

トンネルにおける温度測定とその解析

— 第1報 —

Measurement and Analysis of Tunnel Temperatures Part 1

西川 純一*

Jun'ichi NISHIKAWA

礼文華トンネルにおいて、トンネル内の気温と覆工、地山内の温度が測定された。冬期におけるトンネル内の気温は、側壁よりクラウンで高く、坑口から100 mまでは高くなり、その後はそれほど変わらない。また、覆工、地山内の温度は通常、奥へ行くほど高く、気温の短周期の変動が影響しなくなる。これを、各測定断面において一次元非定常熱伝導解析を行った結果と比較すると、おおむね一致する。地山の熱伝導率を正確に測定すると、よりよく一致すると推定される。

〈トンネル；温度；熱伝導解析〉

Atmospheric temperatures and the temperatures in the lining and the rock at the Rebunge tunnel were measured.

The measurements show that atmospheric temperatures at the crown of the tunnel in winter is higher than it at the sidewalls, and atmospheric temperatures increase for 100 m from the mouth of the tunnel. The temperature of the lining and the rock rises in proportion to the depth and varies less with increasing depth in a short cycle.

Compared with the one-dimensional nonsteady state heat conductivity analysis, the results generally agree. More accurate heat conductivity measurements of the rock behind the lining will improve this agreement.

Keywords : tunnel, temperature, heat conduction analysis.

1. はじめに

道路トンネルにおける凍害防止工法の施工範囲を求めするための基礎資料とすべく、トンネル内の気温および覆工、地山内の温度測定が実施された。鉄道トンネルの断熱つらら防止工に関しては、既設、新設トンネルにおける断熱処理工の条件が、非常熱伝導解析によって求められるという岡田の研究¹⁾²⁾がある。今回、道路トンネルにおいて一連の温度条件、地質条件、測定位置と温度変化の関係を把握し、最終的には断熱処理工の条件の簡易な

設定を目標としている。本論では、1年間の測定が続いている礼文華トンネルの結果の特徴を述べ、計算による値との対比を行い、若干の考察を試みる。

本件は、北海道土木技術会道路トンネル研究委員会技術小委員会の課題の一部をなすものであり、委員の諸氏には日頃、指導、協力をいただいている。温度測定については北海道開発局建設部道路建設課の援助をいただき、今回の測定データは室蘭開発建設部室蘭道路事務所の協力により得ている。また、北海道大学低温科学研究

*地質研究室主任研究員

所の福田正己博士からは、熱伝導解析のプログラムをいただいた。

以上、記して感謝申し上げる

2. 測定場所および方法

今回測定を行った個所は、一般国道37号豊浦町礼文華トンネル（全長1,152m）である（図-1）。当トンネルの地山を構成する地質は、新第三紀鮮新世フレベシ火山噴出物層と称せられている安山岩質の火山砕屑岩類である。これらは溶岩あるいは自破砕状溶岩あるいは火山角礫岩、凝灰角礫岩などの岩相を呈するが、部分的に熱水変質を著しく受けている。こういった変質部を中心に断面変状が著しく、補強対策工の行われているトンネルでもある³⁾。

トンネル延長方向の坑内気温分布、覆工コンクリート、地山内部への温度変化を継続的に把握するために、室蘭側坑口の外での気温と各断面での温度が測定された。断面は坑口より20、50、110、270、600mに設定され（図-2）、覆工表面から2~3cmの位置での気温、60cm厚の覆工コンクリートの中心、地山との境界線部、地山表面から20、40、80、200cmの位置での温度が測定された。20、50、110、600mでは路面から1.5m高の側壁、50、270mではクラウンにおいて、それぞれ別孔をあけて温度計が埋設された。温度計はPt100Ω（公称測定誤差±0.4°C以内）が使用され、測定結果は電話回線を介して室蘭開発建設部虻田道路維持事業所にて収録されている。最初の冬期間は毎正時の1時間ごとの測定であるが、以後は0時から3時間ごとの1日8回行われている。

測定は昭和61年12月中旬から行われており、現在に（昭和63年1月）に引続いている。今回は、測定開始後約1年のデータをまとめる。

3. 測定結果

結果から日平均温度を計算し、図示した（図-3~9）。以後の記述は、この日平均温度に基づくものである。トンネル坑内から内部にかけての気温（図-9）は、冬期においては、内部に行くほど高くなる。一番高いのは、270m地点クラウンである。50m地点クラウン、600m地点側壁、110m点側壁が類似の傾向を示し、続いて50m、20m地点側壁の順で坑外気温に近い。270mクラウンと坑外気温は、およそ5°Cの差がある。50m地点の側壁とクラウンの気温は、およそ1°C違っている。この冬期におけるトンネル内の気温分布は、凍結指数と坑口からの距離を用いると、図-10のように表現される。データ点

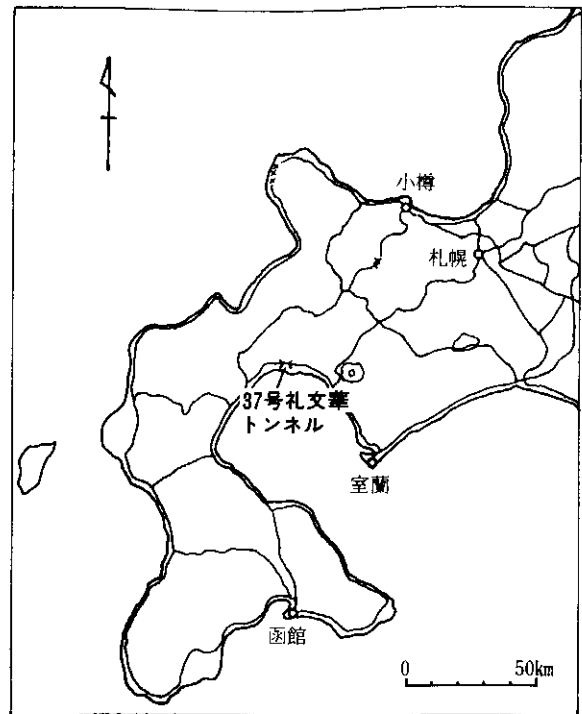


図-1 礼文華トンネルの位置

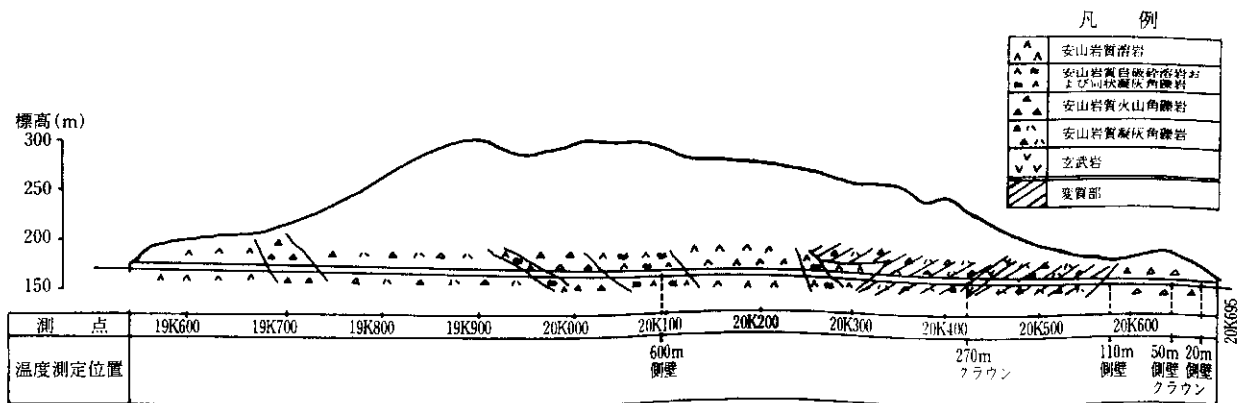


図-2 地質断面と温度測定の位置

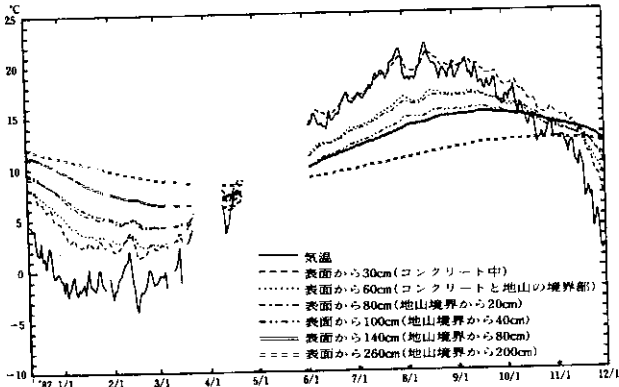


図-3 温度測定結果 坑口から600mの側壁

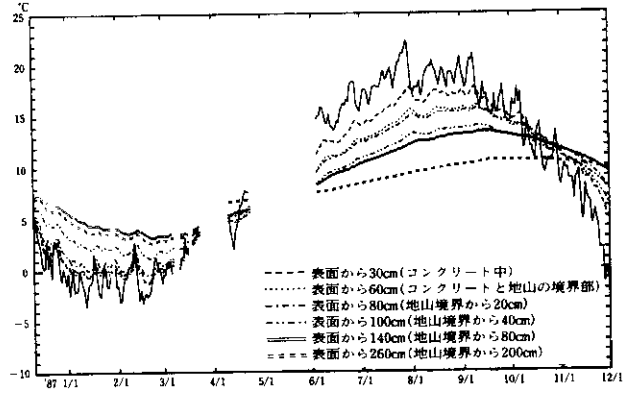


図-7 温度測定結果 坑口から50mのクラウン

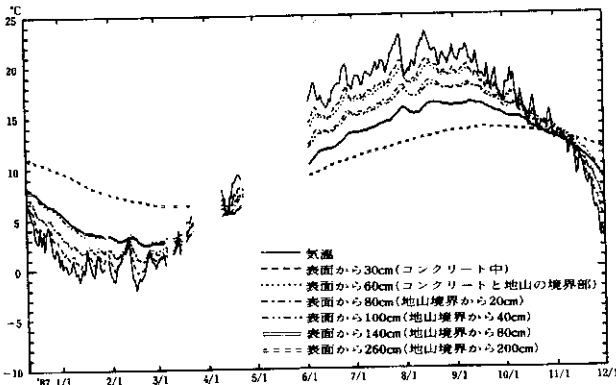


図-4 温度測定結果 坑口から270mのクラウン

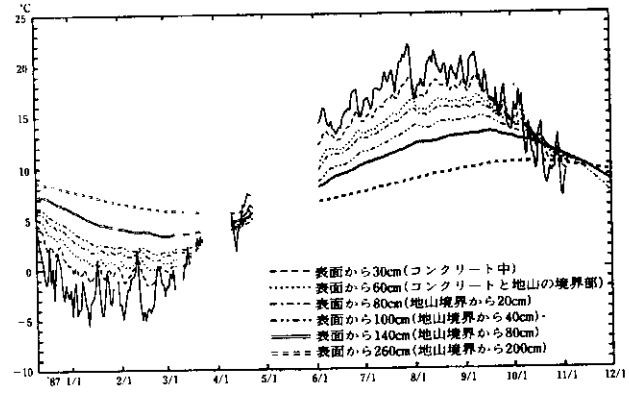


図-8 温度測定結果 坑口から20mの側壁

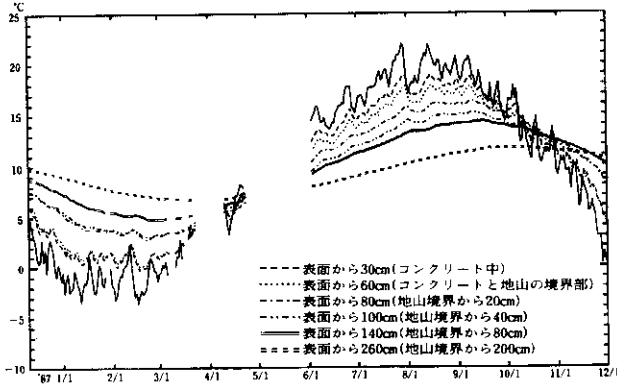


図-5 温度測定結果 坑口から110mの側壁

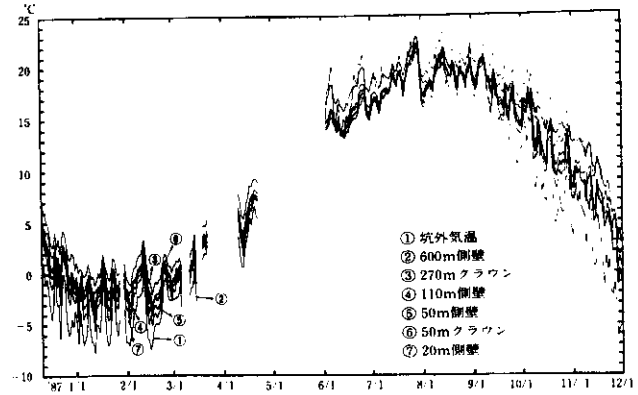


図-9 各測定個所の気温の比較

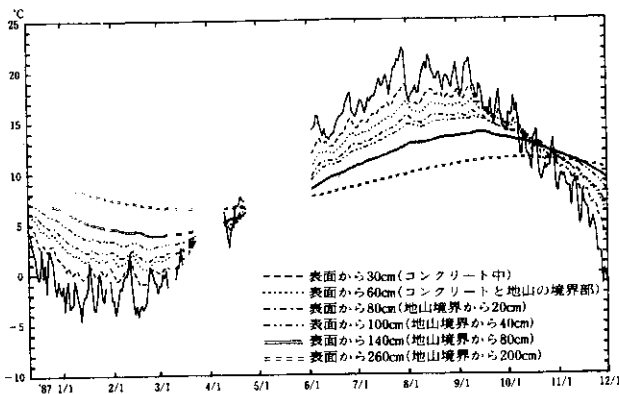


図-6 温度測定結果 坑口から50mの側壁

数は少ないが、側壁、クラウンそれぞれ、坑口から100 m以上になると、あまり変わらなくなる傾向がうかがわれる。

各断面における温度変化をみると、図-8の20 m地点側壁に代表されるように、冬期においては覆工コンクリート、地山内部への深さに応じて温度は高く、夏期には逆となり、それぞれ4月中旬、11月中旬に入替わる。覆行表面付近の気温は坑外の気温と同様に、数日の短周期で高低を繰返しつつ、1年を通じては正弦波的挙動を示す。このうち、数日の短周期の高低の繰返しは覆工コンクリート、地山の内部へ入ると徐々にうすれ、滑らかな曲線となる。

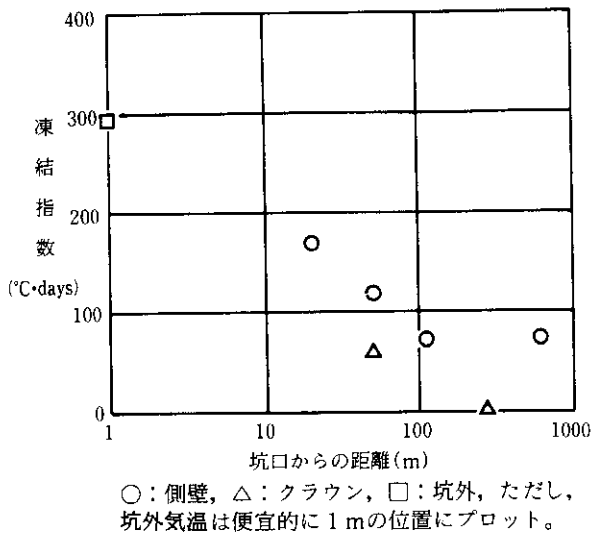


図-10 坑口からの距離と凍結指数の関係

4. 熱伝導解析

日平均気温の変化に応じて覆工コンクリート、地山の温度がどのように変化していくかを、熱伝導解析によって求め、実測値と対比させ、計算の有用性をみた。

計算にあたっては、地表面熱収支を考慮した一次元差分法の非常熱伝導解析⁹⁾の BASIC 言語に書換えられたプログラムを使用した。

ここでは、覆工、地山の熱的物性値（比熱、熱伝導率など）と気象データを入力する必要がある。オリジナルプログラムでは日射量、雲量などが考慮されているが、トンネル内のことであるのでその項を削除した。空気中から覆工コンクリートへの熱伝達率は風速に左右される

表-1 熱伝導の実測値

安定岩質火山角礫岩	$3.00 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$
覆工コンクリート 1)	3.70×10^{-30}
2)	4.00×10^{-3}

※1), 2)は採取位置の異なるもの。いずれも測定条件は乾燥状態、測定開始温度 15~20 °C

表-2 熱伝導解析に用いた推定値

	体積含水比	熱伝導率 cal/cm·sec·°C		比熱 cal/cm³·°C	
		凍結	未凍結	凍結	未凍結
コンクリート	0.2	0.006	0.005	0.5	0.6
地山岩石 1)	0.1	0.005	0.004	0.4	0.5
地山岩石 2)	0.1	0.0025	0.002	0.4	0.5

※1)表-1の実測値より推定したもの 2)図-11~16の計算に用いた値

が、ここでは実測値がないので、平均 2 m/sec と見積り、同時に 1 m/sec と 3 m/sec の条件でも計算し、妥当性をみた。

覆工コンクリート、地山の岩石試料の比熱、熱伝導率は表-1に示す値が得られているが、熱伝導率は乾燥状態の値であり、自然状態より小さい可能性が大きい。その点を考慮して、各熱伝導率を表-2のように設定した。計算に当たっては、6 m 以下を恒温とし、その場所での年間平均気温を入れた。

以上のデータにより、各断面において計算した結果、

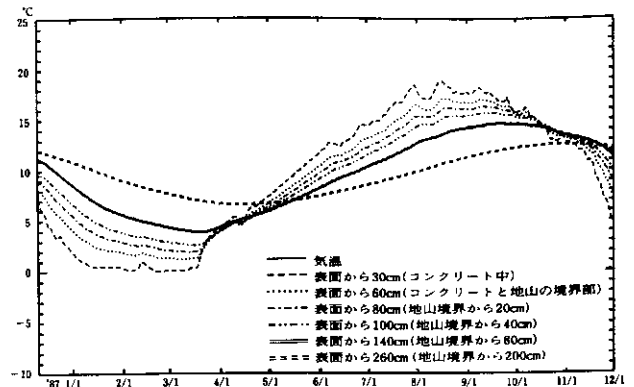


図-11 非定常熱伝導解析結果 坑口から600mの側壁

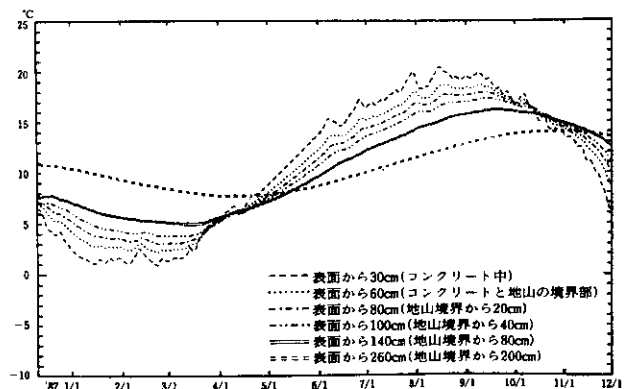


図-12 非定常熱伝導解析結果 坑口から270mのクラウン

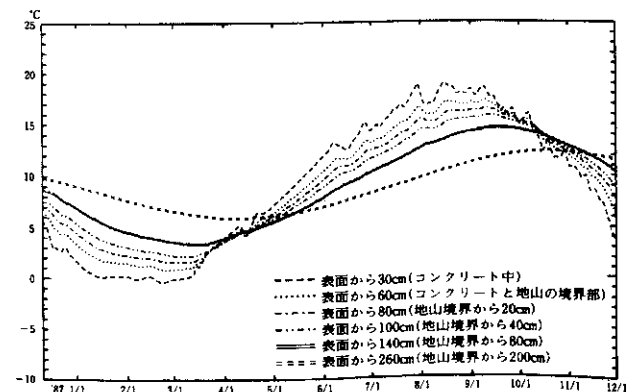


図-13 非定常熱伝導解析結果 坑口から110mの側壁

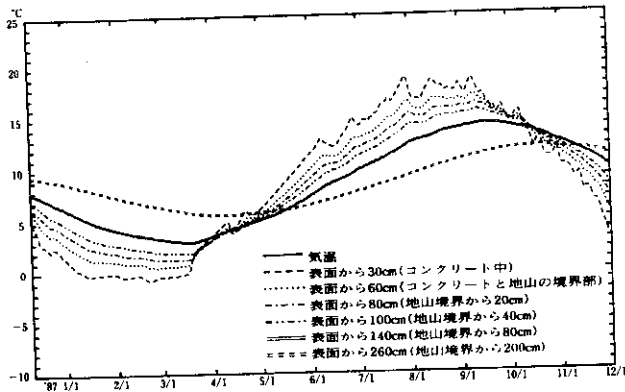


図-14 非定常熱伝導解析結果 坑口から50mの側壁

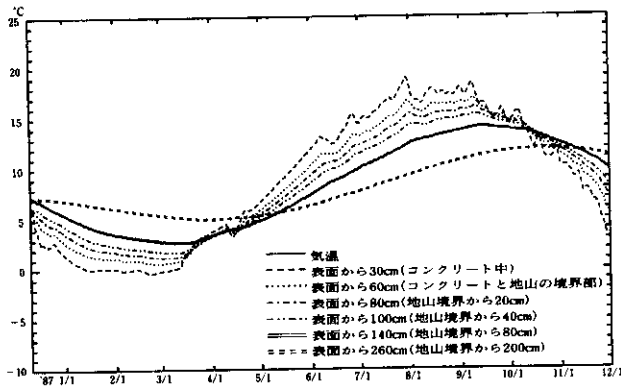


図-15 非定常熱伝導解析結果 坑口から50mのクラウン

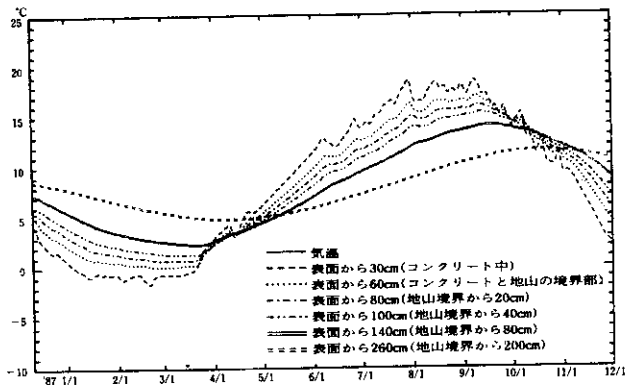


図-16 非定常熱伝導解析結果 坑口から20mの側壁

実測値に最も適合するのは推定した地山の熱伝導率を1/2にした場合(表-2)であることがわかった(図-11~16)。よく一致する場合で1~2°Cのズレである。これは、地山の熱伝導率が岩石試料片を測定して得た値から推定したものであるため、実際の地山ではきれつが多数入っていることにより小さくなっているからと推定される。この計算では、地山の熱伝導率を一定としているが、実際の地山では変質の度合、きれつの頻度に応じて変化するので、実測値と計算値のズレはこれによってある程度説明できる。

5. 考察とまとめ

礼文華トンネルは北海道のなかでは比較的温暖な地域に位置するが、全長1,000mあまりの規模のトンネルの冬期における温度低下の傾向を知ることができた。全長の短いトンネルでは、坑内の気温は坑外の気温と大差ない(たとえば、根岸ら⁵⁾の測定例)が、礼文華トンネルのような規模になると地山の保熱効果が大きく現われているといえる。

各断面における測定値は、前述したように均一な地山を想定した計算とはズレが生じている。たとえば、6つの測定断面のうち、50mのクラウン、270mのクラウン、600mの側壁はズレが大きい。これは、覆工コンクリート背後の地山の熱伝導率が高いことが考えられる。50mのクラウンが地表風化の影響の強い領域に含まれること、270m地点は変質の中心部で内坑変位の大きいところ、600m地点も変質した岩石の近傍であることなどはそれを支持する。

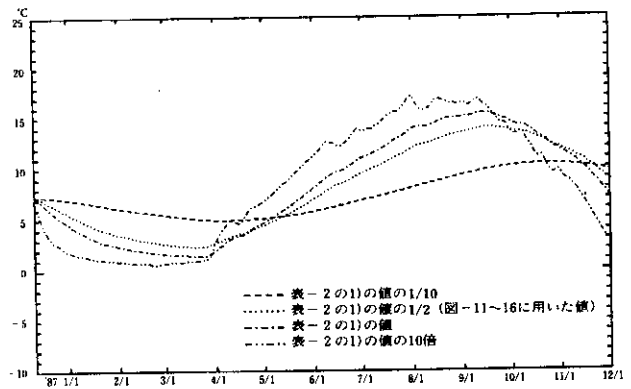


図-17 非定常熱伝導解析において地山岩石の熱伝導率を変えた場合 (a)
坑口から20mの側壁 表面から80cm
(地山境界から20cm)

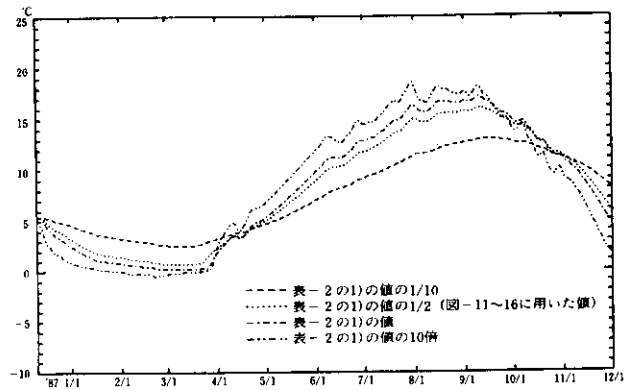


図-17 非定常熱伝導解析において地山岩石の熱伝導率を変えた場合 (b)
坑口から20mの側壁 表面から140cm
(地山境界から80cm)

しかし、計算値は大まかにみると実測値の傾向をよく表わしている。計算値は図-17に示すように、地山の熱伝導率を変えると結果は変わってくる。したがって、自然状態での熱伝導率をより正確に測定して計算に用いることによって、実測値と計算値のズレは小さくなるだろう。

分布をいくつか実証すること、より寒冷な地域のトンネルでの実測例と計算例の対照が必要であろう。これらに基づいた検討は、次の課題とする。

今回の礼文華トンネルでの温度測定の結論は、

- 1) 冬期のトンネル内の気温は坑内より内部へ向かって次第に高くなるが、100 m を越えるとそれより奥との差はみられない。
- 2) 覆工コンクリートと地山内部の温度分布とその変化は、非常熱伝導解析による計算値とおおむね一致する。
- 3) 2) における差異については、地山の熱伝導率の正確

な値を入力することによって補われると推定した。

参 考 文 献

- 1) 岡田勝也；トンネルのつらら発生領域に関する統計的・理論的解析と一提案，鉄道技術研究報告 No. 1349, p. 52, 1987年3月
- 2) 岡田勝也；トンネルの断熱つらら防止工法における断熱材の材質とその厚さの最適化，鉄道技術研究報告 No. 1350, p. 70, 1987年3月
- 3) 坂本 稔；変状トンネルの原因と修復方法，土木試験所月報 No. 450, pp. 23-35, 1987年2月
- 4) 福田正己，石崎武志；平衡地表面温度による土壤凍結深モデル，雪氷，42, 2, pp. 71-80, 1980年
- 5) 根岸正充，星野 寛，小林雄一，吉田 保；岩石および岩盤の凍結と凍害(第1報)，土木試験所月報 No. 268, pp. 1-12, 1975年

*

*

*