

平成16年9月

原 著

琵琶湖周辺の炭酸泉

¹ NPO シンクタンク京都自然史研究所, ² 大谷大学文学部西村 進¹・桂 郁雄¹・西田潤一²

(平成16年6月20日受付, 8月15日受理)

On the Carburetted Springs around Lake Biwa

Susumu NISHIMURA¹, Ikuo KATSURA¹ and Jun'ichi NISHIDA²¹ NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History, ² Otani University

Abstract

Some carburetted springs are registered around Lake Biwa. These springs are pregnant with thick lake-sediments (called as Ko-Biwako Group) with no depositional surface and containing pebbles. Main chemical constituent of free gas of these springs is CH₄ (80~85%) and others CO₂ and N₂.

At the lakeside of Shin-Asahi Cho, north-side of Ado River, northwestern part of Shiga Prefecture, we drilled 200 m depth for the determination to elucidate the origin of CH₄ and CO₂ in spring water. Chemical composition collected from this spring water was determined that main free gas is CH₄ (80.05%) and others CO₂ (3.00%) and N₂ (14.30%) and in subordinate water are HCO₃⁻ (334 mg/l), free CO₂ (75 mg/l) and NH₄ (10.5 mg/l). Based on the relation of CH₄/(C₂H₆ + C₃H₈) to δ¹³C (‰) and δD (‰) to δ¹³C (‰) of discharged gases, CH₄ gas is originated by some germ with CO₂ deoxidization process and remained CO₂.

Some methane originated germs are found in spring water of Onoe Spa, Kohoku-Cho, and Spa of Yamada, Kusatsu City, and core samples and spring water of 200 m depth drilling hole, using DGGE method.

Key words : carburetted spring, water soluble methane, Lake Biwa, methane originated germ

キーワード : 炭酸泉, 水溶性メタン, 琵琶湖, メタン生成細菌

1. はじめに

琵琶湖の堆積物の中に水溶性メタンの胚胎する地層に掘削して、自噴する湧水が各所に見られる。これらは、炭酸ガスも規定以上含有していることが多く、温度が低い（掘削が浅い井）場合は冷鉱泉として、温度が高い（掘削が深い井）場合は温泉として、登録され利用されている。全体として、遊離炭酸の含有量よりもメタンの含有量のほうが多い。この炭酸泉の成因について検討を試みたので報告する。

今からほぼ 115 年前に、「水から火が出た事件」として県内を騒がせたエピソードが伝えられている。明治 16 年夏、当時の栗太郡常盤村（現草津市山田）で井戸掘り工事があったが、30 m ほど掘ったところ、この井戸から 5 日間もガスが吹き出た。5 日目になり、間歇的に水が出だし安心してカンテラを近づけたところ、水に火が付き数丈の火柱となり、近くの倉庫が燃えた。直径 2 m ほどの味噌釜を逆さにし、ふたをしてやっと消しとめた。火力は強く釜が飴のように溶け崩れたと伝える。このほか、ぶくぶく泡の吹き出る内湖や沼地が琵琶湖の周辺でみられ「カニ池」と呼ばれていて、地元の農民や漁民が竹筒を打ち込んでメタンガスを利用しだしたのは、この事件のもっと後からと伝える。

これらの天然ガスの火力が都市ガスの約 2 倍の $8,000\sim 9,000\text{ kcal/m}^3$ もあることが知られ、県内で企業化が本格化したのは、昭和 14 (1939) 年である。この年の夏、近江天然ガス工業所が設立され、山田から竹パイプで浜大津までガスを運び、これをボンベに詰めて京都の市バスや江若鉄道の気動車の燃料として使われた。昭和 18 年には、第二次世界大戦の激化とともに国策としてこの事業が取り上げられ、琵琶湖天然ガス株式会社と発展強化され日産ガス量 $4,000\sim 5,000\text{ m}^3/\text{d}$ もあった。更に、湖西でも滋賀天然ガス株式会社が設立され、今津駅（江若鉄道）前の寒暖計器ガラス製作所へ供給された。これらの掘削は浅く上総掘もしくは機械彫りでも竹管仕上げであった。

これらの事業は終戦とともに衰退し、琵琶湖天然ガス株式会社は昭和 25 年 12 月に休業、滋賀天然ガス株式会社も昭和 29 年 4 月に休業し以降企業化されなかった。

昭和 29 年以降、琵琶湖の周りの天然ガスは一般家庭用燃料として小規模で利用されてきた。昭和 26 年滋賀県が地質調査所大阪出張所と京都大学理学部に依頼し調査されたが、胚胎層の構造を明らかに出来ないで、その成因も明らかにすることは出来なかった。

帝国石油では地理的条件がめぐまれていることから、山田で昭和 32 年 4 月から掘削したが、1,000 m はあると考えられていた地層が 409 m で基盤に入ったので、416 m で掘削をあきらめ、メタンガスも 120~145 m の地層に $200\text{ m}^3/\text{d}$ (ガス水比 0.1 以上) しか胚胎しておらず、採算に乗らないとして放棄された。

その後、この自噴水に遊離炭酸が含むことがわかり湖北町尾上で温泉として使われだした。後、西大津のホテル紅葉で掘削され温泉として使われるようになり、次第に厚い堆積層を狙い各所で温泉が掘削されるに至った。

この数年、この水溶性メタンはメタン生成菌の働きによるのではないかと考え、(財)地球環境産業技術研究機構の援助によりその成因を探ることができた。

2. 琵琶湖周辺の水溶性メタンを含有する自噴井

昭和 54, 55 年度に滋賀県天然ガス調査研究委員会（委員長池辺展生、当時大阪市立大学教授）が作られ、筆者は「重力調査による堆積構造の研究」を任された（西村, 1979; 西村, 1981; 西村 進他, 1991; Nishida *et al.*, 1990）。また、温泉に興味を持っていたので、これらの泉源の調査も行っ

た.

昭和 29 (1954) 年より昭和 56 (1981) 年の間に、琵琶湖周辺に見られた水溶性メタンを含有していた泉源位置を Fig. 1 に、その化学成分を Table 1 に示す. これらの多くは付随水 (温泉水) のなかに溶けている遊離 CO_2 や HCO_3^- の含有量により温泉に登録されている. これらの成因は CO_2 や炭質物が堆積物の中に閉じ込められメタン生成菌の働きによりメタンに転換したものではとの考えを小出 (2000) より得て、(財)地球環境産業技術研究機構に「地中メタン生成菌による CO_2 からのメタン再生のための基礎技術の開発」の研究に持ち込んだ. その初年度 (平成 14 年度) には琵琶湖

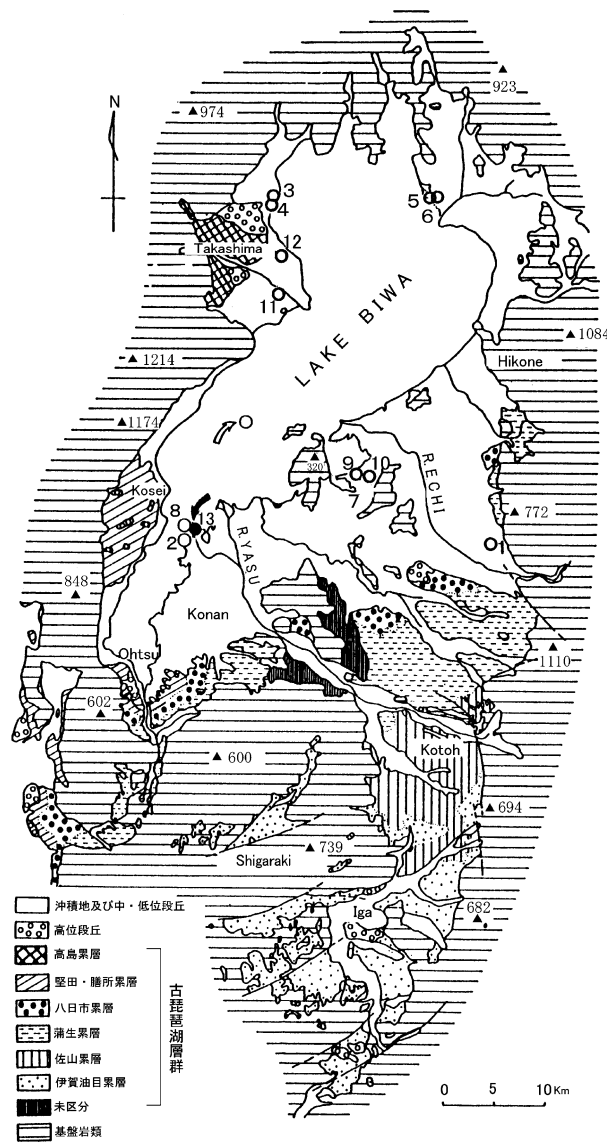


Fig. 1 Geological map of Ko-Biwako Group, around Lake Biwa. (○1 : spring in Table 1).

図 1 琵琶湖周辺の第四系・古琵琶湖層群地質図 (○1 : 第 1 表の泉源の位置を示す).

Table 1 Chemical composition of Carburetted springs in Fig. 1

表 1 図 1 に示した炭酸泉（昭和 29（1954）年から昭和 56（1981）年に見られた）のガス井の化学分析。
琵琶湖周辺地域の天然ガスと付随水（天然ガスの組成は vol% また付随水の溶存成分は mg/l で示されている）

番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
市町村	愛東町	守山市	今津町	今津町	湖北町	湖北町	安土町	守山市	安土町	能登川町	新旭町	安曇川町	守山市
坑井	湖東ホテル	レイク・ビワ	中川三一郎	柳森剛	紅鮎荘	尾上荘	長屋新之助	リゾート・クラブ	長屋喜一	小林健三	秦昭能②	秦昭能①	湖南開発
深度(m)	700	707	30	30	180	180	60	880	60	60	614	240	945
水温(°C)	29.8	35.0	16.5	16.5	20.0	19.5	18.5	31.5	18.0	17.8	27	18.8	33.5
ガス(Nm ³ /d)	—	21.4	<7.4	7.4	3	—	12	—	2	—	>3.2	—	—
水(kl/d)	298	324	—	110	21.6	86.4	>2.4	75	8	—	248	200	121
ガス水比	—	0.066	—	0.068	0.14	—	0.5>	—	0.25	—	>0.13	—	約 0.2
ガス													
He	0.14	0.036	0.000	0.000	0.003	0.003	0.001	0.014	0.000	0.001	0.006	0.003	0.013
H ₂	0.000	0.0011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
O ₂	0.160	0.00*	0.13	0.22	0.50	0.34	0.14	0.28	0.05	0.19	0.24	**	0.18
N ₂	81.54	24.5	17.96	7.72	26.24	17.03	9.90	21.63	10.76	20.01	14.30	15.28	19.62
Ar	1.08	0.279	0.40	0.21	0.45	0.30	0.20	0.31	0.21	0.42	0.23	0.18	0.35
CO ₂	0.005	1.95	2.33	4.88	0.96	1.77	6.82	3.48	6.39	2.90	3.07	9.90	4.62
CH ₄	17.02	73.23	79.18	86.98	71.85	80.54	82.94	74.28	82.60	76.48	82.15	74.64	75.12
C ₂ H ₆	0.005	0.0064	—	—	—	—	—	0.004	0.000	0.000	0.002	0.000	0.006
C ₃ H ₈	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N ₂ /He	582	681	—	—	8,747	5,677	9,900	1,545	—	20,010	2,383	5,093	1,509
N ₂ /Ar	75.5	87.8	44.9	36.8	58.3	56.8	49.5	69.8	51.2	47.6	62.2	87.3	56.1
付随水													
pH	>8.4	7.3	6.5	6.6	7.2	7.2	6.6	7.1	6.4	採取不能	7	6.6	7
HCO ₃ ⁻	51	397	116	172	402	406	305	366	261	採取不能	384	185	350
free CO ₂	14	24	102	190	36	36	170	50	180	採取不能	70	92	60
Cl ⁻	67	383	10.6	9	14.2	14.2	9.2	177	7.8	採取不能	41	7	74
NH ₄ ⁺	0.26	11.6	12.1	16.8	14.2	14.2	22.4	12.1	17.6	採取不能	11.2	14.0	8.4

*および**原分析値はそれぞれ 1.43 vol.% および 14.08 vol.% であり、そのすべてを空気混入によるものとした。

周辺をもう一度見て回り現在、湖北町尾上、新旭町針江、守山市・草津市の湖岸、大津市堅田の湖岸に、この種の泉源が見られることを確認した。他に内湖のあるところにはその可能性がある。しかし、北湖の舞子先の湖底から 1,400 m 深度まで京都大学（堀江正治教授）の研究のために掘削された井からはメタンガスが出なかった（堀江，1988）。そのように琵琶湖の堆積盆のどこにでも水溶性メタン胚胎層があるのではない。そこでどのような堆積環境のところに水溶性メタンが胚胎するのかを、今回検討することとした。

3. 水溶性メタン胚胎層の構造

琵琶湖周辺はラコスト重力計を主として用い、琵琶湖の湖底の重力は 200 m 深度まで測定できるノースアメリカン海底重力計を用い精密な重力測定をした（西村，1981）。その結果を Fig. 2 に示

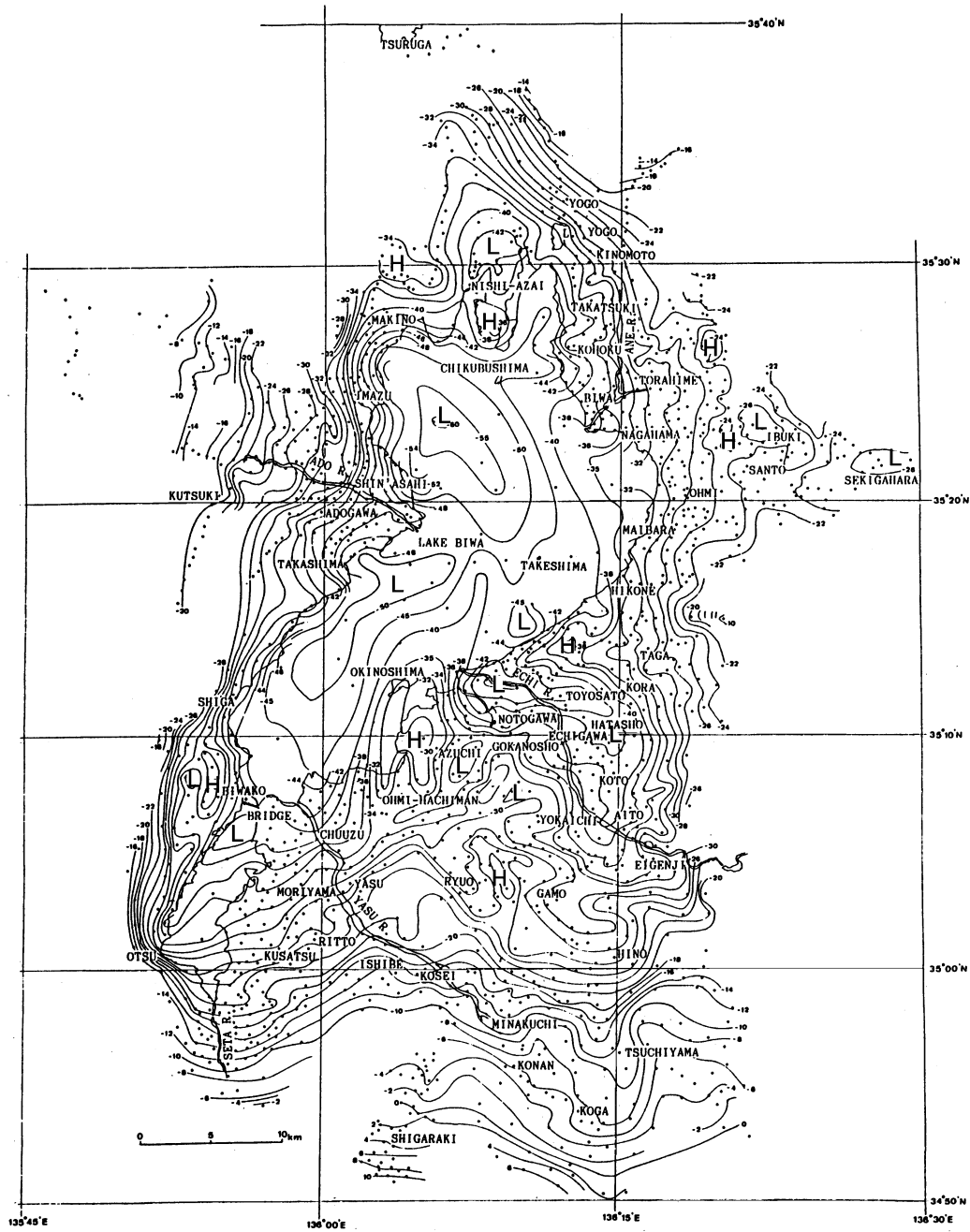


Fig. 2 The distribution of Bouguer anomalies (Nishida *et al.*, 1990). Contour intervals are 2 mgal on land and 5 mgal in the lake. Average density is deduced as 2.4 g/cm³. Solid circles are gravity stations. H and L mean positive and negative anomaly centers, respectively.

図 2 琵琶湖周辺のブーゲー異常図 (Nishida *et al.*, 1990). 等重力異常線は陸域では 2 mgal 間隔で、湖域では 5 mgal 間隔である。ブーゲー補正と地形補正に用いた仮定密度は 2.4 g/cm³ である。黒点は重力測点、H と L はそれぞれブーゲー異常の正および負異常のセンターである。L のところは窪地で、等重力線の密度の高いところは落差のあるところである。

す。1981年当時は琵琶湖の湖盆が一つであるとの意見と複数の湖盆であるとの意見が地質学者のなかであり、この重力測定により湖盆は15~20kmの直径を持ついくつかの湖盆であることを示している(西村, 1981)。これは横山(1973)の考えの、琵琶湖の湖盆は二列に複数あり、東側の南から北へ次に西側に移り南から北へ発達していることを示すものであった。

湖北町尾上では、西側の葛籠尾崎に大きな南北走向の活断層が見られ、東側にも逆断層がみられ、これらの断層で挟まれた地溝状のところで急激に堆積物が重なったところでメタンの胚胎がみられている。

近江八幡市の西の海の窪地でも急激な堆積環境がみられる。琵琶湖大橋の両側も同じような堆積環境がありそうであるが明確でない。草津市山田のあたりは、前述の重力の測定時は湿地が続き重力測定が粗い測点間隔でしかとれなかったが、その後田地の改善工事がすすみ、さらに湖岸道路が完備したため、密な測定が可能になってきたので、平成14年度末に精密な重力測定を行った。その結果、当地は急傾斜の断層沿いであることが示された。これらの堆積地の地下水は停滞していて嫌気性であることも推定できた。

安曇川周辺は寛文2(1662)年の西日本で有史時代最大の地震があり、多くの被害が伝わって

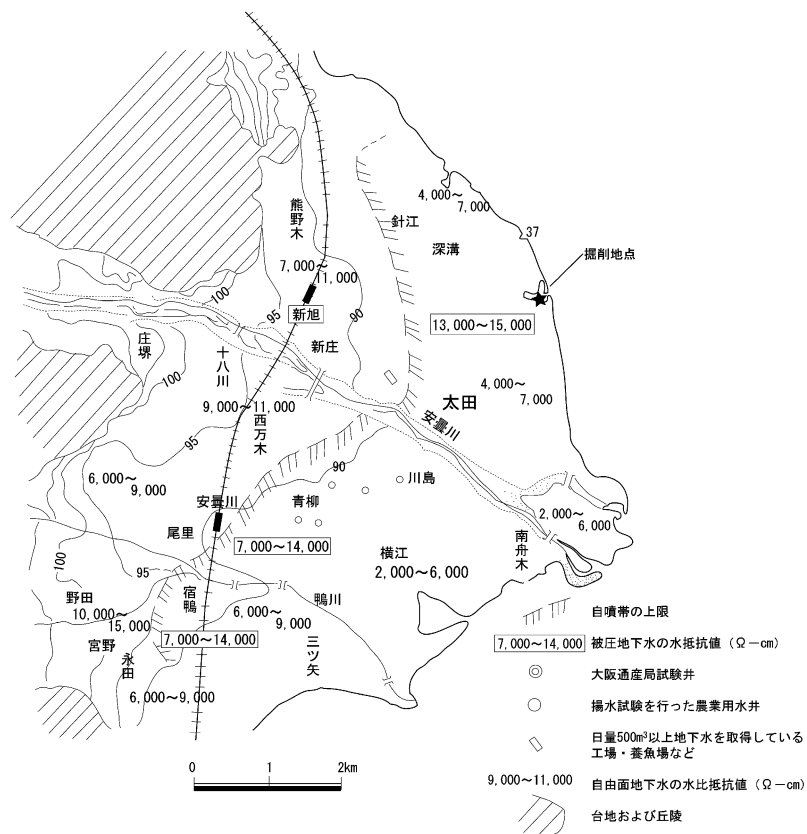


Fig. 3 The character of groundwater around Ado River, northwestern part of Shiga Prefecture.

★ : 200 m 掘削地点.

図3 湖北安曇川周辺の地下水胚胎の様子. ★ : 今回の200m掘削地点.

る。そのとき生じた湖西の地震断層の存在が知られている。地形からみれば、安曇川口に三角州が発達しているように見えるが、重力測定では安曇川の南側は基盤が浅く北側が深いことがわかり、簡単な三角州ではないことが推定できる。降雨の多かったあとの井戸の調査であったが、Fig. 3にはこの周辺の地下水の状態を示した。自噴帯が発達しており、地下水は停滞して嫌気性で、特に安曇川の北側の地下水の電気伝導度が高く、溶解している成分が多いことを示している。この地域でも平成 15 年 3 月に精密な重力測定を行った。その結果、新旭町針江から新旭町風車村にかけては窪地状で、湖岸沿いに 2 本の断層が推定できた。これらの落差の大きい段差のある断層の近辺にメタンが胚胎していることがわかった。

4. 新旭町新旭浜園地

水溶性メタンの胚胎している地質構造の探査とメタン生成菌などの生存をたしかめるために、平成 15 (2003) 年夏新旭町新旭浜園地で、200 m の掘削を行った。このあたりでは、琵琶湖の堆積物は 700 m 程度推定できる。基盤まで掘削したかったが予算の都合で無理であった (NPO シンクタンク京都自然史研究所, 2003 ; 2004)。

掘削はコアの採取と掘削井の検層を行った。その結果、

- ① 堆積環境：堆積物は少なくとも、5 回の急激な堆積の都度メタンは胚胎層が作られたと推定できる。
- ② 不整合の存在：142 m 以深は湖東流紋岩の円礫が混じっている。湖東流紋岩は琵琶湖の中央および東にしか存在しないので、この堆積物は東から来たものであると推定できる。142 m 以浅には短冊状のホルンフェルスの礫が含まれ、湖東流紋岩の礫を含まない。このことはこれらの堆積物は西から来たものであると推定できる。湖西丘陵の連続と考えられるので 142 m の不整合の表面は約 25 万年前の古琵琶湖層群であると推定できる。この堆積時期に比良の上昇がおこったと推定できる。
- ③ 磁気測定：これらの堆積物は、残留磁気の結果からみてブルン正磁極クロンに堆積したもので、火山灰が見られなかったが、若い時代に堆積したものであることが推定できる。
コアは処理が悪かったのかメタン生成菌の存在は認められなかった。

Table 2 On-the-spot investigation of some selected depth

表 2 限られた深度の自噴水の現地分析.

No.	ストレーナ位置	自噴量(l/分)	pH	EC(s/m)	温度(°C)	Fe(mg/kg)	F(mg/kg)
No. 1	56.17 m (53.44~58.90)		7.24	0.399	16.6	6	0
No. 2	184.27 m (181.54~187.0)	0.16	7.91	0.409	17.6	7	0
No. 3	184.27 m (181.54~187.0) 156.97 m (154.24~159.7)	0.11	7.64	0.457	17.7	10	0
No. 4	184.27 m (181.54~187.0) 156.97 m (154.24~159.7) 143.35 m (140.62~146.08)	0.18	7.42	0.448	15.7	10	0
No. 5	184.27 m (181.54~187.0) 156.91 m (154.24~159.7) 143.35 m (140.62~146.08) 87.43 m (84.70~90.16)	0.18	7.71	0.308	15.5	6	0

Table 3 Chemical composition of spring water of 200m drilling

表 3 200 m の掘削井の自噴水のガス・水質の簡易分析

掘削深度	187.00 m	ガス	He	0.004%
水温	18.6°C		H ₂	0.000
ガス	>30 N m ³ /d		O ₂	痕跡
付随水	432 kl/d		Ne	0.20
ガス/水比	>0.15		N ₂	14.3
			Ar	0.20
			CO ₂	3.00
			CH ₄	80.05
付随水		付随水	pH	7.60
			HCO ₃ ⁻	334 mg/l
			FreeCO ₂	75
			Cl ⁻	8
			NH ₄ ⁺	10.5

検層結果やコアの検討から、メタン胚胎層存在の推定できるところにスリットのあるケーシングをいれた。その深度は -53.44~-58.90 m, -84.70~-90.16 m, -140.62~-146.08 m, -154.24~-159.7 m, -181.54~-187.00 m である。この自然状態で自噴し、+4.00 m 程度の高さで安定した。

メタン生成細菌は嫌気性の状態でのみ生存するので、空気を入れてはならない。そこでスリットを挟んでパッカーをかけ、自噴する地下水を採取した。自噴が弱い場合はスリットを複数はさんで自噴させ、採水・採ガスした。

現場で採水した試料の簡易分析の結果を Table 2 に示す。最後の全体の自噴水・ガスの分析結果を Table 3 に示す。ガスの 80% はメタンであった。

Table 2 の No. 1, No. 2, No. 4 の三種の状態、それぞれ約 200 ml の採ガスを行い分析した。分析結果を Table 4, Table 5 に示す。CH₄/(C₂H₆+C₃H₈)-CH₄ の δ¹³C (‰) の関係 (Fig. 4) から、

Table 4 Composition of soluble gas in No. 1, No. 2 and No. 4 (shown in Table 2) samples

表 4 第 2 表に示した No. 1, No. 2, No. 4 に含まれるガス成分

組成	No. 1	No. 2	No. 4
CH ₄ (vol%)	55.7	46.8	65.1
C ₂ H ₆ (vol%)	<0.01	<0.01	<0.01
C ₃ H ₈ (vol%)	<0.01	<0.01	Not Detected
CO ₂ (vol%)	0.465	0.646	0.76
N ₂ (vol%)	35.3	38.9	26.2
O ₂ (vol%)	6.11	8.85	5.11
H ₂ (vol%)	0.05	<0.01	0.02

Table 5 δ¹³C and δD compositions of CH₄ in No. 1, No. 2, No. 4 samples表 5 No. 1, No. 2, and No. 4 試料のメタンの δ¹³C, δD 組成

同位体比	No. 1	No. 2	No. 4
δ ¹³ C(CH ₄)(‰)	-63.9	-61.9	-65.8
δD(CH ₄)(‰)	-185.7	-185.6	測定せず
CH ₄ /(C ₂ H ₆ +C ₃ H ₈)	>5570	>4680	>6510

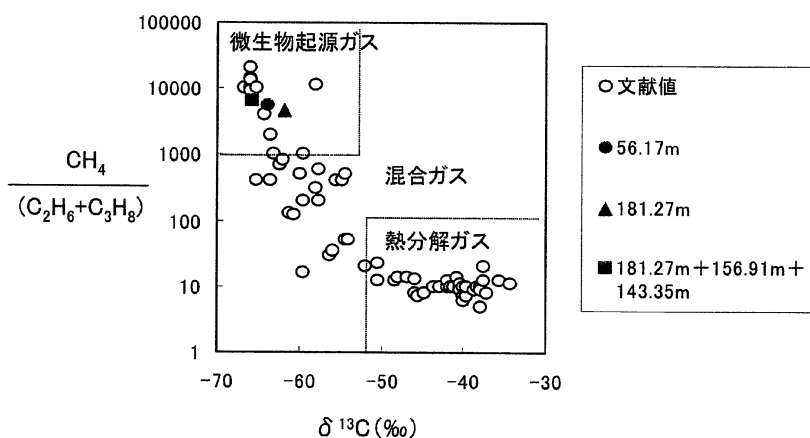


Fig. 4 Formation process and the relation between $\delta^{13}\text{C}$ and $\text{CH}_4/(\text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8)$ of gas in No. 1, No. 2 and No. 4 samples.

図 4 ガスの生成プロセスとメタンの $\delta^{13}\text{C}$ と $\text{CH}_4/(\text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8)$ の関係.

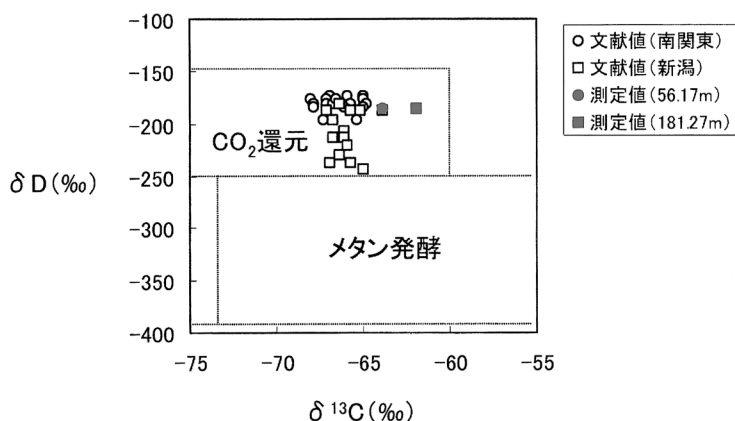


Fig. 5 Generation process and the relation between $\delta^{13}\text{C}$ and δD in No. 1 and No. 2 samples.

図 5 メタンガスの生成起源と $\delta^{13}\text{C}$ と δD の関係.

これらのガスは微生物起源ガスであることが示唆される。また CH_4 の δD (‰) - $\delta^{13}\text{C}$ (‰) の関係 (Fig. 5) からメタン発酵のガスではなく、 CO_2 の還元で生じていることが示唆された。一方、RITE でなされた DGGE 法で、草津市山田、湖北町尾上の自噴井の湧水からアーキアが見つかりメタン生成菌が多く存在することがわかり、結論として「200 m 掘削井からのコア、湧水より、メタン生成菌の存在がみとめられ、他にともに地下深部から見つかった細菌が存在する」との予測通りの結果を得た。

5. ま と め

琵琶湖の周辺の琵琶湖の堆積物 (古琵琶湖層群と通常命名されているが、北湖では現在の堆積物

まで連続している)のある部分に昔から、水溶性メタンの含有する温泉が知られている。これらは「燃える水」として知られるようになった湧水である。これらの地下水に含有しているガスの80~85%はメタンで、残りは殆ど二酸化炭素である。

水溶性メタン胚胎層は礫を含むことが多く、地層面が明確でなく急激な堆積でできた断層近辺の堆積物である。このような環境は、被害地震に伴うような大きな断層活動の近辺である。その中に炭質物・二酸化炭素が固定化され、停滞し嫌気性の地下水の中に生息する細菌のメタン生成菌により二酸化炭素を還元し、メタンに変換している。そのときに二酸化炭素が残り、それが琵琶湖の周辺に遊離炭酸を含む温泉として利用されているのである。

文 献

- 地球環境産業技術研究機構 (2004) : プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発成果報告書 (平成 15 年度).
- 堀江正治 (1988) : 琵琶湖底深層 1400 m に秘められた変遷の歴史, 284 頁, 同朋舎出版, 京都.
- 小出 仁 (2000) : CO₂ 地中隔離技術, *ECO Engineering*, **5**, 19-27.
- Nishida, J., I. Katsura, S. Nishimura and E. Abe (1990) : Gravity Survey around Lake Biwa, Southwest Japan, *J. Phys. Earth*, **38**, 1-17.
- 西村 進 (1979) : 滋賀県の重力測定, 滋賀県の自然, 469-478, 滋賀県自然保護財団.
- 西村 進 (1981) : 琵琶湖周辺・湖底重力測定, 滋賀県天然ガス調査報告書, 43-55, 滋賀県.
- 西村 進, 西田潤一, 桂 郁雄, 阿部悦夫, 橋本精一 (1991) : 滋賀県の重力異常について, 滋賀県の自然誌, 739-769, 滋賀県自然保護財団.
- NPO シンクタンク京都自然史研究所編 (2003) : 特集「プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用等技術開発・基礎技術研究—地中メタン生成菌による CO₂ からのメタン再生のための基礎技術の開発—1. メタン生成盆の地質学的探索」その 1, *自然と環境*, **5 Supplement**, 7-89.
- NPO シンクタンク京都自然史研究所編 (2004) : 特集「プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用等技術開発・基礎技術研究—地中メタン生成菌による CO₂ からのメタン再生のための基礎技術の開発—1. メタン生成盆の地質学的探索」その 2, *自然と環境*, **6 Supplement**, 1-41.
- 横山卓雄 (1973) : 琵琶湖の自然史—その序—, *Nature Study* (大阪市自然史博物館), **19**, 2-8.