

総説

ダム洪水吐きの持続的機能発揮に向けた 貯水池堆砂・流木・沈木管理

高田翔也¹・角哲也²・木村一郎³・山上路生²・小柴孝太⁴

¹土木研究所 河道保全研究グループ水工チーム 研究員

²京都大学防災研究所 教授

³富山大学 都市デザイン学部 教授

⁴京都大学防災研究所 助教

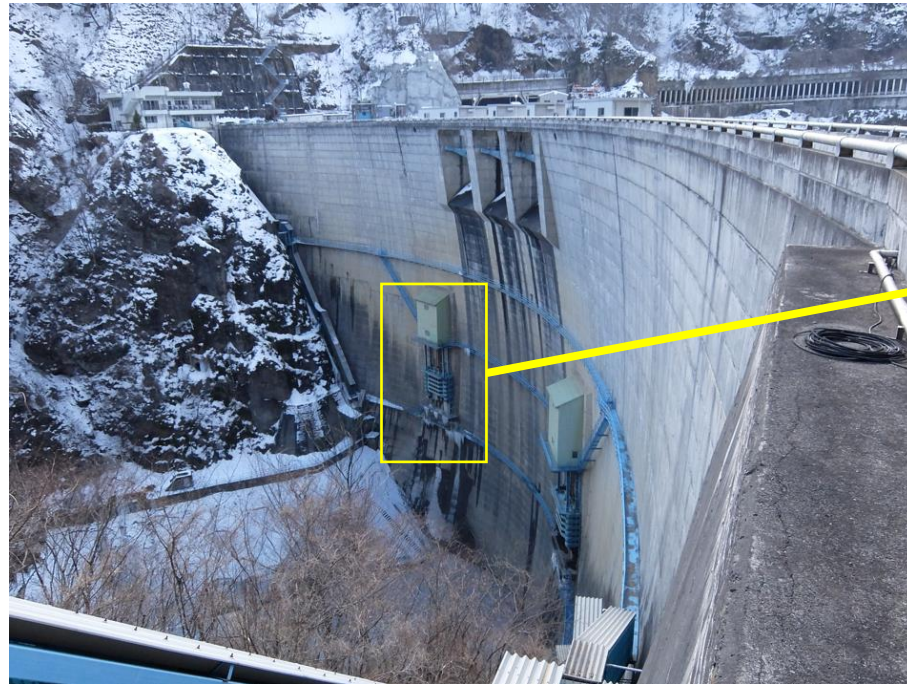
1. はじめに

研究背景

- ✓ 2017年長野県裾花ダムの常用洪水吐きゲートが、土砂と沈木により操作不能となった
- ✓ 原因としては、①呑口敷高まで到達した堆砂と沈木がゲート開口部へ引き込まれ、
②ゲートは土砂・沈木の流入を設計上見込んでおらず、外力増に対応できなかったこと
- ✓ ゲートの機能低下は洪水調節機能の低下に直結し、下流影響も懸念される

低位標高の常用洪水吐きからの土砂排出は、堆砂低減の観点では望ましく、ゲートの機能確保の観点ではリスク管理が必要

現象把握とリスク評価に基づくゲート周辺堆砂・沈木の管理手法を構築していく必要性



裾花ダム全景



閉塞した裾花ダムの常用洪水吐きゲート (MLIT, 2018)

目的

- ✓ 裾花ダムの事例におけるリスクシナリオを示した上で、各進展事象の課題解決に関する既往の検討状況を整理し、今後研究または技術開発すべき課題を提示する
- ✓ 現時点で得られた知見をもとに同リスクシナリオに対する対策案およびリスク管理フロー案を示す

2. 洪水吐き機能低下のリスクシナリオおよび各進展事象の検討状況および今後の課題

1. 流木から沈木に代わる過程の解明 (3W1H)

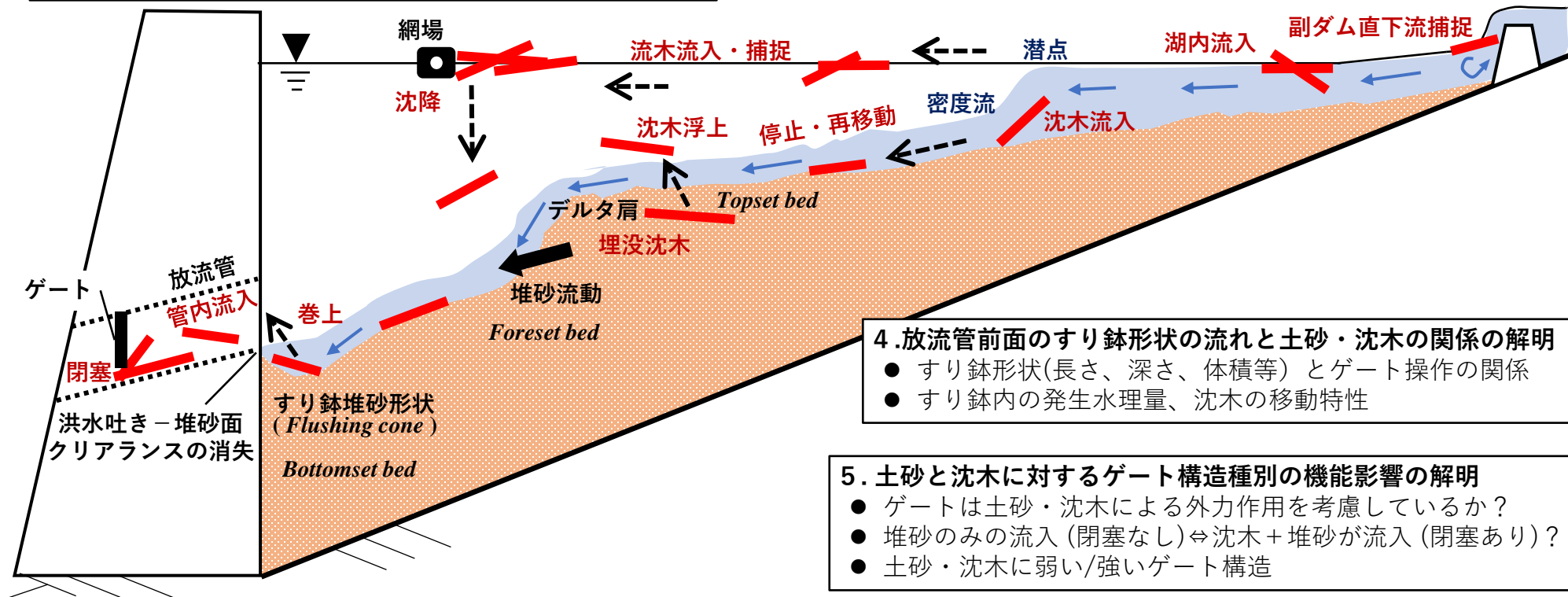
- いつ (密度 > 1 になるタイミング)、洪水時 / 浮遊後
- だれが (樹種、幹径)
- どこで / どのように (貯水池流下中、網場捕捉後)

2. 堆砂と沈木の関係の解明

- 堆砂に着床した沈木は再移動するか?
- 堆砂の中に沈木は埋まっているか?
- 堆砂の中に埋まった沈木が再浮上することはあるか?

3. 堆砂進行 / 堆砂移動と沈木の放流管前面への移動の関係の解明

- 堆砂が再移動する条件は?
(デルタの前進、Foreset bedの水中地すべり(水中安息角の再構成))
- 堆砂が放流管まで進行しているダムは?
(Bottomset bedが放流管呑口標高へ接近)



4. 放流管前面のすり鉢形状の流れと土砂・沈木の関係の解明

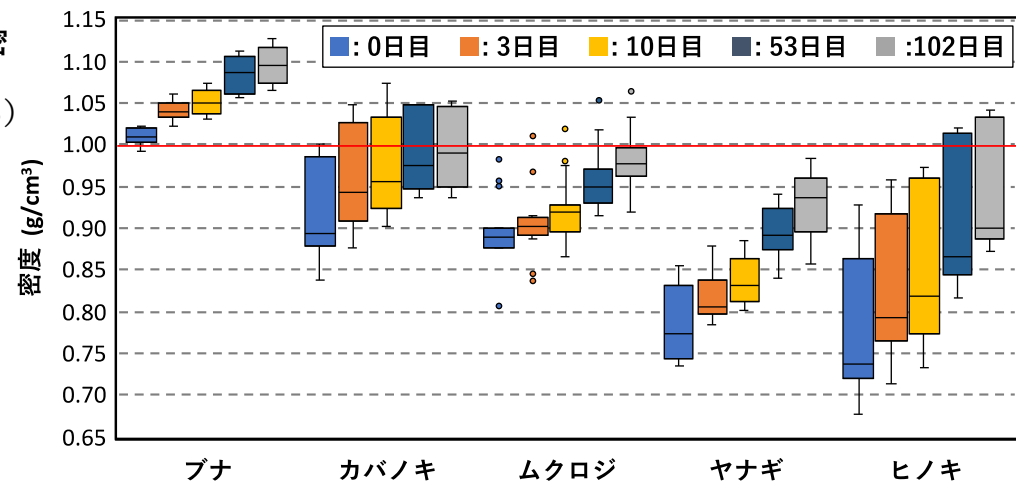
- すり鉢形状(長さ、深さ、体積等)とゲート操作の関係
- すり鉢内の発生水理量、沈木の移動特性

5. 土砂と沈木に対するゲート構造種別の機能影響の解明

- ゲートは土砂・沈木による外力作用を考慮しているか?
- 堆砂のみの流入(閉塞なし) ⇔ 沈木 + 堆砂が流入(閉塞あり)?
- 土砂・沈木に弱い/強いゲート構造

(1) ダム貯水池における沈木の発生過程

立木の樹種別密度変化過程
(2021, 高田ら)



ダム貯水池における沈木の成因

一般事項

- ✓ 流木密度 > 貯留水密度のとき、沈木となる
- ✓ 密度の変動要因：樹種や水分量、木材構造（辺材・心材、樹齢他）、樹皮の剥がれ、腐朽の程度等

a) 貯水池で捕捉した浮遊流木の沈降

- ✓ 網場や湖岸などで捕捉された場合、時間経過とともに密度が大きくなり沈降する
- ✓ 室内実験より、流木は3か月、立木は1か月で25%程度が沈降すること、樹種ごとに沈降割合が異なることを確認
- ✓ アンケート調査の結果、大規模な流木流入時には、回収に1～6カ月を要する
- ✓ 管理者間隔として、1～3割程度沈降しているとの回答もあり

⇒回収期間をなるべく早めることが望ましい。沈木発生が望ましくない場所に対して、流木の早期回収または移動、十分な離隔を取った網場の配置等が必要

b) 洪水時の直接運搬による沈木化

- ✓ 貯水池内の流れと密度が高い流木の動態を把握する必要がある

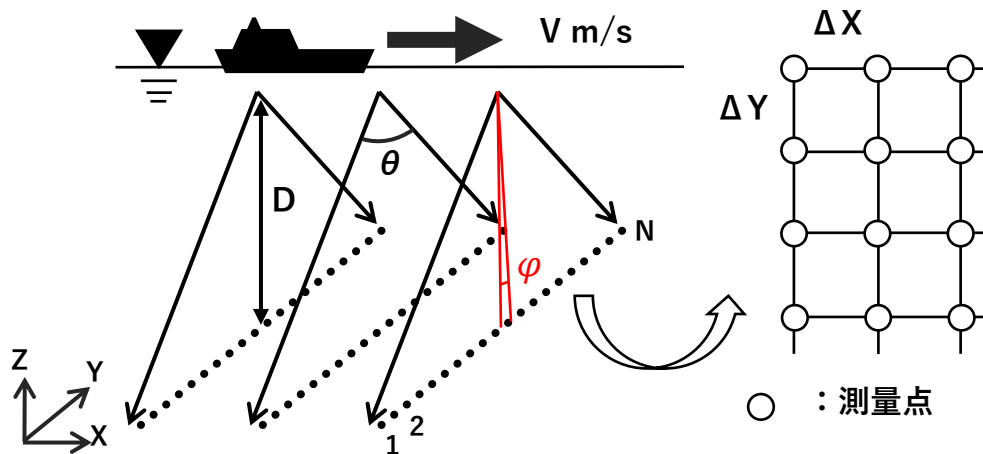
⇒密度が1より大きい流木対策としては、貯水池末端への流木止め施設の設置等が考えられる

(2) 堆砂面上および堆砂面下の沈木移動動態

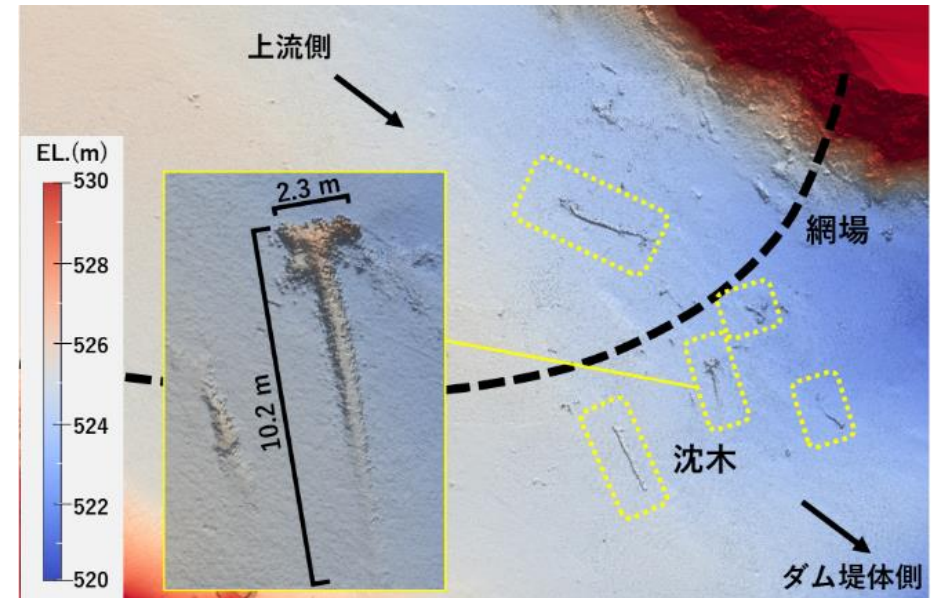
a) 沈木の探査

- 沈木の検出には、測深器の性能としてビーム幅が重要
(水深30mの場合、ビーム幅 $1^\circ \times 1^\circ$ 以下程度で最小測点間隔約5cm)
- 裾花ダムの測量事例では、沈木の長さ・幅に加え、根・幹形状の詳細や、堆砂面下への一部埋没状況を把握できた

一方で、埋没した沈木の探査は不可能な点等は今後の課題であり、埋没沈木の動態およびゲート閉塞への影響把握のためにも今後の技術開発が求められる。



NMB測量による測量点取得イメージ



網場周辺における沈木の探査結果 (2021, 高田ら)

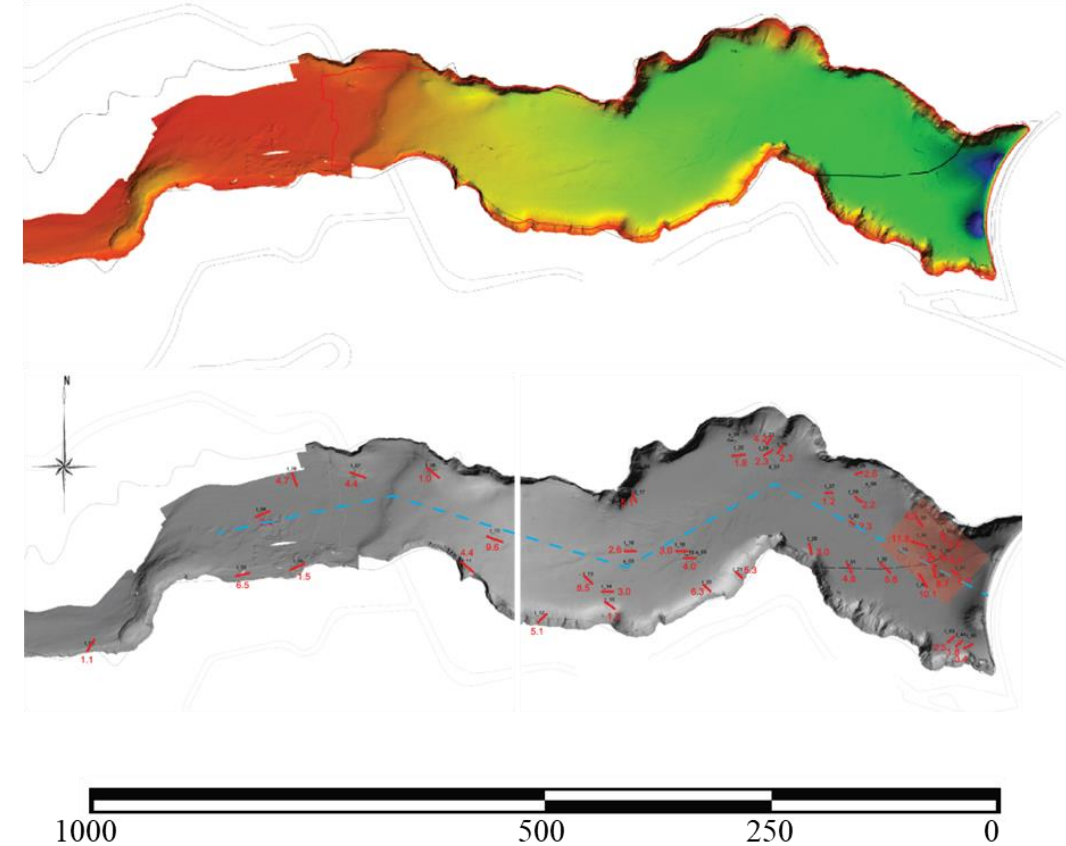
(2) 堆砂面上および堆砂面下の沈木移動動態

b) 沈木の移動・停止・再移動

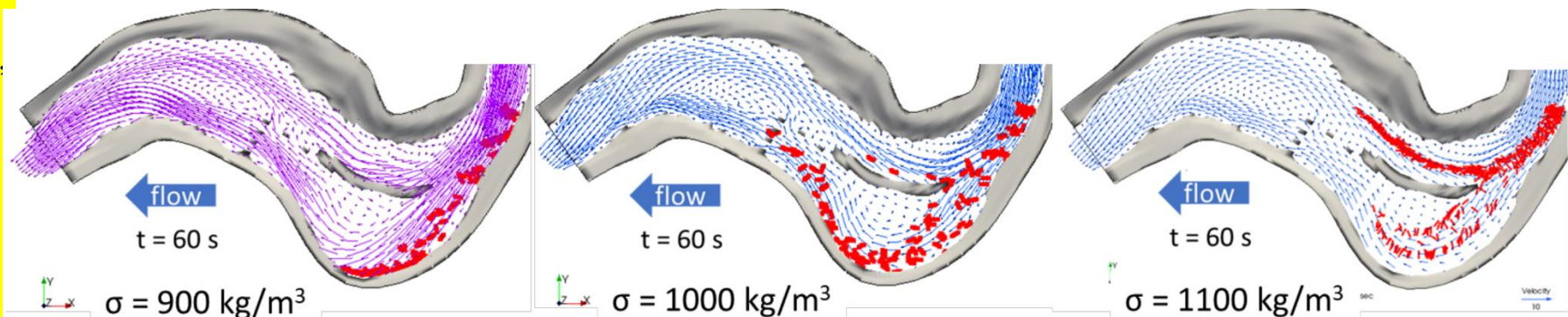
- 裾花ダム貯水池における沈木探査により、貯水池内の沈木は貯水池の流心軸に対し平行に近い角度で停止している
- 水路実験により密度の異なる沈木模型の移動、停止条件等を調査し、特に姿勢（流向に対する水平角度、俯角迎角等）により移動限界条件が異なること、流向に対し平行条件で最も移動しにくい（≒停止する）を提示（2021, 山上ら）
- 河道湾曲部における密度を0.9, 1.0, 1.1kg/m³と変化させた流木動態シミュレーションにより、水路曲がり部では第一種二次流が流木移流に関与。沈降した流木の移動は、河床と沈木の摩擦係数の評価が重要であることを指摘

貯水池内の堆砂面上および下の沈木動態は未解明な点が多い。今後現地の沈木移動履歴の把握手法や土砂性状毎の沈木との摩擦係数の評価方法、密度流やゲート放流の影響等も含めた3次元的な沈木への流れの作用の把握手法等の研究開発が望まれる。

EL.m
545
540
535
530
525
520
515



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)
(2022, 小柴らの図を一部改変)



比重の異なる流木分布の計算結果（比重0.9は表面流速，比重1.0と1.1は底面流速ベクトルを併記）（2021, 木村ら）

(3) 放流管前面への堆砂および沈木移動

a) 堤体近傍における堆砂移動特性

- ✓ 斜め堆砂（形状は、流入土砂の粒度構成や洪水時のダムの迎洪水位による）
- ✓ 予備放流や事前放流により迎洪水位が低下し、洪水時の堆砂がより貯水池内部へ引き込まれることが指摘（2021, 小島ら）
- ✓ 鶴田ダムでは再開発後(H30)の予備放流水位の低下に伴い、デルタ肩が約1km下流へ移動した事例（2021, 国交省）

b) 常用洪水吐きの設置標高の配置設計

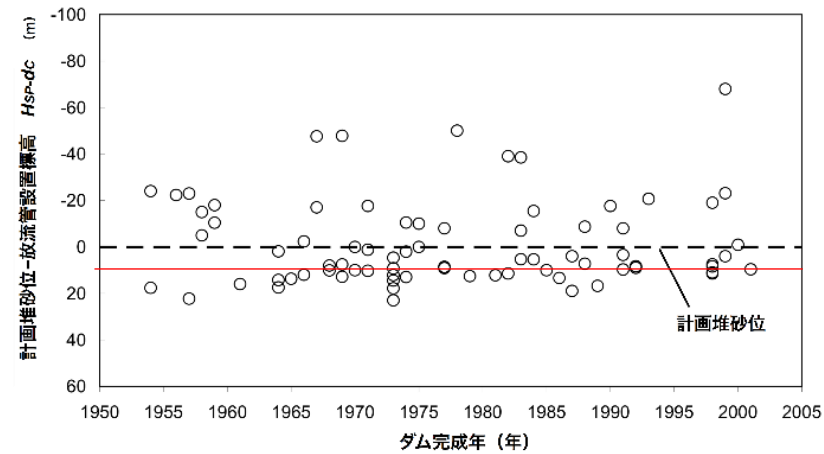
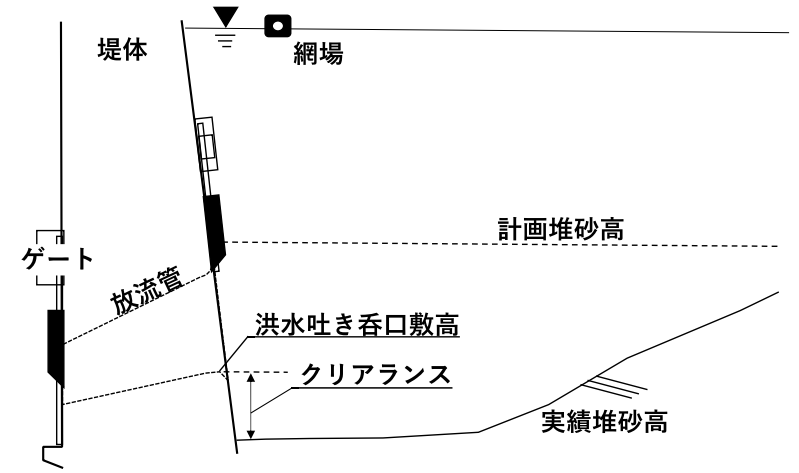
- ✓ 計画堆砂位から-10m程度の深さへの配置が平均的
- ✓ 斜め堆砂を前提として、計画堆砂位は常用洪水吐きの配置設計の制約にならず、かつ長期供用後も堆砂が達しない程度を想定し、設置標高を定めていたと推察

c) 国内ダムの常用洪水吐きに対する堆砂進行状況

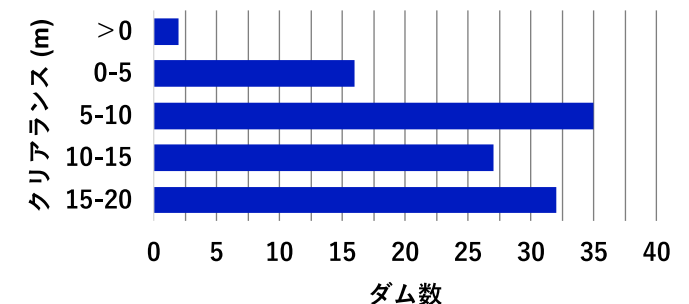
- ✓ クリアランスが5m以下のダムも約15基程度ある
- ✓ 下久保ダムでは、低位の利水放流設備まで約4mのクリアランスとなっており（R1年度時点）、バルブ機能障害や高濁度放流が懸念

洪水調節に用いるダムの常用洪水吐きでは、確実な機能発揮のため、土砂通過を目的として併用せず、機能分離を前提として設計されるため、原則常用洪水吐きには堆砂や沈木が達しないよう堆砂面管理を行う必要がある。

一方で、計画を超過する堆砂進行により前提条件が異なってきており、洪水吐きの機能維持に向けて、ゲート近傍の堆砂形状変化の把握・予測が重要



計画堆砂位から放流管設置標高までの高さ（2006, 高田ら）

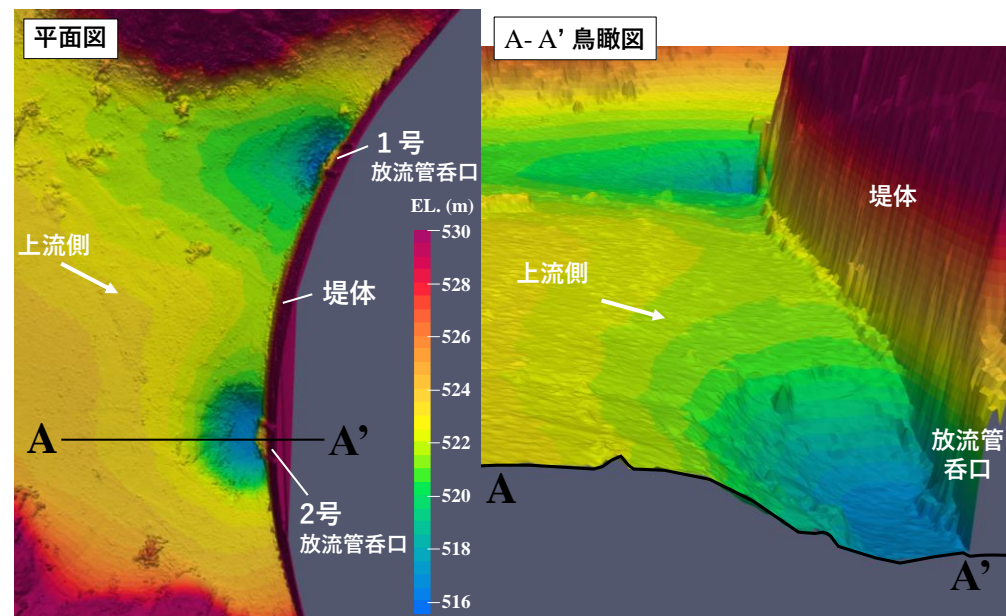


堆砂位に対する呑口敷高のクリアランス（2021, 高田ら）

(4) 放流管呑口近傍の流れ場とすり鉢堆砂形状の形成

a) 高圧下の排砂に関する既往検討

- ✓ ゲート周辺は非常に細かい粒径である粘土・シルトが堆積しており、ゲート操作の度にそれらが排出され、すり鉢形状が形成されている
- ✓ 水位低下を伴わず微細粒土砂が排出される状況は、海外事例に倣うと、Pressure Flushingと呼ばれ、排砂効率は水位低下を伴うフラッシング等の堆砂対策と比べ低いものの、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
- ✓ 形成される半円状の洗掘形状はFlushing Coneと呼ばれており、放流時の水理量・堆積土砂性状とFlushing Coneの規模（長さ・高さ・体積等）の関係性に関する研究がこれまで実施



裾花ダムゲート近傍のH30測量結果

放流管前面に形成されるすり鉢状の堆砂形状について、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リスク管理上重要
国内では裾花ダムで一部観測・分析事例があるのみで、今後現地観測等も含めたさらなる現象把握を行い、運用と堆砂形状変化の関係把握、安定し崩落しない堆砂形状維持等の検討を進める必要がある。

b) Pressure Flushingの活用方向性

- ✓ 米国やイランなどで実現場における検討事例がある
- ✓ 国内でも小渋ダムでは、常用洪水吐きから年間(R3)約26.3万m³の土砂通過を推定
- ✓ 発電ダムにおける排砂管の埋没懸念と対策としての定期放流の必要性（2019，後藤）

今後、国内の洪水調節を目的とするダムでは、堆砂による埋没リスクや次節で示すゲートの課題をクリアしたうえで、排砂効果の最大化に向けた検討や、堆砂管理全体における位置づけ・評価等を進める必要がある。

(5) 土砂および沈木によるゲート構造への影響

a) 洪水調節用ゲートの概要

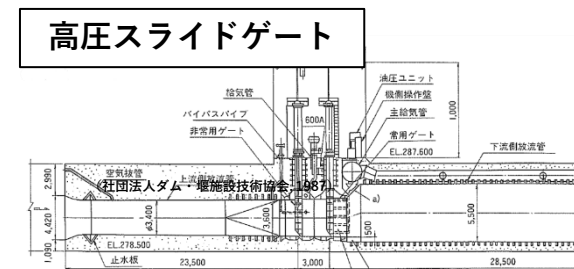
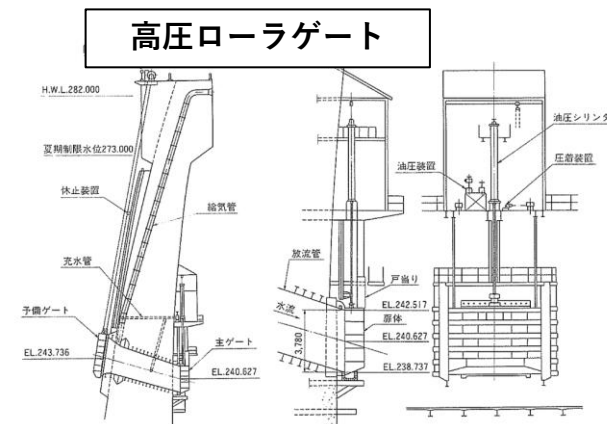
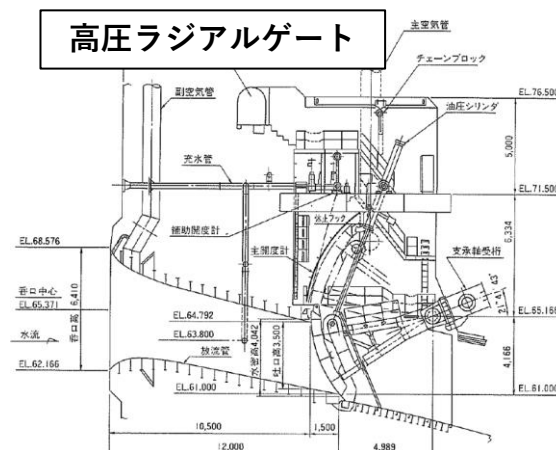
- ✓ 高圧とは25m以上の設計水深を指す
- ✓ 高圧ローラ、ラジアル、スライドゲートの採用事例が多い
- ✓ 全管路型か部分管路型
- ✓ 水密方式として、

圧着式 : ゲート停止位置で扉体側または戸当り側から圧着操作

- 開閉荷重が小さくできる、水密ゴムの摩耗がない、等
- × 四方から噴流が生じる、ゲート操作に時間がかかる、等

摺動式 : 水密ゴムを摺動しながら、ゲートを操作

- スムーズな操作が可能、構造が簡単で保守点検が容易、等
- × 水密ゴムの摩擦で開閉荷重が大きくなる、等



(1987, 社団法人ダム・堰施設技術協会, より引用)

b) 土砂および沈木の通過に対するゲートの課題

- ✓ 基本的に堆砂荷重（沈木含む）は設計上考慮されていない
- ✓ 考慮する場合は、大きな外力要素となり、宇奈月ダムの排砂ゲートの事例では、ゲート3門、摩耗対策、戸溝のフラッシュ操作など対策多数
- ✓ 設計上対象とする通過土砂（量と質）および沈木の外力評価が重要

- 現状のゲート設備に対し、土砂・沈木が通過した場合の設計外力の変化、機能確保の評価の検討等が必要
- 対策検討にあたり、構造的弱部（圧着式の水密部等）の抽出を行う必要⇒ゲート等機械分野の故障分析として用いられるフォルトツリー分析等が有効と考えられる
- 運用中の既設ゲート改造の施工技術等に関する技術開発

2. 洪水吐き機能低下のリスクシナリオおよび各進展事象の検討状況および今後の課題

1. 流木から沈木に代わる過程の解明 (3W1H)

- いつ (密度 > 1 になるタイミング)、洪水時 / 浮遊後
- だれが (樹種、幹径)
- どこで / どのように (貯水池流下中、網場捕捉後)

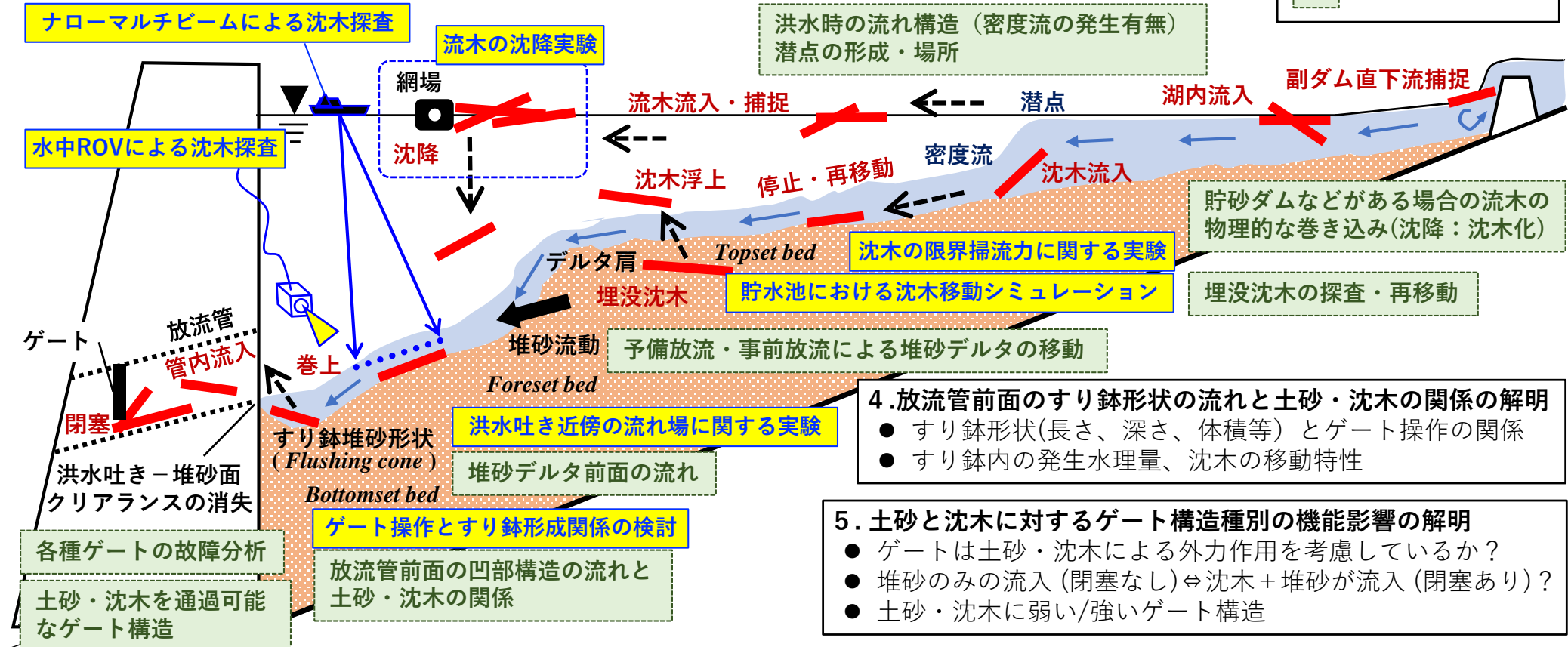
2. 堆砂と沈木の関係の解明

- 堆砂に着床した沈木は再移動するか?
- 堆砂の中に沈木は埋まっているか?
- 堆砂の中に埋まった沈木が再浮上することはあるか?

3. 堆砂進行 / 堆砂移動と沈木の放流管前面への移動の関係の解明

- 堆砂が再移動する条件は?
(デルタの前進、Foreset bedの水中地すべり(水中安息角の再構成))
- 堆砂が放流管まで進行しているダムは?
(Bottomset bedが放流管呑口標高へ接近)

- : 過年度検討事項
- : 今後の検討事項



堆砂および沈木によりゲート操作不能となるリスクシナリオに係る技術的課題と今後の検討事項

3. 結論および堆砂進行下における常用洪水吐きのリスク管理フロー案

✓ 現時点で得られた知見を踏まえ、堆砂進行下における常用洪水吐きの機能確保に向けたリスク管理フロー案を作成

✓ Step2-2ではゲート操作不能時の下流影響の評価を含めている。特に、常用洪水吐きの数が少ないダムでは、ゲート1条がダウンする影響は大きくなると考えられ、リスクに対する各ダムの放流設備配置固有のリダンダンシーの事前確認はダムの安全管理上留意すべき点となる

✓ ダムは現場条件および設備構成が多種多様であるため、堆砂進行に対する各ダム放流設備特有のリスク要因を把握し、対策を検討していく必要がある

Step1 スクリーニング

➤ ゲート敷高に対する堆砂進行度に基づくスクリーニング

【堆砂進行度の評価】

- 放流管呑口周辺の堆砂高さ
- 計画堆砂量に対する堆砂率

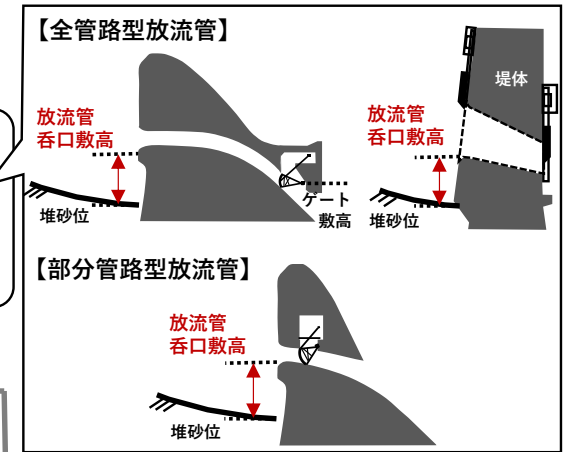
【洪水吐き配置・構造の確認項目】

- 放流管呑口敷高
- 洪水調節を目的に含む
- 放流管条数（少ない＝機能冗長性低い）
- ゲート構造（高圧ラジアル/高圧ローラ/高圧スライド）
- ゲート水密構造（圧着式、摺動式）

クリアランス (= 呑口標高-堆砂高さ)

< 5m-10m程度

経過観察



Step2-1 機能低下のリスク分析

- ゲート周辺の堆砂形状の詳細把握
- 沈木の探査

【観測・分析方法】

- ナローマルチビーム測量の活用
計測水深によるもの、**ビーム幅性能1.0° × 1.0° 程度以下**が望ましい
- 水中ドローンの活用

土砂・沈木による ゲートへの外力の増大

経過観察

- 土砂・沈木に対するゲートの構造的リスク分析

【リスク分析方法】

- 土砂沈木に対する設計条件の確認、構造的弱部（圧着式では隙間が生じる等）の抽出
- フォルトツリー分析等による故障分析の検討

ゲートの構造的脆弱性

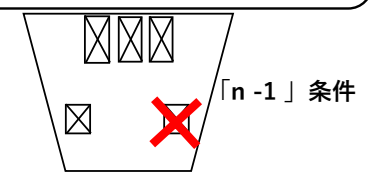
経過観察

Step2-2 下流被害のリスク分析

- ゲート閉塞時（n-1条件）のダム下流への影響分析

【検討方法】

- ゲートが1門または2門使えない「n-1 or n-2」条件における洪水調節計算による下流への放流量増分の評価



Step3 リスク評価

Step4 リスク対策

(リスク受容)

- 土砂・沈木の流入制御

【予防保全】

- 放流管呑口周辺の定期浚渫
- 沈木の接近防除

- ゲートの機能・構造強化

【予防保全】

- 土砂・沈木が通過可能なゲート構造への機能・構造強化
- 代替放流管・ゲートの増設による冗長性確保

【危機管理】

- 放流管呑口周辺の緊急浚渫
- 下流への影響の把握・周知