

気候変動が季節凍土地帯の凍結・融解作用に及ぼす影響

The global warming influence to the freezing and thawing process in seasonal frozen areas

北海道大学工学部
北海道大学大学院工学研究院
北海道大学大学院工学研究院

○ 学生員 高橋佳佑 (Takahashi Keisuke)
正会員 鄭好 (Hao Zheng)
フェロー 蟹江俊仁 (Shunji Kanie)

1. はじめに

近年，地球温暖化の影響について，議論が更に熱を帯びている．地球温暖化の影響について，気候変動に関する政府間パネル（以下 IPCC）による第5次評価報告書のうち，2013年9月に公表された報告書によると，2100年には，世界地上平均気温上昇値は，0.3~4.8℃となる可能性が高いと推測されている．地球温暖化が地盤に与える影響については，特に永久凍土地帯での議論が多くなっており，季節凍土地帯についての解析・考察の数は少ない．しかし季節凍土地帯の方が，より人口の多い地域であることの方が多く，また，温暖化が進むことで，永久凍土地帯であった地域が，季節凍土地帯に変化することも大いに考えられる．そこで本研究では，中国 Harbin を例に用いて，地球温暖化による気候変動が地盤に与える影響について解析した．中国 Harbin は，季節凍土帯を含む寒冷地域であり，更に積雪による断熱効果も少なく，人口も多いため，より人々の実生活に近く，現在地下のライフラインの設置・維持管理についても実際に地盤の凍結深に則っている．その為，未来の実生活に，より有用性の高い結果を得られると考えた．

本研究では混合ハイブリッド有限要素法（以下 MHF）を適用して解析し，季節凍土地帯の地盤内温度を推測し，融解・凍結状態や，それに伴う地下構造物に与える影響を評価する足掛かりとなることを目指した．

2. 解析手法

本研究では潜熱領域を考慮した一次元熱伝導解析を行う．熱伝導解析には，要素境界に熱流量を定義することにより，熱量管理に優れた混合ハイブリッド FEM(以下 MHF)を用いる．

以下に MHF における熱伝導解析は式(1)，(2)からなる混合形式の熱伝導方程式を離散化する．

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -q \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\rho c \frac{\partial T_k}{\partial t} \quad (2)$$

λ ：熱伝導率， T ：辺上の温度， x ：位置， q ：熱流束， ρ ：密度， c ：比熱， T_k ：要素温度， t ：時間

また，式(1)はフーリエ則を，式(2)は質量保存則を表している．式(1)，(2)を離散化し，まとめると MHF における熱伝導方程式は式(3)のように表せる．

$$[M] \begin{Bmatrix} Q_i \\ T_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \lambda T_i \\ \rho c L \frac{\partial T_k}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$[M]$ ：熱伝導マトリックス， λ ：熱伝導率， T_i ：境界温度， Q_i ：要素境界における熱流量， ρ ：密度， c ：比熱， L ：要素長， T_k ：要素温度， t ：時間

次に，潜熱の影響は等価比熱法で評価する．潜熱とは，物質の相が変化するときに必要なとされる熱エネルギーの総量である．等価比熱法とは，本来潜熱の影響で温度変化が滞る温度帯の比熱を変化させることにより，潜熱を考慮した温度変化をさせる手法である．変化させた見かけの熱容量 $c_2\rho$ とすると， $c_2\rho$ は以下の式で表される．

$$c_2\rho = \frac{Lm_w}{T_L - T_S} + c_1\rho \quad (4)$$

T_L ：液相限界の温度(0℃) T_S ：固相限界の温度(-0.5℃)

m_w ：単位体積当たりの土中に含まれる水の質量

L ：水の潜熱 c_1 ：変化させる前の比熱

3. 解析概要

本研究では，地表面の温度変化が地盤内温度に与える影響を，一次元モデルで解析する．境界条件として，季節凍土地帯を含む中国 Harbin の2013年10月~2014年11月のデータを実際に用い，近似した気温変化式を導出することで，気候変動を再現する．

3.1 解析モデル

解析モデルとして，図1のような一次元要素を考える．地表面から2.5mを10分割，2.5~5.0mまでを5分割，5.0m~20.0mまでを15分割し，解析する．また，モデル横両端は断熱されており，モデル外への熱量の移動はなく，下断面の温度は固定しない．物性値は表1を使用する．

表 1. 物性値	
ρ [kg m ⁻³]	1725
c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	750
λ [J s ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹]	2
w_c	0.15

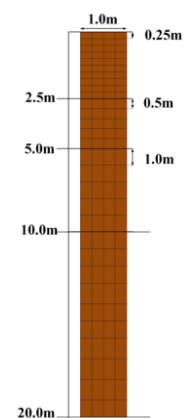


図1.解析モデル

3.2 境界条件

地盤内の温度分布変化を解析するにあたり，地上の気温を地表面の温度として条件を設定する．一般に一年間

の気温変化は sin 曲線に近似できる．今回は，実際に観測された中国 Harbin の一年間の気温変化を用いて，最小二乗法から一年間の気温変化式を導出した．

$$T(t) = a \sin\left(\frac{2\pi}{365}t + b\right) + c \quad (5)$$

t : 時間(Day)

式(5)における a , b , c はそれぞれ最小二乗法から決定されるパラメータである．決定された係数を代入した式と，実際のデータの整合性については下記のグラフに示す．

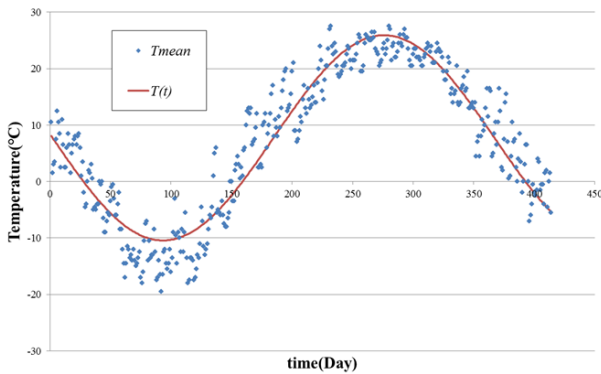


図 2.中国 Harbin の気温分布とその平均の近似グラフ

本研究では，式(5)を Harbin の年間気温変化として考えた．また，IPCC の報告書では，100 年後までには地表面温度が 0.3°C ~ 4.8°C の上昇幅になる可能性が高いとの試算を出している．本研究では，そのいくつかのシナリオ予想のうち，温暖化防止策を一番厳しく行ったシナリオである 0.3°C 上昇パターンと，対策をほとんど行わなかった際のシナリオである 4.8°C 上昇パターンの 2 つのパターンで解析し，地球温暖化が季節凍土に与える影響について考察する．

3.3 初期温度設定

解析を行うにあたり，地盤内の初期温度分布について考える必要がある．そこで，地盤の初期温度をすべて 1°C としたモデルに式(5)を地表面温度として数年間解析し，同時期の地盤内の温度が定常状態に収束した値を初期温度として採用した．

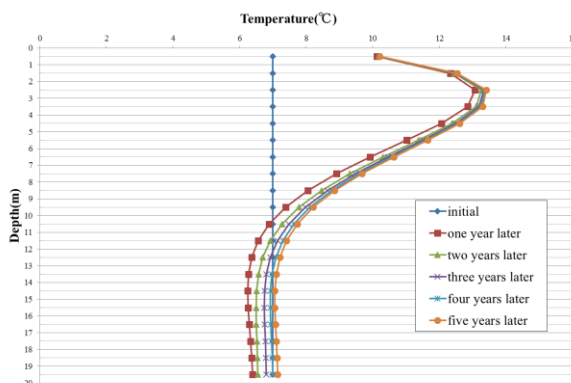


図 3.地盤内収束温度分布

図 3 より，5 年間解析した結果，地盤内の温度分布は十分に収束していることが分かる．従って，この時の温度分布を初期温度として，地表面温度である式(5)のパラ

メータ c を $+0.3^{\circ}\text{C}$, $+4.8^{\circ}\text{C}$ 上昇させた 2 つのパターンでの解析を行った．

4. 結果

解析結果について，各パターンを時間断面グラフで表すと，以下の図 4 のようになった．このグラフから，凍結深の深さについて各パターンで変化が見られる．温度上昇時各 2 パターンでの結果について，実際に地盤が凍結する深さを見てみると，平均上昇気温が 4.8°C の場合，凍結深はより地表面に近くなり，平均上昇気温が 0.3°C のパターンよりも 1 月では 80cm ほど凍結深が浅くなっていることがわかる．また，4 月を見ると，平均気温 0.3°C 上昇時では地盤はまだ凍結しているが， 4.8°C 上昇時では冬に凍結した地盤がすべて融解していることが分かる．

また一般に，気温が 0°C 以下となる積算寒度と，凍結深の関係は深く，線形に表せることが知られている．BRITISH COLUMBIA Ministry of Agriculture and lands のデータによると，今回本研究で行った 2 つのパターンでのそれぞれの積算寒度， 0.3°C 上昇時の約 $650(^{\circ}\text{C} \cdot \text{day})$ では凍結深およそ 150cm ， 4.8°C 上昇時の約 $250(^{\circ}\text{C} \cdot \text{day})$ では凍結深およそ 80cm となっている．本研究の解析結果では，一番低い気温を取った 1 月のそれぞれの凍結深は， 0.3°C 上昇時ではおよそ 150cm ， 4.8°C 上昇時ではおよそ 105cm となり，本解析の結果と，積算寒度の概念・計算式との間には，一定の整合性が取れたと言える．

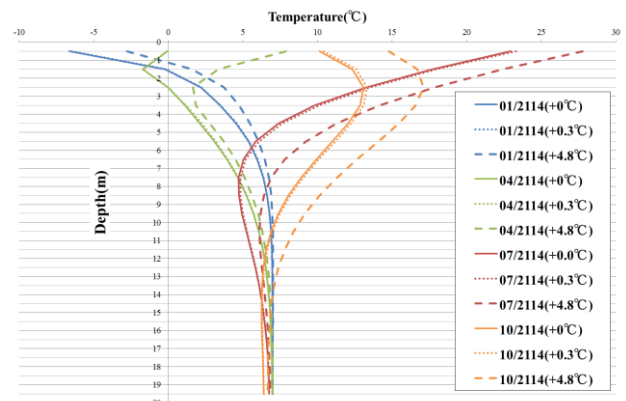


図 4.世界平均気温 4.8°C 上昇時の予想土壌温度分布

5. 考察

平均気温上昇による凍結深において解析結果に差が出ることは，そのまま地盤の沈下量変化につながり，凍土地帯の構造物にも大きな影響を及ぼすと考えられる．また，同じ月を時間断面で見た際の，土壌の凍結の是非からも，気温の上昇が地盤に与える影響の大きさが伺える．現在の季節凍土地帯都市部での排水管などの地下インフラは，設計時のその地帯の凍結深を考慮したデザインとなっている．そのため，今後起こりうる平均気温変動と，それに伴う地盤内温度変化による凍結深の変化を正しく推測・考慮することは，未来の寒冷地域の地下インフラの設計・維持管理の面で経済的に一番有利な判断を行うための手がかりとなると言えるであろう．

参考文献

- 1) 木下誠一：凍土の物理学，森北出版，1982
- 2) BRITISH COLUMBIA Ministry of Agriculture and lands : Livestock Watering FACTSHEETS, 2006