

ダム貯水池における沈木動態と
洪水吐きのリスク管理に関する研究

2023 年

高田 翔也

目次

1章 序論	1
1.1 概説	1
1.1.1 ダムの洪水調節機能と洪水吐きの役割	1
1.1.2 近年の洪水吐きの機能低下事例	4
1.2 本研究の目的	7
1.3 本研究の構成	8
2章 ゲート操作不能事例およびダム貯水池堆砂・流木管理に関する既往研究	10
2.1 概説	10
2.2 常用洪水吐きのゲート操作不能事例	11
2.2.1 検討対象ダムおよびゲート操作不能時の経緯	11
2.2.2 ゲート操作不能時の想定されるリスクシナリオ	14
2.3 ダム貯水池堆砂の課題および管理の現状	18
2.3.1 ダム貯水池堆砂の課題概要	18
2.3.2 常用洪水吐き近傍の流れおよび土砂動態に関する既往研究	21
2.3.3 ダム貯水池堆砂管理の現状	25
2.4 ダム貯水池流木の課題および管理の現状	29
2.4.1 ダム貯水池流木の課題概要	29
2.4.2 ダム貯水池流木管理の現状	31
2.4.3 ダム貯水池沈木に関する既往研究	31
2.4.4 ダム貯水池流木管理における海外事例	33
2.5 常用洪水吐きのゲートの設計および現状	36
2.5.1 高圧ゲートの技術変遷と設計基準	36
2.5.2 主な高圧ゲート形式および水密方式の概要	36
2.5.3 常用洪水吐きの設置状況と計画堆砂位の関係	40
2.5.4 土砂通過を想定したゲート形式の例	41
2.6 ダム水理構造物の点検体制と安全管理	44
2.6.1 国内のダム点検体制と安全管理	44
2.6.2 海外における洪水吐きの安全性に係る設計基準例	46
2.7 結語	48
3章 ダム貯水池における堆砂進行および沈木動態	52
3.1 概説	52
3.2 堆砂進行に伴う沈木によるダム貯水池管理上の課題	53
3.2.1 ダム貯水池の流木管理に関するアンケート調査の概要	53

3.2.2	アンケート調査結果および考察	53
3.3	ダム貯水池における沈木探査	59
3.3.1	沈木の探査方法	59
3.3.2	ダム貯水池における沈木探査の概要	61
3.3.3	沈木の探査結果および考察	62
3.3.4	貯水池全体における堆砂進行と沈木分布状況	64
3.4	沈木発生過程に関する室内実験	67
3.4.1	密度変化過程に関する室内実験の概要	67
3.4.2	室内実験の結果および考察	73
3.5	ダム貯水池における沈木管理方法の検討	77
3.6	結語	79
4章	常用洪水吐き近傍の流れおよび堆砂形状の分析	81
4.1	概説	81
4.2	常用洪水吐き近傍の堆砂形状に関する分析	82
4.2.1	H30 裾花ダムの常用洪水吐き近傍の堆砂形状	82
4.2.2	常用洪水吐き近傍堆砂形状の経年変化	83
4.2.3	運用実績と堆砂形状変化の関係	86
4.3	堆砂接近時の常用洪水吐き近傍の流況把握	89
4.3.1	水理模型実験の概要	89
4.3.2	実験結果および考察	92
4.4	結語	99
5章	土砂および沈木に対するゲートの構造的リスク分析	100
5.1	概説	100
5.2	土砂および沈木に起因する高圧ローラゲートのフォルトツリー分析	101
5.3	裾花ダムにおけるゲート操作不能要因の推定	103
5.3.1	裾花ダムのゲート操作不能過程および復旧過程	103
5.3.2	フォルトツリー分析に基づくゲート操作不能要因の特定	104
5.3.3	堆砂荷重の作用および水密部の異物噛み込みに関する検討	104
5.3.4	堆泥を固形物として検討した開閉荷重による検討	105
5.4	ゲート近傍堆砂位とシリンダ推力の余裕率に基づく他ダムのリスク検討	107
5.5	結語	109
6章	常用洪水吐きの機能低下に対するリスク管理手法の提案	111
6.1	概説	111
6.2	ゲート機能低下のリスクが高いダムの抽出	112
6.2.1	抽出方法の概要	112
6.2.2	抽出結果および考察	112

6.3	洪水吐き機能低下に伴う洪水調節機能への影響に関する一検討.....	115
6.3.1	検討方法.....	115
6.3.2	検討結果および考察.....	115
6.4	堆砂進行下における常用洪水吐きの機能低下に対するリスク管理手法の検討...120	
6.4.1	常用洪水吐きの機能低下シナリオの課題全容と検討状況.....	120
6.4.2	常用洪水吐きの持続的な機能発揮に向けたリスク管理フローの検討.....	123
6.5	結語.....	127
7章	結論.....	128
7.1	各章の研究成果.....	128
7.2	今後の展望.....	129
	謝辞.....	132

図目次

図 1-1	洪水調節における流入量, 貯水位, 放流量の変化 (文献 ²⁾ より引用)	2
図 1-2	洪水調節における貯水位と放流量の関係 (文献 ²⁾ より引用)	2
図 1-3	必要放流能力と対応する放流設備 (一定率・一定量方式の場合)	3
図 1-4	Oroville dam の常用洪水吐きの損壊 (上: 初期損傷箇所, 下: 最終的な損傷状況) (文献 ^{3,4)} より引用)	5
図 1-5	閉塞した裾花ダムのコンジットゲート (文献 ⁵⁾ より引用)	6
図 1-6	厚真ダムの洪水吐きの損傷 (上: 被災直後空撮, 下: 洪水吐き左岸側壁欠損) (文献 ⁶⁾ より引用)	6
図 1-7	本研究の構成	9
図 2-1	裾花川流域図	12
図 2-2	裾花ダムの全景	12
図 2-3	計画高水流量配分図 (文献 ¹⁾ より引用)	13
図 2-4	貯水池運用状況 (文献 ¹⁾ より引用)	13
図 2-5	裾花ダム最深河床高の推移 (文献 ¹⁾ より引用)	14
図 2-6	想定されるゲート操作不能のシナリオ	15
図 2-7	裾花ダム直下流減勢工内	15
図 2-8	減勢工内沈木調査状況 (その1)	16
図 2-9	減勢工内沈木調査状況 (その2)	16
図 2-10	減勢工内沈木調査状況 (その3)	17
図 2-11	典型的なダムの堆砂性状 (大矢らの図を一部改変) ²⁾	19
図 2-12	ダム貯水池堆砂に伴う主な課題 (大矢らの図を一部改変) ²⁾	20
図 2-13	Jiroft Dam (左: 放流状況 (文献 ¹¹⁾ より引用), 右: 放流開始時 (文献 ¹⁴⁾ より引用))	22
図 2-14	Cherry Creek dam (左: 取水塔概観, 右: フラッシュ後の洗掘形状) (文献 ¹⁴⁾ より引用)	22
図 2-15	Flushing Cone に関する無次元パラメータ (文献 ¹³⁾ より引用)	23
図 2-16	評価区分 (A,B,C) に応じた対策内容の概念図 (ダム貯水池堆砂対策の手引き ¹⁷⁾ より引用)	27
図 2-17	主な堆砂対策 (国土交通省HP ¹⁹⁾ より引用)	27
図 2-18	堆砂対策工法概略選定図 (ダム貯水池堆砂対策の手引き ¹⁷⁾ より引用)	28
図 2-19	平成 15 年 8 月の二風谷ダムにおける流木発生状況 (上: 全体, 下: 堤体近傍) ²⁵⁾	30
図 2-20	矢作ダムにおけるダム年最大流入量とダム貯水池流入流木量の関係	30
図 2-21	ダム洪水吐きにおける流木または浮遊物によるハザードアセスメントの概要	

(文献 ³²⁾ より引用)	34
図 2-22 自由越流式のダム洪水吐き構造 ((a)模式図, (b)Palagnedra dam の越流部) (文献 ³²⁾ より引用)	34
図 2-23 Palagnedra dam (スイス) の洪水吐き閉塞 (上:被災時, 下:改修後) (文献 ³²⁾ より引用)	35
図 2-24 Thurnberg reservoir (オーストリア) の洪水吐き流木対策 (文献 ³²⁾ より引用)	35
図 2-25 高圧ラジアルゲートの例 (弥栄ダムの例) (文献 ³⁴⁾ より引用)	38
図 2-26 高圧ローラゲートの例 (青蓮寺ダムの例) (文献 ³⁴⁾ より引用)	38
図 2-27 高圧スライドゲートの例 (十勝ダムの例) (文献 ³⁴⁾ より引用)	39
図 2-28 高圧ローラゲート一覧 (文献 ³⁴⁾ より引用)	39
図 2-29 ダム縦断図と各種計画水位およびコンジットゲート設置諸量 (文献 ³⁶⁾ より引用)	41
図 2-30 計画堆砂位から放流管設置標高までの高さ (文献 ³⁶⁾ より引用)	41
図 2-31 宇奈月ダムの排砂設備の鳥観図 (文献 ³⁹⁾ より引用)	42
図 2-32 宇奈月ダムの排砂設備の排砂操作フロー (文献 ³⁹⁾ より引用)	43
図 2-33 補修実績累計 (堤体および洪水吐き) (文献 ⁴⁰⁾ より引用, 一部改変)	46
図 2-34 効率的な維持管理の考え方 (文献 ⁴¹⁾ より引用)	46
図 3-1 沈木を発見したダムとその長さの内訳	54
図 3-2 沈木によるダム貯水池管理上の支障事例	55
図 3-3 通年規模の流入流木の回収頻度	56
図 3-4 流木の主な回収場所 (主な順に 3 箇所)	56
図 3-5 ダム貯水池内の網場の設置状況	56
図 3-6 大規模な流木の流入時の全回収期間	57
図 3-7 大規模な流木の流入時の現場感覚における沈降割合	57
図 3-8 常用洪水吐き周辺のイメージ図	58
図 3-9 堆砂位に対する呑口敷高のクリアランス	58
図 3-10 MBES 測量による測量点取得イメージ	59
図 3-11 MBES のデータ解析フロー図(文献 ¹⁾ より一部改変)	60
図 3-12 堆砂面上の沈積物に対する取得点群データのイメージ	60
図 3-13 測量状況の概要	61
図 3-14 水深と計測測点間隔の関係	61
図 3-15 裾花ダム上流に設けられた網場	62
図 3-16 網場周辺における MBES 測量結果	63
図 3-17 個別抽出された沈木(a)	63
図 3-18 個別抽出された沈木(b)	64

図 3-19	個別抽出された沈木(c).....	64
図 3-20	貯水池全体の MBES 測量結果(上)と沈木と思われる物体の分布(下).....	65
図 3-21	沈木長の統計量とヒストグラム (文献 ²⁾ の図を引用)	66
図 3-22	(a) ダム湖の主軸に対する沈木の角度の分布, (b) 沈木の縦横比の分布 (文献 ²⁾ の図を引用)	66
図 3-23	実験および計測状況 (中央:質量, 右:体積)	68
図 3-24	裾花ダム流木捕捉状況(2020年7月).....	69
図 3-25	裾花ダムで回収した流木	69
図 3-26	裾花ダム上流域の立木採取場所の例	70
図 3-27	裾花ダム上流域で採取した立木	70
図 3-28	小渋ダムにおける陸揚げ流木回収状況	71
図 3-29	小渋ダム回収流木	72
図 3-30	流木および立木の初期密度分布	74
図 3-31	裾花ダム流木の密度変化 (全サンプル)	74
図 3-32	裾花ダム流域内立木の密度変化 (全サンプル)	75
図 3-33	小渋ダム流木の密度変化 (全サンプル)	75
図 3-34	沈降実験状況	76
図 3-35	裾花ダム立木樹種(科)別の密度変化.....	76
図 3-36	ダム貯水池における沈木管理の要点	78
図 4-1	裾花ダムゲート近傍の H30 測量結果.....	82
図 4-2	1号ゲート呑口周辺の堆砂縦断形状の推移.....	84
図 4-3	2号ゲート呑口周辺の堆砂縦断形状の推移.....	84
図 4-4	2号ゲート呑口周辺の堆砂縦断形状の河床勾配の推移.....	84
図 4-5	Flushing Cone の形状パラメータ	85
図 4-6	FC 体積と長さおよび高さの関係.....	85
図 4-7	裾花ダムにおける運用履歴と検討対象洪水および計測時期.....	87
図 4-8	FC の体積(V_{FC})と最大放流量の関係.....	88
図 4-9	抽出模型形状および PIV 流速計測範囲	89
図 4-10	抽出模型写真 (上:堆砂無し基本形状, 中:傾斜形状, 下:浚渫形状)	90
図 4-11	裾花ダム洪水調節計画図 (文献 ¹⁾ より引用)	91
図 4-12	流況確認結果 (予備検討, 堆砂無し)	93
図 4-13	流況確認結果 (Case1-1)	94
図 4-14	流況確認結果 (Case1-2)	94
図 4-15	流況確認結果 (Case1-3)	95
図 4-16	流速分布(Case1-1).....	95
図 4-17	流速分布(Case1-2).....	96

図 4-18	底面近傍流速の比較	96
図 4-19	流況確認結果 (Case2)	97
図 4-20	流速分布(Case2).....	97
図 4-21	流況確認結果 (Case3)	98
図 4-22	流速分布(Case3).....	98
図 5-1	ゲートの操作不能に至る要因	101
図 5-2	土砂・沈木による高圧ローラゲート操作不能に関する FTA	102
図 5-3	土砂・沈木によるゲート操作リスク事象のイメージ.....	102
図 5-4	復旧時の放流管内の堆泥状況	106
図 5-5	泥圧による作用荷重(上)および堆泥を固形物とした作用荷重 (下)	106
図 5-6	操作不能時－復旧時の開閉荷重とシリンダ推力比較 (荷重内訳)	107
図 5-7	シリンダ推力の余裕率とクリアランス	108
図 6-1	ゲート門数および所管別の内訳	113
図 6-2	堆砂率とゲート設計水深の関係	114
図 6-3	堆砂率とクリアランスの関係	114
図 6-4	「n - 1」条件下での洪水調節計算結果(放流量維持).....	117
図 6-5	「n - 1」条件下での洪水調節計算結果(貯水位維持).....	117
図 6-6	「n - 2」条件下での洪水調節計算結果(貯水位維持).....	118
図 6-7	洪水調節計算結果と各条件下での最大放流量	119
図 6-8	常用洪水吐きの操作不能シナリオにおける諸現象と本研究の検討課題および 今後の検討課題.....	122
図 6-9	土砂・沈木による常用洪水吐きの機能低下に対するリスク管理手法の提案....	126

表目次

表 2-1	貯水池堆砂形状の分類 ⁴⁾	20
表 2-2	Flushing Cone の長さおよび規模に関する実験公式 (文献 ¹³⁾ より引用)	24
表 2-3	評価指標と管理水準 (ダム貯水池堆砂対策の手引き ¹⁸⁾ より引用)	26
表 2-4	評価指標と残余年数の算定方法 (ダム貯水池堆砂対策の手引き ¹⁸⁾ より引用)	26
表 2-5	代表的な木の比重 ²⁹⁾	32
表 2-6	ダムの機能と構成要素(工種)管理レベルとの関係例(コンクリートダムの場合) (文献 ⁴⁰⁾ より引用)	45
表 2-7	構成要素(細別)の管理レベルと健全度区分の組み合わせに基づく保全対策の基 本的考え方	45
表 2-8	「n-1 rule」の適用範囲.....	47
表 3-1	沈木等による貯水池管理上の支障事例数	54
表 3-2	沈木 (堆砂含む) による課題とその対応	54
表 3-3	計測スケジュール	68
表 3-4	裾花ダム流木・立木および小渋ダム流木の樹種(科, 属)一覧	71
表 3-5	流木および立木の平均密度と変化倍率	75
表 4-1	分析対象とした出水とゲート操作	88
表 4-2	実験条件	91
表 5-1	ゲート操作不能時から復旧までの経緯	103
表 6-1	2門以下のコンジットゲートの形式内訳.....	113
表 6-2	各条件下での放流量の比較表	118

1章 序論

1.1 概説

1.1.1 ダムの洪水調節機能と洪水吐きの役割

ダムは、時代の変遷に応じて、農業用水の供給、水道・工業用水の供給、発電、洪水調節といった目的に適う技術開発を経て進化してきている。農業用水については、狭山湖、満濃池など、水道用水では、布引貯水池、発電では、佐久間ダム、黒部ダム、などが一般によく知られる。そして、戦後完成した洪水調節を目的とする多目的ダムとしては、厚東川ダム(1949 竣工)を初めとし、現在 560 基程度に上る。洪水調節を目的とするダムでは、複数の目的を一つのダムに持たせた多目的ダムとして建設された事例が多い。

洪水調節とは、ダム築造により生まれる貯水池の容量を用い、流入量に対して少ない放流量とする、洪水ハイドログラフの波形変換を行うことである。その際、どれくらいの流入量を想定し、放流するか、は上位計画である河川整備基本方針または河川整備計画において定められ、流入量と放流量の差分の時間積分値が計画される洪水調節容量となる。我が国のダム貯水池は、貯水容量が海外等と比べると小さく、流入量をすべて貯めこむことは不可能なため、洪水調節容量を十分に確保するためには利用水深を大きくすることが必要である。また、洪水調節容量を効果的に利用するためには、洪水調節開始水位までは流入量を放流することで容量を失わないようにする必要がある¹⁾。つまり、ダムによる洪水調節を理解する上で重要なことは、ダムの放流能力が重要な役目を担っているということである。

ダムの放流は、放流設備によって行われる。放流設備は、①洪水処理、②発電・水道・工業用水の利水補給、③河川の正常流量の放流、④緊急時の水位低下といった目的別に設置される²⁾。①洪水処理について、計画規模以下の洪水処理は主に常用洪水吐きによって担われる。常用洪水吐きは、計画された波形変換処理のための放流を確実に実施するため、洪水調節計画における貯水位と必要放流能力の関係を包絡した機能を発揮できるよう配置される必要がある。また、近年は事前放流の実施例が増加しており、なるべく洪水が到達する前、すなわち貯水位が低い段階での放流能力が求められつつある。一方、計画規模以上の洪水処理には非常用洪水吐きが主に対応し、ダムの安全性確保のため、いわゆる緊急放流と呼ばれる異常洪水時防災操作により、ダム地点で工学上想定しうる最大の流入量を放流できる放流設備として配置される。

以上について、洪水調節方式の違いによる流入量、貯水位、放流量の関係を図 1-1 および図 1-2 に示す²⁾。ここで、図 1-2 中の実線は、洪水調節計画に対応するためにダムの洪水吐きに求められる必要放流能力を示している。さらに、その洪水調節計画のための必要放流能力とダム安全確保のための放流能力に対応する放流設備は図 1-3 に示すとおりである。

このように、ダムの洪水吐きは、目的に応じた貯水位—放流量条件を満たすよう配置計画がなされており、その機能は、ダム貯水池機能そのものを担保している。

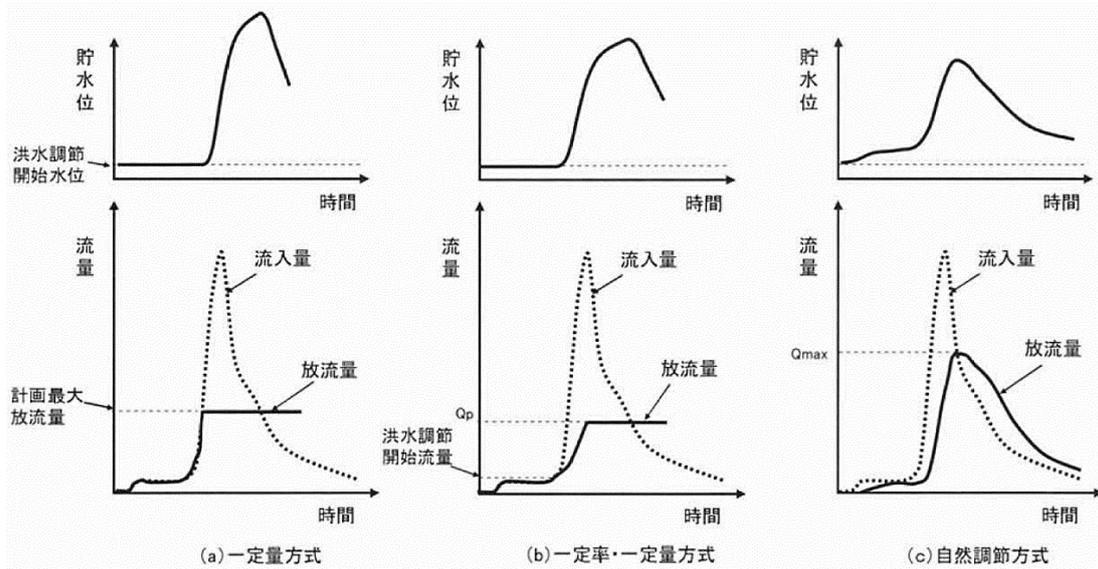


図 1-1 洪水調節における流入量、貯水位、放流量の変化 (文献²⁾より引用)

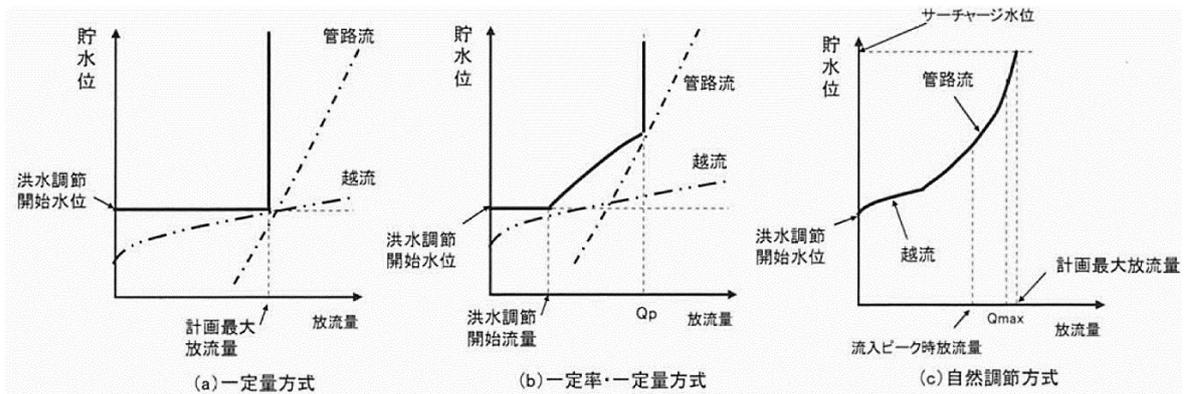


図 1-2 洪水調節における貯水位と放流量の関係 (文献²⁾より引用)

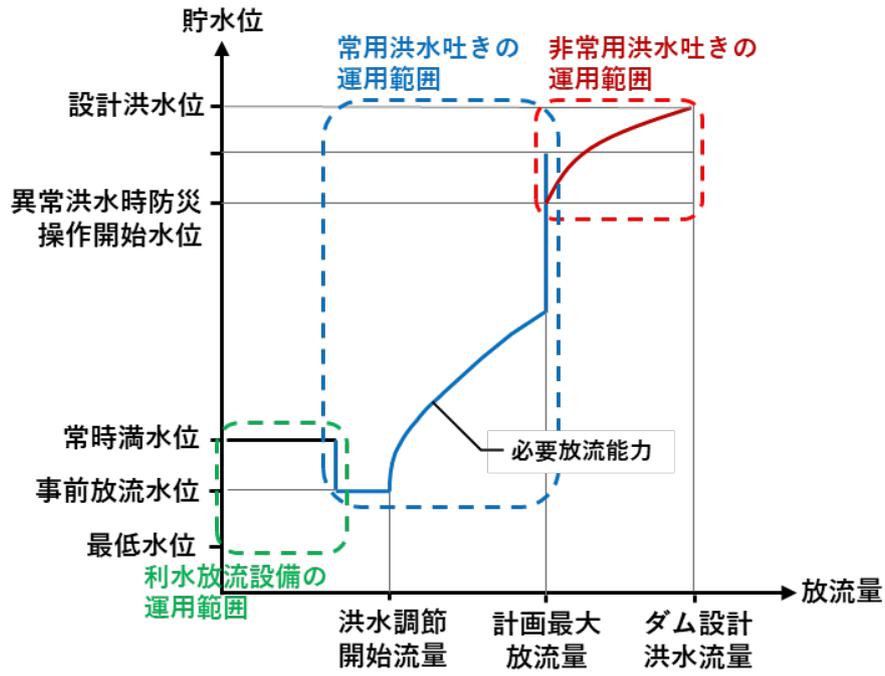


図 1-3 必要放流能力と対応する放流設備（一定率・一定量方式の場合）

1.1.2 近年の洪水吐きの機能低下事例

近年、国内外でダムの高経年化や堆砂進行等に伴う洪水吐きの機能低下事例が複数確認されている。前節で示したとおり、ダムの洪水吐きは、ダムの洪水調節機能および水理的安全性を担保するものであり、その機能低下は下流域に対する重大リスクの発生を意味することとなる。

(1) 米国 Oroville Dam の事例

米国カリフォルニア州の Oroville dam では、2017年2月に洪水調節中の常用洪水吐きのシュート部が損壊し、非常用洪水吐きも安全な放流ができなかったために、ダム下流への放流量が急増する懸念生じ、多くの下流住民が一時避難する事態となった(図 1-4)³⁾。加えて、ダム堤体材料の流出に伴う堰上げによるダム直下の水力発電所の冠水被害があり、また、避難指示発令時には下流部のハッチェリーにおいて魚の避難等も行われた。このダムは、米国で最も高い堤高 234m のアースフィルダムであり、主ダムの堤体部分には損傷がなかったものの、常用洪水吐きの損傷及び運用以降初めて用いられた非常用洪水吐きの機能不全により確実な放流機能が失われ、ダム安全上の危機をもたらしている。なお、詳細な事故および対応の経緯は第三者の委員会によって報告されている⁴⁾。

(2) 長野県裾花ダムの事例

2017年8月に長野県の裾花ダムにおいて、洪水調節中の2門の常用洪水吐き(コンジットゲート)のうち1門がおよそ4ヶ月間開閉不能となり、常用洪水吐き1門のみでの洪水調節が行われる事態が生じている(図 1-5)⁵⁾。ゲートが操作不能となった原因として、堆砂が常用洪水吐きの設置高さまで進行し、ゲート開操作時に流出した土砂と流木がゲート開口部を閉塞させたことが考えられる。最終的には、ゲートの直上流部における堆砂を掘削し、予備ゲートを閉じることで、ゲートが開閉可能となり、堆砂及び沈木を除去するに至った。

(3) その他の事例

北海道の厚真ダムでは、2018年の北海道胆振東部地震により堤体周辺の法面崩落が生じた。その際、左岸側に設けられた洪水吐きに土砂および流木が流入し、シュート部を一部閉塞するとともに、シュート部左岸側壁が欠損し、洪水吐き機能低下が生じている(図 1-6)。その後迅速な復旧活動により、貯水位の低下および洪水吐き内の土砂撤去および補修が進められている⁶⁾。

また、北海道の二風谷ダムにおいては、2003年台風10号洪水時7門中1門のオリフィスゲートが保守点検のため使用できない状態で洪水調節を行った事例がある⁷⁾。ゲートの保守点検や更新等に伴い、ゲートが一時的に使用不可となることもゲートの機能低下として考えられる。その他、貯水池に流入した流木により、ゲートを引き上げるワイヤロープと

シーブに流木が干渉することでゲート操作が不能となった事例もある⁵⁾。



図 1-4 Oroville dam の常用洪水吐きの損壊（上：初期損傷箇所，下：最終的な損傷状況）（文献³⁾⁴⁾より引用）



図 1-5 閉塞した裾花ダムのコンジットゲート（文献⁹より引用）



図 1-6 厚真ダムの洪水吐きの損傷（上：被災直後空撮，下：洪水吐き左岸側壁欠損）（文献⁹より引用）

1.2 本研究の目的

近年の洪水吐きの機能低下事例は、ダム貯水池の機能と安全性に重大な影響を及ぼしている。ダム洪水吐きの機能低下をもたらす要因は様々であり、あらゆるリスクシナリオを把握、分析したうえで、その評価に基づく予防保全的対策を講じていくことが肝要と考えられる。

その中で、長野県の裾花ダムにおいて生じたゲート操作不能事例は、常用洪水吐きの呑口敷高までの堆砂進行および堆砂面に沈木が存在したこと、土砂および沈木の流下に対してゲートが十分に対応できなかったこと、に起因している。同事例は、貯水池堆砂が著しく進行したダムまたは今後の堆砂進行が懸念されるダムにおいても、共通の新たなダム貯水池管理の課題といえ、今後他ダムも含めた再発防止等が求められる。さらに、貯水池における沈木は、これまで着目されていなかった観点であり、堆砂との複合作用によって顕在化してきた新たなリスク要因である。

以上を踏まえ、本研究では長野県の裾花ダムのゲート操作不能事例を参考に、他ダムも含めた同リスクシナリオの再発防止のためのリスク管理手法の提案に向けて、以下の項目を明らかにする。

- ゲート操作不能事例におけるリスクシナリオを特定し、再発防止に向けて解決すべき課題の抽出を行う。
- ゲート操作不能にいたった主なリスク要因である堆砂および沈木について、貯水池内および常用洪水吐き周辺における動態を調査し、ゲートへ至る現象過程を解明する。特に、沈木についてはダム貯水池管理における新たな課題として、その課題の全容把握およびモニタリング手法構築を行う。
- 土砂および沈木に起因するゲートの構造的な操作不能要因を明らかにし、裾花ダムにおけるゲート操作不能シナリオを解明する。
- 以上の常用洪水吐きの機能低下シナリオに係る現象解明およびゲートの機能低下がもたらす洪水調節への影響評価を踏まえ、堆砂進行が著しいダムにおける常用洪水吐きのリスク管理手法を提案する。

1.3 本研究の構成

本研究では、図 1-7 に示す構成にて検討を進める。

第 1 章は序論であり、本研究の背景として、ダムの洪水調節機能とダム水理構造物の概説、近年の洪水吐き損壊事例として裾花ダムのゲート操作不能事例等を紹介するとともに、本論文の主な目的、構成について述べる。

第 2 章では、第 1 章で述べた裾花ダムゲート操作不能事例の詳細と、ダム貯水池堆砂および流木に関する既往知見と管理の現状について、主に既往文献を参照してまとめ、さらに、今回対象とするリスクシナリオについて検討すべき観点について示す。

第 3 章および**第 4 章**からは、ゲート操作不能事例の外力側条件となる、貯水池堆砂、沈木について、現象解明に向けた検討を行う。**第 3 章**では、ダム貯水池における堆砂進行および沈木動態とその探査について検討した内容を示す。ここでは、貯水池における沈木動態の把握を主な目的とし、その探査方法、沈木発生過程に関する検討結果について述べる。

第 4 章では、より局所的な領域を対象として、常用洪水吐き近傍の流れおよび土砂動態に関する分析を行う。ここでは、裾花ダムにおける現地調査結果をもとに、ゲートの操作運用と堆砂形状の変化の関係性を分析するとともに、沈木の駆動力となる常用洪水吐き近傍の流れを対象に水理模型実験により検討を行った結果を示す。

第 5 章は、土砂および沈木に対するゲートの構造的リスク評価についての検討を行う。ここでは、特に裾花ダムのゲート形式である高圧ローラゲートに対し、土砂および沈木の外力が作用した場合の操作不能に至る要因分析を行うとともに、裾花ダムにおけるゲート操作不能シナリオを定量的に示す。

第 6 章では、ゲート操作不能事例を受けて、他ダムを含めた高リスクダムの抽出方法と、ゲート操作不能時の洪水調節および下流への影響評価について検討を行うとともに、前章までのリスク分析の結果を総括し、今後の常用洪水吐きのリスク管理フローと貯水池堆砂・流木・沈木管理およびゲート構造における具体的な方針および対策を示す。

第 7 章は、前章までの検討結果を振り返り、改めて総括した結論を示すとともに今後の課題を述べる。

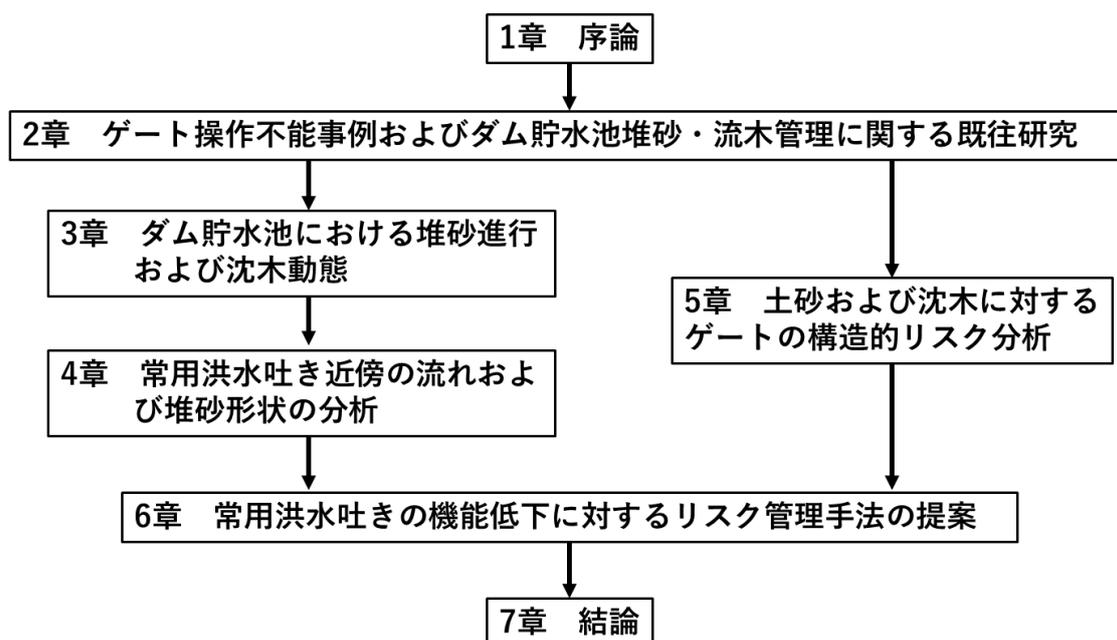


図 1-7 本研究の構成

参考文献

- 1) 藤本成, 高須修二: わが国における洪水調節用高圧放流設備—その歴史を中心として—, 大ダム No.92, pp.66-78, 1980.
- 2) 柏井条介: ダムの水理設計, 一般財団法人ダム技術センター, 2018.
- 3) 松本徳久; ICOLD をめぐる動き(第 38 報)—オロビルダムの洪水吐きの事故—. 大ダム (239), 1-4, 2017.
- 4) John Trojanowski, Stephen Rigbey, John France, Henry T. Falvey, Peter A. Dickson, Irfan A. Alvi: Independent Forensic Team Report, Oroville Dam Spillway Incident, 2018.
- 5) 国土交通省水管理・保全局河川環境課; ダム貯水池流木対策の手引き(案), 2018.
- 6) 北島悠, 岩田徳雄, 星崎友宏: 胆振東部地震における厚真ダムの被災状況と復旧内容, 第 63 回 (2019 年度) 北海道開発技術研究発表会発表論文集
- 7) 中村興一, 藤間聡: 2003 年台風 10 号洪水時での二風谷ダム効果の検証, 水文・水資源学会誌, 第 18 巻, No.1, 2005.

2章 ゲート操作不能事例およびダム貯水池堆砂・流木管理に関する既往研究

2.1 概説

第1章では、ダムの役割、特に洪水調節における洪水吐きに対する要求性能と、近年その機能低下があった事例について示すとともに、洪水吐きの機能低下がもたらす下流域への重大な影響について述べた。また、本研究で特に対象とする裾花ダムのゲート操作不能事例と、同リスクシナリオに対して、本研究で明らかにしていくべき課題を示した。

第2章では、特に裾花ダムのゲート操作不能事例の詳細について示すとともに、そのリスク要因であるダム貯水池堆砂・流木・沈木に関する既往研究を概観し、裾花ダムにおけるゲート操作不能のリスクシナリオを論ずるに検討不足な点を提示する。

また、リスク要因の影響を受けるダムの常用洪水吐きゲートについて、そもそもどのような設計思想および洪水吐き配置条件のもとに、どのような外力を見込んで設計されたか、を既存の技術基準を参照しながら論点整理を行う。加えて、既に排砂ゲート等と呼称され、土砂・流木・沈木を通過することを前提としてダム底部に設けられたゲートにおいては、どのような設計がなされているかの整理を行い、裾花ダムのゲート操作不能事例についてゲート側の観点からも、現状の分析・課題整理を行う。

さらに、常用洪水吐きの機能低下に対し、現行の技術基準、管理指針について整理し、現行の洪水吐きのリスク管理に関するレビューを行った。

2.2 常用洪水吐きのゲート操作不能事例

本研究における洪水吐きのリスク管理に関する主な研究対象である裾花ダムについて、概要およびゲート操作不能が生じた際の経緯、想定されるリスクシナリオ等を以下に示す。

2.2.1 検討対象ダムおよびゲート操作不能時の経緯

裾花ダムは¹⁾、流域面積 280km²、流路延長約 50km の一級河川裾花川下流に建設された長野県管理のダムである（図 2-1、図 2-2）。県営ダムとして初めての多目的ダムで、洪水調節の他に上水道・発電用水の供給を目的として、昭和 44 年に完成し、運用開始後 50 年以上経過している。大きな集水面積を有し、長野県長野市の市街地西部を南流することから、治水上非常に重要なダムであり、ダム地点における計画高水流量 1180m³/s のうち 660m³/s を貯留し、520m³/s の計画最大放流量とし、洪水調節容量 10,000 千 m³ を有している。堤高 83m のアーチ式コンクリートダムで、放流設備として、常用洪水吐き（ローラゲート）2 門（左岸側：1 号ゲート，右岸側 2 号ゲート，設置標高は同じ）と非常用洪水吐き（ラジアルゲート）3 門，灌漑用放流設備を 1 条有している。また，裾花ダムの上流には，昭和 54 年に完成した奥裾花ダムがあり，洪水調節および発電，上水道供給が行われている。それら両ダムを併せ，裾花ダム下流の妻科基準点での流量を 600m³/s まで低減させる計画となっている（図 2-3）。

2017 年 8 月に裾花ダムでは¹⁾、洪水調節中に常用洪水吐き 2 門のうち 1 門が，コンジットゲート敷高にまで進行した堆砂及びその堆砂上にあったと考えられる沈木により操作不能となった（図 1-5）。当時，ダム上流の鬼無里観測所では史上 1 位となる時間雨量 81.5mm を記録し，裾花ダムにおいては，図 2-4 に示すとおり，約 1 時間でピーク流量 591.5m³/s に到達する急激な波形の立ち上がりの流入が記録されている。裾花ダムでは，20 時 30 分から常用洪水吐きの放流を開始しているが，21 時 52 分に開度 54cm（開口高さ 28cm）で開操作が不可能となっており，図 1-5 で示したとおりゲート開口部に沈木等が集積し，閉塞させたことが分かる。その後対策案を協議し，ゲート操作不能発生から 4 ヶ月後に，ゲート直上流の堆砂を掘削，予備ゲートを閉め，放流管内の充水バルブから充水とゲート開操作を繰り返すことで，ゲートの開操作及び放流管内の支障物の除去に至っている。なお，その期間は残りの一門のみで洪水調節を行っている。

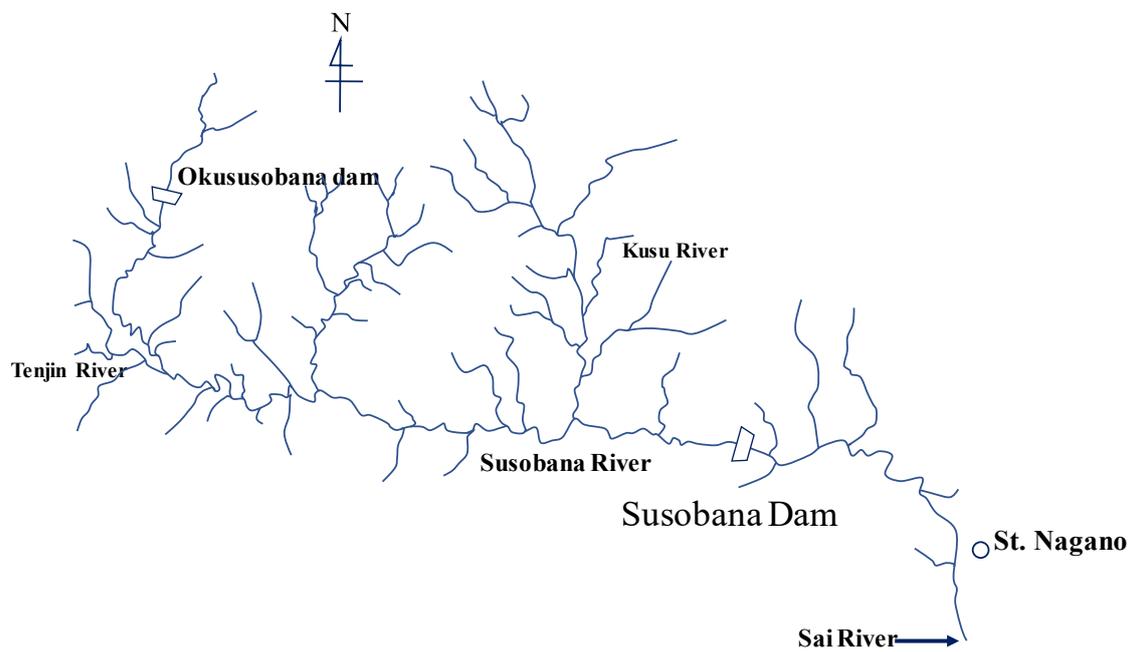


図 2-1 裾花川流域図



図 2-2 裾花ダムの全景

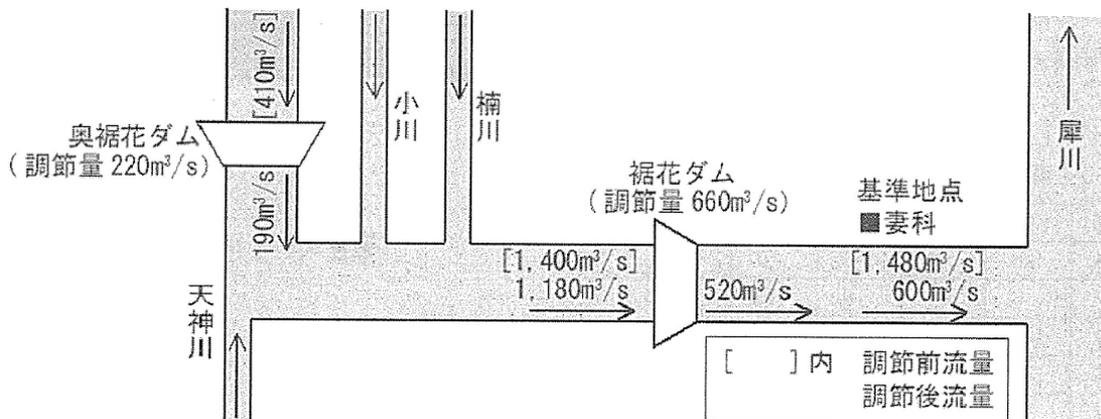


図 2-3 計画高水流量配分図 (文献¹より引用)

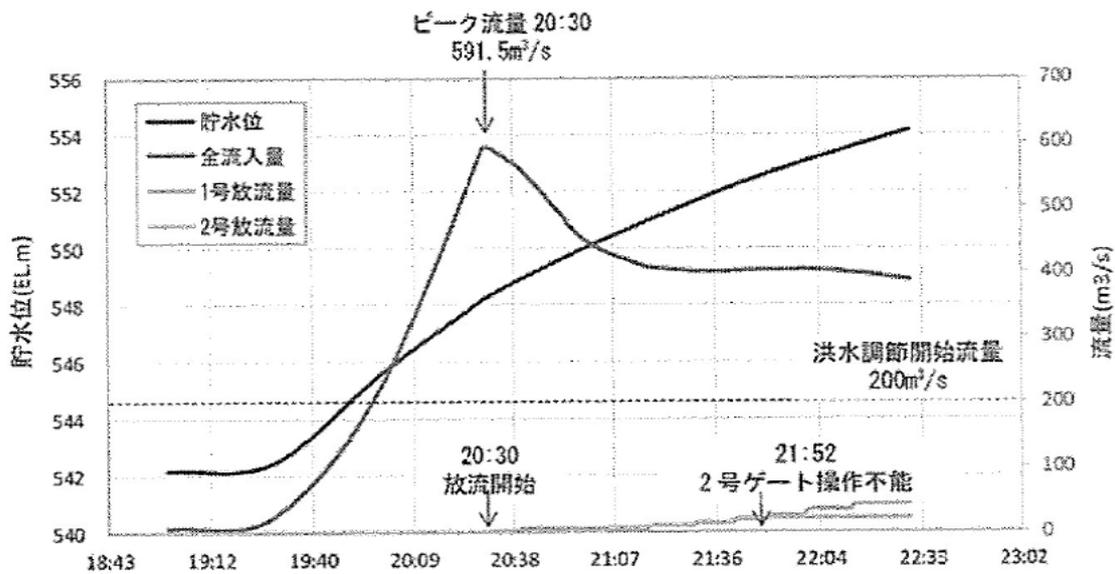


図 2-4 貯水池運用状況 (文献¹より引用)

2.2.2 ゲート操作不能時の想定されるリスクシナリオ

ゲート操作不能が発生した当時、図 2-5 に示すとおり裾花ダムにおける計画堆砂量に対する堆砂率は 100%を超過し、ダム堤体近傍の堆砂高さは、常用洪水吐きの呑口敷高に到達している¹⁾。そのため、度重なる洪水の中でダム湖に沈んだ流木が、図 2-6 に示すように、堆砂面上をゲート方向へ移動し、ゲート操作時に放流管内へ流入、ゲート操作不能を引き起こしたものと考えられる。このリスクシナリオについては、推定の域を出ておらず、そもそもどのように沈木が生じ、ゲート前に到達したか、といった沈木の湖内動態等は不明である。また、ゲート操作不能のメカニズムとしては、沈木が挟み込んで閉操作ができない、ということであれば理解は難しくないものの、当時は開操作中であり、その原因究明が課題となっている。

また、2022 年 10 月に現地調査を行った際の沈木探査状況を図 2-7～図 2-10 に示す。このとき、点検のため水抜きされた副ダムとシルから構成される減勢工内において、大量の沈木が発見され、長さは最大で約 4.3m、根の部分を含めた直径として約 0.8m の沈木が確認された。減勢工内には、コンジットゲートからの放流水以外の流入は無いと考えられ、沈木がゲートを通過した証拠といえる。常用洪水吐きのコンジットゲートの寸法は、縦 3.546m×横 3.5m であり、4m 級の沈木はおおよそ流れに平行姿勢を保つことで流出したことが推察される。また、堆積位置は、シル背後の局所的な逆流域と考えられる箇所に集中しており、副ダムスリットから下流への流出分が存在していることも考慮すると、より多くの沈木が経年的にゲートを通過していると考えられる。

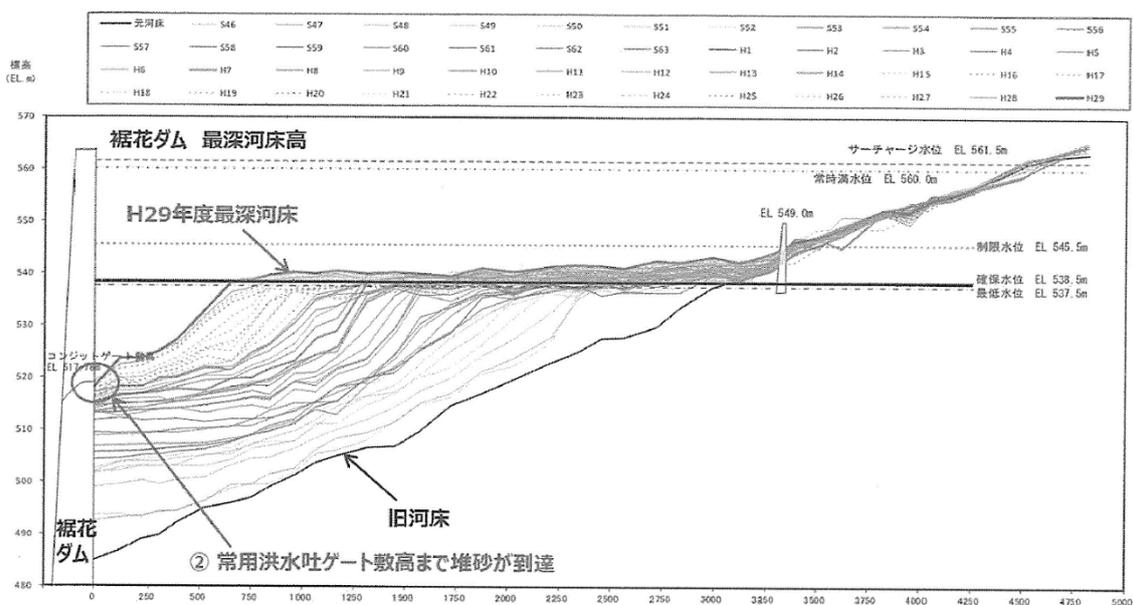


図 2-5 裾花ダム最深河床高の推移 (文献¹⁾より引用)

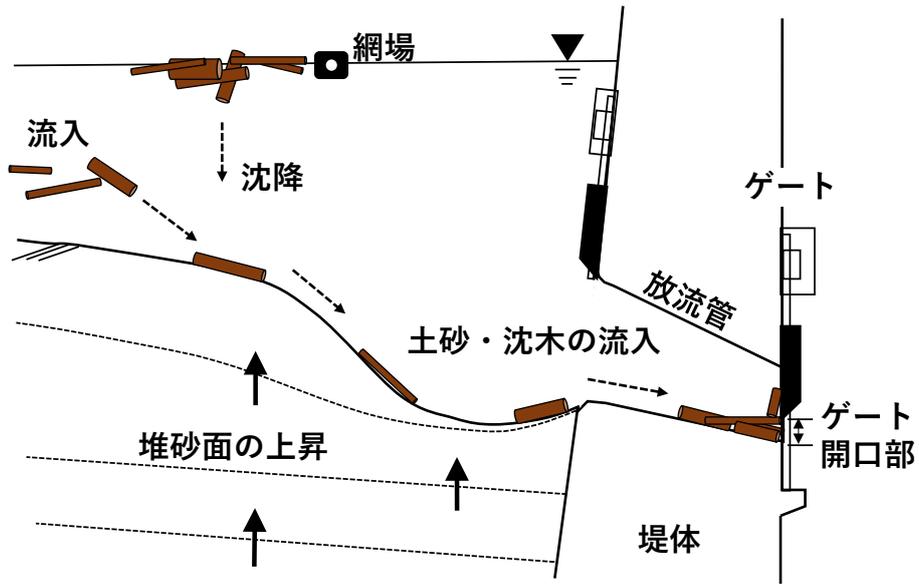


図 2-6 想定されるゲート操作不能のシナリオ



図 2-7 裾花ダム直下流減勢工内

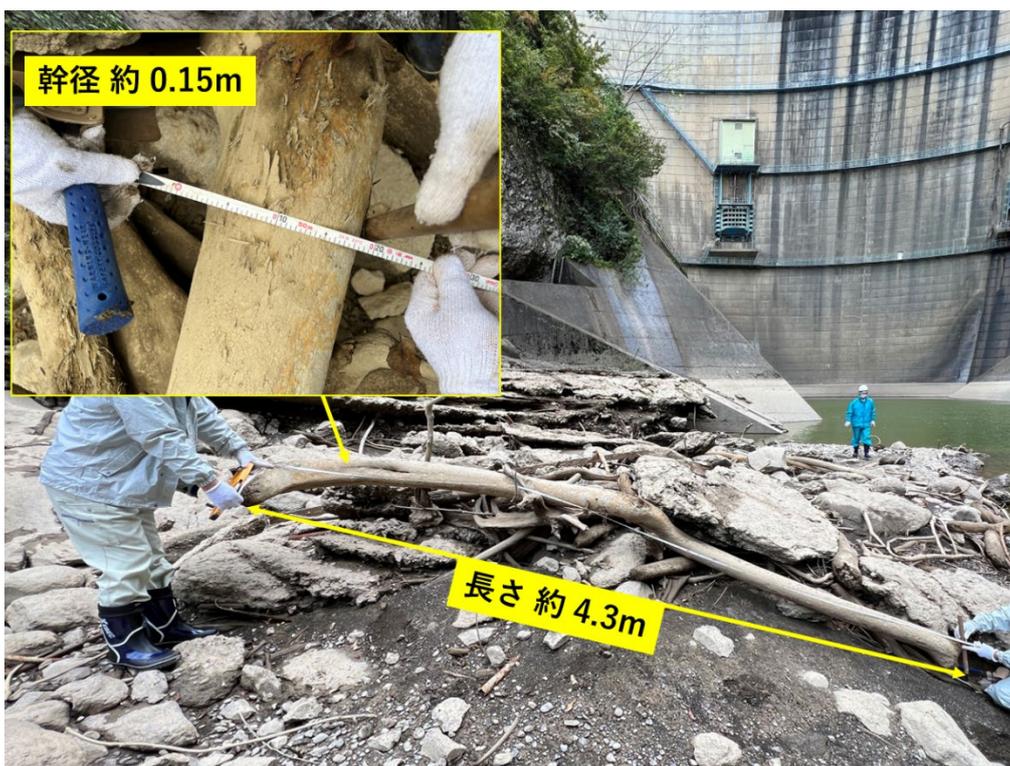


図 2-8 減勢工内沈木調査状況（その1）



図 2-9 減勢工内沈木調査状況（その2）

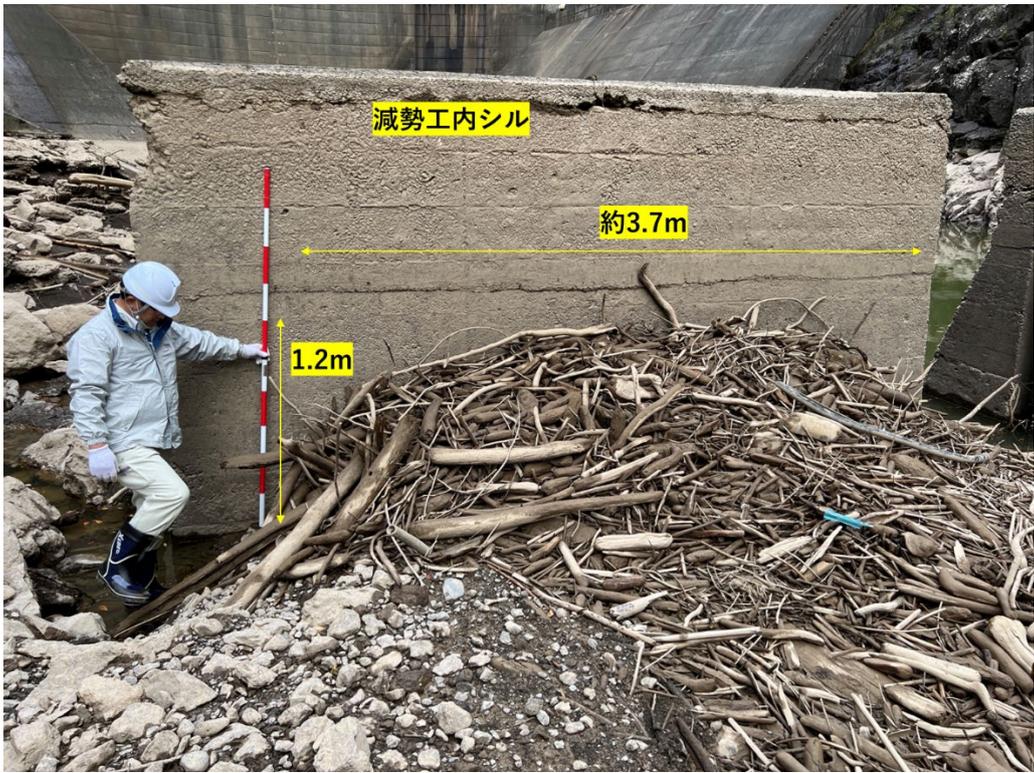


図 2-10 減勢工内沈木調査状況 (その3)

2.3 ダム貯水池堆砂の課題および管理の現状

ダム貯水池における堆砂については、これまで国内外において非常に多くの調査・研究がなされている。以下に裾花ダムのゲート操作不能事例の主要因である貯水池堆砂現象と、特に堤体近傍のゲート周辺における堆砂形状について概説する。

2.3.1 ダム貯水池堆砂の課題概要

はじめに、ダム貯水池における堆砂特性について述べる。ダムは、洪水時の流水とともに土砂もまた貯留する。上流河川から貯水池に流入した土砂は、その粒度によって分級されて貯水池内に順次堆積していく²⁾。大矢ら²⁾は、全国の国土交通省管理の直轄ダムを対象に行われた貯水池内ボーリング調査のデータをもとに、図 2-11 に示すとおり、典型的なダムの堆砂性状の把握を行っている。これによると、ダム貯水池における堆砂領域は、頂部堆積層、前部堆積層（デルタ肩）、底部堆積層と大別され、特に底部堆積層における堤体近傍領域を密度流堆積層としている。頂部堆積層から前部堆積層にかけては、流入土砂のうち掃流砂および浮遊砂が堆積する領域とされ、底部堆積層では浮遊砂およびウォッシュロードが堆積する。その結果、貯水池上流部では礫・砂、中流部では砂、下流部では粘土・シルトが主体として堆砂性状が形成される。このような典型的な堆砂特性に対し、江崎³⁾の調査結果をまとめた芦田ら⁴⁾は、堆砂形状を規定する主要因として、流入土砂の粒度組成を挙げ、表 2-1 に示すとおり、堆砂形状を3つの基本形に分類している。掃流砂、浮遊砂とも相当量流入する場合はI型、掃流砂の流入が少なく、浮遊砂の流入が多いダムはII型、浮遊砂供給が少ない場合はIII型とされている。また、流入量に対し貯水池容量の小規模なダムは、掃流砂と浮遊砂の堆積層の区分が明瞭でなくなり、これをIV型としている。

ダム貯水池堆砂に伴う主な3つの課題を概説する。

図 2-12 に示すとおり、まず貯水池末端部の堆砂による上流側の水位上昇が挙げられる。天竜川水系の泰阜ダムでは、洪水水位の上昇が約 10km 上流に及んだとされる⁵⁾。

次に、洪水調節・利水容量の減少の課題が挙げられる。これは、貯水池内の堆砂は貯水池縦断方向に分級して不均一に堆積し、デルタを形成することによって生じる。特に、貯水池の上方に洪水調節容量を有する多目的ダムでは、堆砂量が計画に満たないうちでも、その容量低下が課題となっており、平成 26 年度には会計検査院より洪水調節容量内の堆砂に関する指摘を受けている⁶⁾。

最後に、ダム堤体近傍における堆砂に起因する課題として、ゲート・取水口等の閉塞リスクが挙げられる。これは具体的には、前節でも述べたとおり、裾花ダムの事例のようなゲート操作不能事例や、発電、水道等各種用水の取水口の埋没等を指している。また埋没に至らない状況においても、下久保ダム（水資源機構）の事例⁷⁾のように、堆砂が利水放流設備に接近し、シルト分による研磨によるバルブの機能障害や、巻き上げによる高濁度放流による下流水質問題が懸念される事例も挙げられる。

ここで、裾花ダムのゲート操作不能事例については、多目的ダムの洪水調節機能を担保

する高圧ゲートの操作不能事例として、筆者らの知る限りこれまで全国的に確認されたことのない事例であり、他ダムでも経年的な堆砂とともに起こり得ることから、新たな貯水池堆砂管理の課題といえる。

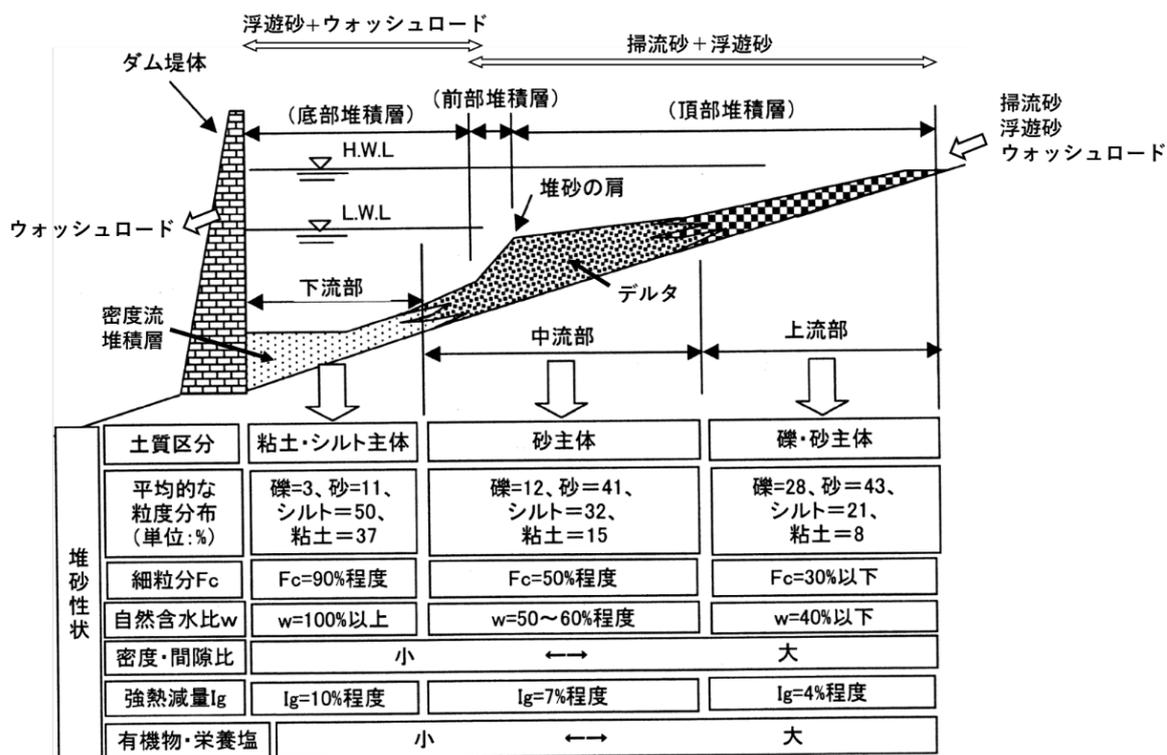
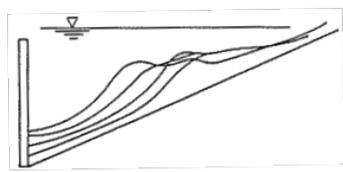
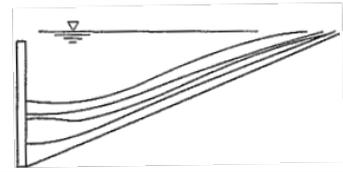
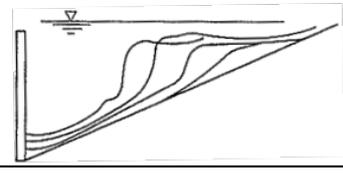
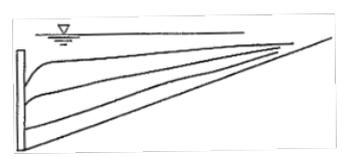


図 2-11 典型的なダムの堆砂性状 (大矢らの図を一部改変) 2)

表 2-1 貯水池堆砂形状の分類⁴⁾

堆砂形状の基本形の分類	堆砂形状及び堆砂過程	流入土砂の粒度組成	貯水池規模	貯水池の特徴
I型		掃流砂・浮遊砂ともに多い	大	最上流に位置する流域に崩壊地が多く、土砂生産が活発 多目的ダムでは、デルタ肩が低水位付近にある
II型		掃流砂が少なく浮遊砂が多い	大	直上流に大規模な貯水池や緩勾配の区間がある
III型		浮遊砂が少なく掃流砂が多い	大	堆砂の比較的初期の段階に現れる
IV型		掃流砂と浮遊砂の堆積に区別がつかない	小	ダム付近まで著しく土砂が堆積している ダムに近づくほど、堆積層の厚さが増加している

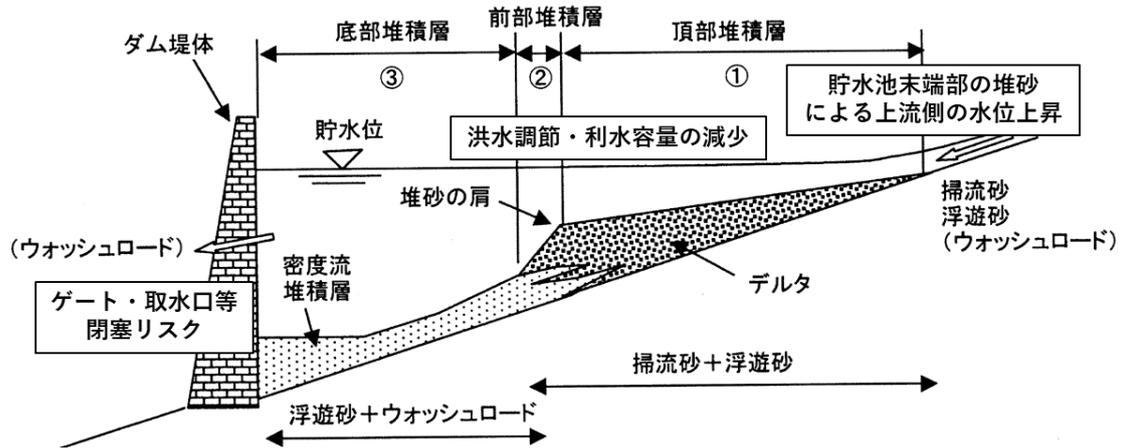


図 2-12 ダム貯水池堆砂に伴う主な課題 (大矢らの図を一部改変)²⁾

2.3.2 常用洪水吐き近傍の流れおよび土砂動態に関する既往研究

裾花ダムのゲート操作不能要因としては、土砂と沈木が要因と考えられる。ここで、堆砂がゲート敷高に到達していない場合、沈木はゲートに到達しないものと考えられ、ゲート敷高まで堆砂が進行していたことが、沈木と新たに複合的な課題をもたらしたといえる。つまり、ゲート周辺の堆砂形状は、沈木の移動河床となり、またその沈木の駆動力となる流れの境界条件を与える点で、ゲート近傍堆砂の形状管理が重要と考えられる。

ゲート周辺の堆砂形状を検討するにあたり、裾花ダムの事例のゲート周辺の水理条件は、貯水位が約 20~30m 存在する箇所における現象であり、黒部川の宇奈月・出平ダムの連携排砂におけるフラッシング⁸⁾や、耳川水系におけるスルーシング⁹⁾といった、水位低下を伴い、貯水池内に従前河道の掃流力を回復させるような状況とは異なっている。つまり、裾花ダムでは高圧下の管路流となるため、貯水池内においては、ゲートの近傍にしか流速場が生じない。また、前項で示したとおり、ゲート周辺は密度流堆積であり、非常に細かい粒径である粘土・シルトが堆積している。海外事例を参考にすると、このような水位低下を伴わない状況における微細粒土砂の排砂方法は、Pressure Flushing と呼ばれ^{10),11),12)}、排砂効率としては他のフラッシング等の堆砂対策手法と比べ低いものの、水位低下が難しいダムにとっては重要な排砂方策の一つとして考えられている¹²⁾。筆者の知る限り、国内で同手法を排砂方策として位置付けた事例は無いが、図 2-13 および図 2-14 に示すとおり、米国やイランなどで実現場における検討事例がある^{14),15)}。

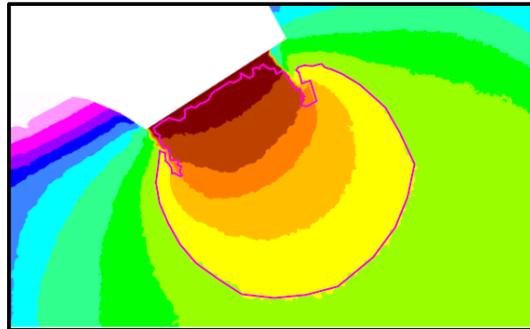
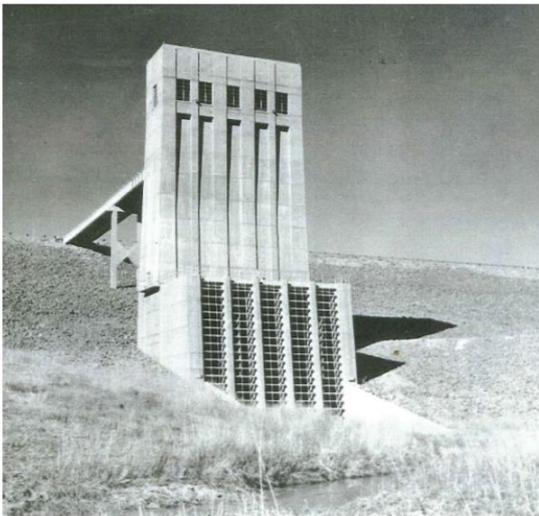
また、Pressure Flushing により、形成される半円状の洗掘形状は Flushing Cone (以下、FC) と呼ばれており^{10),11),12)}、放流時の水理量、堆積土砂性状、Flushing Cone の長さ、体積等の規模の関係性に関する研究がこれまで実施されている。Sanat ら¹³⁾は、図 2-15 に示す無次元パラメータをもとに次元解析により得られる複数の Flushing Cone 形状に関する実験公式を表 2-2 のとおりまとめている。

さらに、ゲート周辺堆砂の関連事例としては、放流設備としては洪水調節を目的に含まないものの、発電目的のダムにおける排砂管が挙げられる。排砂管は、発電を目的とするダムにおいて、発電の停止時および利用水位以下におけるダム下流への利水補給を目的に設置されているが、堆砂による埋没懸念が生じている¹⁶⁾。後藤らは¹⁶⁾、排砂管放流による土砂輸送現象を検討し、現地試験等により下流への濁度上昇や排砂効果を調査し、定期的な排砂管放流により呑口部の埋没予防を行う必要性を示している。

以上のとおり、Pressure Flushing や排砂管放流等のゲート運用については、ゲート埋没防止等も含めた堆砂対策手法の一つであり、実験公式等は多くありつつも、一方で、現地観測データ等は、まだ実証試験等の段階であり、今後裾花ダムにおいても運用操作に伴うコーン形成の関係を継続的にモニタリングすることが重要と考えられる。



図 2-13 Jiroft Dam (左：放流状況 (文献¹¹⁾より引用, 右：放流開始時 (文献¹⁴⁾より引用)

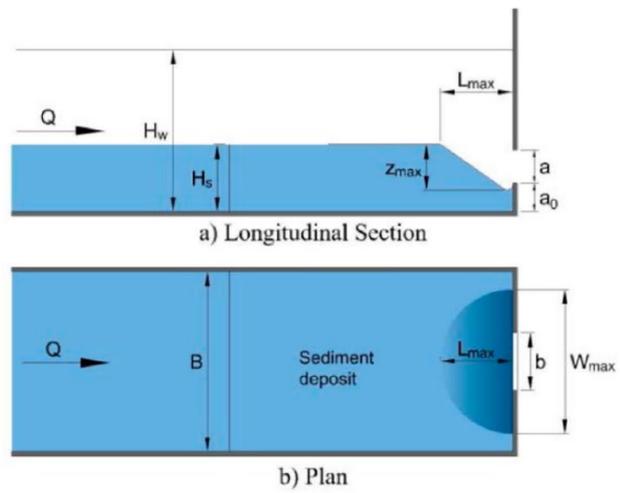


Cherry Creek Outlet Works pre-filling 1952

Scour Zone from Previous Flush

図 2-14 Cherry Creek dam (左：取水塔概観, 右：フラッシュ後の洗掘形状) (文献¹⁴⁾より引用)

- a = height of bottom outlet
- a_0 = height of bottom sill above bed level
- b = width of bottom outlet
- B = width of the reservoir (flume)
- H_s = sediment height above bed level
- h_s = sediment height above outlet's sill
- H_{snet} = net sediment height above centre of outlet opening
- H_w = flow depth above bed level
- h_w = flow depth above outlet's sill
- H_{wnet} = net flow depth above centre of outlet opening
- L_{max} = length of flushing cone
- Q = discharge
- V_s = volume of flushing cone
- W_{max} = width of flushing cone
- Z_{max} = depth of flushing cone



where,

$$h_s = H_s - a_0$$

$$H_{snet} = h_s - a/2$$

$$h_w = H_w - a_0$$

$$H_{wnet} = h_w - a/2$$

図 2-15 Flushing Cone に関する無次元パラメータ (文献¹³⁾より引用)

表 2-2 Flushing Cone の長さおよび規模に関する実験公式 (文献¹³⁾より引用)

Table 1. Empirical equations to predict volume and length of a flushing cone

Reference	Empirical equations	Eq. no.
Emamgholizadeh et al. (2006)	$\frac{V_s^{1/3}}{H_{s,net}} = 0.6139 \left(\frac{u}{\sqrt{gH_{w,net}}} \right)^{0.0062} \left(\frac{H_{s,net}}{d_s} \right)^{0.05} \left(\frac{H_{s,net}}{H_{w,net}} \right)^{0.0036}$ <p>where g is the acceleration due to gravity</p>	1
Powell (2007)	$Z_{max} = \frac{18576 \frac{H_{w,net}}{D} + 33273}{\frac{\rho u}{\mu} \left(\frac{d_s}{H_{w,net}} \right)^{0.1}}$	2.1
	$\frac{W_{max}}{2} = \frac{55789 \frac{H_{w,net}}{D} + 144557}{\frac{\rho u}{\mu} \left(\frac{d_s}{H_{w,net}} \right)^{0.1}}$	2.2
	$L_{max} = \frac{72017 \frac{H_{w,net}}{D} + 45656}{\frac{\rho u}{\mu} \left(\frac{d_s}{H_{w,net}} \right)^{0.1}}$	2.3
	$V_s = 0.673 L_{max} \frac{W_{max}}{2} Z_{max}$	2.4
Shahmirzadi et al. (2010)	$\frac{V_s}{H_{w,net}^3} = 0.042 \left(\frac{u}{\sqrt{gH_{w,net}}} \right)^{0.149} \left(\frac{H_{s,net}}{H_{w,net}} \right)^{3.082} \left(\frac{A}{H_{w,net}^2} \right)^{0.174}$	3.1
	$\frac{L_{max}}{H_{w,net}} = 0.031 \left(\frac{u}{\sqrt{gH_{w,net}}} \right)^{0.104} \left(\frac{H_{s,net}}{H_{w,net}} \right)^{0.733} \left(\frac{A}{H_{w,net}^2} \right)^{0.146}$ <p>where A is the opening area of the bottom outlet</p>	3.2
Meshkati et al. (2010)	$\frac{V_s}{H_{w,net}^3} = 4.6 \left(\frac{u}{\sqrt{g(G_s - 1)d_s}} \right)^{0.21} \left(\frac{H_{s,net}}{H_{w,net}} \right)^{2.2} \left(\frac{D}{H_{w,net}} \right)^{0.89}$	4.1
	$\frac{L_{max}}{H_{w,net}} = 0.02 \left(\frac{u}{\sqrt{g(G_s - 1)d_s}} \right)^{0.1} \left(\frac{H_{s,net}}{H_{w,net}} \right)^{0.75} \left(\frac{D}{H_{w,net}} \right)^{0.34}$ <p>where G_s is the specific gravity of sediment particles and D is the diameter of outlet's opening</p>	4.2
Fathi-Moghadam et al. (2010)	$\frac{V_s^{1/3}}{D} = 5.28 \left(\frac{u}{\sqrt{g(G_s - 1)d_s}} \right)^{0.1} \left(\frac{H_{w,net}}{H_{s,net}} \right)^{-0.046}$	5.1
	$\frac{L_{max}}{D} = 8.19 \left(\frac{u}{\sqrt{g(G_s - 1)d_s}} \right)^{0.1} \left(\frac{H_{w,net}}{H_{s,net}} \right)^{-0.033}$	5.2
Dreyer and Basson (2018)	$\frac{L_{max}}{h_w} = 1.206 \text{Ln} \left(\frac{h_w}{h_w - h_s} \right) - 1.4594 \text{Ln} \left(\frac{u}{\sqrt{gh_w}} \right) + 0.0536 \text{Ln} \left(\frac{b_{oc} + b_{oe}}{h_w} \right)$	6.1
	$\frac{W_{max}}{h_w} = 2.3065 \text{Ln} \left(\frac{h_w}{h_w - h_s} \right) - 3.4197 \text{Ln} \left(\frac{u}{\sqrt{gh_w}} \right) + 0.136 \text{Ln} \left(\frac{b_{oc} + b_{oe}}{h_w} \right)$	6.2
	$\frac{Z_{max}}{h_w} = 0.7615 \text{Ln} \left(\frac{h_w}{h_w - h_s} \right) - 0.7519 \text{Ln} \left(\frac{u}{\sqrt{gh_w}} \right) + 0.0278 \text{Ln} \left(\frac{b_{oc} + b_{oe}}{h_w} \right)$	6.3
	$\frac{V_s}{h_w^3} = \left(\frac{L_{max}}{h_w} \right)^{1.9529} \left(\frac{W_{max}}{h_w} \right)^{-0.3787} \left(\frac{Z_{max}}{h_w} \right)^{1.3663}$ <p>where b_{oc} is the outlet width over the centreline and b_{oe} is the outlet width at the edge</p>	6.4

2.3.3 ダム貯水池堆砂管理の現状

国土交通省¹⁷⁾によると、令和3年度末における堆砂状況としては、国土交通省所管ダム（水資源機構および道府県管理ダムを含む）573基のうち、計画堆砂量を超過しているダムは66基であり、うち49基は令和4年度7月末時点で堆砂対策を実施中、他17基は堆砂対策を検討中である。このようなダム貯水池堆砂対策の実施判断は、ダム貯水池堆砂対策の手引き¹⁷⁾によると、貯水池の堆砂進行度を把握した上で、堆砂進行度を評価するための指標とその管理水準を踏まえ、当該水準に対する残余年数に応じた対策を実施することが示されている。進行度の評価指標および管理水準は表2-3に示すとおりであり、各評価指標に対する残余年数は表2-4により算出される。さらに、残余年数に基づく評価区分をA～Cとし、図2-16の概念図のとおり対策内容を決定する方針が示されている。対策内容としては、図2-17に示すとおり水位低下掘削、浚渫に加え、先述のとおり、フラッシングやスルーシングといった各種対策手法が検討・実施されてきており¹⁹⁾、その対策手法には、貯水池回転率（平均年間流入量に対する総貯水容量の割合）及び推定平均年堆砂量に対する総貯水容量の割合の関係より、図2-18に示すような実績がある¹⁸⁾。

ここで、利水等の観点から水位低下に制約のあるダムにおいて、裾花ダムのようなゲート操作不能事例や、発電等各種用水取水口の埋没といったダム堤体近傍における堆砂に伴う課題への堆砂対策手法としては、浚渫や密度流排出、そしてPressure Flushingが考えられる。密度流排出とは、土砂を含む高濃度の流水の特性を利用した方法で、天竜川水系片桐ダムでは、穴あきオリフィス前面にカーテンウォールを設置して、洪水時に底部に流入する比較的土砂濃度の高い流入水を放流する方法を採用し、洪水時に浮遊土砂を積極的に排出することが期待されている²⁰⁾。なお、本手法は、貯水池の底層または中層に到達する密度流をそのまま放流するという考え方であり、Pressure Flushingは放流設備前面の土砂を排出するという点で、概念が異なっている。一方、浚渫は浚渫船によりグラブ等で直接的に堆砂を引き上げ、土運船等で運ぶ方法であり、古くから存在する方法であるが、掘削に比べコスト面の制約が大きい。このように、水位低下さえ行えば比較的成本を抑えた対策が可能な洪水調節容量内等の堆砂の掘削に比べ、ダム堤体近傍の大水深下における大規模な堆砂対策は困難と考えられ、密度流排出についても堤体前面の土砂排出といった概念とは異なり適用性が不明である。

近年、裾花ダムの事例以外にも、下久保ダム（水資源機構）では一出水の期間でダム堤体近傍における堆砂高さが約3m上昇した、という事例もある⁷⁾。また、小島らは、近年実施事例が増加しているダムの事前放流により、迎洪水位が低下することで堆砂移動を誘起し、より貯水池下流、すなわち底部放流管ゲート近傍への堆砂が進行することを指摘している²¹⁾。このように、今後さらに全国的なダム堆砂進行に伴い、ダム堤体近傍堆砂の上昇とそれに伴うリスクが顕在化する懸念がある。しかしながら、上述のダム堆砂対策の実施判断にあたっては、評価軸として容量のみを考慮した残余年数が示されており、洪水調節容量を考慮したデルタ肩の影響としての堆砂形状は考慮されているが、堤体近傍の堆砂高

さの評価軸は存在していない。これは、これまで課題が顕在化していなかったことによる
と考えられるが、今後課題の特定、影響予測等に基づいた事前のリスク管理が急務となっ
ている。

表 2-3 評価指標と管理水準（ダム貯水池堆砂対策の手引き¹⁸⁾より引用）

把握すべき影響	評価指標	管理水準 (目安)	評価に使用する 堆砂量
貯水池機能への影響	① 堆砂容量に対する 堆砂率	70%	全堆砂量
洪水調節機能への影響	② 洪水調節容量の余裕 に対する堆砂率	15%	洪水調節容量内 堆砂量
貯水池機能への影響	③ 有効貯水容量に対す る堆砂率	5%	有効貯水容量内 堆砂量

表 2-4 評価指標と残余年数の算定方法（ダム貯水池堆砂対策の手引き¹⁸⁾より引用）

評価指標	算定方法		
① 堆砂容量に対する 堆砂率	a	管理水準 までの残率 [%]	$70\% - (\text{全堆砂量} \div \text{堆砂容量}) \times 100[\%]$
	b	今後の堆砂量 の進行見込み [%/年]	$\frac{[\text{実績平均年堆砂量(全量)} - \text{平均年対策量(全量)}] [\text{千 m}^3/\text{年}]}{\div \text{堆砂容量} [\text{千 m}^3]} \times 100$
	c	残余年数 [年]	a/b
② 洪水調節容量 の余裕に対する 堆砂率	a	管理水準 までの残率 [%]	$15\% - (\text{洪水調節容量内堆砂量} \div \text{洪水調節容量の余裕}) \times 100[\%]$
	b	今後の堆砂量 の進行見込み [%/年]	$\frac{[\text{実績平均年堆砂量(洪水調節容量内)} - \text{平均年対策量(洪水調節容量内)}] [\text{千 m}^3/\text{年}]}{\div \text{洪水調節容量の余裕} [\text{千 m}^3]} \times 100$
	c	残余年数 [年]	a/b
③ 有効貯水容量 に対する 堆砂率	a	管理水準 までの残率 [%]	$5\% - (\text{有効貯水容量内堆砂量} \div \text{有効貯水容量}) \times 100[\%]$
	b	今後の堆砂量 の進行見込み [%/年]	$\frac{[\text{実績平均年堆砂量(有効貯水容量内)} - \text{平均年対策量(有効貯水容量内)}] [\text{千 m}^3/\text{年}]}{\div \text{有効貯水容量} [\text{千 m}^3]} \times 100$
	c	残余年数 [年]	a/b

※1 堆砂量及び実績平均年堆砂量の算定に当たっては、供用開始後 3 年目までの堆砂量は、貯水池法
面崩壊等の初期堆砂の影響を排除するため使用しないことを基本とする。なお、初期堆砂の影響
がみられない、または、3 年を超えても明確に初期堆砂の影響がみられるダムについては、状況に
応じて判断する。

※2 実績平均年対策量は近年の実績対策量(排除量等)をもとに平均的な値を用いる。

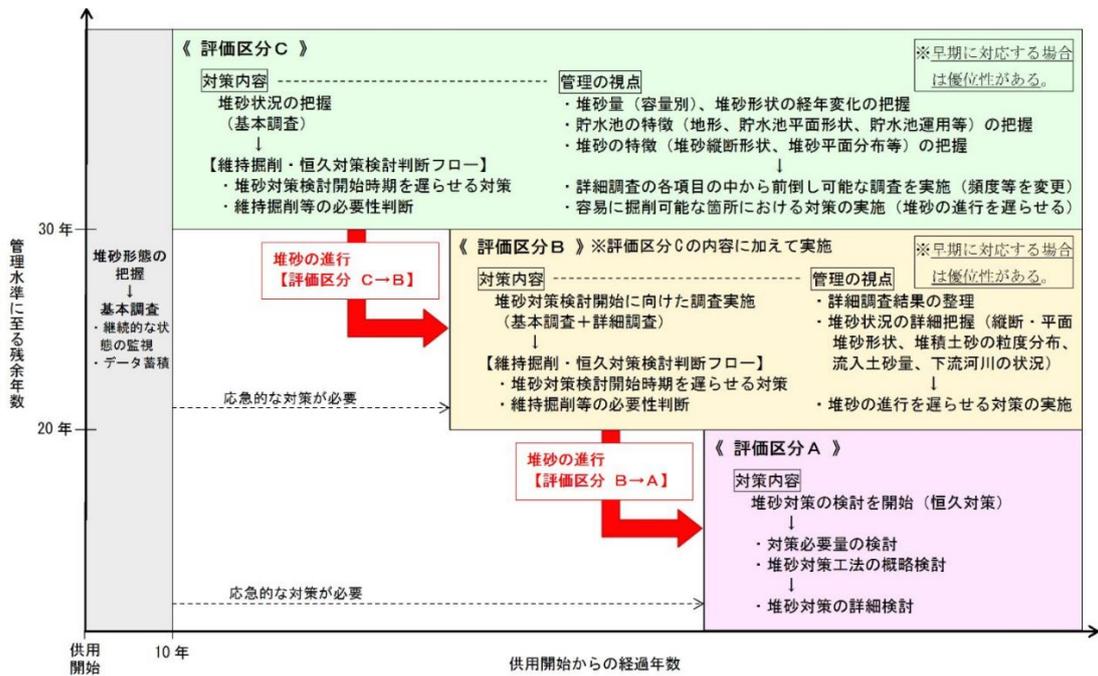


図 2-16 評価区分 (A,B,C) に応じた対策内容の概念図 (ダム貯水池堆砂対策の手引き¹⁷⁾より引用)

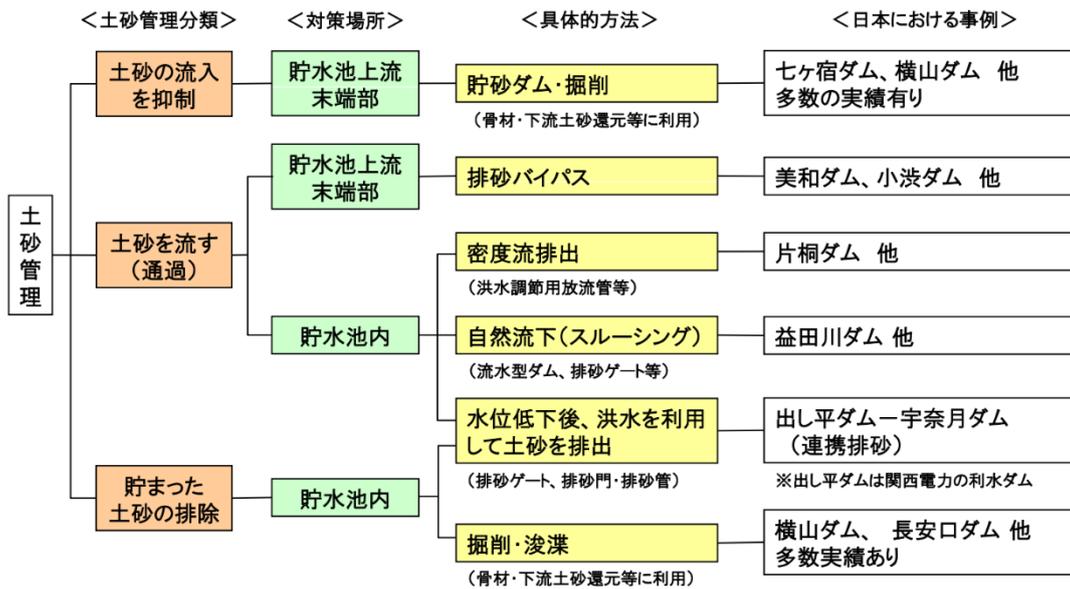
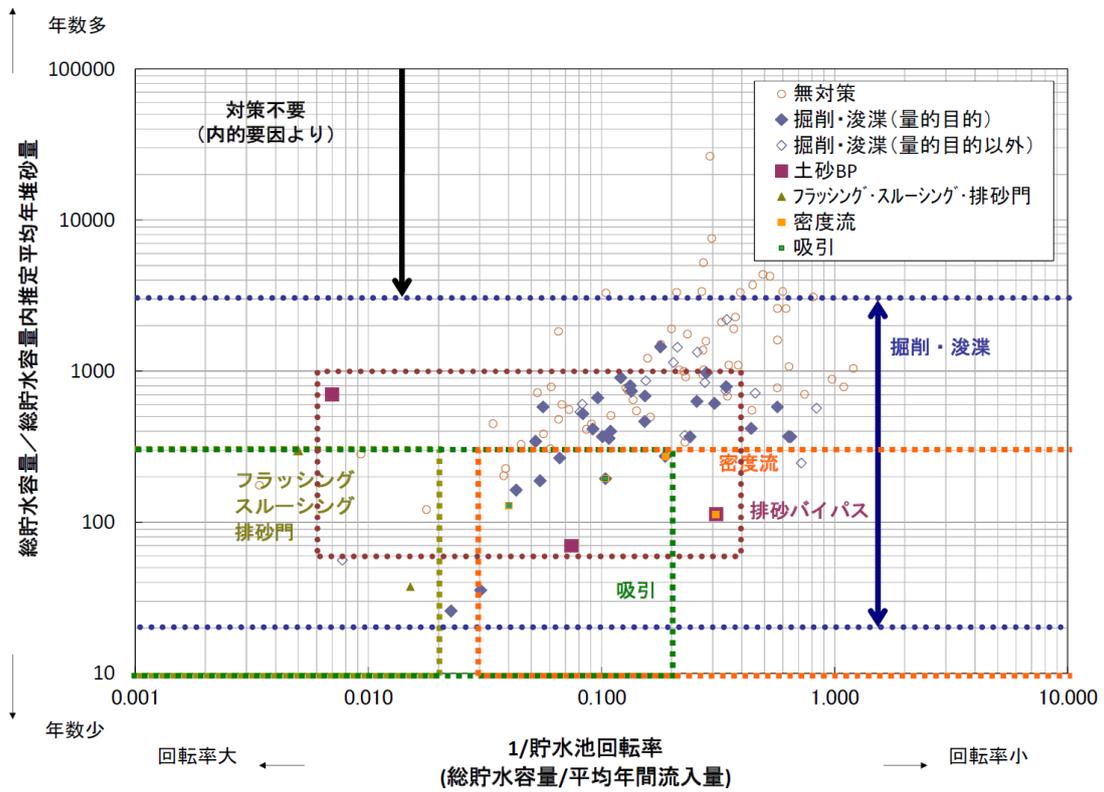


図 2-17 主な堆砂対策 (国土交通省HP¹⁹⁾より引用)



※上記の密度流にプロットされているダムは、結果的に密度流となったダムであり、計画的には実施されていない。
 ※吸引（機械的対策）を実施しているダムはなく、上記のプロットは計画段階のダムとなっている。

図 2-18 堆砂対策工法概略選定図（ダム貯水池堆砂対策の手引き¹⁷⁾より引用）

2.4 ダム貯水池流木の課題および管理の現状

裾花ダムのゲート操作不能要因のもう一つの主要因である沈木について検討を進めるに際し、貯水池流木に関する課題整理および管理の現状について概説する。

2.4.1 ダム貯水池流木の課題概要

流木に関する問題は、古くて新しい問題とされ²²⁾、これまで河川・ダムにおいて様々な対策が行われている。ダムにおいては、通常時にダムに堆積する流木は腐ったものが多く、沢筋あるいは貯水池湖岸に堆積していたものが移動した再移動流木であるとされ、大雨時に貯水池に流入堆積する流木は、斜面崩壊、土石流に巻き込まれた沢筋の樹木が流出した新規発生材が多いとされている²²⁾。また、牧ら²³⁾は2005年に収集した全国のダム管理者へのアンケート結果から、流木発生量は集中豪雨などの影響によるばらつきが非常に大きく、年間発生量の大半がそれらの出水で発生している傾向を指摘している。

北海道沙流川の二風谷ダムでは、2003年台風10号の際に、約5万 m^3 の流木が流入した。この出水では、図2-19に示すとおり、流木止めの網場が破壊され堤体まで流木が接近している。幸いゲートおよび堤体には大きな被害は生じていないものの、撤去には昼夜兼行の作業で約4週間を要している。処理費用としては、パルプ材、チップ化、無料配布等により処分費を3億4千万程度縮減して約1億2千万円としている²⁴⁾。なお、2003年の際には、ダム上流では15橋梁が被災したが、ダム下流では被害を受けた橋梁はなく、ダムの流木捕捉効果が伺える。また、さらに2006年の出水では、約2万 m^3 の流木が発生し、網場は破壊されなかったものの、大量の流木が網場の下を通過し、堤体まで到達している。

2000年東海豪雨時の矢作ダムでは、流域内に斜面崩壊が多発したことなどにより、図2-20に示すとおり、平均的な年の80倍に相当する約35000 m^3 の流木が流入している²⁵⁾。森田ら²⁶⁾は、流木調査を実施し、樹種別の流木本数、流木の発生源の区分を行い、谷筋に多く植えられていた杉の割合が多いこと、立木が流木化した新規発生材が多いことを指摘している。

また、近年では、2017年九州北部豪雨の際に寺内ダムにおいては、同ダムの至近10年の流木発生量の平均値116 m^3 に対し、約10000 m^3 の流木が流入している²⁴⁾。

以上のとおり、ダム貯水池はこれまで多くの流木が流入しており、撤去・処理にかかるコストは大きいものの、チップ化等処理コスト低減の工夫が図られている。また、下流リスク低減における流木捕捉効果も着目されている。一方で、二風谷ダムの事例のように、大量の流木流入は、ゲート等への悪影響を及ぼすリスクあり、網場の強化等の対策が取られている。



図 2-19 平成 15 年 8 月の二風谷ダムにおける流木発生状況（上：全体，下：堤体近傍）²⁵⁾

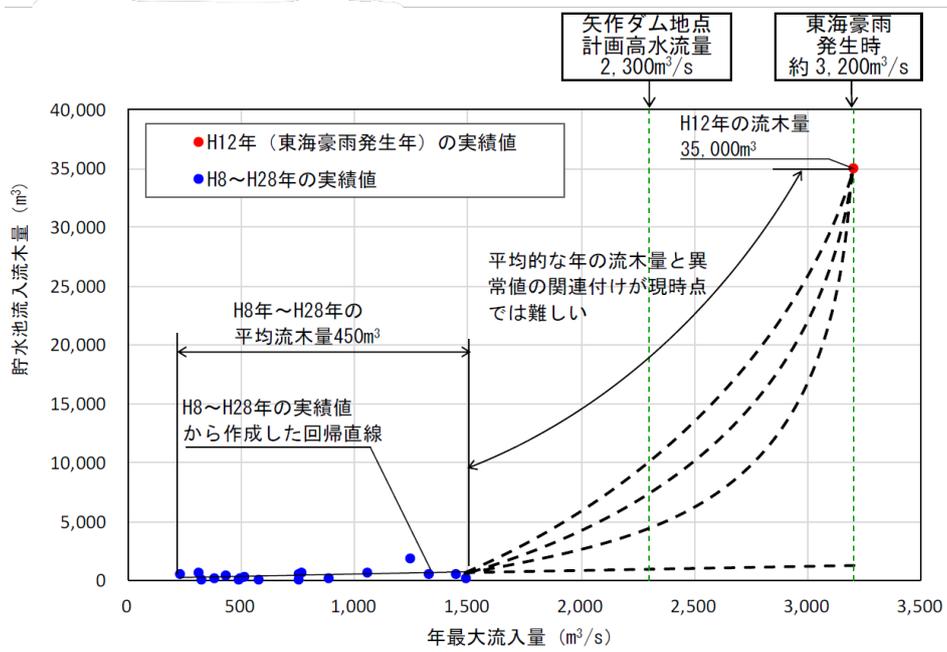


図 2-20 矢作ダムにおけるダム年最大流入量とダム貯水池流入流木量の関係
(ダム貯水池流木対策の手引きより引用)²⁵⁾

2.4.2 ダム貯水池流木管理の現状

ダム貯水池流木管理における現状として、流木量推定および流木止設備、流木処理について概説する。

2018年の貯水池流木対策の手引き²⁵⁾では、平常時の流木対策の対象とする流木量を「通年規模の流木量」とし、非常時に備えておくべき対象とする流木量を「大規模洪水時における流木量」として区分されている。区分の基準については、後者を計画規模相当洪水に伴う、または平均的な年の10倍程度を目安としており、前者をそれ以外としている。このような区分に基づき、管理現場にあっては、まずそれぞれの流木量の推定が行われ、「通年規模の流木量」の推定には、主に当該ダムの流木量と年最大流入量の関係から求められ、流木の回収・陸揚げ施設や、仮置きヤードの大きさ検討に用いられる。一方、「大規模洪水時における流木量」は、多くのダムでそのような規模の出水は未経験であるため、全国のダムにおける流木量の実績値から定まる推定式によって求められ、非常時の作業計画等の参考値に用いるように示されている。

多くのダムでは、出水時の流入流木や塵芥等から、ダム堤体に設けられた放流設備や取水設備等を保護するため、流木捕捉施設として、網場が設置されている。網場の配置と運用には、堤体付近への流出を防止する観点と、捕捉した流木の回収・陸揚げの効率化を図る観点から、貯水池への複数網場の設置事例や、風による捕捉流木の拡散を防ぐ簡易網場の設置事例等がある²⁵⁾。また、網場の設置に加え、上流側にスリット型の流木止めを設置する事例もある。

ダム貯水池において捕捉された流木は、主に人力、集積用簡易網場や集塵船を用いた作業により回収され、バックホウやクレーンにより陸揚げされる。その後、流木量に応じて仮置き、分別され、廃棄処分あるいはチップ化や無償配布等の有効利用がなされる。流木処理費は、収集から仮運搬までの単価が2500円～14300円/m³、処分にかかる単価が4000～23000円/m³、流木処理全体の単価では12100～30200円/m³とされている（2012年と2013年のデータに基づく）²⁴⁾。

以上のとおり、流木管理手法については、これまで各ダムにおける事例共有が図られながら、流木量の推定から回収・処理まで手法改善の取り組みがなされており、今後もその効率化やダム関連構造物の保全に向けた検討が必要である。

2.4.3 ダム貯水池沈木に関する既往研究

前項のとおり、今後も流木対策は引き続きの課題である。一方で、今回裾花ダムで生じた沈木については、流木発生から貯水池流入後、どのように沈木となったか、また、どのように沈木がゲートまで到達したか、という点に関する知見は、国内においては筆者の知る限り見当たらない。

そこで、流木と沈木の境目は、その密度が1を超えるかどうかの基本原則と考え、密度の違い等を考慮した流木等に関連する既往研究において参考となる事例収集を行った。

工業材料としては、木材の密度は強度、熱伝導、膨潤・収縮などの性質に密接に関連することから重要視されており、密度の変動要因としては、樹種や水分量の他、木材構造（立地条件、遺伝的性質、樹齢等による）が挙げられている²⁷⁾。表 2-5 に代表的な木材の比重²⁸⁾を示す。

一方、土木分野で流木の密度について言及している研究としては、流木の移動・堆積および橋梁閉塞に関連する研究が多い^{29), 30)}。水理模型実験や数値計算においては、樹種は主に針葉樹と広葉樹に分けられ、針葉樹の密度は 0.7~1.07 程度で水面上を流れ、広葉樹の密度は 0.93~1.22 程度で流水中を流れるとされる²²⁾が、その再現にあっては一律の値に取り扱われている。一方、Ruiz-Villanueva ら³¹⁾は、流木の収支、輸送における流木密度の評価に着目し、気中と水中における流木と立木の密度変化を検討しており、流木は樹皮の剥がれや、腐朽の程度も密度に影響を及ぼすとされる。

このように、木の密度は諸検討における基本事項であり、ダム貯水池における沈木動態を把握する上でも、密度変化は流木の動態を知る上で重要なファクターであると考えられ、特に、樹皮等に剥がれのある流木であるか、自然に生えている状態に近い立木であるか、また、樹種、水分量等の影響が大きいと考えられる。

表 2-5 代表的な木の比重²⁹⁾

樹種	気乾密度 (g/cm ³)	立木の密度 (g/cm ³)
ヒノキ	0.54	0.86
スギ	0.44	0.88
ブナ	0.72	1.0
モミ	0.48	1.1
ケヤキ	0.74	1.1

2.4.4 ダム貯水池流木管理における海外事例

ダム貯水池における流木管理については、海外においても多くの研究があり、ここでは主に、洪水吐きの閉塞対策事例と対策について述べる。

日本と同様多くのダムを管理しているスイスでは、2017年に Swiss Committee on Dams より技術レポートとして、Large Wood（以下、LW）およびその他浮遊物による洪水吐き閉塞について対策事例を紹介している³²⁾。基本的な貯水池流木対策のコンセプトとして、①流域からの流入流木を減らすこと、②流入流木を洪水吐きから通過させること、③貯水池で流木を捕捉・除去することが挙げられ、図 2-21 に示すとおり、当該ダムの洪水吐き情報および想定される最大流入量や流木量とともに、洪水吐きの閉塞確率の検討およびその帰結としてダムの安全性を評価した結果による対策案決定フローが示されている。閉塞確率の検討にあっては、図 2-22 で示されるようなフリーボード、またはセーフティフリーボードが重要なパラメータとして指摘されている。なお、これは我が国でいうところの、構造令で制定されている設計洪水位時の越流部水面形と天端橋梁またはゲートピン等とのクリアランスにあたる。さらに、②の例として図 2-23 に示すとおり、フリーボードの不足により閉塞した Palagnedra dam の事例と、それを受けて越流部下流に橋梁を付け替えた対策事例が示されている。また、オーストリアの Thurnberg reservoir では、クレストゲート上流側に張り出した間隔が広めのスクリーンが設けられている（図 2-24）。一方、同技術レポートにおいては、沈木に関しての記述はない。

米国では、2016年に U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation（開拓局）により、2014年に Paonia Reservoir において生じた底部放流管の沈木・塵芥等の集積阻害事例が報告されている³³⁾。同事例は、水位低下時の底部放流管スクリーンの点検中に生じたとされており、沈木等の撤去中には貯水池底部に低水路が形成され、最終的に約 500~700m³の沈木等が底部放流管に到達したとされている。さらに、同事例を受け、ダム貯水池の流木対策に関する検討はあるものの、沈木対策に関して検討事例がないことから、今後の沈木対策に関する技術開発の提言や必要性を指摘している。具体的には、沈木等の発生防除・除去、沈木等の通過、沈木等の破碎、等に関連する技術開発の方向性が示されている。なお、同事例は水位低下時の開水路条件において生じた事例であり、我が国における宇奈月・出し平ダムの連携排砂時の操作に近いものであり、裾花ダムの事例は水位が高い状態であるので状況としては異なる。

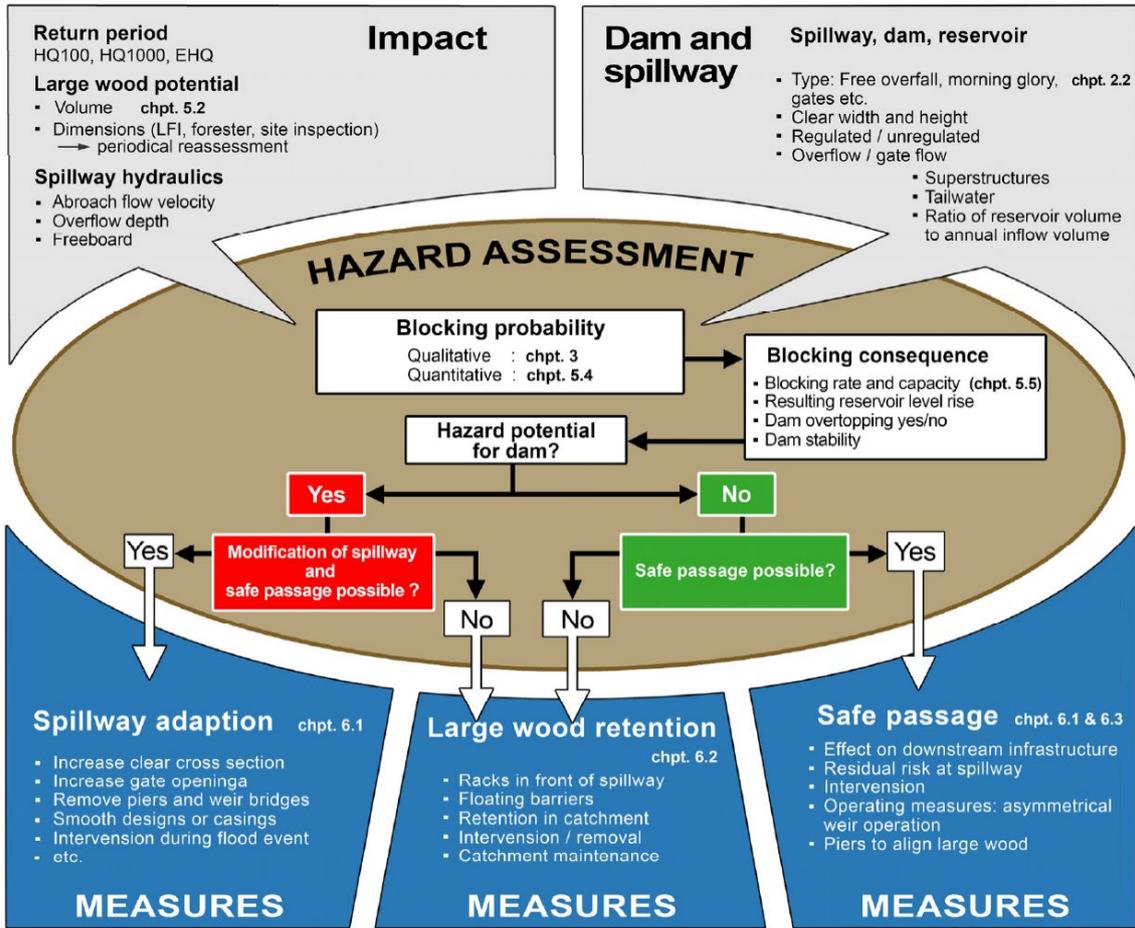


図 2-21 ダム洪水吐きにおける流木または浮遊物によるハザードアセスメントの概要 (文献³²⁾より引用)

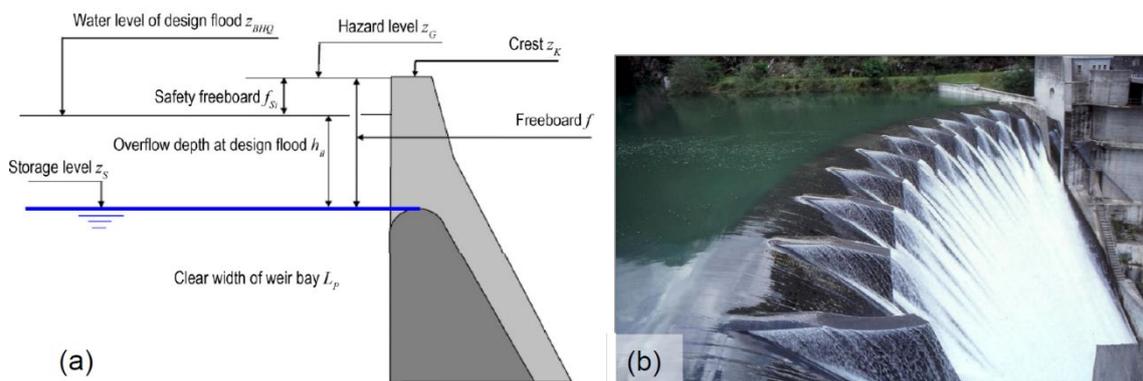


図 2-22 自由越流式のダム洪水吐き構造 ((a)模式図, (b)Palagnedra damの越流部) (文献³²⁾より引用)

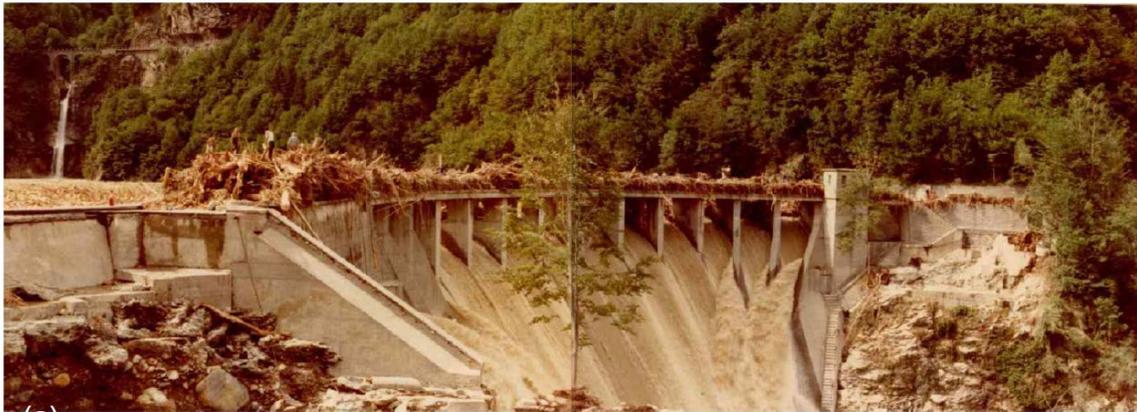


図 2-23 Palagnedra dam (スイス) の洪水吐き閉塞 (上: 被災時, 下: 改修後) (文献³²⁾より引用)



図 2-24 Thurnberg reservoir (オーストリア) の洪水吐き流木対策 (文献³²⁾より引用)

2.5 常用洪水吐きのゲートの設計および現状

本節では、リスク要因の影響を受けるダム常用洪水吐きゲートについて、そもそもどのような設計思想や配置条件のもとに、どのような外力を見込んで設計されたか、を整理し、その技術的な変遷や現状の型式、配置状況等を示す。加えて、排砂ゲート等と称され、土砂・流木・沈木を通過することを前提としてダム底部に設けられたゲートにおいては、どのような設計がなされているかを示し、裾花ダムのゲート操作不能事例について、ゲート側の観点からも、現状の分析・課題整理を行う。

2.5.1 高圧ゲートの技術変遷と設計基準

高圧ローラゲートや高圧ラジアルゲートの「高圧」は水深 25m 以深を設計条件とするゲートを指し、コンジットゲートとも呼ばれる。また、設計水深 25m 以下の場合はオリフィスゲートと呼ばれる。1章で示したとおり、一般に洪水調節を目的とするダムには、ダム堤体下部に設置される洪水調節を行うための常用洪水吐きと、計画を上回る流入量があった場合にダム堤体の安全性を確保するために非常用洪水吐きが設置される。そのため、コンジットゲートは常用洪水吐きへ設けられる。コンジットゲートは、洪水調節計画上低い水位で放流能力を有することが効果的であるため、より深い位置で大きな断面を有するよう、技術開発が行われてきている。

国内で初めて洪水調節用の高圧放流管を設置したダムは田瀬ダム（昭和 29 年完成）とされている³⁴⁾。門数は 4 門、ゲート形式は高圧スライドゲート、設計水深は 41.3m、全開・全閉操作のみとなっており、ダム先進国であった米国メーカより輸入されている。その後、昭和 31 年に竣工した五十里ダムでは、田瀬ダムの仕様や設計手法を踏襲して、国産第 1 号の高圧スライドゲートが設計・製作され、同年に七川ダムでも導入されている³⁴⁾。

次に、流量調節が可能なゲートが設置された最初のダムは、美和ダム（昭和 35 年完成）である。美和ダムは設計水深が 16m であるのでオリフィスゲートに該当するが、同ダムを契機にさらに設計水深が大きくなっていく。昭和 36 年に二瀬ダムでは設計水深 69m の高圧ラジアルゲートが設置されている³⁴⁾。

コンジットゲートにおける設計荷重（外力）としては、ダム堰・技術施設基準によると、原則として考慮する荷重として、静水圧、自重、開閉力、地震時動水圧、地震時慣性力が挙げられ、必要に応じて考慮する荷重として泥・波・氷・水撃圧、浮力、風・雪・温度・津波・その他荷重が挙げられている³⁵⁾。

2.5.2 主な高圧ゲート形式および水密方式の概要

主に洪水調節に用いられ、設計水深が 25m 以深かつ放流量が 100m³/s 程度を超える大容量放流管には、大きく高圧ラジアルゲート、高圧ローラゲート、高圧スライドゲートが用いられる。以下、ゲート総覧の解説編を参考に、各種ゲート形式および水密方式の特徴をまとめる³⁴⁾。

高圧ラジアルゲートは、図 2-25 に示すとおり、1) 戸溝を有しないためキャビテーション防止に対し有利であること、2) 水圧荷重をトラニオンピン中心に集中させ、円弧運動で開閉させるため、開閉荷重が小さくてよいことがメリットとして挙げられる³⁴⁾。しかし、薄肉のアーチダムでは、作用荷重の集中を避けるため、また支障部を支持する張り出しを堤体下流側に設ける必要があり土木構造が大規模となることから、事例は少なく、高圧ラジアルゲートは主に重力式コンクリートダムにおいて用いられている。

一方、高圧ローラゲートは、図 2-26 に示すとおり、1) 荷重は多点指示であり、ゲートへの作用荷重を分散させやすいこと、2) 堤体下流面に設け、戸当り金物を放流管吐口からの拡散水の外に配置することができるので、放流時の戸溝の流況、キャビテーション現象等の心配がないこと、等からアーチダムの主ゲートとしての設置事例が多い。裾花ダムも同様である。

高圧スライドゲートは、洪水調節用ゲート初期に用いられていたゲート形式であり、昭和 29 年田瀬ダムへ導入された。しかしながら、当時の技術では全開・全閉操作のみしかできず、その後、高水深化、流量制御の要請に応じて、ゲートの大型化が可能であること、部分開操作が可能であること、高圧スライドゲートに比べ操作抵抗が小さいことから、高圧ラジアル・ローラゲートが採用されるようになった。一方で、高圧スライドゲートもその後技術改良が進められ、米国シヤスタダムではジェットフローゲートが開発され、これを機に振動・キャビテーション対策の検討が進み、採用事例が増加してきている。図 2-27 に示すとおり、上記 2 型式に比べると、設計荷重が大きくない場合には、コンパクトな構造であり、施工性・経済性に優れたゲート形式と考えられる。また、2 章で示した宇奈月ダムの排砂ゲートの事例に見られるとおり、戸溝をナローズロット形式とすることで土砂通過対策を行った例もある。

次に、水密方式については、圧着式と摺動式に大別される。圧着式は、ゲート停止位置で扉体側または戸当り側から圧着操作を行い、またゲートを動かす際は圧着を解除するという仕組みである。特徴としては、ゲート操作中に水密ゴムとの摺動が無いこと、開閉荷重が小さくできること、水密ゴムの摩耗が無いこと、また振動防止に有利であることが挙げられている。一方で、圧着解除時には四方から噴流が生じる。一方、摺動式は、水密時にダム上流側の作用水圧または扉体の自重を利用して水密面の面圧を与える方式で、一切強制的な外力を使用しない水密方式を指す。そのため、水密ゴムを摺動しながらゲートを操作する方式であり、特徴としては、圧着操作等が無いこと、スムーズな操作が可能であること、構造が簡単で保守点検が容易であることが挙げられる。一方で、水密ゴムの摩擦があるため、開閉荷重が大きくなるデメリットが挙げられる。

図 2-28 に高圧ローラゲート一覧（昭和 61 年時点）を示す。出し平ダムおよび佐久間ダムを除いてすべてアーチダムに設けられている。また、水密方式は、ほとんどが圧着式であり、これは開閉荷重を小さくするためである。なお、ここで裾花ダムは、ゲート規模および設計水深ともに平均的な規模であり、水密方式は戸当たり圧着方式となっている。

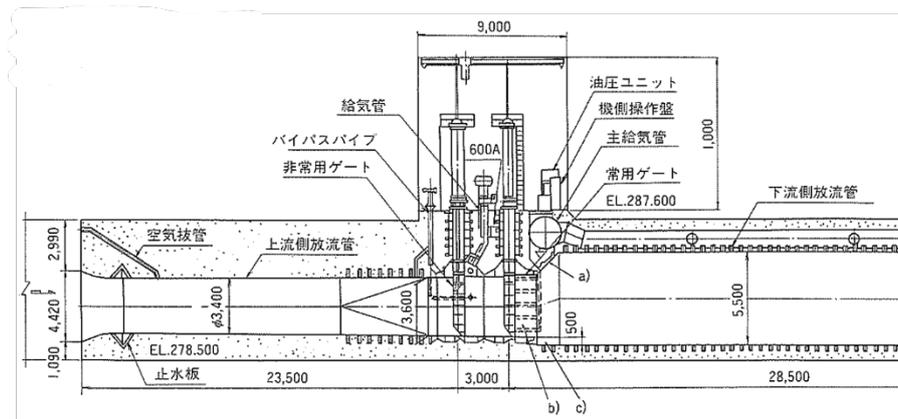


図 2-27 高圧スライドゲートの例（十勝ダムの例）（文献³⁴より引用）

番号	据付年	ダム名	吐出部寸法 幅×高さ (m)	設計水深	水圧 (t)	水密方式	アンカー方式
1	31	佐久間	2.5 × 3.0	61.5	461	B 1	—
2	36	室 牧	2.62 × 2.62	41.3	283	A 2	TR
3	38	一ツ瀬	1.6 × 2.3	55.0	202	B 1	PC・B
4	39	天ヶ瀬	3.42 × 4.56	35.8	558	A 1	PC・C
5	41	川 俣	3.22 × 3.14	61.9	626	A 2	PC・B
6	43	小 渋	3.5 × 3.86	46.9	634	A 1	PC・B
7	44	裾 花	3.5 × 3.55	42.9	533	A 3	PC・C
8	45	矢 作	4.0 × 4.0	48.1	770	A 1	PC
9	45	青蓮寺	3.62 × 3.78	43.4	594	A 3	PC・B
10	47	下 笠	3.5 × 3.5	58.1	712	A 1	PC
11	48	新豊根	3.8 × 4.19	71.5	1138	A 2	PC・C
12	49	阿武川	3.8 × 3.8	66.8	965	A 1	PC・C
13	52	真名川	3.9 × 3.9	68.2	1028	A 1	PC・B
14	55	川 治	3.07 × 3.44	68.0	718	A 2	PC・B
15	57	四 時	3.75 × 5.1	29.7	543	B 3	—
16	60	出し平	5.0 × 4.9	46.4	1136	—	—

A1：扉体圧着式 A2：ゴム圧着式 A3：戸当り圧着式

B1：摺動・ゴム戸当り側 B3：摺動・ゴム不連続

TR：テンションロッド PC・C：PC鋼線 PC・B：PC鋼棒

図 2-28 高圧ローラゲート一覧（文献³⁴より引用）

2.5.3 常用洪水吐きの設置状況と計画堆砂位の関係

一般に、ゲート製作技術さえクリアすれば、ゲートは深い位置にあればあるほど、必要放流量に対し、断面は小さくでき、コスト面や施工性等で優位になると考えられる。一方で、裾花ダムの事例のように、貯水池内堆砂との関係性も重要である。

図2-29はダム堤体の直上流面の縦断面の模式図を示しており、図2-30は高田ら³⁶⁾によって整理された計画堆砂位及び放流管設置標高の関係を示したものである。高田らの調査したダムについては、その半数以上のダムにおいて放流管（コンジットゲート）が計画堆砂位よりも低標高に設置され、おおよその平均値としては計画堆砂位から-10mに設置されている。これは一般にダムの堆砂形状が、ダムの底部から一様とならず、堆砂率(現在の堆砂量/計画堆砂量)が100%となった場合においても、ダム直上流部では、堆砂位がコンジットゲートの設置標高を下回るためである。実際に昭和60年版の多目的ダムの建設³⁷⁾においては、「計画では堆砂面は水平にとるが、通常は傾斜形状となり、微細なウォッシュロードが堤体まで達し水平に堆積する。従って、常用洪水吐きの設置標高は、計画堆砂面以下とすることはできるが、ウォッシュロードの推定堆積面以下とすることは好ましくない。」とする記述が見受けられる。

そのため、一般に洪水調節用のコンジットゲートでは、設計時に土砂が到達することは考えられていない。しかし、裾花ダムの事例のように堆砂率100%を上回っているダムにおいては、堆砂位がコンジットゲート設置標高に達することが考えられる。つまり、今後多くのダムで堆砂が進むにつれ、コンジットゲートには、沈木も含め設計外の負荷が作用する可能性がある。そのような状況について、柏井は³⁸⁾、特に堆砂について高濃度の濁水が放流されること、放流管埋没の可能性のあることを指摘している。特に、放流管の埋没については、放流設備入口周辺の堆砂状況、閉塞した場合に確実にパイピングを生じさせ水みちを確保できる条件、その際の管内圧力の低下量等を判断材料として、どの程度の埋没であれば許容されるかを検討する必要性を指摘している。

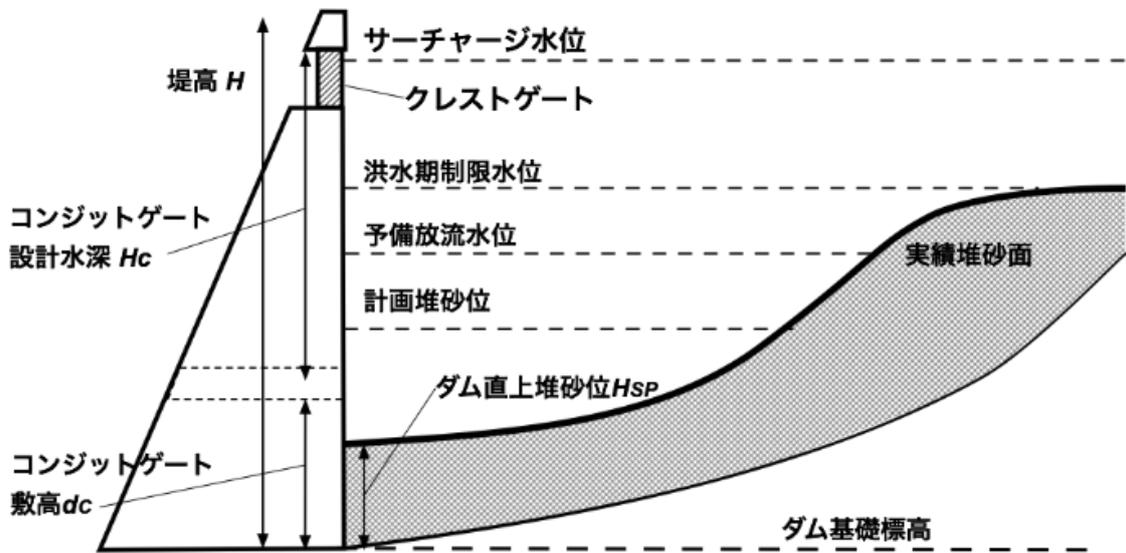


図 2-29 ダム縦断面図と各種計画水位およびコンジットゲート設置諸量 (文献³⁶より引用)

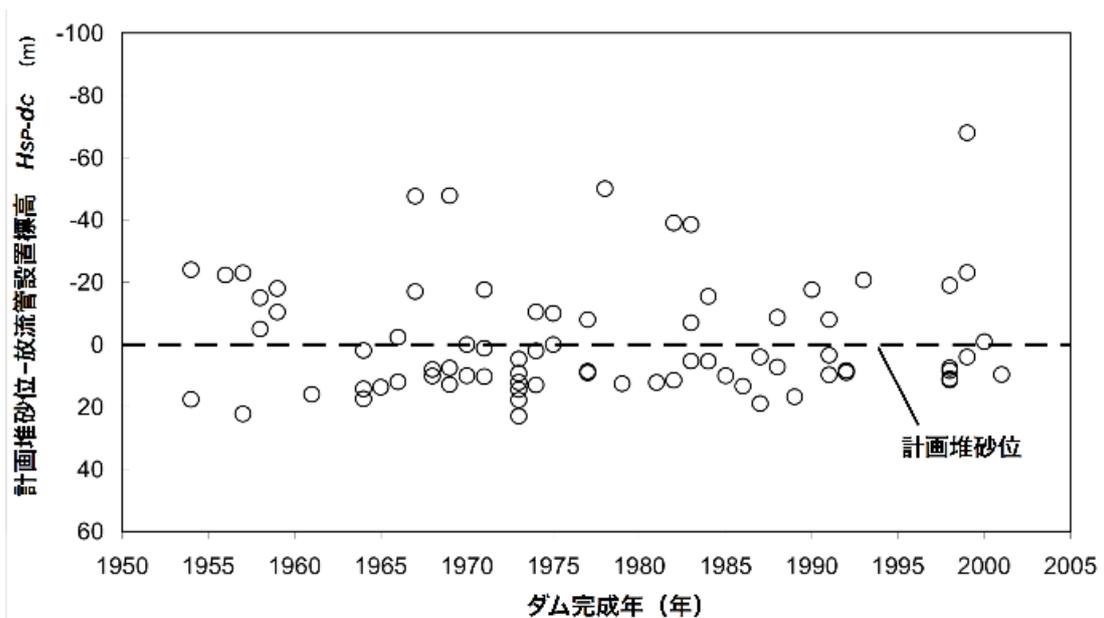


図 2-30 計画堆砂位から放流管設置標高までの高さ (文献³⁶より引用)

2.5.4 土砂通過を想定したゲート形式の例

2.3.2 節で示した黒部川の宇奈月・出平ダムの河床部に設けられた排砂ゲートによる連携排砂や、耳川水系における通砂・スルーシング，等が実施されているダムにおいては，当初設計時から，大量の土砂，とりわけ粘土シルトよりも粒径の大きい，砂や礫，石の通過が想定される。本節では，そのような土砂通過を想定したゲート設計事例として宇奈月ダムの事例を概説する。

宇奈月ダムは³⁹⁾、黒部川水系黒部川に建設した多目的ダムあり、洪水調節、発電、水道用水の供給を目的としている。同ダムでは、土砂流出が極めて多い流域であることから、年間流入推定土砂量が140万m³とされ、堆砂容量の確保が不可能であることから、洪水末期に水位低下を行い、河道の掃流力でもって土砂を下流へ排出することを目的に、排砂設備が2条設置されている。図2-31に示すとおり、ゲートは、上流側から、止水ゲート、調節ゲート、副ゲートの3門で構成されている。止水ゲートは、常時排砂設備の止水を行うものである。止水ゲートの全開時には、土砂による戸溝破損が懸念されるため、戸溝内に挿入される戸溝保護枠が設置されている。調節ゲートは、排砂時の土砂流の調節放流及び遮断に使用され、副ゲートは調節ゲートの異常時に使用される予備的な役割を持つゲートである。また、3枚のゲートは、土砂によるゲート操作不能を招かないよう、図2-32に示すフローで操作を行う計画とされ、止水ゲートの戸溝内の土砂フラッシング操作などが特徴的である。また、土砂が流下する部分へのステンレス鋼板を用いた摩耗対策や、水密ゴムの二重化、砂礫衝突による塗膜の剥離対策のための耐食性に優れる材料選定、扉体の変形・損傷対応のための分解組み立てが可能な構造等、排砂設備としての工夫・対策が多く実施されている。

このように、土砂が通過する場合、流水のみに比べて検討事項が非常に増加することが分かる。加えて、通過する土砂の粒径、量、も重要であり、裾花ダムの事例に関しては、沈木の大きさや形状といった懸案事項もあり、作用外力変化を適切に評価することが重要と考えられる。

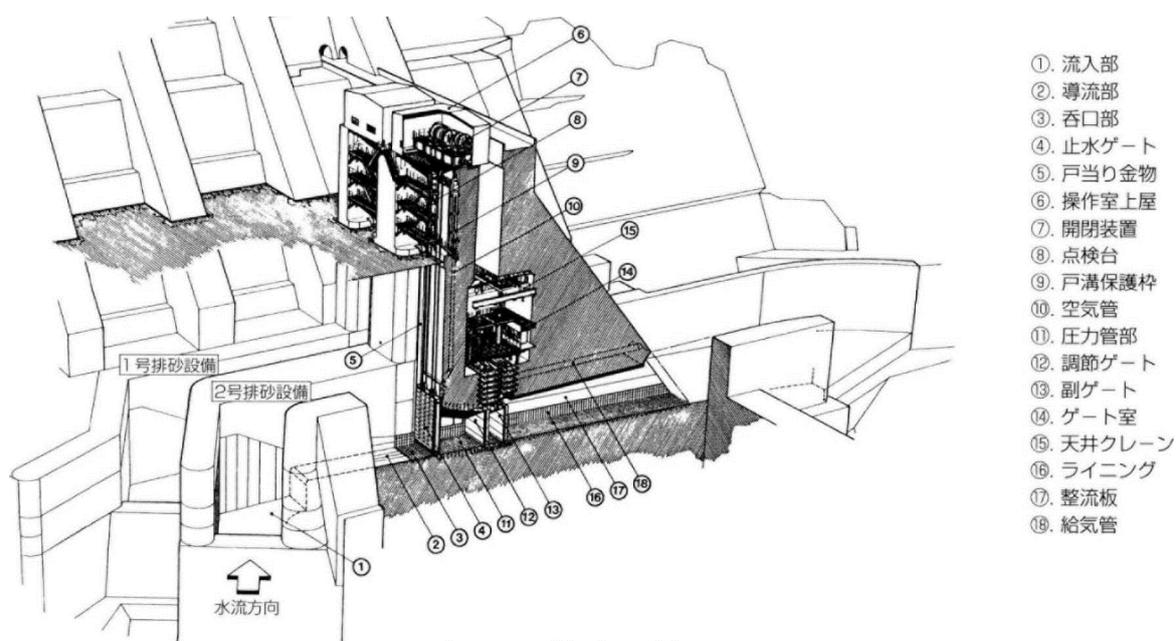


図2-31 宇奈月ダムの排砂設備の鳥観図（文献³⁹⁾より引用）

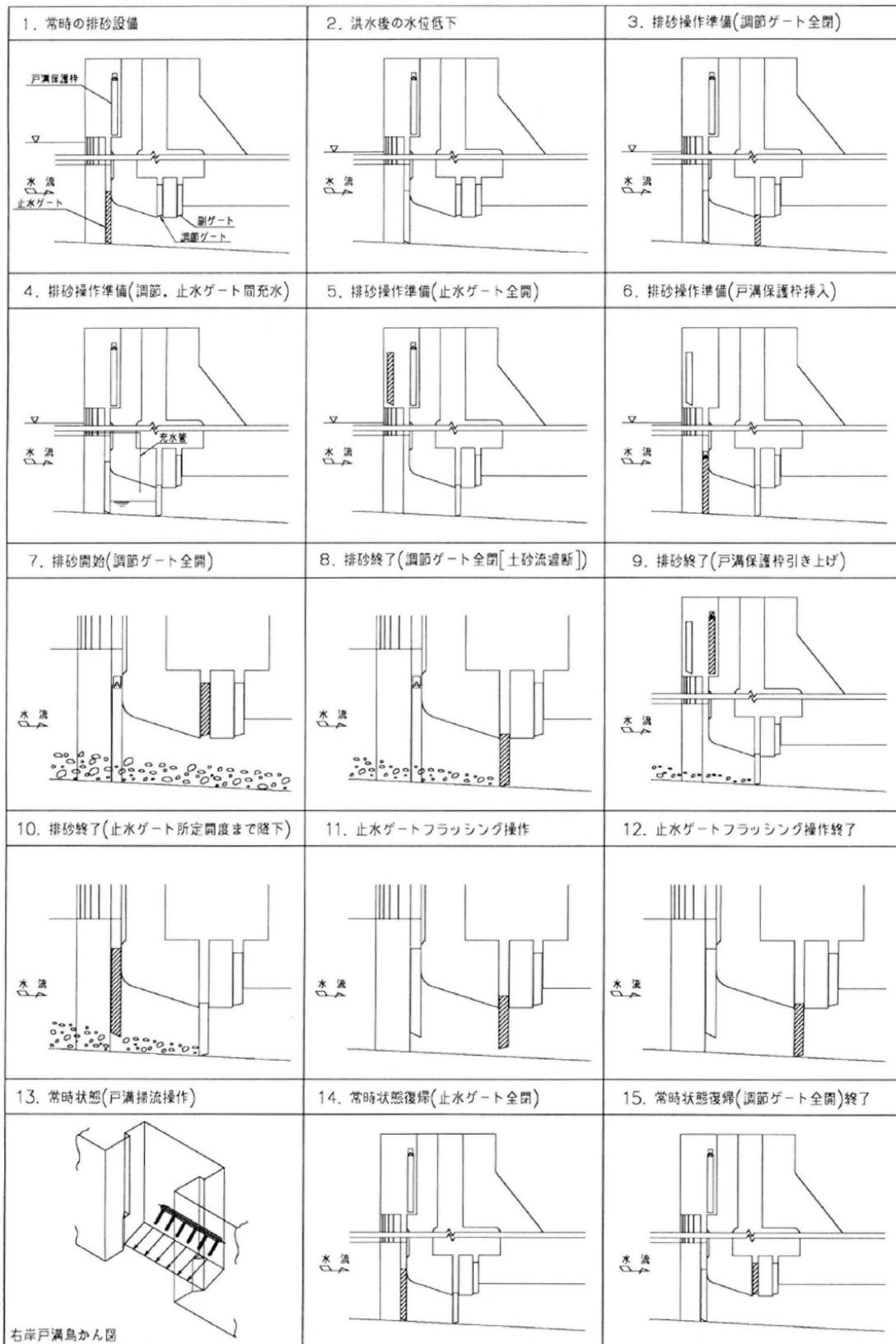


図 2-32 宇奈月ダムの排砂設備の排砂操作フロー (文献³⁹⁾ より引用)

2.6 ダム水理構造物の点検体制と安全管理

2.6.1 国内のダム点検体制と安全管理

国内のダムの安全管理に関する指針として、ダム総合点検実施要領⁴⁰⁾が挙げられる。ここでは、ダムの構成要素毎に求められる機能の種類とその影響度に応じて、管理レベルが設定されており（表 2-6）、そのレベルと対象ダムの健全度の組み合わせにより、予防保全あるいは事後保全の対応がその緊急性も含めて取り決められている（表 2-7）。なお、洪水吐きは洪水調節能力に影響を及ぼすものとして、細別の管理レベル H と設定されており、健全度に関わらず予防保全の対象となっている。また、図 2-33 は、同資料に示されている近年のダムの補修実績累計で、洪水吐きの補修実績はダムの補修実績のおよそ半分以上を占め、その数は建設からの経過年の増加と共に増大していることが分かる。

また、ゲート等の機械・電気・制御系についてもダム用ゲート設備等点検・整備標準要領（案）およびダム用ゲート設備等点検・整備・更新マニュアル（案）^{41), 42)}にまとめられており、健全度評価を行い、ゲート操作に重要な構成要素の特定に基づいた予防保全または事後保全の取り決めがなされている。図 2-34 は、同マニュアルにおいて示されている効率的な維持管理方策の考え方である。

このように、安全管理については、特に海外によくみられるダムリスクマネジメントのような枠組みはなく、設計基準の中で余裕を確保し、また点検による健全度評価と主に予防保全による管理が行われている。一方で、裾花ダムの事例のように、当初設計上考慮していない堆砂および沈木がゲートへ外力として作用し、その機能低下を引き起こす場合、図 2-34 に示すフローにおいて、土砂および沈木がゲートへ到達する外力変化と、それを受けるゲートに係る構造・機械・電気系統の脆弱性を加味した点検・評価フローが必要と考えられる。

表 2-6 ダムの機能と構成要素(工種)管理レベルとの関係例(コンクリートダムの場合) (文献⁴⁰)より引用)

ダムの機能	構成要素の例	要求性能	構成要素(工種)管理レベル
I. 堤体の安定性	ダムコンクリート、継目	堤体の安定性	レベルH 高
	グラウチング、基礎排水孔	基礎地盤の安定性	
	法面保護工、擁壁工	アバットメントの安定性	
II. 洪水吐きの安定性	流入部・導流部・放流管・減勢工	洪水吐き(土木)の安定性	レベルH 高
	越流部・ゲート扉体	洪水吐き(ゲート設備)の安定性	
III. 貯水池の貯水性	地すべり防止工、漏水防止工、集水井工	堤体周辺斜面、貯水池周辺斜面の安定性	レベルH 高
	貯砂ダム	治水調節機能に関わる貯水容量の確保	レベルH 高
		利水機能に関わる貯水容量の確保	レベルM 中
	曝気装置、分画フェンス	貯水池の水質保全性	レベルL 低
IV. ゲート設備の機能性	ゲート扉体、開閉装置、操作橋、門構、戸当り	洪水吐きの放流能力	レベルH 高
	取水・放流施設	利水設備の取水・放流能力	レベルM 中
	環境用水放流設備	環境用水放流設備の放流能力	レベルL 低
	緊急水位低下設備	緊急水位低下設備の放流能力	レベルH 高
V. 関係者の使用性	管理用通路、照明等	管理者の安全・使用性	レベルH 高
	天端橋梁、高欄	一般利用者の安全・使用性	

表 2-7 構成要素(細別)の管理レベルと健全度区分の組み合わせに基づく保全対策の基本的考え方 (文献⁴⁰)より引用)

施設の管理レベル及び健全度に対応する保全対策一覧表		構成要素(細別)の管理レベル		
		H	M	L
健全度の区分	a1	○機能低下により、緊急の措置が必要な状態 予防保全 (直ちに対策を実施)	予防保全 (直ちに対策を実施)	事後保全 (速やかに対策を実施)
	a2	○劣化・損傷により機能への影響が認められ、何らかの措置が必要な状態 予防保全 (直ちに対策を実施)	予防保全 (速やかに対策を実施)	事後保全 (重点状態監視) (必要に応じて対策を実施)
	b1	○現状では機能が維持されているが、劣化・損傷が認められ、近い将来、機能に影響を及ぼすと見られる状態 予防保全 (速やかに対策を実施)	予防保全 (重点状態監視) (必要に応じて対策を実施)	事後保全 (保全対象に至っていない)
	b2	○現状では機能が維持されているが、劣化・損傷が認められ、中長期的には機能に影響を及ぼす可能性がある状態 予防保全 (重点状態監視) (必要に応じて対策を実施)	予防保全 (状態監視)	事後保全 (保全対象に至っていない)
	c	○軽微な劣化・損傷が認められるが機能には支障がなく、将来的にも機能に影響を及ぼす恐れがない状態 ○劣化・損傷が認められない状態 予防保全 (状態監視)	予防保全 (状態監視)	事後保全 (保全対象に至っていない)

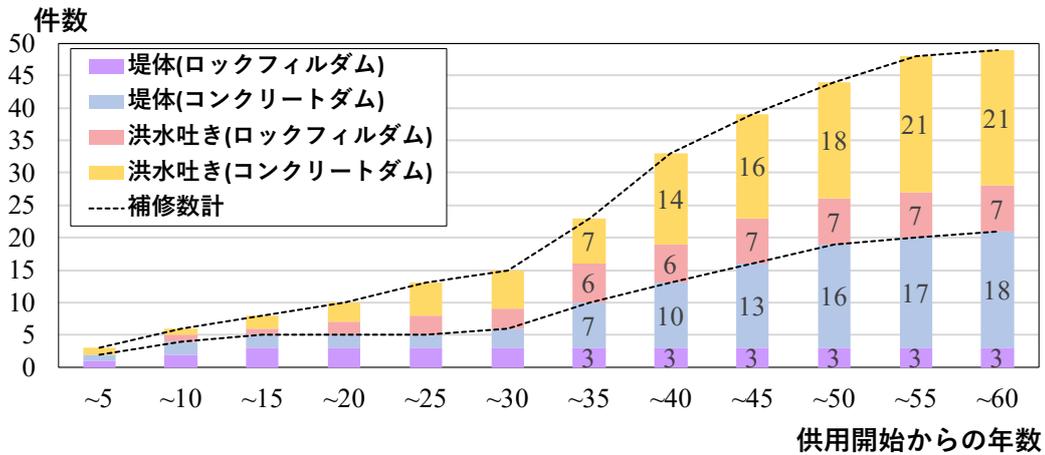


図 2-33 補修実績累計 (堤体および洪水吐き) (文献⁴⁰⁾より引用, 一部改変)

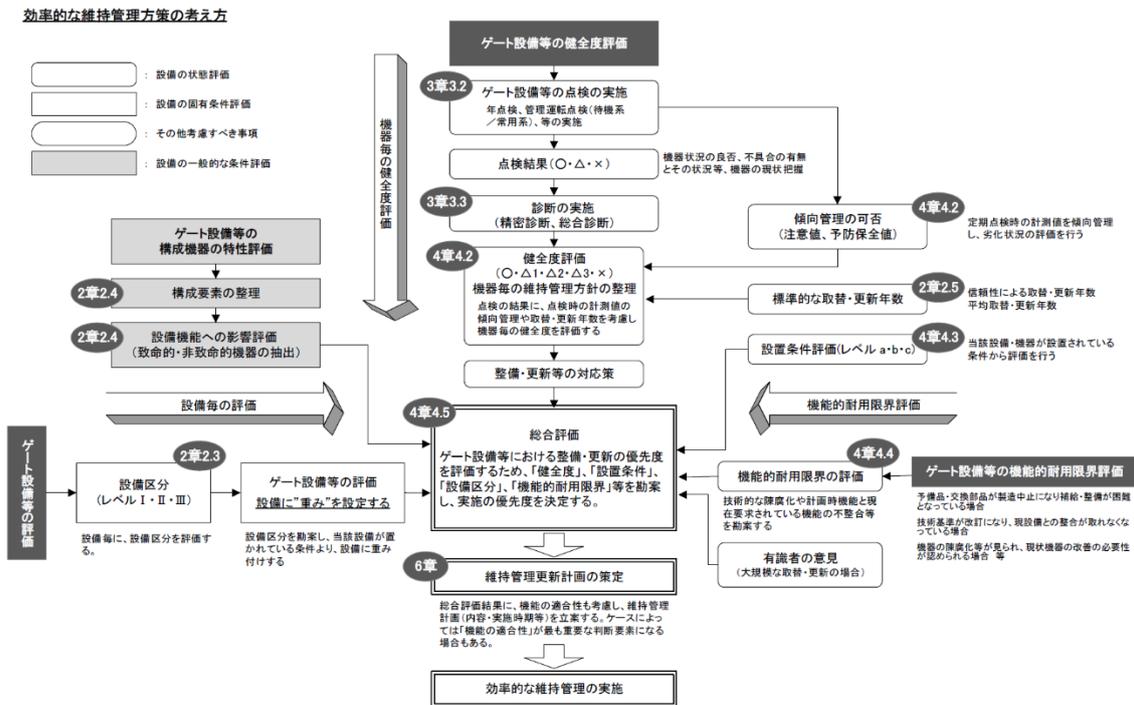


図 2-34 効率的な維持管理の考え方 (文献⁴¹⁾より引用)

2.6.2 海外における洪水吐きの安全性に係る設計基準例

スイスでは、ダム安全性に係る設計基準の一つとして「n-1」ルールが用いられている。Swiss Federal Office of Energy (SFOE)によると、これはダム安全性を確保するために、全てのダムについて、発電用放流設備(もしあれば)及びn門のゲートを有する洪水吐きの中で最大の放流量を有するものが使用不可の場合(n-1)でも、design flood(確率規

模：1/1000)を安全に流下させる能力を必要とするものである。また、アースダムについては design flood の 1.5 倍（既存ダムの場合）で与えられる safety flood についても同条件を満たす必要がある（表 2-8）⁴³⁾。この「n-1 rule」により、多くの要因と不確実性を含む「n-1」条件下での放流能力のチェック、あるいはその結果生じる下流への影響について事前に検証することが可能となっている。

同事例は、裾花ダムのゲート操作不能事例に近い状況を示しており、設計条件として余裕代を見る方法の一つとして、またリスク評価の方法としても重要な示唆を与えていると考えられる。

表 2-8 「n-1 rule」の適用範囲

	Design flood (確率規模：1/1000)	Safety flood (Design flood の1.5倍)
コンクリートダム	発電設備なし 最大放流能力を持つゲート一門 使用付加（n-1 rule）	発電設備なし
フィルダム	発電設備なし 最大放流能力を持つゲート一門 使用付加（n-1 rule）	発電設備なし 最大放流能力を持つゲート一門 使用付加（n-1 rule）

2.7 結語

本章では、はじめに裾花ダムのゲート操作不能事例の詳細について示すとともに、そのリスク要因であるダム貯水池堆砂・流木・沈木に関する既往研究および管理の現状を概観し、裾花ダムにおけるゲート操作不能事例のダム管理課題全般における位置づけ、課題対策に必要な貯水池における諸現象の理解、リスクシナリオおよび対策を検討するために検討不足な点等について示した。概要は以下のとおりである。

2.2 節で示したとおり、裾花ダムにおけるゲート操作不能事例は、ダムの堆砂進行が常用洪水吐き呑口敷高に到達したことが引き金となり、堆砂面に存在した沈木が新たなリスク要因として表面化した課題である。この課題を通じて、沈木はどのように発生し、どのようにゲートまで到達したか、また、ゲートに到達した土砂および沈木はどのようなメカニズムでゲート操作不能を引き起こしたか、という問いと、今後堆砂進行が進む他ダムにおける同事象の再発防止に向けた検討の必要性、が浮かび上がった。

2.3 節では、ダム貯水池堆砂の課題と管理の現状を示し、ダムの堆砂特性の概要とその課題を示し、常用洪水吐き敷高に達した堆砂による課題の位置づけを明瞭とした。また、ダム堤体前面の密度堆積層の土砂除去に有用な方法を示し、Pressure Flushing と呼ばれる排砂方策をレビューするとともに、今後の検討必要性を提示した。さらに、現行の堆砂対策実施判断基準においては、堆砂形状の影響、特に密度流堆積層の堆砂高さについては考慮されておらず、その必要性を提起した。

2.4 節では、ダム貯水池流木の流入実績例を紹介するとともに、ダム貯水池流木対策の手引きに基づく管理の現状を示した。一方で、沈木については特に管理指針はもちろん認知する技術はなく、海外でも水位低下時には課題となっていることを示した。さらに、欧州における流木管理の方針についても触れ、そのハザードアセスメント手法を示した。

2.5 節では、ダムの常用洪水吐きに設けられるコンジットゲートについて、その技術の変遷の概要と設計外力の概要、常用洪水吐き設置敷高と計画堆砂位の関係を示した。その中で、コンジットゲートは計画堆砂位より低標高に設置されるものの、ダム貯水池堆砂の特性から、土砂の接近を外力として考慮しておらず、今後堆砂進行が進む中で、その検討必要性を示した。また、今後堆砂がコンジットゲートに達する場合を考える際の参考事例として、宇奈月ダムの排砂設備の事例を示し、土砂通過を考慮した場合のゲート設計の違い、検討事例を提示した。

2.6 節では、国内のダムおよび関連設備の点検体制・安全管理について、現状の仕組みを示した。国内のダムでは、その安全管理は主に、設計時の余裕代、点検に基づく予防保全が基本となっている。つまり、裾花ダムの事例のようなゲート操作不能を考える場合に、それが設計時の余裕代を超過している場合は、超過分がリスクとして残ることとなる。あるいは、予防保全すべき対象として、ゲート周辺の土砂・沈木管理をしっかりと位置付けることが重要と考えられる。参考としたスイスの「n-1 rule」は前者を検討する場合に参考となる。

次章以降では、本章におけるレビューを踏まえ、ダム貯水池における沈木動態およびゲートの操作不能のメカニズム、同事象の他ダムにおける再発防止に向けたリスク管理の枠組み、等について検討を進める。

参考文献

- 1) 関克浩：裾花川流域ダム再生事業における取り組み，ダム技術, No.413, pp.51-57, 2021
- 2) 大矢通弘, 角哲也, 嘉門雅史, “ダム堆砂の性状把握とその利用法,” ダム工学 12 卷(3), pp. 174-187, 2002.
- 3) 江崎一博, “貯水池の堆砂に関する研究,” 京都大学学術情報リポジトリ紅, 1976.
- 4) 芦田和男, 高橋保, 道上正規, 河川の土砂災害と対策, 森北出版, 1983.
- 5) 岡野眞久：ダム貯水池流砂技術の堆砂対策への適用に関する研究, 京都大学学術情報リポジトリ紅, 2006.
- 6) 会計検査院, 平成 25 年度決算報告, 2014.
- 7) 独立行政法人水資源機構下久保ダム, 下久保ダム堆砂に関する技術資料, 下久保ダム堆砂対策技術検討会資料, 2020.
- 8) 国土交通省北陸地方整備局河川部, 関西電力株式会社電力流通事業本部北陸電力部：黒部川出し平ダム宇奈月ダム連携排砂のガイドライン(案), 2017.
- 9) 吉村健, 朝崎勝之, 角哲也：河川の安全度を考慮した耳川水系におけるダム連携通砂方法の策定, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, I_961- I_966, 2018.
- 10) M.E.Meshkati Shahmirzadi & A.A.Dehghani, T.Sumii, Gh Naser,A.Ahadpour : Experimental investigation of local half-cone scouring against dam, River Flow, pp.1267-1273, 2010.
- 11) M.E.Meshkati Shahmirzadi & A.A.Dehghani, T.Sumii, A. Mosaedi and M. Meftah H. : Experimental Investigation of Pressure Flushing Technique in Reservoir Storages, Water and Geoscience, Volume1, No.1, pp.132-137, 2010.
- 12) Samad Emamgholizadeh and Manoochehr Fathi-Moghdam: Pressure flushing of cohesive sediment in large dam reservoirs, Journal of hydrologic engineering, 19(4), pp.674-681, 2014.
- 13) Sanat Kumar Karmacharya, Nils Ruther, Jochen Aberle, Sudhir Man Shrestha and Meg Bahadur Bishwakarma : Physical modelling of pressure flushing of sediment using lightweight materials, Journal of Applied Water Engineering and Research, 2021
- 14) U.S. Army Engineer Research and Development Center : Cherry Creek dam pressure flushing case study 2017-2018, 2018.
- 15) Anton J. Schleiss, Mário J. Franca, Carmelo Juez & Giovanni De Cesare : Reservoir sedimentation, Journal of Hydraulic Research Vol. 54, No. 6 (2016), pp. 595–614.
- 16) 後藤孝臣, 木下博道, 河島宏治：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, 2019.
- 17) 国土交通省水管理・国土保全局：国交省所管ダムの堆砂状況について,
https://www.mlit.go.jp/river/dam/taisa/taisha_joukyouR3.pdf, 令和4年11月取得.
 - 18) 国土交通省水管理・国土保全局：ダム貯水池土砂管理の手引き(案), 2018.
 - 19) 国土交通省水管理・国土保全局：主な堆砂対策,
<https://www.mlit.go.jp/river/dam/taisa/taisa3.pdf>, 令和4年11月取得.
 - 20) 池淵周一編著, 辻本哲郎, 谷田一三, 角哲也, 竹門康弘, 一柳英隆：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, 2009.
 - 21) 小島裕之・永谷言・久保裕基・孫夢霞・川村育男・角哲也：気候変動下における事前放流が貯水池内堆砂進行特性に与える影響, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.76, No.2, I_853-I_858, 2020.
 - 22) 小松利光監修, 山本晃一編集：流木と災害発生から処理まで, 技報堂出版株式会社, 2009.
 - 23) 牧孝憲, 高橋正人, 落修一, 三宅且仁, 尾崎正明：全国のダム流木発生量調査, 土木学会論文集 G, Vol.63, No.1, pp.22-29, 2007
 - 24) 流域一貫の総合流木管理に向けて, 平成26年度 京都大学防災研究所水資源セミナー講演要旨および発表資料, 2014.
 - 25) 国土交通省水管理・国土保全局：ダム貯水池流木対策の手引き(案), 2018.
 - 26) 森田実, 田中茂信, 高橋洋一：H12.9 東海豪雨による流木調査, 河川技術論文集, 第8巻, pp.231-236, 2002.
 - 27) 岡野健, 祖父江信夫：木材科学ハンドブック(普及版), 株式会社朝倉書店, 2013.
 - 28) 矢澤亀吉：日本産木材の比容及貫當りの容積に就いて, 日本林学会雑誌, 第二十三巻, 第八号, 1941.
 - 29) 坂野章：橋梁への流木集積と水位せきあげに関する水理的考察, 国土技術政策総合研究所資料第78号, 2003.
 - 30) Itoh, T., Ogawa, K., Nishimura, S. and Kuraoka, S. : Preliminary Experimental Studies on Debris Flow with Woods focusing on Difference of Specific Weight of Tree Species, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol.3, No.1, 2010.
 - 31) V. Ruiz-Villanueva, H. Piégay, V. Gaertner, F. Perret and M. Stoffel : Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers, Catena, Vol140, pp.182-194, 2016.
 - 32) Swiss Committee on Dams : Floating Debris at Reservoir Dam Spillways, Report of the Swiss Committee on Dams on the state of floating debris issues at dam spillways, 2017.
 - 33) U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation : Reservoir Debris Management, 2016.
 - 34) 社団法人ダム・堰施設技術協会：ゲート総覧Ⅰ 解説編(第1章～第4章), pp.17-26, 1987.
 - 35) ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準(案)
 - 36) 高田康史, “貯水池土砂管理手法とダム計画・管理への適用に関する研究,” 京都大学博士

学位論文 DOI:10.14989/doctor.k12268, 2006.

- 37) 建設省河川局：多目的ダムの建設—昭和 62 年版第 4 巻設計 II, 1987.
- 38) 柏井条介：ダムの水理設計，一般財団法人ダム技術センター，2018.
- 39) 林俊克, 青川満, 藤田明, 小松原貴志, 上田徹志, 土生川真二, 本田育夫, 福谷伸一, 北條勝也, 福永滋則, 高木芳朗, 新谷浩二：排砂設備（宇奈月ダム特集），取水と制水, No.44, pp.41-62, 2002.
- 40) 国土交通省水管理・保全局河川環境課：ダム総合点検実施要領・同解説, 2013.
- 41) 国土交通省総合政策局 公共事業企画調整課 施工安全企画室：ダム用ゲート設備等点検・整備標準要領（案），2018.
- 42) 国土交通省総合政策局 公共事業企画調整課，水管理・国土保全局 河川環境課：ダム用ゲート設備等点検・整備・更新マニュアル（案），2018.
- 43) INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS : Bulletin Preprint – 170 Flood Evaluation and Dam Safety, 2018.

3章 ダム貯水池における堆砂進行および沈木動態

3.1 概説

2章で示したとおり、裾花ダムのゲート操作不能事例においては、常用洪水吐き敷高に達した堆砂および堆砂面に存在した沈木が主なリスク要因と考えられる。筆者の知る限り、このような沈木に起因するダム貯水池管理上の課題はあまり例がなく、沈木は従来大きな課題ではなかったものと考えられる。しかし、裾花ダムのような貯水池堆砂が計画を超えて進んだダムにおいては、土砂と沈木が複合的に作用することで、洪水吐きゲートや各種取水設備の障害となる、貯水池管理上の新たな課題が顕在化している。

このような新たな課題に対応するためには、まず新たなリスク要因である沈木について、いつ、どこで、どのように発生し、またゲート近傍まで移動するのか、等のダム貯水池における動態を理解する必要がある。

そこで本章では、堆砂進行下におけるダム貯水池の沈木動態を把握するために、以下の検討を行った。

はじめに、ダム管理者へのアンケートにより、沈木による現状のダム貯水池管理上の課題の全貌の把握を試みた。これより、これまであまり表面化していなかった沈木の課題について網羅的に把握するとともに、流木管理の現状および常用洪水吐き周辺の堆砂状況についても調査を行った。これを踏まえ、沈木発生過程に関わる流木管理上の改善点等について考察する。

次に、ダム貯水池内における沈木の存在状況を把握するため、堆砂測量に用いられるナローマルチビーム(Multi Beam Echo Sounder, 以下 MBES)の結果の詳細分析による沈木探査手法を提案するとともに、実際の裾花ダムにおける沈木探査結果とその考察を示す。

さらに、ダム貯水池における沈木の発生過程として、網場捕捉後に流木から沈木に至る過程を想定し、流木や生木を用いた基礎的な沈降実験結果から、樹種等流木条件の違いによる密度変化過程の変化について考察する。

最後に、以上の検討を通じて得られた知見を踏まえ、貯水池における沈木探査方法、沈木発生量を低減させる流木管理方法、等について考察・提案を行う。

3.2 堆砂進行に伴う沈木によるダム貯水池管理上の課題

3.2.1 ダム貯水池の流木管理に関するアンケート調査の概要

調査対象は、令和元年度時点の国土交通省所管の直轄、道府県、水資源機構管理のダムである。アンケート調査の実施期間は 2020 年 6 月から 7 月であり、該当ダムほぼ全ての 561 ダムから回答を得た。なお、調査結果は概ね管理開始以降から前年度までの管理状況を反映している。

本調査の趣旨と概要は、以下の 3 点である。

- (1) 流木と沈木を区別した上で、沈木に関連するダム貯水池管理上の課題を把握する。これまで流木による貯水池管理上の課題は検討されてきているが、沈木に関する情報は少ない。そこで、沈木によるダム設備や貯水池管理への影響について調査した。
- (2) ダム貯水池における流木管理の実態から、流木と沈木の質的（密度や形状）な違いを踏まえて、貯水池における沈木の発生要因・過程を分析する。沈木の発生要因・過程として、洪水時にダム貯水池に流入した流木は、樹種等によって比重等の物理的性質が異なり、①時間の経過とともに沈降する、②直接湖底へ運搬される、といった挙動で沈木化すると考えられる。①については、網場捕捉後の流木管理に起因するため調査項目とした。
- (3) ゲートを有する放流設備（低位標高の洪水吐き、取水設備等）の敷高とその周辺の堆砂標高との関係を把握する。沈木が貯水池管理上の課題となるのは、堆砂が放流設備敷高に達した場合であるため、現況の堆砂状況の分析を行うこととした。

3.2.2 アンケート調査結果および考察

アンケート調査趣旨の 3 項目について、以下のとおり得られた結果を示す。

(1) ダム設備および貯水池管理へ及ぼす影響について

表 3-1 は沈木による堆砂対策の作業障害および、ダム堤体近傍の発電・用水等取水口の運用障害の事例数を示している。現状では堆砂対策時の沈木による障害事例数の割合は多くないものの、今後の貯水池管理において沈木は潜在的なリスク要因と考えられる。表 3-2 は表 3-1 の事例内容であり、沈木によるダム管理上の具体的な課題とその対応の一覧を示す。また、図 3-1 に、障害発生時に発見した沈木の大きさについて、回答のあったダムの長さの内訳を示す。長いものでは、10m～20mまでのものも確認されている。

以上より、実際の貯水池管理における沈木の主な影響として、堆砂対策における掘削・浚渫の施工効率の低下、取水口等設備の機能維持への影響、船舶航行の障害が生じていることが明らかとなった。図 3-2 にそれらをまとめて示す。また、対策には沈木の分別や潜水作業等、時間的・金銭的成本が発生していることが明らかとなった。

表 3-1 沈木等による貯水池管理上の支障事例数

調査項目	細別	ダム数
沈木による堆砂対策の作業障害の事例	掘削時	11
	浚渫時	8
	貯水池内工事等	11
ダム堤体近傍の発電，用水等取水口の運用障害となった事例	堆砂のみ	10
	堆砂+沈木	10

表 3-2 沈木（堆砂含む）による課題とその対応

<p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> - 掘削箇所上部への沈木の堆積 - 掘削，土砂と木の選別に時間を要する - 浚渫土砂を圧送投入時に沈木がスクリーン，投入口に残り支障となる - 沈木がグラブに挟まり土砂掘削量が低下 <p>【対応】</p> <p>切断，分別，撤去による</p>
<p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> - 発電，用水，水道取水口，選択取水設備の最下段の埋没により運用停止 - エアレーション装置上への沈木の堆積 - 常用洪水調節バルブの閉動作に支障 - フロート式水位計の連通管が堆砂により閉塞，計測不可 <p>【対応】</p> <p>水位低下，潜水作業，サンドポンプによる土砂除去，フラッシュ放流の繰返しによる除去</p>
<p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> - 湖面巡視時や観光用水陸両用バス運行時の航行時，船舶のプロペラをぶつけない等の安全確保に注意が必要 <p>【対応】</p> <p>安全な航行ルートを目安ブイを設置</p>

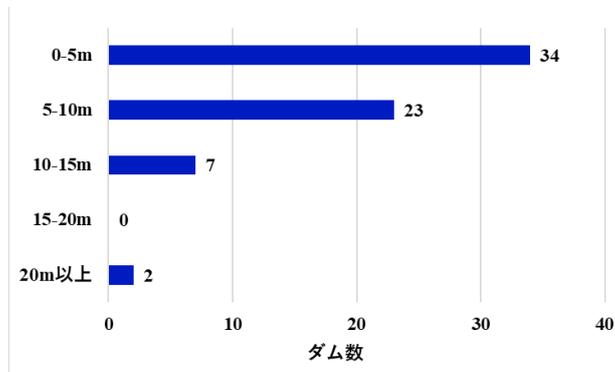


図 3-1 沈木を発見したダムとその長さの内訳

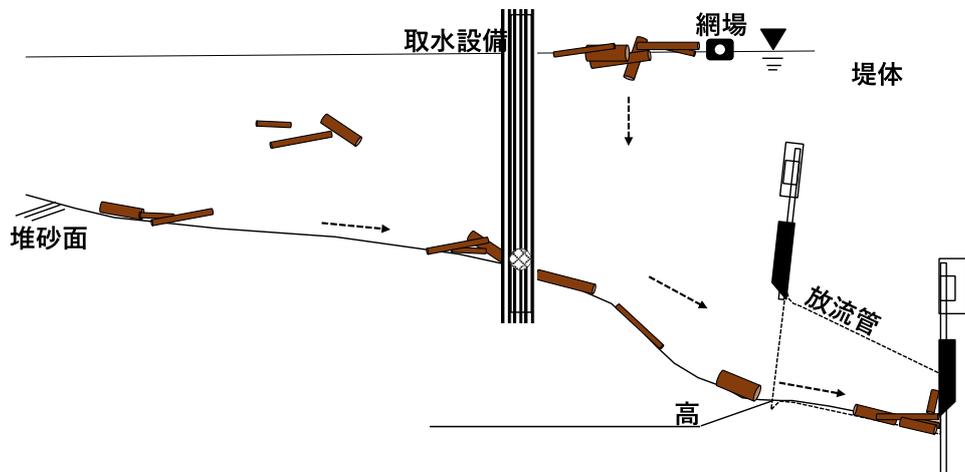


図 3-2 沈木によるダム貯水池管理上の支障事例

(2) ダム貯水池における沈木の発生過程に関する流木管理状況

沈木の発生過程の一つとして、網場からの沈降が挙げられる。そのため洪水に伴う流入流木が、貯水池流入後どのように取り扱われているかに着目した。

はじめに、図 3-3 に通年規模の流入流木の回収頻度、図 3-4 に主な回収場所を示す。ここで、通年規模とは 2 章でも示したとおり、計画規模相当以上の洪水が発生していない年の流入流木量を指し、平常時の回収頻度という意味である。通年規模の流木回収頻度はダムごとに異なり、各ダム地点の流況、同流域の森林整備環境等が影響するものと考えられる。流木の主な回収場所は網場、湖面、湖岸が多い。また、主な回収場所となる網場について、貯水池内設置箇所を整理したものを図 3-5 に示す。網場は多くのダムで堤体近傍のみに設けられており、網場から流木の沈降が生じる場合、洪水吐きに近い網場周辺で沈降流木が生じるケースが多いと考えられる。

計画規模相当以上の洪水時に発生する大規模な流木の流入実績があるダム（561 ダム中 127 ダム）に対し、その際の流木の全回収期間を尋ねた結果を図 3-6 に示す。流木が大規模に流入した際には多くのダムで 1～6 ヶ月以内で回収しているものの、1～2 年かかるケースも確認された。さらに回収期間中に、現場感覚として網場で捕捉された流木の沈降割合を尋ね回答を得た 20 ダムの結果を図 3-7 に示す。1 ヶ月以内に 1～2 割の流木が沈降すると認識しているダムは 10 ダム以上であり、3 割を超えるダムもあった。また、大規模な流木の流入の有無に関わらず、66 ダムにおいては、網場で捕捉した流木が沈降している現象を確認していた。いずれも沈降場所は定かでないが、洪水吐きや各種取水口の付近であれば、貯水池運用上のリスク要因になると考えられる。

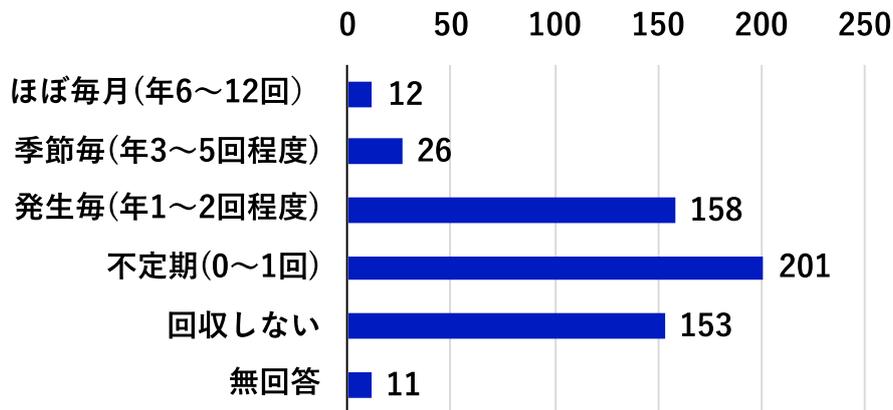


図 3-3 通年規模の流入流木の回収頻度

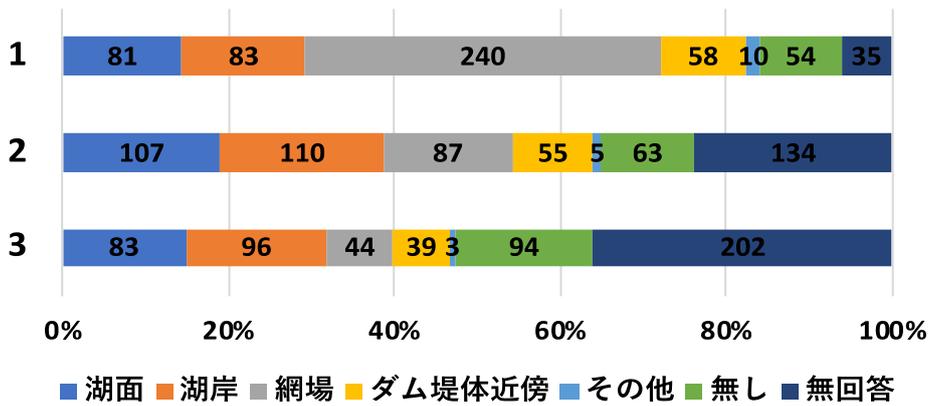


図 3-4 流木の主な回収場所 (主な順に 3 箇所)

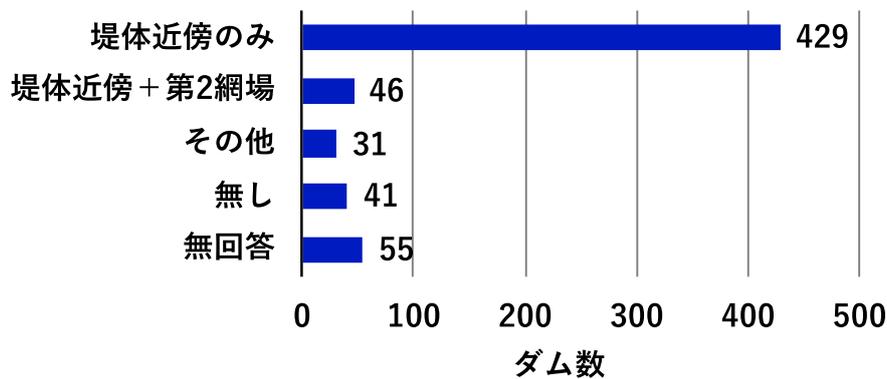


図 3-5 ダム貯水池内の網場の設置状況

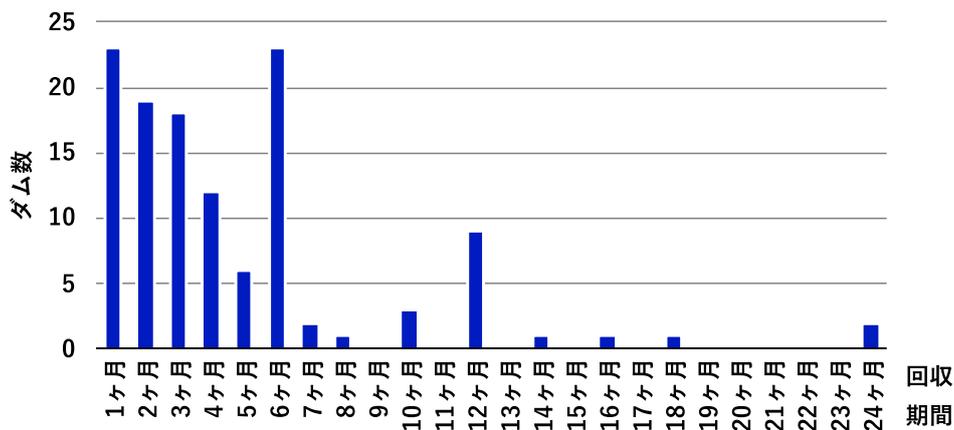


図 3-6 大規模な流木の流入時の全回収期間

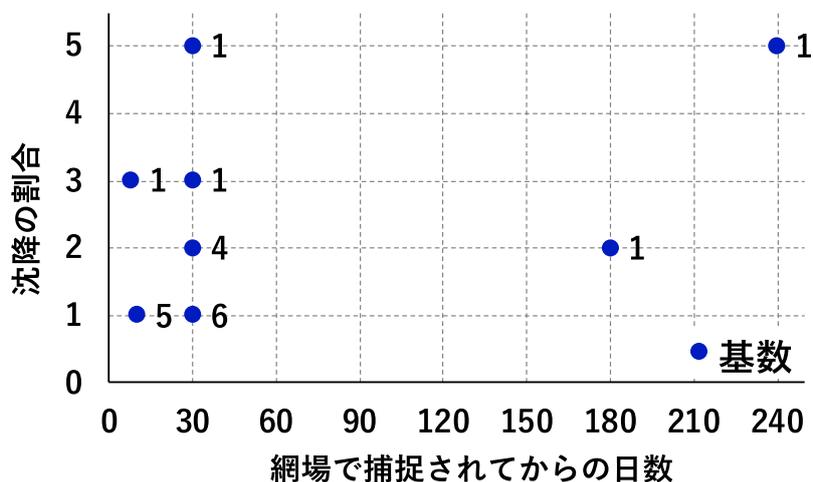


図 3-7 大規模な流木の流入時の現場感覚における沈降割合

(3) 洪水吐き敷高とその近傍の堆砂標高の関係

洪水吐きや各種取水口等の運用操作に支障をきたす場合として、堆砂のみ、あるいは堆砂と沈木が複合的に作用する場合は考えられる。そこで、洪水調節上重要である常用洪水吐きを対象に、その敷高に対する堆砂の進行度合いを調査した。図 3-8 に常用洪水吐き周辺のイメージ図を示す。また、図 3-9 に洪水吐き呑口敷高とその周辺の堆砂標高の差（以下、クリアランス）の調査結果を示している。

図 3-8 に示すとおり、常用洪水吐きは計画堆砂位よりも低標高に設置されるダムが少ない。これは効果的な洪水調節効果、効率的な放流能力断面の確保、堆砂は縦断方向に斜め堆砂すること等の理由によると考えられる。また、図 3-9 に示すとおり、クリアランスが 5m 以下となっているダムは 15 ダム程度あり、常用洪水吐きが低標高に設置されたダムや堆砂進行が著しいダムと考えられる。

ここで、呑口敷高に達した土砂は、常用洪水吐きから排出されるといったプラスの側面も考えられるが、その際に沈木が存在する場合には裾花ダム同様の障害が生じる懸念がある。

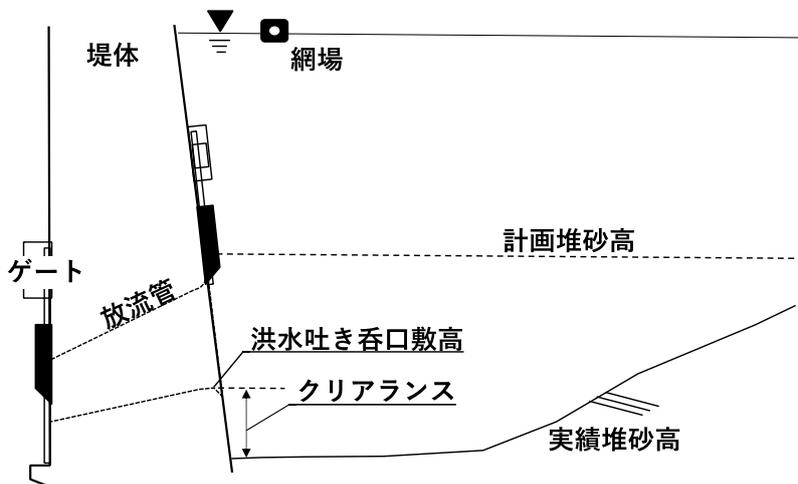


図 3-8 常用洪水吐き周辺のイメージ図

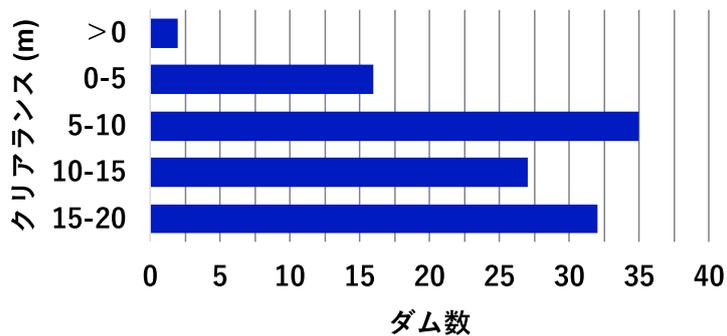


図 3-9 堆砂位に対する呑口敷高のクリアランス

3.3 ダム貯水池における沈木探査

3.3.1 沈木の探査方法

(1) ダム貯水池堆砂の MBES 測定の概要

ナローマルチビーム(Multi Beam Echo Sounder, 以下 MBES)測量は、音響測深法の一つであり、測量船の底部に取り付けられたソナー部から扇状に発射した超音波ビームの反射を受信することにより、面的かつ高精度にダム湖底の3次元地形を観測できる特徴がある(図3-10)¹⁾。データの測点間隔は次式より得られる。

$$\Delta X = \frac{V}{L} \quad (1)$$

$$\Delta Y = 2 \frac{D}{N} \tan \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

ここで、 ΔX : X方向(進行方向)の測点間距離(m)、 ΔY : Y方向(直交方向)の測点間距離(m)、 V : 航行速度(m/s)、 L : 発射頻度(発/秒)、 D : 水深(m)、 θ : スワス幅(度)、 N : 受信ビーム数(点/発)である。なお、(2)式は、Y方向の平均的な測点間隔を示しており、スワス幅(ビーム発射範囲の角度)両端では測点間隔が広がり、中央部で測点間隔が小さくなる。そのため、地形の解像度としては船底直下が最も小さくなり、次式で求められる。

$$\Delta y = d \varphi \quad (3)$$

ここで、 Δy : Y方向最大解像度(m)、 d : 船底の水深(m)、 φ : ビーム(rad)である。なお、スワス幅はビーム幅にビーム数を乗じたものとなっている。以上より、詳細な地形把握には、ビーム幅が重要となる。なお、実際の測量においては、水深に応じて航行軌跡を重複させることが可能なため、Y方向はより高密度に観測可能である。

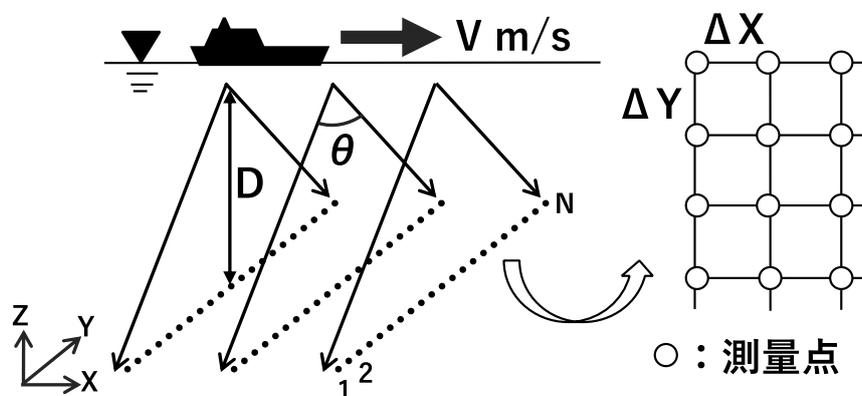


図 3-10 MBES 測量による測量点取得イメージ

(2) 詳細なデータ処理による沈木の抽出

高密度で取得される測量結果は、大量の点群データ(以下ランダムデータ：データ処理前の点群データ)となるため、通常は図3-11に示すフローで、堆砂量の算出に必要な堆砂面形状を得るためのデータ処理が行われている。なお、データ点検・ノイズ除去時の対象としては、測器の異常値や流木、巨石等による局所的な凹凸が挙げられる。図3-12に得られるランダムデータおよびノイズ除去作業のイメージを示す。ここで留意すべきは、このデータ点検・ノイズ除去の工程で、単なるデータエラーとは別に、実際に湖底に存在する障害物による信号が捨てられてしまっていることにある。

そこで本研究では、この MBES 測量のランダムデータを最大限活用することを考える。これまでの検討で、ランダムデータ時点では湖底の空間分解能で数 cm からの測量精度を確保できることが明らかとなっており、これは堆砂面上に堆積している沈木を十分探査可能なオーダーである。そこで、堆砂面形状を得るためのデータ点検・ノイズ除去プロセス前のランダムデータを詳細に分析することで堆砂面上の沈木の抽出を試みた。

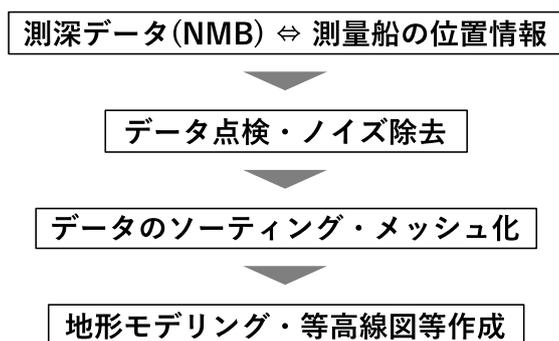


図 3-11 MBES のデータ解析フロー図(文献より一部改変)

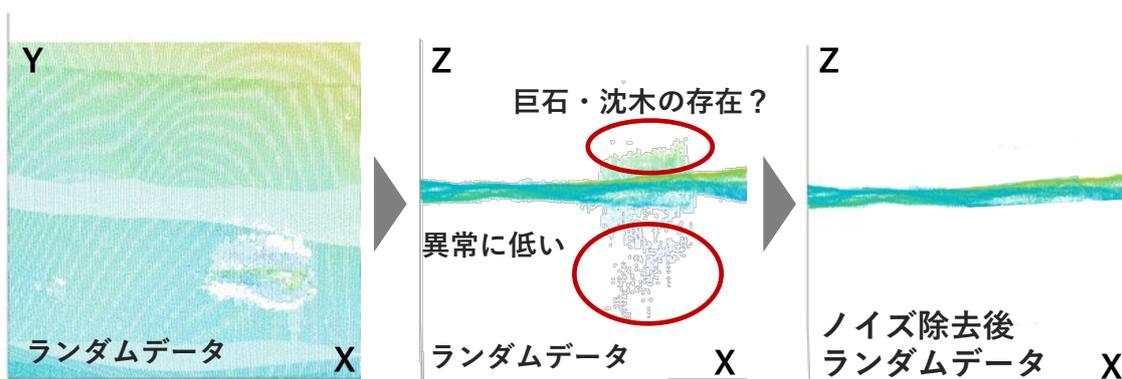


図 3-12 堆砂面上の沈積物に対する取得点群データのイメージ

3.3.2 ダム貯水池における沈木探査の概要

上記手法を用いた沈木探査を行うため、沈木によるゲート障害事例のあった長野県裾花ダムにおいて、2020年9月にMBES測量を行った。

測量方法としては、図3-13に示すとおり、測量用ボート底部に設置されたソナー部より、MBES測深データを取得し、ボートに搭載されているGPSより位置情報を得ることで、xyz方向に座標を持つ点群データを取得した。

測量機器としては、(1)で示したSonic2024(R2Sonic社)を用いた。本機種では、ビーム幅 0.5° 、ビーム数256点、スワス幅 120° 、発射頻度約10発/秒(スワス幅 120° 、水深30m時)のデータが得られる。これより、(1)式および(2)式よりデータの測点間隔は測量場所の水深とボートの航行速度により決定され、例えば、水深30m、船速1.5m/sの場合、 $\Delta X=0.15\text{m}$ 、 $\Delta Y=0.4\text{m}$ 、最大解像度として $\Delta y=0.26\text{m}$ となる。さらに、図3-14に示すとおり水深が大きい50mの場合は $\Delta Y=0.68\text{m}$ 、最大解像度として $\Delta y=0.44\text{m}$ 程度であり、点群間隔が粗く、空間の分解能が低下する。なお、航行軌跡の重複割合(ラップ率)は約20%としており、さらに高い密度のデータが得られる。

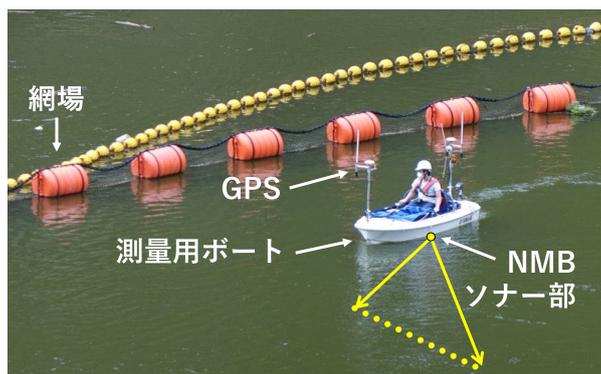


図3-13 測量状況の概要

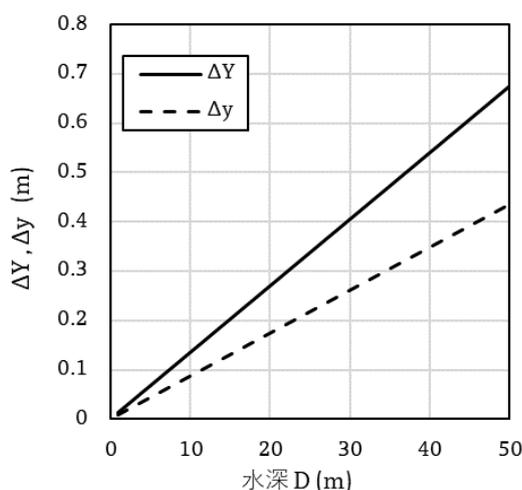


図3-14 水深と計測測点間隔の関係

3.3.3 沈木の探査結果および考察

裾花ダム堤体からおよそ 60m 上流に設置された網場周辺（図 3-15）における MBES 測量結果について、データの詳細分析による可視化を行った結果を図 3-16 に示す。堆砂状況としては、網場直下における貯水池の堆砂標高は EL.523m 程度であり、水深は 20m 程度(測量時貯水位は EL.543m 程度)であった。ここで、図中の陰影、段彩の詳細に着目すると、黄色点線枠囲み部に示すとおり、棒状の突起が確認される。いずれも網場周辺の直下に存在しており、沈木であると想定される。

次に、図 3-16 から個別に抽出された沈木を図 3-17～図 3-19 に示す。図 3-17 で確認された沈木は、長さ 11.6m、幹径約 0.5m であり、幹～根までの形状を十分に確認できる。また、図 3-18 においても、長さ 10.2m、根部分の幅が 2.3m の沈木が確認でき、特に、段彩図のグラデーション変化から、沈木の先端部にかけて堆砂中に埋没している様子が把握できた。さらに、図中左側には、長さ 1.8m 程度と推察される比較的小さい沈木も観察され、こちらも同様に一部堆砂中に埋まっていることが推定される。このような沈木の長さが短い場合でもダム管理の観点からは支障をきたす懸念があり、把握できることが望ましい。

一方で、図 3-19 に示すように、さらに長さが小さくなってくると、形状が棒状から球状となり、巨石やゴミあるいは沈木の根部分のみ堆砂面上へ突出しているか等、沈木であるかどうかの判別は難しくなる。また、全体が埋没している場合も当然探査は不可能となる。

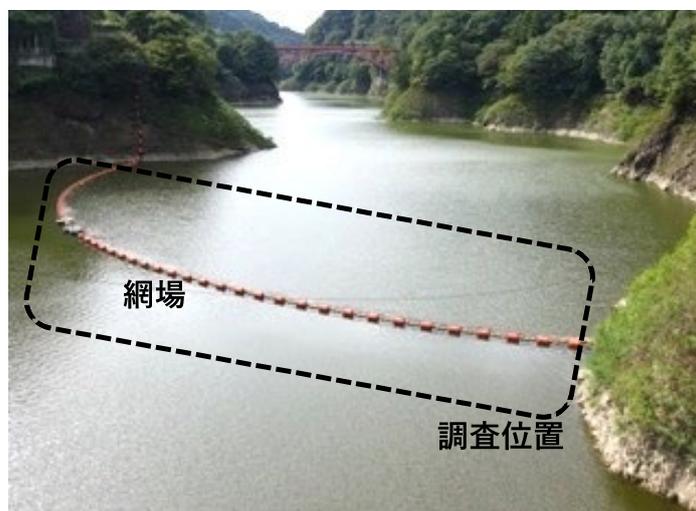


図 3-15 裾花ダム上流に設けられた網場

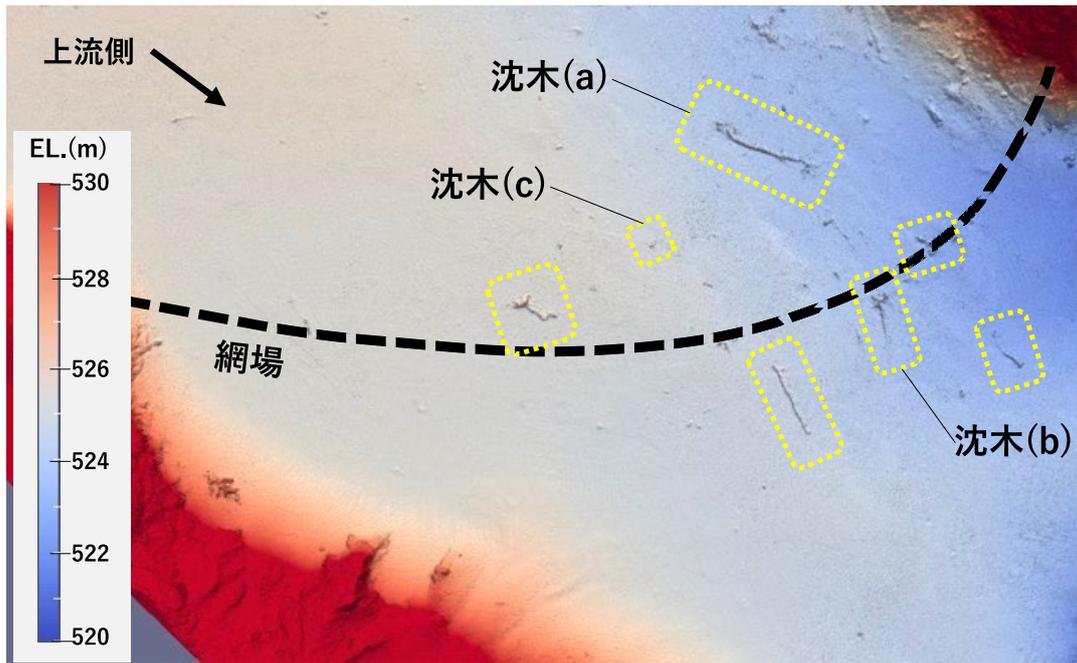


図 3-16 網場周辺における MBES 測量結果

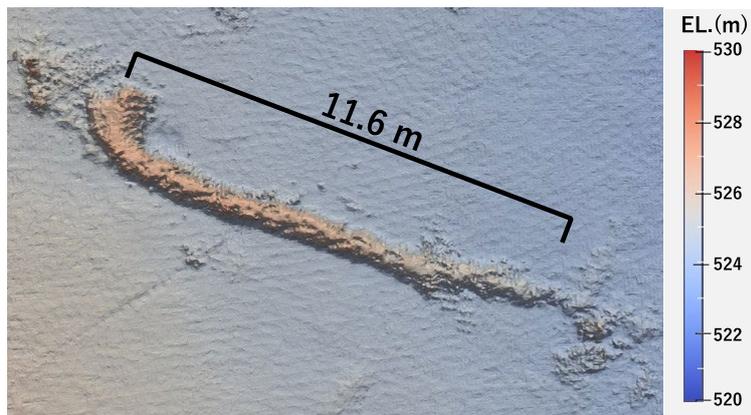


図 3-17 個別抽出された沈木(a)

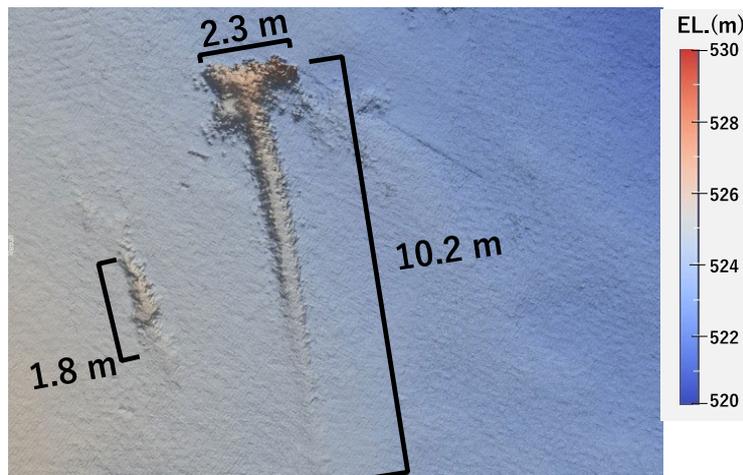


図 3-18 個別抽出された沈木(b)

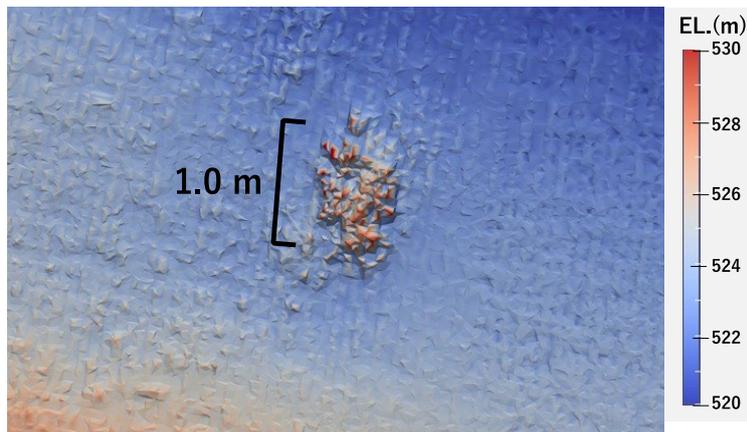


図 3-19 個別抽出された沈木(c)

3.3.4 貯水池全体における堆砂進行と沈木分布状況

貯水池全体の堆砂進行状況および貯水池内全体の沈木分布状況について、小柴ら²⁾が分析した結果を引用し考察する。図 3-20 の上図に示すとおり、貯水池の堆砂進行状況については、2 章でも述べたとおり、堤体近傍の堆砂高さはゲート敷高に到達しており、2つの常用洪水吐きの直上流において、ゲート放流に伴うすり鉢状の洗堀形状が確認できる。貯水池内上流側においては、堤体から 600m 付近において、下流側への急落部が確認され、ここがデルタ肩となっている。

沈木については、図 3-20 の下図に示すとおり、貯水池内で合計 52 箇所抽出された。検出された沈木の長さの中央値は 3.6m、最大値は 11.8m であり（図 3-21）、ゲート幅 3.5m より大きい沈木が湖底に多く存在している。その分布としては、貯水池全体では湖岸付近および前節で示したとおり網場周辺に分布しており、特に網場周辺（下図ハッチング部）の

沈木は相対的に大きな沈木が分布していることが分かる。また、堤体付近右岸側は、流木回収地点となっており、そこにも数本の集積がみられる。さらに、沈木の各個別の姿勢に着目し、ダム湖主軸に対する沈木の長軸の角度のヒストグラムを示した結果を図 3-22 に示す。沈木の多くは、長軸の角度が 30 度以下となっており、流れと平行に近い状態となっている。これは、沈木が流れによる駆動力を最も受けにくい姿勢で停止するためと考えられる。一方、ゲート極近傍においては、沈木が検出されていないが、これはゲート操作時に洗堀形状内の沈木は下流へ流出したか、または埋没化しており、検出できていない可能性等がある。

以上のとおり、分布状況としては、網場周辺に多くまたそのサイズは比較的大きい。また、湖岸付近等の貯水池内の流れが滞留する箇所において、沈木発生がみられることから、一度に多くの流木を捕捉・保持する網場等からの流木沈降現象が、沈木の発生過程として有力なルートとなっていると推察される。

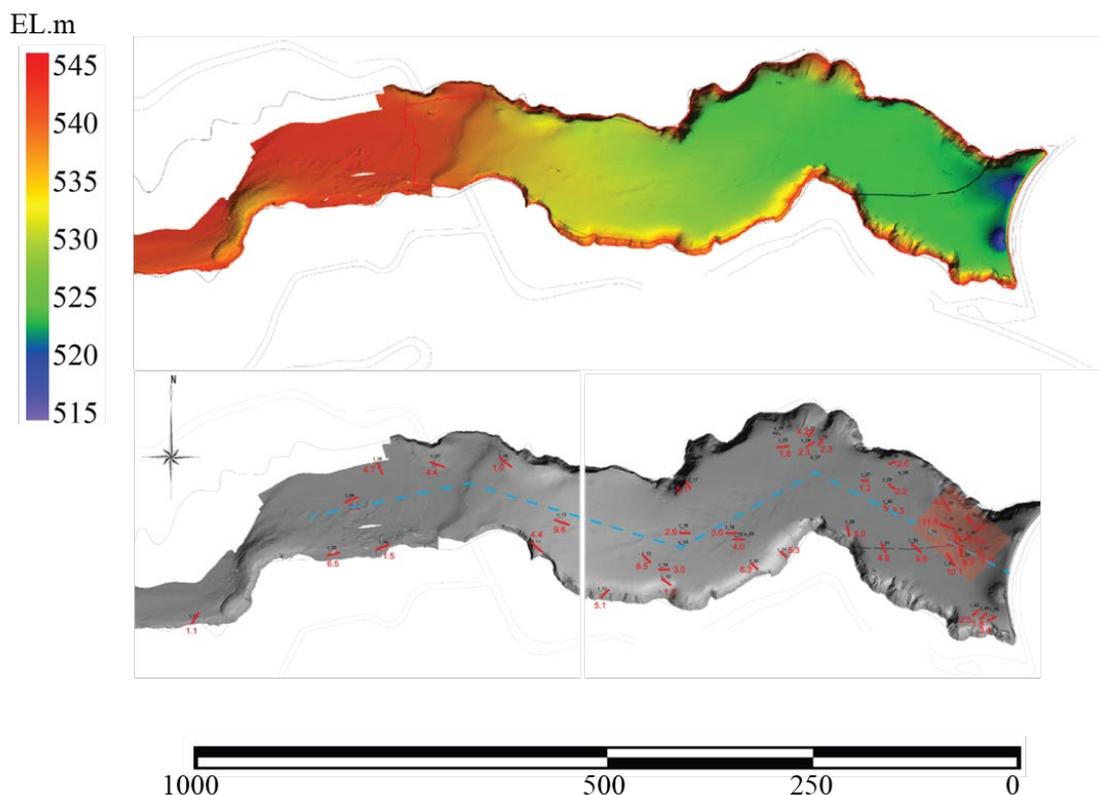


図 3-20 貯水池全体の MBES 測量結果(上)と沈木と思われる物体の分布(下)
(下図、赤棒の数値は長さ(m)、破線はダム貯水池の主軸) (文献²⁾の図を一部改変)

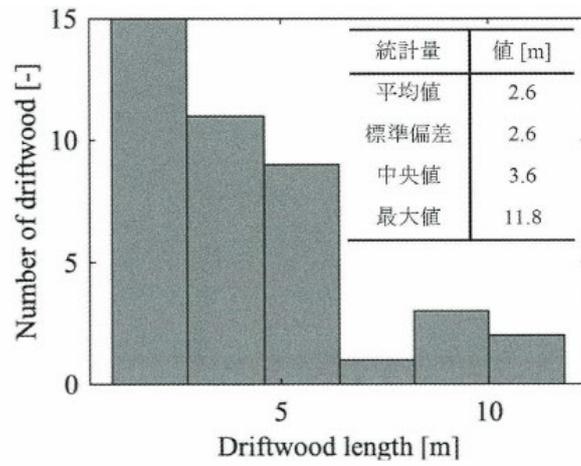


図 3-21 沈木長の統計量とヒストグラム（文献²⁾の図を引用）

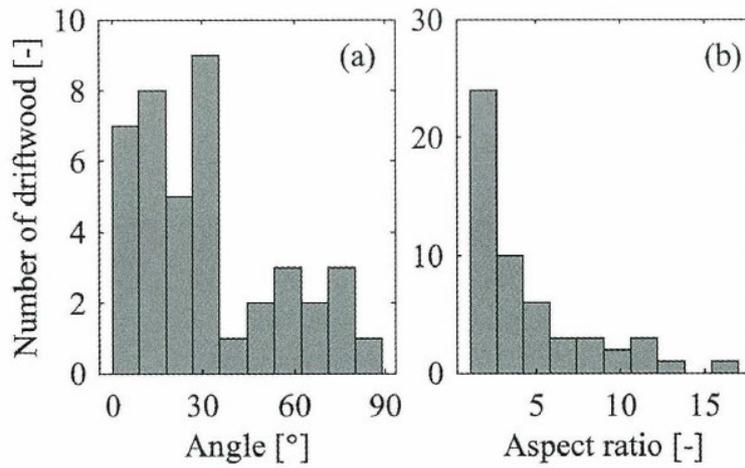


図 3-22 (a) ダム湖の主軸に対する沈木の角度の分布, (b) 沈木の縦横比の分布（文献²⁾の図を引用）

3.4 沈木発生過程に関する室内実験

3.4.1 密度変化過程に関する室内実験の概要

前章の沈木探査で確認されたとおり、沈木の発生過程として、流木を網場で捕捉後沈降するケース、および洪水時に流木が直接湖底へ運搬されるケースが考えられる(図 3-2)。そこで、前者のケースに着目し、裾花ダムおよび小渋ダム貯水池において回収された流木および流木の発生源となる同ダム流域の立木を収集し沈降実験を行うことで、沈木の発生過程に関する基礎的な検討を行った。以下では、流木は、ダム貯水池に到達するまでに停止、再移動を繰り返した腐朽を伴うもので、立木は、大規模出水時の河岸侵食等による新規発生材を想定している。

実験は 2 章で示した Ruiz-Villanueva ら³⁾の既往研究を参考に、裾花ダムの流木および同流域の立木、小渋ダムの流木を用いて実施した。実験は、各サンプルを水槽に浮かべ、時間経過毎の密度変化を計測し、沈降過程を観察した(図 3-23)。サンプルの密度は、質量を体積で除すことにより算出した。計測方法は図 3-23 に示すとおり、質量は 1g 単位で計測し、体積は充水したアクリル筒にサンプルを投入した際の水位変化より計測した。計測の総期間は 102 日とし、質量計測は 0, 3, 6, 10, 16 日目、その後 1~2 週間に一回のペースで計測しており、体積は 0, 21, 88 日目に計測を行った(表 3-3)。ここで、3 回の体積計測において各サンプルとも 1.0~1.1 倍程度の体積膨張が見られたため、体積計測日以外の密度計算には、質量増分を考慮し重みを付けて内挿した体積の値を用いた。また、2 章で示したとおり、流木・立木には、多様な密度変動要因があることから、今回の検討では、値にばらつきを有することを前提とした上で、対象サンプル全体の密度変化の傾向を検討することとした。

各サンプルの概要は次のとおりである。

(1) 裾花ダムにおける流木

2020 年 7 月に裾花ダムへ流入し、網場で捕捉された流木を回収した(図 3-24, 図 3-25)。回収した流木は、長さ 0.5~2.0m、幹径 0.1~0.3m の 25 本であり、流木の樹皮は一部または全体が剥がれている。顕微鏡による樹種同定結果は表 3-3 のとおりである。

(2) 裾花ダム上流域における立木

裾花ダム上流域を中心に、河道沿いの胸高直径 0.1~0.25m、高さ 6m~25m、推定樹齢 15~45 年の立木を選定し、樹種の異なる 22 本を採取した(図 3-26, 図 3-27)。実験サンプルとして、1 本あたり 0.5m~0.6m 程度で 2~3 サンプルを切断し、計 70 本程度を用意した。樹皮や葉から同定した樹種を表 3-4 に示す。なお、いずれのサンプルについても数週間の気乾条件下に保管したのち実験を実施した。

(3) 小渋ダムにおける流木

2020年7月に小渋ダムへ流入し、4カ月後の11月頃に回収・陸揚げされた流木を収集した。流木は、大小さまざまであり、実験サンプルとして、1本あたり0.5m~0.6m程度で切断し運搬を行い、およそ100本用意した。陸揚げ・回収状況を図3-28、図3-29に示す。また、顕微鏡による樹種同定結果は表3-4のとおりである。



図 3-23 実験および計測状況（中央：質量，右：体積）

表 3-3 計測スケジュール

計測日(日後)	0	3	6	10	16	21	30	34	41	47	53	60	74	88	102
質量計測	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
体積計測	○					○								○	



図 3-24 裾花ダム流木捕捉状況(2020年7月)



図 3-25 裾花ダムで回収した流木



図 3-26 裾花ダム上流域の立木採取場所の例



図 3-27 裾花ダム上流域で採取した立木

表 3-4 裾花ダム流木・立木および小渋ダム流木の樹種(科, 属)一覧

裾花ダム流木			裾花ダム立木			小渋ダム流木		
科名	属内訳	サンプル数	科名	属内訳	サンプル数	科名	属内訳	サンプル数
クルミ	クルミ	4	ムクロジ	カエデ、トチノキ、	15	マツ	ツガ、カラマツ、マツ、モミ	38
ヒノキ	スギ	3	カバノキ	クマシデ、ハンノキ	13	カバノキ	ハンノキ、カバノキ	12
ブナ	ブナ、コナラ、クリ	3	ヒノキ	ヒノキ、スギ	9	ヤナギ	ヤナギ	12
カバノキ	クマシデ、ハンノキ	2	ブナ	ブナ、コナラ	6	エゴノキ	エゴノキ	7
クロウメモドキ	ケンボナシ	2	ヤナギ	ヤナギ	6	フサザクラ	フサザクラ	6
マツ	カラマツ	2	エゴノキ	エゴノキ	3	カツラ	カツラ	5
ヤナギ	ヤナギ	2	マツ	カラマツ	3	クルミ	クルミ	4
クワ	クワ	1	ミカン	キハダ	3	ヒノキ	スギ、アスナロ	4
ニレ	ニレ	1	クルミ	クルミ	3	ブナ	ブナ、コナラ、クリ	4
バラ	サクラ	1	アオイ	シナノキ	3	マメ	フジキ、イヌエンジュ	2
ムクロジ	カエデ	1	ミズキ	ミズキ	3	ムクロジ	カエデ	2
モクセイ	トネリコ	1	モクレン	モクレン	3	アオイ	シナノキ	1
モクレン	モクレン	1	—	—	—	ウゴキ	ウゴキ	1
13科	16属	24	12科	16属	70	ウルシ	ヌルデ	1
						バラ	サクラ	1
						マタタビ	マタタビ	1
						ミカン	キハダ	1
						モクセイ	トネリコ	1
						18科	26属	103



図 3-28 小渋ダムにおける陸揚げ流木回収状況



图 3-29 小洪ダム回収流木

3.4.2 室内実験の結果および考察

裾花ダムの流木および上流域の立木、小渋ダムの流木の初期密度の計測結果を図 3-30 に示す。なお、以下図中の箱ひげ図は、中央値、最大および最小値、四分位数、また一部エラー値を示している。

裾花ダムの流木密度は $0.3\sim 0.72(\text{g}/\text{cm}^3)$ の間に分布し、中央値は $0.54(\text{g}/\text{cm}^3)$ である。一方、立木密度は $0.56\sim 1.02(\text{g}/\text{cm}^3)$ の間に分布し、中央値は $0.83(\text{g}/\text{cm}^3)$ であり、立木の密度のほうが大きい。これは水分量の違いによるものと考えられる。また、立木において、初期密度がすでに $1.0(\text{g}/\text{cm}^3)$ を上回る樹種はブナ、コナラ属等の広葉樹のブナ科である。なお、小渋ダムの流木密度は、 $0.4\sim 0.84(\text{g}/\text{cm}^3)$ の間に分布し、中央値は $0.64(\text{g}/\text{cm}^3)$ であり、概ね裾花ダム流木と同様の傾向となっている。このように流木および立木密度の初期密度の分布に関しては、既往文献と同様に立木密度が大きい傾向が確認された。

図 3-31 および図 3-32、表 3-5 に裾花ダムの流木および立木の密度変化状況を示す。いずれのサンプルにおいても初期密度から 3 日目にかけて、気乾状態から湿潤状態となる間で密度増加率が大きく、特に流木は中央値で 1.37 倍となりその傾向が顕著となっている。その後、両者ともに密度は数%ずつ増加しながら $1.0(\text{g}/\text{cm}^3)$ に漸近し、102 日目の流木密度の中央値は $0.90(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、立木は $0.97(\text{g}/\text{cm}^3)$ となった。密度が $1.0(\text{g}/\text{cm}^3)$ を上回っているサンプルについては、実験水槽内での沈降を確認しており、1 ヶ月で立木の約 25% が沈木化した。沈降状況としては、密度はおよそ $0.98\sim 1.02(\text{g}/\text{cm}^3)$ の範囲で、一旦斜め状態となって沈降し、微妙なバランスを保ちながら数時間から数日間浮遊したのち、完全に沈降した(図 3-34)。また、図 3-33、表 3-5 内には小渋ダム流木の密度変化を示しているが、概ね裾花ダムの流木と同様の密度変化の傾向を示すものの、データのばらつきが小さく、沈降するサンプルも少ない結果となった。これは、採集サンプル自体が、回収時にすでに小渋ダム湖で 4 カ月間沈降しなかったものであり、より密度変化が小さいサンプルが集められたためと考えられる。

次に、立木について樹種(科)別の密度変化を図 3-35 に示す。ブナ科が最も密度が大きく、102 日後時点の中央値ではカバノキ科とムクロジ科が密度 $1.0(\text{g}/\text{cm}^3)$ に近づいた。スギ等のヒノキ科は比較的密度が小さいものの、一部日数の経過に伴い密度が $1.0(\text{g}/\text{cm}^3)$ を上回るサンプルも確認された。なお、いずれのサンプルにおいても密度増加率は低減しているものの密度増加を続けており、2、3 ヶ月後にはより多くのサンプルで密度が $1.0(\text{g}/\text{cm}^3)$ に達することが想定される。

以上より、本実験からは貯水池における沈木発生過程について、流入した流木の樹種および質的条件(流木または立木)が沈木に至る重要な要因となると考えられる。そのため、ダム貯水池毎に流入する流木の樹種・質的条件の内訳が、そのまま流木が沈降する割合に直結すると考えられる。さらに、立木については初期密度が高く、貯水池到達時点からすぐに一部沈木化するリスクが高く、例えば河岸侵食などで河道に取り込まれたものなどが該当すると考えられる。なお、本実験については、サンプルの数、表面積のばらつき、樹

齡, 個体毎の特性などの密度変動要因に関する検討余地に留意する必要がある。

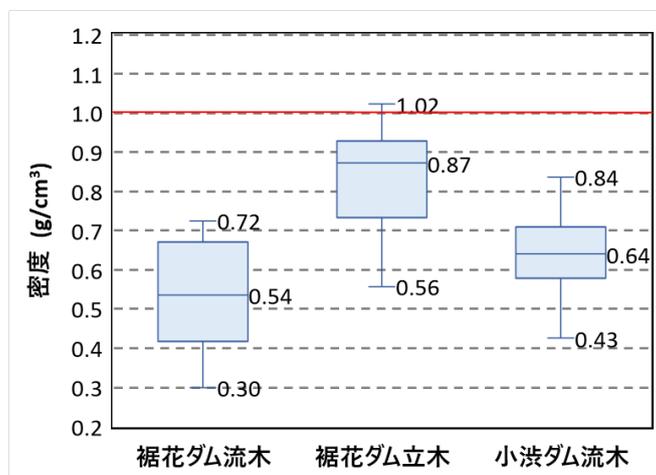


図 3-30 流木および立木の初期密度分布

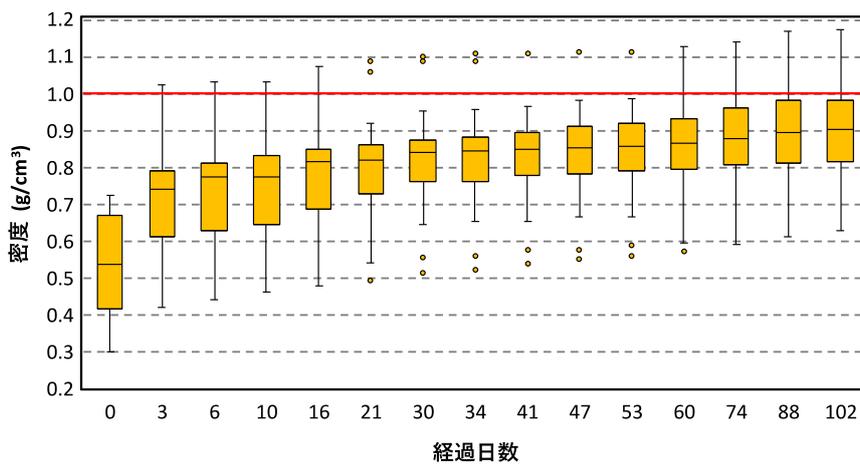


図 3-31 裾花ダム流木の密度変化 (全サンプル)

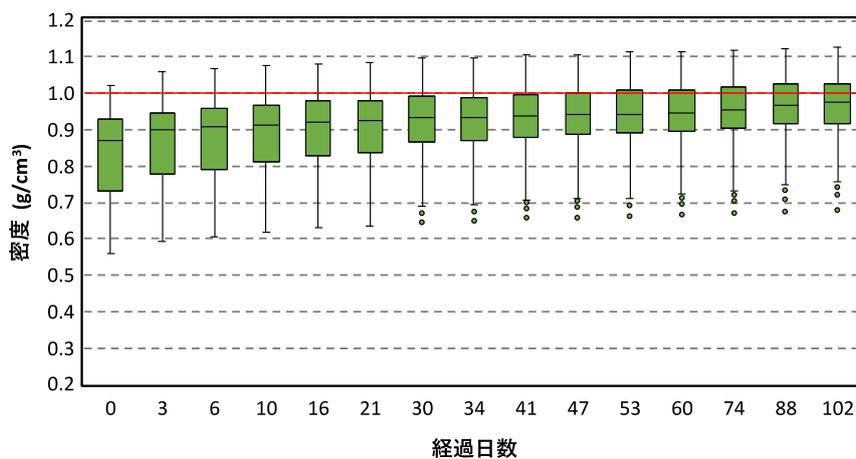


図 3-32 裾花ダム流域内立木の密度変化（全サンプル）

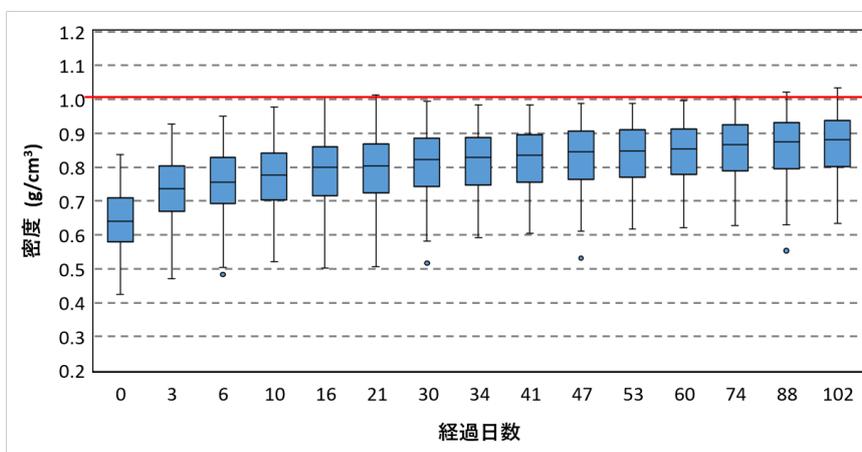


図 3-33 小渋ダム流木の密度変化（全サンプル）

表 3-5 流木および立木の平均密度と変化倍率

	0日目	3日目	10日目	53日目	102日目
裾花流木密度の中央値 (g/cm ³)	0.54	0.74	0.77	0.86	0.90
前回計測日からの変化倍率	—	1.37	1.04	1.12	1.05
裾花立木密度の中央値 (g/cm ³)	0.87	0.90	0.91	0.94	0.97
前回計測日からの変化倍率		1.03	1.01	1.03	1.03
小渋流木密度の中央値 (g/cm ³)	0.64	0.74	0.78	0.85	0.88
前回計測日からの変化倍率		1.16	1.05	1.09	1.04



図 3-34 沈降実験状況

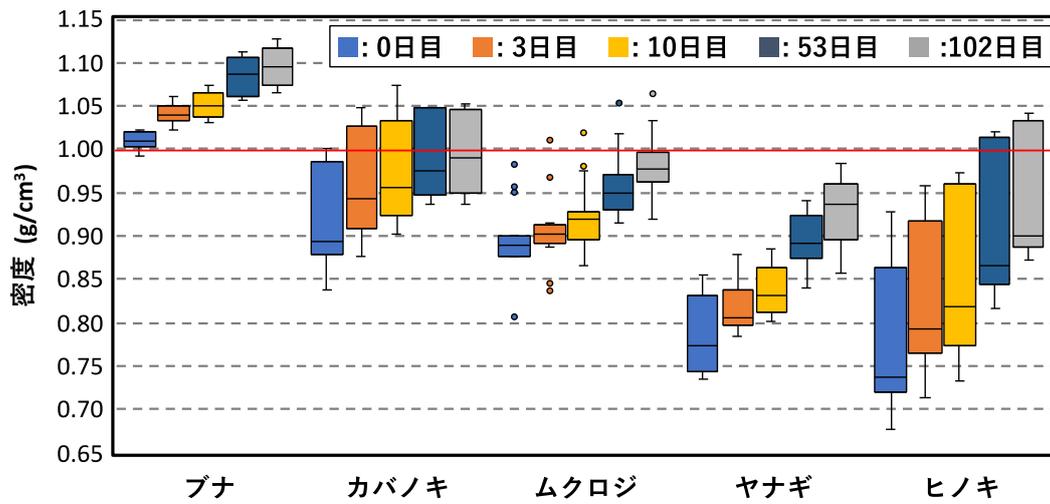


図 3-35 裾花ダム立木樹種(科)別の密度変化

3.5 ダム貯水池における沈木管理方法の検討

本節では、前節で検討してきたダム貯水池における沈木課題の実態および流木管理状況の把握、沈木探査手法の提案ならびに裾花ダムにおける試行結果、流木—沈木の密度変化過程に関する基礎的な検討結果を踏まえ、ダム貯水池における沈木関連課題への対応に向けた管理手法として、以下の3つの観点で検討し、図 3-36 に概要を示す。

(1) 堆砂—沈木のモニタリング

裾花ダムにおけるゲート操作不能事例、または、アンケート調査結果を踏まえると、ダム貯水池管理における沈木の課題は、堆砂問題と複合的に生じるものであり、沈木単独の課題はあまり例がないようである。堆砂のみではなく、沈木が存在するために、土砂がゲートを通り過ぎできない、堆砂浚渫の障害となる、といった課題が生じている。そのため、まずは、堆砂状況のモニタリングが重要であり、堆砂が進行しているダムでは、低位標高に設けられた常用洪水吐きまたは各種取水口等周辺と周辺堆砂高とのクリアランスを、毎年確認しておく必要がある。さらに、クリアランスが接近していることが確認されたダムにおいては、前節で示したとおり、MBES 機器の運用に留意したうえで、詳細なデータ分析を行い、沈木堆積状況を併せて確認し、必要に応じて緊急的な除去等の対策を行っていく必要がある。

(2) 沈木発生量の低減

沈木のゲートまたは各種取水口呑口周辺への接近を防止する観点、また、流木に比べ、浚渫が必要となる沈木の処理費用高の観点からも、まず流木を沈木化させないことが肝要といえる。裾花ダムにおける調査結果から、網場周辺における流木の沈降が、沈木発生過程の一つとして有力であることが確認され、さらに流木および立木の密度変化過程に関する沈降実験により、樹種に応じて沈降期間が異なること、生木かつ特に広葉樹系は沈降までの時間が非常に短いことが明らかとなった。また、アンケート結果からは、管理実態として、流木流入後の回収には一か月以上要しており、流入流木量が多いときは、さらに期間を要している。このことから、特に上流山間部において広葉樹系の分布が多いダム等では、より沈木発生量が増加していることが推察される。抜本的な対策としての提案は難しいが、流入流木の網場捕捉後の早期回収が非常に重要である。

(3) 沈木発生位置のコントロール

時間的制約により、沈木発生がやむをえないと考えられる場合には、沈木発生位置をゲートや各種取水口から遠ざけるという観点で、網場のより上流側への設置、第二網場または貯水池末端への流木捕捉工の設置、網場捕捉後の流木の早期移動、等も対策として有効と考えられる。また、流木回収時にも、その回収位置において引き上げ時間がかかる場合は沈木発生が想定され、回収位置の選定にも留意が必要である。

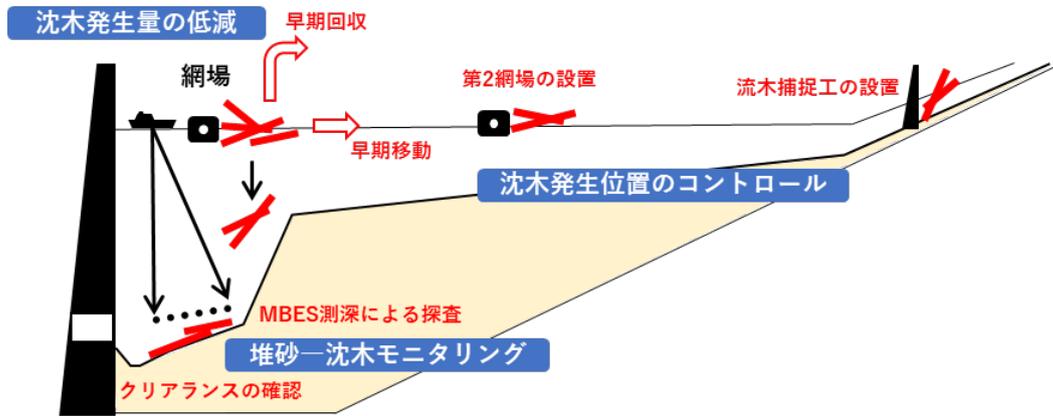


図 3-36 ダム貯水池における沈木管理の要点

3.6 結語

本章では、裾花ダムのゲート操作不能事例における新たなリスク要因である沈木について、ダム貯水池における動態およびその課題を把握するため、ダム管理者へのアンケートによる沈木に起因するダム貯水池管理上の課題の把握、ナローマルチビーム(Multi Beam Echo Sounder, 以下 MBES)の結果の詳細分析による沈木探査手法の提案および裾花ダムにおける沈木探査、基礎的な沈降実験による流木および立木の密度変化過程の変化に関する検討、等を行った。また、最後にそれらの知見を踏まえて、ダム貯水池における流木および沈木管理に関する提案を行った。

アンケート調査では、情報の少ないダム貯水池における沈木に関する課題について、整理・把握を行った。また、沈木発生過程に関連するであろう流木の管理状況についても整理し、流入流木の回収には数か月以上要することが明らかとなった。さらに、常用洪水吐き呑口敷高と堆砂高さのクリアランスが小さくなってきているダムの増加が確認され、ゲート操作に対するリスクの懸念があることが確認された。

沈木の探査においては、初めての試みとして、裾花ダムにおける MBES 測定の生データを用いて、詳細なデータ処理を行うことで、水深約 20m に存在する沈降物を十分に判読し、沈木と断定することができ、貯水池内の沈木探査が可能であることを示した。今後、現地調査を行う際には MBES 測定結果の詳細分析による沈木探査手法を適用することが望ましいと考えられる。その際には、MBES 機器はよりビーム幅が小さい機器選定を行い、測量時の貯水池水理条件に留意して、航行速度等の設定を行うことが重要となる。一方で、流さが 1m より短くなるような沈木については、解像度不足によりその判別が難しくなることや、埋没沈木は同手法では探査できない点には留意する必要がある。なお、埋没沈木については、サブボトムプロファイラー等の低周波を活用した探査手法等に検討の余地がある。また、沈木探査により、貯水池全体における沈木堆積状況の分布として、湖岸、網場周辺、流木回収箇所において存在することを示した。いずれも流木が流れまたは網場等により一時滞留する箇所であり、沈木の発生過程として流木の沈降現象による可能性が主となることが示唆された。

次に沈降実験においては、流木と立木について水中における密度変化過程を調査し、流木または立木、樹種の違い、が密度変化過程に影響を及ぼすことが明らかとなった。特に、立木については 1 か月で約 25%が沈降することが確認された。サンプルの少ない実験結果であることに留意する必要があるものの、網場で捕捉後の流木の沈降現象に対し、定量的なデータが得られた。

最後に、得られた検討結果を踏まえ、現時点における流木—沈木管理に関する提案を行った。堆砂—沈木のモニタリングの点では、頻度、場所、使用機器が重要であり、沈木発生量の低減・発生位置のコントロールの観点では、網場捕捉後の流木の早期回収や第二網場や流木捕捉工の設置等の必要性を示した。

一方、沈木の発生過程として、洪水時に捕捉した流木の網場からの沈降、また、その後

の湖底の再移動、洪水時の湖底への直接運搬を当初想定したが、後者2点については十分な調査ができていない。それは、大水深の貯水池における沈木の現地追跡や、洪水時の流木—沈木動態の現地追跡は、技術的に困難であったためである。また、湖底における再移動については、そもそも土砂とともに存在する沈木がどのような挙動を示すかについては、より水深の小さい河川のような水理条件においても未解明な点であり、現在基礎的な検討が進められているところである⁴⁾⁵⁾。

今後、沈木動態に関する理解をより深めていくために、MBESのより高頻度な現地調査や、水理模型実験および数値シミュレーション等による検討が必要と考えている。

参考文献

- 1) 末次忠司, 坂本辰哉: 堆砂測量手法の概要とその得失, 財団法人ダム水源地環境整備センター, リザーブ, 2008.
- 2) 小柴孝太, 清野泰弘, 村上桂山, 高田翔也, 角哲也: ナローマルチビームを用いたダム湖の沈木探査の可能性, ダム工学, 32(1), pp.4-15, 2022.
- 3) V. Ruiz-Villanueva, H. Piégay, V. Gaertner, F. Perret and M. Stoffel: Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers, Catena, Vol140, pp.182-194, 2016.
- 4) 山上路生, 角哲也, 小柴孝太, 高田翔也, 岡本隆明, 長坂香織: 沈木の限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 77 巻, 2 号, p.I_823-I_828, 2021
- 5) 山上路生・角哲也・岡本隆明・長坂香織・酒井良佑・小柴孝太・高田翔也: 部分埋没した沈木の掃流特性に関する基礎的研究, 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会概要資料, 2022.

4章 常用洪水吐き近傍の流れおよび堆砂形状の分析

4.1 概説

近年、ダム貯水池における当初計画を超える堆砂進行は、洪水調節容量のみならず、計画堆砂量を前提として設計されたダム水理構造物へも影響を及ぼしている。2017年の長野県裾花ダムにおける堆砂および沈木によるゲート操作不能事例は、筆者らの知る限り、ゲートを有する常用洪水吐きにおいてリスクが生じた初めて事例である。大水深となる貯水池下流の常用洪水吐き近傍における堆砂対策は、コスト制約から多く実施できないことも考えると、今後も常用洪水吐き近傍の堆砂面上昇は続くと考えられる。

また、沈木による課題の顕在化をもたらした常用洪水吐き周辺の堆砂については、ダム水理構造物の機能確保の観点以外に、土砂吐き機能を有する設備として、貯水池全体の長期的な堆砂管理の観点からも重要となる。実際に、従来からスルーシング排砂（水位低下を伴う）や密度流排砂、2章でも述べた Pressure Flushing と呼ばれる水位低下を行わない局所的な排砂方法など、低位標高の洪水吐きからの土砂通過を狙った堆砂対策は既に検討されてきている。このことを踏まえると、裾花ダムのような当初設計に考慮されていない常用洪水吐きにおける土砂通過は、今後の恒常的な堆砂進行に対する持続可能な堆砂対策手法として活用の余地があると考えられる。

このように、持続可能な堆砂管理の観点では常用洪水吐きからの土砂通過は望ましいものの、一方で土砂・沈木に起因するゲート操作不能に伴う機能低下のリスクが残った状況といえる。そのため、土砂・沈木に対する最終的なゲート機能確保の観点からは、①ゲート操作に伴う周辺堆砂および沈木の放流管内への流入状況の把握とその評価、②土砂・沈木の通過を設計上考慮していない洪水調節用の常用洪水吐きにおける土砂・沈木に対するゲート形式毎の構造的な脆弱性の評価とその対策による機能確保が求められる。

そこで本章は、①について、特にゲート周辺の堆砂動態に着目し、実際の裾花ダムにおける常用洪水吐きの運用とその周辺の土砂動態の関係の分析を行うとともに、その堆砂形状によって形成される沈木の駆動力となるゲート近傍の流れ場について、水理模型実験による流況把握を行った結果および考察を示す。なお、②については、5章で述べる。

4.2 常用洪水吐き近傍の堆砂形状に関する分析

ダムの常用洪水吐き周辺における堆砂は、急勾配の堆砂面形成とその崩壊に伴う放流管への土砂流入を制御する点、沈木の移動河床となる点でその形状管理が重要と考えられる。本節では、実際に堆砂が常用洪水吐きに達した裾花ダムの堆砂測量データを分析し、洪水吐き周辺の堆砂形状の特性について調査した結果を示す。なお、堆砂形状の分析対象としては、裾花ダム管理事務所より提供を受けた 2017～2021 年（以下、H29～R3）のナローマルチビーム（MBES）測量結果を用いた。

4.2.1 H30 裾花ダムの常用洪水吐き近傍の堆砂形状

2章で示したとおり、裾花ダムでは堆砂が大きく進行し、1号・2号各ゲートの周辺まで堆砂高さが達している。図 4-1 に H30 の裾花ダムゲート近傍の測量結果を示す。右図中 A-A'より、放流管呑口を起点にすり鉢状の堆砂の侵食形状が形成されている。ここで本論文では、2章で述べた海外の既往研究事例に倣い、常用洪水吐きからの放流に伴い形成されるすり鉢状の堆砂侵食形状を Flushing Cone（以下、FC）と呼ぶ。ここで、各 FC の平面形状に着目すると、2号ゲート周辺では管中心からほぼ同心円状に FC が形成されているのに対して、1号ゲート側では上流左岸法面の張出し影響を受けて、管軸に対し右岸寄りに FC が形成されている。さらに、1号・2号ゲートの midpoint にあたる堤体中央前面付近においては、各 FC 末端が若干接続している状況であり、各ゲートからの放流に起因する流れの影響が及んでいると考えられる。

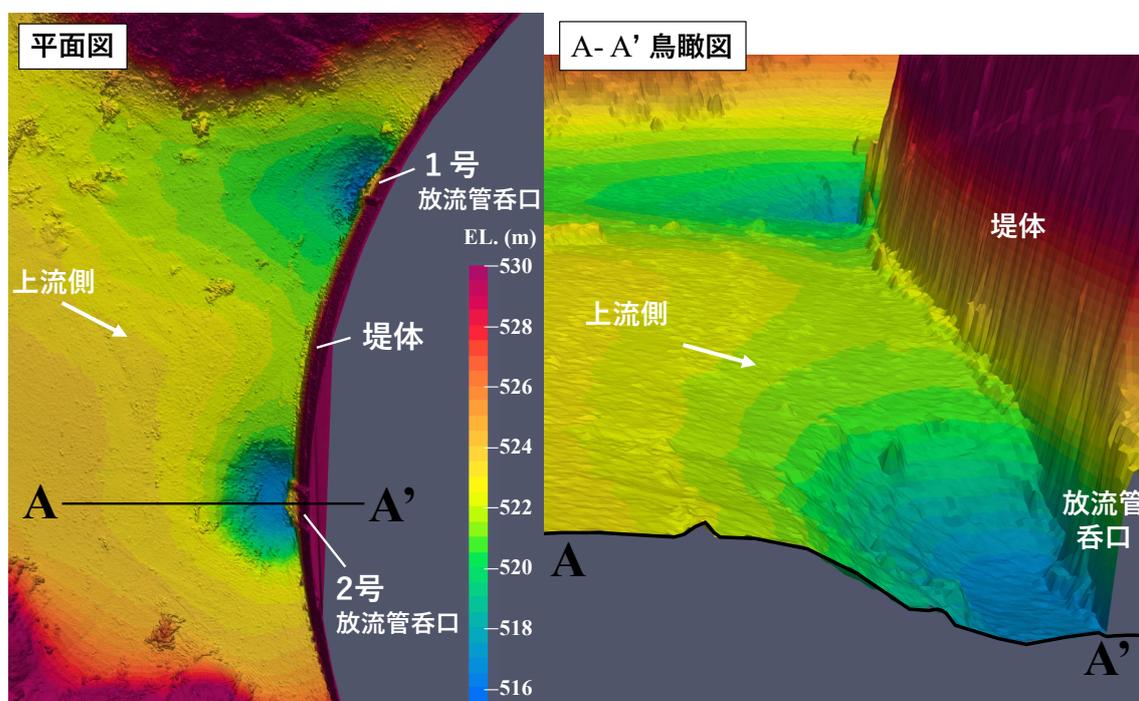


図 4-1 裾花ダムゲート近傍の H30 測量結果

4.2.2 常用洪水吐き近傍堆砂形状の経年変化

各年の堆砂測量結果について、図 4-2、図 4-3 に 1 号および 2 号ゲート近傍の結果を示す。それぞれ図 4-1 中に示す常用洪水吐きの管軸中心方向に沿った FC の縦断堆砂形状を示しており、横軸は放流管呑口からの距離を示している。なお、図 4-3 の R3 の結果は、ゲートの機能確保のために堆砂の浚渫を行った直後の結果（R3.7 浚渫後）と、その後出水を経た後の結果（R3.9 出水後）を示している。

図 4-3 において、H29 の結果はゲート操作不能があった直後の堆砂形状である。操作不能時はゲート開口部（図-1）の高さ 26cm の状態で、土砂および沈木が放流管内の半分程度以上埋める形で堆積していたと考えられ、上流側にも FC を埋める形で堆砂面形成が確認された。H30～R3 の結果については、ゲート機能が回復したことで、放流による FC の形成が確認されており、特に R3 出水後はより大規模な FC が形成されている。また、図 4-2、図 4-3 に共通して、経年的に FC の上流側の堆砂高さが上昇している。さらに、図 4-4 に示すとおり、浚渫または放流操作により、粘土・シルトで構成された堆砂面において、平均的に水中安息角の約 30°程度、局所的に約 50°となる堆砂形状が確認された。

ここで、FC の形状について図 4-5 のとおり定義した。呑口前面の管軸中心上の河床勾配が 0.2 以下（FC の斜面角度 10°以下）となる位置までの距離を FC 長さ（以下、LFC）、LFC の位置の標高以下の体積を FC 体積（以下、VFC）、常用洪水吐き呑口敷高から LFC の位置の標高までの高さを FC 高さ（HFC）とした。

各年の 1 号・2 号 FC の形状特性について、図 4-6 に FC の体積、長さおよび高さを示す。1 号側 FC については、長さ約 7m～13m、体積約 90m³～300m³であり、2 号側 FC は、長さ約 10m～24m、体積は約 800m³～3,000m³となった。ここで、1 号、2 号の FC 規模に大きな差ができたのは、前述のとおり 1 号ゲート上流の法面地形の影響によるものと考えられる。

ここで、FC 体積を恒常的に維持することができるとすれば、常用洪水吐きには数千 m³程度の土砂の排出効果があると考えられる。裾花ダム地点における年間平均流入土砂量のオーダーに比べれば小さいものの、FC の維持による土砂排出により、そのさらに上流側の堆砂面の上昇を制御可能と考えられることから、FC の形状維持が重要であると推察される。一方で、FC の形状安定性の観点から、堆砂進行に伴う FC 高さの上昇はどこまで許容できるかについても、今後検討する必要がある。

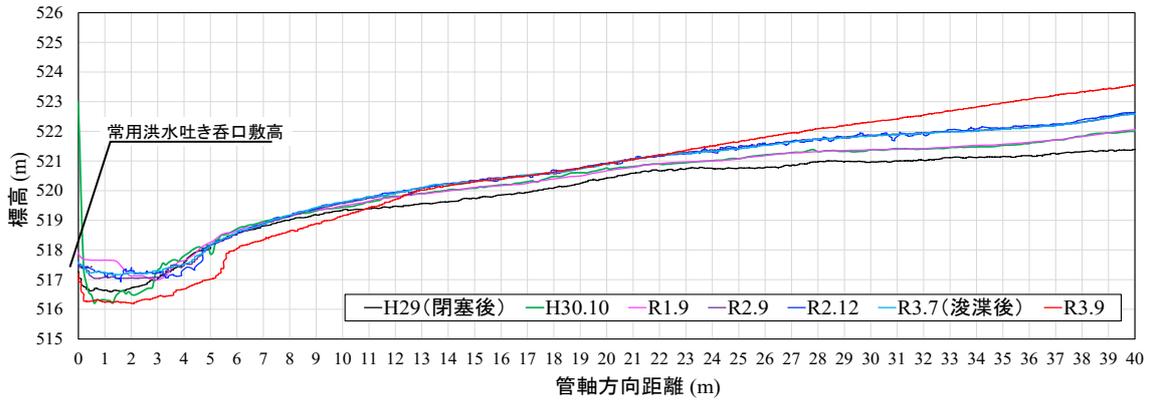


図 4-2 1号ゲート呑口周辺の堆砂縦断形状の推移

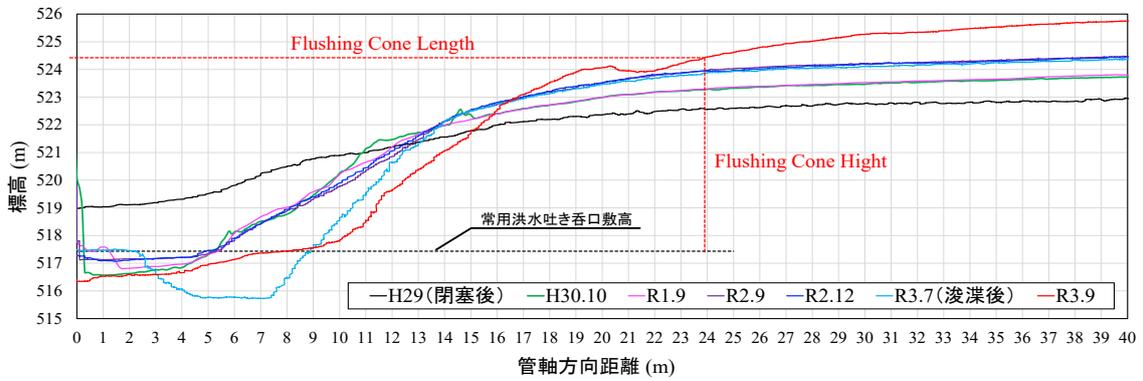


図 4-3 2号ゲート呑口周辺の堆砂縦断形状の推移

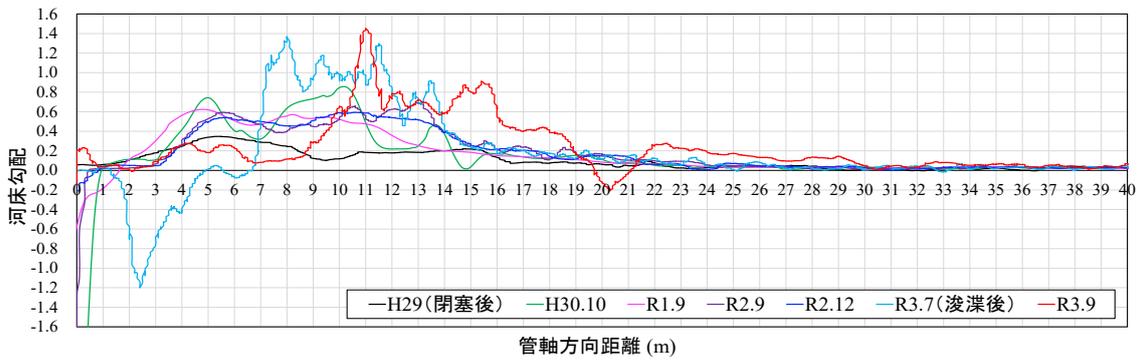


図 4-4 2号ゲート呑口周辺の堆砂縦断形状の河床勾配の推移

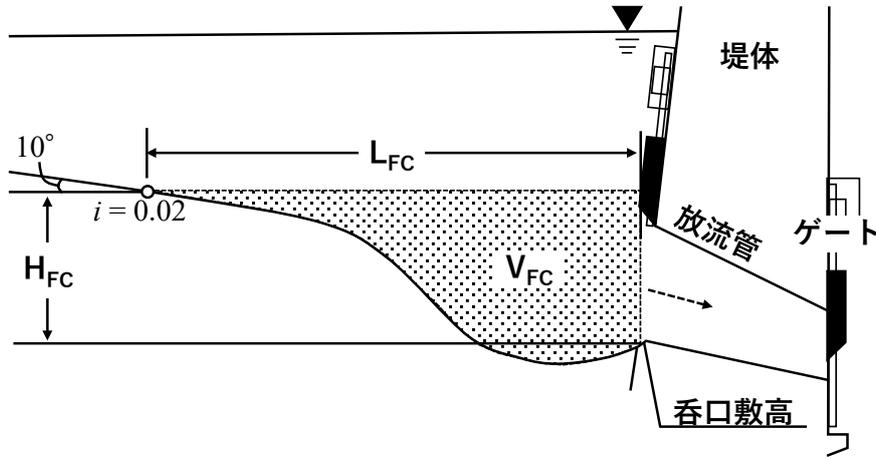


図 4-5 Flushing Cone の形状パラメータ

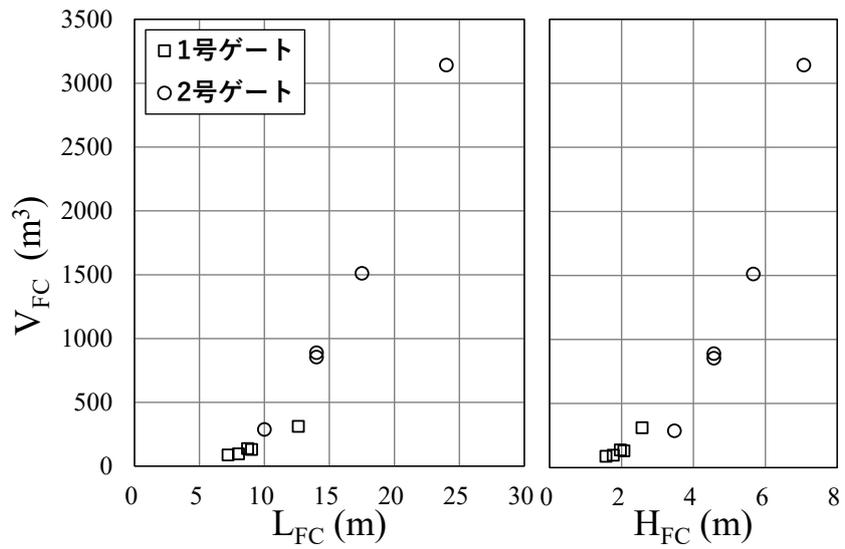


図 4-6 FC 体積と長さおよび高さの関係

4.2.3 運用実績と堆砂形状変化の関係

裾花ダムにおける H29～R3 期間のダム運用状況（貯水位，全流入量，全放流量）の推移を図 4-7 に示す。裾花ダムにおいては，3～5 月にかけて $150\text{m}^3/\text{s}$ 程度の融雪出水があり，6 月中旬から，洪水期制限水位付近を維持し，毎年 $200\text{m}^3/\text{s}$ 程度以上の出水を経験している。また，毎年非出水期には，堆砂測量を実施している。

以上のデータを用い，各年のゲート周辺における FC の形状は，堆砂測量日以前の出水時のダムの洪水調節操作によって形成されるものと考え，FC の規模と裾花ダム運用時の水理条件の関係について調査した。

表 4-1 に裾花ダムの運用履歴から抽出した堆砂測量直前の出水時におけるゲート操作時の最大放流量とその際の貯水位を示す。抽出にあたっては，ゲート周辺の堆砂形状に影響を及ぼすと考えられる流量として，最大放流量が $100\text{m}^3/\text{s}$ 以上（ $50\text{m}^3/\text{s}/1$ 条）となる洪水に着目した。

図 4-8 に H29～R3 の 2 号側 VFC の推移とその計測直前の洪水調節操作における 2 号ゲートの最大放流量の関係を時系列で示す。H29 のゲート操作不能時は，埋め戻しにより VFC は小さくなっているが，H30 では 2 号ゲートからの放流量が $60\text{m}^3/\text{s}$ を上回り，これにより VFC は $1,000\text{m}^3$ 弱として FC の形状を回復している。次に，R2 では最大放流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ に対し，VFC も $1,500\text{m}^3$ と増大している。さらに，R3 は R2 と最大放流量は同程度であるものの VFC は約 $3,000\text{m}^3$ となっている。これは表 4-1 に示すとおり，R3 の放流時の貯水位が R2 に比べ，約 5m 程度低かったためと考えられる。Meshkati らによる先行研究¹⁾によると，放流量が同じ場合，貯水位が低いほうがより大きな FC が形成されるとされており，それが裾花ダムにおいても確認された。なお，ここで R3 年浚渫後の結果については，浚渫による約 250m^3 の VFC の増大があり，それを除いて考えれば $40\text{m}^3/\text{s}$ 未満程度の放流は FC の形成にはあまり影響していないと推察される。

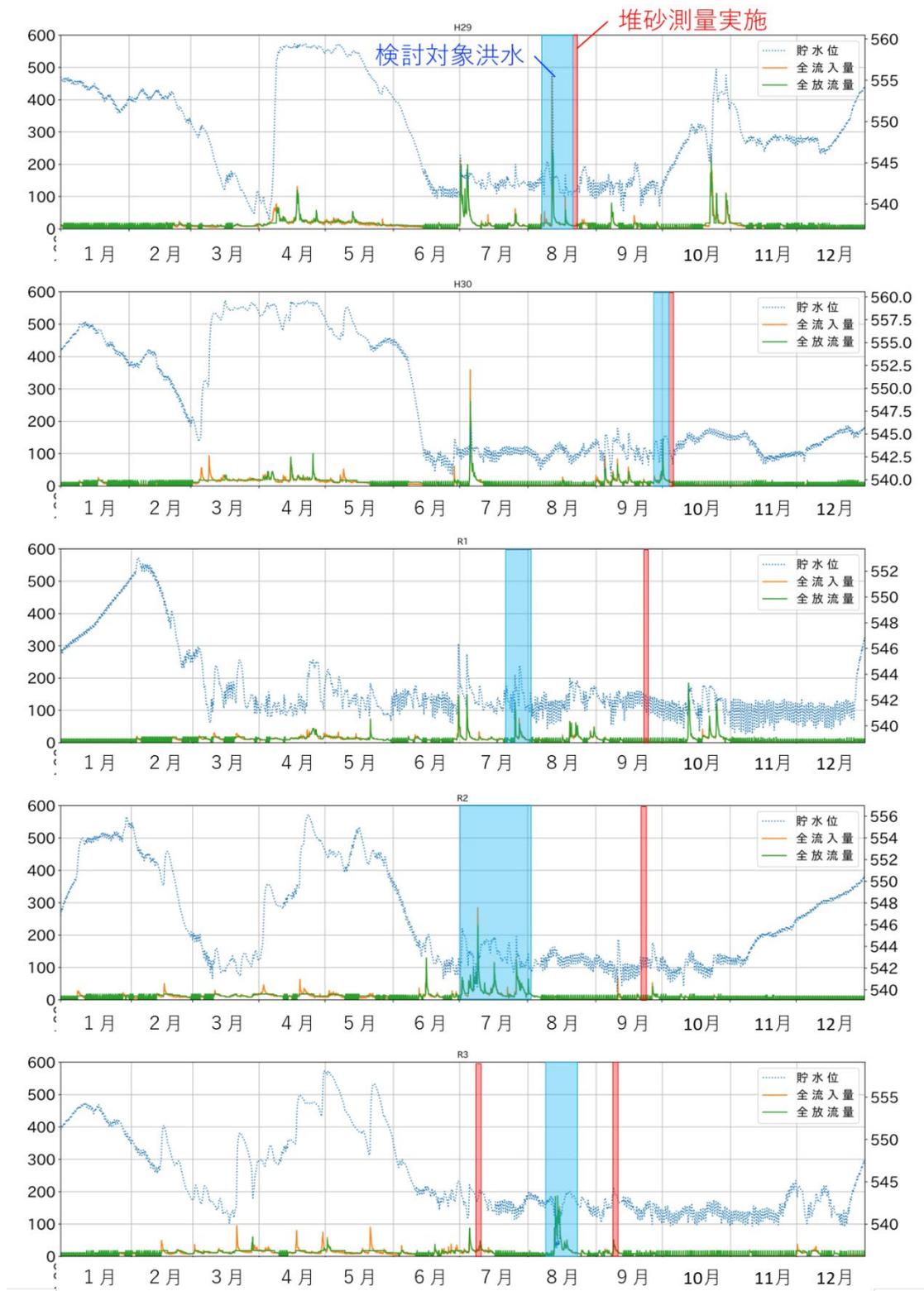


図 4-7 裾花ダムにおける運用履歴と検討対象洪水および計測時期

表 4-1 分析対象とした出水とゲート操作

運用履歴	ピーク流入量 (m^3/s)	1号放流量 ($\text{m}^3/\text{s}/1$ 条)	2号放流量 ($\text{m}^3/\text{s}/1$ 条)	最大放流量時水位 (m)
H29.8 (閉塞時)	591.5	228.85	0	556.23
H30.10	138.71	63.9	63.9	542.3
R1.7	112.33	57.8	57.8	543.79
R2.7	284.57	106.25	106.25	543.49
R3.8	168.91	98.12	98.12	538.4

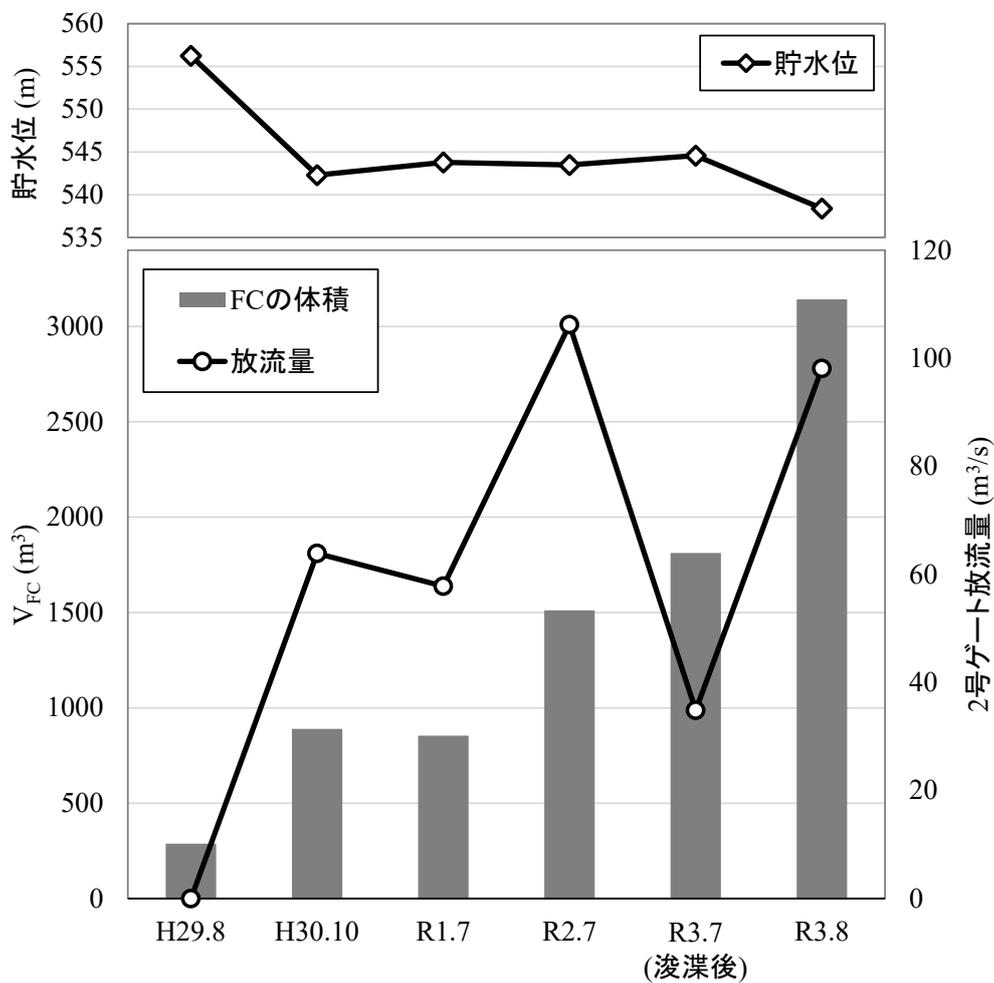


図 4-8 FCの体積(V_{FC})と最大放流量の関係

4.3 堆砂接近時の常用洪水吐き近傍の流況把握

4.3.1 水理模型実験の概要

現地測量結果の分析を踏まえ、今後のゲート機能確保のための堆砂・沈木管理においては、FCの形成要因および、FC内に沈木が存在した場合の放流に伴う流れによる沈木の移動範囲の検討が求められる。そこで、常用洪水吐き呑口付近まで堆砂が迫った条件下における流況の詳細な把握を目的として、固定床水理模型実験を行った。水理模型としては、常用洪水吐き周辺は本来三次元的な流れ場となるものの、貯水池から放流管への断面変化部に設置されたベルマウスにより流線に大きな乱れはなく、管軸方向の鉛直断面の流れ特性を代表可能と考え、さらに流れに対する堆砂の影響を詳細に把握できるPIV計測も可能となることから、管軸中心の鉛直二次元模型を用いた。

実験は、裾花ダムの常用洪水吐きを対象に、模型縮尺1/31.25、ゲートの吐口高さ3.5m、管軸中心断面を幅方向に0.4mとした鉛直二次元固定床抽出模型を用いた。また、呑口上流地形の条件として、予備的検討としての堆砂形状が無い基本形状と、図4-9および図4-10に示すとおり、H30の実績堆砂形状を模した形状、同形状において堆砂勾配を50°とした形状、浚渫による土砂除去後を模した形状の3つの堆砂形状を実験条件とした。

実験条件は、図4-11に示すとおり、裾花ダムの洪水調節計画における予備放流水位（最低水位）時、操作水位と放流量およびH29ゲート操作不能時(ゲート操作不能直前)の流量条件とした(表4-2)。その際、ゲート開度は単位幅放流量が合うよう設定した。

常用洪水吐き呑口周辺の流れ場を把握するため、Flownizer2D((株)ディテクト)を用いたPIV(Particle Image Velocimetry)解析により流速を計測した。PIV解析にあたっては、予備実験により3次元電磁流速計とPIV解析結果を比較し、相対誤差は最大10%程度以下となることを確認している。

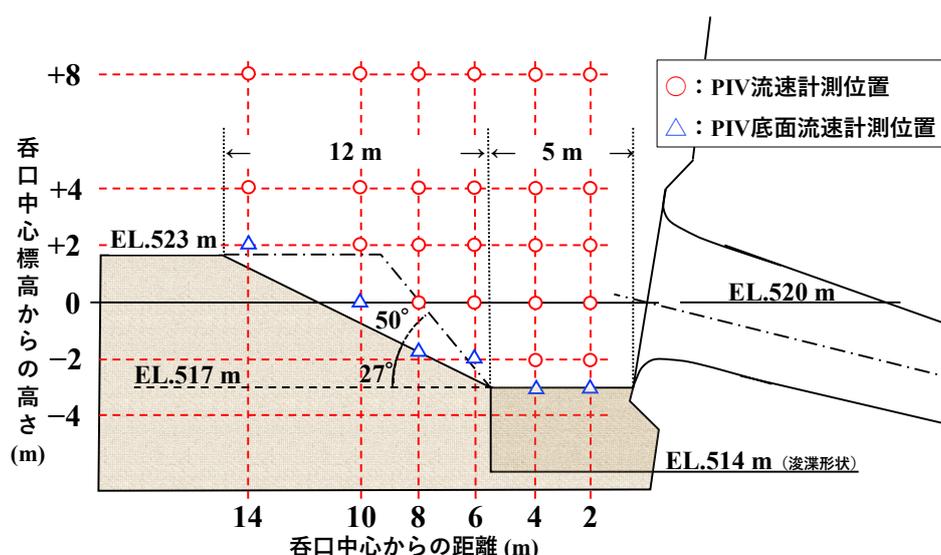


図 4-9 抽出模型形状および PIV 流速計測範囲



图 4-10 抽出模型写真（上：堆砂無し基本形状，中：傾斜形状，下：浚渫形状）

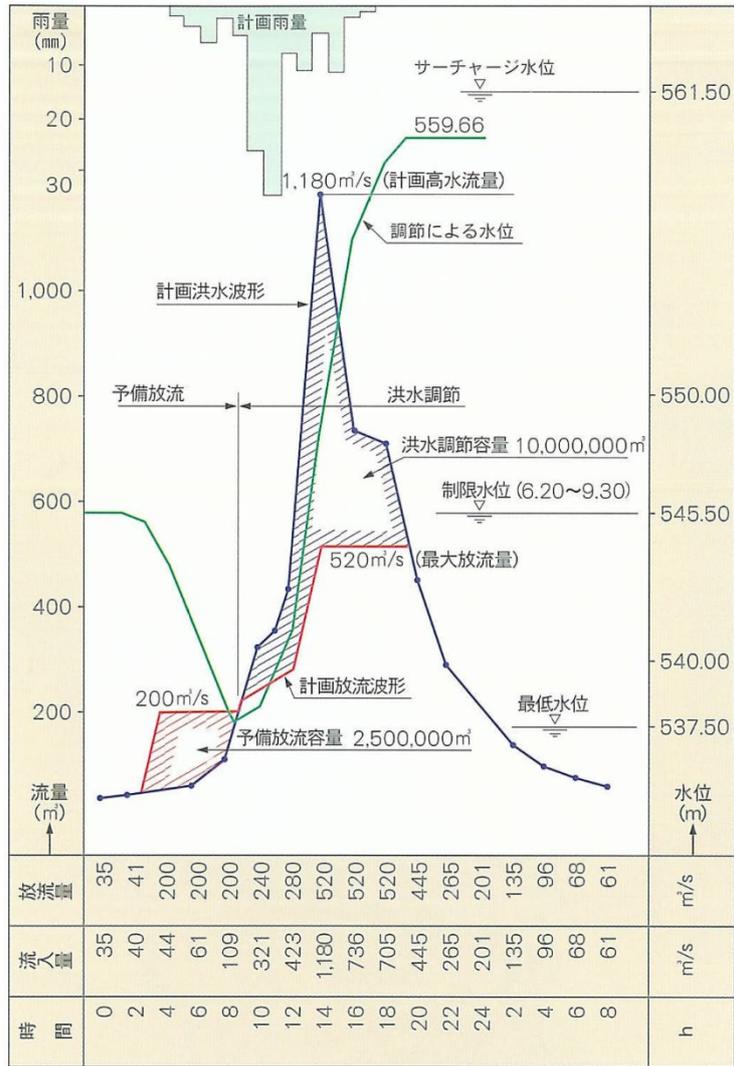


図 4-11 裾花ダム洪水調節計画図 (文献¹⁾より引用)

表 4-2 実験条件

番号	堆砂形状	流量 (m ³ /s)	水位 (EL.m)	備考
Case1-1	H30現地実績(2号ゲート)	18	556	ゲート閉塞時
Case1-2		100	537.5	最低水位相当
Case1-3		260	559.7	計画最大放流時
Case2	堆砂勾配50° (H30実績ベース)	100	537.5	最低水位相当
Case3	堆砂浚渫形状 (H30実績ベース)	260	559.7	計画最大放流時

4.3.2 実験結果および考察

(1) H30 実績堆砂形状(水中安息角)の堆砂条件の結果

はじめに、予備検討として、堆砂形状が無い条件で実験を行い、染料により流れを可視化した結果を図 4-12 に示す。これより、堆砂が接近していない状況では、流れは放流管呑口から同心円状に広がる事が分かる。

Case1-1～Case1-3 について、染料により流況確認を行った状況を図 4-13～図 4-15 に示す。これより、放流管呑口上流側においては、通常鉛直方向にも同心円状に流れ場は形成されるが、堆砂形状の影響により、堆砂面に沿う形で管内に流入している事が分かる。なお、いずれの流量条件においても、このような堆砂形状の影響による常用洪水吐きの放流能力への影響は、ほとんど生じないことを確認した。

次に、Case1-1 における流速分布（流下方向水平成分）を図 4-16 に示す。ここで、以降の実験結果はすべて現地スケールに換算した値としている。しかし、接近流速や鉛直二次元模型のため管軸横断方向からの流入損失等が無いことから、以降に示す実験値は実際の 3 次元現象に比べやや大きな流速値となっており、沈木の引込みに対する評価としては安全側であるが、その取扱いに留意する必要がある。

Case1-1 では、ゲートからの放流量は $18\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、その場合呑口の直上流側における底面近傍流速（PIV 解析において底面付近メッシュより得られた値）としては、呑口地点から 2m 地点で $0.5\text{m}/\text{s}$ 以下である。これより、ゲート操作不能が生じた際の流量条件において、放流管内あるいはその極近傍のみ流速が生じている状態であり、引き込まれた沈木はゲート操作以前から、その周辺に存在していたものと考えられる。

次に、最大放流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ である Case1-2 の流速分布を図 4-17 に示す。その場合呑口の直上流側における底面近傍流速としては、呑口から 2m 地点で $2.9\text{m}/\text{s}$ 、FC の斜面中程（呑口から 10m 地点）で $1.8\text{m}/\text{s}$ である。

図 4-18 は、Case1-1～Case1-3 について、呑口上流側堆砂形状の底面近傍流速を示したものである。放流量の増加に伴い、より上流側へ高流速の領域が生じており、沈木が存在した場合に放流管へ引き込まれる範囲は拡大する。一方で、放流量が大きい場合には沈木の流下断面よりゲート開口高が大きくなると考えられ、ゲート操作不能のリスクは小さい。このことから、中規模以上の放流終了時に遠方より引き寄せられた沈木が呑口近傍に堆積し、次の小放流時に放流管内へ再移動するものと考えられる。

(2) 堆砂勾配 50° の条件の結果

H30 実績堆砂形状をもとに、堆砂勾配を 50° とした堆砂条件および放流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ における流況を図 4-19、流速分布の計測結果を図 4-20 に示す。本ケースでは、FC 縁部の勾配変化点から、流線が剥離しており、FC 斜面部（呑口からの距離-8m 付近）に逆流域が生じている。現地においては、安息角以上の堆砂形状が形成された場合に、上述のような流れ場により堆砂形状の崩壊をもたらす、水中安息角程度の安定形状となっていると考えられる。

(3) 浚渫時の堆砂条件の結果

裾花ダムでは、前節で示したとおり、R3に2号常用洪水吐き前面においてゲート機能の維持を目的に浚渫を実施している。そこで、水理模型においても浚渫形状を模して実験を行い、流れ場への影響を検討した。

図4-21に流況の確認結果、図4-22に流速分布の計測結果を示す。浚渫形状内では、呑口近傍の高流速は生じず、逆流域となっている。同領域に流入した土砂および沈木は、呑口への一部巻き上がりはあるものの、浚渫箇所に一時的に捕捉されるものと考えられる。一方で、出水規模やその際の流入土砂・沈木量によっては、浚渫箇所がすぐに埋戻される可能性が高い。そのため、浚渫対策はFCの局所的な急勾配化に伴う堆砂崩壊時に、土砂・沈木の放流管への流入を防止する一時的なポケットとしての機能が期待される。

呑口近傍の高流速は生じず、逆流域となっている。同領域に流入した土砂および沈木は、呑口への一部巻き上がりはあるものの、浚渫箇所に一時的に捕捉されるものと考えられる。そのため、浚渫対策はFCの局所的な急勾配化に伴う堆砂崩壊時に、土砂・沈木の放流管への流入を防止する一時的なポケットとしての機能が期待される。一方で、出水規模やその際の流入土砂・沈木量によっては、浚渫箇所がすぐに埋戻される可能性が高い。

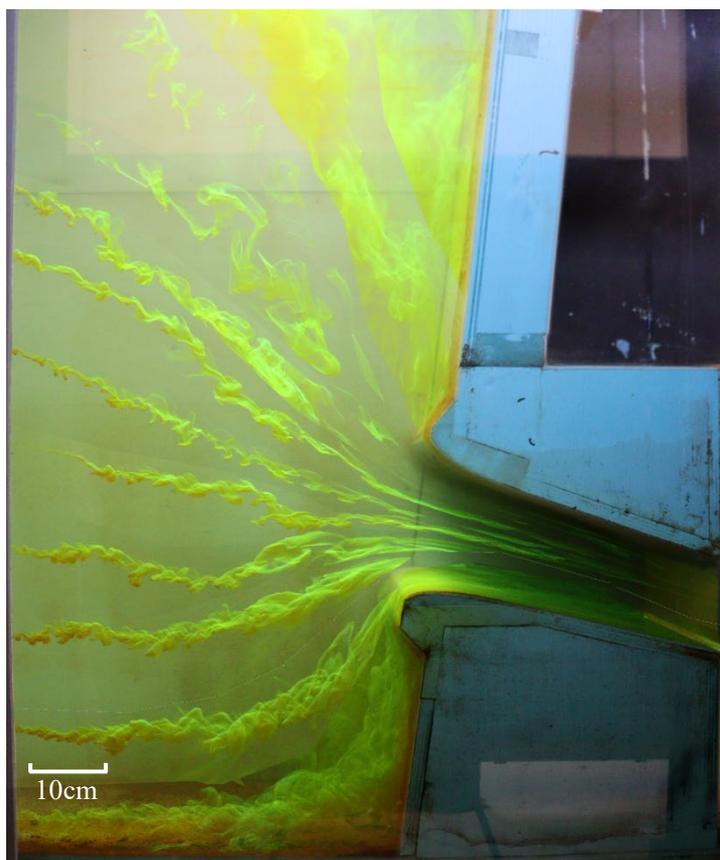


図 4-12 流況確認結果（予備検討，堆砂無し）

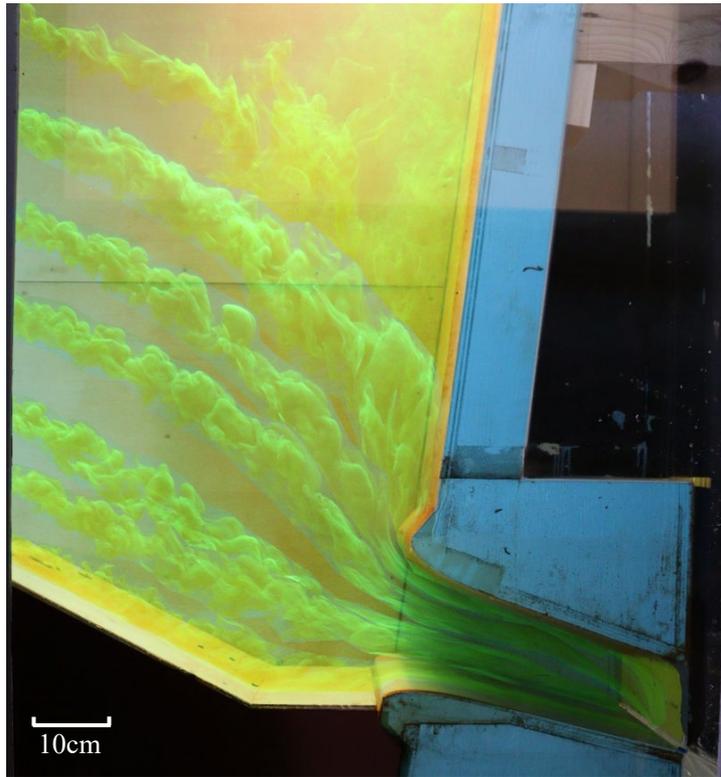


图 4-13 流況確認結果 (Case1-1)

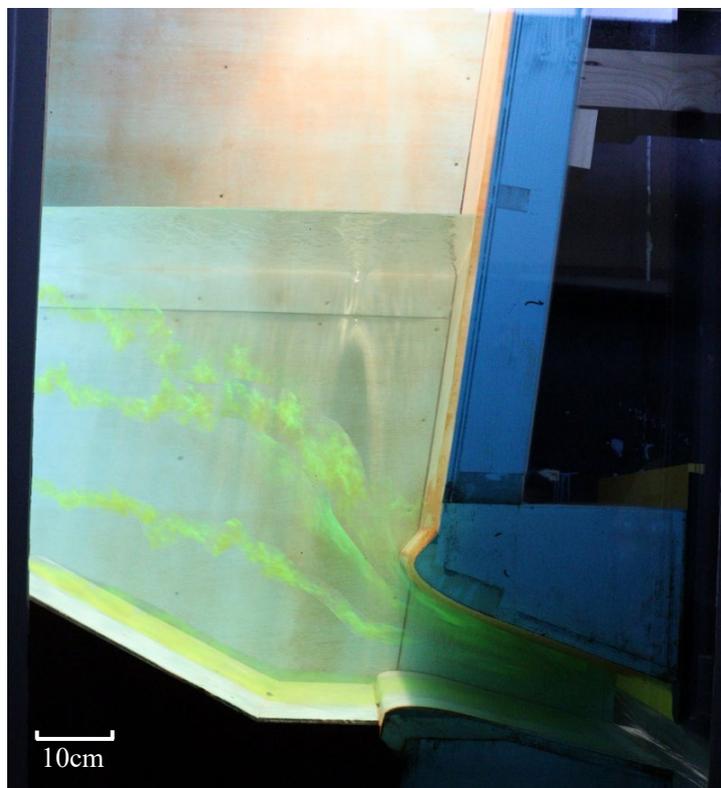


图 4-14 流況確認結果 (Case1-2)

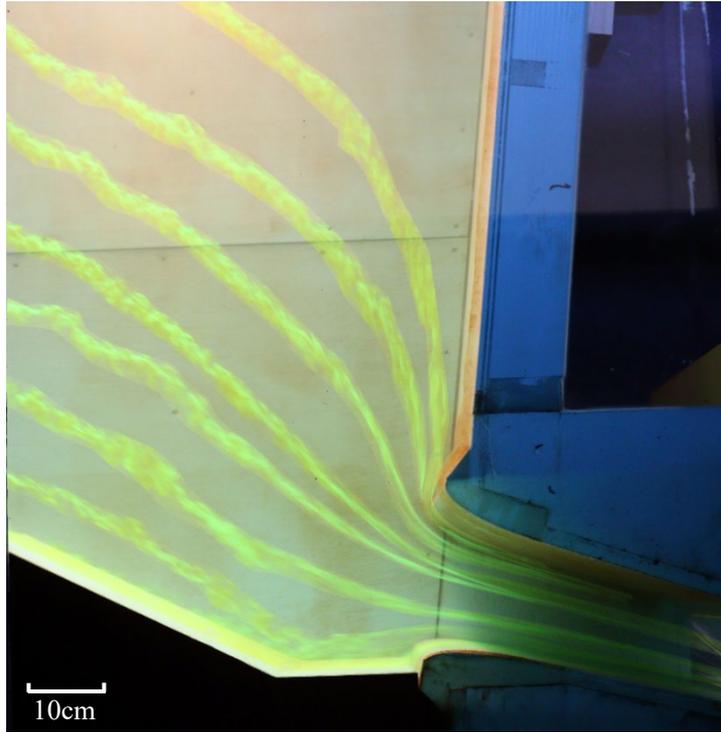


図 4-15 流況確認結果 (Case1-3)

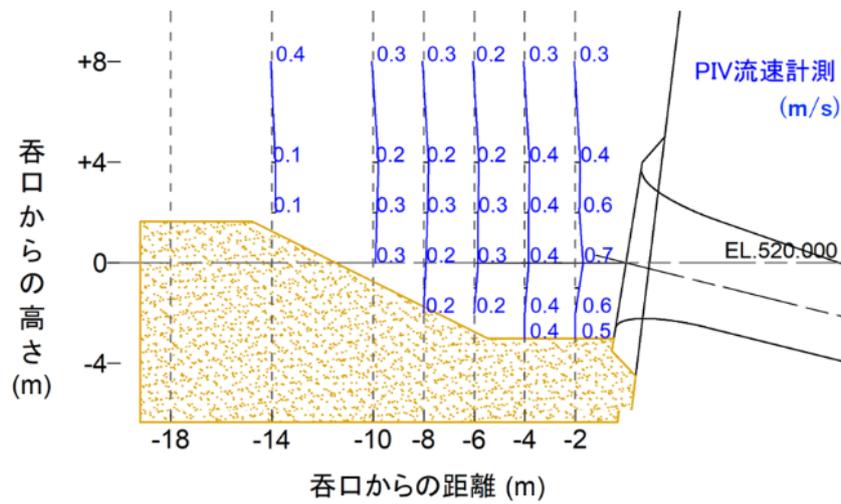


図 4-16 流速分布(Case1-1)

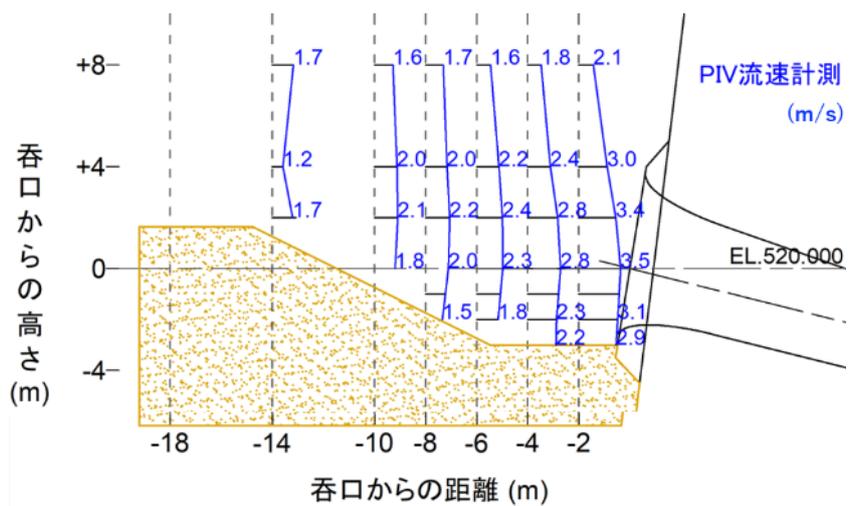


図 4-17 流速分布(Case1-2)

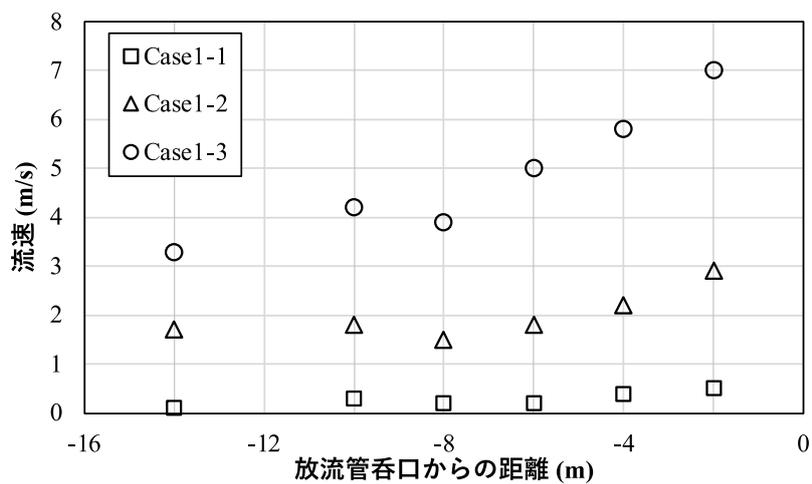


図 4-18 底面近傍流速の比較

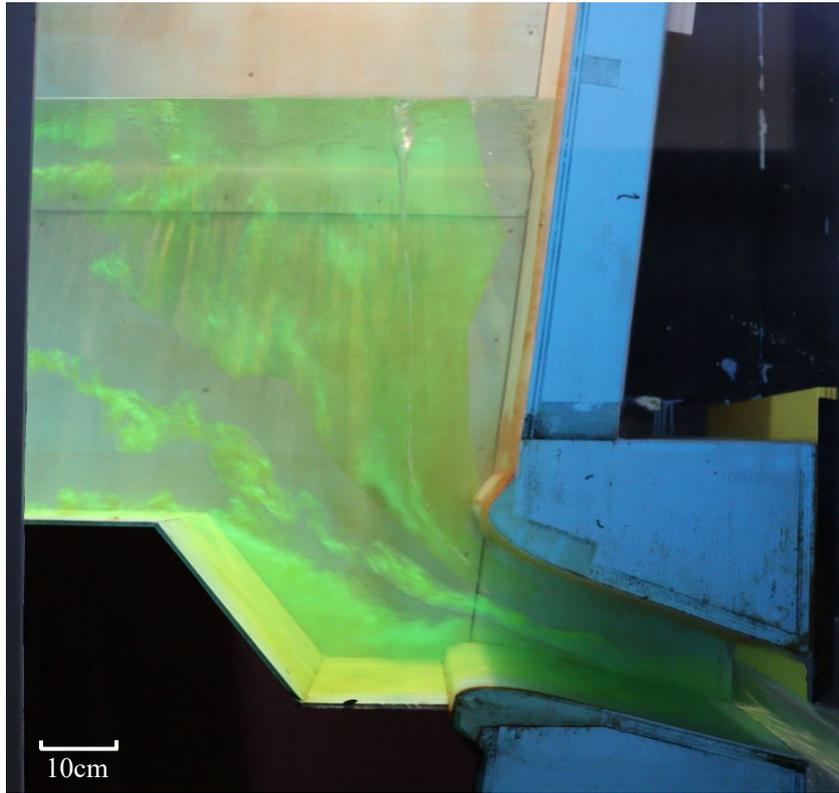


図 4-19 流況確認結果 (Case2)

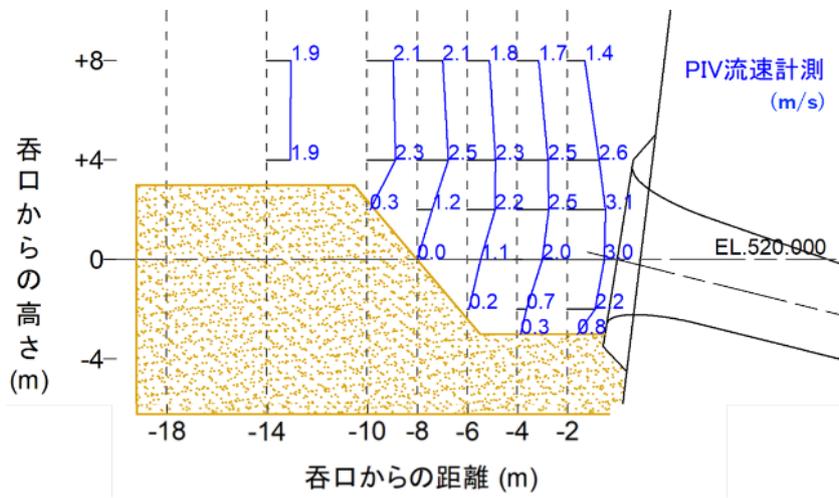


図 4-20 流速分布(Case2)

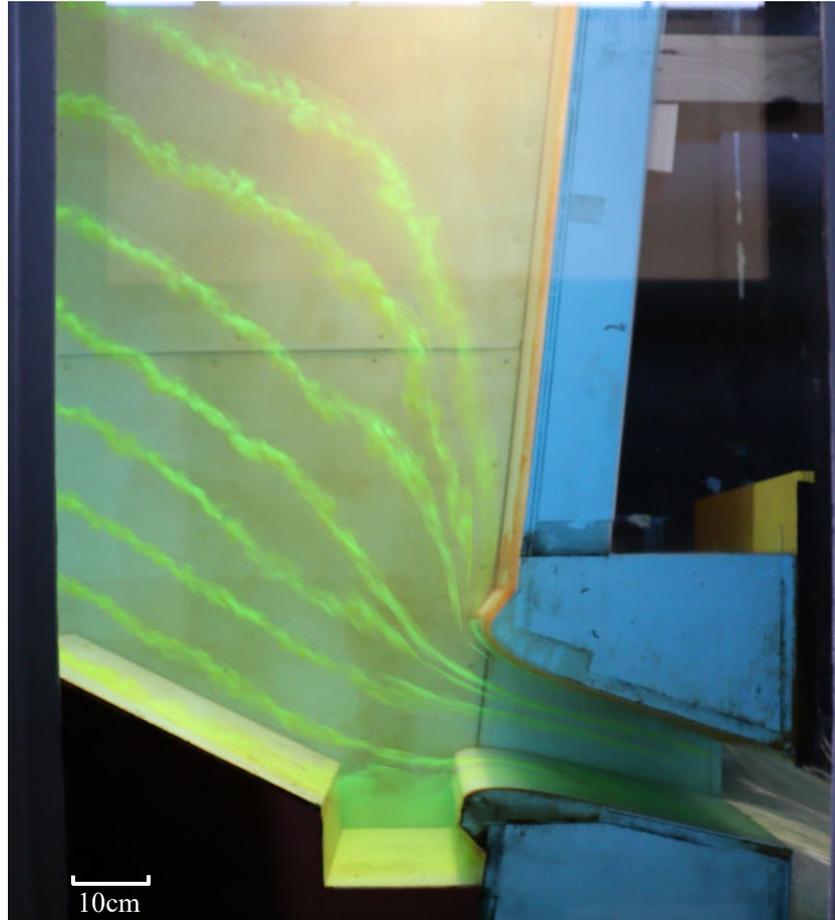


図 4-21 流況確認結果 (Case3)

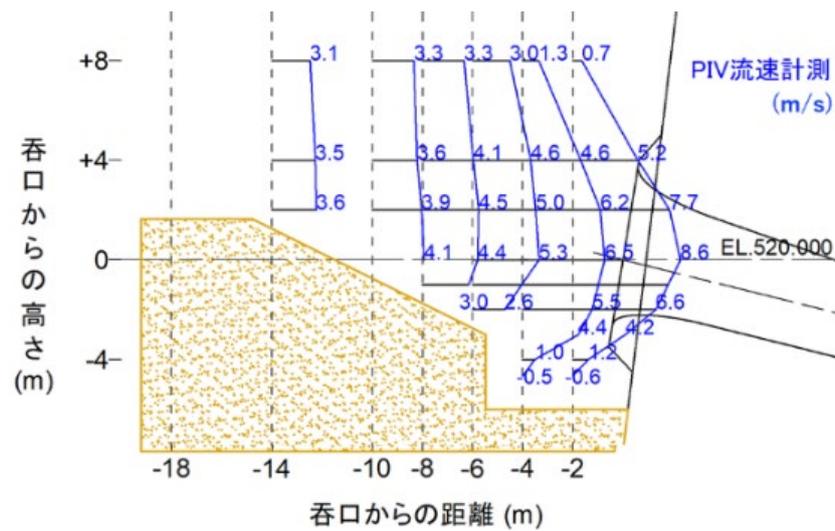


図 4-22 流速分布(Case3)

4.4 結語

本章では、沈木の移動河床となるゲート周辺の堆砂動態に着目し、裾花ダムにおけるH29～R3年の堆砂測量結果と常用洪水吐きの運用の関係の分析を行うとともに、その堆砂形状の影響を受けるゲート近傍の流れ場について、水理模型実験による流況把握を行った。得られた知見を以下に示す。

- 常用洪水吐きからの放流に伴い形成されるすり鉢状の堆砂形状（FC）の規模（体積、長さ）はゲートの最大放流量の増加に伴い増大する。また放流量が一定の場合、貯水位が低い（ゲート開度が大きい）ほうがFCの規模は大きくなる。
- 堆砂が主に、粘土・シルトで構成されている場合の斜面勾配として、平均的には約30°、局部的に約50°となることが確認された。
- 裾花ダムのゲート操作不能時の放流条件では上流側へ高流速場は生じないため、放流管内または呑口近傍の沈木がゲートへ引き込まれたものと考えられる。
- 堆砂勾配50°の条件において、放流量100m³/sの場合FC縁部から流線の剥離が確認され、そこで堆砂面が崩壊し、FCは安息角に近い形状に収束すると考えられる。
- 呑口前面の浚渫箇所は逆流域となることから、一時的な土砂・沈木の捕捉箇所にはなるものの、中小規模の出水で埋戻しが生じる可能性が高い。

さらに、今後の課題として、

- 堆砂面上の沈木の移動限界判定の検討
- 堆砂影響を受けるゲート周辺の流れ場について、三次元的な評価への拡張
- 堆砂崩壊等に対するゲート機能確保の観点から、FC高さの許容値の検討
- 運用による対策案として、沈木径に対するゲート開口高を確保するために、ゲートを左右等開度ではなく、片側のみ使用するルール等の検討

などが考えられ、引き続き検討を進める必要がある。

以上の検討内容は、沈木課題の前提となる堆砂動態および流れ場現象を対象としており、今後沈木の有無に限らず、ゲート運用と堆砂形状の変化、Pressure Flushingの排砂効率および貯水池全体の堆砂管理という観点で重要であると考えられる。特に、ゲート周辺の堆砂は、一定規模の放流が行われることで動的平衡状態を維持できると考えられ、土砂排出の観点のみでなく、堆砂形状管理としても、安定したFC形状を維持できるような一定規模以上の放流を行っていく必要があると考えられる。また、ゲートを運用して土砂を排出することで、貯水池堆砂全体の動的平衡を保っていく方向性等も考えられ、引き続き検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) M.E.Meshkati Shahmirzadi & A.A.Deighani, T.Sumii, Gh Naser, A.Ahadpour : Experimental investigation of local half-cone scouring against dam, River Flow, pp.1267-1273, 2010.

5章 土砂および沈木に対するゲートの構造的リスク分析

5.1 概説

本章は、長野県裾花ダムにおけるゲート操作不能事例を受けて、外力としての堆砂および沈木に対し、その作用を受けるゲート側を検討対象としている。4章で示したとおり、土砂・沈木に対する最終的なゲート機能確保の観点からは、①ゲート操作に伴う周辺堆砂および沈木の放流管内への流入状況の把握とその評価、②土砂・沈木の通過を設計上考慮していない洪水調節用の常用洪水吐きにおける土砂・沈木に対するゲート形式毎の構造的な脆弱性の評価とその対策による機能確保、が求められる。しかし、ゲート設備は、2章で示したとおり、設計上見込んだ外力に対して十分な対応が図られてきているが、設計外力を超過した際の影響は明らかでなく、裾花ダムの操作不能メカニズムについても十分に解明されていない。

4章で述べたとおり、ダムのゲート周辺の土砂および沈木の主な対策は、大水深であることから浚渫となるが、一時的な対策としては効果的であるものの、粘土・シルト分が多いため浚渫土砂の処理費用が高く、さらに、続く出水による浚渫箇所の埋め戻しなど、コスト面で持続性に課題があると考えられる。他の対策案としては、密度流排砂や Pressure Flushing といった低位標高放流管からの土砂排出の概念にあるように、常用洪水吐きのゲートから土砂を排出することが挙げられる。しかし、既設の常用洪水吐きの高圧ゲートに対して、そのような機能拡張を図るには各ゲート形式の構造的な土砂・沈木に対する脆弱性を把握した上での設計・構造強化が必要と考えられる。

高圧ゲートの設計における土砂および沈木の考え方は、ダム・堰施設技術基準（案）¹⁾に示されているとおり、土砂（泥圧）荷重は「必要に応じて考慮する荷重」であり、流木の場合は幅 2m×高さ 2m 以下のゲートは上流側にスクリーン等の設置が必要とされ、沈木に関する記載は無い。裾花ダムの場合、スクリーンの設置を必要としないゲート規模であり、類似形式の高圧ゲートにおいて土砂・沈木を考慮して設計が行われた例は筆者らの知る限り無いことから、同ダムにおいても設計上その荷重や影響は考慮されていないものと考えられる。

そこで本章では、土砂・沈木に対するゲートの構造的リスク分析を行うため、まず高圧ローラゲートを対象としたフォルトツリー分析（Fault Tree Analysis, 以下 FTA）を用いたリスク要因分析を行う。次に、FTA に基づき裾花ダムにおいて生じたゲート操作不能について、ゲート操作不能時から復旧時までの定量的な要因分析を試みた。

最後に、土砂および沈木に起因するゲート操作不能という課題に対して、要因分析に基づく対策案の方向性について考察した。

5.2 土砂および沈木に起因する高圧ローラゲートのフォルトツリー分析

裾花ダムにおけるゲート操作不能要因の特定を行うため、土砂および沈木に起因する高圧ローラゲートの操作不能に関するフォルトツリー分析（Fault Tree Analysis, 以下 FTA）を試行した。FTA とは、求めたい欠陥事象を起点とし、AND と OR の分岐により事象の進展をたどって原因や発生過程を定性的または定量的に分析するものであり、ダム分野では特にゲート等について用いられ米国ではマニュアルも存在する³⁾。

ゲート全般に対して、考えられる操作不能要因に関する FT を図 5-1 に示す。主に、点検、機械・電気系統の故障や人的ミス等に起因する事象が挙げられる。これらについては既に検討例があるため⁴⁾、本検討では、土砂および沈木等の放流管内への流入現象に起因する開閉能力不足および物理的な干渉による操作不能要因にのみ焦点を絞った。

裾花ダムに採用されているゲート形式である高圧ローラゲートの土砂・沈木に起因するゲート操作不能に関する FTA の検討結果を図 5-2 に示す。操作不能に至る要因として、土砂・沈木の挟み込み等物理的な干渉によるもの（図中①～③）と、扉体の自重や支承部の摩擦力などゲート開閉時に抵抗となる当初設計時の荷重に対して、土砂・沈木による開閉荷重増加によるもの（図中④～⑩）に分けて整理を行った。図 5-3 に、各要因①～⑩の現象のイメージ図を示す。なお、この FTA 結果は、高圧ローラゲート形式について網羅的な検討を行うため、同形式の中でも水密方式による違い（圧着式または摺動式）や、使用箇所の違い（主ゲートまたは予備ゲート、等）も含めている。

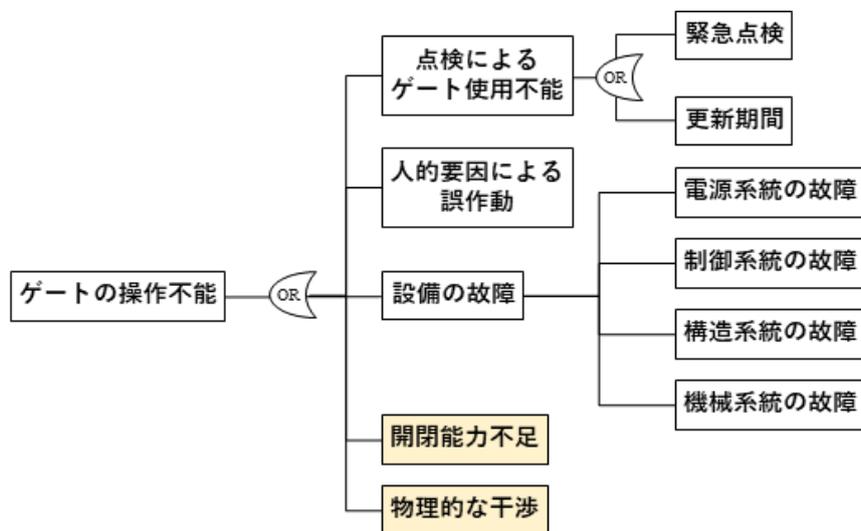


図 5-1 ゲートの操作不能に至る要因

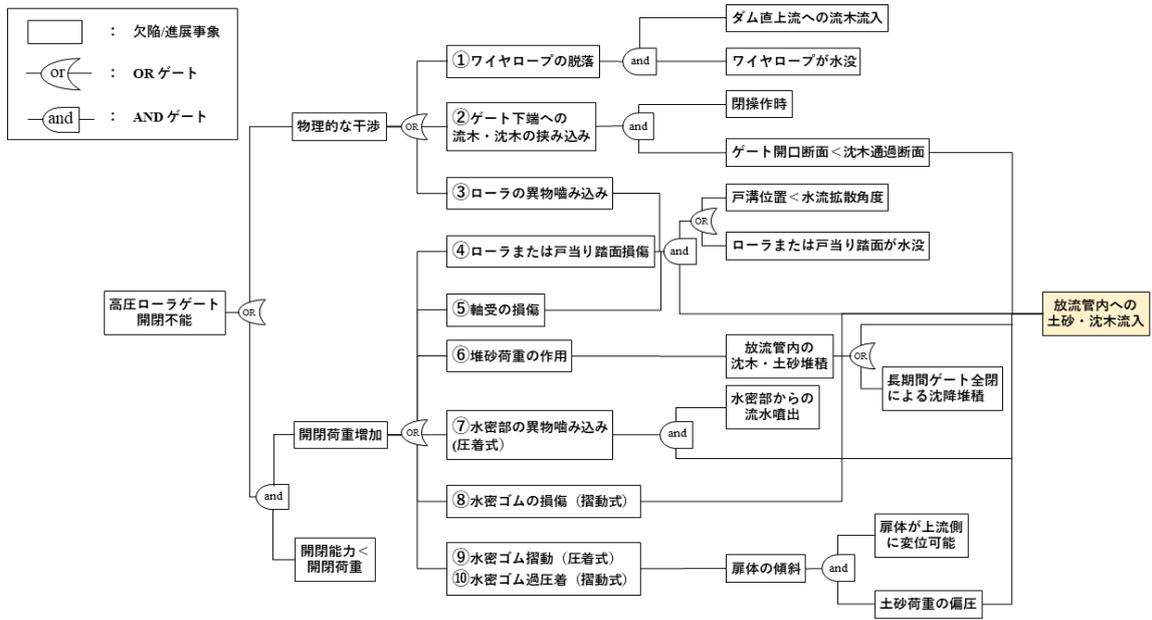


図 5-2 土砂・沈木による高圧ローラゲート操作不能に関する FTA

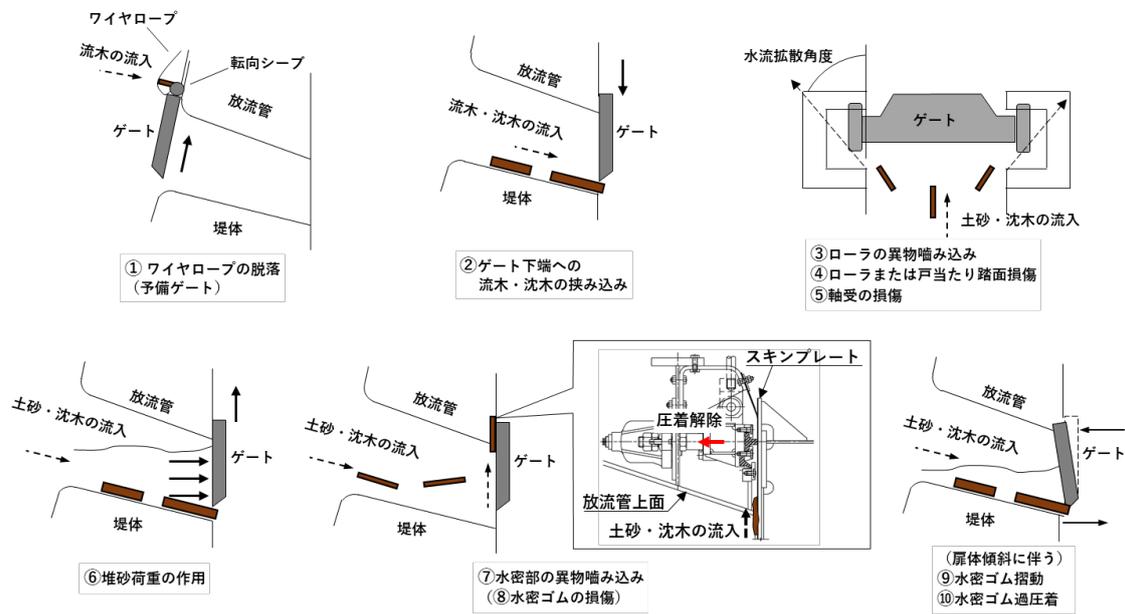


図 5-3 土砂・沈木によるゲート操作リスク事象のイメージ

5.3 裾花ダムにおけるゲート操作不能要因の推定

本節では、裾花ダムのゲート操作不能事例に対し、前節で作成したFTの適用による操作不能要因の推定を行った結果について示す。

5.3.1 裾花ダムのゲート操作不能過程および復旧過程

2章でも示したとおり、裾花ダムは、常用洪水吐きゲート 2 門と非常用洪水吐きゲート 3 門で構成されており、計画高水流量 1,180m³/s に対し、計画最大放流量 520m³/s とする一定率一定量方式の洪水調節計画である。常用洪水吐きは、洪水調節を目的に含むアーチ形式のダムによくみられる全管路型の高圧放流管が計画堆砂位より低位に設けられており、ゲート形式は高圧ローラゲート、水密方式は戸当り側圧着式、開閉装置は油圧シリンダ式である。

2017年8月の裾花ダムにおいて、洪水調節中の2号（右岸側）常用洪水吐きゲートが開操作中に54cm（ゲート開口高さ28cm）となった時点で、「開油圧異常」が検知されて操作不能となった。なお、「開油圧異常」とはゲートの開運転中に油圧シリンダヘッド側圧力が異常に上昇（13MPa以上）した場合、警報・表示を行い、ゲート運転を停止させる状態である。操作不能となった2号ゲート開口部には沈木の挟み込みが確認された（図1-5）。操作復旧には、堆砂浚渫等を経て約4ヶ月間を要している。復旧作業は、予備ゲートを全閉とし、油圧ユニットのリリーフ弁を交換することで定格圧力を当初設計の14MPaから段階的に増加させることで、開閉能力であるシリンダ推力を上昇させ、開閉操作を試みた。最終的には、定格圧力が17MPaの時点で開操作が可能となった（表5-1）。なお、その間片方の常用洪水吐き1条のみで洪水調節が行われる事態となっている。

表 5-1 ゲート操作不能時から復旧までの経緯

年月日	発生事象	対応	ゲートのシリンダ推力 (MPa)
2017年8月	2号ゲート		14
	開操作不能発生	ゲート周辺堆砂除去等	14
12月	復旧作業(1)	予備ゲート全閉	14
	復旧作業(2)	定格圧力を上げてシリンダ推力の上昇	15
	復旧作業(3)	〃	16
	復旧作業(4)	〃	17

5.3.2 フォルトツリー分析に基づくゲート操作不能要因の特定

前章で得られた FT を用いて、2017 年 8 月裾花ダムにおけるゲート操作不能原因の推定を試みた。

裾花ダムの高圧ローラゲートは、戸溝位置が水流拡散角度以上であり、またローラまたは戸当り踏面の水没は生じないため、③「ローラの異物噛み込み」、④「ローラまたは戸当り踏面損傷」、⑤「軸受の損傷」は除かれ、水密形式および開閉方式はゴム圧着式であることから、①「ワイヤロープの脱落」、⑧「水密ゴムの損傷（摺動式）」および⑩「水密ゴムの過圧着（摺動式）」の原因が除かれる。また操作不能時は開操作時であったため②「ゲート下端への流木・沈木の挟み込み」も除かれる。⑨「水密ゴムの摺動」については、扉体の傾斜に起因するため、その可能性について検討を行った。しかし、ゲートリップ部に堆砂・流木・沈木の荷重が作用した場合においても、水圧荷重も同様に作用した状態であることから、扉体が傾斜するには至らなかったため、⑨は除くこととした。

以上の検討より、図 5-2 に示す FT において、ゲート操作不能要因としては、⑥「堆砂荷重の作用」と⑦「水密部の異物噛み込み」による開閉荷重増加のみに絞られた。

5.3.3 堆砂荷重の作用および水密部の異物噛み込みに関する検討

前節で特定した 2 要因について、それぞれ開閉荷重増分について以下の方法により試算を行う。

堆泥荷重の作用については、ダム・堰施設技術基準に示されている最大値を採用し、泥圧係数 $C_e=0.60$ 、堆泥の見かけの単位体積重量 $W=1.84\text{t/m}^3(18.0\text{kN/m}^3)$ 、堆泥の空隙率 $v=0.45$ とする。なお堆泥と金属（スキンプレート）間の摩擦係数はダム・堰施設技術基準では 0.4 とされている。しかし、堆泥の状態が不明であるため、水門鉄管技術基準での摩擦係数 0.3~0.5⁵⁾を参考に、最大値である 0.5 として検討した。

次に、水密部の異物噛み込みについては以下の方法により試算を行った。圧着式の水密装置は、ゲート操作中に圧着が解除されているので操作中に限り漏水がある²⁾とされている。そのため、圧着解除時の水密部に土砂および沈木が噛み込んだ場合を想定し、開閉荷重を算出した。正確な荷重の算定は困難なため、仮に土砂が水密ゴムと扉体の隙間（1mm）に詰まり、圧力によりゴムが圧縮されたことで押付力が発生したと考える。なお水密ゴムの押付力はメーカーの実験値を採用し、圧縮代 9 mm で押付力 600 kg/m² で計算した。

なお、堆砂荷重を泥圧荷重として、ダム・堰施設技術基準¹⁾より、式(1)より算出した。

$$P_e = C_e \cdot W_1 \cdot d \quad (1)$$

ここで、 P_e ：扉体との接触面の任意の点における水平方向泥圧(t/m)、 W_1 ：泥圧の水中における単位体積重量 (t/m³)、 d ：堆泥面から接触面上の任意の点までの深さ(m)を表す。

以上の仮定により、扉体自重等の当初設計荷重に堆砂・沈木影響を加味して計算を行った結果、摩擦係数 0.4 の場合開閉荷重は 46.761 t となり、ゲート操作不能時のシリンダ推力 47.061 t を下回ったが、摩擦係数 0.5 の場合は開閉荷重が 48.538 t とシリンダ推力を上回り、

操作不能となる結果となった。これより、摩擦係数の取り扱いに関する議論は残るものの、ゲート操作不能時は、土砂と沈木による堆砂荷重および水密部の異物噛み込みによって、開閉能力不足が生じた可能性が高いことが明らかとなった。

5.3.4 堆泥を固形物として検討した開閉荷重による検討

前節では、土砂と沈木に起因する荷重増分がゲート操作不能をもたらした可能性を示した。一方で、表 5-1 の復旧時の経緯を確認すると、復旧作業(1)～(3)の時点で、予備ゲートが全閉状態すなわち水圧荷重が作用しないため、操作不能直後に比べて開閉荷重は低減されるタイミングにおいても、荷重を作用させて連続して使用できる最高圧力である定格圧力 14～16MPa のシリンダ推力で操作不能となっている。そこで、堆砂荷重の取り扱いについて追加検討を行った。

前節では堆砂荷重を泥圧荷重として、ダム・堰施設技術基準より、式(1)より算出した。一方で、操作不能から 4 ヶ月が経過した復旧時の放流管内から排出される堆泥の状態（図 5-4）から、堆泥は固形物に近い状態である可能性が考えられる。そこで堆泥を固形物として考え、堆泥の自重が放流管傾斜による水平方向荷重が扉体に作用することから、堆砂による荷重を式(2)とした。

$$P_w = W_2 \cdot V \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \quad (2)$$

ここに、 P_w ：堆泥の水平方向自重分力(t)、 W_2 ：堆泥の単位体積重量(t/m³)、 V ：放流管内の堆泥体積(m³)を表す。ここで、図 5-5 に泥圧による作用荷重および堆泥を固形物とした作用荷重の模式図を示す。

操作不能直後は式(1)の泥圧荷重として、操作不能から 4 ヶ月経過した復旧作業時は堆泥を固形物として検討した式(2)の場合の、開閉荷重とシリンダ推力の比較を各荷重の内訳とまとめて図 5-6 に示す。まず、操作不能直後に着目すると、前節でも述べたとおり「水密部の摩擦力」と「スキンプレートと堆泥間の摩擦力」の作用により、シリンダ推力不足となっている。一方、予備ゲート全閉後の復旧作業時には、堆砂を泥圧と考えた際の開閉荷重はシリンダ推力を下回り、固形物と考えた場合はシリンダ推力を上回る結果となっている。その後、シリンダ推力を定格圧力 17MPa として大きくすることで、開閉荷重を上回り復旧に至っている。

以上のことから、ゲート操作不能直後と、堆泥が固形物となる復旧時で、堆砂の作用荷重が異なっていたことが考えられる。今後、堆泥が固形物となるメカニズムや期間等の検討を踏まえた現象をゲート設計および管理に反映させていくことが必要と考えられる。



図 5-4 復旧時の放流管内の堆泥状況

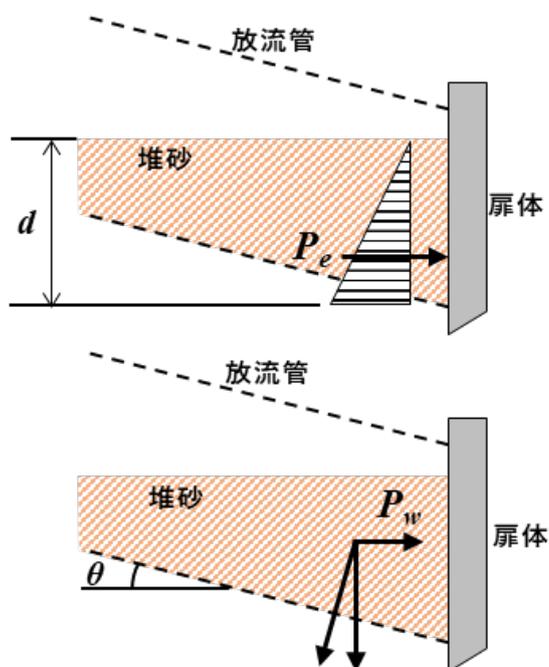


図 5-5 泥圧による作用荷重(上)および堆泥を固形物とした作用荷重 (下)

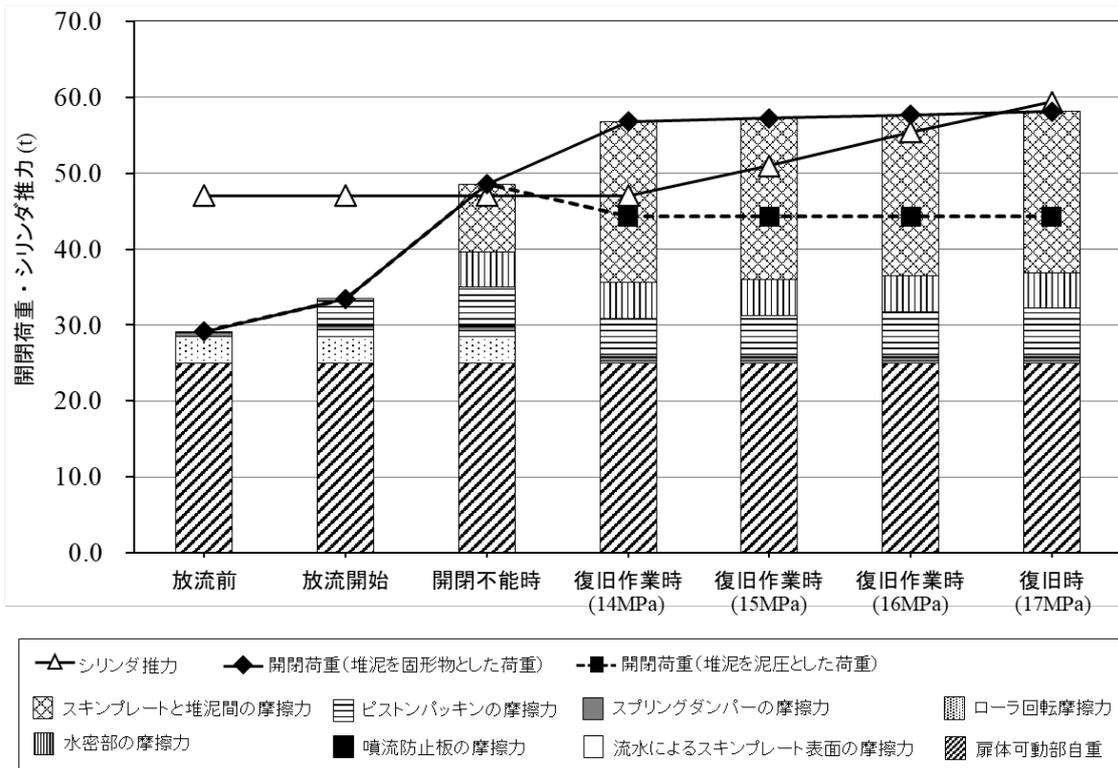


図 5-6 操作不能時－復旧時の開閉荷重とシリンダ推力比較（荷重内訳）

5.4 ゲート近傍堆砂位とシリンダ推力の余裕率に基づく他ダムリスク検討

放流管内への土砂・沈木流入は、物理的な干渉と開閉荷重の増加という両観点でゲート操作が不能となるリスクが生じる。物理的な干渉については、開閉能力に関係無く、ゲートを閉塞させるため、構造的な対策が必須である。

一方、開閉荷重の増加については、そもそも土砂・沈木等による設計外力を見込んでいないゲートにおいて、元々どれくらいの余裕代があるかという観点が挙げられる。つまり、物理的な干渉を防ぐことができれば、基本的には開閉能力不足でなければ、土砂および沈木によりゲートが機能不全となることはないと考えられる。

そこで、図 5-7 に示すとおり、ゲートの設計計算書のデータを入手できた 44 ダムにおけるシリンダ推力の余裕率(シリンダ推力/当初設計荷重)と堤体直上流の堆砂標高と常用洪水吐き呑口敷高の標高差（クリアランス）の関係を整理した。なお、クリアランスはアンケート調査⁷⁾によって得たものである。シリンダ推力の余裕率は、多くのダムで概ね 1.0～1.5 の範囲となっている。これは、ダム堰施設技術基準によると「油圧シリンダ作動圧力（上述におけるシリンダ推力）とは、定格圧力に 0.9 を乗じた値より配管、各バルブおよびパッキンの抵抗を減じた値である」¹⁵⁾とされており、機械設備としての上限である定格圧力に余裕代が含まれていることから、シリンダ推力は概ね設計荷重と合致させて設計されて

いるためと考えられる。

しかし、前章の試算では、裾花ダムのシリンダ推力の余裕は 1.4 程度であるが、その場合においても開閉能力不足となった。また、その後の定格圧力を 17Mpa まで上昇させているが、これは周辺設備が圧力上昇に耐えうるかどうかといった点でいずれのダムにおいても実施可能なものではないと考えられる。つまり、図 5-7 に示されるように高圧ローラゲートの多くは、堆砂の進行に伴う土砂および沈木による外力増加に対して、冗長性は高くないと考えられる。特に、図中左下に示すような堆砂とのクリアランスが小さくなってきているダムにおいては、まず上述のような FTA を含むリスク分析が求められる。

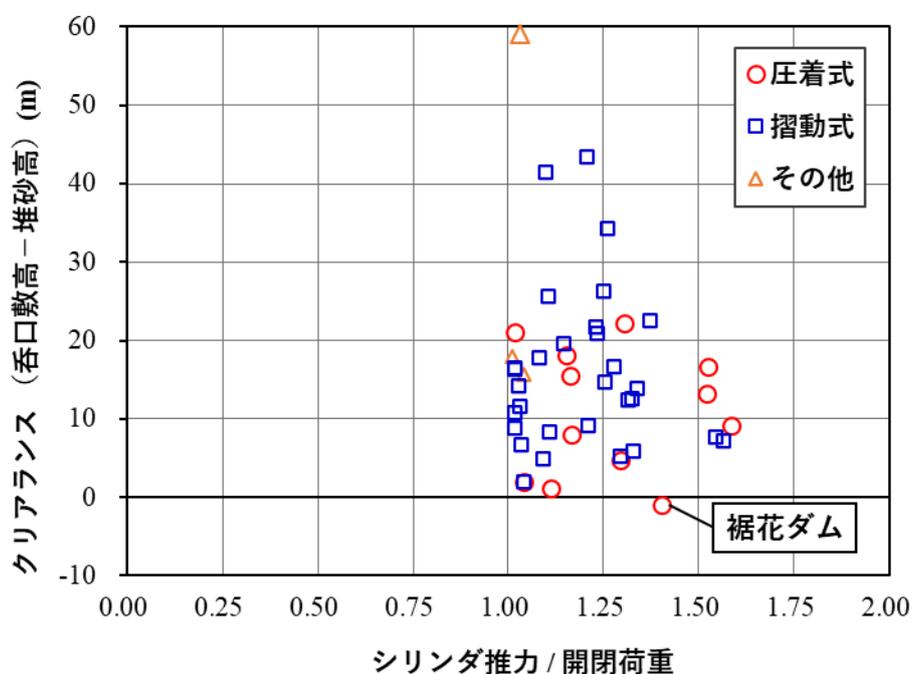


図 5-7 シリンダ推力の余裕率とクリアランス

5.5 結語

本章では、長野県の裾花ダムにおける土砂・沈木によるゲート操作不能事例を受けて、従来、設計上土砂・沈木の放流管内流入を考慮していなかった常用洪水吐きの高圧ローラゲートを対象に、土砂・沈木に起因するゲート操作不能に関する FTA を試行し各リスク要因を体系的に整理するとともに、土砂および沈木による具体的な荷重増分とシリンダ推力の余力検討等を行い、ゲート操作不能要因の特定と操作不能経緯の定量的な検討を行った。さらに、ゲートの開閉能力の余裕率と堆砂進行度に基づき、他ダムにおけるゲート操作不能のリスクを検討した。得られた成果および知見を以下に示す。また、得られた成果および知見を以下に示す。

- 高圧ローラゲートの土砂および沈木に起因するゲート操作不能に関する汎用性のある FT を作成した。なお、同様に高圧スライドゲートおよび高圧ラジアルゲートについても作成可能である。
- 土砂および沈木によるゲート操作不能要因は、物理的な干渉によるものと、開閉能力不足に起因するものに大別される。
- 裾花ダムのゲート操作不能の要因は、圧着式の水密部における異物噛み込みおよび泥圧または固形物としての堆砂による開閉荷重増によるものと考えられる。
- 土砂および沈木による荷重増分があった場合に、土砂通過を想定していないダムの高圧ゲートの設計の余裕代では確実な機能発揮には懸念がある。

本稿では、裾花ダムの事例を基に、高圧ローラゲートの操作不能に関する要因の定量的な分析を行ったが、今後の堆砂進行に伴い、外力増大が見込まれる各種ゲートにおいても、FTA によりゲート構造特有の要因分析を行い、その影響が大きい因子を明らかにし、対策を講じること、または影響を見込んだ設計外力（シリンダ推力）の向上が求められる。例えば、今回の裾花ダムのような事例では、ゲートの水密構造を圧着式から摺動式に変更し、水密部の異物噛み込み等の不確実性を持った外力増分要因を除去し、かつシリンダ推力を向上させるといった対策が考えられる。

一方で、ゲート構造の改良による土砂および沈木への対応は、既設の改造となるため、例えばシリンダ推力を増加させるためには関連構造物を全て取り換える必要が生じるなど、施工性や経済性の観点から困難となることも考えられる。そのため、ゲートにおける対応策以外にも、ゲートへ堆砂、特に沈木を到達させない管理方法や、放流管内土砂の固形化（圧密過程）を防止するために必要なゲート操作頻度に関する検討、といった課題が挙げられる。

今後もダム堤体周辺の堆砂は、浚渫等の除去に係るコストは小さくなく、経年的な増加が確実視されることから、各種ダム水理構造物への影響分析と予防保全としての対策実施判断基準の検討、適切な対策を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準（案）
- 2) ダム・堰施設技術協会：ゲート総覧 I 解説編, 1987.
- 3) US Army Corps of Engineers: Methodology for Risk Analysis of Dam Gates and Associated Operating Equipment Using Fault Tree Analysis, ERDC TR-05-3, 2005.
- 4) 入江洋樹, 柏木順, 上村寿一, 太田道男, 川原修司, 吉澤和美, 柏井条介：ダム分野におけるリスクアセスメントについて, 大ダム, Vol. 188, 2004.
- 5) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準（昭和 48 年版）
- 6) ダム・堰施設技術協会：ゲート式開閉装置(油圧式)設計要領(案), 2000.
- 7) 高田翔也, 宮川仁, 熊本紗也華, 石神孝之：ダム貯水池における流木および沈木管理状況, 土木技術資料, 63-11, 2021.

6章 常用洪水吐きの機能低下に対するリスク管理手法の提案

6.1 概説

本章は、3章から5章の研究成果を踏まえ、長野県裾花ダムのゲート操作不能事例を受けて、堆砂進行下における常用洪水吐きの機能低下を対象としたリスク管理手法を提案することを目的としている。

リスク管理手法の流れとしては、スクリーニング、リスクの特定・把握、リスク分析、リスク算定を行い、それらを踏まえたリスク評価として、ダム管理者におけるリスク受容、リスク対策を意思決定が行われる。前章までで述べた内容は、それぞれ、リスクの特定・把握およびリスク分析は3章～5章の内容が対応しており、本章では、スクリーニングおよびリスク算定、リスク対策を検討し、以上を統合してリスク評価に関して議論を深め、現状で得られた知見を踏まえ、一貫したリスク管理手法として整理を試みる。

はじめに、スクリーニング手法として、長野県裾花ダムのゲート操作不能事例と同様のリスクが生じうる他ダムについて、堆砂率およびゲートの設計水深から、簡易にスクリーニングを行う方法を提案する。また、スクリーニングより得られた結果を踏まえて、追加調査のポイント等を示す。

次に、リスク算定として、ゲートの機能低下または機能不全状態として、裾花ダムにおけるゲートが1門あるいは2門操作不能状況下における洪水調節計算を行い、下流へもたらす放流量増分の算定手法を示す。

最後に、裾花ダムのゲート操作不能事例におけるリスクシナリオを概観し、前節までの得られた知見と引き続き検討すべき課題を提示するとともに、今後の堆砂進行下における他ダムも含めた常用洪水吐きの機能発揮に向けて、現状の得られた知見を踏まえた同リスクシナリオに対するリスク管理フローを示す。

6.2 ゲート機能低下のリスクが高いダム抽出

6.2.1 抽出方法の概要

裾花ダムのゲート操作不能事例について、堆砂進行が沈木による操作支障をきたした主な誘因と捉え、ゲート敷高と堆砂の進行度をもとに、同様の操作不能リスクが高いダムの一次スクリーニングを行う。

本節では、「ゲート総覧I～V巻」¹⁾より得られたデータを用いて、国内の国土交通省（直轄）、都道府県（補助）、（独）水資源機構管理のコンジットゲートを有するダムを対象とし、以下の観点でスクリーニングを行った。

- 洪水調節を目的に含み、コンジットゲート（設計水深の大きいゲート）を有するダムである。
- ゲート操作不能状況を想定した場合、常用洪水吐きからの放流能力は元々の放流能力の「 $(n-1)/n$ 」となるため、ゲートの数(n)が少ないダムのほうが、より放流能力低下の割合が大きくなる。そのため、コンジットゲートの門数(n)が少ないダムほどゲート操作不能時のリスクが大きい。
- ダムの常用洪水吐き呑口敷高が低位であり、堆砂率が高く、または直接的に呑口直上流の堆砂高さとのクリアランスが小さいダムは、ゲート操作不能のリスクが高いものとして捉える。

6.2.2 抽出結果および考察

1951年から2005年までに建設されたダムのゲートのデータがまとめられている「ゲート総覧I～V巻」に掲載されている約1800基のダムのうち、目的に洪水調節を含み、コンジットゲートを有するダムは、116基であった。そのうち、ゲート門数及び所管別の内訳を図6-1に示す。その中で、コンジットゲート2門以下のダムは、93基であり、コンジットゲートを有するダムの8割以上を占めている。また、そのうちゲート門数が1門及び2門のダムについては都道府県管理である補助ダムが多い。また、表6-1は2門以下のコンジットゲートの形式内訳を示しており、高圧ラジアルゲートの割合が多く、裾花ダムのコンジット形式である高圧ローラゲート形式は10基程度である。これは5章で示したとおり、ラジアルゲートには構造設計上のメリットがあり、高圧ローラゲートは基数が少ないアーチ式ダムに多く使用されているためと考えられる。

図6-2は、抽出された93基のダムについて、それぞれ計画堆砂量に対する堆砂率と、堤高に対するコンジットゲートの設計水深の比を示したものである。堆砂率は、平成26年時点の93基中57基の得られたデータを示している。ここで、縦軸は堤高に対する設計水深の比が1に近づくほど、ゲートがダム底部近くに設置されていることを示しており、横軸は堆砂率としている。ここで堆砂率の高さがダム直上流部の堆砂位の高さと相関があると仮定して、裾花ダムをリスク評価の基準と考えれば、堤高に対するコンジットゲートの比

が0.5以上付近、堆砂率は100%付近はリスクの高いダムといえる。

一方、2章でも示したとおり、堆砂率は、各ダム毎の堆砂形状の違いによって、厳密にはより直接的なリスク要因であるダム直上の堆砂高さの代替とならないことが想定される。そこで、3章で示したアンケート調査結果から、堆砂率と、クリアランス（ダム直上堆砂位一常用洪水吐き呑口敷高）の関係について整理した。その結果を図6-3に示す。しかしながら、両者の関係に特に相関は見られず、堆砂率が大きな場合でも、ゲート敷高まで堆砂が進行していないダムも見られる。これは、そもそものゲート配置条件や、堆砂の多くがデルタ域に堆積している等の堆砂形状の違いと考えられる。そのため、堆砂率のみを抽出指標とするのは不十分な部分もあるため、堆砂形状の違いによって、ゲート閉塞リスクに対する堆砂率及びゲート敷高のリスクの捉え方には幅を持たせる必要性があり、ダム直上の堆砂位と呑口敷高のクリアランスを確認していくことが重要である。

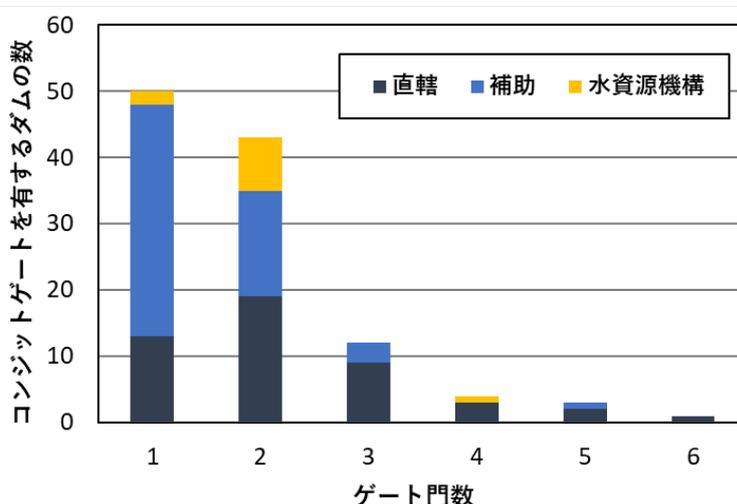


図 6-1 ゲート門数および所管別の内訳

表 6-1 2門以下のコンジットゲートの形式内訳

高圧ラジアルゲート	71
高圧ローラゲート	11
高圧スライドゲート	7
キヤタピラゲート	1
スライドゲート	1
ローラゲート	1
引張りラジアルゲート	1

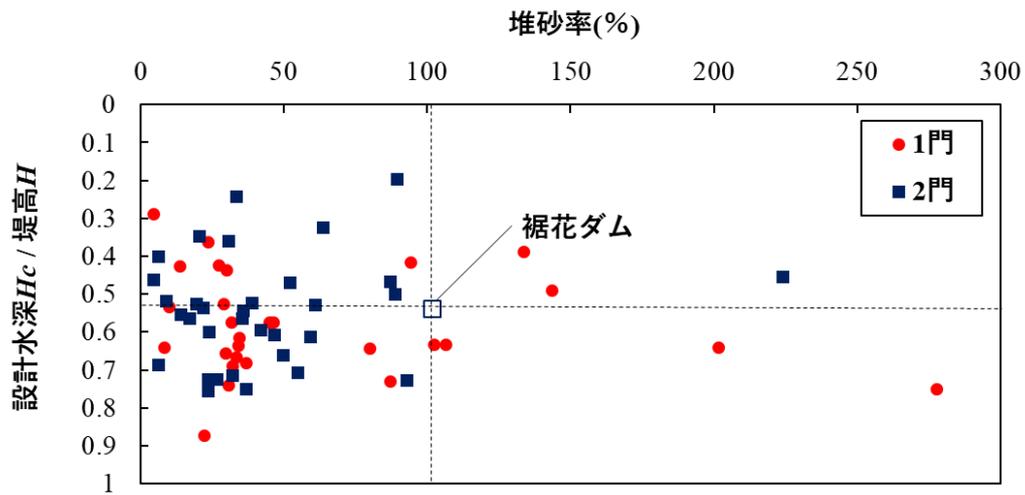


図 6-2 堆砂率とゲート設計水深の関係

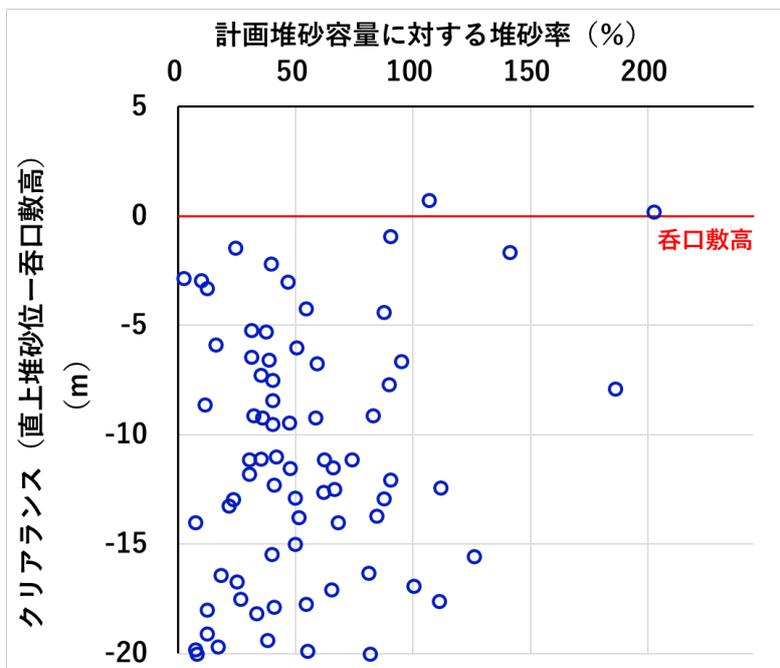


図 6-3 堆砂率とクリアランスの関係

6.3 洪水吐き機能低下に伴う洪水調節機能への影響に関する一検討

本節では、裾花ダムのゲート操作不能事例を受けて、その機能低下時の洪水調節への影響について検討を行う。また、コンジットゲートが一門使用不可となるリスクという観点では、ゲートの機械的な動作不良あるいは設備点検のために使用できないといったことも考えられる。実際、北海道の二風谷ダムにおいては、2004年の洪水時に、7門の常用洪水吐のうち1門は点検のため洪水調節操作をしておらず、6門で洪水に対応した事例が報告されている²⁾。そのため、以下の検討には2章で述べたスイスの「n-1 rule」を参考にすると、堆砂および沈木または設備点検・機械的な動作不良といった要因は問わず、ゲートの機能不全が生じた際の洪水調節機能に対する影響検討といった位置付けも含まれている。

6.3.1 検討方法

「n-1」ルール適用時における洪水調節機能への影響を定量的に把握するため、今回実際にゲート操作不能の生じた長野県裾花ダムを対象に、「n-1」条件下での洪水調節計算を行った。計算には、裾花ダム管理事務所より提供していただいたダム諸量のデータを用いている。計算条件は、裾花ダム地点における計画流入ハイドログラフを流入量と仮定し、現在の裾花ダムの堆砂状況を考慮した貯水位-容量曲線（H-V 曲線）を用い、裾花ダムで定められたゲート操作規則に従って計算した。

6.3.2 検討結果および考察

(1) 「n-1」条件の洪水調節計算

図 6-4 及び図 6-5 は、計画放流量（ $n=2$ ）のハイドログラフ及び「n-1」条件下でのハイドログラフとそれぞれに対応する貯水位を示している。図 6-4 は「n-1」条件下で、計画放流量 $520 \text{ (m}^3/\text{s)}$ を維持したケースであり、図 6-5 は、サーチャージ水位を超えないように放流量の調節を行ったケースである。

図 6-4 では、コンジットゲート 2 門で計画放流量 $520 \text{ m}^3/\text{s}$ を放流可能であるのに対し、「n-1」条件下では、クレスト放流開始水位での最大放流量が $315 \text{ m}^3/\text{s}$ であるため、貯水位がクレストゲートに達するまで、計画放流量へ移行できていない。そのため、貯水位が計画に比べて上昇してしまい、サーチャージ水位を超える結果となっている。裾花ダムでは、ダムの安全上最大の水位である設計洪水水位はサーチャージ水位と同水位であり、ダム損壊のリスクを避けるため、サーチャージ水位以上の水位上昇は許容できない。

一方、図 6-5 は、ダム堤体の安全性確保の観点から、「n-1」条件下で貯水位が維持できるよう洪水調節を行ったケースである。ここでは、クレストゲートの水位までは図 6-4 のケースと同様であるが、その後貯水位の上昇を抑えるため異常洪水時防災操作に移行した結果、計画放流量を上回る $700 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の放流量となっている。これは、裾花ダム下流河道における疎通能力 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ を上回る流量であり、かつ放流量の増大が急激であるため、下流での被害リスクが高まると考えられる。

(2) 「n-2」条件の洪水調節計算

次に、「n-1」ルール of 検討に加え、さらに厳しい条件を仮定することとし、これまでと同様の計算条件下において、「n-2」条件での洪水調節能力への影響を検討したケースを図6-6に示す。ここで「n-2」条件は、ダム下部に設置されたコンジットゲートからは一切放流できない条件となることを意味しており、また、元々のゲート門数が1門のダムにおける「n-1」条件と同様の放流特性を示すものと考えられる。

計算結果より、「n-2」条件では、クレストゲートからの放流のみとなるため、発電設備によるわずかな放流量を除いて、初期の流入量を全て貯留することとなり、「n-1」条件の場合に比べ、急激な貯水位上昇となっている。また、クレスト放流開始水位に達した後、クレスト全開での放流により貯水位上昇に対応することとなり、「n-1」条件下よりもさらに急激な放流量の増大を引き起こしている。

(3) 「n-1」条件の放流機能に関するリスク評価

各条件下における最高貯水位と最大放流量の関係を表6-2に示す。これより、ダム堤体の安全面を考慮して、貯水位が設計洪水位を上回らないようゲート操作した場合、平常時「n」に比べ、「n-1」、「n-2」条件となることで、最大放流量がおよそ1.4倍、1.9倍となった。

図6-7は、貯水位の維持を優先とした各条件について、放流量と貯水位の最大値に至るまでの推移及び、貯水位に対する洪水吐全体の最大の放流能力を示したものである。図中のプロットは、時系列中の同時刻を示している。ここで、「n-1」、「n-2」条件では、平常時「n」の条件に比べ、クレスト標高以下での放流能力が低下することで、洪水初期の流入量を過剰に貯留することとなり、貯水位の上昇速度が速くなっている。それに伴い、ピーク流入時には既に洪水調節容量を大幅に失っており、最大放流量の増大とその放流量に至るまでの時間を早めていることが分かる。また、「n-1」、「n-2」条件においては、放流設備の最大放流量に近い放流量を示しているが、平常時「n」条件のもとでは、設備の能力に対して、余裕を持った計画放流量となっていることが分かる。しかし、その余裕分は「n-1」条件下で計画放流量を代替できるほどには及んでおらず、「n-0.5」（ゲート2門中の1門が操作不能となった状況を想定）程度の事態に対応できる可能性はあるものの、当該ダムには発電設備等で十分な代替放流能力を有する設備は設置されていない。

各条件に共通する放流特性として、コンジットゲートは放流量の維持に適しており、クレストゲートは貯水位の維持に適している。そのため、「n-1 rule」へのリスク対策としては、近年増加しているダム低標高部における放流管増設事例のように、クレスト標高以下で放流量を維持し、ピーク流入量に対して洪水調節容量を確保できる設備投資や、そもそも「n-1」条件が生じないような予防保全的な対策が必須であるといえる。

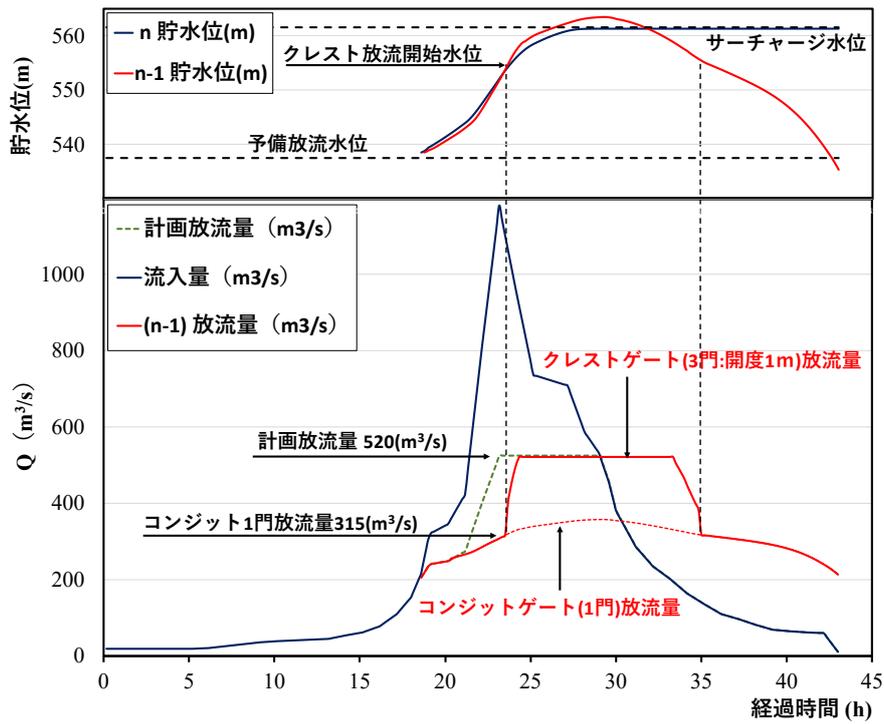


図 6-4 「n - 1」 条件下での洪水調節計算結果(放流量維持)

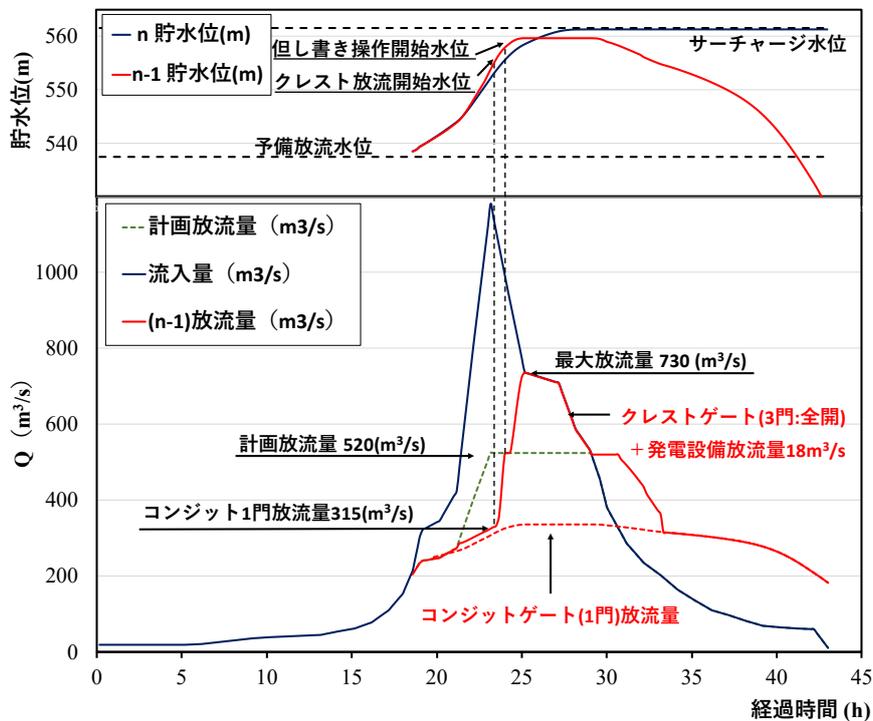


図 6-5 「n - 1」 条件下での洪水調節計算結果(貯水位維持)

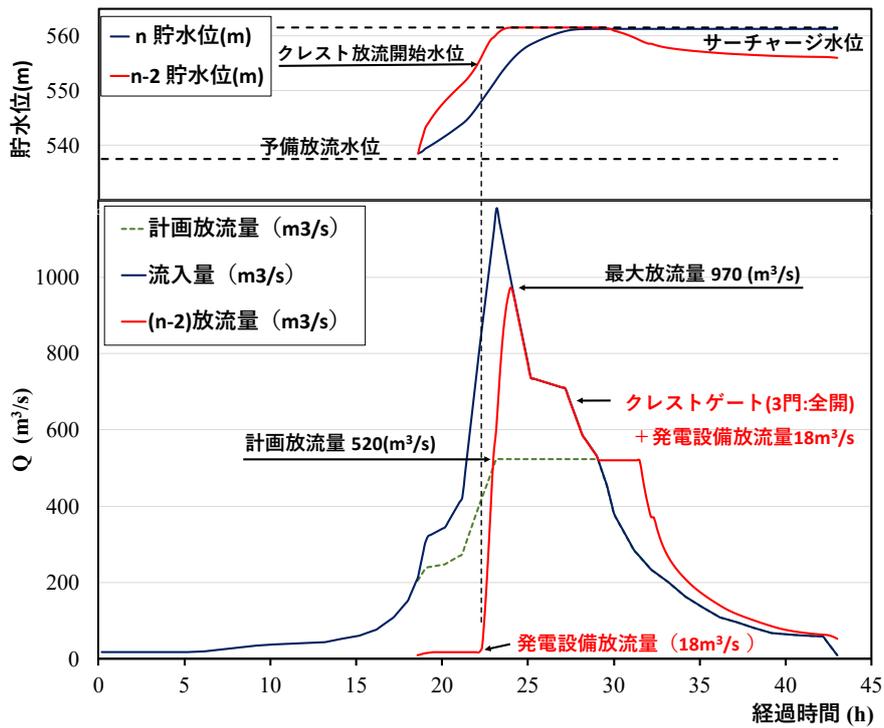


図 6-6 「n-2」条件下での洪水調節計算結果(貯水位維持)

表 6-2 各条件下での放流量の比較表

条件	最高貯水位	最大放流量	平常時に対する比率
「n」 (平常時)	561.5	520.0	1.0
「n-1」 (放流量維持優先)	563.4	520.0	1.0
「n-1」 (貯水位維持優先)	559.6	730.0	1.4
「n-2」 (貯水位維持優先)	561.5	970.0	1.9

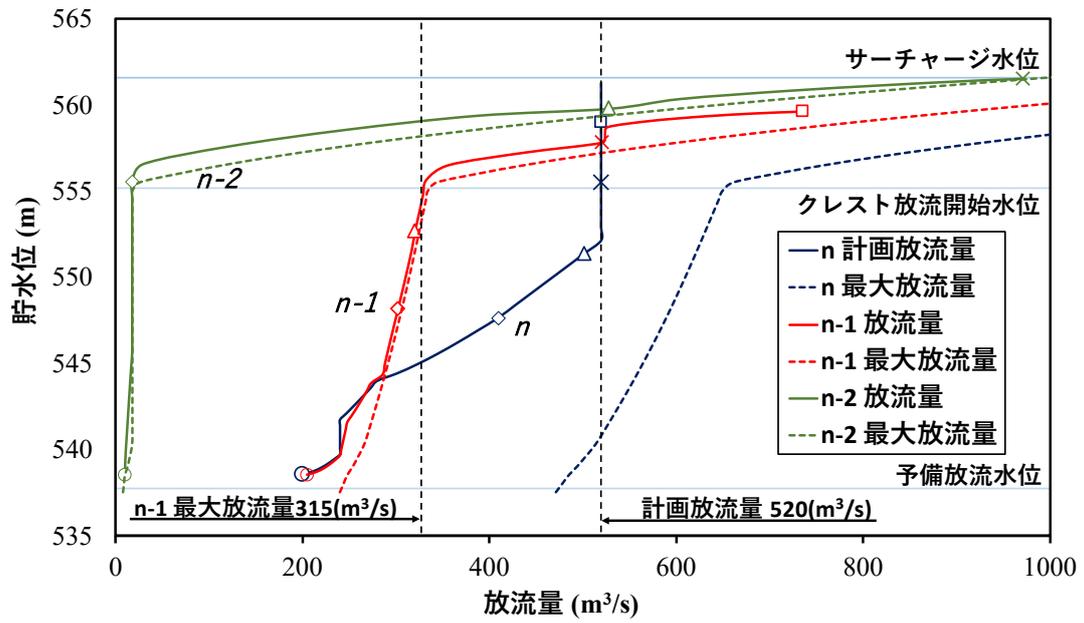


図 6-7 洪水調節計算結果と各条件下での最大放流量

6.4 堆砂進行下における常用洪水吐きの機能低下に対するリスク管理手法の検討

6.4.1 常用洪水吐きの機能低下シナリオの課題全容と検討状況

裾花ダムのゲート操作不能事例を受けて、常用洪水吐きの操作不能というリスクシナリオに対し、その帰結としての下流影響は前節に示したとおりであり、本節では前章までの各現象について検討した結果をとりまとめ、今後の課題も含めその全容を示す。

第一章の研究目的においても示したとおり、裾花ダムにおいて生じたゲート操作不能事例は、常用洪水吐きの呑口敷高までの堆砂進行および堆砂面における沈木の存在、土砂および沈木の流下に対してゲートが十分に対応できなかったこと、に起因している。つまり、堆砂進行が放流管呑口に達したことが本課題の起点であり、貯水池堆砂が著しく進行した他ダムにおいても共通の新たなダム貯水池管理の課題となることが懸念される。加えて、堆砂のみならず沈木が存在することがゲート側により厳しい条件をもたらしており、設計上土砂とりわけ沈木の流入を想定していない洪水調節用の高圧ゲートにおいては、放流管内への土砂堆積および水密部への沈木・土砂等の干渉による外力増により、開閉荷重不足を招くおそれがある。

以上のリスクシナリオにおいて、はじめに貯水池内における沈木の発生・移動現象が課題となった。そこで第3章では、沈木探査手法として、MBES 測深データの詳細分析により、沈木検知が可能なことを示した。これより、裾花ダムの網場周辺において沈降が多く確認されること等が明らかとなった。それを踏まえ、同じく3章では、貯水池における沈木の発生過程として、流木の沈降実験を行った結果を示した。実験結果より、樹種、腐朽程度の違いが密度変化過程へ影響することが明らかとなり、立木のサンプルにおいては1カ月程度で約3割弱の沈降が確認された。なお、アンケート調査結果から流木災害時の流木回収には、1カ月～6カ月かかっており、早期回収の必要性が確認された。

次に、第4章における検討では、裾花ダムにおける現地堆砂測量結果をもとに、放流管呑口に到達した堆砂は、洪水吐きからの放流によって形成されるすり鉢形状（フラッシングコーン）を伴って一時的な安定形状を生じさせることが明らかとなった。その形状規模は、ダム操作時の貯水位とゲート開度から定まる放流量の増大に伴い増加し、最大で3,000m³程度のコーン形状が確認された。また、ゲートからの放流量が小さい場合は、コーン規模に特に変化は見られなかった。しかし、ゲート操作を行わなかった場合には流入土砂の浮遊砂、ウォッシュロード成分が排出されず、放流管近傍および内部に堆積することが考えられ、出水毎の放流がゲート近傍の堆砂管理にとって重要であると考えられる。

加えて、第4章では放流管呑口近傍対象とした水理模型実験を行った。その結果、堆砂がない状態に比べ、堆砂形状が上流側に接続することでより上流側へ流速分布の大きい領域が拡大することが確認された。さらに、ゲート操作不能事象が生じた際の流量条件においては、ゲートの極近傍でのみ流れが生じたことから、閉塞時の沈木はゲート操作時には放流管内またはその極近傍に存在していたことが示唆された。また、ゲート操作不能事象に対する現場対策として、実施された放流管前面の浚渫形状についても検討を行い、浚渫

部に死水域が形成され、前面に土砂および沈木のポケットとして機能することは明らかとなった。一方で、出水毎に埋没すると考えられ、対策の持続性に課題があることが懸念される。

最後に、放流管内へ流入した土砂および沈木に対し、ゲートの機能確保に関するリスク分析を行った。第2章のレビューでも示したとおり、土砂を通過させることを前提としたゲートには、その機能確保のため、ゲートの複数枚設置することや、戸溝部を小さくし、摩耗対策にライニングを行うなど、付加的な工夫が多数を取り入れられている。一方で、洪水調節用の高圧放流管およびゲートでは、計画堆砂位より平均で10m下がりとなる配置が多いものの、堆砂形状が実際は斜め堆砂となることが想定され、土砂および沈木の流入は考慮されていない。そこで、第5章では裾花ダムのゲート形式である高圧ローラゲートを対象に、土砂および沈木に対し、フォルトツリー分析により、リスク要因の連鎖関係を示したツリー図を作成した。さらに、同分析結果をもとに各リスク要因について、その荷重増分を試算した。これより、特に水密部の荷重増および放流管内の堆積土砂による荷重増が土砂・沈木の外力考慮時に卓越する外力増分であることが明らかとなった。加えて、得られた荷重増分と裾花ダムにおけるシリンダ推力から、ゲート操作不能事象発生時から復旧時までの荷重と開閉能力の推移を示し、時系列でその操作不能発生過程を定量的に示した。最後に、設計データを入手できたダムについて、設計開閉荷重とシリンダ推力について比較を行い、余裕度（シリンダ推力/設計開閉荷重）としては1.0～1.5程度であった。ここで裾花ダムは1.4程度の余裕度であり、他ダムのゲートにおいても土砂および沈木荷重が作用した場合に余裕分では対応が難しいことが示唆された。

以上の個別の各成果について、一連のゲート操作不能シナリオにおける位置づけをまとめて図6-8に示す。

これまでの検討課題においても、引き続き検討すべき事項として、

- 埋没沈木の探査方法
 - 観測事例が少ない放流管全面の堆砂形状と運用の関係
 - リスク分析を踏まえたゲート構造改良の検討
- といった課題がある。また、さらに本研究内において検討できていない課題として、
- 沈木の駆動力となる堆砂進行下におけるダム貯水池内の流れ、堆砂の流動
 - 沈木発生過程として、網場からの沈降ではなく、直接湖底へと到達する沈木の動態
 - 貯砂ダム等構造物周辺の沈木化への影響
- 等が挙げられ、一部平行して進められている研究があるものの、今後の継続的な研究課題と考えている。

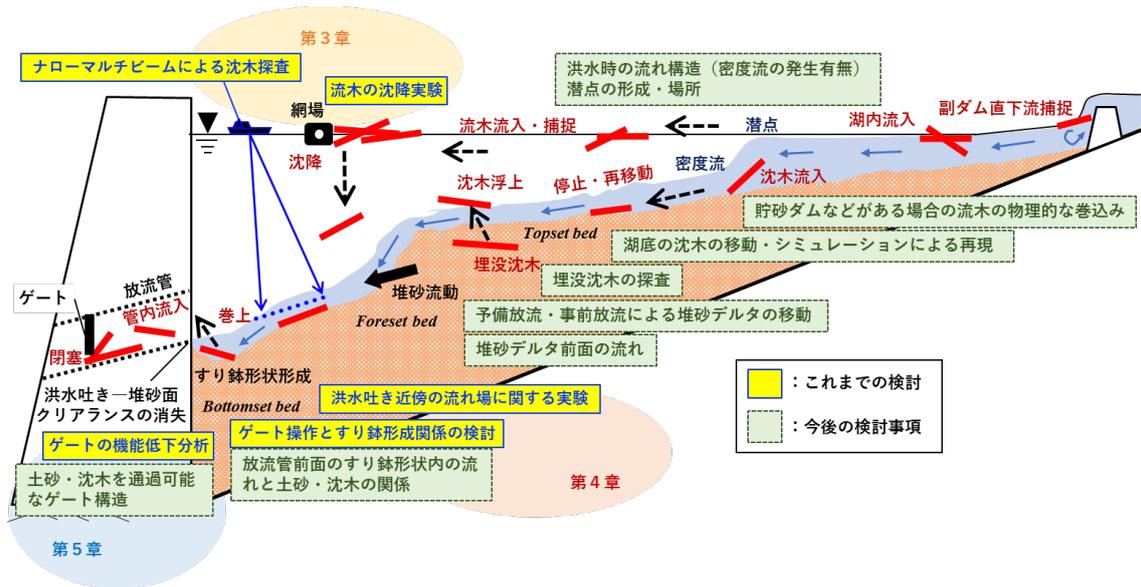


図 6-8 常用洪水吐きの操作不能シナリオにおける諸現象と本研究の検討課題および今後の検討課題

6.4.2 常用洪水吐きの持続的な機能発揮に向けたリスク管理フローの検討

常用洪水吐きの操作不能シナリオに対し、6.4.1 で示したとおり全ての検討課題をクリアした状況ではないものの、今後の気候変動に伴う洪水激甚化によって、堆砂進行、流木流入がダム貯水池管理負担を増加が見込まれる中で、現時点で得られた知見を踏まえて、そのリスク管理手法を構築していく必要がある。本項では、洪水調節機能を有する常用洪水吐きの機能低下に対し、以下に示すリスク管理フローを提案する。

Step1 スクリーニング：常用洪水吐き呑口敷高への堆砂進行度合いによるスクリーニング

はじめに、前節で挙げたとおり、常用洪水吐き呑口敷高と計画堆砂容量に対する堆砂率、またはより詳細に、呑口敷高とダム直上堆砂高のクリアランスを指標とした、マクロな観点でのスクリーニングが挙げられる。これは、今後の堆砂進行をモニタリングしていく中の基本情報として、要監視項目として挙げることを基本とすべきと考えられる。また次なる調査実施判断の指標であり、ダム貯水池の規模によるが、クリアランスが5～10m程度を切ったダムについては、次の調査事項を検討すべきである。

Step2-1 機能低下のリスク分析：①ゲート周辺の堆砂形状の詳細把握

次のステップでは、よりミクロな観点で、常用洪水吐き周辺の堆砂形状を把握すべきである。堆砂高さがゲート敷高まで若干のクリアランスがあるダムの場合は、過年度の堆砂進行度合いを調査し、参考値として既往出水におけるダム直上堆砂の堆砂上昇量を調査するとともに、残りのクリアランスが確率規模でどれくらいの規模相当かを把握しておくことで、クリアランスの余裕度を評価することができる。クリアランスの余裕度については総合的に判断する必要があるものの、例えば、1/100 確率規模相当を下回る余裕度の場合、次の検討を提案する。

- ① 現在多くのダム貯水池管理がそうであるように、いまだナローマルチビーム測量等による3次元的な堆砂形状把握がなされていないダムにおいては、従来の深淺測量により得られた横断測量結果をもとに、上述のクリアランスの評価を行い、常用洪水吐き周辺の3次元的な堆砂形状把握を行う。
- ② ゲート周辺の堆砂形状の観測頻度を増やす。基本的に国内ダムでは、年に一回または大規模出水時のみ堆砂測量が実施されているが、中規模以上の出水規模が生じた際には計測を実施する。その際、時間的・予算的制約がある場合は、少なくともゲート周辺のみでも計測することが望ましい。
- ③ 堆砂形状、特に前章で示したフラッシングコーンに関する形状特性を把握する。得られた形状特性の評価の観点としては、特にフラッシングコーンの最上流側、つまり貯水池側の堆砂標高や、コーン形状の勾配等を確認する。堆砂標高が高い

ほど、土砂通過量も多くなっているものと考えら、また急勾配な角度が形成されている場合、崩壊による急激な放流管への土砂流入が懸念される。

Step2-1 機能低下のリスク分析：② 沈木の探査

3章で示したとおり、ナローマルチビーム測量を活用して、ゲート周辺の沈木等探査を実施し、堆砂面上の沈木検出を行う。探査に際しては、使用機器はビーム幅が十分に小さい機器を選定することに留意する。特に、沈木の位置、サイズ等について、次期出水時のゲートへの移動可能性の観点で分析を行う。

Step2-1 機能低下のリスク分析：③ 土砂・沈木通過に対するゲート機能低下要因の分析

5章で示したとおり、ゲート構造の情報を収集し、ローラ・ラジアル等のゲート形式、ゴム圧着・摺動式等の水密方式、等の基本情報から、土砂・沈木通過に対する FT 図を作成し、土砂・沈木流入時のゲート機能低下要因の分析を行う。また、併せて設計開閉荷重に対するシリンダ推力の余力についても評価を行う。

Step2-2 下流影響のリスク分析：ゲート操作不能時（n-1 条件）のダム下流への影響分析

6章で示したとおり、「n-1 rule」を活用し、ゲート一門操作不能時の洪水調節への影響把握と、それに伴う下流への放流量増に関する検討を行う。

Step3 リスク評価：対策またはリスク受容の意思決定

Step1～3 の結果を踏まえ、堆砂高とゲート敷高のクリアランス、沈木の位置・大きさ、対象ゲートの幅・高さ・構造的脆弱性・機能冗長性、下流影響を総合的に評価し、リスク対策の実施あるいはリスク受容の意思決定を行う。

Step4 リスク対策：沈木接近の防除、定期的または緊急的な堆砂・沈木の浚渫除去、ゲート構造の改良・代替性確保

具体的な対策案としては、以下が挙げられる。

- ① 主な外力要因である堆砂・沈木について、定期的または緊急的な浚渫除去が挙げられる。ゲート操作時に土砂・沈木の引き込み範囲となるゲート周辺を対象に実施する。特に、堆砂形状が安息角より大きく、ゲート周辺で切り立った形状となっている場合等、次のゲート操作時に崩落等懸念がある場合や、顕著な大きさの沈木がある場合も緊急的な浚渫等により除去すべきである。なお、ゲート周辺のみに限った浚渫による対策方法は、浚渫後の出水規模によってはすぐに埋め戻されることが考えられるが、一時的な対策としては有効と考えられる。
- ② 沈木については、ゲート周辺に接近させないことが肝要である。本論文では、

沈木の発生過程として、洪水時に捕捉した流木の網場からの沈降とその後の湖底の再移動、洪水時の湖底への直接運搬を想定したが、後者については十分な調査ができていない。一方で、前者の網場からの沈降に関しては、3章で示したとおり、樹種に応じて沈降期間が異なること、生木かつ特に広葉樹系は沈降までの時間が非常に短いことから、基本的な対策として、流入流木の網場捕捉後の早期回収が挙げられる。また、ダム湖底における沈木発生位置をゲートから遠ざけるという観点では、網場をより上流側へ設置することも対策として有効と考えられる。

- ③ 最後に、ゲート構造における対策については、Step3-1におけるFT分析結果を踏まえ、土砂・沈木に対する構造的な弱部を保護・強化するような部分改良または、ゲート形式の変更や開閉荷重を増強するような抜本的なゲート改造が挙げられる。加えて、土砂吐き機能を持たせた増設放流管を追加し、常用洪水吐きの系として冗長性を増加させるような対応も考えられる。

以上のフローについて、図 6-9 に示す。これらのフローを経て、最終的な低位標高に設けられた常用洪水吐きの管理の在り方として、議論を踏まえる中で筆者が望ましいと考えるのは、常時監視された堆砂・沈木状況下において、土砂・沈木を通過可能なゲートにより、確実な洪水調節を行うとともに、堆砂対策としてのプレッシャーフラッシングを高効率で実施でき、万が一の操作不能時のリスクは事前に把握・評価済みであり、対策としてゲート増設等による機能冗長性を持つ、構造・運用・管理である。

Step1 スクリーニング

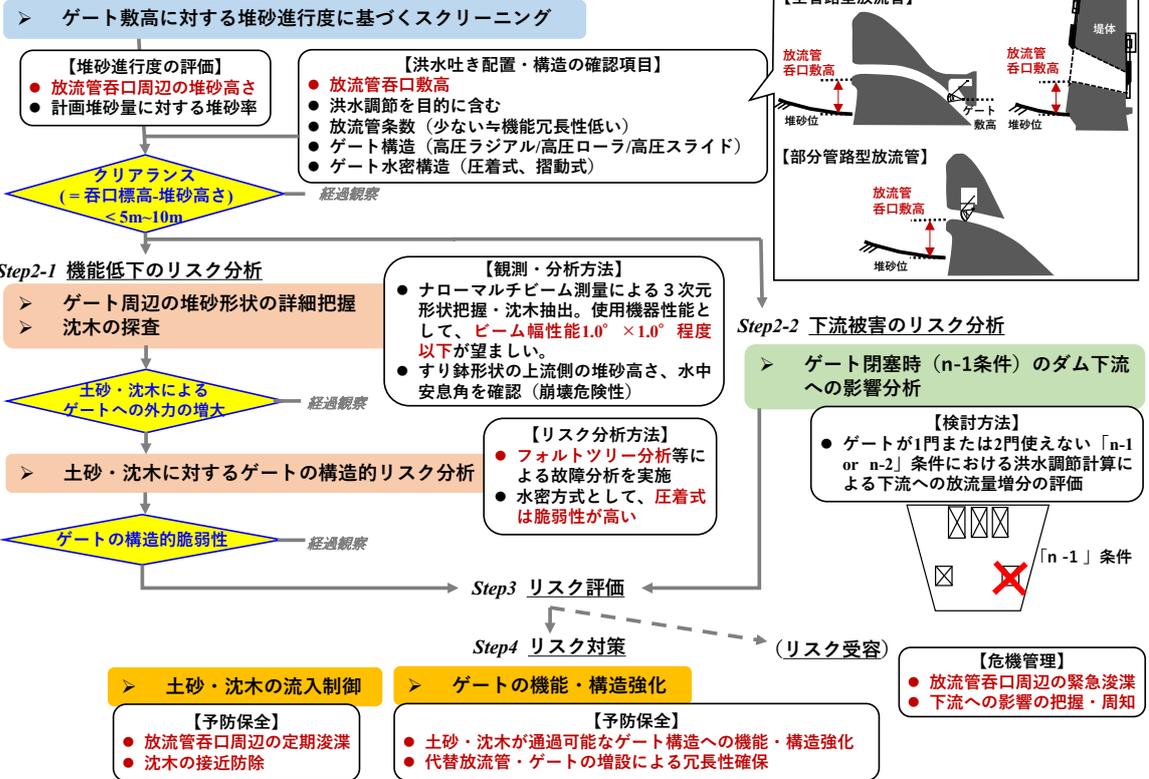


図 6-9 土砂・沈木による常用洪水吐きの機能低下に対するリスク管理手法の提案

6.5 結語

本章では、3章から5章および6.2節、6.3節の研究成果を踏まえ、6.4節において、堆砂進行下における常用洪水吐きの機能低下を対象としたリスク管理手法として、スクリーニングおよびリスクの特定・把握、リスク分析、リスク算定、さらに、そのリスク評価を受けたリスク対策について検討フローとともに示した。

6.2節では、ダム堆砂率とゲートの設計水深から要詳細検討ダムを抽出するためのスクリーニング手法を示した。また、6.4節では、スイスの「n-1 rule」を参考にして、常用洪水吐きゲートが操作不能となった際のn-1およびn-2条件について、裾花ダムを対象とした洪水調節計算によりその影響を検討し、いずれも過剰貯留による水位上昇により、下流への放流量増を引き起こすことを示した。

6.4節では、常用洪水吐きの機能低下シナリオについて、本研究内で検討し、解明された事項と今後の検討事項を整理するとともに、現時点で得られた知見を踏まえたリスク管理フローを示した。今後、堆砂が進む全国のダムへ適用し、まずは同リスクシナリオに対するスクリーニングを踏まえたモニタリングから始めていくべきと考えている。しかし、いまだ裾花ダムの一事例をもとに作成した段階であり、今後堆砂進行が進むダムのリスク管理の中でその適用を図り、持続的な常用洪水吐きの機能発揮につなげていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 社団法人ダム・堰施設技術協会：ゲート総覧 I-V，1987-2006.
- 2) 中村興一，藤間聡：2003年台風10号洪水時での二風谷ダム効果の検証，水文・水資源学会誌，第18巻，1号，2005.

7章 結論

7.1 各章の研究成果

本研究では、裾花ダムのゲート操作不能事例を参考に、他ダムも含めた同事象の再発防止に向けて、ゲート敷高への堆砂進行に伴う土砂および沈木による洪水吐きの機能低下というリスクシナリオについて、諸現象のメカニズム解明に基づいたダム貯水池堆砂・流木・沈木管理手法を提案することを目的として研究を実施した。以下に得られた成果を示す。

第1章では、本研究の背景および目的、構成を示した。

第2章では、裾花ダムゲート操作不能事例の詳細を述べた。また、ダム貯水池堆砂および流木に関する既往研究と管理の現状について整理するとともに、裾花ダムにおいて生じたゲート操作不能発生時の水理的条件について、他の堆砂問題・対策との対比から課題の位置づけを明らかにした。

第3章では、ゲート操作不能事例の外力側条件となるダム貯水池における堆砂進行および沈木動態とその探査についての検討結果をまとめた。はじめに、アンケート結果から、沈木にまつわる貯水池管理課題を網羅的に把握・提示した。次に、沈木探査手法としては、通常堆砂測量に用いられる MBES データの詳細分析による方法を提案し、裾花ダムにおける試行探査結果からその有用性を示すとともに、探査上の留意点として機器性能と計測時水理条件を挙げた。また流木および立木を用いた沈降実験により密度変化過程を明らかにし、貯水池の流入流木の沈木発生過程を検討した。特に、樹種および腐朽程度（樹皮の剥がれ等により流木に近い状態または生木に近い状態か）により、沈木化までの日数に影響することを明らかにした。さらに、上記検討を踏まえ、貯水池流木および沈木管理に関して、そのモニタリング、回収方法等について提案を行った。

第4章では、常用洪水吐き近傍のより局所的な領域を対象として、裾花ダムにおける現地観測データから、堆砂動態の分析を行った。国内でほとんど把握されていない常用洪水吐きからの放流に伴い形成されるすり鉢状の堆砂形状（FC）の規模（体積、長さ）について、実態把握を行うとともに、運用実績と経年の形状変化を分析し、ゲートの最大放流量の増加に伴い FC 規模が増大すること等が明らかとなった。さらに、沈木の駆動力となる FC 周辺の流況を把握するため鉛直二次元の水理模型実験により、堆砂が接近した条件下における洪水吐き近傍の流速分布を把握するとともに、浚渫による沈木対策効果を評価した。

第5章は、土砂および沈木に対するゲートの構造的リスクの分析結果を示した。特に裾花ダムのゲート形式である高圧ローラゲートに対し、土砂および沈木という外力が作用した場合の操作不能に至る要因分析を行うとともに、同分析に基づいたゲート操作支障メカニズムを推定した。本検討を通じて、当初設計では考慮されていなかった土砂および沈木による外力増分を捉えることができ、具体的なゲート改良、堆砂および沈木管理への重要

な示唆を与える知見が得られた。

第6章では、ゲート操作不能事例を受けて、他ダムを含めた高リスクダムの抽出方法と、ゲート操作不能時の洪水調節および下流への影響評価について検討した結果を示した。また、常用洪水吐きの機能低下に関するリスクシナリオについて、前章までの一連のリスク分析の結果を整理するとともに、今後の課題を示した。さらに、堆砂進行下における常用洪水吐きの機能低下を対象としたリスク管理手法として、スクリーニングおよびリスクの特定・把握、リスク分析、リスク算定、さらに、そのリスク評価を受けたリスク対策について検討フローとともに示した。加えて、今後の堆砂進行下における常用洪水吐きの管理の在り方について、常時監視された堆砂・沈木状況下において、土砂・沈木を通過可能なゲートにより、確実な洪水調節を行うとともに、堆砂対策としてのプレッシャーフラッシングを高効率で実施でき、万が一の操作不能時には代替ゲートによる機能冗長性を持つ、構造・運用・管理を実施していくことを提案した。

7.2 今後の展望

以上の研究を踏まえた今後の展望・取り組むべき課題としては、以下が挙げられる。

(1) 貯水池内沈木動態について

貯水池内の沈木動態は現象論として未検討事項が多い。6.4.1に示したとおり、貯水池内の沈木発生過程としては、網場からの沈降過程について検討を行ったが、一方で、直接湖底へと到達する沈木の動態や、貯砂ダム等構造物周辺の沈木化への影響については不明点が多い。さらに、沈木化後、貯水池内の流れおよび堆砂流動とともに、沈木の移動・停止・再移動のメカニズムについても、沈木の形状特性等を踏まえた検討が必要と考えられる。

また、湖底における沈木動態の情報は本研究で沈木探査を行い、少しずつ判明してきたところであり、追加の現地調査が求められる。その際には、リアルタイムの観測は難しいと考えられるが、出水毎のMBES等のデータや、沈木に埋め込んだICタグ等から、移動量や発生量を把握できると考えられる。一方で、その移動過程にあっては、堆砂流動との関係で埋没等も考えられるため、本研究のMBESでは探査不可能な埋没沈木への検知技術も求められる。なお、埋没沈木については、次の出水で再度堆砂表面上に出現するか、等もダム水理構造物リスク管理の点では重要である。

(2) ゲート周辺の堆砂管理について

今後10年、20年と経過していく中で、貯水池は計画堆砂量を超過し、流入土砂粒径比率にもよるものの、堤体直上流の密度流堆積層における堆砂高さが洪水調節用放流管呑口の敷高に達するダムは増加する。また、水位低下による掘削等比較的安価で対策が可能な前部及び頂部堆積層に比べ、密度流堆積層における堆砂対策費は浚渫となりコストは高くなり、上昇傾向は続くものと考えられる。

このような状況に対し、はじめに堆砂の上昇を把握するためのモニタリング技術が求められる。現状、MBES等により、密度流堆積層における堆砂状況は把握されているが、放流管呑口近傍に近くなる場合には、土砂および沈木の流入リスクを把握する必要性から、その頻度を年に一度から、二度、または出水毎、さらにリアルタイムで、と増やすことを検討する必要がある。これは、放流管呑口直上流の粘土シルト分で構成される堆砂が、ゲート放流（Pressure flushing）時に示す挙動を十分に把握できていないことから、リアルタイム観測を行い、ゲート操作一挙動形状変化の関係を把握していく必要がある。しかしながら、大水深下の地形を詳細に常時観測するシステムが現状筆者の知る限りなく、今後開発が求められる。

次に、堆砂対策としては、浚渫、HSRS(吸引排砂工法)、水位低下によるフラッシング、スルーシング、水位低下を伴わない Pressure flushing 等が挙げられる。浚渫については、確実に実施は可能であるものの、経済性の課題が残る。HSRS については、沈木等存在が見込まれるため、吸引部における対策が求められるとともに、浚渫と同様に排出土砂の処理問題が生じる。また、フラッシングやスルーシングは、水位低下時には沈木が大量に放流管へ集中するものと考えられ、ゲート側の対策が求められる。最後に、Pressure Flushing については、裾花ダムのように堆砂が放流管呑口敷高に達し始めたダムにおいては堆砂対策における一手法となり、また放流管埋没を防ぐための重要なフラッシュ操作の一面を持つ。しかし、その効果については依然知見が少なく、現地観測データまたは水理模型実験、数値計算等をもとに、ゲートの運用改善による効率的な土砂排出方策を検討する必要がある。また、いずれの手法においても、放流管近傍の堆砂対策のみではなく、貯水池全体の堆砂への対策効果と影響を考慮する必要がある。

(3) ゲートの土砂・沈木対策について

2章で示したとおり、洪水調節用に設けられた放流管およびゲートでは、土砂・沈木の流入・通過を想定外力に見込まずに設計が行われている。今後想定される通過土砂は、主に浮遊砂・ウォッシュロード成分であるものの、加えて沈木・塵芥等の流入の増加も見込まれる。本来は、貯水池内の堆砂・沈木除去により、このような状況は回避すべきことと考えられるが、経済性等の理由から、ゲートを通させる対策を選定する際には、ゲートは設計外力の変化に対応する必要がある。その際、設計外力の算定方法の考え方等においては、想定されるゲート近傍の水理現象について、ダム水理関連の技術者とゲートメーカーの相互理解が重要と考えられる。加えて、既存のゲート構造に対する具体的な対応策の経済性、施工性を含めた検討が求められる。

(4) 計画堆砂量を超過する貯水池の堆砂管理について

堆砂進行が著しいダムでは、洪水調節容量内の堆砂掘削や、土砂バイパストンネルの設置等、各種対策が図られている。しかしながら、流入土砂量の全量をすべて除去すること

はかなわず、残りは貯水池内に堆砂している。今後、計画堆砂量を超過するダムが増加していく中では、そのようなダムにおける堆砂管理の在り方の研究が必要と考えられる。例えば、築後年数が長く堤高の低い電力ダムにおいては、満砂状態となり、クレストからも土砂が流下するような、ある種の動的平衡の堆砂状態となっていると考えられる。これが持続可能な形か現状把握できていないものの、洪水調節用のダムにおいても、洪水調節容量を確保し、かつ持続可能となる動的平衡な堆砂管理方法を探る必要がある。それは、容量配分の見直しや、堆砂対策のための長期間の水位低下を代替させる管理、等のソフト面の対策や、土砂バイパスとスルーシングや Pressure flushing のようなハード対策の組み合わせから検討が必要と考えられる。さらに、ダム貯水池としては堆砂問題は大きな課題であるが、その土砂が流域全体としては、貯砂機能としての一面もあるのではと考えられ、その効果を評価し、必要な堆砂対策費の位置づけ見直し等も考えられる。

謝辞

本論文は、京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻修士課程の2年間および国立研究開発法人土木研究所への就職後の同博士後期課程の3年間の研究成果をまとめたものです。その間、ダム技術の基礎から本研究内容まで終始懇切丁寧な御指導を賜るとともに、博士課程進学へのきっかけをいただきました京都大学防災研究所教授角哲也先生に深く感謝の意を表します。ご指導を通じて、大変面白く、刺激的な議論に触れさせていただくとともに、研究構成の組み立て方や、研究活動から実問題解決までへの考え方など、今後の研究活動に大変参考となる知見をご教授いただきました。また修士課程在籍時より副指導教員である同研究室准教授竹門康弘先生には、研究をより深く洞察する姿勢を学ばせていただきました。当方の執筆が遅れたため、最後まで御指導いただくことは叶いませんでしたが、本研究構成を考えるにあたり重要なご意見を賜りました。同じく副指導教員である同研究室准教授 Sameh Kantoush 先生には、いつも励ましのお言葉をいただくとともに数値シミュレーション手法に関してご指導賜りました。また、副指導教員である京都大学工学研究科准教授 山上路生 先生には、共同研究時より研究経過報告のたびに励ましの言葉をいただき、論文とりまとめにあたり貴重なご意見を賜りました。心より御礼申し上げます。

また、修士課程在籍時より研究室の先輩であった（現京都大学防災研究所助教）小柴孝太先生には本研究の軸となったデータ分析方法から論文執筆のいろはまで御指導いただきました。小柴先生と角研究室の皆様とは、入学当初よりコロナ禍であったため対面による交流は限られたものの、研究室へ行った際には温かく迎えていただき、研究手法等について情報交換をさせていただきました。また、皆様の研究活動への熱意にも大変刺激され、本研究を進めることができました。この場を借りまして感謝申し上げます。

博士後期課程は、国立研究開発法人土木研究所河道保全研究グループ水工チームに勤務し、社会人ドクターとして在学いたしました。その間当時、水工チームの石神孝之上席研究員、宮川仁主任研究員には、本研究の遂行に関して、貴重なご助言、サポートをいただきました。また、田中千喬元交流研究員にはゲート技術について多くのご助言・ご支援を賜りました。河道保全研究グループの皆様には、研究進捗に関してご心配をいただき、研究へのご助言や叱咤・激励の言葉をいただきました。ここに記して感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、長野県裾花ダム管理事務所様におきましては、ダムの管理状況について資料をご提供いただきました。深く感謝申し上げます。

最後に、学生時代より長年研究活動を応援し、博士後期課程への進学を遠方より支えてくれた両親に、心より感謝いたします。