



Title	3. 北海道白老町虎杖浜・竹浦地域の温泉調査報告
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, 24, 27-55
Issue Date	1970-09-18
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.24.27
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13979
Type	departmental bulletin paper
File Information	24_p27-55.pdf



3. 北海道白老町虎杖浜・竹浦地域の温泉調査報告

福 富 孝 治 ・ 中 尾 欣 四 郎 ・ 浦 上 晃 一
大 槻 栄 ・ 田 上 龍 一 ・ 三 好 日 出 夫
大 友 和 雄 ・ 三 宅 秀 男 ・ 西 和 男
佐 倉 保 夫 ・ 前 田 俊 一 ・ 滝 沢 隆 俊 ・ 瀬 川 良 明
(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 45 年 4 月 受 理 —

I. 序 言

北海道白老町虎杖浜・竹浦地域にはほぼ直線状の海岸線に沿って幅数 100 m の海岸平野があり、この部分に深さ 300~700 m のさく井によって現在 59 口の温泉が湧出している。この土地には元来天然湧出の温泉は全くなかったが、昭和 37 年 7 月この西方登別町登別駅付近に深さ 450 m の boring により 54°C の温泉が得られて以来、当地域にも西側から漸次掘さくが行なわれるようになり、現在は当地域を東へ遙かに越えて白老町ポロト湖畔でも深さ 1200 m の boring によって 45~55°C の温泉が得られている。

虎杖浜・竹浦地域の温泉は湧出量が非常に大で 1 湧出口で開発当初は 200~3600 l/min 平均 1280 l/min という量が自噴したことが知られているし、その水圧も他地方の温泉に較べて著しく高く、昭和 41 年秋筆者らは温泉 No. 25 において水柱に換算して地上およそ 29.5 m の圧力を、昭和 42 年春には温泉 No. 20 において 17.7 m の水圧を測定したことがある (第 1 図参照)。

この地域の温泉水は主として地下 300~700 m の深さに存在する新第三紀室蘭層またはその下部の幌別層からさく井管によって湧出するが、この地層には多くの断層または割れ目が発達していることが報告されている。この地域の温泉についての地球化学的調査は北海道衛生研究所の中谷ら¹⁾によってなされており、水系の分布について興味ある結果が得られている。また、昭和 41, 42 年頃虎杖浜駅付近の温泉湧出口を閉塞したところ付近の浅井戸の水温が上昇したことがあり、当教室の川村が調査²⁾を行なった。

最近、この地域内の温泉数の激増に伴い、一般的温泉調査および地下構造・温泉湧出機構の調査のほか、相互影響や湧出総量の増加に伴う水圧低下の調査等を行なうことが必要となり、北海道衛生部から筆者らに昭和 44 年度の委託研究費による調査が依頼された。そこで、昭和 44 年 11 月中旬から下旬にかけて本調査を行ない、その後補足調査を行なったが、冬季となっ

- 1) 中谷省三ほか；北海道の温泉成分の化学的研究 (第 7 報)、登別町臨海温泉および白老町虎杖浜温泉群、北海道衛生研究所報, 17 (1967), 91. および同上 (第 8 報)、北海道衛生研報 18 (1968), 117.
- 2) 川村政和；虎杖浜における温泉の地下漏水について、北大地球物理学研究報告, 21 (昭 44), 1.

第1表 虎杖浜・竹浦地域の温泉調査

Table 1. Result of investigation of hot springs

温泉番号 Spring No.	温泉所有者 Owner's name	温泉さく井 Hot spring well			湧出口高度 (海面上) Height of orifice above mean sea level (m)	湧出温度 Discharge temp.		
		完了年月日 Date of boring (昭和年月日)	口径 Dia. (mm)	深度 Depth (m)		掘さく 完了時 Initial (°C)	今回の調 査 Nov., 1969 (°C)	差 Temp. difference (°C)
1	石川小二郎	38. 6. 10	100	470		46	29.8	-16.2
2	"	37. 9. 23	6(吋)	270		30	26.3	-3.7
3	"	40. 8. 5	100	745		45	—	—
4	"	39. 11. 9	4(吋)	723		45	—	—
5	泉観光K.K.	41. 12. 1	305	508		47.5	—	—
6	マルゲン観光K.K.	41. 4. 26	4(吋)	824		48	47	-1.0
7	東北興業K.K.	増掘42. 2. 22	144	460		48	39.5	-8.5
8	泉観光K.K.	43. 3. 13	150	419	6.80	47.2	46.3	-0.9
9	森 亀助	44. 2. 18	144	467		48.5	48.5	0
10	山下 敏男	43. 4. 10	144	400	11.90	48	46.3	-1.7
11	山下 光男	42. 9. 10	144	550	7.30	49	47.5	-1.5
12	マルゲン観光	44. 10. 21	152.4	710		52	52.0	0
13	北海ボーリング	42. 4. 21	114	420	6.67	50	48.6	-1.4
14	山下 光男	43. 10. 20	144	372	11.46	49	48.5	-0.5
15	芝田 丑松	42. 6. 8	150	600		50	49.5	-0.5
16	大坪 嘉市	増掘41. 6. 25	144	550	7.26	48	48.0	0
17	石川小二郎	41. 9. 17	150	550		50	49.1	-0.9
18	佐々木昭造	44. 5. 31	150	462	8.82	50	45.5	-4.5
19	紺野 一	42. 6. 24	144	420	7.19	50	47.7	-2.3
20	清水 省吾	42. 4. 20	100	420	11.47	49.5	49.6	+0.1
21	五十嵐仙治	42. 7. 7	75	370	9.15	50.5	47.9	-2.6
22	清水省吾	41. 7. 6	88	312	14.39	45	42.5	-2.5
23	蛸崎 敏明	43. 12. 25	152	465		49.2	—	—
24	清水省吾	44. 8. 1	100	440		48	47	-1.0
25	蛸崎 敏明	41. 7. 14	100	385		49	48.5	-0.5
26	山下 敏男	増掘41. 1. 30	150	620		53	52.0	-1.0
27	萱場 武義	" 44. 1. 9	130	370	8.34	50	47.2	-2.8
28	道南土地K.K.	44. 9. 13	89	480	6.37	51	49.0	-2.0
29	道央観光K.K.	40. 3. 25	152	500		40	—	—
30	山下 徳治	42. 8. 5	144	421	8.22	50	49.6	-0.4
31	合田 清一	43. 5. 25	144	451	7.01	50	(28.8)	
32	中山 弘	43. 12. 12	100	508	6.34	51	51.0	0
33	富川 礼子	42. 5. 2	100	520	17.10	51	43.8	-7.2
34	合田 清一	43. 5. 25	144	451	7.35	50	48.2	-1.8
35	山下 光男	43. 7. 28	144	446	9.55	50	47.1	-2.9
36	中央木材K.K.	40. 8. 8	152	500		51	49.5	-1.5
37	山下 徳治	44. 8. 28	144	589	7.70	50	48.8	-1.2
38	合田 清一	44. 1. 10	150	561		50	50.0	0
39	岡本 博視	43. 6. 10	101	500		25	25.1	+0.1
40	柿原 太助	42. 7. 25	100	657		51.5	43.5	-8.0
41	道央観光K.K.	41. 10. 9	114	550		42.5	(38.5)	
42	齊藤 忠	44. 4. 23	144	640		50	(29.0)	
43	合田 テル	44. 3. 14	144	630	5.37	47	41.0	-6.0
44	兼松 泰晴	44. 3. 4	100	670		48	45.8	-3.0
45	石井 正夫	42. 6. 16	76.5	580	7.42	52	45.5	-6.5
46	大成観光K.K.	43. 9. 5	100	685		43.5	42.0	-1.5
47	後藤 昭義	43. 10. 8	100	655	6.11	44	43.5	-0.5
48	北平 茂雄	44. 7. 13	144	685		48	31.6	-16.4
49	森 博司	42. 11. 13	75	400		34	32.5	-1.5
50	市川 昌則	44. 5. 10	75	700		41	39.0	-2.0
51	横山 薫	41. 12. 20	75	600		32	28.6	-3.4
52	山村 弘	42. 7. 20	155	600		49	—	—
53	斎藤喜代志	44. 11. 30	150	480		53.5	48.5	-5.0
54	金田一忠四郎	44. 12. 10	152	500		51	50.8	-0.2
55	山下 敏男	44. 11. 1	114	597		49	49.7	+0.7
56	荒木 朝光	45. 3. 12	144	558		50	測定不能	
57	兼松 泰晴	44. 11. 10	150	560		50	49.7	-0.3
58	山下 徳治	45. 1. 19	144	688		50	45.5	-4.5
59	合田 清一	45. 2. 23	144	700		45	42.0	-3.0

(昭和44年11月18~24日) 結果

in Kojohama-Takeura locality in November 18-24, 1969

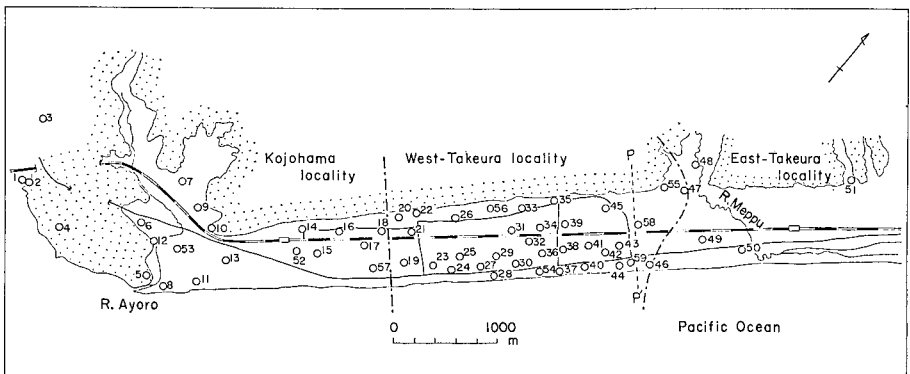
全開湧出量 Full discharge rate		静止水頭高 Height of pressure head		Cl ⁻ 含有量 Cl ⁻ -content	推定使用量 Estimated quantity with use	使用の現況 Present condition of using
掘さく完了時 Initial (l/min)	今回の調査 Nov., 1969 (l/min)	(湧出口上) Above the orifice (m)	(海面上) h Above mean sea level (m)	(mg/l)	(l/min)	
220	—			126		廃井
280	—			501		"
480	—					掘さく時自噴, 動力 (昭41. 12. 21)
400	—					" " (昭42. 5. 30)
320	—					全開使用
600	—			1069		掘さく時自噴, 動力 (昭42. 12. 6)
300	—			996		
1500	831	(7.0)	(13.80)	847	534	全開使用
100	165			1180	0	未利用
1200	247	1.10	13.00	947	18	略未利用
1540	—	(10.5)	(17.80)	142		全開使用
300	289			1037		
1500	394	9.73	16.40	617	219	一部使用
600	358	4.47	15.93	551		全開使用
3600	2500			479		"
1400	646	8.74	16.00	531	0	未利用
1500	1900					全開使用
1000	683	8.15	16.97	382	0	未利用
1600	770	8.55	15.74	387	380	全開使用
1800	309	6.06	17.53	399		別荘のみに使用
1000	—	7.47	16.62	404	(228)	全開使用
1200	320	3.84	18.23	133	183	一部使用
2000	—					"
1800	—			361		全開使用
1700	—			350		"
700	310			374		"
1850	794	7.98	16.32	366	0	未利用
800	704	9.94	16.31	470	0	"
3600	—				0	"
1700	828	8.18	16.40	479	219	一部使用
1500	—	9.30	16.31	234	0	未利用(?)
1500	842	8.43	14.77	429	20	一部使用
1500	313	4.80	21.90	218		全開使用
1500	985	11.65	19.00	187		"
1500	856	(9.15)	(18.70)	242		"
1300	—			380		"
2000	1480	9.95	17.65	460		" (?)
1300	860			467		半開使用
1500	—			10.7	0	未利用
1600	—			173		全開使用
400	—			11.1		"
1500	730			279		1/3以下使用
1000	770	8.22	13.59	110		一部使用
2000	—			130		全開使用
1400	476	8.85	16.27	130	90	一部使用
1600	512			11		全開使用
600	—	(16.3)	(22.41)	—		半開使用
800	500			52		一部使用
1560	—			8.3	0	未利用
300	186			9.2		一部使用
3200	—			6.5	0	未利用
2000	1700			—		一部使用(?)
1300	600			876	0	未利用
500	—			394	0	"
1200	—			199		全開放流
2000	—			99		
400	—			391		} 本調査時には 工事中
800	—			174		
800	—			14.1		

たため十分な調査を行なうことはできなかった。それでも一応の成果を得たのでその結果を報告する。現地調査に際しては苫小牧保健所・白老町の方々の御援助と温泉保護利用組合と温泉所有者の協力をいただいた。ここに厚く謝意を表する次第である。

II. 調査内容と方法

本調査は昭和44年11月19～24日に実施した。第1図は虎杖浜・竹浦地域における温泉湧出口の分布であり、湧出口につけた数字は第1表中の温泉番号である。図中2本の破線によって温泉地域を西から虎杖浜・竹浦西部および竹浦東部の3地域に便宜上分けた。これらの温泉につき湧出温度、バルブ全開時の湧出量、静止水頭の基準点（便宜上各井の地上から1.5mの高さの範囲に設定）上の高さ、使用量（湧出口のバルブを適宜しめて自噴量を制限し現在使用している量）、採水につき Cl^- 含有量の測定等を行なった。当温泉は水圧が高く湧出量が大きいため、水銀柱の高さ2mの圧力計を試作して用い湧出管に接続して湧出口を閉鎖し水圧が定常値に落ちついた水銀柱の高さを測定し、それを水柱に換算し必要な補正を行なって求めた。尚、この際温泉によって水圧が落付くまでの時間に緩急の差違が認められたので、数例につきその水圧の時間的経過をも測定した。湧出量はドラム管を縦に1.5本つないだ桶状の容器に湧出口から長さ5m、口径20cmぐらいの太いゴム・ホースで途中で洩水しないように温泉水を導き満水する時間を秒時計で測って求めた。尚、水圧、湧出量の測定にはかなりの時間を要したため日程と吹雪に災いされて全湧出口について上記の測定を実施することができなかったため昭和45年3月に未測定の湧出口について温度、 Cl^- 含有量だけの補足調査を行なった。以上の結果を第1表に示した。

第1表に記載の温泉さく井の完了年月日、口径、深度ならびに当時の温度、湧出量は苫小牧保健所の御好意によって温泉台帳から転記したものであり、各湧出口の基準点の海面上高度は



第1図 虎杖浜・竹浦地域における温泉削井の分布図
(数字は第1表中の温泉番号)

Fig. 1. Distribution of hot spring wells in Kojohama-Takeura locality. Numerals attached to the sites of hot springs are the number of hot spring in Table 1.

白老町役場の御好意によってこの調査の一環として行なわれた水準測量結果によるもので、これによって湧出口の海面上の高さおよび静止水頭の海面上の高さを求めることができた。使用量の推定値が少ないのは1湧出口から多くの家に分湯されておりその各々の測定は困難であったため、使用時の水圧を湧出口で測定して推定したが、この目的の個所に水圧計を取付け得る湧出口が少なかったことによるのである。

相互影響の調査は昭和42年4月温泉 No. 20 と No. 22 (温泉間距離 165 m) について行なった。詳細については後章に述べるが、この際、温泉の静止水頭に海の潮汐の影響が多少あることが判ったので、今回の調査において温泉 No. 37, No. 43 および No. 31 に前記の水銀水圧計を取付けその水銀柱の上端の上下変化を筆者らの製作した精密水位計によって測定した。

更に、登別駅から白老町ポロト沼付近までの凡そ 17 km に亘る範囲に対し、200 m 間隔で 1 m 深地温の測定を行なった。

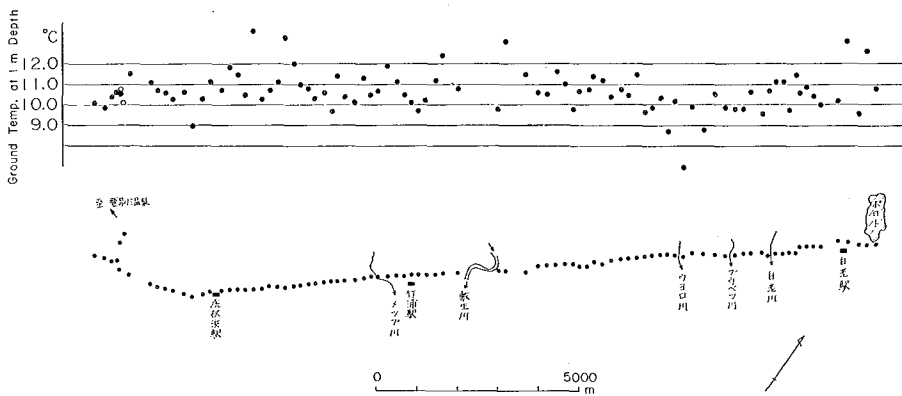
温泉地域付近および boring 孔内の地質調査は北海道大学理学部地質鉱物学教室の石川俊夫教授と小林武男大学院学生によって行なわれたが、別報として報告される筈である。

III. 調査の結果

以上の測定結果の個々について以下に説明する。

1. 1 m 深地温分布

第2図は登別駅付近から白老町ポロト沼付近まで凡そ 17 km に亘る範囲に対し海岸平野の山際に沿って 200 m 間隔で測定した 90 カ所の 1 m 深地温の分布を示したものである。この地域には天然湧出の温泉は存在せず高温な温泉水の存在する深さは 200 m 以下であるため 1 m 深地温には顕著な高温部は認められないが、虎杖浜・竹浦温泉地域からその東方敷生川とウヨロ川中間付近までの間では僅かに 1~2°C 程度の高温を示しているようである。これは温度の



第2図 登別駅付近から白老町ポロト沼に至る間の 1 m 深地温分布

Fig. 2. Change of ground temperature at a depth of 1 m along coastal plain from the vicinity of Noboribetsu railway station to Lake Poroto in Shiraoi Town.

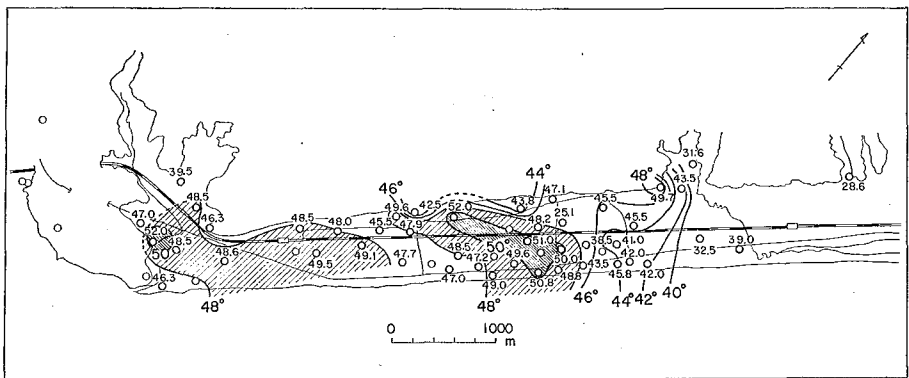
あまり高くない温泉水の一部が深さ 100 m 以浅の所まで上昇して拡がっていることを示唆するものと思われる。

2. さく井の深さの分布

第 1 表から判るように、虎杖浜西部丘陵地域と竹浦東部の平野部で温泉水の得られる深度が 600 m より大きくなっているが、その中間では 300~500 m 程度の深さである。

3. 湧出温度の分布

第 3 図のさく井位置につけた数字は今回の調査における湧出温度の値である。さく井深度が極めて浅いか、深度は付近のさく井と同等であるが温度と Cl^- 含有量の関係から浅層の地下水が混入していると思われる No. 31, No. 36 等を除いて $40^{\circ}C$ から $50^{\circ}C$ まで 2° 毎の等温線を実線で示し、 $48\sim 50^{\circ}C$ の範囲には疎な斜線、 $50^{\circ}C$ 以上には密な斜線を施した。図から次の事柄が推察される。



第 3 図 虎杖浜・竹浦地域における温泉の湧出温度の分布

Fig. 3. Distribution of discharge temperature of hot springs in the Kojohama-Takeura locality.

(1) メップ川谷の出口中央付近から略々南北に引いた線を境としてその西方すなわち竹浦西部および虎杖浜地域では温度が $40^{\circ}C$ 以上であるが、その東方すなわち竹浦東部では急に温度が低下する。

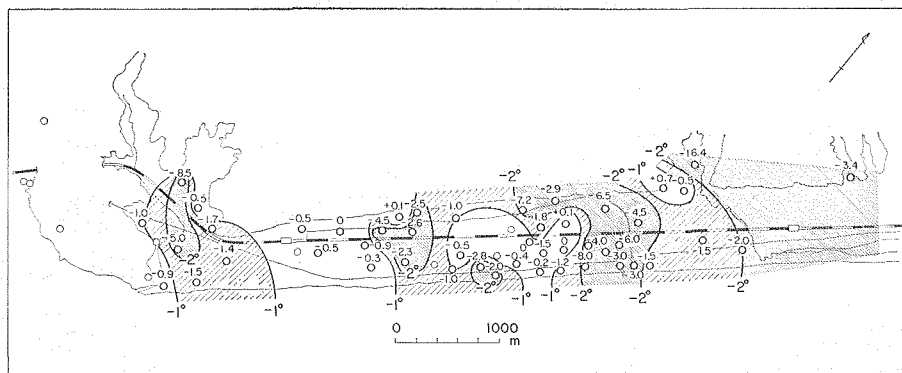
(2) 図のように、 $48^{\circ}C$ 以上の高温域は竹浦西部地域と虎杖浜地域に見られ、それぞれその長軸はほぼ $N70^{\circ}E$ から $S70^{\circ}W$ へ延びていて、地下にこの方向の 2 つの大きな割れ目が存在し温泉水が上昇するようにも思われるが、これに関しては、次のように説明するのが妥当であろう。

第 11 図に示した静止水頭の海面上高度 h の分布図において h が 16 m 以下の場所 (図中点線で示す) と第 3 図中温度が $48^{\circ}C$ 以上の場所とは大略一致する。さらに詳細に見れば、竹浦西部地域の海岸に直角な鉛直断面における地下温泉帯水層内の静止水頭 h の海岸からの距離に対する分布図 (第 23 図中の白丸および実線) においては、丁度第 3 図の $48^{\circ}C$ 以上の高温域に対

応して海岸から 200~300 m 付近で h の値が極小となっている。この物理的意味を考えると、 h の極小部では帯水層内で温泉水の水平方向の流動はないが、 h の値が極小であるために、それより深い所に存在する h よりかなり高い一定水圧 H をもつ高温な A 源温泉水（次の第 4 節参照）が割れ目伝いにこの帯水層まで多量に上昇してくる結果を招き、 h の極小部の温度が最高を示すことになる。すなわち、第 3 図の湧出温度の高温部は温泉帯水層中の静止水頭 h の水平分布の極小値に近い場所であることを意味するに過ぎないのである。

(3) この地域の湧出温度の最高は現在 52.0°C である。

(4) 今回の調査と掘さく完了時における温度を第 1 表から比較すると、資料 48 の内変化の認められないもの 8%, 温度が僅かに上昇したもの 6%, 温度が低下したもの 86% で、今回の値は掘さく完了当時よりも平均して 2.7°C の低下を示していることが判った。第 4 図はその分布図であるが、低下の著しいのは虎杖浜地域の西端部、竹浦東部地域および竹浦西部地域の東部である。



第 4 図 湧出温度の低下の分布

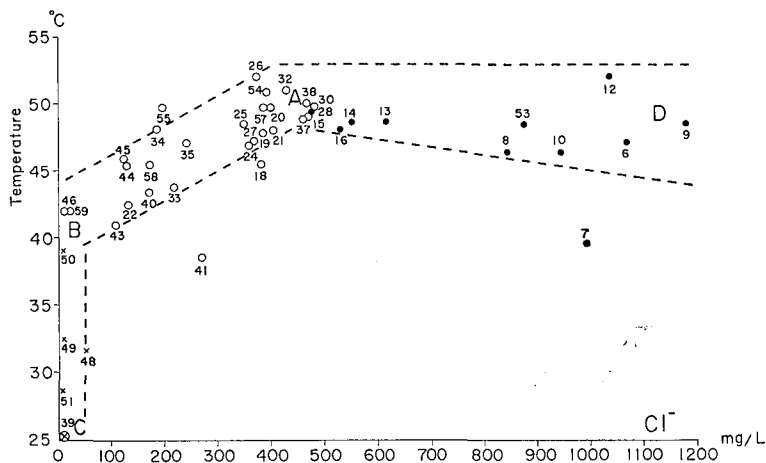
Fig. 4. Distribution of orifice temperature decrease.

4. 湧出温度と Cl^- 含有量との関係

この関係については既に中谷ら¹⁾の研究がある。今回の調査について同様の関係を調べたのが第 5 図である。図中白丸は竹浦西部の温泉、掛印は竹浦東部温泉、黒丸は虎杖浜地域の温泉、丸の中に掛印は浅層の地下水が混入していると思われる温泉である。図から次の事柄が推定される。

(1) 主に竹浦西部地域の温泉については、両者の関係はほぼ直線状の分布をなしており、A 源温泉水（温度 $50\sim 52^{\circ}\text{C}$, $\text{Cl}^- = 400\sim 500 \text{ mg/l}$ ）と B 単純温泉水（温度 $40^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{C}$, Cl^- 微少）との混合によって種々の温泉が生じていること。

(2) メップ川谷出口を通過して南北に引いた直線以東、すなわち竹浦東部地域の温泉水は図中で B, C の中間の掛印で示したものであるが、 Cl^- 含有量は普通の地下水と同様に微少であるが、温度は $25\sim 40^{\circ}\text{C}$ を示し、竹浦西部地域の温泉水とは全く異なった性質の水で、おそら



第5図 湧出温度と Cl^- 含有量との関係

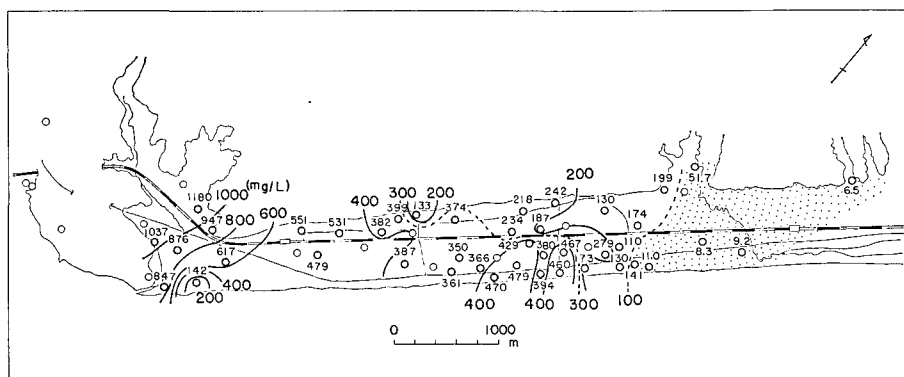
Fig. 5. Relation between orifice temperature of hot springs and the corresponding Cl^- -content.

く普通の地下水が地下から熱伝導によって熱せられた水であろうと思われる。

(3) 虎杖浜地域の温泉水は図中 A, D の中間の黒点で示したものであるが、竹浦西部地域の A 源温泉に近い温度ではあるが Cl^- がかなり多い点で異なっている。

5. 塩素量の分布

第6図は Cl^- 含有量の分布図であるが、温泉位置につけた数字は Cl^- 含有量である。その量は竹浦東部では 100 mg/l 以下、竹浦西部では $100 \sim 400 \text{ mg/l}$ 、虎杖浜地域では $400 \sim 1200 \text{ mg/l}$ で多く、しかも東へ行くほど増加する傾向がある。

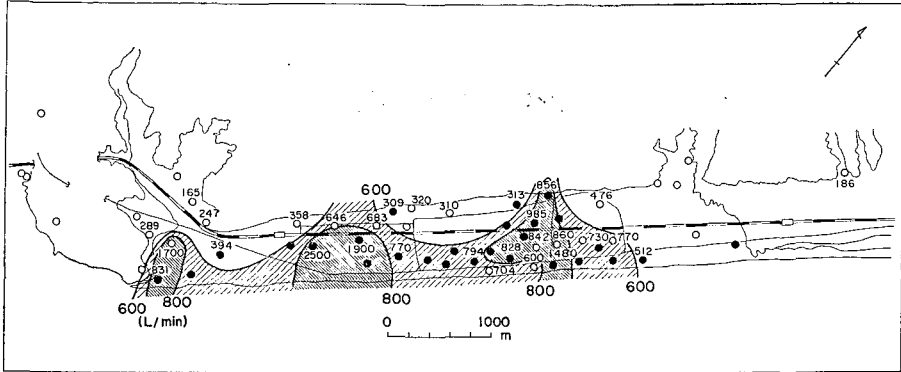


第6図 温泉の Cl^- 含有量 (mg/l) の分布

Fig. 6. Distribution of Cl^- -content (mg/l) of hot springs.

6. 全開湧出量

他の湧出口は現在の使用状態のままにして1つの湧出口のバルブを全開したときの湧出量をその湧出口の全開湧出量と仮称した。第7図の各湧出口に付けた数字はこの値であるが、参

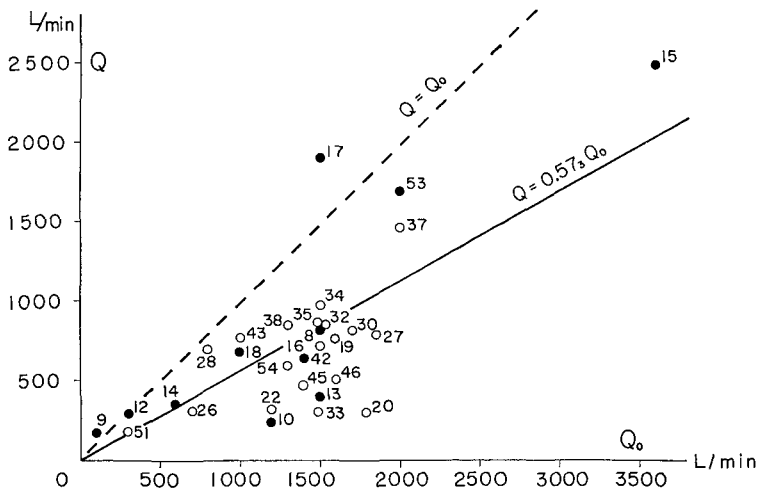


第7図 温泉の全開湧出量の分布（昭和44年11月）（黒丸および二重丸は掘削完了時にそれぞれ1500 l/min 以上および3000 l/min 以上の温泉）

Fig. 7. Distribution of full discharge rates of hot springs in November, 1969. (Black and double circles show respectively the hot springs of more than 1500 l/min and 3000 l/min at the time of boring).

考のために掘さく完了時の全開湧出量が1500~3000 l/min の場合を黒丸、3000 l/min を越えた場合を二重丸で示した。実線は現在の値につき600 l/min および800 l/min の等量線である。図から判るように、この地域の全開湧出量は非常に大きく現在でも165~2500 l/min の範囲の値、平均して745 l/min という値を示している。現在1000 l/min を越えている温泉は、調査した範囲では、虎杖浜のNo. 15 (2500 l/min)、その東隣のNo. 17 (1900 l/min) およびNo. 53 (1700 l/min) であるが竹浦西部ではNo. 37 (1480 l/min) のみで竹浦東部にはない。図から判るように、虎杖浜地域と竹浦西部地域の海岸寄りに大きい値を示すものが多い。

現在の全開湧出量 Q と掘さく当初の値 Q_0 とを比較したのが第8図である。点につけた数



第8図 現在の全開湧出量 Q と掘削完了時の値 Q_0 との比較（数字：温泉番号）

Fig. 8. Comparison of full discharge rates of the hot springs at present with those at the time of initial discharge. (Numerals: No. of hot springs).

字は温泉番号, 点線は $Q=Q_0$ の線, 実線は現在の値が掘さく当初に比較して平均 57% ぐらいとなっていることを示している。図から明らかなように, 多くの温泉は掘さく当初よりも全開湧出量が減少している。ここに注意すべきことは, 各湧出口の全開湧出量の総和は現在およそ 45000 l/min にも達するが, この値は決してこの地域の総湧出量ではないことである。全湧出口を全開すれば水圧の低下がおり各湧出量は減少するからである。

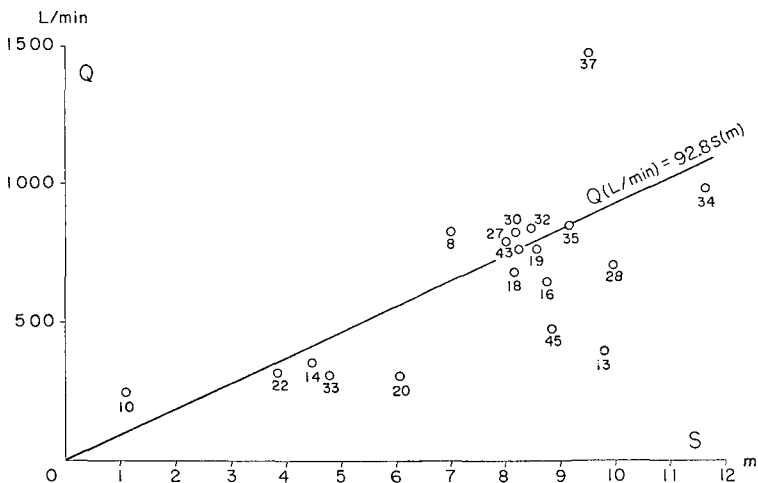
7. 全開湧出量と湧出口上静止水頭高との関係

静止水頭高とは, 他の湧出口は現在の使用状態のままとし, 測定する湧出口の湧出を停出させたときに測った水圧の定常値を水柱に換算した値であるが, 第 1 表には各湧出口上の高さ直して示した。このようにして得られた湧出口上静止水頭高 s を横軸に, それに対応する全開湧出量 Q を縦軸にとってその関係を調べたのが第 9 図である。

被圧帯水層内の温泉水の流動が DARCY の法則に従っている場合には 1 湧出口からの湧出量 Q とその湧出口上の静止水頭高 s との関係は

$$Q \approx \frac{2\pi T}{\log_e \left(\frac{2b}{r_0} \right)} s \quad (1)$$

で表わされる。但し, T は被圧帯水層の透水量係数, r_0 はそのさく井の帯水層に接する部分の半径, b はさく井から割れ目 (地下深くから帯水層まで温泉水を導く割れ目) までの距離である。帯水層の場所で T の値も多少変化するし湧出口毎に r_0 や b の値は異なるので (1) 式の比例常数 $2\pi T / \log_e \left(\frac{2b}{r_0} \right)$ の値は湧出口によっていくらか異なった値となるであろう。第 9 図における Q と s との関係が正の相関を示しながらも点がやや散乱するのはこのためと思われる。第 9 図の Q と s とが (1) 式に従うとしてその比例常数の平均値を求めると図中中央の実線のように



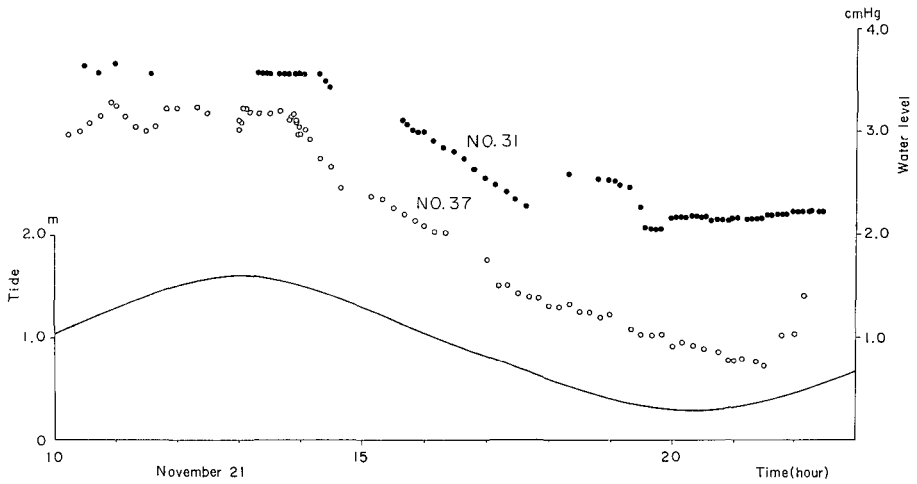
第 9 図 全開湧出量と湧出口静止水頭高との関係 (数字: 温泉番号)

Fig. 9. Relation between full discharge rate of hot spring and height of pressure head above the orifice.

限りでは、聞いたことがない。

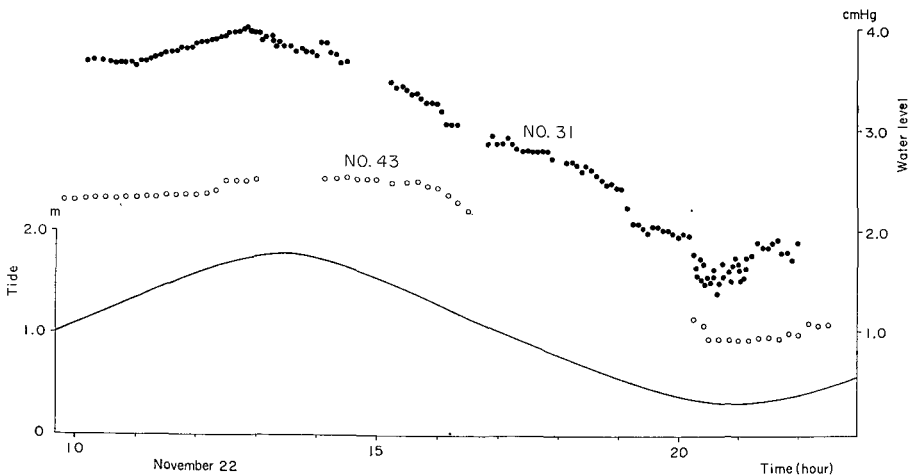
9. 静止水頭の潮汐による変化

昭和42年4月に温泉No.20が掘さく完了の際、その水圧を測定するためにバルブをしめて湧出を停止させた湧出口に細いビニール管を連結して管内の水位が停止するまでその先端を後の急斜面の山の中腹まで持ち上げ管内の水頭の高さを測った。この折、海の潮汐に伴って10 cm程度の水位変化が観測された。それで、今回の調査においても温泉No.37, No.43およびNo.31の湧出口を閉じて水銀圧力計を連結し、その水銀柱の頭の上下の変化を1/20 mmまで読みとれる精密水位計を用いて測定した。その結果の一部を第12図および第13図に示した。



第12図 温泉No.31およびNo.37の静止水頭の潮汐による変化

Fig. 12. Change of pressure head of hot springs No. 31 and No. 37 with time due to tide.



第13図 温泉No.31およびNo.43の静止水頭の潮汐による変化

Fig. 13. Change of pressure head of hot springs No. 31 and No. 43 with time due to tide.

図中点は温泉に連結した水銀圧力計の水銀面の読みで実線は室蘭港におけるその日の潮汐である。図から判るように、潮汐変化に伴って温泉の静止水頭が水銀柱で1~3 cm 程度の変化をしている。

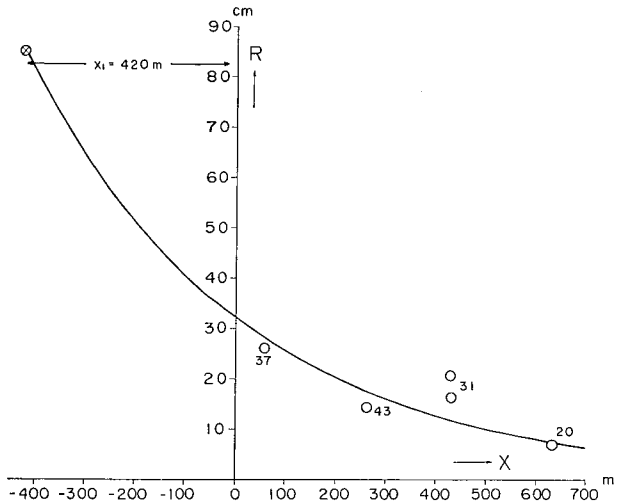
この測定を行なった温泉湧出口の海岸からの距離 λ を横軸にとり、室蘭港の半日潮の潮差 100 cm に対する温泉水圧の変化を水柱に換算した値 R を縦軸にとって、これらの関係を示したのが第 14 図中の丸である。図中の実線は

$$R = ae^{-\lambda} \quad (2)$$

なる関係が成立するとして実測値に最もよく合うようにきめた線である。

a および λ は常数であるが、 $a=32.3$ cm および $\lambda=2.325 \times 10^{-5}$ 1/cm となった。また、室蘭港の半日潮の潮差 100 cm に対し登別港の潮差は実測の結果 85.4 cm であったので、第 V 章 3 節に述べたように地下帯水層の海底下の末端が直接海と連結している地下構造の場合には、(2) 式に $R=85.4$ cm (図中 ⊗) を入れて λ の値を求めると $\lambda=-420$ m すなわち海と連絡のある帯水層の末端は海岸から沖に向かって水平距離 $x_1=420$ m 付近であることが推察される。

また、温泉水圧変化の登別港の半日潮に対する位相のずれは海岸距離とは明瞭な関係が見



第 14 図 半日周期の潮汐による温泉水頭変化の幅 R と海岸距離 λ との関係

Fig. 14. Relation between range of change height in pressure head R of a hot spring and the distance from sea-coast λ due to semi-diurnal tide.

第 2 表 温泉静止水頭に対する潮汐(半日潮)の影響

Table 2. Effect of semi-diurnal tide on pressure head of hot springs.

温泉番号 Spring No.	海岸からの距離 Coastal distance λ (m)	静止水頭変化 Range of pressure head R (cm)	位相のずれ* Phase difference (min.)
37	60	26.2	-76 (Nov. 21, 1969)
43	265	14.3	-54 (Nov. 22, 1969)
31	430	{ 16.6 (Nov. 21) 20.7 (Nov. 22)	+6 (Nov. 22, High water) -27 (" Low water)
20	630	6.9	-88 (April 26, 1967, L. W.) -125 (" 27, " , ") -81 (" 27, " , ")

* + は位相の進み, - はおくれ

られず、第2表に記したように、+6～-125 min の範囲の値で、すなわち、およそ0から2時間位までの位相のおくれがあることが判る。

IV. 調査結果から推察される温泉帯水層の状態

boring 資料についての地質学的研究によれば、温泉水が貯溜されているのは場所によって地下300～700 m の深さに存在する新第三紀の地層であるが、その上部に存在する洪積世または沖積世の地層で被圧されていることは温泉の水圧が著しく大きいことから推察されるし、虎杖浜から竹浦東部地域のどこを掘っても、温度や化学成分濃度にはいくらか変化はあるが、温泉が得られることから被圧層状温泉の形となっていることが推定される。この被圧帯水層の物理的常数を測定する目的で次の測定を行なった。

1. 自噴している湧出口を急に密封したときの湧出管内の水圧の上昇

一定量 Q' を湧出している湧出口を急に密閉してその水圧を測定したところ、この地域の温泉においてはゆっくりと水圧が上昇して一定値に落付く場合と、急に水圧が上昇して一定値に落付く場合とがあった。

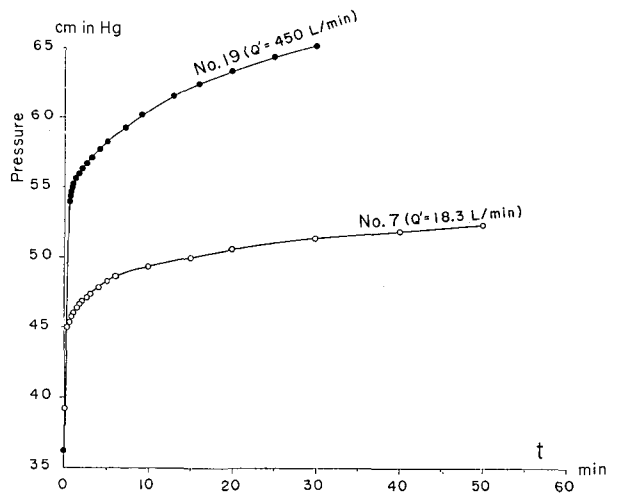
第15図はゆっくり水圧が上昇した場合の例であるが、温泉 No. 7 の場合は最初一定量 18.3 l/min 湧出していた場合、No. 19 は最初一定量 450 l/min 湧出していた場合である。

第16図は急に水圧が上昇した場合の例で、停止前の湧出量はそれぞれ No. 16 で 122 l/min, No. 37 では 1480 l/min, No. 45 では 76.5 l/min であった。両図とも横軸には湧出停止後の時間を縦軸には水銀柱で表わした水圧がとってある。

次に、このような違いのおこる理由につき考察を行なってみよう。

いま、水平で均質一様で透水量係数 T 、貯溜係数 S の被圧帯水層と

この層に温泉水を供給する鉛直な直線状割れ目を考え、この割れ目から水平距離 b にこの帯水層に達する自噴井 A があって定常的に Q_0 を湧出しているものとする。自噴井 A から距離 r_1 、A の割れ目に対する対象点 A' から距離 r_2 にある観測井 P で水圧を測定するものとする。いま、時刻 $t=0$ において自噴井 A の湧出を急に停止させたとき P 点における $t \geq 0$ の水圧の上



第15図 一定量 Q' を自噴していた温泉湧出口を急に密閉した場合に湧出管内の水圧が時間 t に対し緩慢に上昇した例

Fig. 15. Two examples in which pressure in the discharge pipe increased slowly with time t , when the orifices of flowing springs were closed abruptly.

昇(水柱で測る)を $t=0$ の水圧を基準にして測り、これを y とおくと前報³⁾により

$$y = \frac{Q'_0}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{Sr_1^2}{4Tt}\right) - W\left(\frac{Sr_2^2}{4Tt}\right) \right\} \quad (3)$$

で表わされる。但し、 W は井戸関数である。

いま、 P 点を段々自噴井 A に近づけ遂に A と一致させた場合を考えると $r_1=r_0$ (自噴井 A の半径)、 $r_2 \approx 2b$ となるから (3) 式は

$$y \approx \frac{Q'_0}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{Sr_0^2}{4Tt}\right) - W\left(\frac{Sb^2}{Tt}\right) \right\} \quad (4)$$

となる。(4) 式は一定量 Q'_0 を自噴する湧出口を $t=0$ において急に密閉した場合の湧出口上の水圧(水柱で表わした水圧)の上昇 y を与える関係である。

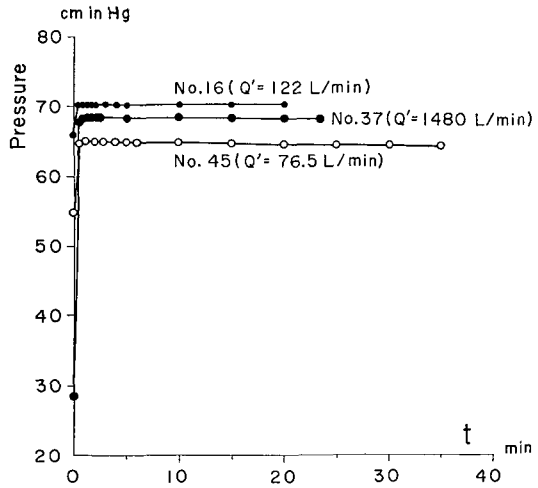
(1) 水圧が緩く上昇する場合

(4) 式において、一般の温泉に対しては $\left(\frac{Sr_0^2}{4T}\right)$ の値は 1 秒よりかなり小さい値である。いま、時間 t が $\left(\frac{Sr_0^2}{4T}\right) \ll t \ll \left(\frac{Sb^2}{T}\right)$ である場合を考えれば (4) 式は

$$y \approx \frac{Q'_0}{4\pi T} \left\{ -0.5772 - \log_e\left(\frac{Sr_0^2}{4Tt}\right) \right\} + \frac{Q'_0}{4\pi TM} \log_{10} t \quad (5)$$

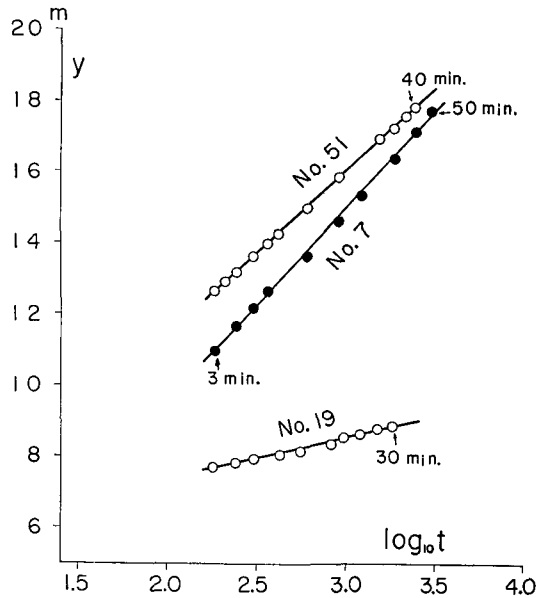
となる。但し、 $M=0.4343$ である。従って、この場合には y と $\log_{10} t$ との間には直線関係があり、 Q'_0 が判っておれば透水量係数 T が求められる。水圧が緩く上昇する場合の例につき、この関係を調べたのが第 17 図であるが、きれいな直線関係が見られる。

この関係から透水量係数 T を求める



第 16 図 一定量 Q' を自噴していた温泉湧出口を急に密閉した場合に湧出管内の水圧が時間 t に対し急激に上昇した例

Fig. 16. Three examples in which pressure in the discharge pipe increased suddenly with time t , when the orifices of flowing springs were closed abruptly.



第 17 図 水圧が時間 t に対し緩慢に上昇する場合における水圧上昇 y と $\log_{10} t$ との関係

Fig. 17. Relation between pressure increase in the discharge pipe y and $\log_{10} t$, when the pressure rised slowly with time t .

3) 福富孝治ほか; 山形県天童温泉の地球物理学的研究, 北大地球物理研究報告, 18 (昭 42), 23.

と、No. 7 に対しては $T=1.0$ (cm²/sec), No. 19 に対し $T=11.2$ (cm²/sec), No. 51 に対し $T=1.7$ (cm²/sec) が求められた。

(2) 水圧が急に上昇する場合

水圧が急に上昇して短時間で y が一定値に達する場合は (4) 式において $t \gg \frac{Sb^2}{T}$ の場合である。 $\frac{S}{T}$ の値は後に述べるように、この温泉地域においては 10^{-5} (sec/cm²) の程度の値であるから b の値が小であればこの条件が満足される。この場合には (4) 式は

$$y \simeq \frac{Q'_0}{2\pi T} \log_e \left(\frac{2b}{r_0} \right) - \left(\frac{Q'_0 S b^2}{4\pi T^2} \right) \frac{1}{t} \quad (6)$$

で近似される。

2. 水圧測定中の温泉から割れ目迄の距離 b

(1), (2) の場合のどちらでもよいが、一般に測定された水圧上昇 y を縦軸にとり $\log_{10} t$ を横軸にとって測定値を記入すると t が $\left(\frac{S r_0^2}{4T} \right) \ll t \ll \left(\frac{S b^2}{T} \right)$ の範囲では第 17 図のような直線となるが、 t が非常に大きいところでは (6) 式から判るように y の値は t に無関係に一定値となり、すなわち横軸に平行な直線になる。この曲線上の任意の一点に切線を引いてその傾斜を求めると (4) 式から

$$\frac{dy}{d(\log_{10} t)} = \frac{Q'_0}{4\pi T M} \left\{ e^{-\frac{t_1}{t}} - e^{-\frac{t_2}{t}} \right\} \quad (7)$$

となる。但し、 $t_1 \equiv \frac{S r_0^2}{4T}$, $t_2 \equiv \frac{S b^2}{T}$ である。

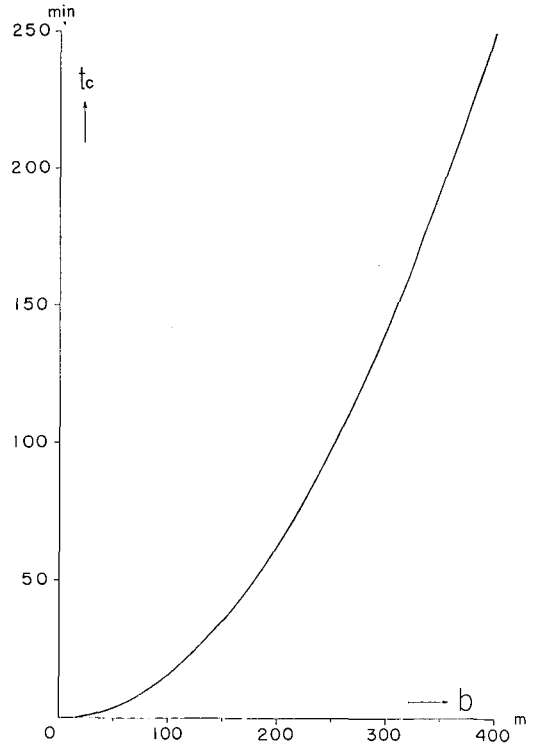
すなわち、 t が $t_1 \ll t \ll t_2$ では $\frac{dy}{d(\log_{10} t)} \simeq + \frac{Q'_0}{4\pi T M}$ となり、 $t \gg t_2$ であれば $\frac{dy}{d(\log_{10} t)} \simeq 0$ となる。従ってこの曲線に $\frac{1}{2} \left(\frac{Q'_0}{4\pi T M} \right)$ の傾斜の切線を引き、その切点の時刻を t_c とおけば (7) 式から近似的に

$$t_c \simeq \frac{\left(\frac{S}{T} \right) b^2}{\log_e 2} \quad (8)$$

が得られる。竹浦西部地域では被圧温泉帯水層の $\frac{S}{T}$ の値は、後章に述べるように、 $\frac{S}{T} = 0.65 \times 10^{-5}$ sec/cm² の値であるから、これを (8) 式に代入すれば

$$t_c (\text{sec}) \simeq 0.0938 b^2 (\text{m}) \quad (8')$$

となる。第 18 図はこの関係を図示したも



第 18 図 t_c と b との関係

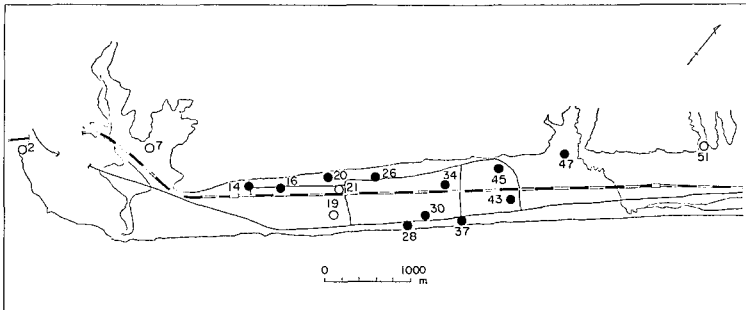
Fig. 18. Relation between t_c and b .

のである。

さて、水圧が緩く上昇する第17図の例の場合に立帰って考えてみるに、 t_c の値はNo.19の場合はこの測定時間の30 minより大きく、従って第18図から $b > 137$ mであることが判る。同様に、No.51の場合は $b > 158$ m, No.7の場合は $b > 177$ mであると推定される。

次に、水圧が急に上昇する第16図の例の場合には t_c の値は(水圧一時間)曲線の折れ曲りの時刻よりもやや小さいと考えられるから、上と同様の推論からNo.16の場合は $b < 15$ m, No.37とNo.45の場合は $b < 20$ mであることが推察される。

すなわち、虎杖浜・竹浦地域の温泉の場合、水圧が緩く上昇する場合はその温泉から温泉水を供給する割れ目までの距離がおよそ130 m以上隔たっていることを示し、水圧が急上昇して1分位で定常値に達する場合は割れ目までの距離が20 mより小さく近接していることを示すのである。第19図は虎杖浜・竹浦地域の温泉について、水圧が急上昇することが認められた温泉を黒丸、緩く上昇することが認められた温泉を白丸で記入して、その分布を示したものである。資料が未だ少ないので断定的なことは言えないが、周辺部のNo.2, No.7, No.51等では割れ目までの距離が大きい中央部の竹浦西部地域では急上昇の型が大部分を占めており、すなわち温泉帯水層へ温泉水を地下深くから供給する割れ目が近接して多く存在することを暗示する。虎杖浜地域については資料が少なくよく判らないが、No.15, No.17, No.52, No.53等湧出量の非常に多い温泉があることから考えておそらく同様の構造となっているのではないかと思う。ただ、虎杖浜と竹浦西部両地域の間に割れ目の少ない部分があるのかも知れない。



第19図 水圧が急上昇して短時間に定常値に達する温泉(黒丸)と水圧が緩慢に上昇する温泉(太い白丸)の地域的分布

Fig. 19. Regional distribution of two kinds of hot spring; one belongs to the type of Fig. 16 (black circle) and the other belongs to the type of Fig. 15 (white circle).

3. 温泉地域の地下構造

以上の調査結果を総合すれば、温泉地域特に竹浦西部・虎杖浜地域では次のような地下構造が考えられる。

- (i) 竹浦西部・虎杖浜地域の地下300~500 mの深さにある新第三紀層が温泉水の帯水層

となっているが、いわゆる透水性地層とは限らず数 m~10 数 m 程度の水の網目状通路によって水平流動の可能な破碎帯をなしているものの如く、しかも更に地下深くにある源温泉水 (温度 50~52°C) が多くの割れ目によってこの帯水層に供給されていると思われる。

(ii) この帯水層はその上部にある洪積世または沖積世の地層により被圧されている。

(iii) この被圧帯水層は海岸平野の地下から北方の丘陵地帯の地下および海底部の地下まで広がっているらしい (海底下まで延びていることはこの地域の静止水頭に僅かであるが潮汐の影響があることから推察される)。

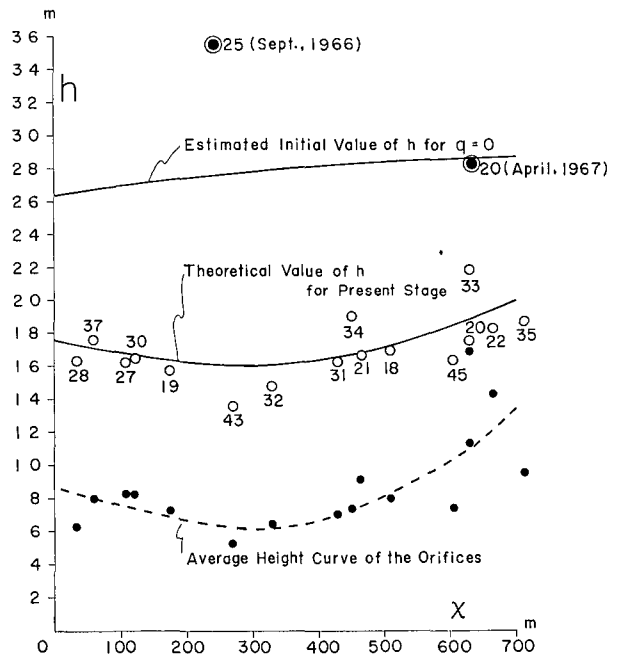
(iv) この地域の温泉はいわゆる「裂か層状温泉」である。

第 21 図または第 22 図は、海岸線に垂直な鉛直断面における温泉帯水層の構造を模型的に示したものであるが、第 21 図は海底における温泉帯水層の末端が海と連絡している場合 (模型 I)、第 22 図はその末端が閉塞されている場合 (模型 II) である。

V. 2 種の地下構造模型における温泉水の流動についての理論的考察と実測値との比較

1. 静止水頭高 (海面上) h と海岸からの距離 χ との関係

静止水頭海面上高 h が求められている湧出口について、 h と海岸からの距離 χ との関係を竹浦西部地域* について調べたのが第 20 図または第 23 図の白丸である。また、以上の h に対応する各湧出口の海面上の高さ (地面上 0~1.5 m の高さの範囲内にある) の海岸からの距離との関係を図中に黒丸で示してある。図から判るように、 h の値はかなり散乱してはいるが、大体海岸付近で 16~18 m の高度であり、海岸から少し内陸に入ると僅かに低下の傾向が



第 20 図 竹浦西部地域* における現在の静止水頭海面上高 h の実測値 (図中白丸) および湧出口海面上高 (黒丸) と海岸からの距離 χ との関係、および地下構造模型 (I) に対する現湧出状況における水頭 h と $q=0$ における水頭の理論曲線、(二重丸) は括弧内の年月における h の実測値

Fig. 20. Relations between the observed value of pressure head above mean sea-level h at present (white circle), the height of the hot spring orifice and the distance from sea coast χ . And the theoretical curves of h in two cases of the present condition of discharge and $q=0$ for the underground structure model (I).

* ここでは、この地域の東側の境界を第 1 図において破線ではなく点線を採用する。

あり 200~350 m 付近で極小値を示し、更に海岸から隔たると高さが増加して海岸からおよそ 700 m 隔たった山際では 18~20 m の高さを示している。湧出口の高さは現在 6~12 m となっている。

2. 竹浦西部における温泉使用量の概値

竹浦西部地域*には調査当時 No. 18 から No. 45 まで 28 の温泉湧出口があったが、全開湧出量の測定されたものは 17 口で、その平均の全開湧出量は 708 l/min であった。この中、測定によって使用量が推定されたものが僅かに 6 口でそれらの使用量の全開湧出量に対する割合は平均して 0.32 であった。また、第 1 表から判るように、この地域で湧出させて利用中の湧出口は 22 口、他はバルブをしめて利用していなかった。それで、この地域から調査当時に湧出させ利用していた量は明らかでないが、その程度を知る目的で次のように概算してみた。

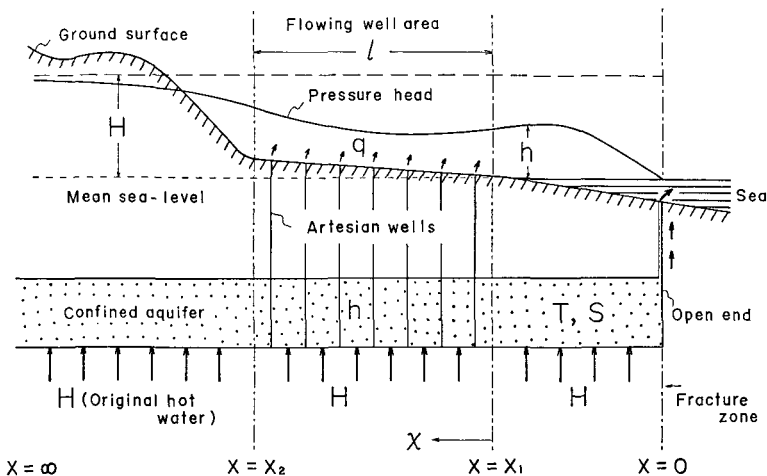
$$708 \text{ l/min} \times 22 \times 0.32 = 4540 \text{ l/min}$$

この量からこの地域 (面積 $1.724 \times 10^{10} \text{ cm}^2$) の単位面積当りの温泉水の放出量 q を求めると $q = 0.44 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ の程度となる。

3. 被圧帯水層の海底下の末端が海と連絡している場合の温泉水流動の理論

第 21 図は前章 3 節に述べたように、海岸線に垂直な鉛直断面における温泉帯水層の構造を模式的に示したもので、帯水層の海底下の末端が海と連絡しているモデル (I) の場合である。

被圧帯水層の海底下の末端から帯水層に沿って内陸方向に x 軸をとり、 x における帯水層内の水頭を h 、地下深くにある源温泉水の水頭を H (一定値)、この源温泉水は帯水層の単位面積当りに $\zeta(H-h)$ だけ供給されるとする。 ζ は常数である。(実際は割れ目依りに供給される



第 21 図 竹浦西部温泉地域における地下構造モデル (I)

Fig. 21. Model (I) of underground structure in the western Takeura hot springs locality.

のであるが、割れ目が多数一様に分布すると考えて巨視的にこのような取り扱いとした。) 同様に平野部の単位面積当り帯水層から q だけ温泉水が地表に放出されると考えた。

この場合、帯水層内の流動を表わす基礎微分方程式は

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \zeta(H-h) - q \quad (9)$$

但し、 t は時間、 h は平均海面を基準とする。 q の値は平野部すなわち $x_1 < x < x_2$ で一定、海底下 $0 < x < x_1$ および丘陵の地下 $x_2 < x < \infty$ で $q=0$ とする。境界条件としては、帯水層と海との連絡場所 $x=0$ では $h = A \sin \omega t$ 、丘陵部地下の十分遠方 $x=\infty$ で $h=H$ とする。但し、 $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ で、 τ は半日潮の周期、 A は半日潮の振幅である。

結局、海岸平野域 $x_1 < x < x_2$ に対し、 $h = h_1 + h_2$ とおけば

$$h_1 = H \left(1 - e^{-\alpha x_1} e^{-\alpha x} \right) + \frac{q}{2\zeta} \left\{ -2 + e^{-\alpha l} e^{\alpha x} + e^{-\alpha x} + e^{-2\alpha x_1} e^{-\alpha x} (1 - e^{-\alpha l}) \right\} \quad (10)$$

および

$$h_2 = A e^{-2\alpha x} \sin(\omega t - \beta x) \quad (11)$$

が得られる。

但し、 l は海岸平野の奥行 (ここでは 700 m) で λ は (2) 式の λ 、また

$$\left. \begin{aligned} \alpha^2 &= \frac{\zeta}{T} \\ \frac{S}{T} &= \frac{1}{k} = \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \left/ \left(\frac{\omega}{2\lambda} \right) \right. \\ \beta &= \left(\frac{\omega}{2k} \right) \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

である。

第 20 図に示した静止水頭海面上高 h と海岸からの距離 x との関係は (10) 式で理論的に示されているので、(10) 式に判っている l の値 $l=700$ m を入れ、 α 、 H および $\frac{q}{2\zeta}$ に種々の値を代入して第 20 図の白丸の値に最もよく適合する α 、 H および $\frac{q}{2\zeta}$ の値を求めるのである。このようにして引いた h と x との関係を示した。この結果、得られた値は

$$H = 29.50 \text{ m}, \quad \frac{q}{\zeta} = 2.274 \times 10^3 \text{ cm}, \quad \alpha = 2.10 \times 10^{-5} \text{ 1/cm}$$

である。これらが定まると x_1 、 T 、 S 、 β 等の値も第 3 表模型 (I) 欄のように決定される。まず、 x_1 の値は実測から第 3 表既知常数欄に記したように求められているので、これらの値を比較するとかなりの喰い違いがある。 H の値も既に推定されている値よりやや小であり、(11) 式から計算される位相の後れも実測と一致しない。 T や S の値は第 IV 章 1-(1) に求められた T の値と同程度であり今迄に知られている他の温泉地の値と比較しても同程度である。

とに角、ここに考えた地下構造模型では実測値を十分に説明することができないので不可

第3表 既知常数と模型(I)および(II)から理論的に推定された常数

Table 3. The known constants and those estimated theoretically from models I and II.

常数名または 常数記号 Simbole or name of constants	単 位 Unit	既 知 常 数 Value of known or already obtained constants	模 型 (I) Model (I)	模 型 (II) Model (II)	備 考 Note
τ (半日潮周期)	hour	12.42			$\omega = 2\pi/\tau$
ω	sec ⁻¹	1.406×10^{-4}			
l	m	700			
λ	cm ⁻¹	2.325×10^{-5}			
q	cm·sec ⁻¹	4.4×10^{-6}			
α	cm ⁻¹	—	2.10×10^{-5}	1.30×10^{-5}	$0.37 \times 10^{-5} \sim$ 1.70×10^{-5} } 中川・ $5.3 \sim 36$ } 天童・ $9 \sim 49$ } 東根温 泉の値
q/ζ	cm	—	2.27×10^3	4.44×10^3	
ζ	sec ⁻¹	—	19.3×10^{-10}	9.92×10^{-10}	
σ	sec ⁻¹	—	—	13.8×10^{-5}	
τ'	hour	—	—	12.62	
β	cm ⁻¹	—	1.00×10^{-5}	1.93×10^{-5}	
ε	—	—	—	1.20	
x_1	m	420	1065▲	(468)	
H	m	35.5	29.50	34.85 ◎	
S/T	sec·cm ⁻²	—	0.33×10^{-5} ○	0.65×10^{-5} ◎	
T	cm ² ·sec ⁻¹	1~11	4.4 ◎	5.9 ◎	
S	—	—	1.44×10^{-5} ○	3.82×10^{-5} ○	
位相差 $\begin{cases} x=x_1 \\ x=x_2 \end{cases}$	min.	+6~-125	$\begin{cases} -127 \\ -201 \end{cases}$ ▲	$\begin{cases} +35 \\ -128 \end{cases}$ ◎	

N.B. ◎ 妥当と思われる値, ○ やや妥当, ▲ 不適当と思われる値

位相差は模型(I)に対しては $-\frac{\beta x}{\omega}$, 模型(II)に対しては $\frac{\varepsilon - \beta x}{\sigma}$ により計算

である。

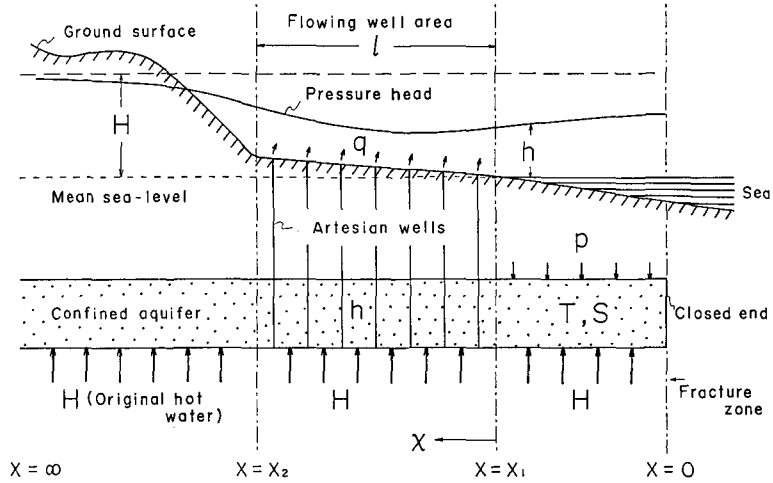
4. 被圧帯水層の海底下の末端が閉塞している場合の温泉水の流動理論

次の模型(II)は第22図に示したが、第21図の模型(I)とほぼ同様であるが、帯水層の海底下の末端が閉塞されていることが異なっている。従って、この場合海の潮汐変化による海水の荷重の変化が帯水層上部の海底下の地層を通じて帯水層に圧力として作用する。この場合の基礎微分方程式は吉川⁴⁾の式に右辺第2項第3項を付加すれば

$$S \frac{\partial (h - \theta p)}{\partial t} = T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \zeta(H - h) - q \tag{13}$$

である。

4) Kyōzō KIKKAWA; Effects of the ocean tide transmitted through the confined aquifer, Geophysical Papers dedicated to Prof. K. SASSA (1963), 149-160.



第22図 竹浦西部温泉地域における地下構造模型 (II)

Fig. 22. Model (II) of underground structure in the western Takeura hot springs locality.

但し、 $\theta = \frac{E_w}{E_w + nE_s}$ で E_w, E_s はそれぞれ水および帯水層の圧縮率の逆数、 n は帯水層の空隙率、 p は帯水層の海底部分の上部にかかる潮圧の変化で、 q は前の模型と同様、 p は

$$0 < x < x_1; p = \gamma p_0 \sin \omega t, \quad x_1 < x < \infty; p = 0$$

であり、境界条件は

$$x = 0; \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad x = \infty; h = H$$

である。

結局、この場合も $h = h_1 + h_2$ とおけば海岸平野部に対し

$$h_1 = H - \frac{q}{2\zeta} \left\{ 2 - e^{-\alpha l} e^{\alpha x} - e^{-\alpha x} + e^{-2\alpha x_1} e^{-\alpha x} (1 - e^{-\alpha l}) \right\} \quad (14)$$

$$h_2 = J (\sinh^2 \lambda x_1 + \sin^2 \beta x_1)^{\frac{1}{2}} e^{-\lambda x} \sin(\omega t - \beta x + \varepsilon) \quad (15)$$

が求められる。但し、

$$\left. \begin{aligned} \alpha^2 &= \frac{\zeta}{T}, \quad \omega = \frac{2\pi}{\tau} \\ \lambda^2 &= \frac{\alpha^2}{2} + \frac{\omega}{2k}, \quad k = \frac{T}{S} \\ \sigma^2 &= \omega^2 - (k\alpha^2)^2 = 4k^2\lambda^2 \left(\frac{\omega}{k} - \lambda^2 \right) \\ \beta &= \frac{\sigma}{(2k\lambda)}, \quad J = \gamma p_0 \theta \\ \tan \varepsilon &= \frac{\sigma \tan \beta x_1 + k\alpha^2 \tanh \lambda x_1}{\sigma \tanh \lambda x_1 - k\alpha^2 \tan \beta x_1} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

である。

第 23 図に示した静止水頭海面上高 h と海岸からの距離 X との関係 (白丸) は理論的には (14) 式で示されるので、前の場合と同様に実測値に理論値がよく適合するように α, H および q/ζ の値をきめるのである。第 23 図中実線はこのようにして引いた理論値で、これに対して

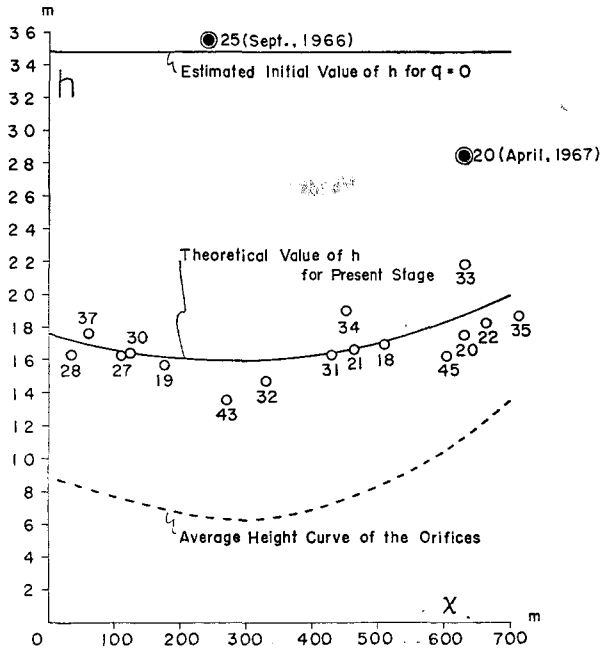
$$\alpha = 1.30 \times 10^{-5} (1/cm),$$

$$H = 34.85 (m),$$

$$q/\zeta = 4.44 \times 10^3 (cm)$$

であった。したがって、これらの値から $\sigma, \zeta, \beta, \varepsilon, T, S$ の値が第 3 表中模型 (II) の欄のようにきまり、(15) 式から計算される位相の後れも第 3 表のようにきまる。これらの値は既に求められている H 、位相の後れ、 T の値や他の温泉地の T, S の値とも同程度の値で不都合はない。

すなわち、竹浦西部地域の地下構造はこの模型の場合に近いと考えられるのである。



第 23 図 地下構造模型 (II) に対する現在の湧出状況における静止水頭 h と $q=0$ における水頭の理論曲線、但し白丸は現在の静止水頭海面上高 h の実測値、二重丸はその番号を付した温泉において括弧内の年月に実測された h の値である

Fig. 23. Theoretical curves of the pressure head h in two cases of the present condition of discharge and $q=0$ for the underground structure model (II). White circles indicate the observed values of h at present, and double circles mark shows the observed value of h in the date indicated in the parentheses.

VI. 相互影響と枯渇現象

1. 相互影響

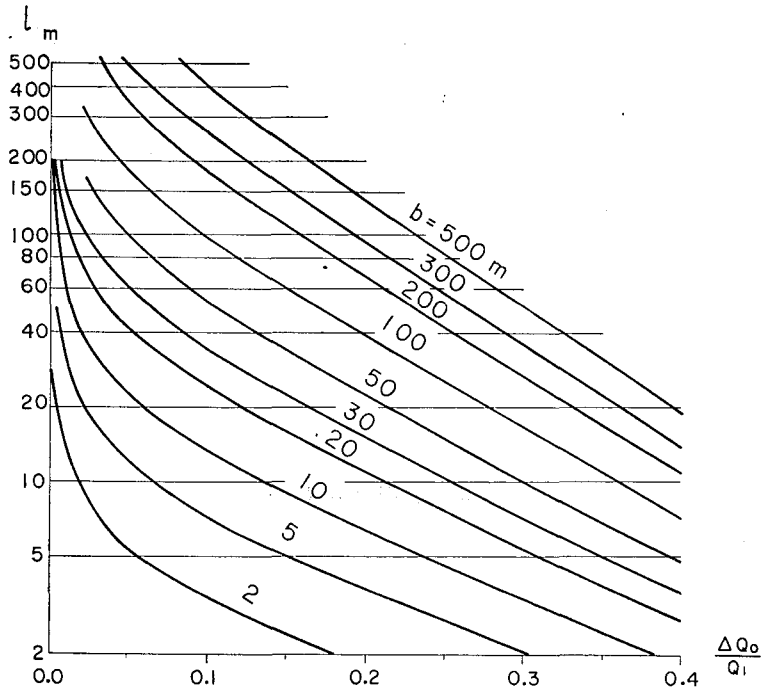
第 IV 章 2 節, 3 節に述べたように、虎杖浜・竹浦地域の温泉は、いわゆる「裂か層状温泉」であって各温泉から帯水層に温泉水を供給する割れ目までの距離が小さい。従って、(3) 式において r_1 と r_2 は比較的小さくて近い値である。それで、 t がある程度大きくなると $W\left(\frac{Sr_1^2}{4Tt}\right)$ も $W\left(\frac{Sr_2^2}{4Tt}\right)$ も展開可能となって比較的短時間のうちに定常値に達する。

いま、割れ目から b_0 の距離に既存温泉 A があり、その湧出管の半径を r_0 とする。A から l の距離、割れ目から b_1 の距離に新たに温泉さく井が掘られて、その湧出量が Q_1 であったため既存温泉 A の湧出量が $4Q_0$ だけ減少したとすれば、 $4Q_0$ は、上に述べたような定常状態においては次式⁵⁾ で与えられる。

$$\Delta Q_0 = Q_1 \frac{\log_e \left(1 + \frac{4b_0 b_1}{l^2} \right)^{\frac{1}{2}}}{\log_e \left(\frac{2b_0}{r_0} \right)} \quad (17)$$

いま、 $b_0 = b_1$ で $r_0 = 5.08$ cm の場合、 $\frac{\Delta Q_0}{Q_1}$ を横軸にとり、両温泉間の距離 l を縦軸にとり、 b_0 が 2~500 m の間の値に対し、その関係を示したのが、第 24 図である。1 例として $b_0 = 20$ m、 $l = 150$ m とすれば $\frac{\Delta Q_0}{Q_1}$ は図から 0.005 となるから、 $Q_1 = 1200$ l/min とすれば $\Delta Q_0 = 6$ l/min となるわけである。すなわち、温泉から割れ目までの距離が小さければ両温泉間の距離 l が余程近くない限り相互影響は小さいのである。

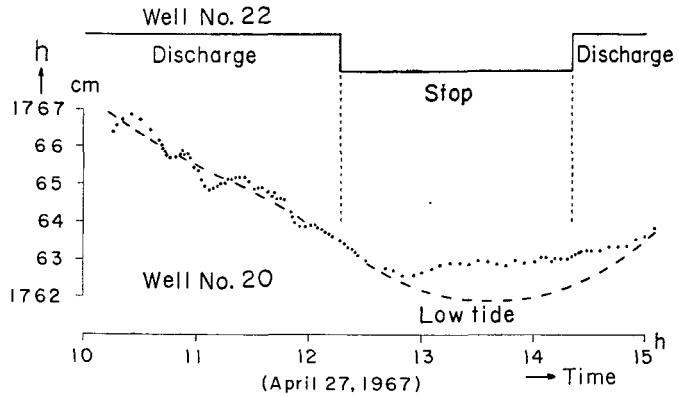
昭和 42 年 4 月竹浦西部地域の温泉 No. 22 (全開湧出量 1200 l/min) から 165 m 西に隔った山際に温泉 No. 20 が掘さくされた。これらの深度はそれぞれ 312 m および 420 m であった。No. 20 の湧出口を密封してそれに細いビニール管を連結し直ぐ裏山の急斜面にその一端を持ち上げて静止水頭の高さを求め、No. 22 の自噴を停止させて、No. 20 の静止水頭にどの程度



第 24 図 新たにできた自噴井 (湧出量 Q_1) が既存の自噴井の湧出量に与えた減少を ΔQ_0 とし、両井の距離を l 、両井から割れ目までの距離は相等しく b 、既存井の半径を $r_0 = 5.08$ cm と仮定した場合における影響度 $\Delta Q_0/Q_1$ と l および b との関係

Fig. 24. Relation between decrease of discharge rate of the first well for unit discharge of the second well $\Delta Q_0/Q_1$ and distance between both wells l in the case of equal distance of b , when the second well discharging Q_1 is newly drilled.

の変化が現れるかを精密水位計で測定した。第 25 図中の点々がその測定値であるが、海の潮汐影響も感ぜられたので点線で潮汐の傾向を示した。すなわち、No. 22 の湧出停止の影響として、およそ 1 cm の上昇が起った。第 9 図の静止水頭と湧出量との関係から、湧出量の変化に直すと約 1 l/min の増量となるから No. 22 の湧出量 1200 l/min に対し約 1/1000 の影響ということになり、先に述べた (17) 式からの計算値とその程度は一致している。



第 25 図 竹浦西部地域の温泉 No. 22 の湧出を停止せしめたとき、165 m 離れた No. 20 において測定された静止水頭 h の変化 (黒点)

Fig. 25. Change of pressure head h (dots) with time observed at well No. 20, located 165 m distant from No. 22, when the discharge of No. 22 was stoped.

とに角、虎杖浜・竹浦西部の裂か層状温泉地帯においては源泉間距離 150 m 程度での相互影響は無視できると言っても過言ではない。

2. 地域の温泉総湧出量の増加に伴う全般的静止水頭高の低下

現在、虎杖浜・竹浦温泉地域においては、温泉の相互間の距離は何れも 150 m 以上である。したがって、前節に述べたように、その相互影響は無視できる。ところが、第 8 図に示したように、現在の全開湧出量を掘さく当初の値と比較すると平均して当初の 57% ぐらいに減少し、その温度も、第 1 表から判るように、平均して 2.7°C ぐらい低下している。また、静止水頭海面上高が昭和 41 年 9 月には温泉 No. 25 では 35.5 m、昭和 42 年 4 月には温泉 No. 20 で 28.4 m であったのが、現在では竹浦西部地域では 14~22 m となり、かなりの水圧低下が起っている。

このように、温泉の開発が段々進んで一温泉地域の湧出量の総和が増加すると温泉水圧の全般的低下(すなわち静止水頭の低下)が必然的に起る。これを枯渇現象と呼んでいることは前報⁵⁾に指摘したが、全国的に見てもこれらの現象の経過が数量的に確かめられた事例はほとんどないので、この問題を当温泉地域でも温泉が最も密集している竹浦西部地域について考えてみよう。

この地域の地下構造としては第 V 章第 4 節第 22 図に示した模型がよく適合することは既に述べた。この場合、静止水頭海面上高 h は (14) 式すなわち、

$$h = H - \frac{q}{c} f(x) \tag{18}$$

5) 福富孝治; 被圧層状温泉における相互影響と枯渇現象の理論的研究, 北大地球物理学研究報告, 15 (昭和 41), 37.

但し、

$$f(x) = \frac{1}{2} \left\{ 2 - e^{-\alpha l} e^{\alpha x} - e^{-\alpha x} + e^{-2\alpha x} e^{-\alpha l} (1 - e^{-\alpha l}) \right\} \quad (19)$$

で表わされるのである。 $f(x)$ は海岸からの距離によってきまる値である。

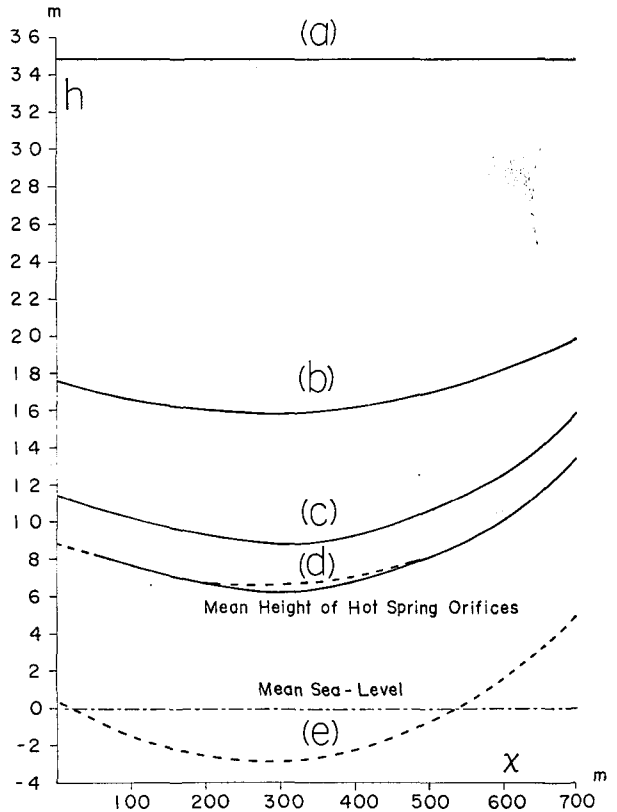
(18)式から判るように、海岸平野の温泉からの自噴量が増加すれば q は増加する。 $q=0$ であれば静止水頭 h は当初温泉さく井皆無の場合の値 H であるが(第26図(a)線) q が段々増加すれば量の増加に比例して h の低下が起ることを示している。第3表の値を用い、 q の値が現在の値(それに対する h の値は図中(b)曲線)の1.5倍および2倍となった場合の h の値を計算してそれぞれ第26図中に(d)および(e)曲線で示した。この場合には動力揚湯によらなければこのような量は採取出来ない。2倍の場合は静止水頭は地地下5~6mまで低下することになる。

現在の使用状況では、湧出口を閉鎖中のもの、バルブを一部開いて使用しているものも少ない。現在この地区で高温な温泉水を湧出する可能性のある全湧出口(調査当時の数26)のバルブを同時に全開して使用した場合の湧出量と静止水頭の高さの概値を次に計算してみよう。

いま、1湧出口当りの平均湧出量を \bar{Q} 、この地域の湧出口総数を N 、この地域の面積を A とすれば、この地域の単位面積当りの温泉流出量 q は

$$q = \frac{\bar{Q}N}{A} \quad (20)$$

である。また、 h_0 を湧出口の海面上



第26図 竹浦西部地域*において、地下構造模型(II)に対し、地域の単位面積当たりの放出水量 q に種々の値を与えた場合の静止水頭 h の理論曲線

Fig. 26. Theoretical curve of pressure head h for several values of q that is the discharge rate of hot water per unit area of the western Takeura hot spring locality in the case of the model (II).

- (a): $q=0$
- (b): 調査時の湧出状態 (q_0 at the present condition)
- (c): 現在の湧出口を全部全開した場合 (q in full discharge of total number of orifices)
- (d): 現在の q の1.5倍に増加した場合 (in the case of $1.5 q_0$)
- (e): 現在の q の2倍に増加した場合 (in the case of $2 q_0$)

高度とし、第 20 図から大略推察されるように $(h-h_0)$ の値は海岸からの距離 λ には無関係にはば一定と仮定して

$$\bar{Q} = \mu(h-h_0) \quad (21)$$

とおき、この関係は第 9 図の全開湧出量 Q と湧出口上静止水頭高 s との平均的關係と同一の關係として $\mu=15.46 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とする。

(18), (20) および (21) 式とから h を求めると

$$h-h_0 = \frac{H-h_0}{1 + \frac{\mu N}{\zeta A} f(\lambda)} \quad (22)$$

となる。いま、この式に $N=26$, $\zeta=9.92 \times 10^{-10} (1/\text{sec})$, $A=1.724 \times 10^{10} (\text{cm}^2)$, すなわち $\frac{\mu N}{\zeta A} = 23.5$ と $H=3485 \text{ cm}$ を代入し、 h を計算して第 26 図中に (c) 曲線で示した。図から判るように、現在の湧出口全部を全開使用すれば、 h_0 の平均値は 8.90 m であるからその総湧出量は (21) 式から 6160 l/min となり、その静止水頭は湧出口上 2 m 程度に低下するであろう。

この事柄は、当温泉の将来に重要な示唆を与えることであって、充分注意する必要がある。

今回の調査では、現在の使用量の調査が充分でなかったので、将来この測定を正確に行ないこの問題を更に検討することが必要である。

VII. 総 括

昭和 44 年 11 月、白老町虎杖浜・竹浦地域の温泉につき、主として地球物理学的立場から調査を行なった。その主要な結果の概要を述べると次のようである。

1. 温泉の存在範囲

温泉湧出口はこの地域に現在 59 口存在するが、すべて深さ 300~700 m ぐらいの掘さくによって得られている。40°C 以上の温度の温泉の存在区域は幅 700 m ぐらいの海岸平野に沿って西方は当地域の西、登別駅近傍から東方は竹浦東部のメップ川谷の中央を通る南北線まで約 7 km の広い範囲である。高温温泉の存在区域からみると、少なくともその熱源は倶多楽火山と関係があるように思われる。最近これよりかなり東方の白老町ポロ沼地域で 1200 m の boring により 45°~55°C の温泉が得られているが泉質がかなり異なっている。

2. 温泉の特徴

温泉の温度は 28°~52°C である。この地域の温泉の特徴は、他地域の温泉と比較して湧出量がいずれも非常に大きく、一湧出口の全開湧出量が 165~2500 l/min にも達し、その水圧も高く現在は湧出口上 3~16 m である。しかし、現在は湧出口の栓をしめて一部分を湧出させ利用している。温泉の最も密集する竹浦西部地域では使用総量は 4500 l/min 程度と推定されるが、全部の湧出口を同時に全開すれば 6200 l/min 程度となるであろう。また、全域ではその倍程度であろう。

3. 温泉地域の地下構造

温泉が最も密集している竹浦西部地域では温泉帯水層の海底部分の末端が密封されている第22図のような地下構造が推定された。温泉水が貯溜されているのは主として地下300~500 mの新第三紀の地層であるが、この部分には無数の割れ目が発達し、帯水層およびこれらの割れ目伝いに水平方向の流動が行なわれているが、更に地下深くから水圧の高い温度50~52°Cの源温泉水が割れ目伝いに帯水層へ供給されている。この帯水層は上層の洪積世または沖積世の地層によって被圧され、いわゆる被圧裂か層状温泉の形をなしている。この温泉帯水層は北方山地の下および海底下に拡がっているものようで、海の潮汐の影響が多少静止水頭変化として観測される。

4. 相互影響と枯渇現象

温泉間の距離の最も小さい165 mの場合について温泉間の相互影響を測定したが、無視できる程度の影響しか認められなかった。しかし、温泉総数と使用量の増加に伴い、地域全般の水圧低下、個々の湧出量の減少、温度低下が明瞭に認められ、すなわち、枯渇現象の徴候が現われている。この問題について第VI章にかなり詳しく論じた。

終りに、本報告の図は三浦カヲル嬢の手を煩わした。厚く謝意を表する。

3. A Geophysical Investigation on the Hot Springs in Kojohama-Takeura Locality in Hokkaido, Japan

By Takaharu FUKUTOMI, Kinshiro NAKAO, Koichi URAKAMI, Sakae ÔTSUKI, Ryuichi TANOUÉ, Hideo MIYOSHI, Kazuo ÔTOMO, Hideo MIYAKE, Kazuo NISHI, Yasuo SAKURA, Shunichi MAEDA, Takatoshi TAKIZAWA and Yoshiaki SEGAWA

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

In about ten years ago, there was not at all a hot spring in the Kojohama-Takeura locality. In 1962, a flowing spring of 54°C in temperature was obtained by boring of 450 m in depth near the Noboribetsu railway station situated at about 300 m westwards from the western boundary of this locality. Since then, borings of 300 m~700 m in depth had been carried out here and there sporadically in coastal plain of the locality. At present, 59 flowing springs of 28°~52°C in temperature are located as shown in Fig. 1.

Some geophysical investigations on these hot springs had been carried out by the writers during the period from Nov. 19 to Nov. 24, 1969, and orifice temperature, discharge rate, that in fully opened orifice bulb, water pressure when the orifice is closed, and Cl⁻-content of hot spring water were measured for the respective hot spring orifices. Further, the increase of water pressure with time after closing of the orifice and the tidal effect on the pressure head were, also, studied for several hot spring orifices.

The results of investigation are summarized as follows :

1) Area containing the hot springs of more than 40°C in temperature is nearly 5 square kilometers extending from vicinity of the Noboribetsu railway station to the entrance of Meppu river valley in the eastern Takeura region along the coastal plain of about 700 m in width. Origin of heat of these hot springs is supposed to have a intimate relation with Kuttara volcano, in the point of view of these geographical distribution.

2) Volume output of respective hot spring in fully opened condition of the orifice bulb, reserving the other orifices in the present condition of use, attains to a large amount of 165~2500 l/min (745 l/min in the average value), corresponding with their high pressure heads of 4~18 m above the ground surface. But, the present total discharge rate in this locality may be order of more or less larger than 10,000 l/min, because many of these orifice bulbs are partly opened for practical use. It is estimated that hot water is flowing out from the Neogene confined aquifer type formation having numerous fractures in the depth of 300 m~700 m. And further, an original hot water having high pressure and 50°~52°C in temperature is supplied from the deep to the aquifer through the underlying fractures. The formation containing hot water is likely to spread northwards beneath the mountain foot of the Kuttara volcano and southwards below the sea bottom in some extents. The underground structure in the locality and the numerical values of the physical constants are estimated as shown in Fig. 22 and Table 3.

3) A measurement of interference due to the changed volume out-put of a hot spring upon the pressure head of the other hot spring situated in a distance of 165 m which is the shortest mutual distance in the locality was observed indicating a negligibly small effect. Tidal effect upon the pressure head is also observed for some hot springs as illustrated in Figs. 12~13. The result is shown Table 2.

4) Due to the recent increase of total numbers of hot springs and of total discharge rates, subsidence of pressure head in the locality and decrease of discharge rate and of temperature of the respective hot spring were distinctly noticed.

Some discussions on the problem were made in Chapter VI.