

トンネル計画地点における気温変動の推定

Estimation of Periodic Change Temperatures at Planning Tunnel

須藤 敦史*・ 韭澤 憲吉**・ 三上 隆***

Atsushi SUTOH, Noriyoshi NIRASAWA and Takashi MIKAMI

This study presents two basic considerations to evaluate the periodic change temperatures at planning tunnel. In this study consists of the following two topics, one is identified to the periodic changes from the observed temperatures, and the other is estimated at the site of non-observed temperatures using the Kriging method. In the former study, unknown parameters in the mathematical formula are identified in order to obtain the characteristics of temperatures. In the latter one, the non-observed site temperatures are estimated in the Kriging which is interpolating technique on the assumption of the spatial correlation of estimated variables, and which is framed by stochastic theory. Finally, Numerical examples are worked out to demonstrate the usefulness of these methods for estimation of the temperatures.

Keywords: Load Tunnel Planning, Temperatures, Identification, Estimation, Kriging.

1. はじめに

寒冷地や高地において矢板工法で施工された道路トンネルの多くは凍害による何らかの変状を受けている¹⁾。そのため新規に施工されるトンネルでは、冬期間の地山や地下水の凍上防止の目的で一次覆工と二次覆工の間に断熱材を施工する例が多くなっている。この断熱材の設計に当たっては、トンネル覆工・断熱材・周辺地山を一次元非定常熱伝導モデルで近似して計算を行う場合が多い。加えて、覆工・断熱材および周辺地山における温度分布は、それぞれの熱伝導率・熱容量等のパラメータとトンネル内・外気温に左右される^{2), 3), 4)}ため、断熱材の合理的な設計には、トンネル計画地点の正確な最低気温が必要となる。しかし、トンネル計画地点の最低気温は長期観測値をもとに統計的に推定するのが基本であるが、計画地点の位置・地形的な条件や経済的な理由により、長期的な観測が難しい場合が生じる。また観測されても期間が短い場合や観測データに欠測が生じる場合があり、自ずと限られたものになり信頼性の高い断熱材の設計計算が行えないのが現状である。したがって、限られた観測データや他地点の観測値をもとに合理的な手法を用いて推定しなければならないが、温度推定や予測を行った研究は数が少ない。

そこで本研究では、以下に示す手法を用いて気温の周期変動や最低気温の推定を数値解析により試みている。

- (1) 実際の観測値をもとに推定式のパラメータを同定し、そのパラメータにより気温の周期変動を推定している。
- (2) 未観測地点の気温を近傍における観測値をもとにKriging(Semi-Variogram)により周期変動と最低気温を推定している。

2. 観測値を用いた気温変動の推定

気温は年周期変動および日周期変動を式(1)、(2)に示す正弦関数の合成式(3)とする場合が多い^{5), 6)}。

$$\theta_{oy} = t_m + A_y \sin(2\pi / 365)d \quad (1)$$

θ_{oy} : 年周期変動, t_m : 年平均気温, A_y : 年振幅, d : 経過日数

$$\theta_{od} = A_d \sin(2\pi / 24)h \quad (2)$$

θ_{od} : 日周期変動, A_d : 日振幅, h : 経過時間

$$\theta_{o,min} = t_m + A_y + A_d \quad (3)$$

$\theta_{o,min}$: 最低気温

したがって、この式(3)を用いる場合には観測値より式中の t_m, A_y, A_d を同定し、周期変動や最低気温を推定しなければならない。しかし、従来の研究において年周期変動は実測値より推定した例は見られるが日周期変動を推定した例は少ない。その理由として以下に示す事項が考えられる。

* 正会員 博士(工学) ㈱地崎工業 技術開発部 主任研究員

** 正会員 博士(工学) 北海道大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

- 1). 日周期変動は年周期変動に比較して局所的な気象(天候・風)の影響を受けるため、トレンド的な年周期変動に対してノイズ的な変動を示す。したがって、データのランダム性が高いため日振幅の推定は難しい。
- 2). 日周期変動を推定するだけの十分な時間観測値がない。

本解析では、1992年1月1日から約3年間観測された上川・白滝7マス[※]の気温を用いている。ここで上川7マス[※]の時間観測気温を図-1に示す。図-1より気温は不規則に変動しているが、季節の推移とともに正弦曲線に近い変化を示している。

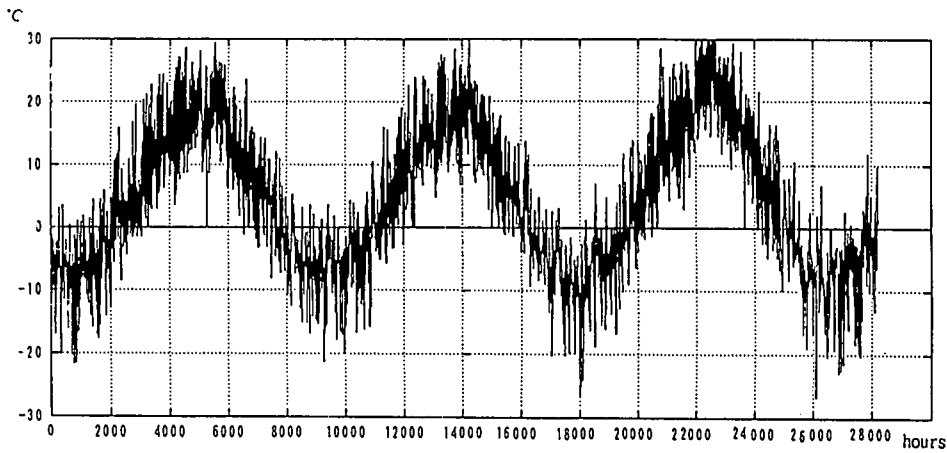


Fig. 1 上川7マス[※]の観測気温(時間)

ここで、気温変動の推定式は式(1)、(2)を基本とするがパラメータ同定には任意の観測日より行う必要があるため、位相を含めた次式を用いる。なお、各パラメータの同定には最小二乗法を用いている。

$$\theta_{oy} = t_m + A_y \sin\{2\pi(d - t_d)/365\} \tag{4}$$

t_d : 日位相

$$\theta_{od} = A_d \sin\{2\pi(h - t_h)/24\} \tag{5}$$

t_h : 時間位相

2. 1 年周期変動

上川・白滝7マス[※]の時間観測記録により、求めた年周期変動を以下の式に示す。

$$\text{(上川)} \quad \theta_{oy} = 4.532 + 15.50 \sin\{2\pi(d - 120)/365\} \tag{6. a}$$

$$\text{(白滝)} \quad \theta_{oy} = 4.096 + 14.20 \sin\{2\pi(d - 120)/365\} \tag{6. b}$$

ここで、 d は1992年1月1日からの経過日数としている。また年周期変動の推定値と観測値の平均気温を図-2に示す。図-2より再現した年周期変動は平均的な気温の変動を示していることより、年周期変動のトレンド推定には正弦関数を用いることができる。

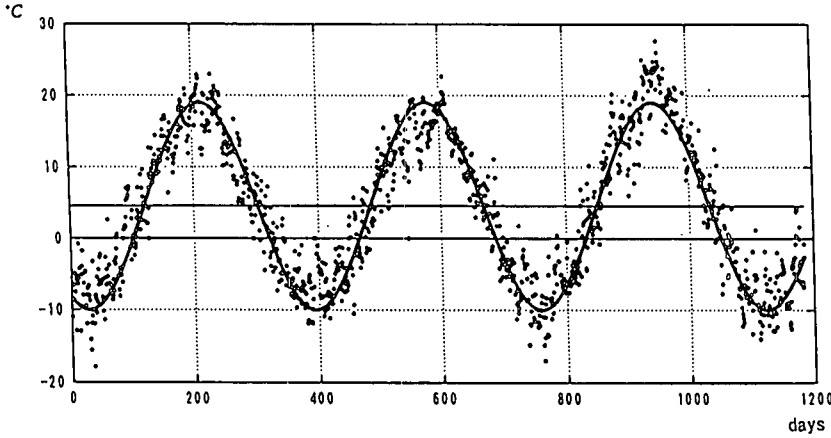


Fig. 2(a) 年周期変動(上川)

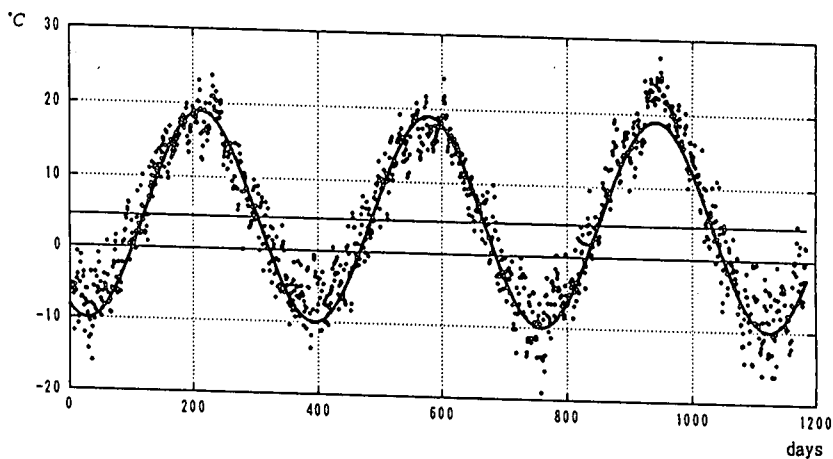


Fig. 2(b) 年周期変動(白滝)

2.2 日周期変動

上川7マスにおける日変動の観測値を図-3に示す。図-3より気温は1/12'的な変動を示し、周期的変動をしているとは言い難い。そこで日周期変動の推定に際して、観測値から周期変動を示していると見られる観測記録を3～5箇所(期間2ヶ月～5ヶ月)選定し、前節と同様に最小二乗法により日周期変動の推定を行い、求められた日周期変動を次式に示す。

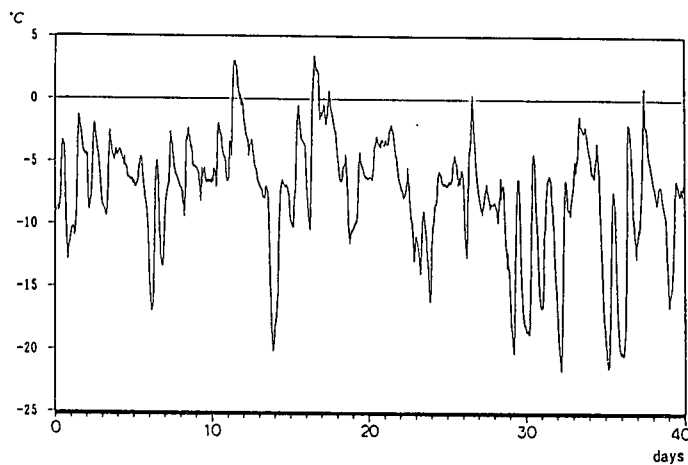


Fig. 3 気温の日変動(上川)

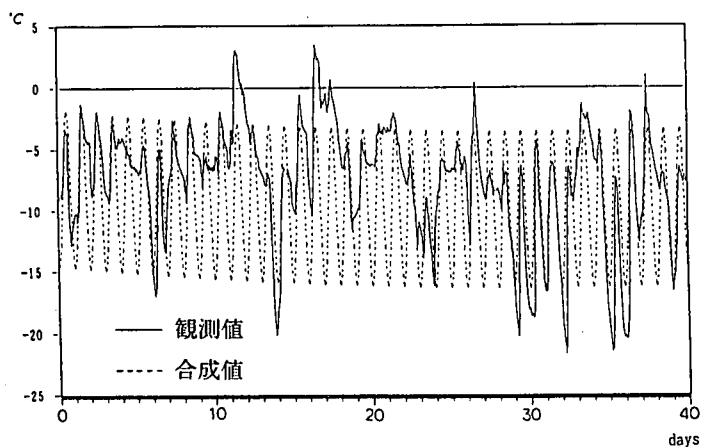


Fig. 4 気温変動の推定値(合成値)

$$\text{(上川)} \quad \theta_{od} = 6.420 \sin\{2\pi(h-8)/24\} \quad (7. a)$$

$$\text{(白滝)} \quad \theta_{od} = 6.203 \sin\{2\pi(h-8)/24\} \quad (7. b)$$

ただし、 h は24時からの経過時間としている。

以上、推定した年周期変動と日周期変動による合成値と観測値を図-4に示す。図-4より、年周期変動は平均的な気温変動を示しているが、日変動の再現性はよくないため日周期変動の推定に正弦関数を用いると最低気温の推定誤差が大きくなる。

3. 最低気温の推定

従来では最低気温の推定は式(3)に示したように平均気温・年振幅・日振幅の合成で表しているが、日変動の推定精度が影響しているため、その再現精度は良くない。そこで、日周期変動の推定を行わず簡便に最低気温のトレンド推定を行うため、観測最低気温による年周期変動を求めると次式のようになる。

$$\text{(上川)} \quad \theta_{oy} = -0.249 + 15.140 \sin\{2\pi(d-120)/365\} \quad (8. a)$$

$$\text{(白滝)} \quad \theta_{oy} = -0.197 + 14.387 \sin\{2\pi(d-120)/365\} \quad (8. b)$$

ここで、最低気温による年周期変動の推定値と式(3)により求めた年・日周期変動の合成値を図-5に示す。

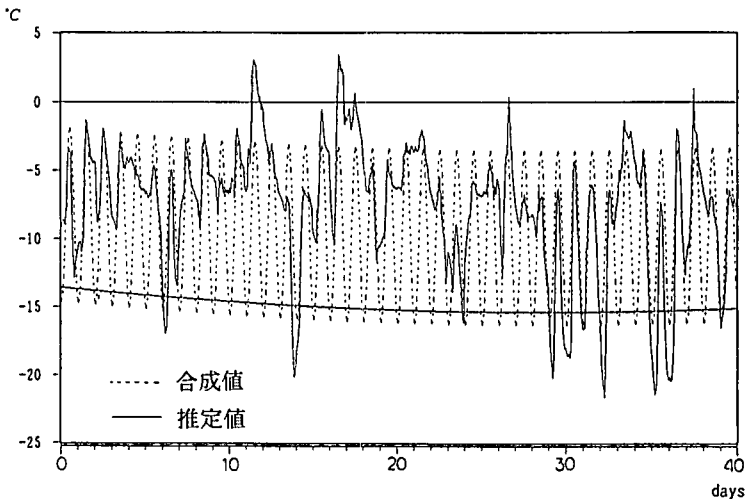


Fig. 5 最低気温の推定値(上川)

図-5より、最低気温に着目すると年周期変動と合成値は大差はない。したがって、簡便に最低気温を推定する式は以下となる。

$$\theta_{o,min} = t_{m,min} + A_{y,min} \quad (9)$$

$\theta_{o,min}$: 最低気温の年周期変動

$t_{m,min}$: 最低気温の年平均, $A_{y,min}$: 最低気温の年振幅

しかし、式(9)のような正弦関数を用いた推定式では気温変動のトレンドを表すだけであり、日変動のようにランダム成分を有する観測値では推定誤差が残る。

4. 未観測点における気温変動の推定

断熱材の設計における熱伝導解析ではその入力値となる気温の精度に左右されるため、最低気温の正確な推定は不可欠である。しかし、上記のような正弦関数による気温変動の推定では、日変動を含んだ気温の再現は難しく、かつ計画地点における観測は経済的に負担が大きくなる。そこで、計画地点以外の観測値をもとに最低気温が正確に推定できれば、経済的な効率化も計られ、かつ断熱材の設計精度が向上する。

そこで、他地点における観測値を用いて未観測点の値や空間的な分布特性を推定する手法としてKriging⁷⁾があげられる。この手法を応用した条件付き確率場のシミュレーション理論を星谷ら^{8),9)}は提案しているが、Krigingは対象領域の平均値や分散値・共分散値等の空間分布特性が既知であることが、前提条件となる。

しかし、実際の問題では標本数が少ないなどに理由により、事前に対象領域の平均値や分散値・共分散値を把握することは難しい。そこで、Krigingを基本としたSemi-Variogramを用いた手法¹⁰⁾により、未観測点における気温変動および最低気温の推定を行う。

4.1 Semi-Variogramを用いた推定

Semi-Variogramによる最小誤差分散推定では、対象領域内における気温変動 $z(x)$ を本質的に定常性を有する確率場(Intrinsic fields)における値と定義している。また、場の平均値 m_z は未知、Semi-Variogram $\gamma(d_{ij})$ は既知として観測点 i, j の2点間距離(d_{ij})のみの関数とする。

このことは、対象領域において観測値間のSemi-Variogramが得られれば、未観測点における気温変動や最低気温の推定が行える。

$$E[z(x)] = m_z \quad (10)$$

$E[X]$: X の期待値

$$2\gamma(d_{ij}) = \text{var}[z(x_i) - z(x_j)] = E[z^2(x_i)] - 2E[z(x_i)z(x_j)] + E[z^2(x_j)] \quad (11)$$

$$E[z(x_i)z(x_j)] = \frac{1}{2}E[z^2(x_i)] + \frac{1}{2}E[z^2(x_j)] - \gamma(d_{ij}) \quad (12)$$

未観測点(x_r)における気温の推定値 $z^*(x_r)$ が既観測点の気温 $z(x_i)$ の線形和として表されるとすると、推定値は次式となる。

$$z^*(x_r) = \lambda_0(x_r) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)z(x_i) \quad (13)$$

$\lambda_i(x_r)$: 未観測点における値を推定する係数, N : 観測点数

ここで、式(13)が不偏推定式となるための条件は、式(14)を満たさなければならないため期待値は式(15)となる。

$$E[z^*(x_r)] = E[z(x_r)] \quad (14)$$

$$m_z = \lambda_0(x_r) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)m_z \quad (15)$$

加えて、上式が場の平均値 m_z によらず成り立つには、以下の条件が必要となる。

$$\lambda_0(x_r) = 0 \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) = 1 \quad (17)$$

よって、式(13)と式(16), (17)より推定式は次式となる。

$$z^*(x_r) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)z(x_i) \quad (18)$$

ここで、推定誤差の分散値が最小になるように各係数 $\lambda_i(x_r)$ が決定されれば、式(18)より未観測点の気温変動は推定される。また、係数 $\lambda_i(x_r)$ は式(19)および式(17)を連立方程式として解くことにより求められる。

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)\gamma(d_{ik}) + \mu(x_r) = \gamma(d_{kr}), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

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

ここで、式(19)におけるSemi-Variogram $\gamma(d_{ij})$ を標本値より正確に求めることが推定精度の上で重要である。

4.2 観測位置

図-6に示すように北海道中部に計画されたトンネルにおける抗口気温変動を推定した。この解析における既観測点はトンネル近傍において観測されている上川, 東川, 白滝, 滝上7地点の気温観測値を用いている。

4.3 対象領域

Semi-Variogramを用いた最小誤差分散推定では、対象領域内が本質的に定常性を有する確率場であれば、観測点間の関係は2点間距離のSemi-Variogramで定義できる。しかし、異なる観測点における気温変動は標高差による気温差や気象変動などのトレンドを有する値であり、気象変動はその地域の気象特性の影響を受けるためトレンドとして除去が難しい。そこで、2地点の標高差による気温差のみを式(20)に示すような関係式を用いて除去する。

$$\Delta z = 0.6 \times \Delta h / 100 \quad (20)$$

Δz : 気温差, Δh : 標高差 (m)

したがって、観測値には気象条件等による非定常性を有する値が含まれていると考えられるが、本解析で対象とするような100km×100km程度の領域においては近似的に定常性は成立すると仮定している。

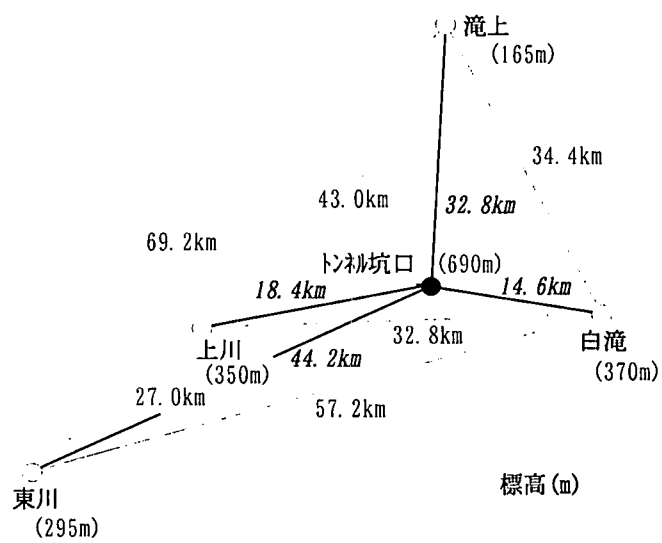


Fig. 6 観測位置図

5. 実観測値による気温変動の推定

各観測点における気温変動値 $z(x_i), (i = 1, 2, \dots, N)$ より、Semi-Variogram $\gamma(d_a)$ を推定する。

$$d_a = \frac{1}{N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} d_{ij} \tag{21}$$

$$\gamma(d_a) = \frac{1}{2N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} [z(x_i) - z(x_j)] \tag{22}$$

ここで、任意の2観測点 (x_i, x_j) の距離が $(a+1) \times d$ から $a \times d$ 間 $(a = 1, 2, \dots)$ のある組数を $N(a)$ とし、離散距離 d は2kmとしている。そこで、各観測値よりSemi-Variogramの離散値を求め、得られた離散値をもとに式(23)に示す指数関数式で推定した2点間の相関を図-7に示す

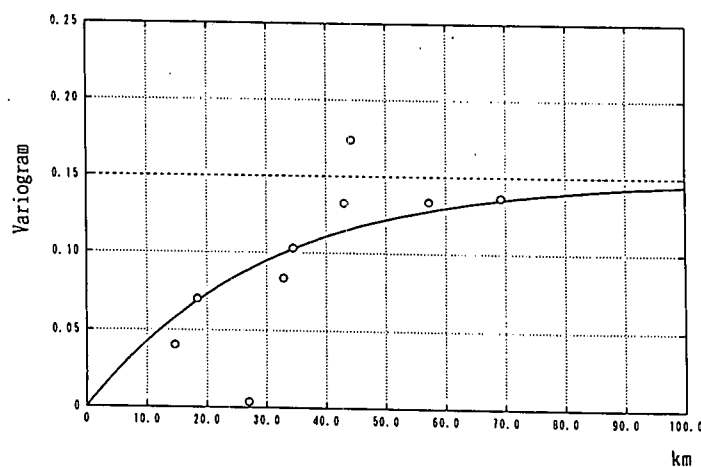


Fig. 7 Semi-Variogramの推定値

$$\gamma(d) = \sigma_z^2 [1 - \exp(-\frac{d}{L_v})] \tag{23}$$

L_v : Semi-Variogramの相関距離

ここで、Semi-Variogramの相関距離 L_v は60kmとなった。また、本解析では観測点が少ないため標本場の統計的性質を算定することができないが、求めたSemi-Variogramより観測値の分散が推定される。

各観測点で観測された気温変動をもとにSemi-Variogramを用いた手法により、上北町の気温変動を推定した結果を図-8に示す。加えて、拡大図を図-9(a)、(b)に示す。

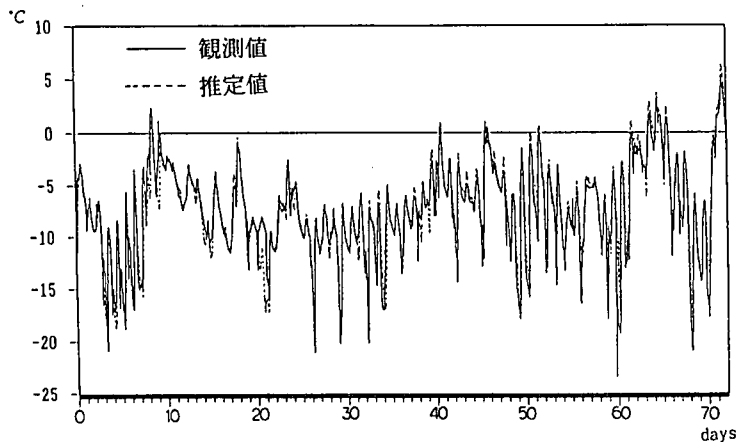


Fig. 8 気温変動の推定値

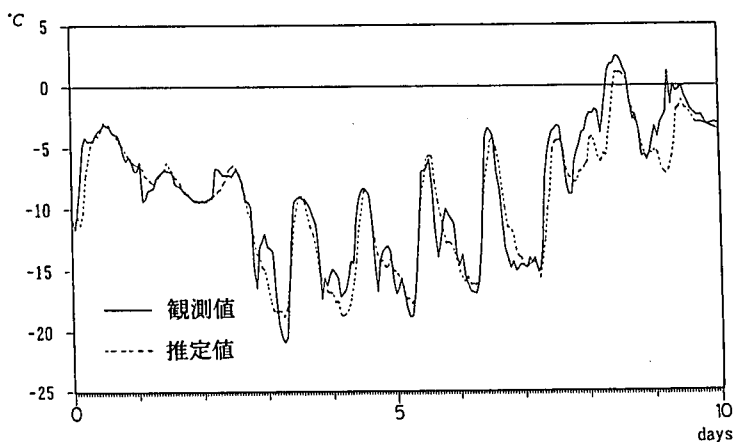


Fig. 9(a) 最低気温の推定値(1)

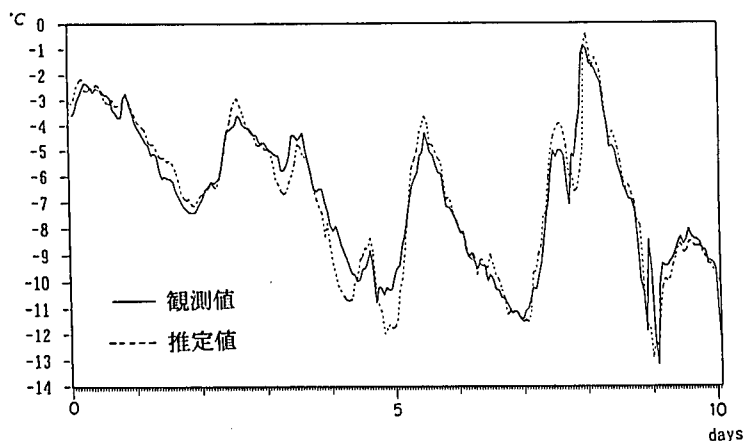


Fig. 9(b) 最低気温の推定値(2)

ここで、観測値と推定値の相関および推定誤差の平均値と分散を表-1に示す。よって図-9と表-1より、安定した推定結果を得ている。

Table. 1 推定誤差

相関係数	推定誤差平均	推定誤差分散
0.9346	-0.1035	2.6517

6. 結 論

本研究は、寒冷地トンネルの断熱材設計における気温変動の合理的な推定を目的として、観測値が得られている場合と得られていない場合において気温変動の推定を行った結果を以下に示す。

- (1)得られた観測値をもとに正弦関数のパラメータを同定し、気温変動と最低気温を推定する方法
- a. 年周期変動の変化は期間変動的な挙動を示すため、気温変動のトレンド推定には正弦関数を用いることができる。
 - b. 日周期変動は年周期変動に比較して気象の影響を受けるためノイズ的な変動を示す。したがって正弦関数を用いた最低気温推定では局所(ランダム)変動に対して追従性が乏しい。
 - c. 最低気温の観測記録を用いて最低気温の年周期変動を推定することにより、最低気温の簡便な推定が行えるが、トレンド推定に過ぎないため推定誤差が残る。
- (2)他地点の観測値をもとにSemi-Variogramを用いた手法(最小誤差分散推定)
- a. 気温変動や最低気温は非定常性を有するものであるが、本解析に示すように限定した領域(100km×100km程度)において気温変動や最低気温は定常性を仮定が可能であれば、観測点に対してその距離(空間的)相関が定義できる。
 - b. 未観測点の気温変動や最低気温は、距離を関数とするSemi-Variogramを用いた手法により推定が可能であり、推定した気温変動や最低気温は正弦関数を用いた推定値より推定誤差は小さい。

最後に、今後の課題として最低気温の推定誤差が断熱材の設計に与える影響や道路トンネルにおいて坑口気温と坑内気温と関係の研究を行う予定である。

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) 岡田勝也・高木憲治・朝倉俊弘・藤林征男:長大トンネルにおける断熱二重巻覆工の断熱材厚さ選定に関する設計法, 土木学会論文集, No. 505/Ⅲ-29, pp. 211-218, 1994.

3) 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.

4) 斉藤知秀・三上 隆・須藤敦史:拡張カマフフィルタを用いたトンネル地山の熱定数の予測, 土木学会北海道支部論文報告集, 第51号, I-23, pp. 110-115, 1995.

5) 天野勲三・水田義明:トンネル内気象の予測計算, 土木学会論文集, No. 387/Ⅱ-8, pp. 219-228, 1987.

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.

7) 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.

8) 星谷 勝:条件付確率場のシミュレーション理論, 土木学会論文集, No. 459/Ⅰ-22, pp. 113-118, 1993.

9) 丸山 収, 星谷 勝, 山口和英:定常・均一・ガウス確率場の条件付き地震波動シミュレーション, No. 489/Ⅰ-27, pp. 177-185, 1994.

10) J. P. Delhomme:Kriging in the Hydrosociology, Advance in Water Resources, Vol. 1, No. 5, pp. 251-266, 1978.