

凍結深さの推定に必要な外気温と路面温度の相互関係に関する検討

松田 圭大¹・川口 貴之²・川端 伸一郎³・中村 大²

¹正会員 北海道科学大学 工学部 (〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1)

E-mail: matsuda-k@hus.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 北見工業大学 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

³正会員 北海道科学大学 工学部 (〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1)

二次元熱伝導解析を用いて舗装路下の凍結範囲を推定する際、本来は路面温度を用いるべきであるが、対象とする舗装路の路面温度が計測されていることは極めて少ない。そのため、外気温と路面温度との関係を明らかにし、容易に入手可能な外気温から路面温度を推定できることが望ましい。本研究では、北海道内 130 箇所の道路テレメータで観測された 10 年分の外気温と路面温度との関係を精査し、地域による違いについて検討した上で、各地域における路面温度と外気温の関係式を求めた。そして、地中温度が計測されている舗装路を対象とした二次元熱伝導解析を実施し、適切な関係式を選べば外気温から推定した路面温度を用いても実測に近い凍結深さが得られることを確認した。

Key Words: frost penetration depth, heat transfer analysis, linear function, road surface temperature

1. はじめに

断熱工法による凍上対策に際して断熱材の設置位置や範囲・厚さを検討する場合や、道路横断方向における凍結深さの違いを考慮して埋設管の敷設位置を検討するといった場合には、二次元熱伝導解析によって舗装路下の凍結領域を推定することが望ましい。このとき、舗装路面に与える温度は路面温度とすべきであるが、対象地域の路面温度が正確に計測されていることはほとんどない。また、日射や風、降雨・降雪の影響を受けるため、容易に入手可能な外気温とは基本的に異なる。実際、外気温をそのまま路面温度として与えた二次元熱伝導解析を行うと、最大凍結深さを過大評価することが報告されている¹⁾。

一方、凍結深さの推定に広く用いられている一次元凍結モデルである修正 Berggren 式²⁾は凍結指数の関数であり、一般に外気温から計算された値が用いられるが、熱比や融解パラメータなどで構成される補正係数があることで、実測に近い凍結深さが得られるようになっている。また、補正係数を構成するパラメータと凍結指数との相互関係などから、最終的には各層の熱的定数と外気温から計算される凍結指数のみで凍結深さの推定が可能になっている³⁾。よって、二次元熱伝導解析で使用す

る路面温度についても、容易に入手可能な外気温から推定できることが望ましい。

積雪寒冷地における冬期間の路面温度と外気温の関係については、路面の乾湿や積雪状況によって大きく異なることが報告されており、武市⁴⁾は 4 種の路面状況に分けて、それぞれ一次関数で近似している。また、岸川⁵⁾も北海道北見市内での数年に及ぶ計測結果から、路面温度と外気温の関係を一次関数で近似している。ただし、積雪寒冷地における路面温度に関する研究の大部分は除雪や凍結防止剤散布等による冬期の路面管理を目的としたものが多く⁶⁾、熱伝導解析に供することを前提とした研究例は少ない。また、広域で計測された数多くの地点における外気温と路面温度との相関を詳細に検討した例も少ない。

そこで本研究では、北海道内 130 箇所の道路テレメータで観測された 10 年間の外気温と路面温度との関係を精査し、地域ごとの特性について検討した上で、それぞれの関係式を求めた。また、地中温度が計測されている舗装路を対象として先述の関係式を用いた二次元熱伝導解析を実施し、実測と解析で得られた最大凍結深さや凍結の推移を比較した。

2. 検討に用いた計測データ

表-1は北海道開発局が効率的な道路の維持管理や迅速な通行規制を行うことを目的として、一般国道や高規格幹線道路沿いに設置した道路気象テレメータ（以下、道路TM）で観測されている項目をまとめたものである。北海道内に300箇所以上ある各道路TMでは、この一部または全ての項目が観測されている。また、表中に示すように、路面凍結を把握する目的で舗装下1cmに接触式の路面温度計を設置し計測を行っている。そこで、道路TMで観測されている外気温と路面温度を用いて両者の相互関係を検討することにした。

表-2は検討対象とした地点数を北海道開発局における部局ごとにまとめたものであり、図-1は部局ごとに色を変えて示した位置図である。検討対象とした地点は、2009年4月から2019年3月までの10年間における気温、路面温度、雨量、積雪深が比較的欠損が少なく記録されていること、狭い地域に偏らずに市街地や郊外・峠などの多様な箇所であることを条件に選定した結果、表や図中に示した計130箇所となった。

表-1 気象観測機器一覧⁶⁾

観測項目	気象観測機器	備考
気温	温度計	強制通風管
風向・風速	風向・風速計 吹き流し	吹き流しはドライバーが風速を知る目安となる
雨量	雨量計	
降雪・積雪	積雪深計 積雪標柱	単独または組み合わせて使用
吹雪・地吹雪	視程計 CCTVカメラ	同上
霧	視程計 CCTVカメラ	同上
路面凍結	路面温度計	同上

表-2 道路TMの全地点数および検討対象地点数

部局	全地点数	検討に用いた地点数
札幌	34	16
函館	35	16
小樽	23	12
旭川	44	13
室蘭	39	8
釧路	39	12
帯広	28	19
網走	35	16
留萌	17	7
稚内	17	11
合計	311	130

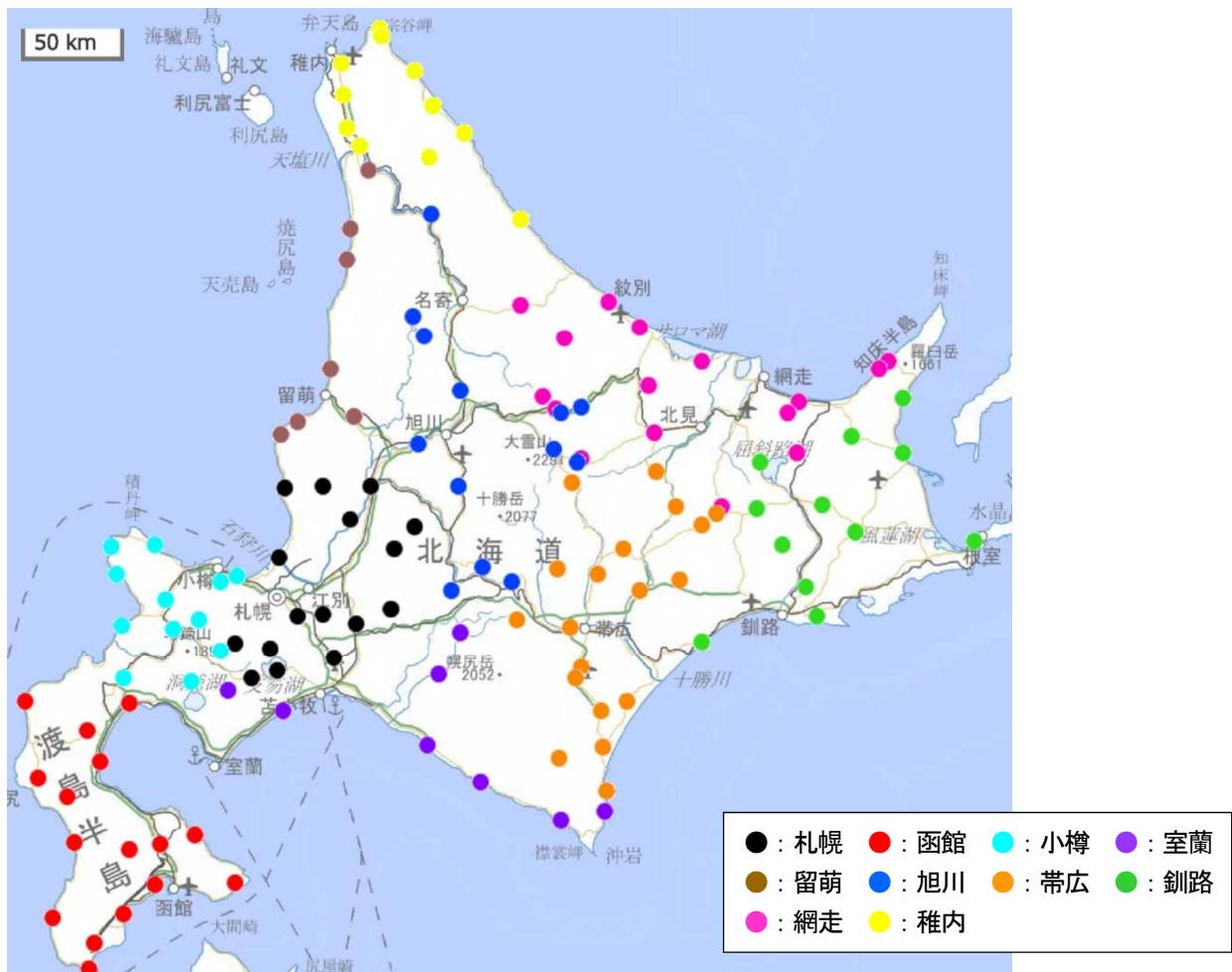


図-1 検討対象とした道路TM（地理院地図に加筆）

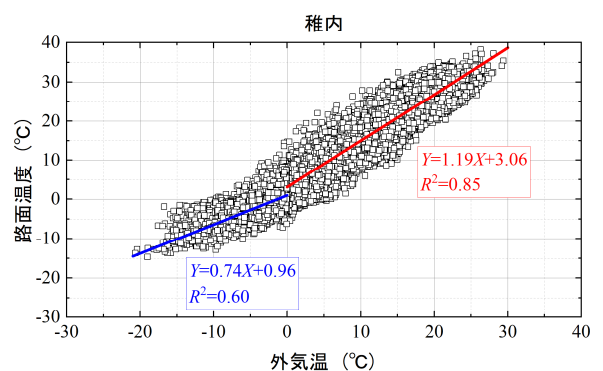
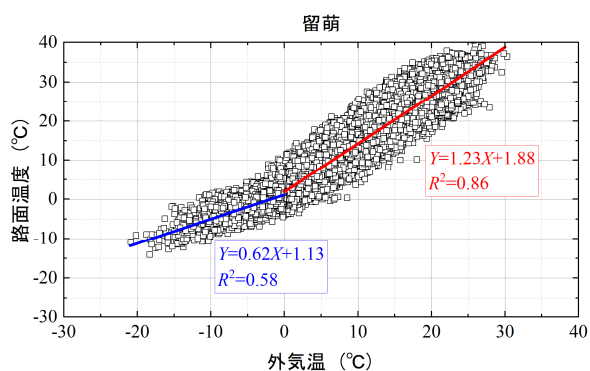
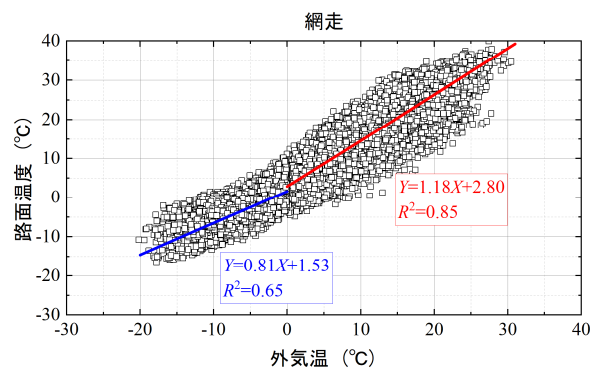
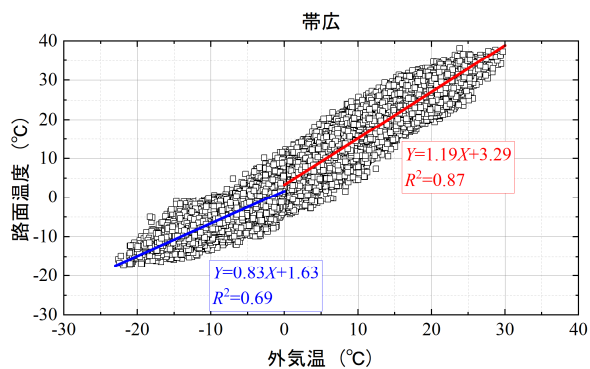
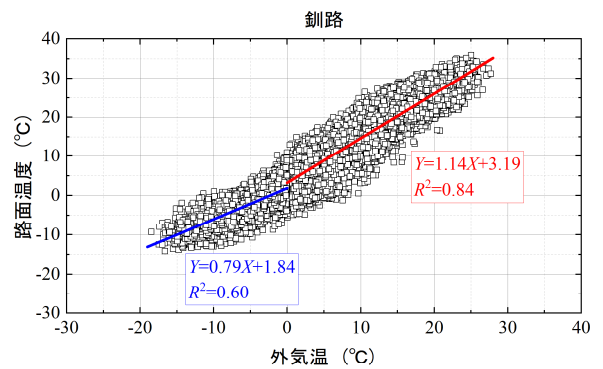
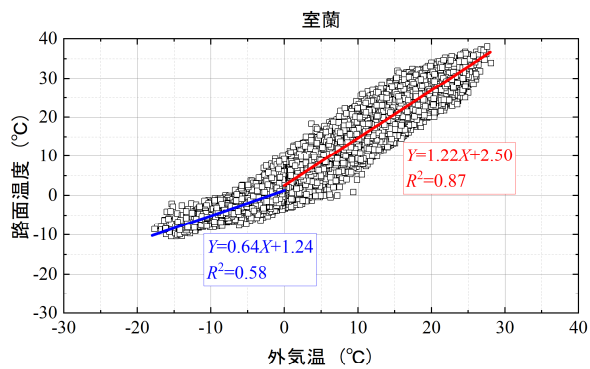
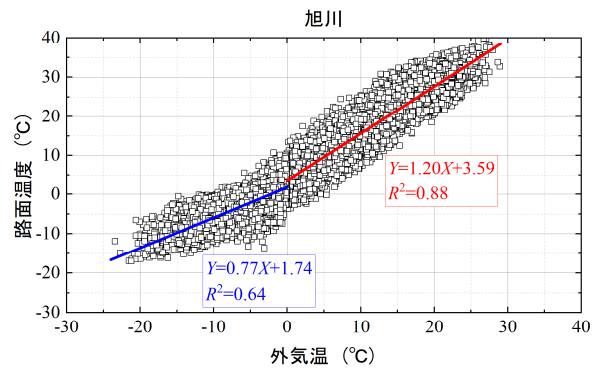
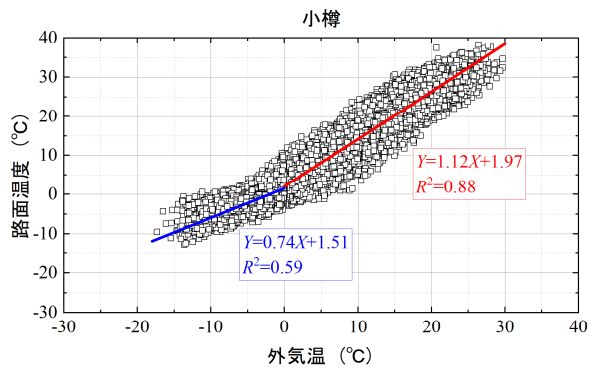
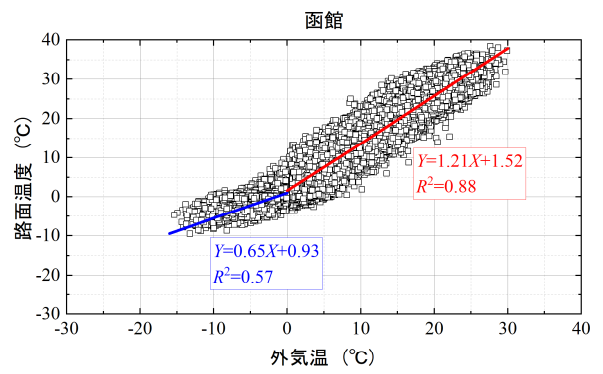
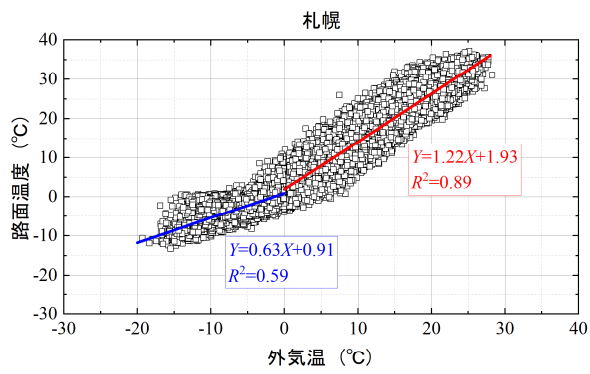


図-2 部局ごとの外気温と路面温度の関係

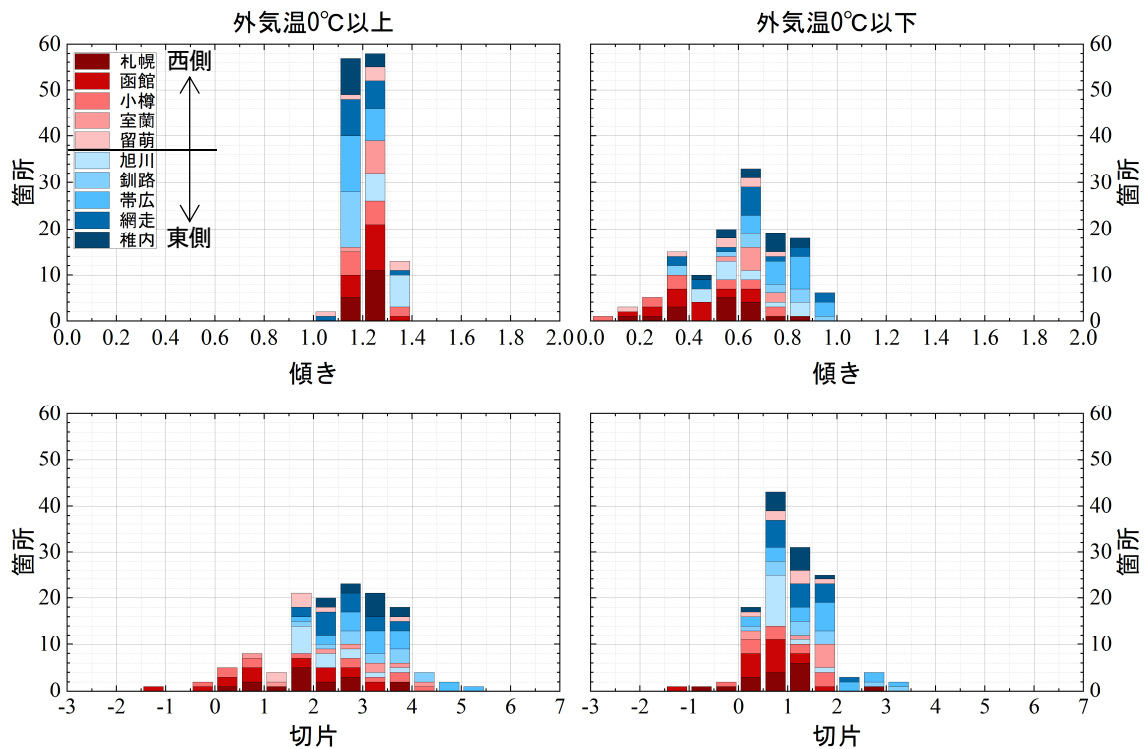


図-3 外気温がプラス領域、マイナス領域それぞれでの傾きの切片の頻度分布

3. 路面温度と外気温の相互関係

図-2は選定した道路 TM で観測された外気温と路面温度の関係を 10 ある部局ごとにプロットしたものである。なお、道路 TM におけるデータの記録間隔は必ずしも同じではないが、基本的には 24 点法に基づいて日平均温度にした上で、選定した道路 TM の 10 年分の関係を全てプロットしている。また、過去の研究成果⁴⁾を参考にして、外気温と路面温度が一次関数で表現できると考え、外気温がプラスとマイナスのそれぞれに分けて近似している。外気温がプラスの領域（各図の右半分）では傾きが 1.12~1.23 と部局による違いが少ないが、マイナスの領域（各図の左半分）では傾きが 0.62~0.83 と部局によって違いがあることが分かる。具体的な例を挙げれば、札幌や小樽では外気温がマイナスの領域における傾きがプラスの領域に比べて明らかに小さいが、帯広や釧路では両領域での傾きの差は小さい。

図-3は地域ごとの特徴について検討する目的で整理した両領域における傾きと切片の頻度分布である。この図から、先述したように外気温がプラスの領域における傾きは部局による違いが小さいのに対し、マイナスの領域での傾きは部局による違いが大きく、北海道の東側にある部局の傾きが大きい傾向にあることが分かる。表-3は過去に武市⁴⁾が札幌の3地区において、1月から3月の間における路面状態ごとの外気温と路面温度の関係をまとめたものである。乾燥露出状態に分類された計測データを一次関数で近似した際の傾きが最も大きく、濡れ雪氷状態の傾きが最も小さいことが分かる。このことから、

表-3 既往研究における路面状態ごとの傾きと切片

名称	傾き	切片	備考
式1	0.84	1.10	湿潤露出状態
式2	1.26	1.40	乾燥露出状態
式3	0.02	-0.83	濡れ雪氷状態
式4	0.65	-1.79	乾き雪氷状態

北海道の東側は西側に比べて全般的に積雪量が少ないために、外気温がマイナスの領域での傾きが大きいと考えられる。一方、切片については、外気温がプラスの領域では北海道の東側にある部局の方が大きい傾向にある。また、外気温がマイナスの領域では東側にある部局の内、釧路や帯広、網走の値がやや大きい傾向にあることが分かる。これについては、当該地域が他地域に比べ少雪かつ日照時間が長いこと日射の影響を受けやすいためと思われるが、同じ部局であっても地理的条件や除雪方法等によって変わるため、今後詳細な検討が必要と考えている。

以上の検討から、外気温を用いて路面温度を適切に推定するために、外気温がプラスとマイナスの領域に分け、それぞれに対して一次関数で近似した関係式を用いた方が良いと判断した。また、使用する関係式は対象とする舗装路がある地域における冬期の気候特性を踏まえて選定した方が良いと判断した。

4. 地中温度が計測された舗装路での検証

(1) 対象地点

前章で検討した方法で外気温から算出した路面温度を用いた凍結深さの推定精度を検証するため、地中温度が計測された舗装路を対象として二次元熱伝導解析を行った。

図-4は検証に用いた道内2箇所の舗装構造と温度センサーの配置を示したものである。1箇所は北海道勇払郡厚真町内の舗装路⁷⁾(以下、地点厚真)であり、2019年秋から2020年春まで地中温度が計測されている。もう1

箇所は北海道北見市内の舗装路¹⁾(以下、地点北見)であり、2013年冬からの5シーズンにわたって計測が行われている。いずれの地点も冬期は除雪管理された道路である。

(2) 解析モデル

図-5は検証に用いた解析モデルである。解析には市販の熱伝導解析ソフトウェアであるTEMP/W[®]を用いた。図中に示すように、モデル地盤の深さは4m、メッシュは1辺0.01mの正方形とした。ただし、路床以深の地盤構成については不明であるため、それ以深は路床と同じ

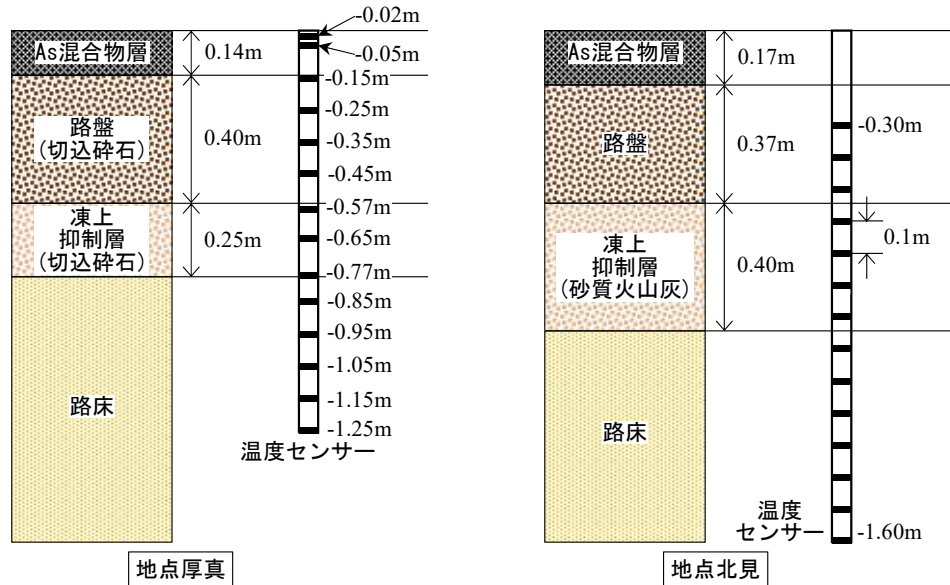


図-4 地点厚真，地点北見それぞれの舗装構造と温度センサー配置図

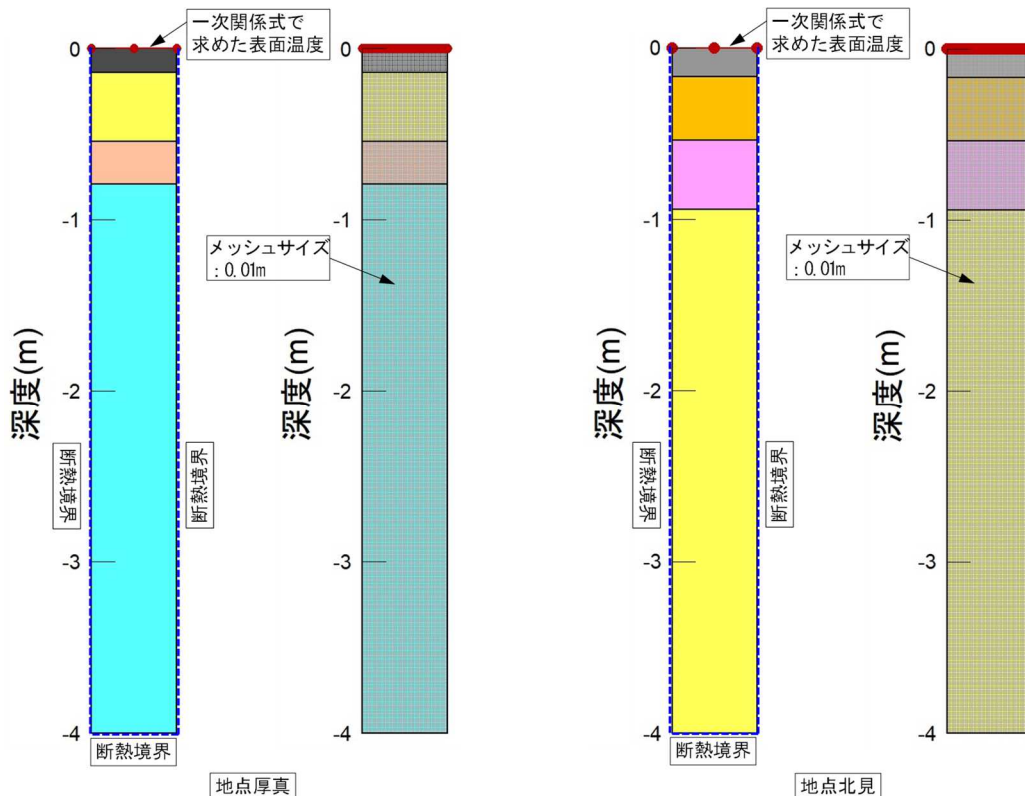


図-5 地点厚真，地点北見それぞれの解析モデル図

材料とした。また、解析開始時の温度は全域で0℃とし、解析のステップは1日とした。このとき、側面と底面は断熱境界とし、路面にのみ後述する関係式を使って外気温から計算した路面温度を外力として与えた。ただし、初期温度を0℃としていることやモデル地盤の底面には外力を与えていない影響を可能な限り小さくするため、凍結深さの検証対象とする期間の3年前から解析を実施した。なお、平井ら⁹⁾は地表面温度が計測されている場合、上記と同様な方法で二次元熱伝導解析を実施すると、比較的均質な地盤で実測と同程度の最大凍結深さが得られることを報告している。

(3) 熱的定数

表-4は対象とした2地点の二次元熱伝導解析に使用し

た各層の熱的定数をまとめたものである。解析に必要な熱的定数は熱伝導率、体積熱容量、体積含水率であり、解析をシンプルにするため、それぞれ凍結・未凍結時で同じ値とした。熱伝導率は広く用いられているKersten式¹⁰⁾によって計算し、体積熱容量は伊福部式¹¹⁾によって計算した。ただし、これらの式で必要となる含水比と乾燥密度は各層の材料試験結果を参照した¹²⁾。

(4) 路面温度の計算式

表-5は各舗装路の路面温度の推定に用いた一次関数式の傾きと切片をまとめたものである。ここでは、それぞれの舗装路について2種類の関係式を採用した。一つはそれぞれ舗装路がある地点が属する部局（地点厚真は室蘭、地点北見は網走）の値とした。以下、この関係式を

表-4 二次元熱伝導解析に用いた各層の熱的定数

材料	地点厚真			地点北見		
	熱伝導率 λ (W/m/K)	体積熱容量 Q (MJ/m ³ /K)	体積含水率 θ (m ³ /m ³)	熱伝導率 λ (W/m/K)	体積熱容量 Q (MJ/m ³ /K)	体積含水率 θ (m ³ /m ³)
As混合物層	1.448	1.875	0.00	1.448	1.875	0.00
路盤	2.192	1.728	0.08	2.132	1.737	0.10
凍上抑制層	2.192	1.728	0.08	1.199	1.833	0.31
路床	0.751	1.451	0.25	1.922	2.679	0.25

表-5 路面温度の推定に用いた一次関数式の傾きと切片

地点	部局	名称	一次関数式			
			外気温0℃以上		外気温0℃以下	
			傾き	切片	傾き	切片
厚真	室蘭	部局平均式	1.22	2.50	0.64	1.24
		部局最寒式	1.21	0.88	0.69	0.06
北見	網走	部局平均式	1.18	2.80	0.81	1.53
		部局最寒式	1.27	1.79	0.90	0.93

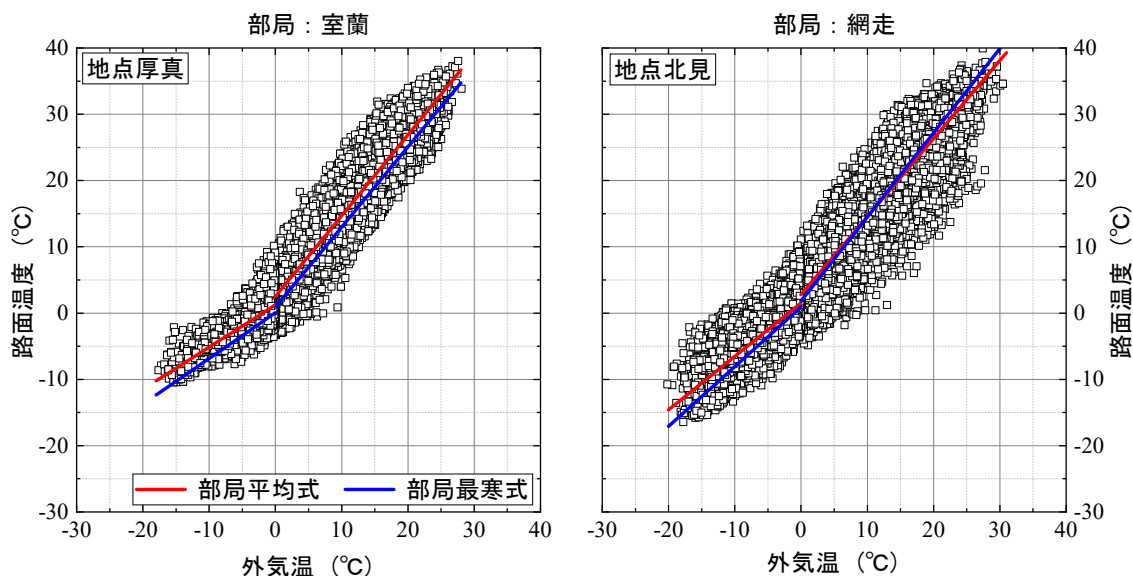


図-6 部局最寒式に選定した道路TMの外気温と路面温度の関係

部局平均式と呼ぶ。もう一つは、両舗装路が比較的除雪環境下にあったことを考慮し、各部局に属する道路 TM で得られた外気温と路面温度の関係式の内、武市らの既往研究⁴⁾を参考に最も路面積雪の影響が小さいと判断した地点の関係式とした。以下、この関係式を部局最寒式と呼ぶ。具体的には、各部局における全ての道路 TM で得られた関係式の内、マイナスの外気温における中央値に近い-10℃を代入した際の路面温度が最も低くなる地点を選定した。図-6はそれぞれの部局における外気温と路面温度の関係に部局平均式、部局最寒式を示したものであり、部局平均式に比べて部局最寒式のほうが外気温がマイナスの領域における傾きが大きく、切片が小さいことが分かる(表-5参照)。

(5) 実測と解析結果の比較

表-6は実測と先述の関係式を用いた解析で得られた最大凍結深さとを比較したものである。なお、表中には比較対象として路面温度が外気温と等しいとした場合の解析結果についても示している。また、実測の凍結深さは地中温度が0℃となっている深さとし、正負が異なる隣接する2点の測点間の温度変化が線形関係にあると仮定して求めた。岸川ら⁷⁾も報告しているように、路面温度と外気温が等しいとした場合には、実測や2つの関係式を用いた場合に比べて最大凍結深さを過大評価することが分かる。また、部局平均式を用いた場合には、最大凍結深さを幾分過小評価する傾向にあり、部局最寒式を用いた場合には最大凍結深さを幾分過大評価する傾向にあることが分かる。

図-7は対象とした2つの舗装路における実測と解析結果から得られた凍結深さの推移を比較したものである。いずれの地点においても、部局最寒式を用いた方が凍結深さの推移を良く表現していることが分かる。地点厚真については、最終的な最大凍結深さは部局平均式の方が実測に近いものの、凍結深さが路床に達するまでの推移

は実測を良く表現している。これについては、路床の熱的定数が実際と異なるためではないかと考えており、Kersten式¹⁰⁾や伊福部式¹¹⁾による熱的定数の推定が可能な土質特性について、今後詳細に検討する必要があると考えている。また、対象とする舗装路面の積雪状況は年によって異なるだけでなく、道路周辺の構造物などによっても変化するため、部局最寒式を用いることは路面積雪が少ない場合を想定した安全側と評価できる。更には、道路 TM における路面温度計は接触式のため、部局平均式に使用された道路 TM の計測結果の中には、オーバーレイなどによって路面温度として扱うことが困難な値も含まれている可能性もある。以上のことから、対象とする周辺地域の道路 TM から得られた外気温と路面温度の関

表-6 実測と解析で得られた最大凍結深さ

年	最大凍結深さ(m)			
	実測された値	地点厚真		
		解析結果		
		路面温度		
	気温と路面温度の一次関数式		アメダス厚真の外気温	
	部局平均式	部局最寒式		
2019-20	0.85	0.81	0.94	1.12

年	最大凍結深さ(m)			
	実測された値	地点北見		
		解析結果		
		路面温度		
	気温と路面温度の一次関数式		アメダス北見の外気温	
	部局平均式	部局最寒式		
2013-14	0.85	0.77	0.85	1.02
2014-15	0.78	0.55	0.69	0.88
2015-16	0.90	0.87	0.95	1.21
2016-17	1.00	0.80	1.03	1.09
2017-18	1.02	0.90	0.95	1.09

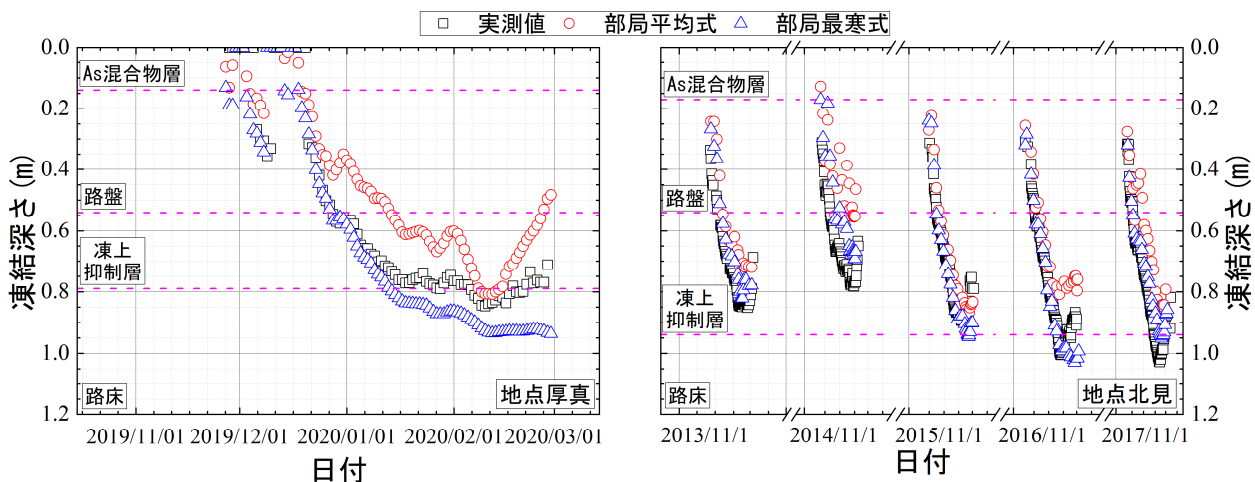


図-7 実測と解析から得られた凍結深さの推移

係式の中から、路面積雪の影響が少ないものを選定して使用すれば、実測に近い幾分安全側の最大凍結深さが得られると判断した。ただし、今後も更なる推定精度向上を目指して、解析方法に関する検討や、他の地域にある舗装路でも検証を続けていきたいと考えている。また、実用への展開を見据え、凍結深さを適切に評価できる確率年数を考慮した入力外力（外気温）に関する検討も行ってほしいと考えている。

5. まとめ

本文では、北海道内にある道路気象テレメータでの観測値を用いて、二次元熱伝導解析による凍結深さの推定にとって重要な外気温と路面温度との関係式について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- ・特に外気温がマイナスの領域における外気温と路面温度との関係には、北海道内の各地域ごとの路面の積雪状況に応じて違いがあることを確認した。このことから、外気温がプラスとマイナスの領域に分け、それぞれに対して一次関数で近似した関係式によって路面温度の推定を行った方が良いと判断した。
- ・地中温度が計測された北海道内 2 箇所の舗装路を対象とし、路面温度の推定式に関する検証を行った結果、周辺地域の道路 TM から得られた外気温と路面温度の関係式の中から、路面積雪の影響が少ない（傾きが大きく、切片が小さい）ものを選んで使用すれば、実測に近い幾分安全側の最大凍結深さが得られることが分かった。

謝辞：本文で用いた道路気象テレメータの観測値は（国

研）土木研究所寒地土木研究所より提供を受けた。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岸川鉄啓, 川口貴之, 中村大, 川尻峻三, Dagvadorj Otgonjargal : 寒冷地の舗装路下における水道管の浅層埋設に関する検討, 土木学会論文集 E1, Vol.74, No.3, I_11-18, 2018.
- 2) Aldrich, H. P. : Frost Penetration Below Highway and Airfield Pavements, Highway Research Board, Bulletin No.135, 1956.
- 3) 地盤工学会北海道支部 : 寒冷地地盤工学, 2009.
- 4) 武市靖 : 路面凍結の予測に関する研究, 土木学会論文集, No.470/IV, pp.175-184, 1993.
- 5) 例えば, 高橋尚人, 徳永ロベルト, 浅野基樹, 石川信敬 : 交通量を考慮した熱収支法による路面温度推定モデルの構築について, 北海道開発土木研究所月報, No.631, pp.28-36, 2005.
- 6) 北海道開発局 : 道路設計要領 第 5 集 電気通信施設 第 14 章 気象観測設備, 2021.
- 7) 川端伸一郎, 亀山修一, 内海正徳, 足立浩, 中村強 : 試験施工による路上路盤再生工法 (CAE 工法) の寒冷地への適用に関する検討, 土木学会論文集 E1, Vol.76, No.2, pp.I_289-I_296, 2020.
- 8) Thermal modeling with TEMP/W, GEO-SLOPE International Ltd, 2014.
- 9) 平井泰輔, 劉爽, 川口貴之, 中村大 : 熱伝導解析を用いた断熱効果に関する検討, 第 61 回地盤工学会北海道支部技術報告集, pp.19-26, 2021.
- 10) Kersten, M. S. : Thermal Properties of Soils, Engineering Experiment Station, Bulletin No.28, Univ. of Minnesota, 1949.
- 11) 伊福部宗夫 : 北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究, 土木試験所報告, Vol.26, 1962.

(Received June 25, 2021)

(Accepted September 13, 2021)

RESEARCH ON THE INTERRELATIONSHIP BETWEEN ROAD SURFACE TEMPERATURE AND OUTSIDE AIR TEMPERATURE REQUIRED TO ESTIMATE THE FROST PENETRATION DEPTH

Keita MATSUDA, Takayuki KAWAGUCHI, Shinichiro KAWABATA
and Dai NAKAMURA

When estimating the freezing zone under the paved road using two-dimensional heat transfer analysis, it is extremely rare that the road surface temperature of the paved road required to the analysis is clarified. Therefore, it is desirable to be able to estimate the road surface temperature using the easily available outside air temperature. In this study, We investigated the interrelationship between the 10-year road surface temperature and the outside air temperature measured at 130 road telemeters in Hokkaido. In addition, the interrelational equations between the road surface temperature and the outside air temperature in each area in Hokkaido was derived. As a result, It is confirmed that the frost penetration depth can be estimated accurately by performing a two-dimensional heat transfer analysis using the road surface temperature calculated by substituting the outside air temperature into the optimal interrelationship equation.