

白浜温泉の1噴騰泉の噴騰機構

(財) 中央温泉研究所 佐藤 幸二

(昭和 45 年 1 月 31 日受理)

Spouting Mechanism of Suisho Well, Shirahama Spa, Kii Peninsula

Koji SATO

Hot Spring Research Center

Formerly the author discussed necessary factors for spouting springs are not only the boiling, but enough proportion of gaseous components and satisfactory factors for gas in water being separated. It is determined that spouting of some Japanese springs are caused by bubbling and expansion of dissolved carbon dioxide.

Spouting of Suisho Well was started by lifting water with air. Thermal water of 57°C was emitted as high as 5m above the orifice at the rate of 233 l/min. The spouting was stopped by pouring cold water into the orifice or plugging it. During the time the well was dormant, water level was found 18m below the orifice. The spouting mechanism of the well was studied based on the spouting height of thermal water, relationship between an amount of air used in lifting water and spouting height, temperature and chemical nature of water in the well during dormancy, and solubility of carbon dioxide in water under various temperatures and pressures.

It is supposed that:

- 1) During the time the well was dormant, carbon dioxide in water did not bubble at any depth in the well.
- 2) Thermal water containing about 3g/l CO₂ rose and bubbling occurred in the water at 30m in depth.
- 3) Spouting continued until the bubbling was stopped artificially and when the spouting stopped, it did not recovered until the bubbling started.

On the other spouting wells or springs, the depth at which gas in water bubbled and an amount of carbon dioxide in water were also examined.

I. ま え が き

著者は先に長野県湯田中温泉を噴騰泉の1例としてとり上げ(佐藤, 1966). さらに, 本邦のいくつかの噴騰泉について考察し, 噴騰泉は酸性の火成活動に伴なう場合が多く, 深部からの温泉水の上昇が帽岩様の岩層で妨げられる場合に多く生成される事を論じた(佐藤, 1969).

しかし, 噴騰泉の噴騰の機構については, 温泉水中に含まれる CO₂ ガスの発泡によるとはしながらも, きわめて定性的な考察に止まった. 本報においては, 1959~1961 年に行なわれた和歌山県白浜温泉の調査資料を基として, 同温泉の1噴騰泉について少しく考察を進めた. もちろん, 未だ多くの仮定があり, 不明な点も多い. 諸賢の御批判御叱正をお願いする.

II. 白浜温泉水晶源泉

白浜温泉については, 露木 (1952), KIKKAWA (1954), 中村ら (1958), 光田 (1963, 1964,

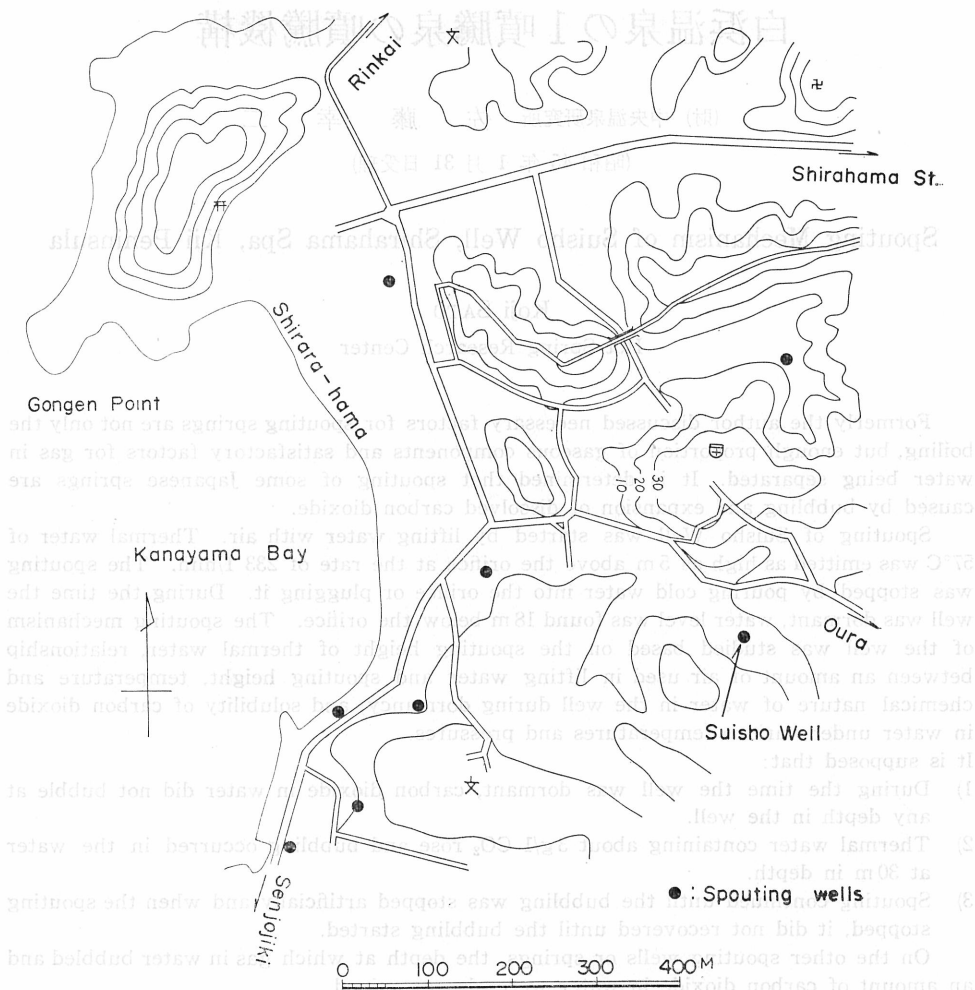


Fig. 1. Map of Suisho Spouting Well in Shirahama Spa.

1965, 1966, 1968), 佐藤 (1964), 益子ら (1964) の研究があり, ことに光田 (1965) は, 同温泉の噴騰泉の噴騰の原因を, 深部で温泉水中に溶存していた CO_2 ガスの上昇途中での膨脹にあるとし, 温泉水の噴騰高から, CO_2 ガスの噴出量を推定している。

1959~1961年, 白浜温泉には26の利用源泉井があり, うち20井は噴騰泉であった。そのうち各種の測定が行なわれた水晶源泉をとりあげて考察を進める。

本源泉の位置は Fig. 1 に示されるように, 海岸より約400m離れ, その坑口は約5mの海拔高度を有している。記録によれば, 掘さく深度は223mであり, $3\frac{1}{2}$ 吋鉄管が200mまで挿入され, 113m以深はストレーナーとなっている。200m以深は裸孔である。温泉層は90m, 130m, 215mにあり, 下部の2層の温泉水が採水されていることとなる (Fig. 2)。噴騰の高さは坑口より約5m, 坑口において 57°C の温泉水が233l/mの湧出量で噴騰する。白浜温泉の他の噴騰泉と同じように, 坑口の密栓, 冷水の注入によって噴騰は停止し, 坑口よ

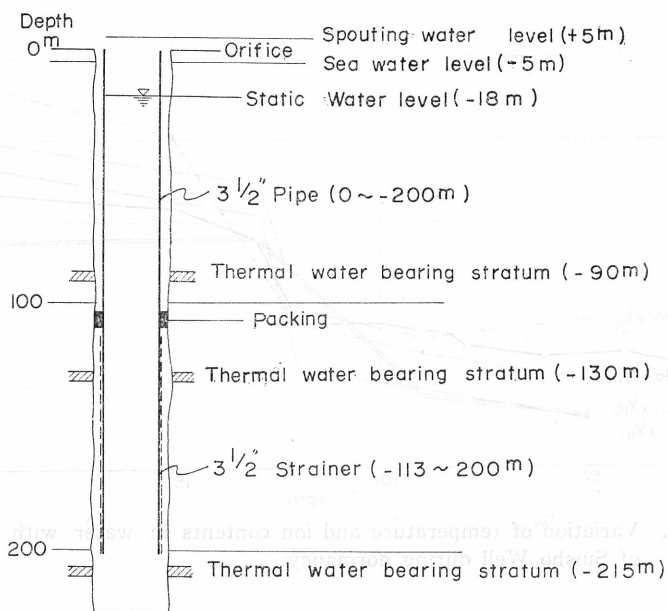


Fig. 2. Diagram of Suisho Well.

り 18 m 低い静止水位を示す。一旦噴騰を停止すると、密栓、冷水の注入をやめても噴騰は停止したままで、エアリフトによって噴騰を再開させるのが普通である。

III. 噴騰停止時の状況

噴騰停止時の坑内の温度検層、深度別採水の結果を Table 1, Fig. 3 に示した。この化学成分は地上に採取された後、常法によって 1 気圧下で分析されたものであるから、ことに溶存ガス成分の値はその深度における値を表わしてはいない。

Fig. 3 にみられる通り、温度とともに多くの成分で深度 120 m と深度 129 m との間で、大きな差異が認められる。これは、噴騰停止時には深部の温泉水は 129 m 以深にあり、113 m (ストレーナー上端) から 129 m の間で冷地下水 (低温温泉水) の混入があって、温度の低下、

Table 1. Variation of chemical composition of thermal water with depth in Suisho Well during dormancy (ions, CO₂ and H₂S are expressed in mg/l)

Depth from the orifice (m)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Dissolved CO ₂	Dissolved H ₂ S
45	6.3	30	210	57.36	25.14	109.9	tr.	725.5	212.9	1.19
90	6.2	30	280	45.84	16.95	193.6	tr.	634	277.7	1.53
120	6.1	30	350	37.08	17.03	240.4	tr.	776.1		2.04
129	6.35			35.28	17.13	618.4	tr.	1388	555.4	1.70
150	6.2	45	810	43.12	17.49	655.2	tr.	1451	559.2	1.70
210	6.4	52.5	970	52.48	17.51	760.9	tr.	1640	548.6	1.70

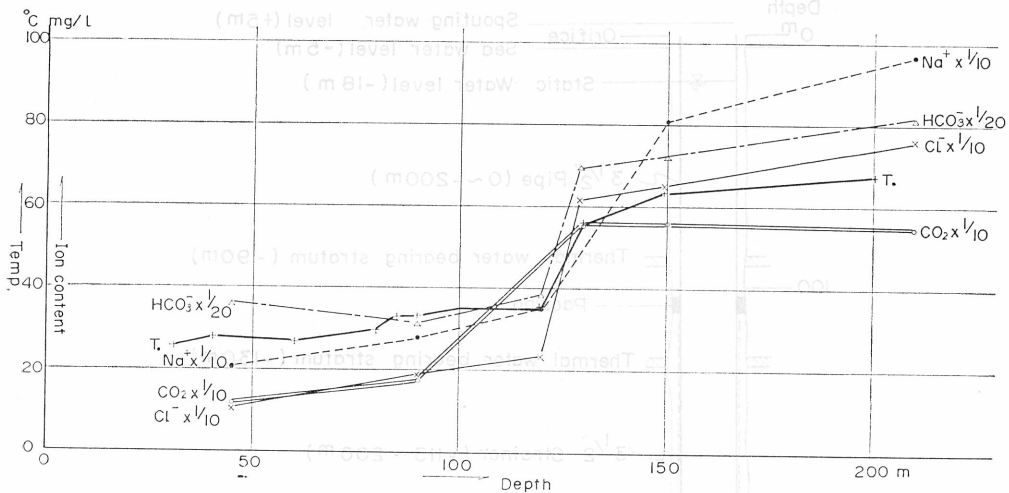


Fig. 3. Variation of temperature and ion contents in water with depth of Suisho Well during dormancy.

成分の稀薄化が起こっていると考えられる。なお、分析されていない深度 120 m の溶存 CO_2 ガスは、他成分との関係から 300 mg/l 程度、深度 129 m の Na^+ は同じように 800 mg/l 程度のものと考えられる。

深度別採水による主要化学成分のうち、特に溶存 CO_2 ガスは各深度、温度で溶存していた CO_2 ガスが、地上に採取されて 1 気圧下で分析された値であるから、当然、圧の低下による逸散が考えられる。

いろいろな温度、圧力の下での CO_2 ガスの水に対する溶解度は、WIEBE & GADDY (1939, 1940) および NOVAK, FRIED & PICK (1961) の実験値をもとにして、Fig. 4, Fig. 5 に示される。水晶源泉においても、この溶解度がそのまま適用出来るとすれば次のように考えられる。

Table 2 に示すように、各採水深度の温度から、それぞれの温度および 1 気圧下で水中に溶存し得る CO_2 ガス量が Fig. 5 から読みとられ、分析値と比較すると、少なくとも深度 45 m, 90 m の場合の溶存 CO_2 ガスは、採水時逸散することなく分析されたと考える事が出来る。さらに、温度、 Na^+ 、 Cl^- の各成分と溶存 CO_2 ガスの関係から深度 120 m, 129 m, 150 m, 210 m の溶存 CO_2 ガス量が推定される。その値も Table 2 に示してある。このような事から、深度 120 m 以浅の温泉水は溶存 CO_2 ガスを逸散することなく地上に採取されたが、深度 129 m 以深の温泉水は、採取時に溶存 CO_2 ガスの一部を逸散したと考えられる。

Fig. 6 は、噴騰停止時の温度分布と、 CO_2 ガスの水への溶解度とを示したものであるが、 CO_2 ガスがほぼ 1.7 g/l 以下の溶存ならば如何なる深度でも未飽和であり、2 g/l の溶存ならば静止水位下 2 m 以浅で、4 g/l の場合は 18 m 以浅でそれぞれ発泡、水中からの逸散が起こるべきであるというような事が判る。しかし、温度検層に際して発泡の起っているような兆候は認められず、発泡は何れの部分でも起こっていないと考えられた。

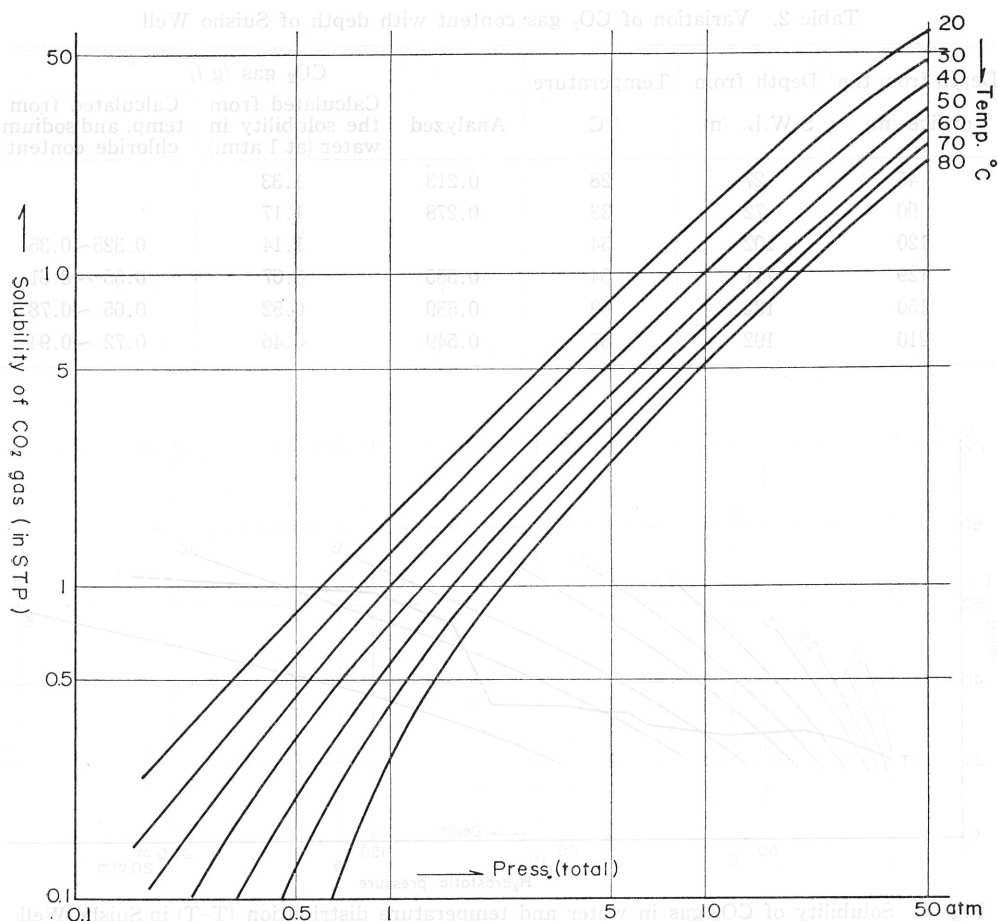


Fig. 4. Solubility of CO₂ in water under various pressures and temperatures (WIEBE and GADDY (1939, 1940), NOVÁK, FRIED and PICK (1961)).

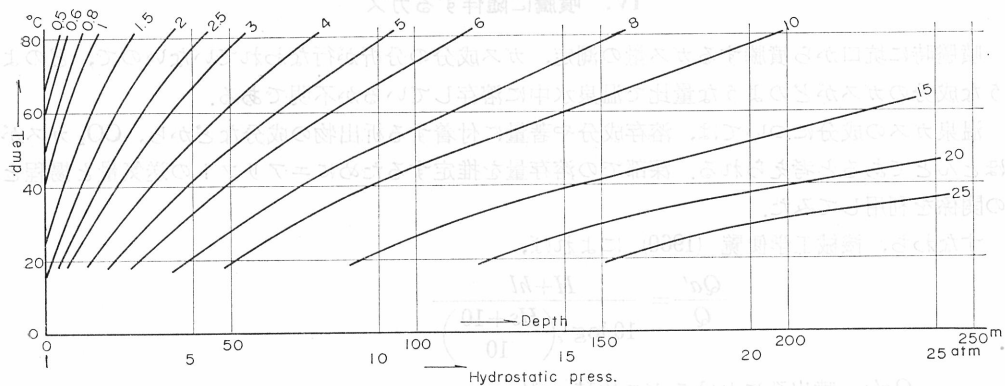


Fig. 5. Variation of the solubility of CO₂ in water with depth and temperature. Curves and numbers show the amount of soluble CO₂ gas in g/l (in STP) (WIEBE and GADDY (1939, 1940), NOVÁK, FRIED and PICK (1961)).

Table 2. Variation of CO₂ gas content with depth of Suisho Well

Depth from the orifice (m)	Depth from S.W.L. (m)	Temperature (°C)	CO ₂ gas (g/l)		
			Analyzed	Calculated from the solubility in water (at 1 atm.)	Calculated from temp. and sodium chloride content
45	27	28	0.213	1.33	
90	72	33	0.278	1.17	
120	102	34		1.14	0.325~0.35
129	111	54	0.555	0.67	0.55 ~0.61
150	132	63	0.559	0.52	0.65 ~0.78
210	192	67	0.549	0.46	0.72 ~0.94

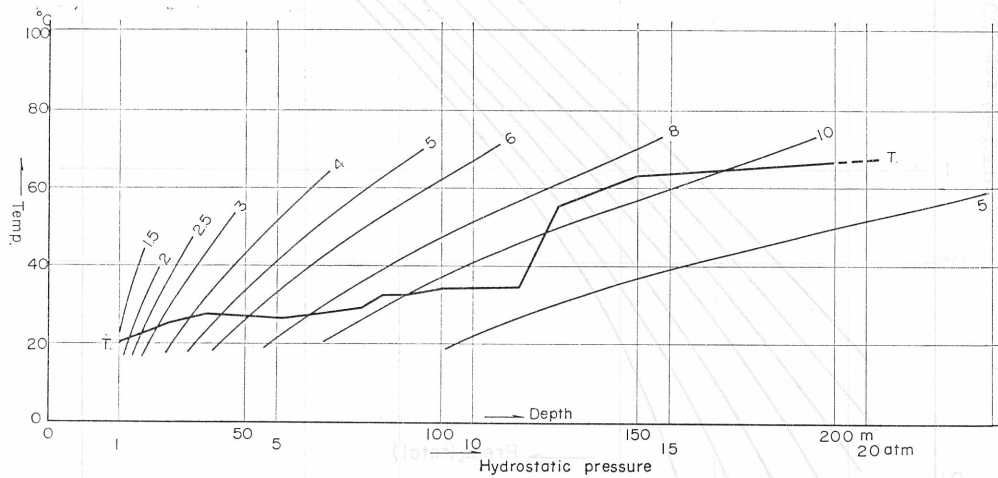


Fig. 6. Solubility of CO₂ gas in water and temperature distribution (T-T) in Suisho Well during dormancy.

IV. 噴騰に伴するガス

噴騰時に坑口から噴騰するガス量の測定、ガス成分の分析が行なわれていないので、どのような成分のガスがどのような量比で温泉水中に溶存しているか不明である。

温泉ガスの成分については、溶存成分や著量に付着する析出物の成分などから、CO₂ ガスがほとんどであると考えられる。深部での溶存量を推定するためにエアリフトの送気量と揚程との関係を利用してみた。

すなわち、機械工学便覧 (1960) によれば、

$$\frac{Qa'}{Q} = \frac{H+hl}{10 \log_e \left(\frac{Hs+10}{10} \right)}$$

Qa': 噴出孔におけるガス体積 m³/s

Q: " 水量 m³/s

(水晶源泉においては 233 l/min=3.88×10⁻³ m³/s)

H : 揚程 m

(水晶源泉においては $18\text{ m} + 5\text{ m} = 23\text{ m}$)

hl : 全損失水頭=摩擦損失+吐出しの速度損失+気泡のすべり損失 m

(水晶源泉においては無視する)

H_s : エア管の浸水深さ m

(水晶源泉においては CO_2 ガスの発泡する深さとする)

Qa' は噴出孔における温度に対応する水蒸気で飽和され、その他には CO_2 ガスのみであるとすれば、 Qa' から標準状態 (0°C , 1 atm.) における CO_2 ガス量 Qa (g/l) が求められる。

すなわち、水晶源泉におけるように 57°C の温泉水 233 l/m を 23 m 吹き上げる場合の坑口における CO_2 ガス量 (標準状態で) と発泡深さとの関係は、上式から Fig. 7 のように示される。 57°C の水の中に1気圧下で溶存し得る CO_2 ガス量 0.6 g/l との合計量も破線で示してある。この破線は従って、 57°C の水から CO_2 ガスが発泡する深さと、その深さでその水に伴なう CO_2 ガス量との関係を示すものである。

Fig. 4 の 57°C 線は、 57°C の温度を有する水に溶解し得る CO_2 ガスの量と圧力との関係を示すものであるから、Fig. 8 の交点は溶解度の関係と発泡の関係との両方をほぼ満足するものである。すなわち、標準状態で 3 g/l 程度の CO_2 ガスを伴なう 57°C の水が、静止水位下

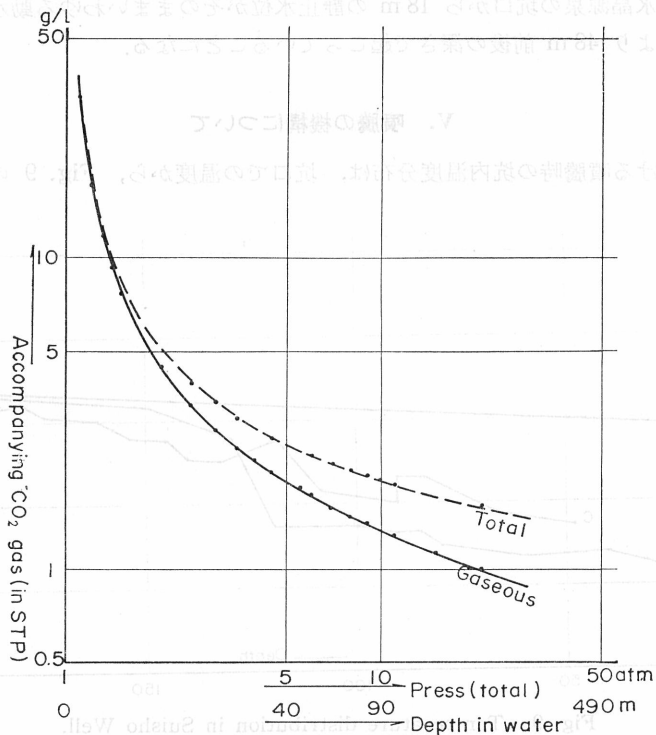


Fig. 7. Relationship between accompanying CO_2 gas at the orifice and the bubbling depth in Suisho Well (temp: 57°C , spouting height from S.W.L.: 23 m , amount of spouting water: 233 l/m (3.88 l/s)).

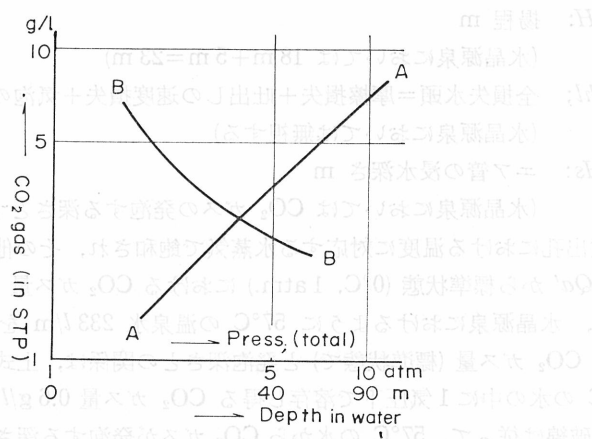


Fig. 8. Solubility of CO₂ in water and the amount of CO₂ in water emitted from Suisho Well.
 A-A: Solubility of CO₂ in water at 57°C
 B-B: Amount of CO₂ in water emitted from Suisho Well. (height 23 m, flow 233 l/m, temp. 57°C).

30 m 前後で発泡する事となる。もちろん、この場合 CO₂ ガスが過飽和になることなく発泡するものとする。水晶源泉の坑口から 18 m の静止水位がそのままいわゆる動水位であるとすれば、発泡は坑口より 48 m 前後の深さで起こっていることになる。

V. 噴騰の機構について

水晶源泉における噴騰時の坑内温度分布は、坑口での温度から、Fig. 9 のように推定され

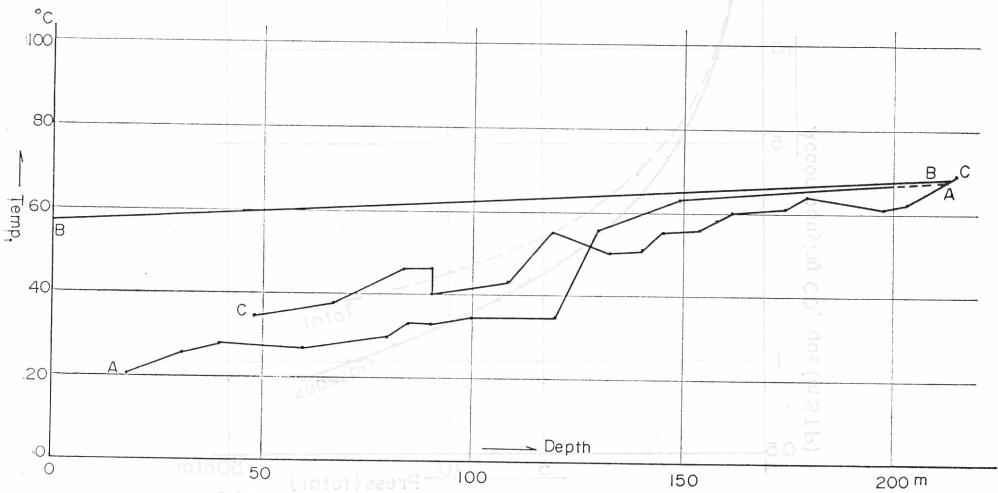


Fig. 9. Temperature distribution in Suisho Well.

- A-A: During dormancy
- B-B: Spouting period (supposed)
- C-C: Bottom temperature during drilling.

Table 3. Chemical composition of the water emitted from Suisho Well
 Temp. 57.0°C pH 6.8 Rate of flow 233 l/m
 E.R. 5990 mg/l Date June, 1959

			mg/l			mval %		
NH ₄ ⁺	5.50	0.32	Cl ⁻	2126	65.71			
K ⁺	114.0	3.06	Br ⁻	8.43	0.12			
Na ⁺	1915.0	87.43	SO ₄ ²⁻	145.7	3.32			
Ca ²⁺	101.1	5.30	HCO ₃ ⁻	1715	30.81			
Mg ²⁺	44.94	3.88	SH ⁻	0.78	0.03			
Mn ²⁺	0.25	0.01	BO ₂ ⁻	0.22	0.01			
Fe ²⁺	tr.		HSiO ₃ ⁻	0.01	0.00			

		mg/l	
H ₂ SiO ₃	105.4		
HBO ₂	1.36		
CO ₂	265.8		
H ₂ S	1.41	Total	6300 mg/l

る。噴騰停止時の温度分布からみれば、噴騰する温泉水は噴騰停止時 130 m 以深にある温泉水であるように見えるが、両者の化学成分 (Table 3) は異なっている。このような現象は間欠泉においても時に認められるが、噴騰によって、噴騰停止時坑内にあった温泉水とは別の温泉水が、温泉坑内に引き込まれ噴騰していると考えられる。噴騰停止時、113~129 m の深さから冷地下水 (低温温泉水) の混入があって、溶存 CO₂ ガスは稀釈されて、発泡一噴騰は起こらず、坑口より 18 m の静止水位を示している。

エアリフトによって、深部の温泉水が浅部へと引き上げられ、CO₂ ガスが 3 g/l 程度溶存している 57°C 程度の温泉水が、深度 48 m 前後に達した時、CO₂ ガスの発泡が起こり、丁度エアリフトの際エア管長を地下 48 m とした場合と同様な現象で発泡一噴騰が始まり、CO₂ ガスに富む深部の温泉水が浅部へと引き上げられ続け、噴騰再開のためのエアリフトが停止しても噴騰が続くのであろう。

ガスに富む温泉水が浅部に極めて静かに上昇すれば、ガスが過飽和となって発泡が起こらないことも考えられる。しかし、本源泉ではエアリフトによっているので、過飽和とはならない。この過飽和は、間欠泉では時として起こっているようで、小石を投げ入れる、石けんを投げ入れる、大声を出すなどの行為が間欠泉を噴出させると言われるものの内には過飽和のガスが一寸した刺激で発泡一噴騰するものがあると思われる。エアリフトは、上記の2つの作用、すなわち、深部の CO₂ ガスに富む温泉水を浅部に引き上げる作用と、発泡を促して CO₂ が過飽和になることを防ぐ作用があると考えられる。

冷水の注入や坑口の密栓は、浅部で CO₂ ガスの水中への溶解を増大させ、CO₂ ガスの発泡を抑制する。発泡が抑制されればエアリフト効果は小となり、CO₂ ガス溶存量の多い温泉水の上昇は妨げられ、噴騰温泉水が坑内に引き込まれることもなくなる。さらに浅部での冷地下水 (低温温泉水) 混入もあって、坑口の密栓、冷水の注入がなくなっても、CO₂ ガスの発泡は起こ

らず、噴騰は停止しつづけることとなる。

VI. 白浜温泉の他の噴騰泉

以上のように、噴騰泉がどの深度で発泡するか、その場合どの程度の CO_2 を伴うかを推定するには、温泉水の温度や量などの他に、静止水頭と噴騰高とが判明していなければならぬ。

幸い光田 (1965) が、水晶源泉も含めて白浜温泉の 13 噴騰泉について、これら資料を明らかにしているの、その資料を用い、上述の水晶源泉と全く同じ計算を試みた。その結果は

Table 4. Data of spouting wells at Shirahama Spa (MITSUDA, 1965):
Bubbling depths and amount of accompanied CO_2 gas at
the bubbling depths

Name of well	Temp. °C	Rate of flow l/m	S.W.L. from ground -m	Spouting height		Bubbling depth		CO_2 at the bubbling depth (in S.T.P.) g/l
				from ground m	from S.W.L. m	from S.W.L. -m	from surface -m	
A Mabuyu	73	545	10	5.5	15.5	24	34	1.8
B Suzushi	60	250	10	3	13	23	33	2.3
C Kamiyama	76	180	13.5	6.5	20	23.5	37	1.75
D Hashiri	72	165	16	3	19	29	45	2.2
E Miyuki	84	300	5	5	10	17.5	22.5	1.13
G Suisho	60	200	18	5	23	33	51	3.05
H Kakitani	51	440	11	3.5	14.5	24	35	2.8
I Higashi Shirahama No. 2	54	750	18	5.5	23.5	34	52	3.35
J Wakaba	63	75	20	2	22	32	52	2.8
M Chōsei	79	150	31	3	34	41	72	2.55
N Tsukumoto	71	350	8	3.5	11.5	22	30	1.8
P Yoake	83	400	21	5.5	26.5	33	54	2
Q Higashi Shirahama No. 3	63	750	16	5.5	21.5	34	50	2.85

Table 4 に示す通りで、白浜温泉では地表より 22.5 m~72 m (静止水位下 17.5~41 m) で発泡が起こり、その時の CO_2 は 1.13~3.35 g/l (標準状態で) が含まれていることとなる。

これが地質構造や化学成分など、他の諸要素とどのような関係にあるか、今後検討を進めたい。

VII. ま と め

白浜温泉の噴騰泉の中から、水晶源泉をえらんで噴騰の機構について考察した。

坑口から 18 m の静止水位を示す噴騰停止時の坑内温度検層・深度別採水の結果と、いろいろな温度・圧力下の CO_2 ガスの溶解度とから、噴騰停止時には、冷地下水 (低温温泉水) の混入もあって坑内の如何なる深度でも発泡が起こらず噴騰を停止し続けることが理解される。

坑口より5mの噴騰高を示す噴騰状況から、エアリフトの式を利用して、随伴するCO₂ガス量と発泡する深度との関係が明らかにされ、前のCO₂ガスの溶解度の関係とから、本源泉においては、噴騰再開のためのエアリフトによって3g/l程度のCO₂ガスを溶存する57°C前後の温泉水が水位下30m前後に上昇して発泡が起こり、エアリフトを停止しても噴騰が続くと考えられる。

冷水の注入、坑口の密栓は、浅部でCO₂ガスの水中への溶解を増大し、CO₂ガスの発泡を抑制し、噴騰を停止し続ける状態に戻す。

白浜温泉の他の噴騰泉について同様の計算を行なった結果、静止水位下17.5~41mで発泡が起こり、その時のCO₂は1.13~3.35g/lが含まれていることとなる。

しかし、本考察は未だ多くの仮定を含んでおり、不充分である。さらに精細な考察を進める必要がある。

謝辞 おわりに本研究の端緒を与えられた坂本峻雄博士を始め、多くの御助言・御示唆を賜った当研究所服部安蔵博士、益子安博士、さらに本研究を助けて戴いた当研究所の細谷昇・甘露寺泰雄・飯塚真二・田中昭の諸氏に厚く謝意を表す。

文 献

- Kikkawa, K.: On Shirahama Thermal Springs, Wakayama Pref., Japan, 地球物理 9, 85-94 (1954).
- 益子 安ら: 温泉の地球化学的研究(第10報)白浜温泉の化学成分に就いて, 温泉科学 15, 16-29 (1964).
- 光田節子: 白浜温泉の地球物理学的研究(I) 京都府私学研究論文集 No. 1, 133-139 (1963).
- 光田節子: 同上(II) No. 2, 1-6 (1964).
- 光田節子: 同上(III) No. 3, 1-6 (1965).
- 光田節子: 同上(IV) No. 4, 1-6 (1966).
- 光田節子: 同上(V) No. 6, 88-92 (1968).
- 中村久由ら: 本邦高鹹泉の温泉地質学的意義 地質調査所月報 9, 431-440 (1958).
- 日本機械学会(編): 機械工学便覧 改訂第4版 9, 73 (1960).
- Novák et al.: Löslichkeit der Kohlendioxyds in Wasser bei verschiedenen Drücken und Temperaturen. Collect. Czechoslov. Chem. Commem, 26, 2266-2270 (1961).
- 佐藤幸二: 紀伊白浜温泉の地質と温泉 地質学雑誌 70, 110-126 (1964).
- 佐藤幸二: 長野県湯田中温泉 地質学雑誌 72, 455-467 (1966).
- 佐藤幸二: 本邦の噴騰泉について 地質学雑誌 75, 329-342 (1969).
- 露木利貞: 和歌山県白浜温泉について 鹿児島大学理科報告, No. 1, 39-45 (1952).
- Wiebe et al.: The Solubility in Water of Carbon Dioxide at 50, 75 and 100°C, at Pressures to 700 Atmospheres. J. Am. Chem. Soc., 61, 315-318 (1939).
- Wiebe et al.: The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Various Temperature from 12 to 40° and at Pressures to 500 Atmospheres. J. Am. Chem. Soc., 62, 815-817 (1940).