

VI-3

地域性を考慮した確率手法による未観測地点の気温推定

北海道大学 工学研究科	学生会員 岡原 貴司
(株)地崎工業 技術開発部	正 会 員 堀尾 時司
(株)地崎工業 技術開発部	正 会 員 須藤 敦史
北海道大学 工学研究科	フェロー会員 三上 隆

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。そのため寒冷地の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との間に断熱材を施工する例が多くなっている。

断熱材の設計ではトンネル覆工・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が、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・熱容量などのパラメータやトンネル内・外気温に左右される。^{1), 2), 3)}したがって、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的な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るなど、おの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。そこで、限られた観測データや他の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。

以上のことから、本研究では、未観測地点の気温をその近傍における地点の観測値を利用して予測するKriging (Semi-Variogram) と呼ばれる手法により、トンネル計画地点の冬期の最低気温を推定(補間)し、その有効性を検討した。

2. 未観測点における最低気温の推定

断熱材の設計精度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が必要となる。そこでアメダスの観測値を利用して最低気温が正確に推定できれば、経済的な効率化もはかられかつ断熱材の設計精度が向上する。

既存の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Kriging⁴⁾があげられるが、この手法で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、実際の問題では予測地域のアメダスの観測数が少ないなどの理由により、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Variogramを用いた手法^{5), 6)}により、未観測点の最低気温の推定を行う。

2.1 Variogramを用いた推定

Variogramを用いた推定では、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標本場(Intrinsic Random Fields)における値と定義し、場の平均値 m_z は未知、Variogram $\gamma(d_{ij})$ は観測点 i, j の二点間距離(d_{ij})のみの関数として既知としている。したがって、対象とする領域において観測点間のVariogram $\gamma(d_{ij})$ (距離相関特性)が得られれば、未観測点における最低気温の推定が行える。

Estimation of Periodic Change Temperatures Using Stochastic Method Considering Area
by Takashi OKAHARA, Tokiji HORIO, Atushi SUTOH and Takashi MIKAMI

$$E[z(x)] = m_x \quad (E[x] : x \text{ の期待値}) \quad \dots(1)$$

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

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

Variogram では式(4)に示すように、未観測地点 x_r における気温の推定値 $z^*(x_r)$ が既知観測地点の気温 $z(x_i)$ の線形和としてあらわすことができる。

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

ここで、 $\lambda_i(x_r)$ は未観測地点における値を推定する重み係数、 N は観測点数をあらわしている。

式(4)が不偏方程式となるには、式(5)を満足しなければならず、場の期待値は式(6)となる。

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

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

加えて式(6)が場の平均値 m_z によらず成立するには、以下の条件が必要となる。

$$\lambda_0(x_r) = 0 \quad \dots(7)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) = 1 \quad \dots(8)$$

よって、式(7)・(8)より式(4)は次式となる。

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

したがって、式(9)の各重み係数 $\lambda_i(x_r)$ が決定されれば、未観測地点の最低気温は推定される。次に、推定値の誤差分散値が最小になるようにすると式(9)は式(10)・式(11)を経て、式(12)となる。

ここで重み係数 $\lambda_i(x_r)$ は、既観測値からの Variogram $\gamma(d_{ij})$ と式(12)・式(8)を解くことで求めることができる。

$$\varepsilon(x_r) = z(x_r) - z^*(x_r) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)z(x_r) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)z(x_i) \quad \dots(10)$$

$$\sigma^2_{\varepsilon}(x_r) = E\left[\left\{z(x_r) - z^*(x_r)\right\}^2\right] = E\left[\left\{\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)\left\{z(x_r) - z^*(x_i)\right\}\right\}^2\right] \quad \dots(11)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)\gamma(d_{ik}) + \mu(x_r) = \gamma(d_{kr}) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \dots(12)$$

ここで対象場の Variogram $\gamma(d_{ij})$ を観測値から正確に求めることが最低気温を予測する上で重要となる。

2.2 非定常性の除去

Variogram では対象領域が本質的に定常性を有する標本場であり、加えて観測地の関係は二点間距離で定義されている。しかし、観測点の位置は三次元的でありかつ標高差による気温差や局所的な気象変動などを有する値であるため、トレンドや非定常による影響の除去が難しい。そこで、二点間の標高差による気温差のみを式(13)に示すような関係式を用いて除去する。

$$\Delta z = 0.6 \times \Delta h / 100 \quad \dots(13)$$

Δz : 気温差、 Δh : 標高差(m)

したがって、アメダスの観測値には局所的な影響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、本解析では 100 km × 100 km 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。

3. 北海道の地域特性

本研究では北海道を太平洋側、オホーツク海側、日本海側の三地域に分け、それぞれの地域における気象庁のアメダス観測地点の三年分の日気温平均較差（一日の最高気温と最低気温の差を三年分出して平均化したもの）を縦軸を日気温平均較差、横軸を海岸からアメダス観測地点までの距離としてそれぞれプロットしグラフにした（Fig.1 参照）。グラフの日気温平均較差の変動特性からおおよその海洋、内陸、山岳エリアの見当をつけて地図上に境界線を引き（Fig.2 参照）、同じエリア内（山岳エリア・内陸エリア・海洋エリア）における何地点かのアメダス観測気温から未観測点の最低気温変動をVariogramを用いて予測し、実際の気温変動と比較することでVariogramの有効性とエリア分けの妥当性をそれぞれ検討する。

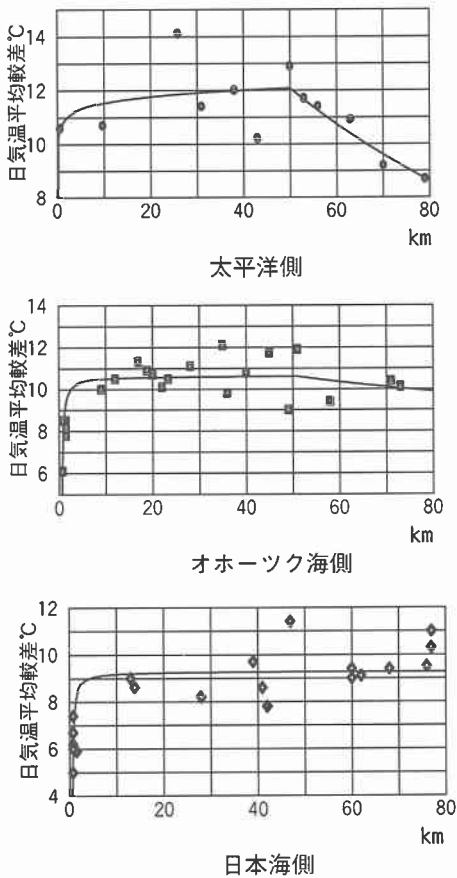


Fig.1 各地域における日気温平均較差

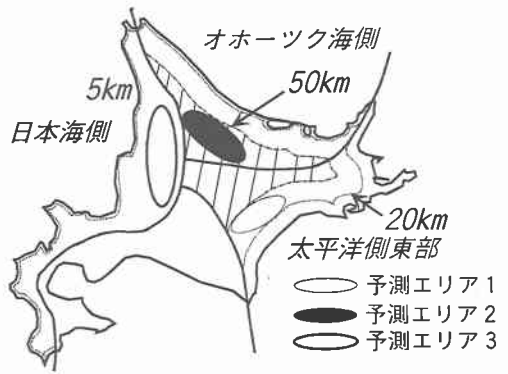


Fig.2 北海道の気象区分

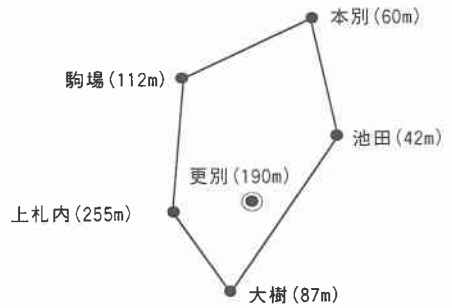


Fig.3-(1) 予測エリア1

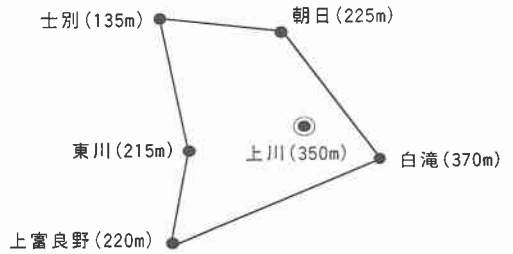


Fig.3-(2) 予測エリア2

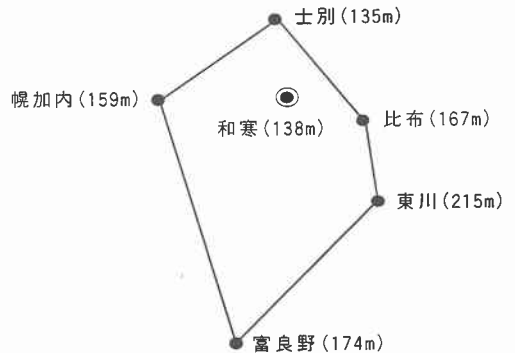


Fig.3-(3) 予測エリア3

4. 観測位置

4.1.1 太平洋側・内陸エリア（予測エリア1）

太平洋側・内陸エリアにある更別の最低気温の変動をそれぞれ Variogram を用いて推定した。予測エリアは Fig.2 の予測エリア1で示された部分で、未観測点と既知観測点の位置関係は Fig.3-(1)に示したとおりである。ここで（ ）内の数値は海面を基準としたときの標高差を表している。下の Table.1 は Fig.3 における各地点間の距離を各予測エリアごとに示したものである。この解析における既知観測点は、同じエリア内に存在する本別、池田、大樹、上札内、駒場の計5点である。用いたデータは1993年12月から1994年3月までの計121日間で、式(13)を用いて標高補正をおこなっている。また、Fig.4は既知観測点の標高補正をおこなう前の生データを40日間分示したものである。

Table.1 各地点の二点間距離（単位：km）

太平洋側・内陸エリア			オホーツク海側・山岳エリア			日本海側・内陸・山岳エリア		
始 点	終 点	二点間距離	始 点	終 点	二点間距離	始 点	終 点	二点間距離
池 田	上札内	42.8	士 別	朝 日	16.5	士 別	比 布	34.5
	大 樹	48.8		白 滝	70.5		東 川	54.0
	駒 場	26.3		上富良野	81.0		幌加内	27.8
	本 別	25.5		東 川	54.0		富良野	93.0
上札内	大 樹	21.0	朝 日	白 滝	54.8	比 布	東 川	19.5
	駒 場	46.5		上富良野	75.8		幌加内	30.8
	本 別	67.5		東 川	47.3		富良野	60.0
大 樹	駒 場	62.3	白 滝	上富良野	75.0	東 川	幌加内	45.0
	本 別	73.5		東 川	57.0		富良野	42.0
	駒 場	36.0		上富良野	27.8		幌加内	76.5

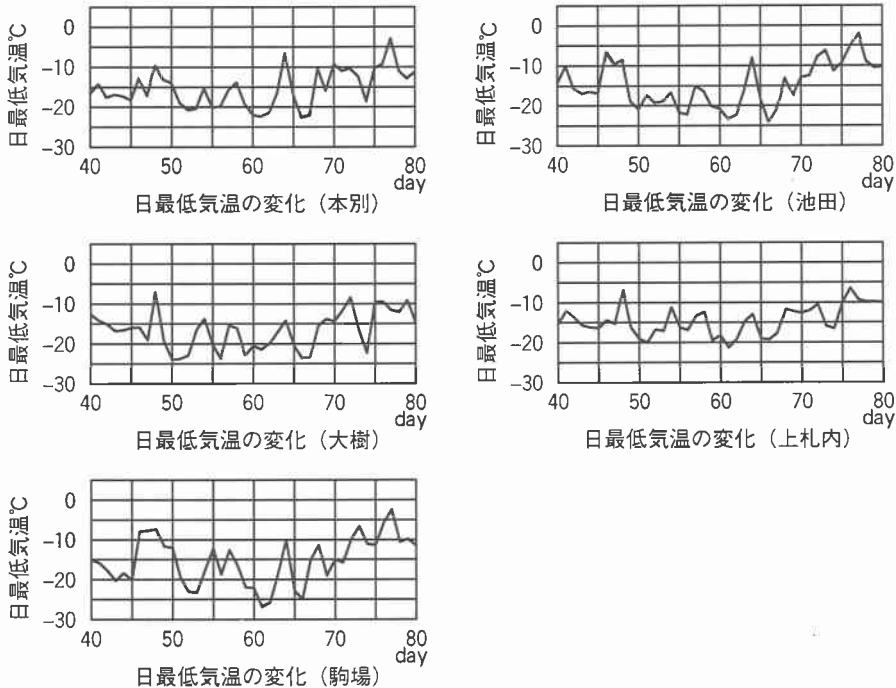


Fig.4 既知観測点の最低気温変動（標高補正前）

4.1.2 未観測点の最低気温の推定

更別の最低気温変動を推定するにあたりアメダスの各観測気温 $z(x_i)$, $(i=1,2,\dots,N)$ より、標本場（対象領域）の二点間の Semi-Variogram $\gamma(d_{ij})$ を以下の式で推定する。

$$d_a = \frac{1}{N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} d_{ij} \quad \dots (14)$$

$$\gamma(d_a) = \frac{1}{2N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} [z(x_i) - z(x_j)]^2 \quad \dots (15)$$

上式において任意の二観測点 (x_i, x_j) の距離が

$(a+1) \times d \sim a \times d$ 間 $(a=1,2,\dots)$ にある組数を $N(a)$ とし、離散距離 d は 2 km としている。

各観測値より Experimental Variogram $\gamma(d_{ij})$ を求め、得られた離散値をもとに式(16)に示す指数関数式より Semi-Variogram $\gamma(d)$ を推定したグラフを Fig.5 に示す。

$$\gamma(d) = \sigma_z^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{L_v^2}\right) \right] \quad \dots (16)$$

ただし、 σ_z : 場の分散 L_v : 相関距離 である。

各既知観測点で観測された気温変動をもとに更別の最低気温変動を推定した結果を Fig.6 で示す。

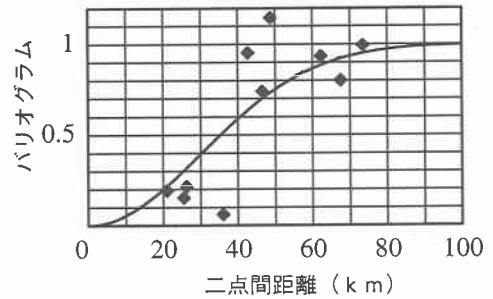


Fig.5 Semi-Variogram

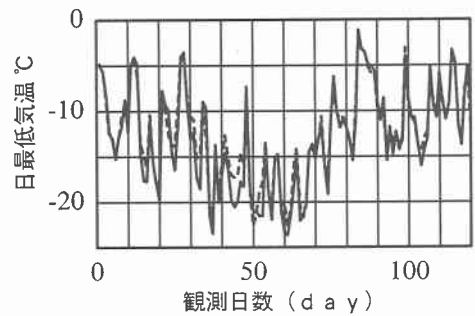


Fig.6 最低気温変動の推定値 (更別)

4.2 オホーツク海側・山岳エリア (予測エリア2)

同様に、オホーツク海側・山岳エリアにある上川の最低気温の変動を推定した。予測エリアは Fig.2 の予測エリア2で示された部分で、未観測点と既知観測点の位置関係は Fig.3-(2)である。既知観測点は、同じエリア内に存在する士別、朝日、白滝、上富良野、東川の計5点である。用いたデータは同じく1993年12月から1994年3月までの121日間である。得られた Semi-Variogram は Fig.7、最低気温変動の推定結果は Fig.8 に示すとおりである。

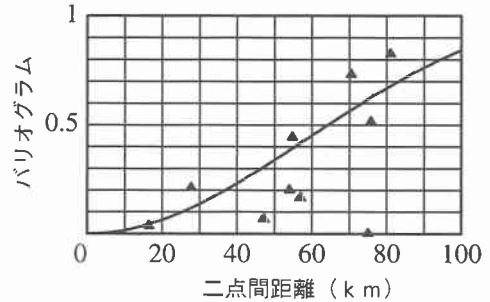


Fig.7 Semi-Variogram

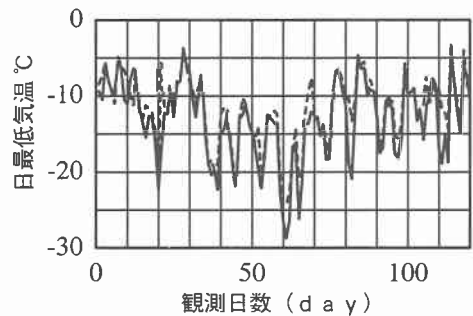


Fig.8 最低気温変動の推定値 (上川)

4.3 日本海側・内陸一山岳エリア (予測エリア3)

最後に、日本海側の内陸一山岳エリアにおける和寒の最低気温変動を推定した。日本海側は内陸エリアと山岳エリアの明確な境界線が存在しないので、この二つのエリアをまとめて Semi-Variogram を求めてみた。予測エリアは Fig.2 の予測エリア3で示された部分で、未観測点と既知観測点の位置関係は Fig.3-(3)である。既知観測点は士別、比布、東川、幌加内、富良野の計5点である。得られた Semi-Variogram および最低気温変動の推定結果を Fig.9、Fig10 に示す。

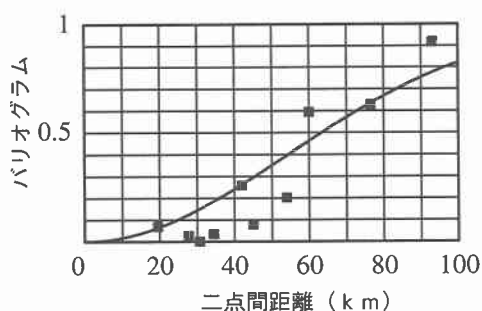


Fig.9 Semi-Variogram

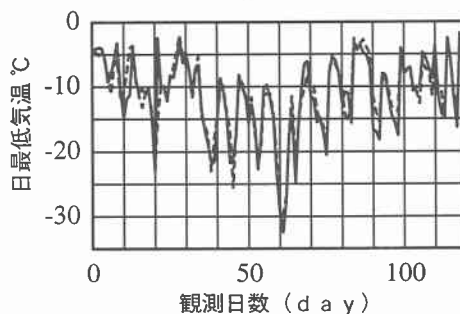


Fig.10 最低気温変動の推定値 (和寒)

5. 結果とまとめ

ここで、観測値と推定値の相関および推定誤差の分散を Table.2 に示す。Fig.6、Fig.8、Fig.10 および Table.2 より安定した推定結果が得られた。

Table.2 推定結果

	相関係数	推定誤差分散
更 別	0.97	1.73
上 川	0.90	4.98
和 寒	0.93	5.05

本研究では、寒冷地トンネルの断熱材設計における最低気温の合理的な推定を目的として、アメダスの観測気温を利用した未観測点における気温推定を Variogram を用いた数値解析により検討したものである。以下、本研究で得られた結果を箇条書きする。

- ・ 気温変動や最低気温は観測地域の高低差や気象変化の時間差など非定常性を有するものであるが、限定した地域においては定常性を仮定することが可能であり、観測地点の気温変動の関係はその距離の Variogram で定義できる。
- ・ 限定地域をより明確にするため、北海道を太平洋側、オホーツク海側、日本海側の三つに大きく地域分けし、それらの地域を日気温平均較差によってそれぞれ山岳エリア、内陸エリア、海洋エリアに分割することで Variogram による最低気温変動の推定精度を高めることができた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 三上 隆・林 憲造・楠田静也：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) 齊藤知秀・三上 隆・須藤敦史：拡張カルマン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.
- 4) 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, 1996.
- 5) J.P.Delhomme: Kriging in the Hydro-science, Advance in Water Resources, Vol.1, No.5, pp.251-266, 1978.
- 6) 小宮謙一・山本欣弥・星谷 勝：地震時の地盤変位の条件付シミュレーション、土木学会第51回年次学術講演概要集、第1部(B), pp.222-223, 1996.