

熱伝導解析を用いた舗装路における凍結深さの推定法に関する検討

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れば、一次元凍結モデルでは困難な部分的な積雪や断熱材の敷設による道路横断方向における凍結深さの違いについても把握できる。しかし、最終的に入手しやすい限られた情報だけから凍結深さを推定するには、解析対象とする地盤の深さや境界条件など、解析方法に関する詳細な検討が必要である。そこで本研究では、二次元熱伝導解析を用いて一次元モデルを作成し、比較的均質な地盤で計測した温度計測結果に基づき、各層の熱的定数と地表面温度だけから最大凍結深さを推定しうる解析方法について検討した。そして、路面温度が計測されている供用中の舗装路を対象に解析した結果、最大深さを精度良く推定できることを確認した。さらに、そのためには路面温度の把握が重要であることや、既存の推定式を用いた熱的定数を用いても精度良く凍結深さを推定できることも確認した。

Key Words: frost penetration depth, heat transfer analysis, thermal parameters, surface temperature, paved road,

1. はじめに

寒冷地の舗装路では、古くから凍上による路面の損傷や融解期の支持力低下が問題となっている。このため、凍結深さが路床に達し、路床が凍上性を示すことが確認された場合には、置換工法等の凍上対策が講じられる。例えば、北海道開発局における設計期間 20 年の道路では、理論最大凍結深さの 70% を非凍上性の材料で置き換えることになっている¹⁾。ここで、理論最大深さとは、地盤が凍上しにくい均質な粒状材料からなると仮定した場合の凍結深さの最大値²⁾であり、複層構造の舗装路等における冬期の最大凍結深さとは異なることに注意する必要がある。

さて、このような凍結深さの推定や理論最大凍結深さの算出には、湖沼の氷層生成を熱伝導論より導いた Neumann の理論とその単純解である Stefan 式を地盤凍結に応用³⁾した Aldrich による修正 Berggren⁴⁾式が用いられることが多い。本来、この式は舗装路を構成する各層の熱的定数や凍結指数を含む多数のパラメータで構成されるが、各パラメータの相互関係などについて検討された結果、最終的には各層の熱的定数と凍結指数だけから凍結

深さを推定する方法が提案されている⁵⁾。また、これに従えば高い精度で最大凍結深さを推定できることが広く知られている^{6,7)}。

しかし、先述の方法では凍結初期や融解期における凍結深さの推移を把握することまでは困難である。また、一次元凍結モデルであるため、部分的な積雪や断熱材の敷設による道路横断方向における凍結深さの違いを正確に把握することも難しい。その場合、近年地盤構造物の凍結問題への適用も進みつつある二次元熱伝導解析⁸⁾であれば把握できるが、先述の修正 Berggren 式⁴⁾を用いた推定法のように、最終的に入手しやすい限られた情報だけから凍結深さを推定できるようにするためには、解析対象とする範囲や境界条件の設定など、解析方法に関する詳細な検討が必要である。

そこで本研究では、その足掛かりとして、二次元熱伝導解析を用いて一次元モデルを作成し、比較的均質な地盤の地中温度計測結果に基づき、解析対象とするモデル深さや境界条件の設定に関する検討を行った。そして、構築した解析方法に従って供用中の舗装路を対象とした熱伝導解析を行い、実測との比較を行った。さらに、温度計測を伴わない場合を想定し、路面温度や熱的定数が

解析結果に与える影響についても検討した。

2. 解析方法に関する検討

(1) 初期温度やメッシュサイズに関する検討

解析方法の検討には、比較的均質な火山灰質土で構成される北見工業大学構内の地盤で計測した地表面と地中温度を用いた⁹⁾。地中温度は所定の深度に複数のサーミスタ式温度センサーを取り付けた塩ビパイプを埋設することによって計測した。また、塩ビパイプの全長は4mであり、塩ビパイプの中には砂を充填している。

図-1は計測期間中における主な測点の地中温度とアメダス北見から得た外気温と積雪深の推移である。計測期間は2017年6月からの1年間である。現地の積雪深と図中に示す積雪深とは必ずしも一致していないが、計測地点は完全な除雪環境下ではないため、積雪期間中の地表面温度と外気温には大きな違いがあることが分かる。

図-2は解析に使用したモデルである。解析には市販の二次元熱伝導解析ソフトウェアであるTEMP/W¹⁰⁾を用いた。モデル地盤の深度は4mまでとし、メッシュは1辺0.01mの正方形とした。また、解析開始時の地盤の温度分布については、基本的には不明な場合が多いことを想定して便宜的に全域で0℃とした。さらに、岸川ら¹¹⁾は道路中央部付近では凍結深さはほぼ同じ深さで推移していることを確認している。これは側方の熱の供給がないことを意味しており、当該箇所は水平地盤であり既往研究と同条件と判断できるため、側方については断熱境界とした。熱的定数については、対象地盤が比較的均質であることを考慮して全深度で同一とした。

後述する解析対象とする深度や境界条件に関する検討を適切に行えるよう、モデル地盤の熱的定数は実測の温度変化を良く表現するように設定した。以降、この方法による熱的定数の求め方を逆解析と呼ぶ。そこで、モデル地盤の上下面（地表面と深さ4m）の節点要素に計測した1年間の日平均気温を外力として10回繰り返して与え、図中に示す3つの測点（地表面から0.9m, 2.1m, 3.0m）で解析値と実測が合うように調整した。なお、計測は1時間ごとであったため、24点法で日平均気温を求めた。最初に設定した熱的定数は一般的な火山灰土の値とし、そこから実測温度と解析結果が近似するように解析を繰り返すことで熱的定数を決定した。なお、凍土・未凍土の熱的定数は同じとしたため、解析に必要な熱的定数は熱伝導率と体積熱容量、体積含水率の3つである。体積含水率は本来地盤の物理定数であるが、ここでは熱的定数に含めて考えることにする。

図-3は決定した熱的定数を用いた解析結果と実測の比較であるが、両者が良く近似していることを確認した。

なお、モデル深さを2.1mとした場合でも熱的定数は同値になることを確認している。また、計測開始が地表面・地中温度が上昇するタイミングであったこともあり、実測と解析結果は比較的早い段階で近似しており、繰り返し回数による最大凍結深さに違いは見られなかった。ただし、初期温度が0℃であるため、地中温度の変化が定常になるまでに、数回の繰り返しは必要と思われる。なお、本研究では0℃の位置が最も深くなった時を最大凍結深さとしている。

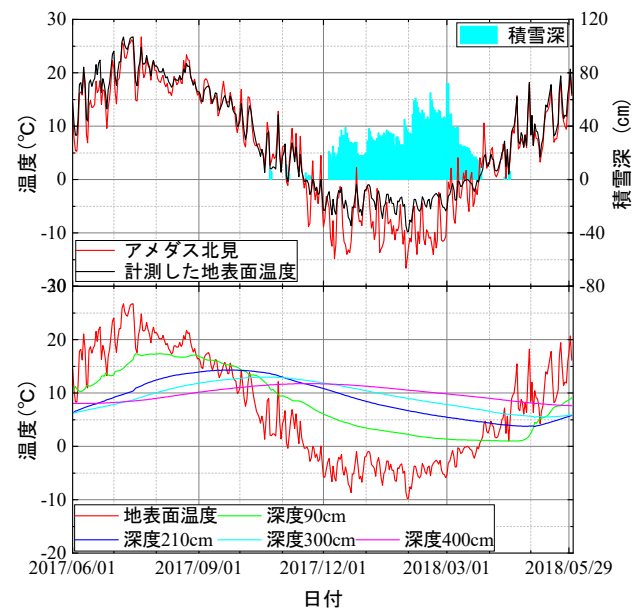


図-1 対象地盤（北見）の計測結果とアメダス北見の外気温と積雪深

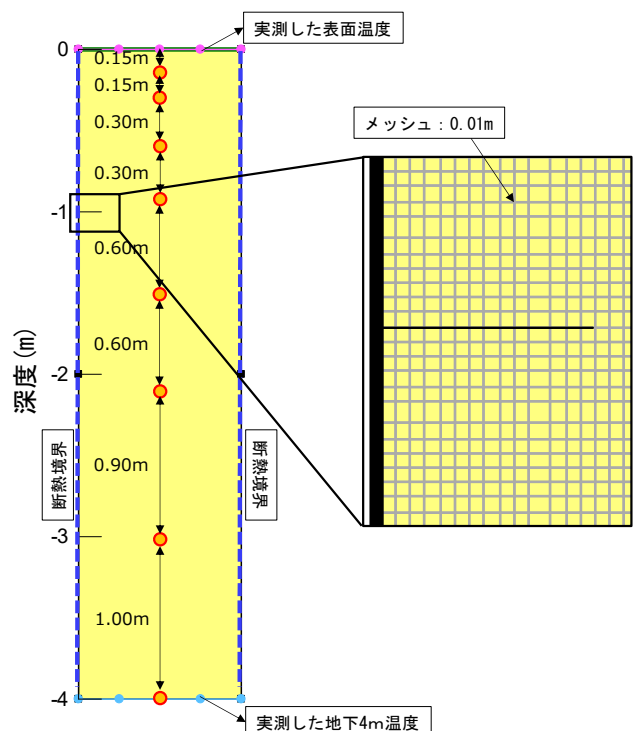


図-2 解析モデル図（対象地：北見）

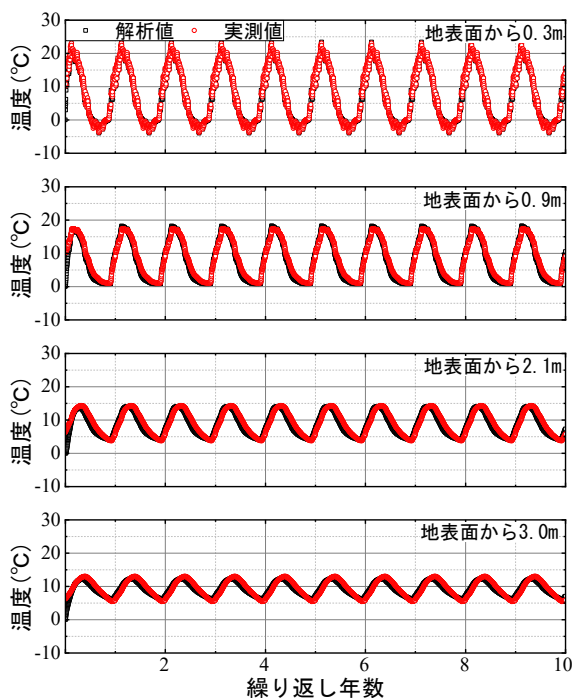


図-3 実測と解析結果の比較 (対象地：北見)

表-1 対象地盤 (北見) の熱的定数と最大凍結深さ

熱的定数			
熱伝導率	体積熱容量	体積含水率	
λ (W/m/K)	Q (MJ/m ³ /K)	θ (m ³ /m ³)	
0.926	1.400	0.35	
最大凍結深さ (m)			
実測	解析結果 (メッシュサイズ:m)		
	0.01	0.02	0.05
0.63	0.64	0.65	0.72

表-1は決定した地盤の熱的定数と、この解析から得られた最大凍結深さをまとめたものである。実測の最大凍結深さは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計算した0℃となる位置が最も深くなった時の値である。また、表中にはメッシュの大きさを変えた時の最大凍結深さも示している。メッシュが0.01mの場合には実測と解析結果の最大凍結深さがほぼ等しく、メッシュが大きくなるほど違いが大きくなることから、当然ながら0.01m単位での凍結深さを求める際のメッシュの大きさは0.01m以下にする必要がある。ただし、最大凍結深さで深いメッシュを大きくしても、最大凍結深さには影響しないため、計算時間を短縮する目的で深い深度でのメッシュは適宜大きくした。

(2) 境界条件やモデル地盤の深さに関する検討

解析対象とする舗装路の地中温度は不明な場合が多いことを想定し、地表面温度にだけ外力を与え、底面(深

さ4m)も断熱境界とした場合の最大凍結深さを求めた。なお、地盤の熱的定数は表-1に示した値を用いた。モデル地盤の深さは2,3,4,6,8mとして検討し、先述の検討と同様に地表面温度は10回繰り返して与えた。

図-4はモデル地盤の深さを4mとした際の実測と解析結果の比較である。底面に温度を与えていないため、深くなるほど実測と解析結果は乖離していることが分かる。

また、地中温度の変化が定常的になるまでの期間も幾分長くなっており、繰り返し回数が1~2回では最大凍結深さを過大評価していたことから、この種の解析方法を採用する場合は、3回以上の温度履歴が必要と考えられる。

図-5はモデル地盤の深さと最大凍結深さの関係を示したものである。モデル地盤の深さが大きくなるほど最大凍結深さは小さくなり、4mを超えると同程度の最大凍結深さに収束していることが分かる。また、その深さは

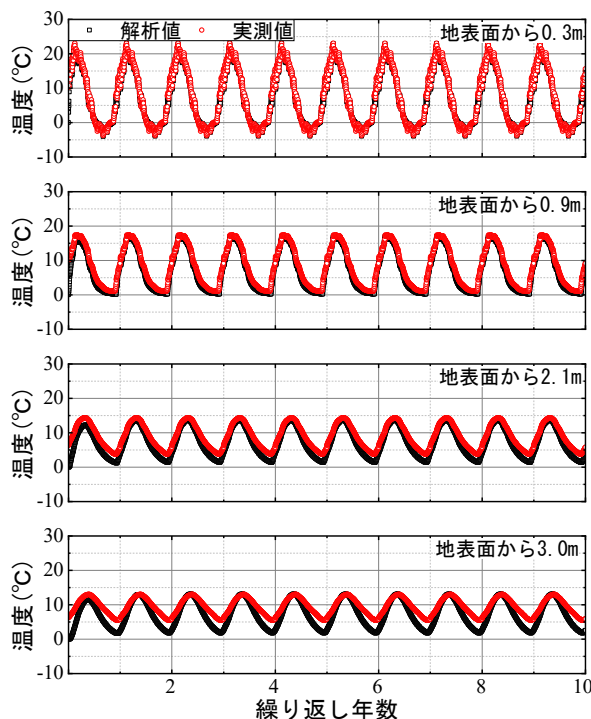


図-4 実測と解析結果の比較 (対象地：北見)
(底面：断熱境界)

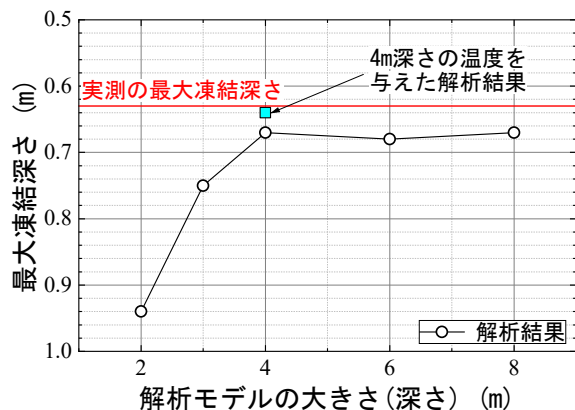


図-5 解析モデルの大きさに伴う最大凍結深さの変化 (対象地：北見)

若干過大評価しているものの、実測や深度4mに計測温度を与えた解析結果と同程度であることが分かる。モデル地盤の深さが小さくなると最大凍結深さが大きくなることを考えると、この結果は熱の供給源となる地盤が凍結深さよりも深い位置にもある程度の厚さが必要であることを意味していると考えられる。また、必要となるモデル地盤の深さは熱的定数や最大凍結深さによって変化すること、モデル地盤を深くしすぎても計算時間が長くなり、実測と乖離する可能性も否定できないことを総合的に勘案すると、凍結深さが1m前後であればこの方法で解析を行う場合のモデル地盤の深さは4~6mが妥当と判断した。以上のことから、地盤の熱的定数と地表面温度が分かれば、上記で検討した方法に従って二次元熱伝導解析を行うことで、実測に近い最大凍結深さが得られることを確認した。ただし、凍結深さが深くなればモデル深さも大きくなると考えられるため、今後はモデル地盤を極端に大きくした場合や凍結深さが1mを超える場合などの検討を行いたいと考えている。

3. 地中温度が計測されている舗装路での検証

図-6は先述した解析方法の検証に用いた北海道勇払郡厚真町にある舗装路の構造と計測機器の配置を示している¹²⁾。舗装構造はアスファルト混合物層0.14m(表層・基層・As安定処理層)、路盤0.4m、凍上抑制層0.25mであり、深度0.79mまでが非凍上性材料で構成されている。温度センサーは熱電対であり、地表面に限りなく近い深度0.02m、0.05mにも設置している。それ以深は基本的に0.1m間隔で深度1.25mまで設置しており、道路のり尻付近には外気温計も設置している。なお、当該路線は除雪管理された路線である。

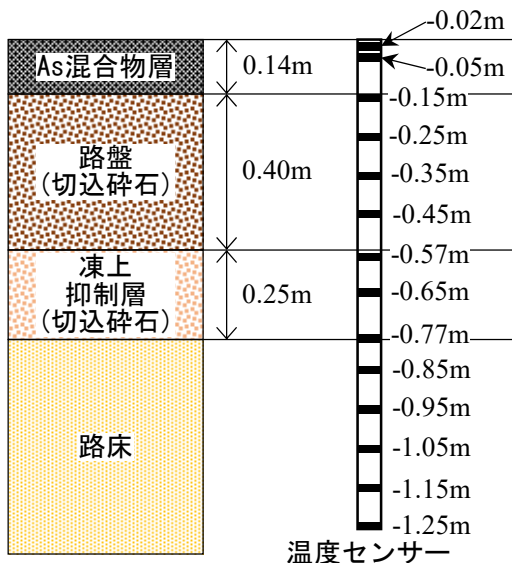


図-6 厚真の舗装構造と計測機器配置図

表-2は各層の土質試験結果をまとめたものである。路床土は軽石混じりの火山灰質砂であり、細粒分含有率は30%程度である。なお、凍上試験によって高い凍上性を示すことを確認している。また、路盤は40mm級、凍上抑制層は80mm級の切込砂利である。

図-7は対象地で計測した外気温と主な測点における地中温度の推移を示している。計測期間は2019年9月25日~2020年3月5日の約5カ月間であり、夏季の温度は計測されていない。

表-3には解析に用いた熱的定数を示した。各層の熱的定数は基本的に前章で対象とした地盤と同様に求めており、地中温度が計測された深度1.25mまでのモデル地盤とし、地表面(路面)と深度1.25mの位置で計測された

表-2 土質試験結果(対象地:厚真)

構成	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	含水比 w (%)	凍上速度 (JGS法) (mm/hr)	凍上率 (NEXCO法) (%)
表層(As)	-	-	-	-
路盤	2.080	3.8	-	1.8
凍上抑制層	-	-	0.01	-
路床	0.921	27.5	0.73	-

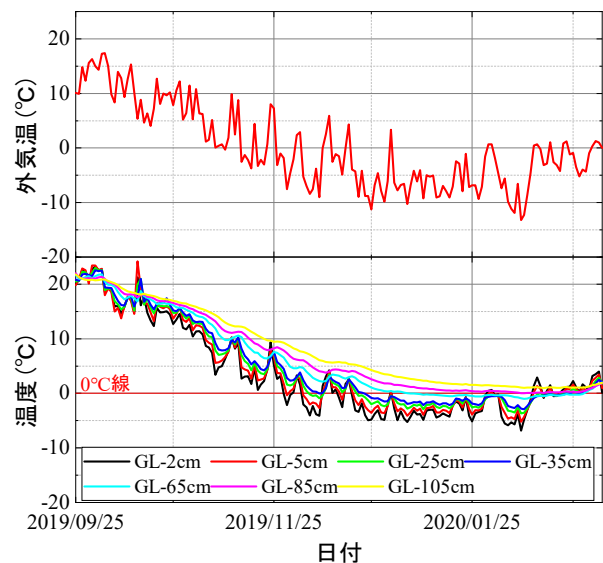


図-7 対象地盤(厚真)の外気温と地中温度計測結果

表-3 対象地盤(厚真)の熱的定数

構成	熱的定数		
	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
路盤	2.083	3.500	0.08
凍上抑制層	1.736	2.500	0.08
路床	0.810	3.000	0.25

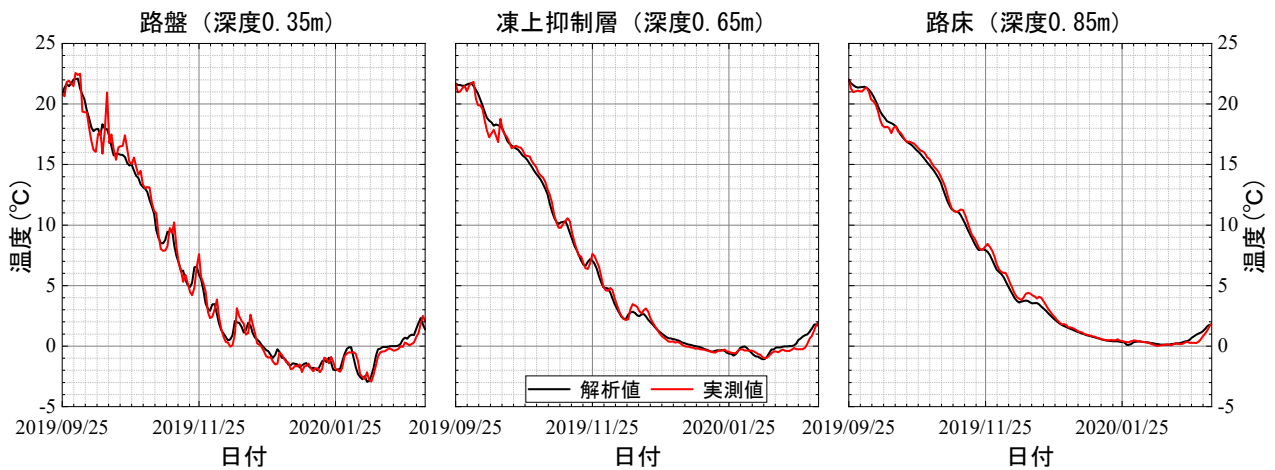


図-8 実測と解析結果の比較 (対象地：厚真)

温度を外力として与えて解析した上で、温度計測された幾つかの測点で実測と解析結果とを比較した。具体的には、アスファルト混合物層については一般値⁹⁾とし、それ以外の熱的定数を調整した。また、体積含水率については各層の材料試験結果を用いた。ただし、初期温度については年間を通じた計測データでないことも考慮し、計測初日の各測点における日平均温度を与えて定常解析した上で、先述の計測期間中における路面温度と深度 1.25 m の実測温度を外力として与えた。また、路面温度として与えた実測値は深度 0.02 m の計測値であるため、アスファルト混合物層を 0.02 m だけ小さくしたモデル地盤として路面に実測温度を与えた。すなわち、モデル地盤の深さは 1.23 m とした。

図-8 は路盤 (深度 0.35 m) , 凍上抑制層 (0.65 m) , 路床内 (深度 0.85 m) にある測点における実測と解析結果を比較したものである。先述の方法と同様に、各材料の一般的な値を初期値とし、実測と解析結果が一致するように基本的に地表面に近い層から順番に各層の熱的定数を調整した結果、両者は良く近似していることを確認した。

図-9 は解析方法の検証に用いたモデル地盤である。熱的定数を求めた時と同様に、アスファルト混合物層の厚さは実際よりも 0.02 m 小さくし、そこに地表面温度として深度 0.02 m での計測値を与えた。モデル地盤の深さは 4 m とし、路面以外は断熱境界とした。初期温度は 0°C とし、路面温度を 3 サイクル与えた。ただし、先述したように、1 年を通じた計測データで無いため、未計測期間 (2019 年 3 月 4 日~2019 年 9 月 24 日) の地表面温度は以下に示す方法で補完した。

図-10 は対象道路で計測した外気温と最も近いアメダス厚真 (対象地点から北東に約 4km) の外気温を比較したものであり、両者は良く近似していることが分かる。また、図-11 は計測期間中の路面温度と外気温の関係を示したものである。ただし、いずれの温度も 24 点法に

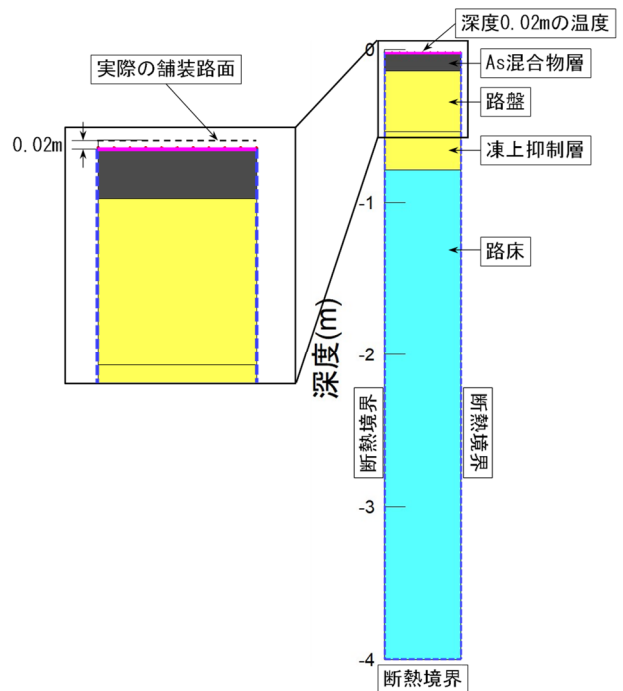


図-9 解析モデル図 (対象地：厚真)

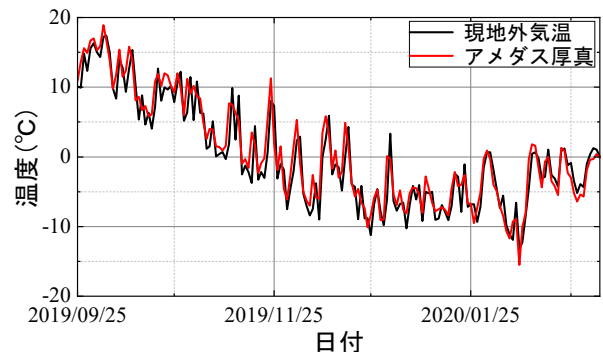


図-10 対象地 (厚真) の外気温とアメダス厚真の外気温

よる日平均である。両者の関係は概ね一次関数で近似できることから、未計測期間の外気温はアメダス厚真の値を使用し、これを図中に示す近似式に代入した値を地表面温度とした。なお、地表面温度と外気温の関係が概ね

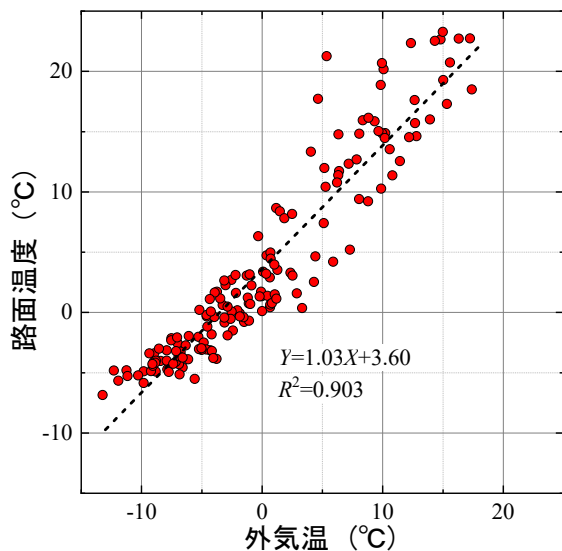


図-11 外気温と路面温度の関係
(計測期間：2019/9/25～2020/3/5)

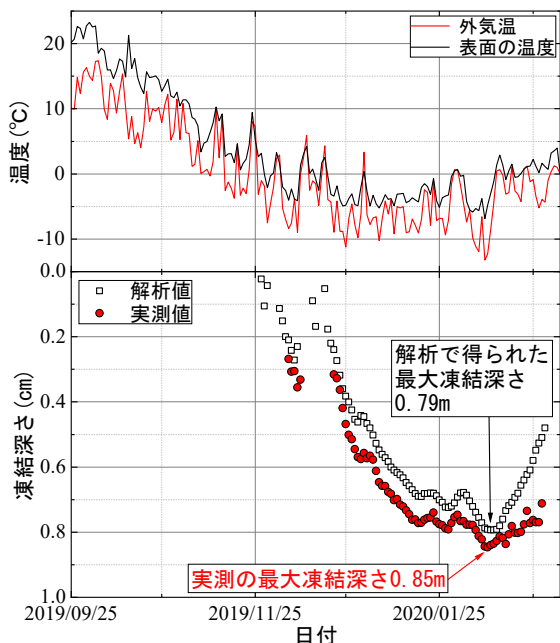


図-12 実測と解析で得られた凍結深さの推移
(対象地：厚真)

一次関数で近似できることは他の研究でも報告されている¹³⁾。

図-12 は実測と地表面にのみ実測を与えた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。実測の凍結深さについては、先と同様に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計算した0℃位置である。最大凍結深さだけでなく、そこに至るまでの推移も含めて解析結果は実測を良く表現できていることが分かる。

以上の検討から、地中温度計測結果を用いた逆解析によって求めた熱的定数(体積含水率を含む)と路面温度が分かれば、前章で検討した解析方法によって、舗装路においても最大凍結深さやその推移を精度良く推定でき

ると判断した。

4. 熱物性値と路面温度に関する検討

舗装路下の地中温度計測が行われていなければ、先述のような逆解析による熱的定数の決定はできない。このとき、いずれも含水比と乾燥密度だけから算出できることもあり、最も広く用いられている Kersten が提案した熱伝導率の推定式¹⁴⁾と、伊福部が提案した体積熱容量の推定式⁹⁾を用いて熱的定数を決定することが予想される。

表-4は前々章で対象とした地盤(北見)と前章で対象とした舗装路(厚真)における推定式から求めた熱的定数をまとめたものである。なお、厚真の凍上抑制層は含水比と乾燥密度が得られていないため、路盤と同値とした。表-2や表-3に示した逆解析から得た熱的定数と比較すると、比較的体積熱容量に違いがあることが分かる。

表-5は推定式から求めた熱的定数を用いた解析で得られた最大凍結深さと、実測や逆解析による熱的定数から得られた最大凍結深さとを比較したものである。表中には舗装だけでなく、前々章で対象とした火山灰質土からなる地盤についても示している。この火山灰質土については、地表から0.5mの深さから採取した試料の含水比と乾燥密度を用いて熱伝導率と体積熱容量を計算した。

式を用いた解析による最大凍結深さの方が逆解析による熱的定数を用いたものより実測を再現できていることが分かる。地点北見の熱的定数を求めたモデルの深さが2.1～4mであるのに対し、地点厚真の熱的定数を求めたモデルの深さは1.25mとなっており、この違いが影響していると思われる。このことから、現地計測結果から熱的定数を求める場合のモデル深さは2m程度以上は必要

表-4 含水比と乾燥密度から得られた熱的定数

構成	対象地：北見			
	熱的定数			
	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)	
地盤	1.273	2.300	0.46	
構成	対象地：厚真			
	熱的定数			
	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
	路盤	2.192	1.728	0.08
凍上抑制層				
路床	0.751	1.451	0.25	

ではないかと思われるが、この点については今後更なる検討が必要と考えている。また、北海道に広く分布する泥炭や、凍上性の高い風化火山灰など、先の推定式によって熱的定数をどの程度の土まで精度良く推定できるかについては、今後詳細に検討していく必要があると考えている。

次に、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と考えられ、この場合は何らかの方法によって路面温度を推定する必要がある。そこで、アメダス厚真の外気温をそのまま路面温度とした場合と、この外気温を図-11に示した関係式から求めた値を路面温度とした場合について、図-9に示したモデル地盤を用いた解析を行った。

表-6はこれらの解析から得られた最大凍結深さを実測との最大凍結深さとで比較したものである。ただし、表中には実測の路面温度を用いて解析した結果についても示している。一次元凍結モデルを用いた他の研究成果でも報告¹⁴⁾されているように、外気温をそのまま路面温度とすると最大凍結深さを過大評価していることが分かる。また、年間を通じて図-11に示した関係式を用いて計算した路面温度を用いた場合には、最大凍結深さを過小評価していることが分かる。以上のことから、精度良く最

大凍結深さを推定するためには、路面温度を推定する手法の確立が非常に重要であることが分かる。

5. まとめ

本研究では、二次元熱伝導解析によって舗装路の凍結深さを推定するのに重要な解析方法について検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- ・ 逆解析や既存の推定式によって求めた熱的定数と路面温度だけから実測に近い最大凍結深さを得るために必要なモデル地盤の深さや初期温度、境界条件に関する知見が得られた。
- ・ 本研究で得られた解析方法を舗装路に適用したところ、舗装路においても最大凍結深さやその推移を精度良く推定できることを確認した。
- ・ 最大凍結深さやその推移を精度良くするためには、地表面温度の推定法が重要であることを確認した。
- ・ 逆解析による熱的定数、既存の推定式を用いた熱的定数、どちらを用いても精度良く凍結深さを推定できるが、逆解析で熱的定数を求める場合には少なくとも深さ 2m 程度の温度計測結果が必要になることを確認した。

表-5 実測と解析で得られた最大凍結深さ
(熱的定数の検討)

対象地：北見		
最大凍結深さ(m)		
実測された値	解析結果	
	熱的定数の設定方法	
	推定式	逆解析
0.63	0.66	0.67

対象地：厚真		
最大凍結深さ(m)		
実測された値	解析結果	
	熱的定数の設定方法	
	推定式	逆解析
0.85	0.87	0.79

表-6 実測と解析で得られた最大凍結深さ
(路面温度の検討)

対象地：厚真			
最大凍結深さ(m)			
実測された値	解析結果		
	路面温度		
	実測された表面温度	外気温と路面温度の一次関係式	アメダス厚真の外気温
0.85	0.79	0.69	1.01

参考文献

- 1) 北海道開発局：道路設計要領 第1集 道路 第5章 舗装, 2021.
- 2) 久保宏：道路舗装の凍上とその対策, 土と基礎, Vol.29, No.2, pp.9-14, 1981.
- 3) Jumikis, A. R. : Thermal Geotechnics, Rutgers University Press, pp.185-204, 1976.
- 4) Aldrich, H. P. : Frost Penetration Below Highway and Airfield Pavements, Highway Research Board, Bulletin No.135, 1956.
- 5) 地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学, 2009.
- 6) 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.
- 7) 武市靖, 久保宏：AMeDAS データを用いた凍結深さの経時変化の推定手法, 土質工学論文報告集, Vol.31, No.2, pp.217-225, 1991.
- 8) 例えば, 林啓二, 鈴木輝之, 豊田邦男：ボックスカルバート周辺地盤の凍結面形状と凍上被害—二次元FEM熱伝導解析を用いた検証—, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.2, pp.147-156, 2009.
- 9) 山岸昂平, 川口貴之, 中村大, 川尻峻三, 石垣幸整, 三上登, 山下聡：樹脂製独立受圧板を用いた地山補強土工に対する凍上対策方法の提案, ジオシンセティックス論文集, Vol.33, pp.77-84, 2018.
- 10) Thermal modeling with TEMP/W, GEO-SLOPE International Ltd, 2014.

- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Kersten, M. S. : Thermal Properties of Soils, Engineering Experiment Station, Bulletin No.28, Univ. of Minnesota, 1949.

(Received June 25, 2021)

(Accepted September 13, 2021)

STUDY ON ESTIMATION METHOD OF FROST PENETRATION DEPTH IN PAVED ROADS USING TWO-DIMENSIONAL HEAT TRANSFER ANALYSIS

Keita MATSUDA, Takayuki KAWAGUCHI, Shinichiro KAWABATA
and Dai NAKAMURA

Two-dimensional heat transfer analysis can be used to understand the difference in frost penetration depth in the road crossing direction caused by partial snow cover and installation of heat insulating material. However, in order to estimate the frost penetration depth from the limited information that is easily available detailed consideration of the analytical method such as the depth of the model ground and the boundary conditions is required. In this study, based on the results of underground temperature measured in a relatively homogeneous ground, an analytical method that can estimate the maximum frost penetration depth only from the thermal properties of each layer and surface temperature is constructed. By analyzing the paved road where the ground surface temperature was measured according to the constructed method, the frost penetration depth could be estimated accurately. In addition, it was confirmed that it is important to grasp the surface temperature in order to accurately estimate the frost penetration depth, and that the frost penetration depth can be accurately estimated even by using the thermal parameters calculated by Kersten's and Ifukube's equation.