



Title	隧道内を流下する流れの水温変化（第2報）：水温日変化におよぼす乱流の影響
Author(s)	八鍬, 功; Yakuwa, Isao; 大谷, 守正 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 69, 167-176
Issue Date	1973-11-15
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41179">https://hdl.handle.net/2115/41179</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	69_167-176.pdf



# 隧道内を流下する流れの水温変化 (第2報)

—水温日変化におよぼす乱流の影響—

八 鍬 功\* 大 谷 守 正\*

(昭和48年4月28日受理)

## Change of Water Temperature Variation in a Flow through a Tunnel (II)

— The Influence of Turbulent Motion on the Daily  
Variation of Water Temperature —

Isao YAKUWA and Morimasa OHTANI

(Received April 28, 1973)

### Abstract

The influence of turbulence on the daily variation of water temperature of a flow through a tunnel is discussed in this paper by solving an equation of the water temperature variation. According to the results of numerical estimation with given thermal and hydrological elements it was expected that the influence was not effective on the flow through a tunnel at the power-station at Kamikawa, and the expectation was confirmed by records of the daily variation of water temperature.

A useful equation to estimate the water temperature variation of the flow through a tunnel was also given on the basis of the results of observation at Kamikawa.

### 1. 序

隧道内を流下する水の温度は周壁との熱交換によって変化する。第1報では均質な岩盤の深部を通る円形断面の隧道内を水が満水状態で流下する理想的な場合における日平均水温や水温日変化の振巾、位相の変化について述べた。

本論文では上述と同じ条件の流れについて、流下方向の乱流拡散を考慮した水温日変化の式をもとめ、上川発電所隧道で行なった水温や流れの観測結果と合わせて、乱流が水温日変化におよぼす影響を考察する。

### 2. 乱流を考慮した水温日変化の式

図-1 に示した半径  $r_1$  の円形断面を有する隧道内を水が満水状態で流下する場合、水温変化は流水と周壁との熱交換によって生ずる。本節でははじめに周壁内の温度変化の式について述べ、次に水温日変化の平均値や振巾、位相の変化をあらわす式をもち

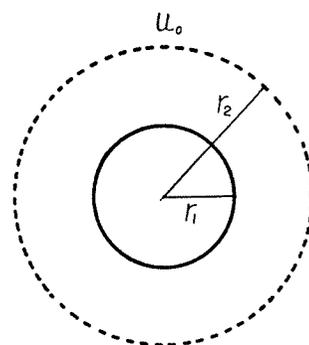


図1

\* 理学第一講座

びく。

### 壁内の温度

周壁の岩盤は均質なものとし、第1報の場合と同様半径  $r_2 (r_2 > r_1)$  なる層では温度日変化の振巾が無視出来る程微小で、一日を通して一定温度 ( $u_0$ ) とみなせるものとする。隧道入口の中心を原点として水の流下方向を  $z$ 、断面内の隧道中心からの距離を  $r$  とするとき、岩盤内では  $z$  方向の温度変化は  $r$  方向にくらべて小さいとみられるので、 $z$  方向の熱伝導は無視するものとする。壁内の温度を  $u$ 、時間を  $t$ 、岩盤の比熱、密度、熱伝導率をそれぞれ  $c_0$ 、 $\rho_0$ 、 $K_0$  とすれば、壁内の熱伝導方程式および境界条件は次のようになる

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k_0 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right)$$

$$k_0 = \frac{K_0}{c_0 \rho_0}$$

$$\text{境界条件 } r=r_1: K_0 \frac{\partial u}{\partial r} = \alpha(u - \theta)$$

$$r=r_2: u = u_0$$

ただし  $\theta$  は水温、 $\alpha$  は壁と水の間の熱伝達率とする。上式の解をもとめ、 $r=r_1$  とおけば壁面の温度  $u_{r_1}$  がもとまる<sup>1,2)</sup>。

$$u_{r_1} = u_0 - (u_0 - \theta) \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{r_1}{h} + \ln \frac{r_2}{r_1}} + \frac{\Theta}{c^* h} \left\{ \left( 1 + \frac{1}{2c^* r_1} + \frac{1}{c^* h} \right)^2 + 1 \right\}^{-1/2} \cos(\omega t - \eta_1) \quad (1)$$

ここに

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = \frac{2\pi}{24} (1/\text{hr}) \\ c^* = \sqrt{\frac{\omega}{2k_0}} \\ h = \frac{K_0}{\alpha} \\ \eta_1 = \cot^{-1} \left( 1 + \frac{1}{2c^* r_1} + \frac{1}{c^* h} \right) \end{array} \right.$$

で  $\bar{\theta}$ 、 $\Theta$  はそれぞれ水温日変化の平均値および振巾である。

### 水温日変化の式

流水は隧道内を一定速度  $V$  で流下するものとする。断面内では  $r$  方向の乱流混合によって水温が一定なるものとし、流下方向 ( $z$ ) の乱流拡散係数  $\eta$  が  $z$  によらず平均的に一定なるものとするれば、 $z$  方向の乱流混合を考慮した水温変化の方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + V \frac{\partial \theta}{\partial z} = \eta \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\alpha l}{c \rho S} (u_{r_1} - \theta) \quad (2)$$

ここで  $c$ 、 $\rho$  は流水の比熱、密度、 $l$ 、 $S$  はそれぞれ隧道断面の円周および断面積である。水温日変化が正弦関数であらわされるものとし、前述の通り平均水温を  $\bar{\theta}$ 、日変化の振巾を  $\Theta$  とすれば、水温  $\theta$  は次式であらわされる。

$$\theta = \bar{\theta}(z) + \Theta(z) e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{24} (1/\text{hr})$$

(2) 式の各項につき一周期 (一日) の平均をとれば、平均水温  $\bar{\theta}$  に関する次の方程式がえられる。

$$V \frac{d\theta}{dz} = \eta \frac{d^2\theta}{dz^2} + \frac{\alpha l}{c\rho S} (\bar{u}_{r_1} - \theta) \quad (4)$$

ここに  $\bar{u}_{r_1}$  は (1) 式であらわされる壁面の温度の定常項で次式によって与えられる。

$$\bar{u}_{r_1} = u_0 - (u_0 - \theta) \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{h}{r_1} + \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

隧道入口 ( $z=0$ ) における流入水の平均水温を  $\bar{\theta}_0$  とすれば、

境界条件は  $z=0: \theta = \bar{\theta}_0$

となるから (4) 式の解は次のようになる。

$$\bar{\theta} = u_0 - (u_0 - \bar{\theta}_0) \exp \left[ \left\{ \frac{V}{2\eta} - \sqrt{\left(\frac{V}{2\eta}\right)^2 + \frac{\alpha l \frac{h}{r_1}}{c\rho S \eta \left(\frac{h}{r_1} + \ln \frac{r_2}{r_1}\right)}} \right\} z \right] \quad (5)$$

とくに

$$\left(\frac{V}{2\eta}\right)^2 \gg \frac{\alpha l \frac{h}{r_1}}{c\rho S \eta \left(\frac{h}{r_1} + \ln \frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (6)$$

なる場合には (5) 式は近似的に

$$\bar{\theta} = u_0 - (u_0 - \bar{\theta}_0) \exp \left[ -\frac{\alpha l}{c\rho S V} \frac{\frac{h}{r_1}}{\frac{h}{r_1} + \ln \frac{r_2}{r_1}} z \right] \quad (5')$$

となるが、この式は第1報でもとめた乱流を考慮しない場合の日平均水温の式と同じである。

次に水温日変化の振巾、位相の式をもとめる。(3)、(4) 式および壁面の温度をあらわす式 (1) を (2) 式に代入すれば、次の振巾  $\Theta$  の方程式がえられる。

$$\frac{d^2\Theta}{dz^2} - \frac{V}{\eta} \frac{d\Theta}{dz} + \Theta \left( \frac{\alpha l A}{c\rho S \eta} e^{-im} - \frac{\alpha l}{c\rho S \eta} - i \frac{\omega}{\eta} \right) = 0$$

$$A = \frac{1}{c^* h} \left\{ \left( 1 + \frac{1}{2c^* r_1} + \frac{1}{c^* h} \right)^2 + 1 \right\}^{-1/2}$$

隧道入口における流入水温の振巾を  $\Theta_0$  とすれば、

境界条件は  $z=0: \Theta = \Theta_0$

となる。この境界条件を用いて上の方程式を解けば、 $\Theta$  を与える式が次のようにもとめられる。

$$\Theta = \Theta_0 \exp \left[ \left\{ \frac{V}{2\eta} - \sqrt{\frac{\left\{ \left(\frac{V}{2\eta}\right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S \eta} (1 - A \cos \eta_1) \right\}^2 + \left(\frac{\alpha l}{c\rho S \eta} A \sin \eta_1 + \frac{\omega}{\eta}\right)^2}{2}} + \left\{ \left(\frac{V}{2\eta}\right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S \eta} (1 - A \cos \eta_1) \right\} \right\} z \right]$$

$$\times \exp \left[ -i \sqrt{\frac{\left\{ \left(\frac{V}{2\eta}\right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S \eta} (1 - A \cos \eta_1) \right\}^2 + \left(\frac{\alpha l}{c\rho S \eta} A \sin \eta_1 + \frac{\omega}{\eta}\right)^2}{2}} - \left\{ \left(\frac{V}{2\eta}\right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S \eta} (1 - A \cos \eta_1) \right\} z \right] \quad (7)$$

(5), (7) 式を (3) 式

$$\theta = \theta(z) + \Theta(z) e^{i\omega t}$$

に代入すればもとめる水温変化の式がえられる。すなわち隧道内を流下する際の水温日変化の振巾減衰率は

$$\sqrt{\frac{\left\{ \left( \frac{V}{2\eta} \right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} (1 - A \cos \eta_1) \right\}^2 + \left( \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} A \sin \eta_1 + \frac{\omega}{\eta} \right)^2}{2}} + \left\{ \left( \frac{V}{2\eta} \right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} (1 - A \cos \eta_1) \right\} - \frac{V}{2\eta} \quad (8)$$

また位相のおくれは

$$\sqrt{\frac{\left\{ \left( \frac{V}{2\eta} \right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} (1 - A \cos \eta_1) \right\}^2 + \left( \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} A \sin \eta_1 + \frac{\omega}{\eta} \right)^2}{2}} - \left\{ \left( \frac{V}{2\eta} \right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} (1 - A \cos \eta_1) \right\} \times z \quad (9)$$

となる。とくに

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{V}{2\eta} \right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} (1 - A \cos \eta_1) &\gg \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} A \sin \eta_1 + \frac{\omega}{\eta} \\ \left( \frac{V}{2\eta} \right)^2 &\gg \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} (1 - A \cos \eta_1) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

なる条件が成立する場合には (8) 式および (9) 式はそれぞれ近似的に

$$\frac{\alpha l}{c\rho S V} (1 - A \cos \eta_1) \quad (8')$$

$$\left( \frac{\alpha l}{c\rho S V} A \sin \eta_1 + \frac{\omega}{V} \right) z \quad (9')$$

となるが、(8)', (9)' 式はそれぞれ第 1 報でもとめた乱流を考慮しない場合の振巾減衰率および位相差の式と同じである。すなわち (10) 式が成り立つような流れでは、振巾および位相差に乱流の影響があらわれない。

### 3. 上川発電所隧道における観測の結果と考察

図-2 に示した上川発電所の沈砂池～調整池間の隧道で、1969 年から 1972 年まで 4 年間に数度隧道流下時の水温変化に関する観測を行なった<sup>3)</sup>。この区間の隧道の長さは 3,592 m、平均勾配 1/1,500、隧道断面は図-3 に示すような馬蹄形で周壁は厚さ 46 cm のコンクリートでおおわれている。入口から出口まで露出部はなく、また途中河川などの流入もなく、常時平均約 20 m<sup>3</sup>/sec の用水が流れている。

観測の内容は隧道入口と出口にサーミスタを感温部とした自記温度計を設置し、約 2 日間にわたって水温を連続記録した。また隧道内の流下時間と流下方向の乱流拡散係数をもとめるために、隧道入口で塩 30-60 kg を投入し、同時に出口で流水の電気抵抗を連続記録して塩分濃度の時間

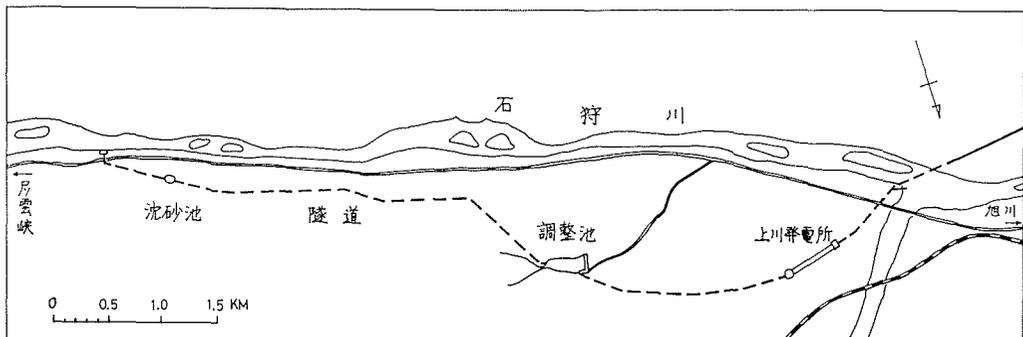


図 2

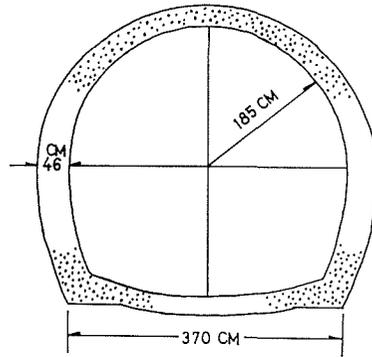


図3

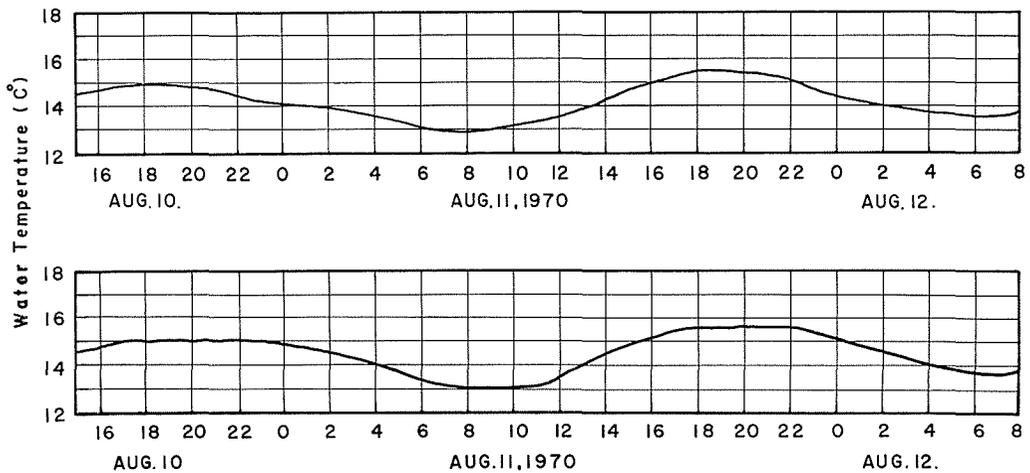


図4 上川発電所隧道における水温日変化  
上：隧道入口 下：隧道出口

的变化を測定した<sup>4)</sup>。上記の塩水による流れの観測と同時に隧道入口および出口でサーミスタ温度計によって水温を約30分間10~20秒間隔で精密測定し、隧道流下時の水温変化量をもとめた。

図-4は1970年8月10日~12日の隧道入口および出口における水温の自記記録である。入口における水温最高時は18時、最低時は8時で水温日変化は平均水温14.0°C、振幅1.2°Cの正弦曲線に近い。入口、出口における水温曲線はほとんど相似形であるが、両者の水温最高時が30分近くずれているのがみられる。これは熱量の大部分が流水によって輸送されることによるもので、この位相のずれは隧道内流下時間を示している。隧道流下時の水温変化を論ずるには入口、出口の流下時間だけずれた時刻における水温を比較しなければならないが、変化量が微小であるため日変化の記録から読みとることは困難である。

図-5は隧道出口における塩分濃度記録の一例を示したもので、1970年8月11日11時30分に入口から塩40kgを溶解して投入し、流出水中に極板を挿入してその電気抵抗を自記記録し、同時に15~20秒毎に約300ccの水を採取して塩素量濃度を測定し、電気抵抗からもとめた値を補正した。塩水投入時から塩分濃度曲線のピークのあらわれた時刻までが流水の隧道流下時間となるが、図-5の場合流下時間は26分25秒であり、従って平均流速は2.27m/secとなった。なお入口で測定した当時の流量は21.3m<sup>3</sup>/secであった。塩分濃度曲線から流下方向の乱流拡散係

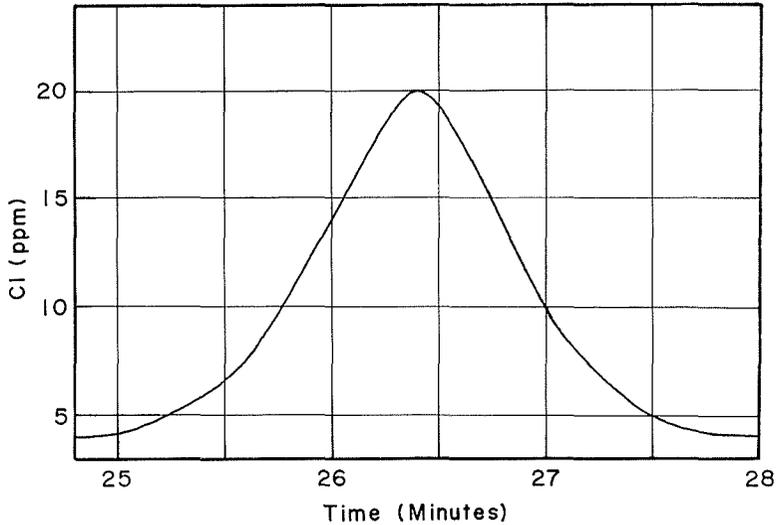


図5

数  $\eta$  をもとめるには塩分濃度最高値の 1/2 以上の濃度が継続した時間を  $2t_{1/2}$ 、流下距離を  $X$ 、平均流速を  $U$  とすれば

$$\eta = \frac{U^3 t_{1/2}^2}{4X \ln 2} \quad (11)$$

から計算することが出来る<sup>2)</sup>。図-5 の場合には

$$2t_{1/2} = 61 \text{ (sec)}$$

$$X = 3,592 \text{ (m)}$$

$$U = 2.27 \text{ (m/sec)}$$

であるから、これらの値を (11) 式に代入すれば 1970 年 8 月 11 日の観測時の乱流拡散係数は

$$\eta = 0.109 \times 10^5 \text{ (cm}^2\text{/sec)}$$

となる。

次に水温日変化におよぼす乱流の影響について考察するため、上川発電所隧道に関する諸常数を定めて条件式 (6) および (10) の成否をたしかめる。隧道断面は図-3 に示した馬蹄形であるが近似的に半径  $r_1 = 1.85 \text{ m}$  の円とする。周壁のコンクリートと周辺の岩盤は熱的諸要素の値がそれ程異ならないので平均的に一定の値とし、次のように定める<sup>2)</sup>。

$$\text{岩盤の比熱: } c_0 = 0.20 \text{ (cal/g} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\text{密度: } \rho_0 = 2.6 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\text{熱伝導率: } K_0 = 4.0 \times 10^{-3} \text{ (cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\text{温度伝導率: } k_0 = 7.69 \times 10^{-3} \text{ (cm}^2\text{/sec)}$$

また流水については

$$\text{水の比熱: } c = 1.00 \text{ (cal/g} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\text{密度: } \rho = 1.00 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\text{熱伝導率: } K = 1.40 \times 10^{-3} \text{ (cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$$

(平均水温  $14.0^\circ\text{C}$  における値)

$$\text{熱伝達係数: } \alpha = 0.0616 \text{ (cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$$

(平均流速  $2.27 \text{ m/sec}$  における値)

以上の基礎要素から計算される諸量の値は

$$\begin{aligned}\omega &= 7.27 \times 10^{-5} \text{ (1/sec)} \\ c^* &= \sqrt{\frac{\omega}{2k_0}} = 0.069 \text{ (1/cm)} \\ h &= \frac{K_0}{\alpha} = 0.0649 \text{ (cm)} \\ \eta_1 &= \cot^{-1} \left( 1 + \frac{1}{2c^*r_1} + \frac{1}{c^*h} \right) = 0.00446 \\ A &= \frac{1}{c^*h} \left\{ \left( 1 + \frac{1}{2c^*r_1} + \frac{1}{c^*h} \right)^2 + 1 \right\}^{-1/2} = 0.996 \\ r_2 &= 2.20 \text{ (m)}\end{aligned}$$

となる。上の値を代入して計算すれば、式 (6) の両辺はそれぞれ

$$\begin{aligned}\left(\frac{V}{2\eta}\right)^2 &= 0.108 \times 10^{-3} \text{ (1/cm}^2\text{)} \\ \frac{\alpha l \frac{h}{r_1}}{c\rho S\eta \left(\frac{h}{r_1} + \ln \frac{r_2}{r_1}\right)} &= 0.123 \times 10^{-9} \text{ (1/cm}^2\text{)}\end{aligned}$$

また (10) 式の両辺は

$$\begin{aligned}\left(\frac{V}{2\eta}\right)^2 + \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} (1 - A \cos \eta_1) &= 0.108 \times 10^{-3} \text{ (1/cm}^2\text{)} \\ \frac{\alpha l}{c\rho S\eta} A \sin \eta_1 + \frac{\omega}{\eta} &= 0.694 \times 10^{-8} \text{ (1/cm}^2\text{)}\end{aligned}$$

となり、また

$$\frac{\alpha l}{c\rho S\eta} (1 - A \cos \eta_1) = 0.244 \times 10^{-9} \text{ (1/cm}^2\text{)}$$

となるから条件式 (6), (10) は満足される。従って上述のモデルでは隧道流下時の水温日変化の平均値および振巾、位相の変化に乱流の影響がほとんどあらわれない。しかし流路に曲線部分が多い隧道などで平均流速に対し流下方向の乱流拡散係数が大きい流れでは、振巾の減衰率が大きくなるなど乱流の影響があらわれるものとおもわれる。

#### 4. 隧道流下時の水温変化量

本節では上川発電所隧道流下時の水温変化量の観測結果から、他の隧道における水温変化量をもとめる式をみちびく。

水温日変化の周期に対して観測時間は短いので、その時間内では近似的に隧道流下による温度変化が定常なるものとすれば、水温変化の式は (5)' 式と同形になる。すなわち入口水温を  $\theta_0$  とすれば、水温  $\theta$  は

$$\theta = u_0 - (\theta_0 - u_0) e^{-\frac{\alpha l}{c\rho S\eta} \left[ \frac{h}{r_1} \right] / \left[ \frac{h}{r_1} + \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \right] x}$$

であらわされる。従って隧道の長さを  $L$ 、隧道出口の水温を  $\theta_L$  とすれば、隧道流下時の水温変化量  $\theta_L - \theta_0$  は次式で与えられる。

$$\theta_L - \theta_0 = (u_0 - \theta_0) \left[ 1 - e^{-\frac{\alpha l}{c\rho S\eta} \left[ \frac{h}{r_1} \right] / \left[ \frac{h}{r_1} + \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \right] L} \right] \quad (12)$$

上式で  $\theta_L = \theta_0$  すなわち隧道流下中に水温の変化が生じないのは  $\theta_0 = u_0$  なる場合であるから、

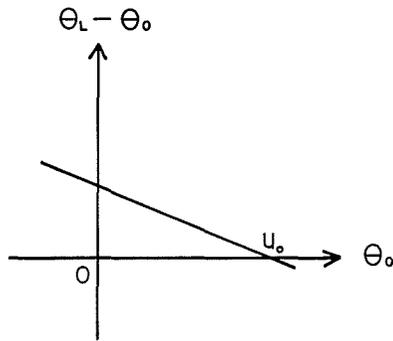


図 6

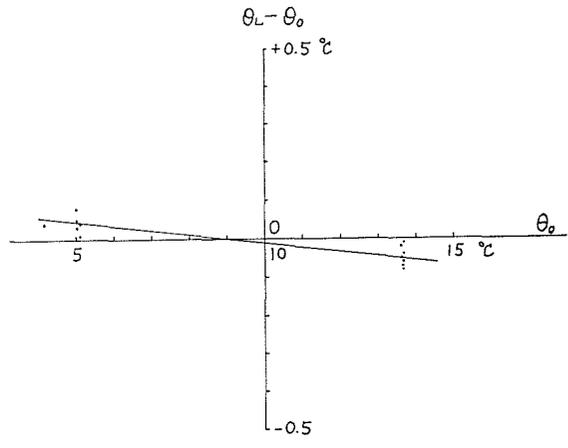


図 7

図-6 のように横軸に入口水温  $\theta_0$ 、縦軸に水温変化量  $\theta_L - \theta_0$  をとって水温観測値を plot すれば、図上の点を結ぶ直線が横軸と交わる点の  $\theta_0$  の値が  $u_0$  の値となる。表-1 は1969年10月1日, 1970年5月28日, 8月11日における隧道入口, 出口の水温観測値である。出口の水温は入口水温観測時から流下時間だけ後の時刻における値であるから, 両者の差が隧道流下中の水温変化量を与える。表-1 の値を図-6 のように横軸, 縦軸をとって図示すれば図-7 がえられる。図上の点を結ぶ直線が横軸を切る点の  $\theta_0$  の値は  $\theta_0 = 9.0$  であるから, 上述のとおり温度不変層の温度は  $u_0 = 9.0(^{\circ}\text{C})$

となる。

いま隧道内を流下する水の流量を  $Q$  とし,

$$k = \frac{K_0}{\frac{h}{r_1} + \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

とおいて (12) 式に代入すれば, (12) 式は

$$\theta_L - \theta_0 = (9.0 - \theta_0)(1 - e^{-2\pi k L / c\rho Q}) \tag{13}$$

表 1 隧道流下時の水温変化量観測値

(1) 1969年10月1日

隧道入口		隧道出口		水温変化量 $\theta_L - \theta_0(^{\circ}\text{C})$
測定時刻	入口水温 $\theta_0(^{\circ}\text{C})$	測定時刻	出口水温 $\theta_L(^{\circ}\text{C})$	
10:48	4.15	11:13	4.19	+0.04

(2) 1970年5月28日

隧道入口		隧道出口		水温変化量 $\theta_L - \theta_0(^{\circ}\text{C})$
測定時刻	入口水温 $\theta_0(^{\circ}\text{C})$	測定時刻	出口水温 $\theta_L(^{\circ}\text{C})$	
9:30	5.00	9:55	5.05	+0.05
9:46	5.01	10:11	5.09	+0.08
9:55	5.02	10:20	5.05	+0.03
10:30	5.11	10:55	5.15	+0.04

水温変化量の平均値: +0.05 $^{\circ}\text{C}$

(3) 1970年8月11日

隧道入口		隧道出口		水温変化量 $\theta_L - \theta_0(^{\circ}\text{C})$
測定時刻	入口水温 $\theta_0(^{\circ}\text{C})$	測定時刻	出口水温 $\theta_L(^{\circ}\text{C})$	
11:34	13.65	12:00	13.60	-0.05
11:37	13.67	12:03	13.60	-0.07
11:38	13.68	12:04	13.60	-0.08
11:39	13.68	12:05	13.61	-0.07
11:40	13.68	12:06	13.61	-0.07
11:41	13.68	12:07	13.62	-0.06
11:42	13.69	12:08	13.65	-0.04
11:43	13.69	12:09	13.65	-0.04
11:44	13.69	12:10	13.65	-0.04

水温変化量の平均値: -0.06 $^{\circ}\text{C}$

表2 水温観測値から求めた  $k$  の値

観測月日	入口水温 $\theta_0(^{\circ}\text{C})$	水温変化量 $\theta_L - \theta_0(^{\circ}\text{C})$	流量 $Q(\text{m}^3/\text{sec})$	$k(\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C})$
1969年10月1日	4.15	+0.04	27.3	0.0967
1970年5月28日	5.04	+0.05	25.0	0.144
1970年8月11日	13.68	-0.06	21.3	0.123

平均値  $\bar{k}=0.121(\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C})$

表3 隧道流下時の水温変化量計算値 ( $Q=20\text{ m}^3/\text{sec}$ )

$\theta_0(^{\circ}\text{C})$ $L(\text{km})$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
1	0.02	0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	-0.04
2	0.04	0.02	0.01	-0.01	-0.02	-0.04	-0.06	-0.07	-0.09
3	0.06	0.03	0.01	-0.01	-0.03	-0.06	-0.08	-0.10	-0.12
4	0.08	0.05	0.02	-0.02	-0.05	-0.08	-0.11	-0.14	-0.17
5	0.10	0.06	0.02	-0.02	-0.06	-0.10	-0.13	-0.17	-0.21
6	0.12	0.07	0.02	-0.02	-0.07	-0.12	-0.16	-0.21	-0.25
7	0.14	0.08	0.03	-0.03	-0.08	-0.14	-0.19	-0.24	-0.30
8	0.15	0.09	0.03	-0.03	-0.09	-0.15	-0.21	-0.27	-0.33
9	0.17	0.10	0.03	-0.03	-0.10	-0.17	-0.23	-0.30	-0.37
10	0.19	0.11	0.04	-0.04	-0.11	-0.19	-0.26	-0.33	-0.41

のようにあらわされる。入口水温  $\theta_0$ 、水温変化量  $\theta_L - \theta_0$ 、流量  $Q$ 、隧道の長さ  $L$  は観測による既知量であるから、表-1 の観測結果を用いて (13) 式から  $k$  の値をもとめれば、表-2 のようになり、平均値は

$$\bar{k}=0.121(\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C})$$

となる。上の値を (13) 式の  $k$  に代入すれば、周壁の岩盤が上川発電所隧道と同質で長さ  $L$  なる隧道中を流量  $Q$  なる水が流下する場合の水温変化量をもとめる次の実用式がえられる。

$$\theta_L - \theta_0 = (9.0 - \theta_0)(1 - e^{-0.700L/c\rho Q}) \quad (14)$$

ただし  $c=1(\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 、 $\rho=1(\text{g}/\text{cm}^3)$  で水温は  $^{\circ}\text{C}$ 、 $L$ 、 $Q$  は C.G.S. 系単位であらわすものとする。一例として (14) 式を用いて流量  $20\text{ m}^3/\text{sec}$  なる場合の隧道の長さ  $L$  に対する水温変化量  $\theta_L - \theta_0$  を計算すれば表-3 のようになる。表には入口水温  $\theta_0$  が 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18,  $20^{\circ}\text{C}$  の場合の  $L=1\sim 10(\text{km})$  における水温変化量を示した。変化量は一般に小さいが、入口水温が  $20^{\circ}\text{C}$  で隧道の長さが  $10\text{ km}$  のときには  $0.4^{\circ}\text{C}$  の温度降下を生ずる。流量が少ない流れでは温度変化量が大きく、また入口水温が  $9^{\circ}\text{C}$  以上のときは水温降下、 $9^{\circ}\text{C}$  以下のときは水温上昇となるが、これは (14) 式からも明らかである。

## 5. 結 語

以上隧道内を流下する流れの水温日変化について本論文で述べたことを要約すれば次のようになる。

1) 流下方向の乱流拡散を考慮した水温日変化の平均値および振幅、位相の変化をあらわす式をみちびき、条件 (6)、(10) 式が成立する場合には第1報でもとめた乱流を考慮しない式と同一式になることを示した。

2) 上川発電所隧道における観測値を代入すれば上述の条件式が満足され、従って同隧道内の流れでは水温日変化に乱流の影響はほとんどあらわれないことが分った。これは隧道入口、出口

における水温日変化の自記記録によっても確かめられた。しかし流路に曲線部分が多い隧道などで平均流速に対し乱流拡散係数が大きい流れでは乱流の影響があらわれるものとおもわれる。

3) 上川発電所隧道内における流水の水温変化量測定値から、周壁の岩盤が同質で長さ、流量の異なる隧道内の流れの水温変化量をもとめる式をみちびいた。この方法によれば、建設予定の隧道周辺の岩質が既知なる場合それと同質な岩盤を周壁とする既設隧道をモデルとして観測を行ない、その結果から建設予定隧道における水温変化量を予測することが出来る。

終りに本研究に対し絶えず有益な御助言をたまわった福島久雄教授、ならびに上川発電所隧道における観測に際し一方ならぬ御援助をいただいた北海道開発局旭川開発建設部、北海道電力株式会社の各位に厚く感謝の意を表す。

## 文 献

- 1) 川下研介：熱伝導論 (1944) p. 290.
- 2) 八鍬 功：隧道内を流下する流れの水温変化 (第1報) 水温日変化の平均値, 振巾, 位相の変化, 北大工学部研究報告第67号 (1973) 117—126.
- 3) 八鍬 功：隧道流下による水温変化, 忠別地区ダム貯溜水温調査解析報告書, 北海道開発局 (印刷中).
- 4) 柏村正和：塩水速度法による流達時間の測定ならびに考察, 忠別地区ダム貯溜水温調査解析報告書, 北海道開発局 (印刷中).
- 5) Taylor, Sir Geoffrey: The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe, Proc. Roy. Soc. A, 223 (1954) 446-468.