

高温岩盤内に関さくされるトンネルの気流温度予想計算

水田 義明*・宮坂 敏男**

Pre-calculation of the temperature of air currents in a tunnel
designed to excavate in the rock mass at high temperature

Yoshiaki MIZUTA, Toshio MIYASAKA

Abstract

There is now an escalating demand for temperature prediction simulations applicable to underground environments. But It is troublesome to analyze the heat transfer across the wall of airways taking the heat conduction in the rock mass in which hot spring flow into consideration.

Then first, authors investigated it by the energy balance analysis based on the meteorological observation at a drift under development in Toyoha mine. Secondly, authors exercise pre-calculation of the rate of flow, temperature and humidity of air current in a tunnel model using the investigated result.

1. はじめに

温泉地帯を有する高温岩盤内を掘さくしてトンネルをつくる際、施工時やトンネルが完成した後のトンネル内気流温度の低下をはからねばならない。それゆえこのようなトンネル内や坑内の温度、湿度、風量を予測するためのシミュレーションが強く望まれている。そこで筆者らは温泉地帯に作る事が予定されている安房トンネルをモデルとし、このトンネルが完成した後、トンネル内の気流温度が立坑による自然通気だけで常温に保てるかどうかを知る目的でトンネル内気流温度の予想計算を行なうことにした。

ここでとくに問題となるのは岩盤から気流に与えられる熱に関して温泉水の影響はどれほどであるのかということであり、まずこれを知る必要がある。そこで、安房トンネル開さく予定地と同様に岩盤温度が高く、実際に温泉水が湧出している豊羽鉱山で通気測定を行ないこれを調査することにした。

さて、外部から坑道まわりの岩盤に熱が補給されない場合に、単位時間当り岩盤から気流に与えられる熱量 $Q_{R'}$ (kcal/h) は理論的に求めることができる。一方豊羽鉱山における測定から温泉水が坑道まわりの岩盤に熱を補給する場合に単位時間当り岩盤から気流に与えられる熱量 Q_R (kcal/h) が実測値から求めら

れ、それらの比 $Q_R/Q_{R'}$ から温泉水の影響がどの程度であるかを知ることができる。

Q_R は気流、岩盤、冷水、排水、温泉水、扇風機からなる系における熱収支計算から求めるほか、各断面における坑道まわりの岩盤内温度分布を実測し、これらの値と理論値との比較から確かめた。

このような解析結果をもとにし、熱源として温泉水の影響を受けた岩盤からの熱、床面中央下に埋設される温泉水排水管からの熱、トンネル内を通行する自動車から放散される熱を考慮して、安房トンネル内の気流温度、湿度、風量の予想計算を行なった。

なお、予定通りトンネルが開さくされ、これが完成すれば自然通気だけのときの気流温度が実測され、この値と予想計算結果とを比較し検討することができることになる。

2. 温泉水の影響

2・1 調査方法

岩盤内温度分布解析に用いる諸定数や熱収支の解析に必要な数値を得るために、現在豊羽鉱山の深部を開発している水平坑道の各測点において、つぎの項目を測定した。乾球温度 θ (°C)、湿球温度 θ' (°C)、坑道の断面積 F (m²) と周囲長 u (m)、測点間距離 s (m)、平均風速 w (m/s)、岩盤表面温度 θ_w (°C)、

* 資源工学科

** 住金鋼管工社(株)

冷水の温度 $t_c(^{\circ}\text{C})$ と使用量 $V_{DC}(\text{l}/\text{min})$, 排水の温度 $t_w(^{\circ}\text{C})$ と水量 $V_D(\text{l}/\text{min})$, 湧出温泉水の温度 $\theta_s(^{\circ}\text{C})$ と湧出量 $V_{DS}(\text{l}/\text{min})$ また 4 つの測定断面では岩盤表面温度のほか、側壁岩盤中にほぼ水平な深さ 2 m のボーリングを行ない、その孔の奥で留点温度計を用いて岩盤温度 $\theta_b(^{\circ}\text{C})$ を測定した。岩盤の初期温度 $\theta_o(^{\circ}\text{C})$, 開さく後の経過時間 $t(\text{h})$ および標高 $z(\text{m})$ は、豊羽鉱山で既に調査してあるデータを採用した。また、気圧 $p(\text{mmHg})$ は測候所に問い合わせたものをもとにした。

使用した温度計や風速計はあらかじめ補正実験を行

ったので使用した。1 m/s 以上の風速に対しては、ピトー管とアスカニア型微圧計を用いて測った値を基準としてアネモメーターで測定し、それ以下の風速に対しては煙を利用して直接測った値を基準として熱線風速計で測定した。また温度の基準はアスマン湿度計で測った値とした。

2・2 測定結果

Fig. 1 は豊羽鉱山の坑内構造の概略および地表からのボーリングによる岩盤温度調査結果を示したものである。風管と冷水で冷却しながら最深部の坑道掘進を行なっている 450 m 坑道については Fig. 1 に示す 1

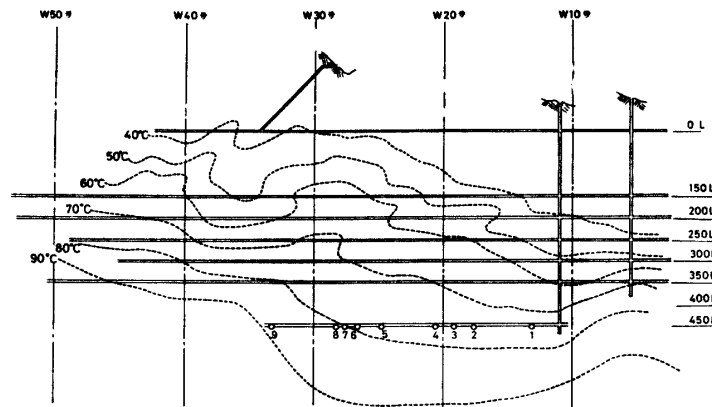


Fig. 1 Isothermal contour map on the section of Soya vein, Toyoha mine.

Table 1 Measured results on ventilation, 450L drift.

Section	θ ($^{\circ}\text{C}$)	θ' ($^{\circ}\text{C}$)	θ_o ($^{\circ}\text{C}$)	θ_w ($^{\circ}\text{C}$)	θ_b ($^{\circ}\text{C}$)	W (m/min)	F (m^2)	u (m)	t_w ($^{\circ}\text{C}$)	V_D (m^3/min)	t (h)	s (m)
1	34.4	30.5		36.0		136	6.87	10.6	39.5	1.70		
2	36.3	33.0	82.0	43.3	71.8	133	7.19	10.8	39.5	1.70	21720	193.5
3	38.3	34.7		39.4		118	8.06	11.4	38.3	1.66		34.2
4	38.4	35.9		41.7		43	7.32	10.9	37.5	1.31		24.1
5	37.3	36.5	83.0	40.8	56.5	19.3	8.80	11.9	40.3	1.01	13680	86.4
6	35.8	34.0	90.0	43.8	71.3	17.9	6.98	10.6	32.1	0.498	3120	68.2
7	34.3	33.9	87.5	38.7	56.0	16.2	6.96	10.6		0.388	1920	33.9
8	35.2	34.5	89.0	41.2		59	6.72	10.4	35.1	0.182	1650	8.6
9	37.6	34.8	86.0	43.6		24.8	9.88	12.9	28.7	0.182	410	95.5

$P=739\text{mmHg}$, $z=101\text{m}$

Table 2 Temperature and volume of cold water, gushing hot spring and waste water.

Section	face		7~6		6~5		5~4		4~3			
t_c ($^{\circ}\text{C}$)	21.5	21.9	19.4	19.0	21.0	21.5	19.4	16.3	18.0	14.7	15.4	14.8
V_{DC} (l/min)	92	89	206	110	196	60	114	102	153	121	68	73
t_s ($^{\circ}\text{C}$)						66.3					86.2	
V_{DS} (l/min)						190					86	
t_w ($^{\circ}\text{C}$)		31.9		32.1		36.2		40.3	37.5		37.9	
V_D (m^3/min)		0.18		0.50		0.78		1.06	1.31		1.49	

～9の測定断面で種々の測定を行なったが、その結果は Table 1 に示すようである。冷水噴霧箇所および温泉湧出箇所は必ずしも測点と一致しないので、これらに関する測定結果は Table 2 に示す。ただし断面1の t_c は 12.7°C 、冷水の合計は $1.384\text{m}^3/\text{min}$ である。Fig. 1 において断面3—4間に通気坑井があり、またここから引立まで風管があるので、坑内気流は1→8、9→4の方向に、冷水は1→9、排水は6→1の方向に流れる。ファンは3—4間と7—8間にあり、入力はおのおの210V、42Aである。現場の岩石の熱伝導率 λ_g は九州大学工学部資源工学科内野健一助教授によって測定された。その結果 λ_g は $2.43\sim 4.90$ の範囲にあり平均値は 3.21 ($\text{kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}$) であった。そこでどの測点の岩盤も λ_g はこの値をとるものとする。なお、坑道周辺岩盤の温度分布に関して測定を行なった4つの断面の測定結果から計算されたそれらの断面の状態を表わす諸定数は Table 3 のようである。

Table 3 Each constants showing the condition of four sections.

Section	r_1 (m)	α ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$)	λ_g ($\text{kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}$)	hr_1	kt/r_1^2
2	1.33	13.3	3.21	5.51	72.9
5	1.48	5.84	3.21	2.69	37.1
6	1.32	5.41	3.21	2.23	10.6
7	1.31	5.88	3.21	2.40	6.64

ただし、坑道壁面の熱伝導率 α ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$) は風速 w から次式で与えられるものとし、

$$\alpha = 5.3 + 3.6w \quad (1)$$

岩盤の比熱 $c = 0.2$ ($\text{kcal}/^{\circ}\text{C kg}$)、岩盤の比重量 $\gamma_g = 2.7 \times 10^3$ (kg/m^3) とする。

2・2 岩盤から坑内気流への熱伝達に関する理論

坑道周辺の岩盤が熱的に均質かつ等方性であり、壁面からの水分の蒸発がなく、また気流温度は同一断面内では均一で、坑道軸方向に対して勾配がなく時間的にも変化しない場合の坑道周辺の岩盤温度および岩盤より放散される熱量の理論計算については、すでにいくつか発表されている。

一般に単位長さの坑道において、単位時間に岩盤より空気に向かって放散される熱量 q_R (kcal/mh) は

$$q_R = 2\pi r_1 \lambda_g (\partial\theta/\partial r)_{r=r_1} = 2\pi r_1 \alpha (\theta_w - \theta) \quad (2)$$

ただし r は坑道中心からの距離 (m)、 θ は坑道周辺の岩盤温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 r_1 は換算半径 (m) と呼ばれるもので $2F/w$ で与えられる。しかるに天野¹⁾の方法によれば、 θ は理論的に次式で与えられる。

$$hr_1 \frac{\theta - \theta_0}{\theta_0 - \theta} = \frac{1 + hr_1 \log(r/r_1)}{\log r_0 + 1/(hr_1)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2hr_1 u_0(x_n) hr_1 u_0(x_n r/r_1) \exp(-x_n^2 kt/r_1^2)}{r_0^2 x_n^2 u_1^2(r_0 x_n) - (h_1^2 r_1^2 + x_n^2) u_0(x_n)}$$

$$u_i(ax_n) = \frac{J_i(ax_n)}{J_0(r_0 x_n)} - \frac{Y_i(ax_n)}{Y_0(r_0 x_n)} \quad (i = 0, 1, a = 1, r_0, r/r_1) \quad (3)$$

ただし、 $r_0 = r_2/r_1$ で r_2 は地熱温度 θ_0 を示す地帯のなかで坑道中心からもっとも近い点までの距離 (m) である。 h および k はそれぞれ坑道壁面の相対熱伝達率 (m^{-1}) および岩盤の温度伝導率 (m^2/h) であって、 $h = \alpha/\lambda_g$ 、 $k = \lambda_g/(c\gamma)$ で与えられる。また x_n は次式の根である。

Table 4 Roots of equation (4), $r_0 = 50$

n	hr_1		
	4	10	20
1	0.0570106	0.0574034	0.0575419
2	0.1216903	0.1222857	0.1224973
3	0.1861706	0.1869445	0.1872211
4	0.2505031	0.2514457	0.2517842
5	0.3147368	0.3158429	0.3162417
6	0.3789011	0.3801674	0.3806255
7	0.4430145	0.4444386	0.4449555
8	0.5070890	0.5086691	0.5092446
9	0.5711332	0.5728679	0.5735015
10	0.6351533	0.6370412	0.6377328
11	0.6991537	0.7011936	0.7019432
12	0.7631380	0.7653287	0.7661361
13	0.8271090	0.8294492	0.8303144
14	0.8910688	0.8935574	0.8944804
15	0.9550194	0.9576550	0.9586344
16	1.0189621	1.0217435	1.0227816
17	1.0828984	1.085239	1.0869196
18	1.1468290	1.1498975	1.1510506
19	1.2107550	1.2139648	1.2151753
20	1.2746772	1.2780268	1.2792946
21	1.3385962	1.3420839	1.3434089
22	1.4025126	1.4061367	1.4075188
23	1.4664269	1.4701857	1.4716248
24	1.5303395	1.5342313	1.5357271
25	1.5942509	1.5982737	1.5998263
26	1.6581613	1.6623133	1.6639225
27	1.7220712	1.7263504	1.7280161
28	1.7859810	1.7903853	1.7921072
29	1.8498904	1.8544181	1.8561961
30	1.9138001	1.9184490	1.9202830
31	1.9777102	1.9824781	1.9843680

$$x_n u_1(x_n) = -hr_1 u_0(x_n) \quad (4)$$

上式の根の一例を Table 4 に示す。したがって、 $r=r_1$ のときの(3)式の左辺の値を η とおけば(2)式はつぎのようになる。

$$q_{R'} = 2\pi\lambda g^\eta (\theta_0 - \theta) \quad (5)$$

η の値は平松ら²⁾, Nottrotら³⁾, Marzilgerら⁴⁾によりこの順にだんだん詳細に計算されている。Fig. 2 に Marzilger らによる計算結果を示す。

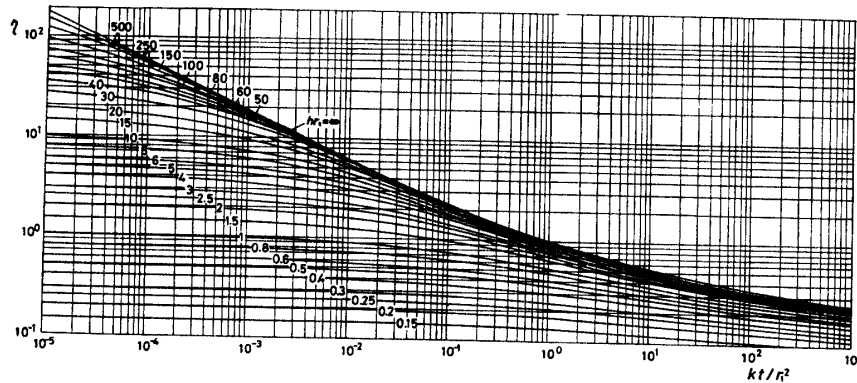


Fig. 2 The value of η

2・4 豊羽鉾山における調査結果

測点 a-b 間において、この区間に運び込まれた物質の量や熱量は運び去られる物質の量や熱量に等しいはずである。したがって、いま気流が a から b の方向に流れるものとするれば次式が成り立ち、左辺の各項の値は Table 1 と Table 2 とから計算できる。

$$(気流のエンタルピー増加) + (排水の熱量増加) + (冷水の熱量増加) - (湧水の熱量減少)$$

$$-Q_M + AG(z_b - z_a) = Q_R = \int_a^b q_R ds \quad (6)$$

ここに、 A は仕事の熱当量 (kcal/kg・m), G は空気の流量 (kg/h) である。また Q_M は機械類から与えられる熱 (kcal/h) である。さて、坑道断面の状態を表わす定数を Table 1 から計算すれば $Q_{R'}$ は(5)式と Fig. 2 とから次式で与えられる。

$$Q_{R'} = \int_a^b q_{R'} ds \quad (7)$$

もし岩盤に熱が補給されるようなことがなければ、 $Q_R = Q_{R'}$ であろうと思われる。ところが(6)式から得

られる Q_R の値は(7)式で与えられる $Q_{R'}$ よりかなり大きい。Table 5 にこれらの値およびこれらの値の比を示す。

一方、温泉の影響がない場合の坑道周辺の岩盤温度は(3)式と Table 3 とから求められる。岩盤温度の測定が行われた4つの測定断面について、これを示すと Fig. 3 の実線のようなのである。ただし $r_0 = 50$ とした。Fig. 3 に示す曲線は、実測された気流温度、岩盤の初期温度、岩盤の熱伝導率および開き後の経過時間、実測された風速から推定した壁面の熱伝達率などをもとにして理論的に岩盤温度を計算したものである。これに対し図中の白丸印は直接岩盤の温度を測定したものである。理論値と実測値とを比較すると、断面1では両者が非常に違っている。これは温泉による熱の補給があるところでは、壁面における温度勾配が理論的に求められる温度勾配よりかなり大きいことを示している。このことはまた(2)式からわかるように、岩盤から気流に与えられる熱量 q_R が(5)式で与えられる理論値

Table 5 Calculated heat values.

Section	$Q_{R'}$ (10 ³ kcal/h)	Q_R (10 ³ kcal/h)	Q_R $Q_{R'}$	q_R (kcal/mh)	$q_{R'}$ (kcal/mh)	q_R $q_{R'}$
1~9	1490	272	5.5			
1~2	220	61	3.6			
2~3	777	11	7.0			
7~face~8	190	82	2.3			
2				626	313	2.0
5				371	332	1.1
6				601	470	1.3
7				533	515	1.0

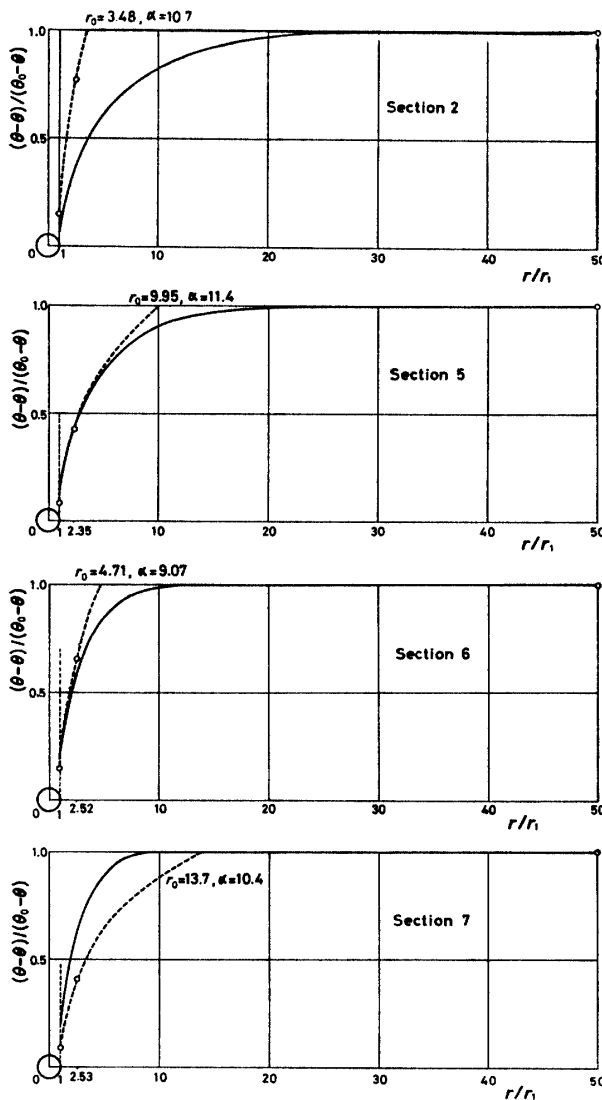


Fig. 3 Temperature distribution in the rock around the drift.

$q'r$ よりかなり大きくなることを表わしている。いまかりに熱の補給があるために地熱温度を示す地帯が坑道壁面近くまで接近しており、またほとんど定常状態に達しているものとする。この場合、 θ_w および θ_b の測定値と理論値とが合うように α と r_0 を決定し、岩盤温度を示したものが Fig. 3 の破線である。

これら 4 つの断面について、(5)式から求めた $q'r$ の値、Fig. 3 の破線をもとにして(2)式から求めた q_R の値およびそれらの値の比を Table 5 に示す。

Table 5 をみるとわかるように岩盤から坑内気流に伝達される熱量は、熱収支から考えると温泉水の影響を受けたものはそうでない場合の 4 倍以上であるが、岩盤内温度分布から考えるとこれがたかだか 2 倍程度である。しかし、現場には気の付かない湧水や滴

水があり、このための熱量が Q_R に含まれていることが考えられ、一方、岩盤内での温泉水の流動が岩盤の熱定数に与える影響や壁面がぬれていることによる影響が Table 5 の q_R には考慮されていない⁵⁾。これらのことを勘案して筆者らは、できるかぎり温泉水の湧出を止める場合、温泉水の影響を受けた岩盤から気流に与えられる熱量は、温泉水がない場合に岩盤から気流に与えられる熱量の 4 倍と見積ることとする。

3. トンネル完成後の坑内気温の予測

3.1 解析方法

鉱山の通気回路網における温度、湿度および風量の同時予想計算の方法はすでに開発され、実際の鉱山の開発区域に適用されている^{6),7)}。これらの方法によればモデルはつぎの仮定に従うものとしている。

- (1) 坑道は円形である。
- (2) 地熱の勾配が与える影響は無視する。
- (3) 坑道は無限の広がりをもつ岩盤内にある。
- (4) 入気坑口の条件は一定のままである。
- (5) 空気に水分を供給する湿った場所は部分的にあり、乾いた部分からぬれた部分への熱の伝導はない。

仮定(5)からぬれ率 ψ をつぎのように決めることができる。

$$\psi = \frac{\text{ぬれた壁面の面積}}{\text{坑道壁面の面積}}$$

さて、測点 a-b 間の熱収支から次式が成立する。

$$c_p G(\theta_b - \theta_a) = AG(z_a - z_b) + Q_M + Q_R - 597G(f_a - f_b) \quad (8)$$

$$c_p G(\theta_b - \theta_a) = AG(z_a - z_b) + Q_M + 2\pi r_1 \alpha \psi (\theta_{ww} - \theta_m) + 2\pi r_1 \alpha (1 - \psi) (\theta_{wd} - \theta_m) \quad (9)$$

c_p は空気の定圧比熱 (Kcal/kg°C) である。(9)式の第 3 項はぬれている壁面から気流に与えられる顕熱であって、 θ_{ww} はぬれている壁面の温度である。第 4 項は乾いている壁面から気流に与えられる顕熱で θ_{wd} は乾いている壁面の温度である。ただし、

$$\theta_m = (\theta_a + \theta_b) / 2 \quad (10)$$

また、(8)および(9)式を考慮して θ_w は(11)式で与えられるものとする。

$$\theta_{wd} = \theta_m + \frac{\eta}{hr_1} (\theta_0 - \theta_m) \quad (11)$$

f は比湿度 (kg/kg) を表わしている。いま f_w を θ_{ww} に対する飽和比湿度とすると(12)式が成立つ。ただし、 f_m は(13)式で与えられるものとする。

$$c_p G(f_b - f_a) = 2\pi r_1 \alpha \phi (f_w - f_m) \quad (12)$$

$$f_m = (f_a + f_b) / 2 \quad (13)$$

(12)式により、飽和水蒸気圧表から θ_{ww} を求めることができる。よって、風量がわかれば(8)および(9)式から温度と湿度が決まる。ただし、この計算は逐次計算によらねばならない⁸⁾。ところで、各点の温度、湿度および気圧が与えられるとそれらの点における空気の比重量 γ (kg/m³) が決まり、各回路の自然通気圧 p_N が求められる。

$$p_N = -\int \gamma dz \quad (14)$$

ただし、気圧は近似的に次式で与えられるものとする。

$$p = 760 \times \left(\frac{288 - 0.0065z}{288} \right)^{5.253} \text{ mmHg} \quad (15)$$

p_N が決まれば通気回路網解析により、各坑道の風量を求めることができる^{9),10)}。したがって、温度、湿度解析と通気回路網解析を交互に収れんするまで繰返すことによって温度、湿度、風量の同時計算を行なうことができる。

3・2 解析条件

さきに述べた調査結果から、温泉の湧出があると思われる岩盤中にトンネルを開削し、できるかぎり温泉水の湧出を止める場合、温泉水および岩盤から気流に与えられる熱量は温泉湧出のない場合に岩盤から気流に与えられる熱量の4倍として安房トンネル完成後の気温、湿度の予想計算を行なうことにする。湧出した

温泉水は Fig. 4 に示すように、床面中央下方60cmの所に埋設した直径45cmのコンクリート管で排水するものとする。この排水管の影響に関する計算法は、まず床面は半無限平面であると仮定して床面の温度分布¹¹⁾を計算し、つぎに床面温度が一定で最高温度に等しく、しかも同一熱放散効果のある床面の幅を決定し、対応する η の値を見出すこととする¹²⁾。

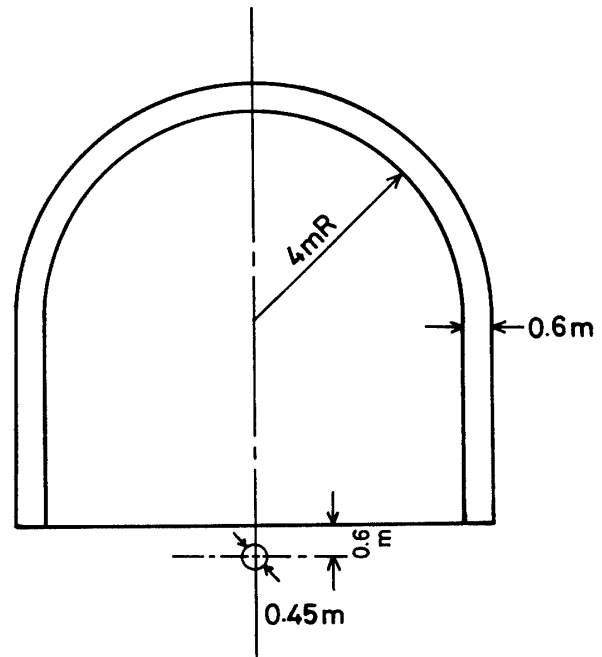


Fig. 4 Cross section of Abo tunnel. 1 : 100

Table 6 Primitive temperature of rock and above the sea level at each section.

Junct. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
θ_0 (°C)	10	14	14	14	16.5	19	27.5	36	65	62
z (m)	1320	1323.8	1328.2	1332.6	1336.4	1340.2	1344.6	1349	1347.2	1345.9
θ (°C)	10.0									
f (10 ³ kg/kg)	7.77									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	59	61.5	64	88	17	10	19	7.78		
	1344.6	1343.4	1342.3	1341.3	1340.7	1340	1460	1661	1661	1661
						10.0				
						7.79				

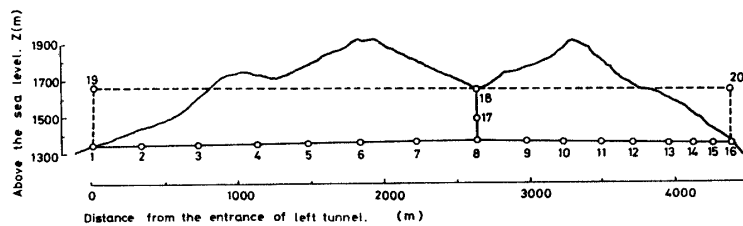


Fig. 5 Outline of Abo tunnel. 1 : 20,000

岩盤温度は中部地方建設局高山国道工事事務所のボーリング調査の結果にもとづき、Table 6のように推定した。Fig. 5はトンネルの計画図を示したものである。また、Table 6には Fig. 5に示す各節点の標高や入気坑口の条件も示してある。なお、岩盤の c と r_g の値やその他の条件は豊彩鉱山の場合と同じであるものとし、 $\lambda_g = 3 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ とする。

3.3 解析結果

Table 7は坑道のぬれ率を0.3にとった場合トンネル完成後6ヶ月、1年、10年を経過した時の坑内気温、比湿度、相対湿度 ϕ (%) の予想計算の結果を示したものである。また、もしこの気温が実現した場合の自然通気量 V ($10^3 \text{ m}^3/\text{min}$) の予想値を Table 8に示す。

Table 7 Calculated results of Temperature and humidity at each junction, $\phi=0.3$ of all branches.

Junct. No.	t (years)								
	0.5			1			10		
	$\theta(^{\circ}\text{C})$	$f(10^{-3}\text{kg/kg})$	$\phi(\%)$	$\theta(^{\circ}\text{C})$	$f(10^{-3}\text{kg/kg})$	$\phi(\%)$	$\theta(^{\circ}\text{C})$	$f(10^{-3}\text{kg/kg})$	$\phi(\%)$
1	10.0	7.77	86.9						
2	9.97	7.85	87.9	9.92	7.85	88.2	9.84	7.85	88.9
3	10.3	7.96	87.4	10.2	7.95	88.0	9.93	7.94	89.3
4	10.5	8.06	86.9	10.3	8.05	87.8	10.0	8.03	89.6
5	10.9	8.17	86.1	10.6	8.14	87.0	10.2	8.11	89.3
6	11.5	8.30	84.1	11.1	8.26	85.4	10.6	8.21	87.9
7	12.9	8.52	78.6	12.4	8.46	80.6	11.5	8.37	84.3
8	15.2	8.86	69.9	14.5	8.76	72.6	13.1	8.61	78.0
8	21.2	9.92	53.7	19.7	9.66	57.4	17.3	9.27	64.5
8	26.1	10.8	43.5	24.0	10.4	47.3	20.7	9.82	55.2
9	25.2	10.1	42.9	23.2	9.79	47.0	19.9	9.34	54.9
10	23.2	9.53	45.7	21.4	9.31	49.8	18.5	8.98	57.7
11	21.0	9.03	49.6	19.5	8.88	53.5	17.0	8.64	61.0
12	18.7	8.62	55.0	17.5	8.52	58.6	15.5	8.36	65.4
13	15.6	8.24	63.6	14.8	8.19	66.5	13.5	8.11	71.9
14	11.9	7.95	78.7	11.6	7.93	80.1	11.1	7.91	81.9
15	10.0	7.82	87.2	10.0	7.82	87.2	9.98	7.82	87.8
16	10.0	7.79	86.9						
17	19.6	10.1	60.0	18.2	9.77	63.7	15.9	9.36	71.3
18	16.7	10.2	72.7	15.5	9.91	76.3	13.3	9.46	83.3

Table 8 Calculated air flow in each branch.

	t(years)	Left tunnel	Vertical shaft	Right tunnel
Air quantity	0.5	8.75	19.6	10.8
V	1	8.19	18.3	10.1
($10^3 \text{ m}^3/\text{min}$)	10	7.09	15.8	8.73

入気温度は1年を周期とした温度変化を行なっている。そこで、坑外気温の季節的周期変化の振幅を11.0 $^{\circ}\text{C}$ として、各季節における坑内温度の予想値を求めると Table 9 のようである。

また、総排気量 1600cc の自動車トンネル内2車線を時速 50km/h、車間距離25m で連続走行するときの春秋における坑内の温度、湿度の予想値は Table 10 のようであり、風量の予想値は Table 11 のようである。

Table 9 Seasonal periodic variation of temperature at each junction, $t=1$ (year).

Junct. No.	Summer	Spring, Autumn	Winter
1	21.0	10.0	- 1.0
2	20.2	9.92	- 0.38
3	20.1	10.2	0.3
4	19.7	10.3	0.96
5	19.4	10.6	1.8
6	19.5	11.1	2.74
7	20.4	12.4	4.37
8	22.0	14.5	7.02
8	30.2	19.7	9.2
8	32.6	24.0	15.4
9	32.2	23.2	14.2
10	30.5	21.4	12.3
11	29.2	19.5	9.82
12	27.4	17.5	7.6
13	25.0	14.8	4.6
14	22.1	11.6	1.1
15	20.8	10.0	- 0.8
16	21.0	10.0	- 1.0
17	28.8	18.2	7.6
18	26.5	15.5	4.5

4. おわりに

一般に坑内の熱源から気流に与えられる熱量が多くなれば坑内温度が上昇し風量が增加する。温度からみた最悪の条件は Table 10 および Table 11 に示すとおりであるが、自動車の排気ガスの浄化からみればこれは最良の条件となる。いま、自動車1台から排出される二酸化炭素の重量を 2.1kg/km とすると左トンネルではCO濃度 34.0ppm である。一方、大気汚染防止法によれば緊急時の協力要請の濃度は 30ppm である。したがって、もしトンネル内に大汚染防止法が適用されるとすれば、左トンネルにおいて、風量が不足することになる。

結局、温度低下の立場からみれば立坑による自然通気だけで、トンネル内を常温に保つことができるが排気ガス浄化の立場からみれば交通量がピークするとき強制通気が必要となることが予想される。なお、計算には、山口大学工学部計算機室の FACOM 230-28 を用いた。

最後に、この解析にあたって、貴重な御助言を賜った京都大学工学部資源工学科平松良雄教授、多くの資料を快く提供して頂いた九州大学工学部資源工学科内

Table 10 Calculated results of temperature and humidity at each junction, $\phi=0.3$ of all branches, $t=1$ (year) at the peak of traffic.

Junct. No.	$\theta(^{\circ}\text{C})$	$f(10^{-3}\text{kg/kg})$	$\phi(\%)$
1	10.0	7.77	86.9
2	12.0	7.87	77.6
3	13.9	8.04	69.4
4	15.4	8.27	64.8
5	16.5	8.49	62.0
6	17.7	8.76	59.5
7	19.3	9.13	56.0
8	21.5	9.60	51.4
8	25.0	10.1	43.6
8	28.0	10.5	37.8
9	26.6	9.83	38.7
10	24.4	9.32	41.9
11	22.0	8.87	45.9
12	19.4	8.50	51.6
13	16.2	8.17	60.8
14	12.7	7.92	74.4
15	10.7	7.82	83.2
16	10.0	7.79	86.9
17	23.1	10.3	49.1
18	19.7	10.5	60.2
19	7.78	6.29	79.0
20	7.78	6.29	79.0

Table 11 Calculated air flow in each branch, $t=1$ (year), at the peak of traffic.

Air quantity	Left tunnel	Vertical shaft	Right Tunnel
$V(10^3\text{m}^3/\text{min})$	10.3	22.4	12.1

野健一助教授、調査に協力して頂いた豊彩鉱山(株) 賀川鉄一採鉱課長、住鉱コンサルタント(株) 技師長 天野勲三博士および建設省中部地方建設局高山国道工事事務所の関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 天野勲三：乾燥した岩盤坑道における気流の温度変化について、日本鉱業会誌、70、787 (1954)
- 2) 平伏良雄・天野勲三、小門純一：坑内気流計算の実用計算、日本鉱業会誌、77、882 (1961)
- 3) R. Nottrot, C. Sadée: Abkühlung homogen en isotropen Gesteins um eine zylindrische Strecke durch Wetter von konstanter Temperatur, Glückauf-

- Forschungs hefte, Jg. 27 (1966)
- 4) B. Marzinger, B. Wagener: Eine numerische Lösung zur Berechnung des Wärmetechnischen Altersbeiwertes mit Fehlerabschätzung, Gluckauf-Forschungshefte, Jg. 33 (1972)
- 5) 水田義明, 平松良雄: 岩盤から坑内気流への熱伝達について, 日本鉱業会昭和52年度春季大会講演要旨集 (1977)
- 6) Y. Hiramatsu, K. Amano: Calculation of the Rate of Flow, Temperature and Humidity air Currents in a Mine, Int. J. Rock Mech. Sci, 9 (1972)
- 7) K. L. Gibson: The Computer simulation of climatic Conditions in Mines, 15th Int. Symposium APCOM 77 (1977)
- 8) 平松良雄: 通気学, 内田老鶴圃新社 (1974) P. 191
- 9) 岡行俊, 木山英郎, 平松良雄: 条件の複雑な通気回路網のデジタル計算機による解析, 日本鉱業会誌 83, 945 (1967)
- 10) P. Tanaskovic: Mathematical Modelling of Control Mining Ventilation Networks, 15th Int. Symposium APCOM 77 (1977)
- 11) 川下研介: 熱伝導論, 複刻版, 生産技術センター (1975) P. 176
- 12) 宮坂敏男: 卒業論文 (1977)

(昭和53年10月12日受理)