

みかけの冷却の式について及び雪下に於る 1 m 深地温の精密測定による温泉探査の可能性について

和田 昭 夫

福富孝治によると、温泉地に於て次式が成立する。⁽¹⁾ $\frac{\partial V}{\partial x} = hV$ 但し、 V : 温泉熱源のある場所の 1 m 深地温—温泉熱源のない場所の 1 m 深地温 (normal 地温)

これは筆者が既に発表したように、^{2) 3) 4)} 1 m 深に於て、みかけ上、ニュートンの冷却の式と同型の式が成立することより、理論的に以下の様にして証明することができる。

ニュートンのクーリングの式と同型の式： $\frac{\partial v}{\partial x} = h(v-v_0) \dots \dots (1) \quad v = V_1 + V_2$

但し、 V_1 : normal 地温 v : 測定地温 $V_2 = v - V_1$

(1)式は次式となる。

$$\frac{\partial(V_1 + V_2)}{\partial x} = h \left\{ (V_1 + V_2) - v_0 \right\} \therefore \frac{\partial V_1}{\partial x} = h(V_1 - v_0) \dots \dots (2) \quad \frac{\partial V_2}{\partial x} = hV_2 \dots \dots (3)$$

(3)式が福富の式となる。これは気温が 0 °C の時熱源のみによる地温に対する冷却の式である。地表に於る冷却の factor は次の通りである。

1) 輻射, 2) 伝導, 3) 蒸発, 4) 日射, 5) 風の乱流による熱伝達, 6) 雨の Infiltration 1), 2), 3), 5), に対してはニュートンの冷却の式と同型の式が成立し, 1 m 深地温に対しては, それらが季節的恒数になることは, 既に筆者が証明した。^{2) 3) 4)} 4) と 6) に対しても同様な事柄が成立することは以下の様にして証明される。

日射：熱の出入りは季節的にみて一定である。故に次式が成立しニュートンの冷却の式と同型になる。

$$\frac{\partial v}{\partial x} + Q = h(v-v_0) + Q \therefore \frac{\partial v}{\partial x} = h(v-v_0) \quad \text{即ち(1)式になる。} \quad Q : \text{日射による熱量}$$

雨による infiltration : 次式が成立しニュートンの冷却の式と同型になる。

$$\frac{\partial v}{\partial x} - R = h(v-v_0) - R \therefore \frac{\partial v}{\partial x} = h(v-v_0) \quad \text{即ち(1)式になる。}$$

但し、 R : 雨の Infiltration による熱移動

§1 地層の効果

1 m 深に於てそれ以浅の地層の効果を冷却効果に含めると、地層の影響は次式で表わされる。 $\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{L}(v-v_0)$ 但し v_0 : 地表面温度の平均 L : 層長 $\frac{1}{L} = h$ とすると、この式はニュートンのクーリングの式と同型になる。

§2 10m 以深の問題

10m 以深の地温は、地表の冷却効果が年的となる為、年的恒数となる。従つて 10m 以深のある地温を normal とするとき、それより深い場所の地温を V_0 とすると、次式が成立する。

$$\frac{\partial V}{\partial x} = h(V - V_0) \dots \dots (4) \quad \text{但し } h = \frac{1}{L} \quad L : \text{熱源からの深さ} \quad \text{故に(3)式 } \frac{\partial V_2}{\partial x} = hV_2 \text{ が成立する。}$$

§3 雪下の地温

雪でおおわれているとき，地表面温度は 0°C になり，季節的にみて次式が成立する。

$$\frac{\partial V}{\partial x} = hV \dots (5), \text{ 但し } h = \frac{1}{L} \quad L: \text{地表面からの深さ, } L=1\text{m とすると, } \frac{\partial V}{\partial x} = V \dots (6) \text{ と}$$

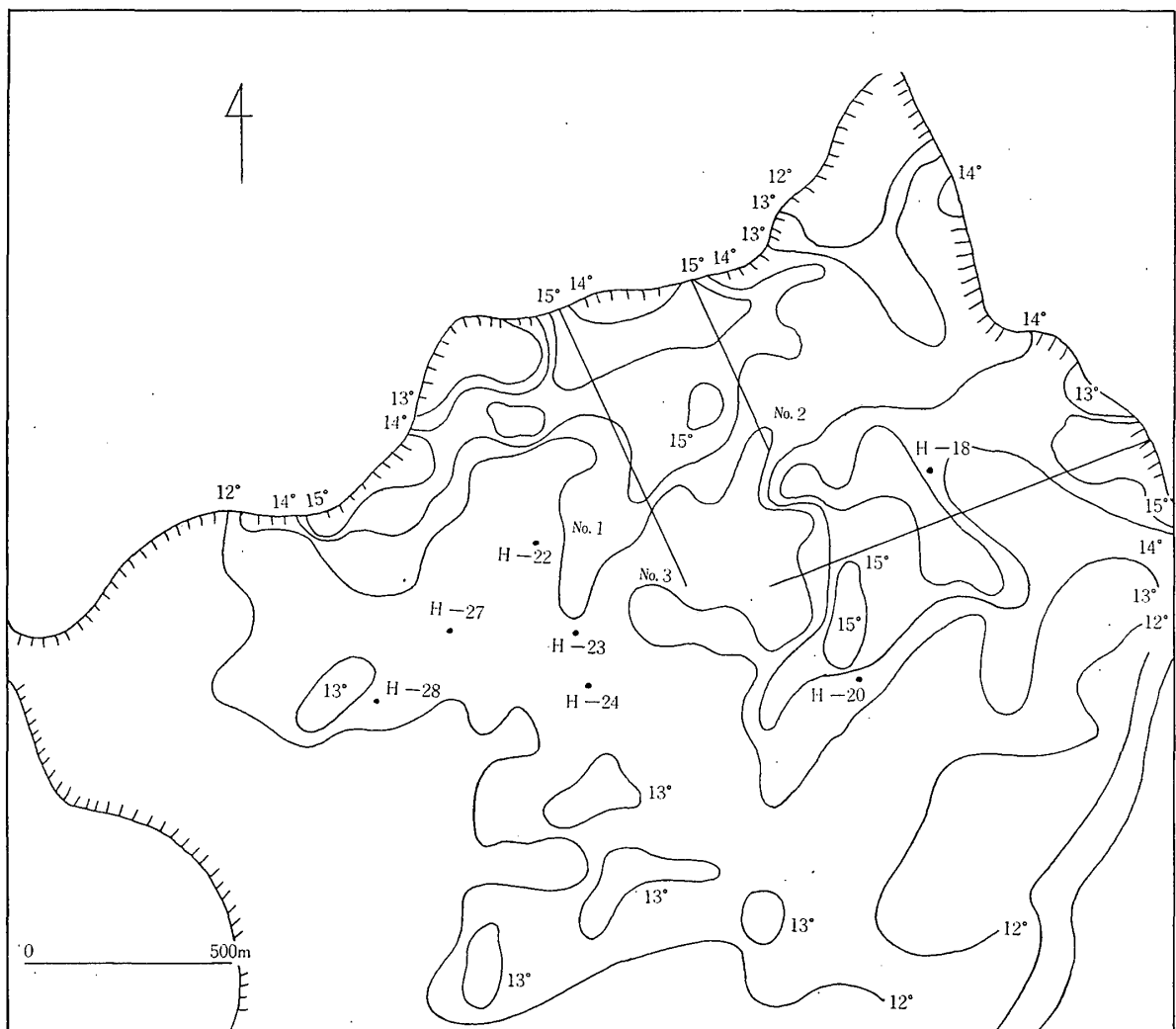
なる。雪が土とまばらに存在するときも，理論的にそれは氷と水が共存状態にあることから地表面は 0°C である，それは筆者が定山溪で実測して確かめた。

§4 地下水層の問題

水の熱拡散係数は $0,0014$ で壤土のそれは $0,003$ である。従つてその比は $1:2$ である。地下水層の厚さを他の層の厚さと比較するとき比較的小であるので，温泉熱源の上面迄の地層を単一層とみなす近似が成立するであろう。

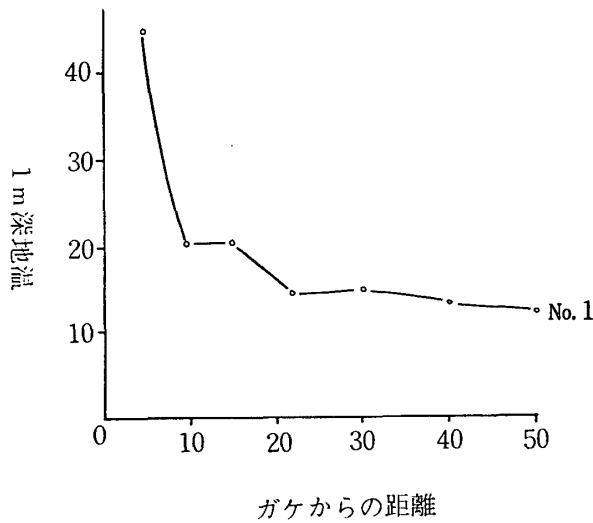
§5 濁川温泉の地温解析

福富等による「北海道濁川温泉の調査」⁵⁾中の Data をもとに濁川温泉の地温解析を試みた。

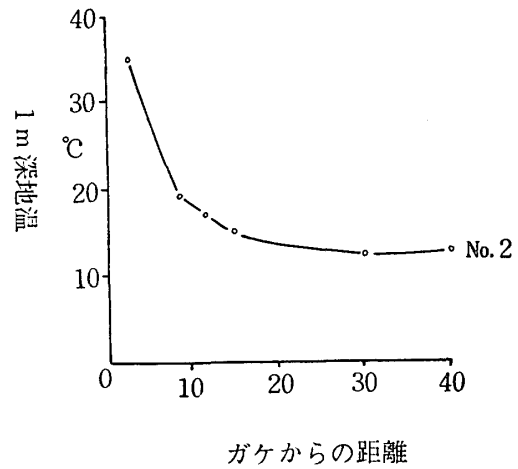


第1図 濁川温泉の地温分佈 (福富孝治, 藤木忠美, 須川明, 大谷清隆, 和田昭夫, 徳永英二, 北海道濁川温泉の調査, 北海道大学, 地球物理学研究報告, 第10号)

第1図はその論文中にある図を転写したものである。



第 2 図



第 3 図

第 1 図から得られた第 2 図を第 3 図を用いて解析する。但し第 3 図は筆者の論文「ニュートンのクーリングの式の検討及び 1 m 深地温分布の図式解法と川湯地域への適用」中の第 4 図、第 5 図、第 6 図、第 7 図を用いて作った表で、各図中の $\lambda=10$ の時の曲線をまとめたものである。

福富の式 $\frac{\partial V}{\partial x} = hV$ の h の値は福富によると大体 1 である。この値は裸地に於る値を解釈できる。このことは次の事を意味する。1 m 以浅の地層の効果は、 $h=1$ を与える。これは、地表面は 0°C と考えてよいことを意味する。第 3 図は、 $\lambda=10$ をもつて地表面が 0°C であるという近似を行い、地表面温度が 0°C で上面が平板の熱源が種々の角度で交つた時の図である。

第 2 図を第 3 図を用いて解析すると次の結果を得る。盆地の境界にある 1 m 深地温の最高部から 10m 以内に於て温泉熱源生の上面の傾斜は極めて急で 30° をこえると予想される。即ち温泉は線状で、割れ目にそつて湧出していると考えられる。又 1 m 深地温の低い盆地の北半分の中央部は熱源の上面が殆んど平面である。北海道濁川温泉の調査中に次の記述がある。

「天然湧出の高温な温泉又は高温なガス噴出口は、当然のことではあるが、 15°C の等地温線に包まれる高温部に全部存在している。又 15°C 以上の地温を示す比較的広い面積の高温部はカルデラの北の壁に沿つた円弧（第 1 図中……）上に多く分布しており、これはカルデラ陥没の境界線であり、これに沿つて地下深くから湧出した温泉によることを示唆している。他の 15°C 以上の高温部は盆地北半部の中央にあり、高温な噴気孔や後述する FC 系の高温温泉の湧出口はこの中に存在し、これら噴気孔をつくるガスや水蒸気と FC 系の源温泉はこの地下深くから湧出することを示している。 14°C 以上の地温を示す地域の形はかなり複雑であるが、上に述べたカルデラ陥没線と中央高温部の存在をよく示している。」「地理調査所発行の 5 万分の 1 地形図を一見すると気付くことであるが、他の地方と異つて比較的深く長い谷が数多く系統的に走っている。これはこの地方に地質から判断された断層よりも更に規模の小さい断層や割目が多く存在することを暗示する。」「これらの割目とカルデラ壁で構成される扇形の内部で地温が周囲より高いのであるが、その理由は未だ判つていない。ただ想像に過ぎないがこの部分が周囲に対し少々陥没していて地下から流出して盆地地下水と混合している温泉も PQ, XY の壁でさえぎられて他への流出が妨げられているためではないかと考えている。」

これ等の記述は、筆者の得た結論を一致する。

福富等の「北海道鹿部温泉の調査」によると鹿部中央地域の 1 m 深地温の高温滞の延長の 20

mの高さの丘の上で normal 地温より 2℃高い地温を示す。これは温泉源の深さがわずか20m位でわずかに高い1m深地温を示すに過ぎず1m深地温の高温帯は温泉水が極めて浅所に存在することを意味すると思われる。実際に同論文によると、この地域に於て、殆んどすべて沸騰泉である。

この論文によると、濁川温泉の源泉として、A 源泉、B 源泉を化学組成から分類している。ここでB 源泉は化学成分を含まないが温度の高い水即ち温度の高い地下水であると考えることができる。又この論文によると、ボーリングによる温泉の温度は50℃が多く、A 源泉の温度は大体100℃である。これは、他の温泉地についても大体言えることである。これより温泉熱源は大体50℃とすることができる。濁川盆地の北半分の1m深地温の低い処で既に述べたように上面が平板の水平に近い温泉熱源を考慮することができるが、その深さは、地温異常が1℃であることから、100mを考慮することができる。これは第1図に於る H-22, H-24, H-25, H-26 の深度が73~75m, 80m, 90m, 66m以上、という値を持つことから裏づけられる。泉温は大体50℃である。これより100m深の温泉の存在地に於て、1m深地温の異常が1℃であるという一般的な決論を得るだろう。既出の論文によると高温帯の bohling 深は、1m~4mの極めて浅いものである。

§6 雪下に於る温泉探査の可能性について

雪下に於ては既に述べたように、(5)式 $\frac{\partial V}{\partial x} = hV$ が成立する。但し $h = \frac{1}{L}$ ここで1m深地温を論ずるとき、(7)式 $\frac{\partial V}{\partial x} = v$ が成立する。雪のない普通の場所に於て、筆者が以前述べたように、特に植生によつて支配されるが、雪下に於てはその影響はない。雪下に於る式 $\frac{\partial V}{\partial x} = hV$ の V は雪下の季節的な1m深地温である。然し雪下に於る normal 地温が積雪1ヶ月後に0℃となることから V は一般的 normal 地温を引いた値、即ち温泉熱源のみによる値とみなすことができる。又裸地に於て福富の式が成立する。故に、この場合は雪下に於ると同様の議論になる。然し植生のある場合は、冷却係数はそれに極めて大きく支配され、福富の方法による温泉探査の障害になるが雪下の1m深地温による温泉探査は、雪は地表面迄達するので、常に地表面温度が0℃に保たれる為植生の影響がなく、従つて精密測定が可能であり、温泉探査の有効な方法であろうと思われる。

§7 温泉熱源の変化について

温泉熱源は本質的に無変化とみなすことができ変化するときは artificial use に関する。artificial use は具体的に言えば揚水であり、一定のエネルギーで揚水するとき揚水量が一定で泉温が一定のとき温泉源は変化しないとみることができる。

ここで揚水量の変化と泉温の変化の積でもつて温泉熱源の変化を表わすことにする。

§8 h の値について

福富の式より裸地に於て地表面が気温0℃の時0に保たれることは、裸地に於る h が ∞ であることを示す。

筆者は既に植生のある処の h が0、半分植生で半分裸地の処で $h = 0.6\text{m}^{-1}$ を得ている。

以上より次の結論を得る、 h をきめる最も重要な Factor は植生である。

§9 地表面温度について

地表面温度は太陽輻射エネルギーと地球熱源による熱エネルギーで定まる。次にそれを検討する。空気から地表面への熱流を I_a 、地球内部から地表面への熱流を I_e とすると、年的 scale で考えると地表面温度は一定に保たれているから、 $I_a = I_e$ となる。従つて地表面温度は年的に見て solar energy で定る。

地表面温度は次式で定まる。

$$v_{x=0} = \frac{A h}{\sqrt{\{(h + \omega')^2 + \omega'^2\}}} \sin(\omega t - \varepsilon - \delta) + \frac{2Kh}{\pi} \int_0^\infty \frac{(\omega \cos \varepsilon - Ku^2 \sin \varepsilon)}{(K^2 u^4 + \omega^2)(h^2 + u^2)} e^{-Ku^2 t} u^2 du \dots (7)$$

$\omega' = \sqrt{\omega/2K}$ の値は予測される値として、かつて筆者は 0.03 を得た。従つて $\omega' \approx 0$ とする。第2項は $t \rightarrow \infty$ の時 0 に収斂する。そうすると(7)式は、 $v_{x=0} \doteq A \sin(\omega t - \varepsilon) \dots (8)$ となる。

又、地表面温度に関しては、檀原毅、友田好文等、「測地、地球物理」に次の記述がある。

「大気と地表との境界面では激しい対流が起つており等価的に、大気は地表にとつてきわめて熱伝導率の大きな物質として働く。以上のことから地表面の温度は第1近似としては大気の温度に等しいと考えられる。」以上の事柄は、実際に筆者が裸地に於て観測して得られた結果及び福富の式より導かれる結果と一致する。

§9 法則について

一般形として次式を与えることにする。

$$\alpha x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} x_3^{\alpha_3} \dots + \beta x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} x_3^{\beta_3} + \dots = C \dots (8)$$

その特殊形として次式が得られる。

$$\alpha x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} x_3^{\alpha_3} \dots x_n^{\alpha_n} = C' \quad \therefore x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} x_3^{\alpha_3} \dots x_n^{\alpha_n} = C \dots (9)$$

$\min(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) = \alpha_k$ とすると(9)式は次式に変形される。

$$(x_1 x_2 x_3 \dots x_n)^{\alpha_k} x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_n^{\beta_n} = C \dots (10)$$

但し、 $x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_n^{\beta_n}$ は $x_k^{\beta_k}$ がぬけている。但し、 $x_k^{\beta_k} = x_k^{\alpha_k}$

ここで(10)式の特殊形として次式が得られる。

$$(x_1 x_2 x_3 \dots x_n)^{\alpha_k} x_j = C \dots (11)$$

(11)式より次式が得られる。

$$(x_1 x_2 x_3 \dots x_n)^{\alpha_k} = \frac{C}{x_j} \dots (12)$$

$x_1 x_2 x_3 \dots x_n = X$ とおく。

(12)式は $X^{\alpha_k} = \frac{C}{x_j} \dots (13)$ となる。

(13)式より次式が得られる。

$$\int X^{\alpha_k} dx = \int \frac{C}{x_j} dx \dots (14)$$

$$\therefore \frac{X^{\alpha_k+1}}{\alpha_k+1} = C \log x_j \dots (15)$$

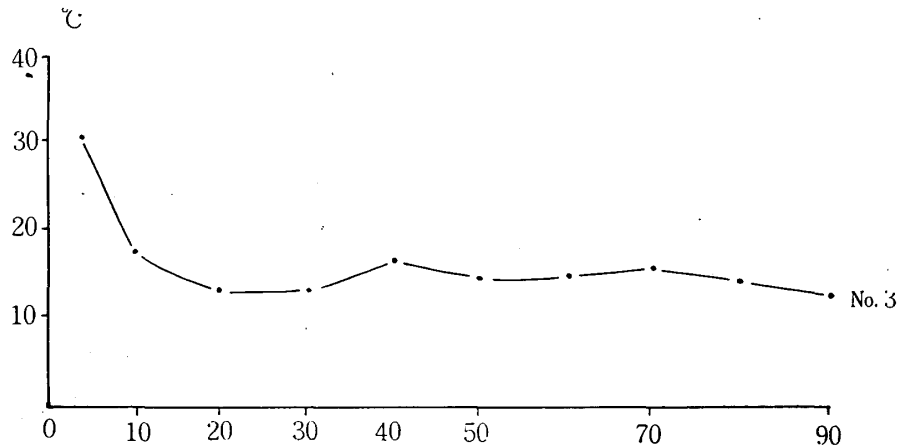
$$\therefore \frac{X^{\alpha_k+1}}{e^{\alpha_k+1}} = c e^{\log x_j} = c x_j \dots (16)$$

ここで $\frac{X^{\alpha_k+1}}{\alpha_k+1} = X$, $x_j = Y$ とおくと (16)式は $e^x = cY \dots (17)$

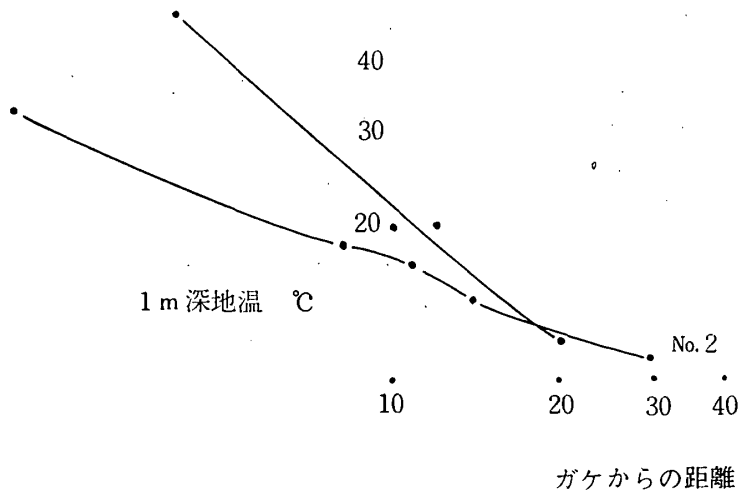
となる。(17)式は又 $Y = c e^X \dots (18)$ と書き表すことができる。

§10 濁川温泉の地温解析

第2図, 第3図, 第4図から両対数表に於て1 m深地温と距離との関係に於て linear な関係が得られる。この図より次式が得られる。 $\log y = c \log x \dots (18) \therefore y = x^c \dots (19) x^c = X$ とおくと, (19)式より $e^y = e^X \dots (20) e^y = Y$ とおくと, (20)式は $Y = e^X \dots (21)$ となる。 $Y = \frac{1}{c} X$ とおいて, (21)式は $Y = ce^X \dots (22)$ となる。これは(18)式と同型である。



第 4 図



第 5 図

参 考 文 献

- 1) 福富孝治：1 m 深地温についての 2, 3 の問題, 北大地球物理学研究報告, No.9, (1962).
- 2) 和田昭夫：1 次元 RC 回路網による地温の解析, 札幌大学教養部紀要第 2 号, 昭和46年.
- 3) 和田昭夫：ニュートンのクーリングの式の検討及び 1 m 深地温分布の図式解法と川湯地域への適用, 札幌大学教養部紀要第 3 号, 昭和47年.
- 4) 和田昭夫：地表面からの冷却について, 札幌大学教養部紀要第 5 号, 昭和48年.
- 5) 福富孝治, 藤木忠美, 須川明, 大谷清隆, 和田昭夫, 徳永英二：北海道濁川温泉の調査, 北海道大学地球物理学研究報告, 第10号, 昭和38年.
- 6) 福富孝治, 藤木忠美, 須川明, 和田昭夫, 伊藤公介：北海道鹿部温泉の調査, 北海道大学地球物理学研究報告, 第10号, 昭和38年.
- 7) 檀原毅, 友田好文：測地, 地球物理.