

雪氷期における気象予測精度向上に向けた観測要素追加の提案について

中日本高速道路株式会社 金沢支社 高速道路事業部 施設課 館 誠一*¹、齊藤 想*¹

1. 概要

雪氷期におけるJPCZの局所的な予測は難しく、気象予報会社による降雪予測と現地の降雪実況を確認しながらの対応となる。特に気象急変による上振れに対しては、降雪予測や降雪実況、現在の路面状態を把握することが非常に重要である。併せて、無降水凍結による事故は、他支社管内含め発生しており、多重事故に繋がる可能性が高いことから、無降水凍結発生の予測精度向上も急務である。

これらを受けて、降雪の実況把握、路面状態、路面の滑りやすさ及び無降水凍結予測に寄与する露点を測定可能な気象観測局を試行的に導入し、新たな観測要素から得られる測定データの分析を行った。併せて、既設気象観測設備に対する観測要素の追加提案と雪氷対策の支援として、本観測要素の運用方法、気象予測の精度向上について報告を行うものである。

2. 現況と問題点

現在、現地の気象状況、路面状況の把握方法については、防災対策室からのCCTVによる降雪状況の監視、雪氷巡回での目視確認による報告等を実施している状況である。これらは、個人の感覚によるものが大きく、冬季の安全な道路交通を確保するためには、現地の気象状況や路面状態を定量的に表すなどして、悪天候時の状況を正確に把握することが求められる。

冬季の気象状況を把握するためには、観測要素の中でも降雪強度の把握が不可欠である。しかしながら、降雪強度の実測は容易ではない。現状、通行止め実施判断としては、3時間予報が除雪能力を超過しているか否かなど、雪氷運用上、時間降雪量を重要な要素として取扱っている。時間降雪量の実測は、図1に示す測定原理を持つ機器にて、時間降雪量を計測している。金沢支社管内の56箇所設置されている時間降雪量計にて常時、計測が可能な状況である。

一方で、降雪粒子は、雨滴よりも風の影響を受けやす

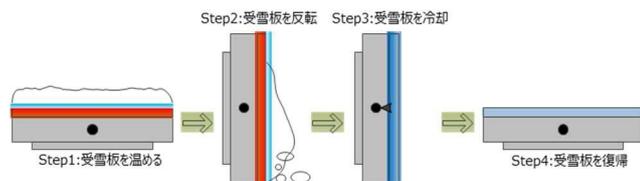


図1 時間降雪量計の測定原理

く、時間降雪量計への補足率が強風時ほど低下する。実際に一昨年度の雪氷期において、機器の構造上、豪雪時における助炭部（風よけ）への堆雪による受雪板の動作不良、強風時における受雪板への着雪不足など、計測精度の低下に関する事象も現地より報告された。このことから、時間降雪量の測定精度向上を目指すべく、抜本的な対策として、現在天気計（後述）を導入し、基準時間単位での時間降雪強度を計測することを提案した。

路面状態については、NEXCO標準の現状の既設気象観測局では、計測が出来ない。路面状態の把握については、水や氷、雪の膜厚について測定し、路面状態、路面滑り摩擦係数（以下、摩擦係数という。）を求めることで、目視で捉えていた路面状態を常時リアルタイムで数値管理することができる。

そこで、無降水凍結の予測、発生状況把握に必要な不可欠な路面状態の他、露点計の測定データを用いた予測精度の検証と雪氷体制支援への活用方法について検討を行うこととした。

3. 気象観測局の試行導入

(1) 試行導入機器

前述の課題を検証するために、追加した観測要素を具備した気象観測局を富山管内の庄川橋観測局近傍に試行導入し、検証を行うこととした。無降水凍結発生の可能性が高い鋼床版の橋梁部で川等の水源に近い場所かつ、近傍に既設の気象観測局がある場所を選定した。今回導入した気象観測局は写真1に示すとおりであり、観測要素は次の①～⑦である。

①現在天気計：

現在の天気をWMO（世界気象機関）コード39種類に分類出来るものである。感雨センサによって降水を感知し、前方散乱の光学的データと温度の計測値を合わせて情報処理することで、降水が雨か雪か、あるいはその他の降水現象かを判別する。また、時間降雪量を測定可能である。

②気温/湿度/露点温度計：

現在の気温、湿度計測の他、空気中の水蒸気を冷却したとき、結露または結氷が生じ始める温度（露点）を測定可能である。どの温度にも空気が保持できる水蒸気の最大量が存在する。この最大量を飽和水蒸気量と呼び、水蒸気量が飽和水蒸気量を上回ると、結露が

* 1 中日本高速道路株式会社 金沢支社 高速道路事業部 施設課



写真1 試行導入した気象観測局



図2 データ出力イメージ

4. 試行導入した気象観測局の信頼性について

(1) 現在天気計の測定精度

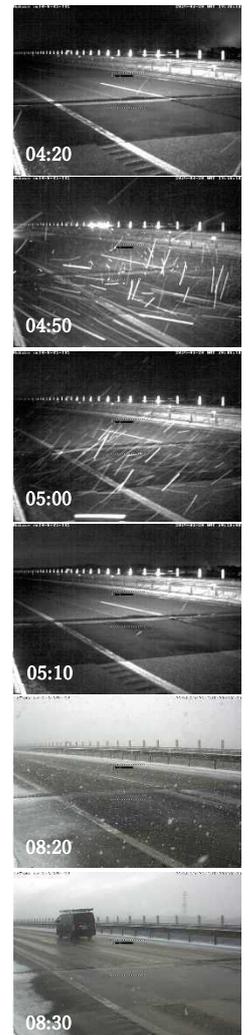
現在天気計の測定精度を確認するため、既設気象観測局（庄川観測局）での時間降水量と最寄りの気象庁の時間降水量を比較するとともに現在の天気を映像で確認した。比較結果は表1に示すとおりである。

なお、最寄りの気象庁の観測所は砺波観測所であり、今回設置した箇所から直線距離で約6.7km離れた箇所の計測データを採用した。気象庁の観測所での観測値で「—」は降水がない状態、「0.0」は、降水はあるが、0.5mmに足りない状態を示す。今回、試行導入

表1 計測降水量の比較

2024年3月21日

	現在天気計	庄川観測局	気象庁
4:00	0.0	0.0	—
4:10	0.0	0.0	—
4:20	0.4	0.0	—
4:30	0.0	0.0	—
4:40	0.0	0.0	—
4:50	1.5	0.0	—
5:00	2.1	0.0	—
5:10	0.3	0.0	—
5:20	0.0	0.0	—
5:30	0.0	0.0	—
5:40	0.0	0.0	—
5:50	1.8	0.0	—
6:00	2.1	0.0	0.0
6:10	0.2	0.0	0.0
6:20	0.1	0.0	0.0
6:30	0.0	0.0	—
6:40	0.0	0.0	—
6:50	0.0	0.0	0.0
7:00	0.0	0.0	0.0
7:10	0.0	0.0	0.0
7:20	0.0	0.0	0.0
7:30	0.0	0.0	0.0
7:40	0.0	0.0	—
7:50	0.0	0.0	—
8:00	0.0	0.0	—
8:10	0.0	0.0	0.0
8:20	21.4	0.5	0.0
8:30	9.7	0.5	—
8:40	0.0	0.5	—
8:50	0.0	1.0	—
9:00	0.0	1.0	—



が発生する。

③路面状態計：

路面状態を6分類（乾燥/湿潤/濡れ/雪/氷/シャーベット）可能。その他膜厚（水/氷/雪(mm)）、摩擦係数の測定が可能。

④路面温度センサ

⑤Webカメラ

⑥超音波式風向風速計

⑦データロガー

上記設備にて、以下の内容を観測し、これまで計測出来ていなかったデータの測定と時間降雪量については精度向上を目指すものとした。

- ・現在の天気把握（現在天気計）
- ・現在の降雪強度と予測（現在天気計）
- ・路面の状態（路面状態計）
- ・路面の滑りやすさ（路面状態計）
- ・露点（露点計）

(2) 測定対象箇所

測定対象路面は橋梁部（ジョイント部より橋梁側）で走行側の轍部を測定対象範囲とした。

(3) 測定データ出力イメージ

データロガーからサーバへデータを集約し、Web上で測定データを確認可能な環境とした。測定頻度は10分毎とし、各観測要素を組み合わせ、図2に示すとおりグラフ化を可能とし、カメラによる画像も併せて確認出来るものとした。また、グラフの下部には時間変化に応じて路面状態と現在天気を示す画面出力とした。

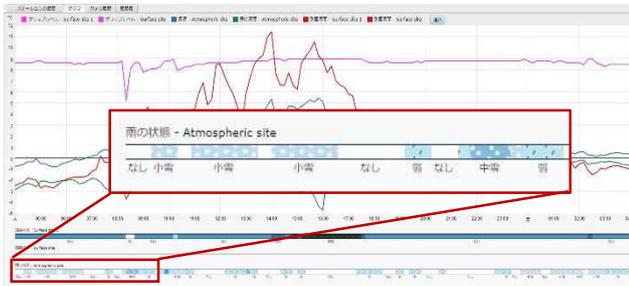


図3 現在天気計による降雨及び降雪の判別

した気象観測局に搭載されているWebカメラの画像も対象時間に併せて、比較したところ、既設の気象観測局や気象庁の観測所で検知出来ない降水を現在天気計では捉えられており、現在天気計が最も精度が高いことが分かる。併せて、既設の気象観測局及び気象庁の計測結果では、当該時間の降水が降雨か降雪か分からないが、現在天気計では図3に示すとおり、降雨か降雪かの判別に加え、降雪の強さまで判別出来ている。

(2) 摩擦係数別の路面状況について

路面状態計にて測定可能な摩擦係数の測定範囲は0.09~0.82で、数値が低いほど滑りやすい。ここでは、日中と夜間の路面状態の見え方と摩擦係数の関係について表2（日中）、表3（夜間）に整理した。

日中に関してはおおよそ、画像を見た印象と摩擦係数の数字に相関があることが分かる。なお、日中の0.3と0.2を比較した際、0.2の方が滑りやすい訳だが、0.3の方が路面に雪が堆雪し、滑りやすい印象を受ける。これは一見、路面が黒く見えても圧雪等、雪の状態により、路面の滑りやすさに変化があることを示している。一方、夜間に関しては降雪の状況にもよるが、路面状況を正確に判断することが難しい。画像や目視による判断は人の感覚を挟むことから、正確な状況を捉えづらくなるが、定量的に表すことで、現地状況を正確に把握出来ると考える。

5. 測定データの検証

(1) 現地気象状況について

今冬期の降雪量の多かった12月及び1月の特定の日について、今回試行導入した機器と既設気象での時間降雪量及び対象期間の累計降雪量を比較する。併せて、予報との差についても比較した。12月21日~23日の比較を図4、1月23日~26日の比較を図5に示す。いずれの場合も、今回試行導入した機器（現在天気計）のデータと比較する。

図4においては、既設気象の数値が急激に上振れる結果となった。既設気象の数値が大きく上振れている

表2 路面状態と摩擦係数（日中）

0.6	0.5
0.4	0.3
0.2	0.1

表3 路面状態と摩擦係数（夜間）

0.6	0.5
0.4	0.3
0.2	0.1

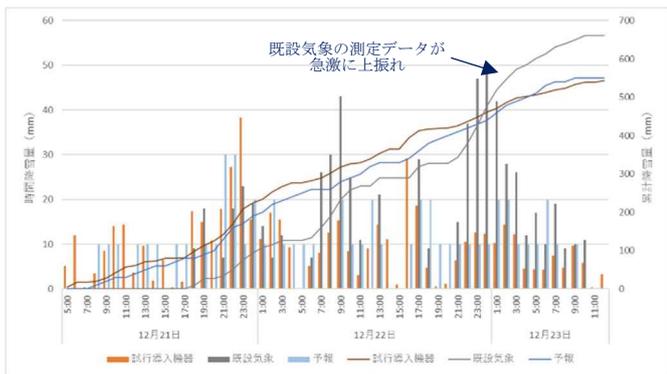


図4 時間降雪量・累計降雪量の比較（12月）



図5 時間降雪量・累計降雪量の比較（1月）



図6 既設時間降雪量計

原因として、降り始めの推移としては、同じ動きをしており、ある程度降雪が続いた中盤から降り終わりまでの間で大きく上振れていることから、既設の時間降雪量計の構造（図6）が、今回の計測結果に影響している。計測部の受雪板の周辺には助炭と呼ばれる風除けが付いており、そこに堆雪した雪が時間の経過とともに受雪板に落ちたり、受雪板に積もった雪と一体化したりして、受雪板の除雪動作が上手く働かなかったことが考えられる。

一方、図5の1月の降雪比較においては、推移の仕方は相似していることが分かる。なお、今回は、予報が大きく上振れ、既設気象での計測が出来ていないように読み取れる。予報が上振れている理由は、安全側に予報を発出したことが考えられる。既設気象が下振れている理由としては、受雪板での計測が上手くいかなかったことが原因と考えた。そこで、この期間の風速を確認したところ、平均風速7m程度の風が確認されたため、強風により、受雪板での補足率が低下したものと考察した。

(2) 現地路面状況について

路面状態計での測定結果から、路面状況の変化についても検証した。12月の降雪があった日の路面状態計で測定したデータ推移を図7に示す。当該日は、路面温度が氷点下以下となったが、水膜厚が氷・雪膜厚よりも厚く、薬液散布が効果的であったケースを示している。同時間軸で、摩擦係数を並べてみると、22:50に摩擦係数が0.2程度まで低下した時間帯があるが、図8に示すとおり、VPIS（車両位置情報システム）より、ダイアグラムを確認すると、緑線が薬液散布、赤線が除雪を示すが、22:50に薬液散布がされており、摩擦係数が回復したことが分かる。また、この時の路面状態について確認すると、23時頃で一度路面状態が凍結を示しているが、薬液散布後、濡れになっており、路面状態も問題ないことが見てとれる。その後、摩擦係数が0.3付近まで低下する時間帯もあるものの、除雪作業や明け方の薬液散布が影響し、明け方に向けて徐々に摩擦係数が回復していく傾向が見られた。

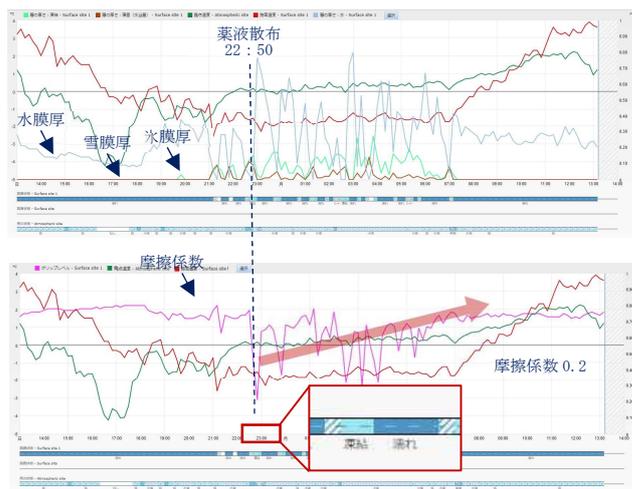


図7 路面状況の各膜厚及び摩擦係数

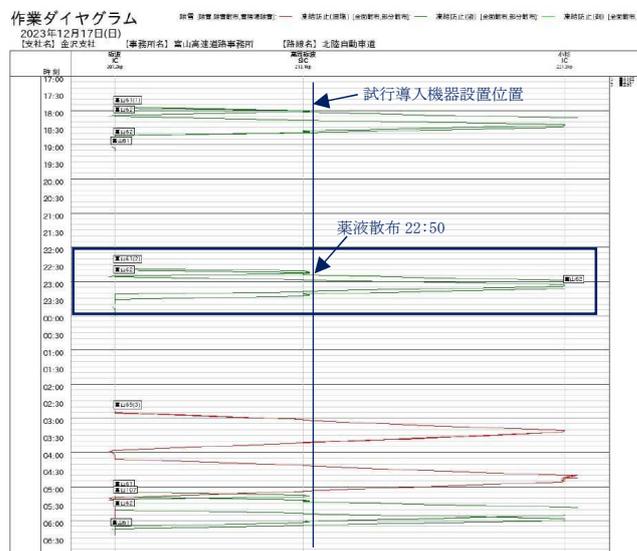


図8 作業ダイアグラム

(3) 無降水凍結について

降雪時の現地の気象状況や路面状況については前述のとおりであるが、ここでは、無降水凍結について検証した結果を示す。今冬期、無降水凍結の発生について予報された回数は、表4のとおりである。予報された際、実際に無降水凍結が発生のリスクがあったかどうかについて検証したところ、18/27回で発生リスクがあったことが分かった。なお、いずれも予報に基づき、適切に散布されていたことから、18回のうち実際に無降水凍結が発生した日はなかった。

一方で、無降水凍結発生の予報がなく、発生するリスクがあった日を表5に示す。該当日1日の路面温度、露点温度、各種膜厚の推移を図9に示す。赤線が路面温度、緑線が露点温度を示しているが、3:00頃から路面温度が露点温度より低くなり、4:00前に路面温度が0℃以下を示している。水色の線は水の膜厚を示しており、路面状態も濡れであり、凍結を示していないため、無降水凍結は発生していないが、発生リスクは十分にあったと考えられる。あくまで、気象予測は、無降水凍結の恐れがある気象条件になっていることを示しており、現地の実態とは異なる可能性が十分にあるため、注意する必要がある。

(4) アラート機能の有効性について

今回導入したシステムでは各種測定データにアラート機能を設定できる。実際の雪氷運用に活かすため、摩擦係数が低下の兆候が見られた際にアラートを発するよう設定することにした。

アラートの発生条件としては、摩擦係数が0.6以下となった場合に注意、0.4以下となった場合に警告のアラートを発するよう設定した。解除条件としては各値を1時間、継続した場合に解除するようにし、アラート機能

表4 無降水凍結発生についての予報回数

12月	1月	2月	3月	合計
6回	4回	13回	4回	27回

表5 予報がなく無降水凍結リスクのあった日

12月	1月	2月	3月	合計
1回	3回	3回	1回	8回

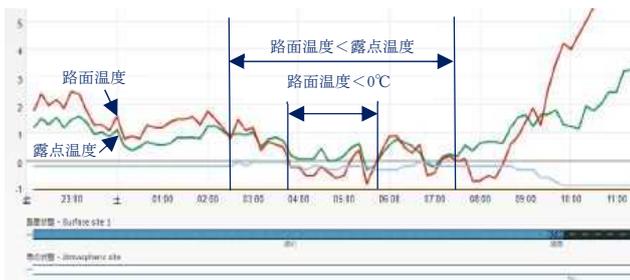


図9 無降水凍結リスクがあった日のデータ推移

の有効性について検証した。なお、機器設置後、道路管理に有効なアラート値について検証しながら進めたため、2024年1月25日の設定となった。ここでは、雪氷期後半の約2ヶ月に対して、アラート機能が有効であったかどうかについて、検証する。

表6はアラート機能を設定した日以降で、実際にアラートが発生、あるいは、リセットした日について取りまとめたものである。ここでは2月5日の雪氷作業について、アラート機能を踏まえた検証結果を図10に時系列で取りまとめた。当該日は、約4時間、0.4以下となったケースである。まず、12:40の薬液散布以降、路面滑り摩擦係数が低下していることから、散布量が少なかったか、途中で雪が発生していたため、効果が薄れたことが考えられる。また除雪後、18:00薬液散布のタイミングをもう少し早めていれば、より良い路面状態を確保出来ていたと言える。

表6 アラート発生日

凡例：アラート発生 ● アラート解除 ○

月日	時間	発生/リセット	0.6以下	0.4以下	解除までの時間
1月26日	6:23	発生	●		
1月26日	7:44	リセット	○		1時間20分
2月5日	14:12	発生	●		
2月5日	14:32	発生		●	
2月5日	19:23	リセット		○	4時間50分
2月5日	21:23	リセット	○		7時間10分
2月10日	22:53	発生	●		
2月11日	0:03	リセット	○		1時間10分
3月9日	20:23	発生	●		
3月9日	21:23	リセット	○		1時間00分
3月10日	2:43	発生	●	●	
3月10日	3:53	リセット	○	○	1時間10分

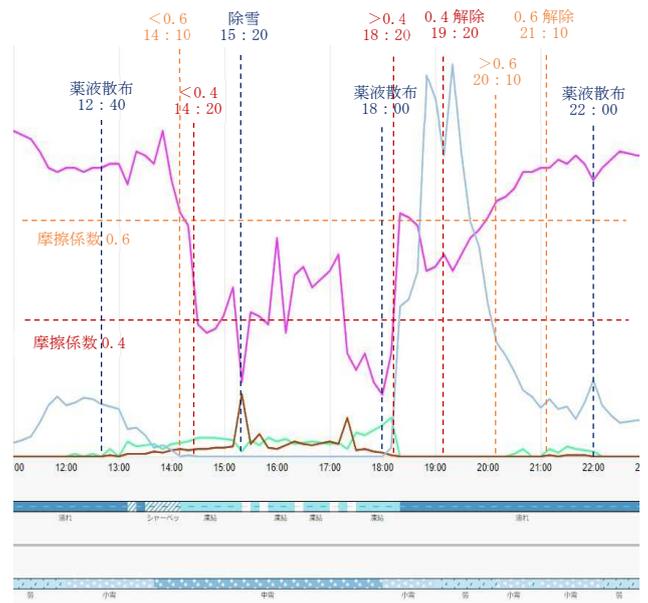


図10 アラート発生と雪氷作業との時系列

ここで、仮にアラート機能を用いて雪氷運用をした場合を考える。摩擦係数が0.6以下になった14:00で路面状況の注視を開始し、0.4以下になった14:20のタイミングで、薬液散布あるいは、除雪の準備を指示する。作業員の常駐期間で準備指示から、基地を1時間以内に出発出来ることを考えると、今回除雪したタイミングと同等のタイミングで、実施が可能と考える。次に路面状態が0.4以下に低下した、16:20頃に作業指示を行ったとすると、17:10に薬液散布あるいは除雪を実施することになり、今回散布した18:00よりも少し早いタイミングで作業を実施可能であり、より適切な路面管理が出来ると考える。このことから、アラーム設定値の妥当性と有効性について確認できたと考える。



図11 雪で固着したプロペラ式の風向風速計

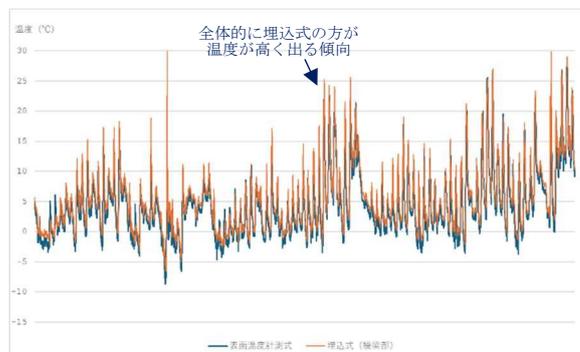


図12 表面温度計測式と埋込式（橋梁部）の差

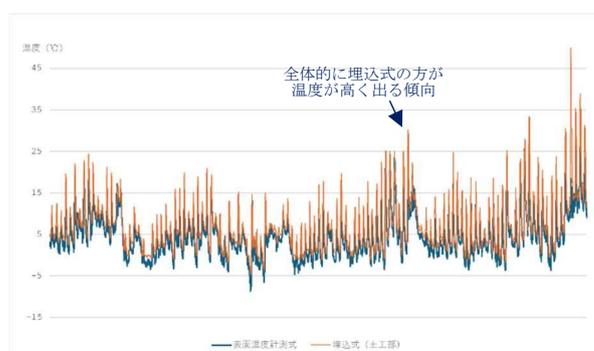


図13 表面温度計測式と埋込式（土工部）の差

6. その他観測要素に対する検証

(1) 超音波式風向風速計について

風向風速計については、これまでNEXCO標準であった稼働式（プロペラ式）の風向風速計に代わり、令和4年度に標準化された超音波式の風向風速計を採用した。プロペラ式の風向風速計では、図11に示すように豪雪時に雪による固着による原因で、観測出来ない状態が発生することがあった。また、監視中央側でもプロペラが回らないだけなので、故障の判別がつかない課題があった。今回、導入した超音波式の風向風速計での計測結果を1シーズン分確認したが、データ欠測もなく、問題なく計測出来ていることを確認した。また、気象業務法に基づく、測機の定期的な検定対応（1回/5年）についても、超音波式は不要であるため、風向風速計は超音波式を積極的に採用することとする。

(2) 路温計について

路温計については、NEXCO標準では埋込式であるが、今回は路面の表面温度が計測可能な路温計を採用した。埋込式については、橋梁部と土工部に設置しており、12月～3月末までの埋込式と表面温度計測式の計測結果の差について、図12, 13に示す。いずれも埋込式タイプの方が表面温度計測式に比べて、高く出る傾向が見てとれる。路面状況には、表面温度がより大きく関係しており、道路管理上、より安全側に出る表面温度計測式の方が適切と考える。

7. まとめ

今回、設置した気象観測局のデータについては、前述の検証の中で、信頼性が高いと判断できた。また、路面状況、気象状況の目視判断等により、実施してきた雪氷作業において、降雪強度や路面状況、摩擦係数等を用いて定量的に表すことで、合理的な雪氷運用における補助ツール

になり得ることも確認出来た。本センサ類は、既設気象観測局への取り込みも可能なことから、導入を進めていけば、気象急変箇所の現地状況が正確に把握でき、無降水凍結の頻発箇所には必要なセンサに絞り、設置すれば、より適切な路面管理が可能と考える。

また今回、測定データをリアルタイムで気象予測会社にも共有した。天気予報の精度は、予報を計算する上でデータの“多さ”が重要な要素となるが、今までの観測要素だけでなく、取り扱う観測要素の追加も必要である。降雪実況や露点温度などを学習させると予測精度が上がるのは間違いなく、予測モデルに実況を取り込むことで、予測精度向上に繋がる旨の意見も頂いている。

こうした意見を受け、全箇所を展開し、それらのデータを予報会社へ渡すことが出来れば、更なる予測精度向上が見込め、より適切な路面管理、一刻も早い初動体制の構築等、雪氷運用全体のスパイラルアップを見込むことが出来る。