

自由課題 一般部門<安全・安心 I >

NO	課題名	所属	発表者	頁
1	XバンドMPLレーダを用いた吹雪観測の可能性について	国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 雪水チーム	大宮 哲	1-1
2	大型車両の燃費に路面雪氷が及ぼす影響に関する研究	国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地保全技術研究グループ 寒地道路保全チーム	大浦 正樹	1-7
3	除雪機械の老朽化リスクと見える化について	北海道開発局 事業振興部 機械課	大上 哲也	1-13
4	東北地方整備局における新たな雪庇処理車の検討	東北地方整備局 東北技術事務所 施工調査・技術活用課	千田 育雄	1-19
5	子供が安全に通学できるまちづくり ～ETC2.0プローブデータを活用した生活道路の交通事故対策～	北陸地方整備局 新潟国道事務所 調査課	松本 優里	1-23
6	佐賀県「安推連」で取り組んだカラー舗装等の安全対策の効果について	九州地方整備局 佐賀国道事務所 交通対策課	猪井 知明	1-27
7	ビッグデータを用いたヒヤリハット分析について	沖縄総合事務局 開発建設部 南部国道事務所 交通対策課	下地 涼大	1-33
8	領域海洋モデルROMSを用いた東京湾における副振動の解析	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 海洋情報・津波研究領域 津波高潮研究グループ	岩本 匠夢	1-39
9	全国初！疑似重力式構造を採用した耐震強化岸壁の整備について	中部地方整備局 三河港湾事務所 企画調整課	長田 康輝	1-44
10	インフラ被災情報の把握技術に関する性能水準の検討	国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 道路地震防災研究室	白石 萌美	1-48
11	UAV搭載型レーザスキャナを用いた土砂崩落の把握	国土地理院 基本図情報部 地図情報技術開発室	澤 可那子	1-54
12	災害時の緊急点検におけるドローンの活用について ～都市部における新たな取り組み～	関東地方整備局 道路部 地域道路課	田邊 和嗣	1-59
13	防災点検箇所に関する実効性のある効率的な調査手法について	関東地方整備局 関東技術事務所 技術課	福永 良三	1-63
14	南海トラフ巨大地震の津波を想定した中部管内排水計画について	中部地方整備局 河川部 河川計画課	野田 雄太	1-69

XバンドMPレーダを用いた吹雪観測の可能性について

大宮 哲¹・國分 徹哉¹・松下 拓樹¹・高橋 丞二¹・松澤 勝¹

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 雪氷チーム

(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号) .

本報では、XバンドMPレーダを用いた吹雪観測の可能性について議論した。レーダデータおよび地上観測結果を解析し、レーダ雨量データから地上降雪量をより正確に算出するための補正係数を提示したほか、レーダデータから上空における飛雪流量を面的に求め、地上における実測飛雪流量との比較を行った。その結果、XバンドMPレーダ観測から得られる上空のデータのみを用いて、地上における吹雪の発生状況を定量的に把握できる可能性が示唆された。

キーワード XバンドMPレーダ, 吹雪災害, 飛雪流量, DFIR, 災害情報

1. はじめに

吹雪の発生は局地的かつ突発的である。そのため、吹雪被害を効果的に軽減するためには、吹雪の発生状況を面的かつリアルタイムに把握することが望ましい。しかし、吹雪を計測する観測機器を面的に配置することは非現実的であるため、現状は気象条件から吹雪の発生状況を推測している。

一方、国土交通省は、集中豪雨や局所的豪雨の監視体制強化を目的に、XバンドMPレーダ（以下、X-MP）の全国配備を2008年より進めてきた。北海道内には2013年に北広島市、2014年に石狩市に設置され、現在はこの2基体制で札幌圏を中心とする半径約60kmの範囲を常時監視している。X-MPは、降雨を高精度に観測する手段として定着している。X-MPの特長は二重偏波（水平・垂直）を用いて観測を行っている点である。雨滴が落下する際、空気抵抗によってその形状は横方向に扁平するが、雨滴が大きいほど扁平量が大きくなる。二重偏波によって雨滴形状を正確に捉えることができるため、高精度な降雨観測が可能となる¹⁾²⁾。X-MP観測の空間分解能は250mメッシュである。また、観測間隔は1分間、情報配信までに要する時間は観測終了から約1分間である。そのため、X-MPによって、面的な降雨情報をほぼリアルタイムに把握することが可能である。

北海道では大雨災害もさることながら、大雪や吹雪に伴う雪氷災害が毎年発生しており、X-MPの冬期利用に関する社会的要請が高い。本報では、X-MP観測で得られる上空のデータから地上における吹雪の発生状況を把握することができるか、その可能性について議論する。

なお、本研究の対象は降雪を伴う吹雪であり、降雪を伴わない地吹雪については対象外としている。

X-MP観測で得られる上空のデータについて、その一部を簡単な説明とともに以下に記す。

(i) レーダ雨量

単位時間あたりの降水量（降水強度）のことで、単位はmm/h。なお、Webサイト「国土交通省 川の防災情報HP」³⁾などで一般配信されている雨量情報（図-1）は、複数レーダで観測されたレーダ雨量を合成処理したものである。

(ii) ドップラー速度

レーダ基地局に向かう（もしくは遠ざかる）方向の風速のこと。2基のレーダから得られるドップラー速度を解析することによって、風の2次元分布を算出することができる。

(iii) レーダ反射強度

観測対象物から反射した電波の強さのこと。レーダ反射強度が強いほど降水も強い。X-MP観

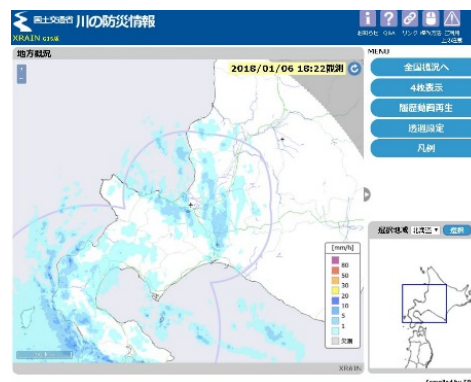


図-1 レーダ雨量情報（国土交通省 川の防災情報HP³⁾より）

測では、水平偏波・垂直偏波それぞれについてのレーダ反射強度が得られる。

(iv) 偏波間位相差

水平偏波と垂直偏波の位相差のこと。より大きく扁平した雨滴が存在するほど偏波間位相差は大きい。降雨の場合、この位相差をもとに高精度な降水強度が算出される。

(v) レーダ反射因子差

水平偏波によるレーダ反射強度と垂直偏波によるレーダ反射強度の差のこと。この差をもとに、雨滴の粒径分布が推定される。

2. 研究の手順

図-2に本研究の実施イメージを記す。X-MP観測で得られる上空のデータ（レーダ雨量、ドップラー速度）から算出される各要素と、地上での観測結果（降雪量、飛雪流量など）を比較解析する。なお、本研究に用いたX-MPデータは、地球環境情報統合プログラム（DIAS）のHP⁴⁾よりダウンロードした。

次に、本研究の手順を以下に記す。

- ① X-MPによる降雪観測結果（レーダ雨量）と地上降雪強度の関係解明
- ② 上空における飛雪流量の推定および地上における飛雪流量の実測
- ③ 上記②で求めた飛雪流量の比較により、X-MPを用いた吹雪観測の可能性に関する検討

本研究の対象は降雪を伴う吹雪であることから、X-MPデータから降雪量を正確に把握することが本研究の第一歩である。そこで、X-MPを用いた吹雪観測の可能性を検討するための前段として、降雪時のX-MPレーダ雨量と地上における降雪強度の関係について議論する。次に、X-MPデータから上空における飛雪流量を推定する。最後に、地上で実測した飛雪流量との比較を行い、X-MPによる吹雪観測の可能性について検討する。

なお、「新版雪氷辞典」⁵⁾によると、降雪強度とは「単位時間に単位面積に降った雪の重さに等しい水の深さ」のことを指し、その単位はレーダ雨量と同じmm/hである。また、飛雪流量は吹雪の激しさを示す指標の1つであり、「風向に直交する単位面積を単位時間に通過する雪の質量（単位は $g/m^2/s$ ）」のことを指す。

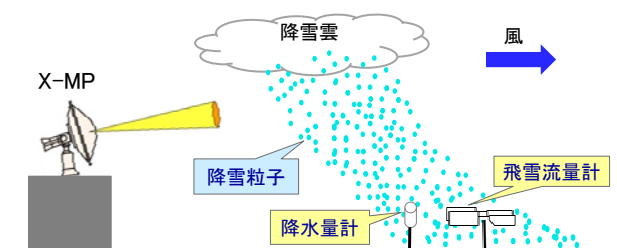


図-2 本研究の実施イメージ

3. X-MPレーダ雨量と地上降雪強度の関係

X-MPは、雨滴が扁平する性質を利用することによって高精度な降雨観測をしていることは、上述したとおりである。一方、降雪粒子は気象条件の違いによって、あられや雪片、みぞれなど様々な状態に変化するため、降雪粒子の形状や密度、落下速度も様々である。それゆえ、X-MPを用いた降雪量の観測精度については検討の余地が残されており、その研究例も少ないのが現状である^{6) 7) 8)}。本章では、X-MPと地上の降雪量の観測結果を比較解析し、X-MPデータからより正確な地上降雪量を算出するための補正方法について検討する。

(1) 研究方法

北広島市と石狩市に設置されている2基のX-MP観測から求められた合成処理済みのレーダ雨量（mm/h）と、寒地土木研究所が所有する石狩吹雪実験場（北緯43°12′、東経141°23′）で行った地上降雪量の観測結果を比較する。

地上降雪量の観測には、二重柵基準降水量計（DFIR）を使用した。DFIRは、現在最も高精度な降水観測ができる地上降水量計として世界気象機関（WMO）によって推奨されている計器である。以後、本報に記す「地上降雪量」とは、DFIRにより観測された10分間降雪量を水量換算した値のことを指す（単位はmm）。なお、DFIRの緒元や観測原理、実測値に対する補正処理の方法については、WMOのレポート他^{9) 10)}を参照されたい。

本解析には3冬期分のデータ（2014～2016年度、12月1日～3月31日）を使用した。1分おきに配信されるDFIR直上メッシュにおけるX-MPレーダ雨量（mm/h）から10分間降水量を求め、地上降雪量と比較した。なお、本比較の対象は降雪であることから、地上気温が0℃以下の時のデータのみを使用した。

X-MPレーダ雨量は上空のデータである一方、DFIR観測値は地上のデータである。降雪粒子は雨滴に比べて風の影響を受けやすいと考えられる。すなわち、両者の比較にあたっては、降雪粒子が落下中に風によって移流される影響や、降雪粒子が地上に達するまでの時間差について考慮に入れる必要がある。そこで、本解析では風による移流の影響を極力なくするため、気象庁発行の「気象観測の手引き」¹¹⁾に基づき、高度10mにおける10分間平均風速が0.3m/s未満の事例のみを抽出し、比較に用いた。この手引きによると、0.3m/s未満の風速は「煙がまっすぐ昇る状態」と記述されており、降雪粒子が風の影響を受けずに真下に落下するとみなすことができる。降雪粒子が地上に達するまでの時間差を考慮するうえで、降雪粒子の落下開始高度と落下速度を仮定する必要があるが、これらを正確に定めることは難しい。そこで本解析では、X-MP石狩局の冬期運用仰角と石狩吹雪実験場までの距

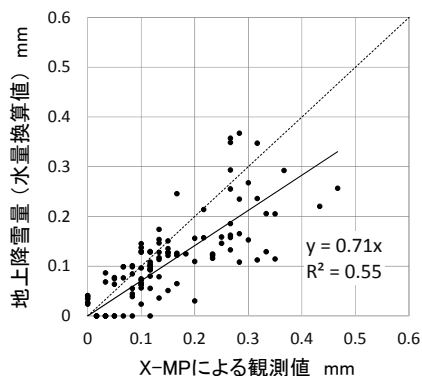


図-3 X-MPによる降雪観測値と地上降雪量の関係

離を加味したビーム高度から、降雪粒子の落下開始高度を一律340mと仮定した。降雪粒子の落下速度は、降雪粒子の大きさや降雪種（雪片、あられ、みぞれなど）によって異なる値を示すが、おおむね0.7~1.2m/s^{12), 13)}である。これらの落下開始高度と落下速度に基づいて試算した時間差は5~8分間であることから、ここでは降雪粒子が地上に達するまでに要する時間を10分間と定め、比較時にはその時間差を考慮に入れた。

(2) 比較結果

X-MPレーダ雨量から求めた10分間降水量と地上降雪量の関係を図-3に記す。図中の破線は1対1の等値線を、実線はX-MP観測値と地上観測値との間の近似直線を示す。この結果から、降雪時のX-MP観測値は実際の地上降雪量を過大評価する傾向があることが示された。近似直線の傾きは0.71であった。決定係数 R^2 は0.55（データ数は109）であることから、この近似式は地上降雪量を良く説明できるといえる。以上の結果から、降雪時のX-MPレーダ雨量に対して補正係数0.71を乗ずることで、従来よりも正確な地上降雪強度を把握することができることが示された。以降、本報では、レーダ雨量 P と降雪強度 P' の関係は、式(1)が成り立つものとして扱う。

$$P' = 0.71P \quad (1)$$

4. X-MPを用いた上空における飛雪流量の推定

X-MP観測データから上空における飛雪流量の推定を行う。ここで、飛雪流量 M_f ($g/m^2/s$)は、飛雪空間密度 n (g/m^3)と風速 V (m/s)の積で与えられる(式(2))。

$$M_f = n \times V \quad (2)$$

(1) 上空における飛雪空間密度 n の算出

n は1立方メートルあたりの空間に存在する雪粒子の質量であり、降雪フラックス M_v ($g/m^2/s$)を降雪粒子の落下速度 w (m/s)で除することで求められる(式(3))。なお、 M_v は単位時間に単位面積を通過した(落下し

た)降雪粒子の質量のことを指す。

$$n = M_v / w \quad (3)$$

ここで、 M_v と P' の関係は $M_v = 0.28 P'$ として表すことができることから、 P と M_v の関係は式(1)を用いて式(4)で表され、さらに n は P と w を用いて式(5)によって算出される。これにより、降雪粒子の落下速度 w とX-MP観測によって得られるレーダ雨量から、上空における飛雪空間密度 n を算出できる。

$$M_v = 0.2P \quad (4)$$

$$n = 0.2P / w \quad (5)$$

(2) 上空における風向風速の算出

a) Dualドップラー解析

1基のX-MPから得られるドップラー速度は、レーダビームに沿った方向のみの風速成分であるため、その風がレーダ基地局に向かうものか、遠ざかるものか、についての情報しか得られない。そこで、2基のX-MP（北広島局・石狩局）から得られるドップラー速度をDualドップラー解析¹⁴⁾することにより、上空における風（以下、Dual風）の2次元分布を求めた。ここでは、吹雪発生時における毎正時のX-MPデータについて、2015年度冬期は58ケース分、2016年度冬期は24ケース分を解析した。

本解析で求められた高度500mにおけるDual風の一例（2015年12月25日12:00の結果）を図-4に記す。ここで、Dualドップラー解析の対象エリアは、図-4中における2つの円内（ただし、円の重なり部分は除く）である。解析対象エリア内においてDual風が示されていないエリアがあるが、それは当該時刻において降雪粒子が存在しなかったためにDual風を算出することができなかったこと、また、実際には降雪があったとしても、レーダビームが山岳などの障害物によって遮断されることにより、Dual風が算出されなかったことを意味する。

b) Dual風の妥当性について

本解析結果の妥当性を確認するため、同日同時刻の気象庁毎時大気解析GPV（以下、HANAL）により得られ

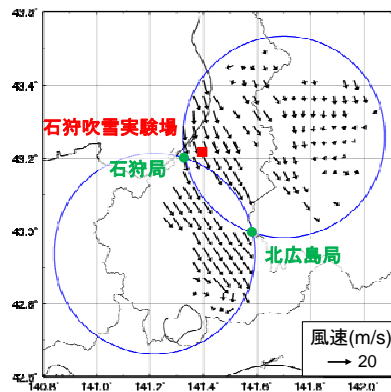


図-4 Dualドップラー解析により求めた風向風速の一例

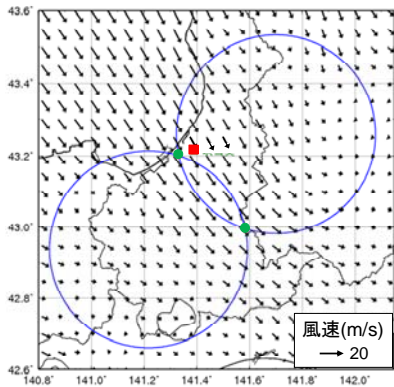


図-5 気象庁毎時大気解析GPV (HANAL) による風向風速の一例

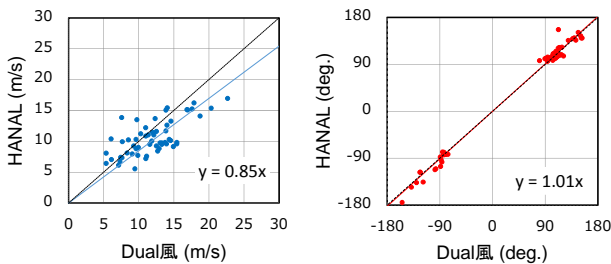


図-6 Dual 風と HANAL の比較 (左: 風速, 右: 風向)

た950hPa高度面 (高度約500m) の風向風速 (図-5) との比較を行う。ここでは、HANALの風向風速を真値とみなす。図-4、図-5より、Dual風とHANALは、風向、風速ともに定性的に概ね一致していることが確認される。

次に、Dual風とHANALを定量的に比較する。ここでは、2015年度冬期の吹雪58ケース分のDual解析結果について比較した。石狩吹雪実験場の直上メッシュにおけるDual風およびHANALの比較結果を図-6 (左: 風速, 右: 風向) に示す。なお、風向比較図の作成にあたっては360方位を用い、南風 (風向角180°) をオフセット値とした。すなわち、図中の-180および180が北風、-90が東風、0が南風、90が西風をそれぞれ示す。

比較の結果、Dual風の風速はHANALよりも大きい傾向にあること、風向はHANALとほぼ一致することが示された。図-6中には風速、風向それぞれについて近似直線を付記しており、その傾きはそれぞれ0.85、1.01であった。以降、Dual風の風速に補正係数0.85を乗じたものを、高度500mにおける風速として扱うこととする。なお、風向については補正しない。

c) 高度340mにおける風速の算出

前項までにおいて、X-MPによる観測データから高度500mにおける風向風速を算出した。一方、3章では降雪粒子の落下開始高度を340mとみなしたことから、ここでは大気の中立状態にあると仮定し、高度500mの補正済みDual風速を用い、風の対数則にならって高度340mにおける風速を求めた。本計算では、石狩吹雪実験場周辺の地表状況を加味し、道路橋耐風設計便覧¹⁵⁾に基づき、地面粗度長を0.05と仮定した。

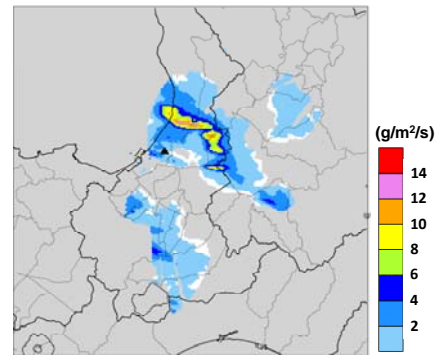


図-7 X-MP 観測データから求めた上空の飛雪流量の一例

(3) 上空における飛雪流量の推定結果

次に、2016年度冬期の吹雪24ケース分を対象に、4章(1)節で求めた飛雪空間密度 n と4章(2)節で求めた高度340mにおける風速 V から、式(2)より高度340mにおける飛雪流量 M_f を面的に求めた。なお、ここでは降雪粒子の落下速度 w を1.2m/sとして計算した。飛雪流量の推定結果の一例 (2017年2月17日22:00) を図-7に記す。なお、図中に示す黒三角は、石狩吹雪実験場の位置を示す。

5. 地上における飛雪流量の実測

地上の飛雪流量観測は、石狩吹雪実験場において、Snow Particle Counter (以下、SPC) を用いて行った。SPCは非接触で光学的に吹雪粒子を計測する機器である¹⁶⁾。図-8にSPCの外観を、図-9にセンサー部分の詳細を示す。図-9に示す投光部から近赤外光が受光部に向けて照射されており、その範囲内 (2 mm×25 mm×0.5 mm) が計測領域である。この領域を吹雪粒子が通過すると、それに応じて受光部に到達する光量が減衰する。吹雪粒子が全て球体であるとの仮定のもと、光量の減衰量およ



図-8 Snow Particle Counter

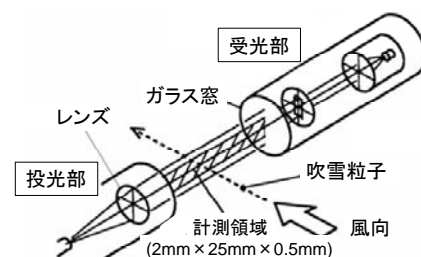


図-9 SPC センサー部分の詳細

び減衰回数から、計測領域を通過した雪粒子の粒径および個数がカウントされ、1分おきに1秒毎の飛雪流量が出力される。SPCには風向舵が取り付けられており(図-8)、センサー部分が常時風向に直交する。なお、本観測では、地吹雪粒子(一度地面に降り積もった雪が風によって舞い上げられた粒子)の誤カウントを極力防ぐため、SPCの設置高度は7mとした。

6. 上空の推定飛雪流量と地上実測値の比較

X-MPによる上空の推定飛雪流量と地上における実測飛雪流量を比較し、X-MPを用いた吹雪観測の可能性について検討する。

本報4章において、X-MPによる観測データから上空における飛雪流量の面分布を推定した。しかし、降雪粒子は雨滴よりも軽く、密度も小さいため、風によって移流される効果が大いと考えられる。すなわち、上空における飛雪流量の面分布をそのまま地上に適用することはできない可能性が高い。そこで本章では、上空と地上の飛雪流量を比較するにあたり、降雪粒子の移流効果を考慮しない場合とした場合、その両方について検討した。なお、ここでは、4章(3)節で飛雪流量の計算対象とした吹雪24ケースについて比較する。

(1) 移流効果を考慮しない場合の比較結果

移流効果を考慮しない場合、すなわち石狩吹雪実験場の直上メッシュにおける推定飛雪流量と、地上での実測飛雪流量を比較した結果を図-10に記す。図中の破線は1対1の等値線である。なお、落下開始高度を340m、降雪粒子の落下速度を1.2m/sと仮定していることから、ここでは降雪粒子が落下を開始してから地上に達するまでの時間を5分間と定め、比較時にはその時間差を考慮に入れてある。図-10より、両者の間に明瞭な相関は確認されず、バラツキが大きいことが確認される。決定係数 R^2 はマイナス0.3(データ数は24)二乗平均平方根誤差(RMSE)は $1.86\text{g/m}^2/\text{s}$ であった。

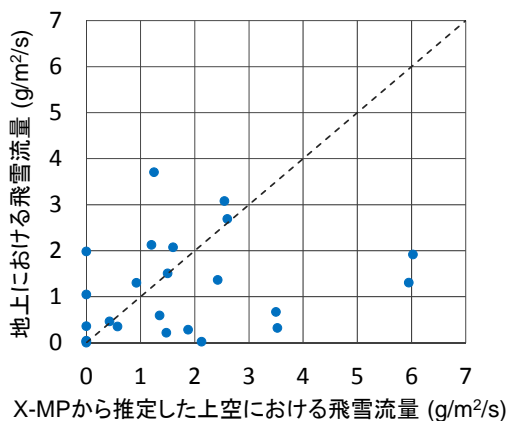


図-10 X-MPによる推定飛雪流量と地上の実測飛雪流量の比較(降雪粒子落下中の移流効果を考慮しない場合)

(2) 降雪粒子の移流に関する検討

降雪粒子の移流について、地上に到達した吹雪粒子が、上空のどこから落下してきたのかを推定した。

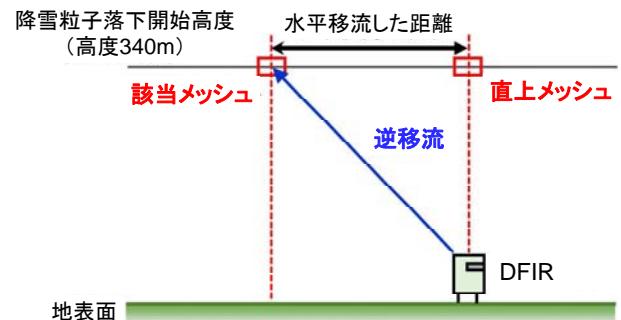
はじめに、4章(2)節c)項で求めた上空風を用い、風の対数則を用いて上空(高度340m)から地上(石狩吹雪実験場)までの間における水平風の鉛直分布を求めた。次に、地上で観測された吹雪粒子を時間を遡って逆移流させ、その移流距離と方角について計算し、高度340mでの落下開始地点を推定した。推定イメージを図-11に記す。ここで、水平風の鉛直分布の計算においては、各高度間を10mに分割し、地面粗度長は4章(2)節c)項と同様に0.05と仮定して行った¹⁵⁾。

吹雪24ケースについて、吹雪粒子の落下開始地点を推定した結果を図-12に示す。ここでは、計算した吹雪24ケースの結果をそれぞれナンバリングして示してある。

(3) 移流効果を考慮した場合の比較結果

図-12に示す推定落下開始地点における上空の推定飛雪流量と、石狩吹雪実験場で実測した地上飛雪流量を比較した結果を図-13に示す。図-10と同様、降雪粒子が落下を開始してから地上に達するまでの時間差についても考慮に入れてある。なお、図-13は図-10に比べてプロット数が少ないが、これは推定落下開始地点(図-12)の一部がDualドップラー解析の対象エリア(図-4参照)から外れたため、飛雪流量を計算できなかったことに起因する。

図-13より、X-MPデータから推定した飛雪流量は地上の実測飛雪流量を過大評価する傾向にあるものの、両者



石狩吹雪実験場
図-11 吹雪粒子の落下開始地点の推定イメージ

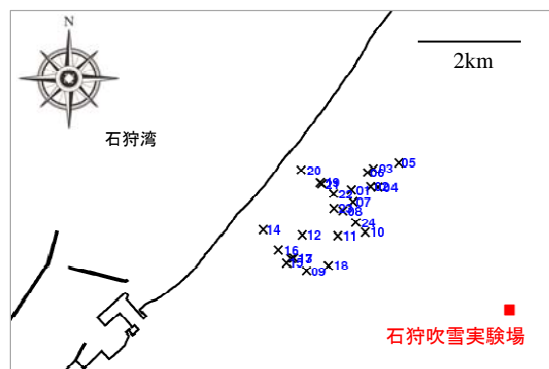


図-12 吹雪粒子の落下開始地点の推定結果

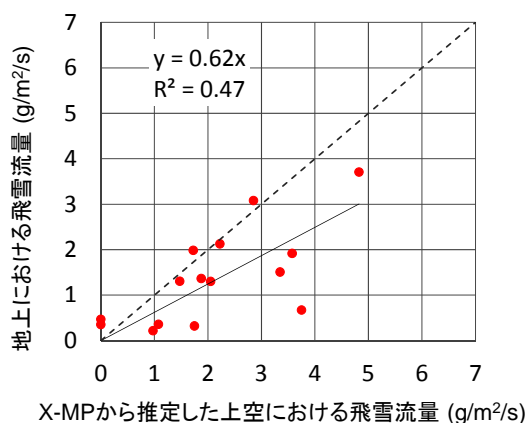


図-13 X-MPによる推定飛雪流量と地上の実測飛雪流量の比較
(降雪粒子落下中の移流効果を考慮した場合)

には正の相関があることが示された。図中に実線で示す線形近似式の傾きは0.62，決定係数 R^2 は0.47（データ数は15）であった。RMSEは1.23 $\text{g/m}^2/\text{s}$ であり，移流効果を考慮に入れなかった場合（図-10，RMSEは1.86 $\text{g/m}^2/\text{s}$ ）に比べ，地上における実測飛雪流量をより正確に表現できることが示された。

以上の結果は，X-MP観測から得られる上空のデータのみから，地上における吹雪状況を定量的に把握することができることを示唆するものである。

7. まとめと今後の展望

本報では，X-MP観測データを用いた吹雪観測の可能性について明らかにすることを目的とし，レーダデータと地上観測結果を解析した。本研究より，一般配信されているX-MP冬期レーダ雨量データからより正確な地上降雪量を算出するための補正係数について提案した。また，X-MPデータから求められた飛雪空間濃度および風向風速を用い，上空における飛雪流量を面的に推定した。その推定値を地上の実測値と比較したところ，両者の間には正の相関が見られた。この結果は，X-MP観測データのみから，地上における吹雪状況を定量的に把握することができることを示唆するものである。

本解析では，上空における推定飛雪流量と地上観測値の比較検証として，石狩吹雪実験場1地点のみでの実測データを用いた。今後は，複数地点（札幌近郊，全6地点）にSPCを配置し，飛雪流量観測を行う予定である。また，VVP法を用いてより広域にわたる風向風速の推定を行う。広域での推定飛雪流量と複数地点での地上実測値を比較検証に用い，X-MPデータのみから地上における吹雪情報をリアルタイムかつ面的に把握するためのアルゴリズム構築を目指す。

参考文献

1) Maki *et al.* : Effect of Natural Variations in Rain Drop

Size Distributions on Rain Rate Estimators of 3 cm Wavelength Polarimetric Radar, *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 871-893, 2005.

- 2) 大手：新技術を用いたXバンドMPレーダ雨量計の整備について，国土交通省関東地方整備局，スキルアップセミナー関東，2013。
http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000080090.pdf（2018年10月11日閲覧）
- 3) 国土交通省川の防災情報HP，
<http://www.river.go.jp/x/xmn0107010.php>（2018年10月11日閲覧）
- 4) 地球環境情報統融合プログラムHP，
<http://www.diasjp.net/>（2018年10月11日閲覧）
- 5) 日本雪氷学会：新版雪氷辞典，古今書院，2014.
- 6) 林ら：北陸地方における地上雨量観測所を用いたXバンドMPレーダの降水量（降雪量）推定精度の評価，*水文・水資源学会誌*，27（2），67-76，2014.
- 7) 今長ら：冬季除雪支援におけるレーダ技術の活用に関する一考察－Xバンドレーダによる雪検知性能と活用案について－，2017ふゆトピア・フェアin函館研究発表会，2017。
http://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/chousei/PDF/34T_H.pdf（2018年10月11日閲覧）
- 8) 谷口ら：XRAINを用いた冬期降水量推定精度向上に向けた取り組み，平成29年度北陸地方整備局事業研究発表会，2017。
<http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h29/b/B-10.pdf>（2018年10月11日閲覧）
- 9) WMO : International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intecomparison, Final Report of the First Session. Naskoping, Sweden. WMO, Geneva, 31pp, 1985.
- 10) 大宮：強風時における降雪計測の課題と二重柵基準降水量計を用いた降雪強度の測定，*寒地土木研究所月報*第744号，31-34，2015.
- 11) 気象庁HP，気象観測の手引き，
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/tebiki.pdf（2018年10月11日閲覧）
- 12) Ishizaka *et al.* : A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured Size-Fall Speed Relationship, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.91, No.6, 747-762, 2013.
- 13) 梶川ら：雪片の落下速度と降雪結晶形との関係，*雪氷*，58，455-462，1996.
- 14) 石原：ドップラー気象レーダーの原理と基礎，*気象研究ノート*，2001，pp 1-38, 2001.
- 15) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧（平成19年改訂版），日本道路協会，P75，2007.
- 16) Schmidt, R. A : A system that measures flowing snow, USDA, Forest Service Research Paper, RM-194, 1977.

大型車両の燃費に路面雪氷が及ぼす影響に関する研究

大浦 正樹¹・丸山 記美雄¹

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

舗装路面の種類等が車両の燃費に影響を及ぼすことが、最近の研究によって明らかにされてきている。このことから積雪寒冷地において路面雪氷が存在することで燃費に影響を及ぼすと推測されるが、その影響度合いは定量的に把握されていない。本研究では実車を用いた各種実験を行い、燃費と雪質や走行抵抗の関係についての知見が得られたので、路面雪氷による燃費への影響を定量的に把握する手法の一つとして報告する。

キーワード 燃費、路面雪氷、走行抵抗、積雪寒冷地

1. 背景と目的

車両の燃料消費率（一般的には燃費と呼ばれ、単位はkm/L、以下、燃費）に関する最近の研究によって、舗装路面の種類¹⁾²⁾、路面のテクスチャ³⁾、平坦性⁴⁾⁵⁾などが、燃費に影響を及ぼすことが分かってきている。それらの報告結果から類推すると、積雪寒冷地においては路面に存在する雪氷が、燃費が悪化する方向に影響を及ぼすことが推測される。しかし、既往の研究論文をレビューする限り、路面の雪氷がどの程度燃費に影響を及ぼすのかを定量的に論じた報告は見当たらない。

燃費に路面雪氷がどの程度影響を及ぼすのかを定量的に知ることは、2つの側面から有用な意味を持つ。1つは燃料消費に伴う金銭的側面であり、もう1つはCO₂の排出量削減という環境的側面である。燃費を良くすることができれば、燃料に要する費用とCO₂排出量を減らすことができるので、金銭的側面と環境的側面の両方でプラスの効果が発生する。路面の雪氷がどのように燃費に影響を及ぼし、たとえば除雪作業などによって雪を除去することの金銭的効果や、環境的効果がどの程度得られているのか定量的に知る事ができれば、有意義なことと考えられる。

しかし、現状では路面の雪氷によって燃費がどのように変化するのか、その影響度合いは定量的に把握されていない。そのため路面の雪氷を除雪作業などで除去することによる道路利用者費用の低減効果や、CO₂排出量の低減効果を把握することができないのが現状である。

そこで、本研究では路面の雪氷が走行車両の燃費にどのような影響を及ぼすのか、その影響度合いを把握し、さらに雪氷の影響度合いを定量化する手法を構築することを目的としている。そのために、積雪雪氷路面における大型車両の燃費を把握するための実験を行い、データ

を解析した結果、路面に雪氷がある場合には大型車両の燃費が低下することや、燃費の低下割合は雪氷の密度や路面の凹凸に影響されることなどの知見が得られた。さらに、燃費は走行速度、路面平坦性指標IRI、雪密度を考慮した数値の関数として表現することが可能で、雪氷の存在によって燃費がどのような影響を受けるか定量的に算定する一手法を構築することができたので、ここに報告するものである。

2. 実験方法

路面に存在する積雪や踏み固められたり乱された雪氷が、タイヤを介して車両の燃費にどの程度影響を及ぼすかを試験周回路において4年間にわたり実験によって検討した。

実験手順を図-1に示す。雪氷路面を作成し、その雪氷路面上で平坦性IRI(International Roughness Index、国際ラフネス指数)、燃費、雪密度、風向風速、気温、気圧を計測し、一連の計測が終わると、次の雪氷路面を作成してまた一連の計測を行うといったことを繰り返した。

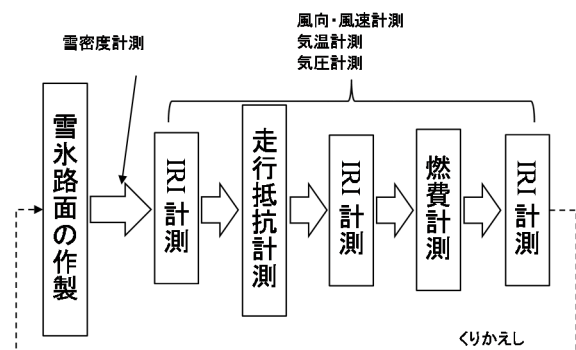


図-1 実験の流れ概要図

(1) 実験場所と実験路面

a) 実験場所

実験場所は当研究所が保有する苫小牧寒地試験道路であり、図-2に示すような全長2,700mの周回路である。周回路の直線区間であるKP=400~900間の500mのアスファルト舗装上に、雪をバックホウとホイールローダで敷き並べ、適宜ロードローラで締め固め、必要に応じて除雪グレーダ等で整正を行って様々な積雪雪氷路面を人為的に作成し、その上を試験車両を通過させて各種測定を行った。

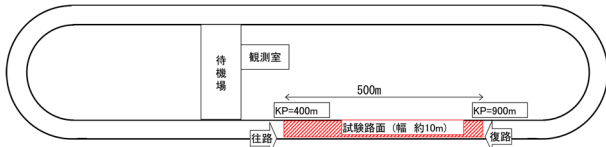


図-2 苫小牧寒地試験道路の試験区間概要図

b) 雪氷路面の密度計測方法及び分類方法

実験を行った雪氷路面の雪密度計測方法及び雪質分類や道路雪氷としての分類の判別方法について述べる。

まず本実験で使用した雪氷路面は、試験区間内で行えるだけ均一な性状となるよう配慮して作成したもの、実際の供用中の道路における雪氷路面がそうであるように、2種類以上の複数の雪質が存在し、密度が鉛直方向にも平面方向にも不均一なものであった。たとえば表面数ミリはざらめ雪で、その下は数cm程度の圧雪、その下には氷の層があるなどである。このような道路雪氷の性質を的確に定量的に表現することは難しく、現在において表現方法は確立していないのが実態である。

そこで、本研究ではタイヤが接触する表面から3~5cm程度の深さまでの雪氷層のおおよその密度及び雪質に着目することとし、その部分の雪氷の状態を数値化して定量的に表現することを試みた。具体的には実験路面の表面から3~5cm程度の深さまでの雪氷層を容積100cm³の角型サンプラーで採取し、測定した雪密度によって雪の状態を代表させることとした。測定した雪密度値を元に表-1に示すような0.1g/cm³刻みの階級に区分し、その階級の中間値を階級代表値として扱うこととした。計器の不備で雪密度を欠測した場合には、路面雪氷の種類を目視によって判別し、雪氷分類に対応する密度を決定することとした。目視での路面雪氷判別においては、表-2に示す日本雪工学会の自然積雪分類法⁷⁾や、表-3に示す低温科学研究所の前野らによる道路雪氷分類方法⁸⁾などの既往の研究報告を参考にして路面雪氷の分類を行い、密度を決定した。

さらに、本研究では雪氷路面の表面から3~5cm程度までの深さの雪氷密度の逆数を取り「雪区分値」なる指標を定義した。たとえば表-1に示すように新雪など密度が0.15g/cm³の場合の雪区分値は6.667、乾き硬圧雪で密度が0.65g/cm³の場合の雪区分値は1.539となる。路面に雪氷が

ない場合の乾燥路面での雪区分値は0と定義した。つまり、雪氷が存在し雪密度が低く軟らかいほど数値が大きくなる指標となっており、乾燥路面→氷板路面→粒雪路面→新雪路面の順番で数値が大きくなる。このような指標を設定することで、燃費と路面雪氷の相関を定量的に把握できるよう工夫した。

表-1 実測雪密度の階級分け及び階級代表値と雪区分値

実測雪密度の階級(g/cm ³)	階級代表値(g/cm ³)	雪区分値
0.1~0.2	0.15	6.667
0.2~0.3	0.25	4.000
0.3~0.4	0.35	2.857
0.4~0.5	0.45	2.222
0.5~0.6	0.55	1.818
0.6~0.7	0.65	1.539
0.7~0.8	0.75	1.333
0.8~0.9	0.85	1.177
0.9~1.0	0.95	1.053

表-2 雪工学会による自然積雪の分類方法

雪質	密度(kg/m ³)
新雪	50~150
こしまり雪	150~250
しまり雪	250~500
ざらめ雪	300~500
こしもざらめ雪	300前後
しもざらめ雪	

表-3 低温科学研究所による道路雪氷の新分類

大分類	名称	密度(kg/m ³)	硬度(kg/cm ²)	別称・通称
新雪	乾き新雪	約100	~0	-
	濡れ新雪	100~200		
圧雪	乾き軟圧雪	250~500	10~50	しまり
	乾き硬圧雪	500~750	50~200	
	濡れ圧雪	400~800	10~50	
粉雪	粉雪	200~400	~0	-
粒雪	乾き粒雪	250~500	~0	ざらめ ざくれ ざくざく
	濡れ粒雪	400~750		
水べた雪	水べた雪	700~1000	~0	シャーベット
氷板	乾き氷板	700以上	90~300	アイスバーン 氷盤
	濡れ氷板	800以上		
氷膜	乾き氷膜	700以上	-	アイスバーン つるつる(圧雪)
	濡れ氷膜	800以上		

c) 実験路面の状態

実験を行った雪氷路面は、雪の密度、硬さ、厚さ、踏み固め状態などが様々に異なる12種類の路面である。また、雪氷路面での測定値と比較するために、同一の区間においてアスファルト路面2回、湿潤路面1回においても測定を行った。アスファルト路面の乾燥路面は標準的な路面であり、基準路面と位置づけられる。なお乾燥路面の表層混合物は密粒度13Fである。

各雪氷路面の雪密度、道路雪氷分類、雪区分値などの判定及び測定結果を表-4に示す。

表-4 実験を行った12種類の雪氷路面一覧表

路面種別 番号	雪質分類 and 道路雪氷分類	実測雪密度 (g/cm ³) 上段：上部 下段：下部	雪密度 代表値 (g/cm ³)	雪区分値	気温 (°C)	試験時 風速 垂直成分 (m/s)
乾燥路面1 (基準路面)	雪無し 乾燥			0	1.1	1.5
乾燥路面2	雪無し 乾燥			0	-1.8	-1.8
雪氷路面1	凍結 乾き氷膜、つるつる圧雪	欠測	0.85	1.177	0.6	0.3
雪氷路面2	こしもざらめ雪 乾き粒雪	欠測	0.30	3.333	1.3	-2.7
雪氷路面3	しまり雪 乾き圧雪	0.43 0.62	0.55	1.818	0.8	3.1
雪氷路面4	しまり雪 乾き硬圧雪	0.57 0.68	0.65	1.539	2.3	1.2
雪氷路面5	凍結 乾き氷膜、つるつる圧雪	0.85 0.85	0.85	1.177	-3.1	3.7
雪氷路面6	ざらめ雪 乾き粒雪、下層氷板	0.42 0.68	0.55	1.818	-4.3	3
雪氷路面7	しまり雪 乾き圧雪	0.42 0.64	0.55	1.818	0	1
雪氷路面8	しまり雪 乾き硬圧雪	0.62 0.64	0.65	1.539	-3.3	-0.3
雪氷路面9	ざらめ雪 乾き粒雪、下層氷板	0.44 0.59	0.55	1.818	-4.4	-1.5
雪氷路面10	ざらめ雪 濡れ粒雪、下層氷板	0.56 0.58	0.55	1.818	-0.9	3
雪氷路面11	凍結 乾き氷膜、つるつる圧雪	0.85 0.85	0.85	1.177	-4.4	1.7
雪氷路面12	こしまり雪 乾き圧雪	欠測	0.45	2.222	-6.1	1.7
湿潤路面	雪無し 湿潤			0	1.2	1.1



写真-1 試験に使用した大型車両

表-5 試験車両の主要諸元

車種区分	大型車
車両名称	いすゞGIGA
駆動方式	6×2 (後輪一軸駆動方式)
ミッション	マニュアル
試験時 車両総重量	25,010 kg (満載状態)
全長	11,980mm
車軸数	3
使用タイヤ	ブリヂストンW990 275/80R22.5 (スタッドレス)
タイヤ 空気圧	前輪：900kPa 後輪：900kPa
燃料種類	軽油

(2) 実験に使用した車両および計測機器

試験に使用した車両は、写真-1に示すカーゴタイプの大型車両であり、その主要諸元を表-5に示す。試験車両には500kgのコンクリートブロックを29個荷台に積載し、満載状態に相当する車両総重量25tとした。

雪氷路面上での走行速度計測のために、図-3に示すGPSセンサーによる計測装置であるRACELOGIC社製のGPSロガーV-BOX3を使用した。

燃費の計測には、燃料タンクとエンジンをつなぐ経路の燃料配管上に小野測器社製の車載型燃料流量計DF-210および容積式燃料流量検出器FP-2140Hを設置し(写真-2)、実際の燃料消費量をリアルタイムで計測し、燃料使用量と走行距離から燃費を算出した。

雪氷路面のIRIの計測には、車両のバネ上およびバネ下に設置した2つの加速度計から得られる上下加速度を逆解析することによって路面プロファイルを測定し、リアルタイムでIRIを算出する装置⁹⁾である共和電業社製のSTAMPERを使用した。なお本研究において測定したIRIは、前述したとおり加速度計を使用して主に雪氷路面上で計測したものであり、水準測量など静的手法で舗装路面を計測して得られる一般的なIRIと区別するため、以降IRI_aと表現することとする。

測定時の環境条件を把握するために、風向風速計、気圧計、路面温度計、雪密度計を使用した。燃費にタイヤの空気圧が影響することが知られているため、日々の試験前と試験後にタイヤ空気圧計によって空気圧をチェックし、空気圧を一定に保つよう配慮した。

項目	性能	
分解能	速度	0.01km/h
	距離	1cm
	時間	0.01s
サンプリングレート	100Hz	
出力データ	経緯度	
	速度・垂直速度	
	方位・高度	
	距離 加速度(縦/横)	

図-3 GPSセンサーによる計測装置の概観と仕様



写真-2 燃料タンク脇に設置した燃料流量検出器

(3) 燃費測定方法

燃費の測定方法は「JIS D 1020自動車-燃料消費率試験方法」¹⁰⁾で示された方法のうち、定速度燃料消費率試験方法に則って実施した。具体的には、2章(1)節c)項で示した様々な種類の路面を、試験車両のトランスミッションギア段を6段に固定して、試験速度である30km/h、40km/h、50km/hの一定速度で500mの実験路面区間を走行し、その間の燃料消費量を燃料流量検出器で実測した。

(4) IRI_a計測による平坦性測定方法

IRI_a計測時の走行速度は40km/hで一定とした、燃費測定の前後にIRI_aの計測を行い、その平均値をもって燃費測定時のIRI_aとした。

3. 実験結果および考察

(1) 燃費試験結果

各路面における車両速度ごとの燃費試験結果を図-4に示す。乾燥路面を基準として様々な雪氷路面の燃費を比較すると、雪氷が存在する路面では雪氷がない乾燥路面と比較すると、いずれの場合においても燃費が悪化していることが読み取れる。

図-5は乾燥路面を基準として、様々な雪氷路面での燃費の低下割合を示した。雪氷路面2の低下割合は約70%程度と群を抜いて大きな値を示している。雪氷路面2は幹線道路ではほぼ出現しないレベルの悪い路面であり、上限値として見ておくのが妥当である。雪氷路面2を除いた11種類の雪氷路面の燃費低下割合は5~50%程度の範囲にあり、低下割合が10%を超えるデータが大半で平均約21%と算定された。既往の研究¹²⁾³⁾でアスファルト舗装とコンクリート舗装の燃費差は数%程度とされていることや、タイヤ自体のころがり抵抗の改良による燃費の改善効果は数%とされているものと比較すると、路面の雪氷が燃費に及ぼす直接的な影響は無視できないほど大きいと評価できる。除雪により完全に乾燥路面を出すことができたと仮定すれば、燃費は改善することとなり、その燃費改善分が除雪の効果として計量可能となる。

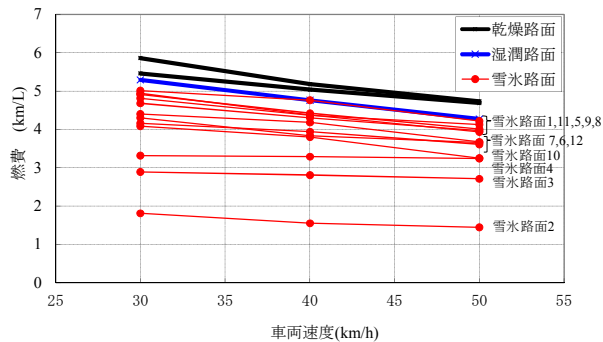


図-4 雪氷路面上の燃費測定結果

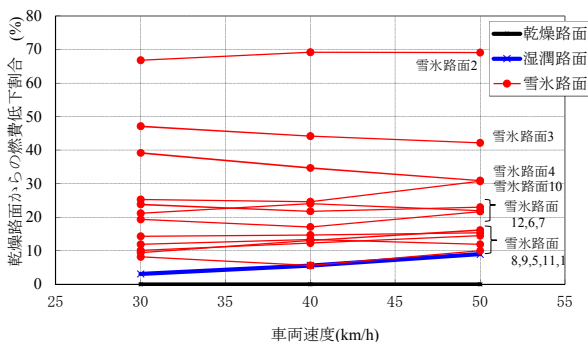


図-5 乾燥路面からの各雪氷路面の燃費低下割合

(2) IRI_aの値と走行抵抗値および燃費の関係

IRI_a値はその値が大きいほど路面の平坦性が悪く、乗りごちが悪いと評価される指標である。実験を行った区間のアスファルト乾燥路面でのIRI_aは1.4であるが、その路面上に雪氷路面を作成する場合には多少なりとも凹凸が生じるため、IRI_aは悪化する(大きくなる)傾向を示す。つまり試験を行った雪氷路面のIRI_aは、アスファルト乾燥路面でのIRI_aよりも値が大きくなっている。

試験を行った様々な路面のIRI_a測定値(基底長10m)と、大型車の燃費の関係について図-6に示す。雪氷の存在によってIRI_a値が大きくなった路面ほど燃費が悪くなる傾向が読み取れる。

つまり雪氷の存在によるIRI_a値の変化は燃費に影響を及ぼし、IRI_a値が大きいほど走行抵抗が大きくなり、燃費が悪化する関係にあるといえる。

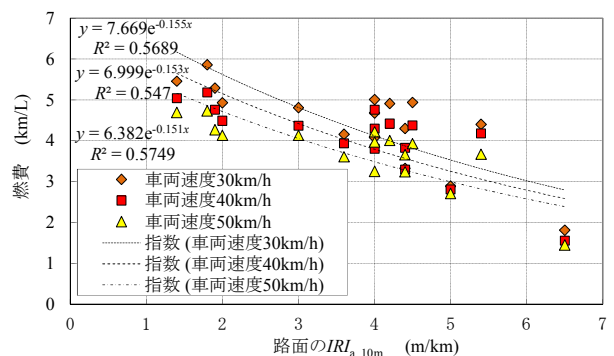


図-6 路面のIRI_a値と燃費の関係

(3) 路面上の雪密度や雪質と燃費の関係

試験を行った様々な雪氷路面の雪密度と燃費の関係について図-7に示す。雪密度が低くなれば燃費が悪くなる傾向を示すことがわかる。つまり路面雪氷の密度が低く新雪に近い状態であれば燃費は悪化する。燃費はタイヤが接触する部分にある雪の密度、つまり雪質に影響を受けていることが確認できたといえる。密度の低い雪はタイヤの進行方向のエネルギーを吸収損失させるものと理解される。

次に2章(1)節b)で定義した雪区分値と燃費の関係について図-8に示す。雪区分値はその値が0の時は路面に雪がない乾燥路面や湿潤路面を意味し、大きくなるにつれ路面に雪密度が低い雪が存在していることを示す指標である。図-8から雪区分値が大きくなるにつれ燃費は悪化することが分かる。

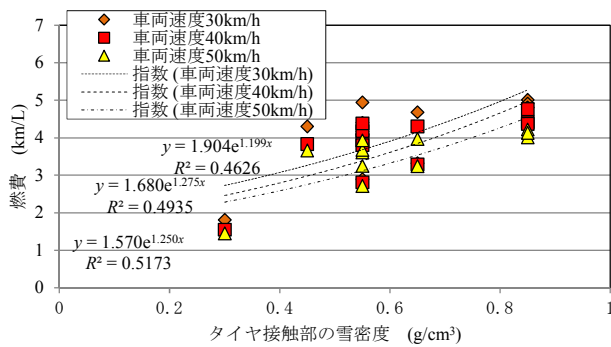


図-7 雪密度と燃費の関係

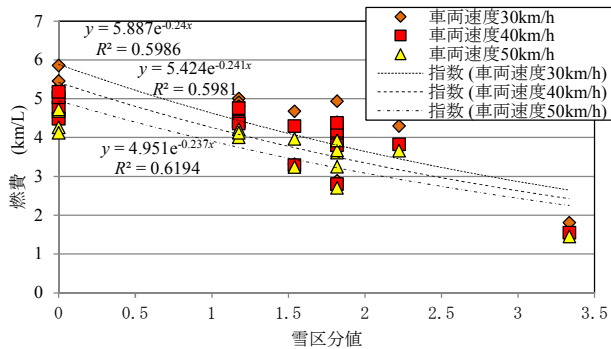


図-8 雪区分値と燃費の関係

(4) 路面雪氷が燃費に及ぼす影響の定量化手法の考察

a) 雪氷路面による燃費への影響の定量化

既往の研究によれば、燃費に影響を与える路面に関する要因としては、以下の項目が挙げられている。

- 1) 路面の平坦性(IRI)
- 2) 路面のテクスチャ
- 3) 舗装材料の質(コンクリートとアスファルト)
- 4) 段差

本研究での試験結果を踏まえると、積雪寒冷地の場合には上記の項目のほかに、路面に影響を及ぼす要因として以下の項目を加える必要があることを指摘できる。

- 5) 路面雪氷による平坦性IRI_aの悪化
- 6) 路面雪氷の密度や質

そこで燃費を従属変数とし、走行速度、IRI_a、雪区分値を説明変数とした非線形重回帰分析および線形重回帰分析を行った。重回帰分析に際しては、各説明変数の指数関数または一次関数を結合した複数の重回帰モデルを設定し比較検討した。具体的には走行速度、IRI_a、雪区分値の3つの説明変数の一部を指数関数とし、他の説明変数は一次関数として結合したモデルなどを設定した。3つの説明変数全てを一次関数とした線形重回帰分析も行った。解析に統計解析ソフトSPSSを使用した。

様々にモデルを比較した結果、速度の指数関数にIRI_aと雪区分値の一次関数を線形結合させる式が最も決定係数が高く、実測値に近い値を得られると判断した。一連の非線形重回帰分析の結果得られた重回帰式を式(1)に示す。

$$Fe = 6.849 \cdot \exp(-0.008 \cdot V) - 0.06821 \cdot IRI_a - 0.7868 \cdot SNOW + 0.2523 \quad (1)$$

ここに、Fe: 燃費(km/L)

V: 速度(km/h)

IRI_a: 対象区間のIRI_a値(m/km)

SNOW: 雪区分値(雪密度の逆数、雪がない路面では0とする)

なお、この式の決定係数R²は0.671であり、この非線形重回帰式は当てはまりが良いと判断できる。各説明変数の係数の符号に着目すると、車両速度、IRI_a、雪区分値の増加はいずれも燃費の悪化方向に作用しており、実験結果とも整合がとれた妥当な式であると評価できる。

また、式(1)を用いて算定した燃費推定値と、燃費実測値の対応関係を図-9に示す。式(1)によって算定された燃費は実際の計測燃費と非常に良い対応関係にあり、算定値と実測値R²値は0.67、誤差の平均は0.14となっており、精度良く算定できる式であると確認できる。この式を用いれば、様々な雪質の雪氷路面において、走行速度、IRI_a、雪質に応じた燃費を計算することが可能になる。従来はその影響度合いが明確でなかった、路面に存在する雪氷が燃費に及ぼす影響を定量的に表現した式であると考えられる。

式(1)を用いることで、様々な雪氷路面を大型車が走行する場合の走行速度、IRI_a、雪質に応じた燃費を計算することが可能となる。

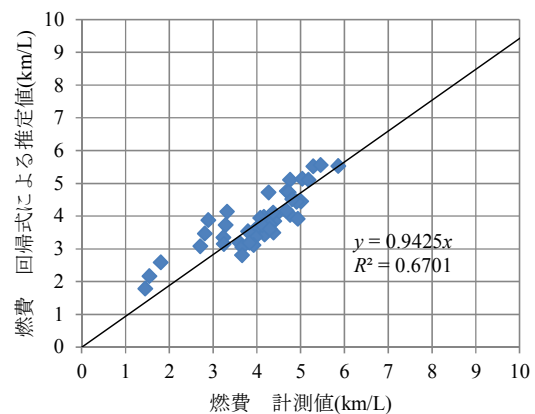


図-9 燃費実測値と重回帰式による推定値の関係

b) 乾燥路面からの燃費の低下割合の定量化

次に路面が雪氷路面の場合に、乾燥路面に比べてどの程度燃費が低下したか、その低下割合を定量的に把握できる式を検討した。乾燥路面からの低下割合として示すことで、車種やエンジン性能などによる燃費の絶対値に左右されることなく雪氷の影響を一般化して表現できるのではと考えたためである。

図-5に乾燥路面からの燃費の低下割合をグラフで示してあるが、このデータに対して従属関数を乾燥路面から燃費低下割合として線形重回帰分析を行った。その結果

得られた重回帰式を式(2)に示す。

$$A=0.045 \cdot V+1.688 \cdot IRI_a+26.97 \cdot SNOW-26.60 \quad (2)$$

ここに、 A : 乾燥路面からの燃費低下割合(%)
 V : 速度(km/h)
 IRI_a : 対象区間の IRI_a 値(m/km)
 $SNOW$: 雪区分値(雪密度の逆数、雪がない路面では0とする)

各説明変数の係数の符号に着目すると、車両速度、 IRI_a 、雪区分値の増加はいずれも燃費の低下割合が増える方向に作用しており、実験結果とも整合性がとれた妥当な式であると評価できる。

重回帰式(2)の精度を確認するために、重回帰式(2)を用いて算定した燃費低下割合推定値と、燃費低下割合実測値の対応関係を図-10に示す。式(2)によって算定された燃費低下割合は、実測の燃費低下割合と良い対応関係にあり、算定値と実測値 R^2 値は0.691、誤差の平均は0.424となっており、精度良く算定できる式であると確認できる。この式を用いれば様々な雪質の雪氷路面において、走行速度、 IRI_a 、雪質に応じた大型車一般の燃費低下割合を計算することが可能になると考えられる。

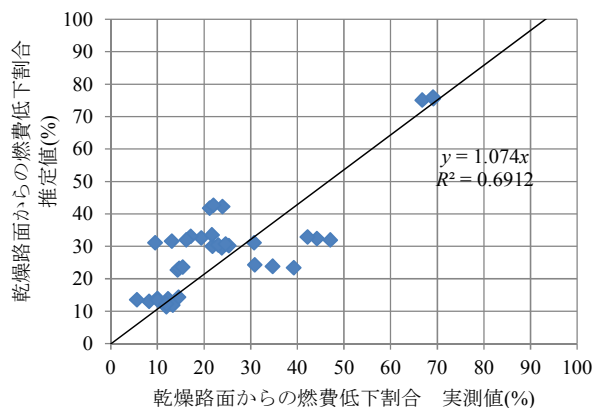


図-10 燃費の低下割合実測値と推定値の関係

4. 結論

本研究で得られた知見および成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 雪氷が存在する路面では、雪氷が存在しない路面と比べ燃費が低下する傾向を示す。
- (2) 実験データでは、路面雪氷によって燃費が最大で70%程度の低下を示し、供用中の幹線道路でみられるレベルの雪氷路面の場合でも約5~50%程度、平均で21%の低下を示した。路面の雪氷が燃費に及ぼす影響は無視できないほど大きいと評価できる。
- (3) 雪氷の存在によって、 IRI_a は大きくなる(悪化する)傾向を示す。雪氷の存在による IRI_a 値の変化は燃費にも影

響を及ぼし IRI_a 値が大きいほど燃費が悪化する関係にある。

(4) 雪氷路面における燃費は、雪の密度などの雪質にも影響され、路面雪氷の雪密度が低いほど燃費が悪化する傾向を示す。

(5) 雪氷が存在し、雪密度が低く軟らかいほど数値が大きくなる雪区分値を提案した。この指標を設定することで、燃費と路面雪氷の相関を定量的に把握できるようになる。

(6) 雪氷路面における燃費および燃費の低下割合を定量的に算定する式として、車両速度 V 、平坦性 IRI 、雪区分値 $SNOW$ を変数とする式を導出した。これまで定量的に示されていなかった、雪氷の存在による燃費への影響を定量的に把握する一手法として提示するものである。

最後に、本研究は大型車での実験結果を述べたものであるが、乗用車での実験も別途実施している。また一連の実験から得られた知見を活用することで、除雪作業による雪氷除去の効果を、燃費の改善という具体的尺度によって経済性の面から評価できるようになると考えられる。これらの検討結果は別途報告したいと考える。

参考文献

- 1) Taylor, G. W.: Additional Analysis of the Effect of Pavement Structure Type on Truck Fuel Consumption, Cement Association of Canada, 2002.
- 2) Taylor, G. W. and Patten, J. D.: Effect of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption Phase III, National Research Council Canada Technical Report, CSTT-HVC-TR-068, 2006.
- 3) 吉本徹、風戸崇之、熊田一彦、笠原篤：高速道路での重量車の転がり抵抗の測定と燃費に及ぼす影響に関する研究、土木学会舗装工学論文集、第14巻、pp.203-210, 2009.
- 4) 川上篤史、寺田剛、久保和幸、石垣勉：タイヤ/路面転がり抵抗と舗装の路面性状に関する検討、土木学会第68回年次学術講演会概要集、V-617, pp.1233-1234, 2013.
- 5) Ross, F. R.: Effect of pavement roughness on vehicle fuel consumption, Transportation Research Record, No.846, pp.1-6, 1982.
- 6) Amos, D.: Pavement Smoothness and Fuel Efficiency: An Analysis of the Economic Dimensions of the Missouri Smooth Road Initiative, Missouri Department of Transportation Organizational Results, OR07-005, 2006.
- 7) 日本雪氷学会：日本雪氷学会積雪分類、日本雪氷学会誌雪氷、60巻5号、pp.419-436, 1998.
- 8) 前野紀一、成田英器、西村浩一、成瀬廉二：道路雪氷の構造と新分類、低温科学物理編、46、pp.119-133, 1987.
- 9) 富山和也、川村彰、石田樹、中田孝一：地方自治体の道路維持管理実態と市街地道路の簡易平坦性モニタリング、土木学会第66回年次学術講演会概要集、V-408, pp.815-816, 2011.
- 10) 日本規格協会：自動車—燃料消費率試験JIS D 1012-1997, 1997

除雪機械の老朽化リスクと見える化について

大上 哲也¹・木下 豪²・中村 隆一¹

¹北海道開発局 事業振興部 機械課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

²北海道開発局 室蘭開発建設部 (〒051-8524 北海道室蘭市入江町1番地14) .

積雪・寒冷地域に住む人々にとって冬期の道路交通確保は不可欠であり、その手段である除雪には非常に高いニーズがある。しかし、近年は除雪機械の老朽化に伴う故障件数の増加や、修理期間の長期化など、潜在していた除雪機械の老朽化リスクが表面化している。

本稿では、除雪機械の老朽化の影響を定量的に確認したほか、道路ネットワークとリンクした老朽化リスクの見える化について検討した。

キーワード 除雪機械，老朽化の影響，老朽化リスク，見える化

1. はじめに

積雪・寒冷地域に住む人々の生活にとって冬期の円滑な道路交通の確保は必要不可欠であり、冬期の維持管理に対しては非常に高いニーズがある。その冬期維持管理の主体である除雪は、主に除雪専用機械や建設機械（以下「除雪機械」という）によって施工しており、高い信頼性が求められている。

しかし、近年の除雪機械は使用年数が大幅に伸び、老朽化に伴う故障件数の増加や、部品調達の遅延等による修理期間の長期化など、潜在していた老朽化リスク（除雪機械の老朽化に伴う除雪作業に影響する故障リスク）が表面化している。¹⁾

本稿では、除雪機械の老朽化リスクを共通認識とし、今後の除雪機械体制の参考とすることを目的に、除雪機械の老朽化の影響と、道路ネットワークとリンクした除雪機械老朽化リスクの見える化の検討について報告する。

2. 除雪機械を取り巻く状況

(1) 管理区間延長と除雪機械台数

北海道開発局（以下「開発局」という）では、一般国道約6,300km、高規格幹線道路約400kmを管理しており、平成10年7月には北海道で初めて高規格幹線道路が供用するなど年々管理区間延長が伸びている。また、除雪に必要な除雪機械は、平成29年度では約1,000台を保有しており、管理区間延長の延伸などに伴い、直近の20年間で約90台増えている。

今後も高規格幹線道路等の新規供用が予定されており、除雪機械の増強が想定される。

(2) 除雪機械の購入単価

平成26年4月から消費税率が上昇（5%→8%）したほか、大気環境の改善を目的とした自動車排出ガス規制（表-1）が年々強化されており、ベースとなる機械のモデルチェンジや規格の統合などにより、除雪機械の購入単価は直近の20年間で平均50%程度上昇している。

今後も消費税率の上昇（8%→10%）などが予定されており、更なる単価上昇が想定される。

表-1 近年の自動車排出ガス規制一覧

トラック系	建設機械系
平成16年規制(新短期規制)	平成18年規制(3次排対)
平成17年規制(新長期規制)	平成23年規制(4次排対_前期)
平成21年規制(ポスト新長期規制)	平成26年規制(4次排対_後期)
平成28年規制(ポストポスト新長期規制)	

(3) 除雪機械の老朽化の進行

継続的な除雪体制を確保するためには、老朽化した除雪機械を更新（購入）する必要がある。しかし、前述した除雪機械の台数増や単価上昇により、現状の購入予算では老朽化防止に必要な更新台数が確保できていない。

具体的には、使用年数10年を超える除雪機械の保有台数は、平成9年度は全体の22%であったが、平成29年度は51%に増えている。さらに、使用年数15年を超える除雪機械も平成19年度から現れ、平成29年度には全体の21%を占めるなど、老朽化が著しく進行している（図-1）。

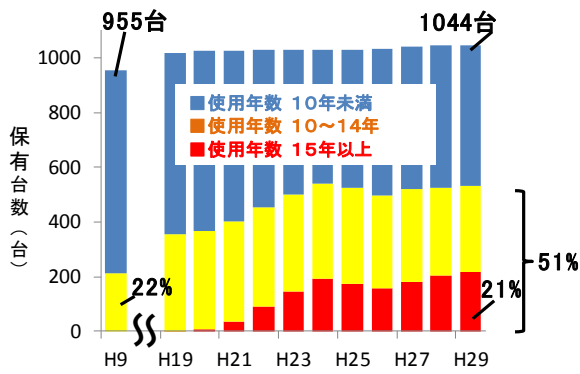


図-1 除雪機械台数と使用年数割合の推移

3. 除雪機械の老朽化の影響

除雪機械の老朽化の影響を確認するため、過去5ヶ年の除雪シーズン中に発生した故障件数と不稼働日数を使用年数別に調査した。なお、除雪機械台数は使用年数毎に大きく異なるため、1台当たりの故障件数及び不稼働日数として整理した。使用年数別の調査対象台数を図-2に示す。

この結果、故障件数及び不稼働日数は、使用年数に伴い右肩上がりに増加しており、決定係数も相関関係を示していることから、除雪機械の老朽化の影響を定量的に確認した(図-3, 4)。さらに、機械構造が近似している機種毎に再整理した結果、より高い決定関係を示した(図-5, 6, 7, 8, 9, 10)。なお、使用年数別の不稼働日数は、故障件数に比べて決定係数が低く、使用年数10年を超えてからのバラツキが大きいことが散布図から読み取れる。

また、今回調査した故障内容には、過去には無かった除雪機械のフレームの腐食、破断など大規模な故障も生じていた(写真-1)。

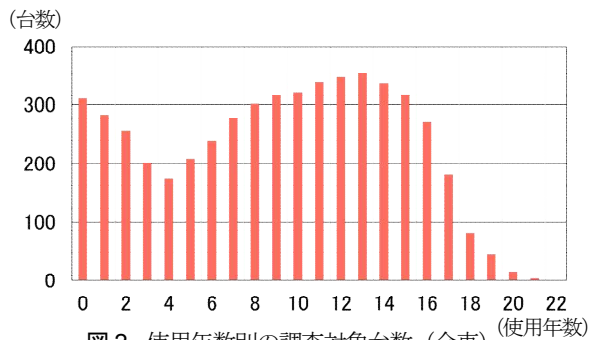


図-2 使用年数別の調査対象台数 (全車)

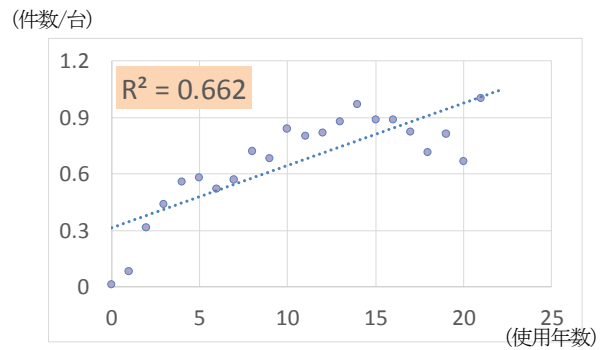


図-3 使用年数別の1台当たり故障件数 (全車)

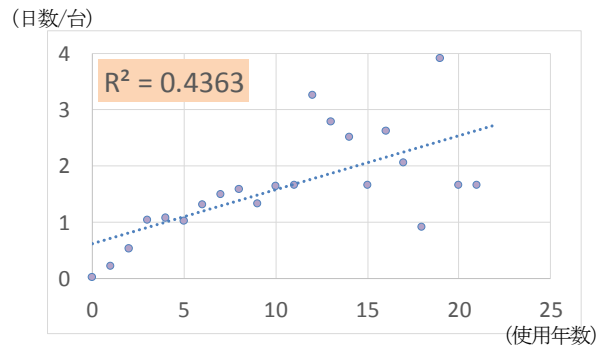


図-4 使用年数別の1台当たり不稼働日数 (全車)

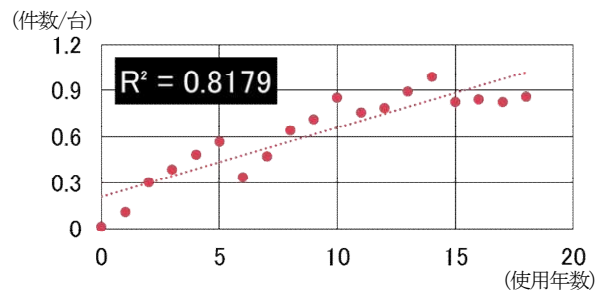


図-5 使用年数別の1台当たり故障件数 (除雪トラック)

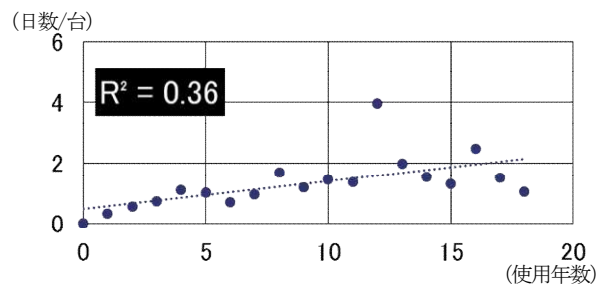


図-6 使用年数別の1台当たり不稼働日数 (除雪トラック)

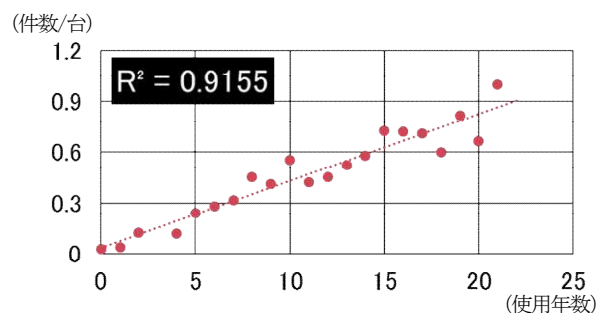


図-7 使用年数別の1台当たり故障件数
(除雪グレーダ・除雪ドーザ)

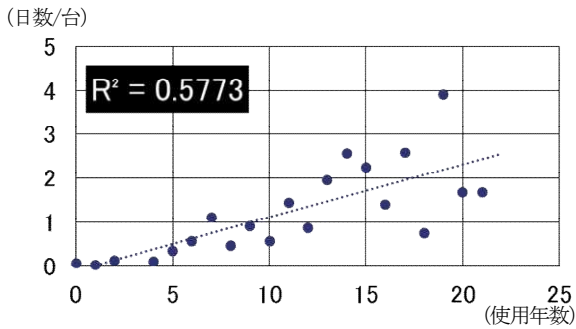


図-8 使用年数別の1台当たり不稼働日数
(除雪グレーダ・除雪ドーザ)

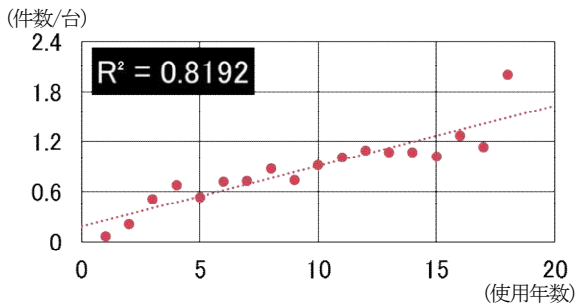


図-9 使用年数別の1台当たり故障件数
(ロータリ除雪車・小形除雪車)

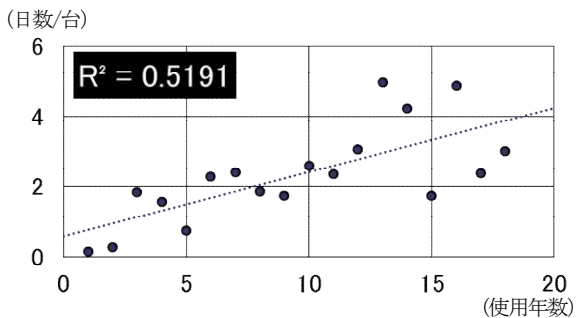


図-10 使用年数別の1台当たり不稼働日数
(ロータリ除雪車・小形除雪車)



写真-1 大規模故障事例 (フレーム破断)

4. 除雪機械老朽化リスクの評価

(1) 除雪機械老朽化リスク

除雪機械に故障が生じた場合、修理に必要な部品を確保する必要がある。この部品の供給年限はガイドライン²⁾に示されており、除雪機械と本体構造が同じであるモーターグレーダなどの建設機械は10年とされ、それ以降の納期等については個別相談とされている。また、除雪機械メーカーに部品の安定供給について聞き取りした結果は10～15年程度であった。このことから、使用年数が長くなった除雪機械は部品調達に時間を要する可能性が高く、修理（不稼働）期間の長期化の要因だと想定される。

除雪機械の故障は、即日の修理が可能であれば、除雪作業への影響を最小限に抑えることができる。しかし、除雪機械の修理（不稼働）期間が2日以上の場合、その間に除雪が必要であっても作業ができないことから、除雪機械の不足による作業遅延など人々の生活への影響が懸念される。

このような除雪機械の老朽化に伴う除雪作業に影響する故障リスクを「除雪機械老朽化リスク」と定義することとした。

(2) 除雪機械老朽化リスクの評価方法

除雪機械の老朽化リスクは、使用年数を指標とし、除雪機械1台毎に評価した（以下、「基本点」という）。具体的には、修理に必要な部品の供給年限を参考に、部品供給が確実な使用年数10年未満、部品供給の遅れが想定される15年未満、部品供給の長期化が想定される15年以上に大別している。さらに、除雪工区（新雪除雪における除雪機械の梯団）毎の老朽化リスクを評価するため、梯団の除雪機械の基本点を平均し、除雪工区としての評価点数を算出した。

また、基本点と評価点数には点数に応じた色を定め、視覚的にも老朽化リスクを表現することとした（表-2）。

【除雪機械毎の基本点及び色】

使用年数10年未満	: 1点 (青色)
使用年数10年以上15年未満	: 3点 (黄色)
使用年数15年以上	: 5点 (赤色)

【除雪工区毎の評価点数の範囲と色】

評価点数	: 1.0～1.7 (青色)
評価点数	: 1.8～2.5 (緑色)
評価点数	: 2.6～3.4 (黄色)
評価点数	: 3.5～4.2 (橙色)
評価点数	: 4.3～5.0 (赤色)



表-2 除雪機械老朽化リスクの評価 (例)

除雪機械				除雪工区(梯団)	
1番車		2番車		合計点	評価点(平均)
使用年数	基本点	使用年数	基本点		
1	1(青)	11	3(黄)	4	2.0(緑)
2	1(青)	12	3(黄)	4	2.0(緑)
3	1(青)	13	3(黄)	4	2.0(緑)
4	1(青)	14	3(黄)	4	2.0(緑)
5	1(青)	15	5(赤)	6	3.0(黄)
6	1(青)	16	5(赤)	6	3.0(黄)
7	1(青)	17	5(赤)	6	3.0(黄)
8	1(青)	18	5(赤)	6	3.0(黄)
9	1(青)	19	5(赤)	6	3.0(黄)
10	3(黄)	20	5(赤)	8	4.0(橙)

(3) 除雪機械老朽化リスクの評価結果

開発局が保有する新雪除雪機械を対象として、平成29年度時点の除雪工区毎の老朽化リスクを評価した。

この結果、開発局の除雪工区のうち黄色評価以上(評価点数2.6~5.0)の老朽化リスクを有している除雪工区は42%であり、約半数に迫る。また、評価結果は開発建設部毎にバラツキがあり、札幌開発建設部は黄色評価以上(評価点数2.6~5.0)の工区が57%を占めるなど最も老朽化リスクが高い(表-3)。これは除雪グレードが多く配置されているためであり、除雪グレードは世界的な規格統一によるモデルチェンジのため、更新が3年間滞ったことが要因となっている。

表-3 除雪機械老朽化リスク評価の結果 (平成29年度)

建設部	除雪工区	除雪機械老朽化評価					新雪除雪機械台数 (内: 除雪グレード)
		青	緑	黄	橙	赤	
札幌	52	10 (19%)	12 (23%)	10 (19%)	10 (19%)	10 (19%)	128 (57)
函館	30	9 (30%)	7 (23%)	8 (27%)	3 (10%)	3 (10%)	52 (4)
小樽	27	12 (44%)	6 (22%)	5 (19%)	2 (7%)	2 (7%)	55 (4)
旭川	37	8 (22%)	10 (27%)	12 (32%)	5 (14%)	2 (5%)	77 (11)
室蘭	27	9 (33%)	4 (15%)	8 (30%)	4 (15%)	2 (7%)	49 (4)
釧路	31	9 (29%)	10 (32%)	9 (29%)	2 (6%)	1 (3%)	62 (3)
帯広	28	17 (61%)	7 (25%)	2 (7%)	1 (4%)	1 (4%)	50 (4)
網走	34	11 (32%)	11 (32%)	8 (24%)	3 (9%)	1 (3%)	71 (4)
留萌	15	4 (27%)	5 (33%)	3 (20%)	3 (20%)	0 (0%)	32 (1)
稚内	14	4 (29%)	5 (36%)	5 (36%)	0 (0%)	0 (0%)	29 (1)
計	295	93 (32%)	77 (26%)	70 (24%)	33 (11%)	22 (7%)	605 (93)

※老朽化評価の構成比第1位部分を網掛けにした

(4) 将来的な除雪機械老朽化リスクの推定

今後の除雪体制の参考とするため、平成39年度時点における老朽化リスクをシミュレーションした。

具体的には、平成29年度の機械購入予算が平成39年度まで同額で推移し、使用年数が長い除雪機械の順に更新した場合の推定であり、将来的な機械単価の増額(消

費税率の上昇、新たな自動車排出ガス規制等)や、高規格幹線道路等の供用に伴う必要な除雪機械の増強などは考慮していない。

この推定の結果、老朽化リスクが黄色評価以上(評価点数2.6~5.0)の工区は46%となり、平成29年度時点の評価結果42%と比較すると、老朽化リスクがより高くなる(表4、図-11)。

なお、老朽化リスクが著しい橙色以上(評価点数 3.5~5.0)以上の除雪工区は 55→40 工区に減少しているが、一方で、青色が構成比1位である建設部は 5→2 建設部となり、黄色が構成比1位である建設部は 2→6 建設部となっている。実際の更新機械選定の際には、使用年数のみでなく、個別機械の状態や稼働時間も考慮するため、橙色や赤色の工区数が今回の推定より減らない要因となり得る。

また、平成25年度及び平成26年度の補正予算により大量に更新した除雪機械の使用年数が15年を超える平成41年度以降には老朽化リスクが著しく上昇することが想定される(図-12)。

表-4 除雪機械老朽化リスク評価の推定 (平成39年度)

建設部	除雪工区	除雪機械老朽化評価					新雪除雪機械台数 (内: 除雪グレード)
		青	緑	黄	橙	赤	
札幌	52	19 (37%)	15 (29%)	13 (25%)	4 (8%)	1 (2%)	128 (57)
函館	30	9 (30%)	8 (27%)	10 (33%)	0 (0%)	3 (10%)	52 (4)
小樽	27	5 (19%)	8 (30%)	12 (44%)	1 (4%)	1 (4%)	55 (4)
旭川	37	12 (32%)	13 (35%)	8 (22%)	4 (11%)	0 (0%)	77 (11)
室蘭	27	11 (41%)	4 (15%)	7 (26%)	4 (15%)	1 (4%)	49 (4)
釧路	31	6 (19%)	10 (32%)	10 (32%)	4 (13%)	1 (3%)	62 (3)
帯広	28	8 (29%)	2 (7%)	13 (46%)	3 (11%)	2 (7%)	50 (4)
網走	34	8 (24%)	7 (21%)	11 (32%)	2 (6%)	6 (18%)	71 (4)
留萌	15	3 (20%)	6 (40%)	5 (33%)	1 (7%)	0 (0%)	32 (1)
稚内	14	2 (14%)	5 (36%)	5 (36%)	0 (0%)	2 (14%)	29 (1)
計	295	83 (28%)	78 (26%)	94 (32%)	23 (8%)	17 (6%)	605 (93)

※老朽化評価の構成比第1位部分を網掛けにした

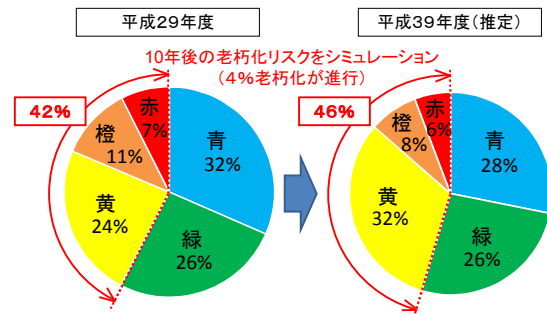


図-11 老朽化リスク推移のシミュレーション

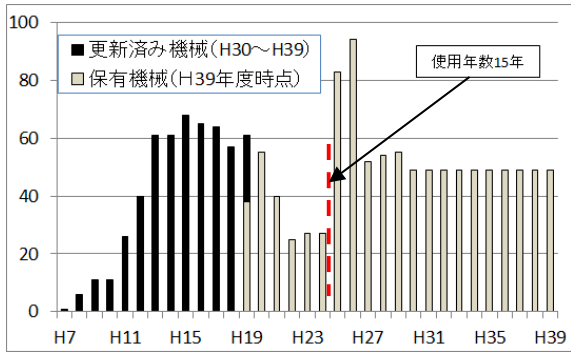


図-12 使用年数別の除雪機械台数 (平成 39 年度)

(1) 交通量とのリンクによる見える化

道路ネットワークにおける路線重要度の指標を交通量と仮定し、除雪機械の老朽化リスクの評価指標と同様に数値化及び階層別に配色した。

さらに、除雪機械の老朽化リスクの評価結果と同じ図に重ね合わせることで、同じ工区における除雪機械の老朽化リスクと道路ネットワークの重要度の対比を視覚的にも確認できるよう作図した。

札幌開発建設部管内の一般国道12号及び275号を対象とした実施例を図-13に示す。

5. 除雪機械の老朽化リスクの見える化

除雪機械の老朽化リスクを共通認識とするため、除雪機械が担保している道路ネットワークとリンクさせた見える化について検討した。

【除雪工区毎の交通量範囲と路線重要度の色】

日交通量：7,000～13,000 台/日 (青色)	『ローリスク』 ↓ 『ハイリスク』
日交通量：13,001～19,000 台/日 (緑色)	
日交通量：19,001～25,000 台/日 (黄色)	
日交通量：25,001～31,000 台/日 (橙色)	
日交通量：31,001～37,000 台/日 (赤色)	

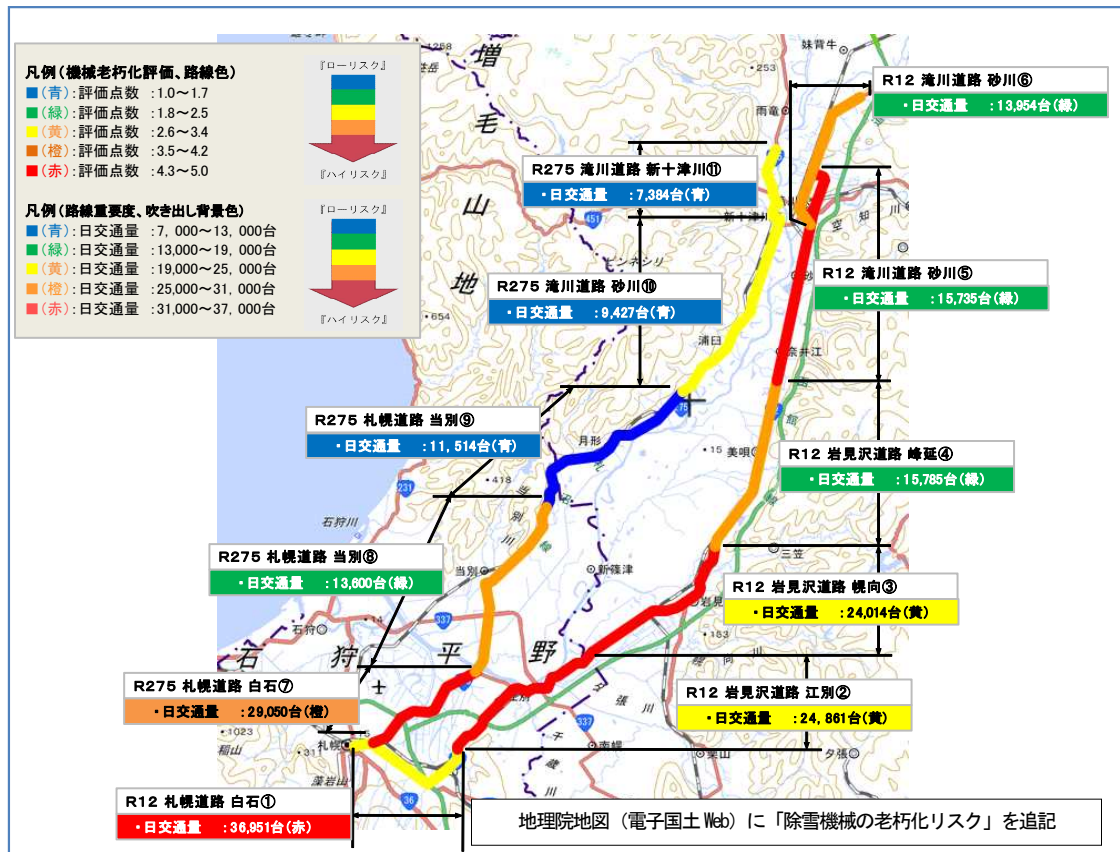


図-13 道路ネットワークとリンクした除雪機械の老朽化リスクの見える化(例)

(2) 冬期通行規制とのリンクによる見える化

道路ネットワークにおける路線重要度の指標を暴風雪災害による冬期通行規制と仮定し、過去10年間の実績を調査し、除雪機械の老朽化リスクの評価指標と同様に階層別に配色した。なお、冬期通行規制は事務所間の除雪応援態勢が想定されるため事務所毎に整理している。

さらに、各工区の除雪機械老朽化リスクの評価を事務所毎に再整理し、冬期通行規制の実績と併せて作表することで、事務所毎の老朽化リスクと道路ネットワークの重要度を対比した(表-5)。

【事務所毎の通行規制回数範囲と路線重要度の色】	
規制回数： 0～ 43 回/10年	(青色)
規制回数： 44～ 87 回/10年	(緑色)
規制回数： 88～ 131 回/10年	(黄色)
規制回数： 132～ 175 回/10年	(橙色)
規制回数： 176～ 219 回/10年	(赤色)

【事務所毎の通行規制時間範囲と路線重要度の色】	
規制時間： 0～ 1,176 H/10年	(青色)
規制時間： 1,177～ 2,353 H/10年	(緑色)
規制時間： 2,354～ 3,530 H/10年	(黄色)
規制時間： 3,531～ 4,707 H/10年	(橙色)
規制時間： 4,708～ 5,884 H/10年	(赤色)

【事務所毎の老朽化評価点数の範囲と色】 『ローリスク』	
評価点数： 1.0～1.7	(青色)
評価点数： 1.8～2.5	(緑色)
評価点数： 2.6～3.4	(黄色)
評価点数： 3.5～4.2	(橙色)
評価点数： 4.3～5.0	(赤色)

『ハイリスク』

(3) 見える化についての考察

図表の作成により、除雪機械の老朽化リスクを実際的に表現することができた。また、路線重要度(交通量、冬期通行規制)が高い工区(事務所)の一部に、老朽化リスクが高い除雪機械が配置されており、優先して安定した除雪機械力を担保すべき道路ネットワークに対して、実際の機械配置が必ずしも除雪機械老朽化リスクを考慮していない現状を確認した。

今後は、除雪機械老朽化リスクを共通認識とし、老朽化リスクを考慮した除雪機械の再配置や、除雪に関する路線重要度の指標について更なる検討が必要である。

6. まとめ

今後の除雪体制の参考とすることを目的に、除雪機械

の老朽化の影響と、老朽化リスクの見える化について検討した。

この結果、除雪機械の老朽化の影響を定量的に整理した。また、部品供給年限を参考に除雪機械老朽化リスクの評価を行い、将来的な老朽化リスクも推定した。さらに、道路ネットワークとリンクさせた見える化について検討を進めた。

今後も除雪機械の老朽化リスクを共通認識とするため、老朽化リスクの見える化について検討を重ねる所存である。

表-5 事務所毎の冬期通行規制状況及び老朽化評価

建設部	事務所	通行規制		老朽化評価(点数)	
		回数(回)	時間(H)		
札幌	札幌	28	268	3.07	黄
	岩見沢	8	309	3.24	黄
	千歳	17	156	3.00	黄
	滝川	5	298	2.83	黄
	深川	53	703	2.38	緑
函館	函館	19	111	2.79	黄
	八雲	2	58	2.40	緑
	江差	4	27	2.08	緑
小樽	小樽	17	219	2.80	黄
	倶知安	24	168	2.24	緑
	岩内	0	0	1.71	青
旭川	旭川	116	2,052	2.64	黄
	士別	24	366	2.52	緑
	富良野	3	50	2.09	緑
室蘭	苫小牧	21	140	2.60	黄
	室蘭	5	72	3.00	黄
	有珠	8	65	1.00	青
	浦河	27	447	3.29	黄
	日高	29	456	2.60	黄
釧路	釧路	9	117	2.08	緑
	弟子屈	144	2,940	2.76	黄
	中標津	163	4,822	1.86	緑
	根室	15	216	2.71	黄
帯広	帯広	58	923	1.89	緑
	広尾	31	612	1.89	緑
	足寄	12	227	1.71	青
網走	北見	82	1,488	2.50	緑
	網走	218	5,882	2.55	緑
	遠軽	37	742	1.92	緑
	興部	20	288	1.50	青
留萌	留萌	9	82	2.23	緑
	羽幌	44	479	2.58	緑
稚内	稚内	29	471	2.41	緑
	浜頓別	31	418	1.50	青
計		1,312	25,670	-	-

※通行規制は平成20年～平成29年、老朽化評価は平成29年時点
 ※冬期通行規制ハイリスク箇所を太枠とした

参考文献

- 1) 北海道開発局事業振興部機械課ほか：北海道開発局が保有する除雪車の老朽化対策に関する取組について、第59回北海道開発技術研究発表会、20162
- 2) (一社)日本建設機械工業会：補修部品の供給に関するガイドライン

東北地方整備局における新たな雪庇処理車の検討

千田 育雄¹・中島 朋也²

¹東北地方整備局 東北技術事務所 施工調査・技術活用課 (〒985-0842 宮城県多賀城市桜木3-6-1)

²東北地方整備局 東北技術事務所 施工調査・技術活用課 (〒985-0842 宮城県多賀城市桜木3-6-1)

東北地方整備局では冬季山間部の雪崩防止対策として雪庇除去作業を行っており、平成7年度から雪庇処理車の導入により作業の安全性、効率化を図ってきた。

近年、老朽化による更新が必要となっているが、ベース車両であるホイール式バックホウは、排出ガス規制に対応した機械を国内メーカーが製造していないため、更新ができない状況となっていた。

本検討は、安全かつ効率的な雪庇除去作業を実施するための新たなベース車両を調査・選定し、現場での適応性調査を行い、その有効性を確認したものである。

キーワード 除雪機械, 雪崩対策, 雪庇処理

1. はじめに

積雪地域特有である雪崩は、隣接する道路を閉塞し利用者の生活や通行に支障をきたす自然災害である。

雪崩被害の抑制には、積雪斜面や道路構造物などに形成される雪庇、防護柵裏に堆積した雪の定期的な除去(除雪)が重要な作業である。

東北地方整備局管内で実施される雪庇除去作業では、ロングリーチ仕様のホイール式油圧ショベルをベース車両として専用バケットを装着させた、雪庇処理車を導入することにより、一般交通への影響を最小限に抑えながら、安全かつ効率的な雪庇除去作業を実施している。

しかし、現在は排出ガス規制の影響によるベース車両の製造・販売終了により、老朽化の進んだ機械の更新が大きな課題となっている。



写真2 不具合状況①



写真1 雪庇除去作業状況



写真3 不具合状況②

本検討は、今後の雪庇除去作業の安全性及び施工性確保の目的に、新たなベース車両を調査・選定し、実機による現場適応性調査を行ったものである。

2. 雪庇処理作業の現状

冬期間、多雪地帯の道路構造物は積雪の影響を大きく受ける。スノーシェッド入口やトンネル抗口、防護柵等の雪庇処理は、人力で実施してきたが作業環境が厳しく、かつ危険度も高く苦渋作業となっており、労働者不足とあいまって問題提起されていた。

これらを解消するため、東北地方整備局では平成7年度から雪庇処理車を導入して、雪庇処理作業の安全性向上、作業員の負担軽減及び効率化を図ってきた。(表1)

表1 雪庇処理車配備一覧表

配備事務所	配備出張所	配備工区	台数	導入年度
山形河川国道事務所	寒河江国道維持出張所	寒河江西工区	1	平成9年度
	米沢国道維持出張所	米沢西工区	1	平成14年度
酒田河川国道事務所	月山国道維持出張所	月山第1工区	1	平成7年度
		月山第2工区	1	平成13年度
郡山国道事務所	会津若松出張所	西会津工区	1	平成16年度
配備台数 計			5	

雪庇処理作業の大半は、図1に示すとおり雪崩・落石防護柵部で実施されており、雪庇処理作業箇所の98.8%を占めている。

東北地方整備局管内における雪庇処理作業は、防護柵部背面の除雪が主であり、堆積した雪の除去を行うことで雪崩被害の抑制を図っている。(図2、図3)

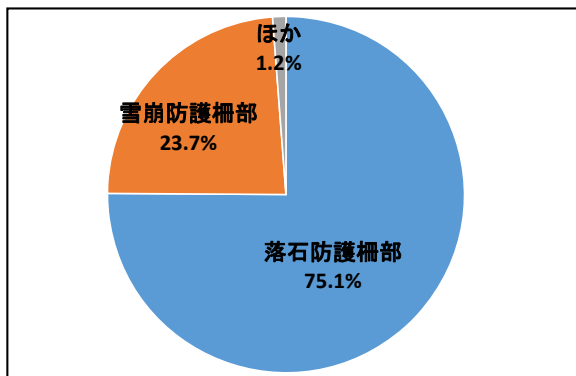


図1 雪庇処理作業の箇所別割合

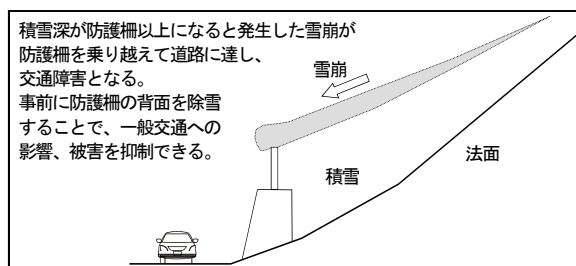


図2 雪崩被害の抑制

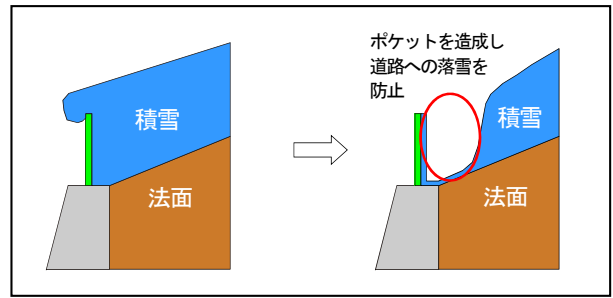


図3 作業イメージ

3. ベース車両機種選定

雪庇処理作業の主な作業が雪崩・落石防護柵裏側のポケット造成であり、雪庇処理作業を実施している箇所の防護柵の高さを調査した結果、6m以下が91%を占めているため、この高さを十分にクリアできる機械が必要となる。(図4)

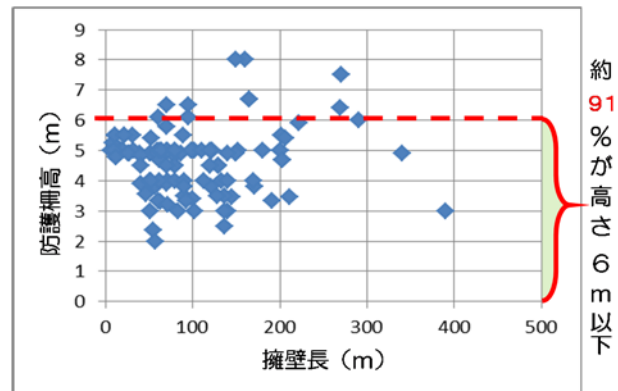


図4 防護柵高さ分布

また、機械オペレータのヒアリング調査により既存の雪庇処理車(以下、既存機)と変わらない形状・性能に加え、運転席がリフトアップする機能を有する機械が欲しいとの意見があがった。(表2)

表2 新たな雪庇処理車に求められる条件

	求められる条件	理由
前提条件	・4次排ガス規制をクリア	—
	・公道走行(車検取得)が可能	—
	・最大施工高が6m以上	—
ヒアリング	・走行部:ホイール式	現場間移動が必要
	・作業装置:ロングリーチ	高所雪庇除去作業が必要
	・アタッチメント:クラムシェルバケット式	既存機と同様の形状
	・キャビン(運転席)が昇降式	苦渋作業の解消

新たな雪庇処理車を設計開発することは莫大な費用・期間・労力を要し、現場への導入に遅れが生じることが懸念された。そのため、現在市販されている国内外の機械市場(建設業・鉄鋼業・解体業・農林業)を調査し、雪庇処理作業に活用可能なベース車両を選定することにより開発コスト及び導入期間等の低減を図ることとした。

国内外の機械市場を調査した結果、ドイツ製の解体工場等(鉄鋼業)において使用されているホイール式の機

械をベース車両として選定した。(写真4)



写真4 ドイツ製ホイール式の機械

4. 仕様比較

既存機と今回選定したホイール式の機械(以下、選定機)の主な仕様比較を表3に示す。

表3 既存機との仕様比較

機械名	既存機(雪底処理車)	選定機(ホイール式の機械)
外観写真		
全長×全幅×全高	11,820×2,490×3,730(mm)	9,700×2,550×3,250(mm)
質量	19,900kg	23,900kg
走行速度	34.0km/h	20.0km/h
旋回速度	13.0min ⁻¹	8.0min ⁻¹
排出ガス規制	第1次基準適合車	第4次基準適合車
昇降キャビン	無し	有り
アウトリガー	車両後方2本(計2本)	車両前後方各2本(計4本)
アタッチメント(バケット寸法)		
操作方式	走行:ペダル+前後進切り替えレバー 舵取:ハンドル 作業:作業用レバー	走行:ペダルのみ 舵取:ボタン 作業:作業用レバー

既存機に対し、選定機は質量が4t程度重く、走行速度が14km/h程度並びに旋回速度が5min⁻¹程度遅い。バケット寸法は既存機に比べ50cm程度短い仕様となっている。

5. 実機による現場適応性調査

(1) 調査内容

選定機は、冬期山間部での使用を前提としているものではない。よって、雪底処理機としての適応性を確認するため、既存機及び選定機とそれぞれ実機を用いた処理作業量及び作業処理時間を計測し、能力比較調査を実施した。

実施内容については、2名のオペレータにより既存機及び選定機で約1時間程度の雪底処理作業を実施し、作

業量と作業時間の計測を行った。(図5)

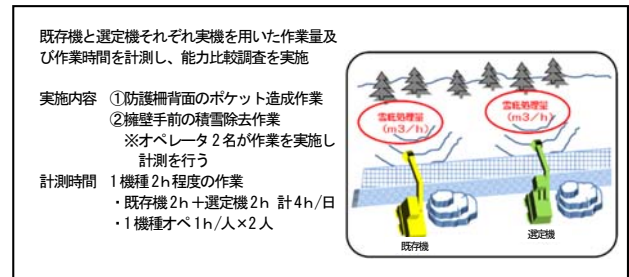


図5 現場適応性調査

また、調査終了後、機械オペレータ並びに現場代理人、道路管理者に対し、選定機の使用感及び意見・要望等のヒアリング調査を実施した。

(2) 調査場所の選定

調査場所は現在東北地方整備局管内において5台配備されている除雪工区のうち、調査場所の選定において以下の2カ所を選定した。

●月山第1工区(国道112号 67.4kp付近)

防雪柵の背面処理(ポケット造成)を頻繁に実施しており、且つ、既存機の導入が最初であった工区(※雪崩防護柵高 H=5.1m)

●西会津工区(国道49号 157.9kp付近)

背面処理のほか、運搬排雪にも使用している工区(※雪崩防護柵高 H=4.0m)

(3) 調査結果

上記2箇所における、調査状況(写真5、写真6)と調査結果を表4に示す。



写真5 防雪柵背面のポケット造成作業(選定機)



写真6 擁壁手前の積雪除去作業(選定機)

表4 各工区調査実施結果

	月山第1工区					
	オペレータA		オペレータB		平均	
	既存機	選定機	既存機	選定機	既存機	選定機
作業量 (m3)	173.72	143.28	208.17	189.53	—	—
作業時間 (min)	46.0	58.0	50.0	57.0	—	—
作業能力 (m3/h)	①226.6	②148.2	①249.8	②199.5	①238.2	②173.9
作業能力増減率 (②/①-1)*100	△ 34.6 %		△ 20.1 %		△ 27.0 %	
	西会津工区					
	オペレータC		オペレータD		平均	
	既存機	選定機	既存機	選定機	既存機	選定機
作業量 (m3)	134.10	53.43	134.10	120.12	—	—
作業時間 (min)	44.0	18.0	33.0	29.0	—	—
作業能力 (m3/h)	①182.9	②178.1	①243.8	②248.5	①213.4	②213.3
作業能力増減率 (②/①-1)*100	△ 2.6 %		1.9 %		0.0 %	

表4より作業能力を比較すると、西会津工区では既存機・選定機の能力は同等、月山第1工区では選定機の能力が27%程度劣る結果を得た。

また、オペレータ及び道路管理者を対象としたヒアリングの実施結果を表5に示す。

表5 ヒアリングまとめ

選定機の使用感
・アウトリガー4本支持は車体が安定する。
・リフトアップ運転室により、作業目線が変わり作業箇所が直視できることに加え、首への負担が軽減されるため非常に良い
選定機に対する意見・要望
・バケットを大きくすればなお良い → オプションにて対応可
・窓ガラスが曇る → 熱線ガラス対応可
・天窓用ワイパーが必要 → オプションにて対応可
・車体右側を確認するミラーが必要 → 右側ミラー対応可

6. 作業能力確保の検討

選定機の上部回転速度とバケット容量がカタログスペック値(表6)において既存機を下回っていることから、作業能力が劣ることは想定されたが、昇降キャビンによる作業部位の直視化により作業効率が改善され既存機と同等もしくは向上を期待したが、低下する結果となった。

そのため、既存機と同等以上の能力を確保するため、バケット容量に着目し、机上検討を行った。

オプション設定されている大きいバケットで作業すると想定し、作業能力を試算した。試算は同じサイクルタイムと仮定し、作業量は調査時バケットとオプションバケットの容積比(1.42)を乗じて算出した。試算及び既存機との比較結果を表7に示す。

表6 性能等比較

	バケット		回転速度	
	容積	容積比	回転数	速度比
既存機	① 1.5m3	—	①' 13min-1	—
選定機	調査時バケット ② 1.2m3	②/① 0.80	②' 8min-1	②'/①' 0.62
	オプションバケット ③ 1.7m3	③/② 1.42		

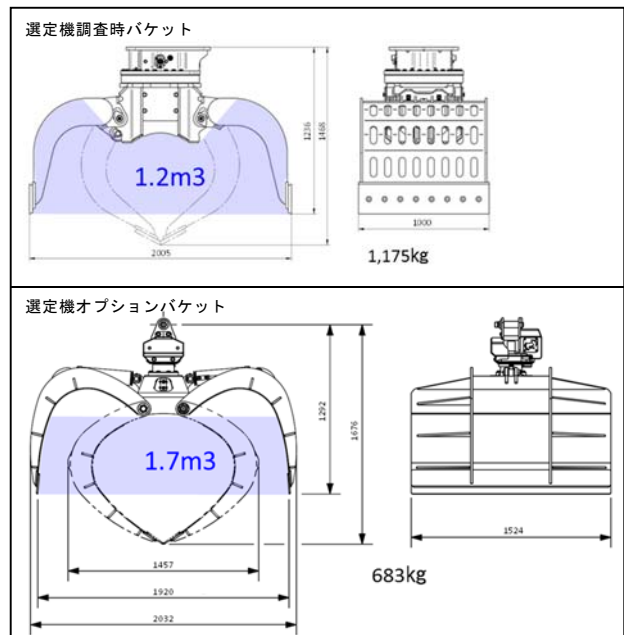


図6 バケット比較図

表7 既存機と選定機(オプションバケット)の試算結果比較

	月山第1工区					
	オペレータA		オペレータB		平均	
	既存機	選定機OP	既存機	選定機OP	既存機	選定機OP
作業量 (m3)	173.72	203.46	208.17	269.13	—	—
作業時間 (min)	46.0	58.0	50.0	57.0	—	—
作業能力 (m3/h)	①226.6	②210.5	①249.8	②283.3	①238.2	②246.9
作業能力増減率 (②/①-1)*100	△ 7.1 %		13.4 %		3.7 %	
	西会津工区					
	オペレータC		オペレータD		平均	
	既存機	選定機OP	既存機	選定機OP	既存機	選定機OP
作業量 (m3)	134.10	75.87	134.10	170.57	—	—
作業時間 (min)	44.0	18.0	33.0	29.0	—	—
作業能力 (m3/h)	①182.9	②252.9	①243.8	②352.9	①213.4	②302.9
作業能力増減率 (②/①-1)*100	38.3 %		44.7 %		42.0 %	

両工区ともに選定機が既存機を上回る結果となる。これはあくまで試算による能力であり、実機による作業試験で確認するべきであるが、本選定機を用いることによって既存機以上の作業能力が期待できると考えられる。

また、ヒアリングの結果、オペレーターや道路管理者からも作業視点が高くなることにより、上向き姿勢の苦渋性が改善される等好評を得ていることから、雪庇処理作業において実用性は十分にあると考えられる。

7. おわりに

既存の雪庇処理車は、平成17年3月をもって販売中止となっており、現在は交換部品も製造されていない。このため、今後の山間部主要路線の安全な道路交通に多大な影響を与えることが危惧されていた。本検討において選定した他分野で活用されている機械が雪庇処理作業に十分有効であることがわかった。早期に選定機が導入され、今後の冬期交通確保の一翼を担うことを期待する。

子供が安全に通学できるまちづくり ～ETC2.0プローブデータを活用した 生活道路の交通事故対策～

鈴木 桂太¹・吉原 悠介²・松本 優里¹

¹新潟国道事務所 調査課 (〒950-0912 新潟県新潟市中央区南笹口2-1-65)

²新潟国道事務所 管理第二課 (〒950-0912 新潟県新潟市中央区南笹口2-1-65)

効果的な生活道路の交通事故対策の実施に向け、新潟市中央区日和山地区を対象に、ETC2.0プローブデータから、速度超過箇所や急ブレーキ多発箇所を特定する等の分析を実施。分析を踏まえ、ライジングボラードや狭さく設置等の対策を行い、その後に実施したETC2.0プローブデータを用いた効果検証について報告する。

キーワード ビッグデータ、ETC2.0プローブデータ、生活道路

1. はじめに

新潟市中央区日和山地区では4つの小学校の統合に併せて、平成29年に日和山小学校の新校舎が完成した。地区内では以前から通過交通が多く、通学路指定が予定されている区間において事故の危険性が高いことが懸念されたため、学校、地元等から対策要望があがっていた。

そこで、平成28年度より新潟市がワークショップを開催し、住民と協働で交通事故対策について意見を出し合った。その際、新潟国道事務所ではETC2.0プローブデータを基に、日和山地区の分析結果を提供することで、住民との課題共有の円滑化や、効果的な対策検討を促進した。それらを踏まえ、対策エリアでは平成29年4月にライジングボラード（1年間の試験導入）、狭さく等が設置されている。また、新潟県警がゾーン30の導入し、生活道路における歩行者等の安全な通行を確保するため、区域（ゾーン）を定めて最高速度30km/hの速度規制を設けた。併せて平成28年3月に生活道路「対策エリア」に登録され、ゾーン内における速度抑制やゾーン内を抜け道として通行する行為の抑制等を行うこととした。

対策実施後にはETC2.0プローブデータを用いて効果検証を行い、その後開催された第4回ワークショップで分析結果を住民と共有した。本論文は、その取り組みと、ワークショップでも用いたETC2.0プローブデータの分析結果を報告するものである。

2. ワークショップに開催による住民との合意形成

日和山小学校交通安全対策ワークショップの開催にあたっては、新潟市、(公財)国際交通安全学会が事務局となり、日和山小学校・PTA、交通安全推進協議会、新潟柳都中学校、日和山セーフティスタッフ、コミュニティ協議会（入舟・栄・湊・豊照地区）、関係自治体、埼玉大学、新潟青陵大学、新潟県警、国土交通省が参加した。

参加者に提示する資料としては、対象エリア内の通過トリップ、走行速度、危険挙動（急ブレーキ、急ハンドル等）のデータであった。ワークショップの場でビッグデータを活用することにより、客観的に課題箇所等の情報を共有することができ、実際の交通状況をわかりやすく見える化することで、関係者の理解を促進することができた。

3. ETC2.0プローブデータによる課題の抽出と対策

(1) 課題の抽出と対策

ETC2.0プローブデータによる分析と、日和山小学校交通安全対策ワークショップでの意見をもとに実施された対策を紹介する。

生活道路「対策エリア」を通行するトリップのうち、対策エリア内にトリップエンドをもたない外外トリップは約3割を占める。日和山小学校近くの栄町銀座を通行するトリップについても、約3割が外外トリップである

(図1) . 時間帯別に見ると、平日では朝の通学時間帯のトリップが突出している (図2) .

また、速度に着目すると、対策エリア内では、車道幅員の狭い道路や速度規制20km/h区間でも、40km/h超で走行している箇所が見られる。特に、栄町銀座では、当時規制速度が20km/hになっているにもかかわらず、それを超過しているトリップがみられ、その割合は約半数であった (図3) . また、20km/h以上の走行が見られる時間帯は、平日朝 (8時台) が最も多い (図4) .

これらのことから、朝の通勤時間帯に渋滞を避けて生活道路を通り抜ける車両を抑制する必要があると考えられる。分析結果を踏まえて、実施した主な対策を図5に示す。警察による通行規制を物理的に補完するために、平日の7:30~8:15までライジングボラードを上昇させる社会実験を実施。朝の時間帯に栄町銀座を通り抜ける車両を抑制した他、狭さを設置し、朝の時間帯以外にも対策を実施した。

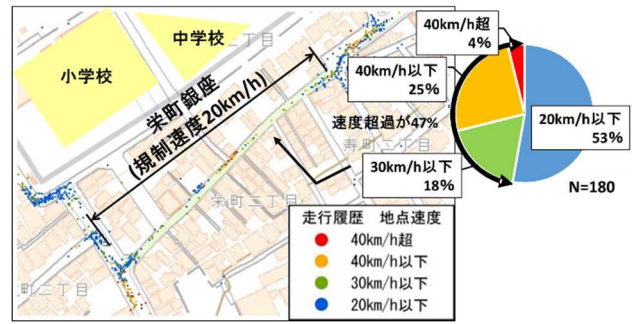


図3 栄町銀座を走行するトリップの地点速度と割合

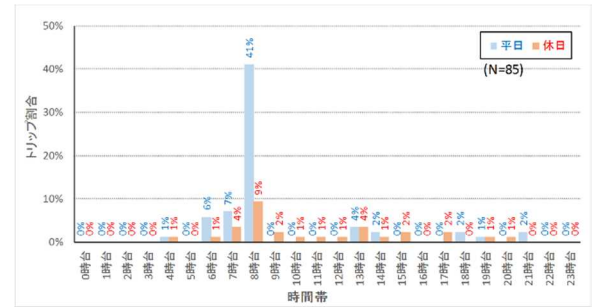


図4 栄町銀座を走行する地点速度のうち20km/h超の発生時間帯
※ETC2.0プローブ (H27.4~H28.3)

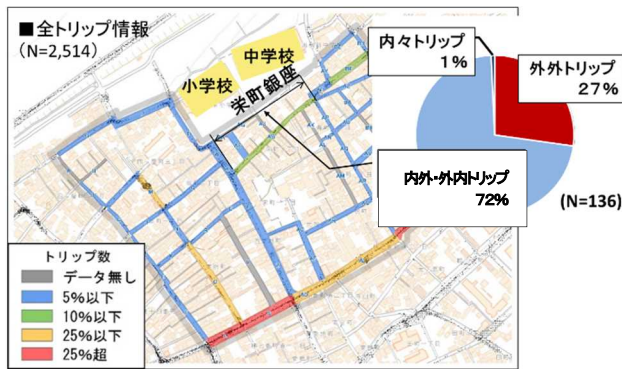


図1 栄町銀座を通過するトリップの内訳
※ETC2.0プローブ (H27.4~H28.3)

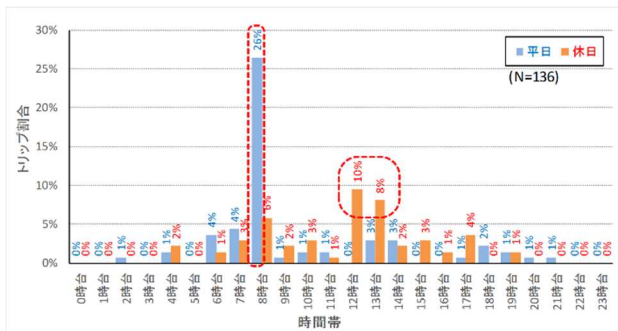


図2 栄町銀座全通過トリップの時間帯別割合
※ETC2.0プローブ (H27.4~H28.3)



図5 実施した主な生活道路対策

(2) 効果検証

新潟国道事務所が提供したETC2.0プローブデータによる効果検証と、対策後新潟市が実施した地域関係者へのアンケート調査の結果について報告する。

a) 区間別交通量

日和山地区の対策エリア内で確認された全トリップについて、区間別交通量の割合を対策前後で図6、図7に示す。

区間別交通量の割合を外外トリップに絞って図8に示す。対策エリア内で確認された外外トリップは対策前が533トリップ、対策後は511トリップ確認された。対策前後で重点対策区間のトリップ割合が6%から3%と減少し、並行路線でトリップ割合が増加している状況が確認できる。

また、ライジングボラードが上昇中の7:30～8:15の全トリップデータで比較すると、通行規制中の重点対策区間の並行路線でトリップ割合が増加している状況が確認できる(図9)。

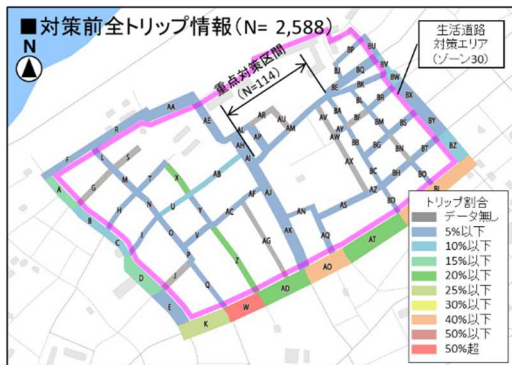


図6 対策エリア内のトリップ割合
対策前 (H27.4.1～H28.3.31)



図7 対策エリア内のトリップ割合
対策後 (H29.4.4～H29.7.31)

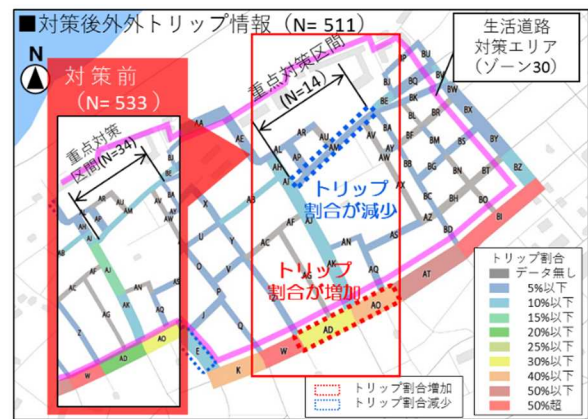


図8 対策エリア内の外外トリップ割合
対策前 (H27.4.1～H28.3.31) 対策後 (H29.4.4～H29.7.31)

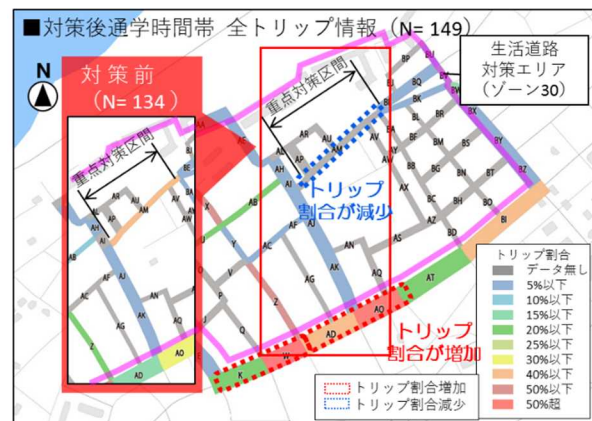


図9 対策エリア内の通学時間帯トリップ割合
対策前 (H27.4.1～H28.3.31) 対策後 (H29.4.4～H29.7.31)

b) 走行速度

次に、走行速度に着目する。

対策エリア内の走行速度割合を図10に示す。30km/hを超える走行速度の割合は対策エリアで17%から14%とわずかな減少で、対策後も規制速度を超過しての走行が見られる。しかし、新設歩道+スムーズ歩道付近で走行速度が低下している等、重点的に対策された箇所では効果が確認された。

対策エリア内の重点対策区間を取り出した分析結果を図11に示す。対策前に見られた区間中央部での40km/h超の走行は、対策後では見られず、狭さく設置の効果が見られる。また、区間全体の走行速度割合を見ても、30km/hを超える走行速度の割合が31%から6%まで減少している。

地域関係者へのアンケートでも、沿線住民の70%が狭さく部分で速度を落としていたと回答しており、データ分析と住民の実感が合った結果となった。

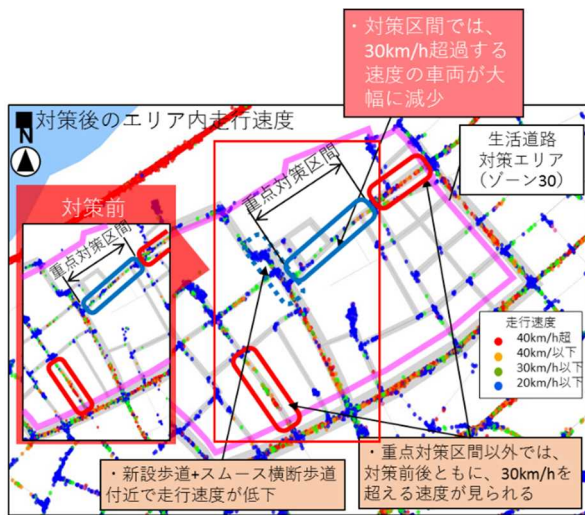


図10 対策エリア内の走行速度
対策前 (H27.4.1~H28.3.31) 対策後 (H29.4.4~H29.7.31)

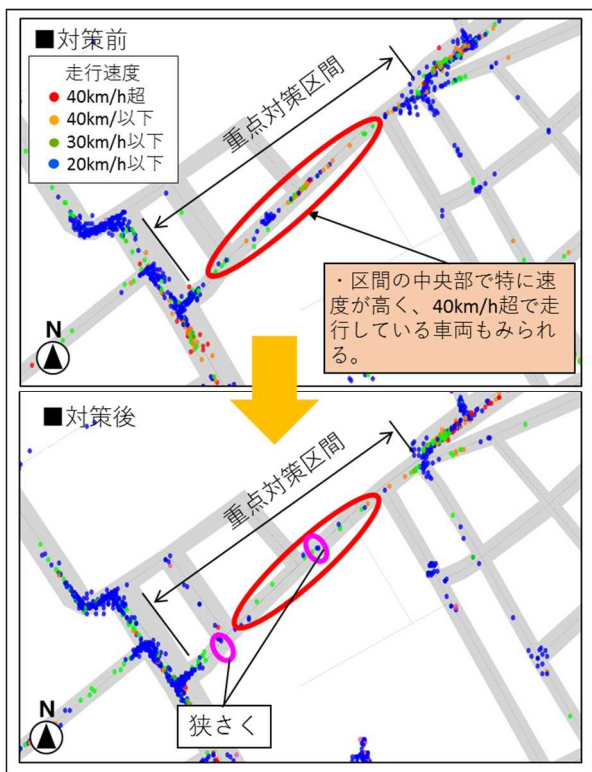


図11 重点対策区間の走行速度
対策前 (H27.4.1~H28.) 対策後 (H29.4.4~H29.7.31)

c) 危険挙動発生状況

スムーズ歩道設置後、急ブレーキは減少し、効果が発現している (図12)。しかし、重点的に物理的な対策を実施していない稲荷神社入り口付近では、変化は無く急ブレーキが多発している。

多数発生している急ハンドルは、対策前後で変化が見られない (図13)。この2箇所は、下り勾配により速度超過でのカーブ進入が要因と考えられる。

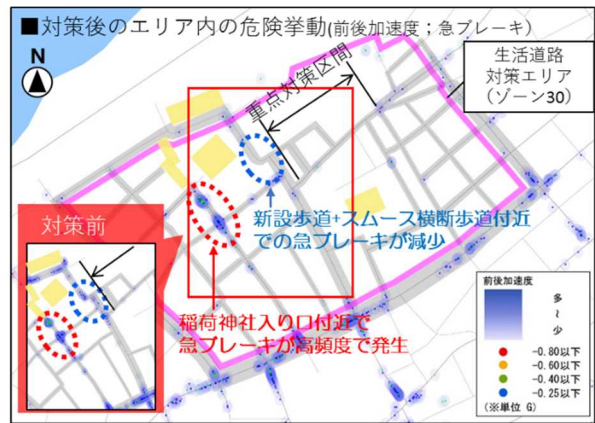


図12 対策エリア内の危険挙動(前後加速度)発生位置図
対策前 (H27.4.1~H28.3.31) 対策後 (H29.4.4~H29.7.31)

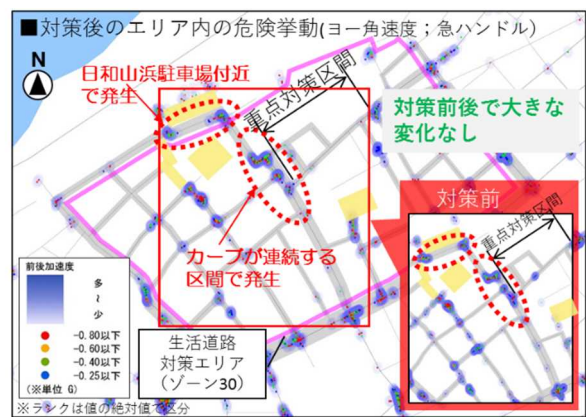


図13 対策エリア内の危険挙動(ヨー角速度)発生位置図
対策前 (H27.4.1~H28.) 対策後 (H29.4.4~H29.7.31)

4. おわりに

生活道路の対策を進める際は、そこで生活する地域住民の声に耳を傾けることが大切であると考えます。しかし、今回の事例のように、道路を毎日利用するのが多くの子供たちである場合、小学生自ら「この道路は出勤中急いでいる車がスピードを出していて危ない」と声をあげるだろうか。近くで見守る地域住民がいて、それに加えて客観的なデータがあると、より対策実施へつながりやすくなると思います。

また、今回重点的に物理的対策を行った栄町銀座や日和山小学校前の歩道付近では、一定の効果が見られた。しかし、ゾーン30指定がされた対策エリア内全体で見ると、物理的な対策を行っていない箇所でも急ブレーキが発生している区間も見られる。今後も、市民とのワークショップ等で意見を交わしながら、必要な対策を行う必要があると考えられる。

謝辞：日和山小学校交通安全対策ワークショップ事務局の新潟市、国際交通安全学会の皆さまに感謝申し上げます。

佐賀県「安推連」で取り組んだカラー舗装等の安全対策の効果について

田胡 匡基・猪井 知明¹

¹九州地方整備局 佐賀国道事務所 交通対策課 (〒849-0924 佐賀県佐賀市新中町5-10)

佐賀県は人口あたりの死傷事故件数が5年（2012年～2016年）連続全国ワースト1であり、現在も高い水準で推移している。交差点及び幹線道路における事故の発生率が高く、かつ追突事故の割合も高いことから、県内全体の事故削減を迅速かつ効果発現性の高い対策を行う必要があった。本稿では、佐賀県道路交通環境安全推進連絡会議で取り組んだカラー舗装等を用いた安全対策の効果検証について紹介するとともに、直轄国道以外への普及に向けた今後の課題として、関係機関と連携した安全対策の推進について報告する。

キーワード：カラー舗装，事故対策，ETC2.0

1. はじめに

佐賀県は人口10万人あたりの死傷事故件数が5年（2012年～2016年）連続全国ワースト1であり、2017年にはワースト2に脱却したものの、現在も高い水準で推移している。道路管理者においては従前より交差点改良や歩道整備等の安全対策を実施しているが、県内全体の事故削減にあたっては、迅速かつ効果発現性の高い対策を行う必要がある。

そこで、佐賀県道路交通環境安全推進連絡会議（以下、「安推連」という。）における議論を踏まえ、道路管理者の佐賀国道事務所と佐賀県が連携して事故が多い交差点におけるカラー舗装等を用いた安全対策を行うとともに、佐賀県警察等では交通安全指導や取締の強化が行われるなど、道路管理者と交通管理者が一丸となり、事故削減に向けた取組を展開している。特に、佐賀県内のカラー舗装は、道路管理者が安推連を介して連携を図ることで、国や県の異なる道路管理者においても統一した塗り方がされており、ドライバーとしても大変分かりやすいものとなっている。

本稿では、カラー舗装を用いた安全対策に関して、安推連で取り組んだ内容とその効果、今後の課題等について紹介する。

2. 佐賀県内の事故状況

佐賀県は人口10万人あたりの死傷事故件数が全国と比べて多く、図-1のとおり都道府県別で2012年から2016年まで5年連続で全国ワースト1であった。そのため、道路管理者、交通管理者や交通安全担当部局等が一丸となって事故削減に取り組んだ結果、2017年には全国ワースト2へ脱却することができたが、依然高い状況となっている。

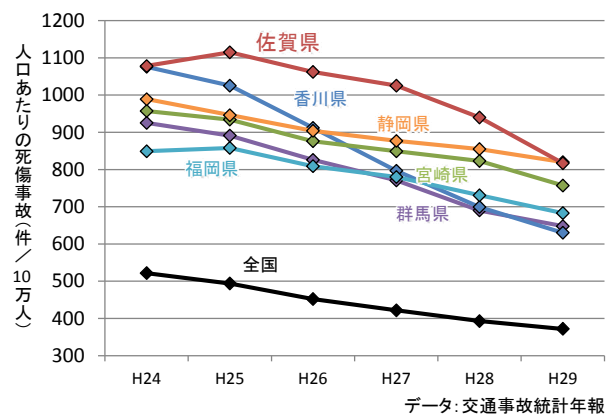


図-1 人口あたりの死傷事故件数（上位6県）

また、幹線道路（国道、主要地方道、県道）の死傷事故率を算出した結果を図-2に示す。交通量を考慮した死傷事故率に関しても、佐賀県は全国ワースト5となっており、幹線道路において事故が多く発生していることが分かる。

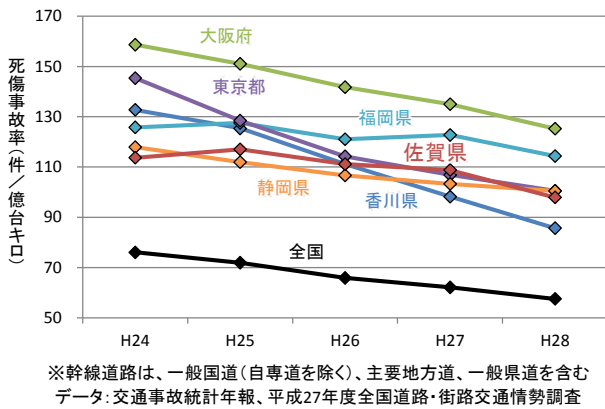


図-2 幹線道路の死傷事故率（上位6都府県）

さらに、佐賀県では事故類型別に見ると全事故に対して追突事故の占める割合が高いことが挙げられる。佐賀県と全国の事故類型別の死傷事故件数の割合比較を図-3に示す。

このように、佐賀県は幹線道路における事故の発生割合が高く、かつ追突事故の割合も高いことから、これらに焦点をあてた対策を行う必要があった。そのため、佐賀国道事務所と佐賀県警察では、2014年度から国道34号における追突事故が多い交差点30箇所を抽出し、「国道34号追突事故ワースト箇所」として、カラー舗装や停止線の前出し等の対策を重点的に実施している。

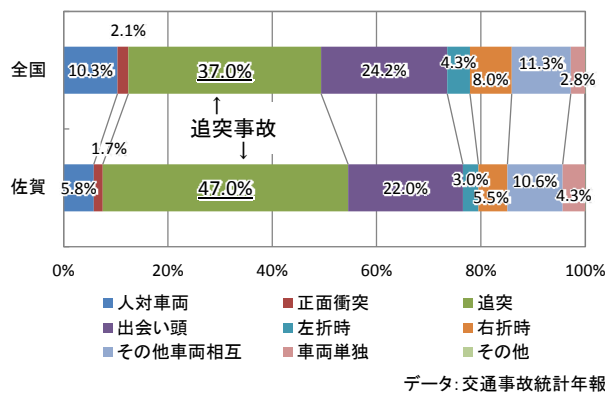


図-3 類型別の死傷事故の割合（2016年）

3. カラー舗装

(1) カラー舗装の目的

追突事故の防止にあたっては、交差点形状の変更や右折車線の設置等の交差点改良が効果的ではあるものの、用地買収を伴うと完成まで長い年月を要することから、迅速な施工が可能で、高い効果が発現し、さらに対策を広げていくためには、低コストである安全対策を行う必

要があった。



図-4 カラー舗装の例（国道34号御本町交差点）

そこで、佐賀国道事務所では、事故が多い交差点において、ドライバーに交差点が近づいたことを気づかせ、交差点を注意して通行してもらえるよう、図-4に示すように交差点の安全対策を目的としたカラー舗装を実施している。

(2) カラー舗装の特徴

道路管理者が行うカラー舗装は法定外表示であり、全国的にみると同じ都道府県内でも道路管理者によって塗り方（色や塗る範囲）に差異が生じている場合がある。しかし、交差点の安全対策を目的としたカラー舗装については、道路利用者の認識を混乱させないために、道路管理者間において塗り方を統一することが重要である。

そのため、佐賀県内においては安推連を介して国と県の道路管理者間の連携を図ることで、統一したカラー舗装を実施することとした。今回のカラー舗装の特徴は主に以下のとおりである。

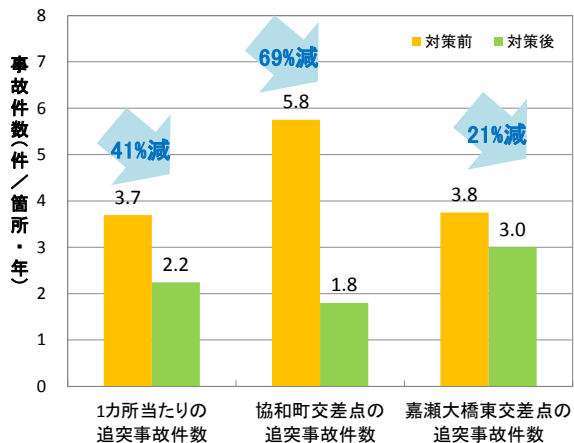
- ① 左折直進及び直進車線を赤色、右折車線を青色としていること。
- ② カラー舗装はタイヤ走行部分を除いた車線中央の1m幅を塗り、走行車両による摩耗を抑えていること。
- ③ 交差点の滞留部は実線、テーパ部やシフト部等にはドット舗装とすることで、交差点が接近していることをドライバーに気づかせるとともに、急な車線変更に伴う事故防止を図っていること。
- ④ 異なる道路管理者（国と県）においてカラー舗装の塗り方を統一することにより、直進車線・右折車線の早期認識を確保していること。

4. カラー舗装の効果

(1) 効果検証

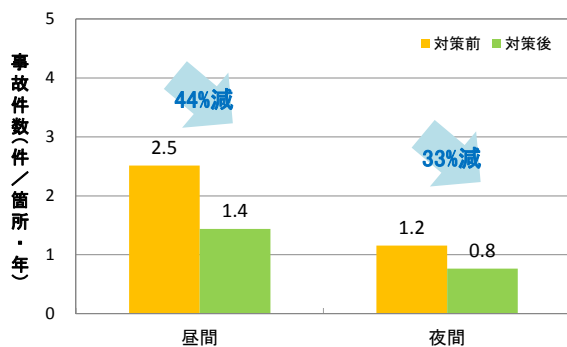
「国道34号追突事故ワースト箇所」における安全対策により、2017年度末までに交差点25箇所（うち、取組開始当初に施工した3箇所は他都道府県でも多くの施工例がある車線全面のカラー舗装）においてカラー舗装を実施した。

車線中央1m幅のカラー舗装を行った交差点22箇所における対策前後での事故件数を比較した結果を図-5～図-7に示す。



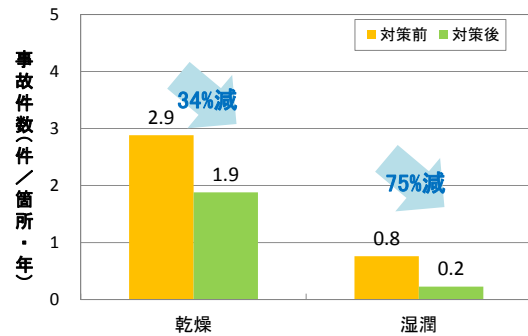
【対策前】：対策完了年月の前月から遡って4年間
 【対策後】：対策完了年月の翌月から4年間もしくは、H30.6まで
 データ出典：イタルダ事故データ(H18～H28)、県警事故データ(H29～H30.6)

図-5 対策前後の追突事故件数



【対策前】：対策完了年月の前月から遡って4年間
 【対策後】：対策完了年月の翌月から4年間もしくは、H30.6まで
 データ出典：イタルダ事故データ(H18～H28)、県警事故データ(H29～H30.6)

図-6 対策前後の昼夜別平均追突事故件数



【対策前】：対策完了年月の前月から遡って4年間
 【対策後】：対策完了年月の翌月から4年間もしくは、H30.6まで
 データ出典：イタルダ事故データ(H18～H28)、県警事故データ(H29～H30.6)

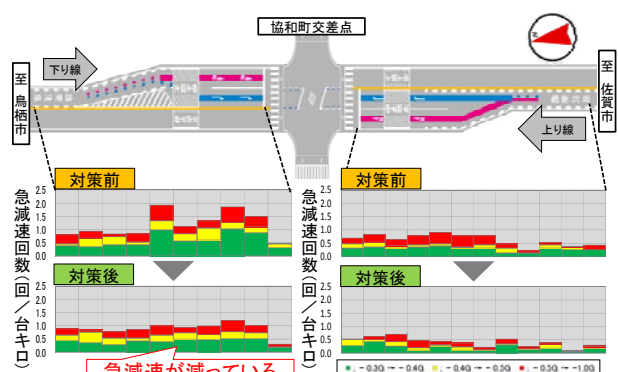
図-7 対策前後の路面状態別平均追突事故件数

さらに、昼夜や路面の乾燥・湿潤の違いについて事故件数を比較した結果を図6, 図7に示す。カラー舗装の効果に大きな差異は無く、夜間でも路面湿潤でも同様に効果が発現していることが分かる。

(2) 効果の高い箇所

図-5に示すように、22箇所の年あたり平均事故件数は41%減少し、カラー舗装による安全対策の効果が確認できた。特に、効果が大きかったのは協和町交差点である。協和町交差点は図-8に示すように、左折直進車線が交差点手前で左にシフトする線形となっているが、カラー舗装によってドライバーが走行ラインを把握しやすくなったと考えられ、対策後の追突事故は1.8件/年と大幅に減少した。

また、ETC2.0プローブデータを用いて詳細に分析したところ、図-8に示すように急減速発生回数についても対策後は交差点全体に渡って減少していることが確認できた。



データ：ETC2.0プローブデータ 挙動履歴情報
 対策前：H28.5～7、対策後：H29.5～7

図-8 協和町交差点の対策前後の急減速発生状況

(3) 効果の低い箇所

一方、今回の検証においてカラー舗装の効果が低かったのが嘉瀬大橋東交差点である。(図-5 参照)

嘉瀬大橋東交差点では、図-9 のように交差点のカラー舗装を行ったものの、交差点手前が橋梁部でクレストになっており、交差点や前方車の存在に気づきにくく、効果が低いと考えられる。

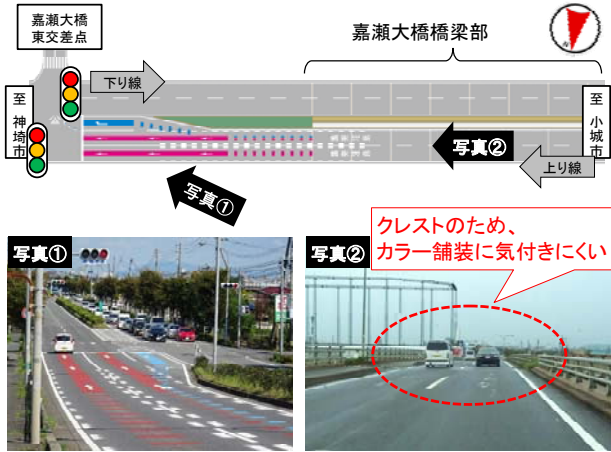


図-9 嘉瀬大橋東交差点の状況

追加対策として交差点の存在が十分に手前から認識できるようにカラー舗装の延伸を検討しているが、残存している事故の発生要因については更に事故データを収集して分析を行うこととしている。

5. カラー舗装の耐久性

カラー舗装は、施工直後は発色が良くドライバーにとっても分かりやすいものの、交通量が多い道路においては数年で薄くなってしまい、事故対策の効果が低下してしまう懸念がある。

そこで、佐賀国道事務所が現在採用している車線中央1m幅のカラー舗装と従前採用していた車線全面のカラー舗装の2種類について、その耐久性を確認した。

車線全面のカラー舗装例として佐賀北警察署前交差点、車線中央1m幅のカラー舗装例として土井交差点の路面状況を図-10に示す。両箇所は同じニート工法(樹脂系滑り止め舗装)で施工したものである。

佐賀北警察署前交差点の全面カラー舗装は、タイヤ走行部分から薄くなり、グラデーションがかかったような状態であることから、カラー舗装が目立ちにくくなっている。



図-10 カラー舗装の耐久性

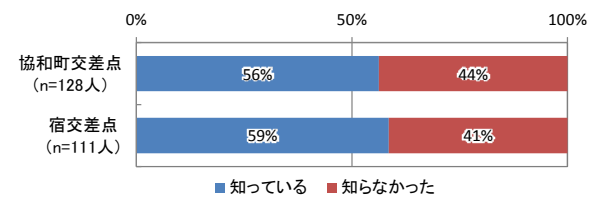
一方、土井交差点の車線中央1m幅のカラー舗装は、カラー舗装の輪郭がクッキリと明確に残っており、カラー舗装が認識できることから、現時点でも施工時と同様の効果があると考えられる。

6. 今後の課題

(1) ドライバーへの周知

事故件数やETC2.0プローブ等のデータからカラー舗装は事故減少に効果的であることが判っているが、ドライバーにどのような影響を直接与えているのか把握することを目的として、カラー舗装の認知度及び理解度についてドライバーへアンケートを実施した。その結果を図-11に示す。

■カラー舗装の認知度



■カラー舗装の理解度

<協和町交差点 (n=128)>

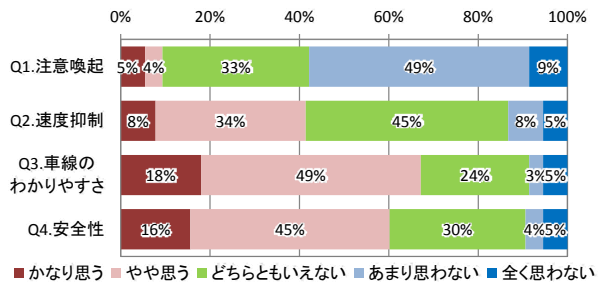


図-11 アンケート結果

カラー舗装を実施した協和町交差点を通行しているドライバーについて、約6割がカラー舗装の存在を認知している一方で、約4割が認知していなかった。また、カラー舗装の目的としては、「車線の分かりやすさ」と思う人が多く、「注意喚起」や「速度抑制」を目的と思う人は少ないことが分かり、更なる効果の発現にあたっては、カラー舗装の意図や意味についてドライバーへ周知する必要性があることが分かった。

そこで、安推連では、カラー舗装の目的をドライバーに周知させるため、図-12 に示す広報ポスターを作成した。現在、警察署や道の駅等において掲示されており、今後も積極的に周知を行う予定である。

交通事故を防ぐ カラー舗装

POINT
1

カラー舗装

注意喚起

事故多発交差点である事を注意喚起しています。直進レーンは赤色、右折レーンは青色としています。



POINT
2

減速ドットライン

スピード抑制

ドライバーに車線幅を狭く感じさせ、スピード抑制を図っています。



POINT
3

追突注意【路面表示】

注意喚起

事故多発交差点が近づいた事を知らせ、注意喚起しています。



事故多発
交差点では
安全運転を
お願いします。

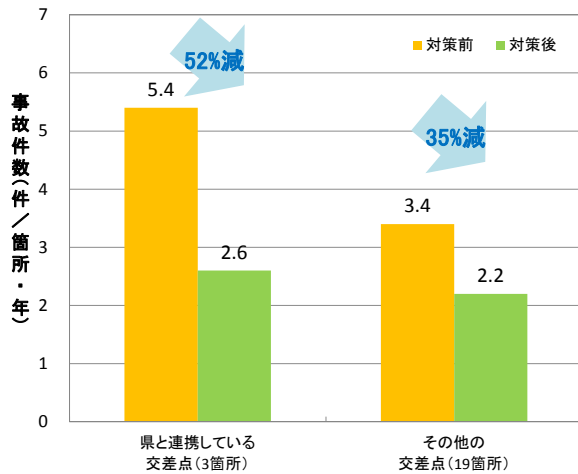
佐賀県道路交通環境安全推進連絡会議

図-12 カラー舗装の広報ポスター

(2) 市町管理道路への展開

今までは国、県、市町のそれぞれの道路管理者が個別に対策を実施していたため、安推連を通じて国と県で連携して実施した場合に、連携していない場合に比べて効果に差が出るか検証した。

検証結果によると図-13 のとおり、国の直轄国道のみ対策した交差点に比べ、国と県が連携した交差点では事故削減効果がより高いことが確認出来た。



【対策前】：対策完了年月の前月から遡って4年間
 【対策後】：対策完了年月の翌月から4年間もしくは、H30.6まで
 データ出典：イタルダ事故データ(H18～H28)、県警事故データ(H29～H30.6)

図-13 対策前後の追突事故件数の比較

■右折専用車線がある交差点の例

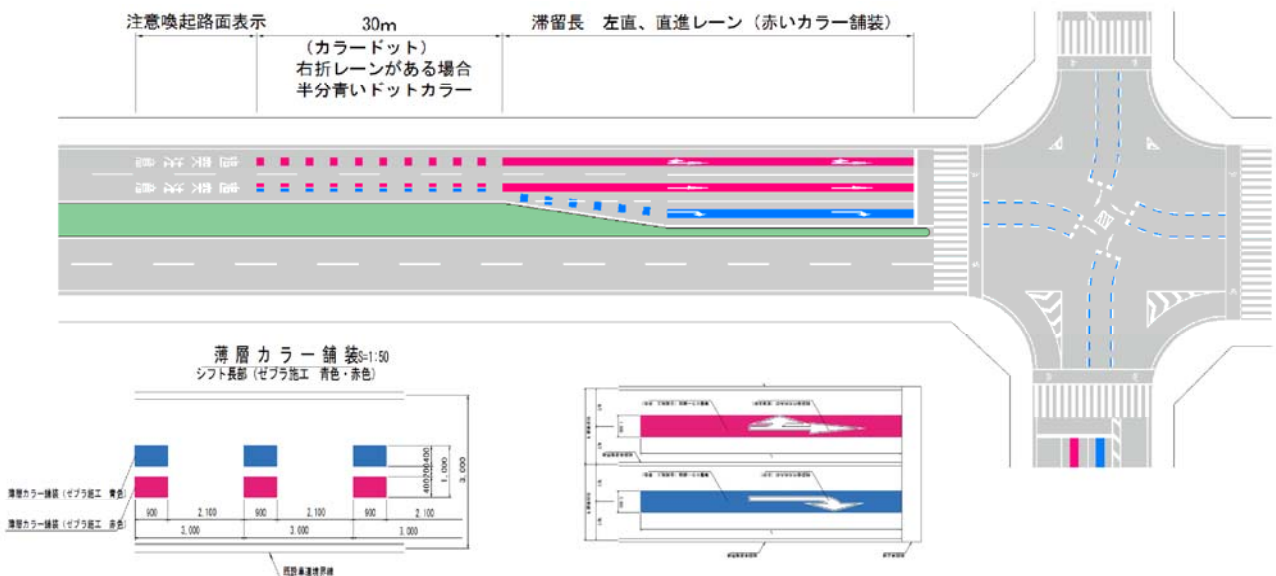


図-14 カラー舗装に関するガイドライン

このことにより、安推連を活用し連携して対策を実施することで、より効果が発揮されることが分かった。

交差点全体の事故を減らすためには、県との連携を進めるとともに市町管理道路においても連携していくことで、より一層の効果を発現することができるものと考えられる。

そこで安推連では、県内で統一したカラー舗装の取組を広げるべく、カラー舗装に関するガイドラインを作成したところである。

昨年度には図-14のとおりガイドライン案を作成し、今年度はガイドラインを策定し、国、県、市町の道路管理者全体で連携してカラー舗装を実施していきたいと考えている。

7. おわりに

佐賀県は人口あたりの都道府県別人身事故発生件数が高い状況であることから、各関係機関が連携し、事故削減に向けた取組を行っている。

現在、安推連により、国と県が連携し、県内で統一されたカラー舗装を用いた安全対策を実施しているところである。今後はガイドラインを活用し、国、県や市町等と連携して、県内全体へ展開したい。

また、カラー舗装の更なる効果発現にあたっては、施工のみにとどまらず、カラー舗装そのものをドライバーに周知させることも重要である。安推連を活用しながら周知活動を展開し、佐賀県内の交通事故削減に向けて引き続き取り組んで参りたい。

ビッグデータを用いたヒヤリハット分析について

伊藝 誠一郎¹・下地 涼大²

¹南部国道事務所 交通対策課 課長 (〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-8-14)

²南部国道事務所 交通対策課 係員 (〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-8-14)

沖縄県内の直轄国道を対象として、事故件数としてはまだ顕在化していないが、急ブレーキが多く、将来的に事故危険性の高い箇所(ヒヤリハット箇所)の抽出、分析、対策立案を実施した。急ブレーキデータとしては、プローブデータを用い、ヒヤリハット箇所の抽出手法や詳細な分析手法、現地踏査を踏まえた原因の特定と対策立案までの流れについて紹介する。

キーワード プローブデータ、予防保全対策、ヒヤリハット分析

1. はじめに

(1) これまでの交通事故対策の進め方と本検討の着眼点

これまでの交通事故対策は、人身事故が発生した箇所を対象として、その原因を取り除き、同様の事故を減少させることを目的としており、『事故が発生するまで対策を実施しない』状態であった。

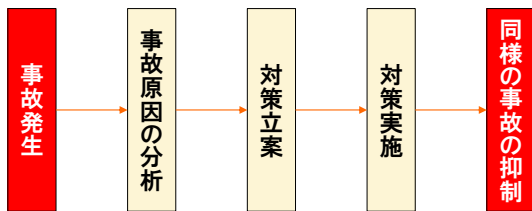


図-1 これまでの事故対策の流れ

本検討では、事故件数としてはまだ顕在化していないが、急ブレーキが多く、将来的に事故危険性の高い箇所(潜在的危険箇所)に対して、『事故を未然に防ぐ(予防保全)』ための対策を実施したものである。

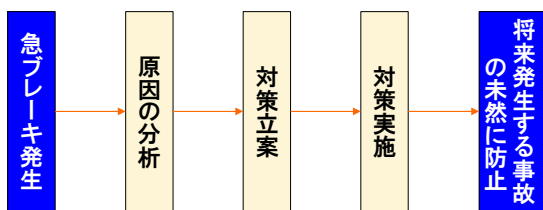


図-2 予防保全による事故対策の流れ

2. 潜在的危険箇所の抽出

(1) 潜在的危険箇所の抽出手法

任意の区間にて、事故データ及び急ブレーキデータを集計し、各発生確率を比較することにより、事故発生確

率が低く、急ブレーキ発生確率の高い箇所を抽出することとした。

具体的なフローを図-3に示す。

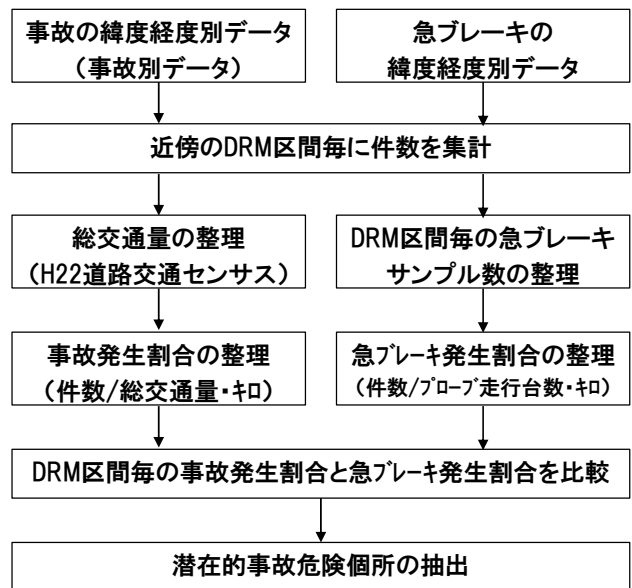


図-3 潜在的危険箇所の抽出フロー

(2) 使用データ

任意の区間としては、カーナビやプローブデータ集計等に広く使用されているDRM(Digital Road Map)区間を用いることとし、その他各データについては表-1に示すデータを用いて抽出を行った。

表-1 使用データ一覧

	データ名称
事故データ	ITARDA事故統合データ事故別(H23-H26)
急ブレーキデータ	民間プローブ急減速データ(H27.9-H28.3)
総交通量	H22道路交通センサス
プローブ走行台数	民間プローブDRMリンク集計値(H27.9-H28.3)
区間延長	DRM区間長(ver.2603)

(3) DRM区間別発生確率の算出

下記計算式より、DRM区間それぞれの事故発生確率、急ブレーキ発生確率を算出した。

事故発生確率

$$= \text{事故件数} \div \text{道路交通センサ日交通量} \div \text{DRM区間長}$$

急ブレーキ発生確率

$$= \text{急ブレーキ件数} \div \text{プローブ走行台数} \div \text{DRM区間長}$$

以下に沖縄県内の集計結果を図化したものを示す。

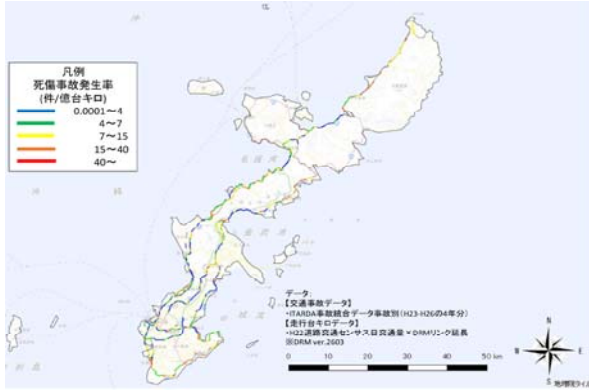


図-4 事故発生確率反映図

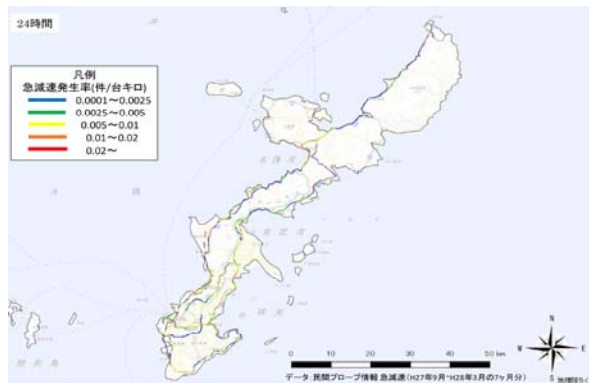


図-5 急ブレーキ発生確率反映図

(4) 潜在的危険箇所の抽出

DRM区間別の事故発生確率と急ブレーキ発生確率を整理し、下記基準のもと潜在的危険箇所の抽出を行った。
潜在的危険箇所抽出の閾値

事故発生確率：100[件/億台キロ]以下（全国平均相当）
かつ、急ブレーキ発生確率上位10位程度



図-6 DRM区間別死傷事故率曲線図、危険箇所抽出

抽出の結果選定された上位11か所のうち、すでに対策

検討が予定されている箇所（事故ゼロプラン選定箇所等）を除いた4箇所について、詳細な分析、現地確認、対策立案を実施した。

表-2 抽出結果及び検討箇所選定結果表

No	交差点名	死傷事故率 (件/億台キロ)	0.3G以上 急減速発生割合 (件/千台キロ)	事故ゼロプランでの 選定箇所との重複 対策状況
①	伊良皆(北)	85.5	56.0	
②	比屋根	76.9	129.9	重複
③	嘉手納町ローリープラザ前	56.6	84.1	要望有、対策実施
④	城一丁目	33.3	77.7	
⑤	国体道路入口	24.6	49.9	
⑥	太平	24.5	53.8	重複
⑦	浦添バイパス西原IC前	23.1	47.6	重複
⑧	浦添バイパス西原IC前	19.0	64.2	重複
⑨	牧港	15.5	50.4	重複
⑩	太平	6.9	64.9	重複
⑪	名嘉地	5.8	52.6	

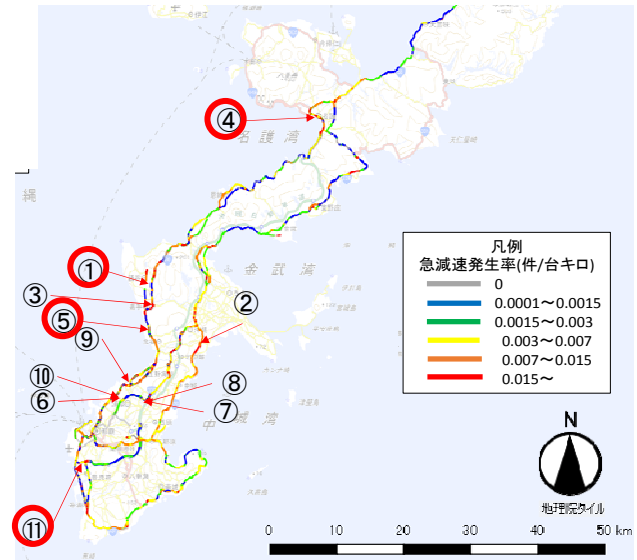


図-7 潜在的危険箇所の抽出箇所位置図

本論文では、そのうち『名嘉地地区』について記載する。

3. 潜在的危険箇所の詳細分析

民間プローブデータを用いて、潜在的危険箇所の詳細分析を行った。分析項目としては、急ブレーキ発生位置分析（10mピッチでの集計分析）、発生時間帯分析（ピーク時、昼夜の割合分析）を行っている。

(1) 急ブレーキ発生位置分析

箇所抽出の際に、分析を行ったDRM区間毎の急ブレーキ発生割合、事故発生割合は図-8のようになっており、区間全体としての傾向を把握することは可能であるが、対策を実施すべき箇所の特定を行うためにはより詳細な位置の把握が求められる。

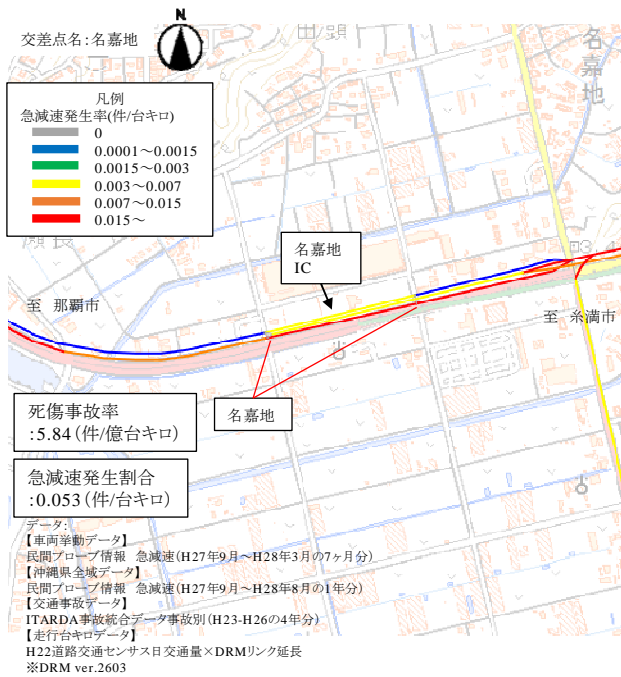


図-8 DRM区間別の分析結果

本検討では、道路延長線上で10m毎に区間を分割し、急ブレーキの数を集計することで、急ブレーキが集中している箇所の特定を行うこととした。分析結果を図-9に示す。

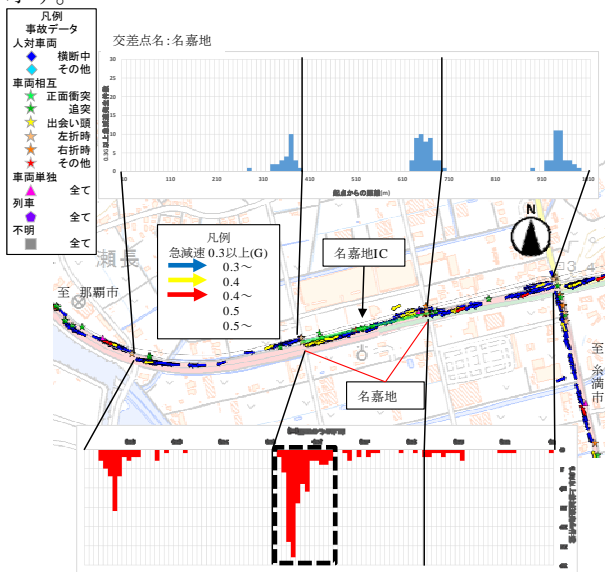


図-9 10mピッチでの分析結果

名嘉地地区では、名嘉地IC合流部付近から交差点までの区間に急ブレーキが集中している状態であることが確認できた。

(2) 発生時間帯分析

急ブレーキが集中している時間帯等、時間帯での特徴を把握するために、発生時間帯毎の割合を算出し、沖縄県全域平均値と比較を行った。

分析対象時間としては、ピーク時分析（朝、夕、OFF）、昼夜分析を行っている。詳細な時間帯については下記に示す。

【ピーク時分析】

朝ピーク時：7～9時

夕ピーク時：17～19時

OFFピーク時：0時～7時、9時～17時、19時～24時

【昼夜分析】

昼：7～19時

夜：0～7時、19時～24時

分析結果を図-10、図-11に示す。

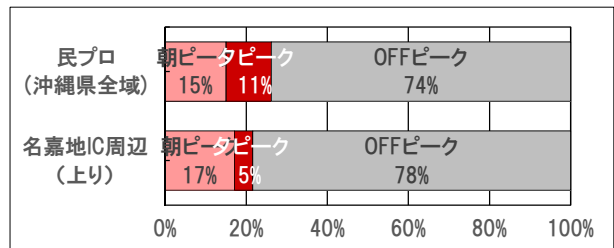


図-10 ピーク時分析結果

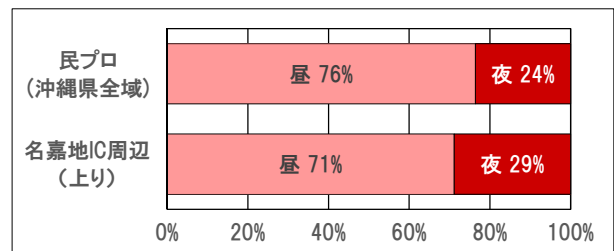


図-11 昼夜分析結果

名嘉地地区では、朝ピーク時に全体の17%が集中していることが分かった。また、昼夜では県内平均と比較し、夜に多い傾向にあることが分かった。

4. 現地確認による原因分析

詳細分析の結果を踏まえ、IC合流部付近から交差点までの区間に着目し、朝ピーク時に現地確認を実施した。

現地確認の結果、交差点滞留時の強引な合流（図-12）や、名嘉地ICからの2車線に跨る合流（図-13）が見られた。



図-12 強引な合流写真



図-13 名嘉地ICからの2車線に跨る合流写真

現地確認の結果を踏まえ、急ブレーキが多い原因としては、『IC合流車線から早期かつ強引な合流』及び『IC合流時の2車線に跨る合流』が原因であると考えられる。

5. 対策立案

現地踏査にて把握した原因を解消する対策について、検討を実施した。

『IC合流車線から早期かつ強引な合流』に対しては、『カラー舗装による誘導対策』を立案した。カラー舗装を目標に滑らかな合流を促すことを狙いとしている。

『IC合流時の2車線に跨る合流』に対しては、『ポストコーン設置による車線変更の抑止対策』を立案した。物理的デバイスにて、車線変更自体を規制することを狙いとしている。

対策図について図-14に示す。

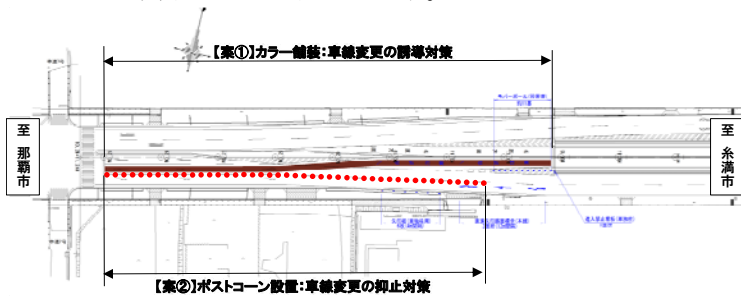


図-14 名嘉地地区の対策図

6. 整備効果

対策実施箇所における整備効果を、対策前後の急減速の変化により把握した。

『①名嘉地地区』に加え、対策後の効果が顕著であった『④城一丁目地区』について本論文にて記載する。

(1)名嘉地地区

整備備考効果の把握については、急ブレーキの発生回数では、サンプル数の差が影響し、比較が困難であることから、発生確率（急ブレーキ発生回数÷サンプル数）にて評価を行った。また、時間別の評価をおこなうため、

ピーク時の分割、昼夜の分割を行い、対策前後の比較を行った。

整備前後の比較の結果、対策後急ブレーキ発生確率が減少し、朝ピーク時、昼間の急ブレーキ割合も減少した。

対策内容がカラー舗装であり、昼間の視認性が向上し、昼間の効果がより発揮されたと考えられる。

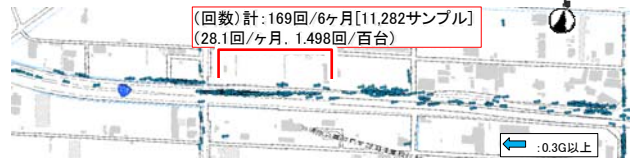


図-15 対策前急ブレーキ発生位置図
(2017年7月～2017年12月 (6ヶ月))

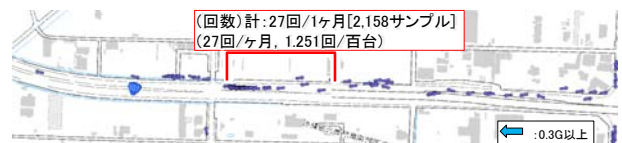


図-16 対策後急ブレーキ発生位置図
(2018年3月 (1ヶ月))

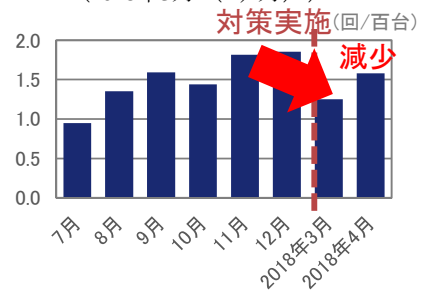


図-17 対策前後の急減速発生回数 (月別)

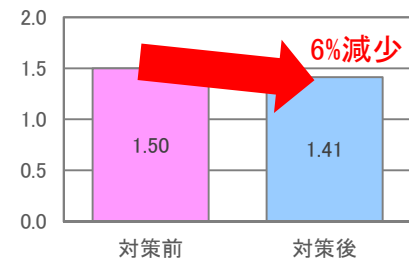


図-18 対策前後の急減速発生回数

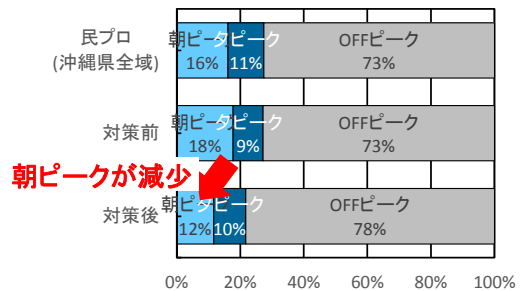


図-19 各ピークごとの発生割合

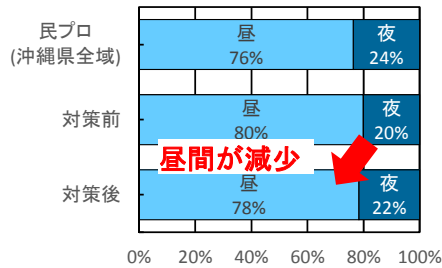


図-20 昼夜の発生割合



図-21 事前事後の現地写真

(2)城1丁目地区 (①整備前の状況)

城1丁目地区については、名嘉地地区同様に整備前の状況、原因分析及び対策立案、そして整備効果について記載する。

a) 整備前の状況

整備前の急ブレーキ発生状況について詳細分析を行った。時間別では『朝ピーク時』に急ブレーキが多発しており、箇所としては、『交差点直近の区間』に急ブレーキが集中していた。

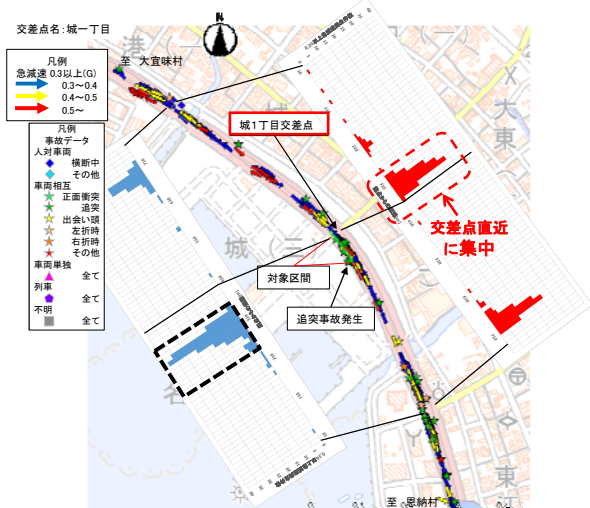
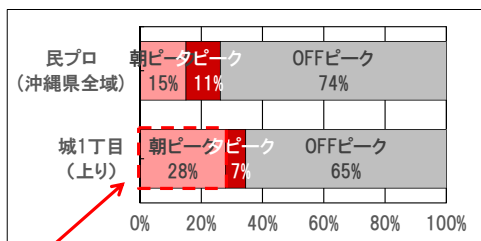


図-22 10mピッチでの急ブレーキ発生箇所分析



朝ピークに集中

図-23 ピーク時間毎の急ブレーキ発生割合分析

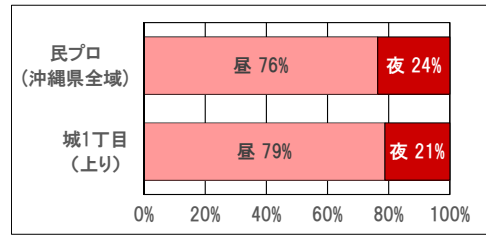


図-24 昼夜別の急ブレーキ発生割合分析

b) 原因分析

詳細分析の結果を踏まえ、交差点直近に着目し、朝ピーク時に現地確認を実施した。

現地確認の結果、対向車線側に設置された補助信号の見落とし (図-25) や、植栽による信号交差点の視認性低下 (図-26) が原因であると考えられる。



図-25 補助信号の設置位置



図-26 植栽帯の視認阻害

c) 対策立案

現地踏査にて把握した原因を解消する対策について、検討を実施した。

『対向車線側に設置された補助信号の見落とし』に対しては、『走行車線の上部への補助信号の移設』を立案した。走行車線上に信号を移設することで視認性が向上することを狙いとしている。

『植栽による信号交差点の視認性低下』に対しては、『植栽の撤去』を立案した。植栽を撤去することで交差点自体の視認性を向上し、より早期にブレーキ行動に移れる状況を作ることを狙いとしている。



図-27 信号移設対策のイメージ



図-28 植栽撤去のイメージ

c) 整備効果

名嘉地地区と同様に急ブレーキ発生確率、時間帯別分析を行い、比較することで整備効果分析を行った

整備前後の比較の結果、対策後急ブレーキ発生確率が減少傾向となり、発生確率は約20%減少した。

ピーク割合や昼夜率等には大きな変化は見られないことから、視認性向上により全時間帯に効果が見られたと考えられる。

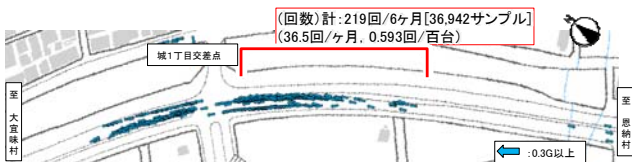


図-29 対策前急ブレーキ発生位置図 (2017年7月～2017年12月 (6ヶ月))



図-30 対策後急ブレーキ発生位置図 (2018年3月～4月 (2ヶ月))

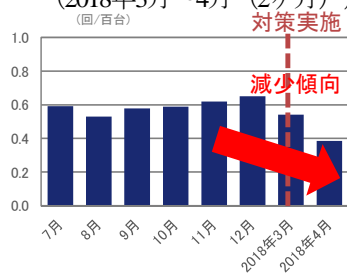


図-31 対策前後の急減速発生回数 (月別)

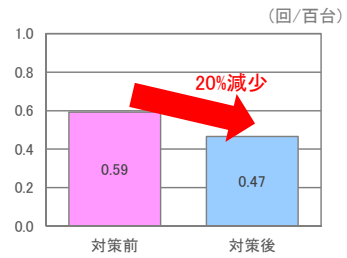


図-32 対策前後の急減速発生回数

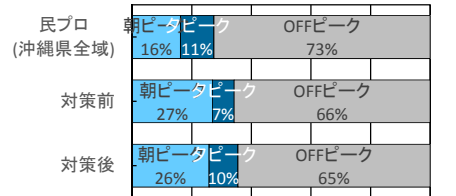


図-33 各ピークごとの発生割合

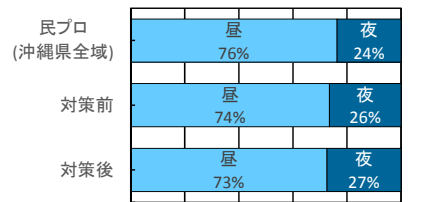


図-34 昼夜の発生割合

7. 終わりに

(1) プローブデータを用いた潜在的危険個所の抽出の可能性

今回、プローブデータを用いた潜在的危険個所の抽出を実施し、地元要望がすでに上がっている箇所や、現地確認の結果危険性の高い箇所が抽出されており、抽出の妥当性の高さが確認できた。

今までの交通事故対策は、事故データに依存していたため、事故が発生してから対策しか行えず、どうしても後手に回っていたが、新たにプローブデータの活用が見えてきた。

今後の交通事故削減に向けた取り組みとして、事故が発生する前に先行して対策を実施する予防保全対策を推進することで、発生する事故を未然に防ぎ、事故件数の削減を図ることが期待できる。

(2) 対策実施個所の整備効果把握

プローブデータの強みの一つとして、データ取得の迅速さがあげられ、早期に整備効果の把握が可能である。

H29.2に対策実施を行ったことから、今後定量的なデータ取得を行い、急ブレーキの発生件数の減少などから、整備効果把握を実施する必要がある。

なお、先行して、周辺商業施設へヒアリングを実施し、以下のような回答を得ている。

- 安全になったと感じている
- カラー舗装により走りやすくなった。
- 色の通りに走ることで、安全性が増した。

領域海洋モデルROMSを用いた東京湾における副振動の解析

岩本 匠夢¹・高川 智博¹

¹国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

副振動とは湾の固有振動モードに対応した、周期が数十分から数時間程度の振動現象である。東京湾では高潮に伴い、6時間程度の副振動が発生することがあるが、その発生要因には検討の余地が残されている。本研究では先行研究に則る形で、領域海洋モデルROMSを用いた双方向ネスティングの高潮再現計算を行った上で、CEOF解析を実施して潮位変動と気象外力の主要モードを求め、副振動の解析を行った。その結果、東京湾における6時間周期の副振動は、台風

の経路と吸い上げ効果の継続時間の両方に起因することが示唆された。

キーワード 領域海洋モデルROMS, 高潮, 副振動, CEOF

1. はじめに

我が国では、高潮・高波による港湾施設や0m地帯等の被災リスクを低減するため、平成27年11月19日に「水防法等の一部を改正する法律」が完全施行され、想定最大規模の降雨・高潮に関する基準が告示された¹⁾。本告知では、激甚化する水災害に備えるため、想定最大外力の新たな設定方法を提示している。高潮については、高潮浸水想定区域図作成の手引き²⁾(以下、手引き)にあるように「最悪の事態」を想定した高潮浸水シミュレーションを実施し、高潮浸水想定区域図を作成することで各港湾における浸水リスクの検討を進めている。この「最悪の事態」とは、高潮に限って言えば、ある港湾に対して既往最大規模の台風が接近したときに、潮位偏差が最大となる経路を取り、かつ朔望平均満潮位との重ね合わせが生じる状況である。このような想定は、ある港湾で発生しうる最大級の高潮を評価する上では有効であろう。

一方、実現現象としての高潮に目を向けると、最高潮位が観測されるタイミングで、潮位偏差が必ずしも最大になるわけではない。例えば、2014年台風18号によって東京湾で発生した高潮は、満潮と副振動のピークが重なるタイミングで最高潮位が観測された(図-1)。副振動とは湾の固有振動モードに対応した、周期が数十分から数時間程度の振動現象であり、津波や気象擾乱による長周期波の侵入によって励起される。例えば、東京湾では高潮に伴って周期が6時間程度の副振動が発生することがある⁴⁾。この副振動は湾奥部を腹、湾口を節とした固有振動の第1モードに当たるもので、2005年から2014年までの間に、晴海の潮位偏差が50 cmを超すと53%の割合で生じていた³⁾。

こうした気象擾乱によって発生する副振動は、ナビ

エ・ストークス方程式の線形化により、減衰型の自由波と強制波の重ね合わせで表される近似解⁵⁾が得られているものの、その発生要因に検討の余地が残されている事例もある⁶⁾。例えば2014年台風18・19号(以下、台風1418・19号)は、規模や経路の点でよく類似していたが、前者では東京湾で顕著な副振動が観測されたのに対し、後者では観測されなかった。そこで、本研究では台風1418・19号の高潮をモデルケースとして、先行研究に則った形で副振動を解析し(図-2)、さらなる検討を行った。

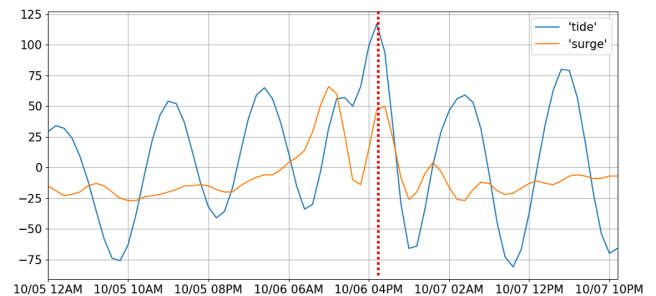


図-1 副振動のピークと潮位の関係(青：潮位, 黄：潮位偏差)

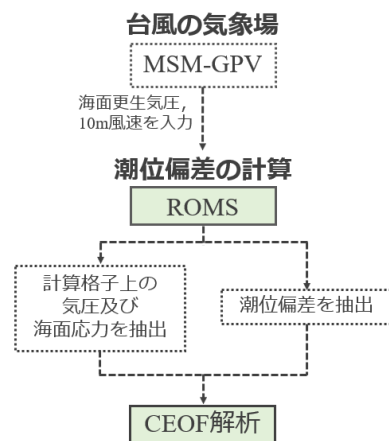


図-2 副振動の解析フロー

2. 検討事例

台風1418号は9月29日15時に南海上で発生し、勢力を強めながら北上したのち、10月6日の8時過ぎに静岡県浜松市付近に上陸した。その後、最低気圧965 hPa、最大風速30 m/sほどの勢力を保持して東京湾直上を通過し(図-3)、10月6日21時に温帯低気圧へ変化した。東京湾・晴海において最大潮位偏差66 cmの高潮が発生し、湾奥部を腹、湾口を節とした6時間周期の副振動が発生した⁹⁾。

一方、台風1419号は10月3日21時にマーシャル諸島で発生し、13日8時半ごろに鹿児島県枕崎市付近に上陸した。その後、最低気圧985 hPa、最大風速25 m/sほどで大阪府泉佐野市付近に再上陸して日本列島を通過し(図-3)、14日9時に温帯低気圧へ変化した。両台風ともに東京湾通過時の移動速度は80 km/h程度で、東京湾・晴海において最大潮位偏差64 cmの高潮が発生したが、台風1418号で見られたような顕著な副振動は発生しなかった。

3. 計算の流れ

本研究では、 σ 座標系を採用した領域海洋モデルROMSを使用した。本モデルは構造格子を使用しており、計算格子の高解像度化にあたってネスティングが必要となる。このとき、大領域と小領域の接続方法として、大領域から小領域にのみ変数を受け渡す一方方向ネスティングと、大・小領域の双方で変数を受け渡す双方向ネスティングがある。一方方向ネスティングの場合、境界条件が不適切だと接続境界上で反射波といった数値誤差が発生する可能性があるため、双方向ネスティングを採用した。ただし、双方向ネスティングの場合、接続境界上で水深に差があると数値振動が発生しやすいことから、大-小領域間で格子が重複する点については水深を等しくした。また、 σ 座標系のモデルにはHydrostatic InconsistencyやPressure Gradient Errorと呼ばれるモデリング誤差が存在しており、誤差を低減する1つの手段として、水深データを均すことが挙げられる。本研究では、Beckman & Haidvogel 数と呼ばれるパラメータが0.2より小さくなるように調整した¹⁰⁾。

気象外力はMSM-GPVの10m風速と海面更正気圧を入力した。MSM-GPVは1日8回、3時間間隔で実施されている現業予報で得られた格子データである¹⁰⁾。本研究では、京大生存研が提供するデータ¹¹⁾のうち、地表面の気象場を与えるものを使用した。時間解像度を高めるため、3時間毎に得られる解析値と、解析値を初期値として時間積分を行い、そこから得られた直近2時間の計算結果(予測値)を組み合わせている。なお、解析値とは数値モデルの計算結果に観測値を同化したもので、予測値に比

表-1 ROMSの計算条件

計算期間	10月4日0時～10月7日23時 (台風1418号) 10月11日0時～10月14日23時 (台風1419号)
計算格子	第1領域 6000m 第2領域 1200m 第3領域 240m
格子数	第1領域 448×498 第2領域 325×235 第3領域 205×290
鉛直層数	3層
海底地形	GEBCO2014

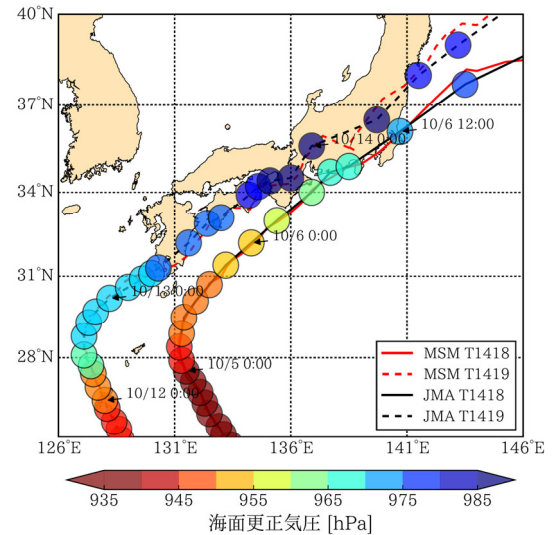


図-3 台風1418号と台風1419号の経路と中心気圧。岩本ら(2017)より引用⁹⁾。

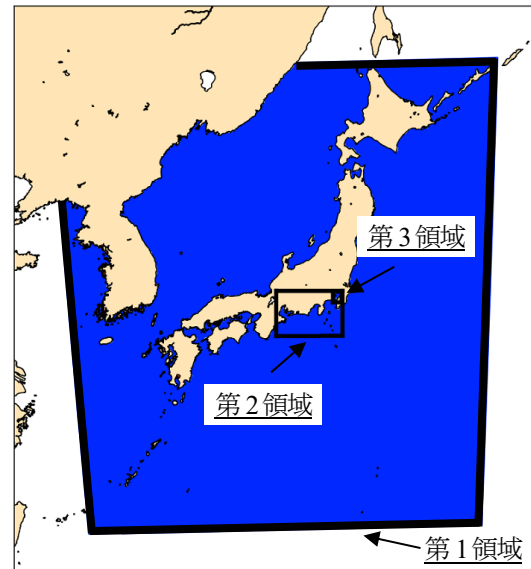


図-4 3段階の双方向ネスティングの設定。黒枠内の青色部分が計算領域に該当。

べて気象場が改善されている。計算条件は表-1の通りであり、計算領域は図-4に示すように3領域を設けた。

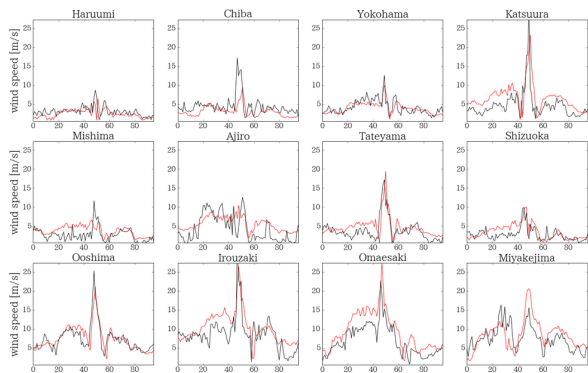


図-5 風速の絶対値の比較 上段：18号 下段：19号
(黒：観測値，赤：MSM-GPV)

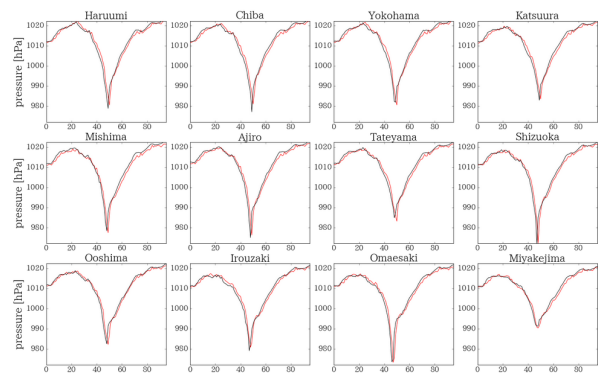


図-6 海面更正気圧の比較 上段：18号 下段：19号
(黒：観測値，赤：MSM-GPV)

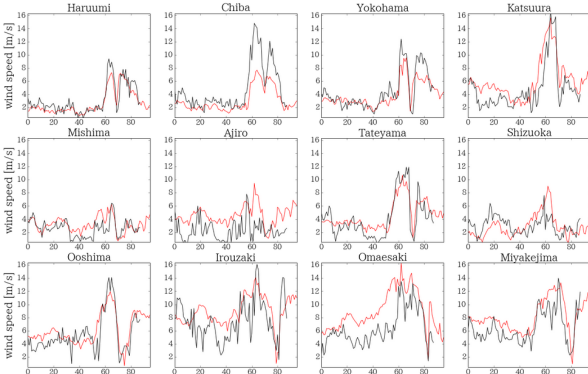


図-7 台風1418号の高潮再現計算結果 (マゼンタ：観測値，青：計算値)

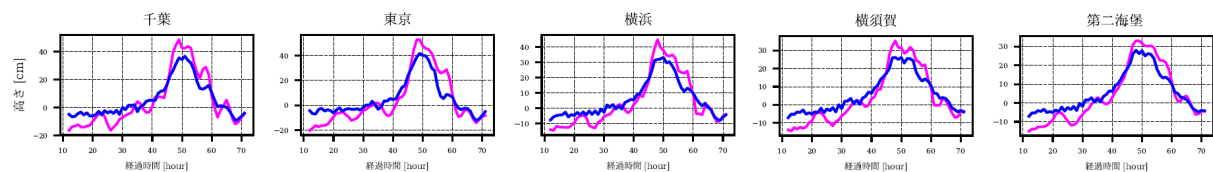


図-8 台風1419号の高潮再現計算結果 (マゼンタ：観測値，青：計算値)

4. 気象場および高潮偏差の再現性

はじめに、MSM-GPVの再現性を確認した。風速については、10 m風速の東西・南北方向成分を合成し、合成風の絶対値を求めたうえで、東京湾および相模湾のアメダス観測所計12地点の観測値¹²⁾と比較した。観測高が確認できない地点も存在したことから、風速の高度補正は行っていない。図-5に風速の絶対値、図-6に海面更正気圧の時間変化を示す。図-5に示す通り、一部の観測点で最大風速を過小評価しているものの、それ以外の地点では最大風速・時系列のいずれについても、概ね良好に再

現できている。また、海面更正気圧の再現性は最低気圧と時系列ともに良好である(図-6)。

次に、気象庁管轄の観測所(東京湾・晴海)、および国土地理院などが管轄する観測所(千葉・横浜・横須賀・第二海堡)の観測値^{13) 14)}を用いて、高潮再現計算の再現性を確認した。晴海については毎時潮位偏差データが提供されているため、これを使用した。千葉・横浜・横須賀・第二海堡については毎時潮位データが提供されているため、調和解析を実施して天文潮位を求め、その上で毎時潮位から天文潮位を引くことで潮位偏差を求めた⁹⁾。再現計算の結果を図-7および図-8に示す。台風1418号

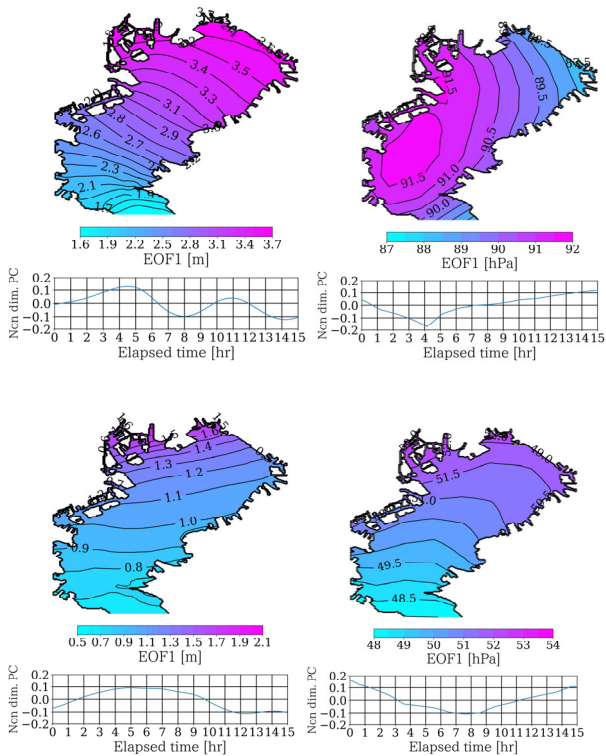


図-9 第一 EOF と時間関数 左：潮位偏差，右：海面更正気圧 (上段：台風 1418 号 下段：台風 1419 号)

による高潮では、湾奥部の千葉で最大高潮偏差を 20 cm ほど過小評価しているものの、それ以外の点では良好に再現できており、6 時間周期の副振動も再現されている。一方、台風 1419 号では全体的に過小評価となっているが、台風 1418 号で見られたような副振動は発生しておらず、波形を再現できている。

5. CEOF 解析の実施

CEOF 解析とは複素経験的直交関数 (Complex Empirical Orthogonal Function) 解析の略称で、大気・海洋分野で時空間変動のパターン抽出に用いられる EOF 解析を、複素数の範囲まで拡張したものである。今、観測して得られたデータ行列 X があるとき、この行列を空間成分 (固有関数：EOF) と時間成分 (時間関数：PC) の積に分解できると仮定したうえで、 X の共分散行列の固有値問題を解くと EOF と PC を求めることができる。また、固有値の大きさから、変動モードの寄与率を求めることができる。この X にヒルベルト変換 F を行い、解析信号 Z を

$$Z = X + iF(X) \quad (1)$$

と求めたうえで、この Z の共分散行列の固有値問題を解いて EOF と PC を求めるのが CEOF 解析である。解析信号 Z には、ヒルベルト変換 F によって X と位相が $\pi/2$ ずれ

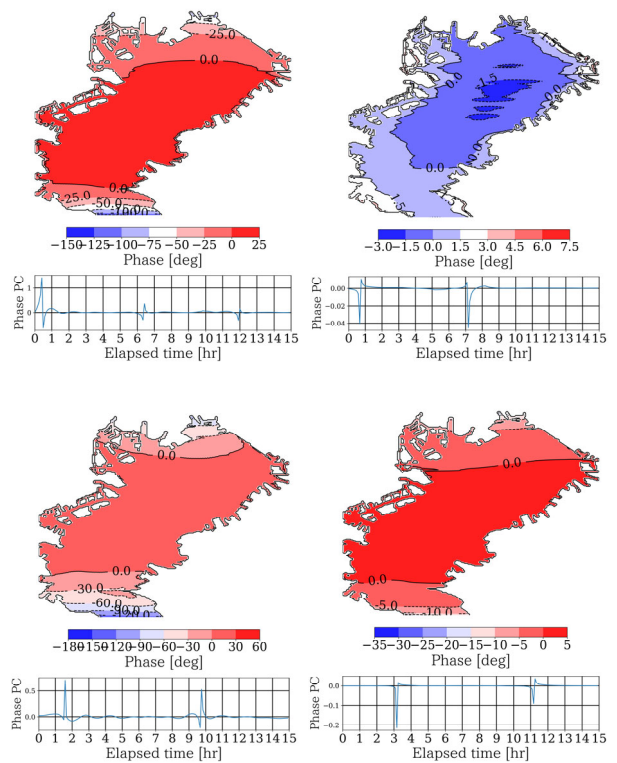


図-10 第一 EOF の位相分布 左：潮位偏差，右：海面更正気圧 (上段：台風 1418 号 下段：台風 1419 号)

た信号 $F(X)$ が含まれているため、データ行列 X の時間方向の変動を解析することができる。本研究では、最大潮位偏差を記録した時刻の前 5 時間、後 10 時間の計 15 時間分の潮位偏差と海面更正気圧に対して CEOF 解析を実施した。

まず、表-2 に第一 EOF の寄与率を示す。台風 1418・1419 号のいずれでもほぼ 9 割以上を示しているため、以降は第一 EOF に限って検討を進める。図-9 から、台風 1418 号では先行研究⁹⁾と同様、海面更正気圧の第一 EOF に台風特有の同心円構造が見取れる。このとき気圧勾配は北東方向に形成されており、潮位偏差の第一 EOF に見られる水面勾配の方向と一致している。この分布形は、東京湾における副振動の第一モードによく類似している¹⁰⁾。また、台風 1419 号についても海面更正気圧と潮位偏差の第一 EOF で、それぞれ北西方向に勾配が形成されている。また、図-10 に示す位相分布から、潮位

表-2 各モードの寄与率

	潮位偏差	海面更正気圧	湾軸方向応力	直交方向応力
第 1 EOF (台風 1418 号)	97.3%	99.2%	90.2%	83.4%
第 1 EOF (台風 1419 号)	96.1%	99.2%	92.8%	95.0%

偏差と海面更正気圧の両方で、湾全体の位相がほぼ等しいことが分かる。これらの結果に加え、吸い上げ効果による水位上昇の空間分布が海面更正気圧とよく対応することを考慮すると、潮位偏差の第一 EOF の差は、台風の経路に理由を求めることができる。すなわち、台風 1418 号は東京湾直上を通る経路を通過したため、気圧勾配が北東方向に形成され、潮位偏差の勾配も同じ方向に形成された。一方、台風 1419 号はより北側の経路を通ったために気圧勾配が北西方向に形成され、これに対応して、潮位偏差の勾配も北西方向に形成されたと考えられる。

さらに、位相分布の時間関数に着目すると、台風 1418 号ではスパイクが 6 時間毎に立っているのに対して、1419 号では 8 時間毎となっている。これは、潮位偏差の第一 EOF の時間関数で見られる波形の周期に対応していると考えられ、特に前者については、東京湾の固有周期が 5.46 時間¹⁰⁾であることと整合する。また、潮位偏差と海面更正気圧の間で、スパイクの立つタイミングを比較すると、台風 1418 号ではほぼ同じである一方、台風 1419 号では海面更正気圧のほうが 1 時間半程度遅い。このことから、台風 1419 号では、潮位偏差が減少に転じるタイミングで海面更正気圧の極小値が現れている可能性がある。これは台風 1418 号に比べ、吸い上げ効果が長時間作用していることを示唆しており、これが顕著な副振動が観測されなかったことの一因と考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/river/suibou/suibouhou.html>, 平成 30 年 10 月 3 日参照。
- 2) 国土交通省: 高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver.1.00 : <http://www.mlit.go.jp/common/001098830.pdf>, 平成 30 年 10 月 3 日参照
- 3) 鈴木高二郎, 坪川将丈: 流速観測による台風通過後の副振動発生の検知について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.127-132, 2015.
- 4) 金成誠一: 台風 15 号通過時の東京湾北部海盆減衰副振動と減衰係数, 線形摩擦係数について, 地球環境研究, Vol.5, pp.43-49, 2003.
- 5) Wilson, B.W.: Seiches, *Adv. Hydrosci.*, 8, pp.1-94.
- 6) 岩本匠夢・高川智博: メソ気象モデルを用いた台風 1418・1419 号による高潮および副振動の再現計算. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, pp.265-270, 2017.
- 7) Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C.: The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Modelling*, Vol.9, pp.347-404, 2005.
- 8) 気象庁: 台風位置表 平成 26 年台風 18 号(オンライン),

6. おわりに

副振動の解析を行うにあたり、本研究では領域海洋モデル ROMS による高潮再現計算を実施し、計算結果と気象外力に対して CEOF 解析を行った。その結果、潮位偏差と海面更正気圧の第一 EOF がよく対応していることが確認された。これに加え、潮位偏差と海面更正気圧の第一 EOF は東京湾内でほぼ同位相であった。これは東京湾と台風の空間スケールの差に起因すると考えられる。以上を踏まえると、潮位偏差の第一 EOF で見られた空間変動パターンは、主に台風の経路に応じた気圧の分布形で説明されると考えられる。また、海面更正気圧の位相分布とその時間関数から、顕著な副振動が生じなかった台風 1419 号で、吸い上げ効果が台風 1418 号に比べて長時間作用した可能性があることが分かった。以上より、東京湾における 6 時間周期の副振動は、台風の経路と吸い上げ効果の継続時間の両方に起因することが示唆された。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、気象庁および日本海洋データセンターの提供する風速・気圧データ、潮位データ、および京大生存圏研究所の提供する気象データを使用した。心から感謝の意を表す。

- <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/typhoon/T1418.pdf>, 参照 2018-10-03.
- 9) 気象庁: 台風位置表 平成 26 年台風 19 号(オンライン), <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/typhoon/T1419.pdf>, 参照 2018-10-03.
- 10) Sikirić, Mathieu Dutour, Ivica Janeković, and Milivoj Kuzmić. A new approach to bathymetry smoothing in sigma-coordinate ocean models. *Ocean Modelling*, 29.2, pp.128-136, 2009.
- 11) 気象庁: 配信資料に関する技術情報(気象編)第 373 号(オンライン), <http://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyohou/pdf/373.pdf>, 参照 2017-07-01.
- 12) 京都大学生存圏研究所: 生存圏データベース, <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>, 参照 2017-07-01
- 13) 気象庁: 各種データ・資料, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>, 参照 2017-07-01
- 14) 日本海洋データセンター: JODC オンラインデータ提供システム, http://www.jodc.go.jp/jodcweb/JDOSS/index_j.html, 参照 2017-07-01.
- 15) 村上和夫: 最小自乗法による潮汐・潮流の調和分解とその精度, 港湾空港技術研究所資料, No.369, 38p., 1981.
- 16) 小西達夫: 2004 年台風第 22 号による東京湾の高潮と副振動, 海と空, Vol.83, No.4, pp.141-150, 2008.

全国初！疑似重力式構造を採用した耐震強化岸壁の整備について

長田康輝¹・下田義治²・森下倫明¹

¹中部地方整備局 三河港湾事務所 企画調整課 (〒441-8075 愛知県豊橋市神野ふ頭町1番地1)

²中部地方整備局 三河港湾事務所 工務課 (〒441-8075 愛知県豊橋市神野ふ頭町1番地1)

当事務所では、岸壁の延長不足及びふ頭用地の貨物の混在等を解消するため「ふ頭再編事業」を進めており、既設護岸を水深12mの耐震強化岸壁として整備した。岸壁は、元々陸地化されている特性を活かし、全国初の疑似重力式構造（原地盤を地盤改良で連続固化処理した構造）を採用した。疑似重力式構造の設計では、複数の構造等を組み合わせることで、新たな設計体系を構築した。また、一連の施工において、固化改良体の一体性及び地盤改良による影響の確認を行い、疑似重力式構造の信頼性を向上させることが出来た。

キーワード：疑似重力式、耐震強化岸壁、設計体系、固化改良体

1. はじめに

三河港は、我が国を代表する完成自動車の輸出入拠点である。一方で、神野地区では、自動車運搬船（船長約200m）に対して、岸壁の延長不足によって同時着岸が制限されていた（図-1）。そのため、船舶の待ちは発生するなど、非効率な輸送を余儀なくされていた。

また、神野地区周辺には、今後発生が懸念される南海トラフの巨大地震に耐えられる耐震強化岸壁がない状況であった。そのため、緊急物資を輸送するための耐震強化岸壁の早期整備が求められていた。

以上のことから、当事務所では、2014年より神野地区における「ふ頭再編改良事業(図-2)」に着手し、7号岸壁の西側に隣接する区域で、水深12mの耐震強化岸壁の整備を進めてきた。

今回整備する耐震強化岸壁では、複数の構造形式の中から、既設構造物の活用や供用中の隣接施設への影響等を理由に、全国初の疑似重力式構造が採用された。

疑似重力式は、地盤改良により一体的に地盤を固化処理することで、大きなひとつの固化改良体を形成する構造である。しかし、その設計には前例が無く、固化改良体の照査手法も含めた設計体系の構築が課題であった。

加えて、施工中に地盤を一体的に固化することが出来たか、その際の施工による変位の影響が無かったか等、施工中及び施工後の品質確認も重要であった。

そのため、本報告では、全国初の疑似重力式構造の設計における新たな設計体系の構築、施工における固化改良体の一体性及び地盤改良による影響の確認結果について紹介する。

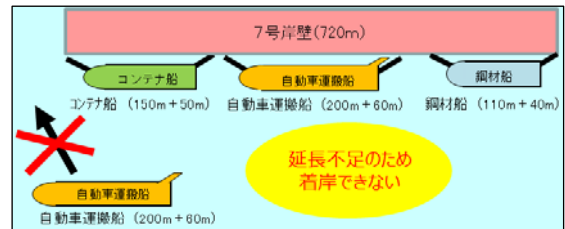


図-1 岸壁の延長不足による自動車運搬船の着岸制限



図-2 神野地区におけるふ頭再編のイメージ

2. 疑似重力式構造の設計体系の構築

(1) 耐震強化岸壁の構造形式の選定

多数の構造形式の中から、成立断面が比較的安価であったケーソン式、鋼矢板式、疑似重力式の3構造について、比較を行った。構造形式の選定に当たっては、①構造の実績、②陸地及び海域への影響、③既設構造物の活用、④施工コストを要件として設定した。

①構造の実績について、ケーソン式及び鋼矢板式は従来から全国的に採用されている。一方で、疑似重力式が耐震強化岸壁の本体構造に採用された実績はない。

②陸地及び海域への影響について、ケーソン式ではケーソン本体の据付時、鋼矢板式では本体鋼管矢板の打設時に、大きな作業船を要し、長期間の海上作業が必要である。一方で、事業対象区間が既に陸域化(図-3)されており、疑似重力式は主工種である地盤改良が陸上から施工出来る。そのため、ほぼ海上での作業がなく、供用中の隣接施設の荷役作業への影響が最も少ない。

③既設構造物の活用について、神野地区には元々護岸があったことから、疑似重力式のみ既設鋼矢板の一部を活用することが出来る。

④施工コストについて、疑似重力式が比較的安価な地盤改良工法を選択出来ることから、最も安価であった。

以上のことから、構造の実績はほぼなく、岸壁本体としての採用は全国初となるものの、他の全項目で優れていた疑似重力式構造を選定した(表-1)。

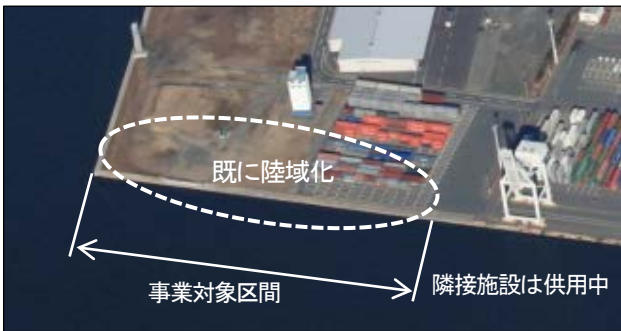


図-3 工事前の事業対象区間の状況

表-1 構造形式の比較結果

構造形式	ケーソン式 (重力式)	鋼矢板式	疑似重力式
構造の実績	◎	◎	△
陸地・海域への影響	△	△	○
既設構造物の活用	△	△	◎
施工コスト	△	○	◎
比較結果	不採用	不採用	採用

(2) 疑似重力式構造の設計

a) 構造の考え方

本来、地盤改良は、主に構造物への土圧軽減、砂質地盤に対する液状化防止を目的として、実施する。一方、本事業で採用した疑似重力式は、地盤改良により一体的に地盤を固化処理することで、一定強度を有した大きなひとつの固化改良体を形成し、その塊を重力式構造物相当の本体構造とする考え方である(図-4)。今回造成した固化改良体は最大で幅30m、高さ20.8mであり、その大きさのコンクリート塊の自重で、地震や土圧等の外力に対し持ちこたえるのが特徴である。加えて、固化改良体として必要な強度は、地盤改良としては一般的な深層混合処理工法等を用いることで、十分満足出来るという利点もある。

また、固化改良体と上部コンクリートの一体性を高める構造上の工夫として、形状をある程度自由に出来る固化改良体の施工性の良さを活かし、固化改良体上部にホゾ穴(図-4)を設けた。

加えて、地盤改良により造成した固化改良体は、波浪等の浸食に弱いため、既設護岸に使用されていた鋼矢板を保護材として有効活用することとした。

b) 設計照査の結果

疑似重力式構造の設計前例は無い。そのため、永続・変動状態(静的照査)の設計では「港湾の施設の技術上の基準・同解説」を準拠し、複数の構造等を組み合わせ(表-2)、その安定性等を確認した。

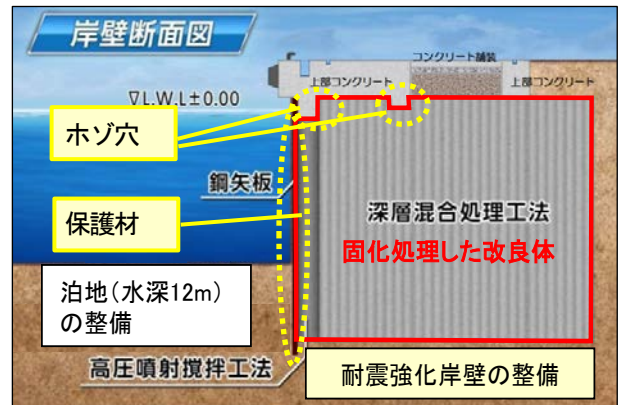


図-4 疑似重力式構造の概念図

表-2 静的照査における構造・工法の組合せ

項目	準拠した構造・工法
固化改良体の安定性	重力式係船岸
上部コンクリートの安定性	重力式係船岸
前面鋼矢板の安定性	矢板式係船岸
固化改良体の強度等	深層混合処理工法

疑似重力式構造のミソとなる固化改良体の照査は、主外力が土圧である永続状態と主外力がレベル1地震動である変動状態に対して、壁体の滑動、転倒及び基礎地盤の支持力不足による破壊が発生しないように行った。変動状態における照査結果の一例を表-3に示す。全項目で、耐力が発生外力を上回り、構造の安定性が確保出来た。

次に、耐震強化岸壁としての性能を確認するため、静的照査により決定した断面に対し、レベル2地震動（海溝型、活断層型、M6.5直下型）に対する地震応答解析（動的照査）を実施した。南海トラフの巨大地震における照査結果を表-4に示す。全項目で許容値以内となった。

なお、参考として全国に先駆けて採用した疑似重力式構造の設計フローを図-5に示す。

表-3 固化改良体の静的照査（変動状態）の結果

検討項目	発生外力	耐力	判定
滑動	2,928kN/m	5,598kN/m	○
転倒	36,761kN・m/m	95,019kN・m/m	○
基礎地盤の支持力	527kN/m ²	1,858kN/m ²	○

※上載荷重有り、R.W.L+2.40m、クレーン有りのケース

表-4 動的照査の結果（南海トラフの巨大地震の場合）

位置	検討項目	解析値	許容値	判定	
岸壁 法線	残留	水平	37cm	100cm	○
	変形	鉛直	21cm	—	—
		傾斜角	0.36°	3°	○
改良体	せん断耐力	185kpa	400kpa	○	
内応力	支圧強度	487kpa	800kpa	○	
鋼矢板	発生モーメント	176kN/m	505kN/m	○	

※既設-4m護岸のケース

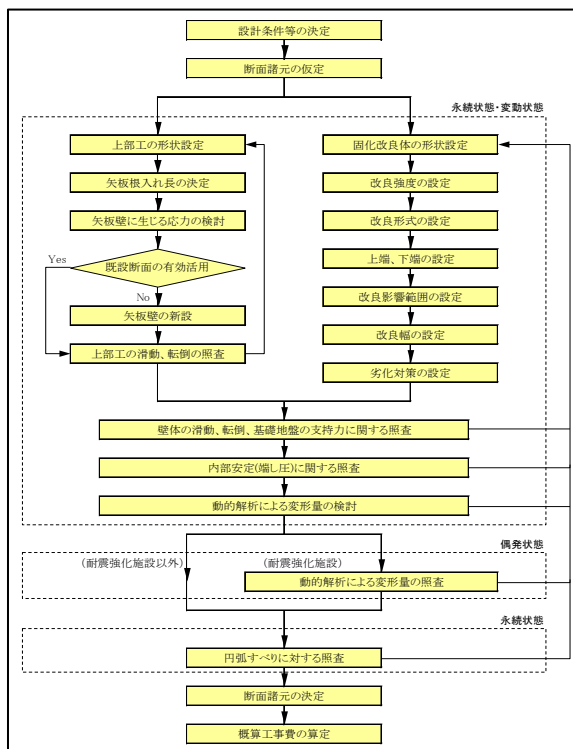


図-5 疑似重力式構造の設計フロー

3. 信頼性向上のための施工上の品質確認

2.のとおり、新しい設計の妥当性を確認したものの、過去に前例がない構造のため、施工中及び施工後の品質確認が重要であった。そのうち、本構造で特に確認すべきポイントは、一体的に地盤を固化することが出来たかどうか、また、その際の施工による影響が無かったかどうかであった。

(1) 固化改良体の一体性の確認

疑似重力式構造は、ほぼ隙間なく地盤改良を行うことで地盤を一体化する構造（ブロック式）であることから、固化処理した改良体の一体性が非常に重要である。

そのため、固化改良体が本体構造として機能するよう適切に施工されているか否かを確認する必要がある。試験施工において、一体化の最も弱点となる、個々の地盤改良体のラップ部分で、鉛直方向のボーリングを実施し、一軸圧縮強度試験を行った。その結果、設計上満足すべき基準強度（1,000kN/m²）を上回る結果であった。

加えて、固化改良体全体の一体性を確認する目的で、通常は行わない斜め方向のボーリングも実施した。結果は、図-7のとおり、全体を通して接合状態に連続性があり、固化体の品質も良好であった。

以上の結果から、個々の地盤改良体が確実に繋がっており、固化改良体の一体性が確認出来た。

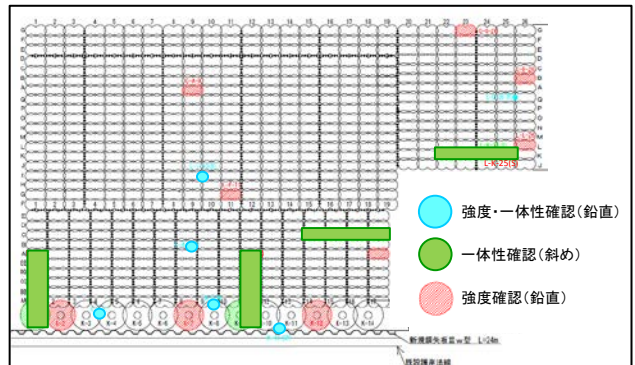


図-6 試験施工におけるボーリングの実施箇所

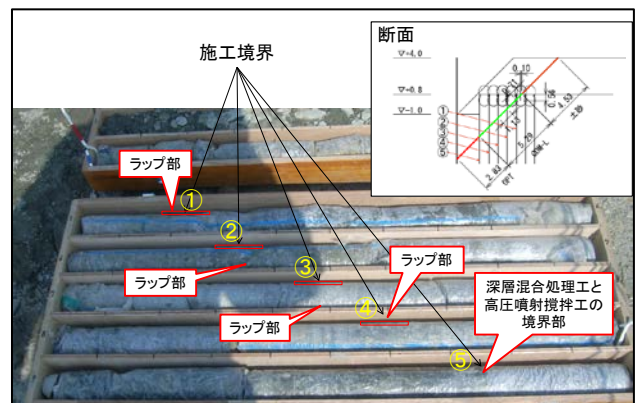


図-7 固化改良体ラップ部の接合状態（斜めボーリング）

(2) 地盤改良による変位の影響の確認

疑似重力式構造は、高密度（改良率92%）で施工を行うことから、施工による変位の影響が懸念される。そのため、地盤改良の一部で変位抑制工法を採用するとともに、地盤改良が鋼矢板等の既設構造物や地中変位に影響を与えないかを確認する必要があった。

以上の理由から、通常行われる鋼矢板天端面における変位計測に加え、施工期間中の前面鋼矢板のひずみ観測及び地盤の傾斜観測を実施した。

a) ひずみ計の観測結果

ひずみ計は、最も剛性の小さい鋼矢板（SP-IIIw型）に、計20ヶ所（D.L.+1.0m～-18.0m迄1m間隔）設置した。

ひずみ観測において、特に影響の大きかった前面泊地浚渫時の結果を図-9に示す。水深4mの現地盤から水深12mに増深した際、鋼矢板前面の受働土圧が解放され、約1.6mm程度のひずみが発生した。このひずみを矢板変位に換算すると、増加変位量は約5cm、累計変位量は約8cmとなった。残留水圧等の外力を等分布荷重に置き換え、上部コンクリートの下端と海底面（水深12.6m）間を単純梁でモデル化し、最大曲げモーメント発生時の水平変位量を計算した結果、約12cmであった。そのことから、観測値が理論値以内の結果であったことが分かった。なお、観測上の最大曲げモーメント発生深度は水深6.0～7.0m付近であり、上述の計算とも概ね一致していたことから、計算過程の妥当性も確認出来た。

以上の結果から、事業期間を通じて、地盤改良が前面鋼矢板へ及ぼす影響に問題がないことが確認された。

b) 傾斜計の観測結果

傾斜計は、理論上地盤改良の影響が及ばない範囲である地盤改良背後に2箇所、前面鋼矢板と地盤改良が隣接する場所に1箇所、設置した。

傾斜観測において、地盤改良の影響範囲外に設置され、特に影響の大きかった前面泊地浚渫時の結果を図-10に示す。相対的な変形が1mm以下であり、ほぼ変化していない結果となった。このことから、今回の地盤改良の施工において、過剰に地中変位を及ぼす力が発生していないことが確認された。



図-8 ひずみ計・傾斜計の位置

4. おわりに

完成した耐震強化岸壁は、全国初の疑似重力式構造を採用した。疑似重力式構造の設計では、既存の構造等を組み合わせることで、新たな設計体系を構築し、安定性等の照査を行った。また、施工時に行った固化改良体の一体性及び地盤改良の影響の確認結果は全く問題なく、これにより疑似重力式構造の信頼性がより高まった。そのため、疑似重力式構造は、今回の設計・施工を経て、今後の岸壁設計における選択肢のひとつとして、確立されたものと考えている。

2018年6月2日には、本施設の供用式典が行われた。今後、耐震強化岸壁の利用とそれに伴うふ頭再編によって、背後地域の国際競争力の向上や地域住民の安全安心の向上に貢献することが期待される。

謝辞：本報告の作成にあたり、ご指導・ご協力を頂いた関係者の方々に深く感謝し、御礼申し上げます。

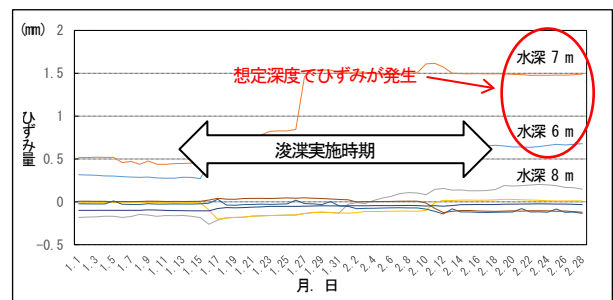


図-9 浚渫時のひずみ計の計測結果

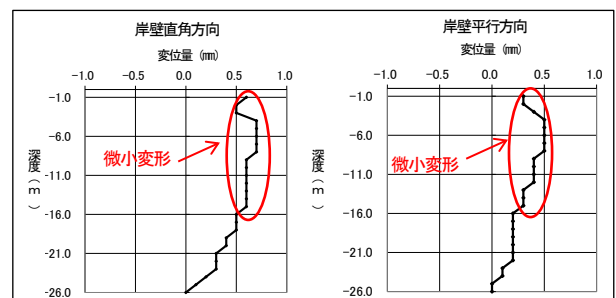


図-10 傾斜計の計測結果（最大値）



写真-1 完成した耐震強化岸壁

インフラ被災情報の把握技術に関する 性能水準の検討

白石 萌美¹・片岡 正次郎²

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

²国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 道路地震防災研究室（〒305-0804茨城県つくば市旭1）。

大規模地震発生時にインフラ被災情報を迅速に収集するため、国土交通省はCCTVカメラや防災ヘリ、UAV、衛星SAR、プローブ情報、SNS情報など各種技術の活用の検討を進めている。これらの要素技術を効果的に活用するためには、災害対応のいつどこでどのような情報が必要であるかや個別要素技術の特徴を明らかにする必要があるが明らかではない。本研究では、平成28年熊本地震の災害対応の実態調査に基づき、即時性・網羅性・信頼性の観点から性能水準として整理することで、情報ニーズの明確化を試みた。また、個別要素技術について、平成28年熊本地震時のデータを用いて活用可能性を検討し、性能水準を用いた評価を実施した。

キーワード 災害対応, 被災把握, 性能水準, 個別要素技術

1. 序論

中央防災会議が策定した防災基本計画¹⁾では、災害発生時、国や地方公共団体は被災規模の早期把握のため情報収集を実施することが記されている。国土交通省は、発災直後から防災ヘリ（災害対策用ヘリコプター）や全国に2万台以上設置しているCCTV(Closed-Circuit TeleVision)カメラ等を用いて迅速な情報収集を実施する。一方で、東北沖太平洋地震など被害が広域である場合や、平成28年熊本地震、平成30年北海道胆振東部地震のように発災が夜間であり、防災ヘリの飛行やCCTVカメラから得られる情報が制限される場合は情報の収集に困難が生じる。複合災害発生時にはより困難な状況が生じることは想像に難くない。

このことから、より確実な情報収集体制を構築するため、国土交通省はUAV(Unmanned Aerial Vehicle)、衛星SAR(Synthetic Aperture Rader)、SNS(Social Network System)、ETC2.0プローブ情報など、様々な技術の活用の検討を進めている。

国土技術政策総合研究所は、SIP防災研究の中で、CCTVカメラや衛星SAR、航空機等のツールを効果的に活用し、インフラ被災情報を早期に収集するための技術開発²⁾を実施している。また、行政側のニーズを技術開発側へ提示するため、災害対応の実態調査を実施し、情報ニーズを整理することで、技術に求められる性能水準を整理する取り組みを進めている。

図-1に本研究のフローを示す。2章、3章では、行政側

のニーズの調査として、熊本地震の災害対応を対象とした調査と、提示した技術要件の例について述べる。4章では、技術開発側のシーズの調査として、被災情報の把

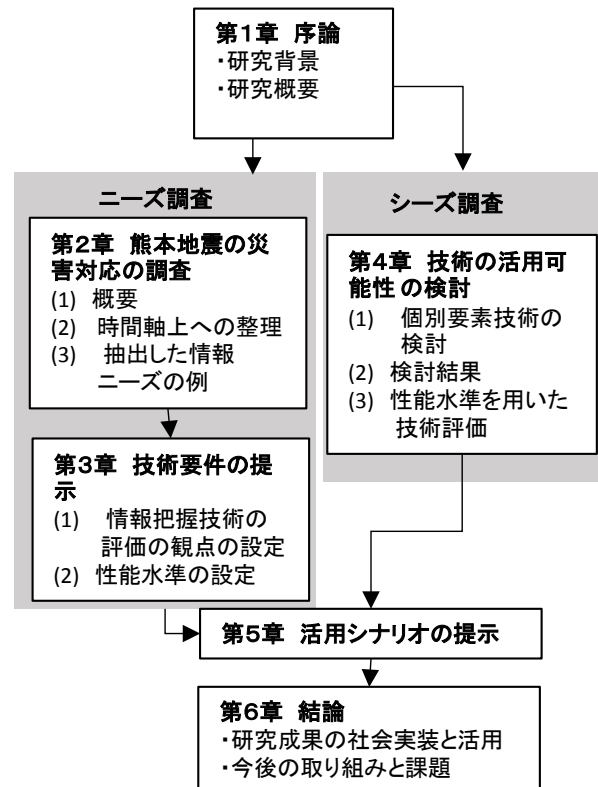


図-1 本論の構成

握可能性を有する各種技術の災害時の活用可能性を検討した結果について述べる。5章では、ニーズ調査とシーズ調査の結果を踏まえ、活用シナリオを提示した例について述べ、6章で本研究の結論を述べる。

2. 熊本地震の災害対応の調査

(1) 概要

平成28年熊本地震を対象に、災害対応の実態を調査した。対象とする災害対応は、国の道路管理者の道路の通行可否に関する情報の収集とし、特に発災直後の諸同時に着目した。調査は既存資料およびヒアリング調査により実施した。まず、九州地方整備局や報道機関などの公表資料の情報をもとに、時間軸上に事実関係の整理を行った。次に、災害対応に従事した九州地方整備局の職員等を対象にヒアリング調査を実施し、いつどこでどのような情報が取得されたのかを明らかにした。

(2) 時間軸上への整理

(1)の調査結果を、図-2に示すような時間軸上に整理した。縦軸は時間軸を表し、横軸は時間の意思決定の主体を表す。時間軸上には、各主体の行動や取得した被災情報を記すことで、「いつ、どこで、だれが、どのような情報を取得したのか」を整理した。

(3) 抽出した情報ニーズの例

時間軸上で整理した実際の災害対応の結果から、主な情報ニーズを抽出した。

a) 大規模被災箇所（阿蘇大橋地区の斜面崩壊）の把握

本震により、阿蘇大橋地区で長さ700m、幅200m、崩壊土砂量約50m³におよぶ大規模な斜面崩壊が発生し、国道57号、国道325号の阿蘇大橋、JR豊肥本線が流される事態が発生したが、発災が夜間（1:25）であり、また被災規模が大きく現場への道路が寸断されていたことから、現場の全容が確認されたのは、日出近く（5:30頃）に

NHKのヘリにより撮影された映像が報道された時点でなされた。

最大震度4以上の地震発生時には、該当するエリアの直轄国道の巡回を実施する。災害協力会社や、出張所の職員が道路状況の把握のため、巡回を開始したが、阿蘇大橋地区の斜面崩壊の現場へは、途中の道路が被災のため通行不可能であり、迂回を余儀なくされ到達することはできなかった。

b) リエゾン、TEC-FORCEの派遣

国土交通省は災害発生時、必要に応じて緊急災害対策派遣隊（TEC-FORCE）等を派遣し、被災状況の迅速な把握、被災地へのアクセス確保、被害の発生及び拡大の防止、被災地の早期復旧その他災害応急対策など、交通の確保に関して被災地方公共団体等が行う活動に対する支援を実施する。

本震発生後には、被災の大きい南阿蘇村へは立野ダム事務所からリエゾンが派遣された。2:55に南阿蘇村へ1名派遣されたが到達できないとの報告があり、8:26に1名が交替で派遣された。しかし、道路の被災や、鉄道の脱線による通行止めにより迂回を余儀なくされ、通常は1時間のルートに5.5時間程度を要し、南阿蘇村へ到達したのは14:00となった。

また、本局から派遣されたTEC-FORCEは、渋滞により移動に時間を要することとなった。移動経路選定のために、自動車メーカーがウェブ上で公開する道路情報を参照したものの、発災直後の渋滞を回避するだけの情報は得られなかった。

c) 孤立地域の把握

国土交通省は、孤立地域を早期に把握し解消する必要がある。直轄道路の点検は比較的早期に行われるが、地方道の道路状況の確認は、県や市町村などの自治体職員が、限られた人数で行うが、電話対応等を含めた様々な災害対応にあたるため、地方道の状況の把握には時間を要する。

14日の前震発生時に派遣されていたリエゾンの情報に

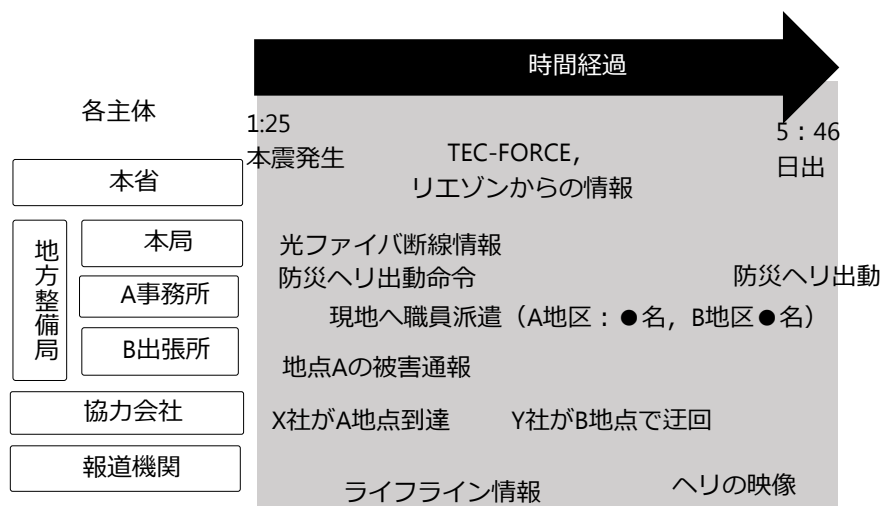


図-2 時間軸上での整理イメージ

より、16日の1:25に本震発生後、3時頃に竹の迫地区の孤立情報が把握され、7時頃には解消された。その他、NHKなどの報道情報により、5:41に垂玉温泉の孤立、9時頃に地獄温泉の孤立、14:47に東海大学キャンパスの孤立が把握された。

3. 技術要件の提示

(1) 情報把握技術の評価の観点の設定

これまで分野ごとに検討がされてきた「災害対応」を、分野横断的に俯瞰して、全体を同じ観点から検討するため、「即時性」・「網羅性」・「信頼性」の3つの観点を設定した³⁾。これら3つを評価の観点として設定した理由は、以下の通りである。

- 即時性：災害対応で取得する情報には、必要な時間内に取得できるかを評価する必要がある。
- 網羅性：時間の経過に従い災害対応が進むと、必要となる情報が全体の包括的な情報から局所的な詳細情報へと変化する傾向があるため、情報のもつ網羅性を評価する必要がある。
- 信頼性：取得した情報が意思決定に用いることができるものであるか、その信頼性を検討する必要がある。

これらの観点を設定することにより、以下のことが可能となる。

たとえば、理想は即時性・網羅性・信頼性のいずれも高い情報が望ましいが、発災直後に被災全域で詳細な調査を網羅的に実施することは困難である。

また、その他の情報の有用性が低いかということ、一概にそうとは言えない。たとえば、発災直後の情報の空白が生じている時間帯では、即時性が高い情報は信頼性が低くても有用性が高いと言える。また、網羅性が低い情報であっても、固定カメラのように局所的に信頼性が高い情報の有用性を評価する必要がある。

このように、性質が異なる情報を1つのものさし

で評価することにより、各種技術を組み合わせた活用方法を検討することが可能となる。

(2) 性能水準の設定

3. (1)で述べた3つの観点をを用いて、情報把握技術の性能水準を設定する取り組みを進めている。表-1に性能水準の例を示す。客観的な指標とするため、即時性・網羅性・信頼性ごとに、S~Dの5段階を設定した。

「即時性」は、地方整備局のBCPや、災害対応の実態調査に基づき設定した。SAR画像やプローブ情報など、生データの解析に時間を要する情報については、使用可能な状態で取得される時間で評価することとした。

「網羅性」は、道路施設などの線的な情報と、斜面崩落などの面的な情報を分けて整理することとした。CCTVカメラや地震計のように、全国に整備している技術については、1つ1つの機材ではなく、全体として評価することとした。

「信頼性」は、災害対応時に道路管理者が判断すべき意思決定に基づき、判断に必要とされる情報の精度から設定した。

4. 技術の活用可能性の検討

(1) 個別要素技術の検討

被災情報の取得が期待される技術について、それぞれ熊本地震発生時に活用した場合を想定し、得られる情報の即時性・網羅性・信頼性がどの程度向上するか検討した。

検討の対象とした技術は、SNS分析システム(DISAANA⁴⁾、赤外線カメラ搭載UAV、光ファイバの断線情報、衛星SAR画像、航空機SAR画像、ETC2.0プローブ情報である。

SNSやETC2.0は、発災から72時間(平成28年4月16日1:25~17日1:25)を対象に、時間とともに網羅性・信頼性がどのように変化するか、また山地部や都市部との違いを明らかにするため、地図上にtweetの件数や内容、自動車の

表-1 性能水準の例 (道路の通行可否判断に関する情報取得の場合)

分類	即時性	網羅性	信頼性
S	・24時間以内に取得可能 ・即時に利用可能なデータ形式で取得可能 ・30分以内に共有可能	・管轄内の全域(9割)の道路情報 ・管轄外を含む情報	・道路の通行可否を判断出来る情報 ・二次被害の可能性が把握できる情報
A	・1時間以内に共有可能	・管轄内のほぼ全域(7割)の道路情報 ・管轄外を含む情報	・車種(一般車, 炎対車, 大型車)を問わず通行が困難なエリアを判断できる情報
B	・3時間以内に共有可能	・管轄内のおおよそ(5割)の道路情報	・通行に影響が生じた可能性があることを把握できる情報
C	・3から12時間以内に共有可能	・管轄内の一部の情報	・通行に影響が生じた可能性があることを把握できる情報
D	・1日以内に共有可能	・管轄内の局所的な情報	・通行可否に関する推測情報

通行実績を時間ごとに表すことで整理した。

赤外線カメラ搭載UAVは、熊本地震で活用した場合を想定して検討した。平成30年2月20日に、県道28号沿いに位置する阿蘇地区の大切畑大橋で実際にUAVを飛行させ撮影した画像を用いて検討を行った。

光ファイバの断線情報は、熊本河川国道事務所の光ファイバ監視装置に記録されていた断線時刻・位置情報と、実際の道路被災による断線位置・時刻を比較し誤差を求めることで、どの程度の精度を有するか活用可能性を検討した。

衛星SAR画像の検討には、JAXAのALOS-2を用いて観測したデータを用いた。航空機SAR画像の検討には、国立研究開発法人情報通信研究機構がウェブ上で公開しているデータを用いた。

(2) 検討結果

SNS分析システムは、震後30分経過時点で停電などライフラインに関する情報が得られることが把握された一方で、道路被害に関する情報は得られなかった。これは、夜間に発災したことによると考えられる。4時間経過時点（日出頃）には、土砂崩れ、地割れ、道路の陥没など道路の通行可否に関する情報が確認された。

ETC2.0プローブは、「人口集中地区」並びに「市街部」を中心に、通行実績のある道路と、実際に通行可能であった道路が概ね一致していることから、通行可能な道路を把握するのに有効であることがわかった⁹⁾。平常時から通行実績が少ない山地区においては、通行実績が確認されない理由が道路被災によるものなのか判断が難しい。また、何台の通行実績があれば「通行可能」と判断できるのか検討する必要がある。

衛星SAR画像および航空機SAR画像は、落橋や斜面崩壊など大規模な被害箇所については、画像上の変状から被害発生の可能性を把握できることが確認出来たが、道路の通行可否に関する情報（段差、横ずれなど）の把握は出来ないことが確認された。特に、橋梁など高さがある構造物については、SAR画像の特性から、レイオーバーやレーダーシャドウといった現象により画像上で歪むため判読が難しい。

光ファイバの断線情報は、地震発生から7分後に、熊本河川国道の監視装置（監視方路：熊本河川国道→阿蘇→R57管理境界）で重障害レベル（6.0dB）以上の障害波形を検知した情報を用いて検討した（図-4）。道路被災と光ファイバ線路監視装置の光ファイバ監視情報に着目し、障害検知位置や検知時刻と道路被災との関係を整理した。その結果、実際の被災箇所との位置の誤差が約

表-2 性能水準を用いた技術評価の例

No	技術名	即時性	網羅性	信頼性
1	CCTVカメラ	A	C	A
2	光ファイバ断線情報	S	A	D
3	防災ヘリ	B	C	S
4	UAV(光学・赤外線)	B	D	S
5	衛星 SAR	B	S	D
6	SNS分析システム	A	C	C
7	ETC2.0プローブ	C	S	C
8	スペクトル分析情報	A	B	D

261mの情報が取得されていたことから、発災直後の大凡の被災位置把握への活用可能性があることがわかった⁶⁾。

赤外線カメラ搭載UAVは、画像から斜面崩壊、橋梁の段差や横ずれ等が判読できたことから、夜間の被害情報収集の可能性が確認できた⁷⁾。一方で、現場での実用のためには、精度の高い自動走行機能や、フェイルセーフ機能の検証など、安全な飛行を実現するための技術開発が必要となる。

(3) 性能水準を用いた技術評価

表-2に、評価の例を示す。たとえば、No.1のCCTVカメラは、常時監視のため即時性はA、全国に設置しているが画角が固定されているため網羅性はC、映像情報であるため信頼性はSとした。

また、国総研が開発したスペクトル分析情報⁸⁾を対象に評価を実施（表-2のNo.7）することで、他の技術との位置づけ等を明確化することを試みた。ここで、スペクトル分析情報とは、地震発生直後にK-NETの即時公開データ⁹⁾等から強震記録を取得し、加速度応答スペクトルを計算して、過去の代表的な被害地震等との比較をもとに施設被害の規模感を推定しようとするものである。地震発生から約15分以内に自動作成・配信をするため、即時性はAとした。また、全国の観測点情報を使用するため網羅性はB、推測情報であるため信頼性はCであるとした。

5. 活用シナリオの提示

4.での各種技術の検討結果を3.(2)の技術要件で評価し、効果的な活用方法の検討を試みた。評価結果から、即時性および網羅性が高い光ファイバの断線情報（表-2, No.2）と、赤外線カメラ搭載UAV

（表-2, No.4）について、熊本地震本震発生時の活用を想定した「活用シナリオ」を検討した（図-4）。

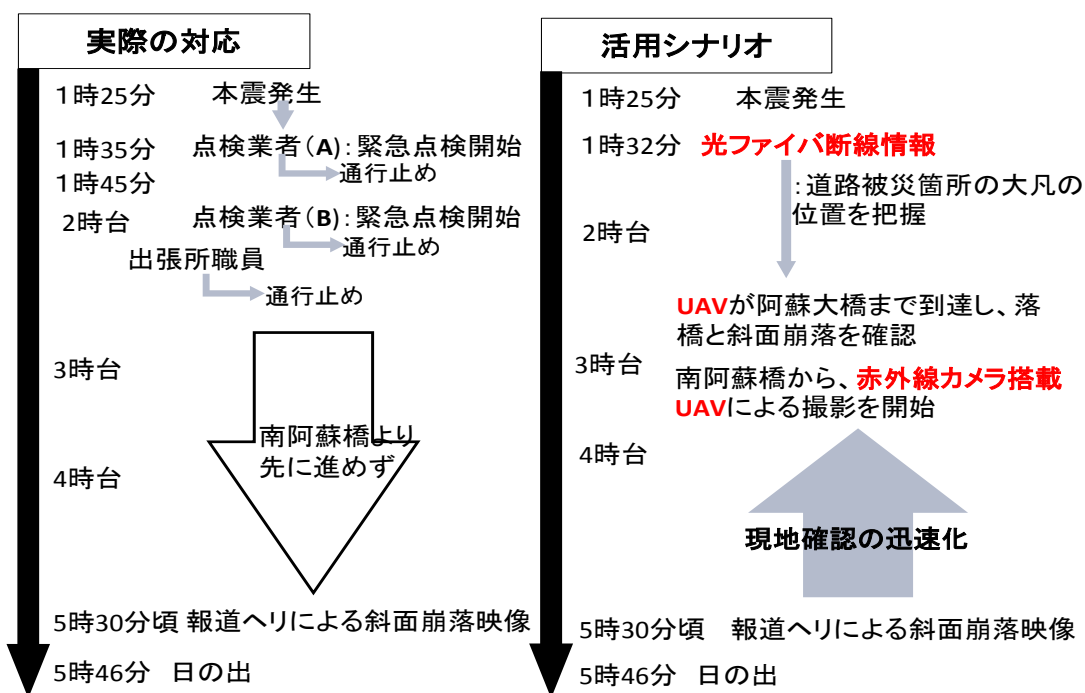


図-4 活用シナリオの例

図-4の左側の時間軸は実際の災害対応を示し、右側の時間軸は活用シナリオを示す。

実際の災害対応では、夜中の1時25分の本震発生後、災害協力会社2社（A社、B社とする）が担当区間の道路の点検を開始し、それぞれ別の方向から阿蘇大橋の斜面崩壊地区の確認に向かった。しかし、道路被災等により、A社は南阿蘇大橋手前、B社は国道57号の斜面崩壊地点手前から先へ進めず、阿蘇大橋落橋の現地の確認はなされなかった。また、警察から阿蘇大橋が落橋したようだとの連絡をうけ、出張所職員が現地の確認へ向かうが、南阿蘇大橋の被災および九州電力導水路の決壊により、現地へ到達することは出来なかった。日出頃、NHKの報道ヘリの映像により、阿蘇大橋の落橋は確認された。

一方、活用シナリオでは、南阿蘇大橋から赤外線カメラ搭載UAVを飛行し、道路被災により巡回が出来なかったエリアを確認することを想定する。平成28年4月16日午前1時25分の本震直後の午前2時台において、点検業者（B社）が巡回で到達できたのは、阿蘇大橋落橋A地点から道程で900mの位置にある南阿蘇橋手前B地点までであった。点検業者が南阿蘇橋手前のB地点から、約900m先のA地点へ、国道325号に沿って赤外線カメラを搭載したUAVを飛行することが出来れば、往復1800mの撮影飛行を8分程度で完了させ、飛行準備を含めて30分以内で阿蘇大橋の落橋及び斜面の崩落の被災状況を確認し、平成28年4月16日午前3時台には被災状況が把握されたものと考えられる。

ただし、本活用シナリオを実践するためには、①光ファイバの断線情報を電子地図上で簡単に確認できるような機能を監視装置に付与すること②赤外線カメラ搭載

UAVが十分な精度の自動走行機能およびフェイルセーフ機能を有することを想定している前提であることに留意されたい。

6. 結論

本研究では、道路管理者等へのヒアリング調査等に基づき、平成28年熊本地震の災害対応を時間軸上に詳細に整理することで、被災情報収集の実態を整理することで情報ニーズを明らかにした。さらに、現在整理を進めている性能水準の設定手法を提示した。また、発災時に被災情報の取得可能性を有する様々な技術について、熊本地震発生時のデータを用いて活用可能性を検討し、設定した性能水準を用いて評価した。一部技術においては、活用シナリオを提示した。

今後は、災害対応の実態調査を引き続き実施するとともに、性能水準を用いた技術要件の整理を進める予定である。

謝辞：本論の作成に当たっては、撮影実験やヒアリング調査にご協力頂いた九州地方整備局、熊本河川国道事務所、熊本復興事務所、熊本復旧研究室、西原村役場、周辺自治体様および住民の皆様に記載して御礼申し上げます。本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人: JST)によって実施されたものである。

参考文献

- 1) 内閣府：防災基本計画（平成 30 年 6 月 29 日中央防災会議決定）
- 2) 片岡正次郎：インフラ被災情報の収集・集約・共有技術の開発, 日本地震工学会・大会-2017
- 3) 白石萌美, 片岡正次郎：技術開発・社会実装に向けた災害把握技術の評価～熊本地震の災害対応時の情報ニーズに基づく分析～, 土木技術資料, Vol.60, No.4, pp. 24-29, 2018.4.
- 4) NICT ウェブサイト：対災害 SNS 情報分析システム (DISAANA) <https://disaana.jp/rtime/search4pc.jsp>
- 5) 片岡正次郎, 白石萌美：ETC2.0 プローブ情報を活用した熊本地震時の道路通行可否判断の評価, 第 8 回インフラライフライン減災対策シンポジウム講演集, pp. 83-88, 2018.1.
- 6) 猿渡基樹, 前田安信, 片岡正次郎：光ファイバ線路監視を活用した道路被災把握の可能性, 第 8 回インフラライフライン減災対策シンポジウム講演集, pp. 71-76, 2018.1.
- 7) 白石萌美, 片岡正次郎：赤外線カメラ搭載 UAV による現場撮影に基づく構造物被災把握の可能性評価, 日本地震工学シンポジウムシンポジウム投稿論文, 2018 (投稿中)
- 8) 石井洋輔, 中尾吉宏, 片岡正次郎：地震発生直後の初動期における早期被災規模感推定の取り組み, 第 32 回日本道路会議論文集, 2p., 2017.10.
- 9) (国研) 防災科学技術研究所ウェブサイト：強震観測網(K-NET,KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

UAV搭載型レーザスキャナを用いた 土砂崩落の把握

澤 可那子¹・野口 真弓¹・笹川 啓¹

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

災害後の復旧・復興作業には正確な被災状況の把握が肝要である。国土地理院では、2018年4月11日に大分県中津市耶馬溪町において発生した土砂崩落の状況把握を目的に、無人航空機に搭載したレーザスキャナによる観測を実施した。観測によって得られたデータから土砂崩落後の斜面の状況を把握するとともに、災害前後の地形モデルで差分解析を行い、流出土砂量の算出を行った。本論文ではレーザ観測の利点、災害時における無人航空機飛行の留意点や地形解析の結果等について報告する。

キーワード 地形把握, 無人航空機, UAV, レーザスキャナ, 土砂量解析

1. はじめに

2018年4月11日未明、大分県中津市耶馬溪町において大規模な土砂崩落が発生した(図-1, 図-2)。土砂崩落範囲は長さ約200 m, 幅約150 mにおよび、多量の土砂が流出した。流出した土砂は周辺の家屋4棟を巻き込み、6名の方が亡くなる等甚大な被害をもたらした。こうした災害時、被災状況の正確な把握は効率的に復旧・復興作業を進めるうえで肝要である。

近年、災害時の状況把握手段として無人航空機(以下「UAV」という。)が注目を集めている。一般に、UAVは航空機と比べ機動性が高く、また、人の立入りが困難な場所においても調査をすることが可能である。UAVは、機種にもよるが、光学カメラやサーモグラフィカメラ、レーザスキャナ等の多様なセンサの搭載に対応できるようになってきており、目的に応じたデータの取得が可能である。

国土地理院は、大分県中津市耶馬溪町で発生した土砂崩落をUAVに搭載したレーザスキャナを用いて

観測した。本報告ではレーザ観測の利点、災害時におけるUAV飛行の留意点、レーザ観測及び地形解析結果等について報告する。

2. 観測方法と観測装置

UAVを用いた3次元情報の取得には、①レーザスキャナによる3次元情報の直接取得、②撮影された複数枚画像からStructure from Motion (SfM) - Multi View Stereo (MVS) 技術を用いた表層高抽出、の2種類が一般的である。

耶馬溪町で発生した土砂崩落は、崩落斜面の一部に植



図-1 ■ : 土砂崩落発生場所



図-2 土砂崩落発生斜面

生が残存していた。この場合、SfM-MVSでは写真や動画に写（映）っていない植生下の3次元情報の取得はできない。一方でレーザスキャナは、無数に照射したレーザパルスの一部が植生の間をすり抜け地表面で反射し、その反射波を検知することで3次元情報を取得する原理上、多少の植生がある環境下においても地形の観測が期待できることから、今回は①の手法を採用した。

なお、本観測で使用した観測装置は、レーザスキャナ、GNSSアンテナ及び慣性計測装置（以下「IMU」という。）が組み込まれたYellowScan社製のYellowScan Surveyorである。レーザスキャナには比較的安価なVLP-16が使用されている。GNSSアンテナ及びIMUが付属されていることで高精度に3次元の点群データの位置情報を得ることができる。YellowScan Surveyorの機器構成を表-1に示す。また、レーザスキャナを搭載したUAVの諸元等を表-2及び図-3に示す。

3. 現地調査

現地調査は5月7日から5月10日に実施した。

(1) 現地下見

現地調査初日に災害発生現場の下見を行った。UAV

表-1 観測装置の機器構成と諸元

レーザスキャナ	VLP-16 (Velodyne 社)	
	照射数	毎秒 30 万発
	測定距離	100 m
	精度	±3 cm
	視野角 (FOV)	進行方向 30° 直交方向 360°
	チャンネル	16
	レーザクラス	1
	重量	830 g
GNSS アンテナ	AV14 (Trimble 社)	
	重量	25 g
IMU	APX-15 (Applanix 社)	
	ロール/ピッチ精度	0.025°
	ヘディング精度	0.080°
	重量	60 g

表-2 UAV の諸元

機体	Matrice 600 Pro (DJI 社)
寸法	1668×1518×727 mm
重量	9.5 kg (バッテリー含む)
ペイロード	6 kg
飛行時間	16分 (最大ペイロード時)

は機動性高く飛行させることが可能である一方、飛行方法を誤ると事故につながりかねない。そのため現地派遣前に飛行範囲周辺の情報収集をすることはもちろん、可能であればUAV飛行前に現地の下見をすることが必要である。現地下見に際しては特に以下の点に注意した。なお、記述している項目は著者が下見時に特に注意した点であり、これを満足すれば十分ということではない。

a) 離着陸場所の確認

UAVで現地調査を行う上で、安全な離着陸場所の確保は欠かせない。二次災害の恐れがない場所で、上空が開けているかつ飛行範囲の見通しが良いところが好ましい。また、UAV搭載型レーザスキャナは観測前に観測装置のキャリブレーションが必要となる。離着陸場所から観測に入るまでに直線及び旋回のキャリブレーション飛行を実施可能な場所があるか確認が必要である。

b) 植生高の確認

植生の高さはUAVの飛行高度を決定するうえで重要な情報となる。地表面の高さである標高に関しては、地理院地図の断面図機能等で事前に情報収集することが可能であるが、樹木等の植生の高さに関する情報を事前に入手することは困難である。そのため下見で植生の高さを確認し、飛行方法の決定に反映することが必要である。

c) 電波状況の確認

多くのUAVは機体とコントローラの通信に2.4 GHz帯を利用している。この周波数帯はWi-Fiの通信等、他の分野でも利用されており、現場周辺でこれらの周波数帯が利用されているとUAV飛行に支障がでる可能性がある。そのため下見時、定常的に当該周波数帯が利用されていないかの確認が必要である。

d) 現場に立ち入る他関係者との調整

災害現場では飛行範囲に工事関係者、災害調査を行う他機関等の立入りが予測される。UAVを第三者の上空で飛ばすことは危険が伴う可能性があることから、UAV飛行時間帯に飛行範囲内へ人の立入りがないように調整している。



図-3 レーザスキャナを搭載した UAV

(2) UAV搭載型レーザスキャナによる観測

UAV搭載型レーザスキャナによる観測を5月9日及び5月10日に実施した。5月8日は雨天のため観測をしていない。飛行コースを図4に示す。崩落斜面全範囲で点群データが取得できるよう、本スキャナの進行方向の視野角を考慮し、観測範囲よりやや広めに飛行範囲を設定した。コース両端は樹木上を飛行させる必要があるため、樹木に接触することのない安全な高さの範囲内かつ本スキャナの測定可能距離等を考慮し対地高度を約50 mとした。レーザスキャナで取得する点群データの点密度は、スキャナの性能、対地高度や飛行速度等により決定される。本観測では、崩落斜面における植生下の地表面の観測を行うのに十分な点密度の点群データを取得することが必要である。そこで、飛行速度を毎秒1 mとしコース間の重複率を多くとることで十分な点密度を取得できるように計画した。工事関係者等と調整した結果、飛行は工事の昼休憩の1時間に実施することとなったため、2日間かけて観測を実施した。観測諸元を表-3に示す。



図-4 飛行コース（背景のオルソ画像は4/11に防災ヘリが撮影した画像から作成）

表-3 観測諸元

計測日	2018年5月9日, 10日
コース数	6
コース間隔	約40m (水平距離)
飛行速度	毎秒1m
対地高度	50m
コース間重複率	約50%

4. 観測データ処理

観測した生の点群データの位置情報は、レーザスキャナ付属のGNSSアンテナで単独測位した結果を利用したものであり、大きな誤差を持つ。そのため、電子基準点を利用して基線解析を行い、位置を補正した。位置補正後の点群データを図-5、図-6に示す。また、レーザスキャナから距離が遠い点ほど誤差が大きくなることを考慮し、レーザスキャナから斜距離60 m以上の観測点は点群データから排除した。

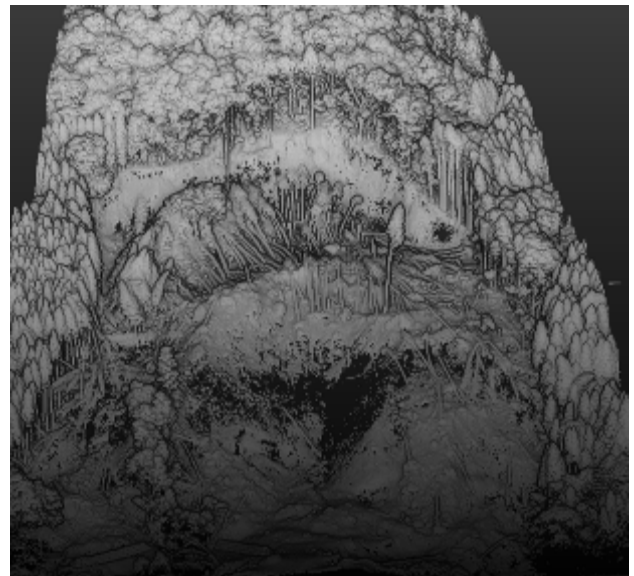


図-5 位置補正後の点群データ（正面から）



図-6 位置補正後の点群データ（右側面から）

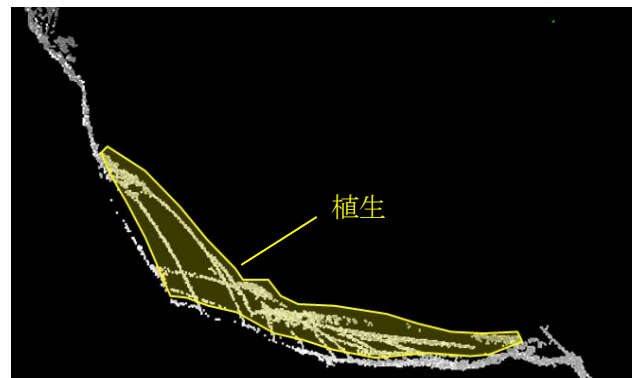


図-7 位置補正後の点群データの断面図

これまでの観測から本観測装置の位置補正後の垂直精度は約10 cm以内であり²⁾、本観測でも、斜面下部に設置した2か所の検証点における検証結果から同等の精度が得られていることを確認した。図-5、図-6から点群データが植生の葉や幹の詳細な部分においても取得されていることが確認できた。また、図-7（前ページ）の断面図から植生下においても点群データの存在が確認でき、点密度を厚くする飛行を行ったことでレーザーパルスの一部が植生間をすり抜け地表を観測していることが確認できた。しかし、図-5下方中央部において点密度が著しく低い箇所が確認された（図-8中央部右）。当該箇所付近では4月29日時点で地下水の湧水が確認されている³⁾。レーザーパルスは水分を含む土壌において反射が弱くなる⁴⁾ことから湧水による影響が考えられる。また、当該箇所はV字状に土砂流下方向にえぐられている場所であった。そのため、起伏の形状からレーザーパルスが照射され難かったことも一因と考える。

地形の変化を解析するため、植生や地物等を観測した点群データを除去するフィルタリング作業を行った。フィルタリング作業は、手動の場合、点群データ断面を確認しながら地表を観測した点群データ以外を除去することによって行う。本災害は土砂崩落範囲の幅が150 m程度あり、手動で詳細にフィルタリング作業を行うことは多大な時間を要することが予想された。本観測は災害時の迅速な状況把握を目的としていることから、簡易的な自動フィルタリングによって地表を観測した最小限の点群データを抽出し、不足がある部分のみ補助的に手動フィルタリングを実施するという方法を採用した。フィルタリング作業後の地形モデルを図-9及び図-10に示す。

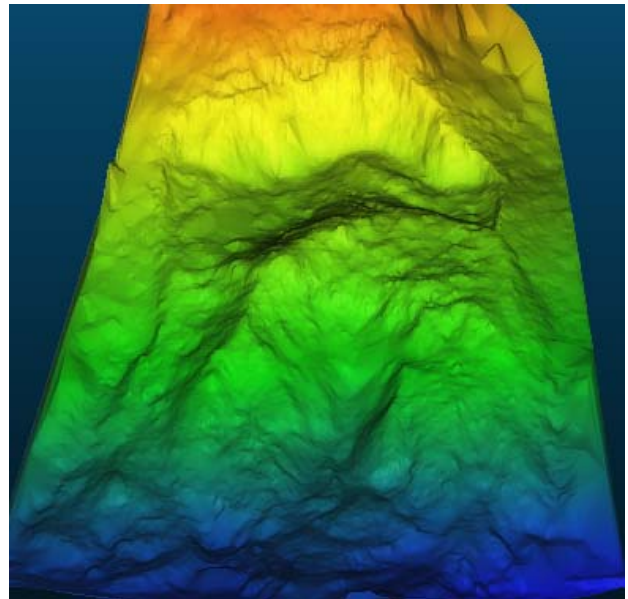


図-9 フィルタリング後の地形モデル（正面から）

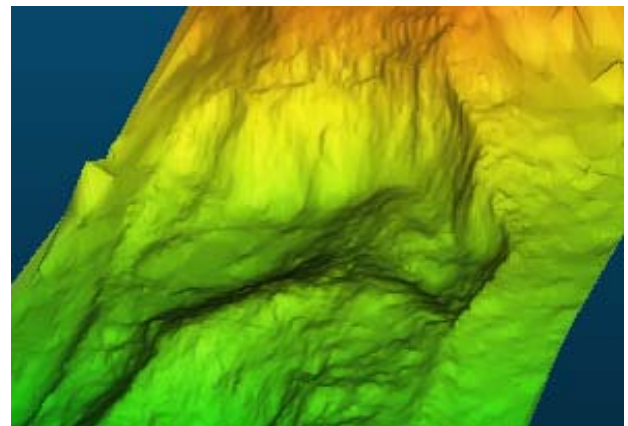


図-10 フィルタリング後の地形モデル（右側面から）



図-8 崩落斜面（○：点密度が低かった箇所）

5. 地形解析

観測した点群データから作成した地形モデルを利用し、流出土砂量の解析を実施した。解析は本観測による災害後の地形モデルと、2009年に航空レーザー測量により整備された基盤地図情報数値標高モデルとの差分をとることで実施した。解析範囲における差分標高値を図-11（前ページ）に示す。土砂流出部分においては最大約20 mのマイナス、堆積部分においては最大約10 mのプラスという結果となった。差分標高値を面積分して流出土砂の体積を算出した。その結果、流出土砂量を約34万立方メートル±0.7万立方メートルと推定した。本解析結果については大分県へ情報提供を行った。なお、本解析においては差分標高値が正となる部分の体積を流出土砂量として算出した（図-12）。観測日にすでに整地されていた部分は解析範囲外とした。

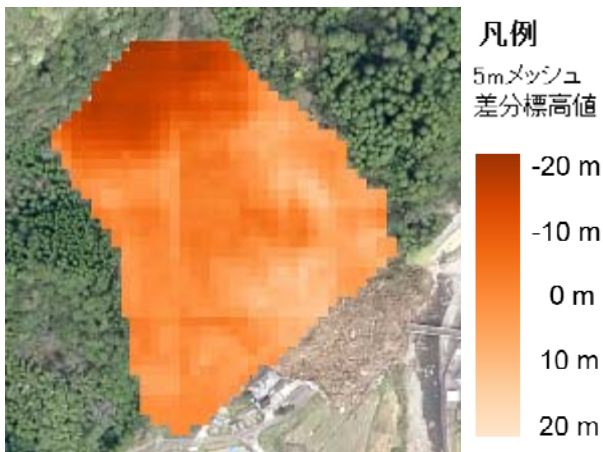


図-11 災害前後の地形モデルの差分標高値

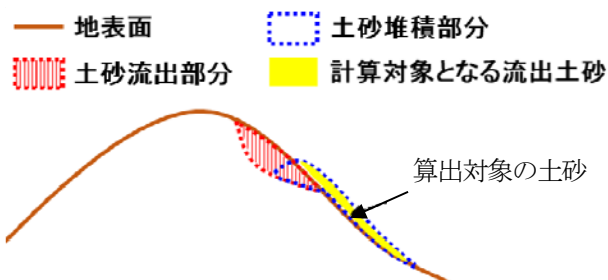


図-12 算出対象の流出土砂

6. まとめ

国土地理院では、2018年4月11日未明、大分県中津市耶馬溪町で発生した土砂崩落において現地調査を行った。現地調査では、機動性の高いUAVに植生下の地形の観

測に有利なレーザスキャナを搭載し、崩落斜面の観測を実施した。UAV搭載型レーザスキャナでの観測において、現地派遣前、現地下見時、観測時の各段階で二次災害につながることはないよう情報収集や各種調整を徹底した。

本観測から得られた点群データから地形モデルを作成し、流出土砂量を約34万立方メートル±0.7万立方メートルと推定した。この結果については大分県に情報提供を行った。

本観測では比較的安価なUAV搭載型レーザスキャナを用いて土砂崩落の把握を行った。比較的安価なスキャナを使用する場合、飛行に際し制約条件が多くなることから、スキャナの性能を正しく理解し、それを踏まえた飛行コースの設計及びデータ処理をすることで有用な観測が可能になり、正確な被災状況の把握が期待できると考える。

最後に、このたびの災害で被災された皆様に心よりお見舞い申し上げますとともに、被災地の一刻も早い復興をお祈り申し上げます。

参考文献

- 1) 国土地理院: UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)の手引き, 2018.
<http://www.gsi.go.jp/common/000198900.pdf>.
- 2) 澤可那子ほか: “UAV 搭載型レーザスキャナの精度検証”. 平成 30 年度年次学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会, 2018, p. 51-54.
- 3) 久保田哲也ほか: “2018 年 4 月 11 日大分県中津市耶馬溪町で発生した斜面崩壊”. 砂防学会誌, 2018, Vol. 71, No. 2, p. 34-41.
- 4) 丹治史哉, 三浦太佳也, 後藤光亀: 地上型 3 次元レーザスキャナにおける被測定物と反射強度の関係. 東北支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会, 2011, IV-43.
<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00322/2011/48-04-0043.pdf>, (参照 2018-08-14) .

災害時の緊急点検における ドローンの活用について ～都市部における新たな取り組み～

田邊 和嗣

関東地方整備局 北首都国道事務所 計画課 (〒340-0044 埼玉県草加市花栗 3-24-15)

[現 道路部 地域道路課 (〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心 2-1 合同庁舎 2号館)]

近年、ドローンは社会インフラの点検、空撮・測量、農薬散布など様々な分野で活用されており、遠隔操作にて目的地まで飛行し、精度の高い映像を取得できる性能を有することから、災害現場での調査にも活用されている。

北首都国道事務所では、首都直下地震時における八方向作戦の実効性を高めるための検討を行っており、早期情報収集の課題解決策として、緊急点検（パトロール）におけるドローンを活用する取り組みを進めてきたため、本稿において紹介する。

キーワード ドローン、無人航空機、首都直下地震、都市部

1. はじめに

(1) ドローンをとりまく状況

ドローンの活用はここ数年で大きく普及している。土木の分野においても、ドローンを用いた測量により出来形精度の向上や作業の迅速化といった、ICT 技術の導入による生産性向上を図ることを目的とした「i-Construction」において更なる検討が進められている(図-1)。また、橋梁点検におけるドローン技術の活用により、危険箇所における点検員の安全性向上や足場設置を不要とした点検効率化など、活用が期待されている。



〔図-1：「i-Con」でのドローン活用〕

(2) 八方向作戦概要

『八方向作戦』とは、首都直下地震が発生した際に各方面から都心に向け優先ルートの道路啓開を行う作戦であり、北首都国道は北方向の責任啓開事務所として、国道4号の緊急点検および道路啓開を担っており、災害時の実効性を高めるための取り組みを行っている。その項目の一つとして、早期の点検や状況把握に関する検討を行っており、その中で「災害時の緊急点検におけるドローンの活用」について取り組みを進めることとなった。

2. 災害時におけるドローン活用の現状

(1) 最近のドローンの活用事例

ドローンの土木分野における活用については、災害現場における状況調査にも非常に有効な手段として活用されている。

【熊本地震】

2016年に甚大な被害を出した熊本地震においては、山岳部での土砂崩れや地割れで車両が道路を通行できない中、ドローンによって被害状況を撮影することで状況確認に大いに貢献している。また、連日の地震による2次被害が心配される状況においても、安全かつ正確に被害状況を撮影し、役目を果たしている。

【九州北部豪雨・秋田豪雨】

2017年7月に発生した九州北部豪雨や秋田豪雨災害においてTEC-FORCE（緊急災害対策派遣隊）が派遣され、被害状況の把握にドローンが活用(写真-1)され、「被災箇所の調査は速やかに概要を把握する必要があり、2次災害の危険性も伴うことから、ドローンによる調査が効率的」との報告がされた。このことから、ドローンによる調査は、迅速な状況把握および被災地での活動の安全確保に有効であることが確認された。



〔写真-1：TEC-FORCEのドローン活用〕

(2) ドローンを活用した災害協定事例

災害時のドローンの有効性が注目され、自治体などにおいて災害時のドローンを活用した被災状況調査に関する協定を締結する事例が増えてきている。

埼玉県内の自治体例では、東松山市・小川町・滑川町などが災害時にドローンで被災現場の撮影による状況把握を行うための協定を締結しており、災害時の迅速な対応が期待されている。

3. 八方向作戦におけるドローン活用の目的

(1) 国道4号パトロールの現状と課題

【現状】

八方向作戦においては、首都直下地震発災後に国道4号の東京都内区間を自転車によりパトロールを行うこととなっている。

【課題】

訓練にて自転車で対象区間（新善町交差点～日本橋：約20km）を走行した結果、平常時においても約3時間程度を要することから、災害時には現地状況や交通状況により多くの時間を要する懸念がある。また、災害時の通信障害等により連絡ができず状況把握ができない懸念がある。

→被災状況の早期収集が困難となる可能性がある

【対策】

上記課題を解決する手法として、飛行機能を有し、かつカメラを搭載するドローンの活用について取り組むこととした。ドローンの活用による、点検の迅速化および上空からの撮影といった被災状況把握の実効性について、検討を行った。

4. ドローン活用の検討

ドローン活用にあたって、検討項目を抽出し、項目毎に検討・整理を行った。



(1) ドローン活用の範囲の整理【STEP1】

ドローンの活用は、緊急点検の迅速化および被災状況の把握を目的とするため、点検の実効性を高めるために活用範囲の検討を行った。

①全区間をドローンにて点検

範囲	全区間をドローンにて点検
効果	迅速な点検が可能 映像による被災状況の把握が可能
課題	第三者が多く存在する箇所での飛行のため、飛行にあたっての制約等の確認を要する

②被災箇所のみをドローンにて点検

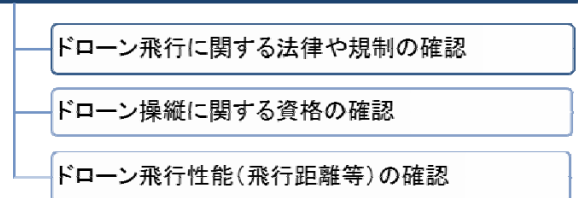
範囲	被災箇所のみを、ドローンにて点検
効果	通行不可箇所や被災箇所の点検が可能
課題	自転車点検後にドローンの飛行を行うため、迅速な点検が出来ない

上記条件にて検討を進めた結果、ドローンを活用する目的である『点検の迅速化および被災状況の把握』を行うため、①全区間をドローンにて点検を行うこととした。

(2) ドローン活用の適用条件整理【STEP2】

【STEP1】において、点検範囲や活用方法が決定したため、【STEP2】としてドローンが飛行するための適用条件について、以下のとおり検討・整理する。

都内の国道4号におけるドローンの飛行



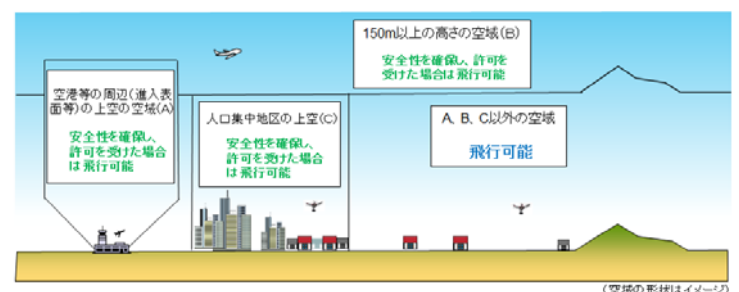
ドローン飛行に関する法律や規制の確認

ドローン（無人航空機）の飛行を規制する法律は、航空法が該当する。昨今、無人航空機が急速に普及し各分野での利用が広がっていること、一方で落下事故が多発している現状を受け、平成27年12月に航空法が改正され、無人航空機の飛行禁止空域や飛行方法が定められた。

【航空法第132条：飛行の禁止空域】

無人航空機の飛行禁止空域が定められ、以下の空域においては、国土交通大臣の許可を受けなければ、飛行させてはならない。

- (A) 空港等の周辺の上空の空域
- (B) 150m以上の高さの空域
- (C) 人口集中地区の上空



〔図-2：飛行禁止空域〕

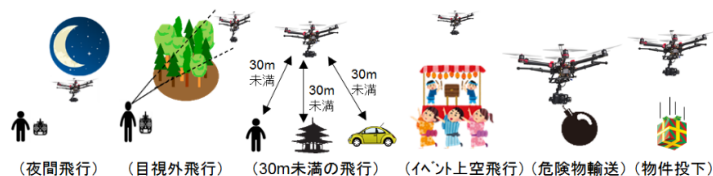
【航空法第132条の2：飛行の方法】

無人航空機の飛行の方法が定められ、以下の方法を外れる場合は、国土交通大臣の承認を受けなければ、飛行させてはならない。

承認が必要となる飛行の方法

- (1) 日中での飛行
- (2) 目視範囲内で無人航空機と周囲を監視して飛行
- (3) 人または建物等との間に30m以上の距離を保って飛行
- (4) 祭礼、縁日など人が集まる催しの上空で飛行させない

<承認が必要となる飛行の方法>



〔図-3：飛行の方法〕

【航空法第132条の3：捜索、救助のための特例】

事故や災害時において、国・地方公共団体又はこれらの依頼を受けた者が、捜査や救助のために飛行する場合には、航空法の『飛行の禁止空域』『飛行の方法』に関する規制が適用されないと規定されている。

⇒これにより、北首都国道での取り組みでは、航空法の規制がされない。ただし、安全確保の責務を有する。

【ドローン操縦に関する資格の確認】

現在の法律では、ドローンを操縦するにあたり、免許等の取得を義務づけられていない。

ただし、ドローンの急速な普及と落下事故の増加を受けて、独自の民間資格により飛行スキルの習得が図られるケースも増えている。

【ドローン飛行性能の確認】

国道4号における点検の具体的な方法を検討するにあたり、ドローンの飛行性能を把握する必要がある。

【飛行時間】

20分～30分

【飛行距離】

5km～7km

【安全機能】

衝突回避・自動帰還

【天候性能】

雨天時飛行不可

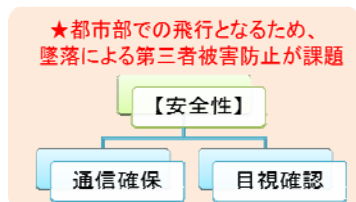
上記、ドローン飛行性能の把握により、点検を行う天候等の条件や点検を実施する範囲や区間延長などの基本的事項を決定した。

(3) ドローン活用における課題【STEP3】

【STEP2】において、ドローンを活用した点検実施の可能性を確認することができたが、点検の実施において以下の課題を抽出した。

【安全性】

最もこの検討を進める中で苦労した課題が、都市部での飛行となるため、点検飛行実施中の安全確保や安全対策といった【安全性】であり、ドローン墜落による第三者被害の発生を防止することである。



〔目視確認〕

点検飛行中に機器トラブルや不具合が生じた場合には、安全な場所に着陸させる措置や緊急帰還措置を講じる必要があるため、飛行状態を常に目視により監視する必要があるが、国道4号に隣接する大型ビルやカーブなどの道路線形により目視確認が困難である。

〔通信確保〕

ドローンの操縦には、一般的に携帯電話スマートフォンなどの通信で使用されている2.4GHz帯と言われる電波を利用するため、災害時の都市部での飛行においては、多くの電波が飛び交い、混信や通信障害が生じやすく、長い距離の操縦が困難である。

(4) ドローン活用課題の対策【STEP4】

【STEP3】において、ドローン活用における課題としたのは全て安全性に関わる項目であるが、一方で、安全性への配慮に重点を傾けると点検効率が低下してしまい、安全対策と点検効率にはトレードオフの関係にある。

【STEP4】では安全対策とその条件における点検効率化を図るための点検区間割の考えかたを述べる。

・目視による確認体制

重要な条件として、操縦者のほかに補助者を配置し常時目視を行い、ドローン飛行中の機器トラブル等に対応できる備えとした。〔目視確認：OK〕

・最大離隔距離

操縦者とドローンの最大離隔距離は、他の災害活動等実績のある操縦者へヒアリングを行い、通信操作可能距離と飛行距離や時間を勘案し、操縦者とドローンの最大離隔距離を1km以内とした。〔通信確保：OK〕

・点検区間割延長

操縦者を点検区間中心に配置した場合、ドローンと操縦者の最大離隔距離が1km以内であるため、1点検区間最大延長は約2kmとなる。よって、区間割りは点検総延長約15kmに対し8区間とした。

上記条件を満たすこと、および協定公募時に安全措置を備えたドローンを優位に評価し採用することで、安全性を確保した点検飛行が実現できると考えられる。ただし、ドローンは墜落する可能性がゼロではないため、今後、安全性に対する検証を続けていく必要がある。

5. ドローンを活用した点検概要

(1) 点検概要

都市部でのドローン点検に関する法律や規制、課題などの検討を進め、点検概要を決定した。

点検区間	<ul style="list-style-type: none"> ●国道4号(日本橋～都県境:延長約15km)をドローン飛行にて点検 ●ドローンの飛行性能や安全性から、1区間あたり2km以内とし、8区間に分割
点検実施	<ul style="list-style-type: none"> ●東京都心23区において、震度6強以上の地震発災後、ドローンによる点検開始 ●事前にプログラムした飛行位置(国道4号上空)にてドローンが自律飛行 ●ドローンにより撮影した画像を道路管理者に提出(送信)
安全対策	<ul style="list-style-type: none"> ●飛行にあたっては、機器不具合等発生時の安全性を考慮し、目視による監視および操縦者からの操縦が可能な体制にて飛行を行う。

[表-1: 点検概要]

(2) 他のドローン災害協定との違い

北首都国道が取り組むドローンによる点検と、他の災害協定のドローンによる点検の違いを以下に示す。

項目	点検地域	点検目的	点検開始
【北首都】	都市部 (第三者あり)	点検の迅速化や被災状況の把握	地震発災直後に開始
【他協定】	山間部等 (第三者なし)	確認された被災箇所状況把握	被災箇所確認後に開始

[図-4: 他の取り組みとの違い]



- ・歩行者などの第三者が多い
- ・ビルにより見通せない
- ・交差物件が多数存在
- ・建物が近接

[写真-2: 都市部の状況]

今回の取り組みにおいて、他の協定等と大きく異なるのは、地震発災直後にドローンにより飛行点検を開始すること、また、都市部という第三者が非常に多く、交差物件や建物が近接しており飛行にあたって危険を伴う地域での活動を行うことである。北首都国道の新たな取り組みでは、迅速な被災状況の把握が可能だが、一方で、墜落等による第三者への被害が懸念されるという安全性への配慮を十分に検討しなくてはならないという課題があり、今後も継続して検討を行う必要がある。

(3) 災害協定公募の結果

これまでの検討結果を踏まえて、ドローンによる災害応急対策活動に協力いただける企業を公募し、2018年1月に「ドローンによる災害応急対策活動(撮影等)に関する協定」を協力会社8社と締結した。

6. おわりに

(1) ドローンを活用した点検の重要性

災害発生時に、迅速かつ正確な被災状況を把握することは、道路の早期啓開と被災施設の早期復旧のために非常に重要である。

ドローンは災害現場の上空を飛行し、上空からの映像を取得することが出来るため、非常に有効な手段であり、各方面で活用が検討されている。

北首都国道においても被災状況の早期把握のための手法として、大いに活躍が期待される。

また、今回の都市部でのドローンの活用は、他の事例がない新たな取り組みであり、この取り組みの実効性がこれからのドローン活用の幅を更に飛躍させる重要な役割を担っている。

(2) 検討における工夫と苦労点

今回協定締結を行った都市部でのドローンによる飛行点検は新しい取り組みであることから、点検の要求事項を満足し、かつ協定参加者に負担なく応募してもらえるよう、協定内容の決定には多くの苦労があった。

a) 工夫(協定参加者の負担軽減)

災害時という非常時での活用となるため、最低限の人数で応募ができるよう、班体制は操縦者と補助者1名の最小2名を可能とした。区間割の決定には、実際に現地を調査し、ドローンの墜落原因となる高圧線や目視の障害となる道路のカーブが区間中央にならないような配慮を行った。

b) 苦労(点検内容の決定)

都市部でのドローンによる飛行実績等の前例がないため、電波障害発生源や操縦可能距離等の明確な根拠が得られず、点検内容や仕様の決定が困難だった。

しかし、道路管理者としてドローン墜落等による第三者被害を防ぐため、災害現場で操縦実績のある操縦者へのヒアリングや少ない類似飛行事例を基に何度も議論を重ね点検内容を決定した。

(3) 今後の課題

ドローンを活用した点検における今後の課題は、どのように災害発生時を想定した訓練を行うか、および災害時に体制が確保できるかである。訓練においては、関係機関との協議の結果、第三者被害の懸念がある都内では訓練としてのドローン飛行ができないため、都市部の状況を再現した訓練を行う必要があり、都市部での問題となる、電波障害や建物による遮蔽がある中での飛行、画像撮影や画像送信等といった訓練手法を検討する必要がある。また、災害時における協定会社の体制確保の検討など、実際の災害時における点検の実効性を高める取り組みを継続していく必要がある。

防災点検箇所に関する実効性のある効率的な調査手法について

福永 良三

関東地方整備局 関東技術事務所 技術課 (〒270-2218 千葉県松戸市五香西6-12-1)

全国の直轄国道では、平成8年・18年の防災総点検の結果を踏まえて作成された「防災カルテ」に基づき継続的にカルテ点検が実施されている。関東技術事務所では、管内のカルテ点検箇所に対し、点検記録や点検結果から対象箇所の安定性等を評価するため「道路防災診断業務」を実施している。

本報告では、点検対象箇所に対し、三次元概略地形図等を用いた調査手法により効率的に地域特性を把握し、無人航空機を用いた近接目視や簡易熱赤外線画像撮影等を用いた調査手法による実効性のある調査手法について、事例に基づき報告するものである。

キーワード 無人航空機, 簡易熱赤外線画像, 防災点検, 防災診断

1. はじめに

道路における災害の発生をできる限り防止するとともに被害を最小限に抑えるためには、岩盤斜面等の状態をできる限り正確に評価するとともに、日常管理等においてできる限り早期に災害に至る要因を発見し、適切な対策を実施する必要がある。しかし、これらの実施は容易ではないことから、道路管理者が防災管理を適切に実施できるようにすることを目指し、「防災カルテ」に基づく点検（以下、「カルテ点検」）が導入されている。本稿では、道路管理者が実施する「防災カルテ」の更新に伴うカルテ点検に関して実効性のある効率的な調査手法の試行結果について報告するものである。

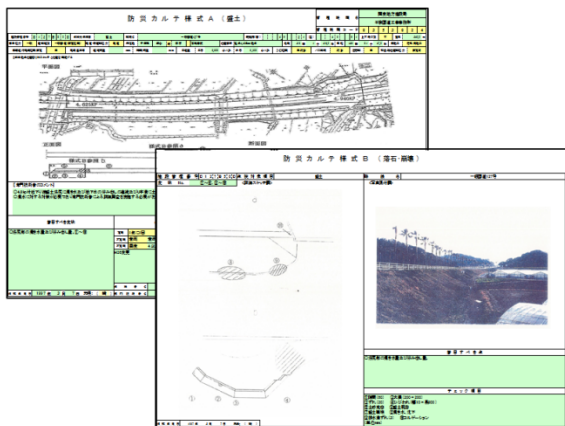


図-1 防災カルテ様式A及び様式B

2. 関東技術事務所における防災診断の実態

カルテ点検は初期に開始された箇所では20年以上が経過しており、当初「要対策」と評価された箇所でもその後対策が完了している箇所もあれば、当初着目した変状以外の部位で新たな変状が発生し不安定化が進行している箇所もある。

関東技術事務所では、これらのカルテ点検箇所に対し、点検記録や点検結果から対象箇所の安定性等を評価するため「道路防災診断業務」（以下「防災診断」）を実施している。「防災診断」は、各直轄国道事務所から関東技術事務所が抽出した箇所についての診断依頼を受けて、斜面防災に関する専門技術者からの助言や現地での合同調査結果を踏まえ、「防災カルテ」の評価等を行っているものである。



図-2 有識者を交えた現地診断状況

3. 防災診断の実施にあたっての課題

【課題①】

平成8年や18年の防災総点検では、管理路線を集中的に現地調査することで、専門技術者は路線を俯瞰的に眺め地域特性や災害特性を十分に把握したうえで防災カルテを作成することができたが、防災診断ではスポット的に調査、評価を行うことから、診断に当たっては広域的な地域特性を十分に考慮した上での評価が困難である。

【課題②】

防災カルテは、古いもので平成8年に作成され運用されている。過去20年の間に、風化や経年劣化、維持管理上の問題により新たな変状や岩盤劣化に伴う新規危険要因が発生している可能性は否定できず、これらを見落としなく抽出し評価する必要がある。

4. 防災診断にあたっての課題に対する実効的かつ効率的な調査手法

【課題①の対応】

カルテ作成開始当時は、1/25,000 地形図や空中写真を用いた実体視、広域地質図等に基づく机上検討や、本線周辺のみ道路台帳 1/5,000 森林基本図をベースにした現地調査を行って膨大な労力と時間をかけて作成されていた。

平成29年度に関東技術事務所が行った防災診断では、広域地形を三次元的に俯瞰することは平面図等からは直接的に把握できない斜面勾配状況、集水地形や地すべり地形等の地形特性を把握に有効なため、国土地理院が提供する基盤地図情報（数値地形モデル）から三次元概略地形図を作成し、要確認箇所等を抽出し現地調査の精度向上を図った。

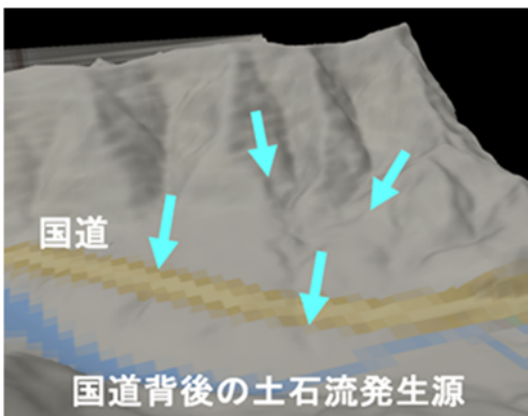


図-3 三次元概略地形図 (例)

また、飛行条件に制約はあるものの、無人航空機（ドローン）を用いた上空からの概観撮影を点検箇所の広域的な状況把握に活用した。なお、広域的な地形形状把握

を目的として無人航空機を用いる際は、映像として記録の方が視覚的な空間把握に優れることから写真撮影ではなくビデオ撮影を採用した。



図-4 無人航空機による広域画像 (例)

【課題②の対応】

カルテ点検箇所には、岩盤斜面や急崖地形等、通常の現地踏査の装備では近接目視できない箇所も存在する。従来は双眼鏡を用いた遠望目視によりかろうじて斜面状況を把握するか、ロープアクセス技術を用いて特殊作業員が長時間をかけて危険を冒したクライミング調査により状況把握することで対応していた。



図-5 遠望目視による調査 (例)

このような箇所については、近接した画像撮影を行うことで変状の有無や発生状況把握が一定の精度で可能となることから、デジタルカメラを搭載した無人航空機による画像撮影を行った。



図-6 無人航空機による調査 (例)

これまで、高所においては上図のように、遠望目視で調査していたが、UAVにより下図のような近接目視が可能となり、斜面の形状等を確認することが可能となった。

続いて、目視点検では確認出来ない吹付法面やもたれ擁壁の背面の浮き状況の確認であるが、不可視部分であるため、有効と考えたのが、熱赤外線画像撮影である。

今回は、デジカメ式の簡易熱赤外線画像撮影により、対象物の温度分布を可視化することで構造物の健全性評価に役立てた。高所にあり近接目視が困難な擁壁に対して簡易熱赤外線撮影を行い、撮影画像から温度分布が周辺と大きく異なる箇所を推定したものである。

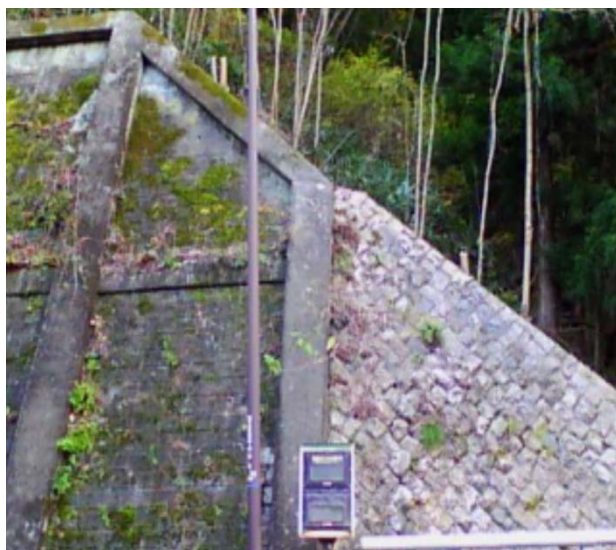


図-8 のり枠天端部分に確認された開口部の状況 (例)

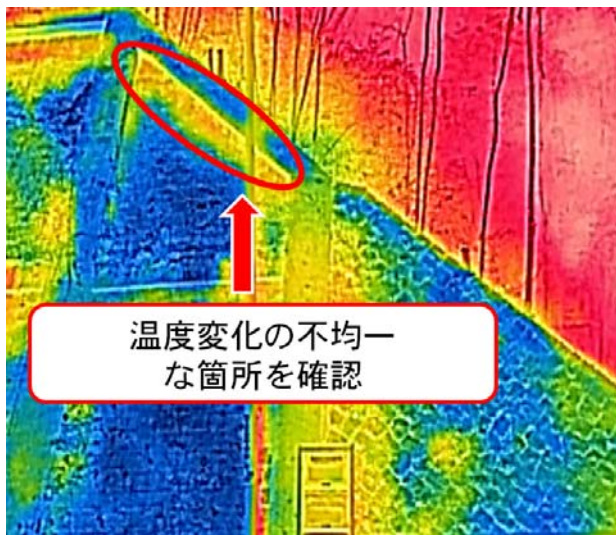


図-7 簡易熱赤外線画像撮影による温度分布調査 (例)

近接目視によって、当該箇所の背面に顕著な開口部が確認されたことから、今回の試行の有効性が確認できた。

5. 有識者診断における診断資料の評価

関東技術事務所で行っている道路防災診断業務（防災カルテ点検の「継続」、「終了」の評価業務）において、これまで示した調査手法を取り纏め、防災診断評価の基礎資料として活用した内容について、今回、防災診断に携わった有識者に意見を伺った。

<有識者意見>

「防災カルテ箇所の多くは山間部を切土により道路が施工されており、谷地形も多く存在することから、対象箇所周辺の広域的な地形を確認する必要がある。今回の防災診断では「三次元概略地形図」に加え、「無人航空機」を活用した画像を動画としてパソコンに取り込み、現場を確認しなくとも、机上で防砂カルテ箇所及び周辺の地形を確認することができた」との意見や、



図-9 無人航空機画像による有識者説明 (例)

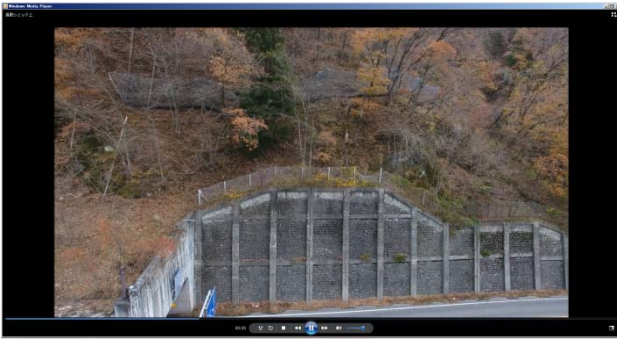


図-10 パソコン上での無人航空機画像動画（例）

「現場に行かずとも地域特性が理解でき、現地をリアルに近い感覚で確認できた」などの意見を、また、「防災カルテ箇所範囲が広い場合は、確認したい箇所へ画像を移動させることにより、時間をかけずに机上で直ぐに確認できる」など、視覚的に広い範囲で俯瞰的に現地状況を確認する方法として、無人航空機の活用が有効であることが解った。

不可視部分の診断では「簡易熱赤外線での撮影画像を整理し、机上診断時の基礎資料や、現地診断時には、画像資料と対象構造物との照らし合わせを行い、温度変化の因果関係についても確認できるものであった」との意見や、「現地診断時に確認したい構造物を対象に、スマートフォンを使用し、リアルな温度変化を確認できた」など、大掛かりな機材の設置等が不要であることから実行的かつ効率的に診断が実施されたものである。



図-11 簡易熱赤外線画像による机上診断（例）



図-12 簡易熱赤外線画像資料による現地診断（例）

有識者からの総合的な意見として「簡易的に調査できるツールとしては診断材料の参考資料として今回実施した調査手法は有効である」との意見を頂き、無人航空機による調査の実用性や有効性に対する高い評価を頂くと共に、簡易熱赤外線の画像を分析し、問題が想定される箇所について近接目視や打音調査の組み合わせで調査することで、より精度の高い確認ができるなど、今回実施した調査手法、診断資料の取り纏め方法については実効性のある効率的な手法として役立つものであった。

6. まとめ

防災診断における簡易熱赤外線画像や無人航空機による画像の使用目的としては、不可視部分を確認するうえでの参考資料として、また、地形、地域特性等の広域的な視野をパソコン上で確認し、防災対策計画や災害を未然に防ぐための地理的状況の把握などに活用するなど、診断精度を向上させるための調査手法として効果的に活用された。しかし、簡易熱赤外線については、画像による温度変化を確認することで、空洞、湧水等を想定することができるが、調査実績が少ないため、引き続き活用データの蓄積による信憑性の分析・検証が必要であると共に、無人航空機の使用に際しては、地形や土地利用は確認できるが、近接しての調査や樹木の茂った場所での調査は困難であることから、使用条件の整理、調査費用の検討が必要となった。

最後に、今回の防災診断では、三次元概略地形図を試行した結果、道路区域外を含めた広域的視点により、斜面全体を地形・地質構造・水文も含め俯瞰的に診断できた。また、道路に近接する土工構造物については、目視による点検に主眼が置かれてきたが、無人航空機やデジタル式簡易熱赤外線撮影を併用することで、不可視領域を可視化して診断を行うことができ、有識者説明の基礎資料として高い評価を得たものであるが、引き続き調査手法や診断資料の取り纏め方法について問題点等を抽出し、分析・検証を行い、全国的な防災診断業務の精度向上に向けた実用化を図っていきたい。

謝辞：道路防災診断にあたり、机上、現地診断を頂きました各県の大学有識者の皆様、現場調整等を頂きました関東地方整備局管内の国道管理事務所・出張所の方々にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。

南海トラフ巨大地震の津波を想定した 中部管内排水計画について

野田雄太・細野貴司・酒井大介

中部地方整備局 河川部 河川計画課（〒460-8514 名古屋市中区三の丸2-5-1）

今後発生が懸念されている南海トラフ巨大地震において、津波により大規模な浸水被害を生じる可能性がある。中部地方は、我が国最大の海拔ゼロメートル地帯である濃尾平野を抱えており、ひとたび津波による浸水が生じると長期浸水する恐れがある。本稿では、現在検討を進めている早期の復旧・復興に向けた排水オペレーション計画について中間報告をする。

キーワード：南海トラフ巨大地震，濃尾平野，浸水対策，排水計画

1. はじめに

近年発生確率が高まっている南海トラフ巨大地震によって中部地方整備局管内では地震・津波による被害が生じる懸念があるが、特に我が国最大の海拔ゼロメートル地帯を抱える濃尾平野をはじめ、愛知県・静岡県・三重県の沿岸部低平地では津波による大規模な浸水被害が想定されている。特に、地盤高が満潮時の海面あるいは河川水位より低い地域が多く存在しており、ひとたび浸水すると自然には排水されず、長期にわたり浸水が継続する恐れがある。浸水域内の道路等交通ネットワークは長期浸水が解消されなければ復旧することができず、早期に排水作業を行うことが、ものづくり中枢としての機能が集積するこの中部地方にとっては課題であり、そのため、災害時に速やかに排水作業を実施するための事前計画として排水計画が必要である。

2. 排水計画検討の経緯

平成23年の東日本大震災を契機に、中部地方整備局では平成23年10月に「東海・東南海・南海地震対策中部圏戦略会議（現・南海トラフ地震対策中部圏戦略会議）」を設立し、中部圏の国、地方公共団体、学識経験者、地元経済界、ライフライン関係者等が幅広く連携し、巨大地震に対する重点的・戦略的に取り組む事項を「中部圏

地震防災基本戦略」として策定している。

この基本戦略を推進するための“優先的に取り組む連携課題”が定められており、道路啓開・航路啓開との連携課題として排水計画が位置づけられ、平成24年8月に公表された南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等（第二次報告）に基づいた「濃尾平野の排水計画（第1版）」を、平成25年8月に策定・公表している（図-1）。

その後、平成26年度末までに静岡県・愛知県・三重県が、津波防災地域づくり法に基づいた“津波浸水想定区域”を公表したことを受け、これに基づいた中部管内排水計画の検討に着手した。

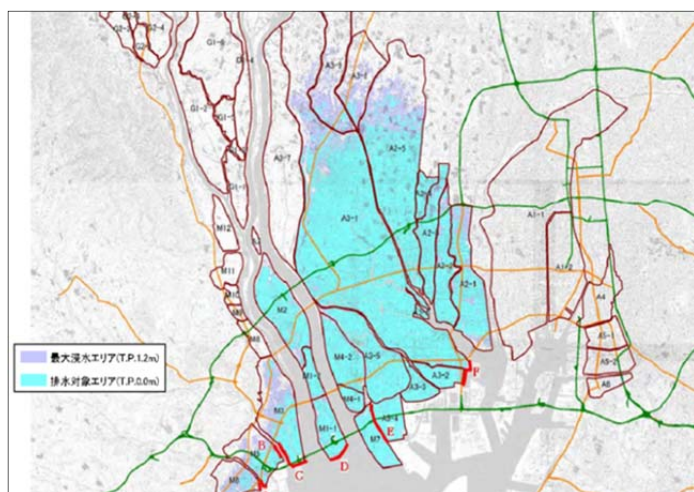


図-1 濃尾平野の排水計画（第1版）の浸水被害想定

3. 中部管内排水計画の検討概要

(1) 排水計画の流れ

地震発生後、救急救命・被災地への支援・施設復旧のための「総合啓開」として道路啓開、航路啓開、排水作業を実施していくことになる。「総合啓開」の流れとしては、まず地震発生後から高速道路等の広域支援ルートへの啓開が始まり、概ね3日間で沿岸沿いの主要道路が通行可能となる。その後、堤防等の仮締切が必要な箇所までの進入ルートを確認し、仮締切を施工後、排水ポンプ車等により排水作業を行う。以上が一連の流れとなる。

仮締切については、地震による広域的な地盤沈下や液状化によって天端高が低くなった河川・海岸堤防を津波が越水し、決壊した箇所が必要となる。

(2) 想定する被害条件

排水計画の対象とする浸水域・浸水深等の被害条件は前述のとおり“津波浸水想定区域”を踏まえて設定するが、公表されている情報はシミュレーション結果の最大値を包絡したものである。現実的には時間経過により自然に排水され、干潮時には浸水深が下がることから、“津波浸水想定区域”の浸水域・浸水深を初期条件とした排水シミュレーションを計算し、概ね自然排水が収束する約3日後の干潮時を排水計画における被害条件とした(図-2)。

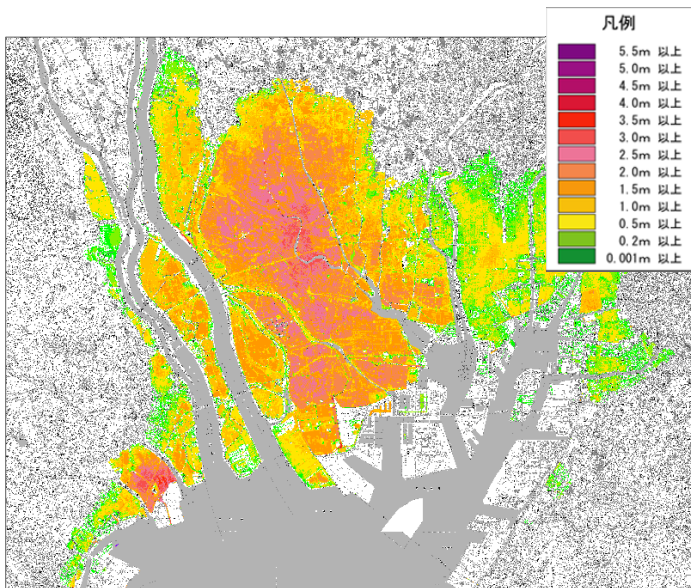


図-2 自然排水後の浸水被害想定(濃尾平野の例)

(浸水面積: 約220km²、湛水量: 約2.7億m³)

(3) 止水対策(仮締切)の検討

排水計画では、河川・海岸堤防の決壊箇所にて仮締切を行う。仮締切は、被災後の地盤高が満潮時の海面水位あるいは河川水位よりも高い箇所であれば、自然排水された後に再度浸水することはないため、仮締切は必要としない。なお、排水計画では、中部地方整備局が独自に、被災事例を参考に破堤箇所を絞り込んだ。

施工方法については早急に仮締切を設置するため、資材調達が容易かつ簡易な施工方法として、大型土のう設置と盛土による施工を想定した。仮締切の高さは満潮時水位以上とする。必要な資材は、中部地方整備局が側帯や防災拠点等に備蓄している土砂を活用することとした。(図-3)。

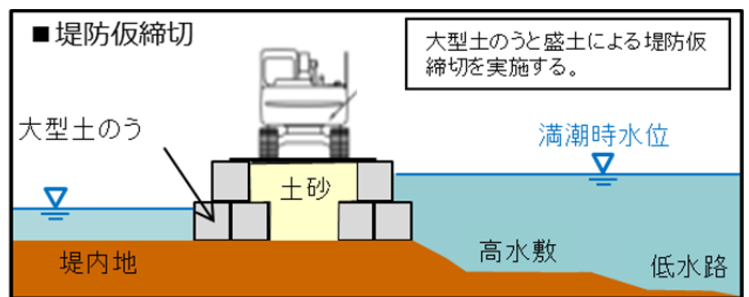


図-3 止水対策(仮締切)イメージ

(4) 排水対策の検討

仮締切による止水対策が完了した後、引き続き堤内地側に溜まった水を排除する。既存の排水機場が稼働するのであれば活用して排水すべきであるが、地震動によりポンプ設備等が被災して使用できない可能性があるため、機動力のある排水ポンプ車による排水作業を想定する。

(写真-1)



写真-1 東日本大震災での排水作業状況

排水ポンプ車は中部地方整備局が所有しているが、広域のかつ大規模な浸水被害でも早急な対策ができるよう、他の地方整備局が所有している排水ポンプ車を派遣していただき、相当台数でもって排水を行うことを想定している。(図-4)



図-4 広域支援のイメージ

ただし、排水ポンプ車台数に対して浸水箇所数が多い場合は、地区毎の優先度を付けて順次排水作業を行うことになる。地区毎の優先度は被災状況・湛水量・重要施設位置などから、その都度判断することとしている。

4. 被災に備えた事前準備

発災時に排水計画の一連の流れを実行するためには具体的な手順や、参考となる資料・データ等を事前に準備しておく必要があり、中部管内排水計画の策定に向けて次のような検討を行っている。

(1) 被災状況の把握手法

津波による浸水範囲が第一に必要な情報であるが、浸水被害が広範囲に及んでいる場合は、陸上での調査では時間がかかる上、津波警報等が発令されている期間は二次被害防止のため被災地域に立ち入ることができない。早い段階で被災状況を把握するためには、衛星画像、防災ヘリ等による上空からの調査結果を活用することとしている。

(2) 排水状況把握システムの開発

排水すべき湛水量については、浸水範囲を特定した後に、独自に開発した“排水状況把握システム”により算出することを提案している。各浸水箇所毎の湛水量が分かれば、箇所毎に必要な排水ポンプ車台数を迅速に概略検討が可能となる。(図-5)。



図-5 排水状況把握システムの画面イメージ

(3) 排水作業カルテの作成

図-2に示した浸水被害想定区域は浸水する可能性がある範囲全てを網羅しているが、どの区域で浸水しても対応できるよう、あらかじめ排水ポンプ車を設置すべき箇所を選定しておき、その箇所毎に1枚にまとめた“排水作業カルテ”を作成している。

(4) 排水ポンプ車の稼働状態監視システム

地方整備局が所有している排水ポンプ車の位置情報についてはすでに活用されているシステムで把握できるが、ポンプが稼働しているか、燃料の残量がいづらか等の情報については別途“排水ポンプ車の稼働状態監視システム(通称:DSシステム)”を開発しており、順次中部地方整備局の排水ポンプ車へ導入を始めている。このシステムの活用により、遠隔地での排水状況監視が可能となる。

5. 課題と今後の検討

これまで検討を進めてきた成果として、“中部管内排水計画(案)”を作成したところではあるが、関係する県・市・機関からの意見・情報を踏まえて見直しを進めている。また、いくつかの課題も残っている。

(1) より現実的な被害想定のカーススタディ

前述のとおり、被害想定としては各県が公表した津波浸水想定区域を元データとしているが、例えば堤防は液状化により一律75%沈下する条件としている。現在は新たな計算手法で沈下率を算出している河川があり、耐震対策も進んでいるため、浸水域・浸水深を見直した上で、より現実的な被害想定に対する排水オペレーションを検討しておくべきと考えている。

(2) 排水ポンプ車等への燃料供給

浸水被害を1日でも早く解消するために排水ポンプ車は24時間稼働を想定しているが、連続稼働のためには絶えず給油する体制が必要である。関係機関との調整や、具体的な給油方法をあらかじめ検討しておくべきである。

(3) 浸水継続時間を減らす取り組み検討

これまで検討した排水オペレーション計画は、既存の排水機場と排水ポンプ車の組み合わせた、一定の稼働条件により浸水解消日数を試算している。

今後は、より現実的な被害想定の設定もさることながら、浸水継続時間を減らすため、排水ポンプ場の耐水化や排水ゲートの新設など、新たなハード対策の検討もしておくべきである。

6. おわりに

南海トラフ地震は発生確率が高まり、排水計画は早急に策定する必要があり、一定の成果が取り纏まった段階で、順次、策定・公表をしていきたいと考えている。

明日起きるかもしれないという状況下において、検討成果を踏まえて職員が今できることをマニュアル化し、訓練を重ねていくことで、いざという時に備えておくことが重要である。

参考文献

- 1)濃尾平野の排水計画【第1版】～南海トラフ巨大地震による津波、大型台風による高潮・洪水から命を守る～