

神奈川県における大深度の温泉取水層の透水性

板寺一洋*・菊川城司*・代田 寧*

Specific Capacity of Deep Hot Spring Aquifer in Kanagawa Prefecture

by

Kazuhiro ITADERA*, Joji KIKUGAWA* and Yasushi DAITA*

1. はじめに

神奈川県における、深度 1000m 以上のいわゆる大深度温泉の開発は、1990 年代以降盛んに行われるようになった。特に 2000 年以降は、県の中央部から東部の地域を中心に開発が進められてきた（板寺ほか、2010）。神奈川県による温泉掘削・動力の許可の経緯等をとりまとめたところ、県内の大深度の源泉数は、2012 年 9 月現在で 80 に及んでいる。

神奈川県は、温泉源保護のために温泉保護対策要綱を定め、温泉の温度や水位が低下するいわゆる枯渇化の傾向や、源泉相互の影響の度合い、源泉密度などの基準により、温泉特別保護地域、温泉保護地域、温泉準保護地域を指定し、新規源泉の開発や揚湯量の規制を行っている。これに対して、大深度の源泉が主に掘削されるのは、要綱による規制対象ではない一般地域である。そのため、かねてより、大深度の温泉源を保護するための「科学的根拠に基づいた」ルールづくりの必要性が指摘されてきた。しかしながら、大深度温泉の開発そのものが、近年になって進んだこともあり、温泉水の生成機構や、温泉水を貯留する地層に関する知見そのものが不足している状況にある。環境省が 2009（平成 21）年にまとめた「温泉資源の保護に関するガイドライン」においても、「課題の解決に向け、様々なデータの収集や法的な議論を進める必要があると認識していることから、都道府県においても、こうした項目を参考にしつつ、これまで以上に精力的なデータ収集等が行われること」が望まれる課題の一つとして大深度掘削泉が挙げられている。

神奈川県内の大深度の源泉の一部については、小田原（2008）や小沢ら（1999）、小沢・江藤（2003）などが、孔井の掘削時に得られた地質試料の観察等にもとづき、温泉帯水層の地質学的な記載を行っている。また、菊川ほか（2007）は、掘削時の孔底温度をもとに県内の地温勾配についてまとめている。さらに、板寺ほか（2010）

は主要成分組成や酸素水素同位体比などにもとづき、大深度温泉水の起源について検討している。

このように、1990 年代以降、大深度の源泉がその数を増してきた中で、神奈川県における大深度温泉に関するデータの集積が進んできた。本稿では、そうしたデータの中から、温泉帯水層の水文学的な特性や、長期間の動向に関するデータを整理し、神奈川県内の大深度温泉帯水層の透水性等について検討した結果について報告する。

2. 使用したデータ

動力装置の許可処分において、温泉源の保護を目的とした揚湯量の制限を課すにあたっては、段階揚湯試験を実施し、その結果に基づく限界揚湯量を基準とする手法が広く行われている（環境省、2010）。神奈川県でも、主に新規の動力許可申請時に、添付資料として段階および連続揚湯試験のデータが提出される（板寺ほか、2010）。

揚湯試験の目的には、こうした井戸の能力を測るだけでなく、透水量係数や貯留係数など温泉帯水層の透水性に関する性質を把握することもある。そこで、温泉動力装置許可申請時に添付された段階揚湯試験結果を整理し、各源泉の温泉帯水層の透水性について検討した。

また、各地域の管轄保健福祉事務所および政令市の保健所によって、県内の個々の源泉を対象とした温泉実態調査（以下、実態調査）が実施されている。この実態調査により、1 から数年に一度の頻度で、源泉における温度とゆう出量を実測され、データが蓄積されている。最も古いデータは 1913 年のものであり、温泉資源の動向を知る上で、非常に重要なモニタリング調査である。そこで、実態調査のデータをもとに、県内の大深度温泉の温度、ゆう出量の推移についても検討した。

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 44 巻, 47-53, 2012

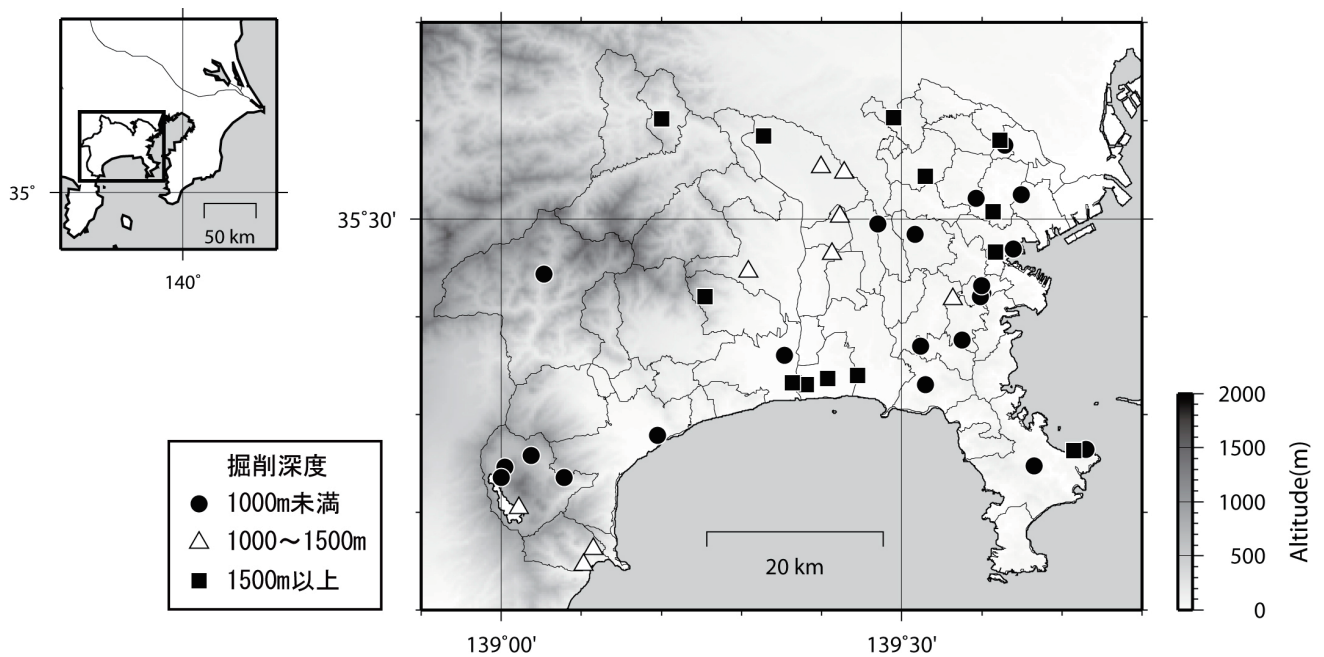


図1 段階揚湯試験の結果を解析した源泉の位置（プロットの形と色は、源泉の掘削深度の別を示す）。

3. 段階揚湯試験の結果からみた温泉帯水層の透水性

ここで検討対象としたのは、平成12年度から23年度までの間に実施された41源泉についての段階揚湯試験結果である。検討対象となった源泉の位置を図1に示した。図1では、源泉の深度の別をプロットの形と色により区分して示している。比較対象のために1000m未満のものも検討対象とした。掘削深度の内訳は図2に示す通りであり、1000m未満のものが18源泉、1000m以上が23源泉、掘削深度の最小は70m、最大は2000mであった。

図3は、横軸に揚湯量、縦軸に静水位に対する水位低下量をとった同一の S_w - Q 図上に、検討対象とした全ての段階揚湯試験結果を示した図であり、プロットの凡例は図1と同じである。図3に示した破線は比湧出量を破線で示しており、ばらつきはあるものの、井戸深度が大きくなるほど、比湧出量が小さくなる傾向が認められた。比湧出量は単位の水位低下に対する揚湯量であり、その値が小さいほど、水位低下量に対する揚湯量が小さいこと、言い換えれば、同じ揚湯量であっても、大きな水位低下を生じることを示している。さらに、井戸深度が大きいくほど、揚湯量そのものも小さくなる傾向も認められた。

比湧出量は、井戸の揚湯量を水位低下量で除したものであり、その次元は透水量係数と同じL2T-1である。比湧出量は容易に算定することができることに加えて、透水量係数と相関があることが知られている。このため、比湧出量を地層の透水性の目安としたり、比湧出量から

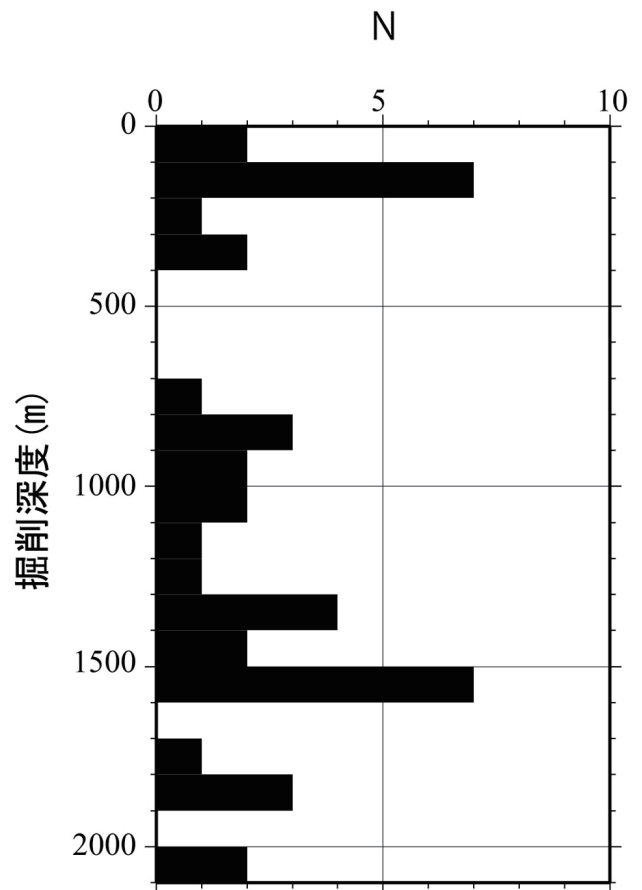


図2 段階揚湯試験の結果を解析した源泉の掘削深度の内訳。

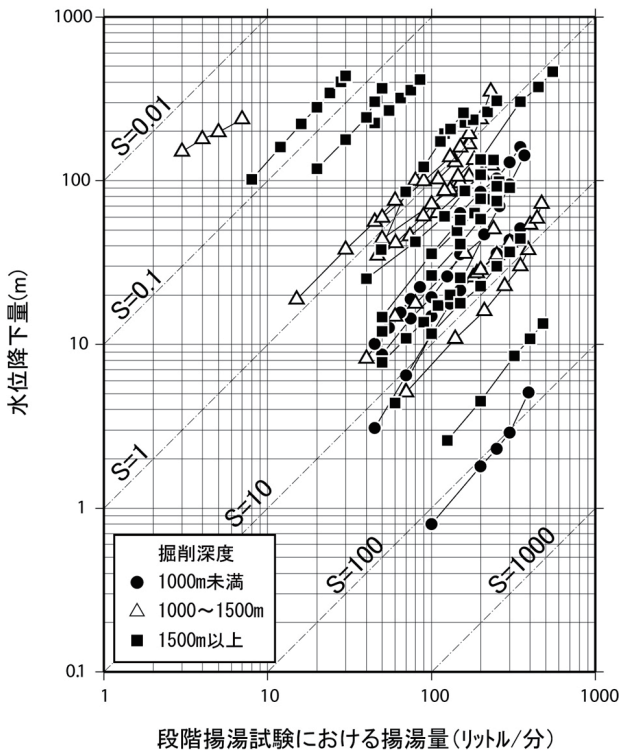


図3 揚湯量と水位降下量の関係を示す S_w - Q 図。
(プロットの別は図1と同じ。)

帯水層の透水量係数を推定したりする方法が用いられており、たとえば、Logan (1964) は次の様な経験式を提案している。

$$T=1.22Sc \quad (T: \text{透水量係数}, Sc: \text{比湧出量})$$

さらに、大山 (1976) や甘露寺 (2003) は、それぞれ湯河原温泉、熱海温泉の事例における、比湧出量と透水量係数の関係について報告している。いずれも、湯ヶ島層群またはその相当層中の亀裂に貯留された温泉の事例であり、 $10^3(\text{m}^2/\text{sec})$ から $10^6(\text{m}^2/\text{sec})$ までの範囲で、比湧出量と透水量係数が非常によい相関関係にあることが示されている (図4)。

そこで、図3に示したそれぞれの段階試験結果において、限界揚湯量に相当する揚湯量を、その時の水位低下量で除すことにより比湧出量を算出した。ここで、限界揚湯量は、両対数グラフ上において、段階的に変えた揚湯量と、その都度の水位降下量の関係を示す曲線の勾配の傾きが1よりも大きくなる揚湯量とした。なお、試験を行った揚湯量の範囲で、その傾きが1を超えない場合は、試験を実施した揚湯量の最大値を便宜的に限界揚湯量とした。

図5は、深度1000m以上の源泉について、上記の方法で算出した比湧出量の地理的分布の状況を示した。図5によれば、比湧出量は、県中央部では $10^6 \sim 10^7 (\text{m}^3/\text{sec}/\text{m})$

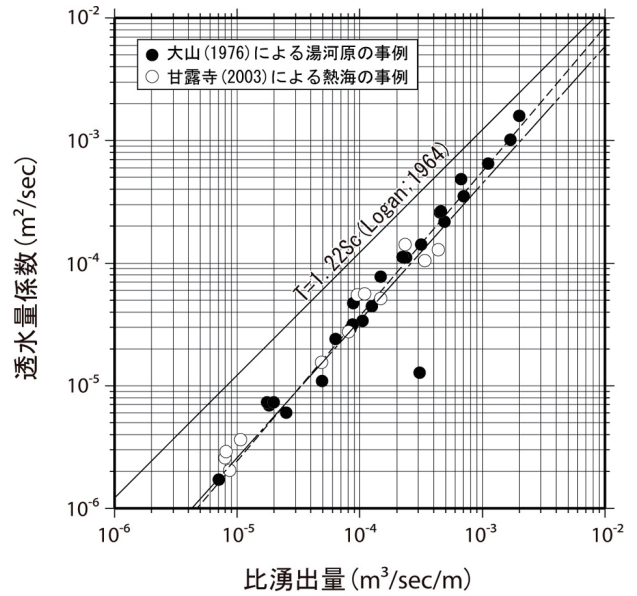


図4 大山 (1976) および甘露寺 (2003) による比湧出量と透水量係数の関係。

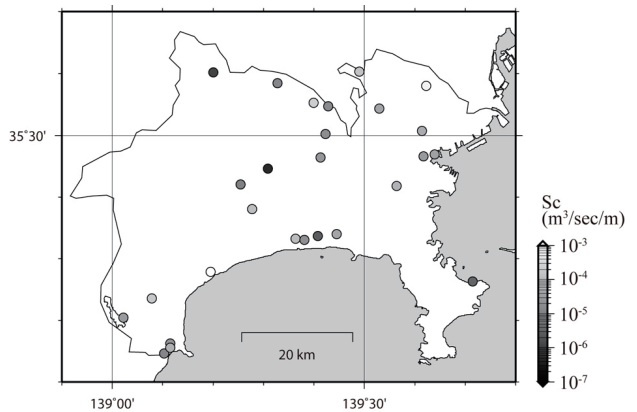


図5 神奈川県内の大深度源泉における段階揚湯試験試験結果による比湧出量の地理的分布。

$\text{sec}/\text{m})$ の値を、その東西では、それより大きな値をとっている。特に、県の東部では $10^4 \sim 10^5 (\text{m}^3/\text{sec}/\text{m})$ となっているなど、県中央部から、東部にかけて比湧出量が大きくなる傾向が認められる。

大山 (2003) は、火山地域の箱根・湯河原と比べて、大深度の温泉湧出層の透水性が悪く、透水係数が $10^6 \sim 10^8 (\text{m}^2/\text{sec})$ であると述べている。板寺 (2010) は、県内の7か所の大深度温泉井における連続揚湯試験の結果をもとに、タイスの標準曲線法 (山本, 1983) により算定した温泉帯水層の透水量係数が、県東部で $10^4 \sim 10^5 (\text{m}^2/\text{sec})$ 程度、県南部で $10^6 \sim 10^7 (\text{m}^2/\text{sec})$ 程度と、一般的な地下水帯水層の透水性と比較して数オーダー小さい値であると報告している。図5にみられる傾向は、これ

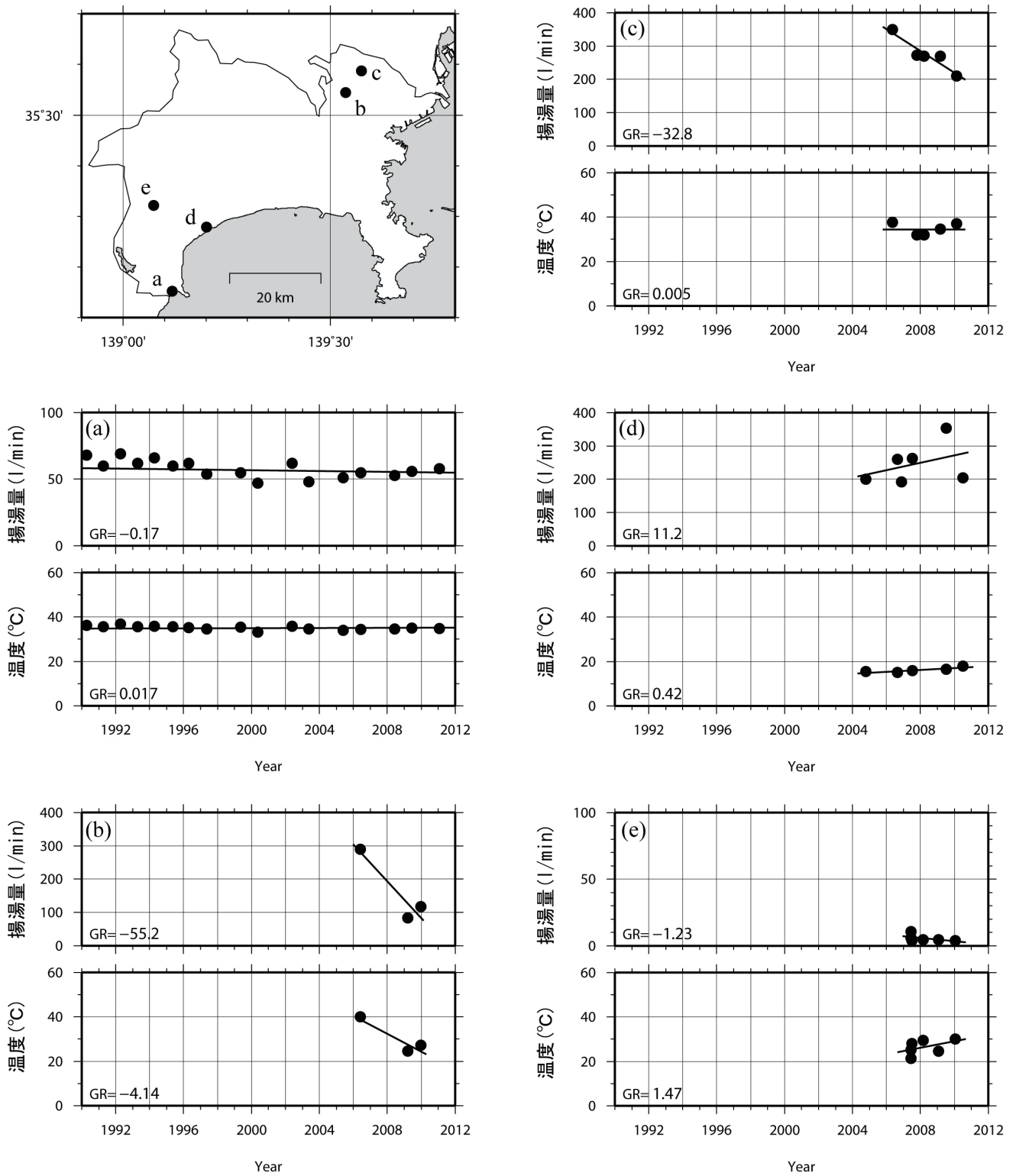


図6 実態調査による揚湯量、温度のモニタリング結果の例。

らの既往の報告と整合的であり、比湧出量の地理的な分布は、県内の大深度温泉の温泉帯水層の透水性の状況を反映しているとみることができる。

4. モニタリング結果

すでに述べたとおり、都道府県による動力装置の許可

処分において、段階揚湯試験の結果を判断の基準とする手法、具体的には、試験の結果求まる限界揚湯量に対し、ある安全率を見込んだ量を適正揚湯量として、揚湯量制限の上限とする手法が採られることがある。

この適正揚湯量は、あくまで、短期間の試験結果により便宜的に決められる量であり、汲み上げによって温泉

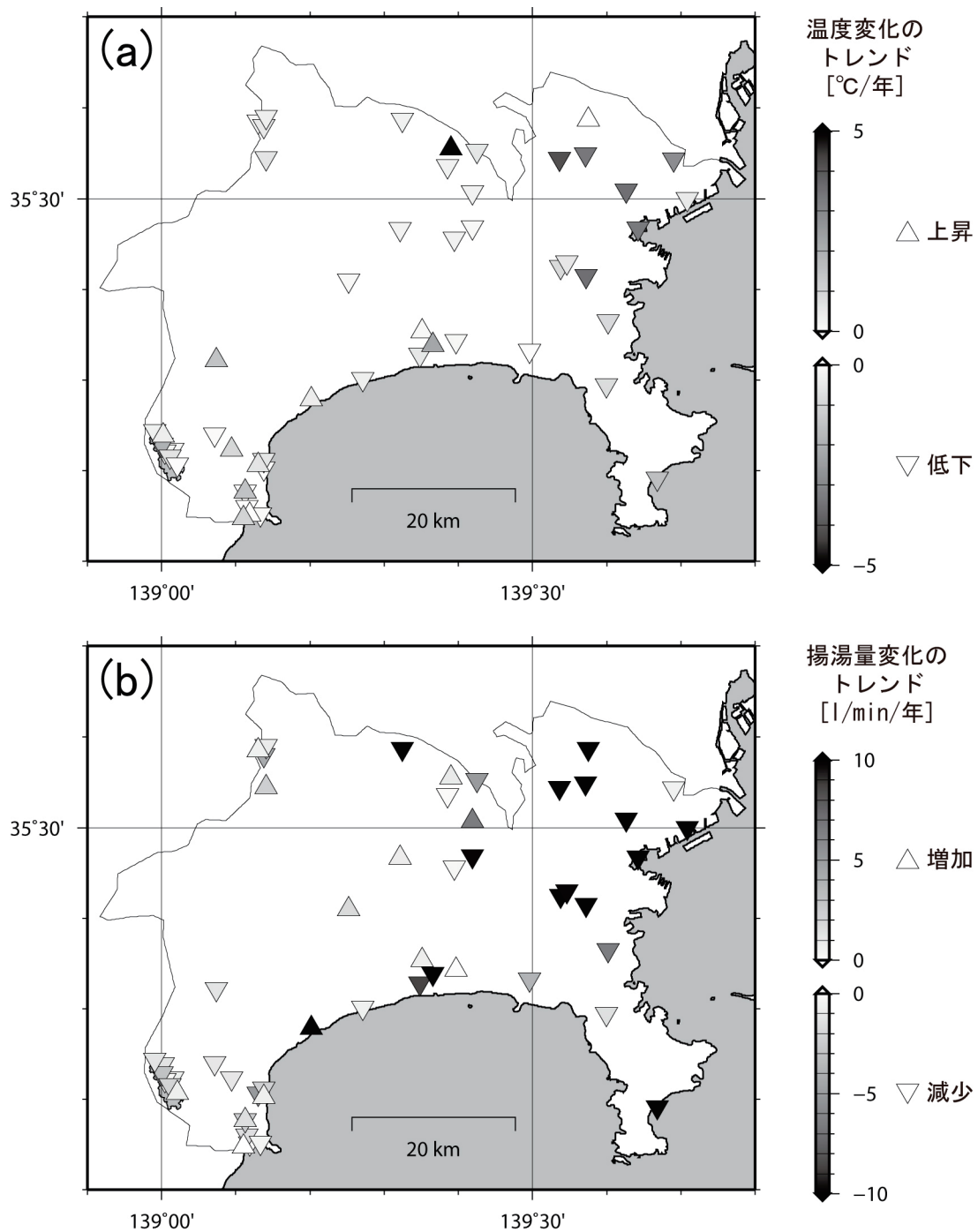


図7 (a) 温度のトレンド、(b) 揚湯量のトレンドの地理的分布。

の枯渇等、環境に対して負の影響を及ぼさないという意味合いでの“適正な”量とは異なる。神奈川県における動力装置の許可処分の多くも、いわゆる適正揚湯量を基準として行われているが、その妥当性については、温度や揚湯量のモニタリングデータに基づく検証が必要である。

そこで、管轄保健所による実態調査のデータをもとに、神奈川県内の大深度温泉の温度、ゆう出量の推移について検討を行った。検討対象としたのは、深度 800m 台の

4 源泉を含む 52 源泉である。

図 6(a) から (e) に、源泉ごとの温度、揚湯量の推移の例を示した。図 6(a) は、長期間にわたり温度・揚湯量とも安定していた事例、図 6(b) は温度・揚湯量ともに低下・減少の傾向が認められた事例、図 6(c) は、温度に比べて揚湯量の減少が著しかった事例、図 6(d) は揚湯量が増加傾向にあった事例、図 6(e) は温度が上昇傾向にあった事例を、それぞれ示している。

図 6 中に GR として記載されているのは、最小二乗法

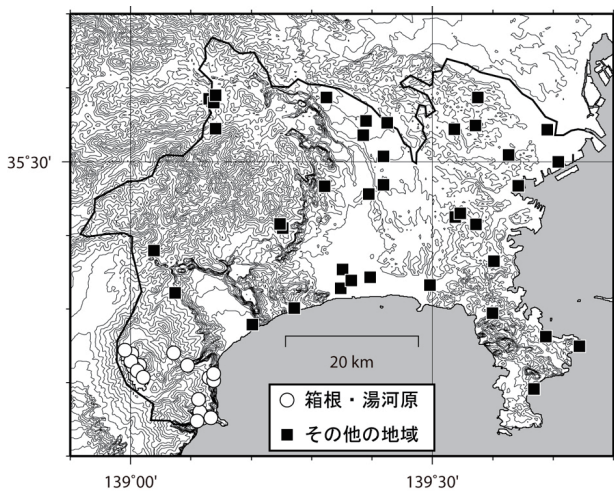


図8 揚湯量、温度のトレンドを調査した源泉の区分。

により求めた調査年と温度および揚湯量との関係を示す近似式の勾配であり、解析期間中における、それぞれの項目の一年あたりの平均的な変化率（以下、トレンドとする）を示す。そこで、対象とした全ての源泉の温度と揚湯量について、同様にトレンドを算定し、その特徴について検討した。解析期間は源泉によって異なっており、最長のもので29年（1983～2011年）、最短のもので2年（2008～2009年）であった。このため、全ての源泉のトレンドを単純に比較することには課題があるが、後述のとおり、温度・揚湯量に大きな変化が見られた源泉の多くは、最近開発された（よって、調査期間の短い）県中央から東部の地域の源泉であり、ある程度の特徴を把握できると考えた。

図7(a)および(b)は、それぞれ、温度および揚湯量の経年変化のトレンドの地理的分布を示している。どちらの図も、プロットの向きで上昇・低下（増加・減少）の別を表しており、全般的に温度低下・揚湯量減少の傾向を示す源泉が多いことがわかる。また、プロットの色はそれぞれのトレンドの大きさを表しており、相対的に透水性が良いとみられる県中央から東部の地域の源泉において、温度低下・揚湯量減少の傾向が特に顕著であることが読み取れる。

次に、源泉各々を、箱根・湯河原地域の源泉とその他の地域の源泉とに分けて（図8）、温度および揚湯量のトレンドの特徴について検討した。揚湯量のトレンドと温度のトレンドとの関係を示した図9において、両者の相関は明瞭ではないものの、箱根・湯河原以外の地域において、揚湯量が減少傾向にある源泉の多くで、温度も低下傾向にあることがわかる。

図10(a)および(b)に、各源泉の当初の温度・揚湯量

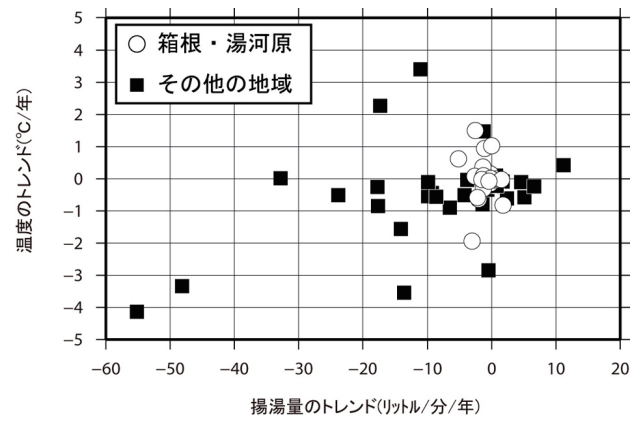


図9 揚湯量のトレンドと温度のトレンドの関係。

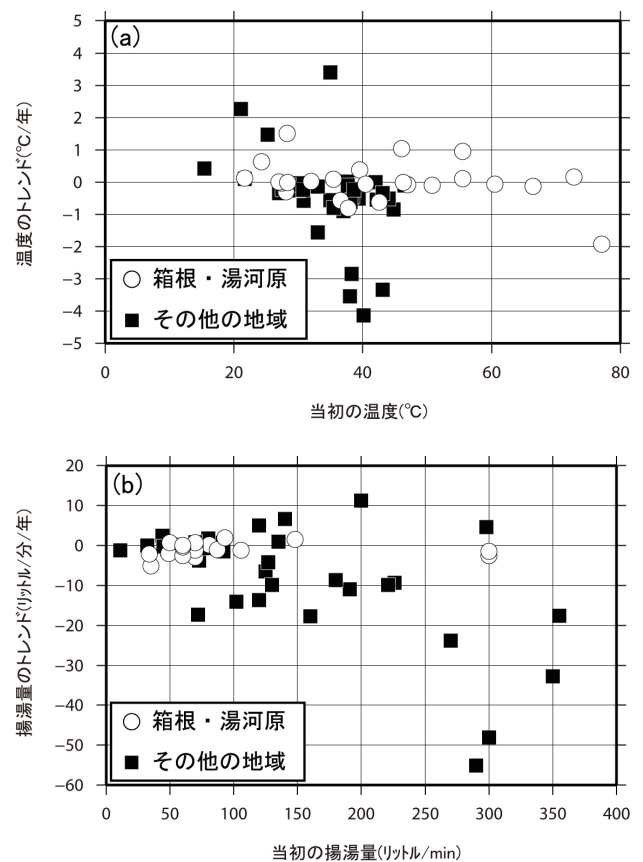


図10 (a) 当初の温度と温度のトレンドの関係、(b) 当初の揚湯量と揚湯量のトレンドの関係。

とそれぞれトレンドの関係を示した。図10(a)によれば、箱根・湯河原地域の温泉には、火山地域であることを反映して、当初の温度が80℃近いものも含まれているが、温度変化のトレンドは概ね $\pm 1^\circ\text{C}/\text{年}$ の範囲にある。これに対して、その他の地域の温泉の当初の温度は概ね30から45℃の範囲にあるが、温度変化のトレンドが年間2℃を超えるような事例も見られる。図10(b)によれば、箱根・湯河原地域の温泉のほとんどは、初期の揚湯

量が毎分 100 リットル以下であり、そのトレンドも小さい。一方、その他の地域の源泉については、当初の揚湯量が多いほど、その減少のトレンドが大きい傾向が認められる。

5. おわりに

神奈川県内で実施された、深度 2000m までの源泉における段階揚湯試験結果をもとに検討した結果、井戸深度が大きくなるほど比湧出量が小さくなり、また、揚湯量そのものも小さくなる傾向が認められた。

実態調査のデータによれば、箱根・湯河原以外の地域の大深度源泉の多くが、温度低下・揚湯量減少のトレンドを示し、比湧出量の分布から温泉帯水層の透水性が相対的に良いとみられる県央から県東部にかけての地域で顕著であった。さらに、当初の揚湯量が多いほど、その減少のトレンドが大きい傾向が認められたことや、揚湯量が減少傾向にある源泉の多くで、温度も低下傾向にあった。

トレンドに関するこれらの検討結果については、様々な解析期間のデータの単純な比較によるため、モニタリングデータの蓄積が進んだ時点で、再検証が必要である。さらに井戸または揚湯装置の経年劣化の影響や、箱根や湯河原などの地域ですでに実践されている温泉保護対策の効果も考慮しなければならない。しかしながら、本稿で報告した結果は、近年、開発対象となっている一般地域における大深度の温泉帯水層は、透水性が極めて低く、多量の揚湯に対して水の供給が追い付かない場合があるなど、決して豊富な温泉を貯留しているわけではないことを示唆している可能性がある。また、たとえ、段階揚湯試験の結果から“適正”とみなされた揚湯量であっても、長期間利用を継続することにより、温度の低下、あるいは揚湯量の減少といった、いわゆる温泉源の枯渇を生じる可能性があることも示している。

長期的な温泉源の保護のためには、いわゆる適正揚湯量があくまで短期間の段階試験によるものであるという観点に立ち、継続的なモニタリングを実施し、その結果に基づいて許可揚湯量を見直すといった仕組みが必要であろう。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、神奈川県温泉保護対策要綱に基づく指導により集められた資料、および神奈川県の各保健福祉事務所および政令市の各保健所による実態調査の結果を利用させていただきました。温泉保護の主旨に御理解いただき、各資料を提出いただいた温泉事業者の関係各位、事務手続きおよび実態調査に携わられた行政の担当職員各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 板寺一洋・菊川城司・小田原啓 (2010) 神奈川県の大深度温泉水の起源、温泉科学, 59, 320-339.
- 環境省 (2010) 温泉資源の保護に関するガイドライン, 57p.
- 甘露寺泰雄 (2003) 伊豆半島所温泉の過剰採取の評価についての一つの試み, 温泉工学会誌, 28 (2/3), 75-80.
- 菊川城司・小田原啓・板寺一洋 (2007) 孔底温度から見た神奈川県内の地温勾配, 神奈川県温泉地学研究所報告, 39, 79-84.
- Logan, J. (1964) Estimating transmissibility from routine production tests of water wells, Groundwater, 2 (1), 35-37.
- 小田原啓 (2008) 横浜市及び川崎市内の大深度温泉井の掘削資料から推定される上総層群／三浦層群境界, 神奈川県温泉地学研究所報告, 40, 87-90.
- 小沢清・江藤哲人・大山正雄, 長瀬和雄, 松沢親悟 (1999) 温泉観測井による神奈川県中央部の地下地質, 神奈川県温泉地学研究所報告, 30, 41-52.
- 小沢清, 江藤哲人 (2005) 神奈川県中・東部地域の大深度温泉井の地質および地下地質構造, 神奈川県温泉地学研究所報告, 37, 15-38.
- 大山正雄 (1976) 湯河原温泉の水位と湧出地域の透水性, 神奈川温泉研究所報告, 7 (2), 69-84.
- 大山正雄 (2003) 大深度温泉の水文学 ー大深度温泉の適正 (持続可能) 採取量と源泉間距離ー, 温泉工学会誌, 29 (1), 27-38.

