

交差点における交通事故対策と効果検証について

太田 奈津江¹、本宮 有剛²

近畿地方整備局 兵庫国道事務所 管理第二課 (〒650-0042 兵庫県神戸市中央区波止場町3番11号)¹
近畿地方整備局 兵庫国道事務所 計画課 (〒650-0042 兵庫県神戸市中央区波止場町3番11号)²

国道2号春日野交差点は、10車線の国道と7車線の神戸市道が交差する大規模な3差路の信号交差点であり、交通事故(人身事故)が多発している状況であった。

本取組ではこの状況を改善するため、ビデオ調査等による現地状況の確認を行うことで、急な車線変更や減速への対応の遅れがその事故要因となっていることを明らかにした。また、その要因となる行動改善を促す効果的な対策を検討・実施するとともに、それらの行動変化及びドライバーへのアンケート調査から対策効果を検証することができた。

本論文では、効果的な交通安全対策を実施するまでのプロセスと、更なる展開を見込んだ効果検証について紹介するものである。

キーワード 交通事故対策, 交差点改良, カラー舗装化

1.はじめに

国道2号春日野交差点は、過去より交通事故が多発しており、平成22年度には『事故ゼロプラン(事故危険区間重点解消作戦)』での対策箇所のひとつとして抽出された。その後、平成24年度に「兵庫県道路交通環境安全推進連絡会議」において、交差道路管理者の神戸市及び公安委員会、兵庫県、学識経験者と現地検討会等を実施し、現状確認・対策の方針を決定した後、平成27年度に事故防止対策工事を実施した。

当交差点で発生している交通事故(H21-H24)には以下の特徴がみられる(図-1, 図-2)。

- ・追突事故の割合が最も高く全体の6割を占めており、次いで出会い頭事故が全体の14%である。
- ・追突事故は国道2号下り線の第1～3車線で多発しており、交差点直近から150m手前まで広く分布している。
- ・出会い頭事故は国道下り線を走行する車両と市道からの流入車との間で多く発生している。

2. 春日野交差点の状況

(1) 交差点概要

国道2号は、大阪府大阪市を起点とし、兵庫県尼崎市、西宮市、芦屋市、神戸市等を経て、福岡県北九州市に至る延長約681kmの主要幹線道路である。

神戸市中央区に存する国道2号の春日野交差点は、10車線の国道2号と7車線の神戸市道が斜めに交差する大規模かつ変則な交差点であり、主に国道2号の下り線で交通事故が多発している状況であった。

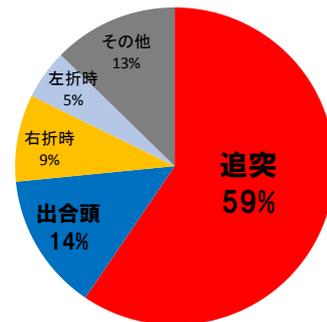


図-1 春日野交差点の事故類型 (H21-H24)

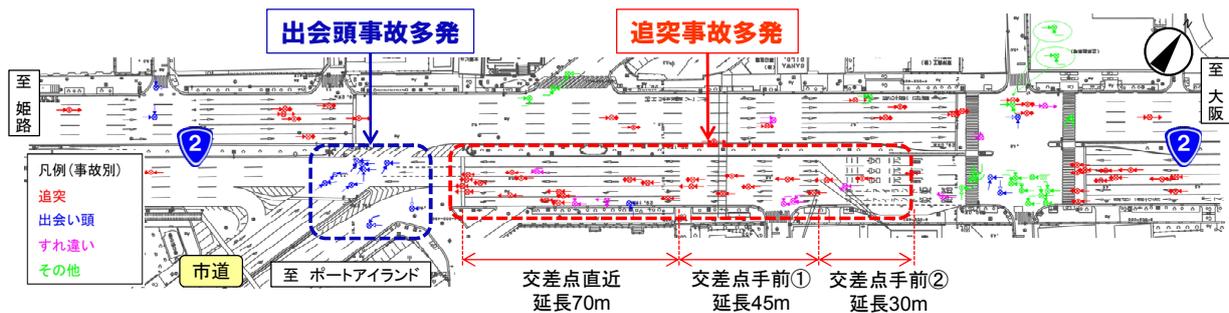


図-2 春日野交差点の事故状況 (H21-H24)

3. 交通事故要因の分析

(1) 現地視察による現状確認

交通事故の特徴を踏まえ、学識経験者、公安委員会、道路管理者による現地検証のうえ、国道2号下り線で発生している交通事故の要因を分析し、以下の要因が交通事故を誘発していると想定した。

- ① 当該交差点付近の国道2号は長い直線区間が続いており、車両速度が上がりやすい。
- ② 国道2号の下り線では進路が分岐（第1・2走行車線が左折レーン、第3～5走行車線が直進レーン）するため、無理な車線変更を行い急減速が発生する。
- ③ 交差点が広大であるため、走行位置が分かりづらい。

(2) 挙動調査による現況確認

さらに追突事故の要因を詳細に把握するため、ビデオ撮影による挙動調査を実施した。ビデオ撮影にあたっては現地視察で想定した事故要因を分析できるよう観測項目を設定し、カメラの台数やアングル等を決定した。また、考察を行ううえで下記のとおり3つの区間に分類した（図-2、表-1）。

交差点直近：停止線から70m（車線変更禁止区間）

交差点手前①：停止線から70m～115mの区間

交差点手前②：停止線から115m～145mの区間

表-1 観測項目

要因	観測項目
①	a. 車両の走行速度
②, ③	b. 車線変更台数及び位置
②, ③	c. 車線変更車両の後続車両が減速する割合
その他	信号無視車両台数、ウインカーの有無、乱横断者数 等

ビデオ調査は平成24年12月20日（木）7時～10時（朝）、22時～25時（夜）に、ビデオ7台により7アングル撮影した。以下に調査結果のうち、本交差点の特徴が現れた項目について記載する。

a) 車両の走行速度

平均速度は直進車線で50.6km/h、左折車線で43.8km/hであり、直進車線においては規制速度（50km/h）超過が約5割と高速走行車両の存在が確認できた（図-3）。

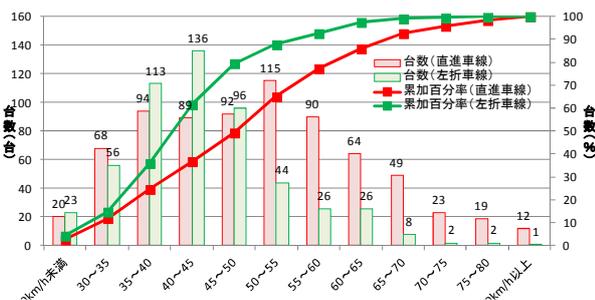


図-3 車両の走行速度

b) 車線変更台数及び位置

車線変更台数は左折車線から左折車線の移動（第1車線と第2車線間の移動）が最も多く、無駄な車線変更が発生していることが判明した。また、区画線により車線変更が禁止されている交差点直近の区間での車線変更も確認された（図-4）。

この原因は、本来、直進車線とは独立に付加して設置すべき左折車線がそのような構造になっておらず、進行方向が分かりにくいこと、また、進行方向に気づいても交通量が多くスムーズな車線変更が困難であるためと考えられる。

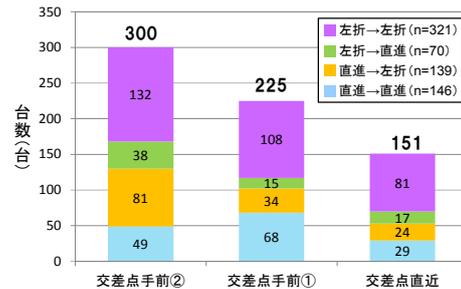


図-4 車線変更台数及び位置

c) 車線変更車両の後続車両が減速する割合

車線変更した車両の後続車両が減速する割合は、交差点手前①区間で最も高く、また、直進車線と左折車線間の車線変更時に高い割合であった（図-5）。

この原因は、高速走行している直進車両の前後で無理な車線変更によるものであり、信号による減速が少ない交差点手前①区間でその影響を強く受けていると考えられる。

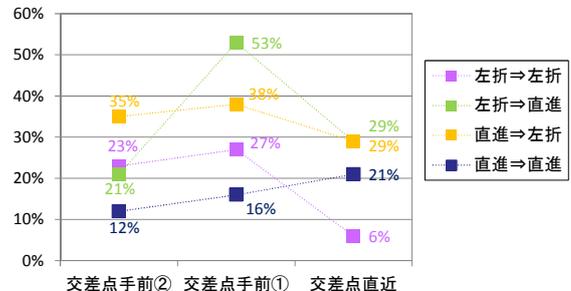


図-5 車線変更車両の後続車両が減速する割合

以上の結果のとおり、現地視察で想定した事故要因が引き起こしたと思われる危険挙動が各項目で確認できた。

(3) 交通事故の要因分析

現場視察および挙動調査の結果を踏まえ、事故類型で最も発生数が多い追突事故について交通事故の要因分析を実施した。①道路環境・交通環境が交通事故当事者（運転手）へどのような影響を与え、②当事者がどのような意識・判断をし、③当事者がどのような行動を取るか、それぞれの相関を想定した「バリエーションツリー」を以下のとおり作成した（図-6）。

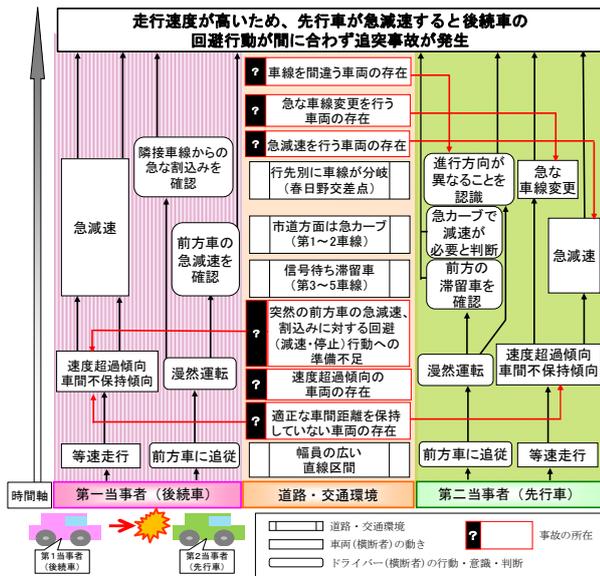


図-6 バリエーションツリー

追突事故の要因を分析したバリエーションツリーで下記のとおり判断した。

広幅員の直線区間を走る車両は漫然運転となり、速度超過や車間距離を十分に空けずに走行することになる。それに加え、複雑な交差点形状であることにより前方の滞留車や急カーブへの認知が遅れ急減速を行ったり、急な車線変更を行うことになる(先行車)。一方、後続車も漫然運転となっていることから、急減速・急な車線変更をした先行車への認知が遅れ回避行動が間に合わず追突事故が発生すると判断した。

出会い頭事故は、国道2号を西進する車両の信号無視が原因であり、長い直線区間と高い走行速度による漫然運転が要因であると判断した。

今回、追突事故をターゲットとした対策を行い、対策の効果検証を行った。

4. 交通事故対策の検討と実施

(1) 交通事故対策の検討・実施

これまでに検討を行った交通事故要因を解消すべく事故対策案の検討を行った(図-7)。

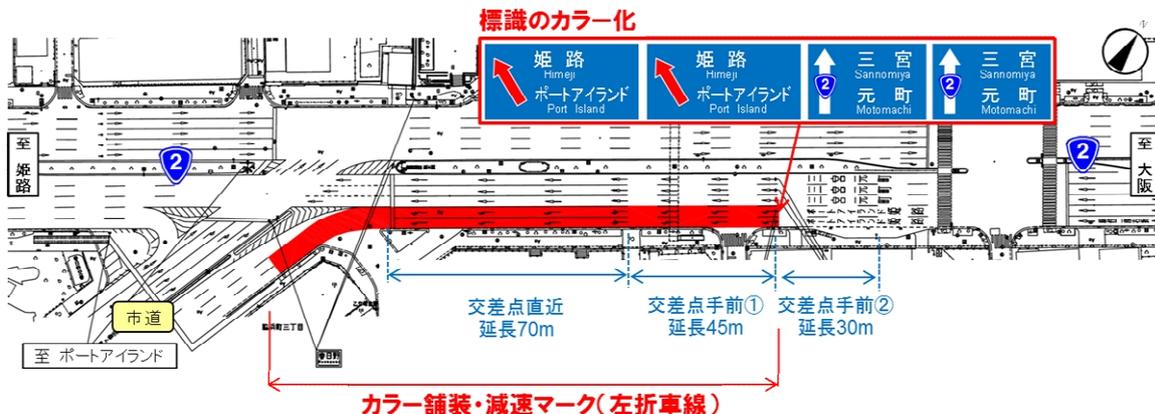


図-7 春日野交差点の対策図

① 迷走対策

本交差点は第1・2車線が左折専用レーン、第3～5車線が直進レーンであり、進行方向を明確にするため既に標識や路面標示による案内をしているが、迷走が生じている状況である。更に運転者が進行方向を把握できるよう、左折車線(ポートアイランド行き)をベンガラ色に着色し、合わせて案内標識も着色することで進行方向を分かりやすくする対策とした。

② 速度超過対策

幹線道路における速度超過対策には一般的に、信号機・信号現時の改良や路面標示・標識による注意喚起、滑り止め舗装等の改良がある。

本交差点は車線数が多く路傍への標識設置では全車線から視認することが困難であることから、車道を狭く見えるように路面標示(減速マーク)を設置するとともに、減速時の制動を向上させるよう舗装の改良(樹脂系滑り止め舗装)を行うこととした。

幹線道路でのカラー舗装化は兵庫県内では、初めて行う対策であり、警察と協議を重ね、車線変更車両が多い左折車線車両の春日野交差点から手前の交差点間をカラー舗装化することにした。

また、カラー舗装化により車線変更車両が減少すれば、直進車線における追突事故も解消されると想定し、路面標示(減速マーク)については急カーブがある左折車線のみに設置することにした。

表-2 対策内容

追突事故	広い直線区間であるため漫然運転になり、速度超過になりやすい	路面標示(ドットライン)の設置	ドットラインの設置により減速を促し、前方車両が減速した場合でも衝突を回避できるようにする
		塗装改良(滑り止め舗装)	タイヤの滑りを抑制し、車両の制動をしやすくして危険時に衝突を回避しやすくする
	車線数の多い区間で進路が分岐するため、進行方向をまちがえた車が急な車線変更を行う	カラー舗装化(進行方向明示)	左折専用レーンにカラー舗装を行うことで進行方向をわかりやすくし、急な車線変更を行う迷走を防止する

5. 対策後の効果検証

効果検証では、交通挙動の変化と利用者意識の変化の2つの観点から検証を行った。交通挙動の変化についてはビデオ観測、利用者意識の変化についてはWEBによる本交差点利用者へのアンケート調査を実施した。

(1) 挙動調査

① 調査概要

挙動調査は、平成27年10月22日(木)7時~10時(朝)、22時~25時(夜)に事前に実施したビデオ観測と同一の角度で撮影し、対策前後での交通挙動の変化を分析した。

② 調査結果

a) 平均速度

平均速度は、直進車線で44.5km/hであり整備前と比較し6.1km/h速度が減少した。一方左折車線は48.8km/hであり整備前と比較し、5.0km/h上昇する結果となった(図-8)。

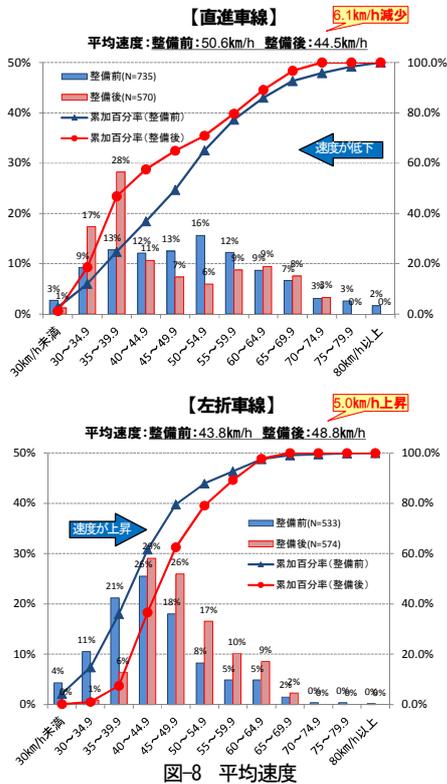


図-8 平均速度

b) 車線変更台数及び位置

車線変更台数は、左折車線から直進車線、左折車線から左折車線への交差点直近での減少が確認できた。特に、事前調査で車線変更割合が最も多かった左折車線から左折車線への移動が約4割減少しており、車線変更を行う車両全体は676台→458台と約3割減少した(図-9)。

車線変更位置の割合は、カラー舗装が始まる交差点手前①での車線変更が増加し、車線変更が禁止されている交差点直近での車線変更は減少している(図-10)。



図-9 車線変更台数

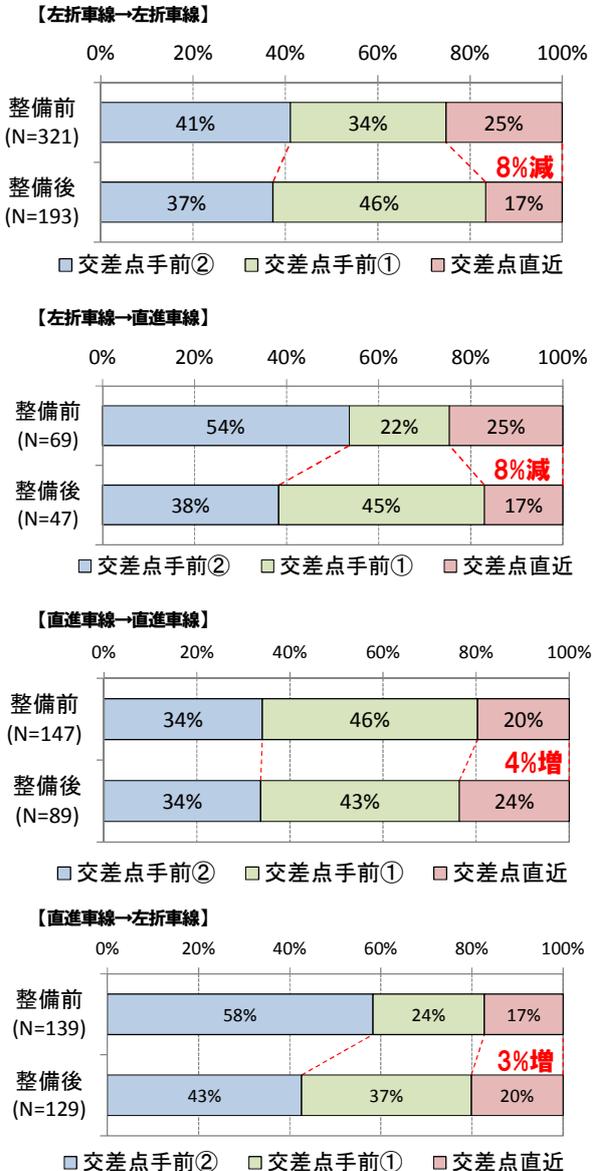


図-10 車線変更位置

c) 車線変更車両の後続車両が減速する割合

車線変更車両の後続車両が減少する割合は、各計測位置で減少した。特に、事前調査で減速割合が最も多かった交差点手前①の区間においても大幅な減速が確認できた(図-11)。

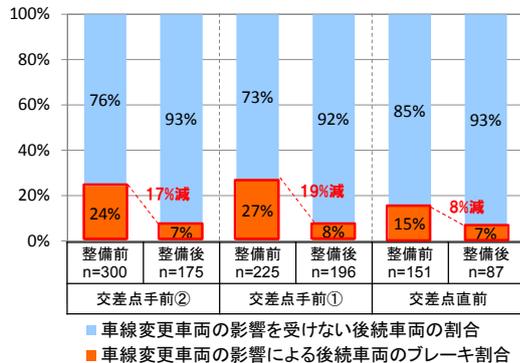


図-11 車線変更車両の後続車両が減速する割合

(2) アンケート調査

① アンケート調査概要

交通事故対策による効果や課題を把握するため、本交差点利用者に対するアンケート調査を実施した。アンケートの概要を以下に示す(表-3)。

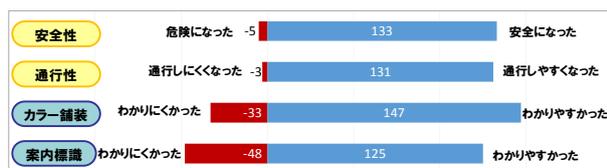
表-3 利用者アンケート調査概要

調査方法	WEB アンケート
調査対象	神戸市在住かつ国道2号春日野交差点利用者かつ自動車運転者
サンプル数	100 サンプル
調査時期	平成27年12月19日~21日
質問概要	安全性、通行性の変化に関する質問 総合的な観点から対策効果の正負評価を行うために、「安全になった/危険になった」「通行しやすくなった/通行しにくくなった」等-5点から+5点の11段階(0点を含む)で点数付けできる質問とした。

② アンケート調査結果

「安全性」「通行性」とともにプラスの回答が多い結果となったが、対策のわかりやすさに関しては、「カラー舗装」、「案内標識のカラー化」でマイナス評価も目立つ結果となった(図-12)。

自由意見では、「赤色の舗装と案内標識により、左折車線であることが事前に分かりやすくなった」という意見が多く挙げられた。一方で、マイナスの意見としては「対策に気づかない」との回答が多い。



※-5点から+5点の11段階(0点を含む)に重み付けされた回答と回答数とを乗じて得点化し、集計した。●:全体評価 ○:個別評価

図-12 アンケート結果

(3) 対策後の効果検証結果

1) 挙動調査

対策前後の交通挙動の変化に着目し、効果検証を実施した結果、①迷走対策、②速度超過対策の効果が以下のとおり確認された。

① 迷走対策 (カラー舗装・案内標識のカラー化)

左折車線にカラー舗装を行うことで進行方向が明確化され、交差点直前で無理な車線変更をする車両が減少した。さらに、車線変更車両の後続車両が減速する割合が低下したことから、追突事故に起因する危険挙動が減少したと推察される。

② 速度超過対策 (減速路面標示・舗装改良)

減速路面標示の設置・舗装改良を行ったが、カラー舗装化等、他の対策を実施したことにより単純比較はできなかった。ただし対策前より左折車線の走行速度が上がっているため、経過を観察し、必要に応じて追加対策を検討することが考えられる。

2) アンケート調査

アンケート調査においても対策効果を認める意見が多く挙げられており、追突対策への一定の効果が認められた。

6. まとめと課題

挙動調査と現地視察により箇所固有の課題である事故要因を特定し、要因に対応した早期に実施可能な対策を講じ、効果検証を行った。

本対策を行うことにより、追突事故の要因と考えられる交差点直近での車線変更の減少を確認することができた。本対策の効果検証より、カラー舗装は車線変更に起因する追突事故の対策として一定の効果が期待できる対策と考えられる。

一方で、カラー舗装が始まる交差点手前①で車線変更をする車両の割合が増加しており、アンケート結果ではカラー舗装に気づかないといった意見もあった。これらの課題については、今後継続してモニタリングを行い、必要に応じて追加対策を検討したい。

今回はビデオ調査等による効果検証を行ったが、対策から期間が経過していないことより、事故データが蓄積しておらず、交通挙動と事故発生との因果関係について統計的な分析は行っていない。

今後継続的にモニタリングを行い、長期的な時系列の中で効果検証を行っていくことも必要と考える。

速効的な渋滞対策案の検討について

西田 拓二¹・今城 由貴²

¹近畿地方整備局 道路部 道路管理課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

²近畿地方整備局 京都国道事務所 (〒600-8234京都府京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動町808)

奈良県内の国道24号奈良市域、橿原市域では慢性的な混雑状況を呈しており、早急に渋滞対策を実施することが喫緊の課題であった。対策の早期実施を念頭に、時間・コストのかかる用地取得を行わず、既存の道路幅員の中で効果的な対策案を立案することにポイントを置き、「①現況調査の実施」「②渋滞要因の分析」「③効果的な速効対策案の検討」「④対策効果の検討」「⑤関係機関との協議、合意形成」のステップに沿って検討を実施した。その結果、速効対策案について関係機関との合意の上、早期の実現に向けて推進していくこととなった。

キーワード 渋滞 速効対策 合意形成

1. はじめに

国道24号は京都市を起点とし、奈良県奈良市、橿原市等を経由して和歌山市に至る一般国道で、奈良県北部平野部における南北方向の主要幹線道路として機能している。当道路は地域の骨格として重要な役割を担う一方で、並行する幹線道路網が十分ではなく、多くの交通が集中し混雑が常態化した状況となっている。

このような状況に対し、国道24号では高規格幹線道路である京奈和自動車道が整備中であり、2017年3月には和歌山県側で阪和自動車道に接続、奈良県側では2017年8月に御所南IC～五條北IC間が開通しており、全体の約3分の2の区間が開通したところである。ただ、奈良市域(大和北道路)や橿原市域(大和御所道路の橿原北IC～橿原高田IC間)については事業が進められているが、整備にはまだ時間を要するものと見込まれる(図-1)。

H27(2015)道路交通センサスによる国道24号の交通量を図-2に示す。奈良市域の観測地点(柏木町交差点付近)の24時間交通量は39,941台/12hと、県内の全観測地点の中で最も多く、非常に交通が集中する区間である。また、橿原市域(土橋町南交差点付近)では34,899台/12hとなっており、H22(2010)道路交通センサス時点(19,899台/12h)に比べ京奈和道の橿原高田IC～御所南IC間の開通もあって増加している状況。これらの区間では複数の主要渋滞箇所¹⁾が連続しており、県内でも特に渋滞が著しい区間といえる。加えて2017年8月の御所南IC～五條北IC間の開通により、更なる交通の集中が見込まれることから、当区間の渋滞対策は喫緊の対応課題となっている。



図-1 京奈和自動車道の整備状況

2. 国道24号の速度低下状況

国道24号の奈良市域・橿原市域におけるボトルネック箇所を把握するため、2015年度の民間プローブデータより旅行速度の整理を行った(図-3)。区間別の旅行速度を見ると、南北方向ともに奈良市域では三条大路二丁目、柏木町北、柏木町の各交差点、橿原市域では土橋町南、曲川町東、新堂ランプの各交差点で顕著な速度低下が生じている。そこで、これらの交差点を対象に渋滞対策を検討するものとした。



図-2 国道24号の交通量

3. 対策検討の考え方

(1) 対策立案の基本方針

国道24号に関しては、長期的には京奈和自動車道の整備による抜本的な改善が期待されるため、過大なコストを要する対策は非効率になってしまう恐れがある。一方で、直面する激しい渋滞への対処は喫緊の課題であり、早急に効果が発現できるものとする必要があった。これらを踏まえ、「現道の用地内で実施可能」で「低コストかつすぐ実施できる対策」を立案することを基本方針とし、少しでも効果が期待できるのであれば前向きに取り組むものとした。

(2) 対策立案の手順

国道24号奈良市域・橿原市域の渋滞対策立案は以下の手順に従って実施した。

a) 現況調査の実施

対象箇所における交通量等の調査は、一部を除いて2013年以降実施されておらず、やや古い情報となっていた。そのため、交通実態調査を実施し、平休の交差点方向別交通量、信号現示、渋滞長に関する最新のデータを把握した。

b) 渋滞要因の分析

渋滞長調査時に記録された渋滞要因について現地踏査

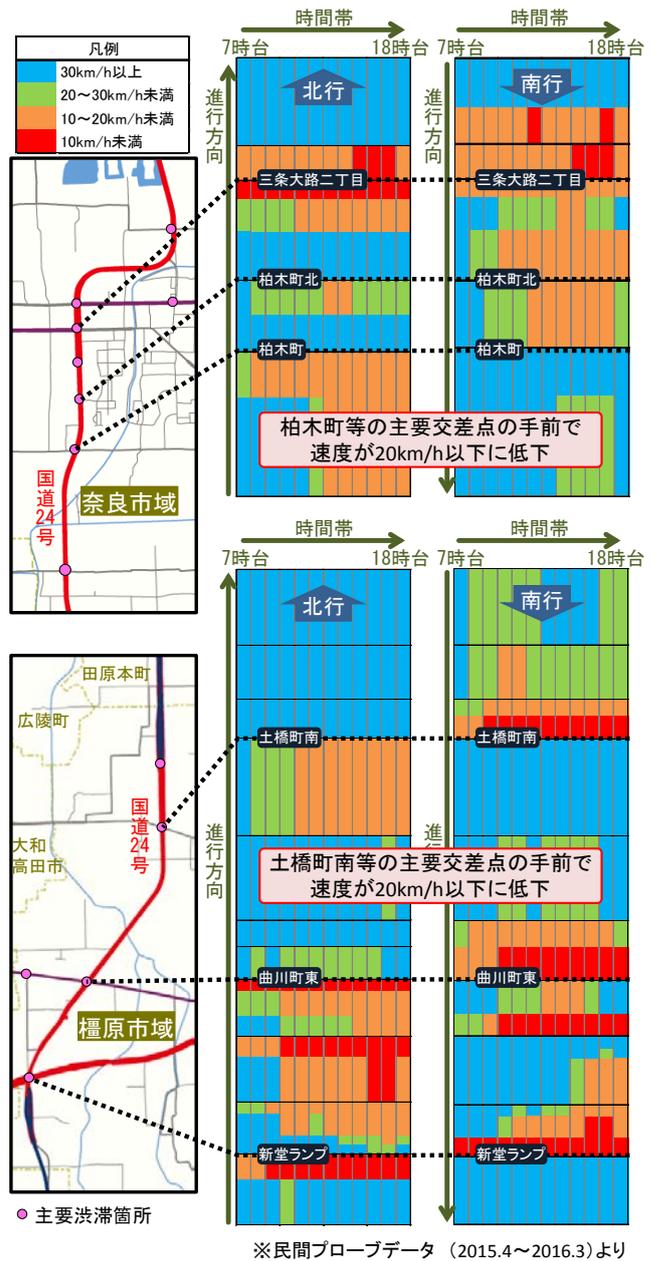


図-3 国道24号（奈良市域・橿原市域）の休日時間帯別旅行速度の状況

時の状況と突き合わせて確認するとともに、隣接交差点からの先詰まりや信号の連動状況など、プローブデータや現地状況等から推察される要因を含めて整理した。

また、渋滞要因のうち右折車・左折車に起因するものなど、ETC2.0データより分析可能なものについては定量化を図り、対策の必要性を示す基礎資料とした。

c) 効果的な速効対策案の検討

渋滞要因を踏まえ、速効的な対策案の検討を行った。新たな用地買収を行わないことから、現道の幅員構成の見直しによる付加車線の設置、信号の見直しによるソフト的対策が主なものとなっている。

d) 対策効果の検討

対策案については交差点解析を実施し、需要率による

チェックを行った。また、以下のような対策については交通流マイクロシミュレーションにより、より詳細な対策効果の検討を行った。

- ・対策の実施により下流側交差点における先詰まりが生じ、効果が相殺される懸念があった箇所（柏木町北～柏木町交差点）
- ・国道24号に左折レーンを設置する案に関し、直進主体の交通状況に対して実際に効果が見込まれるか検証する必要があった箇所（柏木交差点・土橋町南交差点）

e) 関係機関との協議、合意形成

対策案は、幅員構成の変更により自動車交通だけでなく歩行空間やバス停位置などへの影響があるものであったため、警察やバス事業者等の関係機関と協議を行い、案の調整を行っている。また、国・県・市・警察により構成される奈良県渋滞対策協議会の地域別専門部会（奈良市域渋滞対策専門部会、橿原市域渋滞対策専門部会）に諮り、対策案を進めていく方向性について合意形成を行った（写真-1）。



写真-1 奈良市域渋滞対策専門部会の様子

4. 対策検討の実施例

(1) 三条大路2丁目交差点

三条大路2丁目交差点は国道24号奈良市域の交差点である（図-4）。当交差点は奈良高架橋の側道部に位置しており、国道24号の通過交通は高架橋を通行している。また、東西方向には三条通り（交差点東側は（主）奈良生駒線、西側は国道308号）が通っており、こちらも4車線の幹線道路である。

三条大路2丁目交差点の渋滞要因を整理したものを図-5に示す。幹線道路同士の交差点であるため、信号時間に対して各側の交通量が多く交通容量を超過し、信号時間の青時間内で交通が捌けないことが根本的な要因である。しかし、北行に関しては右折レーンからはみ出した右折待ち車両による直進車阻害、南行に関しては直進車の先詰まりが見られ、これらが渋滞に拍車をかけているものと見受けられた。南行の先詰まりに関しては下流（南側）の柏木町北交差点や柏

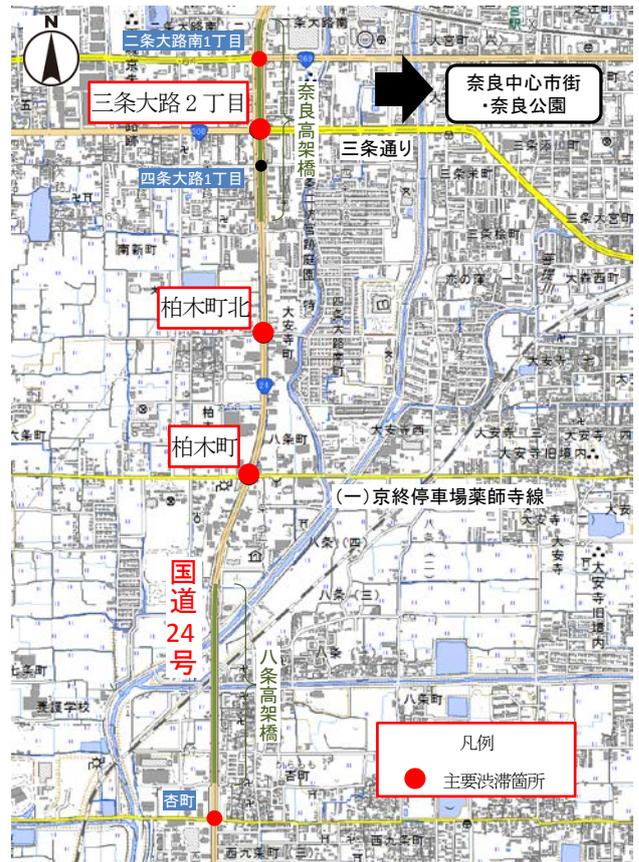


図-4 国道24号奈良市域の交差点位置図

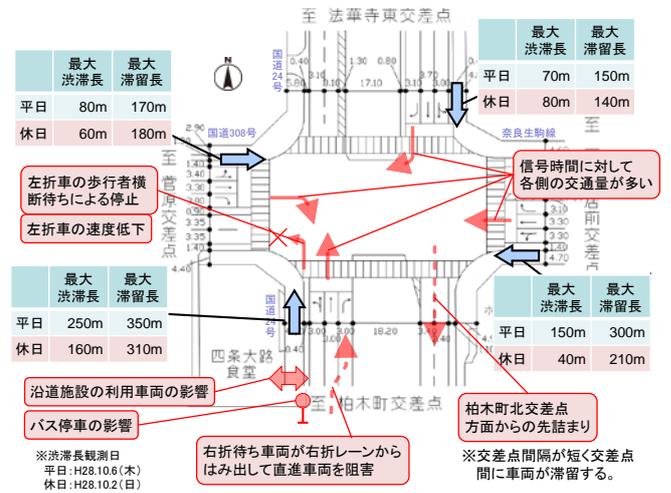
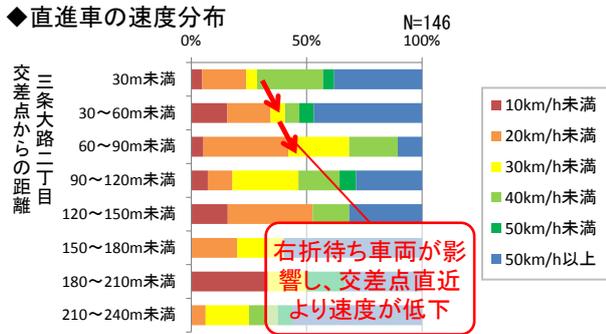
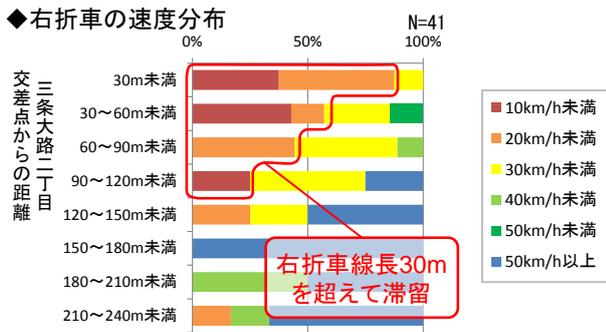


図-5 三条大路2丁目交差点の渋滞長・渋滞要因



写真-2 右折待ち車両による直進阻害



※ETC2.0道路プローブデータ(2016.5～6)より
※平日朝夕(7～10時および16時～19時)

図-6 三条大路2丁目交差点北行(南側流入部)における直進車・右折車の速度分布

木町交差点の対策により改善を図るものとし、三条大路2丁目交差点では北行の右折待ち車両に着目することとした。なお、交差点各側の最大渋滞長を見ると、北行が平日で250mと最も長くなっている。

右折待ち車両による直進車阻害状況については、2通りの方法で確認を行った。一つはETC2.0データの分析、もう一つはVTR調査の実施である。図-6は、ETC2.0データより三条大路2丁目交差点北行における右折車と直進車の速度分布を集計し比較したものである。グラフの上方が交差点直近で、下に行くほど交差点から離れた箇所の速度分布を示している。右折車は交差点直近ほど速度が低く、交差点から離れていくほど速度が高くなっている。右折車線の滞留長である30m以上離れた箇所でも速度が低い車両が見られ、右折レーンをはみ出して停止しているものと考えられる。更に直進車の速度分布を見ると、交差点直近(30m未満)より、30～90m離れた箇所の速度が遅くなっており、右折待ち車両の影響によって速度低下していることを示唆している。VTR調査の結果は写真-2で示したとおりであり、実際に右折待ち車両が直進車を阻害している状況が確認された。

三条大路2丁目交差点の渋滞対策は、右折滞留スペースの確保することにより、右折車両のはみ出しを回避し北行交通の円滑化を図ることとした。しかし、高架橋の橋脚が支障するため、右折レーンを延長することは困難であった。そのため、奈良高架橋の高架下スペースを活用し、右折車線を2車線に増設するものとした(図-7)。

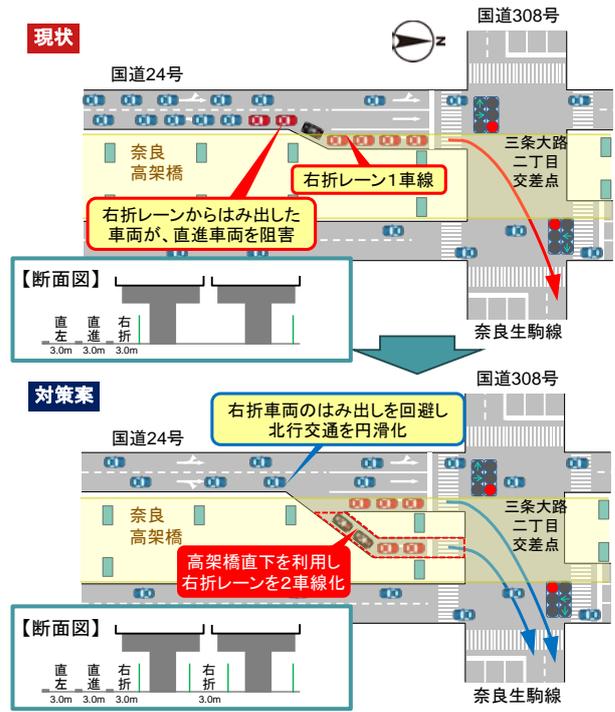


図-7 三条大路2丁目交差点の渋滞対策案

(2) 柏木町北・柏木町交差点

柏木町北・柏木町交差点も国道24号奈良市域の交差点であり、前者は市道と、後者は一般県道と交差している(図-4)。また、奈良高架橋と八条高架橋との間に位置しており、交通量が特に集中する区間となっている。

柏木町交差点の渋滞要因を整理したものを図-8に示す。こちらも幹線道路同士の交差点であり、各側の交通量が交通容量を超過し信号時間の青時間内で交通が捌けないことが根本的な要因である。

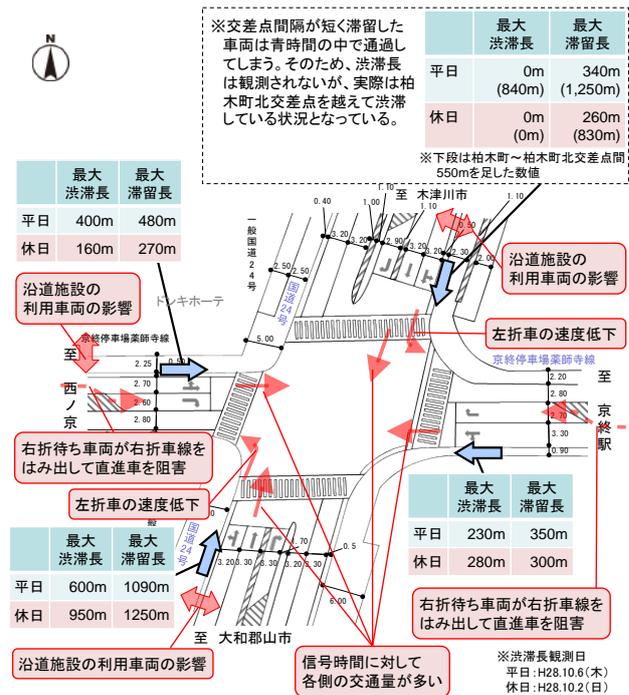
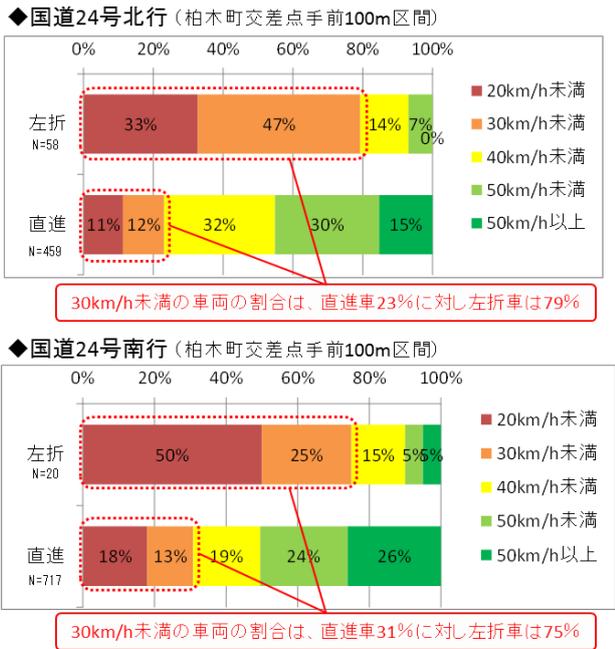


図-8 柏木町交差点の渋滞長・渋滞要因



※ETC2.0道路プローブデータ(2016.4~6)より ※7~19時

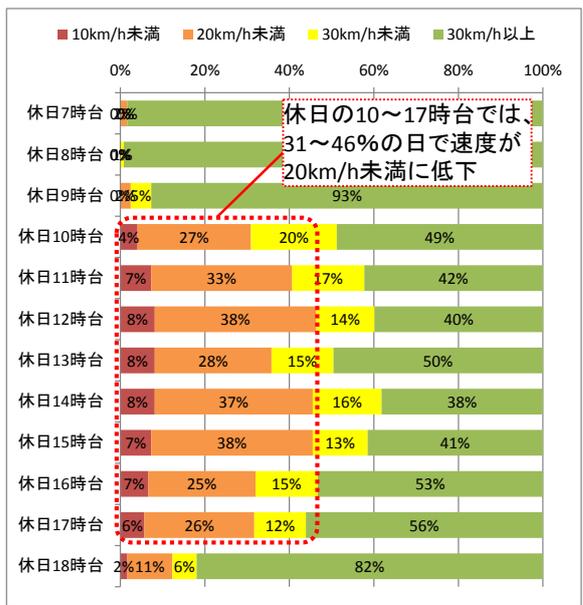
図-9 柏木町交差点（北行・南行）の左折車・直進車の速度分布

特に国道24号南北方向の交通量が多く、信号時間をぎりぎりまで南北方向に割り振っても渋滞が生じる状況となっている（東西方向の歩行者横断時間の制約のため、これ以上南北方向の青時間割合を増やせない）。一方、柏木町北交差点は交差道路の交通量が少なく、柏木町交差点と比較すると交通処理の余裕がある交差点となっている。柏木町北交差点では南行の速度低下が顕著である（図-3）が、柏木町交差点からの先詰まりの影響が大きいものと考えられる。

そこで、柏木町交差点では南北方向の直進交通が卓越しており（北行・南行ともに直進が約9割）、これをいかに円滑化するかが課題と考えた。また、東西方向でも渋滞が生じていることや、すでに南北方向の青時間が限界まで確保されていることから、信号時間の調整による改善は見込めない状況を踏まえ、以下の2点を対策の方向性として検討を行った。

- ①左折車を直進車と分離して直進車の円滑化を図る
 - ②奈良高架橋～八条高架橋間の国道24号部分拡幅
- ①については、ETC2.0データを用いて、柏木町交差点における左折車・直進車別の速度分布を比較してみた（図-9）。その結果、本交差点は道路が直角に交わっていないこともあり、左折車の方が明らかに低速であり、連続して車両が走行する混雑時には左折車が直進車の阻害要因となっているものと考えられる。

次に②の部分拡幅とは、現況で片側2車線となっている国道24号を、現道敷地内の幅員構成見直しにより3車線に拡幅するものであるが、用地の制約から両側を拡幅することは困難であった。そこで、以下の点を考慮し南行を3



※民間プローブデータ(2015.4~2016.3)より

図-10 2015年度の休日（123日）における奈良高架橋南行き（高架部）の時間帯別平均旅行速度の分布

車線化するものとした。

- ・国道24号南行では柏木町交差点からの渋滞が延伸し、上流（北側）の渋滞箇所（柏木町北交差点・三条大路2丁目交差点）の交通処理に影響している
- ・奈良高架橋高架部にも影響が及んでおり、平日7時台や休日昼間にはほぼ2日に1回の頻度で奈良高架橋南行の平均旅行速度が20km/h未満に低下（図-10）

以上より柏木町交差点の渋滞対策案は、暫定案として南北方向に左折レーンを設置し（図-11）、その後南行を3車線化するものとした（図-12）。なお、柏木町交差点

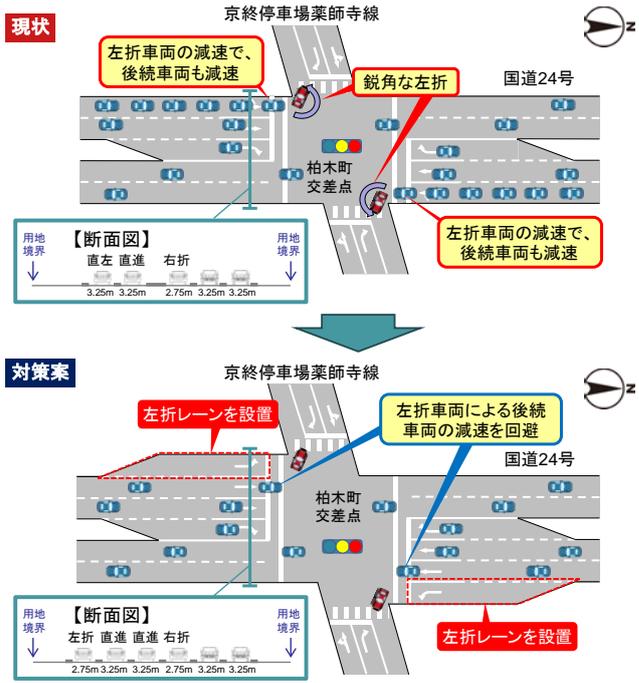


図-11 柏木町交差点の渋滞対策案（1）

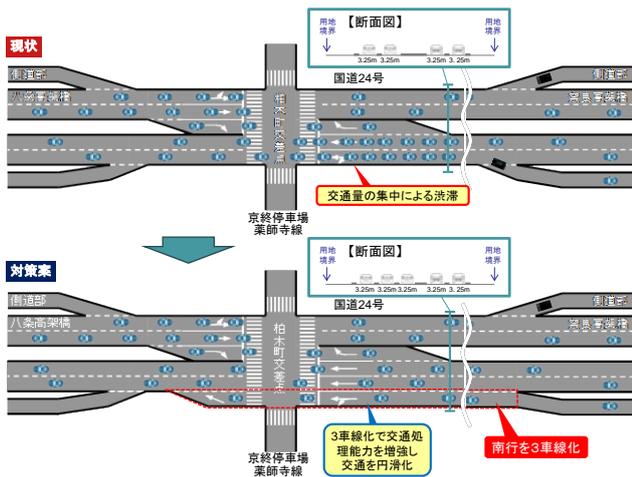


図-12 柏木町交差点の渋滞対策案 (2)

については、奈良県による対策案として東西方向の右折レーン2車線化も計画されている。

対策案の効果や影響を検証するため、交通流シミュレーションを実施した(図-13)。なお、南行3車線化については柏木町交差点の流れが良くなる一方で、南側(下流)の杏町交差点での先詰まりが懸念されたため、杏町交差点までを含めた範囲で検討を行った。結果は以下の通りであり、一定の効果があることが認められた。

- ・南行では完成形(奈良県の対策含む)の場合、ピーク時(7:30~7:45平均)の奈良高架橋~杏町交差点間のトータルの所要時間が現況の907秒から756秒へと約150秒(2割)短縮。
- ・北行では、ピーク時(8:15~8:30)の杏町~三条大路二丁目交差点間のトータルの所要時間が現況の476秒から433秒へと約40秒(1割)短縮。



図-13 交通流シミュレーションの実施状況

5. 国道24号奈良市域、橿原市域の速効対策方針

対策検討結果をもとに、奈良市域渋滞対策専門部会(2017年1月)、橿原市域渋滞対策専門部会(2016年12月)において関係機関との協議を行い、表-1に示す内容を渋滞の速効対策方針として、実施に向けて取り組んでいくこととなった。なお、本方針については2017年2月に公表を行っている。

表-1 国道24号奈良市域、橿原市域の速効対策方針

	交差点	速効対策方針
奈良市域	三条大路2丁目交差点	・(北行)右折レーン2車線化
	柏木町北交差点	・(南行)3車線化
	柏木町交差点	・(南行)3車線化 ・(南北方向)左折レーン設置 ・(東西方向)右折レーン2車線化【県】
橿原市域	土橋町南交差点	・(南行)左折レーン設置 ・(東西)左折レーン設置【県】
	曲川町東交差点	・信号連動の調整(ソフト対策)【警察】
	新堂ランプ交差点	・(南行)右折レーン延伸 ・信号青時間の調整(ソフト対策)【警察】
	葛本町交差点	・(西行)左折レーン設置【県】

6. とりまとめ

奈良県内の国道24号では慢性的な混雑状況を呈している中で、京奈和自動車道の部分開通(御所南IC~五條北IC)が差し迫っており、早急に渋滞対策を実施することが喫緊の課題であった。対策を早期に実現するためには、時間・コストのかかる用地取得を行わず、既存の道路幅員の中で効果的な対策案を立案することにポイントを置くとともに、対策検討に関係機関とともに行うことで合意を図り、スムーズな対策実施につなげていくよう努めた。

個別箇所の検討に際しては、軽微な対策でも少しでも効果的なものとなるよう、最新のデータを把握するための現況調査を実施するとともに、近年データ及び利用例の蓄積が進んでいるビッグデータを活用した分析を行い、渋滞要因の分析及び対策立案を行った。

今後は対策の早期実現にむけて詳細設計や細部条件の関係機関との協議・調整、工事を実施するとともに、実施後のモニタリングを行っていく必要がある。

本稿では、検討の手順及び内容について事例紹介を行ったが、速効的な渋滞対策案を検討する上での参考として頂ければ幸いである。

なお、本論文は筆者が奈良国道事務所調査課に在籍した際に取り組んだ内容をもとに作成したものである。

謝辞: 本論文の対象となった渋滞対策は、奈良県、奈良県警察本部をはじめ、奈良県渋滞対策協議会の専門部会メンバーの助言、協力を受けて策定し、公表に至ったものである。また、本論文の作成にあたり(株)ニュージェックの方々から資料の提供や助言など様々な面で協力をして頂いた。皆様の多大な協力に対し、ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 奈良県渋滞対策協議会:「地域の主要渋滞箇所」の公表について(2013.1)

固化改良した建設発生土の 長期耐久性と締固め特性

宮下 千花¹・井上 玄己²・宮武 裕昭¹

¹国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ 施工技術チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²基礎地盤コンサルタンツ株式会社 関東支社 技術第二部
(〒135-0016 東京都江東区東陽3-22-6東陽町AXISビル), 元国立研究開発法人土木研究所

発生土の適切な有効利用を促進することを目的として、低品質な発生土をセメントや石灰などの固化材混合によって改良し、築造した盛土の長期的な安定性や耐久性と、盛土施工における適切な品質管理手法について研究している。本論文では、改良土による道路盛土の施工から9年後の強度特性の調査、低品質な発生土に固化材を混合した改良土の長期暴露実験、締固め施工実験の結果について紹介する。

キーワード 建設発生土, 固化材, 改良土, 一軸圧縮強さ, 盛土, 長期耐久性, 締固め特性, ボーリング調査, 暴露実験, 施工実験

1. はじめに

建設工事において地盤の掘削等で生じる土を建設発生土（以下、発生土）という。発生土は現場内または近隣の他工事等で利用されており、工事現場で使用される土砂の約9割を占めている¹⁾。「建設リサイクル推進計画2014」の策定等を背景に、近年、発生土の更なる有効利用が求められている。

筆者らは発生土の適切な有効利用を促進することを目的として、低品質な発生土をセメントや石灰などの固化材混合によって改良し、築造した盛土の長期的な安定性や耐久性、盛土施工における適切な品質管理手法について研究を行っている。本論文ではこれまでの取り組みの中から、改良土による道路盛土の施工から9年後のボーリング調査、低品質な発生土に固化材を混合した改良土の長期暴露、締固め施工実験の結果について紹介する。

2. 改良土による道路盛土の施工から9年後の強度特性

本章は、既往の報告²⁾に基づいて改良土による道路盛土のボーリング調査結果をまとめたものである。

(1) 調査対象盛土の概要

対象盛土は最大高さ約40mにおよぶ大規模な谷埋め盛土であり、高含水比の火山灰質粘性土を主体とした発

生土にセメント系固化材を混合した改良土を用いて、2007年までに施工された。盛土自体の安定性を確保するために設定された表-1に示す改良土の設計一軸圧縮強さを目標とし、定置式プラントを採用して発生土と固化材の均質な混合を試みた。当該盛土は前後区間の複数の工区で発生する切土を受け入れる目的で計画されたため、他工区の工程に従って品質の異なる発生土が不規則に運び込まれた。このため、最も強度発現が小さい発生土の配合試験に基づいて安全側にセメント配合量を決定する必要があった。配合量の範囲は32～225 kg/m³であった。

改良土は製造の同日中に運搬、撒き出され、21 t級湿地型ブルドーザを用いて転圧された。盛土材である改良土の物性が常に変化したため、乾燥密度による締固め度の管理は適切に実施できないものと判断された。代替手法として一軸圧縮強さと湿潤密度との関係を利用した湿潤密度比による管理が提案、実施された³⁾。

(2) 調査方法

図-1に示す小段上から盛土底面の原地盤までオールコアボーリング（掘削長L=21 m, コア径φ=70 mm）にて施工から約9年経過後の試料を採取した。固結・混合状態の確認のための目視観察およびフェノールフタレイン試験、強度の確認のための一軸圧縮試験を実施した。深度方向約2m間隔で実施する一軸圧縮試験の補間として、10 cm間隔で土壌硬度試験および針貫入試験を行い、換算一軸圧縮強さを求めた。

表-1 施行当時の改良土の一軸圧縮強さ

	下部路体	上部路体
設計一軸圧縮強さ q_u (kN/m ²)※材齢28日	500	190
配合試験での目標一軸圧縮強さ q_u (kN/m ²)※材齢28日。(現場/室内)強さ比0.8	625	238
プラントでの一軸圧縮強さ q_u (kN/m ²)※材齢28日	範囲	239 ~ 1654
	平均	1022

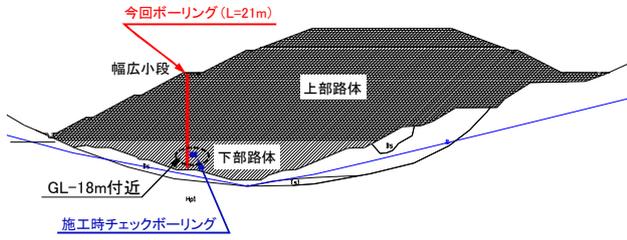


図-1 調査地点の盛土の断面図



図-2 フェノールフタレイン試験結果の一例 (深度15~18m)

(3) 調査結果

採取した試料(ボーリングコア)は比較的硬質で、全体に棒状を呈する固結状態であった。ボーリングに伴う亀裂を除き、潜在的な亀裂は認められなかった。累計29種類の発生土を利用してのことから、部分的に土質(礫径、マトリクス等)や色が異なっていた。図-2にフェノールフタレイン溶液散布前後の代表写真(深度15~18m間)を示す。採取試料全体にフェノールフタレイン反応による色の変化が見られたことから、約9年経過後も固化材混合によるアルカリ性を保持していること、顕著なムラがなく固化材が全体に混合されていたことを確認した。

土壌硬度試験の硬度指標と針貫入試験の針貫入勾配はそれぞれ地盤工学会基準⁴⁾、試験器メーカーのマニュアル(丸東製作所, SH-70)で提案されている式を用いて一軸圧縮強さに換算した。図-3に土壌硬度試験及び針貫入試験の換算一軸圧縮強さ(以下それぞれ $q_{u,D}$ 、 $q_{u,NP}$)を含めた一軸圧縮強さの深度分布を示す。 $q_{u,NP}$ は礫が点在する影響からばらつきが大きい、 $q_{u,D}$ 、 $q_{u,NP}$ 共に一軸圧縮試験と概ね同程度の値を示した。設計一軸圧縮強さを下回る強度も見られたが局所的であったため、施工から9年後も深度方向全体において設計一軸圧縮強さを超える強度を有しているものと判断した。

一方、設計一軸圧縮強さの数倍大きな強度も確認された。後述する施工当時と9年後の強度の比較結果も考慮

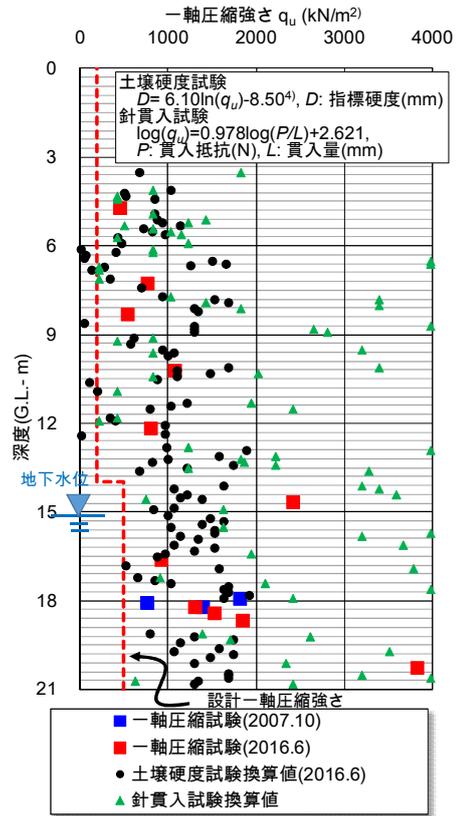


図-3 一軸圧縮強さの深度分布

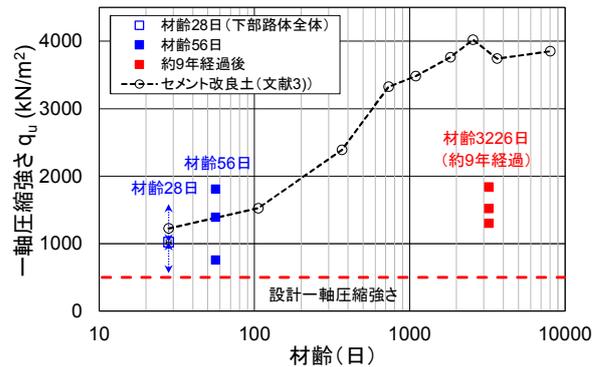


図-4 一軸圧縮強さと材齢の関係

すると、設計値をはるかに上回る強度発現箇所が生じたのは、施工ときに最も強度発現の小さい発生土にあわせて固化材の配合量を決定したためであったと考えられる。

(3) 長期的な強度特性の変化

深度18m付近の施工時(材齢56日)および本調査(約9年経過後)での一軸圧縮強さを図-4に示す。施工時の一軸圧縮強さは盛土の品質管理の一環で強度確認を目的として求めたものである。約9年経過後の強度の平均値は、材齢56日の平均値の約1.2倍であった。既往の研究⁹⁾で報告されているセメント改良土の長期強度特性と比較すると強度増加が緩慢であった。文献3)のセメント改良土は火山灰質粘性土にセメント系固化材をスラリー混合し、地下水位以上の深度に充填・覆土した改良柱体である。本調査の改良土は種類の異なる火山灰質粘性

土に固化材を粉体混合し、敷均し・転圧した改良盛土であり、強度増加傾向の確認は地下水位以深で行った。二つの改良土の長期強度増加傾向の違いは以上のような材料特性、施工方法、固化材の配合量、周辺環境による養生条件等の影響によるものであったと考えられる。

周辺環境の強度への影響がない、または小さい既往の研究によると、室内実験や現地調査から得られた様々な改良土の材齢 28 日に対する材齢 10 年以上の強度増加率は 1.6 ~ 8.6 倍であったと報告されている⁹⁾。表-1 に示す下部路体全体の材齢 28 日の平均強度と、深度 18 m の材齢約 9 年の強度の比で本調査の強度増加率を求めると 1.5 倍であり、既往研究の下限値と同程度となった。

3. 低品質な発生土に固化材を混合した改良土の長期暴露実験

(1) 実験方法

実験には関東地方の 2 種類の発生土 A, B を用いた。表-2 および図-5 に基本物性を示す。固化材の種類と配合量は現場実態調査の結果⁷⁾を参考に決定した。種類はセメント系固化材（六価クロム溶出低減タイプ、以下「セ

表-2 発生土 A, B の基本物性

	発生土 A	発生土 B
土質分類	砂質粘性土	砂混じりシルト
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.725	2.812
最適含水比 w_{opt} (%)	30.1	52.6
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.360	0.995
自然含水比 w_n (%)	40.8	60.5
コーン指数 q_c (kN/m ²)	182	1065

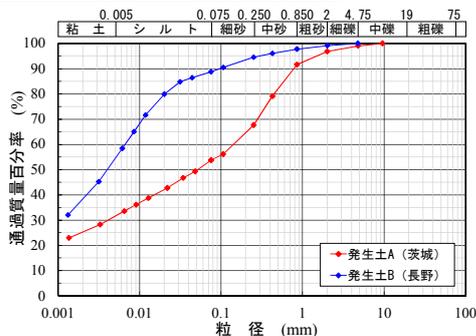


図-5 発生土 A, B の粒度分布

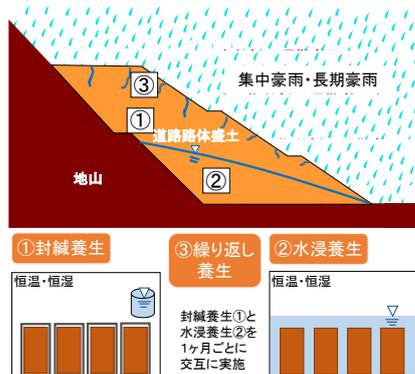


図-6 道路盛土への水の浸透作用を考慮した供試体の養生条件

メント」という)、石灰系固化材（発塵抑制型石灰、以下「石灰」という）の 2 種類とした。配合量はそれぞれの固化材で少ないケースと多いケースの計 4 通りとした。配合量の少ないケースでは、セメント協会のマニュアル⁸⁾に記載の最少添加量、日本石灰協会のマニュアル⁹⁾に記載の必要最小添加量としてそれぞれ 50 kg/m³、30 kg/m³ とし、多いケースでは少ないケースの 3 倍の 150 kg/m³、90 kg/m³ とした。発生土と固化材はミキサーで 5 分間攪拌した。供試体は直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱型のモールドに 3 層に分けて静的締固めにより作製した。混合時の発生土の含水比は自然含水比とし、供試体の密度は道路路体盛土の締固め管理基準値である締固め度 $D_r = 90\%$ とした。

供試体は作製から 7 日間封緘養生した後にモールドから脱型し、供用期間中の路体盛土に想定される状況を簡易的に再現した 3 種類の条件で養生に供した。図-6 に養生条件を模式的に示す。封緘養生は図-6 の①、水浸養生は②、繰り返し養生は③をそれぞれ想定したものである。繰り返し養生は盛土表層付近の降雨による浸潤とその間のやや乾燥する状態を想定したもので、水浸養生と封緘養生を 1 ヶ月ごとに交互に繰り返すこととした。水浸養生と繰り返し養生には水道水を用い、1 ヶ月ごとに交換した。養生温度は全ての過程で 20±3 °C とした。供試体作製から 7 日、1 ヶ月、6 ヶ月、1 年で一軸圧縮試験 (JISA 1216) を実施した。

(2) 実験結果

封緘養生供試体の一軸圧縮強さと材齢との関係を図-7 に示す。凡例に C を含むものはセメント、L を含むものは石灰を混合した供試体であり、C と L に続く各数字は配合量 (kg/m³) を示す。配合量の少ないケースは a)、多いケースは b) に分けて図示している。配合量の多いケースでは、細粒分含有率の低い発生土 A の一軸圧縮強さが同一配合の発生土 B よりも大きかった。配合量の少ないケースでは、材齢の経過とともに発生土 A と発生土 B の一軸圧縮強さが同程度となった。セメント改良土は材齢の経過に伴う強度増加傾向が明確であった。

材齢 1 年における封緘、水浸、繰り返し養生供試体の一軸圧縮強さを図-8 で比較する。各配合、養生ケースの 3 供試体の強度の範囲を縦線「|」、平均値を四角「□」でそれぞれ示す。各養生ケースの強度の差は異なるものの、どの配合においても水浸、繰り返し、封緘養生供試体の順に一軸圧縮強さが小さかった。水浸養生供試体の封緘養生供試体に対する強度比 (図中に青字で表示) は、配合量の多いケースの方が大きかった。

材齢 1 年における封緘、水浸、繰り返し養生供試体の一軸圧縮強さと含水比との関係を図-9 に示す。配合量の小さいケースのみを拡大表示した図を、ピンクの点線の四角枠で囲んで挿入している。また、封緘養生供試体のデータは黒い点線の丸印で囲んで示している。それぞれ

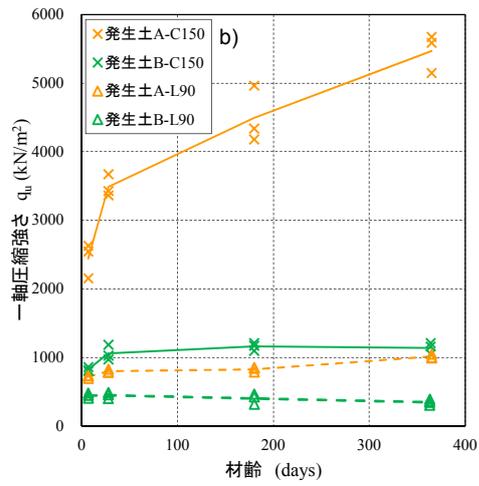
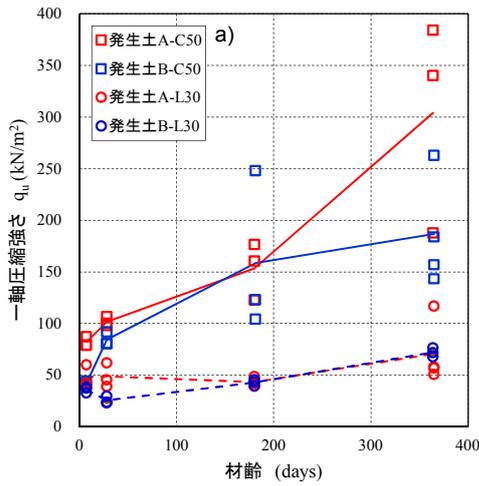


図-7 封緘養生供試体の一軸圧縮強さと材齢の関係

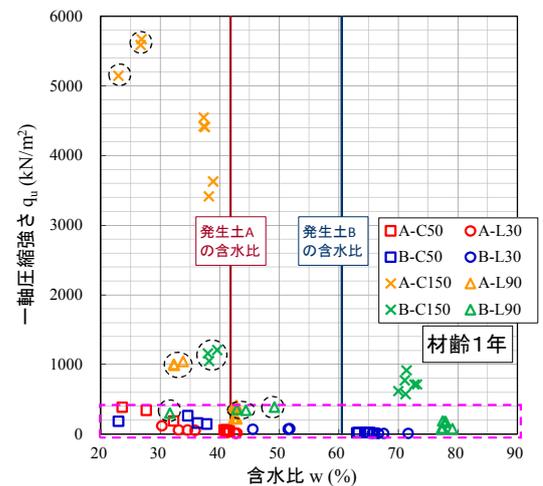


図-9 一軸圧縮強さと含水比の関係

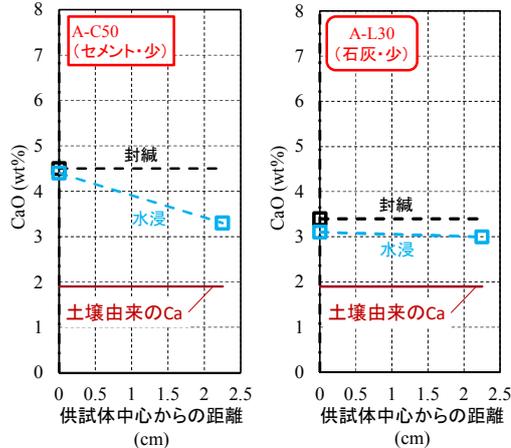


図-10 供試体断面方向のカルシウムイオン量の測定例

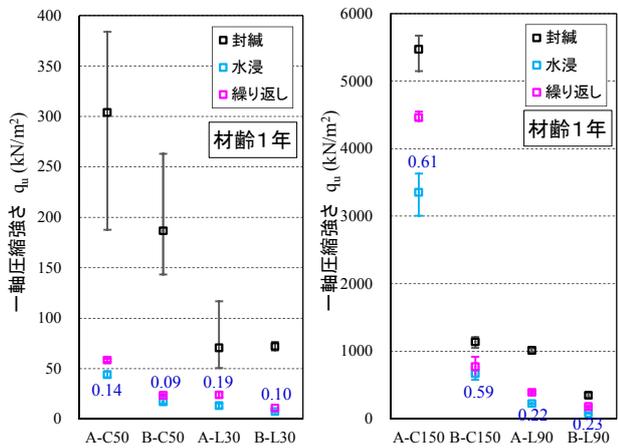


図-8 一軸圧縮強さと養生条件の関係

の発生土で同一の乾燥密度，含水比を目標に作製された供試体は，1年間異なる条件で養生された結果，封緘養生の供試体の含水比が最も低かった．このような物理的性質の影響により，含水比が低いほど一軸圧縮強さは大きかったものと考えられる．

エネルギー分散型蛍光X線分析装置により求めた，カルシウムイオン含有量の計測例を図-10に示す．封緘養生は供試体の中心から，水浸養生は供試体の中心と外周

5 mm 程度の二箇所から試料を採取し，分析した．封緘養生に比べ，水浸養生の供試体ではカルシウムイオンの量が少なく，その差は外周部において特に顕著であった．カルシウム水和物等の固結成分の溶脱に伴う化学的性質の変化によっても強度低下が生じたものと考えられる．

4. 低品質な発生土に固化材を混合した改良土の締固め施工実験

(1) 実験方法

実験に用いた盛土試料の基本物性を表-3，粒度分布を図-11にそれぞれ示す．土質(3)，(4)，(5)は既往の実験¹⁰⁾に用いた試料で，美浦砂は本研究で用いた試料である．土質(3)，(4)は最適含水比 w_{opt} 付近に調整された砂質土，土質(5)は w_{opt} よりも約3%含水比の高い細粒土である．美浦砂は発生土の土質区分で泥土に分類される砂質土で，配合試験結果¹¹⁾に基づいて 21.3 kg/m³ の生石灰，58.7 kg/m³ のセメント系固化材をバックホウで混合することにより，それぞれ石灰，セメント改良美浦砂とした．改良後の含水比はそれぞれの w_{opt} と比較して約11%，9%高かった．

表-3 盛土試料の基本物性

	土質(3)	土質(4)	土質(5)	美浦砂
土質分類	細粒分質砂	細粒分質砂	砂質細粒土	細粒分質砂
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.675	2.681	2.665	2.691
最適含水比 w_{opt} (%)	16.0	18.8	24.9	24.1
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.674	1.666	1.531	1.527
実験時含水比 w (%)	15.9	18.3	28.2	34.5, 34.1
コーン指数 q_c (kN/m ²)	-	-	-	68 (w=34.1%)

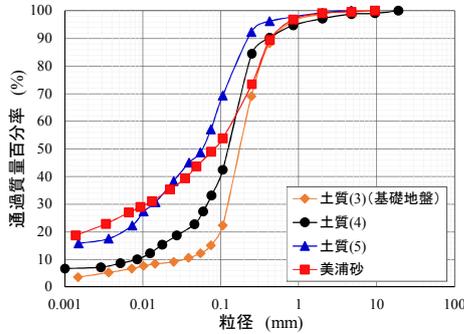


図-11 盛土試料の粒度分布

図-12に示す幅5 m, 長さ44.8 m, 高さ4 mのコンクリート製の実験ピット内に土質(3)で締固め度 $D_v > 95\%$ の基礎地盤を造成し, この上に各盛土試料を敷均した. 転圧終了後の盛土の層厚が30 cm程度となるよう, 敷均しにおける盛土の層厚は約40 cmとした. 0.1 m³クラスの油圧ショベル(自重2.7 t)でクローラ走行した状態を0回転圧と定義して図-12に示す各計測を実施後, 11 t級の振動ローラを用いて転圧を行った. 振動ローラの起振力は土質(3), (4), (5)の実験で226 kN, 石灰, セメント改良美浦砂の実験で181 kNとした. 土質(3), (4), (5)の実験では2, 4, 6, 8, 12, 16回, 改良した美浦砂の実験では西側半分(西レーン)において1, 2, 3, 4, 6, 8回転圧毎に, 0回転圧と同様の計測を行った. 計測項目は現状の施工管理で行われている密度試験(コアカッターによる土の密度試験, JGS1613-2003)の他, 比較的間便に土の剛性や強度を計測できる手法を選択した. これらの計測結果の詳細については文献²⁾を参照されたい.

(2) 実験結果

コアカッターによる上(盛土表層~10 cm), 中(10~20 cm), 下(20~30 cm)層の密度の平均値から求めた締固め度と, 転圧回数との関係を図-13に示す. 土質(3), (4), (5)では転圧を重ねることで締固め度が大きくなり, 路体, 路床盛土の品質管理基準値である $D_v = 90, 95\%$ を超えた. 石灰, セメント改良美浦砂は初めの2回までは転圧後に締固め度が増加したものの, その後は大きなエネルギーを与えて転圧を重ねても密度が大きくなかった.

コアカッターによる締固め度の平均値と, 動的平板載荷試験による地盤反力係数との関係を図-14に示す. 土質(3), (4), (5)は転圧2回以降, 石灰, セメント改良美浦砂は転圧1回以降の計測値である. 土質(3), (4)において,

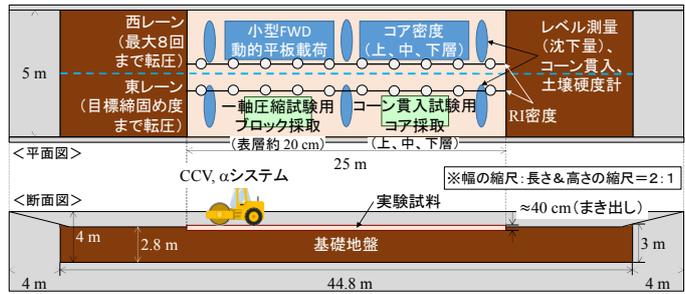


図-12 締固め施工実験の概要

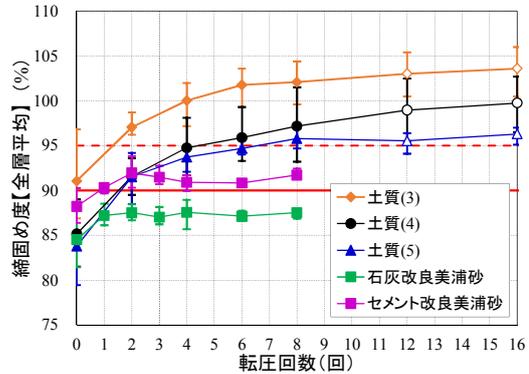


図-13 締固め度と転圧回数との関係

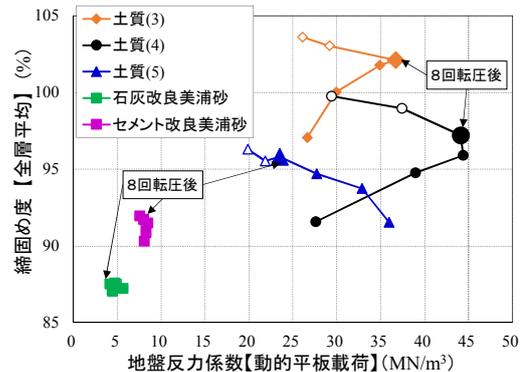


図-14 締固め度と地盤反力係数との関係

転圧回数8回までは地盤反力係数と締固め度との間に正の相関が見られたが, 転圧12, 16回において地盤反力係数が連続的に低下し, 締固め度との関係が逆転した. 土質(5)は転圧2回目から地盤反力係数が低下し続け, 土質(3), (4)とは異なる傾向を示した. 石灰, セメント改良美浦砂は地盤反力係数も締固め度も変化量が小さく, 両者の相関は明瞭でなかった.

各試料の締固め曲線に, 締固め施工実験で得られた転圧中の乾燥密度と含水比との関係を加筆して図-15に示す. 土質(3), (4)は転圧8回, 土質(5)は転圧2回で飽和度が概ね80%以上となった. 飽和度が小さい転圧初期は地盤反力係数と締固め度との間に正の相関が見られるが, 飽和度が大きくなる, つまり密度の増加によって間隙に占める水分の割合が大きくなると, 地盤反力係数の計測値に水の影響(サクシヨンの低下による剛性低下)が表れ始め, 締固め度との関係が変化したものと考えられる. 一方, 石灰, セメント改良美浦砂は含水比が高いために転圧開始時から飽和度が高く, 十分な締固め効果が得ら

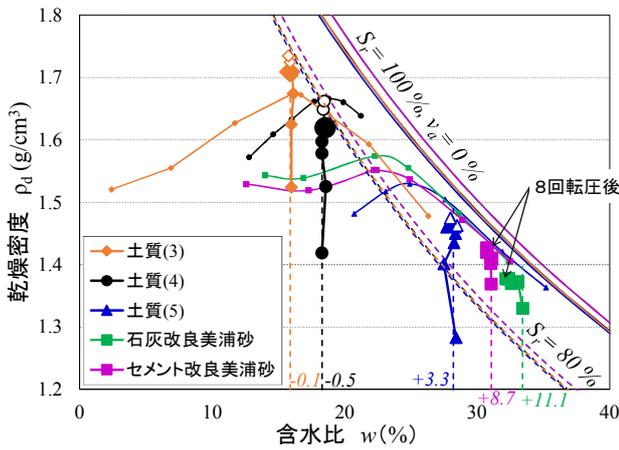


図-15 盛土土料の乾燥密度と含水比の関係

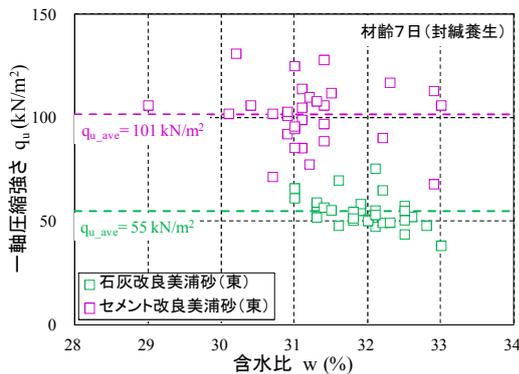


図-16 一軸圧縮強さ(養生7日)と含水比の関係

れなかった。

図-16に石灰、セメント改良美浦砂の一軸圧縮強さと含水比の関係を示す。一軸圧縮強さはブロックサンプリング試料より整形した供試体の7日養生時点での試験結果である。材料の不均質性によるばらつきは大きいですが、配合試験結果から(現場/室内)強さ比を考慮して予想された石灰改良美浦砂の一軸圧縮強さ $q_u = 46 \text{ kN/m}^2$ 、セメント改良美浦砂の目標改良強度 $q_u = 100 \text{ kN/m}^2$ (文献¹¹⁾)に概ね一致する強度が得られた。

改良土の配合試験ではコーン指数や一軸圧縮強さなどの強度の目標値を満たすように固化材の混合量を決定するが、良質な地盤材料と同様の締固め効果を得るためには、配合試験において含水比や飽和度も考慮して固化材の混合量を検討する必要があるものと考えられる。

5. 結論

- (1) 改良土による大規模盛土にてボーリング調査を実施したところ、深度方向全体において、施工から9年後も設計値を超える強度を有することを確認した。また、同一深度で計測した一軸圧縮強さは、材齢56日からの9年間で約1.2倍に増加していた。
- (2) 固化材で改良した二種類の低品質な発生土の改良土

供試体の室内長期暴露実験を実施した。材齢1年において、水浸、繰り返し、封緘養生の順に一軸圧縮強さが小さかった。養生条件による強度の差は、供試体の含水比などの物理的性質の違いと、カルシウム含有量などの化学的性質の違いが原因であったと考えられる。今後は改良土の透水性が強度特性に与える影響についても検討する予定である。

- (3) 固化材で改良した低品質な発生土の締固め施工実験を実施した。本実験の固化材の配合量では、振動ローラによる転圧に対して締固め度がほとんど上がらず、地盤反力係数などの管理候補値と締固め度との関係は明瞭でなかった。今後は固化材の混合量や地盤材料を変えて同様の試験を行い、改良土の締固め特性について引き続き検討する予定である。

謝辞：国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所及び西松建設(株)には、改良土盛土でのボーリング調査に際して資料の提供ならびに精査、ヒアリング等にご協力頂きました。長期暴露実験に用いた発生土は国土交通省関東地方整備局よりご提供いただきました。また、蛍光X線分析装置の利用や結果の解釈にあたっては国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所の山崎秀策氏にご支援いただきました。締固め施工実験は産学計13者による共同研究「建設発生土等の長期的な品質管理向上技術に関する共同研究」に基づいて実施しました。ここに記して以上の関係者へ感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成24年度建設副産物実態調査結果、<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/fukusanbutsu/jittaichousa/index01.htm> (2017.9時点)
- 2) 井上ら：施工から9年経過した改良土による道路盛土の長期耐久性の検証，第52回地盤工学研究発表会，2017
- 3) 西見宣俊：セメント改良土を用いた盛土の品質管理，西松建設技報，VOL.32，pp.67-72，2009
- 4) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.425，2013
- 5) セメント系固化材技術専門委員会：セメント系固化材を用いた改良体の長期安定性に関する研究，セメント・コンクリート，No.804，pp.9-14，2014
- 6) セメント改良土の物性と試験方法に関する研究委員報告：委員会報告書，セメント及びセメント系固化材を用いた固化処理土の調査・設計・施工方法と物性評価に関するシンポジウム，pp.163-166，2005.6
- 7) 宮下ら：建設発生土の利用に関する現場実態調査結果の分析，第60回地盤工学シンポジウム論文集，pp.153-156，2016
- 8) 社団法人セメント協会，セメント系固化材による地盤改良マニュアル，2012
- 9) 日本石灰協会，石灰による地盤改良マニュアル，2016
- 10) 森ら：盛土施工における締固め特性について(その1)，土木学会第69回年次学術講演会，2014
- 11) 井上ら：石灰、セメント改良した建設発生土の締固めに関する基礎的検討(その2)，土木学会第72回年次学術講演会，2017
- 12) 宮下ら：石灰、セメント改良した建設発生土の締固めに関する基礎的検討(その1)，土木学会第72回年次学術講演会，2017

鹿児島湾の安全を確保せよ

一 船舶の管轄区域外緊急出動での課題と 対策について 一

森田 博史¹・江藤 隆文¹

¹ 九州地方整備局 熊本港湾・空港整備事務所 沿岸防災対策室（〒861-4115 熊本市南区川尻 2-8-61）

2016年9月に鹿児島県に上陸した台風16号により、鹿児島湾内に大量の流木が漂流し、航行船舶の安全性が損なわれる恐れが発生した。このため第十管区海上保安部及び鹿児島県からの要請を受けた調査観測兼清掃船「海煌」が緊急出動し、流木回収作業を行った。

本報告では、「海煌」では初めてとなる管轄区域外への緊急出動や、現地で発生した突発事象に臨機に対応しながら任務を遂行した経験上の課題と解決に向けた対策案について発表する。

キーワード 海上漂流木の回収 航行船舶の安全確保 海上啓開 調査観測兼清掃船

1. はじめに

2016年9月20日（火）、鹿児島県を襲った台風16号は非常に強い勢力を保ったまま鹿児島県大隅半島に上陸。この影響により県内各地で土砂災害が発生。これに伴い、河川を經由して大量の倒木が鹿児島湾内に流出した。

鹿児島湾内には多数の定期航路があり、流出した倒木によりフェリーやジェットフォイルなどの船舶航行の安全性が損なわれる恐れがあったため、22日（木）、第十管区海上保安本部（以下、十管）及び鹿児島県より九州地方整備局（以下、整備局）へ漂流木の回収要請があり、整備局所有の調査観測兼清掃船「海煌（かいこう）」が出動する事となった。

本論文は、海煌にとって初めてとなる管轄区域外への緊急出動の状況や、現地で発生する突発事象等の困難に臨機対応しながら任務を完遂した経験と課題、及び対策案についてまとめたものである。

2. 海煌について

海煌は、熊本港湾・空港整備事務所（以下、熊港）に所属し、有明海・八代海等の管轄区域にて海上漂流ごみの回収と、水質・底質調査、潮流観測等の環境調査を実施する「調査観測兼清掃船」である。

海煌には漂流ごみを回収するための塵芥回収装置と多関節クレーングラブ（以下、多関節クレーン）を装備しており、葦・萱等の小さなごみから、流木等の長大ごみまで回収可能となっている。

なお、海煌の活動（管轄区域）は地方整備局組織規則で定められており、国土交通大臣命令で管轄区域外での活動も行うことができる。



写真-1 調査観測兼清掃船「海煌」

3. 鹿児島湾への緊急出動について

(1) 出動検討せよ。

21日（水）午後、整備局より鹿児島湾内での漂流木情報が熊港にあり、併せて海煌の「鹿児島湾への出動検討」指示が出された。

この時の海煌は、八代海にて通常のごみ回収作業を行っており、船内には前日までに回収したごみを積み、鹿児島港までの片道分の燃料が残っている状況であった。

このため熊港では早期出動に向けた燃料・飲料水の補給、船に残るごみの陸揚げの手配、乗組員への出動準備指示、現地での作業基地や往路行程検討を開始。準備等を含め翌日早朝には出港できることを夕方までに確認し基地港（八代港）にて待機した。

(2) 緊急出動せよ。

22日(木)午後、海煌の鹿児島湾出動命令が九州地方整備局長から発出され、翌23日(金)午前5時過ぎに八代港を出港した。

出港を翌日早朝としたのは、十管からの漂流木情報に鹿児島湾入り口での発見情報が多数あり、危険な夜間航行回避と明るい時間帯での同海域での漂流木の探索・回収を考慮したためである。

(3) 鹿児島湾の安全を確保せよ。

a) 現地到着

八代港を出港して9時間後の午後2時、鹿児島湾口に差し掛かり最初の漂流木を発見。幸い付近に航行船舶等は無かったが、潮流で航行船舶が集中する航路へ流入するおそれがあったため、周辺の安全を確認し迅速に回収した。

再び鹿児島港を目指し北上を開始してすぐに、また新たな漂流木群が姿を現したため、引き続き周辺に漂う全ての流木を回収したが、この時点で夕暮れとなり新たな漂流木の発見ができない状況となったことから目的地である鹿児島港へ向け航行を再開した。

結局、目的地の鹿児島港に到着したのは出港から15時間後の午後8時となり、これから続く長い作業を予感させる初日となった。



写真-2 「海煌」鹿児島港入港状況

b) 今日はどこに向かえば・・・。

24日(土)は午前8時過ぎに鹿児島港を出港した。

前日夜、現地の鹿児島港湾・空港整備事務所(以下、鹿港)が十管及び鹿児島県と湾内での流木漂流情報や各主体の回収状況について情報共有を図っており、海煌の今日の流木回収担当海域はジェットfoil等の定期航路沿いと知らされた。

これは派遣先の海域特性情報に乏しい中での活動では非常にありがたく、その後毎日、鹿港より提供されるこの情報が流木回収を進める上で非常に役立つ、以降は十管が鹿児島湾内全域を空から調査した情報(場所・本数)(図-1)も参考に、回収エリアを

限定して搜索作業を進めることとした。

しかし情報では、漂流木群は湾奥から湾口にかけて複数箇所に存在し、かつ带状に400本以上が漂っている様で、「海煌のみでの対応は困難」と思うようになってきた。



図-1 海上保安部からの情報



写真-3 船上での漂流木位置確認

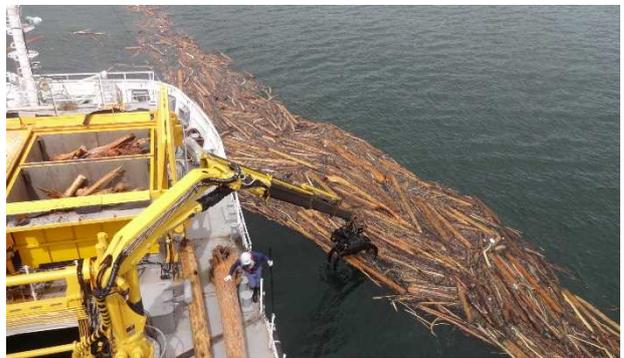


写真-4 漂流木回収状況

c) 地元との連携。

海煌が漂流木回収に着手した頃、既に漂流木の回収を行っていた十管の巡視艇・鹿児島県の漁業調査船・地元漁協の漁船は、漂流木を船上に引き上げる装置が無い事や、船の長さには匹敵する漂流木の回収に苦労していることが判ってきた。

そこで、海煌の多関節クレーンを活用した受け取り回収を提案し、船舶無線や携帯で各船と連絡を取り合い、回収に苦労している大型の漂流木を海煌が回収して回ることとした。



写真-5 巡視艇からの漂流木回収



写真-6 地元漁船からの漂流木回収

d) 多関節クレーンが壊れた！

緊急出動してから5日目の27日(火)、活躍してきた多関節クレーンの油圧ホースが作業中に断裂し、回収作業が続けられない事態となった。

原因は、漂流木が日数経過と共に海水を吸収し重量が増え、多関節クレーンの定格吊荷重に近づいたためと推測された。

出動検討段階から、今回の任務には多関節クレーンの活躍が生命線であると認識しており、予備部品の一部は持参してきていたが、運悪く断裂箇所適合の油圧ホースは持ち合わせていなかった。

そこで、持参していた延長の異なる油圧ホースを応急的に使用し、幸いにも1時間程度で回収作業を再開することが出来た。

なお、その後の漂流木回収では、多関節クレーン付属のチェーンソーで一度切断し、吊荷重に注意しながら回収を進めていった。



写真-7 油圧ホース応急復旧後(白ホース部分)

e) 回収コンテナから流木を出せない！

海煌では回収した漂流木は船上の回収コンテナに収容し、満載になった時点で陸揚げを行っている。派遣先での陸揚げ場所は意外と不陸が大きかったことから、回収コンテナを陸上に置いても水平を保てない事から底蓋を固定するピンを抜くことができず、流木が取り出せない事態となった。

しかし「鹿児島湾にはまだ危険な流木が漂流しており、こんな所で時間は掛けられない！」と、とっさに手頃な流木を枕木にして、何とか水平を保ち対応した。

平時は基地港の平坦地で陸揚げを行っており、こうした事態を想定していなかった。



写真-8 回収コンテナの陸揚げ状況(不陸地)

f) 任務完了まで。

緊急出動から9日目の10月1日(土)、台風18号の接近に伴い、関係機関が集まり対応を協議した結果、台風警戒を兼ねた4日間の一斉作業休止が決定。出港前準備を含めて11日振りの休暇に、船員の顔にも笑みが戻る事となった。

休暇明けの6日(木)より回収作業を再開したが、台風の影響による流木の湾内拡散もあってか、漂流木の発見・回収場所も鹿児島湾内の南や北、東に日々変わって、現場への行き来が大変となったが、これまでの回収成果により、現場での漂流木数も日々少なくなった。

11日(火)、十管・鹿児島県は湾内の流木回収に目処がたったことから、整備局への要請が解除され、長かった鹿児島湾での任務が無事完了した。

9月23日から10月11日迄の13日間において、海煌での漂流木回収本数は1,769本にのぼった。(図-2)



写真-9 海煌から陸揚げされた漂流木

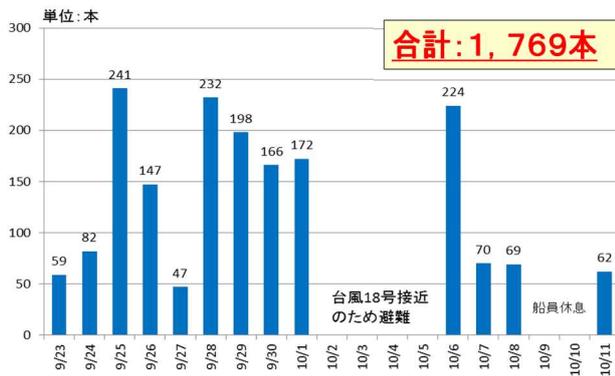


図-2 漂流木回収実績表

4. 反省・要改善事項

(1) 「多関節クレーンは油圧ホースが命」

海煌は多関節クレーンを使用し流木回収業務に当たっているが、全て油圧で動かしているため油圧ホース断裂ともなれば装置は動かない。クレーンは海外メーカー製品で、緊急に発注しても調達に期間を要することから、油圧ホース等の消耗部品は常に一式を準備しておく必要があると考える。

(2) 「回収コンテナには改良の余地有り」

現在の回収コンテナは陸揚げ場所で水平性が保たれて底蓋が開く構造となっているため、派遣先岸壁の不陸を考慮すればコンテナ底が開くのではなく、側面が開くように改良することで現地の状況に影響されることなく対応が可能と考える

5. さいごに

今回の鹿児島湾における流木回収は、管轄区域外で海域特性情報に乏しい中での作業かつ、色々な面で困難が発生したが、地元機関との日々の情報共有・作業連携もあり、効率的に実施すること

ができた。

また、国が所有する調査観測兼清掃船の重要性とその効果について、地元マスコミの取材を通じて多くの方々に認識して頂く一助になったと確信している。

今回の活躍を受けて、他地域からの派遣要請が増えることも予想されることから、迅速且つ適切に対応できるよう、今回の反省点を踏まえて取り組んでいきたい。

謝辞：今回の鹿児島湾における海煌の活動に於いて現地の鹿児島港湾・空港整備事務所による迅速かつ手厚い支援にこの場を借りて謝意を表す。

直轄作業船の大規模災害への対応 ～緊急出動の経験を踏まえて～

奥山真治¹・中野昭人¹

¹中部地方整備局 名古屋港湾事務所 海洋環境・防災課（〒455-0045 名古屋市港区築地町2番地）

南海トラフ巨大地震の発生が危惧されているなか、全国的には東日本大震災や熊本地震といった大規模地震災害が発生している。

これらの大規模災害に対して直轄作業船を派遣し、浚渫兼油回収船「清龍丸」による、緊急物資輸送、給水、入浴等の支援活動や海洋環境整備船「白龍」による被災地沿岸域の漂流物の除去活動を実施してきた。これまでの支援活動や実海域訓練から得られた課題を整理し、直轄作業船による大規模災害への対応を検討した。

キーワード：災害時における支援活動，直轄作業船の連携，航路啓開

1. はじめに

名古屋港湾事務所には、3隻の直轄作業船 浚渫兼油回収船「清龍丸」、海洋環境整備船「白龍」、港湾業務艇「翔龍」が所属している。

(1) 浚渫兼油回収船「清龍丸」

「清龍丸」は、名古屋港内において一般船舶が輻輳する航路や泊地での浚渫を行うほか、タンカー事故などによる大量の油流出事故が発生した場合、現場に向かい油の回収を実施する。また、東日本大震災や熊本地震では、緊急支援物資を輸送する等の支援活動を実施した。



写真-1 清龍丸

(2) 海洋環境整備船「白龍」

「白龍」は、航行船舶の安全確保及び海域環境の保全のため、伊勢湾・三河湾の担務海域（約1,800km²）において、流木やゴミなど漂流物の回収を行うほか、定期的に海域の水質及び底質調査を実施している。なお、同海

域において油の流出事故があれば、現場に向かい油の回収を実施する。また、東日本大震災では、仙台塩釜港に outgoing, 津波により流出した漂流物の回収作業を実施した。



写真-2 白龍

(3) 港湾業務艇「翔龍」

「翔龍」は、港湾工事の監督や検査、測量・調査等に使用している。また、災害時には施設の点検業務や「清龍丸」及び「白龍」の活動支援を行う。



写真-3 翔龍

2. 東日本大震災における支援活動

(1) 東日本大震災の概要

平成23年3月11日、三陸沖を震源とした最大震度7の強い揺れを観測する地震が発生し、それに伴う国内観測史上最大級の津波によって、東北・関東地方を中心とする広い範囲に甚大な被害をもたらした。

(2) 清龍丸の緊急出動

地震発生時に被災地での物資や資材が不足し、陸路からの物資の大量輸送が困難であったため、国土交通省港湾局からの出動要請を受け、清龍丸が出動した。

表-1 清龍丸の軌跡（時系列）

日 時 (平成23年)	内 容
3月11日 (金) 14:46	地震発生 (最大震度7)
3月12日 (土)	本省港湾局から出動要請
3月12日 (土)	※支援物資の積込み開始
3月13日 (日) 8:00	名古屋港を出港
3月16日 (水) 11:00	釜石港に入港
3月17日 (木)	※支援物資荷揚げ開始
3月20日 (日) 6:30	釜石港を出港
3月21日 (月) 8:15	苫小牧港に入港
3月21日 (月)	※支援物資調達・補給作業
3月22日 (火) 17:00	苫小牧港を出港
3月23日 (水) 16:00	大船渡港に入港
3月23日 (水)	※支援物資荷揚げ開始
3月24日 (木) 8:50	大船渡港を出港
3月26日 (土) 10:00	名古屋港に入港



図-1 清龍丸の軌跡

(3) 緊急物資輸送支援

国土交通省港湾局からの出動要請を受け、備蓄品等の支援物資（ペットボトル（500ml）約6,000本・食料 約2,000食・毛布 約100枚等）を積み込んだ清龍丸は、13日8時に名古屋港（愛知県）を出発し、3日後の朝11時に釜石港（岩手県）に到着、支援物資の荷卸しを行った。

引き続き支援活動を行うため、苫小牧港（北海道）に

向かい、物資調達（ペットボトル（500ml）約4,000本・食料 約5,000食・毛布 約200枚等）を行った清龍丸は、その後、大船渡港（岩手県）に入港、支援物資の荷卸しを行った。



写真-4 支援物資荷下ろし

(4) 白龍の出動

東日本大震災に伴い、4月19日～5月24日まで活動拠点を仙台塩釜港とし、仙台塩釜港及び石巻港を有する仙台湾沿岸海域の漂流物の除去作業に従事した。約240m3の流木、漁具等を回収・陸揚げ作業を実施し、海上交通路の確保による港湾機能の早期回復に貢献した。

表-2 白龍の軌跡（時系列）

日 時 (平成23年)	内 容
4月18日 (月)	本省港湾局から出動要請
4月19日 (火) 10:00	名古屋港を出港
4月21日 (木) 14:00	仙台塩釜港に入港
4月23日 (土)	※漂流物除去作業の実施
5月22日 (日)	仙台塩釜港を出港
5月24日 (火)	名古屋港に入港

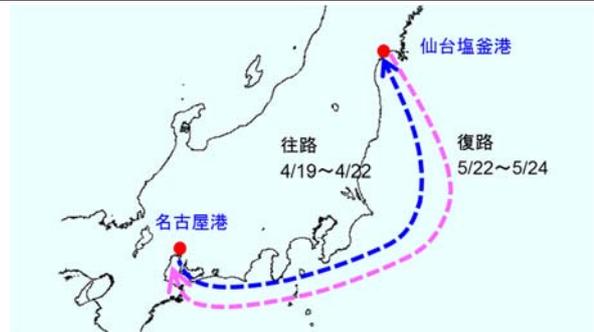


図-2 白龍の軌跡



写真-5 仙台塩釜港で停泊する白龍



写真-6 回収した漁具



図-3 清龍丸の軌跡

3. 熊本地震における支援活動

(1) 熊本地震の概要

熊本地震は、熊本県と大分県で震度7を観測する地震が平成28年4月14日夜間および4月16日未明に発生したほか、最大震度6強の地震が2回、6弱の地震が3回発生するなど、九州地方に甚大な被害をもたらした。

(2) 清龍丸の緊急出動

地震発生時に被災地での物資や資材が不足し、被災地の自治体のみでは災害対応が困難と想定されたため、国土交通省港湾局からの出動要請を受け、国が必要な物資又は資材を緊急輸送する「プッシュ型支援」として出動した。また、国土交通省港湾局の指示により、入浴支援及び給水支援を行った。

表-3 清龍丸の軌跡（時系列）

日 時 (平成28年)	内 容
4月14日 (木) 21:26	地震発生 (最大震度7)
4月17日 (日) 12:00	本省港湾局から出動要請
4月17日 (日) 14:30	※支援物資の積込み開始
4月18日 (月) 10:00	名古屋港を出港
4月20日 (水) 7:00	大分港に入港
4月20日 (水) 7:40	※支援物資荷揚げ開始
4月20日 (水) 9:30	大分港を出港
4月20日 (水) 16:30	宇部港に入港
4月21日 (木)	※支援物資調達・補給作業
4月22日 (金) 10:30	宇部港を出港
4月23日 (土) 15:00	三角港に入港
4月23日 (土) 18:00	※入浴支援開始
4月24日 (日) 8:30	※給水支援開始
4月26日 (火) 10:25	三角港を出港
4月28日 (木) 13:00	名古屋港に入港

(3) 緊急物資輸送支援

国土交通省港湾局からの出動要請を受け、備蓄品等の支援物資（ペットボトル（500ml）約2万本・食料 約2,700食・毛布 約600枚等）を積み込んだ清龍丸は、18日10時に名古屋港（愛知県）を出発し、2日後の朝7時に大分港（大分県）に到着、九州地方整備局が災害協定を締結している一般社団法人日本埋立浚渫協会九州支部の手配したトラックに積み込み、南阿蘇村に届けられた。

引き続き支援活動を行うため、宇部港（山口県）に向かい、食料・水などの補給及び物資調達を行った。



写真-7 支援物資荷下ろし

(4) 入浴支援

三角港（熊本県）に到着した清龍丸は、23日18時から入浴支援を開始、23日～25日の3日間で延べ298名の方が入浴した。また、同時に船内で調理した軽食や洗濯機、乾燥機等の提供を行った。



写真-8 入浴支援（待合室）



写真-9 食事支援

(5) 給水支援

三角港では、清龍丸の清水タンクより九州地方整備局所属の海洋環境整備船「海煌」へ約2トンの給水を行い、熊本港で陸揚げされ、被災者の飲料水として提供された。



写真-10 給水支援

4. 清龍丸の支援活動で見た課題と対応

(1) 緊急物資輸送支援

【課題】

- ① 全国の港の海図を所有していなかったため、緊急手配が必要となった。
- ② 支援物資の船舶への搬入出は、相当の人員と時間が必要であった。
- ③ 寄港地への入出港手配や物資調達は、緊急入港するための代理店が機能せず物資が揃わない可能性があった。

【対応】

熊本地震は、限定的なエリアの被災であったため、その周辺のエリアの大きな被害は無く、物資や船舶代理店の手配が可能であったが、南海トラフ巨大地震のように広範囲のエリアでの被害が想定される場合は、代理店手配も含め被災地への支援が困難になることが想定されることから、事前調整が重要である。

また、支援物資の搬入出は、物資をパッケージ化してクレーンで積降するなどの工夫が必要である。

(2) 入浴支援

【課題】

- ① 女性入浴者が髪を乾かししたり化粧したりするための部屋（スペース）が必要となった。
- ② 入浴者は、夕方以降に集中しており、お湯を供給するボイラーの許容を超え、水に変わる可能性があった。
- ③ 女性入浴者の入浴案内には、女性職員の手配が必要である。

【対応】

被災地のニーズを的確に把握し、支援時間帯の適切な設定や変更など、現地における臨機な対応を行う必要がある。また、既存設備及び機能の範囲内で支援活動を行うなど、乗組員の負担への配慮を含めて検討する必要がある。

(3) 給水支援

【課題】

- ① 清龍丸は、清水を滅菌処理せず相手方のタンクへ供給するため、熊本地震では、清龍丸から供給した水を九州地方整備局所属「海煌」の滅菌装置にて処理を行った。
- ② 給水を行う際に、双方の配管口径が異なるため、九州地方整備局にて急遽、接続アタッチメントを作成した。

【対応】

飲料水を被災者へ提供する場合には、滅菌装置を介して提供できる船舶等への供給や可変式の接続アタッチメントの装備が必要である。

(4) その他清龍丸で行える支援

a) 電源供給支援

岸壁での支援活動（携帯充電・照明など）を行うために、清龍丸から岸壁上へ電源を供給。

b) 燃料支援

避難所や災害拠点病院非常電源用の燃料として清龍丸の燃料（A重油）を供給。

c) 雑用水支援

自宅や避難所で使用する雑用水（トイレ・入浴・洗濯など）を供給。

(5) 清龍丸の支援活動に対する被災地の声

被災地において入浴支援等を行った際には、利用された方々から感謝の言葉をいただき、1年経った今年4月には、「熊本地震から早一年が経ちます。入浴に食事と大変お世話になりました。まだまだ完全復興にはかなりの時間を必要としますが、現地の人達は、元気に頑張っています。」といった内容の近況報告をいただいた。

このような被災地からの声に感激するとともに、1年を過ぎた現在においても震災からの復興はまだまだ終わっていないと感じさせられた。

5. 大規模災害に備えた航路啓開訓練

東日本大震災の教訓を踏まえ、東京湾、伊勢湾、大阪湾の一般水域のうち非常災害時に船舶の交通を確保する必要がある航路として緊急確保航路に指定され、国が迅速に航路啓開作業を行うものである。（平成25年6月港湾法改正）

伊勢湾においては、下図に示す約140kmが緊急確保航路として指定され、船舶が安全に航行するため、地震津波によって海域に流出した漂流物や海底の障害物を除去することとなった。

大規模災害に備え、当所所属の海洋環境整備船「白龍」及び港湾業務艇「翔龍」を使用した航路啓開訓練を実施した。

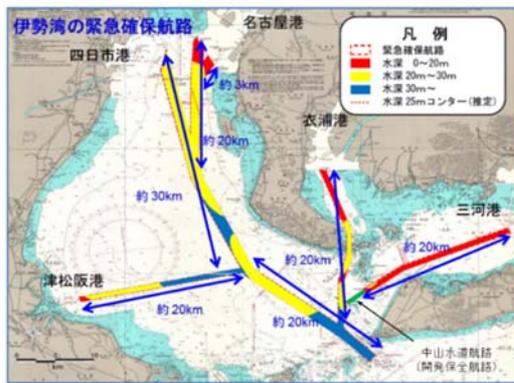


図-4 伊勢湾の緊急確保航路

(1) 白龍及び翔龍による航路啓開訓練

台風16号（平成28年）の通過後、河川や海岸から流出した草木など大量の漂流物が確認されたことから、漂流物の回収に当たり、緊急確保航路の啓開訓練も兼ねて回収作業を行った。

本訓練は、白龍と翔龍等が連携した漂流物回収を目的に実施するもので、翔龍等が先行し漂流物の探索を行い、その情報を白龍に伝達する実海域訓練である。なお、本訓練には、翔龍を含めた小型船舶2隻が参加している。

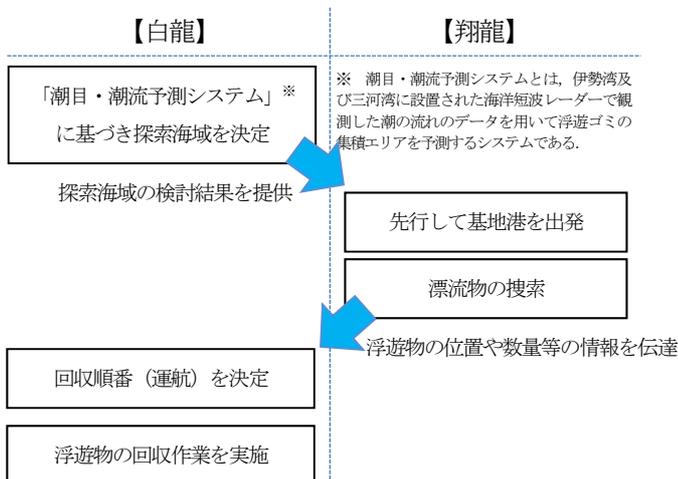


図-5 訓練手順フロー

位置情報の伝達には、伊勢湾グリッドマップを作成し、回収ポイントをメッシュ番号でも確認することとし、緯度・経度を伝達するとともにグリッドマップのメッシュ番号を連絡することで、作業海域が容易に認識でき、運航計画や速やかな作業指示に有効であった。

【漂流物回収作業の実例】

平成28年9月21日10時30分頃（台風16号の通過後）に第四管区海上保安本部より、「伊勢湾内の桑名沖から河芸沖にかけて流木等の漂流物が大量にある」との情報提供を受けたことから、「白龍」を急遽現地へ派遣し、9月25日～10月2日まで伊勢湾内の漂流物の回収作業を実施した。

大きな流木を優先して回収し、年間回収量の約7割に相当する167m³の漂流物を回収した。



写真-11 海面に広がる漂流物



写真-12 回収した流木

6. 白龍の支援活動で見た課題と対応

【課題】

- 漂流物の探索は、担務海域（伊勢湾・三河湾）内では、「潮目・漂流物予測システム」や「漂流物追跡システム」を活用しているものの、担務海域以外では、同システムの対象範囲外となるため、広大な海域で目視による漂流物の探索となる。
- 他船より浮遊物位置の座標を白龍に連絡されても、現地に到着する頃には、潮流や風により漂流物が移動しているケースがあった。

【対応】

他船による先行探索も有用であったものの、海上から

の限られた情報となるため、海上保安部等関係機関や管内直轄事務所との連携強化を図り、ドローンやヘリコプターなど上空からのリアルタイム情報の入手方法の検討とともにUTMグリッドマップを用いて、相互提供を行うことが必要である。

※UTMグリッドマップは、UTM（ユニバーサル横メルカトル）座標により任意の場所を特定する手法であり、世界的にも一般的に用いられている。



図-6 UTMグリッドマップ（伊勢湾）

【課題】

- ③ 伊勢湾・三河湾内で回収した漂流物や海底の障害物などの陸揚げ・保管場所を事前に選定しておく必要がある。

【対応】

白龍で回収した漂流物の陸揚げ場所は、名古屋港と鳥羽港のみであり、三河港方面も含めた陸揚げ場所の複数化に向けて検討を行っている。

また、ガレキ・車両・コンテナなど多種に渡る回収物の陸揚げ・保管場所の確保に向けて、関係機関との協議・調整に取り組んでいく。

7. まとめ

熊本地震において、清龍丸による入浴支援や食事支援は、新たな被災地支援として取り組んだ。

支援活動は、船舶の機能を使って、どのような支援が何処まで行えるのかなど支援活動の範囲や体制などの検討を進めていきたいと考えている。

また、災害への対応力を維持・向上していくため、関係機関等との防災連携を維持・強化し、航路啓開の実効性の向上を図っていきたいと考えている。

国道53号^{よるず}万跨線橋における恒久足場を用いた 橋梁点検の効率化

藤田 和志¹・山花 道孝¹・山田 健¹・大谷 浩一¹・山内 和則²

¹中国地方整備局 岡山国道事務所 管理第二課 (〒700-8539 岡山県岡山市北区富町2-19-12)

²中国地方整備局 岡山国道事務所 総括保全対策官 (〒700-8539 岡山県岡山市北区富町2-19-12)

道路構造物の点検は、近接目視により5年に1回の頻度を基本とする点検が義務づけられた。鉄道を跨ぐ橋梁の場合、鉄道の運行時間帯を避けて点検を行う必要があり、道路単独での点検や補修と比べ点検に時間を要する。特にJR岡山駅に隣接する国道53号万跨線橋では、き電線と橋梁が近接し、点検の作業時間帯や桁下作業スペースに制約があるため、近接目視点検が困難な状況である。この度、仮設足場と比較して耐久性や落下等安全性が向上するFRP（繊維強化プラスチック）板を用いた恒久足場の設置を検討し、施工することとなった。今後は、第三者に対する事故リスクとライフサイクルコストの両方を軽減した点検・補修作業が実施可能となる。

キーワード 橋梁点検, 効率化, 跨線橋, 恒久足場, FRP

1. これまでの経緯

(1) 背景

2014年4月に開催された社会資本整備審議会道路分科会基本政策部会において、道路の老朽化対策の本格実施に向けて、「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」がとりまとめられ、道路法施行規則の一部を改正する省令により、トンネル、橋等の道路構造物の点検は、近接目視により5年に1回の頻度を基本とする点検が義務づけられた。したがって、当該橋梁の万跨線橋についても近接目視による点検が必須となった。一方で、当該橋梁については点検の作業時間帯や桁下作業スペースに制約があるため、近接目視点検が困難な状況である。



図-1 万跨線橋位置図 (概略)

(2) 点検が困難な理由

跨線橋における近接目視による点検については、従来は吊り足場（単管+足場板）を設置して実施してきた。しかし、万跨線橋においては以下の理由によって吊り足場の設置が困難と考えられていた。

a) 万跨線橋の位置

万跨線橋は、JR岡山駅から北に400mほどのところに位置する（図-1・図-2）、橋長L=88.9mの跨線橋（RC床



図-2 万跨線橋位置図 (詳細)

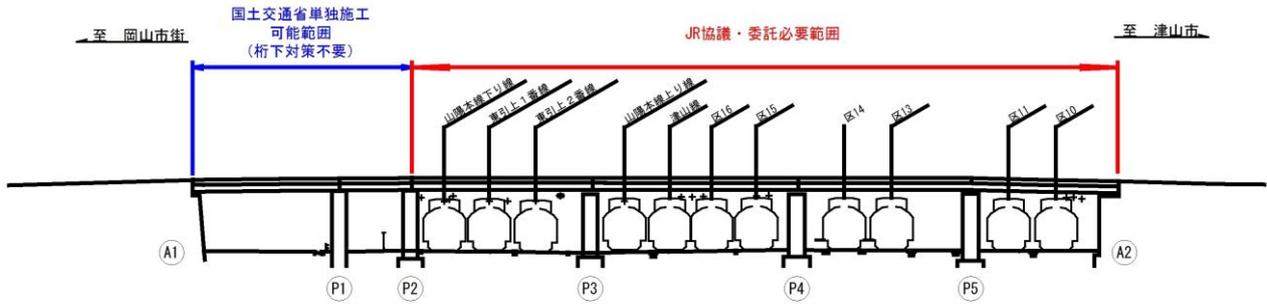


図-3 万跨線橋縦断面図



図-4 万跨線橋P2-A2間写真



図-5 P2～P3間桁下状況写真

版鋼板桁橋)である。

中四国の結節点として機能するターミナル駅である岡山駅にはホーム・留置線が多数設置され、岡山駅に近接する万跨線橋の下部には山陽本線・津山線・引き込み線など合わせて11本の線路が敷設されている(図-3)。このように、在来線の線路がひしめく箇所を越える形となっている上に、跨線橋の上部には新幹線が走行する高架橋までもが存在するため、万跨線橋の桁下空間は点検する上で大変に厳しい状況である(図-4)。

特に、桁下直下には主桁下フランジに吊り金具を有する架空線が存在するため、桁下と架空線とのクリアラン

期間(年)	5		10		15	
	3年	1年	3年	1年	3年	1年
従来足場設置	足場設置	撤去	足場設置	撤去	足場設置	撤去
定期点検(補修工事)	点検	5年間隔	点検	5年間隔	点検	5年間隔

図-6 足場設置・撤去期間と点検期間の関係

スが最小で280mm程度と非常に狭く、P2～P3間では吊り足場の設置が不可能だった(図-5)。

b) 作業時間の制約

線路下の交差線路が多い上に、市街地に立地しかつ列車の終着点である岡山駅に近い箇所であるため、作業実施に必要な停電が可能な間合いが少なく、足場設置のための実作業時間が1日当たり38分、かつ1ヶ月の間に5回程度と非常に限られている。それゆえ、足場の設置に3年、撤去に1年と多くの年数を費やされることが分かった。5年に1度の点検を実施するために、4年間は足場関係の作業が必要となる(図-6)。

この結果、従来型の吊り足場を設置して実際に点検・補修する場合、以下の問題が懸念される。

- ①足場工事費の増加
- ②吊り足場の存置期間の増加により、足場自体の安全性に懸念
- ③常時JR線路上で吊り足場の設置・撤去の作業が行われている状態になり、事故のリスクが増加

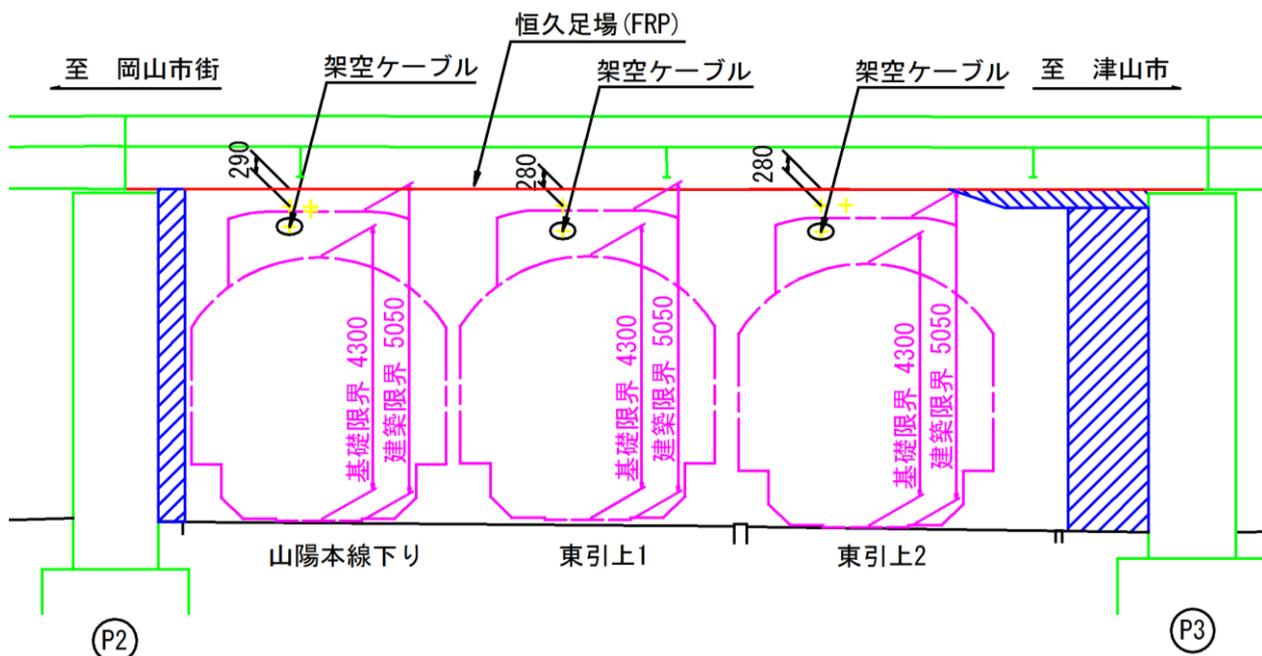


図-7 万跨線橋足場設置要領図 (側面図)

2. JR西日本との協議

点検補修用の足場設置に向けて、2007年のコンクリート片の剥落以降、実現性・安全性・施工工期・コスト等を考慮し、JR西日本との協議・検討を継続して実施してきた。

(1) 補修に関する基本協定の締結

2007年に緊急点検を実施して以降、JR西日本とは主に単管と足場板を利用する従来型の吊り足場を設置することを念頭に、協議を重ねていた。だが、検討を進めるたびに、解決策に対して新たな課題が発覚し、議論に行き詰まりが生じた。

2014年には吊り足場の設置を前提に、JR西日本と補修に関する基本協定を締結するに至ったが、足場施工に関しては依然として課題が残った。工期短縮のために、①断路器の設置②作業休止期間の見直し③停電日数の増加などを検討したが、基本協定で定めた3カ年の間での執行が困難と予想され、JR西日本からは2026年まで足場設置期間を延期することを提示された。これにより、5年に1回と定めた法令を遵守できない状態となった。

(2) 恒久足場の検討

JR西日本における停電回数や作業時間に関する内規、吊り足場工法についての実績の多さなど、従来の慣例に固執するあまり、JR西日本との協議が長期に亘った。だが、従来工法から脱却しなければ事態が進展しないとい

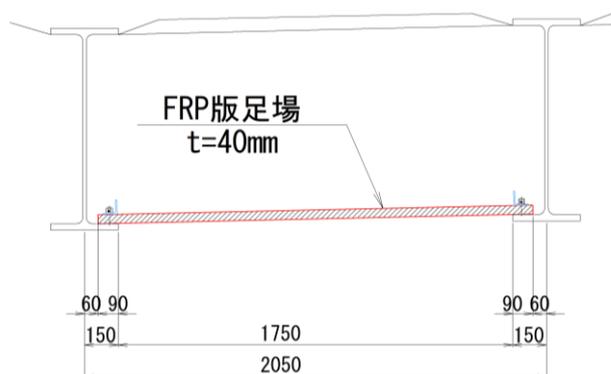


図-8 FRP版取付橋梁断面図

う危機感から、国土交通省・JR西日本・施工業者・設計業者が集まって、新たな点検方法を導き出す検討会を設置した。

当初は、①当該区間だけディーゼル車で牽引して停電させる②線路部分を切り下げて架空線を移動させ足場設置に必要なスペースを確保する③線路上から点検できるような新たな高所作業車を開発する——など、複数の手段について妥当性を検討した。また、足場設置に絞った後も、材料や構造、施工方法について課題を抽出した上で最適案を確定し、仮設か本設かについても維持管理の観点などを踏まえて検討を重ねた。

3. 恒久足場 (FRP) の特徴

検討会にて最終的に、足場の材料としてFRP（繊維強化プラスチック）版を採択し、主桁間に設置して恒久足場として活用することを決定した（図-7・図-8）。

(1) 恒久足場検討時の前提条件

恒久足場については、以下の条件を満たす必要がある。

a) 施工性

営業中の線路の上部で作業するため、作業時間に制約がある。施工にかかる時間を可能な限り短縮する必要がある。

b) 電気絶縁性

電車線上への設置となるため、足場は絶縁性を有した材料としなければならない。

c) 耐荷重

点検時には点検作業員・点検資機材が、補修時には補修作業員・補修資機材が荷重となって足場に負荷を与える。ゆえに、足場はその荷重に耐えうる構造が求められる。

d) 軽量性

恒久足場を橋梁に直接設置する場合、足場そのものが死荷重となって橋梁に影響を及ぼす。橋梁への負荷を小さくすることが望まれる。

(2) FRPの材質

FRP版は以下の材質を持つ。

a) 施工性

現場での加工が容易で、施工時間を短縮できる。

b) 電気絶縁性

プラスチックであり、絶縁性を有する。

c) 耐荷重

引張強さ・曲げ強さは表-1に示す通りである。

d) 軽量性

比重が鋼の1/4、アルミの2/3であり、幅400mm、高さ40mmのFRP板の1m当たりの質量は6.0kgと軽量である。

e) 耐食性

ステンレスやアルミよりも、酸・アルカリ・塩に強く、温度変化による強度劣化も少ない。

(3) 恒久足場（FRP）のメリット

上記の材質を活かして恒久足場（FRP）を設置すると、

表-1 FRP版の耐力

項目	圧力[MPa]
引張強さ	300
引張弾性率	25000
曲げ強さ	350
曲げ弾性率	15000

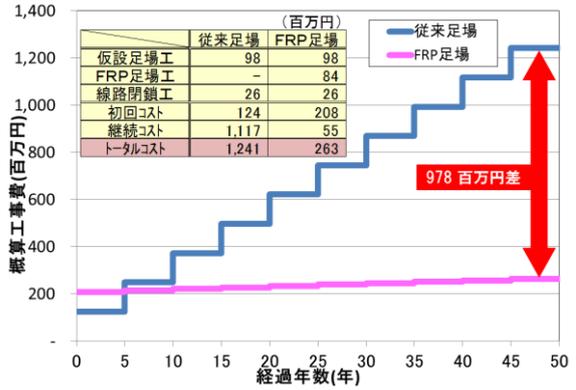


図-9 従来型足場とFRP恒久足場の工事費比較

以下のメリットが発生する。

a) ライフサイクルコストの大幅な縮減

図-9に示す通り、足場設置にかかる工事費は、従来型足場と比較して初期投資は大きいものの、2回目（5年後）の点検・補修以降ではコストが安価になる。

b) 安全性の向上

鋼より強度が高いため、耐久性や落下等安全性が優位となる。

c) 事故リスクの軽減

設置・撤去といった施工を繰り返す必要性がなくなるため、事故の危険性を低くできる。

d) コンクリート片落下の防止

恒久足場そのものが落下防止ネット等の役割を果たし、橋梁からコンクリート片などが線路へ落下するのを阻止できる。

4. 恒久足場（FRP）設置における課題と解決策

(1) 課題

万跨線橋には、主桁間に5～6m間隔で横桁が設置されており、全ての横桁がI桁で、かつ横桁と下フランジの隙間が18cm程度と狭隘である。よって、恒久足場を設

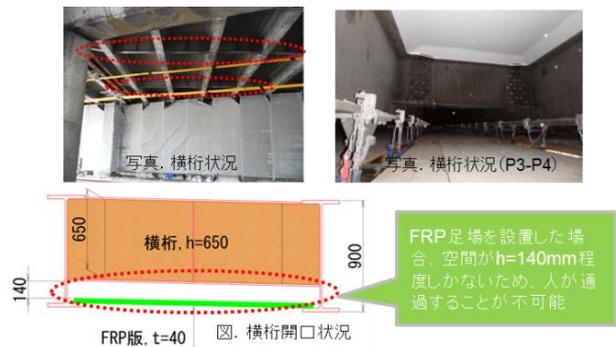


図-10 横桁の状況

置すると足場内部の通行が不可能になることが想定された(図-10)。

(2) 解決策

恒久足場内部の通行を可能とするため、足場を設置すると同時に既設の横桁に開口部(マンホール)を設けることを決めた(図-11・図-12)。横桁を開孔することで、以下のメリットが生まれると期待されている。

a) 足場内部の通行

横桁で仕切られた空間を直接行き来できるようになるため、点検・補修作業の効率化が図られる。

b) 安全性の向上

点検・補修の際に線路を經由せずに足場内部に立ち入ることができるため、列車(第三者)に対する安全性や作業員の転落等に対する作業面での安全性が向上する。

c) 協議・手続きの簡略化

線路上での作業が不要となることで、線路閉鎖や保安停電が簡易化されるため、点検・補修時の協議や手続きが簡略化され、作業を効率化できる。

なお、開口部の設置の設計においては、橋梁の構造への影響も考慮した。検討の結果、欠損断面に対するアングル補強を合わせて実施すること決定した。設計段階にてFEM解析を用いて応力の照査を実施した結果、アングル補強後には安全が確保されていることを確認した。

5. 今後の展望

万跨線橋における制約条件(①桁下クリアランスが少ない②作業空間が狭隘③作業時間が少ない)の下に点検等の作業を実施する場合、FRP版を活用する技術は有効である。この技術は、他の同制約条件下である跨線橋に

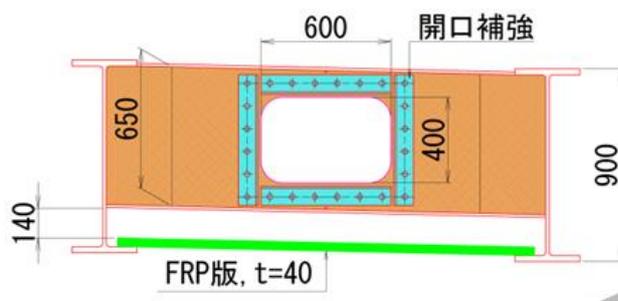


図-11 横桁開孔・補強設計図

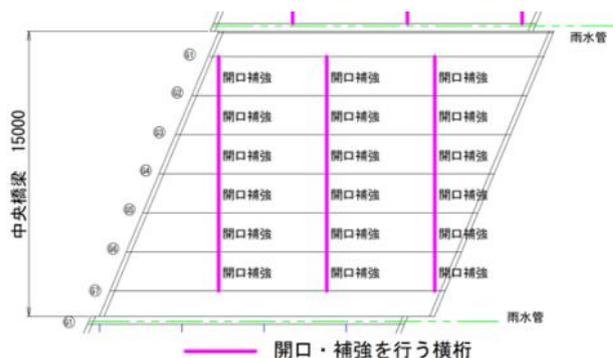


図-12 万跨線橋開口・補強箇所平面図

も活用できるものであると思われる。

5年に1回の近接目視による法定点検が必須となった今日、点検・補修に際しては架橋条件などによってさまざまな課題が生じることが予想される。今回はFRP版という従来と異なる足場形式に注目したが、今後も同様に、従来の対応策に固執しすぎることなく新技術の導入を検討するとともに、画期的な方策を模索しながら道路構造物のメンテナンス業務を確実に効率的に遂行していくことが、道路管理者に託された使命であると考えられる。

荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数法の 港湾構造物への適用性に関する諸考察

竹信 正寛¹・宮田 正史¹

¹国土技術政策総合研究所 港湾研究部（〒236-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」（以下、港湾技術基準）において、防波堤や係留施設の全体安定性の照査に対して、レベル1信頼性設計法（部分係数法）が導入された。現在、港湾技術基準の改定に着手しており、部分係数法に関する設計手法については、材料係数アプローチに基づく部分係数法から、荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数法に移行予定である。本稿ではその理由について、港湾構造物への荷重抵抗係数アプローチの採用による設計実務および信頼性設計法としてのメリットとともに示した。

キーワード レベル1信頼性設計法、部分係数法、荷重抵抗係数アプローチ、不確実性

1. はじめに

港湾の施設の技術上の基準¹⁾（以下、港湾技術基準）は、平成19年の改定により、性能設計体系が導入された。この際、港湾構造物における代表的な構造形式に対し、従来の安全率や許容応力度を用いた設計法に代わり、部分係数を用いたレベル1信頼性設計法が導入された。現行の港湾技術基準は、平成30年を目途に改正予定であり、これに伴い、特に部分係数法を用いた設計法に関しては、材料係数アプローチに基づく部分係数法から、荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数法に移行予定である。

本稿では、①信頼性設計法に関する概説、②現行基準における部分係数法の課題と荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数法の導入に関する設計実務上のメリット、③荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数の導入に関する信頼性設計法の高度化の観点におけるメリットの順に論じ、今回の港湾技術基準の改正により、荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数法を導入する理由について述べる。

2. 信頼性設計法に関する概説

(1) 安全率法と信頼性設計法の違い

港湾構造物の設計では、本来、多種多様な不確実性を考慮する必要がある。例として、地盤強度や材料強度、水圧や土圧など設計パラメータが有するばらつき（ばらつきの概念を図-1に示す。）、設計法自体が有する誤差などがある。これらの不確実性に対処する代表的な設計手法として安全率法と信頼性設計法があり、以下ではそ

れぞれの特徴について述べる。

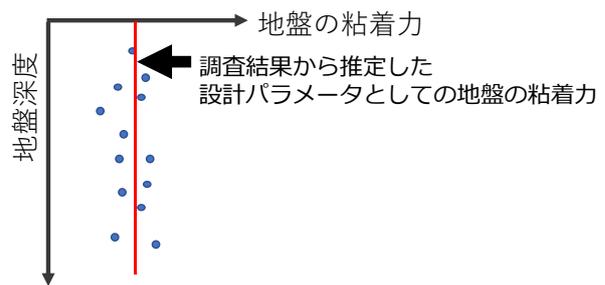


図-1 設計パラメータのばらつきの概念図（例）

(a) 安全率法

安全率法（または許容応力度法）は、安全率がある許容される安全率を下回らないように断面を設定する設計法である。港湾構造物の設計では、現行の港湾技術基準より以前の基準においては長年の間、安全率法が用いられてきた。しかし、経験に基づく手法であり、安全率を見直そうとしても、その根拠を定量的に示すことができないという課題がある。

(b) 信頼性設計法

信頼性設計法は、設計上想定される多種多様な不確実性の要因を確率論的に取り扱い、構造物に要求される限界状態を超過する確率を定量的に照査し、設計断面を決定する方法である。このため信頼性設計法では、構造物が保有する安全性の大小を、破壊確率という指標で定量化し、評価することができる。

破壊確率の数値は、設計に用いる各設計パラメータ

(例えば、地盤のせん断抵抗角や鋼材の降伏応力度など)のばらつき程度に左右される。このため、設計パラメータのばらつき程度を考慮して安全性をコントロールすることが可能となる合理的な設計手法とも言える。このような観点を踏まえ、現行の港湾技術基準においては、信頼性設計法が導入されている。

(2) 現行の港湾技術基準における部分係数法の考え方

(a) レベル1信頼性設計法

信頼性設計法においては、上述のとおり破壊確率を指標として性能照査を行うことが原則である。しかし、設計実務において、直接破壊確率を算定して性能照査することは実務的なハードルが高いため、部分係数法と呼ばれるいわば簡易的な信頼性設計法(レベル1信頼性設計法)が準備されている。

部分係数法では、特性値(ここでは、厳密な定義ではないが、通常設計に用いる設計パラメータの値とする。)に、ある係数(部分係数)を乗じて得られる設計用値を算出し、耐力の設計用値 R_d と、作用効果の設計用値 S_d を求める。この際、 $R_d > S_d$ となれば、破壊確率の計算を設計者で直接実施することなく、ある一定の目標とする破壊確率を概ね担保することが可能となる手法である。この照査方法では、ほとんど安全率法に近い照査手法によって、破壊確率に関する性能照査が可能であるという利点を有している。

(b) 現行港湾基準における部分係数の乗じ方

現行の港湾技術基準における部分係数を用いた照査手法に関して、修正フェレニウス法による円弧すべりに関する安定性照査を例として示す。以下の表-1および図-2は現行の港湾基準において採用されている、修正フェレニウス法によって円弧すべり照査を行う際の部分係数の一例である。

現行基準の部分係数法では、円弧すべり照査を実施する前に、各設計パラメータに設定されている部分係数を特性値に乘じ、各設計パラメータの「設計用値」として算定する。例えば、表-1および図-3を用いて説明すると、粘性土のせん断強度を0.9倍に低減、砂質地盤のせん断抵抗角の正接を0.9倍に低減等の処理を行って設計用値を算定する。更に、これらの設計用値を用いて、修正フェレニウス法によって抵抗モーメントと起動モーメントとの比として定義される耐力作用比が最小となる円弧形状と位置を探索し、許容される耐力作用比(=1.0)が満足するか否かという性能照査を行う。

このように、現行の港湾技術基準では、最初に各設計パラメータの特性値に部分係数を乗じて設計用値を求め、その値を性能照査式に代入して求めた抵抗値や荷重値を利用して、安全性余裕を確保する設計照査の方式を採用している。このような部分係数の乗じ方に基づく部分係数法は、特に「材料係数アプローチによる部分係数法」

と呼ばれ、設計に影響を及ぼす要因の最も源にまでさかのぼり、破壊確率をコントロールするという考え方に基づく設計法である。

表-1 重力式岸壁の円弧すべりにおける永続状態の部分係数¹⁾

		γ	α	μX_k	V	
円弧すべり	γ_c	地盤強度：粘着力	0.90	0.407	1.00	0.04
		地盤強度：せん断抵抗角の正接	0.90	0.330	1.00	0.04
		マウンドが海底面より上に位置する場合	1.10	-0.176	1.00	0.03
	γ_{msf}	1 海底面より上にある地盤、消波工等	1.10	-0.176	1.00	0.03
		2 マウンド、海底面より下にある砂質土	0.90	0.227	1.00	0.03
		3 海底面より下にある粘性土	1.00	0.000	1.00	0.03
	γ_{ms}	1 海底面より上にある地盤、マウンド、消波工等	1.10	-0.176	1.00	0.03
		2 海底面より下にある砂質土	0.90	0.227	1.00	0.03
		3 海底面より下にある粘性土	1.00	0.000	1.00	0.03
γ_w	載荷重	1.80	-0.543	1.00	0.40	
γ_{resL}	残留水位	1.10	-0.014	1.00	0.05	

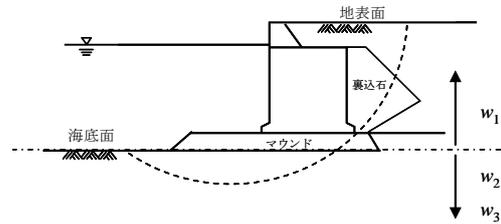


図-2 部分係数を乗じる際の地盤の取扱区分¹⁾

現行基準の手法(例：円弧滑り照査)

赤字：部分係数
青字：設計パラメータ

$$\frac{\sum [\gamma_c c'_s + (\gamma_w W'_i + \gamma_q q_i) \cos^2 \theta \gamma_{ms} \tan \phi'_s] \sec \theta}{\sum [(\gamma_w W_i + \gamma_q q_i) \sin \theta]} \geq 1.0$$

抵抗モーメント(抵抗側) \geq 起動モーメント(作用側)

抵抗モーメント > 起動モーメント ($R_d/S_d \geq 1.0$)
⇒ 目標とする破壊確率以下になることを照査

図-3 現行基準における円弧すべり照査の方法

3. 現行の港湾技術基準における部分係数法による設計法の実務上の課題とその対応

(1) 現行港湾基準における部分係数法による設計法の実務的な課題

部分係数法の導入により、照査する限界状態が明確になるとともに、作用および耐力に関係する多くの設計パラメータのばらつき等を確率論によって取り扱い、限界状態に至る可能性(破壊確率)を考慮した設計を行うことができるようになった。しかし、現場の設計者や関係する研究者等から、現行基準の部分係数法に対する様々な課題が挙げられている。主要な課題について、以下に示す。

1点目は、設計の煩雑さという問題である。現行の港湾技術基準で採用している材料係数アプローチによる部分係数は、各設計パラメータに個別に係数を乗じるため、直感的でわかりやすいという利点を有する一方で、上述

の円弧すべり照査の例において示したように、部分係数が細分化され過ぎており、計算ミスを起こしかねないという設計者からの意見もある。

2点目は、実際には想定し得ない限界状態で照査を行ってしまう可能性があるという点である。例えば、円弧すべり照査の場合、従来は地盤強度の特性値（概ね地盤強度の平均値）に基づき最小安全率となる円弧位置と形状を評価し、その結果に応じて軟弱地盤の地盤改良範囲等を設定してきた。一方で、地盤強度を低減させた設計用値を用いる円弧すべり解析では、図-4に示すように、円弧の位置や形状が変わる場合もあり、設計で照査対象とすべき現実的な限界状態であるかについて不明である。

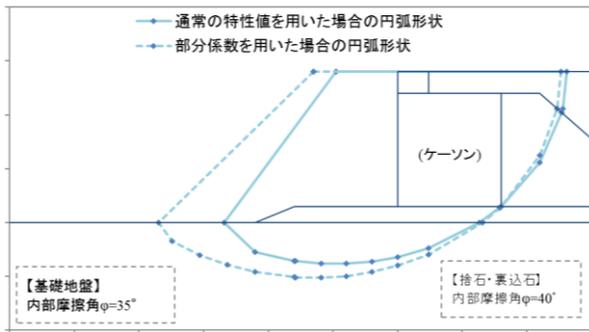


図-4 部分係数を用いた場合の円弧形状の変化

(2) 荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数の導入とその設計実務上の利点

(a) 荷重抵抗係数アプローチによる部分係数の概説

上述した課題を踏まえ、次期港湾基準における、港湾構造物の設計に用いる部分係数の乗じ方（フォーマット）について見直しを行うこととした。ここで、部分係数法において、特性値に対する係数の乗じ方は主に2種類存在する。一つは前述した材料係数アプローチ²⁾による部分係数法、もう一つは荷重抵抗係数アプローチ²⁾による部分係数法である。現行基準の部分係数のフォーマットは、前述のとおり材料係数アプローチに近い方法を採用している。

荷重抵抗係数アプローチとは、各設計パラメータの特性値をそのまま性能照査式に代入して求めた全体的な抵抗値・荷重値を算定し、それぞれの値を抵抗係数によって割り引き、荷重係数によって割り増すことによって、安全性余裕を確保する性能照査方法である。前述までの例における修正フェレニウス法による円弧すべり照査の場合、基本的に各設計パラメータの特性値（概ね平均値）をそのまま利用し、最後に抵抗項または荷重項全体に部分係数を乗じ、修正フェレニウス法による円弧すべり解析を行うことになる。

図-5は修正フェレニウス法による円弧すべり解析において、材料係数アプローチによる部分係数を用いた場合の性能照査式と荷重抵抗係数アプローチによる部分係数を用いた場合の性能照査式をそれぞれ比較したものであ

る。荷重抵抗係数アプローチにおいては、材料係数アプローチによる部分係数と比較して係数を乗じる箇所が大括りとなる。

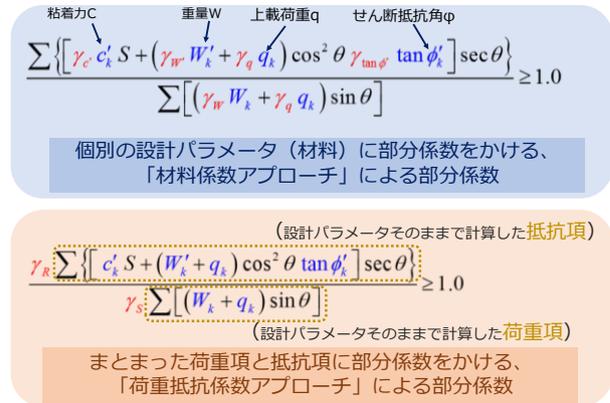


図-5 材料係数アプローチと部分係数アプローチによる部分係数のフォーマットの比較（円弧すべり照査の例）

(b) 荷重抵抗係数アプローチによる部分係数の設計実務上の利点

現行の港湾基準で採用されている材料係数アプローチによる部分係数に代わり、荷重抵抗係数アプローチによる部分係数を導入した場合、少なくとも上述した課題については解消されることが期待される。

まず、3. (1)における課題の1つ目で述べた設計の煩雑さという観点においては、図-5に例として示したように、単純に係数を乗じる箇所は減じられるため、少なくとも設計ミスを誘発する要因が抑えられることとなる。

また、地盤に関連する問題については、地盤の特性値は地盤の平均的な物性値、つまり実現象を設計上最も表現し得ると考えられる値として用いられることが多い。材料係数アプローチによる部分係数法では、性能照査式に代入する値に、特性値にあらかじめ係数を乗じた値を用いて照査を行うため、設計者に違和感を与える側面があることは否めない。

これに対し、荷重抵抗係数アプローチによる設計法では、部分係数は、照査式の一番最後に乗じることになる。このため設計者は、“地盤のもっともありそうな挙動を最後まで見届けて”設計を行うことができると言え、材料係数アプローチによる部分係数法で述べた懸念（設計で照査対象とすべき現実的な状態を照査してない可能性）は回避されると考えられる。更にこの特徴は、設計者の工学的センスや過去の経験による設計チェック機能を有効に働かせることになるため、非常に重要な点であると言える。

4 信頼性設計法としての観点における荷重抵抗係数アプローチによる部分係数法の導入に関する利点

ここまで、材料係数アプローチに対する荷重抵抗係数アプローチによる部分係数法の長所について、特に設計実務における観点から整理を行った。以下では更に、信頼性設計法そのものの観点から、その導入の利点と今後検討すべき事項に関する整理を行う。

(1) 抵抗・作用項に共通する設計パラメータへの対応

例えば、円弧すべり照査における地盤の単位体積重量の増減の影響は、以下の図-6に示すように、すべり破壊に対して危険側にも安全側にも作用する。このような場合、材料係数アプローチを採った場合、その係数は全体安定性に対して危険側に乗じているのか、作用側に乗じているのかという解釈が非常に難しくなる。

荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数法は、「部分係数を乗じる特性値を比較的大括りにした抵抗または作用の合計値としていること」により、抵抗項および作用項の両方に共通の設計パラメータを含むような場合においても、そのパラメータ単体での部分係数を明示することはなくなり、性能関数が複雑な問題にも対応しやすい（係数の解釈に苦しむことがない）という利点があると言える。

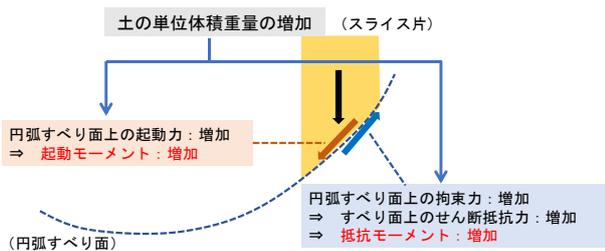


図-6 設計パラメータが作用と抵抗の両方に影響する場合

(2) 性能照査式全体が有する誤差把握の促進

上述のように、信頼性設計法は破壊確率を指標として性能照査を実施する手法である。ただし、現在使用されている「破壊確率」という指標は、必ずしも構造物の破壊と非破壊（安定と不安定）を明確に分離するという観点での指標ではなく、設計で想定している限界状態に対する超過確率としての指標と捉えざるを得ない。信頼性設計の更なる高度化のためには、性能照査式が有している誤差を定量的に把握することが重要であると考えられる。

この際、設計法全体としての不確実性の根拠を、その源となる個々の設計パラメータのみに求めることは是非については、まだ議論の分かれるところである。材料係数アプローチによる部分係数は、性能照査式において示された設計パラメータのばらつきのみが、全ての誤差要因をコントロールしているように誤解を与える一面があ

ることも否めない。例えば、地盤調査で得られたN値の結果から設計で用いる地盤パラメータの特性値を決定するまでの過程を見れば、以下のような誤差が存在している³⁾と考えられるが、実際にこれらを明瞭に分離することは困難である。

- ・地盤のボーリング調査等から得られるN値等の計測誤差
- ・N値から ϕ への変換等の設計上便宜的に用いる物性値に対する変換誤差
- ・使用する物性値等の空間的なモデル化を実施する際の誤差
- ・設計に利用する物性値の統計的なばらつき
- ・物性値の統計的性質を推定する際の誤差
- ・設計に用いる性能照査式自体が有する誤差

このようなことから、過度に細分化した設計パラメータの誤差を把握するというよりも、むしろ、実測などが可能な土圧合力などのある程度大きな括りとしての誤差を把握した上で、性能照査式全体としてどの程度の誤差があるのか、という点を定量化することが重要であると考えられる。荷重項と抵抗項のまとめりとして部分係数を乗じる荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数は、この考え方と親和性が高い。

なお、性能照査式全体の誤差を明らかにするためには現地実験（模型実験も含む）や施工時の計測結果、実際の破壊・非破壊事例などの結果を蓄積^{例えば4)}し、積極的に利用し、これによって本来あるべき設計法の改善や見直しにも繋がるのではないかと著者らは考える。

謝辞：本稿をとりまとめるにあたり、岐阜大学の本城勇介名誉教授、新潟大学の竹雄准教授より、様々なご助言を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007。
- 2)本城勇介：道路橋の部分係数設定法-欧州と北米の動向（下）、土木施工、2014本城勇介：道路橋の部分係数設定法-欧州と北米の動向（下）、土木施工、2014。
- 3)大竹雄、本城勇介：地盤構造物設計におけるモデル化誤差の定量化、土木学会論文集、2014。
- 4)有岡謙一、田中良典、齋藤一三、佐藤幸夫、塩崎禎朗、菅野高弘、小濱英司：鋼矢板岸壁の耐震性に関する実物大実験—耐震岸壁と非耐震岸壁の比較—、土木学会第57回年次学術講演会、2002。
- 5)浅岡頭、小高猛司、松尾稔：複合地盤の非排水支持力に関する研究、土木学会論文集 No.448、III -19、1992

地形分類データの改良と 地理院地図（ベクトルタイル）による公開

吉田 一希¹・飯田 誠²・小島 脩平³・清水 雅行⁴

¹国土地理院 応用地理部 地理調査課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

²国土地理院 応用地理部 地理情報処理課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

³国土地理院 地理空間情報部 情報普及課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

⁴国土地理院 企画部 技術管理課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

国土地理院は、防災対策等に必要な土地の情報を提供するため、各種の地形分類データを提供してきた。地形分類データは、利用目的別に作成してきたため複数の地形分類が存在した。また、地形の種別が多く専門的で、内容を把握するのが困難であった。これらを解消するため、複数の地形分類データをベクトルタイルで1つの地形分類に統合するとともに、地理院地図の機能で地図上をクリックすると地形分類ごとの説明をポップアップで表示させるようにした。これにより、広範囲の地形分類を一度に閲覧できるため、地形について予備知識がなくても、土地の成り立ちや自然災害リスクが簡単に分かるようになった。

キーワード 地形分類, ベクトルタイル, 地理院地図, 土地条件図, 治水地形分類図

1. 地形分類データの整備と提供

1947年に地理調査所（現 国土地理院）が実施したカスリーン台風による洪水調査¹を始まりとして、国土地理院は低地のわずかな起伏（微地形）をはじめとする地形種別の分布を地図に示し、土地における自然災害の危険性の程度を明らかにしてきた。なかでも詳細な地形分類を示した「土地条件図」は、土地の開発や各種防災対策の基礎資料として1963年から整備を進めている。

また、国土地理院は、国土交通省水管理・国土保全局、各地方整備局及び北海道開発局と連携し2007年から「治水地形分類図（更新版）」の整備を進めている。治水地形分類図は、河川堤防が立地する地盤条件の把握など河川管理を目的とした地図であり、低地に焦点をあてた地形分類がなされている。また、国が直接管理する河川の平野部を対象として整備されつつあり、土地条件図が整備されていない地域についても広く整備が進んでいる。

土地条件図と治水地形分類図は、それぞれ刊行図や出力図として紙地図で一般に提供を行ってきた。また、インターネットの発達に伴い、近年は国土地理院のウェブ地図「地理院地図」(<https://maps.gsi.go.jp/>)を介した提供に取り組んでいる。地理院地図では、土地条件図（「初

期整備版」及び「数値地図25000（土地条件）」）と治水地形分類図を、それぞれ地理院タイル（画像形式）にして公開してきた（図-1、図-2）。なお、土地条件図の初期整備版は刊行図のスキャン画像であり、数値地図25000（土地条件）は初期整備版を基にベクトル化したものである。

これらの公開を通じて、着目する土地の地形種別と関連する自然災害リスクをオンラインで提供することで、利用者のニーズに応えてきた。

2. 整備と提供で直面した課題

これまでのデータ整備及びデータ提供において、以下の課題が生じていることが認識された。

(1) [課題1] 地形種別の項目が多い

土地条件図や治水地形分類図には、地形種別の項目が数多く存在し、多様な地形種別から地盤条件や災害リスク等を類推するには、地形に関する専門的な知識を要した。



図-1 土地条件図(数値地図25000(土地条件))の地理院タイトル(画像形式)



図-2 治水地形分類図(最新版)の地理院タイトル(画像形式)

(2) [課題2] 地形分類の体系が異なる

土地条件図と治水地形分類図は、異なる地形種別の体系で地形分類がなされており、それぞれが同一の地域で整備されている場合、内容が整合していないこともあった。

(3) [課題3] 自然地形と人工地形が重なって見づらい

これまでの地形分類図の地理院タイトル(画像形式)では、自然本来の地形である「自然地形」と人工的な改変で生じた「人工地形」の2つの地形が同じレイヤに重なって表示されてきた。そのため、地形が重なる箇所では凡例の色が重畳して、地形種別の読み取りが困難であった。

(4) [課題4] 地図ごとの整備範囲しか表示できない

土地条件図と治水地形分類図を別々に表示するだけでは、それぞれの整備範囲しかウェブ地図上で表示できなかった。

(5) [課題5] 凡例の参照が煩雑

地理院タイトル(画像形式)では、凡例が別ウィンドウで表示されるため、多様な地形種別から判別するには、その都度凡例を表示する必要があり、利用者に不便を強いていた。

3. 課題解決に向けた取組

国土地理院は2015年度以降、2章で紹介した5つの課題を解決するため、以下の改良を行った。まず、各種の地形分類図のシェープファイル(GISで汎用されるファイル形式)から自然地形と人工地形を2つのレイヤに分離して、それぞれを1つのシェープファイルに統合した。次に、シェープファイルに属性コードを付与し、ベクトルタイルに変換した。最後に、属性コードに対応する地形種別の名称等についてスタイル定義に記述した(図-3)。

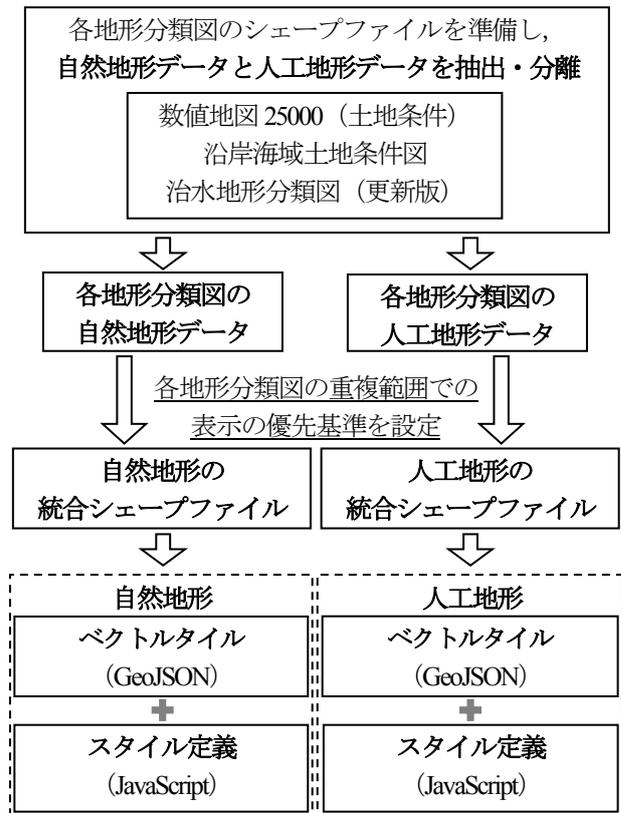


図-3 課題解決に向けた取組フロー

ベクトルタイルは、地形分類が色の情報としてメッシュ状に並ぶ画像と異なり、各ポリゴンの緯度経度や属性コードの情報をテキスト(GeoJSON)で記述している。ベクトルタイルそのものは、各地形分類の色や内容の情報を持たないため、地理院地図上に表示する際の色やポップアップの内容を設定する「スタイル定義」を別途準備する。スタイル定義はJavaScriptであるため、その設定の自由度が高く、かつ容易に変更できる(図-4)。

各行程の内容を以下の節に示す。

(1) 自然地形と人工地形の2レイヤ化

国土地理院が整備した各種の地形分類図(数値地図

25000（土地条件），沿岸海域土地条件図（陸部のみ使用），治水地形分類図（更新版）のシェープファイルから，それぞれ自然地形と人工地形を抽出し2つのレイヤに分けた。これにより，自然地形と人工地形の表示を必要に応じて切換えられるようになり，地形種別の判別が容易となった（課題3に対応）。

(2) 地形分類データの統合

自然地形，人工地形それぞれのレイヤについて1つのシェープファイルに統合した。各地形分類図の整備範囲が重複する箇所では，どちらか一方のデータのみにする処理を行った（原則として整備年度の新しい図を採用）。なお，各地形分類図のシェープファイルには，上記以外の編集処理（地物のポリゴンや属性コードの変更等）は原則行っていない。これにより，整備範囲が拡大し，利用者の利便性が向上した（課題4に対応）。

(3) ベクトルタイル及びスタイル定義の作成

統合したシェープファイルについて，地形種別を属性コード（code）として保持したまま，ベクトルタイルに変換した。

ベクトルタイルが保持している地形種別について，名称，色設定，「土地の成り立ち」及び「この地形の自然災害リスク」を，スタイル定義（JavaScript）に記述した。「土地の成り立ち」には原則として，その地形の形状と成因をそれぞれ分けて並べて記述し，「この地形の自然災害リスク」には，地形種別ごとの表層崩壊，地すべり，土石流，洪水，高潮，地震動（揺れやすさ）の程度，液化等自然災害リスクについて記述した。これにより，ウェブ地図の画面をクリックすると，その場所の地形種別や「土地の成り立ち」及び「この地形の自然災害リスク」がポップアップで表示できるようになり，地形種別の判別が容易になった（課題5に対応）。

ベクトルタイルは，各地形分類図のシェープファイルに付与されている地形種別の属性コードをそのまま保持しているため，対応する属性コードは一意的には定まらない。スタイル定義では，同一の地形分類に対応する属性コード全てに同一のスタイル定義を与えることで，表示上の地形種別を簡略化・共通化した（表-1）。これにより，一般利用者にもより分かりやすく提供できるようになった（課題1, 2に対応）。

表-1 凡例対応表の例

ベクトルタイル 地形分類	数値地図25000(土地条件) 沿岸海域土地条件図	治水地形分類図 (更新版)	属性コード (code)
砂州・砂丘	砂丘		10504
	砂(礫)堆・州		10505
	砂州・砂堆・砂丘		10512
		砂州・砂丘	3050101
凹地・浅い谷	凹地・浅い谷		10601
		浅い谷	2010301



図4 ベクトルタイルをウェブ地図で表現する仕組み

(4) ベクトルタイル地形分類の公開

作成したベクトルタイルの地形分類データを，2017年3月29日にベクトルタイル「地形分類（自然地形）」（図-5）及び「地形分類（人工地形）」（図-6）として地理院地図から公開し，国土地理院ホームページの新着情報に掲載した²⁾。なお，ベクトルタイルでの地形分類データの改良は2回にわたって行っており^{3,4)}，前回（2016年3月9日公開）に作成したベクトルタイル地形分類の解説ページを更新した⁵⁾。

4. 今後の課題

「地形分類（自然地形）」の一部では，タイルの所々に空白部が存在する。この空白部は，主に1995年度以前に整備された地形分類図において人工地形として取得された箇所であり，人工改変される前の自然地形を取得していないために生じたものである。今後このような箇所についても人工改変前の地形を調べる予定としており，



図-5 ベクトルタイル地形分類（自然地形）



図-6 ベクトルタイル地形分類（人工地形）

た同情報の発信では、約 590 のリツイートと約 820 の「いいね」を集めるなど、国土地理院の公式ツイッターの中で最も大きな反響のあった記事の1つとなっている（図-8）。地形分類データは、ネットニュースで紹介され、住宅メーカーや地盤調査等企業から問合せも受けており、世間の関心が高いことがうかがえる。

今後も、地形分類データの整備地区の拡大や利用促進への取組を進め、防災計画、ハザードマップ作成、不動産売買等の基礎資料や、各個人の自然災害への備え、地理教育の充実につながるよう努めていく。

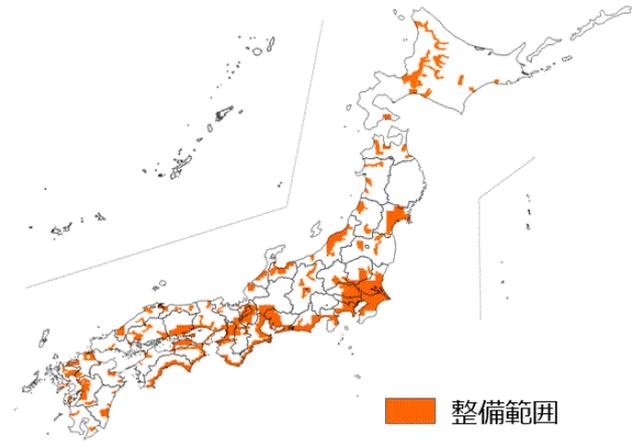


図-7 整備範囲

全面的に自然地形を整備したデータへ改めていく。

5. まとめ

各地形分類図の地形分類データを1つに統合し、かつ分類項目を共通化することで、広範囲の地形分類を一度に閲覧できるようになった。各地形分類図の整備範囲が重複している箇所は、整備年度の新しいものを採用することにより、地形分類の最新の知見や位置精度の良いデータを確認しやすくなった（図-7）。

また、ベクトルタイルで公開することにより、身近な地域の土地の成り立ちと自然災害リスクの情報を得やすくなったことに加え、自然地形と人工地形をレイヤ分けすることで、その土地が本来もっている潜在的な自然災害リスクと、人工的に改変工事がなされたことで発生しうる自然災害リスクとを見分けられるようになった。例えば、「地形分類（自然地形）」（図-5）では、山地や台地等の分布のほか、かつて海や湖、湿地、河川の流路であった場所などを確認することができる。また、「地形分類（人工地形）」（図-6）では、海岸・湖岸沿いの埋立地・干拓地の分布や、宅地造成による盛土地・切土地の分布を容易に把握することができる。

幸い閲覧者には好評で、公開当日に国土地理院応用地理部ツイッター（https://twitter.com/gsi_oyochiri）にて行っ



図-8 国土地理院応用地理部ツイッターでの発信

参考文献

- 1) 地理調査所：昭和二十二年九月洪水利根川及荒川の洪水調査報告，地理調査所時報・特報，20p，1947.
- 2) 国土地理院：身の回りの土地の成り立ちと自然災害リスクをワンクリックで確認できる範囲が広がりました，<http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/bousaichiri41016.html> (accessed 26 Sep. 2017).
- 3) 国土地理院：身の回りの土地の成り立ちと自然災害リスクがワンクリックでわかります，<http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/bousaichiri60024.html> (accessed

26 Sep. 2017).

4) 吉田一希, 飯田誠, 小島脩平, 清水雅行: ベクトルタイル形式による地形分類データの統合と公開, 国土地理院時報, 129, 印刷中, 2017.

5) 国土地理院: ベクトルタイル「地形分類」- 身の周りの土地の成り立ちと自然災害リスクがワンクリックでわかります-, http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/lfc_index.html (accessed 26 Sep. 2017).

ICT を活用した排水機場運転支援 ・不具合対応支援システムの構築

内田 颯太¹・岩松 裕二²

¹ (独) 水資源機構 木津川ダム総合管理所 高山ダム管理所
(〒 619-1421 京都府相楽郡南山城村大字田山字ツルギ 43)

² (独) 水資源機構 琵琶湖開発総合管理所 機械課 (〒 520-0243 滋賀県大津市堅田 2 丁目 1-10)

琵琶湖開発総合管理所(以下「琵琶湖総管」)では、2013年(平成25年)台風18号の影響による琵琶湖水位の上昇に伴い、内水排除操作を行った。この防災業務を通じて、職種を問わず全ての職員による「迅速かつ安全・確実な運転操作」、「最低限度の不具合対応」の2点が課題として浮き彫りとなった。

本稿は、琵琶湖総管において、情報通信技術(以下「ICT: Information and Communication Technology」)を活用して構築・導入した排水機場運転支援・不具合対応支援システムについて報告するものである。

キーワード 内水排除,ICT,AR,双方向通信,HMD

1. はじめに

琵琶湖総管では沿岸域の治水のため、琵琶湖一円に渡り多数の設備を管理している。防災業務の際には防災班を9班編制し、職員が琵琶湖周辺の巡視や水門等の操作を行い、請負業務の運転操作員が排水機場の運転を行うことで洪水被害の防止・軽減に努めている。

表1 琵琶湖開発施設一覧

地区名	湖岸堤	水門等	給・排水機場
草津地区	6.9	1.8	—
守山地区	7.6	3.2	5
野洲川地区	9.2	1.9	1
近江八幡地区	6.8	1.6	2
能登川地区	3.4	1.4	2
稲枝地区	—	6	1
米原地区	—	5	2
姉川地区	10.0	2.4	1
新旭地区	6.5	2.4	4
計	50.4 km	158箇所(263門)	18機場

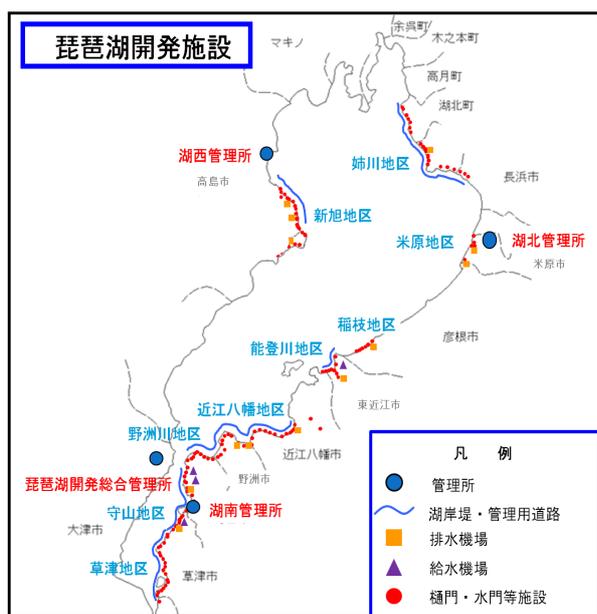


図1 琵琶湖開発施設配置図

2013年(平成25年)台風18号の影響により防災業務が発生した。当該出水では、瀬田川洗堰が下流域の洪水被害軽減のため41年ぶりに全閉操作を行ったこともあり、琵琶湖水位が2日間で102cm上昇し、緊急的に内水排除を行う必要があった。

しかし、総雨量277.8mmという大雨の影響で公共交通機関の麻痺や道路冠水による通行止めが発生し、運転操作員の初期配置が不十分となった。幸い排水ポンプ設備の運転に支障はなかったが、このような状況下では、我々職員が迅速かつ安全・確実に排水機場を運転操作しなければならない。

そのため、琵琶湖総管では内水排除関連施設の操作説明会の実施や、排水機場への操作要領の備え付けにより迅速かつ安全・確実な運転操作に対し日頃から備えてきた。しかしながら、防災業務発生頻度の低さ等から、全職員が迅速かつ安全・確実に運転操作ができる状況には至らなかった。

また、琵琶湖総管における防災業務はダム管理所と比較すると長期間に及ぶため、排水ポンプ設備の運転が長時間となり、故障や不具合の発生率が高くなる。各防災班には様々な職種の職員が配置されているが、機械職については各管内（湖南・湖北・湖西）に1名ずつしか配置できず、故障・不具合発生時は復旧対応に追われることになる。

さらに、機械職の中でも設備の習熟度による技術力の差等により、故障・不具合に対応できない場合も発生する。

平成25年の防災業務から、琵琶湖総管では次の2つの課題が浮き彫りとなった。

- 職種を問わず全ての職員による迅速かつ安全・確実な運転操作
- 職種を問わず全ての職員による最低限度の不具合対応

以上から、内水排除操作の確実性と不具合対応の効率性を向上するため、ICTを活用した職員支援システムの構築を行うこととした。

2. 排水機場運転支援システム

これまで排水ポンプ・水門設備の運転については、職種を問わず誰もが操作できるよう設備毎に写真や図を多用し、専門用語をできるだけ排除した操作要領を作成して操作を行ってきた。

しかし、排水ポンプ設備の運転操作は水門設備と比較し数多くの確認や移動、操作が必要であり、紙媒体の操作要領では解りづらく、また雨天時の使用にも問題があった。

そこで、拡張現実（以下「AR: Augmented Reality」）を活用し、画像と音声により操作をナビゲーションするシステムを構築した。

(1) システムの概要

運転支援システムは、排水機場の運転操作に必要な作業手順が1作業1シナリオのミッションカード形式でタブレット画面に表示される（写真1）。



写真1 現場状況確認シナリオ

職員は、写真2のように貼付されたARマーカをタブレット端末のカメラで読み込み、作業場所に間違いがないかを確認しながら作業を進めることで、迅速かつ安全・確実に排水機場を運転操作することが可能となる。



写真2 ARマーカ貼付・読込状況

(2) システム利用イメージ

図2にシステムの利用イメージを示す。シナリオ化した操作要領は、あらかじめクラウドサーバに登録しておく。職員は、クラウドサーバにアクセスし操作要領をダウンロードすることでシステムの利用が可能となる。

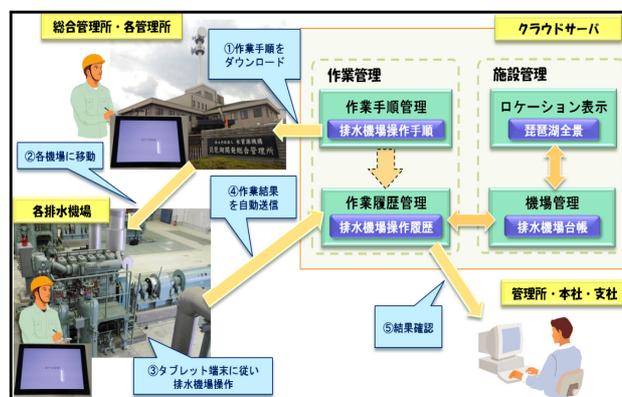


図2 システム利用イメージ

現場では、タブレット端末の画面に表示される作業シナリオに従い、現場状況の確認や各機器の電源投入等を行う（写真1・3）。

操作要領は、

- 作業対象機器までの移動ナビゲーション
 - ARマーカの読み込み
 - 機器の操作・状態確認ナビゲーション
 - 機器の操作・状態確認後の写真撮影
- で構成されており、上記4作業を排水機場内に設置されている各機器に対して行うことにより運転可能な状態となる。



写真3 電源状態確認シナリオ

各作業シナリオの画面左端には、「はい」、「いいえ」の選択肢が表示されており、現場状況に即した選択肢を選ぶことで作業シナリオが分岐する。

図3を例に説明すると、「はい」を選択した場合、機器状態確認後の写真撮影の手順が表示される。

「いいえ」を選択した場合、ON状態へ復旧するための作業手順が表示される。手順に従い復旧作業を実施し、ON状態となれば機器状態確認後の写真撮影の手順に進むが、復旧しない場合は、不具合対応支援システムへと移行し、機械職の支援を受けながら復旧作業を行うこととなる。

復旧完了後は、機器状態確認後の写真撮影の手順へと復帰し、手順に従い作業を継続することで排水ポンプ設備が運転可能となる。

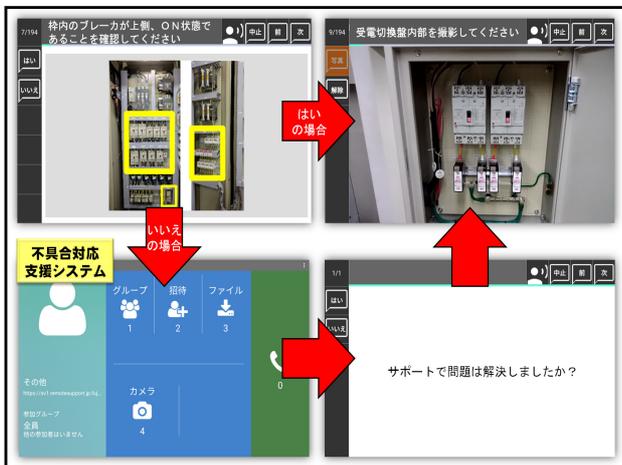


図3 作業シナリオ分岐イメージ

作業結果は、運転操作終了後クラウドサーバに自動でアップロードされる。アップロードされた作業結果は、クラウドサーバへのアクセスで即座に確認でき、琵琶湖総管だけでなく本社・支社・他事務所からも閲覧が可能である。

また、作業結果を報告書として印刷することも可能で、従来現場で手書きした作業結果を防災業務終了後にPCで作り直していた労力と時間を大幅に省略できる。

上記以外にも、排水機場の設備を更新した際にも本システムが利用できるよう、職員の直営により作業手順・作業対象の変更、追加、削除を行うことができる機能を有している。

本システムの構築においては、機械職だけでなく、機器のメカニズムを知らない事務・土木等様々な職種の職員が企画段階から携わることで、視覚的に理解しやすいシステムとなるよう配慮した。

(3) タブレット端末の諸元

表2に本システムで使用するタブレット端末の諸元を示す。屋外・悪天候での使用を考慮し防塵・防滴・耐衝撃対策型のものを採用している。

表2 タブレット端末の諸元

項目	詳細
OS	Android™ 6.0
CPU	Qualcomm MSM8992 1.82GHz (デュアルコア) 1.44GHz (クアドコア) ヘキサコア
メモリ	3GB
ストレージ	32GB
ディスプレイ	10.5インチ WQXGA (2560×1600)
バッテリー容量	6000mAh
その他	防水性能: IP×5・IP×8 防塵性能: IP6× 耐衝撃、耐振動、高温・低温時動作

3. 不具合対応支援システム

ARを活用したシステムは、事前に手順をシナリオ化しておく必要があるため、あらかじめ手順が想定できる作業に対しては非常に有効である。

一方、故障・不具合対応についてはこれまでと同様に、機械職やメーカー・設備の点検業者に頼らざるを得ないが、排水機場は琵琶湖一円に点在しているため、不具合復旧だけでなく現地までの移動にも時間を要する。そこで、専門知識を有しない職員でも遠隔地からの指示により最低限度の不具合対応を可能とするシステムを構築した。

(1) システムの概要

不具合対応支援システムは、インターネット回線を利用し、映像と音声による双方向通信を行うことにより不具合発生現場の状況をリアルタイムで確認できるシステムである。ヘッドマウントディスプレイ（以下「HMD」）のカメラで捉えた映像・音声は、図4のように遠隔地のPC・タブレット端末と共有しており、今まで専門知識を有する職員やメーカーの熟練技術者などを現場に派遣せざるを得なかった不具合内容も、映像・音声から得られる情報により遠隔地からの作業指示で対応可能となる。



図4 システム通信状況

図5にシステム構成を示す。本システムは、最大6名での同時通信を行うことができ、通信用のアプリケーションがインストールされたPCまたはタブレット端末があれば、不具合発生現場、琵琶湖総管のみならず、本社・支社・他事務所からも不具合対応支援が可能となる。

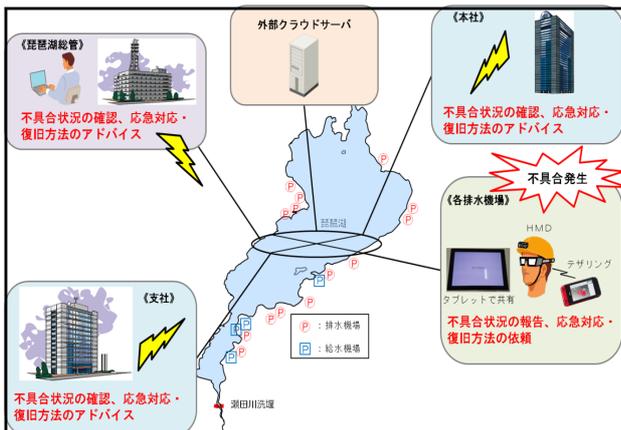


図5 システム構成

(2) システム機能

本システムは通常、映像と音声により故障・不具合情報の共有や作業指示を行う。

しかし、システム使用時には排水ポンプ設備が運転中であることも十分に考えられるため、騒音等により音声が聞き取れない場合を想定し、文字による指示も行えるようにしている(写真4)。

また、HMDのカメラで静止画像を撮影し、通信上で共有することで、写真5のように遠隔地のPC・タブレット端末から静止画像へ指示の書き込みを行うこともできる。遠隔地から資料(図面・写真等)を送付することも可能なため、本機能の利用により映像と音声だけでは指示内容が理解できなくとも、不具合発生機器のどこを確認し作業すれば良いのか直感的に理解することができ、不具合原因の究明、不具合対応の確実性が向上する。

さらに、作業者が何を撮影すればよいのかわからない場合には、遠隔地のPC・タブレット端末からHMDのカメラを遠隔操作する機能を使うことで、カメラ映像をロックすることも可能である。



写真4 文字による作業指示状況



写真5 静止画像による不具合対応支援

(3) HMDの諸元

HMDの外観を写真6に、諸元を表3に示す。HMDはヘルメットに装着可能な構造であり、通信中でも両手を使つての作業が可能となる。

また、ディスプレイ部は可動式になっているため、移動時等は跳ね上げておくことにより、視界をさえぎることなく作業が可能である。



写真6 HMD外観

表3 HMDの諸元

項目	詳細
形状	片眼 非シースルー
ディスプレイサイズ	15インチ 離隔距離81cm
ディスプレイ解像度	854×480
表示色数	約1,677万色
輝度	1,200cd/m ²
カメラ	800万画素 ズーム機能有り
OS	Android4.4
メモリ	8GB SDカード挿入により増設可
バッテリー駆動時間	3,300mAh 約4時間 バッテリー交換可
操作方法	音声認識 ウェアラブルキーボード
システム	6者同時双方向通信
その他	防水性能: IP×5・IP×7 防塵性能: IP5×

4. システムの導入効果

本システム構築後、「排水機場運転支援システム」および「不具合対応支援システム」の導入効果の検証を行った。

不具合対応支援システムについては、現場までの移動時間の短縮、移動による事故のリスク減、機械職からの確実な支援といった効果を得ることができた。

排水機場運転支援システムについては、1度もポンプ設備を見たことがない直接雇用職員の協力の下、紙媒体の操作要領により運転操作した場合と本システムにより運転操作した場合の比較を行った。その結果、本システムの使用により従来に比べ操作時間を31%、報告書の作成時間を89%短縮できることがわかった。

また操作終了後、職員に感想を聞いたところ、ARマーカの誂込により作業対象機器を間違える心配がないため、紙媒体に比べ「より安全・確実な運転操作」ができるという評価を得た。

5. システム運用におけるランニングコスト

「排水機場運転支援システム」および「不具合対応支援システム」は、受注者のシステム、クラウドサーバを利用し構築しているため、システムを運用するためには、受注者と保守契約を結ぶ必要がある。

システム運用にかかるコストとして、表4に示す項目が挙げられる。ICTは各方面でその有用性が注目されている技術であり、今後さらに開発・普及が進むと考えられるため、ランニングコストは現在より安価となることが予想される。

表4 ランニングコスト一覧

項目	詳細
クラウドサーバーの保守・運用	クラウドサーバーの利用・管理 システムメンテナンス データベースのバックアップ ウイルス対策・脆弱性対応 保守サポート・問い合わせ対応
タブレット端末HMDの保守	ソフトウェアの保守
システムログインID	排水機場運転支援システム 不具合対応支援システム
Wi-Fiまたはテザリング使用料	タブレット端末・HMDの通信に利用する 携帯回線通信料（携帯会社への支払い）

6. まとめ

排水機場運転支援システムの構築により、従来に比べ操作時間を短縮し、ヒューマンエラーのリスクを低減した。これにより、「職種を問わず全ての職員による迅速かつ安全・確実な運転操作」が可能となった。

また、不具合対応支援システムの構築により、機械職等を派遣せざるを得なかった故障・不具合でも、遠隔地からの支援だけで「職種を問わず全ての職員による最低限度の不具合対応」を行うことが可能となった。

7. 今後の課題

琵琶湖総管では、運転操作支援、不具合対応支援としてシステムの構築を行ったが、ダム・水路等の管理においては、防災時の下流巡視、放流警報、直営点検、緊急時の操作指示等に活用することで管理業務の効率化を図ることができると考えられる。

また、琵琶湖総管のように多数の設備を管理し、現場まで移動距離がある事務所では、工事の施工管理への活用も可能であると考えられる。

さらに、双方向通信中の映像は動画として保存できるため、不具合対応支援以外にも工事の施工確認、設備の直営点検時に使用することで、経験の浅い職員への技術伝承にも活用できる。

本システムは、アイデア次第でさらなる業務の効率化・高度化を目指すことができるため、様々な分野へ活用方法を発展させていくとともに、使用者の意見を吸収し、現状のシステムをさらに使いやすいものへと改良していくことが今後の課題だと考えている。

本論文は、著者の前任地である（独）水資源機構 琵琶湖開発総合管理所 機械課での成果について取りまとめたものである。

老朽化排水機場の信頼性向上に向けた取り組み

中川 貴文¹・山本 新²

¹ 四国地方整備局 徳島河川国道事務所 防災課 (〒770-8554 徳島県徳島市上吉野町 3-35)

² 四国地方整備局 徳島河川国道事務所 防災課 (〒770-8554 徳島県徳島市上吉野町 3-35)

徳島河川国道事務所が直轄管理する排水機場は、1965～1984年の間に設置されたものが多く、施設の老朽化が著しい状況にあり、その対策が急務となっている。

本稿では、設置後50年が経過した学島排水機場で現在実施しているリニューアル工事における「立軸化・無水化等」の技術を用いた信頼性向上に向けた取り組みについて報告する。

キーワード 維持管理, 老朽化対策, 無水化, 信頼性向上

1.はじめに

一級河川吉野川には徳島河川国道事務所が直轄管理する排水機場が17箇所あり、その総排水量は178m³/sに及び吉野川流域の内水被害軽減に効果を発揮してきた。

(表-1) これらの排水機場は1965～1984年の間に設置されたものが多く、古いものでは設置後50年を経過するなど施設の老朽化が著しく、その対策が急務である。(図-1) 排水機場は洪水時のみ稼働する施設であり、年間の排水運転回数は1～5回と極端に少ないが、確実な始動と連続して稼働する耐久性等、高度な信頼性が求められる。

今回、管理する排水機場で最も古い学島排水機場で現在実施しているリニューアル工事における「立軸化・無水化等」の技術を用いた信頼性向上に向けた取り組みについて報告する。

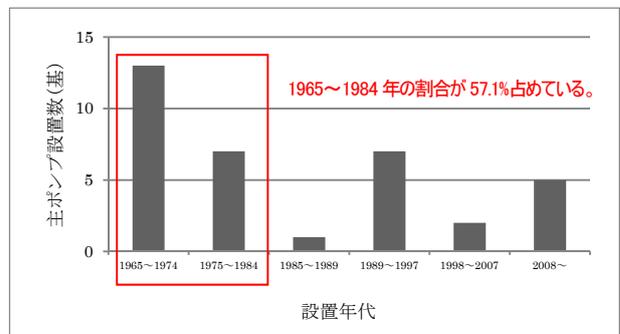


図-1 主ポンプ設置年数

表-1 排水機場施設一覧

	施設名	ポンプ形式	排水量(m ³ /s)	設置年	経過年数
1	角ノ瀬排水機場	立軸軸流	20×1	2008	8
2	神宮入江川排水機場	横軸斜流	2.5×2	1974	42
3	新神宮入江川排水機場	横軸斜流	5×1	1978	38
4	飯尾川排水機場	横軸斜流	5×4	1969	47
5	新飯尾川排水機場	立軸斜流	10×2	1983	33
6	江川排水機場	横軸斜流	5×2	1974	42
7	川島排水機場	立軸斜流	9×2	2009	7
8	学島排水機場	横軸軸流	3×2	1966	50
9	学島川排水機場	横軸斜流	7×2	1978	38
10	ほたる川排水機場	立軸斜流	5×2	2014	2
11	正法寺川排水機場	横軸斜流	3×2, 2×1	1968	48
12	前川救急排水機場	立軸斜流	1×2	1994	22
13	蛇池川排水機場	立軸斜流	5×2	1981	35
14	熊谷川排水機場	横軸斜流	5×2	1979	37
15	指谷川排水機場	立軸斜流	4×2	1986	30
16	柿ノ木谷川排水機場	横軸斜流	4×2	1969	47
17	城の谷排水機場	立軸斜流	2×2	2001	15

2.施設概要

学島排水機場は吉野川右岸 30k/4 (徳島県吉野川市川島町桑村地先) の一級河川吉野川と支川学島川の合流付近に位置し、学島川流域の内水排除を目的として1966年に設置された排水機場であり、設置当初に納入された設備が現在でも使用されている。(図-2)

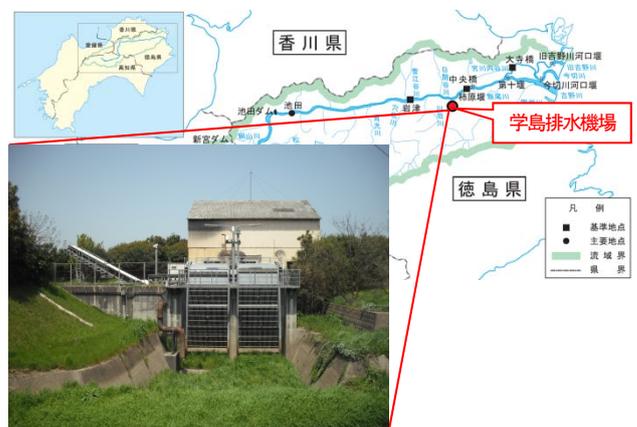


図-2 位置図

3.信頼性向上に向けた検討

信頼性を向上させるためには故障の発生頻度が高い機器を減らすことが重要である。排水機場における機器の故障率を集計したものを次に示す。(図-3)

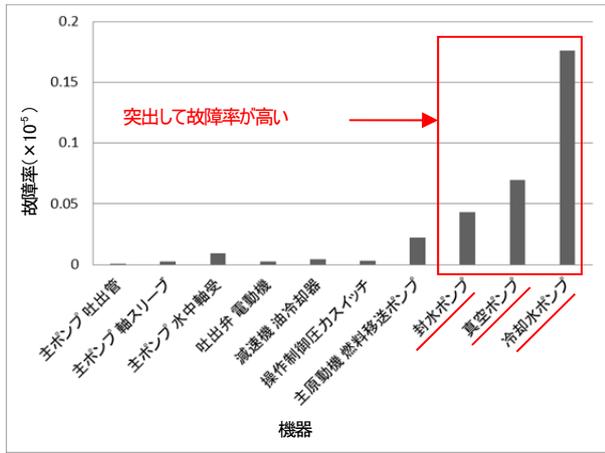


図-3 排水機場における機器の故障率

故障率とは、故障件数/延べ運転時間で求めた数値であり、数値が大きいほど故障する頻度が高いことを表すものである。図-3 より、冷却水ポンプ (冷却系統)、真空ポンプ (満水系) 及び封水ポンプ (軸封系) が高いことが分かる。

故障リスクを減らすために以上の機器を削減するための検討をおこなった。

(1)冷却系統機器の削減

既設では主ポンプの軸封装置や水中軸受、主原動機、減速機の回転部分が運転中に高温になるため、清水 (井戸水等) による冷却方式を採用している。その清水を循環させるために冷却系統機器 (冷却水ポンプ、取水ポンプ、膨張タンク) が必要であった。また主ポンプの軸封装置への注水は冷却目的の他に封水の役割も果たしている。そこで今回、冷却系統機器を無くし、無水化を図るために以下の対策を行った。

a)主ポンプの無水化

主ポンプの無水化の仕様を次に示す。(表-2)

表-2 主ポンプの無水化仕様

	封水装置部		水中軸受	
	形式	特徴	形式	特徴
更新前	グランドパッキン	摺動面 広い 摩擦熱 多い 給水 必要	ホワイトメタル	耐熱性 低い 潤滑油 必要
更新後	フローティングシール	摺動面 狭い 摩擦熱 少ない 給水 不要	セラミックス	耐熱性 高い 潤滑油 不要

封水装置は主ポンプの主軸貫通部から水が漏れるのを防ぐ装置である。従来は耐熱性の低いグランドパッキンを使用していたが、今回方式を見直し無給水型のフローティングシールを採用した。

水中軸受は、従来ホワイトメタルを使用していたが耐熱性、耐摩耗性が低いため油による潤滑が必要であった。

今回素材を見直し、耐熱性の高いセラミックスに変更を行った。セラミックスにすることによりドライ運転が可能となり潤滑機器を削減することができた。

b)主原動機、減速機の無水化

主原動機について更新前は「槽内クーラー方式」であり機器を冷却するために別途冷却水系統機器が必要であった。今回「機付ラジエータ方式」を採用することにより冷却水系統機器が不要となった。

「機付ラジエータ方式」とは主原動機にラジエータを取付け、主原動機からの動力で回転するファンを回しラジエータに風を送ることで冷却するものである。

減速機についても同様に槽内クーラー方式から主ポンプ内の排水を用いた自己冷却方式に変更することで無水化を図った。(表-3 図-4)

表-3 更新前後の設備比較

設備名称		更新前	更新後
主ポンプ設備	主ポンプ	形式	横軸軸流ポンプ
		台数	2台
		吐出量 口径	3.00 m ³ /s・台 φ1,200 mm
主ポンプ駆動設備	主原動機	形式	水冷式 ディーゼル機関
		出力	121 kW
	減速機	形式	水冷式 遊星歯車減速機
			立軸斜流ポンプ (減速機搭載型) 同左 4.25 m ³ /s・台 同左 機付ラジエータ式 ディーゼル機関 223 kW 自然放熱式 直交軸傘歯車減速機 ポンプ搭載型

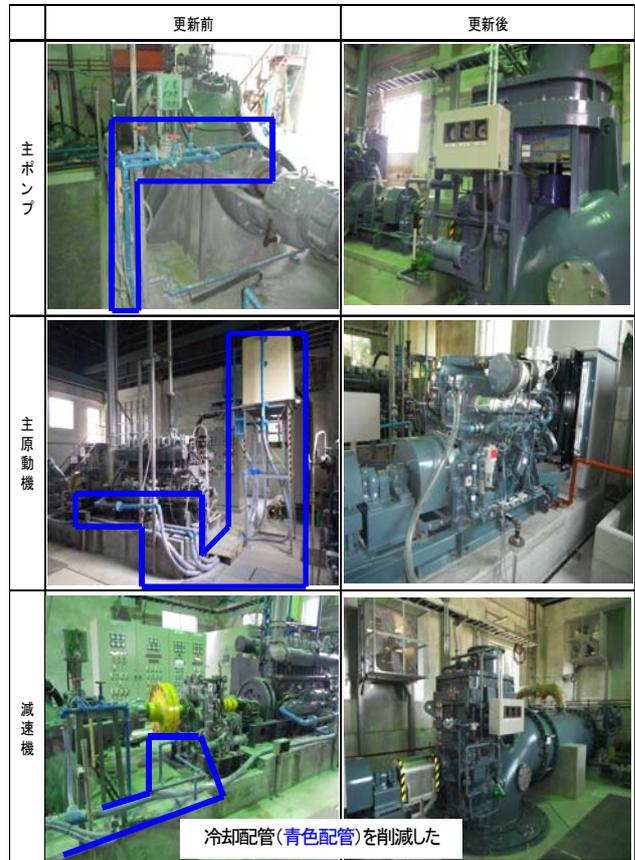


図-4 無水化対策状況

c) 機場全体

前述 a), b) の対策により冷却水系統機器を削減することができ、施設全体がシンプルな機器構成となり信頼性向上を図ることができた。(図-5)

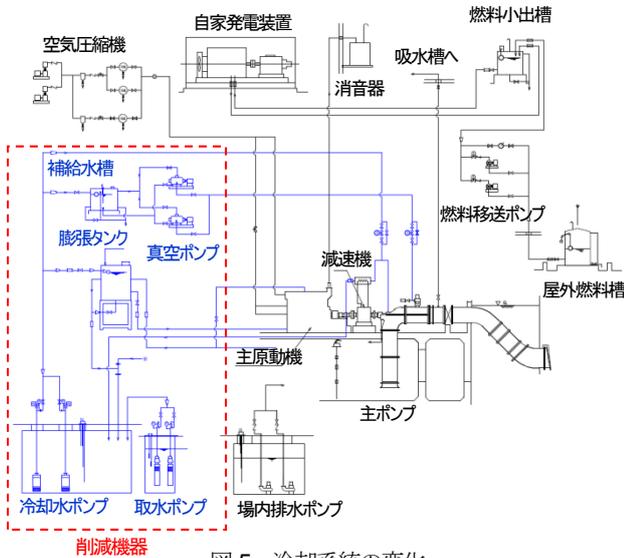


図-5 冷却系統の変化

(2) 満水系統機器の削減

排水機場では「横軸ポンプ」「立軸ポンプ」のいずれかが採用される場合が多い。ポンプ形式の違いを次に示す。(表-4、図-6)

満水系統機器は横軸ポンプ専用の機器であり、立軸ポンプを採用することにより機器を削減することが可能となり信頼性の向上を図ることができる。また、横軸ポンプでは必要であった満水操作（ポンプ内の羽根車の位置まで水を充填する操作）が立軸ポンプでは不要となり、急激な内水上昇時にも迅速な排水操作が可能となる等排水作業の始動性を向上させることができる。

なお、立軸ポンプが横軸ポンプより劣る点については、学島排水機場で立軸ポンプを採用するにあたり問題がないか次の検討をおこなった。

a) 設置条件

立軸ポンプは羽根車及び軸受が常時接水（没水）しているため腐食が進行しやすく、一般的に横軸ポンプに比べて耐久性が劣る場合が多い。なお、支川の学島川の水位が洪水時以外は低いいため、羽根車及び軸受が常時露出した状態であり、耐久性については横軸ポンプと同等である判断した。

b) 維持管理性

設備を長期にわたり健全な状態で維持させるためには定期的な点検・整備が必要である。主ポンプの主な点検・整備項目としては、ケーシング、羽根車、主軸、外部軸受、水中軸受、軸封装置等がある。これらの中でも修繕・交換頻度が高いのが水中軸受である。

横軸ポンプの場合、上部ケーシングを外すことにより比較的容易に水中軸受の点検・整備が行えるが、立軸ポ

ンプでは通常、水中軸受は羽根車上部に設置されることから、減速機、羽根車及び主軸を抜き出す必要があり、点検・整備費用が高額となる傾向にある。(図-6)

そこで今回、立軸ポンプの整備性が劣ることへの対策として水中軸受を従来よりも簡単に整備できる構造の主ポンプを採用した。(図-7)

この主ポンプは水中軸受を羽根車の先に設置した構造であり、全ての整備作業が吸水槽内から人力のみで行うことができる。よって、減速機の撤去等が必要ないため整備性が大幅に向上している。

表-4 主ポンプ形式の比較

項目	横軸ポンプ	立軸ポンプ
設置条件	<ul style="list-style-type: none"> 機場敷地面積 立軸より大 腐食性 羽根車、水中軸受が待機中は空中にあり有利 	<ul style="list-style-type: none"> 横軸より小 羽根車、水中軸受が常時水中にあり不利
ポンプ性能	<ul style="list-style-type: none"> 吐出量(ポンプ口径) 小～中 (~2,000mm) 吸込性能 羽根車が吸水位より上にあるので立軸に比べて不利 	<ul style="list-style-type: none"> 小～大 (~4,600mm) 羽根車が吸水位より下にあるので横軸に比べて有利
操作性	<ul style="list-style-type: none"> 始動性 羽根車が吸水位より上にあるので満水操作要 	<ul style="list-style-type: none"> 羽根車が吸水位より下にあるので満水操作不要
維持管理性	<ul style="list-style-type: none"> 整備性 上部ケーシングを取り外して整備可能なので比較的容易 耐久性 羽根車、軸受が没水なので立軸に劣る 	<ul style="list-style-type: none"> 減速機取り外し等、整備に大がかりな作業が必要 羽根車、軸受が常時没水なので横軸に劣る

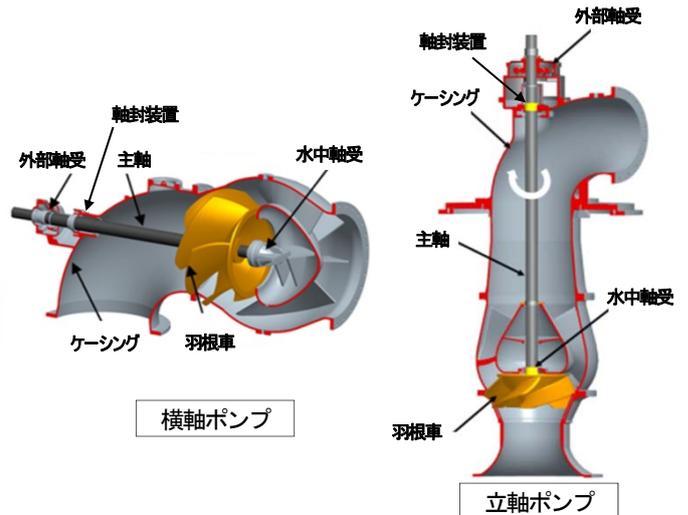


図-6 主ポンプの外形図

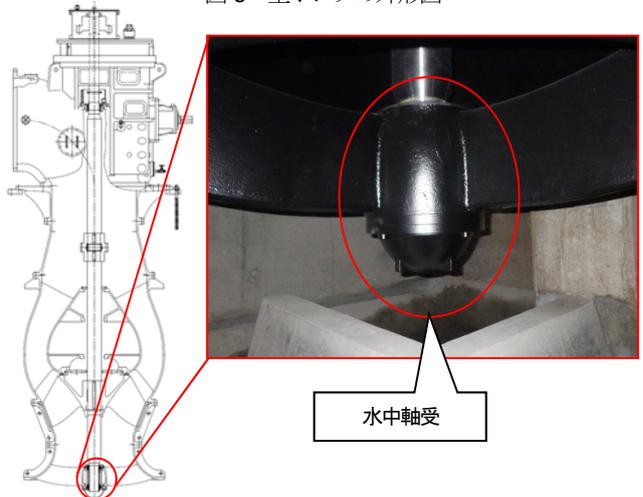


図-7 水中軸受が先端に配置されたポンプ

4.施工方法の検討

本工事は出水期を挟みⅠ期とⅡ期工事でそれぞれ主ポンプ1台ずつ更新する工程で実施している。(図-8)
施工に当たり発生した課題と実施した対策を示す。

課題① 非出水期中であっても最低1台は排水運転可能な状態を確保しなければならず、補機類を撤去ではなく移設させながら順次更新をしていく必要がある。

対策① 事前に綿密な現地調査を実施し効率的な機器配置計画を立てる。

機器配置計画はⅡ基工事の施工で支障のない位置であるかの確認を行いながら、機器同士をつなぐ配線配管が極力短くなるよう配置することで作業スペースの確保を図った。

課題② 既設の天井クレーンの定格荷重及び揚程が小さく主ポンプ設置時に使用することができない。

対策② 仮設の門型クレーンを組立て、搬入を行った。(図-9)

横軸ポンプは立軸ポンプよりも細かく分割できるため機器1つ当たりの重量が小さい。よって、横軸ポンプの排水機場に設置されている天井クレーンの定格荷重は立軸ポンプの排水機場より小さいのが一般的である。

今回、既設天井クレーンの定格荷重5tに対し、設置する主ポンプは約10tあるため、仮設の門型クレーンを機場内に設置した。

なお、主ポンプ以外の機器は天井クレーンでの据付が可能であることから、門型クレーン組立に当たっては天井クレーンの走行・横行に支障の無い範囲に設置するなど、狭い排水機場内での配置を工夫した。

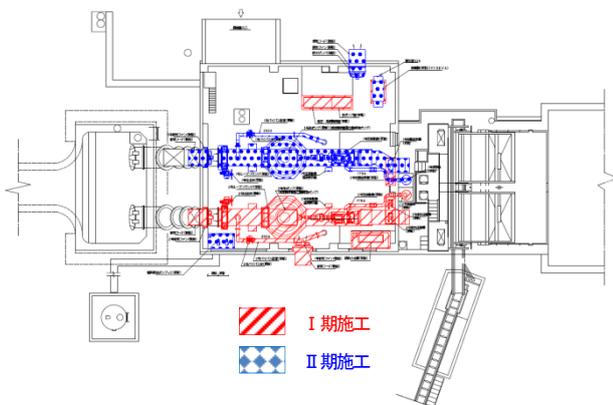


図-8 施工範囲図(Ⅰ期,Ⅱ期)



図-9 仮設門型クレーンによる主ポンプ搬入

課題③ 既設吐出管のフランジ孔の位置が図面と比べて数度ずれており完成図書と既設との不整合があった。

対策③ 工場製作の段階で既設吐出管のフランジ孔のずれにあわせた加工を行った。

今回、吐出管の一部で既設流用を行っているが、既設と新設と接続部において既設側の接続フランジ穴が完成図書の記載より数度ずれていることが分かった。そのためフランジ穴のズレを反映させた新設配管を作成し接続を行った。

5.まとめ

本工事では、主ポンプ、主原動機、減速機の機器に対して「無水化」の技術を採用することで、補機類の削減が可能となり、故障リスクの低下及び維持管理負担の低減など信頼性の高い排水機場にリニューアルできたと考える。

また、主ポンプの「立軸化」により従来の排水機場では必要であった満水操作が不要となり、今まで以上に迅速な排水運転が行えるなど操作性の向上も同時に図ることができた。

老朽化した排水機場における「無水化」「立軸化」は信頼性向上に大きく寄与するものとする。

現在2号ポンプの設置が完了し、2017年11月より1号ポンプの更新を行い、2018年3月に全ての工事が終了する予定である。

参考文献

1)国土交通省土木研究所 材料施工部機械研究室：機械設備の信頼性評価に関する調査研究(第二報)2001年2月

救急排水機場ポンプ設備への状態監視技術の適用について

小林 勇一¹・平地 一典¹・澤口 重夫¹・田所 登²

¹国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地機械技術チーム
(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²北海道開発局 帯広開発建設部 施設整備課 (〒080-8585 北海道帯広市西4条南8丁目)
(前 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地機械技術チーム)

救急排水機場は、内水を排水し洪水被害を軽減することを目的に設置された重要な河川管理施設である。しかし、救急排水機場で使用されるコラム形水中ポンプは、コラムパイプ内に設置されることから、稼働中の異常や変調の確認が極めて困難である。限られた予算のなかで設備の信頼性を維持するためには、状態を的確に把握し、適切な修理や更新を行う必要がある。

そこで、コラム形水中ポンプにおける状態監視技術の提案に向けた基礎検討として、各種状態監視技術について、コラム形水中ポンプへの適用性の検討を行った。その結果、電流情報診断の適用性が高いことがわかり、救急排水機場において電流波形の計測試験を実施した。

キーワード 健全度、長寿命化、維持・管理、救急排水機場、電流情報診断

1. はじめに

河川管理施設である排水機場や救急排水機場は、内水を排水し洪水被害を軽減することを目的に設置された重要な施設であり、非常時には確実に稼働しなければならない。

救急排水機場ではコラム形着脱式縦軸斜流水中モータポンプ（以下、コラム形水中ポンプという）が使用されているが、コラムパイプ内に設置し排水作業を行うことから、現場の運転員や点検従事者がポンプの運転中に目視や触診などにより異常や変調を確認することは極めて困難である。

また、設備の老朽化が進んでおり、限られた予算のなかで信頼性を維持していくためには、状態を的確に把握したうえで、必要な修理や更新を行う必要がある。

そこで、コラム形水中ポンプにおける状態監視技術の提案に向けた基礎検討として、回転機械の状態監視に使用されている各種計測、診断技術について、コラム形水中ポンプへの適用性の検討を行い、現地計測試験を実施した。

2. コラム形水中ポンプの概要

救急排水機場とは、地域ごとの内水の状況に応じた機動的かつ効率的な排水作業を行うことを目的に、「救急内水対策事業」に基づき設置された施設である¹⁾。

写真-1に救急排水機場の外観を、写真-2にコラム形水中ポンプを示す。



写真-1 救急排水機場外観



写真-2 コラム形水中ポンプ

図-1にコラム形水中ポンプの設置概要図を示す。

救急排水機場のポンプユニットは、常設されたコラムパイプ、および可搬式のコラム形水中ポンプで構成されており²⁾、コラム形水中ポンプはクレーン等によりコラムパイプ上部からパイプ内に挿入し設置する。

ポンプは稼働中、常にコラムパイプ内にあり、目視や触診はできない。またポンプを引き上げた状態での空回転もできないため、ポンプの稼働状態を確認することは極めて難しい。

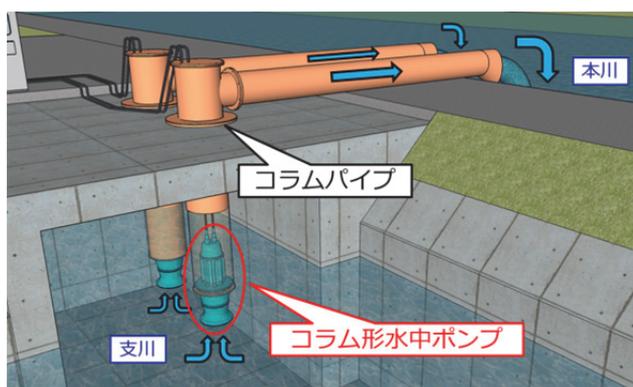


図-1 コラム形水中ポンプ設置概要図

電流情報診断は、誘導電動機電流兆候解析（MCSA：Motor Current Signature Analysis）に基づき、三相誘導電動機に発生する逆起電力を解析することで、機械の異常を検出する技術である³⁾。コラム形水中ポンプの電動機形式は水中乾式かご形三相誘導電動機であるため²⁾、適用が可能である。

電流情報診断による計測方法の概要図を図-2に示す。計測は、機側の分電盤や操作盤の動力配線にクランプを取り付けるのみであるため、非常に容易である。また、騒音や振動などの影響を受けにくいいため、計測データの信頼性も高いと考えられる。

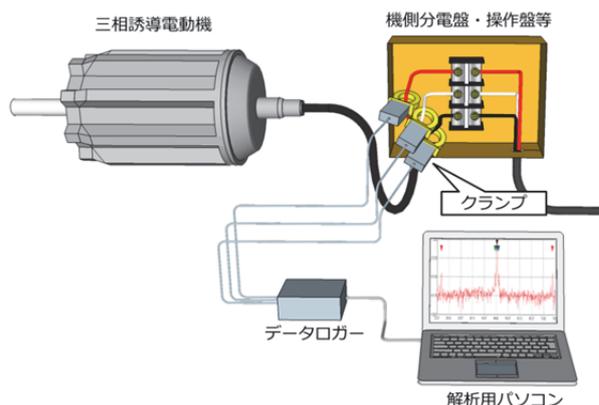


図-2 電流情報診断による計測方法概要図

3. 状態監視技術の適用性の検討

水中ポンプや電動モーターなど回転機械の状態監視に使用されている各種計測、診断技術について、コラム形水中ポンプへの適用性の評価を行った。

評価結果を表-1に示す。

計測データの信頼性は、水流による騒音や振動などによりデータが影響されにくいものを高く評価し、計測の容易さは、計測機器の設置が容易なものや、ポンプを引き上げずに計測が可能なもの高く評価した。

その結果、電流情報診断が最も適用性が高い技術と評価した。

表-1 各種計測、診断技術の適用性の評価

計測データの信頼性	高い	<ul style="list-style-type: none"> ・振動診断(ポンプ本体) ・潤滑油診断 ・AE診断(ポンプ本体) ・内視鏡診断 ・分解検査 ・主軸回転トルク計測 	・電流情報診断
	低い	<ul style="list-style-type: none"> ・温度計測 ・音響診断 	<ul style="list-style-type: none"> ・振動診断(コラムパイプ) ・AE診断(コラムパイプ) ・サーモグラフィ ・音カメラ
		困難	容易
計測の容易さ			

4. 電流情報診断による解析方法

電流情報診断では、電流波形を周波数分析することにより、電動機本体や、ポンプ、減速機などと接続された回転子軸に関わる異常の解析を行う。簡易的な解析方法として、回転子バーの損傷、および回転子軸への異常負荷の解析がある。

(1) 回転子バーの損傷

三相誘導電動機は、固定子に三相交流電流を流すことで、回転子バーに電流を誘起させ、回転子を回転させる。図-3に三相誘導電動機の模式図を示す。

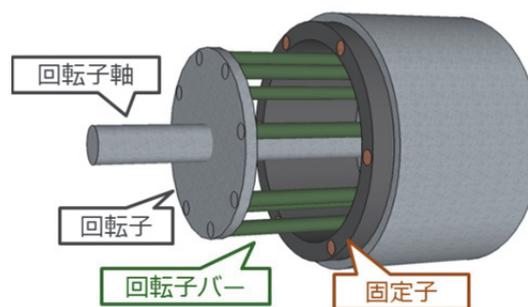


図-3 三相誘導電動機（かご形）模式図

固定子に電流を流すと、磁界が発生するとともに、交流電源の位相変化に合わせて磁界が回転するように変化する。この回転磁界により、回転子は磁界から見て相対的に反対方向へ移動したことになる、フレミングの右手の法則により、回転子バーに電流が誘起される。磁界の中にある回転子バーに電流が流れると、フレミングの左手の法則により電磁力が生じ、その電磁力により回転子は回転する。

図-4にフレミングの法則を示す。

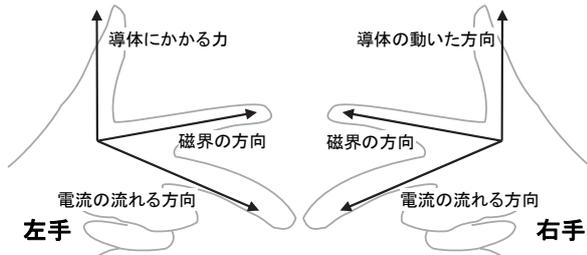


図-4 フレミングの法則

回転子が磁界に対し相対的に移動することにより、回転子バーに電流が誘起され回転するため、回転子は回転磁界よりやや遅い周波数で回転する。この回転磁界と回転子の周波数の差がすべり周波数となる。

ここで、回転子から見ると、相対的に回転磁界はすべり周波数で回転していることになり、回転磁界の磁極が回転子バーを通過する際に、フレミングの右手の法則により、今度は固定子側に電流が誘起される。

回転子バーの1本が損傷した場合、その回転子バーには電流が誘起されにくくなり、結果として固定子への電流誘起に影響を及ぼすことになる。その周波数は、回転子が磁極を通過する周波数となり、すべり周波数と磁極の数（極数）の積で求めることができる。

この場合の電流波形を周波数分析すると、図-5に示すとおり、電源周波数の両端に側帯波が現れる³⁹⁾。この側帯波が大きくなるほど、回転子バーが損傷している可能性が高まる。

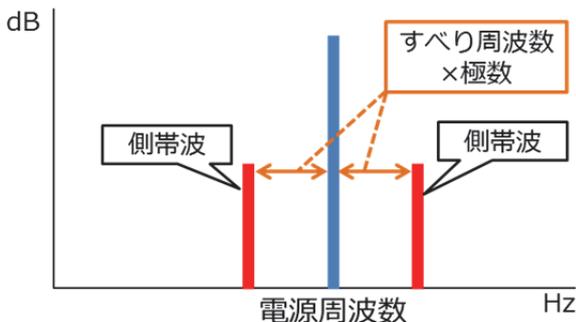


図-5 周波数分析例（回転子バーの損傷）

(2) 回転子軸の異常負荷

ポンプや減速機などが接続された回転子軸に、ミスアライメントやアンバランスなどが発生した場合、回転子軸には異常負荷がかかる。異常負荷により回転子が偏芯すると、空間磁束線に影響を与え、固定子への電流誘起に影響を及ぼす³⁾。

回転子の偏芯については、回転子バーの本数と回転子の回転周波数（以下、実回転周波数という）の積を求めて解析する方法がある³⁾。しかし、回転子バーの本数は電動機メーカーなどからは一般的に公表されておらず、多くの場合は電動機を分解して直接確認する必要がある。

回転子バーの本数が不明な場合の簡易的な解析方法として、実回転周波数による方法がある³⁾。

回転子軸に異常負荷が発生した場合、電流波形を周波数分析すると、図-6に示すとおり、電源周波数の両端に側帯波が現れる。この側帯波が大きくなるほど、回転子軸への異常負荷の可能性が高まる。

回転子軸への異常負荷を解析することで、回転子軸のミスアライメントやアンバランス、軸受の損傷などのほか、接続したポンプや減速機などのカップリング心ずれや軸接触、軸曲がりなどの異常が検出できる可能性がある。

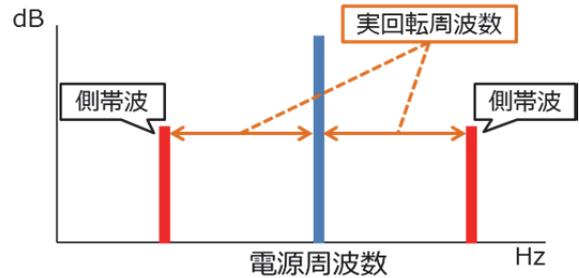


図-6 周波数解析例（回転子軸への異常負荷）

(3) 模型による実証試験

電流波形を周波数分析することにより、側帯波が現れることを確認するため、実験用模型により電流波形の計測試験を行った。写真-3に模型の外観を示す。模型は三相誘導電動機、軸受、フライホイールおよびシャフトにより構成される。フライホイールには開孔部を設けており、ボルト等を取り付けることで、偏芯して回転させることが可能である。

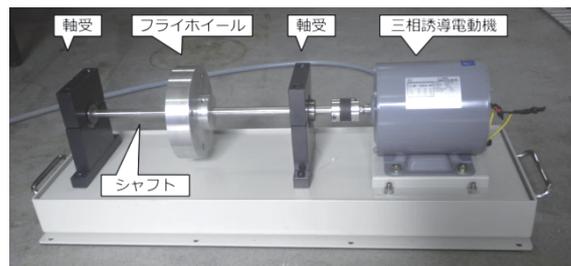


写真-3 実験用模型

電動機の電源は3相交流200V、定格電流は0.71A、極数は4、出力は0.1kWである。電源には商用電源を使用し、電源周波数は50Hzである。

写真-4に計測状況を示す。計測に使用した機器は、株式会社高田工業所製の電流情報量診断システムT-MCMAである。計測条件は、サンプリング周波数を8,192Hz、サンプリングデータ数を65,536とした。



写真-4 計測状況

まず、正常な状態で電流波形を計測し、周波数分析を行った。周波数分析結果を図-7に示す。横軸は周波数、縦軸は周波数成分の大きさである。電源周波数以外の周波数成分は非常に小さいため、大きさの単位にはデシベルを使用する。

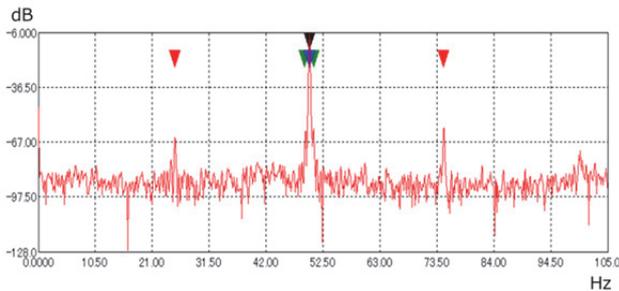


図-7 周波数分析結果 (実験用模型)

回転子バーの損傷解析に用いる側帯波を確認するため、すべり周波数と極数の積を以下のとおり算出した。

電動機の同期回転数 N_x (回転磁界の回転数) は、次式により求められる。

$$N_x = 120 \times \frac{f_L}{p} = 120 \times \frac{50}{4} = 1,500 \text{ rpm}$$

f_L : 電源周波数

p : 極数

実回転数 N は、回転計により計測し、1,488rpmであることを確認した。これより、すべり周波数 f_s は、

$$f_s = \frac{N_x - N}{60} = \frac{1,500 - 1,488}{60} = 0.2 \text{ Hz}$$

となり、すべり周波数 f_s と極数 p との積は、

$$f_s \times p = 0.2 \times 4 = 0.8 \text{ Hz}$$

となった。

また、回転子軸の異常負荷の解析に必要な、実回転周波数 f は、以下のとおり算出した。

$$f = \frac{N}{60} = \frac{1,488}{60} = 24.8 \text{ Hz}$$

図-7を拡大したものを図-8に示す。側帯波は、電源周波数の $\pm 0.75\text{Hz}$ 、および $\pm 24.875\text{Hz}$ に確認することができた。この誤差は、周波数分解能が 0.125Hz であるために生じたものである。

側帯波の大きさは、電源周波数成分と側帯波成分の比率により確認した⁴⁾。電源周波数成分を I_{line} 、側帯波成分を I とすると、側帯波の大きさ L は次式のとおりとなる。

$$L = 20 \log \frac{I_{line}}{I} = 20 \log I_{line} - 20 \log I$$

以上より、側帯波の大きさは、電源周波数成分と側帯波成分のデシベル値の差となる。

図-8より、側帯波の大きさは、 $\pm 0.75\text{Hz}$ で 54.45dB と 52.96dB 、 $\pm 24.875\text{Hz}$ で 57.81dB と 52.37dB となった。側帯波は、大きくなるほど電源周波数成分との差が小さくなるため、デシベル値は小さく表される。電流情報診断では、それぞれデシベル値が小さい方で解析を行うため、 $\pm 0.75\text{Hz}$ では 52.96dB 、 $\pm 24.875\text{Hz}$ では 52.37dB が解析値となった。

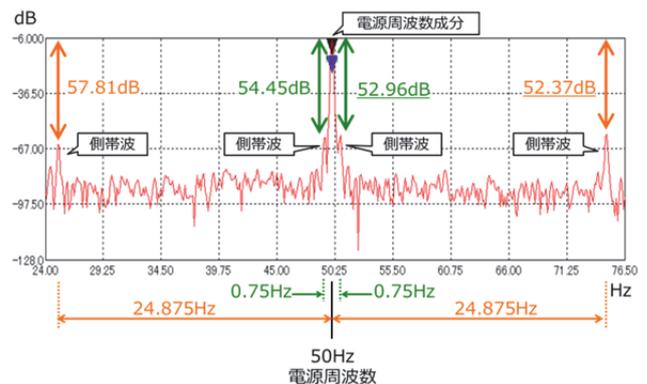


図-8 周波数分析結果 (拡大)

次に、フライホイールにボルトを取り付け、偏芯して回転させた状態で計測を実施した。ボルトは1本の場合と2本の場合を計測し、側帯波の大きさを確認した。

側帯波のデシベル値を表-2に示す。偏芯用のボルトを増やすことで、回転子軸の異常負荷を示す側帯波のデシベル値が小さくなることが確認できた。

以上より、電流波形を周波数分析することで、解析に必要な側帯波が検出できること、また、回転子軸を偏芯させることで、側帯波が大きくなることがわかった。

表-2 側帯波のデシベル値

項目	正常	偏芯 (ボルト1本)	偏芯 (ボルト2本)
回転子バーの 損傷	52.96dB	51.75dB	51.92dB
回転子軸への 異常負荷	52.37dB	50.63dB	48.71dB

5. コラム形水中ポンプの計測試験

電流情報診断のコラム形水中ポンプへの適用性を確認するため、実際に救急排水機場において電流波形の計測試験を実施した。

写真-5に救急排水機場外観および計測用のクランプ取付状況を示す。電流波形は機側操作盤にて計測した。ポンプは高揚程型であり²⁾、電源は3相交流400V、定格電流は230A、極数は6、出力は140kWである。電源は発動発電機であり、設定周波数は50Hzである。計測試験は、定期点検の試運転にあわせて実施した。



写真-5 救急排水機場外観（上段）、計測用クランプ取付状況（下段）

電流の周波数分析結果を図-9に示す。電源周波数成分は50.875Hzに現れており、これは発動発電機による誤差と考えられる。

回転子バー損傷の側帯波は、電源周波数の±1.75Hzに現れており、大きさは48.88dBであった。また、回転子軸の異常負荷の側帯波は±16.75Hzに現れており、大きさは51.09dBであった。

以上より、コラム形水中ポンプにおいても、側帯波が現れることを確認した。

しかし、前項の模型と比較すると、側帯波周辺の周波数成分が大きく、側帯波が判別しにくいことがわかった。模型には商用電源を使用したことから、発動発電機を使用していることが原因の一つとして考えられる。

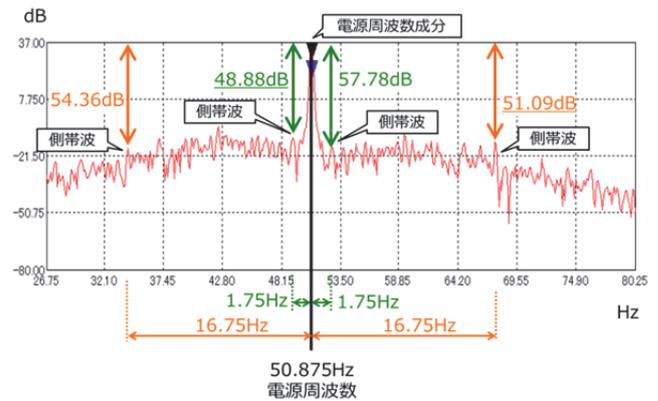


図-9 周波数分析結果（コラム形水中ポンプ）

6. 商用電源を使用した機械設備による計測試験

コラム形水中ポンプとの比較を行うため、商用電源を使用した機械設備の電流波形の周波数解析を行った。

計測試験は、試運転が可能であったダムの子備ゲートの開閉装置により実施した。

写真-6に開閉装置の写真を示す。電動機の電源は3相交流400V、定格電流は18A、極数は6、出力は3.7kWである。電源は商用電源であり、電源周波数は50Hzである。計測は機側操作盤にて実施した。

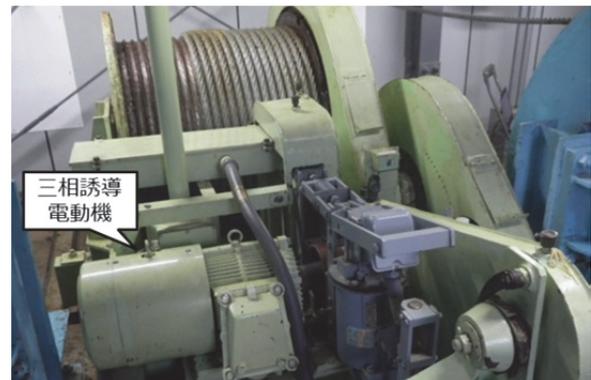


写真-6 ダム子備ゲート用開閉装置

予備ゲートは2門あり、それぞれに同じ規格の開閉装置が使用されていることから、双方の電動機について計測を実施した。それぞれを電動機A、電動機Bとする。

図-10に周波数分析結果を示す。コラム形水中ポンプと比較すると、側帯波が明確であることが確認できた。

また、表-3に側帯波のデシベル値を示す。今回の計測では、電動機Bの方が側帯波が大きい結果となった。これらの電動機は同時期に設置されたものであるが、電動機Aは、接続している減速機を1年前に修理した実績があるため、修理実績が側帯波の大きさに影響している可能性がある。

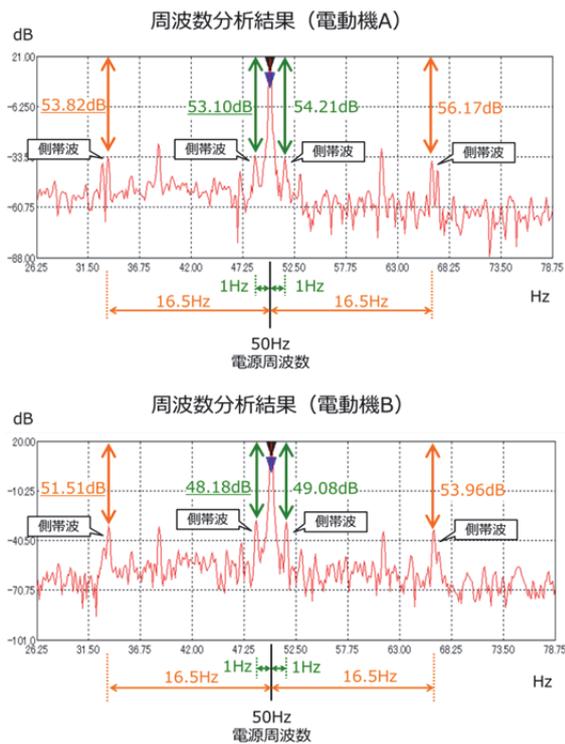


図-10 周波数分析結果（ダム予備ゲート用電動機）

表-3 側帯波のデシベル値（ダム予備ゲート用電動機）

項目	電動機A	電動機B
回転子バーの損傷	53.10dB	48.18dB
回転子軸への異常負荷	53.82dB	51.51dB

7. まとめ

救急排水機場で使用されるコラム形水中ポンプにおける状態監視技術の提案に向けた基礎検討として、回転機械の状態監視に使用されている各種計測、診断技術について、コラム形水中ポンプへの適用性について検討した。

その結果、電流情報診断の適用性が高いことがわかり、救急排水機場において現地計測試験を実施した。

現地計測試験の結果から、解析に必要な側帯波を検出することはできたが、側帯波が判別しにくいことがわかり、発動発電機を使用していることが原因の一つとして考えられた。

今後は、引き続き救急排水機場でコラム形水中ポンプの電流情報診断を実施し、コラム形水中ポンプの計測に適した計測条件、およびノイズ除去などデータ処理の手法について検討を行うとともに、解析結果と損傷状態を比較することで、その適用範囲、診断精度などの検証を行う。

謝辞：電流情報診断に関してご協力いただいた株式会社高田工業所 劉信芳氏、山本英明氏に感謝する。また、現地試験にご協力いただいた国土交通省北海道開発局に感謝する。

参考文献

- 1) 国土交通省（旧建設省）：救急内水対策事業の運用について（通知）H6.41建設省河流発第1号,1994
- 2) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会：救急排水ポンプ設備技術指針・解説,1994
- 3) 豊田利夫：電流徴候解析 MCSA による電動機駆動回転機の診断技術,高田技報 Vol.20,2010
- 4) 豊田利夫：電機設備診断の進め方,日本プラントメンテナンス協会,1993
- 5) 劉信芳：誘導電動機の電流信号による回転機械系の監視診断,第15回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集,2016

塩水遡上制御を目的に大曲地点(図-1参照)に可動式の塩水調整ゲートが建設されている。また、網走湖では内水面漁業が重要な産業となっており、ワカサギ、シラウオ、シジミなど国内でも有数の漁獲量である。加えて、網走湖は例年12月～3月まで湖面が全面結氷する。

2. 2 観測方法

St.1(図-1参照)において、連続機器観測、鉛直機器観測、採水水質調査を行った。結氷期の網走湖では、広範囲で氷下引網漁が行われるため、地元漁業協同組合と協議し、操業範囲から十分離れた漁業区外の水深を確保できる地点を選定した。

a) 連続機器観測

St.1(機器設置時全水深7.4m)において鉛直方向3層に観測機器を係留してデータを取得した。図-2に係留の模式図を示す。EL-1.5m、EL-3.0m、EL-5.5mに塩分水温計(以下CTと略す)、光学式溶存酸素計(以下ADOと略す)、クロロフィル濁度計(以下ACLWと略す)を係留し、EL-2.5mに圧力式水位計を設置した。観測期間は2014年12月13日～2015年6月4日において1時間間隔でデータを取得した。なお、目視による結氷状況確認では、2014年12月20日～2015年3月13日まで全面結氷していた。

b) 鉛直機器観測

St.1において2014年12月13日～2015年6月29日の間に氷上穿孔もしくは船上作業で約2週間毎に多項目水質計を用いて、水温、塩分、濁度、DO、クロロフィルa(Chl-a)の鉛直分布を鉛直方向0.1m間隔で計測した。なお、12月と4月の薄氷時期は安全確保のため、月1回の観測とした。

c) 採水水質調査

鉛直機器観測と同一日に図-2に示す連続機器観測の機器設置標高毎に採水し、室内分析を行った。分析項目は化学的酸素要求量(COD)、全窒素(T-N)、アンモニウム態窒素(NH₄-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、全リン(T-P)、オルトリン酸態リン(PO₄-P)、全有機炭素(TOC)、溶存態有機炭素(DOC)とした。

d) その他

網走開発建設部より、観測期間に対応する網走川の水位、流量、塩分データ(大曲観測所、本郷観測所(図-1参照))を提供いただいた。なお、流量データは暫定値である。また、気象庁webサイトより網走港潮位データ、網走地方気象台および女満別アメダス地点(図-1参照)の気温、降雨量の毎正時データを入手した。

3. 観測結果

3. 1 連続機器観測

図-3に連続機器観測結果を示す。全ての項目でEL-5.5と他2層で挙動が大きく異なっていた。水温は観測開始から4月17日まではEL-5.5の水温が高く、結氷下において逆転水温層を形成している。4月17日以降、特に5月5日以

降のEL-5.5において、EL-3.0とEL-1.5の水温まで上下動する挙動が見られた。EL-3.0とEL-1.5の水温を見ると、1月13日まではほぼ同水温で推移した後、EL-1.5の水温が低下して、逆転水温勾配を形成した。3月8日にEL-1.5の水温がEL-3.0の水温より上昇している。4月17日以降はEL-1.5とEL-3.0の水温はほぼ同水温となっていた。

塩分は、EL-5.5では観測開始から上昇し、一定値となった後、4月3日以降は0～15PSUの間の値で上下動していた。EL-3.0は4月3日まで緩やかに上昇し、その後1PSU以下となった。EL-1.5は1月13日以降でゼロとなった後、4月5日から上昇して4月17日以降はEL-3.0と同程度

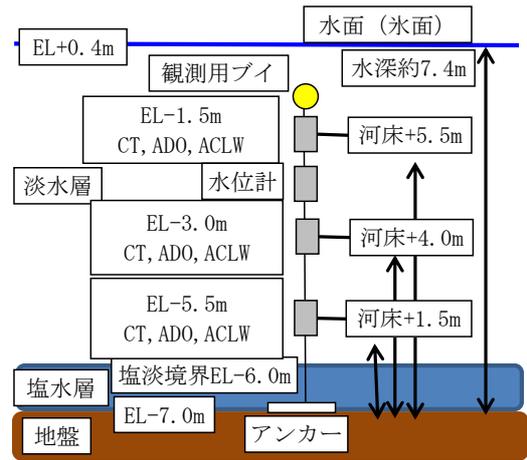


図-2 観測模式図

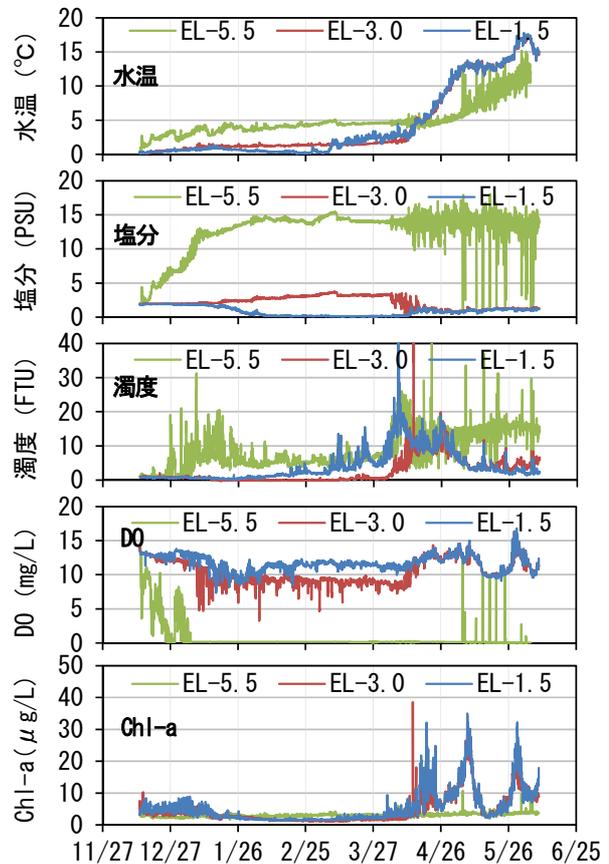


図-3 連続機器観測結果

の値で推移している。

濁度は、EL-5.5では12月27日～1月26日、4月3日にピークがみられる。観測期間中は緩やかな上昇傾向を示していた。EL-3.0では4月17日、4月30日に濁度の上昇が観測された。EL-1.5では3月8日、3月23日、4月3日、4月30日に濁度の上昇が観測された。

DOをみると、EL-5.5では観測開始後から減少し、1月3日に無酸素となった。5月5日以降にEL-3.0とEL-1.5の値と無酸素の間を上下動する挙動が観測された。EL-3.0では観測開始から低下傾向を示し、4月3日に8mg/Lから上昇に転じた後、10mg/L以上で推移している。EL-1.5では1月13日にやや低下したが、4月3日まではほぼ一定値で推移した。その後はEL-3.0と同程度で推移している。

Chl-aをみると、EL-5.5では観測開始から、ほぼ一定値で推移している。解氷後はやや増加傾向もみられるが大きな変化は見られない。EL-3.0とEL-1.5はほぼ同様の挙動を示している。結氷前はEL-5.5より高い値で推移したが、結氷後にはEL-5.5よりも低い値となった。解氷後は4月20日、5月10日、6月1日にピークがみられ、濁度のピーク後2週間前後で水温の上昇にあわせてピークがみられた。

次に潮位、水位、流量、塩分、気温、降雨量データを図-4に示す。なお、流量データの負値は逆流(海から湖への流入)を示す。St.1水位をみると12月18日～1月15日に0.2mほど増加した。このとき、大曲地点のデータから海水が逆流している。1月15日～3月13日まではほぼ横ばいで推移し、3月13日から上昇し始めていた。4月5日にピーク値0.95mとなった後に平水位である0.4mとなった。潮位データをみると、12月～2月にかけて湖水位よりも潮位が高くなる頻度が多くなっており、湖内に海水の逆流が起りやすい状況であった。河川流量をみると大曲では12月～1月に逆流量が増加し、塩分も高頻度で検出されている。4月3日以降は大曲、本郷ともに同程度の流量で順流量が増加していた。気象データをみると、今回の観測期間においては降雪となるため、降雨はほとんどなかった。網走気温は3月10日以降に0℃以上の気温で推移し、女満別気温も4月3日以降は0℃以上となっている。

次に潮位、水位、流量、塩分、気温、降雨量データから得られる知見をまとめる。12月～2月にかけて湖水位よりも潮位が高くなる頻度が上がり、特に12月18日～1月15日に海水が湖内に逆流していた。3月13日から融雪が始まり、4月5日にピークとなるが、4月3日以降は大曲、本郷ともに同程度の流量で順流量が卓越した。気象データをみると、網走気温では3月10日以降は0℃以上の気温で推移し、女満別気温も4月3日以降は0℃以上であった。

これらの結果から、結氷初期の12月20日前後に海水が流入してEL-5.5は塩水となっている。3月10日前後に解氷し、融雪出水によって淡水が流入する。そのため融雪ピークの4月5日以降において、EL-5.5は塩水と淡水が交互に入れ替わる状況となった。

3. 2 鉛直機器観測

図-5に2014年12月13日、2015年2月9日、4月22日の鉛直機器観測結果を示す。各観測日の氷厚は2cm、74cm、0cmであった。12月13日にはChl-a以外の項目で標高-6mに明瞭な躍層がみられる。淡水域となる標高0～-6mにおいては、各々の項目が鉛直方向に均一に分布していた。

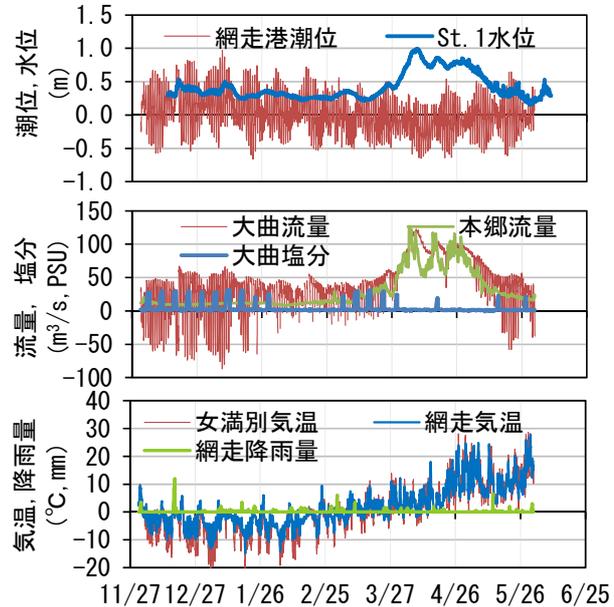


図-4 潮位、水位、流量、気象データ

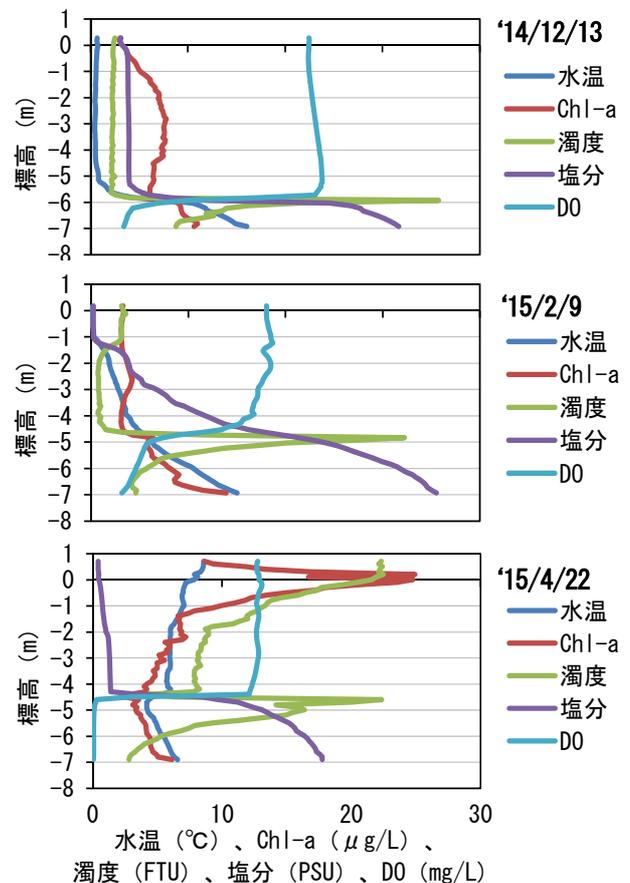


図-5 鉛直機器観測データ

標高-6m以下の貧酸素塩水は水温が8℃ほどあり、躍層位置の標高-6m付近に濁度のピークが観測された。Chl-aは淡水域では標高-3m付近に極値をもつ山型に分布し、塩淡水境界面で不連続となり、標高-6m以深では下層ほど濃度が高くなる分布であった。2月9日には水温と塩分は連続的な勾配を有する分布となっている。このとき、12月13日と比べて下層の水温はほぼ変化しないが、塩分値は26PSUまで増加していた。一方で、濁度とDOは標高-5m付近にピークと躍層を形成していた。このとき、標高0～-5mのDOは12月13日の結氷初期と比較すると12mg/Lから8mg/Lへと減少していた。Chl-aは12月13日と同様に淡水層と塩水層で挙動が異なっていたが、分布形状は12月とほぼ同じであった。

解氷後の4月22日には標高-4.5m付近に塩分とDOの躍層、濁度のピークが観測された。このとき塩水層のDOはゼロとなっている。水温は標高0～-4.5mでは水深とともに温度が低くなり、標高-4.5m以下では水深とともに温度が高くなっていった。また、濁度は水面近傍と標高-4.5m付近に極大値を持つ分布となり、Chl-aは水面付近で極大値を持つ分布となっていた。このとき下層の塩分値は結氷中よりも低下して19PSUとなっていた。

ここで結氷から解氷にかけての標高-7mの数値をみると解氷時に塩分とDOに若干の差が見られるが、それ以外の項目はほぼ同程度の値となっている。またDO躍層付近の濁度のピーク値もほぼ同じであった。これらの挙動から、結氷下では塩分が拡散するが、濁りと酸素は拡散しないこと、融雪出水によって淡水と濁りが供給され、一次的に塩水層の塩分は低下するが他の項目にほぼ影響しないことが明らかとなった。

3. 3 水質分析結果

図-6にCOD、TOC、DOCの分析結果を時系列で示す。なお、CODは過マンガン酸カリウムを酸化剤とした結果であり、EL-5.5の結果は右軸を目盛りとする。CODの結果から、EL-1.5、EL-3.0では結氷下(1月～3月)において4mg/Lほどの一定値で推移し、解氷後の4月以降に増加して5mg/L前後で推移する。一方で、EL-5.5では12月調査時は5mg/Lであり、結氷中かつ無酸素状態の1月13日には19mg/Lまで増加し、その後は緩やかに増加傾向を示した。解氷後の3月16日には13mg/Lに減少したが、融雪出水後の4月22日には34mg/Lまで増加した。その後は20mg/Lほどで推移した。これまでの観測結果から、EL-5.5はDO躍層付近に位置し、無酸素層に入ったときにEL-1.5やEL-3.0の水質挙動との相違がみられる。

次に、TOCはEL-1.5、EL-3.0では3～4mg/Lで推移している。EL-5.5では1月13日に6mg/Lと高い値となるが、結氷下では4mg/Lで推移し、4月以降は4mg/L～6mg/Lへ増加する傾向を示した。DOCはTOCに追従する傾向を示していた。観測期間中の各層のTOCに占める溶存有機炭素(DOC/TOC)は75～100%で平均86%となり、ほぼ同一構

成比であった。また、TOCやDOCはEL-5.5が無酸素層となっても、深度別に大差がない結果であった。

図-7にT-PとPO₄-Pの分析結果を示す。なお、EL-5.5については右軸を目盛りとする。T-Pは12月13日には全層で0.06mg/Lであり、EL-1.5とEL-3.0は0.04～0.06mg/Lの間で変動している。一方で、EL-5.5では無酸素層となった1月13日以降はEL-1.5、EL-3.0と比べて濃度が10倍以上高くなり、解氷した後も継続的に増加する傾向であった。次に、EL-1.5、EL-3.0のPO₄-Pをみると、結氷期間中(1月13日～3月13日の観測結果)では濃度の増加を続けていた。解氷後の4月22日には急激に濃度が低下し、6月以降はゼロで推移していた。一方、EL-5.5では解氷を含めて観測期間中は増加傾向を示している。

図-8にT-N、NO₃-N、NH₄-Nの分析結果を示す。亜硝酸態窒素は濃度が非常に小さいために割愛し、NH₄-NについてEL-5.5の結果は右軸を目盛りとする。EL-5.5のT-Nは解氷前後となる3月13日に大きく減少するが、観測期間全体としては時間とともに増加する傾向がみられる。EL-3.0では結氷下から解氷後の4月22日まで増加し、以降は減少に転じていた。EL-1.5では結氷初期となる1月13日及

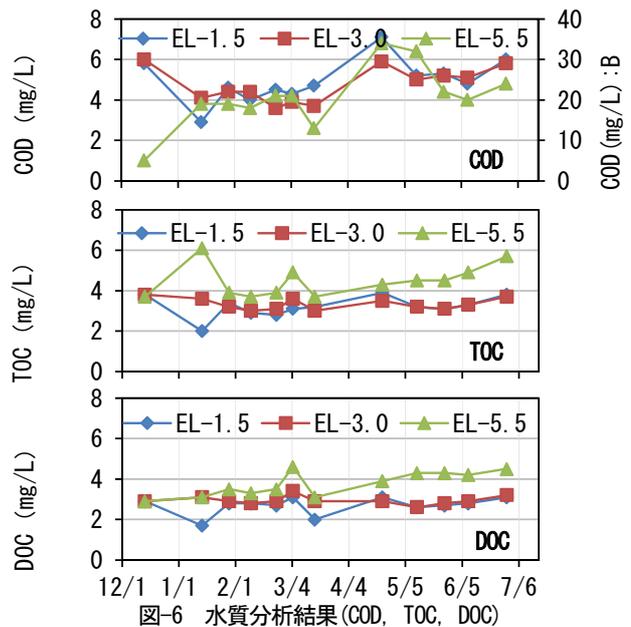


図-6 水質分析結果(COD, TOC, DOC)

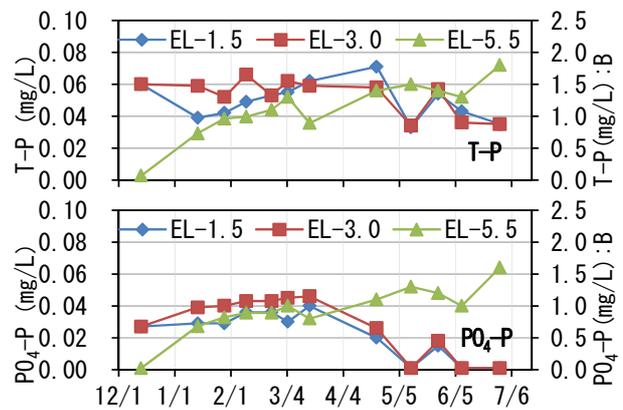


図-7 水質分析結果(T-P, PO₄-P)

び解氷初期となる3月13日に3mg/Lとやや高い値が観測されたが、その他の期間はEL-3.0と同様の傾向を示した。EL-5.5のNO₃-Nは1月13日以降ではほぼ検出されない。EL-1.5とEL-3.0ではT-Nと同様の挙動を示すが、T-Nに対する比(NO₃-N/T-N)は、結氷中(1月13日～3月4日の観測データ)で異なっていた。EL-1.5では平均0.60(0.35～0.75の変動幅)であり、EL-3.0では平均0.25(0.12～0.36の変動幅)となり、標高が低いほど硝酸態の割合が減少していた。次に、EL-5.5のNH₄-NはT-Nと同様の挙動を示し、継続的に増加する傾向が見られる。EL-3.0の結氷中(1月13日～3月4日の観測データ)は単一増加傾向を示す。しかし、3月13日以降は急激に濃度が減少した。3月13日および4月22日はNO₃-Nが増加したことから、解氷によって速やかに酸化されたと推察される。EL-1.5では2月9日に最大値となり、以降は減少を続けていた。EL-3.0に比べて、解氷よりも早い段階で硝酸へと形態変換されていることが推察されるが、詳細は不明である。また、結氷中の全窒素中の無機態窒素比((NH₄-N+NO₃-N)/T-N)は、EL-1.5とEL-3.0ともに平均0.65(変動幅0.5～0.7)であり、解氷以降は0.1まで減少していた。このことからEL-1.5とEL-3.0では無機態窒素が均一に分布し、解氷後は有機態へと変換されている結果であった。

4. 水質挙動の考察

本研究で得られた観測結果から、網走湖における結氷から解氷にかけての水質挙動を考察する。現地調査時の目視から結氷期間は2014年12月20日～2015年3月13日である。観測された挙動を模式的に図-9に示す。観測開始時の塩淡境界はEL-6.0mであったが、結氷直後に海水が逆流して塩淡境界標高はEL-5.0m以上となった。結氷期間中は淡水流入が少ないため、結氷下ではEL-5.0mでも塩分濃度が10PSU以上とやや高い値を維持していた。また、結氷下では水温と塩分濃度は躍層が破壊され、連続的な鉛直勾配を有する分布となった。しかし、DOは躍層を維持し、塩分値11PSUとなる標高に高濁度水塊が存在して

いた。ここで、結氷下においては鉛直方向の流速が小さいため、拡散係数を比較すると温度 $1.4 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 、塩分 $1.5 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ 、酸素分子 $2.1 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{s}$ であり、塩分と酸素は同程度の拡散分布を示すはずであるが、観測結果ではDOは躍層を維持していた。さらに、濁度のピーク標高とDO躍層標高はよく一致しており、DOの鉛直分布は濁度に依存していると推察される。結氷下では河川流入量が減少し、濁質供給の影響がほぼない。また、水面を氷が覆うことで風速など水面での応力影響も排除される。そのため、高濁度水塊は湖内内部での生成、無氷期の流入濁質の残存、逆流海水による供給などが考えられる。3月8日前後に川岸が解氷し、塩水層に大気中から酸素が供給される。4月17日前後は完全解氷となり、融雪流入によって塩淡境界面は低下する。しかし、高濁度水塊は結氷下においても常に存在し、融雪流入によって流出する等の挙動は見られなかった。

次にDOの鉛直分布から、底層の無酸素域と上層の有酸素域に区別して呼称する。底層の栄養塩濃度の変化速

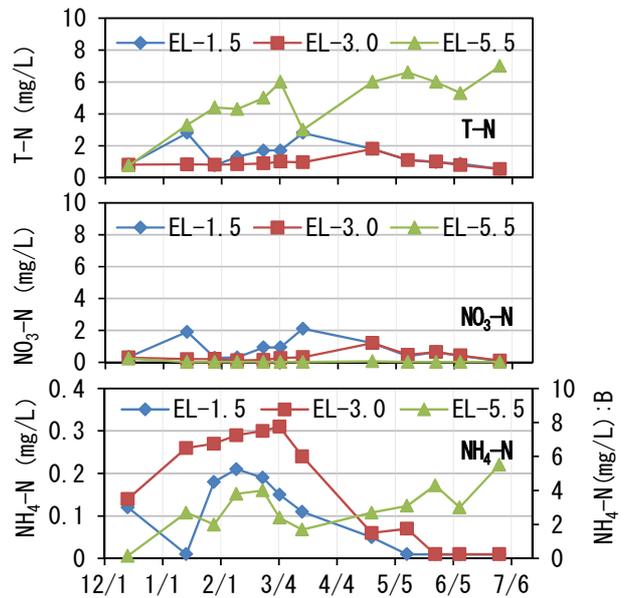


図-8 水質分析結果(T-N, NO₃-N, NH₄-N)

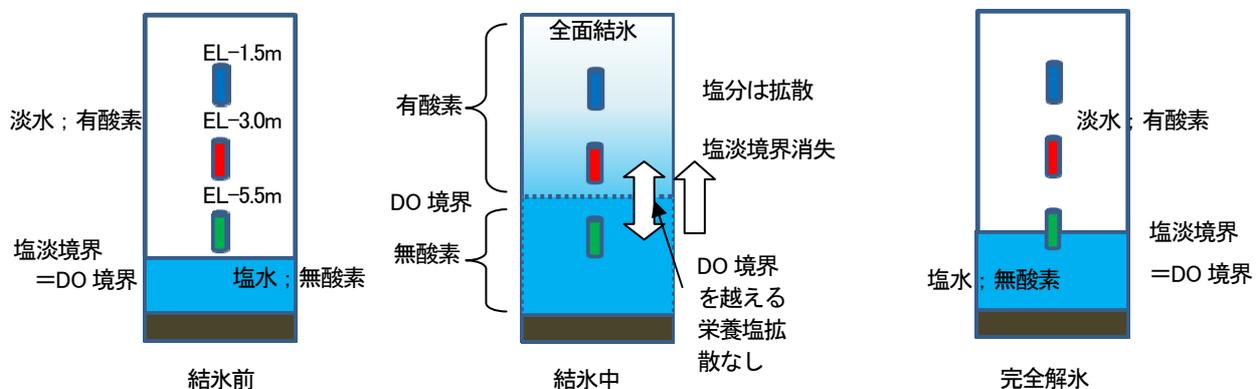


図-9 結氷下水質挙動の模式図

度はEL-5.5の結果より $\text{PO}_4\text{-P}$ で $3.9 \times 10^3 \text{ mg/L/day}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で $1.1 \times 10^2 \text{ mg/L/day}$ となる。湖水量 $2.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、底面積 $3.2 \times 10^7 \text{ m}^2$ とし、溶出速度を概算すると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ で $27.7 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で $74.1 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ となる。結氷する淡水停滞性水域である茨戸川の結氷下の溶出速度⁹⁾は $\text{PO}_4\text{-P}$ で $1.2 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で $38.4 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ であり、網走湖の栄養塩溶出速度が高くなっていた。

次に、結氷下の上層の栄養塩濃度変化速度はEL-3.0の結果から $\text{PO}_4\text{-P}$ で $1.0 \times 10^4 \text{ mg/L/day}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で $1.9 \times 10^3 \text{ mg/L/day}$ となる。底層の濃度変化速度と比較すると、結氷下の外力影響が少ない場合には、底層から上層への栄養塩の供給が少ないことがわかる。このことは、水面付近への栄養塩供給には、DO躍層の攪乱が必要であることを示唆している。また、図-7の結果より底層のCODは上層に比べ10倍ほど高いが、結氷期のTOCやDOCは底層も上層も大差ない。通常CODの分析上、アンモニアや鉄、硫化物など還元性の物質によって数値が上昇する。そこで図-7、9の2月23日のEL-5.5の結果から、CODより酸素、TOCより炭素、 $\text{NH}_4\text{-N}$ より窒素の物質量を概算するとO : C : N = 1.3 : 0.3 : 0.3(mol)となる。窒素の酸化に酸素3原子が必要と仮定すると、CODの約70%が $\text{NH}_4\text{-N}$ に由来すると推察される。

既往報告^{3)~5)}より、夏期の網走湖では塩分、DOはEL-6.0に躍層を形成している。このときの濁度分布をみると、塩淡境界面に濁度のピークがみられ、本観測結果とあわせると通年で塩淡またはDO境界面に高濁度水塊が存在している。また、通年で塩水躍層の標高変動は以下の機構が推察される。結氷後に海水の逆流が卓越して、躍層位置は上昇すると同時に塩分は水面に向かい拡散する。池永ら⁹⁾は、出水によって塩分が連行されること、内部セイシュによって塩分が吸い上げ流出することを報告しており、これにより躍層位置が低下する。このため結氷期に上昇、無氷期に下降を繰り返し、長期的に躍層位置が安定すると考えられる。また、池永ら⁹⁾は内部セイシュによって岸際で塩水が弱混合から強混合になるため、青潮が発生することを報告している。本研究結果から結氷下では、栄養塩は無酸素域に蓄積され、有酸素域に供給されづらい傾向であること、融雪出水によって塩分躍層が破壊されないこと、解氷後には融雪出水の流入に加え、淡水層内のみで鉛直混合が起こっていることがわかった。これらから、通年で湖内の栄養塩循環は結氷下の無酸素域で栄養塩を蓄積し、解氷後に内部セイシュによって水面付近に供給されると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

網走湖において、結氷下の水温と塩分の鉛直分布は躍層が破壊されて連続的分布となる。一方で、DOは躍層を維持していた。濁度はDO躍層と同一標高に高濁度層を有

し、上層では酸素がほぼ消費されず高DOを維持していた。また、解氷によって淡水層内では鉛直混合が起こるが、塩水層は結氷期間を含めて鉛直混合しないことが観測された。解氷後には水温、塩分、濁度、DOの鉛直分布は同一標高に躍層を有する分布となった。結氷下における栄養塩の鉛直分布から、DO躍層の下層から上層への栄養塩の移動は少ないことが明らかとなり、汽水湖における栄養塩の鉛直循環はセイシュなど強制的なDO躍層の混合が必要であることが推察される。また、結氷中では有酸素の塩水域が形成され、無酸素層から有酸素層への栄養塩の拡散も少ないことがわかった。このことから汽水湖においても水質形成の主要因はDO躍層であることが推察される。

結氷下では水温や塩分躍層とDO躍層は必ずしも一致せず、DO躍層と高濁度層が水質挙動に影響することが示唆される。今後は高濁度水塊を形成する物質を特定し、その集積機構を解明して、水質改善策の一助としたい。

参考文献

- 1) 農林水産省：内水面漁業生産統計調査、http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/naisui_gyosei/index.html
- 2) 中村幹雄：宍道湖におけるヤマトシジミ *Corbicula japonica* PRIMEと環境との相互関係に関する生理生態学研究、島根県水産試験場研究報告 第9号、1998.
- 3) 池永均、向山公人、大島伸介、吉本健太郎、山田正：網走湖における青潮発生に関する現地観測と数値解析の比較、土木学会論文集、No.775/II-69、pp.11-27、2004.
- 4) 池永均、向山公人、大島伸介、山田正：塩淡二成層を形成する汽水湖沼の長期的な界面変動予測手法の開発、土木学会論文集、No.628/II-48、pp.77-96、1999.
- 5) 池永均、山田正、向山公人、大島伸介、内島邦秀：網走湖の塩水化の機構と塩淡二成層の長期変動特性に関する研究、土木学会論文集、No.600/II-44、pp.85-104、1998.
- 6) 知北和久、福山龍次、坂本博明、中路晃平：閉鎖性汽水湖における死水の挙動特性；釧路市・春採湖での結氷観測から、北海道大学地球物理学研究報告、Vol. 60、pp. 13-28、1997.
- 7) 中村優子、青井孝夫、黒木宗尚：網走湖の植物プランクトンの季節的消長、北海道大学大学院環境科学研究科紀要、No.3 (1)、pp. 35-46、1980.
- 8) 大高明史、神山智行、長尾文孝、工藤貴史、小笠原高輝、井上栄壮：津軽十二湖湖沼群・越口の池湖群における湖水循環と底生動物の深度分布、陸水学会誌、No. 71、pp. 113-128、2010.
- 9) 杉原幸樹、中津川誠：富栄養化した停滞性水域の結氷下の水質挙動と気候変動による影響、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.69、No.1、pp.44-59、2013.

新しい非塩化物系凍結防止剤の 冬期道路管理における適用性検討

佐藤 賢治¹ 中島 知幸¹ 徳永 ロベルト¹ 高橋 尚人¹ 中島 範行²

¹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 寒地交通チーム
(〒062-8602北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²富山県立大学 工学部 医薬品工学科 (〒939-0398富山県射水市黒河5180) .

富山県立大学と寒地土木研究所は、沿道環境への負荷が小さい非塩化物系の凍結防止剤の開発に共同で取り組んでおり、食品添加物として利用されているプロピオン酸ナトリウム（プロナト）を候補物質として、凍結防止剤としての適用性を検討してきた。凝固点、融氷性能、有害物質、植物への影響、金属腐食、コンクリートのスケーリング、路面すべり抵抗値の改善効果を屋内および野外で検証した結果、プロナトと塩化ナトリウム（塩ナト）を混合した場合、塩ナトに比べて金属腐食を大幅に抑制し、コンクリートおよび植物の生育への影響も小さく、凍結防止剤としての性能も塩ナトと同程度であることを確認した。

キーワード 冬期路面管理、凍結防止剤散布、非塩化物、金属腐食、沿道環境負荷

1. はじめに

凍結防止剤散布は、積雪寒冷地の安全・円滑な冬期交通の確保を図る上で、重要な冬期路面对策の一つに位置づけられている。凍結防止剤には、価格、入手・取り扱い易さおよび融氷性能などの点で総合的に優れる塩化ナトリウム（以下、塩ナト）が主に使用されている。一方、塩ナトをはじめとした塩化物系凍結防止剤は、土壌、植物、道路構造物および走行車両など、沿道環境への負荷が懸念されている。

既往の研究では、宮本ら¹⁾、明嵐ら²⁾は市販の非塩化物系凍結防止剤について、価格、環境影響および融氷性能等を調べた。しかしながら、環境に優しいとされる非塩化物系の凍結防止剤は、塩ナトと比較して価格や融氷性能に劣るため、全国的な普及には至っていない。

筆者らは、沿道環境への負荷が少ない、新しい非塩化物系の凍結防止剤を開発するため、様々な非塩化物系化合物の凝固点、臭いおよび価格などを調査し、凍結防止剤として利用可能性のある物質を探索した。その結果、総合的に優れていた、プロピオン酸ナトリウム（以下、プロナト）を候補物質に選定した。

プロナトは、細菌や真菌の増殖を抑制する効果があるため、主に食品保存料として使用され、日本国内の年間使用量は約36 tと見積られている。外観は白色であり、形状は一般的に粉末状である（写真-1）。価格は、10t以上の購入の場合で250円/kg程度であり、塩ナト（20円

kg程度）と比べると高価であるが、道路の凍結防止剤として多量に使用されることによって価格が下がると期待される。

本稿では、プロナトの冬期道路管理における適用性検討のため、凝固点測定、融氷性能確認、有害物質試験、植物の栽培試験、金属腐食性試験、コンクリートの凍害劣化試験および試験道路での散布試験を実施した。



写真-1 プロピオン酸ナトリウム（粉末状）

2. 凝固点測定

表-1に凝固点の測定結果を示す。対象試料は、塩ナト、プロナトおよび塩ナト・プロナト混合物（重量比8:2）とした。凝固点は濃度20%の水溶液を作成して測定した。測定の結果、塩ナトの凝固点-19.8℃に対し、プロナトは-17.0℃であり、塩ナト・プロナト混合物（重量比8:2）は-18.9℃と、塩ナトの凝固点に近い。

表-1 凝固点測定結果

試料 濃度20%水溶液	凝固点
塩ナト	-19.8℃
プロナト	-17.0℃
塩ナト・プロナト混合物 (重量比8:2)	-18.9℃

3. 融氷性能に関する試験

(1) 試験の概要

プロナトおよび塩ナト・プロナト混合物の融氷性能を調べるため室内融氷量試験を行った。試験条件を表-2に示す。融氷量試験は、寒地土木研究所の低温恒温室で実施した。対象試料は、凝固点測定と同様にプロナトおよび塩ナト・プロナト混合物（重量比 8:2）（本章では以下、塩ナト・プロナト混合物と呼ぶ）とし、塩ナトを比較試料とした。

(2) 試験の方法

試験方法について述べる。i) バットに水道水 200 ml を入れ、室温-5℃の設定で水を凍らせる、ii) 凍結後、室温

表-2 融氷量試験条件

試験容器	ステンレスバット L*W*H=185*140*27mm (氷面積: 0.02m ²)
試料	塩ナト プロナト 塩ナト・プロナト混合物 (重量比8:2)
剤の粒径	0.3~1.0 mm (ふるいがけ)
散布量	5 g (250 g/m ²)
試験温度	-2、-5、-8、-15℃
経過時間	5、10、20、30、60、120、180、360 分

を試験温度に設定し、室温および氷面温度が安定するまで養生する、iii) 試料を氷上に散布し、各経過時間における融出水の質量（以下、融氷量）を計測する。

融氷量は、吸水性の高い紙で融出水を吸い取った後、紙をコップに入れて重量計で計測した。融氷量は、同一条件に付き3 サンプル測定し、結果をその平均値とした。試験実施状況を写真-2に示す。

(3) 試験の結果

各試験温度での融氷量の経時変化を図-1に示す。

試験温度-2℃の場合、プロナトの融氷量は、散布後 30 分まで他 2 試料の融氷量と比べて多かったが、散布後 60 分で逆転した。散布後 360 分の融氷量は、塩ナト、塩ナト・プロナト混合物、プロナトの順に多い。試験温度-5℃の場合、-2℃同様、経時的な融氷量増加の傾向が表れたが、増加の割合および試料間の融氷量差は小さくなった。また、-2℃同様、時間経過に伴う融氷量の逆転が見られた。試験温度-8℃では、経時的な融氷量増加の割合は更に小さくなり、散布後 5 分から 360 分まで試料間の融氷量差は殆ど無かった。以上の結果より、プロナトは、塩ナトと同様に温度が低下すると融氷性能が低下することを確認できた。また、プロナトは、塩ナトと比べて融氷の速効性があり、最終的な融氷量は、塩ナトより



写真-2 試料散布状況

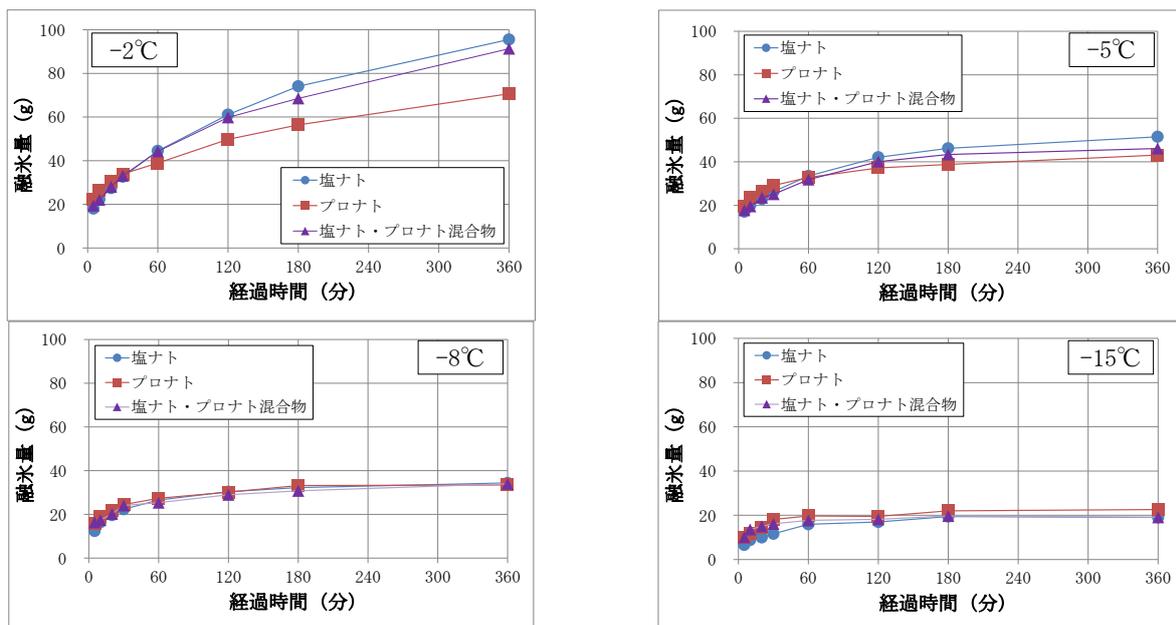


図-1 融氷量の経時変化

劣るものの温度が低くなるにつれてその差は小さくなることを確認できた。試験温度-8℃以下では、いずれの試料も最終的な融水量が極めて少なく、プロナトおよび塩ナト・プロナト混合物は、塩ナトと同様に-8℃程度以上³⁾で使用することが効果的と考えられる。

4. 有害物質試験

プロナトの安全性を確認するため、道路用凍結防止剤として使用する塩化ナトリウムの品質規格⁴⁾に準じ、有害物質試験を実施した。本試験では、プロナト飽和水溶液（濃度 50%）中の含有成分が水質汚濁防止法の排水基準⁵⁾に定める有害物質の内 16 種類の基準値に適合するか確認した。試験の結果、全ての有害物質が基準値を下回っており、プロナトは有害物質の基準値に適合していることがわかった。

5. 植物の栽培試験

(1) 試験の概要

プロナトおよび塩ナト・プロナト混合物が植物の生育へ与える影響を確認するため、こまつなを供試植物とした室内栽培試験を実施した。本試験では、植物に対する害に関する栽培試験の方法⁶⁾に準拠し、土壤に混合する試料およびその添加量を変え、各条件における生育状況を調べた。試験条件を表-3に示す。

表-3 栽培試験条件

試験容器	ノイバウエルポット d*H=113*65mm (表面積0.01m ²)
試料	塩ナト プロナト 塩ナト・プロナト混合物 (重量比8:2)
試料粒径	1.0 mm未満 (ふるいがけ)
土壤添加量	1.0、2.0、4.0、8.0 g (比較用 無添加 (0.0 g))
室内温度	15~25 ℃

(2) 試験の方法

試験方法について述べる。i) 供試土壤 500 ml に対して、規程の化学肥料を施肥する、ii) 試料を 1 mm のふるいを通して均質化し、施肥後の供試土壤に添加してよく混和した後、試験容器に詰める、iii) 土壤水分を最大容水量の約 60% に調節し、こまつなの種子を試験容器あたり 20 粒播種する、iv) 所定の管理方法で栽培し、播種後 21 日目に収穫する。管理状況を写真-3に示す。

試料の添加量は、1.0 g、2.0 g、4.0 g および 8.0 g とした（以下、1 g、2 g、4 g および 8 g と呼ぶ）。これは、100、200、400 および 800 g/m² の散布に相当する。この他、試

料を添加しない土壤（以下、無添加）を比較のため用意した。また、植物の成長の個体差を考慮して、それぞれ 2 サンプル（鉢）ずつ用意した。

調査工程を表-4に示す。発芽調査は、こまつなの種子の発芽数（本）を目視測定した。葉長調査は、発芽したこまつなの草丈（mm）の合計値とした。生体重調査は、発芽したこまつなの地上部を収穫・計量した合計値とした。なお、各調査結果は、2 サンプル（鉢）の平均値とした。併せて、植物の生育に影響を与える要素として、水素イオン指数（pH）および塩化物イオン（Cl⁻）濃度を調査した。



写真-3 管理状況

表-4 調査工程

播種後経過日数	生育調査
7日目	発芽調査（1回目）
10日目	発芽調査（2回目）、写真記録
14日目	発芽調査（3回目）、葉長調査（1回目）
21日目	葉長調査（2回目）、生体重調査、写真記録

(3) 試験の結果

21 日目の生育状況および各調査の最終調査結果を図-2に示す。

無添加の場合、20 本全てが発芽したが、塩ナトの 4 g 以上では一切発芽しなかった。また、2 g では、黄化の異常症状が見られた。プロナトの 1 g では、20 本全てが発芽したが、2 g 以上では、一切発芽しなかった。塩ナト・プロナト混合物の 1 g および 2 g では、20 本全てが発芽したが、4 g では、2 本しか発芽せず、8 g では、一切発芽しなかった。

葉長調査（2 回目）の結果について述べる。無添加は、128 mm であった。プロナトの 1 g では、無添加と同程度の 122 mm であり、塩ナトおよび塩ナト・プロナト混合物の 1 g と 2 g は、無添加と比べて低い値であった。生体重は、葉長とほぼ同様の傾向であった。

塩ナトおよび塩ナト・プロナト混合物の 1 g は、全数発芽したが、葉長および生体重とも無添加と比べて 7~8 割程度だった。これは、Cl⁻イオン濃度の増加がこまつなの生育を阻害したと考えられる。また、プロナトの 1 g は、発芽・葉長・生体重が無添加と同程度だったが、2 g 以上で一切発芽しなかった。こまつなの好適土壤は、pH5.5~6.5 程度の微~弱酸性⁷⁾だが、プロナト 2 g 以上の添加で pH7.7~9.3 程度の弱アルカリ性土壤になったことで発芽が阻害されたと考えられる。ただし、塩ナト・プ

ロナト混合物の1gおよび2gでは、塩ナトの同添加量と比べて、一部を除き葉長および生体重が良好だったことや、わずかであるが4gで発芽したのは塩ナト・プロナト混合物のみであることから、塩ナトの添加量が少ない塩ナト・プロナト混合物の方がこまつなの生育に与える影響が小さかったと考えられる。

今回、こまつなを対象に試験を行ったが、実道への適用を検討する場合には、土壌条件や植生の多様性を考慮して、試験条件を設定することが望ましい。



図-2 21日目の生育状況および最終調査結果

6. 金属腐食性試験

(1) 試験の概要

プロナトの金属腐食性を調べるため、(地独)北海道立総合研究機構工業試験場が定める凍結防止剤の腐食試験(乾湿繰り返し、全浸漬)を実施した。本試験の対象試料は、プロナト単体に加え、塩ナト・プロナト混合物の重量比8:2、9:1および19:1も対象とした。また、蒸留水、塩ナトおよび塩化カルシウム(以下、塩カル)を比

較試料とした。

(2) 試験の方法

試験方法を述べる。i) 各試料を蒸留水100mlに対して3.0gの割合で溶解し水溶液を作る、ii) 各水溶液に亜鉛メッキを除去した鉄片を1枚入れ、24時間浸漬した後に取り出し、24時間放置する、iii) ii)を7日間(3.5サイクル)行い、8日目に取り出す、iv) 鉄片の錆を完全に取り、試験前と後で鉄片の重量の変化をみる。

(3) 試験の結果

図-3に試験の結果を示す。金属腐食性は腐食減少量(mdd)で評価され、この値が大きいほど腐食量が多いことを表す。比較試料の蒸留水、塩ナトおよび塩カル腐食減少量は、それぞれ8.6、22.5、27.5だった。対して、プロナトの腐食減少量は、0.3で、ほとんど金属腐食しない結果となった。塩ナト・プロナト混合物(重量比9:1)でも腐食減少量は塩ナトの約半分となり、沿道構造物の金属腐食の進行を大幅に抑えられる可能性が示唆された。

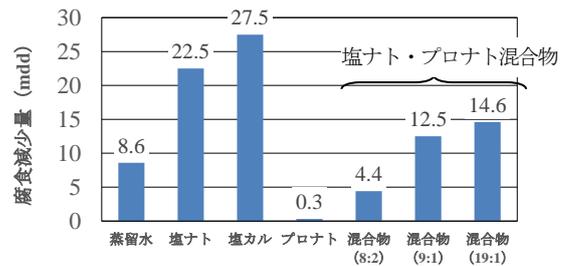


図-3 金属腐食性試験結果

7. コンクリートの凍結融解試験

(1) 試験の概要

塩ナト・プロナト混合物がコンクリートの凍害劣化へ与える影響を確認するため、コンクリートの性能評価手法のひとつであるRILEM-CDFに準拠した室内凍結融解試験を実施し、スケール量を調べた。試験条件を表-5に示す。

表-5 試験条件

セメント種類	普通ポルトランドセメント						
目標スランプ	8.0±2.5cm						
目標空気量	4.5±1.0%						
試料	塩ナト 塩ナト・プロナト混合物(重量比9:1)						
コンクリートの配合							
水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位数(kg/m ³)				AE減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
		水 W	セメント C	細骨材(海砂) S	粗骨材 G		
50	44	145	290	850	1075	0.25	0.0038

(2) 試験の方法

試験方法について述べる. i) 10×10×40 cm の供試体を作成し成型後1日で脱型する, ii) 材齢7日まで20°Cで水中養生, 供試体を10×10×20 cmに切断する, iii) 水中養生後, 20°C, 60%Rh で気中養生, 材齢 21~27 日の間で試験面以外をアルミテープでシールする, iv) 材齢 28 日目から 7 日間, 試験水溶液 (試料濃度 3%) に打設面下部 5 mm 程度浸し事前吸水させる, v) 吸水量を計測し, 試験器に入れた後±20°Cの凍結融解サイクルを 28 サイクル (14 日間) 与える, vi) 8, 14, 28 サイクル毎にスケーリング片を採取し, 乾燥質量を計測する.

供試体は試料毎に 5 個作成し, 乾燥質量 (g) をスケーリング量 (g/m²) に換算して平均値を結果とした.

(3) 試験の結果

写真-4 に試験前後の供試体の状況を示す. また, 図-4 に平均スケーリング量の推移を示す. いずれのサイクルにおいても塩ナトに比べて塩ナト・プロナト混合物 (重量比 9:1) の平均スケーリング量が少ない結果となった.

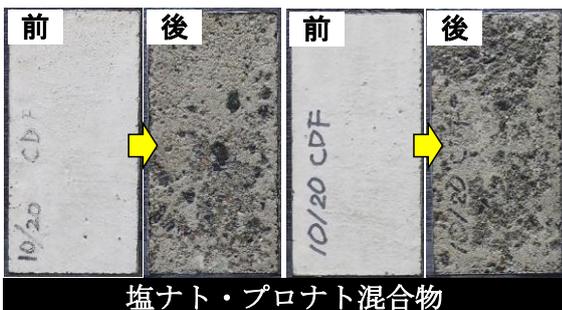
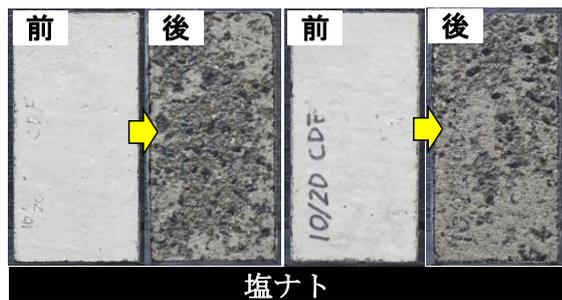


写真-4 試験前後の供試体

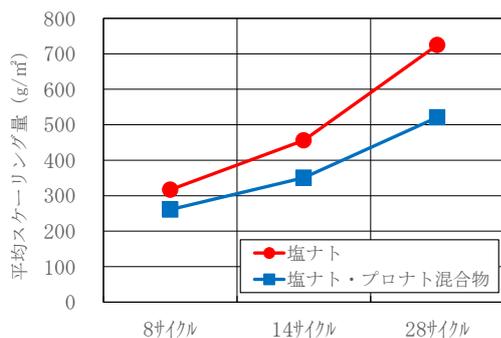


図-4 平均スケーリング量の推移

8. 試験道路での散布試験

(1) 試験の概要

散布による路面すべり抵抗改善効果を確認するために苫小牧寒地試験道路で散布試験を実施した. 試験道路は全長 2700 m の水平な周回道路であり, 本試験は密粒度アスファルト舗装区間の直線部で実施した. 試験条件を表-6 に示す.

塩ナト・プロナト乾式散布に用いる粒状プロナトは, 風による飛散影響等を考慮し, 7 mm程度の粒径に固めたものを使用した. また, 塩ナト・プロナト湿式散布で使用するプロナト水溶液の濃度は, 従来散布で用いる塩カル水溶液の濃度に準じた. 塩ナトを20 円/kg, プロナトを250 円/kgとしてコストを試算すると, 塩ナト・プロナト乾式散布は66 円/kg, 塩ナト・プロナト湿式散布は25.5 円/kgとなり, プロナト単体より大幅にコストを抑えられる.

表-6 散布試験の条件

天候	晴れ
散布時期	路面凍結後 (事後散布)
試料	無散布
	粒状塩ナト(10) = 塩ナト乾式散布
	粒状塩ナト(8) + 粒状プロナト(2) = 塩ナト・プロナト乾式散布
()内は重量比	粒状塩ナト(9) + プロナト濃度30%水溶液(1) = 塩ナト・プロナト湿式散布
	粒状塩ナト(9) + 塩カル濃度30%水溶液(1) = 塩ナト・塩カル湿式散布
散布量	20 g/m ²

(2) 試験の方法

散布試験のレイアウトを図-5 に示す. 各試料の散布区間同士の干渉を避けるために, 各散布区間の間には 50 m の乾燥路面を設けた. 試験の手順を述べる. i) 試験道路の直線区間に散水し, 日没後の気温低下を利用して, 氷膜路面を形成する, ii) すべり抵抗値を測定する, iii) 氷膜路面に試料を散布する, iv) すべり抵抗値を測定する, v) 車両の通過による路面状態の変化を計測するため, 交通模擬車両を 50 台通過させる, vi) 手順 iv)~v) を通過台数が 300 台 (50 台×6 セット) に達するまで繰り返す.

すべり抵抗値の測定には, 連続路面すべり抵抗値測定装置⁸⁾を使用した. 試験車両および交通模擬車両の走行

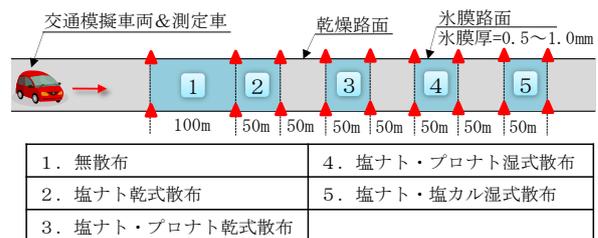


図-5 散布試験のレイアウト

速度は 40 km/h とした。交通模擬車両は普通乗用車を使用した。散布試験の状況を写真-5 に示す。



写真-5 散布試験（測定）実施状況

(3) 試験の結果

図-6 に交通模擬車両通過台数の増加に伴う μ の変化を示す。また、測定時の外気温および路面温度も併せて示す。外気温は、散布後から試験終了時まで $-6.0\sim-3.8^{\circ}\text{C}$ で推移した。路面温度は $-3.3\sim-2.0^{\circ}\text{C}$ で推移した。

μ について述べる。無散布区間の μ は 0.20 程度で推移した。塩ナト乾式散布区間の μ は、散布前の約 0.17 から、50 台走行後以降徐々に上昇し、300 台走行後には約 0.70 に達した。塩ナト・プロナト乾式散布区間の μ は、散布前の約 0.24 から 150 台走行後には約 0.62 まで上昇した。塩ナト・プロナト湿式散布の μ は散布前の約 0.22 から 50 台走行後以降徐々に上昇し、300 台走行後には約 0.68 に達した。塩ナト・塩カル湿式散布の μ は約 0.21 から、50 台走行後以降徐々に上昇し、300 台走行後には約 0.53 に達した。

以上の結果より、 μ にばらつきが見られるものの、プロナトを使用した塩ナト・プロナト乾式散布および塩ナト・プロナト湿式散布は、従来の塩ナト乾式散布および塩ナト・塩カル湿式散布と比較して遜色なく μ を改善できることが分かった。

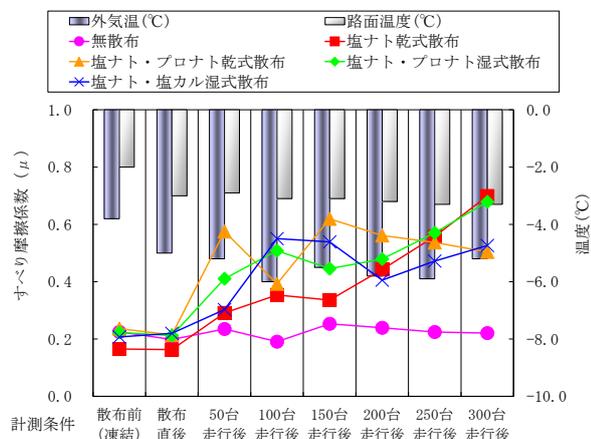


図-6 車両通過台数の増加に伴う μ の変化

9. まとめと今後について

本研究では、プロナトの冬期道路管理における適用性検討の一環として、凝固点測定、室内金属腐食性試験、室内融氷量試験、試験道路での散布試験および室内栽培試験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (i) プロナトは、塩ナトと比べて融氷の速効性がある
- (ii) プロナトの融氷性能は、塩ナトと同様に温度の低下とともに弱まる
- (iii) 塩ナト・プロナト混合物（重量比 8:2）の融氷性能は、塩ナトと同程度である
- (iv) プロナトは、有害物質に関する品質規格をクリアした
- (v) 塩ナト・プロナト混合物（重量比 8:2）は、塩ナトと比べてこまつな発芽および生育に与える影響が小さい
- (vi) プロナトは、金属腐食の進行が小さく、塩ナトと混合した場合にも腐食の進行を大幅に抑えられる
- (vii) 塩ナト・プロナト混合物（重量比 9:1）は、塩ナトと比べて、コンクリートの凍結劣化への影響が小さい
- (viii) 塩ナトとプロナトの乾式散布および塩ナトにプロナト水溶液を付加した湿式散布は、塩ナトの乾式散布および塩ナトに塩カル水溶液を付加した湿式散布と比べて同等の路面すべり改善効果がある

今後は、プロナトの実用化や普及を進めるため、実道での散布を想定した施工性の検討等を実施する予定である。

参考文献

- 1) 宮本ら：北海道における凍結防止剤による冬期路面管理について、開発土木研究所月報, No.487, pp.9-26, 1993.
- 2) 明嵐ら：非塩化物型凍結防止剤の開発等に関する共同研究報告書, 2003.
- 3) 北海道開発局：冬期路面管理マニュアル(案), p.16, 1997.
- 4) 凍結防止剤性能及び品質規定検討委員会：凍結防止剤（塩化ナトリウム）の品質に関する調査報告書, 2004.
- 5) 排水基準を定める省令（昭和 46 年 6 月 21 日総理府令第 35 号）.
- 6) 昭和 59 年 4 月 18 日農蚕第 1943 号農林水産省農蚕園芸局長通知.
- 7) 財団法人日本土壌協会：土壌診断によるバランスのとれた土づくり, p.12, 2008.
- 8) 舟橋ら：連続路面すべり抵抗値測定装置（RT3）の導入について、寒地土木研究所月報, No.651, pp.40-47, 2007.

平成28年1月集中降雪の検証と対応策について

中波 政志¹・吉田 幸矢²

¹長岡国道事務所 保全対策官 (〒940-8512 新潟県長岡市中沢4丁目430-1)

²長岡国道事務所 管理第二課 (〒940-8512 新潟県長岡市中沢4丁目430-1)

平成28年1月に新潟県中越地区で発生した記録的集中降雪により高速道路が通行止めとなり、国道8号をはじめ、県道、市道にも長時間における大規模な渋滞が発生した。渋滞解消までに延べ3日間を要したことから、集中降雪時における対応検証と課題の整理、及びそれに基づく対策の立案が喫緊の課題となった。

そのため、各道路管理者・警察等による長岡圏域冬期道路交通確保連携会議の下に「平成28年1月集中豪雪の検証・対策検討会」を設置し、各関係機関が連携して問題点と課題の整理及び対策の立案を行い、平成28年10月に対応策が合意された。本稿は、その検討結果とその後の取り組みを報告するものである。

キーワード 集中降雪、連携、冬期対応策

1. はじめに

平成28年1月24日～25日にかけて日本上空に非常に強い寒気が入り、新潟県中越地域の平野部を中心に記録的な大雪となった。これにより、鉄道の運休・遅延の他、高速道路の通行止めや、国道8号での交通障害などが長時間にわたり発生し、社会・経済活動に大きな混乱をもたらした。

本稿は、平成28年1月24日～25日に豪雪地域の市街地で発生した集中降雪による交通障害について、地域の状況、気象、道路・交通状況、除雪対応、情報収集・提供等の面からの検証結果と対応策、及びその取り組み状況についてについて報告する。

2. 集中降雪による交通障害の検証

(1) 気象概況

1月24日～25日に日本上空に非常に強い寒気が入り、北陸地方は冬型の気圧配置となり、北陸地方整備局管内全域で降雪(図-1 参照)となった。

特に、見附市・長岡市上空には断続的に強い雪雲が流れ込み集中降雪に見舞われた。気象庁の長岡観測所で最大日降雪量69cm(観測史上4位)、整備局の国道8号中之島観測所で75cm(観測史上最大)という記録的な大雪となった。

(2) 高速道路の状況

北陸地方の北陸道は全線で事故や視界不良により通行止めとなった。特に、長岡IC～中之島見附IC間(上り)で約33時間、長岡IC～三条燕IC間(下り)で約36時間、柏崎IC～長岡JCT間(上り下り)で約38時間にわたる長時間の通行止めとなった。

(3) 国道8号の交通障害状況

24日深夜から25日未明にかけては、橋梁や跨線橋・高架橋の上り勾配(3%程度)の圧雪路面においてスタック車が発生した。そのスタック車により、路面の圧雪除去が円滑に進まなかった。その後、気温上昇により圧雪路

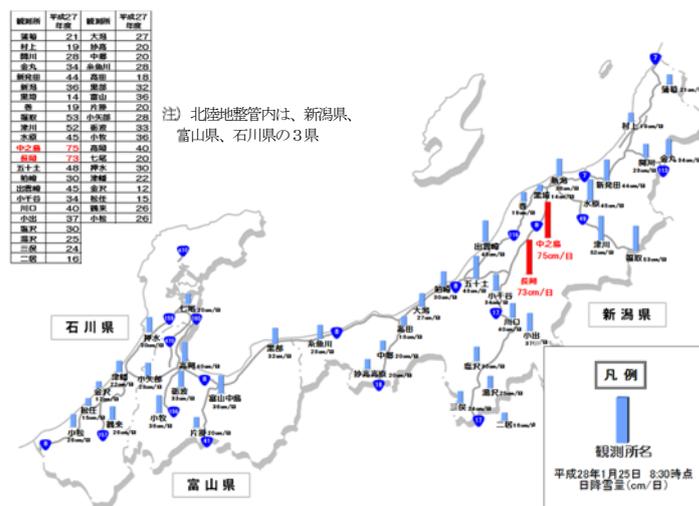


図-1 平成28年1月25日8:30時点の日降雪量 (cm/日) の状況 (北陸地整観測所)

面が悪化し、特に路面が荒れた交差点部でスタック車が
多く発生した。最大渋滞長は上りで約15km, 下りで約
10kmに及んだ。(図-2 参照)

「検討会」と言う)を設立し、今回の集中降雪への対応
にあたっての課題等について検証するとともに、その対
応策の立案を行った。

(4) 情報収集・情報提供

情報収集は、CCTV及び除雪業者からの報告及び現地調
査班の派遣により行った。

情報提供は、道路情報板による情報提供の他、災害対
策基本法の区間指定や高速道路無料措置及び通行止めに
よる集中除雪の実施の記者発表、事務所ホームページ
(以下「HP」と記す)にてライブカメラの道路状況の
提供を行っていた。

しかし、渋滞中のドライバー等への情報提供が不十分
な状況となった。

(2) 連携会議の構成機関

表-1 検討会構成員

① 国土交通省 長岡国道事務所	⑥ 東日本高速道路株式会社 長岡管理事務所
② 新潟県長岡地域振興局	⑦ 長岡警察署
③ 長岡市	⑧ 見附警察署
④ 見附市	⑨ 小千谷警察署
⑤ 小千谷市	⑩ 高速道路交通警察隊

(3) 検討会での検討経緯

表-2 検討会での検討経緯

	実施日	開催内容
第一回	2月2日	・集中豪雪の検証と対策を検討する検討会の設置について合意 ・今回の対応状況 ・今後の会議の進め方
第二回	3月8日	・検証結果 ・今後の対策の視点 ・今後の進め方
第三回	3月29日	・対応策について確認、合意 ・訓練等の実施等
第四回	8月22日	・進捗状況の確認、情報連絡訓練実施の合意等
第五回	10月4日	・訓練結果を踏まえ対応策の決定

3. 長岡圏域冬期道路交通確保連携会議の開催

(1) 目的

1月24日から25日にかけて長岡圏域を襲った記録的な
集中降雪により、国道8号を中心に大渋滞が発生したこ
とから、長岡圏域冬期道路交通確保連携会議の下に、
「平成28年1月集中豪雪の検証・対策検討会」(以下

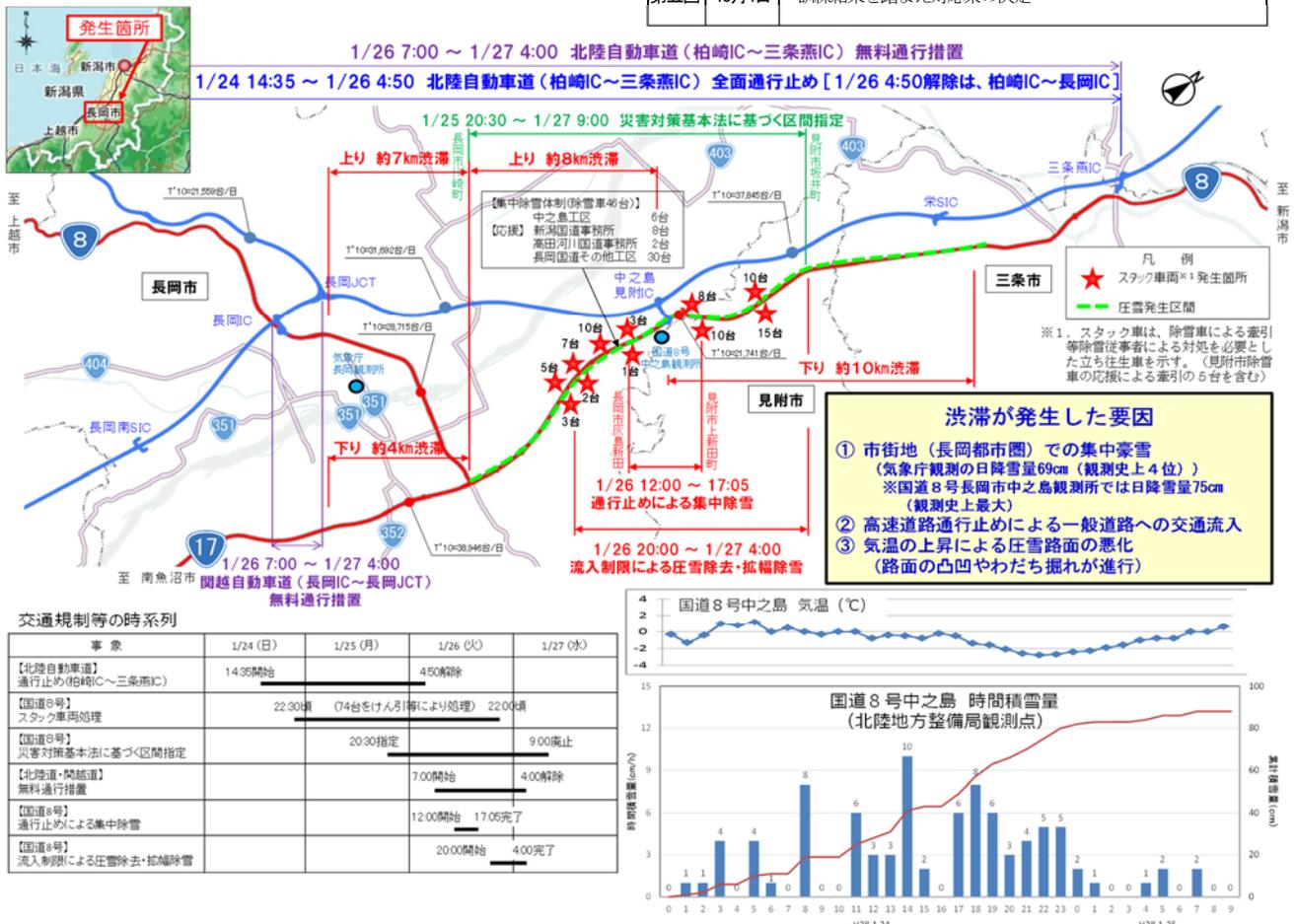


図-2 1月24日からの降雪に伴う交通障害状況(国道8号)

4. 対応策

今回の状況を踏まえ、検討会を中心とした検討により、4つの視点に対して、機関連携施策を中心とした34項目の対応策を検討した。(図-3 参照)

これらの対応策のうち、第5回の検討会で確認された平成28年度冬に実施することとなった主要な施策を以降で紹介する。

(1) 機関連携施策

a) 集中降雪時における行動計画(タイムライン)

気象庁から大雪警報発表の2~3日前に発表される「大雪に関する気象情報」(大雪の恐れ)の時点からの連携会議構成機関の行動計画を具体化した。これにより、早期の段階から、構成機関が情報を共有・一元管理し、同

じ目線で行動することで、相互に連携・支援する体制を確実なものとした。(次頁図-4 参照)

特に、連携会議の構成機関からメンバーが参集し、「情報の一元化・共有」「情報提供」「機関連携・相互支援に向けた対応協議」を行い中枢機関となる『情報連絡本部』開設の判断基準を更に明確化した。

b) 集中降雪時における情報提供計画

情報提供は、『情報連絡本部』が中心となって行うものとし、情報提供のタイミングと情報内容を具体化した。

また、情報連絡本部の開設とともに、概ね2時間おきに定時情報(交通規制、交通渋滞・障害、解消見込み等)を提供するものとした。

更に、各情報提供のタイミングにおける情報提供媒体を具体的に定めるとともに、情報提供内容を様式化して具体化した。

黒字：平成28年度に実施することになった施策

青字：引き続き検討し、内容を充実させる施策



図-3 4つの視点に対する34項目の対応策



情報連絡本部設置の準備開始の判断基準 (案)

情報連絡本部開設の判断基準 (案)

新潟地方気象台から、「大雪に関する気象情報」が発表されており、かつ、大雪注意報が発表された時点。

1. 長岡地域において、新潟地方気象台より「大雪に関する気象情報」が発表され、かつ「大雪警報」が発表中に、長岡地域の高速道路が雪害による通行止めが発生し、継続する恐れがある場合。
2. 情報連絡本部を構成するいずれかの機関からの要請を受け、本部長（長岡国道事務所長）が必要を判断した場合。

図-4 異常降雪時における行動計画 (タイムライン)

c) 情報連絡本部のHP特設サイトの開設

長岡国道事務所HP内に情報連絡本部のHP特設サイトを開設した。また、関係機関でHPの相互リンクを実施して道路利用者からのアクセス環境を改善した。

d) ライブカメラ提供画像 (静止画) の増設

新潟県警との協議・調整により、道路利用者の要望が強かったライブカメラ画像提供箇所数をHPのリニューアルと併せて平成28年度冬から大幅に増設した。これにより、中之島除雪工区は、現状1箇所から10箇所に増設された。

e) 長岡国道事務所Twitterの開設

平成28年度冬から長岡国道事務所Twitterを開設し、道路情報の提供を開始した。

f) 高速道路SAでの情報提供による大型車の流入抑制

関越道・下り線のの上里SAに「新潟県道路情報スポット (仮称)」を開設し、一般道のライブカメラ画像や情報連絡本部から発信される情報を掲示した。これにより、首都圏から新潟県に向かってのドライバーに情報を提供することで、大型車の流入抑制を図るものとした。

g) 情報提供媒体の周知

情報提供ツールとなるラジオの周波数やHPアドレスを県市報や除雪特集及び情報板で周知した。

h) 除雪及びスタック車処理の相互支援

高速道路の早期通行止め解放による円滑なネットワークの確保を目指し、国による高速道路本線除雪の相互支援、及び国・県・市によるICランプ部の相互支援を実施するものとした。また、一般道では、スタック車の早期

処理実施のため、構成機関の除雪車で最も現場に近い除雪車を急行させ、スタック車の救出及び周辺の除雪作業を実施するものとした。(図-5 参照)



図-5 除雪及びスタック車処理の相互支援のイメージ

i) 除雪車のスムーズな移動

集中降雪時には、道路管理者間及び警察との連携・協力により、高速道路を使った迂回、一般道での逆走やUターンによるスムーズな除雪車の移動について、情報連絡本部が中心となって調整を図るものとした。

j) 迂回路の選定と広報及び協力をお願い

長岡圏域の交通の要である直轄国道における交通障害を早期に解消するため、迂回路の検討・設定を新潟県が中心となって行うものとした。また、迂回路情報の広報と迂回にあたっての走行注意のお願いについて、様式化を図って具体化した。

k) 交差点間の渋滞車両を排除した集中除雪

直轄国道において対応の遅れによる立ち往生の発生を回避するため、適切な時期に交通規制を伴う集中除雪を実施するものとした。また、関係機関は通行規制への協力や従道路通行車両の迂回等に連携・協力して取り組むものとした。

(2) 個別施策（長岡国道事務所）

a) スタック車多発地点への消雪パイプ設置

上り勾配のスタック車多発地点（3地点：見附大橋、池之島高架橋、新組跨線橋の6区間）に消雪パイプを設置した。平成28年6月から設計、10月から工事に着手し、平成28年12月に5区間の工事を完成し稼働を開始した。残る1区間も平成29年1月に工事を完成し稼働を開始した。

通常であれば計画開始から約2年を要する工程を9～10ヶ月に短縮し、平成28年度の冬期シーズン内の稼働を実現した。（写真-1 参照）



H28. 1. 14(木) 場所：国道8号 新組跨線橋
写真-1 完成した消雪パイプの稼働状況

b) 異常降雪時における除雪方法の変更

異常降雪時には、除雪予備車の配備調整等により、通常1梯団の除雪体制を2梯団に分割して直進車線の除雪体制の強化を図るものとした。更に、隣接除雪工区からの応援除雪（隣接区間乗り入れ）の調整により除雪体制を強化するものとした。

(3) 個別施策（NEXCO東日本(株)）

a) 除雪機械及びロータリー除雪車等の増強

集中降雪時は、除雪1梯団を現状の除雪車2台編成から

3台編成に増強し、また料金所から一般道までの間に専用除雪車を配備して除雪体制を強化した。

b) 長岡IC、中之島見附ICでの融雪施設の設置

集中除雪時にボトルネックとなるランプ部に融雪施設を設置した。

(4) 個別施策（新潟県長岡地域振興局）

a) 消雪パイプ設置区間の除雪対応

消雪パイプの能力を超える降雪に対して、除雪業者及び臨時道路巡視員による道路情報収集体制を構築し、適正な機械除雪出動判断を図るものとした。

5. 情報連絡訓練及び実働訓練の実施

平成28年9月14日に情報連絡本部を中心とする情報連絡訓練を連携会議構成機関メンバーで行った。（写真-2 参照）



H28. 9. 14(水) 場所：長岡国道事務所
写真-2 情報連絡訓練の実施状況

また、10月26日には、国とNEXCO東日本(株)により、北陸道・中之島見附ICにおいて高速道路IC部での相互支援について、除雪車を用いた実働訓練を実施した。（写真-3 参照）

なお、上記の両訓練はマスコミ公開のもとで実施している。



H28. 10. 26(水) 場所：北陸道・中之島見附IC
写真-3 高速道路IC部での相互支援実働訓練の状況

更に、国、県、NEXCO東日本(株)と各機関の除雪業者で、相互の除雪作業についての詳細な情報交換会を平成28年12月22日に開催した。（写真-4 参照）



H28. 12. 22(木) 場所：NEXCO東日本(株)長岡管理事務所
写真-4 除雪作業の詳細に係る情報交換会の状況

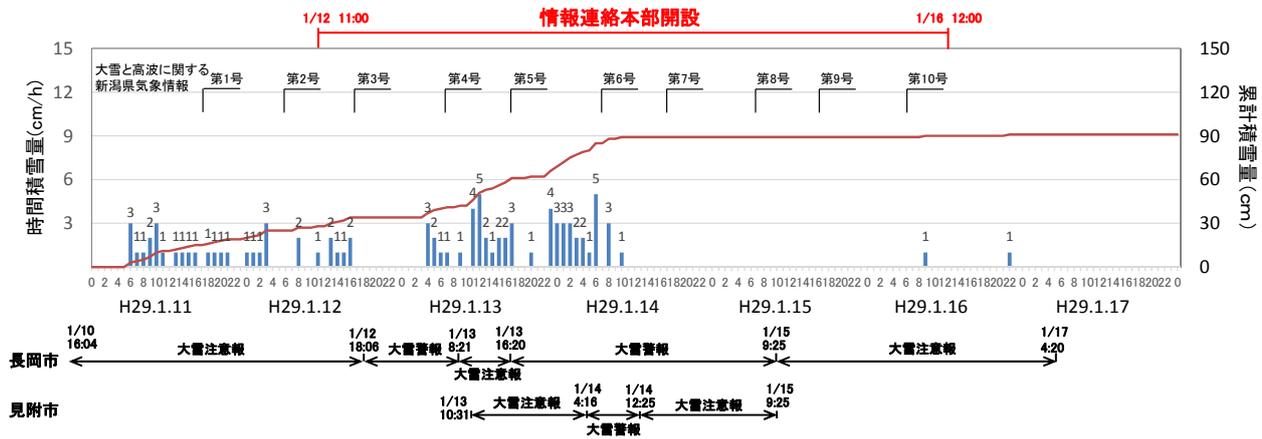


図-6 平成29年1月11日～16日 大雪時の降雪状況 (国道8号・見附)

6. 平成29年1月11日～16日の大雪への対応状況

(1) 情報連絡本部の開設

1月12日5:56 新潟地方気象台発表の「大雪と高波に関する新潟県気象情報」を受け、14日～15日にかけてセンター試験も実施されることから、情報連絡本部の開設を決定し、1月12日11:00に情報連絡本部を開設した。

(図-6 参照)

(2) 情報提供

道路情報板の他、長岡国道事務所Twitterを開設し道路情報を提供した。(写真-5 参照)

『FMながおか』では12日に2回、13日に4回、計6回にわたり気象・注意喚起情報を発信した。



1月11日国道8号、17号、116号の混雑状況
写真-5 Twitterによる道路情報を提供

(3) 除雪対応

大雪に備え、早期の除雪等を実施して対応した。以上の取り組みの結果、交通障害は発生せず交通を確保した。

(4) 情報連絡本部の解散

著しい交通障害の事象は発生していないこと、及び当面異常降雪の可能性が低いことから、1月16日12:00に「情報連絡本部」を解散した。(図-6 参照)

7. ドライバー支援の取り組み (新潟県防災局)

新潟県防災局が主体となって、道路渋滞等が長期化した場合に円滑に県市町村などの支援が受けられる体制を整備するとともに、食料・水の配布、トイレ供与、燃料補給などの支援策をとりまとめた。(平成28年11月)

長岡国道事務所は、同ワーキンググループのメンバーとして参画した。

8. あとがき

近年、異常降雪といわれる局地的な降雪が頻発し、これまで経験してきたものとは違う対応が迫られている。

平成28年1月の経験を活かし、平成29年1月11日～16日の大雪に対しては、新潟地方気象台からの気象情報を受け、情報連絡本部を早期に立ち上げ対応できた。これにより、交通障害は発生せず、実施されていた大学入試センター試験にも影響を及ぼすことなく、交通を確保することができた。

今回の連携会議でとりまとめられた対応策を、今後の冬期道路管理に活かし、安全安心な冬期交通環境につなげていきたいと考えている。