

第3章 温泉・湯けむりの自然科学的概要

第1節	温泉の分類と別府の湯けむり	(由佐 悠紀)
第2節	別府温泉の現状と温泉開発のあゆみ	(由佐 悠紀)
第3節	温泉水の起源・滞留時間・水収支	(由佐 悠紀)
第4節	沸騰泉と噴気	(由佐 悠紀)
第5節	別府温泉を涵養する原温泉水	(由佐 悠紀)
第6節	泉質の形成と各種温泉水の流動経路	(由佐 悠紀)
第7節	地熱-温泉系のモデル (塚原-明礬-鉄輪-亀川)	(由佐 悠紀)
第8節	別府温泉の変化	(由佐 悠紀)

第1節 温泉の分類と別府の湯けむり

「湯けむり」とは、温泉から放出された水蒸気が、空中で凝結して、霧状の微細な水滴になったものである。本来の水蒸気は無色透明であるが、この現象によって目に見えるようになる。しかし、湯けむりは、すべての温泉で見られるわけではない。ここでは、温泉法第二条で定義されている「温泉」を、いくつかの観点から分類し、別府地域の湯けむりを発生させている温泉を特定する。

なお、本章の内容の多くは、『別府市誌』昭和60年版・平成15年版に依っている。

1 分類

◆湧出形態（採取方法）による分類

自然湧出泉：自然状態で湧き出る温泉。古の温泉は、全てがこれであった。

掘削泉：土地を掘削することによって得られる温泉。わが国の温泉掘削は、明治初期（1870～80年代）に、上諏訪温泉（長野県）と別府温泉（大分県）で始まったとされる。次の2種がある。

自噴泉：自力で湧出するもの。

動力泉：なんらかの動力（ポンプ）を用いて温泉を採取するもの。

◆湧出（採取）流体の種類による分類

噴気：水蒸気のみが噴出するもの。温度は沸点以上。

沸騰泉：熱水と水蒸気の混合流体が噴出するもの。温度は沸点（1気圧で100℃）。

温泉（一般温泉）：液体の温泉水が湧出するもの。以下は、細分の例である。

冷鉱泉：温度が25℃未満のもので、化学成分が温泉法の定義に適合するもの。

低温泉：25℃以上、34℃未満のもの。

温泉：34℃以上、42℃未満のもの。

高温泉：42℃以上のもの。

◆泉質による分類（基本的なもの）

単純泉：成分濃度が薄く、温泉水1kg中に含まれる総量（ガスを除く）が1g未満のもの。

塩類泉：温泉水1kg中に含まれる総量（ガスを除く）が1g以上のもの。

主要な陰イオンによって、次の3種に分類される。

塩化物泉：塩化物イオンを主とするもので、主要陽イオンにより次のように細分される。

ナトリウム－塩化物泉（Na-Cl泉）

カルシウム－塩化物泉（Ca-Cl泉）

マグネシウム－塩化物泉（Mg-Cl泉）

硫酸塩泉：硫酸イオンを主とするもので、主要陽イオンにより次のように細分される。

ナトリウム－硫酸塩泉（Na-SO₄泉）

カルシウム－硫酸塩泉（Ca-SO₄泉）

マグネシウム－硫酸塩泉（Mg-SO₄泉）

炭酸水素塩泉：炭酸水素イオンを主とするもので、主要陽イオンにより次のように細分される。

ナトリウム－炭酸水素塩泉（Na-HCO₃泉）

カルシウム－炭酸水素塩泉（Ca-HCO₃泉）

マグネシウム－炭酸水素塩泉 (Mg- HCO₃泉)

実際の塩類泉は、上記のものが混じり合っているので多種多様になる。別府には、それらのほとんどが存在する。

◆熱源による分類

火山性温泉：マグマからの熱と物質によって生成されたもの。生成機構の違いによって、次のような種類がある。

熱水希釈型温泉（「熱水性温泉」ともいう）；地下深部で生成した原熱水が、天水によって希釈された温泉。泉質は塩化物泉。

蒸気加熱型温泉（「蒸気性温泉」ともいう）；原熱水から分離した蒸気が、地表近くで地下水に混入して生じた温泉。泉質は、硫酸塩泉または炭酸水素塩泉。

火山ガス加熱型温泉；マグマからの高温蒸気が、地下水に直接混入して生じた温泉。活火山の山頂近くで見られる。塩酸や硫酸を含む、強酸性泉。

非火山性温泉：地球内部からの地殻熱流を熱源とする温泉。火山とは直接の関係が無い。深層熱水型温泉ともいう。水の起源によって、次の2種がある。

深層地下水型温泉；地下深部に閉じ込められた陸水（淡水）が、昇温したもの。

化石海水型温泉；地下深部に閉じ込められた海水が、昇温したもの。

別府の温泉は、典型的な火山性温泉である。生成機構による分類では、熱水希釈型温泉と蒸気加熱型温泉の両者がある。火山ガス加熱型温泉は存在しない。

2 別府の湯けむりを発生させる温泉（地獄）

別府温泉では、道路の側溝を温泉の湯が流れ、ときに湯気が勢い良く立ち上がっていることがある。これも湯けむりであるが、多くは速やかに消滅することもある。別府では、それらを湯けむりと呼ぶことはめったに無い。霧状の水滴からなる白い塊や柱が空中に立ちのぼり、かなり遠方からも明瞭に見える場合に、「湯けむり」と呼んでいる。このような湯けむりが見えるためには、その現象が生じる条件が必要である。次に、その条件を考えてみよう。

発生した霧状水滴は、しばらくすると蒸発して水蒸気に戻るのだから、見えなくなる。すなわち、霧状水滴には寿命がある。したがって、湯けむりが存在するためには、霧状水滴の集団がある程度の時間保持されなければならない。そのためには、霧状水滴が大量に発生する必要があり、その第1の条件は「源泉から放出される水蒸気量が多いこと」である。この条件のためには、①単位時間当りの放出体積が大きいこと、②水蒸気の密度が大きいことの両方またはいずれかが必要である。

このうち、①だけが満たされている場合、水蒸気の温度が大気の温度に近いとき（低温）は、水蒸気の凝結が進まないから、霧状水滴の発生量は少なく、湯けむりの状態にはならないであろう。したがって、第2の条件として「水蒸気は高温であること」が挙げられる。水蒸気の温度が高ければ高いほど、低温の空中では効率よく凝結が進む。しかも、水蒸気の密度は温度が高いほど大きいので、②にも叶っている。

先に掲げた温泉の分類で、以上の条件を満たすのは、高温の水蒸気を放出する、沸騰泉と噴気である。実際、別府温泉の湯けむりは、全てが沸騰泉または噴気から生じている。それ以外の源泉では、霧状水滴（湯気）が発生しても、それらが湯けむりの状態になることは皆無と言っても過言ではない。

典型的な火山性温泉である別府温泉の沸騰泉や噴気には、自然湧出のものと掘削されたものの両者があり、そ

れらは共に「地獄」と呼ばれてきた。古来の自然の地獄の多くは消滅したが、明礬地区などにその片鱗が残っている。しかし、それら自然の湯けむりの勢いは弱い（単位時間に放出される水蒸気量が少ない）、地上付近を漂っていることが多く、遠方からは見えにくい。現在、鉄輪地区などで見られる高く立ちのぼる優勢な湯けむりは、そのほとんど全てが掘削泉からのものである。なお、鶴見岳と伽藍岳それぞれの山頂に附近には、自然の優勢な噴気孔や噴気地があり、それらからの湯けむりは別府市街からも望見される。

3 湯けむりの見え方

湯けむりの見え方は、噴出する水蒸気量と空中での凝結量及び水滴の蒸発の早さに左右される。水蒸気量については、前項で述べた。凝結量は、気温が低いほど、湿度が高いほど、多くなる。また、そのようなときには、蒸発速度が遅いので、湯けむりは消えにくい。実際、天候は曇りの日に、時間は朝夕に、湯けむりはよく見える。季節では、冬が最も見えやすい。

他方、風が強いとき、湯けむりはたなびいたり、ちぎれたりしてよく見えなくなる。また、曇天でも、霧や霏がかかると、湯けむりと霧（霏）との区別がつきにくくなることに加えて、視界の悪さのため見えにくい。

以下では、「湯けむり」をもたらしている別府温泉の状況やしくみを、地球科学的観点から解説する。

第2節 別府温泉の現状と温泉開発のあゆみ

1 別府温泉の諸元（2008年3月末）

別府温泉が、わが国を代表する温泉地であることは、衆目の一致するところであろう。表3.2.1は、源泉数・温泉採取量の現状など、2008年3月末における、別府温泉の諸元である。なお、全国値は、環境省のデータである。源泉数および採取量（湧出量）は、それぞれ全国総数の9.0%および3.2%に当り、高温の噴気・沸騰泉数は26%に及ぶ。しかも、それらの源泉が、別府湾に面する東西約5km・南北約8kmの狭い範囲に集中しているのは、圧巻である。

全国の温泉地数	3,139
全国の源泉数	28,090
全国の採取量(ℓ/分)	2,799,418
全国の噴気・沸騰泉数	1,168
別府の源泉数	2,516 (9.0%)
別府の採取量(ℓ/分)	89,608 (3.2%)
噴気・沸騰泉数	304 (26.0%)
別府市の面積	125 km ² (0.03%)

表3.2.1 2008年3月末における、別府温泉の諸元
(参考) 1日当りの採取量：約50,000トン (kl)

2 源泉数の変遷

別府温泉は古来の自然湧出温泉や地獄などを核にして発展し、これまで数多くの温泉井戸（源泉）が掘削された。最初の掘削は、明治12年（1879）とも明治22年（1889）とも伝えられ（安部 1987）、また、明治15年（1881）とする資料（松田 1905）もあって判然としない。ともかく、19世紀の終わり頃であり、それらは世界でも最初期の温泉井あるいは地熱井であったと思われる。

明治30年代には、海岸に近い低地部（当時の浜脇町および別府町）を中心に多数の井戸が掘削され、温泉資源への影響が憂慮されるまでになって、大分県知事・大久保利武の依頼による温泉調査が行われた（松田 1905）。その報告書には、別府町に掘湯21、穿湯145、浜脇町に掘湯4、穿湯28、合計198か所の源泉が挙げられている。

なお、掘湯とは、地面を掘り下げて湯槽を設け、その底から湯を湧出させるもので、自然湧出泉に近い。すなわち、当時の低地部では、地表すれすれまで温泉水が流動していたのである。他方、穿湯とは、現在の掘削泉に当たる。当時の掘削手法は、竹の弾力を利用した人力による上総掘りで、別府では“湯つき”と呼ばれた。この

穿湯は、掘湯より安価、かつ、使用方法が簡単だったので、次第に広く行われるようになった。別府における第1次掘削ブームと言える。ちなみに、当時の掘削泉は全てが自噴泉であった。

その後も掘削による温泉開発が進んだが、2回の世界大戦を始めとする多くの国際紛争や世界的な恐慌に伴う不安定な社会情勢の影響を大きく受けて沈滞し、本格的な開発が行われだしたのは、太平洋戦争終結後である。特に1960年代の経済高度成長期には、別府全域で毎年100本前後の新規掘削がおよそ10年間継続して行われた。第2次掘削ブームである。その結果、源泉数は3,000を超えるにいたったが、廃棄されたものもあり、2008年3月末現在の登録源泉数は2,516（表4.2.1）、そのうち2,337が利用源泉である。なお、源泉のほとんどは掘削泉である。

図3.2.1は、1949年から1999年までの間の、登録された利用源泉数の変遷である。また、その後2008年までの変遷は表4.2.2に掲げた。これらに見られるように、総利用源泉数は1970年代後半にピークに達し、1980年代にやや減少した後、統計的にはほぼ一定で推移してきた。しかし、平成19年度に実状との照合・再点検が行われた結果、総源泉・利用源泉の登録数はともに減少した。おそらく、1980年代以降、湧出停止や利用中止などの源泉が現われ、実質的な源泉数は漸減してきていたのであろう。

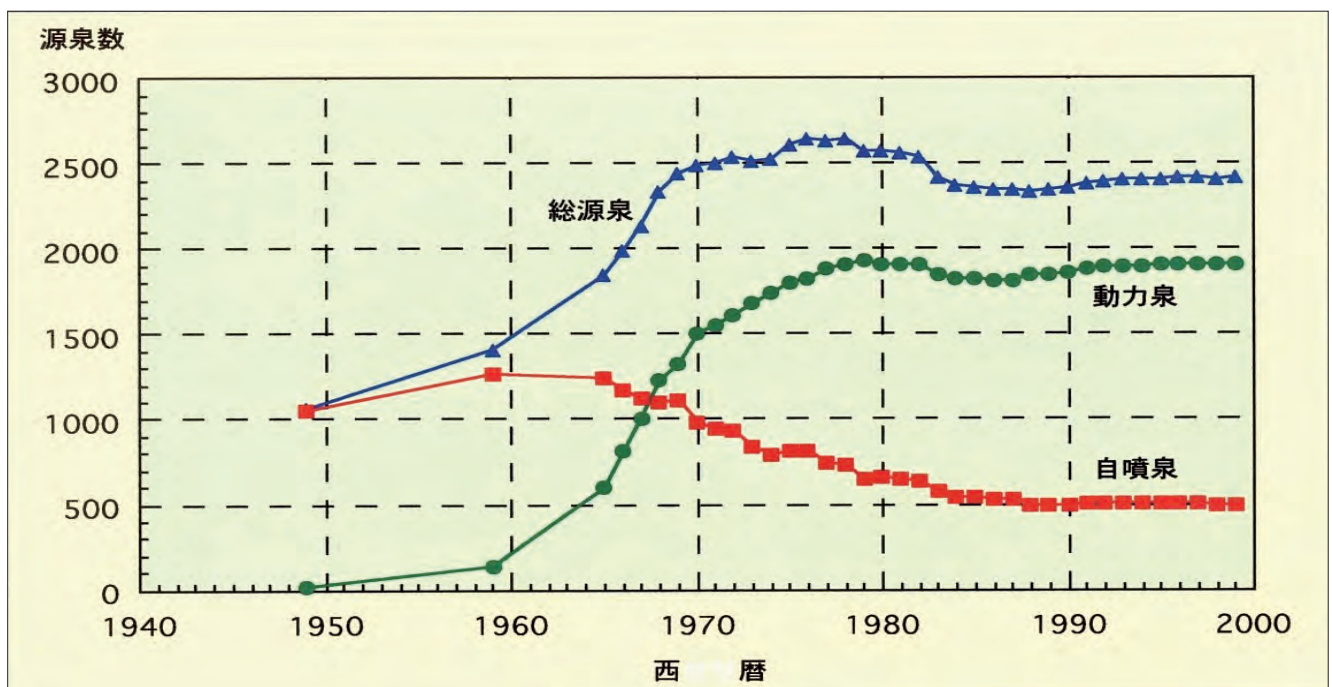


図3.2.1 利用源泉数の変遷

他方、自噴泉と動力泉それぞれの変遷の様相は、大きく異なる。図3.2.1において、昭和24年（1949）の源泉は、ほとんどすべてが自噴泉であった。その後の温泉開発に伴い、動力泉が出現し、1960～70年代（第2次掘削ブーム）に急増した。一方、自噴泉数は初めのうちは増加したけれども、1960年代前半頃をピークとして、減少に転じた。すなわち、従前の自噴泉の一部が自噴しなくなり、動力泉に切り替えられたのである。こうした経過をたどり、現在では約80%が動力泉となっている（表3.2.2参照）。おもな揚湯法はコンプレッサーによるエアリフトであるが、近年は水中ポンプも採用されるようになった。

西暦	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
自噴	500	501	501	500	500	498	498	498	447
動力	1,914	1,917	1,914	1,913	1,913	1,915	1,920	1,917	1,890
計	2,414	2,418	2,415	2,413	2,413	2,413	2,418	2,415	2,337

表3.2.2 近年の利用源泉数の変遷

各数値はそれぞれの年の3月末のものである。2008年の値が減少しているのは、実状との照合・見直しが行われたことによる。

3 源泉分布

図3.2.2は、鈴木政達によって記録された、古来の自然湧出温泉の分布である（『別府市誌』昭和8年版）。図中の太い曲線群は、後の温泉掘削によって得られた地温データに基づく、海面下100mでの等温線である（Allis & Yusa 1989）。北縁部と南縁部にみられる、山岳部から海岸方向に伸びる高温域は、高温水の流路を表わしている。図中には別府八湯の位置を示したが、それらは、北縁部（明礬・鉄輪・柴石・亀川）と南縁部（堀田・観海寺・別府・浜脇）の、高温域に沿って分布していたことが明らかである（第6節参照）。

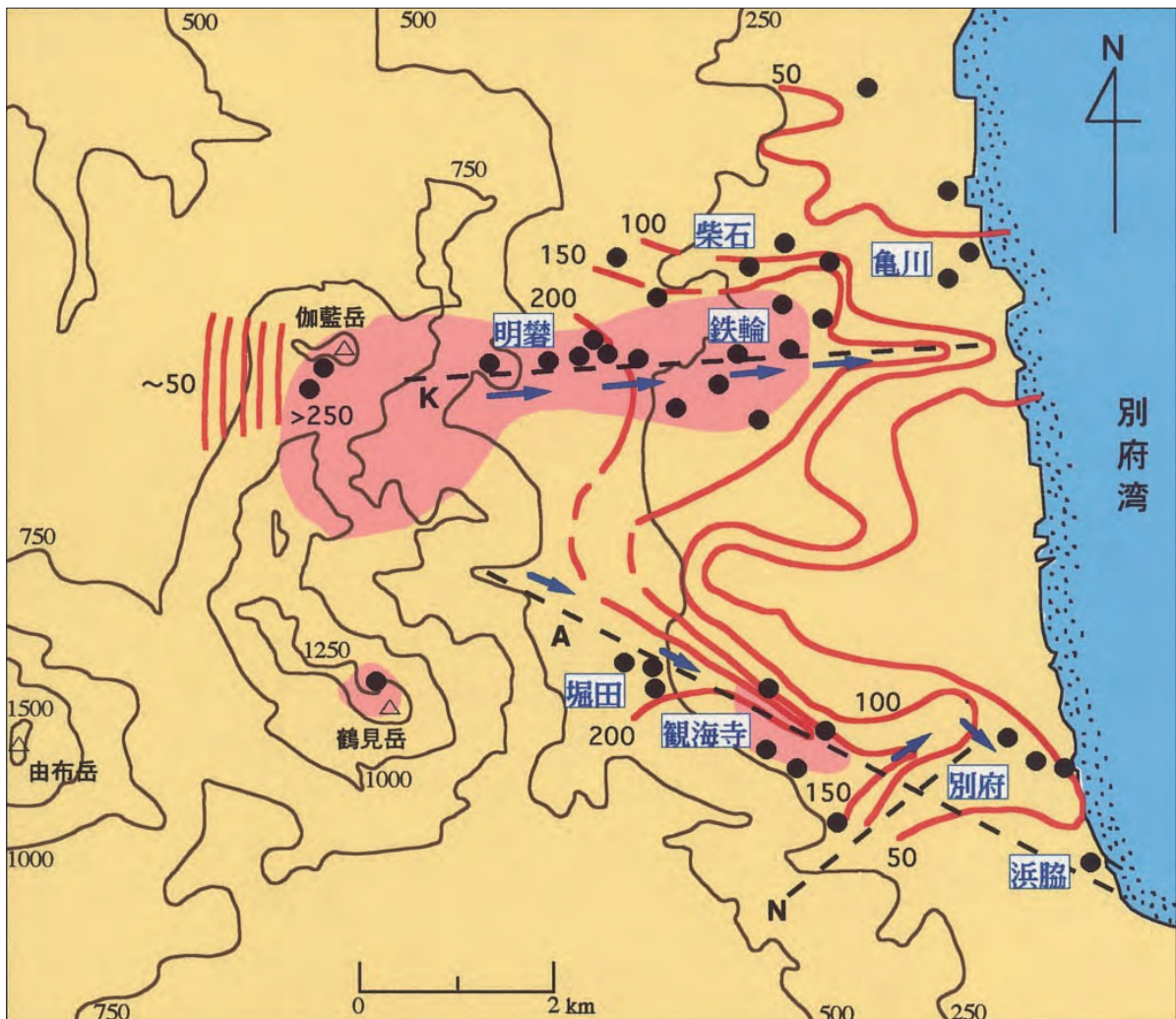


図3.2.2 古の自然湧出温泉の場所（鈴木 1933）と海面下100mでの地温分布（Allis & Yusa 1989）

K：鉄輪断層、A：朝見川断層、N：無名の伏在断層

図3.2.3は、温泉開発が本格化する直前の昭和24年（1949）における源泉分布である（『別府市誌』昭和60年版）。明治末期の分布と大きく変わらないと考えられるが、当時の源泉は別府八湯それぞれの範囲および近傍に限られていた。源泉のほとんどは掘削泉であり、自然湧出のものは少数であった。なお、明礬地区などにある自然噴気は除外してある。

この後、温泉開発が本格化し、それ以前には源泉の無かった地域でも掘削が行われて、源泉の分布範囲が広がった。昭和62年（1987）の分布（図3.2.4）では、別府市の中央部を除いたほぼ全域に源泉が分布し、別府八湯の地理的な区別がつきにくくなっている。特に堀田・観海寺・鶴見・鉄輪・明礬などの高地部で源泉が増えたが、それらの多くは高温の沸騰泉や噴気である。現在（2009年）の源泉分布状態は、源泉数は減少しているが、昭和62年（1987）の分布（図3.2.4）とほとんど同じと思われる。

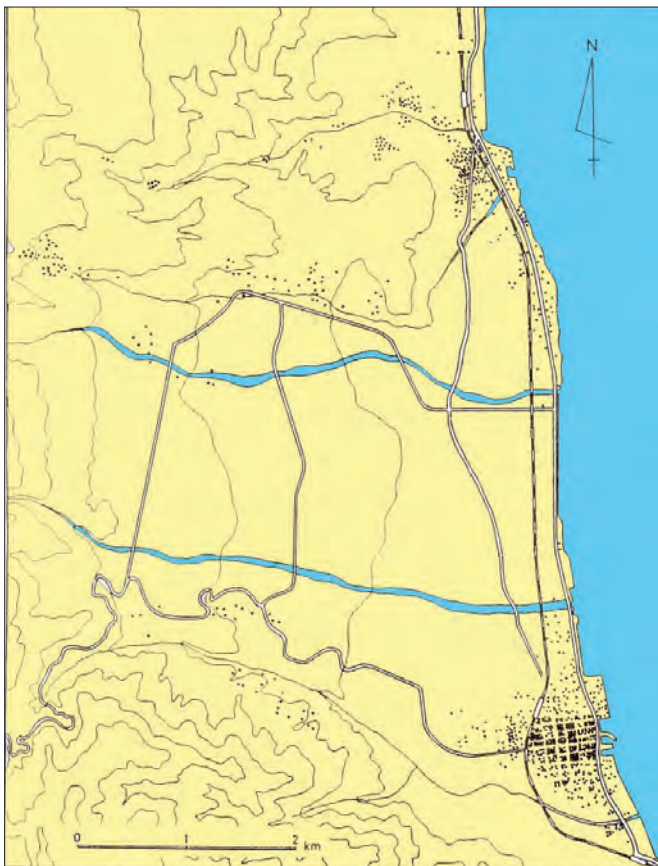


図3.2.3 昭和24年（1949）における源泉分布
（『別府市誌』昭和60年版）

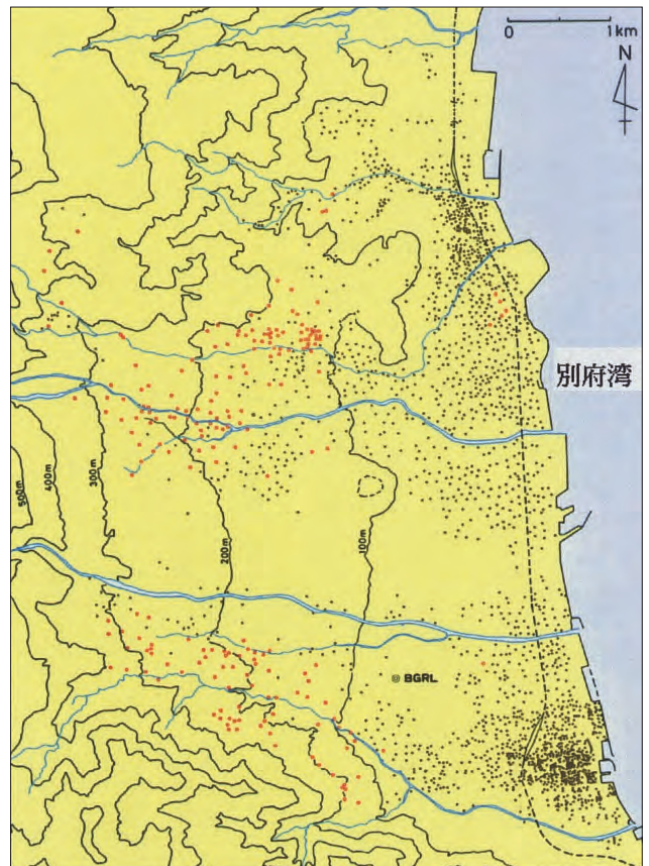


図3.2.4 昭和62年（1987）における源泉分布
（由佐・大石 1988）

4 採取水量と採取熱量

温泉地からの総湧出（採取）量・熱量の見積りは、地球科学的観点だけではなく、その温泉地の資源量の評価という実用的見地からも重要である。表4.2.3には、別府全域における、1日当りの採取水量（水蒸気も含む）と採取熱量（0℃基準）の変遷を示した。用いたデータは、各源泉の1分当りの湧出（採取）量と泉温である。ただし、動力泉については、1日当りの採取時間（動力稼働時間）も考慮されている（『別府市誌』昭和60年版）。噴気・沸騰泉については、筆者らによる実測データを用いた。表3.2.3の源泉数が図3.2.1と異なるのは統計法の違いによる。なお、自然噴気地から流出する水量・熱量は入っていない。

表3.2.3に明らかなように、源泉数・採取水量・採取熱量のいずれも、第2次掘削ブームによって、大きく増加した。とくに噴気と沸騰泉に関わる数値の増加が著しいが、源泉数の増加に比べて、水量と熱量の増加が顕著

なことが注目される。昭和60～62年（1985～87）には、噴気・沸騰泉の数は源泉総数の10%に満たないが、水量は43%、熱量は78%を占めている。

	1949年	1959-61年	1973-75年	1985-87年
源泉数	979	1,320 (112)	2,382 (196)	2,244 (207)
採取水量(1,000トン/日)	37.2	40.2 (9.6)	56.7 (24.6)	50.0 (21.6)
採取熱量(百万キロカロリー/日)	2,050	3,150 (1,490)	7,190 (5,460)	7,260 (5,650)

表3.2.3 温泉採取量の変遷

() のうち数は噴気・沸騰泉の値。1949年のデータは一般温泉のみ。
採取水量・熱量の見積りには、動力泉の稼働時間を用いた。熱量は0℃基準。

図3.2.5および図4.2.6には、それぞれ、昭和48～50年（1973～75）における250m四方ごとの採取水量および採取熱量の地域分布を示した。とくに大量の温泉水が採取されているのは、南部の市街地と北部の鉄輪一带であり、前者は一般温泉、後者は主に噴気・沸騰泉による。次いで多いのは、南部の観海寺・堀田一带（主に噴気・沸騰泉による）と北部の亀川（一般温泉による）である。

採取熱量の分布（図3.2.6）は、水量の分布（図3.2.5）と似ているが、噴気・沸騰泉が多い観海寺・堀田一带および鉄輪一带（明礬地区・小倉地区を含む）における大量の採取が顕著である。

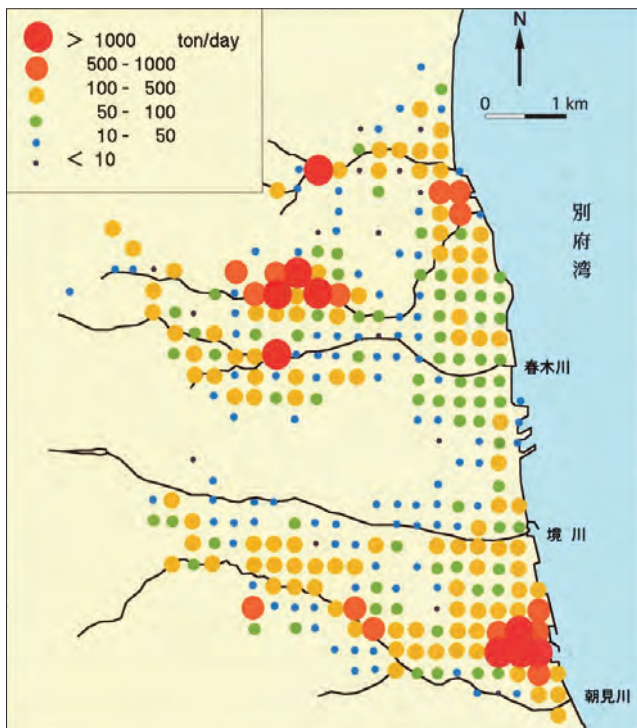


図3.2.5 採取水量の分布：昭和48～50年（1973～75）

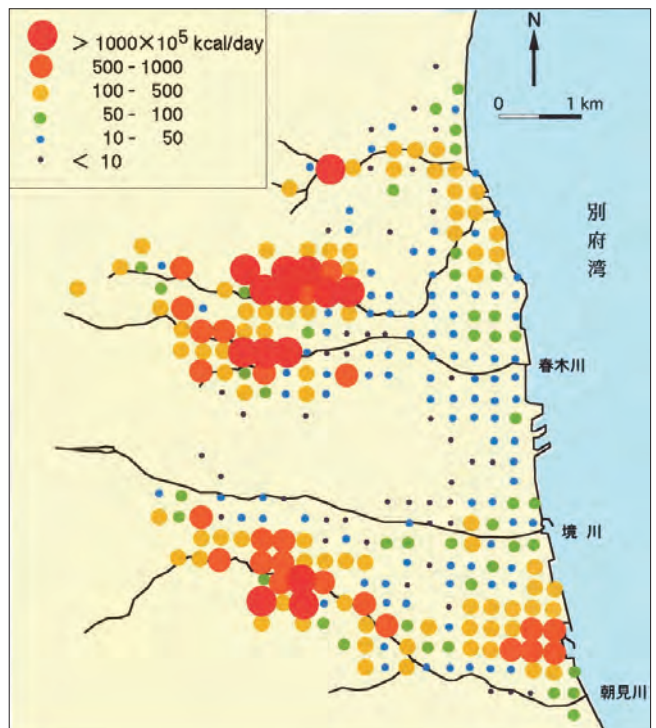


図3.2.6 採取熱量の分布：昭和48～50年（1973～75）

以上のように、第2次掘削ブームにおいて、高地部（別府八湯の明礬・鉄輪・堀田・観海寺）で、優勢な噴気・沸騰泉の開発が進み、大量の高温水・水蒸気と熱が採取されるようになった。これにより、別府の湯けむりは質量とも格段に向上・増大した。

5 泉質分布

図3.2.7は、1970年以前における泉質をヘキサダイアグラム（主要な陽イオンと陰イオンによる六角形の図）

で表現し、その分布を示したものである。ヘキサダイアグラムの形が泉質の種類を、その大きさが成分量の多さを表す。参考のため、図中には、代表的なヘキサダイアグラムの傍に、その泉質の型「塩化物泉」「炭酸水素塩泉」「酸性泉」を記入した。なお、「酸性泉」の酸は硫酸であり、近辺には「硫酸塩泉」が分布する。このように、別府には基本的な泉質のすべてが存在する。図の南東端(浜脇)に描かれているひときわ大きいダイアグラムは、海水浸入の影響を受けた温泉である。各ダイアグラムの下に数字は、左が温度(°C)、右がpHを表す。温度100のものが沸騰泉であるが、そのほとんどは塩化物泉である。ヘキサダイアグラムに示されているように、それらの主要陽イオンはナトリウム(カリウムを伴う)であり、世界の火山・地熱地域に共通して分布する食塩型熱水の特徴を示している。

炭酸水素塩泉型の温泉は南部地域に多く、特に高濃度のものは境川に沿って分布している。

硫酸塩泉型の温泉は明礬地区に分布し、強い酸性を示すものが多い。少数ではあるが、沸騰泉にもこの型を示すものがある。亀川地区の温泉は、塩化物泉と硫酸塩泉が混合した泉質を示す。

上に述べたように、湯けむりを出す沸騰泉の代表的な泉質は「ナトリウム-塩化物泉」であり、まれに硫酸塩泉型のものがある。

温泉の泉質は、さまざまな自然的・人為的な要因に影響されて変化する。近年、別府温泉では、低地部に分布する温泉で、成分濃度の低下や泉質の変化が知られるようになった。これについては、第8節で述べる。

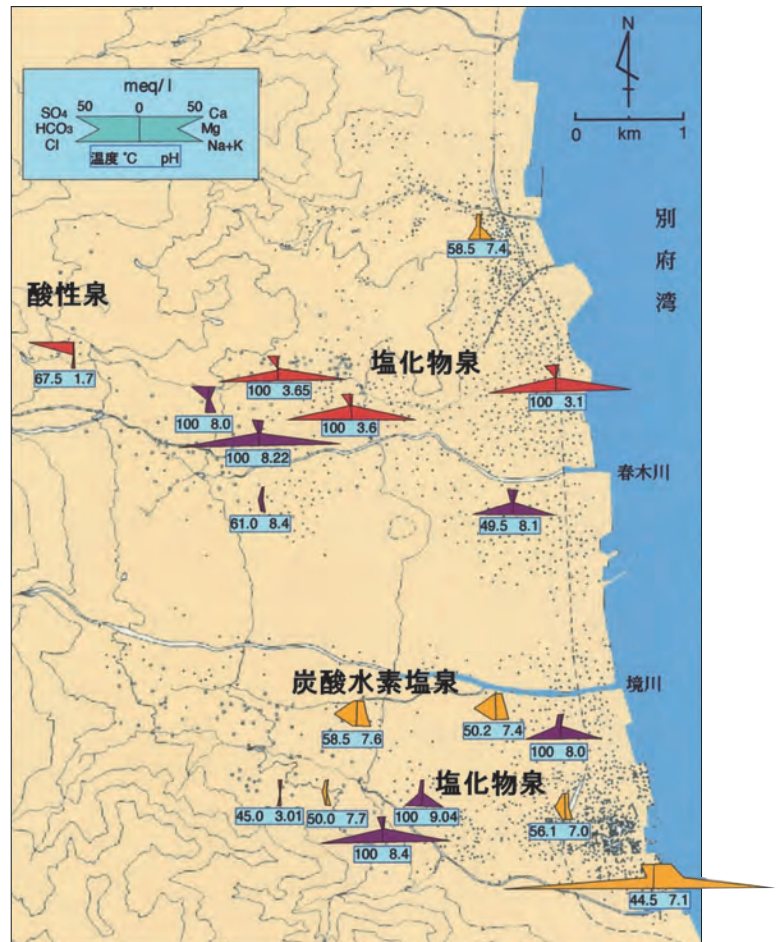


図3.2.7 泉質の分布 (1970年以前)

第3節 温泉水の起源・滞留時間・水収支

1 起源

温泉水の起源の解明は、温泉の科学の重要な研究課題の一つである。具体的には、天水(降水)以外の水、たとえばマグマ起源の水の検出である。別府温泉においては、1990年代頃から、水分子を構成する水素と酸素の安定同位体を用いた研究手法が導入され、以下の結論が得られた(北岡ら 1993)。

- (1) 別府地域の温泉水(水蒸気も含む)は、天水と深部熱水(酸素の同位体比が大きい)とが混合したものである。
- (2) 深部熱水の酸素の同位体比が大きいのは、天水が高温下で岩石と反応した結果である。
- (3) 以上より、別府地域に分布する温泉水は、全てが天水起源と考えられる。

(4) マグマ起源水があるとしても、現在の手法による検出限界以下の微量である。

2 滞留時間

地下に分布する天水起源の温泉水は、常に新しい天水と入れ替わっている。この入れ替わりに要する時間を、「入れ替わり時間」あるいは「滞留時間」という。別府温泉においては、水分子中の極微量の放射性水素（トリチウム）の測定から、平均滞留時間として、約50年という値が得られている（Kitaoka 1990）。この値には、数日～数か月という短時間から数百年以上に及ぶ長時間が含まれている。滞留時間が長い水は地下深くまで循環する水であるが、別府においては深部熱水となっている。

入 力		出 力	
降 水	349	蒸発散	107
		表面流出	104
		地下水流出	138
		浅層地下水	81
		温泉水	57
合 計	349	合 計	349

表3.3.1 別府流域の水収支（単位：1,000トン/日）

3 水収支

ある流域に降った雨水（天水）は、一部は蒸発散によって大気に戻り、残りは河川水などの表流水や地下水となって流域外に流出し、最終的には海に流れ出す。北・西・南の三方を分水嶺で囲まれ、東方で別府湾に面する別府流域（約66km²）における地下水の際立った特徴は、深い循環水が温泉水になっていることである（前節参照）。

このような天水循環系における水の出入り（水収支）を評価するに当たって、地下水は、比較的新しい天水から成る浅層地下水と、古い天水を含む深層地下水（温泉水）に二分するのが適切である。表3.3.1は、こうした観点から評価された別府流域の水収支である。この水収支は、第6節の図4.6.1にも示されている。

大まかに見れば、降水量のおよそ3分の1ずつが、蒸発散・表面流出・地下水流出（浅層地下水と温泉水）として消費されている。別府温泉で特筆されるのは、降水量の約16%が温泉水として流出していることである。この割合は降水から温泉水への転換率でもあり、別府温泉系のポテンシャルの格別な高さが現れている。しかし、温泉水流出量のほとんどは既に採取・利用されていることを注記しておきたい。

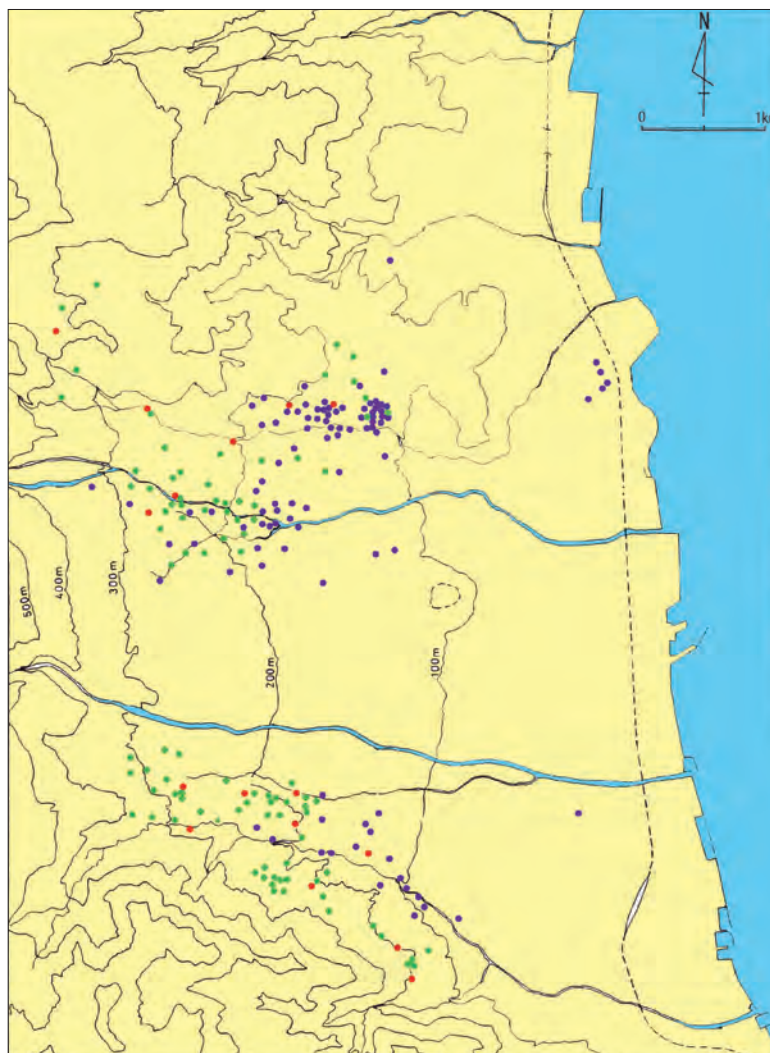


図3.4.1 昭和60～62年（1985～87）における沸騰泉と噴気の分布（由佐・大石 1986/1987/1988）

第4節 沸騰泉と噴気

1 分布

図3.2.4の源泉分布には沸騰泉と噴気も含まれているが、一般の温泉との区別が不明瞭なので、沸騰泉と噴気だけを取り上げ、それぞれを区別して、図3.4.1に示した。●が沸騰泉、●と●が噴気である。両者は、地温の高い南部域と北部域に分布し、中央部には存在しない。また、南部域では、上流部に噴気、それより下がった範囲に沸騰泉が分布するというように、噴気と沸騰泉に分布域がかなりはっきりと分かれている。他方、北部域では、両者が混在している範囲もあるが、南部域と同様の傾向が認められる。最上流部の明礬地区には噴気だけしか存在しない。なお、噴気のうち、●は飽和蒸気（温度が沸点）が噴出するもの、●は過熱蒸気（温度が沸点より高い）が噴出するものである。

図3.4.1の分布が得られてから約四半世紀が過ぎたので、現在（2009年）の状況に触れておこう。高地部においては、この間に噴出が停止したものや掘り替えられたものがあるが、全体的な分布状態は図4.2.7と大きく変わらない。他方、低地部にあった沸騰泉の中には、沸騰しなくなったため、動力泉に切り替えられたり、廃棄されたりしたものもある。例えば、南部域のものは、動力泉になっている。また、北部域にあった5本のうち、現在も沸騰しているのは2本である。

2 熱学的説明

沸騰泉からは液体の水と水蒸気の混合物が噴出するが、湯けむりの素となる水蒸気の割合は一定ではない。一方、噴気からは水蒸気のみが噴出し、その温度の多くは沸点である。しかし、中には沸点をはるかに超えるほど高温のものもある。そのように高温のものを過熱蒸気という。1985～87年に別府で行った観測では、最高温度は137.0℃（北部域）、次いで135.2℃（南部域）であった。

ここでは、以上のような現象について、熱水や水蒸気を純粋な水とみなして、熱学的に説明する（別府市誌昭和60年版）。そのため、エンタルピーという量を用いる。エンタルピーは熱力学的関数の一種であるが、簡単

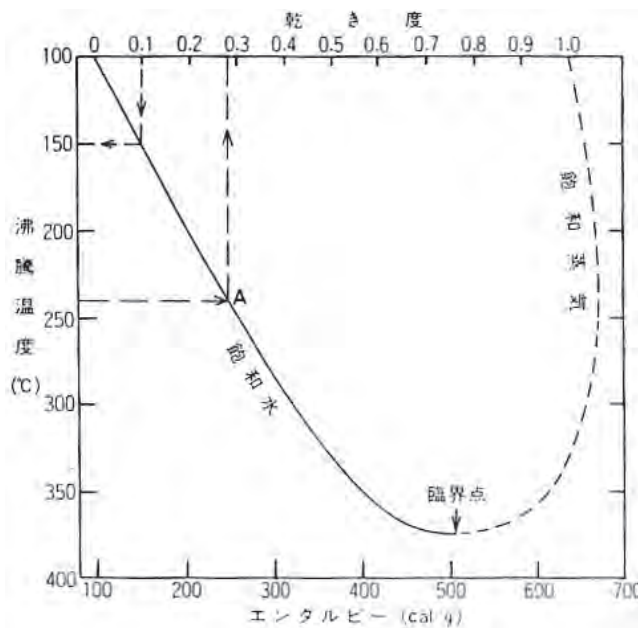


図3.4.2 飽和水・飽和蒸気の温度とエンタルピーおよび乾き度の関係

にはある物質が持っている熱量と考えればよい。以下で用いるエンタルピーは、すべて1g当りの値である。また、熱量の単位はカロリーを用いる。

沸騰泉のように液体の水と水蒸気が共存しているとき、水を飽和水（沸騰水）、水蒸気を飽和蒸気、圧力を飽和蒸気圧、温度を飽和温度（沸騰温度、沸点）という。水は1気圧のもとでは100℃で沸騰するが、そのときの飽和水と飽和蒸気のエンタルピーは、それぞれ100および639カロリーである。両者の差539カロリーが蒸発熱である。

圧力が上がれば沸騰温度は上昇し、飽和水と飽和蒸気のエンタルピーも大きくなる。しかし、飽和蒸気のエンタルピーは30気圧付近（230～240℃）で最大となり、それより高压（高温）では低下する。一方、飽和水のエンタルピーは増大し続けるので、ある圧力・温度に達すると両者のエンタルピーは等しくなり、液体と気体の区別

がなくなる。この圧力・温度（218気圧・374℃）を臨界点という。図3.4.2は、沸騰温度とエンタルピーの関係

で、実線が飽和水、破線が飽和蒸気である。地下の温度は深いところほど高いから、対応づけやすいように、縦軸の温度は下ほど高く描いてある。

流体が暖められも冷やされもせず(断熱的)井戸管の中を急速に上昇し、地表に現われたとき、その流体が持っていたエンタルピーは不変と考えても差し支えない。地下深部に240℃の熱水があるとする。そのエンタルピーは掛かっている圧力によってわずかに変化するが、飽和水の値とほとんど同じで約248カロリーである(図3.4.2のA点)。井戸を掘って、この熱水を断熱的に地表に取り出せば、やはり248カロリーのエンタルピーを持っている。しかし、地表の圧力1気圧の下で液体の水が取りうる最高温度は100℃、エンタルピーは100カロリーであるから148カロリー余分である。したがって、熱水は自身の一部をエンタルピーの高い飽和蒸気に変えることによって(沸騰)、余分のエンタルピーを処分する。これが沸騰泉である。

沸騰泉からの噴出流体に占める飽和蒸気の重量比を「乾き度」、飽和水の重量比を「湿り度」と呼ぶ。両者の和は1である。図4.4.2では、噴出流体のエンタルピー(下の横軸)と1気圧下での乾き度(上の横軸)を対応させてあるが、熱水の温度が240℃のときの乾き度は約0.28となることが分かる。この関係を逆に用いれば、乾き度から地下熱水の温度を推定できる。たとえば、乾き度が0.1のとき、熱水の温度は約150℃である。

場所	噴出形態	温度(℃)	温泉水(ℓ/分)	水蒸気(m ³ /分)
明礬	噴気	98.3	0	29
鉄輪	沸騰泉	99.1	315	20
鉄輪	噴気	125.5	0	97
鶴見	噴気	137.0	0	59
鶴見	沸騰泉	99.0	33	11
照波園	沸騰泉	99.7	42	11
堀田	噴気	135.2	0	71
観海寺	噴気	118.0	0	36
観海寺	沸騰泉	98.7	358	44
別府	沸騰泉	100.0	110	28

表3.4.1 沸騰泉・噴気からの水蒸気噴出量の例

水蒸気は気体であるから体積に換算すると、乾き度が0.28の沸騰泉では、湧出する熱水の体積の623倍もの体積の水蒸気が噴出する。1分当りの液体のみの湧出量が50ℓの場合、同時に噴出する水蒸気の体積は31.2m³である。乾き度が0.1の場合、50ℓの熱水には9m³の水蒸気が随伴する。いずれからも優勢な湯けむりが生じる。表3.4.1には、沸騰泉および噴気の観測例を掲げた。

次に、240℃の熱水と平衡する飽和蒸気が噴出する場合を考える。この水蒸気のエンタルピーは669カロリーであるから、1気圧・100℃の飽和蒸気のエンタルピーより大きい。これを断熱的に地表まで導くと、地表では100℃より高温の過熱蒸気になる。図3.4.3には、図3.4.2の一部を拡大し、1気圧における過熱蒸気の温度を対応させたが、地下で240℃の飽和蒸気は163℃の過熱蒸気になることが読み取れる。この温度が、熱水起源の水蒸気が1気圧で取りうる最高の温度である。

ちなみに、こうした過熱蒸気が噴出するときには、噴出口で鋭く高い衝撃音が生じることが多い。また、水蒸気のエンタルピーが大きいため、すぐには凝結せず、噴出口から数cm～十数cmほどの高さまでは透明である。

実際の地熱・温泉地では完全な断熱状態は成立せず、熱水や水蒸気は地表まで上昇する間に冷却する。冷却効

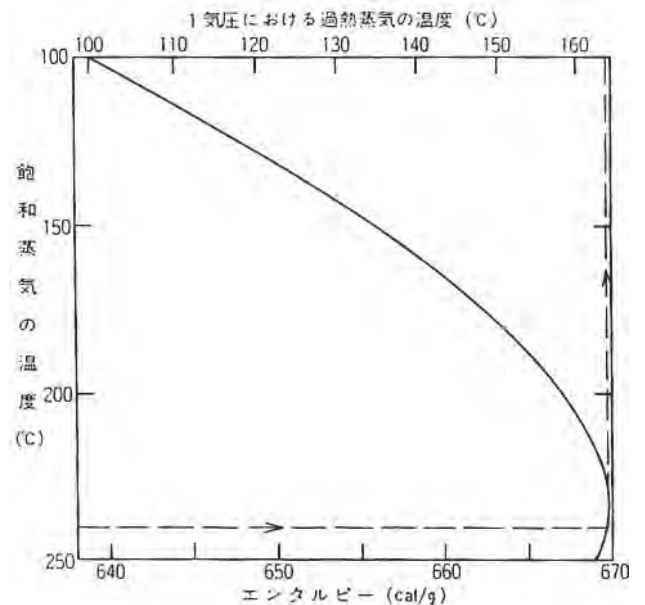


図3.4.3 飽和蒸気の温度とエンタルピーの関係、および1気圧における過熱蒸気の温度

果が大きいとき、地下では水蒸気であったとしても上昇途中で凝結し、霧状の水滴を含む湿った噴気と成る場合があるし、沸騰泉の乾き度は理論的な値より小さくなる。また、もともとの流体が熱水と水蒸気の混合物ということもあり得るから、実際にはもっと複雑である。

3 噴出蒸気中のガス成分

活動的な火山から放出される火山ガス（主成分は水蒸気）においては、二酸化炭素（炭酸ガス：CO₂）・二酸化硫黄（亜硫酸ガス：SO₂）・硫化水素（H₂S）・塩化水素（HCl）の4つが主要なガスである。そのほか、微量成分としてヘリウム（He）・水素（H₂）・アルゴン（Ar）・窒素（N₂）・メタン（CH₄）などがある。別府の自然噴気および掘削による噴気・沸騰泉からの蒸気についても、ガス成分が分析されている。表3.4.2は、主要成分の分析例である。

場所	噴出形態	温度(°C)	SO ₂ /H ₂ S	CO ₂	H ₂ S	HCl	文献
伽藍岳	自然噴気	115	< 0.01	7.81	1.49*	nd	A
鍋山	自然噴気	97.3	< 0.01	7.44	1.63*	nd	A
湯山	噴気	120	—	3.96	0.43*	nd	A
明礬	自然噴気	—	—	9.48	3.20	—	B
明礬	噴気	—	—	5.48	1.33	—	B
鉄輪	沸騰泉	—	—	3.91	0.203	—	B
小倉	沸騰泉	—	—	1.42	0.014	—	B
小倉	噴気	98.7	—	3.73	0.095*	nd	A
堀田	噴気	—	—	83.98	0.900	—	B
堀田	噴気	132	—	37.7	0.33*	nd	A
観海寺	沸騰泉	—	—	1.34	0.024	—	B
観海寺	噴気	—	—	6.22	0.079	—	B
別府	沸騰泉	—	—	3.10	0.021	—	B

表3.4.2 噴気・沸騰泉からの噴出蒸気中のガス濃度 (mmol/molH₂O)

注) * : 文献では全硫黄(ΣS)であるが、H₂Sとみなされる。nd : 検出されず、— : 不測、A : 大沢(2000)、B : 古賀・野田(1973)

まず注目されるのは、火山ガスに一般的に含まれている、HClとSO₂が検出されていないことである。この2つのガスは、よく水に溶ける性質がある。したがって、表3.4.2の分析例は、飽和蒸気はもちろん過熱蒸気も地下で熱水と接していたことを示唆しており、前節での説明に根拠を与えている。

つぎに、CO₂濃度は堀田（南部域）の噴気で高く、H₂S濃度は伽藍岳・明礬（北部域）の自然噴気や噴気（掘削）で高いことが注意を引く。この違いは、それぞれの地域における泉質形成と関わりがある（第7節参照）。

また、微量成分（分析値は掲げない）のうち、化学的に不活性なN₂・Heの一部はマグマ起源の可能性がある（大沢 2000）。これに反して温泉水中にマグマ起源水が検出されない（第3節）のは、天水が圧倒的に多量のためと考えられている。

第5節 別府温泉を涵養する原温泉水

1 温泉の源流域

地下の温泉水は、その水位が高い方から低い方へと流れる。図3.5.1は、別府温泉における温泉水位（平均海面からの高さ：m）の分布である（Allis and Yusa 1989）。等水位線は全体的として山側ほど高く、したがっ

て、温泉水は鶴見火山群から海岸に向かって流れている。より詳しく見ると、等水位線には凹凸があり、南縁部には等水位線が山側に引込んだ明瞭な谷がある。これほど明瞭ではないが、北縁部にも谷が認められる。温泉水は水位の谷に集まるので、これら2つの谷が温泉水の主要な流路と考えられる。地形的には、南縁の谷は朝見川断層と一致し、これに沿って堀田・観海寺の地獄地帯がある。北縁の谷は鉄輪断層と一致し、鉄輪を中心とする地獄地帯を貫いている。

以上を、図3.2.1の地温分布および図3.2.7の泉質分布と総合すれば、南と北の2つの谷に

沿って、Na-Cl 泉型（以下では食塩型と記す）の高温な温泉水が、鶴見火山群から海岸に向かって流動していると結論される。すなわち、別府温泉の源流域は鶴見火山群の地下にある。図3.2.1中の矢印は、食塩型温泉水の主要な流動方向である。

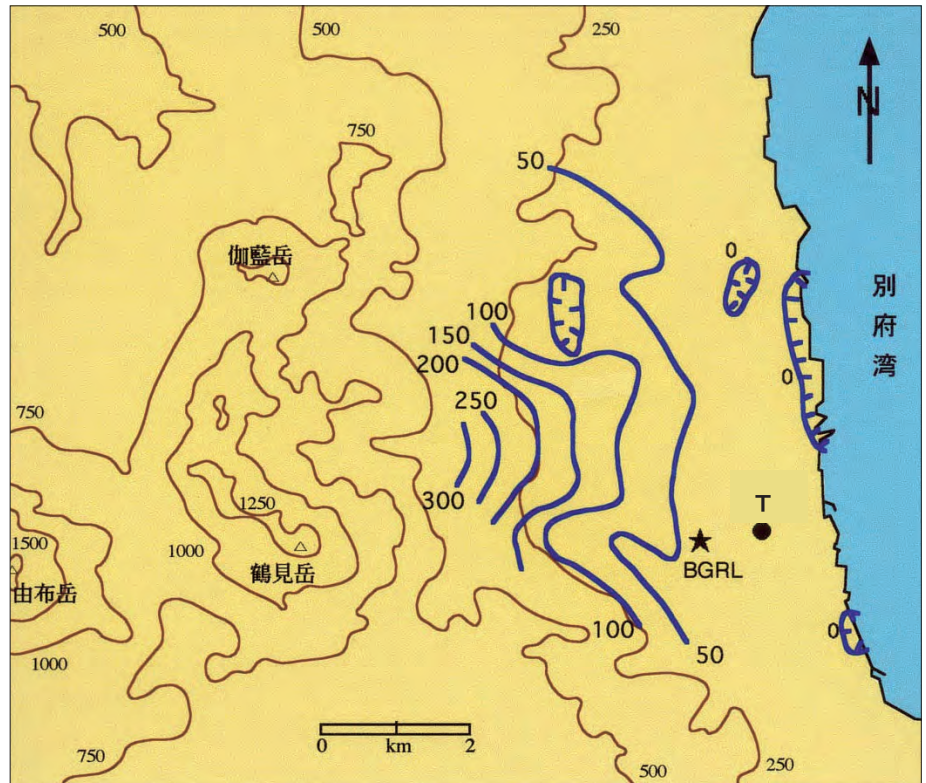


図3.5.1 温泉水位の分布（平均海水面からの高さ：m）

2 原温泉水の温度

食塩型温泉水の陽イオン組成は、接触している岩石との化学反応によって決まる。逆に、温泉水の陽イオン組成から地下での温度を推定することができる。このような推定法は「地化学温度計」と呼ばれている。

1985～87年に採取された別府全域の沸騰泉水の分析データに、ナトリウム (Na)・カリウム (K)・マグネシウム (Mg) を用いた地化学温度計を適用した結果、原温泉水（深部熱水）の温度は250～300℃と推定された。この温度は、水蒸気の水素・酸素安定同位体比から推定される温度（北岡ら 1993）とも、水蒸気中の炭酸ガス・アルゴン・水素の組成から推定される温度（大沢 2000）とも矛盾しない。

3 原温泉水の塩化物イオン濃度

図3.5.2は、温泉水（一般温泉・沸騰泉・噴気）のエンタルピーと塩化物イオン濃度との関係である。沸騰泉水については、水蒸気分離による濃縮効果を考慮して、地下での濃度に補正してある。図中の鍵図の3本の矢印は、それらの要にある熱水が沸騰して水蒸気を失ったり、水蒸気を獲得したり、地表からの浸透水と混合するときの変化の方向を示している。

注目されるのは、南部域のデータが低エンタルピー・低塩化物イオン濃度の領域に集中しているのに対して、北部域のデータは広い範囲に散らばっていることである。前述の鍵図に対応させれば、北部域のデータの分布状態は、蒸気の得失が生じていること、すなわち地下に蒸気層が発達していることを示唆している。

他方、南部域地下の蒸気層は、限られているようである。

地化学温度計による原温泉水の温度を図4.5.2に適用すれば、塩化物イオン濃度は1,400~1,600 mg/kg程度と推定され、蒸気の損失・蒸気の獲得・天水との混合という3つの過程によって、別府全域のデータ（海水混入の温泉水を除く）を説明することができる。

図3.5.2には、推定された原温泉水（温度：250~300℃，塩化物イオン濃度：1,400~1,600mg/kg）が大きい楕円で表わされている。

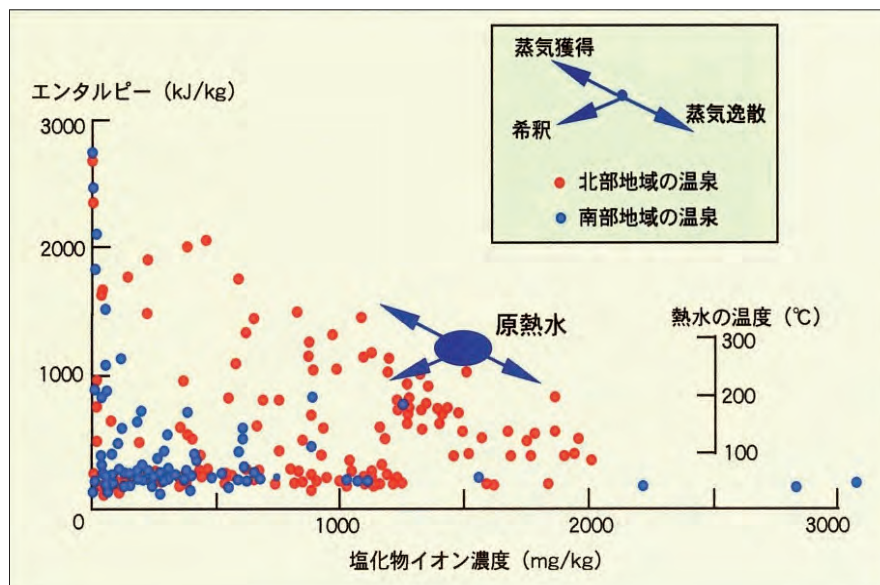


図3.5.2 温泉水のエンタルピーと塩化物イオン濃度の関係
—原温泉水の性質—

第6節 泉質の形成と各種温泉水の流動経路

塩類泉は、主な陰イオンによって、塩化物泉・硫酸塩泉・炭酸水素塩泉の3種に大別される。別府温泉のような火山性温泉の陰イオンは、マグマから上昇してくるマグマ発散物（火山ガス）から生じたものである。第5節で述べたように、火山ガスの主成分は水蒸気であるが、その他の主要なガスとして、 HCl ・ CO_2 ・ SO_2 ・ H_2S が含まれている。これらから、陰イオンが生じる。

1 噴気ガスの成分に見られる深部熱水（原温泉水）存在の証拠

別府地域の噴気や沸騰泉から噴出する蒸気的主要なガス成分は、 CO_2 と H_2S であり、水によく溶ける HCl と SO_2 は検出されていない（第5節：古賀・野田 1973、大沢 2000）。これは、深部熱水（原温泉水）存在の有力な証拠である。

2 塩化物泉

地下深部まで浸透した天水と火山ガスが出会うと、塩化水素は水に溶けて塩酸となり、強い酸性の熱水が生じる。この酸性熱水は周囲の岩石から金属成分を溶かしだすが、特にナトリウムを多量に溶出する。この過程は化学的な中和反応であり、熱水は中性となる。こうして、ナトリウムイオンと塩化物イオンを主成分とする、中性の深部熱水（原温泉水）が生成される。この熱水の性質を保持した泉質が、ナトリウム-塩化物泉である。

それらの塩化物泉には、例外なく硫酸イオンが含まれている。その一部は、地下深部において、火山ガス中の二酸化硫黄から生じたものと考えられている。

3 硫酸塩泉と炭酸水素塩泉

深部熱水が上昇すると、圧力が低下する。そのため熱水は沸騰して蒸気が発生し、蒸気層が形成される。別府の地下に蒸気が存在することは、図3.5.2で示された。明礬・鉄輪・堀田・観海寺で掘削によって噴気が噴出することは、地下に蒸気層が存在することの直接的な証拠である。図3.2.2の影を付けた範囲の地下に、蒸気が存

在すると考えられる。

熱水の沸騰により、二酸化炭素や硫化水素などのガス成分は蒸気側に移動する。蒸気はさらに地表に向かって上昇し、浅層の地下水と混合して、温泉水が生じる。蒸気が多いと、その一部は地面から噴出する。そのような場所が自然噴気地であり、地獄と呼ばれてきた。このように熱活動の激しい土地では、地層の岩石類が熱変質を受け、粘土化していることが多い。

地表近くの地下水には酸素が含まれている。その作用によって、硫化水素は酸化されて硫酸となり、強い硫酸酸性の温泉水が生じる。伽藍岳の塚原温泉や明礬地区の酸性温泉は、その典型的な例である。

蒸気中の硫化水素が少ない場合、地下水中の酸素が既に消費されている場合、また、比較的低温の場合には、硫酸が生じにくい。このような場合には、二酸化炭素が水に溶けて弱酸性の炭酸泉が生じる。観海寺地区でときに見られる炭酸泉が、その例である。

蒸気と地下水の混合によって生じた二種の温泉水は酸性であるから、流動する途中で岩石から金属成分を溶出し、温泉水は中性に近づいていく。硫酸酸性の温泉水は硫酸塩泉となり、炭酸泉は炭酸水素塩泉となる。

ガスの種類	生じる酸	生じる場所	生じる泉質	生成過程の分類
塩化水素 (HCl)	塩酸	地下深部	塩化物泉*	熱水希釈型
硫化水素 (H ₂ S)	硫酸	地表近く	硫酸塩泉	蒸気加熱型
二酸化炭素 (CO ₂)	炭酸	地表近く	炭酸水素塩泉	蒸気加熱型

表3. 6. 1 泉質形成の代表的なプロセス

*：二酸化硫黄 (SO₂) から生じた硫酸イオンを含む。

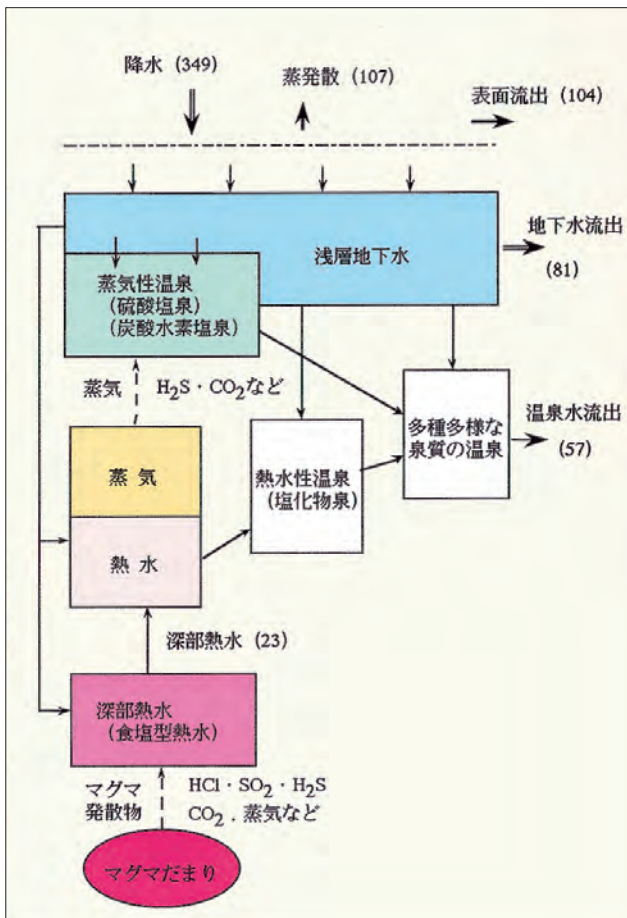


図3. 6. 1 泉質形成モデルと別府流域の水収支

4 地獄の景観

硫酸酸性の温泉水は強酸性であるから、岩石からの金属成分溶出が非常に激しく、岩石は珪石化する。伽藍岳で採取されていた別府白土が、これに当たる。また、珪石化のため、地表面は白色ないし灰白色となり、荒涼とした景観が出現する。

5 泉質形成のモデル

硫酸塩泉と炭酸水素塩泉は、蒸気に加熱されて生じるから、一括して蒸気加熱型温泉（または蒸気性温泉）と呼ばれる。他方、塩化物泉は熱水希釈型温泉（または熱水性温泉）と呼ばれる。現実には、以上3種の温泉水と地下水や地表水が混じりあい、また、岩石類と化学反応を起こし、多種多様な泉質が形成される。図4. 6. 1は、別府における泉質形成の模式図である。図中には、各種の水の流量（水収支：表3. 2. 3参照）が併せて記入されている。この模式図は、世界中の多くの火山性温泉に適用される。

6 各種温泉水の流動経路

1987年から89年にかけて、野口原にある京都大学地球熱学研究施設 (BGRL：図3. 5. 1参照) の構内で、深さ

300mの温泉実験井が掘削された。図3.6.2は、その井戸で測定された温度(Temp.)・塩化物イオン濃度(Cl⁻)・炭酸水素イオン濃度(HCO₃⁻)および泉質(ヘキサダイアグラム)の鉛直分布である。最も浅い所には通常の地下水があり、およそ60mより深い所には、温泉水(温度25℃以上)が流動している。それらの泉質の型は、200m深までは炭酸水素塩泉型、250m深付近では塩化物泉型、それより深い所では別の炭酸水素塩泉型である。最も温度が高いのは塩化物泉型温泉水であり、周辺状況からみて、この高温水は南西から北東に向かって流れている。また、上と下の炭酸水素塩泉型温泉水の陽イオン組成は互いに異なる。このように、BGRL付近では、泉質の異なる温泉水が、別々の層を作って流動している(由佐ほか 1994)。

この結果を参照し、別府全域の泉質分布から求められた各種温泉水の詳細な流動経路を図3.6.3に示す(大沢ほか 1994、大沢・由佐 1996)。

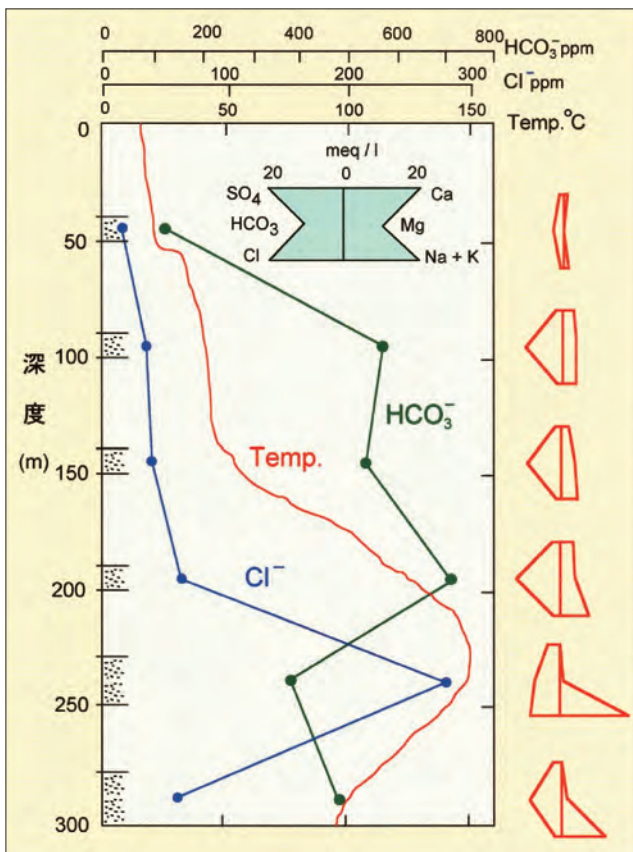


図3.6.2 京大実験井で観測された温度・泉質の鉛直分布

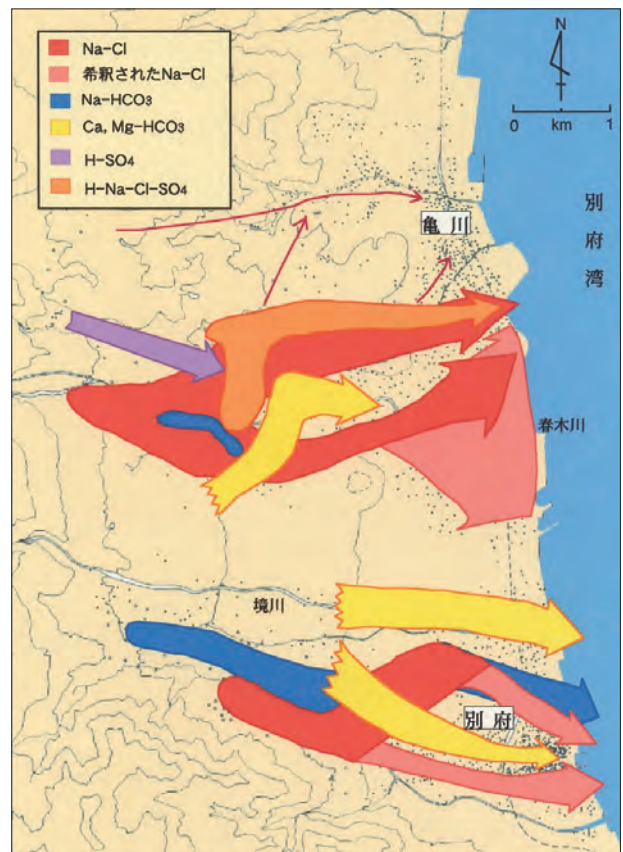


図3.6.3 各種温泉水の流動経路

第7節 地熱-温泉系のモデル(塚原-明礬-鉄輪-亀川)

伽藍岳一帯の蒸気には、マグマ性ガスが含まれている可能性がある(由佐ら 1995、大沢 2000)。また、伽藍岳地下の地熱系の解析によれば、別府地熱系の最高温度300℃(図3.5.2)が出現する深さは、海面下2,500m深程度である(由佐ら 1996)。他方、国が実施した電磁探査(NEDO 1989)によって、海面下5,000m深レベルに、成分濃度の高い高温流体の存在を示唆する、非常に低い電気抵抗が見出されている。さらに、鶴見火山群域におけるキュリー点深度は、海面下7,000m程度とされている(Okubo et al. 1985)。(キュリー点:磁性体が磁性を失う温度、岩石類では500~600℃程度)

図3.7.1は、以上のデータと考察および従来の研究成果などを基にして描かれた、キュリー点の深さ(約7km

深) までの、伽藍岳から海岸にいたる地熱-温泉系の概念的なモデルである。また、図3.7.2には、温泉系の地域区分を具体的に示した。表3.7.1は、各地域の泉質の代表例である。

場所	湧出形態	温度(°C)	pH	Cl	SO ₄	HCO ₃	測定年
塚原	自然湧出	63.4	2.1	2.0	1,827.5 553.0*	0	2004
明礬	自然湧出	62.7	2.9	3.1	174.3 7.5*	0	1993
鉄輪	掘削沸騰	98.0	8.3	1,050.0	154.0	98.9	2005
鉄輪	掘削沸騰	97.7	4.4	1,980.0	345.0	0	2007
鉄輪	掘削沸騰	99.1	8.8	798	390	184	1986
亀川	掘削動力	65.3	8.2	747.5	122.3	238.7	2005

表3.7.1 塚原(伽藍岳)-明礬-鉄輪-亀川に沿う泉質の例(イオン濃度の単位: mg/kg)
大分県温泉調査報告温泉分析書などによる。*: 硫酸水素イオン(HSO₄)

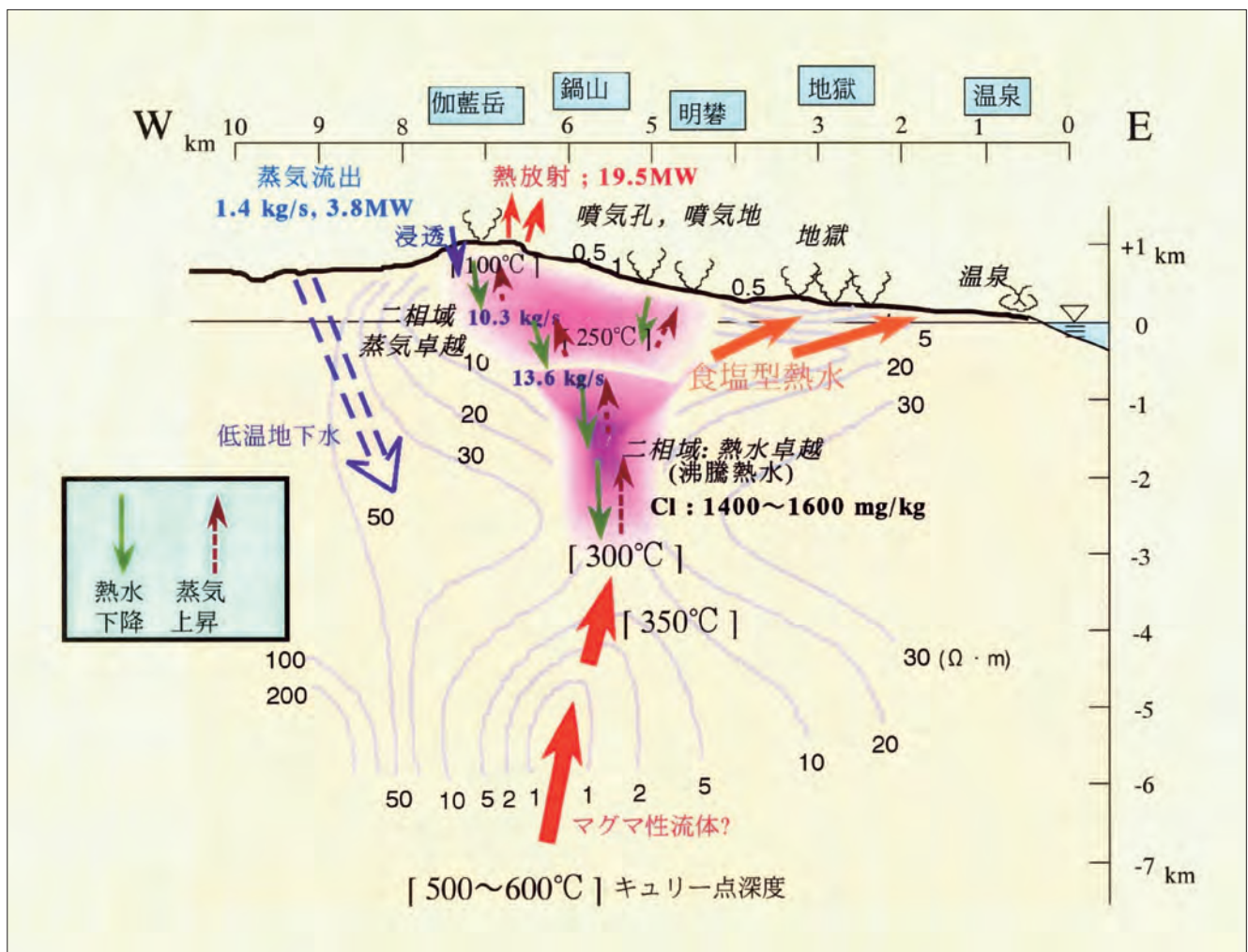


図3.7.1 塚原(伽藍岳)-明礬-鉄輪-亀川に沿う地熱-温泉系の概念モデル(1) 深部まで
図中の蒸気流出や熱放射の数値は、伽藍岳の地熱活動に対するものである。

図3.7.1の主な内容を下に記す。

- (1) 海面下7km 深程度での温度は、500~600°Cである。
- (2) 比較的細い通路を、深部よりマグマ性の流体が上昇している。

- (3) 海面下2～3kmの深さには、300℃の沸騰する熱水（別府の原温泉水）が存在する（熱水卓越の二相流系）。
- (4) 熱水卓越二相流系は海拔0m付近まで連続し、その上面での温度は250℃程度である。
- (5) 熱水の塩化物イオン濃度は1,400～1,600mg/kgである。
- (6) 熱水卓越二相流系の上方には、蒸気卓越の二相流系が発達する。伽藍岳・鍋山・明礬の噴気はその路頭である。
- (7) 熱水卓越二相流系から分岐した熱水（食塩型）は、海岸方向に流動して、地獄地帯の熱水となる。

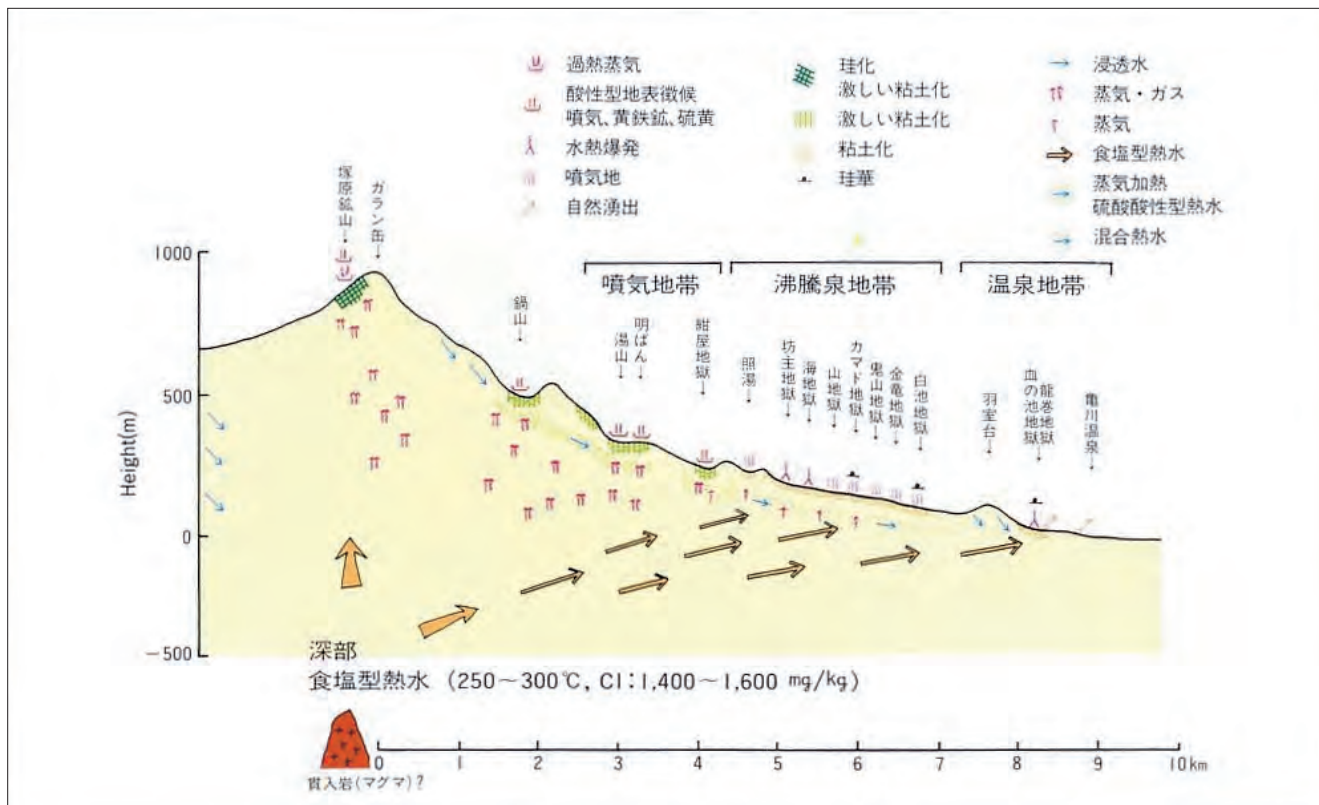


図3.7.2 塚原（伽藍岳）－明礬－鉄輪－亀川に沿う地熱－温泉系の概念モデル（2）浅部

図3.7.2の主な内容を下に記す。

- (1) 深部熱水から分離した水蒸気には、 $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{S}$ が含まれている。 HCl と SO_2 は含まれない。
- (2) 水蒸気は上昇し、伽藍岳山頂付近に噴気地を作り出している。地表近くの水は蒸気で加熱され、また、 H_2S は酸化されて硫酸になるため、強酸性の温泉水が生じている。（蒸気加熱型温泉：塚原温泉）
- (3) 岩石類は酸性温泉水の作用によって粘土化し、金属成分を失ったものは珪酸白土になっている。
- (4) 食塩型熱水は、さらに蒸気を失いながら海岸方向に流れている。その流路に当たり、下方からの蒸気を受けている鍋山・湯山・明礬などの「噴気地帯」では噴気活動が見られ、蒸気加熱型温泉が生じている。明礬の自然湧出温泉は、塚原温泉と類似の硫酸酸性の強酸性泉である。この酸性温泉水は、岩石類と反応し、低地へと流動している。岩石類の粘土化が著しく、明礬地区では地すべりが発生した。（現在は、防止対策が施されている）
- (5) 噴気地帯の下流に位置する「沸騰泉地帯（鉄輪）」では、深部熱水の性質を保持した熱水性温泉水（塩化物泉）が流出している。
- (6) 下流に向かうにつれて、熱水性温泉水に浅層からの温泉水や地下水が混入するため、海岸に近い「温泉地帯」の泉質は複雑化するとともに、温度も成分濃度も低くなっている。

第8節 別府温泉の変化

1 地下温泉水圧の低下

明治時代以降の長期にわたる温泉開発、なかんずく1960年代の急激な開発によって、別府の温泉系に変化が現れた。1960年代以前にはほとんどの源泉が自噴していたのに対し、1960年代半ば以降、自噴泉数が減少した。開発の進展によって地下温泉水圧が低下したことは明かである。

第5節の図3.5.1に描かれている等水位線には、いくつかの極小域（毛羽の内側）が認められる。中でも、北部・鉄輪地区の水位は周辺域より50mも低い。この範囲では多数の沸騰泉や噴気井から大量の熱水・蒸気が流出しており（図3.2.5）、異常な低水位はこの影響のためと考えられている。

2 泉質の変化

南部域の沸騰泉ではCl濃度の低下が顕著であり、1975年から1986年の間に、いくつかの源泉では50%以下になった（図3.8.1）。低地部の温泉では、別府駅北西部に分布していた塩化物泉型温泉が炭酸水素塩泉型に変化した（図3.8.2）。ただし、図の最上部に描かれている源泉（上流に位置する）は、硫酸塩泉型に変化している。上から2番目は、沸騰泉（図3.8.1のT）である。また、北部域においては、多くの沸騰泉や一般温泉でCl濃度の低下が観測された（図3.8.3）。

以上のことは、前項（8-1）で述べた地下温泉水圧の低下、特に、深部を流動する塩化物泉型温泉水の圧力が低下していることを示しており、高地部で1960年代に進行した沸騰泉開発の影響と考えられている（『別府市誌』昭和60年版）。

3 低地部における沸騰泉の衰弱

第4節（4-1）で触れたように、低地部にあった沸騰泉のいくつかは、この数十年の間に、沸騰が停止した。北部域の照波園一帯では、1970年代中頃には8本あったのが、1980年代中頃には5本に減じ、2008年には2本となった。また、南部域・天満町の沸騰泉は、1965年に掘削されて以来、40年以上

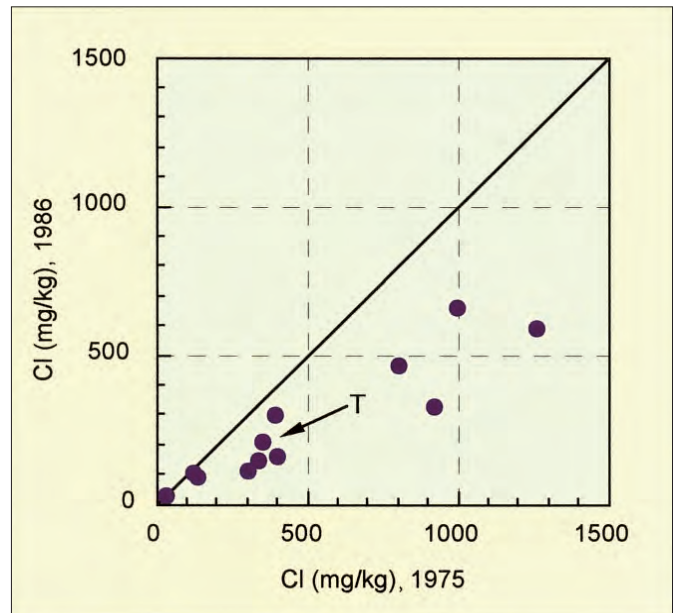


図3.8.1 南部域沸騰泉のCl濃度変化：1975年と1986年の比較

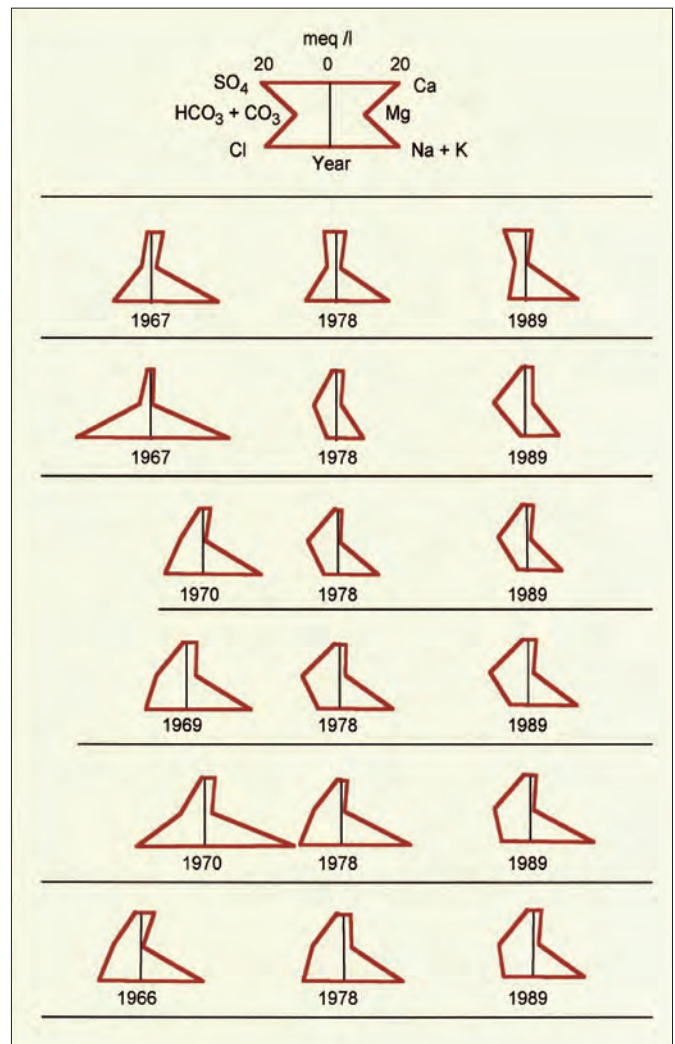


図3.8.2 南部域における泉質変化の例

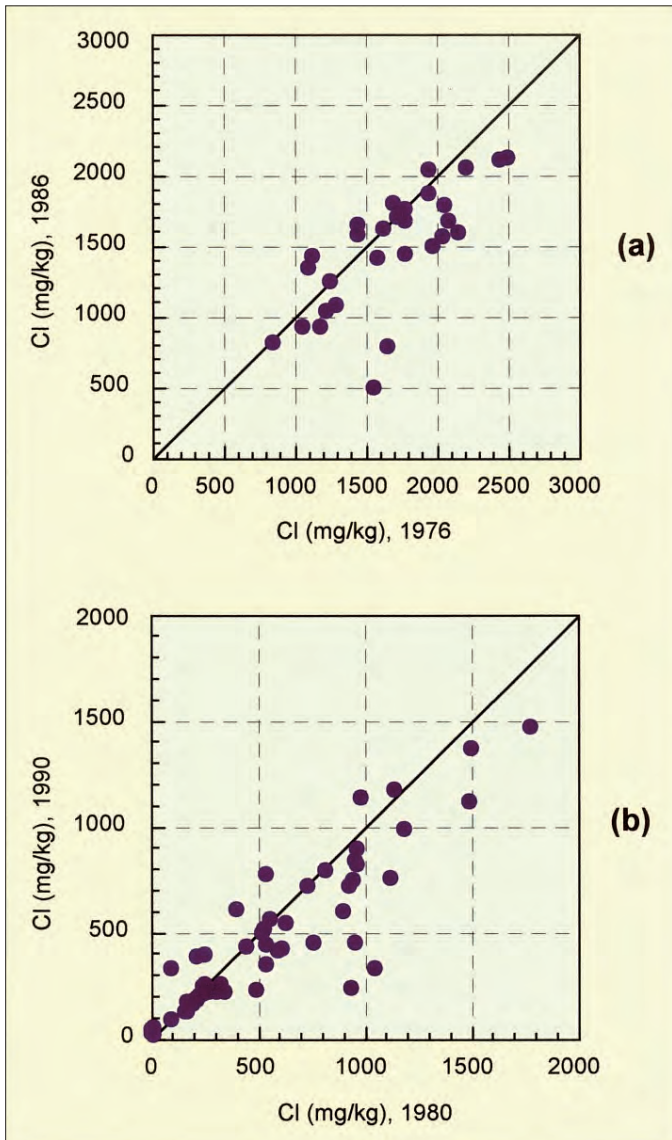


図3.8.3 北部域でのCl濃度変化
 (a) 沸騰泉：1976年と1986年の比較
 (b) 一般温泉：1980年と1990年の比較

にわたって沸騰し続けてきたが、2006年2月、沸騰が停止した。

表3.8.1は、この2つの沸騰泉における前後2回の陰イオン濃度分析値を比較したものである。いずれにおいても、2回目の分析値の方が、深部起源のClの濃度は小さく、浅部起源のSO₄（北部域）またはHCO₃+[CO₃]（南部域）の濃度は大きい。これらは深部温泉水の圧力が低下したことを示しており、前項で述べた傾向が続いていることをうかがわせる。

(a) 北部域・照波園の沸騰泉

分析年	pH	Cl	SO ₄	HCO ₃
1984	3.1	1851	421	0
1998	3.4	752	651	0

(b) 南部域・天満町の沸騰泉（図4.8.1のT）

分析年	pH	Cl	SO ₄	HCO ₃ + CO ₃
1966	8.5	848.8	105.3	194.8 + 3.64
2003	9.1	179.0	69.6	284.0 + 84.10

表3.8.1 低地部の沸騰泉の陰イオン濃度；前後2回の分析値の比較（単位：mg/kg）
 『大分県鉱泉誌』（1970年版、2006年版）による。

〈参考文献〉 第3章

- 安部巖 1987『別府温泉湯治場大事典』 創思社出版株式会社
- Allis, R.G. and Yusa, Y. 1989 Fluid flow processes in the Beppu geothermal system, Japan. *Geothermics* Vol. 18.
- 大分県厚生部 1970『大分県鉱泉誌』1970年版
- 大分県温泉調査研究会 2006『大分県鉱泉誌』2006年版
- Okubo, Y., Graf, R.J., Hansen, R.O., Ogawa, K. and Tsu, H. 1985 Curie point depths of the Island of Kyushu and surrounding areas, Japan. *Geophysics* Vol. 53.
- 大沢信二 2000「噴気ガスの化学・同位体組成からみた別府温泉の地熱流体の起源及び性状」『大分県温泉調査研究会報告』第51号
- 大沢信二・由佐悠紀 1996「温泉水の化学組成から推定される別府温泉北部地域の地下温泉水の流動経路」『地熱流体流動過程と地下構造に関する研究』科学研究費補助金報告書
- 大沢信二・由佐悠紀・北岡豪一 1994「別府温泉南部地域における温泉水の流動経路」『温泉科学』第44巻
- Kitaoka, K. 1990 Water circulation rates in a geothermal field: A case study of tritium in the Beppu hydrothermal system, Japan. *Geothermics* Vol. 19.
- 北岡豪一・由佐悠紀・神山孝吉・大沢信二・M. K. Stewart・日下部実 1993「水素と酸素の安定同位体比からみた別府温泉における地熱流体の移動過程」『地下水学会誌』第35巻
- 古賀昭人・野田徹郎 1973「別府地熱地帯の噴気ガス成分」『大分県温泉調査研究会報告』第24号
- 鈴木政達 1933「第七章 地質 第一節 別府地史」『別府市誌』昭和8年版 別府市
- NEDO 1989『昭和63年度全国地熱資源総合調査（第3次）広域熱水流動系調査 鶴見岳地域 比抵抗（MT,CSAMT法）調査報告書 要旨』
- 別府市 1985『別府市誌』昭和60年版
2003『別府市誌』平成15年版
- 松田繁 1905『大分県別府四近温泉調査報告』大分県知事への報告書
- 由佐悠紀・大石郁朗 1986「別府市における噴気・沸騰泉の調査（1）春木川以南域」『大分県温泉調査研究会報告』第37号
- 由佐悠紀・大石郁朗 1987「別府市における噴気・沸騰泉の調査（2）春木川以北域」『大分県温泉調査研究会報告』第38号
- 由佐悠紀・大石郁朗 1988「別府温泉の統計」『大分県温泉調査研究会報告』第39号
- 由佐悠紀・大沢信二・北岡豪一・竹村恵二・福田洋一 1995「伽藍岳の地熱調査」『大分県温泉調査研究会報告』第46号
- 由佐悠紀・大沢信二・北岡豪一・福田洋一 1996「伽藍岳の地熱調査（2）伽藍岳を中心とする地熱構造モデル」『大分県温泉調査研究会報告』第47号