

IoT を用いた冬期交通網管理の最適化に関する研究

－降雪分布取得、井戸監視、除雪シミュレーションシステム、路面温度予測システムの開発－

キーワード：新技術、効率化、IoT、コスト削減

山下克也*1、山口悟*1、諸橋和行*2、齋藤隆幸*3、神田英一朗*4、
平島寛行*1、杉浦聡*5、竹内祐貴*6

1. はじめに

国土の約半分を占める雪国において、冬期交通網の確保は常に必須の課題であり、道路の除排雪に毎年多額の費用が投入されている。特に生活道路の確保は死活問題である。2016年1月下旬に新潟県中越地域で起こった大雪による数日間に及ぶ道路網の麻痺や、それに伴う物流の停滞が原因で生じた多大な社会的損失のように、雪国における生活道路の確保は、除雪技術が発達した今日でも解決されていない問題である。

生活道路確保対策では、降雪量、気温の予測をもとに除雪・凍結防止剤散布に必要な要員や機材の確保などの事前準備を行い、予測結果と現況状況を勘案しながら、道路除雪や凍結防止剤散布などの対応が行われている。防災科学技術研究所(以後、防災科研)雪氷防災研究センター(以後、雪氷研)では、大雪、雪崩、地吹雪、道路の雪氷状態などを予測する「雪氷災害発生予測システム(Nakai et al., 2012)」を開発しており、冬期道路管理者などと連携して、予測システムの改良のための試験運用を行っている。予測システムでは降雪量分布や特定路線の道路路面温度などの予測も行っているが、予測が現実と異なる場合が未だに散見される。よって、現状では予測値のみを使用した災害対策は現実的ではない。

雪氷研では、現況把握のためにレーダーと地上観測を融合した集中豪雪監視システム、IoT 技術によるセンシング、数値シミュレーションを活用した広域の面的降積雪分布取得システムなどの雪氷災害危険度の現状把握技術の開発も行っている。予測情報と現況情報を統合し、有効に活用することは冬期道路管理に非常に有用である。しかしながら、上で述べたように、現在でも、大雪時には大規模な車両滞留が起こっており、まだまだ有効活用できていない。また、Kawase et al., (2016)では、最新気候シミュレーションを用いた予測より、地球温暖化で豪雪の頻度が高まる可能性が指摘されている。この指摘は、今後、大規模な車両滞留が起こる頻度が高まる可能性があることを示唆しており、予測情報と現況情報を統合し有効活用する技術の開発が重要であることも示唆している。

防災科研では、気象災害軽減イノベーションセンター(雪氷研のメンバーは併任)を設置し、予測技術、現況把握技術、及びリスクコミュニケーションを取り入れ、各ステークホルダーとの密接な連携により地域特性・利用者ニーズに応じた災害予測情報システムの社会実装を目指した取り組みも行っている。この取り組みでは産学官を含めた戦略的で実践的な人材と技術の糾合を行い、防災科研の研究成果の社会実装と産業界への経済的波及効果を目指している。現在、新潟県中越地域を一つのフィールドとして地域課題である冬期道路管理の最適化の取り組みを行っている。本稿では、取り組みの中で開発した詳細降雪・気象情報提供システム、消雪パイプ井戸ポンプ監視システム、道路除雪シミュレーションシステム、路面温度予測配信システムの概要と実証実験の結果を記す。

2. 開発したシステムの概要

2-1 詳細降雪・気象情報提供システム

このシステムは、融雪装置の稼働制御に利用されている降雪センサーの情報をを用いて降雪分布や気温分布を算出するものである。複数の降雪センサーにデータ通信機能を付加し(図1)、クラウドサーバーに集約した情報を基に広域かつ詳細な降雪分布や気温分布を算出し表示する

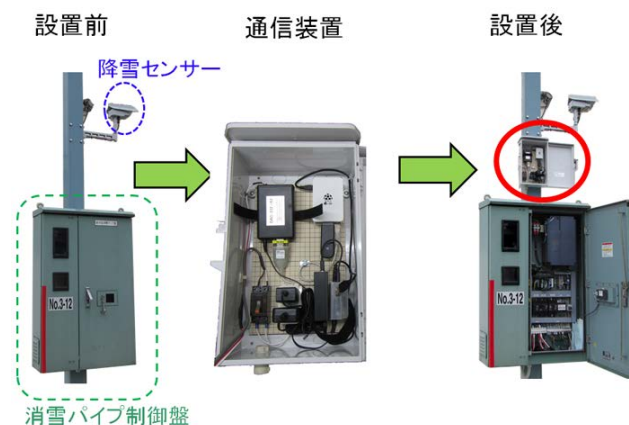


図1 通信装置設置前後の降雪センサーと消雪パイプ制御盤の写真

*1 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター、*2 公益社団法人中越防災安全推進機構地域防災力センター、
*3 株式会社スノーテック新潟、*4 株式会社 KCS、*5 株式会社スノーキャスト、*6 株式会社長岡計器

システムである。

このシステムの利点は既存の降雪センサー設備に通信装置を設置するだけであり、比較的安価に導入できることである。また、降雪センサーは新潟県長岡市だけでも約3万箇所に設置されているので、必要に応じた通信装置の設置により、必要な空間分解能に応じた降雪量分布が取得できる。通信装置自体の消費電力は20W以下であり、融雪施設自体が使用する電力と比べると微小である。通信装置のメンテナンスは、通常の融雪施設の点検に一手間加わる程度の範囲で実施可能である。そのため追加の維持管理コストもほとんどかからず、費用対効果は非常に高い。一つの通信装置の通信費は携帯回線を使用した場合、月に400円ほどであるが、通信装置の台数が多くなるとその分通信費がかさむ。そのような場合の通信費削減に向けて、LoRa通信などのLPWA通信を活用して、複数のセンサーからデータを集約し、そこから一括でデータをアップするという方法の他、地域BWA(Broadband Wireless Access)通信機能もオプションとして有している。これらの通信方法を利用することにより、通信コスト削減や設置環境に合わせた通信方法が選択できる。

北陸地域の降雪は、市町村範囲の狭い領域でも降雪域が不均一であるので、面的に広がる道路網除雪においては、数百mから数kmの空間分解能の降雪分布情報が必要である。このシステムでは管理費が安く、必要とされる空間分解能の観測網を容易に構築できるので、市町村レベルの道路管理に有用であると考えられる。

2-2 消雪パイプ井戸ポンプ監視システムシステム

このシステムは、地下水位の低下に伴う消雪パイプ設備の機能不全を事前に察知するため、IoTを用いて井戸水位をリアルタイムでモニタリングするものである。消雪パイプ設備の停止時期が事前に把握できるようになると消雪パイプ路線の機械除雪への切り替えにリードタイムを長く持った対応をとることができる。

システムは、圧力式水位計、データ変換器、小型PC、3G通信ドングルで構成されており(図2)、集約したデータを用いた降雪時の井戸水位の変動や井戸水の渇水状況をリアルタイムで把握・表示することができる。

2-3 道路除雪シミュレーションシステム

道路除雪シミュレーションシステムは、除雪路線(事前に決められている静的情報)、降積雪分布(詳細降雪・気象情報提供システム、気象予測モデル、レーダーの降雪量分布などの動的情報)、及び道路網情報(静的情報)をGIS(Geographic Information System)上で重ね合わせて、

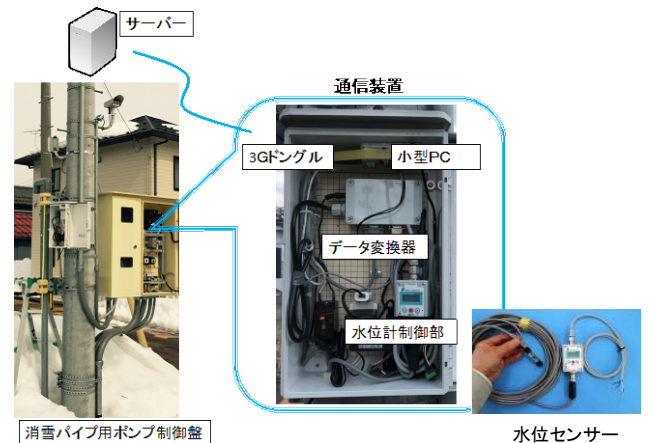


図2 消雪パイプ井戸ポンプ監視システムの構成

道路上の排雪量の推定や効率的な除雪ルートを導くためのシステムである。降積雪分布と道路網データから道路上の積雪深を算出し、これと道路幅から各道路上の堆雪量を求める。算出した堆雪量を除雪経路の路線分積算することで除排雪量が算出される。除雪ルート解析では、道路上の積雪深に応じて除雪車の速度が低下することを考慮した除雪車通過時間を計算できる除雪車用のカーナビデータを作成し、それに除雪の際に必要な除雪優先道路などの各種条件を入力して最適なルート解析を行う。

2-4 路面温度予測配信システム

凍結防止剤を散布する時には、降雪量や最低気温などの予測に基づいて日々の待機計画や出動判断を決定している。路面温度予測配信システムでは地形や道路などの属性データ、大気の詳細条件(気温や放射などの予測値)を入力値として与えることで、路面温度など物理量の変化の状態を計算・予測することができる。しかしながら、この計算モデルでは計算精度が入力値として与える大気の詳細条件に大きく依存するので、精度の良い気象予測値が必要である。そこで新潟県内を対象に独自にきめ細かい気象予測を行っている気象会社の予測値と道路状態計算モデルを結合し、その結果を配信するシステムを開発した。

3. 実証実験結果

3-1 詳細降雪・気象情報提供システムの結果

詳細降雪・気象情報提供システムは、平成28年度から開発を行っている。長岡市と新潟県の所有する降雪センサーに通信装置を設置し、個々の降雪センサーの稼働状況、降雪強度(降雪粒子パルス数)、及び気温の情報が約10分間隔で取得できるようになっている。また、それらの情報をもとに累積降雪量分布や気温分布を推定できるようになっている。

図 3 は、平成 30 年度の実証実験で通信装置を設置した降雪センサーの位置と前 24 時間積算降雪深分布を示している。現状では、25 か所に通信装置を設置し、約 25×30km の範囲の面的な降雪深分布と気温分布が 10 分間隔で冬期を通して連続で所得できる。図 3 より、降雪量分布は範囲内で 30 cm 以上の差が生じており、降雪量はこのような狭い範囲内でもばらつきがあることがわかる。このような情報は今まで得ることができなかった情報であり、有効活用できれば効率的な除雪や迂回路の検討に役立つことが期待される。算出された情報は、ID とパスワードで管理された Web 上で、リアルタイムで閲覧でき

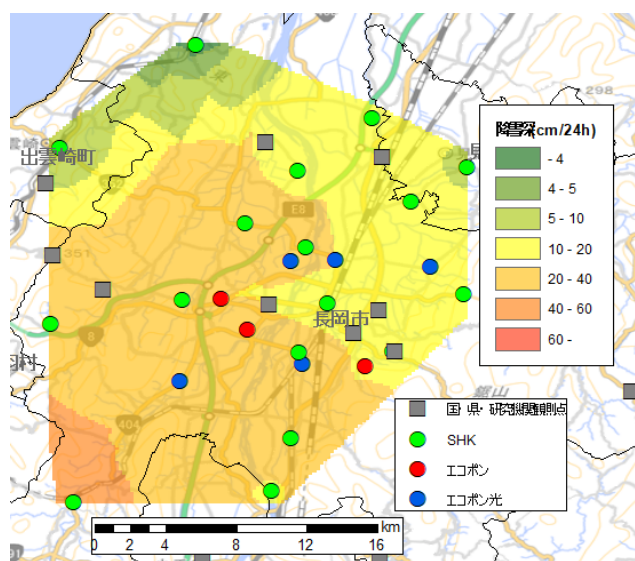


図 3 平成 30 年度の通信装置を設置した降雪センサーの位置と 24 時間積算降雪深分布(2019/2/8 23 時)

る。また、これらの情報の一部は、長岡のケーブルテレビ会社である株式会社エヌ・シー・ティのホームページからも閲覧できるようになっている。

3-2 消雪パイプ井戸ポンプ監視システムの結果

消雪パイプ井戸ポンプ監視システムは、平成 30 年度から開発を行っている。平成 30 年度の実証実験では新潟県所有の 2 か所の降雪センサー施設の井戸に設置した。データの表示は Web 上で表示しており、降雪センサーの稼働状況とともに散水による井戸水位の変化を約 10 分間隔でモニタリングすることができる(図 4)。図 4 より、消雪パイプの稼働に伴う井戸水位の減少傾向を把握することができる。井戸水位の変化と消雪設備の機能停止となる閾水位を可視化することで、消雪設備機能停止による機械除雪切り替えまでの対応時間を拡大できる可能性がある。

3-3 除雪シミュレーションシステムの結果

除雪シミュレーションシステムは、平成 30 年度から開発を行っている。ここでは、2018 年 2 月 6 日の事例(図 5)を用いて、除雪車で取得したデータとシミュレーションした結果を示す(図 6)。除雪にかかる時間を比較したところ、実際にかかった時間よりシミュレーション結果は

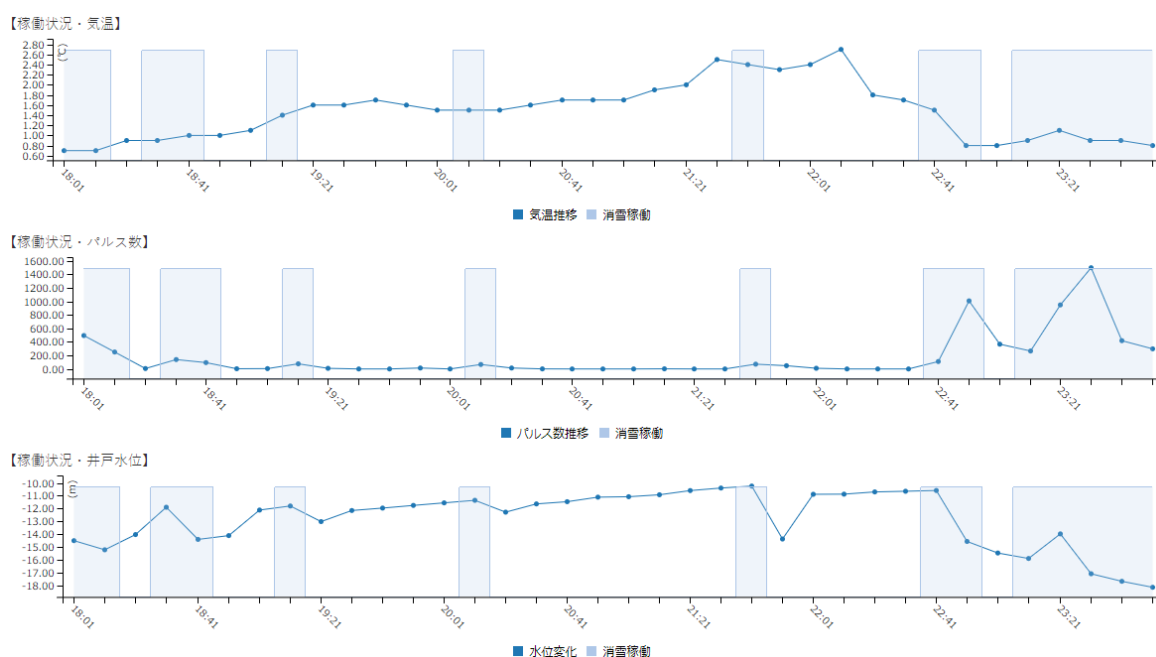


図 4 消雪パイプ井戸ポンプ監視システムの web 表示システム出力例(2019/3/13 の観測例)

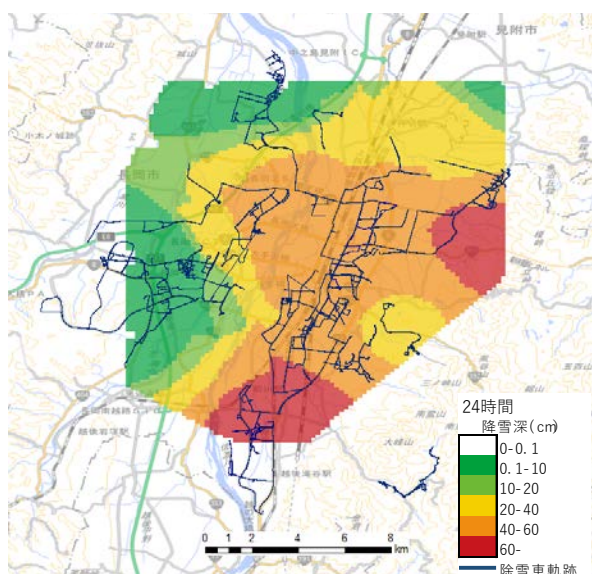


図5 2018年2月6日0時の24時間積算降雪深と除雪車移動経路

除雪時間が約180分短かった。この差の原因として、シミュレーションでは駐車場の除雪を考慮していないこと、及び除雪車の降積雪量に応じた速度低下が正確に考慮できていないことが考えられる。今後は事例解析を増やし、シミュレーションから得られる除雪時間を実際の除雪時間に近づけるための改良、及び効率的な除雪ルート算出のためのアルゴリズムを検討する予定である。まだまだ改良の余地が多いシステムであるが、将来的には、現況

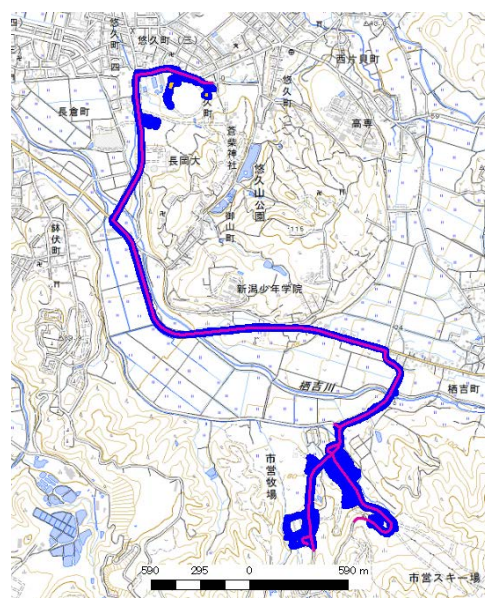


図6 2018年2月6日の実際の除雪車の軌跡(青線)とGIS上で設定した除雪ルート(ピンク線)

データや予測データを用いて、最適除雪ルート算出による除雪業者の除雪の補助情報としての提示や、過去データを用いた除雪作業の効率化解析等への利用を検討している。

3-4 路面温度予測配信システムの結果

路面温度予測配信システムは、平成28年度から開発を行っている。道路雪氷予測モデルの高速化、改良を経

<予測対象>

- ・気温、路面温度

<配信時間>

- ・15時に発表し当日19時から翌日18時までの予測値を表示

<配信方法>

- ・PDFファイルをメールに添付して自動配信

<配信区間>

- ・長岡市内の4路線
- ・新潟市内の8路線

<配信期間>

- ・平成30年
1月4日～3月22日(予定)

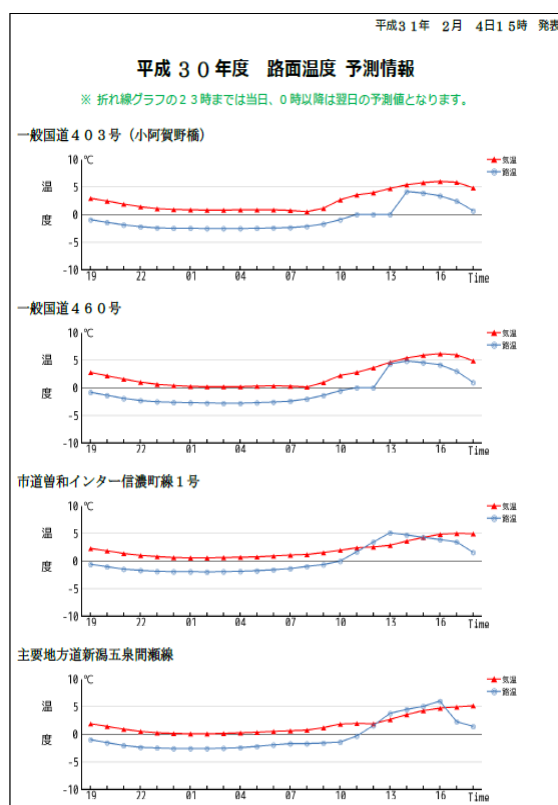


図7 路面温度予測配信システムの配信内容(平成30年度版)

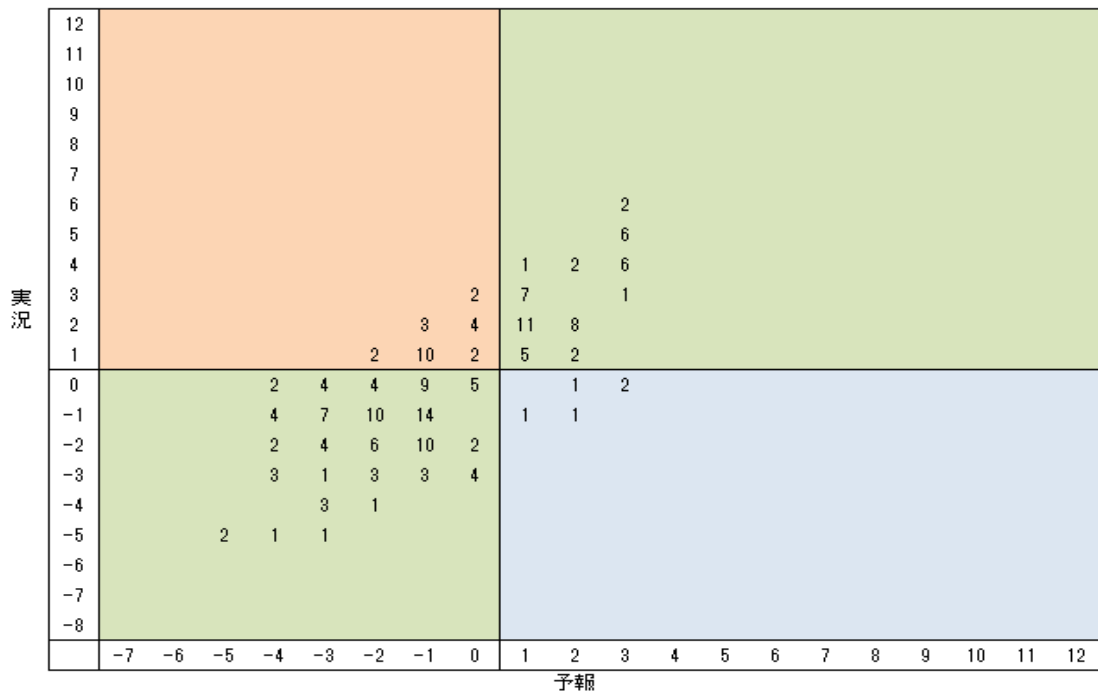


図 8 新潟県長岡市の国道 351 号新榎トンネル付近の路面温度の的中率。閾値を 0 度と仮定。グラフ内の数値は予報した回数を表す。的中率(緑色領域)：85%、見逃率(空色領域)：3%、空振率(橙色領域)：12%。検証期間は 2/23 から 3/10 までの 16 日間、時間は 18 時から 6 時までの夜間から早朝までとした。

表 1 本稿で紹介するシステムから取得できる情報

要素	利用システム	時間分解能	予測or実況
降雪量分布	詳細降雪 ^{*1}	10分	実況
気温分布	詳細降雪 ^{*1}	10分	実況
消パイ稼働状況	詳細降雪 ^{*1}	10分	実況
井戸水位	水位システム ^{*2}	10分	実況
堆雪量	除雪シミュ ^{*3}	10分以上 (入力値と計算時間に依存)	予測・実況
推薦除雪ルート	除雪シミュ ^{*3}	10分以上 (入力値と計算時間に依存)	予測・実況
道路路面状態	道路雪氷予測 ^{*4}	1時間(変更可)	予測
道路路面温度	道路雪氷予測 ^{*4}	1時間(変更可)	予測
道路路面摩擦係数	道路雪氷予測 ^{*4}	1時間(変更可)	予測

^{*1}詳細降雪・気象情報取得システム、^{*2}消雪パイプ井戸ポンプ監視システム、

^{*3}除雪シミュレーションシステム、^{*4}路面温度予測配信システム

て、平成 29 年度から試験的に冬期道路管理者に路面温度や路面状態などの予測情報の提供を行っている。図 7 は平成 30 年度版の予測システムによる配信内容を示している。15 時に発表し、当日 19 時から翌日 18 時までの予測値を配信した。

国道 351 号新榎トンネル付近に設置した道路気象観測システムより取得した路面温度の観測値と配信した予測値との比較検証を行った結果を図 8 に示す。的中率で 85%程度と概ね良好な結果であった。時間帯別では、高気圧に覆われる「日当たりの良い日中」や「雲のない夜間」に実測値が予測値を大きく上回る傾向が確認された。こ

れは路面温度の予測因子として用いている日射や放射の量に影響することから、今後はこれらの予測精度向上、最適化が課題となる。精度向上が図られれば、凍結防止剤散布の適正化につながる。

4. データ活用と今後の取り組み

表 1 には上述したシステムから得られる情報を示している。個々のものでも道路管理の効率化への貢献が期待されるが、それらを統合することにより更なる効率化が図られる可能性がある。表 2 には、雪氷研が提供できる面的な分布情報(一部は試験的利用のみ利用可)を示し

表2 雪氷研が提供できる面分布情報

要素	利用システム	時間分解能	予測or実況
降雪量分布1	雪氷災害発生 ^{*1}	1時間(変更可)	予測
気温分布	雪氷災害発生 ^{*1}	1時間(変更可)	予測
風向風速分布	雪氷災害発生 ^{*1}	1時間(変更可)	予測
吹雪量(視程)分布	雪氷災害発生 ^{*1}	1時間(変更可)	予測
着雪量分布	雪氷災害発生 ^{*1}	1時間(変更可)	予測
降雪量分布2	レーダー	10分	実況
積雪重量分布	雪おろシグナル	1時間	実況

^{*1}雪氷災害発生予測システム

ている。表 1,2 の情報を統合し利用することで、予測では、降雪量分布、気温分布、道路路面状態、道路路面温度、除雪経路上の堆雪量(予測の降雪量分布を入力)、効率的な除雪ルート(予測の降雪量分布を入力)などが道路除雪や凍結防止剤散布の事前対応に利用可能となる。実況値としては、降雪量分布、気温分布、除雪経路上の堆雪量(実況の降雪量分布を入力)、効率的な除雪ルート(実況の降雪量分布を入力)、井戸水位、消雪パイプ稼働状況などが実際の作業の際に利用可能である。これらの情報を地図上で組み合わせて表示することで「IoT を活用した統合的な冬期道路管理システム」としての展開を目指している。また、除雪車の位置情報や除雪による積雪量減少のリアルタイム表示も今後対応していく予定である。

自治体や民間会社の道路監視カメラや一般人のスマートフォンを介した積雪深、道路路面状況、及び道路写真などのレポート情報を収集し、それらの情報を予測や実況を表示する地図上にリアルタイム表示することも検討を始めたところである。信頼性がさらに向上すると考えられる。本節で記述したことはあくまでも想定であり、実際にどれくらい実現可能であるかは、現時点では定かではない。今後もシステムの改良や拡張を行い、実証実

験やステークホルダーの意見を取り入れながら、冬期交通網管理の最適化を目指す予定である。

参考文献

Nakai, S. et al.(2012): A Snow Disaster Forecasting System (SDFS) constructed from field observation and laboratory experiments, *Cold Reg. Sci. Technol.*, **70**, 53-61.

Kawase, H., et al., (2016) : Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-016-1781-3.

謝辞

社会実装実験には、新潟県と長岡市に多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。本研究は「国立研究開発法人科学技術振興機構 イノベーション構築支援事業」及び「内閣府宇宙開発戦略推進事務局 平成 30 年度先進的な宇宙利用モデル実証プロジェクト」の一環で行われました。