

箱根湯本地区温泉の泉質経年変化の評価 — 成因の解明に向けて

Long term Assessment of Hot Spring Quality Changes in Hakone-yumoto — Proposal of a Tentative Model for hot Springs Generations —

菊川城司¹⁾・板寺一洋¹⁾

Joji KIKUGAWA¹⁾ & Kazuhiro ITADERA¹⁾

Abstract. We have investigated long term changes in the components, temperature and the quantities of 82 hot springs at Hakone-yumoto, Kanagawa, Japan. Quantity of water of the hot springs in the area was rapidly decreasing in 70' s and 80' s. Since 90' s, the depletion of the hot springs have been calm due to protection policies by Kanagawa prefectural government. Our recent results, however, show that there is still depletion of hot springs in the central Hakone-yumoto and such depletions have complex spacial variations. A simple model of hot springs generation in Hakone-yumoto, proposed by Hirano *et al.*(1972), is not able to explain such complex variations, and this suggests that the mechanisms of hot springs generation in the area remain as a matter. As the first approach, we tried to make an alternative model to explain spacial variations of chemical characters of the hot springs, in this report. Based on analytical data of anion (Cl^- , SO_4^{2-} , and HCO_3^-) and stable isotope ratio (δD and $\delta^{18}\text{O}$), the hot springs in the area are classified into four groups and the genetic variety between those groups can be explained by simple blend of four end members.

Key words: hot springs, quality change, model of generation, Hakone-yumoto

1. はじめに

温泉は地下水の一種であるが、物理的あるいは化学的に通常の地下水とは異なった特異的な性質を持ち、その温度及び溶存物質量のどちらかまたは両方に富んでいるという特徴がある。温泉は浴用に供するのが最大の目的であるから、浴用にたる「温度」、「成分」および「湧出量」を兼ね備える必要がある。これら、温泉の「温度」、「湧出量」、「成分」は温泉の3要素と呼ばれることもあり、資源として温泉を利用していく上では、掘削当時の状態を持続できることが理想である。一般に「温泉の枯渇」とは、掘削当時と比較して温泉の3要素のいずれかが減少した場合を指す。

温泉の枯渇に対応する場合、3要素の何が減少してい

るのか、また、その原因が何かを把握し対策を立てる必要がある。さらに、原因を考える上では、その温泉がどのようにしてできたのかという成因を考慮することが重要である。3要素のうち、温泉の成分は火山活動に起因する熱水のほか、岩石または地層が形成された際にトラップされた昔の海水（化石水）を起源とする場合もあり、その後、地層中を長期間にわたって流動する過程で地層と化学成分の交換を行って形成されていく。このため温泉の成分の時間変化、空間変化を明らかにすることは、温泉の成因を明らかにする上で重要である。

本報告では、箱根湯本地区の温泉をとりあげて、温泉の時間変化を評価すると共に、その成因解明を試みた。箱根湯本地区は後述の通り、国内有数の温泉地であるが、かつては枯渇化が進み、神奈川県による掘削や採取量の規制が行われてきた。温泉地学研究所では、こうした規制の効果や、現在の枯渇化の傾向について把握するため、2006（平成18）年から2007（平成19）年にかけて、

1) 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
Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture
586 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan
菊川城司; kikugawa@onken.odawara.kanagawa.jp

箱根湯本地区の82源泉について現地調査と採水分析を実施し、過去のデータとの比較により温度、湧出量、成分の変化を明らかにした。ここでは、この調査結果から得られたデータを元に過去のデータとの比較によって箱根湯本地区温泉の現状と経年変化について評価するとともに、箱根湯本地区温泉の成因について考察する。

2. 箱根湯本地区の温泉の概要

神奈川県には、箱根湯本地区が属する箱根温泉をはじめ、湯河原温泉、鶴巻温泉、中川温泉など数多くの温泉地が知られている。2007（平成19）年3月末現在で、神奈川県全体の源泉数620に対して箱根町の源泉数は364源泉と約59%を占めている。また、湧出量は県全体で約38.8kL/minであるのに対して箱根町は約22.5kL/minと約58%を占める。このうち、箱根湯本温泉は73源泉、塔之沢は9源泉を占めている。ここでは箱根湯本温泉と塔之沢温泉をあわせて箱根湯本地区の温泉と呼ぶこととする。箱根湯本地区の源泉数は82カ所であり、箱根町全体の約23%を占める（2008、神奈川県保健福祉部）。

箱根温泉は神奈川県でもっとも大きな温泉地であるとともに、全国的に見ても国内有数の温泉地である。2005（平成17）年の環境省の統計によれば、箱根町の源泉総数は318源泉で全国第7位、高温の源泉数（42℃以上）は223源泉で第5位、総湧出量は22.7kL/minで全国第7位などとなっている。

箱根湯本地区は箱根の玄関口にあたり、箱根町の中で最も多くの観光客が訪れ、にぎわっている温泉場である。年間延べ宿泊利用人数は1068831人で箱根町全体（4448138人）の約24%を占める。

3. これまでの研究

箱根温泉の歴史は古く、738（天平10）年に湯本温泉が発見されたのが始まりといわれている。江戸時代には、湯本、塔之沢、宮ノ下、堂ヶ島、底倉、木賀、芦之湯の七ヶ所の温泉場を合わせて箱根七湯と呼び、広く人々に知られ温泉場がにぎわっていた。現在では、温泉場の数は更に増え箱根二十湯と呼ばれる（平野、1994）が、その泉質は温泉場ごとに特徴を持っている。温泉地学研究所では、場所によって泉質が異なることを統一的に説明しようとする試みが、古くから進められてきた。

大木ほか（1968）は、箱根温泉を中央火口丘とその周辺の温泉と、基盤岩類（早川凝灰岩層、湯ヶ島層）中の温泉とに二分した。さらに、中央火口丘とその周辺の温泉については、酸性硫酸塩泉、重炭酸塩硫酸塩泉、塩

化物泉及び塩化物重炭酸塩硫酸化物泉（混合型）に、基盤岩類中の温泉については、塩化物泉と塩化物重炭酸塩硫酸化物泉（混合型）に細分した。

Oki & Hirano（1970）は、箱根の温泉を主要な陰イオンの特徴から4つに分類し、箱根温泉の分帯図を示した（表1、図1）。このうち、第Ⅰ～Ⅲ帯は中央火口丘で形成される温泉である。第Ⅳ帯は混合型の温泉であり、中央火口丘周辺か基盤岩中かを基準として、さらに第Ⅳa帯と第Ⅳb帯に区分した。本論で扱う箱根湯本地区の源泉は、箱根火山の基盤岩類中から湧出しており、泉質の分帯では第Ⅳb帯に属する。

その後、平野ほか（1972）は、1970（昭和45）年に箱根湯本地区の温泉について初めて包括的な調査を実施した結果から、箱根湯本地区の温泉を、泉温と総溶存成分量の関係、陰イオン、陽イオンの組成比及び湧出場所によって4つのグループに分類しⅣb-H群、Ⅳb-L群、Ⅳb-C群、Ⅳb-D群と名付けた。

Ⅳb-H群は泉温が高く総溶存物質量は1000～1500mg/kg程度で、塩化ナトリウム成分に富む温泉であり、須雲川左岸の湯坂山地域に特徴的に湧出する。

Ⅳb-L群は泉温は40～60℃程度で総溶存物質量が少なく、須雲川沿いに湧出する。Ⅳb-C群は泉温35～60℃程度で総溶存物質量は1000～4000mg/kgと多く、早川、須雲川の合流地点から須雲川の上流側に向かう地域で湧出する。

Ⅳb-D群は泉温が低く、総溶存物質量も1000mg/kg未満で、早川沿いの地域で湧出する。

成分と温度の関係から、これらの成因関係は図2のようにまとめられる。Ⅳb-H群は湯坂山の地下深部から供給される高温で塩化ナトリウムに富む温泉で、この地域の温泉の起源といえる。Ⅳb-L群はⅣb-H群に炭酸物質に富み硫酸イオン、塩化物イオンの少ない地下水が混合した温泉であると考えられた。Ⅳb-C群はⅣb-H群およびⅣb-L群と異なり、硫酸イオンに富むことから、高温で塩化ナトリウムに富む温泉が硫酸イオンに富む基盤岩中の地下水に混入して形成された温泉、Ⅳb-D群はⅣb-C群に地下水が混入した温泉と考えられた。

本報告では、このモデルの妥当性についても改めて検討をする。

4. 2006（平成18）年調査の方法

今回行った現地調査は主に小田原保健福祉事務所温泉課が箱根湯本地区で実施した平成18年度及び平成19年度の温泉実態調査にあわせて実施した。

表1. 箱根温泉の分帯（Oki & Hirano, 1970）.

分帯	泉質	pH	陰イオン比
第Ⅰ帯	酸性硫酸塩泉	<3	$\text{SO}_4^{2-} \gg \text{Cl}^-$ 、 $(\text{CO}_2, \text{HCO}_3^-)$
第Ⅱ帯	炭酸水素塩硫酸塩泉	6～8	SO_4^{2-} 、 $\text{HCO}_3^- \gg \text{Cl}^-$
第Ⅲ帯	塩化物泉	7～8.5	$\text{Cl}^- \gg \text{SO}_4^{2-}$ 、 HCO_3^-
第Ⅳ帯	塩化物炭酸水素塩硫酸塩泉	7～9	$\text{Cl}^- \gg \text{SO}_4^{2-}$ 、 HCO_3^-

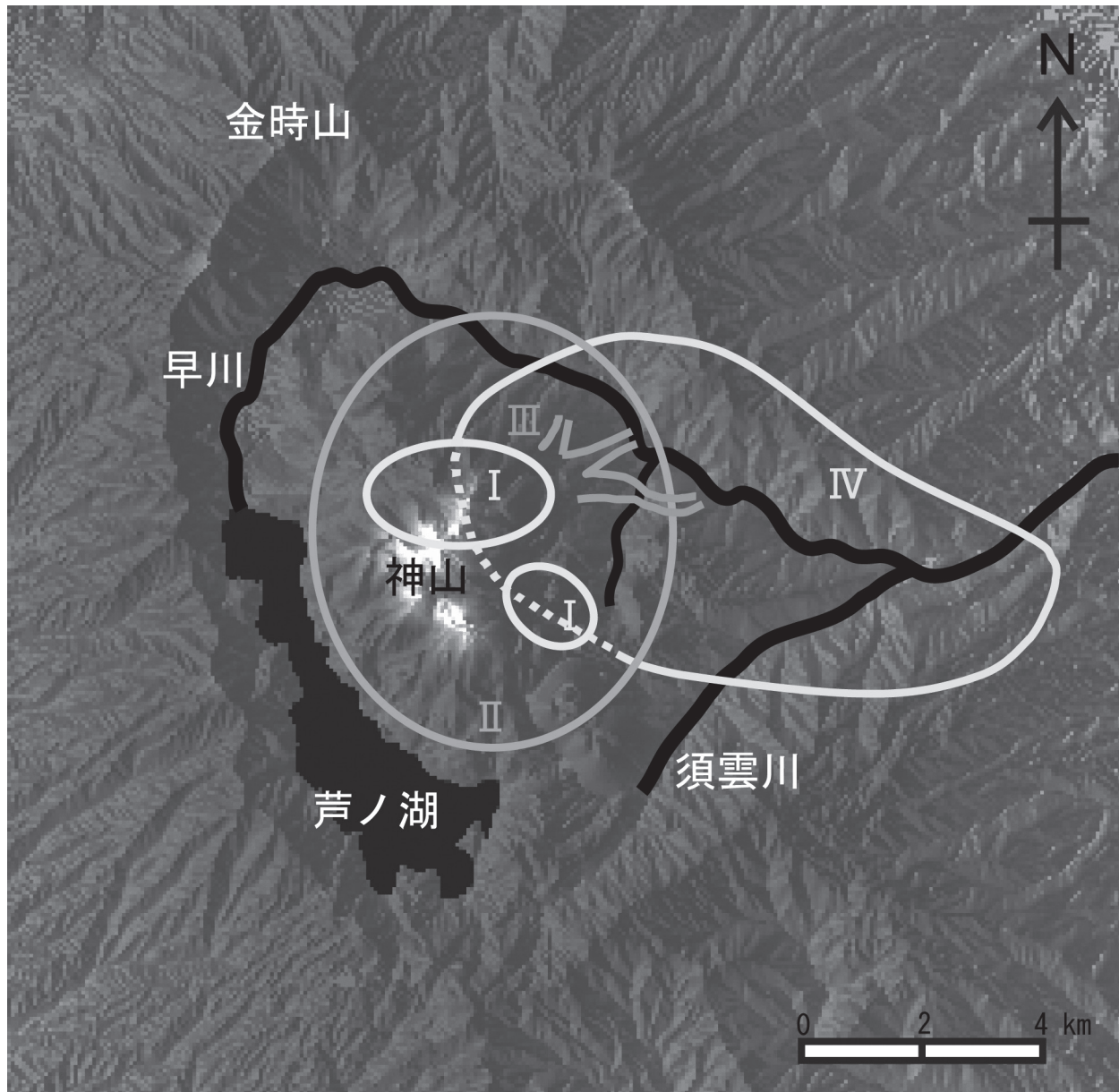


図 1. 箱根温泉の分帯 (Oki & Hirano, 1970). I は酸性硫酸塩泉, II は炭酸水素塩硫酸塩泉, III は塩化物泉, IV は塩化物炭酸水素塩硫酸塩泉の分布を示す.

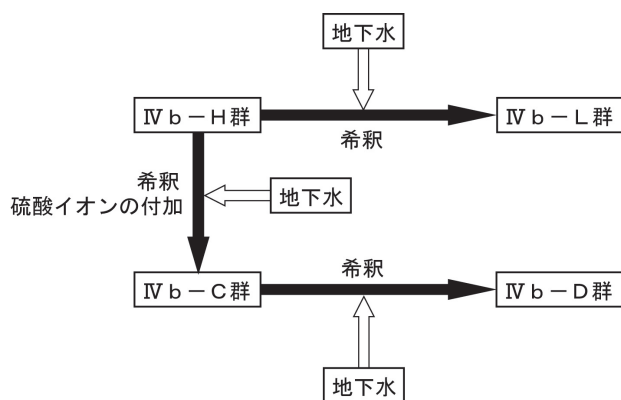


図 2. 平野ほか (1972) による箱根湯本地区の温泉の分類と成因.

現地調査では、温度、揚湯量、pH、電気伝導度の調査とともに温泉水の採水を行った。採水した温泉水は各種イオン濃度など温泉の溶存成分について、鉱泉分析法指針に準じて分析を行った。また、温泉中の溶存成分の分析と平行して、温泉水の酸素、水素同位体比の測定を行った。酸素、水素同位体比の測定は、軽元素質量分析装置 PRISM(VG 現 micromass 社製) により、試料水と同位体平衡に達した炭酸ガスまたは水素ガスについて行い、測定結果と平衡温度下における同位体分別係数により、試料水の酸素・水素同位体比 (δ 値 V-SMOW) を算出した。

採水及び現地調査は 2006 (平成 18) 年 6 月 16 日から 7 月 14 日にかけて 78 源泉について実施した。2006 (平成 18) 年に調査できなかった 4 源泉について、2007 (平成 19) 年 4 月 12 日から 7 月 20 日にかけて追加調査を実施し、計 82 カ所の源泉についてデータを得た。本稿では、82 源泉の調査結果を併せて解析

を行っており、以降では2年分をまとめて2006（平成18）年調査と表記する。調査対象源泉の概略を表2に、調査対象源泉の位置を図3に示した。

ある源泉からくみ上げられる温泉水の温度や揚湯量及び化学組成は、揚湯方法によって異なる場合がある。栗屋ほか（1984）は、箱根町湖尻に所在する源泉について、エアリフトポンプから水中ポンプへの揚湯方法の変更により、pHが8.1から6.5へ低下し、炭酸水素イオンが約6%増加したと述べている。また、井孔内部の清掃や揚湯管の交換の前後でこれらの値が大きく異なることも珍しくない。個別の源泉についてその経歴を追求することは重要ではあるが、本稿では箱根湯本地区全体を概観することが目的であるため、揚湯装置や井孔のメンテナンスの影響については考慮しないこととした。また、井孔の掘削深度や水止め位置などは、温泉の成因を探るためには重要なファクターであるが、同様の理由で本稿では考慮していない。

5. 2006 年調査の結果

主な調査項目の平均値、最小値、最大値を表3に示した。また、トリリニアダイアグラムを図4に示した。泉温は、平均値50.7℃、最小値24.1℃、最大値86.0℃であった。泉温の最小値を示した源泉は、過去の調査では療養泉（単純温泉）の基準を満たしていたが、今回は

表2. 調査対象源泉の概略(全82源泉). 2006(平成18)年のデータ.

	海拔標高 (m)	深度 (GL-m)	水止め (GL-m)	許可揚湯量 (L/min)
最小値	98	0(横穴)	0	15
最大値	428	1500	641	514
平均値	186	532	263	77.8

揚湯装置	源泉数
エアリフトポンプ	44
タービンポンプ	2
水中ポンプ	34
横穴湧泉	2

25℃未満であったため、療養泉には該当しない。また、40℃以下の源泉は18カ所、70℃以上の源泉は8カ所であった。揚湯量は平均値で67L/minであり、箱根湯本地区全体の許可揚湯量の平均値78L/minの約85%であった。揚湯量の最小値は14L/min、最大値は432L/minであり、揚湯量が200L/min以上の源泉は2源泉で、いずれもタービンポンプにより揚湯されている源泉である。pHは、平均値8.6、最小値7.6、最大値9.4で、8.5以上のアルカリ性を示したものが46源泉あり、そのうち9.0以上を示したものは11源泉であった。

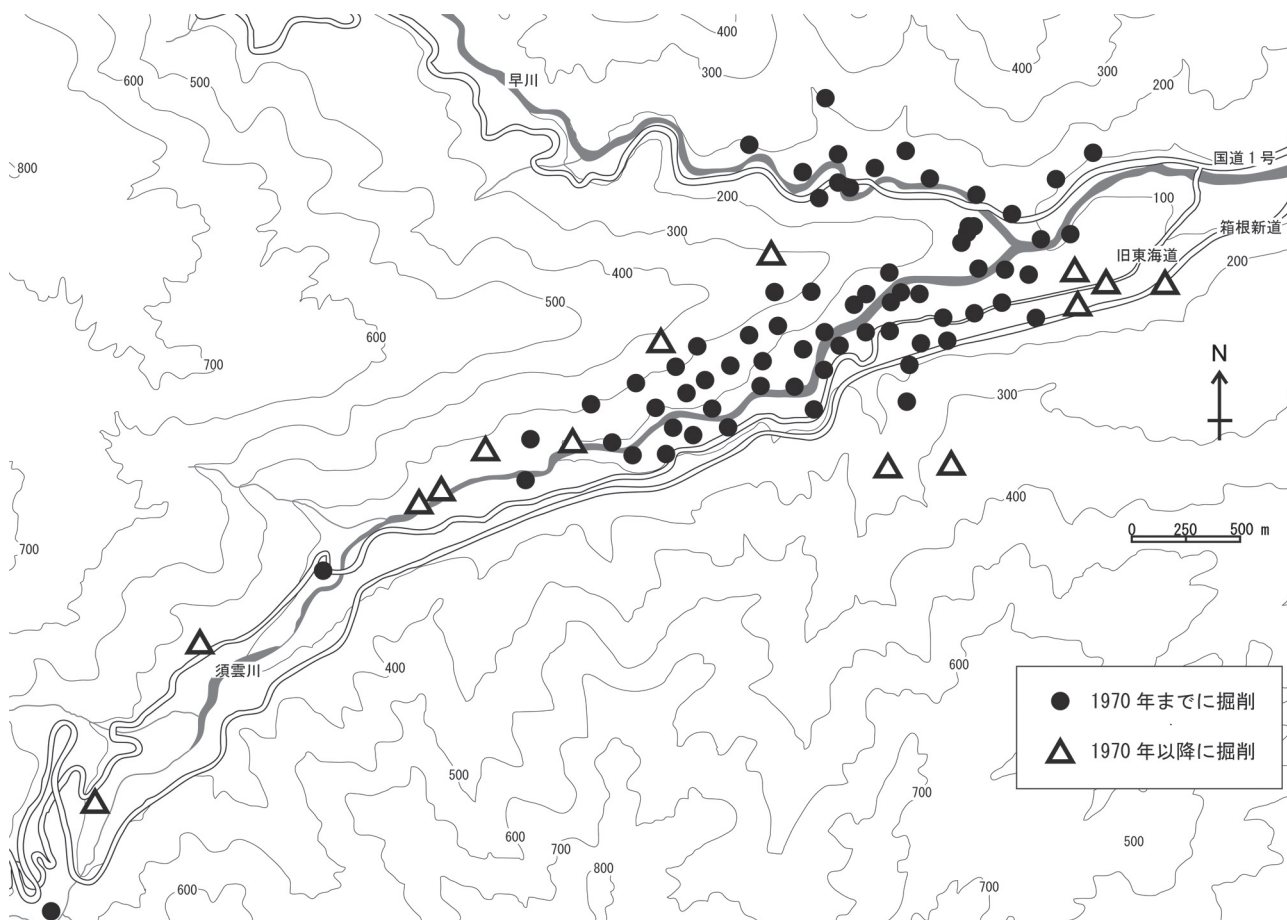


図3. 箱根湯本地区の調査対象源泉の分布.

表 3. 箱根湯本地区温泉の 2006（平成 18）年調査結果の概略.

	温度 ℃	揚湯量 L/min	pH	電気伝導度 μ S/cm	ナトリウムイオン mg/L	カルシウムイオン mg/L	塩化物イオン mg/L	硫酸イオン mg/L	炭酸水素イオン mg/L	メケイ酸 mg/L	メホウ酸 mg/L
平均値	50.7	67	8.6	1253	212	43.5	289	130	58.6	64.8	13.2
最小値	24.1	14	7.6	163	30.4	1.05	6.60	5.67	20.9	29.8	0.43
最大値	86.0	432	9.4	6310	958	409	1946	839	256	156	55.0

6. 議論

6.1. 経年変化

温泉地学研究所では、過去に 1970（昭和 45）年、1980（昭和 55）年及び 1990（平成 2）年の 3 回、箱根湯本地区全体についての調査を行っている（平野ほか，1972；平野ほか，1986；温泉地学研究所，1992）。過去の 3 回の調査と今回行った調査の計 4 回の全てで調査対象となっている源泉は 40 源泉である。この 40 源泉について、主な項目の平均値、最小値、最大値の経年変化を図 5 に示した。最初の調査である 1970（昭和 45）年と今回の調査である 2006（平成 18）年のものを比較すると、泉温は平均 3.2℃低下し、揚湯量は平均 15L/min 減少している。また、箱根湯本温泉の主要成分であるナトリウムイオン、塩化物イオンのほか、カルシウムイオン、硫酸イオンにも減少傾向が認められた。これに対して炭酸水素イオンは僅かではあるが増加している。

塩化物イオン濃度及び硫酸イオン濃度の低下に伴う炭酸水素イオンの増加傾向は、塩化物イオン及び硫酸イオンに乏しい浅層地下水の温泉水へ混入の進行を示してい

る。実際、前述のとおり、泉温の低下が認められており、箱根湯本地区の温泉では今後冷水化の懸念がある。

しかし、1970（昭和 45）年から 1990（平成 2）年までの間では主要成分が大きく減少する傾向が認められたものが、1990（平成 2 年）から 2006（平成 18）年にかけての減少傾向は緩やかになっており、成分の変化にある程度歯止めがかかってきている様子が見受けられる。神奈川県では、揚湯量の規制を柱とする温泉保護対策要綱を 1967（昭和 42）年に策定し温泉保護を行っている。成分の減少率が下がってきたことは、この対策が功を奏し始めている可能性も考えられるが、浅層の地下水との混合が進行し温泉水中の化学成分比が地下水のそれに近づいてきたため、見かけ上変化が穏やかになっている可能性もあり、今後さらに詳しい解析が必要である。

6.2. 泉質分布の時間変化

平野ほか（1986）では、1980（昭和 55）年に実施した調査結果を 1970（昭和 45）年の結果と比較している。ここでは、温泉地学研究所（1992）による箱根湯本地

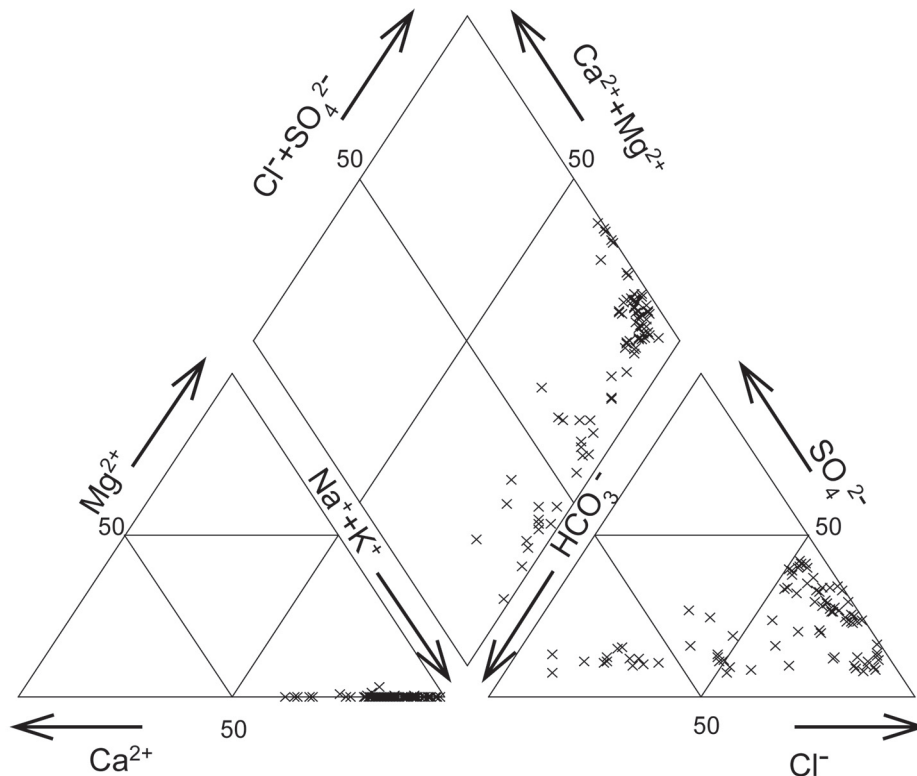


図 4. 箱根湯本地区の温泉のトリリニアダイアグラム、2006（平成 18）年調査による。単位は当量%。

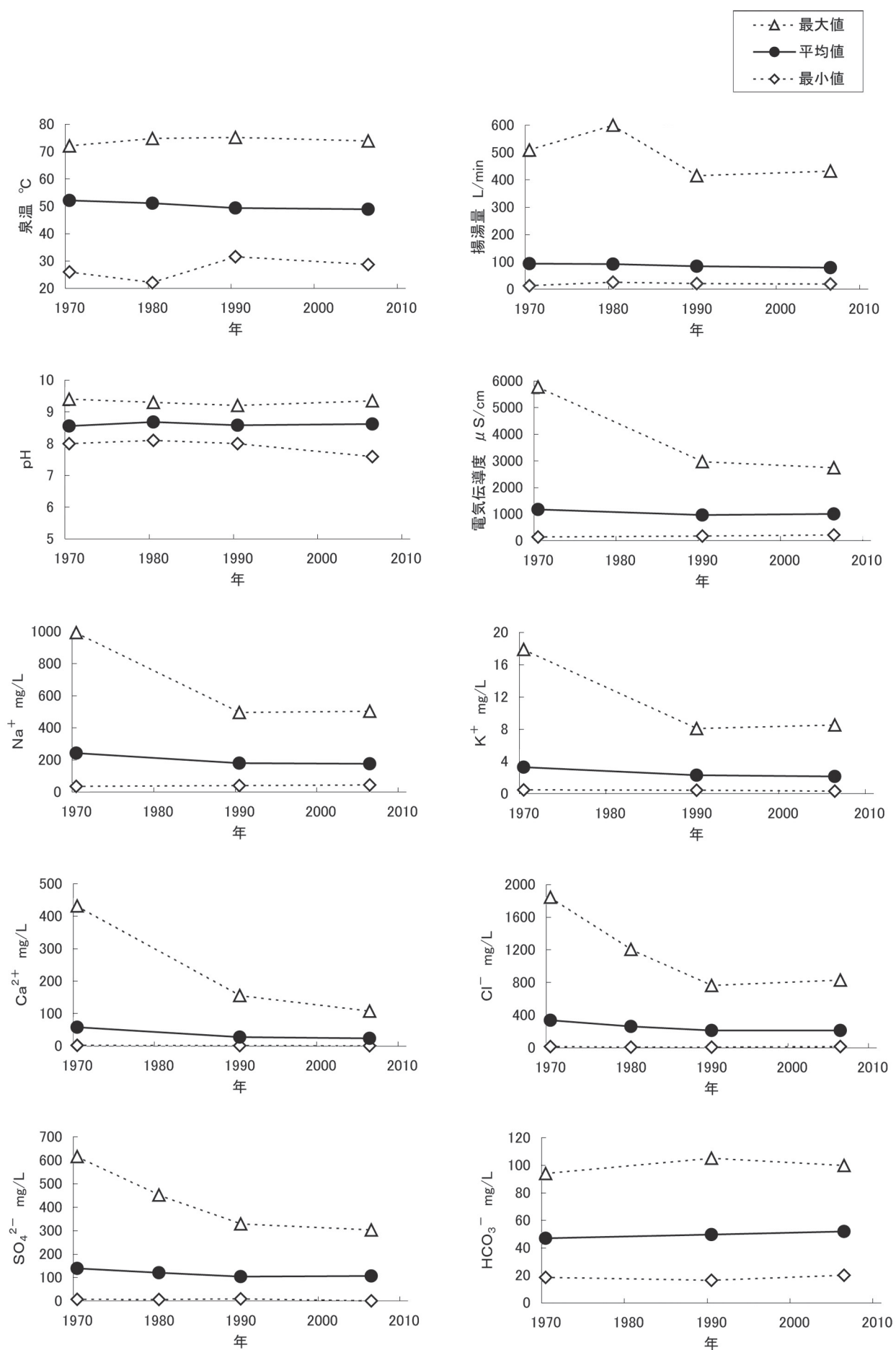


図5. 主な調査結果の平均値, 最大値, 最小値の経年変化. 1970 (昭和45) 年, 1980 (昭和55) 年, 1990 (平成2) 年及び2006 (平成18) 年のすべてで調査を行った40源泉を対象とした.

区の調査結果を加えて、これら過去3回の調査結果と今回の調査結果を平野ほか(1972)の分類に基づき対比してみる。

図6から9は、それぞれ1970(昭和45)年、1980(昭和55)年、1990(平成2)年、および今回の調査結果に基づく泉質分布の状況を示した図である。各図に示した曲線は、平野ほか(1972)による昭和45年時点の泉質グループの境界線である。

昭和45年のIVb-C群の分布域に着目してみると、調査年度が進むとかつての分布域の西部の源泉で泉質が塩類泉から単純温泉へと変化していることが見て取れる。塩類泉と単純温泉の相違は、鉱泉分析法指針において定められており、溶存物質量が1000mg/L以上か否かという点である。つまり、かつてのIVb-C群の分布域西側の源泉は溶存成分の減少が進行しており、IVb-D群の分布域が拡大していることが判る。また、昭和45年のIVb-H群の分布範囲だった地域も、調査年度が進むと分布範囲の東側の源泉が塩類泉から単純温泉に変化しIVb-L群の分布域が拡大する傾向が認められる。これらの分布から、箱根湯本温泉では、温泉地の外側よりも中心部、古くから栄えていた温泉場である滝通り地区や早雲通り地区で溶存成分の減少が著しいことが判る。

昭和40年代までに掘削、利用が開始されている源泉を対象として、箱根湯本地区における各泉質の占める割合を図10に示した。1970(昭和45)年から1980(昭和55)年にかけて、単純温泉及びアルカリ性単純温泉の占める割合が急激に増加しており、この期間に、箱根湯本地区の温泉の溶存成分が大きく減少したことが判る。また、IVb-C群の泉質であるナトリウム・カルシウム-塩化物・硫酸塩泉の占める割合は、1970(昭和45)年から1990(平成2)年まで直線的に減少し、その後2006(平成18)年にかけては緩やかになったもののさらに減少している。IVb-H群の泉質であるナトリウム-塩化物泉の割合は、1970(昭和45)年から1980(昭和55)年にかけて一旦減少したものの、その後は回復している。このことから、IVb-H群の源泉よりも、IVb-C群の源泉のほうが、濃度低下による分布範囲の縮小が進行している状況にあるということがうかがえる。

前述のとおり、温泉の温度や量、溶存成分については、井戸の増掘や浚渫、エアリフトポンプの場合のエア管や揚湯管の入れ替えなどのメンテナンスの有無によって大きく変化するが、本研究ではこれらを考慮していない。そのため、個別の温泉井について枯渇の進行を確認するためには、井戸管理の経歴を考慮する必要もある。しかし、近隣の温泉で一斉に同様の変化が認められることから考えて、今回認められた泉質分布の変化は個々の井戸のメンテナンス等による見かけ上の変化ではなく、実際に温泉成分に富んだIVb-H群やIVb-C群の分布範囲が縮小しているということは明らかであろう。箱根湯本地区全体を見た場合、1970(昭和45)年以降に新規掘削された源泉は、従来の温泉地の外側へと広がっており(図3)、泉温が高く、泉質も塩類泉に分類されるも

のが多い。逆に従来の温泉地の中心部では、溶存成分の減少が進んで単純温泉が増加している。つまり、箱根湯本地区全体として考えると、昭和40年代に認められた大幅な枯渇化は収まりつつあるものの、溶存成分からみると中心部が衰退し外側に塩類泉が広がっていく成分のドーナツ化現象が進行していると言えるかもしれない。ただし、箱根湯本地区の外側の新しい塩類泉についても、これからの利用状況によっては成分が経年的に低下する可能性がある。今後、箱根湯本地区の源泉について、資源保護と有効的な利用を両立させていくためには、従来の温泉湧出地に対する保護対策とともに、その外側に広がる新しい源泉の与える影響の有無について考慮することが重要である。

6.3. 箱根湯本温泉の泉質分類

ここまで述べてきたように、平野ほか(1972)が箱根湯本地区の源泉を4群に分類した当時と現在では、泉質の分布状況が変化してきている。ここでは、2006(平成18)年の調査結果から、主成分の特徴により箱根湯本地区の源泉を複数のエンドメンバーに分離し、それらエンドメンバー間の混合で多様な泉質の説明を試みることにする。

箱根湯本地区の多様な温泉を、いくつかのエンドメンバーに分類するにあたって、主要な陰イオンである塩化物イオン(Cl^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})及び炭酸水素イオン(HCO_3^-)の濃度比の特徴に着目する。これらの陰イオンは、例外がある可能性もあるが、おおむね以下のような起源であると考えられる。塩化物イオンは地下深部の熱水を起源としていると考えられ、地表近くの天水起源の地下水にはあまり含まれない。硫酸イオンも地下深部の熱水を起源としている可能性もあるが、地層中にも多く含まれることから地層中に長く滞留している温泉ほど濃度が高くなる可能性がある。炭酸水素イオンも地下深部の熱水が起源である可能性があるが、天水起源の地下水に多く含まれる(平野・大木, 1971)。

Cl^- と SO_4^{2-} の濃度の関係を図11に示す。これを見ると、箱根湯本地区の温泉は $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比によって3種類のタイプがあることがわかる。これらについてAタイプ、Bタイプ、Cタイプと仮称する。 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比の相違は、地下の熱水の状況あるいは熱水と地層中に長年滞留していた地下水の混合比の違いに依存するなどして決まっているものと思われるが、箱根湯本地区の温泉全体で見てわずか3つの量比に分けられそうであることから、各グループの成分総計の最も多い源泉を地下深所からの温泉源に最も近いものとして、箱根湯本地区の温泉のソースを3つと仮定すると、各グループについて高濃度の温泉源と浅層地下水の1点を直線で結んだ3本の希釈線で単純な説明が可能である。そこで、仮定される3つのソースをエンドメンバー1~3(A~Cタイプの成分総計が最も多い源泉に対応)、浅層地下水をエンドメンバー4と呼ぶことにする。

次に、A~Cの各タイプを Cl^- 濃度と HCO_3^- 濃度の相関図上で示す(図12)。これを見ると、Aタイプ及びBタイプは Cl^- 濃度が低濃度になるに従って HCO_3^- 濃度

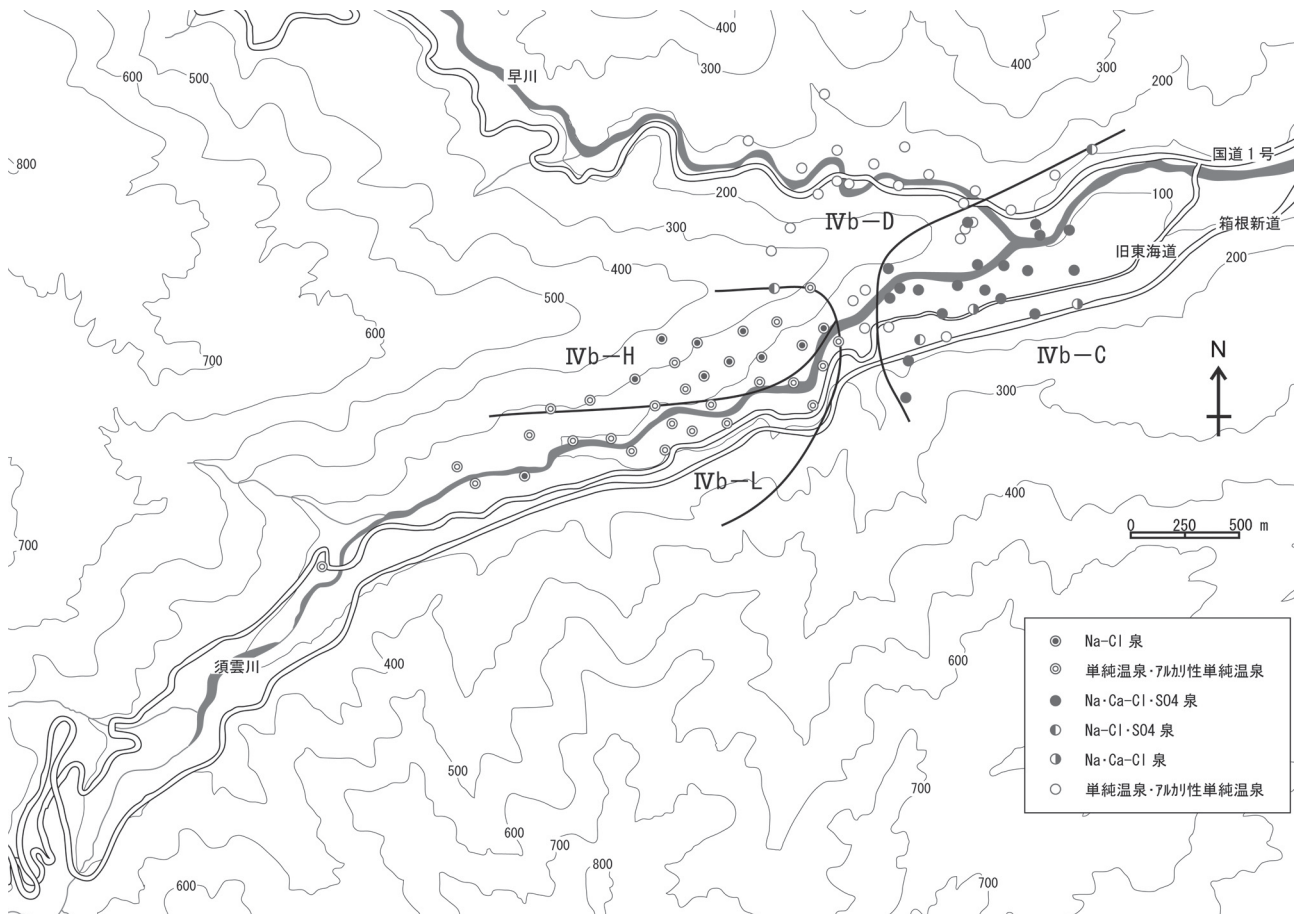


図 6. 1970 (昭和 45) 年の箱根湯本地区の泉質分布. 図中の曲線は, 平野ほか (1972) による 1970 (昭和 45) 年時点の泉質グループの境界線を示す.

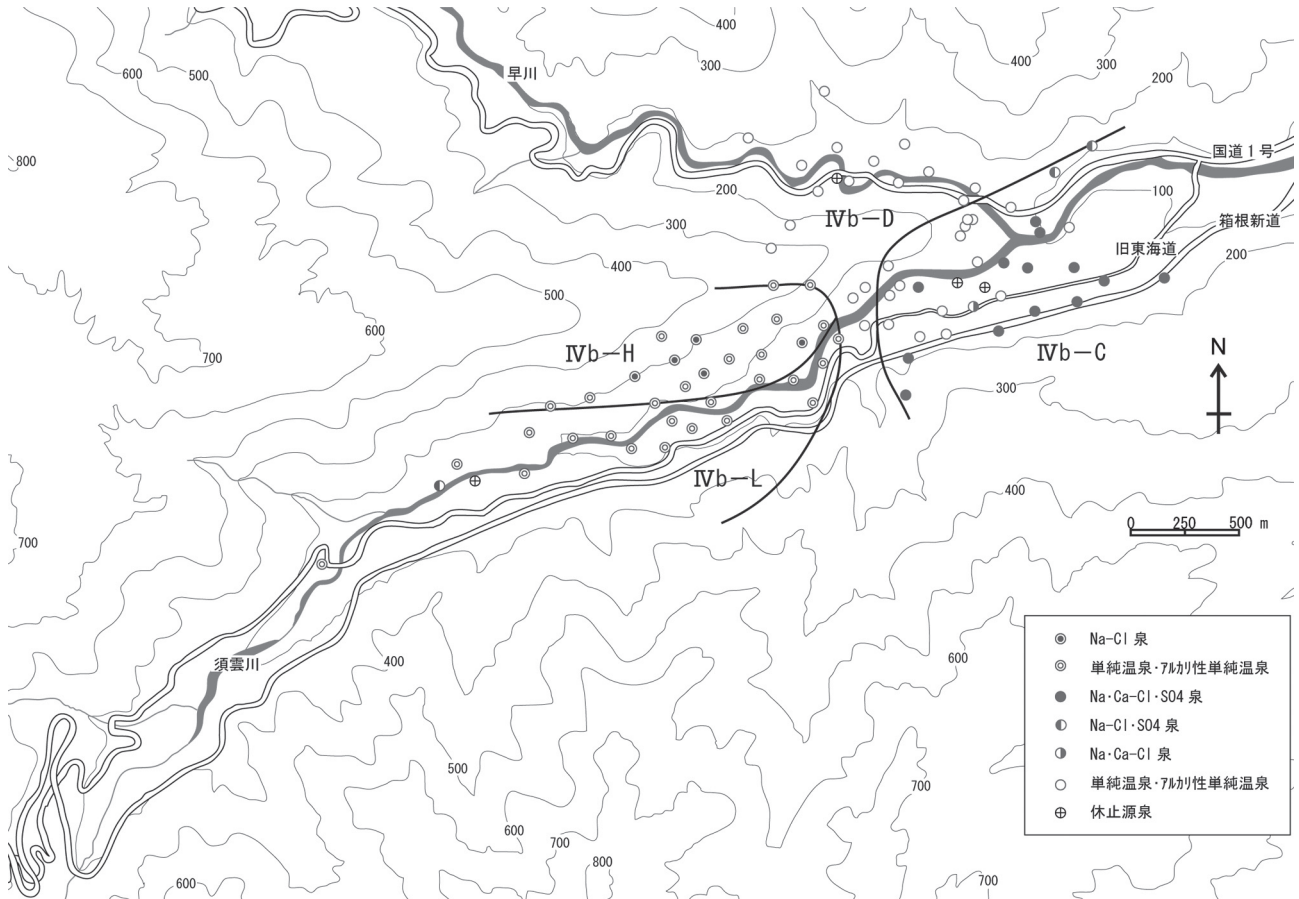


図 7. 1980 (昭和 55) 年箱根湯本地区の泉質分布. 図中の曲線は, 平野ほか (1972) による 1970 (昭和 45) 年時点の泉質グループの境界線を示す.

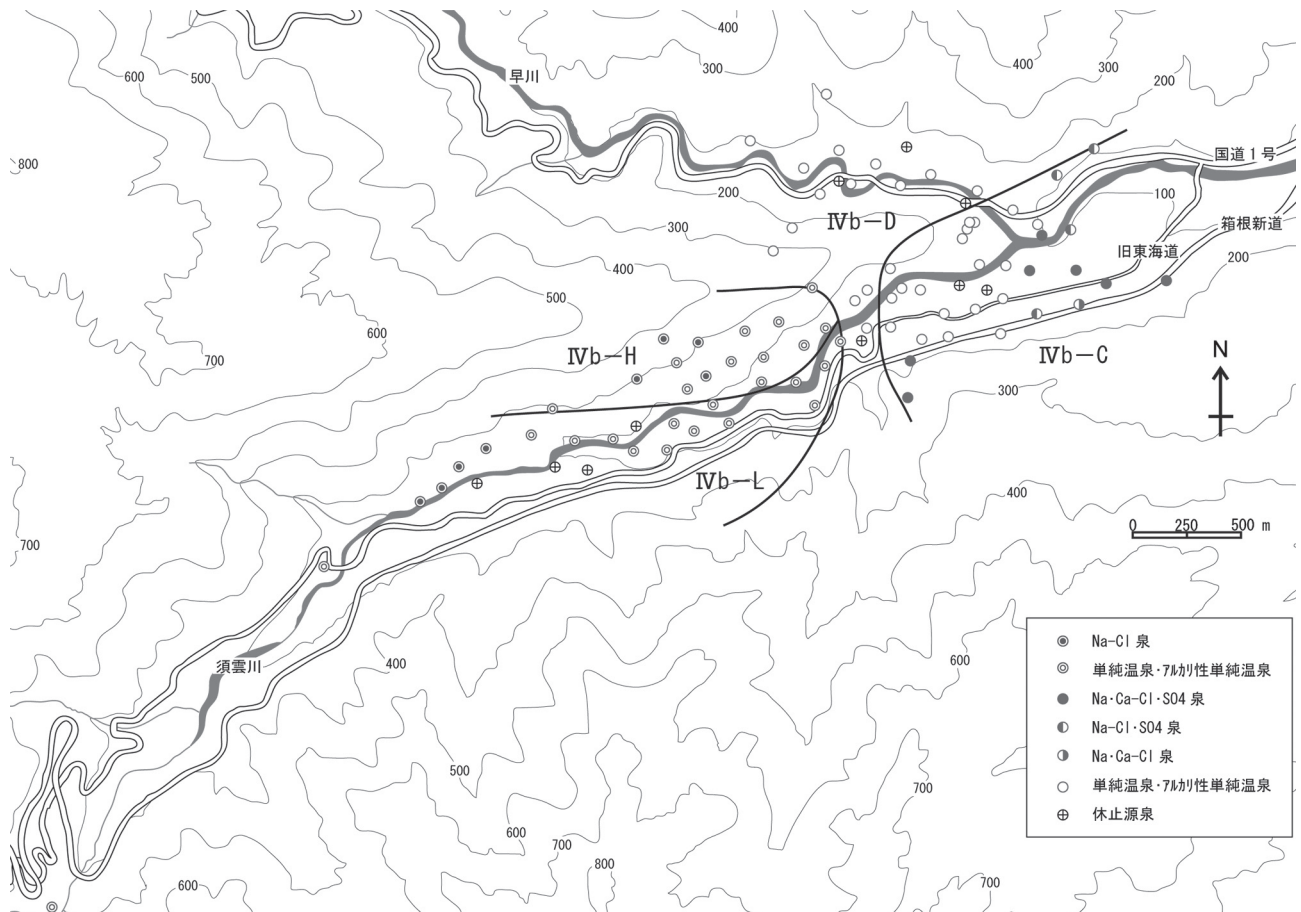


図 8. 1990 (平成 2) 年箱根湯本地区の泉質分布. 図中の曲線は, 平野ほか (1972) による 1970 (昭和 45) 年時点の泉質グループの境界線を示す.

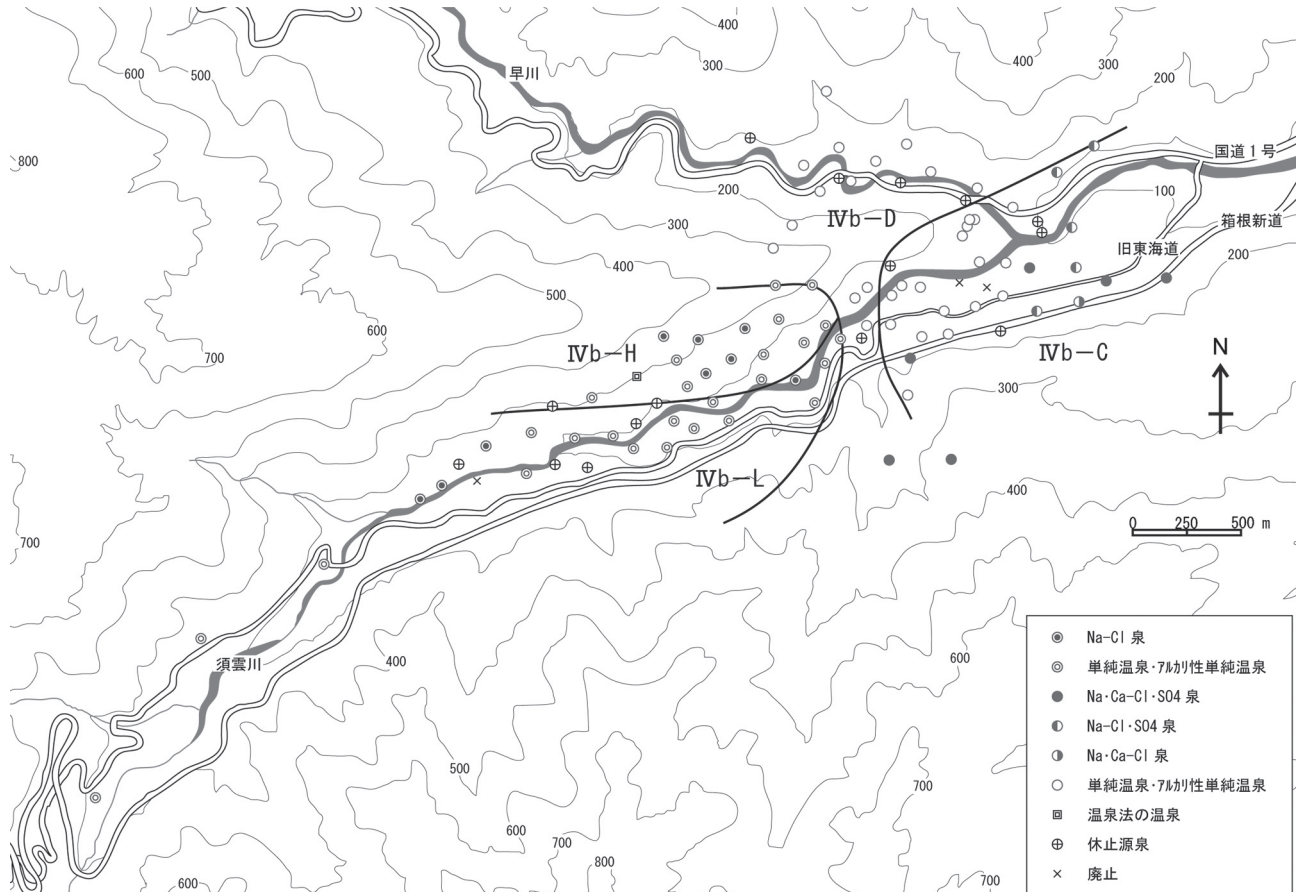


図 9. 2006 (平成 18) 年箱根湯本地区の泉質分布. 図中の曲線は, 平野ほか (1972) による 1970 (昭和 45) 年時点の泉質グループの境界線を示す.

が高濃度になる傾向が認められるが、Cタイプは、Cl⁻濃度に関係なくHCO³⁻濃度は一定である。また、Cl⁻とSO₄²⁻が共に低濃度であるため、図11では特徴が見いだせなかったが、Cl⁻とSO₄²⁻が共に低濃度でHCO³⁻濃度が高い源泉があり、これはDタイプとする。

陰イオンの成分比について、三角ダイヤグラムを図13に示した。A～Dの4つのグループは、三角ダイヤグラムにより濃度比を対比することで特徴がより明確になる。

Dタイプは、他の3タイプと比較してHCO³⁻の比率が60～80%と高く、Cl⁻及びSO₄²⁻の比率が低いことから、地下から上昇し成分を賦与するような温泉源の関

与がなく、浅層地下水が熱伝導により温泉となっている可能性が考えられる。

A、B、Cの3つのタイプについては、成分総計の大小に着目すると特徴的な分布となっている。Aタイプは、成分総計に関わらず全般にSO₄²⁻濃度比が8～13%と小さく、成分総計が多い源泉から成分総計の少ない源泉になるに従いCl⁻濃度比が減少し、HCO³⁻濃度比が増加する傾向がある。Cl⁻濃度比が最も高い源泉の成分総計1776mg/kg、Cl⁻濃度比86%、HCO³⁻濃度比5%に対して、Cl⁻濃度比が最も低い源泉では、成分総計241mg/kg、Cl⁻濃度比17%、HCO³⁻濃度比72%となっている。

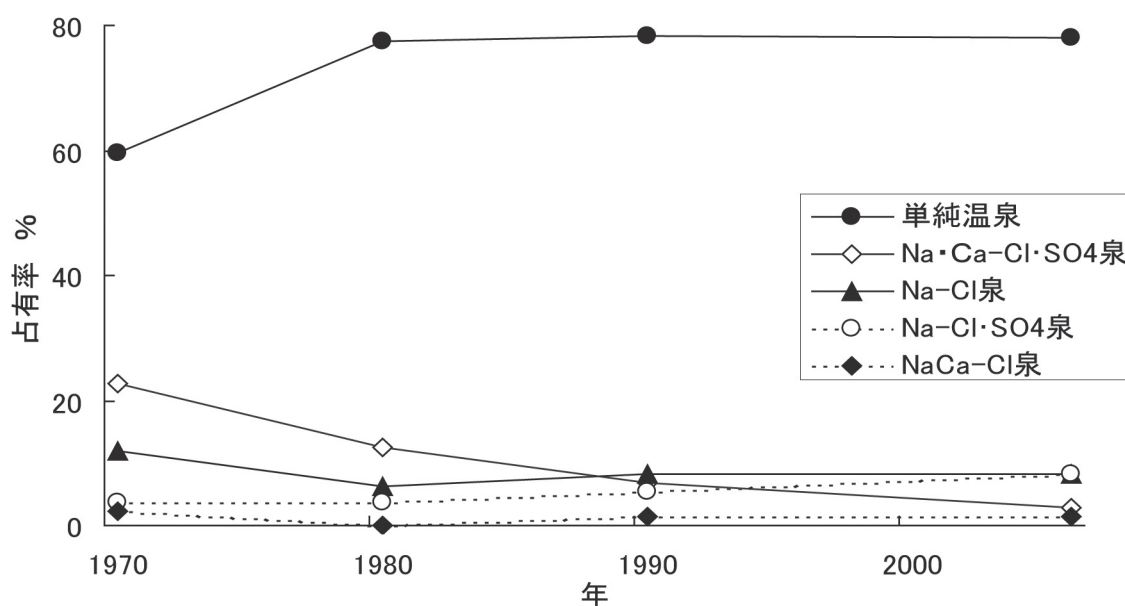


図10. 箱根湯本地区の泉質占有率の経年変化. 昭和40年代までに掘削された源泉を対象とした。

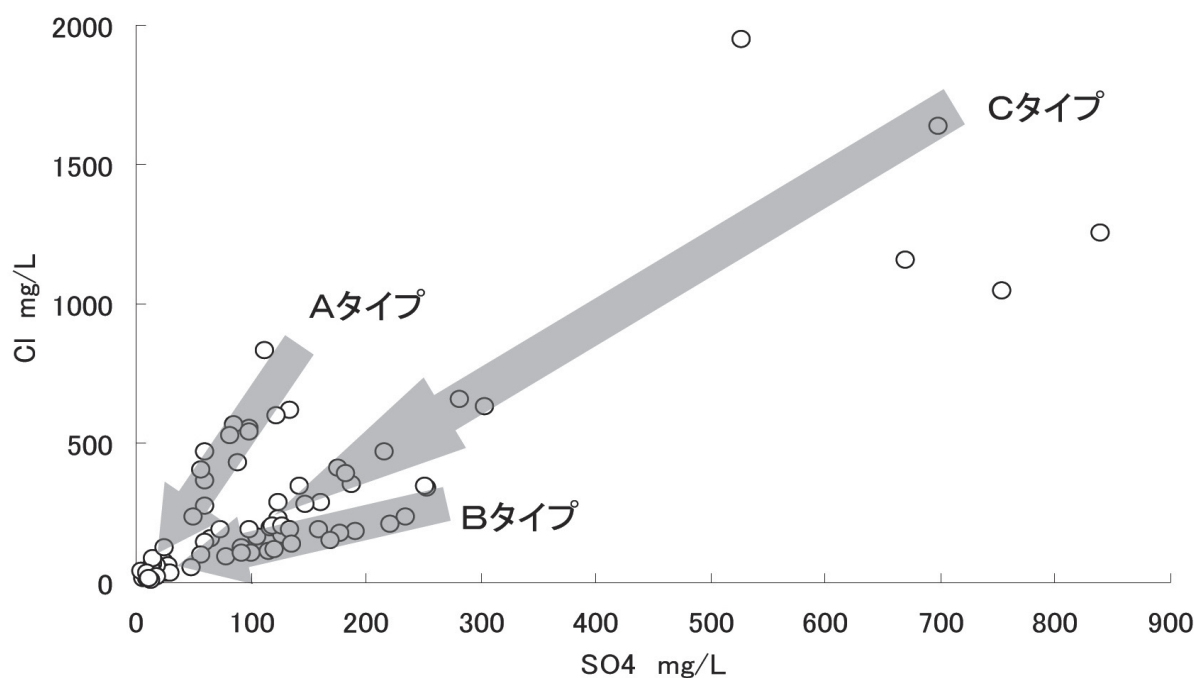


図11. 箱根湯本地区温泉の塩化物イオン (Cl⁻) 濃度と硫酸イオン (SO₄²⁻) 濃度の相関図. 図中の矢印は、各タイプごとの成分総計の多い源泉から少ない源泉への傾向を示す。

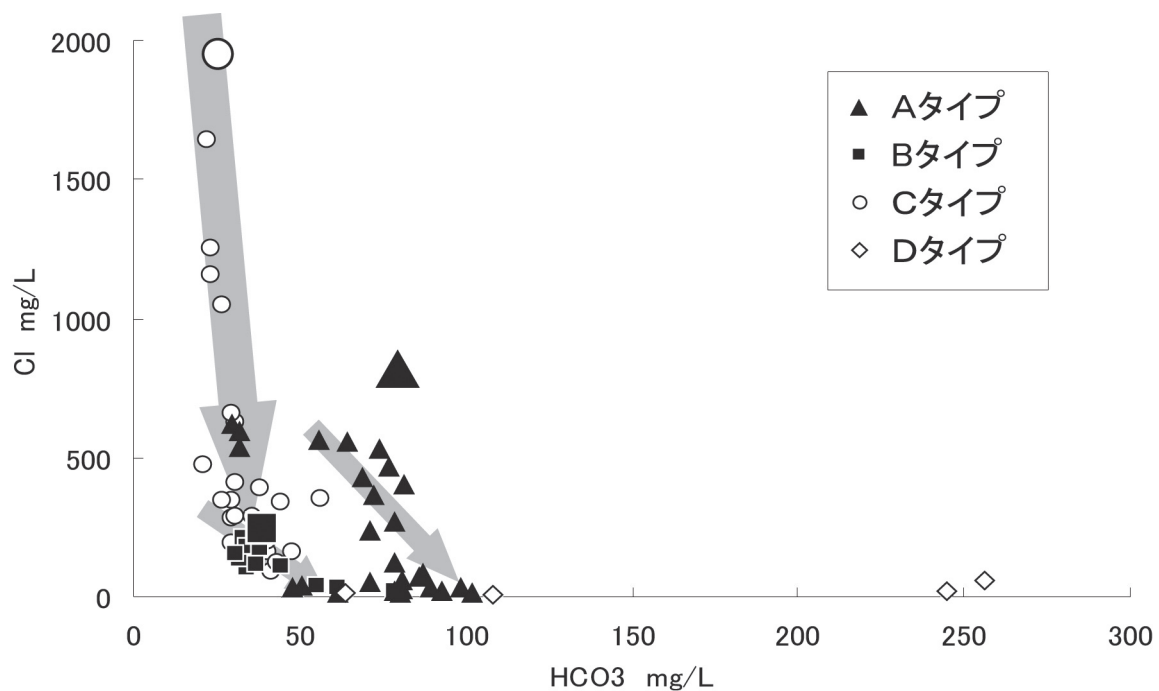


図 12. 塩化物イオン (Cl^-) 濃度と炭酸水素イオン (HCO_3^-) 濃度の相関図. 図中の矢印は, A～C タイプについて成分総計の多い源泉から少ない源泉への傾向を示す. 図中の記号でサイズの大きいプロットは, A～C タイプで成分総計が最も多い源泉を表す.

B タイプは、成分総計の少ない源泉になるに従って HCO_3^- 濃度の比率が増加し、 Cl^- 及び SO_4^{2-} 濃度の比率が減少する傾向が認められる。 Cl^- 濃度比が最も高い源泉の成分総計 850mg/kg、 Cl^- 濃度比 55 %、 SO_4^{2-} 濃度 40 %、 HCO_3^- 濃度比 5 %に対して、 Cl^- 濃度比が最も低い源泉では、成分総計 211mg/kg、 Cl^- 濃度比 29 %、 SO_4^{2-} 濃度比 10 %、 HCO_3^- 濃度比 61 %となっている。

C タイプは、成分総計に関わらず全般に HCO_3^- 濃度比が 1 ～ 12 %と小さく、成分総計が多い源泉から成分総計の少ない源泉になるに従い Cl^- 濃度比が減少し、 SO_4^{2-} と HCO_3^- の濃度比率が増加する傾向がある。成分総計が少なくなるに従い B タイプに組成が近くなってくるように見える。 Cl^- の濃度比が最も高い源泉の成分総計 4005mg/kg、 Cl^- 濃度比 83 %、 SO_4^{2-} 濃度比 16 %、 HCO_3^- 濃度比 1 %に対して、 Cl^- 濃度比が最も低い源泉では、成分総計 436mg/kg、 Cl^- 濃度比 56 %、 SO_4^{2-} 濃度比 32 %、 HCO_3^- 濃度比 12 %となっている。

陽イオンの成分比について、三角ダイヤグラムを図 14 に示した。陽イオンは、陰イオンのようにタイプ間で相違はあまり認められないが、C タイプは他のグループと比較してカルシウムイオンに富んでいることがわかる。

6.4. 各源泉の温度分布

図 15 には、源泉の温度分布を示した。先に仮定したエンドメンバーに着目すると、エンドメンバー 1 及びエンドメンバー 2 は 70℃以上である。エンドメンバー 3 は 60℃以上と、エンドメンバー 1 及び 2 と比較してやや温度が低い、いずれも高温の源泉であり、エンドメンバーが地下深所からの温泉源に最も近いとした仮定と調和的である。

6.5. 各泉質の地理的分布

A～D タイプの分布を図 16 に示した。各タイプの分布は地域的に特徴がある。A タイプは、湯坂山の南斜面を中心に、東は湯本茶屋字観音沢付近から西は須雲川字向河原付近まで分布する。こうしたことから、A タイプを「湯坂山グループ」と呼ぶこととする。B タイプは、塔之沢から湯本字湯場にかけて分布していることから「塔之沢・湯場グループ」と呼ぶ。C タイプは、早川、須雲川合流地点南側の古期外輪山北斜面を中心に、西側は湯本茶屋字片倉付近から箱根湯本駅周辺にかけて分布しており、「古期外輪山グループ」と呼ぶこととする。D タイプは、須雲川字勘山から畑宿字山根にかけて分布しており、「畑宿・須雲川グループ」と呼ぶこととする。

6.6. 各泉質の安定同位体比

箱根湯本地区温泉の酸素、水素同位体比の関係を示すデルタダイアグラムを図 17 に示した。図中の直線は箱根の天水線及び Matsuo *et al.* (1985) による Thermal Water Line (TWL) である。「畑宿・須雲川グループ」は天水線に平行にプロットされており、天水以外の温泉源の関与がないという成分についての検討結果を支持する。その他のグループについて概観すると、ほとんどの源泉が、TWL の高同位体比側から「畑宿・須雲川グループ」の示す範囲に向かう範囲にプロットされており、Matsuo *et al.* (1985) や石坂・栗屋 (2001) が述べている箱根温泉における天水と深部熱水の関係に対応した結果となっている。

図 17 を検討すると、グループ毎に酸素・水素同位体比の関係が異なっていることがわかる。図中の矢印は、「畑宿・須雲川グループ」を除いた 3 つのグループについて、成分総計の大きいものから小さいものへ向かう傾向を示すものであり、低濃度側 (低酸素同位体比側) の

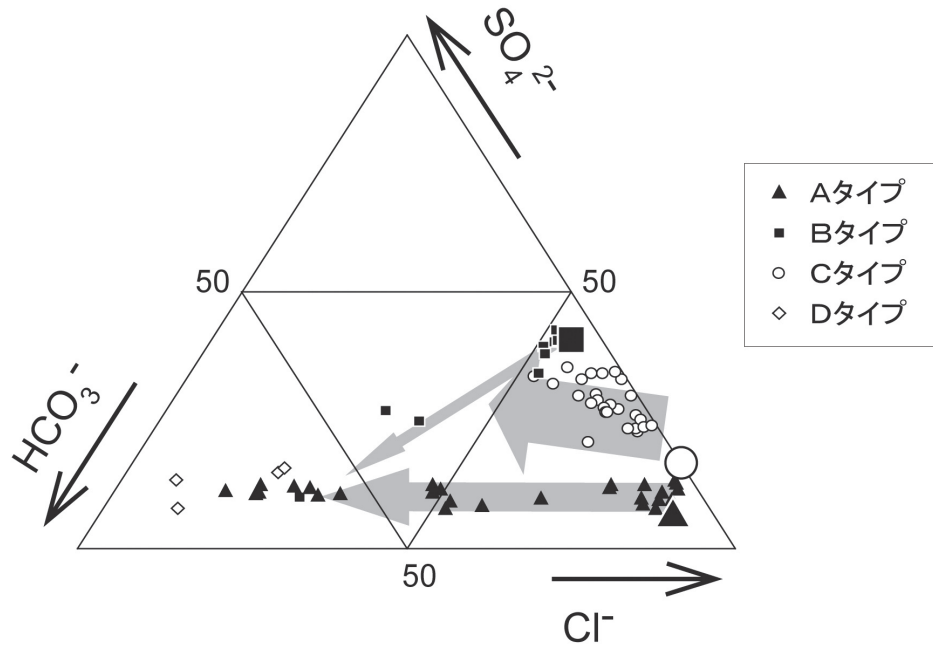


図 13. 陰イオンの成分比三角ダイヤグラム. 単位は当量%. 図中の矢印は, A~Cタイプの成分総計の多い源泉から少ない源泉への傾向を示す. 図中の記号でサイズの大きいプロットは, A~Cタイプで成分総計が最も多い源泉を表す.

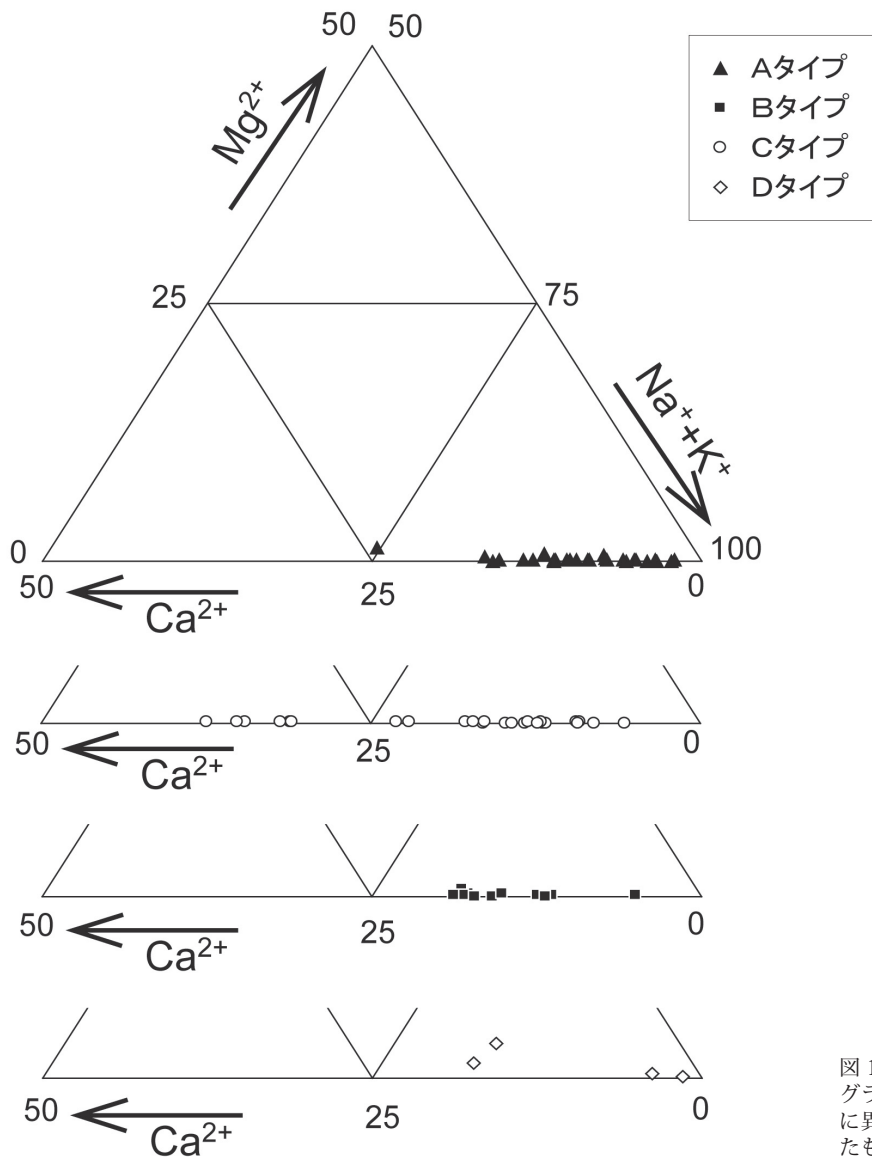


図 14. 陽イオンの成分比三角ダイヤグラム. 単位は当量%. タイプごとに異なるダイヤグラムにプロットしたものを重ねて示している.

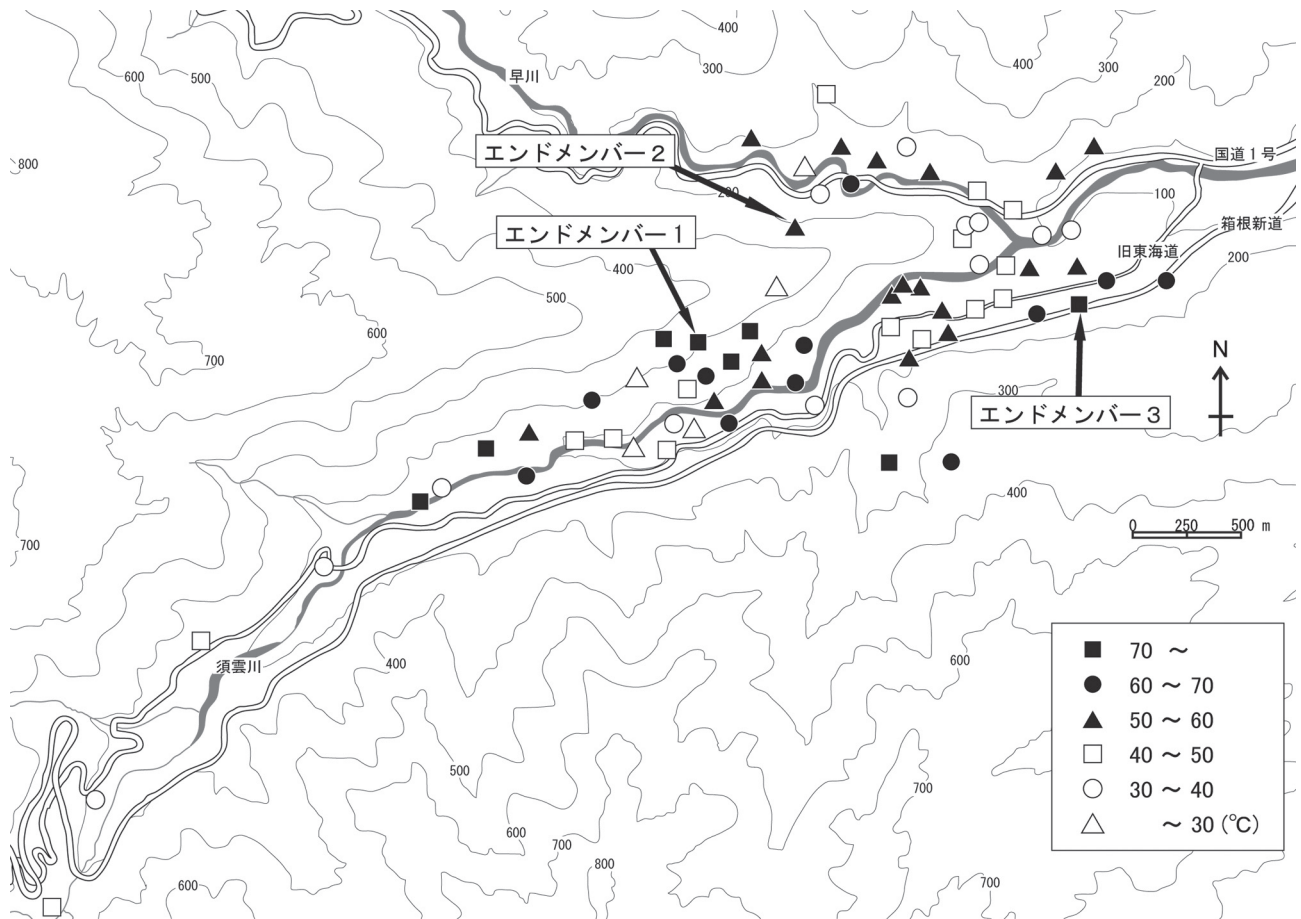


図 15. 箱根湯本地区の泉温分布図. 2006 (平成 18) 年調査のデータ.

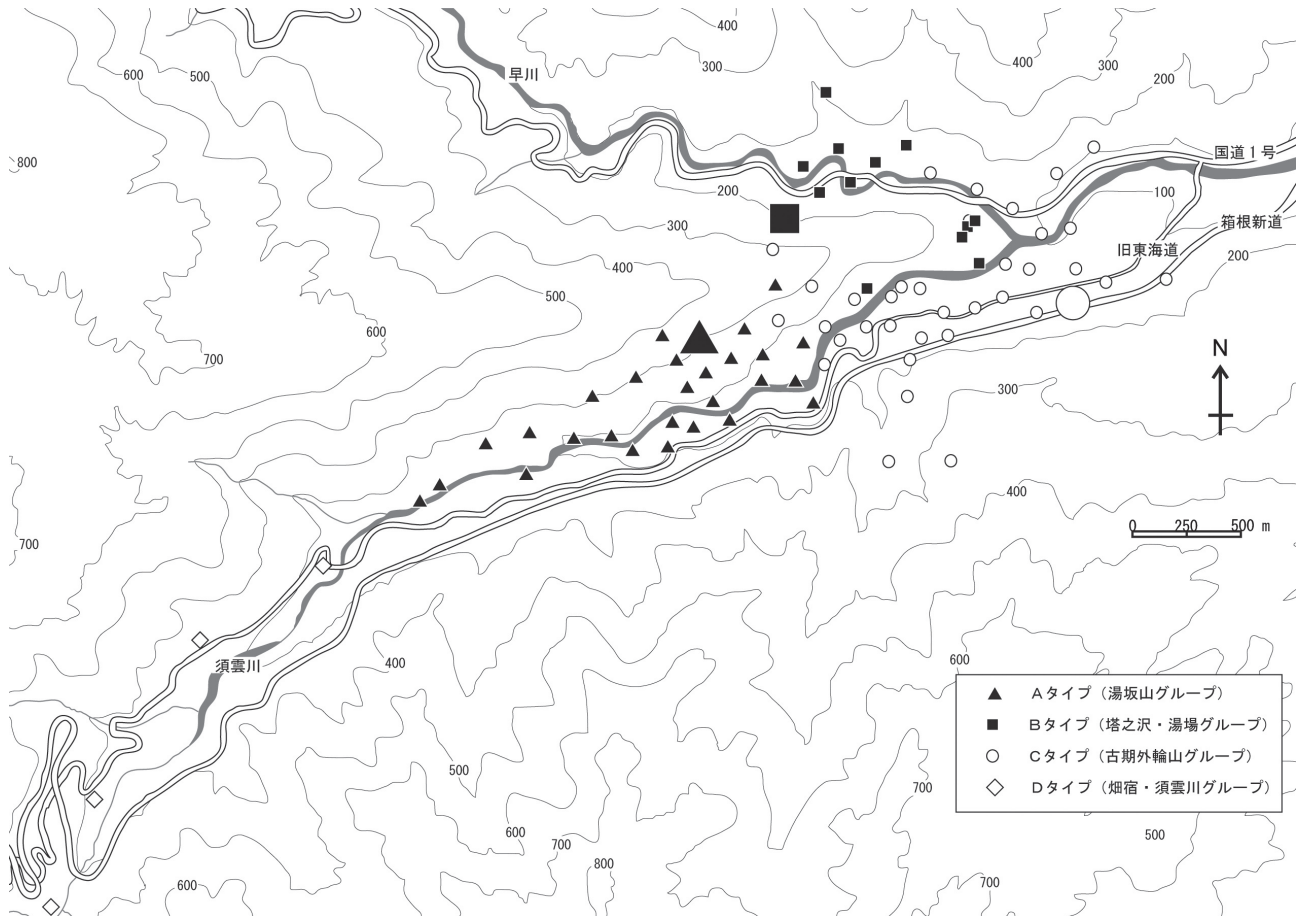


図 16. 箱根湯本地区源泉のタイプ別分布図. 図中の記号でサイズの大きくなっている源泉は、各タイプ (グループ) で成分総計が最も多い源泉を表す.

端点はほぼ共通しているが、グループごとに高濃度側の端点が異なっていることがわかる。

陰イオンの特徴によって分類した4つのグループが、酸素・水素同位体比の関係においても異なる傾向を示し、かつ、高濃度側の端点が異なっているのは、グループごとに関わっているエンドメンバーが異なるとした仮定と調和的である。

デルタダイアグラム上で、「畑宿・須雲川グループ」を除く3グループのエンドメンバーの同位体組成は、温泉源自体の同位体組成を考える上で重要である。これらのグループのうち「古期外輪山グループ」の端点はT W L上にあることから、温泉源としてはMatsuo *et al.* (1985)によって示された火山性の深部熱水が想定される。「湯坂山グループ」および「塔ノ沢・湯場グループ」の端点は、天水以外の関与がない(天水起源である)「畑宿・須雲川グループ」の低同位体比側から酸素同位体比のみが高くなった領域上にあることから、温泉源が、天水-岩石間の同位体交換反応による酸素同位体シフトを経ている可能性が考えられる。今後、溶存成分の形成機構とあわせて詳細に解析する必要がある。

6.7. 箱根湯本地区の温泉の成因

箱根湯本地区の温泉は、以上のことから、4つのエンドメンバー間の混合で説明ができる。4つのエンドメンバーの間では、各グループの成因について以下のようなモデルを仮定した。「湯坂山グループ」、「塔ノ沢・湯場グループ」及び「古期外輪山グループ」については、

2006年調査で得られた各グループの成分総計の最も多い源泉を温泉のエンドメンバーとしたが、今後の新規掘削等により、この成分比でもさらに成分総計の高い源泉が現れる可能性は十分ある。

「畑宿・須雲川グループ」は、 Cl^- と SO_4^{2-} が共に低濃度で HCO_3^- 濃度の比率が高いこと、さらに酸素、水素同位体比が天水線に平行にプロットされることから、地下深所からの温泉成分の供給はなく、地下浸透した降水(エンドメンバー4)が熱伝導により暖められて生成している。「湯坂山グループ」は、湯坂山の深所から上昇する熱水(エンドメンバー1; Cl^- 1000mg/L程度; SO_4^{2-} 150mg/L程度; HCO_3^- 50mg/L程度)が浅層の地下水(エンドメンバー4)と混合して生成している。「塔ノ沢・湯場グループ」は、塔ノ沢付近の比較的低温、低濃度の温泉源(エンドメンバー3; Cl^- 250mg/L程度; SO_4^{2-} 250mg/L程度; HCO_3^- 40mg/L程度)が浅層の地下水(エンドメンバー4)と混合して生成している。「古期外輪山グループ」は、地下深所の塩化物イオンと硫酸イオンに富み炭酸水素イオンの乏しい熱水(エンドメンバー2; Cl^- 2000mg/L程度; SO_4^{2-} 900mg/L程度; HCO_3^- 25mg/L程度)が、浅層の「塔ノ沢・湯場グループ」; エンドメンバー3)の温泉と混合することにより生成している(図18)。

今回仮定した4つのグループを、平野ほか(1972)による箱根湯本地区の4群の分類の分布と対比すると、「湯坂山グループ」はIV b-H群及びIV b-L群の分布域とほぼ一致し、成因についても調和的である。「古期

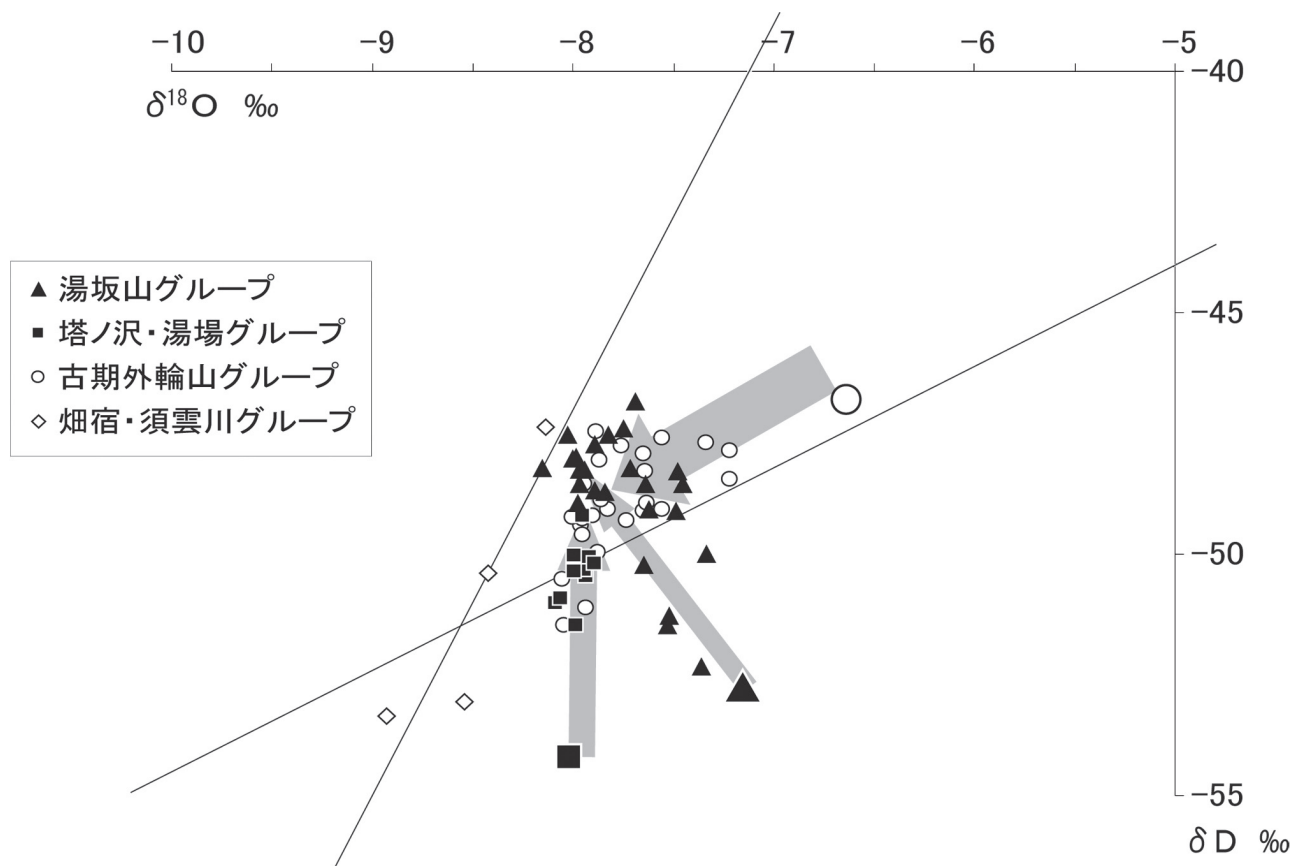


図17. 箱根湯本地区源泉の酸素・水素同位体比の関係. 図中の矢印は、A～Cタイプについて、成分総計の多い源泉から少ない源泉への傾向を示す. 図中の記号でサイズの大きくなっている源泉は、各グループで成分総計が最も多い源泉を表す.

外輪山グループ」はIV b-C群の大部分の分布域とほぼ一致する。「塔之沢・湯場グループ」はIV b-C群の一部及びIV b-D群の分布域と一致する。この2つのグループについては、平野ほか（1972）はIV b-C群が希釈されIV b-D群が生成するとしているのに対して、今回のモデルでは「古期外輪山グループ」を「塔之沢・湯場グループ」が希釈しているとする点が異なる。陰イオンの三角ダイアグラムで、BタイプがCタイプに向かって希釈されていること、酸素、水素同位体比のプロットがBタイプとCタイプで異なっていることからみて今回のモデルの仮定は妥当だと思われる。「畑宿・須雲川グループ」は、該当する区分はなく、箱根町須雲川、箱根町畑宿に所在する比較的最近に掘削された源泉のグループである。

以上のように、箱根湯本地区の4つの源泉グループは、溶存成分、酸素・水素同位体比ともにグループ毎に特徴が認められ、それぞれ異なった成因を持っていると考えられる。今後は、それぞれのグループ毎について、個別の源泉の掘削深度や水止め位置などを考慮した上で、よ

り詳細な解析を行うことにより箱根湯本地区温泉の成因の解明をするとともに、各泉質に応じた温泉保護対策を推進していきたいと考える。

7. まとめ

箱根湯本地区（箱根湯本温泉及び塔之沢温泉）の源泉について、経年変化を評価するとともに、成因について考察した。

1970（昭和45）年、1980（昭和55）年、1990（平成2）年及び2006（平成18）年の比較をしたところ、1990（平成2）年以降は溶存成分の減少が穏やかになっている傾向が認められた。しかし、箱根湯本温泉の中心部では溶存成分の減少が進んで塩類泉が減少し、単純温泉が増加している。

陰イオンの特徴などから、箱根湯本地区の温泉を4つのエンドメンバーに分類して、その混合により箱根湯本地区の温泉の成因が簡単に説明できることを示した。また、地域性から「湯坂山グループ」、「塔之沢・湯場グループ」、「古期外輪山グループ」及び「畑宿・須雲川グループ

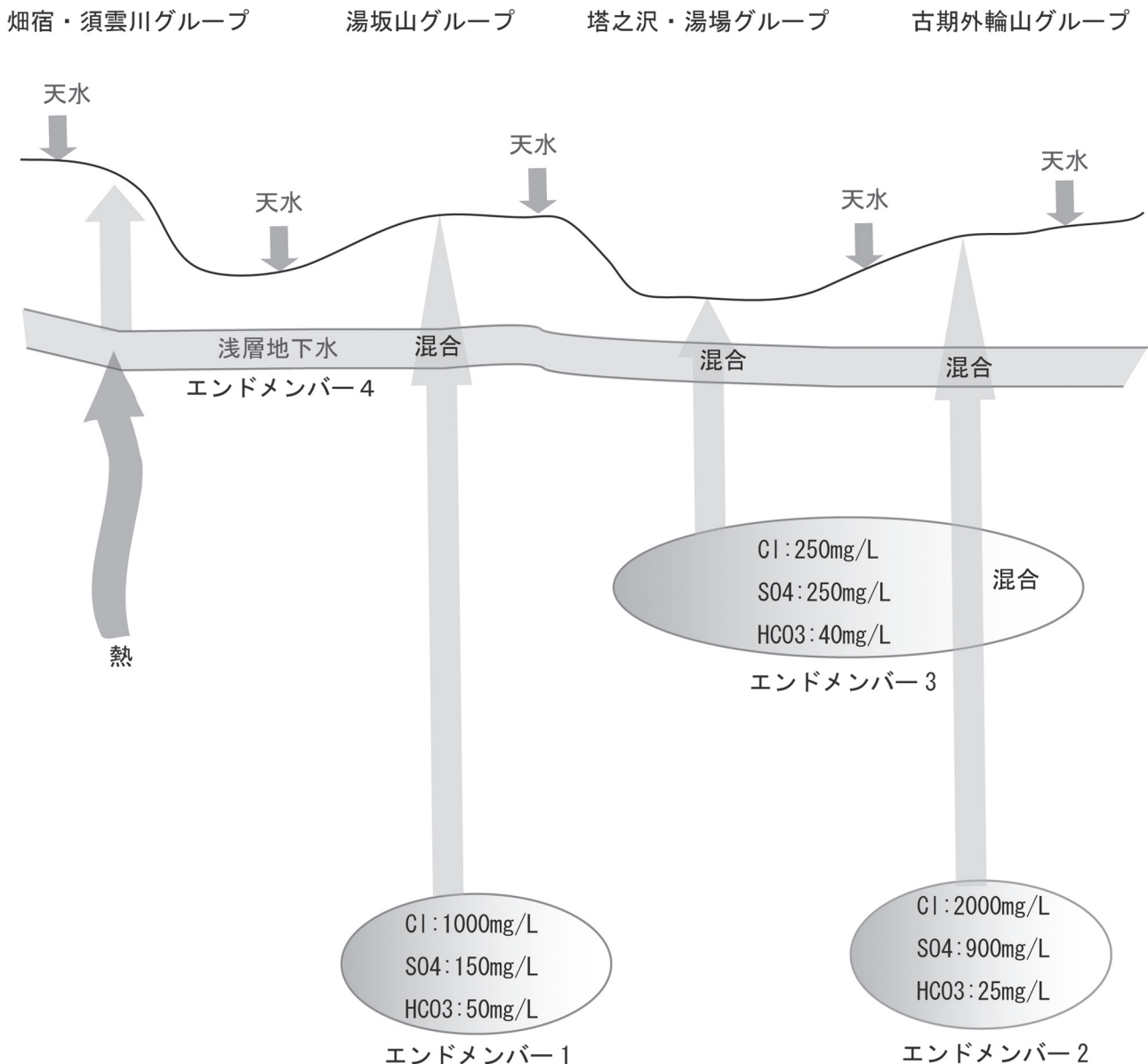


図 18. 箱根湯本地区の温泉の成因モデル。

プ」の4つに分類し、「湯坂山グループ」のエンドメンバーは湯坂山南斜面に、「塔之沢・湯場グループ」のエンドメンバーは湯坂山北斜面に、「古期外輪山グループ」のエンドメンバーは早川、須雲川合流地点南側の古期外輪山北斜面に、それぞれ湧出することを特定した。

謝辞

本稿を取りまとめるにあたり、次の方々にお世話になった。箱根湯本地区の源泉所有者の方々には、快く調査にご協力いただいた。小田原保健福祉事務所温泉課の方々には、源泉所有者の方々との橋渡しをしていただくとともに、現地調査時にご協力いただいた。温泉地学研究所萬年一剛主任研究員には、成因のモデル化について議論していただくとともに、的確なアドバイスをいただいた。温泉地学研究所本多亮技師、小田原啓技師には、作図にご協力いただくなど様々なフォローやアドバイスをいただいた。生命の星・地球博物館の山下浩之学芸員には、本稿を公表する機会を与えていただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

栗屋徹・平野富雄・大木靖衛, 1984. 深部熱水の pH と炭酸ガス分圧. 神奈川県温泉地学研究所報告, 15: 65-72.
平野富雄, 1994. 箱根二十湯. かなしん出版, 34-70.

平野富雄・栗屋徹・大木靖衛, 1986. 箱根湯本温泉の湧出状況について. 神奈川県温泉地学研究所報告, 17(5): 95-114.
平野富雄・大木靖衛, 1971. 箱根カルデラの地下水. 神奈川県温泉地学研究所報告, 2(3): 89-108.
平野富雄・大木靖衛・栗屋徹, 1972. 箱根湯本・塔之沢の泉質, 神奈川県温泉地学研究所報告. 3(3): 109-130.
石坂信之・栗屋徹, 2001. 神奈川県各地の温泉水の水素および酸素安定同位体比の特徴. 神奈川県温泉地学研究所報告, 32: 1-6.
神奈川県保健福祉部生活衛生課, 2008. 平成 18 年度温泉利用状況報告書.
神奈川県温泉地学研究所, 1992. 平成 3 年度温泉保護対策調査報告書.
Matsuo, S., M. Kusakabe, M. Niwano, T. Hiran & Y. Oki, 1985. origin of thermal waters from the Hakone geothermal system, Japan. *Geochem.J.*, 19: 27-44.
Oki, Y. & T. Hirano, 1970. The Geothermal System of Hakone Volcano, *Geothermics*(1970)-special issue 2, U.N. Symposium on the development and utilization of geothermal resources, Pisa 1970. Vol.2, Part 2, 1157-1166.
大木靖衛・平野富雄・田島綾子, 1968. 箱根温泉の成因. 神奈川県温泉地学研究所報告, 1(6): 35-50.