

トンネル断熱材の合理的設計を目的とした Semi-Variogramによる坑口気温の補間

Interpolation of Design Temperature for Tunnel Heat Insulator using Semi-Variogram

須藤 敦史*・三上 隆**・岡田 正之***・角谷 俊次****

Atsushi SUTOH, Takashi MIKAMI, Masayuki OKADA and Shunji KADOYA

*正会員 博士(工学) 株式会社地崎工業 土木技術部 主席研究員 (〒105-8488 東京都港区西新橋2-23-1)

**フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授工学研究科社会基盤専攻(〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目)

***正会員 (株)ドーコン 交通施設部 (〒004-0051 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

****正会員 (株)エーティック 計測部 (〒063-0801 札幌市西区二十四軒1条5丁目6番1号)

In this study consists of the following two topics, one is a basic consideration on the temperatures which have shown in nonhomogeneously distributed spatial process, and the other is estimated and/or interpolation for design temperatures using Semi-Variogram which was a stochastic procedure. In the former study, temperatures can be defined from homogeneous spatial processes by means of a linear transformation. In the latter one, temperatures was interpolated by Semi-Variogram, and compared with observation data. Finally, numerical examples are worked out to demonstrate the usefulness of this method for a heat insulator design in planning tunnel.

Key Words: stochastic procedure, interpolation, semi-variogram, optimum design, tunnel heat insulator

1. はじめに

寒冷地トンネルの多くは凍害による変状を受けている¹⁾ため、北海道の新設トンネルでは地山の凍結防止の目的で一次・二次覆工間に断熱材が施工されている。

この断熱材の設計厚さは図-1に示すように覆工・断熱材・周辺地山を一次元の非定常熱伝導モデルに近似して求めているが、トンネル坑口の設計(最低)気温や各支保部材・地山の熱伝導率・熱容量に大きく左右される^{2),3)}。

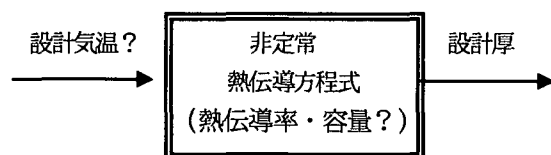


図-1 断熱材の設計フロー

そこで、まず支保部材や地山の熱伝導率・熱容量の設定値に対しては、逆問題として礼文華トンネルで実際に得られた覆工断面の観測温度を用いて検証し、同定における効率的な観測位置や個数、熱伝達率や坑内環境等が非定常熱伝導(設計)解析へ与える影響の考察を行っている⁴⁾。

次に、設計(最低)気温を正確に設定しようとするなら

ば、トンネル計画地点の冬期気温を長期的に観測して決定するのが基本である。しかし一般的に新設トンネルは山間部に計画され(位置・地形的な問題)、加えて社会的・経済的な理由より長期的な気温観測は実施されない場合が多く、信頼性の高い設定に至っていないのが現状である。

一方、地震や気象あるいは材料の物性値などは常に不確定性や観測誤差などを有する現象であるため、普遍的な把握は非常に難しく、そのため確率・統計的な概念では(1)本来有するばらつき(空間分布)、(2)知識やデータ不足のための未知、(3)ランダムな誤差などとして不確定な事象・現象の理解を行っている。

そこで本研究では、断熱材設計における経済的かつ合理的な設計(最低)気温の設定を目的として、地域気象観測システム(以下、アメダスと記述)のような計画トンネル周辺における既存の観測値を利用する確率・統計的な補間(Semi-Variogram⁵⁾)手法を提案している。

まず、北海道における内陸・山間部のアメダスの観測気温から冬期の気温変動の統計的な変動特性を把握する。

次に得られた統計特性と近傍数箇所のアメダス観測気温を用いてトンネル坑口(未観測点)における気温変動の補間を行っている。

最後に補間値と実測値を比較することにより、本手法

の実設計への有用性・妥当性の検証を行っている。

2. 未観測点における気温変動の補間

新設トンネルの計画（未観測）地点における設計（最低）気温の設定は、気温変動とその空間分布を推定する問題に置き換えられる。

このような問題に対して Kriging⁶⁾は空間（標本場）の統計特性と得られた観測（標本）値より未観測点の値を補間する手法であるが、この手法では空間場の平均値や分散値・共分散値など統計的な分布特性が既知であることが前提条件となる。しかし、実際には標本（観測）数はそれほど多くないため、統計的特性を限られた標本より厳密に算出するのは不可能である。

一方 Semi-Varogram は得られている観測値から相関関係（空間場の分布特性）を近似的に算出して、それを基に未観測点における観測値を補間するものである。

ここで Semi-Varogram による補間手法は観測値 $z(x)$ を本質的に定常性を示す確率場 (Intrinsic fields)からの標本値として、式(1)～(3)に示すように場の平均値 m_z は未知、既知点 i, j における標本値の関係は 2 点間距離の関数 (Semi-Variogram $\gamma(d_{ij})$)で示されると定義している。

$$E[z(x)] = m_z \quad (1)$$

$E[X]$: X の期待値 (未知)

$$2\gamma(d_{ij}) = \text{var}[z(x_i) - z(x_j)]$$

$$= E[z^2(x_i)] - 2E[z(x_i)z(x_j)] + E[z^2(x_j)] \quad (2)$$

$$E[z(x_i)z(x_j)] = \frac{1}{2}E[z^2(x_i)] + \frac{1}{2}E[z^2(x_j)] - \gamma(d_{ij}) \quad (3)$$

$\gamma(d_{ij})$: Semi-Variogram (既知)

未観測点 (x_r) の推定気温 $z^*(x_r)$ は、式(4)に示すように既観測点の気温 $z(x_i)$ の線形和とする。

$$z^*(x_r) = \lambda_0(x_r) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)z(x_i) \quad (4)$$

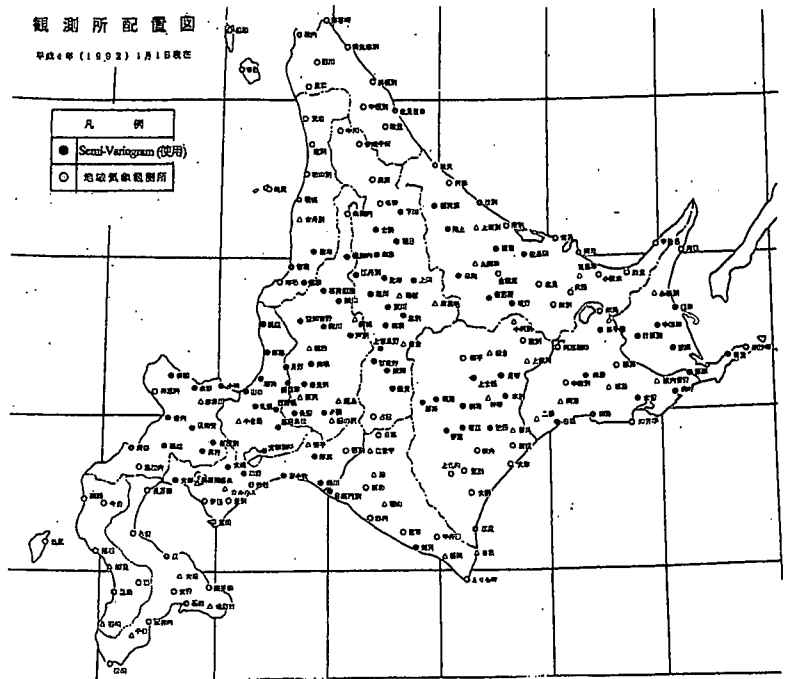


図-2 Semi-Varogram に用いたアメダス観測点

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

ここで、式(4)が不偏推定式となるには、式(5)を満足しなくてはならず式(6)が得られる。

$$E[z^*(x_r)] = E[z(x_r)] \quad (5)$$

$$m_z = \lambda_0(x_r) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)m_z \quad (6)$$

加えて、式(6)が場の平均値 m_z によらず成り立つには、式(7)、(8)の条件が必要となり、補間式は式(9)となる。

$$\lambda_0(x_r) = 0 \quad (7), \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) = 1 \quad (8)$$

$$z^*(x_r) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)z(x_i) \quad (9)$$

よって、以下に示す式(10)と式(8)を連立させて解くと、補間式(9)における各既知点の重み係数 $\lambda_k(x_r)$ ($k=1, 2, \dots, N$) は推定誤差分散を最小にすることと求められる。(APPENDIX 参照)

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)\gamma(d_{ik}) + \mu(x_r) = \gamma(d_{kr}), \quad k=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

ここで $\mu(x_r) = E[\{z(x_r) - m_z\}^2]$, また式(10)における

Semi-Vriogram: $\gamma(d_{ij})$ を観測値より正確に求めることが、

表-1 気象区分ごとの相関パラメータ

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
日本海側 内 陸 側	0.7855	31.276
0.8258	17.709	
道 内 平 均	0.7804	29.989

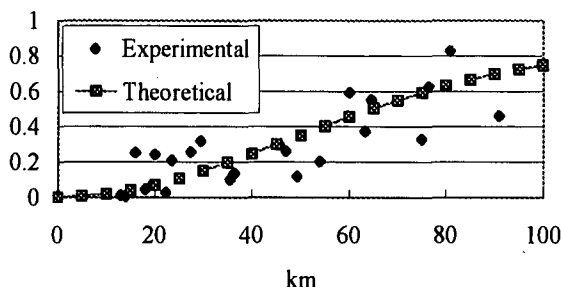


図-3 Experimental Variogram の例 (日本海側)

補間精度を高める上で最も重要な点である。

3. 冬期気温の分布特性 (Semi-Variogram)

冬期に厳しい寒さを示す内陸・山間部を中心とした (宗谷・檜山・渡嶋・日高支庁を除く) 地域における気温変動の空間分布特性を把握するため、図-2 に示すアメダス 78 観測点における冬期(12 月～3 月)3 年分の観測気温から、Semi-Variogram を求める。

3.1 空間分布 (相関特性) の算出

まず、78 点のアメダス観測気温から任意の 2 点を選択し、その時間変動 $z(x_i)$, ($i = 1, 2, \dots, N$) と 2 観測点間の距離から、気温変動の距離に対する相関関係 (Experimental Variogram) を求める。

$$d_a = \frac{1}{N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} d_{ij} \quad (11)$$

$$\gamma(d_a) = \frac{1}{2N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} [z(x_i) - z(x_j)]^2 \quad (12)$$

ここで $N(a)$ は 2 観測点 (x_i, x_j) 距離が $(a+1) \times d \sim a \times d$ ($a = 1, 2, \dots$) 間の組数としており、ま

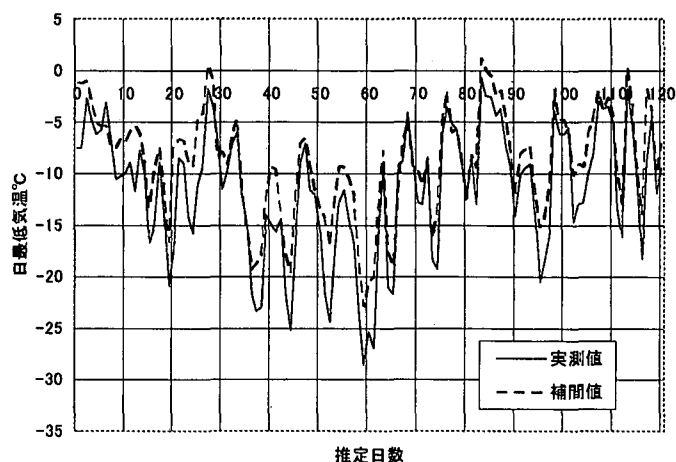


図-4(a) 滝上の補間値(オホーツク海側)

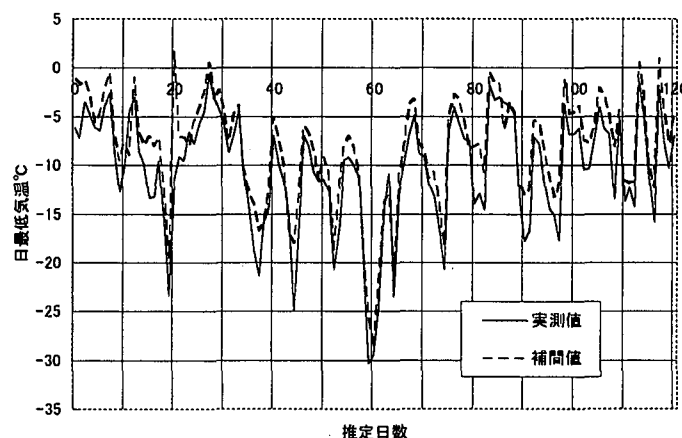


図-4(b) 幌加内の補間値(日本海側北部)

た離散距離 d は 1 km を用いている。

次に、求めた気温変動の距離に対する相関特性から、モデル化した相関関係 (Theoretical Variogram) を求める。ここでは各種提案されている実用的なモデル⁵⁾の中から式 (13) に示す指数関数型を用いている。

$$\gamma(d) = \sigma_z^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{L_v^2}\right) \right] \quad (13)$$

σ_z : 対象場の分散, L_v : 相関距離, d : 二点間距離

ここで、アメダスの各観測点における実際の気温変動から求めた日本海側の Experimental Variogram の例を図-3、加えて気象区分ごとの式 (13) における相関パラメータを (σ_z, L_v) を表-1、に示す。

以上、トンネル計画 (未観測) 点の気温変動を提案する Semi-Variogram で補間するには、まず補間しようする地点と近傍数カ所のアメダス (既知点) との位置関係とその距離を算出し、表-1 の相関パラメータ (σ_z, L_v) お

表-2(a) 補間誤差 (滝上)

相 関 係 数	誤 差 分 散
0.96	3.25

表-2(b) 補間誤差 (幌加内)

相 関 係 数	誤 差 分 散
0.93	5.05

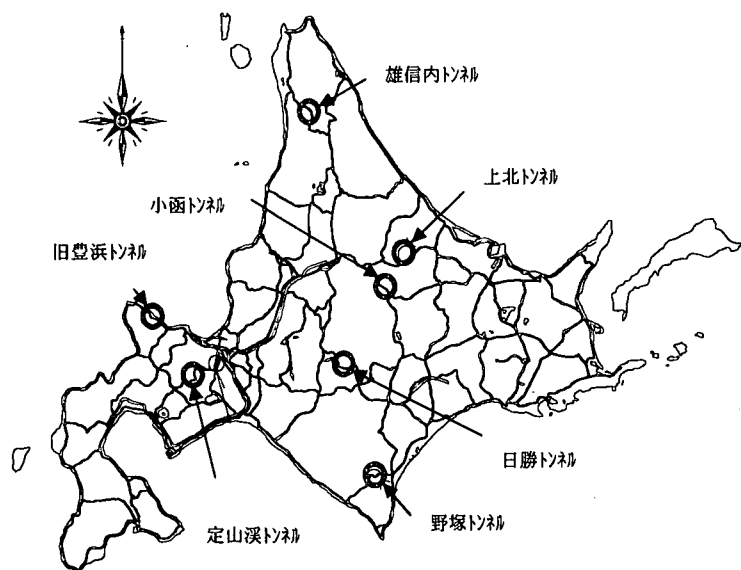


図-5 観測トンネル位置図

および算出された距離より式(13)の Semi-Vriogram $\gamma(d_{ij})$ を求める。

次に,得られた Semi-Vriogram $\gamma(d)$ を式(10)に代入して式(8)と連立させることで,各既知地点における重み係数 $\lambda_k(x_r)$ ($k=1,2,\dots,N$)が求められ,この重み係数 $\lambda_i(x_r)$ と近傍数カ所アメダスの実測値 $z(x_i)$ を式(9)に

表-3 各トンネル坑口部の年平均気温,年振幅

トンネル名	年平均気温	年振幅
雄信内トンネル	6.10	13.8
上北トンネル	2.79	14.3
小函トンネル	2.94	14.5
(旧)豊浜トンネル	7.35	12.9
定山溪トンネル	4.20	13.7
日勝トンネル	1.13	14.2
野塚トンネル	3.68	13.1

代入することで補間値 $z'(x_r)$ が簡単に求められる。

3.2 実観測値による気温変動の補間

Semi-Vriogramを用いた手法の基本的な検証としてオホーツク海側および日本海側北部のアメダス観測点における気温の時間変動の補間を試みる。

検証方法はあらかじめアメダス観測点(1点)を未観測点として選定して,提案する手法によりその点の気温変動を補間する。そして補間値と実際の観測値を比較してその補間誤差を求めて検証を行う。

ここで地形などの局所的な影響の除去は標高差による気温差のみを関係式(14)を用いて除去する。

$$\Delta z = 0.6 \times \Delta h / 100 \quad (14)$$

Δz : 気温差, Δh : 標高差(m)

まず,オホーツク海側の滝上を未観測点として補間に使用した既知点としてのアメダスは西興部・遠軽・上川の計3点,日本海側北部では幌加内を未観測点として用いたアメダス既知観測点は同様に土別・和寒・達布の計3点を用いている。

ここで,求められた気温(時間)変動の補間値を図-4,加えて補間値と実測値の相関係数および誤差分散を表-2に示す。

図-4(a),(b)および表-2(a),(b)より,補間値は0.9以上の相関係数が得られることより,精度の良い補間が行えていると言える。

したがって,未観測点における気温変動の補間にこの Semi-Vriogram を用いた手法は十分適用できる。

ここで補間に用いたアメダスの観測値は1993年12月~1994年3月までの121日間における気温の時間変動を用いている。

4. 断熱材設計のための年平均気温・年振幅の補間

一般に気温の年周期変動を簡便に表す場合には年周期変動は年平均気温と年振幅を有する正弦関数で近似され⁸⁾,アメダスにおいても同様に年周期変動は年平均気温と年振幅で示されている。

これらの値が提案するSemi-Vriogramを用いた補間法で簡便に得られれば,断熱材設計における設計(最低)気温が簡便かつ正確(合理的)に求められ,一次元非定常熱伝導モデルにより断熱材の設計厚さが決定される。

具体的に示すと気温の年周期変動は,式(15)のように年平均気温 U_m と年振幅 A_y を有する正弦関数で表現されている⁹⁾。

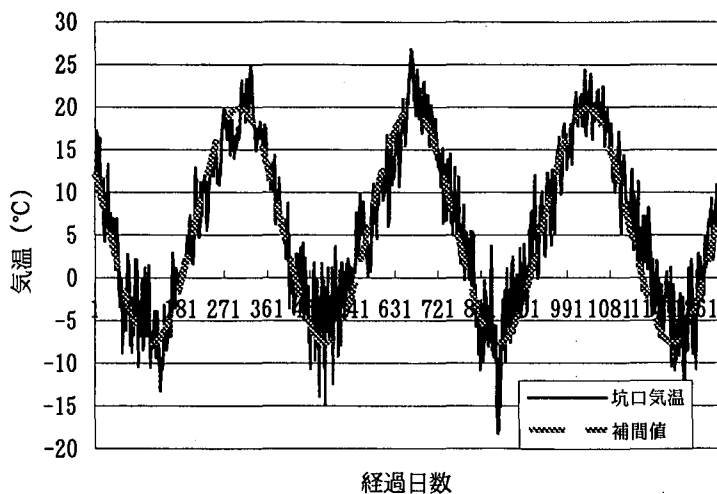


図-6(a) 雄信内トンネル坑口気温の補間値

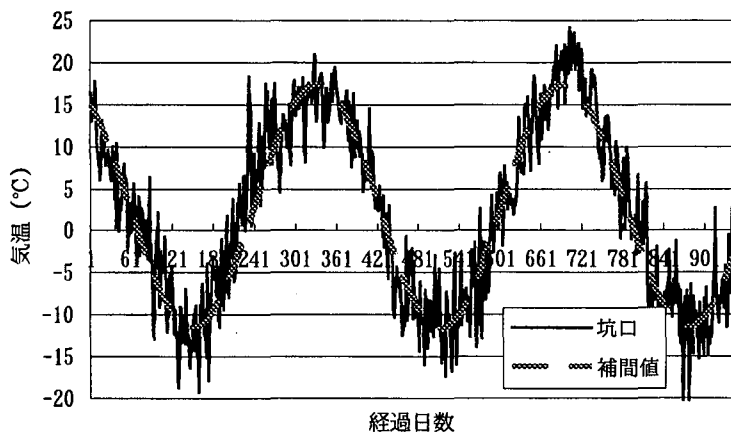


図-6(b) 上北トンネル坑口気温の補間値

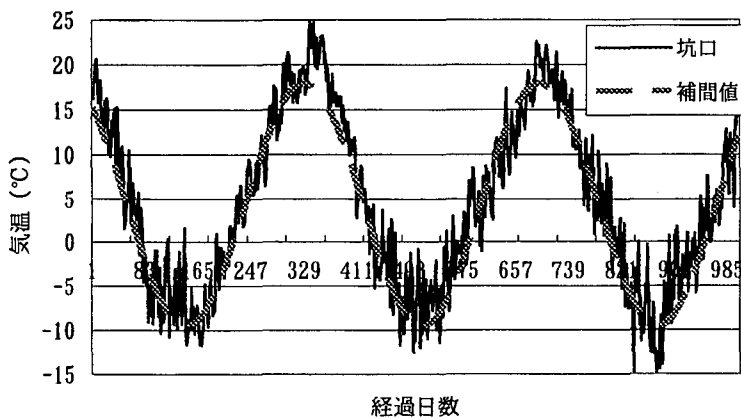


図-6(c) 定山溪トンネル坑口気温の補間値

$$U = U_m - A_y \sin\{2\pi(t - t_0)/365\} \quad (15)$$

U_m : 年平均気温, A_y : 年振幅,

t : 経過日数(t_0 : 調整日数)

表-4 補間誤差

相 関 係 数	誤 差 分 散
0.914	5.242

そこで、断熱材の実設計計算への適応性とその簡便性を検証する目的で、図-5に示す7箇所のトンネルの坑口部における年平均気温 U_m および年振幅 A_y の補間値を近傍3箇所のアメダスの観測値と提案するSemi-Vriogramを用いた手法より求める。

ここで、提案手法により求められた各トンネル坑口の年平均気温 U_m および年振幅 A_y

を表-3に示し、これより得られる年周期変動(正弦関数)と実際に観測された各トンネルにおける口気温の変動を図-6に示す。

加えて、補間値と観測値の相関係数および誤差分散を表-4に示す。

図-6、表-3、4より、補間値は0.9以上の相関係数を示していることより、精度の良い補間が行えている。

したがって気温の変動傾向とその距離との相関特性(Semi-Vriogram)を考慮することで各トンネル坑口気温における年周期変動のパラメータ(年平均気温 U_m 、振幅 A_y)の補間はアメダスの実観測値と簡単な計算でかつ正確に求められ断熱材の設計の省力化・合理化が図れると考えられる。

5. 結 論

本研究は寒冷地トンネルの断熱材設計における合理的かつ簡便な設計(最低)気温の設定法の確立を目的として、未観測点における気温変動の補間を、78点のアメダスの観測気温より求めた気温変動の距離との相関特性(Semi-Variogram)により試みた。

次に、求められた補間値と得られている観測値を比較することにより、提案するSemi-Variogramを用いた手法の妥当性と実際の断熱材設計に対する適用性を検討した結果、

以下に示す結論が得られた。

- (1) アメダス観測値より気温変動の空間分布特性(Semi-Variogram)を事前に求めておけば、少ない観測値(3点程度)から未観測点の気温変動の補間が支障なく行え、補間値は0.9以上と高い相関係数を示す。

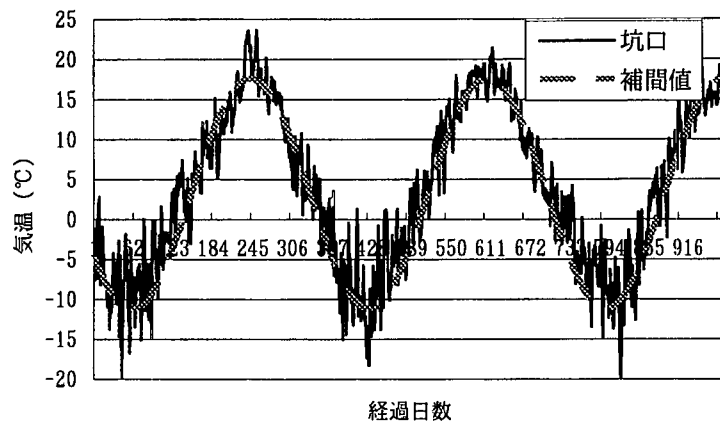


図-6(d) 小函トンネル坑口気温の補間値

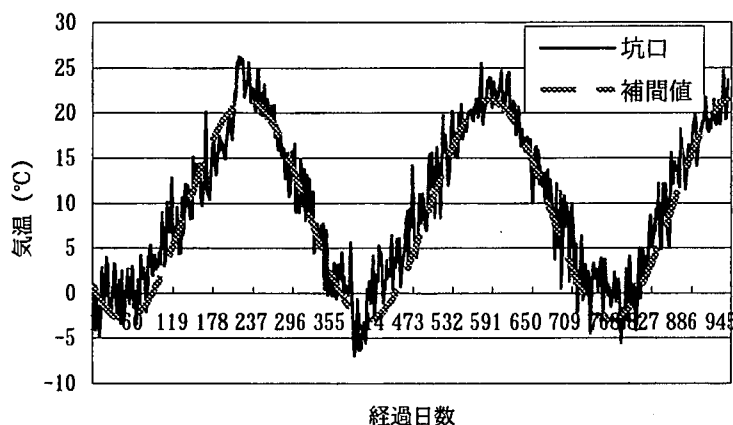


図-6(e) 旧豊浜トンネル坑口気温の補間値

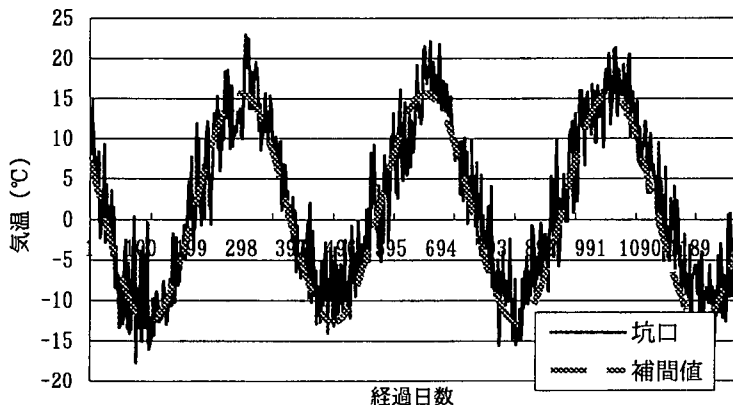


図-6(f) 日勝トンネル坑口気温の補間値

(正弦関数における年平均気温 U_m

および年振幅 A_y)は、時間変動と同様に近傍数箇所のアメダス観測値とSemi-Vriogramから簡便に求められる。加えて7箇所のトンネル坑口における年平均気温 U_m と振幅 A_y の補間精

度(相関係数0.9以上)より、実際の断熱材設計への適応性とその簡便性が検証された。

最後に、このSemi-Vriogram手法は空間場の統計的性質を基にして未観測点における値を補間するため、局所的に変動する場合における観測データに対しての適用は難しいと推測されるため、局所性を考慮した補間手法の開発は今後の課題と考える。

APPENDIX

(係数 $\lambda_i(x_r)$ の最小誤差分散推定)

式(9)において推定誤差の分散値が最小になるような各重み係数 $\lambda_i(x_r)$ は以下となる。

$$\varepsilon(x_r) = z(x_r) - \hat{z}(x_r)$$

$$= \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) z(x_i) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) z(x_i) \quad (\text{A-1})$$

また、推定誤差の分散は式(A-2)となる。

$$\begin{aligned} \sigma_\varepsilon^2(x_r) &= E\{[z(x_r) - \hat{z}(x_r)]^2\} \\ &= E\left\{\left[\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \{z(x_r) - z(x_i)\}\right]^2\right\} \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \\ &\quad \cdot E\{[z(x_r) - z(x_i)][z(x_r) - z(x_j)]\} \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \\ &\quad \cdot [E\{z^2(x_r)\} - E\{z(x_r)z(x_j)\} \\ &\quad - E\{z(x_i)z(x_r)\} + E\{z(x_i)z(x_j)\}] \end{aligned}$$

(2) Semi-Variogram を用いた手法では限られた標本数(78点程度)から統計的な場の分布特性を近似することができる。しかし Kriging では厳密な分布特性が前提であり多くの標本数が必要となるため、実際の観測データから厳密な分布特性を正確に求めるのは非常に難しい。

(3) トンネル坑口における気温の年周期変動パラメータ

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) [E[z^2(x_r)] \\
&\quad - \frac{1}{2} E[z^2(x_r)] - \frac{1}{2} E[z^2(x_j) + \gamma(d_{rj})] \\
&\quad - \frac{1}{2} E[z^2(x_i)] - \frac{1}{2} E[z^2(x_r)] + \gamma(d_{ir}) \\
&\quad + \frac{1}{2} E[z^2(x_i)] - \frac{1}{2} E[z^2(x_j)] + \gamma(d_{ij})] \\
&= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) [\gamma(d_{rj}) + \gamma(d_{ir}) - \gamma(d_{ij})] \\
&= \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \left[\sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) \{\gamma(d_{rj}) + \gamma(d_{ir}) - \gamma(d_{ij})\} \right] \\
&= \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \left[\sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) \gamma(d_{rj}) \right. \\
&\quad \left. + \sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ij}) \right] \\
&= \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \left\{ \sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) \gamma(d_{rj}) \right. \\
&\quad \left. + \gamma(d_{ir}) - \sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ij}) \right\} \\
&= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \gamma(d_{rj}) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) \\
&\quad - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ij}) \\
&= \sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) \left\{ \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{rj}) \right\} + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) \\
&\quad - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ij}) \quad (A-2)
\end{aligned}$$

$\gamma(d_{rj}) = \gamma(d_{ir})$ より, 式(A-2)の第1項と第2項は同じとなるため以下ようになる。

$$\sigma_e^2(x_r) = 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ij}) \quad (A-3)$$

条件式(7),(8)のもとで式(A-3)を最小にする重み $\lambda_i(x_r)$ を求める。

$$\begin{aligned}
I &= \sigma_e^2(x_r) - 2\mu(x_r) \left\{ \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) - 1 \right\} \\
&= 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ij})
\end{aligned}$$

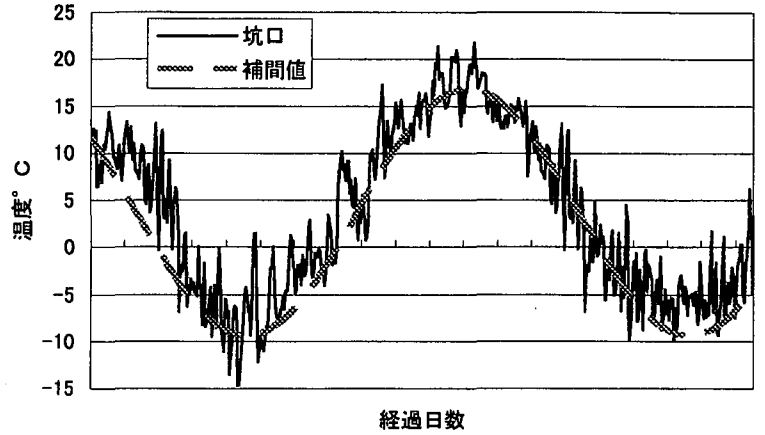


図-6(g) 野塚トンネル坑口気温の補間値

$$-2\mu(x_r) \left\{ \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) - 1 \right\} \quad (A-4)$$

$$\mu(x_r) : E[\{z(x_r) - m_z\}^2]$$

式(A-4)を最小にする係数は $\lambda_k(x_r) (k=1, 2, \dots, N)$ で変微分することによって求められる。

$$\frac{\partial I}{\partial \lambda_k(x_r)} = 2\gamma(d_{kr}) - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ik})$$

$$-2\mu(x_r) = 0 \quad (A-5)$$

したがって, 式(A-6)および式(A-7)を連立方程式として解くと $\lambda_i(x_r)$ が求められる。

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

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) = 1 \quad (A-7)$$

ここで, 式(A-6)のもとでの誤差共分散式は以下のように表される。

$$\sigma_e^2(x_r) = 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \left\{ \sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ij}) \right\}$$

$$= 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \{ \gamma(d_{ir}) - \mu(x_r) \}$$

$$= 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \{ \gamma(d_{ir}) - \mu(x_r) \} \quad (A-8)$$

$$\sigma_e^2(x_r) = \mu(x_r) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) \quad (A-9)$$

なお, 推定点が観測点と一致する場合の推定値は観測値と一致し, その時の誤差分散は0となる。

参考文献

- 1) 坂本稔, 川北稔, 五十嵐敏彦: 道路トンネルの変状実態 - 北海道の場合 -, トンネルと地下, 第20巻5号, pp.31~

- 35,1989.
- 2) 三上 隆,林 憲造,権田静也:寒冷地道路トンネルの断熱材設計のための実用的な温度算定式の提案,土木学会論文 集,No.498/VI-24, pp.87~93,1994.
 - 3) 芳村仁,三上隆,小山田欣裕:寒冷地道路トンネルの地山温解析(非定常熱伝導解析),土木学会北海道支部論文報告集,昭和63年度, pp.109-112,1988.
 - 4) 須藤敦史,三上 隆,荏澤憲吉,齊藤知秀: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.
 - 5) Delhomme, J.P.:Kriging in the Hydrosceince:*Advance in Water Resources*, Vol.1,No.5,pp.251-266,1978.
 - 6) Krige,D.G.:Two-dimensional Weighted Moving Averageing Trend Surfaces for Ore Evaluation, *Proc.of Sym.on Math. Stat. and ComputApplfor Ore Evaluation*, Johannesburg, South Africa, pp.13-38,1966
 - 7) 須藤敦史,三上 隆,岡原貴司,岡田雅之,荏澤憲吉: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.
 - 8) 岡田勝也,松本嘉司:寒冷地トンネルにおけるつらら発生領域に関する統計的・理論的解析,土木学会論文集,No.388/III-8,pp.77-84, 1987.
 - 9) 岡田勝也,松本嘉司:鉄道トンネルにおける凍結深度の実態とトンネル内気温の周期的変化に対するその解析,土木学会論文集,No.424/III-14,pp.179-186,1990.

(2002年4月19日)