

原 著

別府温泉南部地域における温泉水の流動経路

京都大学理学部附属地球物理学研究施設

大 沢 信 二, 由 佐 悠 紀, 北 岡 豪 一

(平成6年8月3日受付, 平成6年10月27日受理)

Flow Paths of Thermal Groundwaters
in the Southern Part of Beppu, Japan

Shinji OHSAWA, Yuki YUSA and Koichi KITAOKA

Beppu Geophysical Research Laboratory, Faculty of Science, Kyoto University

Abstract

A stratified structure of thermal groundwaters has been found by a scientific drilling (named as BGRL well) in the southern part of Beppu, Japan; the Ca, Mg-HCO₃ type water exists at the zone shallower than 200m deep, whilst the Na-Cl and Na-HCO₃ type waters are at the depths of 250m and 300m respectively. The numerical analysis by a mixing model using chemical compositions of the waters indicates that those waters mix little each other around the site of the BGRL well. Compared chemical characteristics of the BGRL well waters with those of other waters distributing in the whole study area, several flow paths of thermal waters have been detected clearly, through which the three types of waters are flowing respectively.

1. はじめに

別府温泉は、標高1,375mの鶴見岳を主峰とする火山群の東麓から別府湾に至る東西5 km、南北8 kmの扇状地のほぼ全域に展開する一大温泉地である。これまでに別府温泉では、扇状地のほぼ南と北の縁に位置する別府八湯と呼ばれる自然湧出の温泉や地獄を核に約3,000口の温泉が掘削された。最近の調査によれば、活動中の温泉井は2,244口、一日当たりの流出水量は約5万トン、熱量は約350MWとされている¹⁾。別府全域での温泉開発が進んだことにより、温泉水頭・地下温度分布や温泉の水質などの各種資料が蓄積され、比較的浅部での温泉水系の概要が明らかとなった。特に南部地域では、温泉水の生成過程や流動過程の解明を目的とした研究が行われてきた^{2~5)}。それらの成果の概要を示すと以下ようになる。別府温泉南部地域の温泉水の起源となる熱水は、塩化物イオンを主体とした典型的な深部熱水(Cl型熱水)と、それより分離した蒸気によって浸透水が加熱されてきた炭酸水素イオンを主成分とする2種類の蒸気加熱型熱水(HCO₃型熱水; HCO₃濃度の大小で区別される)である。これらの熱水はそれぞれが扇状地高地部の異

なる場所に分布しており、扇状地堆積層内を層状の流動形態をとりながら低地部に向かって流動しているものと考えられる。Cl型温泉水とHCO₃濃度が低いHCO₃型温泉水は、ほぼ地球物理学研究施設(BGRL; 図3参照)が位置する辺りで互いに交錯し、しかもHCO₃型の温泉水がCl型の温泉水の上部を流動していると推定される。もう一方のHCO₃型温泉水は、境川の南側をこれに添うような形で流動していると推定される。以上3種類の熱水性温泉水は、標高50m付近の扇状地高地部から低地部に移る辺りから、流動の途中で冷地下水による希釈などを受け始めるために、さまざまな水温や成分濃度を示す温泉水を派生する。これら多種多様な温泉水は、扇状地低地部に分布する沸騰泉や沸点以下の一般温泉として観察される。

京都大学地球物理学研究施設では、地下温泉水流動系の層構造の検出を目的の一つとして、温泉実験井を掘削する計画が立てられた。掘削は、1987年11月から1988年2月にかけて、2種類の熱水性温泉水が交錯し、層状の構造を形成していると推定されている場所に当たる研究施設構内で行われた。掘削作業の概要・揚水試験や温度検層の結果・各種採取試料の記載などについては、別途報告されているので、そちらを参照されたい⁶⁾。本研究では、まず掘削で得られた温泉水の化学的特徴を明確にし、化学分析値を用いた数値解析などにより温泉水流動系の層構造に関する検討を行った。続いて、これらの結果と別府南部の全域から得られた温泉水の化学的データを対比させることにより、別府温泉南部地域における温泉水の流動経路に関する考察を加え、同時に流動経路図の作成を試みた。本論文では、これらの結果について報告する。

2. 温泉実験井より得られた温泉水の化学的特徴

実験井の仕上がり深度は300mである。温泉水試料は、50m掘削するごとに最下部11mの範囲に孔明管をもつケーシングパイプ(ただし250m深と300m深での孔明管の長さは22m)を挿入し、エアリフト方式によって揚水して地表で採取された。より下部の水の採取は、先に挿入したケーシングパイプより小径のものを順次挿入して行き、上方に位置する孔明管を塞ぐことにより行われた。採取された水試料の主要成分の化学分析値を表1に示す(ここで各水試料の名称に付された深度は、シンボリックなものである)。また、主要陰イオンである塩化物イオンと炭酸水素イオン・主要化学成分のヘキサダイアグラムおよび水温の鉛直分布を図1⁶⁾に示す。水温の鉛直分布は、温泉実験井掘削終了3週間後に測定されたものである。温度は浅層では深さとともに徐々に上昇するが、地表から130m深付近より下位で急上昇が見られ、深さ230m付近で151.3℃の最高温度に達する。それ以深では低下し、孔底では、96.0℃であった。ここで得られた特徴的な温度プロファイルは、高温熱水が側方から流動してきていることを示していると考えられる。図1に見られるように、温度と水の塩化物イオン濃度のプロファイルがよく似ていることから230m付近

Table 1 Chemical compositions of the waters sampled from the well of the Beppu Geophysical Research Laboratory, Kyoto University; concentrations are in mg/l, units of isotope ratios are ‰

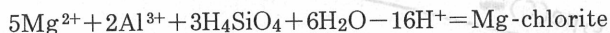
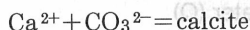
| Depth (m) | Screen position (m) | Temp. (°C) | pH | Na | K | Ca | Mg | Cl | HCO ₃ | SO ₄ | δD | δ ¹⁸ O |
|-----------|---------------------|------------|-----|------|------|------|------|------|------------------|-----------------|-------|-------------------|
| 50 | 39-50 | 20.9 | 7.3 | 32.3 | 3.6 | 20.5 | 10.5 | 17.5 | 127 | 34 | -50.2 | -7.82 |
| 100 | 89-100 | 42.0 | 6.9 | 73.8 | 13.1 | 57.9 | 46.7 | 36.9 | 569 | 60 | -54.8 | -8.73 |
| 150 | 139-150 | 54.4 | 7.0 | 97.5 | 13.3 | 41.5 | 44.2 | 42.1 | 536 | 78 | -56.1 | -8.88 |
| 200 | 189-200 | 125.6 | 7.2 | 154 | 16.8 | 65.4 | 48.2 | 65.7 | 714 | 84 | -55.5 | -8.78 |
| 250 | 228-250 | 147.9 | 8.8 | 380 | 23.0 | 1.4 | 7.1 | 282 | 390 | 166 | -51.9 | -7.18 |
| 300 | 278-300 | 101.8 | 8.4 | 229 | 17.9 | 5.8 | 6.1 | 64.6 | 487 | 85 | -53.1 | -8.17 |

を流動している150℃以上の高温熱水は、Cl型の熱水であるとみて間違いないであろう。これより浅部に存在する水は、塩化物イオン濃度に対して炭酸水素イオン濃度の相対的に高いHCO₃型の水である。したがって以上の結果は、「Cl型とHCO₃型の2種類の熱水性温泉水が、ほぼ地球物理学研究施設の位置する辺りで互いに交錯し、しかもHCO₃型の温泉水がCl型の温泉水の上部を流動している」というこれまでの推定を支持するものであると言える。

一方、230m以深で見られた温度の逆転とCl型熱水の下部のHCO₃型の水の存在は、実験井掘削計画の時点では予想されていなかったものである。これまでの研究のように水質区分を陰イオンのみで行う方法をとるならば、230m以深に存在するHCO₃型の水と200m以浅にあるHCO₃型の水は同種のものとして判断されてしまう。しかし、表1に示した化学分析値を見ると、陽イオン組成は全く違っているのが分かる。

即ち、前者の主要陽イオンはナトリウムであるが、後者のそれは前者に比べ相対的にカルシウムとマグネシウム濃

度が高い。また、水の安定同位体についてのデータ(表1)にも陽イオンと同様に違いが見られる。即ち、100~200m深から採取されたHCO₃型の水のδDとδ¹⁸Oはそれぞれ-54.8~-56.1‰、-8.73~-8.88‰であるのに対し、300m深のHCO₃型の水のδDとδ¹⁸Oはそれぞれ-53.1‰、-8.17‰であり、δDで1.7‰、δ¹⁸Oで0.56‰の差が見られる。この差は測定誤差を超えた有意な差である。以上のデータは、230m以深に存在するHCO₃型の水と200m以浅にあるHCO₃型の水が、成因の異なる別種の水であることを示唆している。ここでまずCl型温泉水の上下を流動する2種類のHCO₃型の水が、研究施設温泉実験井より上流部で一つの流れである可能性について考察を行ってみることにする。200m以浅を流動するHCO₃型の水の陽イオンの主体はCaとMgであり、230m以深を流れるHCO₃型の水のそれはNaであることはすでに述べた。これらの温泉水の陽イオン組成を決めている化学反応としては次のものが考えられる。



なお、ここで取り上げた鉱物は熱水変質帯で普通に見られるものであり、また、本実験井においてもその存在が確認されている⁷⁾。以上の平衡反応はともに温度依存性をもち、温度上昇とともに平衡は右へ移動する。言いかえると、水温が高いほど上記の鉱物の沈殿量は増し、溶液中の陽イオン濃度は相対的にNa>Ca, MgとなりNa-HCO₃型の温泉水が形成される。よって、もとも

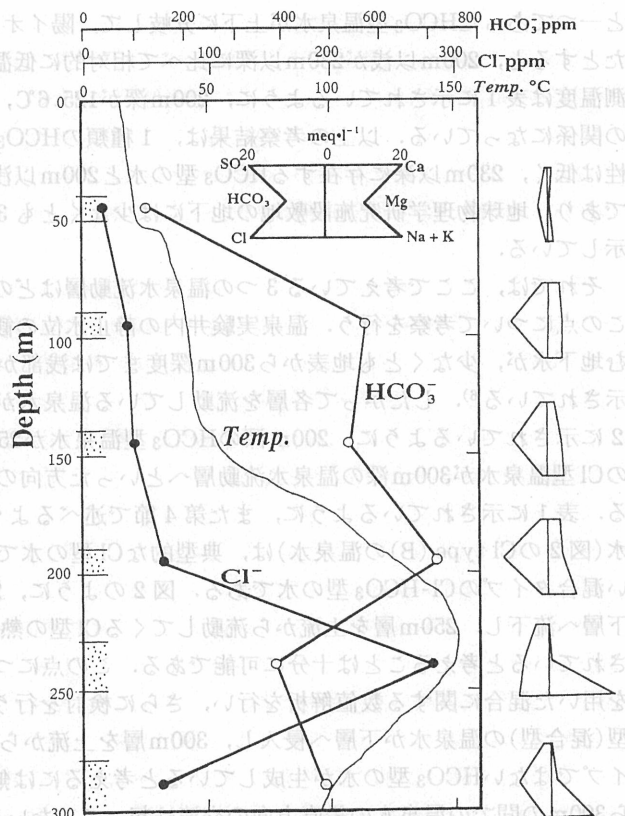


Fig. 1 Vertical profiles of temperature and chemical composition in the drilled well of the Beppu Geophysical Research Laboratory (BGRL well) (after Yusa et al, 1994)

と一つであった HCO_3 型温泉水が上下に分岐して、陽イオン組成の異なる HCO_3 型の温泉水になったとすると、200m以浅が230m以深に比べて相対的に低温となっているはずである。しかし、実測温度は表1に示されているように、200m深が125.6℃、300m深が101.8℃であり予想と全く逆の関係になっている。以上の考察結果は、1種類の HCO_3 型温泉水の分岐という流動形態の可能性は低く、230m以深に存在する HCO_3 型の水と200m以浅にある HCO_3 型の水はむしろ別のものであり、地球物理学研究施設敷地の地下には少なくとも3層構造の温泉水流動が存在することを示している。

それでは、ここで考えている3つの温泉水流動層はどの程度独立したものなのだろうか。次にこの点について考察を行う。温泉実験井内の静止水位の観測から、研究施設付近では温泉水を含む地下水が、少なくとも地表から300m深度までは浅部から深部へ向かう水理状態にあることが示されている⁶⁾。したがって各層を流動している温泉水が互いに混合しているものとすれば、図2に示されているように、200m深の HCO_3 型温泉水が250m深の温泉水流動層へ、また250m深のCl型温泉水が300m深の温泉水流動層へといった方向の水の流れによる混合であると考えられる。表1に示されているように、また第4節で述べるように温泉実験井の250m深を流れる温泉水(図2のCl type (B)の温泉水)は、典型的なCl型の水ではなく、厳密には HCO_3 濃度がやや高い混合タイプのCl- HCO_3 型の水である。図2のように、200m深を流動する HCO_3 型の温泉水が下層へ流下し、250m層を上流から流動してくるCl型の熱水Pに侵入してCl- HCO_3 型の水が形成されていると考えることは十分に可能である。この点については次節において、水の化学分析値を用いた混合に関する数値解析を行い、さらに検討を行う。一方、250m深を流動する HCO_3 -Cl型(混合型)の温泉水が下層へ侵入し、300m層を上流から流動してくる熱水と混合して、混合タイプではない HCO_3 型の水が生成していると考えするには無理がある。したがって、深度250mから300mの間での温泉水の鉛直方向の交流は起っていないと考えてよいであろう。温泉実験井250m深から300m深の間での水位の低下は、小さいことが示されており⁶⁾、この観測結果はこの考えを支持するものである。よって、250m深の温泉水と300m深のそれとの混合はないとして差し支えないと考える。

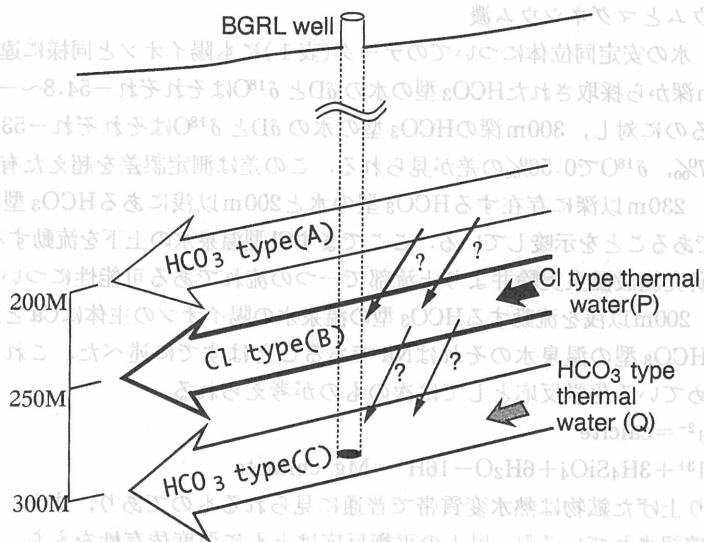


Fig. 2 Mixing model of thermal groundwater flows at the depths ranging from 200m to 300m around the BGRL well

3. 実験井温泉水の化学分析値の解析

研究施設実験井200m深と250m深の温泉水の混合状況について検討を加えるために、各深度で採取された温泉水の化学分析値を用いた混合計算を行った。計算の手続きを以下に示す。温泉実験井内の静止水位の観測から、研究施設付近では温泉水を含む地下水が、少なくとも地表から250m深までは浅部から深部へ向かう水理状態にあることが示されていることは先に述べた⁶⁾。そこで図2に示されているように、実験井250m深の上流から流動してくるある化学組成をもったCl型熱水Pに、200m深のHCO₃型の温泉水Aが上部より侵入・混合し、250m深のCl型温泉水Bが形成されているという2成分混合モデルを考える。ここでPとAの混合により溶存成分の付加や除去(例えば、流動層岩石の溶解や鉱物の沈殿)がない、あるいは無視できるほどであるとすれば、以下に示す混合過程における7種の化学成分に関する物質保存の式(1)~(7)と熱水Pに関する電気的中性の式(8)が立てられる。

$$Na : C_P,Na \cdot X + C_{A,Na} \cdot (1 - X) = C_{B,Na} \quad (1)$$

$$K : C_P,K \cdot X + C_{A,K} \cdot (1 - X) = C_{B,K} \quad (2)$$

$$Ca : C_P,Ca \cdot X + C_{A,Ca} \cdot (1 - X) = C_{B,Ca} \quad (3)$$

$$Mg : C_P,Mg \cdot X + C_{A,Mg} \cdot (1 - X) = C_{B,Mg} \quad (4)$$

$$Cl : C_P,Cl \cdot X + C_{A,Cl} \cdot (1 - X) = C_{B,Cl} \quad (5)$$

$$HCO_3 : C_P,HCO_3 \cdot X + C_{A,HCO_3} \cdot (1 - X) = C_{B,HCO_3} \quad (6)$$

$$SO_4 : C_P,SO_4 \cdot X + C_{A,SO_4} \cdot (1 - X) = C_{B,SO_4} \quad (7)$$

$$C_P,Na / 22.99 + C_P,K / 39.1 + C_P,Ca / 20.04 + C_P,Mg / 12.16 = C_P,Cl / 35.45 + C_P,HCO_3 / 61.02 + C_P,SO_4 / 48.04 \quad (8)$$

ここに、C_P、C_A、C_Bはそれぞれ熱水P、温泉水A、温泉水Bの化学成分濃度、Xは熱水Pの混合率を示す。以上の式のC_{A,Na}-C_{A,SO₄}とC_{B,Na}-C_{B,SO₄}(計14変数)に数値を代入すると、熱水Pの混合率Xと化学組成が一義的に求まる。温泉水Aの化学成分濃度(C_{A,Na}-C_{A,SO₄})に200m深の温泉水の化学分析値を、温泉水B(C_{B,Na}-C_{B,SO₄})のそれに250m深の分析値を代入して(1)~(8)を解くと、表2に示した結果となる。温泉水Aに対する熱水Pの混合率Xは、0.97という結果が得られた。これは温泉水Bが熱水Pとほとんど同じ化学組成をもつことを表わしており(表1と表2を対比すると明らか)、200m深のHCO₃型温泉水Aと250m深のCl型温泉水Bが、少なくとも掘削地点付近においては、ほとんど交流していないことを示している。

以上の検討と前節の議論から、3種類のほぼ完全に独立した温泉水流動層の存在が十分に明らかにされたとしてよいであろう。そこでこれより以後は、温泉水の陽イオン組成の特徴も加味し

Table 2 Result derived from the calculation on the mixing of waters between 200m and 250m depths in the drilled well of the Beppu Geophysical Research Laboratory

Mixing Ratio of Thermal Water P : 0.97
Calculated Chemical Composition of Thermal water P (in mg/l)

| | |
|------------------|--------|
| Na | 390 |
| K | 23 |
| Ca | little |
| Mg | 6 |
| Cl | 293 |
| HCO ₃ | 379 |
| SO ₄ | 170 |

て、300m深に存在するHCO₃型の温泉水をNa-HCO₃型、200m以浅にあるHCO₃型のそれはCa、Mg-HCO₃型、また250m深のCl型の温泉水はNa-Cl型とする分類法をとることとする。

本検討の結果は、京都大学地球物理学研究施設の地下300mの深度を流動するNa-HCO₃型の新たな温泉水の存在を示しており、実験井の掘削が温泉水流動の層構造の検出という初期の目的以外に、これまで認識されていなかった新たな温泉水流動を見出すという重要な成果をもたらしたことをここに明記しておきたい。

4. 南部全域の温泉と温泉実験井との水質化学的対比

これまでの検討から、地下温泉水の深度別採取を目的とする実験井掘削の意義が理解されよう。しかし、そうした実験井が万能であるわけではなく、欠点を合わせ持つこともまた事実である。即ち、地下における温泉水の流動は3次元的な現象であるが、1本の温泉実験井の掘削ではそれを1次元的な側面からしか捉えられないということである。もっとも、複数の地点で掘削を行えば、実際の次元に即した情報を手に入れることは可能である。しかし、これは潤沢な資金を必要とするため、今すぐに行なえるというものでもない。ところが幸いなことに、本研究の対象地域である別府南部地域の温泉はそのほとんどが掘削井であるため、それらから流動に関する情報を引き出せることが期待できる。即ち、科学的な調査を目的としていないため、地表から最終掘削深度までの情報をまんべんなく得ることは困難であるが、温泉井の孔底付近を流動する温泉水の情報の入手は可能である。そこで、地下における温泉水の流動経路に関する考察を行うための前段階として、温泉実験井の掘削とはほぼ時期を同じくして採取された南部全域の温泉水の化学分析値と温泉実験井から得られた各温泉水のそれと比較してみることにした。

検討に用いた別府南部全域から得られた温泉水の主要化学成分の分析値は、沸騰泉・沸点以下の泉温を示す一般温泉を合わせ約100試料のものである⁸⁾。沸騰泉の水試料は1985年7月から9月にかけて、一般温泉の試水は1989年の3月中に採取されたものである。温泉水試料の採取位置を、京都大学温泉実験井の位置(BGRL)とともに図3に示す。図4は、温泉水の化学分析値を用いた主要7成分による水質のキーダイアグラムである。通常作成されるキーダイアグラムでは、硫酸イオンは塩化物イオンと対して表わされる。しかしながら、別府温泉では、硫酸イオンは炭酸水素イオンと同じく蒸気加熱型の温泉水に特徴的な成分であると考えられているので¹⁾、本研究では炭酸水素イオンと対して表わすことにした。これ以後、この図を改変キーダイアグラムと呼ぶことにする。なお、通常のキーダイアグラムも

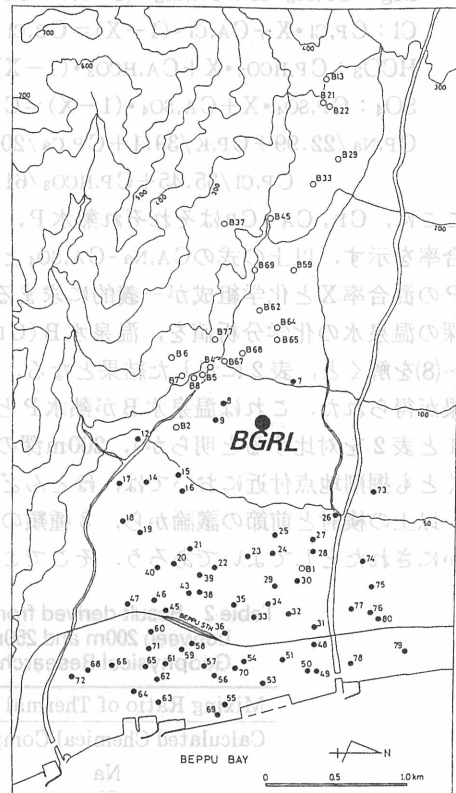


Fig. 3 The studied area showing sampling sites of thermal waters
 ●BGRL: Beppu Geophysical Research Laboratory, ○: Boiling well, ●: Non-boiling well, Numerals of sampling points indicate sample numbers.

作成してみたが、ダイアグラム上に現われる特徴に大差は認められなかった。

その理由は、この地域の温泉水の硫酸イオン濃度が、蒸気加熱型温泉水の炭酸水素イオンやClに富む典型的な深部熱水型の温泉水のそれに比べ1桁ほど小さいため、硫酸イオンが温泉の水質を特徴づける要素になっていないことによるものと思われる。

改変キーダイアグラム(図4)では、沸騰泉は四角(■)の、一般温泉は三角(▲)の点として表わしてある。また、同図には、温泉実験井(以下BGRL井と略記)から得られた水試料のデータも同時にプロットしてある(●印;採取深度を添えてある)。この図から一見して分かることは、別府南部の温泉水がBGRL井に見られた3タイプの水(Na-Cl型, Ca, Mg-HCO₃型とNa-HCO₃型)とそれらの混合型に対比されることである。そしてさらに詳しく見ることで読み取ることができる特徴を挙げると下記のようなになる。

- (A) 別府南部の温泉水の内、沸騰泉から得られるものはBGRL井の250m深のNa-Cl型温泉水あるいは300m深のNa-HCO₃型温泉水に対比され、200m以浅に見られたCa, Mg-HCO₃型の水に相当するものはない。
 - (B) 一部の沸騰泉(B1, B2, B4, B5, B64, B67, B68, B69, B77)とBGRL井の250mから得られた温泉水は、典型的なNa-Cl型温泉水あるいはNa-HCO₃型温泉水ではなく、両者が混合したものと考えられる。これは、BGRL井の250mから得られた温泉水をNa-Cl, HCO₃型の温泉水と修正すべきであることを示しているのであろうが、必要以上に泉質の型を設けることはむしろ混乱を招く場合もあるため、BGRL井の300m深に存在する典型的なNa-HCO₃型温泉水より塩化物イオンに富むという意味で、これまでどおりの名称をとることとする。なお、混合兆候のない温泉水(図4右上や右下のものは、深部熱水の供給域とされている地域のみ分布し、しかも混合を受けた温泉水と混在して分布する。したがって、Na-Cl型温泉水とNa-HCO₃型温泉水の混合は低地に至る流動域ではなく、熱水供給域近傍で起こっていることを示唆しているものと考えられる。
 - (C) 一般温泉から得られる温泉水は、BGRL井の200m以浅に見られるCa, Mg-HCO₃型の水に対比されるものと、Na-Cl型温泉水とCa, Mg-HCO₃型水の混合、Na-HCO₃型温泉水とCa, Mg-HCO₃型の水の混合、あるいは三者の混合で説明される領域に分布する。一般温泉の位置する扇状地低地部には(図3参照)、扇状地高地部から地下を流動してきた温泉水がここに至り相互に混合を始めるような何らかの地下構造が存在することを示唆している。
- 以上が、別府南部全域の温泉とBGRL井とについて水質化学的な対比により明らかとなった事

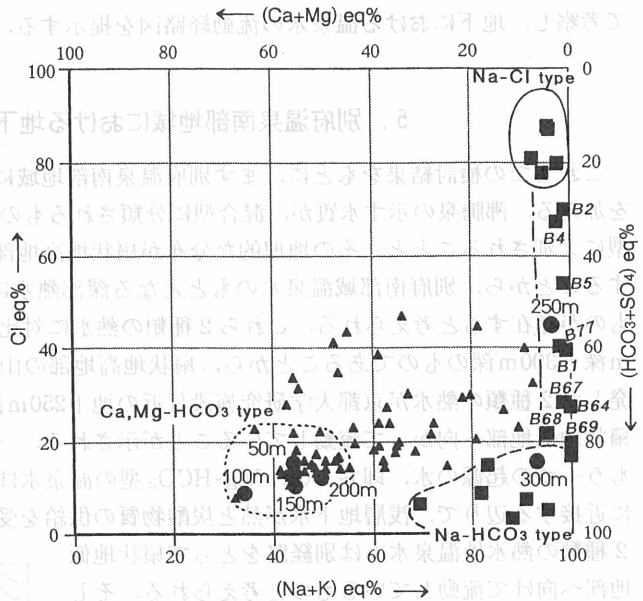


Fig. 4 Keydiagram of thermal waters in the southern part of Beppu including the BGRL well waters ■: Boiling waters, ▲: Non-boiling waters, ●: waters from BGRL well, Numerals of the solid circles show the depths at which the water samples were taken

柄である。次節では、これらの情報をもとに別府温泉南部地域における温泉水の地下流動について考察し、地下における温泉水の流動経路図を提示する。

5. 別府温泉南部地域における地下温泉水の流動経路

これまでの検討結果をもとに、まず別府温泉南部地域における温泉水の地下流動について考察を加える。沸騰泉の示す水質が、混合型に分類されるものが存在するもののNa-Cl型とNa-HCO₃型に大別されることと、その地理的な分布が扇状地高地部の熱水供給域とされている地域を包含することから、別府南部域温泉水のもととなる深部熱水にはNa-Cl型とNa-HCO₃型の2種類のものが存在すると考えられる。これら2種類の熱水に対比されるBGRL井の温泉水はそれぞれ250m深と300m深のものであることから、扇状地高地部の山岳地帯と扇状地の境界付近の断層域に発した2種類の熱水が京都大学研究施設付近の地下250m深と300m深を層状の形態を取りながら扇状地低地部へ向かって流動していることが示される。一方、別府南部地域の温泉水を形成するもう一つの起源の水、即ち、Ca, Mg-HCO₃型の温泉水は、おそらく扇状地高地部の熱水供給域に近接する辺りで、浅層地下水が熱と炭酸物質の供給を受けて生成したものであり、先に示した2種類の熱水性温泉水とは別経路をとって扇状地低地部へ向けて流動しているものと考えられる。そして、これら3種類の温泉水は扇状地低地部にいたり相互に混合したり、浅層地下水の混入を受ける傾向をもちながらさらに低地部へ流下していることができる。以上の考察内容を視覚的に理解しやすいように、温泉水の流動経路図として表わしたのが図5である。ここでの特徴を列挙すると以下のようになる。

- (1) 高地部に発するNa-HCO₃型の温泉水(破線の囲み)が、Na-Cl型温泉水の下位をその流れに沿うようにして流動している。
- (2) Na-Cl型の温泉水(実線の囲み)が2方向に分かれて流動しており、南側の流れは今回初めて示されたものである。主要な温泉水の流動は、BGRL泉井付近では北東方向であり、天満町(図5中のB1付近)に達した辺りから流動方向を南東に転じている。このような流動経路の屈曲の原因は現在のところ不明であるが、地下に埋没した断層などの地下構造の存在を伺わせる。
- (3) Ca, Mg-HCO₃型温泉水の流動経路(点線の囲み)は2つ存在し、そのうちの1つはBGRL井付近でNa-Cl型の温泉水の流動層の上部をほぼ直角に横断し、海岸方向へ流下している。2つのCa, Mg-HCO₃型の温泉水流動が上流部で1つに繋がっているかどうかは、今回用いたデータ⁸⁾からは不明である。公表されているその他のデータを参照

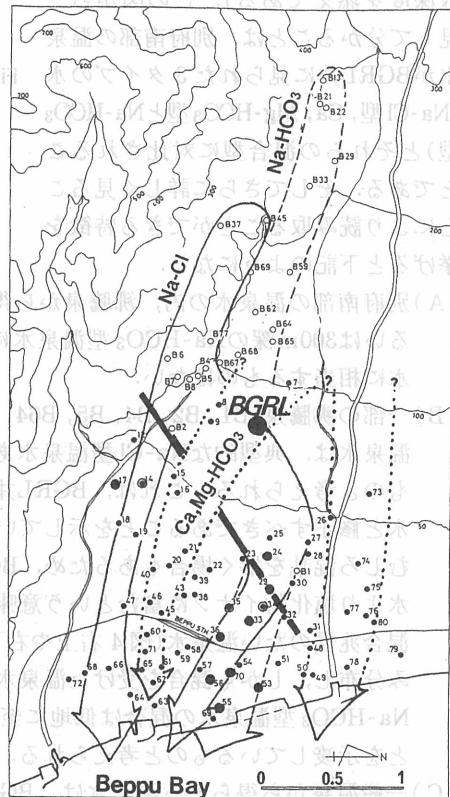


Fig. 5 Subsurface flows of thermal groundwaters in the southern part of Beppu. Na-Cl and Na-HCO₃ type thermal waters get mixed into shallow groundwater and/or Ca, Mg-HCO₃ type thermal water in the region on the east side of the bold line.

すると、合流しているようにもみえるが、なにぶんデータ数が不十分なため推測の域を出ない。この点については今後の検討課題としたい。

図6に別府南部地域の温泉の井戸深分布を示した。この井戸深分布図は、由佐・川村の図²⁾に今回著者らが新たに加筆したものである。温泉水の流動経路の図は、温泉の井戸深分布図とは全く独立に作成されたものであるが、井戸深分布図上の等深度線と流動経路がほぼ平行関係にあることが見て取れる。井戸深分布は、温泉水の採取深度分布に置き換えられるものであるが、上述の関係は温泉水がある決められた深度を流動していることを表わしている。温泉水の流動経路図は、地下の温泉水が層構造をもつ経路に沿ってひとつながりの流れとして流動しているという前提のものに描かれたものであるが、これはその前提の妥当性を示すものであり、化学的手法により描かれた地下の温泉水の流動経路図が信頼性の高いものであることを示しているものと考えられる。

6. おわりに

別府温泉南部地域の京都大学地球物理学研究施設構内に300m深の温泉実験井が掘削されている。そこからは深度別の温泉水が採取され、主要成分の化学分析値が得られている。本研究では、(1)その化学的データを用いた数値解析から温泉水流動系の層構造に関する検討、(2)温泉実験井と別府南部全域から得られた温泉水の水質対比による地下の温泉水流動経路の推定を行った。その結果、200m以浅にCa, Mg-HCO₃型、250m深にNa-Cl型、および300m深にNa-HCO₃型という3層の独立した温泉水流動系の存在が認められた。300m深のNaHCO₃型温泉水は今回初めて認識されたものであり、実験井の掘削により得られた新知見である。温泉実験井から得られた3種類の温泉水に対応する温泉水の流れは、別府南部地域の扇状地高地部に発し、それぞれが独自の流動経路を取りながら低地部へ向かっていることが示された。その様子は、視覚的に温泉水の流動経路図という形で参照できる。

謝 辞

本研究の一部は、平成5年度の文部省科学研究費一般研究(B)(研究代表者：由佐悠紀、課題番号：05452078)の援助を受けて行われた。記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 由佐悠紀：別府温泉における近年の変化。地熱エネルギー，14, 127-135, 1989
- 2) 由佐悠紀，川村政和：化学成分からみた別府市中央部の温泉。大分県温泉調査研究会報告，22，

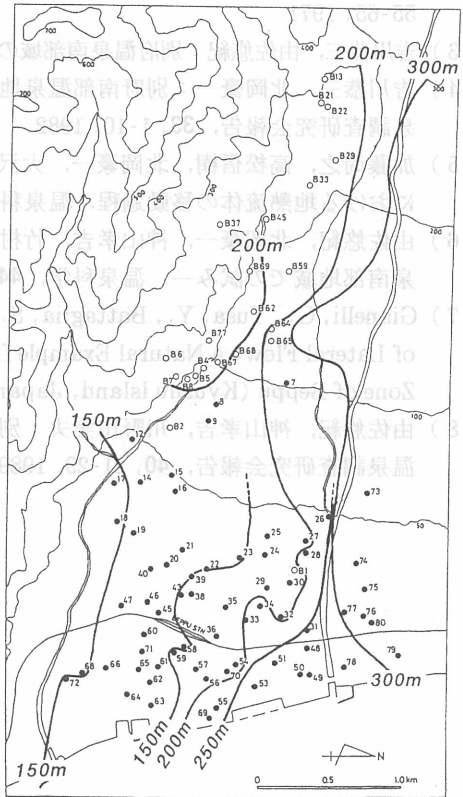


Fig. 6 Depths of wells below the ground surface in the southern part of Beppu

55-65, 1971

- 3) 吉川恭三, 由佐悠紀: 別府温泉南部域の炭酸成分. 大分県温泉調査研究会報告, 23, 11-19, 1972
- 4) 吉川恭三, 北岡豪一: 別府南部温泉地域における熱水の流動経路と温泉水の形成. 大分県温泉調査研究会報告, 33, 1-10, 1982
- 5) 加藤尚之, 高松信樹, 北岡豪一, 大沢信二, 由佐悠紀: RbおよびCs含量からみた別府温泉における地熱流体の移動過程. 温泉科学, 44, 印刷中, 1994
- 6) 由佐悠紀, 北岡豪一, 神山孝吉, 竹村恵二: 掘削による地下温泉水の層構造の検出一別府温泉南部地域での試み一. 温泉科学, 44, 39-44, 1994
- 7) Gianelli, G., Yusa, Y., Battaglia, S. and Takemura, K.: Water-Rock Interaction in a Zone of Lateral Flow: A Natural Example from the Active Geothermal Field and Gold-Mineralized Zone of Beppu (Kyushu Island, Japan). Mineralogy and Petrology, 45, 247-259, 1992
- 8) 由佐悠紀, 神山孝吉, 川野田実夫: 別府温泉南部域の化学成分長期変化について(2). 大分県温泉調査研究会報告, 40, 21-29, 1989



Fig. 6 Depths of wells below the ground surface in the southern part of Beppu

別府温泉南部域の温泉の形成とその歴史を明らかにするために、この地区で多くの温泉井を掘削し、その化学成分を調査した。その結果、200m以深にCa-Mg-HCO₃型、250m深にNa-Cl-Na-HCO₃型、300m深にNa-HCO₃型、350m深にNa-HCO₃型、400m深にNa-HCO₃型、450m深にNa-HCO₃型、500m深にNa-HCO₃型と異なるタイプの温泉が存在していることがわかった。また、500m以深には、Cl-Na型とHCO₃-Na型の温泉が存在していることがわかった。これらの結果から、別府温泉南部域の温泉の形成は、地下深くから上昇してきた熱水が、地表近くに到達するまでに、その化学成分を大きく変化したことが推定される。また、別府温泉南部域の温泉の形成には、地下深くから上昇してきた熱水が、地表近くに到達するまでに、その化学成分を大きく変化したことが推定される。

別府温泉南部域の温泉の形成とその歴史を明らかにするために、この地区で多くの温泉井を掘削し、その化学成分を調査した。その結果、200m以深にCa-Mg-HCO₃型、250m深にNa-Cl-Na-HCO₃型、300m深にNa-HCO₃型、350m深にNa-HCO₃型、400m深にNa-HCO₃型、450m深にNa-HCO₃型、500m深にNa-HCO₃型と異なるタイプの温泉が存在していることがわかった。また、500m以深には、Cl-Na型とHCO₃-Na型の温泉が存在していることがわかった。これらの結果から、別府温泉南部域の温泉の形成は、地下深くから上昇してきた熱水が、地表近くに到達するまでに、その化学成分を大きく変化したことが推定される。また、別府温泉南部域の温泉の形成には、地下深くから上昇してきた熱水が、地表近くに到達するまでに、その化学成分を大きく変化したことが推定される。

おわりに

別府温泉南部域の温泉の形成とその歴史を明らかにするために、この地区で多くの温泉井を掘削し、その化学成分を調査した。その結果、200m以深にCa-Mg-HCO₃型、250m深にNa-Cl-Na-HCO₃型、300m深にNa-HCO₃型、350m深にNa-HCO₃型、400m深にNa-HCO₃型、450m深にNa-HCO₃型、500m深にNa-HCO₃型と異なるタイプの温泉が存在していることがわかった。また、500m以深には、Cl-Na型とHCO₃-Na型の温泉が存在していることがわかった。これらの結果から、別府温泉南部域の温泉の形成は、地下深くから上昇してきた熱水が、地表近くに到達するまでに、その化学成分を大きく変化したことが推定される。また、別府温泉南部域の温泉の形成には、地下深くから上昇してきた熱水が、地表近くに到達するまでに、その化学成分を大きく変化したことが推定される。

結 語

別府温泉南部域の温泉の形成とその歴史を明らかにするために、この地区で多くの温泉井を掘削し、その化学成分を調査した。その結果、200m以深にCa-Mg-HCO₃型、250m深にNa-Cl-Na-HCO₃型、300m深にNa-HCO₃型、350m深にNa-HCO₃型、400m深にNa-HCO₃型、450m深にNa-HCO₃型、500m深にNa-HCO₃型と異なるタイプの温泉が存在していることがわかった。また、500m以深には、Cl-Na型とHCO₃-Na型の温泉が存在していることがわかった。これらの結果から、別府温泉南部域の温泉の形成は、地下深くから上昇してきた熱水が、地表近くに到達するまでに、その化学成分を大きく変化したことが推定される。また、別府温泉南部域の温泉の形成には、地下深くから上昇してきた熱水が、地表近くに到達するまでに、その化学成分を大きく変化したことが推定される。

補 文 参 考

- (1) 由佐悠紀: 別府温泉南部域の温泉の形成とその歴史. 温泉科学, 14, 127-132, 1988
- (2) 由佐悠紀, 川野田実夫, 神山孝吉, 竹村恵二: 別府温泉南部域の温泉の形成とその歴史. 温泉科学, 22, 55-65, 1994