

# 地盤伝熱を連成したトンネル温熱解析モデルの開発

鈴木 圭一 本多 眞

(技術研究所) (技術研究所)

## Development of Prediction Model for Thermal Environments in Tunnels with Computing Heat Conduction in Rock

Keichi Suzuki, Makoto Honda

土被りの大きなトンネルでは坑内の温度が非常に高くなる可能性があり、効率的な換気設備計画が必要となる。その必要性能を見積もるのに有益な実用的な温熱環境予測手法を開発し、その概要を示した。そのなかで限られた調査データから境界条件を適切に設定する必要があるが、熱-浸透流連成解析より定温度層深さを求める方法、さらに年周期定常解析により解を求める方法についても説明した。マレーシアで建設されたパハン・セランゴール導水路トンネルにて温熱環境を測定し、トンネルの掘削当初からの温度変化の予測値と比較することで予測手法の妥当性を確認したところ、良好な結果を得ることができた。

It is necessary to predict the thermal conditions in the tunnel with high temperature in order to design ventilation or tiller systems to combat it at the time of construction and thereafter. Hence, a practical heat transfer analysis model for tunnels was developed. It is also necessary to establish a means of setting up appropriate boundary conditions from limited boring data. The thermal environments in the tunnel of the Pahang-Selangor Raw Water Transfer Project in Malaysia are being measured in order to develop and validate the new analysis model. Comparisons of the analytic values and these measurements of the air and rock temperatures demonstrated broad qualitative agreement, and we consider the model sufficiently accurate for practical uses.

### 1. はじめに

放射性廃棄物処分施設や南アルプスを横断する鉄道トンネルなど、土被りの大きなトンネルの建設が計画されている。このようなトンネルでは地温勾配に起因して岩盤温度が高く、坑内温度も運用上支障があるレベルまで高くなる可能性がある。また首都圏の道路トンネルでは車両からの発熱により坑内温度の上昇が問題となっている事例もある。そのため建設時の労働環境や供用後の保守や構造保全などの観点から、効率的な換気設備などの熱対策の計画が必要となる。この必要性能などを見積もるためには、実用的な温熱環境予測手法が必要であり、加えて限られた調査データから、岩盤温度や熱物性値、地下水流動などの境界条件を適切に設定する手法を確立する必要がある。なお地下鉄などで温熱快適性を評価するために開発されたトンネル温熱シミュレーションプログラムがあるが、周囲の岩盤への蓄熱範囲(定温度層深さ)の設定方法が任意となっているため、何年にもわたる長期間運用時の予測には不明瞭な部分が残ると推測される<sup>1),2)</sup>。

本報告では、換気設備および地盤伝熱を考慮した実用的なトンネル内温熱環境予測手法を開発したので報告する。なかでも蓄熱範囲の設定方法に着目し、初期のトンネル近傍の地盤温度が不確定な場合に、周辺地山の動水勾配を考慮した非定常2次元熱-浸透流連成解析を用いて定温度層深さ(トンネル内の熱が地盤の温度に影響を与えない深さ、図-1参照)を算出し、年周期解析により坑内温度および地盤温度などの変化を適切に予測する方法についても報告する。さらに本予測手法の妥当性確認の1つとして、マレーシアのパハン・セランゴール導水路トンネルの建設中に、本手法によりトンネルの掘削当初からの温度変化の予測を行い、継続的に得られるモニタリングデータ<sup>3)</sup>と比較した。

### 2. 温熱解析モデルの概要

本手法では、多様なトンネルの温熱解析を対象とするため、それぞれ異なる換気方式やトンネル形状、発熱源などに合わせて柔軟にモデルを対応させることを前提としている。ここでは説明を簡

易にするため、単純な縦流換気方式と呼ばれるトンネル軸方向に向かって一律の気流が生じているトンネルで断面内の温度分布などを一様と考え、軸方向に1次元で取り扱うモデルについて述べる。

## 2.1 坑内温度

図-1のようにトンネルの軸方向に1次元流れが生じているとした場合の時間  $t$  と坑内温度  $T$  の関係については、式(1)の非定常熱量保存式が成立する。これを離散化した式を解くことで坑内温度分布の経時変化を求める。

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{Q - Sh_a (T - T_{w,1})}{A} \quad (1)$$

ここで、 $x$  は軸方向の長さ、 $c$  は空気比熱[J/kgK]、 $\rho$  は空気密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\lambda$  は空気の熱伝導率[W/mK]、 $u$  は断面平均の坑内風速[m/s]である。右辺第2項は単位長さあたりの発熱速度であり、 $Q$  は車両などからの発熱[W/m]、それ以外は壁面への失熱で、 $S$  はトンネル周長[m]、 $A$  はトンネル断面積[m<sup>2</sup>]で、坑内温度  $T$  と壁面温度  $T_{w,1}$  [K] の差に対流熱伝達率  $h_a$  [W/m<sup>2</sup>K] の積に比例した値が対流熱伝達量である。両者の温度差が大きいほど失熱も大きくなる。

なお建設中のトンネルのように、大量の湧水が浸入して、蒸発・結露が生じる場合を検討する場合、もしくは高温対策としてミスト設備や打ち水などの効果を考慮する場合には、水蒸気の発生量、移流による湿気移動量、壁面への結露量を考慮した非定常の絶対湿度の保存式を解き、蒸発および結露により生じる熱量を求め、式(1)の  $Q$  にそれを加える<sup>4)</sup>。ここでは詳細な説明は省略する。

## 2.2 地盤温度および定温度層深さの設定

コンクリート壁または周辺地盤の温度分布  $T_w$  [K] は軸対称と考えて円筒座標系1次元とし、式(2)に表す非定常熱伝導方程式により計算する。坑内と接する壁表面の温度は式(3)の境界条件を用いて、坑内温度  $T$  と壁表面温度  $T_{w,1}$  との差に比例する値を対流熱伝達量として与える。反対側の境界である定温度層深さの温度は地中温度  $T_0$  (固定値) を与える。なお馬蹄形や矩形断面のトンネルなどを対象とする際、本モデルのような円形を仮定した解析では予測誤差が生じる懸念があるが、表面から外側へ伝熱が進むにつれて拡がり円形に近

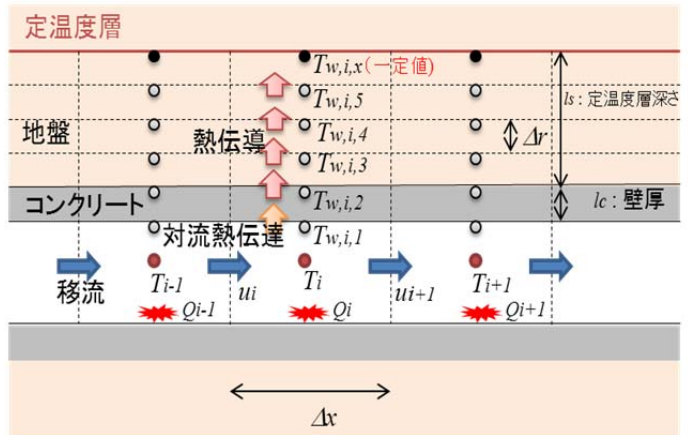


図-1 坑内温度と地盤温度の解析イメージ

づくので、坑内から流出する熱流の総量はそれほど大きな誤差ではないと考える。

$$\frac{dT_w}{dt} = k \left( \frac{d^2 T_w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_w}{dr} \right) \quad (2)$$

$$-k \frac{dT_w}{dr} \Big|_{r=R} = \frac{h_a}{c_c \rho_c} (T - T_{w,1}) \quad (3)$$

ここで  $r$  はトンネル中心軸からの距離[m]、 $R$  はトンネル内径の半径[m]、 $k$  は地盤 (またはコンクリート壁) の熱拡散率[m<sup>2</sup>/s]、 $c_c$  および  $\rho_c$  はそれぞれ地盤 (またはコンクリート壁) の比熱[J/kgK] と密度[kg/m<sup>3</sup>]である。

つぎに定温度層深さの意味について考察する。もし定温度層深さを設定せずに無限遠方まで計算領域を設けると、坑内に発熱があれば地盤に伝熱し、時間経過とともに伝熱範囲は無限に広がり続け、それに伴い坑内温度と地盤温度も上昇し続ける。地盤への蓄熱が増えるほど、坑内からは失熱が小さくなるので、際限なく坑内温度が上昇し続ける。もし定常解または周期定常解を得る問題とすれば、いつまでもたっても収束せずに解が得られなくなってしまう。一方、実際のトンネルでは、地下水の流動により地盤に伝わった熱は遠方もしくは坑内に運ばれ (除去され)、内部の発熱といつかは釣り合うので温度が延々と上昇し続けることはない。そこで従来のトンネル温熱予測モデルでは便宜上、定温度層深さという地盤の伝熱範囲を限定する設定値を与えて、ある値以上に地盤温度および坑内温度が上昇しないようにしている。しかしながら、定温度層深さの決定方法はこれまで曖昧であり、既往のトンネル周辺地盤の温度測

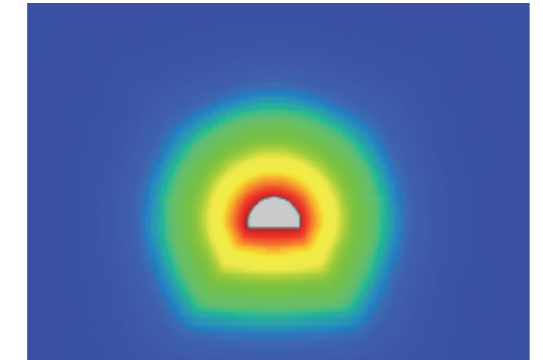
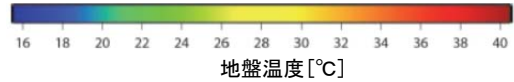
定結果などを参考に設定するケースが多い。妥当な定温度層深さは地下水や地盤の熱物性により大きく異なるので、これから建設するようなトンネルの温度予測をする場合には、既往の温度測定データは信頼性が低く、そのような設定方法では予測結果が大きく違うものになりかねない。

そこで本手法では、定温度層深さを地下水流動と熱伝導を連成した「非定常2次元熱-浸透流連成解析(TOUGH2)」<sup>5)</sup>を用いて、ある湧水量のもとで、トンネル内部から発生した熱の地盤への熱流量を求めることで算出することにした。

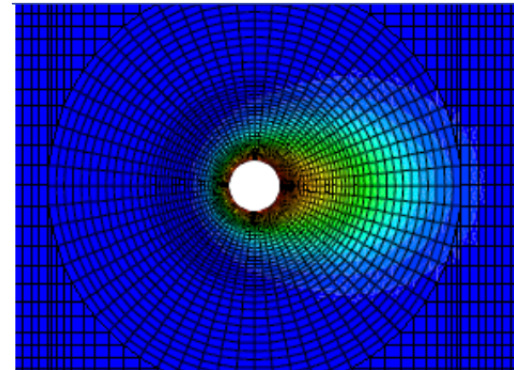
TOUGH2は地熱等の多成分多相状態での地下水流動を取り扱う有限差分法数値モデルであり、3次元解析が可能であるが、ここでは簡易化のため2次元解析を用いる。図-2(a)に示す伝熱解析例のコンターのように、山岳のNATMやTBMトンネルの場合は地下水が湧水として四方からトンネルの内部に流れ込んでくるため、トンネルから周辺への伝熱と湧水の移流により運ばれる熱が逆方向となって相殺し、結果的に坑内から地盤への伝熱範囲が限定される。一方で図-2(b)に示すコンターのように都市部などのシールドトンネルでは、止水性が良いので坑内への湧水の浸入はきわめて少なく、地下水は動水勾配に従って図の右向きに流れ、さらにトンネルを迂回して下流に下っていく、その際にトンネル周囲の地盤の熱を運び去っていくので、坑内および周囲地盤の温度上昇が抑制される。

TOUGH2で得られる伝熱性状は2種類のトンネルで異なるが、熱流量の結果からの定温度層深さの換算方法は同一である。まず対象となるトンネル壁での止水の有無、形状(円形、馬蹄形、内径など)、地盤の熱拡散率、動水勾配(地下水位データなどから算出)、供用(発熱)開始からのおよその年数などを設定条件として、熱-浸透流連成解析を実施し、坑内から地盤への熱流量を求める。そして定温度層深さ $l_s$ を想定した円筒座標系1次元定常熱伝導方程式を考える。坑内温度 $T$ と定温度層の温度(地中温度) $T_\infty$ との差を用いて、坑内から地盤に伝わる単位長さあたりの熱流量 $Q_w$ [W/m]が次式で求められる。

$$Q_w = SK(T - T_\infty) \quad (4)$$



(a) 山岳トンネル (湧水がトンネル内に浸入)



(b) シールドトンネル (地下水が右向きに流れている)

図-2 熱-浸透流解析による温度コンター例

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_a} + \frac{\ln\left(\frac{R+l_c}{R}\right)}{\lambda_c} + \frac{\ln\left(\frac{R+l_c+l_s}{R+l_c}\right)}{\lambda_s}} \quad (5)$$

ただし $K$ は熱貫流率[W/mK]、 $\lambda_s$ は地盤の熱伝導率[W/mK]である。ここで2次元熱-浸透連成解析から得られた地盤の熱流量を $Q_{w2}$ とすれば、 $Q_w = Q_{w2}$ であり、 $l_s$ を求める式を以下のように導出できる。すなわちTOUGH2で熱流量を求め、式(6)から定温度層深さを定量的に求めることができる。なお式(6)に陽的には現れていないが、年数により解析で得られる熱流量が変化するため、この定温度層深さは計算対象とする供用年数により変化する値であり、それに合わせて求める必要がある。特に湧水量や動水勾配が小さい場合は、定温度層深さの時間変化が収まりづらいため、とくに注意を要する。

$$l_s = (R+l_c) \left[ \exp \lambda_s \left\{ \frac{S(T-T_\infty)}{Q_{w2}} - \frac{1}{h_a} - \frac{\ln\left(\frac{R+l_c}{R}\right)}{\lambda_c} \right\} - 1 \right] \quad (6)$$

### 2.3 風速

坑内の風速については通常はファンによりコントロールされているので、計画されている値を設定値として与えることになる。ファンが停止している場合、自然換気のみをトンネルを対象とする場合もしくは換気に必要なファン性能を予測したい場合などには、風速分布および圧力分布も解析により求める必要がある。このとき基本的には坑内と外気の温度差により生じる浮力と気流と壁面との摩擦力、さらに道路または鉄道トンネルの場合は内部を走行する車両により生じる交通換気力を考える。浮力  $F_b$  および壁面摩擦力  $F_w$  については以下のように表される。

$$F_b = g\beta(T - T_0)\Delta h \quad (7)$$

$$F_w = -\frac{\rho\lambda_w}{2D}u^2 \quad (8)$$

$g$  は重力加速度 [ $\text{m/s}^2$ ] ( $=9.8$ )、 $\beta$  は体積膨張率 [ $1/\text{K}$ ] ( $=0.0034$ )、 $T_0$  は外気温度 [ $\text{K}$ ]、 $\Delta h$  は単位長さあたりの標高差 [ $\text{m}$ ]、 $D$  はトンネルの水力直径 [ $\text{m}$ ]、 $\lambda_w$  はトンネルの壁面摩擦係数 [-] である。

交通換気力について、車両走行部と外の領域との関係は流量一定の法則とエネルギー保存則の式より次式で導き出すことができる。

$$(1 - R)(u' - v) = u - v \quad (9)$$

$$P' + 1/2\rho(u' - v)^2 = P + 1/2\rho(u - v)^2 \quad (10)$$

ただし、 $P$  は車両通過位置外における圧力 [ $\text{Pa}$ ]、 $P'$  は車両通過位置における圧力 [ $\text{Pa}$ ]、 $u$  は車両通過位置以外における空気の流速 [ $\text{m/s}$ ]、 $u'$  は車両通過位置における空気の流速 [ $\text{m/s}$ ]、 $v$  は車両速度 [ $\text{m/s}$ ]、 $D$  はトンネルの水力直径 [ $\text{m}$ ] である。これらの2本の基礎式より車両通過時における未知数  $P'$ 、 $u'$  を導出することができる。これより、以下の式で車両の摩擦力  $F_t$  を求める。

$$F_t = \lambda_w \frac{\rho}{2d} \frac{1}{1-\gamma} u' |u'| + \lambda_t \frac{\rho}{2d_r} \frac{\gamma}{1-\gamma} (u' - v) |u' - v| \quad (11)$$

ただし  $d_t$  は車両の水力学的直径 [ $\text{m}$ ]、 $\lambda_t$  は車両側面摩擦係数、 $\gamma$  は車両とトンネルの断面積比である。

しかるに連続の式（流量の保存式）と上記の摩擦力、浮力、交通換気力などを考慮したトンネル軸方向に1次元の運動方程式を立て、それらを連

成して SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 法に基づいて、圧力および風速を算出する。なおこれらの説明は煩雑であり、また気流解析では一般的な手法であるため、ここでは説明は省略する。

### 2.4 計算方法

換気を導入しているトンネルでは、流入する外気の温度に年変動がある。そのため例えば夏の最も暑い時期の坑内温度を予測するのに、夏の外気温を一定値として設定して定常計算をする、または非定常計算を収束するまで繰り返すといった方法では、正しい解を得ることができない。なぜなら地盤内部は壁面の熱が深さに応じて時間差をもって伝わるので、地盤温度はその時点（夏）の坑内温度のみではなく、かなり前の時点（冬）の坑内温度の影響を受けている。地盤温度の分布が正しくなければ壁面温度も坑内から壁面への失熱量も正しくないので、結果として坑内温度も正しく計算ができない。定温度層深さの大小にもよるが、夏から半年前の冬までではなく、地盤のさらに深層では何年も前の坑内温度の影響をうけており、この部分を正しく予測するには、何年間にわたって外気温などを変動させた設定値として非定常解析をする必要がある。

分かりやすいのは供用開始時より非定常解析を始める方法で、坑内温度、地盤温度などの初期値を与え、外気温、坑内発熱などは変動値（たとえば1時間ごとの値）を設定し、目的の時間（供用年数）まで解析を続けるものである。このとき湧水の影響を考慮するため、定温度層深さは熱一浸透流速成解析で求めた、解析内の経過年数に合わせて変化する値を設定する。この方法では例えば供用開始から数十年後の状態を知りたい場合も全期間で解析しなければならないので負荷が大きくなる。

もう一つの方法は年周期定常法と呼ばれるもので、定温度層深さには対象とする供用年数を TOUGH2 に与えて、その結果から算出した値を設定値とし、外気温、坑内発熱量などは1年間分の変動値を用いて非定常計算をする。これを約5年間、連続で繰り返す（定温度層深さなどにより必要な繰り返し年数は変わる）、1年を周期とする周期定常を解として得る方法である。この方法では、全期間を解析するよりも計算時間が短くなること、また坑内温度や地盤温度の初期値が不明の場合でも、最終的には妥当な解が得られることが利点と

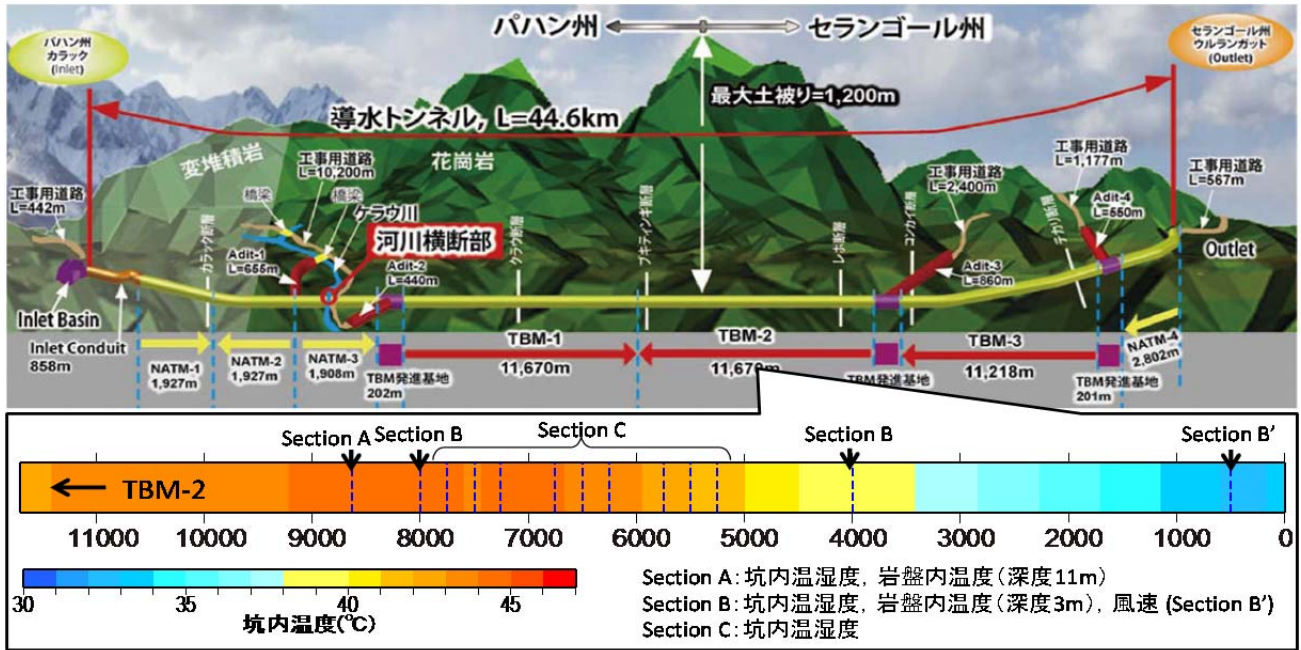


図-3 パハン・セランゴール導水路トンネルの建設概要 (TBM-2 が計測対象)

して挙げられる。そのため利用目的にもよるが、実務上は年周期定常法を用いてよいケースが多いと考えられる。

### 3. モデルの妥当性確認

本解析手法の検証として、パハン・セランゴール導水路トンネルの建設中に温熱環境を継続的にモニタリングしたデータを用いて、トンネルの掘削当初からの温度変化の予測を行い、実測値と比較し、妥当性を確認した。なお当地は赤道直下であり、夏冬の温度差が小さく、坑内の温度や地盤へ伝熱量が季節で大きく変動しないために国内のトンネルに比べて本解析手法の検証が比較的しやすいという利点がある。

#### 3.1 パハン・セランゴール導水路トンネルの概要

本トンネルは都市化が進むマレーシアの首都クアラルンプールの将来の水不足を解消するため、隣接するパハン州より河川水を取水し、セランゴール州の上水処理場まで 189 万  $m^3$ /日の導水をする利水事業である (図-3、図-4)。延長 44.6km の導水トンネルを建設するもので、おもな工区は NATM が 4 工区 (9.1km)、TBM が 3 工区 (34.6km) であり、2014 年 2 月に全区間貫通して東南アジアでは最長のトンネル、世界で 11 番目であり、最大土被り (1,246m) は世界で当時 8 番目となった。



図-4 パハン・セランゴール導水路トンネルの位置

#### 3.2 計測概要

解析手法の妥当性確認のため対象とした区間は、最大土被り約 1,200m の TBM-2 (11.7km) であり、岩盤温度が 55°C 以上となるため、掘削中は風管により外気を切羽付近まで送気し、さらに冷房を TBM に設置して冷却することで、坑内温度を下げ作業環境の改善を図った。坑内には温度計、湿度計および風速計を設置して掘削中の坑内環境を測定した (図-5)。導水トンネルのため、この区間の断面はほぼ円形であり、ごくゆるやかな勾配があるが浮力などが無視できる範囲である。

またアクセス坑から 8,630m の地点 (以下、TD8630) には岩盤内を 11m 穿孔して、9 点の熱電対を埋め込み岩盤内の温度も測定した (図-5 の Section A)。また TD500、TD4000、TD8000 においても坑内温度に加えて、岩盤内 3m 深さまでの温度を測定した (図-5 の Section B)。TD5250~7500 までの 8 箇所では坑内温度と壁面温度を測定した (図-5 の Section C)。風速は TD500 の 1 カ所で測定した。坑内温度、岩盤温度、

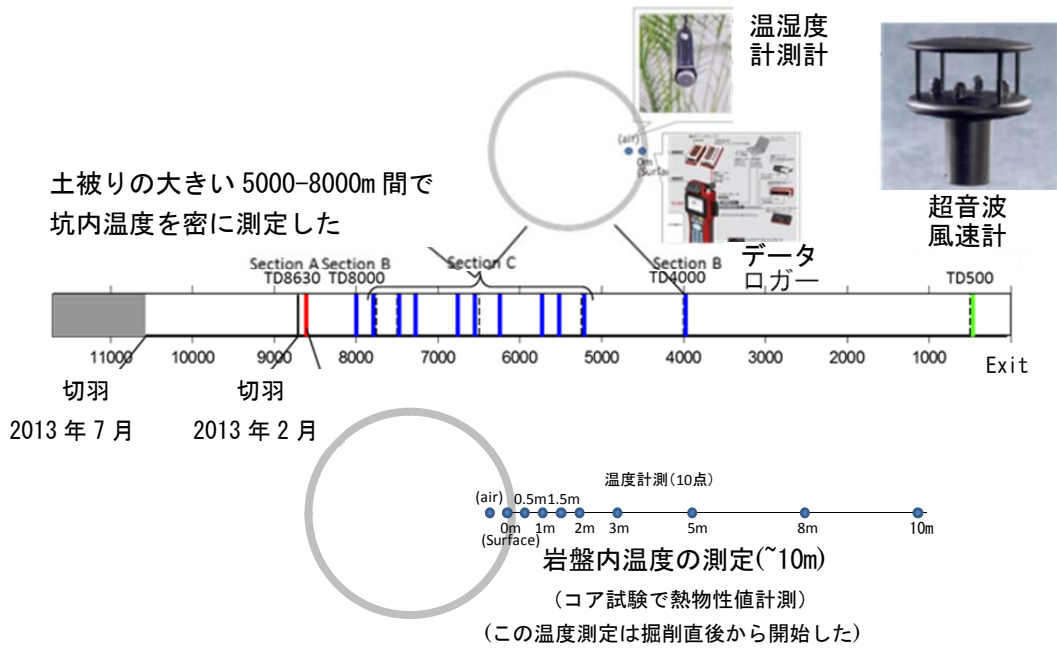


図-5 トンネル内の計測概要

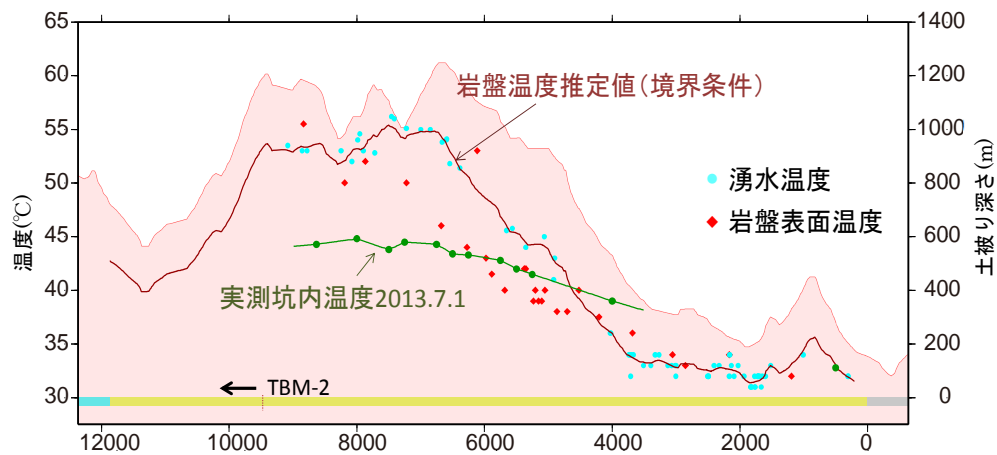


図-6 坑内温度と岩盤温度

湧水温度の測定値を示したグラフが、図-6である。図中の緑色実線が2013年7月に計測された坑内温度である。

また地質はTBM-2の全区間で花崗岩が主体であり、TD8630地点のコア試験から、熱伝導率2.8W/m/K、比熱0.69kJ/KgK、密度2.703g/cm<sup>3</sup>と測定された。

### 3.3 岩盤温度の推定

解析の境界条件となる深部の岩盤温度(定温度層深さの温度)は、まずTD8630の11mの深さで岩盤内の温度を測定しているのでこれを岩盤温度とみなす。他に岩盤表面温度を測定した記録があるが、採掘から時間が経過して深部の岩盤温度よりも低くなっていると考えられる。そこで湧水温度の測定記録を使い、これがほぼ岩盤深部の温度を表していると考えられることから、土被り深さとの相関関係(図-7)から、トンネル延長方向の

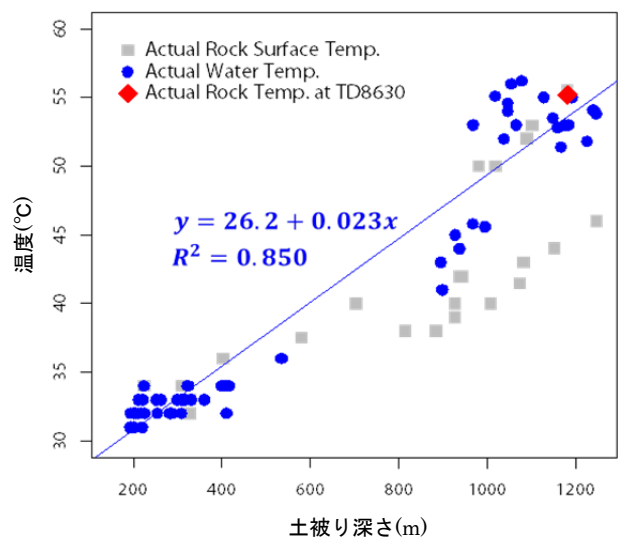


図-7 温度と土被り深さの回帰モデル

岩盤温度分布を推定するモデルを作成し、対象区間における岩盤温度を図-6の赤線のように推定した。決定係数  $R^2$  が 0.85 であるため比較的相関が高いことが分かる。推定には地球統計の一手法を用いた<sup>6)</sup>。

### 3.4 解析条件

建設中の円形断面のトンネルを対象として、上部に吊るされた風管により坑口から切羽に向かって給気をして換気している状態をモデル化した。

図-8に示すようにトンネル軸方向に100m間隔に分割した計算領域を考え、さらに断面内はトンネル内空、風管および地盤（吹付コンクリートを含む）と3分割する。風管内部についても式(1)と同様に移流と熱伝達を考慮して温度を計算した。また風管内部とトンネル内空との熱伝達を考慮して、5mm厚のビニールとして風管温度を計算した。トンネルの掘削開始（2010年7月）からTD11400m付近まで、実際の切羽の進行に合わせて100m毎に解析領域を進行方向に追加しながら約3年半（2014年1月頃まで）の温度履歴を解析した。表-1におもな解析条件をまとめた。給気量は  $1,500\text{m}^3/\text{min}$  で、換気ファンの設置されている坑口付近と坑内の切羽付近には冷房装置が設置されており、それぞれ  $450\text{kW}$ 、 $107\text{kW}$  である。また外気温は実測値を基に  $32^\circ\text{C}$  一定に設定している（赤道付近のため夏冬の変化が小さい）。計算ステップは10秒、岩盤内分割幅は5cmである。

切羽の進行に合わせて追加された領域（100m区間）の坑内温度と岩盤の初期温度は、図-8で示した岩盤温度の推定値とした。換気は外気を坑口側から風管により送気して先端の領域で吹き出し、先端からは坑口に向かって流れるとし、その風速は記録のある期間は実測値を設定し、計測していない掘削当初の期間は平均値  $1.2\text{m/s}$  を与えた。またその流量と釣り合いが取れるように、本坑の風速を自動的に与えた。

風管内の温度は、坑口側では実測値（ $32^\circ\text{C}$ ）で先端に運ばれるまでに風管と坑内との熱伝達により温度が変化する。坑内温度の計算は、岩盤および風管との熱伝達、さらにTBM領域は発熱と冷房装置による冷却を考慮した

（TBMの発熱は計測温度から推定し

表-1 解析条件

換気量 [ $\text{m}^3/\text{min}$ ]	1,500
外気温 [ $^\circ\text{C}$ ]	32
外部冷却装置 [ $\text{kW}$ ]	450
内部冷却装置(TBM付近) [ $\text{kW}$ ]	107
対流熱伝達率 [ $\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ ]	0.015
風管の熱伝導率 [ $\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ ]	0.02
岩盤内定温度層深さ [m]	10
岩盤熱拡散率 [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	1.5

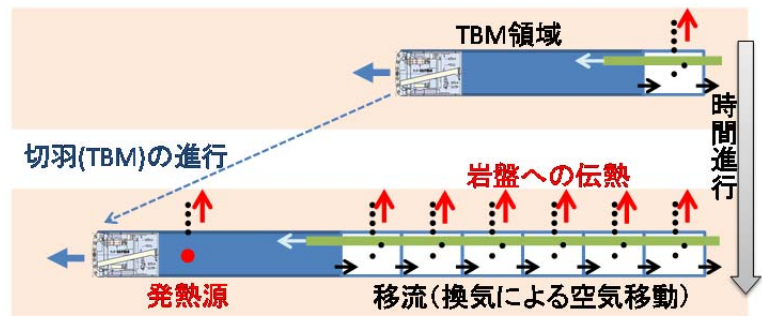
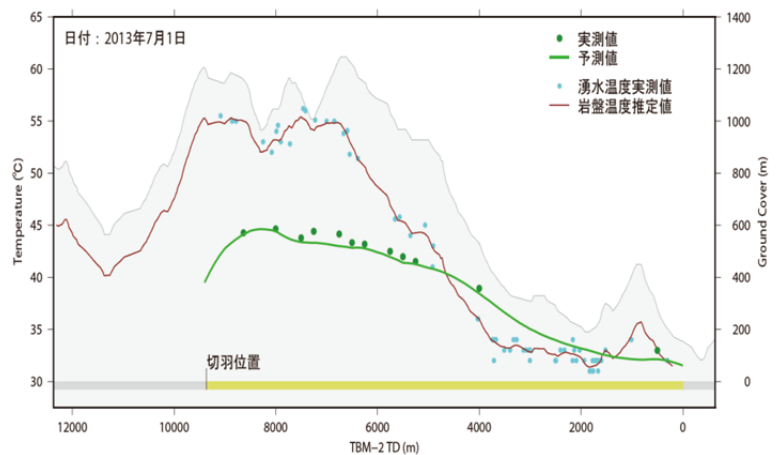
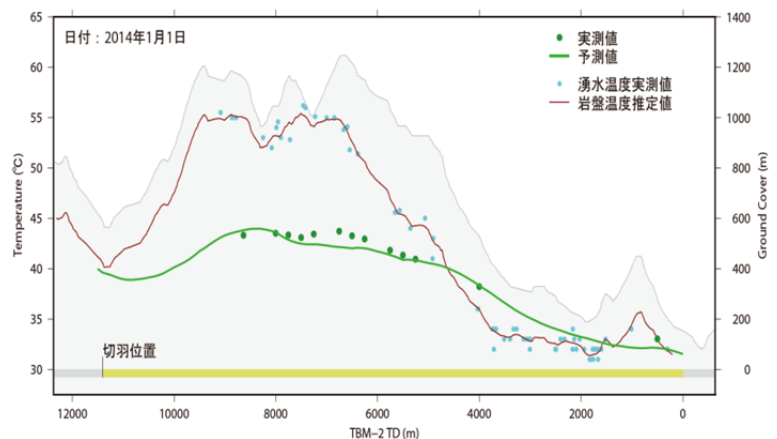


図-8 本トンネルモデルの概要



(a) 2013年7月1日



(b) 2014年1月1日

図-9 坑内温度の実測値と解析値の比較

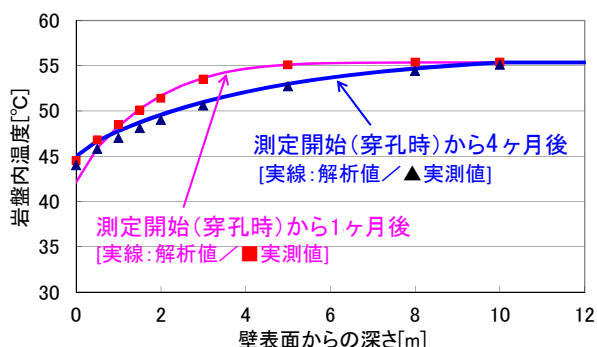


図-10 岩盤内温度の予測値と実測値の比較

た)。湧水の蒸発についても温度に影響が大きいと考えられたため、各地点の相対湿度と温度の実測値を基に蒸発する湧水量を推定し、非定常1次元絶対湿度保存式を連成することで、本坑内における蒸発潜熱を温熱解析の式の中に反映させた。

さらに定温度層深さについてであるが、本トンネルでは湧水は全体としてやや多い印象であったが、地点ごとの湧水量、また周辺地盤の動水勾配分布などのデータが入手できなかったため、熱-浸透流解析を実施しなかった。岩盤内部温度を測定した TD8630m では湧水量が少なかったため、ここを目安に妥当と推定される 10m を全体の設定値に定めた。

### 3.5 解析結果と実測値の比較検証

坑内温度の予測値と実測値の比較を図-9に示す。(a)は掘削開始から3年後で、切羽位置は約 TD9500m である。(b)はその半年後で、TD11400m に進んだ。坑内温度分布の緑色の線で示した予測値は概ね緑色のプロットで示した実測値と一致しているのが分かる。また一部 (TD7000m 付近など) で予測値の方が最大で約 1~2°C 低くなっている地点がある。これは今回の解析では定温度層深さを一律にしているが、実際は湧水量にばらつきがあるため地盤温度の解析に誤差が生じていること、または解析の境界条件の岩盤深部の温度を、実際の温度ではなく、湧水温度の計測値からの推定値を用いていることなど、設定した境界条件の精度が充分ではなかったために生じた誤差と考えられる。

また TD8630m で岩盤内部に埋め込んだ熱電対により計測した温度の実測値と予測値の比較を図-10に示す。坑内温度が岩盤内温度よりも低いため、1か月後よりも4か月後のほうが壁表面から8m 深さまでの間で温度が低下している。1か月後および4か月後のどちらも予測値が実測値とほぼ一致しており、地盤方向への伝熱および地盤蓄熱の性状が本モデルによりよく再現できているのが分かる。

## 4. おわりに

本研究では、換気設備を考慮した実用的なトンネル内温熱環境予測手法を開発した。この予測には定温度層深さの設定値が重要であり、熱-浸透流解析の結果から算出し、また年周期解析で解を求める方法を示した。またトンネルでの実測値と比較することで、手法の妥当性確認をした結果、概ね坑内温度の変化を精度良く予測できることがわかった。ただし一部 1~2°C の誤差が生じる地点があり、これは今回の解析では諸事情より定温度層深さを一律にしているが、実際は湧水量にばらつきがあるため地盤温度の解析に誤差が生じているため、または解析の境界条件の岩盤深部の温度を、実際の温度ではなく、湧水温度の計測値からの推定値を用いているためと考えられる。このような結果を踏まえ、予測に必要なデータ種類についても知見を得ることができた。今後もとくに湧水や地下水性状の測定値も入手可能なトンネルの長期的な実測データと検証して信頼性を高め、様々なトンネルでの熱対策に活用できるようにモデルを発展させていく所存である。

## 謝辞

パハン・セランゴール導水路トンネルでの温度計測に快く協力をいただいた河田孝志 土木技術本部長、松本高之 マレーシア営業所長をはじめとする方々に感謝申し上げます。

## <参考文献>

- 1) W. D. Kennedy et al. : "Subway Environmental Design Handbook: 2nd Edition", U. S. Department of Transportation, 1976.
- 2) 梶山博司 : "地下鉄道の温熱環境シミュレーション", 鉄道総研報告, Vol.11, No.10, pp.41~46, 1997.
- 3) 本多真, 鈴木圭一, 河田孝志, 松本高之 : "高土被りトンネル内の温熱環境のモニタリングとその予測", 構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, OS11-7B, 2015.
- 4) 鈴木 圭一, 今津 雅紀, 藏重 幹夫 : "覆工コンクリートの養生判定に対するトンネル内温湿度の予測方法について", 土木学会学術講演会, VI-419, 2011.
- 5) Doughty, C. : "User's Guide for Hysteretic Capillary Pressure and Relative Permeability Functions in TOUGH2", Report LBNL-6533E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Calif., 2013.
- 6) Goovaerts, P. : "Geostatistics for Natural Resources Evaluation", Oxford University Press, Oxford, pp. 487, 1997.