

平成 17 年 6 月

原 著

## 濃尾平野における大深度非火山性温泉

名古屋大学名誉教授

宮 崎 哲 郎

(平成 16 年 11 月 9 日受付, 平成 17 年 3 月 8 日受理)

### Non-volcanic Hot Springs from Deep Wells in the Nobi Plains

Tetsuo MIYAZAKI

Emeritus Professor of Nagoya University

#### Abstract

There are about 60 non-volcanic hot springs from deep wells ranging from 800 to 1,800 m deep in the Nobi Plains. The properties of the hot springs, such as depth of the wells, temperature, and concentration of ions, are summarized. The anions in the hot springs consist mainly of three ions of  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , and  $\text{Cl}^-$  ions in various ratios, while the val% of other anions are less than 1.7% of total anions. The distribution map of  $\text{Cl}^-$  ions in hot springs deeper than 800 m under the Nobi Plains was made. The hot springs, which contain  $\text{Cl}^-$  ions at high concentration, were found even in the region far from the seaside. The origin of  $\text{Cl}^-$  ions was discussed by a model of fossil sea water before ca. 16 million years and/or a model of concentration of  $\text{Cl}^-$  ions.

Key words : Nobi Plains, Deep well, Hot spring, Origin of  $\text{Cl}^-$  ions, Fossil sea water, Concentration of  $\text{Cl}^-$  ions

キーワード : 濃尾平野, 大深度孔井, 温泉,  $\text{Cl}^-$  イオンの成因, 化石海水, 塩素イオンの濃縮

#### 1. はじめに

1963年に天然ガスを目的に約1,500m掘削された長島町で温泉が発見され,これが日本における大深度温泉の端緒となった.最近の大深度温泉は,従来の火山性温泉の地域に加えて,これらが全くなかった地域にも新しい非火山性温泉を全国的に誕生させ,日本の温泉学に様々な新しい問題を

提起しつつある。本論文では、深度が 800 m 以上の温泉を大深度温泉と呼ぶことにする。名古屋を中心とする濃尾平野には図 1 に番号で示すように約 60 ケ所の深度 800 m 以上の大深度温泉があり、日帰り入浴を中心にした温泉が多数ある。この盛況は、安価に娯楽を創造するという名古屋・東海地方の大衆文化の支えによることが大きい。

濃尾平野は、図 1 の左下図に示すように日本列島のほぼ中央にある。その地質構造（地質調査総合センター、2004）は、図 1 に示すように平野は第 4 紀・新第 3 紀 (0-24 Ma) の地層からなり（図の白色部）、周囲の点線部は古第 3 紀・中生代 (24-200 Ma) の山地である（山下・鮎野・糸魚川、1988）。平野と山地には火山がなく、温泉は非火山性のものである。約 1,600 万年前、図 1 の白色部分は古瀬戸内海と言われている海であった。その後 500 万-100 万年前に濃尾傾動運動が起こり、西側が沈降し東側は相対的に上昇して、現在の東部はさなげ山を中心とした山地となった。沈降部の西縁は南北に走る一志（いちし）断層と養老断層であり、断層の西側が隆起してそれぞれ鈴鹿山脈と養老山脈が形成された。沈下したところには古木曾川等による土砂の堆積が起こり、濃尾平野が誕生した。地層の断面図は後で図 6 に示す。約 14 万年前、海面の上昇に伴い、平野の一部である名

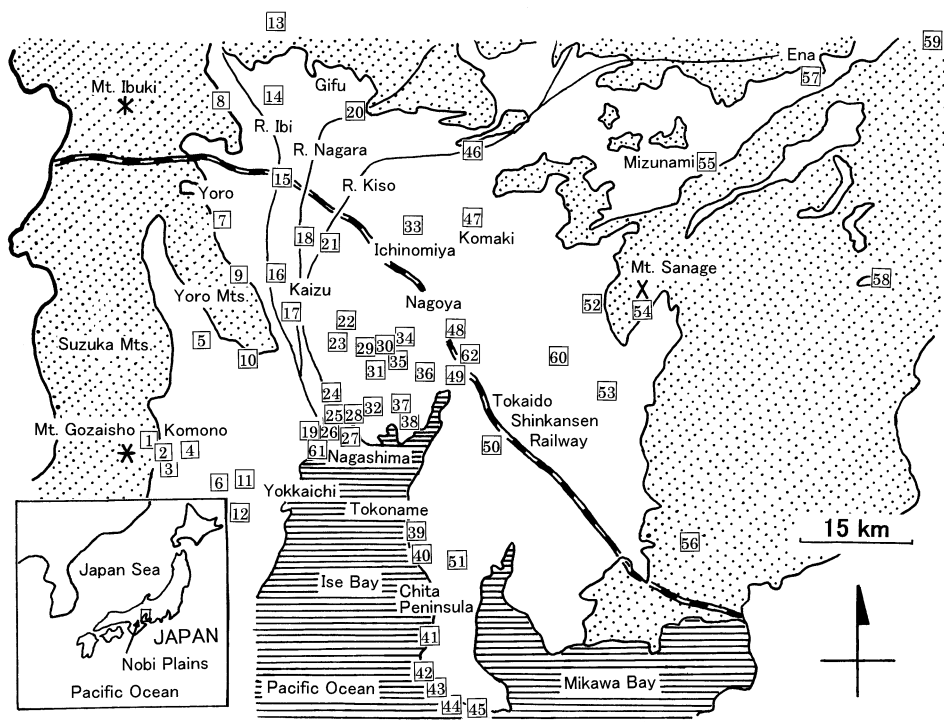


Fig. 1 Hot springs from deep wells and geologic map in the Nobi Plains. The number corresponds to a site of hot spring shown in Table 1. White area : Quaternary and Neogene (0 -24 Ma), Dotted area : Paleogene and Mesozoic (24-200 Ma). \*, \*, and × represent the tops of Mt. Ibuki (1,377 m in height), Mt. Gozaisho (1,210 m in height), and Mt. Sanage (629 m in height), respectively. R. in Fig. 1 represents a river. A small figure in the left-hand square shows a position of the Nobi Plains in the Japanese Island.

図 1 濃尾平野の大深度温泉と地質図。番号は表 1 の大深度温泉の場所を示す。白色地域：第 4 紀・新第 3 紀 (0-24 Ma)、点線地域：古第 3 紀・中生代 (24-200 Ma)。\*、\*、および×は、それぞれ伊吹山 (標高 1,377 m)、御在所山 (標高 1,210 m) およびさなげ山 (標高 629 m) の山頂を示す。図中の R. は川を示す。左下の四角内の図は日本列島における濃尾平野の位置を示す。

古屋・一宮・海津地区が海となり（熱田海進という）、その後、熱田海は退き平野に堆積物を残した。さらに約 6,000 年前、海面が再び上昇して熱田海進の場合とほぼ同じ地域が海となり（縄文海進という）、その後、海岸線は後退して現在に至っている。

この研究の目的は二つある。第一は濃尾平野の大深度温泉についてまとめることである。最近各地で掘削されている大深度温泉は、日本の温泉学に新しい視点を与えつつある。関等（2004）は関東地方東部、菊川・板寺（2004）は神奈川県における大深度温泉についてまとめている。濃尾平野には多数の大深度温泉があるが、総括的な検討は未だなされていない。本論文でこれらをまとめることは、わが国全体の大深度温泉を把握する上で意義あることと考える。今回のまとめにより、海岸から遠く離れた内陸部においても高濃度の塩化物泉の存在が明らかになった。第二の研究目的は塩化物泉の成因について検討することである。この成因について化石海水モデルや塩素イオンの濃縮モデルにより、これらの可能性を議論する。この問題は地質史や古代地球環境にも関連しており、大深度温泉の研究が地球環境学と結びつく可能性があり非常に興味深い。

## 2. 結 果

表 1 に濃尾平野とその周辺にある大深度温泉の性質をまとめてある。各温泉の場所は番号によって図 1 に示す。温泉井の深度は 800-1,800 m、平均深度は約 1,300 m である。温泉の掘削年度は 1965-74 年が全体の約 10%、1975-84 年が約 10%、1985-94 年が約 40%、1995-2004 年が約 40% である。泉温の原因は後述の議論から火山性のものではなく、深度 100 m につき 3°C 程度上昇すると言われている地下温度によると考えられる。温度と成分イオンの濃度は種々の研究機関で測定されたものであり、その機関名は表の最終欄に挙げてある。全陽イオンのバル濃度と全陰イオンのそれとの比は  $1.015 \pm 0.062$  であり、理論値 (1.0) に極めて近いので、イオン濃度の測定値は信頼性が高い。表には紙面の都合上、全陽イオン中 4 種類 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ) のものだけを挙げてあるが、これらのイオンが全陽イオンのバル比に占める割合は  $0.984 \pm 0.042$  となり、98.4% がこれらのイオンである。一方、全陰イオン中 3 種類 ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ) のものを表に挙げてあるが、これらのイオンが全陰イオンのバル比に占める割合は  $0.983 \pm 0.025$  となり、98.3% がこれらのイオンである。表 1 の温泉の pH の平均値は 7.9 であり、全て 6.8-9.2 の間に分布している。大深度温泉の温度や成分の経時変化は温泉の利用面から重要であるが、系統的なデータはない。次の 3 例、大名古屋温泉 (表 1 の番号 34; 1983 年と 1993 年)、飛島温泉 (番号 38; 1967 年と 1996 年)、白砂の湯 (番号 43; 1989 年と 1996 年) では、2 つの年度に測定されている。年度間に温度は平均 4%、 $\text{Na}^+$  の濃度は平均 8%、 $\text{Cl}^-$  の濃度は平均 3% 変動している。表には最新年度の結果を挙げてある。

図 2 に全大深度温泉の炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{-2}$ ) のバル比と塩素イオン ( $\text{Cl}^-$ ) のバル比との関係を示す (●)。大深度温泉の値は勾配が -1 の直線上にのっている。濃尾平野の周辺に古くからある深度の浅い温泉 (湯の山温泉 (□)、榊原温泉 (×)、柿野温泉 (◇)) の値はこの直線から大きくずれている。これらの温泉は地表近くから採取しており、陰イオン中に炭酸イオンや塩素イオン以外のもの ( $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ) が多く含まれているためである。名古屋周辺の地下水 (△) は炭酸イオンの割合が非常に多いが、直線上にのっている。濃尾平野の大深度温泉は種々の割合の塩素イオンと炭酸イオンからなっている。

図 3 に濃尾平野における大深度温泉中の塩素イオン濃度の分布を示す。アニオン中の  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比が、2/3 以上 (⊖)、1/3-2/3 の範囲 (□)、1/3 以下 (△) の 3 段階に分けている。 $\text{Cl}^-$  イオンのバル比が 2/3 以上の高濃度地域は、海津・養老・岐阜・小牧地区、名古屋南部・常滑 (とこなめ) 地区、知多半島先端部、瑞浪 (みずなみ)・恵那地区である。海岸から遠く離れた内陸部に

Table 1 Hot springs deeper than 800m under the Nobi Plains

表 1 濃尾平野の地下 800 m 以上の大深度温泉

Site number <sup>a</sup>	Site name <sup>b</sup>	Depth (m)	Temp. (°C)	Cations (mg/l)				Anions (mg/l)			Measurement <sup>c</sup>
				Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	
1	Kiboso	1500	32.8	446.8	1.5	6.1	0.6	49.8	954.9	18.0	c-1
2	Green H.	1300	45.6	163.1	0.5	1.6	0.1	119.2	200.1	6.0	c-1
3	Kataoka O.	1200	44.1	164.9	4.9			108.8	218.4		c-1
4	Komono O.	1300	47.7	114.5	3.8	1.3	0.1	35	235.5	7.2	c-1
5	Ageki O.	1800	37.6	31.8	7.9	0.9	0.7	2.3	95.2	9.0	c-2
6	Yuyu.	1200	49	170.5	4.0	2.1	0.1	35.8	386.8	7.2	c-1
7	Yoro O.	1700	42	1854	805	40	210.5	4375.7	567.2		c-3
8	Ikeda O.	1300	31.6	282.9	1.7	6.5	0.2	16.8	657.7	18.8	c-3
9	Nanno O.	1500	36.1	3382	2294	17.7	292.7	9965	130		c-2
10	Tado O.	1730	38.8	196.9	4.1	7.0	2.7	11.6	513.6	12.6	c-2
11	Yo.	1300	40	61	3.0	3.4	0.4	4.0	157.4	1.5	c-1
12	Namiki O.	1250	52.1	176	4.7	2.1	0.1	36.8	403.9	6.0	c-1
13	Ta.	990	25.4	564.7	2.2	13.2	1.0	33.3	1293.6	65.2	c-3
14	Shinsei O.	1290	32.8	201.5	1.7	2.1	1.3	32.8	377.2	18.6	c-3
15	Anpachi O.	1060	27.1	292.3	57.9	3.0	13.5	430.4	288.2		c-3
16	Kaizu-cho	>1000		1873	576.2	34.4	90.9	4213	22.9	0.024	c-4
17	Kaizu O.	1370	48.0	2279	865.9	38.8	134.3	5589	206.9	0.1	c-3
18	Hashima O.	1260	38.3	946.2	1173	21.9	239.2	4246	198.6	0.1	c-3
19	Asa.	1700	51.8	552	39.1	6.9	1.8	750.2	255.7	3.0	c-1
20	Gifu O.	1300	29.2	822.6	1046.6	23.8	190.5	3626.4	21.5		c-3
21	Sofue O.	1200	30.1	1150	365	13.0	71.8	2410	135	0.3	c-5
22	Owa.	1200	35	79.7	3.5	2.1	1.3	47.5	149.5		c-2
23	Eiwa O.	>1000	49.4	334	27.3	5.7	2.2	381	319	1.7	c-5
24	Nagas. 1	1300	58	278.8	9.4	5.2	1.3	88.2	625.4	9.3	c-6
25	Nagas. 2	1400	52.3	180	5.2	2.5		80.7	335.6	10.2	c-1
26	Nagas. 3	>1000		201.9	6.0	11.9	0.2	70.5	450.5	4.4	c-4
27	Nagas. 4	1600	54.7	122.6	3.6	1.7		23.4	275.3	6.6	c-1
28	Kiso.	1650	62.8	69.3	16.2	41.5	15.3	47.9	278.3	5.1	c-7
29	Owari O.	1200	51.8	166.8	11.5	6.3	0.7	129.9	273.3	0.8	c-5
30	Kanie-cho	>1000		167.3	7.6	9.2	1.7	116.2	287.9	1.6	c-4
31	Tomi.	1350	50.4	326	34.8	5.5	2.5	447	261	0.5	c-5
32	Yatomi O.	1400	42.9	119	3.5	2.8	0.7	67.8	242	1.7	c-5
33	Ichi.	1100	32.0	1340	1710	16.1	215	5520	73.7	0.1	c-5
34	Daina.	1100	42.2	175	30.4	7.5	3.4	286	10.5	0.2	c-5
35	Coro.	1000	40.4	52.0	6.3	4.7	1.2	32.9	122.2		c-2
36	Toyo O.	1100	38.7	111	19.8	6.6	2.3	170	128		c-5
37	Tobi. 1	>1000		223.9	3.2	5.6	1.9	251.9	185.3	0.7	c-4
38	Tobi. 2	1265	55	197	3.5	4.6	0.8	211	185	0.4	c-5
39	Reicho O.	>1000	46.1	2600	27.8	39.6	13.1	2980	2060	2.5	c-5
40	Tokon.	>1000		2059	699.7	14.9	346.4	5342	75		c-4
41	Mihama O.	1500	55.1	4490	6.5	23.8	2.3	4530	3910	12.7	c-5
42	Uotomo	1300	50.7	2230	112	17	27.9	3440	578	1.3	c-5
43	Shirasu.	1300	43.4	8730	470	120	104	14500	169	0.3	c-5

Site number <sup>a</sup>	Site name <sup>b</sup>	Depth (m)	Temp. (°C)	Cations (mg/l)				Anions (mg/l)			Measurement <sup>c</sup>
				Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	
44	San.	1300	31.3	8340	981	145	490	16100	161	0.3	c-5
45	Ma.	1320	46.2	9850	1050	84.3	125	17100	79.4		c-5
46	Inuyama O.	1500	45	102	4.6	3.8	1.2	1.2	256.5	13.5	c-2
47	Rakki O.	1000	28	682	799	3.5	0.2	2400	12.8	1.7	c-5
48	Crown H.	1200	28.2	52.6	14.7	1.3	1.7	67.1	90.1		c-5
49	Shirato.	1200	46.1	2810	184	51.7	30.9	4800	169	0.2	c-5
50	JA.	1060	44.0	6205	33.7	128.7	29.2	7518	4027		c-2
51	Gon.	1500	56.4	9840	57.0	78.6	25.5	13900	1920	5.0	c-5
52	Nagak.	1800	33.2	510	58.4	1.3	0.2	897	9.6	7.1	c-5
53	Ware.	1300	25.1	1460	1240	4.2	0.4	4270	33.5	0.7	c-5
54	Sanage O.	1200	22	35.6	2.3	0.3		6.1	38.1	27.0	c-5
55	Taka.	1400	36.2	719.8	468.3	5.8	4.5	1929	0.7	6.3	c-3
56	Oka.	1200	29.2	510	2.4	3.3	1.7	5.6	1180	63.0	c-5
57	Ena.	1000	55	1629.3	3020.3	12.3	46.0	7474.9	23.7		c-3
58	Inabu O.	1200	34.2	187	18.1	1.6	5.0	169	260	2.0	c-5
59	Naka.	1130	42	808	3.4	5.9	0.2	285.5	1491.4		c-3
60	Hira.	800	34.4	247.8	2.0	3.6	1.5	70.1	470.4	38.4	c-6
61	Kuwana O.	800	48.7	328.6	51.3	19.6	25.5	579.1	189.9	3.6	c-1
62	Fujimi O.	800	30.4	16.0	5.9	3.2	0.8	9.1	57.8		c-5

a.Sites of hot springs are shown in Fig. 1. b.Abbreviations in this column are as follows. H. : hotel, O. : onsen, Yuyu. : Yuyu kaikan, Yo. : Yokkaichi onsen, Ta. : Tanigumi onsen, Asa. : Asahi no yu, Owa. : Owaritenou no yu, Nagas. 1. : Nagashima onsen Nabana no sato, Nagas. 2. : Nagashima onsen Kurhaus, Nagas. 3. : Nagashima-cho, Nagas. 4. : Nagashima onsen Yuami no shima, Kiso. : Kisosaki onsen, Tomi. : Tomiyoshi onsen, Ichi. : Ichinomiya onsen, Daina. : Dainagoya onsen, Coro. : Corona no yu, Tobi. 1. : Tobishima-mura, Tobi. 2. : Tobishima onsen, Tokon. : Tokoname-shi, Shirasu. : Shirasuna no yu, San. : Hotel Sanmikan, Ma. : Hotel de marronnier Utsumi, Shirato. : Shiratori no yu, JA. : JA Aichi-chita, Gon. : Gongitsune no yu, Nagak. : Nagakute onsen, Ware. : Waremeike onsen, Taka. : Takasago onsen, Oka. : Okazaki Takechiyo onsen, Ena. : Enakyo yumoto onsen, Naka. : Nakatsugawa onsen, Hira. : Hirabari Tokai kenkosenta. c.Concentrations of ions and temperature were measured by the following institutes. c-1 : Mie Prefectural Institute of Public Health, c-2 : Nagano Pharmaceutical Association, c-3 : Gifu Prefectural Institute of Public Health, c-4 : Architectural Institute of Japan (Tokai), The Japanese Geotechnical Society (Tokai), and Nagoya Jiban Chosa Kenkyukai(1969), c-5 : Aichi Prefectural Institute of Public Health, c-6 : Hot Spring Research Center, c-7 : Gifu Pharmaceutical University.

a. 各温泉の場所は図1に示す。b. この欄の略号は下記のとおりである。H. : ホテル, O. : 温泉, Yuyu. : ユーユー会館, Yo. : 四日市温泉, Ta. : 谷汲温泉, Asa. : あさひの湯, Owa. : 尾張天王の湯, Nagas. 1 : 長島温泉なばなの里, Nagas. 2 : 長島温泉クアハウス, Nagas. 3 : 長島町, Nagas. 4 : 長島温泉湯あみの島, Kiso. : 木曾岬温泉, Tomi. : 富吉温泉, Ichi. : 一宮温泉, Daina. : 大名古屋温泉, Coro. : コロナの湯, Tobi. 1 : 飛鳥村, Tobi. 2 : 飛鳥温泉, Tokon. : 常滑市, Shirasu. : 白砂の湯, San. : ホテル山海館, Ma. : オテル・ド・マロニエ内海, Shirato. : 白鳥の湯, JA. : JA あいち知多, Gon. : ごんぎつねの湯, Nagak. : 長久手温泉, Ware. : 割目池温泉, Taka. : 高砂温泉, Oka. : 岡崎竹千代温泉, Ena. : 恵那峡湯元温泉, Naka. : 中津川温泉, Hira. : 平針東海健康センター。c. イオン濃度と温度は下記の研究機関で分析された。c-1 : 三重県衛生研究所 (三重県科学技術振興センター), c-2 : 長野県薬剤師会, c-3 : 岐阜県衛生研究所 (岐阜県保健環境研究所), c-4 : 日本建築学会東海支部・土質工学会中部支部・名古屋地盤調査研究会 (1969), c-5 : 愛知県衛生研究所, c-6 : 中央温泉研究所, c-7 : 岐阜薬科大学。

いても  $\text{Cl}^-$  イオンの高濃度地区があることは大変興味深い。

### 3. 考 察

#### 3.1 塩素イオン ( $\text{Cl}^-$ ) の成因

##### 3.1.1 火山性モデル

温泉中の  $\text{Cl}^-$  の起源としては、直接火山活動からきたものと2次的に海水からきたものが考えられる(湯原・瀬野, 1991)。まず、火山性モデルについて検討する。図1に示す濃尾平野とその周辺の山地には火山はなく、震源分布からみて島弧の火山フロントより海溝側であり、地下にマグマの発生は考えられない(Tatsumi, 1989; 巽, 1995)。従って  $\text{Cl}^-$  イオンの起源として、火山性の起源は考えられない。特に、 $\text{Cl}^-$  イオンが高い温泉(図3の⊖印)は、全て第4紀・新第3紀(0-24 Ma)の地層にある。この地域は500万年前頃から始まった濃尾傾動運動によって沈降し、そこに河川からの土砂が堆積したものである。

##### 3.1.2 化石海水モデル

化石海水モデルを検討するために、まず大深度温泉の成分と現海水のそれとを比較する。現海水中の主要イオンである  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  の各イオンの  $\text{Cl}^-$  に対する重量比を大深度温泉と現海水について比べる。図4に各イオンの重量比(100倍にして表示)を海水(●; Demayo (1985))と長久手(表1における番号52; □), 山海館(番号44; △), 白鳥の湯(番号49; ○)の3ヶ所の温泉および木曾岬温泉(番号28; …×…)を比較してある。3ヶ所の温泉の成分比は現海水の成分比にほぼ一致しており、これらの温泉は海水由来の可能性が高い。一方、木曾岬温泉の値は海水のそれとは著しく異なっている。この比較を数量的に表すために、それぞれのイオンの  $\text{Cl}^-$  に対する重量比について、海水と温泉水の差の絶対値を百分率で示したものを  $\delta(x)$  で示し、これらの和を海水からの偏度( $\delta$ )と定義する(湯原・瀬野, 1991)。

$$\delta(x) = \left| \frac{\text{温泉中の } x \text{ イオン}}{\text{温泉中の } \text{Cl}^- \text{ イオン}} - \frac{\text{海水中の } x \text{ イオン}}{\text{海水中の } \text{Cl}^- \text{ イオン}} \right| \times 100 \quad (1)$$

$$\delta = \delta(\text{Na}) + \delta(\text{SO}_4) + \delta(\text{Mg}) + \delta(\text{Ca}) + \delta(\text{K}) \quad (2)$$

偏度が小さいほど海水の成分に近い。偏度が35以下の場合、温泉成分は海水由来と考えても良い(湯原・瀬野, 1991)。長久手, 山海館, 白鳥の湯の温泉の偏度はそれぞれ29.0, 23.3, 26.3となり35以下であり、これらの温泉の成分は海水の成分に近い。しかし、木曾岬温泉の偏度は239であり、海水の成分とは非常に違っている。

成分分布が海水のそれとほぼ一致した3ヶ所の温泉についてさらに詳しくみると、上記の温泉では  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  比が殆ど零であり、海水の値(0.14)に比べて極めて小さい。図5で後述するように海水からの偏度と  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比は逆比例の関係があり、 $\text{Cl}^-$  イオンのバル比が大きい程、偏度

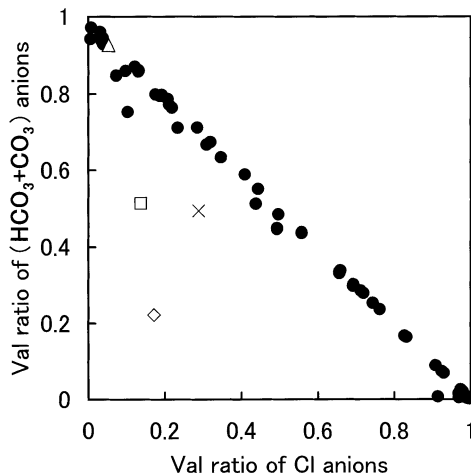


Fig. 2 Relation of val ratio of  $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$  ions to val ratio of  $\text{Cl}^-$  ions in hot springs. ●: hot springs from deep wells, □: hot spring of Yunoyama onsen (shallow well), ×: hot spring of Sakakibara onsen (shallow well), ◇: hot spring of Kakino onsen (shallow well), △: underground water around Nagoya (173 m deep, Sugisaki (1985)).

図2 温泉中の  $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$  イオンのバル比と  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比との関係。●: 大深度温泉, □: 湯の山温泉(浅い井戸), ×: 柿原温泉(浅い井戸), ◇: 柿野温泉(浅い井戸), △: 名古屋市周辺の地下水(深度173m, 杉崎(1985))。



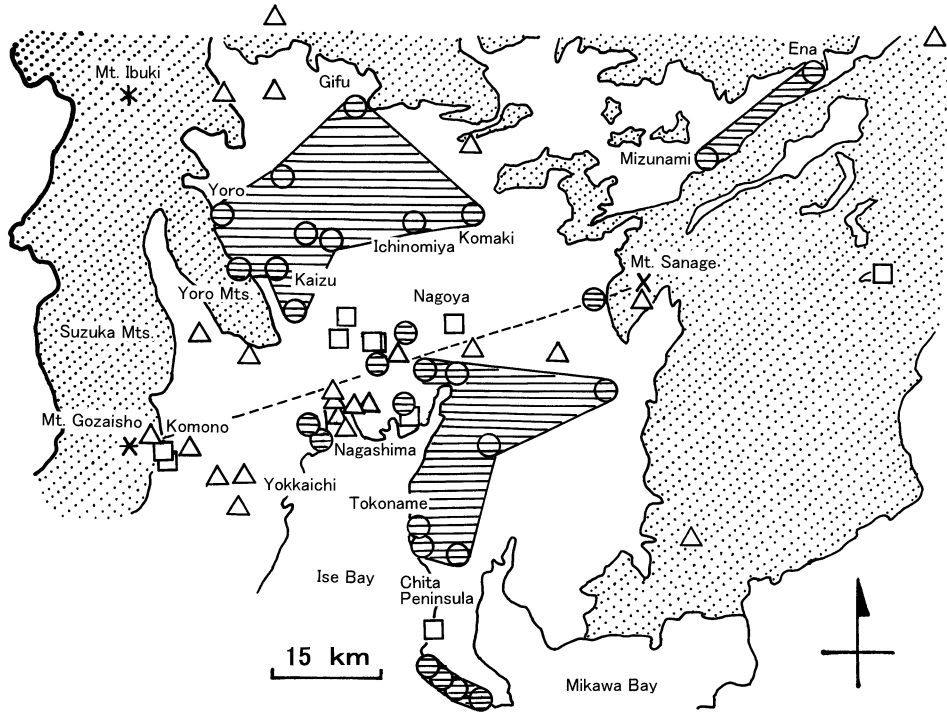


Fig. 3 Distribution of  $\text{Cl}^-$  ions in hot springs deeper than 800 m under the Nobi Plains. The val ratios of  $\text{Cl}^-$  ions in hot springs are classified by the following three cases.  $\ominus$  : larger than 2/3,  $\square$  : 1/3-2/3,  $\triangle$  : less than 1/3. Horizontal lines show the area where the ratios of  $\text{Cl}^-$  ions in hot springs are larger than 2/3. A dashed line is drawn between tops of Mt. Gozaisho (\*) and Mt. Sanage (x) (cf. Fig. 6).

図 3 濃尾平野における大深度温泉中の塩素イオン濃度の分布.  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比は次の 3 段階に分けた.  $\ominus$  : 2/3 以上,  $\square$  : 1/3-2/3,  $\triangle$  : 1/3 以下. 横線は温泉中の  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比が 2/3 以上の高濃度塩素イオンの地域. 御在所山 (\*) とさなげ山 (x) の山頂間を鎖線で結んだ (図 6 を参照).

は小さくなる.  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比が 2/3 以上の温泉 (図 3 の  $\ominus$  印) は 29 ケ所あるが, これらについて  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  重量比の平均値は 0.0062 であり, 0 に近い.  $\text{SO}_4^{2-}$  イオンは地下に長期間保存された場合, 次第に還元されて硫化水素となり, さらに硫化水素は鉄と化合して硫化鉄となって液相から除去される. 従って,  $\text{SO}_4^{2-}$  イオンがないことが化石海水の特徴の一つに挙げられている (湯原・瀬野, 1991).

$\text{Cl}^-$  イオンに対する現海水の影響を表 2 に示す. 海岸に面した長島温泉と海岸より 20 km 内陸にある海津温泉について, 杉崎 (1985) による地下水の値と表 1 の値をまとめてある. 長島温泉の地下 20-90 m では地下水中に多量の  $\text{Cl}^-$  が存在し, これは現海水による. しかし, それ以上の深度, 特に 1,400-1,600 m では  $\text{Cl}^-$  の濃度は低く, 現海水の影響は見られない. 一方, 海岸より 20 km 離れた海津温泉では地下 20-90 m でも  $\text{Cl}^-$  の濃度は低く, 現海水の影響は殆どない. しかし, 1,400-1,600 m の深度では  $\text{Cl}^-$  の濃度は高く, これは現海水とは異なる成因によるものと思われる. このように深度 800 m 以上の温泉では海岸近くでも現海水の影響はないと言える.

次に海水からの偏度と  $\text{Cl}^-$  イオンとの関連性を検討する. 大深度温泉の偏度 (y) と  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比の逆数 (x) との相関関係を図 5 に示す. データ (●) は一次直線 ( $y=62.017x-25.839$ ) で近似され, 相関係数 (R) は 0.993 となり極めて良い相関関係がある. 海水からの偏度と  $\text{Cl}^-$  イオン

のバル比の逆数はほぼ比例関係にある。言い換えると、海水からの偏度と  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比は逆比例している。  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比が大きくなると、海水からの偏度は小さくなり、温泉成分が海水成分に近くなる。

化石海水モデルを地質構造と比較して考える。図3において  $\text{Cl}^-$  の濃度が高い、即ち  $\text{Cl}^-$  のバル比が  $2/3$  以上の温泉は  $\ominus$  印で示されている。これらの温泉がある場所は、序論で述べたように過去に海であった。一方、海でなかった地層にある温泉(図1で番号1, 13, 54, 56)では  $\text{Cl}^-$  濃度は低く、  $\text{Cl}^-$  のバル比は  $0.0072-0.097$  と極めて小さい。このことから  $\text{Cl}^-$  濃度は過去に海であったことと関連しているように思われる。御在所山とさなげ山の山頂を結んだ直線(図3の\*と×間の鎖線を参照)に沿って、図6の上段には、各温泉の成分の海水からの偏度(○、(2)式参照)および炭酸イオン( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ )と塩素イオン( $\text{Cl}^-$ )のバル濃度の比率(△)を示す。下段には、地質構造の断面図(山下・糸野・糸魚川, 1988)を示す。断面図において点線部は古第3紀・中生代の地層であり、白色部は第4紀・新第3紀の堆積層を示す。さなげ山付近と御在所山付近は過去に海であった経歴がない古第3紀・中生代の地層であり、海水からの偏度や炭酸イオン/塩素イオンのバル比率が大きい。即ち、これらの地域の大深度温泉では炭酸イオンが多く、塩素イオンが少ない。過去に海であった名古屋周辺では、上記の偏度やバル比率が小さく、  $\text{Cl}^-$  イオンの濃度が高い。

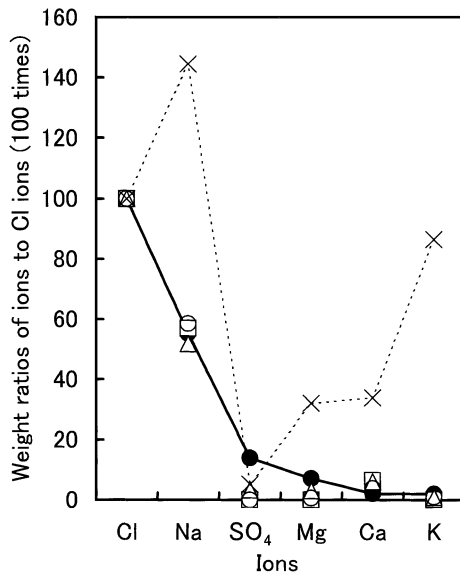


Fig. 4 Comparison of ions in hot springs from deep wells with those in present sea water. The values are represented by weight ratios (100 times) of ions to  $\text{Cl}^-$  ions. ●: present sea water (Demayo, 1985), □: Nagakute onsen (No. 52 in Table 1), △: Hotel Sanmikan (No. 44 in Table 1), ○: Shiratori no yu (No. 49 in Table 1), ×: Kisosaki onsen (No. 28 in Table 1).

図4 大深度温泉中のイオンと現海水中のそれとを比較。値は  $\text{Cl}^-$  イオンに対する各イオンの重量比(100倍で示す)で表す。●: 現海水(Demayo, 1985), □: 長久手温泉(表1の番号52), △: ホテル山海館(表1の番号44), ○: 白鳥の湯(表1の番号49), ×: 木曾岬温泉(表1の番号28)。

Table 2 Effect of present sea on  $\text{Cl}^-$  ions in underground water and hot spring from deep wells

表2 地下水と大深度温泉中の  $\text{Cl}^-$  イオンに対する現海水の影響

Depth (m)	Concentration of $\text{Cl}^-$ ions (mg/l)	
	Nagashima (at seaside)	Kaizu (20 km far from seaside)
20-90 <sup>a</sup>	1500-2000	10-100
90-150 <sup>a</sup>	20-100	0-10
150-230 <sup>a</sup>	20-50	0-10
1400-1600 <sup>b</sup>	23.4	5589

a. Sugisaki (1985). b. cf. Table 1.

a. 杉崎 (1985). b. 表1参照



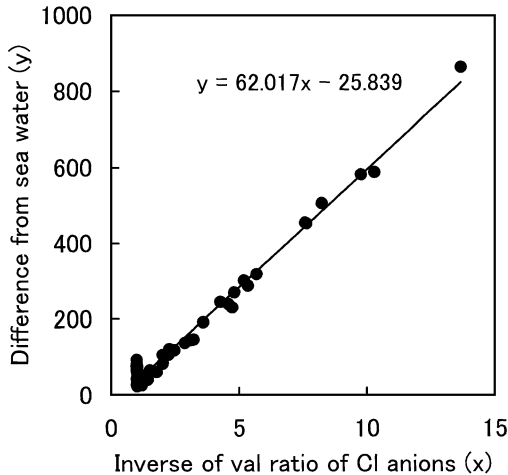


Fig. 5 Relation of difference (y) from the inverse (x) of val ratios of  $\text{Cl}^-$  ions in hot springs from deep wells. ●: data of hot springs. A solid line is a best fitted line for the data, represented by an equation of  $y=62.017x-25.839$ .

図 5 大深度温泉の海水からの偏度 (y) と  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比の逆数 (x) との関係。●: 温泉のデータ。実線はデータに最適化した近似直線であり、 $y=62.017x-25.839$  で表される。

長島付近は過去に海であったにもかかわらず、上記の偏度やバル比率が名古屋付近の値に比べ大きい。この理由として、長島付近には養老断層の活断層が通っており、地下水が地下深くまで浸透し易く、地下水によって  $\text{Cl}^-$  イオンが洗い出されたのではないかと推定される。活断層付近では地下水が地下深くまで入り込み、一般に  $\text{CO}_2$  や  $\text{HCO}_3^-$  の存在が多い (福岡・落合・榎根, 1979)。

### 3.1.3 塩素イオンの濃縮モデル

以上の議論を踏まえると、塩素イオンの成因として化石海水の可能性が考えられるが、これらは決定的証拠とは言えず、今後さらなる研究が待たれる。濃尾平野と海岸線との関連について考える (日本建築学会東海支部・土質工学会中部支部・名古屋地盤調査会 (1969), 桑原 (1970))。約 1,600 万年前の古瀬戸内海では図 1 において白色部分の広い範囲が海であり、その後、沈降し、そこに土砂が堆積して濃尾平野が誕生した。約 14 万年前の熱田海進や約 6,000 年前の縄文海進では濃尾平野の一部分だけ、即ち名古屋・一宮・海津地区だけが海となり、図 1 における瑞浪 (みずなみ)・恵那地区、知多半島、菰野 (こもの) 地区は陸であった。もし塩素イオンが化石海水によるものだとすれば、図 3 における瑞浪 (みずなみ)・恵那地区や知多半島先端部の温泉中の高濃度  $\text{Cl}^-$  イオンや菰野 (こもの) 地区の温泉中の  $\text{Cl}^-$  イオンは約 1,600 万年前の古瀬戸内海の化石海水が取り残されたものではないかと推定される。

図 3 において高濃度の塩素イオンを含む温泉は第 4 紀・新第 3 紀 (0-24 Ma) の地層にあり、一方、古第 3 紀・中性代 (24-200 Ma) の地層にある温泉には  $\text{Cl}^-$  イオンが極めて少ない。従って濃尾平野の温泉中の  $\text{Cl}^-$  イオンは 2400 万年以降のものと言える。この地域は約 500 万年前から始まった濃尾傾動運動によって沈降し、そこに河川からの土砂が急速に、厚くたいせきした。海水面より下部に堆積盆が発達しているため地下水は停滞し、嫌気性の環境である。このような濃尾平野の形成過程において、古地下水或いは古河川水が地下に取り残された可能性がある。濃尾平野の 3 大河川である木曾川・長良川・揖斐 (いび) 川は北部の山地に源を発し、伊勢湾に流れている (図 1 参照)。杉崎 (1985) によると上記 3 河川水における主要なアニオンの濃度は、 $\text{Cl}^-$ , ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  がそれぞれ 4.2, 32.6, 10.5 mg/l である。名古屋周辺の地下水では  $\text{Cl}^-$ , ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  がそれぞれ 2.4, 71.5, 1.2 mg/l である。古地下水或いは古河川水が地下に長期間保存される間に濃縮された場合には、 $\text{Cl}^-$  イオンの濃度が高くなる。古地下水或いは古河川水が長い期間停滞していても  $\text{Cl}^-$  イオンは岩石と反応しないが、 $\text{SO}_4^{2-}$  イオンは岩石との相互反応で取り除かれる。また炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) も或る種の化学反応 (例えば  $\text{Ca}^{+2}$  イオンとの  $\text{CaCO}_3$  の生成反応) を受けて水中から除去され、最終的に  $\text{Cl}^-$  イオンだけが濃縮されたのではなからうか。

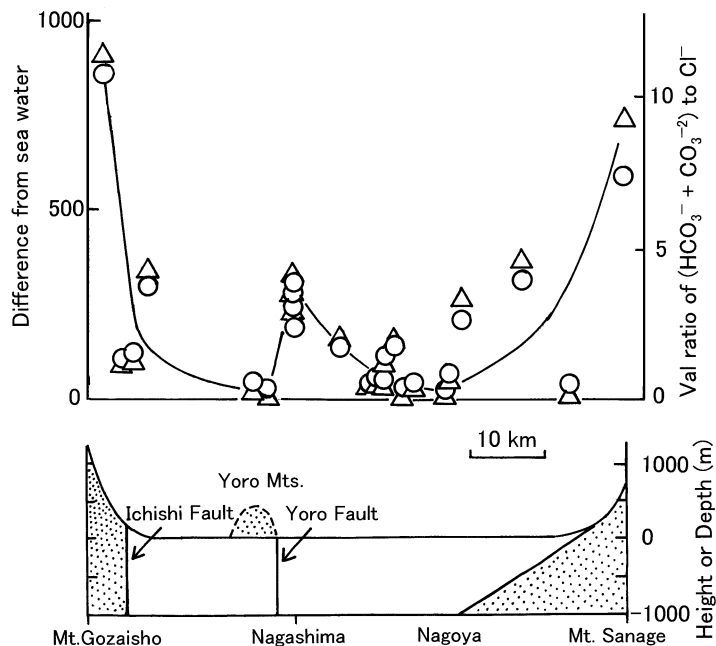


Fig. 6 Differences from sea water and ratios of vals of anions ( $[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]/[\text{Cl}^-]$ ) of hot springs from deep wells along a line between Mt. Gozaisho and Mt. Sanage (cf. a dashed line between \* and × in Fig. 3), shown in the upper figure. ○ : difference from sea water, △ : ratio of vals ( $[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]/[\text{Cl}^-]$ ). Geologic structure along the line between Mt. Gozaisho and Mt. Sanage, shown in the lower figure. White zone : Quaternary and Neogene (0–24 Ma), Dotted zone : Paleogene and Mesozoic (24–200 Ma).

図 6 御在所山とさなげ山とを結んだ直線（図 3 における \* と × 間の鎖線を参照）に沿った大深度温泉の海水からの偏度とアニオン間のバル濃度の比 ( $[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]/[\text{Cl}^-]$ ) (上段図)。○ : 海水からの偏度, △ : バル濃度の比 ( $[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]/[\text{Cl}^-]$ )。同じ直線に沿った地質構造断面図 (下段図)。白色部分 : 第 4 紀・新第 3 紀 (0–24 Ma), 点線部分 : 古第 3 紀・中生代 (24–200 Ma)。

もし炭酸イオンの除去が進まずに濃縮だけが起これば、高濃度の炭酸イオン温泉になるであろう。Cl<sup>-</sup>イオンおよび炭酸イオンのバル比と Ca<sup>+2</sup>イオンの濃度との関係を図 7 に示す。ここで Ca<sup>+2</sup>イオンの濃度範囲が広いので対数で表す。Ca<sup>+2</sup>イオンの濃度が低いときは、陰イオン中で炭酸イオン (○) が主成分となり、Ca<sup>+2</sup>イオンが高濃度の場合は Cl<sup>-</sup>イオン (●) が主成分となる。これは高濃度の Ca<sup>+2</sup>イオンによる炭酸イオンの除去を示唆しているとも考えられ、興味深い。この塩素イオンの濃縮モデルは、これまで殆ど議論されていなかったモデルであり、今後種々の側面からさらに検討すべきであろう。

#### 4. まとめと今後の課題

(1) 濃尾平野およびその周辺には、約 60 ケ所の深度 800 m 以上、平均深度約 1,300 m の大深度非火山性温泉がある。これらの温泉の性質 (深度, 温度, 成分イオン濃度) をまとめた。陰イオン成分は種々の割合での炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) と塩素 (Cl<sup>-</sup>) イオンとからのみになっている。濃尾平野の大深度温泉における塩素イオンの分布図を作成した。海岸から遠く離れた内陸部の温泉においても高濃度の塩素イオンが見出された。

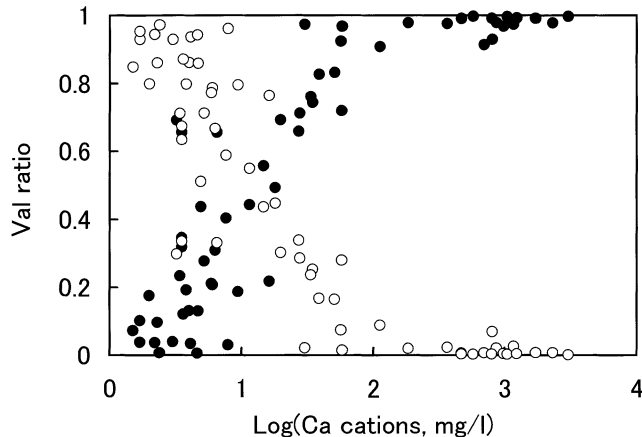


Fig. 7 Val ratios of  $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$  ions and  $\text{Cl}^-$  ions against concentration (mg/l) of  $\text{Ca}^{+2}$  ions in hot springs from deep wells. Concentration of  $\text{Ca}^{+2}$  ions is represented by a logarithmic scale. ○ :  $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$  ions, ● :  $\text{Cl}^-$  ions.

図 7 大深度温泉における  $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$  イオンおよび  $\text{Cl}^-$  イオンのバル比と  $\text{Ca}^{+2}$  イオンの濃度 (mg/l) との関係.  $\text{Ca}^{+2}$  イオンの濃度は対数尺で表示. ○ :  $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$  イオン, ● :  $\text{Cl}^-$  イオン.

(2) 大深度温泉中の塩素イオンの成因について検討した.  $\text{Cl}^-$  イオンの起源として化石海水モデルと塩素イオンの濃縮モデルとの両方について, それらの可能性を議論した.

(3) 大深度温泉中の塩素イオンの成因は地質史とも深く関連しており, 今後その説明は古代地球環境学へ繋がる可能性がある.

## 謝 辞

温泉のデータを提供して頂いた表 1 に挙げた各温泉所に厚く御礼申し上げます. 温泉成分の分析をされた三重県・岐阜県・愛知県の衛生研究所, 長野県薬剤師会, 中央温泉研究所, 岐阜薬科大学に厚く御礼申し上げます. 愛知県衛生研究所の大沼章子博士には貴重な情報を頂き厚く御礼申し上げます. 中央温泉研究所の甘露寺泰雄所長には有益なご助言を賜り大変感謝致します. 名古屋大学理学部地質学教室の杉崎隆一名誉教授と田中 剛教授には有益なご討論やご指導を賜り深く感謝致します.

(2004 年 9 月 11 日 日本温泉科学会第 57 大会で発表)

## 文 献

地質調査総合センター (2004) : 活構造図「京都 (第 2 版)」, 筑波.

Demayo, A. (1985) : Elements in sea water, CRC Handbook of Chemistry and Physics, F-148, CRC Press, Florida, USA.

福岡正己・落合敏郎・権根 勇 (1979) : 地下水ハンドブック, 1-1537, 建設産業調査会, 東京.

菊川城司・板寺一洋 (2004) : 神奈川県における大深度温泉の水素同位体比と化学成分, 日本温泉科学会第 57 大会講演要旨集, No13.

桑原 徹 (1970) : 濃尾平野の形成過程と名古屋周辺の地盤, 土と基礎, 18, 46-54.

日本建築学会東海支部, 土質工学会中部支部, 名古屋地盤調査研究会 (1969) : 名古屋地盤図, 1-24, コロナ社, 東京.

- 関 陽児・中嶋輝允・上岡 晃・金井 豊・間中光雄・月村勝宏 (2004) : 関東地方東部における大深度温泉の特徴. 水質と地質との関係. 温泉科学, **54**, 1-24.
- 杉崎隆一 (1985) : 濃尾平野の地下水. 濃尾平野の地盤沈下と地下水 (東海三県地盤調査会編), 149-188, 名古屋大学出版会, 名古屋.
- Tatsumi, Y. (1989) : Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas, *J. Geophys. Res.*, **94**, 4697-4707.
- 巽 好幸 (1995) : 沈み込み帯のマグマ学. 全マントルダイナミクスに向けて, 1-186, 東京大学出版会, 東京.
- 山下 昇・粕野義夫・糸魚川淳二 (1988) : 日本の地質「中部地方」, 35-242, 共立出版, 東京.
- 湯原浩三・瀬野錦蔵 (1991) : 温泉学第9版, 155-167, 地人書館, 東京.