

## (41) 3次元地物データを用いた広域路面雪氷状態 予測計算処理の高速化に関する研究

齊田 光<sup>1</sup>・藤本 明宏<sup>2</sup>・徳永 ロベルト<sup>3</sup>・高橋 尚人<sup>4</sup>・福原 輝幸<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)  
E-mail:saida-a@ceri.go.jp

<sup>2</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)  
E-mail:afujimot@ceri.go.jp

<sup>2</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)  
E-mail:roberto-1097ga@ceri.go.jp

<sup>4</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)  
E-mail:takahashi-n24k@ceri.go.jp

<sup>5</sup>正会員 国立大学法人 福井大学 大学院工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9-1)  
E-mail:fukuhara@u-fukui.ac.jp

本研究では道路沿道地物からの輻射フラックス計算方法の改良による高速な広域路面雪氷状態予測手法を提案するとともに、路面雪氷状態の計算精度検証を行った。また、提案法を用いた場合の計算時間について、輻射フラックスを厳密に計算した場合の計算時間と比較することで検討を行った。

その結果、提案法は路面雪氷状態の時間変化および空間変化を良好に再現することができ、路面すべり抵抗値の計算精度は輻射フラックスを厳密に計算した場合とほぼ同等であった。また、提案法を用いた場合の計算時間は輻射フラックスを厳密に計算した場合と比較して1/14～1/33まで短縮され、広範囲にわたる路面雪氷状態を従来より高速に予測可能となることが示された。

**Key Words :** winter road maintenance, road snow condition forecast, long wave radiation

### 1. はじめに

日本の約6割を占める積雪寒冷地域では、冬期特有の路面状態に起因する交通事故の防止や冬期道路管理の合理化・適正化は依然として重要な課題である。このような課題を解決するための1つの手段として、広域にわたる路面雪氷状態の予測（広域路面雪氷状態予測）は様々な研究機関で開発が行われている。

広域路面雪氷状態予測は統計的手法と熱収支法の2つに大別される。統計的手法は予測対象路線に設置された道路気象センサの計測データ等を説明変数として路面状態を推定する方法であり<sup>1)</sup>、この手法では精度を上げるために少なくとも数年にわたり路面温度や気象データ等を蓄積する必要がある。このためデータが未整備な区間の路面状態予測をに行うには長い準備期間を要する。一方、熱収支法は舗装や路面雪氷層に出入りする熱および雪氷層の質量の収支を解くことで路面雪氷状態（積雪深、

含水・含氷率）を計算する手法である<sup>2)</sup>。従来の熱収支法では、道路周辺の地形や建築物（沿道地物）などが路面状態に及ぼす影響を考慮するために複数回の路面温度計測（サーマルマッピング）等を行う必要があり、多大な費用を要する。実際に、熱収支法による路面雪氷状態予測は北海道で実用化されている<sup>3)</sup>が、その延長は北海道の一般国道の総延長約6700kmのうち約600kmに留まっている。

このような背景から、筆者らは路面雪氷状態予測を行うための事前準備に係る費用・労力を大幅に削減できる手法を提案した<sup>4)</sup>。本手法は図-1に示すようにデジタル地形データを用いて沿道地物が道路微気象に与える影響を計算する。そのためにサーマルマッピングを必要とせず、本手法は従来手法と同程度の精度での路面温度予測に加えて路面雪氷状態および路面すべり易さの予測を可能とした<sup>5)</sup>。その反面、デジタル地形データを用いて沿道地物が道路微気象などに及ぼす影響を計算するために

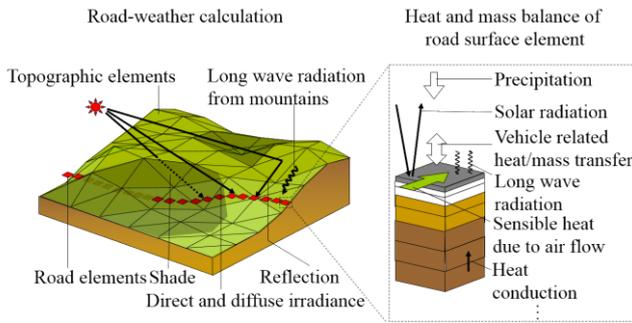


図-1 デジタル地形データを用いた路面雪氷状態計算の概要

は長時間を要することが明らかとなっている<sup>6)</sup>。このため、迅速な対応を要求される冬期道路管理や大規模なデータ処理が必要な交通事故分析に本手法を適用するためには計算精度を損ねることなく計算時間を短縮することが必要である。

そこで本研究では、デジタル地形データを用いた広域路面雪氷状態予測手法の課題である計算に要する時間を改善するために、

- (1) 沿道地物が路面雪氷状態に与える影響の計算手法を改良する、
- (2) 構築した手法を用いて路面雪氷状態計算を行い計算値と実測値を比較することで計算精度を検証する、
- (3) 構築した手法による計算時間の短縮効果を明らかにすることを目的とする。

## 2. 広域にわたる路面雪氷状態の高速計算方法

### (1) 路面雪氷状態の予測手法

本研究で提案する路面雪氷状態の計算手法は、以下の4つの計算プロセス、すなわち、1)沿道地物を考慮した道路気象計算、2)路面熱収支計算、3)路面雪氷層を構成する水・氷・空気の状態計算および4)HFN（路面すべり抵抗値<sup>7)</sup>）の計算から成る手法<sup>8,9)</sup>を基とする。以下にその詳細を述べる。

道路気象計算では沿道地物の形状をデジタル地形データ等を用いて三角形要素の集合体として再現し、沿道地物による日射の遮蔽、反射および輻射による影響を求める（図-1左側）。

路面熱収支計算では路面雪氷層および舗装を模した計算要素に入出入りする熱量を計算し、各計算要素の温度を求める。路面雪氷層の温度は日射や降水等の気象要因、雪氷層からの水分蒸発や昇華等の相変化に伴う要因、雪氷層の飛散や排水など質量変化に伴う要因、地盤からの熱伝導など種々の要因を考慮して求める（図-1右側）。なお、初期の舗装および地盤温度は計算対象地点の気象平年値を用いた熱収支計算の定常値を与えることで、サ

ーマルマッピングを必要としない。

路面雪氷層の体積収支計算では、雪氷層が氷、水および空気の3つの成分で構成されているものとし、各成分の体積収支を求める。

最後に、HFNは上記3)のプロセスで得られた路面雪氷状態計算結果を用いて求められる。

以上の計算が完了すると路面温度や路面雪氷状態の空間・時間分布が出力される。

### (2) 沿道地物からの輻射フラックス計算の高速化

既往の研究では、道路周辺の地形や建築物からの輻射は路面温度に少なからず影響を及ぼしていることが指摘されている。たとえば、高橋らは一般国道5号線で沿道地物からの輻射を考慮した場合と考慮しない場合において路面温度予測をそれぞれ行い、沿道地物による影響を考慮した場合は路面温度予測精度が1.7°C改善することを報告している<sup>8)</sup>。このため、路面温度や路面雪氷状態を精度良く予測する上で沿道地物からの輻射を考慮することは必要不可欠である。

従来の手法<sup>4)</sup>では、計算地点  $i$  に入射する輻射フラックス  $q_{lds}$  は道路周辺に  $n$  個存在する沿道地物要素  $j$  の表面温度  $T_{s,j}$ 、沿道地物要素表面の放射率  $\epsilon_j$ 、ステファン-ボルツマン定数  $\sigma$  および輻射フラックス計算地点  $i$  - 沿道地物  $j$  間の形態係数  $f_{ij}$  を用いて式(1)で算出される。

$$q_{lds} = \sum_{j=1}^n \left\{ f_{ij} \epsilon_j \sigma (T_{s,j} + 273.15)^4 \right\} \quad (1)$$

式(1)のうち、 $\sigma$  および  $f_{ij}$  は時刻の経過にかかわらず一定であるが、 $T_{s,j}$  および  $\epsilon_j$  は気温や日射等の影響を受け時々刻々と変化する。従って、 $q_{lds}$  を求めるためには  $n$  個の沿道地物要素における時刻毎の  $T_{s,j}$  および  $\epsilon_j$  を計算する必要がある。 $n$  は地形解像度を上げることで大きくなり、例えば地形解像度5~10m程度のデジタル地形データを用いて計算対象地点から1km以内の沿道地物を考慮した  $q_{lds}$  を求める場合、 $n$  は数十から数百に達する。さらに、 $T_{s,j}$  および  $\epsilon_j$  を求めるためには多数の時間ステップにわたり熱収支計算を繰り返す必要があるため、 $q_{lds}$  を求めるために必要な  $T_{s,j}$  および  $\epsilon_j$  の計算には多大な時間を要する。

そこで、本研究で提案する手法では  $T_{s,j}$  および  $\epsilon_j$  の計算に要する時間を短縮するために、 $n$  個の沿道地物要素における  $T_{s,j}$  および  $\epsilon_j$  の計算過程を1つの仮想地物要素で集約して行い、計算地点  $i$  における  $q_{lds}$  は仮想地物要素のみから受け取ると仮定する。仮想地物要素における気象要素などは  $n$  個の沿道地物要素  $j$  における値を  $f_{ij}$  によって加重平均したものとし、仮想地物要素の表面温度  $T_{s,vir}$  および放射率  $\epsilon_{vir}$  を求めた後に  $q_{lds}$  を次式で求める。

$$q_{lds} = f_{i-all} \varepsilon_{vir} \sigma (T_{s,vir} + 273.15)^4 \quad (2)$$

ここに、 $f_{i-all}$  : 計算地点  $i$  と  $n$  個の沿道地物要素間の形態係数の和である。

### 3. 計算精度および計算速度の検証方法

#### (1) 路面雪氷状態の計算精度

路面雪氷状態の計算精度検証は、福井県福井市江守の里を通過する県道182号線、253号線および市道を対象として行った。検証では、路面雪氷状態を表す指標の1つであるHFNの分布を2014/2/8 0:00から29 9:00にわたり従来法および輻射フラックス計算を簡略化した手法（提案法）でそれぞれ計算した。次に、同路線で計測されたHFN分布実測値と比較し考察を行うとともに、HFN計算値の絶対誤差を求めた。また、参考として輻射を考慮しない場合についてもHFN計算値の分布および絶対誤差を求めた。HFNの計算では、福井地方気象台で同時刻に計測された気温、相対湿度、降水量、風速および福井大学構内で計測された日射および長波放射フラックスを、対象路線付近の複数地点に設置されたビデオカメラから得られた時間交通量をそれぞれ用いた。なお、計算では沿道地物形状データとして空間解像度5mの航空レーザ測量データを用いた。また、HFN実測値は連続路面すべり抵抗測定装置<sup>7)</sup>を用いて2014/2/8 10:50, 14:10, 17:10および29 8:10に測定した値を用いた。

#### (2) 路面雪氷状態の計算時間

路面雪氷状態の計算時間は、表-1に示す路線を対象として従来法と提案法により24時間にわたる輻射フラックスおよび路面雪氷状態を計算し、計算に要した時間を求めた。また、北海道札幌開発建設部管内および北海道全地域の路面雪氷状態計算では、沿道地物データとして国土地理院 基盤地図情報数値標高モデルを基に作成した空間解像度50mのデジタル地形データおよび株式会社ゼンリンが発行するデジタル住宅地図データに含まれる建築物形状データを用いた。なお、計算時間の検証はワー

クステーション（富士通 CELSIUS R940, CPU : Intel Xeon E5-2650 v3×2, メモリ : 32GB）を用いて行った。

### 4. 検証結果および考察

図-2に計算精度検証対象路線における2014/2/8 14:10のHFN実測値 $HFN_{obs}$ 、従来法および提案法によるHFN計算値 $HFN_{calc}$ および $HFN_{calcF}$ の空間分布を示す。なお、図中濃灰色で示す区間はトンネルを、薄灰色で示す区間はカーブによりHFNが正確に計測できなかった区間をそれぞれ示す。また、同図には沿道地物による輻射の影響を考慮しない場合のHFN計算値 $HFN_{calcN}$ を合わせて示す。検証対象期間中の天候は2/8 4:00から13:00まで雪、その他の時間では曇であった。このため、2/8 14:10には交通量が多い平地および市街地区間（0.0~0.7kmおよび2.2~3.4km）では路面雪氷層の融解および飛散による積雪深の減少・ $HFN_{obs}$ の上昇が見られた。一方で山地区間（1.0~2.2km）では日射や車両通過に伴う積雪深の減少量が少なく、 $HFN_{obs}$ は概ね40程度であった。 $HFN_{calc}$ は3km付近など一部区間で日射遮蔽による融雪量を過大に見積もったために $HFN_{obs}$ より小さい値となったが、その他の区間では概ね $HFN_{obs}$ と同様の傾向を示した。また、 $HFN_{calcF}$ は0.6kmから0.7kmにわたる区間を除いて $HFN_{calc}$ とほぼ同じ値となった。なお、 $HFN_{calcN}$ に着目すると $HFN_{calc}$ および $HFN_{calcF}$ より大幅に低くなる区間が出現し、計算精度は従来法および提案法と比較して低くなった。この理由としては沿道地物からの輻射を考慮しないことにより路面に

表-1 計算時間の検証対象地域および路線の概要

計算対象地域 および路線	路線 延長(km)	沿道地物 解像度	計算ステッ プ (sec.)
福井市南部 (3.1)と同一路線	3.4	5m	1
北海道札幌開発 建設部管内 一般国道	1030	50m+建築 物データ	10
北海道全地域 一般国道	6659	50m+建築 物データ	10

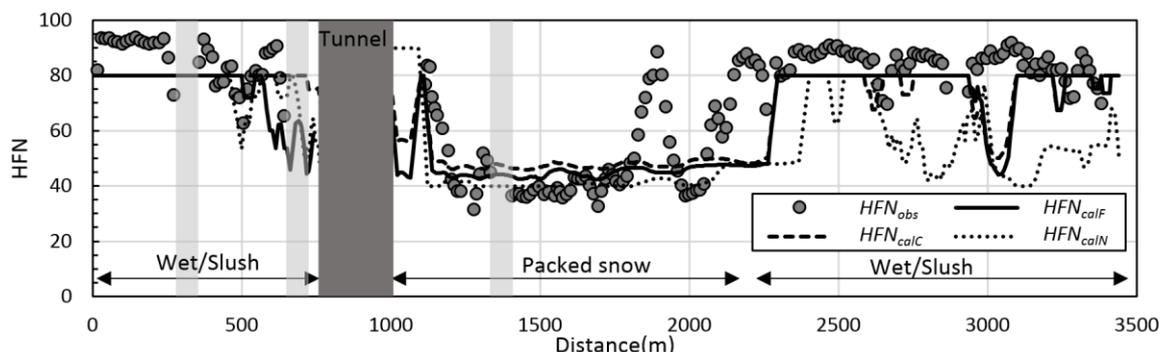


図-2 計算精度検証対象区間における HFN 実測値および計算値の空間分布 (2014/2/8 14:10)

表-2 計算精度検証対象路線における従来法および提案法による HFN の計算誤差

日時	計算誤差		
	従来法 ( $HFN_{calc}$ )	提案法 ( $HFN_{calc}$ )	輻射考慮なし ( $HFN_{calc}$ )
2014/2/8 10:50	7	8	6
2014/2/8 14:10	10	9	17
2014/2/8 17:10	13	14	20
2014/2/9 8:10	8	8	19
全時刻平均	9	10	15

入射する熱量が小さくなり、路面雪氷層の融解が進まなかったためである。このことから、沿道地物からの輻射を考慮することは路面雪氷状態を正確に予測する上で必要不可欠であることが改めて確認された。

表-2は検証対象期間における $HFN_{calc}$ 、 $HFN_{calc}$ および $HFN_{calc}$ の計算誤差を示す。 $HFN_{calc}$ の計算誤差は時刻によってやや異なるが、全時刻にわたる計算誤差は9であり概ね良好に $HFN_{obs}$ を計算することが出来た。また、 $HFN_{calc}$ の計算誤差は $HFN_{calc}$ の計算誤差と同程度の値であった。これらの結果から、本論文で提案する広域路面雪氷状態予測手法は従来の手法と同程度の計算精度を有することが示された。

表-3は従来法および提案法を用いて計算速度検証対象路線の路面雪氷状態計算に要した時間および提案法による計算時間の短縮率を示す。福井市南部の計算対象路線における計算時間は従来法では66.3分、提案法では2.6分であり、提案法を用いた場合の計算時間は従来法と比較して1/25まで短縮された。また、提案法を用いた時の札幌開発建設部管内および北海道全域の一般国道の路面雪氷状態計算に要した時間はそれぞれ65.2分および420.5分であり、計算時間はそれぞれ従来法の1/14および1/33であった。輻射フラックス計算を簡略化した場合の計算時間短縮効果は、北海道内の全一般国道を対象としたケースにおいて最も大きく、札幌開発建設部管内の全一般国道を対象としたケースにおいて最も小さくなった。提案法による計算時間短縮効果が各計算ケースで異なる理由としては、計算対象路線および計算対象地点毎に $n$ が異なり、考慮すべき沿道地物要素数の減少量に差が生じたためである。

以上の結果より、本論文で提案する広域路面雪氷状態予測手法は従来法と比較して計算時間を大幅に短縮することが可能であることが示された。

## 5. おわりに

本研究では、路面雪氷状態を広域にわたり高精度・安価かつ高速に予測する手法を開発することを目的として、

表-3 従来法および提案法による計算時間の比較

計算対象地域 および路線	計算時間 (分)		(B)/(A)
	従来法 (A)	提案法 (B)	
福井市南部 (3.(1)と同一路線)	66.3	2.6	1/25.3 (3.9%)
札幌開発建設部管内 一般国道	924.3	65.2	1/14.2 (7.1%)
北海道全地域 一般国道	13810.9	420.5	1/32.8 (3.0%)

沿道地物からの輻射フラックス計算を改良した熱収支法による広域路面雪氷状態予測手法を提案した。また、提案した手法について路面状態の計算精度および計算時間について検証を行った。その結果、本研究で提案する広域路面雪氷状態予測手法は従来法とほぼ同等の計算精度を有し、かつ計算時間は従来法の1/14~1/33まで短縮可能であることが示された。今後は路面雪氷状態計算の並列化などによる更なる計算の高速化を試みる。

## 参考文献

- 1) 例えば；須田公男，水嶋正二，赤川正臣：一般国道8号，17号の路面凍結予測について，日本雪氷学会誌，Vol. 50，No.3，pp.155-163，1988.
- 2) 例えば；Chapman, L., Thones, J. E. and Bradley V.A.: Modeling of road surface temperature from a geographical parameter database, Part 2: Numerical, *Meteorological Applications*, Vol.8, pp.421-436, 2001.
- 3) 高橋尚人，徳永ロベルト，浅野基樹，石川信敬，林華奈子：我が国の冬期道路管理に適した MDSS (Maintenance Decision Support System)の構築と運用，寒地技術論文・報告集，Vol. 23，pp.307-312，2007.
- 4) 齊田光，藤本明宏，福原輝幸：熱収支法による広域路面温度予測モデル-乾燥路面の路線温度分布予測-，土木学会論文集 E1(舗装工学)，Vol.69，No.1，pp.1-11，2013.
- 5) 齊田光，田中雅人，藤本明宏，寺崎寛章，福原輝幸：広域路面滑り-雪氷状態予測モデル-，日本雪氷学会誌，Vol.32，No.1，pp.1-16，2016.
- 6) 齊田光，藤本明宏，福原輝幸：地形データ解像度が路線温度の計算の時間と精度に及ぼす影響，日本雪氷学会誌，Vol.29，No.1，pp.36-45，2013.
- 7) 徳永ロベルト，舟橋誠，高橋尚人，浅野基樹，中野雅充：連続路面すべり抵抗値による冬期道路管理の高度化に関する研究，寒地土木研究所月報，No.661，pp.11-18，2008.
- 8) 高橋尚人，徳永ロベルト，佐藤隆光，石川信敬：沿道構造物の影響を考慮した路面温度推定モデルの構築について，寒地技術論文・報告集，Vol. 22，pp.153-158，2006.