

寒冷地トンネルの断熱材設計における坑口・坑内気温の推定法の精度検証

Inspection of the Identified and Interpolated Temperatures at Tunnel for Heat Insulator Design

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)地崎工業 技術部 主席研究員 (〒105-8488 東京都港区西新橋2-23-1)

**フェロ-会員 エ博 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)

***フェロ-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 the interpolation of the tunnel mouth temperatures using Semi-Variogram which is a stochastic procedure, and the other is the identification of the tunnel inner temperatures using actual observation data. In the former study, temperatures of tunnel mouth can be defined by a simple formula, and it is interpolated by Semi-Variogram. In the latter one, tunnel inner temperatures are identified by the observation data from several tunnels. And estimated temperatures are compared with some actual observation data. Finally, numerical examples are worked out to demonstrate the usefulness of this estimation method for heat insulator design of planning tunnel.

Key Words: interpolation, Identification, semi-variogram, observation, optimum design, tunnel heat insulator

1. はじめに

北海道における新設道路トンネルでは地山凍結防止の目的で坑口の一定区間において一次・二次覆工の間に断熱材を施工しているが、その施工厚さ・延長はトンネル坑口気温および坑内延

長方向の気温変動に大きく左右される¹⁾。

しかし、トンネル坑口の冬期気温は観測されない場合がほとんどであり、加えて坑内延長方向における気温変動は坑内における風向・風速、通過車両の排気熱や坑内換気など様々な現象の影響を受けるため、その推定は非常に難しく、信頼性の高い評定に至っていないのが現状である。

そこでトンネル坑口(気温の未観測地点)気温の合理的な推定法として、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-Variogram²⁾)手法を提案^{3),4)}している。

次に、トンネル坑内延長方向の気温変動は、図-1に示すように7箇所のトンネルにおける坑口・坑内延長方向の観測気温から、その特性を抽出して、坑内風の状況に即した延長方向における気温変動の回帰式の同定⁵⁾を行っている。

したがって、寒冷地トンネルにおける断熱材設計のための坑口および坑内延長方向の冬期気温の設定(推定)は、1) 坑口気温・周辺アメダスを利用してSemi-Variogramによる補間により求

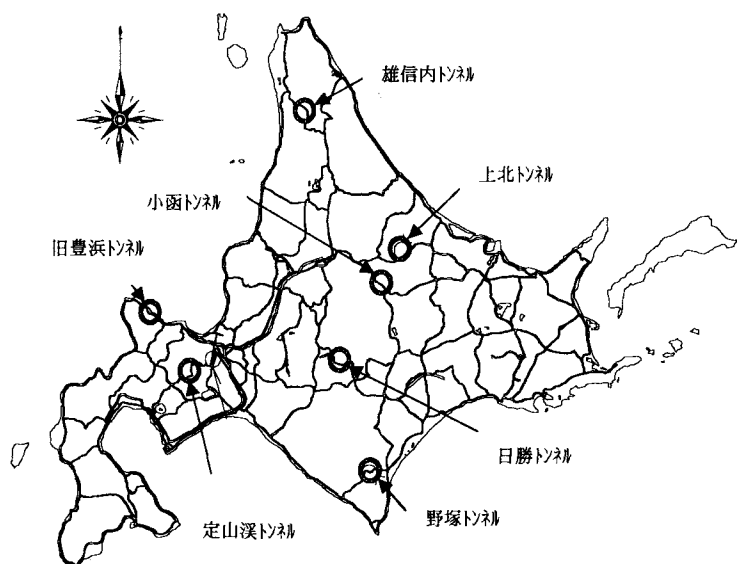


図-1 坑口部・坑内延長方向温度の観測トンネル位置図

め2)坑内気温:補間値と坑内風の状況をパラメータとした回帰式から,任意の坑口から延長距離における推定を行う。

そこで,本論文で別の2箇所道路トンネルにおいて観測された実際の坑口・坑内気温と提案した手法により推定した気温の精度比較を行うことで,提案手法の信頼性および断熱材設計への妥当性・適用性の検討を行ったものである。

2. トンネル坑口気温の推定

(1)気温の年周期変動

一般に気温の年周期は式(1)に示す年平均気温 U_m と年振幅 A_Y を有する正弦関数で表される⁶⁾。

$$U = U_m - A_Y \sin\{2\pi(t - t_0)/365\} \quad (1)$$

U_m :年平均気温, A_Y :年振幅, t, t_0 経過(調整)日数

ここで, U_m と A_Y を合理的(簡便)に求める手法を以下に記述する。(詳細はAPPENDIX参照)

(2)トンネル坑口気温の補間

坑口部の気温補間には Semi-Variogram を採用し,年平均気温 U_m と年振幅 A_Y それぞれの推定値 $z^*(x_r)$ は式(2)の示す重み係数 $\lambda_i(x_r)$ を用いた線形式とする。

$$z^*(x_r) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) z(x_i) \quad (2)$$

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

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ik}) + \mu(x_r) = \gamma(d_{kr}), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\mu(x_r) = E\{[z(x_r) - m_z]^2\}: \text{場の分散}$$

バリオグラム $\gamma(d_{ij})$ は式(5)に示す実用的な気温と距離の相関モデルで表され,表-1に示すように相関パラメータ(σ_z , L_v)は226箇所のアメダスの観測気温から求められる。また気温は緩やかな変動現象として扱うため時間差は考慮しない。

$$\gamma(d) = \sigma_z^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{L_v^2}\right) \right] \quad (5)$$

σ_z^2 :分散係数, L_v :相関距離, d :二点間距離

表-1 アメダス観測点位置の相関

地 域	σ_z	L_v
道内平均	0.78	29.99

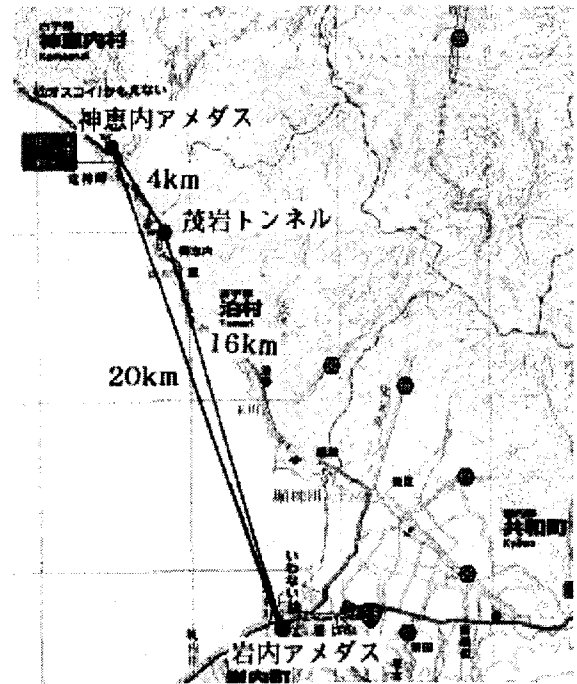


図-2 茂岩トンネルと各アメダスの位置図

表-2(a) 各アメダスの年平均気温,年振幅(1)

アメダス名	標高	年平均気温	年振幅
神恵内	50m	8.7	12.5
岩 内	33m	8.2	12.7

3. アメダス観測値によるトンネル坑口気温の補間

(1)茂岩トンネル坑口気温の補間

一般国道229号茂岩トンネル坑口(標高23m)における気温の補間値は,図-2に示す坑口周辺の神恵内・岩内アメダス観測値(表-2(a))から以下の手順で求められる。

- 1) 各アメダスと茂岩トンネル坑口の標高差は50m以内であるため,年平均気温の標高補正は行わない。ここで標高補正は平均値の修正であるため年平均値のみに行う。
- 2) 既知2点および坑口との距離を求める。(坑口～神恵内4km, 坑口～岩内16km, 神恵内～岩内20km)
- 3) 既知2点と補間点の距離関係および式(5)から,各既知点のバリオグラム係数 $\gamma(d_{11}) \sim \gamma(d_{22})$ と $\gamma(d_{1r}) \sim \gamma(d_{2r})$ を求めると以下の連立方程式となる。

$$0.05904\lambda_2(x_r) + \mu(x_r) = 0.00246 \quad (6a)$$

$$0.05904\lambda_1(x_r) + \mu(x_r) = 0.03836 \quad (6b)$$

$$\lambda_1(x_r) + \lambda_2(x_r) = 1 \quad (3)$$

- 4) 連立方程式の重み係数 $\lambda_1(x_r)$, $\lambda_2(x_r)$ と $\mu(x_r)$ が未知量となり,マトリックス表示すると次式となる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.05904 & 1 \\ 0.05904 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1(x_r) \\ \lambda_2(x_r) \\ \mu(x_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00246 \\ 0.03836 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

- 5) γ_A の逆行列を求めることで、各重み係数 $\lambda_1(x_r)$, $\lambda_2(x_r)$ と $\mu(x_r)$ が求められる。
- 6) 得られた重み係数と神恵内・岩内メダスの年平均と年振幅を式(2)に代入すると茂岩トンネル坑口における気温の補間値が以下のように得られる。

坑口の年平均気温（茂岩）

$$z_1^*(x_r) = \sum_{i=1}^2 \lambda_i(x_r) z_1(x_i)$$

$$= 0.80424 \times 8.7 + 0.19576 \times 8.2 = 8.602 \quad (8.a)$$

坑口の年振幅（茂岩）

$$z_2^*(x_r) = \sum_{i=1}^2 \lambda_i(x_r) z_2(x_i)$$

$$= 0.80424 \times 12.5 + 0.19576 \times 12.7 = 12.54 \quad (8.b)$$

よって、茂岩トンネル坑口の補間値は表-2(b)に示すようになり、最低気温は $8.602 - 12.54 = -3.94^\circ\text{C}$ (約 -4.0°C) になる。

表-2(b) 茂岩トンネル坑口気温の補間値

トンネル名	U_m	A_y
茂岩トンネル	8.602	12.54

(2) 福山トンネル坑口気温の補間

同様に一般国道274号福山トンネルにおける坑口の気温の補間値は、図-3に示す坑口周辺の占冠・日高アメダス観測値(表-3)から以下のように得られる。

ここで、補間箇所(福山トンネル:標高540m)と各アメダス観測点の標高が100m以上であるため、年平均値の標高0mにおける補正値は表-4となる。

坑口の年平均気温（福山）

$$z_1^*(x_r) = \sum_{i=1}^2 \lambda_i(x_r) z_1(x_i)$$

$$= 0.69 \times 7.42 + 0.31 \times 6.192 = 7.04 \quad (9.a)$$

坑口の年振幅（福山）

$$z_2^*(x_r) = \sum_{i=1}^2 \lambda_i(x_r) z_2(x_i)$$

$$= 0.69 \times 14.3 + 0.31 \times 14.9 = 14.49 \quad (9.b)$$

よって、福山トンネル坑口における標高補正後(540m)の補間値は表-5に示すようになる。

以上のように、未観測点(設計トンネル坑口)の年平均気温・振幅が数点の周辺アメダス観測値と提案手法より求められ、補間値と実観測値を示すと図-4となる。

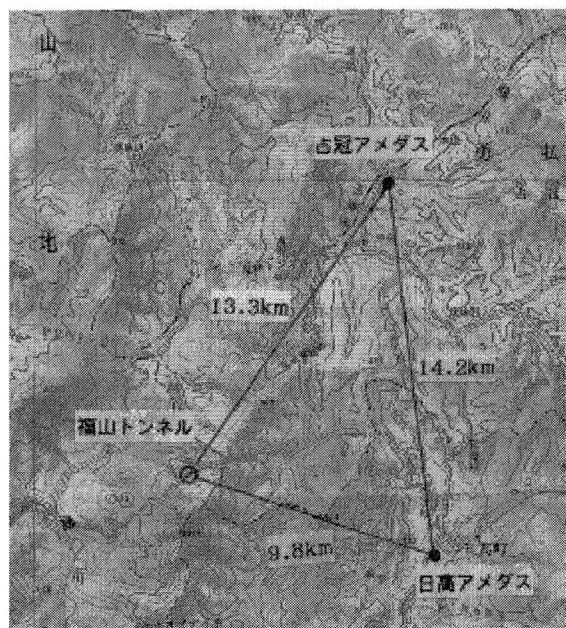


図-3 福山トンネルと各アメダスの位置図

表-3 各アメダスの年平均気温、年振幅(2)

アメダス名	標高	年平均気温	年振幅
占冠	332m	4.2	14.9
日高	280m	5.8	14.3

表-4 占冠・日高アメダス、福山トンネルの標高補正

アメダス名	標高	年平均気温	補正値
占冠	332m	6.192	1.992
日高	280m	7.42	1.62
福山トンネル	540m	-	3.24

表-5 福山トンネル坑口気温の補間値

トンネル名	U_m	A_y
福山トンネル	3.8	14.49

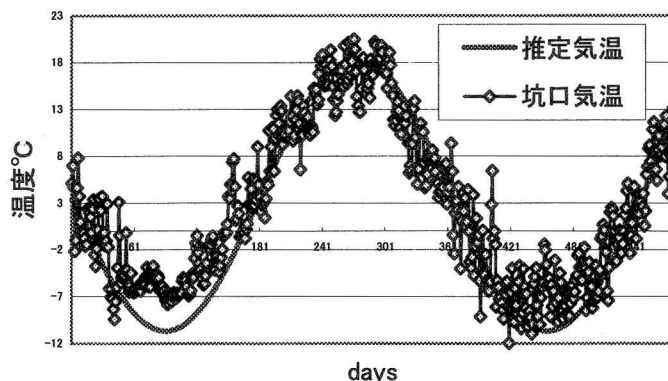


図-4 福山トンネル坑口気温の補間値

4. トンネル坑内延長方向の気温推定

次に、トンネル坑口から延長距離に伴って上昇する年平均気温 U_z と減衰する年振幅 A_z に対して、図-1に示した道内7箇所でのトンネルにおいて坑内風の状態等を考慮して観測された延長距離に対する平均気温・年振幅を坑口の値を基準として示すと図-5(a),(b)のようになる。

ここで、トンネル延長距離や方向および坑口の地形、両坑口の標高差などの諸状況により、トンネル坑内の風が弱い(0.5m/s以下)タイプとトンネルの延長距離が短くもしくはトンネルが東西向きまた坑口の地形、標高差などの理由により、トンネル坑内で一定方向の風が1.0~1.5m/s程度が吹いている風が強いタイプに大別される。

ここで上記の風のタイプ毎に年平均気温 U_z と年振幅 A_z の回帰式の同定値を図-5(a),(b)に示す。

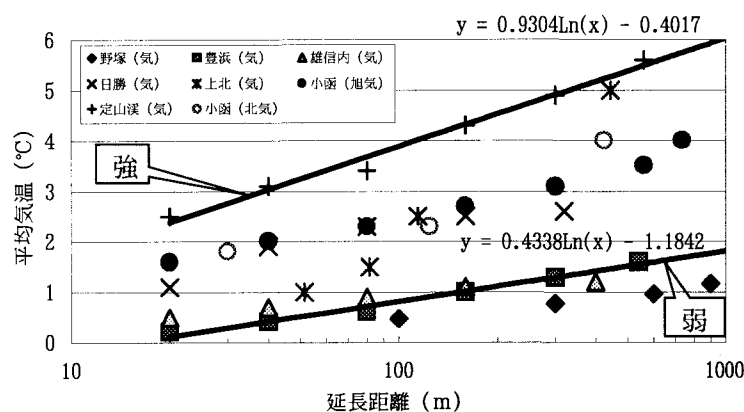


図-5(a) トンネル坑内の年平均 U_z の上昇(北海道)

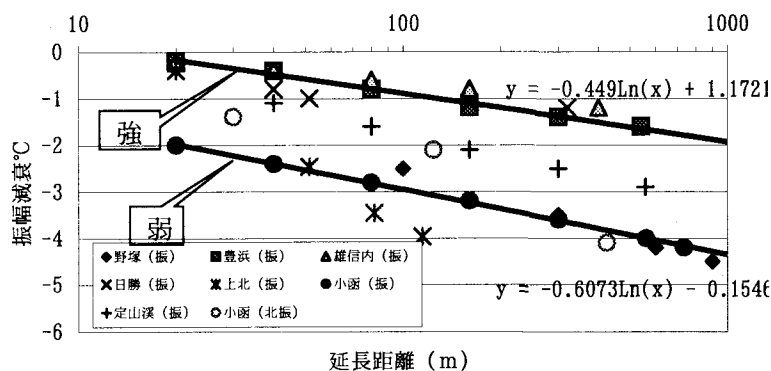


図-5(b) トンネル坑内の年振幅 A_z の減衰(北海道)

5. トンネル坑内の気温推定と実測値との比較

アメダス観測値より補間した坑口気温を図-5に示す回帰式により坑内延長方向の気温変動に変換し、実際の観測値と精度の比較を行うことで、提案手法の信頼性および断熱材の設計における適用性の検討を行う。

(1) 茂岩トンネル坑内 (317m) 気温の推定

一般国道229号茂岩トンネルでは坑内(坑口から317m地点)において気温変動の観測を行っている。

ここで図-5より、茂岩トンネルと位置・延長・坑口の方など環境条件の類似しているトンネルにおける回帰式を使用して年平均気温 U_m と年振幅 A_y を求めると以下となる。

年平均(茂岩317m): U_m

$$y = 0.4338\ln(x) - 1.1842 \quad (10.a)$$

年振幅(茂岩317m): A_y

$$y = -0.449\ln(x) + 1.1721 \quad (10.b)$$

これに茂岩トンネルの温度観測点の距離(坑口からの延長距離) 317.0mを代入すると年平均気温の上昇値1.314°C、振幅の減衰値

-1.414°Cが求められる。

ここで求められた茂岩トンネル坑口から延長距離317mの地点の気温変動の推定値(年平均気温 U_z 、年振幅 A_y)は表-6に

表-6 茂岩トンネル坑内気温 (317m)

トンネル名	U_m	A_y
茂岩トンネル (317m)	9.916	11.126

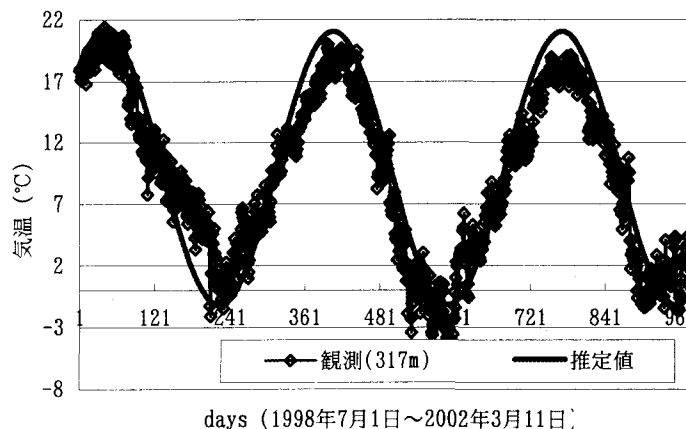


図-6 茂岩トンネル坑内 (317m) の推定気温

示すようになる

次に得られた茂岩トンネル坑口から延長距離317mの地点の気温変動の推定値と実際に観測された気温変動を示すと図-6となる。

図-6より、トンネル坑内延長方向の年平均気温 U_z および年振幅 A_z の減衰は、図-5に示すトンネル坑内風の強さを考慮した回帰式を用いることで精度よく求められる。

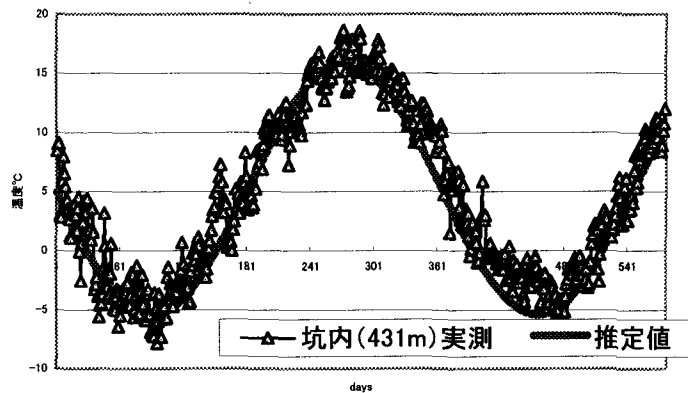


図-7 福山トンネル坑内 (431m) の推定気温

(2)福山トンネル坑内 (431m) 気温の推定

同様に一般国道274号福山トンネルでは坑内 (坑口から431m地点) において気温変動の観測を行っている。

ここで位置・延長・坑口の方角など環境条件の類似しているトンネルの回帰式より福山トンネル坑内431m地点における推定気温を求めると以下となる。

年平均 (福山431m) : U_m

$$y = 0.4338 \ln(x) - 1.1842 \quad (11.a)$$

年振幅 (福山431m) : A_y

$$y = -0.6073 \ln(x) - 0.1546 \quad (11.b)$$

これに坑口からの延長距離431mを代入すると平均気温、振幅は表-7、図-7のようになる。

表-7 福山トンネル坑内気温 (431m)

トンネル名	U_m	A_y
福山トンネル (431m)	5.247	10.6515

6. 結 論

本研究では寒冷地トンネルの断熱材 (施工厚さ・延長) 設計における坑口気温と坑内延長方向の気温変動の合理的な設定方法として、確率・統計的な方法および実際の観測値をもとに回帰式を求め、以下に示す結論が得られた。

- (1) 末観測点である計画トンネル坑口気温の補間値 (年平均気温 U_z 、年振幅 A_z) は周辺のアメダスの観測気温と確率・統計的手法 (バリオグラム) を用いることにより、高い精度で得られる。
- (2) トンネル延長方向の年平均気温 U_z の上昇および年振幅 A_z の減衰は、トンネル坑内風の状況を考慮することで実用的かつ精度良く求められ、このことにより現在では概算的に設定されている断熱材の施工延長が合理的かつ簡便な設計手法により決定される。

参考文献

- 1) 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.872-93, 1994.
- 2) Delhomme, J.P.: Kriging in the Hydrosociete: Advance in Water Resources, Vol.1, No.5, pp.251-266, 1978.
- 3) 須藤敦史, 三上 隆, 岡原貴司, 岡田正之: 寒冷地トンネルの温度変動について, トンネル工学研究論文・報告集第10巻, 報告-28, pp.251-256, 2000.
- 4) 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.
- 5) 須藤敦史, 三上隆, 岡田正之, 飯塚哲善: トンネル内(延長方向)の気温変動について, 寒地技術論文・報告集, Vol.17, pp.66-73, 2001.
- 6) 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.

【APPENDIX】「係数 $\lambda_i(x_r)$ の最小誤差分散推定」

ここで、式(3)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。

$$\varepsilon(x_r) = z(x_r) - z^*(x_r)$$

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

また、推定誤差の分散は式(A-2)となる。

$$\sigma_\varepsilon^2(x_r) = E[\{z(x_r) - z^*(x_r)\}^2]$$

$$= E[\{\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \{z(x_r) - z(x_i)\}\}^2]$$

$$= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \cdot E[\{z(x_r) - z(x_i)\} \{z(x_r) - z(x_j)\}]$$

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

$\gamma(d_{rj}) = \gamma(d_{ir})$ 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。

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

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。

$$\begin{aligned}
I &= \sigma_e^2(x_r) - 2\mu(x_r) \left\{ \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) - 1 \right\} \\
&= 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ij}) \\
&\quad - 2\mu(x_r) \left\{ \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) - 1 \right\} \quad (\text{A-4}) \\
&\quad \mu(x_r) : E[\{z(x_r) - m_z\}^2]
\end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial I}{\partial \lambda_k(x_r)} &= 2\gamma(d_{kr}) - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ik}) \\
&\quad - 2\mu(x_r) = 0 \quad (\text{A-5})
\end{aligned}$$

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。

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

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

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。

$$\begin{aligned}
\sigma_e^2(x_r) &= 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \left\{ \sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) \gamma(d_{ij}) \right\} \\
&= 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \{ \gamma(d_{ir}) - \mu(x_r) \} \\
&= 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ir}) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \{ \gamma(d_{ir}) - \mu(x_r) \} \quad (\text{A-8})
\end{aligned}$$

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

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。

(2004年4月16日)