



JAEA-Research

2007-040



JP0750148

## 非火山地域における地温の特徴

(受託研究)

Subsurface Temperature in Non-Quaternary Volcanic Regions, Japan  
(Contract Research)

山川 正 武田 聖司 木村 英雄 兵頭 浩\*

Tadashi YAMAKAWA, Seiji TAKEDA, Hideo KIMURA and Hiroshi HYODO\*

安全研究センター

廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

Waste Disposal and Decommissioning Safety Research Group  
Nuclear Safety Research Center

JAEA-Research

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

非火山地域における地温の特徴

(受託研究)

日本原子力研究開発機構 安全研究センター

原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

山川 正<sup>\*</sup>、武田 聖司、木村 英雄、兵頭 浩<sup>\*</sup>

(2007年2月6日受理)

放射性廃棄物の地層処分では、人間社会への核種移行を評価することが安全性を評価する上で重要である。地層処分の安全評価においては、地質特性に関して長期にわたる時間的変動および空間的変動を考慮する必要がある。火山・マグマ活動、地震活動、地質構造の変形、熱水活動、浸食と堆積などの天然事象では、個々の天然事象はもとよりそれらが複合的に生起する地質特性の変動に関する研究がこれまでに行なわれている。原子力安全委員会が定めた環境要件によれば、たとえば火山・マグマ活動および熱水活動については、火山地域を避けて立地するとされている。これと関連して、本研究では日本列島における第四紀火山地域以外の地域（非火山地域）の変動のひとつとして地温を取り上げ、その空間的な特徴を調査した。使用した主なデータは泉温分布、地熱分布、地温勾配、第四紀火山および地質図である。これらのデータを用いて、比較的データの豊富な第四紀火山地域の火山影響範囲の特定とその地温特徴を確認後、日本列島全域より第四紀火山地域を除外し、非火山地域での地温特徴の空間分布を整理した。

その結果、第四紀火山地域の火山影響範囲は、火山の熱的影響および火山起源の地下水の影響を考え合わせると、火山中心より約 24 km までと判断してよいことが判明した。第四紀火山中心より 24 km 以遠の地域、すなわち非火山地域における温泉の泉温と深度の関係は、 $y = 0.0163x + 22.454$  (ただし、 $x$  : 深度(m)、 $y$  : 地温(°C)、標準偏差約 10°C) であった。これより、非火山地域の一般的な地温勾配は約 16 °C/km であり、従来の非火山地域における平均的な地温勾配といわれる 20°C/km より小さい値を示した。地温勾配の頻度分布などから 50 および 80°C/km を閾値とすると、日本列島の地温勾配異常域は十勝平野、網走、熊石、横手盆地、庄内平野、新潟平野、阿武隈、能登、紀伊半島、道後の 10 地域に限られる。地温勾配異常域を別にすると、非火山地域の概略の地温は前出の関係式によって推定できるものの、標準偏差に示す温度の不確実性が考えられる。

本研究は、経済産業省原子力安全・保安院の委託により実施した研究成果の一部である  
原子力科学研究所（駐在）〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

\* 出向職員（三菱マテリアル資源開発株式会社）

\* 三菱マテリアル資源開発株式会社

Subsurface Temperature in Non-Quaternary Volcanic Regions, Japan  
(Contract Research)

Tadashi YAMAKAWA\*, Seiji TAKEDA, Hideo KIMURA and Hiroshi HYODO\*

Nuclear Facilities Safety Research Unit  
Nuclear Safety Research Center,  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 6, 2007)

Radionuclide migration toward the human environment is to be assessed as the part of safety assessments of geologic disposal for radioactive waste. The geologic processes, which include volcanic activity, hydrothermal activity, seismicity, deformation, erosion, sedimentation and so on, bring various changes into a repository site in both geologic time and scale. It is important that these changes are assessed through various methods for further studies. In addition, taking the regulation for a site selection into consideration, the Quaternary volcanic region should be avoided in such influence as volcanic and hydrothermal activities. From these points of view, a subsurface temperature in non-Quaternary volcanic regions was focused as one of the changes closely related to the volcanic and hydrothermal activities in this study.

The study was conducted to extract features of subsurface temperature in non-Quaternary volcanic regions throughout Japan. Data used in the study were available databases of hot springs, geothermal resources, geothermal gradients, Quaternary volcanoes and geologic maps. Features of subsurface temperature in Quaternary volcanic regions were delineated first from using these databases. Consecutively, ones in non-Quaternary volcanic regions, by buffering Quaternary volcanic regions, were studied in various aspects.

The present study clarified that a relationship between subsurface temperature and its depth was expressed by an equation:  $y = 0.0163x + 22.454$ , where  $x$  as depth in meters,  $y$  as subsurface temperature in °C and about 10 °C in a standard deviation, in non-Quaternary volcanic regions far from approximately 24 km of Quaternary volcanic centers. This led to approximately 16 °C/km in general geothermal gradient in non-Quaternary volcanic areas, which was lower than 20 °C/km in the previous study. In addition, defining geothermal gradient boundaries at 50 and 80 °C/km, following 10 areas were extracted as anomalous regions, they are Tokachi-plain, Abashiri, Kumaishi, Yokote-basin, Shonai-plain, Niigata-plain, Abukuma, Noto, Kii-peninsula and Dogo regions. Subsurface temperature could be determined by installing depth in the equation apart from these anomalous regions, but it is indispensable that uncertainty of subsurface temperature represented by the standard deviation here should be assessed in further study.

Keywords: Geologic Disposal, Subsurface Temperature, Non-volcanic Region, Hot Spring, Geothermal Resources, Geothermal Gradient

---

Studies reported in this paper were supported in part by the Nuclear and industrial safety Agency in Ministry of Economy, Trade and Industry.

\* Research Staff on Loan (Mitsubishi Materials Natural Resources Development Corporation)

\* Mitsubishi Materials Natural Resources Development Corporation

## 目 次

1.はじめに	1
2.研究方法	1
2.1 研究の流れ	1
2.2 用語の整理	1
2.3 使用データ	2
2.4 データの特性	2
3.第四紀火山地域の特定	3
3.1 第四紀火山中心から温泉までの距離と泉温との関係	3
3.2 第四紀火山中心から温泉までの距離と地温勾配との関係	4
3.3 第四紀火山中心から地熱中心までの距離と地熱温度との関係	5
3.4 第四紀火山の影響範囲	5
4.非火山地域の地温特性	6
4.1 地温特性の整理	6
4.2 泉温の特徴	8
4.3 泉温分布と地温勾配の関係	9
4.4 地温異常域の抽出	9
5.考察	10
6.まとめ	11
参考文献	11

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Methodology.....	1
2.1 Flowchart of the study.....	1
2.2 Definition of jargons.....	1
2.3 Data used.....	2
2.4 Data properties.....	2
3. Delineation of Quaternary volcanic regions.....	3
3.1 Geometric features of Quaternary volcanoes associated with hot spa temperature.....	3
3.2 Geometric features of Quaternary volcanoes associated with geothermal gradient.....	4
3.3 Geometric features of Quaternary volcanoes associated with geothermal resources.....	5
3.4 Assumption of outlining Quaternary volcanic regions .....	5
4. Features of subsurface temperature in Quaternary non-volcanic regions.....	6
4.1 Overview of features on subsurface temperature.....	6
4.2 Features of hot spa temperature data .....	8
4.3 Relationship between hot spa temperature and geothermal gradient .....	9
4.4 Anomalous zones on subsurface temperature .....	9
5. Discussion .....	10
6. Summary.....	11
References .....	11

## 1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分では、人間社会への核種移行を評価することが安全性を評価する上で重要である。地層処分の安全評価においては、地質特性に関して長期にわたる時間的変動および空間的変動を考慮する必要がある。火山・マグマ活動、地震活動、地質構造の変形、熱水活動、浸食と堆積などの天然事象について、個々の天然事象はもとよりそれらが複合的に生起する地質特性の変動に関する研究が行なわれている。たとえば火山・マグマ活動および熱水活動についてみると、これまでの研究では、第四紀火山と地温勾配分布、地下温度構造、地下温度構造を支配する要因、熱水対流系、熱水の化学組成、貫入岩による熱的影響などの解析が実施されている。これらの研究は、比較的データの豊富な第四紀火山地域を対象としており、原子力安全委員会が定めた環境要件を参照すると、排除すべき天然事象を特定することにつながる。一方、第四紀火山地域以外の地域については、地質特性の解明および天然事象のデータ・知見の解析は十分に行なわれておらず、課題となっている。

このような背景から本研究では、日本列島における第四紀火山地域以外の地域（非火山地域）を対象として、変動のひとつである地温を取り上げ、その空間的な特徴を整理した。

## 2. 研究方法

### 2.1 研究の流れ

本研究では日本列島全域を対象とするため、日本列島をカバーする地温関連データの収集を行なった。データの種類は温泉分布、地熱分布、地温勾配、第四紀火山、地質図の5種類である。これらのデータを利用して、先ず、第四紀火山地域において、第四紀火山の影響範囲の特定を行なった。検討項目は、火山中心より半径50 km<sup>註1)</sup>の地域におけるpH・水質の特徴、地温勾配とpH・水質の関係、泉温と地温勾配との関係、地熱中心から火山中心までの距離と地熱温度との関係である。これらの結果を利用して、第四紀火山の影響範囲を設定した。次に、第四紀火山の影響範囲を日本列島全域から除外し、第四紀火山地域以外の地域（以降「非火山地域」と称する）の地温特徴を検討した。検討項目は、全国の地熱・泉温特徴、泉温・pHと地温勾配の関係、泉温分布と地温勾配の関係、地温異常域の抽出である。これらの結果を利用して、非火山地域における地温特徴を整理した。研究の流れを図1に示した。

### 2.2 用語の整理

本研究での地温とは、全国を網羅的に取り扱った地熱および温泉関連データを利用して推定できる地下の温度を指し、その深度は地表下数1,000 mまでを対象とした。地熱および温泉に関する用語は、それらの利用目的や分野により多少異なる。本研究では用語の統一性を図るために、表1にまとめた分類にしたがって使用するものとする。

地熱については、新第三紀中新世以降の火成活動に由来する呼称が定まっていない。ここでは、阪口ほか(2004)<sup>(1)</sup>の記述にしたがってタイプAとタイプBに区分した。新第三紀鮮新世以降の若い地層

<sup>註1)</sup> 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会(2003)における事象に伴う影響範囲50 kmを参考し、非火山地域をバックグラウンドとして十分に含む範囲とした。

で覆われた平野では、新エネルギー産業技術総合研究所(1984)<sup>(2)</sup>および阪口ほか(2002)<sup>(3)</sup>で区分されている名称を併用した。これらの区分は地層の年代、地熱流体の温度、重力基盤深度、キュリ一点深度を定義の尺度としている。なお、その他の区分として断層構造やドーム構造があるが、これらは上記のタイプや型の地質構造側面に着目した場合の区分である。

温泉については、第四紀火山に由来するものとして火山性温泉がある。その一部に海岸付近に位置する海岸温泉を含む。海岸温泉は成因の分類によって区分する。新第三紀中新世以降の火成活動に由来するものでは湯原ほか(1988)<sup>(4)</sup>などに広域熱伝導卓越型やグリーンタフ型として記載されているが、両者はほぼ同義であるため広域熱伝導卓越型の表記とする。同様に深層熱水型とジオプレッシャー型もほぼ同義であるため深層熱水型の表記とする。その他の区分として、有馬型、深成岩類に起因した型、地質構造に規制された型などがある。このうち有馬型と深成岩類に起因した型は、それらの成因が広域熱伝導卓越型や深層熱水型とは異なるため、それらとは区分して表記する。地質構造に規制された型は、上記の地質構造側面に着目した場合であるため、上記の成因による分類に区分して利用する。

地温勾配とは、地中の温度が深度と共に増加する割合を示す。単位は°C/mが一般的であるが、地熱分野では熱力学的な観点からK(ケルビン)/kmが用いられている。本研究では°C/mあるいは°C/kmを基本とするが、既往データの引用の場合にはK/kmを踏襲するものとする。

### 2.3 使用データ

収集および使用したデータを表2に示した。データの種類は温泉分布、地熱分布、地温勾配、第四紀火山、地質図の5種類、8データベースである。これらのデータはいずれも日本列島全域あるいは東北・九州などの広い領域をカバーするデータである。温泉分布では、「温泉地化学データベース」を第四紀火山の地温特性に、「日本温泉・鉱泉分布図及び一覧」を非火山地域の地温特性に用いた。これらのデータは、その網羅性に着目して使い分けをした。温泉分布と地温特性とを比較・検討するためには、地熱分布、地温勾配、第四紀火山、地質図の6データベースを適宜併用した。データの種類はテーブル、ポリゴン、ポイント、紙面などであり、GIS(Geographic Information System: 地理情報システム)処理に供するため、A/D変換・フォーマット変換の後、測地系と投影法<sup>注1)</sup>を日本測地系2000(中央経線: 東経137°、標準緯線1:30°、標準緯線2:45°)、正距円錐図法に統一した。

### 2.4 データの特性

#### (1) 温泉分布

ここでは「温泉地化学データベース<sup>(5)</sup>」および「日本温泉・鉱泉分布図及び一覧(第2版)<sup>(6)</sup>」を収集した。

「温泉地化学データベース」には緯度、経度、温度、pH、化学分析値などが県別にExcel<sup>®</sup>ファイルで収録されており、これらを1つのファイルに統合した。当該データの信頼性を確保するために、湧水量の記載がありかつ採水水源が湧水である2,400件のデータを第四紀火山地域の地温特性の研究に

<sup>注1)</sup> 座標を持った地球上のフィーチャは、測地系と投影法を指定することによりその位置を決定することができる。測地系と投影法は目的によって選定することができ、また相互の変換も可能である。

利用した<sup>(5)</sup>。化学分析値は、地下水の起源を簡易的に判定するために、キーダイヤグラムによって区分した。キーダイヤグラムでは陽イオン ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) と陰イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) の分析値モル比によって、地下水は Type I : アルカリ土類非炭酸塩（熱水、化石水起源）、Type II : アルカリ土類炭酸塩（地下水起源）、Type III : アルカリ炭酸塩（停滞地下水起源）、Type IV : アルカリ非炭酸塩（海水起源）の 4 タイプに区分される（図 2）。なお、化学分析値についてイオンバランス<sup>注1)</sup>を検討したが、pH4.8 以上の火山性と考えられる酸性地下水<sup>(7)</sup>では、その差が 20% 以上に達し、何らかの原因でイオンバランスが崩れている可能性が認められた。

一方、「日本温泉・鉱泉分布図及び一覧（第 2 版）<sup>(6)</sup>」では、4,536 件の温泉・鉱泉データが収録されており、緯度、経度、温度、掘削深度（深度データが存在する場合）、湧出量、pH と共に地質図を背景とした位置確認が簡便に行なえる。このデータは非火山地域の地温特性の研究に利用した。

## （2）全国地熱分布図

「東北・九州地熱資源図 CD-ROM 版<sup>(3)</sup>」は、地熱資源賦存地域の範囲（ポリゴン）と、地熱開発地域における地熱井の情報（テーブル）から構成される。本研究では”地熱中心”を、「地熱井データのうち最高温度が記載されている全ての孔井の重心位置」と、“地熱温度”を「地熱井の最高温度の平均値」と定義した（図 3）。この処理により、地熱中心の位置と地熱温度データを本検討に利用した。

## （3）日本列島地温勾配図

「日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース<sup>(8)</sup>」に納められているデータのうち、テーブル”grad.tab”を使用した。温泉位置における地温勾配データを検索取得するために、このデータから TIN(Triangulated Irregular Network)<sup>注2)</sup>を生成した。そのためには、元データが温泉周辺の空間において線形に変化する必要がある。地温勾配データの頻度分布およびその常用対数の頻度分布を図 4、図 5 にそれぞれ示した。後者の頻度分布は正規分布に近い形状を示すことから、温泉周辺の地温勾配は常用対数をとることにより概ね線形に変換できることがわかる。この処理により、元データを各温泉が位置する地点の地温勾配データに変換し、本検討に利用した。

## 3. 第四紀火山地域の特定

### 3.1 第四紀火山中心から温泉までの距離と泉温との関係

温泉に最も近い火山までの距離を空間検索して、火山中心から温泉までの距離と泉温との関係を検討した。なお、以降の統計処理では火山の熱的影響などを網羅するために、影響のある全てのデータを包含するよう泉温や地温勾配の上限値を取り扱うこととした。pH 別および水質による起源別の結果を図 6 および図 7 にそれぞれ示した。これによると、pH 4.8 未満の泉温分布は、そのほとんどが火山中心から 16 km 以内（図中の点線部分）であった。pH 4.8 以上の泉温分布では泉温の上限が形成され、火山中心からの距離が 16 km 付近からそれ以遠では泉温の上限が直線的に低下する傾向が認められる（図中の黒色直線部分）。この特徴を完新世火山と更新世火山に区分して統計処理すると、前者では火山中心からの距離が約 13~22 km までは急速に低下し、22 km 以遠では緩やかな低下を示した（図中

<sup>注1)</sup> 地下水の分析値では、陽イオンと陰イオンそれぞれの当量濃度の合計が等しくなる。

<sup>注2)</sup> TIN は平面上に分布した点を使って三角形を生成するもので、その内部を直線的にデータ補間する場合などに用いられる。

の橙色屈曲線部分)。また後者では第四紀火山全体とほぼ類似する傾向を示した(図中の緑色直線部分)。これらの傾向は、完新世火山の熱的影響範囲が狭小であるのに対し、更新世火山ではより広範囲に及んでいる可能性を示している。

水質による起源別区分では、Type I(熱水・化石水)が距離10km以内に集中する(図中の赤色直線部分)。Type II(地下水起源)は距離8km以内では比較的高温を示すが、それ以遠では急速に低化し、その多くが20°C以下の泉温となる(図中の緑色直線部分)。Type III(停滞地下水)はType IIに類似するが、泉温の低下の度合い小さい(図中の黒色屈曲線部分)。Type IV(海水)は緩やかな低下を示した(図中の青色直線部分)。

### 3.2 第四紀火山中心から温泉までの距離と地温勾配との関係

温泉データは基本的に深度方向の地温情報に関する精度が低いため、本研究で地温勾配図を利用し、その地点の深度方向の地温情報を補った。データ補間は先に述べたTINによった。本研究では、温泉に最も近い火山までの距離を空間検索して、火山中心から温泉までの距離と地温勾配の関係を検討した。pH別および水質による起源別の結果を図8および図9にそれぞれ示した。これらによると、いくつかの温泉の例外はあるものの母集団の特徴を見ると、pH4.8未満の温泉の地温勾配は、距離が離れるにしたがって急速に低下する。pH4.8以上の温泉の地温勾配はその上限を形成し、火山から距離約12kmまでは急速に低下(約300K/km)し、約12~24km間は緩やか(約30K/km)となり、約24km以遠ではほとんど変化しない。

水質による起源別区分では、いずれのタイプも火山から離れるにしたがって指数関数的に減少し、その勾配はType I(熱水・化石水)>Type III(停滞地下水)・Type IV(海水)>Type II(地下水起源)の順に小さくなる。なお、この傾向は完新世火山と更新世火山を区分して統計処理した場合、完新世火山について特に顕著であった。

上記の第四紀火山中心から温泉までの距離と泉温との関係および第四紀火山中心から温泉までの距離と地温勾配との関係を包括的に判断すると、完新世火山と更新世火山の間で相違が認められるものの、Type I(熱水・化石水)は第四紀火山を、Type II(地下水起源)は非火山地域をそれぞれ特徴付ける。双方の関係は泉温や地温勾配に代表される漸移的变化を示すことから、第四紀火山としては上記約12~24kmの範囲で、Type I(熱水・化石水)とType II(地下水起源)の混合を表わしている可能性が高い。

そこで、第四紀火山中心から温泉までの距離と地温勾配の関係について、両対数グラフにプロットして再度その傾向について検討した。これは、前出の地温勾配の頻度分布が対数正規分布を示すことや、水質による起源別区分において指数関数的变化を示すことによる。その結果を図10に示した。同図では全体として負の相関を示し、その相関係数は-0.51であった。pH4.8未満の温泉の地温勾配は相対的に高く(図中の桃色点線内)、pH4.8以上の温泉の地温勾配は相対的に低い(図中の青色点線内)傾向にあり、全体として直線的な地温勾配上限を形成した(図中の黒色実線部分)。この傾向は先のType I(熱水・化石水)とType II(地下水起源)の混合を地温勾配から支持する。

第四紀火山全体で見られる地温勾配の上限を示す直線（図 10 中の黒色実線部分）は、次式で近似される。

$$\log(G) = -0.71 \log(D) + 5.08$$

G : 地温勾配 (K/km)

D : 火山中心から温泉までの距離 (m)

今回使用している地温勾配および温泉データは全国規模で取得されたものであり、多様な天然事象の条件が混在しているにも係わらず、地温勾配分布領域を制限する直線的な傾向は、火山からの距離と地温特性の関係についての指標として利用可能な情報であるといえる。この直線の上限を越える幾つかの地点は、山形県温海温泉、北海道音更町十勝川温泉などであり、これらの温泉は、いずれも新第三紀貫入岩並びに堆積岩が分布している地域であった。

### 3.3 第四紀火山中心から地熱中心までの距離と地熱温度との関係

第四紀火山中心から地熱中心までの距離と地熱温度との関係を図 11 に示した。地熱は、第四紀火山に関連した地熱（図中で火山性地熱として赤色印）、深層熱水賦存型および深層熱水系型地熱（図中で深層熱水として桃色印）、新第三紀中新世以降の火成活動に由来するもののうちタイプ A（図中で非火山性 A として青色印）に区分した。火山性地熱については、火山中心から約 7 km 以内に集中した。非火山性地熱については、火山中心から遠ざかるにつれて地熱温度が低下する傾向が認められるものの、火山中心からの距離と地熱温度との間には顕著な相関性は見られなかった。42°C以上の地熱温度を示す非火山性地熱の母集団は、火山中心までの距離が約 20 km 以内の範囲に限られる（図中の黒色点線）。

### 3.4 第四紀火山の影響範囲

前項までの研究により、第四紀火山の影響範囲は次のように考えられる。

火山性地熱は火山中心から約 7 km 以内に分布し、さらに第四紀火山中心から温泉までの距離と地温勾配の上限限界値は、火山中心より約 12 km、約 12~24 km、約 24 km 以遠の 3 つに区分される。この結果に温泉の水質の特徴を考え合せると、火山中心より約 12 km までは火山の熱的影響を直接的に蒙る範囲であり、約 12~24 km では火山起源の地下水の影響が及ぶ範囲であり、約 24 km 以遠では火山の影響が及ばない範囲であると解釈される。既往の知見ではその影響範囲は 10~20 km<sup>注1)</sup> とされており、本研究の結果もこれに整合する。したがって、以降の非火山地域の地温特性に関する研究では、第四紀火山地域の範囲を火山中心から 24 km の範囲を仮定して実施するものとする。

---

<sup>注1)</sup> 火山の影響範囲は小松・梅田（1999）では数 km~10 km 程度、浅森・石丸・岩月（2002）では、火山起源の低 pH データの分布範囲として数 km~20 km 程度が報告されている。

#### 4. 非火山地域の地温特性

##### 4.1 地温特性の整理

第四紀火山中心から 24 km のバッファを発生させ、さらに使用データで示した地熱および温泉データをプロットした。温泉データについては、定義の区分にしたがって泉温 42°C以上を対象とし、10°C毎に区分して表示した。その結果を図 12 に示した。同図中で相対的に広い空間領域を示し、また地熱地帯並びに温泉が高密度に分布する地域として、全国で 41箇所の地域が抽出された。全国を北海道、東北、関東・甲信越、中部・近畿、四国・九州の 5 地域に分け、上記 41 箇所の地熱および温泉の特徴を以下に取りまとめた。取りまとめにおいては、新エネルギー産業技術総合研究所(1984)<sup>(2)</sup>および産業技術総合研究所(2005)<sup>(6)</sup>などから位置の特定、地熱分布、地熱タイプ、キュリ一点深度<sup>注1)</sup>、温泉分布、温泉タイプ、温泉の成因、その他を引用した。

###### (1) 北海道地域

本地域では根釧平野、十勝平野、勇払（ゆうふつ）平野、稚内（わっかない）、天塩（てしお）、留萌（るもい）、枝幸（えさし）、石狩平野、留辺蘂（るべしべ）、積丹（しゃこたん）、名寄（なよろ）盆地、網走、熊石（くまいし）の 13 地域が抽出された。地熱タイプは、石狩平野の深層熱水賦存型および名寄盆地並びに網走の高温可能性型を除くと、全てが深層熱水系型に区分された。深層熱水系型はキュリ一点深度が一般に 12~8 km の範囲にあるが、深層熱水賦存型では 13~9 km とやや深く、高温可能性型では 8 km あるいはそれ以浅となる。分布する温泉の泉温が相対的に高い地域は根釧平野（標茶温泉など）、十勝平野（十勝川温泉など）、石狩平野（長沼温泉など）、留辺蘂（温根湯温泉）、網走（長万部温泉など）、熊石（乙部温泉など）などである。このうち留辺蘂と網走では泉温の標準偏差が大きく、それらの地域に分布する温泉の泉温に温度差が大きいことが伺える。温泉タイプは、熊石の広域熱伝導卓越型を別にすると、その他の地域は深層熱水型に区分され、CH<sub>4</sub> や N<sub>2</sub> を伴う高濃度 Na-Cl 泉および低濃度 Na-HCO<sub>3</sub> 泉が一般的である。熊石は新第三紀火山碎屑岩を貯留層とし、基盤からの伝導的な熱輸送が支配的と考えられている<sup>(2), (12)ほか</sup>。

###### (2) 東北地域

本地域では津軽東部、津軽西部、下北平野、秋田平野、北上平野南部、横手盆地、庄内平野、米沢、阿武隈の 9 地域が抽出された。地熱タイプは秋田平野の高温可能性型および阿武隈のタイプ B を除くと、全てが深層熱水系型および深層熱水賦存型に区分された。キュリ一点深度は 14~7 km の範囲を示し、秋田平野および庄内平野が 9~7 km のやや深い深度を示す。分布する温泉の泉温が相対的に高い地域は秋田平野（強首温泉など）、横手盆地（山の手温泉など）、庄内平野（長沼温泉、温海温泉など）、阿武隈（楢葉温泉、五浦温泉など）である。温泉タイプは、グリーンタフの分布に関連する広域熱伝導卓越型および深層熱水型である。庄内平野南部に位置する温海温泉は、熱源が中部中新統のプロピライトに由来すると考えられており、温泉の溶存成分から熱水の起源はマグマ発散物で、その分化過程の進んだ段階にあるとされている。横手盆地には、その北部に山の手温泉、南部に雄物川温泉などの高温泉が位置するが、地熱・温泉に関する報告は少なく、その成因は不詳である。阿武隈には先第

<sup>注1)</sup> 岩石の磁性には温度依存性があり、強磁性を示す岩石でも加熱するとある温度で急に磁化が減少し、常磁性に移行する。この温度をキュリーサーモメータ、その深度をキュリ一点深度とそれぞれ呼ぶ。一般に物理探査によって得られる情報で、堆積盆の深度情報を推定することができる。

三紀変成岩、白亜紀花崗岩の上に前期中新世以降の堆積岩分布する。北部沿岸部には Na-Cl 泉の楷葉温泉が位置し、その南部では五浦温泉や太子温泉などが分布し、硫酸塩成分が卓越する広域熱伝導卓越型の高温泉となる。本地域の地温勾配は 33~38 K/km 程度であり、一般的な地殻熱流量で説明できるとの解釈もあるが、充分な熱源の特定には至っていない<sup>(2),(13)ほか</sup>。

### (3) 関東・甲信越地域

本地域では新潟平野、那須、関東平野、房総、秩父、牧の原の 6 地域が抽出された。地熱タイプは全てが深層熱水系型並びに深層熱水賦存型に区分される。キュリ一点深度は 12~9 km の範囲を示す。分布する温泉の泉温が相対的に高い地域は新潟平野（雲母（きら）温泉、柏崎温泉、村松浜温泉、小針温泉、月岡温泉、湯ノ平温泉、飯豊（いいで）温泉、瀬波温泉など）、那須（喜連川温泉など）である。温泉タイプは深層熱水型および広域熱伝導卓越型であるが、地域毎あるいは地域内でも多様である。新潟平野は、前期中新世の火山碎屑岩から更新世堆積物まで 3,000 m 以上の厚さを示す。雲母温泉、柏崎温泉、村松浜温泉、小針温泉は Na-Cl 泉で、村松浜温泉と小針温泉ではヨウ素を含有する特徴を示す。月岡温泉は断層・褶曲運動により被圧された深層熱水型で天水の混入は無く、熱源をマントルからの熱伝導と解釈されている。一方、湯ノ平温泉、飯豊温泉、瀬波温泉などは硫酸塩を含んでおり、広域熱伝導卓越型の高温泉である。特に瀬波温泉では、マグマから熱供給を受けた高温循環水が水一岩石反応を生じたものであり、その熱源は流紋岩とされている<sup>(2),(14)ほか</sup>。

### (4) 中部・近畿地域

本地域では能登、福井平野、濃尾平野、琵琶湖、大阪平野、三田（有馬）、奈良、紀伊半島の 8 地域が抽出された。地熱タイプは能登および福井平野が高温可能性型、濃尾平野、琵琶湖、大阪平野、三田（有馬）、奈良が深層熱水系型、紀伊半島がタイプ B である。キュリ一点深度は 16~6.5 km の範囲を示し、能登および福井平野では浅く、紀伊半島では深い傾向にある。琵琶湖と奈良を除くといずれの地域にも高温泉が分布し、特に能登、三田（有馬）、紀伊半島では、泉温 90°C 以上の温泉がみられる。能登および福井平野は重力基盤深度が浅く、地殻熱流量が高い地域である。濃尾平野および大阪平野では、いわゆる化石海水で特徴づけられる深層熱水型の温泉が多数分布する。三田（有馬）には、高温泉の有馬温泉が位置し、本地域を模式とする有馬型に区分される。この温泉は、断層に伴った高濃度の深部熱水を特徴とする。また、温泉水の同位体比から地下には比較的新しいマグマが存在することが指摘されている。紀伊半島ではキュリ一点深度は深いが、重力基盤深度は 1.5 km 以浅と浅い。本地域に分布する温泉の成因には様々な議論があるが、地殻内にはマグマは存在せず、沈み込むスラブからの脱水した深部流体が熱源であると解釈されている。しかしながら、海域のボーリングデータでは南海トラフの南側でも高温域が確認されており、沈み込むフィリピンプレートのスラブからの脱水のみでは説明しきれない事象<sup>注1)</sup> も依然存在している<sup>(2),(15)ほか</sup>。

### (5) 四国・九州地域

本地域では道後、日田（ひた）、佐賀、宮崎、水俣の 5 地域が抽出された。地熱タイプは日田が深層熱水系型、佐賀および宮崎が高温可能性型並びに深層熱水賦存型、水俣がタイプ A であり、道後については不詳である。キュリ一点深度は 14~6.5 km の範囲を示し、道後は深度が深く日田は浅い傾向に

<sup>注1)</sup> 南海トラフの南側ではスラブは存在しないが、広範なボーリングデータによって高温域が確認されている。スラブからの脱水した深部流体だけが熱源となる解釈では説明しきれていない。

ある。他地域と較べると相対的に高温泉は少なく、水俣の湯出温泉が 56.3°C を示す。温泉タイプは大部分が深層热水型であるが、道後温泉は有馬型の可能性を、また日田の筑後川温泉は深部白亜紀の花崗岩を熱源とする可能性を有する<sup>(2),(16)ほか</sup>。

#### 4.2 泉温の特徴

第四紀火山中心から 24 km 以遠にある温泉の泉温データの統計的特徴を検討するために、その頻度分布と正規確率値をプロットした。その結果を図 13 に示し、以下にその特徴を列挙する。

- ① 泉温の頻度分布ではその分布特徴が明瞭ではないが、正規確率値のプロットでは 18°C と 60°C に分布の境界があり、3 つの集団に区分できる。
- ② 泉温 18°C 未満の集団は、鉱泉に定義される温泉に相当する。
- ③ 泉温 18°C 以上 60°C 未満の温泉は、第四紀火山に関連しない温泉の母集団であり、泉温の一般的な特徴である。
- ④ 泉温 60°C 以上の温泉は、有馬温泉、瀬波温泉、和倉温泉、湯の峰温泉などに代表される高温泉である。

次に、第四紀火山周辺の温泉を含めた全ての泉温データを利用して、第四紀火山中心から 24 km 以遠にある温泉の pH と泉温の関係を検討した。その結果を図 14 に示し、その特徴を以下に列挙する。

- ① 全ての温泉は pH 0~11までの範囲にプロットされる。このうちの第四紀火山中心から 24 km 以遠にある温泉は、pH 6~10までの分布密度が高く、中性~弱アルカリ性の性質を示す。
- ② pH 4 以下で 42°C 高温を示す温泉は、第四紀火山に関連する火山性高温酸性泉（同図中の赤太枠内）である。第四紀火山中心から 24 km 以遠にある温泉は、この範囲には一切分布しない。火山性高温酸性泉は、泉温の低下と共に pH が上昇する下限値（同図中の緑色破線）を持つ。
- ③ 第四紀火山中心から 24 km 以遠にある温泉のうち、pH 4 未満の酸性泉は約 25°C 以下の低い泉温を示す。

これらの pH 4 未満の酸性泉は、西山（北海道、pH 0.3）、金磯（かないそ、徳島県、pH 1.0）、藤野（北海道、pH 1.5）、城山（栃木県、pH 2.0）、祿剛崎（ろっこうざき、石川県、pH 2.0）、桧山（ひやま、京都府、pH 2.5）、炭沢（たんざわ、新潟県、pH 2.5）、宮本（岩手県、pH 2.7）、杉の奥（岡山県、pH 2.8）、岩戸（京都府、pH 2.8）、ふいご（徳島県、pH 2.8）、白岳（しらたけ、長崎県、pH 2.8）、坂下（岐阜県、pH 2.8）、多和（たわ、香川県、pH 2.8）、春照（すいじょう、滋賀県、pH 2.9）、姫路（兵庫県、pH 3.0）、火打崎（ひうちざき、山形県、pH 3.1）、上板並（かみいたなみ、滋賀県、pH 3.3）、足利（群馬県、pH 3.3）、谷崎（石川県、pH 3.4）、赤井（福島県、pH 3.4）、不動の湯（福島県、pH 3.5）、弥高山（やたかやま、岡山県、pH 3.6）、当野（とうの、兵庫県、pH 3.8）、白岩（山形県、pH 3.8）の 25 温泉であった。

一方、第四紀火山中心から 24 km 以遠の温泉について、泉温と深度の関係を図 15 に示した。泉温に対する深度の変化を抽出するために、深度 100 m 間隔で各々の区間の平均値（同図中の赤い点）および標準偏差（同図中の黒いバー）を算出した。その結果、区間の平均値は良い直線性を示し、次式で

近似できる。

$$y = 0.0163x + 22.454$$

x : 深度 (m)

y : 温度 (°C)

標準偏差 : 約 10°C

この近似式の傾きから、第四紀火山中心から 24 km 以遠の温泉については約 16 °C/km の地温勾配が得られた。ただし、温泉の場合には約 22°C のバイアスがあることになる。この結果を、先に抽出した 41 箇所に適用した。主要な十勝平野、新潟平野、阿武隈、能登の 4 例を図 16 に示した。それらの特徴は、以下の通りである。

- ① 十勝平野では、全ての温泉の泉温がこの近似式の周辺にプロットされた。
- ② 新潟平野では、全ての深度にわたって泉温が近似式周辺にプロットされるが、そのうちのいくつかの泉温データは近似式の高温側に外れる。これらは瀬波温泉、雲母温泉、高瀬温泉、湯ノ平温泉、飯豊温泉であり、非火山地域の高温泉であった。
- ③ 阿武隈では 4 箇所が高温側に外れる。これらは常磐湯本温泉、五浦温泉、平潟港温泉、五浦觀光温泉であった。
- ④ 能登では 1 箇所を除き、全ての温泉の泉温がこの近似式の周辺にプロットされた。高温側にプロットされたのは、和倉温泉であった。

なお、上記の地域別に加え、温泉タイプ別（広域熱伝導卓越型、深層熱水型、有馬型、その他の区分）への適用では、タイプ間に優位な差異は認められなかった。

#### 4.3 泉温分布と地温勾配の関係

地温勾配データを用いて、第四紀火山中心から 24 km 以遠の地温勾配データについて、その頻度分布と正規確率値分布を検討した。その結果を図 17 に示した。地温勾配は常用対数をとることでほぼ正規分布に近い頻度分布を得る。この正規確率値分布を詳細に検討すると、約 50 K/km (50°C/km に相当) を境界として 2 つの集団に分離できる可能性が認められた。

#### 4.4 地温異常域の抽出

第四紀火山から 24 km 以遠の地温勾配値の頻度分布で見られた 50 K/km (50°C/km に相当、産業技術総合研究所(1999)<sup>(17)</sup>では「やや高い値」と表現されている) と、従来から用いられている 80 K/km (80°C/km に相当、産業技術総合研究所(1999)<sup>(17)</sup>では「高温異常」と表現されている) を地温勾配値の閾値として、50 K/km (50°C/km に相当) を超える地点が複数含まれるか、もしくは 80 K/km (80°C/km に相当) を超える地点が 1 箇所でも含まれる地域を地温勾配の異常域と仮定する。これを先に抽出した 41 地域に適用すると、地温勾配の異常域は十勝平野、網走、熊石、横手盆地、庄内平野、新潟平野、阿武隈、能登、紀伊半島、道後の 10 地域となった。これまでの処理により、日本列島全域の第四紀火山から 24 km 以遠の地域を対象として、地熱、温泉、地温勾配データの特徴は表 3 のようにまとめら

れる。この内容から、温泉データと地温勾配データの和集合を取ると、温泉データの空間分布は地温勾配データの異常域に含まれることとなった。この和集合を地温異常域とすると、十勝平野、網走、熊石、横手盆地、庄内平野、新潟平野、阿武隈、能登、紀伊半島、道後の10地域が抽出された。日本列島全域の地温異常域の分布を図18に示した。

## 5. 考察

放射性廃棄物の地層処分では、その深度での温度は廃棄体に直接作用する要素として極めて重要である。これまでに第四紀火山地域の地温特性については、地熱や温泉関連情報を利用してその推定が多角的に実施されてきた。しかしながら、非火山地域については関連データや資料が散逸し、当該目的のための既往情報の整理が行なわれていなかった。このため、本研究では日本列島をカバーする地熱や温泉情報をコンパイルすべく、非火山地域の地温データの検討を行なった。

ここでは、火山の影響範囲を火山中心より24kmとすると、それ以遠の温泉の泉温と深度の間には、 $y = 0.0163x + 22.454$ （標準偏差約10°C）の関係があることが判明した。この勾配は約16°C/kmに相当し、日本列島の非火山地域における平均的な地温勾配といわれる20°C/km<sup>(17)</sup>よりさらに低い値を示した。この地温勾配は、非火山地域に存在する地熱地域や高温泉を特定して除外したことによる非火山地域の一般的な値として解釈することができる。また標準偏差約10°Cは、地質条件などによる温泉ごとの相異、地温計測の精度、気象による地表温度の変化などに起因する変動量である。処分深度を仮に1,000mとすると、非火山地域の一般的な地温は約39±10°Cとなる。ただし、湯の浜・温海（庄内平野）、常磐湯本・五浦・平潟港・五浦観光（阿武隈）、瀬波・雲母・村松浜・高瀬・湯ノ平・飯豊・赤谷（新潟平野）、和倉（能登）などの各温泉は例外的な高温泉として取り扱われるべきである。また、高温泉の空間的位置と地温勾配の閾値を50および80K/km（50および80°C/kmに相当）とすると、日本列島の地温勾配の異常域は十勝平野、網走、熊石、横手盆地、庄内平野、新潟平野、阿武隈、能登、紀伊半島、道後の10地域であり、これらの地域の地温は非火山地域の一般的な地温とは区別して検討すべきである。

ここで重要な課題となるのが、地層処分における安全評価の不確実性を表す変動量である。本研究では既往のデータベースを利用しておらず、それらの統計処理までの結果である。したがって、上記の標準偏差約10°Cに含まれる変動量についての充分な議論は今後の研究を待たなければならないが、以下に示す観点の解明が重要と考えられる。

- ① 地質条件については、地温が直接熱の伝播によって上昇することは考えにくく、地質・地質構造に支配された地下水流动との係わりにおける変動が重要と考えられる。
- ② 地温計測の精度については、温泉データがどの深度の地温を代表しているのかを明らかにすると共に、地温プロファイルの近似方法について検討する必要がある。
- ③ 気象による地表温度の変化については、少なくとも泉温データが取得された時期の記載が不可欠となる。
- ④ 上記の観点を総合的に解析することによって、地温が示す変動量の不確実性を解釈することが可能となる。

## 6. まとめ

非火山地域の地温特性に関する研究の結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 第四紀火山地域の影響範囲は、火山の熱的影響および火山起源の地下水の影響を考え合わせると、火山中心より約 24 km までとなる。このことから、非火山地域は第四紀火山中心より 24 km 以遠の地域とすべきことが判明した。
- (2) 第四紀火山中心より 24 km 以遠に位置する温泉の泉温と深度の間には、 $y = 0.0163x + 22.454$  (ただし、x : 深度(m)、y : 地温(°C)、標準偏差約 10 °C) の関係が導出された。
- (3) その結果、非火山地域の一般的な地温勾配は約 16 °C/km (ただし約 22°C のバイアスを有する) であり、従来の非火山地域における平均的な地温勾配といわれる 20°C/km より小さい値を示した。
- (4) 非火山地域において、地温勾配の頻度分布などから 50 および 80°C/km を閾値とすると、日本列島の地温勾配異常域は十勝平野、網走、熊石、横手盆地、庄内平野、新潟平野、阿武隈、能登、紀伊半島、道後の 10 地域であることが判明した。
- (5) 地温勾配異常域を別にすると、非火山地域の概略の地温は前出の関係式によって推定できるものの、標準偏差に示す温度には地温の不確実性が考えられ、今後これの科学的根拠を明らかにする必要性が認められた。

## 参考文献

- (1) 阪口圭一、玉生志郎：熱水系が地層処分地に及ぼす影響評価のための基礎研究、月刊地球、26巻、7号、pp.430-436、2004.
- (2) 独立行政法人新エネルギー産業技術総合研究所：地熱有望地域図及び地熱有望地域断面モデル作成、1984.
- (3) 阪口圭一、高橋正明：東北・九州地熱資源図（CD-ROM 版）数値地質図 GT-1、産業技術総合研究所地質調査総合センター、2002.
- (4) 湯原浩三、瀬野錦蔵：温泉学、株式会社地人書館、pp.5-35、1988.
- (5) 核燃料サイクル開発機構：温泉地化学データベースの作成（データ集）、東濃地科学センター、JNC TN7450 2002-003、pp.1-5、2003.
- (6) 独立行政法人産業技術総合研究所：日本温泉・鉱泉分布図及び一覧（第2版）CD-ROM 版、2005.
- (7) 浅森浩一、石丸恒存、岩月輝希：日本列島における火山周辺の酸性地下水分布、サイクル機構技法、No.15、pp.103-111、2002.
- (8) 田中明子、山野誠、矢野雄策、笹田政克：日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース、数値地質図 DGM P-5、産業技術総合研究所 地質調査総合センター、2004.
- (9) 日本火山学会：日本の第四紀火山カタログ、第四紀火山カタログ委員会編、1999.
- (10) 気象庁：火山噴火予知連絡会による活火山の選定及び火山活動度による分類（ランク分け）について、報道発表資料、2003.
- (11) 地質調査総合センター：数値地質図 G-1 100 万分の1 日本地質図 第3版 CD-ROM 第2版、2003.

- (12) 加藤誠、勝井義雄、北川芳男、松井愈：日本の地質 1 北海道地方、pp.292、1990.
- (13) 岩井武彦：青森県津軽平野地域における温泉群の研究、4 sheets、pp. 25p、1979.
- (14) 大木靖衛、徐輝龍、石坂信之、河内一男：信濃川地震帯のジオプレッシャー熱水を伴う活断層と歴史被害地震、温泉科学、48巻、4号、pp.163-181、1999.
- (15) 北陸農政局計画部資源課：地熱水開発調査報告書（第1編広域調査）、pp.34、1987.
- (16) 小泉尚嗣、佐藤努、中林憲一：1946年南海地震の時の愛媛県道後温泉と和歌山県湯峯温泉の変化について（演旨）、歴史地震、20巻、pp.113-113、2005.
- (17) 独立行政法人産業技術総合研究所：坑井の温度データによる日本の地温勾配のコンパイル、1999.
- (18) 地質調査所：日本地熱資源賦存地域分布図、1980.
- (19) 日本原子力研究所：平成15年度放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査報告書(1/2)【確率論的アプローチによる長期的評価手法の調査】、pp.2-15～2-33、2004.
- (20) 2004 日本原子力研究所：平成16年度放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査報告書(1/2)【確率論的アプローチによる長期的評価手法の調査】、pp.2-52～2-72、2005.
- (21) 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 地層処分の技術的信頼性、pp.II-54～II-112、1999.
- (22) 梅田浩司、小島 亮、中司 昇：坑井データによる地下温度構造の推定、サイクル機構技報、No.4、pp.29-36、1999.
- (23) 小松 亮、梅田浩司：日本列島における温泉・熱水変質帯について、サイクル機構技報、No.2、pp.121-128、1999.
- (24) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会：廃棄物安全小委員会報告書 - 高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて - 、pp.1-106、2003.

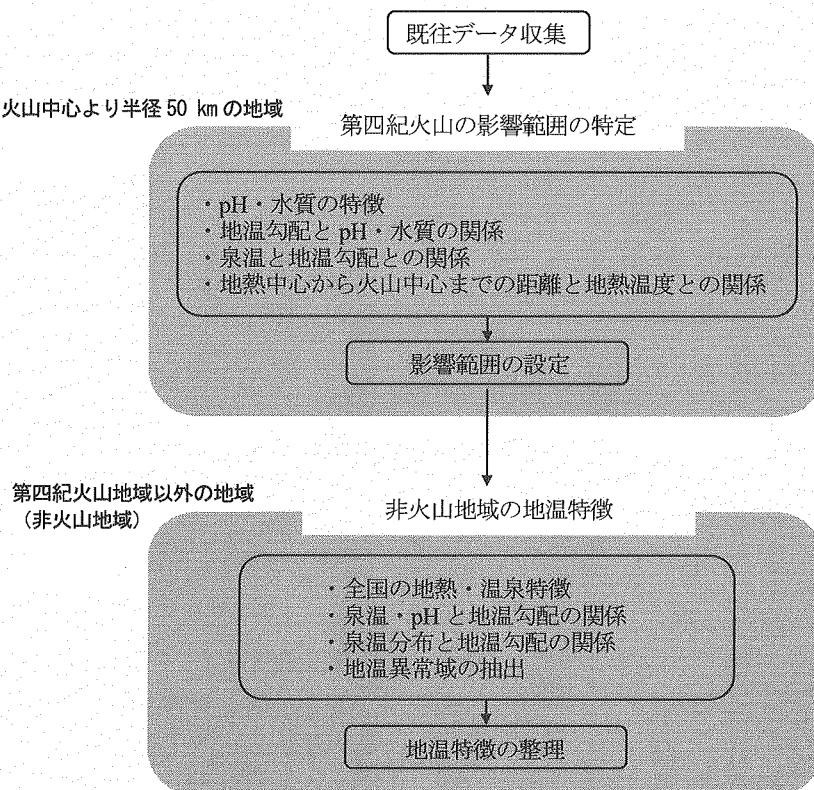


図1 研究の流れ

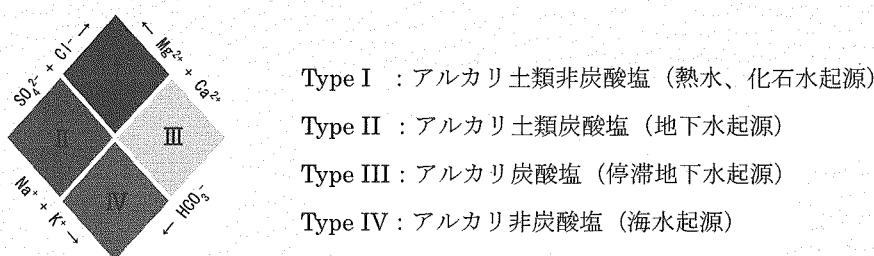


図2 キーダイヤグラムによる地下水起源種別

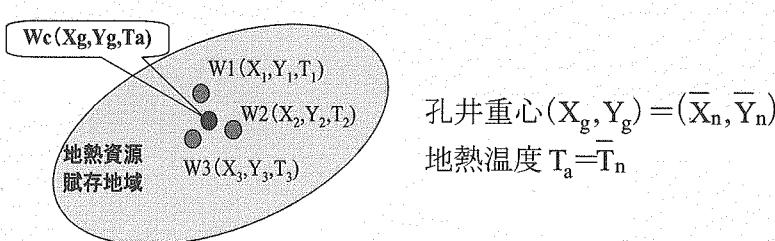


図3 “地熱中心”と“地熱温度”的算出方法

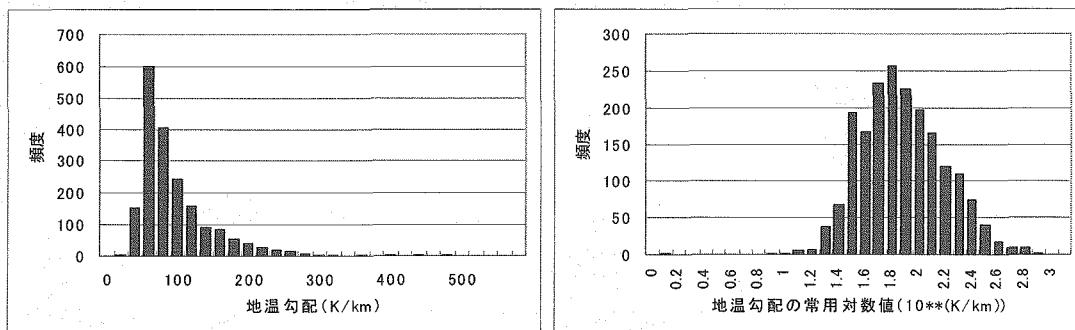


図4 地温勾配の頻度分布図

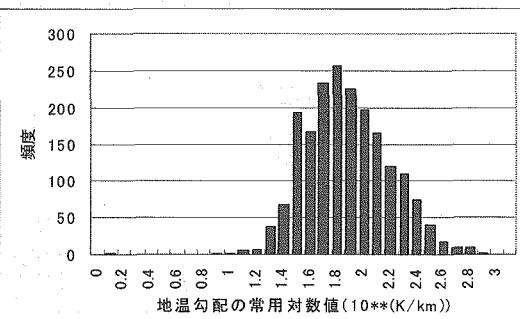
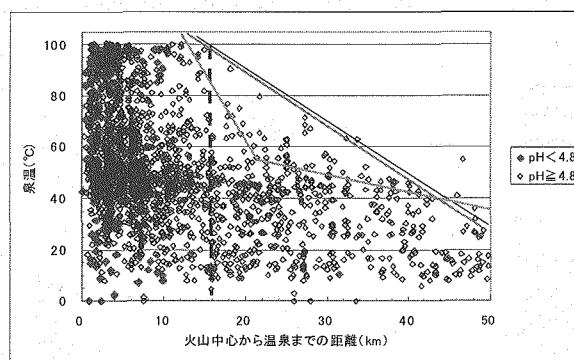
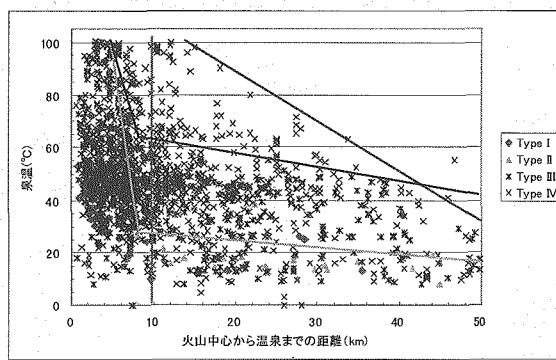


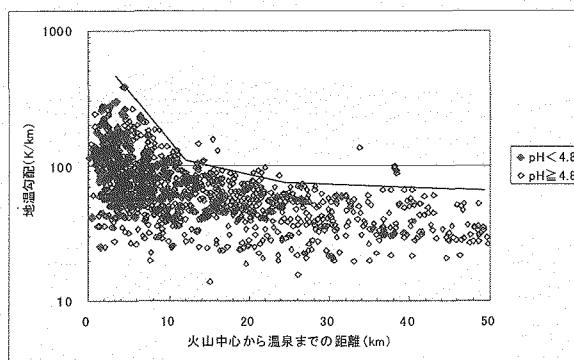
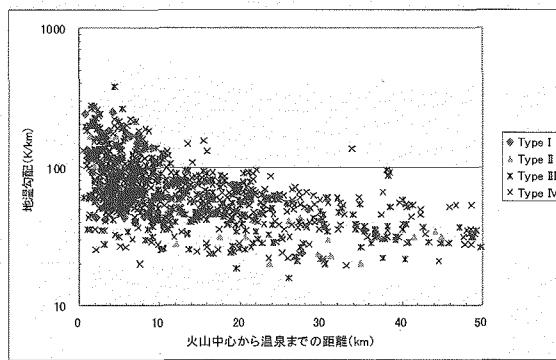
図5 地温勾配の常用対数頻度分布図

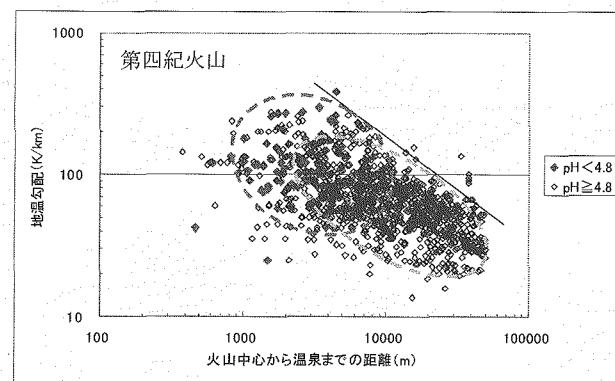


註) 黒色点線 : pH 4.8未満の泉温の分布範囲 (16 km)  
 黒色直線 : pH 4.8以上の泉温の分布上限  
 橙色屈曲線 : pH 4.8以上の泉温の分布上限  
 (完新世火山の場合を投影)  
 緑色直線 : pH 4.8以上の泉温の分布上限  
 (完新世火山の場合を投影)

図6 第四紀火山中心から温泉までの距離と  
泉温との関係 (pH別)

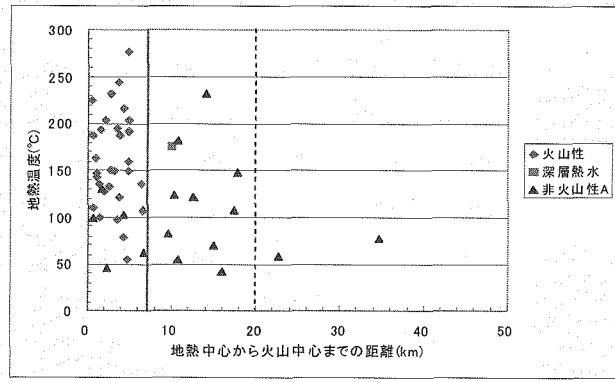
註) 赤色直線 : Type I の泉温の分布範囲 (10 km)  
 緑色屈曲線 : Type II の泉温の分布上限  
 黒色屈曲線 : Type III の泉温の分布上限  
 青色直線 : Type IV の泉温の分布上限

図7 第四紀火山中心から温泉までの距離と  
泉温との関係 (水質による起源別)図8 第四紀火山中心から温泉までの距離と  
地温勾配との関係 (pH別)図9 第四紀火山中心から温泉までの距離と  
地温勾配との関係 (水質による起源別)



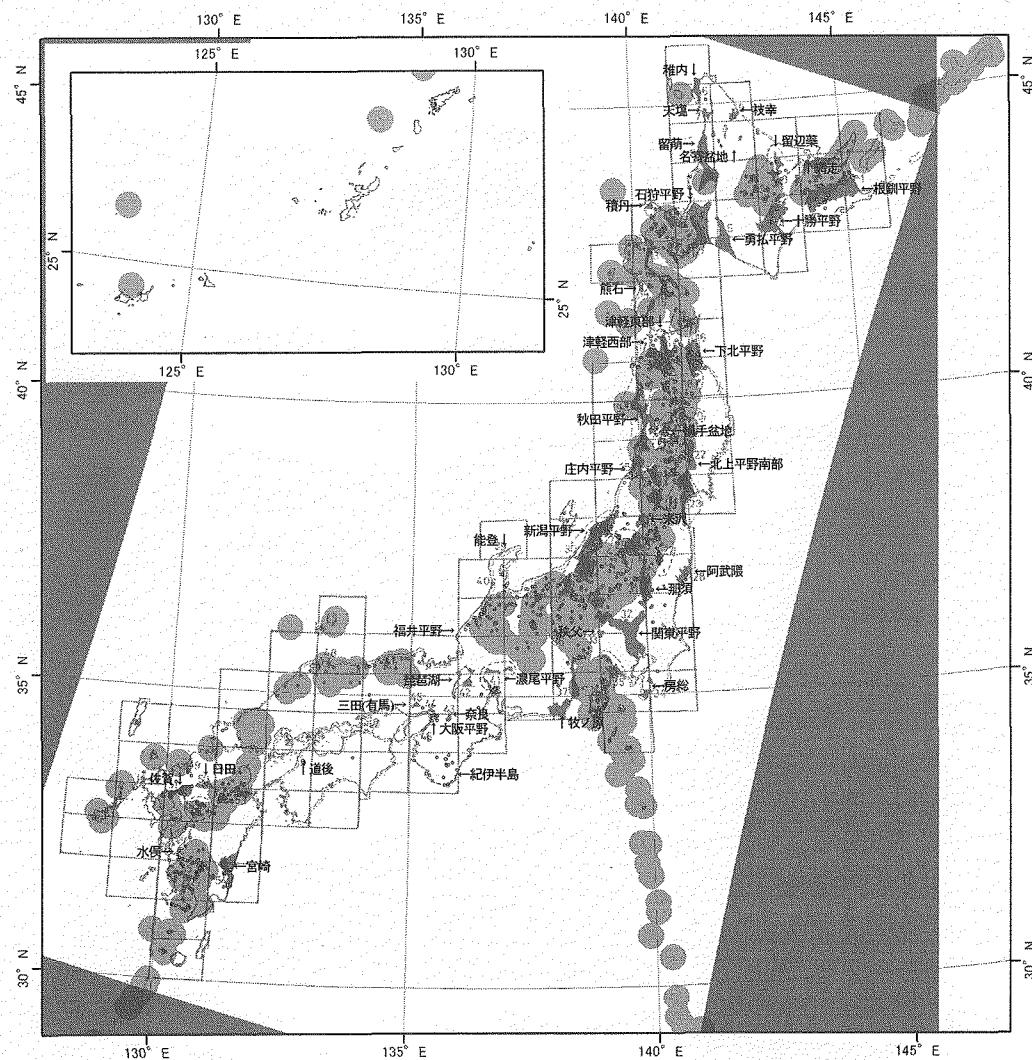
註) 桃色点線 :  $pH < 4.8$  の温泉の主要分布域  
青色点線 :  $pH \geq 4.8$  の温泉の主要分布域

図 10 第四紀火山中心から温泉までの距離と地温勾配との関係 (pH別、両対数)



註) 赤色直線 : 火山性地熱の分布範囲 (7 km)  
黒色点線 : 非火山性地熱の分布範囲 (20 km)

図 11 第四紀火山中心から地熱中心までの距離と地熱温度との関係



火山バッファ:「日本の第四紀火山カタログ」1999による  
温度上限:「日本温泉・旅館分布図及び一覧(第2版)CD-ROM版」2005から  
温度上限42°C以上をプロット

火山バッファ	温度上限(°C)
第四紀火山から24kmの範囲	101 - 124
東北・九州地熱資源図(産総研2002)	91 - 100
深層熱水	81 - 90
地熱有望地域図(NEDO 1984)	71 - 80
深層熱水系地域	61 - 70
	51 - 60
	42 - 50

図 12 既往データによる地熱および温泉の分布

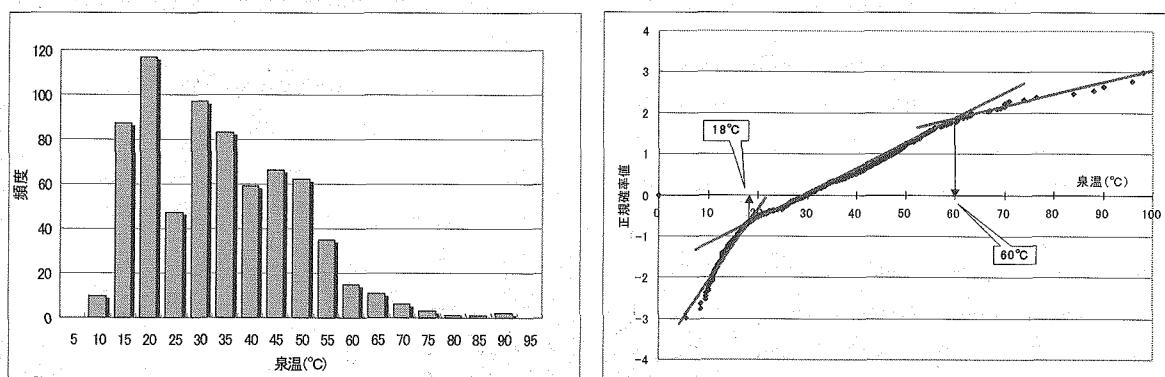
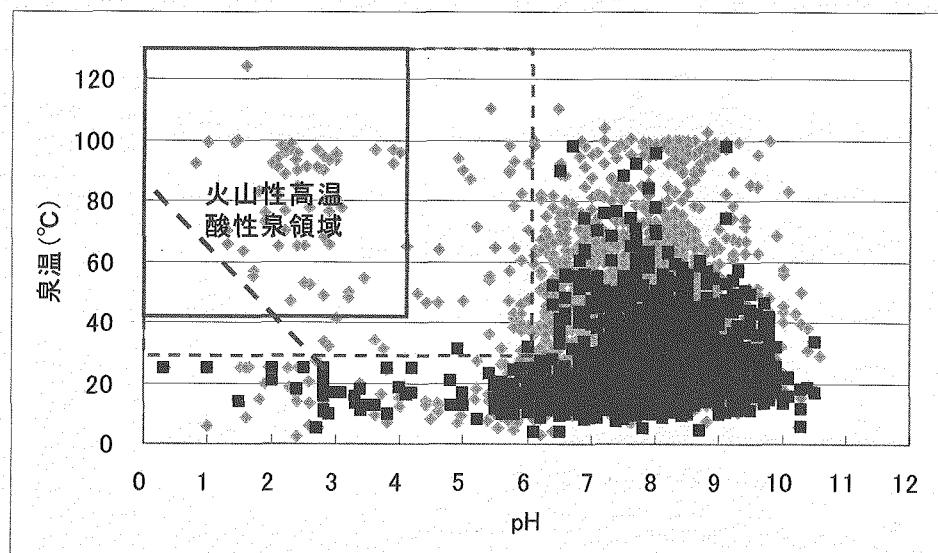


図 13 第四紀火山中心から 24 km 以遠の泉温データの頻度分布と正規確率値分布



註) 橙色：全ての温泉  
 青色：第四紀火山から 24 km 以遠の温泉  
 赤色太枠内：火山性高温酸性泉分布領域 ( $\text{pH} > 4$ かつ $\text{泉温} > 42^\circ\text{C}$ )  
 緑色破線：火山性高温酸性泉分布の下限値

図 14 日本列島全域の温泉と第四紀火山から 24 km 以遠の pH と泉温の関係

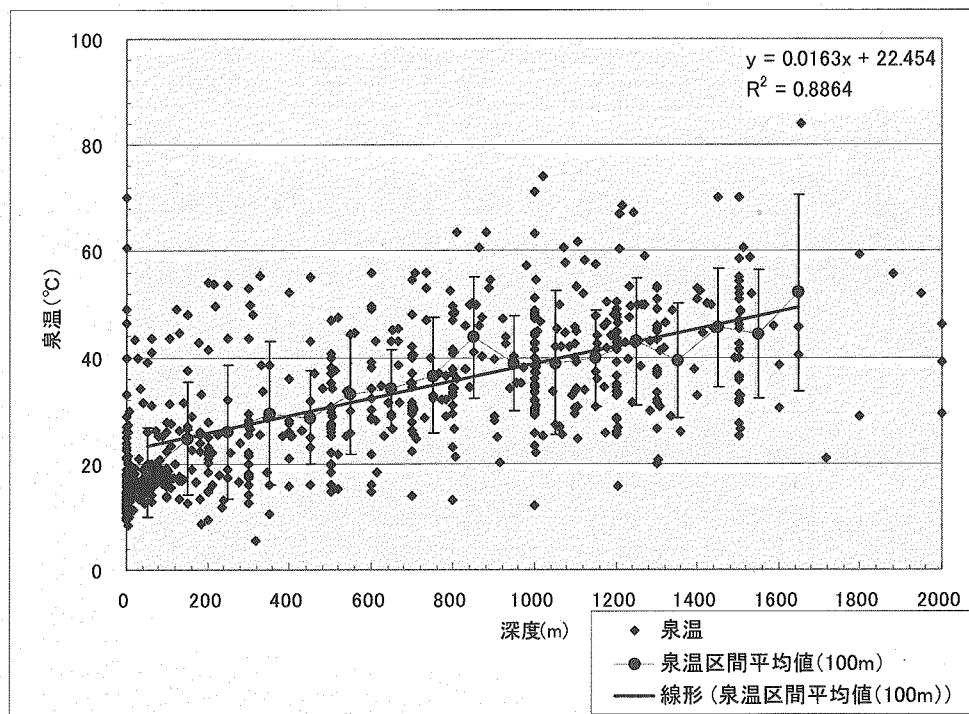


図 15 第四紀火山中心から 24 km 以遠の温泉の深度と泉温の関係

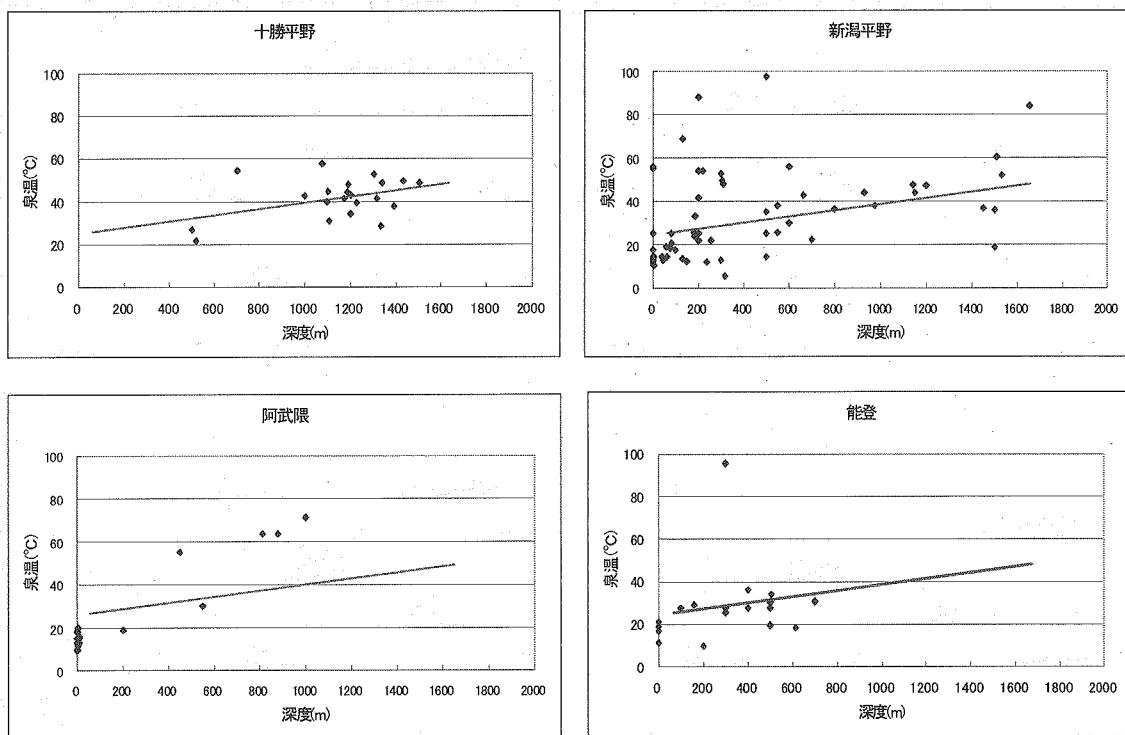


図 16 代表的な地熱地帯の温泉の深度と泉温の関係の例

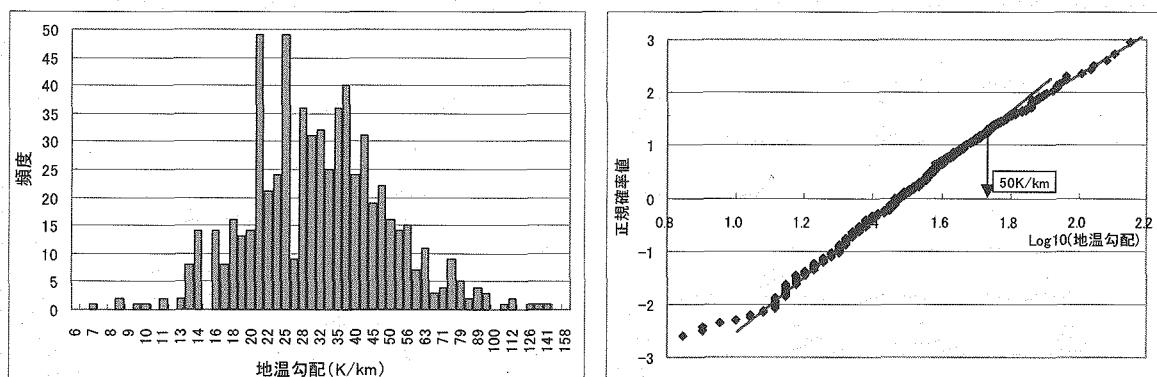


図 17 第四紀火山中心から 24 km 以遠の地温勾配データの頻度分布と正規確率値分布

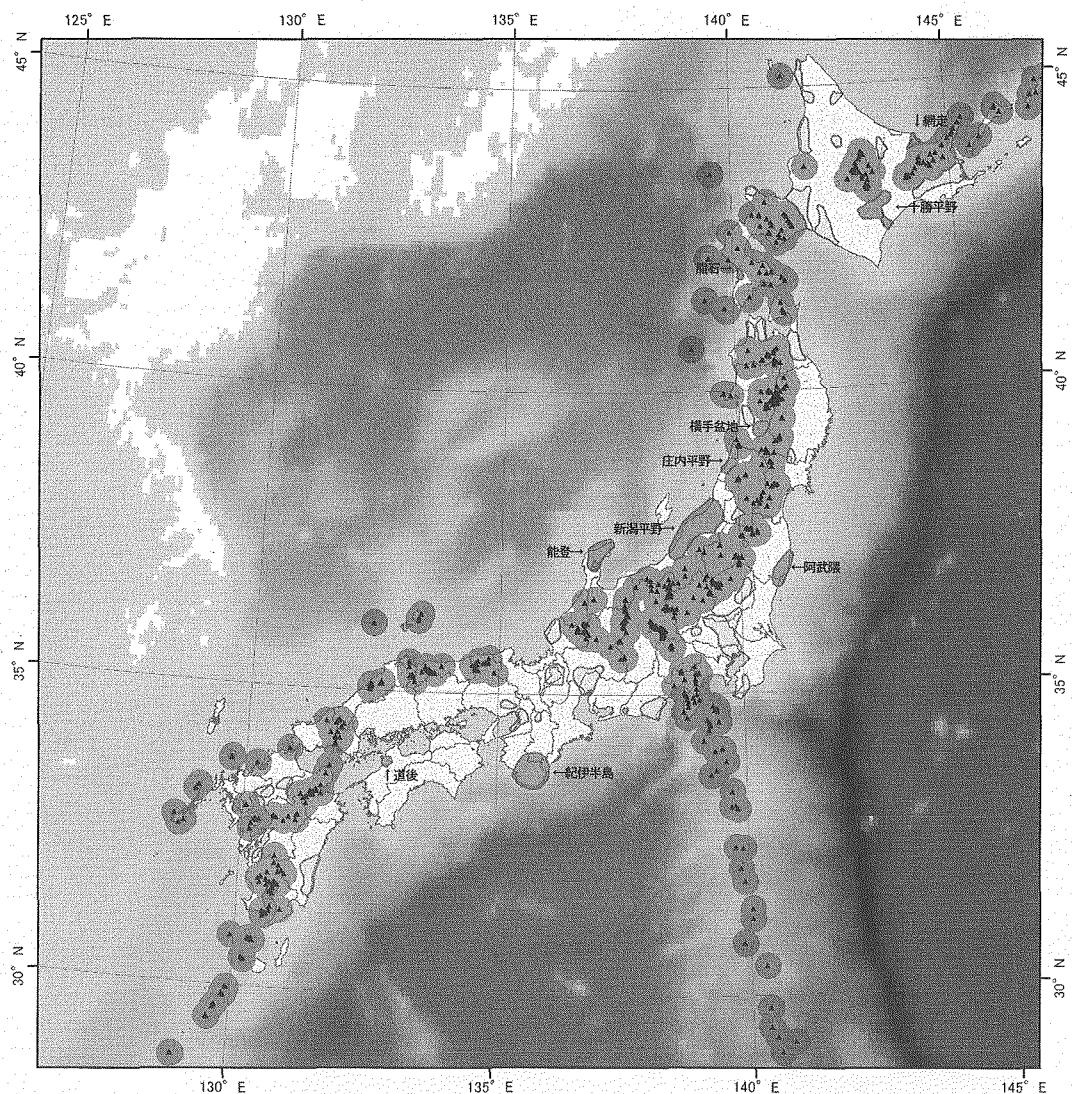


図 18 日本列島の非火山地域における地温異常域の分布

表1 地熱/温泉の分類と定義

分類	第四紀火山に由来するもの	新第三紀中新世以降の火成活動に由来するもの	新第三紀鮮新世以降の若い地層で覆われた平野	その他
地熱	第四紀火山に関連した地熱	第四紀火山に関連しない地熱		
		タイプA (火山フロントより背弧側および前弧側20km以内に位置するもの)	深層熱水賦存型 深層熱水系型 高温可能性型	断層構造 (区分の方法が異なる)
温泉	火山性温泉 (海岸温泉を含む)	第四紀火山に関連しない温泉 (海岸温泉を含む)		
		広域熱伝導卓越型 (グリーンタフ型と同義)	深層熱水型 (ジオプレッシャー型とほぼ同義)	有馬型 第三紀深成岩/半深成岩に関連した型 第三紀以前の花崗岩に関連した型 断層に規制された型 (区分の方法が異なる) 成因不明

表2 地温特性研究のために収集したデータ一覧

種類	データ名	出典	データの種類
温泉分布	温泉地化学データベース <sup>(5)</sup>	核燃料サイクル開発機構, 2003	テーブル
	日本温泉・鉱泉分布図及び一覧 (第2版) CD-ROM版 <sup>(6)</sup>	(独) 産業技術総合研究所、地質調査総合センター, 2005	テーブル
地熱分布	地熱有望地域図及び地熱有望地域断面モデル作成 <sup>(2)</sup>	(独) 新エネルギー産業技術総合研究所, 1984	紙面
	東北・九州地熱資源図 CD-ROM版 <sup>(3)</sup>	(独) 産業技術総合研究所、地質調査総合センター, 2002	ポリゴン、ポイント、テーブル
地温勾配	日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース <sup>(8)</sup>	(独) 産業技術総合研究所、地質調査総合センター, 2004	ポリゴン、テーブルなど
第四紀火山	日本の第四紀火山カタログ <sup>(9)</sup>	日本火山学会, 1999	データベーステーブル
	活火山リスト <sup>(10)</sup>	気象庁, 2003	テーブル
地質図	100万分の1日本地質図 第3版 CD-ROM 第2版 <sup>(11)</sup>	(独) 産業技術総合研究所、地質調査総合センター, 2003	ポリゴンなど

表3 地熱、温泉、地温勾配データの特徴

データの種類	処理内容	処理結果
地熱データ	地熱の定義に合致する地域を抽出。	第四紀火山に関連しない地熱地域として、41 地域を特定した。
温泉データ	泉温と pH および深度の関係を検討。	泉温と深度の関係は、 $y = 0.0163 x + 22.454$ で近似でき、その標準偏差は 10°C 程度である。この近似式から高温側に外れる主な温泉名は以下の通り。 庄内平野：湯の浜、温海 阿武隈：常磐湯本、五浦、平潟港、五浦観光 新潟：瀬波、雲母、村松浜、高瀬、湯ノ平、飯豊、赤谷 能登：和倉
地温勾配データ	地温勾配の境界値を 50 K/km、80 K/km とし、上記 41 地域に適用。	異常域として、以下の 10 地域を抽出。 十勝平野、網走、熊石、横手盆地、庄内平野、新潟平野、阿武隈、能登、紀伊半島、道後

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム每立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の)1	1

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	m · m <sup>-1</sup> <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	m <sup>2</sup> · m <sup>-2</sup> <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力、応力	ニュートン	N	m · kg · s <sup>-2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
工率、放射束	ジユール	J	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup>
電荷、電気量	ワット	W	J/s
電位差(電圧)、起電力	クロン	C	s · A
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	アラド	F	m <sup>2</sup> · kg <sup>-1</sup> · s <sup>4</sup> · A <sup>2</sup>
コンダクタンス	シーメンス	S	V/A
磁束密度	ウエーバー	Wb	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> · A <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリリー	T	V · s
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	Wb/m <sup>2</sup>
光强度	ルーメン	lm	Wb/A
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	ベクレル	Bq	kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-1</sup>
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	m <sup>2</sup> · s <sup>-2</sup>

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号 “1” は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号 sr を単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度 m°C のように SI 接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む SI 組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	m <sup>-1</sup> · kg · s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup>
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg · s <sup>-2</sup>
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> · s <sup>-2</sup>
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg · s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup>
質量熱容量(比熱容量)、質量エンタルピー	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	m <sup>2</sup> · s <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup>
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> · s <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m · K)	m · kg · s <sup>-3</sup> · K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> · kg · s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	m · kg · s <sup>-3</sup> · A <sup>-1</sup>
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> · s · A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> · s · A
誘電率	ファラード每メートル	F/m	m <sup>-3</sup> · kg <sup>-1</sup> · s <sup>4</sup> · A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	m <sup>-1</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · mol <sup>-1</sup>
モルエンタルピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> · mol <sup>-1</sup>
モル熱容量	クーロン每モル每ケルビン	J/(mol · K)	m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> · mol <sup>-1</sup>
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> · s · A
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	m <sup>2</sup> · s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> · m <sup>-2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	m <sup>2</sup> · m <sup>-2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> = kg · s <sup>-3</sup>

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼット	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
ヘルツ	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バルーン	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バーン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイニ	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ボアズ	P	1 P=1 dyn · s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa · s
ストーカス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G=10 <sup>-4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 <sup>-8</sup> Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホル	ph	1 ph=10 <sup>1</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s=10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	IX unit	1 IX unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-4</sup> T
ジヤンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W·m <sup>-2</sup> · Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
標準大気圧	atm	1 Torr=(101 325/760) Pa
力口リーン	cal	1 atm=101 325 Pa
ミクロポン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m