

トンネル内気象の予測計算

PREDICTION CALCULATION OF CLIMATE IN ROAD TUNNEL

天野 勲三*・水田 義明**

By Kunsou AMANO and Yoshiaki MIZUTA

A numerical method for precalculation of temperature and humidity distributions along air current in tunnel was established, in which sensible heat and material transfers from rock to air current related to non-steady heat conduction in rock around the tunnel are taken into consideration. Seasonal variations of surface climate were measured at the entrances of Abo tunnel where investigation tunnel is under excavation. The original temperatures and the thermal constants of rock along the tunnel were also investigated. And prediction calculation has been carried out, being based on the investigation results and assuming traffic conditions or the cases where sudden changes of surface climate happen.

Keywords: underground climate, numerical prediction, non-steady phenomena, evaporation

1. はじめに

地下空間を有効に利用するためには、トンネル内気象の予測計算が必要となってくる。本研究においては、まず、予測計算のために必要な基礎理論を明らかにし、ついで安房トンネルを例にとり、同所で実施された坑外気象、調査坑における岩盤温度などの測定資料を参考にして、予測計算に必要な入力データを求め、トンネル完成後の気象予測を行った。

安房トンネルは、一般国道158号線の長野・岐阜両県境に計画されている全長4300mの道路トンネルであるが、この地帯は北アルプス南端に位置し、周りには焼岳を代表として多くの火山が存在する。そのため岐阜県側には温泉湧出帯、長野県側には高熱地帯が存在するため、供用後においても、トンネル内の温度風量等の条件の変化をあらかじめ把握しておく必要がある。

本論文は安房トンネル内の気象変化を予測するための計算手法を紹介するものである。

2. 予測計算の基礎となる理論

(1) トンネル周囲の岩盤温度

トンネルを無限に広がる均質な岩盤の中に作られた半径 r_1 (m) の長い円孔と考え、このトンネルをいくつかの区間に分割する。またトンネル軸方向に垂直な断面における熱の流れは、どの区間においても、半径方向にだけ起こるものとする。ただし、このような近似を行ってなおかつ精度のよい結果を得るためには、一区間の長さとは十分に小さく、たとえば300m以下にとらなければならない¹⁾。このとき各区間の岩盤内の熱伝導の微分方程式は

$$\partial\theta/\partial t = a \{(\partial\theta/\partial r)/r + \partial^2\theta/\partial r^2\} \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここに a は岩盤の温度伝導率 (m^2/s) であって、 $\lambda_0/(c_0 \cdot \rho_0)$ で与えられる。ただし、 λ_0 は岩盤の熱伝導率 (thermal conductivity, $\text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$)、 c_0 は岩盤の比熱 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)、 ρ_0 は岩盤の密度 (kg/m^3) である。

風道開削直後においては、岩盤温度はどこでも初期岩盤温度 θ_0 (K) であるが、坑道から離れた地点では、通気開始から非常に長い時間経過した後でもなお初期岩盤温度を保っている。このような地点のなかで坑道中心から最も近い地点の距離を b (m) とすれば

$$t=0, \quad r_1 \leq r \leq \infty \quad \text{に対して} \quad \theta = \theta_0 \dots \dots \dots (2)$$

* 工博 前秋田大学教授 鉱山学部採鉱学科
(〒010 秋田市手形学園1-1)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部資源工学科
(〒755 宇部市常盤台)

$$t > 0, r \geq b \text{ において } \theta = \theta_0 \dots\dots\dots (3)$$

なる条件式が成立する。実際の数値計算においては、 b の値を十分に大きくとればよく、それが十分に大きいかどうかは、計算された岩盤内温度分布をみて、 r が b に近づくと温度勾配がなくなるかどうかにより判定できる。

乾燥した岩盤壁面から気流に熱が流れる場合、単位時間に単位面積を通じて流れる熱量は、岩盤壁面における温度勾配に比例し、また壁面温度 θ_w (K) と気流温度 θ (K) との差に比例するので、トンネル壁面における境界条件が次式で与えられる。

$$(\partial\theta/\partial r)_{r=r_1} = h(\theta_w - \theta) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $h = \alpha/\lambda_g$ (1/m) であり、 α はトンネル壁面の熱伝達率 ($J/m^2 \cdot s \cdot K$) である。

したがって、トンネル壁面が乾燥している場合のトンネル周囲の岩盤温度は式 (1) の微分方程式を式 (2), (3), (4) の条件のもとで解くことによって求めることができ、この厳密解はすでに求められている^{2),3)}。

トンネル壁面が濡れている場合は式 (4) で示される顕熱移動のほかに物質移動が生じる。いま、単位時間に単位長さの濡れたトンネル壁面から気流に移動する水の蒸発量を ω ($kg/m \cdot s$) とすれば

$$\omega = 2\pi r_1 \beta (\gamma_{ww} - \gamma_w) \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここに γ_w は気流の絶対湿度 (kg/m^3)、 γ_{ww} は濡れたトンネル壁面温度に対する絶対湿度 (kg/m^3)、 β は水の物質移動係数 (m/s) である。湿り空気が水と接触して状態変化をする場合には、Lewis の関係が成立するから、乾燥空気密度を ρ_a (kg/m^3) とすれば、 α と β との間には

$$\alpha/\beta = \rho_a c_p \dots\dots\dots (6)$$

なる関係が成立する。ただし c_p は空気定圧比熱 ($J/kg \cdot K$) である。また、 $\gamma_w = f\rho_a$ であるから、水の潜熱を l_w (J/kg) とすると、水の蒸発による熱移動量 q_L ($J/m \cdot s$) は式 (5) および式 (6) から

$$q_L = 2\pi r_1 \alpha \{f(\theta_{ww}) - f\} l_w / c_p \dots\dots\dots (7)$$

ここに f は比湿度、すなわち湿り空気 (1+f) kg 中に水蒸気 f kg が含まれていることを示す値である。また $f(\theta_{ww})$ は、濡れた壁面温度 θ_{ww} に対して飽和している湿り空気の比湿度を表わし、 θ_{ww} に対する飽和水蒸気圧を p_{ww} (Pa)、気圧を p (Pa) とすれば次式で求められる。

$$f(\theta_{ww}) = 0.622 p_{ww} / (p - p_{ww}) \dots\dots\dots (8)$$

したがって、濡れたトンネル壁面における境界条件は

$$(\partial\theta/\partial r)_{r=r_1} = h \{(\theta_{ww} - \theta) + f(\theta_{ww}) - f\} l_w / c_p \dots\dots (9)$$

となる。それゆえ、壁面が濡れたトンネル周囲の岩盤温度を求めるためには、式 (1) の微分方程式を式 (2), (3), (9) の条件のもとで解かなければならない。しかし、この方程式の厳密解を得ることは實際上ほとんど

不可能である。そこで、差分法を利用してこの方程式の近似解を求めることにする⁴⁾。

トンネル周囲の岩盤を Fig. 1 に示すように同心円状に分割する。分割された各部分の中心に温度点 $j=2, 3, \dots, e$ をとり、それらの点の温度を $\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_e$ とする ($j=1$ はトンネル壁面したがって $\theta_1 = \theta_{ww}$)。ただし、 $j=e$ は最遠点を表わし、この点の温度は常に岩盤の初期温度 θ_0 を示すものとする。トンネルから遠ざかるほど温度勾配が小さくなることを考慮すれば、Fig. 1 に示すように、モデル化されたトンネル周囲の岩盤をいくつかの領域に分け、距離の刻みの間隔をトンネルから遠い領域ほど大きく取ることにより、効率のよい計算を行うことができる。

いま、時刻 t および $t + \Delta t$ における点 j (≥ 2) の温度をそれぞれ θ_j, θ'_j とする。また、点 $j-1$ と点 j の間の熱伝導係数 (thermal conductance) を $K_{j-1,j}$ ($J/s \cdot K$)、点 j が代表する区間の熱容量を c_j (J/K) とすれば、点 j が代表する区間内の熱が Δt の間に変化する量に関して次の差分式が得られる。

$$c_j (\theta'_j - \theta_j) = \Delta t [K_{j-1,j} (\theta_{j-1} - \theta_j) + K_{j,j+1} (\theta_{j+1} - \theta_j)] \dots\dots\dots (10)$$

ただし、時間刻み Δt は次なる安定条件によって制限を受ける⁵⁾。

$$c_j / \Delta t \geq K_{j-1,j} + K_{j,j+1}$$

いま $\Delta x_1 = r_1/4$ であるものとすれば、領域 D_1 の各区間の単位奥行に対して

$$c_j = 2\pi |r_1 + (2j-3)|/2 \Delta x_1 | \Delta x_1 c_p \rho_a \dots\dots\dots (11)$$

$$K_{1,2} = 2\pi (r_1 + \Delta x_1/4) \lambda_g / (\Delta x_1/2) \dots\dots\dots (12)$$

$$K_{j-1,j} = 2\pi |r_1 + (j-2)\Delta x_1| \lambda_g / \Delta x_1 \quad (j \geq 3) \dots\dots (13)$$

となる。ただし c_p ($J/kg \cdot K$) は岩盤の比熱である。これらを式 (10) に代入すれば次式が得られる。

$$\begin{aligned} \theta'_j = & 32 a \Delta t \{ (j+2)\theta_{j-1} + (j+3)\theta_{j+1} \\ & + (2j+5)(r_1^2/32 a \Delta t - 1)\theta_j \} / (2j+5)r_1^2 \\ & (j \geq 3) \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

$$\theta'_2 = 16 a \Delta t \{ 17 \theta_{ww} + 10 \theta_3 \}$$

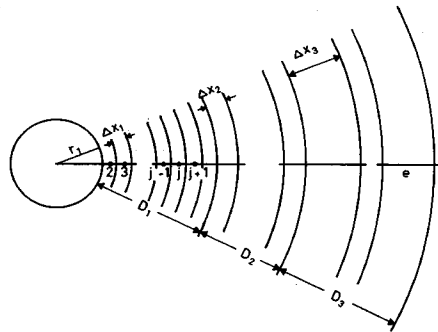


Fig. 1 Finite difference modelling.

$$+(9 r_1^2/16 a \Delta t - 27) \theta_2 / 9 r_1^2 \dots \dots \dots (15)$$

$$\theta_1' = \theta_{ww} \dots \dots \dots (16)$$

領域 D_2 や D_3 に対しても同様に考えればよい。

岩盤から気流に伝わる熱量は Fig. 1 の壁面と点 2 の中間の面 A を通して点 2 から壁面に流入する熱量と近似的に等しいとすれば、岩盤壁面が濡れている場合のトンネル壁面温度 θ_{ww} は、次式を解くことによって求められる⁶⁾。

$$2 \pi \lambda_g (r_1 + \Delta x_1 / 4) (\theta_2 - \theta_{ww}) / (\Delta x_1 / 2) = 2 \pi r_1 \alpha \{ \theta_{ww} - \theta \} + l_w [f(\theta_{ww}) - f] / c_p \}$$

すなわち、

$$l_w f(\theta_{ww}) / c_p + (2 + 17 / h r_1) \theta_{ww} = l_w f / c_p + 2 \theta + 17 \theta_2 / h r_1 \dots \dots \dots (17)$$

また、岩盤が乾燥している場合の壁面温度 θ_{wa} は次式から求められる。

$$(2 + 17 / h r_1) \theta_{wa} = 2 \theta + 17 \theta_2 / h r_1 \dots \dots \dots (18)$$

上記の方程式を用いて、トンネル周囲の岩盤温度は次の計算順序によって求めることができる。

- 1) 各点の岩盤温度をすべて θ_0 と置く ($t=0$ における岩盤温度分布)。
- 2) 岩盤表面が乾燥している場合は θ および θ_2 の値を式 (18) に代入して θ_{wa} を求める。また壁面が濡れている場合には θ , f および θ_2 を式 (17) に代入して θ_{ww} を求める ($t=0$ における壁面温度)。
- 3) 2) で求めた岩盤壁面温度を用いて、式 (14) および式 (15) から Δt 時間後の岩盤温度を求める ($t = \Delta t$ における岩盤温度分布)。
- 4) 3) で求めた θ_2 を式 (17) および式 (18) に代入して θ_{ww} , θ_{wa} を求める ($t = \Delta t$ 時間後の壁面温度)。

以下同様にして 2)~4) の計算を繰り返すと、 Δt を時間刻みとする岩盤温度分布を計算することができる。

(2) トンネル壁面の一部が濡れている場合の壁面温度

実際のトンネル壁面は完全に濡れていたり、あるいは完全に乾燥していることは珍しく、その一部が濡れているのが普通である。一般には床面の一部あるいは全部が濡れていて、天盤や側壁は比較的乾燥している場合が多い。そこで、ある区間のトンネル全周に対する濡れている部分の比率を濡れ率と定義し、濡れ率 ϕ のトンネルの壁面温度について考えてみる。壁面の一部が濡れているトンネルでは、濡れた部分の壁面温度は乾燥した部分の壁面温度よりも低くなるので、両者の間に熱移動が起こり、濡れた部分の壁面温度は全周が完全に濡れているトンネルの壁面温度よりいくぶん高くなり、乾燥した部分の壁面温度は全周が完全に乾燥したトンネルの壁面温度よりもいくぶん低くなるのが推測されるが、その平均値には余り差がないであろう。そこで濡れ率 ϕ のト

ンネルの平均壁面温度 θ_w は次式で見積もることとする。

$$\theta_w = (1 - \phi) \theta_{wa} + \phi \theta_{ww} \dots \dots \dots (19)$$

すなわち、全周が乾燥しているトンネルでは、 $\phi=0$, $\theta_w = \theta_{wa}$, 壁面の全周が濡れているトンネルでは $\phi=1$, $\theta_w = \theta_{ww}$, 壁面の一部が濡れているトンネルではその中間の値を示すことになる。

しかし、トンネルの現場においてはその濡れ具合を定量的に見積もることは困難である。そこで、壁面の一部が濡れているトンネルを空気が S (m) だけ通過する場合の水の蒸発量と、それと全く同じ仕様のトンネルで壁面が完全に濡れている場合の水の蒸発量の比をもって濡れ率 ϕ を見積もることにした⁷⁾。すなわち、Fig. 2 に示すように、トンネル内の長さ S (m) のある区間の起点および終点における気流の比湿度を f_1 および f_2 , 通気量を G (kg/s) とすると、濡れ率 ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = G c_p (f_2 - f_1) / 2 \pi r_1 S \alpha [f(\theta_{ww}) - f] \dots \dots \dots (20)$$

かつて、別子鉱山 22 番坑道において、通気開始直後から約 2 年間にわたって、毎週 1 回気流の温度と湿度が乾湿球温度計を用いて計測された。式 (19) がどの程度当てはまるかを検討するために、これらの計測結果を用いて、式 (17), (18), (20) から θ_{wa} , θ_{ww} , ϕ の値を計算し、これらの値を式 (19) に代入して平均壁面温度を求めた結果は実測値から求めた平均壁面温度とかなりの精度で一致した⁶⁾。したがって、式 (19) を用いて θ_w を求めることができると考えられる。

(3) 地下に埋設された排水管から気流に与えられる熱量

一般に、一定温度の流体が地下に埋設された排水管内を流れるときの単位長さ当たりの熱損失 q (J/m·s) は次式で与えられる⁸⁾。

$$q = 2 \pi (\theta_a - \theta) / R \dots \dots \dots (21)$$

ここに θ_a は流体の温度 (K) である。また R は排水管の熱抵抗 (m·s·K/J) であって次式で与えられる。

$$R = \xi / \lambda_s \dots \dots \dots (22)$$

ただし、 λ_s は土の熱伝導率 (J/m·s·K) であり、 ξ は次式で与えられる係数である。

$$\xi = \log (d + \sqrt{d^2 - r_a^2}) / a \dots \dots \dots (23)$$

上式において、 d はトンネル床面から排水管の中心の深さ (m), r_a は排水管の半径である。

(4) 気流温度および湿度の計算

Fig. 2 に示すように、トンネル内の長さ S (m) の区間を考え、その両端を断面 1 および 2 とする。

いま気流温度を θ (K), 比湿度を f (kg/kg), 標高を z (m) とし、断面 1, 2 におけるこれらの値を示すのに、それぞれの文字に添字 1, 2 を付けることにする。また、断面 1·2 間でトンネル内の照明や設備機械およびトンネル内を走行する内燃機関から気流に与えられる

熱量を Q_m (J/s), 重力の加速度を g (m/s²), トンネル内を流れる空気量を G (kg/s) とすると, この区間の気流に対する単位時間当たりの熱収支は次式で表わされる^{6),9)}.

$$Gc_p(\theta_2 - \theta_1) = 2\pi r_1 S \alpha (\theta_w - \theta) + 2\pi \lambda_s S (\theta_2 - \theta) / \xi + S q_m + Gg(z_1 - z_2) \dots (24)$$

上式の θ の値は区間長をそれほど長くとなければ, $\theta = (\theta_1 + \theta_2) / 2$ としてよいので, 式 (24) から次式が得られる.

$$\theta_2 = \theta_1 + [2\pi r_1 S \alpha (\theta_w - \theta_1) + Gg(z_1 - z_2) + 2\pi \lambda_s S (\theta_2 - \theta_1) / \xi + S q_m] / (Gc_p + \pi r_1 S \alpha + \pi \lambda_s S / \xi) \dots (25)$$

一方, 断面 1, 2 間のトンネル壁面の濡れ率を ϕ とすると, この区間の気流に対する水分の収支は式 (20) を書き直した次式で表わされる^{6),9)}.

$$G(f_2 - f_1) = 2\pi r_1 S \alpha \phi [f(\theta_{ww}) - f] / c_p$$

区間長がそれほど長くなければ $f = (f_1 + f_2) / 2$ としてよいので,

$$f_2 = f_1 + [2\pi r_1 S \alpha \phi [f(\theta_{ww}) - f]] / (Gc_p + \pi r_1 S \alpha \phi) \dots (26)$$

上記の方程式を用いて, トンネル内気流の温度と湿度が次の計算手順によって求めることができる⁹⁾.

- 1) トンネル全長を Fig. 3 に示すように, 中之湯側, 平湯側トンネルとも 9 区間に分割し, 立坑を 2 区画に分割して予測計算のためのモデルとする.
- 2) 各点の気流温度を $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_{23}$ とする. また入気坑口 (節点 1 と 11) の温度および湿度は常に坑外温度および湿度を示すものとする.
- 3) 岩盤温度をすべて岩盤の初期温度 θ_0 と置く ($t = 0$ における壁面温度).
- 4) 入気温度を定め, 式 (25) および式 (26) によりトンネル軸方向の気流温度および比湿度 θ_i, f_i を順次求める ($t = 0$ における通気温度).
- 5) 前節で述べた岩盤温度の計算手順に従って, Δt 時間後の濡れた壁面温度 θ_{ww} と乾燥した壁面温度 θ_{wd} を求める.
- 6) 式 (20) により平均壁面温度 θ_w を求める ($t = \Delta t$ における平均壁面温度).
- 7) 式 (25) および式 (26) により, 各点の通気温度

および比湿度を求める ($t = \Delta t$ における気流温度). 以下同様にして 4)~6) の計算を繰り返すと, Δt を時間刻みとする気流温度および比湿度を計算することができる.

(5) 自然通気圧

一般にある通気回路に強制通気をすることなく通気を起こさせる自然通気圧 P (Pa) は, その回路を構成する風道内の気流の比重量を回路に沿って積分した値の負値

$$P = - \int \gamma dz, \quad \gamma = \rho g \dots (27)$$

で与えられる. 実際の予測計算においては, Fig. 3 の中之湯側を例にとれば, 近似的に次式で求められる.

$$P = (z_{21} - z_{20})(\gamma_{21} + \gamma_{20}) / 2 + (z_{20} - z_{10})(\gamma_{20} + \gamma_{10}) / 2 + \dots + (z_2 - z_1)(\gamma_2 + \gamma_1) / 2 + (z_1 - z_{22})(\gamma_1 + \gamma_{22}) / 2 \dots (28)$$

ただし γ_j や z_j は j 点における比重量や標高を表わす. また湿り空気の比重量 γ (kgf/m³ = 9.80665 N/m³) は水蒸気圧を p_w mmHg (133.322 Pa), 気圧を p (mmHg), 気温を T (K) とすると, 次式で与えられる.

$$\gamma = (0.465 p - 0.176 p_w) / T \dots (29)$$

3. 予測計算の基礎となる調査の概要

(1) 坑外気象

昭和 56 年 4 月から 3 年間にわたって, 中之湯側入気坑地点における温度と相対湿度が実測された. また平湯側入気坑地点においても, 温度については同じく 3 年間にわたって, 相対湿度については昭和 55 年度の 1 年間にわたって実測された. たえば, 昭和 56 年度の 1 年間について, 中之湯における毎日の平均温度 θ (K) と平均比湿度 f (kg/kg) を図示すると Fig. 4 のようである. この図からもわかるように, 坑外の気温や湿度は不規則に変動しているが, 大まかには季節の推移とともに, 温度はある振幅と平均値をもつ 1 つの正弦曲線で表わされる変化を, 湿度は 2 つの正弦曲線で表わされる変化をしている. 最小二乗法を適用して各年度ごとに求めた正弦曲線は, 中之湯と平湯とはいくぶん異なるが, 各年もほぼ同じであった. そこで, 各年について求められた係数のそれぞれについて平均値 (平湯側の湿度については昭和 56 年度について求められた係数) をとることにし, 次のように決定した. ただし t は 4 月 1 日からの

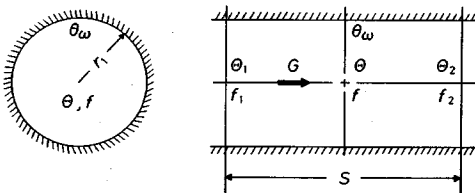


Fig. 2 Airway model.

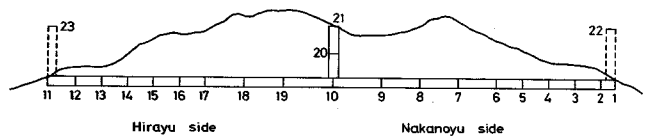


Fig. 3 The outline of the Aboh tunnel.

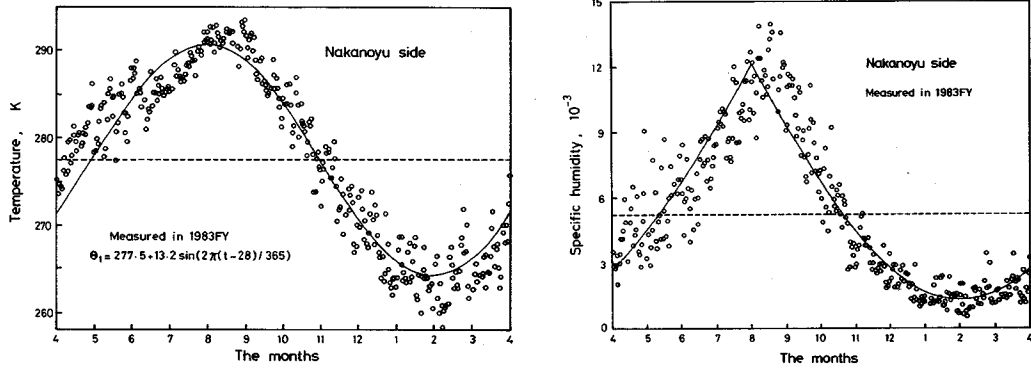


Fig. 4 Daily average temperatures and humidities measured.

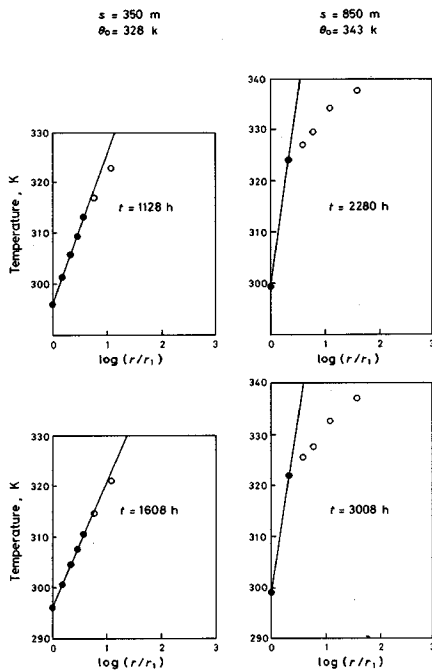


Fig. 5 The examples of the rock temperature distributions measured.

経過日数とした。

中之湯側

$$\theta = 277.63 + 12.0 \sin [2 \pi (t - 29) / 365] \dots (30)$$

$$f = 0.0114 - 0.0101 \sin [\pi (t + 242) / 365] \quad (0 \leq t \leq 122) \dots (31)$$

$$f = 0.0114 - 0.0101 \sin [\pi (t - 123) / 365] \quad (123 \leq t \leq 365) \dots (32)$$

平湯側

$$\theta = 279.47 + 12.5 \sin [2 \pi (t - 28) / 365] \dots (33)$$

$$f = 0.0143 - 0.0124 \sin [\pi (t + 242) / 365] \quad (0 \leq t \leq 122) \dots (34)$$

Table 1 The principal input data.

Section	S (m)	θ_0 (K)	a (m^2/s)	λ_g ($J/m \cdot s \cdot k$)	θ_d (K)	Z_1 (m)	Z_2 (m)
1-2	100	293.0	0.0063	3.66	325.3	1355	1357
2-3	200	313.5	0.0025	5.64	330.6	1357	1361
3-4	200	331.8	0.0097	5.64	334.0	1361	1364
4-5	200	344.8	0.0097	5.64	334.6	1364	1366
5-6	200	340.6	0.0009	5.64	331.2	1366	1368
6-7	300	331.0	0.0063	3.66	326.5	1368	1371
7-8	300	322.0	0.0063	3.66	322.0	1371	1372
8-9	300	309.0	0.0063	3.66	309.0	1372	1367
9-10	380	305.0	0.0063	3.66	307.0	1367	1359
11-12	200	280.1	0.0063	3.66	294.3	1316	1319
12-13	200	286.2	0.0063	3.66	295.8	1319	1323
13-14	200	327.5	0.0025	5.64	296.8	1323	1327
14-15	200	306.3	0.0063	3.66	293.0	1327	1331
15-16	200	279.5	0.0009	3.66	280.1	1331	1335
16-17	200	279.5	0.0009	3.66	293.0	1335	1339
17-18	300	279.5	0.0009	3.66	295.7	1339	1345
18-19	300	288.0	0.0063	3.66	299.8	1345	1351
19-20	380	297.0	0.0063	3.66	303.7	1351	1359
10-20	200	292.8	0.0063	3.66	-	1359	1559
20-21	210	282.3	0.0063	3.66	-	1559	1769

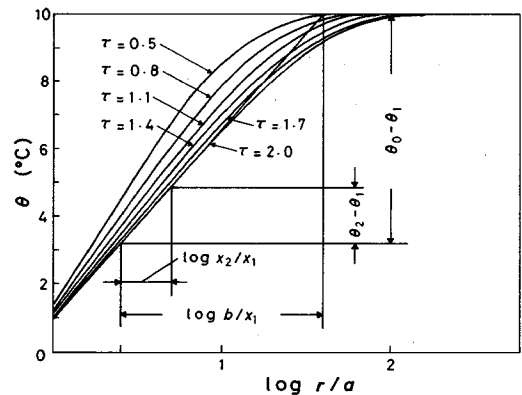


Fig. 6 General variation of rock temperature distribution.

$$f = 0.0143 - 0.0124 \sin [\pi (t - 123) / 365] \quad (123 \leq t \leq 365) \dots (35)$$

(2) 岩盤の初期温度

中之湯側トンネルの坑口から1200mの区間については、調査坑における岩盤温度の実測結果、平湯側トンネル

ルの坑口から1500 mの区間については、調査坑における湧水温度の実測結果、その他の区間(平湯坑口から1500 m~3160 m)については、地表からのボーリング調査の結果を参考にして、各測点の岩盤初期温度 θ_0 (K)をTable 1の所定の欄に示すように推定した。

(3) 岩盤の温度伝導率の測定

中之湯側調査坑の145 m, 300 m, 350 m, 450 m, 650 m, 850 m, 950 m, 1050 mの各地点において、調査坑の側壁(650 m地点においては両側壁および床面)に直径40 mm, 長さ5~30 mの測定孔を設け、壁面から0 m, 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 3 m, 5 m, 7.5 m, 10 m, 15 m, 30 mの各位置のいくつかに温度センサーを挿入して、壁面付近の岩盤温度の経時変化を測定した。各測定孔の種々の深さにおいて計測された岩盤温度は、坑道の等価半径を r_1 , 測点の壁面からの深さを x , 坑道中心から測点までの換算距離を $r=r_1+x$ として、 $\log(r/r_1)$ に対してプロットされた。Fig. 5にそれらのうちの2つの測定孔に対する結果が示されている。

一方、坑道開削後の岩盤の冷却過程を差分法によって計算し縦軸に岩盤温度 θ , 横軸に $\log(r/r_1)$ の値をとって図示するとFig. 6のようである。ただし $r_1=2.0$ mm, $\theta_0=283$ K, $K=0.006$ m²/s, $\alpha=10$ J/m²·s·Kとした。

Fig. 6において、たとえばフーリエ数 $\tau=Kt/r_1^2=2.0$ の場合の、坑道中心から3および4 (m)の点の岩盤温度 θ_1 と θ_2 とを結び、その直線を延長して岩盤の初期温度 θ_0 と交わる点を b とすれば

$$(\theta_2 - \theta_1)/(\theta_0 - \theta_1) = (\log r_2/r_1)/(\log b/r_1) \dots (36)$$

となるので、

$$G(\tau) = (\log b/r_1)^{-1} \dots (37)$$

とおけば、

$$G(\tau) = (\theta_2 - \theta_1)/(\theta_0 - \theta_1) (\log r_2/r_1) \dots (38)$$

が成立する。

Starfieldはトンネル壁面における $G(\tau)$ の値は、 $1.5 < \tau < 1000$ の範囲内において1%以内の誤差で次の近似式によって得られると述べている¹⁰⁾。

$1.5 < \tau < 10$ の場合

$$G(\tau) = (0.979813 + 0.38376 \log \tau)^{-1} \dots (39)$$

$10 \leq \tau < 100$ の場合

$$G(\tau) = (0.839337 + 0.444718 \log \tau)^{-1} \dots (40)$$

$100 \leq \tau < 1000$ の場合

$$G(\tau) = (0.683043 + 0.479054 \log \tau)^{-1} \dots (41)$$

Fig. 5の $S=350$ mにおける坑道開削後1128時間経過したときの $G(\tau)$ の値を式(38)から求めると

$$G(\tau) = 29.02/(328 - 296.17) = 0.912$$

よって、式(39)から $\tau=1.687$ となり、 $r_1=2.54$ (m)であるので温度伝導率 α は、

$$\alpha = 1.687 \times 2.54^2 / 1128 = 0.0096$$

となる。このようにして求められた安房トンネル中之湯側調査坑の周りの岩盤の温度伝導率 α の値をTable 1に示す。これを見ると、同種岩石の従来の測定結果とほぼ等しい値を示す地点と、きわめて低い値を示す地点の2つの異なった状態が存在することが推定される。

豊羽鉱山における原位置測定結果では、温泉湧出地帯ではきわめて低い値の温度伝導率を示す地帯が存在することが報告されており、これは温泉によって岩盤に熱が補給されているところでは、熱の補給のないところよりも岩盤の冷却速度が遅くなり、壁面における温度勾配が急になるためと考えられる¹¹⁾。

そこで、平湯側についても、その湧水状況から、豊羽鉱山や菱刈鉱山における測定結果から得られた知見を考慮して、予測計算に入力される岩盤の温度伝導率および熱伝導率を、Table 1の所定の欄に示すように決定した。

(4) トンネル壁面の熱伝達率

Starfieldらは、壁面温度一定の滑らかな管に対するMcAdamsの式に、Nunnerの粗面円管内の熱伝達率に関する研究の成果を加味して、坑道の熱伝達率 α (J/m²·s·K)の計算式として次式を提案している¹²⁾。

$$\alpha = K \times 0.023 (\lambda_a/D) R_e^{0.8} P_r^{0.4} \dots (42)$$

ここに λ_a は空気の熱伝導率 (J/m²·s·K), D は坑道の代表寸法 $2r_1$ (m), R_e はレイノルズ数, P_r はプラントル数であり、 K は壁面の凹凸の影響を加味する係数で1.7の値を与えている。したがって熱伝達率は、計画通気量が平湯側と中之湯側とに等分に分流されるものとするれば、

計画通気量	400 m ³ /sの場合	$\alpha=12.83$
	570 m ³ /sの場合	$\alpha=17.01$

で与えられる。ただし、 $\lambda_s=0.0249$, 空気の動粘性係数 $\nu=1.56 \times 10^{-5}$ (m²/s), 空気の定圧比熱 $c_p=1.005 \times 10^3$ (J/kg·K), 湿り空気の密度 $\rho=1.2$ (kg/m³)とした。

(5) 通過車両からの放熱量

2種類の計画通気量およびそれらに対応する計画交通量は、Table 2に示すようである。通常、通気量決定の際の時間交通量は、日交通量の14%として計算されるが、Table 2では1/24として計算されている。これは熱量計算にあたっては、岩盤が温度調節帯の働きをするため、走行中の車両から発生する熱量としては1日の平均値をとる方がより妥当性があると考えたからである。

小型車(ガソリン車)の燃費の代表値を1800 ccクラスとして23.25 km/l, ガソリンの発熱量を 47.3×10^6 J/kg, 比重を0.725 kg/lとすると、安房トンネルの全長は4.36 kmであるから、トンネル内で1台の小型車が発生する熱量は 6.43×10^6 Jとなる。また大型車の燃費の代表値を8 tクラスとして5.78 km/l, 軽油の発熱量を 44×10^6 J/kg, 比重を0.82 kg/lとすると、大型車

Table 2 The values related to traffic.

Planned rate of flow, V (m^3/s)	500	570
Number of total traffic per day	5100	6700
Number of total traffic per hour	213	280
Distribution ratio of large car (%)	27	30
Heat generated by traffic, q_m ($J/m \cdot s$)	164	226
Heat transfer coefficient, α ($J/m^2 \cdot s \cdot k$)	12.8	17.0

1台がトンネル内で発生する熱量は $27.2 \times 10^6 J$ となる。したがって、通過する全車両によって、トンネル内の単位長さの区間の気流に与えられる単位時間当たりの熱量 Q_m ($J/m \cdot s$) は Table 2 の下から 2 行目に示すようである。

4. 解析プログラムと全入力データ

2. で述べた手順に従い、まず $t=0$ でのトンネル軸方向各点の気流温度、湿度を計算し、次に、 Δt を時間刻みとする気流温度および比湿度を打切時間 T まで反復計算する。また、設定された途中打ち出し時間ごとに、トンネル軸方向各点の気流温度と比湿度とが逐次出力される。

解析に必要な入力データを整理すると次のようである。

- 1) 式 (30)~(35) で与えられる経過時間の関数としての入気温度、湿度
- 2) Table 1 に示される諸データ。これらは区間によって値が異なる。
- 3) Table 2 に示される通過車両からの放熱量 q_m および式 (22) で与えられる排水管の熱抵抗 $R_h = 0.565 (m \cdot s \cdot K/J)$ 。これらに区間延長を乗じたものが各区間に対する値となる。
- 4) Table 2 に示されるトンネル壁面の熱伝達率およびトンネル断面の等価半径 r_1 、岩盤の比熱 $c_g = 1.0 \times 10^3 (J/kg \cdot K)$ と密度 $\rho_g = 2.5 \times 10^3 (kg/m^3)$ (トンネルの全区間に対して一定)。
- 5) 通気風量 $V = G/\rho (m^3/s)$ とトンネル壁面の濡れ率 ϕ はともに仮定して計算する。ただし、中之湯側トンネル内と平湯側トンネル内とは等分に分流されるものとする。

5. 気流温度と湿度の計算結果

(1) 気流温度の経年変化

Fig. 7 は中之湯側トンネルと平湯側トンネルの合流点直前における中之湯側トンネル内気流温度の経年変化を示したものである。ただし、図の正弦関数のような曲線は季節変化の影響を受けた実際の経時変化を示し、指数関数のような曲線は季節による周期変化を取り除いた経

年変化を表わしている。この図からわかるように、気流温度はトンネルが開削されて通気が開始された直後には急激な温度降下を示すが、1~2か月経過すると温度低下の割合は比較的小さな値となる。その後も時間の経過とともに温度は低下するが、1年を経過すると年間の温度低下は0.9 K程度、2年を経過すると0.5 K程度となり、経年変化の影響はきわめてわずかとなる。

Fig. 8 は通気開始1年後の4月からその翌年の3月までの各月における中之湯坑口からの距離による気流温度の変化を示したものである。一般に、坑外気温が年間平

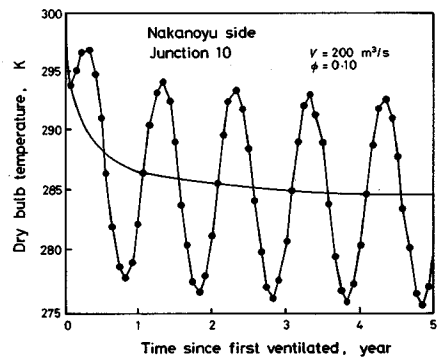


Fig. 7 Variation of air temperature with time since first ventilated.

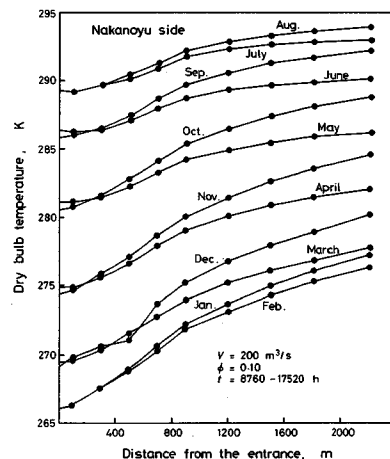


Fig. 8 Variation of air temperature distribution along the tunnel.

均温度よりも暖かい半年間（5月から10月）はトンネル内を流れる空気から岩盤に熱が吸収され、逆に寒い半年間（11月から4月）はこの吸収された熱が岩盤から気流に向かって放散されるという気温調節帯としての岩盤の作用によって、気流温度は入気坑口から遠ざかるに従って季節による温度差が小さくなる。実際、図においても、坑口では12 Kであった温度振幅が合流点直前では8.8 Kとなっている。また2, 3, 4, 5, 6, 7の各月と1, 12, 11, 10, 9, 8の対応する各月とは、両方の坑外温度がほとんど同じであるが、暖かさに向かい初めの各月よりも、寒さに向かう後の各月の方が温度上昇の割合が高く、合流点直前の温度は12, 11, 10, 9の各月では対応する各月より約2 K, 1月と8月においては約1 K高い。

(2) 風量の影響

トンネル内の風量を増加すれば気流温度および湿度は低下する。ただしその低下の割合は風量がある量に達するまでは急激であるが、それ以上になるとだんだん緩慢となる。このことは風量増加による気流温度、湿度の低下には限度があることを示している。

Fig. 9は、風量が100, 200, 400 m³/sのそれぞれの場合に対して、各月における平湯坑口からの距離による気流温度の変化を計算した結果の一部を示したものである。

この計算結果から、平湯側トンネルでは、9月から3月までの秋および冬季には坑口から遠ざかるに従って気流温度は上昇するが、4月から8月までの春および夏季には温度上昇はほとんどなく、ほぼ一定の値を示すことがわかる。また風量を増加すれば気流温度は低下するが低下の割合は季節によって大きく変化することがわか

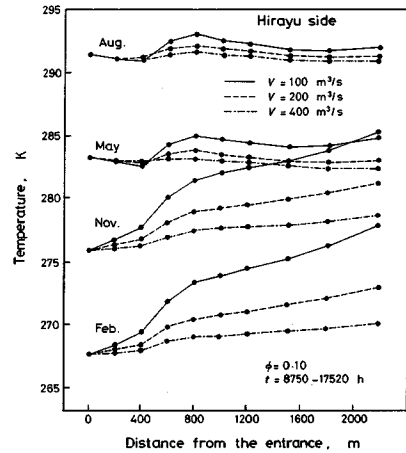


Fig. 9 Influence of ventilation rate on air temperature distribution.

る。すなわち、秋および冬季には風量増加によって気流温度は大幅に低下するが、春および夏季には風量を増加しても気流温度の低下はわずかである。

(3) 壁面の濡れ率の影響

計算結果は省略するが、壁面の濡れ率が増加すると気温は低下し、絶対湿度は増加する。

(4) 入気温度および湿度が急変した場合の影響

Fig. 10は、トンネル完成後2年目の8月および12月に坑外温度が急変した場合のトンネル内気流の温度変化を示したものである。具体的には、8月においては、その月の平均温度289.2 Kから最高温度に急上昇して20時間経過した後、最低温度に急下降した場合、2月においては、その月の平均温度266.1 Kから最低温度に急下降して20時間経過した後、最高温度に急上昇した場

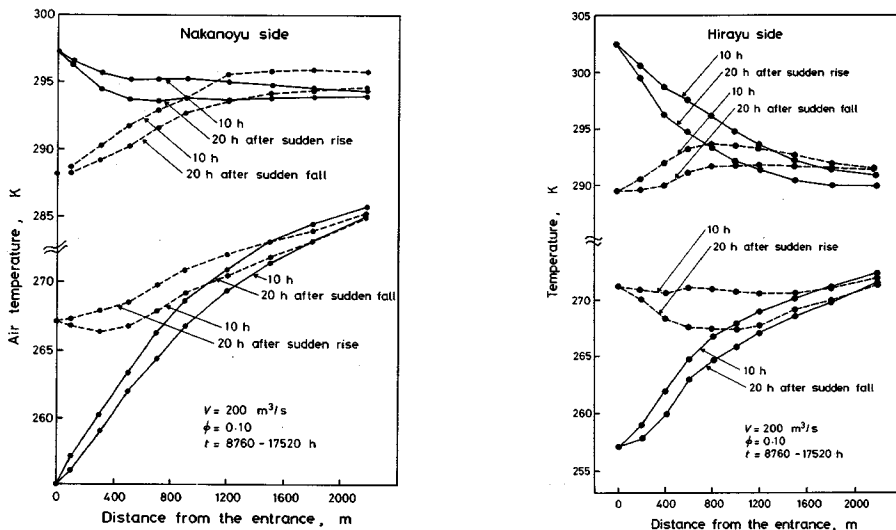


Fig. 10 Variations of the temperature distributions along the tunnel when surface temperatures suddenly change.

合の中之湯側および平湯側坑口からの距離による温度変化が求められた。ただし $V=200$, $\phi=0.10$ とした。

これらの図から坑外気温が急変した場合には、中之湯側坑口での温度差は8月では9.1 K, 2月では12.1 K, 平湯側坑口ではそれぞれ13.1 K, 14.2 K あるが、坑口から遠ざかるに従ってそれらの温度差はしだいに減少し、中之湯側で900 m, 平湯側で800 m 離れると温度差はなくなることがわかる。また坑外気温が急下降したあとの900 m または800 m 以遠の気流温度が、急下降する前の気流温度よりも高くなるのは、岩盤の気温調節帯としての作用により、熱移動に遅れが生ずるためと考えられる。

(5) 2種類の計画交通量・通気量に対する気流温度の比較

1日の計画交通量が5100台および6700台、これらに対応する計画通気量 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ および $285 \text{ m}^3/\text{s}$ のそれぞれの場合について、中之湯側トンネル内の気流温度が計算された。Fig. 11は坑口からの距離による気流温度の変化を示したものである。この図から、交通量の増加により、通過車両からの発熱量は増加するが、その温度上昇よりも風量増加による温度低下の方が大きいことがわかる。

(6) 立坑内気流の温度・湿度および自然通気圧

中之湯側および平湯側トンネルの合流点における気流温度および湿度は、合流点直前の両トンネル内から合流点に流入する気流の単位時間当たりの熱量の合計は合流直後の気流のそれに等しいとして計算した。気流温度だけを図示すると Fig. 12 のようである。また、これらの温度・湿度を時間に対する正弦曲線とし、最小二乗法を用いてこれらの式を求めると次式のようなになる。

$$\theta = 283.56 + 8.91 \sin [2\pi(t-38)/365] \dots\dots\dots(43)$$

$$f = 0.00679 + 0.00506 \sin [2\pi(t-32)/365] \dots\dots\dots(44)$$

上式を入力データとして、 $V=400 \text{ m}^3/\text{s}$, $\phi=0.10$, $t=8760 \sim 17520 \text{ h}$ のときの立坑内の温度および湿度の予測計算を行い、その結果から式(29)を用いて立坑内各区分、中之湯側坑外および平湯側坑外の平均比重量を坑外温度の標高による気温減率を 0.0065 K/m として計算した。その値を式(28)に代入して、中之湯側および平湯側回路の自然通気圧 P (Pa) を求めると Table 3 の所定の欄に示すようである。

立坑はトンネル中間点にあるので、立坑頂部に設置された扇風機を用いる強制通気は両側のトンネルに同じ通気量をもたらす。しかし、Table 3 に示すように、両回路の自然通気圧が異なるので、両側の風量は一般には異なってくる。ある回路の自然通気圧 P_N によってその回路に流れる風量 V (m^3/s) は

$$P = \sum R V^2,$$

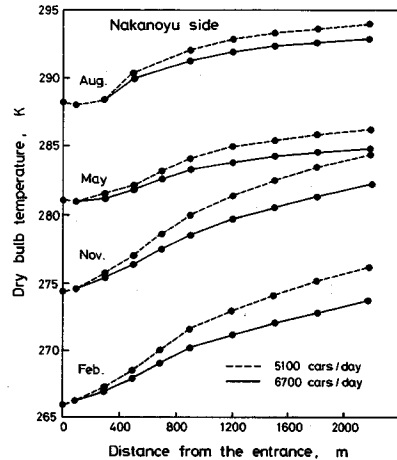


Fig. 11 Influence of the number of traffic on temperature distribution.

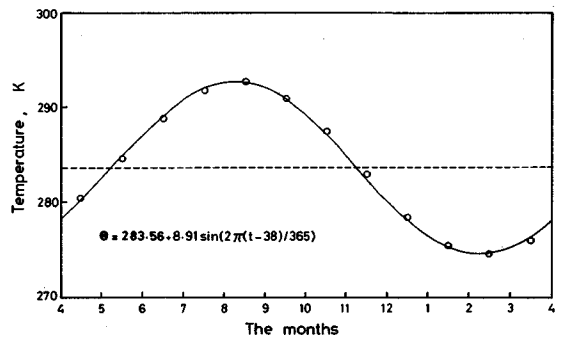


Fig. 12 Seasonal variation of air temperature at the junction 10.

Table 3 Natural ventilation pressures and corresponding flow rates.

Months	P_N (Pa)		V (m^3/s)	
	Nakanoyu	Hirayu	Nakanoyu	Hirayu
4	80.0	47.8	77.2	59.7
5	54.3	18.1	63.6	36.8
6	37.8	0.4	53.0	5.4
7	32.2	-7.7	48.9	-23.9
8	41.8	4.8	55.8	18.9
9	67.6	33.0	70.9	49.5
10	96.5	67.6	84.9	70.9
11	124	98.1	96.2	85.5
12	142	76.8	103	75.6
1	146	124	104	96.2
2	135	111	100	90.8
3	110	80.8	90.6	77.6

$$R = \lambda \rho \cdot SU / 8 g F^3 \dots\dots\dots(45)$$

で与えられる。ただし λ はその回路を構成する各風道の摩擦係数であり、 R はそれらの比抵抗であって、アーチ形のライニングを施した真直な風道については $\lambda=0.02$ である¹³⁾。そこで、この値を式(45)に代入して自然通気のみによる両側トンネルの風量を求めると Table 3 の所定の欄のようなになる。ただし立坑の周囲長、

断面積ともにトンネルと同じであるものとした。この表から、自然通気だけによる風量は冬季には大きい夏季は小さいこと、特に平湯側トンネルにおいて小さく、7月には風向きが逆転することがわかる。

6. ま と め

トンネルまわりの岩盤からトンネル内気流への顕熱移動と物質移動、これと関連して生ずる岩盤内の非定常熱伝導を同時に考慮に入れて、通気開始後の経過時間とともに変化する気流の温度・湿度分布の予測計算法を確立した。また、安房トンネルの2つの入口となる付近の坑外気象、安房トンネル周辺岩盤の初期温度や温度伝導率などについて調査を実施した。これらの調査の結果に基づき、坑外気象の急変や交通量の大小など種々の条件を設定して、供用時の安房トンネル内気象を予測した。

謝 辞：トンネル内気象の予測計算を実際に行うにあたって、建設省中部地方建設局中部技術事務所および高山国道工事事務所より種々のデータを提供して頂いた。

これらの関係各位に対してここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 平松良雄：通気学，内田老鶴園新社，pp.197，1974年7月。
- 2) 天野勲三：坑道周辺の岩盤温度について，日本鉱業会誌，No.774，pp.549～553，1952年12月。
- 3) 天野勲三：坑道周辺の岩盤より放散される熱量について，No.755，pp.11～14，1953年1月。
- 4) 天野勲三・山下 秀・川辺金光：濡れた風道周囲の岩盤温度について，日本鉱業会誌，No.1101，pp.781～784，1979年11月。
- 5) 柳本竹一・内野健一：乾燥した坑道における通気温度計算，日本鉱業会誌，No.1039，pp.583～587，1974年9月。
- 6) Amano, K., Mizuta, Y. and Hiramatsu, Y. : An improved method of predicting underground climate, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.19, pp.31～38, Feb. 1982.
- 7) 天野勲三・山下 秀・川辺金光・平松良雄：年間気流温度および湿度の予測計算，日本鉱業会誌，No.1103，pp.13～17，1980年1月。
- 8) 披山四郎：熱(披山四郎論文集)，養賢堂，pp.13，1973年。
- 9) 天野勲三ほか：パソコンによる坑内通気設計システムの開発，日本鉱業会誌，No.1185，pp.1～9，1986年11月。
- 10) Starfield, A. M. and Bleloch, A. L. : A new method for the computation of heat and moisture transfer in a partly wet airway, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., pp.263～269, Nov./Dec. 1983.
- 11) 天野勲三・平松良雄・荻野正二・水田義明：温泉湧出を伴う高温坑道内の気流の熱収支について，日本鉱業会誌，No.1123，pp.929～935，1981年9月。
- 12) Starfield, A. M. and Dickson, A. J. : A study of heat transfer and moisture pick up in mines, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., Vol.68, pp.211～234, 1967.
- 13) 文献1)，pp.11。

(1986.11.22・受付)