

令和 5 年度
国土交通省 国土技術研究会

概要論文集

～一般部門＜安全・安心Ⅱ＞～

研究会 1 日目（12 月 7 日（木））

15：30～18：15

研究会 2 日目（12 月 8 日（金））

9：45～11：00

自由課題(一般部門<安全・安心Ⅱ>)

12月7日(木) 15:30~18:15③C会場

発表 順序	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
1	15:30~15:45	超急峻斜面における調査・施工について	長野県 建設部河川課	坂田 健剛
2	15:45~16:00	国道252号(あいよし橋・出逢橋)雪崩被害の概要と対策について	福島県 小名浜港湾建設事務所 企画調査課 (旧所属:南会津建設事務所 河川砂防課)	渡部 裕貴
3	16:00~16:15	防雪柵の開閉部対策に関する技術資料(案)について	国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 雪氷チーム	松下 拓樹
4	16:15~16:30	専門的知見を取り入れた更なるロードキル対策への取組	本州四国連絡高速道路株式会社 DX推進室 情報システム課	河内 聡
5	16:30~16:45	インフラDX技術を活用した交通安全対策箇所における要因分析の高度化の取り組み	中部地方整備局 岐阜国道事務所 管理第二課	近藤 和歩
6	17:00~17:15	衛星画像を活用した道路被災状況把握の試み	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	梅原 剛
7	17:15~17:30	衛星・AIを活用した地図作成の効率化	国土地理院 基本図情報部 地図情報技術開発室	桑村 亜実
8	17:30~17:45	AI流入量予測を活用したダム管理	四国地方整備局 河川部 河川管理課	佐原 大理
9	17:45~18:00	厚真川水系日高幌内川の大規模河道閉塞箇所における移動土塊の安定性評価について	北海道開発局 室蘭開発建設部 厚真川水系砂防事業所	本田 浩貴
10	18:00~18:15	漂着軽石の埋立材料への活用手法検討と埋立実施について	内閣府 沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 中城湾港出張所	富田 晋平

自由課題(一般部門<安全・安心Ⅱ>)

12月8日(金) 9:45~11:00 ③C会場

発表 順序	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
11	9:45~10:00	災害時における被災状況把握への取り組みについて	関東地方整備局 相武国道事務所 管理第二課	齊藤 瑞穂
12	10:00~10:15	阿蘇山噴火後の降灰状況調査手法-立入困難区域での降灰観測-	九州地方整備局 阿蘇砂防事務所 調査課	宮崎 仁
13	10:15~10:30	アルミ樹脂複合版を用いた外装ファサードの燃え拡がりに及ぼす影響因子の分析	国立研究開発法人建築研究所 防火研究グループ	西尾 悠平
14	10:30~10:45	ダム操作中における危機的状況に対する備えの強化-ダムコンダウン時を想定した独自のシステム対応-	独立行政法人水資源機構 池田総合管理所 第一管理課	吉村 研人
15	10:45~11:00	真名川ダム主放水ゲート設備油圧シリンダー更新について	近畿地方整備局 九頭竜川ダム統合管理事務所 真名川ダム管理支所	原 裕貴

超急峻斜面における調査・施工について

坂田 健剛

長野県建設部河川課（〒380-8570 長野市大字南長野字幅下692-2）

県道沿いの山腹斜面が岩盤崩落して県道を完全に閉塞し、復旧及び再度災害防止のための対策が必要となった。

一つのミスが命取りの危険な現場であるが、現場条件を考慮し、UAVによる3次元測量や無足場施工、ICT技術を活用した施工等、様々な技術を駆使して効率的かつ的確に現場を進めることができるよう工夫した取組を紹介する。

キーワード 急斜面、ICT、鉄筋挿入、無足場工法

1. はじめに

今回、岩盤崩落が発生した箇所は、長野県中部の上田市南部旧武石村の集落内を通る幹線道路である主要地地方道美ヶ原公園沖線に接する自然斜面である。（図-1）

同路線は、コロナ過以前には年間50万人以上の観光客が訪れていた美ヶ原高原エリアに位置し、近くには番所ヶ原スキー場、道の駅 美ヶ原高原、王ヶ頭電波塔や牧場等がある観光アクセス道路になっている。

また、美ヶ原林道を行くと松本市浅間温泉へと繋がっており、地域間を結ぶ路線としての役割もある。

崩落箇所は、冬期通行止区間であり、2021年4月20日の交通開放を前に道路維持JV業者がパトロールを2021年4月6日に行ったところ、岩盤斜面が幅13m、斜面長50m、高さ42m、深さ3mの範囲で崩落（推定土量1,000m³）し、幅20mにわたって県道を完全に塞いでいることが確認された。（写真-1,2）崩土の先端は県道を超えてさらに20m下方の一級河川武石川まで達したが、河道閉塞までには至らなかった。幸いにも、けが人等はなかったが、斜面が不安定な状態であったため、通行止期間の継続を余儀なくされた。すぐに緊急調査を実施し、復旧方針の検討、復旧工事を実施した。

当箇所は、斜面勾配が50° から75° のまさに超急峻斜面であり、一つのミスが命取りの危険な現場であるが、調査業者、施工業者と知恵を出し合い、様々な技術を駆使して効率的かつ的確に現場作業を進めることができるように工夫した。その事例を本稿で紹介する。



図-1 位置図



写真-1 上空から



写真-2 斜面上部（左） 道路閉塞状況（右）

2. 現地調査と復旧方針について

(1) 現地調査

現地調査の結果、以下の素因・誘因が考えられた。

【素因】

- ・尾根凸部遷急線にあり地形的に不安定
- ・尾根部のため岩盤が風化していた
- ・岩盤に節理が多く発達し、流れ盤と受け盤が複合したブロックで分離しやすい
- ・標高1400mの積雪寒冷地で凍結融解が著しい

【誘因】

当該地に近い鹿教湯アメダス（降水量）、及び松本（気温）の崩壊発生冬季の気象状況を図-2に示す。

これを見ると、寒暖差が激しく凍結融解が進んでいたことと、3/20頃の多量の降雨（43mm/日）と気温上昇による融雪が誘因となって崩壊が発生したものと考えられる。

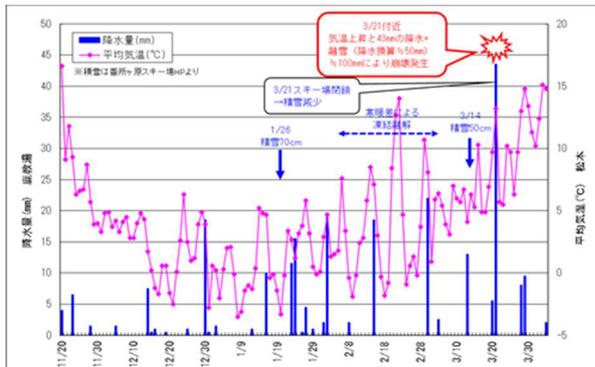


図-2 被災時の気象状況

(2) 現地調査時の工夫

(a) UAVレーザによる測量

当箇所は、平均勾配60°の超急斜面であり、測量作業の効率性、安全性を考慮してUAVレーザによる測量を行った。これにより、危険な現場での作業時間が大幅に減ることによる災害リスク軽減と横断図がどこでも抽出できる点、周辺の危険な転石も確認できたことから、設計検討時に路線測量成果を待つことがなくなり、滞りなく検討することが可能になった。

(b) 弾性波探査の実施

滑落崖は、オーバーハングしていたり、表面が強風化していたりと不安定な状況であり、対策工を検討するために法面全体の詳細な岩盤状況を調査する必要があった。本来であれば、地質調査ボーリングを2本以上実施して、風化して崩落する恐れのある範囲やすべり面を推定したいところだが、今回は、最急勾配75°の斜面であり、斜面上の地質調査ボーリングは、不可能であった。

そこで、比較的安全な滑落崖頭部での地質調査ボーリング1箇所と弾性波探査を併用して実施し、すべり面を推定することとした。図-3に調査概要を示す。

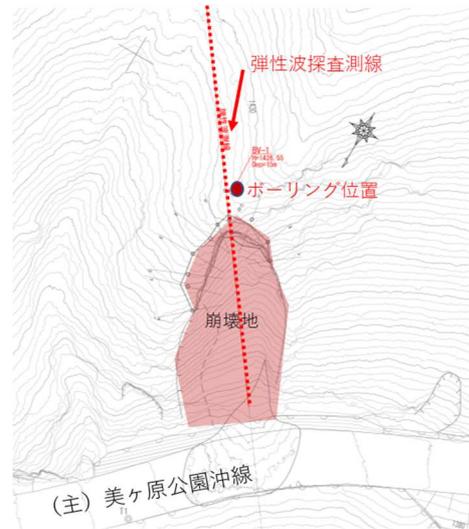


図-3 調査概要

弾性波探査は、人工的な衝撃により弾性波を発生させ、その地中の弾性波速度（伝播速度）により、地盤の固さや種類、成層状況などを確認する方法で、今回現場での作業は1日で完了した。これは、ボーリング調査を1箇所実施するよりも遥かに早い。

また、地質調査ボーリングと併用することで調査精度が上がる。たとえ、ボーリングを2箇所実施したとしても、それは点の情報であり、それを線で繋いで地層を推定することしかできない。しかし、弾性波探査であれば高密度解析により法面の詳細な二次元解析が可能になる。その結果をボーリング結果と比較することで信頼性が高い解析が可能になることから採用した。

今回の弾性波調査結果を図-4に示す。

弾性波速度が低ければ、亀裂が多く風化している岩が分布しており、高ければ亀裂が少ない、良好な岩が分布していることを示している。結果を見ると、直線斜面から尾根～滑落崖にかけての表層は速度が低い風化帯であり、滑落崖の下部から平滑な崩壊面までは良好な岩が分布していることがわかる。

この結果を考慮し、崩壊面延長線の良好な岩と風化岩の境界を想定すべり面とした。

一般的には、山岳トンネルやダム、地すべり等の検討時に活用することが多い弾性波探査を実施することで、的確に岩盤状況を捉えることができ、対策工の設計に活かすことができた。

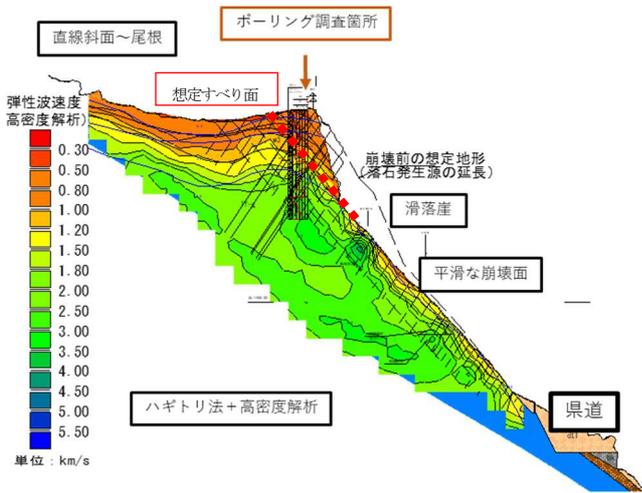


図4 総合解析図

(3) 復旧方針

今回の復旧計画について、図-5に示す。

滑落崖斜面については、分離面が後退する可能性のある風化岩が残存しており、安定勾配が確保できていないため、抑止対策として鉄筋挿入工を施工する。滑落崖の表面については、風化により岩盤の目に沿った細かな亀裂が密に発達していたため、モルタル吹付工を施工することにより落石防止、風化防止対策を行うこととした。他にも、周辺を現地調査した結果、崩落箇所周辺に浮石・転石が多く見つかった箇所があり、斜面下を通る県道まで落石が影響する可能性が生じたため、原位置対策としてロープネット工を施工することとした。

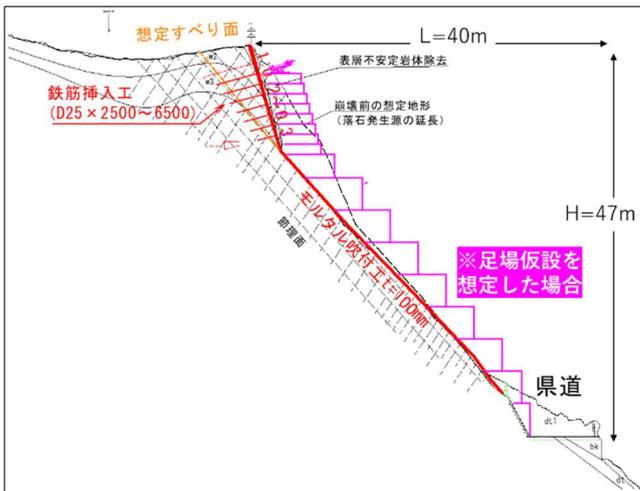


図5 復旧計画

3. 施工時の工夫について

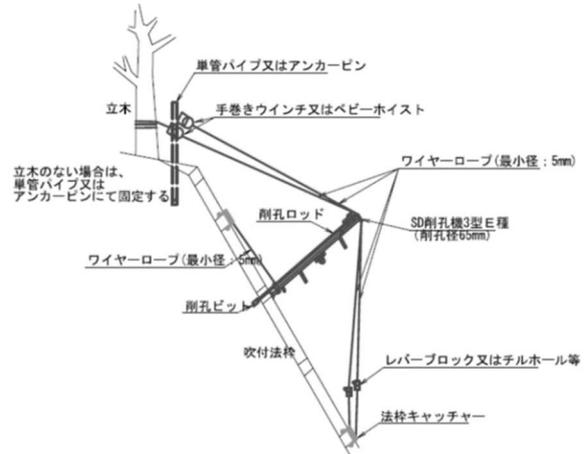
(1) 無足場工法の採用

今回の現場で一番苦悩したのが、鉄筋挿入工削孔時の仮設計画である。

足場を組むにしても、斜面の勾配が非常に急で起伏が激しく、表面が強風化している状態であったため、斜面

内からの足場支持は不可能な状態であった。そのため、足場を組むとしたら、県道から立ち上げる必要があったが、今回の施工箇所は県道からの高さ47m、県道からの離れ40mと高いだけでなく、道路から離れていることもあり、安全性、施工性、経済性に懸念があった。(図-5) また、削孔箇所の岩質が中硬岩に相当することもあり、削孔中の振動に耐えられるのかも不安があった。

そこで、「スタンドドライブ(SD)工法(図-6)」と呼ばれる無足場での削孔が可能な工法を採用した。



※この図は標準機器設置例であり、現場条件により異なる。

図6 スタンドドライブ(SD)工法

この工法は、上下4箇所をワイヤーで固定して削孔反力を従来の削孔機重力で抑えるのではなく、ワイヤーの緊張力で抑える仕組みである。今回は、上2箇所を立木で固定し、下2箇所を法面に簡易なアンカーを打設して固定した。

削孔機械等の重量が比較的軽く、積載可能重量500kgのモノレールでの現場搬入を実施した。

本工法は、岩盤でも長さ7.0mまで削孔可能ということであったが、本当に削孔できるのか半信半疑であった。しかし、いい意味で期待を裏切られ、現場はスムーズに進み、事故なく工事を終えることができた。



写真-3 削孔状況

(2) 3次元測量データを活用しての位置出し

今回の現場は、起伏が激しい地形条件であり、鉄筋挿入の間隔を設計通りに設置するための現場への墨出しに時間を要することが想定された。

そのため、モルタル吹付工の完了後、地上型レーザースキャナによる3次元測量を行い、データ上で配置設計をした後、現場への墨出しを行った。3次元データで検討を行うことにより、鉄筋の干渉についてもチェックが可能になり、精度の高い検討が可能となった。

この工夫により、モルタル吹付工から鉄筋挿入工までの間を滞りなく作業を進めることができた。



写真-4 鉄筋挿入位置の墨出し

(3) 3次元での出来形管理

今回、モルタル吹付工に関わる出来形管理について、地上型レーザースキャナによる3次元測量での管理を行った。危険な斜面内での作業を削減できた。

また、鉄筋挿入工の配置間隔については、従来通りテープにより測ったが、施工業者の強い探求心により UAV 写真測量と地上型レーザースキャナ(TLS)により測量を実施し、それぞれのデータについて比較検討し、今後の ICT 活用工事の参考とすることとした。

(4) そのほか

施工業者の現場での工夫として、パワーアシストスーツ(PAS)採用による負荷軽減とモーション検知センサー設置による安全管理を行った。(写真-5,6)

PAS は、グラウト練混ぜ時に、人力によりグラウト材を移動、投入する際に使用して労力負荷軽減を行った。使用者からは、低負荷での作業が可能になり、疲労軽減、効率化に繋がったとの感想をいただいた。このような常に安全に気を配ることが必要な現場では、少しでも疲れを軽減させることが安全な施工につながると考える。そういったことから、施工性だけでなく安全面にも効果があったのではないかと。

モーション検知センサーは、斜面上部の作業場に設置し、人が前を通ると「ここから先は危険です」とアナウンスしてくれるものを設置した。普段の安全教育、安全管理だけでなく、作業現場(崖上)にも注意喚起を看板等の目だけでなく、音でもすることによって、より安全への意識が傾き、現場を進めることができたといえる。

これらは、工事全体からすれば小さな工夫かもしれない

いが、こういった小さな工夫の積み重ねが今回のような条件が厳しい現場でも事故なく終わった要因だと考える。



写真-5 PAS

写真-6 検知センサー

ここまでスタンドドライブ工法による無足場施工、3次元データを活用しての施工を通して、この現場での有効性をとりまとめるとともに鉄筋挿入工の出来高管理に関わるテープ測量、UAV 写真測量、TLS 測量のデータを比較検討することとした。

4. 結果・考察

(1) スタンドドライブ工法の有効性

今回、スタンドドライブ工法での無足場での施工をしたことにより、足場を設置した場合よりも大幅な施工性の向上(工期短縮)が図られた。(図-7)

足場がある場合だと2500空m³ほどの足場が必要になり、その設置撤去に60日(40空m³/日)かかってしまう予定であったが、今回の工法だと15日間で済み、67日の工期短縮に繋がった。

削孔機械の重量が200kgと比較的軽量なため、基本的には4点で支えているワイヤーの伸縮で削孔箇所への移動が行えるため、他の機会に比べてスムーズにできたことも工期短縮に繋がった。

また、コスト削減も図られた。(図-8)

こちらも足場工の場合だと足場工に関わる工事費が多くを占め、10,000千円ほどかかる予定であったが、今回それが丸々不要となったため、足場工で実施するよりも直接工事費で2,400千円のコスト削減が図られた。

さらに、モノレールの規格について、今回は積載重量500kgのもので運搬ができたが、足場工でやる場合は、それでは削孔機械が運搬できず、モノレールの積載可能重量を上げなくてはならない可能性が高い。その観点からも、コスト削減が図られたと考える。

今回の現場のように不安定な超急斜面上での作業は、作業日数をできる限り短縮することが事故リスクの軽減に繋がり、何よりの安全性向上だといえる。このことから、先で述べた施工性、経済性のみでなく、安全性にも有効であった。

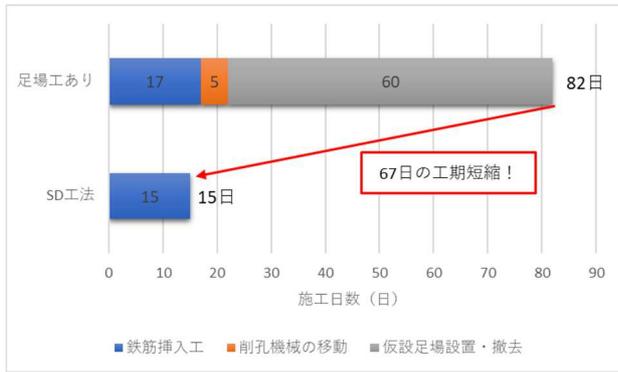


図-7 足場設置した場合との工期比較

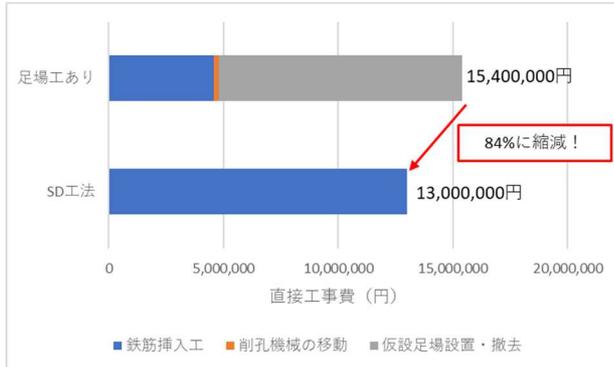


図-8 足場設置した場合との直接工事費比較

(2) 3次元データ活用の有効性

ICT活用工事といえば、ICT建機にデータをインプットして生産施工上に繋げるのが一般的である。今回の現場では、基本的に人力作業によるものが多く、3次元測量やデータを活用した施工が有効かどうか疑問であったが、施工性と安全性向上の面で効果があった。

まずは3次元測量を実施することによって、作業の省人化が図れ、ほかの作業に人員を充てることができ、滞りなく現場を進めることができた。特に、鉄筋挿入位置の検討に3次元測量データを活用した際には、モルタル吹付工と並行して測量を行うことにより、スムーズにモルタル吹付工から鉄筋挿入工に移行できた。従来であれば、現場の安全上、吹付がすべて完了してからか、作業を止めて測量をする必要があったが、斜面上での測量作業がないため、吹付作業を止めることなく実施できた。残る吹付工を施工している間に、測量データを活用して配置位置の検討をパソコン上で行ったことで、効率的な施工に繋がった。

安全性の面では、測量、出来形管理時に危険な斜面上での作業が不要となったことによる作業員の転落、転倒、墜落リスクが低減できたことが一番大きい効果である。

(3) UAV写真測量とLS測量の比較について

比較結果を表-1に示す。

一般的には、UAVよりもTLSの方が精度が高く、今回のように起伏、高低差が激しい現場では、UAVは不向きとされていたが、結果的にはどちらもテープ測量に較べ

て同程度の結果となった。周りに立木等の障害物が少なく、好条件であったことが要因の一つかと思われる。ちなみに、管理基準の配置誤差規格値は100mmである。両測量ともテープ測量に較べて10mm程度の誤差であったことから、精度的に十分使用可能であったといえる。

まだまだ事例収集、整理は必要であるが、UAVでもTLSと同程度の精度が見込めるのであれば、今回のような急斜面での場合は、UAVを使用して出来形管理を行うのが効率的で、安全上も望ましいと考えられる。

※UAV:写真測量

TLS:地上型レーザー

スキャナ

表-1 鉄筋挿入工の配置間隔比較結果

	UAVとテープの差	TLSとテープの差
縦(58側線)	11mm	14mm
横(57側線)	13mm	13mm
計(115側線)	12mm	13mm

5. まとめ

今回、超急斜面である危険な現場において、施工性、安全性、精度等を向上させるために様々な取り組みを行ったが、それぞれ有効性が確認できた。

特に今回は、現場作業をしている最中は常に重大な事故リスクが伴う現場条件であったため、“現場作業日数の短縮=事故リスクの回避(安全性向上)”につながり、施工性向上、工期短縮が重要課題であった。

その点、足場の不要なスタンドドライブ工法とUAVやTLSによる3次元測量の活用効果が大きかったと感じた。

今回のように危険度が高く、交通を確保するために早急な復旧が求められるような現場は、実績の多い工法を採用することが多く、実績が少ない工法や最新技術等の採用を敬遠しがちだと感じる。

危険な現場こそ、新技術による施工性向上が見込まれる工法や今回の施工業者のようにICT技術、BIM/CIMを臆することなく積極的に活用し、施工効率を上げ、現場での作業ができる限り少なくなる工夫をすることが重要であると私は考える。

謝辞:本調査・工事にご協力いただいたすべての関係者に敬意を表するとともに、感謝を申し上げます。



写真-7 竣工写真

国道252号(あいよし橋・出逢橋) 雪崩被害の概要と対策について

渡部 裕貴

福島県 小名浜港湾建設事務所 企画調査課 (〒971-8101 福島県いわき市小名浜字辰巳町 68 番地)

令和4年3月4日、ダムの定期点検を行っていた電源開発株式会社より福島県の最西端に位置する只見町と新潟県を結ぶ国道252号に架かるあいよし橋が流失しているとの情報を受けた。その後の調査であいよし橋の流失、出逢橋の損傷を確認した。災害復旧事業での事業採択に向け、雪崩メカニズムの解析や復旧工法を検討した。

キーワード：雪崩メカニズム，三次元雪崩シミュレーション，基本方針策定，ワーキンググループ

1 はじめに

令和4年3月4日、ダムの定期点検を行っていた電源開発株式会社より福島県の最西端に位置する只見町と新潟県を結ぶ国道252号に架かるあいよし橋が流失しているとの情報を受けた。その後の調査で、橋長93mの3径間連続鋼方杖ラーメン橋のあいよし橋が流失し、下流の谷部に確認された。さらに、出逢橋も上流側の桁や高欄が下流側へ大きく変形していることが確認された。

被災したあいよし橋を含む国道252号は、福島県只見町と新潟県を結ぶ道路であり、両県の観光や物流に欠かせない重要な路線であることから、県としては、一日も早い復旧を目指し、災害復旧事業での事業採択に向け、雪崩メカニズムの解析や復旧工法の検討を行った。

2 被害の状況

あいよし橋の流失情報が入った後、調査を実施した結果、橋長93mの3径間連続鋼方杖ラーメン橋のあいよし橋が流失し、さらに、出逢橋も上流側の桁や高欄が下流側へ大きく変形した(写真-1、写真-2)。

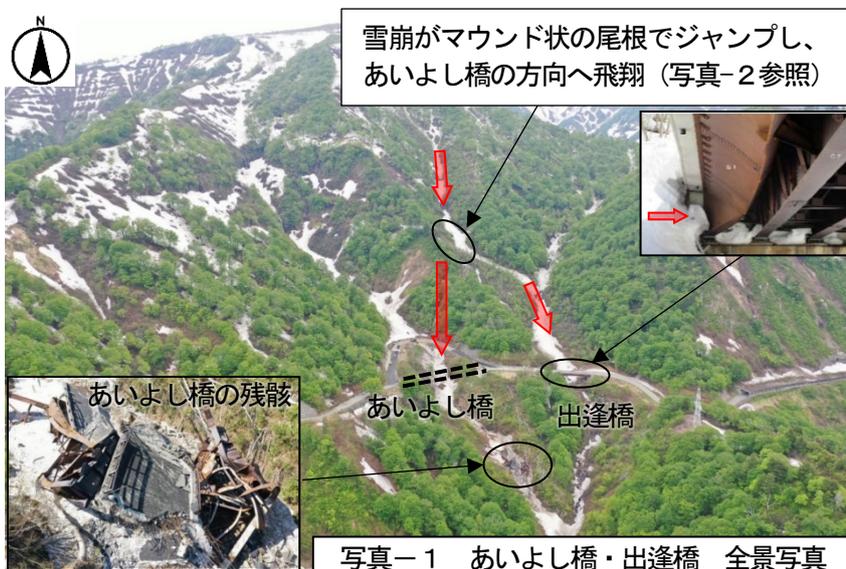


写真-2 尾根付近の倒木状況



写真-3 雪崩の発生源の状況

3 被災原因の特定

3.1 国等専門機関との現地調査

国内でも前例のない大規模な雪崩災害から復旧するため、国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人土木研究所の国等専門機関の方等と合同現地調査を実施した。

調査の結果、「出逢沢は雪崩の痕跡（枝折れ・倒木の方法）が明瞭に出ているため三次元雪崩シミュレーションと対照し、雪崩メカニズムの解析にあたること」、また、「橋梁の被災状況・部材の変形や破損状況からどの方向からどのような力がかかったのかを整理すること」等の助言を頂いた。

ドローンによる調査の結果、あいよし沢の上流部では、雪崩が発生した痕跡は確認出来なかった。一方、隣の出逢沢の最上流部では、周辺と比べて極端に着雪が薄くなっている箇所があり、その下方には雪崩の流下痕跡が確認できたことから、この地点から雪崩が発生したと推測した(写真－3、写真－4)。



写真－4 雪崩の走路と痕跡



写真－5 高欄損傷状況 (A2側)



写真－6 P1橋脚の損傷状況

3.2 あいよし橋の被災メカニズム

専門家との現地調査を踏まえ、三次元シミュレーションを実施した結果、想定したとおり、出逢沢のマウンド状の尾根で雪崩が飛び越え、あいよし橋方向に飛翔していく過程を再現することができた(図－2)。

また、あいよし橋の損傷状況を確認すると、A1、A2付近の高欄はほぼ変形せず、抜けた形となっていたことから、横からの力はほぼ加わっていないことが推察された(写真－5)。

さらに、P1橋脚付近では、上流側の側壁のみ破壊されており、これは斜め上方向から橋脚に力が加わり、回転しながら落下した際に損傷を与えたものと推察した(写真－6、図－1)。

以上、現地調査や三次元シミュレーションによる再現結果などから、出逢沢の最上流部で発生した雪崩が流下し、尾根を飛び越え、あいよし橋に斜め上方から衝突し、落橋させたと結論づけた(写真－4)。

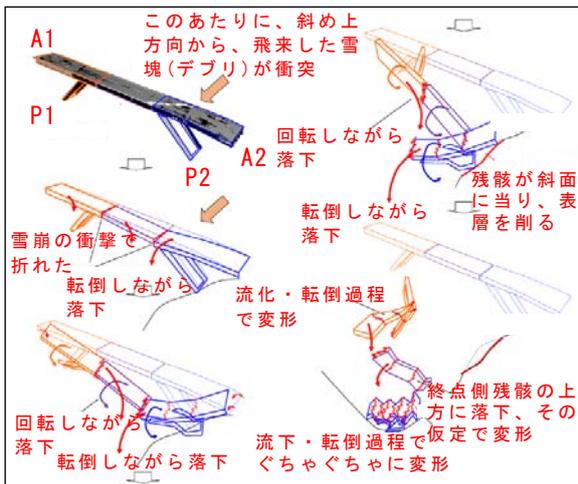


図-1 あいよし橋破壊メカニズム

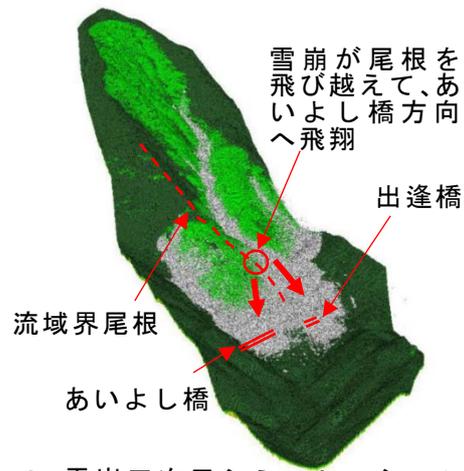


図-2 雪崩三次元シミュレーションによる検討

4 復旧工法の検討及び概要

国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人土木研究所の専門家の方々から助言を頂きながら、2つの復旧基本方針を策定した。1つ目は「施工時の現道交通を確保すること」、2つ目は「同規模の雪崩が到達しても、落橋や通行止めに繋がる致命的な損傷を受けずに交通を確保すること」とし、復旧工法の検討を行った。

復旧工法については、「①原位置での橋梁案」、「②橋梁を下流側へ架け替える案」、「③スノーシェッド案」、「④トンネル案」の4案とした。

①については、先述のとおり上空を飛翔してくる雪崩を回避することは不可能であることから、雪崩の発生源や走路での対策を検討したが、積雪深が6mを超える場所では適用可能な工法がないことが判明した。これを踏まえ、雪崩の外力に耐えうる構造について検討したが、桁や基礎等をより強固な構造とする必要が生じ、著しく不経済となることから、①は不適とした。

また、③については、谷部の山側にスノーシェッドを配置することから、沢水処理のための函渠や谷部を埋めるための大規模盛土が必要となり、豪雨出水時において盛土の流失等や函渠の目詰まりが懸念されることから、不適と判断した(図-4)。

④について、当該地域は山岳地域のためトンネル照明のための電源を確保することが難しく、また、トンネル延長も長くなるため、施工性や経済性が著しく劣ることから、不適と判断した(図-5)。

また、本箇所は、越後三山只見国定公園区域(第1種特別地域)内にあり、大規模な土地の改変を行う③、④については、関係機関との協議に時間を要することも、不適と判断した一因である。

②について、雪崩の三次元シミュレーション結果をもとに、雪崩が衝突したとしても落

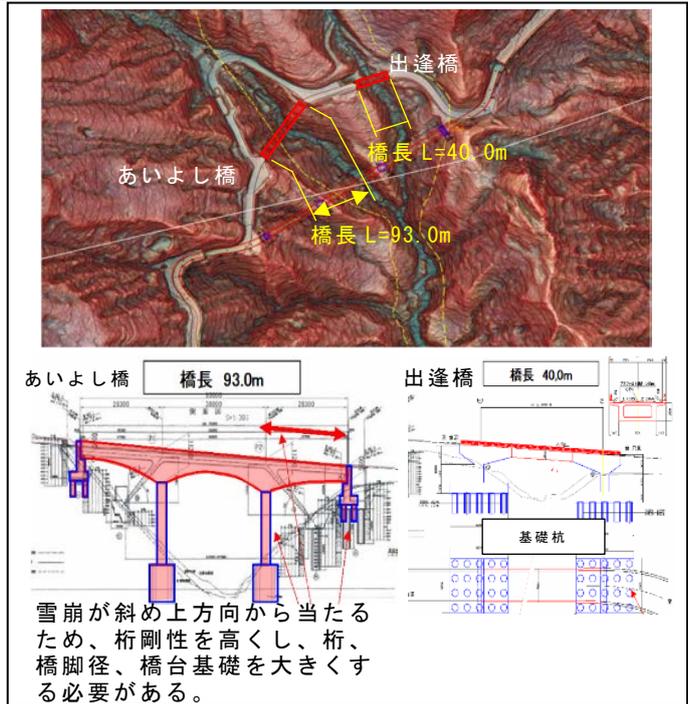
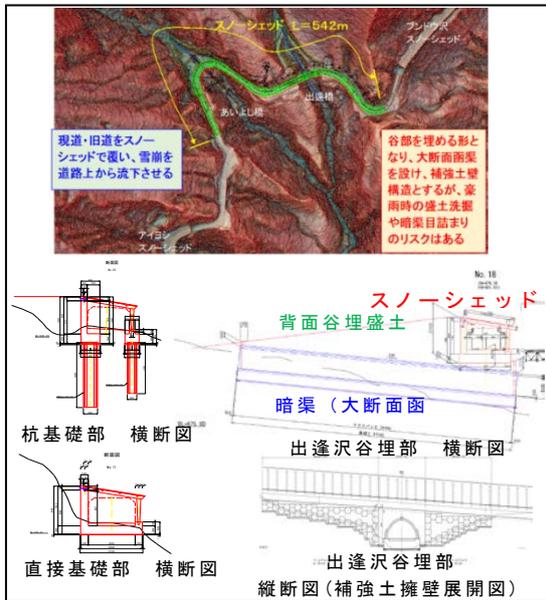


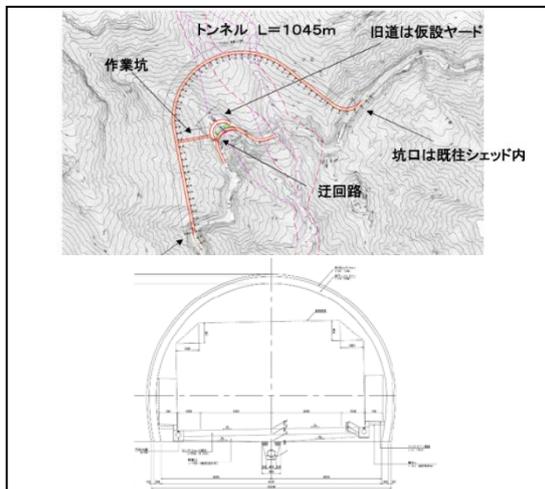
図-3 ①原位置での橋梁案

橋や通行止めに繋がる致命的な損傷を受けずに交通を確保できる位置に架け替えが可能なのか検討した結果、現橋梁よりも約 130m 下流側に架け替える案が、雪崩の影響が小さく経済的にも有利であること判明したことから、②案を採用することとした。

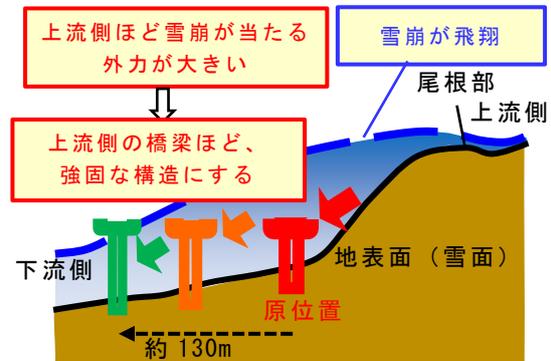
橋梁型式は、橋長 289.0m の PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋で、剛性の高い PC 橋箱桁とするとともに、上部工（桁）と橋脚を一体とすることで、雪崩による致命的な損傷を受けない構造とした（図－7、8）。



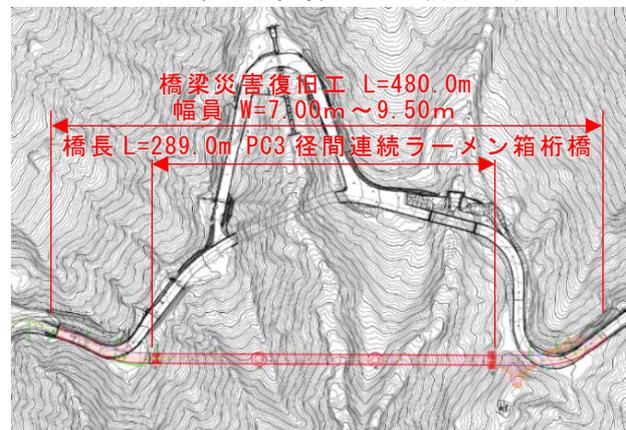
図－4 ③スノーシェット



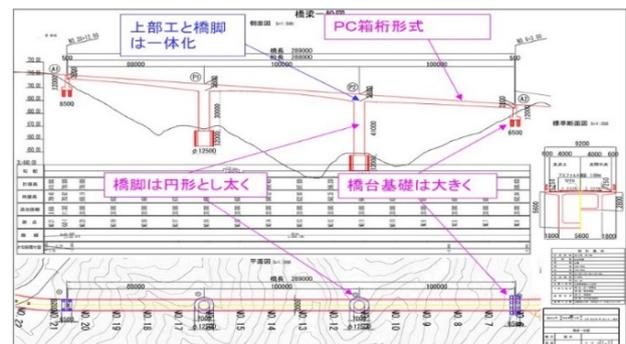
図－5 ④トンネル案



図－6 雪崩の影響による橋梁位置の



図－7 ②橋梁を下流側へ架け替える案(平面図)



図－8 ②橋梁を下流側へ架け替える案(橋梁一般図)

5 おわりに

国内でも前例のない大規模な雪崩災害であったことから、国等専門機関の方々とワーキンググループを設置するなど、緊密に連携し、様々な助言等を頂きながら、雪崩解析や復旧工法の検討を行い、降雪期前の令和 4 年 11 月に無事に災害査定を受検することができた。

本箇所の復旧に対しては地元からの期待も非常に大きいことから、1 日も早い復旧に向けて全力で復旧工事に取り組んでまいりたい考えである。

防雪柵の開口部対策に関する 技術資料(案)について

松下 拓樹¹・櫻井 俊光¹・松島 哲郎¹・植野 英睦¹

¹国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

道路の吹雪対策施設である防雪柵には、道路交差部等で開口部を設ける必要がある。防雪柵の開口部では、吹雪時に局所的な視程障害が生じることがあり、交通事故の誘因となることが懸念されている。しかし、防雪柵の開口部において、どのような条件で視程が低下して運転に影響するのか十分に解明されていない。また、防雪柵開口部の視程急変を緩和する対策として、延長の短い柵（副防雪柵）を用いる場合があるが、その対策効果の程度等についても必ずしも明確ではなかった。寒地土木研究所では、これらの未解明な点を調査結果に基づいて解説し、防雪柵の開口部対策を実施するために必要な事項をとりまとめた技術資料(案)を作成した。

キーワード 防災，道路，自然災害，吹雪，吹雪対策

1. はじめに

道路における吹雪対策施設として防雪柵が整備されている¹⁾が、取付道路や道路の交差部等では防雪柵を設置することができない。このように防雪柵が一時的に途切れる箇所を、防雪柵の開口部と呼ぶ。防雪柵の開口部では、吹雪時に視程が局所的に急激に低下する（写真-1）²⁾ことがあるため、ドライバーの運転への影響や交通事故の誘因となることが懸念されている³⁾。しかし、防雪柵の開口部において、吹雪時のどのような条件でどの程度視程が低下し、それがどのようにドライバーの運転に影響を与えるのか十分に明らかにされていなかった。また、防雪柵開口部の視程急変を緩和する対策として、延長の短い柵（副防雪柵）⁴⁾⁵⁾が開口部に設置されている場合があるが、副防雪柵による視程急変の緩和効果の程度等についても必ずしも明確ではなかった。



写真-1 防雪柵の開口部における吹雪時の状況の例²⁾。

このような背景から、寒地土木研究所の雪氷チームと寒地機械技術チームでは、防雪柵開口部における視程急変の実態把握と運転挙動への影響、および副防雪柵の視程急変の緩和効果の程度等を明らかにするため、実際の道路における移動気象観測⁶⁾⁸⁾や石狩吹雪実験場での現地観測⁹⁾¹¹⁾、防雪柵模型を用いた風洞実験¹²⁾¹⁴⁾、防雪柵周辺の気流を再現する数値シミュレーション解析¹⁵⁾¹⁷⁾を実施してきた。今回、これらの結果をとりまとめて作成した「防雪柵開口部の対策施設に関する技術資料(案)（以下、本技術資料(案)とする）」について報告する。

2. 本技術資料(案)の概要

(1) 目的

本技術資料(案)は、吹雪対策施設として整備された防雪柵の開口部における局所的な視程障害の対策を行うために必要な技術的事項を、現時点で得られている知見に基づいてまとめたものである。本技術資料(案)により、防雪柵の開口部対策の効率的な検討および適切な実施に資することを目的とする。

(2) 適用範囲

本技術資料(案)は、北海道開発局が整備する一般的な道路の防雪柵に適用することを意図したものであり、防雪柵の開口部対策に関して「道路吹雪対策マニュアル（平成23年改訂版）」¹⁾を補完するものである。

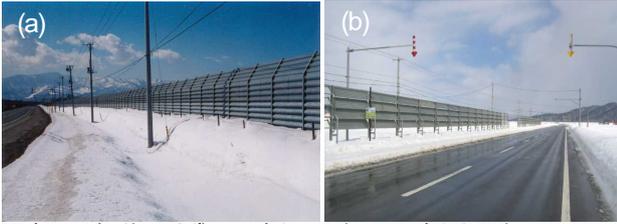


写真-2 防雪柵の例¹⁾。(a)吹き止め柵, (b)吹き払い柵。

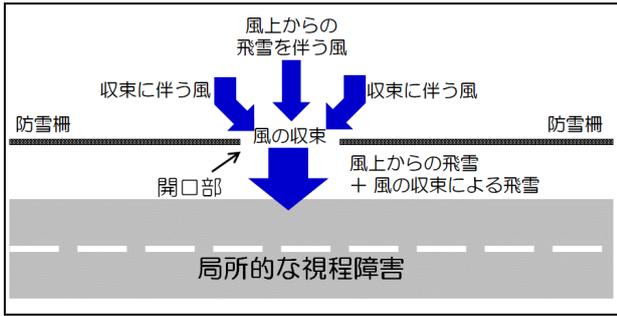


図-1 防雪柵の開口部における視程障害の発生機構。

また、防雪柵開口部における視程障害は、吹き止め柵の開口部において顕著¹⁸⁾であるため、本技術資料(案)で示す開口部対策は、主に吹き止め柵の開口部を対象としている。吹き止め柵(写真-2(a))は、同じく道路用地内に設置される吹き払い柵(写真-2(b))に比べて、空隙率の小さい柵の構造を有しており、吹雪時に風上側から吹き付けられる飛雪を遮る柵形式である。吹き止め柵の開口部では、飛雪を遮る柵が途切れていることに加えて、開口部で風が収束することに伴う飛雪流量の増加(図-1)により局所的な視程障害や視程の急変を生じやすい。以下では、吹き止め柵を単に防雪柵と呼ぶ。

(3) 構成

本技術資料(案)の構成を、表-1に示す。第1章は総則として、目的と適用範囲および構成を示し、本技術資料(案)で用いる主な用語を説明した。第2章で、防雪柵の開口部における視程障害の発生機構やドライバーの運転への影響について解説し、第3章で、防雪柵の開口部対策の目的や必要性の検討、対策の種類と選定、および開口部対策として実際の道路において施工実績のある副防雪柵に関する技術的事項等を、現時点で得られている調査結果に基づいて説明した。第4章では、開口部対策に関するその他の技術的事項として、新たな形式の副防雪柵の技術的な紹介と防雪柵の端部対策について触れ、防雪柵の開口部対策事例を例示した。以下では、第2章から第4章の概要を説明する。

表-1 本技術資料(案)の構成。

第1章 総則
・目的, 適用範囲, 構成, 用語の説明
第2章 防雪柵の開口部における視程障害
・開口部の視程障害の発生機構, 運転への影響
第3章 防雪柵の開口部対策
・対策の目的, 必要性の検討, 種類と選定
・副防雪柵の特徴, 副防雪柵による対策の実施
第4章 開口部対策に関するその他の技術的事項
・新たな副防雪柵, 端部対策, 対策事例

3. 防雪柵の開口部における視程障害 (第2章)

(1) 開口部における視程障害の発生機構と特徴

防雪柵の開口部では、防雪柵の設置区間に比べて、吹雪時における風上側からの飛雪流量に、開口部で収束した風に伴う飛雪流量が加わるにより視程障害が生じやすい(図-1)。特に、これまでの現地観測等の結果から、吹雪時の風向が、本線の防雪柵に直交する方向を中心とした45°の範囲のときに、開口部において局所的な強風や視程低下が顕著となる(図-2)¹⁹⁾。また、開口部の延長(幅)が長いほど風速が大きく、視程が低下する傾向にある²⁰⁾²¹⁾。

(2) 開口部の視程障害による運転への影響

防雪柵の開口部における視程の低下が局所的でも、ドライバーの運転挙動への影響として、視程の低下に伴いアクセル踏量やハンドル操作角等の運転挙動に変化が現れ、車速の低下が生じ車両間の速度差を招く可能性がある²⁰⁾²¹⁾。この傾向は、図-3(b)に示す調査例のように、特に吹雪時の視程が100m以下になると顕著になる⁹⁾。

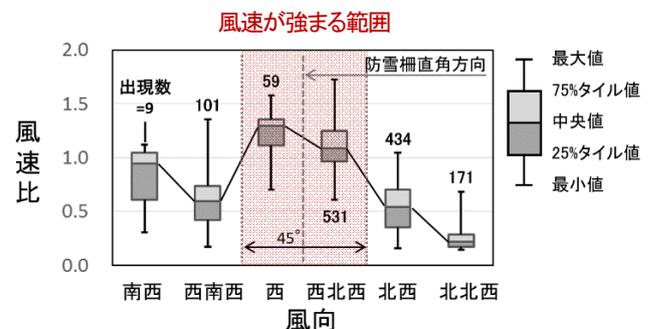


図-2 風向と防雪柵開口部における風速の関係¹⁹⁾。

風速比は、防雪柵の風上20mの箇所と開口部の風速の比。

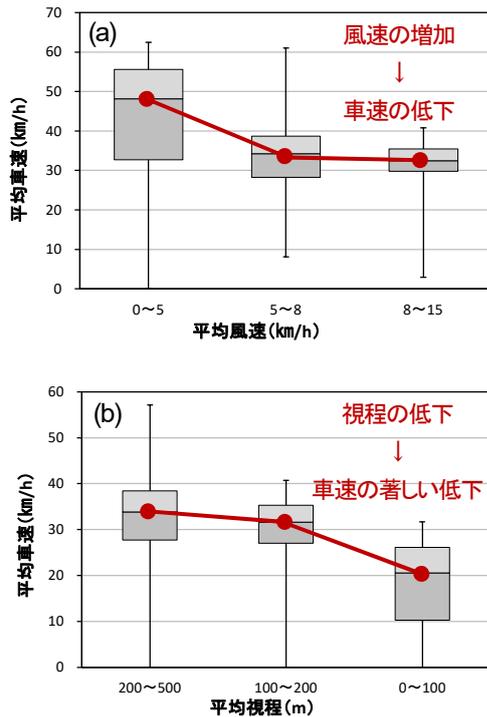


図-3 開口部の車速と(a)風速, (b) 視程の関係⁹⁾。
図中の箱ひげは、図-2に同じ。

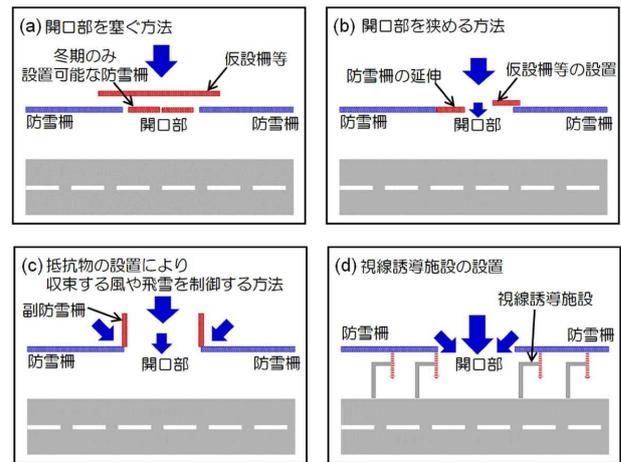


図-4 開口部対策の種類。

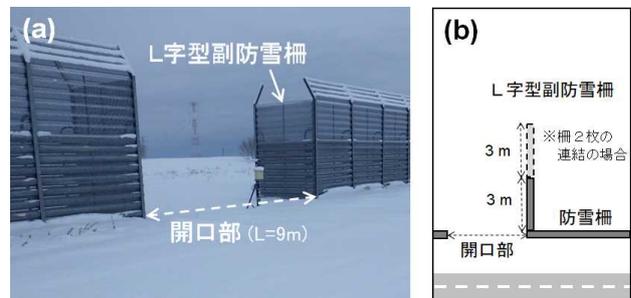


図-5 L字型副防雪柵。

4. 防雪柵の開口部対策 (第3章)

本技術資料(案)の第3章「防雪柵の開口部対策」では、開口部対策の目的や必要性の検討、対策の種類と選定について説明し、実際の道路において施工実績があるL字型副防雪柵（以下、副防雪柵とする）（図-5、図-6）による対策実施に関する技術的事項を解説している。

(1) 開口部対策の目的

防雪柵の開口部対策の目的は、開口部における局所的な視程障害や視程の急変を緩和すること、および開口部において路側や道路線形の吹雪時の視認性を高めることにより、冬期道路交通の安全性を確保することである。開口部対策の必要性の検討は、対策する箇所の視程障害の程度や頻度、交通量や事故履歴等の現地の交通実態等に基づいて行う。

(2) 開口部対策の種類と選定

防雪柵の開口部対策には、開口部の風や飛雪を制御して局所的な視程障害を緩和する方法と、開口部における路側や道路線形の吹雪時の視認性を高める方法の2つがある。これらの方法を図-4に示す。開口部の局所的な視程障害を緩和する方法には、冬期のみ設置可能な形式の

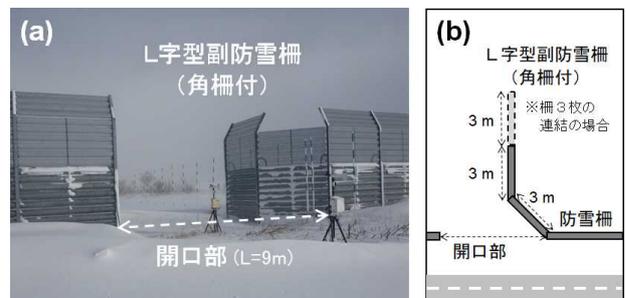


図-6 L字型副防雪柵 (角柵付)。

防雪柵や仮設柵等で開口部を塞ぐ方法（図-4 (a)）、防雪柵を延伸して開口部の延長を狭める方法（図-4 (b)）、抵抗物（副防雪柵等）を設置して収束する風と飛雪を制御する方法（図-4 (c)）がある。吹雪時において開口部の路側や道路線形の視認性を高める方法には、視線誘導施設を設置する方法（図-4 (d)）がある。

開口部対策のうち冬期のみ設置可能な形式の防雪柵や仮設柵等で開口部を塞ぐ方法は、冬期末使用の交差道路や農地等への取付道路における開口部のみに実施することができる限定された方法となる。抵抗物（副防雪柵（図-5、図-6））を設置する方法は、防雪柵の開口部に

おける風上側からの飛雪や風の収束（図-1）を制御して、開口部風下側の道路上へ侵入する飛雪の量を減少させて視程障害や視程の急変を緩和させる方法である。副防雪柵は、仮設応急的に冬期間のみ設置することもできる。

図-4に示す対策方法の選定は、各対策方法の利点や留意事項等の特徴と現地の各条件を勘案して行い、さらに整備費や維持費等も考慮して総合的に判断する。ここで、視線誘導施設は、吹雪による視程障害を緩和する施設ではなく、路側や道路線形の視認性を高めるための施設であるため、副防雪柵等の対策を実施できない場合の二次的な対策方法として位置付けられる。

(3) 副防雪柵による対策効果

副防雪柵（図-5）は、延長の短い柵を本線の防雪柵に対して直角に設置（端部をL字型に加工）したものである¹⁴⁾。この副防雪柵には、道路交差部の道路形状に合わせて、延長の短い柵を45°の角度で繋ぎ合わせた角柵付のものもある（図-6）。

副防雪柵による対策効果の例を図-7に示す。図-7より、開口部における風速の増加と視程の低下は、副防雪柵の有無に関わらず開口部の延長（幅）が大きくなるほど顕著になるが、副防雪柵を設置した場合には風速の増加と視程の低下を抑えることができる²⁾。また、副防雪柵を設置した開口部では、設置しない場合に比べて吹雪時の視程が100 m未満になる割合が16 %から6 %に減少し³⁾、副防雪柵の設置によってドライバーのアクセルやブレーキ操作のばらつきが小さく車速の低下が抑えられる傾向があることも確認されている⁸⁾。ただし、吹雪時の風向が本線の防雪柵に直交する場合等の気象条件によっては、副防雪柵の設置により逆に風が強まり視程が低下する場合⁹⁾、¹⁰⁾がある。

(4) 副防雪柵による対策実施のための技術的事項

本技術資料(案)では、副防雪柵を用いた開口部対策実施のための主な着眼点を整理している。防雪柵の開口部に副防雪柵を設置する際は、前述の4(3)で示した副防雪柵の利点や留意事項等の特徴と、対策を行う箇所の現地条件や設置にかかる費用等を勘案して、総合的な観点から検討を行う。現地条件の主なものは、吹雪時の卓越風向等の気象条件、副防雪柵を設置することが可能な用地確保の可否等である。

吹雪時の卓越風向は、副防雪柵の開口部における片側設置または両側設置を判断するための基本的な情報となる。また、吹雪時の卓越風向が本線の防雪柵に直交する場合は、4(3)で述べたように、副防雪柵を開口部に設置すると風速が強まる場合⁹⁾、¹⁰⁾がある。よって、副防雪柵による開口部対策を実施する際は、直交風の頻度が極めて高いのか等の吹雪時の卓越風向と、それに伴う視程

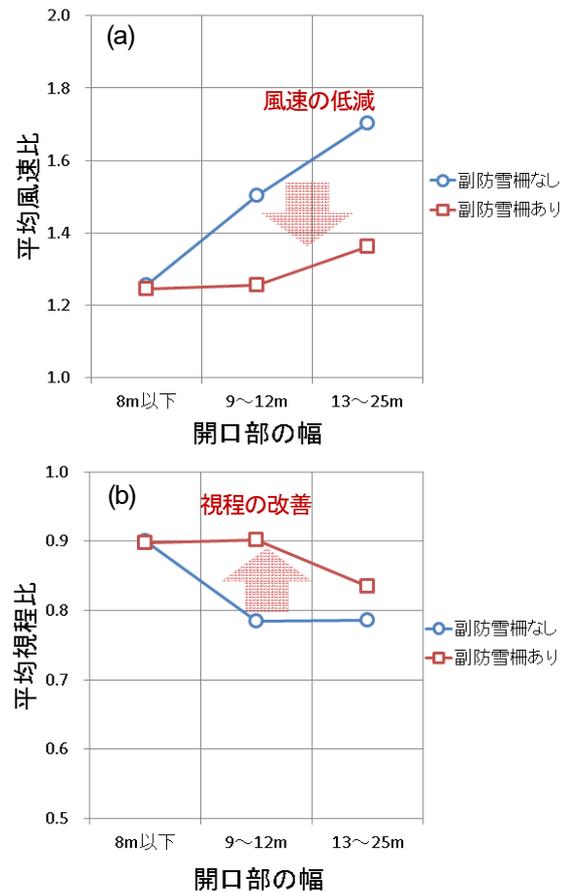


図-7 開口部延長(幅)と(a)風速比, (b)視程比の関係²⁾。

L字型副防雪柵が設置されている開口部(□)と設置されていない開口部(○)の観測による比較。風速比は、開口部とその前後の防雪柵設置箇所区間の風速の平均値に対する最大値の比。同様に視程比は、視程の中央値に対する最低値の比。

障害の程度に留意する必要がある。

副防雪柵の設置に必要な用地幅（図-5、図-6を参照）については、吹き止め柵の設置位置が路肩端から6.5~10mであることに基づき、これを含めた用地幅を本技術資料(案)で示している。なお、対策する開口部の道路構造や土地利用状況に基づく用地確保の可否等により、副防雪柵を設置できない場合も考えられるので、副防雪柵による開口部対策を計画した段階で、道路用地条件に関する詳細な情報を事前に調査しておくことが望ましい。

副防雪柵の設置にかかる費用に関しては、本技術資料(案)では副防雪柵個々の各部材の数量を提示している。副防雪柵による対策を検討する際は、この数量に基づく材料費や施工費に加えて、路線全体や工区全体において対策すべき開口部の箇所数に基づく総費用の観点からも検討する必要がある。

副防雪柵の柵高や防雪板等の構造は、基本的に本線の防雪柵と同じである。ただし、吹き止め柵に設けられる

ことが多い柵上部の忍び返しは、副防雪柵においては必ずしも必要ではない。なお、副防雪柵を設置する際は、交差点付近におけるドライバーの視距の確保等についても留意する必要がある。

5. その他の技術的事項（第4章）

(1) 新たな形式の副防雪柵について

本技術資料(案)では、新たな形式の副防雪柵として、斜行柵群（図-8）と鉤型（くの字型）副防雪柵（図-9）を紹介している。これらの副防雪柵は、実際の道路における施工実績はないが、当所の石狩吹雪実験場（石狩市美登位）で実物大の防雪柵を用いた現地観測^{10, 11}や防雪模型を用いた風洞実験¹⁴、数値シミュレーション解析^{16, 17}を行い、開口部における視程障害や強風を緩和する効果を有することが確認されている。以下では、新たな形式の副防雪柵の開発経緯を紹介する。

本線の防雪柵に直交する風向でも開口部における視程障害を緩和できる副防雪柵の開発を目的として、副防雪柵の設置角度を変えた場合の防雪柵周辺の風速分布に関する数値シミュレーション解析^{16, 17}を実施し、また防雪柵に関する既往技術¹⁹も参考に検討を行った。その結果、防雪柵に直交する風と斜めからの風の両方に対して開口

部における視程障害の緩和効果を有するように、防雪柵の1スパン分（幅3 m）の柵を複数枚並べて配置した副防雪柵（図-8）を考案した¹⁰。この副防雪柵を「斜行柵群」と呼ぶ。

斜行柵群は3～4枚の柵から構成され、開口部の両側に設置する場合はその倍の数量が必要になる。一方、副防雪柵の設置にかかる用地の制約や整備費を鑑みれば、柵の枚数は可能な限り少なく、設置に要する面積はできるだけ小さい方が望ましい。そこで、柵の枚数をより少なくして設置に必要な用地幅を小さくするため、防雪柵の1スパン分（幅3 m）の柵2枚を直角に連結して本線の防雪柵から離して設置する副防雪柵（図-9）を考案した¹⁰。この副防雪柵を、「鉤型（くの字型）副防雪柵」と呼ぶ。

斜行柵群と鉤型副防雪柵の防雪柵開口部における強風緩和効果について、数値シミュレーション解析^{16, 17}や防雪柵模型を用いた風洞実験¹⁴により、直交風の際も開口部における強風緩和効果を有することが確認されている。

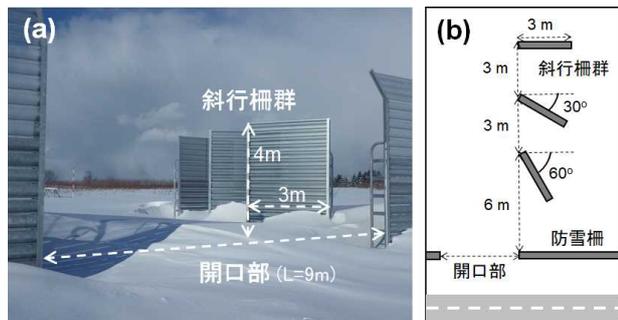


図-8 斜行柵群。

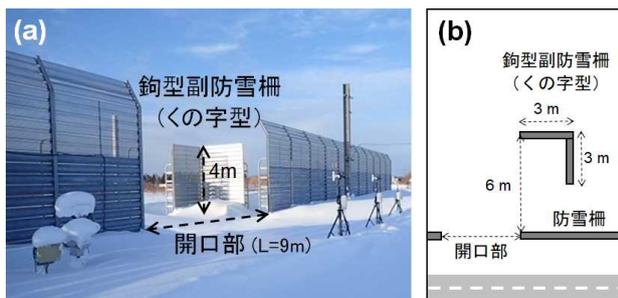


図-9 鉤型（くの字型）副防雪柵。

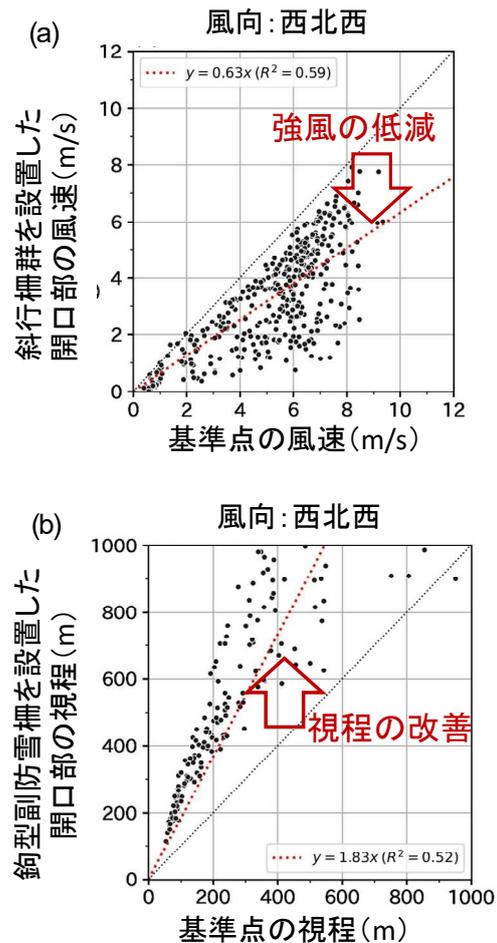


図-10 斜行柵群と鉤型副防雪柵の現地観測結果の例¹¹。

防雪柵の風上50mの基準点と、(a)斜行柵群を設置した開口部の風速、(b)鉤型副防雪柵を設置した開口部の視程の比較例。

また、実寸大の防雪柵を用いた現地観測^{10) 11)}により、直交風時の開口部における視程低下を緩和する効果があることが確認されている(図-10)。

これらの新たな形式の副防雪柵を設置する場合は、L字型副防雪柵(4.章参照)を含めた各副防雪柵の利点や留意事項等の特徴と、対策を行う箇所の吹雪時の気象状況や設置に必要な用地確保の可否等の現地条件、設置にかかる費用等を勘案して検討を行う。

(2) 端部対策と対策事例について

本技術資料(案)で示した防雪柵の開口部対策は、防雪柵の端部の視程急変緩和対策としても活用できる⁹⁾。本技術資料(案)では、これらの対策の施工事例を例示した。

6. おわりに

本技術資料(案)は、寒地土木研究所のホームページ(https://www2.ceri.go.jp/jpn/pdf2/202303-CERI_Document-Snow_Fences.pdf)で公開しており、PDF(図-11)をダウンロードすることができる。防雪柵の開口部対策を検討または実施する際に、少しでも参考になれば幸いである。

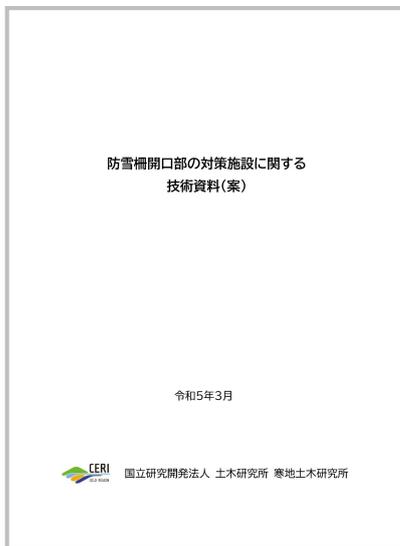


図-11 「防雪柵開口部の対策施設に関する技術資料(案)」²⁰⁾

参考文献

- 1) 寒地土木研究所：道路吹雪対策マニュアル(平成 23 年改訂版)，p.567, 2011.
- 2) 小中隆範，伊東靖彦，松澤 勝：吹雪時における防雪柵開口部の移動気象観測，寒地土木研究所月報，No.774，pp.17-22, 2017.
- 3) 竹内政夫：吹雪時の視程に関する研究，土木試験所報告，第 74 号，p.31, 1980.

- 4) 福澤義文，加治屋安彦，金子 学，川上俊一，金田安弘：防雪柵端部での吹雪による視程の急変とその対策—数値シミュレーションによる検討—，北海道の雪氷，第 16 号，pp.41-43, 1997.
- 5) 伊東靖彦，福澤義文，松澤 勝：防雪柵開口部における視程障害に関する考察，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，pp.539-540, 2003.
- 6) 小中隆範，金子 学，高橋丞二，松澤 勝：防雪柵開口部における運転挙動の考察，寒地土木研究所月報，No.782，pp.31-36, 2018.
- 7) 金子 学，小中隆範，高橋丞二：吹き止め式防雪柵の開口部における風速と視程の変動について，寒地土木研究所月報，No.802，pp.42-46, 2020.
- 8) 松下拓樹，金子 学，高橋 涉，櫻井俊光，松島哲郎：防雪柵開口部・端部における副防雪柵の対策効果について，寒地技術論文・報告集，Vol.36，pp.112-117, 2020.
- 9) 高橋 涉，櫻井俊光，金子 学，松下拓樹：防雪柵開口部における副防雪柵の対策効果について，寒地土木研究所月報，No.810，pp.35-42, 2020.
- 10) 松下拓樹，櫻井俊光，松島哲郎，吉井昭博，遠藤康男，西村敦史：防雪柵開口部の斜行柵群による視程と風速の緩和対策，寒地土木研究所月報，No.825，pp.2-11, 2021.
- 11) Sugawara, K., Sakurai, T., Matsushita, H., Matsushima, T., Yoshii, A., Nishimura, A. and Ono, S.: New countermeasures to mitigate blowing snow at apertural areas in snow fences. The 102th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, TRBAM-23-03739, 2023.
- 12) 幸田 勝，伊藤義和，植野英睦：風洞実験による防雪柵開口部における風速変化の把握，寒地土木研究所月報，No.787，pp.32-38, 2018.
- 13) 齋藤 勉，植野英睦，戸川卓治：防雪柵開口部における副防雪柵の長さの違いによる風況把握に関する風洞実験，寒地土木研究所月報，No.826，pp.21-26, 2022.
- 14) 齋藤 勉，植野英睦，山崎貴志：防雪柵開口部の新型柵による風速緩和に関する風洞実験，寒地技術論文・報告集，Vol.38，pp.184-189, 2022.
- 15) 金子 学，櫻井俊光，高橋丞二：防雪柵開口部における風の現地観測と数値解析，寒地土木研究所月報，No.804，pp.14-18, 2020.
- 16) 櫻井俊光，菅原邦泰，松下拓樹，松島哲郎，西村敦史，植野英睦，齋藤 勉，片野浩司：数値シミュレーションを利用した防雪柵開口部における新型副防雪柵の検討，寒地土木研究所月報，No.827，pp.27-32, 2022.
- 17) Sakurai, T., Sugawara, K., Matsushita, H., Matsushima, T., Nishimura, A. and Ono, S.: Arrangements of secondary snow fences as countermeasures against the end effect based on 3D numerical simulation. The 102th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, TRBAM-23-02089, 2023.
- 18) 福澤義文，加治屋安彦，畠山拓司：防雪柵端部付近における視程障害と対策，第 24 回日本道路会議一般論文集(A)，pp.358-359, 2001.
- 19) Tabler, R. D.: Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design. Final Report, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, p.307, 2003.
- 20) 寒地土木研究所：防雪柵開口部の対策施設に関する技術資料(案)，p.43, 2023.

専門的知見を取り入れた更なるロードキル対策への取組

河内 聡

本州四国連絡高速道路株式会社 DX推進室 情報システム課

(〒651-0088 兵庫県神戸市中央区小野柄通四丁目1番22号)

西瀬戸自動車道大三島IC～今治IC間におけるロードキル工対策は、平成28年度に概ね完成しているが、令和元年度にイノシシによるロードキルが27件発生し、ロードキル対策工完成時の発生件数と比べ1.35倍に増加したため、更なるロードキル対策が必要となった。

西瀬戸自動車道ではイノシシによるロードキルが多く発生しており、動物侵入箇所特定、イノシシの生態や特性に合わせた侵入対策が重要であると考え、イノシシによるロードキル発生状況の推移、現状のロードキル対策の事例、ロードキル削減に向けた作業手順、警察・大学等とロードキル削減に向けた専門的知見を取り入れた更なる取組を報告する。

キーワード 高速道路, イノシシ, ロードキル

1. はじめに

ロードキルとは、車で野生生物に衝突してしまったり、轢いてしまったりすることで動物を死なせてしまうことをいう。



写真-1 イノシシと接触した車両状況

2. ロードキルによる車両破損状況の特徴

イノシシが高速道路上を走行する車両と衝突した場合、以下の特徴がある。

- ①車両左前輪付近に擦過・損傷する車両が多い。
- ②物損事故として取り扱う車両は、普通車・軽自動車が多い。
- ③上記②でイノシシと接触した車両は、自走で走行することができず、レッカー車等での排出となる。

イノシシは、側道側に設置されている防護柵（ガードレール）に平行して徘徊することが多く、道路中央部を徘徊していたとしても、側道方向に退避行動をとるため、車両左前輪付近と接触（写真-1）することが多い。なお、大型車以上の車両は、車両自体の構造が強固であるため、車両への損傷が少なく自走可能であることが多く、事故としての取扱が少なく。

路上で発見されたイノシシの死骸は、道路管理隊車両では回収できないため、ブルーシートに梱包し仮置きし、翌朝、維持業者が回収している。

3. 高速道路本線への動物侵入対策事例

高速道路本線への動物侵入対策は、（写真-2）に示すとおり。①立入防止柵ドレスネットは、立入防止柵下部の開口部からの動物侵入防止対策及びイノシシにより掘り起こし防止対策として設置。②側溝部の対策（アニマルストッパー）は、立入防止柵下部の開口部からの中小動物侵入を防止するために設置し、高速道路側に侵入した中小動物は脱出可能な構造となっている。③防護柵部への金網設置は、開口部からの動物侵入を防止するために設置し、高速道簿本線横に側溝が隣接している箇所、または本線と原自歩道との境界に位置するガードレール、ガードケーブルに設置している。④立入防止柵（番線タイプ）は、人の立入がない山間部の急斜面部に施工されていたが、動物侵入を防ぐ観点より、「金網タイプ」への順次取替を行い、動物侵入対策を行っている。



写真-2 高速道路本線への動物侵入対策事例

4. イノシシによるロードキル発生の推移

(1) 島毎の発生状況（令和元年度）

大三島，伯方島，大島，今治市内でのロードキル発生状況は図-1のとおりである。本四道路区間では，大三島11頭，大島7頭の順に発生している。大三島は，高速道路敷地に接している用地に側道がなく，山間部区間が多い。また，人の立入がほとんどない箇所が存在している。伯方島は，高速道路用地に接している用地に側道が設置されていることが多く，集落も近いことが特徴である。また，供用区間も他の島と比較し短い。

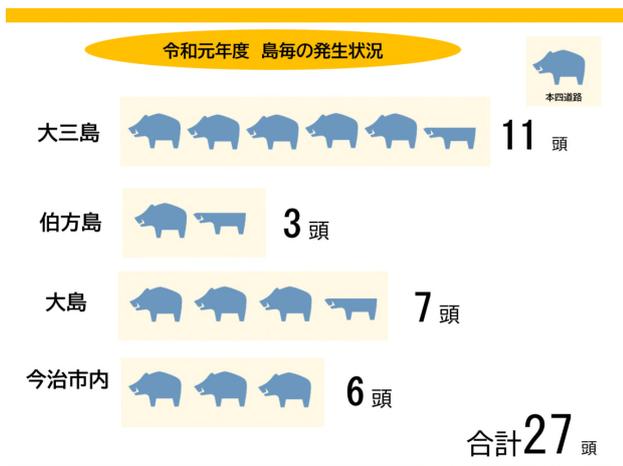


図-1 島毎の発生状況（令和元年）

(2) 更なる対策を行う前の発生状況推移（過去3年間）

西瀬戸自動車道しまなみ今治管理センター管理区間（大三島IC～今治IC）で平成29年度～令和元年度のイノシシによるロードキル発生状況は図-2のとおりである。平成29年度20頭だったが，令和元年度27頭と本四道路内でロードキル発生件数が1.35倍であり，増加傾向にあった。増加した理由の一つとして，平成30年度に発生した西日本豪雨による環境の変化や島しょ部の人口減少や高齢化に伴う高速道路外の耕作放棄地の増加なども要因となったと推察される。

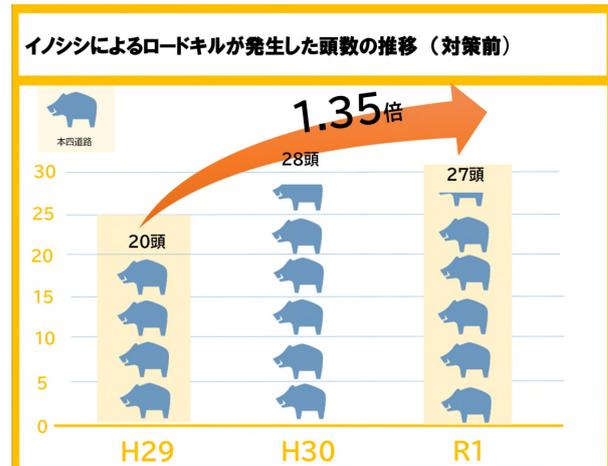


図-2 今治管理センター管内のロードキル発生件数

5. ロードキルを減少させるための計画立案

増加傾向であるイノシシによるロードキル件数を減少させるため、以下の目標設定をした。

○ロードキル減少目標を設定（3年間で半分に）

○実施したロードキル対策内容を社内共有を行う

当社の経営理念のひとつである「安全・安心・快適なサービスを利用していただけるよう、サービスの充実に努めます」を実践するため、しまなみ海道をご利用するお客様に対し、夜間の高速道路走行時に安全・安心・快適に利用していただくため、現行実施している対策に加え、ロードキル事故件数が削減対策が必要と考え、更なるロードキル対策に取り組むことにした。

6. ロードキル減少に向けた作業検討

(1) 動物侵入箇所の特定

イノシシが侵入していると思わせる箇所を絞り込むため、過去3年分の障害物（落下物）回収一覧表（H29～R1）を利用し、キロポスト毎におけるイノシシ死骸回収実績を確認した結果、①大三島IC～上浦PA付近②宮窪トンネル南坑口付近③近見山トンネル南坑口付近で回収実績が多いことを確認した。

また、実際にロードキル発生後の現場作業を行う道路管理隊員から死骸回収状況の確認及び回収実績が多い箇所などの意見高校を行った。

さらに、今治市農林水産課（鳥獣対策担当）に連絡を行い、今治市、地元猟友会と合同で料金所付近でのイノシシ侵入ルート特定調査及び本四高速で実施可能な対策などの意見交換を行い、動物侵入箇所の特定を行った。

(2) 専門家によるイノシシの生態、特性及び対策の意見聴取

今治市及び地元猟友会から頂いた意見は以下のとおりである。

- ①高さ120cmの柵であれば飛び越えることができるが、一般的には柵の下を掘る。
- ②20cm程度の隙間があれば地面を掘らずに通り返けることができる。
- ③雑食のため、何でも食べる。
- ④感覚は非常に優れており、犬の嗅覚に匹敵する。
- ⑤決まった縄張りを持たない。
- ⑥青・青緑と紫色について識別する。
- ⑦非常に臆病な動物である。

猟友会の方からは、料金所付近では、忌避剤を設置するよりも「光」による対策が効果的であり、自発光デリネーターの設定について提案を頂いた。また、一度怖い思いをした箇所には侵入しない傾向があるため、入口対

策をしっかりと行うことなどのアドバイスを頂いた。

(3) 対策

現地調査の結果、イノシシ死骸の改修実績が多い箇所では、側道部付近（図-3）のような特徴があることから、以下の方針とする。

①側道部からの竹、草木の繁茂による薄暗い箇所や側道清掃が行われていない箇所は、イノシシの住処や外敵から身を守る場所になるため、立入防止柵付近の竹、草木などの撤去を行う。

②立入防止柵付近のイノシシ等を近づけさせない対策として、イノシシが嫌う臭いと色を使用したシート状の忌避剤を設置することで、効果検証を行うこととした。

(4) ロードキル対策の方針決定

イノシシ死骸回収実績を元に現地でのイノシシ侵入箇所調査を実施したが、以下の点で苦労した。

①対象調査箇所が広いため、侵入箇所の特定が困難。

②形跡（足跡や獣道）が、時間経過しすぎており、侵入箇所がわからない。

③社員2名1組で調査を行うため、調査を実施するにも時間がかかる。

上記理由により、以下の方針に切り換え、現地調査を行うこととした。

新方針…イノシシによるロードキルが発生した「翌日」であれば侵入した箇所の痕跡が残っているのではないかと考え、翌日に現地調査を対策・実施することとした。

この方針のよい点は、イノシシの侵入箇所がピンポイントでわかることである。路面にも血のりが残っていること。また、動物死骸回収実績を記載した業務日報（以下「日報」という。）を作成した道路管理隊員にイノシシを仮置きした場所を詳細に聞けるため、侵入箇所の特定が比較的容易である。その特定した場所を中心に立入防止柵周辺の現地調査・対策を行うことで、イノシシによるロードキルが減少に繋がるものと考えた。

(5) 実際の現地調査・対策にあたっての留意点

現地調査は、業務日報に基づき、ロードキル結果を確認し、イノシシであった場合は、業務日報作成者に詳しい場所及び状況を聞き取ったうえで、調査に必要な資材等を車両に詰め込み、2名1組で実施する。調査箇所までのルート選定は、地図等で事前確認を行っている。その理由として、市道及び法定外道路は、道幅も狭く、道を間違えるとUターンが困難な場所もあり、現地調査に要する時間を最大限確保するためにも重要である。また、調査場所によっては、足場が不安定かつ急斜面な場所もあるため、滑落等による事故とならないように、安全なルートを確認しながら現地調査を行う必要がある。立入防止柵付近の道が草木の繁茂により徒歩にて通行できない場合には、立入防止柵を乗り越える専用器具を使用し

て、高速道路区域側に立入するなど、安全に調査を行う工夫が重要となる。

(6) 現地調査の状況

現地調査にて、判明したイノシシ侵入場所特定結果、立入防止柵下部の隙間(写真-3)や獣道(写真-4)になっている箇所を確認した。



写真-3 立入防止柵下部の隙間



写真-4 立入防止柵下部の獣道

(7) 現地調査での補修状況

現地調査において、変状を発見した場合は、可能な範囲での補修が重要であり、以下の対策を実施した。

- ①立入防止柵下部に隙間
侵入防止金具設置，忌避剤設置(写真-5)
- ②立入防止柵フェンスに穴
フェンス既存部の仮復旧，忌避剤設置
- ③立入防止柵端末部のフェンス未設置
フェンスの仮設置
- ④立入禁止看板の劣化
看板の取替，新設
- ⑤倒木の発見，その他構造物の変状
現地写真を撮影し，維持担当課に連絡



写真-5 発見した変状の復旧状況

7. 新方針によるロードキル対策結果(対策後)

(1) 対策後の発生頭数実績

令和2年度から新方式に基づき対策を実施した結果、令和3年度におけるイノシシによるロードキル発生状況は、7頭にまで減少し、対策前(令和元年度)に比べ74.1%減少という結果(図-3)になった。また、大三島、伯方島、大島、今治市内でのロードキル発生は、各島とも発生頭数が減少する結果(図-4)となった。

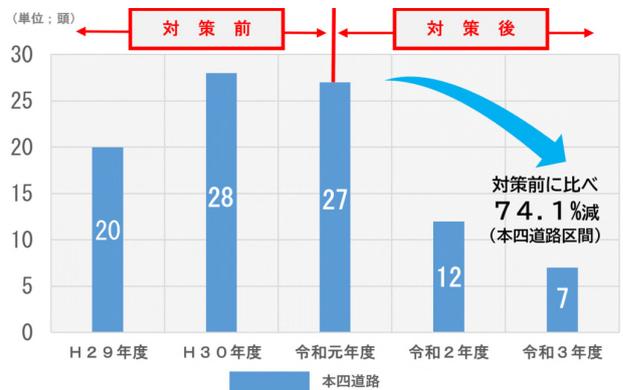


図-3 イノシシによるロードキル実績(対策前・後)

	令和3年度 島毎の発生状況	
	令和元年度	令和3年度
大三島	11頭	2頭
伯方島	3頭	0頭
大島	7頭	2頭
今治市内	6頭	3頭
		合計 7頭 (27頭→7頭)

図-4 令和3年度 島毎の発生状況

8. ロードキル対策の意見・更なる対策

(1) ロードキル対策会議の実施

新方針に基づくロードキル対策により一定の効果を得ることが出来たが、今後更なる削減を図るため、しまなみ今治管理センター管理区間（西瀬戸自動車道：大三島IC～今治IC）における「ロードキル対策会議」を実施した。（写真-6）。会議出席者は、道路生態学を研究分野とされている岡山理科大学教育推進機構辻教授，同大学獣医学部小野准教授，中国四国管区警察局広島高速道路管理室早島分室長，今治市産業部産業政策局農林水産課，自動車部品メーカー担当者などが参加し，ロードキル対策の意見交換を行った。その中で，小野准教授より頂いた意見は次のとおり。

「島嶼部におけるイノシシの生息個体状況は減る要素がない。その理由として，大三島での調査では年中発情期があるようだ。季節性の繁殖期が崩れているためだと思われる。イノシシは年に一度の繁殖期で1回の出産で2～6頭産まれるが，島嶼部で繁殖している多くはイノブタの可能性がある。イノブタは高い繁殖力を持っており，一年中交尾，出産する。」このため，現在設置している忌避剤はイノシシ用であるため，イノブタ用も併用することにより効果検証を行う。また，当社で実施している現状のロードキル対策方法は，これない対策であるため継続すれば，ロードキルは減少するはずとの回答を頂いた。



写真-6 ロードキル対策会議

(2) 新たな取組（高周波発生装置による対策）

会議において辻教授と山形県の自動車部品メーカー「TM works」が共同開発した高周波発生装置（商品名：「鹿ソニック」）の紹介があった。当該商品は，車両の進行方向にいる動物に向かって35パターンの高周波音を左右50度，前方50m～70mにわたって照射するものであり，装置は本体（9cm，横4.4cm，奥行き2.5cm）を車両ボンネット下に装着し，車両前方にスピーカー（縦5.4cm，横12.6cm，奥行き2.4cm）を取付することで，

イノシシやタヌキなどの小動物にも効果が期待できることから，道路巡回車に搭載した場合，動物侵入防止対策及び車両への安全確保対策に有効であると意見を頂いた。よって「試行運用」として道路巡回車（2台）へ設置・運用を行い，今後の効果検証を行うものである。（写真-7）



写真-7 道路巡回車への鹿ソニック取付状況

7. おわりに

本論で述べた，ロードキル発生状況，ロードキル対策実施，対策後の結果，更なる対策等について取りまとめた。

ロードキル対策は，対策や装備が完了すれば終了ということではなく，対象が生き物であるため，今後も根気よく対策を継続・新規対策を実施することで，発生を抑えることが可能となる。今後も引き続き，お客様に安全，安心，快適にご利用していただけるようサービスの充実にと努める所存である。

謝意：本稿の作成にあたり，関係者の皆様に多大なるご協力およびご助言をいただき心より感謝申し上げます。

インフラDX技術を活用した交通安全対策箇所における要因分析の高度化の取り組み

近藤 和歩¹

¹中部地方整備局 岐阜国道事務所 管理第二課 (〒500-8262 岐阜県岐阜市茜部本郷1-36-1)

岐阜国道事務所は、管内の交通事故削減のため、2010年に策定された岐阜県事故ゼロプランに基づき、PDCAサイクルを実践することで交通安全対策を推進してきた結果、死傷事故件数は大きく減少してきた。一方で依然として年間約500件の死傷事故が発生している。そこで岐阜国道事務所では、PDCAサイクルを効果的に運用するため、インフラDX技術を導入し、交通事故発生要因の明確化等に取り組んできた。本稿では、これまでに活用してきたインフラDX技術の概要と活用により得られた効果について報告する。

キーワード 交通安全対策, 事故要因分析, DX

1. はじめに

岐阜国道事務所は、管内の交通事故削減のため、2010年に策定された岐阜県事故ゼロプランに基づき、交通安全対策を推進してきた。その結果、管内における死傷事故件数は減少傾向となっている。しかし、依然として年間約500件（2017年～2020年平均）の死傷事故が発生しており、うち約7割が追突事故である。

また、交通安全対策の取り組みは図-1に示すPDCAサイクルで運用し、事故データに加え、交通挙動調査結果、利用者アンケート調査結果等を実施し、対策立案や効果検証等を行い、一定の効果は発現しているものの、依然として追突事故等が多発している状況にある。

そこで、岐阜国道事務所では、さらなる交通事故の削減に向け、交通安全対策の取り組みのPDCAサイクルを効果的に運用するため、インフラDX技術を導入し、交通事故発生要因の明確化に取り組んできた。本稿では、これまでに活用してきたインフラDX技術の概要と活用により得られた効果について報告する。

2. 交通安全対策のPDCAサイクルと導入したインフラDX技術

PDCAサイクルを効果的に運用するためには、事故発生要因を正確に捉え、事故発生要因に対して最適な交通安全対策を検討することや、対策の効果が発現した箇所において、事故が削減した要因を踏まえ、他の箇所にお

ける対策検討に反映させることが重要である。そのためには、PDCAサイクルの各段階において、インフラDX技術を活用し、分析の高度化を図ることが有効であると考え、インフラDX技術を活用してきた。

これまで、岐阜国道において交通安全対策のPDCAサイクルを効果的に運用するため、活用したインフラDX施策を以下に示す。

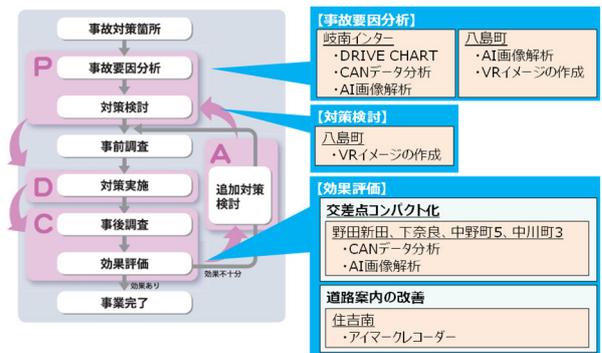


図-1 事故ゼロプランのPDCAサイクルと活用したインフラDX

(1) DRIVE CHART

DRIVE CHARTは図-2に示す通り、ドライブレコーダーをベースとした専用車載器から得られる自動車と自転車との交錯等の危険事象を把握できる技術¹⁾であり、



図-2 DRIVE CHARTによる危険事象の検知イメージ¹⁾

DRIVE CHARTを活用することにより、車両の走行データや速度・加速度等の挙動データに加えて、危険事象発生時の走行映像を分析することで事故要因を具体的に特定することができる。本稿では、岐南インター交差点における事故要因分析に活用した。

(2) CANデータ

CANデータは図-3に示す通り、コネクティッドカーに装着された無線通信装置（DCM）を介して取得される位置情報や車両状態に関するデータで、ETC2.0データでは分析が困難であるウインカーやワイパーなどの車両状態データに基づく分析ができ、危険事象の発生要因等の分析が可能である。本稿では、岐南インター交差点における事故要因分析や交差点コンパクト化の効果評価に活用した。

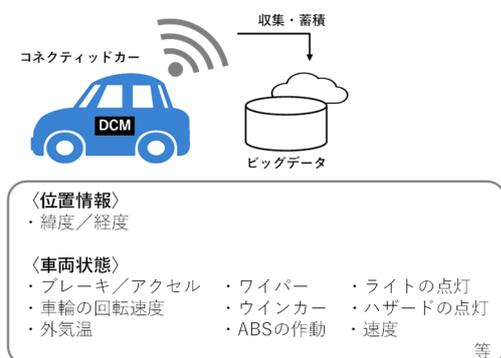


図-3 CANデータの概要

(3) AI画像解析

AI画像解析は図-4に示す通り、現地で撮影したビデオデータをAI技術を用いて解析することで、車両の挙動（車線変更の状況、走行速度等）を分析することができる技術である。AI画像解析により得られた情報を活用することで後述するPET等の事故リスクを示す指標による分析も可能となる。本稿では、岐南インター交差点、八島町交差点における事故要因分析や交差点コンパクト化等の効果評価に活用した。

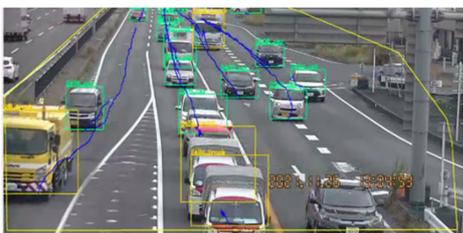


図-4 AI画像解析による車両挙動の分析イメージ

(4) VRイメージの作成

VRイメージの作成は図-5に示す通り、事務所で保有するMMSデータを活用し、検討対象箇所のVRイメージを作成し、VR上で視覚的に対策内容を把握できるものである。VRイメージを活用することで、ドライバー

目線での対策の視認性等を確認することができ、最適な対策内容の決定に活用することができる。本稿では、八島町交差点における事故要因分析や対策検討に活用した。

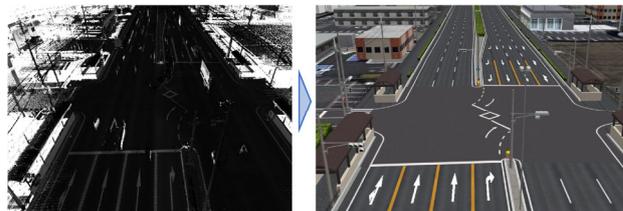


図-5 MMSデータ（左）から作成したVRイメージ（右）

(5) アイマークレコーダー

アイマークレコーダーは図-6に示す通り、被験者がアイマークレコーダーを設置した車両で検討対象区間を走行することで、走行時に注視した箇所などを分析することができる技術で、交通安全対策を実施した際にドライバーがどこを注視して運転しているかを把握することができる。本稿では、住吉南交差点における効果評価に活用した。



図-6 アイマークレコーダーを活用した走行調査の状況

3. インフラDX技術を活用した事故要因分析・対策検討

交通安全対策の取組みにおいて、事故要因分析はPDCAサイクルの最初の段階であり、PDCAサイクルを効果的に運用するためには、この段階で事故発生要因を正確に把握し、対策検討等につなげることが重要である。

また、注意喚起等の対策を検討する際には、ドライバーからの視認性を高めることも重要である。

そこで事故発生要因を正確に把握することやドライバーからの視認性を考慮したうえで対策検討を行うことを目的に、DRIVE CHART、CANデータ分析、AI画像解析、VRイメージの作成等のインフラDX技術を活用した。

以下にインフラDX技術を活用した事故要因分析・対策検討の事例を示す。

(1) 岐南インター交差点の事故要因分析

岐南インター交差点の北側流入部では、追突事故が8件/4年と多発しており、要因として流入部が直線的な

線形のため速度が出やすいことや、図-7に示す通り、車線数が多く、交差点手前に分岐部も多いことから不要な車線変更や急な車線変更が発生しやすく、後続車が追突することなどが想定された。そこで、事故発生要因を明確にするため、DRIVE CHARTやCANデータ分析、AI画像解析等のインフラDX技術を活用し、車線変更の状況や車両の走行速度等の分析を行った。

a) DRIVE CHART

DRIVE CHARTを用いた分析では、危険事象として検知された事象が発生した際の走行映像を分析した結果、前方を走る車両が交差点手前で左折するため、減速したことに伴い、後続直進車が急減速した状況を把握した(図-7)。これにより、交差点手前に沿道取付部や分岐があることで急減速が発生し、追突事故に繋がる可能性があることを明確化した。

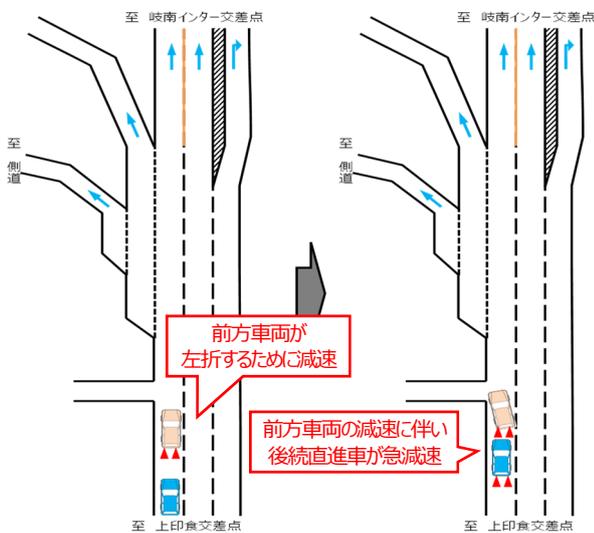


図-7 DRIVE CHARTで検知したヒヤリハット発生状況

b) CANデータ分析

車両から取得された車両情報データであるCANデータを用い、車両の走行速度やブレーキの踏みこみ度合い、ウインカー開始位置等(図-8)を詳細に分析した。これにより、追突事故発生位置付近では、車両の走行速度や60km/h超過割合が高く、急ブレーキが多発する位置やウインカー開始位置とも重なることから、車両の走行速度が高いことや、急な車線変更や無理な車線変更、車線変更直前でのウインカー開始等により、後続車が急ブレーキをかけ、後続直進車が追突する事故が発生しやすいことが事故発生要因の1つであることを明確化した。

c) AI画像解析技術

AI画像解析技術の活用により、現地で撮影したビデオデータを解析することで、車線変更位置・回数を読み取りを行った(図-9)。これにより、流入部手前の区間において不要な車線変更が多発しており、追突事故につながる可能性があることを明確化した。

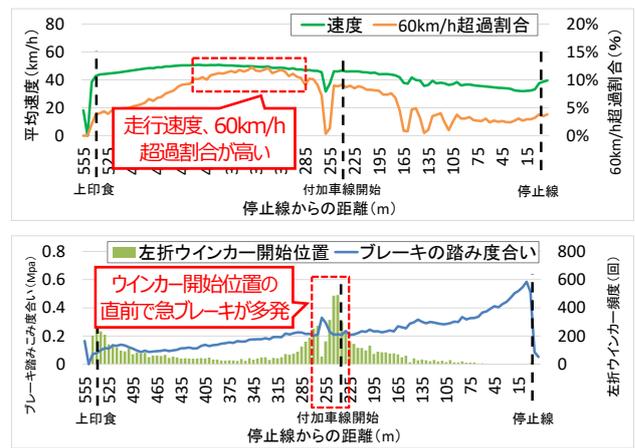


図-8 CANデータ分析結果

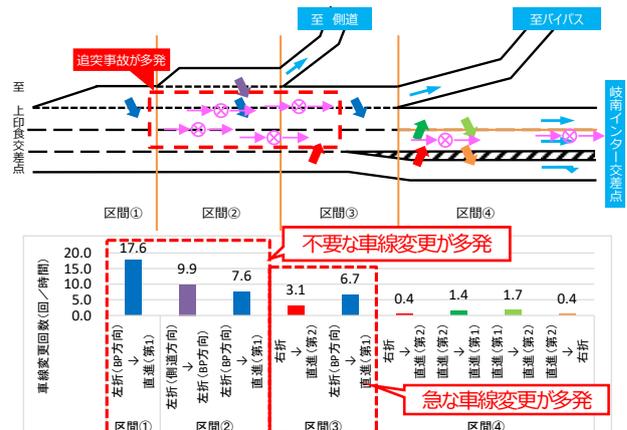


図-9 AI画像解析による車線変更位置の分析結果

これらの分析結果を踏まえ、岐南インター交差点の北側流入部では、車線数が多く、分岐も多いことから急な車線変更が発生しやすく、追突事故の要因となっていると想定されるため、図-10に示す通り、案内標識や路面標識の改良等の対策を検討した。

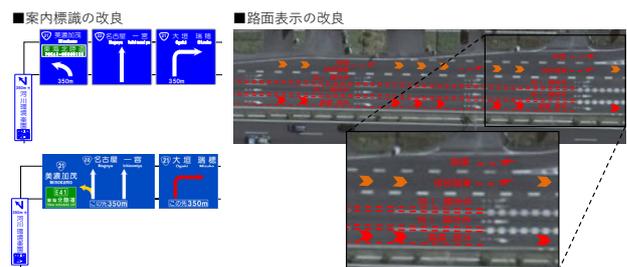


図-10 岐南インター交差点における対策検討結果

(2) 八島町交差点の事故要因分析

八島町交差点では、流入部において追突事故が発生しているほか、右左折時に横断中の歩行者・自転車と接触する事故が多発していた。その中で、左折時事故の発生要因として、歩道に設置された地下道の上屋により、横断者の視認性が悪く、左折車や右折車のドライバーが横断者の存在を認知するのが遅れることで横断者とのニアミスが発生することなどが想定された。そこで、事故発

生要因を明確にするため、AI画像解析やVRイメージ等のインフラDX技術を活用し、左折車と横断者の交錯状況（左折車と横断者の交錯点の通過時間差）や左折車の走行速度、右折車からの横断者の視認性等を分析した。

a) AI画像解析

図-11に示す通り、AI画像解析の結果から衝突が回避された時間差を示す指標であるPETを算出し、危険度を評価した。



図-11 AI画像解析による自動車と横断者の交錯状況の読み取り

なお、PETは図-12、図-13に示す通り、交錯点を通る2者間の交錯点の通過時間差から算出され、PETの値が小さくなるほど危険度が高いといえる。PETを算出した結果、交差点を低速で左折する自動車と横断者の交錯点を通る時間差が短く、左折車の速度が高いことが左折時事故の直接的な要因ではないと想定された。よって、地下道の建屋により視認性が低下し、横断者を見落とすことで左折時事故につながっている可能性が高いことが事故発生要因であることを明確化した。



図-12 自動車と歩行者の交錯状況の分析結果

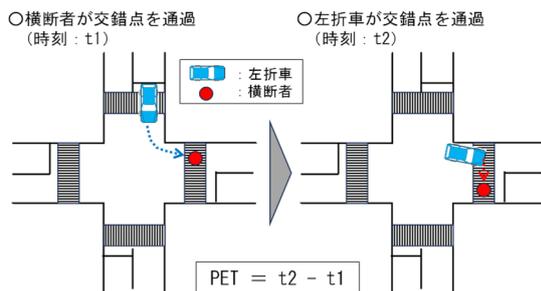


図-13 PETの算出イメージ

b) VRイメージの作成

VRイメージを作成し、右折車のドライバーから横断者の視認性の検証を行った。その結果、歩道を通行する歩行者が地下道の上屋に隠れ、ドライバーからの視認性が低下していることが明確になった（図-14）。



図-14 VRイメージを活用した歩行者の視認性の検証

(3) 八島町交差点の対策検討

活用したインフラDX技術：VRイメージの作成

交通安全対策の検討において、注意喚起看板等の対策を実施する場合には、注意喚起の対象となる自動車のドライバーからの視認性が高い必要がある。

そこで、八島町交差点で多発する右折時事故に対する効果的な対策を選定するため、事務所で保有するMMSデータをもとに3次元データを構築し、VR上で複数の対策実施イメージを作成し、左折時を含めた対策の視認性等を確認した（図-15）。

その結果、隅切り部のガードパイプにLED情報板を設置するパターンが地下道の上屋に設置するパターンより、右折車からの視認性が優れることが把握でき、事故削減に向け、最適な対策実施方法を選定することができた。

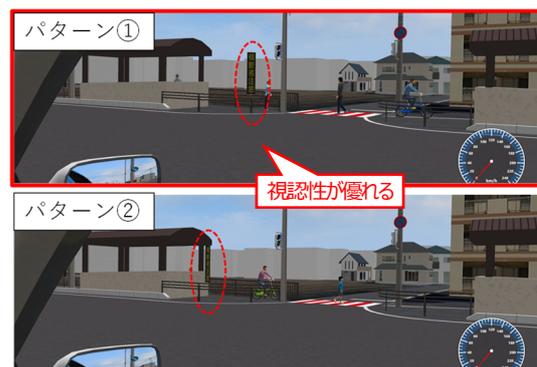


図-15 VRイメージを活用した対策の比較検討

4. インフラDX技術を活用した効果評価

追突事故の更なる削減に向け、追突事故削減に効果的な対策を検討するため、CANデータやAI画像解析、アイマークレコーダー等のインフラDX技術を活用し、追突事故対策の対策工種に着目した効果検証を実施した。

以下に効果評価において、インフラDX技術を活用した事例を示す。

(1) 交差点コンパクト化の効果検証

活用したインフラDX技術：CANデータ、AI画像解析

交差点コンパクト化は、停止線間距離の短縮による追突事故の削減等、多様な交通事故の削減が期待される対策とされている。そこで、交差点コンパクト化による追

突事故の削減に着目し、CANデータやAI画像解析技術等を活用した効果検証を行った。

なお、交差点コンパクト化の効果評価については、表-1、図-16に示す、停止線間距離が異なるものの、車線数や非混雑時旅行速度等の道路交通状況が近似している4交差点を選定し、比較評価を行うことで交差点コンパクト化の効果を分析した。

表-1 交差点コンパクト化の効果検証の対象交差点

交差点名	車線数		停止線間距離		差 (m)	非混雑時旅行速度 (km/h)			
			現況	対策		西	東	西	東
野田新田	西 3	東 3	42.1	37.5	0	西 37.5	東 32		
下奈良	西 3	東 3	36.1	-	-6	西 29.1	東 47.8		
中野町5	西 3	東 3	29.3	-	-12.8	西 37.6	東 27.9		
中川町3	西 3	東 3	24.7	-	-17.4	西 21	東 30.3		

車線数が同等

非混雑時旅行速度が同等

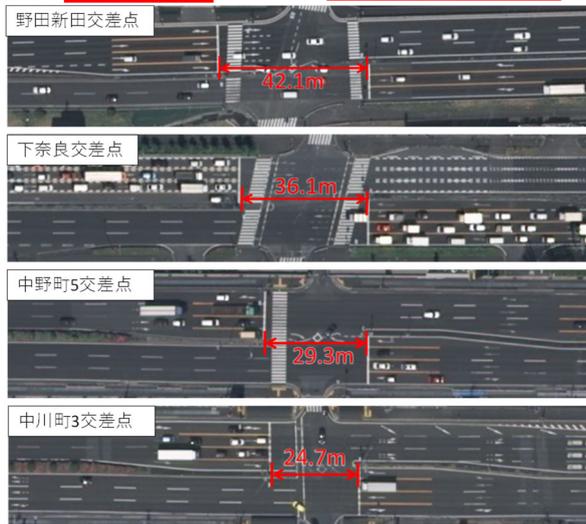


図-16 交差点コンパクト化の効果検証対象交差点の航空写真

a) CANデータ分析

CANデータによる分析では、4交差点の流入部におけるブレーキペダルの踏みこみ度合い等の比較を行った。その結果、停止線間距離が最も長い野田新田交差点（停止線間距離42.1m）と比較して、停止線間距離が最も短い中川町3交差点（同24.7m）では、ブレーキペダルの踏みこみ度合いが小さく、停止線間距離が短いほど、ブレーキペダルの踏みこみ度合いが小さくなる傾向があり、追突事故が発生しにくいことを明確化した（図-17）。

b) AI画像解析

AI画像解析技術を活用した効果検証では、図-18、図-19に示す通り、追突事故の発生につながる信号切り替わり時の交差点進入判断のばらつき等について定量的な分析を行った。その結果、信号切り替わり時の交差点進入判断のばらつきは、停止線間距離が最も長い野田新田交差点では判断がばらつき区間が長く、停止線間距離が短い中川町3交差点では、判断のばらつき区間が短いことを明確化した。また、下奈良交差点では、停止線か

らの距離が20~30mの区間では、速度の高い車両は通過し、速度の低い車両は停止しており、交通状況によって判断が分かれる結果となった。

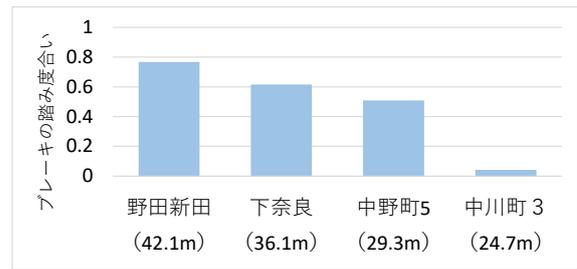


図-17 停止線から30m以内の区間におけるブレーキペダルの踏みこみ度合いの比較結果

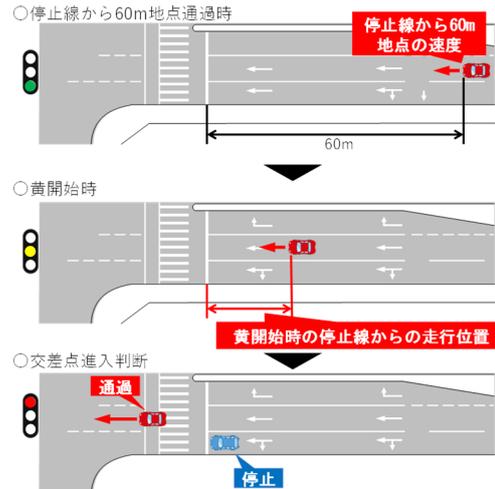


図-18 交差点進入判断のばらつきの評価指標イメージ

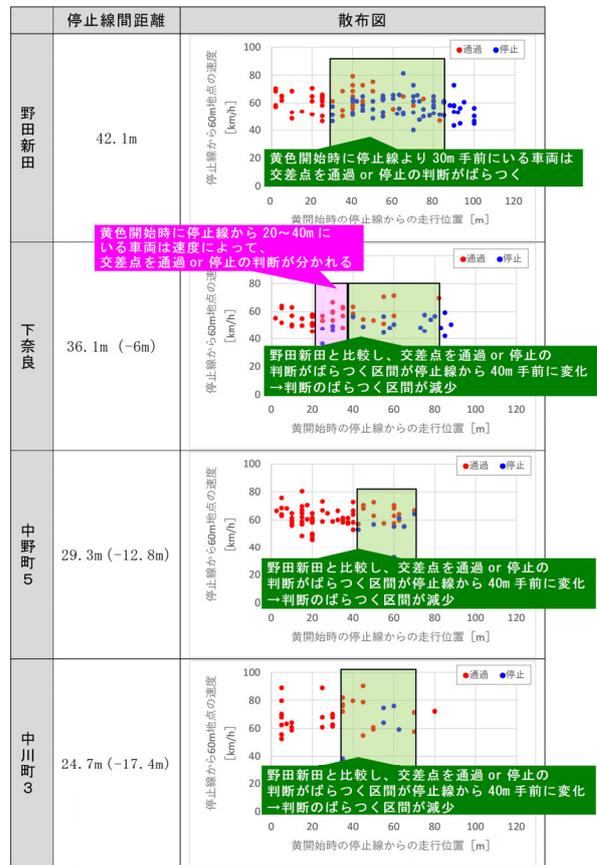


図-19 交差点進入判断のばらつきの比較結果

これらの結果より、停止線間距離が30m以下程度になると追突事故の削減効果が発現する可能性が高く、今後、交差点コンパクト化による停止線間距離の短縮を検討する際の1つの目安として設定することができた。

(2) 道路案内の改善の効果検証

活用したインフラDX技術：アイマークレコーダー

道路案内の改善については、車線運用が複雑な交差点等において、走行すべき車線が明確になり、不要な車線変更が減少することで、追突事故が減少すると想定される。そこで2020年度に道路案内の改善を行った住吉南交差点において、アイマークレコーダーを設置した車両による走行調査を実施し、対策の有効性の評価を行った。

その結果、実施した対策のうち、最も上流側に設置した案内標識は、被験者の半数が注視しているほか、被験者の8割は実施した対策のいずれかを注視していることが明らかになった（図-20）。このことから、多くの利用者が経路判断のため、案内標識や路面表示等の道路案内を活用しており、特に案内標識を注視する利用者が多いことから、道路案内の改善の有効性を明確化できた。



被験者ID	①案内標識の改良 (車線運用と一致)	②カラー矢羽根指導線	③案内標識の改良 (車線運用と一致)	④路面標示(21号)	注視した対策数
1	○				1
2		○			1
3	○		○		2
4					0
5					0
6	○		○		2
7		○			1
8	○		○	○	3
9	○	○	○		3
10		○		○	2

図-20 実施した対策及び被験者の視認状況の分析結果

5. おわりに

本稿では、交通安全対策箇所における事故要因分析や対策検討、効果評価等のPDCAサイクルの各段階でインフラDX技術を活用した結果について報告した。

事故要因分析においてはインフラDX技術を活用したことで、多車線道路において、不要な車線変更により、追突事故が発生しやすいことや、交差点付近に設置された地下道の上屋が横断者の視認性を低くし、見落としの原因になっていることなどの事故発生要因を明確化することができた。ただし、DRIVE CHARTはサンプル数が少ないため、すべての事故要因を明確化できるシーンの動画が得られない可能性があることに留意が必要である。

対策検討においては、VR上で対策イメージを作成し、ドライバー視点から交通安全対策の視認性を確認し、最適な対策内容を選定することができた。

効果評価においては、インフラDX技術の活用により、追突事故の削減に向けた対策の効果検証を行い、対策の効果が期待できることを定量的に示すことができた。

今後は、これまでの取り組みにより得られた知見を踏まえ、新たなインフラDX技術の活用や効果検証結果を踏まえた他の箇所における対策検討への反映等により、追突事故をはじめとした事故件数の削減に繋がりたいと考えている。

参考文献

- 1) 株式会社オリエンタルコンサルタンツ HP
https://www.oriconsul.com/news/post_files/200720_newsreleasc01.pdf

衛星画像を活用した道路被災状況把握の試み

梅原 剛¹・上仙 靖¹・徳武 祐斗¹

¹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）

道路管理者は、地震や豪雨等の異常気象発生時において、緊急パトロールを実施し、道路施設の被災状況や通行の可否等を把握して、適切な措置を講じることとなっている。しかし、斜面崩壊等により道路閉塞が起きた場合等、緊急パトロールによる目視での被災状況把握に時間を要し、情報空白の地域を抱えることとなる。そこで、情報の空白域をできる限り最小にすべく、リモートセンシング技術を活用した災害発生時の調査支援の検討を行っている。

本稿では、SAR衛星に着目し、近年の地震災害を例に、衛星データを用いた道路被災状況の把握がどの程度可能であるか試みたので報告する。

キーワード 災害対応、道路被災状況把握、SAR衛星、衛星コンステレーション

1. はじめに

道路管理者は、地震や豪雨等による大規模災害が発生すると、ただちに体制を構築し、パトロールを実施して、道路施設の被害状況を把握することとなる。しかしながら、休日や深夜など勤務時間外に発生した場合や被害が甚大となりその分布が広範囲にわたる場合では、被災状況の把握に多大な時間を要することもある。

例えば、深夜1時25分に発生した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¹⁾。

そこで、国土技術政策総合研究所では、地震や豪雨災害等による道路施設の被災状況の迅速な把握及び応急復旧方法の検討、被害の拡大や二次災害の防止を目的として、CCTV等の道路管理技術に加え、リモートセンシング技術を活用した災害発生時の調査支援の検討を行っている。これまでに、図-1に示す道路の被災情報収集における適用条件早見表を整理するとともに、一部の事務所管内において、早見表を用いた地震災害時の道路被災状況の調査方法に関する机上検討や自動航行UAVの現場での試験飛行等も実施してきた²⁾。

本稿では、悪天候時や夜間においても利用可能な技術であるSAR衛星に着目し、災害時の道路被災状況調査への活用可能性について検討した。

2. SAR衛星の概要

SAR衛星は、レーダーを搭載した衛星で、レーダーはマイクロ波を対象物に照射し、反射して返ってきた信号を分析して対象物を観測するものである。特徴としては、電波が大気の影響を受けにくく、夜間や雲がある状況でも地表面を広範囲に観測できることがあげられる。

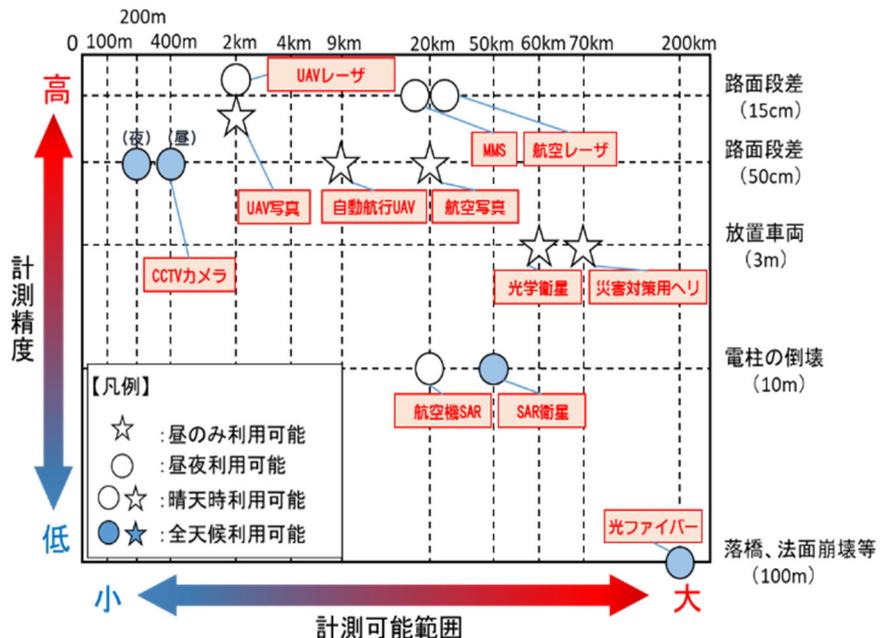
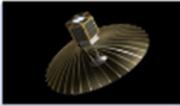


図-1 道路の被災情報収集における適用条件早見表

表-1 日本の代表的な SAR 衛星

	ALOS-2	iQPS	Synspective
イメージ			
衛星規模	大型	小型	小型
分解能	Stripmap: 3.0m × 3.0m Spotlight: 1.0m × 3.0m	Stripmap: 1.8m × 0.46m Spotlight: 0.46m × 0.46m	Stripmap: 1.8m × 2.6m Spotlight: 0.5m × 0.9m
撮影幅	Stripmap: 70 × 50km Spotlight: 25 × 25km	Stripmap: 14 × 7km Spotlight: 7 × 7km	Stripmap: 10 ~ 30km Spotlight: 10 × 10km
観測波長帯	Lバンド	Xバンド	Xバンド
衛星配備計画	1機	36機	30機
観測頻度	14日 (観測条件が同一の場合)	10分※1	2時間※2
打ち上げ年次	2014年～	2019年～	2020年～

※1：36機体制実現時の観測頻度

※2：<https://ja.wikipedia.org/wiki/Synspective> による

代表的な日本のSAR衛星としては、表-1に示すものがある。大型衛星としては2014年に打ち上げられたALOS-2があり、小型衛星としては、令和4年度の小型SAR衛星コンステレーションの利用拡大に向けた実証事業により注目を浴び始めている株式会社QPS研究所や株式会社Synspectiveの衛星がある。

また搭載しているセンサにも観測周波数があり、波長帯としては、Lバンド、Cバンド、Xバンドがある。図-2に示すように、一般に長い波長を持つ電波は物質の内部に入り込みやすく、短い波長を持つ電波は物質の表面で反射しやすい性質を持つ。さらに、各センサの帯域幅は、電波法に基づく周波数割りあてに制限され、レンジ方向の分解能がLバンドでは3m程度、Xバンドでは数十cm程度となる。

道路被災事象を捉えようとするXバンドの方が適していると考えられるが、災害時に撮影可能な衛星に限られることもあり、Lバンド衛星及びXバンド衛星の両方について衛星を活用した道路被災状況把握に関する活用の可能性に関する検討を実施した。

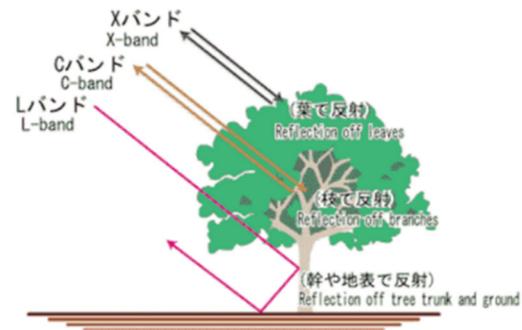


図-2 バンドの違いと特徴

表-2 各解析手法の特徴

解析手法	特徴
一時期反射強度解析	地震発生後に撮影された強度画像を判読して災害後の土地被覆状況を把握可能な解析手法
二時期反射強度解析	二時期（地震前後）に観測された電波の反射強度の差分値を画像化し、災害前後の土地被覆状況の変化を把握可能な解析手法
干渉解析	二時期（地震前後）の位相情報から位相差を算出することで、地表面の変位を把握可能な解析手法

3. LバンドSAR衛星画像を用いた道路被災状況把握

現在運用されアーカイブ画像が蓄積されている日本のSAR衛星ALOS-2の画像を利用して、平成28年熊本地震における、道路被災箇所の抽出を試み、道路被災状況調査への衛星画像の活用可能性について検討した。

なお対象路線は、震度6強以上を記録した市町村内の国道57号、国道325号、県道28号とした。

(1) 衛星画像を用いた道路被災箇所の把握

平成28年熊本地震の被災箇所について、震災後の現地調査資料等を用いて、道路被害（路面クラック、段差等）、橋梁被害（落橋、橋台の破損、伸縮装置の段差等）、土砂崩壊等に区分した上で、ALOS-2の分解能3m画像（常時観測モード）を用いた一時期反射強度解析、二時期反射強度解析、干渉解析（表-2）により、道路被

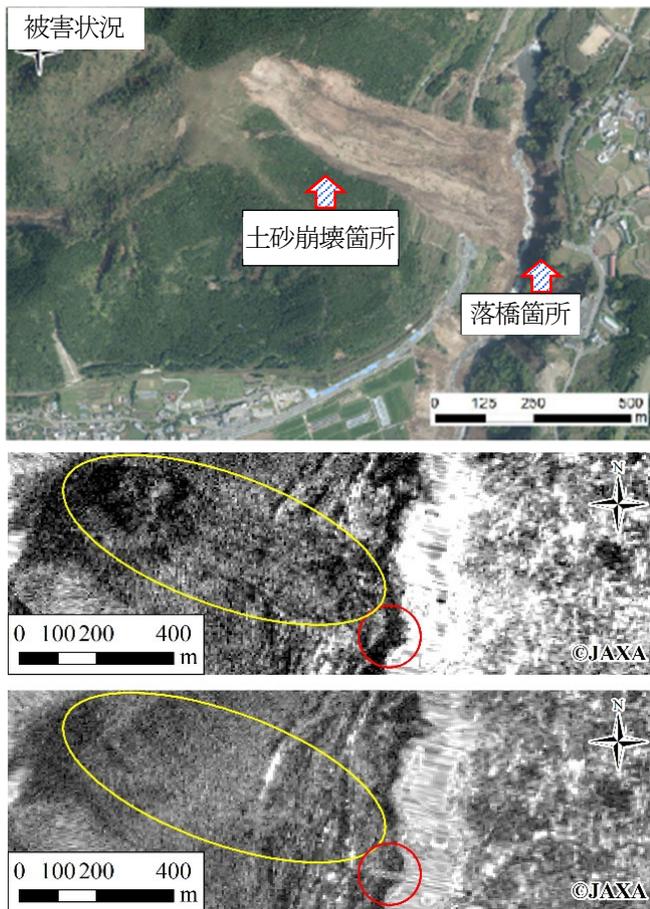


図-3 一時期反射強度解析による判読例

(上：被害状況、中：判読（被災後）、下：判読（被災前）)

災箇所と推測される箇所の目視判読を行い、実被害箇所と比較した。ここで、反射強度解析は電波の振幅に、干渉解析は電波の位相に着目した解析である。

以下に解析結果を示す。なお、今回干渉解析も実施したが、干渉解析は一般的に広域的な変化の把握に用いられる手法であり、道路被災事象を直接的に把握する手法としては活用が難しい結果となったため、本紙での記載は省略する。

a) 一時期反射強度解析

熊本地震本震後の2016年4月29日に撮影された強度画像を用いて、一時期反射強度解析による道路被災箇所の判読を行った。ここで強度画像とは、SARで受信した電波の強度を白黒の濃淡で表した画像である。一時期反射強度解析で判読できた道路被災の例を図-3に示す。下段に示す被災前の強度画像では、赤枠の中に阿蘇大橋が白く映っているが、中段に示す被災後の強度画像では黒く映っていることから、地震の影響により落橋していることがわかる。また、図中の黄枠は大規模斜面崩壊が発生した箇所であり、表面が植生から土砂へ変化した影響で強度が弱くなり、強度画像では周囲の斜面と比べてやや黒く、崩落箇所が窪んだように映っていることがわかる。このように一時期反射強度解析では、大規模な被災箇所は判読が可能であったが、道路のクラックや段差、路面

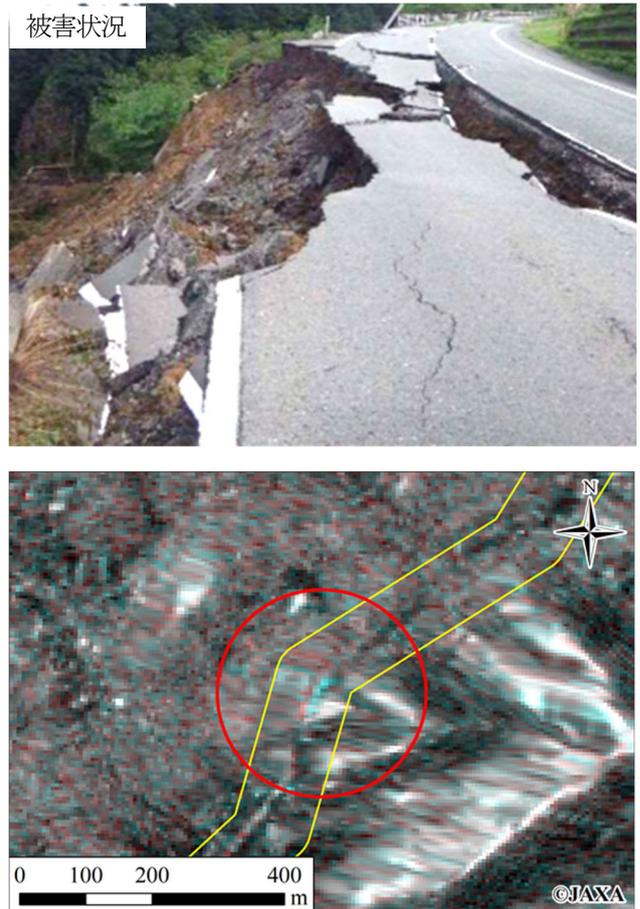


図-4 二時期反射強度解析による判読例

(上：被害状況、下：判読結果)

の崩落等の規模の小さい被災箇所については判読が困難であることがわかった。

b) 二時期反射強度解析

本震前後に観測された2016年4月15日の画像と、2016年4月29日の画像を用いて二時期反射強度解析を実施した。二時期反射強度解析では、本震前後で変化がない場合は白または黒色を示し、本震後に強度が弱くなった場合は赤色、本震後に強度が強くなった場合は水色を示す。二時期反射強度解析で判読できた道路被災の例を図-4に示す。図中の赤丸は路面が崩落した箇所を示している。一般的に路面からの反射強度は弱いものであり、二時期強度差分画像では黒く表示されるが、路面の崩落に伴い路面の形状が複雑に変化したことで、本震前と比べて反射強度が強くなり水色で表示されていることがわかる。二時期反射強度解析では、一時期反射強度解析と比較し、このような比較的規模の小さい現象を捉えることができる可能性が示唆された。

(2) コヒーレンス値を用いた道路被災箇所の把握

衛星画像からコヒーレンスを算出し、その値から被災箇所の絞り込みができないかを検討した（以下、コヒーレンス解析という）。ここで、コヒーレンスは干渉SAR処理において、地震発生前後の2つのSAR画像の干渉度

合い（電波の振幅と位相の双方に着目した二時期電波の相関性）を示す値で、1に近いほど干渉度合いが高いことを、また、0に近いほど干渉度合いが低いことを示す。本検討は、地震前後の電波の振幅、位相の双方に着目すれば、振幅又は位相の何れかのみに着目した前述の3.(1)よりも、道路変状で引き起こされた地表面の乱れを把握することができるのではないかと考えたものである。なおコヒーレンスは、分解能3mのSAR画像ピクセル毎に求められるものではあるが、レーダー特有のノイズに起因する乱れが含まれているため、本検討では、係るノイズの低減を図るための処理を施した上で、コヒーレンス値を算出し、路線を道路中心から幅各15mの計30m、延長50mに分割した道路ポリゴン内で平均化したコヒーレンス平均値を求めている。そして、その大きさを道路ポリゴンを色分け表示したコヒーレンスヒートマップを作成した。さらに被災箇所と重ね合わせて図化することで、コヒーレンスヒートマップにより道路被災箇所の絞り込みが可能であるかを評価した。

図-5にコヒーレンスヒートマップと被災箇所との関係を示す。被災箇所の多くでは、コヒーレンス平均値が小さくなっており、被災箇所とコヒーレンス平均値には関連性があることが認められる。今回、コヒーレンスヒートマップを用いることで道路被災箇所の絞り込みはある程度可能であることが確認できた。

ここで、道路被災箇所の絞り込みの推定精度を把握するため、ある閾値以下のコヒーレンス平均値を持つ道路ポリゴンを被害があった箇所と推定し、実状と比較することで、当該道路ポリゴンの推定結果を図-6に示す正解、見逃し、空振りに分類・整理する試みを行った。被害があったとみなすコヒーレンス平均値の閾値を変化させ、正解、見逃し、空振りの構成がどのように変わるかを整理した結果を図-7に示す。本結果から、0.7以下のコヒーレンス平均値を持つ道路ポリゴンを被災箇所と推定すれば、7割の正解率を確保しつつ、見逃しの発生を抑制できることがうかがえる。

最適な閾値については、今後も他の災害事例での検証を進め検討していく必要があるが、今回、Lバンド衛星データを用いた道路被災箇所抽出のための一手法として用いることが可能であることが確認できた。

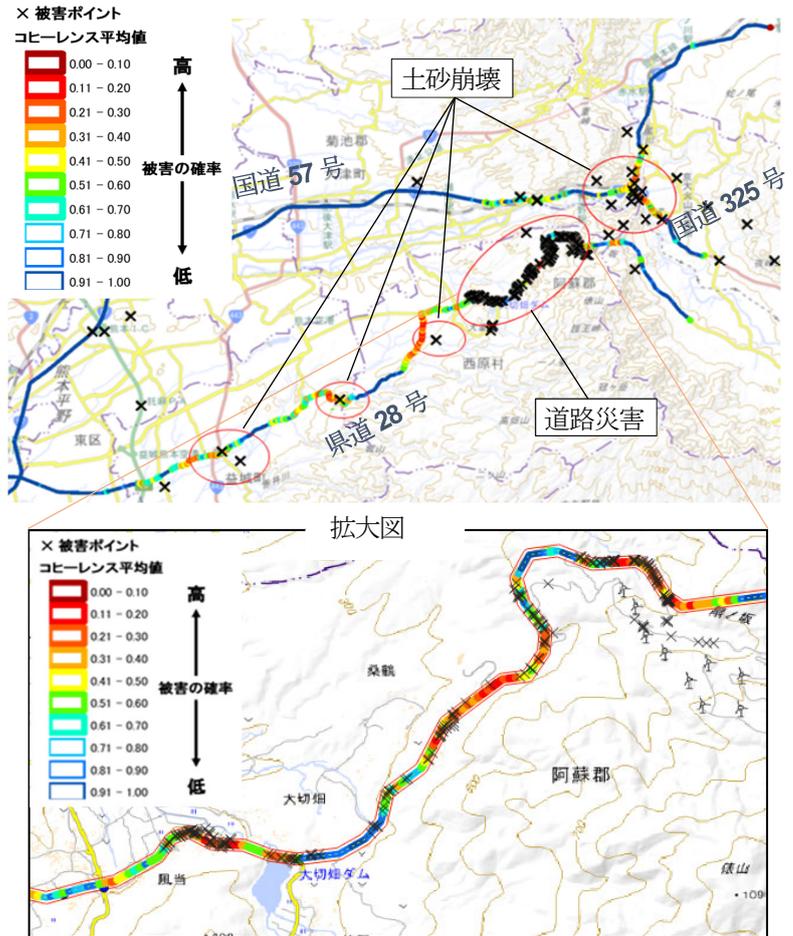
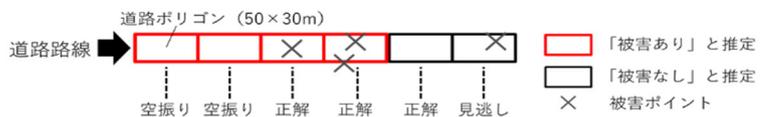


図-5 コヒーレンスヒートマップと被災箇所



	被害あり	被害なし
「被害あり」と推定	①正解	②空振り
「被害なし」と推定	③見逃し	④正解

図-6 評価概念図

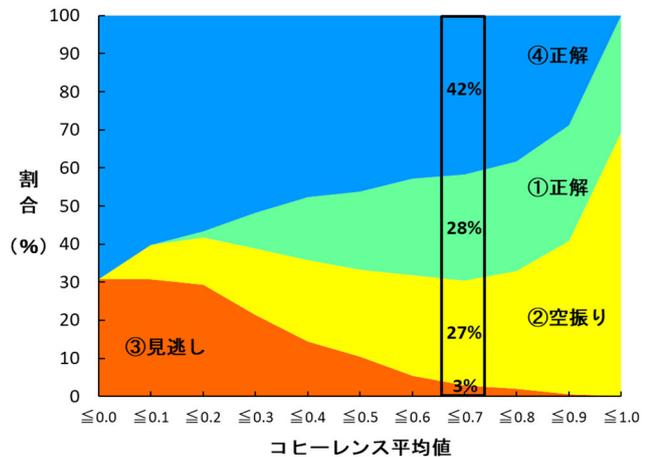
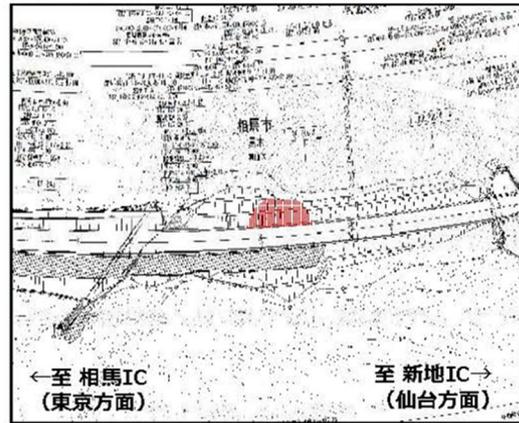


図-7 評価整理結果

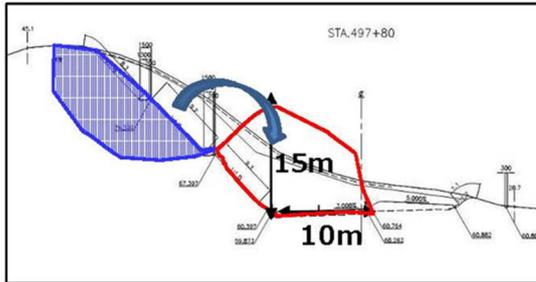
【位置図】



【平面図】



【横断図】



【被災状況】



図-8 福島沖地震による道路被災状況 (NEXCO 東日本記者発表資料 (2021年2月14日) より引用)

4. Xバンド小型SAR衛星画像を用いた道路被災状況把握

3.(1)からもわかるように、Lバンド衛星の分解能では、大規模な道路事象を把握することが限界であること、またデータ転送や解析時間等も要することから、今まで道路被災状況調査における活用可能性の検討がほとんどなされてこなかった。しかしながら、2022年に内閣府による「令和4年度小型SAR衛星コンステレーションの利用拡大に向けた実証」プロジェクトが開始され、小型SAR衛星が注目され始めるとともに、近年、急速に配備が進み、小型SAR衛星コンステレーションが構築されつつある状況となったことから、道路分野においても被災状況

把握に活用できないかと考え、現在、活用可能性の検討を始めたところである。

先に紹介した株式会社QPS研究所や株式会社Synspectiveの衛星も2020年代後半までに30機体制のコンステレーション構築を目指して計画が進められており、災害対応において新たな活用の進展が期待されているものの、現在はまだ数機程度の運用であり、災害時の撮影データも蓄積されていない。そこで、本検討においては、衛星の性能が上記2社のものとはほぼ等しい米国のXバンド小型SAR衛星であるCapella衛星 (Stripmapモード分解能: 1.2-1.7m×0.75m, 撮影幅: 5km) の強度画像を用いて、一時期反射強度解析を実施した。

(1) 衛星画像を用いた道路被災箇所の把握

2021年2月13日の夜に発生した福島沖地震時の道路被災状況(図-8)に関して、2021年2月14日に撮影されたCapella衛星の強度画像を用いて、一時期反射強度解析による道路被災箇所の判読を行った結果を図-9に示す。なお図-9には、上段に分解能1.0m程度のCapellaデータを用いた強度解析結果、下段に分解能3.0mのALOS-2データを用いた強度解析結果を示した。図-9をみると、一般的に路面からの反射強度は弱く黒く表示されるが、図中の黄枠箇所において、反射強度が強くなり白く反射していることから、何らかの道路被災事象が発生していると判断することができる。一方で、ALOS-2データとCapellaデータを用いた強度解析結果の分解能の違いに視点をあてると、判読のしやすさは明らかに異なることがみてとれる。このことから、日本における小型SAR衛星コンステレーションが実現すれば、被災現場の把握精度の向上も見込まれるものと考えられ、現在、国総研においては、現場模擬事象等を作成し、ほぼ同スペックの米国のCapella衛星を用いて、その事象を撮影することで、各道路被災事象の把握精度の確認を実施している。

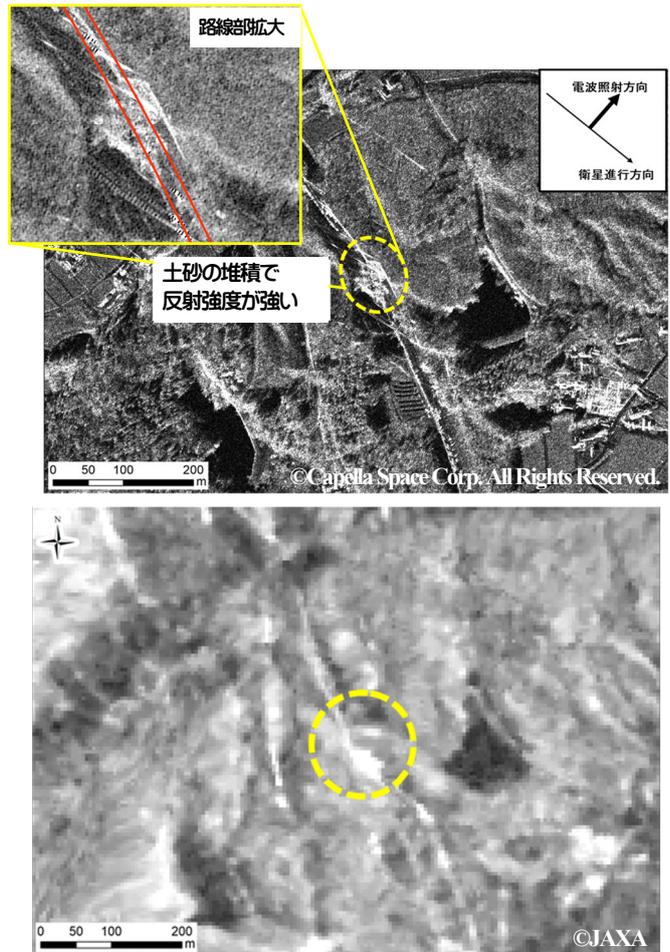


図-9 一時期反射強度解析結果(福島沖地震2021)
(上: Capella 分解能 1.0m 程度, 下: ALOS-2 分解能 3.0m)

5. おわりに

本稿では、Lバンド及びXバンドSAR衛星画像を用いた判読結果について報告した。LバンドSAR衛星における一時期反射強度解析及び二時期反射強度解析では、落橋や斜面崩壊、路面崩落等の大規模な被災状況は判読できたが、小規模な被災状況の把握は困難であることがわかった。コヒーレンス解析では、コヒーレンス値と実被害に関連性が認められ、適切にコヒーレンス値を被災箇所推定の閾値として設定することで、道路被災箇所の抽出に役立つデータとなることも確認できた。他方、Xバンド小型SAR衛星における強度解析では、Lバンド衛星と比べて、被災事象の把握精度の向上が見込まれる技術となることが確認できた。加えて日本における小型SAR衛星コンステレーションが実現していくことで、図-10に示すような把握時間等の向上にも期待できる技術となることが想定される。

今後は他の災害事例での検証を進めるとともに、高分解能なXバンド衛星画像を用いた反射強度解析による道路被災状況把握への活用可能性調査を進め、道路被災状況調査に関する衛星活用標準仕様書(案)を作成していく予定である。

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

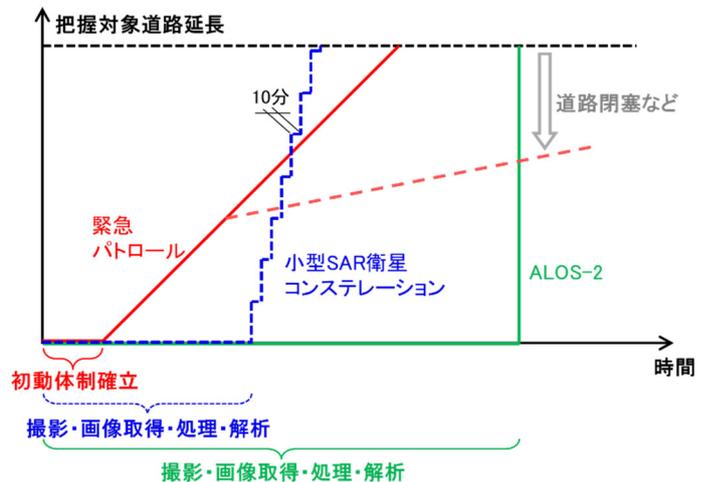


図-10 各技術を用いた道路被災状況調査時間のイメージ図

- 2)梅原剛, 森賢二, 渡邊和宏, 増田仁, 片岡正次郎: 現場適用性を考慮したリモートセンシング技術による道路被災状況調査方策の提案, 土木技術資料, 第 62 巻, 第 10 号, pp.26-29, 2020.
- 3)梅原剛, 増田仁: 自動航行 UAV を用いた実道における被災状況把握実験, 土木技術資料, 第 64 巻, 第 4 号, pp.24-27, 2022

衛星・AIを活用した地図作成の効率化

桑村 亜実¹・佐々木 励起¹・浅野 剛²

¹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)

²国土地理院 基本図情報部 国土基本情報課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番) .

国土地理院では、電子国土基本図（地図情報）の整備・更新を継続的に行い、変化を続ける国土の現況を地図に反映する取組を行っている。この情報は、災害対応の基盤となる情報として活用されるため、いつどこで起こるか分からない災害に備えて国土の変化を適切に反映する必要がある。そのためには、国土全域の変化を網羅的に把握し、変化箇所を効率的に地図に反映することが課題となっており、膨大な枚数の画像分析を機械的に行うことに優れたAIを活用した新たな技術開発が必要である。本発表では、二時期の中分解能衛星画像からAIによる画像分析によって変化部を抽出する技術開発について、現状の成果と今後の展望を報告する。

キーワード 衛星画像, AI, 画像分析, 電子国土基本図, 地図作成

1. はじめに

日本列島は、地震や火山噴火、風水害などの自然災害が発生しやすい自然条件下に位置しており、近年では自然災害が頻発化、激甚化している。このため、国土、国民の生命、身体及び財産を守る災害対策の一層の充実強化が求められている。災害発生時の課題として、使用する地図が機関ごとに異なる場合に被災場所の特定に時間がかかることや、使用する地図が現況と異なる場合に誤った被災情報が伝達され混乱が生じることが挙げられる。迅速な場所の特定と正確な情報共有のためには、全国を統一的に表現した基盤となる地図情報が不可欠である。国土地理院は、災害対策基本法に基づく指定行政機関として、測量や地図分野の最新技術を活用して地理空間情報を整備し、災害対応の基盤となる情報を提供している。このうち電子国土基本図は、統合災害情報システム（DiMAPS）の背景図や、災害時に関係機関等に提供される災害対策用図の元データとして活用されている。

2. 地図更新の現状と技術開発の概要

国土地理院では、面的更新と迅速更新の二つの手法を組み合わせて電子国土基本図を更新している。面的更新では、空中写真や大縮尺の地図情報、公共測量成果である都市計画基図等を用いて、対象地域内の地物を面的に修正・更新している。迅速更新では、行政面や防災面で利用ニーズの高い道路や公共施設等を、管理者と連携し優先的に更新している。電子国土基本図は、行政機関等で登録・公開されている、正確性や最新性が確保された社会の基盤となるデータベース（ベース・レジストリ；

デジタル社会形成基本法第31条に規定する「公的基礎情報データベース」）に指定されている。広く利活用される基本的な地図情報としての品質を確保するため、国土の現況を反映させるよう効率的な情報更新が求められる。

電子国土基本図の面的更新を実施する範囲は、前回更新からの経過年数や当該範囲の実際の地物の変化量等に基づいて決定している。このうち地物の変化量については、更新に用いる地図情報や空中写真と既存の地図情報を目視で比較することで把握しているため、多大な労力と時間を要している。地物の変化量の大きい箇所をどのように効率的に把握するかが、全国的な変化に基づいた計画的な更新を実施する上での課題となっている。これまでの国土地理院における既往研究では、二時期の空中写真と衛星画像による自動変化抽出手法の開発¹をはじめとする、地図修正が必要な箇所の効率的な把握に寄与し得る特定の地区を抽出した検証が行われてきた。現在は、既往研究を踏まえた国土全域の変化を網羅的に把握する技術開発を進める段階に差し掛かっている。

近年、写真測量やリモートセンシングの分野においてAIの活用が着目されており、航空写真や衛星画像を用いた物体検出に関する研究が進められている²。AIによる物体検出では、学習素材となるデータが多かつ多様になるほど検出精度が向上する傾向にある。衛星画像は、航空写真と比較して低解像度である一方、一シーン当たりの観測幅が広く一度に広範囲を観測することが可能である。このため、衛星画像から全国の多様なデータを多く取得可能であり、全国の変化把握に用いる学習データとして適している。AIは、人に代わって膨大な枚数の画像を機械的に分析することが可能である。国土全域の変化を把握するという多大な労力と時間を要する作業にAIを活用することで、限られたリソースの最適配分につな

がる。

国土地理院では、国土変化に応じた計画的な地図の更新における課題を解決するため、二時期の中分解能衛星画像を用いたAIの画像分析による変化抽出技術の開発を行っている。本業務で開発を進めるシステムの今後の運用方針の概略を図-1に示す。まず、本業務で開発を進めるAIモデルに対し、過去と最新の衛星画像ペアを入力する。これを基に、AIが変化抽出処理を実行し、国土全域の一定面積以上の建物及び道路の変化をヒートマップ状に出力する。抽出結果を基に面的更新の実施範囲を決定することで、国土変化に応じた効率的な地図更新が可能になる。決定した地図更新範囲の空中写真を撮影し、地物変化を詳細に計測し地図を更新する。この地図更新業務で用いた詳細な地物変化情報をAIに学習させることにより、AIの抽出精度を向上させる。また、地物変化情報をAI学習における正解データとして蓄積することで、学習データ作成の労力軽減につなげる。衛星画像とAIを用いた正確かつ高鮮度な地図整備を行うことにより、災害対応における地理空間情報活用促進に寄与すると考えられる。

本報告では、技術開発の一連の流れと現段階で得られた成果に加え、現状の課題を踏まえた改善策と今後の運用方針について報告する。

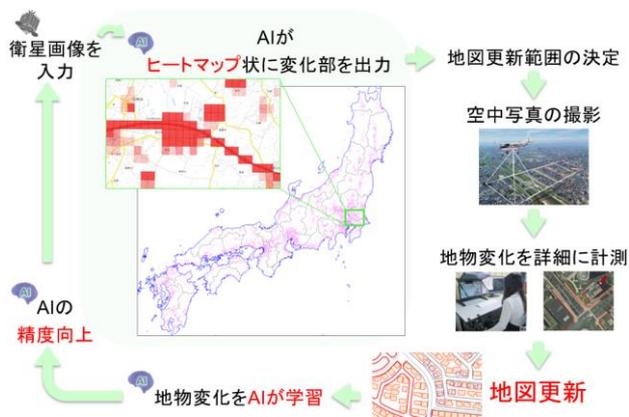


図-1 本業務で開発を進めるシステムの今後の運用方針概略

3. 使用データ概要

(1) 各衛星のスペック及び衛星画像の概要

変化抽出には、観測時期が異なる二時期の光学衛星画像を使用した。地上分解能が高い白黒のパンクロマティック画像（以下「PAN」という。）と、分解能が低いカラーのマルチスペクトル画像（以下「MS」という。）にカラーパンシャープン処理とオルソ補正を行った8ビットカラー画像を使用した。地物の変化前を示す過去の画像には、フランスのAirbus Defence and Space社が運用す

る光学衛星SPOT-6及びSPOT-7（以下「SPOT」という。）の分解能1.5 mの衛星画像を使用した。地物の変化後を示す最新の画像には、日本のAxelspace社が運用する光学衛星GRUSの分解能2.5 mの衛星画像を使用した。衛星画像の変化抽出には、同じセンサーで観測された衛星画像を用いることが望ましいが、最新の画像として用いるGRUSは2018年12月に打ち上げられたため、それ以前のアーカイブ画像が存在しない。このため、本業務では過去の画像にSPOTのアーカイブ画像を採用した。

GRUS衛星は、国産の光学地球観測衛星であり、質量約100 kgの小型人工衛星である。現在五機を運用しており、日本を含む中緯度域において約2日に1回観測が可能である。将来的には数十機体制での運用が計画されており、地球上の全陸地の約半分を1日に1回観測する高頻度観測が可能になるとされている。本開発業務の試行後は、実運用のため継続的に衛星画像を利用することを想定している。そのため、今後も定期的な観測が見込まれており、比較的低価格で入手可能なGRUS衛星画像を用いることは、業務上有用である。

本開発業務で使用した各衛星の性能を表-1に示す。また、解像度2.5 mのGRUS衛星画像から判別可能な地物の例を図-2に示す。

表-1 使用した各衛星の性能

衛星名	SPOT	GRUS
高度	694 km	585 km
観測幅	60 km	57 km
分解能 (PAN)	1.5 m	2.5 m
分解能 (MS)	6.0 m	5.0 m

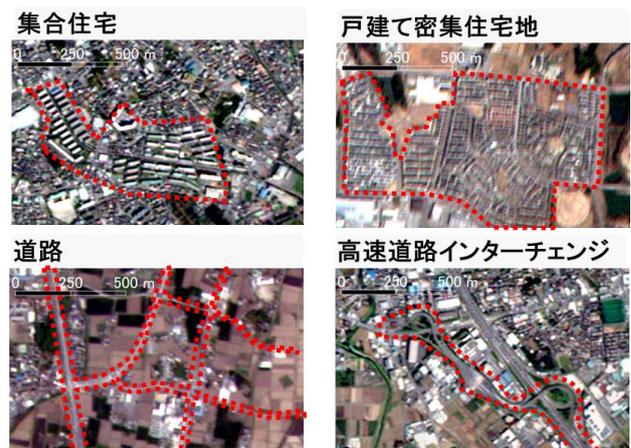


図-2 GRUS衛星画像から判別可能な地物の例

(2) 本開発業務の対象地域

対象地域は、山間部や都市部などの種別を考慮して16地域とした。各対象地域と重複する5万分1地形図の図郭名と衛星画像の観測時期、種別を表-2に示す。種別は、

衛星画像を基に主な土地利用を目視で分類し、農地をF、山間部をM、都市をC、港をPとした。16地域の位置関係を図-3に示す。

表-2 対象地域の図郭, 使用した衛星画像の観測日, 土地利用種別

No.	図郭	SPOT観測日	GRUS観測日	種別
1	中標津	2015-08-25	2023-02-18	F
2	金木	2018-09-06	2022-08-25	F
3	常葉	2015-10-27	2023-04-13	M
4	宇都宮	2015-12-18	2023-04-22	C
5	前橋	2015-12-18	2023-03-19	C+F
6	金沢	2017-09-19	2022-04-10	C+F+M
7	金沢	2017-04-30	2022-04-10	C+F+M
8	佐倉	2015-12-19	2023-03-11	C+F
9	大宮	2018-12-15	2022-12-16	C
10	東京東北部	2015-12-18	2023-05-16	C
11	豊田	2015-10-07	2023-03-01	C+F+M
12	半田	2015-11-21	2023-03-01	C+F+P
13	浜田	2015-12-07	2023-03-20	C+M+P
14	大阪東南部	2017-12-20	2022-02-28	C
15	玉島	2015-05-02	2023-05-01	C+M
16	長崎	2015-11-04	2023-03-15	C+M+P

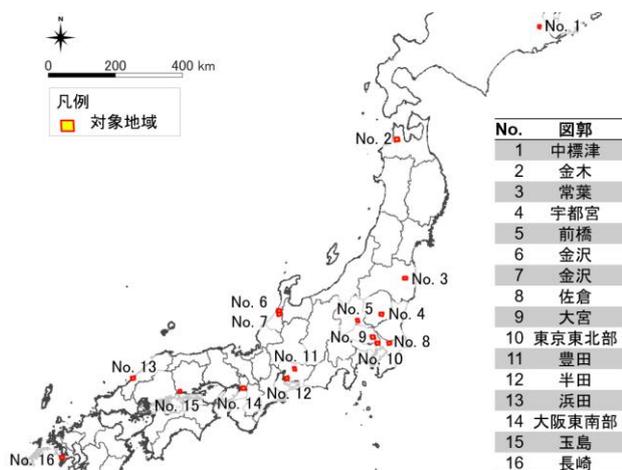


図-3 対象地域の位置と図郭名

4. AIの学習データ及び抽出条件

開発には、深層学習の一手法であるSiamese Network modelというAIモデルを使用した。これは、変化検出タスクで効果的なモデルであり、学習に用いるラベル付きデータが少数である場合に有用であるとされている。

AIを用いて画像から変化部を抽出するためには、変化前を示す過去の画像と変化後を示す最新の画像をセットにした画像ペアに加え、AIに抽出して欲しい地物の基準を学習させるためのラベル付きデータが必要である。本

開発業務では、衛星画像を小さな正方形に分割したグリッド単位での変化抽出を実施した。そのため、はじめに地物単位での学習データを作成し、次に地物単位の学習データが重なるグリッドにラベルを付与しAIにインプットするという、二段階で学習データの作成を実施した。

地物単位での学習データの作成に当たり、作業者がGISソフトを用いて二時期の衛星画像から変化部を目視判読し、変化した地物を囲むようなポリゴンを作成した。抽出する変化部は、「建物新設」、「建物滅失」、「道路新設」、「道路滅失」の4カテゴリに分類した。抽出する目安は、GRUS衛星画像から判別可能な地物をもとに決定し、概ね6軒以上まとまって行われた戸建て住宅の新設及び滅失、概ね400 m²以上の建物の新設及び滅失、幅員6 m以上で延長が概ね50 m以上の道路とした。なお、この抽出基準はAIによる抽出精度に影響するため、精度評価の結果を踏まえて基準を調整しながら開発を進めている。

次に、作成した地物単位での学習データをAIにインプットした。グリッド単位でインプットを実施するため、地物単位での学習データがグリッド内に1ピクセルでも含まれれば、「建物新設」、「建物滅失」、「道路新設」、「道路滅失」のうち該当するラベルを付与した。なお、同一グリッドに複数の変化が含まれる場合には、複数のラベルを付与した。ラベルの付与は、各グリッドに0又は1を入力することで実施し、変化有りのグリッドには1、変化無しグリッドには0を入力した。地物変化の例とAIへの入力例を図-4に示す。図-4のC-2グリッドのように、変化部ポリゴンが点で接している場合にも変化有りとして定義した。なお、グリッドのサイズは128 px × 128 px, 256 px × 256 px, 512 px × 512 pxの3サイズとし、サイズを変更しながら精度検証を行い、精度向上を試みている。

地物変化の例	AIへの入力例		
	A	B	C
1	道路新設		建物新設
2	建物滅失		
			建物新設
			建物滅失
			道路新設
			道路滅失

	建物新設	建物滅失	道路新設
A-1	0	1	1
A-2	0	1	0
B-1	0	0	1
B-2	0	0	0
C-1	1	0	0
C-2	1	0	0

図-4 地物変化の例とAIへの入力例

全16画像ペアのうち、1ペアをテストデータに使用し、その他15ペアを学習データと評価データに使用した。テストデータには、都市部や山間部、港や海岸線がバランスよく含まれる、No.16の長崎地区のデータを使用した。

AIは、学習データを基に学習を繰り返すことでパラメータの自動調整を行った。その後、作業者が評価データ

をもとにコード修正を繰り返すことで、ハイパーパラメータを調整した。調整後、学習に使用していないテストデータによって精度評価を実施した。これにより、実運用に近い形で学習済みAIの精度を評価した。各パラメータを変更しながら精度検証を行い、精度向上を試みている。

5. 精度評価の算出方法

精度評価には、混同行列を用いた。正解データとAIの予想結果の組み合わせにより、True Positive (以下「TP」という。), False Positive (以下「FP」という。), True Negative (以下「TN」という。), False Negative (以下「FN」という。)の4カテゴリに分類した。TPはAIが変化有りと予想し実際に変化していた箇所, FPはAIが変化有りと予想したが実際は変化していなかった箇所, TNはAIが変化無しと予想し実際に変化していなかった箇所, FNはAIが変化無しと予想したが実際は変化していた箇所を指す。

混同行列を基に、全予測の正答率を示す適合率 (以下「Precision」という。)と正に対する正答率を示す再現率 (以下「Recall」という。)を算出した。求めたPrecisionとRecallから精度指標 (以下「F値」という。)を算出した。Precisionは変化有りと予想した箇所のうち実際に変化していた割合を示した値, Recallは実際に変化していた箇所のうち変化有りと予想できた割合を示した値, F値はPrecisionとRecallの調和平均である。各算出式を以下に示す。

$$\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}) \quad (1a)$$

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \quad (1b)$$

$$\text{F1} = 2 \times \text{Precision} \times \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall}) \quad (1c)$$

Precisionが高くRecallが低い場合、抽出の精度は高いものの未抽出が多い傾向にあり、Precisionが低くRecallが高い場合、抽出の精度は低いものの未抽出が少ない傾向にあることを示す。一般的に、両者はトレードオフの関係にあるとされている。このため本業務では、両者のバランスで精度を評価し、評価結果を基に精度向上及びシステムの運用を行う予定である。

6. 学習データ作成及びAIによる自動抽出

地物単位での学習データの作成作業を行った結果を図-5に示す。左図が過去の画像、右図が最新の画像である。図中の黄色線は、作業者が二時期の衛星画像を目視判読し、変化部を囲んだ箇所を示す。



図-5 作成した地物単位での学習データの例

図-5で示した各カテゴリの例と同様に、学習データとする15地域の画像を用いて学習データの作成を行い、グリッド単位に変換した上でAIに学習させた。

学習済みAIがNo. 16長崎地域の変化部を抽出した結果を図-6に示す。抽出カテゴリごとに色分けをしており、赤色が「建物新設」、青色が「建物滅失」、紫色が「建物新設かつ建物滅失」を示す。なお図-6は、開発の初期段階に出力された図であるため、誤抽出もある程度含まれている。現在、AIによる自動抽出技術については開発途中であり、抽出に向けた様々なアプローチを試みている段階である。



図-6 No.16長崎地域におけるAIによる自動抽出

7. 考察

AIにより良好な精度を得る上で、学習データの不足が課題として挙げられる。この課題は、全国シームレスな衛星画像を継続的に調達し、学習データを充実させることで解決を目指す。また、来年度以降の取組として、地図更新に用いたデータをAIの学習データとしてフィードバックする。これにより、抽出精度の向上に寄与するだけでなく、学習データの作成作業に要する労力や時間の削減につながると考えられる。全国の国土変化を網羅的に把握するため、AIの精度向上のための継続的な取組が

必要である。

8. まとめ

国土地理院では、災害対応の基盤となる情報として活用されている電子国土基本図の整備・更新を継続的にを行い、変化を続ける国土の現況を地図に反映する取組を行っている。国土変化に応じて地図更新範囲を決定するため、二時期の中分解能衛星画像を用いたAIの画像分析による変化抽出技術の開発を実施している。現状では開発の途中段階であるため、今後も取組の継続により、国土全域の変化を網羅的に把握することを目指す。変化部を効率的に地図に反映することにより、災害発生時の迅速な場所の特定と正確な情報共有に貢献する。

参考文献

- 1) 笹川啓, 田代ゆかり, 石塚麻奈, 柴田光博 (2021) : 二時期の空中写真と衛星画像による自動変化抽出手法の開発. 国土地理院時報, 134, 33-42.
- 2) 李勇鶴 (2022) : 3. 日本写真測量学会学術講演会の発表論文からみた写真測量・リモートセンシング分野における深層学習の活用状況. 写真測量とリモートセンシング, 61 巻 2 号, 59-65.

AI 流入量予測を活用したダム管理

河川部 河川管理課 佐原 大理
河川部 河川管理課 河川保全専門官 松田 康裕
河川部 河川管理課 ダム管理係長 山田 耕大

ダム管理の現場では、限られた職員で情報収集、流入量予測、予測結果に対する判断とそれにとともなう予警報やダム操作等の業務を長時間継続して行っており職員への負担が大きくなっている。このような状況の中、AI技術を導入することにより将来的にデータ分析や予測精度を向上させることでダムの適切な操作を確保し、業務を効率化し、職員への負担を軽減する取り組みの状況、今後の展望について紹介する。

キーワード AI流入量予測, 統合型ダム管理システム, ダム管理, クラウド

1. はじめに

2018年に発生した西日本豪雨など、近年の気候変動にともない豪雨被害が頻発していることから、既存のダム容量を活用して下流被害を軽減する事前放流や特別防災操作などの高度な操作が求められている。また、渇水頻度の増加も懸念されており、限られた水資源をより効率的に利用することが求められている。ダム管理の現場においては、限られた職員で高度な操作を継続して実施していくことが課題となっている。

こうした中、国土交通省は「インフラ分野のDXアクションプラン(令和4年3月)」を策定し、その中では取り組みの柱として「行政手続のデジタル化」、「情報の高度化とその活用」、「現場作業の遠隔化・自動化・自律化」を挙げている。ダム管理分野においてもAIやクラウド等の新技術の活用が推進されている。

本論文では、四国内における国土交通省および水資源機構が管理する12ダムを対象とした、ダム操作支援を目的とするAI技術導入に向けた現時点での取り組みの状況、今後の展望について紹介する。具体的には、AI技術を用いることで予測情報の信頼性向上を図るとともに、対象12ダムを一元的に表示・操作できる統合管理システムを構築した。

2. 全国におけるAI技術の導入状況

ダム操作に対するAI技術活用については、これまで主にダム流入量予測への適用が検討されてきた。これは、予測対象とするダム流入量と、予測に必要な雨量の関係性を、実績データをもとにAIに学習させることで、新たな雨量の入力に対して予測されるダム流入量をAIに算定させるものである。

上記のAIダム流入量予測モデル(以下、「AIモデル」という。)については、これまでに個別に導入可能性の検討が進められ、一定の精度で予測可能であることがわかっている。令和3年度以降は、他水系に展開するための汎用化や、技術的課題・留意事項等の抽出が行われ、有識者の意見等もふまえ、AI導入のガイドラインを策定しているところである。今後はダムの放流量予測(操作判断)に資する支援ツールの開発を目指している。

3. 四国管内におけるAIモデルの検討状況

(1) 検討概要

四国管内では、高水時の操作支援と低水管理を目的としてAIモデルの構築を段階的に進めている。

高水時のAIモデルについては、これまでに、野村ダム、鹿野川ダム、長安ロダム、大渡ダム、中筋川ダム、横瀬川ダムの6ダムで構築しており、従来からダム流入量予測に用いられている物理モデルとの精度比較を行ったうえで、今後のAIモデルの活用方法を検討した。残るダムについても順次AIモデルを構築予定である。

低水時のAIモデルについては、石手川ダム、長安ロダムを対象として、各ダムの特性をふまえて、降雨後の補給タイミングを予測するモデルと渇水時の長期的な流入量を予測するモデルを試行的に構築した。



図-1 四国管内ダム位置図

(2) 高水時AIモデル

a) 物理モデルとの比較

地形や土地利用等の流域特性に関する条件の設定や、複数のパラメータの調整等の作業が必要な貯留関数や分布型流出モデル等の物理モデルと異なり、AIモデルは比較的簡単にモデルを構築することができるメリットがあるが、予測雨量等を入力データとしてダム流入量を予測する入出力の構造自体は物理モデルと同様である。このため、既存の物理モデルと今回構築したAIモデルの予測精度を比較して、AIモデルのメリット・デメリットを明らかにしたうえで、今後のAIモデルの活用方法を検討した。物理モデルについては、全国の一級水系において運用されている水害リスクラインに使用されるなど、リアルタイムの流量予測に広く適用されている新土研分布型流出モデルを比較対象として選定した。

その結果、未経験規模洪水に対しては、AIモデルは基本的には予測不可であり(図-2)、物理現象を表現するため水収支等が異常な出力は発生しない物理モデルが有利であると考えられる。しかし、AIモデルは立ち上がりや低減部等で物理モデルよりも高い精度が得られやすい結果が得られた(表-1、図-3)。物理モデルでは、土壌中の水分量の与え方による誤差の影響を受けやすいのに対し、AIモデルは現時刻までのダム流入量の変化から、土壌中の水分量に相当する状況まで学習できると考えられる。

b) 実管理への適用方法について

上記のように、AIモデルは物理モデルと比較しても精度面でメリットが大きいですが、実管理への適用に向けては、未経験洪水への対応を検討する必要がある。

未経験規模洪水への対応としては「①物理モデルと併用」、「②外挿可能なAIモデルの使用」、「③仮想洪水を学習したAIモデルの使用」が考えられる。四国管内のダムでは既に物理モデルを構築済みであることからコスト面の不利がなく、「①物理モデルと併用」が未経験規模に対する精度・リスクの面で最も有利である(表-2)。

表-1 物理モデルとAIモデルの精度比較

項目	物理モデル※	AI技術活用モデル
立ち上がり	△ ・ AI技術活用モデルより精度が劣る ・ 土壌中の水分量の表現が難しく、全洪水に対して良好な再現性を得るのは難しい	○ ・ 物理モデルより再現性が良好
ピーク	○ ・ 良好に再現できる	○ ・ 物理モデルと同様、良好に再現できる
低減部	△ ・ AI技術活用モデルより精度が劣る	○ ・ 物理モデルより再現性が良好
多峰性洪水	△ ・ 単峰性より再現精度が劣る ・ AI技術活用モデルと比べやや良好	△ ・ 学習データが少ないため、二山目以降の再現精度が劣る(一山目の再現性は良好) ・ 物理モデルよりも精度が劣る場合がある
未経験規模洪水	△ ・ 水収支の整合がとれる結果の出力が可能 ・ 再現性の検証は不可	× ・ 基本的には予測不可 ・ 予測可能な手法(仮AI)もあるが異常値を出力するリスクがある
評価	・ AI技術活用モデルと比較してやや精度が劣る部分があるが、未経験規模洪水に対しては水収支の整合がとれる結果の出力が可能	・ 立ち上がりや低減部等で物理モデルよりも高い精度が得られやすい ・ 未経験規模洪水に対しては何かの対応が必要

※物理モデルの評価は今回使用した「新土研分布型流出モデル」の計算結果に現時刻スライドのみを適用(データ同化なし)した場合の評価結果

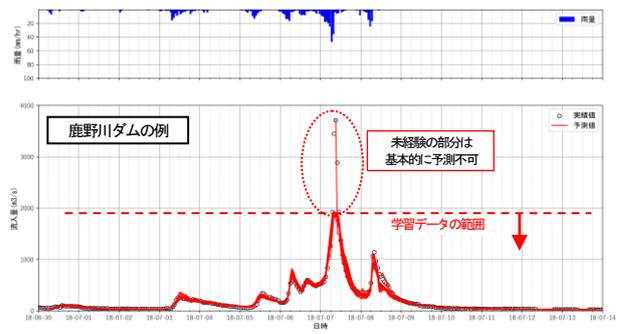


図-2 未経験規模洪水に対するAIモデルの再現性確認の例

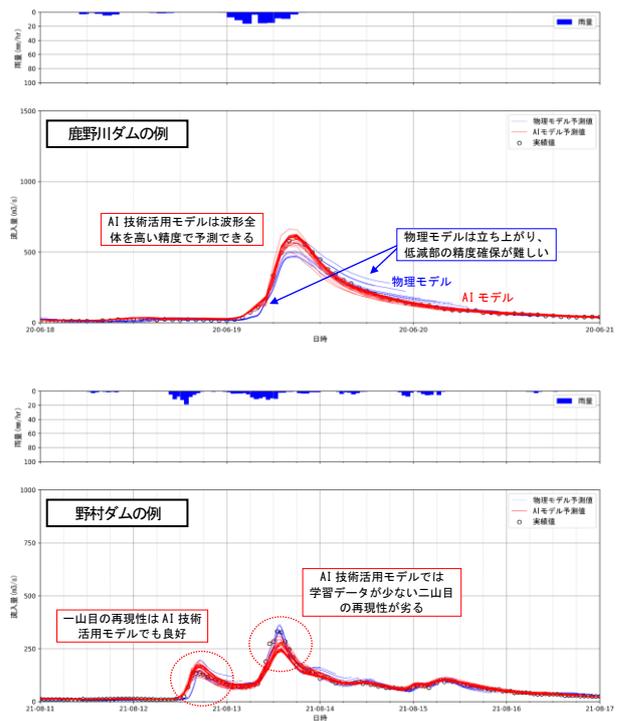


図-3 物理モデルとAIモデルの精度比較の例

表-2 AIモデルの実管理への適用方法(未経験洪水の対応方法)

項目	実管理への適用方法(未経験洪水への対応方法)		
	①物理モデルを併用	②外挿可能なAIモデルの使用	③仮想洪水を学習したAIモデルの使用
物理モデルの構築	必要※ ※構築済み	不要	必要※ ※仮想洪水を作成するために物理モデルが必要、構築済み
物理モデルのシステム化	必要※ ※データ同化処理等が必要で一般的にコストが大きい	—	—
未経験規模の精度(異常値出力リスク)	水収支の整合がとれる結果の出力が可能	水収支の整合がとれない異常値を出力するリスクが潜在的に存在する	物理モデルの出力結果を学習させるため、物理モデルより精度が劣る
その他	物理モデルとAIモデルの予測結果が合わせて出力されるため、判断が必要	—	—
評価	コストを十分にかける場合は、未経験規模に対する精度・リスクの面で最も有利	未経験規模洪水に対する精度・リスクに留意する必要があるが、最も安価にシステム化が可能	物理モデルより未経験規模洪水の精度が劣るが、システム化のコストを抑えられる。

※：留意事項・デメリット

(3) 低水時AIモデル

低水時においては、各ダムでの管理上の特性により、必要になる予測が異なる。石手川ダムについては、降雨後の補給タイミングを予測するモデルと渇水時の長期的な流入量を予測する3つのAIモデルとし、長安口ダムについては、渇水時の長期的な流入量を予測する1つのAIモデルを構築した(表-3)。

これまで、低水時のダム流入量予測は、実績データをもとに設定した低減カーブにより予測することが一般的であり、降雨の状況によっては予測精度が十分に得られなかったり、小降雨による流入量の増加が予測できない等の問題があった。これに対しAIモデルを用いることで、ダム流入量の低減状況を降雨の影響も含めて精度よく予測することができる(図4)。

また、AIモデルでは実績データがない未経験の状況は予測できない特性があり、無降雨が実績で経験した以上に継続する場合に異常な値を出力することが想定された。これに対しては、低減カーブを用いて長期無降雨の仮想データを作成し、これを学習させることで対応した。これにより、未経験の状況に対しても低減カーブに準じた異常値のない出力を得られることができた。

表-3 低水時AIモデルの概要

ダム	モデル	基本事項	予測対象
石手川ダム	①	1時間ピッチ	ダム流入量
	②	72時間予測 ^{※1}	下流基準地点流量
	③	1日ピッチ	ダム流入量
長安口ダム	①	365日間予測 ^{※2}	ダム自然流入量 (上流小見野々ダムと一体で予測)

目的：※1 降雨後の補給タイミングを予測、※2 渇水時の長期予測

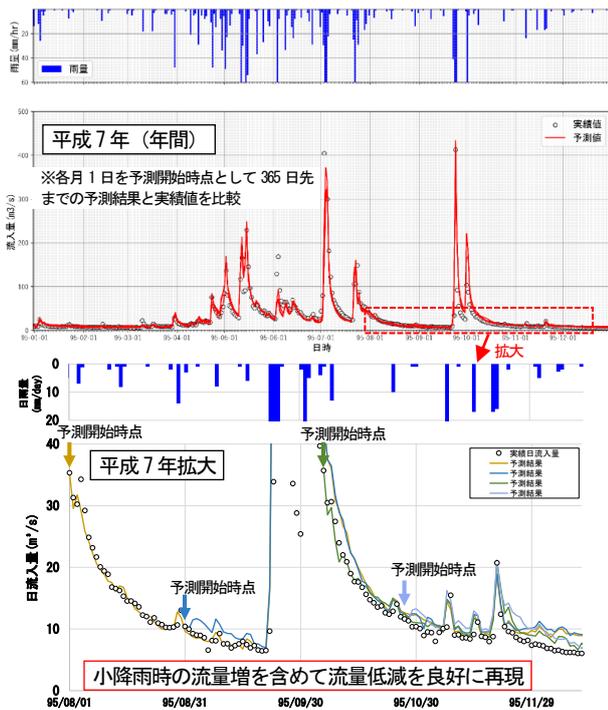


図-4 低水時AIモデルの再現結果(長安口ダムの例)

4. 統合型管理システムの構築状況

(1) 統合型管理システムの概要

従来のダム操作支援システムについては、ダム流入量予測モデルやシステム構築、サーバ調達、システム運用等はダム管理所毎に実施されていた。また、リアルタイムでシステムを運用するために必要となる観測データや予測雨量データ等についてもシステム毎に取得していた。予測結果を確認するためのシステムインターフェース(表示・操作画面)はシステム毎に異なっており、職員は異動のたびにシステム操作に慣れる必要があった。

今回構築した統合型管理システムは、各ダムの高水・低水の予測演算、ダム操作を総合的に支援するシステムとして、四国地整全体で構築するものである。図-5に示すようにデータ取得機能やデータベース、インターフェース(表示機能)等を共有プラットフォームとして構築している。また、データベースを共通化することにより、機能拡張を容易とする構成としている。

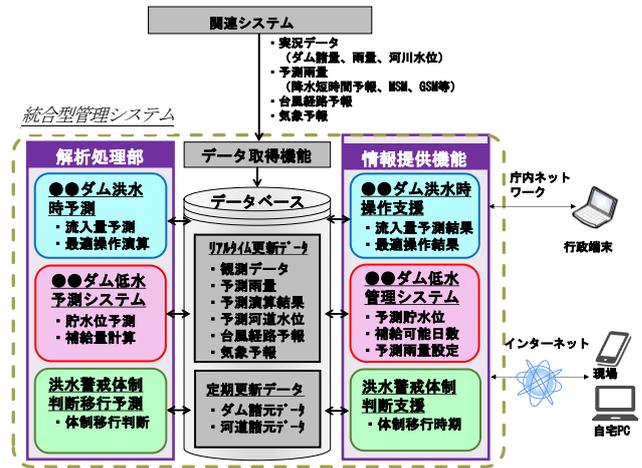


図-5 統合型管理システムのシステム構成

(2) システムの構築状況

統合型管理システムとしては、四国管内の国管理・水資源機構管理のダムを対象として構築することを目的としている。全ての機能を短期間で構築することは困難であるため、必要とする機能を順次機能を拡張していく予定としている(表4)。

表-4 統合型管理システムの構築状況

機能	対象ダム							
	野村鹿野川	長安口	石手川	大波	中筋川横瀬川	早明浦池田	富郷新宮	柳瀬
リスクライン結果表示	●	●	●	●	●	■	■	■
72時間高水予測システム	●	●	△	●	■	△	■	■
AI操作予測(参考)	●※	●※	△	△	△	△	△	△
アンサンブル予測雨量表示	●	●	●	●	●	△	△	△
流入量予測	△	△	△	△	△	△	△	△
操作支援	△	△	△	△	△	△	△	△
平水時操作支援システム	△	△	△	△	△	△	△	△
スマホ画面対応	△	△	△	△	△	△	△	△

●：構築済み、■：今年度追加、△：次年度以降※一部機能のみ構築

システム運用にあたっては、以下の2種類のシステムをクラウド環境で今年度試行運用を実施し、今後のシステム本格運用に向けた運用方法やシステム構成等を検討する予定としている。

- ①「72時間予測システム」：高水に関する流入量予測結果を表示し、ダム操作を支援するシステム
- ②「アンサンブル予測システム」：アンサンブル予測雨量を用いた11日先までの予測雨量を表示するシステム

a) 72時間予測システム

72時間予測システムについては、本論文で構築したAI予測モデルを用いた自動演算を実施し、水害リスクラインの予測結果を比較して表示する。（水害リスクラインでは、新土研分布型モデルによる流出計算、不定流計算により36時間先までの流入量の予測結果をもとに、操作規則・細則にもとづいた貯水位・放流量の演算を実施）また、水害リスクラインのダム流入量・貯水位・放流量の予測結果をもとに、今後の防災操作時における操作支援情報をWEB画面にリアルタイムで提供する機能を有している（図-6）。

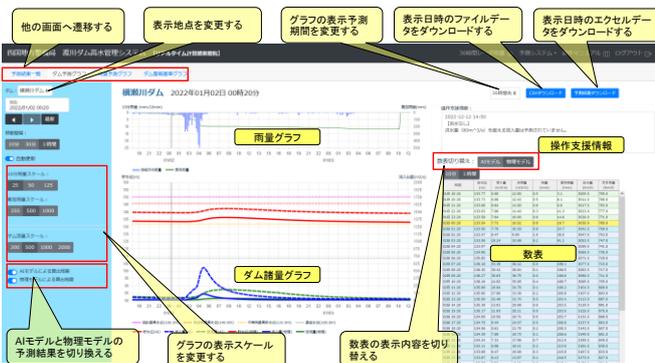


図-6 72時間予測システムの画面例

b) アンサンブル予測システム

72時間予測システムでは、気象庁から発表される確定的な予測雨量（降水ナウキャストや降水短時間予報、MSM、GSMガイダンス）をもとに予測された結果を表示している。

一方、気象庁からは予測雨量の不確実性を考慮した全球アンサンブル予測として、11日先までの51メンバーの予測雨量情報が配信されている。

アンサンブル予測システムでは、表-4に示す7ダムを対象として、51メンバーの流域平均雨量（時間雨量と累加雨量）と、下記基準による上位、中位、下位の予測雨量情報を表示している（図-7）。

- 上位：累加雨量ランクの上位3位
- 中位：累加雨量ランクの21位（平均メンバー）
- 下位：累加雨量ランクの下位5位のメンバー

今後、アンサンブル予測雨量を用いた流出予測を実施することにより、異常洪水時防災操作等のダム操作の実施の必要性、事前放流時における利水容量の確保を確認することができ、予測雨量の誤差を考慮したダム操作支援を想定している。



図7 アンサンブル予測システムの画面例

5. システム導入におけるダム管理のメリット

(1) 予測精度の確保

従来の物理モデルでは、より高い精度で予測を行おうとしたときに、土壌水分量などの各種パラメーターを調整する必要があった。AIモデルは、現時刻までの流入量や降雨量の変化から、土壌水分量などの変数的な条件も学習出来ると考えられ、これまで経験している中小規模洪水については、従来の物理モデルよりも立ちあがりや低減部等において、扱う者の習熟度によらず、高い精度が得られることが確認されている。

(2) 情報の統一化による労力軽減

クラウド上に統合型管理システムを構築することで、いつでもどこでも、予測情報を確認することが可能となる。流出予測システムがダムのクローズ環境に設置されているようなダムでは、防災体制の構築の観点から、事前にダムに詰め、流出予測を確認する必要があった。システムが構築されれば、自宅で状態監視が行えるため、出勤を伴う対応は必要最低限となる。また、関係者も同様の情報を確認出来ることから、ダム管理者と河川管理者等間での情報共有のためのやりとりの手間が不要となり、迅速に状況把握することが可能となる。

(3) システムの画一化によるコスト縮減

共通プラットフォームとして統合型管理システムを構築しているため、共通すべき改良内容の他ダムへの反映やシステム運用コストの縮減を図ることが可能となる。

6. 今後の展開・展望

クラウド環境での試行運用を踏まえて、事務所システムと比較して不足している情報や機能、ダム管理の負担軽減に向けて追加すべき支援情報等の本格導入に向けて必要となる機能を検討する。また、ライフサイクルコストや利便性、保守管理の負担、システムの安定性、等を考慮したシステム導入方法を検討する。

また、AI流入量予測やアンサンブル予測雨量については、導入実績が少ないことから、データを蓄積・検証しながら今後の適用性について、検討を進めていく。

厚真川水系日高幌内川の大規模河道閉塞箇所における移動土塊の安定性評価について

本田 浩貴¹・倉本 洋平¹・秋山 瑤貴¹

¹北海道開発局室蘭開発建設部厚真川水系砂防事業所 (〒059-1362 北海道苫小牧市字柏原32番地の40)

厚真川水系日高幌内川は、平成30年北海道胆振東部地震に伴い、大規模な河道閉塞が発生した。緊急対策工事及び恒久対策工事の施工完了までの間、二次災害の発生を防止する目的で、移動土塊の挙動監視を継続して実施している。発災以降、緊急対策工事による移動土塊末端部の掘削や降雨、融雪及び湛水位の上昇に伴う地下水位の上昇など、移動土塊の不安定化要因に対して、移動土塊の再滑動は認められず安定している。また、将来的に発生が予想される湛水位上昇に伴う地下水位上昇に対する、安定計算も行い、移動土塊の安定性が確認できたため、ここに報告するものである。

キーワード 河道閉塞, 挙動監視, 安定性評価, 緊急対策工, 恒久対策工

1. はじめに

平成30年北海道胆振東部地震に伴い、日高幌内川右岸斜面において、地すべりが発生し、移動土塊によって、日高幌内川の大規模な河道閉塞が発生した(図-1)。

河道閉塞により上流側で湛水が発生し、越流が生じた場合、河道閉塞部の移動土塊が侵食されることにより決壊し、土石流が発生する恐れがあるため、平成31年3月までに直轄砂防災害関連緊急事業(以下「災関事業」)による緊急対策工を講じ、2019年3月完了した。現在、直轄特定緊急砂防事業(以下「特緊急事業」)による恒久対策工を施工中であり、2024年3月完了予定である。

一連の対策工検討および対策工施工時の二次被害の防止の必要から、移動土塊の地質調査および挙動監視観測が行われてきた。

本件は、挙動監視の開始から複数年で蓄積した各種調査結果・観測結果に基づき、移動土塊の安定性評価を行った結果を報告するものである。

2. 河道閉塞部の概要

平成30年北海道胆振東部地震は、2018年9月6日に発生し、マグニチュード6.7、震央は厚真町、震源深さ37kmであり、最大震度7を観測した。この地震に伴い、日高幌内川右岸の尾根型斜面において、幅約400m、奥行約800mの地すべりが発生した¹⁾。移動土塊は、南側へ約350m滑動し、日高幌内川の谷底平野を埋積し、さらに対岸に乗り上げ大規模な河道閉塞(延長約1,100m、高さ約50m、推定崩壊土量約500万m³)を発生した²⁾(図-2、図-3)。河道閉塞部上流の流域面積は9.75km²、湛水容量は1,300万m³と見積もられた¹⁾。

湛水の発生、決壊を想定した氾濫解析により、下流域において、被害発生が想定されたことから、早急な対策工の実施が必要とされた。



図-1 河道閉塞の状況

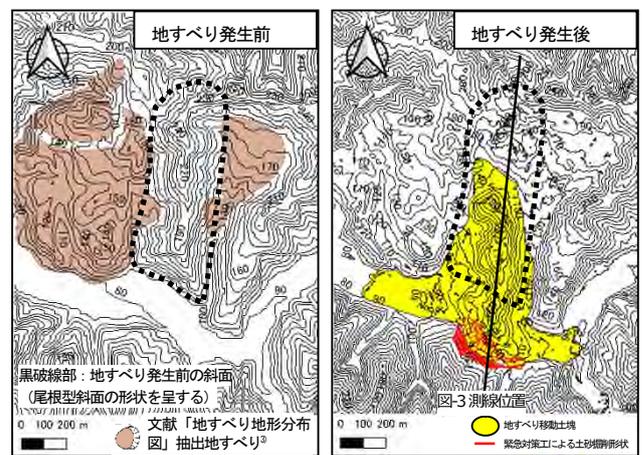


図-2 地すべり発生前後の比較

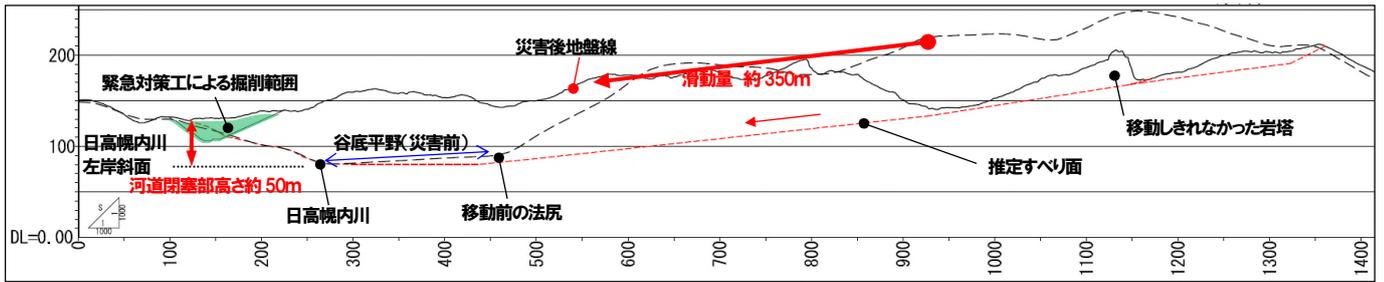


図-3 地すべり発生前後の比較（断面図）

3. 対策工事の概要

河道閉塞部における対策の基本として、①河道閉塞上流域での浸水被害対策、②決壊対策、③侵食対策および④土砂流出対策が挙げられる⁴⁾。当現場においては、①河道閉塞上流域での浸水被害対策の保全対象が無いことから、②～④に重点を置いた対策工が実施された。

災関事業による緊急対策工は、決壊流量規模を低減するため湛水量の低減および河道閉塞部の安定化を図ることに重点を置いた対策が実施された。具体的には、河道閉塞部を掘削し、高さを約30m切り下げることで、決壊流量（湛水容量）の低減を図った。河道閉塞部の掘削土は、河道閉塞部下流側に盛土を施し、緩勾配化することで安定化を図るとともに、連節ブロック工による水路工を設置し、侵食の防止を図った。また、河道閉塞の脚部固定を目的とする基幹砂防堰堤を設置し、さらに下流側には、侵食による下流への流出土砂を捕捉する目的の砂防堰堤が設置された（図-4）。

特緊事業による恒久対策工は、災関事業によって施工された連節ブロック水路の表面に、コンクリート張工を施し、流下能力を向上するとともに、溪流保全工および砂防堰堤の整備が進められている。

また、直轄事業とは別に、北海道の災害復旧事業による湛水部の埋め立て工事（以下「北海道事業」）が実施され、2022年3月に工事が完了している。この湛水部埋め立てによって、湛水容量が低減している。

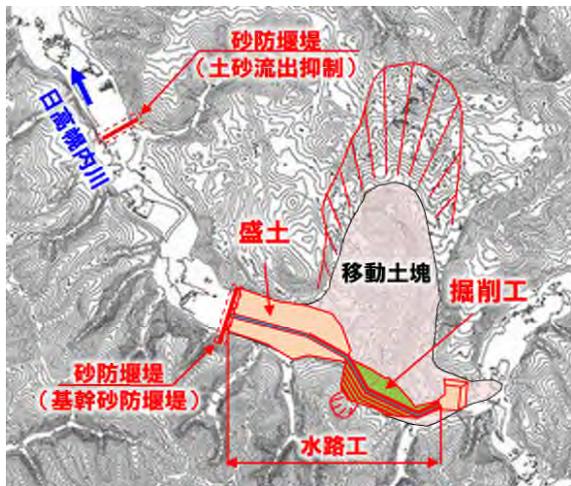


図-4 災関事業による緊急対策工の模式図

4. 地質調査結果

河道閉塞部周辺で実施された地質調査箇所を図-5に示す。対象斜面は新第三紀の砂岩泥岩互層からなる軽舞層⁵⁾の分布域で、基盤岩の地質構造は、ボアホールカメラによる画像解析より傾斜10°前後の流れ盤構造を呈する。

すべり面想定深度について、BV-2を除くボーリング調査地点においては、旧河床堆積物や左岸側地山の旧表層堆積物と破碎岩の混合層下面付近に、すべり面が想定される（図-6 a）。岩盤同士が接するBV-2では、全体として無破碎を主体とする中で、深度75.29m付近に、局所的に細粒化部（無構造角礫状、基質支持）が認められ（図-6 b）、破碎部下面付近にすべり面が想定される。

すべり面勾配は、基盤の地質構造と概ね平行であり、流れ盤の層面すべりを素因として、すべり面が形成されたと想定される。なお、対岸斜面に乗り上げた部分は、著しい破碎を伴い、無構造角礫化している⁷⁾。

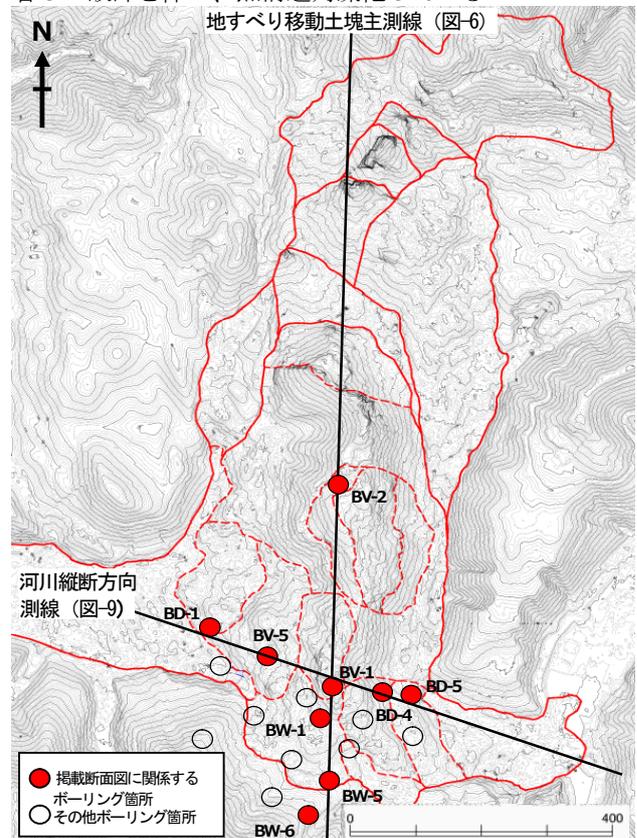


図-5 地質調査箇所図

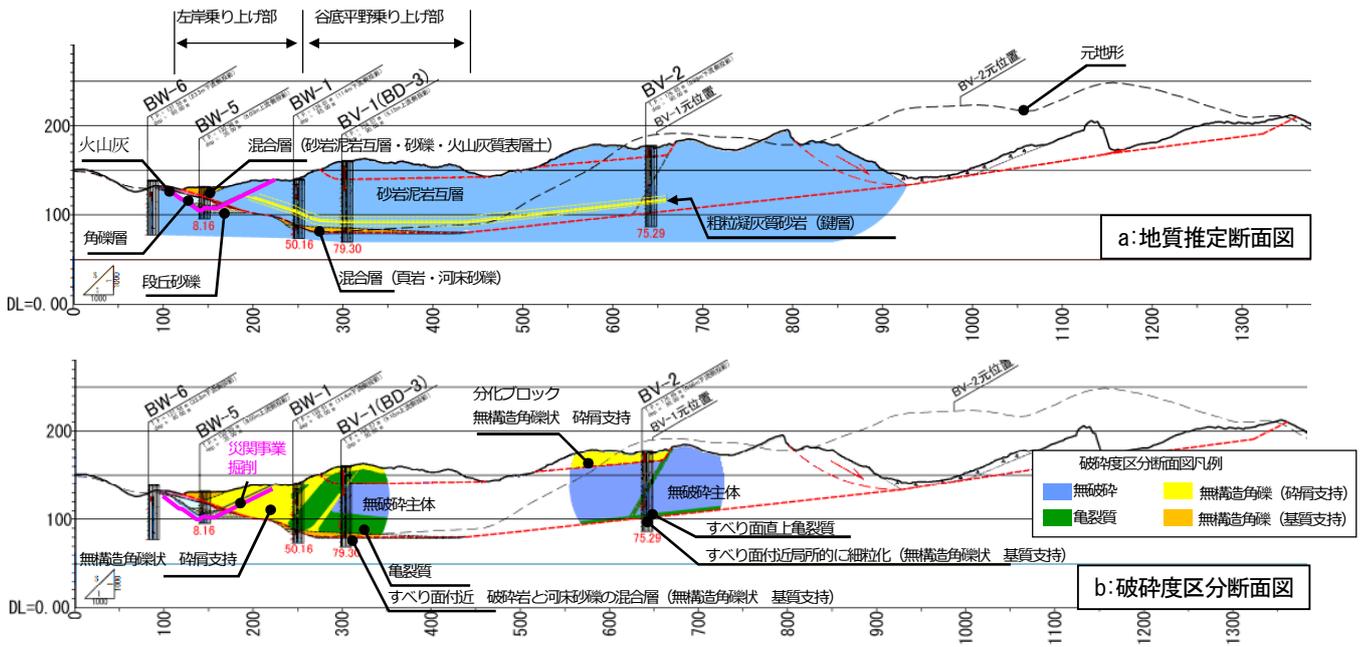


図-6 移動土塊断面図

なお、災関事業による河道閉塞部の掘削によって、移動土塊末端の抵抗領域となっている土塊の一部が除去され（図-6 b）、地すべり移動土塊の安定性に対して、不安定側に作用した可能性があることから安定性評価において、その影響を考慮した。

5. 挙動監視

日高幌内川河道閉塞部の移動土塊の挙動監視観測を目的として設置した観測計器を図-7に示す。

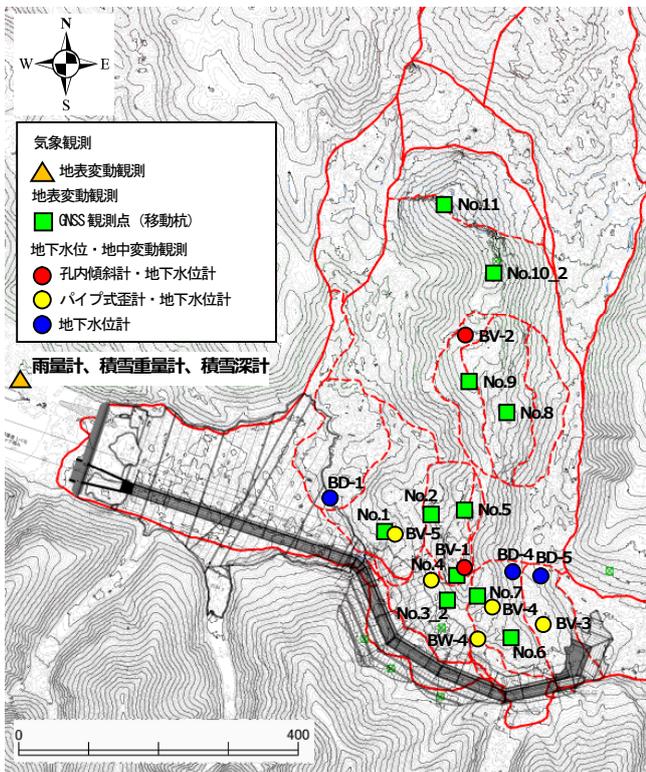


図-7 観測計器位置図

(1) 観測の目的

一般に、降雨および融雪水が地盤に浸透し、地下水位を上昇させ、すべり面に作用する間隙水圧が上昇することで、移動土塊の不安定化を引き起こす。よって、降雨および融雪に対応した地下水位応答と、地下水位変動に対応した移動土塊の移動変形量を観測によって把握し、安定度を定量的に評価する目的で、各種観測を実施した。

(2) 気象

河道閉塞部付近の気象条件を把握する目的で、雨量計、積雪深計、積雪重量計および温度計等の気象観測計器を設置し、継続的に観測を行っている。

観測の結果（図-8）、24時間雨量で、3年確率程度の降雨を2021年11月10日と2022年8月15日の2回記録した。また、2020年3月10日は、降雨によって融雪が急激に進み、融雪換算降水量を含めると20年確率規模相当となる。

なお、確率降雨はアメダス厚真観測所の1976年から2020年までの年最大24時間雨量をサンプルとし、水文統計ユーティリティに基づき算出された値とした（3年確率雨量：94.9mm、5年確率雨量：114.3mm、20年確率雨量：156.1mm）。

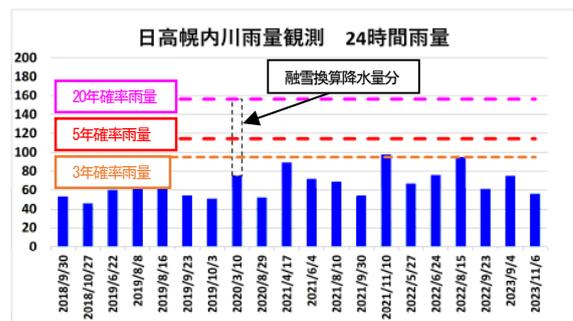


図-8 雨量観測による24時間雨量と確率降雨規模

(3) 地下水位観測

移動土塊を対象として、2018年11月～2019年2月までに計11箇所の地下水位計が設置され（図-7）、現在まで継続的に観測を実施している。

観測の結果、降雨時および融雪期に地下水位上昇が認められる。また、湛水位上昇に伴って、移動土塊内の地下水位上昇が認められる（図-9、図-12 e f）。

湛水位は、2018年12月14日にEL=102.33mを記録して以降、2022年2月までポンプ排水、北海道事業にともなう転流工の影響により、湛水位上昇が抑制された。2022年2月に、北海道事業に伴う転流工が撤去されて以降は、湛水位が上昇し、2022年3月20日にEL=108.3mで満水状態となった。その後、2022年8月15日出水の影響により、2022年8月16日に湛水位が最高水位EL=108.98mを記録した。湛水位が最高水位を記録した3日後の2022年8月19日に移動土塊内の地下水位が最高水位を観測した（図-12 f）。

移動土塊内の地下水位について、観測期間における最低水位（2020年3月9日）と最高水位（2022年8月19日）の比較から、BD-5付近で、最大約13mの地下水位上昇が認められた（図-9）。

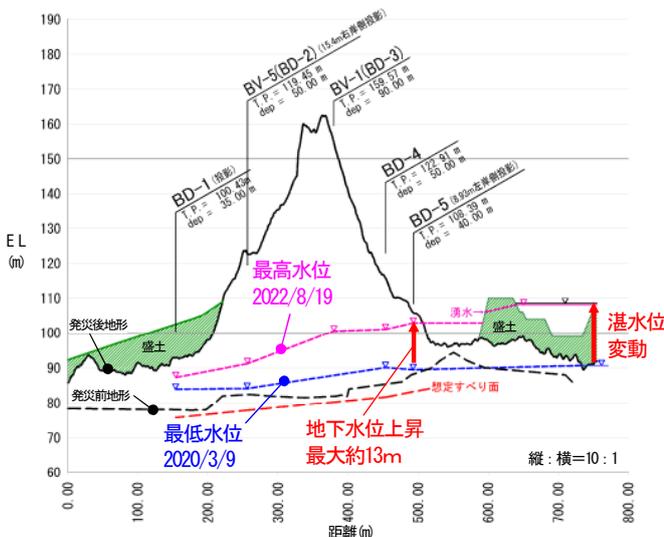


図-9 河川縦断方向測線における推定地下水位分布

(4) 地表変動観測（移動杭のGNSS観測）

移動土塊の地表変動の有無を監視する目的で、移動土塊内に移動杭を11箇所設置し（図-10）、GNSS観測による挙動監視を実施している。観測頻度は、1回/2ヶ月の頻度で、2018年9月以降、現在まで継続的に計測を実施している。

観測の結果、観測初期に、沈下および水平方向の成分を持つ変位が認められた（図-10、図-12 a b）。変位は、時間経過とともに、安定化する傾向が認められ、誘因に対応した変位の加速や再滑動性が顕著ではないことから、移動土塊の圧密沈下が主な変動要因と考えられる。

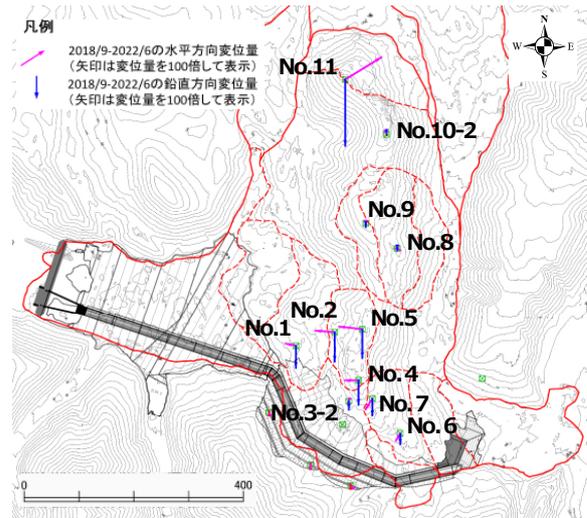


図-10 GNSS計測変位ベクトル図

(5) 地中変動観測

移動土塊内の移動変形量調査を目的として、2018年11月～2019年1月までに、孔内傾斜計2箇所、パイプ式歪計6箇所が設置され（図-7）、現在まで継続的に計測を実施している。パイプ式歪計は自記式で、1時間毎の変動データが取得されている。孔内傾斜計は、2回/月の頻度で手動計測を実施している。

地すべりの主測線における想定すべり面深度付近の変動グラフを図-12 c dに示す。パイプ歪計（図-12 c）は、観測初期に変位が認められたが、時間経過とともに安定化傾向にあり、前述の地表変動観測の結果、地盤沈下が認められることを踏まえると、地盤沈下に伴う観測孔の圧縮性の変形の可能性が高い。なお、BW-7は、観測初期以外に変動が認められるが、その他計器に変動が認められないことから、移動土塊の再滑動による変位の可能性は低い。

孔内傾斜計BV-1号孔およびBV-2号孔は（図-12 d）、観測期間を通して、想定すべり面深度付近に、有意な変位は認められていない。なお、孔内傾斜計BV-1号孔は、2019年8月1日観測時点において、深度20.0mで孔曲がりが発生し、以深が計測不能となった。変位鳥観図より、孔曲がり区間は、らせん状に変形しており（図-11）、孔曲がりの要因は、ガイド管と地盤の充填不良が要因と考えられる⁹⁾。

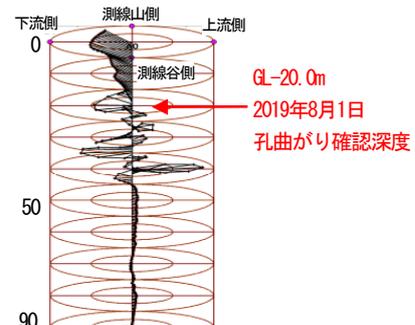


図-11 BV-1孔内傾斜計 累積変位鳥観図 (2019年1月29日～2019年7月18日の累積変位量)

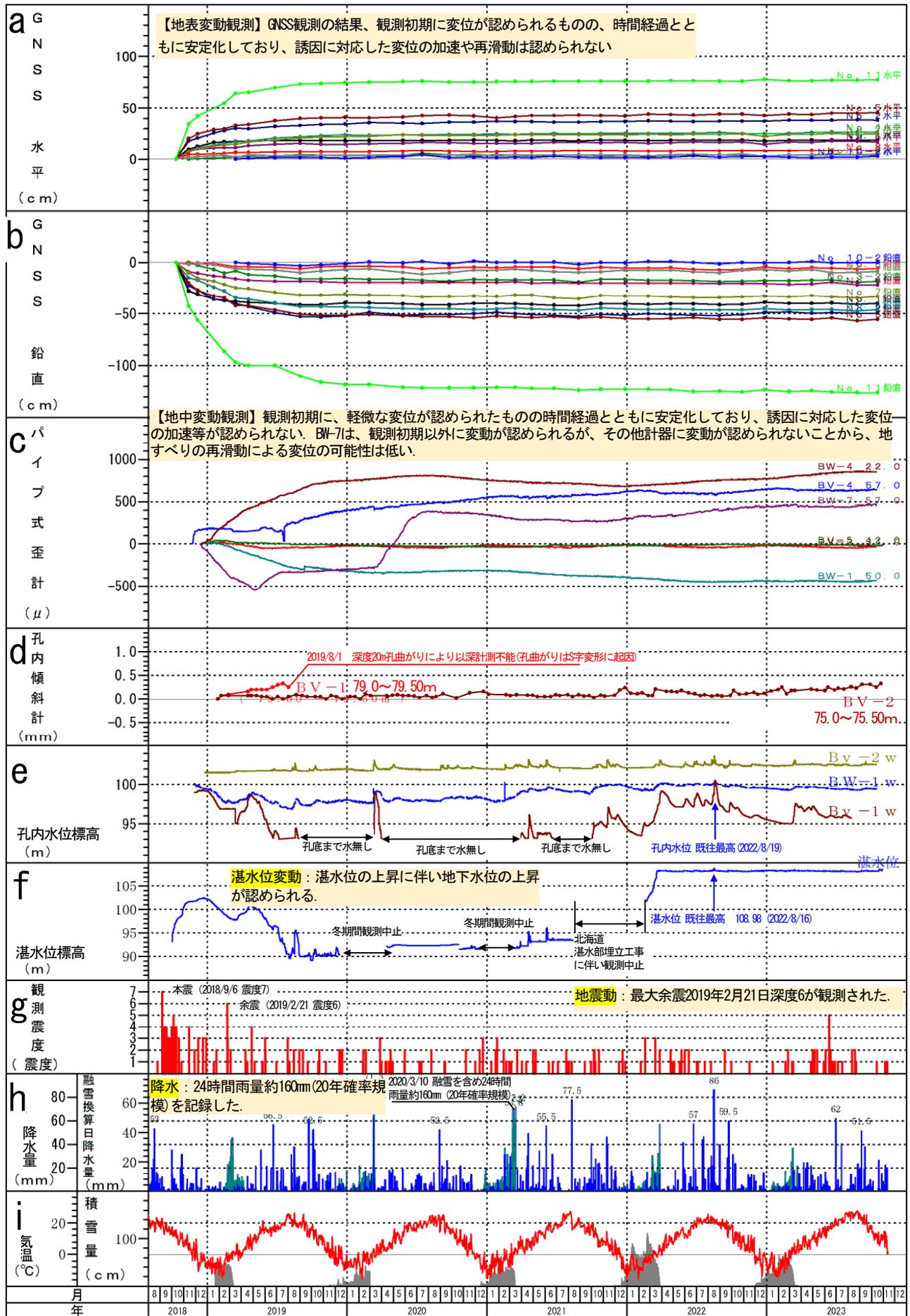


図-12 総括変動図

7. 移動土塊の安定性評価

挙動監視結果より、発災以降、河道閉塞部の掘削に伴う移動土塊末端抵抗領域の一部が除去されたことや、降雨、融雪及び湛水位の上昇に伴って移動土塊内の地下水位が上昇するなど、移動土塊の不安定化誘因に対して、変動は認められず、安定しているものと考えられる。

今後、未経験の事象として、特緊事業による水路工の施工が完了し、設計対象流量が水路工を流下する状況においては、既往未経験の湛水位となり、追従性が認められる移動土塊内部の地下水位も既往未経験水位となる可能性がある。そこで、想定される最大限の地下水位上昇（図-13）が発生した場合の移動土塊の安定性について、安定解析を行い安定度を検証した。

安定解析の条件および安定解析の流れを図-14に示す。

安定解析は、災関事業による河道閉塞部掘削後の地形形状で、地下水位をEL=111.3mまで上昇させた際の安全率推移を求めた（図-15）。

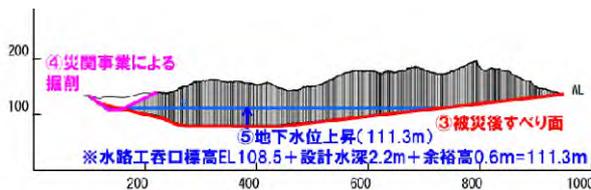


図-13 安定解析断面

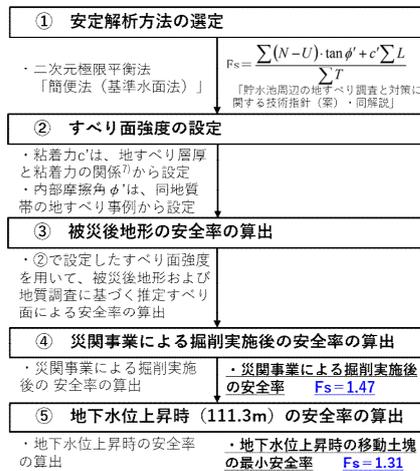


図-14 解析条件および安定解析の流れ

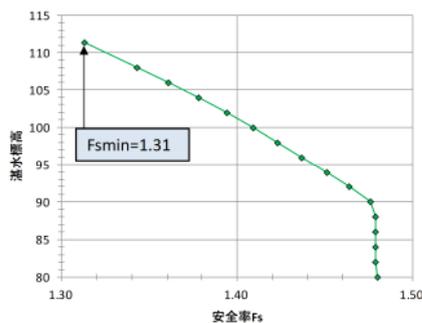


図-15 地下水位上昇に伴う安全率推移

安定解析の結果、想定される最大限の地下水位上昇が発生した場合において、移動土塊の安全率は $Fs=1.31$ であり、 $Fs=1.00$ を大きく上回っていることから、安定的であると考えられる。

8. おわりに

平成 30 年北海道胆振東部地震に伴い大規模な河道閉塞を発生させた移動土塊について、調査結果および挙動監視結果に基づき、安定性の評価を行った。

挙動監視結果より、発災以降、河道閉塞部の掘削に伴う移動土塊末端抵抗領域の一部が除去されたことや、降雨、融雪及び湛水位の上昇に伴って移動土塊内の地下水位が上昇するなど、移動土塊の不安定化要因に対して、移動土塊の再滑動を示す変動は認められず、安定していることが確認された。また、将来発生が想定される湛水位上昇に対しては、安定解析を行った結果、安全率が $Fs=1.00$ を大きく上回っており、安定していることが確認できた。

参考文献

- 1) 早川智也・清水龍来・寺口慧介・石崎俊一、戸田英明・田近淳・木崎健治 (2020) : 日高幌内川岩盤地すべり, 地震による地すべり災害—2018年北海道胆振東部地震一, 北海道大学出版会, p. 164-176.
- 2) 岩田清徳・渡邊一靖・福岡渉 (2021) : 厚真川水系日高幌内川の大規模河道閉塞対策工に関する水理模型実験・検証について, 第64回 (2020年度) 北海道開発技術研究発表会論文, p. 372-377.
- 3) 防災科学技術研究所 (2010) : 防災科学技術研究所研究資料 第345号、地すべり地形分布図 穂別.
- 4) 近畿地方整備局 大規模土砂災害対策技術センター紀伊山系砂防事務所 (2017) : 紀伊山地における大規模河道閉塞 (天然ダム) 対策の考え方 (案) .
- 5) 高橋功二・和田信彦 (1987) : 5 万分の 1 地質図幅「穂別」および同説明書, 北海道立地下資源調査所, 40p.
- 6) 独立行政法人土木研究所、応用地質株式会社、坂田電機株式会社、日本工営株式会社 (2010) : 地すべり地における挿入式孔内傾斜計計測マニュアル P56.
- 7) 国土交通省 水管理・国土保全局 (2019) : 貯水池周辺の地すべり調査と対策に関する技術指針・同解説, P56

漂着軽石の埋立材料への活用手法検討と埋立実施について

内間 和秀¹・富田 晋平¹

¹沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 中城湾港出張所（〒904-2162 沖縄県沖縄市海邦町3-25）

2021年8月に発生した海底火山「福德岡ノ場」の噴火に由来するとみられる大量の軽石が沖縄本島及び周辺離島に漂着し、沖縄総合事務局では約2万^m³の軽石を除去している。

除去した軽石の埋立材料への改良方法を検討し、土質試験の結果及び有識者による議論を踏まえ取りまとめた「中城湾港泡瀬地区における軽石埋立処分手順」を基に、中城湾港泡瀬地区土砂処分場にて全国で初めて軽石埋立処分を実施した。

軽石埋立処分した箇所は大型車両等が走行可能なトラフィカビリティが確保できていることを確認しており、今後は長期的な沈下等の経過観察を続ける予定である。

キーワード 軽石、埋立、混合土、土質試験、発生土利用基準、スタビライザ、トラフィカビリティ

1. はじめに

2021年8月に発生した海底火山「福德岡ノ場（ふくとくおかのば）」の噴火に由来するとみられる大量の軽石が沖縄本島及び周辺離島に漂着し、2021年10月末より離島航路の運航に影響を与える状況となった。これに対応するため、内閣府沖縄総合事務局では、港湾において軽石を除去する技術の検証を行い、沖縄本島北部の運天港を中心に約2万^m³の軽石を除去している。ここでは、除去した軽石を埋立材料として活用するための検討と埋立実施の状況について報告する。

2. 軽石の漂着

沖縄県内港湾への軽石の漂着は沖縄本島北部等で2021年10月25日より確認され、10月27日には港内に流入した軽石により沖縄本島周辺離島へのフェリー等の欠航等が生じ始めた。この後、先島地方の港湾でも漂着が確認され県内港湾41港中38港湾で軽石の漂着が確認された。

漂流している軽石は海面上に浮いているため風の影響を強く受け、天候の変化により港内への流入・流出を繰り返していたものの、2022年1月頃には大部分の港湾で軽石による欠航等の影響は解消し、漂流している軽石も次第に少なくなっていた。しかし、沖縄本島北部に

置する運天港（図-1参照）では羽地内海に流入した軽石が滞留し、同内海に設定されている台風等荒天時にフェリー・作業船等が避難する避難泊地の利用が困難となり、夏以降の台風襲来時期までに軽石を除去する必要に迫られた。

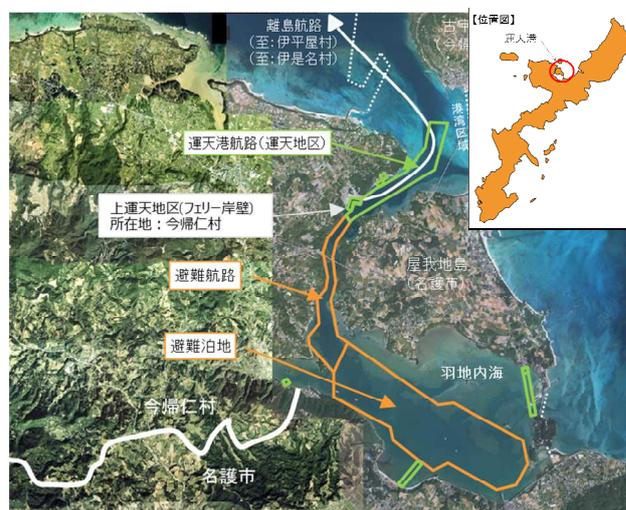


図-1 運天港の位置と主要水域施設

3. 軽石の回収技術の検証と回収

軽石の漂着直後から、港湾管理者等において軽石の回

収方法が模索され、沖縄総合事務局においても災害協定に基づき事業者団体とともに様々な軽石回収技術の実証試験を実施している。これらの結果は国土交通省港湾局と水産庁が連携して設置した「漂流軽石回収技術検討ワーキンググループ」において取りまとめられ「漂流軽石の回収技術に関する取りまとめ」（2021年11月、国土交通省港湾局、水産庁）として公表されている。

運天港に流入した軽石の除去については、これらの回収技術のうち海上からの回収として「小型船+回収器具」と「砂利採取運搬船」、陸上からの回収として「バックホウ」が主に用いられた。沖縄総合事務局は海上からの回収を実施し、2021年12月から2022年6月までに国が約2万 m^3 、港湾管理者である沖縄県が約4万 m^3 を除去している（図-2. 1, 2. 2参照）。

沖縄総合事務局が除去した軽石はすべて沖縄本島中部にある中城湾港に運搬され処分までの間仮置きされた。



図-2. 1 小型船+回収器具による軽石回収状況



図-2. 2 砂利採取運搬船による軽石回収状況

4. 軽石の処分に向けた検討

運天港で除去した軽石は中城湾港泡瀬地区の直轄土砂処分場で埋立材として活用することを想定し、施工時や埋立完了後の施設整備・利用等の際に問題が生じないよ

う、「軽石の埋立処分に関する技術検討委員会」の議論を踏まえ軽石の埋立材への利用の考え方を整理した「中城湾港泡瀬地区における軽石埋立処分手順」（2022年3月23日、内閣府沖縄総合事務局、以後「軽石埋立処分手順」とする）を策定した。

この際、軽石を埋立材として活用するため「発生土利用基準について」（平成18年8月10日、国官技第112号、国官総第309号、国営計第59号）表一 土質区分基準のうち、第3種建設発生土（通常の施工性が確保される粘性土及びこれに準ずるもの）で定めているコーン指数 400kN/m^2 以上を目標とし、埋立箇所想定される埋立方法（軽石と浚渫土砂等との混合割合）で性状を確認するための試験を実施した。

試験項目は、発生土利用基準に準じた試験項目（コーン指数、自然含水比、単位容積質量）を現地にて実施し、これら以外に平板載荷試験、軽石の粒径別の見かけの比重確認（単位容積質量試験）、破碎後試料による粒度試験、透水試験を実施している。

5. 試験概要

現地試験として、軽石単体、礫質系浚渫土（以降「礫質土」）単体、購入砂単体と、礫質土・購入砂1に対し軽石を0.5, 1.0, 2.0の割合（体積比）で混合した材料を用い、盛土を形成したのち、発生土利用基準に準じた試験及び平板載荷試験を実施した。また、軽石の粒径別の見かけの比重確認（単位容積質量試験）、破碎後試料による粒度試験、透水試験については同等の材料を使用し室内にて試験を実施した。



図-3 現地試験（盛土転圧）状況

(1) 発生土利用基準に準じた試験

a) 現地試験項目（コーン指数、自然含水比、容積質量）

軽石単体ではコーン指数が 129.7kN/m^2 であり、目標としたコーン指数 400kN/m^2 以上を確保できないが（表-1参照）、他の材料では目標以上の強度を確保できること

が確認された(表-2参照)。なお、軽石の比率が2.0の場合には容積重量が1.0g/cm³を下回ることが確認された。

表-1 現地試験施工(単体)

試料	コーン指数 (kN/m ²)	自然含水比 (%)	容積重量 (g/cm ³)
軽石単体	129.7	37.3	0.58
礫質土	1211.8	16.5	1.56
購入砂	779.1	10.4	1.62

表-2 現地試験施工(混合土)

試料	項目	混合割合 礫質土・購入砂：軽石		
		2:1	1:1	1:2
礫質土	コーン指数(kN/m ²)	1186.6	1077.8	1182.6
	自然含水比(%)	20	22.1	23.2
	容積質量(g/cm ³)	1.34	1.07	0.89
購入砂	コーン指数(kN/m ²)	731	715.3	839
	自然含水比(%)	14.9	16.2	20.5
	容積質量(g/cm ³)	1.32	1.09	0.91

b) 現地試験施工(平板載荷試験)

すべての材料で埋込材に使用している購入砂と同等以上の強度が確認された(表-3, 表-4参照)。

表-3 平板載荷試験(単体)

試料	項目	単体
軽石	極限支持力(kN/m ²)	300
	許容支持力(kN/m ²)	100
	最終沈下量(mm)	22.9
礫質土	極限支持力(kN/m ²)	900
	許容支持力(kN/m ²)	300
	最終沈下量(mm)	29.19
購入砂	極限支持力(kN/m ²)	300
	許容支持力(kN/m ²)	100
	最終沈下量(mm)	19.93

表-4 平板載荷試験(混合土)

試料	項目	単体	混合割合 礫質土・購入砂：軽石		
			2:1	1:1	1:2
礫質土	極限支持力(kN/m ²)	900	750	750	900
	許容支持力(kN/m ²)	300	250	250	300
	最終沈下量(mm)	29.19	28.28	25.04	27
購入砂	極限支持力(kN/m ²)	300	750	450	750
	許容支持力(kN/m ²)	100	250	150	250
	最終沈下量(mm)	19.93	20.48	29.38	22.59

(2) 室内試験

a) 軽石の粒径別の見かけの比重確認(単位容積質量試験)

軽石には気泡が含まれており、粒径選別を行わない軽石の単位容積質量は0.58g/cm³であるが、比較的大きな粒径19.0~9.50mmでは0.44g/cm³、軽石をすりつぶし実施した土粒子の密度試験では粒径0.075mm以下の軽

石で2.476g/cm³が確認された(表-5, 表-6参照)。

表-5 軽石の粒径別単位容積(自然含水比, 容積重量)

試料	粒径 (mm)	自然含水比 (%)	容積重量 (g/cm ³)
軽石単体	全体	37.3	0.58
	19.0~9.50残	14.2	0.44
	9.50~4.75残	15.2	0.46
	4.75~2.00残	21.4	0.5
	2.00以下	35.4	0.52
	0.85以下	35.2	0.98
	0.075以下		1.13(注)

(注)：暫定値

表-6 軽石の土粒子の密度

試料	粒径 (mm)	土粒子の密度 (g/cm ³)
軽石単体	0.85以下	2.146
	0.075以下	2.476

b) 破碎後試料による粒度試験

軽石単体では締固めにより比較的粒子破壊が多く生じるが、混合土の場合には軽石の粒子破壊をかなり抑えることができた(表-7, 表-8参照)。

また、軽石単体及び混合土(礫質土1:軽石1)の粒径加積曲線を図-4, 図-5に示す。

表-7 粒度試験結果(軽石)

項目	軽石		礫質土		購入砂				
	自然状態	①締固後	②締固後	①締固後	②締固後	自然状態			
自然含水比(%)	37.3	—	—	16.5	—	10.4			
粒度	最大粒径(mm)	26.5	26.5	26.5	37.5	37.5	26.5	9.5	
	石分75mm以上(%)	—	—	—	—	—	—	—	
	礫分2.0~75mm(%)	79	67.3	33.1	59.2	57.7	53.7	3.7	
	砂分0.075~2.0mm(%)	19	26.2	47.7	37.5	36.6	39.3	90.2	
	細粒分0.075mm以下(%)	2	6.5	19.2	3.3	5.7	7	6.1	
分類	地盤材料の分類名		砂質礫	細粒分混じり砂質礫	砂質礫	細粒分混じり砂質礫	細粒分混じり砂	細粒分混じり砂	
	分類記号		(GS)	(GS-F)	(SFG)	(GS-F)	(GS-F)	(S-F)	
	容積重量(g/cm ³)		0.58	—	—	1.56	—	—	1.62
			—	—	—	—	—	—	—

①締固後：締固め方法B-b法(締固めエネルギー：E_c≒550kJ/m³) ②締固後：締固め方法E-b法(締固めエネルギー：E_c≒2500kJ/m³)

表-8 粒度試験結果(礫質土：軽石)

項目	礫質土・軽石 混合								
	礫質土：軽石 2:1		礫質土：軽石 1:1		礫質土：軽石 1:2				
	自然状態	①締固後	混合後	①締固後	②締固後	自然状態	①締固後		
自然含水比(%)	20	—	22.1	—	—	23.2	—		
粒度	最大粒径(mm)	26.5	26.5	37.5	37.5	37.5	26.5	37.5	
	石分75mm以上(%)	—	—	—	—	—	—	—	
	礫分2.0~75mm(%)	60.3	58.7	61.7	57.6	51.7	64.4	54.3	
	砂分0.075~2.0mm(%)	36.8	37.7	36.2	39.1	37.3	33.9	41	
	細粒分0.075mm以下(%)	2.9	3.6	2.1	3.3	11	1.7	4.7	
分類	地盤材料の分類名		砂質礫	砂質礫	砂質礫	砂質礫	細粒分混じり砂質礫	砂質礫	砂質礫
	分類記号		(GS)	(GS)	(GS)	(GS)	(SG-F)	(GS)	(GS)
	容積重量(g/cm ³)		1.34	—	1.07	—	—	0.89	—
			—	—	—	—	—	—	—

①締固後：締固め方法B-b法(締固めエネルギー：E_c≒550kJ/m³) ②締固後：締固め方法E-b法(締固めエネルギー：E_c≒2500kJ/m³)

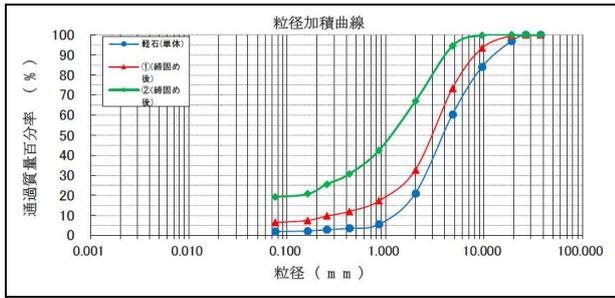


図4 粒度試験結果 (軽石単体)

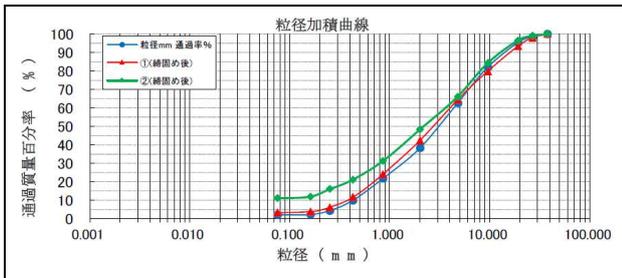


図5 粒度試験結果 (礫質土1:軽石1)

c) 透水試験

混合割合が1:1の礫質土及び購入砂を用いた混合土の透水性は、礫質土・購入砂単体と同等程度であることが確認された(表-9参照)。

表-9 透水試験 (単体, 混合土)

項目	軽石	礫質土	購入砂	礫質土: 軽石	購入砂: 軽石	
	単体	単体	単体	1:1	1:1	
透水試験	透水係数(定水位)(m/s)	0.000791	0.000534	—	0.000326	—
	透水係数(変水位)(m/s)	—	—	0.0000721	—	0.0000129
	湿潤密度(g/cm ³)	0.693	1.787	1.988	1.187	1.377

6. 軽石埋立処分手順の策定

「軽石埋立処分手順」の策定に際しては、有識者による「軽石の埋立処分に関する技術検討委員会」を設置し、検討を実施した。

この委員会では、軽石の特性を把握するための試験項目の提案や、懸念事項、対応方策等の議論が行われた。軽石の特性から、粒子破壊の恐れがあり土地の利用用途に留意が必要であること、大規模埋立の際には比重が1より大きくする必要があること等が、また施工上の留意点として、軽石の分離を避けるため混合土の水面への直接投入は避けること等が指摘された。

これらを踏まえ「軽石埋立処分手順」を策定し、中城湾港泡瀬地区土砂処分場のうち、多目的広場・緑地として利用が計画されている箇所の表層部分を対象とし、混合土を埋立材料として活用することとした。

7. 土砂処分場での軽石埋立処分

(1) 土砂処分場の概要

中城湾港泡瀬地区土砂処分場は中城湾港新港地区の航路・泊地浚渫で発生した浚渫土の処分場であり、粘土質土砂を多く含む浚渫土が投入されている。軽石埋立範囲は歩行も困難な軟弱粘性土地盤である。

(2) 軽石埋立処分仕様

2022年10月から2023年2月にかけて、中城湾港泡瀬地区土砂処分場(図-6参照)にて、全国で初めて軽石埋立処分を実施した。

軽石埋立処分の仕様は表-10の通り、軽石埋立処分手順に基づき混合土への軽石の混合割合は1:1(体積比)とした。改良材は購入砂及び同年度中城湾港浚渫工事で埋立地内に空気圧送揚土した礫質土を浚渫工事進捗に合わせて使用した。

品質確認として、混合後のコーン指数が第3種建設発生土の基準である400kN/m²以上であることを確認し、埋立柱材として利用した。

軽石改良方法は費用及び施工速度の観点より、スタビライザによる攪拌改良を計画した。県内在籍機械の最大改良厚に合わせて軽石30cm厚及び砂または礫質土等30cm厚の計2層60cm厚の土盛りを築造し、土盛り上からスタビライザで攪拌改良を行う計画とした。本改良方法は施工実績が無い方法であったため、本施工前に試験施工を行い施工方法の妥当性確認を行った。



図-6 中城湾港泡瀬地区土砂処分場

表-10 軽石埋立処分仕様

軽石・改良材混合割合	体積比で1:1
軽石数量	1.8万m ³
改良材数量	購入砂 1.4万m ³ 礫質土 0.4万m ³
品質管理	コーン指数400kN/m ² 以上

(3) 埋立地における軽石改良埋立試験施工

試験施工では軽石の敷均し改良埋立方法の施工性確認やスタビライザによる攪拌改良後の品質の確認を行った。図-7のように軽石と改良材（図-8参照）を上下層入替えたケースと改良材の2種類のケースで計4ケースの試験を実施した。



図-7 試験施工軽石改良敷均しケース



図-8 軽石（左側写真）と礫質土（右側写真）

a) 軽石敷均し改良埋立方法の確認

敷均し作業に使用するバックホウ、湿地ブルドーザ及び改良に使用するスタビライザの施工性を確認した。全てのケースで軽石上の機械の走行や均一な敷均し・改良作業に支障が無いことを確認した。

埋立は軟弱粘性土上へ投入となるため、混合土を1m厚程度投入しなければバックホウ及びブルドーザが走行可能なトラフィカビリティが確保できない。また、振動ローラによる転圧作業は機体が沈み込むため使用できなかったことから、転圧はバックホウによるバケット転圧及びブルドーザ転圧のみとした。

b) 改良後の品質確認

スタビライザ改良後にバックホウによるバケット転圧を行い、ポータブルコーン貫入試験でコーン指数を確認したところ、全てのケースでコーン指数1,000kN/m²前後で、400kN/m²以上を満たしていることを確認した。

土盛り端部は法勾配のため、1層目に軽石を敷き均すケースでは2層目の改良材より軽石の数量が多くなってしまい混合割合が1:1以下になってしまうため、本施工では図-9のように改良材の数量が多くなるように敷き均すこととし、端部はバックホウで攪拌することとした。



図-9 軽石改良端部処理

(4) 軽石改良埋立本施工

試験施工の結果より施工数量を600~800m³/日と設定し、軽石改良ヤード60m×25mを3箇所整備した。軽石改良埋立は、①材料搬入敷均し、②スタビライザ改良、③ダンプ運搬埋立の手順で施工し、3つの作業を別々に行った。各ヤードでは日替わりで作業内容を変化（例①→②→③→①）させることで、重機の輻輳作業や作業待ちが発生しないようにした（表-11参照）。

改良後の品質確認としてポータブルコーン貫入試験を1回/日行い、コーン指数400kN/m²以上を確認した（図-10参照）。

表-11 ヤード別作業一覧

日程	ヤード①	ヤード②	ヤード③
1日目	材料搬入・敷き均し		
2日目	スタビライザ改良	材料搬入・敷き均し	
3日目	ダンプ運搬埋立	スタビライザ改良	材料搬入・敷き均し
4日目	材料搬入・敷き均し	ダンプ運搬埋立	スタビライザ改良
5日目	スタビライザ改良	材料搬入・敷き均し	ダンプ運搬埋立
6日目	ダンプ運搬埋立	スタビライザ改良	材料搬入・敷き均し



図-10 ポータブルコーン貫入試験（左側写真）と混合状況写真（右側写真）

(5) 軽石改良埋立の結果

混合土を軟弱地盤上に投入することで重機走行に必要なトラフィカビリティを確保し、良質な地盤を形成することができた（図-11. 1, 11. 2参照）。

以下に本工事で知見を得られた軽石改良埋立の利点と欠点を示す。



図-11. 1 軽石改良埋立箇所全景（施工中）



図-11. 2 軽石改良埋立箇所全景（施工後）

a) スタビライザによる軽石改良埋立の利点と欠点

スタビライザを使用した軽石改良埋立の施工上の利点としては、均一に混合攪拌されるため、混合土の品質はばらつきが少なく、施工手順が簡便である。

品質面ではスタビライザはセメント混合用機械のため、良質な混合用土砂が確保不可能な際に、セメント添加のうえ混合を行い、強度を増加させることも想定できる。

一方、施工上の欠点としては、混合用土砂に人頭大以上の石や異物が混入しているとスタビライザの混合翼に挟まり故障するため、事前のふるい分けが必要になる。

搬入敷均しに関しては、敷き均した軽石上は転圧が不可能であり十分なトラフィカビリティが確保できないため、ダンプトラックのタイヤが嵌ることがある。またブルドーザは湿地ブルドーザを使用する必要がある。

機械調達に関しては、沖縄では60cm厚を混合可能なスタビライザが1台しか無いため、他現場での機械利用時や大量施工時は本土からの輸送を検討する必要がある。

b) 軽石改良埋立に関する留意事項

軽石改良埋立に関する留意事項としては、軽石は乾燥密度が $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ と軽いため、混合改良しても埋立地表面の軽石が大雨時に水に浮き、水の流れとともに移動・流出してしまうため軽石を捕獲する沈砂池設置や表面土砂被覆等の対策が必要になる。一方で軽石は粒径が大きく空隙が多いため、混合土は通常の購入砂や礫質土と比較して水はけが非常に良かった。

長期的な留意事項としては、埋立後の軽石の粒子が破碎されると体積が減少するため、長期的に沈下が発生する可能性があることや、均質な転圧が困難であることから液状化が発生することが懸念されるため、埋立後の沈下計測やボーリング調査等が必要となる。

(6) 軽石改良埋立の今後の技術

今回の軽石改良埋立は時間・材料確保上の制約等から本施工方法を計画・実施したが、将来的には以下のような軽石処分方法が考えられる。

a) 軽石の性能を生かした埋立方法

軽石及び混合土の比重が通常の土砂より軽いことから、軽量盛土としての使用方法が考えられる。また水はけが良いことから埋立地でサンドマットとして使用することが考えられる。

b) 軽石単体での埋立処分方法の検討

軽石を改良せずに単体で埋立が可能となれば、大規模なヤードや改良材の手配等が不要となる。軽石は粒子破碎を行うことで単位体積密度が増加するため、安価かつ効率的な粒子破碎を行い、埋立を行う施工方法の開発が期待される。

c) 軽石埋立後の挙動予測

今回軽石埋立後に沈下計測や強風・大雨後の地表面の様子を確認することで、今後の軽石埋立計画に将来挙動を反映することが可能となる。

8. おわりに

今般の軽石漂着は近年まれにみる規模であり、高頻度で起きるとは考えにくい災害である。しかし、日本近海には活動中の海底火山が多数存在しており、将来同様な事態が生じることが考えられる。その際には沖縄での経験を活用し、迅速な対応が図られることを期待する。

なお、沖縄県に漂着した軽石は港湾の利用だけでなく漁業・観光等の多岐にわたり影響を与え、その除去・回収には強い注目が集まり、港湾管理者である沖縄県や那覇港管理組合、業界団体である埋立浚渫協会九州支部の各会員企業を始め様々な主体が影響の低減に向け対応が進められた。沖縄総合事務局では影響が大きく対応が困難な運天港を中心に活動を行い、ここで除去回収された軽石を埋立材として活用する方策を検討・実施し、その処分まで完了させた。これら施策の実現に当たっては、軽石処分手順の検討にご参加頂いた東京理科大学菊池喜昭教授、北海道大学渡部要一教授、港湾空港技術研究所森川嘉之地盤研究領域長並びに国土交通省港湾局ご担当者の皆様の多大なご協力を頂いたことに謝意を表したい。

災害時における被災状況把握への 取り組みについて

齊藤 瑞穂¹・田中 正志²

¹ 関東地方整備局 相武国道事務所 管理第二課 (〒192-0045 東京都八王子市大和田町4-3-13)

² 元 関東地方整備局 相武国道事務所 管理第二課 (〒192-0045 東京都八王子市大和田町4-3-13)

現 関東地方整備局 横浜国道事務所 防災情報課 (〒221-0855 神奈川県横浜市神奈川区三ツ沢西町13-2)

近年異常気象による災害が多発し、災害対応に費やされる時間が増加しているほか、今後発生予測の高い首都直下地震・南海トラフ地震等への備えにおいても対応マニュアル改定が繰り返されるなど、各現場における事前準備・日々の備えが必要不可欠となっている。また、情報収集の新たなツールとして、DXやUAVなど各ツール利用が防災計画に取り込まれるなど、新情報収集手法の対策も急務となった。

本論文では、相武国道事務所におけるUAV運用への取り組みのほか、自身の資格取得・課題整理を述べるとともに、今後の方針、自身の関わりについて記述する。

キーワード ドローン、災害対応、DX化、人材育成

1. はじめに

相武国道事務所は雨量通行規制区間を有し、令和元年東日本台風にて大規模な被災に見まわられている。(図-1)

また、首都直下地震発生時の道路啓開八方向作戦においては、西ルート責任啓開事務所であり、有事の際における所内防災体制強化をはじめ、企業等と災害協定の締結など日頃より防災対策の強化を図っている。



図-1 令和元年東日本台風による管内被害状況
※協力会社によるUAV空撮映像

2. 相武国道事務所におけるUAV関連防災業務の

課題

令和3年度には、昨今のICT技術等を活用して、迅速・効率的な被災情報を入手するべく、地震等の災害発生時に無人航空機を活用して詳細な被災状況を把握し、被害の拡大防止と被災施設の早期復旧に資することを目的とした「無人航空機による災害応急対策活動(撮影等)に関する協定」を11者と締結している。

また、道路施設に地震・大雨等による自然災害及び予期できない災害が発生した場合に、被災箇所の測量、調査、設計及び無人航空機による災害状況把握等を行い、道路啓開、被災施設を早期復旧に資することを目的とした「災害時における災害応急対策業務に関する協定」を締結している。



図-2 相武国道事務所管理区間の各企業等担当区画



図-3 都内啓開道路区間の各企業等担当区

これら協定会社との災害発生時における実行体制を整理していく中でUAV運用の問題点を抽出した。

- (1) 職員によるUAV操縦資格保有者がいないため、職員による飛行が不可
- (2) 協会社との飛行調整において、技術スキル、コンプライアンス判断が出来ず、100%外部委託での運用
- (3) 管内区域はほぼDID地区であるとともに、米軍基地・自衛隊施設等があり、実飛行時における問題箇所が多数存在し、リスク管理より平時での国道上空訓練飛行が困難

3. 実運用に向けての問題解決への取り組み

事務所の各種防災対応・災害対応マニュアルにてUAVを用いた情報収集手法が顕在化してきたことから、災害時に職員での体制が組めるよう、関東地整無人航空機運用方針に基づく屋外飛行活動可能なインストラクターライセンス取得を目指すべく資格取得に意欲のある若手・中堅職員が主体となり事務所勉強会の開催や屋内飛行練習を実施した。この取り組みは、ライセンス取得と同時に人材育成も兼ねると期待している。

・関東地方整備局小型無人機操縦者資格制度への参画と取得対策

関東地整操縦者資格は以下の全5種である。(表-1)なお、表-1中のFPV飛行とは、ゴーグルを装着しUAVカメラ映像を見ながら操縦する飛行のことである。また、飛行する際は3人体制である必要がある。(表-2)

表-1 資格の種類

資格の種類	級	概要
トップガン	S	運用制度における最上位ライセンス(技能認定団体講師)
マイスター	A	目視外飛行、FPV飛行が可能
タコ	A	飛行箇所でフライトプラン立案・カメラアングル操作指示
インストラクター	B	屋外有視界飛行が可能
操縦者	C	インストラクター指導の下のみ飛行が可能

表-2 飛行時の体制表

飛行の場所・方法	操縦者	ナビゲーター	ワッチ	監督者	備考
第10条第1項 ・DID地区以外 ・人や物体から30m以上 ・半径150m以内	C級	いづれかにB級以上が1名			B級以上の立ち合いが必要
	B級以上	資格を問わない			
第10条第2項 ・DID地区内 ・人や物体から30m未満 ・半径150m以内	B級以上	資格を問わない			航空局の承認・許可後に限る
第10条第3項 ・DID地区内 ・人や物体から30m未満 ・半径150m未満、FPV等※	A級 (マイスター)	A級 (TACCO)	資格を問わない		航空局の承認・許可後に限る ※双塔標準で無し 可能な範囲に限る



図-4 屋内飛行訓練の様子

令和4年9月に本局で行われるC級及びB級ライセンス取得試験にて事務所で唯一の受験枠をいただいた私は、所内で資格取得事例がない中、手探りで以下の取り組みを行った。

(1) 実技試験対策

今回取得を目指すインストラクターライセンス受験資格条件は、「局防災室開催のドローンに関する講習会を受講していること」「講習会受講日から試験前日までに10時間以上の屋内飛行実績を有すること」の2点であった。また、試験合格条件は「C級操縦者試験(筆記試験及び規定飛行)の合格基準を満たすこと」「B級操縦者試験(筆記試験及び規定飛行)の合格基準を満たすこと」さらに、両級同時受験のため両資格の合格が必須であった。

そこで、通常業務計画を整理し、効果的な練習が可能となるようイントラ掲載の「ドローン練習メニュー」に基づいた個人練習のほか、勉強会参加者間による飛行チェックを行うなど、お互いの飛行スキルを見合う練習を実施した。また、夏期インターン来所時に防災業務取組紹介として飛行スキルを披露するなど、他の受験者が同席している試験状況を想定したロケーションでの飛行訓練を行った。この結果、3ヶ月で19時間の飛行練習を行うことができ、第3者の目で見ってもらうことは安定飛行への近道であると感じた。今後の所内訓練時において、

次期受験者へのアドバイスとし資格取得者として積極的な働きかけを行ってきたい。

(2) 筆記試験対策

勉強時間の確保、過去の事例がないため対策の方法が不明瞭という点が課題だった。

指定講習教本をもとに、C級選択問題・B級筆記試験における引っかけ対策問題を自ら30問ほど作り、繰り返し解いて法規知識を定着させた。また、ドローンに関する講習会での講師説明のポイント整理を行い、勉強会で共有しさらに、他の受講者が作成した対策問題を解き合うことで知識・視点を幅広く身につけた。

(3) 環境整備

練習のたびに組み立てから行うのは手間がかかり、練習時間・場所の確保（試験対策と通常業務との両立）も課題だった。そこで、いつでもだれでも容易に飛行練習ができるよう、機体の保管環境を整備し加えて、業務時間中にも練習可能となるように事務所幹部職員へ調整依頼を行い許可していただいた。また課に設置の行動予定表に「ドローン練習」の項目を追加提案し、自ら練習に取り組みやすい環境を構築した。

練習機のバッテリーは1つにつき10分程度の飛行しか出来ず、予備バッテリーを含めても一度に連続して飛行できる時間は最大40分である。そのため、職員間でバッテリーの充電時間も考慮しながら規定飛行時間を確保するため、記録簿による時間調整を行うなど練習時間確保を実践した。



図6 機体の保管環境

4. 協定会社との連携強化の取組み

防災対応時のスムーズな連携を図るため、UAV協定各社使用機体、飛行経験、保安規定など、法規に準じた実体制の状況把握を行うため、協定書に基づく飛行訓練を実施した。

訓練時には、相武国道運用の考え方を説明するととも

に、映像記録方法、撮影情報管理手法、天候不順時の飛行可能限界などの各社個別情報収集を行い、リスト化し各社操作スキルの現状を把握した。



図7 実飛行訓練の様子

5. 資格取得の取組みの結果

多くの人の支援のおかげで事務所内第一号の資格取得者になることができた。首都圏の災害対策に携わりたいという思いで関東地方整備局を志したので、その一歩を踏み出すことができてうれしい。この資格を取得した責務を全うできるよう、業務を安全に遂行していくことを常に心に留め、これからの業務に取り組んでいきたい。また、協定会社との実働訓練を通して、飛行スキルの習得方法や飛行時の注意点等を学んだ。屋外飛行を実際に見るのは初めての経験だったので、自らのスキルアップのためにも参加出来て良かった。あわせて、協定会社間の連携を図るべく、各社操作スキルの違いを確認いただき、全体の底上げの実現に向けて関係者共有が図れたことは事務所防災体制における重要な財産となった。今後も定期的な飛行訓練を行い、相武国道職員の飛行スキルの向上のほか協定会社との連携強化を継続していく。

6. ライセンス取得に向けた考察・課題

事務所では唯一のUAVライセンス取得者となったが、実際に災害状況調査等を行う為には、操縦者を拡充する必要がある。以下、自身がライセンス取得の過程で感じた課題等をまとめた。

(1) 事務所体制の構築

事務所職員にて複数人のパイロットがいると非常時の体制確保がしやすくなるだけでなく互いの技術向上にもつながると考えるため、まずは興味を持ってもらえるよう飛行の様子を披露する場を増やす等して、資格取得者の拡大に努める。

また、資格を取得する上で一番の障害は安全面への不

安であると考えている。事務所単位で事故の可能性を踏まえた対策（保険加入、責任体制の構築、緊急時対応の勉強会等）を行う必要があると考える。

(2) 機材の準備

人材に限らず、練習機を増やす・バッテリーを持ちの良いものにする等の機材の準備のほか、現場飛行の際はリアルタイムで視聴可能な機材・撮影データを現地からすぐに送る手段等についてDXの取り組みを含め考察を継続していく。

(3) 道路系事務所への情報発信

道路系事務所においてはUAV操作資格の取得が進んでいないように感じる。問題点にも記載した通り、管内区間・道路啓開区間はDID地区が多く、実際の飛行において各種問題整理が必要であると考え。

こうした課題への対応を図ることにより、UAVライセンス取得者を増やし、職員による運用の拡大が可能と考える。

いて次回資格取得試験が行われる前までにとりまとめ、屋外飛行スキルの習得や職員間連携についての体制構築を目指したい。

(3) 情報整理および発信

相武国道事務所管内は米軍基地・自衛隊基地のほか飛行場などがあるため、東京航空局を含む各機関への飛行条件確認を実施し、飛行時に必要な措置についてのマニュアルを作成した。本マニュアルには管内での飛行訓練候補地のリストアップも行ったため、今後の屋外訓練計画の参考となるように情報整理を継続する。

今後、本マニュアルを道路系事務所へ共有し、各事務所での実働飛行計画や人材育成の礎になればと考える。

こうした取り組みによりUAVの運用課題が前進し、異常気象による災害が多発する状況下において被災状況調査等が迅速・確実に行われることにより、災害対応に費やされる時間の縮減等につながると考える。

7. 今後の展開

(1) 自身の操縦技術ステップアップ

B級ライセンスを取得した自身としては、次のステップとしてA級ライセンスの取得を目指す。当ライセンスを取得できれば飛行可能な範囲が広がり、各種現場シチュエーションに応じた災害状況把握に役立てられると考えるからである。また、2022年12月5日から「無人航空機操縦者技能証明」という国家資格制度が運用開始された。業務を遂行する上で必要となる場合は、そちらの取得も視野に入れていきたい。なお、現在本局が実施しているライセンス取得試験の受験枠が各事務所1名分ほどしかなく、事務所内で受験条件を満たす職員は複数人いても資格取得の機会を待ち望んでいる状態であり、次年度以降受験出来る保証も少ないのが現状である。これではモチベーション維持も難しく、事務所職員での体制構築に相当な期間を要すると考える。よって、受験枠の拡大を望むとともに、所内勉強会の継続にて資格取得に向けた取り組みを継続していきたい。

(2) 事務所内の体制構築

資格取得を目指す上で、一人でやみくもに練習を行うことは非効率的であると感じた。そこで、安定した飛行技術を身につけ、今後の資格取得希望者に向けて「操作のポイント」動画の作成や関東地方整備局小型無人機運用会議講師への依頼を図り、パイロットとしての操縦スキル及びナビゲーターやワッチとしてのパイロットサポートスキルを向上させた上で、複数人での練習方法につ

阿蘇山噴火後の降灰状況調査手法 -立入困難区域での降灰観測-

宮崎 仁¹・梶原 慎一¹

¹九州地方整備局 阿蘇砂防事務所 調査課 (〒861-8019 熊本県熊本市東区下南部1-4-73)

土砂災害防止法では、降灰後の降雨での二次的な土砂移動による災害リスクを把握するべく、国が緊急調査を実施し、都道府県知事および市町村長に土砂災害緊急情報を通知することが規定されている。また、緊急調査着手の判断として、土砂災害防止法施行令 第8条 第1号により、降灰厚1cm以上の範囲を把握する必要がある。そこで、阿蘇山噴火後に立入困難区域を含む全域で、迅速かつ安全に降灰厚1cm以上の範囲を把握する手法を確立したので報告する。

なお、本報は噴火後の緊急減災対策の一部であり、溪流での土砂移動状況の把握および降灰による土砂移動現象への影響の検討と対策に関する詳細は、別の機会に報告するものとする。

キーワード 火山噴火、降灰状況調査、緊急減災対策、立入困難区域、UAV観測

1. はじめに

噴火による降灰後に土石流や泥流などの土砂移動現象が発生することが知られている。例えば、長崎県の雲仙普賢岳を流れる水無川では1990～1995年の噴火期間中に149回の土石流が発生した¹⁾。また、北海道の有珠山を流れる一の沢では1977年8月の噴火後2カ月の間に、5回の泥流が報告されている²⁾。

噴火後の土砂移動現象の予測では、降灰状況の把握が重要である。雲仙普賢岳を流れる水無川では、火山灰による斜面の浸透能の低下により、表面流が発生し、多数のガリーが形成されたことで土石流が発生したことが報告されている³⁾。また、降灰量の多い桜島や雲仙岳では、降灰量の少ない活火山に比べて不安定土砂の量が多く、土石流が発生しやすいことが指摘されている⁴⁾。

降灰状況の把握では、降灰範囲と降灰厚の把握が重要である。日本全国における7つの噴火事例では、降灰厚が1～30cmの箇所です砂移動現象の発生が報告されている⁵⁾。また、土砂災害防止法施行令 第8条 第1号では、「河川の勾配が10度以上である区域の概ね5割以上に1cm以上の降灰等が堆積した場合」かつ「概ね10戸以上の人家に被害が想定される場合」に国土交通省が緊急調査を実施することが規定されている⁶⁾。

噴火後の降灰調査では、安全性と迅速性の点からリモートセンシングの活用が進んでいる⁷⁾。なかでも、予め山体に設置したスケールをUAVで判読する手法は、運用コストが低く、短時間で高精度な情報が取得できるため、降灰調査での有効性が期待されている⁸⁾。一方、阿蘇砂防事務所では、有人による定面積サンプリングでの降灰調査を実施しており、噴火直後に立入禁止の規制

がかかる火口周辺での降灰調査手法について検討する必要がある。

そこで、本発表では、阿蘇山噴火後における立入困難区域での降灰状況調査手法の検討と確立を目標とし、立入困難区域での調査手法の選定と想定される調査工程を取りまとめた。

2. 実施地域の概要

本検討は、国土交通省 九州地方整備局 阿蘇砂防事務所が業務範囲としている熊本県の阿蘇山で実施した。阿蘇山は、東西18km、南北25km、面積380km²にわたるカルデラ外壁と、17個の山体からなる中央火口丘で構成されるカルデラ火山である⁹⁾。1923～2023年の100年間のうち92年間で噴火活動が観測され¹⁰⁾、黒色細粒火山灰の放出を特徴とする噴煙型活動が多い⁹⁾。有史以降最大の規模の噴火である1933年の噴火では13225km²の範囲に降灰し、1270万m³の降灰量を記録した¹¹⁾。カルデラ内4箇所にAMeDASが存在し、年平均降水量2399～3205mm、年平均気温9.6～14.6℃であり、降雨は主に夏に集中する¹²⁾。地質は、第四紀更新世以降の火山岩類を主とし¹³⁾、侵食地形の進んだ急峻な谷を形成している。

カルデラ内の北側の黒川流域 (173km²) には、JR豊肥本線と国道57号が通り、南側の白川流域 (207km²) には、南阿蘇鉄道と国道325号が通っている。阿蘇市、高森町、南阿蘇村の3つの自治体が存在し、合計で40555人が生活している¹⁴⁾。環境省の阿蘇くじゅう国立公園やUNESCOの阿蘇世界ジオパーク、観光庁のモデル観光地に指定されており、熊本地震前の2003～2015年には年平均で1545万人の観光客が訪れている¹⁵⁾。

3. 検討方法

(1) 検討の流れ

本検討は、火山防災体制の緊急時における国土交通省の業務内容に該当し、土砂災害防止法での降灰後の土石流に関する緊急調査業務に関する検討である。本検討は、①現状の把握、②調査手法適応の検討、③具体化、の3段階を経て実施した(図-1)。なお、「火山噴火緊急減災対策砂防計画策定ガイドライン(別冊)火山噴火時に立入困難となる区域を調査するための技術手法に関するマニュアル(実事例および計画検討編)⁷⁾」に準拠している。

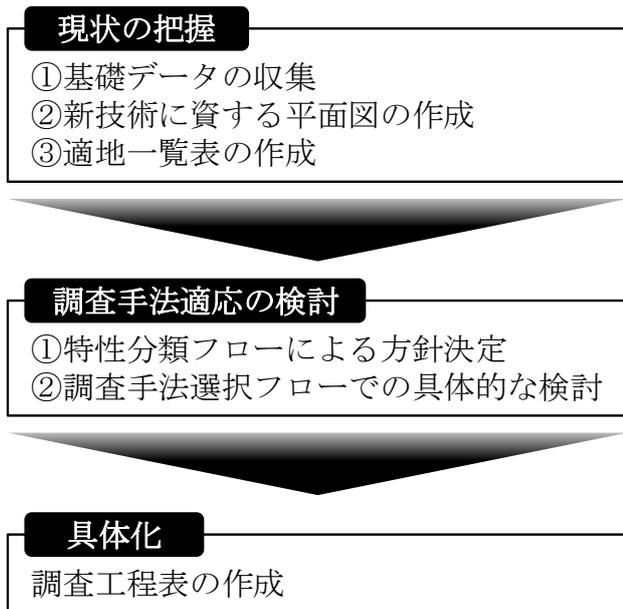


図-1 検討の流れ

(2) 現状の把握

①基礎データの収集、②新技術に資する平面図の作成、③適地一覧表の作成、の3段階で実施した。

①基礎データの収集では、噴火時の立入制限に関わる規制情報を確認した後、地形情報、インフラ整備状況に関する情報、実施体制に関する情報を収集した。規制情報は、阿蘇火山噴火緊急減災対策砂防計画を用いて、噴火警戒レベルに対応した立入禁止区域と立入規制範囲、登山道の規制範囲、主要道路の規制範囲、自然公園法や森林法による法規制範囲を把握した¹⁶⁾。地形情報は、2019年12月20日～2020年2月24日に計測した1mDEM(数値標高モデル)とオルソ画像を用いて、GIS(地理情報システム)解析により取得した。インフラ整備状況は、国道と県道の把握、NTTドコモの通信エリアの把握¹⁷⁾、既存の降灰監視設備の把握¹⁶⁾を実施した。実施体制は、九州地方整備局が保有する災害対策用ヘリコプターの性能、2023年度災害協定締結企業が保有するUAVの性能、自動降灰量計の備蓄状況、既往の緊急調査計画の検討状況の把握を実施した。

②新技術に資する平面図の作成では、基礎データを基に、降灰観測機器設置とUAV離発着箇所の適地を机上で選定した。降灰観測機器設置適地は、開空度が高く、斜度10°以下の緩傾斜であり、登山道や堰堤などの人工構造物設置箇所から選定した。UAV離発着箇所は、作業場所と駐車場所を確保でき、噴火時の退避可能性と安全性を確保できる場所から選定した。また、降灰観測機器設置適地とUAV離発着箇所の縦断図を作成し、離発着地の上空150mを想定し、フレネルゾーンの評価を行った。

③適地一覧表の作成では、平面図を基に、降灰観測機器設置適地で現地調査を行い、詳細な環境情報を把握した。具体的には、斜度と地表面の凹凸状況の把握、WT-920(大井電気製)を用いたRSSI(受信信号強度)値の観測によるLPWA通信(Low Power Wide Area; 低消費電力広域通信)の利用可能性の把握を行った。

(3) 調査手法適応の検討

①特性分類フローによる降灰調査手法の方針の決定、②調査手法選択フローによる具体的な調査手法の検討、の2段階で実施した。特性分類フローとは、緊急調査での方針の決定を目的とし、地形や降灰観測体制の整備レベルから対象火山をA～Fの6クラス(付録-1)に分類するフローチャートである。例えば、口永良部島はクラスB火山、霧島山はクラスD火山、桜島はクラスE火山といったように、対象火山全域を一意的クラスに分類する。調査手法選択フローとは、降灰観測手法ごとの実施難易度と優先度の設定を目的とし、実施可能な手法の抽出と整理を行うフローチャートである(図-2)。

①特性分類フローでは、現状の把握を基に、「規制区域に観測機器が整備されているか」、「規制区域に対象溪流が分布しているか」、「規制区域に観測機器が設置可能か」の3段階で阿蘇山をクラス分けした。その後、適地一覧表とクラス分けに基づき、②調査手法選択フローを用いながら、阿蘇山で実施可能な降灰調査手法の整理および、各手法の実施難易度と優先度の設定を行った。

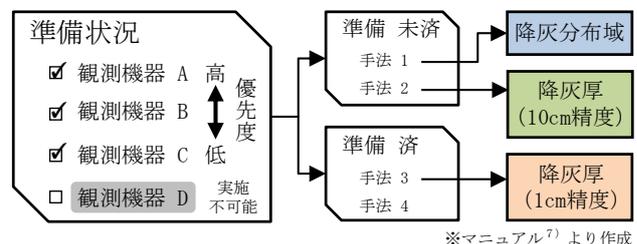


図-2 調査手法選択フロー

(4) 具体化

調査手法選択フローを基に、縦軸に調査手法、横軸に時間を取った調査工程表を作成し、調査に必要な時間と精度をまとめた。これにより、前兆期と噴火後3日目までに実施する作業項目を整理し、把握可能な降灰情報を明確にした。

4. 検討結果

(1) 現状の把握

a) 規制情報

気象庁の噴火警戒レベル2（火口周辺規制）で火口から概ね1km以内が立入禁止となり、レベル3（入山規制）で概ね2km以内が立入禁止となっていた。また、噴火警戒レベルに応じて、阿蘇火山防災会議協議会による登山道の通行規制や立入禁止が設定されていた。主要道路では、交通施設への被害や救助活動に支障がある場合に交通規制が計画されていた（図-3）。本地域一帯は、自然公園法と森林法による法規制の範囲であり、工作物の設置には事前の申請を必要とした。

b) 地形情報

火口から1km以内に源頭部を持つ流域が6流域、2km以内に17流域、3km以内に40流域存在した。また、火口から3km以内では、ほぼ全域で河床勾配が 10° 以上であった（図-3）。

c) インフラ整備状況に関する情報

火口の西側には、市道の阿蘇山公園道路と県道111号および298号が敷かれており（図-3）、その外周北側に国道57号、南側に国道325号が敷かれていた（図-4）。火口西部で通信環境の無い場所が存在するものの、概ね全域で通信が可能であった（図-3）。既存の降灰監視設備は、6台の監視カメラが設置されているが、いずれも火口から5km以上離れた場所に設置されており、6台とも破損していた（図-4）。

d) 実施体制に関する情報

九州地方整備局では、災害対策用ヘリコプターを1台保有しており、調査員5名搭乗時の最大運行時間が約4時間、最大84倍ズームの高感度カメラを搭載していた。2023年度災害協定締結企業のうち4社で合計23機のUAVを保有しており、航空可能距離が2~23km、最大風圧抵抗が8~15m/s、有効画素数が1200~2430万画素であった。自動降灰量計の備蓄は無く、有人による定面積サンプリングでの降灰調査が想定されていた（図-4）。

e) 新技術に資する平面図の作成

降灰観測機器設置適地として、登山道の通行規制により立入困難となる可能性が高い火口から2km以内の7地点を選定した。UAV離発着箇所として、噴火警戒レベル2を想定し、火口から2km以上離れた5地点を選定した（図-3）。降灰観測機器設置適地とUAV離発着箇所の縦断面図より、阿蘇火山博物館~S2地点間では、フレネルゾーンに障害物が存在した（図-5）。

f) 適地一覧表の作成

現地調査により、地点N2、NE2、SSE2は斜度が 10° 以上の急傾斜地であり、地点N2、NE2、SSE2、S2は凹凸のある地表面であった。通信状況については、携帯電話、LPWA通信ともに、全地点で通信可能であった（表-1）。

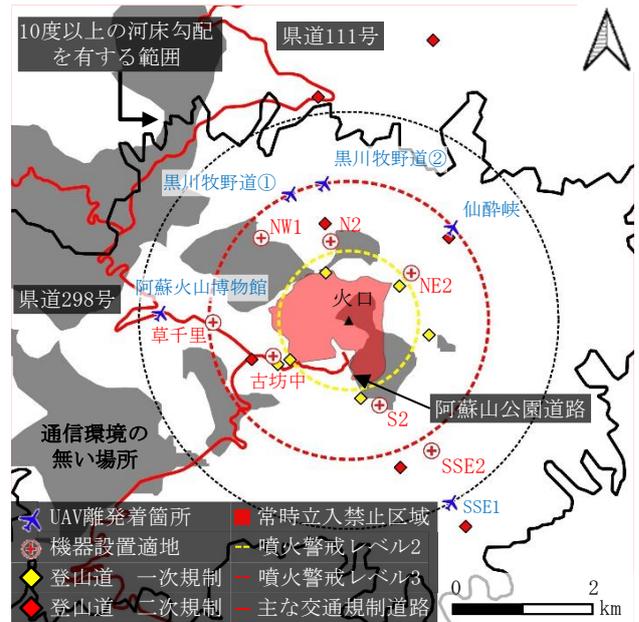


図-3 火口周辺の地図

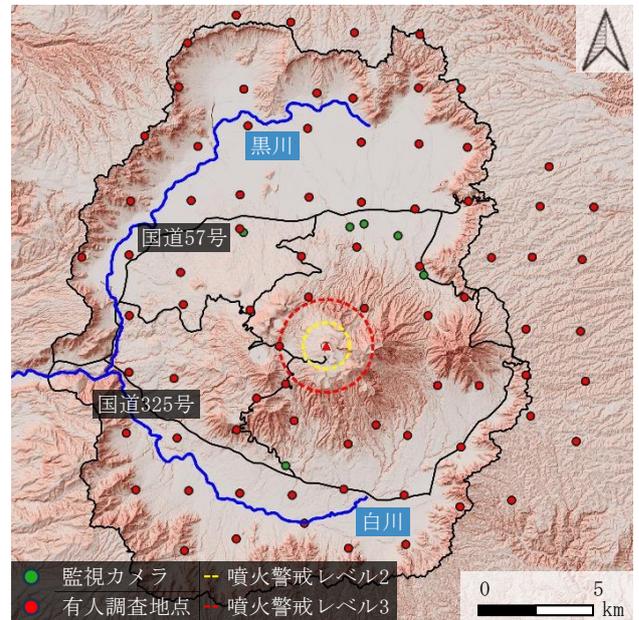


図-4 阿蘇全域の地図

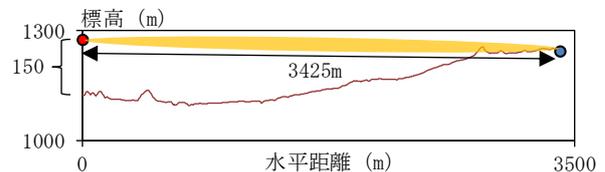


図-5 阿蘇火山博物館~S2地点間のフレネルゾーン

表-1 適地一覧表の抜粋

UAV 離発着箇所	観測 機器	フレネル ゾーン	地表面状況 斜度	通信環境 状況	携帯	LPWA
黒川牧野道②	N2	○	$\geq 10^\circ$	凹凸	○	○
仙酔峡	NE2	○	$\geq 10^\circ$	凹凸	○	○
SSE1	SSE2	○	$\geq 10^\circ$	凹凸	○	○
阿蘇火山 博物館	草千里	○	$\leq 10^\circ$	平坦	○	○
	古坊中	○	$\leq 10^\circ$	平坦	○	○
黒川牧野道①	NW1	○	$\leq 10^\circ$	平坦	○	○

(2) 調査手法適応の検討：特性分類フロー

阿蘇山では、規制区域に観測機器が整備されておらず、規制区域に対象渓流が分布し、規制区域に観測機器が設置可能であるため、特性分類フローにより、クラスDの火山に分類された(図-6)。クラスDの火山では、緊急時は面的な情報の取得と緊急設置機器を活用した降灰情報の取得が降灰調査手法の方針となる。また、緊急調査の着手判断は、有人ヘリやUAV等のリモートセンシング技術を活用した面的調査で行う⁷⁾(付録-1)。

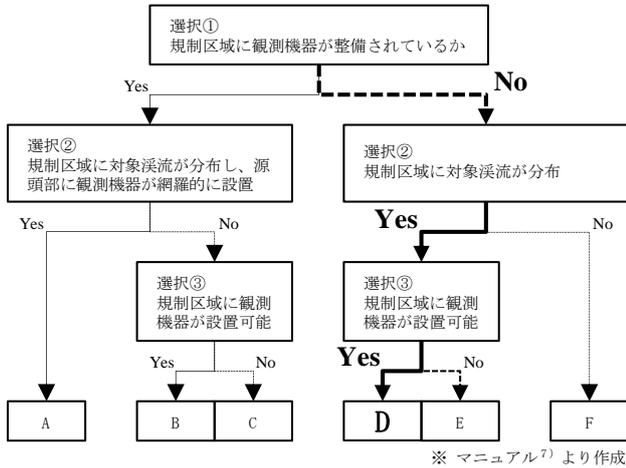


図-6 阿蘇山の特性分類フロー

(3) 調査手法適応の検討：調査手法選択フロー

a) 具体的な降灰調査手法の選定

表-1の適地一覧表より、斜度 10° 以上かつ凹凸のある地表面であるため、降灰スケールと降灰マーカー(凸型)を適用可能手法として選定した。降灰スケールは、1~15cmの大きさ毎に色調が異なる正四面体であり、噴火の前兆現象確認後にUAVを用いて運搬・投下し、降灰後にUAVで視認できる色調から降灰厚を計測する装置である¹⁸⁾(図-7)。事前の設置を必要とせず噴火時に緊急で対応できるメリットがあるものの、投下時の転動や微地形の影響を受ける可能性が考えられた。

降灰マーカー(凸型)は、平板上に設置された1~3cmの高さ毎に色と形状を変えたマーカーであり、平時に予め山体に設置し、降灰後にUAVで視認できるマーカーから降灰厚を計測する装置である¹⁹⁾(図-8)。事前の設置が必要となるものの、正確に設置した位置を把握できることや、各マーカーが平板上に存在するため微地形の影響を受けることなく一律な条件で降灰観測を実施できるメリットがある。また、鹿児島県諏訪之瀬島での2022年3月21~25日の噴火において観測・運用の実績があり²⁰⁾、阿蘇山でも2019年10月から視認性と耐久性の現地試験を実施している²¹⁾。以上のことから、平時に観測機器の設置が可能な阿蘇山では、安定した観測が可能であり、観測・運用の実績もある降灰マーカー(凸型)を降灰観測手法として選定した。

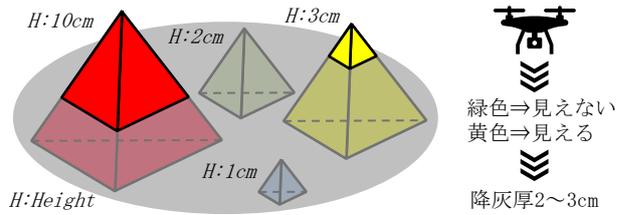


図-7 降灰スケール

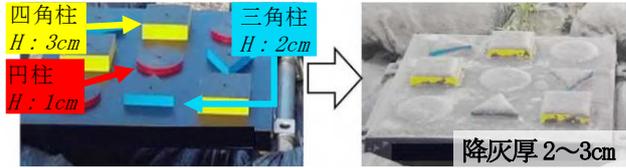


図-8 降灰マーカー(凸型)

b) 実施難易度の整理と優先度の設定

現状実施可能な手法は、各種リモートセンシングによる降灰分布域の把握と、事前に設置した降灰マーカーをUAVで空撮することによる降灰厚の把握であった(表-2 白色部)。また、観測体制を整備することで、降灰ゲージによる1cm精度での降灰厚の観測や、自動降灰量計によるリアルタイムでの降灰厚の観測が可能であると判定された。なお、降灰範囲の把握では、事前準備として、UAVでのSfm測量や衛星写真の収集を行うことで、降灰後のSfm差分解析とSAR差分解析により、厚さ1~20cm精度での降灰厚の把握が可能であると判定された(表-2 淡褐色部)。一方、地形などの環境的な制限により、降灰スケールや降灰ユニットを用いた降灰厚の観測は難しいと判定された(表-2 濃褐色部)。

実施の優先度では、降灰調査での運用実績があるヘリ・航空機での降灰範囲の把握が最優先となり、1日以内に調査が完了するUAVでの写真判読が次点であった。また、調査結果の取得まで数日かかるUAVでのSfm差分解析と衛星写真によるSAR差分解析の優先度は低かった。

表-2 各手法の実施難易度と優先度

取得情報	事前準備	情報取得手段	使用技術	降灰厚 (cm)	難易度 ^{※1)} (優先度 ^{※2)}
降灰範囲	-	ヘリ・航空機	写真判読	×	易
	-	UAV	写真判読	×	易
	-	UAV	オルソ作成	×	易
	-	衛星写真	写真判読	×	易
	ランドマーク	ヘリ・航空機	目視確認	×	可 (A)
ランドマーク	UAV	写真判読	×	可 (B)	
降灰前情報	UAV	Sfm差分	1~10	可 (C)	
降灰前情報	衛星写真	SAR差分	10~20	可 (D)	
降灰厚さ	降灰マーカー	UAV	写真判読	1	易
	降灰ゲージ	監視カメラ	-	1	可 (A)
	自動降灰量計	通信	-	0.1	可 (A)
	降灰スケール	UAV	写真判読	1	難 (E)
	降灰ユニット	通信	-	0.1~1	難 (E)

※1) 易：現状実施可能、可：整備後実施可能、難：実施困難
 ※2) 優先度：高 A ←→ E 低

(4) 具体化：調査工程表の作成

現状実施可能な手法を用いた場合、噴火後1日目までに降灰マーカを設置した溪流での降灰厚1cmの範囲と、阿蘇カルデラ全域での降灰の分布域を把握することが可能となった。また、2日目までに中央火口丘全域での大まかな降灰厚の分布情報の把握が可能となり、3日目までに阿蘇カルデラ全域での大まかな降灰厚の分布情報を把握できるようになった。(図-9)。

時間推移	前兆期	噴火後		
		1日目	2日目	3日目
調査手法	ヘリ写真による写真判読	機材確保	調査実施 ⇒ 取りまとめ	
	UAV空中写真による写真判読	調査員確保	調査実施 ⇒ 取りまとめ	
	UAV-Stmによるオルソ作成	関係部署調整	調査実施 ⇒ SfM解析 ⇒ 取りまとめ	
	衛星写真による降灰分布の確認	衛星位置確認	衛星写真の入手 ⇒ 写真判読	
点情報	UAV空撮による降灰マーカ撮影	機材確保 調査員確保 飛行計画作成 マーカ点検	調査実施 ⇒ 取りまとめ	
	アウトプット	一部流域での降灰厚 & 降灰の分布域 → 降灰厚の分布情報 & より広域での把握		

● 取得情報活用のタイミング

図-9 阿蘇山での調査工程表

5. 現行での降灰調査体制

本検討により、噴火後の立入困難区域において、降灰厚1cmの精度で降灰調査を行うことが可能となった。また、噴火警戒レベル3発令時には、半径2km以内の範囲でUAVによるリモート調査を実施し、半径2km外で有人による定面積サンプリングを実施することで、阿蘇カルデラ全域での降灰分布と降灰厚を把握することが可能となった(図-10)。一方、フレネルゾーンの判定からUAVによる降灰厚調査が実施できないS2地点での降灰観測が課題として残っており、監視カメラや自動降灰量計などの代替手段での観測体制の構築を模索中である。また、降灰マーカは耐用年数が2年程度であり¹⁸⁾、継続的なメンテナンスと付け替えが必要となる。

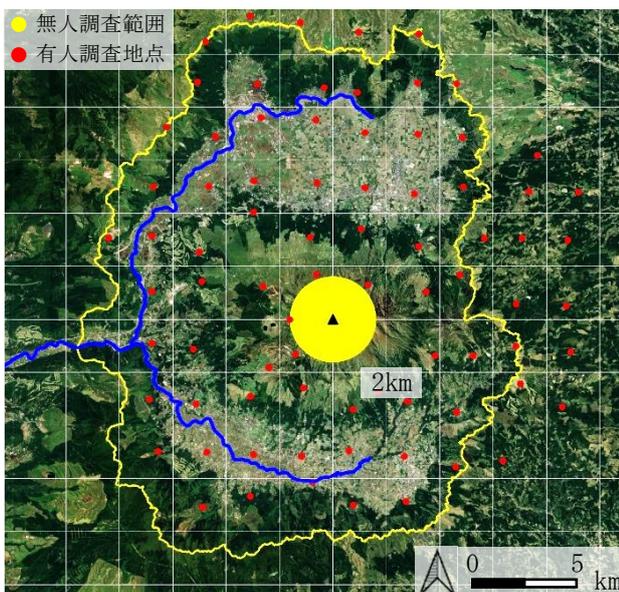


図-10 現行での降灰調査体制

6. 今後の展望

降灰の監視・観測体制の強化、降灰後の土砂移動対策の整備、降灰・土石流監視システムの整備、の3本柱で阿蘇山での噴火対応計画を進めている(図-11)。降灰の監視・観測では、本検討で設置した降灰マーカの継続的なメンテナンスを実施するとともに、4章3節b項で検討した「実施難易度の整理と優先度の設定」における整備後実施可能な手法(表-2 淡褐色部)の実施を進めている。具体的には、リアルタイムで降灰厚情報の確認を行える自動降灰量計の設置を検討している。また、降灰分布域や降灰厚分布情報の把握の更なる迅速化と簡便化を進めるべく、UAV自動飛行システムの構築、ヘリ用ランドマークの抽出、噴火前の空中写真と衛星写真の収集、それらのデータベース化を計画している。

降灰後の土砂移動対策では、溪流における土石流の監視・観測体制の整備を進めている。土石流については、立入困難区域での土砂移動状況を監視すべく、溪流の監視を目的としたカメラの設置と堰堤透過部へのLVP (Loadcell, Vibration and Pressure meter; 荷重計測、振動計測、圧力計測) センサーの設置を検討している。

降灰・土石流監視システムでは、降灰状況の情報と土石流の観測情報を一元的に確認できるシステムの構築を検討している。一元的な管理を行うことにより、迅速な情報収集と職員のユーザビリティの向上、関係機関との共有による噴火対策の効率化が期待される。以上の3本柱により、阿蘇山における噴火対応火山砂防計画と通常対応火山砂防計画の整備と運用を進め、阿蘇地域での土砂災害対策を強力に推進していく。

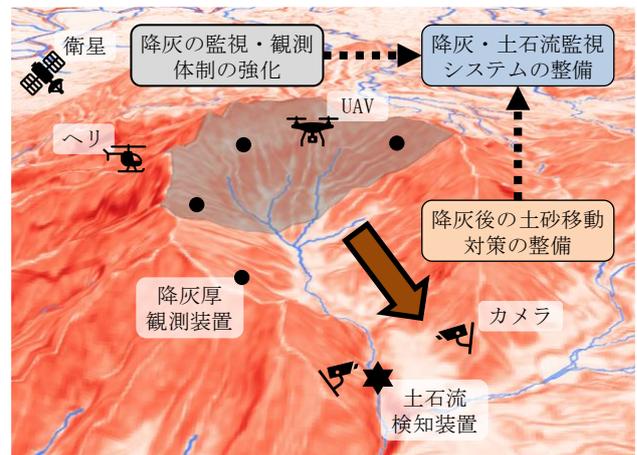


図-11 阿蘇山噴火対策の3本柱 (イメージ)

7. 謝辞

本発表は、阿蘇砂防事務所ならびに九州地方整備局の皆様のお力を借りて磨かれたものである。また、日本工営の田方様には、阿蘇山以外での事例も交えながら降灰観測機器の特性と選定理由について御教授いただいた。本論文の執筆および本発表の準備にあたり、支えて下さった全ての方々に厚くお礼申し上げます。

8. 付録

付録-1 クラスごとの特徴と調査方針

クラス	特徴と方針
A	対象溪流について既存の監視機器にて降灰状況を把握できるクラス。 ・既存観測点を主体に着手判断、溪流抽出を実施。
B	既存の観測機器及び緊急時の機器設置による調査が可能なクラス。 緊急時は面的情報取得と既存監視機器および緊急設置機器を活用して降灰情報を取得する。 ・着手判断は既存観測機器と有人ヘリ等を組合せて判断。 ・溪流抽出は、追加緊急観測点・面的調査を加えて実施。
C	既存の観測機器による調査が可能なクラス。 緊急時の機器設置は実施できないため、面的情報と既存監視機器を活用して降灰情報を取得する。 ・着手判断は既存観測機器と有人ヘリを組合せて判断。 ・溪流抽出は、追加面的調査を加えて実施。
D	既存の監視機器がないが、緊急時の機器設置による調査が可能なクラス。 緊急時は面的情報取得と緊急設置機器を活用して降灰情報を取得する。 ・着手判断は有人ヘリや UAV 等の面的調査で判断。 ・溪流抽出は、追加緊急観測点・面的調査を加えて実施。
E	既存の監視機器がなく、さらに緊急時の機器設置も困難なクラス。 緊急時には面的情報を活用して降灰情報を取得する。 ・着手判断は有人ヘリや UAV 等の面的調査で判断。 ・溪流抽出は、追加面的調査を加えて実施。
F	立入規制区域内に調査対象溪流が分布しないクラス。 但し、アクセスが困難な溪流が分布する場合はクラス D, E に準じた検討を実施する。 ・着手判断は有人ヘリや地上踏査で判断。 ・溪流抽出は、追加緊急観測点・面的調査を加えて実施。

9. 引用文献

- 1) 原田民司郎・平野宗夫・川原恵一郎 (1999) 雲仙・水無川における土石流の流出特性と流出解析. 砂防学会誌 52(1) 3-9.
- 2) 末包昭彦 (1979) 1977年有珠山一の沢泥流の発生について. 地理学評論 52(6) 302-310.
- 3) 池谷浩 (1993) 雲仙・水無川の土石流発生機構について. 新砂防 47(2) 15-21.
- 4) 池谷浩 (1994) 活動中の活火山における土石流対策計画. 新砂防 47(2) 23-29.
- 5) 田村圭司・山越隆雄・松岡暁・安養寺信夫 (2010) 火山噴火後に土石流が発生した事例. 土木技術資料 52(3) 34-39.
- 6) デジタル庁 (2017) 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律施行令. e-Gov法令検索.
- 7) 国土交通省 (2023) 火山噴火緊急減災対策砂防計画策定ガイドライン (別冊) 火山噴火時に立入困難となる区域を調査するための技術手法に関するマニュアル (実事例および計画検討編).
- 8) 国土交通省 (閲覧:2023/6/21) 降灰マーカーとドローンを活用した降灰量調査を実施!
https://www.mlit.go.jp/report/press/sabo01_hh_000088.html
- 9) 小野晃司・渡辺一徳 (1985) 阿蘇山山地質図. 火山地質図 4.
- 10) 気象庁 (閲覧:2023/5/16) 「阿蘇山 有史以降の火山活動」
https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/fukuoka/503_Asozan/503_history.html
- 11) 青木成一・本多彪・早水逸雲 (1940) 昭和8年2月阿蘇火山の活動調査報告. 験震時報 11 133-163.
- 12) 気象庁 (閲覧:2023/5/11) 「過去の気象データ 阿蘇乙姫、阿蘇山、高森、南阿蘇」
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php>
- 13) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター (2020) 20万分の1日本シームレス地質図2020年4月6日版.
- 14) 総務省統計局 (2020) 令和2年国勢調査 人口等基本集計. e-Stat.
- 15) 熊本県 (閲覧日:2023/5/11) 「統計年鑑 22 観光」
https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/20/#ka_headline_2
- 16) 熊本県 (2018) 阿蘇山火山噴火緊急減災対策砂防計画 (案).
- 17) NTT docomo (閲覧日:2023/6/21) 通信・エリア
<https://www.docomo.ne.jp/area/>
- 18) 金崎裕之・森山裕二・島田徹・永田直己・皆川淳・永谷圭司・久利美和・桐林星河・谷島諒丞・菊地泰洋・中川範晃 (2018) 火山噴火時における土石流発生区域に関する無人調査手法の開発 その2 ドローン搭載用調査デバイスによる土石流発生リスクの評価手法の提案と実証試験一. 平成30年度砂防学会研究発表会.
- 19) 田方智・古屋海砂・酒匂俊輔・黒木隆 (2022) 降灰マーカー(凸型・凹型)の適用性検証. 令和4年度砂防学会研究発表会概要集.
- 20) 福永健志・下村慎一郎・久保世紀 (2022) 諏訪之瀬島に伴う事務所防災対応について. 令和4年度九州国土交通研究会.
- 21) 内閣府 (閲覧日:2023/6/28) 火山防災対策会議 (第13回) 配布資料1-1 「最近の火山防災対策の取組状況」
<https://www.bousai.go.jp/kazan/taisakukaigi/20211008kaigishiryu.html>

アルミ樹脂複合板を用いた外装ファサードの燃え拡がりに及ぼす影響因子の分析

西尾 悠平¹

¹国立研究開発法人建築研究所 防火研究グループ (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

アルミ樹脂複合板を用いた建築物の外装ファサードが激しく燃え広がる火災事例が国外で見られており、その火災安全性に懸念がある。燃え拡がりが発生する要因に関しては、アルミ樹脂複合板の燃焼性状だけでなく、通気層等の構法の部分の影響が指摘されており、材料単体だけでなく、構法を含めた各種影響要因と燃え拡がり発生との関係性を明らかとする必要がある。本稿では、アルミ樹脂複合板を用いた外装ファサードの燃え拡がりに材料特性および構法が及ぼす影響に関して、中規模の火災実験を実施し、その結果を元に影響因子の分析を行った。

キーワード 可燃性外装, アルミ樹脂複合板, ファサード試験, 燃えひろがり

1. はじめに

アルミ樹脂複合板（以下、ACM）は建築内外装の化粧パネルとして使用されているが、2017年6月にイギリスで発生したグレンフェル・タワー火災¹をはじめ、中東やアジアにおいて比較的規模が大きい火災事例が発生しており、外装ファサードを介した燃え拡がりが注目されるようになった。外装ファサードの燃え拡がりに関しては、材料の燃焼性状だけではなく、通気層等の構法部分が影響を与えていると指摘されており、実際の施工状況を含めて試験することが望ましいとされている。諸外国においては、外装ファサードの防火性能評価に対し、中規模および実大規模でのファサード型の試験方法が規格化されており、日本においても、開口噴出火炎にあふられた際の外装における燃え拡がり性状を評価する試験方法として、“JIS A 1310建築ファサードの燃えひろがり試験方法”²（以下JIS A 1310）が2015年に制定された。試験方法は制定されたものの、ACMの外装ファサードでの燃え拡がりに対し、材料および構法がどの程度影響を与えるかに関しては、まだ明らかでない部分が多く、ACMの外装材での火災安全性能を向上させるために、その燃え拡がり要因を詳細に解明する必要がある。

本稿ではACMを用いた外装ファサードに対し、材料の燃焼性状および構法部分の影響を明らかとするために、JIS A 1310を用いて実験を実施し、ACMの燃え拡がりに対し、材料および構法が与える影響の分析を行った。

以降、本研究で用いた試験体と実験データを2章で、各種影響要因に関する実験結果を3章で、実験結果を踏まえたまとめと考察を4章で各々記述する。

2. JIS A 1310の実験概要

(1) ACMの燃え拡がりに及ぼす影響要因

ACMの燃え拡がりに及ぼす影響要因として、材料の燃焼性状に関連して、ACMの芯材として使用されるポリエチレン（PE）の難燃処理の有無、ACM表面への可燃物の付与を、構法に関連して、通気層内部の断熱材およびファイヤーストップの有無等を設定し、①ACMの燃焼性状、②ACM以外の可燃物の付与、③通気層内部の断熱材、④開口部の保護、⑤通気層の幅・ファイヤーストップ（層間塞ぎ）、⑥袖壁に着目して検討を行った。要因の概要図を図-1に示す。

(2) 検討の対象としたJIS A 1310の試験条件

JIS A 1310は、燃焼チャンバー（内寸:高さ1.35m, 幅1.35m, 奥行1.35m）の開口部に合わせたファサード試験体（高さ4.10m×幅1.82m）を設置し、チャンバー内部の

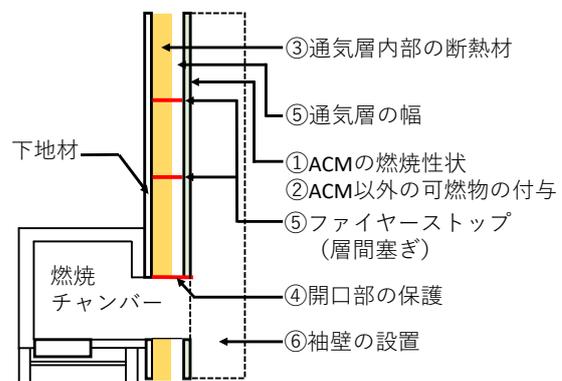


図-1 燃え拡がりに及ぼす要因

ンフェル・タワーの外装を模擬した試験体である。「IN-51-nt-FS」, 「RW2-51-FS」のファイヤーストップを設置位置を図-5に示す。

3. 実験結果の概要および影響要因

2章で示した試験を対象に、各影響要因が燃え広がりに及ぼす影響について、火炎高さ、通気層内部の温度、試験体の焼損状況より検討を行った。なお、本論文における火炎高さは、ファサード表面近傍温度が500°Cに減衰した高さまでの距離を壁面火炎の到達高さとし、実験中にファサード表面近傍温度が500°Cを超えた最も高い測定点とその1つ上の測定点を線形補完して求めた。最も高い2.5m高さの測定点で500°Cを超えた場合の火炎高さを2.5mとした。

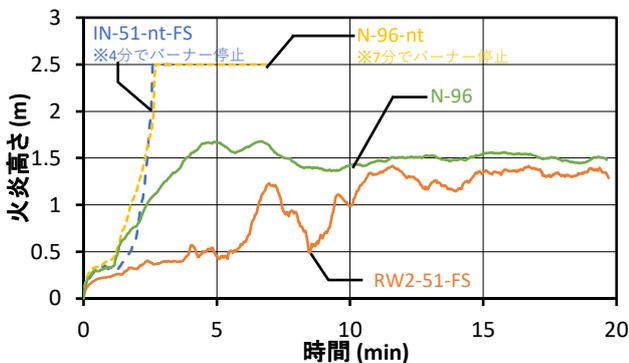
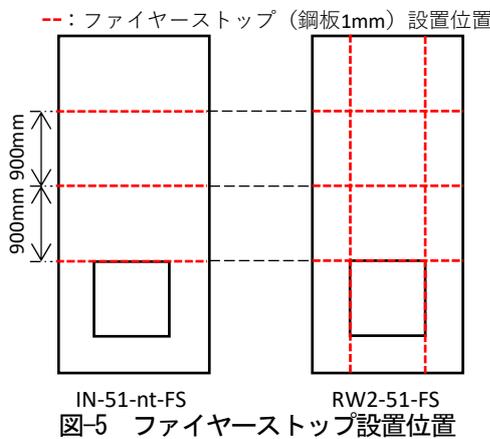


図-6 ファサードの燃え広がり（芯材の難燃処理）

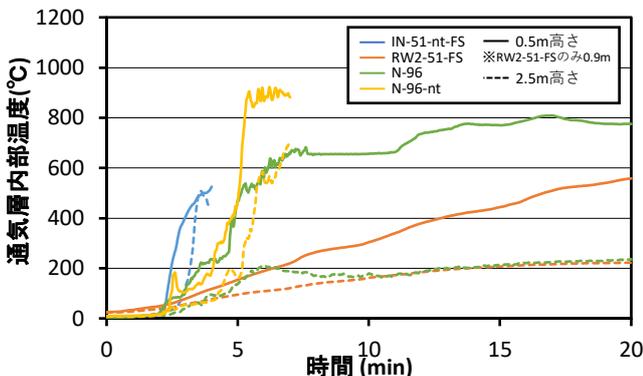


図-7 通気層内部の燃え広がり（芯材の難燃処理）

(1) ACMの燃焼性状（芯材の難燃処理）

主に芯材の難燃処理の有無に違いがある各実験における火炎高さの経時変化を図-6に、開口上端より0.5mおよび2.5mの高さの通気層内部の温度の経時変化を図-7に示す。なお、図-7の「RW2-51-FS」の通気層内部温度は0.9mおよび2.5mの高さとなっている。

芯材がPEの試験体において、実験開始より3分程度で2.5m高さまで火炎が到達し、芯材が難燃処理された試験体と比較し、激しく燃え広がり、通気層内部においても、「IN-51-nt-FS」では、実験開始より3分経過時点においては、2.5mの高さにおいても温度上昇が確認された。「RW2-51-FS」においては、0.9m以上の高さで温度の急激な上昇は観察されなかったが、試験終了時点で、ACMが0.9m高さまで焼損し、試験途中から通気層内部へ噴出火炎が侵入していると判断できる。

(2) ACM以外の可燃物の付与（PVシート）

図-8はACM表面にPVシートを張り付けた試験体の最も燃え広がった時点の様子および実験終了後のACMの焼損状況の様子を示す。バーナー出力が低出力での結果ではあるが、試験終了後のACMの焼損状況より、ACMの芯材がfrPEの場合、開口部周辺部のみ損傷にとどまり、PVシートの燃焼のみではACMの焼損は限定的であった。

(3) 通気層内部の断熱材

通気層内部の断熱材の有無を変更した「N-86」, 「RW-96」の各実験における火炎高さの経時変化を図-9



図-8 PVシートを張り付けた試験体の試験時の様子

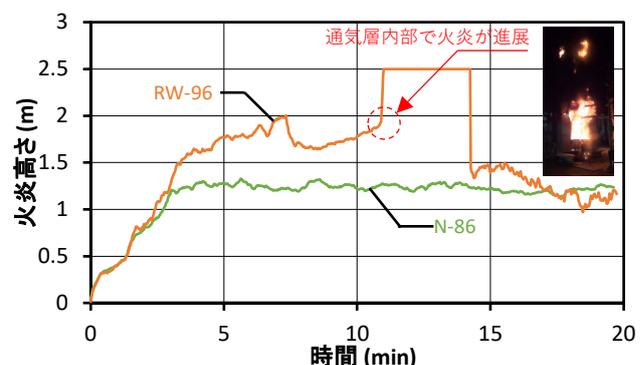


図-9 ファサードの燃え広がり（通気層内部の断熱材）

に示す。実験の観察結果より、通気層内部に断熱材がある場合、実験開始から12分経過後に通気層内部で火炎が進展していることが確認されており、火炎高さが高くなっている。試験体の厚さが異なるため、断熱材だけの影響とは判断できないが、断熱材の存在が通気層内部での燃え広がりに影響を与えたと考えられる。

(4) 開口部の保護

開口部材の鉄製とアルミ製で比較した試験体においては、図-8 に示すように、鉄製の開口部材を用いた試験体において ACM の損傷が小さかった。バーナー出力が低出力でのみの結果ではあるが、噴出火炎が小さい場合、開口部の保護により、ACM の焼損等を抑制する効果があると判断できる。しかしながら、開口部上端を鉄板で保護した「RW-96」において、開口部周辺の ACM が焼損し、通気層内部へ炎が侵入したことから、開口部の保護のみでは、通気層内部での燃え広がりを抑えることは難しい。

(5) 通気層の幅・ファイヤーストップ

図-10 は通気層幅を変更した試験体における外装表面および通気層内部の火炎高さの経時変化を示す。高出力のみでの比較ではあるが、通気層幅が大きい「N-296」では、開口上端より 2.5m の高さにおいても、通気層内部で高温を計測し、噴出火炎が通気層内部で進展することが観察された。バーナーが高出力であったため、実験終了後には開口上端より 2.0m の高さまで ACM が焼損していたが、通気層幅が大きい場合、通気層内部において火炎が進展する危険性があることが示された。

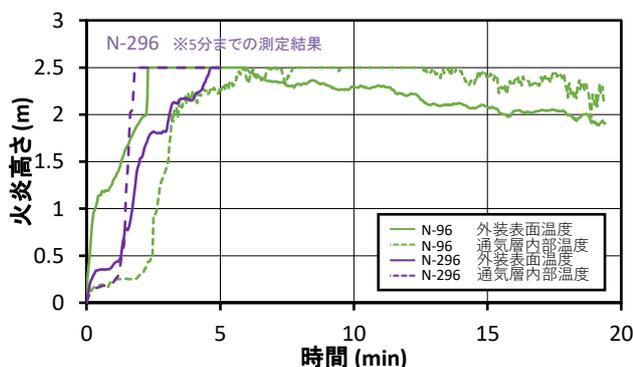


図-10 外装・通気層内部の燃え広がり (通気層幅)



図-11 試験後の焼損状況 (袖壁の有無)

ファイヤーストップに関しては、図-6 および図-9 に示す「RW2-51-FS」, 「RW-91」の結果より、通気内部に断熱材がある場合においても、通気層内部の炎の進展を防ぐ効果があり、frPE 芯材の ACM の場合、通気層内部の炎の進展を防ぐ効果が期待できる。

(6) 袖壁の設置

「N-86」, 「RW-96」に関しては、開口右端より50mm の位置に袖壁を設けた状態で実験を実施した。断熱材がない「N-86-W」においても、袖壁と主壁の取合いの部分が激しく損傷している様子が観察された (図-11)。袖壁の設置により、ACM が焼損し、燃え広がる危険性が高くなると判断できる。

4. まとめと考察

(1) 各種影響因子の分析

3 章の結果より、燃え広がりに影響を及ぼす要因として、①芯材の難燃処理が最も大きな要因であると判断できる。②ACM 以外の可燃物として、PV シートを張り付けた際の結果を示したが、今回用いたもの程度であれば、難燃処理された ACM の燃え広がりおよび焼損には大きな影響は与えないと判断でき、また、⑥袖壁の設置は噴出火炎が袖壁に沿って大きくなることから、燃え広がりの危険性が高くなる。また、通気層内部での燃え広がりに関しては、③通気層内部の断熱材、および⑤通気層の幅が影響を及ぼすが、④開口部の保護や⑤ファイヤーストップにより抑制可能であることが確認された。しかしながら、ACM の芯材が難燃処理されていない場合、ファサード表面での燃え広がりが激しく、通気層内部のファイヤーストップの効果が薄くなり、難燃処理された芯材の ACM においても、ACM が焼損することから、開口部の保護の効果は限定的であり、通気層内部の火炎の進展を防ぐには、開口部以外の位置にもファイヤーストップを設けることが有効であることが確認された。

(2) 検討結果の活用方法

本稿で実施した影響要因の検討により、今後、アルミ樹脂複合板を利用する際の火災安全性の規準等の必要な技術資料としての利用や、致命的な外装火災を防止するための設計フローの構築に寄与すると考えられる。

謝辞：実験実施に際し、JIS A 1310 建築ファサード燃えひろがり抑制研究会の協力を得た。日本建築学会 上階延焼検証小委員会の皆様より、ご助言・ご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小林恭一：防火法令の基礎知識 第 15 回 高層建築物 (4) ロンドンのタワーマンション火災, 月刊フェスク, pp.22-25, 2017.8
- 2) JIS A 1310 : 2019 建築ファサードの燃えひろがり試験方法

ダム操作中における 危機的状況に対する備えの強化 —ダムコンダウン時を想定した 独自のシステム対応—

吉村 研人¹・加藤 慎一郎¹・竹内 一郎²

¹独立行政法人水資源機構 池田総合管理所第一管理課（〒778-0040 徳島県三好市池田町西山谷尻4235-1）
²九州地方整備局 筑後川ダム統合管理事務所松原ダム管理支所（〒877-0201 大分県日田市大山町西大山8492-2）

ダム管理業務にあたり、ダム操作中に各観測計器や伝送装置、ダム管理用制御処理設備（以下、「ダムコン」という）に異常が生じた場合においても、職員は迅速かつ的確な洪水対応が求められる。池田総合管理所では、ダム操作中にダムコン上で流入・放流量が算出されない状況、いわゆるダムコンダウン時を想定した「ダムコンダウン時対応Excel」という独自のシステムを作成し、危機的状況下での的確な対応に備えている。

本稿は、池田総合管理所のダム操作中における危機的状況に対する備えを報告するものである。

キーワード ダム操作，洪水対応，ダムコンダウン，危機的状況に対する備え

1. 池田総合管理所の概要

池田総合管理所では、吉野川本川上流に位置する早明浦ダム及び池田ダム、支川である銅山川に位置し愛媛県へ分水を行う富郷ダム及び新宮ダムの管理を実施している。また、2021年度より国土交通省所管の柳瀬ダムの管理業務を受託し、銅山川3ダムの連携管理を行っている。各ダムは吉野川総合開発計画の根幹としての役割を担っており、洪水調節、利水補給及び共同事業者による発電を担う多目的ダムであるこれら施設を限られた人員で管

理するにあたり、総合管理所としての機能を適時・適切に発揮できるよう、業務の連携体制・支援態勢の構築や日常的な訓練を重ね、種々の危機的状況の対応にも備えている。

2. 洪水対応中における設備障害

昨今の記録的な豪雨をはじめ、2005年には台風14号による最大流入量約5,600m³/sの出水により、早明浦ダムの貯水率が0%から100%に回復するほどの洪水も発生して



図-1 ダム位置図



写真-1 ダムコンイメージ

表-1 各障害状況における必要な対応

		ダム・水位 データ伝送	ダムコン 諸量演算	ゲート 遠方操作	必要な対応
レ ベ ル が 上 が る ほ ど 大	レベル3	×	×	×	・水位計現地読み取り ・流量算出 ・ゲート機側操作
	レベル2	○	×	×	・流量算出 ・ゲート機側操作
	レベル1	○	○	×	・ゲート機側操作

表-2 システムの入力・確認項目一覧

入力項目 (手動)	・貯水位 ・発電放流量 ・ゲート開度（目標開度設定シートにて算出）
計算項目 (自動)	・流入量（式1参照） ・放流量（オリフィス／フリーフロー）
チェック項目	・過放流警告 ・ステップオーバー警告 ・一定率超過警告
目標開度設定	・ゲート目標放流量から開度及び放流量の設定 ・ゲート開度から放流量の決定

おり、計画規模以上の出水に対しても、その備えが必要な状況である。この一環として、ダム管理業務において不可欠であるダムコンをはじめ、各設備は、日々の点検・整備を行うことにより健全な状態を保っている。しかし、洪水対応中、突発的な設備の障害が起きた場合には、ダム管理業務に支障が生じることが想定される。例えば、落雷によりダムコンの演算処理機能が一時的に失われた場合は、ダムの流入量が計算されない状況が生じる。このような状況となった事例では、職員が手計算で流入量や放流量を算出するなどの対応を行っている。

このように洪水対応中のダム操作において、特に重要な役割を持つダムコンにおいて想定される主な障害と対応項目を表-1に示す。本稿は、表-1に示すダムコン諸量演算における障害発生時の対応として作成した「ダムコンダウン時対応Excel」（以下、「本システム」という）について報告する。

3. システム構築の目的

池田総合管理所では管理受託中の柳瀬ダムも含め、表-1に示すいずれの状況においても職種を問わず誰もが対応できるよう各種マニュアルの策定と、水位データ伝送に障害が生じた場合を想定した水位計現地読み取り訓練や機側におけるゲート操作訓練を実施している。また、

ダムの流入量・放流量等の諸量演算を職員が自ら算出できるように訓練を実施している。これらの訓練は、実際の緊急対応時に役立つような内容でなければならない。また、緊急時は限られた人員での対応となることも想定しておく必要がある。このため、ダムコンダウン時において迅速かつ適確に対応することを目的として、職員により本システムの構築を行った。

4. ダム操作中における危機的状況に対する備え

(1) システムの概要

本システムはMicrosoft®Excelを用いたもので、池田ダム、早明浦ダム、新宮ダム及び富郷ダムに加え、管理受託を実施している柳瀬ダムの計5ダムに対応したものとなっており、表-2に示す項目を入力することで、ダム操作に必要な流入量・放流量を計算することができる（図-2）。

本システムの機能として、各種自動計算に加えて、過放流の警告や次回放流増加可能量の表示、ハイドログラフの自動作成（図-3）、目標放流量からゲート開度、目標開度から各ゲートの放流量を算出する計算シート（図-4）など、ダム操作に必要な機能を備えている。

なお、図-2、図-3及び図-4は本システムのイメージ図であり、図-5に示す本システムの操作フローに沿って、着色しているセルに数値を入力することで、他の項目が算出される。

また、放流量算出式は、ゲート形状等によりダム毎に算出式は異なるため、各ダムコン演算に用いられているものと同じ数式・定数を採用している。一方、流入量の算出式は共通のものを採用しており、計算時間毎に求める方法により算出している。下記式に示す計算間隔に相当する貯水位変化に要した時間（T）について、本システムは洪水対応中に利用することを想定しており、対応するダムによって5分または10分を標準としている。

$$Q_{it} = \frac{V[H(t)] - V[H(t-T)]}{T/60} + Q_{ot}(t-T) \quad (1)$$

ここで、 Q_{it} ：正分全流入量（ m^3/s ）、 $V[H(t)]$ ：現流入量算出時の有効貯水量（ m^3 ）、 $V[H(t-T)]$ ：全流入量算出時（T分前）の有効貯水量（ m^3 ）、 $Q_{ot}(t-T)$ ：現流入量算出時からT分前の全放流量（ m^3/s ）、 T ：貯水変化に要した時間（分）とする。

(2) システムの特徴

表-1に示すような複合した障害が生じる状況に陥った場合、ダムコンの諸量演算に対応するため、開度表の確認、流入・放流量算出、クロスチェックと従来の方法では手間を要する。これに対して本システムを用いた場合は、流入・放流量を算出する者とクロスチェックを行う

時刻	ダム水位 EL.m	貯留量 万m3	流入量 m3/s	放流量				放流量警告					オフィスゲート	コンジットゲート	
				オリフィス1門	コンジット2門	発電放流	全放流量	過放流警告	次回の通常ステップ増加可能量	ステップオーバー	一定率放流量	一定率超過			
				m3/s	m3/s	m3/s	m3/s		m3/s						
2022/7/1 13:10	444.34	3426.0	427.15												
				195.63	226.90	4.00	426.53		43.50				458	132	
2022/7/1 13:20	444.36	3428.5	468.20										195.63	226.90	
				195.83	268.21	4.00	468.04		43.50				458	156	
2022/7/1 13:30	444.38	3431.1	511.38										195.83	268.21	
				196.03	303.30	4.00	503.33		43.50		503.79		458	177	
2022/7/1 13:40	444.40	3433.7	546.66										196.03	303.30	
				196.23	314.67	4.00	514.91		43.50		515.55		458	184	
2022/7/1 13:50	444.42	3436.2	556.57										196.23	314.67	
				196.43	317.98	4.00	518.41		43.50		518.86		458	186	
													196.43	317.98	

図-2 ダムコンダウン時対応Excel 入力画面イメージ図

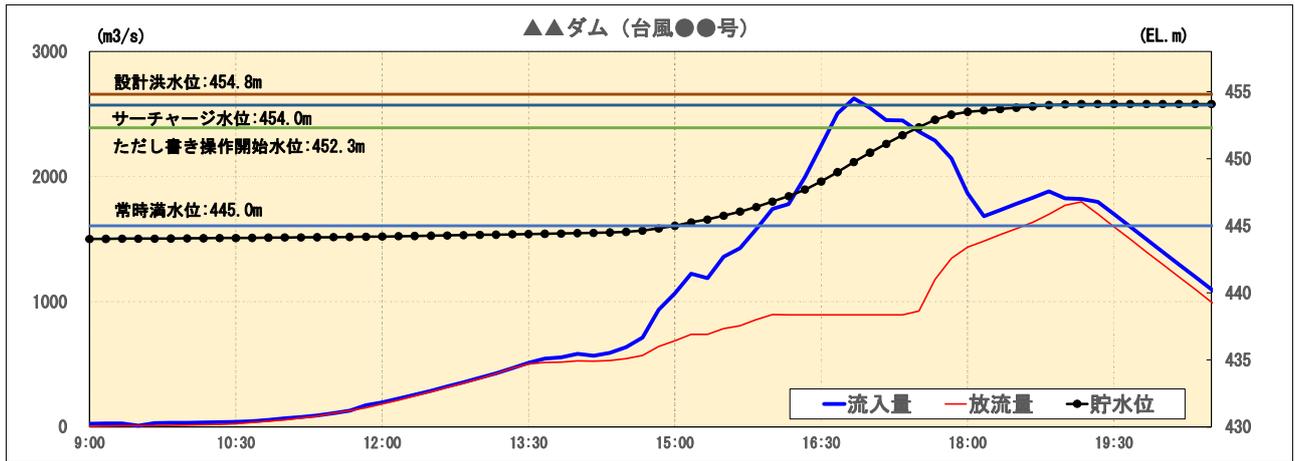


図-3 ダムコンダウン時対応Excel 出力グラフ

【放流量指定】		貯水位	444.34 m																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">オフィス放流量(1門)</th> <th colspan="2">コンジット放流量(2門)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>目標放流量</td> <td>196.00 m3/s</td> <td>目標放流量</td> <td>227.00 m3/s</td> </tr> <tr> <td>ゲート開度</td> <td>458 cm</td> <td>ゲート開度</td> <td>132 cm</td> </tr> <tr> <td>開度上限</td> <td></td> <td>放流量(1門)</td> <td>113.45 m3/s</td> </tr> <tr> <td>放流量(1門)</td> <td>195.63 m3/s</td> <td>放流量(2門)</td> <td>226.90 m3/s</td> </tr> <tr> <td colspan="2">放流量合計</td> <td colspan="2">422.53 m3/s</td> </tr> </tbody> </table>				オフィス放流量(1門)		コンジット放流量(2門)		目標放流量	196.00 m3/s	目標放流量	227.00 m3/s	ゲート開度	458 cm	ゲート開度	132 cm	開度上限		放流量(1門)	113.45 m3/s	放流量(1門)	195.63 m3/s	放流量(2門)	226.90 m3/s	放流量合計		422.53 m3/s	
オフィス放流量(1門)		コンジット放流量(2門)																									
目標放流量	196.00 m3/s	目標放流量	227.00 m3/s																								
ゲート開度	458 cm	ゲート開度	132 cm																								
開度上限		放流量(1門)	113.45 m3/s																								
放流量(1門)	195.63 m3/s	放流量(2門)	226.90 m3/s																								
放流量合計		422.53 m3/s																									
【開度指定】		貯水位	444.34 m																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">オフィス放流量(1門)</th> <th colspan="2">コンジット放流量(2門)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ゲート開度</td> <td>458 cm</td> <td>ゲート開度</td> <td>132 cm</td> </tr> <tr> <td>開度上限</td> <td></td> <td>放流量(1門)</td> <td>113.45 m3/s</td> </tr> <tr> <td>放流量(1門)</td> <td>195.63 m3/s</td> <td>放流量(2門)</td> <td>226.90 m3/s</td> </tr> <tr> <td colspan="2">放流量合計</td> <td colspan="2">422.53 m3/s</td> </tr> </tbody> </table>				オフィス放流量(1門)		コンジット放流量(2門)		ゲート開度	458 cm	ゲート開度	132 cm	開度上限		放流量(1門)	113.45 m3/s	放流量(1門)	195.63 m3/s	放流量(2門)	226.90 m3/s	放流量合計		422.53 m3/s					
オフィス放流量(1門)		コンジット放流量(2門)																									
ゲート開度	458 cm	ゲート開度	132 cm																								
開度上限		放流量(1門)	113.45 m3/s																								
放流量(1門)	195.63 m3/s	放流量(2門)	226.90 m3/s																								
放流量合計		422.53 m3/s																									

図-4 ダムコンダウン時対応Excel 目標開度設定シート

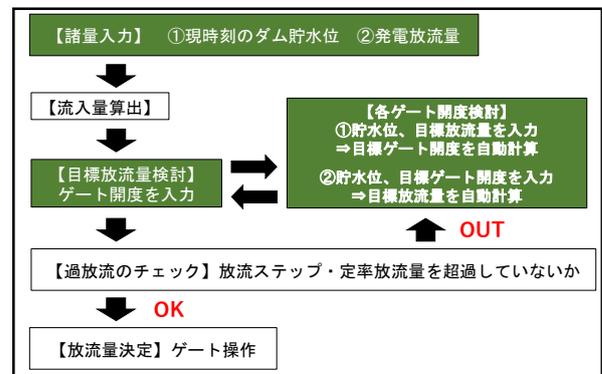


図-5 ダムコンダウン時対応Excel 操作フロー

者のみで対応が可能となるうえに、本システムは計算毎にエラーチェックを行うため、緊迫した状況下においても初歩的な計算ミスを防ぎ、洪水対応時にあってはならない誤操作を行うこともない。このことは、池田ダム及び新宮ダムのような、一般的なダムの操作間隔である10分に対して5分と短い場合は、計算に時間がかかることがダム操作の遅れに繋がるため、より迅速かつ的確な操作が求められることから、洪水対応においては特に重要なことである。

また、本システムの動作に必要な情報はMicrosoft®Excelシート内に保存されており、運用環境にネットワークを必要としない。このため、Microsoft®Excelを利用することができる機器であれば媒体を問わず、ノートPCやタブレットPCといった充電式バッテリー内蔵の端末に本システムを保存しておくことにより、ダムコンの障害に加え、電力供給が不安定な状況においても継続して操作支援が可能となる。

このほかに、本システムを使用した期間のデータは保

表-3 ダムコンダウン時対応 Excel 構成データ

項目	内容
流入量	式1参照
ダム放流量演算式	計算式及び定数はダムコンに導入されているもの
H-Vテーブル	ダムコンと同じテーブル
開度表	ダムコンと同じテーブル
洪水調節における定率計算式	施設管理規定に基づく
放流量ステップ表	施設管理規定細則／急激放流実施要領に基づく
その他	施設管理規定に定められた各諸量

存できることから、障害が発生している期間の管理記録資料としての役割も果たすことができる。さらに、不要な情報を非表示にする等、体裁を整えることでダムコンが出力する管理日報と同等のものを作成することも可能である。

(3) 他ダムへの適応

本システムの構成は表-3のとおり、ダム貯水池のH-Vテーブルやゲート開度表といった各ダムが所有しているデータを用いて作成しているため、同様のデータを差し替えることで池田総合管理所以外のダムにも容易に適用することが可能である。各ダム管理所において、それぞれの異常時対応用マニュアルや対応方針が構築されているなか、限られた人員の中で多様な操作も行わなければならないなど、本システムを活用することで少しでも合理化を図ることは、危機的状況に対する備えとして重要であると考えられる。

(4) 本システムの訓練方法

前述のとおり、危機的状況に対する備えとして作成した本システムを使用することは、ダムコンダウン時において有効であることから、池田総合管理所では、本システムを用いて、ダムコンダウン時の対応訓練を日頃から行っている。

訓練は、以下のような流れで実施している。

- ①講師役の職員が10分毎のダム貯水位を読み上げ、訓練参加者は各自が持参したノートPCに値を入力し、流入量を算出する。
- ②算出された流入量に対する適切な放流量を設定し、ゲート開度を決定する。
- ③流入量の立ち上がり、洪水調節操作、ただし書き操作、流入量の低減時といったダム操作段階毎に①

②を繰り返し行う。

以上の訓練は、実際のダムコンダウン時の対応を模して行っており、誰もがダムコンダウン時に適切な対応を速やかに行えるよう繰り返し実施している。さらに、訓練により洪水時の対応における職員の基礎知識の向上や対応技術の伝承にも期待できる。

5. 今後の課題

日々の訓練や対応要領の策定、システムの作成などソフト面における対策を講じているが、実際の洪水対応中の障害対応となると人員が不足するおそれがある。池田総合管理所では、新たに管理業務を受託した柳瀬ダムを含めた全ての管理ダムへ応援要員を派遣できるよう体制を構築している。

また、洪水対応中、管理ダム全てとWEB会議を常時接続し、横方向へのリアルタイムの情報共有による、正確な情報伝達や伝達時間の短縮なども行っている。

このように、ソフト面などの整備を十分に行うことで、あらゆる状況においても的確なダム操作を誰もが行える態勢を整えることが重要であり、同時に今後の課題と考える。このため、池田総合管理所では、本システムを用いたダムコンダウン時の訓練を繰り返し実施し、職員のスキルアップを行うとともに、表-1に示すレベル3を想定した総合訓練などを実施していきたいと考えている。

6. まとめ

池田総合管理所では、職種を問わず職員が障害対応ができるよう訓練の実施・要領の策定、また本システムを用いた独自の訓練を実施して危機的状況に備えている。

本稿にて紹介した「ダムコンダウン時対応 Excel」は他ダムにも容易に適用することが可能であり、ダム管理技術向上の一助になると考える。

そして、今後もダム管理者として、万が一を想定した状況においても対応できる態勢を引き続き築いていくとともに、誰もが適確なダム操作を行える管理所を目指す。

参考文献

- 1) 富崎ら, 雷被害時のゲート放流について, 第10回九州ブロック技術研究発表会(平成19年)

真名川ダム主放水ゲート設備 油圧シリンダー更新について

原 裕貴¹・宮川 昌樹²

¹近畿地方整備局 九頭竜川ダム統合管理事務所 真名川ダム管理支所
(〒912-0423 福井県大野市下若生子25字水谷1-36)

²近畿地方整備局 九頭竜川ダム統合管理事務所 管理課 (〒912-0021 福井県大野市中野29-28)

令和3・4年度にかけ、真名川ダムにおいて主放水ゲート設備油圧シリンダーの経年劣化に伴う更新を行った。アーチ式コンクリートダムの構造上、油圧シリンダーの搬出入は非常に困難な施工である。今回の工事では安全対策は当然のこと、出水期間や積雪といった制約を考慮した効率的な施工が必要であった。今回、安全で効率的な施工が出来たため、これから更新時期を迎える他のダムの参考になると考え、紹介する。

キーワード 施工, 維持管理, 安全対策, ダムゲート油圧, シリンダー

1. はじめに

真名川ダム主放水ゲート設備は、大型の油圧シリンダー一式の高圧ローラゲートである。当該設備を更新するにあたっては、真名川ダムが不等厚アーチ式コンクリートダムであること、所在地が豪雪地帯であることなど、様々な制約があり、安全で効率的な施工計画の立案に苦労した。

なお、真名川ダム及び更新対象である主放水ゲート設備油圧シリンダーの諸元は表-1及び表-2のとおりである。外観及び立面図については図-1及び図-2に示す。

表-1 真名川ダムの諸元

河川名	九頭竜川水系真名川
所在地	福井県大野市下若生子
形式	不等厚アーチ式コンクリートダム
竣工	昭和52年10月
堤高	127.5 m
堤頂幅	6.0 m
堤頂高	EL387.5m
上段キャットウォーク高	EL350.0m
主ゲート操作室床面高	EL331.0m

表-2 主放水ゲート設備油圧シリンダーの諸元

型式	揺動直結式1本吊り
油圧シリンダー内径	507 mm
ピストンロッド外径	320 mm
長さストローク	5,269 mm
最大揚程	5 m
最大開閉荷重	1,274 KN



図-1 真名川ダム全体写真



図-2 主放水ゲート設備近景写真

2. 油圧シリンダー更新における課題

真名川ダムにおいて主放水ゲート設備の油圧シリンダーを更新するにあたり、以下の課題があった。

(1) 重機使用の制約

油圧シリンダーなどの重量物を効率的に搬出入するためには、ラフテレーンクレーン等の重機の利用が不可欠である。しかし、真名川ダムは不等厚アーチ式コンクリートダムであるため、油圧シリンダーが据え付けられているダム中央部へ近づくほどダム堤体が下流側へ傾斜している。そのため、ダム堤頂から重機のみで油圧シリンダーの搬出入を行うことは不可能であった。また、ダム下流側へ進入路を造成しクレーン構台を設ける案も考えられたが、道路整備と大規模な足場整備が必要となるため、工期・費用ともに現実的ではなかった。



図3 ダム堤体の傾斜

(2) 施工時期の制約

既存の足場はキャットウォークのみであり、施工においては主放水ゲート設備周辺での足場組立・解体作業が伴う。工事時期を検討した結果、春先は融雪出水があるためゲートを利用することが多く、施工時期として望ましくない。よって、出水期明けから積雪が始まるまでという約2ヶ月間で油圧シリンダーの搬出入と足場組立・解体、屋根の解体・復旧を実施する必要があった。



図4 冬期の真名川ダム

3. 施工方法検討

前章で上がった重機使用及び施工時期の制約を解決すべく、施工方法の検討を行った。

(1) 油圧シリンダー搬出入方法

前章で述べたとおり、真名川ダムにおいては、ラフテレーンクレーンのみで油圧シリンダー搬出入を行うことは不可能である。しかし、ダム堤体の傾斜は左右岸側へ近づくにつれ緩やかになることから、油圧シリンダーを水平移動させることが出来ればラフテレーンクレーンで搬出入することは可能である。直近の施工事例である天ヶ瀬ダムにおいては、ホイストレールをダム堤体へ取付け、油圧シリンダーの搬出入に活用しており、当ダムでも適用可能か検討を行った。

(2) 油圧シリンダー搬出入工法の比較

ホイストレールを活用して油圧シリンダーを搬出入するにあたり、足場形状に加え、ホイストレール形状によって作業量や作業効率が大きく変わることが想定された。そのため、図-5に示す3つの案を検討した。それぞれの案のメリット・デメリットを示す。

a) キャットウォーク撤去+簡素な足場

油圧シリンダーを水平姿勢にしてキャットウォーク上を水平移動させることで、ホイストレール支持材のダム堤体からの張り出し長を短くでき、鋼材の費用を抑えることができる。しかし、キャットウォークの取り外しが必要となる手法であることから、施工中は開口部が生じるため安全性が劣る。また、ホイストレールの延長によっては、油圧シリンダーの反転作業において不安定な足場上から斜めに引っ張る必要があり、人力では施工できず、電気チェーンブロックが必要となる。

b) キャットウォーク撤去+作業構台

前項であった油圧シリンダーの反転作業を不安定な足場上で行う必要があるという課題を解決したのが当案である。操作室上部に作業構台を設けることで、油圧シリンダーの反転作業をより安全に行える。しかし、作業構台の設置・撤去作業が安全な足場等が無い中で実施する必要がある点、作業構台の製作費用がかかる点など、デメリットも大きい。

c) キャットウォーク活用

他案においてデメリットが生じた根本的な原因である油圧シリンダーの反転作業が不用となるよう、ホイストレール支持材のダム堤体からの張り出し長を長くとしたのが当案である。この案のメリットは、キャットウォークの撤去・復旧作業が不要となる点である。開口部のない足場上で作業できるため、安全性は申し分ない。ホイストレールの鋼材費用は増加するものの、全体として作業量を大きく減らせることから、工期面でのメリットが大きいという点が決め手となり、当案を採用した。

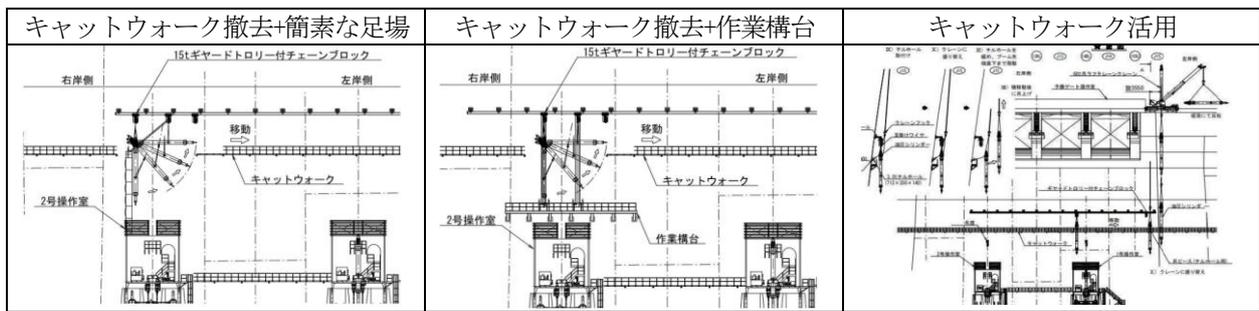


図-5 油圧シリンダー搬出入工法比較

(3) 屋根復旧方法

油圧シリンダーの搬出入に際して、操作室の屋根を解体する必要があり、油圧シリンダー更新が完了後に復旧する必要があった。しかしながら、屋内側から完全に復旧させることは困難なため、屋外に足場を設けて作業をする必要がある。真名川ダムにおいては、ゲート塗装工事等で活用している張り出し足場を保有していたため、これを活用して安全な足場をゲート下部から立ち上げることにした。

全部ではなく一部解体としたのは、つららの落下や落雪による機材損傷のリスクを少しでも低減させるためである。室外の足場組立にあたっては、過去のゲート塗装工事で製作した張り出し足場を活用した。後述する屋根復旧に活用する足場を先行して組み立て、その足場を拡張する形で油圧シリンダー搬出入時に利用する足場を組み立てた。

4. 実際の施工状況

(1) ホイストレール取付け

まず初めに、ダム堤体へのホイストレール取付けを行った。取付けにあたっては、既設キャットウォーク上に足場を組み、ラフテレーンクレーンで吊り下げたホイストレールを引き寄せる形で部材搬入を行い、取付けを行っている。ホイストレールの取付け場所が、主放水ゲート設備が据え付けられている箇所と比べるとダム上部に位置していることから、吊り荷の引き寄せが可能であった。なお、放流に支障がないため、出水中に施工した。



図-7 張り出し足場の活用状況



図-6 ホイストレール取付け状況

(2) 足場組立、屋根の一部解体

油圧シリンダー搬出入に向け、ゲート室内及び室外の足場組立、屋根の一部解体作業を行った。なお、屋根を

(3) 油圧シリンダー搬出入

油圧シリンダーを搬出するにあたり、シリンダー上部の屋根解体および、キャットウォーク直下のダム堤体へ吊環を設置した。屋根を全解体しなかった理由としては、降雨・積雪に備えた養生箇所を最低限とし、ゲート室内への水滴等の侵入を防ぐためである。

なお、油圧シリンダーの据付箇所からホイストレールまでの吊り上げ及び吊り下げは手動チェーンブロックで行った。これは、電気チェーンブロックは電源ケーブルの敷設及び撤去に時間を要すること、施工後にはチェーンブロックを撤去する計画であったことから、施工に要するトータルの期間を比較した結果である。

油圧シリンダーの水平移動、ラフテレーンクレーンでの搬入・搬出については、計画通りスムーズに行え、計4日間で実施することができた。

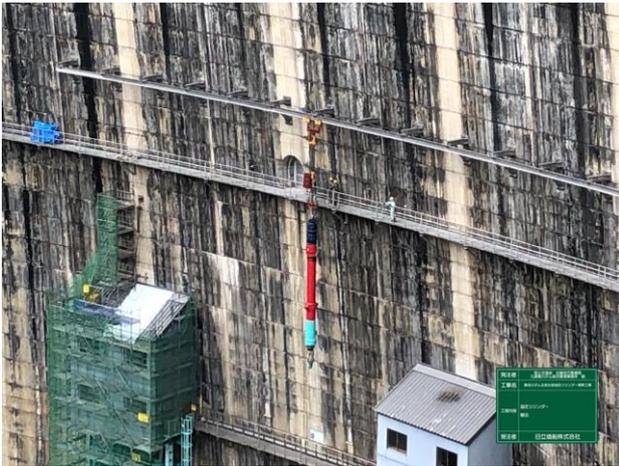


図-8 油圧シリンダーの水平移動



図-10 積雪開始直後の足場解体作業

(4) 屋根復旧

屋根復旧にあたっては、撤去が済んでいない箇所の屋根を撤去した後に全面復旧を行った。作業の際は、降雨・積雪がある場合に備えて養生を行うが、気温や天候によってはつららの落下や落雪の可能性があった。今回の工事では、本格的な積雪開始直前に作業を終えることができたため、つららの落下や落雪が起こる前に施工を完了させることができた。なお、屋根材の搬入・搬出については、クレーンでの搬入・搬出が可能な左岸側のB1ギャラリーを利用し、ダム堤体内の監査廊経由で行った。



図-9 屋根復旧作業

(5) 足場解体

足場解体までは天候に恵まれたものの、張り出し足場撤去中に積雪が始まり、除雪が若干必要であった。ただ、懸念されていた積雪に伴う人力での除雪作業が本格的に必要となる直前で作業を終えることができたため、幸いにも作業期間の大幅な遅延は発生しなかった。

5. 終わりに ～課題と提言～

今回の真名川ダムにおける油圧シリンダー更新で明らかになった、アーチ式ダムや積雪地帯にあるダム特有の課題とその対策方針について整理を行った。今回の事例が既存のアーチ式ダムや建設予定のダムにおいて各種設計の一助になることを期待したい。

(1) 新規のアーチ式ダムにおける対応

真名川ダムにおいては、建設当時にはなかったホイストレール、吊環、ゲート直下の張り出し足場といった維持管理に必要な設備の製作、据付を行っている。土木構造物に比べると機械設備の寿命は短いことが起因となっており、維持・修繕のためにこうした設備が必要となった。ダム建設当初に将来発生しうる設備の更新工事を考慮した設計を盛り込むことができれば、将来発生する機械設備更新がより円滑に行える。ダム工事完了後の周辺の道路状況等も考慮し、ダム本体に事前に取り付けておくべき設備の検討を行うことが、機械設備の円滑な修繕・更新に繋がる。

(2) 既存のダムにおける対応

既存のダムにおいては、周辺の道路状況等によっては、ダム下流側に足場を組み立てて施工することが難しいため、今回活用したホイストレールや吊環、張り出し足場といった附属設備を製作、据付する必要がある。この場合、他の維持修繕でも利用可能な構造とすることで、トータルコストの削減を行うことができるため、維持修繕の対象設備だけでなく、他の維持修繕時に必要な設備についても合わせて検討しておくべきである。

(3) 積雪の影響を考慮した施工方法及び工程

積雪地帯にあるダムの機械設備更新においては、作業箇所機械による除雪ができない箇所があること、つら

らの落下や落雪による設備損傷や被災のリスクがあることから、冬期の施工は好ましくない。屋外作業や屋根の解体・復旧作業を伴う設備更新については、可能な限り積雪時期を避けることのできる施工方法及び施工計画を立てるべきである。

(4) チェーンブロックの選定

今回の施工においては、電動チェーンブロックの検討も行ったが、高揚程に応じた製品を特別に作る必要があること、電源等現地の設置条件を検討した結果、手動チェーンブロックを採用することとした。

また、電気チェーンブロックを採用する場合は、クレーンとしての取り扱いとなるため、電源、許認可、工程、費用対効果等を総合的に検討した上で判断する必要がある。

参考文献

- 1) 油圧シリンダー更新仮設概略設計業務 報告書 平成31年2月
株式会社建設技術研究所
- 2) 真名川ダム主放水設備油圧シリンダー更新工事 完成図書 令和5年3月 日立造船株式会社