

温泉放熱量分布に基づく熱異常地域の抽出手法の検討

阪口圭一¹

Keiichi Sakaguchi (2004) Consideration on the analytical method for heat anomalies based on distribution of heat discharge by hot springs. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 55(11/12), p.393 - 398, 5 figs.

Abstract: Distribution of heat discharge by hot spring is a valuable feature for evaluating geologic repository site because it reflects both underground temperature and underground hydrologic conditions. Considering preparatory procedure of updating the manner of heat discharge calculation, several points have been noted. The following two points are particularly significant. For the time being naturally discharging hot springs occupy about 30 percent of the total amount of hot spring water in Japan. Therefore (1) we must evaluate natural discharge and pumped hot water separately. Recently developed hot springs, especially those by deep wells, are likely to be suffered from changes in their condition such as decrease in water temperature and/or production rate in a short period after development. Therefore (2) hot spring data should be carefully treated for evaluating heat discharge by them.

Keywords: heat discharge by hot spring, geothermal resources map, water temperature, flow rate, underground hydrologic condition, geothermal anomaly

要 旨

温泉放熱量による熱異常地域抽出と特性把握手法は、温泉の温度と流量の2個の要素を持ち、地下温度とともに地下水理条件をも反映しているため、地層処分地の評価にとって有益な情報をもたらすと考えられる。地質調査所が1980年に出版した「日本温泉放熱量分布図」で用いられた計算法にならい、新しいデータを加えて温泉放熱量計算法をアップデートするために、特に使用データについて定性的な考察を行った。温泉放熱量計算に使用するデータの収集や利用可能性、計算に当たっての留意事項についての定性的な考察によると、様々な形態で公表されている温泉データについては、(1) 自噴泉と動力揚湯泉の識別が必要であり、(2) 温泉（特に大深度掘削で得られた温泉）についての諸データの経時変化の可能性を考慮する必要がある。

1. はじめに

本稿では、原子力発電環境整備機構委託研究「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」のうち、高温地域の地球科学的特性の検討の一部として実施している温泉放熱量分布に基づく熱異常地域の抽出手法の研究（平成15年度実施分）の一部について報告する。

非火山地域における高温地域（熱異常地域）の反映として温泉は最も一般的な地表兆候であり、温泉国日本では過去のデータの蓄積も豊富である。温泉とその熱源、また温泉が湧出する地質条件との関連解明については多くの研究例があるが、1960年代から1970年代

にかけては、中村（1962）、福富（1970）、角（1977a）など日本全国をカバーする視野での温泉研究が相次いだ。その中で、角の一連の研究（角、1977a, b; 1980a）、及びそれらの総括と言える「日本温泉放熱量分布図」（角、1980b）（以下、単に温泉放熱量分布図と言う場合にはこれを指す）は、日本全国を対象としており、かつ使用されたデータが公開された計算例として価値の高いものである。

温泉放熱量分布には温泉の泉温と湧出量の2個のパラメータが関係するので、高温泉に着目した温度異常の抽出だけでなく、流体移動も加味した高温（高熱流量）異常域の抽出やその特性（地下の水理学的構造など）を把握するために有用なものになることが期待される。本研究テーマにおいては、温泉放熱量分布を用いることの有効性・課題の検討、モデル地域での温泉放熱量分布図の試作、等を実施する。以下に、平成15年度に実施した、温泉放熱量計算法や利用可能なデータの収集に関わる定性的な検討結果を報告する。

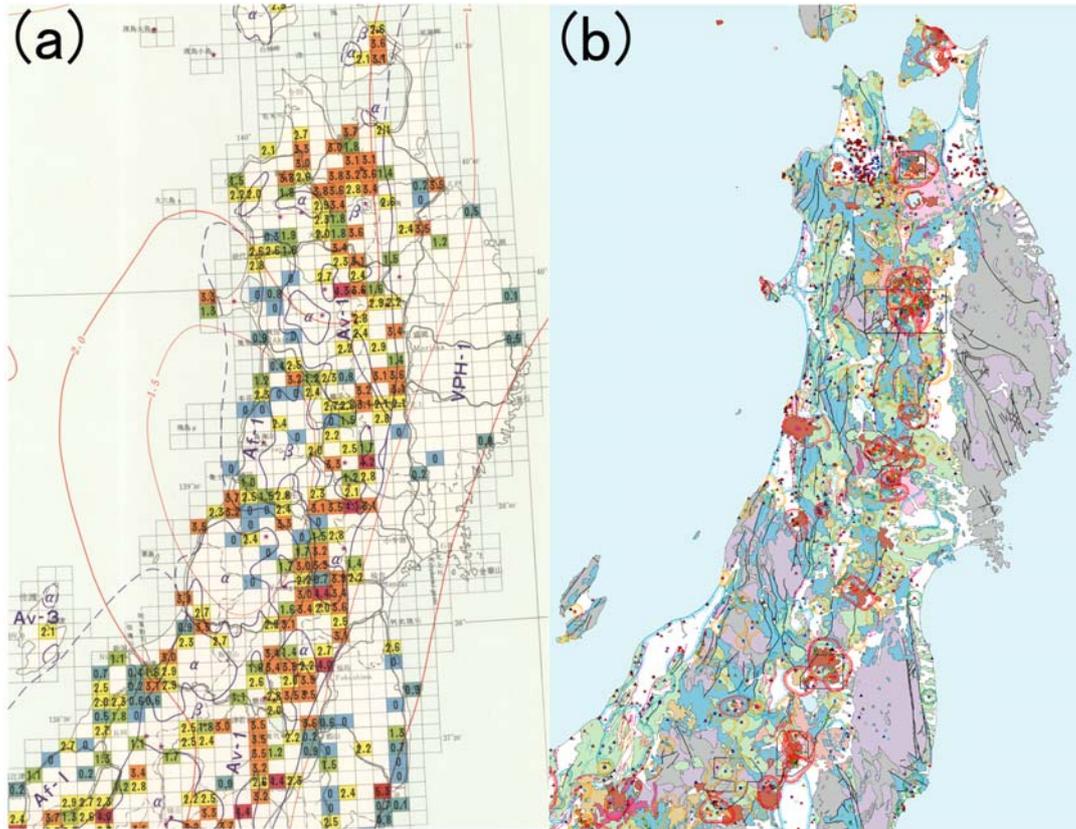
2. 温泉放熱量分布計算についての検討

2.1 日本温泉放熱量分布図における計算法

本節では、まず角（1977a, 1980b）に基づいて温泉放熱量分布図で用いられたデータと計算法について記述し、用いられているデータの簡単な性格付けについて述べる。

温泉放熱量分布図（角、1980b）は、全国を2万5千分の1地形図相当のメッシュ（東西7.5分間隔、南北5分間隔）に区切り、各メッシュ内の温泉における放熱

¹地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, GSJ)



第1図 (a)温泉放熱量分布図(角, 1980b)と(b)地熱資源図(阪口・高橋, 2002)の東北地方部分の比較。

Fig. 1 Comparison of “Distribution map of heat discharge by hot spring” (a:Sumi, 1980b) and “Geothermal resources map” (b: Sakaguchi and Takahashi, 2002).

量を7段階の色階級に分けて図示したもので、地質調査所の200万分の1地質編集図シリーズの1つとして発行された。温泉放熱量分布図のデータソースは地質調査所より発行された「日本温泉・鉱泉一覧」(角, 1975)で、同一覧に掲載された2,237個の温泉のうち、泉温と湧出量のデータが明らかな1,631個の温泉データが用いられている。この中には地熱発電用の蒸気や未利用の天然噴気は計算には含まれていない。2万5千分の1地形図相当のメッシュごとの温泉による放熱量は次の式を用いて計算された。

$$Q = 8166 \sum_{i=1}^N [Vi(Ti - 54.6 + 1.07\theta_i + 0.0038Hi) / \cos\theta_i] \quad (\text{第1式})$$

ただし、Q: 温泉放熱量 ($\mu \text{ Wm}^{-2}$)、N: メッシュに含まれる温泉数、Vi: 温泉湧出量 ($\text{m}^3\text{sec}^{-1}$)、Ti: 温泉水の水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 θ_i : 温泉湧出地の緯度 (degree)、Hi: 温泉湧出地の海拔高度 (m)である。放熱量は温泉水の水温と温泉湧出地の平均気温の差に基づくものなので、緯度地及び標高値を用いて温泉湧出地の平均気温を産出する手法を用いている。

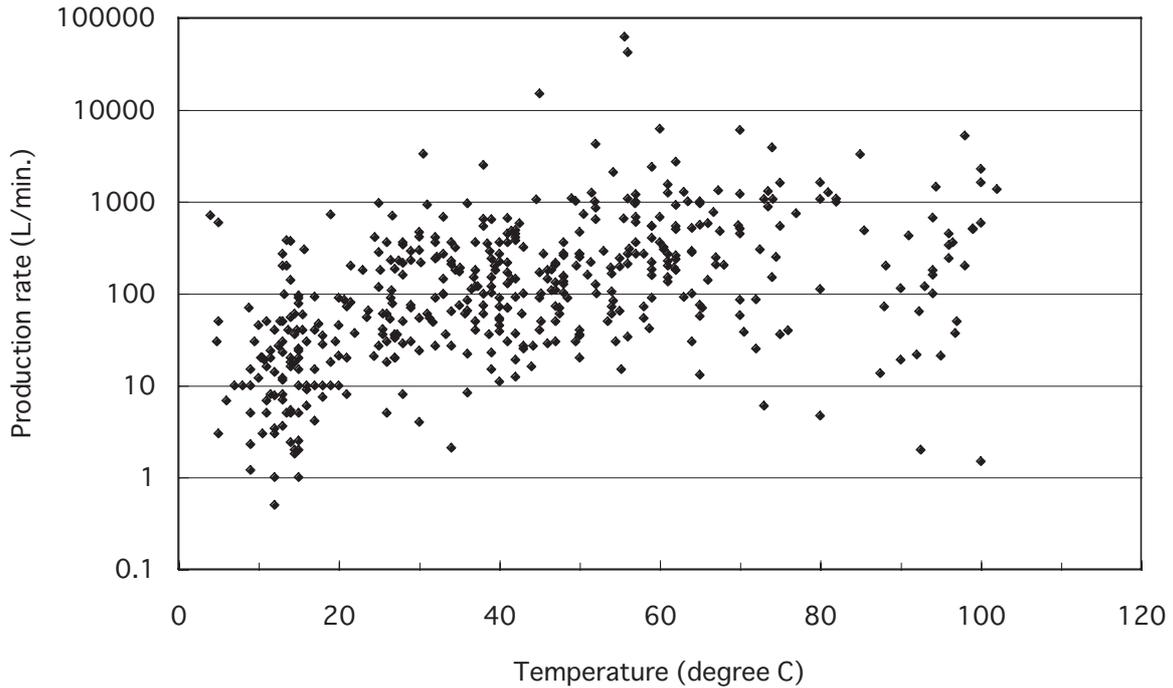
温泉放熱量分布図では、結果として1,029個の地域メッシュの温泉放熱量が計算され、7階級の放熱量に

区分されて表示された(第1図(a))。角(1977a, b, 1980a)はこれらの放熱量分布と地質構造区分との関連について考察を加えているが、本説ではその議論については立ち入らないこととする。

温泉放熱量分布図に用いられたデータの特徴の抽出の例として、各温泉の泉温と湧出量との関係のプロットを第2図に示す。泉温の範囲は 10°C から 100°C であるのに対して、湧出量は $10 \sim 10,000 \text{ L/分}$ を中心として、 $0.1 \sim 100,000 \text{ L/分}$ の6桁に及ぶ広い範囲を持つことが分かる。第2図において、プロットされたデータはグラフの横方向に伸びた分布をしている。グラフの縦軸が対数軸であることから、同じ放熱量階級にある温泉群の中でも泉温には幅があることが分かる。すなわち、同程度の温泉放熱量を持つ地域でも、泉温が高く湧出量が小さい地域と、泉温が低く湧出量が多い地域が実際にあることを示している。放射性廃棄物処理を考える場合には、一般に熱異常地域として考えられる高温地域以外にも、地下流体の移動量が大きな高湧出量地域を考慮することが重要であろう。

2.2 新しい温泉データ利用に関する検討

1970年代末以降は、地熱資源の探査・開発プロジェ



第2図 温泉放熱量分布図(角, 1980b)に用いられた温泉データのうち東北6県と新潟県の温泉の泉温と湧出量との関係。個別の温泉データは角(1977a)による。

Fig. 2 Relation between water temperature and production rate of the hot springs used in Sumi(1980b).

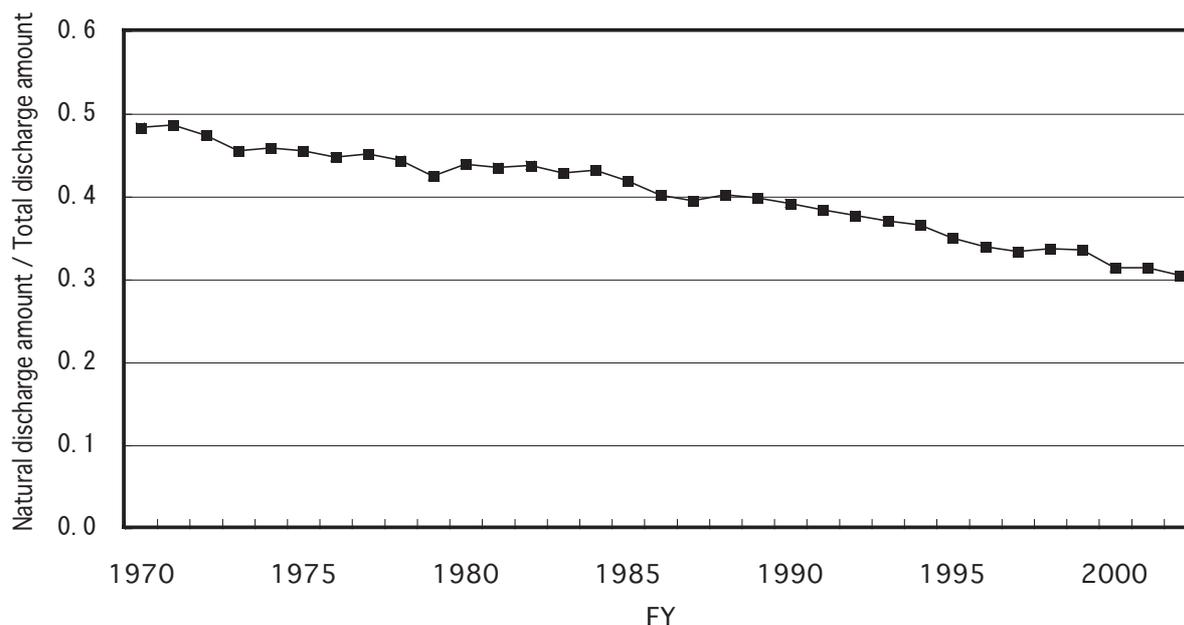
クトにおける重要なデータとして温泉データの収集・解析が実施され、データベース構築も始まった。地質調査所において実施された地熱研究の成果として、温泉水分析データ集等も発行された(比留川ほか, 1977, 1981, 1988)。また、温泉を含む地熱資源とそれが位置する地域の地質や地質構造との関係を読み取ることを目的とした「50万分の1地熱資源図」シリーズの編集・発行が開始された。1993年から2001年の期間に、北海道南西部から関東北部までの東北日本弧をカバーする「札幌」(玉生ほか, 2001), 「青森」(高橋ほか, 2001), 「秋田」(高橋ほか, 1996), 「新潟」(高橋ほか, 1993)各図幅、及び九州全域を納めた「九州」(阪口ほか, 2000)の5図幅が出版された。また、以上の5図幅のデータをGISデータとして編集して収録したCD-ROM版の地熱資源図(阪口・高橋, 2002)が出版された。

地熱資源図シリーズに収録されている温泉データは1990年代のものまでを含み、1970年代前半までのデータに基づく温泉放熱量分布図とは20年以上のデータ収集時期の差がある。第1図は、温泉放熱量分布図と地熱資源図の東北地方の部分と比較したものである。広範囲を示したためにやや見づらくなっているが、地熱資源図上の細かいポイントマークが温泉を示している。温泉ポイントマークは、マークの外形で温泉を、塗色で化学成分の特徴を示しているのので、この図のスケールでは個々の温泉の泉温は読み取れない。地熱資源図

上でハッチの緑で示された領域は「地熱資源賦存地域」として抽出された地域で、42℃以上の温泉が分布する地域である。

温泉放熱量分布図(a)で放熱量の大きい(暖色系で示された)地域の多くは第四紀後期の火山の周辺に分布しており、地熱資源図(b)での温泉や地熱資源賦存地域の密集地域にほぼ対応している。すなわち、温泉国日本においては、大まかには最近20年間に新たに発見された有望温泉(熱異常地域)は多くないと言える。しかし、詳細に見ると、例えば青森県上北地域や津軽地域など、地熱資源図において新たな地熱兆候地域が記載されている場合もある。

これらの新しい温泉データを用いる場合には幾つか考慮すべきことがある。第一は、ポンプによる人工揚湯の識別とその評価である。角(1977a)も“その当時の”人工揚湯温泉の増加に触れ、“今後の”温泉放熱量計算における自然放熱量と人工放熱量との区別の必要性について言及している。環境庁が作成した温泉利用状況経年変化表(平成15年3月末現在版)(環境省自然保護課のホームページに掲載されている)では1970年度以降の湧出量が自噴と動力に分けて記載されているが、既に1970年度において動力揚湯量が自噴量を上回っている(第3図)。湧出量自噴率(自噴湧出量/総湧出量)は1970年度に0.48であったが、年々減少を続け、2002年度には0.31になっている。自噴温泉が全体



第3図 温泉の自噴湧出量割合の経年変化。環境省資料に基づく。

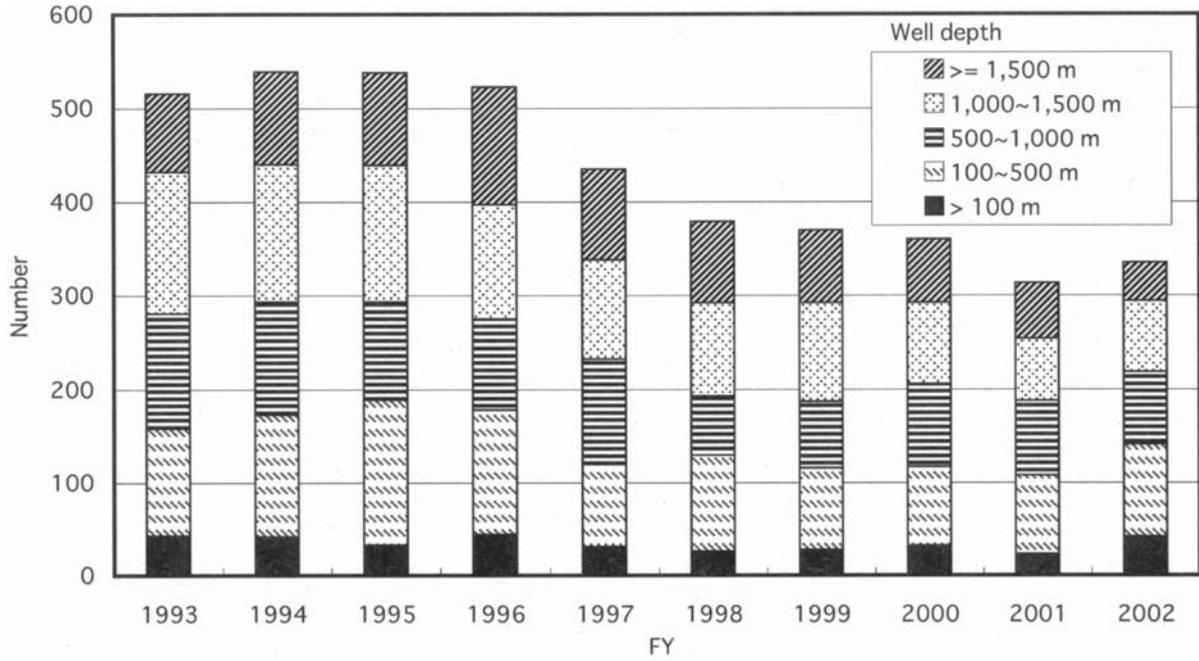
Fig. 3 Temporal change of natural discharge rate of hot springs, based on the data provided by the Ministry of Environment.

の3分の1以下の状態で温泉放熱量を計算することの意味は、慎重に吟味されなければいけない。十分な坑井情報や経時変化データが得られるなど条件のそろった比較的狭い地域では、自然湧出量と人工湧出量を分けて計算することによって地下水利構造やその経時変化の解明に資することができる可能性もあり、検討を進めていく予定である。温泉は、日本国内において最も広範囲に分布して比較的条件のそろった情報を提供する地熱活動把握のための指標であるので、活用法を探っていく必要がある。

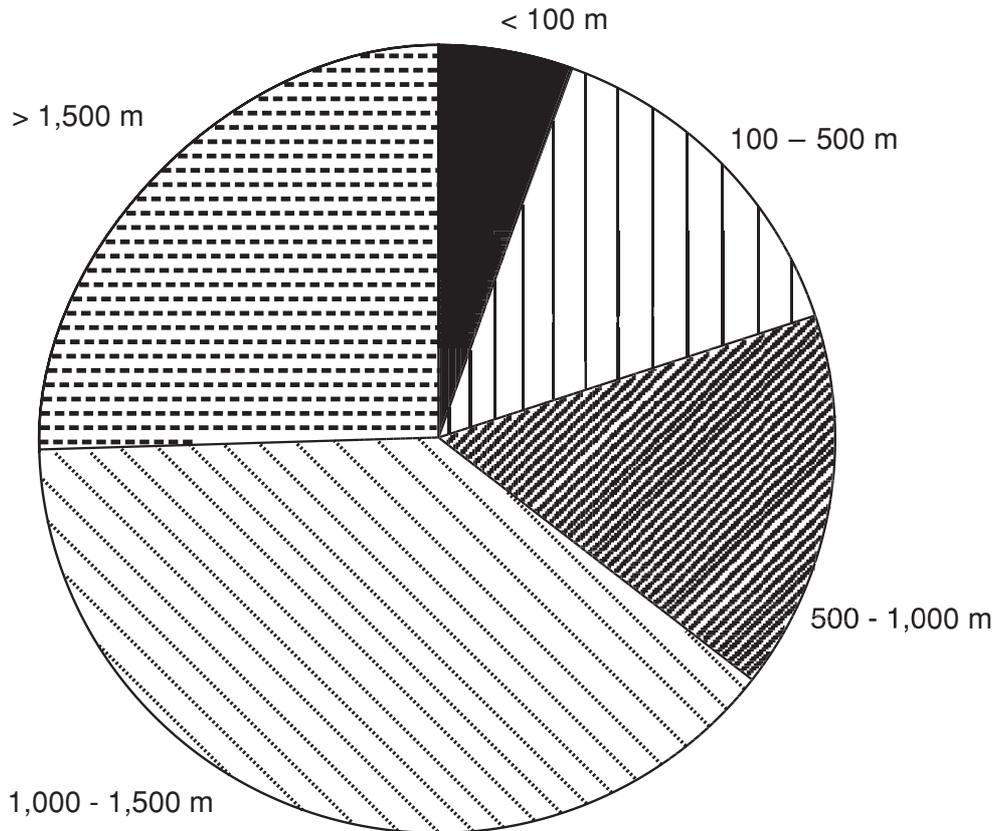
そのほか、温泉井の掘削深度の増大も考慮すべき事項である。これについてはまとめて公表された資料が無いが、近年では掘削深度1,000～1,500 mの温泉ボーリングはごく普通に行われている。環境庁がまとめたデータ（第4回温泉の保護と利用に関する懇談会の資料：環境省自然保護課のホームページに掲載されている）によると、最近10年間では新規掘削温泉井のうちの30～50%が1,000 m以上の掘削深度となっている（第4図）。地殻の平均的な増温率は100 m当たり3℃と言われているので、平均的な地温勾配環境下にある場合でも、地下1,000 m以深では温泉法に定められた温泉に該当する流体が得られる可能性が大きい。そのような温泉を温泉放熱量計算の対象に入れることの是非、組み入れる場合の取り扱い方、等の検討が必要である。

地熱資源図の編集時期は前述のように1990年代であるが、その時点において、古い分析値や湧出量データしか得られていない温泉も少なからずあり、温泉放熱

量分布図と同一のデータを用いたものもある。その結果、地熱資源図の温泉データは、温泉放熱量分布図に比較して、より時間幅が大きいデータセットとなっている可能性が大きい。放熱量分布図としては、なるべく同一時期のデータを使ったスナップショットとして示すことが望ましいのは言うまでもないことであるが、実際にどのくらいの時間幅までが許容され得るかについての検討が必要である。また、大深度の人工開発温泉が増えつつある現状では、温泉の開発後短時間での変動が大きい恐れがあることが一部で指摘されている。第5図は、平成5年度に新規掘削された516の温泉ボーリングのうち、坑井掘削後10年間のうちに源泉状況の変化を示した90坑井の深度別内訳を示したものである（第4回温泉の保護と利用に関する懇談会の資料：環境省自然保護課のホームページに掲載されている）。源泉状況の変化とは、(a) 自噴から動力揚湯への変更、(b) 揚湯量変化のための動力変更、(c) 源泉廃止、を合わせたものである。変化のあった90坑井での内訳は、(a) 36件、(b) 4件、(c) 50件となっており、源泉廃止に至ったケースが過半数を占めている。坑井の深度別では1,000 m以深の坑井が64%を占めている。地熱資源図などの編集には一般に公開された文献資料から温泉データ（泉温、湧出量、化学成分等）を収集しているが、データを採取した温泉の経時変化にまで言及している文献は多くない。このような短期間で変化してしまうデータをふるい分けることが可能であるかの検討も必要である。



第4図 近年の新規掘削温泉井の深度内訳。 環境省資料に基づく。
 Fig. 4 Depths of recent hot spring wells, based on the data provided by the Ministry of Environment.



第5図 平成5年度の掘削された温泉井のうち10年以内に源泉変化のあった坑井の深度内訳。 環境省資料に基づく。
 Fig. 5 Wells drilled in FY1993 being suffered from serious condition change within 10 years (grouped by depth), based on the data provided by the Ministry of Environment.

3. まとめ

温泉放熱量分布計算による熱異常地域抽出と特性把握手法は、温泉の温度と流量の2個の要素を持ち、地下温度とともに地下水理条件をも反映しているので、地層処分の評価にとって有益な情報をもたらすと考えられる。温泉放熱量計算に使用するデータの収集や利用可能性、計算に当たっての留意事項についての定性的な考察によると、様々な形態で公表されている温泉データについては、(1) 自噴泉と動力揚湯泉の識別が必要であり、(2) 温泉（特に大深度掘削で得られた温泉）についての諸データの経時変化の可能性を考慮する必要がある。

謝辞：本研究の機会を与えていただいた原子力発電環境整備機構、及び原稿の改善のための有益な意見を頂いた査読者の野田徹郎博士に感謝いたします。

文 献

- 福富孝治 (1970) 本邦の温泉分布からみた温泉の熱の起源。北大地物研報, no. 23, 15-28.
- 比留川貴・安藤直行・角 清愛 (1977) 日本の主要地熱地域の熱水の化学組成。地調報告, no.257, 934p.
- 比留川貴・安藤直行・角 清愛 (1981) 日本の主要地熱地域の熱水の化学組成, その2。地調報告, no.262, 403p.
- 比留川貴・高橋正明・茂野 博 (1988) 日本の主要地熱地域の熱水に適用した地球化学温度計。地調報告, no.267, 754p.
- 中村久由 (1962) 本邦諸温泉の地質学的研究。地調報告, no.192, 126p.
- 阪口圭一・高橋正明 (2002) 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。
- 阪口圭一・野田徹郎・高橋正明・駒澤正夫 (2000) 50万分の1九州地熱資源図及び同説明書。特殊地質図 (31-3), 地質調査所, 88p.
- 角 清愛 (1975) 日本温泉・鉱泉一覧。地質調査所,

134p.

- 角 清愛 (1977a) 日本における温泉放熱量分布と地質構造区との関係。地調月報, **28**, 277-325.
- 角 清愛 (1977b) グリントフ地域における基盤岩分布と温泉放熱量分布との関係—日本における温泉放熱量分布と地質構造区との関係—第2報—。地調月報, **28**, 589-592.
- 角 清愛 (1980a) 日本の温泉放熱量と第四紀火山分布との関係—日本における温泉放熱量分布と地質構造区との関係—第3報—。地調月報, **31**, 255-266.
- 角 清愛 (1980b) 日本温泉放熱量分布図。1:2,000,000地質編集図21, 地質調査所。
- 高橋正明・山口 靖・野田徹郎・駒澤正夫・村田泰章・玉生志郎 (1993) 50万分の1新潟地熱資源図及び同説明書。特殊地質図 (31-1), 地質調査所, 116p.
- 高橋正明・駒澤正夫・村田泰章・玉生志郎 (1996) 50万分の1秋田地熱資源図及び同説明書。特殊地質図 (31-2), 地質調査所, 162p.
- 高橋正明・玉生志郎・駒澤正夫 (2001) 50万分の1青森地熱資源図及び同説明書。特殊地質図 (31-5), 地質調査所, 126p.
- 玉生志郎・松波武雄・金原啓司・川村政和・駒澤正夫・高橋正明・阪口圭一 (2001) 50万分の1札幌地熱資源図及び同説明書。特殊地質図 (31-4), 地質調査所, 65p.

参考ホームページ

- 環境省自然環境局ホームページ
<http://www.env.go.jp/nature/>
 本文で引用した、下記資料へのリンクが掲載されている。
- ・温泉の保護と利用に関する懇談会
 - ・同懇談会中間報告
 (http://www.env.go.jp/nature/onaen/chukan/)
 - ・温泉利用状況
 - ・温泉利用状況経年変化表

(受付：2004年11月12日；受理：2004年12月16日)