

# アンサンブル予測を活用した 木津川ダム群の貯水池管理

徳永 倫一<sup>1</sup>・村田 裕<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人水資源機構 木津川ダム総合管理所 管理課（〒518-0413三重県名張市下比奈知2811-2）

<sup>2</sup> 独立行政法人水資源機構 木津川ダム総合管理所 管理課長（〒518-0413三重県名張市下比奈知2811-2）

水資源機構木津川ダム総合管理所では、ECMWF（ヨーロッパ中期予報センター）のアンサンブル降雨予測（全球モデル）をベースに、AIによりダウンスケーリングされた初期値の異なる51本の定量的な降雨予測と予測された降雨予測すべてに対し流出予測を行うシステム（以下、「アンサンブル予測システム」という。）を開発し、2020年7月末からより効率的な貯水池管理を目指して運用を行っている。

本稿は、アンサンブル予測システムの導入契機や貯水位の柔軟な運用（低水管理）、異常洪水時防災操作の可能性の早期把握や河川管理者等への情報提供（高水管理）など、現在の運用状況を報告するものである。

キーワード アンサンブル、事前放流、貯水池管理、高水管理、低水管理

## 1. はじめに

近年、前線や台風による想定を超える降雨が多数発生している。2018年7月には、国土交通省所管558ダムのうち213ダムで洪水調節が実施され、ダム下流河川の水位低減により被害の軽減・防止効果を発揮している。一方で、計画以上の洪水となりダムの洪水調節容量を使い切り、ダムへの流入量と同程度の放流量とする異常洪水時防災操作（以下、「緊急放流」という。）が全国8ダムで実施されている。

これらを受けて、政府は2019年12月に「既存ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針」を策定し、これを基に2020年4月に国土交通省所管ダム等を対象とした「事前放流ガイドライン」が定められた。

こうした状況の中、木津川ダム総合管理所で管理している5ダム（以下、「木津川5ダム」という。）では、事前放流実施要領の策定と運用を行っているが、2020年7月末からは事前放流の高度化（早期判断、放流量の合理的設定等）を目指し、アンサンブル予測システムの試行運用を開始した。

## 2. アンサンブル降雨予測とは

### (1) 従来の降雨予測

従来の1本の降雨数値予報は、時間の経過とともに初期値に含まれる誤差が拡大し、想定した降雨とならない場合がある。想定よりも大きな降雨となれば一段階上の

防災対応が必要となったり、一方で想定よりも小さい降雨のときはダム容量が回復しないなど、予測の不確実性の程度が分からずダム操作の判断に苦慮することがある。

### (2) アンサンブル降雨予測

このような予測の不確実性の程度を把握する手法がアンサンブル（集団）降雨予測である。アンサンブル降雨予測は僅かに異なる初期値を複数用いて多数の予測を行い、平均やばらつきの程度といった統計的な情報を用いて不確実な現象を確率的に予測するものである。また、その予測期間も長時間先まで得ることが可能である（図-1）。

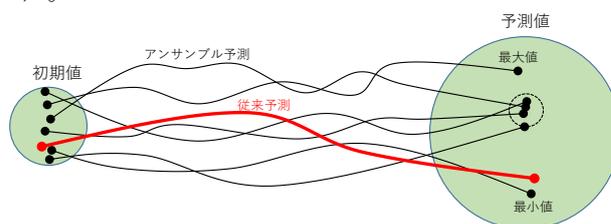


図-1 アンサンブル降雨予測イメージ

## 3. アンサンブル予測システム導入の契機

### (1) 事前放流

事前放流は、治水の計画規模や河川（河道）・ダム等の施設能力を上回る洪水の発生時に、ダム下流河川の沿川における洪水被害の防止・軽減を目的として、ダムの有効貯水容量を洪水調節に最大限活用できるように予め利

水容量を放流することにより、その容量を確保するものである。

## (2) 現在の事前放流の懸念事項と導入契機

現在の事前放流は、事前放流ガイドラインに基づき、気象庁のGSMガイダンスやMSMガイダンスの予測降雨量が基準降雨量を超えるなどの実施基準を満たした場合に実施するものである。

しかし、事前放流の実施判断は3日前から行うことが基本とされており、実施基準に合致すれば短時間のうちに事前放流しなければならない場合がある。その場合、ダム貯留水の安全かつ有効な事前放流が実施できるかが懸念される。

具体的には、事前放流すべき容量が放流時間や放流設備能力等の物理的には放流可能であっても、降雨前の短時間に大量の放流をしなければならない場合は下流河川利用者への影響やゲート等放流による貯留水の無効放流（発電放流設備を通さない）が懸念される。

以上より、アンサンブル予測システムの試行導入は、事前放流における懸念事項の解消と高度化（早期判断、放流量の合理的設定等）を目指すためであり、そのために高度で長期的な降雨予測が求められることがその契機となっている。

## 4. 木津川5ダムのアンサンブル予測システム

木津川5ダムのアンサンブル予測システムは、ECMWF（ヨーロッパ中期予報センター）の降雨予測データを基に、ダム運用予測に適した高解像度降雨予測の

生成やバイアス補正、ダウンスケーリングといった一連の計算を行い、51本（メンバー）のアンサンブル降雨予測情報を得ている。また、予測結果を把握しやすくするため51メンバーの降雨予測情報から上位予測、中位予測、下位予測の3つのシナリオの作成も行っている。

上位予測は、大雨のリスクを見逃さないための安全側の予測であり、予測総雨量が大きい3メンバーを平均して作成している。

中位予測は、最も精度が高いと考えられる予測であり、予測総雨量の中位10メンバーを平均して作成している。

下位予測は、最低でも見込まれる雨を把握するための予測であり、予測総雨量の下位5～10メンバーを平均して作成している。

また、これらの降雨予測情報（51メンバー、上位・中位・下位）すべてに対し木津川5ダムそれぞれの貯留関数モデルによる流出予測計算を行っている。

## 5. アンサンブル予測システムの活用

アンサンブル予測結果は、図-2のように51メンバーや3つのシナリオが表示される。この画面では、15日先までの雨量やダム流入量などが、いつ・どのくらい予測されているかを把握することができる。

また、予測情報を定量的に把握するため、図-3のように概略表示画面も構築している。この画面では、事前放流の基準降雨量以上となる予測のほか、洪水調節や緊急放流となる予測が51メンバー中にどのくらいの割合で予測されているかが一目で分かるように表示している。

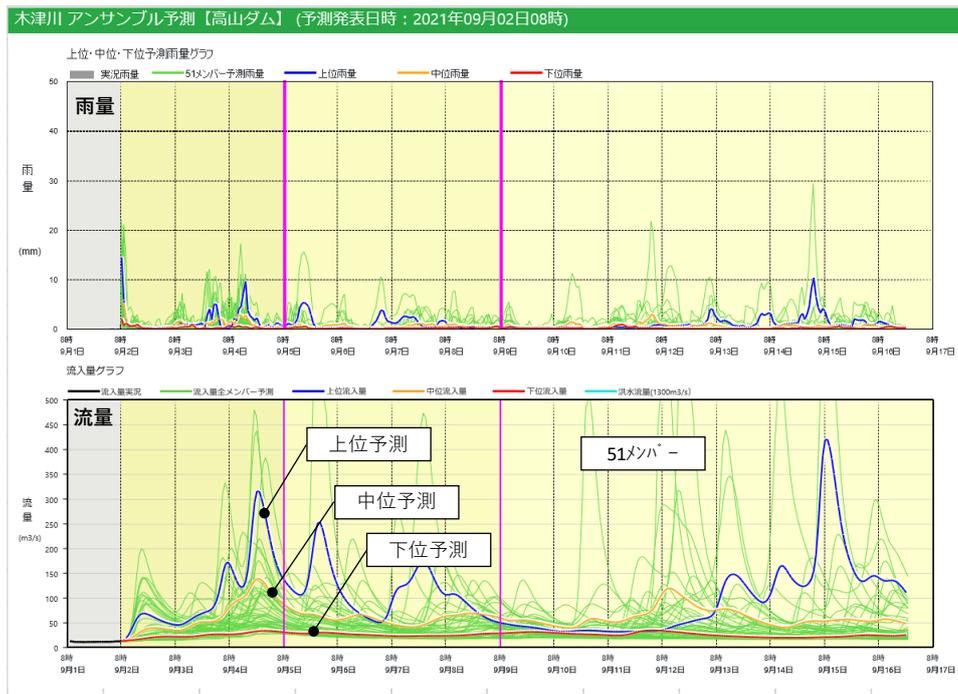


図-2 アンサンブル予測システムグラフ

## 木津川 概略【高山ダム】

### 高山ダム 降雨流出予測

高山ダム	～3日先				4日～7日先			8日先～				
	アンサンブル予測			ガイダンス予測	micos72h予測	アンサンブル予測			アンサンブル予測			
	上位	中位	下位			上位	中位	下位	上位	中位	下位	
予測発表時刻	09月02日08時			09月02日08時	09月02日08時	09月02日08時			09月02日08時			
雨量	最大48時間雨量	84.4mm	48.9mm	14.1mm	55.9mm	53.8mm	105.5mm	47.8mm	10.5mm	103.9mm	44.0mm	9.9mm
	130mm/48h超過	0 (0%)			0	事前放流の基準降雨量以上の予測情報						
	300mm/48h超過	0 (0%)			0							
流入量	最大流入量	314.9m³/s	138.3m³/s	33.1m³/s	137.6m³/s	136.5m³/s	252.3m³/s	86.7m³/s	30.4m³/s	420.1m³/s	119.1m³/s	34.2m³/s
	42m³/s超過	44 (86%)			1	ゲート放流、洪水調節、緊急放流の予測情報						
	1300m³/s超過	0 (0%)			0							
下流	有市 9.5m超過	0 (0%)			0	0	0 (0%)			0 (0%)		
	132.2m超過(ただし書き開始)	0 (0%)			0	0	0 (0%)			0 (0%)		
貯水位	回復量(制限水位-0.8m)	51 (100%)			1	1	51 (100%)			51 (100%)		
	回復量(制限水位-1.0m)	51 (100%)			1	1	51 (100%)			51 (100%)		
	回復量(制限水位-1.2m)	51 (100%)			1	1	51 (100%)			51 (100%)		
	回復量(洪水調節容量)	0 (0%)			0	0	0 (0%)			5 (10%)		

図3 アンサンブル予測システム概略画面

木津川ダム総合管理所では、毎朝、職員がこれらの予測情報を確認し洪水に備えている。

#### (1) 事前放流への活用

現在の事前放流ガイドラインでは、事前放流の実施判断は3日前からが基本である。しかし、アンサンブル予測システムを活用し、より以前から事前放流が実施できれば、先に述べた懸念事項の解消が可能であると考えている。

#### a) ダム下流河川利用者の影響回避

木津川5ダムの下流には、キャンプ場やアユ釣場のほか、生活道路として利用されている潜没橋などがある。事前放流は、施設管理規程や事前放流実施要領などにに基づき安全を確保した上で実施することとなるが、降雨前の短時間に大量の放流となるため河川利用を終える協力を得たり、潜没橋の水没により生活道路の通行止めを措置するなど、河川利用者に影響を与える場合がある。

これに対して、アンサンブル予測システムを活用した場合は、洪水調節のための容量が少量のダム放流を長時間行うことで確保でき、河川利用者への影響回避や負担軽減になると考えている。また、キャンプ場ではテント1張ごとに退避をお願いする職員の労力も軽減される。

#### b) 貯留水の有効活用

政府は2050年カーボンニュートラル（脱炭素社会の実現）を宣言するとともに、2030年度の温室効果ガスの排出量を削減する目標を掲げており、再生可能エネルギーの創出が重要となっている。

これについても、アンサンブル予測システムを活用すれば、短時間のうちにゲートや利水バルブ放流と

いった無効放流を防ぎ、長時間かけて発電放流設備から放流することでダム貯留水の有効活用が図られると考えている。

#### (2) 高水管理への活用

アンサンブル予測システムでは、ゲート放流、洪水調節や緊急放流となる予測も長時間先まで確認できる。

これらの予測が確認されたら、放流設備等の点検、防災要員の確保、工事等段取りの見直し、河川管理者等への情報提供など、従来よりも“早めに”対応することが可能である。

#### (3) 低水管理への活用

先に述べたとおり、事前放流は利水容量の水を放流し洪水調節に利用可能な容量を確保するもので、治水上の安全に配慮したものである。しかし、事前放流を実施したものの予測された降雨がなく、低下させた水位が回復しないといった利水者への負担増となる一面も持ち合わせている。

アンサンブル予測システムは、事前放流の高度化を目指すために試行導入したものであるが、“長期的に降雨が予測されない”“降雨があっても少量”であることも確認できる。そのため、副次的にダムの低水管理にも活用し、日々のダム管理水位の上げ下げ判断に用いている。

#### a) 従前の低水管理

木津川5ダムでは、突発的な降雨及び利水放流設備や洪水吐き設備の動作に要する時間の遅れ等により、洪水調節の実施前に洪水貯留準備水位を超過しないよう管理水位を設けている。洪水期の管理水位は、制限水位から50cm下がり（高山ダムは100cm下がり）とし、通常はこの水位でダム管理を行っている。（図4）

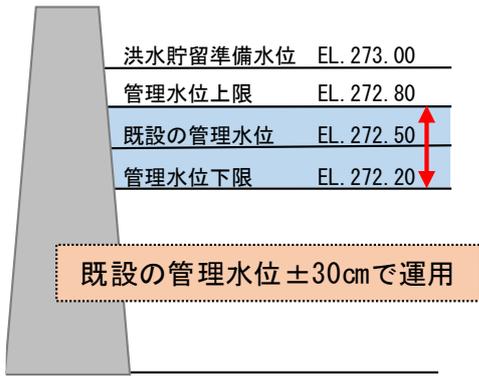


図4 管理水位（青蓮寺ダムの例）

b) アンサンブル予測システムを活用した低水管理

2021年度洪水期からは、図-5に示すアンサンブル予測システムを活用した貯水位運用表を作成し、少しでも利水者への負担が軽減できるように従来の管理水位よりも高めの水位でダム管理を行っている。また、管理水位を高くすることで、発電放流設備の有効落差も大きくなり発電効率の向上にも寄与している。

アンサンブル予測システムの活用方法は、下記のとおりである。

①アンサンブル予測結果の確認

職員は毎朝、「3日先まで」「4～8日先まで」の予測情報を確認する。

②3日先までの予測情報による判断（STEP1）

3日先までに洪水吐きゲートからの放流となるような予測が確認されたら、既設の管理水位もしくは管理水位下限まで水位低下させる。予測がなかったら、STEP2へ進む。

③4～8日先までの予測情報による判断（STEP2）

4～8日先までに洪水吐きゲートからの放流となる

ような予測が確認されたら、既設の管理水位まで水位低下させる。予測がなかったら、高めの水位を維持もしくは回復させる。

④水位低下方法

STEP1又はSTEP2で水位低下が判断された場合は、従前の管理水位まで水位低下させる。水位低下にあたっては、発電放流設備で実施することを優先する。

6. まとめ

木津川5ダムでは、アンサンブル予測システムを試行導入し、2020年7月末より効率的な貯水池管理を目指して運用を行っている。

しかし、アンサンブル予測システムの試行導入以後、洪水調節に至る降雨を経験していない。そのため、現在までの小規模な出水事例では予測結果が流域や事例毎にばらつくなど、明確な有効性の検証ができていない状況である。今後も引き続き、事例収集や有効性の検証、事前放流方法の確立などの検討を進め、利水者や河川管理者との情報共有や理解を得た上で、ダム貯留水を安全かつ有効に活用できる事前放流が実施できるよう努めていきたい。

また、アンサンブル予測システムは事前放流以外にも多くのメリットがある。高水管理では早めの防災対応が可能となるほか、低水管理では現在の管理水位付近での管理に加え、さらには洪水貯留準備水位よりも高い水位帯での管理を行うなど、利水安全度や発電効率の向上に繋がるよう既存インフラ効果がさらに強化できればと考えている。

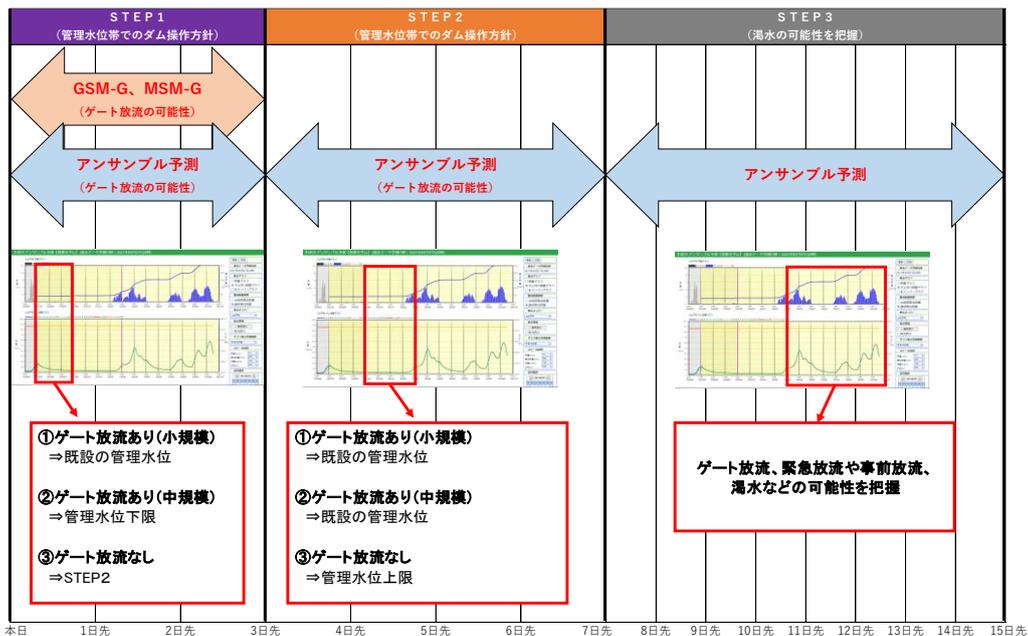


図-5 アンサンブル予測システムを活用した貯水位運用表

# 那賀川床上浸水対策特別緊急事業における 支川加茂谷川の合流位置の検討について

北原 右京<sup>1</sup>・三國 宣仁<sup>1</sup>・山崎 久美子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>四国地方整備局 那賀川河川事務所 工務課 (〒774-0011 徳島県阿南市領家町室ノ内390)

徳島県を流れる那賀川の17km付近に位置する加茂地区は無堤で治水安全度が著しく低く、2004年～2019年においては2年に1回以上の頻度で浸水被害が発生した。2014年8月台風11号では過去最大の浸水被害を受け、那賀川床上浸水対策特別事業(加茂地区)が採択され、那賀川本川及び支川加茂谷川の堤防整備を緊急的かつ集中的に実施することになった。一方、当地区が位置する那賀川本川はS字湾曲河道を有しているために水位上昇が懸念され、支川加茂谷川の治水上最適な合流位置について検討する必要性が生じた。そこで、合流部上下流区間の流況などを調査・分析し、屈曲による水位上昇の影響などについて評価指標の設定を行い、最適な合流位置を決定した。

キーワード 支川処理, バック堤, 支川合流位置, 湾曲河道

## 1. はじめに

徳島県南部を流れる那賀川17km付近に位置する加茂地区(図-1)は、支川加茂谷川を有する扇状地であり、無堤区間であることから度重なる浸水被害を受けてきた。特に、戦後最大流量を記録した2014年8月台風11号(以下、台風11号)による洪水では、最大浸水深が5m程度まで達し(図-2)、加茂谷中学校や郵便局などを含む床上浸水152戸、床下浸水37戸と過去最大の被害を記録した。

この浸水被害を契機として「那賀川床上浸水対策特別緊急事業(加茂地区)」が採択され、那賀川本川の堤防整備と支川加茂谷川付替えを実施することとなった。しかし、支川加茂谷川合流付近の那賀川本川の縦断形状はS字湾曲を有し(図-3)、特に加茂地区下流端は堤防整備により屈曲形状となることから、それによる水位上昇の影響も考慮した合流部計画が必要となった。本稿では、那賀川本川と支川加茂谷川との治水上最適な合流位置に関する検討内容について報告する。

## 2. 事業概要と現地状況

### (1) 事業概要

【事業名】 那賀川床上浸水対策特別緊急事業  
(加茂地区)



図-1 加茂地区位置図



図-2 加茂地区浸水状況(2014年8月10日)



図-3 事業箇所周辺の河道状況

【事業期間】 2015年度～2022年度

【事業内容】 堤防・護岸 那賀川 約800m  
加茂谷川 約1,000m  
樋門 4基

【整備方式】

台風11号と同規模の洪水において、外水氾濫による家屋の床上浸水を防止することを目的として、経済性に優れ家屋移転が少ない「那賀川本川築堤+加茂谷川バック堤整備」(図-4)を採用した。

## (2) 現地の状況

上述したように那賀川本川と支川加茂谷川の合流部付近では、図-3に示すように那賀川本川がS字湾曲し、交互砂州による土砂堆積がみられるなど、複雑な流況となっている。

本川の堤防整備および支川加茂谷川の付替え計画においては、過去の洪水時の流況や整備後の流況など現地状況を調査・分析した上で、水位上昇や土砂堆積などの影響を考慮した適切な合流位置の設定が重要となる。

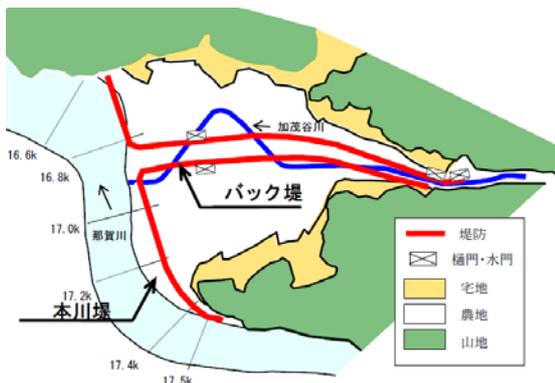


図-4 本川築堤+加茂谷川バック堤整備案

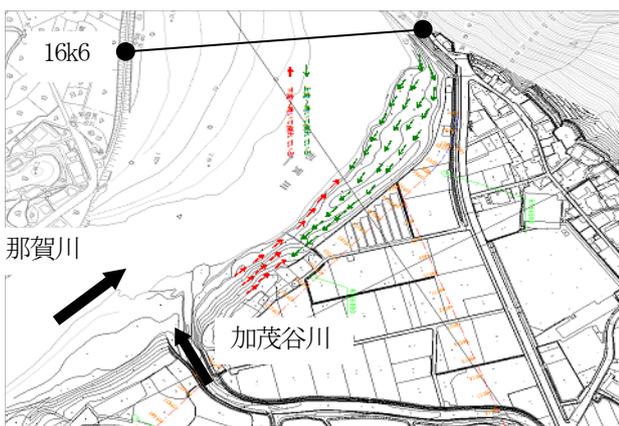


図-5 現地調査に基づく流向 (2011洪水)

## 3. 流況の把握

### (1) 堤防整備前の周辺流況の把握

一般に、支川の合流位置は本川のできるだけ下流とした方が、本川水位が低く背水の影響が軽減され、内水排除にとっても有利であるとされている。しかし、当該箇所は加茂地区下流端が屈曲部となることから、屈曲による水位上昇の影響により必ずしも下流水位が低いとは限らない。

まずは、2011年洪水時のデータをもとに、本川河道の流況把握を行った。

図-5は、2011年洪水後に調査した樹木の倒木状況を示すデータである。本川右岸の矢印が、河岸で倒木した樹木の方向を示している。屈曲部直上流では樹木が上流向きに倒木している。一方、2011年当時の加茂谷川合流点に近い箇所では倒木の方向が下流向きとなっている。

図-6には、左右岸痕跡水位を示す。屈曲部が16k6となるが、屈曲の抵抗により右岸側で水位が大きく上昇し、上流に向かって若干逆勾配となっていることが分かる。

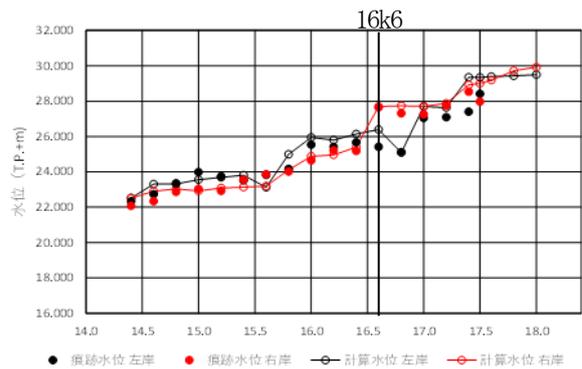


図-6 数値解析による再現解析 (2011洪水)

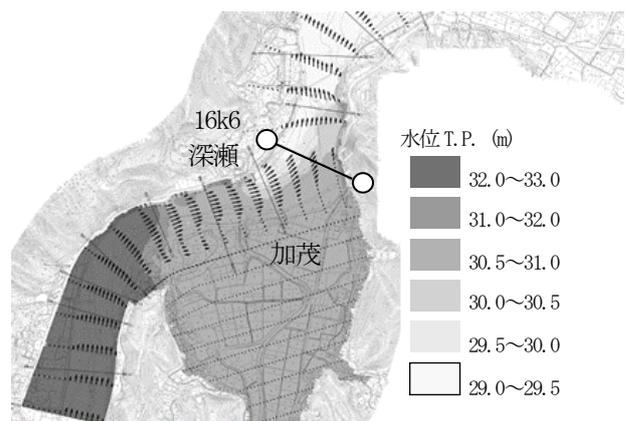


図-7 数値解析による流況再現解析 (2011洪水)

倒木状況および水面形の状況から、屈曲部右岸側で逆流が生じていたことが推定できる。堤防整備により、このような水位上昇および逆流がさらに大きくなることが予想され、本堤防整備において一つの懸案となる。

さらに、検討区間の詳細な流況を把握するために、2011年洪水を対象に平面2次元不定流解析を実施した。図-6に示すように、湾曲部と無堤地区（加茂・深瀬）を有する状況での左右岸痕跡水位を再現できるように解析を行い、図-7に示す平面流況を得た。得られた平面流況では、16k6右岸の岩壁に流速ベクトルが垂直に衝突していることが分かり、この流況が大きな水位上昇を生む要因となっていることが分かる。

## (2) 堤防整備後の流況把握

堤防整備により、検討区間の水位・流速ベクトルがどのように変化するかを把握するため、堤防整備後の地形を対象に平面2次元不定流解析を実施した。流量は、既往最大洪水である2014年台風11号洪水の最大流量で解析を行った。図-8には解析により得られた左右岸水面形を、図-9には平面流況を示す。本川河道の堤防整備により加茂地区下流端には屈曲部が形成され、解析結果では屈曲の抵抗による大きな水位上昇と右岸側での逆流が生じている。この結果からも、屈曲による水位上昇および逆流域を意識した合流部計画が必要であることが分かる。

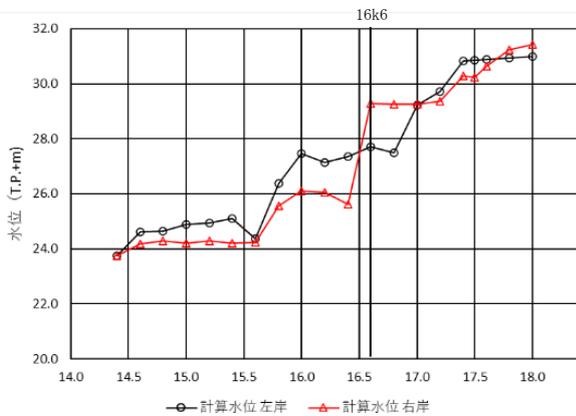


図-8 堤防整備後の水位解析結果(2014洪水)

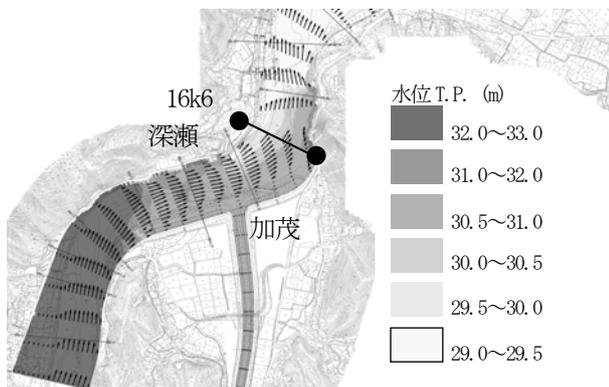


図-9 堤防整備後の流況解析結果(2014洪水)

## 4. 支川合流位置を決定するための評価指標の設定

### (1) 評価指標

現状把握の結果をふまえ、支川合流位置を設定するためには評価するための指標が必要であると考え、洪水時の支川水位に与える影響、許可工作物設置基準（樋門と水門の設置基準）を参考に、本川水位が低いこと、水衝部を避けること、河床変動が小さいことの3つの指標を選定した。

#### a) 本川水位が低いこと（水位）

合流点の本川水位が低いほど、支川への背水影響が少なく、支川の洪水流下がスムーズとなり、内水の影響も軽減できる。

#### b) 水衝部を避けること（流向）

洪水時の流れの向きが、河道中心から、河岸側へ向かう方向（支川を逆流する方向）の場合、支川の洪水流下の阻害となることから、水衝部を避けることが重要となる。具体的には、流況解析で得られるベクトルが支川合流部へ向いていないことで評価を行った。

#### c) 河床変動が小さいこと（掃流力）

河床変動が大きいと深掘れや土砂堆積が生じる。深掘れが生じると、合流点周辺の堤防等の安全性低下が懸念され、逆に堆積が生じると洪水流下が阻害される。従って、合流位置は河床変動ができるだけ小さい箇所が望ましい。今回の検討においては、河床に作用する掃流力が大きく変化しない箇所を選定することとした。

### (2) 合流点の評価位置

合流点評価を行う範囲は、図-10に示す評価ラインの範囲とした。合流点にすでに土砂が堆積していると支川の洪水流下が阻害される可能性が高いため、測点始端（測点1）は砂州下流端に設定した。また、測点終端は、合流点位置として湾曲部を避けたいと考えたことから（水位上昇の直接的な影響と逆流区間を避けるため）、測定終端（測点67）を右岸堤防が湾曲する始端に設定した。測点1と測点67をつないだ直線において5m間隔で評価測点を設定した。

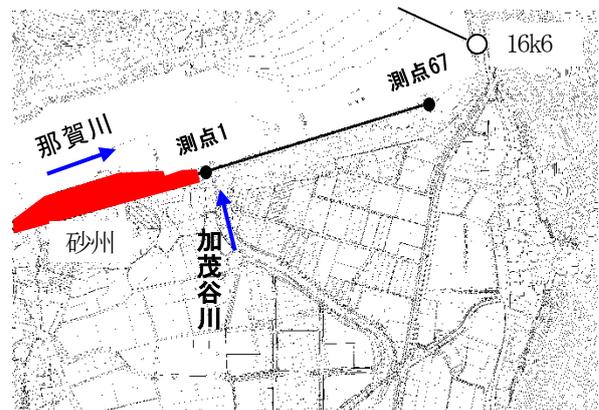


図-10 評価ライン

## 5. 各評価指標の評価結果

図-11に、図-9に提示した解析結果から評価ライン上の各指標に関係する水位・流向・掃流力について抜き出した数値をそれぞれ提示する。横軸の数値は評価ラインの測点番号を示す。

### (1) 本川水位の影響評価

評価ライン上の水位分布（図-11 (a)）をみると、下流（測点67）から上流に向けてTP29.4m程度の水位となる。この水位縦断の中で、TP29.4mより低い水位の箇所があり本指標の評価としては、測点2～8および測点14～28に合流点を設定することが優位であることがわかった。

### (2) 水衝部に関する評価

図-11 (b) 中に示す評価ライン上の流向分布を示す。上向きの流向が本川河道中心へ向かう流れを示し、下向きが堤防側へ向かう流れを示す。下流に位置する測点52-63は、流向が堤防側に向かっていることから、堤防整備後も渦を巻く流れが生じることが分かる。逆流が想定される当区間は、支川から本川への流下に支障が出る恐れがあることから、合流点位置からは除外する。

### (3) 河床変動に関する評価

本検討では無次元掃流力（掃流力を土粒子の粒径・密度で無次元化）の増減により河床変動の有無について評価する。一般に、無次元掃流力が徐々に大きくなる区間では洗掘が生じやすく、逆に無次元掃流力が徐々に小さくなる区間では堆積が生じると考えられる。評価ライン上の無次元掃流力分布（図-11 (c)）をみると、測点25～49では無次元掃流力が徐々に減少することから土砂が堆積する傾向にあることがわかる。また、測点49より下流では無次元掃流力が0に等しいことから河床での流れが無く土砂が堆積しやすい。合流部で土砂堆積が生じると、支川の流下に影響することから、この区間は合流点位置として好ましくない。また、測点8～13付近では無次元掃流力が徐々に増加する傾向にあり、河床の深掘れにより堤防等の安全性が低下することが懸念されるため、この区間も合流点として好ましくない。測点0～8では短い区間で無次元掃流力が上昇低下をしていることから、河床が安定していないことがわかる。従って、河床変動の評価の観点から考えて測点14～24が優位であるということが分かる。

### (4) 支川合流最適位置の設定

前述の3つの評価指標から、合流点として優位である区間を整理すると、14～24となる。本計画では最終的に測点15～23に合流点位置を設定した。

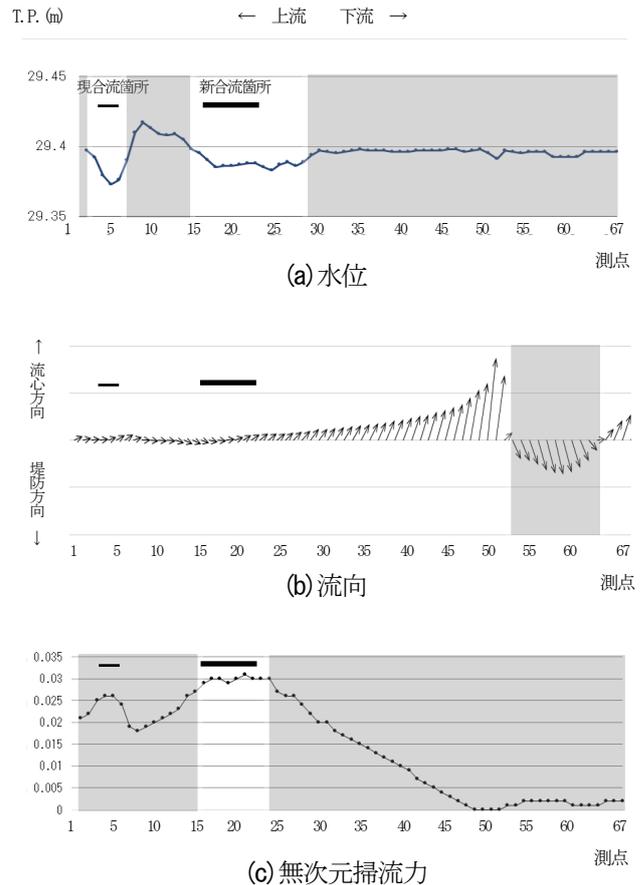


図-11 新設合流点の設定に関わる3つのデータ

## 6. おわりに

河川管理施設等構造令や工作物設置許可基準等には、水門・樋門の設置位置についての条件は明記されているが、支川合流位置の選定条件は明確にされていない。そのような中、本川がS字湾曲し、複雑な流況を呈している支川加茂谷川の付替にあたり、最適な合流位置を選定するために①本川水位が低いこと②水衝部を避けること③河床変動が小さいことの3つの指標を設定し、水理解析により定量的な評価を行った。その結果、設定した3つの評価指標をクリアする治水上最適な合流位置を選定することができ、加茂地区の治水安全度を高められたと考える。

本検討から、特に複雑な流況を呈する箇所では支川の付替を行う場合には、安易に既存合流部で合流位置を決定するのではなく、重要な指標を設定し、調査・解析等のデータから評価した上で、合流点を決定することが重要であることがわかった。本提案が、今後の支川合流位置の検討の際に参考になれば幸いである。

謝辞：本調査の実施に当たり、多くのご助言をいただいた阿南工業高等専門学校 創造技術工学科建設コース 准教授の長田健吾氏に深謝の意を表す。

# 効率的でメリ・ハリのある河川管理を目指して ～巡視結果判断基準の作成～

本間 美紀<sup>1</sup>・三戸 真紀子<sup>2</sup>・皆澤 和哉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>新庄河川事務所 大石田出張所 (〒999-4113 山形県北村山郡大石田町大字今宿鷺の原466-2)

<sup>2</sup>最上川ダム統合管理事務所 経理課 (〒990-0732 山形県西村山郡西川町大字砂子関158) .

河川巡視については、これまで河川巡視員から報告された結果をもとにその都度出張所職員が対応方針を判断していたが、担当者により対応方針の判断にバラツキがあったり、経過観察箇所が年々増加する等問題点も顕在していた。

本報告では、効率的かつ要点を押さえたメリ・ハリのある河川管理を目指すために大石田出張所が作成した巡視結果判断基準の内容と成果について報告するものである。

キーワード 安全・安心, 業務効率化, 河川管理

## 1. はじめに

河川巡視は、河川巡視員（委託業者）が一般巡視を週2巡、その他目的に応じて堤防徒歩巡視やボート巡視、樋管概略調査などを行っている。

巡視結果については、河川巡視員から「河川巡視日誌」により報告があり、報告内容について出張所職員がその都度対応方針（A：要対策（急ぎ）、B：要対策、C：経過観察）を判断し、その対応方針を委託業者が一覧表に取りまとめるという流れになっている。

この一覧表は対策済、未済が一目でわかる点で便利であるが、河川管理の経験が浅い職員はその都度判断が求められる負担が大きいこと、また、大きく2つの問題点があることから、今般、巡視結果判断基準を作成することとなった。

例えば同じ量水標のメートル表記ラベルの剥がれについても「経過観察」と「要対策」に判断が分かれる等、年度毎に一貫性がなく、また、事務所内の出張所毎にも判断に違いがあった。



図-2 量水標の標記ラベル剥がれに対する判断のバラツキ

実施日	河川名	箇所	距離	地名	状況	要対策	対応方針	対応等
4/7	最上川	水門・樋管等の状況	48.8km+20m	尹沢地区	尹沢第三排水樋管川裏側量水標に破損箇所あり。(右岸全線が調査)	—	A	維持工事対応
4/7	最上川	付属施設等の状況	51.8km	川前地区	新築表示板に破損(折れ)箇所あり。	—	B	維持工事対応予定
4/12	最上川	付属施設等の状況	42.2km+120m	毒沢地区	毒沢特種防犯天端川裏側に設置されている転倒防止柵に破損あり。応急処置及び目視調査。4箇所。	—	B	維持工事対応予定
4/12	最上川	河岸の状況	48.4km+70m	尹沢地区	尹沢堤防河岸に洗掘箇所あり。(延長=約0.4km 高さ=約1.5m 陥没状況=約0.5m幅=約2.8m)	—	C	経過観察
4/14	最上川	水門・樋管等の状況	51.8km+30m	大瀬地区	大瀬第二排水樋管川裏側階段上に設置されている量水標に破損箇所あり。(7m×7.5m部分)	—	A	維持工事対応予定

図-1 巡視結果記録一覧表

## (2) 経過観察箇所の増加による巡視員の負担増

対応方針の判断で「経過観察」とされているものについて、漫然と引き継がれて年々巡視箇所が増加しており、特にボート巡視において確認する河岸洗掘・崩落箇所については数が膨大で巡視員の負担増となっているだけでなく、本当に重要な箇所が見落とされる可能性があった。

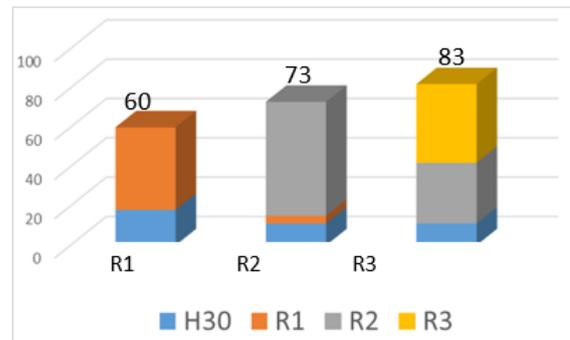


図-3 過去3年間 一般巡視・異常確認件数

## 2. 河川巡視結果判断の問題点

### (1) 対応方針についての判断のバラツキ

人事異動により河川管理者の判断が変わることにより、

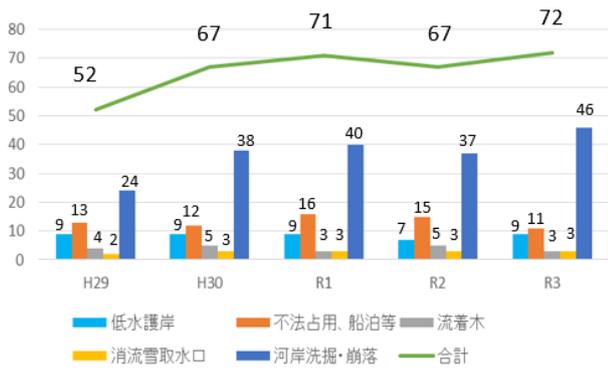


図-4 過去5年間 ボート巡視・経過観察件数

### 3. 巡視結果判断基準作成の手法

これらの問題点を踏まえ、不明瞭である判断基準により河川管理者の判断が変わることがないように、また、巡視業務の効率化のためにも、巡視結果判断基準を整理する必要があると考えた。

基準の作成にあたっては大石田出張所職員だけでなく、実務を担っている河川巡視員、事務所内の巡視結果の取りまとめを行う河川管理課、他出張所の職員からの意見も反映して作成し、下記2点をポイントとした。

#### (1) 判断基準をより具体的に定義

従来のA：要対策（急ぎ）、B：要対策、C：経過観察という基準を、A：早急に対策が必要なもの（出水時に影響、管理瑕疵が問われるおそれのあるもの）、B：対応が必要ではあるが急ぎではないもの（予算状況による。1年以内の対応を目安とし、できない場合は次年度優先的に実施）、C：河川管理上又は施設の機能上、一定期間変状を観察のうえ判断すべきもの、－：他管理者案件（占用等）と、より具体的に定義し、さらに過年度の巡視結果を踏まえよく報告があがるものについては具体例として示し、統一的基準を作成した。修繕が必要なものについては、対応期限の目安を設定することで、先送りせず確実に引き継ぎ、対応できるようにした。

##### a) Aの具体例

堤防本体の損傷、樋管水路への土砂堆積（ゲートの開閉に支障）、樋管の量水標の破損（読み取りに支障あり）、転落防止柵の損傷や堤防天端の大きな損傷など、第三者に被害を生じさせる危険性のあるもの など

##### b) Bの具体例

量水標の破損（読み取りに支障なし）、距離表示版の傾き、転落防止柵の歪み（転落の危険性なし）など



▲堤防本体の損傷

▲樋管水路への土砂堆積や流着木等



▲樋管の水位観測員退避水位の明示の劣化

▲転落防止柵の損傷（転落の危険性あり）



▲樋管の量水標の破損（読み取りに支障あり）



▲堤防天端の大きな損傷

▲樋管への蜂の巣の造営

図-5 (具体例) A：早急に対策が必要なもの



▲距離表示板や距離標杭の損傷

図-6-1 (具体例) B：対応が必要ではあるが急ぎではないもの  
-1



▲樋管の量水標の破損(読み取りに支障無し)



▲転落防止柵の損傷  
(転落の危険性無し)

▲水位観測所の量水標の  
損傷 流着木ひっかけり等

図-6-2 (具体例) B : 対応が必要ではあるが急ぎではないもの  
- 2

c) C の具体例

堤防の車両走行跡・轍掘れ(堤防に損傷なし)については植生が回復すれば終了、不法投棄については注意看板を設置後、1ヶ月程度で回収されなければ、不法投棄の温床となることを防ぐため回収して終了、護岸などの河川管理施設の軽微な損傷については、経過観察を継続するなど、いつまで経過観察するかも決定した。



▲堤防の車両走行跡・轍掘れ(堤防に損傷無し)  
※植生が回復したら終了



▲不法投棄  
※約1ヶ月で回収して終了



▲河川管理施設の軽微な損傷  
(補修が必要な程ではない) ※継続監視が必要

図-7 (具体例) C : 河川管理上又は施設の機能上、一定期間変状を観察のうえ判断すべきもの

d) 一の具体例

占用許可標示板の損傷、占用物件の損傷、雪捨て場占用後の法面損傷などは、占用者へ連絡し、以降随時状況を確認する。内容によっては、速やかな補修を依頼し、確実な履行を確認する。



▲占用許可標示板の損傷

図-8-1 (具体例) - : 他管理者案件- 1



▲占用物件の損傷

図-8-1 (具体例) - : 他管理者案件- 2



▲雪捨て場占用後の法面損傷

図-8-3 (具体例) - : 他管理者案件- 3

(2) 河岸洗掘・崩落について明確な判断基準を設定

河岸洗掘・崩落については、経過観察の大半を占めていること、ボート巡視は川の中から見ることが可能であるが年2回の巡視であるため、一般巡視でも定期的にフォローしていく必要があることから、個別に検討した。

a) 経過観察を開始する基準

原則全ての洗掘・崩落箇所をボート巡視で確認し、そのうち有堤部については堤防防護ライン40m(最上川中

流部の場合)を割り込んでいる場合、無堤部については、上部に施設(民家や公共的な道路)がある場合は、一般巡視でも経過観察を開始することとした。

#### b) 経過観察期間

一般巡視・ボート巡視共通で、堤防防護ラインを割り込んでいる箇所は、継続して経過観察とし、上記に当てはまらない箇所については、3年程度経過すると安定勾配になり、植生も回復し経過観察する必要がないと考えられるため、3年間を経過観察の目安とした。

なお、この間に出水等で拡大した場合にはその時点から3年間とする。いずれにしても、職員がボート巡視で最終的に確認したうえで、経過観察終了とする。



図-9 植生回復の様子

#### 4. 巡視結果判断基準作成の効果

巡視結果判断基準を作成したことにより、経過観察箇所が約4割も減少し、巡視員の負担軽減はもとより、本来に見るべき箇所が明確になるという効果があった。

また、担当者による判断のブレが解消し、具体例を参考に誰でも効率的に評価をすることができるため、巡視結果に対し適正な評価が可能となった。

巡視結果一覧表についても、より適正で実効性のある資料として維持費の予算要求資料として活用が可能となり、業務削減の効果にも繋がった。

さらに副次的な効果として、職員と巡視員とで意識を共有することにより効率的な河川巡視が可能となることに加え、初めて河川管理を経験する職員の負担軽減にも繋がるものと思われる。



図-10 当初(巡視結果判断基準作成前)と見直し後(巡視結果判断基準作成後)のボート巡視箇所数

#### 5. 今後の展開

巡視結果判断基準は、他の河川出張所でも適用が可能であることから、大石田バージョンをベースに、令和4年度から新庄河川事務所管内の他出張所でもこの判断基準を元に巡視結果を整理していくこととなり、所内で統一的な判断と整理が可能となった。

また、堤防や樋管など構造物の点検に対する評価基準要領と整合を図り、河川巡視結果による対応方針をA→d: 要対策(急ぎ)、B→c: 要対策、C→b: 経過観察)と置き換えて運用していくこととなったため、より効率的で一体感のある河川管理業務への足がかりとして貢献できたものとする。

今後は、試行を踏まえて、管理課・出張所ならびに河川巡視員と活発に疑問点や改善点について意見を交換し、より良い河川管理を目指して基準を改善していきたい。

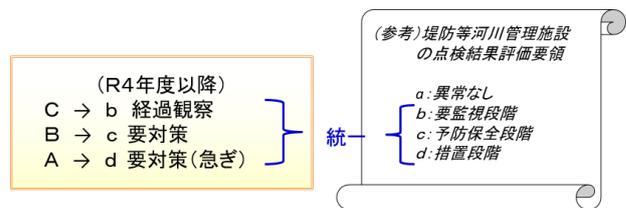


図-11 堤防等河川管理施設の点検結果評価要領による評価基準との整合性

# 令和3年8月洪水における河川護岸の 被災原因と予防保全について

米山 竜弥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地方整備局 太田川河川事務所 工務課 (〒730-0013広島県広島市中区八丁堀3-20)

堤防、護岸等の河川管理施設は計画高水流量を安全に流下させるため計画高水流量により設計を行うが、太田川では計画高水流量以下の洪水において被害が発生している。

令和3年8月の洪水では、太田川左岸39k800付近の護岸前面の砂洲が流出し、護岸が被災した。この砂洲の洗掘現象について無次元限界掃流力を超える継続時間に着目して被災分析を行った。その結果、被災原因は砂洲高を超過する水位継続時間に起因したものと考えられるため、今後の予防保全を想定して同様の被災リスク箇所の抽出を行ったので報告する。

キーワード 中小洪水による護岸被災，平面二次元流況解析，洪水継続時間

## 1. はじめに

太田川は広島県の西部に位置する幹川流路延長103km、流域延長1,710km<sup>2</sup>の一級河川である。今回被災を受けた左岸39k800付近は三川合流点より上流であり、太田川中流部にあたる(図-1)。

太田川中流部は、両岸に山が迫る狭隘地区で集落が点在する区間は輪中堤が整備されている状況である。また、太田川中流部の氾濫特性は、河床勾配も急で洪水時の水位上昇も早く、集落の背後には山が迫っており、大規模な洪水時には河道のみならず、太田川沿いにある道路や川沿いの低い土地にある田畑で氾濫しながら流下する状況にある。



図-1 被災箇所位置図

## 2. 令和3年8月洪水及び護岸被災状況

### (1) 令和3年8月洪水概要

令和3年8月洪水は、8月12日から18日にかけて山陽地方及び中国山地沿いに梅雨前線が停滞したことで局地的な大雨となった。加計雨量観測所で累計雨量370mmを記録し、飯室水位流量観測所で避難判断水位6.00mを超過し、6.13mの水位を記録した(図-2)。令和3年8月洪水は、洪水ピークが8月13日11時と14日の12時と2回あり、洪水継続時間が長いという特徴がある。

また、飯室水位流量観測所において流量2,954m<sup>3</sup>/sであり、平成17年の既往最大流量5,911m<sup>3</sup>/sに比べては約半分程度の流量であった。飯室水位流量観測所にて過去の洪水データを整理した結果、令和3年8月洪水と同規模(2,500~3,000m<sup>3</sup>/s)の洪水は、約5年に1回程度の頻度で発生しており、1/5確率規模の中小洪水である。

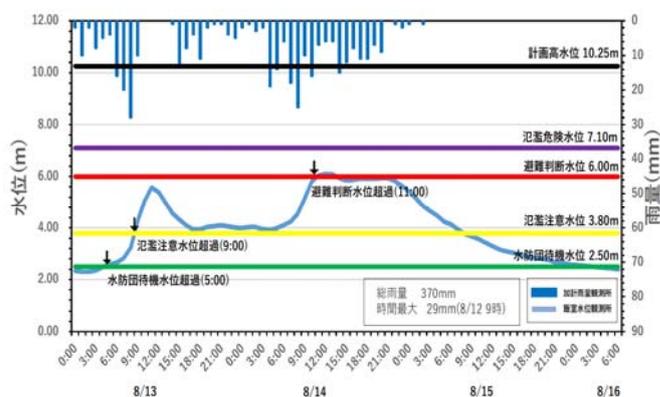


図-2 飯室水位流量観測所及び加計雨量観測所グラフ

### (2) 護岸被災状況

被災箇所は、太田川左岸39k600+126mから39k800の延長74mの区間（写真-1）であり、急峻な山地内河道の湾曲部下流側に位置し、護岸前面に10～25m程度の砂州が形成されていた（写真-2、図-3）。令和3年8月洪水により護岸前面の砂州が流出し、護岸基礎部が洗掘を受けて護岸が被災したものである。

既設護岸構造は、護岸台帳より昭和55年に整備されたブロック張護岸であり、護岸基礎は砂州から1.0～1.5m程度、根入れされていたと想定される。被災後の護岸状況は、写真-3、図-4に示すように、ブロック張護岸下部が破壊され、護岸部と基礎部が離れ護岸背面も洗掘を受け、「死に体」となってしまう、護岸の新設復旧が必要となった。

### (3) 被災要因の推定

被災要因は、被災箇所が湾曲部の内岸で対岸は岩盤が露頭していることから、対岸の岩盤露頭により向きを変えた流れが集中したものと考えられた（図-3）。ただし、図-5から洪水時の痕跡水位DHWLも計画高水位に比べて約半分の水位あること、流量規模も1/5確率程度であることから、過去の洪水にて被災せず令和3年8月洪水で被災を起こした原因が不明確であった。



写真-2 被災箇所周辺写真

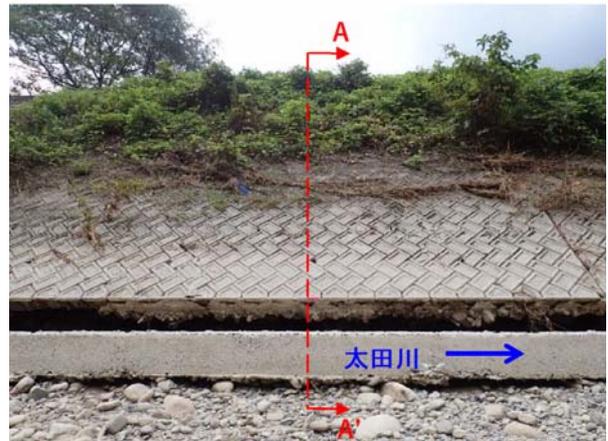


写真-3 被災状況拡大写真



写真-1 被災状況写真

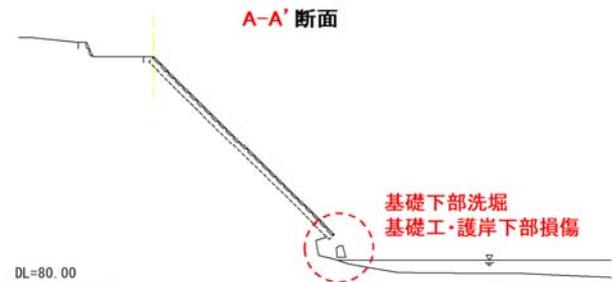


図-4 A-A箇所 横断面図



図-3 被災箇所平面図

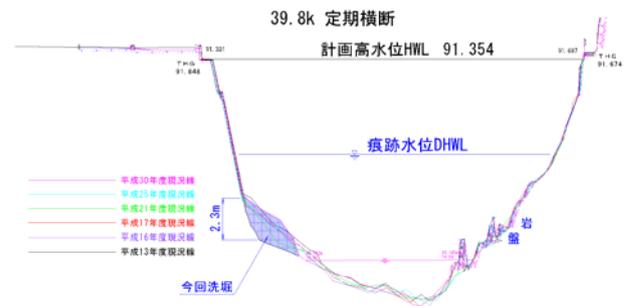


図-5 定期横断面図重合せ図 (39k800)

### 3. 被災原因の分析

#### (1) 令和3年8月洪水の検証

被災原因の要因分析として、令和3年8月洪水の再現計算を実施した。再現計算は、砂州に作用した水理量（水位、流向、流速等）の時間的な変化を把握することを目的とし、非定常流解析の1つである平面二次元流況解析を実施した。平面二次元流況解析は、令和3年8月の実績洪水ハイドロを用いて行った（表-1）。

平面二次元流況解析の結果、図-6より出水時の水位、流向（露岩の反射）、流速を再現でき被災箇所の流速は5m/s以上で周辺の流速と比較しても高いことを確認した。

表-1 解析条件

対象洪水	令和3年8月洪水ハイドロ (飯室水位流量観測所における流量: $Q_p=2.954\text{m}^3/\text{s}$ )
解析対象区間	下流端: 29.4k (飯室水位流量観測所)、上流端: 41.2k
出発水位	飯室水位流量観測所の実績水位
粗度係数	低水路: $n=0.040$
樹木群	考慮しない
解析地形	平成30年度航空レーザ測量成果
解析メッシュ分割	縦断方向メッシュ: 10m 横断方向メッシュ: 30分割 (5~10m)

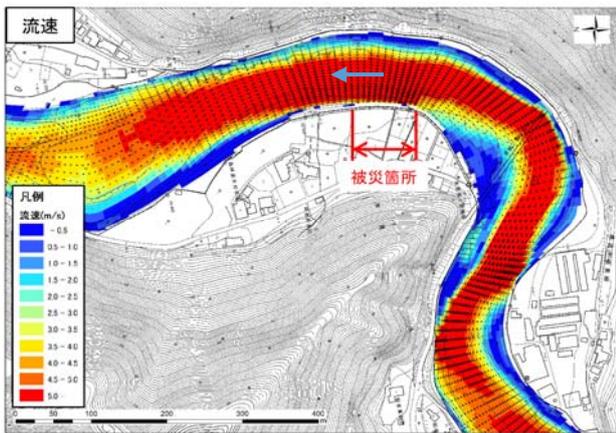


図-6 令和3年8月洪水の流向・流速平面図

#### (2) 無次元掃流力による整理

砂州の洗掘現象については、河道の安定に関わる河床構成材料の移動のしやすさを無次元化して表現した無次元掃流力 $\tau^*$ に着目して整理した。流れが河床構成材料に及ぼす掃流力と抵抗力の比で示しており、河床構成材料は代表粒径で評価する。対象地点の代表粒径 $d_R$ は、河道技術資料より $d_R=200\text{mm}$ で計算した。

$$\tau^*_{*R} = u_*^2 / (s \cdot g \cdot d_R)$$

$u_*$ : 摩擦速度

$s$ : 河床構成材料の水中比重 ( $\approx 1.65$ )

$d_R$ : 河床構成材料の代表粒径

$g$ : 重量の加速度

土砂移動が発生する指標は、無次元掃流力 $\tau^*$ が0.05以上の時である。図-7より被災箇所の無次元掃流力 $\tau^* \geq 0.05$ となっており、今回の洪水で砂州が洗掘された可能性を再現できた。

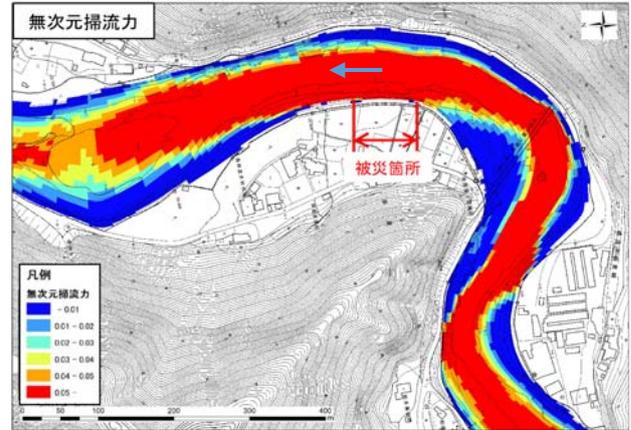


図-7 令和3年8月洪水の無次元掃流力平面図

#### (3) 無次元掃流力の時間的変化

今回の被災箇所が既往最大流量を観測した平成17年で被災せず、今回の洪水で被災した原因を明らかにするために、無次元掃流力の時間的変化に着目して整理した。無次元掃流力の整理は、被災箇所上流部で実施し、無次元掃流力 $\tau^*$ が0.05を超えた継続時間は31時間46分であり、非常に長い時間継続したと考えられる（図-8、図-9）。

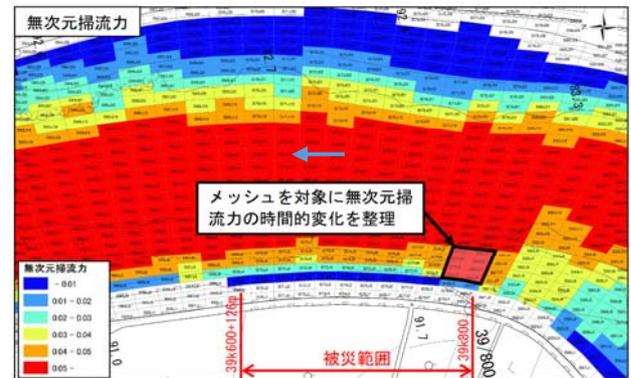


図-8 無次元掃流力着目箇所

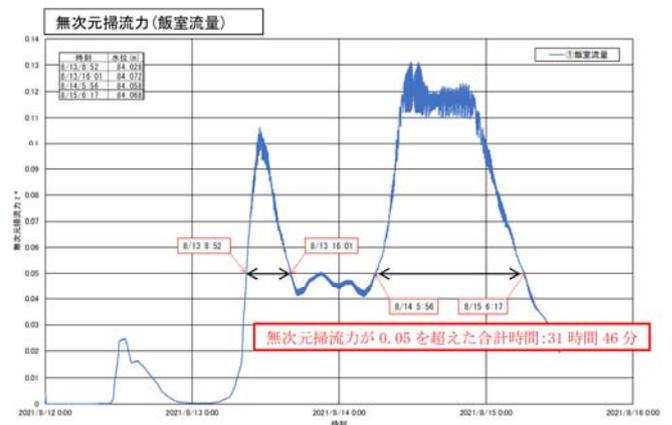


図-9 令和3年8月洪水の無次元掃流力継続時間

(4) 平成17年洪水と令和3年8月洪水との比較

平成17年洪水と令和3年8月洪水との比較は、平成17年河道の地形モデルが無く同様の水理検討ができないため、流量ハイドロによる継続時間に着目して整理を行った。

無次元掃流力 $\tau \geq 0.05$ 時の水位は、TP+84.00mであり、砂州高と概ね一致し、流量は990m<sup>3</sup>/sとなる(図-10)。

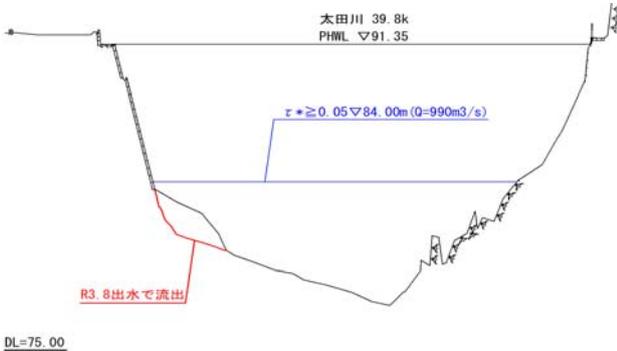


図-10 被災箇所断面図

図-11の流量ハイドロより、砂州高相当流量990m<sup>3</sup>/sの継続時間を比較すると、平成17年洪水で13時間、令和3年8月洪水で46時間となる。

令和3年8月洪水の継続時間は平成17年洪水の3倍以上長く、被災原因は砂州高見合いの洪水継続時間に起因したものと考えられる。

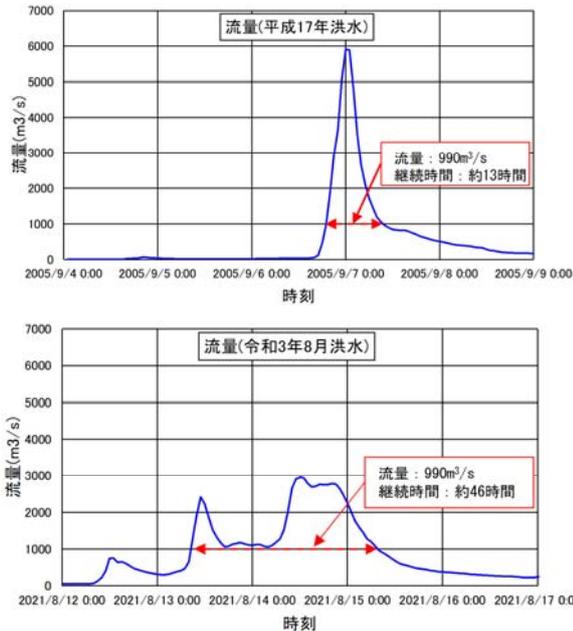


図-11 流量ハイドロ(上:平成17年洪水,下:令和3年8月年洪水)

(5) 過去の洪水との検証

水文水質データベースより過去の洪水(平成14年~令和元年度)を対象として、砂州高相当流量990m<sup>3</sup>/sの継続時間について整理した(表-2)。過去の洪水の継続時間は概ね10時間程度であり、令和3年8月洪水の46時間ほどの長時間の継続時間は観測されていない。

また、図-12から平成30年洪水の継続時間が27時間と比較的長いこと、写真-4より平成30年前後の航空写真にて被災箇所を確認すると、砂州が10m程度洗掘されていることも分かった。

被災箇所は、平成30年洪水でも砂州が洗掘され、令和3年8月洪水で更に洗掘を受けて、砂州が流出したと考えられる。

表-2 砂州高相当流量の継続時間

年	最大流量 (m <sup>3</sup> /s)	継続時間	考察
H16	3013	約7時間	ピーク流量は令和3年8月洪水と同程度であるが、継続時間は短い。
H17	5911	約13時間	ピーク流量は既往最大であるが、継続時間は短い。
H21	1759	約12時間	中規模出水であり、継続時間は短い。
H25	1667	約14時間	中規模出水であり、継続時間は短い。
H27	1526	約5時間	中規模出水であり、継続時間は短い。
H30	2452	約27時間	ピーク流量は2500m <sup>3</sup> /s程度であるが、継続時間は長い。令和3年8月洪水被災箇所はH30洪水でも洗掘されていた可能性がある。
H31	1507	約3時間	中規模出水であり、継続時間は短い。
R3	2954	約46時間	中規模出水であるが、出水の継続時間が長い。

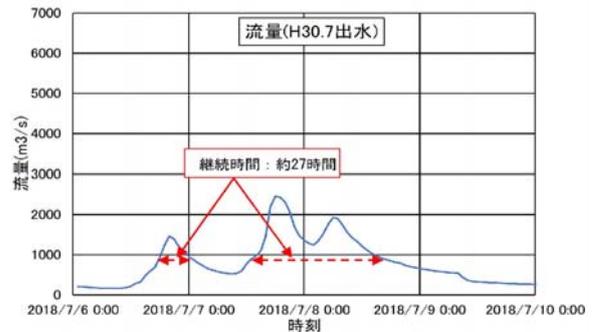


図-12 流量ハイドロ(平成30年洪水)



写真-4 被災箇所の航空写真(上:平成20年,下:平成31年)

## 4. 危険箇所の抽出

### (1) 砂州洗掘幅と洪水継続時間の整理

太田川中流部は、河床深さが左右岸で大きく異なった箇所が多く、護岸基礎は最深河床高でなく砂州高見合で配置されている箇所が多い。

今回と同様の被災を防止するため、過去の類似被災箇所を対象に砂州の洗掘をモデル化し、洗掘に対する洪水継続時間の相関性を確認した。(図-12、図-13)

対象洪水は、平成5年被災と令和3年の2洪水としたが、被災箇所39k800の平成30年洪水の洗掘幅10mも再現できている。検討結果より、砂州の洗掘幅10m程度を引き起こす洪水継続時間は25～30時間程度と考えられる。

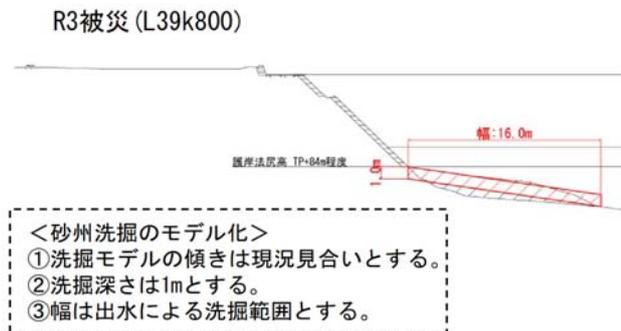


図-12 砂州洗掘のモデル化

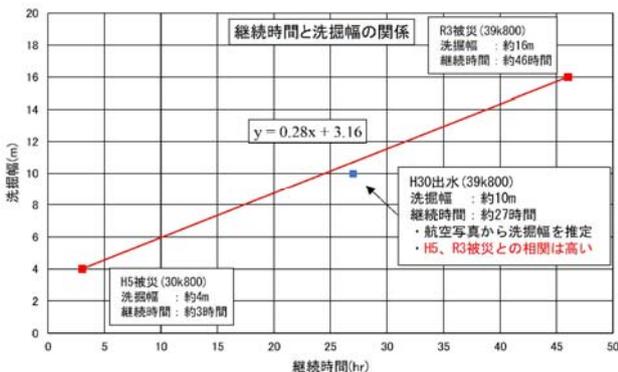


図-13 洗掘幅と洪水継続時間の相関図

### (2) 危険箇所の抽出

危険箇所として、現地踏査により太田川中流部において、砂州に護岸が設置されている箇所について現地踏査を行った。対象範囲は水理検討を実施した29k400から41k100の区間とし、「砂州幅と洪水継続時間」の関係より、危険が想定される箇所の確認を行った。

右岸30k600が以下の理由より危険箇所と考えられる。

- ・砂州幅13mで基礎高が浅いと想定される。
- ・上流に橋梁があり流れが乱れやすい。
- ・上流部は平成5年災害で整備されており、下流の当該区間も洗掘の恐れがある。



写真-5 右岸30k600

## 5. 今後の管理・設計について

### (1) 今後の管理について

今回の洪水継続時間に着目した検討より、砂州高を超過する継続時間が30時間程度継続した場合は、砂州が概ね10m程度洗掘されることが確認できた。令和3年8月洪水のように洪水継続時間が長く続いた場合は、洪水後の護岸調査や根固工等の洗掘対策が必要と考えられる。

また、今後の護岸管理は以下の点が重要と考える。

- ①砂州に護岸が設置されている箇所の基礎高の把握
- ②定期縦横断測量による河道の経年変化の把握

### (2) 現在の護岸設計手法について

現在の護岸設計は、「護岸の力学設計法」に準拠して、ピーク流量である計画高水流量に対して行われ、法覆工と基礎工の安定照査を行う。法覆工の安定照査は、計画高水流量に対する流速に対して必要ブロック重量の算出を行うため問題ない。一方で基礎工の安定照査は、最深河床高を評価して設計を行うが、洪水時の洗掘現象を考慮した最深河床高の定量評価が困難とされている。

太田川中流部において濬筋部の最深河床高と砂州高が大きく異なる地点は、基礎工は最深河床高見合いの計画は現実的でなく、砂州高見合での計画となる。そのため、砂州からの護岸基礎高の評価や砂州洗掘の評価や根固工等の保護対策が重要となる。現在の設計基準では、洪水継続時間などの時間的な概念がなく、砂州の時間的な洗掘ボリュームを考慮することができない。

近年は線状降水帯の発生など過去の洪水パターンも変化していることや令和3年8月洪水による基礎部の被災を含め、洪水継続時間などの時間的要素を考慮した設計手法が確立されることが望ましいと考える。

**謝辞：**本稿の作成にあたり、いであ株式会社の関係者の方々にご指導、助言を頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 国土交通省中国地方整備局：太田川水系河川整備計画
- 2) いであ株式会社：令和3年度元安川外護岸測量設計業務

# 水理諸量に着目した河岸侵食リスクの 評価について

## —対策必要箇所抽出の指標化に向けて—

萬谷 太雅<sup>1</sup>・今村 仁紀<sup>1</sup>・佐々木 博文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北海道開発局 建設部 河川計画課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

近年、大規模な洪水を経験していない河川では、砂州の発達や樹林化とともに、滞筋が固定化し、河床低下が進行しており、洪水等が生じた際に河岸侵食が発生し、堤防侵食へと進行する事が懸念される。そこで河岸侵食対策が必要となる箇所を簡便的に把握するために、近年の被災実績を有する河川を対象に、水理諸量に着目して洪水による外力を指標化し、河岸侵食リスクとして評価する手法について検討した。

キーワード：防災, 自然災害, 維持管理

### 1. 序論

砂州の発達は、出水時の流れの偏り等により河岸侵食を誘発する<sup>1),2),3)</sup>。近年では、千曲川中流部において、HWL以下の洪水であっても、砂州地形と関連するように堤防侵食、鉄道橋の被災等が発生している<sup>4)</sup>。北海道内の河川においても、砂州波高の増大に伴い、樹林化が進行した砂州の対岸で、河岸侵食による被災が発生している<sup>5),6)</sup> (例えば、図-1)。これらは、計画規模相当以下

の洪水であっても、洪水流が安全に流下できないリスクの高い状況であることを示唆している。これまで治水安全度として、流下能力の向上といった量的整備を重視してきたが、砂州の発達、樹林化による滞筋固定等が進行している道内河川では、河岸侵食の可能性が考えられる箇所への対応といった質的整備が必要となっている。

各河川においては、量的整備は着実に進展しているが、質的整備については事前の評価手法がないため、事後対応となっているのが現状である。今後の気候変動に伴う外力増加、砂州の発達や樹林化の進行等を考慮すると、対策必要箇所の抽出と、計画的な対策の実施が不可欠と考えられ、河岸侵食リスクに関する評価手法の構築が必要である。

リスク評価については、全川的なスクリーニングを実施した上で、対策必要箇所においては河床変動解析による詳細検討が有効と考えられる。スクリーニングにおいては、砂州の発達形状といった「地形指標」、トリガー

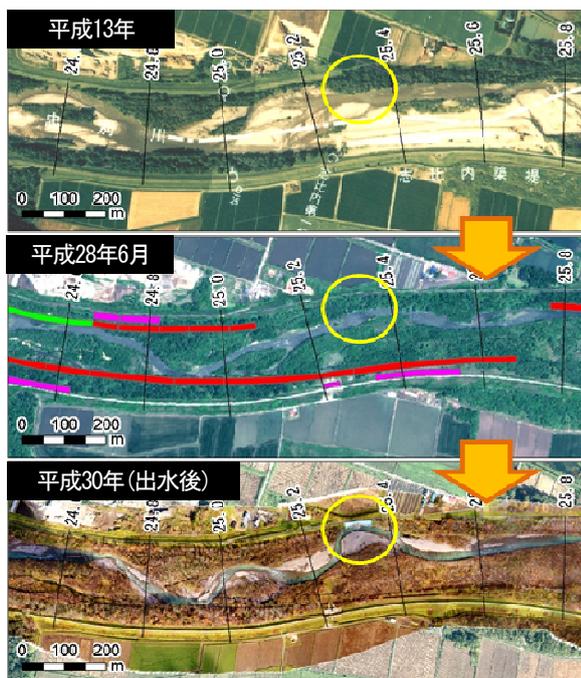


図-1 忠別川の河道変化

$$\text{比高水深比 (低水路満杯相当)} \\ = \text{砂州波高 (Zb)} / \text{満杯水深 (D)}$$

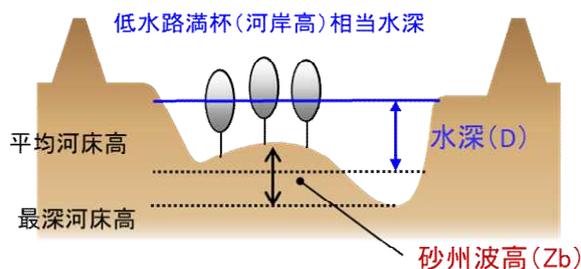


図-2 地形の指標化

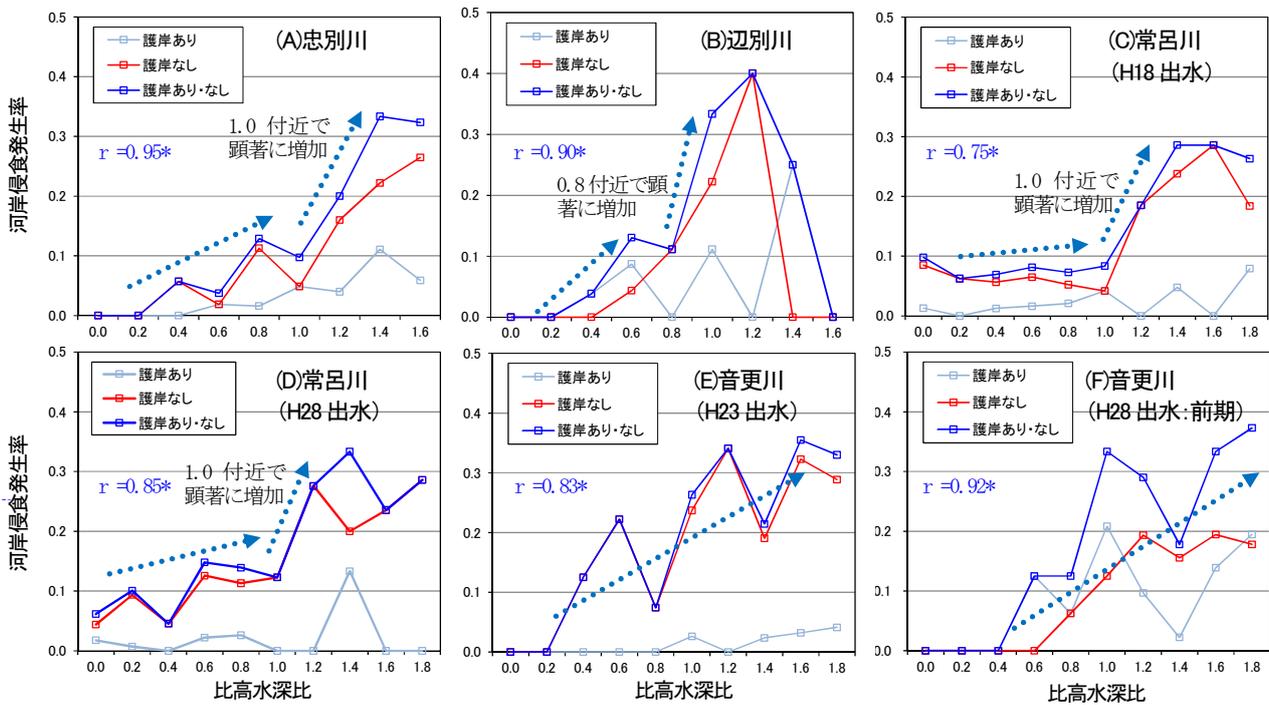


図-3 地形指標と侵食発生率の関係<sup>7)</sup>

・比高水深比のレンジ毎の平均値を示す。相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、\*は統計的に有意な相関を示す(p<0.05)。

となる洪水外力の作用「外力指標」の観点から、評価指標の構築が必要である。過年度の検討<sup>7)</sup>では、地形指標として、出水前の砂州波高と低水路満杯相当水深の関係(比高水深比)に着目し、比高水深比の増加に伴い河岸侵食発生率及び河岸侵食幅が増加する傾向を確認した(図-2, 3, 4)。また、交互砂州領域では比高水深比が1.0以上になると河岸侵食発生率が急増する傾向等も確認しており、地形指標の有効性を確認している。

今年度は、出水前の河道形状より得られる外力指標に着目し、河岸侵食リスクとの関係性より指標としての有効性について検討した。

## 2. 対象河川の特徴・対象洪水

対象河川は、近年に河岸侵食を有する河川を対象に、表-1に示す石狩川水系忠別川、同水系辺別川、常呂川水系常呂川、十勝川水系音更川とした。

各河川の砂州領域は、忠別川が交互砂州～複列砂州、辺別川が主に交互砂州、常呂川が砂州非発生～交互砂州、音更川が主に複列砂州である(表-1)。

近年に河岸侵食が生じた洪水は、表-1、図-5のように、4河川9洪水であり、常呂川、音更川で継続時間が長い状況であった。音更川では平成28年に2度(前期:8月18日～24日、後期:8月31日)の出水が発生しているが、前期出水後に砂州形状が大きく変化した後、後期出水が発生したこと、前期出水で多くの箇所侵食が発生したことを踏まえ、出水前の初期河道が及ぼす影響として前期出水を検討対象とした。また、忠別川では平成28年及び

平成30年に河岸侵食を伴う出水が生じており、常呂川では平成28年8月及び同年10月に出水が生じているが、どちらの出水によって河岸侵食が発生したか判断出来なかったため、本検討では両河川とも2つの出水により河岸侵食が発生したものとして評価することとした。

## 3. 検討方法

### (1) 河岸侵食の把握方法

河岸侵食実績は、出水前後の空中写真及び横断測量から河岸の後退距離を計測し、何れか大きな方を該当測線の侵食幅とした。なお、横断測量では出水前の河岸からの後退距離を200mピッチ測線毎で計測し、空中写真では20mピッチ測線毎に計測した。これらを基に、全測線数に占める侵食発生測線数を侵食発生率としてまとめた(左右岸別カウント)。

### (2) 着目した水理諸量

洪水の影響としては、河岸近傍の継続時間や累積的な影響が想定されるため(図-6)、摩擦速度 $u_*$ 、無次元掃流力 $\tau_*$ の観点から、 $u_*$ を時間積分した積算 $u_{*t}$ 、 $\tau_*$ を時間積分した積算 $\tau_{*t}$ 、継続時間 $u_{*c}$ 、継続時間 $\tau_{*c}$ に着目した。これらについては、出水前河道の準二次元不等流計算で算定した河道HQ式を用いて、洪水ハイドロ時間における水深や水面形を算定しながら評価した。

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot I_e} \quad \tau_* = \frac{u_*^2}{s \cdot g \cdot d}$$

(単位式)  
 $d \geq 0.303 \text{ cm}$ :  $\alpha_{*k} = 80.9d$   
 $0.118 \leq d < 0.303 \text{ cm}$ :  $= 134.6d^{0.78}$   
 $0.0565 \leq d < 0.118 \text{ cm}$ :  $= 55.6d$   
 $0.0065 \leq d < 0.0565 \text{ cm}$ :  $= 8.41d^{0.78}$   
 $d \leq 0.0065 \text{ cm}$ :  $= 226d$

$u_*$ : 摩擦速度  
 $\tau_*$ : 無次元掃流力  
 $\alpha$ : 重力加速度  
 $h$ : 水深  
 $I_e$ : エネルギー勾配  
 $s$ : 砂の水中比重  
 $d$ : 代表粒径

表-1 対象河川

河川	砂州領域*	延長	勾配	対象洪水
忠別川	【交互～複列】 ・非発生 1% ・単列 65% ・複列 34%	約 30km	1/200 ～ 1/80	H28+H30
辺別川	【主に交互】 ・非発生 15% ・単列 85% ・複列 0%	約 9km	1/160 ～ 1/150	H28
常呂川	【非発生～交互】 ・非発生 53% ・単列 45% ・複列 2%	約 87km	1/2000 ～ 1/160	H18 H28
音更川	【主に複列】 ・非発生 0% ・単列 31% ・複列 69%	約 30km	1/200 ～ 1/130	H23 H28 前期

※出水前河道の中規模河床形態の領域区分<sup>6)</sup>による(該当断面の割合)。水深は河岸満杯相当である。常呂川は平成18年出水前、音更川は平成23年出水前河道である。

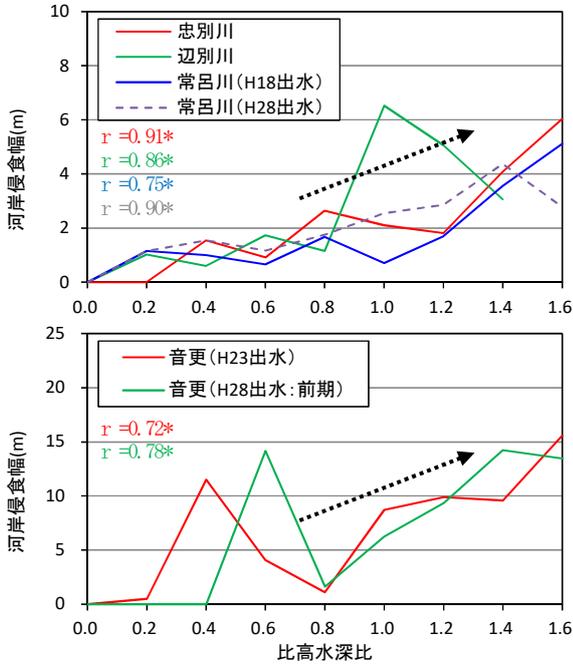


図-4 地形指標と河岸侵食幅の関係<sup>7)</sup>

比高水深比のレンジ毎の平均値を示す。比高水深比のレンジ0.2は、 $0.2 \leq \text{比高水深比} < 0.4$ を示す。相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、\*は統計的に有意な相関を示す( $p < 0.05$ )。

水理諸量算定にあたっては、河岸近傍(河岸から川幅の10%範囲)の平均河床高を評価高とした水深、上下流断面の水面勾配の平均値をエネルギー勾配として算出した。積算値、継続時間の算定にあたっては、ハイドロ時刻毎に、侵食への影響が大きいと考えられる限界値( $u_{lc}$ :河床材料に応じた岩垣式の値、 $\tau_{*c}$ :0.05)以上を対象とした。

MANTANI Taiga, IMAMURA Hitoki, SASAKI Hirohumi

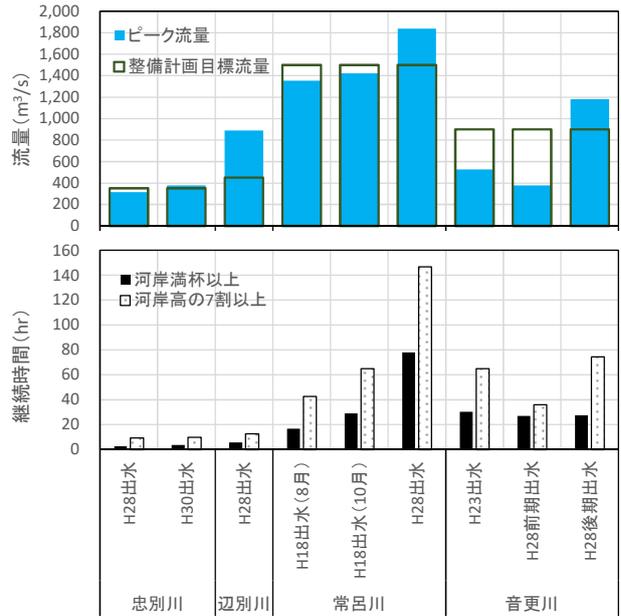


図-5 各洪水のピーク流量(上)、継続時間(下)

観測所は、忠別川は曉橋、辺別川は18号、音更川は音更、常呂川は上川沿である。継続時間は出水前河道の河道HQ式による全断面の平均値である。

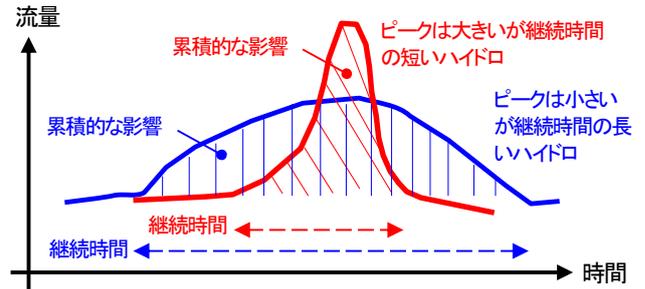


図-6 ハイドロの継続時間、累積的な積算値のイメージ

#### 4. 検討結果及び考察

着目した4つの水理諸量と河岸侵食の発生率、侵食幅との関係をまとめたのが図-7、図-8である。

発生率については、図-7のように、積算 $u_{lc}$ 、積算 $\tau_{*c}$ において全体に右肩上がりの傾向となっており、継続時間については積算値より右肩上がりの傾向は弱くなっている。侵食幅については、図-8のように、積算 $u_{lc}$ 、積算 $\tau_{*c}$ では若干右肩上がりの傾向は見られるが、発生率ほど明瞭な傾向となっていない。

これらの相関関係についてまとめたのが表-2である。表より、外力指標については、積算 $u_{lc}$ が発生率との正の相関関係を有している河川が多い状況にある。侵食幅との関係については、発生率に比べ、正の相関関係を有する河川が減少している。このように、外力指標について

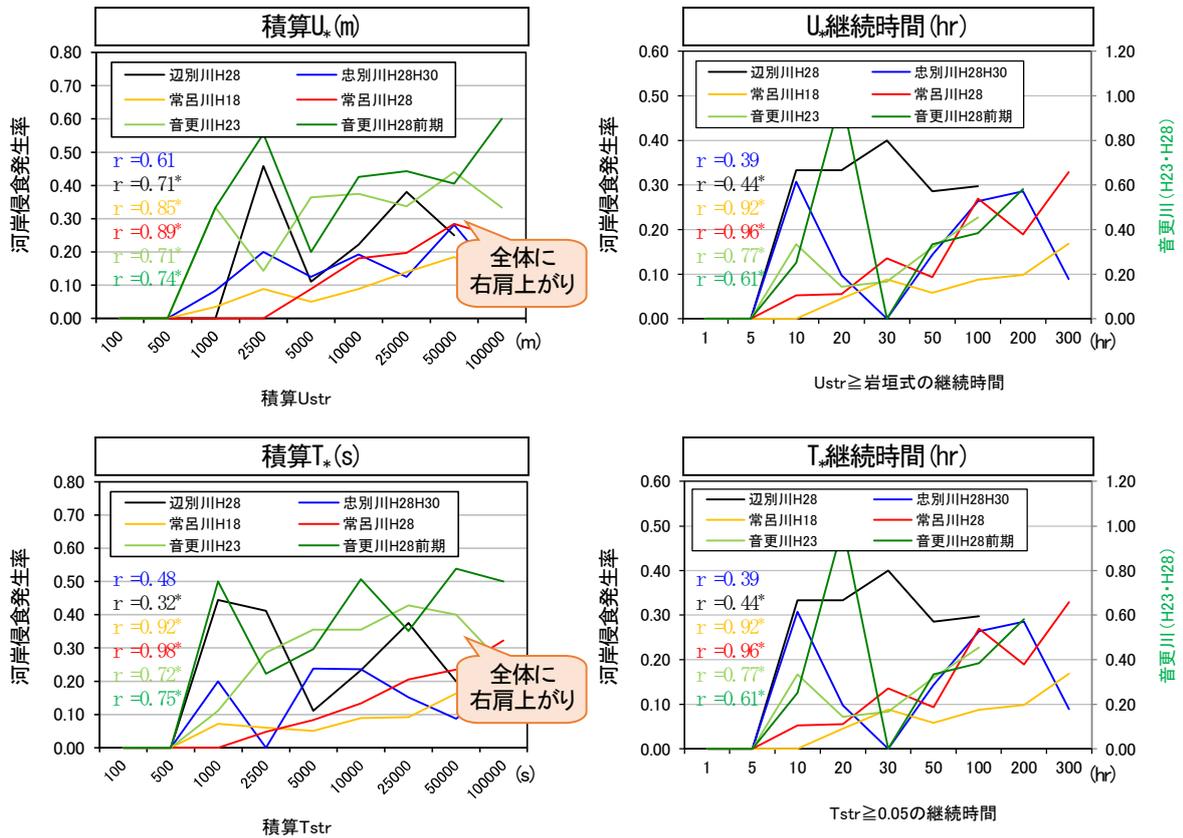


図-7 外力指標と河岸侵食発生率の関係

各水理諸量のレンジ毎の平均値を示す。相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、\*は統計的に有意な相関を示す(p<0.05)。

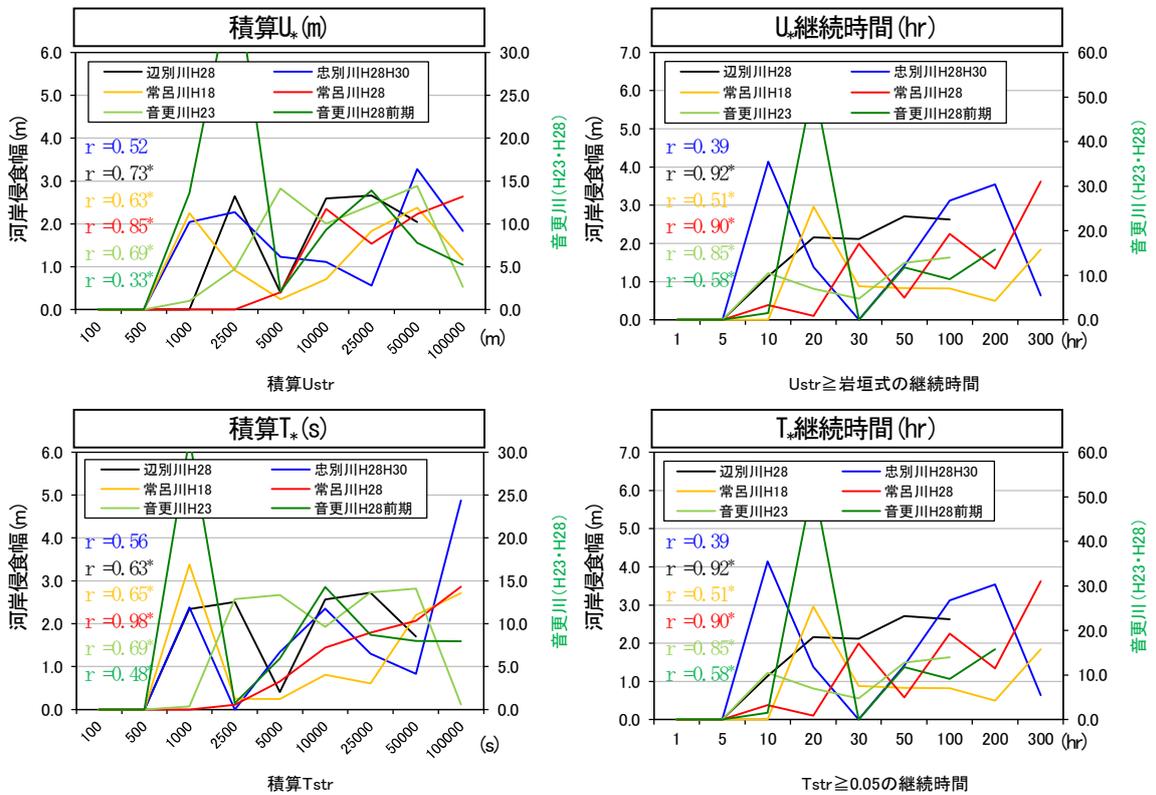


図-8 外力指標と河岸侵食幅の関係

各水理諸量のレンジ毎の平均値を示す。相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、\*は統計的に有意な相関を示す(p<0.05)。

表-2 各水理諸量の相関係数比較

河川・出水	外力指標							
	積算 $U_*$		積算 $\tau_*$		$U_*$ 継続時間 ( $U_* \geq U_{*c}$ )		$\tau_*$ 継続時間 ( $\tau_* \geq \tau_{*c}$ )	
	侵食発生率	侵食幅	侵食発生率	侵食幅	侵食発生率	侵食幅	侵食発生率	侵食幅
忠別川H28・H30出水	0.61	0.52	0.48	0.56	0.39	0.39	0.39	0.39
辺別川H28出水	<b>0.71 *</b>	<b>0.73 *</b>	0.32	0.63	0.44	<b>0.92 *</b>	0.44	<b>0.92 *</b>
常呂川H18出水	<b>0.85 *</b>	0.63	<b>0.92 *</b>	0.65	<b>0.92 *</b>	0.51	<b>0.92 *</b>	0.51
常呂川H28出水	<b>0.89 *</b>	<b>0.85 *</b>	<b>0.98 *</b>	<b>0.98 *</b>	<b>0.96 *</b>	<b>0.90 *</b>	<b>0.96 *</b>	<b>0.90 *</b>
音更川H23出水	<b>0.71 *</b>	<b>0.69 *</b>	<b>0.72 *</b>	<b>0.69 *</b>	<b>0.77 *</b>	<b>0.85 *</b>	<b>0.77 *</b>	<b>0.85 *</b>
音更川H28前期出水	<b>0.74 *</b>	0.33	<b>0.75 *</b>	0.48	0.61	0.58	0.61	0.58

※相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、\*は統計的に有意な相関を示す(p<0.05)。

※外力指標については、出水前河道においてほとんど水理諸量が発生していない箇所でも侵食が発生等、洪水中に上流断面の影響で巻き込まれた等の影響も想定される箇所もあった。これらは、今回の簡便的な方法では対象とできない領域と考え、洪水中の河岸近傍水深1.0m未満、水理諸量の棄却値以下を除外して検討した。棄却値は各水理諸量の外れ値となっている付近の値とし(積算 $U_*$ が1000m、積算 $\tau_*$ が1000、継続時間は10hr)、それ以下を除外した。

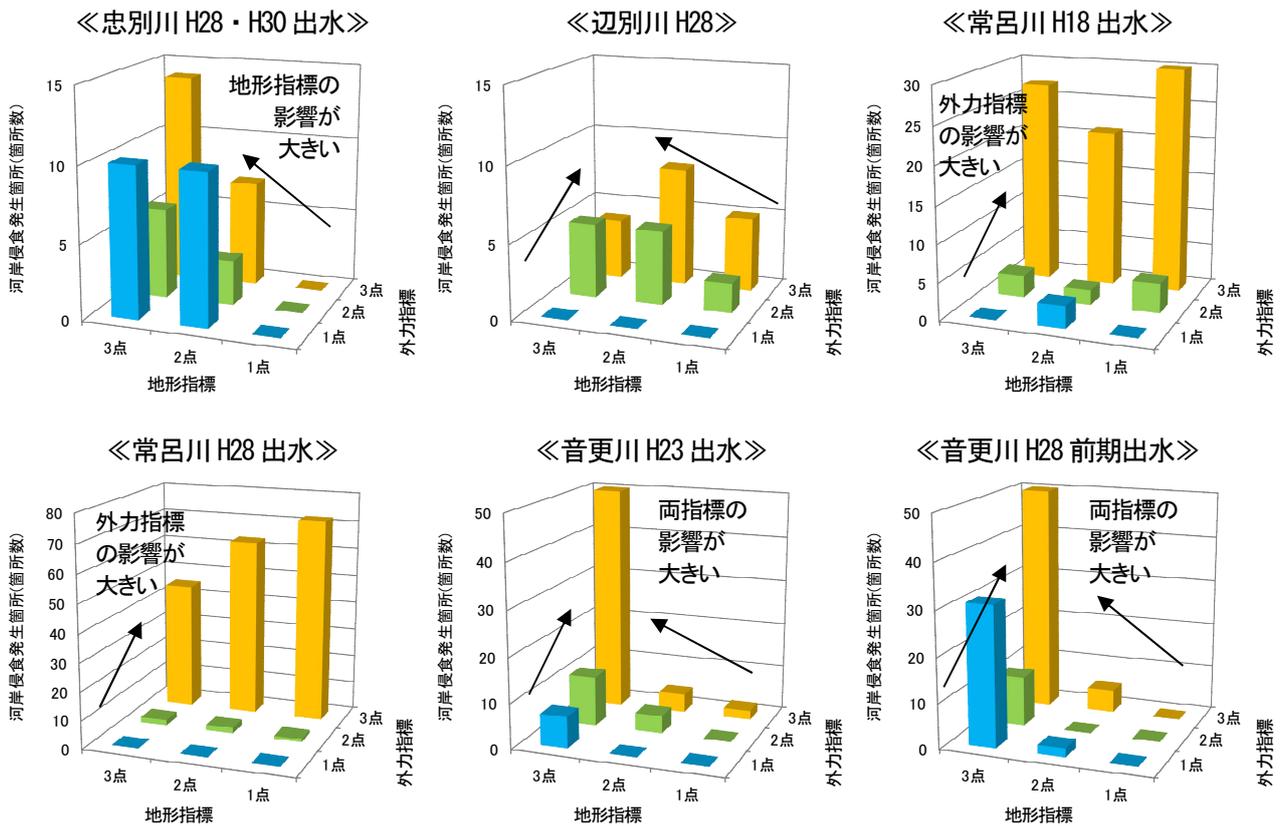


図-9 地形指標・外力指標のランクと河岸侵食発生箇所数の関係

※地形指標の危険度 (1点: 比高水深比 $\leq 0.5$ , 2点:  $0.5 < \text{比高水深比} < 1.0$ , 3点:  $1.0 \leq \text{比高水深比}$ ), 外力指標の危険度 (1点: 積算 $U_* \leq 1000$ , 2点:  $1000 < \text{積算}U_* < 10000$ , 3点:  $10000 \leq \text{積算}U_*$ ) と仮にランク区分を与えた。

※データは表-2と同様に、水深1.0m未満かつ積算 $U_*$ の棄却値以下を除外した。

は、積算 $u_s$ が最も感受性が良いと考えられる。

なお、積算 $u_s$ について、侵食幅の相関関係が発生率ほど高くない原因としては、水理諸量の把握は出水前地形の河道HQ式によるものであり、洪水時の砂州の変化を考慮できないこと等も影響していると思われる。

## 5. 今後の展開に向けて

### (1) 地形指標と外力指標の影響度

本検討では、河岸侵食リスクのスクリーニングにあたり、既往検討である砂州の発達を表現する地形指標に加え、トリガーとなる外力指標に着目し、侵食実績との関係性より、積算 $u_s$ の適合性が高く、指標として適していると考えた。しかしながら、実河川への適用にあたっては、各指標の重みづけの必要性等もあり、困惑する原因ともなる。

ここでは、仮に河岸侵食リスクについて、地形指標の危険度（1点：比高水深比 $\leq 0.5$ ，2点： $0.5 < \text{比高水深比} < 1.0$ ，3点： $1.0 \leq \text{比高水深比}$ ），外力指標の危険度（1点：積算 $u_s \leq 1000$ ，2点： $1000 < \text{積算}u_s < 10000$ ，3点： $10000 \leq \text{積算}u_s$ ）として、ランク区分を与えて、実績の侵食発生箇所数との関係をまとめた（図-9）。

図-9からは、地形指標の影響の大きな忠別川、外力指標の影響の大きな常呂川、両指標の影響の大きな音更川というような特徴があらわれている。このように、両指標とも同数のランク区分を与えることにより、地形の影響の大きな河川やイベント、外力の影響の大きな河川やイベントに対しても対応できると考えられる。なお、辺別川については、平成22年出水、平成23年出水による被災も発生し、その直後に河道が整備され、出水前の河道データ（横断測量平成23年、砂州高の平成25年LPデータ）は砂州が未発達で地形指標が小さな状態であったと考えられる。

今後は、各指標の重みづけの考え方等についても検討する必要がある。

### (2) 実河川への評価方法の実装に向けて

河岸侵食リスクについては、侵食発生時に、堤防侵食まで到達する危険性を見逃さないことが重要と考えられる。このため、地形指標、外力指標に加え、低水護岸の有無や安定性といった河岸防護機能の指標、堤防法尻まで侵食が到達する容易さ（高水敷幅）等の指標もあわせて検討していく必要がある。

加えて、侵食破堤後の背後地の浸水リスク等を考慮することで、対策必要箇所の優先度を定めることが可能となることが期待されるため、今後はリスク評価手法についても検討が必要である。

## 5. おわりに

本研究は、各開発建設部の河床低下対策について取りまとめ、研究を行い、より効率的、効果的な河道管理を実施するために、「北海道河道技術研究会」を立ち上げ議論した結果をとりまとめたものである。

研究会の成果としては、これまで、「河道の変化要因に着目したこれからの河道管理の実践読本（案）」<sup>9</sup>等、指針として取りまとめた。

引き続き、河岸侵食リスクの検討を進めて、河岸侵食対策が必要となる箇所の抽出や発生要因とあわせて、対策工のアイディアについて議論し、指針を充実化していく予定である。

**謝辞：**本研究は北海道開発局が主催する河道技術研究会の成果の一部です。研究会でご意見を頂いた寒地土木研究所、各開発建設部の方々に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 渡邊康玄，島絵里子，山口里美：浸食性河岸を有する水路を用いた中規模河床波の形成実験，土木学会論文集 B1，Vol.71，No.4，pp. L1009-1014，2015.
- 2) 井上卓也，矢部浩規：河床地形の二極化が河岸侵食に及ぼす影響，寒地土木研究所月報，No.802，pp.2-8，2020.
- 3) 川村里美，久加朋子，岡部和憲：大規模な側岸侵食と低水護岸背後洗掘の発生プロセス，音更川における被災の要因分析と急流河川における今後の対策に向けて，第64回北海道開発技術研究発表会，2021.
- 4) 千曲川堤防調査委員会：千曲川堤防調査委員会報告書，2020.
- 5) 小田島大祐，桑村貴志，永多朋紀：音更川における出水時の堤防一部流出の原因分析について，第55回北海道開発技術研究発表会，2012.
- 6) 天野直哉，米元光明，石井克英：辺別川における平成23年9月出水での被災について，第55回北海道開発技術研究発表会，2012.
- 7) 傳甫潤也，井上卓也，橋本慎一，千葉学，戸村翔，川上北斗，佐々木博文：河道の二極化の形状指標と河岸侵食リスクの関係，土木学会論文集B1(水工学) Vol.77，No.2，L373-L378，2021.
- 8) 黒木幹男，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96，1984.
- 9) 北海道開発局・寒地土木研究所：河道の変化要因に着目したこれからの河道管理の実践読本（案），2014.

# 土砂移動トレーサを用いた 新たな土砂動態モニタリング技術の開発

水垣 滋<sup>1</sup>・村上 泰啓<sup>2</sup>・巖倉 啓子<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム  
(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

<sup>2</sup>北海道開発局 札幌開発建設部 河川計画課 (〒060-8506 北海道札幌市中央区北2条西19丁目)

<sup>3</sup>北海道開発局 事業振興部 都市住宅課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

流砂系の総合土砂管理計画の策定に際し、流砂系全体で俯瞰できる土砂動態マップは最も基本的かつ重要な情報である。一方、年々変動する土砂動態を流砂系全体で把握するためには、複数の地点で流砂観測を継続することが必要であるが、必ずしも容易でなく、新たに効率的な土砂動態モニタリング手法が求められている。そこで、岩石由来の放射性同位体を土砂移動トレーサとした浮遊土砂の生産源推定手法を開発し、流域内の地質別浮遊土砂流出量の評価と支流単位での浮遊土砂流出量マップの構築を試みた。

キーワード 放射性同位体、土砂生産源、浮遊土砂流出量マップ

## 1. はじめに

流砂系の総合的な土砂管理において、流域から海域への流出土砂量とその生産源の空間分布は流域土砂動態の最も基本的かつ重要な情報である。とくに、豪雨や地震に伴う崩壊や地すべりといった大規模土砂生産現象は、その後の土砂流出に長期的に影響を及ぼす場合があり、流域から海域へ流出する土砂が山地のどこから供給されたか、すなわち流域内の土砂生産源を定量的に把握することは、土砂生産源対策における重要課題となる。検討対象流域の流出土砂量は、一般に、下流端における流砂水文観測により把握される。しかし流域内の土砂生産源の空間分布を把握するには、支川流域ごとに流砂水文観測を実施する必要があり、労力やコスト面で観測を継続することが困難な場合が少なくない。そのため、流域内の土砂生産源を効率的に把握できる新たなモニタリング手法が求められている。

一方、土砂生産源の推定は古くから海岸砂や河床材料を構成する砂礫を対象に行われてきた。わが国では、一般に岩種の肉眼判定に頼ってきたため、大規模出水時の浮遊土砂の生産源評価事例は少ない。近年、欧米では、流域から海域に流出する微細土砂の地球化学特性を土砂移動トレーサとした、定量的な生産源推定が広く行われている<sup>2)</sup>。この手法を流砂水文観測と組み合わせることで、土砂生産源を定量的に把握できる可能性がある。そこで寒地土木研究所では、岩石由来の放射性同位体を土砂移動トレーサとした土砂生産源推定手法（以下、トレーサ手法）の開発に取り組んできた<sup>3)</sup>。本研究の目的は、流域内の浮遊土砂生産源の空間分布を定量的に把握する

ために、トレーサ手法を活用した流砂系の土砂動態モニタリング手法を開発することである。

## 2. 方法

### (1) 研究対象流域

研究対象流域は、北海道南部の沙流川流域とした（図-1）。流域の地質は多様な岩相によって構成され、Mizugakiら<sup>3)</sup>によると、浮遊土砂の生産源は岩石由来の放射性同位体特性によって6つの地質地域（A, B, C-1, C-2, C-3, D）に区分される<sup>3)</sup>（図-1）。上流域は日高山脈を構成する深成岩（D）、付加コンプレックスの堆積岩・メランジ基質（C-3）や玄武岩ブロック（C-1）及び玄武岩岩体（C-2）で構成される。中流域は白亜紀の堆

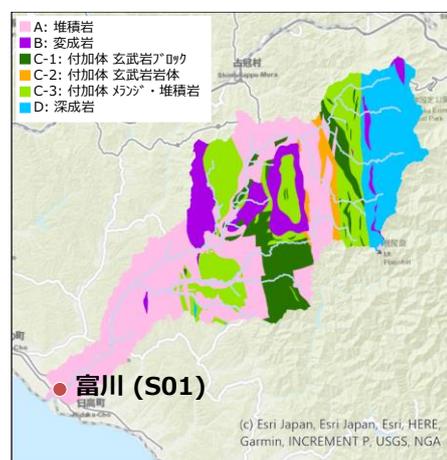


図-1 対象流域の地質別生産源区分と調査地点

積岩 (A) , 蛇紋岩や片岩で構成される変成岩 (B) , 付加体のC-1やC-3で構成される。下流域はほとんどが第三紀の堆積岩 (A) である。

沙流川流域の既往最大流量は2003年 (平成15年) 8月台風10号に伴う豪雨時に記録され、流域内に数多くの斜面崩壊が発生し、大量の土砂・流木が流出した。その多くが二風谷ダムで捕捉されたが、斜面崩壊等で発生した土砂はいまだ山地流域内に貯留されている<sup>4)</sup>。近年では、2016年 (平成28年) 8月に4つの台風に伴う集中豪雨により、上流域で斜面崩壊や土石流、河岸侵食、土砂・洪水はん濫が発生し、農地や道路・橋梁が被災した。沙流川流域における土砂生産量・流出量について、いくつかの調査・研究事例がみられるものの、実態把握は必ずしも十分でない。

## (2) 調査・分析・解析方法

沙流川流域の浮遊土砂流出量を把握するため、流砂水文観測点を富川水位観測所に設定した (図-1) 。2011年～2020年にかけて、国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部との合同水質調査において融雪期と降雨期の出水時に表面採水を行い、SS濃度を分析した。また浮遊土砂は、表面採水試料や河川内に一定期間設置した浮遊土砂サンプラーで捕捉された濁水試料を全乾燥させて抽出し、後述する放射性同位体分析に供した。また、高濃度濁度



図-2 沙流川流域の年 SS 流出量 (4~11 月) の経年変化

計により濁度の連続観測を行い、濁度とSS濃度との関係式を構築することで、SS濃度の連続データを得た<sup>5)</sup>。年間の浮遊土砂流出量は、河川の凍結・結氷期間を除外するため、4月1日～11月30日までを対象として解析した。

流域から流出する浮遊土砂の生産源を把握するために、抽出した浮遊土砂の放射性同位体 (<sup>210</sup>Pb, <sup>40</sup>K, <sup>228</sup>Ac) の濃度をガンマ線スペクトロメトリーにより定量分析した<sup>3)</sup>。Mizugakiら<sup>3)</sup>は、これらの放射性同位体を土砂移動トレーサとし、流域の6つの地域 (以下、地質別生産源) と浮遊土砂のトレーサ濃度特性におけるマハラノビス距離を計算し、浮遊土砂に対する各地質別生産源の寄与率を評価した<sup>3,6)</sup>。マハラノビス距離は以下の式 (1) で求められる<sup>6)</sup>。

$$d_s^2(c_1, c_2, \dots, c_i) = (c_1 - C_{s1} \quad c_2 - C_{s2} \quad \dots \quad c_i - C_{si}) \begin{bmatrix} s_{11}^2 & \dots & s_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{s1} & \dots & s_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} c_1 - C_{s1} \\ c_2 - C_{s2} \\ \vdots \\ c_i - C_{si} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに $d_s$ は生産源 $s$ と流出土砂とのマハラノビス距離、 $c_i$ は流出土砂のトレーサ濃度、 $C_{si}$ は生産源 $s$ におけるトレーサ $i$ の平均濃度、行列式は各トレーサ間の共分散逆行列である。各生産源の流出土砂に対する寄与率は、マハラノビス距離の逆数に比例するもの仮定し、以下の式で算出した<sup>3,6)</sup>。

$$P_s = \frac{1/d_s}{\sum_{s=1}^n 1/d_s}, \quad P_s \geq 0, \quad \sum_{s=1}^n P_s = 1 \quad (2)$$

ここに $P_s$ は流出土砂に対する生産源 $s$ からの寄与率、 $n$

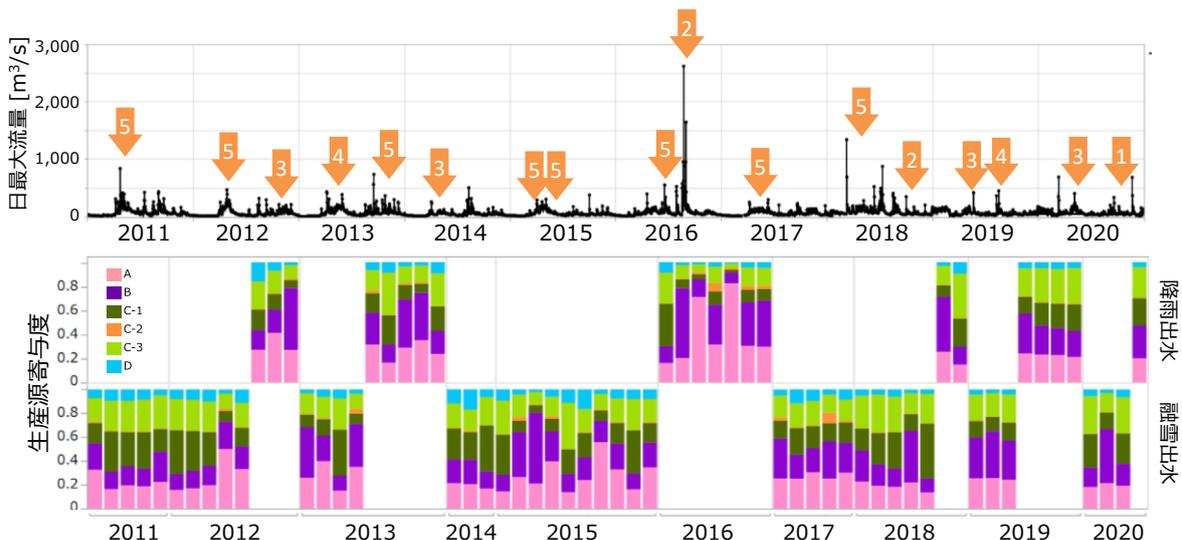


図-3 出水時の採水調査時期・サンプル数 (上) と浮遊土砂の生産源寄与率 (下)

は生産源区分数である。

### (3) 地質別生産源からの浮遊土砂流出量

放射性同位体トレーサによる生産源寄与率から、年間の地質別生産源からの浮遊土砂流出量を評価するため、地質別生産源 $s$ の浮遊土砂濃度 ( $C_{ss}$ ) と流量 ( $Q$ ) との関係式を構築した。一般に、浮遊土砂濃度は流量のべき乗式で近似されるが、必ずしも決定係数は高くない。そこで、水垣ら<sup>9)</sup>が提案した流量と浮遊土砂濃度との関係式 (以下、C-Qモデル) を採用し、式 (3) の3つの変量 ( $C_{max}$ ,  $K_m$ ,  $Lmt$ ) の最適解を数値解析的に求めた。

$$\ln(C_{ss}) = \frac{C_{max}(Q + Lmt)}{K_m + Q + Lmt} \quad (3)$$

ここに、 $C_{ss}$ はSS濃度、 $C_{max}$ はSS濃度の上限値に関する係数、 $K_m$ はSS濃度の増加率に関する係数、 $Lmt$ はSS濃度に影響する流量の下限値に関する係数である<sup>9)</sup>。生産源 $s$ からの浮遊土砂流出量 ( $Q_{ss}$ ) を浮遊土砂流出量に生産源 $s$ の寄与率 ( $P_s$ ) を乗じたものとし、 $C_{ss}$ と $P_s$ の積で得られる地質別生産源 $s$ の浮遊土砂濃度 ( $C_{ss_s}$ ) と流量との関係をC-Qモデルにあてはめて、数値解析により各係数を決定した。構築した各地質別生産源のC-Qモデルにより、地質別生産源からの年浮遊土砂流出量 ( $t/yr$ ) 及び比浮遊土砂流出量 ( $t/km^2/yr$ ) を算出した。

### (4) 支流域単位の浮遊土砂流出量の推定

流域内の浮遊土砂流出量の空間分布を評価するため、支流域単位の浮遊土砂流出量の評価を検討した。支流域ごとに地質別生産源 $s$ の面積をGISにより計測し、前述の各生産源 $s$ からの比浮遊土砂流出量を乗じて合計することで、支流域単位の浮遊土砂流出量を算出した。これをGISで空間分布として表現することで、浮遊土砂流出量マップを構築した。

## 3. 結果と考察

### (1) 2011~2020年の浮遊土砂流出量の変化

沙流川流域の浮遊土砂流出量を評価するため、濁度計観測によるSS濃度の連続データから年SS流出量を評価し、2011年~2020年の10年間における経年変化を調べ、年最大流量とともに図-2に示した。年浮遊土砂流出量は概ね年最大流量の変動に対応しており、この10年間の浮遊土砂流出量の平均は59万t、最大は2016年8月豪雨による大規模土砂生産が生じた2016年の271万tであった。次に浮遊土砂流出量が多い2011年 (81万t) と2018年 (73万t) は、2016年の27%~30%程度であった。その他の年は38万t以下であり、最小は2015年と2020年の約13万tであっ

た。

### (2) 浮遊土砂に対する地質別生産源の寄与率

浮遊土砂の生産源を定量的に把握するため、融雪期及び降雨期のさまざまな出水時に採取した浮遊土砂について、放射性同位体分析を行い、6つの生産源からの寄与率を評価した (図-3)。寄与率の構成割合は採取した浮遊土砂によって様々であるが、主要な生産源はA, B, C-1及びC-3で構成されていることがわかった。

2016年8月豪雨に伴う出水期間は、流量に対する浮遊土砂濃度の違いによって、台風10号の前 (主に台風7号、11号及び9号; 以下、BT10) と後 (以下、AT10) の2時期に区分できる (図-4)。表面採水によって採取した浮遊土砂の生産源寄与率は、7月末の低気圧による出水時

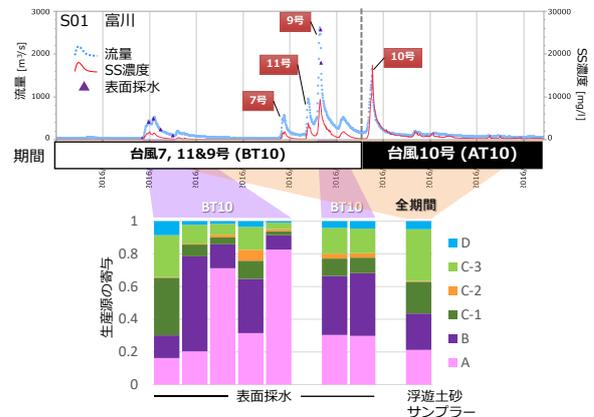


図-4 2016年8月豪雨時の浮遊土砂生産源の寄与率

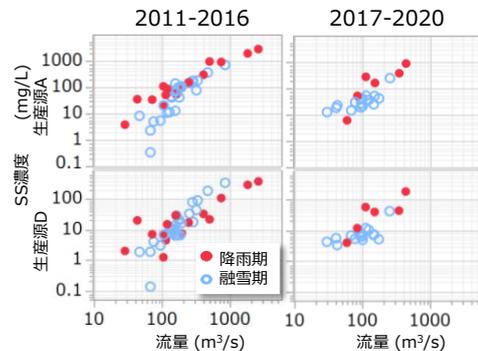


図-5 地質別 SS 濃度と流量との関係例

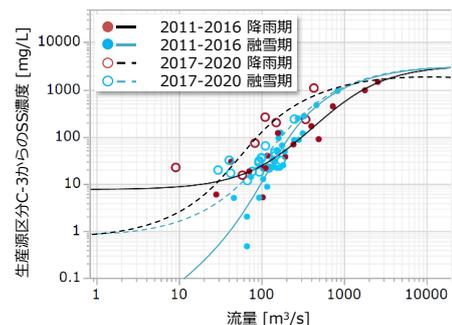


図-6 地質別 SS 濃度への C-Q モデルのあてはめ事例

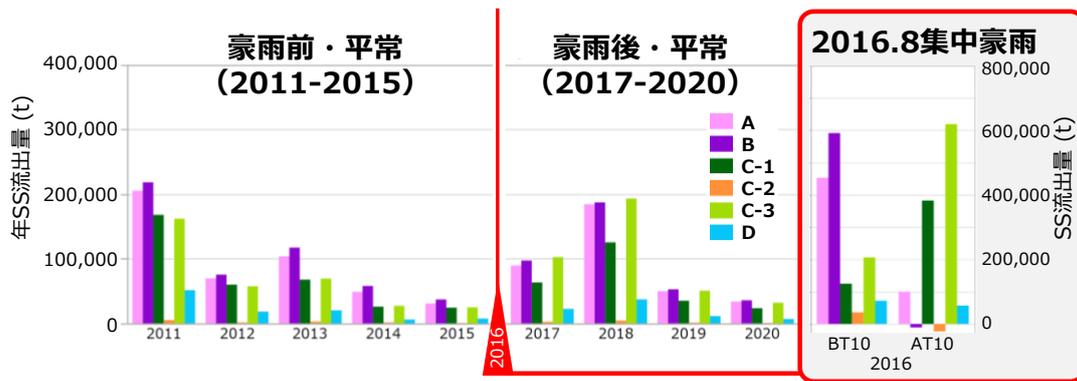


図-7 地質別の年 SS 流出量の変化

左：地質別C-Qモデルによる年SS流出量（4月～11月），右：2016年8月豪雨時の2時期の地質別SS流出量

はAやBが高く、台風9号による出水時はAとBは同等程度に高い。一方、7月～9月にかけて河川内に設置した浮遊土砂サンプラーで捕捉された浮遊土砂の生産源寄与率は、C-3で最も高かった。台風10号による豪雨は沙流川上流域で斜面崩壊や河岸侵食などによる相当量の土砂生産が確認されており<sup>7)</sup>、上流域に分布する地質地域からの浮遊土砂の流出が示唆される。

### (3) 地質別生産源からの年浮遊土砂流出量の評価

地質別生産源からの浮遊土砂流出量を評価するため、地質別生産源ごとに流量とSS濃度との関係式を構築した。流量とSS濃度との関係はばらつきが大きく、とくに2016年8月豪雨の前後で土砂流出特性が大きく変化した可能性があるため、2016年の前後で区分する必要があること、また融雪期と降雨期で異なる傾向があることが確認された（図-5）。したがってC-Qモデルを適用するにあたり、2011年～2020年までをひとつの関係式で近似することが困難なため、時期（2016年以前と2017年以降）と季節（5月までの融雪期と6月以降の降雨期）に区分してC-Qモデルを構築した（図-6）。なお、2016年8月豪雨時の地質別浮遊土砂流出量は、採水調査を実施したBT10では評価可能であったが、AT10では採水調査を実施していないためC-Qモデルを構築できなかった。そこで、AT10のBT10とAT10の全期間の地質別浮遊土砂量（濁度計観測による浮遊土砂流出量に浮遊土砂サンプラーによる浮遊土砂試料の生産源寄与率を乗じて算出）からBT10のそれを差し引くことで、AT10の地質別浮遊土砂流出量を推定した。

構築したC-Qモデルを用いて年浮遊土砂流出量を評価した結果を、2016年8月豪雨時の時期別の浮遊土砂流出量と合わせて図-7に示した。2016年8月豪雨時の地質別浮遊土砂流出量は、BT10とAT10で明らかに異なる傾向を示しており、BT10ではB（変成岩）やA（堆積岩）からの流出量が他の生産源よりも多く、一方AT10ではC-3（付加体基質・堆積岩）とC-1（付加体玄武岩ブロック）からの流出量が多く、AやBの流出量はBT10に比べてかなり少なかった。2011～2015年は、全体的な流出量の多

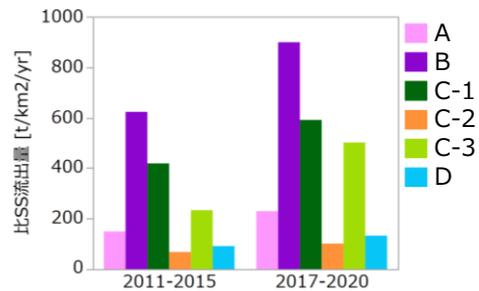


図-8 2016年前後の地質別比SS流出量

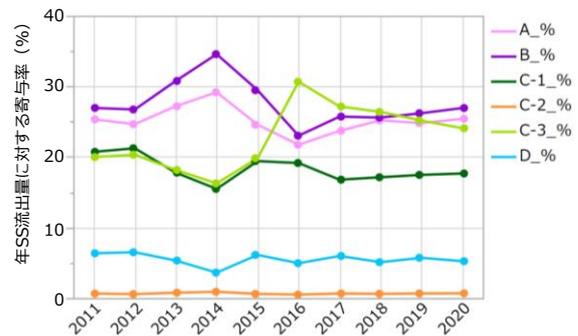


図-9 SS 流出量に対する地質別生産源の寄与率の経年変化

寡はあるものの、AとBが同等程度の流出量で最も寄与が大きく、次いでC-1とC-3がAとBに比べてやや少ないが、寄与率が高くなっている。一方2017年～2020年は、C-3の流出量がAやBと同程度となっており、それ以前に比べて寄与が高くなっている。地質別の比浮遊土砂流出量（単位面積当たりの浮遊土砂流出量）を2016年の前後、すなわち2011年～2015年と2017年～2020年で比較すると、地質による違いは傾向が類似しているが、2017年以降でいずれの生産源でも値が増大しており、とくにC-3の値が高くなっていた（図-8）。これを相対的な生産源の寄与率の経年変化で見ると、2016年には8月の豪雨によりC-3の寄与率が急増してBやAを上回り、2017年から2020年にかけて徐々に減少する傾向が認められた（図-9）。これらのことから、2016年8月豪雨により流域全体の土砂流出量が増加し、とくに2016年台風10号に伴う豪雨により上流域のC-3で生産された土砂が継続的に流出していることが示された。一方、2011年～2015年はBと

A及びC-1とC-3にそれぞれ同じ寄与率の変動パターンが認められた(図-9)。このことから、中小規模出水時の浮遊土砂生産には岩石の風化特性が反映したと推察される<sup>8)</sup>。

#### (4) 浮遊土砂流出量マップの構築

流域内の浮遊土砂流出量の空間分布を表現するため、支流の地質構成割合と地質別の比浮遊土砂流出量から、支流単位での浮遊土砂流出量を算出し、GISを用いて浮遊土砂流出量マップを作成した(図-10)。この流域

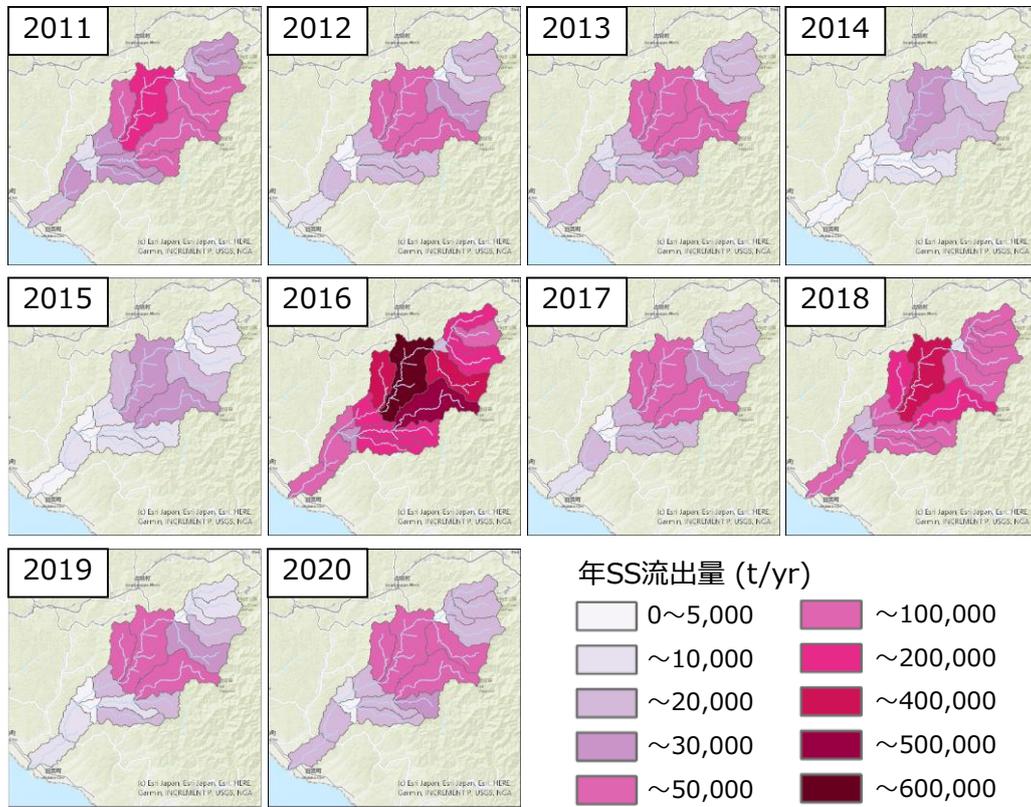


図-10 沙流川流域の年浮遊土砂流出量マップ

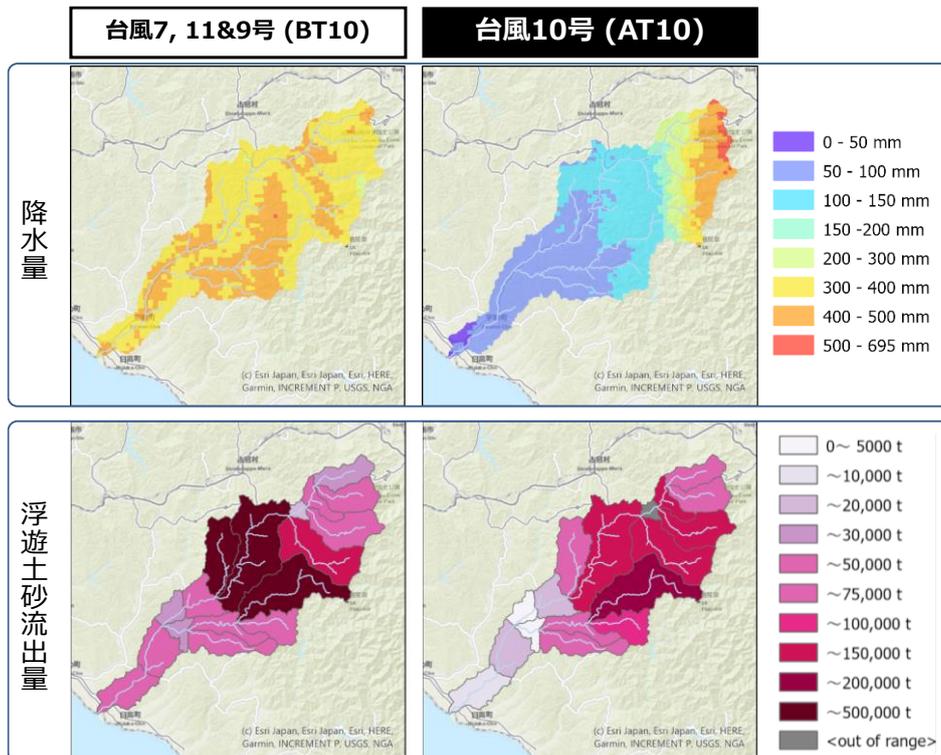


図-11 2016年8月豪雨に伴う沙流川流域における降水量の分布とSS流出量マップ(降水量による加重処理済み)

単位の浮遊土砂流出量は、区分した支流域の面積に依存することに留意が必要であるが、概ね、比浮遊土砂流出量が大きい地質（BやC-1, C-3）が分布する中流域で浮遊土砂流出量が多い傾向が認められる。

図-10で示した浮遊土砂流出量マップは、地質別の比浮遊土砂流出量を、該当する地質地域全体に均等に分配したものである。すなわち、同じ生産源区分であれば、上流域から下流域まで同じ量の浮遊土砂が流出すると仮定したものである。解析対象期間のうち2016年を除けば、豪雨による大規模な土砂生産がなく、概ねノンポイントソースと考えられ、信頼性があるものと考えられる。一方、2016年8月の局地的豪雨による大規模土砂生産が生じた場合は注意が必要となる。

2016年8月豪雨時の降水量分布について、1 kmメッシュ全国合成レーダーGPVをもとに調べたところ、台風10号の前（BT10；2016年8月16日17時～28日23時）と台風10号以降（AT10；2016年8月28日23時～9月17日0時）では大きく異なっていた（図-11上）。BT10期間では総雨量300～500 mmが全域に分布していたが、AT10期間では日高山脈の地形性豪雨により総雨量300～500 mmの範囲が沙流川上流域に限定され、中～上流域では100～150 mm、中～下流域では100 mm以下であった。このように、同じ地質別生産源に区分される地域でも、土砂生産に影響を及ぼす降水量が大きく異なる場合は、支流域単位の浮遊土砂流出量に換算する際に、何かしらの補正が必要と考えられる。

そこで、地質別浮遊土砂流出量を1 kmメッシュの降水量に応じて加重して分配することで、支流域単位の浮遊土砂流出量マップを再構築した（図-11下）。その結果、AT10において降水量が比較的少ない下流域では浮遊土砂流出量が下方修正され、一方、降水量の多い上流域では上方修正された。このように、降水量等で補正することで、より実態を反映した浮遊土砂流出マップとして表現できたものと考えられる。ただし、降水量だけでなく、土壌侵食・土砂流出に影響を及ぼす地形、土地利用（植生被覆）や崩壊跡地等の裸地の分布、河川流量等の諸因子をどのように反映させるかについては今後の課題である。

#### 4. まとめ

2011年～2020年の10年間にわたって継続的に濁度計観測や出水時の水質調査といった流砂水文観測が実施されている沙流川流域を対象に、放射性同位体トレーサを用いて地質別の浮遊土砂流出量を評価し、支流域単位の浮遊土砂流出量マップを構築した。土砂移動トレーサを用いた生産源推定において、流域内の生産源の区分方法と有効な複数のトレーサの組み合わせを統計的に探索する

ことが最も重要であり、最初に取り組む必要がある<sup>9</sup>。しかし、検討対象流域において、一旦、複合トレーサと生産源区分の組み合わせの探索に成功すれば、あとは流出土砂のサンプリングとトレーサ分析を行うことで、比較的簡単に各生産源からの寄与度を定量的に評価することができる。

本研究で構築した浮遊土砂流出量マップにより、流域全体の土砂動態を俯瞰することができ、さらに10年間の経年変化を見える化した。とくに2016年8月豪雨による大規模な土砂生産・流出を含めた流域の土砂動態変化を把握することができた。すなわち、浮遊土砂流出の時空間分布を把握できる、新たな流域土砂動態モニタリングツールとして有効であることを示した。今後、さまざまな流砂系における総合土砂管理において活用されることが期待される。

**謝辞：**沙流川流域における出水時のSS濃度及び浮遊土砂試料の多くは北海道開発局室蘭開発建設部治水課・二風谷ダム管理所（当時）・沙流川ダム建設事業所（当時）との継続的な合同調査により得られたものです。また降水量分布について寒地土木研究所水環境保全チームの山田嵩研究員にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 後藤宏二, 内田太郎 (2012) 大規模土砂生産後の流砂系土砂管理のあり方に関する研究. 建設マネジメント技術 2012年7月号, 49-53.
- 2) Collins, A.L., Walling, D.E. and Leeks, G.J.L. (1998): Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 23, p. 31-52.
- 3) Mizugaki, S., Abe, T., Murakami, Y., Maruyama, M. and Kubo, M. (2012) Fingerprinting Suspended Sediment Sources in the Nukabira River, Northern Japan. *International Journal of Erosion Control Engineering* Vol. 5, p. 60-69.
- 4) 村上泰啓, 中津川誠 (2004) 斜面崩壊・土砂生産・流木発生. (編) 土木学会水工学委員会, 平成15年台風10号北海道豪雨災害調査団報告書. 土木学会, 東京, p. 46-56.
- 5) 水垣滋, 捧雅章, 小田島大祐 (2018) 鶴川・沙流川水系における2016年8月豪雨による浮遊土砂流出量. 第61回 (平成29年度) 北海道開発技術研究発表会論文集, 防37(治).
- 6) 水垣滋, 古市剛久 (2022) 複合トレーサによる土砂の生産源推定. 砂防学会誌, Vol. 74 (5), 48-54.
- 7) 秋田寛己, 水垣滋, 村上泰啓 (2020) 豪雨に伴う新規崩壊による流域スケールの土砂生産量推定-沙流川水系パンケヌーシ川流域における平成28年台風10号の事例-. 2020年度砂防学会研究発表会概要集, p. 71-72.
- 8) 水垣滋, 谷瀬敦, 平井康幸 (2015) 岩石の暴露試験による積雪寒冷地域の微細土砂生成速度. 寒地土木研究所月報 750, 2-13.

# 熱海伊豆山地区の土石流災害における対応

岩田 宏治<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中部地方整備局 企画部 情報通信技術課 (〒460-8514愛知県名古屋市中区三の丸二丁目5番1号)

河川・道路の維持管理において、CCTVカメラの映像情報は現地状況を確認するうえで重要な役割を担っている。また、災害対応の初動時は、被災状況の把握や情報共有が重要であり、特に現地映像は有効な情報となっている。

2021年7月に発生した熱海伊豆山地区の土石流災害において、現地映像の収集や関係機関への配信に関する課題と対策、その後の経験を活かした取り組みを報告する。

キーワード 災害対応、映像情報、衛星通信

## 1. はじめに

2021年7月3日10時30分頃、梅雨前線に伴う降雨により、静岡県熱海市伊豆山の逢初川において、土石流が発生した。標高約390mの源頭部で発生した崩壊土砂が海岸までの約2kmを流下し、下流で甚大な被害が発生した。

熱海市は、関東地方整備局と中部地方整備局の管理境に位置し、直轄河川・砂防・海岸・国道がなく、管理用光ケーブルも近隣にない場所での災害であった。



図-1 位置図

中部地方整備局は、TEC-FORCE隊員、リエゾンを派遣し、現地での情報収集や被災状況の調査など地方公共団体の支援を実施した。

## 2. 情報通信設備の運用

### (1) 衛星通信車

TEC-FORCE情報通信班は、直近の沼津河川国道事務所から衛星通信車を前進配備し、4日には逢初川中流域から映像配信を行った。発災当日、翌日も悪天候により

ヘリサット（衛星経由でリアルタイム映像を配信可能なヘリコプタ）の活用ができなかったため、有効な映像情報となった。



図-2 衛星通信車



図-3 衛星通信車映像

### (2) Car-SAT

2020年3月に導入したCar-SATは、移動しながらリアルタイム映像の配信が可能な車両で、中部地方整備局では導入後、初めて実災害で出動した。これまでも運用してきた衛星通信車と比較して、コンパクトな車両に搭載可能であることから機動性が向上し、移動途中の周辺状況を把握可能であることに加え、現地での設営時間が無いことから、到着後直ちに被災地周辺の映像も配信可能となった。

また、Car-SATへの映像入力は、汎用的なHDMI端子であるため、ドローン操作機（プロポ）のHDMI出力を取り込み、上空からのリアルタイム映像も配信を行った。



図-4 ドローン映像リアルタイム配信

### (3) 臨時Webカメラ

熱海では、電力や通信（携帯電話網）の被害は土石流の流下した範囲から僅かな距離までと限定的であったため、携帯電話回線による臨時WEBカメラも活用した。

臨時に設置したWebカメラは、カメラにLANケーブルで電源も供給するPoE-HUBやモバイルルータなどを収容した筐体と、カメラ本体の2点で構成し、携帯電話回線に接続することによりインターネットを経由して遠隔地で映像が視聴可能となる。



図-5 臨時Webカメラ

現地では、監視目的物を理解する土木職の職員、地域に精通した県・市の職員、設備の設置方法などを得意とする電気通信職の職員が連携し、設置場所や設置の協力依頼などそれぞれが役割を果たすことにより、民間ホテルの屋上、アパートの踊り場、私有地の通路などにも設置可能となり、最適な画角が確保された。



図-6 カメラ設置位置

### (4) ドコモによる回線安定化

逢初川中流域や下流域は、携帯電話回線が安定していたが、源頭部は民家も少なく携帯電話回線が不安定であった。更には、ケーブルテレビや電話事業者のインターネット接続もサービスエリア外であった。土石流災害に

より、警察、消防、防衛による捜索活動に加えて、報道なども殺到したことから、街中における携帯電話の需要がひっ迫する状況でもあった。通信を所管する総務省東海総合通信局へ相談し、ドコモの協力を得て回線の安定化が図られた。

カメラに設置したルータの電波を受信し、多くの人が殺到する街中を越えて、離島の初島へ電波を飛ばし、海底ケーブルで本土へ戻すことにより、安定回線を構築いただいた。



図-7 ドコモ回線経路

### (5) ビーチラインの映像

土石流により通行止めとなっていた国道135号の代替路として、熱海ビーチラインが無料開放された。橋梁の下を土石流が通過したビーチラインは、被災地を横断する重要な道路となったため、状況把握が必要であった。新たにWebカメラの設置も検討されたが、先に紹介したCar-SATで走行することにより、道路沿いに設置されたカメラがあることを現地と中部地方整備局で共有した。現地状況を共有することで、迅速な意思決定がなされ、管理者から映像の提供（視聴の許可）を依頼することとなった。

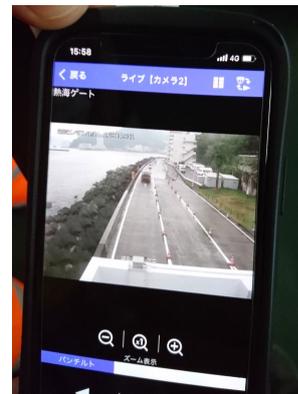


図-8 ビーチラインの監視状況

中部地方整備局からの1ユーザのみ接続し、自営の映像システムで再配信するため、ビーチラインの既存ネットワークに大きな負荷を与えないことを説明し、承諾が

得られたため、映像の取得に至った。

#### (6) 静岡県配信

中部地方整備局と静岡県は、協定を締結し、河川・道路のカメラ映像を共有している。カメラが追加で整備されると、年に1回程度情報交換を行い、相互のネットワーク設定などにより、共有するカメラ映像の追加を行ってきた。

災害により設置した臨時Webカメラは、他のカメラ追加と同様に、ネットワークの設定を行うことで、静岡県でも視聴可能となる。被災地である静岡県では、様々な対応に追われ、ネットワーク設定を遅滞なく行うことは困難な状況であった。中部地方整備局で既設CCTVカメラの映像を置き換えるようネットワークの設定を行うことで、静岡県の対応無く配信することとした。



図-9 静岡県での映像受信確認

#### (7) Ku-SAT配信

熱海市役所とは、無線や光ファイバケーブルによる通信回線が整備されていないため、Ku-SATを設営し映像の意共有を図った。あらかじめ、衛星通信車の設置可否や配置可能位置を調査した自治体支援台帳が整備されていたこともあり、Ku-SATの配置やモニタまでの配線が円滑に行われた。熱海市役所の災害対策本部へは、JRなどの関係機関も詰めていたため、災害対策室内の配置は状況に応じて変更となったものの、機材配置は自治体支援台帳のとおり設置可能であったため、迅速な整備が可能であった。



図-10 Ku-SAT設営



図-11 市長への説明

#### (8) Webex配信

熱海市役所から災害対策本部以外の執務室等で、また

災害対策本部に参集したJRなどの関係機関から会社への映像提供について、要望があった。

映像の画角内では、搜索活動も行われており、関係機関以外には提供することが望ましくない判断されたことから、パスワードを付したYouTube配信を検討したが、パスワードが流出した場合に視聴者を特定できず、流出の歯止めもできないことから、中部地方整備局で使用していたWeb会議ソフトWebexを活用して、映像の共有を行うこととした。カメラ機能を有していないパソコンにおいて、USBにより外付けカメラで自身を撮影する代わりに、現地映像を流し込むイメージで配信した。熱海市役所の災害対策本部において、接続する際に組織名が把握できる名前とするなどの注意事項を添えたWeb会議接続用のURLを配布し、関係機関等と映像の共有を図った。

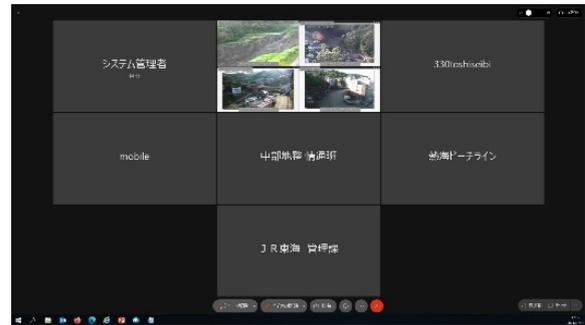


図-12 Webexによる映像配信

#### (9) YouTube配信

搜索活動を行う消防、警察、防衛の各機関は、二次災害へとつながる更なる土石流を警戒しており、周辺住民においても強い関心ごとであった源頭部の映像は、民家や通行人なども画角内には入っていないため、一般の方などへも情報提供することとした。

YouTubeへリアルタイム配信を行い、中部地方整備局のホームページから、リンクを設定することで周知した。特に降雨時には30~40名ほどの視聴があり、関心の高さが伺えた。

## 2. 課題と対応

#### (1) Ca-SATの配信映像確認

中部地方整備局では、Car-SATを初めて実災害で運用したため、様々な課題が生じた。その一つが、映像の切り替え操作を車の後部において行うが、助手席に設置されたモニタが見えないことであった。

助手席のモニタは、走行中に送信映像を確認するためには合理的であるが、撮影映像を確認した後に送信映像の切り替えを行うためには、後部へモニタの追加が必要であった。映像切替器に空きポートがあったため、モニタの追加を行うことにより、円滑な切り替え作業が可能

となった。



図-13 助手席モニタ



図-14 後部モニタ(追加)

## (2) ハンディカメラの活用

Car-SATには、前部カメラ、後部カメラ、ハンディカメラが搭載され、位置情報としてカーナビとの4画面を合成して走行中の映像を配信した。しかしながら、ハンディカメラを助手席の搭乗者が走行中に絶えず持っていることは現実的でないため、活用方法を検討した。



図-15 ハンディカメラが欠如した映像

走行中も活用するため、ヘッドレストに設置してサイドカメラとして活用することとし、現地到着後はカメラ部分のみ取り外してハンディカメラとして使用するなど、活用機会の充実を図った。



図-16 ヘッドレスト設置

## (3) 映像入力の機動性

HDMIケーブルは、規格上10mが最大とされ、距離に応じてケーブルが太くなる。繊細な操縦が必要なドローンプロポに接続したケーブルの荷重は、操作者に負担となる。

延長の制限と荷重の課題を解決するため、無線エクステンダー（HDMI無線映像伝送システム）を導入した。エクステンダーは、屋外使用可能で見通し120mまで送信可能な機種を選定した。車両の侵入や停車ができない場所であっても、映像伝送が可能となり、機動性が格段に向

上した。

## (4) 県との臨時カメラ共有

災害時には、部署を問わず緊急的な対応により、人手不足が生じる。静岡県への映像伝送は、設定作業を回避するため、影響の小さいCCTV映像の配信を停止し、設定を代替して伝送したが、広域な災害においては、既存のCCTVを停止することは避けなければならない。

中部地方整備局では、管内の4県（岐阜、静岡、愛知、三重）の防災通信担当者との定期的な打ち合わせがあり、臨時映像を配信可能な枠を事前設定することを依頼した。アドレス等の詳細な調整を経て、今年度中に整備することとした。整備が完了すれば、中部地方整備局から配信先を設定することで10映像の臨時配信が可能となる見込みで、映像情報の迅速な共有が可能となる。

## 3. 経験を活かした対応

令和4年5月18日に中部地方整備局管内である明治頭首工で漏水が発生し、緊急的に映像の集配信を行った。熱海土石流災害から1年も経っていないとはいえ、4月には情報通信技術課の約半数が異動により入れ替えが生じた。

このため、熱海土石流災害の経験者と未経験者により現地でのカメラ設置に出動し、本局内で収集映像の確認や担当部署への画角確認、関係機関への配信なども経験者を中心に未経験者への伝承を兼ねて対応を行った。

### (1) Ca-SAT

映像入力にエクステンダーを導入することと併せて、USB出力の大容量バッテリーを整備した。三脚にカメラ、エクステンダー、バッテリーを接続することで、電源も含めて独立した。

明治頭首工での映像収集では、臨時Webカメラの設置準備と並行して、三脚セットを直ちに組み上げ、到着後10分程度で映像配信を行った。画角調整は、独立した三脚の移動のみであり、容易に変更可能なため、瞬時に完了した。自立した三脚セットで先行して映像配信を行ったため、臨時Webカメラの設営を慌てることなく進められ、現場の心理的な負担の軽減にもつながった。



図-17 独立・自立した三脚セット



図-18 明治頭首工での設置状況

## (2) 臨時Webカメラ

事務所から臨時Webカメラ設置の可能性があるとの情報を受け、空振りを許容する前提で、動作確認と運搬準備を行った。正式な要請が河川部から入った際には、運搬車両の確保と人選後直ちに出発可能となった。

また、熱海土石流災害の事例から、監視範囲（画角）を理解し、施設管理者（東海農政局、土地改良区管理所）との調整が可能な土木職員を、最寄り事務所から派遣いただいた。このため、昼過ぎに現地集合であったにもかかわらず、監視対象施設の明確な判断と併せて管理者の協力もいただけたことから、夕方には3台の臨時Webカメラが設置された。



図-19 臨時Webカメラ設置場所

## (3) Webex

東海農政局など関係機関との映像情報の共有には、Webex配信を活用した。熱海土石流災害で関係者に配布した資料を、接続用URLの書き換えなど修正程度で準備が整い、直ちに配布された。また、施設の設置されている豊田市からも要望に応じて資料を追加配布した。

情報共有の要請から、実現までは資料修正時間程度で進められ、まさに迅速な情報共有となった。

## 4. おわりに

災害対応において、映像情報の共有は今後も重要性が高いと考える。熱海土石流災害や明治頭首工での対応は、携帯電話回線が活用できたため、多くの映像を迅速に収集し、インターネット回線を用いて関係機関による共有が可能であった。

携帯電話や電力供給が大規模に停止した場合においては、Car-SAT、衛星通信車、Ku-SATなど、限られた設備による映像の配信に留まることが十分想定される。

現地の条件に応じて、市販品を活用した設置が比較的容易な資機材と、専門性が高い衛星通信機材を組み合わせた最適な配置が必要であり、訓練等を通じて対応者の拡大や迅速な設営など習熟を図りたい。

今回紹介した事例は、いずれも梨子沢土石流災害や御

岳山の噴火など、中部地方整備局がこれまで経験した災害対応により、情報通信班に対する土木職員の理解が高く、衛星通信機材やカメラの設置場所など、設置条件などの意見交換が円滑であったため、迅速な設営につながった。

今後も、電気通信職員のみならず、土木職員の理解につながる訓練等により、連携の向上につなげたい。

# いろは坂における多機能型排水性舗装について

小島 墨<sup>1</sup>

<sup>1</sup>栃木県 日光土木事務所 (〒321-1414 栃木県日光市萩垣面2390-7) .

一般国道120号いろは坂は、急な勾配とカーブが連続しており、冬季には降雪の影響で交通事故が多発している。これまでも、凍結防止剤の散布や薄層すべり止め舗装、路面注意喚起標示等の対策を講じてきたが、思うような効果は得られなかった。そこで事故対策として実績があり、舗装耐久性の向上、凍結抑制効果の向上等を目的に開発された多機能型排水性舗装(FFP)を舗装修繕工事で採用し、耐久性や事故件数低減効果を検証した。その結果、耐久性において大幅な低下は見られず、凍結抑制効果等から事故件数も減少した。

キーワード FFP、多機能型舗装、凍結抑制、事故対策

## 1. はじめに

一般国道120号は、世界遺産にも認定されている東照宮などが立ち並ぶ栃木県日光市山内を起点とし、いろは坂、中禅寺湖、金精道路を經由し、群馬県沼田市へ至る幹線道路である。そのなかでもいろは坂においては、令和2年度に土木遺産にも認定され、春夏には新緑、秋には紅葉、冬には雪景色が堪能できる観光においても重要な路線である。

この国道120号のいろは坂は、急な勾配（縦断勾配11%以上）とヘアピンカーブ（最小4.5R）が連続しており（**図-1**）、冬季には降雪や路面の凍結が多く、その影響で交通事故が多発している。また、冬季には群馬県へと抜ける金精道路が通行止めになることから、いろは坂のみが中禅寺湖（中宮祠）と日光市街地を繋ぐ唯一の道路であり、事故等でいろは坂を長時間通行止めにできない状況である。これまでも事故防止対策として凍結防止剤の散布や交通標識・路面注意喚起標示、薄層すべり止め舗装を採用するなどの対策を講じてきたが、思うような効果が得られずに耐久性等にも課題があった。このような背景から、他の自動車道で事故対策舗装として実績のあった多機能型排水性舗装フル・ファンクション・ペーパー（以下、FFP）をいろは坂での舗装修繕工事に導入し、事故低減への効果と耐久性について検証した。

FFPとは、舗装耐久性の向上、凍結抑制効果の向上、騒音低減効果の保持を目的に開発された多機能型排水性舗装であり、専用のアスファルトフィニッシャーを用いる施工により縦溝粗面を形成し（**図-2**）、すべり抵抗や運転手の視認性向上も期待できるものである。専用のアス

ファルトフィニッシャーを使用して混合物の敷均しを行うが、転圧作業は一般的な舗装工事で使用されるタイヤローラやマカダムローラで施工でき、特別な作業工程もないので施工性は一般的な舗装工事で同等である。

また、同様に溝が形成されるグルーピング舗装は縦断方向に溝を切ると二輪車の走行安全性に懸念があるが、FFPはタイヤ幅の狭い競技用自転車による大会でも縦溝が影響したハンドル操作の不具合や転倒事故は見られず、二輪車の走行における支障はない。



図-1 カーブが連続するいろは坂



図-2 専用アスファルトフィニッシャーによる敷均し例

本報告は、FFP工法の技術概要を紹介するとともに、舗装修繕工事にFFPを採用したことによる事故件数低減効果や路面性状を含めた耐久性を検証した結果について報告するものである。

## 2. FFPの概要

### (1) 従来の排水性舗装の課題

排水性舗装は、従来の舗装（密粒度As等）に比べ、水跳ね、ハイドロプレーニング現象、視認性、すべり抵抗の低下による事故発生、に効果・メリットがある反面、耐久性低下（骨材飛散）や空隙詰まりによる排水機能低下、浸透水による下部舗装構造の品質低下（砂利化）、寒冷地における凍結膨張破壊等のデメリットが課題になっていた。表層だけに留まらない損傷は、基層も同様に損傷しているため、表層と基層の補修が必要であり補修費の増大が見込まれる。

### (2) FFPの特徴

上記の課題に対してFFPは、混合物一層の施工により、降水の影響で溜まった表面水を滞留させにくくする機能を持つ縦溝粗面仕上げと、下部に砕石マスタックアスファルト混合物と同等の防水性機能とを併せ持つことができる舗装である。

FFPには以下の特徴がある。

- a) 一層で排水性機能と防水性機能の2つを併せ持つ（図-3）
- b) 専用のアスファルトフィニッシャ施工により、路面が縦溝粗面に仕上がる（図-4）
- c) 縦溝粗面効果により、昼夜における走行時の視認性が向上する
- d) 縦溝粗面効果により、密粒度タイプの舗装に比べて路面騒音が低減する
- e) 防水機能を有するため、散布された凍結防止剤が外部へ流出しにくく、また、縦溝粗面に凍結防止剤が留まるため、凍結抑制機能の持続性が高い
- f) 防水機能により、積雪寒冷地域における排水性舗装で起きているような空隙内の水分が凍結することによる破損を抑制できる
- g) 縦溝粗面仕上げにより浮き水が発生しにくくなり、ブラックアイスバーンが抑制できる
- h) 排水性機能によるハイドロプレーニング等の抑制により、走行時の安全性向上が図れる
- i) 高性能改質アスファルトや層構造の効果により、耐流動性と骨材飛散抵抗性に優れる（表-1）

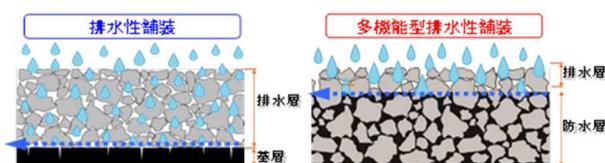


図-3 排水性舗装と多機能型排水性舗装のイメージ図



図-4 縦溝粗面仕上げ例

表-1 各種仕様

項目	排水性舗装	多機能型排水性舗装
マーシャル突固め回数(回)	両面 50 回	両面 50 回
マーシャル安定度 (kN)	3.34 以上	5.0 以上
残留安定度 (%)	75 以上	75 以上
カンタプロ損失量 (%)	20 以下	12 以下
動的安定度(DS) (回/mm)	3000 以上	6000 以上
路面のキメ深さ(MPD)(mm)	□	1.2 以上
浸透水量 (ml/15sec)	1000 以上	800 以上
すべり抵抗値(BPN)	60 以上	60 以上

## 3. いろは坂でのFFP施工事例

### (1) 施工概要

国道120号のいろは坂では図-5のようなスリップ事故が多発しており、また、冬季には積雪や路面凍結が起これ、事故が発生しやすい環境になっている。この対策として舗装の表面に樹脂骨材を擦り込む薄層すべり止め舗装が採用されてきた（図-6）。

従来の対策では、表層施工後にすべり止め施工を行うことから施工日数も延長を強いられ、規制日数も延ばさなければならなくなり、カーブの連続するいろは坂では事故の危険性から規制日数が延長されることは好ましくない。また、この対策において、施工直後は事故件数の減少は見られるもののその効果は持続せず、さらに、耐久性の面や気象条件による施工性においても難が見られた。このため、事故件数の減少と耐久性の向上を目的とした薄層すべり止め舗装の代替となる事故防止対策が望まれていた。

そこで、他の自動車道で事故件数減少の実績があり、施工の規制が複数回必要な薄層すべり止め舗装に対して、施工時の1回のみで対応できるFFPを、いろは坂の舗装修繕工事に導入することとした。

いろは坂におけるFFPの施工箇所を図-7に示す。路面の損傷や老朽化が著しく、事故件数が多い箇所や凍結防止剤の効果が高めるために凍結防止剤自動散布装置設置箇所を選定した。



図5 スリップ事故の例



図7 いろは坂におけるFFPの施工箇所



図6 薄層すべり止め舗装の施工例



図8 FFP施工直後路面状況

それぞれの施工概要を以下に示す。

- a) 第一いろは坂45カーブ、47カーブ  
 施工日：2017年4月25日  
 施工面積：2236m<sup>2</sup>  
 施工厚さ：t=50mm（切削オーバーレイ）
- b) 第一いろは坂21カーブ、22カーブ  
 施工日：2019年8月26日  
 施工面積：1697m<sup>2</sup>  
 施工厚さ：t=50mm（切削オーバーレイ）
- c) 第一いろは坂44カーブ  
 施工日：2019年11月27日  
 施工面積：858m<sup>2</sup>  
 施工厚さ：t=50mm（切削オーバーレイ）
- d) 第二いろは坂明智第二トンネル出口  
 施工日：2020年8月4日  
 施工面積：1418m<sup>2</sup>  
 施工厚さ：t=50mm（切削オーバーレイ）
- e) 第一いろは坂23カーブ  
 施工日：2020年9月8日  
 施工面積：1420m<sup>2</sup>  
 施工厚さ：t=50mm（切削オーバーレイ）
- f) 第二いろは坂18カーブ、19カーブ  
 施工日：2020年12月1日  
 施工面積：1471m<sup>2</sup>  
 施工厚さ：t=50mm（切削オーバーレイ）

上記の中で、施工後の路面性状などの追跡調査を行ったのは22カーブ、23カーブ、47カーブである。図8に示すとおり、施工直後の路面はFFPの特徴である縦溝粗面で仕上がっており、施工は良好であった。

## (2) 路面性状

いろは坂22カーブ、23カーブ、47カーブのFFP施工直後とそれぞれ8ヵ月～4年後の路面性状試験の結果を表2に示す。浸透水量とすべり抵抗値は規格値を下回ることによって事故が発生する確率が高くなる。BPNは一般的な指標であるが動摩擦係数の計測値はよりすべり抵抗値の信頼度が高い。

施工直後はどの箇所でもFFPの品質基準値を満たしていた。また、追跡調査の結果では施工後の経過期間が最長の47カーブにおいても大幅な低下は見られず、すべて

表2 施工直後と追跡調査後の路面性状試験結果

第一いろは坂	測定日	現場試験結果				
		①路面のキメ深さ MPD (mm)	②現場透水試験 浸透水量 (ml/15s)	すべり抵抗試験		
				③BPN BPN <sub>20</sub>	④DFTIによる動摩擦 μ <sub>40</sub> μ <sub>60</sub>	
(47)カーブ	2017.04.28	1.66	1,047	79	0.38	0.35
4年3か月経過	2021.07.26	1.82	1,134	91	0.56	0.57
(22)カーブ	2019.08.26	1.50	1,055	93	0.44	0.40
1年10か月経過	2021.07.26	1.63	919	89	0.53	0.52
(23)カーブ	2020.09.10	2.02	1,168	85	0.42	0.40
8か月経過	2021.07.26	1.67	1,113	86	0.51	0.52
	平均	1.73	1,090	86	0.41	0.38
		1.71	1,055	89	0.53	0.53
	社内基準値	1.2以上	800以上	60以上	μ 0.25以上	

の箇所では基準値（寒冷地の排水性舗装と同等の浸透水量）を満たしており、耐久性が高いことが確認された。すべり抵抗値が施工直後より高くなっているのは舗設直後のアスファルトの被膜が無くなり、砕石の表面のすべり抵抗に移行するためと考えられる。

### (3) 凍結抑制効果

いろは坂は降雪や氷点下になる日が多く、冬季の事故発生の原因の多くが積雪や路面凍結によるものである。FFPは凍結防止剤が縦溝粗面に滞留することによって凍結抑制機能の持続性を高める効果があるとされているので、ここでは管内のFFPを施工した路面に定点カメラを設置し、降雪時のFFPの凍結抑制効果を検証した。

図-9はFFP施工路面を定点カメラで撮影したものであり、手前がFFP施工の舗装で奥が密粒度As舗装である。この路線は凍結防止剤を散布している路線であり、その効果の持続性の高さの違いが密粒度As舗装とFFPで顕著に表れた。図-9から判断すると、比較舗装には積雪があることに対し、FFPの路面がはっきり露出していることがわかり、凍結防止剤の効果を持続させていることが確認できた。

また、図-10のように凍結防止剤を滞留させたFFPの路面上を車が通過することにより引きずり効果で密粒度As舗装にも凍結抑制の効果が表れるということも確認できた。粗面系凍結抑制舗装は路面の凹凸を確保してすべり抵抗の改善を図る工法であることから、FFPは粗面系凍結抑制効果を発揮しているといえる。



図-9 路面状況（国道122号・2021年2月施工）



図-10 路面状況（第二いろは坂 明智第二TN出口・2020年8月施工）

### (4) 事故発生件数

いろは坂における冬季事故発生件数を表-3に示す。ここでは第二いろは坂のFFP施工区間内における2019年11月1日～2020年4月30日と2020年11月1日～2021年4月30日の事故発生件数を表している。工事区間内においては前年比81%（30件）の減少となった。また、この中でも二輪車の事故件数も減少していた。

前述の凍結抑制機能持続効果などから事故件数低減に寄与しており、走行時の安全性が向上していると考えられる。

表-3 工事区間内の事故件数

	2019年11月1日 ～2020年4月30日	2020年11月1日 ～2021年4月30日	差
18C～19C	28	2	-26
TN出口	9	5	-4
合計	37	7	-30

## 4. おわりに

いろは坂の事故多発区間において、FFP施工後、事故発生件数を81%低減させたという結果が得られ、事故抑制に有効な工法であることが言える。また、前述の薄層すべり止め舗装は表層舗設後に表面処理の工程が必要であり、表層一回施工のFFPは規制回数減少によるコスト低減や施工性の面でも有利である。

そして、1年程度ですべり止めの効果が減少する薄層すべり止め舗装に対して、FFP舗装は4年の期間を経てすべり抵抗などの品質低下もなく、耐久性が高いことが確認できた。これは修繕回数の削減にも繋がり、ランニングコスト低減の観点からも有効である。

凍結抑制効果については、一般的な密粒度As舗装に比べてFFP施工の舗装では散布された凍結防止剤が外部へ流出しにくく、縦溝粗面に凍結防止剤が留まるため路面上の積雪は見られず、凍結抑制機能の持続性が高いことが確認できた。

最後に、日光土木事務所管内では他にも降雪や路面凍結が多く、事故が発生しやすい箇所も多数存在しているので今後も現場条件を判断しながら多機能型排水性舗装（FFP）を採用し、事故件数減少の効果や耐久性について検証していきたい。

謝辞：FFPを導入した舗装修繕工事にあたって、FFPの施工から調査まで約4年間、ご協力いただいた株式会社ガイアートの皆様や、事故なく工事を完成させていただいた施工者の皆様、事業にご協力いただいた関係者の皆様に深く感謝するとともに、今後とも栃木県の取り組みへのご理解ご協力をお願い致します。

# 千歳橋の補修について

## ～技術提案・交渉方式での橋梁補修～

山内 聡<sup>1</sup>・溝口 正二郎<sup>2</sup>・中野 周史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>, <sup>2</sup>九州地方整備局 佐賀国道事務所 道路保全課 (〒849-0924 佐賀県佐賀市新中町5-10)

<sup>3</sup>九州地方整備局 佐賀国道事務所 鳥栖維持出張所 (〒841-0012 佐賀県鳥栖市田代昌町492)

国道3号千歳橋は、PCケーブルの破断や腐食などの損傷が多数確認され、耐荷力の不足が懸念された。「連続ケーブル桁吊工法」特有の課題やPCケーブル張替え時のリスク回避が求められ、九州管内で初めて技術提案・交渉方式（ECI方式）での橋梁補修が実施された。

本稿では、ECI方式の実施経緯、橋梁補修への適用で得られた効果について報告する。

キーワード 橋梁補修, 外ケーブル, ECI方式, 工期短縮

### 1. はじめに

国道3号に架橋する千歳橋（L=177m, RC7径間ゲルバー橋, 昭和30年竣工）は、平成5年の道路橋示方書改定に伴い、ゲルバーヒンジ支点部のB活荷重補強対策として、PCケーブルによる「連続ケーブル桁吊工法」を平成8年に、全国で初めて採用した（写真-1）（図-1）。



写真-1 千歳橋全景

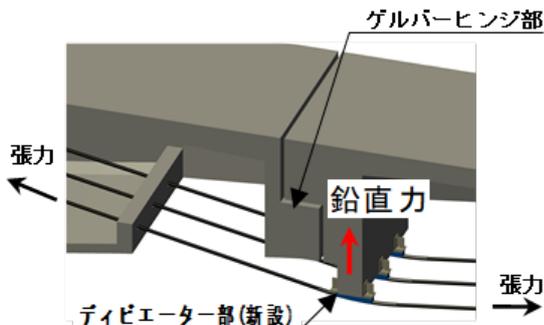


図-1 連続ケーブル桁吊工法概要

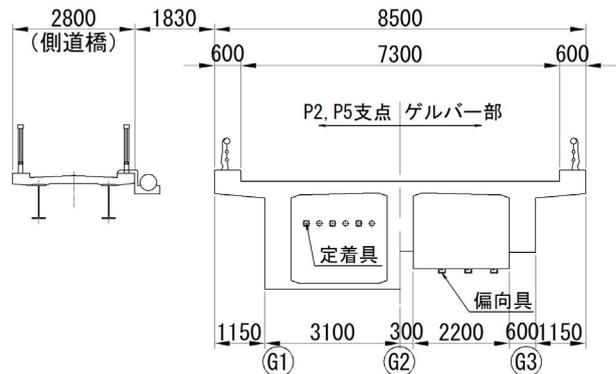


図-2 橋梁断面図 (mm)

その後、橋梁定期点検により、PCケーブルの破断やケーブル素線の腐食などの損傷が多数確認され、耐荷力不足が懸念されたため、速やかなPCケーブルの更新が必要となった。（写真-2）。



写真-2 外ケーブル損傷状況

更新に際しては、「連続ケーブル桁吊工法」特有の課題や腐食状態にあるPCケーブルの張替え時のリスクを考慮する必要があることから、設計段階から施工者独自の技術を取り入れる発注方式であるECI方式（技術提案・交渉方式）を採用することとした（図-3）。

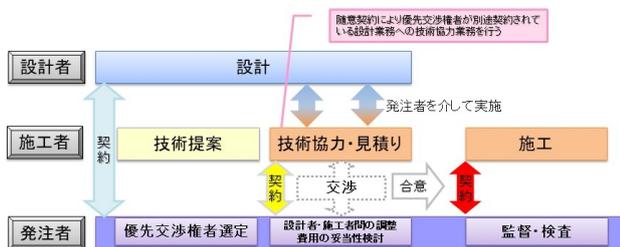


図-3 技術協力・施工タイプにおける契約形態

発注前の検討において、ECI方式による効果を従来の設計・施工分離発注と比べ、①複数班の施工による現場工期の短縮②材料調達に係る市場調査や早期発注による工期短縮③三者協議や設計と現地相違による設計変更に係る期間の短縮を想定した。

## 2. 千歳橋におけるECI方式の実施経過

ECI方式では、技術提案に基づき選定された優先交渉権を持った施工予定者と技術協力業務を締結し、別契約で実施している詳細設計業務の設計内容に技術提案内容を反映させ、施工予定者と価格等の交渉が成立した場合に、工事契約の相手方に決定する。

施工予定者の選定は、技術提案書の審査を行い、優先交渉権者及び次順位以降の交渉権者を決定する方法とした。技術提案等の審査・評価は、佐賀国道事務所の入札契約手続運営委員会に諮ったうえで、決定した。また、中立かつ公正な審査・評価の確保を図るため、学識経験者4名で構成する「技術提案・交渉方式に係る専門部会」を設置し、3回開催した（表-1）。

表-1 工事請負契約者決定までの主な経緯

日付	内容
令和元年11月27日	技術提案・交渉方式に係る専門部会（第1回）
令和元年12月3日	入札・契約手続運営委員会（公示内容確認）
令和元年12月10日	契約手続開始の公示
令和元年12月10日～令和2年1月23日	申請書及び技術提案書の提出期間
令和2年1月29日、31日	技術提案書提出者に対するヒアリング
令和2年2月12日	技術提案・交渉方式に係る専門部会（第2回）
令和2年2月18日	入札・契約手続運営委員会（優先交渉権者決定）
令和2年2月21日	優先交渉権者選定通知
令和2年3月3日	基本協定締結、技術協力業務委託契約設計協力協定締結
令和2年7月16日	価格等交渉（1回）
令和2年7月20日	技術提案・交渉方式に係る専門部会（第3回）
令和2年7月21日	入札・契約手続運営委員会（契約相手方特定）
令和2年7月27日	特定通知
令和2年8月3日	見積り合せ
令和2年8月3日	工事請負契約締結

千歳橋のECI方式で求めた技術提案は、1) 技術協力業務の実施に関する提案、2) 外ケーブルの損傷原因をとらえた有効な補修工法の提案、3) 現道交通への影響の最小化に有効な工法等の提案、4) 河川内における出水期施工可能な工法の提案の4項目である。評価方法は、技術提案書の内容において、理解度、実施手順及び実施体制、提案の的確さ、実現性を評価した（表-2）。

表-2 技術提案評価項目

1) 技術協力業務の実施に関する提案	<ul style="list-style-type: none"> <li>・業務目的、現地条件、与条件の理解度</li> <li>・与条件に対して、主要ポイントの抽出に対する着眼点が適切さ</li> <li>・本業務の内容と規模に対して、十分な実施体制が確保</li> </ul>
2) 外ケーブルの損傷原因をとらえた有効な補修工法の提案	<ul style="list-style-type: none"> <li>・損傷状況やその原因に関する理解度</li> <li>・上部工の安全性に配慮した有効な補修工法等の提案</li> <li>・施工時に想定されるリスクとその回避方法に関する有効な提案</li> </ul>
3) 現道交通への影響の最小化に有効な工法等の提案	<ul style="list-style-type: none"> <li>・交通状況や周辺環境等の与条件が適切に理解されている場合</li> <li>・工期短縮や工事の品質向上に有効な補修工法や規制手法等の提案</li> </ul>
4) 河川内における出水期施工可能な工法の提案	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工期短縮方法あるいは出水期施工可能な工法の提案</li> </ul>

価格等の交渉では、発注者及び優先交渉権者が、技術協力業務を踏まえて作成する設計の内容や成果物に基づき、工事費の見積りの内容、その他工事契約締結に必要な条件等について協議し、合意を目指すプロセスである。価格の妥当性の検証については、原則、標準歩掛を使用し、優先交渉権者独自のものは、別途見積りを依頼し、優先交渉権者との価格交渉及びこれまでの類似実績等を参考に、妥当性を確認した。

## 3 技術提案を反映した補修

### (1) 想定されるリスクを回避した補修

外ケーブルの損傷要因は、緊張時のケーブルの伸びや活荷重による振動でPC鋼材と偏向具側面の接触箇所での摩擦が発生し、PC鋼材を覆う被覆材が剥がれ、伸縮装置からの漏水により、鋼材の腐食が進行し破断に至ったと推測される。このため、外ケーブルの補修は、既存の3S15.2mm・6箇所(全18本)の外ケーブルを、ダブル方式F100TS・6箇所(全6本)のケーブルへ交換し、PC鋼材と偏向具との接触による摩擦の防止を図った。表-3にPC鋼材の諸元を示す。腐食要因となった偏向具フラット形状の鋼製偏向具から、耐摩耗性・耐衝撃性に優れたナイロン樹脂製に交換、ケーブルと偏向具の接触面にフッ素樹脂被覆処理を施したスライドプレートを設置し摩擦の影響が小さい構造とし、再発防止を図る補修計画とした（写真-3）。

表-3 PC鋼材の諸元

名称	3S15.2mm	F100TS
規格	3×φ15.2mm	7×φ11.1mm
断面積	416.1mm <sup>2</sup>	519.3mm <sup>2</sup>
引張荷重	783kN	966kN
定着方式	くさび式定着	ねじ式定着
断面図	φ16.4 PC鋼より線 エポキシ塗膜 ポリエチレン被膜	φ33.3 PC鋼より線 (7×φ11.1) 亜鉛メッキ+防錆油 ポリエチレン被膜

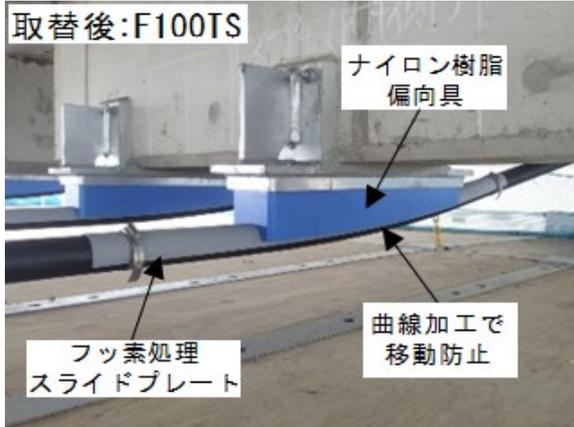


写真3 交換後の偏向具

(2) 現道交通への影響の最小化を図る仮設足場

国道3号の千歳橋周辺の12時間交通量は、約1.7万台（大型車混入率約29%）で、昼夜を問わず非常に交通量が多いため、現道交通への影響を最小限にする施工工法の選定が課題となった。そのため、補修足場の計画では、従来の単管パイプや足場板を使用したパイプ式吊足場と比べ、吊りチェーン間隔を拡大することで設置するアンカー数の低減し、組立解体の効率化により交通規制日数の低減が図れ、また、出水のリスクを考慮し、比較的容易にリフトアップダウンできる先行床施工式フロア型システム吊り足場（図-4）を採用した。

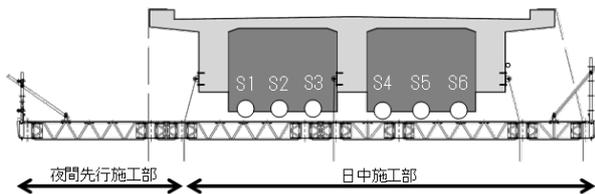


図4 先行床施工式フロア型システム吊り足場断面図

吊りチェーン間隔を最大2500mmまでに拡大し（写真-4,5）、アンカー削孔箇所は、標準パイプ式吊り足場の90箇所/10mを約75%減の24箇所/10mに低減し、夜間の交通規制日数は、当初計画48日を30日削減となる計画18日とした。



写真4 先行足場設置状況



写真5 システム吊り足場

4 外ケーブル補修工事

(1) 施工フロー

既設ケーブルの撤去から取替え後の外ケーブル緊張までを1サイクルとし、1列毎に全6回繰り返し施工を行った。（図-5）また、足場設置に合わせて、橋梁本体の断面修復やひび割れ補修、ゲルバーヒンジ部の表面被覆などの補修も同時に実施した。

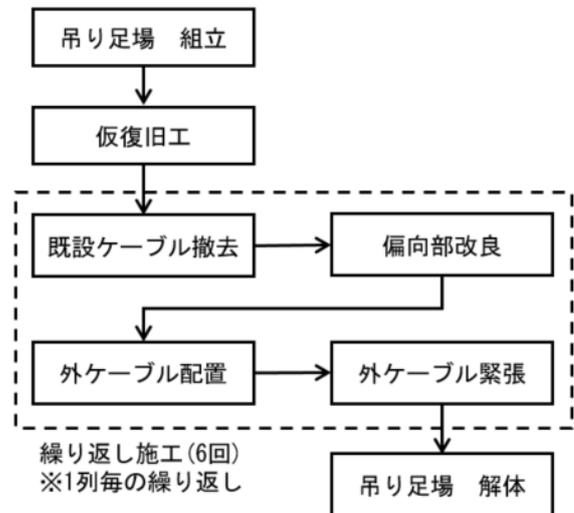


図5 施工フロー

## (2) 吊り足場の施工

出水期の夜間片側規制にてアンカー削孔を行った際は、超ロングブームを有する大型橋梁点検車を使用することで、片側規制のみで全てのアンカーを設置することができるため、規制日数を計画より約半分に短縮できた。

非出水期の吊り足場の組立は、歩道側と車道側の分割施工とし、夜間片側規制で歩道側の1パネルを全長にわたって先行して設置し、組立てた吊り足場を車道側足場材の仮置き場とした(図-6)。これにより、車道側の組立作業を交通規制が伴わない昼間の作業とし、夜間の規制日数を削減した。

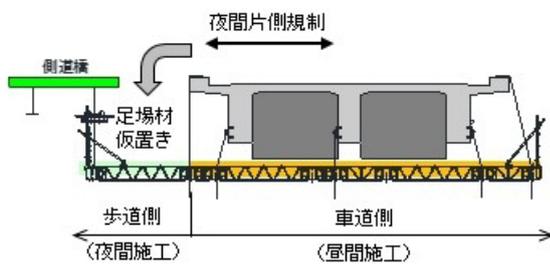
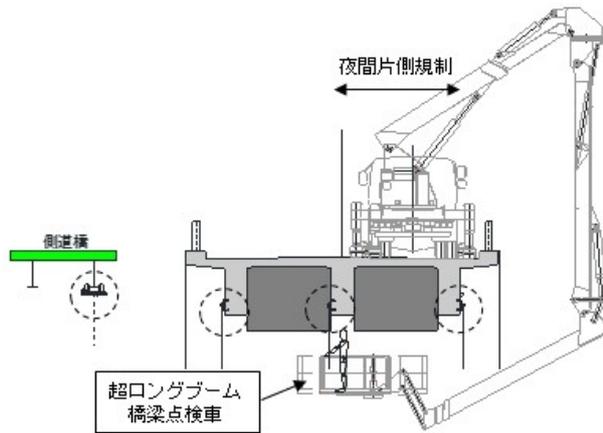


図-6 上：出水期の吊り足場施工  
下：非出水期の吊り足場施工

## (3) 外ケーブルの補修

### a) 3次元測量

3次元測量を実施し、中間横桁部の定着位置、および、貫通孔位置の座標を取得し、貫通部の干渉具合やケーブルの配置位置、ケーブルの長さ等を決定した。

### b) 既設ケーブルの仮復旧

既設ケーブルにより耐荷力を確保した状態で外ケーブル

ルの取替えを行うために、破断した2本のケーブルを、仮設ケーブル(1S15.2mm)にて復旧した後に、外ケーブルの取替えを行う計画とした。ケーブルの仮復旧を行うことで、素線が腐食しているケーブルを含む残り16本が負担する張力変化の影響を軽減し、取替え作業時に懸念されるケーブル破断の連鎖や想定しない下部工の変形などのリスク回避を図った。(写真-6)



写真-6 外ケーブルの仮復旧状況

### c) 外ケーブルの取替え

外ケーブルの交換手順は、外ケーブルの損傷状況をグループ化し、劣化したケーブルから優先的に交換する計画とした。(図-7)。橋脚への影響を最小限に留めるため、1列毎に既設ケーブルの撤去、取替えケーブルの緊張を段階的に実施した。外ケーブルの緊張作業を写真-7に示す。



写真-7 外ケーブルの緊張

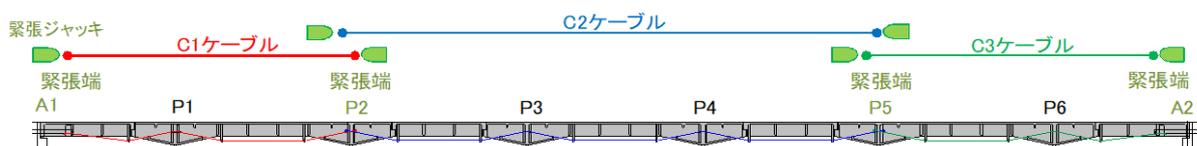


図-7 外ケーブルによる同時作業

#### d) モニタリング

モニタリングは、補修工事作業中の橋梁本体への影響や、ケーブル張力変動を確認し、突然のケーブル破断などのリスクを回避するなど、橋梁利用者、工事作業員の安全を確保することを目的に実施した。施工時の張力変化も微小で、破断のリスクはなく、PCケーブル補修（復旧）による張力回復を確認できた。（図-8）

また、今回計測したデータは初期値計測として、今後の定期点検など維持管理に活用できるものである。

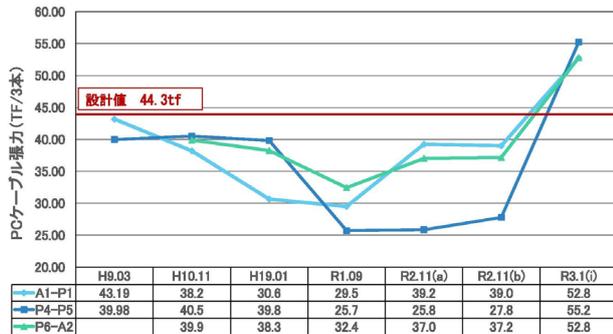


図-8 外ケーブル張力計測結果（S5）

### 5 ECI方式の効果

#### (1) 損傷原因をとらえた補修

「連続ケーブル桁吊り工法」は他に事例がなく、外ケーブルの損傷原因をとらえた補修に対して実現性が求められた。ECI方式における価格交渉前段階で、補修工事に必要となる工種及び外ケーブル等の計測計画について、事前の調整を行うことで損傷原因に対する対策を的確に実施し、設計による手戻りがなく円滑に施工できた。

#### (2) 工期短縮の効果

図-9に橋梁補修工を除く施工日数の比較を示す。当初は現場施工期間が230日（夜間規制日数48日）の計画であったところ、前述の通りシステム式吊り足場の採用や大型橋梁点検車の使用などにより、現場施工期間を56日（夜間規制日数30日）短縮する計画であった。実作業においては、外ケーブル取替えのサイクル施工が回を重ねる度に作業効率が向上したことで、システム式吊り足場の採用で段差のない作業床により施工性が向上したことから、提案計画よりさらに現場施工期間を14日（夜間規制日数3日）短縮することができた。橋梁補修工で追加工種があったが、前述の通り実施工程では現場施工期間160日（夜間規制日数15日）に短縮でき余裕工程を確保したことで、10月から5月の非出水期内に足場解体までの全工程を完了させることができた。

#### (3) その他

千歳橋の補修では、事業課題を明確にしたうえで事前に施工業者からの提案を想定し、早期に確実な補修が実施されるよう技術提案は自由度の低い4項目に絞られて

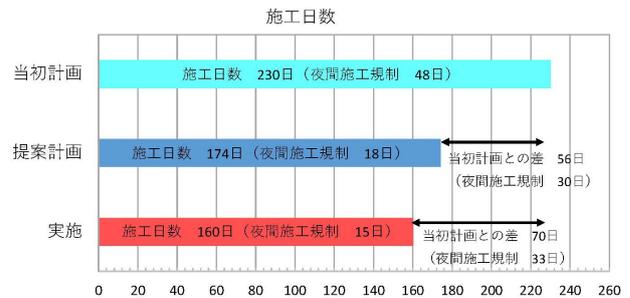


図-9 施工日数の比較

いる。3か月の技術協力期間で施工者の提案技術の適用、設計課題を踏まえた改善が図られた。また、施工中に新たに損傷が発見された際の対応方針も、3者で協議がなされ、設計変更が生じた場合でも円滑に対応できた。

一方、技術提案の審査にあたって、提案項目に対して評価項目とすべき根拠を整理したうえで、的確性や実現性を評価内容として、工法採用の妥当性、リスクへの対応や施工実績の裏付け等の確認作業に労力を要した。ECI方式の適用を早期に検討することで、専門部会の運営をはじめ、発注者の負担を考慮した提案課題数を設定するなど業務の効率化に期待できると考える。

### 6 おわりに

ECI方式の採用は、「発注者が最適な仕様の設定ができない」もしくは「仕様の前提となる条件の確定が困難」な工事とされている。千歳橋の補修では、連続ケーブル桁吊り工法で補強された「外ケーブルの補修方法」や「現道交通への影響を最小化」などの技術的課題を明確にし、技術提案を求めることで施工者の技術を早期から設計に取り込み、実施工に配慮した設計を行うことで、手戻りの少ない効率的な施工が実現できた。

今後も、維持管理分野において、不確定要素（リスク）があり、かつ早期補修が求められる工事でも、適切に課題を設定し、短期間の技術協力でECI方式を活用することは、工事の品質確保や施工の効率化に有効であると考えられる。

謝辞：本工事に際し貴重な御意見をいただいた専門部会の委員各位、設計コンサルタント、工事関係者各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通省直轄工事における技術提案・交渉方式の運用ガイドライン，2020.1
- 2) 橋梁と基礎 2022 VOL.56 2022年5月号 ECI を活用した千歳橋の補修設計・施工
- 3) 九州時報 NO.71 2022.9 ECI方式を活用した千歳橋の補修について

# 地震直後の情報空白期における 構造物被害の規模感の把握

中川 拓真<sup>1</sup>・中尾 吉宏<sup>1</sup>・長屋 和宏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 道路地震防災研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

地震発生直後の情報空白期では、初動体制を構築する上で限られた情報から被害の概況を推測する必要がある。そこで、国土技術政策総合研究所では、初動対応時の情報として活用されるよう、加速度応答スペクトルに基づく構造物被害の規模感に関する情報（以下「スペクトル分析情報」という）を地震発生後約8分で国土交通省の災害対応従事者等に自動配信している。

本稿では、加速度応答スペクトルに着目した経緯やスペクトル分析情報の推定精度について紹介するとともに、システム改良により即時配信が実現したことや、その活用により維持管理の負荷軽減が図られた災害対応のDXについても報告する。

キーワード 災害対応、被災把握、加速度応答スペクトル、DX

## 1. 地震発生直後の情報空白期における課題と取組

日本における主要な自然災害としては、台風等による大雨や地震が挙げられるが、災害対応に関して、この2つのハザードには大きな違いがある。大雨は、台風の予測進路や天気予報のように今後の動向を事前に予測することができるため、災害体制も事前確保することが可能である。一方で、地震はいつ、どこで発生するかを予測することはできない。そのため、地震発生後に体制を構築し、パトロールを実施し、道路施設の被害状況を把握することとなる。したがって、地震発生から被害状況把握に至るまで情報空白期が生まれてしまう。

さらに、休日や深夜など勤務時間外に発生した場合や被害規模が広範囲に及ぶ地震の場合は、状況把握により多くの時間が必要となる。

例えば、深夜1時25分頃に発生した2016年の熊本地震（本震）では、多くの道路が被災したため通行不能となり、管内の道路パトロールが完了するまでに非常に多くの時間を費やした。阿蘇大橋地区では大規模な斜面崩壊や、阿蘇大橋の落橋が発生したが、多くの道路が被災しネットワークが寸断されたため、速やかに被災現場に到達することはできなかった。そのため、阿蘇大橋地区の被害状況を確認できたのは、日の出近く（5:30頃）に報道機関のヘリからの映像が放送された時点であった<sup>1)</sup>。

中央防災会議が策定した防災基本計画<sup>2)</sup>には、災害発生時、国や地方公共団体は、被害規模の早期把握のための情報収集にあたることが記されている。

道路管理者は、パトロールによる目視点検を基本とし

つつ、情報空白期を埋めるために様々な機器やデータを活用している。全国に2万台以上設置しているCCTVや防災ヘリ（災害対策用ヘリコプター）等の既存設備だけでなく、近年では、ETC2.0プローブ情報やSNSによる情報発信などデジタル情報も被害把握に活用されつつあり、UAVの自動航行や衛星で取得した画像等の解析による被害把握の研究も進められている。

本稿では、被害把握に関する取組の一環として、国土技術政策総合研究所が、地震発生後約8分で構造物被害の規模感の情報として自動配信を行っているスペクトル分析情報について、概要やこれまでの取組状況等について報告する。

## 2. スペクトル分析情報の活用の経緯と配信情報

### (1) 地震直後に取得可能な情報と固有周期への着目

地震発生直後に入手可能な情報として、気象庁が公表するマグニチュードや震度があるが、マグニチュードは、地震そのもののエネルギーの規模を表し、各地点の揺れの大きさを示すものではない。また、震度は各地点の揺れの大きさを表す指標ではあるが、地震波形から震度を算出する上で影響が大きい周期<sup>3)</sup>と、強い揺れにより構造物が影響を受けやすい固有周期が異なるため、震度の大きさと構造物の被害の程度は必ずしも一致しないことが指摘<sup>4)</sup>されている。

例えば、2003年9月26日に発生した十勝沖地震と2011年3月15日に発生した静岡県東部地震における地震の規

模と被災橋梁数、全壊住家数を比較した結果が表-1である。なお、被災橋梁の判定は道路震災対策便覧（震災復興旧編）平成18年度改訂版<sup>9)</sup>の耐荷力に関する被災度の5区分のB判定以上を対象としている。

表-1 十勝沖地震と静岡県東部地震の概要比較

	十勝沖地震	静岡県東部地震
地震の規模	M8.0, 最大震度6弱	M6.4, 最大震度6強
被災橋梁数	4橋 <sup>9)</sup>	0橋
全壊住家数	116棟 <sup>7)</sup>	0棟

住家密度や震源の深さ、マグニチュード等の条件は異なるものの、最大震度6弱の十勝沖地震では多数の被害が生じているのに対し、最大震度6強の静岡県東部地震では被災橋梁および全壊住家は発生していない。

上記の事例からも、地震がどの程度の構造物に被害を与えるかを捉えるためには、揺れの大きさとして一般的な震度の情報だけでなく、地震波の周期にも着目する必要がある。

ここで、ある地点で観測された地震波が様々な固有周期の構造物に作用した場合に、それぞれの最大応答加速度がどうなるかを表すものに加速度応答スペクトルがある。一部の地震計では地震直後に加速度応答スペクトルを算出することが可能である。国総研では、構造物の被害と相関の高い固有周期の加速度応答スペクトルに着目することで、被害の規模感を予測できるのではないかと考えた。

## (2) 被害発生ラインの定義

被害が限定的であった既往地震の加速度応答スペクトルをもとに、新たに地震が発生した際に構造物の被害が限定的となるか否かの閾値を表す被害発生ラインを提案した。

具体的には、2003～2018年度に発生した最大震度6弱以上の23地震のうち全壊住家数が10棟未満の8地震を対象として、構造物への影響が大きいとされる固有周期の加速度応答スペクトルの最大値を包絡する{固有周期0.9s, 最大応答加速度9m/s<sup>2</sup>}と{固有周期2s, 最大応答加速度2m/s<sup>2</sup>}を結ぶ両対数グラフ上の線分が被害発生ラインの定義である(図-1)。地震波形から算出された加速度応答スペクトルが被害発生ラインを超えると、構造物に被害が生じる可能性が高いことを示している。

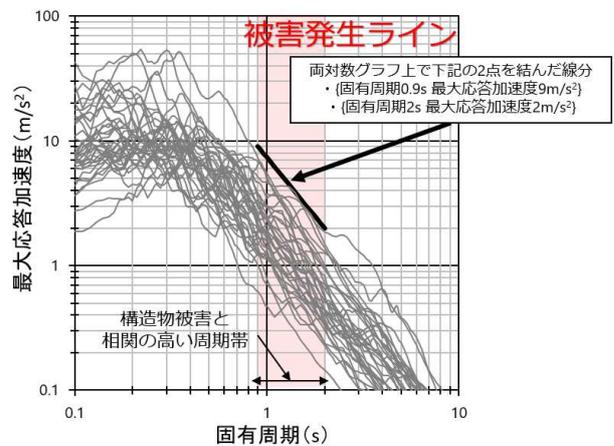


図-1 被害が少なかった地震の加速度応答スペクトルと被害発生ライン

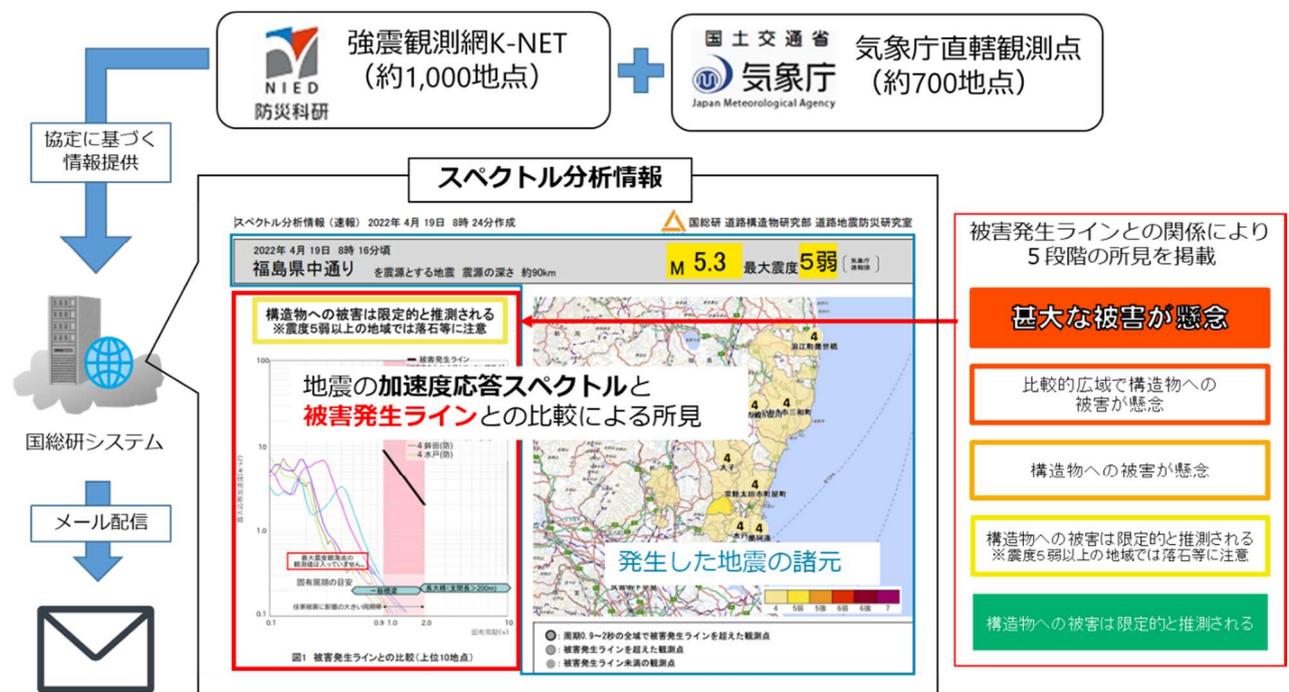


図-2 スペクトル分析情報（本体）の概要と作成・配信フロー

### (3) スペクトル分析情報の概要

最大震度4以上の地震が発生した際、当該地震の加速度応答スペクトルと被害発生ラインとの関係から5段階の所見を付した情報(図-2)とそれらを補足・解説する資料(図-3,4)を加えた計3ページの資料をスペクトル分析情報として国総研にて作成し、被害の規模感の推定情報として、地震発生後約8分で国土交通省の災害対応従事者等のメールアドレスに自動配信している。

スペクトル分析情報の本体(図-2)では、当該地震の加速度応答スペクトルの大きさと構造物被害の規模感の所見、自治体毎の震度情報や加速度応答スペクトルの観測点の位置を記載している。

また、補足・解説情報は発生地震に関わらず同一であり、その1(図-3)では、加速度応答スペクトルや被害発生ライン、5段階の所見の解説を記載しており、その2(図-4)では、1995年の兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)以降で震度7を観測した5つの地震における加速度応答スペクトルや被害概要を記載している。

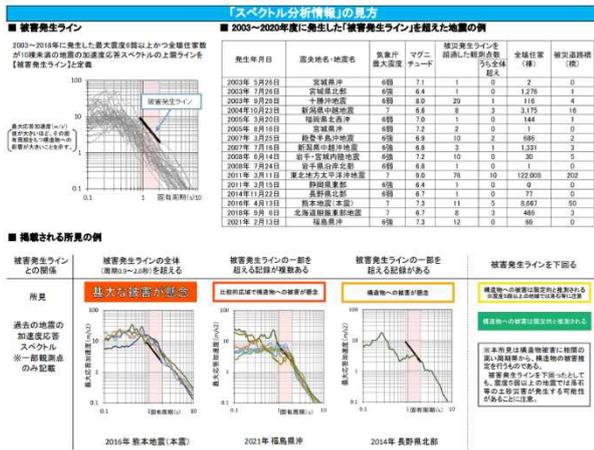


図-3 スペクトル分析情報の補足・解説 その1 (加速度応答スペクトルや被害発生ライン、所見の解説)

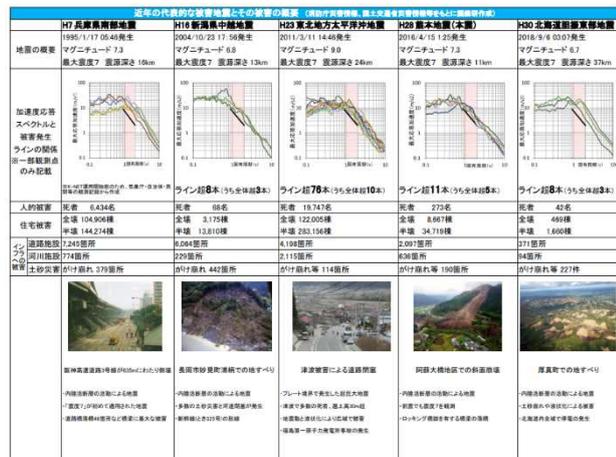


図-4 スペクトル分析情報の補足・解説 その2 (過去の大規模な地震のスペクトルや被害概要)

スペクトル分析情報を地震後8分以内に配信するためには、加速度応答スペクトルのデータを安定的かつ速やかに国総研が入手する必要である。

地震直後に加速度応答スペクトルのデータを算出・提供することが可能であり、日本国内で網羅的に整備されている地震計としては、(国研)防災科学技術研究所(以降、「防災科研」という。)のK-NET(約1,000地点)および気象庁の直轄観測点(約700地点)がある。防災科研はHP上で加速度応答スペクトルを即時公開<sup>9)</sup>しているものの、広範囲で揺れが観測された場合、HPの公開までに多くの時間を要する課題がある。また、気象庁も地震波形やスペクトルのデータをHPで公開<sup>9)</sup>しているが、地震直後には公開されていない。

これらの課題を解決するため、加速度応答スペクトルの情報提供に関する協定を防災科研、気象庁それぞれと結んだ。協定により、地震直後に安定的に加速度応答スペクトルのデータの取得が可能となったことで、現在の地震後約8分でのスペクトル分析情報の配信が実現している。

### 3. スペクトル分析情報の効果と精度検証

#### (1) 2022年3月の福島県沖地震の情報と実際の被害

ここで、近年に発生した大規模な地震として、2022年3月16日の深夜に発生した最大震度6強の福島県沖地震を例に、スペクトル分析情報が被害の規模感とどの程度合致しているのかを確認する。

福島県沖地震で作成・配信したスペクトル分析情報(図-5)によると、9つの観測地点で被害発生ラインを超過していることが示されており、特に、相馬市と角田市の2つの観測点で固有周期0.9~2秒の全域で被害発生ラインを超過する揺れを観測したため、「甚大な被害が懸念」されると推定した。

実際に、道路管理者がパトロールした結果、相馬市ではE6常磐道や国道6号において路面段差が生じていた。また、角田市では市道の枝野橋で下部工が損傷(図-6)し、応急復旧工事が完了するまでの約3ヶ月の間、通行止めとなった。また、住家被害に目を向けると本地震では全壊住家204棟の被害があったことが報告<sup>10)</sup>されており、スペクトル分析情報が被害の規模感を的確に推定できていたことが分かる。

甚大な被害が懸念

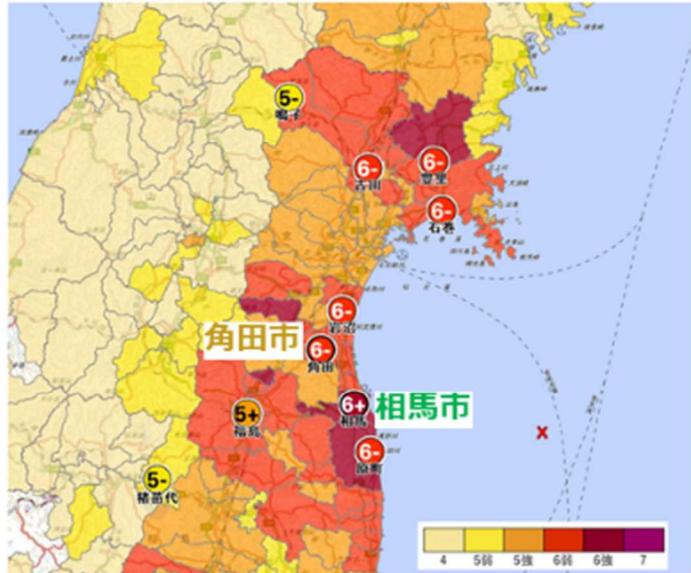
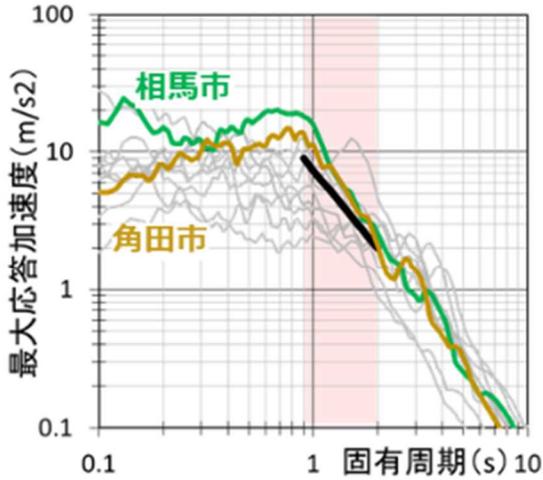


図-5 福島県沖地震のスペクトル分析情報  
(グラフの色を修正し、地図上に注釈を追加)



図-6 地震で被災した角田市の枝野橋

(2) 被害発生ラインの精度検証

前節では、個別の地震事例に着目し、スペクトル分析情報の効果を確認したが、本節では2003～2021年に発生した最大震度6弱以上の地震を対象として、加速度応答スペクトルの被害発生ライン超過有無に基づく、被害推定の精度検証の結果について報告する。

表-2は、検証の対象となる23地震をスペクトル分析情報による被害推定(列方向)と、被災道路橋と全壊住家数の実際の被害(行方向)で分類した結果である<sup>1)</sup>。それぞれI(推定:被害大, 実被害:大)とIV(推定:被害小, 実被害:小)は正しく推定しており、空振りのII(推定:被害大, 実被害:小)と見逃しのIII(推定:被害小, 実被害:大)は推定が外れたと解釈できる。

表-2 2003～2021年に発生した大規模地震における被害予測と実際の被害状況

加速度応答スペクトルと被害発生ラインの関係	被災道路橋数		全壊住家数	
	1橋以上	0橋	30棟以上	30棟未満
被害発生ラインを超過した	I 10	II 6	I 12	II 4
被害発生ラインを下回った	III 0	IV 7	III 0	IV 7
予測精度 (  )の割合	17/23 = 74%		19/23 = 83%	

正しく推定したIとIVの割合は、被災道路橋および全壊住家それぞれ70%を超えており、高い精度で被害を推定できていることが確認できる。加えて、IIIの見逃しは発生しておらず、楽観視させるような情報発信とはなっていない。

災害時の心得<sup>2)</sup>として、「状況が不確実なときには、最悪を想定し、あらゆるリスク計算をして臨むのが原則であり、あとでムダにならないようになどと考えず、大きく構えるのが定石である」と言われており、スペクトル分析情報において見逃しが発生していないことは、地震の初動対応の意思決定を行う上での情報として、重要なポイントである。

4. 自動配信の高度化の経緯と現場での活用

(1) 現行システムの自動配信に至るまで

2.(3)で示したとおり、現在では、加速度応答スペクトルの取得やスペクトル分析情報を配信するシステムが構

築され、地震発生後約8分での自動配信が可能となっているが、これは一朝一夕に実現したものではない。

スペクトル分析情報は、2009年8月に発生した駿河湾の地震以降、最大震度6弱以上の地震発生時に作成・共有する運用を開始している。運用開始当初はデータのダウンロードから配信に至るまで国総研の職員が全て手動で行っていた。加えて、当時はテレワークの環境も十分ではなく、職場に参集した上での作業だった。そのため、例えば2016年の熊本地震の場合、スペクトル分析情報を配信できたのは地震発生から3時間以上経った後であった。このように、当初においてはスペクトル分析情報は初動対応に十分寄与することができなかった。

その後、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）により、スペクトル分析情報を自動作成・自動配信するシステムが構築された。加えて、防災科研および気象庁と協定を結び、加速度応答スペクトルのデータ取得も自動化された。

以上のように、スペクトル分析情報は、配信の即時性や安定性が向上したことで、地震後約8分での配信が可能となった。配信条件も最大震度4以上（部署によっては5弱以上）の地震に変更され、地震発生直後の初動対応の情報として活用することができるようになった。

実際に、国土交通省道路局道路防災対策室の職員からは、「地震直後にスペクトル分析情報が配信されることで、構造物被害発生の有無を想定できるなど、災害対応では非常に役立っている」とコメントをいただいている。

## (2) 初動対応の変更により現場の負荷軽減にも寄与

震度4を観測した地域における地震後の道路パトロールについて、2019年度から試行的な取組を実施しており、その中でスペクトル分析情報が新たに位置づけられた。

従来は、震度4以上の地震を観測した直轄国道事務所では、地震発生後「直ちに」緊急点検を実施することが求められていた。

しかし、スペクトル分析情報による構造物被害の規模感の把握に関する手法が確立され、地震後約8分で配信される環境が構築されたこともあり、震度4の地震発生時の対応は試行的に変更されている。具体的には、直近の天候等による被害の発生が懸念されず、スペクトル分析情報の結果等からも被害の発生が懸念されない場合は、「地震発生の当日又は翌日の平常時道路巡回」で点検を行うこととなっている（震度5弱以上は変更無し）。

つまり、スペクトル分析情報の活用により、道路管理者や維持管理業務等を受注している関係企業も含め、現場の負担軽減に寄与しているとも言えることができる。

2021年度の1年間に最大震度4の地震は全国で43回発生している。そのうち、勤務時間内（平日の8:30～

17:15）は11地震で、残りの32地震は平日の勤務時間外、もしくは、休日に発生した地震である。そのため、この1年間だけでも32回の現場の初動対応を変えたと考えられ、災害対応におけるDXにも寄与しているとも言える。

## 5. おわりに

本稿では、地震直後の情報空白期を埋めるための取組の一つとして、加速度応答スペクトルに着目して構造物被害の規模感を推定するスペクトル分析情報について、背景や効果を報告した。

スペクトル分析情報はこれまで10年以上の長い年月をかけて開発・高度化されてきたものである。今後も自動配信の取組を継続しつつ、推定精度の向上に向けた研究や安定的な配信に向けたシステム改修を行って行く予定である。

**謝辞：**スペクトル分析情報で使用している加速度応答スペクトルのデータは、防災科研および気象庁の地震計で観測・収集したデータである。また、自動配信するシステムの構築については、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）によって実施されたものである。

## 参考文献

- 1)白石萌美，片岡正次郎：インフラ被災情報の把握技術に関する性能水準の検討，平成30年度国土交通省国土技術研究会論文集，p48-53，2018.11
- 2)内閣府：防災基本計画（令和4年6月17日中央防災会議）
- 3)岡田成幸：防災学に必要な地震動入力尺度について考える～震度のフィルター特性の検証を通じて～，第26回地震工学研究発表会パネルディスカッション，土木学会地震工学委員会，pp.13-19，2001.8
- 4)境有紀，神野達夫，瀧川一，建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，CD-ROM，2002
- 5)社団法人 日本道路協会，道路震災対策便覧（震災復旧編）平成18年度改訂版，2007.3
- 6)国土交通省国土技術政策総合研究所：平成15年（2003年）十勝沖地震被害に係わる現地調査報告書，pp.69-73，2005.
- 7)消防庁：平成15年（2003年）十勝沖地震（確定報）
- 8)（国研）防災科学技術研究所：即時公開データ  
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/instant/>
- 9)気象庁：強震観測データ  
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>
- 10)消防庁：福島県沖を震源とする地震による被害及び消防機関等の対応状況（第22報）
- 11)川嶋祥之，増田仁，小嶋啓太，片岡正次郎：地震動のスペクトル分析情報—分析情報の概要と検証—，国土技術政策総合研究所資料，No.1204，2022.3
- 12)国土交通省東北地方整備局：災害初動期指揮心得，2013.3

# 災害時における3次元データの視覚化の検討

佐々木 励起<sup>1</sup>・新藤 昭彦<sup>1</sup>・岸本 紀子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国土地理院 基本図情報部 地図情報技術開発室 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番) .

災害時、国土地理院では、航空写真を用いた写真測量や無人航空機に搭載したレーザスキャナによるレーザ計測により、3次元点群データや3次元メッシュモデルの作成を行っている。この3次元データを視覚化し分かりやすく扱いやすい形で関係者や一般において活用できるように、WebアプリケーションやVRゴーグル等を使用した3次元データの視覚化の試行を行い、各手法について比較検討を行った。

キーワード 災害対応, 3次元点群データ, データ視覚化, VR

## 1. はじめに

3次元点群データは多様な分野で活用可能な価値が着目され、整備・活用を図る動きが出ている。また、2020年に国土地理院長の私的諮問機関である測量行政懇談会において、3次元点群データの流通促進に関する提言が取りまとめられたり。さらに、事前防災・被災状況把握、浸水想定などの3次元化などシミュレーションの高度化、盛土など災害リスクの高い地域の可視化等に役立つことから、国土地理院では、将来的な3次元点群データの整備・提供を見据え、適切な提供形態やその効果等について検討を進めている。

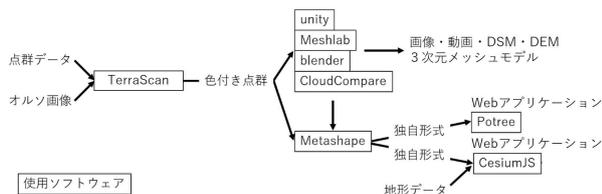
また国土地理院では、航空写真を用いた写真測量や無人航空機に搭載したレーザスキャナによるレーザ計測により、3次元点群データや3次元メッシュモデルの作成を行い災害時の状況把握に活用している。3次元メッシュモデルは、3次元点群データから不整三角網メッシュを発生させ、画像からテクスチャを生成させて組み合わせた3次元のデータである。しかし、3次元点群データと3次元メッシュモデルは容量が大きく、表示や編集に専門的なソフトウェアを必要とするため、発災直後及び災害後(本報告では発災から数日以降の落ち着きを取り戻した時点をいう。以下同じ。)において有用な情報にもかかわらず、専門家以外では取扱いが困難である。そこで、主に災害時に計測した3次元点群データが関係者や一般において活用されることを想定し、3次元データの

視覚化の方法について検討を行った。なお、本論文では、3次元点群データと3次元メッシュモデル、DSM・DEMを合わせて3次元データと称する。

## 2. 3次元データの視覚化フロー

レーザ計測で取得した3次元点群データは、XYZの位置情報を有し、特に写真測量に比べ高さ方向の精度が良い。しかしながら、3次元点群データそのものだけを見ても、どこの位置のどのような地物の情報であるか認識することは難しい。そこで、TerraScanというソフトウェアを用いて、別途撮影したオルソ画像から色の情報を抜き出して3次元点群データに与え、場所や地物が視覚的に認識できるような色付き点群データの形に加工する。

また、3次元点群データは閲覧に専門的なソフトウェアが必要であり扱いが難しいため、地理空間情報データを扱うソフトウェアや知識を有する専門家以外でも閲覧しやすい形にするためには別の形式に変換することが適当である。例えば、色付き点群データから、CloudCompareやMeshlab, unity, blenderといった3次元データを扱うソフトウェアによって、画像や動画、さらには後述の通りVRコンテンツを作成することが考えられる。また、Metashape等の3次元データ編集ソフトウェアを用いることで、3次元データをWeb上で3次元表示することができるツール(CesiumJSやPotree)のファイル形式に変換することができる。これら視覚化の工程について、図-1に示した。



TerraScan	オルソ画像を使用して3次元点群データの色付けができる。
CloudCompare	3次元点群データのトリミング等編集ができる。
Metashape	複数方向の写真からSfM/MVS処理により3次元メッシュモデルを作成できる。
Meshlab unity/ blender	3次元データの編集やレンダリング、撮影ができる。

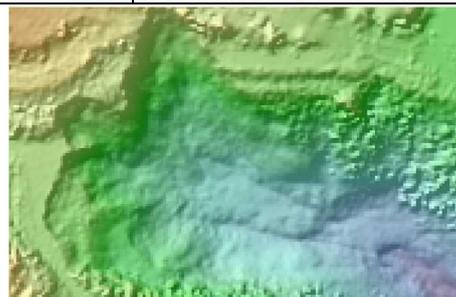
図-1 3次元データの視覚化フロー

表-1 視覚化方法のメリット・デメリット

		メリット	デメリット
ダウンロード コンテンツ	3次元点群データ (LAS・XYZ) ※1	・生データであるため用途に合わせて加工し、 見せ方の工夫が加えられる	・データ容量が大きい ・閲覧に専用のソフトウェアや高性能なPCに加え 見せ方の工夫についてノウハウが必要
	DSM・DEM (TIFF) ※2	・生データに比較的近いため、見せ方の工夫が ある程度可能 ・データ容量が3次元点群データより少なく、 取り扱いやすい	・閲覧にはGISソフトが必要であり、その操作能 力が必要 ・通常、GISソフトでは画面上での平面的な見え方 にとどまる
	3次元 メッシュモデル (OBJ等) ※3	・3次元メッシュモデルを動かして閲覧できる ・VRコンテンツに加工することで、常時、3次 元的に表示視点を移動、回転することがで き、より臨場感を持った視覚化を実現できる	・3次元メッシュモデルやVRコンテンツへの加工 は専門のソフトウェアや知識が必要であり、閲 覧・加工を行うための手順が煩雑 ・VR機器等について多少の費用が生じる
ブラウザ コンテンツ	画像・動画 ※4	・一般のPCで閲覧でき、専用のソフトは不要	・視点をを変えるなどの高度な操作は不可能
	Webアプリ CesiumJS ※5	・ブラウザ上で3次元点群データを表示し、動 かして閲覧することができる ・地形図上に3次元点群データを直接表示した り、データを重ねて表示することができる ・一般のPCで閲覧でき、専用のソフトは不要	・Webサイトの構築・保守が求められる ・閲覧用データ加工に一定の能力と労力を要する ・画面上での見え方はVRほど立体的ではない ・現状では回転や倍率変更の表示に時間がかかる
	Webアプリ Potree ※6	・ブラウザ上で3次元点群データを表示し、動 かして閲覧することができる ・表示が綺麗で軽快 ・一般のPCで閲覧でき、専用のソフトは不要	・Webサイトの構築・保守が求められる ・閲覧用データ加工に一定の能力と労力を要する ・画面上での見え方はVRほど立体的ではない ・地形図上への3次元点群データ表示や、データを 重ねて表示するにはやや手間がかかる



※1 色付き3次元点群データ



※2 DEM (標高・陰影段彩)



※3 3次元メッシュモデル (VRコンテンツ化)



※4 画像・動画



※5 Webアプリ CesiumJS



※6 Webアプリ Potree

### 3. 各視覚化方法のメリット・デメリット

各視覚化方法のメリットとデメリットを検討した(表-1)。その際、2021年7月に発生した熱海市における土石流源頭部の3次元点群データを様々な形式に変換し、検討に用いた(表-1※1~※6)。

3次元点群データは、災害時の使用目的に応じてDSM・DEMや3次元メッシュモデル等様々な形式に加工できる。GISや3次元点群データ編集ソフトウェアを用いて、場合に応じて不要な3次元点群データをフィルタリングした上でDSMやDEMに加工することで、GISを用いて段彩図等の視覚化や地形・地物の変化の分析がしやすくなる。また、熱海市の土石流の事例では災害現場のDEMを作成の後、発災前後の標高変化量を算出し、土砂の流出量を定量的に明らかにすることができた。さらに、3次元点群データから3次元メッシュモデルを作成し、動かして閲覧することで、確認したい災害現場の地形等の3次元的な特徴を把握しやすくなる。

3次元点群データを画像や動画として公開することで、災害現場を3次元的に捉えることができるが、さらに、ブラウザ上で閲覧することができるCesiumJSやPotreeのようなWebアプリケーションを用いる方法では、3次元点群データに対し、視点の移動や、データの回転など3次元的に操作を行うことが可能である。CesiumJSはWebブラウザ上の地球儀に情報を可視化でき、3次元地形図上へ3次元点群データを直接表示するなど、データを重ねて表示することが可能である。表-1※5に示したように、発災前の地形図に発災後に取得された3次元点群データを重ね、表示・非表示を切り替えることで災害現場の地形変化を3次元的に把握することができる。PotreeではCesiumJSと比較して3次元点群データをより軽快に表示することができる。

しかしながら、ブラウザ上で示す方法では、正確な位置情報を有する3次元データを用いるにもかかわらず、2次元的な画面上での視覚化に留まる。画面上では、実物よりも3次元データが縮小表示され、奥行き表示も平面に投影されたものとなる。

そこで、3次元メッシュモデルによるVRコンテンツを用いた被災地の3次元データの視覚化について検討した。VRは仮想現実とも称され、コンピュータ等を用いて仮想的な世界を作り出し、人間の感覚器官に働きかけることでその世界に属しているように感じさせるような装置、又はその体験のことを指す。VRゴーグルを使用することで、3次元データを実物大のように閲覧でき、奥行き方向への視点移動や景色を見渡すことができる。また、画面上での閲覧と比較すると、災害現場と同様の認知・心理的反応を

伴う視覚化が可能となる。これにより、二次災害の危険がある箇所をVR空間に複製し、安全に災害現場の状況確認を行える。

しかしながら、3次元データのVRコンテンツ化は、煩雑なデータ加工や細かな設定が必要となり、災害時の利用は進んでいない。そこで、次の章ではVRコンテンツによる視覚化の手法について述べる。

### 4. VRコンテンツ作成の試行

#### (1) VRコンテンツの作成フロー

図-2にVRコンテンツの作成フローを示す。VRコンテンツの作成フローは、3次元点群データを用いる場合と、3次元メッシュモデルを用いる場合で異なる。3次元点群データを用いる場合、前述のとおり、まずオルソ画像等によって3次元点群データに色付けを行う。色付き点群はCloudCompareやMeshlabといった3次元データ編集ソフトウェアによってファイル形式を変換し、3次元データを編集できるゲーム開発エンジンであるunityに取り込むことができる。一方で、3次元メッシュモデルを用いる場合は、SfM-MVS処理によって作成された3次元メッシュモデルをそのままの形式でunityに取り込むことができる。unityに取り込まれた3次元点群データや3次元メッシュモデルは、モデルやカメラの位置を調整してアプリケーションとして出力し、VRゴーグルに取り込み、VRコンテンツを閲覧することが可能となる。

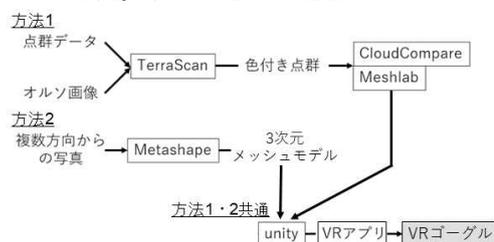


図-2 VRコンテンツの作成フロー

#### (2) 衝突判定・コントローラ操作の導入

unityでは、衝突判定機能であるメッシュコライダーを使用でき、メッシュ数が多いほど衝突判定が正確となるが、VRゴーグルでの表示は遅くなる。そこで、元データである3次元メッシュモデルを間引いたモデルにメッシュコライダーを適用し、一方で表示には元データのモデルを用いることで、快適な動作で高精細な視覚化が可能と考えた(図-3)。これに操作プログラムを適用することで、操作者が、コントローラを用いてVR上で任意の場所に移動しながら地形や地物をスムーズに確認することができる。なお、メッシュコライダーを適用するモデルは、間引き率が大きいほど高速に表示できるが、衝突判定が不自然となる特徴があり、目的に応じた設定が必要となる。

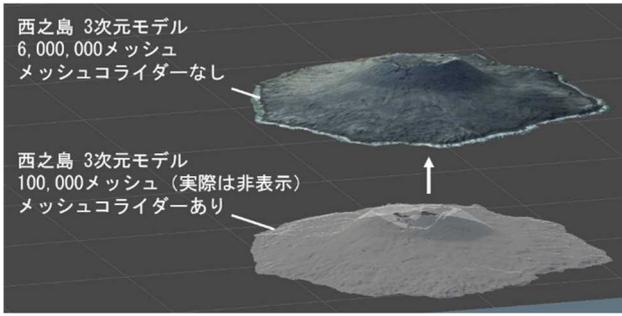


図3 西之島3次元メッシュモデル 衝突判定実装の例

### (3) VRコンテンツの作成・活用事例

国土地理院が西之島噴火の対応のために撮影した航空斜め写真にSIM-MVS処理を行い、3次元メッシュモデルを作成した。このモデルに前述の衝突判定とコントローラ操作を導入し、VR上で西之島の3次元メッシュモデルの上をプレイヤーが移動できるようにした。これにより、現時点では一般人の上陸が困難な西之島の地形を、実際に散策するようなVR体験ができるようになった。

VRゴーグル上で閲覧している風景は、WebサイトによってPC画面上にミラーリングすることができ、これにより一人が閲覧している景色を多数の人で共有して閲覧することができる(図4)。

このように、実際に西之島に上陸したかのようにデータを見ることができ、西之島における活動計画立案等の予察への活用や、火山活動を観察することで、防災地理教育への活用が期待される。



図4 VRゴーグルのミラーリング

## 5. 考察

災害時における3次元データの視覚化について検討を行った。3次元点群データを直感的で分かりやすいように視覚化するほどデータ加工が煩雑となり、発災直後の迅速な提供には不向きな傾向があると言える。そのため、各機関で災害対応が行われる発災直後と災害対応が落ち着いた災害後のフェーズに分けてデータ提供の方法について検討した(図5)。

発災直後においては、迅速な情報提供が求められる

る。そのため、加工を施さない3次元点群データや、加工が容易な画像・動画、CesiumJSやPotreeのようなWebアプリケーションといった形態でのデータ提供が迅速な提供という観点で適していると考えられる。3次元点群データは専門的なソフトウェアで加工や分析を行うことができる。それに対して画像・動画やWebアプリケーションは多くの人が直感的に災害の状況を把握するのに適している。

一方で、災害後においては、複雑なデータ加工を行う時間が確保できるため、DSM・DEMや3次元メッシュモデル等VRコンテンツの作成・提供も想定できる。DSM・DEM形式に加工することで、GISを用いた地形等の分析が行いやすくなる。また、VRコンテンツ作成の試行では、臨場感のある体験により、直感的に災害状況を把握できることが確認できた。特に災害時の地形や規模を把握しやすいほか、建物等を側方からの視点で眺めることができるため、浸水状況や損壊状況が一目で見て取れる。そのため、被災地での災害対応に係る意思決定支援やそれによる二次災害の防止効果が期待できる。

## 6. まとめ

災害時の3次元データは、現地の状況を把握する上で効果的であることから、今回の分析を踏まえ、今後災害が発生した際に緊急度や利用するユーザに適した形式で視覚的に分かりやすいデータを作成できるよう、引き続き技術開発を行うことが有用である。また、レーザ計測による全国の標高データ整備や測量成果のオープンデータ化の推進に伴い、3次元データの活用への機会は今後増加していくと予想される。そのため、3次元データの視覚化や作成の方法について、実践的に試行を行い、検討を重ねる必要がある。

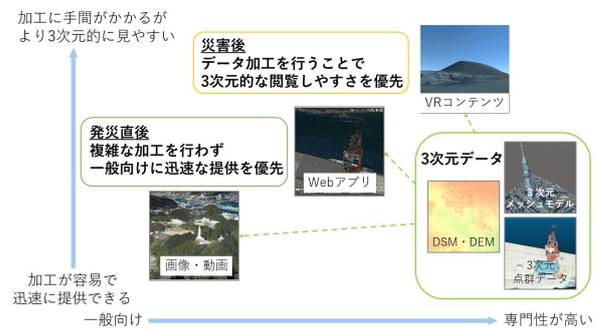


図5 視覚化方法のまとめ

## 参考文献

- 1) 第25回測量行政懇談会(2020) 3次元地図検討部会報告書. <https://www.gsi.go.jp/common/000239754.pdf> (最終閲覧日:2022年7月13日)。