

処分環境下でのガラス変質に関するナチュラルアナログ研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003年1月

株式会社 ダイヤコンサルタント

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

処分環境下でのガラス変質に関するナチュラルアナログ研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

二口 克人 ※, 桜本 勇治 ※, 廣木 峰也 ※

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分に係わるナチュラルアナログ研究の一環として、火山ガラスの変質性状に関する調査を実施した。

火山ガラスの埋没続成作用による変質に関して、温度、埋没時間、変質に関わる地下水の組成をキーワードとして文献調査を実施した。

また火山ガラスについては、南関東において財団法人防災科学技術研究所によって実施された、地殻活動観測井（横浜孔）の掘削時に採取された三浦層群の火山灰に含まれる火山ガラスの変質について調査した。変質状況および変質条件を把握するために、火山灰の薄片観察、コアの希釈法で得られた水試料および横浜孔近傍の深部地下水の水質分析、そしてコアの微化石分析を実施した。

薄片観察結果では、火山灰中のガラスは全て鉱物結晶に変質していることが認められた。

希釈法で得られた間隙水の組成から、変質に関与した水は Cl⁻イオンに富むことが推定され、横浜孔近傍の深部地下水の組成は化石海水と天水起源の地下水との混合であることが判明し、これらのことから横浜孔の火山ガラスの変質に関与した水は化石海水的な水質であったことが確認できた。

微化石分析の結果、調査対象の火山ガラスは 3.65～4.2Ma.の堆積年代であることが解り、三浦層群上部に相当することが確認できた。

以上のことから、調査対象の火山ガラスは、環境温度が約 70℃で約 50 万年間の期間に化石海水的な地下水環境の下で、全てがモンモリロナイトおよび斜プチロル沸石に変質した天然事例と考えられた。

本報告書は株式会社ダイヤコンサルタントが核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

※ 株式会社ダイヤコンサルタント

Natural Analogue Studies of Long Term Alteration of Volcanic Glass
under the High Level Radioactive Waste Disposal Conditions.

(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Katsuhito Futakuchi ※ Yuji Sakuramoto ※, and Minenari Hiroki ※

Abstract

The alteration characteristics of volcanic glass and bentonite in geological medium are investigated as natural analogues of geological disposal of high-level radioactive wastes.

For the study of alteration of volcanic glass, literature survey, petrographical observation by using optical microscope, chemical analysis of pore water and groundwater, and microbiostratigraphical study were carried out.

The volcanic ashes were collected from a borehole, which had been drilled in the Kanto region by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. The volcanic glass was wholly altered in thin sections.

Chemical analysis of pore water indicate the chloride-rich composition. And chemical analysis of groundwater, which are pumped up near the studied borehole, indicate the mixing product of connate marine water and fresh groundwater.

Fossil evidence suggests that the studied volcanic glass is 3.65~4.2Ma. in age, and is correlated with upper Miura Group.

This study leads to the following conclusion.

The volcanic glass, under the temperature condition 70°C, was wholly altered to montmorillonite and clinoptilolite. This case must be occurred in the connate marine water at last 0.5 Ma..

This work was performed by Dia Consultants Co. Ltd under contract with Japan Nuclear Cycle Development Agency.

JNC Liaison : Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

※ Dia Consultants Geoengineering Department

目 次

1. はじめに.....	1
2. 火山ガラスの続成変質に関する文献調査.....	2
3. 調査地域の概要.....	13
3.1 地形.....	13
3.2 地質.....	14
4 分析・試験.....	19
4.1 試料.....	19
4.2 方法.....	20
4.3 試料の埋没史.....	25
4.4 分析・試験結果.....	35
5 考察.....	43
6 おわりに.....	47
7 参考文献.....	48

目 次

図 2-1	凝灰岩質堆積層中の続成変質帯	2
図 2-2	地温勾配と沸石帯の関係	3
図 2-3	間隙水の塩素濃度と沸石帯深度の関係	4
図 2-4	海成・淡水成層中の珪質ガラスの埋没続成変質と沸石帯	5
図 2-5	山梨県御坂山地西部における沸石帯	6
図 2-6	各鉱物の変質に影響を与える物理的, 化学的要因	7
図 2-7	第三紀, 白亜紀の堆積物中の各鉱物の続成変質に必要な最大被覆圧力と地温	7
図 2-8	油田地域のボーリング孔位置図	8
図 2-9	油田地域の微化石基準面	8
図 2-10	各ボーリング孔における微化石基準面の位置と沸石帯の区分	8
図 2-11	各ボーリング孔における沸石帯上限の堆積速度曲線と地質時間の概算	9
図 2-12	各ボーリング孔における各沸石帯上限深度と温度履歴曲線	11
図 2-13	各沸石帯の有効被熱時間ダイヤグラム	12
図 3.1-1	横浜孔付近の地形図	13
図 3.2-1	横浜孔付近の地質図	15
図 3.2-2	横浜孔付近の層序	16
図 3.2-3	横浜孔総合柱状図	17
図 4.2-1	横浜孔および横浜温泉位置図	22
図 4.3-1	横浜孔層序細区分案	27
図 4.3-2	三浦半島と南房総半島中部における三浦層群の層序と時代	29
図 4.3-3	上総層群のシーケンス層序	31
図 4.4-1	横浜孔の軽石の薄片写真 (40 倍)	35
図 4.4-2	横浜孔の軽石の薄片写真 (400 倍)	36
図 4.4-3	横浜温泉のヘキサダイヤグラム	41
図 5-1	横浜温泉の Br/Cl-B/Cl 比のプロット	44
図 5-2	水素・酸素安定同位体比のデルタダイヤグラム	46
図 5-3	本検討結果を追加した各沸石帯の有効被熱時間ダイヤグラム	46

表 目 次

表 2-1	各変質帯上限の圧力, 深度, 地温の範囲.....	3
表 2-2	油田地域における深掘試錐で観察された各沸石帯の境界深度および温度.....	5
表 2-3	調査孔の地質および地球物理パラメーター.....	6
表 2-4	調査孔における斜プチロル沸石帯, 方沸石帯, 曹長石帯の物理的データ.....	9
表 4.1-1	調査対象コア試料.....	19
表 4.2-1	横浜温泉の化学成分表.....	23
表 4.2-2	水質分析項目および分析方法.....	24
表 4.3-1	南関東ガス田産付随水の化学分析例.....	33
表 4.4-1	石灰質ナンノ化石分析結果.....	38
表 4.4-2	有孔虫分析結果 (浮遊性種).....	39
表 4.4-3	有孔虫分析結果 (底生種).....	40
表 4.4-4	水質分析結果.....	41
表 4.4-5	横浜孔コア希釈水の希釈率による換算結果.....	42
表 5-1	横浜温泉と White(1957)の Cl, I, B, Br 濃度比の比較.....	44

1. はじめに

圧縮ベントナイト中の廃棄物ガラスの長期変質挙動に関するナチュラルアナログ研究として、これまでに南房総鴨川地域に分布する泥質岩中の火山ガラス(南関東に広く分布する上総層群中の大田代層中の 8 番の凝灰岩質鍵層で、「O8」と呼ばれるスコリア層中のガラス)の変質状態ならびに変質環境条件の調査が実施されてきた。

その結果、以下のことが明らかになっている。

- (1) 水/ガラス単純系のナチュラルアナログである富士宝永スコリアの火山ガラスに観察されたような表面変質層が、泥質岩中の火山ガラスの表面に観察されない。
- (2) 房総半島茂原地域のガス井から採取した、泥質岩中の火山ガラスの変質に関与したと考えられる地下水の SiO_2 濃度は 60~80ppm であり、 $\text{SiO}_2(\text{am})$ に平衡とみなせる。
- (3) 火山ガラス(O8)は均質に水和が進行しているものの、表面付近のわずかな Na の減少を除けば成分の変化は認められない。
- (4) 自生鉱物の生成温度から推定された火山ガラス(O8)の受けた最高温度は 28°C 程度と低い。

以上のように、泥質岩中に取り込まれた火山ガラス(O8)は堆積後約 100 万年間変質しなかった事例として重要と評価されているが、履歴温度が低いことと、調査に用いた試料が露頭試料であることから、試料が現在まで置かれてきた温度および地下水環境(地下深部環境から浅部環境へ)の変化に不明確さが残ると考えられている。

これらの結果を受けて平成 13 年度は、地下水環境や温度条件について、より明解な条件を有する試料として、南関東において掘削された大深度のボーリングのコア中の火山ガラス(凝灰岩類)を調査対象試料としてナチュラルアナログ研究がなされている。具体的には、財団法人防災科学技術研究所(現在は独立行政法人防災科学技術研究所、以下、防災科学技術研究所と呼称)が南関東において 1994~1997 年にかけて掘削した地殻活動観測井で得られたボーリングコアをナチュラルアナログ研究の対象としている。掘削された 15 孔のうち、比較的南房総鴨川に近い横浜孔と市原孔に認められた凝灰岩類を調査対象としている。その結果、以下のことが判明している。

- (1) ガラスの変質生成物と考えられる自生鉱物は、横浜孔の深度約 2000m の試料において確認され、それらは斜プチロル沸石およびモンモリロナイトである。
- (2) 当該深度は、既往文献による温度検層結果から約 70°C であり、約 50 万年前以降から現在まで変化していないと判断される。
- (3) 横浜孔付近の既往文献によれば、変質に関与した地下水の水質は化石海水的なものと推定される。

平成 14 年度の研究は、火山ガラスの続成作用による変質に関して、温度、埋没時間、変質に関わる地下水をキーワードとして文献調査を実施した。

また上記の横浜孔の深度約 2000m の試料を用いて、偏光顕微鏡観察による火山ガラスの変質状況のさらなる調査、希釈法によるコアに残されている水質情報取得や横浜孔近傍の深部地下水の水質分析、微化石分析による試料採取層準の地質時代の把握を実施し、天然ガラスの地下深部環境下における長期変質挙動のナチュラルアナログ事例を得ることを目的とした。

2. 火山ガラスの続成変質に関する文献調査

処分環境下におけるガラスの長期耐久性に関する知見を得るために、火山ガラスの続成作用下における変質状況に注目して既往文献調査を行った。処分環境下におけるガラスの変質に関する天然事象を調査する上で、変質状況以外に温度、埋没時間、変質に関わる地下水をキーワードとして注目した。ガラス質の岩石の続成作用の研究に関しては、わが国において従来から検討されている石油開発に伴う基礎試錐孔での自生鉱物の生成条件についての検討が多角的なものである点を評価し、その中でも変質に関わる温度、埋没時間が記載されているものを本文献調査で取り上げた。以下に、油田地域での続成作用の研究成果を主に紹介する。

わが国における深層ボーリングでの自生鉱物の研究としては、古くは IJIMA and Utada(1971)が行った新潟油田地域における堆積層を対象とした続成作用によるガラスの沸石化についての研究がある。この中で珩長質ガラスの累進的な沸石～長石化が提唱されている(図 2-1 参照)。また地温、埋没深度と各変質段階との関係が表 2-1 および、図 2-2 のように示されている。また、珩長質ガラスに作用する間隙水の塩化物イオン濃度と深度と堆積岩の岩種、自生鉱物との関係についても示されている(図 2-3)。

これらの研究の中で、ガラスの続成変質の中で pH8~10 のアルカリ影響下では温度の上昇に伴い、ガラス → 斜プチロル沸石・モルデン沸石 → 方沸石 → 曹長石という系列の沸石化が進行することが明らかにされている。しかし、各沸石帯の出現温度、深度などについては調査地ごとに異なっており、一般的とはいえない。またガラスの変質に関わる地下水の組成についても記載されていない。

	I	II	III	IV	V
FELSIC GLASS		-----			
ALKALI-CLINOPTILOLITE		-----	-----		
MORDENITE			-----	-----	
Ca-CLINOPTILOLITE			-----	-----	
ANALCIME				-----	-----
LAUMONTITE					-----
ALBITE					-----
Albitized PLAGIOCLASE					-----
K-FELDSPAR					-----
OPAL	-----				
QUARTZ					
MONTMORILLONITE	-----				
CORRENSITE				-----	-----
CHLORITE				-----	-----
CELADONITE				-----	-----
ILLITE				-----	-----

図 2-1 凝灰岩質堆積層中の続成変質帯

(IJIMA and Utada,1971 から引用)

表 2-1 各変質帯上限の圧力, 深度, 地温の範囲

(IIJIMA and Utada,1971 から引用)

Zone	Temperature Range of the Upper Limit, °C	Depth Range, Meters	Total Pressure Range, Kb
II. Clinoptilolite	41-49	800-1900	
III. Mordenite	55-59	1450-2400	0.4-0.7
IV. Analcime	84-91	2900-3500	0.9-1.1
V. Albite	120-124	4150-4500	1.3-1.4

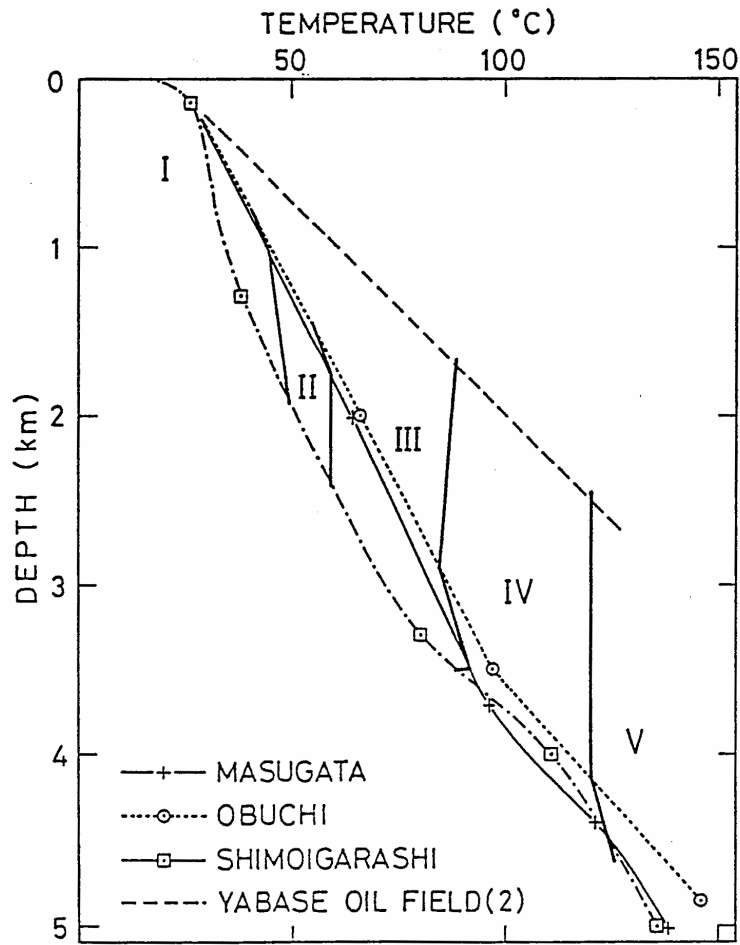


図 2-2 地温勾配と沸石帯の関係

(IIJIMA and Utada,1971 から引用)

ただし, 温度は坑底温度。また沸石帯の境界線はお互いにほぼ平行で, 本質的に温度によって影響されている。(IIJIMA and Utada,1971)

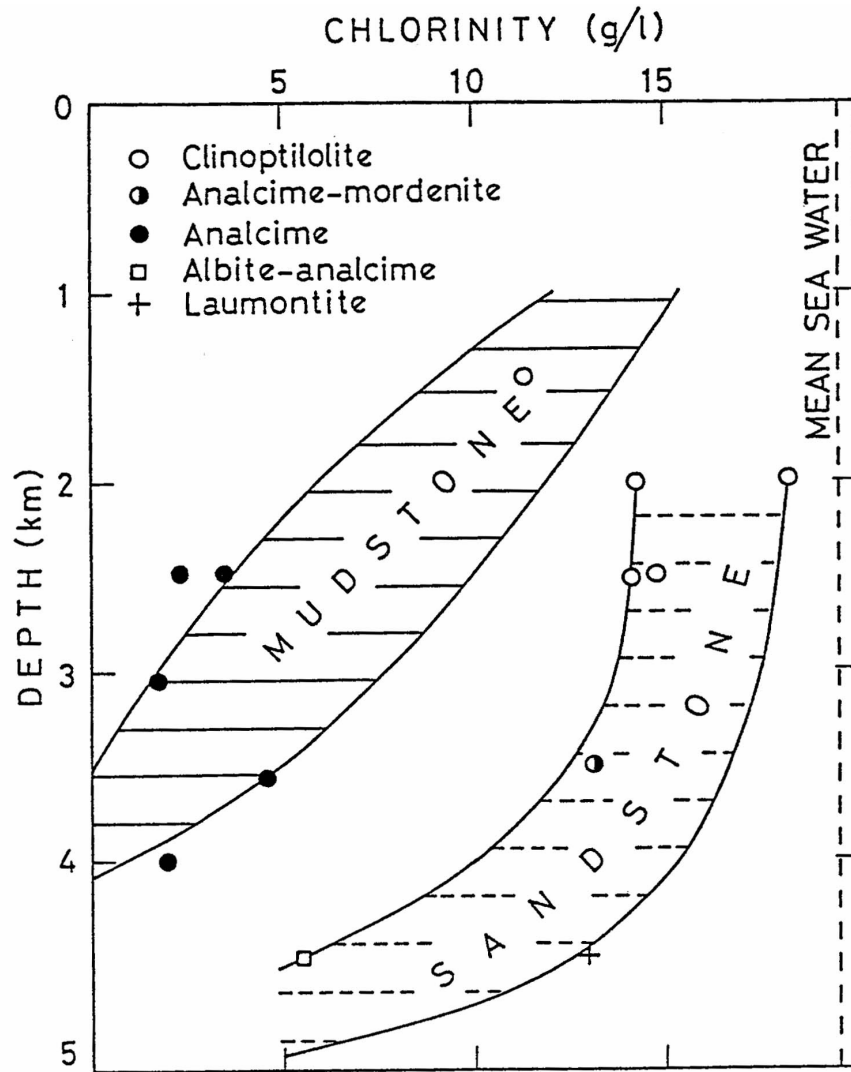


図 2-3 間隙水の塩素濃度と沸石帯深度の関係

(IIJIMA and Utada,1971 から引用)

一般的な堆積物中の間隙水塩素イオン濃度は埋没深度が深くなるにつれて低下する。また凝灰岩質堆積物の沸石帯に含まれる間隙水の塩素イオン濃度は一般的な堆積物に含まれる塩素イオン濃度と同様である。(IIJIMA and Utada,1971)

飯島(1978)は、続成作用の過程で起こる沸石反応はすべてアルカリ性環境 (pH8~10) 下で進行するとしている。また、彼は沸石中のシリカ量はある反応系における遊離シリカの使える度合いに関係し、珪質ガラスを母材とする沸石反応はほとんどすべてシリカに飽和した環境下で起こり、苦鉄質ないし超苦鉄質ガラスの沸石反応はシリカに未飽和の環境下で起こる場合が多いとしている。

珪質ガラスの続成作用と沸石帯や粘土鉱物の変化などの累進的なステージを図2-4のように区分している。油田、ガス田地域の深掘試験コアの分析結果から得られた沸石帯の現在の温度と深度を表2-2に表している。沸石に変化しはじめるI→IIの区間は多少温度にばらつきがあるが、II→IIIやIII→IVの温度はよく一致しているとしている。

また、珪質テフラと苦鉄質テフラとにおける沸石帯の各ステージでの構成鉱物種の相違の整理例として、山梨県御坂産地西部の調査結果を図2-5のようにまとめている。これによると、原岩が苦鉄質のものにのみ認められる沸石は、phillipsite, stilbite, epistilbite, thomsoniteなどのCa沸石である。

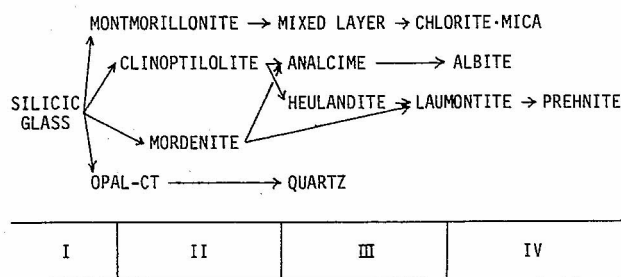


図2-4 海成・淡水成層中の珪質ガラスの埋没続成変質と沸石帯
(飯島,1978 から引用)

表2-2 油田地域における深掘試験で観察された各沸石帯の境界深度および温度
(飯島,1978 から引用)

試 錐 名	I→II		II→III		III→IV		備 考
	T°C	深度	T°C	深度	T°C	深度	
MITI大 淵*	41°	800m	84°	2,900m	120°	4,160m	現在の深度が最大埋没深度であり、埋没続成が前進的に進行中と解される。
MITI下五十嵐*	49°	1,900	87°	3,500	124°	4,480	
MITI升 瀉*	45°	1,050	91°	3,490	124°	4,500	
八橋油田**	60°	1,000	88°	1,700	120°	2,500	
MITI浜 勇知	30°	635	85°	3,250	120°	4,500	
MITI稚 内	—	—	60°	2,000	85°	3,250	隆起・侵食により、1000~1500mの被覆層が削削されたと解される。
MITI遠 別	—	—	55°	1,350	95°	3,750	
MITI南 幌	—	—	55°	2,200	—	—	
MITI軽 舞	—	—	50°	1,750	90°	4,020	
MITI新 冠	—	—	50°	2,600	—	—	

* IJIMA and UTADA (1971), ** 藤岡・吉川 (1969) .

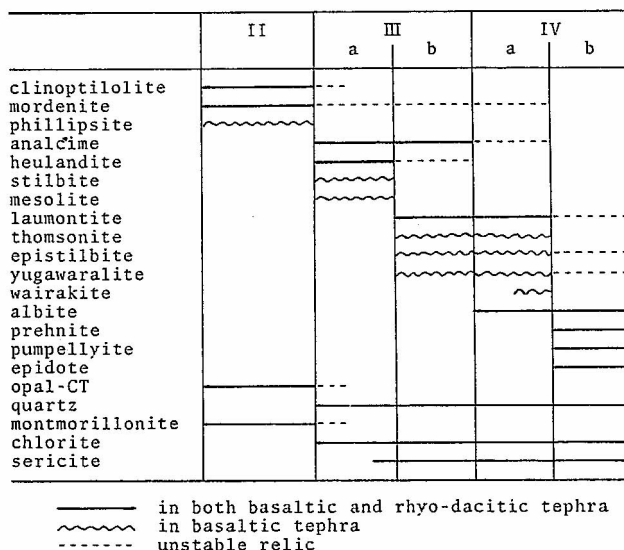


図 2-5 山梨県御坂山地西部における沸石帯
(飯島,1978 から引用)

Aoyagi and Kazama(1980)は、日本の第三紀、白亜紀の泥岩を対象に、続成作用に関する重要なファクターは埋没圧力（深度）、地温、地質年代として研究している。表 2-3 に検討したボーリング孔の地質および地球特性パラメーターの一覧を示している。特に沸石類の変質に関して強い影響を与えているパラメーターは温度であるとしている（図 2-6）。

Aoyagi and Kazama(1980)火山ガラスの変質系列は次のとおりであるとしている。ただし、IJIMA and Utada(1971)で認められていたモルデン沸石は示されていない。

火山ガラス → 斜プチロル沸石 → 方沸石または輝沸石 → 曹長石または濁沸石

図 2-7 に被覆圧と地温と変質帯の関係を示しており、これによると火山ガラスから斜プチロル沸石への変質には 330kgf/cm²の圧力と 56℃の温度が、斜プチロル沸石から方沸石、輝沸石への変質には 860kgf/cm²の圧力と 116℃の温度が、方沸石、輝沸石から曹長石、濁沸石への変質には 930kgf/cm²の圧力と 138℃の温度が必要であるとしている。

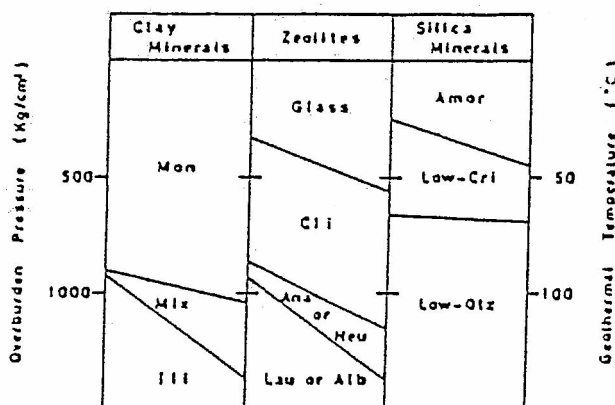
表 2-3 調査孔の地質および地球物理パラメーター

(Aoyagi and Kazama,1980 から引用)

Wells	Locality	Date	Depth (m)	BHT (°C)	GG (°C/100 m)	Age (formation)	Number of samples
Miti Kubiki	Niigata, Honshu	Oct., 1970	3781.7	127.2	3.89	Neogene (Hiuchiyama)	84
Miti Sorachi	Central Hokkaido	Jan., 1971	3712.9	87.8	2.57	Pre-Cretaceous(?)	95
Miti Wakkanai	Northern Hokkaido	Dec., 1971	4017.1	108.7	3.06	Palaeogene (Ishikari)	118
Miti Amakusa	Kumamoto, Kyushu	Oct., 1972	2807.0	82.2	3.14	Cretaceous (Goshoura)	77
Miti Hamayuchi	Northern Hokkaido	Oct., 1972	4520.9	121.0	3.07	Neogene (Onishibetsu)	108
Nishi-Sapporo SK-10	Central Hokkaido	Feb., 1973	3305.4	114.0	3.92	Neogene(?)	51
Miti Nanporo	Central Hokkaido	Aug. 1973	4374.7	118.9	3.11	Jurassic (Sorachi)	110
Miti Enbetsu	Northern Hokkaido	Nov. 1973	4012.4	98.0	2.71	Cretaceous (Hakobuchi)	97
Miti Karumai	Central Hokkaido	Sept., 1974	4374.0	87.2	2.38	Palaeogene (Poronai)	102
Miti Niikappu	Central Hokkaido	Jan., 1976	4505.1	78.0	1.83	Neogene (Fureoi)	102
Biratori SK-9	Central Hokkaido	Sept., 1976	4505.0	91.1	2.21	Palaeogene (Poronai)	72
Abira SK-1	Central Hokkaido	Apr., 1977	4502.6	105.0	2.62	Palaeogene (Poronai)	100
Yufutsu-oki B-1a	Off-shore Hokkaido	Apr., 1977	4030.0	110.0	3.09	Palaeogene (Ishikari)	121

Transformation of Minerals	Physical			Chemical		
	Press.	Temp.	Time	pH	Eh	Ions
1. Clays Mon. - Mix. - Ill.	• •	• • •	• •	•	•	• •
2. Zeolites Glass - Cli. - Ana. or Heu - Lau or Alb.	•	• • •	•	•	•	• •
3. Silicas Amar. - low-Cri. - low-Qtz.	•	• • •	•	•	?	
4. Carbonates Ara. - Cal. - Ool.			?	•	•	• • •

図 2-6 各鉱物の変質に影響を与える物理的, 化学的要因
(Aoyagi and Kazama,1980 から引用)



Abbr. : Mon = Montmorillonite
 Mix = Mon-Ill Mixed-layer Mineral
 Ill = Illite
 Glass = Volcanic Glass
 Cli = Clinoptilolite
 Ana = Analcite
 Heu = Heulandite
 Lau = Laumontite
 Alb = Albite
 Amar = Amorphous Silica
 Cri = Cristobalite
 Qtz = Quartz

図 2-7 第三紀, 白亜紀の堆積物中の各鉱物の続成変質に必要な最大被覆圧力と地温
(Aoyagi and Kazama,1980 から引用)

これまでの研究をふまえ, 佐々木(1990)はわが国の油田地域の海成層における沸石化作用を見直し, それらの間隙水が海水的であり, ガラスの沸石への転換が温度と時間の関係に規制されるものと考え, 有効被熱時間の概念を導入しガラスの沸石化を論じている。検討対象は北海道, 秋田, 新潟の主要な油田地域の基礎試錐資料としている。ボーリング地点の位置図を図 2-8 に, 検討対象とした地質時代範囲の微化石基準面と年代値のデータを図 2-9, 図 2-10 に示す。

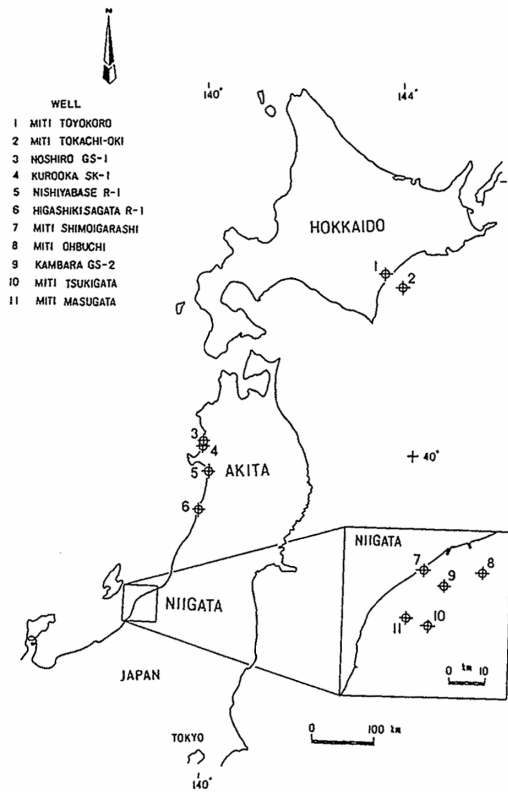


図 2-8 油田地域のボーリング孔位置図
(佐々木,1990 から引用)

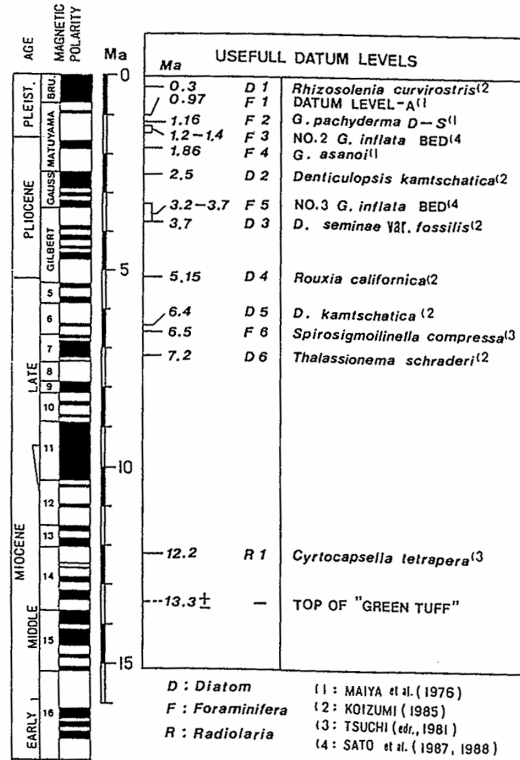


図 2-9 油田地域の微化石基準面
(佐々木,1990 から引用)

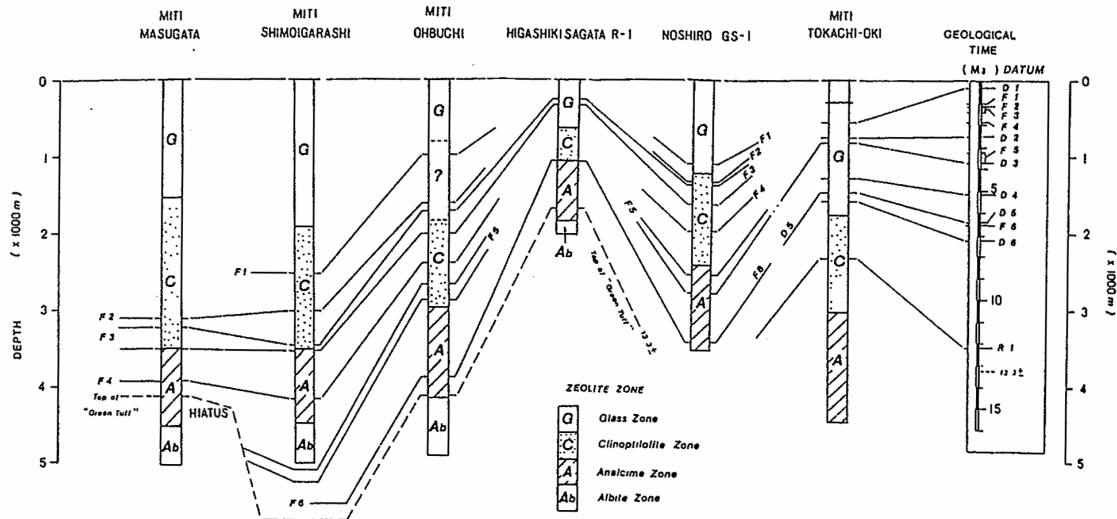


図 2-10 各ボーリング孔における微化石基準面の位置と沸石帯の区分
(佐々木,1990 から引用)

沸石帯上限深度と地質年代について、堆積岩中に狭在する火山ガラスなどの珪酸物質が続成作用を受けると、鉱物学的変化が起こり自生鉱物の垂直的分布配列が形成され、油田地域の沸石帯は上位から下位に向かって、ガラス帯 → 斜プチロル沸石帯 → 方沸石帯 → 曹長石帯と区分されるとしている。図 2-10 によると、沸石帯の出現深度と地質層序は一致せず基準面と斜交しており、各孔において沸石帯の層位学的位置に地域差が認められるとしている。

そこで各ボーリング孔の微化石層序と微化石基準面の年代を用いて、各ボーリング孔における堆積速度曲線図を作製し、沸石帯上限深度における地質時間を概算している（図 2-11）。対象とした全ボーリング孔における沸石帯上限の地質年代は斜プチロル沸石帯で 0.5~8.5Ma., 方沸石帯で 1.4~12.8Ma., 曹長石帯で 2.1~13.3+Ma.と出現深度同様に地域差が表れているとしている（表 2-4）。

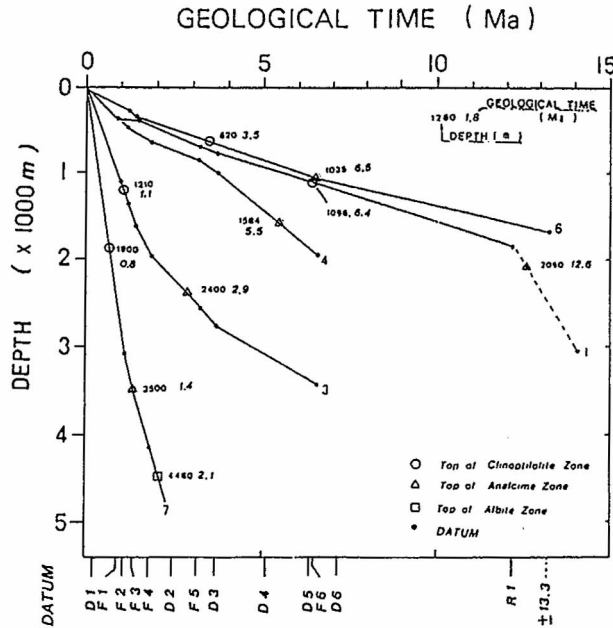


図 2-11 各ボーリング孔における沸石帯上限の堆積速度曲線と地質時間の概算
(佐々木,1990 から引用)

表 2-4 調査孔における斜プチロル沸石帯, 方沸石帯, 曹長石帯の物理的データ
(佐々木,1990 から引用)

No.	Well Name	Top of Clinoptilolite Zone				Top of Analcime Zone				Top of Albite Zone				Re- marks
		Depth (m)	Temp (°C)	Age (Ma)	Eff. Time (Ma)	Depth (m)	Temp (°C)	Age (Ma)	Eff. Time (Ma)	Depth (m)	Temp (°C)	Age (Ma)	Eff. Time (Ma)	
1	MITI Toyokoro	1098	44	6.4	2.9	2050	64	12.6	3.2	-	-	-	-	
2	MITI Tokachi-oki	-1465	42	8.5	5.0	-2715	64	12.8	5.2	-	-	-	-	
3	Noshiro GS-1	1210	58*	1.1	0.2	2400	99	2.9	0.4	-	-	-	-	
4	Kurooka SK-1	-	-	-	-	1584	83	5.5	1.1	-	-	-	-	
5	Nishiyabase R-1	1070	58	3.5	1.0	1980	88	3.7*	1.0	-	-	-	-	
6	Higashikisagata R-1	620	53	3.5	1.5	1035	78	6.5	1.9	1820	124	13.3+	1.6	
7	MITI Shimoigarashi	1900	60	0.8	0.3	3500	106	1.4	0.3	4480	152	2.1	0.3	
8	MITI Ohbuchi	-	-	-	-	2970	101	4.0	0.4	4160	151	13.3+	0.3	Hiatus
9	Kambara GS-2	1253	60*	0.5	0.1	3003	112	1.4	0.2	-	-	-	-	
10	MITI Tsukigata	1400	58	0.7	0.2	3450	101	2.6	0.2	-	-	-	-	
11	MITI Masugata	1524	63*	0.7	0.1	3485	105	1.4	0.2	4500	152	13.3+	0.2	Hiatus

Depth in offshore well : from sea bottom (-), Eff. Time : Effective heating time,

* : poor quality

沸石帯上限の温度については、油・ガス田層の坑底圧測定時温度、試油・試ガス実施時の温度、検層時測定温度から斜プチロル沸石帯で 42～60℃、方沸石帯で 64～112℃、曹長石帯で 124～152℃となり、幅が認められている。これは地域差によるものとし、その要因として間隙水の化学組成、特に Na⁺濃度、地質的な反応時間であるとしている。これについて、ボーリング孔のコアに含まれる間隙水の分析より Cl⁻の濃度が 5000～20000mg/l であることから、間隙水の大部分は NaCl を主成分とした鹹水とされ、Na⁺濃度は 4000～12000mg/l と推定されている。また、間隙水の化学組成、水素酸素同位体比、底生有孔虫化石群集の分析から、検討対象の堆積層中の間隙水は堆積時に取込まれた海水を起源とし、各ボーリング孔においても間隙水の Na⁺濃度はほぼ同程度と推定されている。これより間隙水の影響は無視できるほど小さいと仮定し、沸石転換温度の変化は主に時間に規制されるとしている。

次に、各ボーリング孔における埋没史と以下の地質学的仮定をもとに、各ボーリング孔の温度履歴を復元している。

- ・地殻熱流量は中新世以降ほぼ一定であった。
- ・海底面の温度は堆積層の大部分が半深海成層であることから、2℃とする。
- ・埋没初期の地層温度は、埋没深度 300m で約 22℃に達すると仮定する。

この仮定のもとで斜プチロル沸石帯、方沸石帯、曹長石帯の上限の温度と地質年代をプロットしたものを図 2-12 に示している。これによると、それぞれの帯の上限の温度と地質年代の位置はそれぞれ一つの曲線上に並ぶとしている。現在がそれぞれの沸石帯の最高温度に達していると仮定し、各沸石帯上限の層序が最高温の±15℃に達した時点から滞留していた経過時間を有効被熱温度として考慮すると、図 2-13 のようになるとしている。この図からガラスの斜プチロル沸石への転換は有効被熱時間 5Ma で 41℃、2Ma で 50℃、0.5Ma で 60℃となり、また方沸石への転換温度は有効被熱時間 5Ma で 62℃、0.5Ma で 105℃となり、方沸石から曹長石への転換温度は有効被熱時間 1.5Ma で 125℃、0.5Ma で 152℃となるとしている。

これらのことから、科学的要因が類似する海成層中の沸石化作用は温度、時間（有効被熱時間）に強く支配され、反応速度論的に進行するとしている。

上記の有効被熱時間を導入した整理は、ガラスの沸石化に対する変質予測に重要なものであると考えられる。

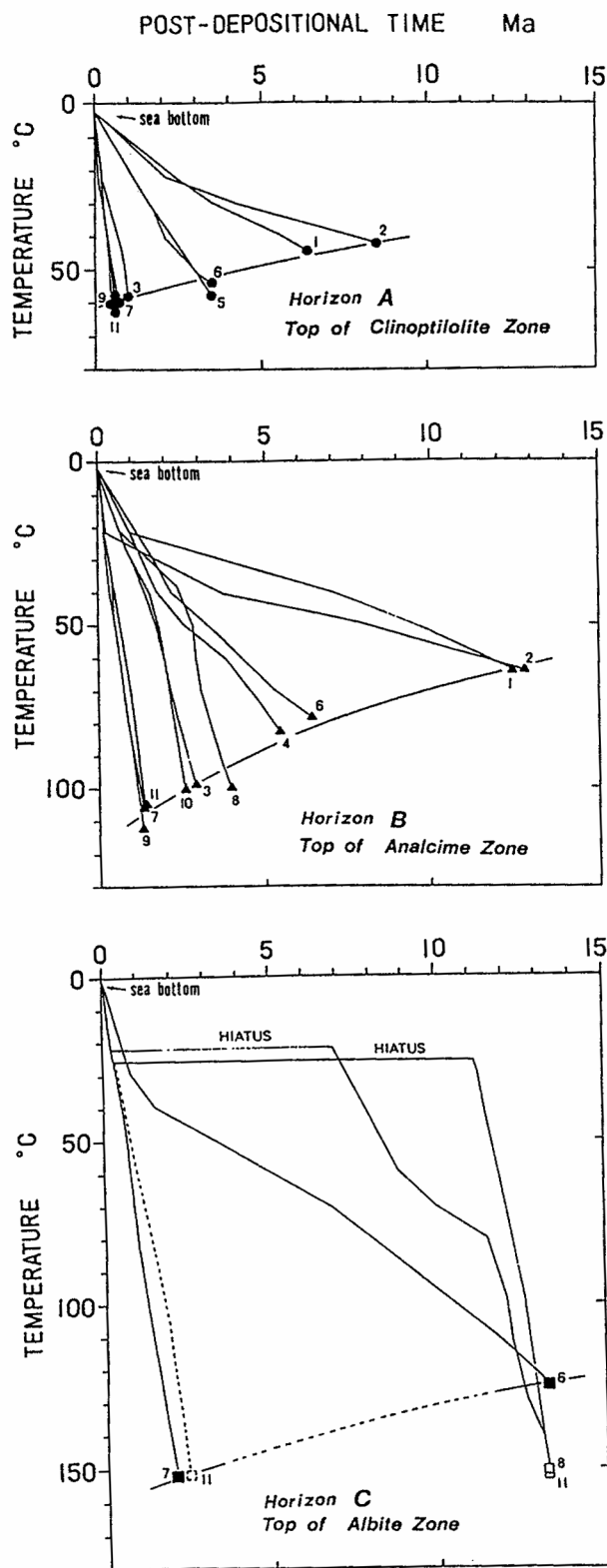


図 2-12 各ボーリング孔における各沸石帯上限深度と温度履歴曲線
(佐々木,1990 から引用)

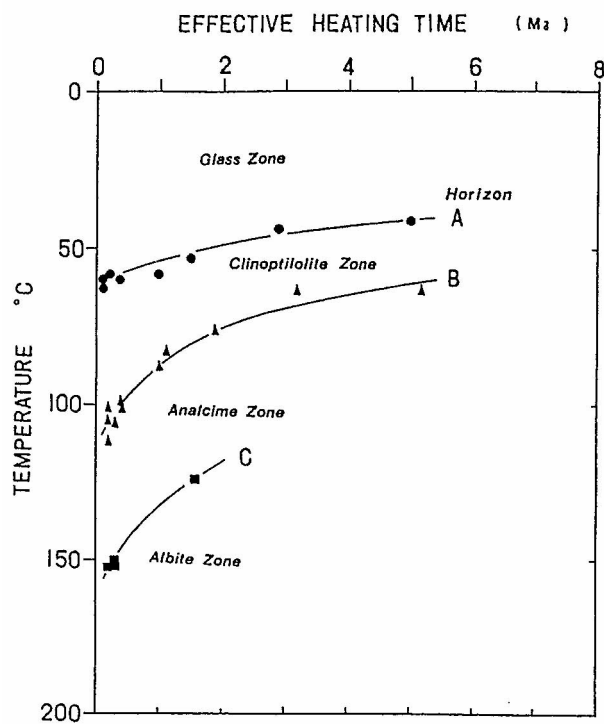


図 2-13 各沸石帯の有効被熱時間ダイヤグラム
(佐々木,1990 から引用)

3. 調査地域の概要

3.1 地形

横浜孔は、防災科学技術研究所によって神奈川県横浜市旭区川井宿で掘削された孔口標高 61.6m、深度 2045.0m のボーリング孔である。横浜孔の位置を図 3.1-1 に示す。

横浜孔付近は、標高 80m 程度の丘陵地を帷子川^{かたびら}の北東に延びる支流が浸食して形成された谷部に位置している。

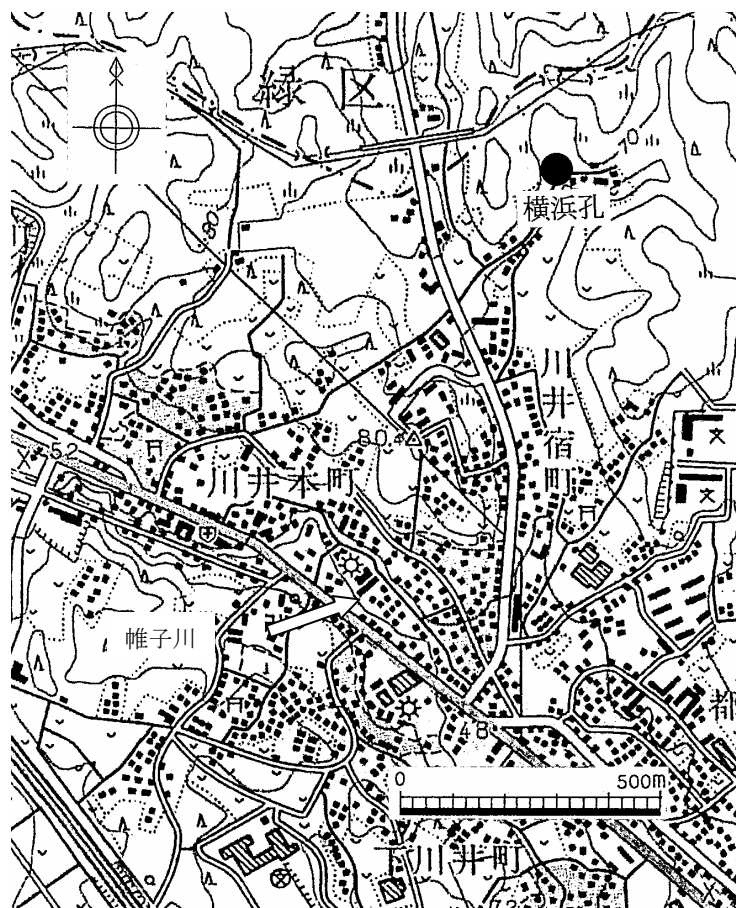


図 3.1-1 横浜孔付近の地形図

(国土地理院発行 1/25000 地形図横浜西部に一部加筆)

3.2 地質

(1) 横浜孔

横浜孔付近の地質図を図 3.2-1 に、横浜付近の層序を図 3.2-2 に示す。また、鈴木、小村 (1999) による横浜孔の総合柱状図を図 3.2-3 に示す。

横浜孔付近の丘陵地の地表付近は、いわゆる関東ローム層が堆積しているが、それらを開析する谷部斜面には中期更新世の相模層群が露出する。

図 3.2-3 の横浜孔の柱状図によれば、深度 10m までが相模層群、10~1370m までが更新世~鮮新世の上総層群で、1370m 以深が鮮新世~中新世の三浦層群とされている。図 3.2-3 の横浜孔の柱状図の右端欄には温度検層結果が示されており、孔底で約 70°C に達している。なお、上総層群および三浦層群はいずれも海成層である。

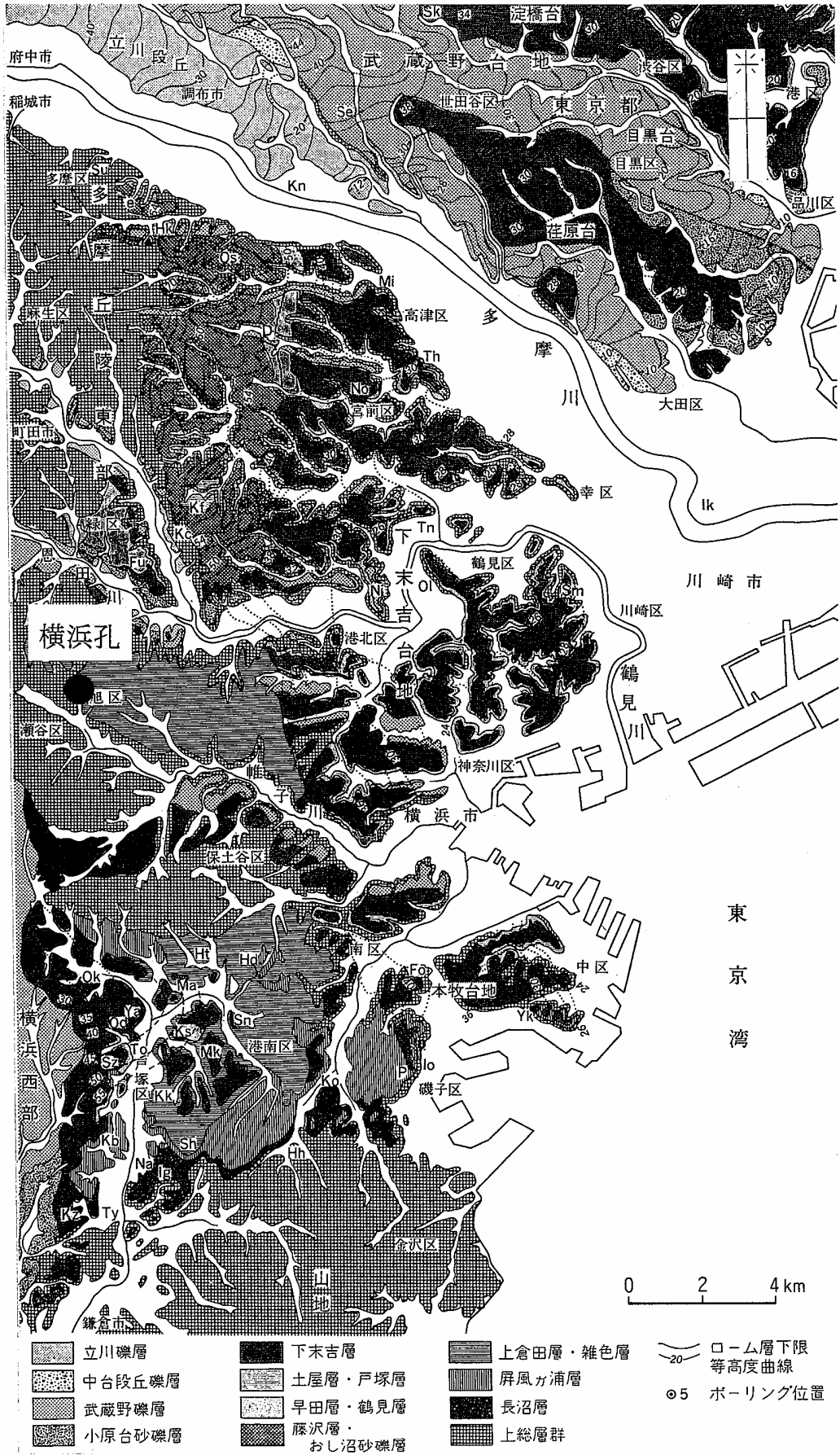


図 3.2-1 横浜孔付近の地質図

(岡,1991 から引用)

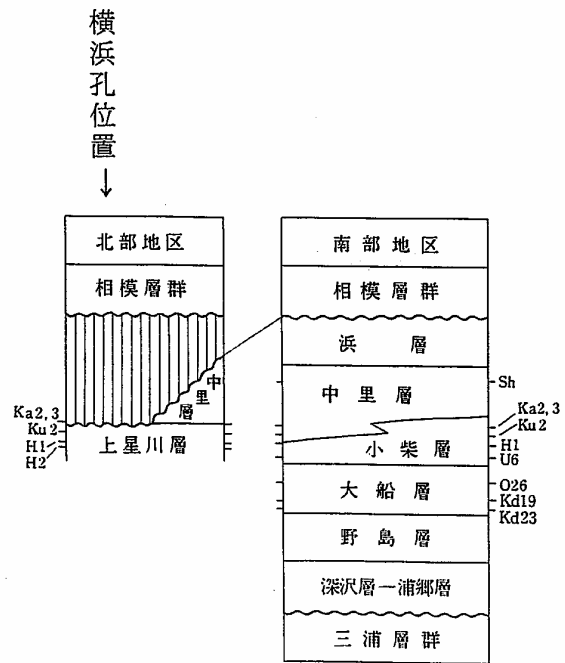
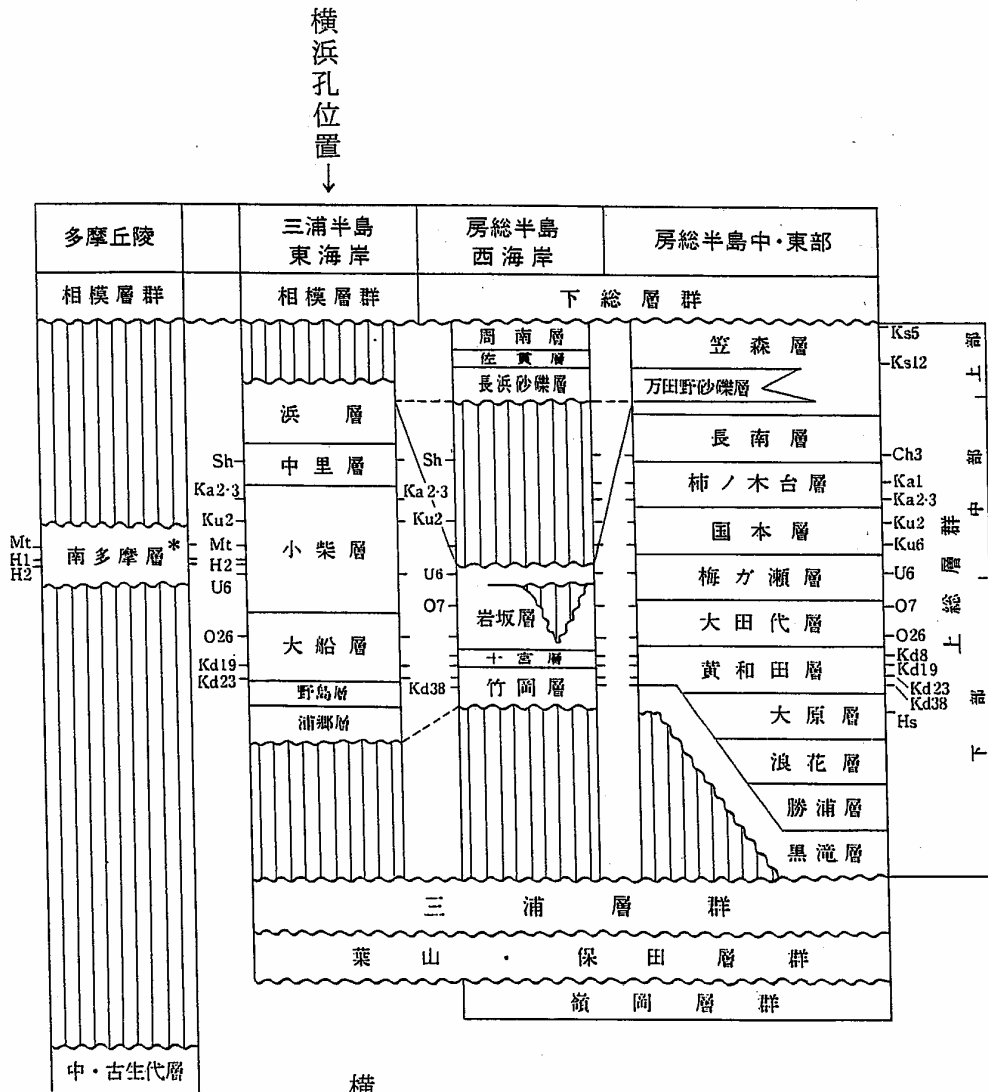


図 3.2-2 横浜孔付近の層序
(三梨・菊池,1982 から引用)

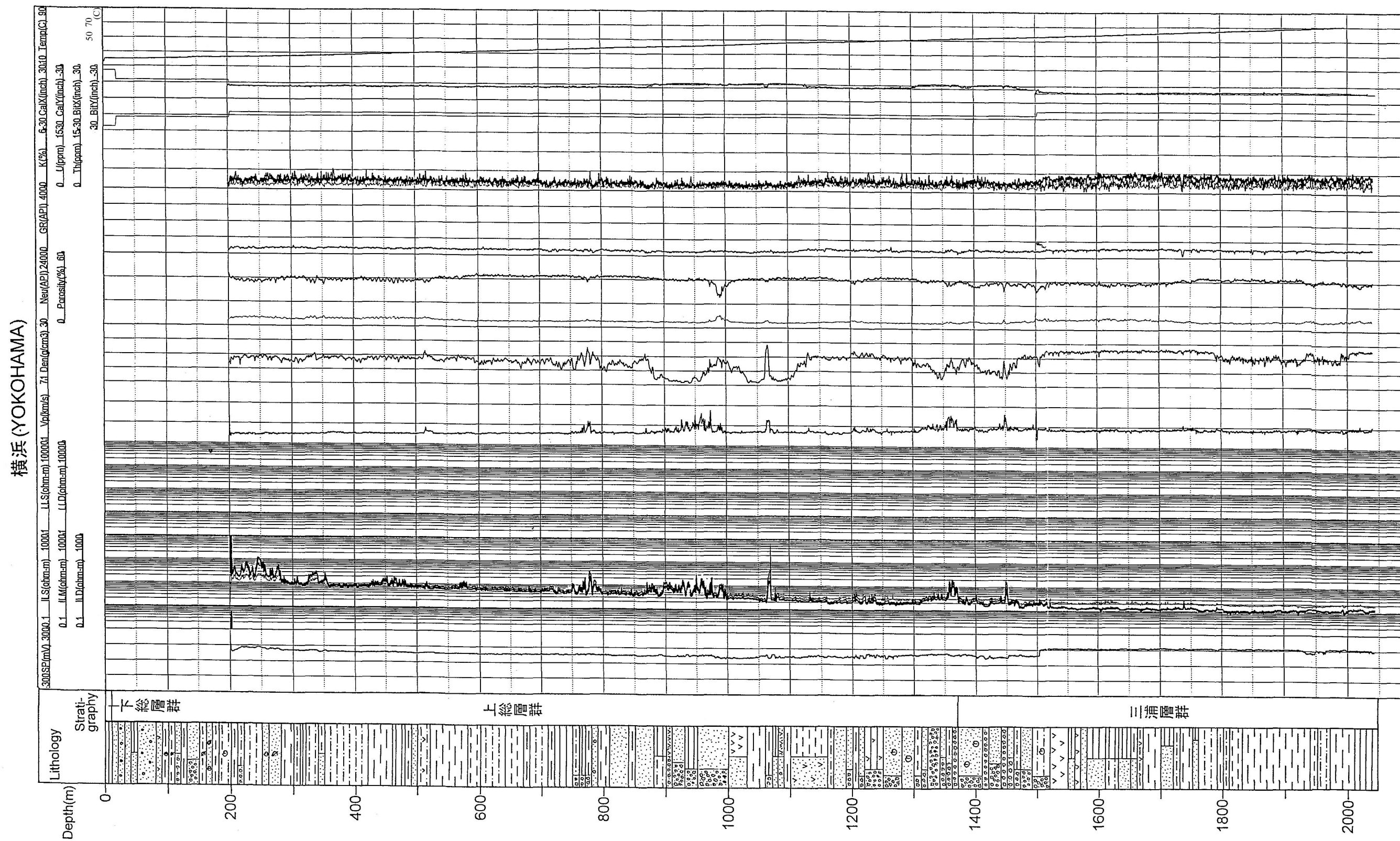


図 3.2-3 横浜孔総合柱状図
(鈴木・小村, 1999から引用)

4 分析・試験

4.1 試料

試料は、鈴木・小村(1999)に示された、採取コア一覧表とボーリング柱状図をもとに凝灰岩類の出現が期待できる深度を選び、防災科学技術研究所に保管されているコアを直接観察して採取した。採取した試料を表 4.1-1 に示す。同表には岩質や肉眼的な特徴を併記した。

表 4.1-1 調査対象コア試料

孔名	上限深度	下限深度	主岩質	詳細な特徴
横浜	2000.12m	2000.18m	泥質岩	虫食い状砂岩，軽石点在
	2006.34m	2006.37m	泥質岩	軽石散在，一部凝灰質泥岩

なお，薄片作製および微化石分析には 2000.12～2000.18m のコアを，希釈法には 2006.34～2006.37m のコアを用いた。

4.2 方法

(1) 偏光顕微鏡観察

薄片の作製は、試料に樹脂を浸透・固化させたのち、油擦りで実施した。薄片作製においては、SEM-EDS を用いた組成像の観察を考慮して鏡面仕上げとし、カバーガラスを貼り付けないこととした。作製した薄片は、偏光顕微鏡を用いて軽石などの火山ガラスの変質状況に注目して観察を行った。

(2) 微化石分析

① 珪藻

分析の手順を以下に記述する。試料約 10g (湿重) について、過酸化水素水と塩酸により、泥化と有機物の分解・漂白を行った。分散剤を加えた後、蒸留水を満ちし放置した。その後、上澄み液中に浮遊した粘土分を除去したうえで、珪藻殻の濃縮を行った。この操作を 4~5 回繰り返した。次に、L 字形管分離で砂質分の除去を行い、検鏡し易い濃度に希釈し、カバーガラス上に滴下して乾燥させた。乾燥した試料上に封入剤のプリユウラックスを滴下し、スライドガラスに貼り付け永久プレパラートを作製した。

検鏡は、顕微鏡を用い、油浸 600 倍または 1000 倍で行い、メカニカルステージを用い任意に出現する珪藻化石が 100 個体以上になるまで同定・計数した。なお珪藻殻が半分以上破損したものについては同定・計数は行わないものとした。

② 石灰質ナノ化石

分析の手順を以下に記述する。試料約 1g をビーカーに移し、20ml 程度の水を加えた。続いて、よく攪拌し、懸濁液を作った。攪拌した懸濁液をそのままの状態です約 30 秒間放置した後、懸濁液の上層部をストローに吸い取り、カバーガラス (18×23mm) 全面に広がるように静かに滴下し、ホットプレート上において 40℃ 前後で乾燥させた。完全に乾燥したのを確認したのち、カバーガラスを光硬化接着剤によって封入し、プレパラートを完成させた。

検鏡は、偏光装置を備えた位相差顕微鏡を用いて、1500 倍で行った。

試料中の化石全体の保存状態 (Preservation) と産出頻度 (Abundance) は、以下に示すような記号を用いて示した (結果表に記載)。

保存状態 (Preservation) の目安は次のとおりである。

- ・ G (Good : 良好) : 殻は溶解 (破損) あるいは再結晶作用の影響を受けていない
- ・ M (Moderate : 普通) : 一部に溶解 (破損) または再結晶した個体が認められる
- ・ P (Poor : 不良) : 殆どの殻が溶解 (破損) または再結晶作用の形跡が認められる
- ・ VP (Very poor : 極不良) : すべての殻が溶解あるいは再結晶しており、種の同定が容易でない
- ・ VVP (Very Very poor : 極極不良) : すべての殻が溶解あるいは再結晶しているため種の同定が困難

産出頻度 (Abundance) の目安は以下のとおりである。

- ・ A (Abundant) : 1mm²中に 10 個体以上
- ・ C (Common) : 1mm²中に 1 個体以上
- ・ F (Few) : 2mm²中に 1 個体以上

- ・ R (Rare) : 2mm²中に1個体以下
- ・ VR (Very Rare) : 4mm²中に1個体以上
- ・ VVR (Very Very Rare) : 4mm²中に1個体以下

③ 有孔虫

分析の手順を以下に記述する。開口径 0.063mm の標準篩により篩い分けをして得られた砂粒を、簡易試料分割器にて適宜分割した。それらを、実体顕微鏡下で底生種 200 個体を目安として抽出した。その際、産出する浮遊性種の個体数も計数し、全有孔虫に占める浮遊性種の割合（以下、有孔虫 P/T 比）を算出した。さらにこれとは別に、浮遊性種の群集解析のため、浮遊性種のみ 200 個体程度を抽出した。その際は、開口径 0.125mm の標準篩を用いて、それより粗粒な粒子のみより、抽出を行った。それらについて、種を同定・計数した。

(3) 水質分析

横浜孔の火山ガラスの変質に関与した地下水の水質を知るために、次の水試料を対象に水質分析を行った。

- ・ コアの希釈法による水試料
- ・ 横浜孔近傍の採水可能な深層ボーリング孔からの水試料

希釈法による水試料の採取は、平成 2 年度の「天然ガラス及びベントナイトの長期変質挙動に関する調査研究、PNC ZJ1308 91-002」と同様、以下の手順で行った。

泥質岩をステンレス乳鉢で粗砕し、さらに自動らいかい機で 0.1mm 以下に粉碎し、粉末試料を作製した。この粉末試料 100mg と蒸留水（電気伝導度が 1.0 μ S/cm 以下）100ml をポリエチレン製容器（200ml）に入れ、1 時間振とう後、メンブランフィルター(0.45 μ m)を用いてろ過して分析に供した。

一方、横浜孔の近傍には 1988 年に登録された「横浜温泉チャレンジャー（以下横浜温泉と呼称する）」がある。横浜温泉は図 4.2-1 に示す位置に存在し、横浜孔とは水平距離で 2km 程度離れている。神奈川県温泉地学研究所の栗屋ほか(2002)によると、横浜温泉は深度 1500m からポンプアップされており、表 4.2-1 の中の台帳番号 YH 73 に分析結果が示されている。この結果によれば、横浜温泉の水質は典型的な Na-Cl 型を呈し、SO₄²⁻を含まず、ホウ素に富む特徴を有している。また、海水の Cl 濃度を 19000mg/l とした場合、横浜温泉は海水に対して約 3.5 倍の希釈率となる。

希釈法によって得られた水試料および横浜温泉の水試料は、表 4.2-2 に示す項目および方法によって分析を実施した。

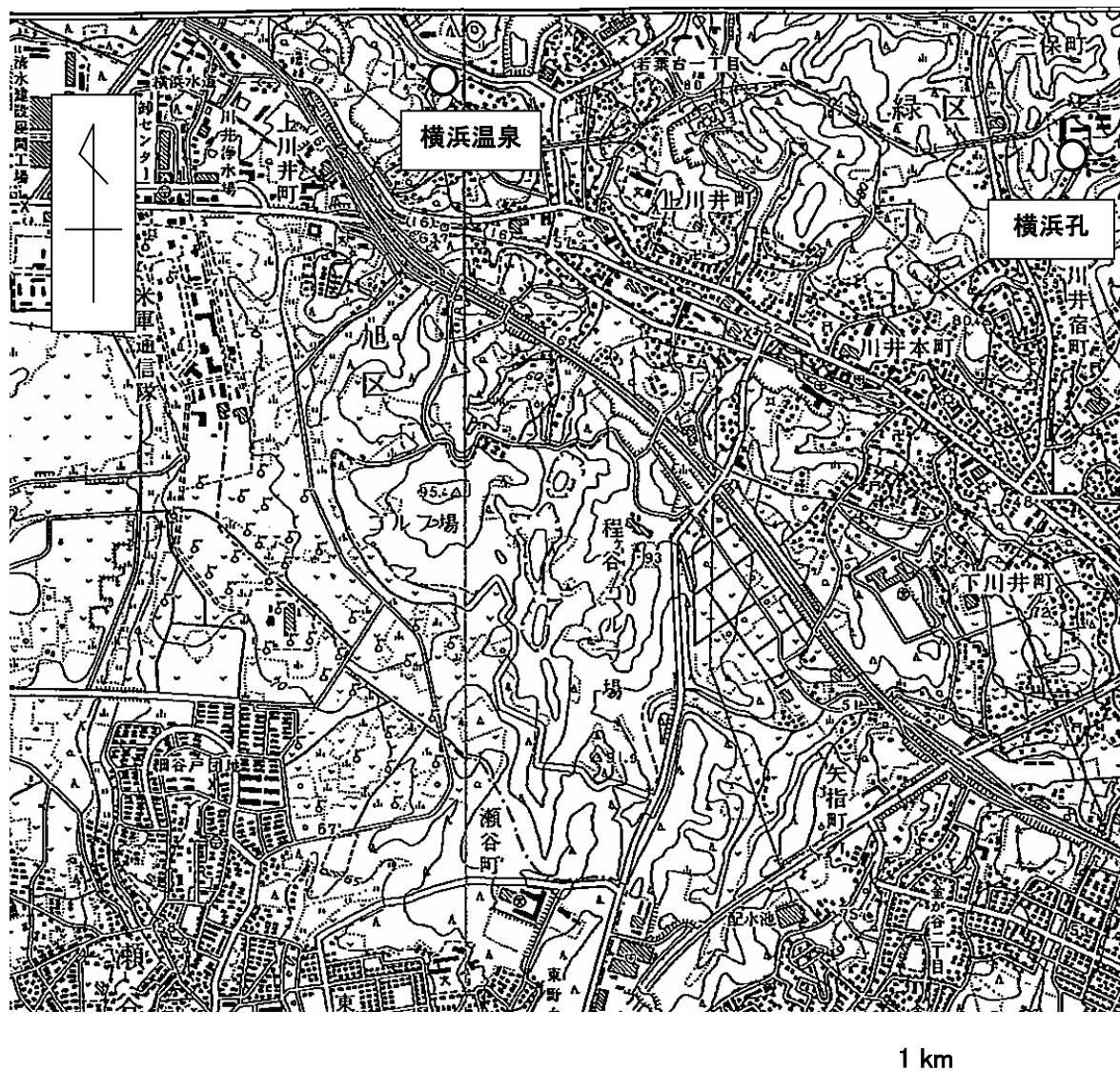


図 4.2-1 横浜孔および横浜温泉位置図

(国土地理院発行 1/25000 地形図横浜西部に一部加筆)

表 4.2-1 横浜温泉の化学成分表 (栗屋ほか, 2002から引用)

No.	台帳 番号	採水日	温度 ℃	撈湯量 l/min	pH	導電率 μS/cm	Total mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	H ₂ SiO ₃ mg/l	HBO ₂ mg/l	Fe ²⁺ mg/l	吸光度 400nm	COD mg/l	知覚的試験	備考
1	YH 6	980626	18.0	17	8.3	1840	1750	459	17.4	6.30	4.05	126	1.15	0.76	1070	53.0	6.24	1.20	0.89	167	茶褐色透明	*2
2	YH 9	001019	17.4	24	8.3	940	855	206	7.45	1.22	1.36	23.4	0.35	0.61	544	66.8	3.69			54.8	茶褐色透明	*1
3	YH 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	YH 11	001019	17.4	42	8.1	1400	1240	305	13.2	1.65	2.66	28.9	15.6	0.74	799	65.2	4.60		1.58	65.3	茶褐色透明	*1
5	YH 12	001019	16.9	19	8.5	1800	1750	425	17.7	6.66	8.50	49.7	0.20	0.18	1140	98.2	3.87		2.96	148	茶褐色透明	*1
6	YH 13	001019	19.6	8.5	2210	1940	514	19.0	19.0	5.79	4.85	165	1.43	0.36	1160	63.3	5.25		3.10	152	茶褐色透明	*1
7	YH 14	980224	17.5	99	8.4	822	841	197	10.1	1.09	1.90	4.03	1.43	0.70	549	73.4	2.29	0.05		7.15	薄茶褐色透明	*2
8	YH 22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	YH 23	970224	16.5	230	7.4	1403	1480	265	33.3	20.2	48.0	20.2	46.2	0.09	956	89.7	3.92	0.41		9.16	茶褐色透明	*2
10	YH 28	960621	19.6	-	8.1	1820	1870	458	22.1	8.00	11.7	22.5	1.87	0.22	1250	89.1	5.44	1.18		26.7	茶褐色透明	*2
11	YH 29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	YH 30	001019	17.0	40	7.8	894	855	199	10.1	1.70	2.93	28.6	6.97	1.69	530	71.2	2.44		0.53	14.5	薄茶褐色透明	*1
13	YH 31	001019	16.8	41	7.8	864	816	188	9.38	1.32	1.98	5.69	7.77	0.94	520	78.9	2.54		0.22	1.92	薄茶褐色透明	*1
14	YH 33	990621	17.3	40	8.4	1300	1400	344	12.2	1.92	3.27	7.95	0.16	0.29	964	65.4	3.36	1.34		72.8	茶褐色透明	*2
15	YH 34	001019	17.3	9	8.0	1410	1310	340	9.94	3.11	2.57	103	0.00	0.27	788	60.2	3.99		0.37	19.4	茶褐色透明	*1
16	YH 37	001019	16.6	8.1	1230	1010	240	9.26	9.26	1.40	2.35	6.08	14.3	0.20	659	69.6	3.10		1.13	40.3	茶褐色透明	*1
17	YH 38	001020	17.3	68	8.0	1290	1160	262	11.6	6.25	8.88	8.35	0.00	0.17	773	82.6	3.77	0.20	2.02	90.4	茶褐色透明	*1
18	YH 40	980525	17.5	45	8.3	1110	1120	242	17.1	5.73	15.3	4.51	0.25	0.35	757	75.8	2.17	0.20		17.1	薄茶褐色透明	*2
19	YH 41	870204	16.9	69	8.4	923	967	227	12.4	0.06	8.80	5.65	20.4	1.14	625	60.3	1.73	4.08		17.1	茶褐色透明	*2
20	YH 45	671220	16.9	166	6.7	388	388	12.4	4.00	24.4	21.9	18.4		12.6	256	24.1	0.00	14.4		0.00	褐色	*2
21	YH 47	690606	16.5	40	8.8	508	508	128	9.48	1.86	4.93	33.5		28.3	252	50.2	0.00	0.15			褐色	*2
22	YH 49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	YH 50	001020	17.0	55	8.6	962	866	210	8.66	0.81	1.04	10.1	0.00	5.26	561	66.7	2.21		0.32	8.14	薄茶褐色透明	*1
24	YH 51	970728	35.7	68	8.1	5360	4650	1430	39.5	2.04	5.41	1140	1.13	0.18	1890	129	12.7	0.40		62.7	茶褐色透明	*2
25	YH 52	940818	17.2	572	7.9	1400	1330	291	24.8	13.5	32.1	123	0.00	22.8	732	78.4	9.35	0.62		29.5	茶褐色透明	*2
26	YH 55	961119	18.0	364	7.9	1657	1720	423	21.0	7.89	14.9	25.3	0.06	1.94	1140	83.0	3.19	0.30		24.3	茶褐色透明	*2
27	YH 57	780110	14.5	13	8.2	1250	295	295	18.5	4.95	9.66	8.20	0.34	25.8	828	54.2	0.00	0.53		77.5	茶褐色透明	*2
28	YH 58	780920	19.4	6.4	212	20.0	20.0	20.0	1.38	6.05	15.0	19.3		32.6	60.7	53.5	3.10	0.12		0.32	無色透明無臭	*2
29	YH 59	990422	17.1	68	8.1	1820	1510	404	21.3	11.8	17.2	384	1.18	0.13	600	70.2	1.50	0.52		10.5	薄茶褐色透明	*2
30	YH 61	981224	16.7	113	8.1	4130	3280	980	34.7	28.2	26.3	1140	2.75	0.18	977	83.0	4.47	0.56		17.7	薄茶褐色透明	*2
31	YH 63	001020	17.8	41	8.1	1070	909	222	10.1	2.04	1.61	54.5	5.56	0.12	546	63.9	2.75		0.38	19.2	薄茶褐色透明	*1
32	YH 64	830713	18.2	99	7.8	1330	338	338	15.0	6.58	8.28	134	0.71	0.00	750	66.3	12.6	2.32		32.9	茶褐色透明	*2
33	YH 65	831125	16.3	56	8.4	776	946	228	11.8	2.17	5.93	8.13	18.0	1.74	604	65.3	0.00	0.66		13.3	茶褐色微混濁	*2
34	YH 67	860821	17.3	28	7.4	776	840	193	12.4	2.13	10.4	35.6	9.82	4.66	501	68.5	2.82	0.05		17.5	茶褐色微混濁	*2
35	YH 68	980403	16.1	204	7.1	220	274	274	8.19	2.08	23.8	3.86	0.00	0.76	141	84.8	0.13	1.65			微白濁無臭	*2
36	YH 69	001020	17.0	7.4	960	727	174	174	8.69	7.26	9.08	133	0.00	0.00	326	67.8	0.97		0.03	0.00	無色透明無臭	*1
37	YH 70	001020	19.4	8.5	1780	1770	445	445	14.2	2.36	3.51	6.53	0.06	0.00	1220	69.8	4.77		3.37	211	茶褐色透明	*1
38	YH 72	910626	18.3	40	8.4	466	480	101	11.6	0.41	8.09	6.87	0.00	0.00	287	64.4	0.28	0.10			茶褐色透明	*2
39	YH 73	980416	45.0	86	7.7	14900	9740	3320	69.4	41.0	181	5500	15.9	0.00	346	90.0	171	1.05			無色透明無臭	*2
40	YH 74	971110	18.2	42	8.3	554	529	98.0	7.92	7.87	10.5	3.77	2.06	0.00	329	68.9	0.95	0.31		11.8	薄黄緑色透明	*2
41	YH 75	990309	16.8	82	8.4	570	528	102	12.4	7.03	15.6	16.5	20.0	0.89	306	46.3	0.99	0.58			茶褐色透明	*2
42	YH 76	981126	17.8	44	8.1	1070	1180	273	14.5	3.85	6.21	3.77	0.17	0.91	795	79.6	1.67	0.12		9.74	薄茶褐色透明	*2
43	YH 77	010207	43.5	270	8.0	8010	5250	1790	78.7	6.97	67.1	2750	6.44	3.31	401	130	13.8	0.35		21.0	薄茶褐色透明	*2
44	YH 78	011004	37.2	290	7.2	30400	17800	6440	170	107	224	10500	0.00	0.00	259	116	11.6	7.04			薄茶褐色透明	*2

YH:横浜の略、採水日:例えば「980626」は1998年6月26日を示す。「-」は当所で分析していない。Na⁺:ナトリウムイオン、K⁺:カリウムイオン、Ca²⁺:カルシウムイオン、Cl⁻:塩素イオン、NO₃⁻:硝酸イオン、SO₄²⁻:硫酸イオン、HCO₃⁻:炭酸水素イオン、H₂SiO₃:ケイ酸、HBO₂:珪酸、Fe²⁺:第一鉄イオン、吸光度:茶褐色の吸光度、COD:有機物、*1:温泉地学研究所(2001)、*2:温泉分析試験結果

表 4.2-2 水質分析項目および方法

項目	方法	検出限界値	備考
pH	ガラス電極法	—	JIS K 0102 12.1 準拠
電気伝導度 mS/m	電極法	1 μ S/cm	JIS K 0102 13 準拠
Na ⁺ mg/l	フレイム原子吸光法	0.05mg/l	JIS K 0102 48.1 準拠
K ⁺ mg/l	フレイム原子吸光法	0.05mg/l	JIS K 0102 49.1 準拠
Ca ²⁺ mg/l	ICP発光分析法	0.01mg/l	JIS K 0102 50.3 準拠
Mg ²⁺ mg/l	ICP発光分析法	0.01mg/l	JIS K 0102 51.3 準拠
SO ₄ ²⁻ mg/l	イオンクロマトグラフ法	0.2mg/l	JIS K 0102 41.3 準拠
HCO ₃ ⁻ mg/l	酸滴定法	2mg/l	JIS K 0102 15.1 準拠
Cl ⁻ mg/l	イオンクロマトグラフ法	0.05mg/l	JIS K 0102 35.3 準拠
Cl ⁻ * mg/l	滴定法	2mg/l	JIS K 0102 35.1 準拠
I ⁻ mg/l	イオンクロマトグラフ法	0.1mg/l	—
Br ⁻ mg/l	イオンクロマトグラフ法	0.1mg/l	JIS K 0102 37.2 準拠
H ₂ BO ₃ ⁻ mg/l	ICP発光分析法	0.02mg/l	JIS K 0102 47.3 準拠
SiO ₂ mg/l	モリブデン黄吸光光度法	2mg/l	JIS K 0101 44.1.1 準拠
TOC mg/l	燃焼酸化-赤外線分析法	1mg/l	JIS K 0102 22.1 準拠
δ D ‰	質量分析法	—	—
δ ¹⁸ O ‰	質量分析法	—	—

*: 温泉水とコア希釈水について他の項目は分析法は同じだが、Cl⁻のみ希釈水は滴定法

4.3 試料の埋没史

横浜孔から採取した各分析用試料の埋没史検討のために、まずボーリング孔に出現する層群レベルの対比を、累層レベルに細区分することを平成13年度に試みた。鈴木、小村(1999)では微化石分析の結果が示されていないので、地質調査所発行の1/5万「横浜」図幅に示されている近傍の断面図を参考にして、岩質の変化や層厚等に注目して、上総層群および三浦層群の細区分を試みた。

図4.3-1に横浜孔の層序の区分案をそれぞれ示す。

横浜孔では、下位から逗子層、池子層（以上三浦層群）、浦郷層、野島層、大船層、上星川層（以上上総層群）の順に累重すると推定される。

次に、横浜孔での地史について検討する。

横浜孔では三浦層群の逗子層そして池子層の堆積後に、いわゆる黒滝不整合の形成を経て、一連の上総層群が堆積している。そして、長沼不整合の形成の後に相模層群が堆積している。

横浜孔近傍において三浦層群は露出しておらず、横浜市南の三浦半島に比較的広く地表分布が認められる。図4.3-2に示すように、三浦半島北部における逗子層から池子層にかけての石灰質ナンノ化石による時代はCN9～CN12a付近であり(蟹江、笹原, 1991), Okada and Bukry(1980)の編年によれば7.0～2.5 Ma.の範囲である。この間の堆積環境としては、隣接する横須賀地域では上部漸深海帯下部～中部漸深海帯(500～2,000m)とされており、池子層内で上位ほど水深が増す傾向にあるとされている(江藤ほか3名, 1998)。

三浦層群と上位の上総層群との間は、黒滝不整合と呼ばれる不整合が認められる。房総半島の上総層群のシーケンス層序を検討した伊藤(1992)によれば(図4.3-3), 黒滝不整合面の上位に上総層群が堆積し始めた時代は房総半島東部で2.4Ma.頃、中・西部で1.8Ma.頃と考えられる。横浜地域の上総層群は房総半島西部の上総層群と対応すると考えられるため、浦郷層の堆積開始は1.8Ma.頃と考えられる。上総層群と相模層群との間の長沼不整合は、相模層群と房総半島側の下総層群が対比されていることから、房総半島での上総層群の上限の年代(約0.45Ma., 伊藤〔1992〕)頃に形成されたと推定される。この間の横浜孔付近の上総層群は、浅海から半深海をへて(浦郷層から大船層)再度浅海化していったと考えられている。

これらの二つの不整合の形成は、伊藤(1992)に記述されているように、堆積盆の発達にプレートの運動変化が影響しており、黒滝不整合の形成は2.6Ma.頃の天皇海山列の屈曲(太平洋プレートの運動方向の変化)、長沼不整合の形成はおおよそ0.5Ma.頃の日本海東縁での新生海溝の発生に関連するといふ、広域応力場の変化に対応したものであると考えられている。また、このおおよそ0.5Ma.頃の応力場変化以降から現在まで、応力場の状況が変わらないことから、長沼不整合以降の応力場は現在まで同様であると推定されている(例えば核燃料サイクル開発機構, 1999)。

一方、横浜孔における地下水水質の状況を考えると、表4.3-1に示す例から、横浜孔に近い保土ヶ谷井の深度1300m付近の地下水の塩化物イオン濃度が17140mg/lであること(福田、永田、鈴木, 1988)を踏まえると、間隙水は高濃度の塩水的なものであり、いわゆる化石海水的な地下水が現在もなお賦存しているものと推定される。すなわち、長沼不整合形成以降も、比較的深部においては地下水の淡水化が生じなかったと考えられる。したがって、少なくとも長沼不整合以降は現在の間隙水の水質が保持されていたと推定される。

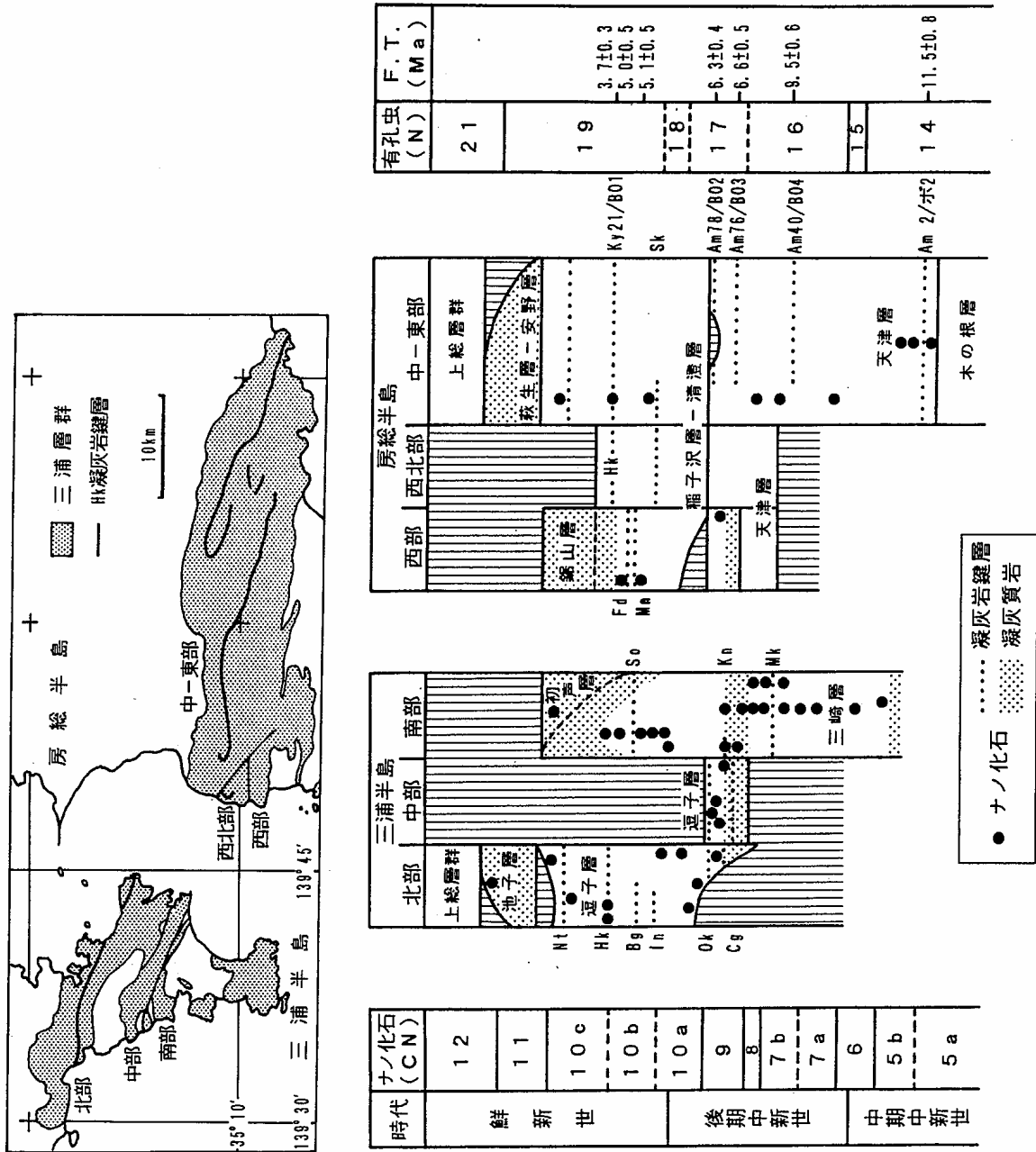
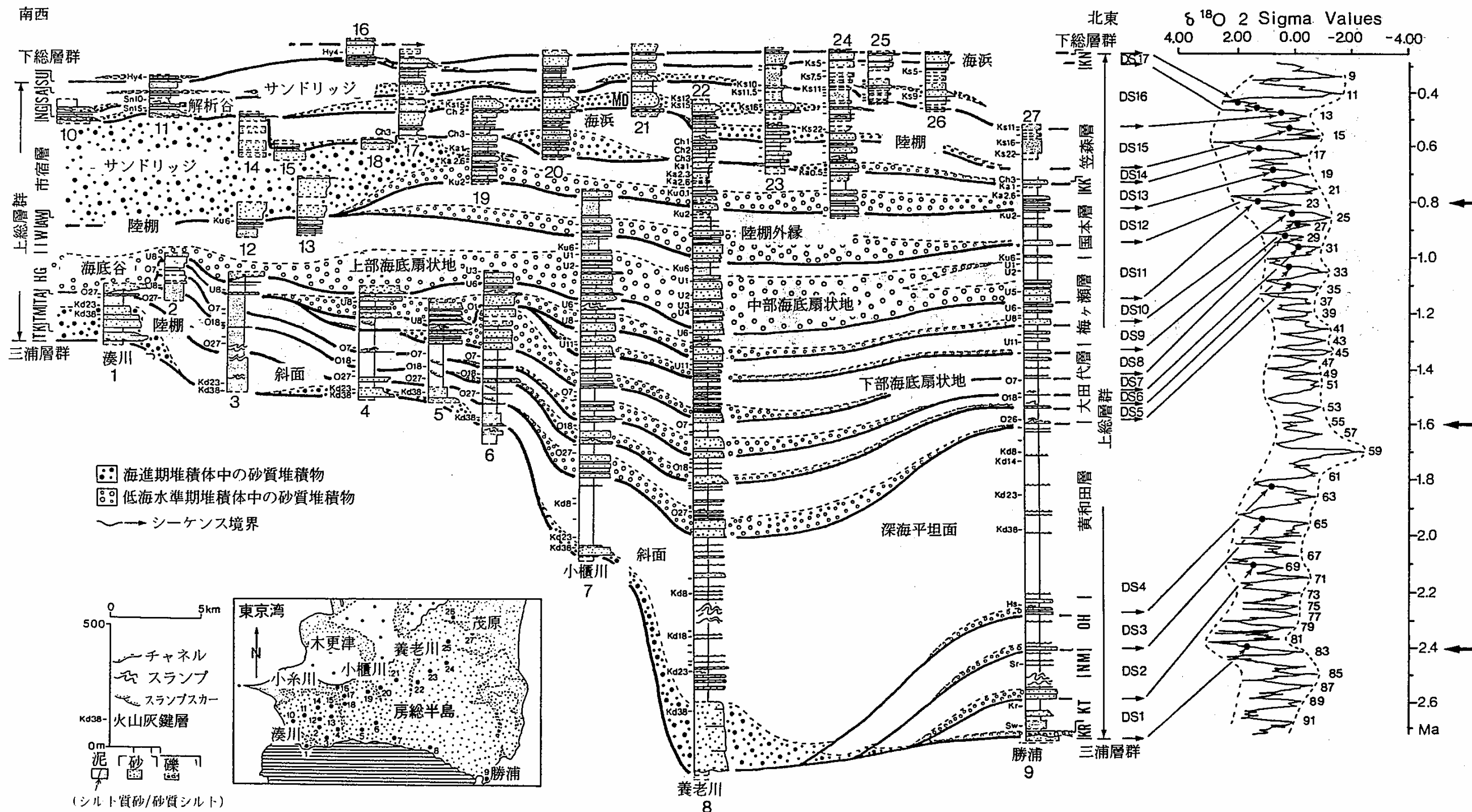


図4.3-2 三浦半島と南房総半島中部における三浦層群と時代

蟹江・笹原(1991)より引用



図の右側はシーケンス境界と酸素同位体比曲線(Williams, 1990)との対応を示す。9から91までの奇数はステージ番号を示す。略語は図17.5と同じ。養老川ルート(8)の柱状図の一部は三梨・他(1959)に基づく。右端の太い矢印は Vail curve に示されたシーケンス境界の形成時期(Haq et al., 1988)。

SU=周南層, SA=佐貫層, NG=長浜層, MD=万田野層, AW=栗倉層, IW=岩坂層, HG=東日笠層, TA=高溝層, TM=十宮層, TK=竹岡層, KN=金剛地層, CH=長南層, KK=柿ノ木台層, OH=大原層, NH=浪花層, KT=勝浦層, KR=黒滝層。

図 4.3-3 上総層群のシーケンス層序

(伊藤,1992 から引用)

表 4.3-1 南関東ガス田産付随水の化学分析例
(福田,永田,鈴木,1988 より引用)

地区	坑井名	採取深度 (m)	採取層位	主 要 成 分												ガス量 (m ³ /日)	水量 (m ³ /日)	ガス水比	分析者
				pH	f. CO ₂ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl (g/l)	Br ⁻ (mg/l)	I ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (g/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	KMnO ₄ 消費量 (mg/l)	I (mg) /Cl (g)				
上 滝	412	120 ~ 500	大田大, 黄和田 上部	7.7		969	13.13	61.2	105.1	35.2		129	277	234	8.00				地質調査所
夷 隅	NR 11	100 ~ 462	大田代中部~黄 和田上部	7.3		1,085	16.72	71.2	122.3	54.6		146	248	292	7.32				"
古 沢	古沢(大東) R2	(166 ~) 680 ~ 800	(黄和田~) 大原	7.5		1,490	19.10		125.5	179		169	464	180	6.57	300 ±	550 ±	0.55 ±	"
長者町	SR 1	602 ~ 1,002	勝 浦	7.5	5.0	411	19.68	118	90	80.0	11.74	440	262		4.57	280 ±	190 ±	1.4 ~ 1.5	"
一ノ宮	T 4	440 ~ 550	黄 和 田	7.5		1,620	13.02	49.2	86.8	69.8		93	323	255	6.66				"
茂 原	八積 R11	313 ~ 506	梅ガ瀬下部~大 田代	7.7	14	780	17.13		82	107		187	460	176	4.79	(2,440)	(106)	(23)	"
細 草	細草 R1	403 ~ 667	梅ガ瀬中・下部, 大田代	7.6	37	1,144	17.30	61.1	99.7		9.8	351	500	232	5.76			1.2 ±	"
大 網	KR 2	803 ~ 1,360	梅ガ瀬中部~黄 和田上部	7.8	6.1	948	19.21	42	89	115	11.40	238	342	267	4.63	1,000 ±	430 ±	2.3 ±	"
成 東	成東 R10	1,500 ~ 1,795	大原およびそれ 以下の上総層群	7.55		576	19.04	117	64.9	7.3		382	264	221	3.41	2,955	1,251	2.36	帝 石
横 芝	横芝(富士) R1	624 ~ 850	黄和田	7.5	57.2	1,397	19.00	68.2	90.5	34.2	10.60	194	550	216	4.76	1,700	960	1.77	地質調査所
木更津	木更津(大天) R1	741 ~ 895	岩 坂?	7.7	6	1,293	5.89		18		4.00	48	54	123	3.06	(400)	(430)	(0.93)	"
千 葉	CR(県) 1	650 ~ 885	笠森中・下部, 長南	7.9		1,005	19.53	101	47.0	254		207	593	250	2.41	2,060 ~ 2,190	1,300 ±	1.6 ~ 1.7	"
四街道	四街道 R2	1,503 ~ 1,800	大田代, 黄和田	7.75		656	19.41	123	80.6			332	271	166	4.15	4,100	1,630	2.54	帝 石
船 橋	FR 5	992 ~ 1,298	江東砂層とその 上位の上総層群	7.7		532	18.62	201	40	267	10.40	339	514	264	2.15	3,000	1,130	2.66	地質調査所
成 田	成田 R1	855 ~ 955	大田代 (~黄和 田上部)	7.6	15.4	544	19.10	128	43.6	54	11.58	207	418	187	2.28	2,500+	1,400	1.8+	"
竜ガ崎	竜ガ崎(新利根) R1	(613 ~) 750 ~ 813	(梅ガ瀬) 大田代	7.5	30.6	329	14.11	54	19.5	53	8.02	302	266	60	1.38	2,590	1,620	1.60	"
野 田	野田 R1	900 ~ 1,035	上総層群基底部	7.4	10.0	348	7.43			1.6	4.20	318	141	12		780	1,400	0.56	"
草 加	草加(帝石) R1	1,311 ~ 1,792	上総層群下部, 中新統	6.6		265	18.10	76.7	15.9	12		893	549	284	0.88	4,000	2,350	1.7	帝 石
江 戸 川	ER 2	946 ~ 1,565	江東砂層より下位 の上総層群	7.7	25.0	789	17.82	71.5	36.4	153	11.00	279	328	344	2.04	1,040+	400+	2.4 ~ 3.4	地質調査所
	ER 10	1,185 ~ 1,690	江東砂層より下位 (上総層群基底 まで)	7.7	2.8	545	19.17	87	81.4	185		273	315	450	4.24	800 ~ 1,500	420 ~ 700	1.9 ~ 2.5	河井ら
江 東	江東試1	(409 ~) 534 ~ 590	江東砂層(とその 上位の上総層群)	7.8	22	1,118	9.05	29	17	40	5.48	132	183			1,000 ~ 1,250	750 ~ 890	1.3 ~ 1.5	地質調査所
東 京 江 東・ 江 戸 川 以 外	大森 R1	(784 ~) 890 ~ 900 (~ 955)	江東砂層より下位 の上総層群	7.8		616	12.60	60.7	26.4	112	8.01	163	154	64	2.10	1,050	580	1.81	"
	中目黒試験	700 ±	"	8.0	0	1,920	0.50			26.5		7.6	6.5	875		少量	少量	0.4 ±	"
横 浜	保土ガ谷(相生) R1	359 ~ 600	" (大船)	7.8	13	2,538	0.82			9				1,526		(80)	(234)	(0.34)	河井ら
	保土ガ谷(帝石) R1	1,260 ~ 1,340	逗 子	7.3		231	17.14		4.2	70		1,330	166					(1.62)	帝 石

(注1) 水色は、中目黒試験、保土ガ谷(相生) R1で暗褐色であるが、他はおおむね無色ないし微黄色。
(注2) SO₄²⁻は、保土ガ谷(帝石) R1で23mg/l認められたほかには、ほとんどない。
(注3) Feは一般に数mg/l以内で認められるが、その大部分はFe²⁺であって、Fe³⁺はきわめて少ない。
(注4) ガス量、水量、ガス比の値のうち()内のものは、水試料採取時でないときの値。
(河井・福田, 1973)

4.4 分析・試験結果

(1) 偏光顕微鏡観察結果

薄片中の軽石を偏光顕微鏡で観察すると、いずれも、軽石を構成するガラスは変質を受け、鋳物化しており、ガラスの残存は認められなかった。例を偏光顕微鏡による薄片写真として図 4.4-1 および図 4.4-2 に示す。

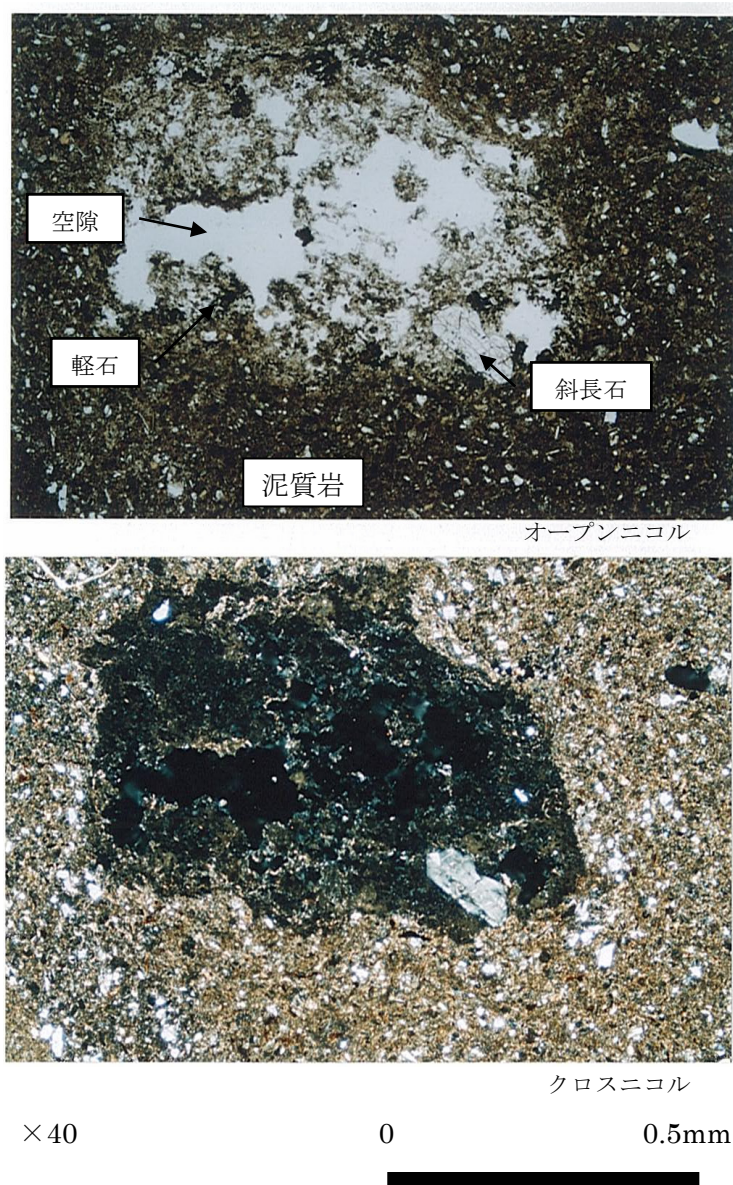


図 4.4-1 横浜孔の軽石の偏光顕微鏡写真（40倍）

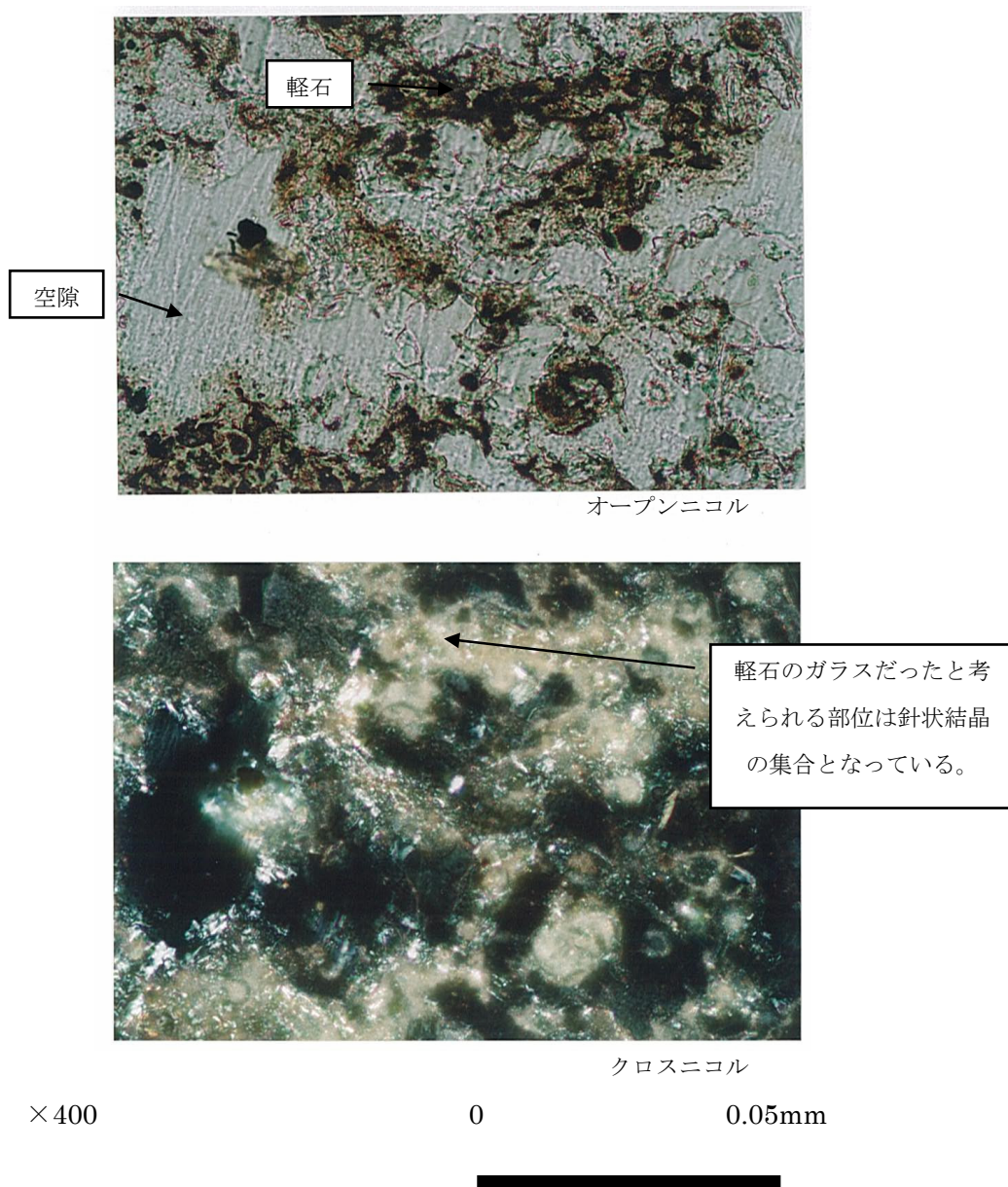


図 4.4-2 横浜孔の軽石の偏光顕微鏡写真 (400 倍)

(2) 微化石分析結果

石灰質ナンノ化石の分析結果を表 4.4-1 に、有孔虫分析結果のうちの浮遊性種の分析結果を表 4.4-2 に、そして有孔虫分析結果のうちの底生種の分析結果を表 4.4-3 に示す。なお、珪藻は検出されなかった。

石灰質ナンノ化石の産出率は、比較的高い傾向にある。産出した個体の保存状態は、半壊した殻が認められるものの、溶解あるいは再結晶作用を受けている殻が少ないことから普通あるいはやや良好であるといえる。

本試料から産出したナンノ化石は、10 属・17 種・種不明 5 の計 22 分類群である。

検出されたナンノ化石群集は、*Calcidiscus leptoporus*, *Calcidiscus macintyreii*, *Coccolithus pelagicus*, *Dictyococcites antarcticus*, *Dictyococcites productus*, *Discoaster triradiatus*, *Florisphaera profunda*, *Gephyrocapsa* spp.(small), *Pseudoemiliana lacunosa*, *Reticulofenestra minuta*, *Reticulofenestra minutula*, *Reticulofenestra pseudoumbilicus*, *Sphenolithus abies*, *Umbilicosphaera rotula*, *Umbilicosphaera sibogae*等を伴う種群で構成される。

以上の種群の中で示準種は、*Calcidiscus macintyreii*, *Discoaster triradiatus*, *Gephyrocapsa* spp.(small), *Pseudoemiliana lacunosa*, *Reticulofenestra pseudoumbilicus*, *Sphenolithus abies* であり、生存期間はそれぞれ *Calcidiscus macintyreii* が Okada and Bukry (1980) の CN3~CN13a の生存期間を有するほか、*Discoaster triradiatus* が(CN9-12), *Gephyrocapsa* spp. (small) が (CN11b ~ ;FAD: 4.2Ma.), *Pseudoemiliana lacunosa* が (CN11b ~ 14a;LAD:0.41(0.46)Ma.), *Reticulofenestra pseudoumbilicus* が(CN3~11b;LAD: 3.66Ma.), *Sphenolithus abies* が(CN9~11b? ; LAD≒:3.6Ma.)とされる。

よって、本試料の時代は、*Gephyrocapsa* spp.(small), *Pseudoemiliana lacunosa*, *Reticulofenestra pseudoumbilicus* が共存することから、Okada and Bukry(1980)の CN11b 亜帯に比較される。CN11b 亜帯は、前期鮮新世の後期にあたり、4.17~3.75Ma.の間に相当する。

また、浮遊性・底生有孔虫化石ともに、産出が認められた。産出状況は多い (abundant) ~ 普通 (common) である。有孔虫化石の保存状態は、悪い (poor) ~ 大変悪い (very poor) であり、とくに、浮遊性有孔虫化石には著しく変形した個体が多く観察される。

浮遊性有孔虫化石は、*Globigerina bulloides*, *Neogloboquadrina pachyderma* が卓越する。また、*Globorotalia* 属も産出し、保存不良ながら *G. miozea conoidea* の産出が認められた。底生有孔虫化石は、*Nonionellina labradorica*, *Brizalina bradyi*, *Melonis pompilioides*, *Bolivinita quadrilatera* が多産する。有孔虫 P/T 比は、44%であった。

以上、浮遊性有孔虫化石の示準種の産出にもとづき、本試料の堆積年代について、推定を試みた。本試料では、中期中新世~鮮新世に産出する *Globorotalia miozea conoidea* が少ないながらも産出する。しかし、同種の産出期間については、研究者間で見解が異なっており、Oda (1977) は後期中新世~前期鮮新世、Kennet and Srinivasan (1983) は中~後期中新世としている。このことは、本種が属する *Globoconella* 系列で子孫種への形態変異が漸進的に起きていることで、研究者間での形態種の認識に相違があるためとされる。この点は、*G. miozea conoidea* より進化した *G. conomiozea* の共産の有無から、ある程度、中新世であるか否かを絞り込むことが可能であることを示唆している。しかし、本試料では *Globorotalia* 属の産出が乏しく、また保存状態も悪いため、*G. conomiozea* の有無を特定するにはいたらなかった。したがって、本試料の堆積年

代は、浮遊性有孔虫化石からは、中期中新世～前期鮮新世のいずれかの時点と解釈するのが妥当である。

一方、生息深度分布の研究（秋元・長谷川，1989；長谷川ほか，1989）にもとづき、底生有孔虫化石の種構成から本試料堆積時の堆積水深について推定を試みた。生息深度帯区分は、長谷川ほか（1989）の西南日本（太平洋側地域）の鮮新世におけるものを用いた。本試料では、それぞれ、上部漸深海帯、中部漸深海帯以深に産出する *Nonionellina labradorica*, *Bolivinita quadrilatera* が多産する。それらから判断すると、本試料の堆積時の水深は、中部漸深海帯（水深 400-500m～800-1000m）以深と推定される。

表 4.4-1 石灰質ナンノ化石分析結果

Species	Range	Range		Depth(m)
		()内：斉藤1999		
	Age/CN Zone	FAD	LAD	2000.12 — 2000.18
<i>Calcidiscus leptoporus</i> (Murray & Blackman) Loeblich & Tappan	long range ⇌ Neogne			1
<i>Calcidiscus macintyreii</i> (Bukry & Bramlette) Loeblich & Tappan	E.M.-E.Ple.(CN3-13a)			1
<i>Coccolithus pelagicus</i> (Wallich) Schiller (7-7.9μ)	long range ⇌ Creta.→			1
<i>Dictyococcites antarcticus</i> Haq	long range			1
<i>Dictyococcites productus</i> (Kamptner) Backman	long range ⇌ Neogne			23
<i>Dictyococcites</i> spp.(small:2~4μ)	long range			5
<i>Dictyococcites</i> spp.(v.small:<2μ)	long range			1
<i>Dictyococcites</i> spp.	long range			1
<i>Discoaster triradiatus</i> Tan Sin Hok	L.M.-L.Pli.(CN9-12)			1
<i>Discoaster</i> spp.	Neogne form			1
<i>Gephyrocapsa</i> spp. (small:<2.5μ)	L.Pli.→(CN11b→;FAD: 4.2Ma)			87
<i>Helicosphaera carteri</i> (Wallich) Kamptner	long range ⇌ Neogne			1
<i>Pseudoeumiliana lacunosa</i> (Kamptner) Gartner	E.Pli.-L.Ple.(CN11b~14a)	0.41Ma		1
<i>Reticulofenestra amplia</i> Sato, Kameo & Takayama	M. ? M.-Pli.(Mid.Mio.?~12a)			1
<i>Reticulofenestra doronicoides</i> (Black & Barnes) Pujos(round Type)	long range ⇌ Neogne			41
<i>Reticulofenestra doronicoides</i> (Black & Barnes) Pujos(elliptical Type)	long range			28
<i>Reticulofenestra gelida</i> (Geitzenauer) Backman (6-9μ)	E.M.-E.Pli.(CN3~11b)	3.66Ma		2
<i>Reticulofenestra minuta</i> Roth	long range			5
<i>Reticulofenestra minutula</i> (Gartner) Haq & Berggren	long range			9
<i>Reticulofenestra pseudoumbilica</i> (Gartner) Gartner	E.M.-E.Pli.(CN3~11b)	3.66Ma		8
<i>Reticulofenestra</i> spp.	Neogne form			1
<i>Sphenolithus abies</i> Deflandre	L.M.-E.Pli.(CN9~CN11b?)			1
<i>Sphenolithus</i> spp.	Neogne form			1
<i>Umbilicosphaera rotula</i> (Kamptner)Varol	E.M.-E.Pli(CN1c-CN12a)			1
<i>Umbilicosphaera sibogae</i> (Weber-van Bosse) Gaarder	long range			1
Elliptical placolith	long range			1
石灰質ナンノ化石総数				225
<i>Florisphaera profunda</i> Okada & Honjo				3
含有量 A:多い, C:普通, F:少ない, R:稀, VR:極稀, VVR:極極稀, No:無化石				F
保存状態 G:良好, M:普通, P:不良, VP:特に不良				M

E.Ple.: 前期更新世, L.Ple.:後期更新世, E.Pli.:前期鮮新世, L.Pli.:後期鮮新世,

E.Pli.:前期鮮新世, L.Pli.:後期鮮新世,

E.M.:前期中新世, M.M.:中期中新世, L.M.:後期中新世,

Pal.:暁新世, Eo.:始新世, Oli.:漸新世,

表 4.4-2 有孔虫分析結果 (浮遊性種)

調査地	横浜	
深度 (m)	2000.12~2000.18	
砂粒径組成 (c:粗粒、m中粒、f:細粒、S:砂)		
泥化处理方法 (NaS:硫酸ナトリウム法)		
浮選処理 (○:実施、-:未実施)		
砂粒組成 (VA:大変多い、A:多い、C:普通、R:少ない、VR:大変少ない)		
軽鈹物	C	
重鈹物		
岩片(固結岩)		
スコリア		
ガラス (pm:軽石、H:平板型)		
風化粒・未泥化粒	VA	
黄鉄鉱		
植物片・有機物		
化石	R	
その他・備考		
含有化石組成 (VA:大変多い、A:多い、C:普通、R:少ない、VR:大変少ない)		
貝		
ウニ		
甲殻類		
貝形虫		
有孔虫 産状 状態 (g:良い、m:普通、p:不良、vp:大変不良)	A p - vp	
放散虫 産状 状態 (g:良い、m:普通、p:不良、vp:大変不良)		
珪藻		
骨針		
植物片		
その他 (Makiyama chitanii?)	VR	
備考		
有孔虫		
砂粒中の含有量 (VA:大変多い、A:多い、C:普通、R:少ない、VR:大変少ない、N無化石)	A	
保存状態 (g:良い、m:普通、p:不良、vp:大変不良)	vp	
浮遊性種比 (浮遊性種/全有孔虫%)	44.0	
浮遊性有孔虫	PL	
<i>Globigerina bulloides</i> d'Orbigny	PL	50
<i>Globigerinoides</i> sp.A	PL	3
<i>Globorotalia miozea conoidea</i> Walters	PL	5
<i>Globorotalia</i> sp. indet.	PL	4
<i>Globorotalia</i> sp.A	PL	1
<i>Globorotalia</i> sp.B	PL	1
<i>Neogloboquadrina humerosa</i> ? (Takayanagi and Saito)	PL	1
<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> (Ehrenberg)	PL	37
<i>Neogloboquadrina</i> sp.A	PL	15
<i>Orbulina universa</i> d'Orbigny	PL	1
Miscellaneous	PL	64
浮遊性種 合計	PL	182

浮遊性種比(%)は、計数個体数が100個体以上の試料について算出し、100個体以下で浮遊性種を産出する試料は分数で示す。

表 4.4-3 有孔虫分析結果 (底生種)

調査地	横浜	
深度 (m)	2000.12~2000.18	
砂粒中の含有量 (VA: 大変多い、A多い、C普通、R少ない、VR: 大変少ない、N無化石)	C	
保存状態 (g: 良い、m: 普通、p: 不良、vp: 大変不良)	p	
浮遊性種比 (浮遊性種/全有孔虫% : 計数総数が100個体以下で浮遊性種を産出する試料は分数で示す)	44.0	
底生有孔虫	殻	
膠着質種	AG	
Miscellaneous	AG	5
石灰質ガラス質殻種	CH	
<i>Bolivina robusta</i> Brady	CH	1
<i>Bolivina</i> sp.A	CH	5
<i>Bolivina</i> sp.B	CH	2
<i>Bolivinita quadrilatera</i> (Schwager)	CH	13
<i>Brizalina</i> sp.A	CH	3
<i>Bulimina alazanesis</i> Cushman	CH	2
<i>Bulimina</i> sp.A	CH	1
<i>Cibicidoides subdepressus</i> Asano	CH	7
<i>Dentalina</i> sp.	CH	3
<i>Eponides</i> sp.	CH	1
<i>Globobulimina auriculata</i> (Bailey)	CH	5
<i>Globocassidulina</i> sp.	CH	1
<i>Gyroïdina</i> sp.	CH	1
<i>Lagena</i> sp.	CH	1
<i>Brizalina bradyi</i> (Asano)	CH	22
<i>Melonis pompilioides</i> (Fichtel and Moll)	CH	14
<i>Nonionella labradorica</i> (Dawson)	CH	42
<i>Oridorsalis tener</i> (Brady)	CH	5
<i>Planocassidulina praehelena</i> Nomura	CH	5
<i>Plectofrodictularina advena</i> (Cushman)	CH	1
<i>Pseudoparrella exigua</i> (Brady)	CH	2
<i>Pullenia apertura</i> Cushman	CH	7
Miscellaneous	CH	38
膠着質種 合計	AG	5
石灰質磁器質殻種 合計	CP	0
石灰質ガラス質殻種合計	CH	182
底生種 合計		187

(3) 水質分析結果

希釈法による横浜孔コアの水試料および横浜温泉の水試料の水質分析結果を表 4.4-4 に示す。
また、分析結果から作成したヘキサダイアグラムを図 4.4-3 に示す。

表 4.4-4 水質分析結果

試料名	横浜温泉		横浜孔コア希釈水	
採水深度	GL-1500m		GL-2000.12~2000.18m	
対象地層名	三浦層群		三浦層群	
pH	7.8		—	
Eh(mV)	—		—	
EC(mS/m)	1460.0		—	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Na ⁺	2820	122.66	5.5	0.24
K ⁺	64	1.64	1.8	0.05
Ca ²⁺	160	7.98	5.3	0.26
Mg ²⁺	35	2.88	0.7	0.06
陽イオン合計	—	135.16	—	0.61
HCO ₃ ⁻	310	5.08	15	0.25
SO ₄ ²⁻	1未満	0.00	5	0.10
Cl ⁻	4900	138.22	9	0.25
陰イオン合計	—	143.30	—	0.60
I	1未満		1未満	
Br	18		1未満	
SiO ₂	76		—	
H ₂ BO ₃	120		0.1未満	
TOC	7		—	
δD (‰)	-5.2		—	
δ ¹⁸ O (‰)	-32.1		—	

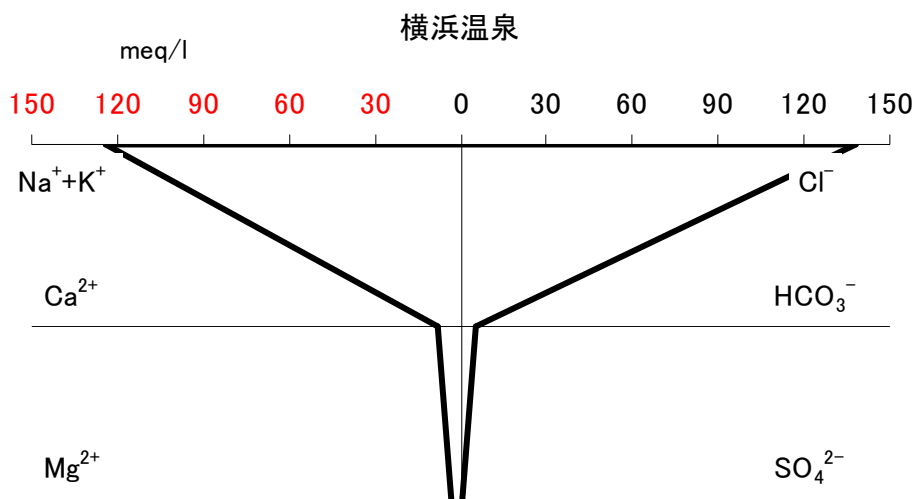


図 4.4-3 横浜温泉のヘキサダイアグラム

希釈法で得られた水質分析結果をコアが地下において飽和していた時の水の濃度に換算するために、以下の手順を用いた。

まず、鈴木、小村(1999)に示されている 2000m 付近のコアの乾燥密度(1.934g/cm³)から、希釈に供した粉末 100mg の粉末化前での体積は 0.0157cm³となる。次に、地下において間隙は水に飽和していたと考えられることから、求めた粉末化前の体積の間隙率(29.1%)相当が 100mg の粉末試料に本来含まれていたはずの間隙水の体積と考えると、間隙水の体積は 0.0150ml となる。岩石試料粉末を 100ml の水に溶かし検液を作成していることから希釈率は 100/0.0150 となる。このようにして求めた希釈率から算出した各イオンの濃度を表 4.4-5 に示す。

表 4.4-5 横浜孔コア希釈水の希釈率による換算結果

試料名	横浜孔コア希釈水 (換算)	
採水深度	GL-2000.12~2000.18m	
対象地層名	三浦層群	
pH	-	
Eh(mV)	-	
EC(mS/m)	-	
	mg/l	meq/l
Na ⁺	36667	1,595
K ⁺	12000	307
Ca ²⁺	35333	1,763
Mg ²⁺	4733	390
陽イオン合計	-	4,055
HCO ₃ ⁻	100000	1,639
SO ₄ ²⁻	33333	694
Cl ⁻	60000	1,693
陰イオン合計	-	4,025

5 考察

平成13年度の粉末X線回折分析結果においてモンモリロナイトと斜プチロル沸石が認められた軽石粒の薄片の偏光顕微鏡観察結果では、軽石を構成する火山ガラスは変質を受け鉍物化しており、ガラスの残存が認められなかった。したがって、変質速度に関する情報としては、70°Cで約0.5 Ma.の加熱条件はガラスのモンモリロナイトや斜プチロル沸石への変質には十分な条件であるといえるが、活性化エネルギーなどの情報を得ることができない試料であることが解った。

この変質に関与した地下水の水質については、平成13年度は比較的近傍に位置する横浜R1孔の水質(福田, 永田, 鈴木, 1988)から、茂原地域のような化石海水に非常に近い水質組成を維持してきたものと推定された(表4.3-1)。平成14年度は、この推定を実測データで確認するために、コアの希釈法によって得た水試料と、横浜孔の近傍の横浜温泉の水試料とを分析した。

コアの希釈水の分析の結果、各イオン合計は陰陽間におけるバランスはとれている。しかし、イオン等量の絶対値が4000meq/l程度であり、これは海水の約7倍にも達し、わが国の自然条件下では考えにくい。この原因として希釈作業における水-岩石比が大きすぎたことが考えられる。このことは絶対値自体に大きな誤差を含む可能性が高いが、個々の成分間の比率を議論することは可能と考えられる。

コア希釈水の分析結果では著量の SO_4^{2-} が認められる。これは海成泥質岩試料の黄鉄鉱の希釈作業中における酸化による生成と解釈すれば、陽イオンのうちの Ca^{2+} がこの硫酸の中和のために岩石中の石灰分(多くは微化石と思われる)の溶解に起因すると類推される。この解釈に基づけば、硫酸イオン等量分の Ca^{2+} を差し引くと陽イオンで最も高濃度なのは Na^+ となる。 HCO_3^- イオンの起源を希釈水(精製水や脱イオン水であっても、大気中では徐々に大気中の炭酸ガスが溶解して HCO_3^- が生成される)に求めると、岩石中に本来入っていた間隙水の水質は典型的なNa-Cl型の水と推定される。 HCO_3^- イオンや SO_4^{2-} イオン、そして Ca^{2+} イオンの高濃度の原因が上記の推論で妥当ならば、 Cl^- イオン濃度は現海水より大きいことから、天水でほとんど希釈されていないような化石海水が胚胎していた可能性が高い。

一方、横浜孔に平面的な位置に近い横浜温泉の分析結果は、表4.2-3のYH73の文献値に非常に近いものであった。B, BrおよびIの Cl^- 濃度に対する比(重量濃度比)を取ってWhite(1957)の示した海水、油田塩水、火山性温泉でのそれぞれの値の分布領域と比較を行った(表5-1)。この表5-2を見ると、横浜温泉のBおよびBrの Cl^- 濃度に対する比はいずれもWhite(1957)の油田塩水の領域に含まれ、火山性の温泉の特徴を持たないことが認められた(図5-1参照)。

表 5-1 横浜温泉と White(1957)の Cl⁻, I⁻, B, Br濃度比の比較

試料名	Cl ⁻ (mg/l)	B (mg/l)	Br (mg/l)	I ⁻ (mg/l)	B/Cl	Br/Cl	I/Cl
横浜温泉	4900	21.3	18.0	0.1未満	0.00435	0.00367	-
海水	19350	4.45	67.3	0.064	0.0002	0.00348	0.000003
油田塩水	-	-	-	-	0.00001 ～ 0.02	0.0001 ～ 0.01	0.00003 ～ 0.02
火山性温泉	-	-	-	-	0.01 ～ 0.1	0.0001 ～ 0.001	0.00001 ～ 0.0005

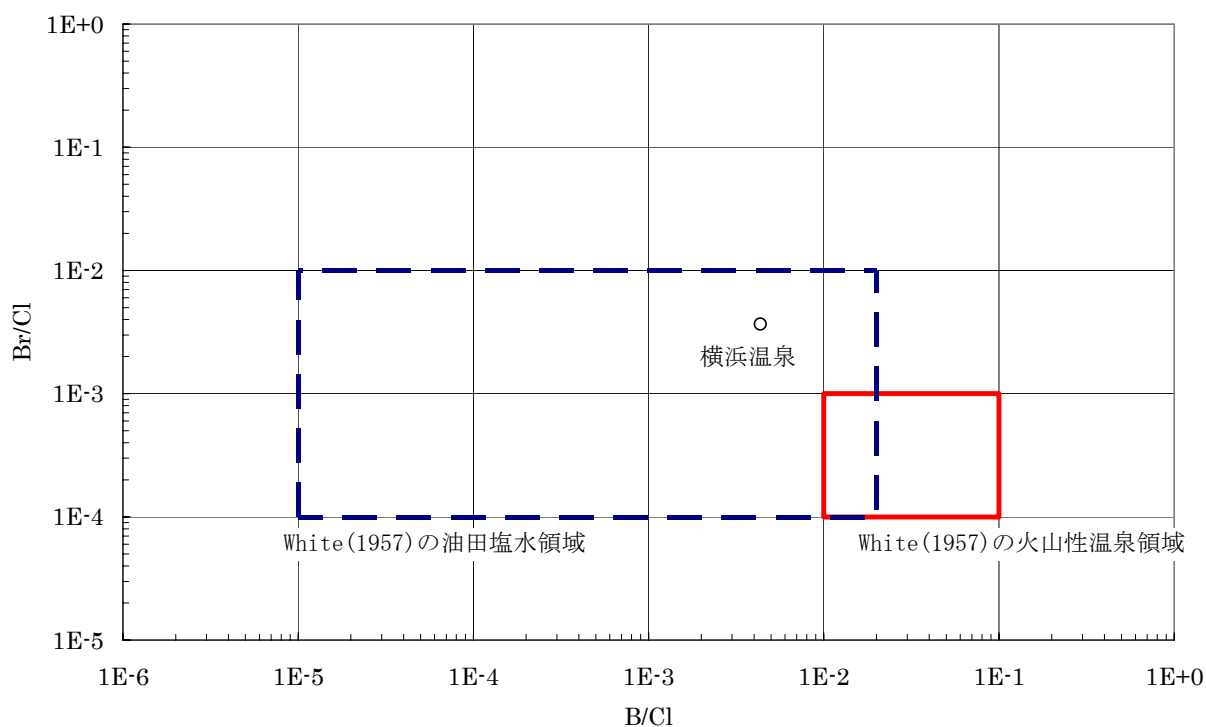


図 5-1 横浜温泉の Br/Cl-B/Cl 比プロット

横浜温泉の試料水の水素・酸素安定同位体比の分析結果をデルタダイヤグラムにして図 5-2 に示す。図 5-2 には、参考のために茂原地域での地下水および表流水のデータも併記した。デルタダイヤグラムの中で横浜温泉の同位体比は Craig(1961)の天水線位置に極めて近い位置にプロットされ (d 値で 9.5‰), 茂原の表流水に比較的近い位置にあるものの, その d 値は異なっている (d 値とは, 天水線の傾きを 8 と固定した場合に算出される天水線の切片の値)。

横浜温泉の地下水が化石海水と天水起源の地下水との単純混合によるものとする, Cl の希釈比をもとに, 化石海水を希釈した天水起源の地下水の同位体比を推定することができる。標準海水の Cl 濃度を 19000mg/l とし, 天水が Cl-free とすると, 希釈率は約 3.88 倍となり, 逆算される天水起源の地下水の水素・酸素安定同位体比はそれぞれ $\delta D = -43.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -7.0\text{‰}$ となり, この d 値は 12.7‰ となる。なお, 石坂, 栗屋(2001)に示されている神奈川県央部の天水線の d 値は 14‰ とされており, 逆算によって算出した天水起源の地下水の d 値に近い値となっており, これらの推論を裏付けるものと考えられる。

微化石分析結果によると, 横浜孔の 2000m 付近の堆積年代は, 石灰質ナンノ化石から 3.65~4.2Ma. と考えられ, 浮遊性有孔虫から N21 以前 (3.35Ma.以前) と考えられ, 石灰質ナンノ化石と浮遊性有孔虫との間での堆積年代に矛盾は無く, 3.65~4.2Ma.の堆積物と判断される。

両者の結果から判断して, 本試料は, 池子層最下部もしくはその下位の逗子層の上部付近に対比されるものと考えられる。

推定された堆積水深は, 江藤ほか (1987) が, 三浦半島地域の逗子~池子層で報告している 500~2000m (逗子層主部) あるいは 500~1000m (池子層) と, ほぼ同様の深度である。

以上のことから, 横浜孔の 2000m 付近の火山ガラスは, まず 3.65~4.2Ma.に海底に三浦層群の堆積物として堆積し, その後の黒滝不整合(約 1.8 Ma.頃)を介した上総層群の堆積後に長沼不整合(約 0.5 Ma.頃)によって削剥と相模層群以降の堆積を受けて現在に至っていることが考えられる。したがって, 少なくとも長沼不整合以降(約 0.5 Ma.頃)から現在まで約 70°Cの温度の化石海水的な地下水環境下に置かれた結果, 変質鉱物としてモンモリロナイトと斜プチロル沸石とが生じた天然事例であると考えられる。

なお, この検討結果と文献調査で得られた「火山ガラスの斜プチロル沸石への転換は有効被熱時間 5Ma.で 41°C, 2Ma.で 50°C, 0.5Ma.で 60°C」という知見と比較する。本研究で得られた「火山ガラスの斜プチロル沸石への転換は有効被熱時間 0.5Ma.で 70°C」という結果を図 2-13 にプロットし, 図 5-3 に示す。本試料の火山ガラスがすでに変質していたことから 0.5Ma.で 60°Cの時点でガラスの斜プチロル沸石への変質は完了し, 温度が現在の 70°Cに達していると考えられ, 本研究の検討は文献調査で得られた知見と整合する。

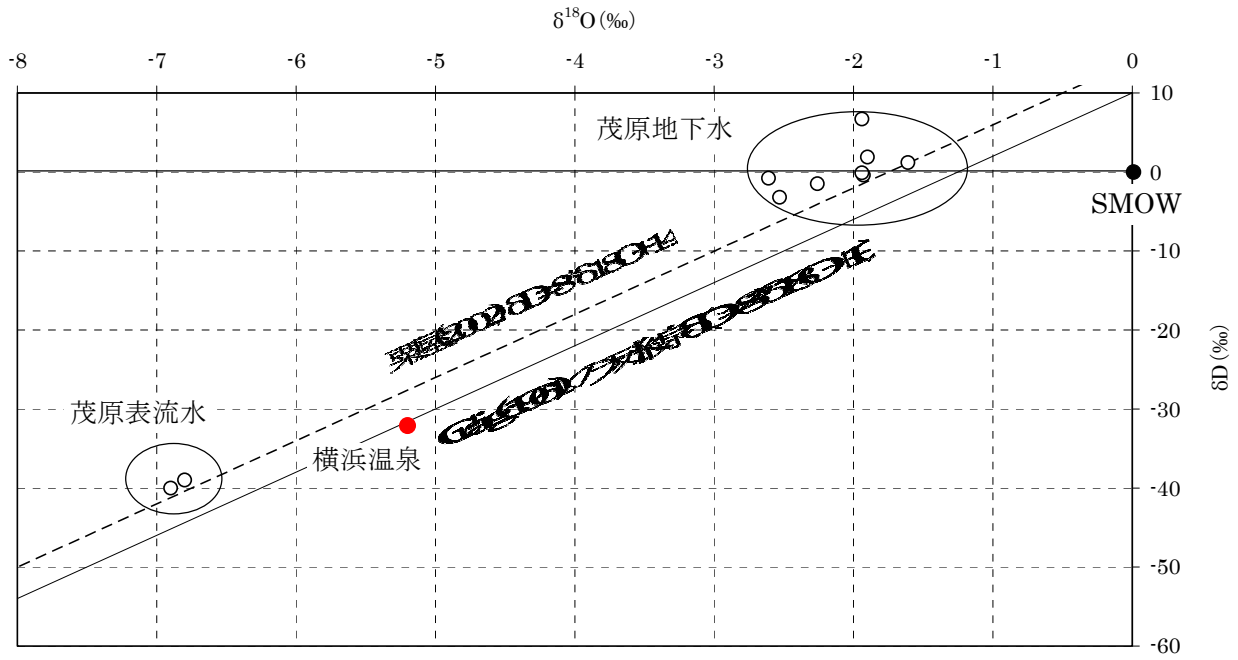


図 5-2 横浜温泉の水素酸素同位体比のデルタダイアグラム

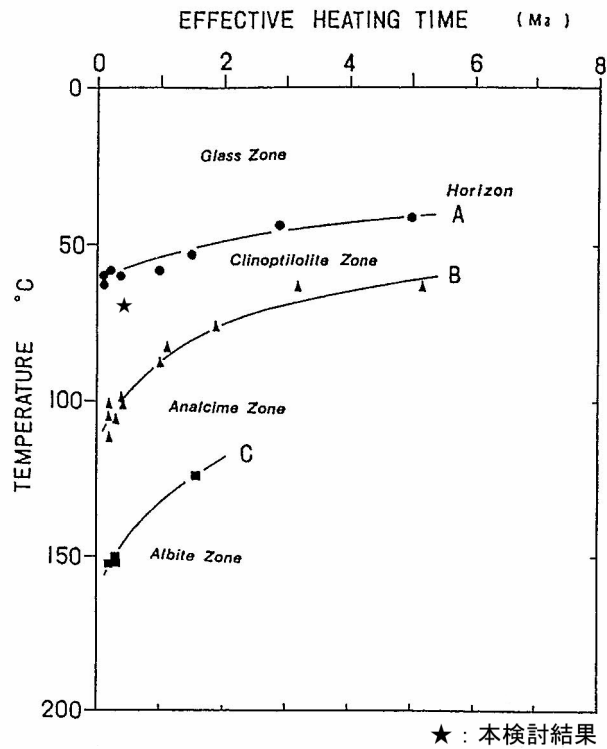


図 5-3 本検討結果を追加した各沸石帯の有効被熱時間ダイアグラム
(佐々木,2000 に一部加筆)

6 おわりに

南関東の地下深部に長期間置かれ続けてきたと考えられる、防災科学技術研究所所有の大深度のボーリングコア中の火山ガラスを調査し、約 0.5Ma.(約 50 万年)から現在までの時間、温度約 70°Cで化石海水的な地下水環境下では火山ガラスはすべて変質し、モンモリロナイトおよび斜プチロル沸石が形成されることを確認した。

平成 13 年度の段階において、火山ガラスの変質に関与した地下水の組成については、近傍の地下水情報から化石海水と推定しているに過ぎなかったが、既存コアの希釈法による間隙水の水質推定および横浜孔近傍の深部地下水の水質分析結果を得て、当該火山ガラスの変質に関与した水が化石海水的な地下水であったことが明らかとなった。

また、コア試料の採取層準の年代の把握については、既存コアの微化石分析を実施することによって 3.65~4.2Ma.の堆積と限定することができた。

本調査対象試料では、火山ガラスの変質が終了していることが確認されたため、活性化エネルギーなどの反応速度に関する情報を得ることができなかった。しかし、環境履歴を復元できる試料の天然ガラスの変質に関するナチュラルアナログ研究のアプローチの例を示すことはできた。

また本地域を含め、さらなる事例の蓄積も今後重要と考えられる。

謝辞:本研究で使用したボーリングコア試料は独立行政法人防災科学研究所殿よりご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

7 参考文献

- Azuma Iijima, Minoru Utada : “Present-Day Zeolitic Diagenesis of the Neogene Geosynclinal Deposits in the Niigata Oil field, Japan”, *Molecular Sieve Zeolites*, v.1, pp.342-349, (1971)
- 飯島 東 : “沸石続成作用”, *地質学論集*, No.15, pp.135-150, (1978)
- Aoyagi, K. and Kazama, T. : “Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis.”, *Sedimentology*, v.27, pp.179-188. (1980)
- 佐々木 詔雄 : “本邦油田地域の後期新生海成層における沸石化作用”, *石油技術協会誌 Journal of the Japanese Association of Petroleum Technologists*, v.55, No.1, pp.1-14, (1990)
- 岡 重文 : “関東地方南西部における中・上部更新統の地質”, *地質調査所月報*, v.42, No.11, pp.553-653. (1991)
- 三梨 昂, 菊地 隆男 : “横浜地域の地質”, *地域地質研究報告*, 地質調査所, 105p. (1982)
- 鈴木 宏芳, 小村 健太郎 : “関東地域の孔井データ資料集”, *防災科学技術研究所研究資料*, 第 191 号, 80p. (1999)
- 栗屋 徹, 板寺 一洋, 石坂 信之 : “横浜温泉に含まれる主な化学成分の特徴”, *神奈川県温泉地学研究所報告*, v.33, p.71-76. (2002)
- 蟹江 康光, 笹原 由紀 : “三浦半島と房総半島中部の三浦層群の層序”, *月刊地球*, v.13, No.1, pp.11-14. (1991)
- Okada. H and Bukry, D. : “Supplementary modification and introduction of code numbers to the low-latitude coccolith biostratigraphic zonation.”, *Marine Micropaleontology*, v.5, pp.321-325. (1980)
- 江藤 哲人, 矢崎 清貴, 卜部 厚志, 磯部 一洋 : “横須賀地域の地質”, *地域地質研究報告*, 地質調査所, 128p. (1998)
- 伊藤 慎 : “上総相群の堆積シーケンス”, *地球環境の復元—南関東のジオ・サイエンス*, (株)朝倉書店, pp.120-134. (1992)
- 核燃料サイクル開発機構 : “わが国における高レベル放射性廃棄物地層著聞の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ— 分冊1”, *我が国の地質環境, 地震・活断層*, pp.II-1-II-53. (1999)
- 福田 理, 永田 松三, 鈴木 宏芳 : “関東平野の地下地質と地層流体”, *地質学論集*, No.31, pp.5-40. (1988)
- Oda M. : ‘Planktonic Foraminiferal Biostratigraphy of the Late Cenozoic Sedimentary Sequence, Central Honshu, Japan’, *Tohoku Univ. Sci. Rep. 2nd ser.(Geol.)*, Vol.48, No.1, pp.1-72, (1977)
- Kennet J. W. and Srinivasan M. S. : ‘Neogene Planktonic Foraminiferal A Phylogenetic Atlas’, *Hutchinson Ross Publishing Company*, 265p., (1983)
- 秋元 和實, 長谷川 四郎 : ‘日本近海における現生底生有孔虫の深度分布—古水深尺度の確立に向けて—’, *地質学論集*, No.32, pp.229-240, (1989)
- 長谷川 四郎, 秋元 和實, 北里 洋, 的場保望 : ‘底生有孔虫にもとづく日本の後期新生代古水深指標’, *地質学論集*, No.32, pp.241-253, (1989)

White, D. E. : “Magmatic, connate, and metamorphic waters” ,Bull.Geol.Soc.Am, v.68, pp.1659-1662. (1957)

石坂 信之, 栗屋 徹 : “神奈川県各地の温泉水の水素および酸素安定同位体比の特徴”, 神奈川県温泉地学研究所報告, v.32, pp.1-5. (2001)

Craig, H. : “Isotopic variations in the meteoric waters”, Science, v.133, pp.1702-1703. (1961)

江藤 哲人, 尾田 太良, 長谷川 四郎, 本田 信幸, 船山 政昭 : “三浦半島中・北部の新生界の微化石生層序年代と古環境”, 横浜国立大学理科紀要, 2類, No.34, pp.41-57, (1987)