JNC TJ8400 2001-046

アルカリ性環境でのガラスおよびベントナイトの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）

2002 年 2 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

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)
2002

JNC TJ8400 2001-046
2002 年 2 月

アルカリ性環境でのガラスおよびベントナイトの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、火山ガラス及びベントナイトの変質性状に関する調査を実施した。

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、地殻活動観測井の掘削時に採取された上総層群および三浦層群の凝灰岩に含まれる火山ガラスの変質について調査した。

環境温度が約 70℃と推定された条件下におかれた火山ガラスにはモンモリロナイトおよび斜プチロル沸石の生成が認められたが、50℃以下の条件下におかれた火山ガラスには変質が認められなかった。これらはいずれも約 50 万年間、化石海水的な地下水中での反応事例と考えられた。

ベントナイトについては、北海道羅臼温泉付近に分布するアルカリ性の温泉湧出地付近の火成岩や堆積岩の変質状況について、水質と併せて調査した。

現地調査の結果、変質生成鉱物としてモンモリロナイト、カオリナイト、モルデン沸石、明ばん石が認められた。また、現在も pH が 9 程度で 90℃程度の Na^+－Cl^-型の温泉の湧出が複数確認できた。

この温泉水は、溶存成分および水素・酸素安定同位体比の検討によって、天水起源の水が地層中を浸透する過程で塩分濃度が上昇し、熱源によって加熱されて湧出しているものと考えられた。また、灰長石－カオリナイト－モンモリロナイト－シリカ鉱物－水溶液の安定関係の検討から、これらの温泉水はモンモリロナイトが安定である領域の組成を有している。

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

JNC TJ8400 2001-046
February, 2002

Natural Analogue Studies of Long Term Alteration of Volcanic Glass and Bentonite in Alkaline Conditions.

Katsuhito Futakuchi*, Yuji Sakuramoto*, 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 volcanic glass, volcanic ashes are collected from boreholes, which were drilled in the Kanto region by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. The volcanic glass, under the temperature condition 70℃, was altered to montomorillonite and clinoptilolite, but another volcanic glass, under the temperature condition up to 50℃, was not altered. Both cases may be occurred in the connate marine water at last 0.5 Ma

For the study of bentonite, slight alkaline hot spring water (pH:up to 9) and rocks in Rausu area, Hokkaido Prefecture, have been studied to examine the zeolitization of montmorillonite.

X-ray diffraction analysis show that montmorillonite, kaolinite, mordenite, and alunite were recognized as the alteration minerals.

Alkaline (pH:up to 9) and high temperature (about 90℃) water(Na^+—Cl^-type) were found at several outcrops, chemical and isotopic analysis show that those alkali hot spring waters were meteoric origin, increasing of salinity were as a result of seepage through the marine sedimentary strata, and high temperature was derived from the heat source.

Stability relationship for system anorthite—kaolinite—montmorillonite—silica minerals—aqueous solution shows that montmorillonite was stable in those spring water.

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 Co. Ltd.

目　次

1. アルカリ性環境での火山ガラスの変質に関するナチュラルアナログ研究.....1
1.1 はじめに.....1
1.2 調査地域の概要.....2
1.2.1 地形.....2
1.2.2 地質.....4
1.3 分析・試験.....12
1.3.1 試料.....12
1.3.2 方法.....13
1.3.3 試料の埋没史.....14
1.3.4 分析・試験結果.....21
1.4 考察.....22
1.5 おわりに.....25
参考文献.....26

2. アルカリ性環境でのベントナイトの変質に関するナチュラルアナログ研究.....27
2.1 はじめに.....27
2.2 調査地域の概要.....28
2.2.1 地形.....28
2.2.2 地質.....29
2.3 調査・分析・試験.....34
2.3.1 試料.....34
2.3.2 方法.....39
2.3.3 分析・試験結果.....42
2.4 考察.....46
2.4.1 変質.....46
2.4.2 水質.....47
2.4.3 モンモリロナイトの安定性.....51
2.5 おわりに.....53
参考文献.....54

図 目 次

アルカリ性環境での火山ガラスの変質に関するナチュラルアナログ研究

図 1.2.1－1　横浜孔付近の地形図……2
図 1.2.1－2　市原孔付近の地形図……3
図 1.2.2－1　横浜孔付近の地質図……5
図 1.2.2－2　横浜孔付近の層序……6
図 1.2.2－3　横浜孔総合柱状図……7
図 1.2.2－4　市原孔付近の地質図……9
図 1.2.2－5　市原孔付近の層序……10
図 1.2.2－6　市原孔総合柱状図……11
図 1.3.3－1　横浜孔層序細区分案……16
図 1.3.3－2　市原孔層序細区分案……17
図 1.3.3－3　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……18
図 1.3.3－4　上総層群のシーケンス層序……19
図 1.4－1　南房総鴨川地域の X 線回折結果と採取層準……23

アルカリ性環境でのベントナイトの変質に関するナチュラルアナログ研究

図 2.2.1－1　羅臼地区地形図……28
図 2.2.2－1　羅臼地区地質図……30
図 2.2.2－2　羅臼地区層序……31
図 2.2.2－3　羅臼地区の変質帯……33
図 2.3.1－1　羅臼川周辺試料採取地点位置図……34
図 2.3.1－2　落沢川周辺試料採取地点位置図……35
図 2.3.3－1　羅臼地区分析試料のヘキサダイヤグラム……43
図 2.4.2－1　羅臼周辺の水素・酸素安定同位体比デルタダイヤグラム……47
図 2.4.2－2　羅臼地区の温泉構成課程概念モデル図……50
図 2.4.3－1　$\log[H_4SiO_4]-\log[Ca^{2+}]+2pH$ の関係図……52

表 目 次

アルカリ性環境での火山ガラスの変質に関するナチュラルアナログ研究

表 1.3.1－1　採取試料一覧表 12
表 1.3.2－1　X 線回折条件 13
表 1.3.3－1　南関東ガス田産付随水の化学分析例 20
表 1.3.4－1　含有鉱物一覧表 21
表 1.3.4－2　偏光顕微鏡観察結果 21
表 1.4－1　南房総鴨川のスコリアの変質に関するまとめ 24

アルカリ性環境でのベントナイトの変質に関するナチュラルアナログ研究

表 2.2.2－1　羅臼地区の泉質 32
表 2.3.1－1　水質の現地調査項目および方法 34
表 2.3.1－2　現地水質および地質記載一覧(1) 36
表 2.3.1－2　現地水質および地質記載一覧(2) 37
表 2.3.1－2　現地水質および地質記載一覧(3) 38
表 2.3.2－1　羅臼地区水質分析項目および分析方法 39
表 2.3.2－2　試料採水の前処理 40
表 2.3.2－3　X 線回折条件 41
表 2.3.3－1　羅臼地区採取試料水質分析結果 42
表 2.3.3－2　羅臼地区採取試料含有鉱物一覧表 44
表 2.3.3－3　偏光顕微鏡観察結果 45
表 2.4.2－1　羅臼地区と White(1961)の Cl^-, I^-, B の濃度比の比較 48

1. アルカリ性環境での火山ガラスの変質に関するナチュラルアナログ研究

1.1 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を実施してきた。

その結果、以下のことが明らかとなっている。

(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(O8)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、SiO_2(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も認められない。

(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℃程度と低い。

これらの結果は、泥質岩中に取り込まれた火山ガラス(O8)が堆積後約 100 万年間変質しなかった事例として重要と評価されたが、履歴温度が低いことと、調査に用いた試料が地表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る。

そこで今年度は、地下水環境や温度条件が明確である、南関東における大深度のボーリングコア中の火山ガラス(凝灰岩類)を調査対象試料とすることとした。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)が 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選定した。これらの 15 孔のうち、比較的南房総鴨川に近く、かつ凝灰岩層が期待された横浜孔と市原孔を調査対象とした。

今年度の研究は、横浜孔と市原孔から採取した凝灰岩を用いて、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ている。

1.2　調査地域の概要

1.2.1　地形

(1)　横浜孔

横浜孔は、神奈川県横浜市旭区川井宿に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。横浜孔付近の地形を図 1.2.1－1 に示す。

横浜孔は、標高 80m 程度の丘陵地を帷子川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。

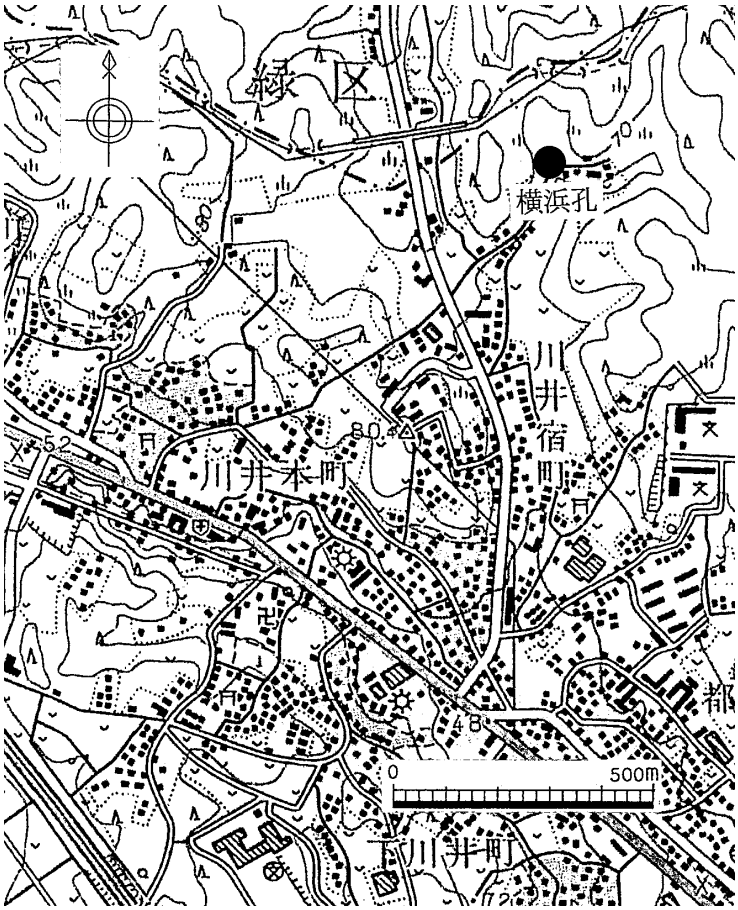


図 1.2.1－1　横浜孔付近の地形図

（国土地理院発行 1/25000 地形図横浜西部に一部加筆）

(2)　市原孔

市原孔は、千葉県市原市国本桜の谷に掘削された孔口標高 92.4m、深度 2034.0m のボーリング孔である。市原孔付近の地形を図 1.2.1－2 に示す。

市原孔付近は、標高 200m 程度の丘陵地からなるが、標高のわりには谷が急峻である特徴を有している。

図 1.2.1－2　市原孔付近の地形図

（国土地理院発行 1/25000 地形図大多喜に一部加筆）

1.2.2 地質

(1) 横浜孔

横浜孔付近の地質図を図 1.2.2－1 に、横浜付近の層序表を図 1.2.2－2 に示す。また、鈴木、小村(1999)による横浜孔の総合柱状図を図 1.2.2－3 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 1.2.2－3 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～中新世の三浦層群である。図 1.2.2－3 の右端欄には温度検層結果が示されており、孔底で約 70℃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。

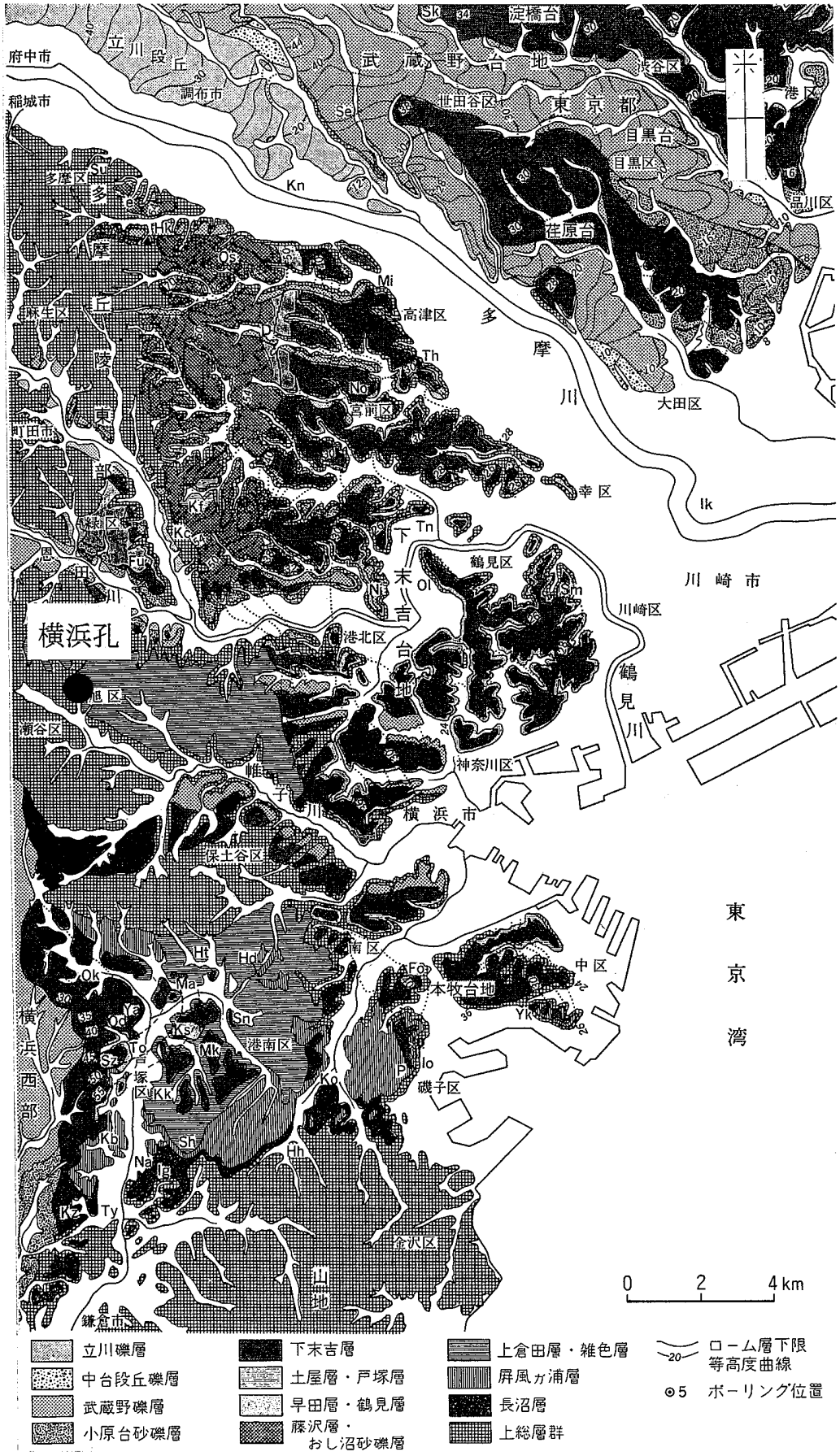


図 1.2.2－1　横浜孔付近の地質図

岡(1991)に一部加筆

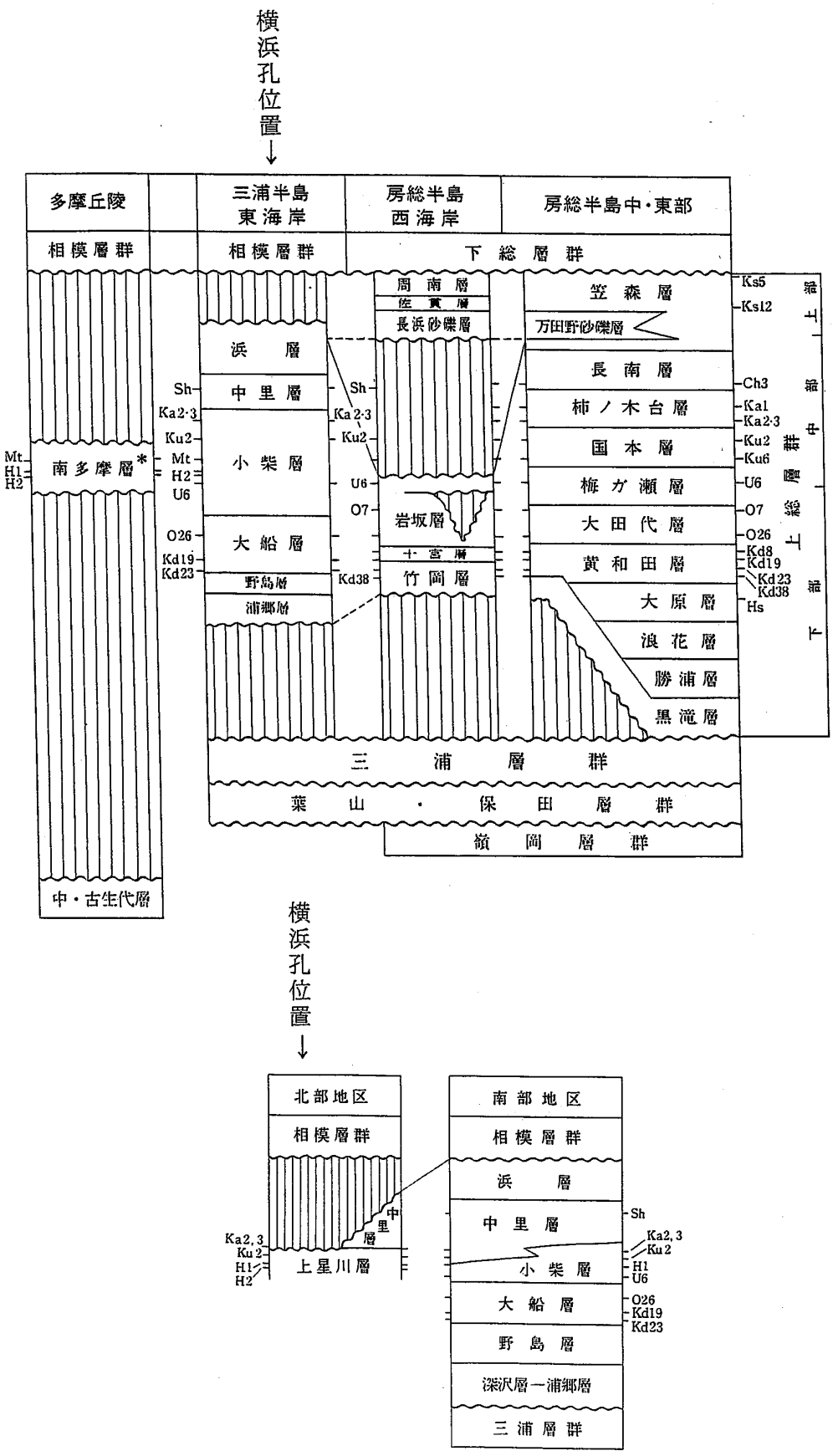


図 1.2.2－2　横浜孔付近の層序表

三梨・菊池(1982)に一部加筆

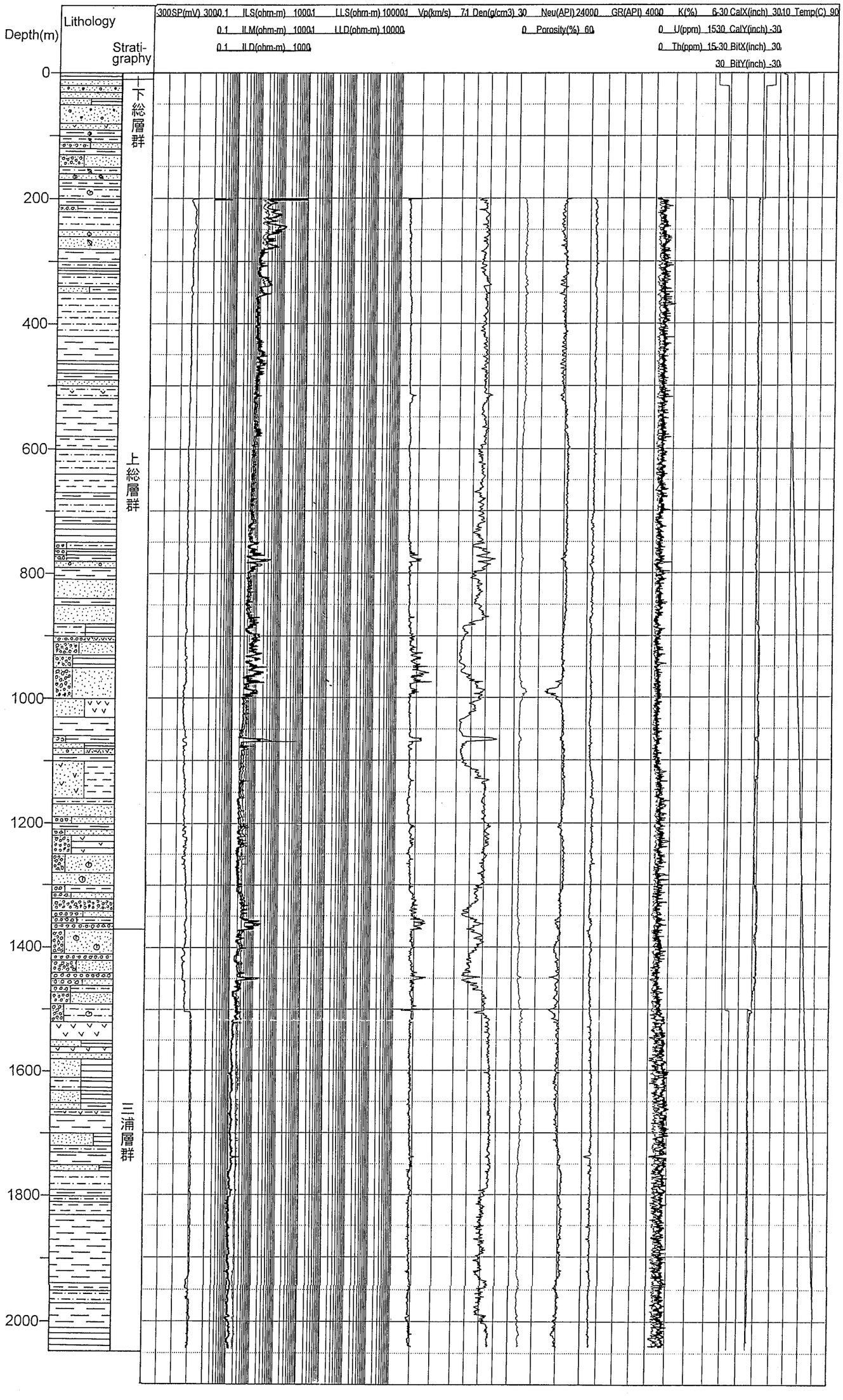


図1.2.2－3 横浜孔総合柱状図

鈴木・小村(1999)より引用

(2)　市原孔

市原孔付近の地質図を図 1.2.2－4 に、市原付近の層序表を図 1.2.2－5 示す。また、鈴木、小村(1999)による市原孔の総合柱状図を図 1.2.2－6 に示す。

市原孔付近の丘陵地は更新世～鮮新世の上総層群が広く分布し、市原孔付近は上総層群の国本層の模式地となっている。

図 1.2.2－6 によれば、孔口から深度 1650m までが更新世～鮮新世の上総層群で、1650m 以深が鮮新世～中新世の三浦層群である。図 1.2.2－6 の右端欄には温度検層結果が示されており、孔底で約 50℃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。

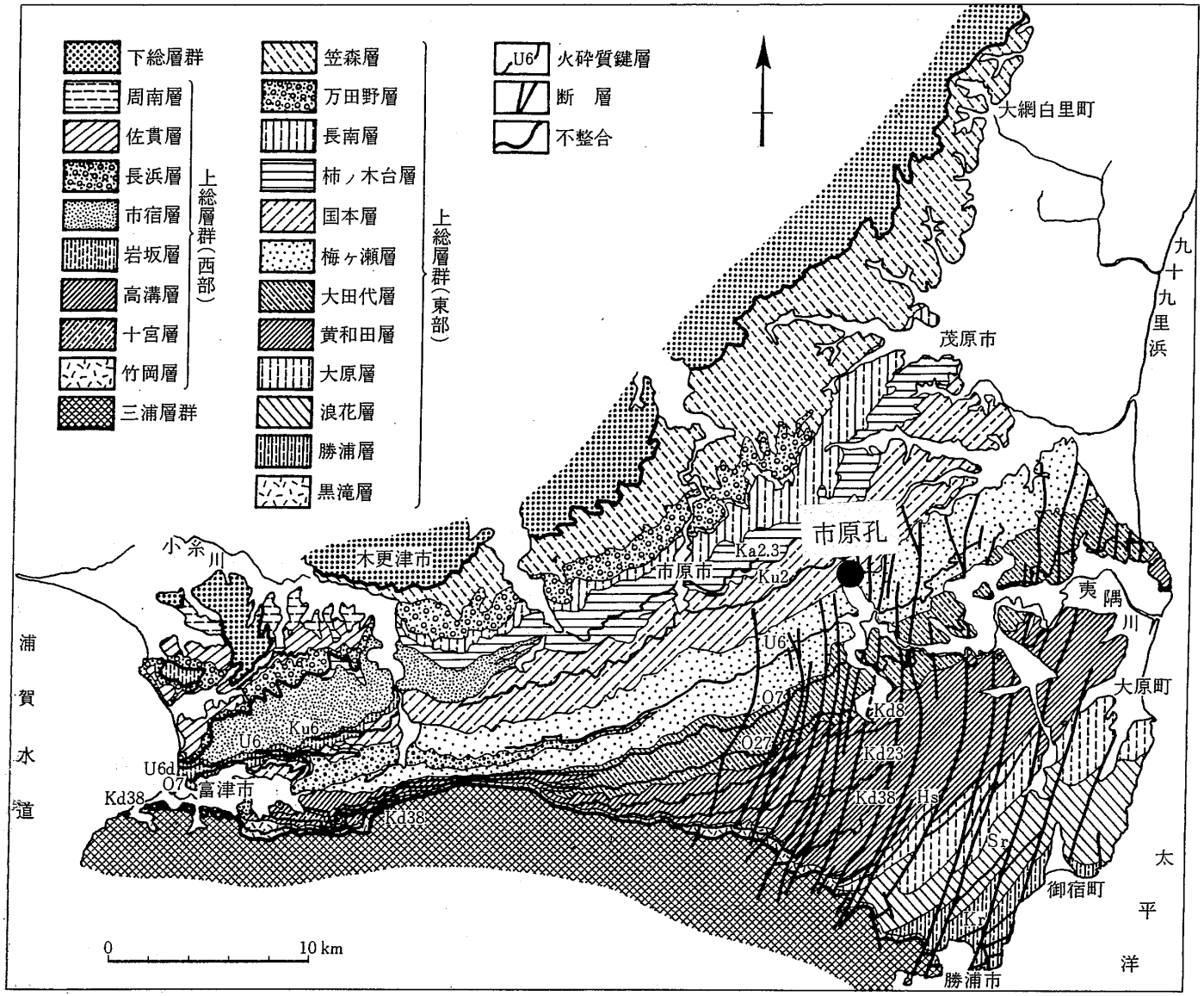
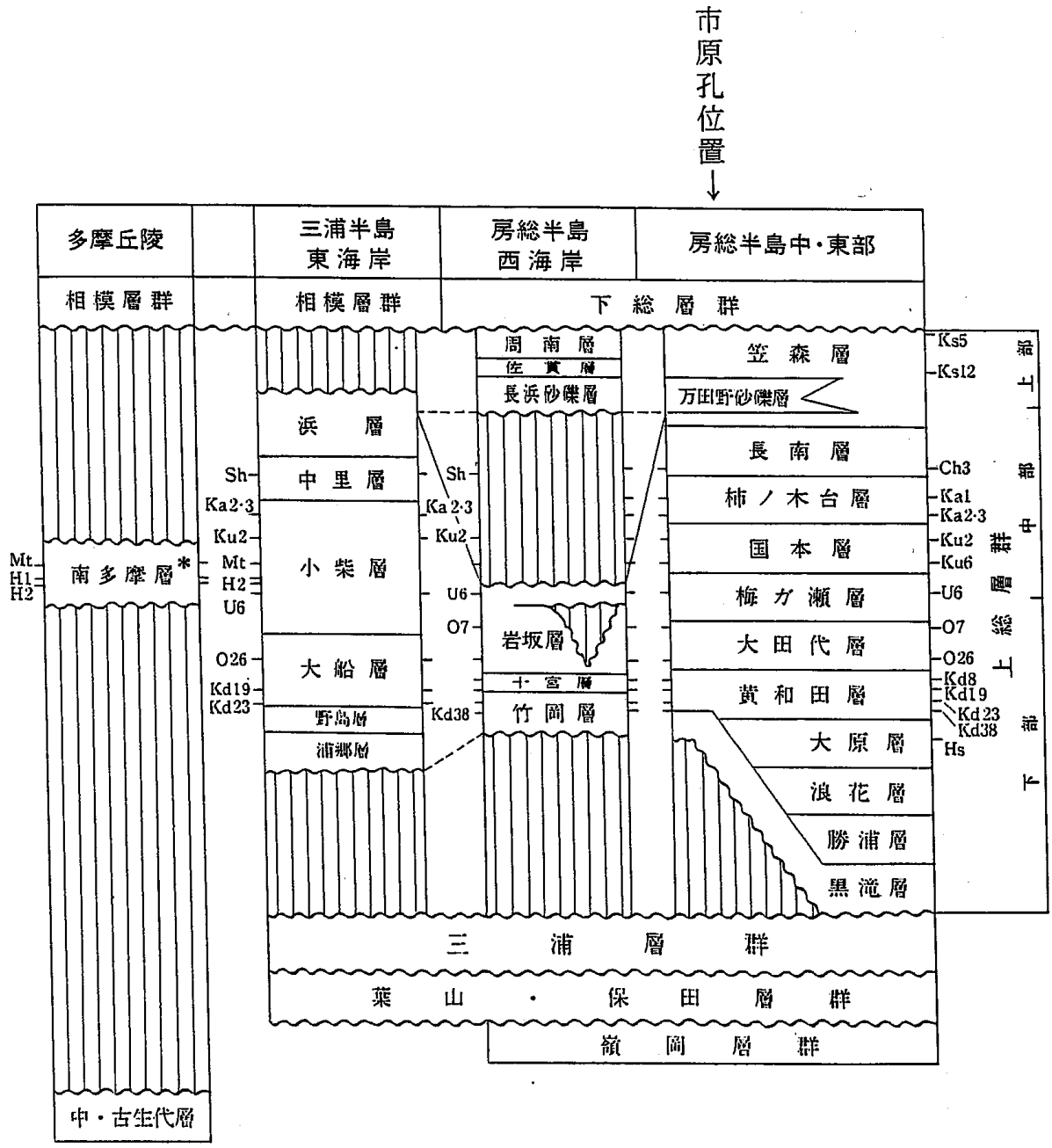


図1.2.2－4　市原孔付近の地質図

日本の地質編集委員会(1986)に一部加筆



* 多摩丘陵地区では3層に区分されているが，この表では仮にこの名でよぶ

図 1.2.2—5　市原孔付近の層序表

三梨・菊池(1982)に一部加筆

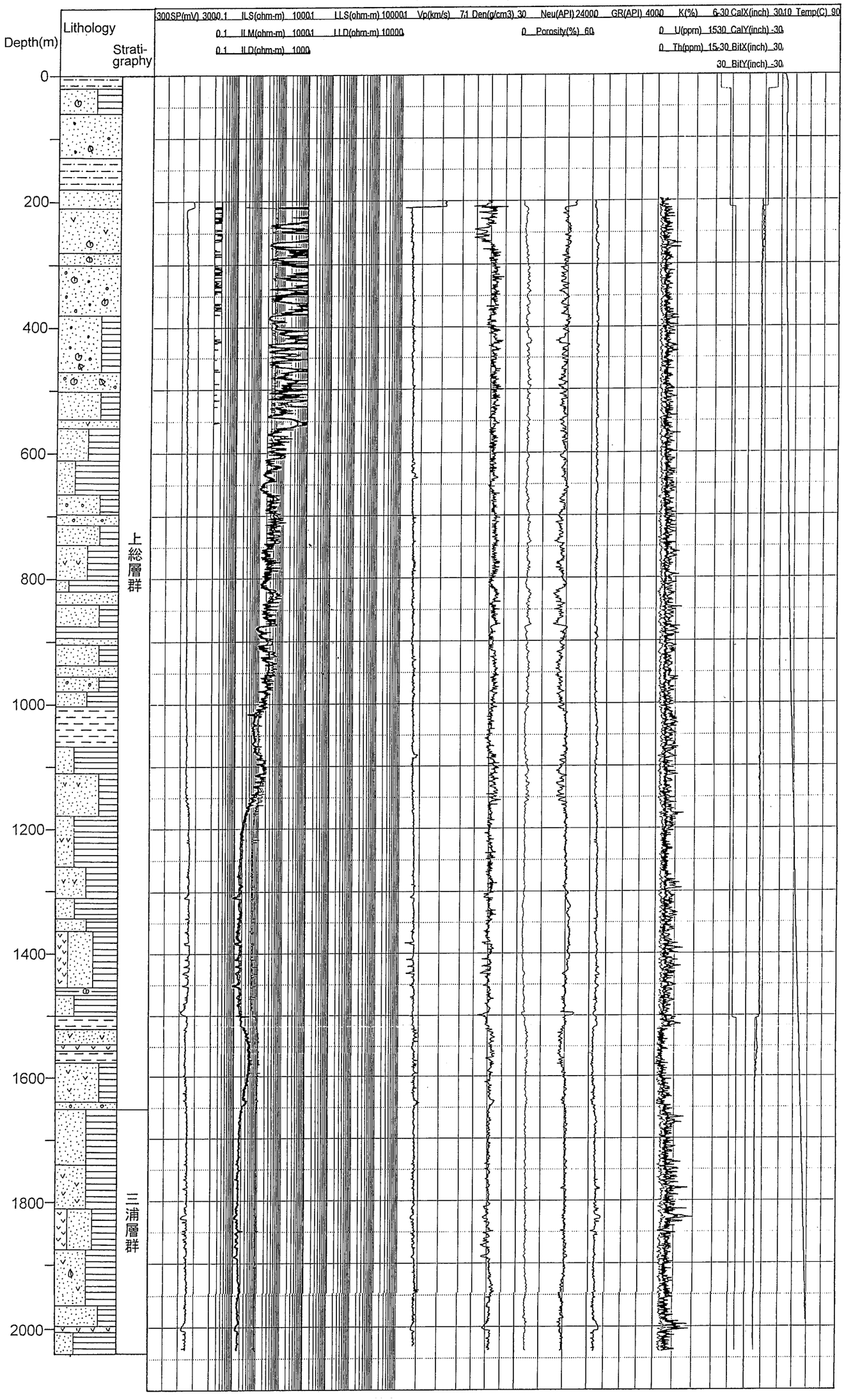


図1.2.2−6 市原孔総合柱状図
鈴木・小村(1999)より引用

1.3　分析・試験

1.3.1　試料

試料は、鈴木、小村(1999)に示されている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定し、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 1.3.1－1 に示す。なお、同表には岩質や肉眼的な特徴を併記した。

表 1.3.1－1　採取試料一覧表

孔名	採取深度		主岩質	詳細な特徴
	上限深度	下限深度		
横浜	1003.47m	1003.53m	ｽｺﾘｱ凝灰岩	幅 1cm、φ1mm 以下
	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
市原	2038.17m	2038.2m	ｺﾞﾏ塩状凝灰岩	幅 10cm 強

主岩質が泥質岩の試料については、表 1.3.1－1 の詳細な特徴欄中の下線部を試料とした。また、横浜孔の 1003.47～1003.53m のスコリア凝灰岩については、実体顕微鏡下でスコリアのみをハンドピッキングで選別・採取して分析用試料とした。

薄片作製試料は、肉眼でスコリアを含むと判断された、横浜孔の 1003.47～1003.53m のスコリア凝灰岩のみを対象とした。

なお、横浜孔の 1003.47～1003.53m から採取した試料は上総層群に、それ以外の試料は三浦層群に属する(鈴木、小村、1999)。

1.3.2　方法

得られた試料は、粉末 X 線回折分析および薄片の作製・観察に供した。

粉末 X 線回折分析は、次の手順で行った。

採取した試料を風乾したのちステンレス乳鉢で粗砕し、さらに自動らいかい機で指頭にざらつきを感じない程度までに粉砕し、粉末試料を作製した。この粉末試料の一部をガラス製試料板に詰め、無定方位試料を作製した。

また、この粉末試料を蒸留水と共にシリンダー(容積:1 リットル)中に分散させ、8 時間放置したのち、上澄み液 10cm を回収し、遠心分離機によって粘土分を沈殿させた。この沈殿物をスライドガラスに塗布して定方位試料を作製した。

無定方位試料については、表 1.3.2－1 の左側に示した条件で、定方位試料については表 1.3.2－１の中央に示した条件で X 線回折分析を行った。定方位試料のうち、14Å付近の反射が認められるものについてはエチレングリコール処理を行った後、表 1.3.2－１の右側に示した条件で X 線回折分析を行い粘土鉱物を同定した。

なお、X 線分析には、日本電子(株)製 JDX-11PA 型 X 線回折装置を用いた。

表 1.3.2－1　X 線回折条件

区分	無定方位試料	定方位試料	定方位試料(ｴﾁﾚﾝｸﾞﾘｺｰﾙ処理)
対陰極	Cu	Cu	Cu
ﾌｨﾙﾀｰ	Ni	Ni	Ni
管電流	10 mA	10 mA	10 mA
管電圧	30 kV	30 kV	30 kV
ｽﾘｯﾄ系	１°－0.3mm－１°	１°－0.3mm－１°	１°－0.3mm－１°
走査速度	1°/min.	1°/min.	1°/min.
ﾌﾙｽｹｰﾙ計数	2000cps	1000cps	1000cps
時定数	1 sec.	1 sec.	1 sec.
走査範囲	2θ=2～60°	2θ=2～20°	2θ=2～20°

薄片は、試料に樹脂を浸透・固化させたのち、油擦りで作製した。作製した薄片を、偏光顕微鏡下で、スコリア粒子のガラスを中心に観察した。

1.3.3　試料の埋没史

横浜孔および市原孔から採取した試料の埋没史検討のために、まず、それぞれの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(三梨、菊地、1982)に示されている近傍の断面図や日本油田・ガス田図 4「富津－大多喜」(地質調査所、1961)に示されている層序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を細区分してみた。

図 1.3.3－1 に横浜孔、図 1.3.3－2 に市原孔の層序の区分をそれぞれ示す。

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。

市原孔では、下位から安野層（以上三浦層群)、黒滝層、黄和田層、大田代層、梅ケ瀬層、国本層（以上上総層群）の順に累重すると推定される。

次に、それぞれの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。

三浦層群は横浜孔近傍においては露出しておらず、三浦半島に比較的広く地表分布が認められる。図 1.3.3－3 に示すように、三浦半島北部における逗子層から池子層は、石灰質ナノ化石による時代が 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 1.3.3－4)、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ため、浦郷層の堆積開始は 1.8Ma.頃と推定される。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。

市原孔近傍においては、地表に直接上総層群が露出していることから、市原孔の層序は伊藤(1992)に示されたシーケンス層序図の養老川ルートの位置にほぼ相当すると判断される。市原孔の孔口は図 1.2.2－4 に示したように、ほぼ国本層の Ku3 付近に相当するので、市原孔に出現している上総層群の堆積環境は、下位から上位に向かって、深海平坦面から海底扇状地を経て一部陸棚環境にあったと読みとることができる。

市原孔における三浦層群および上総層群の堆積年代については、基本的には横浜孔と同様の状況を想定することになる。すなわち、市原孔の孔口が国本層であっても、基本的に長沼不整合形成までの地史的変遷は共通と考えられる。

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う、広域応力場の変化に対応したものとであると考えられている。また、このおよそ 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、横浜孔と市原孔における地下水水質の状況を考えると、表 1.3.3－1 に示す例より，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)と、市原孔付近が現在も水溶性天然ガス採取地域であることを踏まえると、いずれも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。そして、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考えられる。

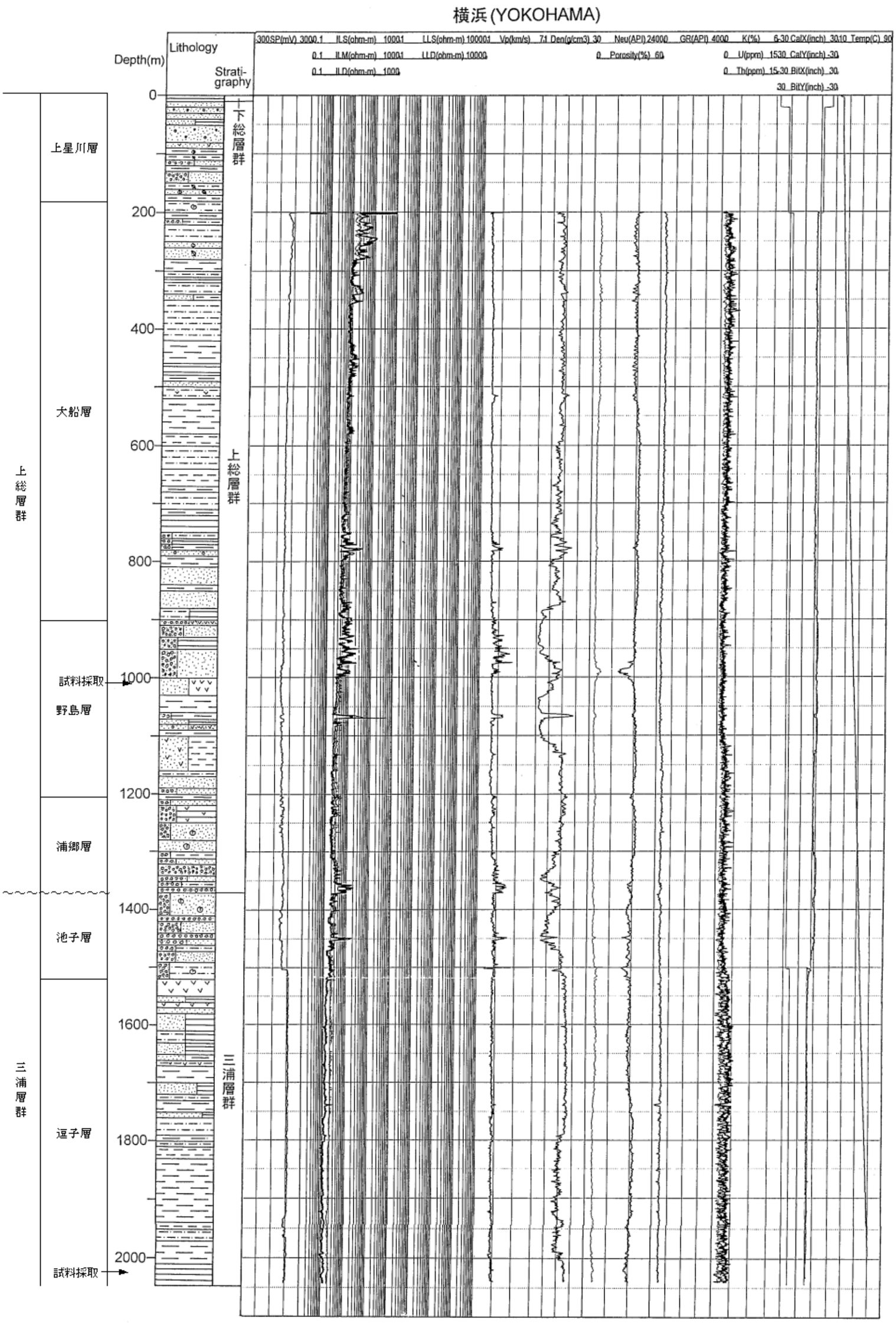


図1.3.3－1　横浜孔層序細区分案

鈴木・小村(1999)に一部加筆

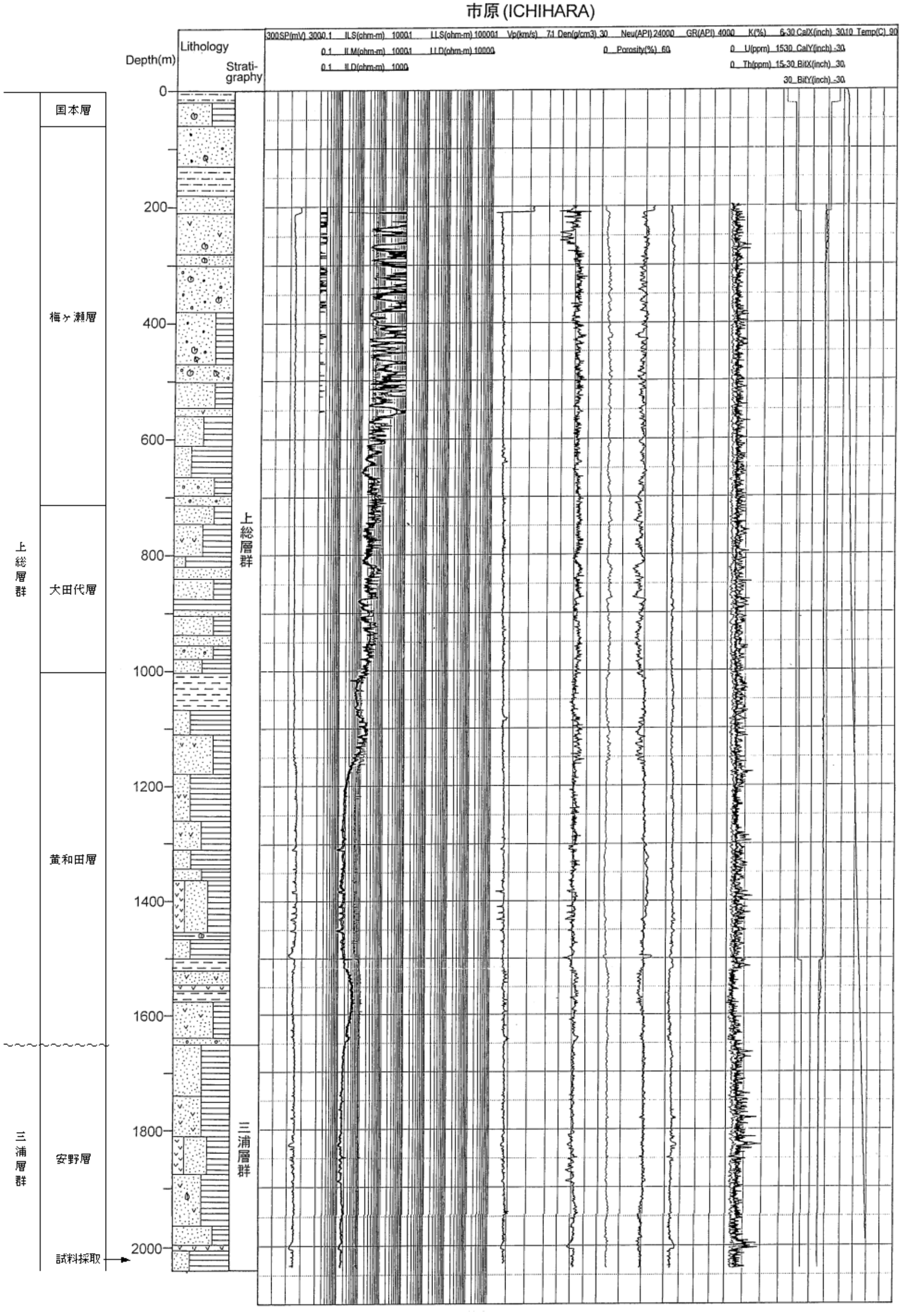


図1.3.3－2　市原孔層序細区分案

鈴木・小村(1999)に一部加筆

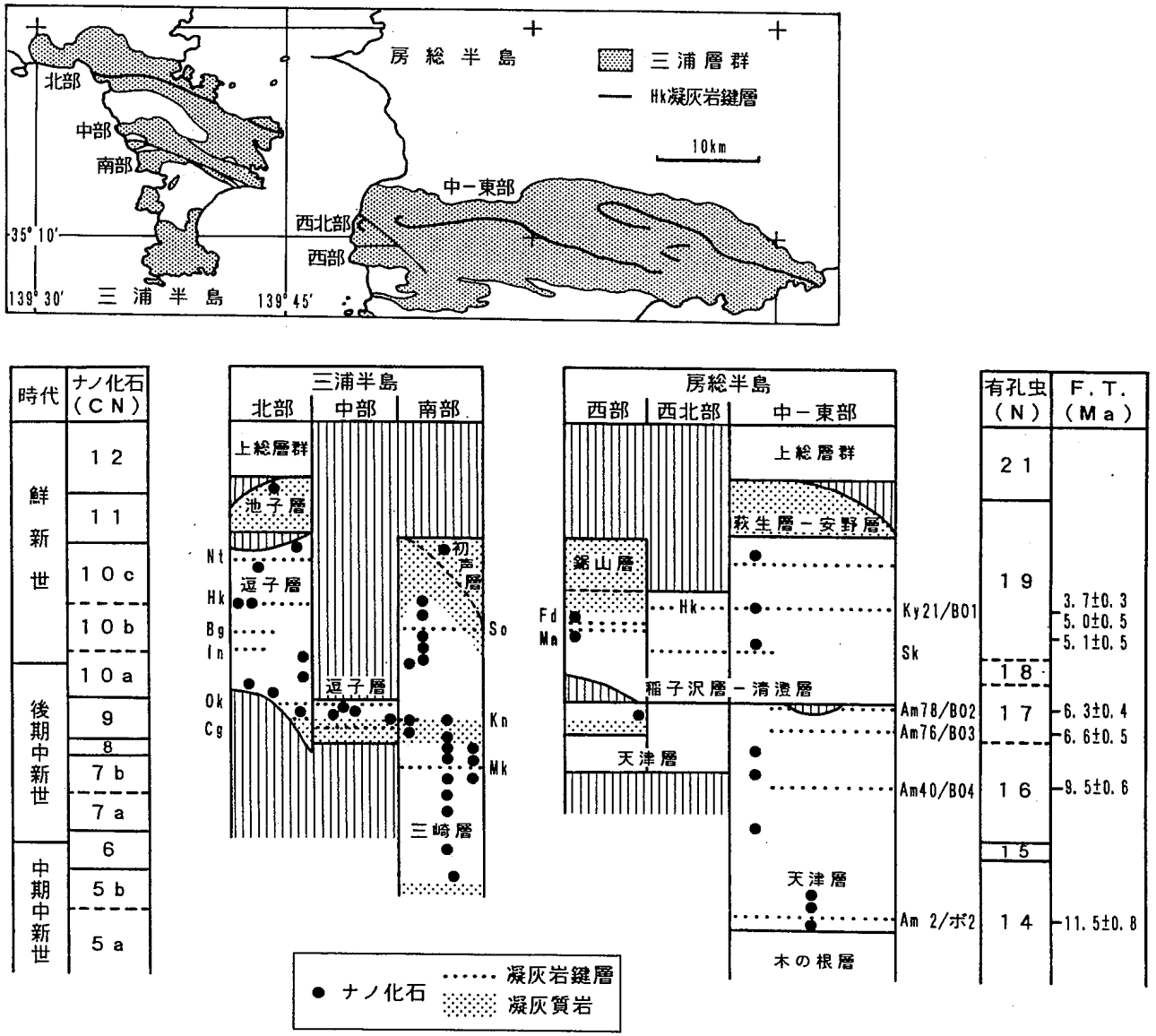


図1.3.3－3　三浦半島と房総半島中部における三浦層群の分布

蟹江・笹原(1991)より引用

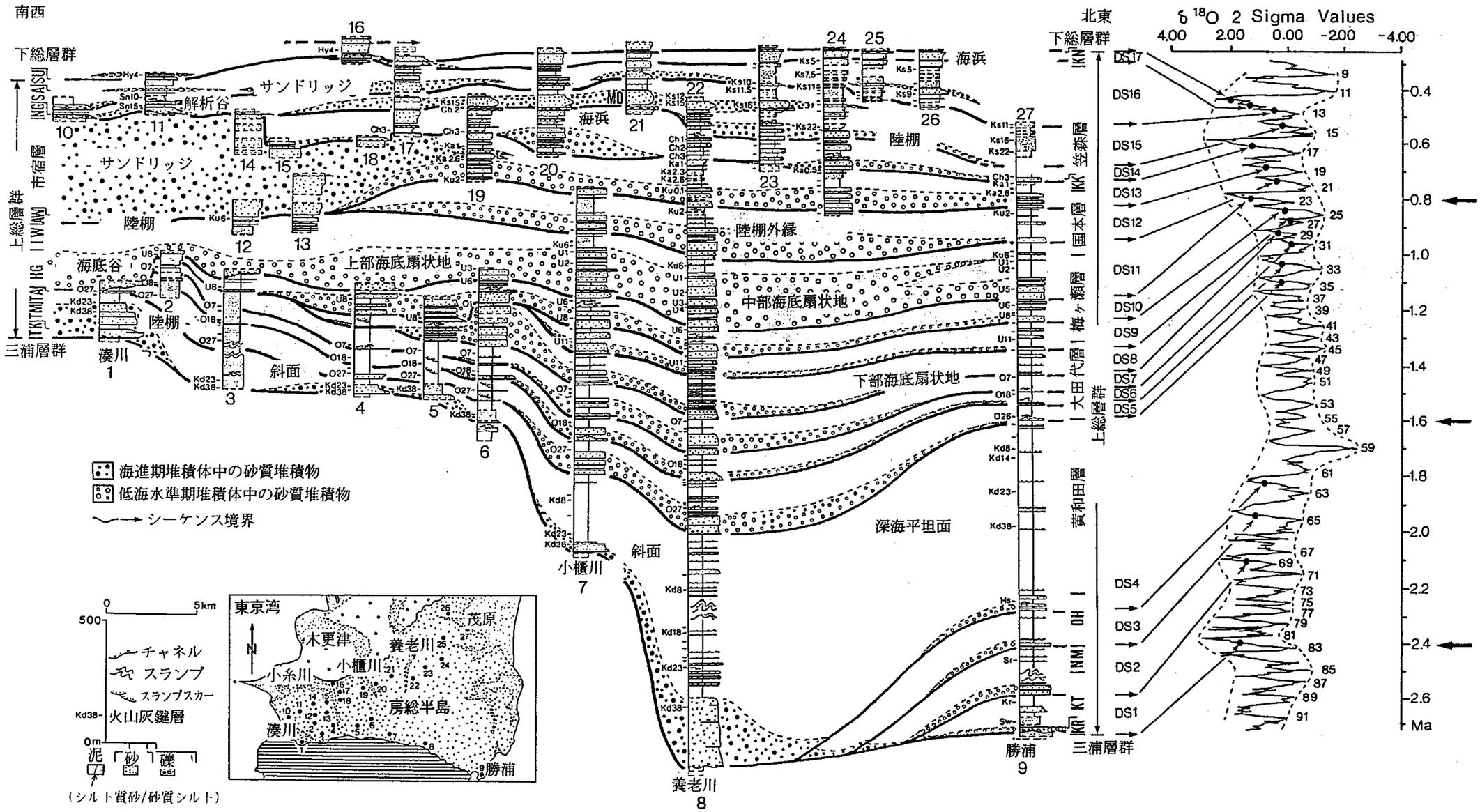


図　　上総層群のシーケンス層序(伊藤・桂原図)

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 1.3.3－4　上総層群のシーケンス層序

伊藤(1999)より引用

表 1.3.3－1　南関東ガス田産付随水の化学分析例

福田ほか(1988)より引用

地区	坑井名	採取深度 (m)	採取層位	主要成分 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)	ガス量 (m^3／日)	水量 (m^3／日)	ガス水比	分析者
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（太東）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+	〃
亀ガ崎	亀ガ崎（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	〃
	中目黒試錐	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		0.25			(1.62)	帝　石

（注1）水色は，中目黒試錐，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）SO_4^{2-}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，それの大部分はFe^{2+}であって，Fe^{3+}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）

1.3.4　分析・試験結果

粉末 X 線回折分析結果を表 1.3.4－1 に示す。表 1.3.4－1 には、横浜孔および市原孔で実施された温度検層結果から読み取られる温度を併記した。また、薄片中のスコリアの偏光顕微鏡観察結果を表 1.3.4－2 に示す。

表 1.3.4－1　含有鉱物一覧表

試料名＼鉱物名		モンモリロナイト	緑泥石	イライト	石英	斜長石	斜プチロル沸石	普通角閃石	推定温度(温度検層結果から推定)
横浜孔	1003.47～1003.53m					△			約 43℃
	2000.12～2000.18m	△				○	・		約 70℃
	2006.34～2006.37m	・	・	・	◎	○	△		約 70℃
市原孔	2038.17～2038.20m					△		△	約 50℃

相対含有量：◎多量、○中量、△少量、・微量

表 1.3.4－2　偏光顕微鏡観察結果

区　分	記　　事
組　織	径 1mm 前後の暗褐～暗灰を呈する。斑晶とガラスからなる。
斑　晶	斜長石および斜方輝石からなる。 斜長石は長さ 20～50μm 程度を主体とし、短冊状～柱状の自形～半自形を呈し多量含まれる。アルバイト双晶、累帯構造を示している。斜方輝石は粒状の自形～半自形を呈し、40～70μm 程度の結晶が少量含まれる。
ガラス	暗褐～暗灰を呈し、発泡していない。鏡下においては、変質は認められない。

1.4　考察

粉末 X 線回折分析結果において火山ガラスの変質を示唆する可能性がある鉱物としては、モンモリロナイト、緑泥石、イライト、石英、斜プチロル沸石が挙げられる。しかし、「火山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 92-001」においても記述したように、緑泥石とイライトが共存する試料においては、これらの鉱物が堆積粒子として多量に存在し、分析試料中に含まれていた可能性が高いと考えられる。このことを踏まえると、横浜孔の 2000m 付近の 2 試料のいずれにも認められたモンモリロナイトと斜プチロル沸石が火山ガラスの変質鉱物である可能性が高いと判断される。

これらの鉱物が認められた横浜孔の 2000m 付近は、温度検層結果から約 70℃と推定されるが、認められなかった横浜孔の 1000m 付近では約 43℃、市原孔の 2000m 付近では約 50℃と低い温度となっている。

図 1.4.－1 に「火山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 92-001」における鴨川地域での粉末 X 線回折分析結果と試料採取層準の関係を示し、表 1.4－1 に試料の受けた最高温度とガラスの変質との関係を示す。図 1.4－1 や表 1.4－1 に示された結果は、試料は地表露頭試料を用い、Aoyagi and Kazama(1979)によるガラスから石英が生成する温度を 69℃として古地温勾配を検討したものである。これらの図 1.4－1 や表 1.4－1 に示された結果と今回の分析結果を比較すると、約 70℃の環境温度においてモンモリロナイトの生成が認められ、50℃以下の環境温度では認められない点で良い整合を示している。

以上のことから、ボーリングによって直接地下深部から得た凝灰岩試料で認められた、約 70℃におけるモンモリロナイトおよび斜プチロル沸石の生成は、地表試料を用いた既往研究結果と調和的であることから、「火山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 92-001」での地表試料を用いた検討方法の妥当性も示すことができたと判断される。

この変質に関与した地下水の水質については、横浜孔の直接的なデータはないが、比較的近傍に位置する横浜 R1 孔の水質(福田、永田、鈴木、1988)を見ると、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る(表 1.3.3－1)。

以上をまとめると、横浜孔の 2000m 付近の火山ガラスは、まず海底に堆積し、その後の上総層群の堆積後に長沼不整合よって削剥と相模層群の堆積を受けて現在にいたっていることが考えられる。そして、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℃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と考えられる。

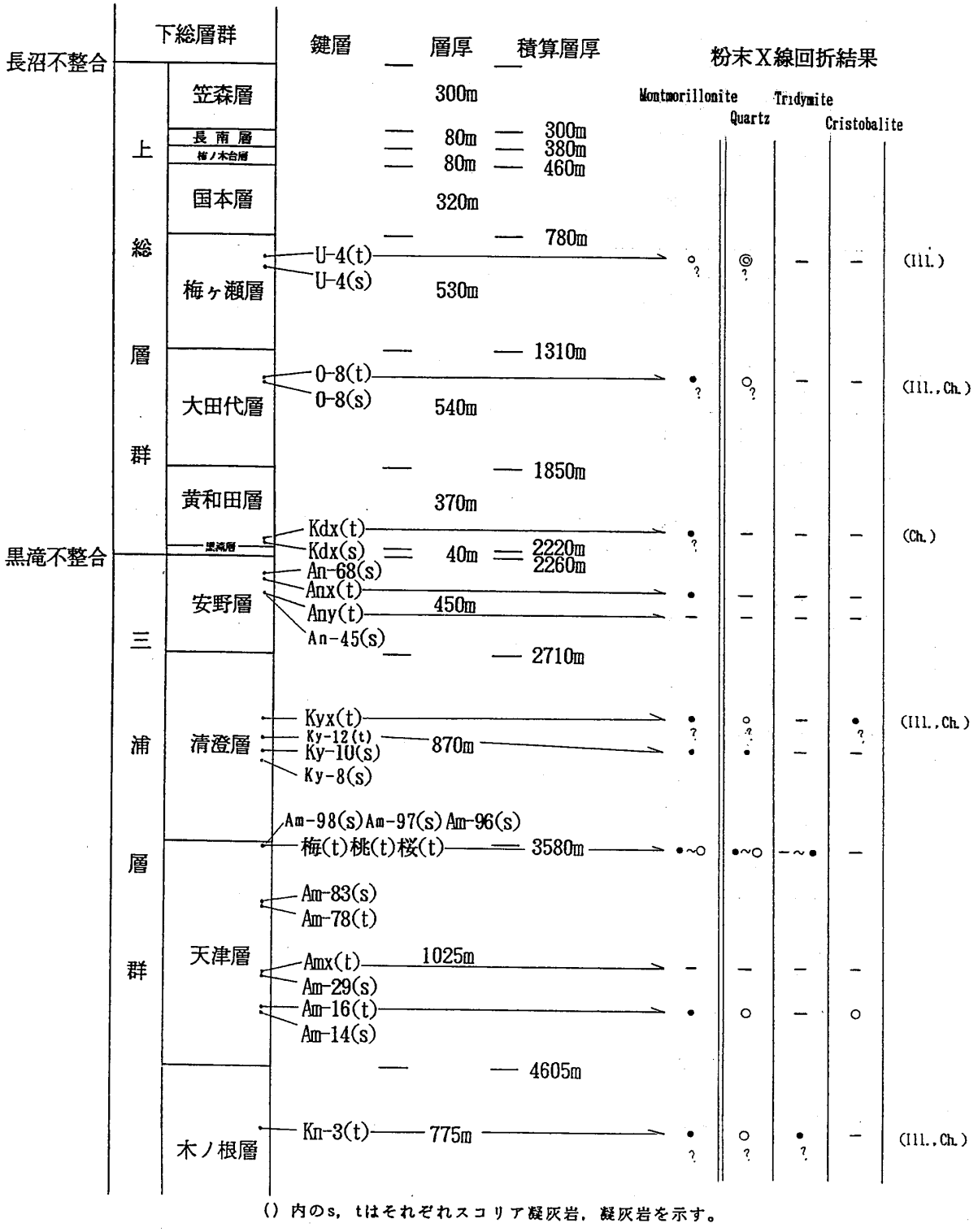


図 1.4－1　南房総鴨川地域の X 線回折結果と採取層準

火山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 92-001 より引用

表 1.4−1　南房総鴨川地域のスコリア変質に関するまとめ

火山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 92-001 より引用

地層名	鍵層名	鏡下での変質層の有無	X線回折分析結果			試料の構成
			スコリア中のモンモリロナイトの有無	自生鉱物（石英）の有無	最高温度	
					20℃	
梅ヶ瀬層	U−4(t) U−4(s) U−4(m)	×	○	?		凝灰岩 スコリア凝灰岩 泥岩中のスコリア
					31℃	
大田代層	O−8(t) O−8(s) O−8(m)	× ×	×	?		凝灰岩 スコリア凝灰岩 泥岩中のスコリア
					43℃	
黄和田層	Kdx(s) Kdx(t)	×		?		スコリア凝灰岩 凝灰岩
					51℃	
安野層	An-68(S) An-68(m) Anx(t) Any(t) An-45(S)	○ ×	×	× ×		スコリア凝灰岩 泥岩中のスコリア 凝灰岩 凝灰岩 スコリア凝灰岩
					61℃	
清澄層	Kyx(t) Ky-12(t) Ky-10(s) Ky-10(ss) Ky-8~9(s) Ky-8(s)	× × × ×	○	? ○	69℃	凝灰岩 凝灰岩 スコリア凝灰岩 砂岩中のスコリア スコリア凝灰岩 スコリア凝灰岩
					79℃	
天津層	Am-98(s) Am-97(s) Am-96(s) Am-96(m) 梅桃桜 Am-83(m) Am-78(t) Am-78(m) Amx(t) Am-29(s) Am-16(t) Am-14(s)	○ × ○ ○ ○	○ ○ ○	○ × ○		スコリア凝灰岩 スコリア凝灰岩 スコリア凝灰岩 泥岩中のスコリア 凝灰岩 泥岩中のスコリア 軽石凝灰岩 泥岩中の軽石 凝灰岩 スコリア凝灰岩 凝灰岩 スコリア凝灰岩
					100℃	
木ノ根層	Kn−3(t)			?		凝灰岩

注）○は有りを，×は無しを，？は石英が自生鉱物であるか否かを確定できない場合をそれぞれ示す。
最高温度は，ガラスの変質鉱物の出現とその生成温度とから算出した。

1.5　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財団法人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 万年前)から現在まで、温度約 70℃で化石海水的な地下水環境下では変質鉱物としてモンモリロナイトおよび斜プチロル沸石が認められたが、温度約 50℃以下で化石海水的な地下水環境下では変質鉱物が認められなかった。

以上の結果は、南房総鴨川地域での既往研究結果と良く整合しており、地表試料を中心として実施した研究を地下深部の試料で裏付けたことにもなる。一方、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いため、地下水の水質データも併せて収集可能な試料の調査が望ましい。このことに対しては、

・　既存コアの希釈法による間隙水の水質推定

が有効であると考えられる。また、コア試料の採取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

が有効と考えられる。

そして、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。

参考文献

地質調査所：“ 日本油田・ガス田図 4 富津－大多喜 ”，地質調査所．(1961)

Aoyagi,K. and Kazama,T. ：“ Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis. ”，Sedimentology, v.27, pp.179～188 . (1979)

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)

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)

日本の地質『関東地方』編集委員会編：“ 日本の地質 3 関東地方 ” 共立出版株式会社，335p.(1986)

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，第 31 号，pp.5～40. (1988)

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.587. (1991)

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)

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)

江藤哲人、矢崎清貫、ト部厚志、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，pp45～52．(1998)

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)

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)

2. アルカリ性環境でのベントナイトの変質に関するナチュラルアナログ研究

2.1 はじめに

昭和 62 年以来､ベントナイトの長期安定性の検討･評価のためのナチュラルアナログ研究として、モンモリロナイトの熱変質に関する天然事例を調査・検討してきた。これらは、サイト選定とは無関係に、検討内容に対して好条件を満たすという趣旨で調査地が選択されている。

一方、最近では処分坑道に用いられるセメント系物質の使用に伴う、高 pH環境下でのベントナイトの長期安定性が懸念されている。この問題については、Pusch(1983)や「火山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 95-001 および 96-001)において指摘されてきたように、基本的には高 pH環境下でのモンモリロナイトの沸石化が問題とされている。これらの既往の報告によれば、モンモリロナイトの沸石化は膨潤性の喪失、透水性の増大、そして塑性の減少といった緩衝材に期待される諸機能の劣化を引き起こすと考えられている。さらに、埋設処分後初期の廃棄体の発熱による温度上昇は、モンモリロナイトの沸石化を促進することも懸念されている。

そこで本研究では、比較的高温で高 pHの条件を有する北海道羅臼地区の地熱地域を調査対象として選定し、高温で高 pHの水の確認とモンモリロナイトの存在の確認を行って、それらの性状を詳細に把握して、高温で高 pH環境におけるモンモリロナイトの安定性に資するナチュラルアナログ研究のフィールドとしての適性を評価し、その中での一次評価を得ることを目的とした。

2.2　調査地域の概要

2.2.1　地形

羅臼温泉を擁する羅臼地区の地形を図 2.2.1－1 に示す。

羅臼地区は、知床半島中部の南東側の国後島に面する地域に位置し、標高 200～400m 程度のピークを有する比較的急峻な山地からなる。

羅臼地区の中央部には西から東に流下する羅臼川があり、河床付近(標高 100m 程度)に羅臼温泉が分布している。

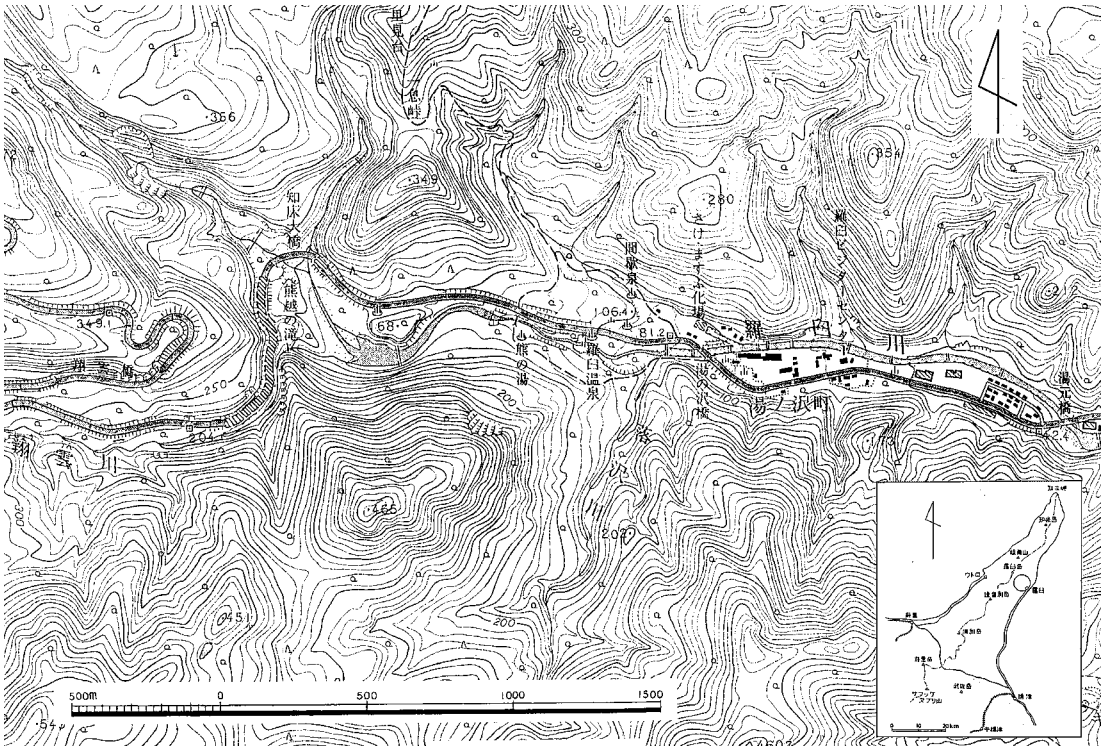


図 2.2.1－1　羅臼地区の地形図

（国土地理院発行 1/25000 地形図羅臼に一部加筆）

2.2.2　地質

図 2.2.2－1 に羅臼地区の地質図を示す。また、羅臼地区の層序を図 2.2.2－2 に示す。

和気ほか(1978)および北海道立地下資源調査所(1984)の記述に基づき、羅臼地区の地質の概要を以下に記述する。

羅臼温泉は知床半島の中軸に沿って分布する第四紀火山列の南東麓に位置する。この第四紀火山の基盤は、新第三紀の中新世～鮮新世に属する地層群から構成され、半島に沿う大きな背斜構造を形成していると考えられている。

羅臼温泉付近の地質は、主として新第三紀層と同時期の火成岩および第四紀の羅臼岳火山噴出物から構成されている。

新第三紀中新世の地層は、下位から安山岩質プロピライト溶岩、安山岩質凝灰角礫含・砂質凝灰岩、頁岩・砂岩層の３つに区分される。これらの地層間に不整合関係は見いだされず、図 2.2.2－2 に示すような指交関係が上部２層に認められる。鮮新世の地層は下位の中新世の地層を不整合に被覆している。また、羅臼川をはさんで、南北の尾根には、それぞれ鮮新世と考えられる安山岩溶岩が広く覆っている。

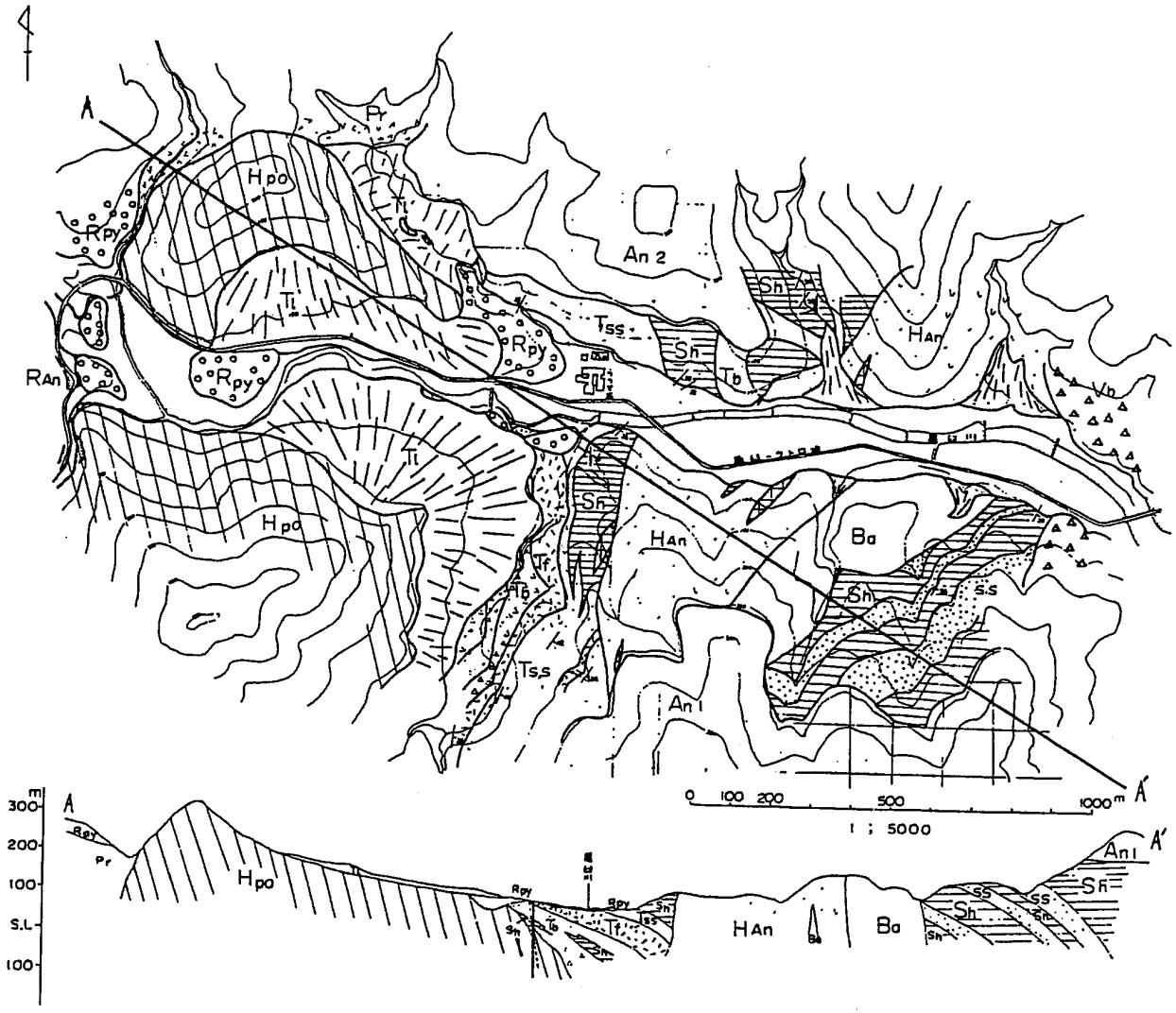
新第三紀層の地質構造は、一般に NE－SW 走向で 30～40 ° E の傾斜を有し、根室海峡に向かって順次新しい地層が分布する同斜構造を呈している。

これらの第三紀層に対して、角閃石斑岩、角閃石安山岩、玄武岩の貫入が認められる。角閃石斑岩、角閃石安山岩は中新世後期、玄武岩は鮮新世の貫入と考えられている。このうち角閃石斑岩は地形から南北２つの貫入中心をもち、それぞれ 1～1.5km 程度の規模である。この 2 つの中間に羅臼川沿いの凹地が形成され、凹地～岩体の東縁付近に温泉が位置する。

第四紀層は、羅臼岳火山噴出物、崖錐堆積物、扇状地堆積物、および氾濫原堆積物から構成されている。

和気ほか(1978)および北海道立地下資源調査所(1984)によれば、羅臼温泉には、表 2.2.2－1 に示すように、泉温が 100℃近い高温でアルカリ性(9 を越えるものがある)を示し、塩化物イオン濃度が 1000mg/l を越えるグループと、泉温が 80℃以下で微酸性を示し、塩化物イオン濃度が数 100mg/l のグループの 2 つのグループの温泉があるとされている。

また、同じ和気ほか(1978)および北海道立地下資源調査所(1984)によれば、羅臼温泉付近には、図 2.2.2－3 に示すように、非晶質シリカ・アルミナ鉱物＋石英、カオリン鉱物＋石英＋黄鉄鉱、モンモリロナイト＋石英＋黄鉄鉱という３つの変質帯があり、これらは温泉の分布範囲に認められることから、モンモリロナイトとアルカリ性の温泉との関係が注目される。



Ti：崖錐堆積物，Rpy：羅臼岳火山噴出物（火砕流堆積物），RAn 羅臼岳火山噴出物（両輝石安山岩溶岩），An_1：両輝石安山岩溶岩(I)，An_2：両輝石安山岩溶岩(II)，Vb：含浮石安山岩質火山角礫岩層，Ss：砂岩層，Sh：頁岩・泥岩層，Tss：砂質凝灰岩層，Tf：流紋岩質凝灰岩層，Tb：安山岩質凝灰角礫岩層，Pr：安山岩・石英安山岩質プロピライト，HAn：角閃石安山岩，Ba：玄武岩，Hpo：角閃石斑岩

図 2.2.2－1　羅臼地区地質図
和気ほか(1978)より引用

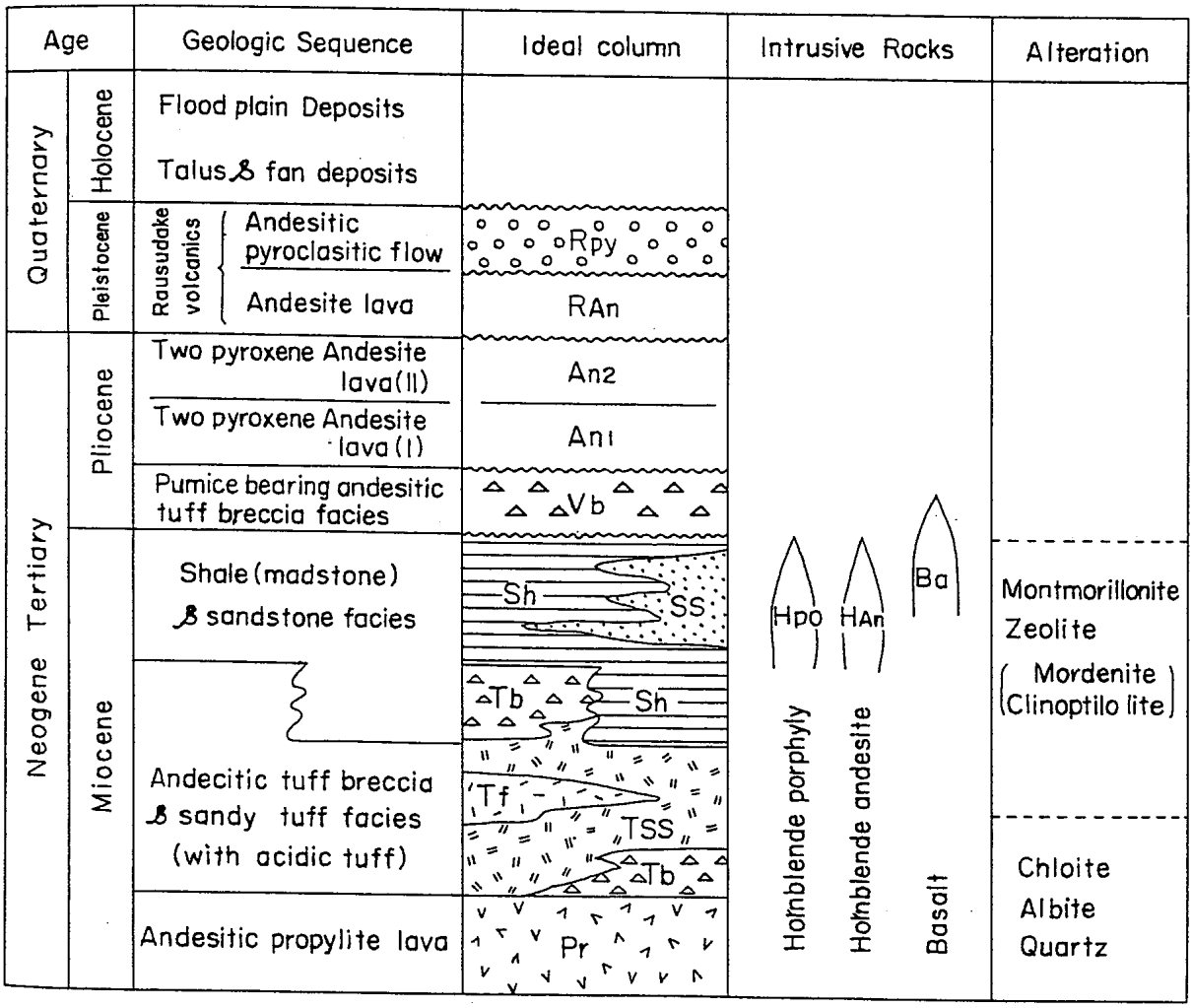


図 2.2.2－2　羅臼地区層序

和気ほか(1978)より引用

表 2.2.2－1　羅臼地区の泉質

北海道立地下資源調査所(1984)より引用

A グループ

No.	泉温(℃)	pH	Cl (mg/l)	T.S.M (mg/l)
24	94.8	9.2	1,275	3,045
27	95.2	8.8	1,213	2,821
48	95.1	8.3	1,587	3,812
54	95.0	9.2	1,609	3,871
55	96.8	9.1	1,580	3,821
64	98.0	9.5	1,396	3,235
S51	99.5	8.6	1,331	3,152
S53	76.5	6.7	1,633	3,836
S54-1	98.1	9.1	1,628	3,738
S55	96.0	7.6	1,551	4,119
S56-B	98.8	8.7	1,669	3,706
S56-E	99.1	8.9	1,576	3,821

B グループ

No.	泉温(℃)	pH	Cl (mg/l)	T.S.M (mg/l)
11	66.0	6.5	571.1	1,582
15	79.0	6.5	375.5	1,217
18	77.8	6.9	433.7	1,349
26	75.6	6.4	725.6	2,013
30	37.0	8.0	135.3	465
34	67.6	6.5	462.0	1,402
58	56.5	6.1	280.6	703
62	66.4	6.1	499.5	1,447
72	57.1	6.1	416.6	1,207
77	65.6	6.4	542.8	1,552
83	75.0	6.5	670.3	1,835

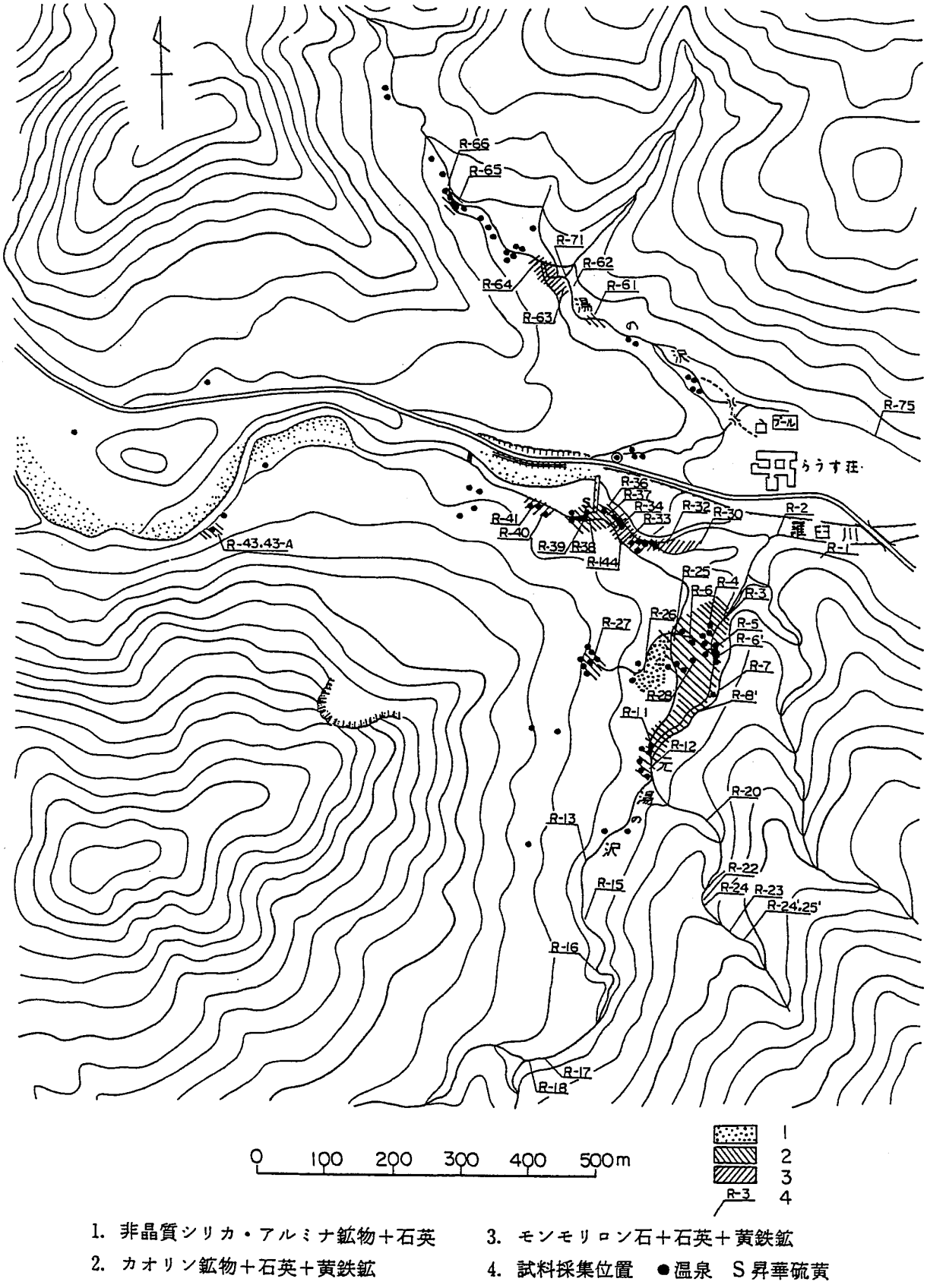


図 2.2.2－3　羅臼地区の変質帯
和気ほか(1978)より引用

2.3 調査・分析・試験

2.3.1　試料

試料は、羅臼地区の地質、水文状況の把握を目的として実施した現地調査の際に採取した。

現地調査においては、変質に着目した岩質の分布と湧水の分布について把握するよう努めた。湧水の調査に際しては、水温、pH、電気伝導度を現地でチェックした。現地測定を実施した項目と方法を表 2.3.1－1 に示す。

表 2.3.1－１　水質の現地調査項目および方法

項目	単位	方法	使用機器	備考
温度	℃	棒温度計法	標準水銀棒温度計	分解能 0.1℃
pH	－	試験紙法	ADVANTEC 製	pH:1～11、分解能 1
		ガラス電極法	HORIBA 製 D-14	pH:1～14、分解能 0.01
ORP	mV	ガラス電極法	HORIBA 製 D-14	0RP:-1～1 mV、分解能 1mV
電気伝導度	mS/m (25℃)	電気伝導度計法	YOKOGAWA 製 SC82	0～20,000 mS/m(25℃)

現地調査結果に岩石および水試料の採取位置を記入して図 2.3.1－1、図 2.3.1－2 に示す。また、各岩石・湧水露頭の記載をまとめて表 2.3.1－2 に示す。

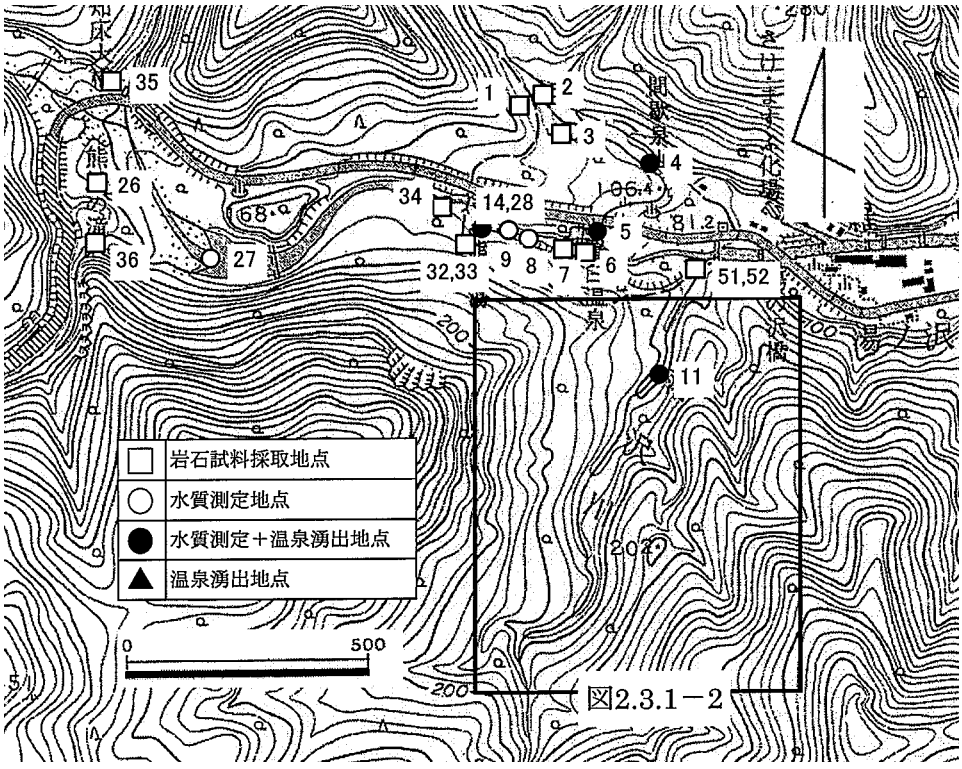


図 2.3.1－1　羅臼川周辺試料採取地点位置図

（国土地理院発行 1/25000 地形図羅臼に一部加筆）

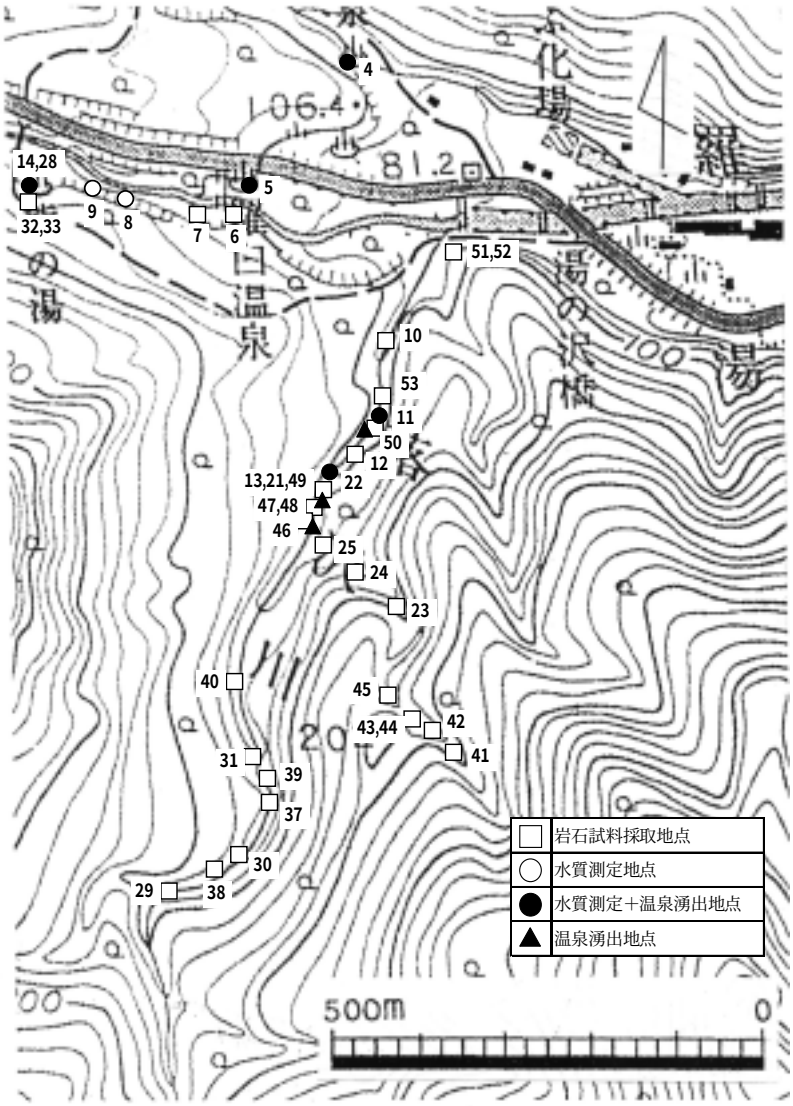


図 2.3.1－2　落沢川周辺試料採取地点位置図

（国土地理院発行 1/25000 地形図羅臼に一部加筆）

表 2.3.1－1　現地水質および地質記載一覧

注) 地点番号	水質記載	地質記載	備　　考
1	無し	黄褐色粘土化著しい火砕流堆積物（Rpy）	露頭に湧水は認められない。
2	無し	黄褐色粘土化著しい火砕流堆積物（Rpy）	露頭に湧水は認められない。
3	無し	「未変質」の火砕流堆積物(Rpy) 安山岩，軽石，スコリアを粒子として含む （mtxは中～粗粒火山砂）	露頭に湧水は認められない。
4	水温：95℃ pH：8.15（36.6℃） 硫化水素臭，無色透明（間歇泉）	黄褐色粘土化著しい火砕流堆積物（Rpy）	間歇泉の5m程度下流に， 酸化鉄を沈殿させる湧水 (33.6℃、pH:6.04)が認められる。
5	水温：76.4℃ pH：7.46（50.9℃），ORP：-281mV EC：2.45mS/cm（58.6℃） 硫化水素臭，無色透明（S54）	無し(S54の源泉のみ)	S54泉源の配管からの湯を測定。
6	無し	黄褐色粘土化著しい火砕流堆積物（Rpy） 一部緑灰色を呈する。	露頭に湧水は認められない。
7	「噴気」pH：1（pH試験紙）	黄褐色，青灰色，黄灰色を呈し，粘土化著しい 火砕流堆積物（Rpy）。但し，噴気部分には 鮮緑を呈する部分が有り，硫黄や明礬を析出。 また部分的に赤褐色の酸化鉄汚染が認められる。	露頭に湧水は認められない。
8	水温：42.5℃ pH：5.55（38.3℃） ORP：-114mV EC:1.741mS/cm（38.4℃）	無し	露頭に湧水は認められない。 湧水からは酸化鉄が沈殿。
9	水温：37.0℃ pH：6.35（36.7℃） 「捨てられた温泉（泉源位置不明）」	無し	露頭に湧水は認められない。
10	無し	黄褐色に風化した層状の砂岩(Tss)。 N5W35E	露頭に湧水は認められない。
11	水温：98.0℃，pH：8.8（43.0℃） ORP：-227mV，EC： 4.70mS/cm(53.2℃) 硫化水素臭，無色透明	青灰色（試料名11'）～灰白色（試料名11"）を呈し，粘土化著しい 流紋岩質凝灰岩(Tf)。 自噴露頭付近は白色化（試料名11）。	温泉自噴部 H139/11，沢の増水で水没。 粉末X線回折分析実施：11，11'，11"
12	無し	黄灰色，褐灰色，緑灰色を呈し，粘土化 著しい流紋岩質凝灰岩(Tf)。塊状。	露頭に湧水は認められない。
13	無し	緑灰色を呈し，粘土化著しい流紋岩質凝灰岩(Tf)。	露頭に湧水は認められない。
14	「熊ノ湯」 水温：81.9℃pH：8.55（53.4℃） ORP：-353mV EC：5.87mS/cm（58.7℃）	無し(分布上は角閃石斑岩)	泉源の配管からの湯を測定。
21	無し	13と同じもの。 緑色変質の著しい流紋岩質凝灰岩(Tf)，構造不明。	露頭に湧水は認められない。 粉末X線回折分析実施

注）地点番号は図 2.3.3－1，図 2.3.3－2 に対応

表 2.3.1－1　現地水質および地質記載一覧(つづき)

注) 地点番号	水質記載	地質記載	備　　考
22	水温：78.2℃ pH：6.40（60.3℃），ORP：-270mV EC：2.96mS/cm（60.7℃）	無し	湧出地点
23	無し	凝灰質泥岩(TSS)。 硬い。N12W38W	露頭に湧水は認められない。
24	無し	流紋岩質凝灰岩(Tf)。 青灰色を呈し硬い。	露頭に湧水は認められない。 粉末Ｘ線回折分析実施
25	無し	青灰色を呈し，弱い粘土化を受けた軟質な 流紋岩質凝灰岩(Tf)。 Pyriteを含む	露頭に湧水は認められない。
26	無し	新鮮な角閃石班岩(Po)。	熊越の滝付近にて採取。 露頭に湧水無し。
27	羅臼河川水 水温：7.2℃，pH：8.17(6.5℃) ORP：12mV EC：158μS/cm(7.3℃)	無し	河川水の採取のみ
28	熊ノ湯源泉 水温：86.4℃，pH：8.96(54.6℃) ORP：-252mV EC：6.06mS/m(60.8℃)	無し(分布上は角閃石斑岩)	付近に新鮮部の露頭無し 粉末Ｘ線回折分析実施
29	無し	安山岩（新鮮）	採取点：落沢川上流西沢転石
30	無し	角閃石斑岩（新鮮）	採取点：落沢川上流転石 38（地点名）の下流
31	無し	角閃石斑岩（新鮮）	採取点：落沢川上流転石 39（地点名）の下流 粉末Ｘ線回折分析実施
32	無し	角閃石斑岩（変質） ｄ：斑晶有り（粒状），d'：弱変質（礫状） d''：強変質（粘土状），d'''：弱変質（礫状）	採取点：熊ノ湯南側泉源 粉末Ｘ線回折分析実施：d'，d"
33	無し	角閃石斑岩（変質） e-1 e-2	採取点：熊ノ湯北側泉源 粉末Ｘ線回折分析実施
34	無し	角閃石斑岩（新鮮） やや風化	採取点：熊ノ湯上流100m
35	無し	角閃石斑岩（新鮮）	採取点：知床大橋左岸転石 粉末Ｘ線回折分析実施
36	無し	角閃石斑岩（新鮮）	採取点：熊越の滝真下転石
37	無し	凝灰質細-中粒砂岩（新鮮）	採取点：落沢川主流上流 走向傾斜：N35E,40E

注）地点番号は図 2.3.3－1，図 2.3.3－2 に対応

表 2.3.1－1　現地水質および地質記載一覧(つづき)

注) 地点番号	水質記載	地質記載	備　　考
38	無し	緑色凝灰岩（粗粒）　（新鮮）	採取点：落沢川主流上流 粉末Ｘ線回折分析実施
39	無し	凝灰質細-中粒砂岩（新鮮）	採取点：落沢川主流上流 走向傾斜：N35E,45E
40	無し	粗粒凝灰岩（新鮮）	採取点：落沢川主流上流 走向傾斜：N40E,45E
41	無し	凝灰質中粒砂岩（新鮮）	採取点：42（地点名）の上流
42	無し	凝灰岩（新鮮）	採取点：43（地点名）の上流
43	無し	砂質凝灰岩（新鮮）	採取点：44（地点名）の上流
44	無し	凝灰岩（新鮮）	採取点：45（地点名）の上流 粉末Ｘ線回折分析実施
45	無し	凝灰岩（新鮮）	採取点：23（地点名）の上流
46	無し	凝灰角礫岩（変質）	採取点：落沢川分岐下流の小滝の根 本温泉湧出点有り（2m）
47	無し	凝灰角礫岩（変質）	採取点：13（地点名）より上流, 湧出点より3m下流
48	無し	凝灰角礫岩（変質）	採取点：13（地点名）より上流, 湧出点より30m下流 粉末Ｘ線回折分析実施
49	無し	凝灰角礫岩（変質）	採取点：13（地点名）より5m下流
50	無し	風化凝灰角礫岩（非変質？）	採取点：13（地点名）より下流, 11'（地点名11の周辺）より 10m上流
51	無し	凝灰質中粒砂岩（比較的新鮮） 含凝灰岩疑礫（青緑色）	採取点：落沢川入り口 水面近く
52	無し	砂質凝灰岩（非変質）	採取点：落沢川入り口 51（地点名）の真上 粉末Ｘ線回折分析実施
53	無し	凝灰質砂岩（？）　（非変質？）	採取点：11（地点名）より30m下流

注）地点番号は図 2.3.3－1，図 2.3.3－2 に対応

2.3.2　方法

採取した水試料については室内水質分析を、岩石試料については粉末 X 線回折分析を実施した。

採取した水試料の水質分析項目と方法をまとめて、表 2.3.2－１に示す。また、採水時の前処理について表 2.3.2－2 に示す。

表 2.3.2－1　羅臼地区水質分析項目および分析方法

項　目		方　法	検出限界値	備　考
Na^+	mg/l	ﾌﾚｰﾑ原子吸光法	0.05mg/l	JIS K 0102 48.1 準拠
K^+	mg/l	ﾌﾚｰﾑ原子吸光法	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
Fe^{2+}	mg/l	ﾌｪﾅﾝﾄﾛﾘﾝ吸光光度法	0.1mg/l	JIS K 0102 57.1 準拠
Fe^{3+}	mg/l	ﾌｪﾅﾝﾄﾛﾘﾝ吸光光度法	0.1mg/l	JIS K 0102 57.1 準拠
Cl^-	mg/l	滴定法	2mg/l	JIS K 0102 35.3 準拠
HCO_3^-	mg/l	酸滴定法	2mg/l	JIS K 0102 15.1 準拠
CO_3^{2-}	mg/l	酸滴定法	1mg/l	JIS K 0102 15.2 準拠
SO_4^{2-}	mg/l	ｲｵﾝｸﾛﾏﾄｸﾞﾗﾌ法	0.2mg/l	JIS K 0102 41.3 準拠
B	mg/l	ICP発光分析法	0.02mg/l	JIS K 0102 47.3 準拠
Br^-	mg/l	ｲｵﾝｸﾛﾏﾄｸﾞﾗﾌ法	0.1mg/l	JIS K 0102 37.2 準拠
I^-	mg/l	抽出吸光光度法	0.1mg/l	JIS K 0102 36.1 準拠
S^{2-}	mg/l	ﾒﾁﾚﾝﾌﾞﾙｰ吸光光度法	0.1mg/l	JIS K 0102 39.1 準拠
SiO_2	mg/l	ﾓﾘﾌﾞﾃﾞﾝ黄吸光光度法	2mg/l	JIS K 0101 44.1.1 準拠
tot.Al	mg/l	ｷﾉﾘﾉｰﾙ吸光光度法	0.05mg/l	JIS K 0102 58.1 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	－	－
$\delta\ ^{18}O$	‰	質量分析法	－	－

表 2.3.2－2　試料採水の前処理

分析項目	採取容器	容器の洗浄法	前処理
Na^+ mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
K^+ mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
Ca^{2+} mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水1000mlに6N HCl 10ml加える。
Mg^{2+} mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水1000mlに6N HCl 10ml加える。
Fe^{2+} mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水1000mlに6N HCl 10ml加える。
Fe^{3+} mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水1000mlに6N HCl 10ml加える。
Cl^- mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
HCO_3^- mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
CO_3^{2-} mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
SO_4^{2-} mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
B mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
Br^- mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
I^- mg/l	ｶﾞﾗｽ製試料ﾋﾞﾝ	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水300mlにNaOH 2粒加える。
S^{2-} mg/l	ｶﾞﾗｽ製試料ﾋﾞﾝ	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水300mlにNaOH 2粒加える。
SiO_2 mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)をする。
tot.Al mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水	ろ過(ﾒﾝﾌﾞﾗﾝﾌｨﾙﾀｰ:孔径0.45μm)後の試料水1000mlに6N HCl 10ml加える。
TOC mg/l	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
δ D ‰	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し
$\delta\ ^{18}O$ ‰	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ製ﾋﾞﾝ	試料水	無し

粉末 X 線回折分析は、以下の手順で行った。

採取した試料を風乾したのちステンレス乳鉢で粗砕し、さらに自動らいかい機で指頭にざらつきを感じない程度までに粉砕し、粉末試料を作製した。この粉末試料の一部をガラス製試料板に詰め、無定方位試料を作製した。

また、この粉末試料を蒸留水と共にシリンダー(容積:1 リットル)中に分散させ、8 時間放置したのち、上澄み液 10cm を回収し、遠心分離機によって粘土分を沈殿させた。この沈殿物をスライドガラスに塗布して定方位試料を作製した。

無定方位試料については、表 2.3.2－3 の左側に示した条件で、定方位試料については表 2.3.2－3 の中央に示した条件で X 線回折分析を実施した。定方位試料のうち、14Å付近の反射が認められるものについてはエチレングリコール処理を行った後、表 2.3.2－3 の右側に示した条件で X 線回折分析を実施して粘土鉱物を同定した。

なお、X 線分析には、日本電子(株)製 JDX-11PA 型 X 線回折装置を用いた。

表 2.3.2－3　X 線回折条件

区分	無定方位試料	定方位試料	定方位試料(ｴﾁﾚﾝｸﾞﾘｺｰﾙ処理)
対陰極	Cu	Cu	Cu
ﾌｨﾙﾀｰ	Ni	Ni	Ni
管電流	10 mA	10 mA	10 mA
管電圧	30 kV	30 kV	30 kV
ｽﾘｯﾄ系	１°－0.3mm－１°	１°－0.3mm－１°	１°－0.3mm－１°
走査速度	1°/min.	1°/min.	1°/min.
ﾌﾙｽｹｰﾙ計数	2000cps	1000cps	1000cps
時定数	1 sec.	1 sec.	1 sec.
走査範囲	2θ=2～60°	2θ=2～20°	2θ=2～20°

岩石薄片の作製は角閃石斑岩の新鮮部を対象に通常の作製方法で実施した。作製した薄片を偏光顕微鏡を用い、構成鉱物や組織について観察・記載した。

2.3.3　分析・試験結果

水試料の水質分析結果を表 2.3.3－1 に、主要成分をもとにして作成したヘキサダイヤグラムを図 2.3.3－1 に示す。

採取した岩石の粉末 X 線回折分析結果を表 2.3.3－2 に、薄片の偏光顕微鏡観察結果を表 2.3.3－3 に示す。

表 2.3.3－1　羅臼地区採取試料水質分析結果

採水地点番号	28		11		27	
地点名	熊の湯源泉		落沢川自然湧出		羅臼川	
水の種類	温泉水		温泉水		河川水	
水温 (℃)	86.4		98.0		7.2	
pH	8.9(54.6℃)		8.8(43.0℃)		8.1(6.5℃)	
ORP (mV)＊	-252		-227		12	
EC (mS/m)　25℃	606		470		15.8	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Na^{+}	1300	56.55	1030	44.80	12	0.52
K^{+}	78	1.99	52	1.33	1.7	0.04
Ca^{2+}	0.9	0.04	1.2	0.06	14	0.70
Mg^{2+}	0.03	0.00	0.04	0.00	3.9	0.32
陽イオン合計	－	58.58	－	46.19	－	1.59
Cl^{-}	1510	42.60	1230	34.70	10	0.28
HCO_3^{-}	384	6.29	346	5.67	46.3	0.76
CO_3^{2-}	84	2.80	45	1.50	0	0
SO_4^{2-}	244	5.08	204	4.25	24	0.50
陰イオン合計	－	56.77	－	46.12	－	1.54
Fe^{2+}	0.1未満	-	0.1未満	-	0.1未満	-
Fe^{3+}	0.1未満	-	0.1未満	-	0.1未満	-
B	9.7	-	8.9	-	0.04	-
Br^{-}	0.1未満	-	0.1未満	-	0.1未満	-
I^{-}	20	-	25	-	0.1未満	-
S^{2-}	7.0	-	2.4	-	0.1未満	-
SiO_2	267	-	251	-	32	-
tot.Al	0.09	-	0.08	-	0.09	-
TOC	10	－	9	－	1未満	－
δ D (‰)	-63.4	-	-64.4	-	-70.3	-
$\delta\,^{18}O$ (‰)	-8.1	-	-8.6	-	-11.6	-

＊ORP測定は3.3mol/l塩化銀電極を使用した。

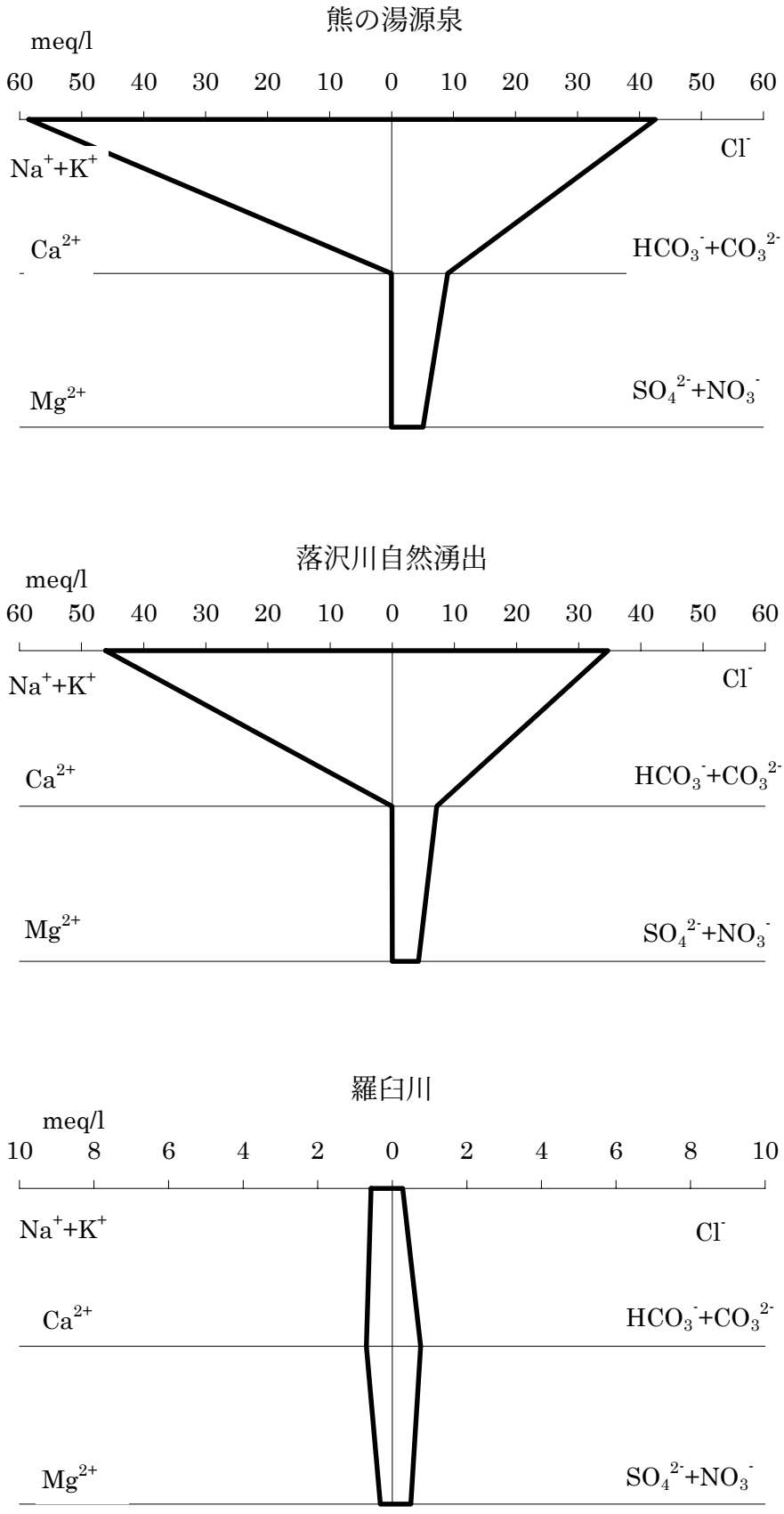


図 2.3.3-1　羅臼地区水質分析試料のヘキサダイヤグラム

表2.3.3－2　　羅臼地区採取試料含有鉱物一覧表

採取地点 注）		鉱物名 ＼ 試料名	モンモリロナイト	緑泥石	カオリナイト	黒雲母	石英	斜長石	カリ長石	モルデン沸石	明ばん石	輝石	普通角閃石	黄鉄鉱	備　考
31	熊の湯付近	011123-c	・	・		・	◎	◎					△		角閃石斑岩（新鮮，転石）
35	知床大橋付近	011123-g	・	・			◎	◎					△		角閃石斑岩（新鮮，転石）
28	熊の湯付近	010921-28	・				◎	○							角閃石斑岩（温泉湧出部）
33	熊の湯付近	011123-e1	・				◎	◎							角閃石斑岩（礫状変質）
32	熊の湯付近	011123-d'					◎				○			・	角閃石斑岩（礫状変質）
32	熊の湯付近	011123-d"			△		◎				△				角閃石斑岩（粘土状変質）
44	落沢川支流	011123-8					◎	○							凝灰岩（新鮮）
52	落沢川河口	011123-16					◎	△	△						砂質凝灰岩（新鮮）
24	落沢川支流	010920-24	△		・		◎	○							流紋岩質凝灰岩（青灰色硬質部）
11	落沢川下流自噴部	010910-11	・				◎	◎		・				△	流紋岩質凝灰岩（自噴部）
11	11の落沢川対岸	010910-11'	△		・		◎	△							流紋岩質凝灰岩（青灰色粘土化）
11	11'の上流	010910-11"			△		◎				・				流紋岩質凝灰岩（白色粘土化）
21	落沢川主流	010920-21					◎			△					緑色変質凝灰岩
38	落沢川主流上流	011123-2					◎	△		△					緑色変質凝灰岩
48	落沢川主流	011123-12					◎	△		△				・	緑色変質凝灰岩

相対含有量：◎多量，○中量，△少量，・微量
注）採取地点の番号は図2.3.1－1，図2.3.1－2に対応

表 2.3.3－3　偏光顕微鏡観察結果

区　分	記　　事
岩石名・組織	閃緑岩質組成の完晶質斑状の半深成岩(角閃石斑岩)
斑　晶	斜長石および普通角閃石からなる。 斜長石は長さ 2～3mm で、短柱状の自形～半自形を呈し多含する。アルバイト双晶、累帯構造を示し、内部は塵状鉱物で汚れている。また、径 1.5mm 程度の集斑状の集合も見られる。 普通角閃石は長柱状の自形～半自形を呈し、2.5～3mm 程度の結晶が多く、6mm 程度に達するものもある。結晶の周縁部は変質して粘土鉱物リムが形成されており、結晶内に磁鉄鉱、斜長石、緑泥石の微晶を含む。 なお、径 0.3～0.5mm 程度の柱状の斜方輝石が少量含まれるが、ほとんど粘土鉱物化している。
石　基	填間状組織をなす。普通輝石、斜長石、磁鉄鉱、黄褐色の粘土鉱物、炭酸塩鉱物が間隙を満たしている。

2.4　考察

2.4.1 変質

角閃石斑岩では、新鮮部においては石英、斜長石を主要鉱物とし、次いで普通角閃石を含み、モンモリロナイト、緑泥石等の粘土鉱物が少量含まれる。角閃石斑岩の変質が進むと、普通角閃石が消失し、明ばん石やカオリナイトという酸性変質を示唆する変質鉱物が認められる場合がある。

凝灰岩では、新鮮部においては石英、斜長石を主要鉱物とし、カリ長石を少量含むものもある。青灰色を呈する硬質～粘土化したものではモンモリロナイトを少量～微量含み、カオリナイトやモルデン沸石を微量含む場合がある。一方白色粘土化したものでは、斜長石およびモンモリロナイトが消失し、少量のカオリナイトと微量の明ばん石が認められる。

緑色変質凝灰岩では、石英が多量、モルデン沸石が少量常に認められ、少量の斜長石が認められる場合がある。

以上の変質状況は、数 m 以内の範囲のなかでも青灰色の粘土化と白色の粘土化が確認され(例えば 11 地点)、変質鉱物から比較的広い範囲を変質帯区分することが困難であることを示しており、局所的に浸入した熱水の性状に起因した変質状況の変化であると考えられる。また、緑色変質凝灰岩では普遍的にモルデン沸石が認められるが、この試料における斜長石は少量あるいは不検出であり、凝灰岩試料でモルデン沸石が認められる試料においては斜長石は多量に認められる。したがって、緑色変質凝灰岩の変質が凝灰岩の方に基本的にはおよんでおらず(およんでいればモルデン沸石が微量の試料で斜長石が多量になることはあり得ない)、それぞれ別の変質系列を有している可能性が高いと判断される。

これらのことから、凝灰岩と緑色変質凝灰岩は異なる変質過程を受けていると考えられるため、その後に高 pHの熱水の浸入が考えられた際にも、個別に検討・評価していく必要がある。

2.4.2　水質

室内水質分析を実施した 2 地点の温泉水の水質を見ると、いずれも高温(90℃前後)で高 pH(9 付近)の Na^+－Cl^-型の水質組成を有している。一方、羅臼川の河川水は pHが弱アルカリ性で、Ca^{2+}－HCO_3^-型となっている。

水の起源を検討するために、水素・酸素同位体比関係図を図 2.4.2－1 に示す。図 2.4.2－1 には、今回のデータに加えて松葉谷ほか(1978)に示された羅臼地区近傍のデータも併せてプロットした。また、Craig(1961)および松葉谷、酒井(1977)に示された天水線を記入した。我が国の天水については、一般に太平洋側では Craig(1961)の示した天水線の式　　$\delta D=8\cdot\delta^{18}O+10$（‰）に、日本海側では松葉谷、酒井(1977)の示した天水線の式 $\delta D=8\cdot\delta^{18}O+25$（‰）に近い同位体組成を有するとされている(松葉谷、酒井、1977)。図 2.4.2－1 を見ると、羅臼川の河川水はこれら 2 本の天水線に挟まれた領域に位置し、さらに既往資料の知床地域の水とほぼ同じ領域にプロットされるが、2 地点の温泉水は、羅臼川の河川水と原点(SMOW)とを結んだ直線上にはのらず、Craig(1961)の天水線よりも酸素が重い領域にプロットされる。

このことは、温泉水の同位体組成が、羅臼川の河川水に代表される天水と海水との単純混合で形成されたものではないことを示している。さらに、Craig(1961)の天水線よりも酸素が重い領域にプロットされることから、高温水と岩石との反応によって酸素同位体比のみが重くなる、いわゆる oxygen sift が生じているものと考えられる。

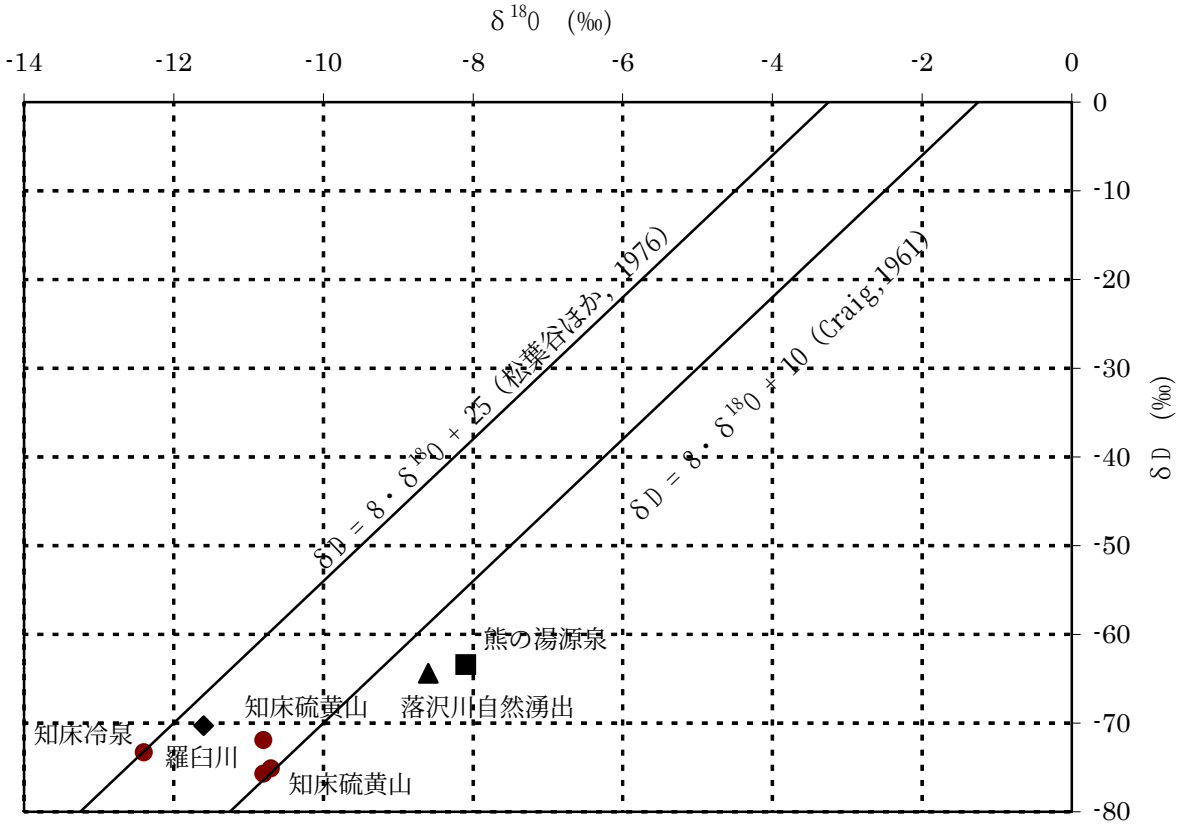


図 2.4.2－1　羅臼周辺の水素・酸素同位体比関係図

次に、熊の湯源泉と落沢川自然湧出温泉の温泉水が Na^{+}－Cl^{-}型の水質組成を有することから溶存成分の起源を検討するために、ホウ素(B)およびヨウ素(I)の塩化物イオンに対する濃度比（B/Cl、I/Cl）を計算し、White(1957)による海水、油田塩水、火山性温泉の濃度比との比較を行った。その結果を表 2.4.2－1 に示す。表 2.4.2－1 に示されるように、いずれの温泉水の B/Cl および I/Cl は、海水や火山性温泉の濃度比とは異なり、油田塩水の濃度比の範囲にある。このことは、熊ノ湯源泉、落沢川自然湧出温泉の溶存成分は地層中の海塩を起源としていることを示唆している。

表 2.4.2－1　羅臼地区と White(1961)の Cl^{-}，I^{-}，B の濃度比の比較

試料名	Cl^{-} (mg/l)	B (mg/l)	I^{-} (mg/l)	B/Cl^{-}	I^{-}/Cl^{-}
熊ノ湯源泉	1510	9.7	20	0.0064	0.013
落沢川自然湧出	1230	8.9	25	0.0072	0.0203
羅臼川	10	0.04	0.1未満	0.004	-
海水	19350	4.45	0.064	0.0002	0.000003
油田塩水	-	-	-	0.00001 ～ 0.02	0.00003 ～ 0.0202
火山性温泉	-	-	-	0.0001 ～ 0.001	0.00001 ～ 0.0005

図 2.4.2－2 の上の図は、北海道立地下資源調査所(1984)によって示された、羅臼地区の地熱系の概念モデル図である。以下に、北海道立地下資源調査所(1984)で推定された羅臼地熱地域の湧出機構を引用・転記する。

(1) 半島稜線部から根室海峡に向かって傾斜する新第三紀層中の裂か等を通じて天水の供給,浸透が存在する.

(2) 斑岩岩体中に形成された地下深部に達する裂かにそって上昇する集中的な熱の供給が存在する.

(3) 地下深部より熱の供給を受けた天水は,ナトリウム塩化物タイプの高温熱水を形成する.深部では 200℃を越える地下温度が期待される.

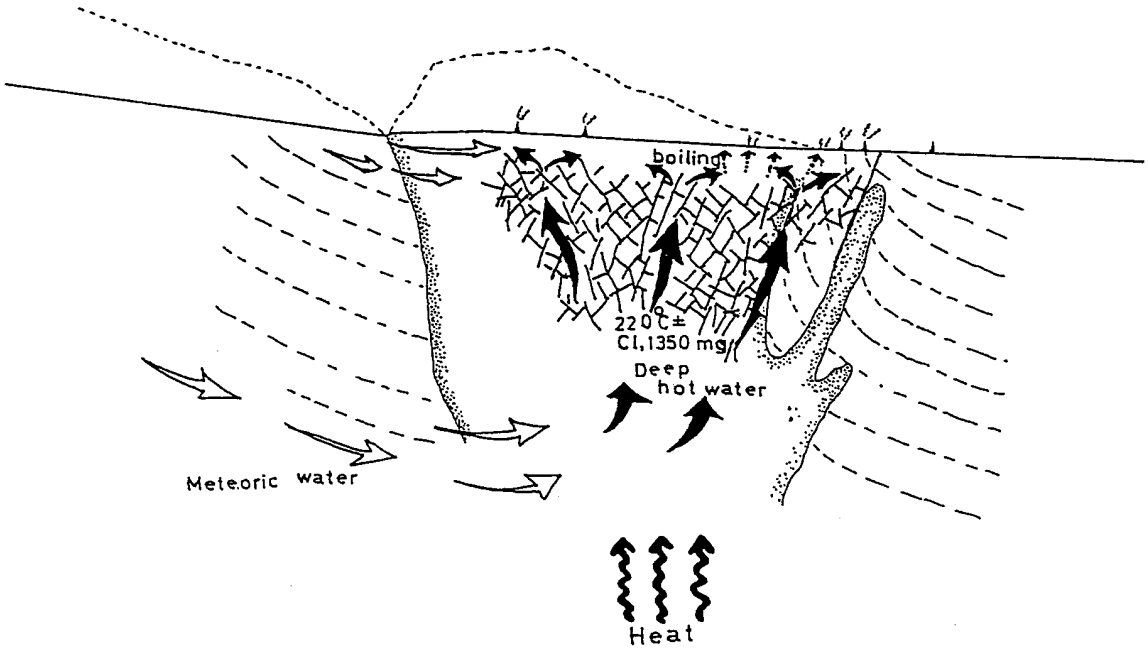
(4) 高温による密度減少により,高温熱水は主として羅臼川ぞいに斑岩岩体の裂か中を上昇する.一部は斑岩岩体下流側隣接地域にもたらされる.そこでも主たる賦存形態は新第三紀中に局部的に発達する裂かに胚胎していると推定される.したがって,この地域の地熱貯留層は,一般的に考えられるような広がりをもつものではなく,きわめて限定された裂か系に規制されていると判断される.

(5) 上昇する高温熱水は地下浅部で沸とうする.地表部および以下浅部に粘土化を主体とする変質帯が形成される.また一部で,高温熱水と浅層地下水との混合が生じる.沸騰現象は羅臼川本流沿いで,地下水との混合は縁辺部の湯の沢,落沢川流域で顕著である.

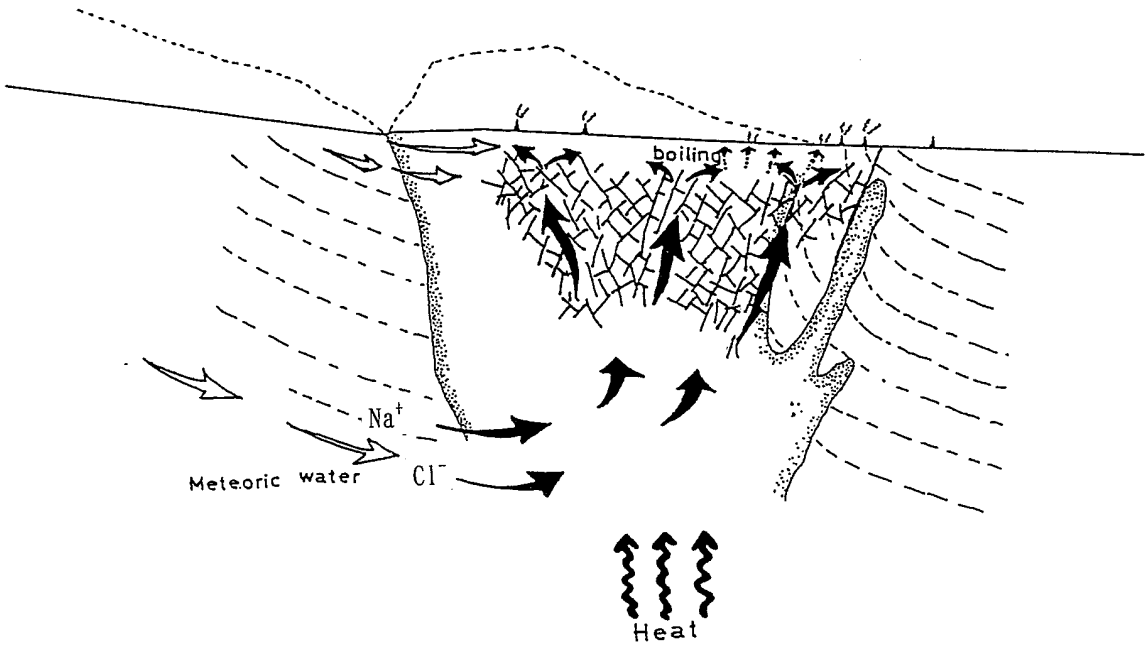
(6) 地表近くまで上昇した熱水は,透水性に富む部分に広がり,浅部の温泉胚胎層を形成している.

一方、本研究の水質分析結果から、天水起源の水が地下を浸透してくる過程において地層中の海塩を溶かして Na^+－Cl^-型となり、熱源によって加熱されて温泉水として湧出したものと推定される。

以上のことから、北海道立地下資源調査所(1984)のモデル説明のうちの(3)の段階以前の天水の新第三紀層中への浸透中に Na^+－Cl^-型化が生じ、その後に加熱されて上昇・湧出したと考えられることを踏まえ、図 2.4.2－2 の下の図に示すようなモデルをここでは提示する。



既往モデル



本研究の検討モデル

図 2.4.2－2　羅臼地区の温泉構成課程の概念モデル図
北海道立地下資源調査所(1984)に加筆

2.4.3　モンモリロナイトの安定性

今回室内分析を実施した熊の湯源泉、落沢川自然湧出温泉、そして羅臼川河川水について、鹿園(2001)に示された Ca-アルミノシリケートの安定範囲を示すダイヤグラムに測定値をプロットしたものを図 2.4.3－1 に示す。ただし、図 2.4.3－1 は 25℃、1atm の条件での関係図であるため、今回のような比較的高温の温泉水に適用させるためには、温度に関する補正が必要であることに留意しなければならない。

図 2.4.3－1 をみると，いずれの試料も Ca－モンモリロナイトに飽和で、羅臼川の河川水を除く温泉水は非晶質シリカにも過飽和であることが判る。すなわち、今回の温泉水は Ca－モンモリロナイトに関して安定であるような水質組成を有していると考えられ、モンモリロナイトの沸石化が生じるような条件下にはないことが推定される。このことは、緑色変質凝灰岩の分布領域に今回のような温泉水が接触する箇所が認められる場所が見いだされれば、確認できると考えられる。また、モンモリロナイトによる粘土化変質を受けた領域にそのような温泉水が接触している箇所を調査することでも、沸石化の有無によって確認可能であると考えられる。

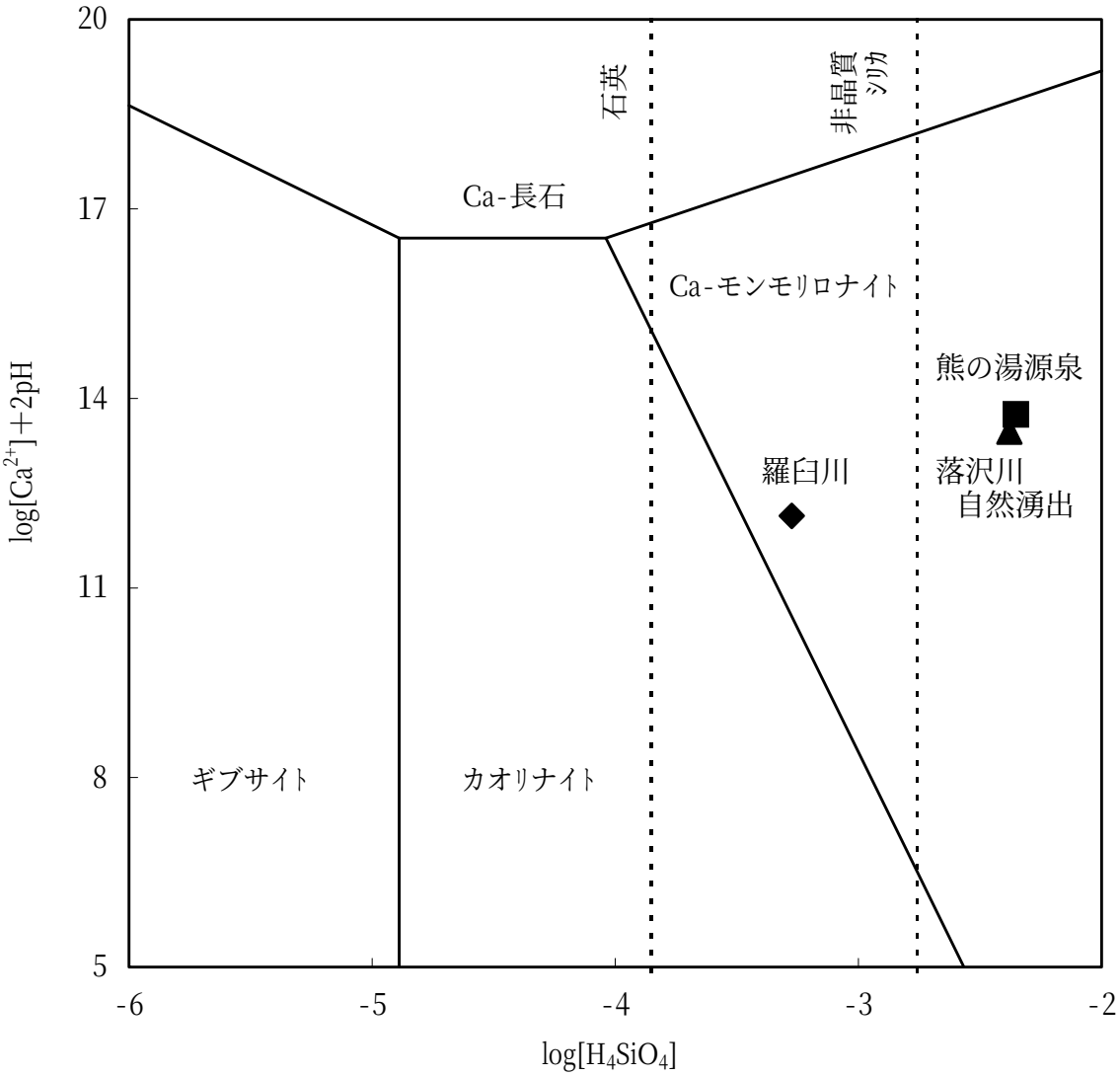


図 2.4.3－1　$\log[H_4SiO_4]-\log[Ca^{2+}]+2pH$ の関係図（25℃、1atm）

2.5　おわりに

現在までの羅臼地区において判明した事象としては、

- 比較的高温で高 pHの温泉水が現在も存在する
- この温泉水は、水の起源は天水起源を主体とし、地下浸透の過程で塩水化して、熱源で加熱されて湧出した
- この温泉水は地球化学的な検討において、モンモリロナイトが安定である
- ある変質作用によって、母岩にモンモリロナイト、カオリナイト、モルデン沸石が形成されている

という点が挙げられる。

これらのことは、本地区がモンモリロナイトの高 pH溶液による沸石化の検討を行うためのナチュラルアナログ研究フィールドとして好適であることを示していると考えられる。この研究のためには、

- 凝灰岩と緑色変質凝灰岩をそれぞれ独立に変質状況を追跡する
- 変質を被った岩石の地史を解読する（時間軸の確定）
- 高 pHの温泉水の岩石に対する接触時間の見積を行う（例えばフィッショントラック長の解析）

といった方向が重要であると考えられる。

参考文献

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

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

河田英, 土居繁雄 :“ 目梨郡羅臼町らうす温泉調査報告 ”, 地下資源調査所報告, No.37, pp.67～74. (1964)

松葉谷治, 酒井均 :“ 地表水の水素および酸素同位体の挙動 ”, 日本地球化学会年会講演要旨集, C12, pp.121. (1977)

松葉谷治, 酒井均, 上田晃, 堤真, 日下部実, 佐々木昭 :“ 北海道の温泉ならびに火山についての同位体化学的調査報告 ”, 岡山大学温泉研究所報告, No.47, pp.55～67. (1978)

和気徹, 松波武雄, 横山英二, 川森博史, 藤本和徳, 佐久間勉, 二間瀬洌 :“ 羅臼温泉地域の地熱, 地下資源調査所報告 ”, No.50, pp.35～55. (1978)

Pusch,R.： “ Stability of Deep-sited Smectite Minerals in Crystalline Rock-ChemicalAspects. ”, KBS TR 83-16, pp.1～68. (1983)

北海道立地下資源調査所 :“ 羅臼の地熱資源 ”, 地下資源調査所調査報告 第 13 号, 97p. (1984)

鹿園直建 :“ 水－岩石反応による地下水中の主化学成分組成の変化(1)－化学平衡とマスバランス－ ”, 地下水学会誌, v.43, No.3, pp.149～159. (2001)