

論文

関東平野の温泉開発と泉質の特徴およびカッティングスの地質学的検討 (予報)

道前香緒里*・石賀 裕明**・石川 憲一*³・千代延 俊*⁴・丸岡 幹男*⁵

Preliminary report on spa exploitation, characteristics of their ground water, and geologic examination of slurries from boring in the Kanto Plain, Japan

Kaori Dozen*, Hiroaki Ishiga**, Ken-ichi Ishikawa*³, Shun Chiyonobu*⁴ and Mikio Maruoka*⁵

Abstract

Eighteen spa with wells over 1000 m deep have recently been exploited in the Kanto Plain. They have potentially high temperatures ranging from 30 to 45°C. The spa waters can be divided into two groups based on their water quality. The first is characterized by relatively higher contents of dissolved matter, especially organic matter, bromine and iodine. The second group has lower contents of dissolved matter and relatively lower temperature. Radiocarbon ages of ten spa water range from 25 k to 35 k years before present, suggesting relatively older water age than those measured in the sedimentary basins. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values were determined for estimation of the origin of the waters (derivation from higher plants or marine planktons) and to provide fundamental data for evaluation of water quality change due to utilization of the spa in the future. Th/Sc ratios of slurries from drilling are useful for discrimination of strata widely distributed in Kanto plain. The Miocene Miura Group is characterized by ratios which change from 0.8 in its lower part to less than 0.1 in its upper part, suggesting change to an immature provenance. The Plio-Pleistocene Kazusa Group has Th/Sc=0.4, and is therefore characterized by a less primitive provenance.

はじめに

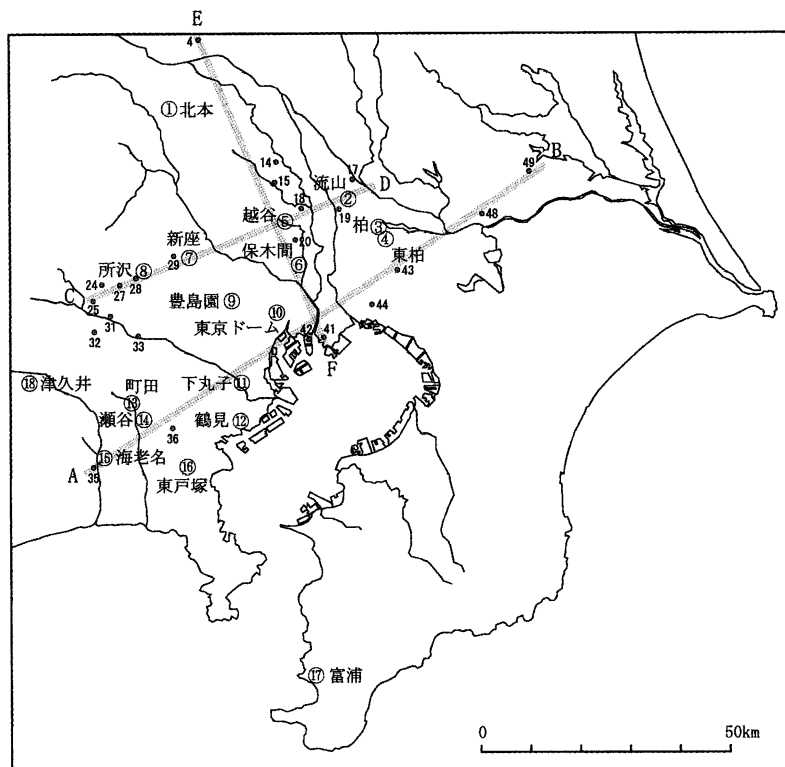
最近、関東平野では多数の温泉開発が行われている。平野における温泉開発は地熱地帯におけるそれとは異なり、一般的な地温勾配を利用した深層ボーリングを行うもので、地下深部に関する貴重な地質情報を提供することで重要である。関東平野は中・古生界を基盤の岩石として、厚い第三紀層の堆積に引き続いて第四紀まで沈降を続け 3000 m にも達する厚い堆積物が存在する。これらの堆積層には温泉開発に有効な帯水層が存在して豊富な被圧地下水を賦存している。しかし、すでに開発が進んだ大阪平野の温泉に比較するとやや温度的には低く、地温勾配は低いものと予想される。一方、関東平野、特に東部の千葉県茂原ではガス田やヨウ素田が古くから開発されている(国末ほか, 2002 参照)。また、関東平野中央部でもかつてよりメタンガスを伴い、有色で臭気をもつ特徴的な温泉が存在することが知られていた(亀井, 2001)。今回の掘削により得られた温泉水の多くが塩化物泉

であり、有機物を含むとともに臭素やヨウ素を含有する。本論ではこれらの温泉の将来における持続可能で適正な使用を考える資料として炭素、窒素の安定同位体の測定を行った。また、深層地下水は様々な地下水の混合したものではあるが、その起源について¹⁴C年代測定を行った。以上の結果を予察的に報告し今後の温泉利用と維持のための基礎資料とするとともに地質ボーリングによって得られた試料についての元素組成の分析を行ったのでその一部を紹介する。

関東平野の地質

関東平野はフォッサマグナよりも東に位置する外帯の地質地帯が基盤の岩石を構成する。深層ボーリングでは三波川変成帯や秩父累帯の構成岩類が基盤岩として捕らえられており、西南日本の帯状配列をなす地帯構造がおおまかに東へ延長して分布する(矢島ほか, 1986)。関東山地は秩父累帯の堆積岩コンプレックスが分布しておりその東延長の平野の地下にも広くそれらの岩石が分布する。その南側に最も若い付加体の四万十帯が分布する。四万十帯のなかには嶺岡構造体と呼ばれる蛇紋岩をふくむ塩基性岩類が分布している(中嶋ほか, 1981)。もともと外帯は白亜紀以降の深成岩の貫入岩に乏しく、地温勾配は低いと判断される。しかし、フォッサマグナの形成で示されるように伊豆マリアナ弧の衝突によって形成される高い地熱地帯は関東平野の西部には広く広がり温泉水の形成に影響を与えているものと考えられる。

* (福) 大阪府社会福祉事業団美原荘
大阪府南河内郡美原町平尾 595-1
** 島根大学総合理工学部地球資源環境学科
*³ テルマリウム(株)
東京都中野区東中野 1-57-8 辻野ビル 5F
*⁴ 秋田大学工学資源学部
秋田市手形学園町 1 番 1 号
*⁵ 湧 有限会社
東京都港区新橋 6-5-4 DIK 616 号



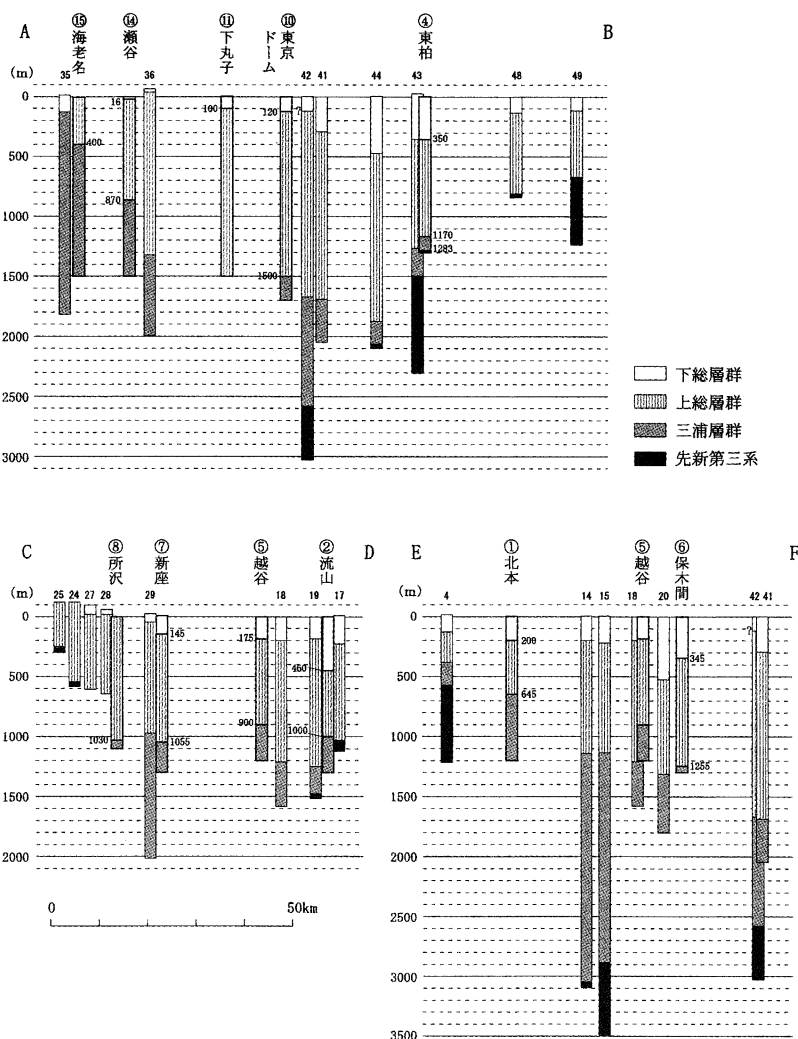
第1図 関東平野における温泉ボーリングの位置および既存のボーリング位置(鈴木, 2002の番号に対応)を示す図。

最も特徴的なことは、関東平野は第三紀以降沈降を続けて3000 mにも達する厚い堆積層を現在まで蓄積していることである。三浦層群と上総層群はそれらを代表する地層で陸上では房総半島や三浦半島に広く分布している。それらの層序は三梨ほか(1979)に詳しい。平野の地下における地層の詳細な層序の確立が必要である(鈴木, 2002)。関東平野では地震予知のための地質構造の解析と活断層の研究は重要であり、温泉開発のために掘削された地質試料も活用されている。また、一方では房総半島に広く知られるガス田やヨウ素田の起源についての研究も重要である(亀井, 2001; 金子ほか, 2002など)。ヨウ素田については同じ平野の大阪平野では知られておらず、関東平野に特徴的な現象である。これらの特色有る地質の解明のためにも温泉ボーリング試料の解析は重要である。鈴木(2002)では防災科学技術研究所で掘削された2000 m級の観測井のデータについて、物理検層のデータも加味して層序を再検討している。上総層群と三浦層群では物理探査結果は著しい相違を示すが、カッタングスでは新第三系以降の地層の判別は難しいことがあるとしている。そして石灰質ナンノ化石を用いた層序の確立を試みている。本論ではその結果を用いて地層対比を行った。厚い堆積層のある関東平野では地下水は広い集水域をもっており、豊富な地下水に恵まれていることから今後さらに利用が進むと考えられる。

柱状試料の層序

関東平野で温泉開発のために掘削した温泉のうち本論で報告するのは18本の温泉である(第1図)。この図には地層対比のために用いた鈴木(2002)のボーリング資料も示している。ここで報告する温泉ボーリングは、掘削深度は1100 mから1700 mまでの様々な深度であり、いずれも10 mピッチでカッタングスを採取しているとともに部分的にはコア試料も採取した。それらの層序については電気検層のデータもあわせて検討して層序を推定した(第2図)。関東平野南西部のボーリング試料の対比をもとに北東-南西方向で2本(A-BおよびC-D)、北西-南東方向で1本(E-F)の断面を作成した。三浦層群と上総層群の境界は上総層群基底部の礫岩により区分され、三浦層群では多数の凝灰岩が挟まれることによっても識別される。上総層群は下位より黄和田層、飯能礫層、仏子層、豊岡礫層に区分されているが、これらの地層の判別はカッタングスのみでは難しい場合もある。ただし、黄和田層のようにシルトや泥の厚い層からなる地層や飯能礫層のように礫に富む地層は特徴的である。

A-B断面: 15.海老名から北東に11.下丸子, 10.東京ドーム, 4.東柏に延びる断面では、平野中央部の江東地殻活動観測井(番号42, 第2図)において最も基盤深度が深くなり、先第三系との境界は2572 mに達する。三浦層群は1670 m以深にあり900 mの層厚を持つと推定されている。その上位に重なる上総層群は、11.下丸子や10.東京ドームにおい



第2図 関東平野の地質ボーリング資料(鈴木, 2002)をもとに温泉ボーリングの地質柱状図の対比を行った図。

ても1400m前後の層厚をもつ。これよりも東の4.東柏では基盤深度はやや浅くなり深度1283mで三波川変成帯の塩基性片岩に着岩している。

C-D断面：8.所沢-7.新座-5.越谷-2.流山の断面では、越谷の東において三浦層群と上総層群の境界面が最も深くなり、1200mに達する。上総層群の層厚は1000mと見積もられている。

E-F断面：1.北本-5.越谷-6.保木間の断面では、番号15の岩槻地殻活動観測井において先第三系と三浦層群との境界は2888mと非常に深くなっている。ここでは三浦層群は1850m以上の層厚で厚く堆積している。逆に上総層群は800m前後であり、平野中央部と比較してやや薄くなっている。

関東平野の温泉の特徴

関東平野の温泉について、これまで掘削開発した18本の温泉の特徴を以下にまとめる。

1) 温泉は1100mから1500mの掘削深度を持つものが多

く、最も深いものでは1700m(10.東京ドーム)に達する。これらは地層中の帯水層から開発され湧出量が多い(100~500m³/日)。しかし、基盤の断層から開発された温泉である15.海老名, 17.富浦および18.津久井の湧出量は少ない(約60m³/日)。

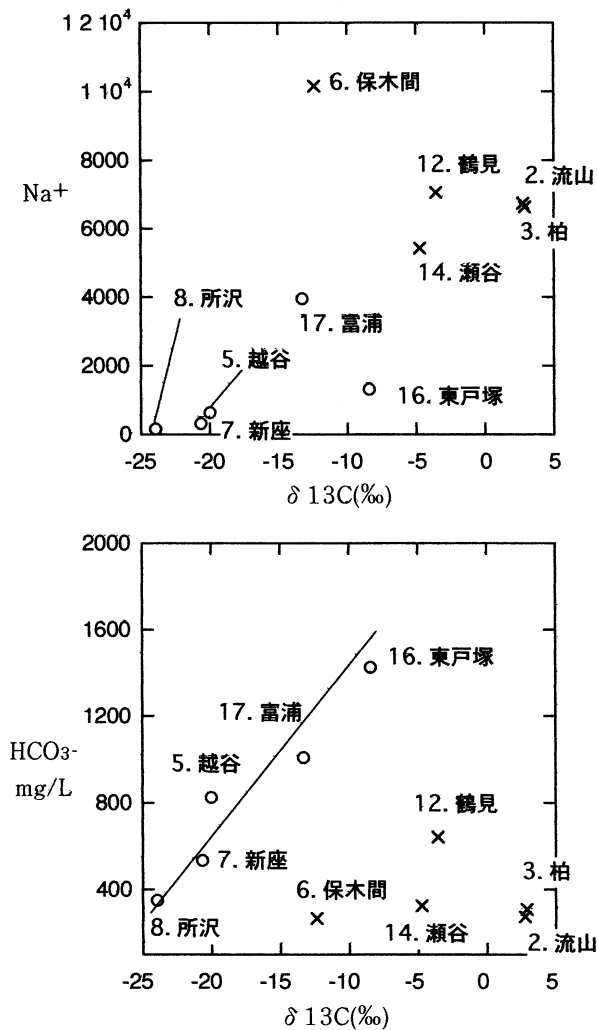
2) 地温勾配は2℃~3℃/100mであるが、地域的な変化があり関東平野の西部では高くなる。

3) 温泉水は一般に有機物に富み着色していて、メタンガスを伴うことがある。

4) 泉質は、ほとんどが塩化物泉(食塩泉)である。

5) 臭素やヨウ素などのハロゲン化物を含むものが多い。

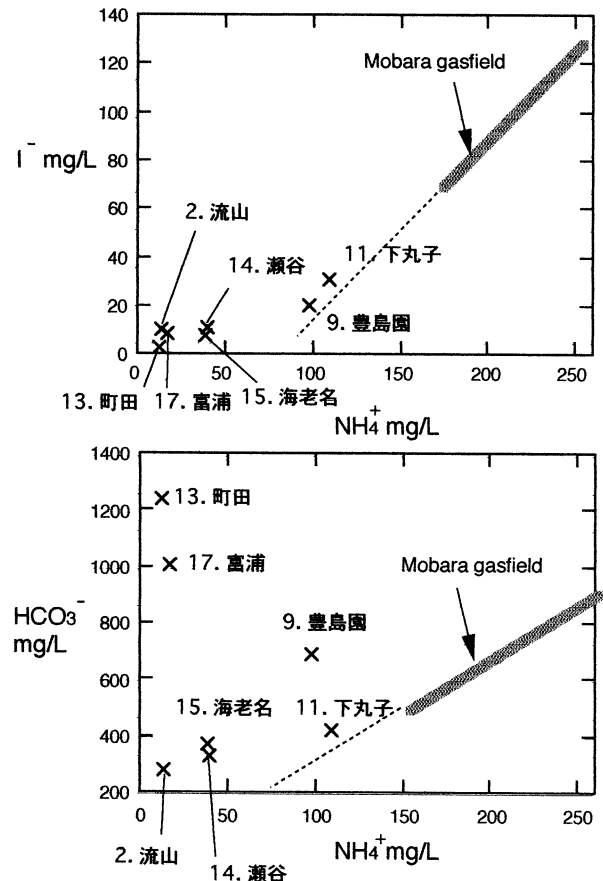
しかし、より詳しく見れば溶存物質の多いものと比較的小さいものに二分される(第3図, 第1表)。これらは掘削深度の相違によるものだけではなく地域的な相違もある。Naイオンが5000mg/Lを超えるものは2.流山, 3.柏, 6.保木間などの関東平野中央部から12.鶴見, 14.瀬谷などの平野の南西部にむかって北東-南西方向の帯状の地域に分布する。逆にNaイオンの低いものは平野北西部の5.越谷, 7.新



第3図 関東平野の温泉水の $\text{Na}^+ - \delta^{13}\text{C}$ および $\text{HCO}_3^- - \delta^{13}\text{C}$ の相関図。 Na^+ に富み重い炭素同位体を持つもの (×) と Na^+ 濃度が低く軽い同位体組成を持つもの (○) に区分される。また、 $\text{HCO}_3^- - \delta^{13}\text{C}$ 相関図では正のよい相関を持つグループ (○) と低い HCO_3^- 濃度を持つグループ (×) に区分される。

座, 8. 所沢などである。

ヨウ素田の発達する茂原地域での地下水と湧出する地層の深度との関係が検討されており, 上総層群においてモル比で $\text{I}/\text{Cl} \times 10^3$ の値は 800 m ~ 1000 m では最も高く 1.8 であり, 深度を増すごとに値は減少して 1800 m ~ 1600 m では 1.0 前後となること示されている (亀井, 2001)。関東平野の温泉において $\text{mol I}/\text{Cl} \times 10^3$ で高い値を示すのは 10. 東京ドーム (0.56), 11. 下丸子 (0.53) であるが, mg/L I-NH_4 の相関図 (第4図) に示すように茂原ガス田 (亀井, 2001) のそれらに比較すれば低濃度である。また, $\text{mol NH}_4/\text{Cl} \times 10^3$ の値についても上総層群の 800 m ~ 1000 m では 28 前後であるが深度が深くなる (1600 m ~ 1800 m) につれて値は 16 に減少する (亀井, 2001)。関東平野の温泉ではこの値は 9. 豊島園 (16), 11. 下丸子 (13), 13. 町田 (14) などではその他の温泉に比較して高い値を持つものの茂原ガス田のそれよりもはるかに低い



第4図 $\text{I}^- - \text{NH}_4^+$ および $\text{HCO}_3^- - \text{NH}_4^+$ 相関図。茂原ガス田の組成をあわせて示す。関東平野において掘削された温泉水にはヨウ素濃度の高い温泉水が存在するが, 下丸子, 豊島園は茂原ガス田の組成線の延長にある。 $\text{HCO}_3^- - \text{NH}_4^+$ 相関図では町田や富浦は HCO_3^- に著しく富んだ組成を持つ。

(第4図)。 $\text{HCO}_3^- - \text{NH}_4^+$ の相関図においては 11. 下丸子は茂原ガス田の組成線の延長付近に位置するが, その他の試料についてはこの線よりも NH_4^+ に乏しい値を示す。特に 13. 町田と 17. 富浦の両試料は極めて高い HCO_3^- 値を持ち HCO_3^- の付加を示す。

温泉水の年代分析および $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 同位体組成

神奈川・東京・埼玉・千葉の9箇所の温泉および千葉県富浦の温泉について年代分析および $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 同位体組成分析を行った (地球科学研究所における AMS による炭素同位体組成測定, および窒素同位体測定による)。富浦の温泉は例外的に若い年代 (2070 年前) を示すがこれを除いて, 他の温泉水の放射年代は 2 万 5 千年 ~ 3 万 8 千年であり 3 万年前後に値が集中している (第2表)。地域的には関東平野中央部の 7. 新座, 6. 保木間, 5. 越谷について 3 万 7 千年前後とやや古い傾向がある。 $\delta^{13}\text{C}$ 値は +2.9‰ ~ -24‰ であり大気の炭酸ガスないし無機炭酸ガスの組成に近い。 $\text{Na}^+ - \delta^{13}\text{C}$ 図では大きく分散するものの Na^+ の高いグループは高い $\delta^{13}\text{C}$ 同位体組成値を持つ (第3図)。また, $\text{HCO}_3^- - \delta^{13}\text{C}$ 図 (第4

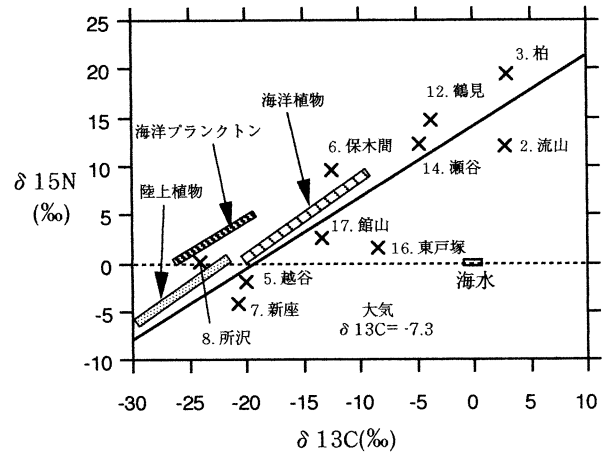
第1表 関東平野の温泉水の掘削深度、温度、湧出量と泉質および分析値をまとめた表。

番号	湧出地	深度 m	泉温 ℃	湧出量 m ³ /day	泉質	色	味・臭い	水素イオン濃度 pH	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Al ³⁺	Mn ²⁺	Fe ²⁺	F	Cl	Br
									mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1	北本	1,200	32.2	374.4	ナトリウム-塩化物・炭酸水素塩温泉	無色澄明	微弱塩味無臭	7.8	590	10.5		7.8	28.5	0.2	0.1	1.4	0.2	763	
2	流山	1,300	43.6	619.2	ナトリウム-塩化物強塩温泉	淡黄色僅微白濁	鹹味微銻物油臭、ガス湧出有り	7.4	6764	63.2	13.2	129.2	363.4	0.2	2.4	0.3	0.1	11200	38.1
3	柏	1,200	42.0	1008.0	ナトリウム-塩化物強塩温泉	無色澄明	鹹味及び鉄味殆ど無臭、ガス発泡有り	7.5	6650	74.8		167.5	352.2	<0.05	0.8	2.1	0.7	11230	42.7
4	東柏	1,300	42.4	835.2	ナトリウム-塩化物強塩温泉	無色澄明	強塩味及び鉄味殆ど無臭、ガス発泡有り	7.5	6612	70.6		152.2	339.4	<0.05	1.1	1.9	1.0	11270	42.7
5	越谷	1,200	39.8	864.0	ナトリウム-塩化物・炭酸水素塩温泉	淡黄色澄明	弱塩味微銻物油臭	8.2	650	29.3		1.8	8.8	<0.05	<0.05	0.6	0.6	554	
6	保木間	1,300	40.8	446.4	ナトリウム-塩化物強塩温泉	無色澄明	強鹹味及び鉄味殆ど無臭	7.4	10170	434.9		140.3	672.3	<0.05	0.9	3.7	0.5	17470	74.3
7	新座	1,300	38.0	820.8	ナトリウム-炭酸水素塩・塩化物温泉	淡黄色澄明	弱塩味無臭	8.2	322	9.1		0.7	0.8	0.4	<0.05	0.4	0.4	191	
8	所沢	1,100	33.4	648.0	単純温泉	淡黄色澄明	殆ど無味無臭	8.3	178	4.3	3.3	0.9	1.4	0.4	0.1	1.5	0.2	67	n.d.
9	豊島園	1,445	33.8	158.4	ナトリウム-塩化物強塩温泉	僅微黄緑色澄明	鹹味微銻物油臭	7.5	7254	272	98.1	112.9	227.5	0.3	0.2	6.9	<0.05	12160	43.8
10	東京ドーム	1,700	41.3	576.0	ナトリウム-塩化物強塩温泉	僅微黄色澄明	鹹味殆ど無臭、ガス湧出有り	7.3	10620	332.0		280.6	532.8	0.2	1.1	4.0	0.5	18260	95.0
11	下丸子	1,500	40.0	144.0	ナトリウム-塩化物強塩温泉	淡黄色澄明	鹹味微銻物油臭、ガス発泡ガス湧出有り	7.3	9496	276.9	109.4	216.8	444.2	<0.05	0.7	12.2	0.1	16180	64.5
12	鶴見	1,500	39.4	388.8	ナトリウム-塩化物強塩温泉	灰白色混濁	鹹味微銻物油臭、砂沈澱有り、ガス湧出ガス発泡有り	7.4	7042	210.0		126.3	297.0	0.6	0.4	0.4	0.1	11680	47.4
13	町田	1,500	36.7	403.2	ナトリウム-塩化物・炭酸水素塩温泉	淡黄色澄明	塩味殆ど無臭	8.1	1558	42.0	12.9	11.9	50.3	0.4	<0.05	1.0	0.2	1825	6.1
14	瀬谷	1,500	45.4	504.0	ナトリウム-塩化物強塩温泉	淡黄色澄明	強塩味微銻物油臭、ガス湧出有り	7.5	5422	53.4	39.8	111.5	412.0	<0.05	0.6	4.0	<0.05	9473	27.7
15	海老名	1,500	30.7	64.8	ナトリウム-塩化物温泉	黄色混濁	強塩味微銻物油臭、ガス湧出有り	8.1	4329	96.7	38.6	29.2	118.1	1.5	0.1	1.7	<0.05	7023	24.6
16	東戸塚	1,300	44.1	432.0	ナトリウム-塩化物・炭酸水素塩温泉	褐色澄明	塩味殆ど無臭	7.9	1321	43.2	1.3	4.2	7.2	0.6	<0.05	0.7	<0.05	1308	n.d.
17	富浦	1,250	26.0	64.8	含鉄-ナトリウム-塩化物温泉	黒色澄明	強銻物油臭、泡沫発生有り	7.4	3960	109.5	17.6	36.2	319.9	<0.1	0.6	51.9	0.5	6403	14.9
18	津久井	1,500	31.5	59.0	ナトリウム-塩化物温泉	無色澄明		9.8	1170	8.0		0.3	77.5					1890	

番号	湧出地	I mg/kg	HS mg/kg	SO ₄ ²⁻ mg/kg	HCO ₃ ⁻ mg/kg	CO ₃ ²⁻ mg/kg	H ₂ SiO ₃ mg/kg	HBO ₂ mg/kg	HAsO ₂ mg/kg	有機物 mg/kg	MnO消費量 mg/l	CO ₂ mg/kg	陽イオン計 mg/kg	陰イオン計 mg/kg	非解離成分計 mg/kg	溶存ガス成分計 mg/kg	成分総計 g/kg	一般細菌	大腸菌群	Rn	
																		集落数 /ml	集落数 /ml	Ci/kg	M.E./kg
1	北本			<0.1	396.0	12.6	58.4	18.9	<0.005			0.0	638	1172	77.3		1.89			n.d.	n.d.
2	流山	9.7	<0.1	2.3	275.8	0.3	44.8	175.8	<0.01		51	6.2	7736	11530	220.6	6.2	19.09	≧10,000	n.d.	n.d.	n.d.
3	柏	11.0		<0.1	312.4	0.3	69.0	189.3	<0.01			24.2	7247	11600	258.3	24.2	19.13			n.d.	n.d.
4	東柏	10.7	n.d.	<0.1	242.8	<0.1	54.1	205.6	<0.01		74	12.3	7177	11570	259.7	12.3	19.02	≧10,000	n.d.	0.76×10 ¹⁰	0.21
5	越谷		0.7	2.3	823.7	4.5	109.7	4.4	<0.005			8.8	690	1385	114.1	8.8	2.20			n.d.	n.d.
6	保木間	16.3		<0.1	269.7	0.3	98.4	7.4	<0.01			7.5	11420	17830	105.8	7.5	29.37			n.d.	n.d.
7	新座			0.7	535.7	3.3	101.7	14.9	<0.005		51	2.2	333	732	116.6	2.2	1.18	6,100	n.d.	1.24×10 ¹⁰	0.34
8	所沢	n.d.	n.d.	2.1	352.1	19.8	53.3	9.8	<0.01			<0.1	190	441	63.1		0.70			n.d.	n.d.
9	豊島園	20.2	<0.1	1.3	684.6	0.9	3.3	8.5	<0.01		≧100	7.0	7972	12910	11.8	7	20.90	≧10,000	n.d.	n.d.	n.d.
10	東京ドーム	36.7	n.d.	<0.1	512.5	0.3	117.3	12.0	<0.01		≧100	23.3	11770	18910	129.3	23.3	30.83	≧10,000	n.d.	0.15×10 ¹⁰	0.04
11	下丸子	30.8	n.d.	4.2	416.1	0.3	108.7	15.5	<0.01			26.0	10560	16700	124.2	26.0	27.40			n.d.	n.d.
12	鶴見	14.7	n.d.	1.7	643.1	0.6	63.2	13.4	<0.01		84	33.4	7682	12390	76.6	33.4	20.18	≧10,000	n.d.	0.24×10 ¹⁰	0.07
13	町田	2.6	<0.1	0.4	1237.0	9.6	50.9	51.0	<0.01	46.0	63	<0.1	1677	3081	147.9		4.91	≧10,000	n.d.	n.d.	n.d.
14	瀬谷	11.0	n.d.	<0.1	324.6	0.3	75.9	34.9	<0.01		53	15.0	6043	9837	110.8	15.0	16.01	43	n.d.	n.d.	n.d.
15	海老名	7.6	<0.1	<0.1	369.8	39.6	66.2	38.9	<0.01			<0.1	4615	7465	105.1		12.18			n.d.	n.d.
16	東戸塚	n.d.	<0.1	<0.1	1423	4.2	104.5	12.6	<0.01	93.3	≧100	11.4	1378	2735	210.4	11.4	4.34	≧10,000	n.d.	n.d.	n.d.
17	富浦	8.2	n.d.	3.4	1007	0.9	238.6	12.4	<0.01	105.0	≧100	57.7	4496	7438	356.0	57.7	12.35	≧10,000	detect	n.d.	n.d.
18	津久井			3.8	103.0		24.2	22.6					1256	1997	46.8		3.30				

第2表 関東平野の温泉の ^{14}C 年代と炭素および窒素安定同位体組成. 17. 富浦を除いて 25,000~38,000 年前の年代を持つ.

地点	地名	^{14}C 年代	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
2	流山	32,320 ±470年	2.8	12.1
3	柏	31,960 ±400年	2.9	19.5
5	越谷	36,210 ±530年	-20.0	-2.0
6	保木間	38,270 ±600年	-12.4	9.6
7	新座	37,160 ±600年	-20.7	-4.3
8	所沢	27,280 ±200年	-24.0	0.1
12	鶴見	35,380 ±490年	-3.6	14.8
14	瀬谷	25,120 ±120年	-4.8	12.3
16	東戸塚	29,530 ±400年	-8.4	1.5
17	富浦	2,070 ±40年	-13.3	2.6



第5図 関東平野の温泉水の炭素-窒素安定同位体組成を示す図. 両者は正の強い相関を持ち、軽い組成から重い組成まで変化に富み、陸上植物の同位体組成に近いものから海洋植物、そしてさらに別の組成のものまで認められる.

図)では両者に正の相関を持つグループ(図中の○)と HCO_3^- が低く高い炭素同位体組成を持つグループ(図中の×)に区分される. 後者のグループは一般に無色に近く 40°C 以上の泉温を持つものが多い. HCO_3^- - $\delta^{13}\text{C}$ 図で正の相関を示すものは、16. 東戸塚は 44.1°C を示すが、その他は 40°C 以下でやや低い. 温泉の掘削深度は 1100 m - 1300 m と大きな相違はないので地域的な帯水層の変化に関連するものかも知れない.

窒素の同位体組成については深層地下水の場合には何に起因するかは不明な点が多い. また、両元素の同位体は生物の活動によって同位体交換を行い変化に富む. しかし、一般には陸上植物では炭素、窒素共に軽い同位体組成を持ち、海洋植物では共にやや重い同位体組成を持つ(第5図). また、海水はほぼ $\delta^{15}\text{N}=0\text{‰}$ 、 $\delta^{13}\text{C}=0\text{‰}$ である (Hoefs, 1997).

関東平野の温泉水の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 同位体組成を示した. 両者には良い正の相関が見られ軽い組成を持つ 8. 所沢の試料 ($\delta^{13}\text{C}=-24$, $\delta^{15}\text{N}=+0.1$) および 7. 新座 ($\delta^{13}\text{C}=-20.7$, $\delta^{15}\text{N}=-4.3$) から 3. 柏の重い同位体組成を持つ試料 ($\delta^{13}\text{C}=+2.9$, $\delta^{15}\text{N}=+19.5$) まで変化に富む. その他、2. 流山、12. 鶴見および 14. 瀬谷は窒素、炭素同位体共に重い組成をもつ. これに対して 5. 越谷、7. 新座は両者ともに軽い組成を持つ. 両元素の同位体組成から判断すると陸上植物のそれと類似する組成を持つものから海洋植物のそれまで変化に富むこととなるが、さらに重い同位体組成を持つものについては塩化物濃度が高く HCO_3^- 濃度が低いグループの温泉群であり、軽い同位体組成を持つ温泉水のグループとは起源は異なると言える.

堆積物の元素組成分析

現在温泉掘削の行われた地点のカッティングスについて全岩の元素組成を分析しているが E-F 断面の 6. 保木間を代表例として分析結果を以下に示すとともに、関東平野南西部の 15. 海老名(おもに三浦層群からなる)、中央部で最も上総層

群が厚くなる 9. 豊島園の堆積岩の元素組成の内 Th/Sc 比を用いて元素組成の垂直変化を検討する. また、山崎ほか(1999)は房総半島的那古と鴨川地域において三浦層群および上総層群の代表的な地層の元素組成を検討し、両層において境界部付近で組成が著しく変化することを報告しているのであわせて対比する.

堆積岩の元素組成は様々な要素の総和であり、源岩の組成、風化侵食作用、運搬作用、続成作用などのそれぞれの作用と最も関連ある元素および元素の組み合わせによって評価する. 保木間のカッティングスでは深度 $10\sim 790\text{ m}$ は 20 m ごとに、 800 m 以深は 10 m ごとに元素組成を検討した(第6図、第3表). これに加えて Sc, Br, I はこれらの試料をさらに 1 試料おきに分析した.

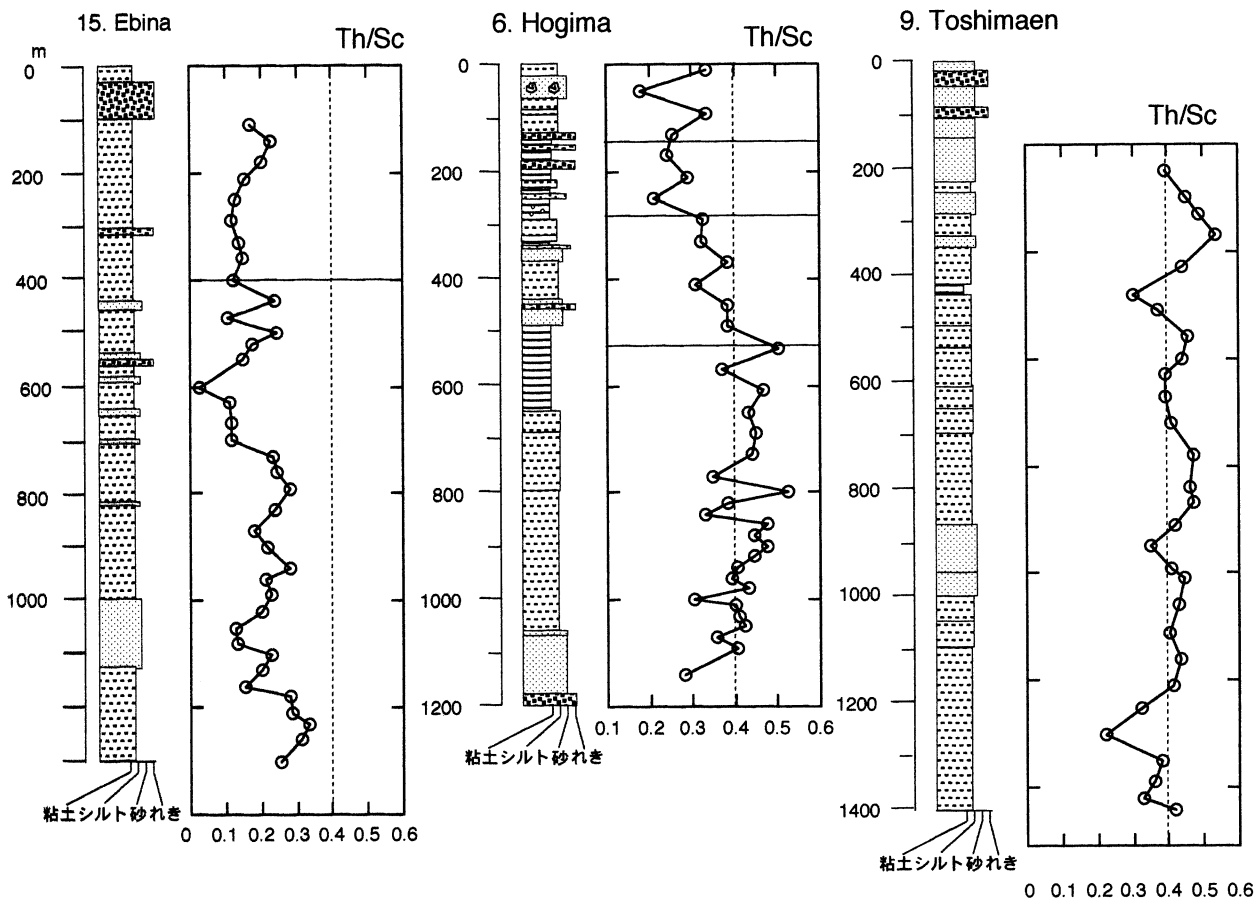
Th/Sc 比: Th/Sc 比は源岩組成を評価する上で重要であり、上部大陸地殻では $\text{Th}/\text{Sc}=1.0$ 、塩基性岩ではこの値より低くなり、 $\text{Th}/\text{Sc}=0.3$ 前後となる. 保木間における垂直変化を見ると 1200 m から 500 m までは多少変化するものの $\text{Th}/\text{Sc}=0.45$ 前後であり、中性ないし塩基性岩の組成を持つ岩石が後背地に存在したと考えられる. 粒度組成はシルトないし上部で泥質岩であり、粒度組成による元素組成の変化は少ない. 深度 500 m から上位では最上部まで次第に Th/Sc 比の値は減少し ($\text{Th}/\text{Sc}=0.3$)、塩基性岩の組成を持つ岩石に富むようになったと言える.

Zr 値: Zr の濃度は鉱物のジルコンの存在度に強く関連する. もちろんジルコンは細粒砂に淘汰を受けて含まれやすい. また、源岩組成では花こう岩質の岩石に多く含まれ、強い風化作用を受けた砕屑物に濃縮する. 保木間の試料の Zr の垂直変化では、Th/Sc と同じく 1200 m から 500 m の試料は $\text{Zr}=120\text{ ppm}$ でほぼ一定である. この上位では砂質であり Zr 濃度は変化するが全体的に減少し、深度 300 m で再び 120 ppm に増加するが、この層準からは 100 ppm 前後となり、深度 100 m 以降さらに減少する.

Fe_2O_3 : 鉄は $1200\text{ m}\sim 500\text{ m}$ ではほぼ一定 ($6\text{ wt}\%$) である.

第3表 関東平野中央部の6.保木間におけるカッティングス試料の蛍光X線分析による全岩元素組成の分析値。

Hogima-1																		Hogima-2																							
ppm																		ppm																							
m	As	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	V	Sr	Y	Nb	Zr	Th	Sc	Br	I	wf%		m	As	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	V	Sr	Y	Nb	Zr	Th	Sc	Br	I	wf%							
																TiO2	Fe2O3	CaO	P2O5	TS																TiO2	Fe2O3	CaO	P2O5	TS	
10	13	15	92	33	35	62	180	203	20	6	117	7	21	3.9	33	0.64	7.27	3.34	0.13	0.73	800	13	17	85	68	36	63	141	185	24	7	130	9	18	0.9	31	0.57	6.95	2.35	0.13	0.40
30	6	10	59	11	5	29	73	488	12	3	71	3				0.36	4.28	17.4	0.12	0.28	810	10	16	82	47	30	57	144	214	22	7	128	8		0.56	6.59	2.83	0.22	0.52		
50	6	10	75	16	15	60	183	215	15	4	89	4	21	0.3	32	0.66	7.21	3.89	0.06	0.19	820	7	13	68	35	13	48	111	290	18	5	107	7	17	1.7	25	0.47	5.57	3.48	0.1	0.48
70	7	12	69	16	9	45	123	360	14	3	92	3				0.49	5.8	4.23	0.11	0.50	830	11	16	85	54	25	53	126	196	23	7	121	9		0.51	6.82	2.82	0.09	0.51		
90	8	13	79	25	17	55	150	225	19	5	115	6	17	1.2	31	0.57	6.57	2.92	0.11	0.79	840	8	12	75	28	13	48	123	256	18	5	114	6	18	2.4	30	0.48	5.88	3.39	0.09	0.60
110	8	13	82	31	19	50	152	227	19	5	106	6				0.56	6.68	2.97	0.09	0.86	850	8	12	71	37	15	42	128	266	18	5	113	6		0.51	5.86	3.73	0.1	0.62		
130	8	14	96	40	23	58	179	290	20	5	107	6	22	1.3	28	0.66	8.05	3.2	0.08	0.69	860	9	16	78	38	19	46	119	213	21	6	122	7	15	1.7	28	0.5	5.64	2.97	0.09	0.53
150	6	11	70	40	16	49	187	234	17	3	98	4				0.59	7.52	2.65	0.06	0.14	870	9	15	78	33	18	47	120	220	20	6	124	6		0.48	5.6	3.01	0.09	0.54		
170	7	11	68	31	19	46	154	197	17	4	97	4	18	0.3	27	0.49	6.13	2.98	0.15	0.34	880	9	16	83	33	31	61	141	202	21	7	123	7	16	3	26	0.55	6.23	2.78	0.12	0.46
190	4	10	48	23	14	31	85	168	15	4	95	4				0.35	4.57	1.9	0.07	0.27	890	10	16	82	37	26	51	133	218	21	6	126	7		0.58	6.11	2.98	0.1	0.63		
210	6	12	58	26	17	40	124	192	17	4	103	5	15	0.3	25	0.43	5.48	2.67	0.07	0.21	900	11	15	79	37	28	51	129	216	21	6	124	8	16	3.4	24	0.47	6.28	2.89	0.1	0.64
230	5	12	86	52	20	50	187	182	20	4	105	5				0.6	7.41	2.57	0.06	0.14	910	9	16	75	130	17	48	115	229	20	6	115	6		0.46	6.74	3.55	0.12	0.47		
250	3	9	53	29	10	40	124	204	15	3	91	4	17	0.0	30	0.38	5.39	2.35	0.06	0.04	920	10	15	82	46	21	48	114	195	22	6	124	8	17	2.6	25	0.51	5.95	2.63	0.09	0.47
270	12	14	81	31	31	63	152	192	20	6	122	6	17	0.5	29	0.56	6.25	2.46	0.07	0.39	930	10	15	86	48	28	0	220	20	6	118	7		0.49	5.06	2.95	0.19	0.42			
290	9	16	101	47	41	78	187	200	22	7	118	7				0.75	8.17	2.68	0.11	0.41	940	7	12	76	25	22	47	117	229	19	5	122	6	16	3.2	32	0.47	5.18	2.98	0.09	0.59
310	9	16	101	47	41	78	187	200	22	7	118	7				0.75	8.17	2.68	0.11	0.41	950	8	14	74	21	18	39	107	201	21	6	127	7		0.47	5.06	2.98	0.09	0.59		
330	10	13	69	23	17	38	108	183	18	6	110	5	16	0.8	24	0.48	5.51	2.25	0.08	0.30	960	9	15	83	31	37	53	126	211	20	6	122	6		0.51	5.95	2.88	0.09	0.57		
350	4	11	36	15	10	33	40	165	15	3	87	6				0.21	3.63	2.43	0.06	0.08	980	9	14	81	25	22	48	129	200	21	6	123	7	17	3.8	25	0.51	6.07	2.91	0.09	0.62
370	7	13	49	12	7	36	71	167	17	3	94	5	12	0.2	26	0.33	4.19	2.53	0.06	0.16	990	9	14	80	32	18	40	124	198	20	6	127	6		0.49	5.65	2.92	0.09	0.70		
390	4	10	27	8	1	21	2	192	11	1	67	3				0.09	1.79	6.86	0.04	0.12	1000	9	15	74	25	16	42	129	203	20	6	122	5	16	3.3	32	0.51	5.77	3.01	0.08	0.62
410	4	11	58	10	5	32	66	220	15	3	87	5	15	0.1	25	0.31	4.11	3.39	0.05	0.10	1010	9	15	79	28	22	50	131	197	20	6	126	6	16	3.1	32	0.5	5.83	2.87	0.09	0.57
430	7	13	62	13	12	51	95	217	18	5	120	6				0.41	4.76	3.01	0.05	0.25	1020	10	16	78	27	20	45	123	195	21	6	128	7		0.48	5.6	2.79	0.11	0.42		
450	6	12	51	10	11	47	74	204	16	4	98	5	12	0.1	25	0.34	4.08	2.79	0.06	0.24	1030	9	15	76	22	21	52	118	198	21	6	127	7	17	2.2	26	0.47	5.49	2.92	0.09	0.42
470	7	12	26	14	7	15	4	305	15	3	82	5				0.09	1.57	4.21	0.06	0.36	1040	9	16	80	52	20	47	119	201	21	6	125	7		0.49	5.76	3.01	0.09	0.42		
490	6	13	57	12	10	49	100	231	17	5	148	5	14	0.2	27	0.45	4.39	4.19	0.07	0.36	1050	10	16	79	24	24	50	114	189	21	6	131	7	17	2.4	30	0.48	5.6	2.77	0.09	0.46
510	10	15	49	146	9	36	53	350	16	4	92	6				0.25	3.02	6.42	0.12	0.65	1060	7	14	81	23	15	40	107	245	19	5	117	7		0.46	5.41	3.98	0.1	5.85		
530	11	15	89	28	25	59	128	253	21	6	116	9	17	1.0	24	0.5	6.36	3.53	0.08	0.69	1070	7	14	81	21	17	37	111	244	19	5	115	6	16	3.6	34	0.45	5.38	3.9	0.1	5.59
550	9	14	75	48	26	53	150	220	22	6	125	7				0.56	5.87	3.09	0.1	0.59	1080	9	15	79	123	20	48	132	210	20	6	121	7		0.49	5.92	3.42	0.1	5.58		
570	11	16	80	34	26	54	142	311	20	6	115	7	18	1.2	31	0.55	6.27	3.72	0.08	0.73	1090	9	14	80	26	19	42	123	204	21	6	125	7	18	3.1	28	0.48	5.89	3.27	0.09	0.47
590	10	16	86	53	39	65	161	238	23	7	123	9				0.59	5.82	3.42	0.1	0.88	1100	8	14	82	23	18	40	109	217	20	6	129	8		0.47	5.35	3.91	0.09	0.62		
610	12	15	76	37	26	53	128	233	22	7	122	7	16	0.7	26	0.52	6.35	3.32	0.2	0.58	1110	9	15	81	25	21	46	113	199	22	7	129	8		0.48	5.61	3.19	0.09	0.65		
630	11	18	81	40	26	46	130	209	24	7	133	9				0.49	5.47	2.71	0.15	0.62	1120	10	16	84	32	29	57	150	197	21	6	124	9		0.53	6.08	2.87	0.1	0.52		
650	10	15	76	32	26	64	143	279	19	6	113	7	17	1.8	27	0.54	6.32	3.4	0.1	0.57	1130	9	15	81	33	25	54	146	215	21	6	119	7		0.55	6.35	3.21	0.1	0.47		
670	11	16	84	39	32	58	151	196	23	7	124	7				0.56	6.53	2.61	0.1	0.38	1140	7	12	77	32	18	47	162	299	16	4	96	6	20	2.7	29	0.56	6.72	4.49	0.1	0.49
690	12	15	90	36	49	67	166	183	24	8	131	9	19	1.0	25	0.61	7.31	2.33	0.1	0.29	1150	7	12	79	32	19	42	152	303	16	4	94	5		0.55	6.26	4.63	0.09	0.45		
710	10	15	86	30	26	58	141	198	22	7	125	8				0.56	6.14	2.63	0.09	0.41	1160	9	16	84	198	34	48	136	219	21	6	116	6		0.54	6.29	3.29	0.09	0.53		
730	10	15	78	29	25	59	133	221	21	7	121	7	16	1.2	28	0.56	6.78	2.93	0.16	0.43	1170	11	14	85	22	18	40	146	219	21	6	116	6		0.54	7.18	3.29	0.16	0.54		
750	11	17	83	31	30	59	138	215	22	7	127	7				0.6	6.7	2.71	0.1	0.39	1180	10	15	83	27	15	41	159	263	19	4	101	5		0.59	7.48	4.52	0.18	0.64		
770	11																																								



第7図 関東平野の15.海老名(Ebina), 6.保木間(Hogima)および9.豊島園(Toshimaen)におけるボーリング試料の柱状図とTh/Sc比の垂直分布を示す図。

三浦層群と上総層群の元素組成の変化

15.海老名および9.豊島園の試料におけるTh/Sc比の垂直変化について次に検討する。海老名の試料では1100m~1000mに砂層が存在するが全般にシルトないし泥が卓越する。最上部の礫層を除いてこれらは三浦層群に対比される。Th/Sc比はやや変化するもののいずれも0.4以下であり、最下部(Th/Sc=0.3)から600mの深度の試料まで減少し、0.1以下となり塩基性岩石からの寄与が大きいことを示す(第7図)。その上位(500m)でやや増加するがTh/Sc=0.1~0.2で推移する。このように著しく低いTh/Sc比を持つことは特徴的である。

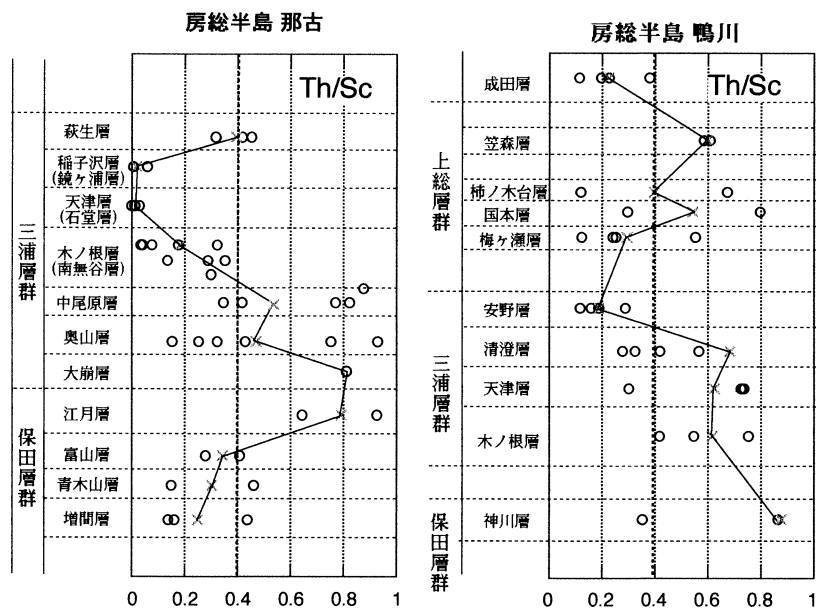
豊島園の試料はやや推移するもののTh/Sc=0.4で一定である。分析に用いた深度200mから1400mまでの試料について、1200mにわたり組成が均一であることは、1)堆積盆地において後背地の組成が変化しなかったこと、2)堆積速度が速く泥質堆積物が卓越していても供給された碎屑物の量が多かったこと、などが予想される。いずれにしてもTh/Sc比をもとに地層の対比を行うことが可能である。

山崎ほか(1999)は房総半島で三浦層群と上総層群の元素組成を検討して、年代ごとの変化を検討した(第8図)。房総半島西部の那古地域では漸新統ないし中新統下部の保田層

群ではTh/Sc=0.2~0.4で低いが中新統中部の三浦層群下部では値は高くなり(Th/Sc=0.8),そこから再び三浦層群上部にむけて値は著しく低下する(Th/Sc<0.1)ことが示されている。鴨川地域ではこのような変化はややおくれて生じているように見えるが、三浦層群最上部(安野層)でTh/Sc比は減少する(0.2)。それより上位の上総層群中部の柿ノ木台層ではTh/Sc=0.4となる。したがって、三浦層群の上部においてTh/Sc比が著しく低下することは、塩基性岩が後背地に多量に露出して碎屑物として供給されたと推定される。その上位の上総層群の堆積時にはややTh/Sc比は高くなるのでこれらの塩基性岩の露出は縮小したと予想される。

ま と め

1. 関東平野には溶存物質に富み有色で有機物が含まれる温泉水が1100m~1700mの深度の掘削で開発されている。
2. これらにはヨウ素と臭素のほかメタンガスを伴うものが有る。
3. 炭素、窒素の安定同位体化学組成からはこれらの温泉は2分され、塩分濃度が高くほとんど無色のものと、塩分濃度が低く同位体組成も軽い値を持つものに区分される。
4. ボーリング試料の堆積物の元素組成の検討からは、源岩



第 8 図 房総半島の那古および鴨川地域に分布する保田層群，三浦層群，上総層群の各地層の Th/Sc 比の変化。山崎ほか (1999) および未公表資料に基づいて作成。三浦層群上部で Th/Sc 比は著しく低くなる傾向をもつ。

の組成としては塩基性岩に由来するといえる。しかし、ヨウ素や臭素の含有量は少なく関東平野の東部の茂原地域で報告されている上総層群のこれらのハロゲン元素の濃度とは異なる。

5. 堆積岩の元素組成で特に後背地の源岩組成をよく反映する Th/Sc 比からは三浦層群の上部では $Th/Sc < 0.2$ と極めて低くなり、この上位の上総層群では $Th/Sc = 0.4$ となり、組成変化をよく反映している。

謝 辞

関東平野の温泉ボーリングについて地質試料ならびに温泉水の分析値の公表を快く認めていただき、また、日頃より研究への援助と理解をいただいている前特殊プラント工業(株)会長駿河 進氏および社長駿河 学氏に感謝いたします。南関東地質研究所の三梨 昂先生には関東平野の地質について有用な御助言と情報をいただいた。環境地質学講座の山内靖喜教授には著者の道前，石川が島根大学在学中より御指導御鞭撻いただいている。英文はバリーロザー先生に校閲をいただいた。記して感謝いたします。

引用文献

- Hoefs, J., 1997, stable isotope geochemistry. Springer, 201 p.
- 亀井玄人, 2001, 茂原ガス田の地下水に含まれるヨウ素の起源と挙動. 資源地質, **51**, 145-151.
- 金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎, 2002, アークアによるメタンの生成と間隙水への濃縮機構. 石油技術協会誌, **67**, 97-110.
- 国末彰司・三田 勲・和氣史典, 2002, 千葉県茂原ガス田の地下地質と水溶性天然ガス・ヨウ素の生産性について. 石油技術協会誌, **67**, 83-96.
- 三梨 昂・菊地隆男・鈴木尉元・平山次郎・中嶋輝允他, 1979, 東京湾とその周辺地域の地質. 特殊地質図 (20), 10 万分の 1, 地質説明書. 地質調査所, 91 p.
- Motojima, K. and Hirukawa, T., 1979, Geochemistry of some iodine-rich rocks and brines from the Mobarra Gasfield, 50 km southeast of Tokyo. Bull. Geol., Surv. Japan, **30**, 441-457.
- 中嶋輝允・牧本 博・平山次郎・徳橋秀一, 1981, 鴨川地域の地質. 地質調査報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 107 p.
- 鈴木宏芳, 2002, 関東平野の地下地質構造. 防災科学技術研究所研究報告, **63**, 1-19.
- 矢島敏彦・吉田 尚・鈴木尉元・楡井 久, 1986, 日本の地質 3 関東地方, 関東平野の先第三系基盤, 76-78. 共立出版.
- 山崎静子・道前香緒里・石賀裕明, 1999, 台湾および日本列島の古第三系および新第三系の堆積岩の Th, Sc および希土類元素組成. 島根大学地球資源環境学研究报告, **18**, 55-67.

(受付: 2003 年 11 月 14 日, 受理: 2003 年 12 月 9 日)