

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510200

研究課題名(和文)都市域対応型広域路面温度予測モデルの開発

研究課題名(英文)Development of wide area road surface temperature forecasting model for urban area

研究代表者

福原 輝幸 (Fukuhara, Teruyuki)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10156804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,400,000円、(間接経費) 1,320,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、道路および沿道構造物をコンピュータ上で処理し、沿道構造物のが路面温度に及ぼす熱的影響を計算するモデルを構築した。

本モデルによる路面温度誤差の観測期間に亘る空間平均誤差は1.5度であり、実際の路面温度を精度よく計算することができた。また、日射量および長波放射量の計算値は路線の大部分で実測値と概ね一致し、沿道構造物による影響を正しく計算することができた。

本モデルは日射遮蔽、反射および輻射計算に用いる地形データの解像度を10m以上とし、道路から離れた山岳地形の計算省略を行うことで路面温度計算精度と計算時間短縮の両立が可能であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Wide area road surface temperature forecasting model was proposed in this study allows to forecast the road surface temperature along a road network using the DSM and heat balance method.

The mean absolute error of road surface temperature over the entire route was 1.5 degree celcius.

This model can calculate road surface temperature accurately with DSM which spatial resolution is greater than 10m. CPU time with an algorithm to combine mountain elements and to remove invisible mountain elements from calculation routine was reduced without the algorithm.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：土木計画学・交通工学

キーワード：広域路面温度予測 熱収支法 冬期道路管理

1. 研究開始当初の背景

積雪寒冷地域では、冬期の気温低下や降雪によって雪氷路面が出現し、交通事故や渋滞、立往生の原因となる。このため、除雪や凍結防止剤散布による道路管理は必要不可欠であるが、一方で道路雪氷対策予算は減少傾向にあり、除雪および凍結防止の最適化は重要な課題となっている。

路線縦断方向の路面温度や道路雪氷状態を予測し、除雪や凍結防止剤散布の最適化を支援するモデル(広域路面雪氷状態予測モデル)の道路管理への利用はこれらの問題を解決する手段の1つとして期待されているが、予測精度や予測解像度に解決すべき課題があり、実用化には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、従来の広域路面雪氷状態予測モデルが持つ課題を解決するために、

- (1) 沿道構造物が路面に与える影響を考慮した広域路面温度予測モデルの開発
- (2) 通過車両が路面に与える影響を考慮した広域路面温度予測モデルの開発
- (3) 高解像度地形データを用いた路面温度予測精度および予測解像度の改善
- (4) 計算高速化アルゴリズムの開発を目的とした。

3. 研究の方法

本研究は以下に示す方法で行われた。

- (1) 沿道構造物が路面に与える影響を考慮した広域路面温度予測モデルの開発
沿道構造物が路面に与える熱的影響を考慮するために、道路線形、地形形状や標高などをデジタルデータで表現し、沿道構造物による日射の遮蔽、反射および輻射が路面温度に及ぼす影響を計算する手法について検討を行った。また、日陰における日射量の予測手法を散乱日射量計測実験により開発し、広域路面温度予測モデルに用いることで路面温度予測精度の改善を行った。
- (2) 通過車両が路面に与える影響を考慮した広域路面温度予測モデルの開発
通過車両による日射の遮蔽、輻射および風

速の変化が路面温度に与える影響を計算するアルゴリズムを(1)で開発したモデルに組み込むことで、交通量を考慮した広域路面温度モデルを開発した。

さらに、兵庫県北近畿豊岡自動車道において路面温度および道路微気象の線的計測を行い得られた実測値と計算値を比較することで開発したモデルの妥当性検証を行った。

(3) 高解像度地形データを用いた路面温度予測精度および予測解像度の改善

沿道構造物による局所的な日射遮蔽および反射が路面温度に及ぼす影響を予測するために、高解像度な地形データを用いた予測精度の改善について検討を行った。同時に、地形解像度と予測精度の関係について数値計算を用いた検証実験を行った。

(4) 計算高速化アルゴリズムの開発

(3)で挙げた高解像度地形データを用いた広域路面温度予測を高速に行うために、地形形状の正確な表現と地形データ量削減の両立が可能なアルゴリズムを開発し、計算精度と計算時間削減効果の関係について数値計算を用いた検証実験を行った。

4. 研究成果

(1) 沿道構造物が路面に与える影響を考慮した広域路面温度予測モデルの開発

本研究では、図1に示すようにデジタル標高データおよび道路線形データを用いて道路および沿道構造物をコンピュータ上で処理し、太陽方位角および高度と道路および沿道構造物の位置関係から路面に入射する日射量および長波放射量を計算するモデルを構築した。本モデルは路線の各地点において沿道構造物による日射遮蔽、反射および輻射が路面に入射する日射量および長波放射量に与える影響を計算し、舗装および地盤温度計算を行うことで路面温度の予測を行う。

(2) 通過車両が路面に与える影響を考慮した広域路面温度予測モデルの開発

(1)で開発したモデルに車両通過に伴う日射量、長波放射量および風速変化を定量的に評価するモデルを組み込み、交通量が路面温

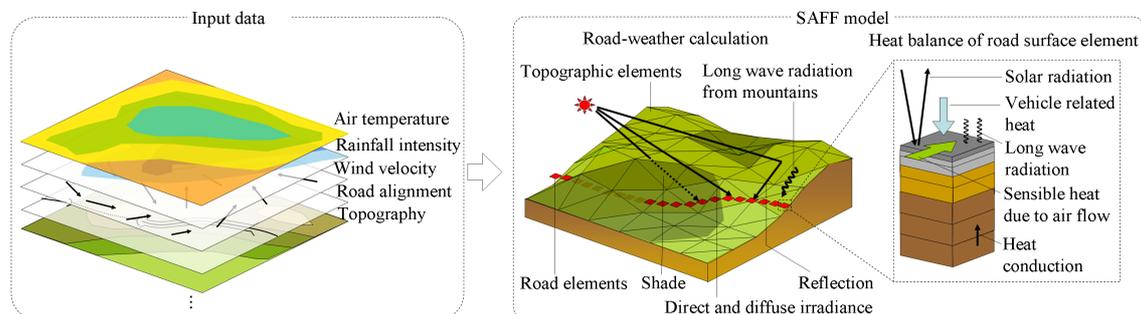


図1 沿道構造物が路面に与える影響を考慮した広域路面温度予測モデルの概要

度に及ぼす影響を考慮した広域路面温度予測モデルを構築した。

また、兵庫県北近畿豊岡自動車道 青垣 IC ~ 山東 IC(12.6km)を対象として路面温度、日射量および長波放射量の計算精度検証実験を行った。実験では、計測機器を搭載した車両で上記区間を走行し、路面温度、日射量および長波放射量の線計測を 48 時間にわたり行った。また、国土地理院が発行する数値標高データ(空間解像度 50m)、GPS による道路線形データ、道路交通センサによる交通量測定結果および定点気象観測によって得られた気象データを用いて上記区間の路面温度計算を行い、線計測により得られた結果と比較することでモデルの計算精度について検証を行った。

図 2 は北近畿豊岡自動車道 青垣 IC ~ 山東 IC における路面温度 T_s 、日射量 q_{sd} および長波放射量 q_{ld} の実測値と計算値の空間変化を示す。 T_s の実測値 T_{s-obs} (図中○)は 10 から 18 の範囲で大きく変化した。

区間(a)では、 T_s の計算値 T_{s-cal} (図中実線)と T_{s-obs} はともに 16 前後で、その差は 0.5 未満であった。 q_{sd} の計算値 q_{sd-cal} (図中破線)と実測値 q_{sd-obs} (図中△)および q_{ld} の計算値 q_{ld-cal} (図中点線)と実測値 q_{ld-obs} (図中□)もそれぞれ良好に一致したことから、日向・日陰判別および形態係数の計算は妥当であったと判断される。

区間(c)では、日中の大半が日陰となったことが原因で、 T_{s-obs} は約 13 および q_{sd-obs} は約 50W/m² となり、他の区間と比較して小さい値となった。 q_{ld-obs} は 330W/m² であった。一方 T_{s-cal} q_{sd-cal} および q_{ld-cal} はそれぞれ 12.1、40W/m² および 325W/m² となり、実測値とほぼ一致した。

区間(b)のうち 46.8 キロポスト付近では、区間(c)と同様に道路に隣接する山による日射遮蔽によって局所的に T_{s-obs} および q_{sd-obs} は 10.6 および 45W/m² のような小さな値が現れた。一方、 T_{s-cal} および q_{sd-cal} はそれぞれ 14.1 および 193W/m² であり、実測値より大きくなった。これは、山による日陰(約 30m)が、DSM の解像度(50m)以下で変化したため

に、日射遮蔽が正しく判別されなかったことに起因する。

区間(b)では全体的に T_{s-cal} 、 q_{sd-cal} および q_{ld-cal} は T_{s-obs} 、 q_{sd-obs} および q_{ld-obs} をそれぞれ良好に再現した。しかしながら、42.0 キロポストから 43.0 キロポストの区間では、道路に隣接する樹木により日射がスパイク状に遮蔽されたために T_{s-obs} は 12 から 16 の範囲で、 q_{sd-obs} は 30W/m² から 220W/m² の範囲でそれぞれ大きく変化した。同区間における T_{s-cal} および q_{sd-cal} の計算値は 15~17 および 50~220W/m² となり、 T_s と q_{sd} をそれぞれ過大評価した。これは 46.8 キロポスト付近と同様の理由(解像度の粗さ)により局所的な日陰が見落とされたことによる。

本モデルによる路面温度誤差の観測期間に亘る空間平均誤差は 1.5 であり、実際の路面温度を精度よく計算することができた。また、日射量および長波放射量の計算値は路線の大部分で実測値と概ね一致し、沿道構造物による影響を正しく計算することができた。

(3) 高解像度地形データを用いた路面温度予測精度および予測解像度の改善

(2)で開発した広域路面温度予測モデルに入力する地形データとして、主に河川管理業務に用いられている航空レーザ測量データ(LP データ、最大空間解像度 1m)を用いて地形解像度が路面温度予測精度に及ぼす影響の評価実験を行った。

本実験では福井市合谷町において路面温度および路面微気象の線計測を行い、得られた実測値と広域路面温度予測モデルによる計算値を比較した。広域路面温度予測モデルに用いる地形データの解像度は 3,5,10,20,30 および 50m の 6 種類とし、それぞれについて路面温度計算精度を求めた。

地形解像度 $R=3m$ の T_{s-cal} は市街地を除いて概ね路面温度実測値 T_{s-obs} と一致し、地形および沿道地物による日陰の影響を再現することができた。市街地における計算では T_s が小刻みに変動することは再現できたが、 T_{s-cal} の変動幅(5~7)は T_{s-obs} のそれより大きくなっ

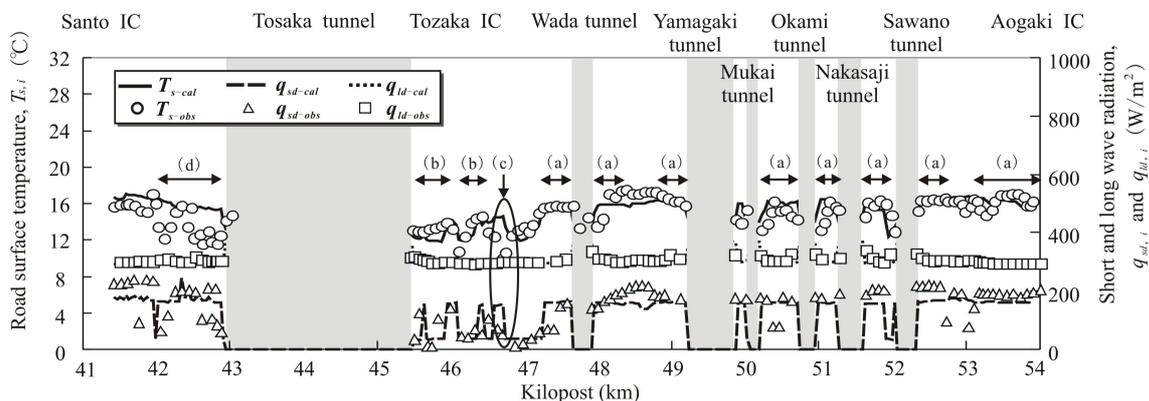


図 2 北近畿豊岡自動車道における路面温度、日射量および長波放射量の実測値および計算値

た．これは，道路近傍の樹木による日射の部分的な透過が考慮できなかったことに起因する． $R=5\text{m}$ および 10m の T_{s-cal} は概ね $R=3\text{m}$ の T_{s-cal} と同様な路線分布を示したが，市街地に加え山地の一部で路面温度計算誤差 ΔT_s が増大した．

$R=20\text{m}$, 30m および 50m の T_{s-cal} は平地で T_{so} と良好な一致を見たが，市街地および山地では局所的に ΔT_s の絶対値 $|\Delta T_s|$ が 2 を超えた．

表 1 は R および時刻毎の $|\Delta T_s|$ の区間平均誤差 $|\overline{\Delta T_s}|$ ，すなわち全道路要素数の $|\Delta T_s|$ の平均値を示す． $|\overline{\Delta T_s}|$ は日中に比べて夜間に小さくなり易い．また，夜間の $|\overline{\Delta T_s}|$ は R に殆ど依存せず 1 以下となった．

以上の結果より，路面温度予測精度は地形解像度に比例して高くなり，市街地の路面温度予測には解像度 10m 以上の地形データを用いることが望ましいことが明らかとなった．一方で，平地における地形データ解像度は路面温度予測精度に大きな影響を及ぼさないことが示された．

(4) 計算高速化アルゴリズムの開発

路面における日射量および長波放射量に及ぼす地形の影響は，路面 - 沿道構造物間の形態係数 f に大きく左右される． f は道路路面要素 - 山岳面要素間の距離 r の 2 乗に反比例して小さくなる．そこで， r が大きくなるにつれて山岳面要素を大きく(山岳面要素数を削減)しながらも，山岳の形状をできるだけ正確に表現するために，本モデルでは結合基準距離 r_s を前もって複数(x 個)設定し($r_{s1} < r_{s2} < \dots < r_{sn}$)，図 3 のように， $r < r_{s1}$ ， $r_{s1} < r < r_{s2}$ ， \dots ， $r_{sx} < r$ に従って，段階的に異なる大きさの山岳面要素を結合し，要素数の削減を行った．

また，図 4 のように道路路面要素 E_r から山岳面要素 E_{s1} へ向けて発した 1 つの走査線が， E_{s1} の手前にある E_{s2} と交差する場合， E_{s1} は E_r から不可視となる．この場合， E_{s1} から E_r

に向かう反射日射および輻射は E_{s2} によって遮蔽されるため E_r に熱的影響を及ぼさない．従って，全ての道路路面要素に対して不可視な山岳面要素(不可視面要素と呼称)は，計算の対象外となる．本モデルでは不可視面要素に係わる計算を省略することで，計算の高速化を試みた．

表 2 は計算高速化手法適用時および非適用

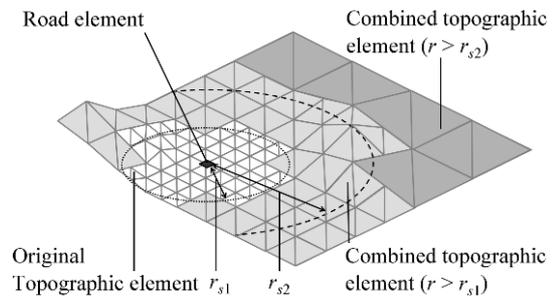


図 3 要素結合基準距離と要素サイズの関係

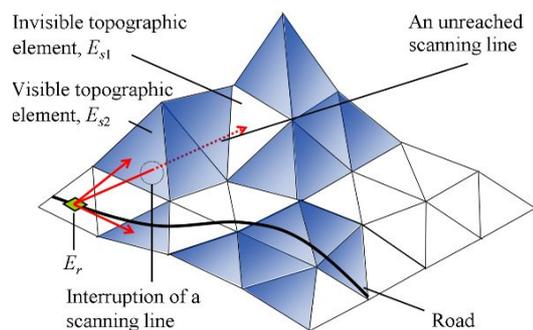


図 4 可視および不可視面要素の判別方法

表 1 地形解像度および時刻毎の路面温度予測誤差

地形解像度, R (m)	路面温度予測誤差, $ \overline{\Delta T_s} $ ()					
	3m	5m	10m	20m	30m	50m
11/4 12:00	2.24	2.18	2.32	3.11	3.24	3.05
11/4 15:00	1.90	1.71	1.83	2.76	2.90	2.69
11/4 18:00	0.67	0.69	0.67	0.86	0.87	0.85
11/4 21:00	0.69	0.67	0.67	0.72	0.73	0.72
11/5 00:00	0.81	0.76	1.00	0.75	0.74	0.76
11/5 06:00	0.44	0.39	0.37	0.38	0.37	0.38
11/5 09:00	1.39	1.31	1.25	1.23	1.23	1.23
全時間平均	1.16	1.10	1.16	1.40	1.44	1.38
日中	1.55	1.47	1.52	1.99	2.06	1.96
夜間	0.65	0.60	0.68	0.62	0.61	0.62

時に兵庫県北近畿豊岡自動車道 青垣 IC～山東 IC において 24 時間の路面温度予測に要した計算時間 t_c を比較したものである。山岳面要素数の段階的結合に伴う山岳面要素数削減および不可視面要素の計算除外を適用した場合、 t_c は 11.4 分となり、計算高速化手法を用いない場合(263.4 分)の 4.3%となった。また、不可視面要素の計算除外のみを適用した t_c は計算高速化手法を用いない場合の 74%であった。これより、計算の高速化手法としては主に山岳面要素数の削減が有効であることが知れる。

次に、計算高速化が路面温度の計算精度に及ぼす影響を検討する。高速法として山岳面要素数の削減および不可視面要素の計算除外を適用した場合の計算誤差は 1.53，不可視山岳面要素の計算除外のみを適用した場合は 1.52 であった。一方、計算高速化手法を用いない場合は 1.52 であり、計算高速化手法を適用した場合との間で計算誤差の違いは生じなかった。また、 T_s の路線分布も両手法で違いがなかった。

以上より、本研究で開発した計算高速化手法は、計算精度の低下を引き起こすことはないことが分かった

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. 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.
2. 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, 日本雪工学会誌, Vol.29, No.1, pp.36-45, 2013.

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 齊田光, 田中雅人, 寺崎寛章, 福原輝幸: 北近畿豊岡自動車道における広域路面温度予測モデルの精度検証, 雪氷研究大会講演概要集, pp.251, 2013.
2. 齊田光, 藤本明宏, 福原輝幸: 道路気象

表 2 計算高速化適用時(高速法)および非適用時(厳密法)の計算時間比較

Combination of topographic elements	Exclusion of invisible elements	In elapsed CPU time (minutes)
Non	Non	263.4
Non	Inc.	195.6
Inc.	Inc.	11.4

観測データを用いた補正路面温度予測モデル, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, Vol.67, pp.639-640, 2012.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福原 輝幸 (Fukuhara, Teruyuki)
福井大学 大学院工学研究科 教授
研究者番号: 10156804