

地球物理

第 5 卷 第 3 號

昭和 16 年 12 月

論 說

引 湯 の 研 究

I. 引 湯 の 冷 却

理學博士 野 滿 隆 治

理 學 士 瀨 野 錦 藏

1. 緒 言

温泉は湧出地で其のまゝ利用出来れば之に超したことは無いが、土地の状況その他で可なり遠方まで引湯をせねばならぬことも往々にしてある。かかる場合に如何にすれば最も冷却が少く成分の變化も僅少ならしめ得るか等引湯に就いても研究を要する問題が少くない。

舊別府市内に於ては、海岸近くでは温泉水頭が地表より高くボーリングにより到る處に自噴温泉を得らるゝけれども、海岸を遠ざかるに従ひ温泉水頭は地表の上昇に伴はず（濱脇方面は海岸近くでさへ）、温泉水は地上まで湧出することが出来ずポンプによつて吸上げて居る。ポンプ使用は温泉水頭が地下 5~7 米程度のものまでは行はれて居るが、更に山手になれば温泉水頭は地下 10 米以深にもなりポンプ工事も簡単でなくなるから温泉掘鑿も實施されて居ない。之を補ふ爲山地の地獄地帯より引湯をして居る。我火山温泉研究所は文部省科學研究費を受け阿蘇に研究用温泉を掘鑿すると共に、別府には昭和15年4月研究所構内に引湯を行ひ、夫れと市内多數の引湯を利用して引湯研究をもすることになった。

山地より市内への引湯は個人や會社によつて行はれ、かなりの數に上つて居る。現在で

は次の如きものがある。

- | | |
|-------------------|-----------|
| 1. 別府市経営堀田温泉(計畫中) | 6. 山手温泉會社 |
| 2. 別府海軍病院* | 7. 國武會社* |
| 3. 奥村虎太郎所有 | 8. 白瀧温泉 |
| 4. 麻生商店 | 9. 海地獄* |
| 5. ケーブル遊園地* | |

此の内*印の源泉は湧出温泉であるが、他は總て山腹にボーリングをなし、之より高熱蒸氣の噴出を見、夫れに山水を導入して、謂はゞ蒸氣わかしの湯とでも云ふべきものを作つて居る。我研究所内の引湯は研究上最も都合よき奥村虎太郎氏所有の同種温泉から分けたものである。この泉源は二個の噴汽孔より熱源を得て居るが、 74.4°C の高溫水を一日六千石近く供給し得るので實に大きな量といへやう。夫れによつて配當される引湯全體の分布は第1圖の通りである。

山地より高溫水を市街地まで引湯するには少くとも2軒遠きは3.4軒にも及ぶ長距離を流動せしむるので、保温施設にはかなりの考慮が拂はれて居るけれども、勿論其の間に漸次冷却を伴ふのは當然である。引湯研究の手始めとして我々は先づこの冷却法則を明かにする爲、一方では理論的考察により冷却式を作り、他方研究所引湯に就きては浴槽口と途中構内二ヶ所に設けた測定用マンホールの處と都合三ヶ所の溫度を自記測溫計にて絶えず記録せしむると共に、之と同系に屬する奥村氏配當引湯全部につき溫度及び流出量の一齊調査をも行つた。夫れ等の觀測値による理論式の檢證や最も經濟的な導管の敷設深度等に關する研究結果を茲に報告する。

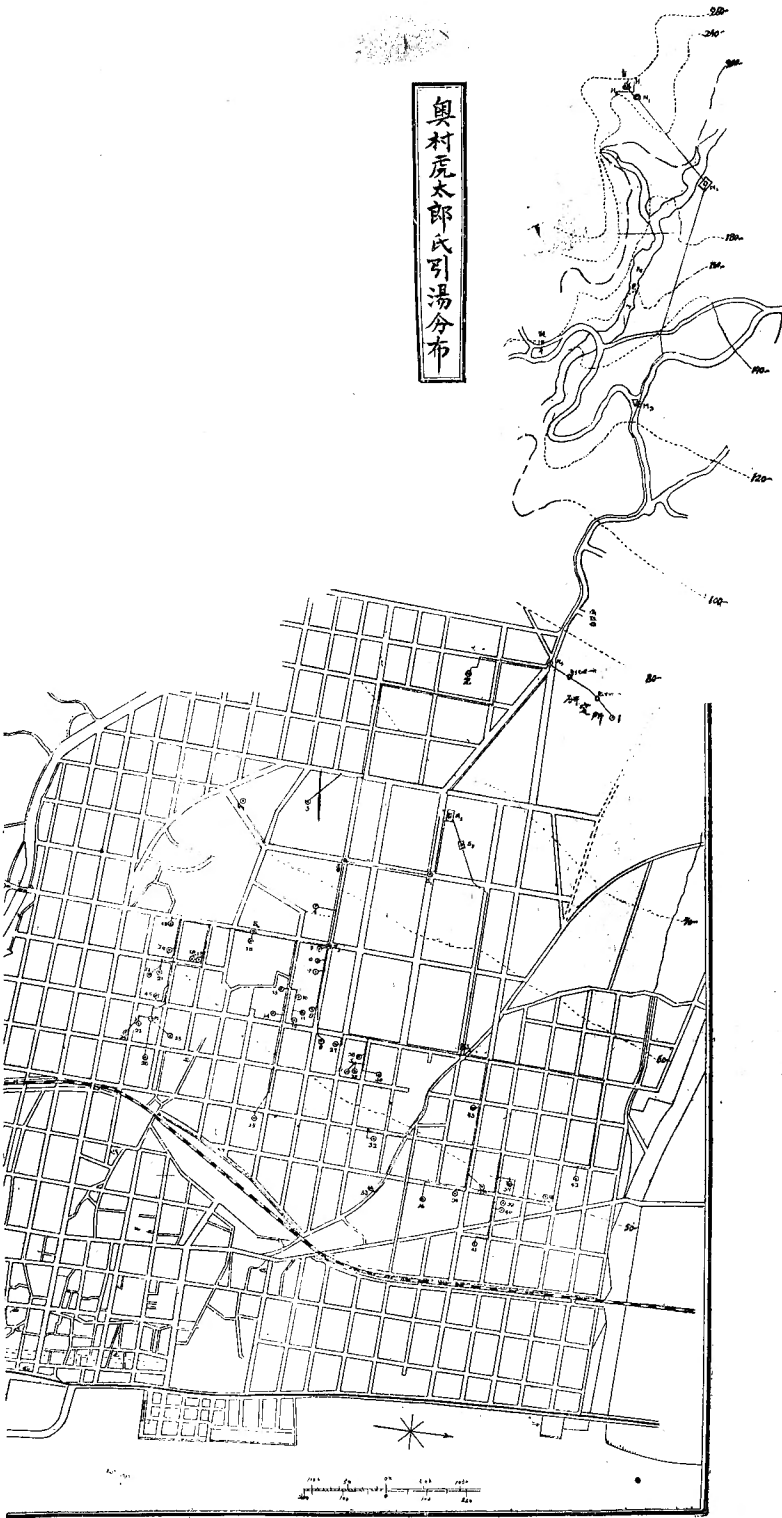
2. 引湯導管の冷却法則

我々は嘗て垂直ボーリング管中に於ける湧出高溫水の冷却機構⁽¹⁾を概説したことがあるが、冷却度は導管の太さ、長さ、湧出量、周圍の熱傳導率等によつて定まるのである。引湯の冷却も大體同様の諸要素によつて左右せらるべきは云ふまでもないが、只異なる處は引湯にあつては地表近くで略ほ夫れに平行な導管内を高溫水が流動するので、其の冷却に及ぼす氣溫の影響が比較的顯著となることである。

(1) 野滿、瀬野：別府温泉と潮汐附氣壓效果、本誌第2卷(昭和13年)1頁

奥村虎太郎氏引湯分布

第 1 圖 奥村虎太郎氏引湯分布圖



奥村氏の引湯に於ける保温施設は數個處の觀察によると

- 土管の太さ： 直径 1.6~5 寸 (=5~15cm), 京大研究所のは 7.6 cm.
- 地下埋設深度： 60cm~1.5m, 研究所内は約 1m.
- 土管の外部： 約 20cm ほどの厚さに珪藻土混合物を塗りつける(第2圖参照)



第2圖 引湯導管埋設工事實況 (昭和15年4月京大研究所敷地内)

かゝる施設によつても尚ほ相當に熱の放出があり地溫從つて氣溫の影響を受ける。その具體的實例として、冬季積雪の場合には導管に沿うて雪がはやく解けることがあり、又降雨後土壤の乾きが矢張り導管に沿ひ速いことが認められる。かくて導管の到る處同様に地溫の影響を受くべきは明かである。而して其の冷却作用は管の上部と下部とで異なることも察するに難くないが、其點まで考慮した嚴密な解決は暫く措き、冷却の實效値を見るには管周圍の平均値を考へて行けばよい。然るときは熱の授受に關して次の式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} qdT &= 2\pi r_0 \cdot k \frac{\partial T}{\partial r} dl \\ \text{或は } dT &= k \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \frac{2\pi r_0}{q} dl \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

こゝに q =溫水流量, r_0 =導管半径, k =周圍の熱傳導率,

l =導管の長さ, $-dT$ =冷却溫度, $-\frac{\partial T}{\partial r}$ =導管側壁の溫度勾配平均

此の式を解くには導管周壁に於ける $\frac{\partial T}{\partial r}$ の値を知らねばならぬが、地面溫度 θ と溫泉水溫 T の二つの境界値が與へらるれば其の中間の溫度分布は如何なる地質でも均一でさへあれば一元的にきまるものであるから、結局は $\frac{\partial T}{\partial r}$ も其間の平均溫度傾斜 $(T-\theta)/d$ [d

は敷設深度]と一定比率を保ち、従つて敷設深度が略ぼ一定な場合には

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda(T-\theta) \quad (2)$$

と見ても近似的には差支ないであらう。こゝに λ は土地の熱傳導率 k に正比例し、敷設深度 d と共に減少すべき定数である〔此の點はすぐ後に詳論する〕。又若し導管が全部空中に露出せる引湯ではニュートンの冷却法則によつて直接に (2) 式が書ける。但し其の時には θ は氣温である。

何れにしても (1) 式に (2) を代入し

$$-dT = \lambda(T-\theta)ds, \quad \text{但し } s \equiv \frac{2\pi r_0}{q}l \quad (3)$$

氣温従つて地面温度 θ は引湯區域位の範圍では一般に s とは無關係と考へてよいから、上式を積分すれば

$$T-\theta = Ce^{-\lambda s}$$

然るに積分常數 C は泉源 ($s=0$) の温度を T_0 とすれば $C=T_0-\theta$

$$\begin{aligned} \therefore T-\theta &= (T_0-\theta)e^{-\lambda s} \\ \text{或は 温度降下 } T_0-T &= (T_0-\theta)(1-e^{-\lambda s}) \end{aligned} \quad (4)$$

以上は導管途中に分湯がなく流量 q が一定であり導管の大きさ r_0 も一定なら問題はないが、實際には途中所々に分枝があり、従つて q も r_0 も不連続的に變化する。さういふ場合でも熱傳導率 k と敷設深度が變らず λ が一定ならば、(4) 式は成立する。但し s は q 及び r_0 の變る毎に夫れに應ずる様に計算すべきは勿論である。例へば泉源より距離 Δ_1 の間は q_1, r_1 であり、それより Δ_2 の間は q_2, r_2 で、以下之に準ずれば

$$s \equiv \sum_{n=1}^n \frac{2\pi r_n}{q_n} \Delta_n$$

の様な s を使ふのである。さすれば Δ_1 終端の泉温を T_1 , Δ_2 終端のそれを $T_2, \dots$ とすると、各區毎に (4) 式類似の關係が成立つことは明かであるから、各區端の s の値を $s_1, s_2, \dots$ にて表はせば

$$\begin{aligned} T_1-\theta &= (T_0-\theta)e^{-\lambda s_1} \\ T_2-\theta &= (T_1-\theta)e^{-\lambda(s_2-s_1)} = (T_0-\theta)e^{-\lambda s_2} \\ T_3-\theta &= (T_2-\theta)e^{-\lambda(s_3-s_2)} = (T_0-\theta)e^{-\lambda s_3} \\ &\dots\dots\dots \end{aligned}$$

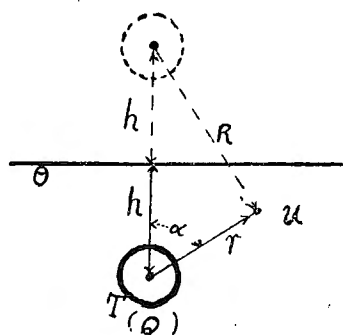
$$\text{一般に } T - \theta = (T_0 - \theta)e^{-\lambda s} \quad (4')$$

となつて常に(4)式と同形となるのである。

斯の如く s なる量は引湯の冷却に極めて重要なもので、言はゞ導管の一般化された長さ (Generalised length) とも稱すべく、其の物理的意味は或浴室に到達した温泉水が泉源から流通し来る途中単位流量 ($q=1$) 毎に割當てた冷却面積に相當する。

兎も角 (4) 式が引湯の冷却法則を與ふるもので、之により導管の長さによつて、將又地温從つて氣温により如何に影響を受けるかなどを検討することが出来るのである。只此處に再論して置きたいことは (2) 式が一層精密な理論によつても果して成立するか、又 λ は眞實 T や s には全く無關係な定數であるかどうかである。上には問題の了解と取扱の便宜上常識的に極めて簡単に片附けたが、次に一層嚴密な解説を加へて置かう。

第3圖に於て地盤を半無限體とし、地表下 h の深さを中軸として半径 r_0 の導管を埋



設したとする。導管の温度 T は泉源よりの距離と共に遞減はするが、數軒を距てても温度降下は僅かに $10^\circ \sim 20^\circ$ 程度に過ぎないのに、上方地面に向つては埋設深度僅か1米内外の間に $40^\circ \sim 50^\circ$ もの温度差があるから、垂直横断面上の温度勾配に比し導管方向の夫れは何千分の一にも足らぬ微小なもので省略しても差支なく、從つて温泉水の熱を傳導放散する

第3圖 引湯導管を横斷する垂直面 のは實際上垂直横断面内に於てのみ行はれると見てよい。換言すれば泉管の放冷は其の各部各部に就いて、其處の温度を有する均一温度の圓筒による放冷と同様に考へても實用上差支ないわけである。かゝる場合の定常状態に於ける垂直横断面内の温度分布は比較的容易に解決が出来る。

今先づ泉管が無限に小さい場合から考へる。垂直横断面上に於て地中或一點の導管中軸よりの距離を r 、鉛直線と r との傾角を α 、其點の温度を u とすれば、熱傳導の基本式は

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \alpha} = 0 \quad (5)$$

境界條件は

$$\text{地面: } r \cos \alpha = h \text{ にて } u = 0 \quad (6)$$

$$\text{管壁: } r \rightarrow 0 \text{ にて } \left| 2\pi r k \frac{\partial u}{\partial r} \right| = Q \quad (7)$$

茲に Q は導管單位長から單位時間に放散される總熱量である。

かゝる場合の解は、溫度 θ の無限媒體內に Q なる熱量を單位長から單位時間毎に發散する微小圓筒と、地面に對し之と寫像の位置に於て同量の熱を吸収する假想導管との合成效果に相當し

$$u = \theta + \frac{Q}{2\pi k} \log \frac{R}{r} \quad (8)$$

なること明かである。こゝに R は假想導管より或點までの距離を示し

$$R = \sqrt{4h^2 + r^2 - 4rh \cos \alpha} \quad (9)$$

である。

次に泉管が有限の大きさをもち半徑 r_0 である場合には、泉管の溫度 T は (8) 式の $r = r_0$ に於ける u の平均、 $\frac{\partial T}{\partial r}$ は $\frac{\partial u}{\partial r}$ の平均と見て實用上差支あるまい。即ち

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\alpha \left| u \right|_{r=r_0} = \theta + \frac{Q}{2\pi^2 k} \int_0^\pi \log \frac{\sqrt{4h^2 + r_0^2 - 4r_0 h \cos \alpha}}{r_0} d\alpha \\ \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\alpha \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \frac{Q}{2k\pi^2} \int_0^\pi \left(\frac{r_0 - 2h \cos \alpha}{4h^2 + r_0^2 - 4r_0 h \cos \alpha} - \frac{1}{r_0} \right) d\alpha \\ \therefore \lambda &= -\frac{k \frac{\partial T}{\partial r}}{T - \theta} = k \frac{\int_0^\pi \left(\frac{1}{r_0} - \frac{r_0 - 2h \cos \alpha}{4h^2 + r_0^2 - 4r_0 h \cos \alpha} \right) d\alpha}{\int_0^\pi \log \left(\frac{1}{r_0} \sqrt{4h^2 + r_0^2 - 4r_0 h \cos \alpha} \right) d\alpha} \quad (10) \end{aligned}$$

特に、別府引湯では r_0 は $2h$ に比し $1/40$ 内外に過ぎないが、かやうに導管の半徑が敷設深度の二倍に比して甚小なる場合には

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} / (T - \theta) = \lambda \doteq k / \{ r_0 \log(2h/r_0) \} \quad (10')$$

此の(10)或は(10')式を見れば、 λ は單に k と h と r_0 のみの函數であつて、先に言つた通り溫度(T)や管の長さ(l 又は s)には無關係なことが確認される。従つて(3)式が成立し且つ(4)式は k , h , r_0 が一定なる限り嚴密なる解答である。たゞ引湯の分歧により敷設深度 h や管の半徑 r_0 が急變する場合の(4')式は實は平均的な略近式で、嚴密には各區間毎に(10)或は(10')により λ を修正し(4)式を適用すべきものであることも知られる。

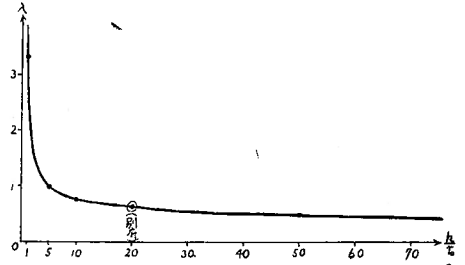
尙冷却係數 λ の算式(10)(10')は、引湯導管の埋設に當り實用上極めて適切な指標を與へる。即ち k が小さく h や r_0 が大なる程冷却係數 λ が小で引湯の能率はよくなるが、其の内敷設深度 h は別府引湯程度($h/r_0 \doteq 20$)にすれば夫れ以上深くしても著しい效果増進にはならない。例へば h を管半徑 r_0 に比し種々の倍數にした場合の λ の相對値

を上式で算出すれば下表の通りで、之を圖示すれば第4圖の様になる。

第4圖 埋設深度と λ (相對値)

第1表 埋設深度と冷却係數 λ (相對値)

h/r_0	1	5	10	20	30	50	100
λ	3.33	1.00	0.77	0.62	0.56	0.50	0.44



3. 別府の引湯觀測により理論の檢證

(1) 導管の長さによる影響: 一引湯の冷却度 $T_0 - T$ が導管の長さによつて受くる影響のみを検討するには、地温 θ の影響が入らぬ様に短時日で全配湯温度の状況を觀測すればよい。我々は奥村氏配當の全引湯を昭和16年4月30日より5月3日まで四日間であつた晴天続きの略ほ同一狀況で觀測したので、氣温も地温も餘り變化なしに實測を終了し得た。其等の觀測温度を各引湯の一般化された距離 s と共に第2表に掲げる。 s の計算には q を cc/min, r_0 と l とは cm に換算した故單位は [min/cm] である。尙觀測期四日間の平均地温 θ と泉源温度 T_0 は $T_0 = 74.4^\circ\text{C}$, $\theta = 17.3^\circ\text{C}$ であつたから、夫れによつて冷却度 $T_0 - T$ 及び $T - \theta$ をも算出して同表に附記した。

第2表 奥村虎太郎氏配給温泉 (1941 IV. 30—V. 3 調査, 地温 $\theta = 17.3^\circ\text{C}$)

番 號	使 用 者	流 量	温 度 T	$T - \theta$	降下度 $T_0 - T$	l	s
M_1	泉 源 (總計) (放流)	702.6	74.4°C	57.1	0	0	0
M_2			73.4	56.1	1.0	283	1.8
M_4			72.4	55.1	2.0	1368	9.2
M_5			71.7	54.6	2.7	2129	11.8
S_1		47.9	70.8	53.5	3.6	2269	13.0
S_2			70.2	52.9	4.2	2485	14.9
S_3			69.5	52.2	4.9	2695	18.5
S_4			68.0	50.7	6.4	2837	18.0
S_5			70.6	53.3	3.8	2261	13.5
S_6			69.5	52.2	4.9	2760	19.9
S_7			61.8	44.5	12.6		
1	京 大 研 究 所	11.1	55.1	37.8	19.3	1833	56.7
2	中 山 別 荘	27.0	63.8	46.5	10.6	1913	25.1
3	遞 信 省 療 養 所	17.5	50.3	33.0	24.1	2601	122.7

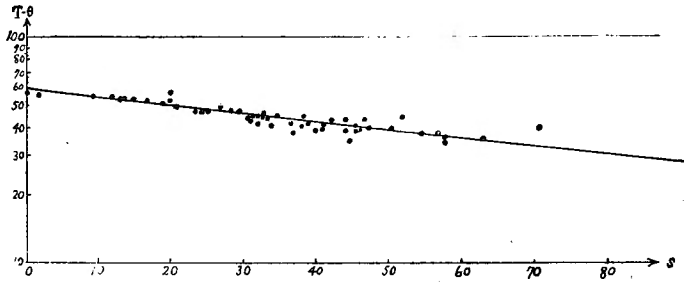
引 湯 の 研 究

4	池	田	兵	老	6.4	63.6	46.3	10.8	2655	24.3
5	山	内			3.9	66.6	49.3	7.8	2711	20.6
6	中	島			0.7	56.8	39.5	17.6	2727	50.3
7	甲	斐	大	藏	12.5	64.0	46.7	10.4	2759	23.4
8	大	津	久	次郎	13.4	61.5	44.2	12.9	2859	31.9
9	定	行	八	郎	20.1	57.6	40.3	16.8	2908	33.8
10	栗	山	借	家	6.1	64.7	47.4	9.7	2942	28.2
11	後	藤		良	6.0	61.6	44.3	12.8	2961	31.4
12	渡	邊		茂	8.3	61.1	43.8	13.3	2974	33.1
13	壽	樂		園	16.1	64.0	46.7	10.4	2903	44.8
14	陶	山			13.8	58.8	41.5	15.6	2978	32.0
15	清	和		園	17.6	51.5	34.2	22.9	3218	57.6
16	陸	軍	療	養	57.2	68.4	51.1	6.0	2840	20.0
17	神	田	重	一	3.1	61.2	43.9	13.2	3068	30.7
18	三	橋	安	次	7.2	55.1	37.8	19.3	3121	36.9
19	貝	島			15.8	60.1	42.8	14.3	3129	31.0
20	東	郷	三	枝	11.1	64.6	47.3	9.8	3149	29.4
21	橋	口			15.9	63.6	46.3	10.8	3204	32.8
22	安	部	雅	也	13.9	62.1	44.8	12.3	3223	34.5
23	前	田			9.1	57.5	40.2	16.9	3376	40.9
24	片	山		巖	11.9	55.9	38.6	18.5	3426	45.5
25	別	府	市	長	11.3	56.0	38.7	18.4	3414	45.8
26	山	田	耕	平	15.6	56.0	38.7	18.4	3422	44.0
27	廣	瀬	頼	司	23.6	60.9	43.6	13.5	3090	43.8
28	安	部	英	吉	6.6	61.9	44.6	12.5	3031	38.3
29	山	田			7.9	60.4	43.1	14.0	3085	42.1
30	石	井	善	次	11.6	60.0	42.7	14.4	3094	46.7
31	福	原	ナ	ヲ	10.0	57.5	40.2	16.9	3110	45.4
32	長	島	新	太	12.9	54.6	37.3	19.8	3140	54.5
33	白	湯	野	口	35.6	61.5	44.2	12.9	3211	51.8
34	百	崎	岩	吉	15.4	57.4	40.1	17.0	3167	38.1
35	姫	野			21.2	59.2	41.9	15.2	3160	36.5
36	野口小學校	(35 姫野の内)			(17.9)	52.1	34.8	22.3	3140	44.6
37	末	宗	安	吉	3.7	59.2	41.9	15.2	3247	38.8
38	鮫	島			13.5	52.8	35.5	21.6	3182	57.6
39	横	尾	謙	藏	13.1	56.2	38.9	18.2	3283	39.7
40	共	同	温	泉	19.0	61.8	44.5	12.6	3276	32.6
41	俵	町	温	泉	19.4	56.9	39.6	17.5	3372	47.1
42	宮	内			27.1	57.3	40.0	17.1	3380	70.5
43	富	士	見	薬	27.5	67.1	49.8	7.3	2970	26.8
44	グラウンド	西	共同	温泉	21.2	53.2	35.9	21.2	2805	62.8
45	中	山	旅	館	12.8	57.1	39.8	17.3	3291	40.9

地温及び泉源温度が一定の場合には、(4)式によると、 $T-\theta$ と s とは半対数方眼紙上では直線関係を示さねばならぬ。第2表の数値では事實其の通りになつて第5圖を得、(4')

引湯の研究

第5圖 別府引湯の $T-\theta$ と s との関係



式の成立を裏書する。此の直線の傾斜から λ を出せば

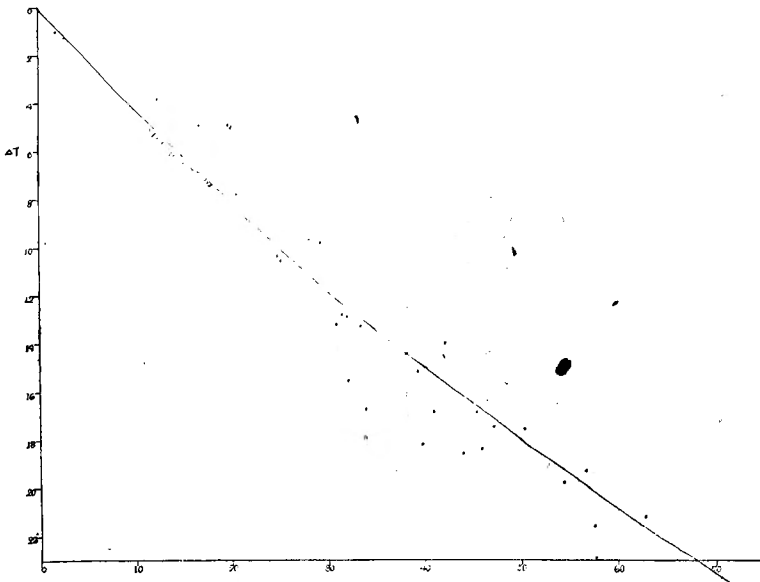
$$\lambda = 0.00759 \quad [\text{cm/min 単位}]$$

故に各引湯の温度冷却は観測時には

$$\Delta T = T_0 - T = 57.1(1 - e^{-0.00759s})$$

となつて居た筈で、之を普通の方眼紙に描けば第6圖の様になる。観測結果と大體に於て一致する。只泉源に近い處は實際の冷却度が幾分過小になつて居る。之はその邊の導管が

第6圖 別府引湯の冷却度 ΔT と s との関係



當然大で (10) 又は (10') 式により λ が平均値よりも小なること、及び泉源に近い山手は別府の地獄地帯で高熱蒸氣が地表へ逃げて居るから地温が市街地の低平な處よりも幾分高いこと等に因ると考へられる。此の見解を確めるため八月の或一日泉源附近から研究所ま

第3表 地温分布状況

側 點	深 さ	地 温
泉源側方約 5m	70cm	23.8C
M_1 側方約 7m	70"	22.0
M_2 側方約 5m	60"	22.0
M_4 側方約 10m	20"	20.0
M_5 側方約 8m	15"	19.3
S_1 側方約 20m	15"	20.5
研 究 所 構 内	50"	18.5
	100"	20.8

で6點で地温測定を試みたところ、第3表の如く泉源附近より低地に至るほど地温が低くなることは明かとなつた。

尙第6圖に於て今一つ説明して置きたいことは、 s の大なるに従ひ觀測値の分散する傾向あることである。之は市街地に入つて分岐が著しく多數になると管半径 r_0 や埋設深度 h 及び保温施設従つて h が全部一樣でなく、爲に λ が個々の分湯に就て多少違つて來るに因るのであらう。只 No. 3 の引湯だけは其の偏差が餘りに著しく其の理由は今のところ解

し兼ねる。

(2) 冷却の季節變化と地温及び流量の影響：一前項では地温に變化なき場合に導管の長さが如何なる影響を與へるかを主眼として、多數の引湯を極めて短時日の内に一齊調査を行つた結果に就き考究したが、次には地温が著しく變化する場合にも其の効果が吾人の引湯冷却法則を満足するや否やにつき檢證して見たい。それには一年中觀測を繼續して年變化を檢討すればよいのであるが、然し市内多數の引湯は皆其のマンホールが密閉されて居て、年中頻繁に之を開閉觀測することは所有者が承知して呉れないし、又研究所でも人手不足のため到底實施し難い。夫れで止むを得ず吾々は、吾々の自由になる研究所引湯だけにつき、構内三箇所のマンホールに於ける水温(T_1, T_2, T_3)を連續自記せしむると共に頻繁に觀測を併施した。其の成果を利用して茲に引湯冷却度の年變化と夫れに及ぼす地温(或は氣温)と流量との影響を研究報告する。

引湯開施直後の昭和15年5月より今日まで約一年半の觀測から、各種温度の月別平均値を掲出すれば、第4表の通りである。残念ながら觀測員不足其他の事情で觀測中斷した月が相當にあるけれども、兎も角一箇年以上には跨つて居るので、之により第1マンホールを泉源と見た第3マンホールまでの冷却度($T_1 - T_3$)を計算し、年變化圖を作れば第7圖となる。八月より十一月までは2年の觀測があるので、兩者の平均を取つた。尙ほ泉源温度 T_1 と氣温や地温との差をも併記した。

之によると引湯の冷却は常識的にも豫想される如く、大體に於て寒季に著しく暖季に少なくなつて、氣温従つて地温の影響が明瞭である。即ち泉源温度と氣温又は地温との差に並

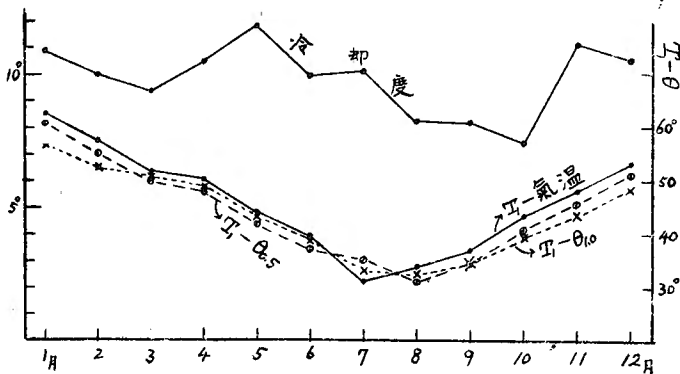
引 湯 の 研 究

第4表 京大別府研究所引湯観測値月別平均

年 月	T_1	T_2	T_3	氣 溫	地 溫 (0.5米)	地 溫 (1.0米)	流 量 q	s_{1-2}	s_{2-3}
昭和15年	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	L/M	cm. min	cm. min
5月	61.5	54.1	49.7	17.5	19.7	17.9	10.88	16.7	11.4
6	60.3	53.8	50.4	21.0	23.4	21.3	10.18	17.2	11.7
7	57.5	50.7	47.4	26.6	27.0	24.8	7.74	21.5	14.6
8	56.1	49.4	46.6	25.0	27.7	26.5	7.15	22.4	16.5
9	56.3	49.4	46.3	22.8	24.7	24.8	8.23	20.8	14.1
10	62.6	55.8	52.5	18.4	20.8	21.9	11.21	15.1	10.2
11	61.4	53.7	50.0	13.6	16.2	18.3	9.87	20.3	13.7
昭和16年									
1	67.3	60.2	56.4	4.8	6.6	10.7	13.75	12.0	8.2
2	61.9	55.4	51.9	4.5	6.9	9.6	14.34	11.5	7.8
3	61.9	55.8	52.5	10.5	12.1	11.6	13.56	12.2	8.3
4	63.2	55.1	52.7	13.0	15.5	14.6	13.51	12.2	8.3
8	60.0	55.6	53.1	23.8	26.5	25.2	11.26	14.7	10.0
9	61.0	56.1	54.7	21.1	23.8	24.0	12.77	12.9	8.8
10	58.8	54.3	54.1	16.5	19.5	20.6	13.23	12.4	8.5
11	61.7	55.1	50.9	13.8	15.7	17.9	13.17	12.6	8.5
12	62.1	55.8	51.6	9.2	11.0	13.9	13.21	12.5	8.5

T_n は第 n 番のマンホールの泉温である。マンホール間隔; $l_{1-2}=69\text{m}$, $l_{2-3}=47\text{m}$.
 註 $s_{(n-1)-n}$ はマンホールの第 $n-1$ 番と第 n 番間の s を示す
 昭和15年度は開設當初で配當量が16年度より可なり少ない。

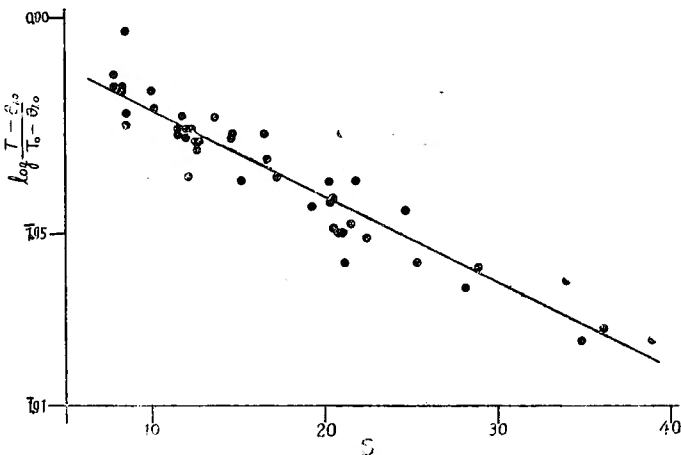
第7圖 研究所引湯冷却度の年變化と氣溫又は地溫の影響



行する趨勢にある。(4)式を見ても然らざるを得ぬのである。

然し詳しく云ふと、両者は完全には並行して居らず、特に冷却度が五月に異常過大で二三月に異常過小なることなどが目立つ。吾々の見解によれば、是等は主として引湯流量 q の變化によるもので、従つて q に反比例する s が變り、(4)式によつて冷却度に影響するのである。今の場合の如く地温も流量も著しく變化しても、吾人の冷却法則(4)によれば $\log\{(T-0)/(T_0-0)\}$ と s とを縦横軸にすると直線になる筈である。第1又は第2マンホールの温度を源温 T_0 と考へ、下流の第2又は第3孔の温度を T と見て、第4表のデータを全部採用し圖を描けば、事實第8圖の様に略ぼ直線配列をするのである。點の分散が多少あるのは、勿論降雨や冬期寒冷等のため土湿に差を生じ熱傳導率 k が變る爲や、測定の

第8圖 研究所引湯地温及び流量の冷却度に及ぼす影響



誤差等によるのであらう。上には0として1米深度の地温を採用したが、0.5米の地温も或は又氣温を用ゐても殆んど變りないことは、第7圖を参照しただけでも首肯出来るから、夫等は總て略する。

4. 各區の冷却率 $k \frac{\partial T}{\partial r}$ 並に λ, k

流通導管の相離れた二點の温度と流量との測定が出来れば、(1)式によつて其の間の平均 $k \frac{\partial T}{\partial r}$ を計算することが出来る。第2表中かやうな計算可能な區間につき $k \frac{\partial T}{\partial r}$ を算出して見ると第5表の如き結果を得る。これは垂直導管の冷却率に比すれば同桁ではあるが

(2) 前出(1)

第5表 別府引湯各區の $k \frac{\partial T}{\partial r}$ (cal. cm. min)

調査個處	$k \frac{\partial T}{\partial r}$	調査個處	$k \frac{\partial T}{\partial r}$
M_2-M_4	0.135 *	S_7-29	0.635
M_4-M_6	0.280 *	S_7-31	0.781
M_6-S_1	0.750 *	M_4-1	0.444
S_1-S_2	0.316	1_1-1_2	0.514
S_2-S_3	0.368	1_2-1_3	0.392
M_6-S_6	0.646	M_6-44	0.785 ▲
S_6-S_8	0.172 *	$35-36$	1.57 ▲
S_8-42	0.282		

第6表 城崎温泉の $k \frac{\partial T}{\partial r}$

温 泉 名	$k \frac{\partial T}{\partial r}$
裏 川 湯	1.35
〃	0.763
鴻ノ湯第一	0.394
〃	0.480
〃	0.228
〃	0.240
〃	0.247

*は導管中殆んど温泉水が充滿す, ▲は保温施設なし。

少々大きいと考へられる。此の原因はボーリング導管は地中深く地下高温部を通過して來るのに比して、今の水平導管は地表に近く比較的低温層のみを通過して來るに因る。更に注意しなければならぬ事は垂直導管には管中一杯に高温水が充滿して居るのに、水平導管は多くの場合下部の一部を流動して上部は空氣がある。この空氣が移動しなければ満水して居る場合と大差なからうが、空氣が移動すれば夫れと共に水蒸氣が去り、熱量を餘分に運び去ることゝなつて冷却が大となることにも原因が考へられぬでもない。第5表に於て * 印は導管中殆んど温泉水の充滿せるもので、(M_6-S_1) を例外として他は總じて冷却率の小さな事は此の事を立證して居る様に思はれる。

導管中の高温水冷却に就ては松山基範博士も城崎温泉で資料をとり報告せられて居る。その中で吾々の方法による處理に必要な資料の揃つたものを借用し冷却率を計算すれば第6表の如くなり、ほゞ同程度の値を示し、 $k \frac{\partial T}{\partial r}$ の値は $0.1 \sim 0.6$ cal. cm.⁻² min⁻¹ くらゐが一般的に共通ではないかと思はしめる。

尙ほ $k \frac{\partial T}{\partial r}$ が分れば、之と各區の $T-r_0$ の値から(2)式を用ひて λ が得られ、更にその λ の値を(10') 式に入れて熱傳導度 k も算定出来るのであるが、各區毎の計算は煩を避けて省略する。只別府引湯全體の平均として $\lambda=0.00759$ cm. min⁻¹ を得て居るから、之に應ずる k を(10')式で計算すると、 $r_0=2.5 \sim 7.5$ cm, $h/r_0 \div 20$ として

$$k=\lambda r_0 \log (2h/r_0)=0.0698 \sim 0.209 \quad \text{cal. cm.}^{-1} \text{ min}^{-1} (\text{C}^{\circ})^{-1}$$

(3) 松山基範; 城崎温泉に就て; 地球第27巻第1, 2號(昭和12年), 3頁。

$$=0.00116\sim0.00348 \text{ cal. cm}^{-1} \text{ sec.}^{-1} (^\circ\text{C})^{-1}$$

然るに各種材料の k を理科年表に就いて見ると第7表の如くで、別府地中の k は漆喰や

第7表 熱傳導度(理科年表による)

物 質	温 度	[cal. cm ⁻¹ sec ⁻¹ C ⁻¹]
珪 藻 土	15—650	$\times 10^{-3}$ 0.158—0.258
コンクリート	0	2.0
漆 喰	20	1.9
砂	2°	0.779

コンクリートと同程度なることが分る。尙表によるとコンクリートや漆喰は砂よりも却つて保温上よくない様に見えるが、實際の引湯では反対である。例へば第5表の引湯中、最後の二つは竹導管を特別の保温施設なしに直接砂中に埋めてあるが、冷却率は大きい。之

は k の測定に使はれた砂の状態と野外實地の状態とが違ひ、實驗室では勿論乾砂を用いたものであるのに、野外では多く濕潤となつて居るために違ひない。特に降雨の場合など野外の砂中には雨水の滲透多く冷却を促進するが、コンクリートや漆喰だと雨水の影響は輕減されるのは想像に難くない。

今試みに別府引湯の $k=2\times 10^{-3} \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} (^\circ\text{C})^{-1}$ と見れば

$$\left| \frac{\partial T}{\partial r} \right| = \frac{1}{k} \frac{0.1\sim 0.6}{60} = 0.8\sim 5 ^\circ\text{C}/\text{cm}$$

となる。導管の埋設深度 $h=60\sim 150\text{cm}$, $T-\theta=30^\circ\sim 60^\circ$ とすれば、上方の温度勾配

$(T-\theta)/h=0.2\sim 1^\circ\text{C}/\text{cm}$ に比し、管壁の處の温度勾配は約5倍になつて居る勘定である。

5. 結 論

以上を要約すれば大體下の様なことが研究された。

1) 熱傳導の原則より埋設引湯導管の冷却法則を導いた。夫れによると空中に於けるニュートンの冷却法則に類似な公式

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda (T-\theta), \quad T=\text{泉温}, \theta=\text{地温}, k=\text{熱傳導度}, r=\text{管徑方向の距離}$$

が成り立つことを知つた。定數 λ の計算式をも導いた。

2) 従つて引湯の冷却度は距離の指數函數に従つて遞増するのみならず、流量、地温(或は氣温)、敷設深度等の影響もあり、夫れ等を一括して算定し得る公式が得られた。

3) 敷設深度は管徑の10~20倍程度が最も能率的で、それ以上深くしても掘進費ほどの效能はない。別府引湯は丁度能率的な深度になつて居る。

4) この様な理論的研究に併行して、他方では別府市内多數の引湯につき短時日の間に一齊調査を施行して、泉源よりの距離や流量による温度の降下状況を研究して理論式の檢

證を行つた。

5) 更に京大研究所内の引湯につきては三點の溫度を一年半に互り連續自記乃至觀測して、冷却の季節變化及び地溫若くは氣溫と流量との影響を明かにし、理論式の檢證をした。

6) 尙、別府引湯の冷却率 $k \frac{\partial T}{\partial r}$, γ , k 等を決定した。野外表土の熱傳導度 k は漆喰やコンクリートと大體同程度のやうである。

終りに、研究所内の引湯施設及び本調査は文部省科學研究費によつたもので、感謝に堪えない。