

現行の凍結深さ測定法の問題点と改善点

外塚 信（札幌道路エンジニア(株)）、石崎武志（北大・低温科学研究所）
間谷邦利（日本道路公団札幌建設局）

1. はじめに

北海道のような寒冷な気象条件では、冬の寒さのために地盤や土壌の凍結が生じる。その凍結に伴って、地中や地盤中の水分が凍結面に向かって吸い寄せられ、凍土中に氷（アイスレンズ）が析出して、その体積増加によって地盤が隆起する凍上現象が生じて、道路に不整な隆起が生じて舗装面を破壊したり、建物や鉄道線路が持ち上がるなどの雪氷災害を引き起こす。この凍上対策には各種の工法が採用されているが、その対策上、土壌の凍結過程に伴う凍結深さをより高い精度で測定して、各地域に応じた年最大凍結深さを決定する事は最も重要である。

従来の凍結深さの測定法には、直接、調査孔を掘削して①地温分布を測定したり、地盤の凍結状態を目視観察するという一部の特別な調査目的で実施される測定手法の他に、一般的には、②メチレンブルー凍結深度計を埋設する、③熱電対や測温抵抗温度計等を地中深さ方向に埋設してその地温分布から 0°C 線を算出する、④最大凍結深さや凍結・融解過程を自記記録・検知できる計測器を埋設するなどの測定手法が使用される。

しかし、国内、海外を問わず、多くの研究者からメチレンブルー凍結深度計による簡易的な測定結果と他の測定手法による結果との間には、しばしば食い違いが見られるという報告がされており、今後、凍結深さの測定法の統一化が望まれる現状にある。

そこで、著者らは高速道路の今後の凍上対策のあり方を検討するために、野外凍上試験で継続的に観測している種々の条件に応じた凍結深さの測定データを整理し直して、現在、一般的に使用されているメチレンブルー凍結深度計の構造も含めた従来の凍結深さの測定法の問題点や改善方法について簡単な検討を行ったので報告する。

2. 凍結深さの測定方法と測定結果の比較

旭川、帯広2地区では、凍上現象の地下水位深さへの依存性を現地実態調査で検証する目的に加えて、地表面熱収支解析を用いた精度の良い凍結深さの推定手法を確立する事をめざして、自然条件の寒さを利用した現場凍上試験を3～4年程度、継続実施している。

現地の凍結深さの測定は、地中に深さ5～20cm間隔に埋設された白金温度センサーを用いて、冬期間を通して1時間毎の連続計測から日平均地温分布を計算して 0°C 凍結線を算出する測定方法に並行して、メチレンブルー凍結深度計を用いた2週間毎の隔日測定を同時実施した。

図1には帯広地区6ヤード、4カ年間の地温測定結果から算出した凍結深さとメチレンブルー凍結深度計による測定値との相関結果を表した。メチレンブルー凍結深度計による測定値は、地温分布から推定した 0°C 凍結線にほぼ一致する試験ヤードもあるが、全体としては、多くの場合、地中凍結の進行時期や融解時期の違いにかかわらず、メチレンブルー凍結深度計の測定値が10～20cm程度、深めに計測される傾向が現れている。この傾向は、各試験ヤード毎ともに上記の2手法による測定値の間に測定年度によらずに同様な相違（地温では $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ のほぼ一定した温度差）が見られる事から、当該試験ヤードでは地中埋設前に計測機器－地温センサーを接続した時の温度校正を行わなかった原因

による機器測定上の誤差が大きく影響しているものと考えられる。

一方、図2は、事前に計測機器とセンサー1本毎を接続して0℃の温度校正を行った旭川地区試験ヤードにおける測定結果である。厳冬期、地中凍結が比較的ゆっくりと進行する時期（凍結進行速度1~2cm/day程度）には、地温測定による0℃凍結線とメチレンブルー凍結深度計による測定値の値にはかなりの一致が見られるのに対して、厳冬期でも気温上昇による一時的な凍結線の減少が見られる時期や、さらには、地表面方向からの融雪水浸透で急速に地温上昇を起こして地中凍結が促進される融雪期には、閉じた計測システムであるメチレンブルー凍結深度計では実際の地温変化（凍結状況）に対してメチレンブルー凍結深度計の測定値の応答性の遅れが顕著になることがわかる。

測定の一例として、ある一冬期全体について、地温測定とメチレンブルー凍結深度計それぞれによる0℃凍結線の測定結果の比較を図3に示す。一時的に急激な気温低下（日平均気温-20℃）が現れた2月下旬の時期や3月以降の本格的な融解期には、0℃凍結線の日変化が3cm/day程度と大きく、メチレンブルー凍結深度計の指示値には応答の遅れが目立つ傾向が読みとれる。

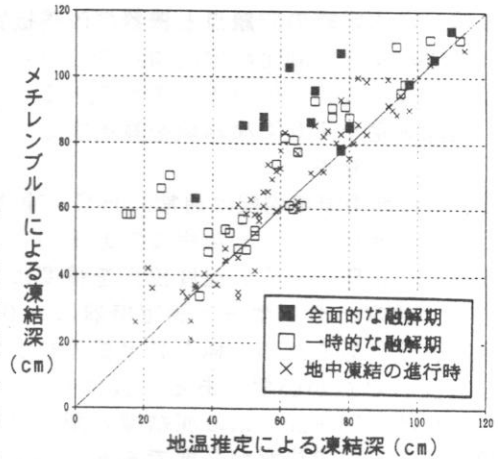


図1 凍結深さの測定値同士の相関関係
(機器との温度校正を未実施の試験ヤード、深さ20cm間隔に地温センサーを埋設)

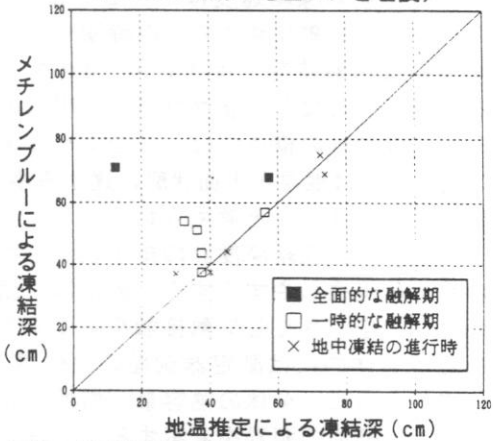


図2 凍結深さの測定値同士の相関関係
(機器との温度校正を行った試験ヤード、深さ5~10cm間隔に地温センサーを埋設)

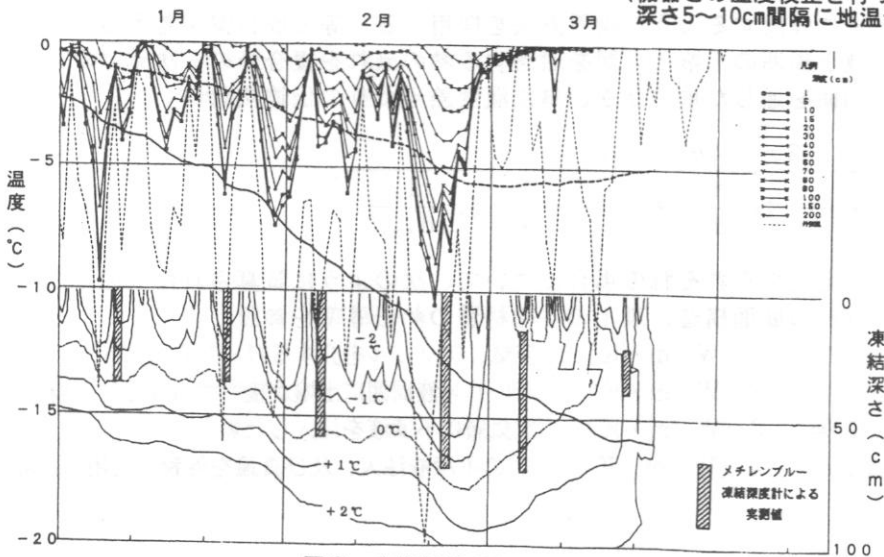


図3 冬期間を通した0℃凍結線の比較

3. 凍結深さ測定時の問題点と機器の改善提案

従来の凍結深さの測定時の問題点や注意点、および、今後の改善点は以下の通りである。

(1) 地温測定から0℃凍結線を算出する

方法の留意点

0℃近傍の地中温度勾配は通常0.05℃（凍結停滞時）～1℃（凍結進行時）／cm程度であるので、測定計器を接続した状態で0℃の温度校正を精度よく行う必要がある（通常、センサーと測定機器は±0.3℃程度の測定誤差があるため、極力測定誤差を少なくするような事前の対処が必要である。仮に0.5℃の測定誤差があれば、10～20cmの凍結深の測定誤差が生じる可能性があるので注意が必要である）。

(2) メチレンブルー凍結深度計の改善提案

通常、厳冬期の凍結速度は1～2cm/day程度である。しかし、急激な寒さの出現時期や最大凍結深以降の全面的な融解時期には3cm/dayを上回る凍結速度&融解速度になる可能性が高い。現状のメチレンブルー凍結深度計の構造では、このような大きな土壤温度の変化時には地温と平衡状態に達する事ができず、指示値が追従できないと考えられる。

メチレンブルー凍結深度計の指示値が土壤の0℃凍結線の変化に追従しやすくするためには、測器の慣性（Inertia）を小さくして熱接触をよくする工夫が必要である。具体的には測定器側面の熱伝導（熱接触）を良くするとともに、全体の熱容量（慣性）を小さくするために、①細めの測器を考案する、②空気層の隙間を小さくする、③空気層の隙間を不凍液で満たす、④アクリル製の外部保護管を金属製にして測器全体が地中に埋没するような設置方法を採用する等の改良案が考えられる。

メチレンブルー液と周囲の土壤との間を通過する熱の流れを複合管の一次元定常熱伝導と仮定した時、両側面を通した単位長さ、単位温度差当たりの伝達熱量は

$$Q = \frac{2\pi l (\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_i} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_n}{d_{n-1}}}$$

の計算式を用いて、上記のそれぞれの場合について、次のように試算された（図4のメチレンブルー凍結深度計の断面構造、表1の各種材質の熱伝導率を参照）。

- 1) $Q_1 / (l \cdot \Delta T) = 0.7$ [W/m・K] : 空気、アクリルを介するメチレンブルー凍結深度計本体
- 2) $Q_2 / (l \cdot \Delta T) = 1.8$ [W/m・K] : メチレンブルー液周囲に土壤が接触する仮想的な場合
- 3) $Q_3 / (l \cdot \Delta T) = 2$ [W/m・K] : 空気層に不凍液を注入した場合
- 4) $Q_4 / (l \cdot \Delta T) = 4$ [W/m・K] : 3)の不凍液注入、及び真鍮を外管に使用した場合

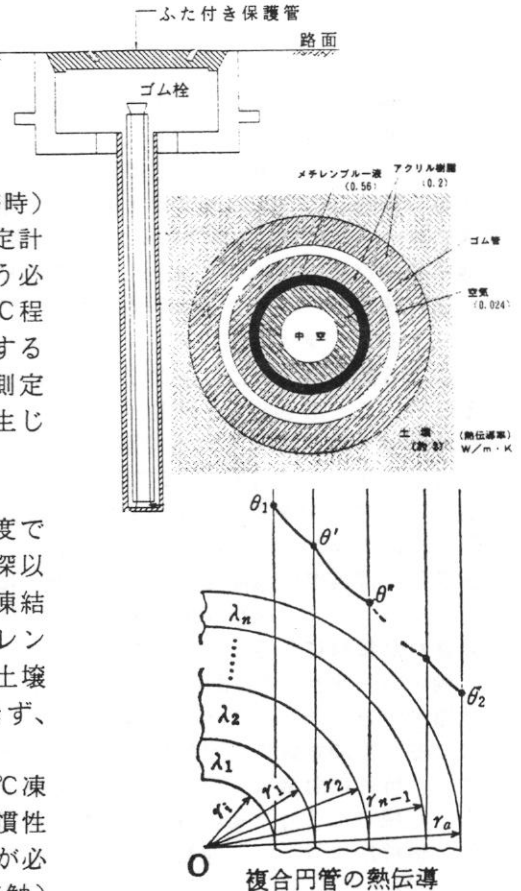


図4 メチレンブルー凍結深度計の構造と複合円管の熱伝導概略図

このように、メチレンブルー液の外側を全て土壌と仮定した時に比べて、実際のメチレンブルー液のアクリル容器とその周囲の空気層による熱伝達量の比率は約4%に過ぎない。仮に内管と外管の隙間の空気層に水（不凍液）を注入すると熱伝達量の比率は約10%に大きくなって熱伝導が良くなる。さらに、外管を真鍮にするとその比率は20%まで拡大して、周囲の土壌からの熱伝導はさらによくなる事が予想される。

過去の調査では、メチレンブルー凍結深度計の上蓋から融解水が浸入して管内で凍結して測定時に引き出せなくなる危険性を防止するために、内外保護管の空気層の隙間に不凍液を注入した場合の測定結果を図5に表す。不凍液注入によって周囲の土壌との熱伝導が改善された理由もあって、メチレンブルー凍結深度計による実測値と地温測定から算出した凍結深さとの間には、0℃凍結線の変動速度の大小にあまり影響されずに両者の測定値はほぼ一致する結果が得られている。不凍液注入による管内の熱対流は1～2mmと薄い水膜である事からその影響はほとんど無視できるものと考えられる。

4. まとめ

現場凍上試験による凍結深さの実測結果から得られた凍結深さの測定方法に関する知見は以下のようにまとめられる。

- (1) 3級や5級程度のPt白金温度センサーやサーミスタセンサーを使用する場合、0℃凍結線近傍の緩やかな地温勾配を考慮して、埋設前に十分な温度校正が必要である。
- (2) 現状のメチレンブルー凍結深度計は構造が簡単で安価な利点があるが、急激な地温変化に追従できない欠点がある事がわかった。しかし、通常の1～2cm/日程度の地温変化では、かなり高い精度で凍結深さの測定が可能である事も示唆された。メチレンブルー凍結深度計の場合、連続測定が不可能なために最大凍結深さに達する時期には2～3日間隔の密な測定を行ったり、他の測定との併用が必要である欠点はあるものも、構造上の改善を試みれば、凍結深さの測定機器としては今後とも十分使用可能であると考えられる。

表1 各種材料の熱伝導率 一覧表 (W/m・K)

	水	氷	アクリル樹脂	空気	土壌
熱伝導率 (0℃)	0.56	2.2	0.2	0.024	1.4～2.5

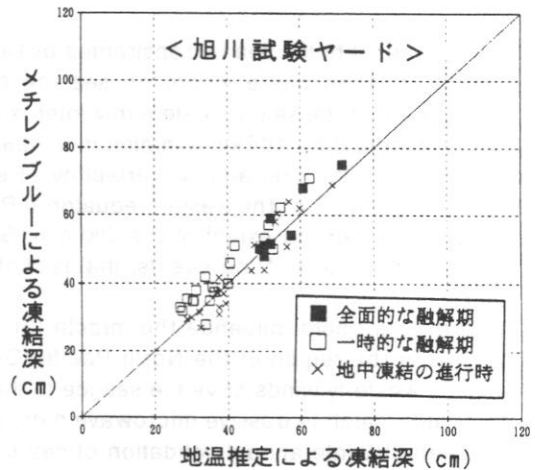


図5 凍結深さの測定値同士の相関関係
(メチレンブルー凍結深度計の内外管の隙間に不凍液を注入した場合)