

VI-5

断熱材設計における最低気温の簡易推定

○(株)地崎工業 技術情報センター 正会員 渋谷 卓
 (株)地崎工業 土木部技術課 正会員 須藤 敦史
 北海道大学大学院教授 正会員 三上 隆
 北海道開発コンサルタント(株) 正会員 岡田 正之

1. はじめに

寒冷地トンネルにおいて施工される断熱材の設計厚や施工延長は、一次・二次覆工コンクリート、断熱材、周辺地山の熱伝導率・熱容量などのパラメータや設計気温（入力値）により大きく左右¹⁾されるが、これらを正確に求めることは難しい。ここで寒冷地トンネルにおける断熱材の設計厚はFig.1に示すようなフローとなり、この問題点を整理すると以下に示す2つの基本事項に分けられる。

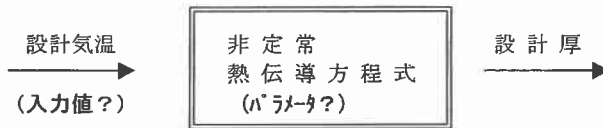


Fig.1 断熱材の設計フロー

(1) 覆工コンクリート、断熱材、周辺地山の熱定数・熱容量などの非定常熱伝導方程式中のパラメータの推定は、その不均質性により容易ではない。（パラメータの設定問題）

(2) 一般にトンネル計画地点における冬期の気温は観測されない場合が多いため、最低気温の推定は難しく、加えて供用時の複雑な坑内環境などによりトンネル延長方向の気温変動の推定はさらに難しい。（設計気温（入力値）の設定問題）

ここで断熱材の設計の際に必要な計画地点（坑口）の最低気温は、本来観測によって求めるべきものであるが、トンネルの位置・地形的な条件や社会的・経済的な理由により観測を実施していない場合が多く、合理的でかつ信頼性の高い設計条件の設定に至っていないのが現状である。

そこで本研究ではトンネル計画地点における設計気温の簡便な設定方法として、アメダスの観測気温を利用した確率・統計論を用いた手法を提案している。この手法は気温の統計的な特性を把握し、得られた統計特性と近傍の観測値からトンネル計画地点の気温推定を行うものである。

2. 統計特性による気温推定の概要

確率・統計的な推定手法のKriging²⁾では、対象場の平均値や分散値・共分散値などが既知であることが条件である。しかし今回の問題では平均値や分散値・共分散値を求めるのは難いため、他の近似的な手法が必要となる。そこでSemi-Varogram³⁾では平均値 m_z は未知、Semi-Variogram $\gamma(d_{ij})$ は2観測点間 (i, j) の距離 (d_{ij}) の相関関係として、観測値 $z(x)$ をもとに推定するものである。

ここで未観測点 (x_r) の推定気温 $z^*(x_r)$ は、式(1)のように既観測気温 $z(x_i)$ の線形和とし、これが不偏推定式になるには(2)、(3)の条件が必要となり、推定式は式(4)となる。

$$z^*(x_r) = \lambda_0(x_r) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) z(x_i) \quad (1)$$

$\lambda_i(x_r)$: 未観測点の係数(重み), N : 観測点数

$$\lambda_0(x_r) = 0 \quad (2), \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) = 1 \quad (3)$$

$$z^*(x_r) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) z(x_i) \quad (4)$$

ここで、式(4)の推定誤差の分散を最小にするように、式(5)を誘導すると式(6)が求められる。

$$\sigma_e^2(x_r) = E[\{z(x_r) - z^*(x_r)\}^2] \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ik}) + \mu(x_r) = \gamma(d_{kr}), \quad k=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Temperature at Planning Tunnel for Heat Insulator Design

By Taku SHIBUYA, Atsushi SUTOH, Takashi MIKAMI and Masauki OKADA

したがって、式(3)と式(6)を連立させて解くと式(4)の重み係数 $\lambda_k(x_i)$ ($k=1,2,\dots,N$)が求められ、この重み係数と観測値を式(4)に代入することで推定値が得られる。ここで式(6)における Semi-Vriogram $\gamma(d_{ij})$ を観測値より正確に求めることが推定精度を高める上で重要であり、詳細は文献4)等に委ねる。

3. 北海道における冬期の気温特性 (Semi-Variogram)

北海道における各地域(太平洋側東部, オホーツク海側, 日本海側南部・北部)および北海道全体の気温変動の統計特性を把握する目的で、北海道のアメダス78観測点における冬期(12月~3月)3年分の観測値から気温の統計特性 (Semi-Vriogram) を求める。

(1) アメダス観測値の標高補正

アメダスの観測値はその位置や標高により気温差を有しており、また地形などに起因する局所変動を示すと考えられるため、観測値の定常性を保つためにはトレンドや局所性を観測値から除かなければならない。しかし地形などに起因する局所的な影響の除去は容易でないため、ここでは式(7)に示すように標高差による気温差のみをアメダスの観測値から除去する。

$$\Delta z = 0.6 \times \Delta h / 100 \quad (7)$$

Δz : 気温差, Δh : 標高差(m)

ここでアメダスの観測値は局所的な影響を含むものが近似的に定常性は成立するものと仮定している。

(2) Experimental Variogram の算定

アメダス78観測点の気温 $z(x_i)$, ($i=1,2,\dots,N$)から、2観測点間の距離に対する Semi-Variogram $\gamma(d_{ij})$ (各観測点間の距離に対する相関関係)を以下に示す式(8), (9)より算定する。

$$d_a = \frac{1}{N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} d_{ij} \quad (8) \quad \gamma(d_a) = \frac{1}{2N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} [z(x_i) - z(x_j)]^2 \quad (9)$$

なお式(8)(9)において2観測点 (x_i, x_j) の距離が $(a+1) \times d \sim a \times d$ ($a=1,2,\dots$)間にある組数を $N(a)$ とし、離散距離 d は1kmとしている。

(3) Theoretical Variogram の推定

観測値から得られた Experimental Variogram から、式(10)に示す Theoretical Variogram $\gamma(d_{ij})$ を求める。

$$\gamma(d) = \sigma_z^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{L_v^2}\right) \right] \quad (10)$$

σ_z : 対象場の分散, L_v : 相関距離, d : 二点間距離

ここで各アメダスの観測値より求めた各地域(太平洋側東部, オホーツク海側, 日本海側南部・北部)および北海道全体における Theoretical Variogram の各パラメータを表-1に示す。

表-1 北海道における各地域のパラメータ

地 域	σ_z	L_v
オホーツク海側	0.7849	31.362
日本海側 北部	0.7855	37.979
南部	0.6907	13.726
太平洋側 西部	0.8843	57.871
東部(根室)	0.7861	13.330
東部(帯広)	0.6356	4.889
道 央	0.8161	25.261
道央(日本海側)	0.7855	31.276
道央(内陸側)	0.8258	17.709
道 内 平 均	0.7804	29.989

*道内78箇所の過去3年間
における冬期気温変動より算定

4. 実観測値による気温変動の推定

提案手法の妥当性を検証する目的でアメダスの観測値を用いた数値解析を実施する。あらかじめ既知アメダスの観測点(1点)を未観測点として選定して気温変動を推定する。次に推定値と実際の観測値を

比較して、推定誤差等により適用性の検証する。

まず、基本的な適応性の検証としてオホーツク海側および日本海側北部における気温変動の推定を試みる。オホーツク海側では滝上アメダスを未観測点として、滝上の観測値の推定に用いたアメダス観測点は西興部(ニホッパ)、遠軽、上川 計 3 点、日本海側北部では幌加内アメダスを未観測点として、幌加内の推定に用いたアメダスの観測点は同様に士別、和寒、達布 計 3 点を用いている。

ここで、それぞれ 3 点の既知点の観測値より推定した気温変動と実観測値を図-1, 2 に示す。

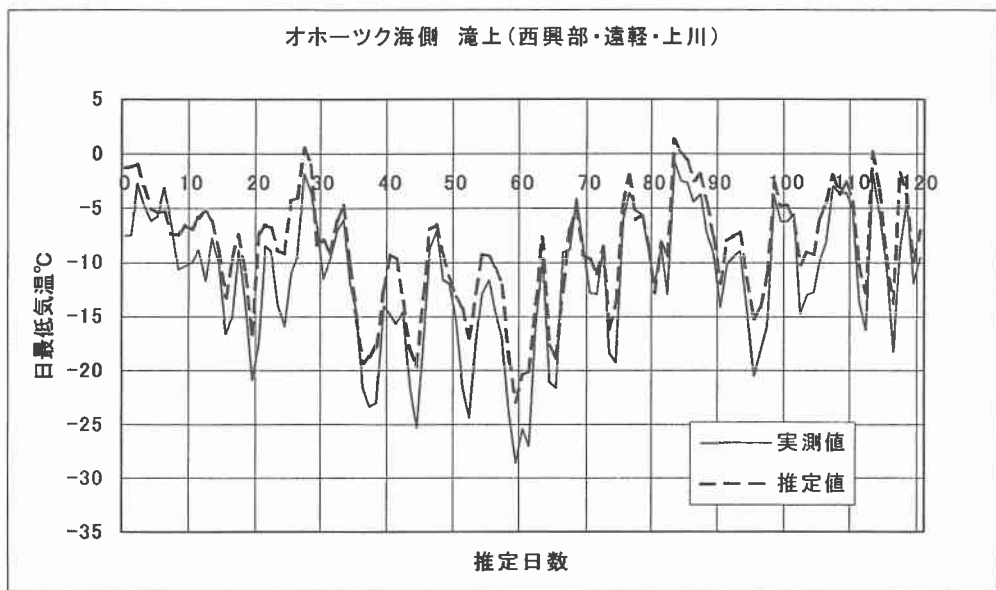


図-1 滝上の推定気温 (オホーツク海側)

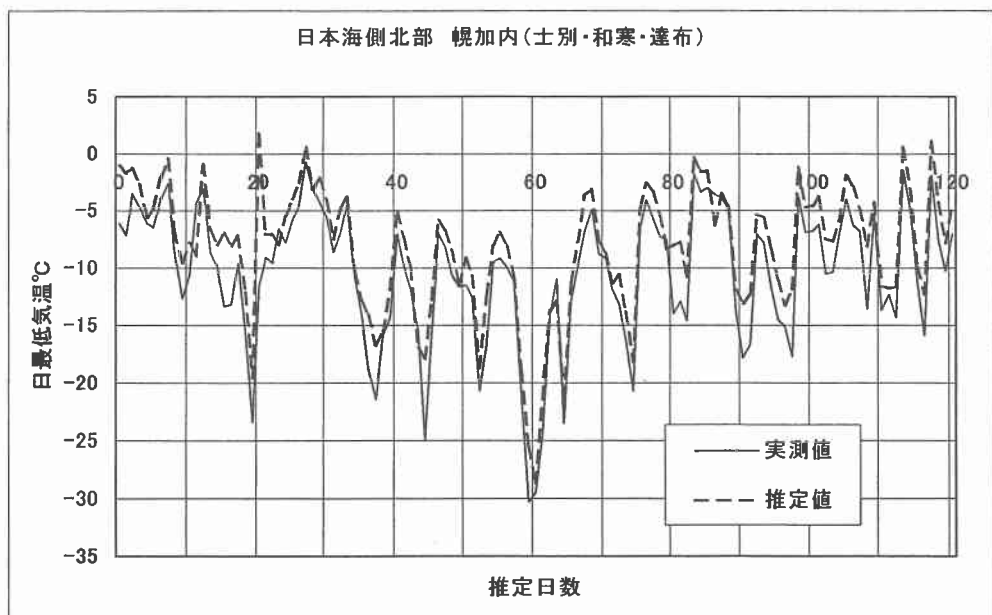


図-2 幌加内の推定気温 (日本海側北部)

加えて、表-1 に示した各地域における推定値と観測値の相関係数および誤差分散を表-2 に示す。

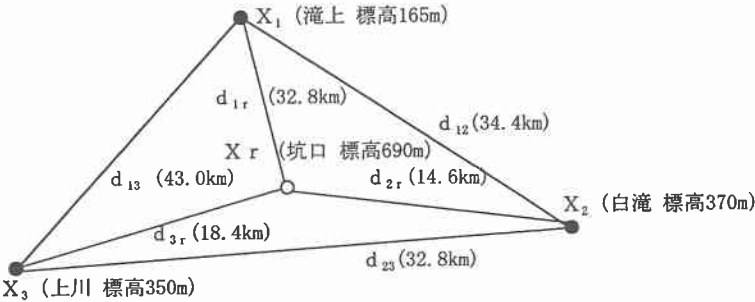
表－2 各地域における推定値の相関係数・誤差分散

地 域	相 関 係 数	誤 差 分 散
オホーツク海側	0.9385	5.0377
日本海側 北部	0.9409	3.9626
日本海側 南部	0.9520	2.8418
太平洋側 東部	0.9567	2.0647
太平洋側 根室	0.9425	4.2522
道 央		
日本海側	0.9393	3.4605
内陸側	0.9292	4.5737
道 内 平 均	0.9427	3.7419

ここで推定に用いたアメダスの観測データ期間は、1993 年 12 月～1994 年 3 月までの 121 日間である。また図-1, 2 および表-2 より比較的精度のよい推定値が得られていることから、未観測点の気温変動の推定に適用できる。

5. 断熱材の設計気温

実際の断熱材設計における未観測点の最低気温は、近傍のアメダス観測点における年平均気温 U_m および年振幅 A_y を用いて設定する。そこで本節では実設計と同様な手順で未観測点における年平均気温および年振幅を提案手法により算定する。いま図-3のような位置関係を示すアメダス(滝上、白滝、上川の既知3点)観測値から、坑口の年平均気温 U_m および年振幅 A_y を求める。



図－3 坑口とアメダス観測点（滝上、白滝、上川）

ここで、3点のアメダス観測点における年平均気温および年振幅を表-3に示す。

表－3 アメダス年平均気温・年振幅

	上 川	白 滝	滝 上
平均気温	5.0	4.8	5.0
年 振 幅	14.4	14.5	14.5

表－4 標高補正後の年平均気温

	上 川	白 滝	滝 上
平均気温	7.10	7.02	5.99

まず、各アメダスに対して式(7)に示した標高補正(0.0m)を施した年平均気温(表-4)を求める。次に各観測点と未観測点の距離および表-1に示したパラメータを式(10)に代入することにより、式(6)における各重み係数 $\gamma(d_{11}) \sim \gamma(d_{33})$ および $\gamma(d_{1r}) \sim \gamma(d_{3r})$ が求められ、以下の連立方程式が得られる。

$$0.3454\lambda_2(x_r)+0.4458\lambda_3(x_r)+\mu(x_r)=0.3243 \tag{11a}$$

$$0.3454\lambda_1(x_r)+0.3243\lambda_3(x_r)+\mu(x_r)=0.0848 \tag{11b}$$

$$0.4458\lambda_1(x_r)+0.3243\lambda_2(x_r)+\mu(x_r)=0.1291 \tag{11c}$$

$$\lambda_1(x_r)+\lambda_2(x_r)+\lambda_3(x_r)=1 \tag{3}$$

この連立方程式を解くことにより、 $\lambda_1(x_r)=0.0150$ 、 $\lambda_2(x_r)=0.5585$ 、 $\lambda_3(x_r)=0.4265$ が得られ、この係数と観測値を式(1)に代入して求められた値をに対して標高補正を施すことにより、表-5に示す坑口の年平均気温および年振幅が算定される。

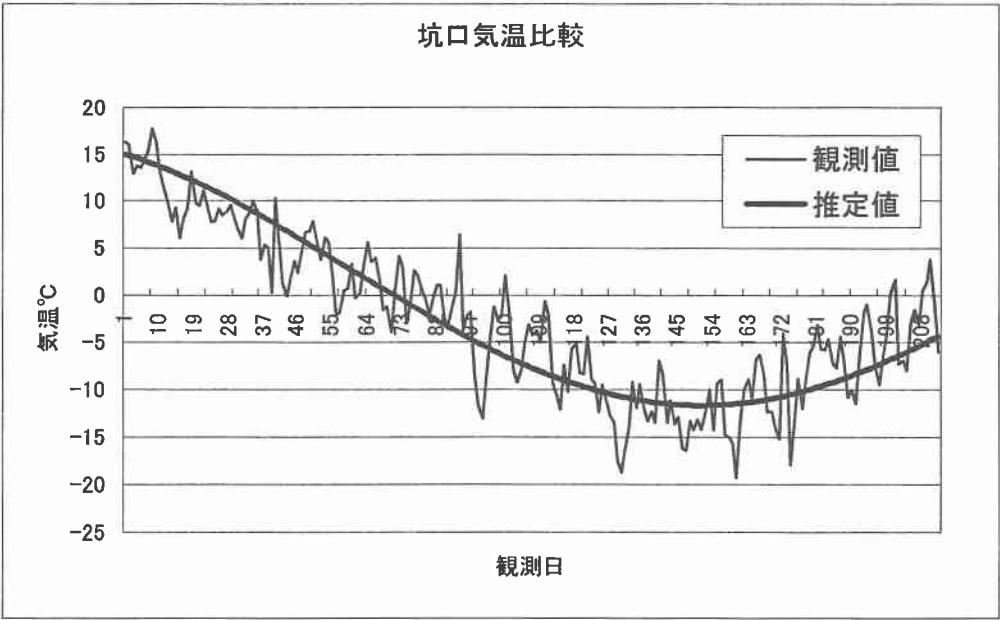
表－5 年平均気温・年振幅

	平均気温	振 幅
推 定 値	2. 899	14. 457

表－6 相関係数・誤差分散

	相関係数	誤差分散
推 定 値	0. 9139	12. 51

ここで求めた年平均と振幅よりを算出した推定値と上川坑口の観測気温を図-4に示し、同時に相関係数および誤差分散を表-6に示す。



図－4 観測気温と推定値

6. 結 論

本研究は寒冷地トンネルにおける合理的・経済的かつ簡便な断熱材の設計気温の設定方法として、アメダスの観測気温を利用した確率・統計論による推定手法を提案し、また同時に提案手法の妥当性の検証を行い実設計への適用性を示した結果、以下の結論が得られた。

(1) 未観測点における気温変動特性は距離によるSemi-Variogram (相関特性) で表すことが可能であり、

近傍のアメダス観測値とSemi-Variogramにより推定した未観測点における気温変動の推定誤差は小さい。

- (2) 実際の断熱材設計に用いる年平均気温および年振幅の推定においても提案手法による推定誤差は小さく、提案手法は合理的・経済的で簡便な手法であり実設計で十分使用可能である。

謝 辞 今回の研究に際して坑口の気象観測データ（一部）を御提供頂いた、北海道開発局 旭川開発建設部 上川道路建設事業所の皆さまに感謝の意を表します。

参考 文献

- 1) 須藤敦史, 三上 隆, 菫澤憲吉, 斉藤知秀 : 寒冷地道路トンネルの断熱材設計のための地山熱定数の推定, 土木学会論文集, No.553/VI-33, pp.201~208, 1996.
- 2) D.G.Krige: Two-dimensional Weighted Moving Averaging Trend Surfaces for Ore Evaluation, Proc.of Sym.on Math. Stat. and Comput. Appl. for Ore Evaluation, Johannesburg, South Africa, pp.13-38, 1966.
- 3) J.P.Delhomme: Kriging in the Hydrosience, Advance in Water Resources, Vol.1, No.5, pp.251-266, 1978.
- 4) 須藤敦史, 三上 隆, 岡原貴司, 岡田正之, 菫澤憲吉 : 寒冷地道路トンネルの断熱材設計における気温変動の推定, 土木学会論文集, No.616/VI-42, pp.103-110, 1999.