

温泉の湧出量と水頭との相關, 其の二 裂罅泉

理學博士 野 滿 隆 治

理學士 後 藤 己 與 治

I. 緒 言

ドローネー⁽¹⁾は温泉を大別して層狀泉 (Nappes thermales) と脈狀泉 (Filons d'eau ther-male) とにする。前者は其の地下の或面積一面に溫水を湛え居るものをいひ、後者は管狀の空隙を流動して來るもので今日一般に裂罅泉と呼ばれるものを指すのである。或溫泉が其の何れに屬するかを知ることは學術上のみならず實用上にも甚だ有益である。例へば或溫泉が層狀泉なることが判れば、其の附近はどこを掘つても新溫泉が得られる筈であるし、又該溫泉が脈狀泉に屬するものならば新掘に依つて新溫泉を得んには恰度其の裂罅に當るを要するから中々困難である。

それで筆者の一人野滿は或溫泉が層狀泉なりや裂罅泉なりやを地上より判斷する方法を考究し、其の一法として湧出口の高さを變ずるに伴ひ湧出量が如何に變化するか、換言すれば溫泉の水頭と湧出量との相關型式によるが最も簡便適確なるべきことに想到した。蓋し層狀泉であれば、普通の地下水中に於ける縦井戸と水理學上には變りはない。然るに井戸理論によると、被壓地下水中の掘抜井は湧出量と水頭とが直線關係を示す筈であるし、不壓地下水中の淺井ならば水頭の二乗と湧出量とが比例して變化し湧出量の軸上に頂點を有する拋物線關係にならねばならぬ。之に反して、裂罅泉ならば湧出量の二乗が水頭に比例して増減すべきものであつて、水頭の軸上に頂點を有する拋物線關係を示す筈なのである。

斯様な考へを以て先づ別府舊市内多數の溫泉につき瀬野山下兩君と共に調査を行ひ、其の結果を本誌第2卷に報告した。⁽²⁾別府は舊市内殆んど到る處掘りさへすれば溫泉が得られ

(1) L. de Launay: Recherches, captage et aménagement des sources thermo-minerales. 1899.

(2) 野滿, 瀬野, 山下: 別府溫泉の湧出量と水頭との相關, 其ノ一層狀泉. 本誌第2卷(昭和13年), 260頁.

るので、當然層狀泉たるべきことを豫想して調査に當つたのであるが、案の通り殆んど皆湧出量と水頭とは直線關係を示した。只三口だけ異常のものがあつたが、何れも田ノ湯温泉脈上に存在することを指摘し、其の異常を示す理由に就きては簡単に説明した。だけで充分なる論究は差控へて置いた。此の點は本論文に於て再検討を加へる積りである。

次に筆者は何處かで裂罅泉を捉へ湧出量の二乗が水頭に比例して増減する様な拋物線關係を示す實例を得たいと思ひ、其の當時から龜川附近を見て廻り、同町野田附近の山際で露頭岩塊に近く湧出する高熱温泉が若干あるを認め、是等こそ恐らく求むる所の裂罅泉ならんと想定した。それで別府在住の研究所員に其の調査を命じて置いたが、他の仕事に忙殺されて、中々實行が出来ないのであつた。止むを得ず筆者自身で今夏同所に出張の上後藤の協力を得て實測調査し漸く當初からの目的を完了することが出来た。以下夫等を一括報告する。

II. 裂罅泉の水頭對湧出量相關の理論的考察

裂罅泉に於ては湧出量の二乗が水頭の一乗に比例して増減すべきことは、ドローネーの證明法もあるが、尙ほ簡單明瞭なる説明は河川又は水道管内の流水に關するシェーギーの法則を利用するがよい。

シェーギー法則によれば流路横斷面の平均流速 v は動水勾配 I と徑深 R との積の平方根に比例し

$$v = C\sqrt{RI}$$

である。温泉管の如く満水せるものにあつては R は一定であるし、又水位勾配 I は或基準面より測つた泉源の靜止水頭 H (湧出量なきまでに泉口を高くしたときの高さ) と湧出時の水頭 h (泉口の高さ) との差を管長で割つた商に外ならぬから、

$$I \propto H - h \quad (h \text{ の變化は管長に比し微小とし})$$

故に $v^2 \propto C^2 R (H - h)$

然るに湧出量 Q は v に斷面積をかけたものに等しいから

$$Q^2 = K(H - h), \quad K \text{ は或常數}$$

となるのである。

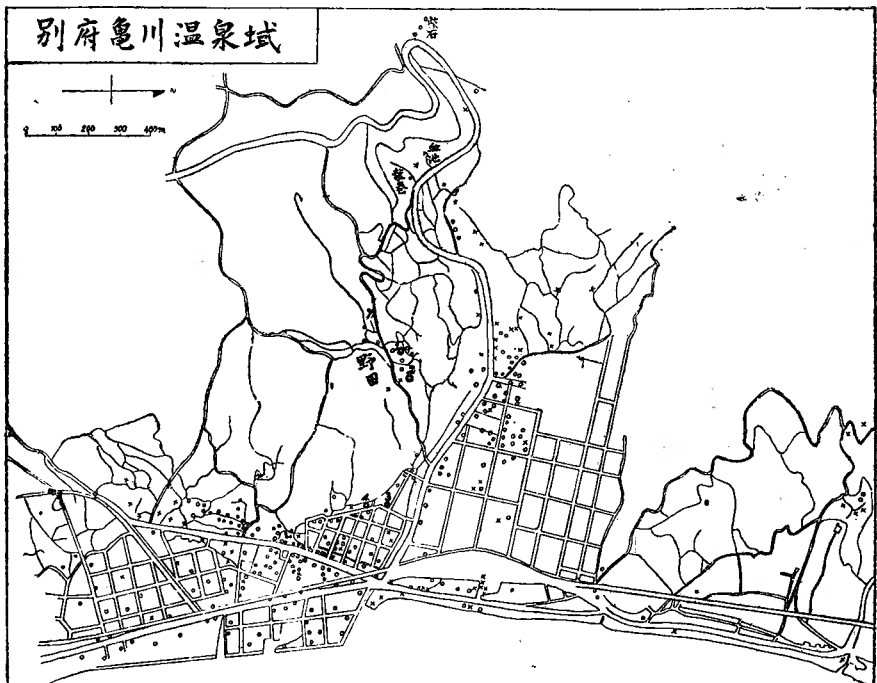
それで Q を横線に、 h を縦線にして (Q, h) 相關圖を作るならば、縦線上の $h = H$ な

る點を頂點とし h 線を軸とする拋物線になるべきことが知られる。逆に或温泉の Q, h 相關を實測して如上の性質を有する拋物線關係が得られたならば、該温泉は裂罅泉に屬し罅隙孔道を流過上昇し來るものと斷じてよい。

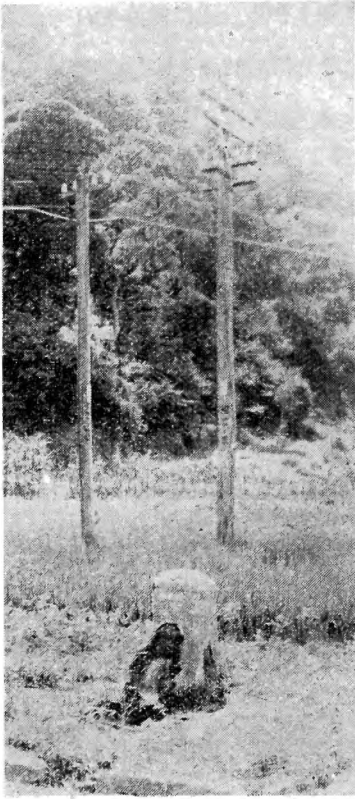
III. 別府市龜川町野田の裂罅泉

既述の如く龜川町は別府温泉地帯中でも最も高熱部に屬し、特に其の野田部落方面は有名なる血の池地獄に近接し、鐵分に富んで血赤色沈澱物を作ることや重碳酸鹽の少いことなど溶解成分の上からも類似の性質を有することが知られて居り、其の間何等かの脈絡あるものゝ如く、裂罅泉も此の方面には必ず少くないであらうとは、著者の疾に耽んで居た所である。況んや野田部落の位置たる、三方山に圍まれた小谷地をなし山腹山麓には岩盤露頭多く、裂罅泉存在の可能性は愈々大きい。仍つて山際に近い高熱温泉を選出して水頭對湧出量關係を調査研究することにした。

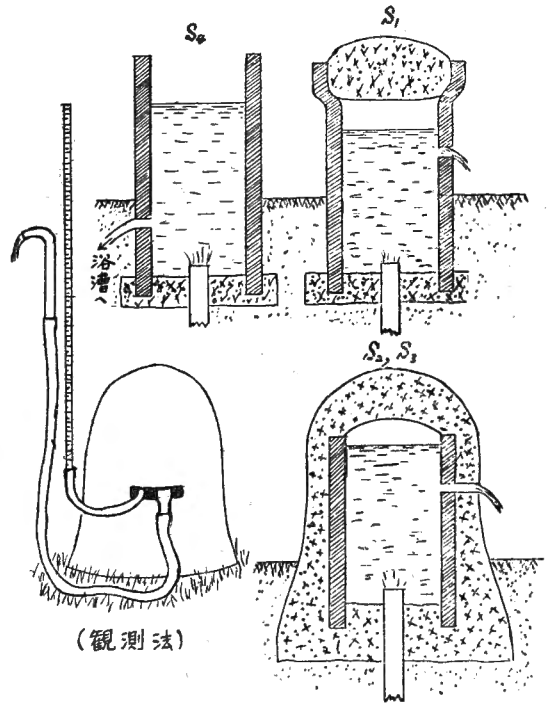
然し、何分にも常時使用の温泉では湧出口を上下したり或は全く停止したりする作業は



第1圖 別府市龜川温泉地域圖 (番號入り◎印は研究泉口)



第2圖 龜川野田部落の放流裂罅泉の一例



第3圖 泉口の構造と實測方法

到底所有者の承諾を得難いので、不使用放流に委せてある泉口など特別のものでないと自由にならない。かやうな譯で、裂罅泉らしきものは十數口あつたのではあるが、實驗を施行し得たのは遺憾ながら其の中僅かに四口に過ぎなかつた。第1圖に其の位置を示し、湧出口の實景を口繪及び第2圖に例示する。數米離れた山麓に岩盤の露頭あることなども夫れによつて見て頂きたい。又何れも $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{C}$ の熱泉であることを附記して置く。

此の附近の湧出口仕上りは多く第3圖の様にしてあつて、掘鑿上昇管頭上に中空のコンクリート又は漆喰製饅頭形の湯溜を覆ふせ、其の一側に泉管よりも遙かに大きな吐口を開けて、そこから湯を流出させて居る。自然の状態では湯溜内の水面は稍ゝ吐口の高さより上になつて、上部に多少の空積がある。

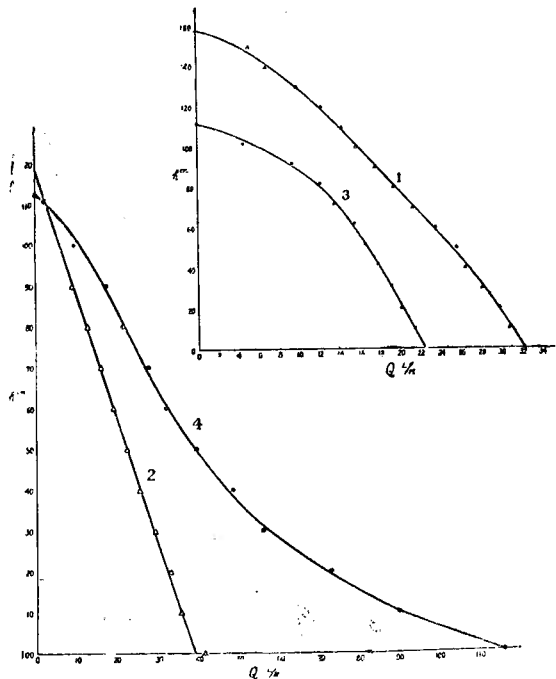
水頭と湯出量との關係を實測するには、此の側孔から測壓管とゴム製導水ホーズとを湯溜内に挿入し、側孔の餘隙は布片を以て充分に填充して漏水を完全に防ぐ。導水ホーズ先

温泉の湧出量と水頭との相關其の二、裂隙泉

第1表 水頭 h (cm) 對湧出量 Q (lit/min) 實測結果

温 泉 S_1 (泉 温 82°.0C)		温 泉 S_2 (泉 温 63°.5C)		温 泉 S_3 (泉 温 63°.5C)		温 泉 S_4 (泉 温 71°.C)	
h	Q	h	Q	h	Q	h	Q
158.5	0	117	0	112	0	112.5	0
150	5.17	90	9.05	102	4.55	100	9.53
140	6.83	80	12.8	92	9.37	90	17.6
130	9.92	70	16.1	82	12.1	80	21.3
120	12.3	60	19.1	72	13.5	70	27.8
110	14.35	50	22.3	62	15.5	60	31.9
100	15.7	40	25.3	52	16.5	50	39.4
90	17.6	30	29.3	42	17.8	40	48.6
80	19.4	20	33.0	31	19.1	30	55.8
70	21.3	10	35.6	20	20.1	20	72.5
60	23.5	0	41.2	10	21.4	10	90.0
50	25.6			0	22.4	0	117.0
40	26.4						
30	28.1						
20	29.8						
10	30.7						
5	32.2						

端を湯溜頂部より高く上げると、湯溜内は全部満水して壓力増加し、其の示度は壓力管に現はれる。其の時の湧出量と水頭とを同時に測定する。勿論測定は同一條件にて數回宛繰返し平均を取る。かくして導水ホーズ先端の高さを種々に變へ實驗すれば、水頭對湧出量の關係が得られるのである。而して導水ホーズ先端を一定の高さまで上げると遂に湯の流出は止まる。この時の水頭が所謂温泉の靜止水頭に外ならぬ。既に靜止水頭に達したならば、次には次第にホーズ先端を下降しつゝ水頭と湧



第4圖 $h-Q$ グラフ

温泉の湧出量と水頭との相關其の二、裂罅泉

出量とを測定して、往復二系の實測を完了し、兩者を平均して實驗結果の精度を高める。

實測の結果は第1表の様になつた。表中の水頭 h は各温泉毎に適當な基準面から測つた値である。

之を圖示すれば第4圖の様になる。温泉 S_1 と S_3 とは h 軸上に頂點を有する拋物線狀となすから、豫期の通り裂罅泉であると斷定する。特に S_3 は $Q^2=4.313(112-h)$ なる拋物線と殆んど一致し、僅に $h=102$ cm に對する Q の實測値が幾分過小なるに過ぎないこと第2表の通りである。

第2表 温泉 S_3 の湧出量實測値と計算値との對照

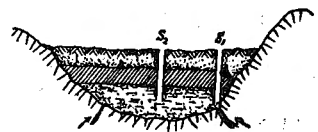
h	112	102	92	82	72	62	52	42	31	20	10	0
Q { 實 測	0	4.6	9.4	12.1	13.5	15.5	16.5	17.8	19.1	20.1	21.4	22.4
計 算	0	6.7	9.5	11.7	13.4	15.1	16.5	17.8	19.1	20.4	21.4	22.5

S_1 温泉は之ほど満足ではないが $Q^2=5.5(158.5-h)$ に大體近似すること第3表の通りである。實際にはそれよりは湧出口の高い前半に稍と過小で低い後半に幾分過大の湧出量となつて居るが、之は恐らく之と連絡ある隣接裂罅泉の影響があるものと思考する。

第3表 温泉 S_1 の湧出量實測値と計算値

h	158.5	150	130	110	90	70	60	50	30	10
Q { 實 測	0	5.2	9.9	14.4	17.6	21.3	23.5	25.6	28.1	30.7
計 算	0	6.9	12.5	16.3	19.4	22.0	23.2	24.4	26.6	28.6

然るに S_2 温泉の Q と h とは完全に直線關係を示し被壓層狀泉の特性を示して居る。之は恐らく第5圖に想像する如く、此の野田部落の谷には其の基岩盤に裂罅があつて諸所に湯を出して居るが、其の上に土砂の堆積があつて透水層内に瀰漫蓄積し、所謂層狀温泉に變化するのであらう。それにしても第1圖から判る通り此の谷の幅は僅かに100 m 内外にすぎないのに、其の中央にある S_2 温泉が理想的な層狀温泉の特性を具備するのである。即ち

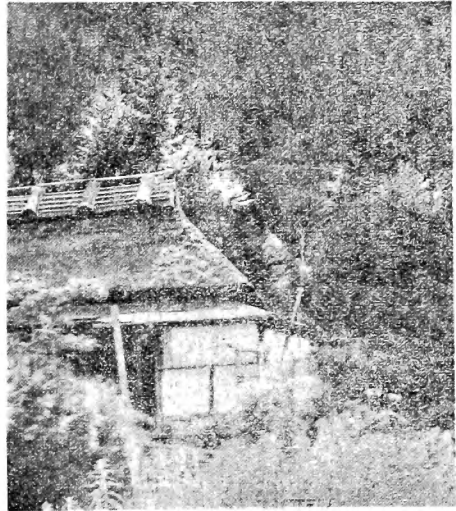


第5圖 S_2 温泉想像圖

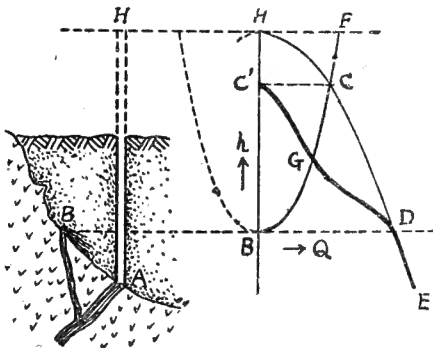
帯水層の廣さが此の程度に狭いものでも、充分の透水性を有して溫水層を成す場合には其處に掘つた温泉は直接裂罅に貫通せぬ限り充分層狀泉たり得ることを吾々は此の例で知る

次第である。別府舊市内の温泉が温泉脈上にあるものでも殆んど皆層狀泉の性質を示したのも、成るほどと肯ける。従つて龜川地區の海岸附近多數の温泉は測定するまでもなく同様に $Q-h$ 相關が直線式なるべき事は明かである。

最後に温泉 S_4 は眞とに興味ある $Q-h$ 曲線を示した。靜止水頭に近い h に對しては拋物線關係となつて居るから、之も裂罅泉には違ひない。只湧出口を相當に低くすると、湧出量が初めの割合よりも随分大きくなるのは、此の温泉が單獨完全な裂罅泉でないことを物語る。然らば如何なる事情が伏在するであらうか。筆者は、此の温泉の裂罅と連絡ある別な裂罅が派出して、其の開口は S_4 温泉の泉管底よりは高く靜止水頭よりは1~2米低い處即ち地地下淺い處にあるものと推定する。其の證據には此のすぐ近くの山腹にも第6圖に示す七五三繩の張つてある岩壁からは大雨のときだけ割目より熱泥水が湧出するのである。即ち此の附近には幾つかの大小裂罅が存在することは殆んど確實であつて、其のあるものが上記想定 of S_4 温泉の裂罅と關聯して居ると考へられる。



第6圖 S_4 温泉附近の間歇的裂罅泉
(七五三繩のところ)



第7圖 派出裂罅ある裂罅泉の湧出量對水位關係

扱てその様な傍系裂罅が派出して居るとすれば、第7圖に於て A を S_4 温泉の裂罅、其の靜止水頭を H とし、派出裂罅の開口を B としよう。 B 裂罅がないならば S_4 温泉湧出量對水頭は拋物線 $HCDE$ の如くなる筈であるが、 B 裂罅への流出によつてそれが歪曲される。 B 裂罅よりの流出は S_4 泉の湧出口を B より低くすれば無いのであるが、それより高い間は兩者の高度差によつて B も亦拋物

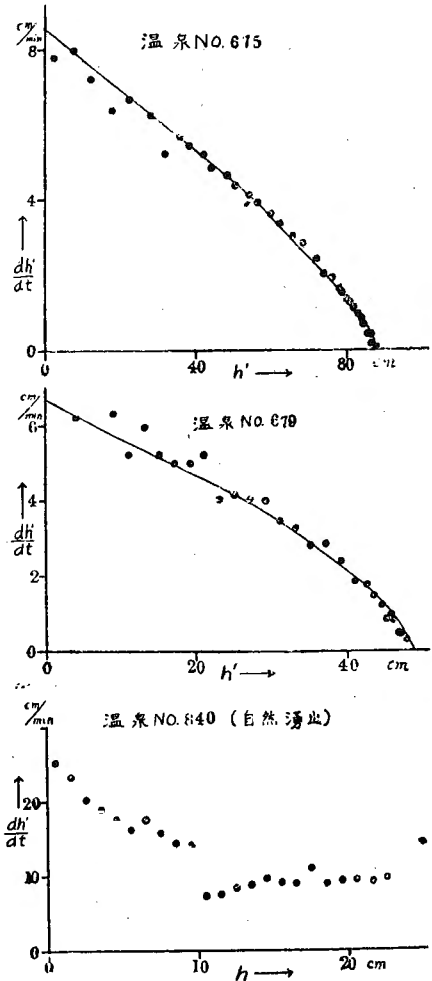
線的關係を維持する湧出をやる。 BCF 曲線がそれを代表する。従つて S_4 泉の實際の湧

出量は兩拋物線の差 $C'GDE$ の様な相關を示すであらう。 $C'D$ 間の曲がり工合はB裂隙の強さによつて相違はあるが、大體に於て其の上部 $C'G$ あたりは湧出量が拋物線關係よりは割合少く、下部 GD あたりは遙かに多くなり、 D 以下の DE 線は元の拋物線に一致するわけである。實測した S_1 泉の $Q-h$ 曲線（第4圖）は恰度この $C'GD$ 部分に相當して居る。變曲點 D に當る處はまだ現はれて居ないから派出裂隙の開口は實測範圍（地面下約 1 m）よりも更に深い處にあると思はれる。

序ながら前掲の S_1 温泉も、 $Q-h$ 曲線が略ほ拋物線に近いとはいひながら、 h の大なる部分では湧出量が幾分過小であり h の小なる部分では稍と過大の傾向を示すのであつた。之も或は極めて弱勢なる派出裂隙があつて而も $h=60$ cm 位の所に開口して居るのかも知れない。第7圖のD點に相當する状況が見られるではないか。

IV. 別府舊市内の異常温泉再検討

別府舊市内の温泉は殆んど皆層狀泉に屬し $Q-h$ グラフが直線になる中に、たゞ三口だけが第8圖の如く違つた關係を示すことは前論文⁽³⁾に説明した所である。而して其の異常泉三口は何れも同地の最も有力なる田の湯温泉脈上にあることも述べて置いた。従つて是等の異常が何か裂隙と關係あるべきことは想像されるが、今回龜川地區の裂隙に關係ある温泉調査を終へて其の理法を了解した上、別府の異常温泉を回顧し其の $Q-h$ 曲線を再検討



第8圖 別府舊市内に於ける三口の異常泉
(縦軸は泉管の單位斷面積當り湧出量)

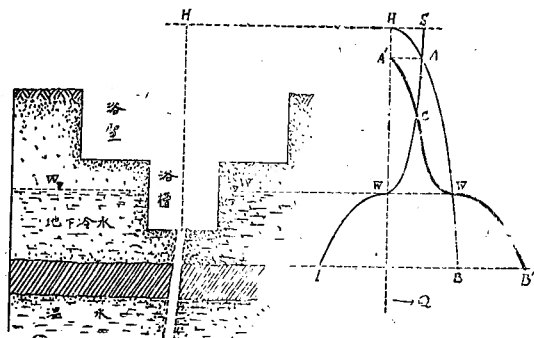
(3) 前出 (2).

して見ると其の本質が眞に明瞭となつて来る。

先づ温泉 No. 675 と No. 679 であるが、共に人工掘鑿泉であつてそれに泉管を挿入してあるから、途中の漏洩は大體無いと見てよい。而して其の湧出量對水頭曲線は明かに h 軸上に頂點を有する拋物線形狀となつて居る。故に此の二泉は全く裂罅泉に屬し、田の湯温泉脈の本源をなす裂罅に恰度突き當てたものと斷定してよい。前論文では不壓地下水との交流の爲ではないかと解して置いたが思違ひであつた。

次に No. 840 温泉の $Q-h$ 曲線は甚だ複雑の様に見えるが、此の温泉の事情を知れば成るほどと了解出来る。本温泉は自然湧出であつて、地表下僅かに 2 m 餘り掘つて浴槽を拵え其の上面は地下約 1 m にある。従つて温泉水の浴槽への上昇路は完全な水密管ではなく周壁の沈澱セメンテーションが不完全のため水の漏洩又は侵入も可能であらうし、更に浴槽面程度の深度には此の地帯に温水が不壓地下水となつて流れて居るのである。尙ほ瀬野助教授⁽⁴⁾によると、此の附近は温泉靜止水頭が地表より上約 1 m 高い區域である。換言すれば地表上 1 m ほど上昇し得る靜水壓を有する温泉水が泉脈を成す裂罅から地表へ出る處に浴槽上面を地下 1 m ほど下に拵へたものである。それを吾々は 50 cm ほど汲み下げた後浴槽内の水面變化に應ずる湧出量を測つて第 8 圖の曲線を得たのである。浴槽上面より上まで水位を上げることが出来なかつたのに、極めて狭い範圍で湧出量變化があれほど複雑化して居るわけである。

それで此の温泉地下の事情を模式的に表せば第 9 圖左の様になる。従つて其の $Q-h$ 曲線は同圖右の様な形勢になつて然るべきである。即ち上昇通路が完全に水密なる管狀ならば HAB の様な拋物線となるべきものが、實は通路が不完全なるが爲、周圍の不壓水位 W よりも温泉水位 h



第 9 圖 別府温泉 No. 840 の地下事情と $Q-h$ 曲線模圖

を低くすれば、普通の不壓井揚水や或は穴開き管を底につけた桶を水中に挿入したる如く、

(4) 瀬野錦藏：別府市街地の温泉水頭分布，地球物理第 2 卷（昭和 13 年），280 頁；冷水頭分布，同誌第 4 卷（昭和 15 年），280 頁。

温泉井内に外水が侵入して湧出量を増し、其の増量は其の下の不透層上面に頂點をもつ拋物線狀の WI の如きもので表はされる筈である。

之に反し温泉水頭 h が W よりも高ければ温泉水が漏洩して外周に逃げ湧出量 Q を減少する。其の減量は前の WI 曲線と Q の方向が反對なばかりでなく、其の數値が相當小さいであらう。何となれば、水頭低く侵水する場合には浴槽下であれば勿論浴槽内水位の場合でも侵水管壁の長さが水頭の高さに對し割合大なるに拘らず、水頭高く浴槽内にあつて漏洩する場合には浴槽壁は不滲透性であるから漏洩管壁の長さは水頭の高さに比し遙かに僅少だからである。兎も角もそれで此の漏洩と侵水との影響を完全水密管に對する $HA-WB$ 曲線に修正すれば結局の $Q-h$ 曲線は $A'CW'B'$ の如くなり、 W 附近で不連続的急變を現すであらう。

翻つて問題の温泉 No. 840 の $Q-h$ 實測圖を見るに、 $h=10$ cm (地表下 143 cm で浴槽の半ほど) の處に不連続がある。之が周圍地下水面の高さと想定されるが、事實それ位の處に不壓地下水が流れて居るのである。之より $h=23$ cm あたりまで湧出量が殆んど一定の様になつて居るけれども、それは靜止水頭まで 200 cm 以上ある内の 1/10 ほどに過ぎない水位變化の爲に外ならぬ。若し浴槽を更に 2 m 以上も築上けたとして靜止水頭まで h を高め得るならば、必ずや湧出量は漸減して遂に零となるべきことは疑ひを容れない。

V. 結 論

以上吾々は温泉の二種別——層狀泉と裂罅泉——を地上より判斷する方法として水頭 h 對湧出量 Q との相關曲線によることを提唱し、前論文にて層狀泉の例を別府舊市内多數温泉によつて示したから、本論文では裂罅泉の $Q-h$ 曲線の特徴を目的とし實測考究した。而して其の結果の主要條次の通りである。

1) 被壓層狀泉の $Q-h$ 曲線は直線となり、不壓層狀泉ならば Q 軸に頂點を有する拋物線となるに反し、完全なる裂罅泉では h 軸に頂點を有する拋物線とならねばならぬ。

2) 別府市龜川町野田の山麓岩盤に近い温泉中には上述後者の如き特性を示す温泉が實在することを突止め、裂罅泉の實例を實測舉示した。 S_3 温泉は其の典型的なものである。

3) 尙前論文で別府舊市内異常泉としたもの三口の内、二口は矢張り完全なる裂罅泉に屬することを明かにした。

4) 裂罅泉も堆積層中に湧出して透水性砂層に瀰漫すれば、裂罅を少し離れた地點の温泉は當然層狀泉となるが、其の程度は 20~30 m の距離で充分であり $Q-h$ グラフが直線になることを、同じ野田部落の温泉で實證した。 S_2 泉がそれである。

5) 裂罅泉が派出裂罅を有する場合の影響をも考究し、實例を以て之を説明した。派出裂罅の開口上端が問題の温泉靜止水頭より低くある場合には、主泉の水頭を高くするほど派出裂罅に逃げる温泉水が多くなるから、 $Q-h$ 曲線は單一裂罅の場合よりも h の大なる處で Q が比較的少く、 h 小なる部分では Q が割合多くなり、派出裂罅上端附近で急増する。従つて $Q-h$ 曲線は二つの拋物線狀曲線が連らなつた様な形になる。但し實驗が派出裂罅開口までは h を低下しない場合には一つの拋物線の先端が著しく開いて變曲點を示すだけに止まるのは當然である。龜川野田部落の S_1 , S_4 泉が夫れ等の例である。

6) 更に裂罅泉の泉管が不完全なる爲に温泉水の漏洩又は外水の浸入による影響をも考究し實例を以て之を説明した。

自然湧出の裂罅泉が帶水砂層を貫通する場合には、温水の通路周壁は溶解成分の沈澱等により管壁を形成するが、未だ充分完成に至らず漏洩浸入が可能である。其の内、上端不壓地下水の影響は、温泉水位 h が地下水位より低い場合には外水浸入によつて湧出量を増し、高き場合には更に著しき漏洩によつて湧出量激減し、其の間に不連續的急變化を示すべきことを推論し、別府市舊市内の自然湧出泉 No. 840 によつて實證した。

終りに本研究は文部省科學研究費によつて遂行し得たものである。