

VI-6

断熱材設計のためのトンネル延長方向の温度観測

北海道大学大学院教授	正会員	三上 隆
北海道開発局札幌開発建設部	正会員	山口 賢治
北海道開発コンサルタント(株)	正会員	岡田 正之
○(株)地崎工業 北海道本店	正会員	河村 巧
(株)地崎工業 土木部技術課	正会員	須藤 敦史

1. はじめに

寒冷地のトンネルは冬期間に凍害を受ける可能性が高いため、新設のNATMトンネルでは防水シートと二次覆工コンクリートの間に断熱材が施工されている。しかし、断熱材の設計厚や施工延長は、坑内の気温や一次・二次覆工コンクリート、断熱材、地山の熱伝導率・熱容量によって決定され、特に施工延長は延長方向の気温変動によって大きく左右される¹⁾。したがって断熱材の施工延長を合理的に決定するためには、トンネル延長方向の気温分布を正確に把握しなければならないが、実際は坑内風（自然および強制換気）や通過車両の排気などが複雑に影響し合う現象であるため、その正確な推定は非常に難しいのが現状である。そこで、旭川紋別自動車道上北トンネル(Fig. 1)上川側坑口では断熱材設計のための基礎資料を収集する目的で、トンネル延長方向の温度(坑口, 51.5m, 81.5m, 141.5m, 444.0m, 1000m: 計6点)と覆工断面内温度(51.5m, 81.5m, 141.5m: 計3点)の連続観測を実施²⁾しており、今回の研究報告は延長方向の温度観測結果の一部を整理したものである。

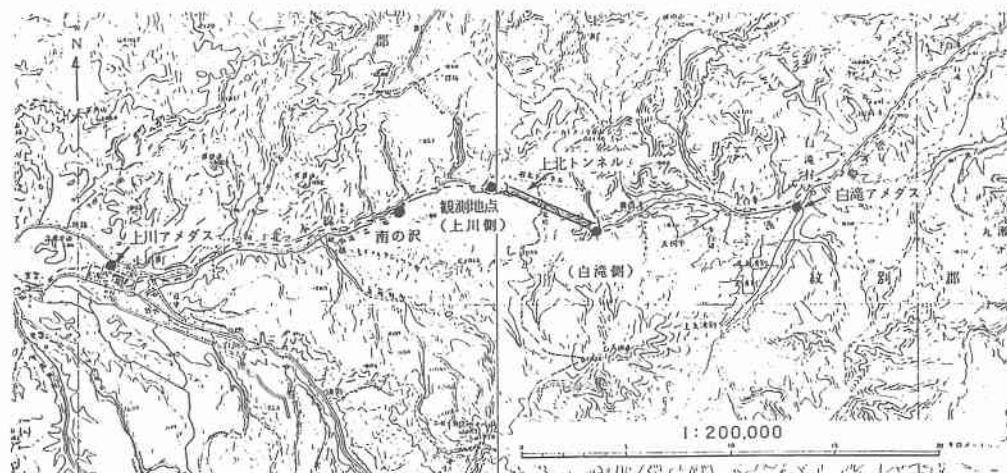


Fig. 1 旭川紋別自動車道上北トンネル位置図

2. 坑外・坑内の気象

2.1 坑口の気温

観測期間1997年9月～1998年3月における坑口部(坑外)の月別平均気温をTable. 1に示す。ここで冬期間(12月～3月)の平均気温は約 -8.6°C を示しており、上川トンネル坑口部では1月、2月の寒さが特に厳しいのが特徴である。加えて、1998年2月7日3:00には今回の観測期間における最低気温 -27.6°C を記録している。ここで冬期間で日平均気温が -10.0°C および -15.0°C 以下を記録した日数をTable. 2に示す。

Table. 1 坑口部の月別平均気温(1997年9月～1998年3月)

	1997年				1998年		
	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
平均気温	11.0	4.2	0.4	-6.2	-12.7	-10.8	-4.7

A Measurement of Temperatures in Tunnel and Lining for Heat Insulator Design

By Takashi MIKAMI, Kenji YAMAGUTI, Masauki OKADA, Takumi KAWAMURA, and Atsushi SUTOH

Table. 2 日平均気温日数表(1997年12月～1998年3月)

	1997年 12月	1998年			計
		1月	2月	3月	
-10.0° C 以下	5日	25日	14日	3日	47日
-15.0° C 以下	0日	5日	5日	0日	10日

以上より、上北トンネル上川側坑口では冬期の間、約50日間程度日平均気温が -10.0°C 以下になり、そのうち約10日程度は日平均気温が -15.0°C 以下になると考えられる。また、最低気温が -25°C 以下の日も約10日程度観測されている。

2.2 坑口の風速・風向

冬期における上川坑口部の平均風速は約 6.0m/sec 以下(全体の約80%)の日が多く、その内訳は平均風速が約 6.0m/sec 以下の日が全体の約40%、約 2.0m/sec 以下の日が約40%である。風向は北西に伸びる沢筋に坑口が位置しているため、地形効果と季節風の影響が明瞭に現れてWNW系(全体の約75%)が卓越している。ここで坑口は西北西に面しているため冬期の風(寒気)はトンネル内に吹き込むと考えられる。

2.3 坑内の風速・風向

坑内の風速・風向は、トンネルの位置・標高・坑口地形や気象条件に影響を受け、また供用時の排気設備の稼働状況によっても変化する。今回の観測期間で白滝側がトンネルの施工中であったため、坑内の自然状態ではないが、得られた風速・風向および気温変動と作業内容とその位置などから坑内の風速・風向の推定を試みる。

まず、WNW系の風が弱い場合やWNW系以外の方向の風が吹いている場合は、トンネル上部では坑内から坑口に向かって吹き、トンネル下部では坑口から坑内に向かって風が流れている。冬期の平均気圧は白滝側坑口： $P_i = 937.1\text{hPa}$ 、上川側坑口： $P_o = 928.9\text{hPa}$ であり上川側坑口が $\Delta P = 8.2\text{hPa}$ (気圧差)低いことより、定常的な坑内風は白滝側から上川側への流れ (Fig. 2(a)) が卓越するものと推測される。

しかし、初冬や2月下旬～3月にかけてWNW系の風が強い場合にはトンネル全面で坑口から坑内に向かって風が流れている (Fig. 2(b))。このような状況では坑口から1000.0mの観測点においても覆工コンクリート壁面付近の気温は 0°C 以下を示している。

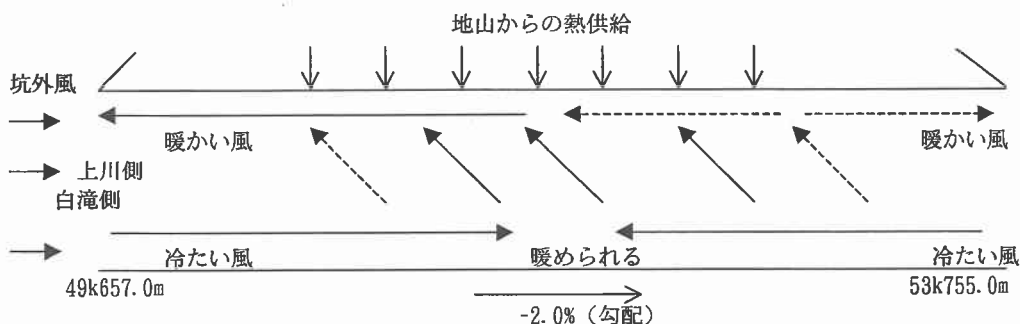


Fig. 2(a) 坑内自然風の推測(1)

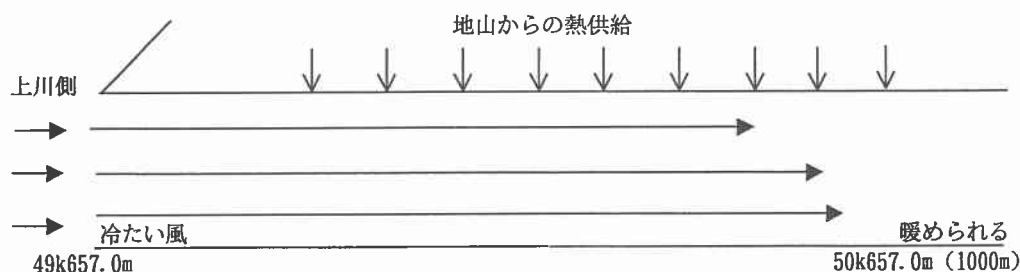


Fig. 2(b) 坑内自然風の推測(2)

3. 坑内の気温変動

トンネル坑外の気温変動が式(1)のように正弦波で与えられると、トンネル内の延長方向に対する気温変動は式(2)で表される³⁾。

$$U = U_m - A_y \sin\{2\pi(t-120)/365\} \quad (1)$$

$$U_T = U_m - A_z \sin\{2\pi(t-120)/365 - B_z\} \quad (2)$$

U_m :年平均気温, A_y :年振幅, A_z :振幅(延長距離 z m), B_z :位相遅れ

ここで1998年2月5日～2月7日において観測されたトンネル壁面下部の温度経時変化をFig. 2に示す。

Fig. 3より、観測間隔1時間の温度観測では式(2)における位相遅れ B_z は明確に現れず、位相遅れは1時間以内であると予測される。したがって、実際の断熱材設計では位相遅れ B_z は考慮しなくても断熱材設計の精度に対する影響は小さいと考えられ、坑口からの距離に対する気温変動は式(3)となる。

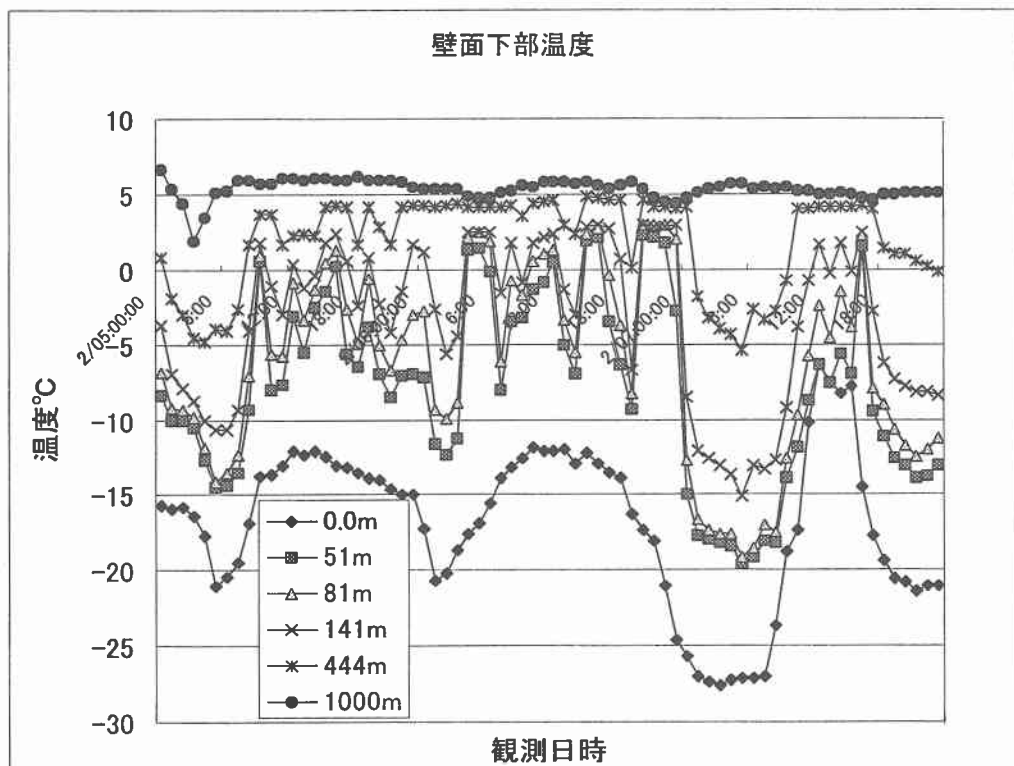


Fig. 3 気温経時変化図(1998年2月5日～2月7日)

$$U_{T1} = U_m - A_z \sin\{2\pi(t-120)/365\} \quad (3)$$

U_m :年平均気温 (=2.899)

ここで年平均気温 U_m は一定とし、観測気温より式(3)における振幅 A_z を求めるとTable. 3となる。

Table. 3 坑口からの距離による振幅

延長	0.0m	51.5m	81.5m	141.5m	444.0m	1000m
振幅	14.26	10.80	9.90	8.20	3.40	—

また、式(3)より求めた444.0m地点における気温変動と観測された日平均気温を示すとFig.4となり、坑口からの距離が長くなるにつれて一定の年平均気温 U_m ではその推定誤差が大きくなっている。
 そこで、式(3)に対して年平均気温 U_z も延長距離に対して考慮した気温変動は以下となる。

$$U_{T2}=U_z-A_zSin\{2\pi(t-120)/365\} \tag{4}$$

U_z :年平均気温, A_z :振幅(延長距離 z m)

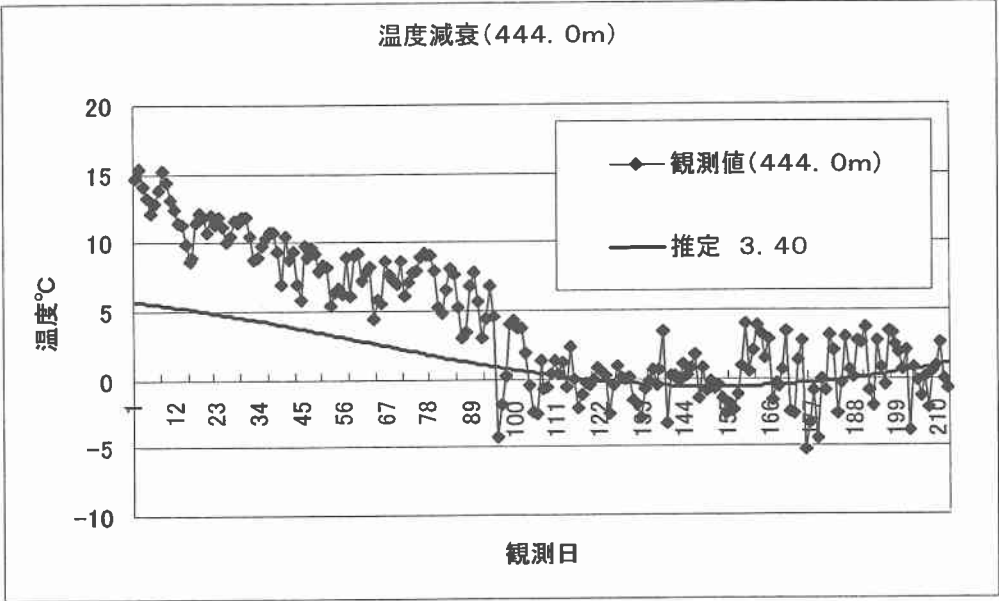


Fig. 4 延長距離444.0mの温度変動

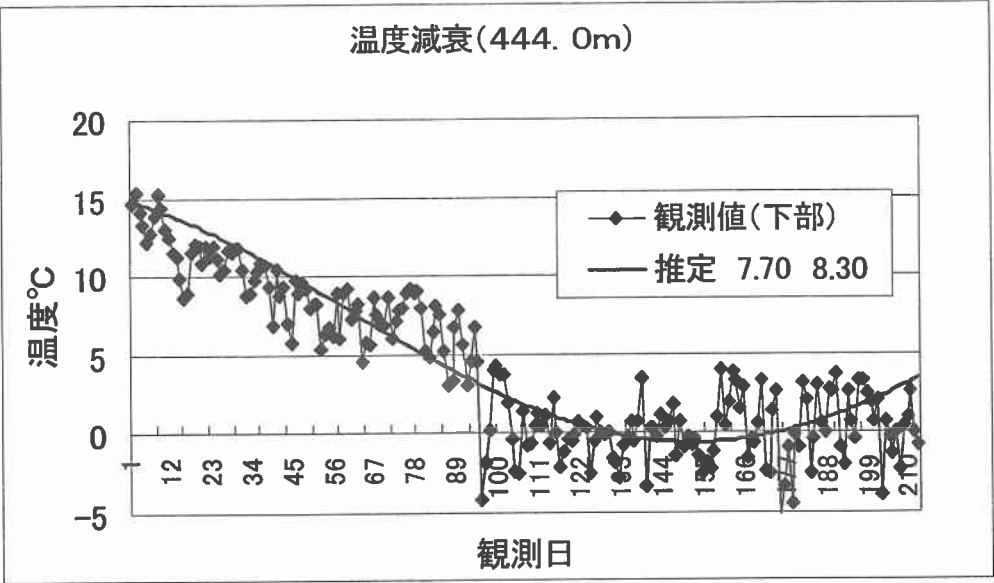


Fig. 5 延長距離444.0mの気温変動

ここで観測気温より式(4)の平均気温 U_z および振幅 A_z を求めるとTable.4となり、式(4)より求めた44.0m地点の気温変動と観測された日平均気温をFig.5に示す。

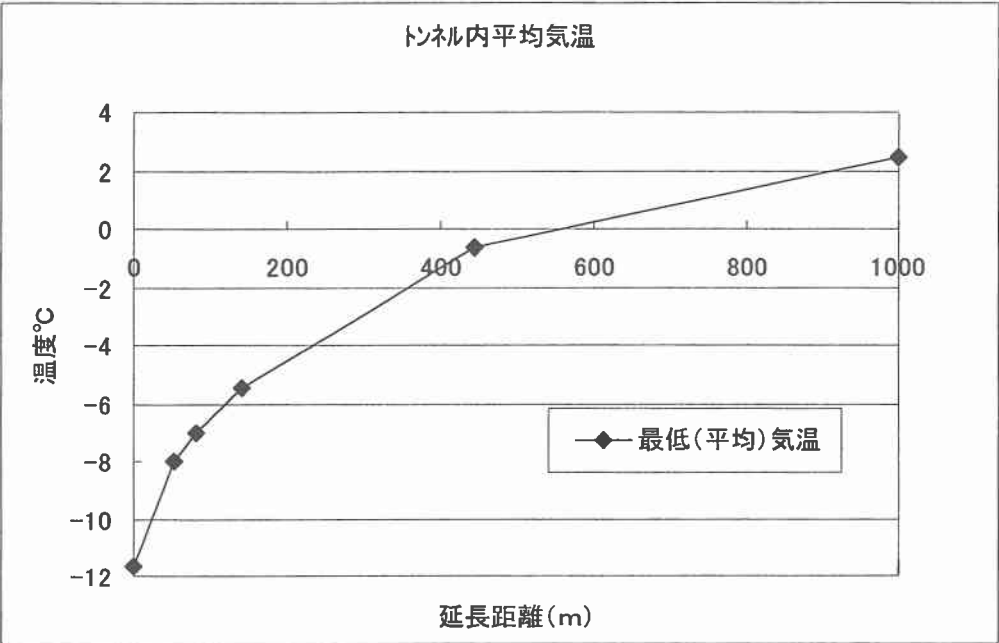


Fig.6 延長距離による平均最低気温

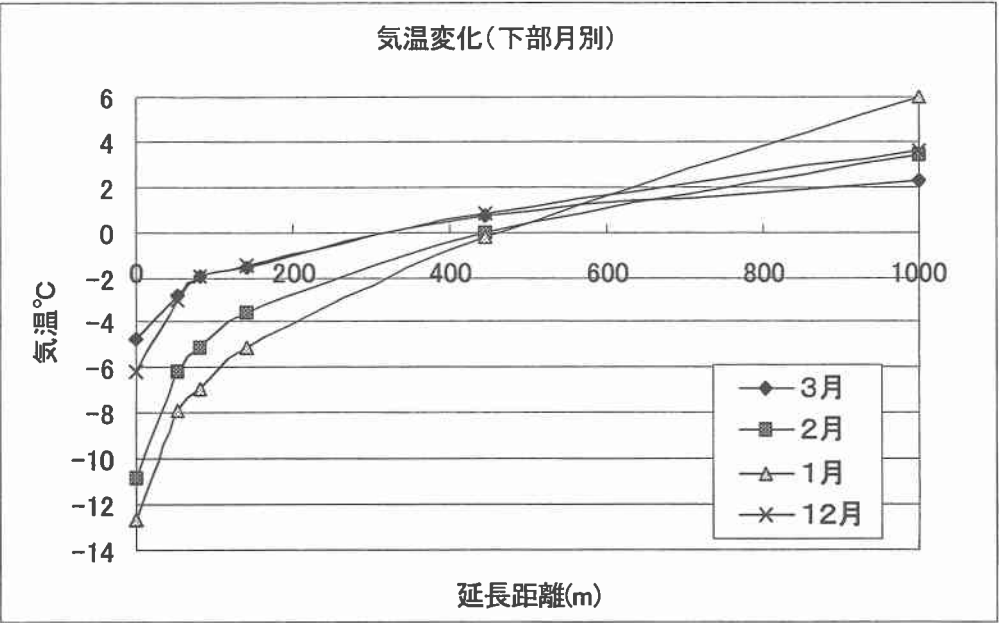


Fig.7 延長距離による平均気温 (下部)

Table. 4 延長距離による平均気温、振幅

延 長	0.0m	51.5m	81.5m	141.5m	444.0m	1000m
平均気温	2.79	4.00	4.50	5.25	7.70	9.25
振 幅	14.26	12.00	11.00	10.75	8.30	6.80

Table. 4より、坑口からの距離により平均気温は上昇し、平均振幅は伴って減少する傾向が見られる。また式(4)の気温変動の推定式により求められるトンネル内の平均最低気温を示すとFig. 6となる。

ここで、気温変動式(4)で求めた坑口からの距離における平均最低気温(Fig. 6)は、Fig. 7に示した観測より得られた月別の平均気温1, 2月とほぼ同じ気温変動を示していることより、この推定式でトンネル坑内における延長方向の気温変動や最低気温の推定は可能であると考えられる。

5. 結 論

上北トンネル上川側坑口部における気象観測およびトンネル延長方向の温度観測の一部を整理した結果、以下に示す結論が得られた。

5.1 坑外・坑内気象観測

(1) 上川側坑口部では、冬期において約50日間程度日平均気温が -10.0°C 以下になり、そのうち10日程度日平均気温が -15.0°C 以下になる。また日最低気温が -25°C 以下になる日も10日程度観測されている。

(2) 冬期の坑口部は平均風速は約 6.0m/sec 以下（全体の約80%）の風の日が多く、風向はWNW系（全体の約75%）が卓越している。したがって、冬期の寒気はトンネル内に吹き込む風であると考えられる。

(3) トンネル上部では坑内から坑口に向かって吹き、トンネル下部では坑口から坑内に向かって風が流れている。また定常的な坑内風は白滝側から上川側への流れが卓越するものと推測される。

5.2 延長方向の温度変動の推定

(1) 従来の推定式において位相遅れ B_z は考慮しなくてもよく、一定の年平均気温 U_m を用いると推定誤差が大きくなる結果が得られた。

(2) 年平均気温 U_z の延長距離による変動を考慮した気温変動は観測値とほぼ同じ変動を示しており、加えて延長距離に伴い平均気温は上昇、平均振幅は減少する傾向が見られた。

(3) 以上より、坑内の気温は延長距離に伴い上昇し、坑口気温と延長距離を変数とする関係式に近似が可能と考えられる。しかし、今回は限定された環境における観測値であるため、今後、さらにトンネル延長方向における温度変化を詳細に観測して延長方向の温度推定式を誘導しなければならない。

謝 辞：今回の研究報告は北海道土木技術会トンネル研究会（凍結分科会）における断熱材設計に関する観測の一部であり、関係各位および上北トンネルを管轄されている北海道開発局 旭川開発建設部 上川道路建設事業所の皆さまに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 須藤敦史, 三上 隆, 堀尾時司：寒冷地トンネルにおける断熱材の効果観測, 寒地ソフジウム'97, 寒地技術論文・報告集, Vol. 13, pp. 207-212, 1997.
- 3) 岡田克也, 山本嘉司：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, 第388号/Ⅲ-8, pp. 77-87, 1987.