



Title	1. 山形県天童温泉の地球物理学的研究
Author(s)	福富, 孝治; FUKUTOMI, Takaharu; 中尾, 欣四郎 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 18, 1-32
Issue Date	1967-08-10
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.18.1
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13927
Type	departmental bulletin paper
File Information	18_p1-32.pdf



1. 山形県天童温泉の地球物理学的研究

福富孝治・中尾欣四郎・浦上晃一・大槻 栄

和気 徹・三好日出夫・田上龍一

小島正博・小泊重能・西田直樹

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 42 年 4 月受理 —

I. 序 言

山形県よりの委託研究として昭和 41 年 11 月 26 日～12 月 1 日に、山形県天童市天童温泉について、廃井中の深さによる温度分布の測定、1 m 深地温調査、浅層地下水の調査、電気探査(比抵抗法)、温泉揚湯の一時停止に伴う付近温泉水頭の恢復の測定、温泉および地下水の水頭の水準測量、付近土壌の熱伝導率測定等を行なった。

以上の調査の結果と、山形県衛生部によって行なわれた過去の調査結果¹⁾と天童温泉協同組合における保管資料とを併せ用いて、天童温泉地域における地下構造、表層地下水の動向、温泉水の地下状態と湧出機構、温泉の存在範囲、温泉と深層地下水との関係等について論じたのが本報告である。

調査に際し種々援助を与えられ、また過去の調査資料を提供して下さった山形県衛生部薬務課の東海林技師はじめ他の方々、天童温泉協同組合の萬 現吉氏はじめ他の方々に対し、また種々便宜を与えられた旧温泉穿井所有者に対し厚く謝意を表する次第である。

II. 地形、地質の概況

天童温泉は奥羽本線天童駅の東方約 1 km に位置し、村山盆地の東隅を占める沖積平野に湧出する温泉である。温泉地域の南西側には舞鶴山があり、その南東方に八幡山および竜王山がほぼ直線状に配列している。温泉地域の東側には湯神山があり、その東南方は連続した山塊となっている。天童温泉地域を含む沖積平野はこれら両山地群の中間に介在する。

この平野は南から北へ傾く緩い扇状地を形成し、この平野のほぼ中央を東南から北西方向へ倉津川が流れ、その流域は厚い沖積層で覆われている。付近の山地はいずれも第三紀層によって構成され、沖積層の基盤もまた第三紀層と推察されている。山形県衛生部の報告¹⁾によれば、第三紀層中には舞鶴山と八幡山の中間から N30°E に延びる山元断層(推定)と八幡山と竜王山の中間から N20°E へ湯神山付近まで延びるやや小規模な貫津断層とが認められている。

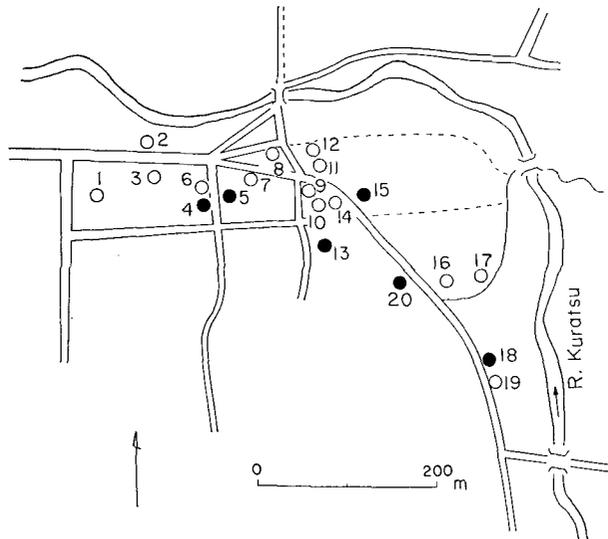
1) 山形県衛生部；山形県の温泉(第 5 輯)村山南部地区温泉(昭 40), 1-2.

III. 温泉地域とその付近の地下構造

1. 温泉 No. 20 (協同組合 6 号井) における地下構造

第 1 図は温泉地域とその付近の略図 (山形県衛生部報告¹⁾ による) で、白丸は昭和 31 年に行なわれた集中管理以前の温泉で現在廃井となっている温泉の位置、黒丸は現在常時揚湯されている温泉の位置である。

温泉地域の南東隅に近く存在する温泉 No. 20 (温泉協同組合 6 号井) は昭和 38 年 4 月 25 日~7 月 26 日の期間に rotary-boring 法により深さ 200 m まで掘削して得られた最も新しい温泉で、掘削当時に採取された core により第 2 図下段に示したように地質が推定されている。すなわち、地表から 96 m までは沖積層、それ以下は第三紀層である。第 2 図上段および中段は夫々掘削当時測定された孔内水位および孔底温度の深さに対する変化を示したものであるが孔底温度の深さに対する変化は、図のように、折れ曲ったいくつかの線分の連結として表わされることが判る。掘削完了後の揚湯試験において揚湯量 180 l/min に対し 62°C の温泉が得られていることと、温水が管内を上昇する場合の冷却を考えると、この温泉水は深さ 137~148 m の礫岩層から湧出しているものと推察される。この深さで温度が 63.5°C の極大値を示していることもこれを示唆する。



第 1 図 天童温泉の源泉分布

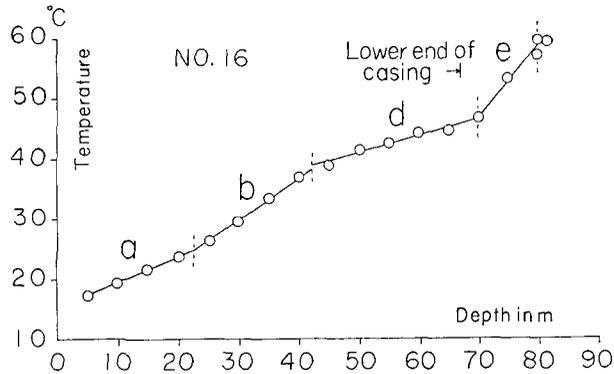
図中丸は温泉の位置 1. 滝の湯 2. 東松館 3. 小関館 4. つるや 5. 松の湯 1 号 6. 松の湯 2 号 7. 新庄館 8. 天童荘 9. いなり湯 1 号 10. いなり湯 2 号 11. 富士の湯 12. やよい館 13. 舞鶴荘 14. 一楽荘 15. 篠田病院 16. 東湯 17. いづみ荘 18. 組合 1 号 19. 栄屋 20. 組合 6 号

Fig. 1. Geographical distribution of hot springs at Tendo in Yamagata prefecture.

を除き数年来全く使用されていないことと、管の口径は No. 7 が 10.0 cm, 他は 3.75~6.25 cm で細いので、管内の水温はその部分の地層の地温と考えられる。

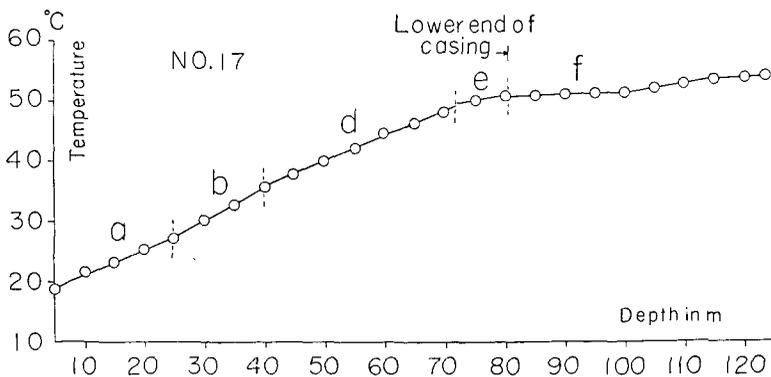
第 3 図および第 4 図は夫々 No. 16 および No. 17 の地温鉛直分布図であるが、No. 20 の場合と同様に地温の鉛直分布は直線の折れ曲りで表わされる。その直線の傾きの様子と No. 20 との対比から No. 16 においては a, b, d および e の 4 層, No. 17 の場合には a, b, d および f の 4 層の存在が推定された。

第 5 図, 第 6 図および第 7 図は夫々 No. 11, No. 7 および No. 2 における地温の鉛直分布図であるが、前と同様な考えから、図に示したように、a, b, c, d, e および f の 6 層に区分された。ここに c 層とは b 層と d 層との間にある地温傾斜の小さい比較的薄い層である。c 層と f 層は、地温傾斜が小さいか、ないことから見て、夫々温度は異なるが温泉水を含む層であることが推察される。



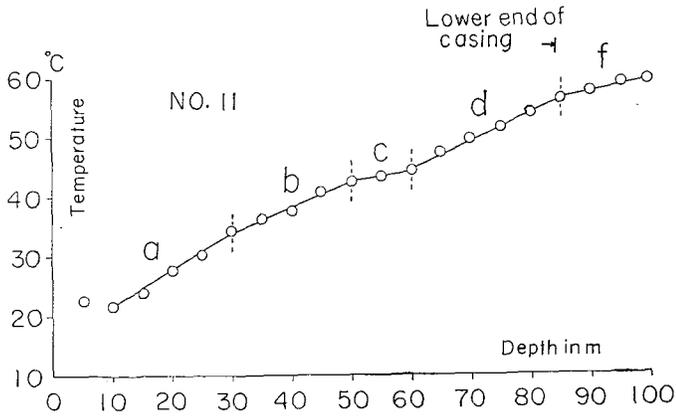
第 3 図 No. 16 における孔内水温の鉛直分布

Fig. 3. Vertical distribution of underground temperature at bore-hole No. 16.

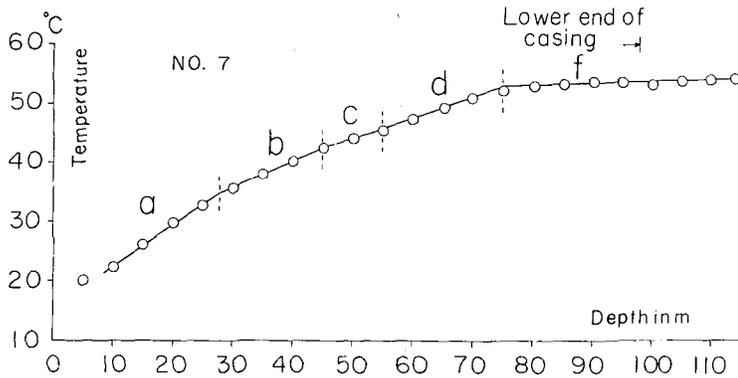


第 4 図 No. 17 における孔内水温の鉛直分布

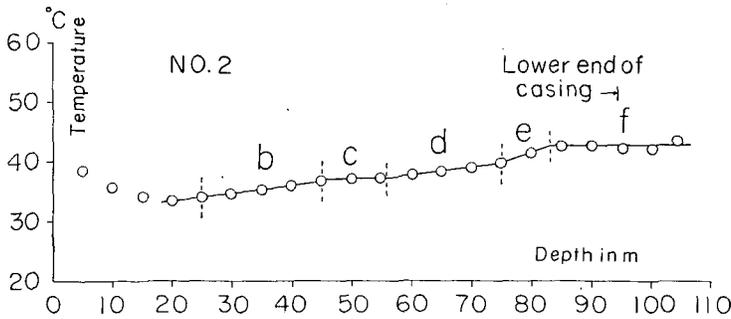
Fig. 4. Vertical distribution of underground temperature at bore-hole No. 17.



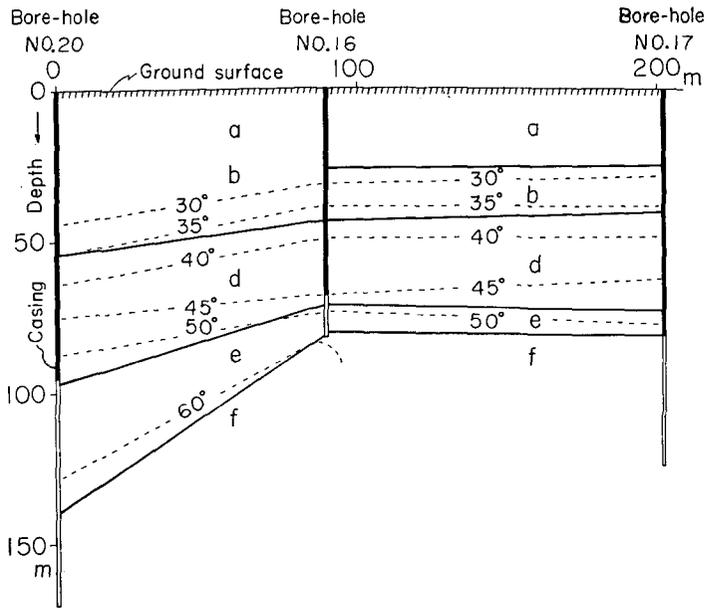
第5図 No. 11における孔内水温の鉛直分布
 Fig. 5. Vertical distribution of underground temperature at bore-hole No. 11.



第6図 No. 7における孔内水温の鉛直分布
 Fig. 6. Vertical distribution of underground temperature at bore-hole No. 7.

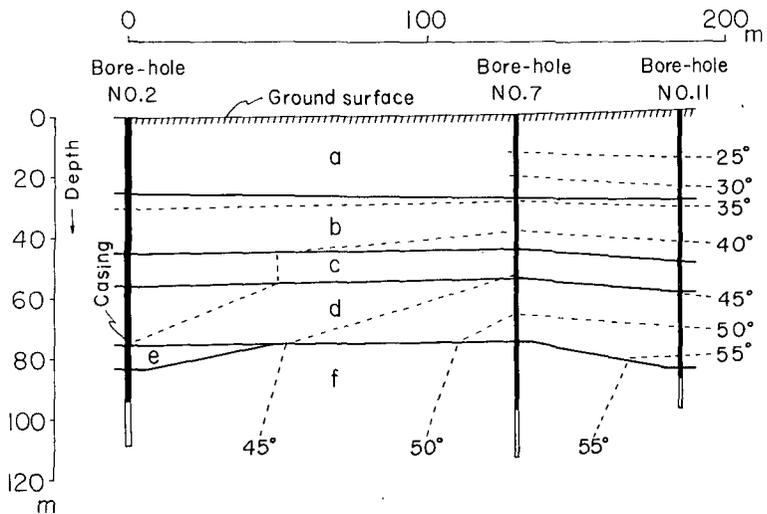


第7図 No. 2における孔内水温の鉛直分布
 Fig. 7. Vertical distribution of underground temperature at bore-hole No. 2.



第8図 No. 20, No. 16 および No. 17 を通る鉛直断面における層状構造と地温分布

Fig. 8. Laminar structure and underground temperature distribution at a vertical plane passing through bore-holes No. 20, No. 16 and No. 17.



第9図 No. 11, No. 7 および No. 2 を通る鉛直断面における層状構造と地温分布

Fig. 9. Laminar structure and underground temperature distribution at a vertical plane passing through bore-holes No. 11, No. 7 and No. 2.

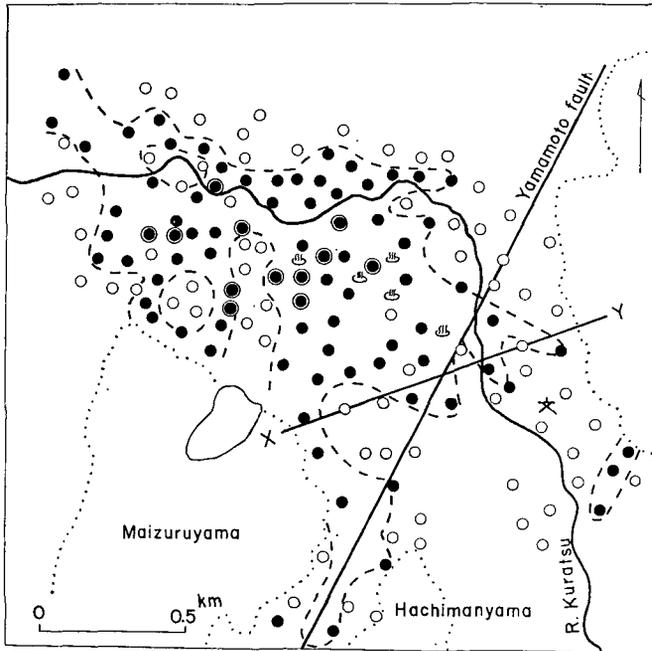
第1図から判るように、No. 20, No. 16, No. 17 はほぼ一直線上に配列しているので図中に実線で示した鉛直断面上に3 穿井を投影して各層の境界 (図中太い線) および地温の等温線 (点線) の概況を示したのが第8図である。図から判るように、No. 16 と No. 17 においては各層の境界は大体水平であるが、No. 16 から No. 20 へ向うと沖積層と第三紀層との境が急に深くなっていると思われる。第9図は No. 11, No. 7 および No. 2 における同様な関係を示したものであるが、この場合各層の境界はほぼ水平をなしている。ただ、No. 2 においては第三紀層の表層に薄い e 層が存在するが、No. 7, No. 11 ではこれが存在しないと思われる。

以上の結果を総合すれば、温泉地域における沖積層の厚さはおよそ 70~100 m である。しかし、温泉地域の NNW へ 2.4 km の明治乳業付近では沖積層の厚さは 150 m 以上にもなっていることが掘削当時の柱状図から確かめられている。温泉地域の南方貫津に至る地域内の7 測線において L-10 型大地比抵抗器を用いて地下構造の探査を試みたが、温泉帯水層についての手掛りはほとんど得られなかったので、ここでは省略する。

IV. 温泉地域とその付近における 1 m 深地温分布

1. 1 m 深地温の分布

天童温泉地域を中心に、面積 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 毎におよそ 1 点の割合で 159 の地点において



第10図 1 m 深地温の分布

Fig. 10. Horizontal distribution of ground temperature at a depth of 1 m in Tendo hot spring locality.

1 m 深地温を測定した。測定は従来の方法によった。第 10 図中の丸は測点の位置である。測定された 1 m 深地温の値は温泉街の数測点において $15^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{C}$ の高温を示したほかは $10^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{C}$ の範囲内の値であった。 15°C 以上の高い値には配湯管などの影響もあると思われる。1 m 深地温 θ が 11.9°C 以下の測点を白丸、 $12^{\circ}\leq\theta<13^{\circ}\text{C}$ の測点を黒丸、 13°C 以上の測点を二重丸で第 10 図中に示し、白丸と黒丸との境界線すなわち 12°C の等温線を図に記入した。しかし、境界線を引く際には、1 点だけ孤立して異なった値を示す測点は無視した。また参考として、地質から推定されている山元断層と、後章において推定した温泉水を地下深くから導くと考えられる割れ目の中央線 XY を図中に記入した。

この地域と同緯度同高度における 11 月末の 1 m 深地温の平常値は、福富の表²⁾によれば 11.3°C と推定されるので、 12°C 以上の 1 m 深地温を示す部分は何らかの原因で普通の場合よりもやや温度が高いと考えられる。この場合、この高温部には温泉の湧出地域を含んでいるので、この温度のやや高い原因を地下に温泉水が存在するためであると考えるのは、一応妥当であろう。ここで注意すべきことは、 12°C 以上のやや高温な地温を示す地帯は南側は山元断層または XY 線を境界として、温泉地域を中心に 500 m ぐらいの幅で北西方向におよそ 1.5 km 延びていることである。

2. 天童温泉地域から空気中に放出される熱エネルギー

天童温泉地域の 9 の測点において 50 cm, 1 m 深地温を同時に測定し、地温勾配 G を求めた。一般に温泉地域では 1 m 深地温 θ とその地点における地温勾配 G との間には直線の関係のあることが知られている。天童の場合には温度範囲が狭いためあまり明瞭な関係ではなかったが、大略

$$G = \frac{4}{3} \theta \quad (1)$$

で表わされる。ただし、 G および θ の値からは、温泉による影響のないと思われる周辺地区の 1 m 深地温 10°C 、地温勾配 $3\times 10^{-2}\text{C}/\text{cm}$ を差引いてある。また、土壤の熱伝導率 κ は、probe method によって測定して得た $\kappa=1.92\times 10^{-3}\text{ cal}/\text{cm sec }^{\circ}\text{C}$ を採用した。

したがって、平野部において、1 m 深地温 12°C 以上を示す地域の熱放出量 Q_2 を従来の方法を用いて求め、 $Q_2=3.1\times 10^7\text{ cal}/\text{min}$ を得た。

V. 地下水調査

地下水調査は、天童温泉を中心に下貫津部落から天童市街地にかけて約 60 カ所の井戸について行なった。調査したのは、主として深さ 5 m たらずの浅井戸で、沖積層上部の自由水面地下水である。水位標高・水温・ Cl^- 含有量および井戸の深さの調査結果を第 1 表に示した。

2) 福富孝治; 1 m 深地温分布より温泉探査の可能性について, 北大地球物理学研究報告 1 (昭 26), 1.

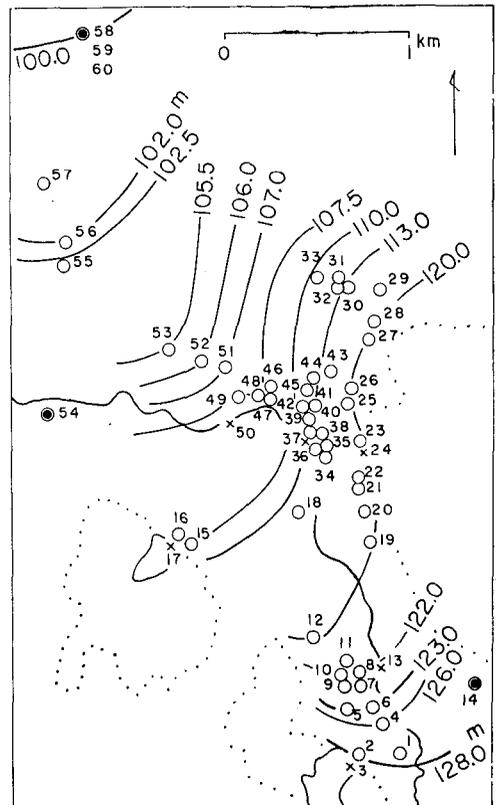
第1表 天童市地下水調査

Well No.	Well depth (m)	海拔標高 Water level (m)	Water temp. (°C)	Cl ⁻ (mg/L)	備 考
1	4.4	125.43	11.7	20	
2	4.0	127.78	11.2	19	
3			7.3	10	六十里養魚池
4	1.2	126.03	11.2	51	
5	2.9	122.62	11.3	18	
6	4.0	122.93	12.3	55	
7			11.9	91	
8	2.9	122.14	11.6	51	
9	3.1	121.88	11.9	23	
10	2.5	121.19	11.8	17	
11	3.4	120.47	12.9	73	
12	4.0	119.69	12.3	22	元用水用井戸
13			8.1	9	倉津川
14	200		26.7	6	武田3号
15	3.1	110.16	12.1	46	
16			14.2	16	佐藤善兵衛
17			7.5	11	愛宕沼
18	1.1		14.8	12	
19	1.5	119.12	8.9	13	
20			15.3	11	
21	(7.6)	116.75	10.7	9	堰の湯, 自然湧出時 27°C
22	4.7		14.0	69	
23	0	118.75	14.0	10	湧水
24		118.01	6.8	9	約10m直径の沼
25	3		13.0	30	
26	5.5	121.55	14.2	14	
27			13.0	19	
28	0.9	119.73	10.0	20	
29			12.5	15	
30	3.8	117.00	12.5	33	
31	4.7	112.76	12.0	17	
32	4.0	113.00	7.6	11	
33	5.3	110.41	15.4	12	
34	0.5	114.07	13.1	12	
35	1.5	116.03	12.9	11	
36	0.5	116.03	13.1	31	
37			9.2	10	倉津川
38			13.6	15	
39	0.5	111.84	13.6	20	
40	5.5	112.60	12.9	39	
41	4	112.49	14.1	30	
42	3	112.13	13.9	33	
43	5.5	114.17	11.8	11	
44	2	112.84	12.1	11	
45	2	112.21	13.3	21	

Well No.	Well depth (m)	海抜標高 Water level (m)	Water temp. (°C)	Cl ⁻ (mg/L)	備 考
46	4.1	108.10	13.0	14	
47	3.2	107.63	11.9	38	
48	2.0		9.2	37	
49	2.5	107.53	13.9	18	
50			10.2	12	倉津川 (鎌田橋)
51	3.1	107.04	13.1	11	
52	3.5	106.03	14.1	12	
53	2.9	105.54	13.9	14	
54	(72)		(23.2)	(141.8)	五軒長屋
55	4.7	102.64	12.7	11	水源池 (直径 3.6 m 井戸)
56	3.6	101.84	12.1	12	
57	6.2	102.37	13.3	19	
58	65		15.3	42	明治乳業 1 号井 (揚水中)
59	110		13.0	109	明治乳業 2 号井 (揚水停止中)
60	115		18.2	125	明治乳業 3 号井 (揚水中)

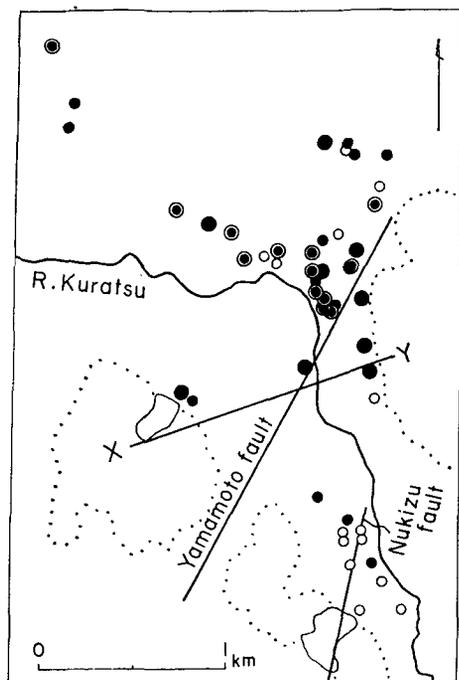
地下水の等水位線を第 11 図に示したが、浅層地下水の動向は、下貫津付近では倉津川にそって流れ、天童温泉付近で北東方向の谷(山元部落)からの比較的優勢な地下水と合して北北西乃至西北西方向に流れる。なお、図中に調査井戸を丸印で示し、それらに第 1 表の井戸番号を附した。また、×印は川あるいは沼の調査箇所、二重丸は深井戸の位置である。

第 12 図には、深井戸を除いて浅層地下水の水温の分布を示した。天童温泉の北東倉津川の東側ではほとんど 13°C 以上であり、概して東方の山麓部で高い。温泉地域には井戸が存在しないので断言はできないが、1 m 深地温は浅い地下水の影響を受けることが大きいことと、1 m 深地温が温泉地域付近でやや高いことから推察すれば、温泉地域の表層地下水の温度は 14°C 以上の値を示すことが想像される。しかし、1 m 深地温のやや高い地帯が北西方向に長く延びているのは第 11 図に示した浅層地下水の流動の影響をかなり



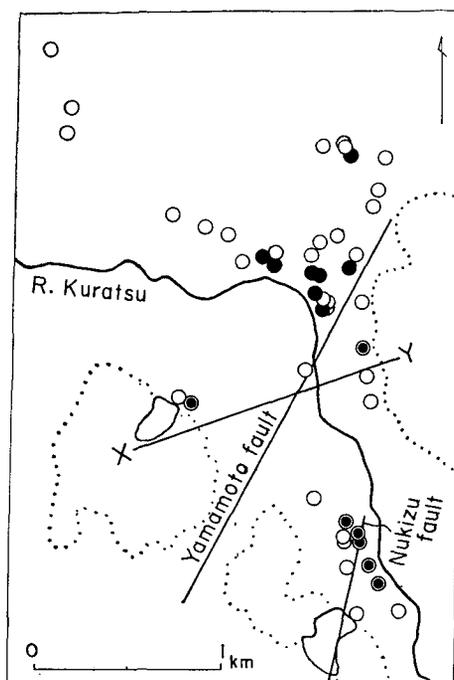
第 11 図 地下水の等水位線 (数字は井戸番号)

Fig. 11. Horizontal distribution of height of water head of shallow ground water above mean sea-level. Numerals attached to points are number of wells in Table 1.



第12図 浅層地下水の水温 (°C)
 $12^{\circ}\text{C} > \circ$ $12^{\circ}\text{C} \leq \bullet < 13^{\circ}\text{C}$
 $13^{\circ}\text{C} \leq \odot < 14^{\circ}\text{C}$ $14^{\circ}\text{C} \leq \ominus$

Fig. 12. Temperature distribution of shallow ground water.



第13図 Cl^- 含有量の分布 (mg/L)
 $30 \text{ mg/L} > \circ$ $30 \text{ mg/L} \leq \bullet < 40 \text{ mg/L}$
 $40 \text{ mg/L} \leq \odot$

Fig. 13. Horizontal distribution of Cl^- content of shallow ground water.

受けていると思われる。

Cl^- の地域分布を第13図に示したが、 Cl^- の分布で特徴的なのは、地下水水温の低い地域である下貫津で最高 91 mg/L と異常に Cl^- が大きく、その周囲にも Cl^- の比較的大きい井戸が集中していることである。第13図に示した貫津断層の位置はちょうどこの付近を通るので、この断層と Cl^- を多く含有する水との間に何らかの関係の存在が示唆される。また、水温の高い地域である天童温泉東部で、30~40 mg/L の Cl^- が比較的多い井戸が認められた。

VI. 温泉水の地下流動と湧出の機構

1. 天童温泉は層状温泉である。

第III章において、温泉 No. 20 の掘削時における孔底温度の調査、core による地質の判定資料、ならびに廃井中の温度の鉛直分布の測定結果から、場所によってややその深さは異なるが地下 75~140 m に上面をもつ f 層すなわち第三紀礫岩層を含む帯水層中を温泉水は、主として、ほぼ水平に流動することが推定された。

したがって、天童温泉はいわゆる(被圧)層状温泉であることが判るのである。

2. 温泉水の地下流動状況

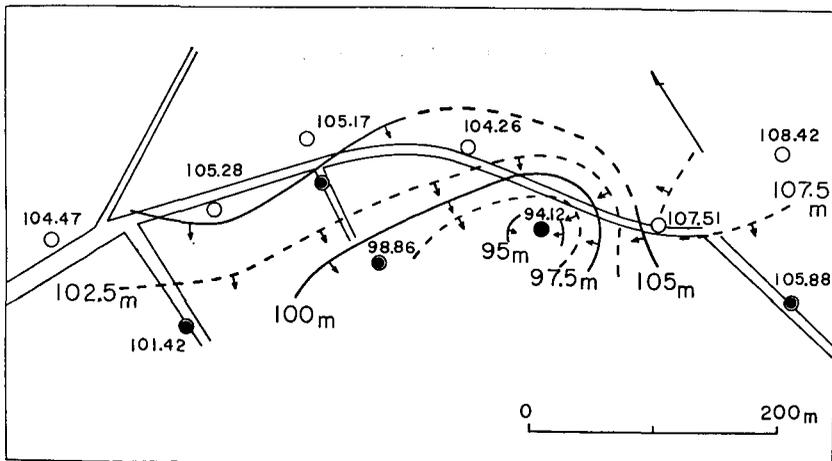
(1) 今回の調査時における流動状況

今回の調査の際には、天童温泉協同組合の1号井(温泉 No. 18), 2号井 (No. 15), 3号井 (No. 13), 5号井 (No. 5), 6号井 (No. 20) 等がいずれも常時揚湯中であった。これらの揚湯量, 動水位の穿井管口からの深さ, ならびに, この状況における温泉廃井 No. 2, No. 7, No. 11,

第2表 天童温泉における温泉調査結果(昭和41年11月28~29日)

源 泉 名	温 泉 No.	揚 湯 量 (L/min)	温 度 (°C)	穿井管口下動 水位または静 止水頭*まで の深さ (m)	動力位または 静止水頭の海 面上高度** (m)	Cl ⁻ (mg/L)
天童温泉協同組合 1号	18	138	65.0	6.62	105.88	121
” 2号	15	115	62.8	5.74	104.26	135
” 3号	13	105	60.2	7.29	98.86	137
” 5号	5	83	56.2	6.74	101.42	136
” 6号	20	353	65.0	17.70	94.12	151
温 泉 廃 井 (東 松 館)	2	—	—	1.42*	104.47	
” (新 庄 館)	7	—	—	2.15*	105.28	
” (富 士 の 湯)	11	—	—	3.40*	105.17	
” (東 湯)	16	—	—	3.34*	107.51	
” (い づ み 荘)	17	—	—	3.38*	108.42	
計		794				

N. B. ** は No. 17 湧出口コンクリート枠上面を 112.20 m として算出



第14図 天童温泉における揚湯井の動水位および廃井の静止水頭の海面上高度分布(昭和41年11月28日~29日調査) ●: 揚湯井 ○: 廃井

Fig. 14. Horizontal distribution of height of water head at hot spring wells above mean sea-level in the time of constant pumping of wells No. 5, No. 13, No. 15, No. 18 and No. 20.

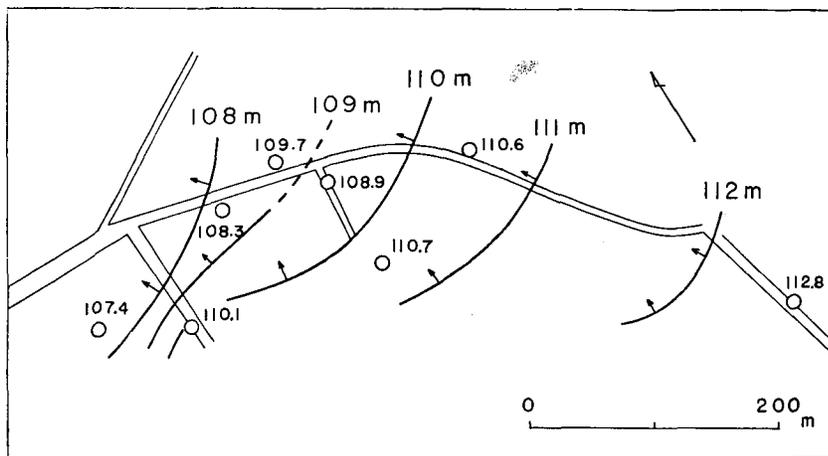
No. 16 および No. 17 の静止水頭の穿井管口からの深さを測定した。これらの値を第 2 表に示した。また、これらの各穿井管口の高さの差を水準測量で求めたので、これらの動水位および静止水頭の海面上高度を算出してこれも第 2 表に示した。

第 14 図はこれら揚湯井の動水位および廃井中の静止水頭の海面上高を地図上の穿井の位置に記入し、95~107.5 m の範囲で 2.5 m 毎の等高線を引いたものである。地下帯水層中の温泉水は水頭の高い方から低い方へ等高線に直角に流れることはよく知られていることであるが図から判るように、現在の地下流動は 5 穿井からの揚湯のためかなり複雑である。しかも、揚湯井 No. 20 および No. 13 付近で水頭の低下が著しく、これらに周囲から流れ込むような形となっている。

第 3 表 昭和 36 年 7 月下旬における天童温泉各湧出口の静止水頭高

温 泉 名	温 泉 No.	湧 出 口 上 静 止 水 頭 高* (cm)	静 止 水 頭 高 海 面 上 高 (m)	記 事
栄 屋	18	33	112.8	ポンプ 使用
篠 田 病 院	15	46	110.6	"
舞 鶴 荘	13	146	110.7	"
天 童 荘	8	173	109.7	自 噴
新 庄 館	7	129	108.3	"
松 の 湯	5	189	110.1	"
小 関 館	3	57	107.4	"
い な り 湯	9	35	108.9	"

N. B. * 山形県衛生部薬務課により測定



第 15 図 昭和 36 年 7 月における天童温泉の静止水頭高の分布

Fig. 15. Horizontal distribution of height of water head at hot spring wells above mean sea-level in the time of self-discharging condition.

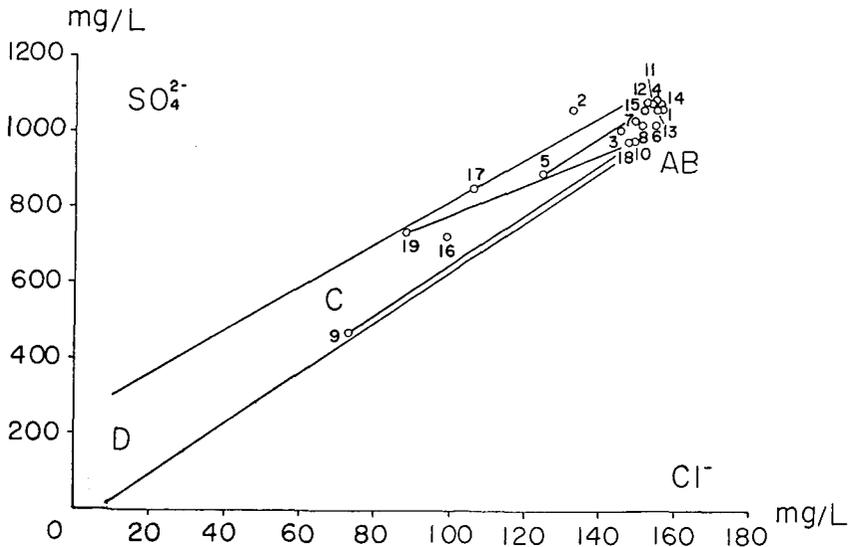
(2) 昭和36年7月における流動状況

昭和36年7月下旬に山形県衛生部薬務課の東海林技師³⁾、桜井技師、鈴木技師は天童温泉の各源泉について湧出口の高さ y を変えた場合の湧出量 Q の変化を測定し、 Q と y との間には負の直線関係があることを求めている。したがって、これらの資料から当時の静止水頭の湧出口上の高さが判る。これに湧出口の海面上の高さを加えて、静止水頭の海面上高に換算した値を第3表に示した。

第15図は地図上の各湧出口にこの計算値を記入し、108~112 m の範囲で1 m 毎の等高線を引いたものである。すなわち、温泉水は地下の第三紀 f 帯水層中をおよそ南乃至南東から北乃至北西へ向って流動していたことが推察される。この当時の流動状況は単純な様子を示しているが、これは各源泉が自噴していた時代の天童温泉地下における温泉水流動に近い状態であると思われる。その後、強力な pump の使用特に温協6号井等の揚湯により(1)に述べた現在の複雑な流動に変化したものと思われる。

3. 温泉水と地下水との混合

昭和24~28年の温泉自噴時代に各源泉について化学分析が山形県衛生部薬務課¹⁾によって行なわれている。その結果によれば、 HCO_3^- を除き各主要化学成分相互間には正の直線関係が存在することが認められ(1例として第16図参照)、天童温泉各源泉は同一温泉源と地下水との混合の結果生じたものであることが指摘されている。しかしながら、湧出温度と residue または諸化学成分との関係はやや複雑な様子を呈している。この問題について多少の考察を加



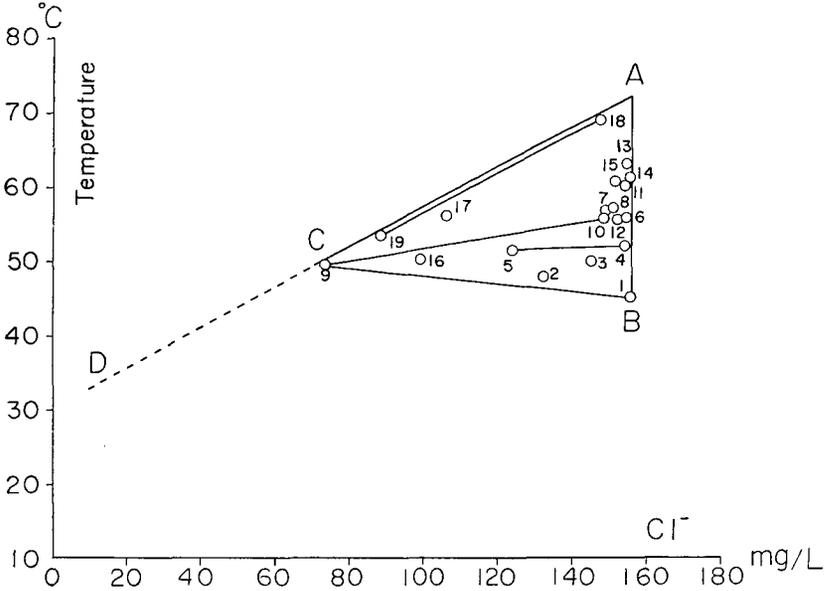
第16図 天童温泉における SO_4^{2-} と Cl^- との関係
(山形県衛生部資料による)

Fig. 16. Relation between SO_4^{2-} and Cl^- in Tendo hot springs.

3) 東海林辰雄・桜井守・鈴木生男；天童温泉揚湯試験調査報告書(昭36)。

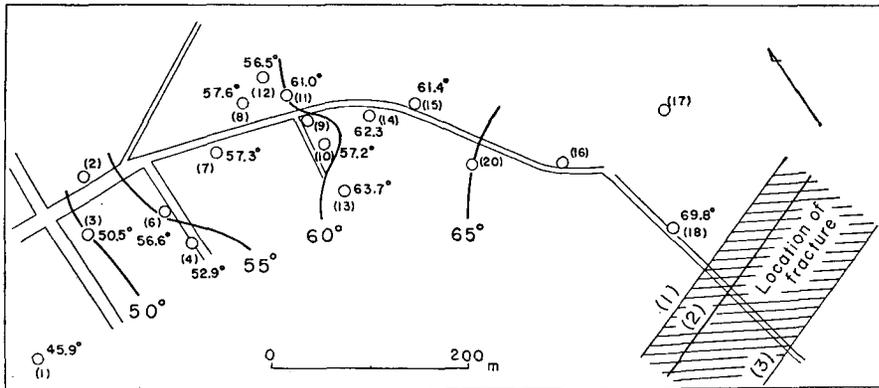
えてみたい。

第 17 図は温度と Cl^- との関係である。図中、丸は各湧出口の値であって、それに付けた数字は第 1 図中の温泉番号である。図から判るように、天童温泉の各源泉を示す丸は A (73°C , $\text{Cl}^- = 156 \text{ mg}/\ell$), B (46°C , $156 \text{ mg}/\ell$) および C (50°C , $71 \text{ mg}/\ell$) を頂点とする三角形内に大略



第 17 図 天童温泉における温度と Cl^- との関係
(山形県衛生部資料による)

Fig. 17. Relation between temperature and Cl^- in Tendo hot springs.



第 18 図 天童温泉における湧出温度の分布と割れ目の位置
(但し Cl^- が $140 \text{ mg}/\text{L}$ 以上の温泉)

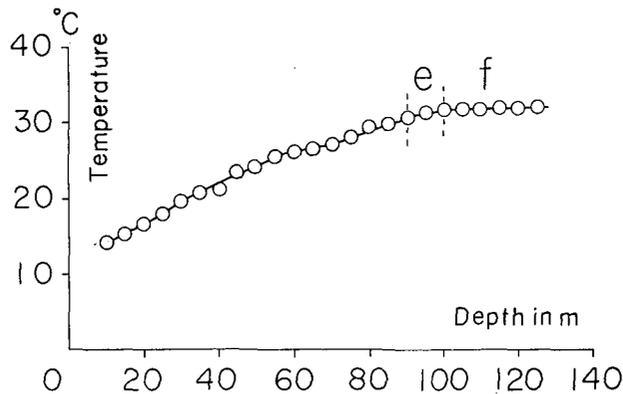
Fig. 18. Horizontal distribution of temperature of Tendo hot springs, Cl^- of which are more than $140 \text{ mg}/\text{L}$, and the location of fracture through which hot water is ascending from the deep.

分布している。このような分布は、一般には A, B, C で代表される 3 つの泉源が地下に存在し、これらの混合によって天童の各源泉が生じたものと解釈される。

しかしながら、第 17 図および第 16 図から判るように、A 泉源と B 泉源とは温度を除けば他の化学成分はほとんど同じであって、以下に述べる理由から A, B 両泉源は同一温泉水と考える方がよいと思われる。

第 17 図において C 泉源の混入が少ない $\text{Cl}^- > 140 \text{ mg/l}$ の源泉について、その湧出温度を地図上の源泉の位置に記入し等温線を引いてみると第 18 図が得られるが、温泉地域の南東方に温度高く北西方へ次第に温度が低下している。本章 2-(2) に述べたように、当時の温泉水の流動は第 15 図から判るように南乃至南東から北乃至北西に向っていたのであり、温泉 No. 18 に近い泉質の A 泉源の温泉水が f 帯水層中を北寄りに流下するに従って、泉質には何ら変化はおこらずに、温度だけが次第に低下し温泉地域の末端付近で温泉 No. 1 に近い性質の B 泉源の温泉水となったことを意味する。したがって、A から B に移る変化の過程は単なる冷却、すなわち、第 2 図～第 7 図から示唆されるように、熱が温泉層から上方へ熱伝導により移動したと考えて十分説明される。

次に、泉源 C についてであるが、第 17 図から判るように、温泉 No. 9, No. 19, No. 16, No. 17 が C に近い泉質の温泉水であることから判断して、温泉地帯、特にその南東部の地下において f 層とは違う層内に拡って存在するのではないかと考えられる。というのは、温泉 No. 18 と No. 19, No. 10 と No. 9, No. 4 と No. 5 等はそれぞれ近接した位置にあるのにその温度、化学成分含量にかなり差があること、第 17 図から判るように、No. 19, No. 9, No. 5 等はそれぞれ No. 18, No. 10, No. 4 等の温泉水が泉源 C と混合して生じたことが推察されること、しかもその温泉の近接度からみて同一温泉水層内でこの混合が起っているとは考え難いからである。従って、A B 泉源と C 泉源とは深さの違う層内に存在し、既に山形県衛生



第 19 図 せき湧泉裏山斜面の廃井中の温度の鉛直分布

Fig. 19. Vertical temperature distribution in a well located at hill-side of Seki spring.

部によって指摘されているように、湧出管の連結部の洩水が主な原因となって、この混合がおこっているであろう。現在の地下流動はこの化学分析の行なわれた自噴時代とかなり違っていると思われるので、自噴時代に近い資料として温協6号井の掘さく当時に測定された温度の鉛直分布図(第2図中段)を用いると、泉源Cの温度50°Cに相当する深さはd層の下部ということになる。しかし、第2図上段の孔内水位の低下を見るとe層の上部またはd層とe層との境界付近という可能性もある。

後に述べるように、泉源Aは現在温泉地域の南東側の地下深くから割れ目を伝って上昇し第三紀f層中に流入していると考えられるが、C泉源の起源はどう考えるべきであろうか。第17図または第16図において、ACを結ぶ直線の延長上にDなる水を考えれば、Dは化学成分はほとんど含まないが温度が30°Cを少し越えた微温泉である。このような微温泉が温泉地域の南東部付近の地下に存在することは事実であって、No.18の東方およそ500mの第三紀層からなる山の斜面に掘削された廃井(堰湧泉裏)について筆者らが行なった穿井内水温の鉛直分布の測定結果(第19図)によれば、平野面から深さ80~90mで水温32~34°Cの微温泉層に達している。

泉源Aからの温泉水をf層まで運んだ同一割れ目の他の部分か、付近の他の割れ目内か、付近の帯水層中で泉源Aと微温泉Dとが混合して泉源Cを生じたと考えることは可能であろう。

4. 温泉地域から出る総熱エネルギー

天童温泉の5揚湯井から汲み出されている温泉の熱エネルギーを第2表を用いて集計すれば

$$Q_1 = 4.1 \times 10^7 \text{ cal/min}$$

となる。但し、この値は付近の冷地下水温11.5°Cを基準にして求めた。温泉地域表層の地下水は、前に述べたように、この温度よりもやや高いものもあるので、 Q_1 は上記の値をやや上まわると思われる。

第IV章に述べたように、温泉地域の地表から空气中へ放出されている熱エネルギー Q_2 の概値は

$$Q_2 = 3.1 \times 10^7 \text{ cal/min}$$

であった。従って、この両者を合計して総熱エネルギー Q を求めると

$$Q = 7.2 \times 10^7 \text{ cal/min}$$

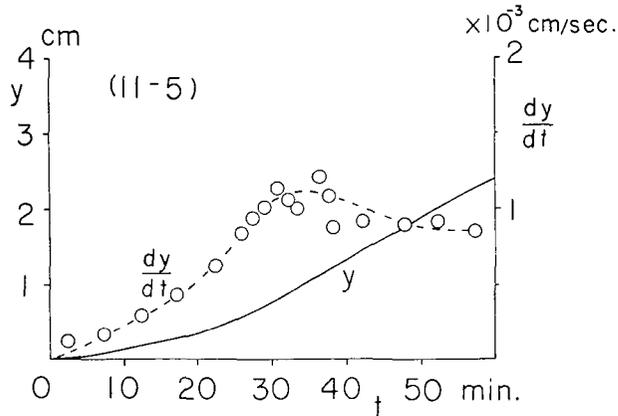
となり、温泉の熱階級⁴⁾で表わすとIIIとなる。

4) T. FUKUTOMI; Rates of Discharge of Heat Energy from The Principal Hot Spring Localities in Hokkaido, Journ. Fac. Sci., Hokkaido Univ. (Geophysics), 1 (1961), 315.

VII. 地下深くから温泉水を導く割れ目の位置

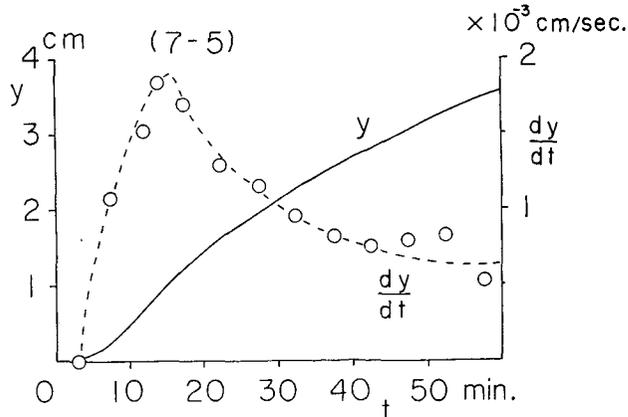
1. 揚湯の一時停止による付近廃井中の水頭上昇の測定

被圧帯水層による穿井の揚水能率を調べるために行なわれる揚水試験では、穿井から一定量の揚水を継続して付近の観測井中の水頭低下の時間的变化を測定し、帯水層の透水量係数、貯溜係数を求めることが一般に行なわれている。天童温泉においては6つの穿井から常時揚湯が行なわれているが、これらを全部長時間に亘って停止することは許されなかったので、逆に常時揚湯中の穿井 No. 5, No. 20, No. 18, No. 15, No. 13 の中1井宛を1時間程度停止させて付近の廃井を観測井として利用し、その管内水頭の変化を定山溪温泉の調査の際に製作使用し



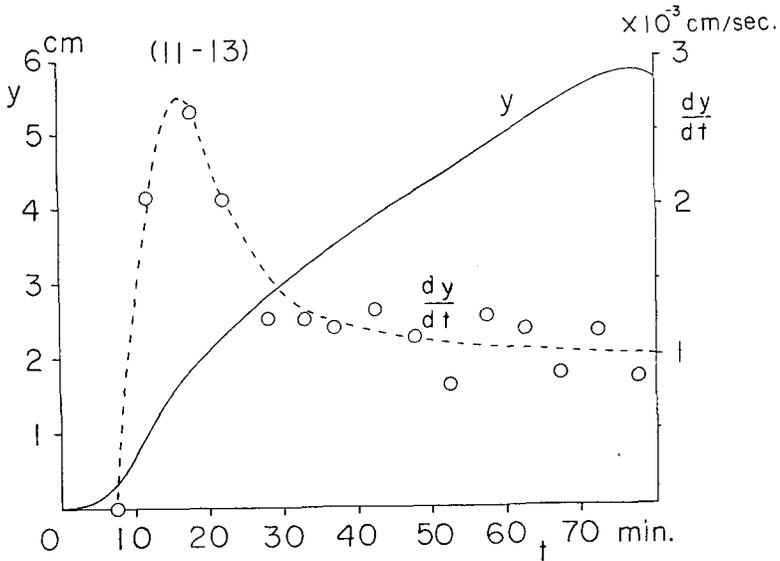
第20図(1) 温泉 No. 5 の揚湯停止による廃井 No. 11 中の水頭上昇 y の時間的变化

Fig. 20 (1). Change of rise of water-head observed at well No. 11 due to sudden stop of discharge of well No. 5.



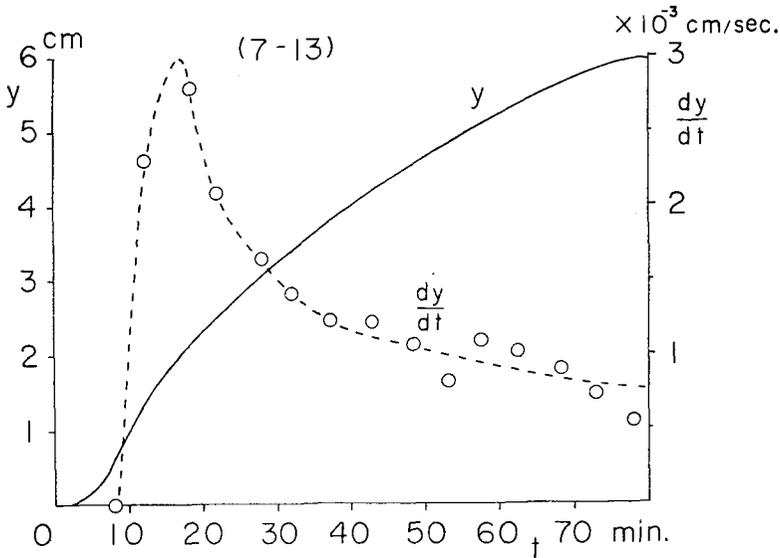
第20図(2) 温泉 No. 5 の揚湯停止による廃井 No. 7 中の水頭上昇 y の時間的变化

Fig. 20 (2). Change of rise of water-head observed at well No. 7 due to sudden stop of discharge of well No. 5.



第20図(3) 温泉 No. 13 の揚湯停止による廃井 No. 11 中の水頭上昇 y の時間的变化

Fig. 20 (3). Change of rise of water-head observed at well No. 11 due to sudden stop of discharge of well No. 13.



第20図(4) 温泉 No. 13 の揚湯停止による廃井 No. 7 中の水頭上昇 y の時間的变化

Fig. 20 (4). Change of rise of water-head observed at well No. 7 due to sudden stop of discharge of well No. 13.

た精密水位計を用いて測定した。観測井は第1図中の No. 7, No. 11, No. 16 および No. 17 であるが, No. 16, No. 17 については第VI章3に述べたように別の帯水層の水が混合していることが判ったので, この資料は使用しないことにした。第20図中の実線は揚湯井 No. 5, No. 13, No. 15, No. 20 の揚湯停止による観測井 No. 11 および No. 7 の水頭上昇 y の測定結果を示したものである。点線は y を時間 t について微分したもので, すなわち $\frac{dy}{dt}$ と時間 t との関係を示したものである。

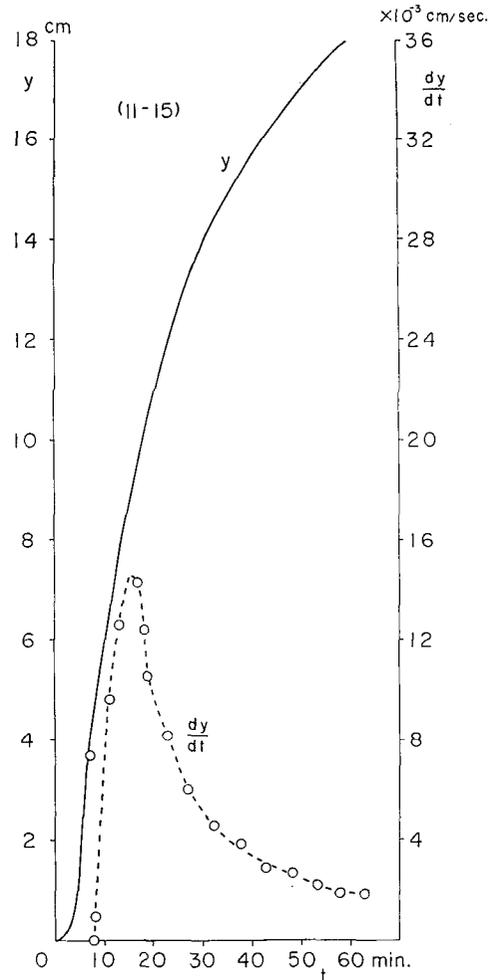
この結果から天童温泉の温泉水を含む被圧帯水層の透水量係数と貯溜係数を求め, さらに地下深くからこの帯水層に温泉水を導いた割れ目の位置を推定しようというのがこの章の目的である。

2. 理論的考察

水平で半無限の拡がりをもつ被圧帯水層の一端が鉛直面をなす割れ目で切断されていてこの割れ目に沿って地下深くから温泉水の補充が十分であるため, 割れ目上では温泉水は常に一定な水頭 H に保たれている場合を考え, 帯水層の到る所でその厚さ, 透水係数, 貯溜係数は一様であるとする。

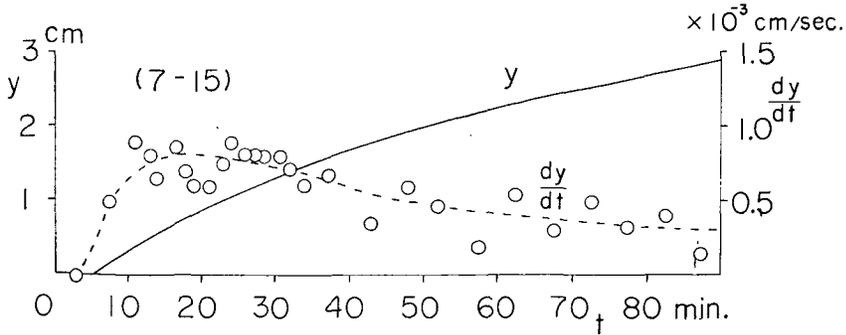
第21図(平面図)に示したように, この帯水層を貫いて1つの穿井 A があり, 定常状態になるまで十分長い時間一定量 Q なる揚湯が行なわれていたが, 時刻 $t=0$ で突然揚湯が停止されたとする。この揚湯井 A から r_1 の距離にある観測井 P において, その水頭 h の時間的変化を測定したとすれば, 揚湯停止後どんな形の水頭変化が得られるか理論的に考察してみよう。

先ずこの問題を解くための予備的問題として, 割れ目は存在しないが問題の帯水層と全く同様の性質である帯水層が存在し, それが水平に無限の広さをもつ場合を考え, 最初長時間揚湯停止の状態にあった穿井 A において時刻 $t=0$ から Q なる一定量を継続揚湯したものとし, A から r の距離の観測井 P では A の揚湯開始以前は水頭が H であったのに, A の揚湯開始



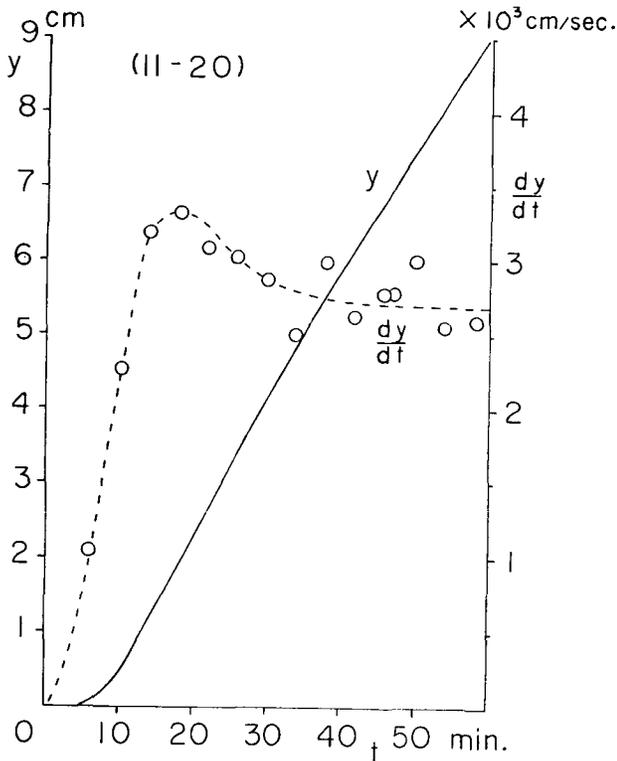
第20図(5) 温泉 No. 15 の揚湯停止による廃井 No. 11 中の水頭上昇 y の時間的変化

Fig. 20 (5). Change of rise of water-head observed at well No. 11 due to sudden stop of discharge of well No. 15.



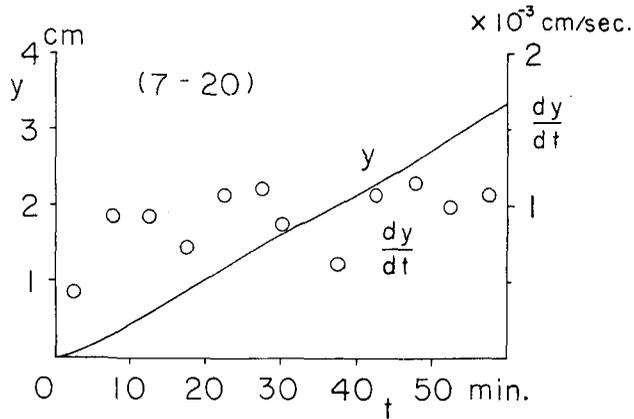
第20図(6) 温泉 No. 15 の揚湯停止による廃井 No. 7 中の水頭上昇 y の時間的变化

Fig. 20 (6). Change of rise of water-head observed at well No. 7 due to sudden stop of discharge of well No. 15.



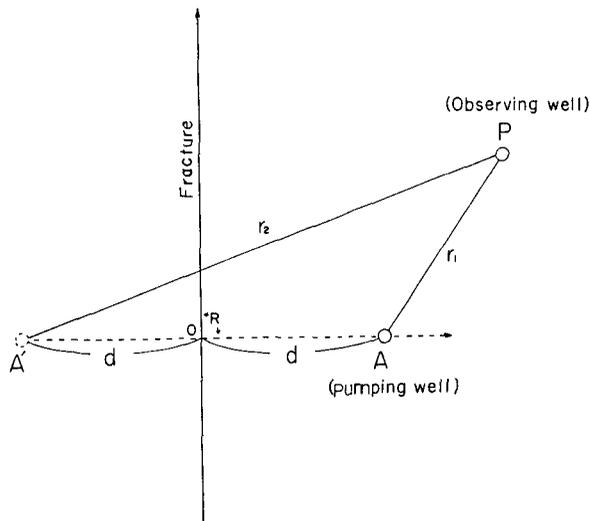
第20図(7) 温泉 No. 20 の揚湯停止による廃井 No. 11 中の水頭上昇 y の時間的变化

Fig. 20 (7). Change of rise of water-head observed at well No. 11 due to sudden stop of discharge of well No. 20.



第20図(8) 温泉 No. 20 の揚湯停止による廃井 No. 7 中の水頭上昇 y の時間的变化

Fig. 20 (8). Change of rise of water-head observed at well No. 7 due to sudden stop of discharge of well No. 20.



第21図
Fig. 21.

後時刻 t で水頭は h になったとする。この問題については地下水学の教科書に記載されており、帯水層の透水量係数を T 、貯溜係数を S 、 $x = Sr^2/4Tt$ とおけば

$$s_1 = H - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \equiv \frac{Q}{4\pi T} W(x) \quad (2)$$

が得られる。観測井 P について時刻 t における揚湯開始以前の水頭からの水頭の低下量 s_1 も (2) 式で与えられる。

次に第2の予備的問題として、最初の問題同様の割れ目を考え、割れ目上では常に水頭は H 、すなわち、水頭低下 s は常に零に保たれているとし、穿井 A が最初長時間揚湯停止の状

態にあった後、 $t_2=0$ から Q なる一定量の継続揚湯を行なった場合、時刻 t_2 における P の水頭低下を s_2 とする。 s_2 は次式で与えられる。

$$s_2 = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W(x_1) - W(x_2) \right\} \quad (3)$$

但し、

$$x_1 = \frac{Sr_1^2}{4Tt_2}, \quad x_2 = \frac{Sr_2^2}{4Tt_2} \quad (4)$$

であり、第 21 図から判るように、 r_1 は揚湯井 A と観測井 P との距離、 r_2 は揚湯井 A の割れ目に対する対象点 A' と P との距離である。

井戸函数 $W(x)$ は $x < 1$ すなわち $t > \frac{Sr^2}{4T}$ であれば

$$W(x) = -0.5772 - \log x + x - \frac{x^2}{2 \cdot 2!} + \frac{x^3}{3 \cdot 3!} - \frac{x^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (5)$$

なる級数で表わされるので、 t が充分大きければ P における水頭低下は

$$|s_2|_{t \rightarrow \infty} = \frac{Q}{2\pi T} \log_e \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (6)$$

となる。

ここで最初の問題に戻って、揚湯井 A から Q なる揚湯が充分長時間行なわれ水頭の低下が (6) 式で与えられるように定常状態になった後、時刻 $t \geq 0$ において揚湯を停止した場合を考えると、これは $t < 0$ および $t \geq 0$ においては揚湯量が常に Q の場合と、 $t \geq 0$ において揚湯量が常に $-Q$ の場合を加え合せたと考えて差支えないから、 $t \geq 0$ なる時刻 t における観測井 P の水頭低下 s は

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \log_e \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W \left(\frac{Sr_1^2}{4Tt} \right) - W \left(\frac{Sr_2^2}{4Tt} \right) \right\} \quad (7)$$

で表わされる。

然るに、観測井 P における水頭を実測するに当っては $t=0$ における水頭の沈下、すなわち $\frac{Q}{2\pi T} \log_e \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$ を基準として、水頭の上昇を (正) として測りこれを y で表わすとすれば

$$y = \frac{Q}{2\pi T} \log_e \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - s$$

となる。これに (7) 式を代入すれば、P の水頭上昇は

$$y = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W \left(\frac{Sr_1^2}{4Tt} \right) - W \left(\frac{Sr_2^2}{4Tt} \right) \right\} \quad (8)$$

で表わされる。これが求める式である。

ここでは揚湯井として A だけを考えたが、他に揚湯井 B, C, …… が存在する場合にも、これらの揚湯量が常に一定にそれぞれ Q_b, Q_c, \dots で時間が $-\infty$ から考える時刻 t まで常に

継続して揚湯していたとすれば、(8) 式の結果には何ら変りはない。

3. 実測値の整理方法

井戸函数 W は通常 x すなわち、 $\frac{Sr^2}{4Tt}$ の函数として表示されているが、ここでは便宜上

$$v \equiv \frac{4Tt}{Sr^2} \quad (9)$$

とおいて W を $W_1(v)$ で表わすことにする。第 22 図は v を横軸にとり、それに対応する $W_1(v)$ および $\frac{dW_1}{dv}$ の値を縦軸にとってその関係を示したものである。 $\frac{dW_1}{dv}$ は、図から判るように、 $v=1$ において極大となる。換言すれば $W_1(v)$ は $v=1$ において転向点となる。この点においては

$$v = 1; |W_1(v)|_{v=1} = 0.219, \left| \frac{dW_1}{dv} \right|_{v=1} = 0.366 \quad (10)$$

である。

故に、(8) 式は次式で表わされる。

$$y = \frac{Q}{4\pi T} \{W_1(v_1) - W_1(v_2)\} \quad (11)$$

但し、

$$v_1 = \frac{4Tt}{Sr_1^2}, \quad v_2 = \frac{4Tt}{Sr_2^2} \quad (12)$$

である。

同じ t においては、(12) 式から

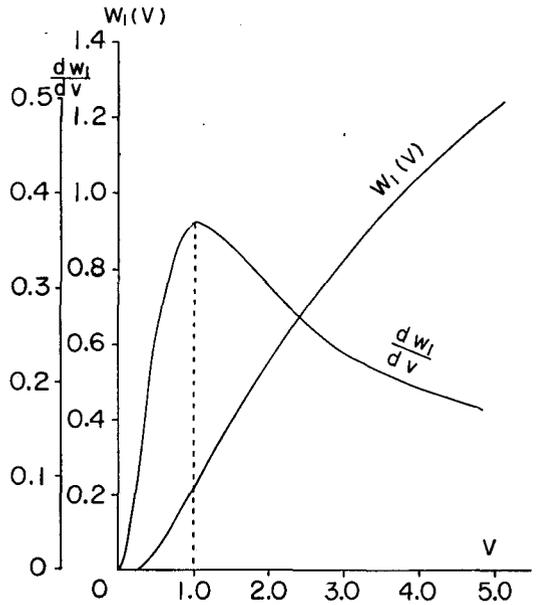
$$v_2 = \left(\frac{r_1^2}{r_2^2} \right) v_1 \quad (13)$$

であるから (11) 式は次のように表わされる。

$$y = \frac{Q}{4\pi T} W_1(v_1) \left\{ 1 - W_1 \left(v_1 \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \right\} / W_1(v_1) \quad (14)$$

次に、(11) 式または (14) 式を t について微分すれば

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Q}{\pi Sr_1^2} \left\{ \frac{dW_1(v_1)}{dv_1} - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \frac{dW_1(v_2)}{dv_2} \right\} \quad (15)$$



第 22 図 $W_1(v)$ および $\frac{dW_1}{dv}$ と v の関係

Fig. 22. Relation between $W_1(v)$ or $\frac{dW_1}{dv}$ and v .

または

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Q}{\pi S r_1^2} \left| \frac{dW_1(v)}{dv} \right|_{v_1} \left\{ 1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \left| \frac{dW_1(v)}{dv} \right|_{v_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2} \right\} \quad (16)$$

が得られる。

いま、揚湯停止の時刻を起点として水頭上昇 y を測定した時間 t の範囲を $0 \leq t \leq \alpha \frac{S r_1^2}{4T}$ とすれば、 v_1 については $0 \leq v_1 \leq \alpha$ の範囲となる。ここに α は測定時間の範囲に関する常数である。

まず、 $r_2 \gg r_1$ の場合を考える。これは、揚湯井と割れ目との距離が揚湯井と観測井との間の距離に比較してかなり大きい場合に相当する。この場合には (14) 式の $W_1 \left(v_1 \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) / W_1(v_1)$ は 1 に比べて微小となるので

$$y \simeq \frac{Q}{4\pi T} W_1(v_1) \quad (17)$$

が成立する。これを t について微分すれば

$$\frac{dy}{dt} \simeq \frac{Q}{\pi S r_1^2} \frac{dW_1(v_1)}{dv_1} \quad (18)$$

が得られる。但し、

$$v_1 = \frac{4T}{S r_1^2} t \quad (19)$$

である。これらの 3 式から

$$\frac{t \left(\frac{dy}{dt} \right)}{y} \simeq \frac{v_1 \left(\frac{dW_1}{dv_1} \right)}{W_1(v_1)} \quad (20)$$

なる関係も得られる。

今回の調査では $\alpha=5$ 程度であった。すなわち、第 22 図において v の範囲を $v=0$ から転向点における v の値 $v=1$ の 5 倍まで取ると、(14) 式の代りに (17) 式を用いることによって生ずる誤差を 1% 以下とするためには

$$W_1 \left(5 \times \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) / W_1(5) \leq 0.01 \quad (21)$$

であればよい。第 22 図を利用して (21) 式から $\frac{r_2}{r_1}$ の値を求めると、 $\frac{r_2}{r_1} \geq 3.91$ でなければならぬことになる。もし、この場合 $\alpha=1$ とすれば $\frac{r_2}{r_1} \geq 2.13$ であればよいことになる。

4. 天童における温泉帯水層の透水量係数と貯溜係数

天童温泉において温泉帯水層へ温泉水を供給する割れ目の位置は、第 15 図に示した自噴時代の温泉水の地下流動方向、第 18 図の温度分布から考えて、温泉地域の最南東端にある温泉 No. 18 の付近かその南寄りにあることが想像される。いま、No. 18 を丁度通って第 15 図の等圧線に平行な方向に割れ目が存在すると仮定して、各観測井について r_2 の値を求め、 r_2/r_1

第4表 割れ目の位置を仮定して求めた $\frac{r_2}{r_1}$ の値

No.	観測井 No.	揚湯井 No.	r_1 (m)	r_2 (m)	r_2/r_1
(11-5)	11	5	177	700	3.95
(7-5)	7	5	96	690	7.20
(11-13)	11	13	114	612	5.37
(7-13)	7	13	135	681	5.04
(11-15)	11	15	126	630	5.00
(7-15)	7	15	204	657	3.22
(11-20)	11	20	198	548	2.77
(7-20)	7	20	261	576	2.21
(11-18)	11	18	411	411	1.00
(7-18)	7	18	478	478	1.00

の値を計算してみると第4表の結果を得る。もし、割れ目がこれよりも南寄りにある場合は、 r_2/r_1 の値はさらに大きい値となるであろう。

すなわち、表の上から1~5については $0 \leq v \leq 5$ の範囲内で、表の上から6~8については $0 \leq v \leq 1$ の範囲内で (17)~(20) 式を使用することが可能である。表の上から9~10については (14) 式および (16) 式を用いるのが妥当である。

さて、 $\frac{dW_1(v_1)}{dv_1}$ の値は $v_1=1$ において極大となり、それに対応する $W_1(v_1)$ および $\frac{dW_1(v_1)}{dv_1}$ の値が (10) 式で与えられることは既に述べた。この極大点の諸量には0なる suffix をつけて表わすものとする。(18) 式から $\frac{dW_1(v_1)}{dv_1}$ の極大値に対応して水頭上昇の増加の割合 $\frac{dy}{dt}$ も極大値を示すことが明かであるので、(17)~(20) 式および (10) 式から次の関係が得られる。

$$T = \left\{ \frac{W_1(v_{10})}{4\pi} \right\} \frac{Q}{y_0} = 1.744 \times 10^{-2} \cdot \frac{Q}{y_0} \quad [\text{cm}^2/\text{sec}] \quad (22)$$

$$S = \left\{ \frac{W_1(v_{10})}{\pi v_{10}} \right\} \frac{t_0 Q}{y_0 r_1^2} = 6.98 \times 10^{-2} \cdot \frac{t_0 Q}{y_0 r_1^2} \quad [\text{dimensionless}] \quad (23)$$

$$\frac{t_0 \left(\frac{dy}{dt} \right)_0}{y_0} = \left\{ \frac{v_{10} \left(\frac{dW_1}{dv_1} \right)_0}{W_1(v_{10})} \right\} = 1.675 \quad [\text{dimensionless}] \quad (24)$$

故に、 $r_2 \gg r_1$ が成立つ場合には、揚湯量 Q 、揚湯井と観測井間の距離 r_1 、揚湯停止による観測井内の水頭上昇 y の転向点における値 y_0 、その時間 t_0 と $\left(\frac{dy}{dt} \right)_0$ の値を知れば、(22) および (23) 式から温泉帯水層の透水量係数 T 、貯溜係数 S は求められる。また、(24) 式からはこれらの式がどの程度まで正確に成立しているかどうかを検討されるであろう。

第5表は第20図に示した実測値の中、揚湯井 No. 18 に関係したもの2を除いた8つの場合について、 r_1 、 Q の値と第20図から求めた揚湯停止から転向点までの時間 t_0 、 y_0 および

第 5 表

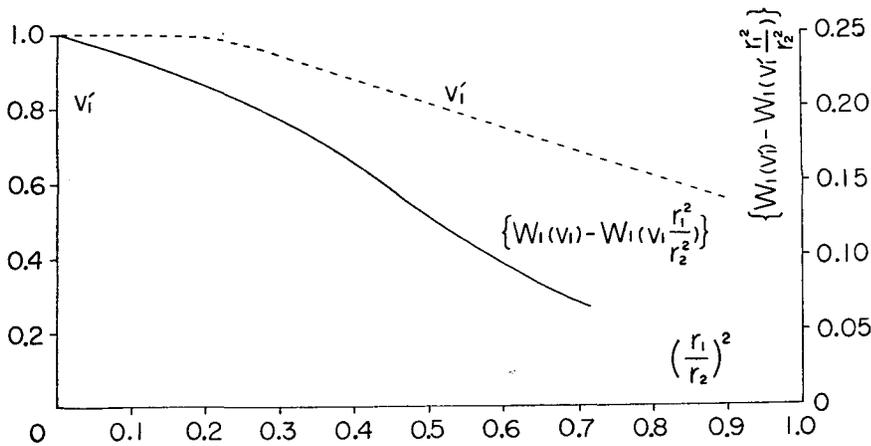
No.	r_1 (m)	Q (cc/sec)	t_0 (sec)	y_0 (cm)	$\left(\frac{dy}{dt}\right)_0$ (cm/sec)	T (cm ² /sec)	S	$t_0\left(\frac{dy}{dt}\right)_0/y_0$
(11-5)	177	1.38×10^3	2040	1.07	1.07×10^{-3}	22.6	2.94×10^{-4}	2.04
(7-5)	96	1.38×10^3	750	0.81	1.80×10^{-3}	29.8	9.70×10^{-4}	1.67
(11-13)	114	1.75×10^3	510	0.83	2.73×10^{-3}	36.8	5.77×10^{-4}	1.68
(7-13)	135	1.75×10^3	510	0.97	3.0×10^{-3}	31.5	3.53×10^{-4}	1.58
(11-15)	126	1.92×10^3	420	3.70	15.0×10^{-3}	9.03	0.96×10^{-4}	1.71
(7-15)	204	1.92×10^3	1050	0.62	0.83×10^{-3}	53.8	5.43×10^{-4}	1.41
(11-20)	198	5.88×10^3	1020	1.85	3.36×10^{-3}	55.4	5.77×10^{-4}	1.85
(7-20)	261	5.88×10^3	—	—	—	—	—	—
Mean						34.2	4.87×10^{-4}	1.70

$\left(\frac{dy}{dt}\right)_0$ の値, (22)~(24) 式によって計算した T, S および $\frac{t_0\left(\frac{dy}{dt}\right)_0}{y_0}$ の値を示したものである。透水量係数 T および貯溜係数 S は, 表から判るように, あまり一致した値を示していないが, $\left\{t_0\left(\frac{dy}{dt}\right)_0/y_0\right\}$ はかなり一致した値を示していることから考えて, 温泉帯水層を主に構成している第三紀層中の礫岩層にはその性質にかなり場所によって差違があるのであろう。

5. 地下深くから温泉水を導く割れ目の位置

温泉水を地下深くから導いている割れ目に最も近い距離にあると考えられる揚湯井 No. 18 については, 第 4 表の結果から次式を適用すべきであるとの結論に到達した。

$$y = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W_1(v_1) - W_1(v_2) \right\} \tag{11}$$



第 23 図 v_1 および $\left\{ W_1(v_1) - W_1\left(v_1 \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) \right\}$ と $\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$ との関係

Fig. 23. Relation between v_1 or $\left\{ W_1(v_1) - W_1\left(v_1 \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) \right\}$ and $\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$.

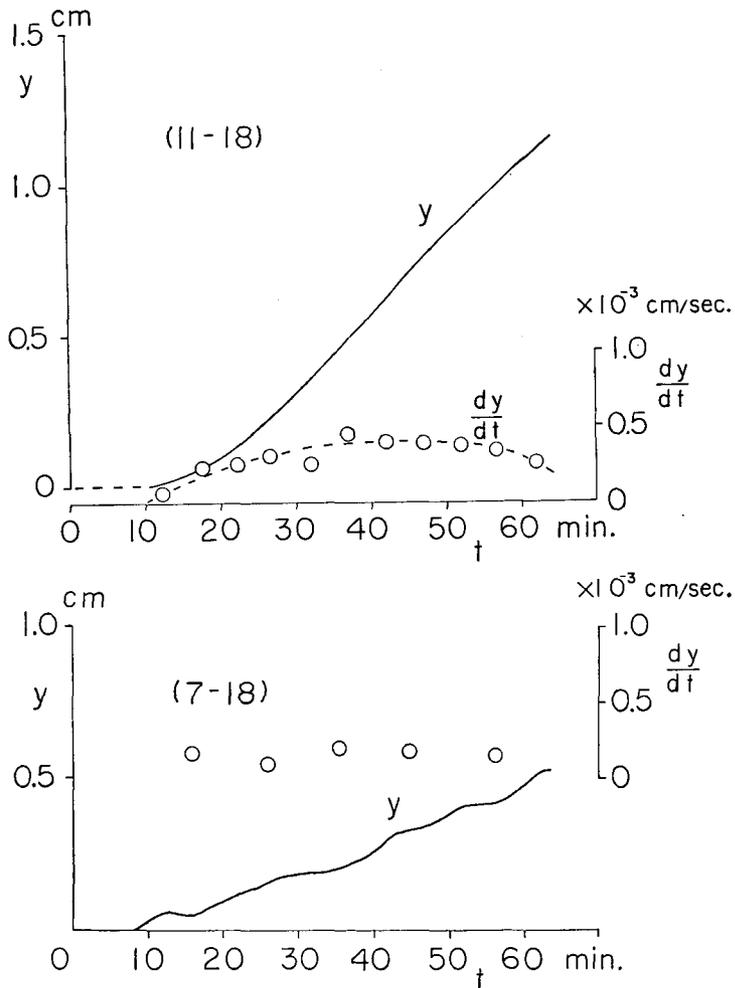
これを t について二度微分すれば

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{4TQ}{\pi S^2 r_1^4} \left\{ \frac{d^2W_1}{dv_1^2} - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^4 \frac{d^2W_1}{dv_2^2} \right\} \quad (25)$$

を得る。水位上昇 $y(t)$ の転向点においては $\frac{dy}{dt}$ が極大または極小、すなわち $\frac{d^2y}{dt^2} = 0$ であり同じ t に対しては (13) 式から $v_2 = v_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$ なる関係があるから

$$\left| \frac{d^2W_1}{dv^2} \right|_{v_1} - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^4 \left| \frac{d^2W_1}{dv^2} \right|_{v_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} = 0 \quad (26)$$

でなければならない。故に、 $\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$ を任意に与えれば (26) 式を満足する v_1 の値を求めること



第 24 図 温泉 No. 18 の揚湯停止による廃井 No. 11 および No. 7 中の水頭上昇 y の時間的变化

Fig. 24. Change of water-head at wells No. 11 and No. 7 due to sudden stop of discharge from well No. 18.

ができる。この v_1 の値は一般に 2 個存在するが大きい方は天童の場合測定範囲外にあるので、小さい方の値 v_1 と $\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$ との関係を図 23 中に点線で示した。図中実線はこの v_1 に対する $|W_1(v)|_{v_1} - |W_1(v)|_{v_1\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}$ と $\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$ との関係である。

揚湯井 No. 18 の揚湯停止による観測井 No. 11 および No. 7 の水位上昇 y の時間的変化の実測値を図 24 中に実線で示したが、これから計算した $\frac{dy}{dt}$ と t との関係を図 24 中に点線で示した。図から判るように、(7-18) においては $\frac{dy}{dt}$ が極大値を示す t の値が不明瞭であったが、(11-18) については $\frac{dy}{dt}$ が極大となる y の値として $y_0 = 0.64$ cm を得た。

揚湯量 Q は既知であるから温泉帯水層の透水量係数 T が判っておれば (11) 式において $\frac{4\pi T y_0}{Q}$ が計算され、図 23 から $\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$ を求めて r_2 が求められる理である。第 5 表の T の値の内、(11-15) の場合を除けば 23~55 cm²/sec の範囲にあり、平均値は 34.2 cm²/sec であるから、この両端値と平均値を温泉帯水層の T の値として採用すれば、求める r_2 の値は第 6 表のように計算される。

第 6 表

(観測井- 揚湯井)	r_1 (m)	y_0 (cm)	Q (cm ³ /sec)	T (cm ² /sec)	$\frac{4\pi T y_0}{Q}$	$(r_1/r_2)^2$	r_2 (m)
(11-18)	411	0.64	2.3×10^3	23	0.080	0.657	507 (1)
				34.2	0.119	0.513	573 (2)
				55	0.192	0.308	739 (3)

割れ目の方向を温泉帯水層中の等水圧線 (第 15 図参照) に平行と考えれば、割れ目の位置は第 18 図中に斜線を施した (1) および (3) 両直線の間ということになる。(1) と (3) の中央の線を XY として第 10 図の 1 m 深地温分布図に記入してあるが、1 m 深地温がこの線を大体境として北側でやや高くなっていることも合理的である。

VIII. 総括および結語

昭和 41 年 11 月 26 日~12 月 1 日の期間に山形県天童温泉について行なった研究結果と、山形県衛生部および天童温泉協同組合によって行なわれた過去の調査資料を総合して次の結果を得た。

1) 温泉 No. 20 の掘削当時に測られた資料と温泉廃井中の温度の鉛直分布の測定結果から温泉地域における沖積層の厚さは 70~97 m で上から a, b, c, d の 4 層となっていること (第 2 図~第 9 図)、沖積層の下は第三紀層であるが掘削の深さの範囲では e および f の 2 層となっていること、温泉水を含むのは主に f 層であることが推察された。

2) 1 m 深地温は場所によってあまり顕著な差は認められなかったが、12°C 以上の部分が栄屋旅館と津山小学校の間を通る東北東から西南西に向う線の北西側にあること、特に温

泉地域を軸としておよそ 500 m の幅で北西方向へ 2 km ぐらい延びていることが認められた (第 10 図)。

3) 表層地下水の流動状況は、第 11 図から判るように、下貫津付近では倉津川に沿って流れ、天童温泉付近では北東方向の谷からの比較的優勢な地下水と合して北西へ流れている。水温 (第 12 図参照) は天童温泉の北東倉津川の対岸付近は概して 13°C 以上でやや高いが東方の山麓部ではこれよりもやや高くなっている。温泉地域には浅井戸がないので不明である。 Cl^{-} については、地下水温度の低い下貫津地域が最高 91 mg/L を示し、温泉地域東部でも $30\sim 40 \text{ mg/L}$ のやや大きい値を示している (第 13 図参照)。

4) 天童温泉はいわゆる被圧層状温泉である。昭和 36 年 7 月頃においては温泉水は f 層中を温泉地域の南あるいは南東から北あるいは北西へ向って流動していたことが水頭高の水平分布 (第 15 図) から推察されるが、現在は 5 井からの揚湯の影響でその様子に変化している (第 14 図)。天童温泉の泉源は温度 73°C 、 $\text{Cl}^{-}=156 \text{ mg/L}$ の A 泉源が主要なものであり、これが f 層中を南寄りから北寄りに流動する間に上層へ逃げた熱のために冷却するらしい。A 泉源のほかに C 泉源が沖積層と第三紀層の境界付近に存在し温泉によっては A 泉源に混入して湧出する。

5) 常時揚湯中の天童温泉協同組合の泉源を 1 つ宛 1 時間程度停止させて、付近の温泉廃井中の水頭の回復を測定し (第 20 図および第 24 図参照)、それから温泉帯水層の透水量係数 T 、貯溜係数 S を第 5 表のように求めた。これらの値は場所によってかなりの差違を示した。これは温泉帯水層が場所によってかなり不均質であることを意味している。また、これらの測定から温泉水を地下深くから供給する割れ目の概略の位置を第 18 図のように推定した。

6) 天童温泉の地下における温泉水の水平の拡がりはあまり明瞭には判らないが、この割れ目の北側に存在し、温泉水の流動方向 (第 15 図)、1 m 深地温分布 (第 10 図) 等からみて現在の温泉の存在区域を含んでやや南西側へ広がっているものと推察される。

7) 天童温泉地域から温泉として湧出する熱エネルギー Q_1 は $4.1 \times 10^7 \text{ cal/min}$ 、地表から放出される熱エネルギー Q_2 は $3.1 \times 10^7 \text{ cal/min}$ 、これらを合計すれば $Q=7.2 \times 10^7 \text{ cal/min}$ となり、温泉の熱階級は III である。

1. A Geophysical Investigation on Tendo Hot Springs, Yamagata Prefecture

By Takaharu FUKUTOMI, Kinshiro NAKAO, Kôichi URAKAMI,
Sakae ÔTSUKI, Tôru WAKE, Hideo MIYOSHI,
Ryuichi TANOUE, Masahiro KOJIMA,
Shigeyoshi KODOMARI and Naoki NISHIDA

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

A geophysical investigation on Tendo Hot Springs, Yamagata Prefecture was carried out by the writers during the period from November 26 to December 1, 1966. From the investigation with those carried out by the Sanitary Office of Yamagata Prefecture and by the Tendo Hot Springs Association, the following results were obtained.

1) Thickness of Quaternary stratum in Tendo hot spring locality is estimated as 70~97 m which is divided into four layers of a, b, c and d as shown in Figs. 2-9. Tertiary stratum, which is composed of two layers of e and f in the extent of boring depth, lies directly below the Quaternary stratum. Hot water is chiefly restored in the f-layer.

2) Underground temperature at a depth of 1 m in the hot springs locality shows, as illustrated in Fig. 10, relatively higher value of more than 12°C in a broad area of north-western side of a line, which runs from ENE to WSW passing through the median point between Sakaeya Hotel and Tsuyama Primary School. This line corresponds to a fracture through which hot water is ascending from the deep to the f-aquifer.

3) Shallow unconfined ground water flows, as shown in Fig. 11, along Kuratsu river in the neighborhood of Shimo-nukizu, and turns to north-western direction in the vicinity of Tendo hot springs locality due to mixing of a comparatively dominant ground water flow from the north-eastern valley.

4) Tendo hot springs discharge from a Tertiary confined aquifer f. It is estimated, as shown in Fig. 15, from the distribution of height of water-head that hot water was flowing from south or south-eastern side of the hot spring locality to north or north-western direction through f-aquifer in 1961, but its flow pattern at the present is moderately changed by the steady pumping from five wells indicated in Fig. 14. The principal original hot water of Tendo hot springs is A (Temp.=73°C, Cl⁻=156 mg/L) which exists in the underground of the south-eastern end of Tendo hot springs locality, as shown in Fig. 17, and its temperature decreases gradually with the increases of length of path from the initial location due to heat dissipation to the upper layer in the course of flow through f-aquifer without accompanying any change in Cl⁻-content. Another original hot water is C which exists, perhaps, in the vicinity of the boundary layer between Quaternary and Tertiary strata, and happens to intrude, in some cases, into the conduit pipe and mixes with A on the way of discharge to the ground surface.

5) One of five pumping-up wells, from which steady discharge of hot water had been carrying out, was stopped during one hour and the change of increase of water-head

y in two observation wells with time t are precisely measured. From these measurements, transmissibility T and storage constant S of the hotwater-bearing stratum are calculated as shown in Table 5, using equations (22) and (23). And also, the approximate position of the fracture through which the original hot water is ascending from the deep to the f-stratum was estimated as shown in Table 6 and in Fig. 18.