図を用いた検討に活用することが可能となる (図 5.5-6)。本稿では、浸水深や死亡確率についての結果を紹介したが、そのほか、地域としての主要インフラ施設や土壌流出率などを考慮したリスク情報を作成しており、これらの定量的情報を活用した地域との議論が開始されている。加えて、今後は複合的

なりリスクを踏まえた検討も必要と考える。その例を次に示す。2018年9月に発生した北海道胆振東部地震では、その震央に位置する胆振地方東部において広範囲に亘る多数の土砂崩壊が発生し、甚大な被害となった（農林水産省, 2019）。豪雨は土砂崩壊のリスクを増加される要因として挙げられる。仮に当該地震の直前に、大雨により土砂崩壊のポテンシャルが高くなった状態に対して、地震による外力が襲来した場合、その被害はより甚大となったであろう。これは大雨と地震が同程度のタイミングで発生することによる複合的なリスクと言える。したがって、膨大な気候変動予測情報の活用により、土砂崩壊のリスクを高める豪雨のパターンを事前に想定するとともに、当該豪雨と複合する可能性のある外力（ここでは地震動）を検討することで、豪雨と地震の双方を考慮したリスク情報が創出される。これはアンサンブル気候データを基軸とすることで、他の外力と豪雨とが結びついた複合的なリスクへの評価が実現することを意味する。また、2021年7月には北海道において記録的な高温・少雨となり、深刻な農業被害が報告されている。このような渇水に伴うリスクも考慮すべきであり、前述の洪水リスクと同様に生起確率と水資源の不足による被害の掛け合わせによるリスクの定量化が今後の安定的・効率的な水資源の利用に不可欠と考えられる。

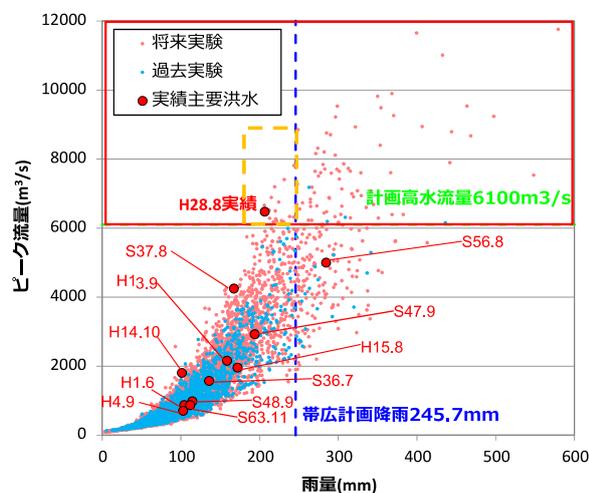


図 5.5-3 十勝川流域における年最大 72 時間（3 日）降雨量と同基準地点におけるピーク流量の関係。

（同図は北海道開発局：「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」資料より引用。）

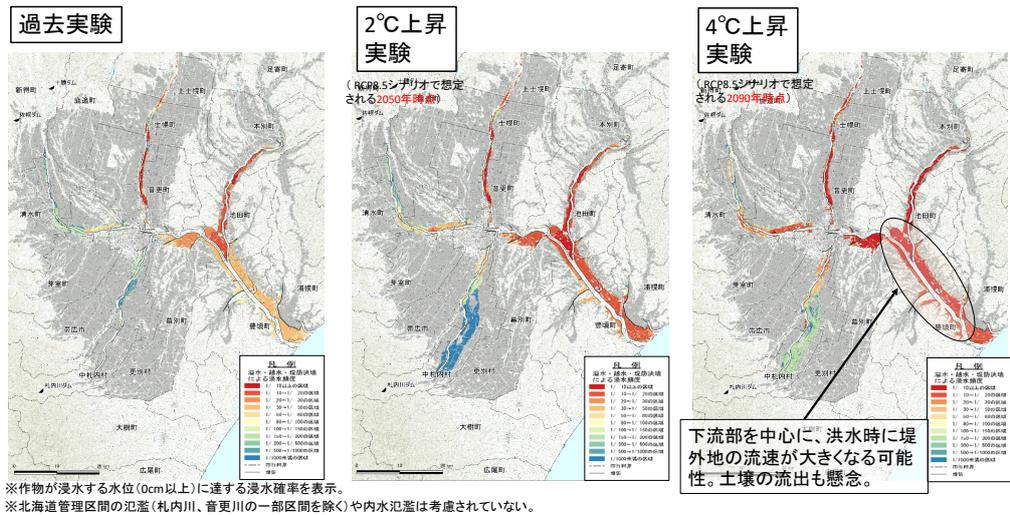


図 5.5-4 農地の浸水リスク評価結果.

(同図は北海道開発局：「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」資料より引用.)

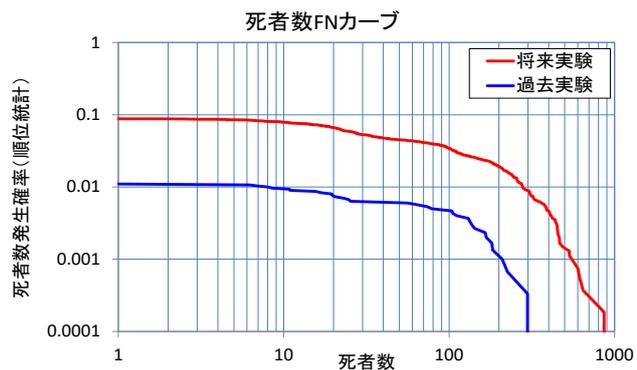


図 5.5-5 過去実験(下側の実線)・将来実験(上側の実線)における洪水氾濫による死者数発生確率(F-Nカーブ).

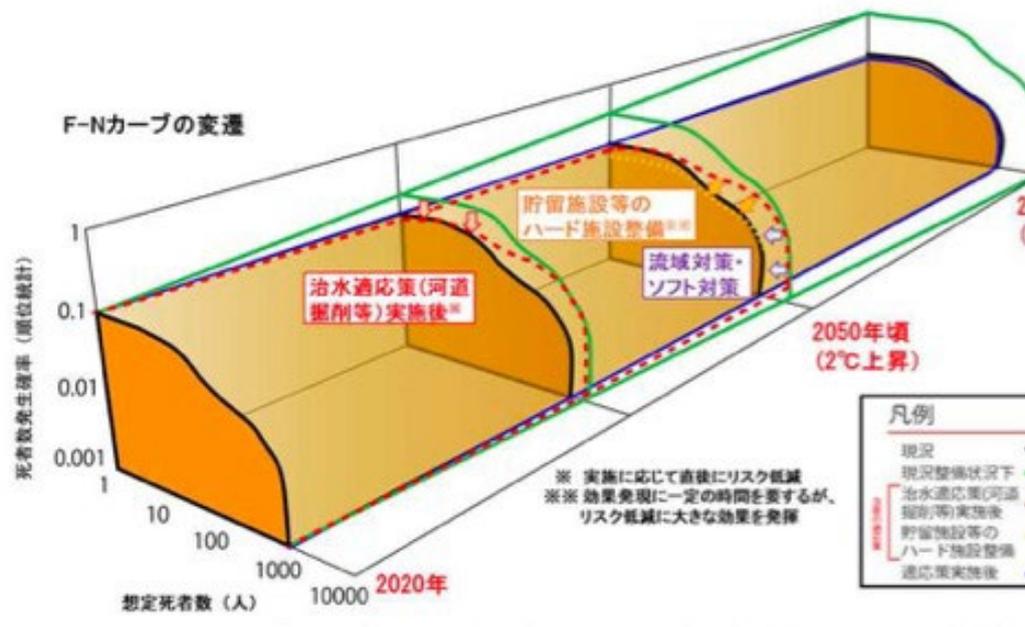


図 5.5-6 時間軸上で議論可能となる F-N カーブ。

気候変動に伴う降雨外力，各種の適応策等によって F-N カーブの大きさ・形状が決定される。

#### 参考文献

Yamada, T.J., Hoshino, T., Suzuki, A.: Using a massive high - resolution ensemble climate data set to examine dynamic and thermodynamic aspects of heavy precipitation change. Atmos. Sci. Lett. pp.1-11, 2021.

農林水産省，平成 30 年北海道胆振東部地震による被害状況，2019.

山田朋人，清水康行：気候変動を踏まえた豪雨・洪水氾濫リスクの考え方，日本流体力学会，ながれ，第 40 巻，第 1 号，p.21，図-3，2021.

## 5.6 日々の防災への適用（鈴木ら, 2023）

災害に対する住民の避難促進を目的に、市町村は避難指示等の避難情報を発令している。洪水時には、避難情報が地域住民の避難行動の起点となることが確認されており、流域治水における被害軽減において、適切な避難情報の発令判断は重要な対策の1つであると言える（武内ら, 2022）。一方で、既往の大雨時の調査から、未経験の規模の豪雨時には、正確な状況把握や避難情報発令等の意思決定が困難となることが指摘されている（佐藤ら, 2011）。しかし、気候変動進行時に起こりうる大雨・洪水を想定した訓練や演習のためのシナリオの作成手法は確立しておらず、気候変動の影響を考慮した訓練や演習のためのシナリオの作成は喫緊の課題となっている。著者らのグループが実施した北海道十勝川流域の市町村を対象としたヒアリングでは、近年に実施された洪水に対する訓練・演習において、主にハザードマップや過去の災害事例を参考にして想定するシナリオが作成されたことを確認した。ハザードマップを参考にした場合、想定しうる最大規模の降雨（1/1,000）に対する浸水深に基づく潜在的な被害の想定は可能であるが、気象や各河川の氾濫にいたるまでの状況および氾濫後の浸水の進行は考慮できない。ハザードマップ作成に活用されている、浸水想定区域図を参考にした場合には、河川整備において基本となる降雨（1/200 から 1/10）および最大規模の降雨（1/1,000）による氾濫発生後の浸水の進行状況を確認できるが、氾濫に至るまでの気象・河川水位の状況や、複数河川の氾濫の想定は難しい。また、過去の災害事例を参考にした場合には、気象状況や各河川の水位は考慮することができるが、気候変動進行時に起こりうる大雨・洪水は考慮できない。しかし、2015年9月関東・東北豪雨における複数河川の氾濫による逃げ遅れ（中央防災会議 水害時の避難・応急対策検討ワーキンググループ）や気候変動の進行に伴う降雨の時空間特性の集中化の予測（星野&山田, 2018）を鑑みると、将来に予測される大雨ベースでの中小河川の氾濫も含めた地域・流域単位の洪水リスクに備えることが求められる。

本研究は、気候変動の影響を考慮した大雨に起因する洪水リスクへの対応を検討するための方法の開発を目標としており、著者らは、アンサンブル気候データの大雨事例に基づく地域単位の洪水シナリオの作成手法、および市町村におけるシナリオを活用した避難情報発令を検討するための演習手法を提案した。本手法を適用した北海道帯広市との実証実験では、アンサンブル気候データに基づく未経験の規模の洪水シナリオに対する具体的な時刻・地区への避難情報の発令が検

討された。さらに、演習の振り返りを通して、同様の大雨・洪水発生時に行うべき発令等の対応を事前に議論することが可能となった。

演習に向けては、対象とする大雨事例における地域の洪水リスクを想定するために、国管理河川（十勝川・札内川）だけでなく北海道管理河川（ウツベツ川・柏林台川・帯広川・新帯広川）を対象に、同一の雨量データから降雨流出および氾濫解析を実施して洪水シナリオを作成した（図 5.6-1）。対象とする大雨事例は、十勝川流域における特徴的な降雨の空間パターンの中から規模の大きい事例を選定するとともに、市町村との議論を通して、2016 年台風 10 号に類似し、中小河川からの氾濫が発生する洪水シナリオを選定した（図 5.6-2）。これまでに十勝川流域で進めてきた取り組みにおいて、市町村の防災担当者が避難情報の発令を判断するためには時間雨量や河川水位の量的情報だけでなく、気象および河川に関する警報、予報および概況情報等が必要であることを確認していたため、選定した洪水シナリオに基づき、避難情報の発令判断に参考にされている防災関連情報（気象情報・注意報・警報、各河川の水位到達情報・洪水予報・氾濫発生状況）を作成した（図 5.6-3）。演習では、防災関連情報および、地図上で可視化した洪水シナリオ（雨量，河川水位，浸水）を時系列で提供することで、具体的な時刻や地区へのリードタイムを確保した避難情報の発令が検討された。さらに、演習の振り返りを通して、同様の大雨・洪水発生時に行うべき発令等の対応や課題について事前に議論することが可能となった（図 5.6-4）。

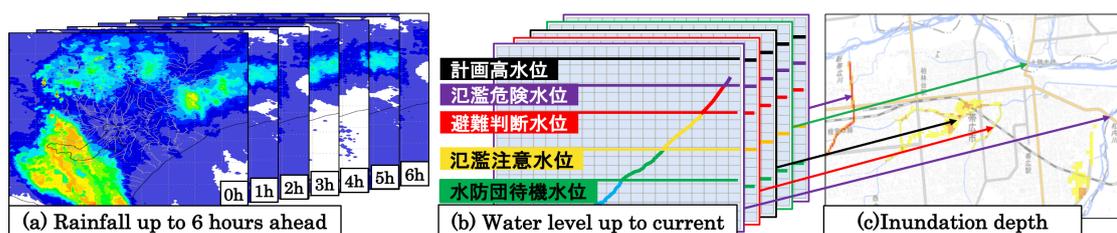


図 5.6-1 d4PDF の大雨事例から作成および演習で提供した洪水シナリオ。

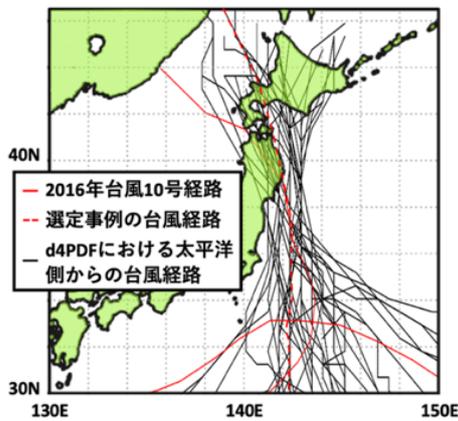


図 5.6-2 選定事例および d4PDF 過去・4°C 上昇実験における平成 28 年台風 10 号に類似した台風経路.

**台風●号に関する十勝地方気象情報 第●号**

●月●日●時 帯広 発表  
 十勝地方では●日にかけて、台風の影響で大雨や荒れた天気となるでしょう。

【特記事項】  
 十勝地方全域で大雨注意報(浸水)、洪水注意報を発令しました。

<気象概況>  
 大型で非常に強い台風第●号は、●時には日本の南東の北緯34度 東経142度付近に位置し、1時間におよそ20kmの速さで北へ進んでいます。中心気圧は968ヘクトパスカルとなっています。台風第●号は●日の昼ごろに北海道に接近する恐れがあります。●日の夜にかけて北海道周辺は気圧の谷となり、暖かく湿った空気が流入するでしょう。

<防災事項>  
 十勝地方では、気圧の谷の影響で、●日夜にかけて、激しい雨が降る見込みです。低い土地の浸水や河川の増水に十分注意してください。

<雨の実況>  
 ●日9時から18時までの雨量  
 上士幌町ぬかびら源泉郷 50ミリ 中札内村上札内 120ミリ  
 新得町4条 30ミリ 上士幌町三股 20ミリ  
 幕別町糠内 30ミリ 浦幌町留真 20ミリ  
 芽室 70ミリ 帯広 50ミリ

<雨の予想>  
 ●日18時から24時間先までの予想  
 1時間雨量の最大値 十勝地方 40ミリ 24時間雨量 十勝地方 300ミリ

図 5.6-3 洪水シナリオから作成した避難情報の発令判断に必要な防災関連情報の一例(台風に関する気象情報).

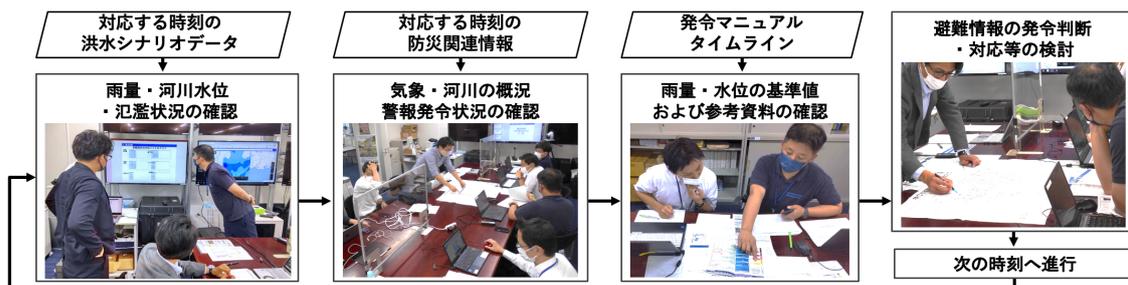


図 5.6-4 洪水シナリオおよび防災関連情報を活用した避難情報の発令判断の検討を目的とした演習の進行.

参考文献

鈴木章弘, 植村郁彦, 星野剛, 石原道秀, 米田駿星, 山本太郎, 橋本慎一, 山田 朋人: 気候変動進行時に起こりうる大雨による洪水リスクを考慮した避難情報発令の事前検討, 土木学会論文集 G (環境), 2023 (採択決定).

鈴木章弘, 植村郁彦, 山本太郎, 星野剛, 橋本慎一, 山田 朋人: 避難情報発令の事前検討に向けた気候変動進行時に起こりうる洪水シナリオの可視化手法, 第 51 回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2023.

武内慶了, 諸岡良優, 山田正: 洪水時の避難開始行動を記述するシステム方程式の提案, 災害情報, Vol. 20, pp. 239-250, 2022.

佐藤 翔輔, 林 春男, 田村 圭子, 浦田 康幸: 平成 21 年の大雨時の避難勧告発令経験にもとづく自治体の対応に関する教訓・課題 -大雨災害における避難のあ

り方等検討会「避難勧告・避難指示を発令した市町村に対する調査」の自由回答の TRENDREADER 解析-. 自然災害科学, Vol. 30, pp. 123-145, 2011.

中央防災会議 水害時の避難・応急対策検討ワーキンググループ: 平成 27 年 9 月  
関東・東北豪雨災害の概要, ワーキンググループ第一回資料(平成 27 年 11 月 17 日).

星野 剛, 山田 朋人: 大量アンサンブル気候予測データを用いた年最大降雨の時空間特性の将来変化の把握 ～十勝川流域を対象として～, 土木学会論文集 G(環境), Vol.74, No. 5, pp. 25-31, 2018.

## 5.7 アンサンブル気候データを用いた利水ダムにおける洪水被害低減手法の効果検証（松本ら，2021）

2016年8月北海道大雨激甚災害を契機に，電源開発㈱は，気象予測情報を適用し，事前にダム水位を低下させる洪水被害軽減のためのダム運用手法を案出し，糠平ダムで暫定的に運用を開始した（高倉ら，2013）（以下，本手法）．本手法は，2016年8月北海道大雨激甚災害時の4つの台風（以下，4台風）襲来時と同規模の出水に対して安全な放流を実施することを目的に案出したものであるが，4台風規模の出水の出現頻度は少なく，過去の実績による本手法の効果の検証に時間を要すると予想されることから，アンサンブル気候データを活用して本手法の効果を検証することとした．

本稿では，日本周辺域について実施された過去3,000年分の過去実験の中から，糠平ダム流域の大雨事象を抽出してハイドログラフならびにダム流入量のハイドログラフを作成してダム放流のシミュレーションを行い，4台風襲来時と同規模の出水に対して，目標水位までの水位低下の可否，放流量の低減効果などの観点から，下流に安全な放流が実施可能か否かを検証した．

過去実験3,000年分雨量データの中から，15日間の累積雨量が大きい期間に着目し，各期間の5kmメッシュのデータを流出解析モデルの平面解像度1kmに合わせて空間内挿を行い15日間の累積雨量を再計算した．空間内挿は，5kmメッシュ中心点を格子点とし1kmメッシュ格子点との距離による重み付き内挿法により行った．ダム流入量を計算する時の流出解析モデルには分布型モデルを適用し，京都大学で開発されたOHyMoSとGeoHyMoS（椎葉ら，2013；引用（2023/8/20確認）：<https://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/geohymos/geohymos.html>）に準拠して，河道は河道要素モデル，斜面は部分流域要素モデルで流域の地形を作成した．河道の流れにはkinematic waveモデル，斜面の流出，不飽和・飽和中間流，表面流モデルを適用し，モデルの各パラメータは，大規模出水時の流域の飽和状態を考慮したモデルとなるよう，4台風襲来時のハイドログラフの再現性が最も高くなるもので設定した．

図5.7-1に示した各事例のダム流入量に対して，気象予測情報を適用した洪水被害軽減のためのダム運用手法を適用し，安全な放流が可能か否かシミュレーションを実施した．シミュレーションは本手法を適用する前の標準操作を実施した場合と本手法を適用した場合の2パターン設定した．シミュレーションでは気象予測情報が100%的中すると仮定し，先行降雨で165mm降った後（≡先行降雨の

出水でゲート放流中)、後続降雨の累積雨量が 100mm となった時点の 84 時間前に水位低下開始基準 1 に、39 時間前に水位低下開始基準 2 に到達する条件とした。また、水位低下開始直前の水位は最も危険な状態を想定して予備放流水位 (LWL+29.75m) とし、水位低下開始時刻については基準到達時刻から 6 時間後、ただしゲートを開けて放流している最中であれば基準到達時刻から 3 時間後と設定した。この 6 時間と 3 時間は、基準に到達してから実施する放流準備や下流パトロール、気象予測の配信に要する時間等を考慮したものであり、放流中であれば下流パトロールは省略できるので 3 時間とした。水位低下開始直前の水位は、既往のダム運用実績から予備放流水位以上となることは極めて稀であることから予備放流水位を設定した。本手法適用前の標準操作ではこれが目標低下水位となる。

糠平ダム操作規程のとおり標準操作での遅らせ時間は 40 分とし、本手法を適用した場合の遅らせ時間は 3 時間とした。遅らせ時間を 40 分から 3 時間に延長して放流量の低減を図るのが本手法である。遅らせ時間を延長するには標準操作に比べて多くの流入水を貯水池に貯めるため、事前に LWL+29.75m よりさらに水位を下げて空容量を確保しておく必要がある。

水位低下操作を実施した時のシミュレーション結果を図 5.7-2 に示す。これらによると、4 台風襲来時に比べて総流入量が 1.6 倍である事例 1 の場合、最大流入量  $944\text{m}^3/\text{s}$  に対して標準操作で対応すると最大放流量は  $909\text{m}^3/\text{s}$  であるが、本手法により  $760\text{m}^3/\text{s}$  まで低減している。標準操作では流入量に対してほとんど放流量を低減できないが、本手法により最大流入量に対して 20%程度低減できた。事例 1 では流入量が洪水量に到達する前までに目標水位まで水位低下することに成功している。事例 1 の流入量ハイドログラフは 3 つの波から成り、1 つめと 2 つめの波を処理し、3 つめの波を処理している最中に貯水位が LWL+30.4m のサーチャージ水位に迫り、流入量と同量の放流を余儀なくされた。結果、下流河川の現況流下能力  $600\text{m}^3/\text{s}$  まで最大放流量を低減することはできないが、2016 年 8 月台風時の実績値  $777\text{m}^3/\text{s}$  を下回る結果となった。

次に事例 2 は、4 台風襲来時の 80%程度の総流入量となった事例である。最大流入量  $999\text{m}^3/\text{s}$  に対して標準操作で対応すると最大放流量は  $933\text{m}^3/\text{s}$  であるが、本手法により  $618\text{m}^3/\text{s}$  まで低減している。標準操作では流入量に対してほとんど放流量を低減できないが、本手法により最大流入量に対して 40%程度低減している。

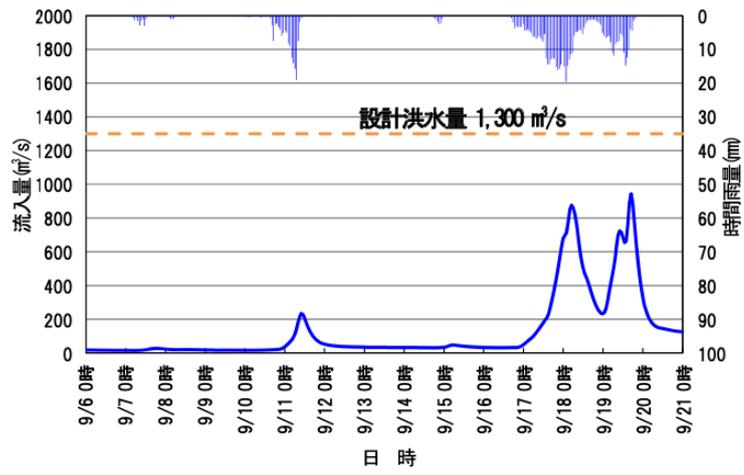
事例2においても、流入量が洪水量に到達する前までに目標水位まで水位低下することに成功した。事例2の流入量ハイドログラフは2つの波から成り、流入量と同量の放流を行う、いわゆる“但し書き操作”を実施することなく洪水を処理し、最大放流量を下流河川の現況流下能力と同程度まで低減することができた。

最後に、事例3は4台風襲来時の60%程度の総流入量である。最大流入量 $501\text{m}^3/\text{s}$ に対して標準操作での対応により最大放流量は $475\text{m}^3/\text{s}$ に低下している。これは、下流河川の現況流下能力を十分に下回っているので、本手法を適用するまでもなく標準操作で安全に放流を行うことができる事例である。

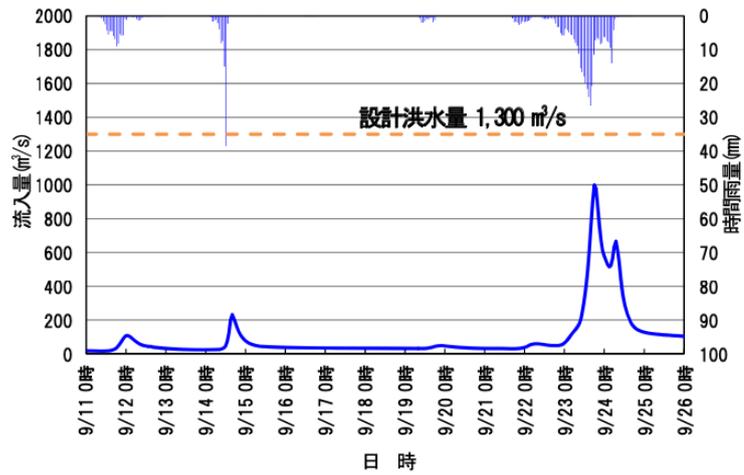
アンサンブル気候データの過去実験値を用いたダム放流シミュレーションにより糠平ダムにおける本手法の効果を検証した結果、気象予測が的中するとした条件付きではあるが、4台風襲来時と同等規模の出水に対しては、事前に水位低下可能であり、かつ放流量の低減効果が期待できる評価を得た。また、本手法開始の契機となった4台風襲来時の雨量およびダム流入量は、過去実験3,000年分の中で上位4位に相当する大規模なものであること、4台風襲来時を超える規模の出水に対しては、現況河道最小流下能力を超える流量を放流せざるを得ないことがわかった。

電源開発(株)は、河川管理者および流域利水者と締結した治水協定に基づく糠平ダムの事前放流についても、音更川流域連絡協議会(2011年12月発足。音更町、上士幌町、士幌町、河川管理者、釧路地方气象台、電源開発(株)で構成)で合意を得た本手法で協力している。

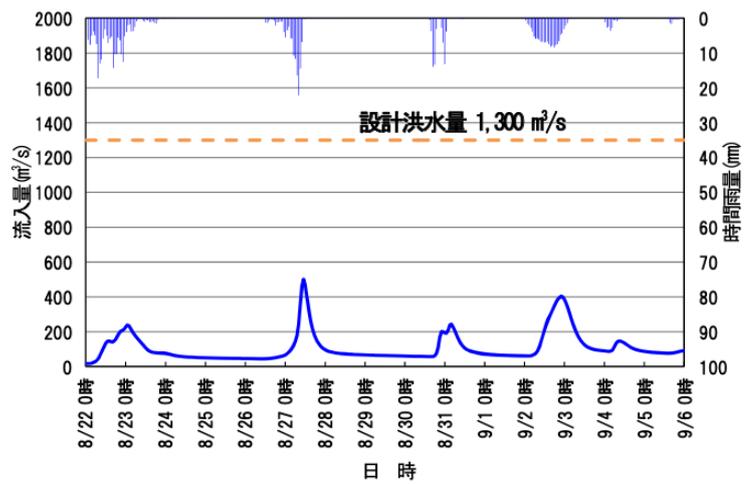
2016年の水害発生以降、河川管理者による河道整備が精力的に進められており、河川の流下能力は年々向上しているものの、実際の台風襲来時等の雨量やダム流入量、本手法の効果に係るデータの蓄積、分析による本手法の妥当性の検証を継続し、今後必要に応じて流域の状況も勘案した改良などについても提言を進めていく必要がある。



事例 1

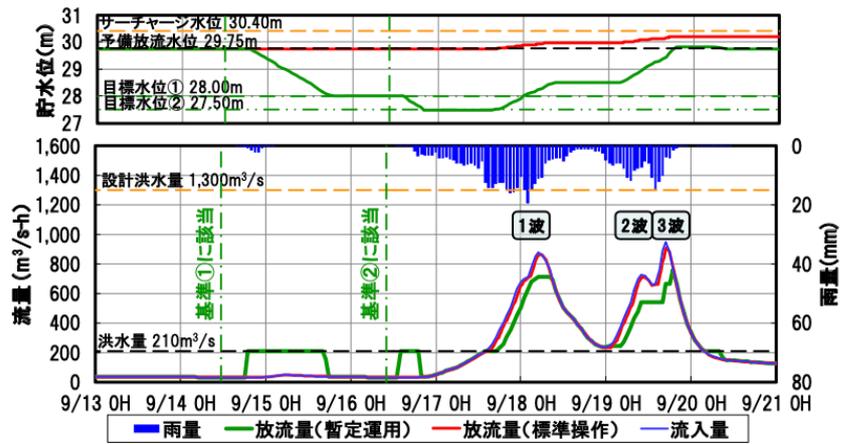


事例 2

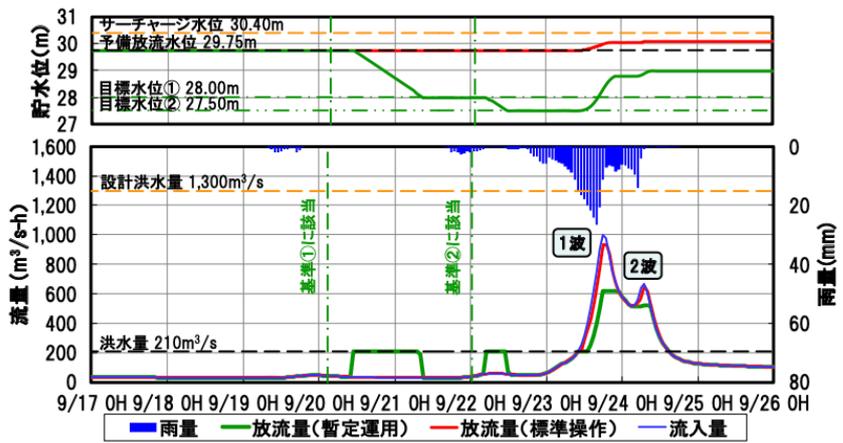


事例 3

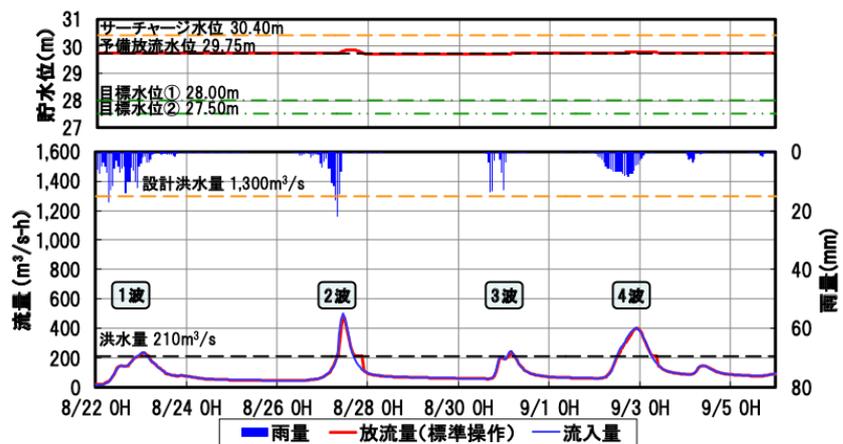
図 5.7-1 糠平ダム流入量の時系列変化.



事例 1



事例 2



事例 3

図 5.7-2 ダム操作シミュレーション結果.

## 参考文献

- 松本知士, 池田典之, 河田暢亮, 山田朋人, 中津川誠, 中北英一: d4PDF を活用した発電専用ダムによる洪水被害軽減運用手法の効果検証. 河川技術論文集, Vol. 27, pp. 637-642, 2021.
- 高倉秀幸, 河田暢亮, 中北英一, 中津川誠: 気象予測情報を適用した発電専用ダムにおける流域の洪水被害軽減運用手法の検討, 河川技術論文集, Vol. 23, 2018.
- 椎葉充晴, 立川康人, 市川温: 水文学・水工計画学, 京都大学学術出版会, 2013

## 5.8 まとめ

近年の記録的豪雨は、人命や社会資本に甚大な被害を発生させており、気候変動の影響に伴う激甚化も危惧されている。気候変動の影響を考慮する以前の治水計画は既往の豪雨を基準として外力の設定がなされており、大雨の経験の多寡に関わらず、いずれの地域でも外力の増大を踏まえた対策が洪水災害や農業被害を始めとした流域の総合的なリスクの軽減に不可欠となる。気候変動への適応策の策定のためには、これまでの降雨観測を経て蓄積されてきた知見と合わせ、最新の科学技術に基づく低頻度かつ極端な豪雨現象の予測を積極的に実行する必要がある。本章では、その研究の枠組みを紹介するとともに、関連する風水害分野におけるアンサンブル気候データの適用事例や可能性を提示した。気候変動を踏まえた洪水対策に向けて、「流域治水」の概念に基づく、流域が一体となって洪水から人命・資産を守る新たな治水の在り方が提言され、その実現に向けた法整備（流域治水関連法案）が実施された。今後は流域に関係する人々が共同し、どのように地域を洪水から守っていくのかを議論していく時代に移行しつつあり、その際、本稿で紹介したアンサンブル気候データを用いた最新の研究枠組み及び適用事例は流域関係者の意思決定に大いに資するものと考えられる。

本章では、豪雨に起因する総合的な被害リスクの評価手法を紹介した。当該の洪水リスク評価に上述したような関連の情報を組み込むことは、流域全体での総合的なリスクの推定に寄与し、気候変動を踏まえた今後の地域計画にも利活用できよう。さらに、少雨や高温などに関するリスクも同様の考え方に基づくことで評価可能であり、関連分野に影響する多角的なリスク評価に基づく適応策の検討が可能な状況となっている。今後、気候変動に伴って頻発化・激甚化が想定される風水害に対する個人、企業、行政のリスクを定量化し、防災行動を促進することで社会の行動変容の実現は気候変動に適応する強靱な社会を構築する上で必須である。著者はそうした防災行動の「ジブンゴト」化を実現するために、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）課題「スマート防災ネットワークの構築」サブ課題 B「リスク情報による防災行動の促進」を研究責任者として開始する予定である（引用（2023/8/20 確認）：<https://www.bosai.go.jp/info/news/2023/20230630.html>）。今後、同研究課題を通じて科学的な成果に立脚したリスク情報を国、自治体、企業、住民の目的別に示していくことで、各関係機関の主体的な取り組みおよび連携による効果的なリスクの低減を推し進めていく。

## 総論

本報告書では、近年の豪雨による水力発電設備への影響とそれに対する保守運用技術について、気候変動影響評価も含めながら広範にわたり調査した。1章では、台風、ゲリラ豪雨、および線状降水帯について最新の知見をレビューしながら近年の動向を網羅的に調査した。これにより、水力発電設備を取り巻く近年の豪雨状況について、降雨イベント別にその実情が明らかとなった。2章では、水力発電設備が豪雨により被災した近年の事例を調査した。被災の種類として大規模出水、貯水池段波、土石流、斜面崩壊(地すべり)等に分類した。それぞれの被災事例と、その時の豪雨の状況やその後の対策も含めて整理した。これらは、今後同様の災害が発生した場合に非常に有益な情報になりうる。加えて、海外の水力発電設備における豪雨による被災事例についても整理した。3章では、豪雨に対する水力発電設備を対象とした対策技術について、特に近年のものを中心に調査した。まず、豪雨に対する予防保全策として、経済産業省を中心とした会議体(自然災害WG)において実施された対策について整理した。加えて、それ以外に電力会社において独自に実施されてきた予防保全策についても整理した。これらの対策は、豪雨被害を予め軽減するための手段であり、かつ汎用性も高いことから、多くの地点で活用が期待できるものである。また、水力発電施設では堆砂が発生し、それに起因して出水時に災害が発生する場合がある。そのため、土砂管理の取り組みとして、水力発電施設で実施されてきた堆砂対策について網羅的に整理した。堆砂状況や地点の特性に応じた対策を参照できるようになっているため、堆砂対策を実施するための有益な情報となりうる。また、豪雨被害を軽減するためには降雨出水予測が対策のベースとなる場合が多いため、降雨出水予測技術についても網羅的に整理した。既存の予測手法のみならず、最新の予測手法や実際に利用されている予測システムについても紹介しているため、降雨出水予測を導入する上で有益な情報となりうる。4章では、異常豪雨の頻発化に伴い、近年ダムに期待される運用について調査した。まず、基本的な利水ダムの特徴と分類、運用方法について整理した。これらは水力発電事業者の実務に深くかかわるものであり、水力発電事業者がこれまで実施してきた対応を再確認することに役立つ。次に、近年の取り組みとして、事前放流、ダム再生、および弾力的運用についてそれぞれ調査した。事前放流は特に近年注目されている取り組みの一つであるため、その具体的な流れについて詳細に記載した。その一方、事前放流の実施判断は降雨予測により行われ、その予測精度が一つの課題になりうることも

確認した。ダム再生についてはその内容に加え、実際の事例も紹介しながら整理した。弾力的運用についてはイメージ図を参照しながらその内容について整理した。これら取り組みについては主に国土交通省主導のものであり、利水ダムに対する近年の国の動向について理解することに役立つ。5章では、豪雨・出水に関する気候変動影響評価について最新の研究を整理した。最近の豪雨・出水に関する気候変動影響評価については、アンサンブル予測を活用した気候変動予測結果に基づいて実施されることが明らかとなった。アンサンブル予測が活用されていることから、現在気候および将来気候に対して数千年分の気候が再現される状況になっており、それゆえこれまでよりも確度の高い予測が可能となっている。この気候変動予測結果を活用した事例も紹介されており、水力発電事業にとって有益な情報を提供している。以上が本報告書において取りまとめた内容の要約となる。

政府は 2050 年まで温室効果ガス排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを 2020 年 10 月に宣言した（経済産業省, 2021）。水力発電は二酸化炭素をほとんど排出しない再生可能エネルギーの 1 つであるため、カーボンニュートラルに貢献する重要な電源であると言える。続いて、2021 年は新型コロナウイルス感染症からの経済回復に伴ってエネルギー需要が急拡大する一方で、世界的な天候不順や災害、化石資源への構造的な投資不足、地政学的緊張等の複合的な要因によってエネルギー供給が世界的に拡大せず、エネルギーの需給がひっ迫し、2021 年後半以降、歴史的なエネルギー価格の高騰が生じた（経済産業省, 2022）。2022 年に入ると、2 月にはロシアがウクライナに侵略し、世界のエネルギー情勢は混迷を深め、エネルギー価格の上昇は一過性のものにとどまらない可能性が指摘されている（経済産業省, 2022）。これらのエネルギー価格の上昇を考慮すると、純国産の再生可能エネルギーである水力発電の役割は、より一層重要になっていると言える。以上より、水力発電の価値が今まで以上に高まっている状況にあるものの、本報告書で取りまとめたように、水力発電は近年の気候変動の影響に伴う豪雨の更なる激甚化が危惧される状況にあるとも言える。本報告書には豪雨被害軽減のための対策技術や運用技術を取りまとめているため、是非これら技術をこれからの水力発電のために役立ててもらうことに期待したい。

## 参考文献

経済産業省, 2021. 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略.

経済産業省 資源エネルギー庁, 2022. エネルギー白書 2022.

## おわりに

エネルギー委員会は、土木学会の約 30 ある学術研究関連の委員会の一つとして、長年、その時代の課題について主に電力分野での調査研究、アウトリーチ活動を行って来ました。近年の課題として、2018 年 9 月初旬の台風 21 号（近畿地方を縦断）、その直後の北海道胆振東部地震（我が国初の大規模停電が発生）、翌 2019 年 9 月上旬の台風 15 号（関東地方の送電設備に大被害）を踏まえ、大規模停電対策に注目しました。国、電気事業連合会、電力会社等での審議や取り組みの検討と並行して、エネルギー委員会の下に大規模停電に関する検討会を設置し、学会としての取り組みを検討しました。また台風・豪雨により多くの水力発電設備が被害を受けたことを踏まえ、水力発電設備の保守運用の必要性を課題として認識し、同委員会の新技術・エネルギー小委員会の下に新たな分科会を設置することとしました。他方で、国は、発電を含む利水目的のダムを治水目的として活用するという方針を打ち出し、関係省庁・自治体・ダム管理者の間の治水協定の締結が進み始めたことから、分科会の前に準備委員会を開き、学術的・専門的な立場からより慎重に検討することとしました。準備委員会及び分科会の活動は、新型コロナウイルス感染症による緊急事態宣言等が発出されたことから、委員間の意思疎通が円滑にできない、現場の課題の把握が実感できない等の影響を受けました。こうした経緯、状況の下、今般ようやく報告書をまとめられました。

主査として分科会をリードして頂いた豊田康嗣様、本報告書の執筆にご協力を頂きました幹事・委員の岸本秀真様、新井涼允様、川上洵様、委員の村田浩一様、和泉康平様、清野則和様、鈴木健様、新妻秀樹様、寺田義和様、三沢剛様、大坪祐介様、佐々木勝教様、清田雅樹様、山田朋人様に心より感謝申し上げます。また本分科会委員ではございませんが、株式会社 Dshift 取締役社長 角田恵様、電力中央研究所 杉本聡一郎様および佐藤隆宏様にもご執筆賜りましたこと、深く感謝申し上げます。加えて、電気事業連合会 尾林孝平様にはオブザーバーとして参加していただき貴重なご助言いただきましたこと、深く感謝申し上げます。

国土交通省水管理・国土保全局河川計画課河川計画調整室長 石川博基様、河川環境課流水管理室企画専門官 田中里佳様、大阪大学大学院工学研究科 牛尾知雄教授、北海道大学大学院工学科研究院 山田朋人教授（本分科会委員）、一般社団法人電力土木技術協会特任技師長 高島賢二様には、分科会でのご講演とともに貴重なご意見を賜り、心より感謝を申し上げます。

更に、北海道電力(株) 水力部土木グループリーダー白川部秀基様、 藻岩リプレイス工事建設所長角谷英一郎様、屋久島電工(株) 発電事業部事業部長 長野政章様、発電事業部管理課係長高田知幸様には、当分科会の現場視察にご協力頂き、深く感謝申し上げます。

激甚化する水害の警鐘が鳴らされて久しい昨今、CO<sub>2</sub>をほぼ排出しないクリーンエネルギー源である水力発電を最大限活用しながら、治水にも活用できるようにするためにも、発電施設・設備の保守運用のレベルを一層高めることは、地味な取り組みであるけれども国民生活と経済活動を守るために不可欠な取り組みです。このような認識が、実務者だけでなく国民全体に広がることを祈念して、本報告書の締めとします。

2024年8月  
公益社団法人 土木学会  
エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会  
委員長 山田安秀