

寒冷地の高速道路トンネルにおける坑口と 坑内の推定気温の精度検証

Verification of Estimated portal and inside Temperature at Highway Tunnel in Cold Region

三上 隆¹・豊田 邦男²・須藤 敦史³・外塚 信⁴

Takashi MIKAMI, Kunio TOYOTA, Atsushi SUTOH and Shin TOZUKA

¹フェロ-会員 工博 北海道大学大学院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)

E-mail: tmikami@eng.hokudai.ac.jp

²東日本高速道路㈱北海道支社 札幌技術事務所 (〒004-0042 札幌市厚別区大谷地西5丁目12番15号)

³正会員 工博 ㈱地崎工業 技術部 (〒105-8488 東京都港区新橋5丁目11番3号)

⁴理博 札幌道路エンジニア㈱ 調査設計部 (〒003-0005 札幌市白石区東札幌5条4丁目3番20号)

In cold region at Hokkaido, due to cold winter climate shows the experience of frost into tunnels, it is necessary to prevent or reduce the opportunity of frost in tunnels. But, amount of the frost information of all northern part of Japanese municipalities is not published. Therefore, this paper presents a pair of interpolation and identification procedures, to estimate of temperature at the portal and inside tunnel. The former study, the tunnel portal temperature is interpolated by Semi-Variogram which stochastic method using to the temperatures from Automated Meteorological Data Acquisition System (AMEDAS) in Japan, and the others, the inside tunnel temperature is identified by actual observation data. Finally, numerical examples are worked out to demonstrate the usefulness of these methods.

Key Words : Temperature in tunnels, Interpolation, Identification, Stochastic procedure

1. はじめに

寒冷地の道路トンネルは冬期間厳しい寒さに曝されるため、約半数のトンネルにおいて凍害による何らかの変状が認められている¹⁾。そこで北海道では寒気の進入す

るトンネル坑口部の一定区間において凍結防止工を施工するが、計画されている新規トンネルの坑口気温は観測されない場合が多く、加えてトンネル坑内における気温変動は坑内風の風速・向き、通過車両の排気熱や換気など様々な環境の影響を受けるため、その推定は難しいのが現状である。

そこで寒冷地のトンネル坑口（未観測地点）における最低気温の推定手法として、気象庁の地域気象観測システム（以下、アメダス）など既存の観測値を利用した確率・統計的な補間(Semi-Variogram²⁾)が提案³⁾され、加えてトンネル坑内気温変動は実際の観測値から回帰式を同定⁴⁾している。

本研究は、図-1に示す道内の2箇所（常磐:1,843m・金山:2,177m）の高速道路トンネルにおいて観測された坑口および坑内気温と提案した手法で求めた推定気温の比較を行うことにより手法の精度と信頼性の検証を行った。

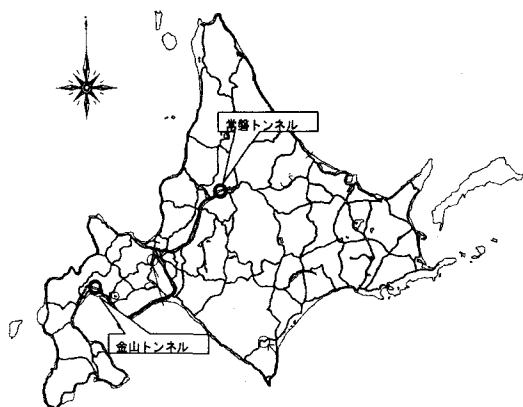


図-1 観測トンネル位置

2. トンネル坑口（未観測地点）の気温変動

(1) 気温の年周期変動

表-1 アメダスにおける観測気温の相関距離

地 域	σ_z	L_v
道内平均	0.78	29.99

表-2 旭川・深川アメダスの年平均気温、年振幅

アメダス	標高	年平均気温(°C)	振幅(°C)
旭 川	122m	6.5	14.9
深 川	55m	6.3	14.5

表-3 旭川・深川アメダスの標高補正後の年平均気温

アメダス	補正年平均気温(°C)	標高補正值(°C)
旭 川	7.32	0.73
深 川	6.63	0.33

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 を有する正弦関数がいわれている。

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

U_m : 年平均気温, A_y : 年振幅,

t : 経過日数, t_0 : 調整日数

以下に U_m と A_y をSemi-Variogramにより、確率・統計的に求める手法を示す。(詳細は文献4),5),6)参照)

(2) トンネル坑口気温の Semi-Variogram

による補間 (推定)

トンネル坑口の年平均気温 U_m と年振幅 A_y を推定値

$z^*(x_r)$ とし、 $z^*(x_r)$ は重み係数 $\lambda_i(x_r)$ を用いた線形式(2)と定義される。

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

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

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

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

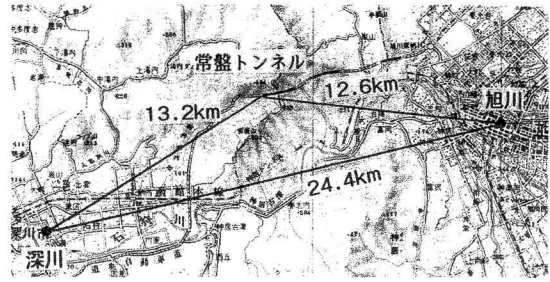


図-2 常磐トンネルと旭川・深川アメダスの位置

ここで $\gamma(d_y)$ は式(5)に示すように観測点距離の相関で表

され、式(5)中の相関係数 $(\sigma_z \cdot L_v)$ は北海道内 226 箇所のアメダス観測気温から表-1 のように求めた。

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

σ_z : 分散, L_v : 相関距離, d : 二点間距離

3. アメダス観測値を用いたSemi-Variogramによる トンネル坑口気温の補間 (推定)

(1) トンネル坑口気温の補間

a) 常磐トンネル

常磐トンネルの平均標高は294m、トンネル坑口近傍におけるアメダス観測点は旭川・深川アメダスとなる。

ここで各位置関係を図-2、各アメダスの年平均気温・年振幅、標高を表-2に示す。

未観測 (推定) 点となる常磐トンネル坑口 x_r の平均

気温 U_m と年振幅 A_y の補間値は以下の手順で求める。

- 1) 使用する各アメダスとトンネル坑口の標高差が50m以上であるため、各年平均気温に標高0.0mを基準とした補正 (0.6°C/100m) を施す (表-3参照)。
- 2) 旭川・深川アメダス (既知2点) と常磐トンネル坑口 (補間点) との各距離を求め (坑口～深川アメダス13.2km, 坑口～旭川アメダス12.6km, 深川アメダス～旭川アメダス24.4km), 式(5)から式(4)の

Semi-Variogram 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。

$$0.29456\lambda_2(x_r) + \mu(x_r) = 0.10715 \quad (6a)$$

$$0.29456\lambda_1(x_r) + \mu(x_r) = 0.09845 \quad (6b)$$

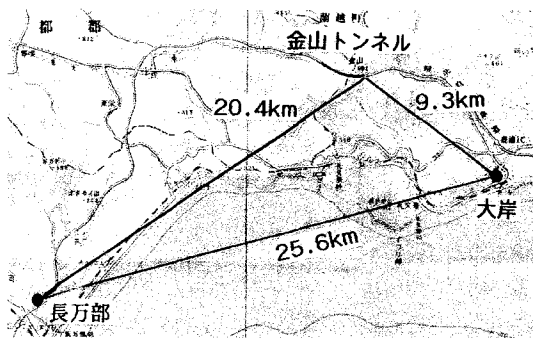


図-3 金山トンネルと長万部・大岸アメダスの位置

表-4 常磐トンネル坑口の補間年平均気温、年振幅

トンネル名	年平均気温(°C)	年振幅(°C)
常 磐	5.1	14.7

表-5 長万部・大岸アメダスの年平均気温、年振幅

アメダス	標高	平均気温(°C)	振幅(°C)
長万部	10m	6.9	12.8
大 岸	8m	7.1	12.8

表-6 金山トンネル坑口の補間年平均気温、年振幅

トンネル名	年平均気温(°C)	年振幅(°C)
金 山	5.8	12.8

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

3) 連立方程式の未知数（重み係数） $\lambda_1(x_r)$ 、

$\lambda_2(x_r)$ と $\mu(x_r)$ を求め、得られた重み係数とアメダス観測点の値を式(2)の線形推定式に代入すると常磐トンネル坑口の年平均気温と年振幅の補間値が得られる。

$$\begin{aligned} \text{年平均気温: } z_1^*(x_r) &= \sum_{i=1}^2 \lambda_i(x_r) z_1(x_i) \\ &= 0.515 \times 7.232 + 0.485 \times 6.63 = 6.94 \quad (7a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{年振幅: } z_2^*(x_r) &= \sum_{i=1}^2 \lambda_i(x_r) z_2(x_i) \\ &= 0.515 \times 14.9 + 0.485 \times 14.5 = 14.71 \quad (7b) \end{aligned}$$

得られた常磐トンネル坑口の年平均気温に標高補正(294m)を施すと表-4に示す補間値が得られる。

b) 金山トンネル

金山トンネルの平均標高は209.5mであり、坑口近傍のアメダス観測点は長万部・大岸アメダスとなる。

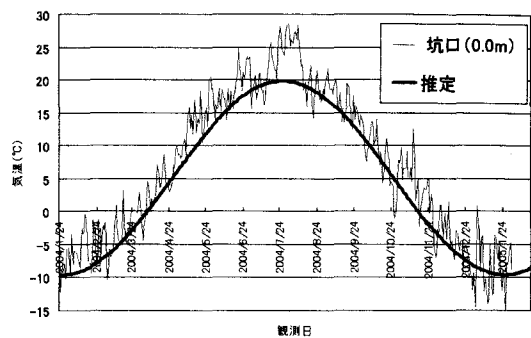


図-4 常磐トンネル坑口の推定気温

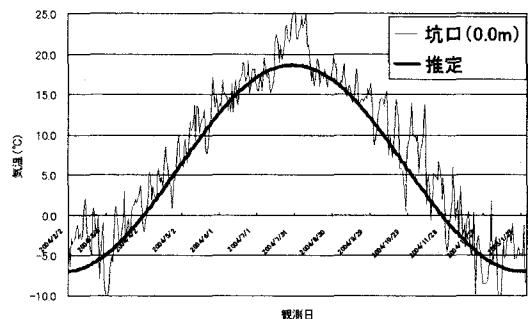


図-5 金山トンネル坑口の推定気温

(2) トンネル坑口における推定気温の精度検証

アメダス観測値より補間された坑口気温を実際に常磐・金山両トンネルで観測された坑口の気温と比較することにより、Semi-Variogramによる補間気温の推定精度の検証を行う。

a) 常磐トンネル坑口気温の推定精度

Semi-Variogram で推定した常磐トンネル坑口の気温変動と実際にトンネル坑口で観測された気温変動を示すと図-4 となる。

b) 金山トンネル坑口気温の推定精度

次に同様にSemi-Variogramで推定した金山トンネル坑口の気温変動と実際に坑口で観測された気温変動を示すと図-5となる。

ここで図中、観測地点0.0mは明り巻き工が施工されたため坑口から10m坑内に入った地点であり、若干高めの気温が観測されている。

図-4、5よりSemi-Variogramで推定した常磐・金山両トンネル坑口の気温変動と実際に観測された気温変動はほぼ一致している。

4. トンネル坑内の気温推定と実測値との比較

道内7箇所、延長が1,000m以上の比較的長いトンネル

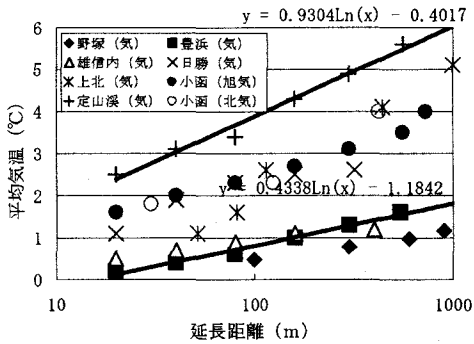


図-6(a) 坑内延長方向の年平均気温

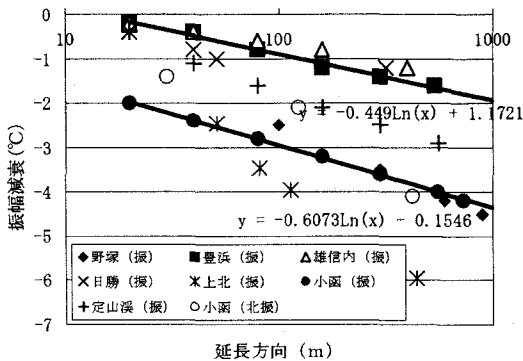


図-6(b) 坑内延長方向の年平均振幅

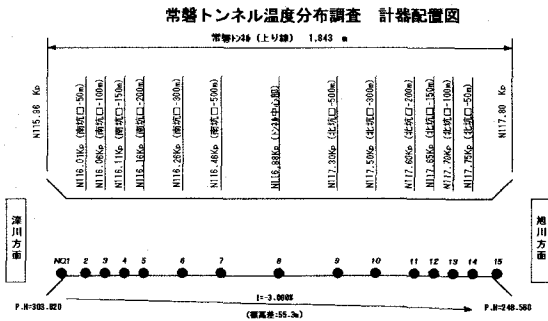


図-7 常磐トンネル坑内温度観測位置

において坑口からの距離に対する年平均気温 U_m ・年振幅 A_y の変化を坑口を基準(0.0m)として示すと図6(a), (b)のようになる。ここでトンネルの坑口からの延長距離や軸の方向および坑口の標高差・周辺地形などの諸状況および海外文献(8)などを参考にして、トンネル坑内風が弱い(0.5m/s程度以下)タイプとトンネル坑内風が1.0～1.5m/s程度(一定方向)と強いタイプに大別され、年平均

表-7 常磐トンネル坑内の推定年平均気温、年振幅

旭川側坑口からの距離(m)	平均気温(°C)	年振幅(°C)
50m	6.00	14.16
100m	6.30	13.84
150m	6.48	13.66
200m	6.60	13.53
300m	6.78	13.35
500m	7.00	13.12
920m (TN 中間点)	7.27	12.84

気温 U_m と年振幅 A_y を回帰したものが図-6(a), (b)のうに同時に示されている⁴⁾。

アメダス観測値より補間した坑口気温から、図-6(a), (b)に示す回帰式により常磐・金山両トンネル坑内の延長方向における気温を推定し、さらに実際に得られているトンネル坑内の温度観測値と比較を行い推定手法の妥当性を考察する。

(1) 常磐トンネル坑内気温の推定

常磐トンネル(坑口標高札幌(深川)側:304m、旭川側248m)では図-7に示すように、両坑口を含めて坑内15地点において気温変動の観測を行っている。

ここで冬期の常磐トンネルはトンネル軸が東西方向であることより季節風は札幌側から旭川側に吹き込むが、旭川側からの上り勾配が3.0% (旭川側坑口が56m低い)と急なため、札幌側からの寒気流入は坑口の標高(気圧)差により制限され、旭川側からの気圧差による坑内風に乗って寒気は流入しているものと考えられる。

そこで旭川側からの坑内気温推定は図-6(a), (b)における平均温度の上昇が小さく、かつ振幅の減衰が小さい回帰式(8a,b)を使用する。

$$\text{年平均気温 } U_m : y = 0.4338 \ln(x) - 1.1842 \quad (8a)$$

$$\text{年振幅 } A_y : y = -0.449 \ln(x) + 1.1721 \quad (8b)$$

この式に常磐トンネル中間点(920m)までの各観測点における旭川側坑口からの延長距離を代入すると観測点の年平均気温 U_m の上昇および年振幅 A_y の減衰が表-7のように求められる。

次に得られた年平均気温 U_m と年振幅 A_y を式(1)に代入して常磐トンネル坑内の各観測点における推定気温を求め、実際にトンネル坑内で観測された気温を示すと図-8となる。

図-8より、坑内風の強さなど基本とした温度上昇・振

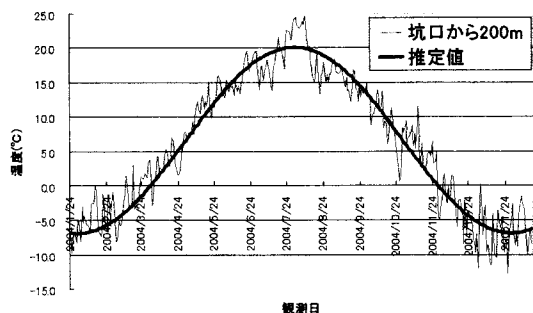


図-8(a) 常磐トンネル坑内の推定気温と実測値 (200m)

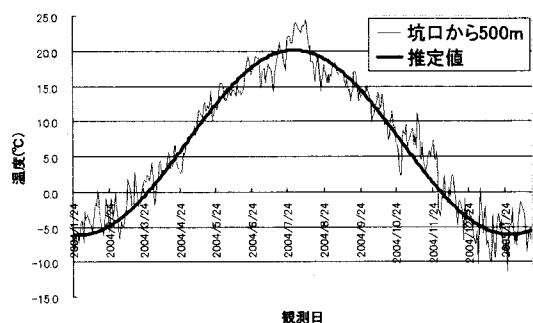


図-8(b) 常磐トンネル坑内の推定気温と実測値 (500m)

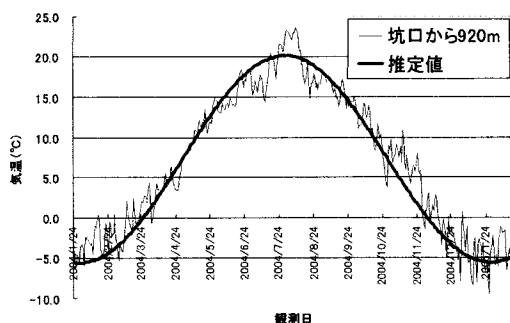


図-8(c) 常磐トンネル坑内の推定気温と実測値 (920m)

幅の減衰を考慮する回帰式を用いて年平均気温 U_m と年振幅 A_y を推定することでトンネル坑内の任意の地点における気温の推定値が精度よく求められる。

(2) 金山トンネル坑内の気温推定

同様に金山トンネル（坑口標高:室蘭側:189m,長万部側232m）においては図-9に示すように,両坑口を含めて坑内11地点において気温変動の観測を行っている。

金山トンネルでもトンネル軸が東西方向であることより冬期季節風は長万部側から室蘭側に吹き込むが,室蘭

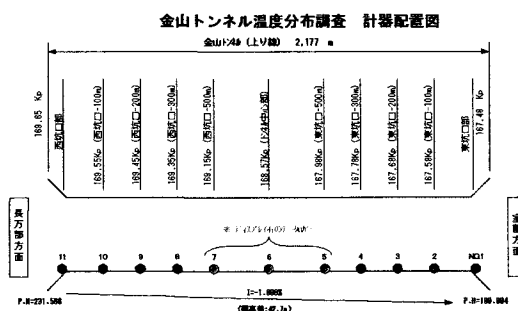


図-9 金山トンネル坑内温度観測位置

表-8 金山トンネル坑内の推定年平均気温, 年振幅

室蘭側坑口からの距離 (m)	平均気温 (°C)	年振幅 (°C)
100m	6.30	13.84
200m	6.48	13.66
300m	6.60	13.53
500m	6.78	13.35
1,085m (TN 中間点)	7.00	13.12

側からの上り勾配が2.0%（室蘭側坑口が43m低い）であるため,常磐トンネルと同様に標高（気圧）差により室蘭側から寒気は流入しているが,気圧差が小さく常磐トンネルほどの規模ではない。

そこで図-6(a), (b)において,坑内気温の推定において中間的な平均温度の上昇および年振幅の減衰として回帰式の平均値を求め使用する。

$$\text{年平均気温 } U_m : y = 0.6821 \ln(x) - 0.7930 \quad (9a)$$

$$\text{年振幅 } A_y : y = -0.5282 \ln(x) - 0.5088 \quad (9b)$$

この式に金山トンネル中間点（1,085m）までの各温度観測点における室蘭側坑口からの延長距離を代入すると年平均気温 U_m の上昇および年振幅 A_y の減衰が表-8のように求められる。

同様に得られた年平均気温 U_m と年振幅 A_y を式(1)に代入して金山トンネル坑内における観測点の推定気温を求め,同時に実際に坑内で観測された各点の気温を示すと図-10となる。

同様に図-10においても,トンネル坑口の標高および坑内風の強さなどを考慮して求めた回帰式を用いて年平均気温 U_m と年振幅 A_y を推定することでトンネル坑内の任意地点における気温変動が精度よく求められている。

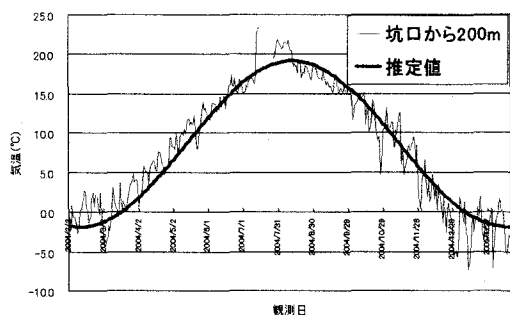


図-10(a) 金山トンネル坑内の推定気温と実測値 (200m)

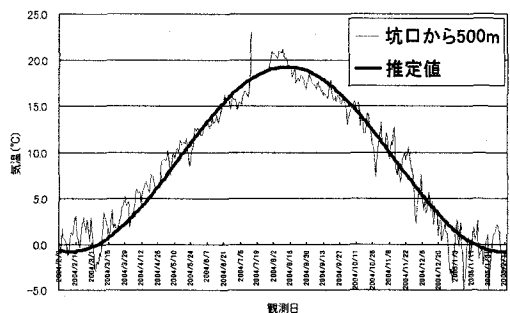


図-10(b) 金山トンネル坑内の推定気温と実測値 (500m)

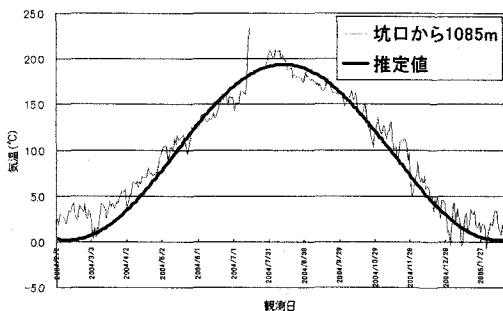


図-10(c) 金山トンネル坑内の推定気温と実測値 (1,085m)

6. 結論

本研究は寒冷地トンネルの坑口と坑内延長方向の気温変動に対する合理的な設定方法として、確率・統計的な方法および観測値をもとに回帰式を同定し、以下に示す結論が得られた。

- (1) 未観測点であるトンネル坑口気温の補間値（年平均気温 U_m と年振幅 A_y ）は周辺のアメダス観測気温と確率・統計的手法（バリオグラム）より、高い精度で得られる。
- (2) トンネル延長方向における年平均気温 U_m と年振幅 A_y の減衰の推定は、トンネル両坑口の標高（気圧）差、坑口の周辺地形および季節風などその気象環境から、トンネル坑内風の状況を推測することにより、用いる回帰式が決定される。
- (3) 決定された回帰式よりトンネル坑内の任意地点における気温変動の推定値が実用的には問題ない精度で求められる。
- (4) また今後の課題として、実測データを収集して、坑内気温を推定する回帰式の精度を向上させる予定である。

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) 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.
- 3) Delhomme, J.P.: Kriging in the Hydrosceince, *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: 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.
- 5) 須藤敦史, 三上 隆, 岡原貴司, 岡田雅之, 菲澤憲吉: 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Road Tunnels (Norwegian Design Guide) Norway Public Roads Administration, pp.59-65, 1990.