

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 2023-1

研究テーマ

デジタルツインによる
冬期道路交通マネジメントシステムの技術開発

研究代表者：	北海道大学准教授	高橋	翔
共同研究者：	金沢大学特任助教	八木	雅大
	北海道大学教授	吉井	稔雄
	北海道大学名誉教授	萩原	亨
	室蘭工業大学教授	有村	幹治
	室蘭工業大学准教授	浅田	拓海
	北海道開発技術センター・部長	永田	泰浩
	北海道開発技術センター・部長	大井	元揮
	北海道開発技術センター・研究員	大橋	一仁
	北海道開発技術センター・研究員	三原	夕佳
	日本気象協会・統括主幹	丹治	和博
	日本気象協会・主任技師	小松	麻実
	日本気象協会	槌本	陽
	ドーコン・室長	山本	郁淳
	ドーコン・次長	内藤	利幸
	ドーコン・グループ長	松田	真宜
	ドーコン・主任技師	平川	貴志
	ドーコン・グループ長	高橋	歩夢
	ドーコン・技師	蛭名	将平
	東日本高速道路北海道支社・技術部長	木村	泰

令和 8 年 5 月

新道路技術会議

目次

研究概要	1
第 1 章 はじめに	3
1. 1 研究目的	3
1. 2 研究内容	3
第 2 章 国内・海外の既存研究状況	5
2. 1 国内の研究動向	5
2. 2 海外における研究動向	5
第 3 章 冬期道路交通マネジメントシステムにおけるデジタルツインの構築と検証	5
3. 1 テーマ 1：冬期の道路環境・交通・気象データで構成されるデジタルツインでの予測に 関する技術開発	5
3. 2 テーマ 2：デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの構築に関する技 術開発	25
3. 3 テーマ 3：交通・気象データを利用するシミュレーション及び高度交通制御に関する技 術開発	26
3. 4 テーマ 4：積雪寒冷地における人の移動の負担軽減に資する技術開発	31
3. 5 テーマ 5：道路 API を備えたデジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステム の社会実装方法の検討	39
第 4 章 まとめ	48
4. 1 5 つのテーマによって得られる成果	48
4. 2 本研究で構築するシステムの全体像	49

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(令和5年度採択)
研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No.2023-1	デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの技術開発	北海道大学 准教授 高橋 翔

冬期の人やモノの移動にかかる負担軽減、効率化を実現するため、フィジカル空間とサイバー空間で動的データを交換する道路 API を持ち、将来起きると想定される道路交通状況を把握可能とするデジタルツインを研究目的として、冬期道路環境をエッジコンピュータにより低通信量かつリアルタイムに収集し、それを活用した AI に基づくデジタルツインを構築するとともに、道路交通マネジメントに反映する社会実装の方法まで検討する研究開発。

1. 研究の背景や動機、目的および目標等

北海道の強みである「食」、「観光」を提供する「生産空間・市街地・圏域中心都市」の3層からなる「北海道型地域構造の保持・形成」の実現は、第8期北海道総合開発計画の基本方針の一つとなっている。人口減少が進む中、人やモノの移動頻度の維持・向上を図る道路交通ネットワークの維持が重要であるが、北海道の冬期は気象の極端化も相まって、大雪・視程障害・吹きだまり・路面凍結が頻発し、都市内及び都市間において道路状況変化が人やモノの移動の妨げになっている。実際、2022年2月の北海道石狩地域の大雪により札幌都市圏の道路交通網が寸断された。公共交通の運行情報の提供が一元的に行われず、札幌駅や新千歳空港に多くの人が滞留し、帰宅困難者も発生した。加えて、記録的な雪害が発生し市内全域で交通が麻痺している状況にも関わらず、自動車利用者の行動変容（出控え）を適切に誘導できなかったことが渋滞を拡大し、市民生活と地域経済に大きな影響を与えるものとなった。

以上の背景から、気象や交通状況の的確な予測、迅速・適切な通行規制・移動制限、除排雪オペレーション等の冬期道路交通マネジメントが必要と考えられる。そこで、本研究では、サイバー空間に道路 API (Application Programming Interface) を備えたデジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムを構築し、積雪寒冷地における高度な移動支援の実現を目的とする。これにより年間を通じて安全で快適な道路交通の確保を可能とする。

本研究で開発するデジタルツインとは、フィジカル空間とサイバー空間で動的データを交換する道路 API を持ち、将来起きると想定される道路交通状況について AI を用いて予測しマネジメントに貢献する機能を持つ。冬期の道路交通状況は、気象に左右され時々刻々と変化するため、交通データ・気象データ等の動的データを加工し、道路 API を通してサイバー空間に送り、シミュレーションを実行することから道路交通状況として今後起きることを再び道路 API を通して道路管理者や道路利用者に提供可能とする。

2. 研究内容

本研究では、デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムに繋がる技術開発として、次の5つのテーマを設定した。

- 【1】 冬期の道路環境・交通・気象データで構成されるデジタルツインでの予測に関する技術開発
- 【2】 デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの構築に関する技術開発
- 【3】 交通・気象データを利用するシミュレーション及び高度交通制御に関する技術開発
- 【4】 積雪寒冷地における人の移動の負担軽減に資する技術開発
- 【5】 道路 API を備えたデジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの社会実装方法の検討

3. 研究成果

本研究では、冬期道路交通マネジメントシステムに繋がるデジタルツインを構築(図1)した。その機能は、冬期の道路環境・交通・気象データ集積、シミュレーション機能、およびそこから読み取れ情報発信の Web インタフェースと自動車などで道路利用時にも情報獲得可能な地域 FM などと

の連携方式を確立した。

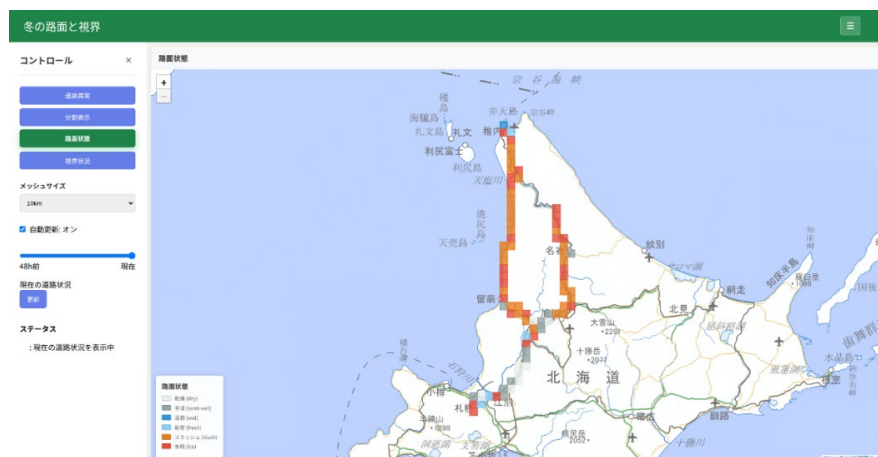


図1 デジタルツインシステムの画面出力例

4. 主な発表論文

本研究では、令和5年度から令和7年度の3年度間に査読論文24件、国際会議発表15件、および学会発表30件となった。その主たる発表論文は次のとおりである。

- [1] Masahiro Yagi, Sho Takahashi, Kazuhito Ohashi, Yasuhiro Nagata, Toru Hagiwara, “Predicting Visibility Conditions at the CCTV Installation Site Using Long Short-Term Memory,” Transportation Research Record, 2026年.
- [2] 福井 千菜美, 丹 悠紀, 高橋 翔, 吉井 稔雄, 萩原 亨, “積雪寒冷地におけるドライバーの行動選択に有用な冬期道路環境の情報に関する一考察,” AI・データサイエンス論文集, 2025年5月.
- [3] Tran Vinh Ha, Mikiharu Arimura, “The Application of ETC2.0 Probe Data and Network Clustering in Investigating Urban Mobility Patterns During an Extreme Snow Event,” International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2025年2月.

5. 今後の展望

本研究では、期間全体をととして、冬期における人の移動の負担軽減を目的として、デジタルツインを活用した道路情報提供に関する技術開発と実証を行った。本研究の取組により、安全な経路選択や出控え等の行動変容を促す情報提供の有効性を確認するとともに、他地域への展開に向けた知見やロードマップ、導入マニュアルを整理した。このことは、道路行政で活用可能な情報提供につながる整理となったものであり、道路政策の質が向上する次代の道路行政に活きることが期待できる。方法論の導出の観点では、デジタルツインシステムを実現するに至っており、情報提供の試行で利用者から一定の評価をいただいているが、今後はユーザインターフェースの改善、データフュージョン（データ融合）による精度の高い情報の提供等について継続的に研究開発していくことが必要である。

6. 道路政策の質の向上への寄与

今後の道路行政の実務に本研究成果を本格的に反映するには、道路行政で活用可能な情報提供につながる「(仮称) 情報センターの設置・運営」や「道路利用者等のニーズに応じた情報提供」などの行政との連携が必要となるが、ここに至ることができれば、道路政策の質の向上に大きく貢献する。このことから、本研究では道路行政への反映するための知見やマニュアル、実装方策をとりまとめた。

7. ホームページ等

北海道大学大学院工学研究院 先端モビリティ工学研究室

<https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/kyoku/>

デジタルツインシステムを活用した地域FMのパフレット

https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/kyoku/document/moeru_digitalTwin/digitaltwin.pdf

第1章 はじめに

北海道の強みである「食」、「観光」を提供する「生産空間・市街地・圏域中心都市」の3層からなる「北海道型地域構造の保持・形成」の実現は、第8期北海道総合開発計画の基本方針の一つとなっている。人口減少が進む中、人やモノの移動頻度の維持・向上を図る道路交通ネットワークの維持が重要であるが、北海道の冬期は気象の極端化も相まって、大雪・視程障害・吹きだまり・路面凍結が頻発し、都市内及び都市間において道路状況変化が人やモノの移動の妨げになっている。実際、2022年2月の北海道石狩地域の大雪により札幌都市圏の道路交通網が寸断された。公共交通の運行情報の提供が一元的に行われず、札幌駅や新千歳空港に多くの人が滞留し、帰宅困難者も発生した。加えて、記録的な雪害が発生し市内全域で交通が麻痺している状況にも関わらず、自動車利用者の行動変容（出控え）を適切に誘導できなかったことが渋滞を拡大し、市民生活と地域経済に大きな影響を与えるものとなった。

以上の背景から、気象や交通状況の的確な予測、迅速・適切な通行規制・移動制限、除排雪オペレーション等の冬期道路交通マネジメントが必要と考えられる。そこで、本研究では、サイバー空間に道路API (Application Programming Interface) を備えたデジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムを構築し、積雪寒冷地における高度な移動支援の実現を目的とする。これにより年間を通じて安全で快適な道路交通の確保を可能とする。

本研究で開発するデジタルツインとは、フィジカル空間とサイバー空間で動的データを交換する道路APIを持ち、将来起きると想定される道路交通状況についてAIを用いて予測しマネジメントに貢献する機能を持つ。冬期の道路交通状況は、気象に左右され時々刻々と変化するため、交通データ・気象データ等の動的データを加工し、道路APIを通してサイバー空間に送り、シミュレーションを実行することから道路交通状況として今後起きることを再び道路APIを通して道路管理者や道路利用者に提供可能とする。

1.1 研究目的

本研究は次の2点を目的として進めた。

- ・サイバー空間に道路APIを備えたデジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムを構築し、積雪寒冷地における高度な移動支援の実現を目的とする。これにより年間を通じて安全で快適な道路交通の確保が可能となる。

- ・本研究で開発するデジタルツインとは、フィジカル空間とサイバー空間で動的データを交換する道路APIを持ち、将来起きると想定される道路交通状況についてAIを用いて予測しマネジメントに貢献する機能を持つ。従来の道路交通に関するデジタルツインは、道路構造、地図、公共交通機関の移動経路・時刻表等の静的データを用いた事後処理が主となっていた。しかしながら、冬期の道路交通状況は、気象に左右され時々刻々と変化する。交通データ・気象データ等の動的データを加工し、道路APIを通してサイバー空間に送り、シミュレーションを実行することから道路交通状況として今後起きることを再び道路APIを通して道路管理者や道路利用者に提供する。道路インフラと人やモノとのスマートな協調といった新たな付加価値の創造を顧みると、道路の走行環境・交通状況・気象状況をリアルタイムにモニタリングし、人やモノが必要とする情報を提供するインタフェース (Infra to Humans and Things) の開発が必要であり、本研究開発はその先駆けとなる。

1.2 研究内容

本研究では、デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムに繋がる技術開発として、5つのテーマを設定した。5つのテーマとそのマイルストーンは図-1に記載のとおりである。また、それぞれのテーマについて以降に記載する。

(1) テーマ1：冬期の道路環境・交通・気象データで構成されるデジタルツインでの予測に関する技術開発

本テーマは、カメラと小型PCを搭載した車両から連続的かつ即時に得る路面や視界状況などの道路環境・交通データと気象予測データを統合するデジタルツインにより利用者に先読み情報を提供する技術を開発する。また、本テーマは、主に高橋翔、八木雅大、萩原亨、北海道開発技術センター、日本気象協会が担当した。

(2) テーマ2：デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの構築に関する技術開発

本テーマでは、道路・交通を高度化する各種機能が共通して利用する動的データ・解析結果（昼夜視程状況、路面状況、雪堤状況、交通流、気象、道路交通状況の可視化結果、道路環境予測のシミュレーション結果等）の集積システムを構築する。このとき、時々刻々と変化する冬期の交通流や気象状況等の動的データ・解析結果を供給するインタフェース

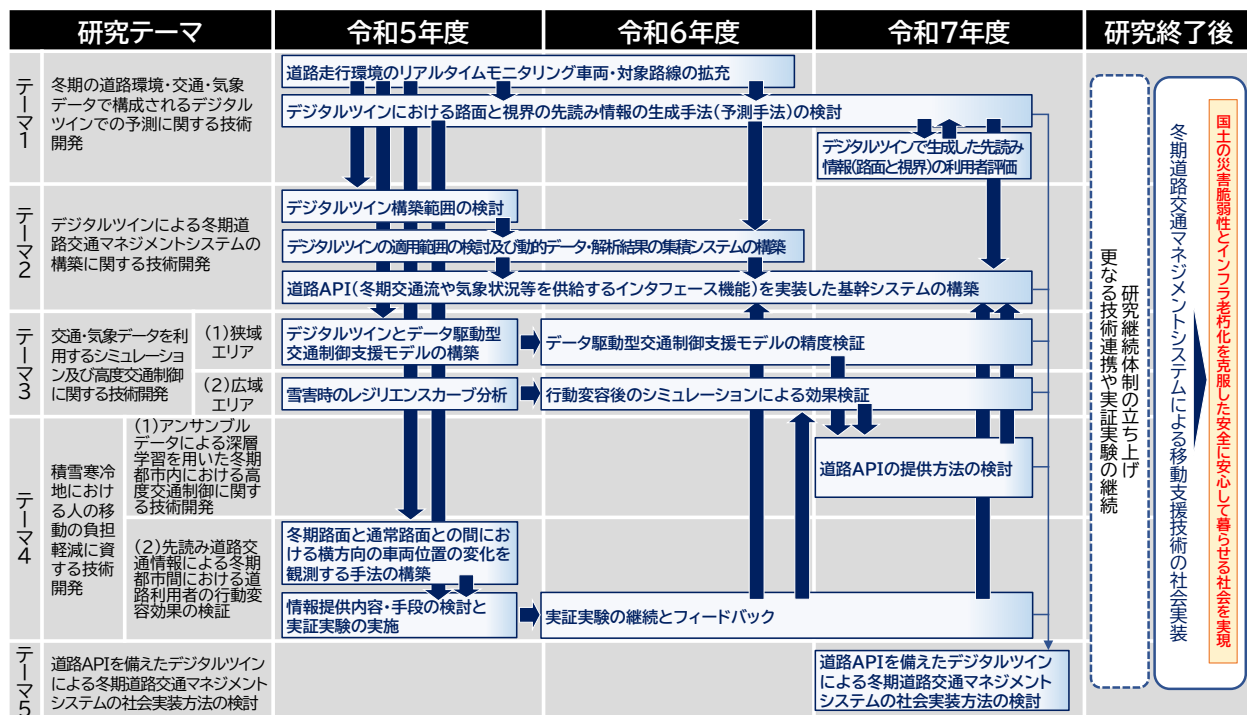


図-1 「デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの技術開発」で設定した5つのテーマと進め方

機能としての道路APIを実装した基幹システムを構築する。また、本テーマは、主に高橋翔、八木雅大、有村幹治、北海道開発技術センター、日本気象協会が担当した。

(3) テーマ3：交通・気象データを利用するシミュレーション及び高度交通制御に関する技術開発

本テーマは、さらに2つの小さいテーマとして、(3-1) 狭域エリアにおけるシミュレーション及び高度交通制御に関する技術開発、および(3-2) 広域エリアにおけるシミュレーション及び高度交通制御に関する技術開発を進める。それぞれ、(3-1)では、AIカメラを用いた道路状況の常時観測データに応じたシミュレーションの活用方法を検討する。(3-2)では、デジタルツインの高速道路や国道空間を対象とした常時観測データを活用したアンサンブルデータの生成、入出力関係を深層学習でモデリングした短期的な将来渋滞予測の方法論の導出を行う。加えて、テーマ3の中で交通流の状況に応じた面的信号現示パターンの提供手法や、移動時間信頼性の提供手法を併せて検討し、札幌市全域を対象とした雪害時のレジリエンスカーブの分析に発展させるとともに、情報提供による行動変容の効果検証について、行動変容後OD予測とシミュレーションによって分析する。また、本テーマは、主に有村幹治、浅田拓海、吉井稔雄、ドーコンが担当した。

(4) テーマ4：積雪寒冷地における人の移動の負担軽減に資する技術開発

本テーマは、構築するデジタルツインシステムやアンケート調査などによって、情報提供による行動変容（経路変更、取りやめ、時間調整等）の効果を検証する。このとき、道路利用者へのリアルタイムな情報提供手段として、「コミュニティFM」や「道の駅」、「コンビニエンスストア」等と連携し、多様な情報発信を実装する。また、情報提供内容については、情報科学的な計算理論導出も実施することとなるが、具体には、車載カメラから得られる「視程情報」、「路面情報」に加え、GPSによる「車両位置情報」と都市間高速バスの定時の差からの「遅延情報」を提供可能とする。

(5) テーマ5：道路APIを備えたデジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの社会実装方法の検討

本テーマは、デジタルツインから得られるリアルタイム道路情報の新たな価値、情報サービス提供範囲を検討するなど、技術の確立・高度化へ貢献する。また、冬期事象以外の濃霧や集中豪雨などへの応用可能性と、その情報提供の方策の検討、さらには、社会実装のための連携先プレーヤーとサービスの体系化なども検討し、レジリエントな社会構築へ貢献する。本テーマは、主に高橋翔、八木雅大、吉井稔雄、萩原亨、有村幹治、浅田拓海、北海道開発技術センター、ドーコン、東日本高速道路が取り組む。

以上のとおり、本研究は5つのテーマを進めることで、冬期の道路、気象、交通などが複雑に関係し合う状況のデジタルツイン構築と、道路管理者や都市間バ

スの運行管理者を含む道路利用者など多様な関係者への適当な判断材料を提供する、新しい冬期道路交通マネジメントへの展開につなげる。

第2章 国内・海外の既存研究状況

本章では、本研究を開始するにあたって関係する国内および海外の既存研究の状況について説明する。

2.1 国内の研究動向

デジタルツインの構築は建設分野のBIM/CIMを中心に近年精力的に進められている。都市や道路に関するデジタルツインとしては、国土交通省が全国約50都市で都市3Dモデルを整備する「Project PLATEAU」を開始している。道路交通に関しては自動運転車の位置特定のための点群データマップや、全国の断面交通量データが提供されている。また、交通課題解決のプラットフォームとして、国土交通省が整備している国土交通データプラットフォームの利用も提案されている。

しかしながら、北海道のような広大な道路空間をリアルタイムにサイバー空間に再構成するに至っていない。時々刻々と変化する冬期道路の移動支援のためには、そもそものデータの収集と加工、提供がリアルタイムになされる方法・仕組の構築が必要であり、気象データや各種の交通データを活用するための方法論としてのデジタルツインの構築が急がれる。

2.2 海外の研究動向

道路交通システムのデジタルツインは、道路交通マネジメントの高度化を目的に、ここ数年、多数の組織（欧米）で研究が進められている。この分野におけるデジタルツインの研究をレビューによって、道路交通マネジメントへの応用の可能性とその意義も明らかになっている。その中で道路交通状況のデータ収集手法、それを用いたシミュレーション手法など、今後開発すべき技術は多数あることが指摘されている。

デジタルツインに関してはシンガポールやケンブリッジ等の事例がある。シンガポールでは、地形情報、建築物情報、交通機関等の社会インフラ情報、また各種のリアルタイムデータ（交通情報、人の位置情報等）を統合し、デジタルツインの拡充が図られている。

インド・アーンドラプラデーシュ州首都アマラヴァティ（Amaravati）がデジタルツインにより設計された最初の都市として発表される等、世界的にデジタルツインの研究開発と社会実装が進んでいる。

交通分野においては各種交通計画・運用策定支援のためのシミュレーション技術が開発されてきた。これらは優れた可視化機能を有し、デジタルツインとの親和性が高い。また道路や車両から生成される大量のデータを用いて交通計画や運用、交通制御のためのプラットフォームとして機能させることも可能となっている。

第3章 冬期道路交通マネジメントシステムにおけるデジタルツインの構築と検証

本章では、デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムにつながる技術開発として設定した5つのテーマそれぞれについて取り組んだ内容を説明する。

3.1 テーマ1：冬期の道路環境・交通・気象データで構成されるデジタルツインでの予測に関する技術開発

本テーマでは、令和5年度から令和7年度にかけて、

都市間バスによる道路状況のモニタリングが可能となる車載システムの設置台数および路線の拡充を進めつつ、画像解析他の計算を軽量化することによるシステムのリアルタイム演算の性能向上や、複数エッジ端末での集散的自律学習の方法論導出などを進めた。また、道路環境・交通データと気象予測データを統合解析、夜間の視界推定や車載カメラ画像を用いた道路の狭窄状態の推定手法の導出、デジタルツインで生成した先読み情報の有効性など多岐にわたる検討を行った。

本報告書では、車載システムの設置台数および路線の拡充、画像解析他の計算の軽量化、道路環境・



図-2 令和5年度から令和7年度にかけてのモニタリング可能な路線と車両台数

交通データと気象予測データの深層学習による統合解析に基づく道路の視界予測、デジタルツインで生成した先読み情報の有効性に関する検討結果を報告する。

なお、本研究で構築するデジタルツインでは、冬期道路に関わるデータとして、路面や視界などの道路環境に関するデータや気象データを、時空間方向に解像度高くサイバー空間に集積可能とすることが求められる。過年度までに集積可能としたデータの仕様・要求水準は以下のとおりである。

- ・**車載モニタリングシステム**：計9台の都市間高速バスから、約10秒間隔で、緯度経度や日時などのGNSSに基づくデータや路面や視界の判別結果を随時収集し、集積可能なもの。
- ・**CCTVカメラ画像解析**：約5km間隔で設置されるCCTVカメラを用いた定点観測に基づいて、視界に関するデータを5分間隔で解析し、集積可能なもの。
- ・**気象データ**：5分間隔で更新される降水量の実況と予測（250mメッシュ）、3時間ごとの風向風速の実況と予測（1kmメッシュ）、および毎時更新される視程の解析と予測のデータ（1kmメッシュ）を集積可能なもの。

冬期道路交通マネジメントシステムのためのデジタルツインの実現に向けては、以上の性能が要求水準となる。

(1) 車載システムの設置台数および路線の拡充

積雪寒冷地では、暴風雪や吹き溜まりによる視界不良が一日を通して発生する。吹雪時の視界不良は、交通事故のリスクだけでなく、車両滞留や通行止めのリスクも高まる。視界不良に起因する事故は、冬型事故でスリップ事故に次いで多くなっている¹⁾。特に吹雪を要因とする事故件数は晴天時の2倍となっている²⁾。そのため、昼夜をとおして視界状況をリアルタイムに推定可能とすることは、より安全で円滑な道路交通の実現に近づく。視界状況を定量的に

把握する手法として、視程計を利用した手法³⁾やClosed-Circuit Television Camera (CCTVカメラ) 画像を用いた手法^{4),5)}がある。しかしながら、これらは設置箇所が局所的であることや、夜間に照明の影響を受けやすいという課題がある。

そこで、一日を通して広範に視界状況を把握可能とするため、前照灯によって道路空間が視認できる車両で車載カメラによって取得された前方視野映像を活用することを考え、提示出発となる都市間バスに画像解析可能なエッジAI（深層学習などの計算が可能な小型コンピュータ）を搭載したシステムを車載し、デジタルツインを構成する基礎データとしての道路空間解析結果データを集積可能とする。

この車載システムは、研究代表者らの既存研究において、特急わっかない号（札幌ー稚内、都市間高速バス4台の車両）を用いて路面と視界の情報をモニタリングし、デジタルツインに蓄積できることが検証されている。令和5年度は、既存研究を踏まえ、車両台数および路線を拡充することにより、デジタルツインの時空間解像度を向上させた。具体的には、車両台数および路線を次のとおりに拡充し、路線を2倍に、台数を2.25倍とした。

- ・「特急わっかない号（札幌ー稚内）」で、これまでの4台から7台に拡充
- ・新路線として「えさし号（札幌ー枝幸）」を追加（えさし号は2台の車両でモニタリング）

以上のとおりに、路線が2倍となると共に、モニタリング可能な車両台数計が2.25倍となったが、これは、時間解像度の観点では既設となっていた「札幌ー稚内」で最大1.75倍に、空間解像度の観点では「えさし号」が新設されたことから300[km]分の路線が新規でモニタリング可能となったことを意味する。

令和6年度は、令和5年度に引き続き、モニタリング可能な車両台数を拡充することにより、デジタルツインが構築可能な時空間解像度を向上させた。具

表-1 従来手法における計算時間

項目	特徴ベクトル	計算時間(秒)
特徴ベクトルの算出	空間周波数	8.59
	明度	2.64
	Optical flow	1.75
	物体認識モデル	7.66
	車速	4.05×10^{-5}
SVM による暫定的な識別	空間周波数	8.80×10^{-2}
	明度	1.14×10^{-1}
	Optical flow	2.10×10^{-2}
	物体認識モデル	3.97×10^{-1}
	車速	8.87×10^{-3}
ELM による暫定的な識別	空間周波数	3.96×10^{-2}
	明度	3.78×10^{-1}
	Optical flow	2.96×10^{-3}
	物体認識モデル	1.35
	車速	2.67×10^{-3}
暫定的な識別結果の統合		2.13×10^{-3}
合計時間		23.1

体的には、車両台数を次のとおりに拡充した。

- ・「特急わっかない号（札幌－稚内）」：昨年度までの7台から10台に拡充
- ・「えさし号（札幌－枝幸）」：昨年度までの2台から5台に拡充

モニタリング可能な車両台数計が令和5年度に対して約1.7倍の15台となった。時間解像度の観点では、「札幌－稚内」で最大1.4倍、「札幌－枝幸」で最大2.5倍に向上した。また、空間解像度の観点では、えさし号が、旭川－鬼志別の路線も一部運行しており、車両の拡充によりモニタリングが可能となったことから、路線の数が昨年度から1.5倍となった。

令和7年度は、令和6年度までに引き続いて、モニタリング可能な車両台数を拡充することにより、デジタルツインが構築可能な時空間解像度を向上させることを目標とした。この目標の達成に向けて、車両台数を次のとおりに拡充した。

- ・「特急わっかない号（札幌－稚内）」：昨年度までの10台から11台に拡充
- ・「えさし号（札幌－枝幸）」：昨年度までの5台から6台に拡充
- ・「特急はぼろ号（豊富－札幌）」：新たに10台

モニタリング可能な車両台数計が昨年度から約1.8倍の27台となった。また、今年度から新たに道央道（札幌IC－士別釧路IC）をデジタルツインの対象範囲に追加した。これによりデジタルツインの対象範囲を約180km拡充した。以上のように、車両および対象範囲の各術にデジタルツインの時空間解像度の向上を達成した。令和5年度から令和7年度にかけてのモ

ニタリング可能な路線と車両台数について、図-2にまとめた。

なお、本研究で搭載したシステムでは、冬期の前方視野映像にみられる降雪・地吹雪時の複雑な特徴を複数の画像特徴量で表現し、視界レベルに相關するWeighted Intensity of Power Spectra (WIPS)⁴⁾や、複数の特徴量に基づく識別器をLate-fusionする機構を備えたEdge-computingによって夜間の視界レベルを推定する手法などを搭載している。

(2) 画像解析他の計算の軽量化

前述のとおり、本研究で構築を進める車載システムでは、車載カメラにより撮影する画像からWIPSを計算することで、視界状況を定量化している。WIPSは、日中の視界状況を定量化する評価指標として提案されたものであり、夜間は本来の分析対象ではないことから、その精度には課題がある。したがって、一日をとおして道路交通をマネジメント可能なデジタルツインを構築するためには、より精度高く夜間の視界状況を定量化可能な手法を構築することが必要である。

先行研究⁶⁾では、前方視野映像から、夜間での視界状況の特徴を表現可能な複数の特徴ベクトルを算出し、それらを入力とする複数の機械学習による識別器に基づいて、視界状況をレベル分けする手法が提案されている（以降、従来手法）。従来手法は、精度高く夜間の視界状況をレベル分け可能である一方で、計算に必要な時間に関して、議論がされていない。ここで、本研究で構築するモニタリングシステムでは、マイクロコンピュータにより、路面や視界を判別する演算を実行している。従来手法についても、マイクロコンピュータのように、演算能力が限られた計算機で計算可能であることが望ましい。そこで、

表-2 提案手法および比較手法における計算時間

項目	特徴ベクトル	計算時間 [秒]	
		従来手法	提案手法
特徴ベクトルの算出	空間周波数	8.59	3.96
	明度	2.64	
	Optical flow	1.75	
	物体認識モデル	7.66	
	車速	4.05×10^{-5}	
SVM による暫定的な識別	空間周波数	8.80×10^{-2}	8.80×10^{-2}
	明度	1.14×10^{-1}	1.14×10^{-1}
	Optical flow	2.10×10^{-2}	2.10×10^{-2}
	物体認識モデル	3.97×10^{-1}	5.12×10^{-1}
	車速	8.87×10^{-3}	8.87×10^{-3}
ELM による暫定的な識別	空間周波数	3.96×10^{-2}	3.96×10^{-2}
	明度	3.78×10^{-1}	3.78×10^{-1}
	Optical flow	2.96×10^{-3}	2.96×10^{-3}
	物体認識モデル	1.35	1.37
	車速	2.67×10^{-3}	2.67×10^{-3}
暫定的な識別結果の統合		2.13×10^{-3}	2.13×10^{-3}
合計時間		23.1	6.08

今年度はまず、従来手法の演算に必要な時間をマイクロコンピュータで確認し、その実現可能性について検討すると共に、夜間の視界レベル推定を軽量化する手法を構築する。

a) 従来手法：車載カメラ映像を用いた夜間の視界レベル推定

従来手法では、画像の空間周波数、明度、Optical Flow、物体認識モデル、および車速に関する特徴量を算出する。次に、それぞれを入力とする機械学習に基づく識別器として、Support Vector Machine (SVM)⁷⁾およびExtreme Learning Machine (ELM)⁸⁾を計10個構築する。さらに、それらの確信度を入力とするSVMを用いることで視界レベルを推定する。これによって、各識別器から出力された確信度の傾向に基づく推定が可能となる。

本手法で用いる特徴ベクトルそれぞれには、次を期待している。空間周波数は視界が劣悪な場合、降雪が画像全体を覆い平坦な画像となるため、低周波成分が多くなることを期待している。次に、明度は視界が劣悪な場合、前照灯の光が雪粒子に反射して画像全体が白くなる現状の表現を期待している。Optical Flowは物体の動きを定量化するものであり、車載カメラ映像では、視界が良好な場合に車両の進行に伴って映像内の物体が放射状に移動する様子の定量化を期待する。また、物体認識モデルによる特徴量は、深層学習によるモデルであるInception-V3⁹⁾の第3プーリング層から得られる認識の様子を表す数値を用いる。これは、視程障害が認められる場合に物体の識別が困難となる様子を表現することを期待するものである。最後に車速については、車載システムによってGNSSで得る速度を用いる。車速は画像のノイズの影響を受けないデータであることから、夜間の道路空間において、頑健な識別に貢献

することを期待するものである。

b) 要求性能の定義

冬期高速道路の管理業務においては、凍結防止剤の散布判断を行うことを目的として、100[m]単位で路面状態の識別が行われている。このように、多くの道路管理業務が100[m]単位で行われており、視界状況についても100[m]単位で把握可能となることが望ましい。また、スタッドレスタイヤを装着した小型車が、視程115～185[m]程度の視界不良状態で安全に走行可能な運転速度は約40[km/h]である。以上の内容から、車両速度を40[km/h]と想定して、100[m]単位で視界状況を把握可能とするためには、約9[秒]に1回の頻度で計算する必要がある。

c) 計算時間の確認と課題の明確化

従来手法の計算時間を確認する。本実験では、バッテリー駆動可能なマイクロコンピュータ、USB接続型のカメラおよびGNSS受信器で構成されるシステムに、従来手法を直列に搭載して、計算時間を確認する。

表-1に計算時間を示す。表-1より、従来手法が必要とする計算時間は約23[秒]であり、これは実装に要求される計算時間(9[秒])を超過している。特に、特徴ベクトルの算出に必要な時間が、他のプロセスに比して大きくなっている。したがって、実装に向けては、特徴ベクトルの算出に掛かる時間を削減することで、計算時間を約14[秒]削減する必要がある。

d) 視界レベル推定の軽量化

ここでは、前述の課題解決に向けて、夜間の視界レベル推定を軽量化する手法を検討する。提案手法では、以下の3つのアプローチにより、特徴量算出のプロセスを軽量化し、視界レベルの推定精度を維持しながら、実装に要求される9秒に1回の頻度で視界レベルを判定可能とすることを目標とする。

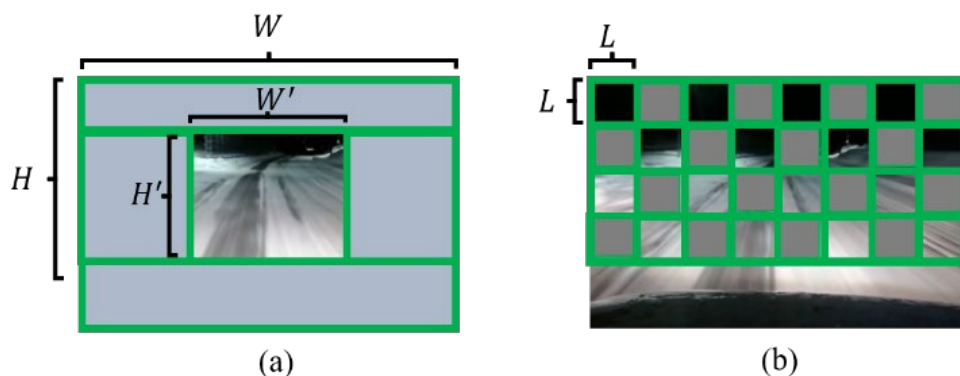


図-3 提案手法における分析領域とパッチ分割

1. 特徴量算出に用いるパッチ数およびフレーム数の削減
2. 軽量の物体認識モデルの導入
3. 特徴量算出の並列化

ー特徴量算出に用いるパッチ数およびフレーム数の削減ー

従来手法では、図-3 に示すように、入力画像下部に撮像されるボンネットを含む領域以外の $W \times H$ の領域を用いて特徴量を求める。空間周波数、明度および Optical Flow の特徴ベクトルにおいては、この領域を横方向に1分割、縦方向に m 分割して得る合計 lm 個のパッチから特徴ベクトルを求めている。また、従来手法では、約 3[秒]の映像(30fps, 640×480)を入力データとし、全フレームから特徴ベクトルを求めている。

従来手法における空間周波数の特徴ベクトルでは、視界が良好な場合は画像の高周波成分が大きい、視界が劣悪な場合は降雪によって画像全体の色が平坦になり、低周波成分が大きくなるという画像特徴に着目している。これより、視界レベルの判定には、遠方が映る画像中央部分のみの解析で十分である。したがって、提案手法では、図-3 (a)に示すように、分析領域を入力画像の中心部($W' \times H'$ の領域)に絞る。

次に、従来手法における明度の特徴ベクトルでは、視界が劣悪な場合は車のヘッドライトの光が雪粒子に反射することで光が散乱し、画像全体が白くなるという画像特徴に着目している。これより、画像全体を満遍なく解析する必要がある。したがって、提案手法では、入力画像の特定の領域を解析するようにパッチを削減するのではなく、図-3 (b)に示すように、画像全体を満遍なく解析する。

夜間における道路空間の映像は、隣り合うフレームが類似しているため、フレーム数を削減することで、冗長性を排することが可能である。また、入力映像全体を捉えるため、入力映像のまとまった一部を解析対象とするのではなく、解析するフレームを交互にサンプリングすることが望ましい。したがって、本稿では、空間周波数、明度および Optical Flow の特徴量算出において、90枚のフレームから、1枚おきにフレームを削減し、合計45枚のフレームについて解析を行う。

ー軽量の物体認識モデルの導入ー

従来手法では、Inception-v3 に基づく特徴量の算出に 7.66[秒]の時間を要しているため、軽量の物体認識モデルを用いることで計算時間を削減することを目指す。提案手法では、物体認識モデルとして MobileNetV2 を用いる。MobileNetV2 は、空間方向とチャネル方向に独立に畳み込み処理を行うため、Inception-v3 と比較して、推定時の処理速度が速いネットワークである。提案手法では、計算時間の観点から、特徴ベクトルの次元数が高くなることを避けるため、MobileNetV2 の最終層の出力値を特徴ベクトルとして用いる。

ー特徴量算出の並列化ー

従来手法では、特徴ベクトルの算出処理を直列に実装しており、並列化により計算時間が削減可能となることが期待できる。提案手法では、特に計算時間を要する物体認識モデルに基づく特徴量の算出処理をパイプ 1 とし、他の空間周波数、明度、Optical Flow、車速に基づく特徴量の算出処理をパイプ 2 として、これら二つのプロセスを並列化することで、計算時間を削減する。

e) 軽量化手法の性能評価

ここでは、軽量化手法の性能を評価するため、提案手法および従来手法の計算時間および視界レベル判定の精度を比較する。本実験では、視界状況を 5 つレベルに分類し、各視界レベル 500 本ずつの合計 2500 本の映像をデータセットとして用いる。また、視界レベルの推定には 5 分割交差検証を行う。計算時間を計測するシステムは、前述 (c) 計算時間の確認と課題の明確化)と同じものを用いる。

計算時間および視界レベルの判定精度をそれぞれ、表-2と表-3に示す。表-2より、提案手法を用いることで、実装に要求される 9 秒に 1 回の頻度で視界レベルを判定可能であることが確認できる。また、表-3より、提案手法の視界レベルの判定精度は、従来手法に比べてわずかに低下しているが、8割以上の精度を維持しており、計算時間の削減率に比して、精度の低下度合はわずかである。以上より、提案手法を用いることで、視界レベルの判定精度を維持しながら、9[秒]に 1 回、すなわち 100[m]に 1 回の頻度で視界レベルを判定可能となり、提案手法の有効性が確認された。

表-3 提案手法および比較手法における視界レベルの判定精度

再現率						
	Lv. 1	Lv. 2	Lv. 3	Lv. 4	Lv. 5	Average
提案手法	0.974	0.902	0.776	0.650	0.854	0.831
従来手法	0.972	0.936	0.810	0.738	0.872	0.867
適合率						
	Lv. 1	Lv. 2	Lv. 3	Lv. 4	Lv. 5	Average
提案手法	0.984	0.879	0.732	0.705	0.852	0.831
従来手法	0.992	0.895	0.807	0.762	0.870	0.865
F 値						
	Lv. 1	Lv. 2	Lv. 3	Lv. 4	Lv. 5	Average
提案手法	0.979	0.890	0.753	0.676	0.853	0.830
従来手法	0.982	0.915	0.808	0.750	0.871	0.865

(3) 道路環境・交通データと気象予測データの深層学習による統合解析に基づく視界予測

本研究では、路面や視界等の予測手法の構築を3年度に亘って検討した。最終的には路面予測にとどまらず、視界の予測も可能とした。令和6年度までには、CCTVカメラや車載カメラにより取得する画像から視界の現況を判別する手法を構築してきた。加えて、視界の判別結果や気象データをプラットフォームに集積する機能を構築した。最終年度までには、これらの集積されたデータを使って、視界が将来どのような状況になるかを予測可能とした。予測した結果をドライバーに情報提供することは、出控えや出発時間を遅らせるなどの行動変容を促すことに繋がる。

a) LSTMによる視界予測

予測手法の概要を図-4に示す。提案手法では、画像を用いた視界状況の評価値であるWIPSの将来予測を行う。ここで、本研究で構築するプラットフォームでは、CCTVカメラや車載カメラにより取得する画像から計算するWIPS値を集積可能としている。

WIPS は、人間のコントラスト感度特性を考慮した空間周波数成分の差異を表す指標であり、道路の

視界状況を定量的に評価可能である。WIPS の算出手順を以下に示す。まず、画像内において遠方の道路空間が撮像された領域（256×256 ピクセル）を抽出する。その後、RGB 成分から各画素の輝度値（0～255）を算出する。次に、得られたグレースケール画像に対して 2 次元高速フーリエ変換（FFT）を適用し、異なる空間周波数成分に分解する。道路前方の視界が悪化すると、高空間周波数成分のパワースペクトル値が減少する。そこで、人間のコントラスト感度が相対的に高い 1.5～18 cycle/degree の範囲におけるパワースペクトル強度を加算した値を WIPS と定義する、なお、夜間に撮影された画像については、WIPS の評価精度に課題があるため、提案手法では対象外とした。

提案手法では、WIPS および気象の時系列データを入力とする深層学習に基づく予測器を地点毎に構築する。提案手法では、視界予測のための予測器として、再帰型ニューラルネットワーク（RNN）を拡張した LSTM（Long Short-Term Memory）^{10）}を採用する。RNN は時系列データを扱うことが可能であるが、長期依存関係の学習が困難であるという課題がある。

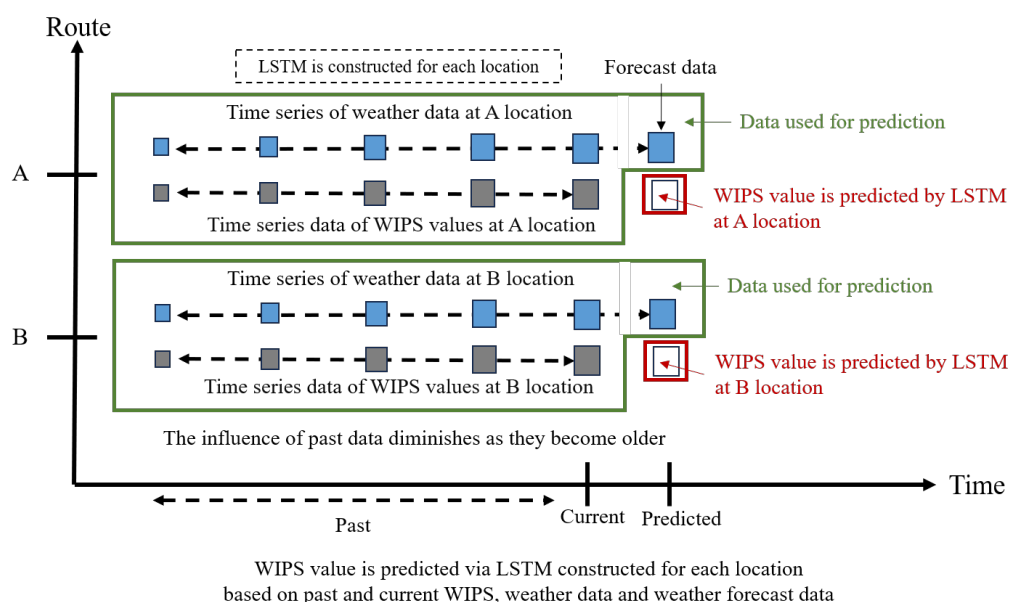


図-4 予測手法の概要

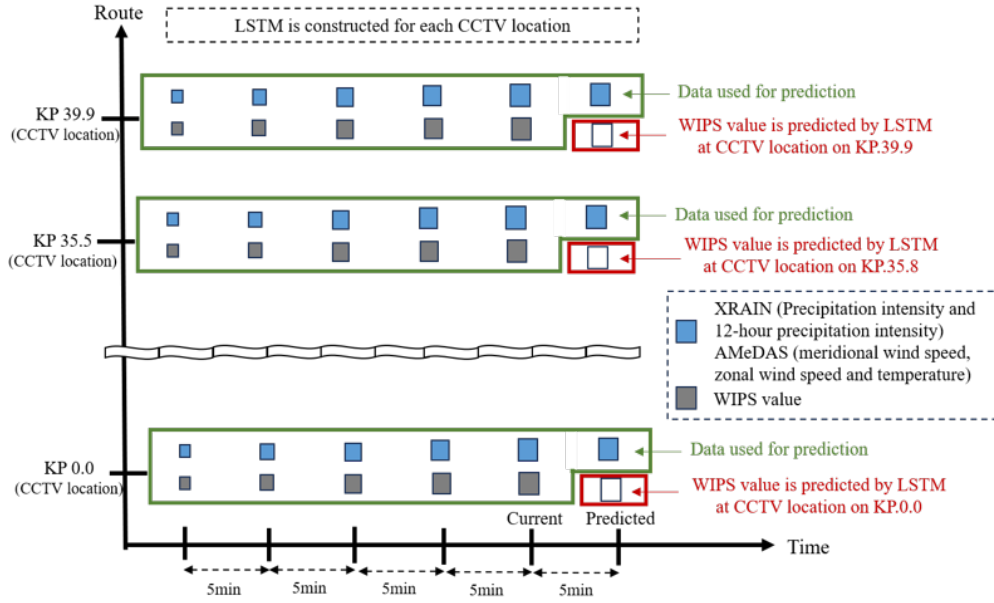


図-5 実験の概要

LSTM は、入力ゲート、忘却ゲート、出力ゲートを導入することで、この問題を解決している。LSTM の計算式を以下に示す。

$$f_t = \sigma(W_{f,x} \cdot x_t + W_{f,h} \cdot h_{t-1} + b_f) \quad (1)$$

$$i_t = \sigma(W_{i,x} \cdot x_t + W_{i,h} \cdot h_{t-1} + b_i) \quad (2)$$

$$o_t = \sigma(W_{o,x} \cdot x_t + W_{o,h} \cdot h_{t-1} + b_o) \quad (3)$$

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tanh(W_{c,h} \cdot h_{t-1} + b_c) \quad (4)$$

$$h_t = o_t * \tanh C_t \quad (5)$$

ここで、 x_t は時刻 t における入力ベクトル、 h_t は時刻 t における出力である。 f_t, i_t, o_t はそれぞれ忘却ゲート、入力ゲート、出力ゲートの出力を表す。 W および b は重みおよびバイアス、 σ はシグモイド関数である。提案手法で構築した時系列予測モデルは、入力層、2層のLSTM層、および2層の全結合層から構成される。LSTM層では、時系列データの時間的依存関係および非線形な変動特性を学習する。予測時には直近のWIPS値、観測された気象データ、ならびに予測対象時刻の気象データを入力として使用する。

b) 実データを用いた精度検証

実際にCCTVカメラによって取得された画像から得るWIPS値を予測する実験を行う。図-5に実験の概要を示す。本実験では、過去25分間のデータを入力として用い、5分後の視界状況を予測する。本研究では、予測器および説明変数の異なる複数の手法を検証し、予測器としてLSTMを用いることの妥当性、および説明変数としてWIPS値や降水強度、風、気温といった気象データを用いることの有効性を確認する。さらに、夜間などWIPS値が取得できない状況を想定し、気象データのみに基づく手法の予測性能についても評価する。

一評価指標一

本実験では、各手法の予測性能をWIPSの平均予

測誤差によって評価する。値が小さいほど、対象期間全体にわたって観測されたWIPS値に近い予測が行われていることを示す。

また、全体的な傾向だけでなく、異なる視界条件ごとの予測性能を評価するために、WIPS値をその大きさに基づいて4段階(Lv.1~Lv.4)に分類する。各レベルについて、再現率(Recall)、適合率(Precision)、およびF値(F-measure)を算出し、各レベルのF値およびその平均値を追加の評価指標として用いる。

なお、Lv.1は視界が良好な状態を表し、Lv.4は非常に視界が悪い状態を表す。道路管理における視界予測では、視界変化が小さい定常状態よりも、視界が急激に変化する異常時における予測精度を確保することが特に重要である。そこで、本研究ではWIPSの変動が大きい日と小さい日に分けて予測性能を評価する。具体的には、1日の最大WIPS値と最小WIPS値の差が2.0以上の場合を「変動大の日」、2.0未満の場合を「変動小の日」と定義する。各時刻において予測誤差が最小となる手法を特定し、各手法が最小誤差を達成した回数をカウントする。最小誤差を達成した回数が多い手法ほど、予測性能が安定しており信頼性が高いと判断する。

一LSTMおよび線形回帰(LR)を用いた6手法一

本実験では、3種類の説明変数と2種類の予測器を組み合わせた6手法を評価する。予測器はLSTMおよび線形回帰(LR)である。説明変数としては、CCTVカメラによるWIPS値、XRAINによる降水強度および12時間降水量、AMeDASによる南北風速、東西風速、気温を用いる。LSTMおよびLRを用いた6手法(M1~M6)の詳細を表-4に示す。各手法は以下のとおりである。

M1 : LSTM (WIPS)

M2 : LSTM (WIPS, XRAIN, AMeDAS)

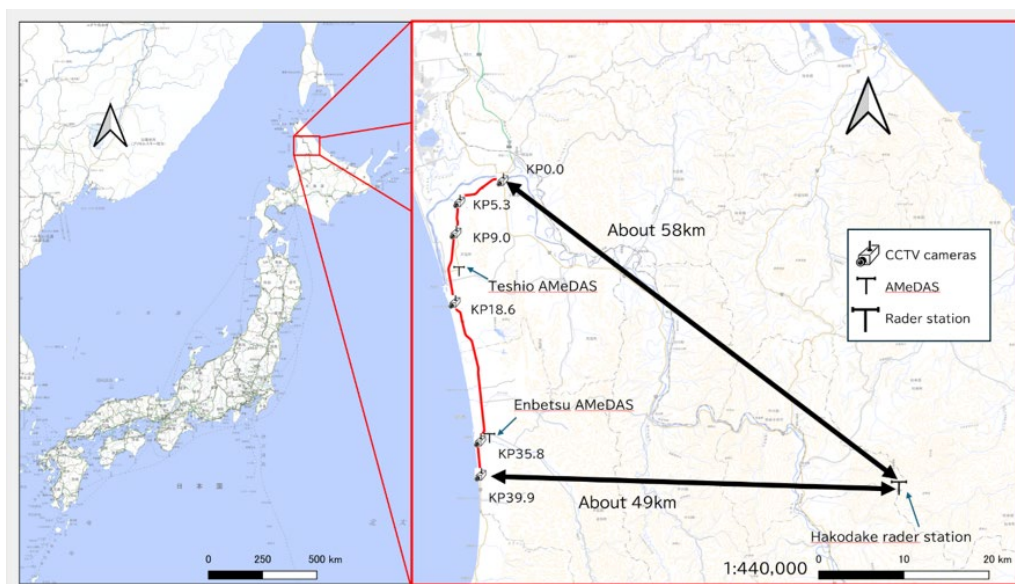


図-6 本実験で対象とする CCTV カメラ

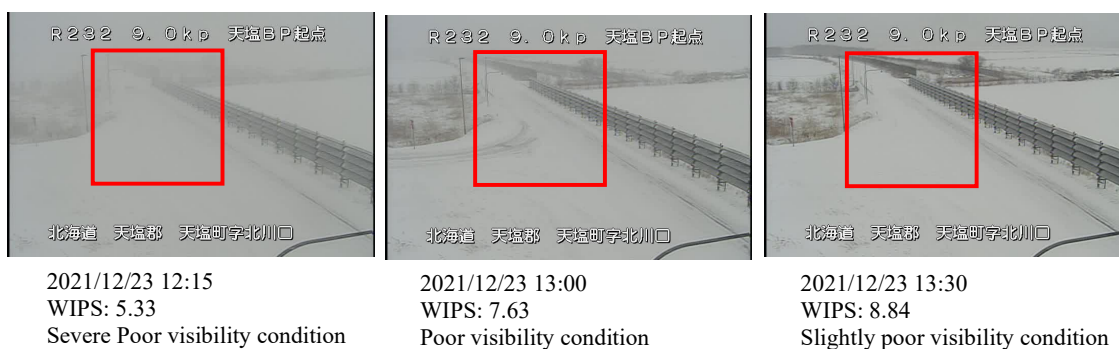


図-7 視界状況が異なる場合の CCTV カメラ画像と対応する WIPS 値

M3 : LSTM (WIPS, XRAIN)
M4 : LSTM (XRAIN, AMeDAS)
M5 : LSTM (XRAIN)
M6 : LR (WIPS, XRAIN, AMeDAS)

これら 6 手法を評価する理由は以下のとおりである。

- **M2 vs. M6 :**
非線形予測が可能な LSTM を予測モデルとして用いる妥当性を検証するため
- **M2 vs. M4 :**

現在および過去の WIPS 値を説明変数として用いる妥当性を検証するため

- **M1 vs. M2 vs. M3 :**
XRAIN による降水強度・12 時間降水量および AMeDAS による風速・気温といった気象データを説明変数として用いる妥当性を検証するため
- **M4 vs. M5 :**
夜間など WIPS 値が取得できない状況を想定し、気象データのみを用いた場合に AMeDAS データの有無が予測性能に与える影響を調べるため

表-4 本実験で検証する手法の説明変数と予測器

Method	Predictor		Explanatory variables		
	LSTM	LR	WIPS	XRAIN (Precipitation intensity and 12 hour precipitation intensity)	AMeDAS (Meridional wind speed, zonal wind speed and temperature).
M1	√		√		
M2	√		√	√	√
M3	√		√	√	
M4	√			√	√
M5	√			√	
M6		√	√	√	√

表-5 各キロポストにおける学習データとテストデータの数

	kp0	kp5.3	kp9.0	kp18.6	kp35.8	kp39.9
Num. of training data	5,263	5,924	6,430	5,556	6,152	6,313
Num. of test data	3,004	3,000	3,010	2,140	3,004	3,012

—実験条件—

本実験で用いるデータを以下に詳しく説明する。
CCTV 画像データ：

本実験では、図-6に示す区間を分析対象とする。対象の40 km区間には6基のCCTVカメラが設置されている。各CCTVカメラは、専用の光ファイバネットワークを介して映像データをデータサーバに常時送信している。このシステムでは、各CCTVカメラにつき5分間隔で静止画像が取得され、データサーバに保存される。本研究では、各CCTV地点において7時30分から16時までに取得された静止画像を用いて視界評価を行った。これら6基のCCTVカメラは、撮影方向がほぼ固定されており、レンズへの着雪や着氷が発生するケースは比較的少なかった。本研究では、図-6に示した6基のCCTVカメラから取得された5分間隔の静止画像と、それに対応するWIPS値を保存するデータベースサーバを構築した。対象期間は2021年12月1日から2022年2月28日までの90日間である。図-7に、3枚のCCTV静止画像と、それぞれに対応するWIPS値の例を示す。視界が悪化することによってWIPS値が低下することが確認できる。なお、カメラレンズに雪や氷が付着した画像、あるいは道路路面のみを拡大撮影した画像については、視界評価に適さない誤画像として目視により除外した。

AMeDAS データ：

気温、風速および風向については、2か所のAMeDAS観測点（天塩および遠別）で観測された10分平均値を使用した。天塩AMeDASはKP12.0付近に位置しており、KP0.0、KP5.3、KP9.0、KP18.6に設置された4基のCCTVカメラに対応付けた。一方、遠別AMeDASのデータは、KP35.8およびKP39.9の2基のCCTVカメラに対応付けた。

XRAIN による降水強度データ：

降雪状況の把握には、気象レーダによって観測された降水強度データを用いた。XRAINは、日本において国土交通省が2010年より整備を進めている高解像度レーダ観測システムであり、250mメッシュ・1分間隔で降水強度を観測可能である。冬期においては、大気中の降水粒子の多くが雪粒子であるため、XRAINで観測された降水強度は道路上の降雪強度を検知するための有効な指標となる。ただし、降雪がレーダ観測高度から地表面に到達するまでには、雪粒子の落下速度を考慮すると約5～15分の時間遅れが生じる。また、冬期には雪粒子が鉛直方向に落下しない場合も多く、この影響により時間遅れはさらに大きくなる。そのため、本研究では、予測対象時刻の10分前から20分前までの降水強度の平均値を、その時刻における代表的な降水強度として定義

した。

本実験では、2021年12月および2022年1月のデータを学習データとして用い、2022年2月のデータをテストデータとして用いた。各KPにおける学習用およびテスト用サンプル数を表-5に示す。LSTMの学習には、学習率0.001のAdamオプティマイザを用い、損失関数には平均二乗誤差(MSE)を採用した。学習はバッチサイズ64、エポック数100で実施した。

—実験結果—

本実験で得た各手法同士の比較の様子を次に記載する。

M2 vs. M6：

実験結果を表-6に示す。非線形予測が可能なLSTMを予測器として用いる妥当性を検証する。予測誤差については、全体平均ではM6がM2を上回る結果となったものの、M2は2地点で全手法中最小の誤差を記録し、KP35.8を除く地点では平均誤差でもM6を上回った。さらに、再現率、適合率、F値の平均はいずれもM2がM6を上回った。特に視界が極めて悪い状態を示すLv.4において、F値はM2が0.51、M6が0.48となり、M2の優位性が確認された。また、WIPS変動が大きい日では、M2が最小誤差を達成した回数はM6より多かった。変動が小さい日でも、KP35.8を除いてM2がM6を上回った。これらの結果から、特に視界悪化の予測が重要な道路視界予測において、LSTMを予測器として用いる妥当性が確認された。

M2 vs. M4：

現在および過去のWIPS値を説明変数として用いる妥当性を検証する。予測誤差の全体平均においてM2はM4を上回った。また、再現率、適合率、F値の平均においてもM2がM4を上回った。特にLv.4におけるF値は、M2が0.51、M4が0.14と大きな差が見られた。さらに、WIPS変動が大きい日および小さい日のいずれにおいても、M2はM4を上回る結果となった。これらの結果から、現在および過去のWIPS値を説明変数として用いることの有効性が確認された。

M1 vs. M2 vs. M3：

XRAINによる降水強度・12時間降水量、およびAMeDASによる風速・気温といった気象データを説明変数として用いる妥当性を検証する。予測誤差の全体平均ではM1およびM3がM2を上回った。一方、再現率、適合率、F値の平均ではM2が最も良好であり、次いでM3が続いた。特にLv.4におけるF値は、M1が0.39、M2が0.51、M3が0.41となり、M2が最も高い値を示し、M3が次点となった。また、WIPS変動が大きい日における最小誤差

表-6 実験結果

	MAE for each KP						
Method	kp0	kp5.3	kp9.0	kp18.6	kp35.8	kp39.9	Average
M1	0.18	0.22	0.16	0.1	0.23	0.25	0.19
M2	0.18	0.21	0.19	0.1	0.34	0.22	0.21
M3	0.23	0.21	0.17	0.09	0.23	0.23	0.19
M4	0.44	0.49	0.4	0.26	0.48	0.46	0.42
M5	0.63	0.59	0.66	0.33	0.63	0.63	0.58
M6	0.19	0.22	0.17	0.1	0.24	0.23	0.19
F-measure of each level and average of Precision, Recall F-measure of all levels							
	F-measure				Average		
	Lv. 1	Lv.2	Lv.3	Lv.4	Precision	Recall	F-measure
M1	0.98	0.62	0.4	0.39	0.68	0.56	0.6
M2	0.98	0.62	0.44	0.51	0.69	0.61	0.64
M3	0.98	0.61	0.43	0.41	0.69	0.58	0.61
M4	0.98	0.39	0.35	0.14	0.62	0.42	0.47
M5	0.96	0.05	0	0	0.28	0.26	0.25
M6	0.98	0.61	0.44	0.48	0.69	0.59	0.63
The num. of times the error was the lowest in dates with high variability in WIPS							
Method	kp0	kp5.3	kp9.0	kp18.6	kp35.8	kp39.9	sum
M1	269	468	175	93	300	354	1659
M2	350	210	222	77	326	240	1425
M3	332	376	237	98	239	398	1680
M4	192	228	102	51	272	267	1112
M5	184	198	72	43	250	200	947
M6	235	287	132	61	281	217	1213
The num. of times the error was the lowest in dates with low variability in WIPS							
KP	kp0	kp5.3	kp9.0	kp18.6	kp35.8	kp39.9	sum
M1	298	325	572	288	325	152	1960
M2	469	178	300	377	86	346	1756
M3	132	227	401	476	268	354	1858
M4	150	70	177	171	141	108	817
M5	56	90	110	103	85	66	510
M6	160	166	332	245	253	131	1287

達成回数は M3 が最多であった。これらの結果から、視界悪化の予測が重要となる道路視界予測において、WIPS に加えて気象データを説明変数として用いる

ことの有効性が確認された。

M4 vs. M5 :

夜間など WIPS 値が取得できない状況を想定し、気

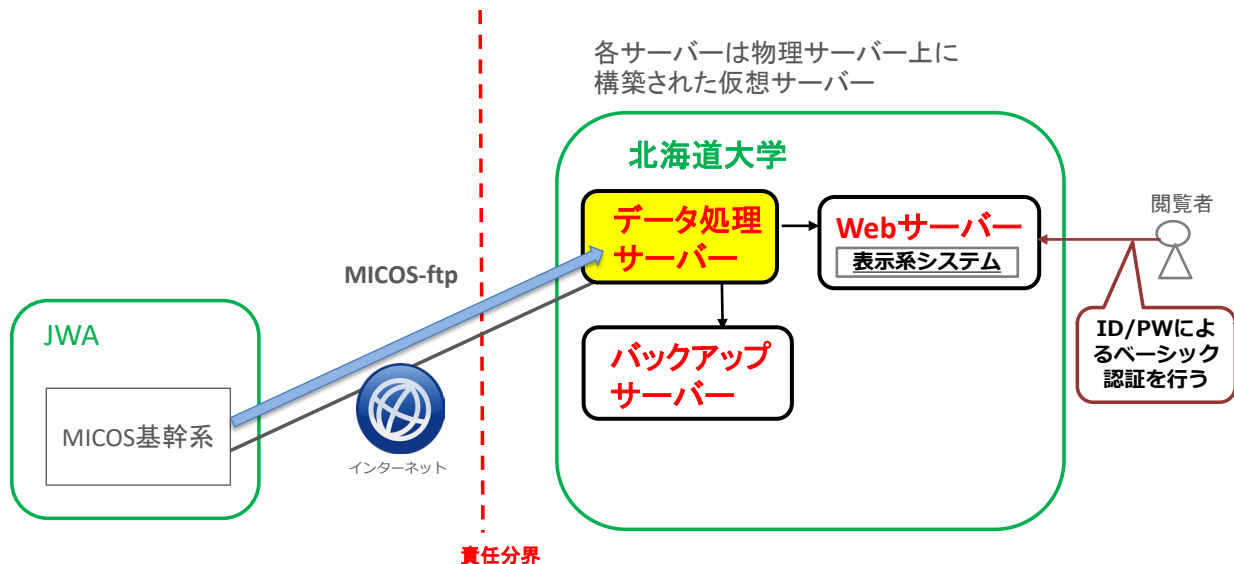


図-8 気象に関わる先読み情報の提供の流れ

象データのみを用いた場合の予測性能について検討する。まず、両手法とも WIPS を説明変数から除外することで予測精度が低下した。さらに、すべての評価指標において M4 は M5 を上回った。これらの結果から、WIPS 値が利用できない場合には、XRAIN による降水情報に加えて、AMeDAS による風速および気温を用いることが有効であることが確認された。

一実験結果に基づく考察一

実験結果に基づいて、提案手法の視界予測における有効性について検討し、視界不良に対する説明変数の影響について検討する。具体的には、XRAIN、AMeDAS、および WIPS の影響をそれぞれ個別に議論し、各説明変数の効果を明らかにする。その後、道路安全管理における実用性の観点から提案手法の有効性を検討する。最後に、視界不良予測に関する今後の課題について考察する。

視界予測における提案手法の効果：

表-6 に示すように、提案手法は F 値を、M2 と M6 の比較では最小で 0.01、M2 と M5 の比較では最大で 0.39 改善した。北海道内には約 2,000 台の CCTV カメラが設置されており、7 時から 16 時までの間に 5 分間隔で画像が取得されている。これにより、1 日あたり合計 216,000 枚の画像が生成される。F 値が 0.01 改善されることは、1 日あたり約 2,160 件の予測誤りが修正されることに相当する。これは、冬期（12 月～2 月）の 1 シーズンで約 19 万件の予測改善に相当する。一方、F 値が 0.39 改善される場合、1 日あたり約 84,240 件の予測誤りが修正されることになり、同一冬期間において約 750 万件の予測改善に相当する。これらの結果は、提案手法がより安定かつ信頼性の高い視界予測を可能にし、運用上大きな影響を持つことを示唆している。

視界不良予測における 12 時間降水量の影響：

気象データが予測精度に与える影響を分析するため、説明変数として WIPS のみを用いる M1 と、WIPS および気象データの両方を用いる M2 の 2

つのモデルを比較した。平均的には、M1 の方が M2 よりも高い予測精度を示す傾向があった。WIPS のみを用いるモデルは直近の WIPS 値に強く依存するため、WIPS の傾向が比較的一定である安定した視界条件下では良好な性能を示す。その結果、全体的な傾向を反映する平均予測誤差は、安定状態に属する多数のサンプルの影響を強く受け、M1 の方が良好な結果となった。

一方で、視界不良を示す レベル 3 およびレベル 4 における F 値では、M2 が M1 を上回った。これは、M2 が現在までの累積降水量および予測降水量を変数として含んでいるため、視界悪化の兆候を事前に捉え、それを予測に反映できたためであると考えられる。なお、レベル 1 は視界良好、レベル 4 は極めて視界が悪い状態を表す。

M2 は、道路交通において危険となる視界不良状態の予測に優れているため、望ましい予測モデルである。しかしながら、M2 の F 値はレベル 3 で 0.44、レベル 4 で 0.51 にとどまっており、改善の余地がある。この要因は、データの不均衡に起因すると思われる。

提案手法では、LSTM に基づく予測器の学習において、全サンプルに対する平均二乗誤差（MSE）を損失関数として用いている。その結果、出現頻度の高いクラスがモデルに強い影響を与え、少数クラスに対する表現学習が不十分となる。視界不良は視界良好な状態に比べて発生頻度が低いため、レベル 3 およびレベル 4 における予測性能低下を招いた可能性がある。今後は、少数クラスの情報をより保持できる構造的改善が必要である。

視界不良予測における南北風速・東西風速・気温の影響：

南北風速、東西風速、および気温が WIPS 値に与える影響を、M4 と M5 の比較により分析した。決定係数（ R^2 ）の結果が示すように、降水強度および 12 時間降水量のみを用いて低視界（すなわち低い WIPS 値）を正確に予測することは困難である。

◆ 留萌、宗谷地方の道路視界放送原稿（案）

【放送タイミング：道路交通情報（高速道路、高規格道路の道路規制情報）終了後】

♪（ジングル）SE チャイム♪

♪ BGM スタート

現在時刻は、〇〇 時 〇〇 分

ここからは、北海道大学 先端モビリティ工学研究室、冬期道路交通マネジメントシステムから最新の**道央自動車道**、**深川留萌自動車道**、**国道231号及び232号**で、吹雪や地吹雪の発生などにより特に視界が悪くなっている道路区間をご紹介します。

まずは、道央自動車道！

以上の区間では、視界がかなり悪くなっている模様です。

※灰色しかない場合

現在のところ視界が悪くなっている区間があるという情報は入っていません。

つづいて深川留萌自動車道！

以上の区間では、視界がかなり悪くなっている模様です。

※灰色しかない場合

現在のところ視界が悪くなっている区間があるという情報は入っていません。

つづいて、国道231号及び232号！

〇〇市から〇〇町までの区間（赤丸が並んでいる場合）

以上の区間では、視界がかなり悪くなっている模様です。

※灰色しかない場合

現在のところ視界が悪くなっている区間があるという情報は入っていません。

北海道大学 先端モビリティ工学研究室、冬期道路交通マネジメントシステムは、**沿岸バス**、宗谷バスに搭載されたカメラから送信される視界の情報を分析し、提供しています。実際に通行する際の視界の状況とは異なる場合がありますのでご注意ください。

ここまでは、道央自動車道、深川留萌自動車道、**国道231号及び232号**で特に視界が悪くなっている道路区間をご紹介します。

♪ BGM フェードアウト

※補足

- ・アナウンスは留萌を起点に行う。
（留萌から羽幌が全部赤丸の場合 → 留萌市から羽幌町までの区間）
（留萌から羽幌の間に赤丸がある場合→留萌市から羽幌町までの一部区間）
※高速道路に関してはリスナーに馴染みがある IC 毎のアナウンスにしました。
- ・視界の情報部分のみを使用する。
放送のタイミングについて（案）
朝（10：05）、**昼（12：10）**、夕（16：05）
放送時間は多少前後する可能性あり。

図-9 エフエムもえるでの放送原稿の例

これは、道路表面に堆積した乾雪が強風によって再浮遊することが、視界低下の主要因の一つであるためである。したがって、南北風速、東西風速、および気温を説明変数に含めることは、視界悪化の予測に有効であると考えられる。

視界不良予測における WIPS の影響：

極端な低視界条件下において、WIPS を使用した場合と使用しない場合で予測性能がどのように異なるかを検討した。具体的には、WIPS と気象データの両方を用いる M2 と、気象データのみを用いる M4 を比較した。レベル 4 の視界条件において、M2 の F 値は 0.51 であったのに対し、M4 は 0.14 と著しく低い値を示した。これは、WIPS が急激に低下する状況において、気象データのみでは状況を正確に捉えることが困難であることを示唆している。AMeDAS データの空間解像度が低いため、局所的な気象変化を正確に表現することが難しく、その結果、類似した気象パターンの中に中程度の WIPS 低下と極端な WIPS 低下が混在してしまう。このため、まれに発生する極端な WIPS 低下について、モデルが十分に学習できなかった可能性がある。一方、

WIPS を説明変数として用いるモデルでは、直近の WIPS 低下を入力データに直接取り込むことができるため、気象データのみに基づくモデルよりも、極端な変化を効果的に追跡することが可能となる。気象データを用いた視界予測を改善するためには、より高い空間解像度を持つ観測データが必要である。**道路安全管理における実用性を考慮した計算コスト：**

提案手法は、道路安全管理への適用を目的としている。本手法により、予測結果に基づいて経路変更、外出抑制、一時避難といった行動を道路利用者に促すことが可能となる。

例えば、本報告書で示しているように、5 分後の視界状況を予測することが一つの応用例である。提案手法が極めて視界が悪い状態を予測した場合、運転者に警告情報を提供し、近隣の安全な場所へ誘導することで、衝突事故や交通滞留の防止につながる可能性がある。

このような応用を実現するためには、予測を迅速に行うことが求められる。そこで、本研究では計算コストの観点から提案手法の実用性を評価した。提案手法は、Intel(R) Core(TM) i7-9700K CPU (3.60 GHz)、32 GB RAM、および NVIDIA GeForce RTX 3070 Ti GPU を搭載した計算機上で実行した。1 回の予測に要する計算時間は 0.06 秒であった。説明変数として用いる監視結果は、エッジコンピューティングを介してサーバに収集されることを想定しているため、データ転送に要する時間は短い。したがって、提案手法は迅速な予測が可能であり、道路安全管理において実用的であることが示唆される。

(4) デジタルツインで生成した先読み情報の有効性

本研究では、デジタルツインで生成した先読み情報の利用者評価として、デジタルツインで生成した先読み情報の配信を行った。

一気象に関わる先読み情報の提供一

デジタルツインを用いた冬期道路交通マネジメントシステムの実装では、**図-8**の流れで気象に関わる先読み情報の配信構築を進めた。気象に関わる先読み情報は、日本気象協会（JWA）からインターネット回線を介して北海道大学のデータ処理サーバに FTP-PUT で送信される。送信された先読み情報は北海道大学内のデータ処理サーバで必要な加工や統計処理が行われ、Webサーバ上で構築された表示システムを通じて閲覧者に情報が届けられる。

一道路管理者への情報提供

デジタルツインで生成した先読み情報を配信する仕組みの実現性を検証するために道路管理者による除排雪出動判断支援等への活用を見据え、稚内道路事務所および留萌開発建設部に先読み情報の情報提供を行った。

一地域FM（エフエムもえる）での道路情報放送の試験導入一

株式会社エフエムもえるは、北海道留萌市の道の

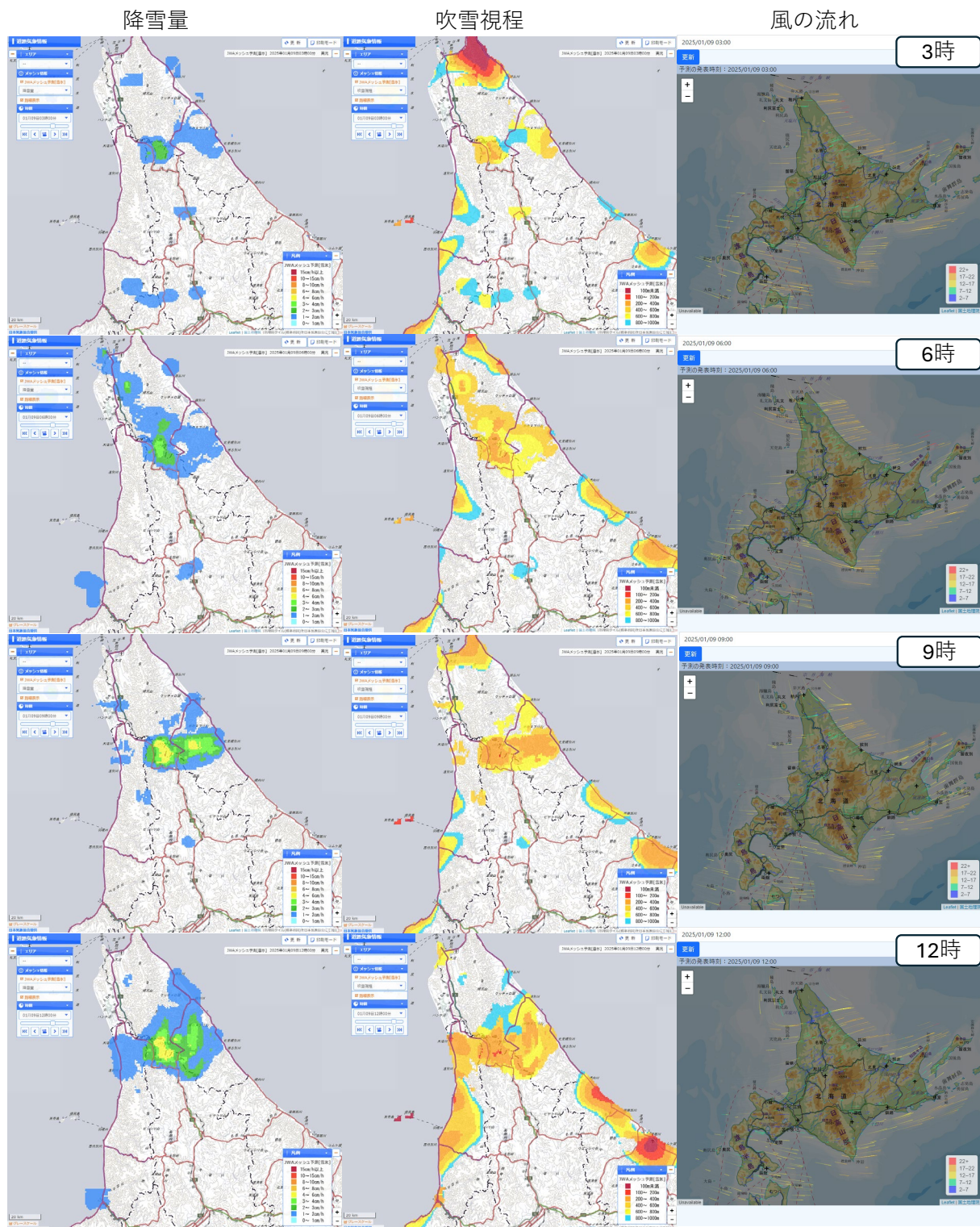


図-10 気象に関わる先読み情報の実施例（令和7年1月9日）

駅るもいのモデュロー内より、発信されている特定地上基幹放送事業者である。

2004年10月24日に開局しており、留萌市とその周辺の町の一部が放送区域である。WEB放送にも対応している。本研究では、令和6年度と令和7年度の冬期間、道路情報放送をエフエムもえるで試験導入した。その放送原稿の例を図-9に示す。

一利用者評価一

デジタルツインで生成した先読み情報を配信す

る仕組みの実現性を検証するために道路管理者による除排雪出動判断支援や地域 FM などでの道路情報の放送に試験導入し、その先読み情報について、利用者（道路管理者、道路利用者）へのヒアリングを実施した。ヒアリング結果を次に示す。

稚内道路事務所：

- ・この冬、今日まで、通行止めがありましたか？
なかった。今年は、雪の降り方がこれまでと

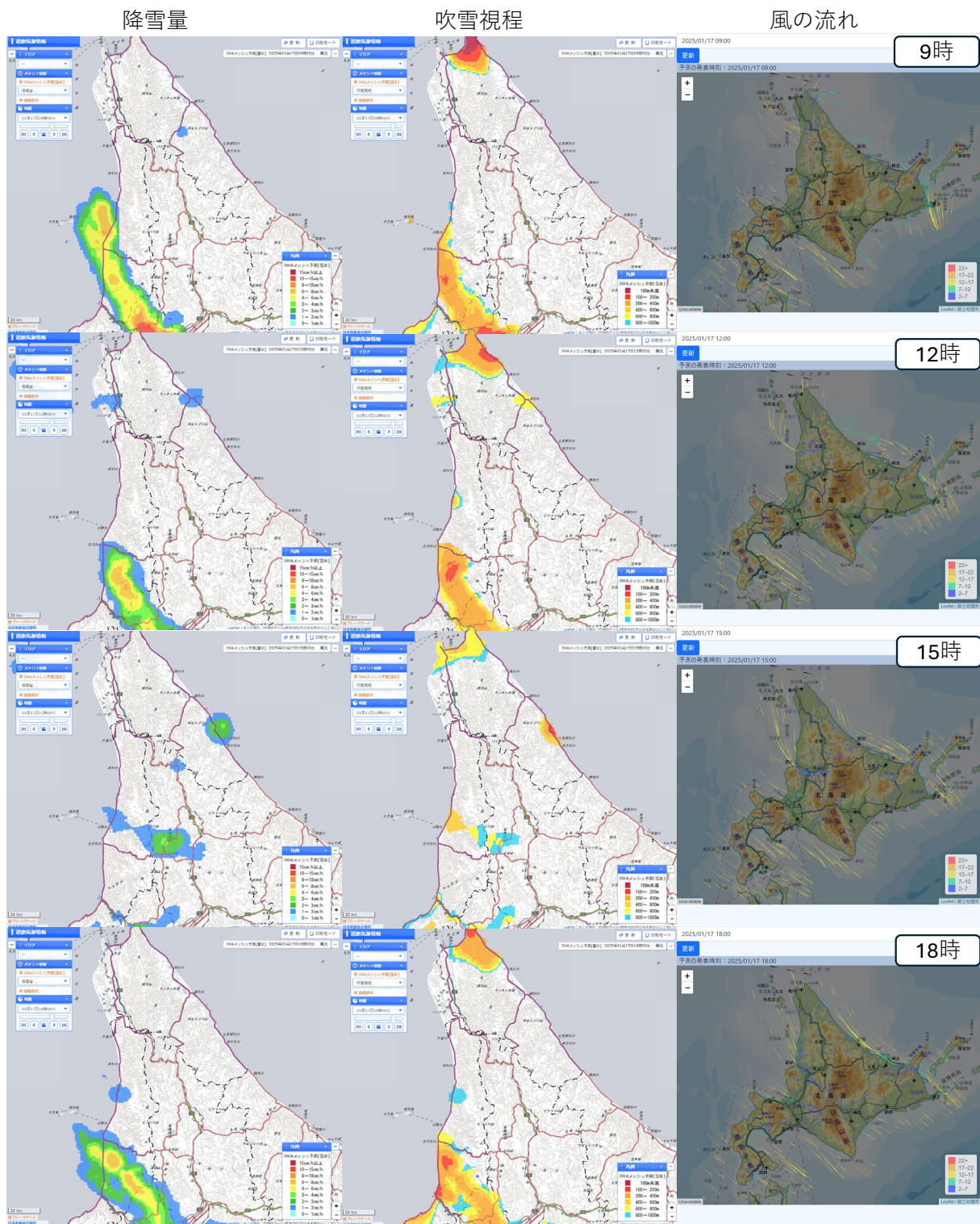


図-11 気象に関わる先読み情報の実施例（令和7年1月17日）

違う感じがする。これまで雪の粒が流れることがほとんどだったが、今年は、雪の粒が縦に、下に降ることが多くなった。

・道路状況のモニタリングについてお聞かせください。

CCTVからの映像をアイパッドで確認できるような仕組みを作っている。バスからの映像では除雪の判断のタイミングにならない時間のため、自分たちでの黄色パトカーに設置した装

置からのカメラ映像を利用している。CCTVより、このカメラからの映像はドライバー目線の視界状況が把握できて有用となっている。

道路にWEBカメラを設置してモニタリングをしていて、こちらもドライバー目線の映像として有用だと感じた。CCTVカメラより低い位置にあり、ドライバー目線に近く有用と思っている。

気象協会による道路気象データ予測を使っている。現在降雪量などを予測をしながら危な

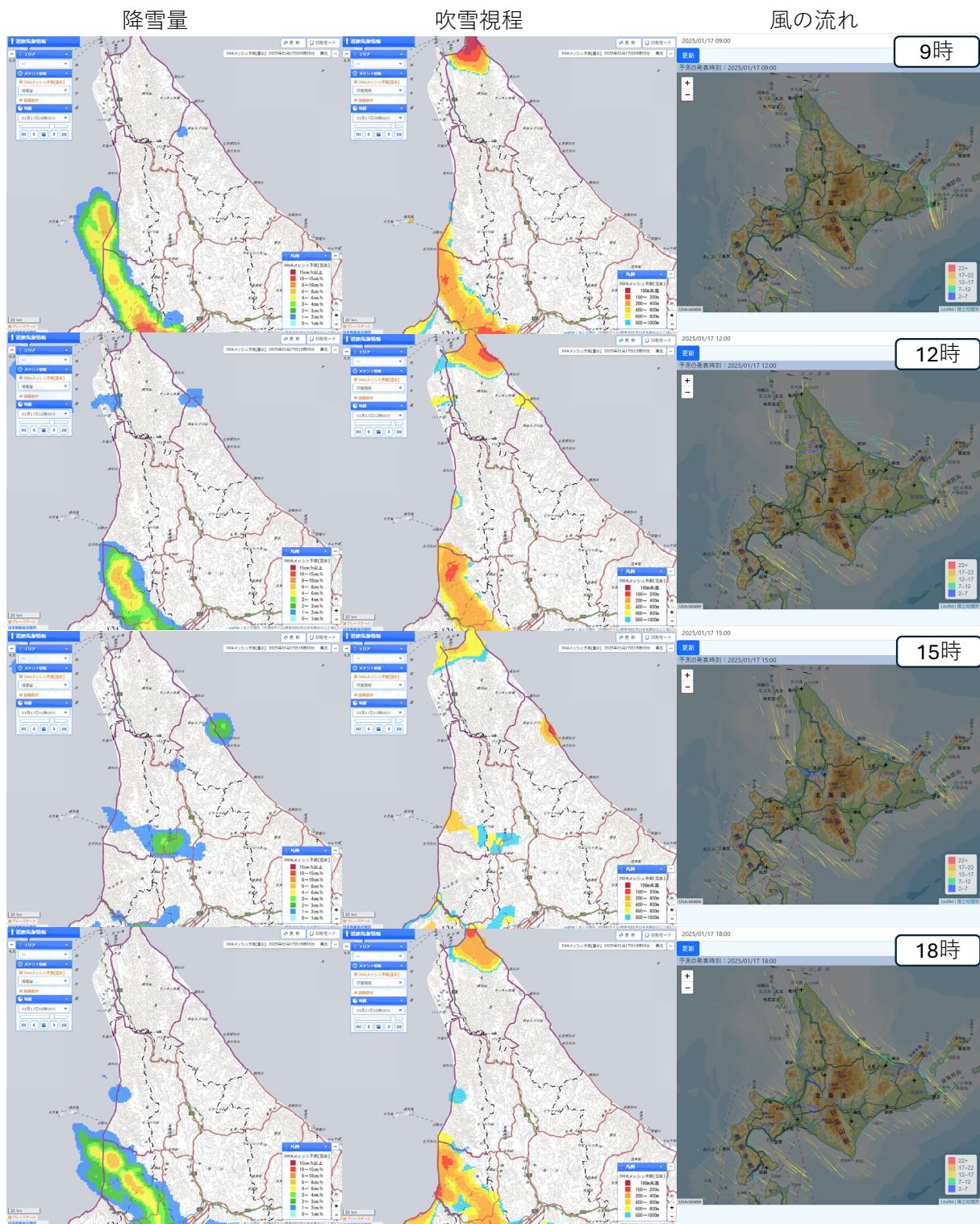


図-12 気象に関わる先読み情報の実施例（令和7年2月4日）

そんなエリアに関してプッシュ型で配信するというシステムとなっていて、有用と思っている。ただし、気象に関しては予測精度がまだまだ低いので、今の状態確認がいつでも監視できないと道路管理は難しいと感じる。

・WEBカメラ設置の場所はどのように決めているのか？

西風で視界不良となりやすいところ、東風で視界不良となりやすいところなど、設置を使い

分けている。厳密な基準で決定しているというわけではないが経験則を使って判断している。将来は、このWEBカメラをもっと増やしたい。

・本プロジェクトは、このようなデジタルツインを先行的に研究開発しているものとなります。例えば、巡回の判断、除雪開始の判断、通行止めの判断、作業の効率化、作業の高精度化などにどのように貢献できますか？

ハザードマップは有用と思う。東風だとここ

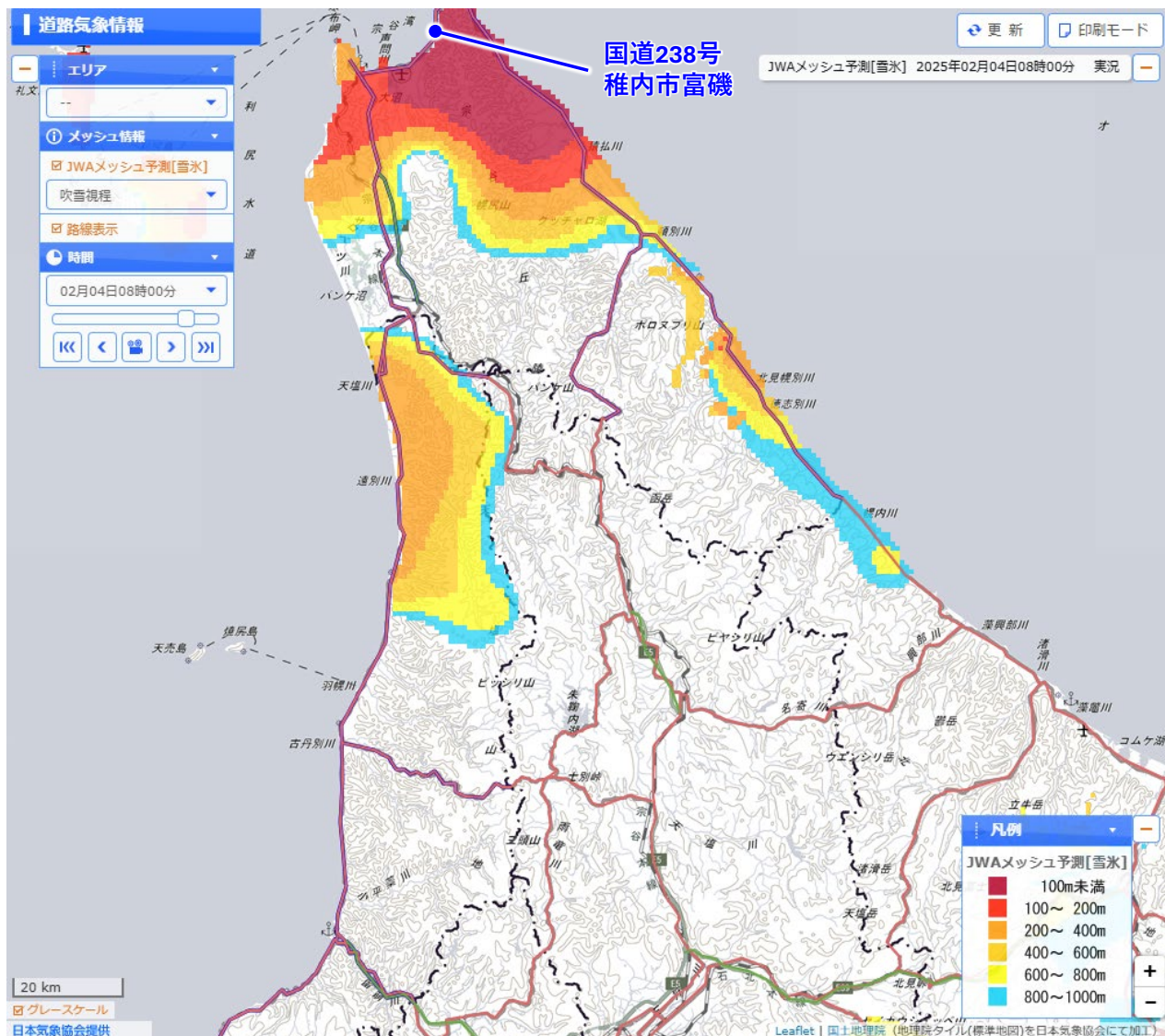


図-13 国道 238 号稚内市富磯で多重衝突事故が発生した直前（2 月 8 日 8 時）の吹雪視程

が危険、西風だとここが危険といったことが分かるのはとても助かる。経験から、ある程度はわかっているが、最近の気象状況による変化を踏まえた、ハザードマップは非常に有用だと思う。風、気温、降雪からの経過時間、路肩の雪、吹きだまりなど視界不良の発生可能性は多くの要因があるため予測の判断が難しい。データの組み合わせから、この地点でこのタイミングではこのような状況が予測されるのでこれぐらい危険であるというデータを得られたらいいと思う。

留萌開発建設部：

- ・この冬、今日まで、通行止めがありましたか？
深川留萌道で1回あった。吹雪がひどく、止めた方がいいという現場からの話で、通行止めを実施した。
- ・道路状況のモニタリングについてお聞かせください。

主に気象情報とパトロールの両面から判断している。

気象の警報は半日後など、事前予告が来ます。

気象の警報事前予告をトリガーとし、除雪・通行規制などに備える。ただし、通行規制については、気象のように事前予告はしない。

気象情報は、安全側となることが多い。ただし、低気圧の動きを予測し難いという面もあり、安全側となることは受け止めている。安全側であったとしても、前述したように事前予告情報を準備のトリガーとして利用している。

気象庁以外に気象情報会社からの気象情報を購入し、路線の道路状況の予測値として利用している。この情報は、黄パトによる雪見の開始、除雪の開始、通行規制の実施などの貴重な情報源となっている。

- ・本プロジェクトは、このようなデジタルツインを先行的に研究開発しているものとなります。例えば、巡回の判断、除雪開始の判断、通行止めの判断、作業の効率化、作業の高精度化などにどのように貢献できますか？

このプロジェクトによって開発している技術は、AIによって吹雪いていて視界不良になっているとか、路面凍結とかそういうことを判

断して ウェブサイト上に表示するものと理解している。担当者が見ていなくても、吹雪による視界不良の場所などを教えてくれる。究極は、担当者がパトロールしなくても、通行止めにしてはどうでしょうか、そういうことの判断まで示してもらえたら、おそらく一番いいでしょう。ただ、通行止めについては、経験的なジャッジが大事となっていて、ケースバイケースのため、なかなかAIでの判断は難しいと思える。

一方、道路維持管理作業は多岐にわたり、今回のようなデジタルツインは将来的には導入され则认为している。例えば、雪見の巡回が空振りしてしまうことが、人員不足の中で無駄を多く生み出してしまっている。ここにデジタルツインを導入していけば、空振りを減らすことができ、効率的な作業になると思える。

また、除雪作業などの簡単化において、デジタルツインは必要と考えている。

デジタルツインによるハザードマップは有効と思っている。というのは、吹雪による視界不良の頻度が高い、視界が悪くなりやすいところがあります。一年間の道路状況が蓄積され、だいたいこういう天候になれば、ここは吹雪きますよ、視界が悪くなりますよというハザードマップがあれば、除雪作業の効率化などに大きく貢献すると考えています。

232号の災害強靱化として 防雪対策を中心にやっている。そのとき、古いデータをもとに、ここは吹かないという判断をしている。しかし、気象が変化しており、整備している防災対策が果たして効果があるのかわからないときがある。最近の状況で蓄積したデータをもとに作成された吹雪などのハザードマップは、このようなケースで価値がある。これにより、除雪回数を減らせる、適切なタイミングで除雪を開始できるとかのメリットが生まれる。また、現場代理人の経験に近づくことができ、AIによる作業判断につながるものと思える。

一方、交差点など、人海戦術に頼るような除雪を、効率化することは難しい。道路側の施設を、簡素なものとし、人手に頼らなくても除雪できるような構造としていることも必要なかもしれない。また、市街地があるエリアの除雪は夜間しかできない。このため、除雪出動時間を気象に合わせることは難しい。昼間作業などの可能性など、別の次元で検討が必要となる。

・CCTV以外のカメラを道路に設置していますか？

CCTV以外のWEBカメラを道路につけています。雪面の状況、視界状況をカメラから見ています。先日も暴風が起きたのですが、雪面の雪が固まっていた、吹雪にはなりませんでしたが、そのようなとき、気象情報では分らないのですが、カメラを見ると吹雪になっていないことを知ることができます。カメラの映像は役立っています。

吹き払い柵の下に雪が溜まり、効果が低下し

ているような状況もWEBカメラで知ることができると考えています。これもデジタルツインによって過去のWEBカメラの情報蓄積があれば、どのくらい悪くなっているかなどの差分を知ることができ、対策をしようという判断につながるできるようになります。WEBカメラのようなデバイスを導入していくとき、デジタルツインはセットで必要になると思います。

宗谷バス（道路利用者）：

※特に重要な内容を赤字で記載

「わからない号」と「えさし号」に、車載モニタリングシステムを搭載してきました。この3年間の総まとめ（こちらで実施しているプロジェクトの最終年）ということで、車載モニタリングシステムの役割などなどについてご意見を伺った。

- ・車載モニタリングシステムによる前方映像の利用
画像確認に時間制限が無いので直ぐに確認出来るように常時画面表示している。そのとき、都市間ルートの天候・道路状況・到着地の天候・道路状況を確認している。悪天候時に確認回数が増える。これにより、運行計画時間等を調整できる。

- ・車載のモニタリングシステムの役割
リアルタイムでの画像からの状況確認は、運行判断の是非や無事故の安心感がある。安全走行可能と考え運行を開始するが、オロロンライン等、予測の難しい所、情報もなにもない時に画像確認出来る事は運行の安全性を確認でき、大変役立っている。

・車載モニタリングシステムのメリット

現在進行形の運行状況、天候の把握、位置確認、ダイレクトに情報収集出来るので調べる時間の短縮と目視確認でき、運行管理の安心感が高まる。直接状況が、見えるのが非常に良い。

- ・車載モニタリングシステムの利用方法
画像確認時間に制限がないので、出来るだけ画像を映している。暴風雪警報発令地区は注視しているが、天塩から留萌、特に遠別から羽幌までの区間で画像を見ている。

- ・車載のモニタリングシステムの利用の事例
朝一の便を通常ルートで出したが、モニタリングによる吹雪の状況から後続便は国道40号へ経路変更を指示した。

オロロンラインの強風に注意が必要なときに映像を利用した。初山別付近は雪雲が〇〇時位まで発生する予報なので、吹雪による視程悪化に注意するよう点呼時に指示した。指示後に道路状況をこのシステムで確認でき、安心できた。

・路線の気象予報などの情報の活用

インターネットの天気図(11日前からの予想図)で、冬型気圧配置、特に等圧線間隔に注目、低気圧中心の移動予想(通過場所で影響の予測)をしている。これに他の予報サイト情報を重ね合わせている。

天候が心配な早朝は、当番管理者が羽幌の沿岸バスに情報をもらう。2月23日の低気圧は余り経験のない位置を通過、始めは暖気南風、後、右斜め下に稚内がある状況下では寒気強烈な西風。前日の22日、夜行便の運行は風速予測を基に国道40号の迂回運行を決定した。

毎回、気象予報で難しく思うのは、どれ位の降雪量があるかがよくわからない。吹雪による視程障害を考慮し、強い寒気の時は注意している。

情報収集は「sunny spot」、「Windy」、「気象庁」を見ている。特に早期注意情報等見ている。毎週木曜日13:30～ 「上川・留萌管内防災連携TV」をzoomで視聴し、上川留萌の詳しい気象情報を聞いている。

必要に応じ運行管理者が沿岸バスに天候状況や現地運行情報をもらっている。昨年はデジタルツインの風予測や降雪予測も参考にしていた。

・運休の判断について (事例)

2月5日夜行便から2月6日全便の運休を2月4日17:00に決定し、2月5日9:00に発表した。早期の判断により、利用者も対応が容易になっていると考えている。

2月5日17:00に、宗谷管内の全路線運休を発表した。これにより、各学校が臨時休校になった。稚内の定期路線バス運行に関してはぎりぎりまで運行し直前運休が多くなる。

(全体)

都市間バスは出来るだけ早めの判断を心掛けるようになってきた。令和3年に比べ情報の質・量ともにレベルアップアップされている、早期判断に役立っている。現在は、一人で判断するのではなく、管理者複数名それぞれが持ち寄った情報で話し合っている。

・沿岸バスなどと打ち合わせしていると以前伺いました。JRやANAの運行状況を調べたりしていますか、あるいは直接話をされていますか？

出勤後、ネットでJR、ANA運行状況の確認をしている。ANAは空港から欠航連絡や都市間バス空席の問い合わせ等電話が入る。JRからの運休情報はこない。ただし、運休時、代替運行バスの問い合わせがあるときがある。沿岸バスからは運休予定や通行止め情報等の連絡をもらっている。

・わからない号がキャンセルとなったときの行動

札幌などに行くのを中止する方が多い。今年はないが、都市間バス走っていますかの問い合わせがときどきある。自車で行けるかどうかの判断に利用している。

・バスのドライバの方と、この車載モニタリングシステムの利用について、意見交換されたことがありますか？

ドライバが直接画像確認を見る事は無い。

その中で、接続関係電源やWi-Fi等の確認、カメラ設置について話をした。

ドライバの作業は、Wi-Fiの接続不良によりインバーターの再起動等、カメラの作動を確認するだけだった。大きな負担にはなっていない。管理者としては、将来、目指す物が出来れば、管理者・運転手さん自身のプラスになると考えている。

・車載モニタリングシステムによる道路情報は一般ドライバに役立つか？

高速や札幌市内の道路状況、渋滞などの情報は役立つ。車を利用する人には良い情報と考えている。特に悪天候時の運行予定中止及び経路変更の判断材料に役立つと思う。

・車載モニタリングシステムは、時間的には不連続。このデメリットをどう考えているか？

ダイレクトの連続画像は断片的に見る静止画像より必要に感じている。画像が途切れても次の景色が分かっているのも頭の中で次の場面を想像している。

・気象情報、CCTVの情報などを使って、時間的な穴埋め、2時間後予測、などの将来予測は役立ちますか？

このようなシステムが構築されて2時間毎の予測は助かる。2～4時間後の情報はネットで手に入りやすい、特に6時間後・12時間後が必要と思う。

・今後も車載モニタリングシステムの利用を継続していきたい？

もちろん継続していきたい。既に運行管理業務の必要ツールの一つになっている。運行状況が瞬時に確認可能で見えているという安心感、情報収集時間節約。

・車載モニタリングシステムの機能

蓄積された視程・路面データに天気図データを重ね合わせ、車両走行に対する運転のし易さの数値化、将来は天気予報を基に過去データからAIによる運行可否判断の情報提供システムが出来ると運行管理者・道路利用者の負担軽減になる。(不確かな経験や勘に頼らない)

－気象に関わる先読み情報の有効性－

令和6年度～7年度に運用したデジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムでの気象に関わる先読み情報について、暴風雪事例や多重衝突事故事例からその有効性を検討した。

《令和7年1月9日：留萌・宗谷地方での暴風雪事例》

発達した低気圧の通過に伴い令和7年1月9日を中心に留萌・宗谷地方では暴風雪となった。新聞報道によると、1月9日にはこの暴風雪によって留萌・宗谷地方では、主に次の影響があった。

- ・ JR宗谷線の名寄～稚内間が終日運休となった。
- ・ 沿岸バスの都市間バスおよび路線バスが終日運休となった。宗谷バスの都市間バスおよ

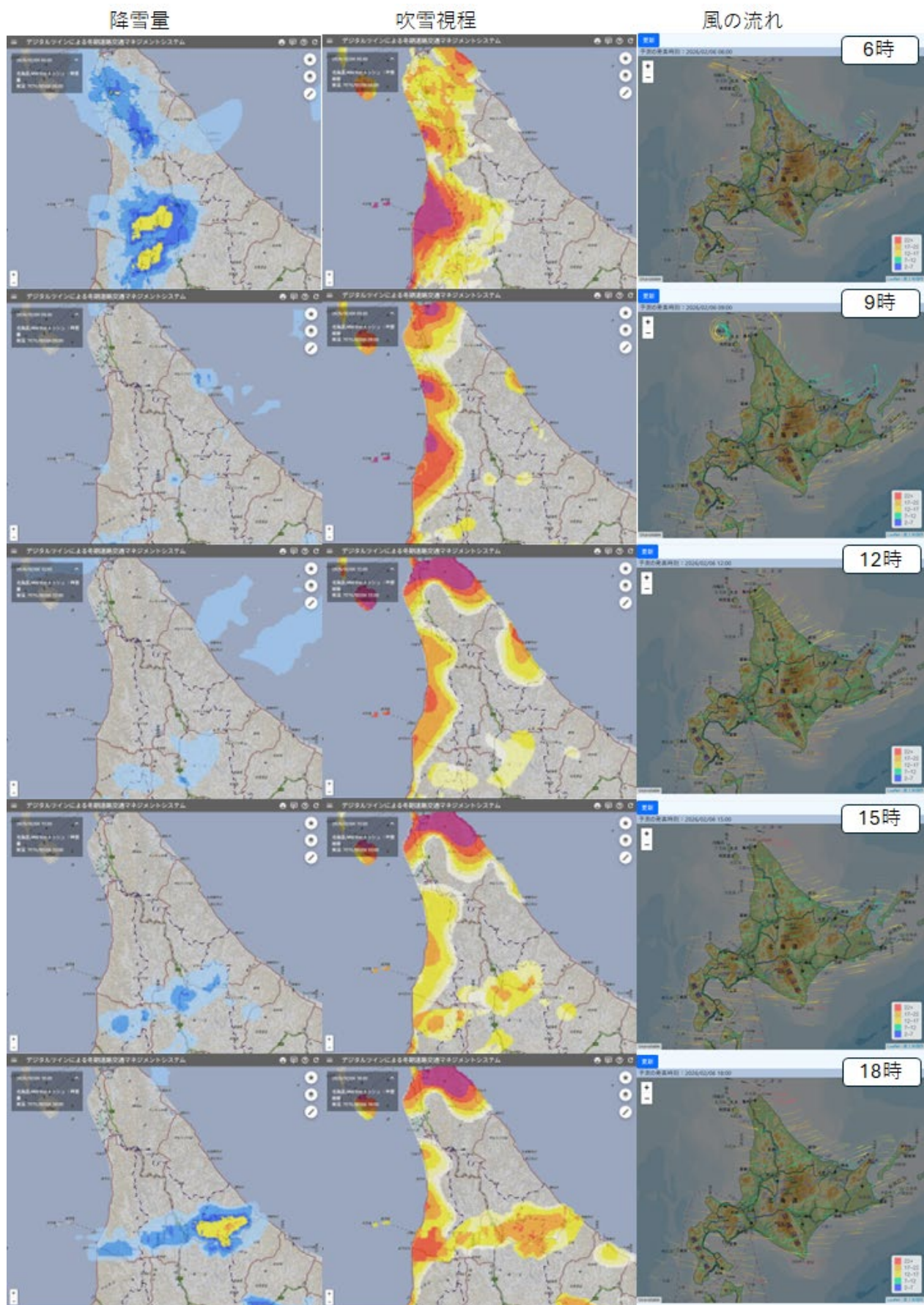


図-14 気象に関わる先読み情報の実施例（令和8年2月6日）

- ・ 路線バスは一部運休となった。
- ・ 稚内市の一部では一般ごみの収集に影響が

生じた。

図-10は令和7年1月9日の3時～12時までに試行したデジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムでの気象に関する先読み情報（降雪量、吹雪視程、風の流れ）を3時間毎に示したものである。気象に関する先読み情報では宗谷地方で、3時頃には宗谷北部での著しい視程障害を、6時頃に降雪の強まりが表現されている。また、留萌地方では激しい降雪となっている箇所は少ないが、沿岸部では局所的な著しい視程障害が表現されている。風の流れを見ると宗谷・留萌地方は強い西風が吹いており、これに伴う暴風雪や地吹雪による視程障害の発生が先読み情報として提供されているといえる。

《令和7年1月17日：留萌地方での大雪事例》

冬の気圧配置が強まったことにより留萌地方では令和7年1月17日～18日に大雪となった。特に大雪となったのは中留萌の苫前町古丹別や留萌市に接する空知地方の沼田町などであった。新聞報道では留萌地方での大雪の影響は報道されていないが、沼田町で大雪になったことから、留萌・宗谷地方と札幌を結ぶ都市間バスが利用する深川留萌自動車道で視程障害などの影響があったものと推察される。

図-11は令和7年1月17日の9時～18時にかけての3時間毎の気象に関する先読み情報（降雪量、吹雪視程、風の流れ）である。1月17日の午前と夕方に北西から南東に延びる発達した雪雲が留萌市にかかり大雪となっていることが表示されている。また、この降雪に対応して吹雪視程では厳しい視程障害の発生が表現されていることがわかる。

《令和7年2月4日：宗谷地方での暴風雪事例》

令和7年2月4日は発達した低気圧の影響により宗谷地方では暴風雪となった。この暴風雪による宗谷地方での主な影響は新聞報道から次のようである。

- ・ 稚内市内の全小中学校が臨時休校となった。
- ・ 稚内市郊外や道道や市道が通行止めとなった。
- ・ 国道238号の稚内市富磯で8時10分頃に車両5台が関係する多重衝突事故が発生した。

図-12は令和7年2月4日の6時～15時までの気象に関する先読み情報（降雪量、吹雪視程、風の流れ）を3時間毎に示したものである。吹雪視程では、宗谷地方北部を中心に視程100m未満となる深刻な視程障害が発生していたことが表現されている。一方、降雪量はどの時間帯でもほぼ0cmに近く、降雪はほとんどない。これは、雪が降っていない（雪が降っていたとしても量が少ない）ものの、宗谷地方の北部では積もっている雪が舞いあげられる激しい地吹雪が発生していたことを表していると考えられる。**図-12**の右列の風の流れでは宗谷地方では非常に強い西風が卓越していたことがわかる。

国道238号の稚内市富磯で多重衝突時刻が発生した8時の吹雪視程を**図-13**に示す。8時頃の稚内市富磯の吹雪視程は視程100m未満のエリアに位置し、深刻な視程障害に見舞われていたことがわかる。

《令和8年2月6日：留萌・宗谷地方での暴風雪事例》

令和8年2月6日は、発達した低気圧が宗谷海峡

付近を通過したため、宗谷・留萌地方では激しい暴風雪となった。新聞報道によると、留萌・宗谷地方では次のような影響があった。

- ・ 宗谷バスと沿岸バスが終日運休となり、JR宗谷線も終日運休となった。
- ・ 道路の通行止めが頻発した（ただし国道は通行止めにはならなかった）。
- ・ 稚内市内では地面の雪が舞い上がりホワイトアウトが発生した。
- ・ 稚内市では全ての小中学校が臨時休校に、幼稚園と保育園が休園、市立図書館などの公共施設が休業した。

図-14は令和8年2月6日の6時～18時までの気象に関する先読み情報（降雪量、吹雪視程、風の流れ）を3時間毎に示したものである。**図-14**の中列の吹雪視程に着目すると留萌地方から宗谷地方にかけての範囲で視程200m未満のエリアが広がっていることがわかる。これは留萌市と稚内市を結ぶ国道232号や国道40号が吹雪や地吹雪により著しい視程障害状況下にあったことを示している。一方、**図-14**の左列の降雪量を確認すると6時頃には雪雲がかかっている地域はあるものの、留萌地方や宗谷地方では強い降雪は見られない。さらに、**図-14**の右列の風の流れ（風向風速）を見ると、2月6日の日中は強い西風が終始卓越していたことがわかる。このことから、2月6日の留萌・宗谷地方では降雪そのものは少ない（または降っていない）ものの、非常に強い西風によって地面の雪が舞い上がる地吹雪が発生していたと考えられる。この地吹雪が新聞報道に記載されているようなホワイトアウトや公共交通機関の運休をもたらした。

以上、留萌・宗谷地方での大雪や暴風雪事例をもとに、実際に冬期道路交通マネジメントシステムで運用した気象の先読み情報について述べたが、冬の一般的な気象情報である降雪量に加えて、北海道のような積雪寒冷地では視程や風の情報も不可欠な情報といえる。

一道路維持管理におけるデジタルツインの有効性一

本プロジェクトでは、道路維持管理のデジタルツインを先行的に研究開発した。デジタルツインの道路維持管理における有用性を以下に示す。

画像、映像データ、気象データを用いた道路状況判断：

CCTVに加え、道路維持管理でも設置型のWEBカメラ、車載型のWEBカメラが使われてきている。これらのWEBカメラは、ドライバーの目線に近く、実際の視界状況を再現している。気象情報と地形と道路周辺の雪面状況が複雑に組み合わせられて視界が悪化しており、これらの多数のカメラからの画像を踏まえたダイナミックな変化をデジタルツインのシミュレーションで判断する仕組みは、道路維持管理者の負担を減らし、無駄な作業を減らすものになる。また、この仕組みが進むことから、エキスパートに代わるレベルになれば、今後のエキスパート作業者の高齢化への対策ともなる。

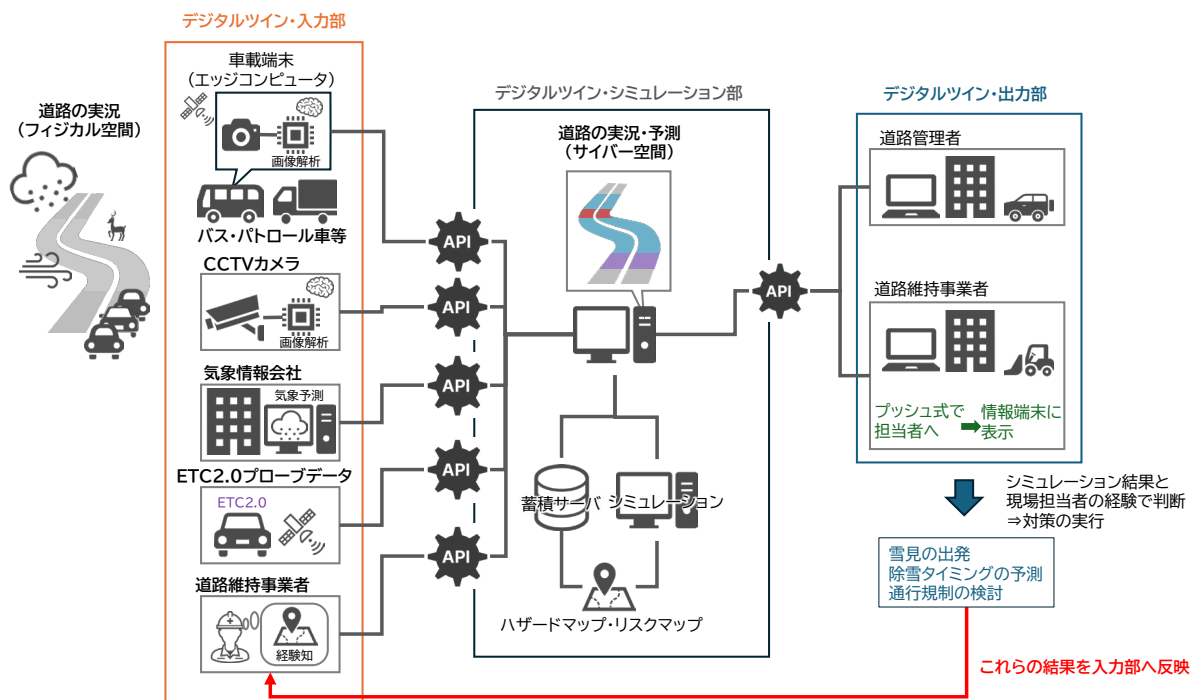


図-15 道路維持管理用デジタルツイン（案）

道路状況のハザードマップの生成：

デジタルツインの道路モニタリング情報から、最新の冬期の道路状況を蓄積でき、道路状況のハザードマップ（毎年更新）の生成が可能になる。最近、気象状況が変化しており、視界状況が悪化する地点や気象が変化してきている。最新のハザードデータは、巡回の判断、除雪開始の判断、通行止めの判断に大きく貢献するものとなる。加えて、これらのデータは、視界状況対策の有効なハード対策に資するものとなる。

一道路維持管理用のデジタルツイン（案）－

上記の結果を踏まえた道路維持管理用のデジタルツイン案を図-15および以下に示す。デジタルツインの活用により、無駄な巡回が減る、除雪出動が的確なタイミングとなる、判断を行う代理人の知識と経験が受け継がれる、時間が読めるため準備が容易となる、安全側の気象情報（警報）に振り回されなくなる等の有効性があると考えられる。また、合わせて適切な暴風雪対策にも寄与すると考える。

3.2 テーマ2：デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの構築に関する技術開発

本テーマでは令和5年度から令和7年度にかけて、複数のエッジから送信される大量データを集積するプラットフォーム機能を可能とするためのシステム設計に基づいて、実サーバにシステムを実装した。また、プラットフォーム機能としての動的データ解析結果の集積とそれらのデータを円滑に表示するシステムを再設計し、APIによるやり取りを複数サーバ

で行うことによる負荷分散によって遅延を低減した最終出力を可能とした。それらについて、以下に説明する。

(1) プラットフォーム機能の拡充と動的データ・解析結果の集積システムの構築

令和 5～6 年度までに個別の基盤システムをもとに、複数のエッジから送信される大量データを集積するプラットフォーム機能を拡充し、プラットフォーム機能としての動的データ・解析結果の集積システムを構築した。

時々刻々変化する冬期道路の情報収集、およびその提供にあたっては、各種データの入出力・連携が自動・低遅延で実施されることが必要である。このために、令和 6 年度までに処理分散などを可能とする仕組みとして、令和 6 年度までには、1) 複数の車載システムから常時送信される道路空間を撮影した画像およびエッジコンピューティングによって取得する解析結果のデータを受け入れるサーバのプロトタイプの構築、2) 物理サーバの上に3つの仮想サーバを配置する新たな仕組みを検討した。1) について、具体的には、一般的な WebDAV システムによって構築したデータを受信する仕組みを構築し、不定期に起動およびデータ送信する 9 台のエッジから、データをもれなく収受できることを確認した。2) について、各仮想サーバの機能は、それぞれ、「フィジカル空間からのデータの受け入れとストレージ」、「シミュレーション」、および「情報提示」と設計した。これによって、物理サーバが外部とのインタフェースとなり、ポートフォワードイングによって、各仮想サーバと外部をやり取り可能とする。

令和7年度には、図-16のように設計した基幹シス

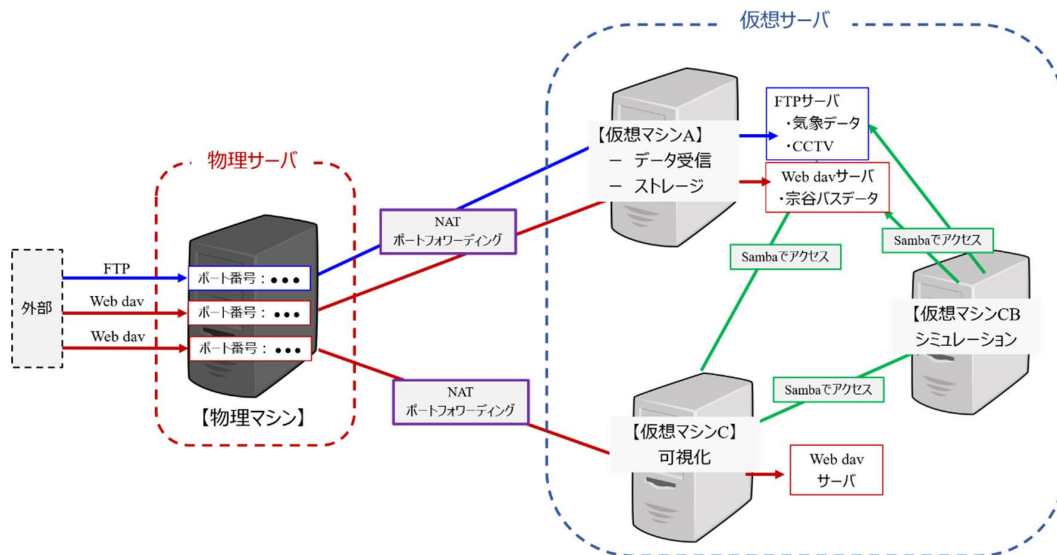


図-16 令和7年度までに実サーバに実装した基幹システムの構成

テムを実サーバに実現した。

(2) 道路APIの基幹システムの構築

これまでに、複数のエッジや各種シミュレーション機能のためのデータ入出力に関する道路 API の基幹システムの仕様を整理し、プロトタイプシステムを構築してきた。本研究プロジェクトで構築するデジタルツインは、フィジカル空間に散りばめられた複数のエッジからのデータを大量に集積する。

新サーバに前節にある基幹システムを図-16のとおり実装しているが、このときに道路APIとしては、その想定しうる内容に応じて、APIの形式（REST等）、データ送受信の形式（JSON、XML等）、公開範囲、認証方法などを定めたうえで公開・提供することが必要となる。令和7年度に実装したシステムにおいては、気象データ・CCTVを受け取りから可視化画面まで構築している。この実現には、そのデータ集積、データ処理、およびインタフェース画面の構成を必要とし、それらは複数のサーバで通信を介して実行される。ここにおいても、本サーバで設計したJSONおよびXML形式でのやりとりする道路APIを活用しており、サーバ間での遅延の無い伝送と処

理が実施されることを確認した。図-17には、令和6年度までに構築したデジタルツインシステムの画面出力までに要するシステムレスポンスに比して低遅延かつ複数データを一元的に扱うことを可能とした新システムの画面例を示している。このとき本デジタルツインが扱うデータは、その種類が適時追加されることを想定する。このため、新種のデータに拡張可能なデータ構造を確保した。また、外部からのリクエストに対して安定したAPI提供が可能となるよう、機能を分けた複数システムからなる基幹システムとした。

3.3 テーマ3：交通・気象データを利用するシミュレーション及び高度交通制御に関する技術開発

本テーマでは、令和5年度から令和7年度にかけて、ETC2.0プローブデータや人流データに基づいて、雪害時のレジリエンスカーブや交通配分シミュレシ

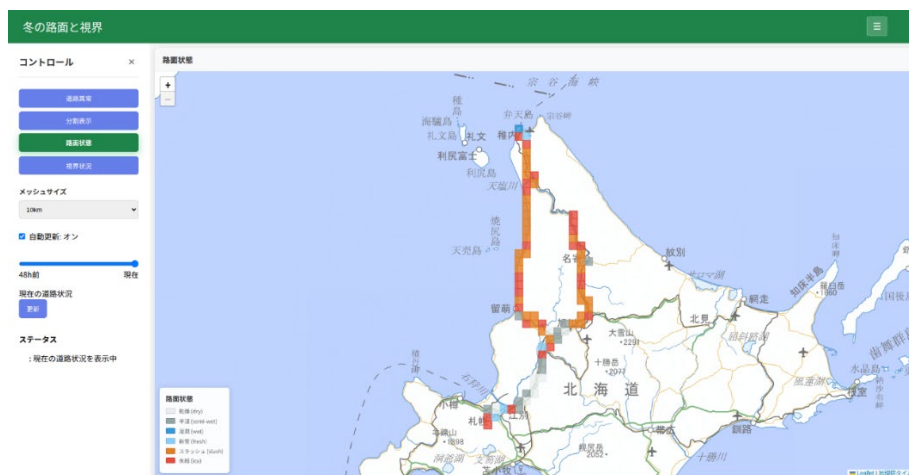


図-17 最終的に実サーバに実装した基幹システムの例

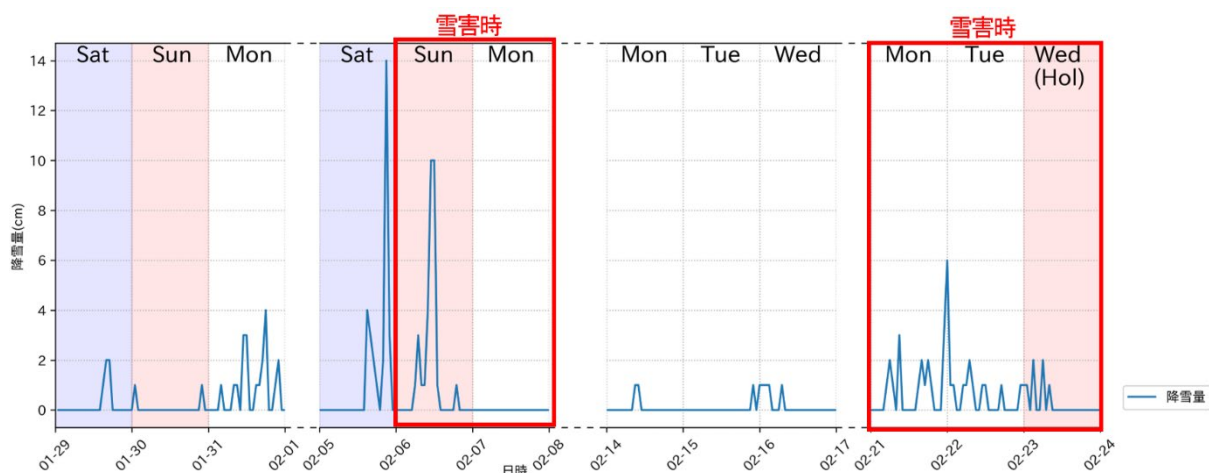


図-18 札幌市の降雪量の推移

ョン、ブレイクダウン判定手法の構築など多岐にわたる分析や方法論の導出を試みた。また、ミクロ交通シミュレーションを活用した交通制御支援モデルの構築も行った。

本報告書では、雪害時のレジリエンスカーブの分析、ミクロ交通シミュレーションを活用した交通制御支援モデル、およびブレイクダウン判定手法に関する検討結果を報告する。

(1) 雪害時におけるレジリエンスカーブの分析

2022年2月に札幌圏で発生した大規模雪害における交通利用の時系列的変化について分析した。雪害時には、一時的に交通サービスレベルが大きく低下し交通利用数も大きく減少するが、除雪作業の進捗や鉄道の運行再開により再度利用数が増加し、最終的に雪害時前の値に戻る。この過程を時系列にグラフに曲線で示したものをレジリエンスカーブといい、復旧のスピードが速いほど、災害時に対して強い都市交通であると言える。

本分析では、「移動オプション付きモバイル空間統計」を使用する。このデータは各メッシュの出発・到着トリップを交通手段別に把握可能である。本研究では、この移動手段付きのモバイル空間統計に加え、降雪・運搬排雪データを使用した。降雪量・運搬排雪距離と各交通手段の利用数を時系列にグラフ化し、雪害時の交通サービスレベルの推移を把握可能とする。この結果より、交通サービスレベルが低下する降雪・排雪状況や他の交通機関の利用不可に伴う需要変動の把握を行い、都市交通全体を改善するための効果的な対策について考察する。

a) 使用データ

移動オプション付きモバイル空間統計に加え、札幌市全体の一時間毎降雪・積雪量（気象庁の観測データ）と道道・市道の運搬排雪データを使用する。前者、降雪・積雪量は降雪時間帯による各交通利用への影響を検証するため、積雪深は長期的な積雪による影響を検証するために利用する。後者について、運搬排雪とは道路脇の堆雪をダンプトラックに積み

込み、雪堆積場や融雪槽に運び出す作業である。これにより、道路幅員の拡大や雪山の高さの引き下げ、歩行者の安全確保が図られる。本研究では札幌市行政区別の運搬排雪の延長距離を一日毎に集計し、運搬排雪の状況による交通利用への影響の把握に使用する。

b) 分析方法と結果

この分析では、降雪量と各交通の利用数の時系列変化について比較を行う。これにより、各交通のサービスレベルが低下する降雪・運搬排雪状況を把握する。

一札幌市の一時間降雪量の変化一

図-18に札幌市の降雪量の推移を示す。この図は、本研究で使用するモバイル空間統計の集計期間と合わせた12日間を3日毎に表示している。また、本雪害の日を赤枠で囲っている。この図より、1回目の雪害では、2/5（土）15時～23時と2/6（日）3時～12時に一時間当たり10cm程度の非常に集中した降雪があった。また、2回目の雪害では、2/21（月）5時～2/23（水）8時まで断続的な降雪があった。また、1回目の初日2/6（日）、2回目初日2/21（月）と二日目2/22（火）深夜は深夜帯の降雪が確認できる。

一道道・市道の運搬排雪距離一

日々の積雪・除雪作業の実施によって、道路の路肩堆雪は大きく成長する。この路肩堆雪を減らすため、運搬排雪は行われている。図-19に1月29日～2月28日の運搬排雪距離を日毎に集計したグラフを示す。運搬排雪作業は、雪害時には大きく減少し、その後大きく増加していることが読み取れる。よって、多量の降雪により一時的に運搬排雪が行えない状況になるが、その後、道路幅員の拡幅のため通常時以上に排雪作業が行われた。これにより、自動車の移動速度と交通量は徐々に回復していったものと予想される。

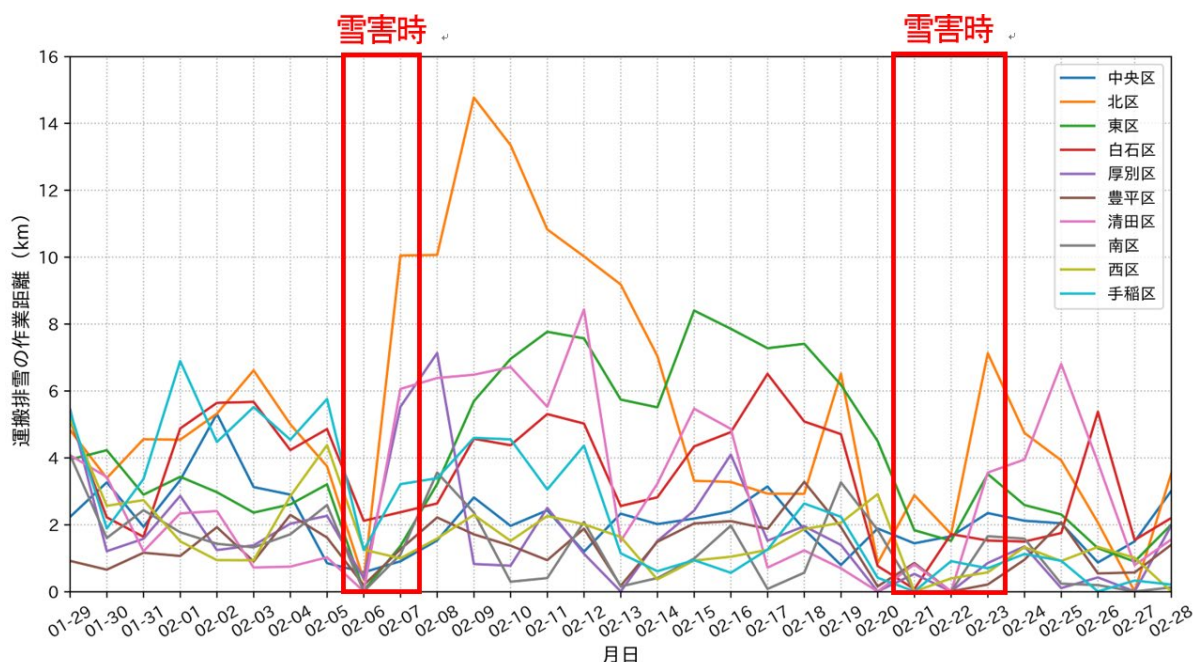


図-19 道道・市道の運搬排雪距離（日毎）

一交通手段別・出発人口の変化一

図-20 に交通手段別の出発人口の変化を示す。また、図-21 に自動車の出発人口の変化のみを拡大して示す。まず、全体の傾向として、徒歩・電車について休日は、昼間にピークがあり、平日は朝、夕方にピークがある。自動車は朝のピークは大きい夕方のピークは見られない。次に通常時と雪害時を比較すると、雪害に伴い、すべての交通機関で出発人口が減少していることが確認できる。休日は正午頃のピークが多く減り、朝、夕の減少は少ない。一方、平日の雪害時はピークの時間帯を変えず、全体的に減少している。また、自動車の減少率は、徒歩・電車の減少率より大きい。電車に関して、JRは全便運休したが地下鉄は正常に運行していたため、減少が比較的少なかったと考えられる。特に注目すべきは2/7（月）、2/23（水・祝）における自動車の出発人口の減少である。これらの日は昼間に雪が降らなかったにもかかわらず、出発人口が大幅に減少した。この現象は、深夜の除雪作業が難航し、朝までに間に合わなかったことに起因していると考えられる。1回目の雪害では、24時間で60cmもの大雪が降り、観測史上最大の降雪となった。2回目の雪害では、深夜から早朝にかけて雪が降り続けたことが道路の除雪作業を妨げた要因と推測される。また、丹治ら¹¹⁾の研究で行われた道路管理者や除雪業者へのヒアリングにおいても「朝方の3～4時頃に雪が降っていて、除雪が終わったらまたやらないといけない状況だった」とのコメントがある。さらに、2/21～23の交通量の減少は、強風による地吹雪が発生したこと2)による影響も大きい。2/22（火）は深夜の降雪・強風・昼間の降雪の3つの要素により、平日にもかかわらず自動車の減少量は最大となった。

c) 結論

本研究では、降雪・運搬排雪情報の供給情報と利用交通手段が把握可能な携帯電話位置情報を用いた降雪・運搬排雪距離と各交通の利用人口の時系列的变化をグラフで比較することにより、交通サービスレベルが低下する降雪・運搬排雪の状況を推定した。記録的な大雪が影響することはもちろん、特に深夜帯の断続的な積雪が除雪の妨げになり、翌日の交通に大きな悪影響を及ぼすことが示唆された。考えられる対策として、深夜帯の降雪に備えて除雪機器の追加と最適化が必要である。処理が難しい場合は事前に市民に除雪の不足を伝え、交通需要を減らすTDM施策も考慮すべきである。

今後の課題としては、集計期間の拡大が挙げられる。本研究では、雪害時6日間のデータのみを使用したため、交通のサービスレベルが復旧する様子を確認できていない。各交通手段別のレジリエンスカーブと地域差を調査することで、運搬排雪との関連性の明確化が期待される。今後はこの情報を取り入れることで札幌圏全体の被害削減に貢献できると考える。

(2) ミクロ交通シミュレーションを活用した交通制御モデルの検討

道路交通流のカメラ画像解析を入力としたミクロ交通シミュレーションを構築し、信号現示パターン・車種別交通量を入力、渋滞長を出力としたアンサンブルデータ生成技術を開発した。

a) ミクロ交通シミュレーションの構築

一対象区間・対象交差点一

対象区間・対象交差点は、図-22に示す札幌都心部から千歳市間の一般国道36号線沿道地域および札幌新道である。

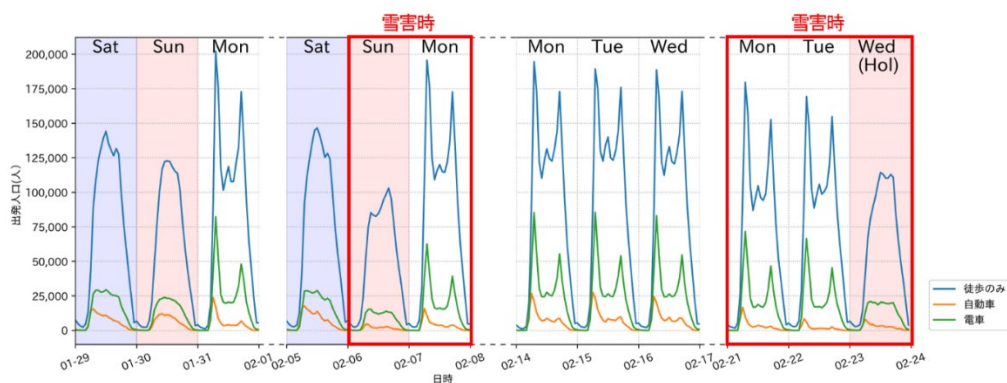


図-20 交通手段別，出発人口の変化

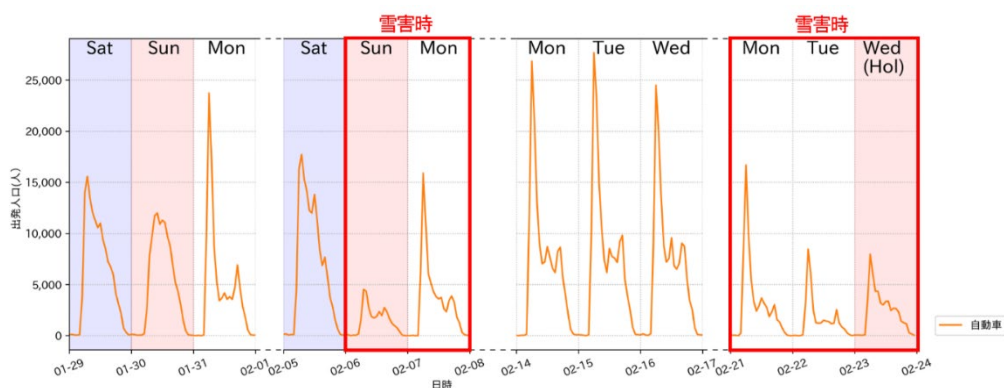


図-21 自動車の出発人口の変化

ー交通シミュレーションソフトー

本研究では，交通流ミクロシミュレーションソフトPTV Vissimを使用した。Vissim は道路構造や交通運用，交通量，大型車混入率等のデータを入力することにより，現実の多様な交通現象を再現したシミュレーションモデルの構築が可能である。シミュレーション中のある地点での通過交通量や滞留長の測定や，車両の挙動を 3D アニメーションによって可視化することができる（図-23）。以上の機能を有するため渋滞対策の事前効果検証等に用いられている。

ーシミュレーションモデルの構築方法ー

シミュレーションモデルの構築の手順を図-24に示す。シミュレーションモデルの構築にはR2年度社会実験の実調査で得られた4パターンの交通基礎調査データ（交通量，滞留長，ビデオ等）を用いた。それぞれの交通量調査データから流入交通量，分岐率，大型車混入率を算出し，道路構造や信号現示データと同時にシミュレーションソフトに入力した。

また，実調査データを用いたシミュレーションモデルの現況再現性の検証と，モデルのパラメータを調整するシミュレーションモデルの較正を繰り返し

行った。再現性の検証には交通量のGEH値，累積交通量の相関，オフランプ部の滞留長の3つの指標を用いた。また，シミュレーションモデルの較正の際に調整したパラメータを表-7に示す。このプロセスによって再現性の高いシミュレーションモデルを構築する。時間帯は特に交通状況となる夕方ピークの16時～19時とした。

ーシミュレーションモデルの再現性ー

較正したシミュレーションモデルの現況再現性の検証結果を示す。交通量のGEHの再現性検証では，各流入部から流出する方向別の10分間交通量を用いて実調査データとシミュレーション結果を比較した。

GEH値とは，シミュレーションの良好性を示す指標であり，GEHが5以下となるように較正している。較正後のモデルで評価した際にGEH値が5以上となった箇所を表-8に示す。新川通交差点A流入部からの右折交通量が社会実験結果よりも小さくなった。これは対向車線の車両の増加が影響したと考えられる。しかし，A流入部での滞留車両の増大等，高速道路での交通渋滞に影響を及ぼす事象は発生していない。よって，交通渋滞対策の効果検証には大きく影響しないと判断した。

累積交通量の相関では，各流入部を通過する交通量を3時間累積値において，観測値とシミュレーション値の相関係数から評価した。その結果，いずれのモデルでも相関係数 $R^2=0.9$ 以上となり，高い相関関係を示した。

表-7 較正時に調整したパラメータ

較正項目	調整パラメータ
右折タイミング 合流ルール	Priority Rules:優先ルール
車間距離	Driving Behavior:運転挙動
オフランプでの挙動	Static Routes:分岐率



図-22 札幌都心部から千歳市間の一般国道 36 号線沿道地域および札幌新道



図-23 ミクロ交通シミュレーションソフト Vissim
(上：アニメーション表示実行時，下：構築した道路ネットワーク)

オフランプ部の滞留長では、10分間のオフランプ部最大滞留長を用いて、その値と時間変動が一致するかを比較した。その結果、シミュレーション中の最大値は、観測データ最大値の7～15%程度の変動であった。また、10分毎の滞留長の時間変化もおおよそ一致している。以上より、各シミュレーションモデルは概ね現況再現できたことを確認した。

(3) ネットワーク交通流ブレイクダウン判定手法の構築

雪害時の移動実績データを基に、都市内における渋滞の早期検知・被害軽減のために、ネットワーク交通流ブレイクダウン判定手法の構築を行った。あるボトルネックで発生した渋滞車列の延

伸により、他のボトルネック容量の減少を引き起こすことによって生じる深刻な渋滞を「ネットワーク交通流ブレイクダウン」と定義し、その発生を客観的に判定する手法を構築する。交通渋滞は一般に、需要超過型渋滞と容量減少型渋滞に分類される。容量減少型渋滞はさらに、事故等に起因するインシデント渋滞と、渋滞車列の延伸が他のボトルネック容量を低下させることで発生するブレイクダウン渋滞に分けられる。本研究では特に後者に着目した。特に札幌のような積雪寒冷地では、降雪や路肩の堆雪による有効車線幅員の減少などを理由として交通処理能力が低下し、頻繁にブレイクダウンが発生すると考えられる。この現象を客観的に判定可能とすることは、積雪寒冷

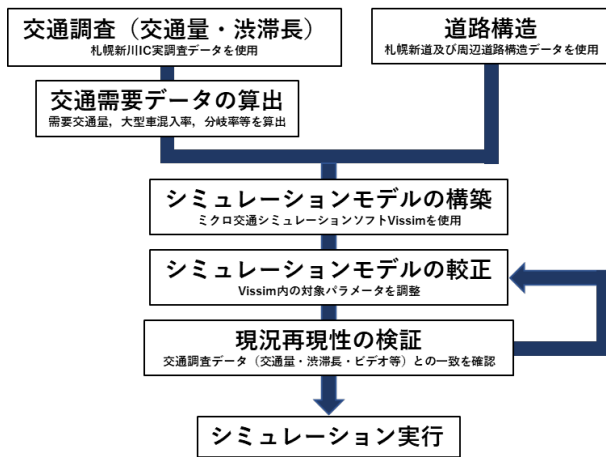


図-24 シミュレーションモデル構築の手順

地における冬期交通マネジメントにおいて重要である。

具体的には、ネットワーク交通流渋滞を需要超過型渋滞、インシデント渋滞およびブレイクダウン渋滞の3タイプに分類し、それぞれにおける渋滞発生から解消までのネットワーク交通流状態推移の差異に着目して、ブレイクダウン渋滞の判定を行う手法を考案した。渋滞解消過程における交通流状態の推移方向は渋滞タイプごとに異なる。需要超過型渋滞では、解消時に流率・密度ともに減少し、QK図上で左下へ推移する。インシデント渋滞では、容量回復により流率が増加し、密度が減少するため左上へ推移する。これに対しブレイクダウン渋滞では、まず周辺渋滞の解消により左下へ推移し、その後ボトルネック間干渉の解消に伴い左上へ推移するという、[左下]→[左上]の特徴的なヒステリシスを示す（図-25）。この推移順序が判定の鍵となる。提案手法では、ETC2.0プローブデータを用いて集計QおよびKを推定し、交通流状態の推移ベクトルの方向について統計的検定を行うことで、ブレイクダウン発生の有無を判定する。具体的には、推移前後の集計交通流率および集計交通密度の増減について片側検定を実施し、ブレイクダウンを判定する。

本手法の有効性を検証するため、冬期の札幌都心部道路ネットワークに適用した。2021年12月から2022年3月までの117日間を対象に分析した結果、3日間においてブレイクダウン発生と判定された。代表事例（2022年2月24日）では、集計QK図上において理論通りの左下→左上の推移が確認された（図-26）。

さらに、250mメッシュ単位で平均速度の変化量を可視化した結果（図-27）、周辺渋滞の解消後にネットワーク中心部で流率が回復する様子が観測され、ブレイクダウン解消過程と整合的であった。以上より、本研究で提案した手法は、積雪寒冷地におけるネットワーク交通流ブレイクダウンを客観的に判定

表-8 GEH値5以上の各流入部方向別交通量断面

	時刻	交差点	流入	流出	GEH値
現況	17:20	新川通	A	右折	5.57
	18:20	新川通	A	右折	5.05
	18:30	新川通	A	右折	5.28
策1					
策2	16:20	新川通	A	直進 (IC入口)	5.54
	18:10	新川通	A	右折	5.35
策3	18:10	新川通	A	右折	5.77

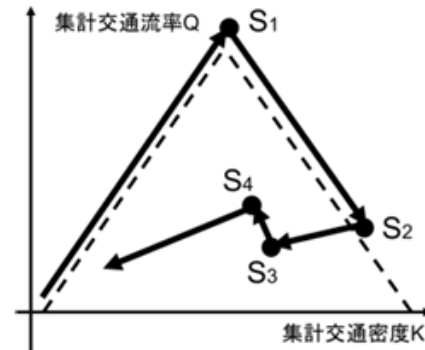


図-25 ブレイクダウン渋滞における交通流渋滞推移

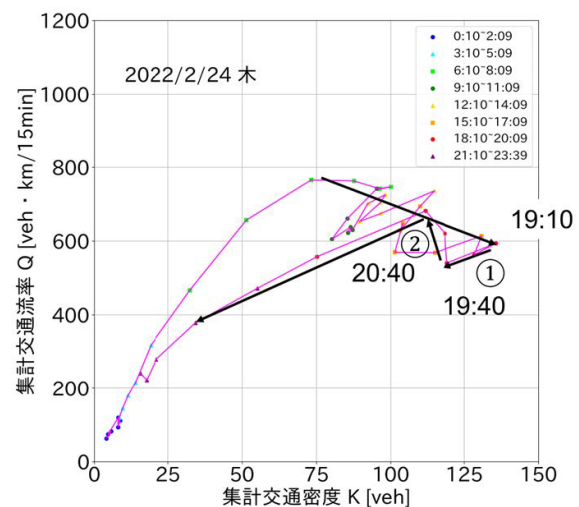


図-26 2022年2月24日（火）の集計QK図

できる可能性を有することが示された。今後は発生予測モデルへの拡張およびリアルタイム交通マネジメントへの応用が期待される。

3.4 テーマ4：積雪寒冷地における人の移動の負担軽減に資する技術開発

本テーマでは、令和5年度から令和6年度にかけて冬期道路マネジメントシステムのプロトタイプとしてのデジタルツインシステムを活用した地域連携の実証実験とそれに関するアンケート調査をもとに、情報発信内容やインタフェースを改善した上での実証

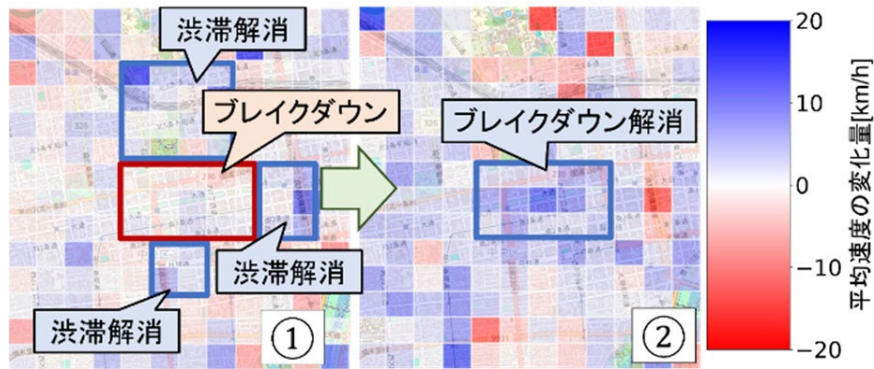


図-27 2022年2月24日（火）の渋滞解消時の平均速度の変化量

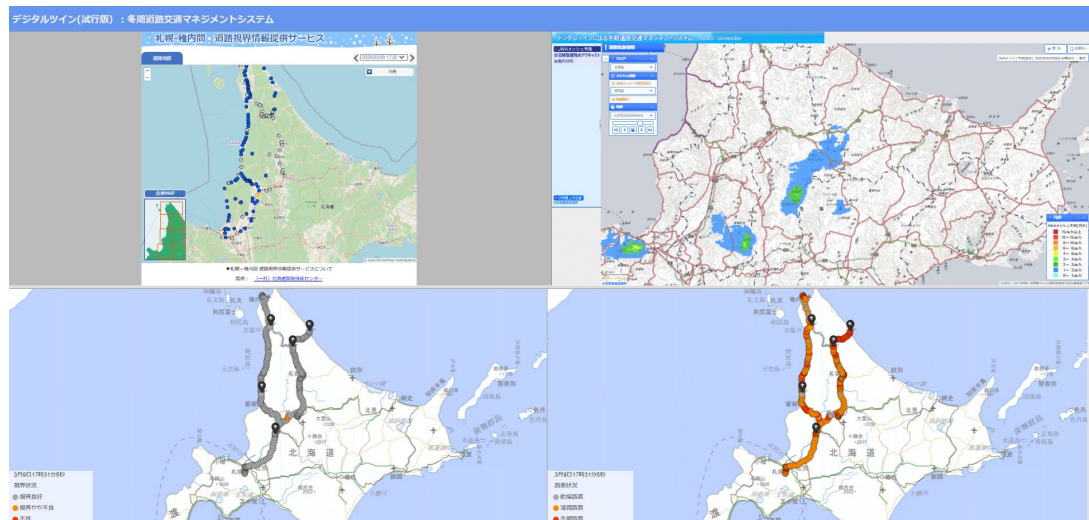


図-28 令和6年度に試行した情報提供システム

実験の継続実施と時空間解像度を向上させるシステムの拡充を行った。また、プラットフォームによる直接的な情報発信に加え、マスメディア、地域関係者、行政関係者の協力のもと情報発信を強化し、道路利用者への情報の訴求性を検証した。

また、実証実験結果で得られた知見に基づき、冬期道路情報の提供を他地域に展開するための知見やロードマップを整理して、当該マネジメント手法の導入・構築にあたっての手法やポイント・留意事項を示したマニュアルをとりまとめるとともに、道路APIの提供方法を取りまとめた。

(1) 冬期道路交通マネジメントシステムの拡充

令和6年度までのアンケート調査結果をもとに、情報発信内容やインタフェースを改善した。

a) 令和6年度の情報提供システム概要

令和6年度は、これまで個別に扱っていた複数データを一つのシステムとして扱う情報提示を試行した。具体的には、図-28に示すように、車載システムにより獲得する路面や視界のデータ、CCTVカメラにより撮影された画像を解析することで得る視界のデータ、および複数の気象データを統合して一つの画面で表示した。統合画面では、複数データを統合して

提示することで、全てのデータを一目で確認可能となり、さらには、データ間を照らし合わせることが容易となることが期待できる。また、令和5年度までは、アクセス時にパスワードの入力が毎回必要であるが、令和6年度からは、2回目以降のパスワードの自動入力可能な設定とした。これにより、情報提供システムの利便性向上が期待された。

図-29は、2024年12月5日12時の各情報を示している。この日の北海道は、北部を中止に大雪となり、留萌市周辺で視界不良が発生した。図-28に示すとおり、各視界情報（車載システム、CCTV画像、気象データによる吹雪視程）とともに、視界が悪化している様子を情報提供できていることがわかる。

令和6年度に施行した統合画面（車載システムの情報、CCTVの情報、気象データ）およびIDとパスワードの自動入力機能は、有用だという意見が多くあった。一方で、スマホで確認するための情報提示方法の高度化、及びモニタリングの時空間解像度を上げることが課題であることが明確となった。また、雪質など、積雪している雪のより細かな情報を提供可能とすることで、維持管理者にとってより有用なシステムとなることが分かった。

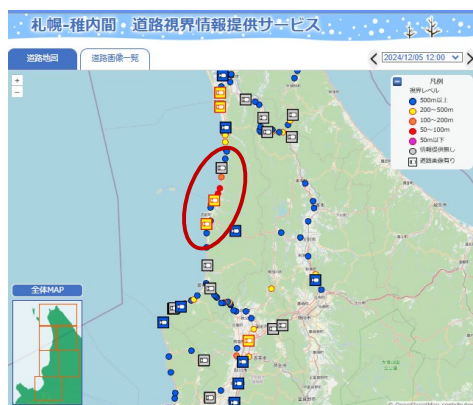
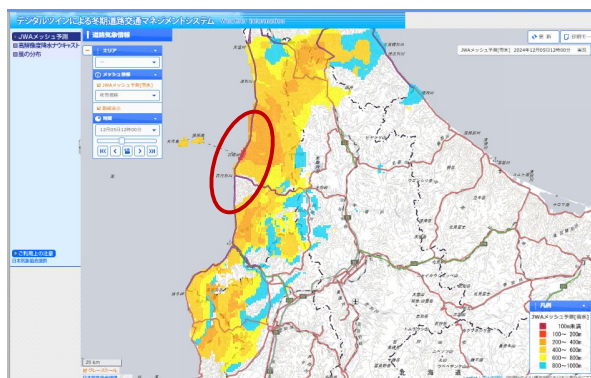


図-29 2024 年 12 月 5 日の情報提示（視界情報）の例

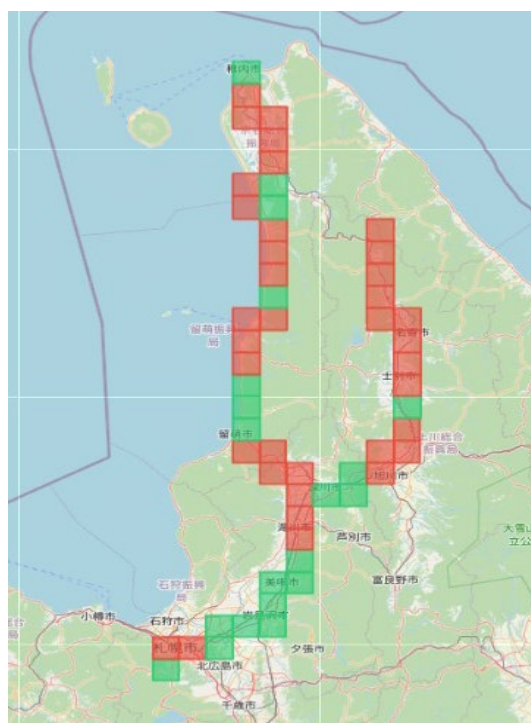


図-30 インタフェースの改善（左：令和 6 年度，右：最終版）

b) 情報発信内容・インタフェースの改善

令和6年度までの試行結果をもとにインタフェースの改善を行った。

ーデータをグリッドに区切って表示ー

令和6年度までは、点での表示により情報提供してい

たが、グリッド(1km or 10 km)での表示に変更し、より直感的に道路状況を把握できるよう、図-30と図-31に示す最終版を構築した。

ー危険度の高い箇所を知らせるアラート表示ー

俯瞰的にみた際に危険箇所を見落とす可能性がある

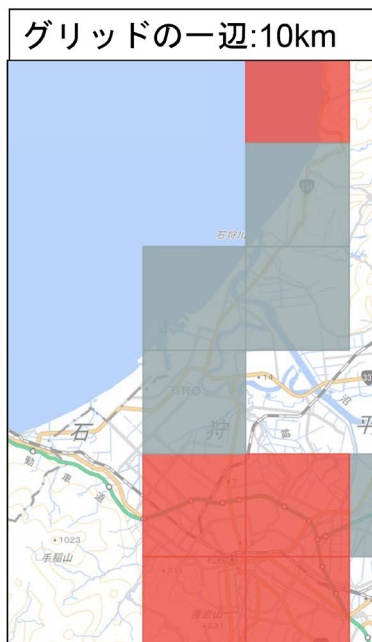
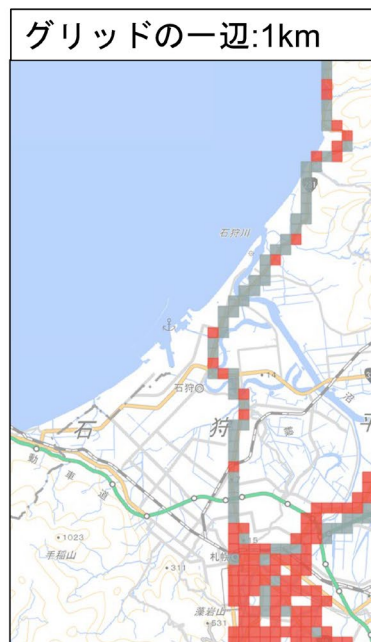


図-31 グリッドでの表示サイズの例

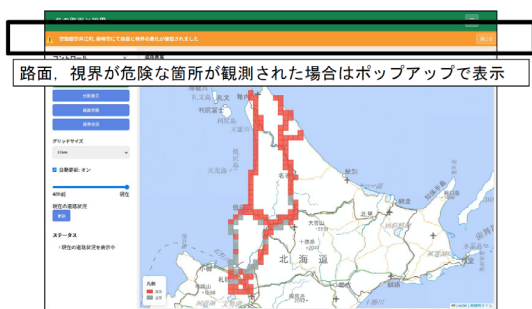
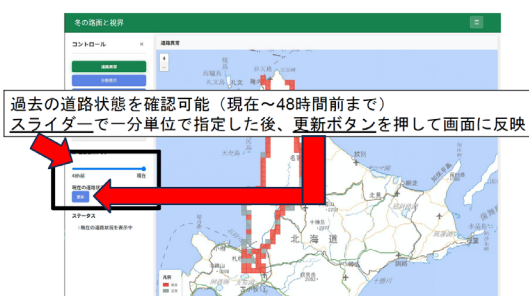
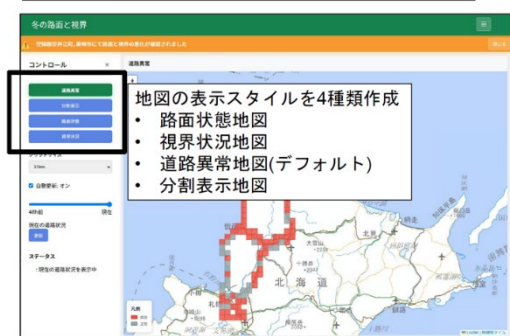
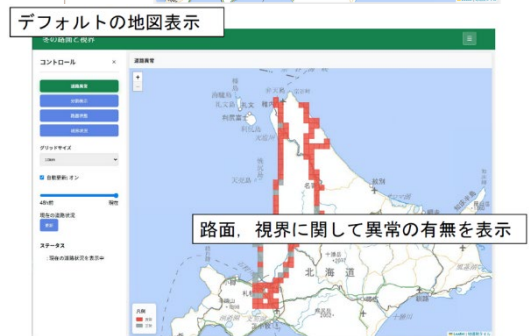
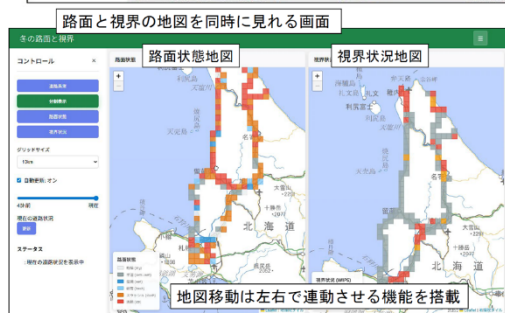
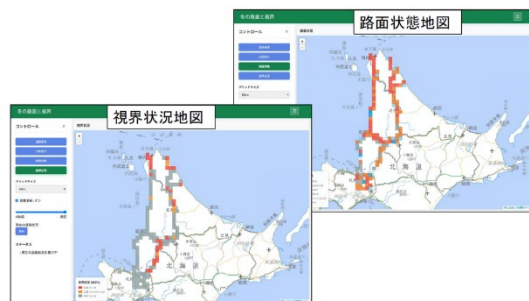


図-32 各種機能の例

(左上：アラート表示，右上：48 時間までの道路状況の確認，左中：地図表示（4 分割），右中：地図表示（道路異常：標準），左下：地図表示（分割表示），右下：地図表示（路面状態・視界状況）)

ことから、路面や視界が危険な箇所が観測された場合はアラート表示ができるように変更(図-32)した。

—48時間前までの道路状態の確認—
過去の道路状態も確認できるよう48時間前まで遡



冬の路面や視界情報をリアルタイムで観測
※予測・解析結果のイメージ

■ 異常

視界: 悪 路面: 雪

■ 正常

視界: 良 路面: 乾

車載型AIによる情報提供

冬の道路状況
(渋滞、交通量、混雑状況等)

コミュニティFM、道の駅、
コンビニ等と連携による情報提供

冬期道路の実況・予測情報 デジタルツインで安全を守る！

視界
路面
幅員
気象
(観測・予測)
交通流

デジタルツインとは、物理空間を仮想空間に再現し、可視化・シミュレーション・予測を行う技術です。AIカメラや車載システムを用いて道路をモニタリングし、吹雪や積雪、道路異常、路面や視界状況等を観測します。「今、どこで、何が起きているか」をリアルタイムで把握し、過酷な環境下での交通安全を確保するために、事故や立ち往生を未然に防ぐための次世代インフラ技術として期待されています。

放送中！「エフエムもえる道路視界情報」月曜～金曜 10:05/12:10/16:05 (1日3回 5分間)

FM 76.9 MHz

★ラジオ放送は FM周波数76.9MHz

★無料ラジオアプリでスマホからもお聴きいただけます

ダウンロード無料・課金なし

気象情報、道路交通情報、防災、災害情報もプッシュ通知！

北海道大学先端モビリティ工学研究室

図-33 視界情報提供のリーフレット（案）

れるよう、スライダー形式で実装した。

ー地図の表示スタイルの追加ー

地図の表示スタイルとして、路面状態地図、視界状況地図、道路異常地図（標準）、分割表示地図の4種を作成し、用途に応じて選択できるようにした。

ーページの自動更新機能ー

ページのリロード無しで最新データに表示更新することを可能にし、常に最新情報が表示されるようにした。

ー拡大機能ー

より詳細に道路状況を確認する場合は、拡大機能により、各地点の状況を確認できるようにした。

ー時空間解像度の向上ー

令和7年度までに毎年、モニタリング可能な車両台数を拡充することにより、デジタルツインが構築可能な時空間解像度を向上させてきた。最終年度には、車両台数を次のとおり拡充し、研究開始時に比し

て時空間解像度が向上した。

- ・「特急わっかない号（札幌～稚内）」：最終11台
- ・「えさし号（札幌～枝幸）」：最終6台
- ・「特急はぼろ号（豊富～札幌）」：最終10台

モニタリング可能な車両台数計が研究開始時から約6.75倍の27台となった。また、研究機関中に道央道（札幌IC～士別剣淵IC）や国道40号などをデジタルツインの対象範囲に追加した。これによりデジタルツインの対象範囲を研究開始時より約480km拡充した。以上のように、車両および対象範囲の各術にデジタルツインの時空間解像度の向上を達成した。

(2) プラットフォームによる情報の発信

プラットフォームによる直接的な情報発信に加え、マスメディア、地域関係者、行政関係者の協力のもと

と情報発信を強化し、道路利用者への情報の訴求性を検証した。

a) 情報発信方法の改善・強化、情報訴求性の検証 ーバス事業者へのデジタルツインの提供ー

バス事業者へのデジタルツインの提供を行った。車載器による観測結果（視界と路面）やCCTVによる観測結果（視界）などの提供を行った。

ーコミュニティラジオ放送局（エフエムもえる）への提供ー

令和6年度に実施した「エフエムもえる」での視界情報提供の効果把握のためのアンケート調査の結果、取り組みについて、全体的に肯定的な意見が多かった。また、情報を聞いて、天気回復まで待つなど、冬期の運転への行動にも寄与することがわかった。今後の改善点として、区間の拡大やデータの時空間解像度の拡大などがあげられた。また、ラジオだけではなく、WEBでの情報提供要望も高かった。

最終年度も継続してドライバー自身に安全な交通行動を促すようなソフト面での対策として、コミュニティラジオ放送局（エフエムもえる）を活用した情報発信を昨年度に引き続き実施した。具体的には、車載システムが判別した視界情報を基に、ラジオ放送を通じて吹雪や地吹雪などにより視界が特に悪化している道路区間の情報を提供した。

これまでの国道232号、深川留萌自動車道の2路線に加え、道央自動車道、国道231号の2路線を追加し、空間解像度の向上を図った。また、放送時間は、昨年度と同様の1日2回実施（朝10:05、昼12:10、夕16:05）した。併せて、より取り組みが周知されるよう、エフエムもえると共同で視界情報に関するリーフレット案を図-33のように作成した。

ー情報訴求性の検証ー

道路利用者であるバス事業者（宗谷バス）へのデジタルツインの提供した結果について、ヒアリング結果をもとに情報の訴求性検証を行った。ヒアリング結果は前項で整理している。

「わからない号」「えさし号」に搭載した車載モニタリングシステムは、運行管理者に対し直感的で即時性の高い情報を提供する点で、極めて高い訴求性を有していることが確認された。特に、前方映像を中心とした“見える情報”は、文字情報や数値情報では補いきれない現地の道路・気象状況を直接的に伝える役割を果たしている。

即時性・直感性による高い理解度：前方映像は常時表示が可能であり、確認に時間制限がないことから、悪天候時ほど確認頻度が高まっている。これにより、運行中または運行前の状況を「考える前に把握できる」情報として提供しており、運行計画の調整や経路変更判断を迅速に行うことが可能となっている。特に、オロロンライン（国道232号）など予測が難しく、既存の気象・道路情報が乏しい区間において、映像情報は代替のきかない判断材料となっている。

運行判断に対する安心感の醸成：リアルタイムの映像確認は、運行可否の判断に対する心理的な不安を

大きく軽減している。安全走行可能と判断して運行を開始した後も、継続的に状況を確認できることで、「見えていること」自体が安心感につながるという評価が得られている。この安心感は、無事故運行への意識向上にも寄与しており、情報の訴求性が安全性の確保に直結していることが示唆される。

情報収集負担の軽減と意思決定支援：車載モニタリングシステムは、現在進行形の天候・道路状況・位置情報を一元的に把握できるため、複数の情報源を個別に確認する手間を削減している。結果として、バスの運行管理者の情報収集時間が短縮され、意思決定に集中できる環境が形成されている。また、朝便で得られた国道232号の道路状況を踏まえて、後続便で経路を国道40号経由に切り替えた事例などから、映像情報が具体的な行動（運行・迂回・注意喚起）に直結している点も、訴求性の高さを裏付けている。

他情報との補完関係による説得力の向上：バスの運行管理者は、天気図、気象予報サイト、留萌管内を拠点とする沿岸バスからの現地情報、JR・ANAの運行状況など、多様な情報を組み合わせて判断しているが、その中で車載モニタリングの映像は最終確認・裏付けとして機能している。特に、予報では把握しにくい吹雪による視程悪化や局所的な強風について、映像情報が判断の確信度を高めている。

将来予測情報への期待と訴求性の拡張可能性：現状の映像は時間的に不連続であるものの、利用者は前後の状況を想像しながら活用しており、大きなデメリットとは捉えられていない。一方で、CCTVや気象情報と組み合わせた2～6時間後、さらには12時間後の予測情報への期待は大きく、将来的に予測情報が付加されることで、情報の訴求性は「現状把握」から「先読み判断」へと拡張される可能性が高い。

b) 情報発信方法の改善・強化に対する客観的評価 手法の提案と検証

冬期道路のデジタルツインの情報提供機能のインターフェース（以降 I/F）が有効な情報提供寄与しているかを客観的に評価する手法を検討し、本研究の情報提供I/Fを対象に検証した。従来、情報提供I/Fの評価は、ユーザテストによるアンケート調査によって判断されてきた。しかしこれらには多くの手間を必要とするという課題がある。

本研究では、冬期道路の情報提供 I/F が有効なものであるかを、ユーザテストを必要とせず、客観的に判断できる評価手法の構築を目的とした。ここで有効な情報提供 I/F に必要な要件とは情報をはやく、わかりやすく提供できることであると考えられる。本研究の提案手法は情報提供までのはやさ、わかりやすさを定量的に、ユーザテストを用いずに評価できる手法である。

ー評価手法の構築ー

上記の目的を満たす評価手法を構築するにあたり「はやい情報提供」と「わかりやすい情報提供」が何かを事前に定義する。本研究において「はやい情

表-8 KLMにおける操作単位と時間

簡易表記	操作内容	時間[s]
K	キ-, ボタン押下 (習熟度による)	0.08- 1.20
P	画面上のポインタ移動	1.10
H	デバイス間の手の移動	0.40
M	心的準備(次の操作の考慮, 画面上を解釈する等)	1.35

報提供」は提供する情報を I/F ユーザが認識するまでの時間が短いこととし、「わかりやすい情報提供」とは提供する情報がユーザの注意を引く形で提示されることとする。

提案手法において上述の「はやさ」「わかりやすさ」を評価するため、情報提供までのはやさを評価できる KLM に対して、顕著性マップを用いたわかりやすさの評価指標を導入する。

KLM(Keystroke Level Model)の概要: KLM とはユーザがシステムを利用する際、事前に設定したタスクを達成するまでの時間を予測する手法である。タスクを達成するまでに必要なシステムの操作を表-8 の操作単位まで分解する。表-8 を参照して各操作にかかる時間を求め、合計することでタスク達成の時間を予測する。

ユーザが情報を提供するまでのはやさを評価することが出来ると考えられる。しかし「画面を解釈する」等の操作単位である「心的準備」は操作にかかる時間として情報提示画面によらない固定値となっている。これは情報提供のわかりやすさを考慮することができていないと考えられる。

この手法の特徴としてユーザテストを必要とせず、定量的にシステムを評価できる手法であることが挙げられる。またタスク達成までの時間を予測するためユーザが情報を提供するまでのはやさを評価することが出来ると考えられる。しかし「画面を解釈する」等の操作単位である「心的準備」は操作にかかる時間として情報提示画面によらない固定値となっている。これは情報提供のわかりやすさを考慮することができていないと考えられる。

顕著性マップの概要: 顕著性マップとは画像のピクセルごとに、注意を引く度合い(誘目性)を数値化したものである。画像の各ピクセルの色、明度、方向の特徴量を抽出し各特徴量について特徴マップを生成した後、統合することで各ピクセルに顕著性値が割り当てられた顕著性マップが生成される。このようにして生成された顕著性マップは、顕著性値の高い箇所と誘目性が高い箇所に相関があることが知られている。したがってわかりやすい情報提供の評価をするにあたって顕著性値を用いることで、提示する情報が注意を引く形で提示できているかを評価することが出来ると考えられる。

客観的評価手法: 提案手法においては KLM の操作単位である心的準備時間の推測に顕著性マップを用いて行う。これにより情報提供までのはやさ、わかりやすさを評価できると考えた。以下でその手順を述べる。なお操作単位の表記は表-8 の簡易表記を用

いる。

まず「ある特定の情報を認識する」というタスクを設定する。評価対象の I/F においてタスクを達成するために必要な操作を把握し既存の KLM と同様に操作単位に分解する。ここで操作単位 M 以外の操作単位に要する時間は表-1 の時間列の値を参照する。

次に操作単位 M に要する時間の推定を行う。I/F の操作画面において、次の操作や情報の認識に必要なオブジェクトを構成するピクセルを特定する。ここで操作画面でのオブジェクトの誘目性 F を式(1)で求める。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J m_{ij} s_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J s_{ij}} \quad (1)$$

ここで I, J は操作画面の横方向、縦方向のピクセル数である。また $m_{ij} \in \{0,1\}$ は i 行 j 列ピクセルがオブジェクトに含まれているか否かを示す値であり、 s_{ij} は操作画面に対して生成された顕著性マップにおける i 行 j 列ピクセルにおける顕著性値を示す。画面内におけるオブジェクトの誘目性が高いとき、それを認識するまでの時間は短くなると言える。よって操作単位 M の時間は小さくなるので、F の逆数に定数係数を乗じて操作単位 M の時間とする。ここで a は F の逆数の平均的な値が操作単位 M の表-1 における時間になるように補正する係数である。本研究においては $a = 143 \times 10^{-3}$ と設定した。

上記よりタスク達成までの操作に要する時間の予測が得られたのでこれらをすべて合計し、評価対象である I/F における評価値として扱う。KLM の特性として、この評価値はタスク達成までの予測時間を示しているので低い数値であるほど、その I/F が高い評価であることを示している。

客観的評価手法の適用: 提案手法を実際に冬期道路の情報提供 I/F に適用する。それに際して冬期道路の情報として路面状態と視界状況を提供する 2 つの I/F を作成し、片方の I/F に情報提供までのはやさとわかりやすさを向上させる要因となる機能を搭載した。これにより有効な情報提供 I/F-A (図-34) とあまり有効でない情報提供 I/F-B (図-35) が作成できた。提案手法をこれらの 2 つの I/F に対して適用した評価結果が I/F-A を高く、I/F-B を低く評価できているかを確認する。

なお、提案手法の適用にあたって、タスクは「ある地域の道路に異常が発生しているか否かを認識する」と設定した。これはドライバーが自身の進行方向の危険を避ける行動をする傾向 3) を考慮したものである。ここで「異常」は路面状態もしくは視界状況が危険と判断される状態を指すこととする。また「ある地域」として札幌市、旭川市、稚内市の場合を考慮し、それぞれ「札幌タスク」「旭川タスク」「稚内タスク」と設定した。

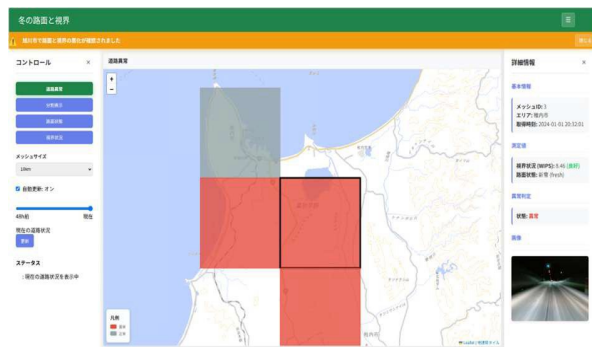


図-34 I/F-Aの画面

一適用対象のI/Fについて一

本研究において作成したI/Fの基本的な機能は路面状態と視界状況を提供するものである。冬期道路の情報提供I/Fで有効な機能として、道路環境の異常の有無を表示する機能（図-34 地図部分）、危険度の高い地域は目立つ色の警告表示を画面上部に提示する機能（図-34 上部のオレンジ色のバー）をI/F-Aに搭載した。またI/F-Bでは観測されたデータを単点として細かく表示しているのに対して、I/F-Aではグリッドを用いて表示して地図上に大きく表示できるようにした。

一提案手法の適用結果とその考察一

I/F-A, I/F-B に対して提案手法の適用を行って評価結果（表-9）を得た。提案手法において評価値は低い数値ほど高い評価であることを示すため、すべてのタスクにおいて I/F-A が I/F-B よりも高い評価を得た。

この結果は異常があるか否かのシンプルな表示により見る必要がある箇所を減らしたことに加えて、グリッドを用いることによる地図にプロットされた情報をわかりやすくしたことを評価できた結果であると考えられる。前者は情報提供まではやささが評価できていたこと、後者はわかりやすく情報提示できたことを評価できていたことを示唆する。したがって提案手法が情報提示まではやささとわかりやすさを向上させた I/F を高く評価できる手法であることが確認できた。また評価結果を数値として取得でき、ユーザテストは実施していないため、定量的でありユーザテストが不要な評価手法であることも確認できた。

まとめと今後の展望：提情報提供 I/F の評価に際してはやさ、わかりやすさを評価できる定量的で、ユーザテストを必要としない評価手法の構築を行った。また実際にデジタルツインで今年度除雪提供を行った I/F において提案手法を実施し、昨年度の I/F よりも今年度の I/F の評価が高いという結果が確認できた。

今後の展望として、評価手法としての信頼性の検

表-9 タスクごとに提案手法を検証した結果

	I/F-Aの評価値	I/F-Bの評価値
札幌タスク	1.13	3.49
旭川タスク	0.14	4.43
稚内タスク	1.14	3.78

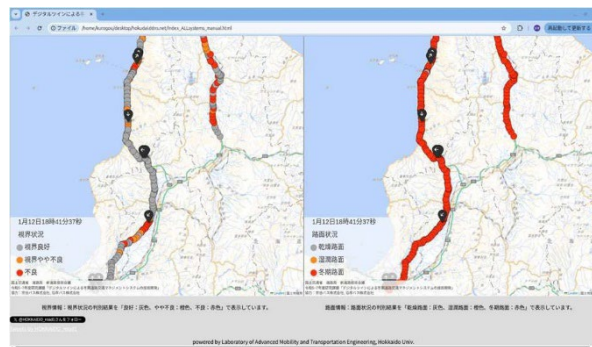


図-35 I/F-Bの画面

討を本稿より詳細に行うことや、提供する情報の重要度を加味した評価手法への改良が挙げられる。また提案手法を既存の冬期道路の情報提供I/Fに対して適用し、その結果を分析することで、評価結果の基準を策定することも重要であると考えられる。

(3) 他地域への展開に向けた知見やロードマップの検討

実証実験結果で得られた知見に基づき、冬期道路情報の提供を他地域に展開するための知見やロードマップを整理して、当該マネジメント手法の導入・構築にあたっての手法やポイント・留意事項を示したマニュアルをとりまとめるとともに、道路APIの提供方法を取りまとめた。ここには、冬期道路情報の提供を他地域に展開するための知見・ロードマップの整理を報告する。

冬期道路情報の提供を他地域に展開するための知見を以下に列記するとともに、準備から運用までのロードマップ（案）を示す。また、これらの関係を図-36に併せて示す。

一対象道路の現況把握と課題整理一

- ・ 冬期道路のデジタルツイン構築にあたっては、対象とする道路ネットワーク、路線、区間の道路状況、気象特性、交通条件を把握の上、道路交通課題を抽出することが必要。

一デジタルツイン構成要素の抽出一

- ・ 対象とする道路の課題解決に資するデジタルツインの構成要素を定めることが必要。

一デジタルツインの設計方針・全体構成の設定一

- ・ 対象とする道路ネットワーク、路線、区間の各種特性を踏まえ、収集・処理・出力する情報項目を抽出し、デジタルツインの全体構成を設定することが必要。

一デジタルツインの構築方針・全体構成の設定一

- ・ 対象とする道路ネットワーク、路線、区間の各種特性を踏まえ、収集・処理・出力する情報項目を抽出し、デジタルツインの全体構成を設定することが必要

一基礎データの構築一

- ・ 対象とする道路ネットワーク、路線、区間の静的な情報を格納した基礎データを構築することが必要。

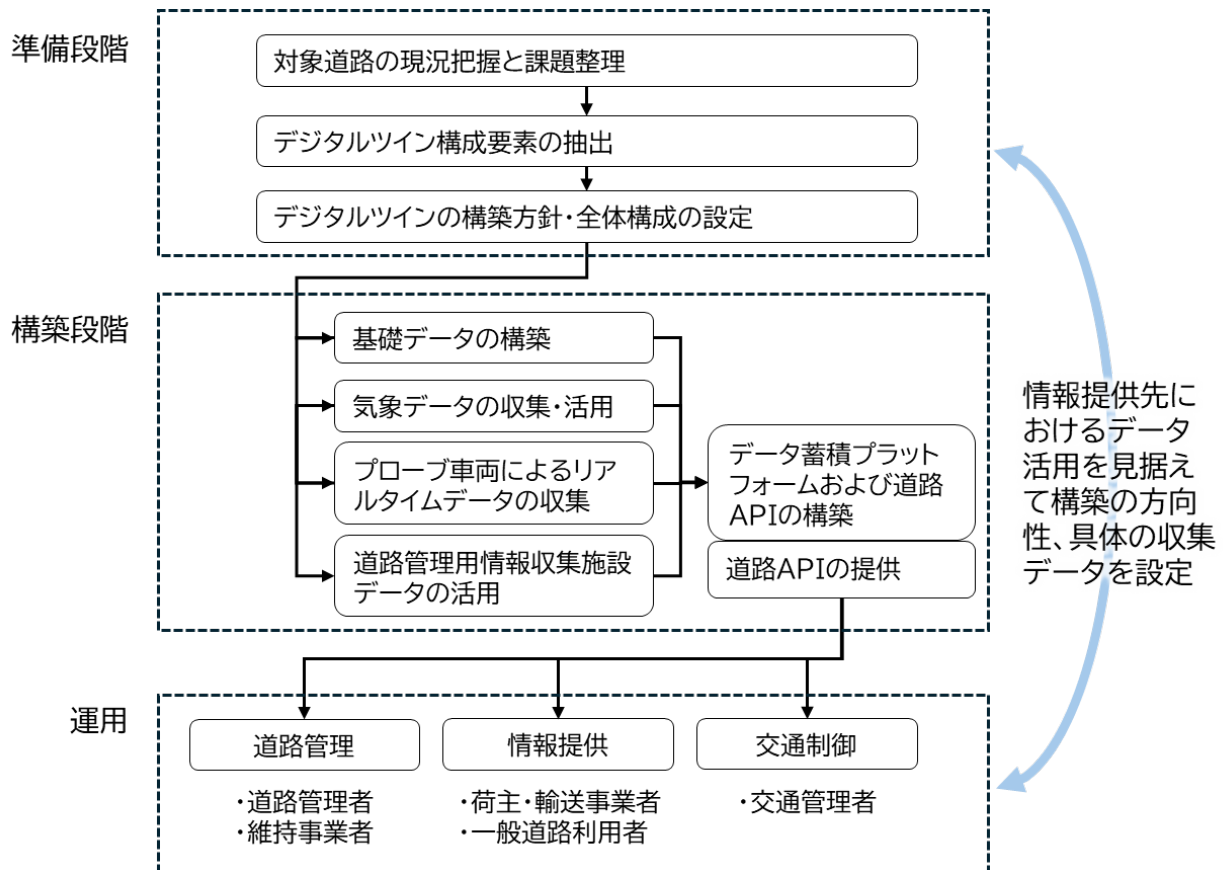


図-36 ロードマップ（案）

－気象データの収集・活用－

- 対象とする道路ネットワーク、路線、区間の気象特性および道路交通に及ぼす影響を踏まえ、デジタルツインに反映すべき気象データを定めることが必要。

－プローブ車両によるリアルタイムデータの収集－

- 対象とする道路ネットワーク、路線、区間を走行する車両から道路交通状況を取得することを検討することが必要。

－道路管理用情報収集施設データの活用－

- CCTVカメラや道路気象テレメータなどの情報収集施設で得られる情報の活用を検討するものとする。CCTVカメラ画像は画像データだけではなく、画像解析等により得られる各種情報を活用することも検討することが必要。

－データ蓄積プラットフォームおよび道路APIの構築－

- 現在の道路交通状況の入手・蓄積・解析・提供を効率的かつ円滑に行うことが可能なデータ蓄積プラットフォームおよび道路APIを構築する。

－道路APIの提供－

- 外部プログラムから簡単かつ円滑に基幹システムの各機能の呼び出しができるよう、道路APIを公開・提供できるものとする。

－情報提供機能－

- 収集・蓄積・解析した各種情報を、道路管理者、

道路利用者等が円滑に入手し、利活用できる機能を搭載する。

－交通制御機能－

- 収集・蓄積した各種情報をもとに信号現示サイクル等の交通制御へ反映するための解析機能を、必要に応じて搭載する。

－冬期道路のデジタルツインの活用－

- 情報利用者を設定の上、ニーズを把握し、各利用者が必要とする情報が適切に提供できるよう、情報を適切に加工し提供・公開することが必要。
- プローブ車両に搭載するエッジコンピュータの演算・処理能力の向上を図り、道路上の様々な事象を検知できるよう継続的に検討を進めることが必要。
- また、データ蓄積プラットフォームや道路API機能は、将来の機能拡充に対応できるものとしなければならない。

3.5 テーマ5：道路APIを備えたデジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの社会実装方法の検討

本テーマでは、デジタルツインにより集約、蓄積されるデータのユースケースを検討し、とりまとめる。本委託研究で実証する道路利用者や物流・運輸事業者への情報提供による移動の負担軽減以外に、

表-10 気象データ一覧

気象要素	名称	予測	メッシュ	更新頻度
降水量	高解像度降水ナウキャスト	30分先まで	250m	5分
降雪量	JWA独自メッシュ	6時間先まで	1km	1時間
気温	JWA独自メッシュ	6時間先まで	1km	1時間
風向風速	JWA独自メッシュ	予測発表から	1km相当	12時間
視程	JWA独自予測	69時間先まで	1km	1時間
	JWA独自メッシュ	6時間先まで	1km	1時間

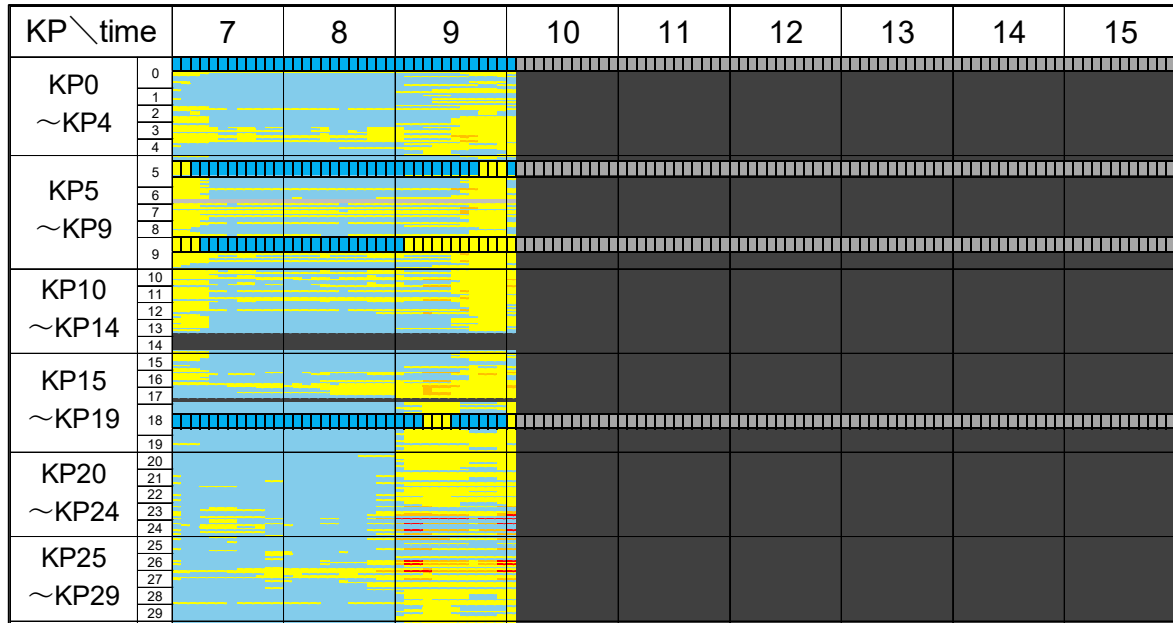


図-37 CCTVカメラによる視界状況の推定結果イメージ

道路管理用カメラや道路巡視の補完による冬期道路維持管理の効率化・高度化や道路政策評価、沿線自治体の住民への防災支援情報としての活用などについて、想定する利用者の具体的な体系化と社会実装及び全国展開に向けた方法を検討し、とりまとめる。

また、冬期事象以外の濃霧や集中豪雨などへの応用可能性と、その情報提供の方策の検討、社会実装のための連携先プレイヤーとサービスの体系化などを検討し、とりまとめる。

(1) デジタルツインにより集約・蓄積可能なデータのユースケース検討

デジタルツインにより集約、蓄積されるデータのユースケースを検討し、とりまとめる。

a) 冬期道路交通に関わるデータの整理

本研究におけるデジタルツインにより、集約・集積されるデータの整理を行った。本研究においてデジタルツインにより集約・集積されるデータとして、路面や視界などの道路環境に関するデータや気象データを、時空間方向に解像度高くサイバー空間に集積可能とすることが求められる。本研究で集積可能としたデータの仕様・要求水準は以下のとおりである。

- ・ 車載モニタリングシステム：計27台の都市間高速バス・沿岸バスから、約10秒間隔で、緯

度経度や日時などのGNSSに基づくデータや路面や視界の判別結果を随時収集し、集積可能なもの。

- ・ CCTVカメラ画像解析：約5km間隔で設置されるCCTVカメラを用いた定点観測に基づいて、視界に関するデータを5分間隔で解析し、集積可能なもの。

気象データ：5分間隔で更新される降水量の実況と予測（250mメッシュ）、3時間ごとの風向風速の実況と予測（1kmメッシュ）、および毎時更新される視程の解析と予測のデータ（1kmメッシュ）を集積可能なもの。

—エッジAIデバイス—

都市間バス・路線バス等エッジAIデバイスから取得可能なデータとして、「視界」、「路面」、「速度」、「幅員」等のデータが取得可能である。テーマ1の報告に詳述したとおりである。

—気象データ—

表-10のとおり気象データを一覧にまとめた。

—CCTVカメラ—

図-37にCCTVカメラによって得られる画像・映像を活用した視界状況の推定イメージを示す。

b) 各種データのユースケース

各種データのユースケースを冬期事象に注目した5つのカテゴリに分けて整理した。

－移動負担軽減－

先読み情報（視界・路面）：視界・路面状態をリアルタイムに把握し、通行前に危険箇所を把握できることで、一般利用者の安全な移動を支援する取り組みである。道路管理者・事業者も同じデータを活用することで、通行規制判断や運行計画の高度化に寄与し、地域全体の移動負担を軽減する効果が期待される。

先読み情報（CCTVカメラ）：CCTV映像を活用し、現地の視界や状況を直接確認できることで、利用者に対してわかりやすい事前注意喚起が可能となる。映像情報は信頼性が高く、冬期や悪天候時の運転判断を大きく支援する。道路管理者にとっても効率的な状況把握により迅速な判断ができる点が利点である。

先読み情報（総合）：視界・路面・速度・画像など複数データを統合し、より高度な先読み情報を提供する仕組みである。単一データでは判断しづらい道路状況も、総合化により変化点や危険箇所を高精度に把握できる。事業者の運行最適化にも貢献し、総合的な道路情報サービスとして価値が高い。

自動運転への応用：視界、路面、速度、幅員、画像などあらゆるデータを総合して自動運転技術へ活用するユースケース。多面的な道路環境情報により走行判断の精緻化が可能となり、安全性と自律性の向上につながる。冬期道路での高度な自動運転実現において特に重要な基盤となる。

－冬期道路維持管理の効率化・高度化－

パトロールの効率化・省力化：視界・路面・速度データを活用し、従来の巡回パトロールの一部をデジタル化することで、巡回回数の削減や見逃し防止を実現する。危険兆候の早期発見にも寄与し、限られた人員で高い品質の維持管理を継続可能とする点が大きなメリットである。

維持管理の効率化（不要な出動削減）：気象や路面情報をもとに、出動判断を精緻化し、無駄な維持作業の発生を抑制する。作業員の負担軽減だけでなく、燃料・人件費の削減といったコスト面の改善も期待される。道路状況に応じた柔軟な管理が可能となり、冬期の効率的な運用に寄与する。

除排雪の優先度把握：視界や路面状態を基に、どの道路を優先して除雪すべきかを判断する仕組み。交通量や危険度を考慮し、限られたリソースを最も必要な箇所へ投入できるため、冬期の道路確保における効率性と安全性が大きく向上する。

融雪剤散布の優先度把握：路面温度や凍結状態を把握し、必要な場所へ適切に融雪剤を散布することで、散布量の最適化と路面改善効果の向上が図られる。過剰散布の抑制や環境負荷の低減にもつながり、経済的かつ持続可能な維持管理に寄与する。

通行止め実施の判断材料：視界・路面・速度データから危険度を評価し、通行止めが必要かどうかを迅速・客観的に判断するための指標を提供する。極端な視界不良や急激な路面悪化などを確実に捉え、事故防止を最優先にした道路管理が可能となる。

通行止め解除の判断材料：回復状況を速度・路面デ

ータから把握し、安全に通行を再開できるかを判断するために役立つ情報。判断の属人化を防ぎ、利用者への開放を最適なタイミングで行うことで、地域交通への影響を最小限に抑える。

維持管理業務の見える化・記録自動化：維持作業の進捗や状況をデータで自動記録し、管理帳票の作成や履歴追跡を効率化する。業務負荷の大幅削減に加え、記録の正確性向上にもつながる。将来の業務改善やコスト分析にも利用可能な基盤となる。

－道路政策評価－

維持管理コストの軽減：路面・速度・幅員データなどを用いて維持管理の最適化を図ることで、除雪や補修の必要性を精密に判断できるようになり、結果としてコスト削減を実現する。効率的な配分により安全を確保しつつ全体予算の最適化に貢献する。

交通マネジメントの効果検証：速度データや画像情報から交通量の変動や渋滞の改善状況を分析し、交通施策の効果を検証する。信号制御や規制改善の正当性を示す根拠として活用でき、実効性の高い交通政策の実施に役立つ。

視線誘導施設の整備効果：視界や速度データを活用し、視線誘導標の設置が運転行動に与える効果を定量的に評価する。カーブや吹雪区間での安全性向上をデータで裏付けることで、施設整備の妥当性や改善点を把握できる。従来は感覚的だった効果検証を客観化し、効率的な対策立案に貢献する。

除雪実施（吹きだまり除去）の効果把握：除雪や吹きだまり除去後の道路状態を、視界・速度などのデータで分析し、作業の有効性を明確に示すことができる。作業効果を定量的に評価することで、維持管理戦略の改善や予算配分の最適化に役立つ。現場の努力を可視化する重要な指標となる。

除雪実施（路面改善）の効果把握：除雪後の路面改善度を路面データで確認し、作業がどの程度効果を発揮したかを分析する。路面状態の変化を定量的に把握することで、作業計画の精度向上や運用改善が可能となる。効率的な維持管理を実現し、冬期道路の安全性向上に寄与する。

融雪剤散布（路面改善）の効果把握：融雪剤散布後の路面状態の改善度をデータで検証することで、散布の適正性を評価できる。過不足の判断に役立つほか、散布量の最適化やコスト削減にも貢献する。データに基づく維持管理により、冬期道路の安全性確保と環境負荷低減を同時に実現する。

排雪実施（幅員確保）の効果把握：排雪作業が幅員確保にどれほど寄与したかを速度・幅員データで評価する。幅員不足は事故リスクに直結するため、作業の効果を客観的に示すことは重要である。効果測定により排雪計画の最適化や人員配置の効率化が可能となる。

外出抑制・行動変容の分析：道路状況悪化時の利用者行動変化（外出抑制）を速度・画像・ETC2.0データから分析する。異常気象時の交通需要の実態を把握することで、適切な規制や情報発信の検討につながる。災害時の行動計画策定にも有用な分析である。

道路整備計画検討時の基礎データ：視界や速度データなどを基礎的な道路評価情報として活用し、整備計画の合理性を高める。客観データは、事業採択や優先順位付けにおける重要な判断材料となる。現状の課題を明確にし、費用対効果の高い道路整備を支える基盤となる。

－防災支援情報－

吹きだまりの早期発見：画像データやETC2.0などを用いて吹きだまり発生を早期に検知し、事故や通行止めのリスクを軽減する。視界が悪い状況でも自動検知が可能となるため、迅速な作業判断につながる。冬期特有の危険を未然に防ぐための有効な取り組みである。

立ち往生の発生把握：速度データの異常や画像から、車両の立ち往生を早期把握し、救援や規制に迅速に対応できる。大規模な交通障害に発展する前に把握できるため、冬期道路管理では特に重要である。利用者の安全確保と交通円滑化の両面に貢献する。

－その他－

道路APIを備えた基幹システム：視界・路面・速度など多様な道路データをAPIとして外部に提供することで、カーナビ、物流管理、MaaSなど多様なサービス連携が可能となる。道路管理者だけでなく一般・事業者も活用でき、道路情報の利活用を広く推進する基盤となる。

マスメディア連携：画像や速度データを活用し、テレビ・ラジオ・ウェブなどのメディアへ迅速に道路状況を提供する。災害時や冬期の交通障害における注意喚起に役立ち、一般利用者への情報浸透を強化する。公共情報の信頼性向上に寄与する取り組みである。

(2) 冬期道路交通マネジメントシステムの社会実装方法の検討

本委託研究で実証する道路利用者や物流・運輸事業者への情報提供による移動の負担軽減以外に、道路管理用カメラや道路巡視の補完による冬期道路維持管理の効率化・高度化や道路政策評価、沿線自治体の住民への防災支援情報としての活用などについて、想定する利用者の具体的な体系化と社会実装及び全国展開に向けた方法を検討し、とりまとめる。

a) 情報利用者ごとの活用シーンの体系化

道路利用者ごとの利用シーンについて体系化を行った。

－移動負担軽減－

一般利用者：

- ・ 運転前に危険箇所や路面悪化を把握し、安全なルート選択に活用
- ・ 高齢者や子供の送迎時など危険回避に寄与

道路管理者：

- ・ 事前の通行規制判断、除雪隊配置の最適化
- ・ 迅速な異常把握による事故防止

事業者（物流・交通）：

- ・ 配送ルートの上最適化、遅延の予防

- ・ 運行管理のDX化により燃費・人件費削減

その他（メディア・地域住民団体など）：

- ・ 注意喚起情報として広報に活用
- ・ 観光情報として冬期安全案内に活用

－冬期道路維持管理の効率化・高度化（道路管理者）－

パトロール効率化／不要出動削減／迅速化：

- ・ 出動判断の精緻化により人員負担軽減
- ・ 見逃し防止で維持管理の品質向上
- ・ 異常箇所の自動把握で監視負荷を削減

除雪優先度把握／融雪剤散布判断：

- ・ 資源配分の最適化（除雪車・薬剤）
- ・ データに基づく「優先順位付け」で作業効率化

通行止め判断・解除材料：

- ・ 視界・速度・路面データに基づく客観的な判断ができる
- ・ 解除タイミングの透明性向上

－道路政策評価（道路管理者）－

各種効果検証（視線誘導施設／防雪林／除排雪効果／交通マネジメント）：

- ・ 整備効果をデータで説明し、予算根拠を強化
- ・ 次期整備や見直しの判断材料となる

外出抑制・行動変容分析：

- ・ 交通需要管理（TDM）の基礎データに
- ・ 大雪・暴風時の規制や啓発の適正化

道路整備計画の基礎データ：

- ・ 地域特性に応じた整備計画や優先度付けの根拠
- ・ 将来の道路マネジメント指針の重要要素

－防災支援情報（道路管理者）－

- ・ 除雪・救援の迅速化
- ・ 避難・規制判断の明確化

－その他－

一般利用者：

- ・ カーナビ・交通アプリでの詳細ルート表示
- ・ 冬期の危険箇所アラート受信

道路管理者：

- ・ 系統的な道路情報提供の中核機能
- ・ 他機関連携（消防・自治体）にも応用

事業者：

- ・ 物流管理システムやMaaSアプリとの統合
- ・ 配送最適化アルゴリズムに活用

その他：

- ・ 交通情報のライブ配信への利用

b) 冬期道路交通マネジメントシステムの社会実装方法の検討

－移動負担軽減－

移動負担軽減の社会実装において最も重要な要素は、道路利用者が「いつ・どこで・どのような危険があるか」を事前に把握でき、その情報を基に移動行動を最適化できる環境を整えることである。積雪寒冷地を中心に、視界不良・路面悪化・渋滞・公共交通の乱れなどが複合的に発生する地域では、道路

交通情報を早く・正確に・わかりやすく提供することが移動負担の軽減に直結する。近年では、エッジコンピュータによるリアルタイム収集・AI解析・デジタルツイン構築によって、刻々と変化する道路環境を高解像度で再現する技術が整備されつつある。実際に、冬期道路環境をエッジコンピュータで収集し、視界や路面の先読み情報を生成する技術開発が進められており、その目的として「冬期の人やモノの移動負担の軽減」が明確に掲げられている。この方向性は、日本の寒冷地における移動課題の大部分が、情報不足から生じる不安・混雑・行動判断の遅れであることを示す。

社会実装の第1段階は、データ収集の高度化である。道路走行環境を把握するためには、車載カメラ、CCTV、気象データ、ETC2.0など多様な情報源を統合する必要がある。冬期の路面や視界などは刻々と変動するため、リアルタイムかつ低通信量で送信可能なエッジ処理の導入が求められる。この点は、冬期道路マネジメントシステム研究でも明確に示されているように、モニタリング車両の増強やデータの高度分析が進められており、路面や視界の先読み精度を高める基盤が整えられている。特に視界不良や積雪による危険性は局所的に発生しやすく、利用者がその変化を察知できるような仕組みが欠かせない。

第2段階は、収集データのデジタルツイン化である。データをただ集めるだけでなく、現実の道路空間を仮想空間に再構築し、その上で予測や解析を可能とする。デジタルツインによる先読み情報の活用は、道路利用者にとって「次の数分・数十分で何が起きるか」を把握できる利点があり、特に冬期の長距離移動では大きな安心につながる。研究概要資料でも、冬期道路デジタルツインの構築によって「冬期の人やモノの移動負担軽減」を実現するという方針が示されている。この取り組みにより、移動の安全性だけでなく、心理的負担の軽減、行動変容の促進、無駄な移動の抑制が期待できる。

第3段階は、情報提供の仕組みの整備である。デジタルツインで生成された先読み情報を、どのチャネルで誰に届けるかが社会実装の核心と言える。道路APIの整備はその中心的役割を担っている。実際、冬期道路情報を社会展開するための研究では、道路APIの仕様検討や、地域関係者・マスメディアと協力した情報発信の強化が盛り込まれている。利用者はスマートフォンアプリ、カーナビ、SNS、コミュニティFM、道の駅など多様な媒体を使う。研究の中では、コミュニティFMやコンビニと連携した情報提供の仕組みも検討されており、移動中のドライバーが情報を受け取りやすい環境を整える点が重視されている。

第4段階は、利用者の行動変容を誘発する仕組みの構築である。移動負担軽減の最大の成果は、利用者が「危険を避ける行動」を自発的に選択することである。研究でも、先読み情報の提供によって、経路変更・出発時刻調整・移動取りやめなどの行動変容が効果検証の対象とされており、情報提供に基づ

く行動変容は事故減少や混雑緩和に大きく貢献することが示唆されている。社会実装上の鍵は、利用者が情報を信頼できるかどうかであり、情報の正確性・リアルタイム性・わかりやすさが重要となる。

最後に、第5段階として、事業者・自治体・道路管理者の連携強化が必要である。特に物流・公共交通事業者は移動負担軽減の恩恵を大きく受けるため、APIを通じたデータ連携や運行管理システムとの統合が求められる。また、自治体側も防災支援・道路管理・住民案内の観点で、冬期交通情報を活用することで業務効率化が期待できる。委託研究では、冬期移動負担軽減のみならず、維持管理効率化や道路政策評価など、複数用途を統合した社会実装の体系化が求められている点も重要である。

ー冬期道路維持管理の効率化・高度化ー

冬期道路維持管理の社会実装には、従来の経験則中心の維持判断を、データとアルゴリズムによる「客観的かつ効率的な判断」へと転換する仕組みが必要である。特に除雪・融雪剤散布などの維持作業は、道路管理者にとって最も業務負担が高い分野であり、社会実装が成功すればコスト削減・作業効率化・安全性向上のすべてに寄与する。

まず、エッジAIデバイスや車載カメラから取得した視界・路面・速度・幅員情報をもとに、除雪優先度を自動算出する「冬期道路マネジメント基盤」を構築する。この考え方はデジタルツインの実証内容にも示されており、維持管理の効率化や高度化は主要テーマとして位置付けられている。本基盤では、危険度・交通量・気象予測を統合し、総合危険度マップを生成することで、どの区間をいつ除雪すべきかが可視化される。

社会実装のためには、行政内部のオペレーション変革が不可欠である。従来の紙ベース日報や巡回依存型の業務から、デジタルデータを中心に据えた維持管理フローへ転換する必要がある。そのためには、維持管理システムと車載端末・AIデバイス・道路管理者向けダッシュボードを統合し、現場職員が直感的に操作できるUIの設計が重要となる。また、民間維持業者とデータを共有する協調体制の整備も重要で、維持契約にデータ運用条項を明記し、作業内容を可視化することで品質が均一化される。

次に重要となるのが、出勤判断の高度化である。不要な出勤の削減はコスト削減に直結するが、過少な出勤は事故増加につながるため慎重な運用が必要である。そこで、過去の出勤実績・路面凍結履歴・交通事故データを用いた機械学習モデルを導入し、「必要である可能性の高い出勤」「判断が微妙な出勤」を分類する。モデルの挙動をブラックボックス化せず、説明可能性(XAI)を取り入れることで、職員が納得しながら判断できる仕組みを作る。

さらに、迅速な維持作業の社会実装には、道路利用者側の理解促進も鍵となる。事前に「この区間は優先除雪路線」「この条件で規制となる」といったルールを住民へ公開し、社会全体で冬期維持管理を支える文化を醸成することも必要だ。地域企業・自治

体・観光業者が共同で冬期危険情報を共有する体制をつくれれば、雪害による地域機能停止を最小化できる。

また、維持管理結果を客観的に評価する仕組みも不可欠である。除雪後の速度回復状況、視界改善度、事故発生の減少などを定期的に測定し、効果を可視化することで予算獲得や改善に役立てられる。

総じて、冬期維持管理の社会実装には「データドリブンな意思決定」「現場作業の標準化」「住民・事業者・行政の協働」という3本柱が重要であり、段階的に適用範囲を広げることで全国展開が可能となる。

一道路政策評価一

道路政策評価を社会実装するには、効果検証の仕組みを“事業後の報告書作成のための作業”から“政策改善のための継続的な評価体系”へと発展させる必要がある。防雪林・視線誘導施設・融雪剤散布・除雪作業など各種政策・事業の効果をデータで評価し、改善サイクルを回す仕組みは、現代の道路DXにおける重要な柱の一つである。

まず、政策評価の基盤として、道路状況データ・交通流データ・気象データ・事故データ等を統合した「道路政策データレイク」を構築する。委託研究仕様書でも、デジタルツインに膨大なデータを集約し、冬期管理や政策評価に活用する構想が示されている。これを全国的に展開することで、単独施策では見えなかった政策効果を広域で比較可能になる。

続く社会実装のステップは、「政策効果モデル」の構築である。特に冬期安全施設や維持管理施策の効果は、交通流や天候と相互作用するため、単純な比較では評価が難しい。そこで機械学習・統計モデルを活用し、「除雪のタイミングが5分遅れると速度が何%低下するか」「防雪林の設置によって視界不良時間がどれだけ減少したか」など、政策の定量効果を分離して推定する手法が必要となる。これにより、政策立案者は費用対効果に基づいた合理的な意思決定が可能となる。

さらに、政策評価結果を可視化し、わかりやすく示す「政策ダッシュボード」の整備が求められる。行政職員だけでなく、住民や議会、メディアも利用できる透明性の高いツールを提供することで、道路政策の正当性や改善ポイントが共有され、社会的理解が深まる。特に道路整備計画の評価には、アクセシビリティ評価やシミュレーションモデルが不可欠であり（関連資料にも複数記述あり）、これらをダッシュボード上で統合的に扱うことが望ましい。

また、評価制度の社会実装には、法制度や行政手続の見直しも不可欠である。現行制度は報告書提出が中心だが、今後は「データ検証結果を踏まえた改善計画策定」を義務化し、さらにPDCAサイクルを行政全体で回す仕組みが必要となる。また、維持管理予算や設備投資の優先度決定にデータ分析結果を組み込む制度の整備も求められる。

道路政策評価が社会に実装されることで、住民の安全性向上、限られた財源の有効活用、計画の透明性向上、維持管理の最適化など、多くの公共的価値

が生み出される。政策は作って終わりではなく、データで改善し続ける時代へ移行することが求められている。

一防災支援情報一

防災支援情報の社会実装は、道路ネットワークの安全性確保において最も重要な分野である。吹きだまり、冠水、落下物、立ち往生などの危険事象は「発生から認知までの遅れ」が事故や混乱を拡大させる。したがって社会実装の目的は、「異常を即座に検知し、最適な形で最適な相手に届け、迅速な対応につなげる」ことである。

まず基盤となるのが、AIカメラ、CCTV、車載カメラ、ETC2.0などの多様なデバイスから危険を自動検知するシステムである。委託研究仕様書でも、冬期道路情報の高度化や異常監視の強化が重要テーマとして強調されている。画像AIによる吹きだまり検知、速度プロファイル異常による立ち往生推定、ETC2.0データによる渋滞検知など、複数の検知手法を重層的に組み合わせることで、検知精度を向上できる。

次に、自治体・警察・消防・道路管理者など、危機対応に関わる複数機関がリアルタイムに情報を共有できる「情報統合プラットフォーム」の整備が必要となる。危険度に応じた自動アラート通知、対応履歴の記録、対処完了を共有する機能が求められる。また、緊急車両向けに優先情報提供を行うプロトコルも整備すべきである。

住民向けの情報提供については、SNS、スマホアプリ、交通情報板、ラジオ等、多様な媒体を組み合わせることが重要である。特に地域メディアとの協力は委託研究でも強調されており、災害時の情報伝達速度を高めるうえで実効性が高い。濃霧や豪雨といった危険事象の予兆を知らせるプレアラート機能を追加すれば、住民の事前行動を促せる。

さらに、事業者—特に物流・バス・タクシー事業者—にとって、防災情報は運行可否判断の基礎データである。事業者向けAPIを提供し、企業の運行管理システムとデータ連携を行うことで、複数車両の安全性を一括管理できる。また、企業側から危険箇所を逆送信できる双方向プラットフォームを実装すれば、現場発の情報が迅速に集約され、行政の把握精度も向上する。

防災情報の社会実装には、地域住民参加型の仕組みも効果が高い。住民が簡単に通行障害を報告できるアプリや、地域コミュニティとの連携により、行政ではカバーしきれない生活道路の情報収集が可能になる。

最後に、防災情報提供の効果を評価するため、事故件数、危険箇所認知率、対応時間短縮率などのKPIを設定し、継続的に改善することが実装の定着には不可欠である。

一その他（道路API・情報連携）一

道路API・データ連携に関する社会実装は、すべてのユースケースを統合し、民間サービス・行政・交通機関が共通の情報基盤を利用できる状態をつくる

ことが目的である。委託研究仕様書でも「道路 API を備えたデジタルツインの社会実装」が大きな論点となっており、国レベルでも優先度の高い取り組みである。

社会実装に向けた最初のステップは、データ項目・提供形式・更新頻度・API 利用ポリシーを標準化することである。視界、路面、速度、幅員、気象、カメラ画像、ETC2.0 といった多様なデータを統合し、統一したフォーマットで提供する必要がある。また、民間企業が商用サービスに容易に組み込めるよう、利用規約や料金体系も明確化する。

次に実装すべきは、「利用者別の API インタフェース」の設計である。一般向けは危険箇所の簡易表示や音声案内、事業者向けは運行管理システムとの高頻度データ連携、道路管理者向けはダッシュボードと高度分析が可能なローデータ提供など、用途に応じた API レイヤーを用意するのが望ましい。

加えて、民間交通サービスとの連携が不可欠である。カーナビ、MaaS アプリ、物流プラットフォーム、観光情報サービスなど幅広い用途に API 接続が可能となれば、道路利用者への価値提供が加速度的に拡大する。また、民間事業者側からフィードバックループを形成することで、道路データの品質も向上する。

メディア連携については、テレビ局、ラジオ局、ウェブニュースとの協定を結び、危険情報を即時共有する体制を整える必要がある。委託研究にも情報発信の強化が明記されており、災害時の迅速な注意喚起には欠かせない。さらに重要なのが、国・自治体・民間が共同で運営する「ガバナンスモデル」の構築である。API プラットフォームをどの主体が管理し、費用負担をどのように分担し、データ公開範囲をどう定めるかといったルールづくりが、社会実装の成否を左右する。OSS モデル・共創モデル・公的機関管理モデルなど複数の方式を比較検討し、地域の実情に応じた体制を選択する必要がある。

最後に、API の利用効果を測定し、スケール展開につなげる評価フレームを作成する。閲覧数、接続事業者数、交通事故減少、維持管理効率化効果などの KPI を定期的に評価し、改善を続けながら全国展開を進めることが望ましい。

(3) 冬期事象以外への応用可能性検討

a) 冬期事象以外の事象への応用可能性と情報提供の方策の検討

ー集中豪雨、冠水、土砂流出ー

近年、短時間強雨や線状降水帯の発生に伴い、道路空間における冠水や土砂流出等の被害が顕在化している。気象データ、道路構造情報、走行データ、画像データを統合することで、これらの事象への応用が可能である。

集中豪雨：集中豪雨に対しては、降水量実況および短時間予測データをデジタルツイン上に統合することで、局所的な降雨強度の把握が可能となる。さらに、道路縦断勾配や排水構造、交通量および走行速

度変化を組み合わせることで、「道路交通に影響を与える降雨強度か否か」を評価できる。これにより、降雨強度の急増区間の抽出、交通流への影響評価、危険度の空間的可視化が可能となり、道路管理者に対する事前警戒情報として活用できる。

冠水：冠水は道路縦断形状や地形条件に依存する局所的事象である。降雨強度と道路標高・縦断勾配情報を統合することで、冠水リスク区間の抽出が可能となる。また、エッジ AI による走行速度の急減速検知や、車載カメラ画像からの路面水位把握により、実際に通行困難が発生している区間を早期に特定できる。これにより、冠水リスク区間の可視化、通行可否情報のリアルタイム更新、代替経路提示が可能となり、立ち往生や二次被害の抑制に寄与する。

土砂流出：山間部や法面区間では、豪雨に伴う土砂流出が通行障害を引き起こす。本研究で構築する画像解析基盤を活用すれば、路面上の堆積物や法面崩壊兆候を抽出することが可能である。前回走行時の画像との比較や通常状態との差分解析により異常を検出し、さらに速度低下データと統合することで、交通流に影響を与えている区間を把握できる。これにより、巡視業務の補完や通行止め判断の迅速化が期待される。

ー濃霧ー

本研究で用いる視界レベル推定技術 (WIPS 等) は、吹雪のみならず濃霧発生時にも適用可能である。車載カメラおよび CCTV 画像を活用した視程の定量化により、視界低下区間をリアルタイムに把握し、さらに気象データと統合することで短時間先の視界変化を予測することが可能となる。これにより、視界低下状況のマップ表示、危険区間の事前通知、推奨走行速度情報の提示が可能となる。さらに気象予測と統合することで、短時間先の視界悪化予測も実現可能である。特に高速道路や山間部における突発的な濃霧発生時において、安全確保および交通流維持に寄与するものと考えられる。

ーロードキルー

車載カメラ画像を活用したエッジ AI 解析に異常物体検知アルゴリズムを組み込むことで、路上落下物やロードキル等を自動検知し、道路管理者へ通知する仕組みを構築することが可能である。本研究では、都市間高速バスにエッジ AI 機器を搭載し、通常走行の中で取得される画像データを活用する体制を整備した。都市間バス等の一般走行車両を活用することで、専用の道路パトロール車両に依存することなく、広範囲を高頻度で監視することが可能となる。異常物体を検知した際には、位置情報付き画像を管理者へ自動送信することで、現場確認や通行規制判断の迅速化が図られる。従来、落下物等の把握は通報や巡視に依存する部分が大きかったが、本手法により通常走行車両からも異常情報を取得できるため、人的巡視に依存した管理体制を補完し、より迅速かつ効率的な維持管理体制への転換が期待される。さらに、検知情報をもとに帳票を自動生成する仕組みを導入することで、報告書作成や資料整理に要する業

務負担の軽減にも寄与するものとする。

―付帯施設の異常検知（除草作業判断）―

本研究では、都市間高速バス等に搭載した車載カメラにより、日常的に道路空間の画像データを取得し、デジタルツイン上に時系列で蓄積している。この継続的な画像取得基盤を活用することで、道路付帯施設の状態変化を把握し、維持管理業務の高度化に活用することが可能である。本手法では、同一区間を再度走行した際に取得された画像と、前回走行時の画像との差分を自動比較することにより、直近の状態変化を抽出する。これにより、従来の定期巡視に依存していた施設点検を補完し、異常発生直後の早期把握が可能となる。

対象施設としては、以下が想定される。

- ・ガードレールの変形・破損
- ・矢羽根（視線誘導標）の欠損・傾倒
- ・道路標識の傾き、破損、汚損による視認性低下

- ・区画線の摩耗や消失
- ・照明柱の傾斜
- ・街灯の不点灯（夜間画像との比較による検知）
- ・情報板の表示異常や故障
- ・吹雪対策施設（防雪柵等）の破損

例えば、夜間走行時の画像を活用することで、前回走行時には点灯していた街灯が不点灯となっている箇所を抽出することが可能である。また、標識の傾きやガードレールの変形についても、物体認識および位置関係の変化を検知することで異常を判定できる。

さらに、植生の繁茂状況を画像解析により把握することで、

- ・標識や矢羽根の視認性を阻害する草木の繁茂
- ・交差点部の視距確保状況
- ・路肩や法面の過度な植生増加

等を抽出でき、除草作業の実施判断や優先順位付けに活用できる。

これらの検知結果をデジタルツイン上で可視化し、異常度スコア等として整理することで、補修・更新・除草等の維持管理作業の優先順位を客観的に評価することが可能となる。本研究の特徴は、専用の道路パトロール車両を用いることなく、通常走行車両から取得される画像データを活用できる点にある。これにより、広範囲を高頻度でモニタリングすることが可能となり、人的巡視に依存した管理体制を補完する仕組みとして機能する。

さらに、異常検知情報を基に帳票を自動生成する仕組みを導入すれば、報告資料作成や記録管理業務の省力化にも寄与することが期待される。このように、本研究で構築するデジタルツインは、道路交通マネジメントのみならず、道路維持管理の効率化および予防保全型管理への転換を支える基盤としても展開可能である。

―渋滞・滞留把握―

本研究で集約する走行速度データ、交通量データおよび位置情報データを統合することで、道路区間ご

との交通流状態をリアルタイムに把握することが可能である。特に、都市間高速バス等の移動体から取得される連続的な走行データを活用することにより、固定観測点では把握が困難であった区間単位での速度低下や滞留の発生状況を空間的に連続して把握できる点に特徴がある。具体的には、平均走行速度および最低速度の変化を基に、速度低下区間の抽出、滞留長の推定、交通流の急変箇所の検知等が可能となる。これにより、事故や工事に起因する局所的な渋滞に加え、豪雨や降雪等の気象条件の悪化に伴う広域的な交通機能低下を早期に把握できる。特に冬期や豪雨時には、視界不良や路面状態悪化が交通流に波及的な影響を及ぼす可能性があるため、速度変化を継続的に監視することは重要である。本研究では、気象データや路面状態情報と交通流データを統合することで、単なる混雑の発生状況だけでなく、その発生要因を踏まえた分析が可能となる。道路管理者にとっては、滞留発生区間の早期把握、情報提供の判断支援、除雪・復旧作業の優先順位付け等に活用できる。また、物流事業者や公共交通事業者にとっては、遅延発生区間の把握や経路変更判断の基礎情報となり、一般利用者に対しては経路選択の判断材料として提供可能である。さらに、蓄積された交通流データを活用することで、平常時の交通状態との比較分析が可能となり、異常な交通機能低下の検知精度向上が期待される。このように、本研究のデジタルツインは、交通流の空間的・時間的変化を可視化する基盤として、平常時から災害時に至るまで幅広い交通マネジメントに資するものである。

―物流・運行管理―

本研究で整備する道路APIは、物流事業者および公共交通事業者の運行管理システムと連携することで、移動・輸送の高度化に寄与する基盤となる。提供可能な情報としては、視界レベル、路面状態、走行状況、危険区間、通行可否、渋滞・滞留情報等が挙げられる。物流分野においては、豪雨や大雪等の災害発生時における道路機能低下状況を空間的に把握できる点が重要である。本研究のデジタルツインは、道路機能の低下状況をリアルタイムに可視化できるため、使用可能なルートの把握、代替ルートへの切替判断、配送優先順位の見直し等を迅速に実施できる。これらの情報は、輸送停止リスクを低減し、影響を最小化するための判断材料として活用でき、物流分野における事業継続計画（BCP）の実行判断を支援する技術基盤となり得る。公共交通分野においても、遅延発生可能性の事前把握やダイヤ再編成判断の客観化に活用でき、運行管理の高度化に寄与する。

―カーナビ・MaaS等への展開―

従来のカーナビゲーションシステムにおける交通情報は、主として渋滞情報や通行止め情報といった「結果情報」に基づく経路検索が中心であった。一方、本研究では、視界レベル、路面状態、冠水・濃霧等のリスク区間情報といった「道路環境そのもの」に関する情報をAPIとして提供することが可能であ

る。これにより、カーナビ側では単なる所要時間最短経路ではなく、視界不良区間を回避した経路、路面状態悪化区間を避けた安全重視経路、冠水リスク区間を回避したルート等の提示が可能となる。また、リアルタイムに更新される道路環境情報を活用することで、走行中においても状況変化に応じた経路再探索や注意喚起を行うことができる。例えば、前方区間において視界悪化が予測される場合には音声や画面表示により警告を行い、利用者に減速や経路変更を促すことが可能である。さらに、走行履歴データや過去の交通流データを活用することで、特定の時間帯や気象条件下で発生しやすい交通機能低下区間を事前に提示することも考えられる。これにより、利用者は出発前の段階で移動判断を行うことができ、出控えや時間調整といった行動変容を促す情報提供にもつながる。

MaaS基盤と連携した場合には、自家用車利用にとどまらず、公共交通や他の移動手段との組合せを含めた移動提案が可能となる。例えば、悪天候時には自家用車移動のリスクが高い区間を提示するとともに、公共交通利用を含めた代替移動手段を提案するなど、総合的な移動最適化への展開が期待される。このように、本研究で整備する道路APIは、従来の渋滞中心型ナビゲーションから、道路環境リスクを考慮した安全重視型ナビゲーションへの高度化を支える基盤として機能し得るものである。結果として、利用者の移動負担軽減および事故リスク低減に寄与するとともに、地域全体の交通レジリエンス向上にも資することが期待される。

b) 社会実装に向けた検討

ー想定される連携先プレイヤーー

冬期道路交通マネジメントシステムの社会実装方法を検討した。また、前節では、冬期事象以外の事象への応用可能性と情報提供の方策を検討した。これらの整理結果を踏まえ、冬期事象以外も含めた道路交通マネジメントシステムの社会実装時の利用者と、連携先プレイヤーを整理した。

自治体：自治体は全てのカテゴリにおける連携先プレイヤーと考えられる。①移動負担軽減に向けては、利用者である道路管理者や事業者とともに自治体の連携が重要となる。③道路政策評価においては、可視化された政策評価結果を行政職員への提供がイメージされており、冬期事象以外も含めた②道路維持管理効率化・高度化においては、自治体の管理する道路も対象となる。特に、④防災支援においては、自治体が先頭に立って危機対応に携わることから、連携が必須である。⑤その他(道路API・情報連携)については、国などと共同で運営する「ガバナンスモデル」の構築への自治体の関与は必要であり、そこでも連携が求められる。

警察・消防など：警察や消防等が連携先プレイヤーとなるのは、④防災支援情報である。防災支援情報には、救援や避難の迅速化や、規制判断の明確化には、警察や消防との連携が必須である。集中豪雨な

ど、冬期以外に発生する事象もあることから、⑩冬期事象以外でも連携が求められる。

メディア：メディアについては、②道路維持管理の効率化・高度化を除いて、連携先プレイヤーとなりうる。①移動負担軽減や④防災支援情報、⑤その他(道路API・情報連携)においては、情報発信手段として、メディアの連携は重要であり、これは⑩冬期事象以外における障害発生時や災害発生時においても同様である。③道路政策評価においては、可視化された政策評価結果を、メディアも利用できる透明性の高いツールで提供することがイメージされている。

情報提供会社：冬期事象以外も含む①移動負担軽減や④防災支援情報、⑤その他(道路API・情報連携)においては、スマートフォンアプリ、カーナビ、SNSなど多様な媒体での情報提供をイメージしており、これらの情報媒体を管理している情報提供会社との連携が必要である。

システム会社：システム会社は全てのカテゴリにおける連携先プレイヤーである。次項に示すように本マネジメントシステムを構築し、安定的にサービスを提供するためには、高度な知見を持つシステム会社との連携が必要である。システム会社は車載カメラ、CCTVカメラなどのハード機器に詳しいだけでなく、気象データやETC2.0などのデータにも精通している必要がある。また、利用者に一般や事業者がおり、連携先にはメディアが含まれていることから、使いやすい設計が求められる。さらに、道路管理者のほか、警察や消防、自治体とも連携することから、高いセキュリティも求められる。

他民間会社：これまでの示された連携先プレイヤーのほかにも、①移動負担軽減では、情報提供場所として、道の駅やコンビニエンスストアと連携できる可能性が考えられる。これは⑤その他(道路API・情報連携)や、⑩冬期事象以外でも同様な連携が考えられる。また、カーナビ、MaaSアプリ、物流プラットフォーム、観光情報サービスなど幅広い用途にAPI接続が可能となれば、道路利用者への価値提供が加速的に拡大することから、このような民間交通サービス会社も連携先プレイヤーのひとつと考えられる。

ーサービスの体系化検討ー

デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの社会実装にあたって、サービスの体系化を検討した。本技術開発において実際に検討を行った部分は、現地データ収集、解析・統合、デジタルツインである。社会実装に向けては、道路API・情報連携基盤についての検討や構築、社会実装サービス群と提供チャネルについての検討が重要となる。本報告書において、道路API・情報連携基盤部分についての説明が不足しており、その点について以下に追記する。

道路API標準化：道路API標準化の目的は、情報の仕様を統一し、連携先プレイヤーのシステム会社や情報提供会社が情報を安定的に活用できるようにすることである。提供先や提供場所、提供内容によって、

データ形式や単位、指標などの定義が異なっていた場合には、適用する場所ごとでアプリを作成する必要が生じたり、提供する情報に誤りが生じたり、指標の意味が異なってしまう可能性が考えられる。そのためにも、様々な情報を共通仕様で外部に提供する標準化が必要であると考えられる。

利用者別APIレイヤー：本サービスは、多様な提供チャネルを通じて、道路管理者、事業者、一般、その他、様々な利用者に届けられます。利用者別APIレイヤーは、冬期道路交通マネジメントシステムで生み出された情報を利用者に適した情報に再構築するレイヤーである。例えば、道路管理者と物流業者、一般ドライバーでは、必要とする情報内容や情報の精度、更新頻度などが異なる。属性によって、多すぎる情報は判断の遅れや理解不足につながる可能性がある。また、少なすぎる情報は、情報の誤解や精度不足につながる。冬期道路交通マネジメントシステムで生み出された情報を活用してもらうためにも、利用者の役割、責任、用途に応じて最適化する本レイヤーの位置づけは重要である。

ガバナンス・利用ポリシー：情報提供を行う上で、ガバナンスや利用ポリシーの明確化が非常に重要である。ガバナンス・利用ポリシーを用意する目的と

しては、以下のような項目が挙げられる。

- ・データの適正利用の担保
- ・責任範囲の明確化
- ・公平性・透明性の確保
- ・データ品質の維持

ガバナンスには、運営主体や責任体制（責任分界点）、データ品質管理、情報セキュリティの対応方法を示しておく必要があると考えられる。また、利用ポリシーには、利用目的の範囲、二次利用の条件、再配布ルールなどの明記が必要である。

データ共有・フィードバック：データ共有・フィードバックの目的は、構築した冬期道路交通マネジメントシステムを継続的に改善することである。ただ情報を提供して終えるのではなく、現場からの評価や利用状況などを踏まえて、システムをブラッシュアップしていくことが望ましいと考えられる。また、情報によっては、利用者側から得られるフィードバックによって、さらに付加価値の高い情報を構築できる可能性もある。将来的には現場からの情報もデジタルツインに組み込んで、提供する情報の精度、信頼度をさらに向上させる仕組みの構築も検討できると考えられる。

第4章 まとめ

本章では、第3章の各検討項目を連携・統合して得られる成果、および本研究で構築するシステムの全体像についてまとめる。

4.1 5つのテーマによって得られる成果

(1) 冬期の路面や視界等の情報収集・活用に関する技術開発

デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントの高度化を目的として、路面状態や視界状況等の情報収集・予測・活用に関する技術開発について整理した。気象レーダやメッシュ気象情報、CCTV・車載カメラ画像等を活用し、降雪量、風向風速、視程などの先読み情報を整備するとともに、深層学習を用いた路面状態判別や視界予測、夜間における視界評価の高精度化、堆雪による道路狭窄状態の推定手法を構築した。さらに、これらの道路・気象データを統合した道路環境の総合評価指標の検討を行い、通行困難区間の把握や異常検知への適用可能性を示した。加えて、デジタルツインで生成した先読み情報を道路管理者や道路利用者に配信し、除排雪判断支援や地域FM等での試験導入を通じて利用者評価を実施した。その結果、現地判断の高度化や作業の効率化、行動変容の促進に資する有効性が確認され、冬期道路維持管理への実装に向けた知見を得た。

(2) 冬期道路交通マネジメントを可能とするデータ集積プラットフォームに関する技術開発

複数のエッジや各種シミュレーション機能に対応する道路APIを実装し、道路APIを備えたデジタルツインの基幹システムを構築した。本デジタルツインは、フィジカル空間に分散配置された複数のエッジから送信される大量データを集積することを目的としている。令和5年度には初年度の取組として、複数の車載システムから常時送信される画像データやエッジ解析結果を受信するサーバのプロトタイプを構築し、WebDAVを用いた一般的な仕組みにより、不定期に稼働する9台のエッジからの確実なデータ収受を確認した。令和6年度には、将来的な大量データ受信を見据え、認証処理やデータ受け入れの高速化・安定化を目的にシステムを拡張し、物理サーバ上に複数の仮想サーバを配置する構成を設計した。これにより、データ集積、シミュレーション、情報提示の各機能を分担・連携させ、動的データおよび解析結果を集積するプラットフォーム機能の拡充を可能とした。令和7年度には、令和6年度までに設計した基幹システムを新サーバに実装している。このとき、道路APIとしては、JSONやXMLでやり取り可能な方式で実装している。令和7年度に実装したシステムにおいては、気象データ・CCTVの受け取りから可視化画面まで構築している。この実現には、そのデータ集

積、データ処理、およびインタフェース画面の構成を必要とし、それらは複数のサーバで通信を介して実行される。このサーバ内での通信においても、設計したJSONおよびXML形式でのやりとりする道路APIを活用しており、サーバ間で遅延の無い伝送と処理が実施されることを確認している。本デジタルツインが扱うデータは、その種類が適時追加されることを想定する。このため、新種のデータに拡張可能なデータ構造を確保した。また、外部からのリクエストに対して安定したAPI提供が可能となるよう、機能を分けた複数システムからなる基幹システムとしている。

(3) 冬期道路交通マネジメントのための交通・気象データを利用したシミュレーション等に関する技術開発

雪害時における過度な交通混雑を抑制するため、交通・気象データを活用した冬期道路交通マネジメント手法の技術開発を行った。需要側対策として外出抑制等の行動変容による需要削減効果を、供給側対策として除排雪による道路容量回復効果を対象に、集計QK分析および交通量配分シミュレーションを用いて検証した。まず、ETC2.0プローブデータを用いてネットワーク交通流ブレイクダウンを客観的に判定する手法を構築し、積雪寒冷地特有の渋滞発生・解消過程を把握可能とした。次に、モバイル空間統計と人流データを統合して冬期OD表を推計し、雪害時の行動変容を反映した交通需要モデルを構築した。これらを用いたシミュレーション分析の結果、優先除雪のみでは都市全体の交通機能回復は不十分であり、概ね20～30%程度の需要抑制策を併用することが有効であることを定量的に示した。

(4) 冬期における人の移動の負担軽減に資する情報提供に関する 技術開発

冬期における人の移動の負担軽減を目的として、デジタルツインを活用した道路情報提供に関する技術開発と実証を行った。令和5年度の検証結果を踏まえ、令和6年度にはアンケート調査結果に基づき情報発信内容やインタフェースを改善するとともに、モニタリング車両台数および対象路線を拡充し、時空間解像度の向上を図った。また、プラットフォームによる直接的な情報提供に加え、バス事業者や道路維持管理者、コミュニティラジオなど多様な媒体を通じた情報発信を実施し、情報の訴求性を検証した。さらに、車載カメラ画像やCCTV、気象予測データを統合した道路APIおよびデータ蓄積プラットフォームを構築し、視界不良区間や通行困難区間を分かりやすく提示する仕組みを整備した。これらの取組により、安全な経路選択や出控え等の行動変容を促す情報提供の有効性を確認するとともに、他地域への展開に向けた知見やロードマップ、導入マニュアルを整理した。

(5) 道路APIを備えたデジタルツインによる冬期道

路交通マネジメントシステムの社会実装方法の検討

道路APIを備えたデジタルツインを活用した冬期道路交通マネジメントシステムの社会実装方法について検討した。まず、車載エッジAI、CCTVカメラ、気象データ、ETC2.0などにより高解像度で集約・蓄積される道路環境データを整理し、移動負担軽減、冬期道路維持管理の効率化・高度化、道路政策評価、防災支援情報等のユースケースを体系的に整理した。これらのデータを活用することで、視界・路面状態の先読み情報による安全な移動支援や、除排雪・融雪剤散布の優先度判断、通行規制判断の高度化、維持管理作業の省力化が可能となることを示した。さらに、情報利用者ごとの活用シーンを整理し、一般利用者、道路管理者、物流・交通事業者、自治体・メディア等との連携による社会実装の方向性を明確化した。加えて、冬期事象に限らず、集中豪雨や濃霧、冠水、落下物などへの応用可能性を示し、道路APIの標準化、利用者別APIレイヤー、ガバナンス整備を通じた全国展開に向けた実装方策をとりまとめた。

4.2 本研究で構築するシステムの全体像

本章では、本研究で構築するデジタルツインシステムの全体像についてまとめる。また、図-38に全体像のイメージを併せて示す。

(1) フィジカル空間上の事象の把握

冬期道路における様々な道路交通事象は、気象状況（降雪、風、気温変化等）の変化によって引き起こされる。冬期道路のデジタルツインを実現する上は、気象状態とその予測が特に重要である。また、結果として生じる道路上の事象（視界状況、路面状況変化、走行車両の速度変化等）は時空間で時々刻々変化するため、高頻度で状態を記録することが必要となる。

本研究では、気象の実況および予測データは気象会社から提供される取得するとともに、対処路線を定期的に走行する都市間バスをプローブ車両として道路交通状況を取得した。将来的には、都市間バスだけではなく物流車両、道路巡視車両等も対象とすることでより高頻度の実況データを取得することが可能となる。

近年は、道路管理用に設置されているCCTVカメラの画像解析によって交通量を観測しているが、本研究でも活用したWIPS（Weighted Intensity of Power Spectrum）によって視界状況の把握が可能となる。既存インフラの活用という点においても有効である。また、ETC2.0プローブ情報のリアルタイム取得が可能になれば、路線上の走行速度分布が把握できる等のメリットがある。

この他、道路維持事業者が有する道路特性に関わる情報、除排雪情報などの取り込みも検討すべき情報と考えられる。

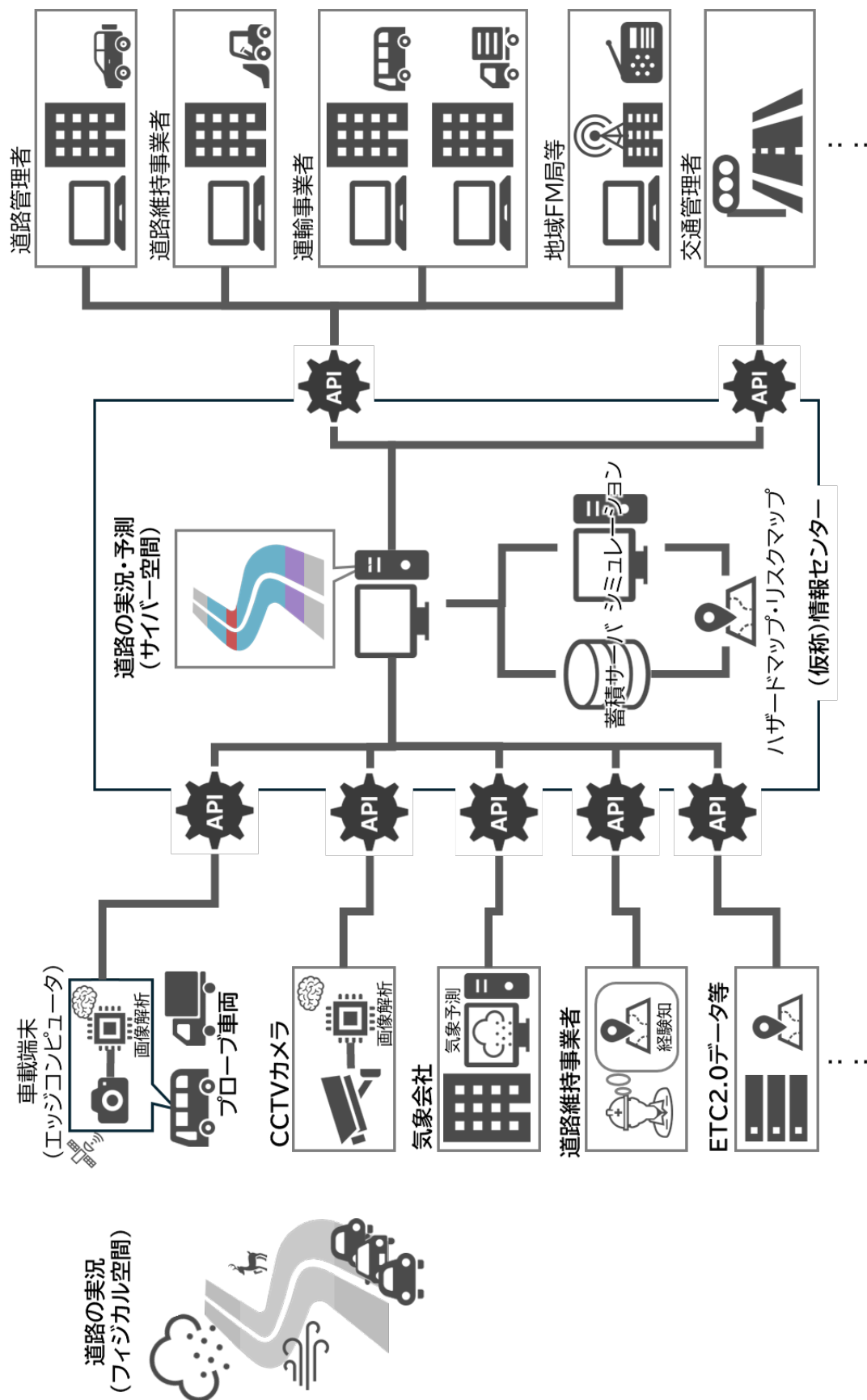


図-38 デジタルツインシステムの全体像

(2) (仮称) 情報センターの設置・運営

情報をAPIで収集・蓄積するとともに、これらの情報を加工して道路利用者等へ情報提供するための

(仮称) 情報センターの設置・運営が不可欠である。道路交通法（以下「法」）第109条の3第1項の規定により、予測交通情報を提供する事業を行おうとす

る者は、国家公安委員会に特定交通情報提供事業の届出をしなければならない等の規定がある。

(仮称) 情報センターの設置・運営をどのような組織で行うべきかについては、本格運用を行っていく上で大きな課題である。

(3) 道路利用者等のニーズに応じた情報提供

冬期道路のデジタルツインは、道路利用者の長距離移動の負担軽減、安全確保を目的とするものである。

本研究においてプローブ車両として協力をいただいたバス事業者は、運行経路上の気象状況、道路状況を先行して走行している車両から得られた情報によって把握し、後発のバスの運行経路変更等の判断に活用していた。今後物流車両等へ拡大した場合においても同様の活用が考えられる。また、一般利用者への情報提供について本研究では、地域FMを通じた提供を行い、経路選択や運転取りやめ等の行動変容を期待した。

本研究での情報提供の試行で利用者から一定の評価をいただいているが、今後はユーザインターフェースの改善、データフュージョン（データ融合）による精度の高い情報の提供等について継続的に研究開発していくことが必要である。

参考文献

- 1) 竹内政夫：冬の視界不良事故について，北海道の雪氷，No.33，2014.
- 2) 松澤勝：吹雪時の視程推定手法とその活用に関する研究，寒地土木研究所報告，題 126 号，寒地土木研究所，2006.
- 3) Y. Ma, W. Liu, H. Gao, N. Chen, and X. Xiong: The Scattering effects on the visibility measurements of laser transmissometer in rain and fog, *Optik*, vol. 157, pp. 957-967, 2018.
- 4) T. Hagiwara, Y. Ota, Y. Kaneda, Y. Nagata, and K. Araki: Method of processing closed-circuit television digital images for poor visibility identification, *Transportation Research Records: Journal of the Transportation Research Board*, 1973, pp. 95-104, 2006.
- 5) C. Liu, X. Lu, S. Ji, and W. Geng: A fog level detection method based on image HSV color histogram, *2014 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing*, pp. 373-377, 2014.
- 6) R. Sato, S. Takahashi, T. Hagiwara, Y. Nagata, and K. Ohashi : A Visibility Level Estimation Via Late-fusion Based on Probabilities of Multiple Classifiers Using In-vehicle Camera Videos Under Nighttime, *Artificial Intelligence and Data Science*, Vol. 3, No. J2, pp. 534-542, 2022.
- 7) C. Cortes and V. Vapnik: Support-vector networks, *Machine learning*, Vol. 20, no. 3, pp. 273-297, 1995.
- 8) G.-B. Huang, Q.-Y. Zhu and C.-K. Siew: Extreme Learning Machine: a new learning scheme of feedforward neural networks, *Proc. In the IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, Vol. 2, pp. 985-990, 2004.
- 9) C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Loffe, J. Shlens and Z. Wojna: Rethinking the inception architecture for computer vision, in *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Recognition*, pp. 2818-2826, 2016.
- 10) Hochreiter, S. and Schmidhuber, J.: Long Short-Term Memory, *Neural computation*, Vol.9, Issue 8, pp.1735-1780, 1997.
- 11) 丹治和博，小松麻美，金村直俊，松岡直基，尾関俊浩：2021/22 札幌都市圏の大雪の特徴と雪害要因，第 38 回寒地技術シンポジウム（2022 年 11 月 30 日・12 月 1 日・2 日）