阿武隈地域の温泉水の地球化学的研究

高橋 正明^{*1}・風早 康平^{*1}・安原 正也^{*1}・
高橋 浩^{*1}・森川 徳敏^{*1}・稲村 明彦^{*1}

Geochemical study of hot spring waters in Abukuma area, northeast Japan

Masaaki TAKAHASHI^{*1}, Kohei KAZAHAYA^{*1}, Masaya YASUHARA^{*1},
Hiroshi A. TAKAHASHI^{*1}, Noritoshi MORIKAWA^{*1} and Akihiko INAMURA^{*1}

Abstract

Analyses of chemical compositions and hydrogen and oxygen isotopic ratios were carried out for 167 hot and cold spring waters from Abukuma area, northeastern part of Ibaraki, eastern part of Fukushima and southeastern part of Miyagi Prefectures, northeast Japan.

As a result, followings were concluded.

(1) Heat sources of all hot springs were able to be explained by conductive heat flow in this area, except those in the western side of the Abukuma River, near the volcanic front of northeast Japan.

(2) Vertical variation of geochemical characteristics of hot spring waters in this area was Cl type at the lowermost part, followed by Cl-SO₄ and Cl-HCO₃ types at the lower part, Cl/SO₄/HCO₃ types at the upper part, and SO₄ type and SO₄/HCO₃ types at the uppermost part.

(3) Hot spring waters in this area were categorized into two types by their origins. The first type of hot spring waters were originated from interstitial water or oil field brine which had very high chloride ion concentration and very low sulfate ion concentration. The second type of hot spring waters were originated from meteoric water. Chloride and sulfate ions in them were leached out from minerals in layers which had both high chloride and sulfate ion concentration, although chloride ion in them had a possibility for the origin from brine in layers.

Key words: Abukuma, isotopic ratio, greentuff type hot spring, oil field brine, interstitial water
キーワード：阿武隈，同位体組成，グリーンタフ型温泉，油田鹹水，間隙水

I. はじめに

阿武隈地域は東北日本弧火山フロントの東側（前面）に位置する。そのためそこに存在する温泉は火山（活動）の熱的，物質的影響を受けている可能性が低いことが考えられる。阿武隈地域は

主に海成の第三紀層および花崗岩類より構成されているので，本地域の温泉水の化学組成の詳細，起源，形成機構を調査・研究することは，地質的に同様の地層，岩石から構成され，火山（活動）の熱的，物質的影響を受けている地域にある温泉の起源，形成機構を解明する上で，バックグラウ

* 1 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター Research Center for Deep Geological Environments, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

ンドとなる可能性を持つと考えられる。しかしながら現状では阿武隈地域の温泉は化学組成の報告（例えば、福島県厚生部、1978）以外はほとんど行われておらず、地球化学的な温泉調査・研究の空白地帯であるといえることができる。

一方で、阿武隈地域南東部にある常磐湯本温泉は、東北日本弧の火山フロントより約60kmも前面にあるにもかかわらず、日本の42～60℃の全温泉の放熱量の16%を占め、6.3℃/100mという火山地帯に匹敵する地温勾配を持つ温泉である（角、1977）。安藤・中村（1953）は常磐湯本温泉水の化学組成分析値の報告をするとともに、成因に関する若干の考察を行ったが、その後は放熱量の研究（例えば、角、1977）が行われたのみであり、温泉水の起源、形成機構、および周辺部にある温泉との化学的な相互関係については阿武隈地域の他の温泉と同様、全く考察が行われてきていない。

そこで本研究では、第一に常磐湯本温泉の放熱量について考察を行うこととしたい。また、阿武隈地域全域に分布する温泉水の化学、同位体組成について報告し、特に塩濃度が高い(1)北茨城市からいわき市、(2)双葉郡（楡葉、富岡および双葉各町）、および(3)桑折町に分布する温泉について、その起源、形成機構および相互関係の考察を行うこととしたい。

II. 地形・地質概説

茨城県北東部、福島県東部および宮城県南東部にまたがる阿武隈地域は、南北200km、東西60kmの広がりがある。阿武隈花崗岩類、阿武隈変成岩など花崗岩類、斑れい岩類、変成岩類からなる主要部は、標高300-600m程度の高原になっている。最高標高は大滝根山の1192mである。阿武隈高原の北東部は双葉断層により区切られ、ジュラー最下部白亜系の相馬中村層群と新第三系・第四系からなる標高100m以下の丘陵地と接している。一方、阿武隈高原の南東部は上部白亜系の双葉層群、古第三系の白水層群および新第三系・第四系

の順に重なっているやはり標高100m以下の丘陵地と接している。相馬中村層群、双葉層群は海成層、白水層群は陸成～海成層、新第三系は海成層である。

阿武隈高原の南西部は棚倉構造線により区切られ、新第三系・第四系からなる標高100m以下の丘陵地と接している。その西部は足尾帯の一部である八溝山地（最高標高は八溝山の1022m）であり、中・古生層からなっている。新第三系は主に海成層からなる。

阿武隈高原の西部には標高100m以下の福島盆地と、標高300m以下の郡山盆地が位置し、阿武隈川が貫流している。新第三系・第四系からなっており、いわゆるグリーンタフ地帯の東縁である。盆地の西方には脊梁山脈が位置している。新第三系は海成層あるいは陸水成層からなる（日本の地質「東北地方」編集委員会（1989）を参照）。

III. 試料と分析

温泉水および湧水試料の採取は、阿武隈高原およびその周辺部より行った。調査地域には、阿武隈川の西岸地域および八溝山と阿武隈高原に挟まれた大子地域も含まれる。温泉水試料の採取地点をFig. 1に、間取り調査などにより得られた坑井深度など温泉諸元をTable 1に、それぞれ示した。採取した試料数は167である。

現地で温泉水試料の水温、pH、電気伝導度の測定を行った。化学および同位体組成の測定は以下のように行った。

重炭酸イオン濃度：pH4.8アルカリ度より換算。

化学組成：0.2μmのセルロースアセテートフィルターで温泉水試料を濾過後、イオンクロマトグラフDionex DX-500 modelにより、Cl⁻、SO₄²⁻、F⁻、Br⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、およびPO₄³⁻の7成分の分析を行った。陰イオン分析用の溶離液は水酸化カリウムで、濃度を1m.molから35m.molに順次変化させるグラディエント分析を行った。

水の水素・酸素同位体組成分析：水素同位体組成は亜鉛を用いた水-水素還元法（バッチ法）、酸

Fig. 1 Locality map of sampling points and distribution map of water temperatures of sampled hot spring waters

素同位体組成は二酸化炭素-水自動平衡法をそれぞれ前処理とする質量分析法により測定した。用いた測定装置は Finnigan-MAT Delta-S model。測定誤差は水素同位体組成で $\pm 1\%$ 、酸素同位体組成で $\pm 0.1\%$ である。

分析結果を Table 1 に示した。

IV. 結果と考察

1. 水温

Fig. 1 に阿武隈地域の温泉水の泉温分布を示し

た。25℃以上の温泉は56ヶ所あり、最高温度の温泉は五浦温泉（茨城県北茨城市）の72℃であった。60℃以上の高々温温泉は、他に平潟港温泉（64℃、北茨城市）と常磐湯本温泉（60℃、福島県いわき市）の2ヶ所があり、42℃以上の高温温泉は、上記の五浦温泉（58℃）の他、あゆり温泉（51℃、福島県矢吹町）、鶴の岬荘（46℃、茨城県十王町）、ならは天神岬温泉（43℃、福島県楮葉町）および郡山市など阿武隈川の西岸地域にある9温泉の計13ヶ所であった。また、25℃以上の温泉の大部分は上記温泉の周辺、すなわち阿武隈地域の高原部分以外の地域に分布していることは、Fig. 1 から明白である。

常磐湯本温泉の放熱量、 $10^{9.6}\text{cal/min}$ は、日本の42～60℃の全温泉の16%を占め、温泉の熱階級（Fukutomi, 1961）はⅦ^{*1}に達するなど異常に大きく、地殻熱流量による加熱機構以外の何らかの熱源が存在する必然性が述べられている（中村・安藤, 1953; 角, 1977）。ただ、温泉放熱量の計算に用いられたのは、水温55.6℃、湧出量約62ton/min という値である（角, 1977）。中村・安藤（1953）は、常磐炭田の大部分を占める常磐炭砒坑内からの総排水量が約100ton/min、その内75～80%が温泉水で占められていると述べているので、62ton/min という湧出量値は、常磐炭田全域からの総出湯量に近い値である。62ton/min という湧出量値自体、大きな湧出池を持つ草津湯畑の3.6ton/min^{*2}、玉川大噴の8.4ton/min^{*3} という湧出量値と比較しても相当に大きな値である。また、中村・安藤（1953）を見ると、常磐炭田坑内から湧出する温泉の水温は、南部（常磐炭砒砒崎砒）では60℃以上であるが、北部（常磐炭砒隣の好間炭砒）では30℃未満の場所も存在している。これらのことから、常磐湯本温泉の放熱量、 $10^{9.6}\text{cal/min}$ という値は過剰見積りである可能性があると考えられる。

*1: 温泉の熱階級とは、温泉地からの放熱量を $10^{6.5}\text{cal/min}$ 以下をI、 $10^{6.5} \sim 10^{7.0}\text{cal/min}$ をIIのように $10^{0.5}\text{cal/min}$ 刻みに区分したもの。熱階級Ⅶに区分される温泉地の放熱量は $10^{9.5} \sim 10^{10.0}\text{cal/min}$ である。

*2: データの出典は、<http://tabijozu.ne.jp/area/kanto/kusatsu/>。

*3: データの出展は、<http://www.yukemuri.jp/akita/tamagawa.html/>。

Table 1 Chemical and isotopic compositions of hot spring waters taken from Abukuma area

No.	For Fig. 8	Sample name	sampling date	Temp. (°C)	pH	EC (μs/cm)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	F (mg/l)
Ibaraki Prefecture										
1		Kikunoyu	2001.11.09	17.3	8.5	1960	415.	3.879	567.	0.593
2		Yasuraginooka (Takahagi) Spa Hospital	2001.11.08	17.1	8.1	310	25.6	0.352	742.	0.019
3		Otakaji	2001.11.15	27.6	9.0	840	20.0	264.	65.9	11.5
4		Kukainoyu	2001.11.15	28.1	8.9	1410	48.5	561.	59.2	13.0
5		Horikawa-1	2001.11.15	32.6	8.6	2800	125.	1290.	28.1	8.729
6		Horikawa-2	2001.11.15	20.3	7.0	1170	57.1	85.6	466.	1.535
7		Sekison	2001.11.09	12.9	6.6	680	43.6	94.2	262.	0.175
8	●	Hirakatako	2001.11.15	64.2	7.9	19500	7640.	5.48	18.7	3.188
9		Tomonoyu	2001.11.08	18.9	7.0	590	30.8	179.	107.	0.233
10	●	Joban Uguisudani	2001.11.08	16.1	8.1	200	597.	17.8	171.	0.493
11		Isohara-1	2001.11.08	16.8	8.9	540	54.2	57.0	198.	0.201
12	●	Isohara-2	2001.11.08	17.1	7.9	640	1560.	189.	205.	
13		Yunoami	2001.11.15	13.2	6.4	1030	223.	97.8	75.2	0.265
14		Sekiyama-1	2001.11.09	15.0	9.2	550	29.2	43.7	248.	0.381
15		Sekiyama-2	2001.11.09	18.2	8.7	670	24.9	140.	221.	0.211
16		Iwabana	2001.11.09	14.2	7.0	440	25.3	54.3	142.	0.091
17	●	Otsuko	2001.11.09	16.3	7.8	1240	347.	23.0	168.	
18	●	Izura-1	2001.11.15	72.3	7.6	18700	7060.	53.8	28.6	3.468
19	●	Izura-2	2001.11.15	38.3	8.2	5300	1590.	0.247	477.	1.45
20	●	Izura-3	2001.11.15	57.5	8.0	>20000	7710.	11.6	29.6	3.816
21		Yokokawa	2001.11.09	13.8	10.2	380	21.3	29.6	99.8	5.257
22		Osuge	2001.11.09	15.4	9.9	390	33.4	34.9	74.4	6.685
23		Isago	2001.11.09	10.0	9.7	350	26.2	28.5	92.5	5.937
24		Satomi	2001.11.09	32.6	10.1	400	42.3	10.3	96.1	9.201
25		Daigo	2001.11.08	29.2	8.7	1480	160.	513.	41.5	6.575
26		Asakawa-1	2001.11.08	25.9	9.0	1480	170.	517.	37.0	6.636
27		Asakawa-2	2001.11.08	15.6	6.8	160	4.659	4.469	76.4	0.086
28		Fukuroda-1	2001.11.09	38.6	8.9	640	33.5	158.	110.	8.797
29		Fukuroda-2	2001.11.09	37.0	8.9	650	34.6	158.	105.	8.71
30		Shionosawa	2001.11.08	13.1	8.2	550	6.697	64.5	281.	0.753
31		Yuzawa	2001.11.09	26.0	8.8	1160	147.	306.	62.9	10.1
32		Tsukiori	2001.11.09	42.5	8.9	660	31.7	158.	103.	11.4
33		Unomisaki	2001.11.08	46.1	8.9	330	128.	1450.	28.4	6.82
Fukushima Prefecture										
34		Koriyama	2001.11.09	31.3	8.9	1230	139.	301.	101.	9.387
35		Gendanoyu	2001.11.09	16.2	8.3	440	18.6	147.	48.6	1.416
36		Nakatsugawa	2001.11.06	11.8	6.6	68	1.219		23.7	0.035
37		Moriyama	2001.11.05	17.4	6.6	320	5.491	13.8	102.	0.031
38		Moriyama	2001.11.06	17.3	6.2	194	16.3	15.4	53.7	0.104
39		Mihoda	2001.11.06	44.3	8.5	1060	112.	215.	164.	2.63
40		Tohoku-hara	2001.11.09	41.0	8.5	1280	114.	167.	365.	11.5
41		Ishibashi-1	2001.11.06	44.8	8.6	1840	438.	179.	146.	17.0
42		Ishibashi-2	2001.11.06	48.9	8.7	1910	256.	503.	67.2	6.635
43		Gekko	2001.11.05	41.9	8.6	980	129.	83.1	229.	11.5
44		Yasumiishi	2001.11.06	29.8	9.1	2000	158.	840.	18.7	2.548
45		Uneme	2001.11.05	43.3	7.9	2300	232.	171.	825.	6.037
46		Goreibitsu	2001.11.05	19.1	9.0	870	46.0	385.	18.5	2.007
47		Konan	2001.11.06	41.0	8.7	570	3.43	107.	86.3	0.954
48		Koriyama Yumoto	2001.11.09	40.0	8.6	1390	209.	324.	101.	7.199
49		Kosai Tsutsumi	2001.11.05	42.9	8.4	1630	179.	327.	301.	8.238
50		Narita	2001.11.05	43.3	8.3	550	28.3	1.371	273.	1.596
51		Namiki	2001.11.06	36.4	9.0	2200	15.7	22.6	51.1	0.465
52		Yaji-1	2001.11.15	15.2	10.3	370	9.671	27.1	165.	0.66
53		Yaji-2	2001.11.15	15.6	10.3	350	10.2	28.1	157.	0.664
54		Yaji-3	2001.11.15	16.0	10.3	380			160.	
55		Kunohama	2001.11.15	14.6	10.1	380	7.32	14.9	185.	0.396
56		Irimazawa	2001.11.15	15.2	8.8	230	7.399	22.5	103.	0.141
57		Tamaya	2001.11.14	12.6	10.0	410	7.03	28.4	198.	0.563
58		Shiraiwa	2001.11.14	13.5	4.1	1000	15.4	622.	0.00	0.782
59		Narusawa	2001.11.15	15.5	10.0	510	5.498	14.9	265.	0.251
60	◎	Yotsukura Maiko	2001.11.14	17.8	7.2	4100	1480.	0.302	184.	
61		Sawanoyu-1	2001.11.15	17.3	6.4	300	13.8	70.8	40.7	0.064
62		Sawanoyu-2	2001.11.15	13.8	6.5	310	10.9	81.4	39.4	0.047
63	◎	Iwaki Shin-Maiko	2001.11.14	37.4	7.9	7400	2840.	21.4	88.8	3.581
64	◎	Iwaki Yumoto	2001.11.14	60.0	8.6	3100	622.	458.	62.9	5.319
65		Yoshinotani-1	2001.11.14	12.0	7.1	240	10.1	38.4	85.1	0.059
66		Yoshinotani-2	2001.11.14	13.0	7.1	260	7.90	37.6	70.3	0.133
67		Yoshinotani-3	2001.11.14	13.7	7.1	250	5.142	30.0	95.2	0.104
68		Nakanenoyu	2001.11.14	11.6	6.8	111	5.704	4.24	43.1	0.053
69		Koya-1	2001.11.15		10.0	370	3.721	13.0	194.	0.115

阿武隈地域の温泉水の地球化学的研究

No.	Br (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO2 (mg/l)	P04 (mg/l)	δD (‰)	δ18O (‰)	Well depth	Latitude ° ' "	Longitude ° ' "	Altitude (m)
Ibaraki Prefecture										
1	1.713	7.262		1.88	-51.50	-8.28	270	36 42 34.26	140 43 7.11	5
2	0.123	0.423			-47.20	-7.85	226	36 42 26.70	140 43 25.65	3
3					-51.80	-8.56	405	36 43 25.08	140 41 46.20	32
4					-51.80	-8.63	955	36 43 32.81	140 41 43.30	40
5					-54.10	-8.77	780	36 44 34.84	140 42 15.12	20
6		1.632			-46.90	-7.88	351	36 44 34.84	140 42 15.12	20
7	0.307	3.25		1.00	-44.80	-7.59	2	36 50 33.22	140 47 25.81	28
8	27.1				-26.50	-3.97	880	36 50 24.45	140 47 44.53	19
9		4.055		1.338	-39.10	-7.32	5	36 51 7.85	140 47 30.73	45
10	2.239	6.532		0.348	-43.70	-7.63	1000	36 48 12.68	140 45 27.95	14
11	0.424	0.295	3.686		-44.70	-7.56	20	36 47 32.89	140 45 37.27	9
12	5.132	7.549			-43.40	-7.00	50	36 47 28.98	140 45 36.91	0
13	1.248	2.814			-43.70	-7.52	3	36 50 33.44	140 45 14.41	29
14	0.276	5.083		0.797	-47.40	-7.79	15	36 51 25.16	140 46 36.68	19
15	0.258	4.994		0.724	-47.10	-7.75	2	36 51 18.52	140 46 34.84	14
16	0.135	0.779		0.276	-46.20	-7.71	5	36 50 33.05	140 46 16.82	19
17	1.423				-45.70	-7.46	70	36 49 40.25	140 47 20.41	1
18	25.1				-27.30	-4.22	1800	36 49 46.78	140 48 17.82	19
19	6.051				-44.10	-7.48	1200	36 49 54.59	140 48 23.64	11
20	29.4				-24.30	-3.86	1800	36 49 54.59	140 48 23.64	11
21	0.084				-54.80	-9.16	2	36 43 19.88	140 30 45.88	247
22	0.092				-53.80	-8.92	3	36 40 7.42	140 31 30.48	151
23	0.084				-50.60	-8.89	100	36 40 2.03	140 31 34.35	149
24	0.109				-56.60	-9.40	1400	36 44 32.97	140 29 51.74	242
25	0.83	0.80			-52.70	-8.88	780	36 47 22.23	140 20 50.07	143
26	0.851	0.783			-53.00	-8.90	300	36 47 9.41	140 20 34.55	134
27					-49.30	-8.01		36 47 9.41	140 20 34.55	134
28	0.266	0.323			-54.60	-9.07		36 45 30.31	140 23 42.25	99
29	0.269	0.477			-53.80	-9.00		36 45 30.31	140 23 42.25	99
30					-54.60	-8.88	2	36 45 50.39	140 18 14.50	189
31	0.666	0.676			-49.70	-8.42	1	36 41 41.25	140 24 9.49	82
32					-55.70	-9.02	800	36 45 38.20	140 25 0.82	227
33	0.308				-53.60	-8.54	1300	36 39 38.40	140 43 7.11	3
Fukushima Prefecture										
34	0.579	1.285			-63.50	-10.44		37 23 21.80	140 18 46.14	271
35					-62.70	-10.34	50	37 22 59.34	140 13 35.76	442
36		0.724			-60.10	-9.84	1	37 19 32.97	140 31 19.80	596
37		9.736			-56.60	-8.89		37 19 8.52	140 23 41.02	265
38	0.157	5.739			-53.90	-8.47	8	37 19 5.94	140 23 40.58	267
39	0.488				-67.30	-10.48	900	37 20 54.53	140 18 14.77	260
40	0.676				-66.80	-10.62	1000	37 24 7.89	140 18 6.50	278
41	1.445		1.164		-59.20	-9.43	600	37 21 26.09	140 20 45.85	237
42	0.915	0.773			-65.50	-10.53		37 21 29.14	140 20 40.84	238
43	0.454				-65.20	-10.27	600	37 20 51.25	140 21 36.48	244
44	0.778				-65.20	-10.97		37 23 16.68	140 13 15.06	420
45	0.794				-67.40	-10.44	870	37 24 18.67	140 20 12.67	252
46					-64.60	-10.79	30	37 25 30.16	140 12 40.25	538
47					-71.40	-11.46	1300	37 23 5.16	140 5 34.69	532
48	0.87	1.102			-66.00	-10.34		37 22 47.15	140 21 36.48	245
49	0.75	0.697			-67.20	-10.56	1055	37 23 43.95	140 20 20.32	253
50	0.249			1.069	-66.10	-10.57	700	37 21 18.95	140 20 18.56	239
51					-66.50	-10.54	800	37 24 20.47	140 21 43.64	241
52	0.072				-51.30	-8.68	2	37 10 26.05	140 56 52.57	109
53					-50.10	-8.54	8	37 10 24.38	140 56 53.45	117
54					-50.80	-8.67	10	37 10 24.38	140 56 53.45	117
55					-50.20	-8.38	15	37 10 53.28	140 57 0.00	88
56		1.463			-48.00	-8.29	6	37 9 53.44	140 57 46.27	39
57		3.481			-49.40	-8.34	80	37 7 37.42	140 56 4.45	39
58					-45.20	-7.61	0	37 7 38.75	140 57 18.37	29
59		0.131			-51.20	-8.70		37 4 56.68	140 47 46.73	257
60	5.532				-47.80	-8.11		37 5 11.64	140 58 59.53	0
61	0.094	13.6		0.835	-46.60	-7.79		37 3 33.40	140 53 5.64	20
62	0.084	24.4		0.318	-47.50	-7.70		37 3 33.40	140 53 5.64	20
63	10.1				-35.60	-6.59	1500	37 1 15.70	140 58 20.46	1
64	2.69				-46.70	-7.92	600	37 0 26.56	140 51 10.37	22
65		3.565			-42.90	-7.47		37 0 44.92	140 55 8.86	45
66		0.171			-43.40	-7.60		37 0 44.92	140 55 8.86	45
67		0.16			-42.60	-7.66		37 0 44.92	140 55 8.86	45
68		1.028			-48.00	-8.03		37 0 28.75	140 43 12.42	128
69					-50.30	-8.47	1	37 3 7.97	140 48 7.78	157

No.	For Fig. 8	Sample name	sampling date	Temp. (°C)	pH	EC (μ S/cm)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	F (mg/l)
70		Koya-2	2001.11.16	14.3	10.4	390	3.432	12.3	205	0.29
71		Koya-3	2001.11.15	19.1	10.1	370	4.725	14.8	193.	0.392
72		Zuya	2001.11.15	15.4	8.1	370	6.284	58.9	122.	0.514
73		Kotaki	2001.11.14	16.0	7.0	90	40.8	270	179.	0.121
74		Harakida	2001.11.15	14.7	7.1	730	19.1	282.	132.	0.225
75		Kanchiyama	2001.11.15	9.6	6.7	280	15.7	73.5	37.0	0.067
76		Kajiro	2001.11.14	11.3	9.0	1810	316.	268.	334.	0.466
77		Jikiri	2001.11.14	13.1	7.3	590	13.5	221.	126.	0.194
78		Shimokawanoyu	2001.11.15	14.2	7.2	1400	83.0	435.	218.	0.27
79		Kawabe	2001.11.14	11.5	9.7	480	7.953	38.2	200.	0.518
80		Nishiki	2001.11.14	16.1	5.7	106	9.926	14.9	11.1	0.018
81		Shiroyone	2001.11.14	15.8	7.1	320	23.1	14.3	117.	0.073
82		Kinshoji-1	2001.11.06	12.1	6.0	38	1.627	4.306	13.7	
83		Kinshoji-2	2001.11.06	14.6	5.9	91	7.991	12.0	17.3	0.059
84		Mamegara Fudosen	2001.11.06	12.2	6.9	77	2.335	0.714	43.1	
85		Omura	2001.11.06	14.3	6.6	410	24.7	74.5	104.	0.04
86		Nittagawa	2001.11.13	25.5	8.9	1700	486.	1.283	149.	11.0
87		Serizawa	2001.11.06	48.4	9.0	510	23.7	2.008	259.	3.825
88		Kabaniwa	2001.11.13	14.6	7.3	200	16.3	6.437	78.1	0.032
89		Kori	2001.11.16	27.6	8.3	9800	1800.	1080.	218.	2.278
90		Shirasawa-1	2001.11.07	15.8	6.6	570	33.2	0.685	206.	0.248
91		Shirasawa-2	2001.11.07	15.8	7.0	240	26.4	13.5	51.3	0.061
92		Marunaka	2001.11.05	37.6	9.0	500	34.3	0.322	234.	3.627
93		Kagamiishi	2001.11.05	31.4	9.0	300	6.869	0.284	176.	1.588
94		Shin-Kikushima	2001.11.05	38.6	8.3	164	2.851	0.943	93.7	1.189
95		Yanaka	2001.11.05	14.4	7.2	114	1.155	1.969	75.2	0.109
96		Kitsuneuchi	2001.11.05	29.9	9.3	370	8.29		194.	1.359
97		Nakajima	2001.11.05	38.4	9.2	380	18.6	0.206	192.	1.804
98		Ayuri	2001.11.05	50.9	8.8	900	85.1	0.813	391.	6.001
99		Kan'nonyu	2001.11.05	53.6	9.2	520	33.1	1.777	250.	2.886
100		Tanakura	2001.11.08	27.1	9.6	290	1.127	2.865	167.	0.287
101		Takinosawa-1	2001.11.08	11.5	9.7	530	4.783	42.9	260.	1.266
102		Takinosawa-2	2001.11.08	10.8	9.7	360	3.088	27.9	154.	0.74
103		Higashidate	2001.11.07	26.6	10.1	470	28.1	25.0	150.	12.3
104		Tsukise	2001.11.07	13.6	8.2	810	17.9	2.316	483.	4.848
105		Yujimata-1	2001.11.07	37.2	9.8	210	4.523	10.9	82.6	0.82
106		Yujimata-2	2001.11.07	38.2	9.7	210	4.396	10.6	92.5	0.796
107		Shin-Yujimata	2001.11.07	29.2	9.7	147	3.734	7.456	74.0	0.469
108		Tanigawa	2001.11.07	14.3	10.0	210	2.694	10.3	103.	0.469
109		Shihonoyu	2001.11.07	28.6	9.8	260	7.927	17.2	109.	1.537
110		Yunota	2001.11.07	25.5	9.6	147	3.927	9.896	51.3	0.679
111		Bobata-1	2001.11.06	20.0	10.0	192	9.946	9.219	81.4	0.753
112		Bobata-2	2001.11.06	14.0	10.0	173	7.958	9.592	75.2	0.867
113		Bobata-3	2001.11.06	25.0	9.9	145	3.491	8.19	56.7	0.232
114		Hageyama	2001.11.06	16.3	6.3	78	2.607	6.235	29.6	0.032
115		Narigame	2001.11.06	14.9	7.0	120	4.60	1.953	58.6	0.077
116		Nekonaki	2001.11.07	14.1	10.0	160	5.048	9.512	75.7	0.335
117		Katakura	2001.11.06	13.7	7.0	131	5.752	3.607	52.5	0.045
118		Shionosawa-1	2001.11.07	20.7	9.8	128	3.899	8.881	63.5	0.237
119		Shionosawa-2	2001.11.07	13.7	6.9	73	1.892	0.482	34.5	0.054
120		Yotsutsuji	2001.11.06	13.9	6.1	101	6.111	6.352	22.2	0.098
121		Mayumi	2001.11.06	13.8	6.2	185	4.941	14.0	71.5	0.046
122		Kajikanosato	2001.11.07	11.5	6.1	139	3.421	6.055	46.8	0.014
123		Asakawa	2001.11.06	14.6	6.2	172	8.542	18.4	73.2	0.042
124		Nyudo	2001.11.07	12.6	10.4	380	22.6	6.073	134.	11.9
125		Babanoyu	2001.11.07	16.5	7.3	171	6.95	8.782	76.4	0.299
126		Saitonoyu	2001.11.08	12.9	6.5	230	9.659	26.2	74.0	0.062
127		Yawaraginoyu	2001.11.07	13.7	6.5	199	10.4	19.9	55.5	0.139
128		Yuzawa	2001.11.07	26.9	9.6	120	3.702	7.074	60.4	0.207
129		Hariyu	2001.11.07	16.5	9.5	115	4.363	7.511	41.5	0.131
130		Kanda	2001.11.08	14.7	9.3	128	10.8	5.978	59.8	1.032
131		Hidokoronoyu	2001.11.07	11.4	6.5	88	2.236	3.916	36.1	0.061
132		Kanameta	2001.11.08	14.3	6.7	350	6.461	7.248	184.	0.131
133		Izumi	2001.11.07	14.2	6.9	260	9.083	11.9	47.6	0.02
134		Hananoyu	2001.11.08	12.6	6.6	92	5.30		46.8	0.058
135		Oriki	2001.11.15	10.7	10.0	360	8.045	24.5	142.	0.423
136		Oriki-Menoyu	2001.11.15	13.0	3.0	800	9.84	263.	0.00	0.372
137		Naraha-Tenjinmosaki	2001.11.15	43.2	8.6	2600	674.	3.696	408.	0.709
138		Iwaido	2001.11.14	11.4	7.5	250	7.074	25.0	92.7	0.086
139		Tamanoyu	2001.11.14	25.8	9.8	210	6.519	17.9	65.3	0.584
140		Karo	2001.12.20	12.9	8.0	200	5.528	7.41	102.	0.058
141		Bekonoyu	2001.11.13	12.3	7.5	410	5.035	5.332	111.	0.061

阿武隈地域の温泉水の地球化学的研究

No.	Br (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO2 (mg/l)	PO4 (mg/l)	δD (‰)	δ18O (‰)	Well depth	Latitude ° ' "	Longitude ° ' "	Altitude (m)
70					-51.00	-8.70		37 2 38.79	140 48 31.55	113
71		0.197			-50.50	-8.76		37 2 17.66	140 48 33.22	108
72				4.678	-47.10	-7.96	2	36 58 54.77	140 45 59.06	69
73	0.15	0.855			-44.50	-7.58	10	36 57 47.58	140 53 52.09	4
74		9.622			-40.10	-7.26	4	36 57 32.11	140 54 4.84	4
75	0.076	10.6			-40.20	-7.16	20	36 57 56.64	140 53 58.59	36
76	1.318	4.581		0.712	-48.30	-7.82		36 58 24.38	140 55 17.43	19
77		0.725			-45.20	-7.64	0	36 57 49.53	140 56 6.08	29
78	0.777	2.069			-46.00	-7.56		36 56 0.47	140 51 44.91	4
79	0.071				-46.40	-7.96		36 54 10.55	140 43 55.75	38
80		8.076			-43.80	-7.31		36 54 4.69	140 45 56.60	30
81	0.114	0.81			-46.10	-7.79	4	36 53 24.77	140 44 31.17	31
82		2.467			-59.60	-9.34	0	37 8 2.89	140 12 37.05	357
83		4.771			-58.30	-9.30	80	37 8 2.89	140 12 37.05	357
84		3.958			-55.80	-9.28	0	37 6 45.00	140 13 27.36	380
85		0.276			-55.60	-8.92	25	37 7 21.72	140 15 20.21	346
86	1.541				-54.20	-9.19	1100	37 39 50.20	140 55 11.15	55
87					-63.90	-10.22	800	37 16 26.80	140 21 24.79	275
88	0.09	4.652			-48.20	-7.95	5	37 44 24.57	141 0 23.91	38
89	6.809		0.531		-60.00	-10.22	1280	37 51 20.00	140 30 37.09	131
90	0.286	8.172			-54.20	-8.63	20	37 30 58.16	140 28 38.70	294
91	0.084	30.3			-62.10	-9.82	50	37 30 58.16	140 28 38.70	294
92	0.111	0.115			-64.00	-10.20	550	37 15 5.51	140 20 30.73	267
93				0.636	-65.40	-10.40	600	37 15 21.48	140 21 2.81	271
94				1.169	-65.30	-10.33		37 13 0.86	140 19 27.10	266
95				0.203	-59.90	-9.32	110	37 4 10.00	140 16 34.92	343
96				0.176	-65.10	-10.25	970	37 6 6.33	140 21 56.87	325
97	0.093	0.451		0.217	-64.40	-10.28	1000	37 8 58.28	140 21 11.95	295
98	0.398				-63.80	-10.07	800	37 11 24.61	140 20 12.19	294
99	0.272				-64.10	-10.04	800	37 13 2.46	140 19 10.66	258
100					-60.10	-9.60	407	37 2 13.05	140 24 31.11	342
101		0.244			-54.40	-8.78		36 51 58.52	140 24 59.02	164
102		1.382			-52.20	-8.41		36 51 59.10	140 24 58.32	164
103	0.113				-58.30	-9.72	1000	36 52 8.05	140 25 32.46	158
104		0.533			-57.10	-9.36	10	36 58 7.97	140 26 49.45	253
105					-56.80	-9.35	0	36 53 30.94	140 28 29.39	478
106					-57.80	-9.39	50	36 53 33.67	140 28 30.88	493
107		1.559			-56.30	-9.27	0	36 53 18.36	140 28 48.46	509
108					-58.20	-9.58	1	36 56 28.98	140 28 1.66	427
109					-57.00	-9.49		36 54 29.30	140 28 39.76	498
110					-58.40	-9.65	9	37 1 42.42	140 30 41.53	450
111					-59.90	-9.73	80	37 10 22.62	140 28 10.71	319
112					-59.50	-9.85	0	37 10 11.84	140 28 20.51	299
113					-58.50	-9.65		37 9 48.98	140 28 13.65	291
114		2.372			-54.50	-9.10	5	37 10 10.31	140 26 48.05	311
115		1.254			-56.40	-9.20	10	37 9 12.81	140 25 6.45	296
116		0.263			-61.50	-9.86	5	37 7 56.41	140 26 20.10	287
117		6.35			-55.30	-9.06		37 8 5.63	140 27 4.92	318
118					-58.00	-9.63		37 4 58.32	140 28 15.76	429
119		0.198	0.034		-56.10	-9.47		37 4 58.32	140 28 15.76	429
120		8.562			-59.00	-9.49	5	37 14 16.99	140 29 46.68	486
121		7.09			-52.60	-8.83	10	37 11 13.91	140 32 40.49	460
122	0.07	3.547			-59.10	-9.53	5	37 14 21.95	140 33 54.58	489
123	0.097	6.482			-54.10	-8.47		37 5 46.09	140 25 27.71	298
124					-63.40	-10.26	2	37 1 24.30	140 34 4.03	423
125	0.065	3.073			-61.90	-10.00	300	37 26 0.31	140 29 35.21	319
126	0.085	18.1	0.078		-58.80	-9.59	3	37 23 29.69	140 27 44.30	269
127	9.627				-59.00	-9.63	80	37 25 57.58	140 29 33.63	341
128					-61.80	-9.87	2	37 15 42.54	140 40 50.66	472
129					-62.10	-9.90	10	37 18 34.10	140 39 45.39	439
130					-62.30	-10.25		37 26 15.78	140 37 54.30	436
131		2.047			-60.70	-9.85		37 28 47.42	140 33 51.68	433
132	0.126	2.334			-59.40	-9.43	9	37 27 4.61	140 31 10.75	356
133	0.074	29.6			-61.70	-9.79	9	37 28 20.47	140 34 38.00	413
134		5.187			-59.60	-9.92	50	37 27 1.09	140 34 17.39	433
135					-50.00	-8.62	0	37 11 52.34	140 57 32.39	105
136		0.367			-42.60	-7.57	0	37 11 35.47	140 57 39.64	72
137	3.335				-50.10	-8.40	783	37 15 56.76	141 1 2.67	36
138		0.32		0.491	-48.00	-8.23	0	37 19 5.78	140 58 54.65	90
139					-52.20	-8.92		37 24 35.39	140 55 1.26	184
140		3.974			-51.50	-8.76	0	37 51 25.63	140 52 21.65	143
141					-50.00	-8.44	0	37 42 21.84	140 55 11.81	56

No.	For Fig. 8	Sample name	sampling date	Temp. (°C)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	F (mg/l)
142		Kazaananoyu	2001.12.20	10.0	7.3	220	5.218	8.71	133.	0.04
143		Kawagonoyu	2001.11.13	8.7	6.6	75	12.4	2.384	13.6	
144	○	Naraha-Haguroyama	2001.11.15	36.5	7.7	>20000	12900.	1.341	51.8	
145		Tenzannoyu	2001.11.14	19.8	10.4	310	10.9	11.1	144.	2.688
146	○	Sakuranoyu	2001.11.15	39.1	7.8	>20000	10900.	2.143	22.0	
147		Utsumine	2001.11.06	14.5	6.1	186	14.0	14.2	43.1	0.029
148		Deguchi	2001.11.14	14.1	4.0	1210	67.2	543.	0.00	0.412
149		Baba	2001.11.14	14.5	6.6	125	8.433	11.8	34.5	0.058
150		Ohara	2001.11.14	12.8	7.8	200	4.328	6.982	98.6	0.058
151		Setogaro	2001.11.16	11.3	6.6	61	3.487	2.545	13.4	0.052
152		Nakago	2001.11.09	35.6	8.5	300	148.	1420.	30.8	7.643
153		Skypalace Tokiwa	2001.11.08	11.7	6.5	94	3.462	2.186	37.4	0.038
154		Kobo	2001.12.19	12.0	7.6	75	2.508		45.2	0.05
155		Hoshonomura Fureai	2001.12.19	11.3	6.8	88	3.612	4.782	31.7	0.068
156		Ippai	2001.11.13	11.5	8.1	220	7.613	12.6	107.	0.08
157		Ukon	2001.11.13	13.1	6.5	210	12.6	1.441	52.3	0.04
158		Ryozen Yusuinosato	2001.12.20	10.7	8.0	59	2.442	0.506	30.8	0.03
159		Noda	2001.11.16	28.1	8.8	420	41.1	44.6	109.	3.353
160	○	Sendan	2001.11.14	31.0	7.3	>20000	14400.	4.628	22.0	
161		Namezu	2001.12.19	17.9	9.4	126	6.835	7.487	57.9	1.147
162		Midoriya	2001.12.19	12.8	6.3	3100	27.2	27.6	98.6	
163		Chomeisui	2001.11.14	12.8	7.8	39	2.422	0.185	21.0	0.049
164		Nukui	2001.12.19	15.2	8.6	138	4.035	9.666	57.4	0.182
165		Tennogawa-Tron	2001.11.14	8.6	7.5	47	2.255	0.934	17.3	0.031
Miyagi Prefecture										
166		Aoba	2001.11.13	22.1	9.8	156	4.282	5.967	62.2	1.42
167		Saikawa	2001.11.13	20.3	9.6	98	3.674	3.824	53.5	0.176

また、本来温泉の熱階級は自然状態で湧出している温泉に対して用いる指標である (Fukutomi, 1961)。常磐湯本温泉の自然状態での放熱量は、(1)近傍に位置する常磐炭田の開発の始まりが江戸時代の1850年代にまで遡ること (いわき市史編さん委員会, 1975, p.526), (2)明治38年 (1905年)頃始まった温泉湧出量の減少後に湧出量の測定を開始していること (温度測定は行われていない), (3)この段階で既に温泉は自然湧出ではなくすべて18～45m (10間～25間), 最高115m (63間)の掘削井より湧出あるいは汲湯していること (中村, 1909) などから、完全に復元することは不可能であると考えられる。ただ、中村 (1909) が記載した湯本温泉原泉位置図では、原泉が幅80m, 長さ500mの範囲内に南北2群あり、両群とも3列の配列を見させていること、また、地質調査所 (1914) が記載した湯本温泉原泉位置図では、湯本断層の直上に原泉群が位置すること、原泉群を取り囲むように江戸時代から温泉宿として栄えてきた湯本の村落があること、湯本の村落を通る水戸街道が原泉群近傍で、原泉群を避けるように平行する2道になっていることなどから、温泉坑井群は元々自然湧出していた場所の近傍に分布して

いることが考えられる。中村 (1909) が記録した温泉湧出量の最大値は849 ℓ /min (4.7石/分)である。水温を現在の常磐湯本温泉と同じ60℃程度であったと仮定すると、放熱量は10^{7.7}cal/minとなり、温泉の熱階級はⅢである。熱階級Ⅲの放熱量の上限は10^{8.0}cal/minであり、水温から逆算される温泉水の湧出量の上限は1667 ℓ /minとなる。Fig. 2に、中村 (1909) が記録した明治38年 (1905年) 10月から明治42年 (1909年) 4月までの湯本温泉の湧出量の変化を示した。最初の1年間の湧出量の減少が、後半の湧出量の減少より大きく、直線的に約300 ℓ /minも減少していることがわかる。中村 (1909) には、温泉湧出量の減少が始まったのは明治38年5月と記載されている。温泉湧出量の減少率が、明治38年5月から10月までとそれ以降の1年間とが同様であったと仮定すると、明治38年5月当時の湧出量は975 ℓ /min程度になることがFig. 2から読み取れる。水温に著しい変化がなければ、温泉熱階級はⅢの範囲内である。福富 (1965) は、温泉熱階級がⅢ以下の場合、地殻熱流量による加熱機構のみで温泉放熱量を説明できることを示した。ここでいう地殻熱流量とは、地球内部から地表に向かう熱の流れの意味であ

No.	Br (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO2 (mg/l)	PO4 (mg/l)	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	Well depth	Latitude	Longitude	Altitude (m)
142		0.30			-50.60	-8.67	0	37 41 14.88	140 55 11.11	61
143		0.575			-39.40	-7.09	0	37 40 2.73	140 58 28.46	19
144	50.7		22.7		-26.70	-4.14	1200	37 14 49.38	141 0 0.70	27
145					-63.70	-10.46	1500	37 20 0.31	140 48 45.00	411
146	34.1		13.2		-32.30	-3.51	1500	37 21 52.03	140 59 54.77	59
147	0.093	15.2			-57.00	-9.43	107	37 17 35.63	140 26 0.76	280
148					-46.40	-7.70		37 30 42.50	140 58 45.07	39
149	0.083	7.139			-49.20	-8.18		37 35 47.58	140 55 22.62	61
150		0.837			-49.00	-8.46	0	37 39 58.40	140 52 13.08	122
151		0.834			-45.70	-8.08		37 10 58.24	140 49 8.77	160
152	0.323				-50.00	-8.87	800	36 45 9.57	140 42 40.39	41
153		5.803			-63.70	-10.15	25	37 28 9.69	140 39 57.83	702
154		0.174			-61.20	-10.09		37 39 52.34	140 44 14.12	476
155		1.767			-60.00	-9.57	28	37 21 7.77	140 39 55.02	521
156		2.943		2.992	-52.70	-8.68		37 52 15.55	140 53 34.07	52
157	0.128	48.4	0.096		-51.30	-8.31		37 52 54.45	140 51 55.02	180
158					-63.00	-10.44	0	37 47 4.38	140 40 34.39	587
159	0.111				-72.80	-11.26	1350	37 49 10.39	140 30 37.71	54
160	42.3				-30.30	-4.80	1600	37 27 9.22	141 0 58.36	8
161					-64.00	-10.18	3	37 32 20.31	140 38 8.59	416
162		6.444			-61.10	-9.52	7	37 36 57.89	140 33 38.41	268
163					-54.20	-9.01		37 24 25.00	140 51 11.34	509
164		1.384			-64.60	-10.32		37 37 27.50	140 33 50.23	324
165		0.322			-51.60	-8.64		37 3 21.02	140 42 41.40	235
Miyagi Prefecture										
166					-55.80	-9.43		37 49 56.84	140 50 14.69	96
167					-55.70	-9.33		37 48 53.71	140 50 32.23	192

Fig. 2 Change of discharge rates of hot spring waters at Iwaki-Yumoto hot spring from 1905 to 1910

り、地球内部にある地球創生時に閉じこめられた熱、放射性物質の崩壊による熱などが熱伝導などにより地表に徐々に運び出されてくる現象のことである。このことは、常磐湯本温泉には火山性熱源（例えば、中村・安藤、1953）の様な特別な熱源を考える必要がないことを意味している。

阿武隈地域における温泉放熱量は、常磐湯本温泉からの熱量が際立って大きく、ついで大きな放熱量を示す温泉はすべて火山フロントの近傍にある温泉である（地質調査所（1980）を参照）。最大の放熱量を示した常磐湯本温泉においても地殻熱流量による加熱機構のみで説明が出来ることか

ら、阿武隈地域西部の火山フロントの近傍にある温泉を除く全ての温泉の熱源は、地殻熱流量による加熱機構のみで説明が可能であると考えられる。

2. 温泉水の化学組成

Fig. 3(a) ~ 3(c) に、阿武隈地域の温泉水の塩化物イオン (Cl^-) 濃度を、100mg/l, 500 mg/l, 1,000 mg/l および 5,000 mg/l で、硫酸イオン (SO_4^{2-}) 濃度を、100mg/l, 500 mg/l および 1,000 mg/l で、重炭酸イオン (HCO_3^-) 濃度を、100mg/l, 250mg/l および 500mg/l で区分した濃度分布図をそれぞれ示した。 Cl^- 濃度の最高濃度の温泉はせんだん温泉 (14,400mg/l, 福島県双葉町), SO_4^{2-} 濃度の最高濃度は鶉の岬荘 (1450 mg/l, 茨城県十王町), HCO_3^- 濃度の最高濃度はうねめ温泉 (825mg/l, 福島県郡山市)において、それぞれ観測されている。

Fig. 3(a) から、 Cl^- 濃度が 500mg/l を越える温泉は、内陸部にあるこおり温泉 (1800mg/l, 福島県桑折町, 以下桑折温泉) 以外のすべての温泉が海岸部に存在すること、100mg/l を越える温泉は海岸部以外に、内陸部の郡山市西部および茨城県大子町に存在していることがわかる。また Fig.

Fig. 3(a) Distribution map of chloride ion concentrations of hot spring waters taken from Abukuma area

Fig. 3(b) Distribution map of sulfate ion concentrations of hot spring waters taken from Abukuma area

3(b) から、 SO_4^{2-} 濃度が $1,000\text{mg}/\ell$ を越える温泉は、海岸部の茨城県北茨城市に 2 温泉、内陸部に桑折温泉がそれぞれ存在すること、 $100\text{mg}/\ell$ を越える温泉は海岸部以外に、内陸部の郡山市西部および大子町に存在していることがわかる。Fig. 3(a) と、Fig. 3(b) を比較すると、海岸部、内陸部の桑折町、郡山市西部および大子町において Cl^- 濃度、 SO_4^{2-} 濃度とも高くなっており、両者の高濃度地域が概略一致していることがわかる。ただし、海岸部における Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の分布を詳細に見ると、 Cl^- 濃度の高い部分が福島県いわき市から双葉郡など、より北方にあるのに対し、 SO_4^{2-} 濃度の高い部分は茨城県北茨城市など、より南方にあるなど、必ずしも完全に一致しているわけではないこともわかる。

一方、Fig. 3(c) から、 HCO_3^- 濃度が $500\text{mg}/\ell$ を越える温泉は、海岸部の茨城県高萩市および北茨城市に存在すること、 $100\text{mg}/\ell$ を越える温泉は、阿武隈高原部以外の場所に存在していることがわかる。また Fig. 3(c) を、Fig. 3(a) および Fig. 3(b) と比較すると、 HCO_3^- 濃度と Cl^- 濃度および SO_4^{2-} 濃度が高濃度である地域が一致しないことがわかる。

Fig. 4(a) ～ 4(c) に、阿武隈地域の温泉水の Cl^- 、 SO_4^{2-} および HCO_3^- 各濃度と、試料採取標高の関係を示した。坑井深度が明らかな場合は、坑底から温泉水が湧出していると仮定して、(試料採取標高-坑井深度)の位置に Cl^- 、 SO_4^{2-} および HCO_3^- 濃度をそれぞれプロットした。

Fig. 4 ～ Fig. 9 の凡例は、温泉の化学・同位体

Fig. 3(c) Distribution map of bicarbonate ion concentrations of hot spring waters taken from Abukuma area

組成と地域的な分布との関連を明確に表示することを目的として、以下のように区分した。

- (1) 塩化物イオン濃度が 5,000mg/l 以上ある高塩濃度の温泉。すべての温泉が(2)の地域の海岸部にある。
 - (2) 試料採取標高が 200m 以下の温泉。阿武隈高原の東側の海岸部と、阿武隈高原の南西側で八溝山地との間（大子地域）に存在する。
 - (3) 試料採取標高が 200m 以上の温泉。阿武隈高原地域と、阿武隈高原の西側で脊梁山脈との間（阿武隈川西岸地域）に存在する。阿武隈高原地域の面積的割合が他地域と比べ大きいので、便宜的に東経 140.5 度を境に東側と西側に区分した。
- (2)と(3)により、温泉は東から西へ順に、(a) 海岸部、(b) 阿武隈高原（東側）地域、(c) 阿武

Fig. 4(a) Vertical variation of chloride ion concentrations of hot spring waters taken from Abukuma area

- △ : Hot spring waters which contain higher than 5,000mg/l chloride ion All hot springs in this category are in coastal area
- : Hot springs in coastal area
Sampling altitude < 200m, Longitude $\geq 140.625^\circ$ E
Latitude < 37° N (⊗), 37° N $\leq$ Latitude < 37.4° N (⊙), Latitude $\geq 37.4^\circ$ N (◎)
- ◇ : Hot springs in Daigo area
Sampling altitude < 200m, Longitude < 140.625° E, Latitude < 37° N
- : Hot springs in the eastern part of the Abukuma highlands
Sampling altitude > 200m, Longitude $\geq 140.5^\circ$ E
Latitude < 37° N (⊗), 37° N $\leq$ Latitude < 37.4° N (⊙), Latitude $\geq 37.4^\circ$ N (◎)
- ◇ : Hot springs in the western part of the Abukuma highlands
Sampling altitude > 200m, Longitude < 140.5° E
 37° N $\leq$ Latitude < 37.4° N (⊗), Latitude $\geq 37.4^\circ$ N (⊙)
- ▽ : Hot springs in the western side of the Abukuma River
Sampling altitude > 200m
Longitude < 140.4° E and Latitude $\geq 37^\circ$ N, or
Longitude < 140.6° E and Latitude $\geq 37.8^\circ$ N
- : Iwaki-Yomoto hot spring (Nakamura and Ando, 1953)

Fig. 4(b) Vertical variation of sulfate ion concentrations of hot spring waters taken from Abukuma area Same legends with Figure 4(a).

Fig. 4(c) Vertical variation of bicarbonate ion concentrations of hot spring waters taken from Abukuma area Same legends with Figure 4(a).

隈高原（西側）地域、および (d) 阿武隈川西岸地域に区分される。大子地域は (c) の阿武隈高原（西側）地域の最南部に位置する。

(4) 温泉の化学・同位体組成の南北方向の違いを示すため、(a) 海岸部、(b) 阿武隈高原（東側）地域、および (c) 阿武隈高原（西側）地域の温泉を、北緯 37 度以南、北緯 37-37.4 度および北緯 37.4 度以北に区分した。大子地域の温泉は北緯 37 度以南に区分された。

(1)～(4)により、研究地域の温泉は 11 の地域に区分された。表示する印の詳細は Fig. 4(a) の説明に書き込んである。

また、Fig. 4(a)～4(c) には、中村・安藤（1953）が示した常磐湯本温泉の温泉湧出深度と Cl^- 、

SO_4^{2-} および HCO_3^- 各濃度の関係も併せて示した。

Fig. 4(a) から、 Cl^- 濃度は濃度幅があるものの深度とともに増加する傾向があることがわかる。また、Fig. 4(b) から、 SO_4^{2-} 濃度は -1500m 以深では最高でも 50mg/l 程度と全般的に低濃度であるが、それ以浅では最高濃度が 1000-3000mg/l から非常に低濃度の部分まで非常に濃度幅が広い状態が最上部まで続いていることがわかる。一方、Fig. 4(c) から、 HCO_3^- 濃度は -500 ~ 0m 付近で濃度が最高 800mg/l と高く、0m 以浅では深度とともに濃度が徐々に増加し、-500m 以深では濃度が徐々に低下する傾向があることがわかる。このような濃度変化のため、阿武隈地域では、最深部に Cl 型、その上部に Cl-SO_4 型あるいは Cl-HCO_3 型、

その上部に $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型など Cl , SO_4 , HCO_3 三者が関連する泉質, 最上部に $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ 型, $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ 型あるいは SO_4 型という順に, 温泉の泉質が変化していることになる。中村 (1962) は, 常磐湯本温泉では, 常磐炭田の坑内深部から Cl 型および Cl-SO_4 型, 一部に Cl-HCO_3 型温泉が, 古洞から $\text{Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$ 型温泉水が, 浅部坑道から $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ 型, 一部に SO_4 型地下水が, それぞれ湧出することを示した。深度に対する泉質変化の順序が Fig. 4(a) ~ 4(c) から示唆される泉質変化の順序と全く同じであることがわかる。

Fig. 5 に, 阿武隈地域の温泉水の Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係を示した。Fig. 3(a) および Fig. 3(b) に示した両濃度の地理的分布からも推定されたように, Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度との間には 2 つの関係, すなわち (1) 濃度幅は広いが Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度との間に正の相関関係がある温泉が存在すること, (2) 海岸部では Cl^- 濃度の高さに比べ, SO_4^{2-} 濃度が著しく低い温泉が存在することが見て取れる。Jenden and Gieskes (1984) は, 海洋堆積物中の間隙水の化学組成を報告した。 Cl^- 濃度が海水程度であるのに対し, SO_4^{2-} 濃度の多くは分析限界以下であった。加藤・梶原 (1986) および加藤ほか (2000) は, 新潟から秋田地域に掘削された石油井から産出する油田鹹水の化学組成を報告した。Jenden and Gieskes (1984) と同様に, Cl^- 濃度が海水程度であるのに対し, SO_4^{2-} 濃度は高々 100mg/l 程度, 多くは分析限界以下であった。これらのことは, Cl^- 濃度が高く, SO_4^{2-} 濃度が著しく低い温泉水は, 間隙水あるいは油田鹹水と類似した性質を持つ, 地層中に封入されている塩水を起源としている可能性を示唆している。

また Fig. 5 で, Cl^- 濃度, SO_4^{2-} 濃度とも 1000mg/l を越える位置にプロットされているのは桑折温泉のみである。泉質は Na-Cl-SO_4 型であり, 桑折町がいわゆるグリーンタフ地域 (例えば, 日本の地質「東北地方」編集委員会, 1989, 197p.) に位置していることを考えると, 本温泉は, 地下水が地層中の塩化物塩, 硫酸塩鉱物を溶出させることにより形成される温泉 (Matsubaya *et al.*, 1973), い

Fig. 5 The relation between chloride and sulfate ion concentrations of hot spring waters taken from Abukuma area
Same legends with Figure 4(a).

わゆるグリーンタフ型温泉 (Sakai and Matsubaya, 1974) である可能性があると考えられる。Fig. 6 に, Sakai and Matsubaya (1974) と松葉谷 (1981) が典型的なグリーンタフ型温泉であるとした大鰐温泉 (中村, 1962), 鳥取周辺の温泉 (比留川, 1981) および青函隧道坑内水 (Mizukami *et al.*, 1977) の Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係をそれぞれ示した。グリーンタフ型温泉に分類されている温泉は, SO_4^{2-} 濃度の最高濃度は 1000mg/l 程度であるが, Cl^- 濃度は 100mg/l から $15,000\text{mg/l}$ まで大きな濃度範囲に分布すること, すなわち Cl-SO_4 型のみならず, Cl 型から SO_4 型まで幅広い泉質に分布することがわかる。中村 (1962) は, 大鰐温泉では Ca-SO_4 で特徴づけられる温泉系と, Na-Cl-HCO_3 で特徴づけられる温泉系が混合して形成されていると考えている。

Fig. 6 には, Fig. 5 で示した阿武隈地域温泉水および常磐湯本温泉水 (中村, 1962) の Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係を併せて示した。阿武隈川の西岸地域 (いわゆるグリーンタフ地域) に分布する温泉の Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係と, その東部, すなわち阿武隈地域の海岸部 (Fig. 6 の $\otimes$, $\odot$ および $\odot$ 印) と, 阿武隈高原と八溝山地に挟まれた大子地域にある非グリーンタフ地域海成層から得られる温泉 (Fig. 6 の $\triangle$ 印) の Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係とは, 非常に類似しており, 泉質的に

Fig. 6 The relation between chloride and sulfate ion concentrations of hot spring waters taken from Joban-Yomoto, Seikan Tunnel, Owani and Tottori hot spring

○: Iwaki-Yumoto hot spring, ⊙: Brine from Seikan Tunnel,
 ⊖: Owani hot spring, ⊗: Hot springs in Tottori area
 Other legends are same with Figure 4(a)

両者を区別することが出来ないことがわかる。ここから、 Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の両方が高濃度の温泉は、グリーンタフ型温泉と同様の形成機構、すなわち地下水が地層中の塩化物塩、硫酸塩鉱物を溶出させることにより形成される温泉である可能性を示唆している。ただ、Fig. 4(a) 図に示したように、 Cl^- 濃度は深度とともに一方的に増加する傾向があり、温泉水中の塩化物イオンを供給しているのが、ある深度までは塩化物塩の地下水による溶出、ある深度からは堆積岩中に封入されている間隙水、あるいは油田鹹水に類似の性質を持つ塩水の流出というような区別を考えるより、堆積岩中に封入されている塩水が地下水により様々な割合に希釈されたものである可能性についても考慮すべきであるとする。

3. 温泉水の水素・酸素同位体比

Fig. 7 に、阿武隈地域の温泉水の水素同位体比 (δD 値) の分布を示した。 δD 値の最大値は海岸部にある五浦温泉 (-24‰, 茨城県北茨城市)、最小値は阿武隈川の西岸地域にある野田温泉 (-73‰, 福島県伊達町) において、それぞれ観測されている。Fig. 7 から、(1) 海岸部に δD 値が大きな

Fig. 7 Distribution map of hydrogen isotopic ratios of hot spring waters taken from Abukuma area

温泉が多いこと、すなわち海岸部の温泉の形成には天水以外に、例えば海水のような大きな水素同位体比を持つ水が関与していること、および(2) 阿武隈川の西岸地域の温泉の δD 値が他の地域に比べ非常に小さいことがわかる。阿武隈川の西岸地域の温泉は、地形から考えて涵養域が阿武隈高原側ではなく、脊梁山脈側であることが推定され、内陸度や涵養標高を考えてもより小さな同位体比を持つ天水が供給される可能性が十分考えられる。実際、Mizota and Kusakabe (1994) の Fig. 2 から、脊梁山脈側の地下水が 10 ~ 20% も水素同位体比が小さいことが見て取れる。

Fig. 8(a) および Fig. 8(b) に、阿武隈地域の温泉水の δD 値と酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$ 値) の関係を示

した。Fig. 8(b) には、塩化物イオン濃度が 500mg/ℓ 以下の温泉のみ示した。Fig. 7 と同様に、(1) 塩化物イオン濃度が概略 5000mg/ℓ 以上の温泉のみが非常に大きな δD 値および $\delta^{18}O$ 値を持つこと、および(2)例えば桑折温泉など、阿武隈川の西岸地域の温泉の δD 値および $\delta^{18}O$ 値は非常に小さいという涵養域の違いを反映した現象が見られることがわかる。

Fig. 8(a) で、 δD 値および $\delta^{18}O$ 値が他の地域と著しく異なり、非常に大きな値を示すのは、茨城県北茨城市にある 3 温泉 (Table 1 に●で表示、以下北茨城温泉群) と、福島県双葉郡にある 3 温泉 (Table 1 に○で表示、以下、双葉温泉群) である。北茨城温泉群は δD 値と $\delta^{18}O$ 値との間に良い相関が見られる。北茨城市内の海岸近傍にある Cl^- 濃度が 500mg/ ℓ 程度以上ある 7 温泉 *4 (Fig. 8(a) に灰色印で、Table 1 に●で、それぞれ表示) の δD 値と $\delta^{18}O$ 値を用いて両者の関係を求めると、

$$\delta D = 5.35 \times \delta^{18}O - 4.6 \text{ (R}^2 = 0.98\text{)}$$

という、非常に良い相関が見られる。北茨城市北隣の福島県いわき市にある Cl^- 濃度が $500\text{mg}/\ell$ 以上ある 3 温泉 (Table 1 に◎で表示, 以下, いわき温泉群) も, 上述の回帰直線に近い位置に δD 値と $\delta^{18}\text{O}$ 値とがプロットされることがわかる。一方, 双葉温泉群の内, 楢葉, 双葉両温泉の δD 値と $\delta^{18}\text{O}$ 値とは, 北茨城温泉群から求めた回帰直線のごく近傍にプロットされるが, 富岡温泉は, $\delta^{18}\text{O}$ 値が相対的に大きな位置にプロットされることがわかる (Fig. 8(a))。双葉温泉群には, 北茨城-いわき温泉群とは性質が異なる温泉水が存在している可能性を示唆していると考えられる。

Cl⁻濃度が高い温泉のうち桑折温泉は、 δD 値が -60‰ 、 $\delta^{18}O$ 値が $-$

10.2%と、いずれの値也非常に小さく、周辺部の Cl⁻ 濃度が 500mg/ℓ 以下の低塩濃度の温泉と同様、meteoric water line の近傍にプロットされることがわかる (Fig. 8(a))。Matsubaya *et al.* (1973) が示した、日本海側に多く見られ、Cl⁻ 濃度は高いが、その安定同位体組成が天水と類似しているという、グリーンタフ型温泉 (Sakai and Matsubaya, 1974) と共通した特徴を持つことが水素・酸素同位体比からも推定される。

Fig. 8(b) から、Cl⁻濃度が 500mg/ℓ 以下の温泉は、その大部分が δD 値と $\delta^{18}O$ 値の比が約 8 の相関線の近傍に位置していることがわかる。各温泉の d 値 (δD 値 $-8 \times \delta^{18}O$ 値) は、最大値 23, 最小値 14, 平均値 17.4 である。この値は、関東平野の河川水の d 値 (大部分 10 ~ 12, 稲村・安原, 2003) と、日本海側の冬季の降水の平均の d 値 (26, 松葉谷, 1981) との中間的な値である。NEDO (1991) は、阿武隈地域の西にある磐梯地域の河川水の δD 値と $\delta^{18}O$ 値を報告している。計算される d 値は、最大値 29, 最小値 7 と、やや分布範囲が広いが、平均値は 18.8 であり、今回阿武

Fig. 8(a) The relation between hydrogen and oxygen isotopic ratios of hot spring waters taken from Abukuma area

Same legends with Fig. 4(a). A regression line is calculated from seven isotopic data of hot springs marked gray and "Kitaibaraki" in the diagram.

*4: 各温泉はすべて海岸から 1km 以内に位置している。また、各温泉の Cl 濃度は 1 温泉が 350mg/l である以外はすべて 500mg/l 以上。

Fig. 8(b) The relation between hydrogen and oxygen isotopic ratios of hot spring waters taken from Abukuma area, which contain less than 500mg/l chloride ion. Same legends with Figure 4(a).

隈地域の温泉水から得られた δ 値とほぼ同等である。ここから、 Cl^- 濃度が低い温泉の水の起源は基本的には天水であると考えられる。

Fig. 9(a) および Fig. 9(b) に、阿武隈地域の温泉水の Cl^- 濃度と、 δD 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値それぞれの関係を示した。Fig. 9(a)、9(b) には、海洋堆積物中の間隙水 (Jenden and Gieskes, 1984)、油田鹹水 (加藤・梶原, 1986; 加藤ほか, 2000) および松之山

Fig. 9(a) The relation between hydrogen isotopic ratios and chloride ion concentrations of hot spring waters taken from Abukuma area. Same legends with Figure 8(a). A regression line is calculated from seven isotopic data of hot springs marked gray and "Kitaibaraki" in the diagram.

温泉水 (渡部ほか, 1996) の Cl^- 濃度と、 δD 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値それぞれの関係も同時に示した。Fig. 8 で良い相関が見られた北茨城温泉群では、Fig. 9(a)、9(b) でもやはり良い相関が見られる。Fig. 8 と同様に、北茨城市内の Cl^- 濃度が 500mg/l *⁴ 程度以上ある 7 温泉 (Fig. 9(a)、9(b) に灰色印で表示) の Cl^- 濃度と、 δD 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値を用いて関係を求めると、

$$\delta\text{D} = 2.8 \times 10^{-3} \times \text{Cl} - 47.0 \quad (R^2 = 0.98)$$

$$\delta^{18}\text{O} = 5.2 \times 10^{-4} \times \text{Cl} - 7.9 \quad (R^2 = 0.99)$$

という、非常に良い相関が見られる。回帰直線の Cl^- 濃度が高い方向への外挿は、加藤・梶原 (1986) および加藤ほか (2000) が示した油田鹹水の部分を通っている。また、北隣のいわき温泉群の Cl^- 濃度と、 δD 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値それぞれの関係も、北茨城温泉群から得られる回帰直線の近傍に位置している (Fig. 9(a)、9(b))。

一方、双葉温泉群の Cl^- 濃度と、 δD 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値との関係からは、北茨城—いわき温泉群で広範囲に見られるような、海洋堆積物間隙水あるいは油田鹹水的な Cl^- 濃度が高い部分と、天水的な Cl^- 濃度が低い部分の混合というような傾向がみられない。各温泉ごとに Cl^- 濃度が高い部分の化学的・同位体的性質が異なっていると考えられる。これ

Fig. 9(b) The relation between oxygen isotopic ratios and chloride ion concentrations of hot spring waters taken from Abukuma area

Same legends with Figure 8(a). A regression line is calculated from seven isotopic data of hot springs marked gray and "Kitaibaraki" in the diagram

は、双葉温泉群は、北茨城—いわき温泉群より相互に化学的・同位体的に孤立している可能性、すなわち相互の温泉貯留層の連続性が乏しいことを示唆していると考えられる。双葉温泉群近傍の Cl^- 濃度が低い温泉（ならは天神岬温泉水）を起点として双葉温泉群の各温泉水と結んだ外挿方向を見ると、楢葉、双葉両温泉は、 Cl^- 濃度と δD 値、 Cl^- 濃度と $\delta^{18}\text{O}$ 値、両者とも海洋堆積物のコア試料から得られた間隙水の方となっている。また詳細に見ると、双葉温泉の方がより Cl^- 濃度が高く、 δD 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値とも小さい間隙水の方になっている（Fig. 9(a), 9(b)）。一方、富岡温泉については、その外挿方向は Cl^- 濃度と δD 値から推定される端成分と、 Cl^- 濃度と $\delta^{18}\text{O}$ 値から推定される端成分が若干異なっている。Fig. 8 に示したように、 δD 値と $\delta^{18}\text{O}$ 値との関係も他の 2 温泉と異なっている。原因については不明である。今後の検討課題としたい。

V. 結 論

茨城県北東部、福島県東部および宮城県南東部にまたがる阿武隈地域の 167 ヶ所から温泉水試料を採取し、その化学組成および水の水素・酸素同位体比の分析および解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 25℃ 以上の温泉の大部分は、阿武隈花崗岩類、阿武隈変成岩などが分布する阿武隈地域の主要部以外の地域、すなわち (a) 主に第三紀の海成層からなる海岸部、(b) 阿武隈高原と八溝山地の間（太子地域）、および (c) 阿武隈川の西岸地域に分布している。本地域内で最大の温泉放熱量が報告されている常磐湯本温泉においても自然状態の温泉放熱量の熱階級はⅢであると推定でき、地殻熱流量による加熱機構以外の特別な熱源を考える必要はないと考えられることから、阿武隈川の西岸地域の火山フロント近傍にある温泉を除く、阿武隈地域の全ての温泉の熱源は、地殻熱流量による加熱機構で説明可能であると考えられる。

- (2) 阿武隈地域の温泉水の泉質は、最深部に Cl 型、その上部に Cl-SO_4 型あるいは Cl-HCO_3 型、その上部に $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型など、 Cl 、 SO_4 、 HCO_3 三者が関連する泉質、最上部に $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ 型あるいは SO_4 型という順に垂直的に変化している。

- (3) 阿武隈地域の温泉は、 Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度との関係から、(a) Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度との間に正の相関関係がある温泉、および (b) 海岸部の Cl^- 濃度の高さに比べ、 SO_4^{2-} 濃度が著しく低い温泉の 2 種類に区分できることがわかった。前者は地下水が地層中の塩化物塩、硫酸塩鉱物を溶出させることにより形成されるグリーンタフ型温泉あるいは類似の形成機構を持つ温泉である可能性が考えられる。一方後者は、堆積物間隙水あるいは油田鹹水と類似した性質を持つ、地層中に封入された塩水を起源としている可能性が考えられた。また、前者の温泉の塩化物イオンについては、地層中に封入された塩水が地下水により様々な割合に希釈された可能性を考慮する必要があると考えられた。

今後は、陽イオンデータも用いた水質形成機構の考察を行っていきたいと考えている。

謝 辞

温泉水試料・試料の収集、水温、pH、および電気伝導度の測定は笠井加一郎氏をはじめとする地熱エンジニアリング(株)の方々により、水の水素・酸素同位体比分析は上田 晃氏・川端明子氏をはじめとする三菱マテリアル(株)総合研究所の方々により、重炭酸イオン濃度の測定は筑波大学大学院の李盛源、Khan Md Hasmatullah 両氏によりそれぞれ行われた。2 名の査読者の方々からは論文の不備についての重要なご指摘をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

福島県厚生部 (1978)：福島県の温泉（昭和 53 年

- 版). 65p.
- 稲村明彦・安原正也 (2003): 関東平野と周辺山地の河川水の水素・酸素同位体比. 日本水文科学会誌, **33**, 115-124.
- いわき市史編さん委員会 (1975): いわき市史・第二巻 近世, いわき市, 872p.
- 加藤 進・梶原義照 (1986): 新潟地域油・ガス田付随水の水素および酸素の同位体組成. 石油技術協会誌, **51**, 113-122.
- 加藤 進・安田善雄・西田英毅 (2000): 秋田・山形地域油・ガス田の地層水の地球化学. 石油技術協会誌, **65**, 229-237.
- 角 清愛 (1977): 日本における温泉放熱量分布と地質構造区の関係. 地質調査所月報, **28**, 277-325.
- 高橋正明 (1997): 深部地熱系にはどんな水があるのかー熱水系の熱的・化学的分類についてー. 日本水文科学会誌, **27**, 95-103.
- 地質調査所 (1914): 常磐炭田第一区磐城国石城郡湯本村附近地質図および同説明書, 46p.
- 地質調査所 (1980): 日本温泉放熱量分布図. 1: 2,000,000 地質編集図.
- 中村新太郎 (1909): 福島県石城郡湯本温泉調査報告. 地質調査所報告, no.14, 35-56.
- 中村久由・安藤 武 (1953): 常磐炭田坑内温泉水について. 地質調査所月報, **4**, 355-382.
- 中村久由 (1962): 本邦諸温泉の地質学的研究. 地質調査所報告, no.192, 126p.
- 日本の地質「東北地方」編集委員会 (1989): 日本の地質 2 東北地方, 共立出版, 東京, 338p.
- NEDO: 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1991): 平成2年度全国地熱資源総合調査 (第3次) 広域熱水流動系調査 磐梯地域 地熱調査成果図集, 88p.
- 比留川 貴 (1981): 日本の主要地熱地域の熱水の化学組成, その2. 地質調査所報告, no. 262, 403p.
- 福富孝治 (1965): 地下水起源の温泉の温度. 北海道大学地球物理学研究報告, no. 13, 53-70.
- 松葉谷 治 (1981): 水素および酸素同位体比からみた温泉水の起源. 温泉科学, **31**, 47-56.
- 早稲田 周・中井信之 (1983): 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成. 地球化学, **17**, 83-91.
- 渡部直喜・大木靖衛・佐藤 修・日下部 実 (1996): 新潟県松之山地すべり地の Na-Cl 型地下水の起源. 新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報, no.18, 81-92.
- Fukutomi, T. (1961): Rates of discharge of heat energy from the principal hot spring localities in Hokkaido, Japan. *Journal of the Faculty of Science Hokkaido University ser VII Geophysics*, **1**, 315-330.
- Jenden, P. D. and Gieskes, J. M. (1984): Chemical and isotopic composition of interstitial water from deep sea drilling project sites 533 and 534. *Initial Report, DSDP*, **76**, 453-461.
- Matsubaya, O., Sakai, H., Kusachi, I. and Sakai, H. (1973): Hydrogen and oxygen isotopic ratios and major element chemistry of Japanese thermal water systems. *Geochemical Journal*, **7**, 123-151.
- Mizota, C. and Kusakabe, M. (1994): Spatial distribution of δD - $\delta^{18}O$ values of surface and shallow groundwaters from Japan, south Korea and east China. *Geochemical Journal*, **28**, 387-410.
- Mizukami, M., Sakai, H. and Matsubaya, O. (1977): Na-Ca-Cl-SO₄ type submarine formation waters at the Seikan undersea tunnel, Japan. Chemical and isotopic documentation and its interpretation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**, 1201-1212.
- Sakai, H. and Matsubaya, O. (1974): Isotopic geochemistry of the thermal waters of Japan and its bearing on the Kuroko Ore solutions. *Economic Geology*, **69**, 974-991.

(受付 2004年3月29日)

(受理 2004年10月7日)

この論文に対する「討論」を2004年5月31日まで受け付けます。