HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	4. 湧出管を上昇する温泉の温度低下について
Author(s)	須川, 明
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 9, 33-44
Issue Date	1962-03-06
DOI	10.14943/gbhu.9.33
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/13835
Type	bulletin (article)
File Information	9_p33-44.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

4. 湧出管を上昇する温泉の温度低下について

須　川　　明
(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和36年8月受理 —

I. まえがき

温泉が湧出している場合，一般に湧出管の底での温度と湧出口での温度とは異るが，それは温泉が地表に達するまでの間に冷却されるからで，それには次の2通りの冷却の仕方が考えられる。

(1) 温泉が上昇する途中で，熱を周囲の地層に与えるために冷却する。

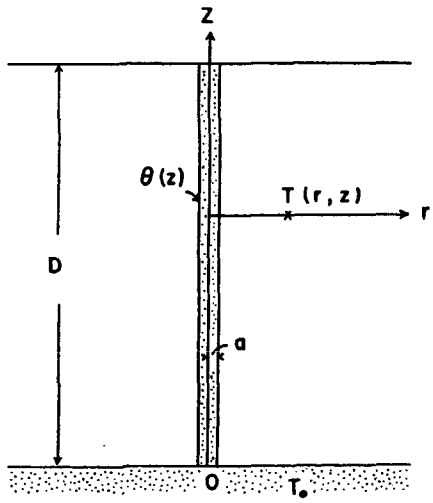
(2) 湧出管が底まで達していない場合には，往々地下水が途中から混入してくることがあり，そのために冷却する。

温泉地において湧出口と底での温度に著しい差があることを屢々経験するが，これは明らかに途中で地下混水が混入している場合で，筆者はその凡その混入量を求めてみた。

又(1)の冷却については，さきに瀬野[1]により研究されているが，筆者は他の方法によりこれを求めてみた。

II. 途中で地下水の混入がない場合の冷却の式

第1図のように深さ D のところに水平に無限に拡がる温度 T_0 の温泉があり，それに垂直に立つ半径 a の湧出管によって地表に温泉を湧出している場合，図のように原点，z 軸を又湧出管の半径方向に r 軸をとると，地下の任意の点 (r, z) での地温 T は次式のように表される。



第1図 温泉と湧出管
Fig. 1. Hot spring and pipe.

$$\frac{T}{T_0} = 1 - \frac{\lambda z}{1+\lambda D} + 2\sum_{s=1}^{\infty} C_s B_s \frac{K_0\left(\frac{\mu_s}{D} r\right)}{K_0\left(\frac{\mu_s}{D} a\right)} \sin \frac{\mu_s}{D} z \quad (1)$$ [2]

1) 瀬野錦蔵： 温泉湧出導管中における温度垂直分布の近似解．地球物理，第5巻，第3号 (昭和16年12月).
2) 須川　明： 湧出管中を上昇する温泉が附近の1m深地温に及ぼす影響．北大．地球物理学研究報告，第9号 (昭和37年).

ここで

$$\lambda = \frac{h_c}{k}$$

h_c; Newton の冷却の常数

k; 地層の熱伝導度

Q; 湧 出 量

$K_0\left(\frac{\mu_s}{D} r\right)$; 0次の第2種 Modified Bessel 函数

又

$$C_s = \frac{1}{1+\frac{\cos^2 \mu_s}{\lambda D}} \quad {}^{3)} \tag{2}$$

$$\tan \mu_s = -\frac{\mu_s}{\lambda D} \quad {}^{4)} \tag{3}$$

$$B_s = \frac{\lambda D}{1+\lambda D}\left[\frac{\sin \mu_s - \mu_s \cos \mu_s}{\mu_s^2} - \frac{4\pi a k}{Q} \sum_{m=1}^{\infty} C_m \frac{K_1\left(\frac{\mu_m}{D} a\right)}{K_0\left(\frac{\mu_m}{D} a\right)} \times \frac{\sin \mu_m - \mu_m \cos \mu_m}{\mu_m^2}\left\{\frac{1-\cos \mu_s}{\mu_s} - \frac{\mu_s}{\mu_s^2 - \mu_m^2}\left(1 - \cos \mu_s \cos \mu_m - \frac{\mu_m}{\mu_s} \sin \mu_s \sin \mu_m\right)\right\}\right] \quad {}^{5)} \tag{4}$$

により，C_s, μ_s, B_s は与えられる。$K_1\left(\frac{\mu_m}{D} a\right)$ は1次の第2種 Modified Bessel 函数である。

湧出管中の温泉の温度を θ とすると，θ[6] は (1) において $r=a$ とおいた時の T の値で，次のように z のみの函数として表される。

$$\frac{\theta}{T_0} = 1 - \frac{\lambda z}{1+\lambda D} + 2\sum_{s=1}^{\infty} C_s B_s \sin \frac{\mu_s}{D} z \tag{5}$$

III. 数 値 計 算

前節の (5) より θ/T_0 の値を求めてみる。この際用いた各常数は

$$\lambda = \frac{h_c}{k} = 0.15\ \mathrm{m}^{-1} \quad {}^{7)}$$

$$k = 1.7\times10^{-3}\ \text{C.G.S.}\ \ (\text{凝灰岩})\ {}^{8)}$$

$$a = 5\ \mathrm{cm}$$

---

3), 4), 5), 6): 2) に同じ.

7) 湯原浩三: 地下1m深の地温分布から地下の熱源を理論的に推定する一方法. 物理探鉱, 第8巻, 第1号 (昭和30年3月).

8) 理科年表より.

$D = 50,\ 100,\ 200,\ 300,\ 500$ m

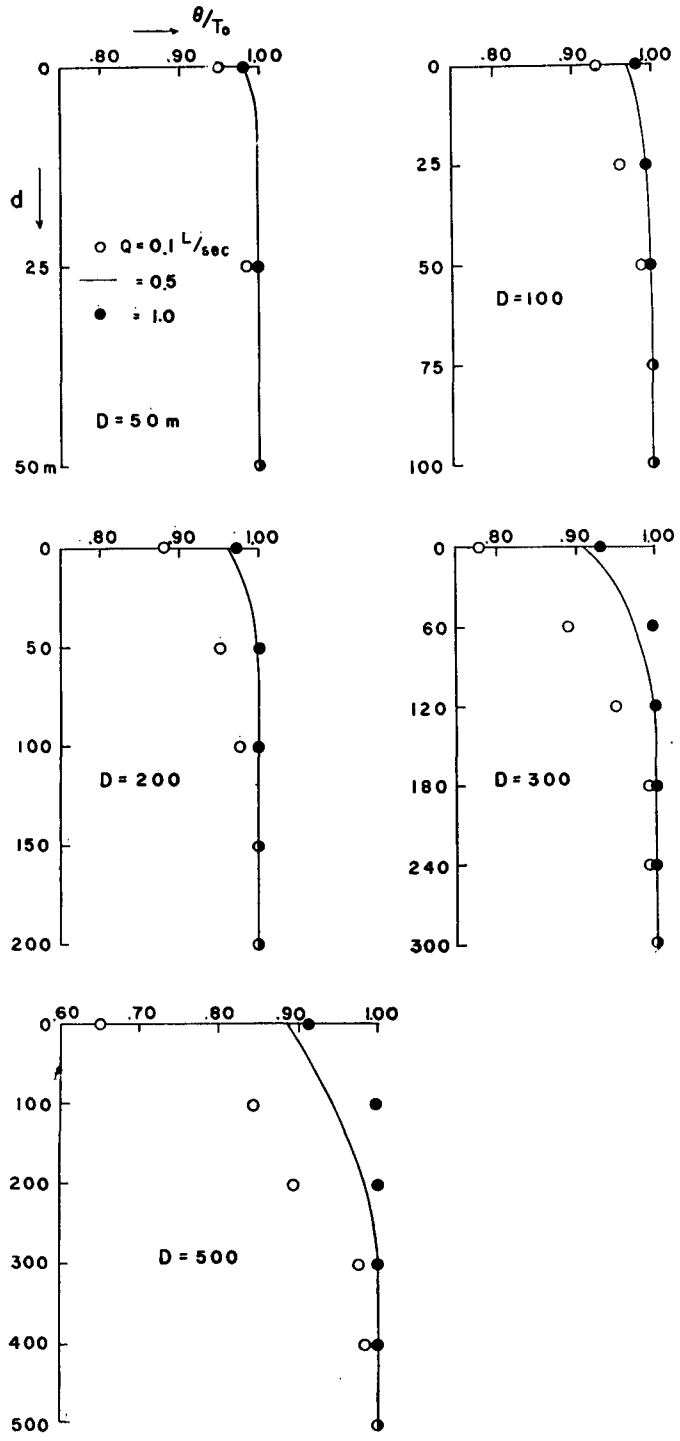
$Q = 0.1,\ 0.5,\ 1.0,\ 2.0,\ 5.0$ L/sec

であり，第**1**表に θ/T_0 と z との関係を示し，第**2**図はそのうちの 2，3 の例である。尚第**2**図の縦軸には湧出口からの深さ d をとる。

第**2**図より明らかなように，湧出量の如何にかかわらず θ/T_0 の値は地表近くなるに従って急に減少する。$Q=1.0$ L/sec (第**2**図の黒丸) では地表近くまで θ/T_0 の値は殆んど 1.00 に等しく，地表近くになって急に減少する。即ち温泉は地表近くまであまり冷却されずに上昇してく

第 1 表 θ/T_0 の 値

D (m)	Q (L/s)	z (m)				
		$D/4$	$D/2$	$3D/4$	D	
50	0.1		0.98		0.95	
	0.5		1.00		0.98	
	1.0		1.00		0.98	
	2.0		1.00		0.98	
	5.0		1.00		0.98	
100	0.1	1.00	0.98	0.96	0.93	
	0.5	1.00	0.99	0.99	0.97	
	1.0	1.00	1.00	0.99	0.98	
	2.0	1.00	1.00	0.99	0.98	
	5.0	1.00	1.00	0.99	0.98	
200	0.1	1.00	0.97	0.95	0.88	
	0.5	1.00	1.00	1.00	0.96	
	1.0	1.00	1.00	1.00	0.97	
	2.0	1.00	1.00	1.00	0.97	
	5.0	1.00	1.00	1.00	0.97	
		z (m)				
		$D/5$	$2D/5$	$3D/5$	$4D/5$	D
300	0.1	0.99	0.99	0.95	0.89	0.78
	0.5	1.00	1.00	0.99	0.99	0.91
	1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93
	2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93
	5.0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94
500	0.1	0.98	0.98	0.89	0.84	0.65
	0.5	1.00	1.00	0.98	0.94	0.89
	1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91
	2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92
	5.0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93



第 2 図 θ/T_0 と d との関係

Fig. 2. Relation between θ/T_0 and d.

るが，地表近くになって盛に冷却が行なわれ，温度は急激に減少する。

IV. $(\theta_0/T_0)_{obs.}$ と $(\theta_0/T_0)_{cal.}$ との比較

$(\theta_0/T_0)_{obs.}$ は湧出口で測った温泉の温度 θ_0 と孔底で測った温度 T_0 との比であり，$(\theta_0/T_0)_{cal.}$ は(5)で $z=D$ とおいて求められる θ/T_0 の値である。

今迄述べてきた温度については，その基準を気温にとり，これを0として居る故 $(\theta_0/T_0)_{obs.}$ の値を求めるには測定した湧出温度，孔底温度がそのまま θ_0, T_0 とはならず，各々の測定温度より気温を差し引いた値を用いなければならない。次に気温として如何なる値をとるべきかについて考えてみる。

先きに任意の点の地温 T を求めるにあたり，筆者は気温は時間的に変化せず，常に0を保つものと仮定した。今気温 v の変化がどの深さまで及ぶかをみるために，気温の年週変化を簡単に正弦函数で表し，

$$v = v_m + A\sin(\omega t - \varepsilon) \tag{6}$$

t: 時　間

v_m: v の平均値

A: 気温の年週変化の振幅

$\omega = 2\pi/365\ \mathrm{day}^{-1}$

とおくと，(6)の第2項による任意の深さ x での地温変化 v_x も又正弦函数で次のように表される。

$$v_x = Ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}x}\sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}x - \varepsilon\right)^{9)} \tag{7}$$

κ: 土の熱拡散率

v_x の振幅は $Ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}x}$ となり，$\kappa=3.3\times10^{-3}$ C.G.S.[10] を用いて x と $e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}x}$ の値との関係を求めると第**2**表のようになる。

第**2**表より明らかなように，気温の年週変化が及ぶ深さは，ごく浅い部分に限られ，それより深いところでの地温を考えるときは気温として変化を表す項((6)の第2項)は無視し，$v=v_m$ とおいて差し支えないことになる。この v_m は時間的に変らない一定値で，先にあげた気温は時間とともに変らず，一定であるとの仮定をも満足する。従って今後一定の気温の値としては，その場所での全年平均気温を用いることにする。

第2表 x と $e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}x}$ との関係

x (m)	$e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}x}$
1	0.58
2	0.33
3	0.19
4	0.11
5	0.06

9) Carslaw and Jaeger: Conduction of Heat in Solid (2nd Edition) 1959.

10) 9)に同じ.

北海道の2, 3の温泉地附近の都市の全年平均気温を第**3**表に示し，その結果を用いて $(\theta_0/T_0)_{obs.}$ と $(\theta_0/T_0)_{cal.}$ との比較を第**4**表に示す。尚各湧出管の半径は2 inch で約5 cmである。

第3表 各地の全年平均気温

地名	全年平均気温	適要する温泉地名
帯広	5.6°C [11]	十勝川温泉
倶知安	6.2°C [12]	ニセコ温泉
函館	8.5°C [13]	函館湯の川温泉

第**4**表で $(\theta_0/T_0)_{obs.}<(\theta_0/T_0)_{cal.}$ の泉源は温泉が上昇する間に熱伝導で周囲の地層に熱を奪はれて温度が低下すること以外に，尚他の原因で冷却が行なわれていることを示すもので，それはまえがき(2)にて示した湧出管が孔底まで達しなくて，温泉が上昇する途中で地下水が混

第4表 $(\theta_0/T_0)_{obs.}$ と $(\theta_0/T_0)_{cal.}$ との値

測定年月日(昭和年月日)	温泉地名	所有者名	深さ (m)	湧出量 (L/s)	孔底温度 (°C)	湧出口温度 (°C)	T_0 (°C)	θ_0 (°C)	$(\theta_0/T_0)_{obs.}$	$(\theta_0/T_0)_{cal.}$
29. 10. 9	十勝川温泉[13]	雨宮旅館	178	2.9	50.0	43.8	44.4	38.2	0.86	0.97* 1
30. 8. 7～8	〃 [14]	観月ホテル	200	1.0	46.2	43.5	40.6	37.9	0.93	0.97
〃	〃	笹井ホテル	84	7.6	45.4	45.4	39.8	39.8	1.00	0.98* 2
〃	〃	中津川氏	140	4.6	40.4	39.7	34.8	34.1	0.98	0.98* 3
〃	〃	十勝川ホテル	162	2.2	45.1	44.3	39.5	38.7	0.98	0.97* 4
〃	〃	林氏	180	8.1	44.2	41.1	38.6	35.5	0.92	0.97* 5
〃	〃	音更町営	133	5.7	34.2	31.0	28.6	25.4	0.89	0.98* 6
34. 8. 27	ニセコ温泉[15]	観光ホテル	65	0.9	56.5	53.0	50.3	46.8	0.93	0.98* 7
〃	〃	紅葉谷温泉	63	1.1	54.1	53.1	47.9	46.9	0.98	0.98* 8
35. 8. 31 ～9. 2	函館湯の川[16]	石塚氏	65	0.2	52.3	47.0	43.8	38.5	0.88	0.95* 9
〃	〃	中野氏	61	0.7	54.0	49.5	45.5	41.0	0.90	0.98*10
〃	〃	中野氏	56	0.6	56.8	50.8	48.3	42.3	0.88	0.98*11

注意： $(\theta_0/T_0)_{cal}$ は次のような深さ，湧出量のときの値をあげた。

	*1	*2	*3	*4	*5	*6	*7	*8	*9	*10	*11
D (m)	200	100	100	200	200	100	50	50	50	50	50
Q (L/s)	3.0	5.0	5.0	2.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0.1	0.5	0.5

11) 8)に同じ.

12) 倶知安測候所の資料より.

13) 8)に同じ.

14) 福富孝治： 十勝川温泉について. 北海道衛生部北海道温泉調査報告, 第1号 (昭和30年3月).

15) 福富孝治・須川明・藤木忠美：十勝川温泉の地球物理班調査報告. 北海道衛生部環境衛生に関する報告, 第11号 (昭和31年3月).

16) 藤木忠美・須川明・梶原昌弘・大谷清隆： ニセコ温泉群の調査 (地球理物班) 北海道衛生部環境衛生に関する報告, 第18号 (昭和36年3月).

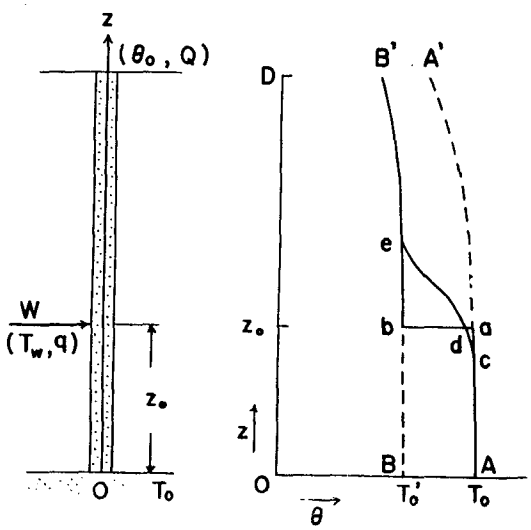
17) 福富孝治・藤木忠美・須川明・大谷清隆・和田昭夫： 函館市湯の川. 谷地頭温泉の調査(地球物理班)(未発表).

入するためと考えられる。

V. 途中で地下水が混入する場合の冷却

途中で地下水が混入しない時は，**III** で求めた値，即ち第 **3** 図の AA′ に沿って温度は低下する。然し $z=z_0$ で地下水 W の混入がある場合には，同図の A c d e B′ に沿って温度は低下する。但し c d e 間の温度の低下の仕方は，混入する地下水の量 q，湧出口での湧出量 Q，孔底の温度 T_0，などによって変るものである。

今 A c d e B′ なる温度低下の過程を A c a d b e B′ に沿って温度が変ったものとおきかえる。ここで a, b は各々 AA′ BB′ の $z=z_0$ における点である。即ち A (T_0) より a (θ_1) までは孔底温度 T_0，湧出量 $Q-q$ の場合の温度変化 AA′ に沿い，$z=z_0$ で地下水が混入するため，そこで温度が a(θ_1) より b(θ_2) にさがり，それからは孔底温度 T_0'，湧出量 Q の場合の温度変化 BB′ に従って温度は低下するものと考える。ここで T_0' の値は，深さ D，湧出量 Q がきまれば $(\theta_0/T_0)_{\mathrm{cal.}}=m$ の値が (5) より求まり，m と測定した湧出口での温度 θ_0 より



第3図 地下水の混入がある場合の泉温の垂直分布

Fig. 3. Vertical distribution of temperature of ascending hot water that is mix with ground water.

$$\frac{\theta_0}{m}=T_0' \tag{8}$$

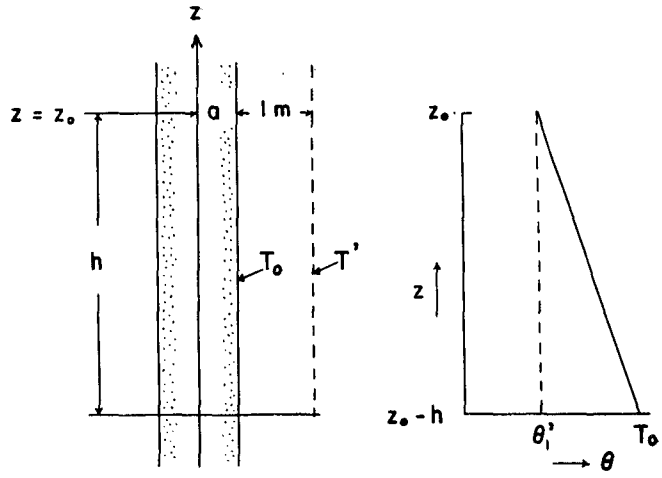
により求まる。即ち孔底温度 T_0'，深さ D，湧出量 Q の場合に，途中で地下水の混入がなければ，湧出口温度は上の測定値 θ_0 に一致し，θ_2 はその温度変化を示す曲線の $z=z_0$ における θ の値である。

地下水の混入量を求める前に，実際の温度分布の $z=z_0$ における値 d(θ_1') と a(θ_1) との差 $\theta_1-\theta_1'$ がどの程度の大きさになるかを求めてみる。

$z=z_0$ で a となるべきを d となった理由について先に述べる。a, d も地下水の混入前の温度を示す故，混入した地下水の直接の影響は受けない。然し混入が行なわれた結果，$z>z_0$ での θ の値は AA′ に沿う値より小さくなる。従って $z>z_0$ での管壁附近の地温は，AA′ に沿って θ が分布した時よりも低下する。$z>z_0$ での地温の低下が $z<z_0$ での地温にも及んで，混入がない時に示す地温よりも小さい値を示すことになる。従って $z<z_0$ における $r=a$ (管壁) での温度勾配が混入がない時よりも大きくなり，周囲の地層に与えられる熱量も大きくなる。即

ち冷却が盛に行なわれることになり，ｃａに沿って温度が低下すべきが，ｃｄと変ってくるのである。

一般に $\theta_1<T_0$ 従って $T_0-\theta_1'>\theta_1-\theta_1'$ そこで $T_0-\theta_1'$ が無視し得るような値ならば，$\theta_1-\theta_1'$ も当然無視出来る値である。次に $\theta_1-\theta_1'$ の代りに $T_0-\theta_1'$ の極く凡その値を求めてみる。



第 4 図 $z_0\geq z\geq z_0-h$ での地温及び泉温の垂直分布

Fig. 4. Vertical distribution of temperature of ground and ascending hot water at $z_0\geq z\geq z_0-h$.

ｃａ間で周囲の地層に与えられる熱量を求めるために，第 **4** 図のように壁面の温度を T_0 として実際より大きくとり，又 $r=105$ cm における地温は孔底温度 T_0', 深さ D, 湧出量 Q の場合に示す地温 T' を用い，実際よりも小さくとる。従って第 **4** 図の左図で示される地温分布による各点での温度勾配は実際より大きくなる。

尚混入前の湧出量は Q でなく $Q-q$ を考えねばならぬが，第 **1** 表より $Q-q\geq 1$ L/s 又は混入がある深さ以上で行なわれるときは $Q-q\geqq 0.5$ L/s の場合には，Q でも $Q-q$ でも泉温の分布は殆んど等しく，従って地温の分布も等しくなる。それ故後に述べる方法で q を求めて $Q-q$ を計算し，それが上の条件を満せば，上にあげた T' がそのまま用いてよいことになる。

今 $z>z_0$ における地温の低下が $z=z-h$ まで及ぶものとし，先に述べた $r=5$ cm で $T=T_0$, $r=105$ cm で $T=T'$ なる温度分布の時，$z_0-h\leq z\leq z_0$ での周囲の地層に与えられる熱量 H を求めてみる。簡単のために $\dfrac{T_0-T'}{100}$ を以て $r=55$ cm における温度勾配とおくが，この値は第 **4** 図での $r=55$ cm における $\dfrac{\partial T}{\partial r}$ とは異なる値である。然し $T_0-\theta_1'$ の概算値を求める時は $\left(\dfrac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=55\,\mathrm{cm}}$ の代りに $\dfrac{T_0-T'}{100}$ とおいても充分である。従って H は

$$H=\int_{z_0-h}^{z_0} 2\pi\cdot 55\cdot k\,\frac{T_0-T'}{100}\,dz$$

$$H = 1.1\pi k\int_{z_0-h}^{z_0}\left\{T_0-\left(T_0'-\frac{\lambda z}{1+\lambda D}T_0'+2\sum_{s=1}^{\infty}C_sB_s\frac{K_0\left(\frac{\mu_s}{D}1.05\right)}{K_0\left(\frac{\mu_s}{D}0.05\right)}\sin\frac{\mu_s}{D}z\right)\right\}dz \tag{9}$$

k, λ, C_s, B_s, μ_s, K_0 は **II** におけると同じ。(9) を積分すると

$$H = 1.1\pi kT_0\left[h\left(1-\frac{T_0'}{T_0}\right)+h\frac{\lambda\left(z_0-\frac{h}{2}\right)}{1+\lambda D}\frac{T_0'}{T_0}\right.$$
$$\left.-4D\frac{T_0'}{T_0}\sum_{s=1}^{\infty}\frac{C_sB_s}{\mu_s}\frac{K_0\left(\frac{\mu_s}{D}1.05\right)}{K_0\left(\frac{\mu_s}{D}0.05\right)}\sin\frac{\mu_s}{D}\left(z_0-\frac{h}{2}\right)\sin\frac{\mu_s}{D}\frac{h}{2}\right] \tag{10}$$

次に第**4**図の右図のように $z_0-h\leq z\leq z_0$ での θ の分布を簡単のため直線と考えると，その部分での熱収支から次式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}\rho\cdot c\cdot Q(T_0-\theta_1') = H \tag{11}$$

ρ, c は各々温泉の密度，比熱を表す。

$\rho\fallingdotseq 1$, $c\fallingdotseq 1$ とし，(10) を (11) に代入すると

$$\frac{T_0-\theta_1'}{T_0} = \frac{2.2\pi k}{Q}\left[h\left(1-\frac{T_0'}{T_0}\right)+h\frac{\lambda\left(z_0-\frac{h}{2}\right)}{1+\lambda D}\frac{T_0'}{T_0}\right.$$
$$\left.-4D\frac{T_0'}{T_0}\sum_{s=1}^{\infty}\frac{C_sB_s}{\mu_s}\frac{K_0\left(\frac{\mu_s}{D}1.05\right)}{K_0\left(\frac{\mu_s}{D}0.05\right)}\sin\frac{\mu_s}{D}\left(z_0-\frac{h}{2}\right)\sin\frac{h}{2}\frac{\mu_s}{D}\right] \tag{12}$$

h の値は判明しないが $(T_0-\theta_1')/T_0$ の概算値を求めることが目的である故，一応 $h=5$ m とおき，又 $k=1.7\times10^{-3}$ C.G.S. とすると，$D=200$ m，$Q=1$ L/s の場合の (12) は

$$\frac{T_0-\theta_1'}{T_0} = 11.8\times10^{-3}\left[\frac{1}{2}\left(1-\frac{T_0'}{T_0}\right)+\frac{1}{2}\frac{\lambda(z_0-2.5)}{1+200\lambda}\frac{T_0'}{T_0}\right.$$
$$\left.-80\frac{T_0'}{T_0}\sum_{s=1}^{\infty}\frac{C_sB_s}{\mu_s}\frac{K_0\left(\frac{1.05}{200}\mu_s\right)}{K_0\left(\frac{0.05}{200}\mu_s\right)}\sin\frac{(z_0-2.5)}{200}\mu_s\sin\frac{2.5}{200}\mu_s\right] \tag{13}$$

十勝川温泉観月ホテルの泉源の $(T_0-\theta_1')/T_0$ の値がどの程度になるかを求めてみる。

第**3**表より

$D=200$ m，$Q=1$ L/s，$T_0=40.6$℃，$\theta_0=37.9$℃，$(\theta_0/T_0)_{\text{cal.}}=0.97$ 又 z_0 の値は測定されていないので，$z_0=50$，100，150 m の場合について $(T_0-\theta_1')/T_0$ の値を (13) より求めると第**5**表のようになる。尚$(Q-q)$ の値がわからないが，一応 (13) が適用出来るものとした。又この場合の T_0'/T_0 の値は (8) より

$$T_0' = \frac{37.9}{0.97} = 39.1°\mathrm{C}$$

$$\frac{T_0'}{T_0} = \frac{39.1}{40.6} = 0.96$$

である。

第5表 $(T_0-\theta_1')/T_0$ の値

z_0 (m)	$(T_0-\theta_1')/T_0$
50	0.9×10^{-3}
100	1.5×10^{-3}
150	2.2×10^{-3}

第5表より $(T_0-\theta_1')/T_0$ の値は非常に小さく，従って $(\theta_1-\theta_1')/T_0$ も又非常に小さい値であることがわかる。即ち θ_1 と θ_1' とは殆んど等しい値として取り扱って差し支えないことになり，今後 θ_1' の代りに θ_1 の値を用いることにする。

$z=z_0$ にて混入する地下水の量 q を次に求める。

z_0 の大体の値が推定出来 D と Q とがきまれば $\left(\frac{\theta_2}{T_0'}\right)_{\mathrm{cal.}} \equiv \left(\frac{\theta(z_0)}{T_0'}\right)_{\mathrm{cal.}} = n$ の値が (5) よりきまり

$$\theta_2 = nT_0' \tag{14}$$

(8) を (14) に代入すると

$$\theta_2 = \frac{n}{m}\theta_0 \tag{15}$$

で θ_0 と θ_2 の関係が求まる。

混入する地下水の温度を T_W とすると，混合前後の熱収支より

$$qT_W+(Q-q)\theta_1 = Q\theta_2 \tag{16}$$

$$q = \frac{\theta_1-\theta_2}{\theta_1-T_W}Q \tag{17}$$

(15) を (17) に代入すると

$$q = \frac{\theta_1-\frac{n}{m}\theta_0}{\theta_1-T_W}Q \tag{18}$$

孔底からの湧出量 $(Q-q)$ がわからなければ θ_1 の値はきまらないので，次のようにして近似的に q の値を求める。

(18) で $\theta_1=T_0$ とおき求めた混入量を q_1 とすると，孔底からの湧出量は $(Q-q_1)$ となる。湧出量 $(Q-q_1)$ がわかれば，$z=z_0$ での $\left(\frac{\theta_1}{T_0}\right)_{\mathrm{cal.}} \equiv \left(\frac{\theta(z_0)}{T_0}\right)_{\mathrm{cal.}} = n'$ の値が (5) から求まり，

$$\theta_1 = n'T_0 \tag{19}$$

となる。(19) を再び (18) に代入し，求めた混入量を q_2 とし再び上の操作を繰り返す。以上の操作を無限に繰り返せば，真の q の値に無限に近づく筈である。然し孔底からの湧出量が大きい程繰り返す回数は少なくて済む。

混入がある深さ以上で行なわれるときには $Q-q \geq 1$ L/s の場合は第2図より明らかなように

$$\theta_1 \fallingdotseq T_0 \tag{20}$$

又 $Q>Q-q\geqq 1$ L/s であるから (20) が成り立つときには θ_2 も (8) より

$$\theta_2 \fallingdotseq T'_0 = \frac{\theta_0}{m} \tag{21}$$

となる。(20), (21) を (17) に代入すると

$$q = \frac{T_0 - \dfrac{\theta_0}{m}}{T_0 - T_W} Q \tag{22}$$

地下水の混入量は (18) 又は (22) に依って求めることが出来る。

VI. 地下水混入量の推定

十勝川温泉雨宮旋館の泉源での地下水混入量を求めてみる。第 **4** 表より

$T_0 = 44.4$°C

$\theta_0 = 38.2$°C

$Q = 2.9$ L/sec

$D = 178$ m

$m = 0.97$

又附近の地下水温[18] は 9.3°C 故

$T_W = 9.3 - 5.6 = 3.7$°C　　(5.6°C は帯広の全年平均気温)

z_0 の測定値がないが，$z_0 < \frac{3}{4}D$ と仮定すると，第 **2** 図より $\theta_1 = T_0$ とおくことが出来，(22) から

$$q = \frac{44.4 - \dfrac{38.2}{0.97}}{44.4 - 3.7} \times 2.9$$

$$\fallingdotseq 0.4 \text{ L/sec}$$

を得る。尚

$$Q - q = 2.9 - 0.4 = 2.5 \text{ L/s} > 1 \text{ L/s}$$

で，この泉源は (22) を用いるための条件を充分満している。

VII. あ と が き

上昇する温泉は次の 2 通りの仕方で冷却される。

1) 周囲の地層に熱を与えることによる冷却。

---

18) 14) に同じ.

2) 途中で地下水の混入があるための冷却。

温泉が(1), (2)の両方の作用で，冷却される場合は，第3図のように混入前後の温度低下は，AA′，BB′に沿って表され，混入場所附近での温度低下はｃｄｅに沿って示される。若し(2)の冷却がなく，(1)のみの場合の温度低下は，第2図で示すように地表に近い程冷却が盛に行なわれ，温度の低下も著しい。特に湧出量が1 L/sec以上の場合には，地表近くまで殆んど温度は一定で，地表近くになって急激に低下する。

尚途中で混入するものを，ここでは地下水と限ったが，他の温泉が途中から混入してくることも考えられ，今後そのような場合の問題も取り扱ってみたいと思う。

終りに終始ご指導いただいた福富教授に，又種々ご助言いただいた松沢教授に厚くお礼申しあげる。尚本研究の費用の一部は文部省科学研究費によるものである。

4. On the Cooling of the Ascending Hot Water in the Vertical Pipe.

By Akira SUGAWA
(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

In the vertical pipe, temperature of the ascending hot water at the bottom of the pipe and the orifice are different. The ascending hot water is generally cooled by the next processes, (1) conducting heat to the rock around the pipe from the ascending hot water, (2) mixing with the ground water on the way.

In the case that the cooling is made by (1) only, a value of $\left(-\frac{d\theta}{d\mathrm{d}}\right)$ at the upper part of the pipe is larger than a value at lower part, where θ is the temperature of the ascending hot water and d is the downward distance from the orifice.

In the case that the ascending hot water mix with ground water at $z=z_0$, θ before the mixture is shown by $\widehat{\mathrm{Ac}}$ in a part of $\widehat{\mathrm{AA'}}$, and θ after the mixture is shown by $\widehat{\mathrm{eB'}}$ in a part of $\widehat{\mathrm{BB'}}$ as Fig. 3. $\widehat{\mathrm{AA'}}$ and $\widehat{\mathrm{BB'}}$ are the curves gained in the case that the ascending hot water do not mix with the ground water, and the discharge rate is $Q-q$ and Q, bottom temperature of the pipe is T_0 and T_0' respectively. In this part, the cooling is made by the heat conduction to the rock. And the temperature near $z=z_0$ is shown by the curve $\widehat{\mathrm{cde}}$ as Fig. 3. It is due to the mixture with ground water and the heat conduction to the rock.