

鹿児島市内温泉の賦存状態-地域地下水の研究(1)-

著者	露木 利貞
雑誌名	鹿児島大学理学部紀要. 地学・生物学
巻	8
ページ	63-77
別言語のタイトル	Hydrogeologic Studies on the Hot Springs in Kagoshima City, South Kyushu, Japan-Hydrogeologic Studies on the Local Groundwater-
URL	http://hdl.handle.net/10232/00009953

鹿児島市内温泉の賦存状態

—地域地下水の研究(1)—

露木利貞*

(1975年9月30日受理)

Hydrogeologic Studies on the Hot Springs in
Kagoshima City, South Kyusyu, Japan

—Hydrogeologic Studies on the Local Groundwater (1)—

Toshisada TSUYUKI*

Abstract

Hydrogeologic studies on the hot springs in Kagoshima City were carried out based upon geologic informations and chemical characteristics of water from drilled wells. In this area, more than ninety wells of various depths between 400 m to 850 m have been drilled to get thermal water since 1950.

Geologic setting of this area is as follows: The Shimanto Formation composed of sandstone and shale ranging from Cretaceous to Paleogene in age is the basement complex of this area. The surface relief of this basement rocks is shown in Fig. 2. Overlying the Shimanto, the Kekura Formation of late Cenozoic age widely develops in the Alluvial plain area. Alluvial aquifer with cold fresh water covers the older rocks.

Thermal water in this area can be classified into three types, which coincide rather well with the subsurface lithostratigraphic division.

1) A-type is alkaline simple spring, total concentration of dissolved solids in this thermal water is very low with values less than 1 g/kg. A-type thermal water is stored within both the fractured Shimanto Formation and the overlying marine Kekura Formation. Location of existence of A-type water is rather restricted. (Figs. 4, 5).

2) B-type is saline thermal water highly variable in total dissolved solids ranging from 5 to 22 g/kg. B-type thermal water is located in the Kekura Formation and the Terukuni Welded Tuff. Water of this type is assumed to have been originated from ancient sea water buried in the marine formation throughout its geologic history, and migrated south-eastwards to the present storage location through gently dipping aquifer. (Fig. 5).

3) C-type thermal water is characterized by chloride and bicarbonate having total concentration of dissolved solids ranging 1 to 5 g/kg. Water of this type, found in a considerably wide area, occupies large hydrologic situations both in the bed rocks and the Kekura Formation.

Though the relation between A and C-types of thermal waters is not yet clear, it is supposed that one part of this water is the relic of thermal water caused by ancient thermal activities, and another part is produced by mixing of A and B-types of thermal waters during the processes on the way of accumulation and migration of saline connate water.

* 鹿児島大学理学部地学教室

Institute of Earth Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, Kagoshima, Japan.

(1) ま え が き

「温泉」という語は学術用語としては、きわめて曖昧なもので「非温泉」との厳密な区別点はない。本邦では昭和23年、温泉法の制定に際し、湧出温度 25°C 、蒸発残量 $1\text{g}/\text{kg}$ 、あるいは一定量以上の特殊成分を目途として「温泉」と「非温泉」を区別した。すなわち温泉を温度と成分の両面から定義づけたのである。したがって、この場合には、その成因や賦存状況、深度など地理・地質的条件、つまり温泉の存在する「場」の問題は何も規定されていない。ただ石油・天然ガスなど炭化水素を主とするものが「温泉」から除外されているにすぎない。

一方、温泉の歴史をたどると、その多くは最初から多少とも自然湧出していたもの、何らかの温泉徴候をもっていたもの、すなわち温泉の自然露頭が発見されその後それぞれに発展するという経過をたどっている。したがって広い平野部などのように、新期堆積岩層のきわめて厚いところや、浅層地下水がきわめて豊富な場合には、たとえば地下深くに温泉があっても、直接温泉の露頭がないため、地表からの探査が容易でなく発見される機会も稀であった。もし発見される機会があるとすれば、温泉以外の目的で深く探査して偶然見つけられるか、温泉水の湧出力が優勢で浅層地下水に混入しているとか、地震時などに突然噴出した場合などで、その例はきわめて少ないことであった。

しかし、近年、掘削技術の進歩に加え、温泉そのものの持つ付加価値の増大、さらに揚水・引湯の方法も改善され、温泉試掘の風潮が激増し、掘削深度もますます増大するに至った。その結果、従来発見されていなかった新しい温泉もいくつか開発されて現在に及んでいる。これらの温泉は、自然湧出泉あるいはこれに似た浅層温泉とは異なり、温泉化した超深層地下水（福田1966、佐藤1972）に属するものである。最近、地熱資源の一環として低エンタルピーの超深層地下温泉の探査・開発が、ソ連・ハンガリー・オーストリー・フランス・西独などでも注目されつつあるのも、本邦とその揆を一にするものである。

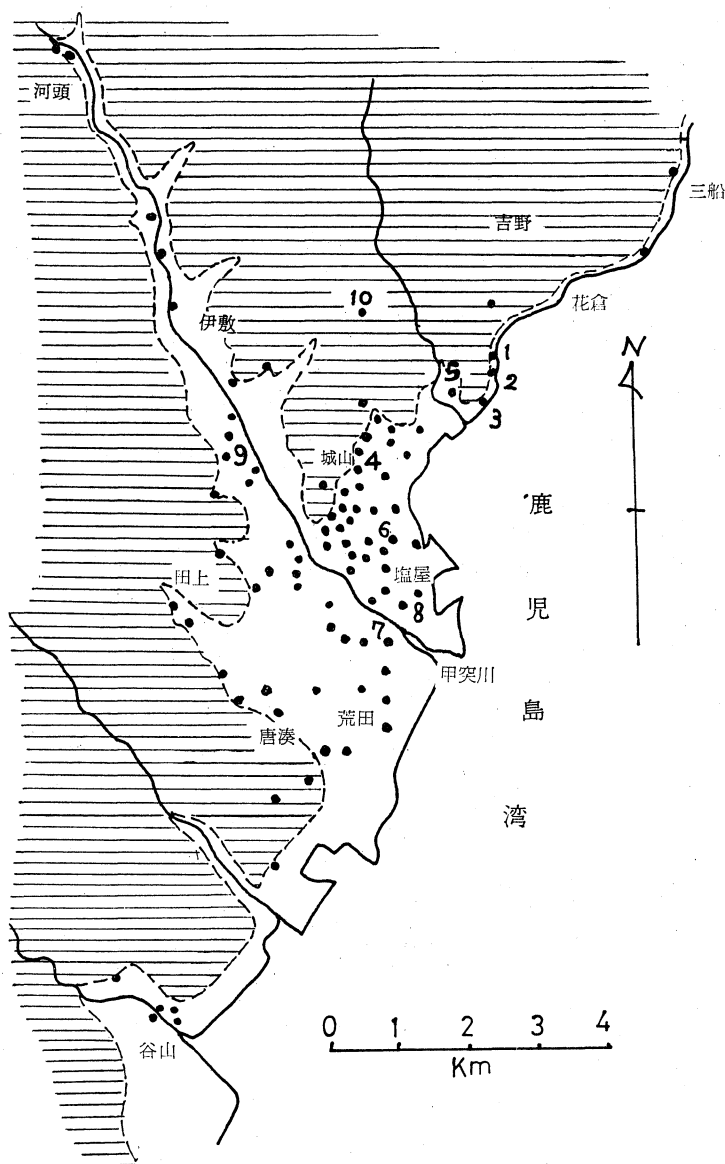
ある地域において、地下層温率あるいは地殻熱流量の値が大きい場合はもちろん、いわゆる $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ という平均温度勾配をとったとしても、 $1,000\text{m}$ の深部に存在する水はその成因には関係なく常に温泉化している。つまり「温泉」となっているはずであり、保温・揚水の技術的進歩とともに、連続的に地表まで誘導できる水さえあれば温泉を得ることが比較的容易にできるようになってきた。このような意味から、「温泉」の概念にも微妙な変化がみられ、地下での賦存場所や賦存状態を全く考慮しないで「温泉」という語を用いて果してよいものだろうかという疑問が当然ながら生じてくる。つまり、従来は湧泉（spring）としての温泉を考え、その土地の年平均気温より $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 以上高温な湧水や浅層の地下水は異常なものであると考えたのである。そしてこの場合湧泉に関係する天水の降下深度は一応 $200\sim 300\text{m}$ の深さまでとして考えていた。（福富：1965）ところが実際には地表下 $400\sim 500\text{m}$ 以上のところにある地下水は、その成因には無関係にすべて 25°C 以上の温度をもった温水（thermal water）であり、冷却しない方法で採取できれば温泉（広義）が得られるはずである。

したがって、深部地下水と深層温泉とは、その賦存状態に関するかぎり、地下に存在する水として同一に取り扱ってよいといえる。また、ある地域や盆地の地下に深層温泉が存在することは、その地域の深部の地下水そのものが温泉で代表されることを意味する。つまり、地下深部にかなり普遍的に温泉が存在するという事実は、温泉をきわめて特異な現象と見做して研究してきた従来の考えかたから、温泉を地下水学の立場にたってその性質やありかたを研究するという方向に転じさせるに至った。筆者は、このような意味から、それぞれの地域・地区には、

おのおのその地域の地形・地質の発達過程に応じた特徴ある地下水が地下には存在していると見做し、これを地域地下水 (local ground-water) と呼んだ。(露木：1969) 以下は、鹿児島市内の温泉について、特にその賦存状態について述べ、地域地下水の概念をより明らかにせんとするものである。

(2) 鹿児島市内の温泉

鹿児島市内 (行政区画は鹿児島湾をへだてた桜島火山の南半部まで市域に入るが、論述の都合からこれを除いた) には現在およそ 90 の源泉が散在し、1日 5,000kl の温泉が動力で揚水され一般に利用されている。その分布は第1図に示す如く、東西 8km、南北 14km の広域に及び、市街地においては全域にわたって地下には温泉水の存在が知られている。現在の掘削



第1図 鹿児島市内温泉の源泉分布図
(横線部はいわゆるシラス台地部)

深度は 400~900m (最多深度 500~600m, 湧出温度 40~55°C (最多温度 45~50°C) である。

歴史的にみると、鹿児島市内温泉は 1900 年の初頭まではほとんど知られず、ただ市街地周縁部のシラスの崖下より 2, 3 の黄褐色を示す鉄鉱泉が湧出していたが、これは現在開発されている温泉とは無関係の湧水であった。ただ北西部河頭^{こがしら}において当時 30°C の単純温泉が存在していたのが唯一のものである。1930 年代の初期には、既に海岸附近の荒田^{あらた}に 40°C 前後の温泉が 400m 前後の掘削で発見されていた。その後 1950 年に入ってから急速に開発が行なわれ、源泉数が増すとともに、より高温なもの、より泉質の良い温泉を求めて掘削深度も増大し現在に至っている。したがって近々 20 数年間に、掘削範囲・深度ともに増大し、急速な湧出量の増加をみた。その結果地下の地質構造も次第に明らかとなり、温泉の賦存状況もかなり明瞭に把握できるようになった。

現在、市内には蒸発残量の少ない単純温泉と、食塩泉との 2 系統のものが存在し、その中間型 (混合型) のものも多い。これら各型に属する温泉が、単に平面的に分布範囲を異にするのみでなく、地下の地質および深さの条件により立体的に賦存場所を異にしている。従来から温泉水系を論じ、平面的な分布について取り扱った研究は多いが、水体として立体的にとりあげたものは比較的少ない。

この報文は試料の豊富な鹿児島市内の温泉について、立体的に地質構造と温泉を関連させて、その賦存状態を述べ深部における地域地下水の存在形態の一例を示したものである。

(3) 鹿児島市地域の地下地質

鹿児島市周辺の地質については既に大城 (1956)、大木・早坂 (1971)、大木 (1974) などの調査がある。従来は、市街地平野部の地下地質に関しては不明の点が多かった。幸にも、市街地で多数行なわれた温泉掘削のためのボーリング試料が集積されたことによって急速に進展した。これらはいずれも深度 300m 以上のもので、なかには 900m に達するものもあり、十分吟味して利用するかぎり市内の地下地質に関する貴重な資料となることはもちろんである。この一部については露木・他 (1970) が記載し、その後大木・早坂 (1971) は周辺の地質を加味して総合的に整理検討を加え当地域の地下地質を詳細に論じた。

大木らによると、地下地質の層序的区分は第 1 表の如くである。

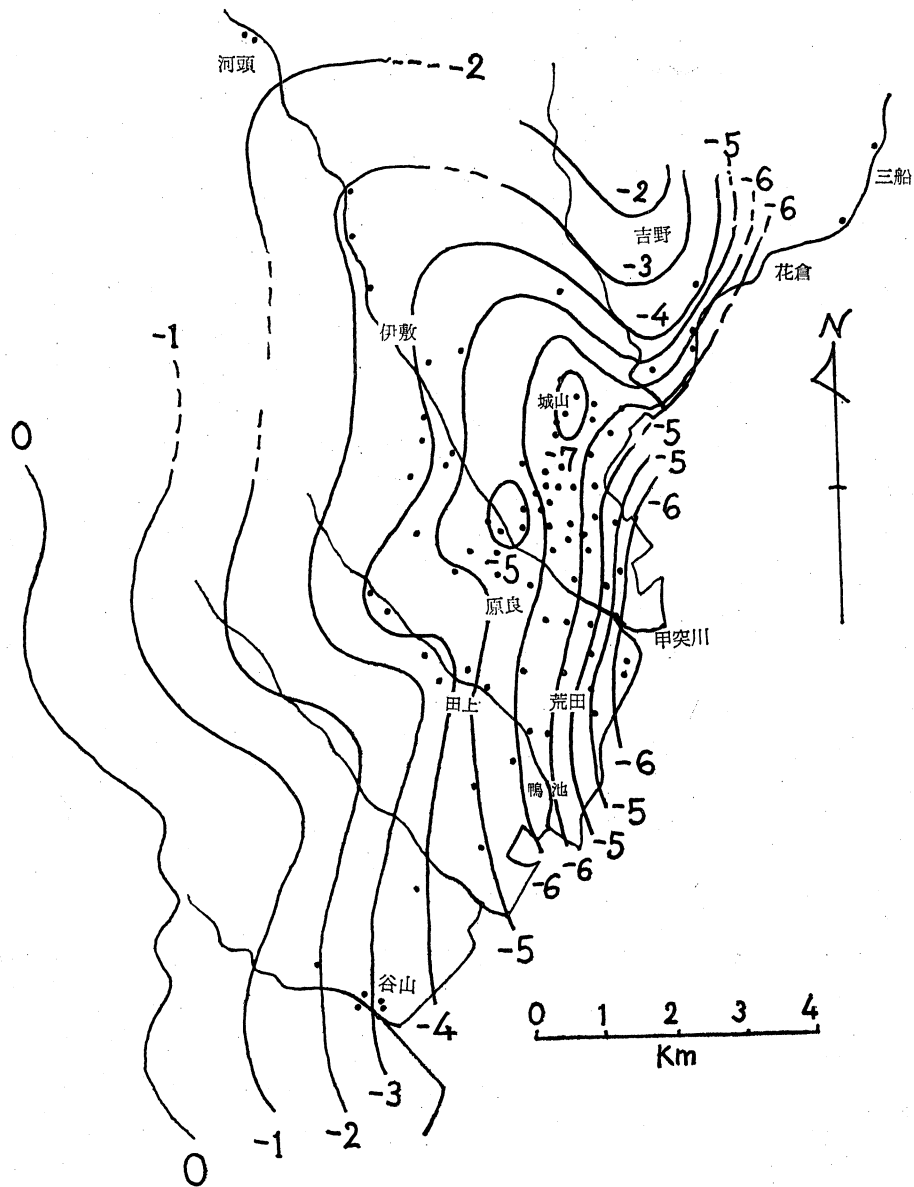
第 1 表 鹿児島市街地における地質層序

現 世	未固結砂礫層
更 新 世	竜尾層・坂元軽石流 (シラス)
	城 山 層
	吉野軽石流
	荒田軽石流・横井安山岩
更 新 世 } 鮮 新 世	花 倉 層
	照国軽石流
	三船流紋岩
古第三紀 } 白 堊 紀	基盤岩 (四万十層群)

基盤岩（四万十層群）

薩摩半島の山稜をつくって広く分布するものであるが、市街地では南部の地表にみられるにすぎない。しかし、地下においては広く普遍的にみられ、市内温泉の第一次貯留体となっている。多くの場合、堅硬緻密な砂岩・頁岩からなり、ことに新鮮な砂岩にあっては割れ目ないし空隙は少ない。もちろん温泉水はこのなかの割れ目に充填されているため割れ目の少ない基盤岩に到達した場合には地下の温度はかなりあったとしても水量がきわめて少なく、したがって温泉掘削は失敗に終ることになる。基盤岩の表面は風化して灰褐色を呈し、数 m ないし 10 数 m の間には割れ目の多いことがしばしばあり、割れ目には酸化第 2 鉄の褐色汚染がみられる。またこの不整合面のすぐ上位には赤褐色の粘土層、あるいは礫層がみられることもある。

数多くのボーリング資料によると第 2 図に示すように基盤岩表面は北部ではかなり顕著に南



第 2 図 鹿児島市域における基盤岩（四万十層群）上限の等深線図（単位：100m）
（早坂，大木原図，筆者一部修正）

東あるいは東に向って深くなり、一方南部では北に深くなる傾向を示す。このことはほぼ現在の鹿児島湾方向にのびる鹿児島地溝の西縁を画する基底構造が表現されているものと解釈され、N-S方向の比較的小規模の断層群の存在が予想される。したがって、基盤岩上表面の起伏も平地部では南北方向を示し、後述のアルカリ性単純泉および高塩泉の賦存形態もこの傾向に左右されている。

三船流紋岩

地表では北方三船部落にわずかに露出するもので、流紋岩・ハリ質岩石・球顆岩など岩相変化にとむ。

照国軽石流

基盤岩（四万十層群）の上位に直接不整合関係でみられるもので、模式地においては130mに達し、なかに2枚の礫層をはさむ。ほかの地点では最下部基盤岩との間に礫層、場合によっては粘土層と礫を伴うこともある。岩相から2枚に区分され、上部の溶結凝灰岩は暗青灰色ないし黒色であるに対し、下部のものは外来岩片の多い白色～灰白色の溶結凝灰岩である。おそらく鹿児島湾周縁部にみられる最古のものである。

本層は地点により厚さを異にし、またこれを欠くこともあり、本層をおおう花倉層との間には著しい不整合関係の存在が認められる。本層は比較的割れ目は少ないが、本層中には高塩泉が存在する。

花 倉 層

市内の平野部に普遍的に分布する厚い海成層で、しばしば貝化石・植物化石を含む。一般に下部はシルト層、上部は砂層で代表されるが岩相の側方変化も著しい。地表では模式地の市街地北部花倉に露出し、凝灰角礫岩、凝灰岩、凝灰質砂層よりなり、10～20度の傾斜をもって平野部に没するが地表下においては古鹿児島湾を埋めて厚く発達し、地下温度も漸次上昇し、低温の高塩型温泉を豊富に貯留していることが掘削資料によって明らかにされた。しかし本層中には腐蝕物質を含有し赤褐色を呈するアルカリ性単純温泉も城山地区を中心として多量に包蔵されている。

荒田軽石流

荒田および坂元の2点の岩芯で認められた暗褐色ハリ質溶結凝灰岩に対して大木らが与えたもので、この分布は限定されている。「おそらく花倉層堆積後の侵食面の凹部を埋めるような形で堆積したもの」（早坂・大木）である。

吉野軽石流

吉野台地にみられる灰褐色軽石流で、当台地では緩く南方に傾斜し地表下に没する。市街地北部の掘削資料にはしばしばあらわれ、下位花倉層の侵食面の凹所に薄く発達している。

城山層、竜尾層、坂元軽石流

それぞれ泥層、凝灰質砂～シルト層、軽石質角礫凝灰岩よりなり、いずれも台地を構成する主要メンバーである。ほぼ水平に分布するため台地をとりまく縁辺部にわずかに露頭をもつものである。台地縁辺部に近接した沖積平野部にみられるが、それ以外の沖積平野の地下では全く存在しない。本岩中には表層地下水が分布し、湧水もみられるが、温泉水による汚染はない。

未固結礫層

花倉層より上位の諸層を著しく侵食して生じた不規則面の上に堆積した厚い未固結堆積層である。その深度は場所により変化がはげしく最深220mに達することもあるが、いずれも削井

資料であるため本層の詳細については不明である。海岸部 (No. 8) 周辺の深い未固結堆積層の下底部では既に 20 数度の微温泉を貯留していることが知られている。

(4) 温泉の概況

市内における温泉源分布はすでに第 1 図に示したが、そのうち周縁台地部および北西部甲突川上流のものは、最近数年のあいだに新しく掘削されたものである。当温泉については筆者 (1969) はさきに鹿兒島地溝内に湧出する諸温泉に関連して簡単に触れ、その後も別に報告した。(露木・他 1969)

一般に温泉の発見・発展過程は、その賦存状態を知る上に重要な鍵となることが多い。当温泉は、1950 年代の前半までは上総式掘削法によって削井されていたため地下の地質資料も明確でなく、かつ基盤の堅硬な岩石に到達すればそれ以深の掘削は極めて困難であった。したがって当時までの温泉はすべて堅硬な基盤岩類より上部の岩類から採取していた。その当時の温泉の記録によれば、最高温度 45°C 、ほとんどが 42°C 前後の食塩泉であった。1955 年、No. 5 温泉が完成し、当時知られていた源泉から 4km も北の地点の地下にアルカリ性単純温泉が確認され、孔内温度も最高 53°C に達することが判明した。これを契機として、掘削機はロータリー式のものが用いられ、地下の地質も次第に明らかになるとともに、新しい温泉を求めて急速に源泉数も増加してきた。

その結果明らかとなった地下の地質、温泉の性質、温度傾向などを総合すると、鹿兒島市内の温泉の一般的特徴は次のようである。

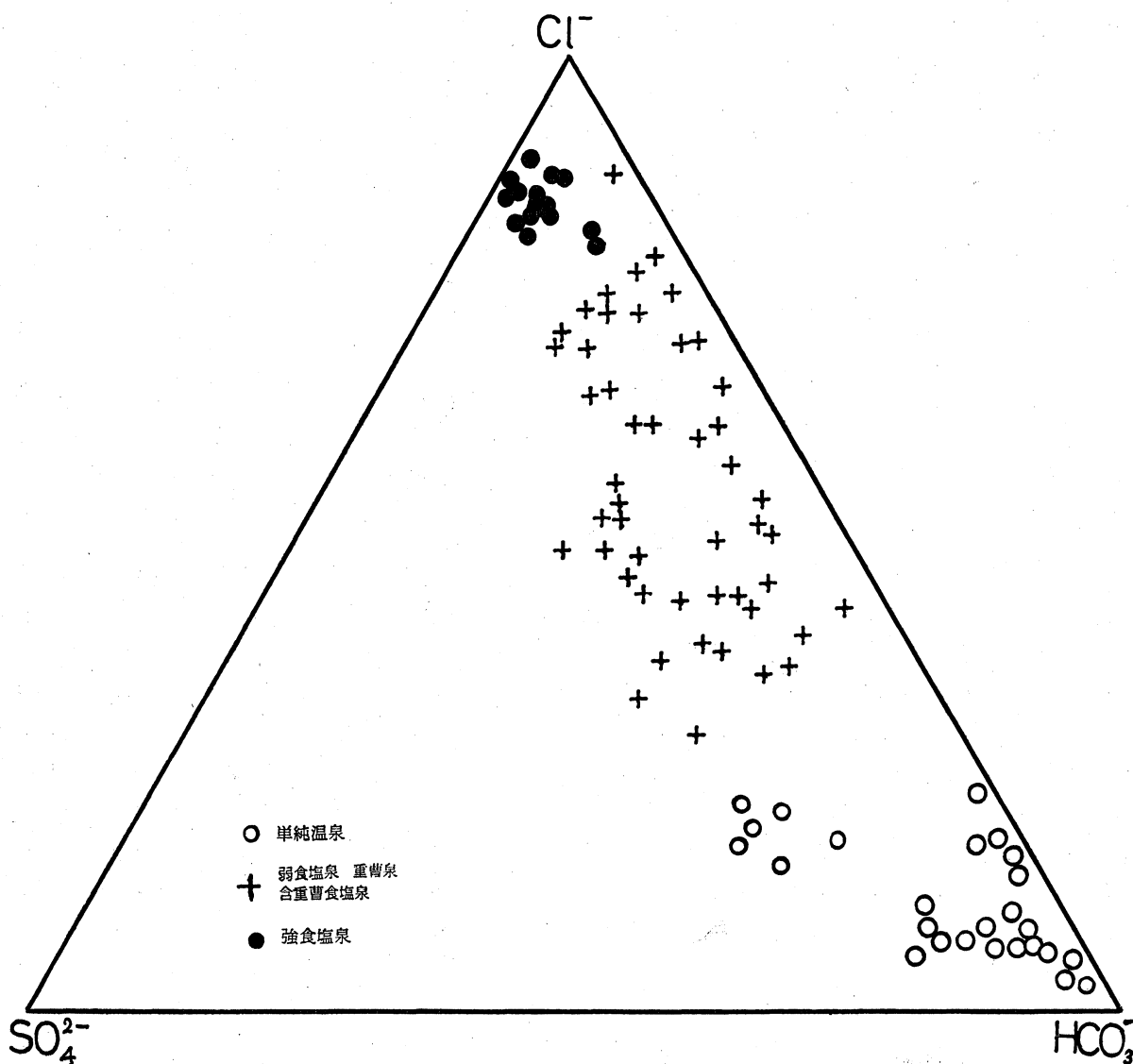
(1) 掘削深度が大きい。掘削深度 500~650m のものが多いが、なかには 900m に達するものもある。500~900m とはいえ本邦の温泉の掘削深度としては大きい部類に属するが、その割には温泉が低く、孔底温度は $55\sim 63^{\circ}\text{C}$ 、地表での湧出温度 $40\sim 55^{\circ}\text{C}$ を示す。当地域の平地部を構成する最表層砂礫層中には豊富な冷地下水が存在するが、この中には温泉による汚染は見られない。その下位の城山層・竜尾層・坂元軽石流中にも同様に下部からの温泉の混入は認められない。したがって地下の温度異常は 150~200m に存在する花倉層上部の不整合面直上においてはじめてみられ、花倉層中においては $5\sim 7^{\circ}/100\text{m}$ の増温率を示す。

(2) 四万十層群を一次貯留体としている。

現存する源泉のほとんどが四万十層群に属する岩盤にまで到達し、さらに本岩を 20~150m 掘進して温泉を得ている。したがって 500~900m という掘削深度の差は、一つにはその地点における四万十層群までの深さの差、つまり四万十層群の侵食面の形態を示し、さらに温泉水を胚胎する岩盤中の割れ目の状態を表現している。すなわち、高温・良質の温泉水を豊富に胚胎する割れ目の多い岩相の場合には四万十層群を深く掘進する必要はなく深度はむしろ小さく温泉が得られ、逆に亀裂が少ない場合には所要の温泉を求めてこの岩層中をより深く掘進する傾向をもっている。しかし一般には、基盤岩到達後の増温率は花倉層中と比べて小さく、ことに割れ目の多い岩石中ではこの傾向が強い。したがって基盤の砂岩・頁岩中に破碎部が存在するか、割れ目の発達が良好な場合には温泉が得られるが、割れ目の少ない場合は孔底温度が高温であっても水量不足で必ずしも良い温泉が得られず失敗に終る事例が起りうるわけである。このように、当地域では温泉は四万十層群の割れ目のなかにほとんど普遍的に存在することが明らかであり、この意味から本層群が本温泉の一次貯留層であるといえる。すなわち、四万十層群を一次貯留層としている温泉水が存在し、その上位に不整合に重なる花倉層中にも及んでいるわけである。

(3) 湧出範囲がきわめて広い。鹿児島市域においては地下に広く四万十層群、花倉層が分布しているため、これを貯留層とする温泉がきわめて広範囲に地下に存在する。現在源泉の密集している市街地平野部はもちろん、南は谷山、北は吉野、河頭、郡山など次第に周辺部に及び、今後さらに外延的にその範囲が拡大することが予測される。すなわち、一次貯留層を形成する四万十層群のつくる凹地を埋めるように分布する花倉層およびその相当層は、その性質上からも、地下にきわめて広範囲に分布するものと考えられ、これらが温泉水の二次貯留層として作動しているのである。

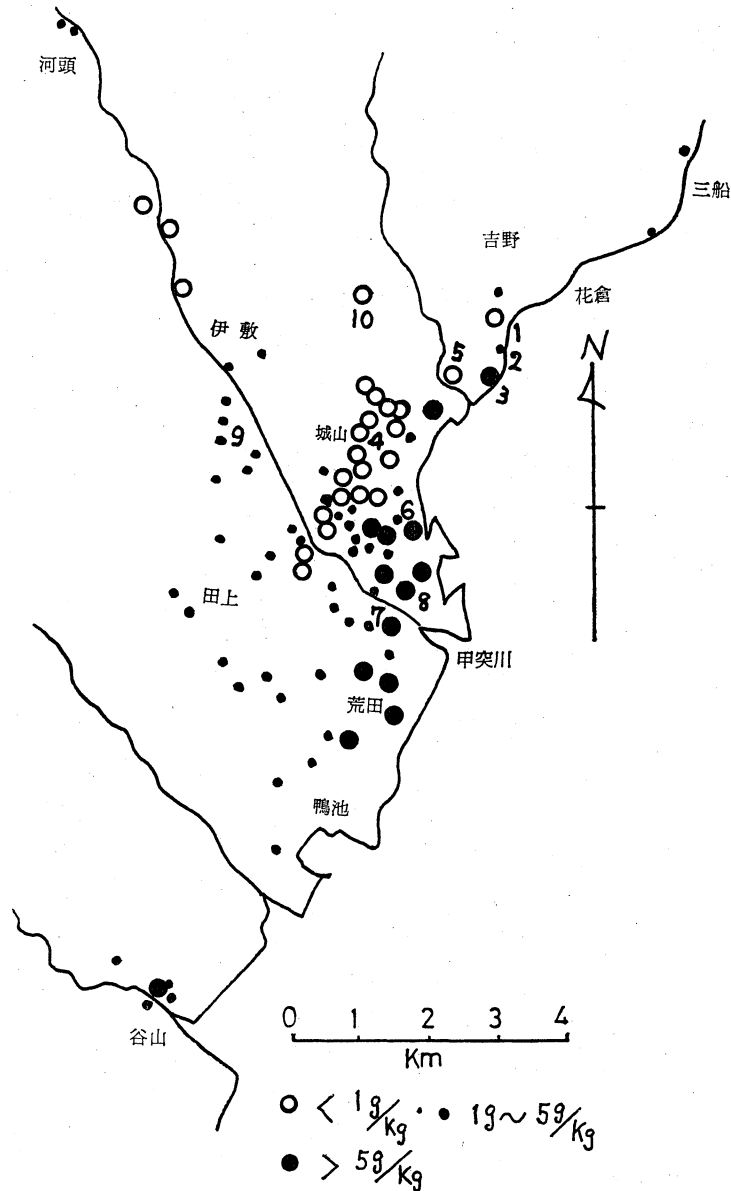
(4) 泉質は大別してアルカリ性単純泉と弱食塩泉・食塩泉に区別される。前者は北部の台地縁部城山地区を中心としておもに分布し、しばしば腐植質を含み黄褐色～茶褐色に着色している。また後者のうち含塩量 10g/kg 以上のものは海岸部において花倉層中からの温泉にみられるが、化学的性質を異にした温泉水体の存在は、当温泉を研究する上に重要な示唆を与えているように思われる。



第3図 鹿児島市内温泉水の Cl^- - SO_4^{2-} - HCO_3^- 相関図

(5) 泉質からみた特徴

前述の如く鹿児島市内にはきわめて広い範囲から温泉が湧出しているが、その泉質および地下における賦存状態は単一ではない。鹿児島市内の温泉について県衛生研究所の行なった分析結果により Cl^- - SO_4^{2+} - HCO_3^- の相関をみると第3図の如くなる。これで見ると結局、成分的には Cl^- を主とする食塩泉と HCO_3^- を主とする重曹泉ないし単純泉、さらに両者の混合したような成分をもつ温泉で特徴づけられることがわかる。さらに源泉位置に対応させた蒸発残量について検討すると第4図のような特徴ある分布がみられる。すなわち温泉のなかには蒸発残量 8g/kg 以上のものが90例中11あり、そのなかには 22g 、 28g に達するものがある。これら含塩量の多い温泉は、いずれも平野部の海岸に近い位置に存在するもので、他の種類の温泉と



第4図 鹿児島市内温泉の蒸発残量分布

第2表 鹿児島市内温泉の泉質

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
温度 (°C)	45.5	50.6	41.2	45.0
pH	8.65	7.8	7.0	8.2
蒸発残留物 (g/kg)	0.320	1.402	9.540	0.273
K ⁺ (mg/kg)	3.57	47.77	80.54	11.34
Na ⁺ (mg/kg)	42.01	428.6	2629	46.85
Ca ²⁺ (mg/kg)	1.72	26.59	365.9	2.21
Mg ²⁺ (mg/kg)	0.83	3.52	325.0	0.18
Fe ²⁺ (mg/kg)	0.51	0.33	3.85	4.48
Cl ⁻ (mg/kg)	8.67	391.8	5106	7.88
SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	4.28	95.97	655.6	1.60
HCO ₃ ⁻ (mg/kg)	85.91	517.5	275.2	134.1
H ₂ SiO ₃ (mg/kg)	202.3	51.24	152.9	140.5
CO ₂ (mg/kg)	0.5	13.81	30.3	0.97
腐植 (mg/kg)	23.60			9.3
泉質	単純温泉	含重曹弱食塩泉	食塩泉	単純温泉

比較するとやや低温である。一方、含塩量の少ない単純温泉に属するものは、大部分が蒸発残留量 0.5g/kg 以下で、北部城山周辺部に集中して分布する。なお 1~2g/kg の範囲におよそ 60% あり、それぞれ分布を異にする。このように含塩量および組成を異にした温泉水がそれぞれ地域を異にして地下深部に存在することは、当温泉の特徴のひとつである。

次に同一地点においても、深度あるいは採湯層の差によって泉質が著しく異っている。鹿児島市内の温泉においても、含塩量の非常に多い温泉は利用者側からみて必ずしも良質のものではなく、又パイプの腐蝕などの理由で同一点において再掘削（掘り替）が行なわれたものが数例ある。（例えば第2表および第1図の No. 6, No. 7）その結果はいずれの場合にも含塩量の少ない、より高温な温泉が得られている。このように中間部に高塩温泉水が存在することは海岸部のみならず平地部のかかなり広い範囲で、掘削過程における泥水のゲル化の現象などから認められている。またこの高塩泉を含むのはおもに花倉層の下半部より基盤岩直上の不整合部までの位置である。したがって新しい源泉においては高塩泉を含む部位は止水し、基盤岩中の塩分の少ない温泉水のみを採取するように努めているが、必ずしも完全とはいえず至近距離の源泉でも泉質にかなりの差がみられる場合もある。（例えば第2表および第1図の No. 1-No. 2-No. 3 など）

このような鹿児島市内温泉にみられる泉質の地域的特徴、深度による顕著な差異は同一成因をもつ水体として説明できるものではなく、2つ以上の異水体と考えるのが妥当である。

現在では直接同一源泉で上部の高塩泉と下部の温泉を同時に採取することは困難であり、かつ上部の高塩泉の採取も不可能である。したがって塩水が現在の海水の直接進入か、いわゆる化石水的なものであるかという点に関しては、いまのところ何れとも断定し難い。しかし現在の鹿児島市沖の海底は深度 60m であること、鹿児島湾内でもほとんど 150m（三船沖など）以下であること、さらに花倉層の岩質などを考えると、地下 300~500m 以上の深部にまで現海水が容易に進入しているとは考え難い。またこの塩水が 40~45°C の温度をもちその下位には

(源泉番号は第1図の番号と対応する)

No. 6(1)	No. 6(2)	No. 7(1)	No. 7(2)	No. 8	No. 9
39.0	48.0	41.3	51.9	38.5	46.0
7.9	7.7	7.4	8.2	7.1	8.1
8.496	1.968	10.44	2.158	22.035	1.203
98.43	24.35	140.1	69.89	747.4	34.55
2348	647.8	2942	653.6	5786	412.6
241.9	64.89	367.1	58.03	1053	6.96
227.3	20.54	378.6	8.653	423	2.38
0.685	0.419	5.81	0.135	12.65	0.80
4202	765.8	5712	899.5	11470	413.8
610.5	86.75	526	183.4	1542	93.18
269.4	599.0	316.5	303.5	221.4	433.3
175.0	44.61	142.5	38.3	770.2	47.63
5.18	28.8	38.0	6.126	42.59	0.136
食塩泉	含重曹弱食塩泉	含塩化土類食塩泉	含塩化土類弱食塩泉	含塩化土類強食塩泉	含塩化土類弱食塩泉

(鹿児島県衛生研究所資料)

更に高温な単純泉が存在する事実も単に現海水が上層部から進入してきているものとして説明するには幾つかの難点があるように思える。

筆者が少くとも、組成と成因を異にする2水体が500~700mの深部に存在し、これらは古い時代から地下の地質条件に制約されて賦存していたものと考えらるゆえんである。

(6) 温泉の賦存状態に関する考察

以上述べた事実を要約しつつ鹿児島市内温泉の地下での賦存状態について2,3の考察を行なうことにする。

鹿児島市内低地部の地下深部に広く分布する温泉は基盤岩(四万十層群)の割れ目のなかに胎児しているのであるが、その上位にある溶結凝灰岩、花倉層の凝灰質頁岩、シルト岩、砂質頁岩のなかにも存在する。泉質からみて含塩量のきわめて少ないアルカリ性単純泉に属するもの(以下A型という)、蒸発残量の多い食塩泉(B型とよぶ)、両者の中間のもの、すなわちもっとも多数を占めて周縁部にまでみられる蒸発残量1~3g/kgのもの(C型とよぶ)との3種類に区分して考えることができる。

そのそれぞれの分布は平面的には第4図に示したが、垂直的には第5図の如く模式的に表現することができる。

(i) 四万十層群中の温泉

鹿児島市内の平野部の地下400~600mの位置にはその基盤岩として四万十層群が広く普遍的に分布している。その上面は第2図に示すように南方および西北に浅く東方海側に開いた馬蹄形の凹地を形成する。

現在では市内温泉はほとんどすべて本層中から採取し、できるだけその上位の岩層中に含まれる温泉の混入を防いでいる。前述の如く、上位層のなかには高塩水が分布することを考慮した処置である。しかし技術的な問題、あるいは地下における四万十層群中の割れ目の状況など

により多少の上部塩水の混入は事実上さげられない。

本層中に貯留されている温泉水は基本的にはA型のものであることが知られる。海岸地域のB型分布地域においても深度を大きくして本層中より採取すれば、少なくとも上層部の高塩泉よりは高温かつ低塩分のA型ないしC型の温泉がえられているところからしても、四万十層群中には本来高塩泉が存在しないことは明らかである。

もちろん海成の四万十層群であるが、長い地質時代にあたる続成作用、岩化作用、地殻変動などの結果、堆積当時の海水の影響は全く消失しているものと考えてよい。さらに市内の地下地質からみて、照国軽石流の噴出時期には侵蝕期が認められ陸化していたことが明らかである。したがって四万十層群中の空隙水は堆積当時の海水が残留しているものではない。このことは外帯各地に広く分布している四万十層群中の地下水、あるいは本層群中からの温泉水についても同様で、高塩水の含有されている例は他地域からも報告されていない。本県の温泉においても、宮之城・湯之元・高城など四万十層群のなかより湧出する温泉が北薩地域にかなり分布するが、そのいずれも単純泉ないし単純硫化水素泉の泉質をもつものである。(露木・鎌田・黒川: 1967)

鹿児島市内の本層群からの温泉も、泉質として分類すると単純泉、重曹泉、含重曹食塩泉、含芒硝食塩泉、弱食塩泉などに区別されるが、本質的には含有塩分のきわめて少ない HCO_3^- で特徴づけられる重曹性または芒硝性の単純温泉(A型)である。C型のものは本来四万十層群中に大量に存在するものではなく、何らかの条件によって上部のより塩分量の多い温泉水の混入によるもので、より深部においてはA型に漸移していくものと考えられる。

(ii) 花倉層・照国軽石流中の温泉

基盤岩である四万十層群のうえには著しい不整合関係をもって照国軽石流が、あるいは照国軽石流のない場合は直接花倉層がのっている。多くの場合、風化して黄褐色を帯びた割れ目の多い四万十層群の砂岩・頁岩とは礫層をはさんで接するがその境界にはしばしば赤褐色粘土層の薄層をはさんでいる。したがって不整合面附近は他の部位と比較して空隙が多く透水性も大きく、なかに豊富な温泉水を貯留することが可能である。しかしこの部位に貯留されている温泉水は、ことに海岸に近い場所においては鉄を多量に含む高塩水(B型)である。したがって不整合面直上から直接採取している温泉はことに塩分が多く 10g/kg 以上に達するものが多い。

この高塩泉は四万十層群との不整合面附近のみならず、花倉層のなかおよび照国軽石流の割れ目・空隙のなかにも同様に貯留されている。

地下地質資料によれば、照国軽石流堆積当時、陸上で風化にさらされていた四万十層群は、その後 500m 以上におよぶ相対的沈下を行ない海成の花倉層を堆積している。したがってこの時期に海底で生成した花倉層および沈下した照国軽石流の割れ目・間隙は当然その当時の海水によって飽和していたはずである。その後、花倉層も変動をうけ、その一部は陸化し、荒田軽石流・未固結砂礫層の基底面には侵食凹地もみられ、さらに市北方では $10\sim 15^\circ\text{C}$ の傾斜を示して花倉層の一部は地表に露出している。しかし、氷期における海水準の変動も含めて平野部に存在する花倉層が全面的にその最下位まで陸化した証拠は認められない。むしろ少なくともその下半部は生成当時から現在に至るまで海水準下にあったものと考えられる。したがって花倉層堆積当時の地層水が完全に外部に流出したり淡水に置換される条件下に置かれたことはなかったといえる。このような理由から、現在、花倉層下部および照国軽石流のなかから高塩泉として採取され、またこの部分に豊富に貯留されている高塩泉は花倉層堆積当時の化石水または包蔵水とよぶべきものであるといえる。因みに、先述の如く現在の鹿児島湾の水深は最深部

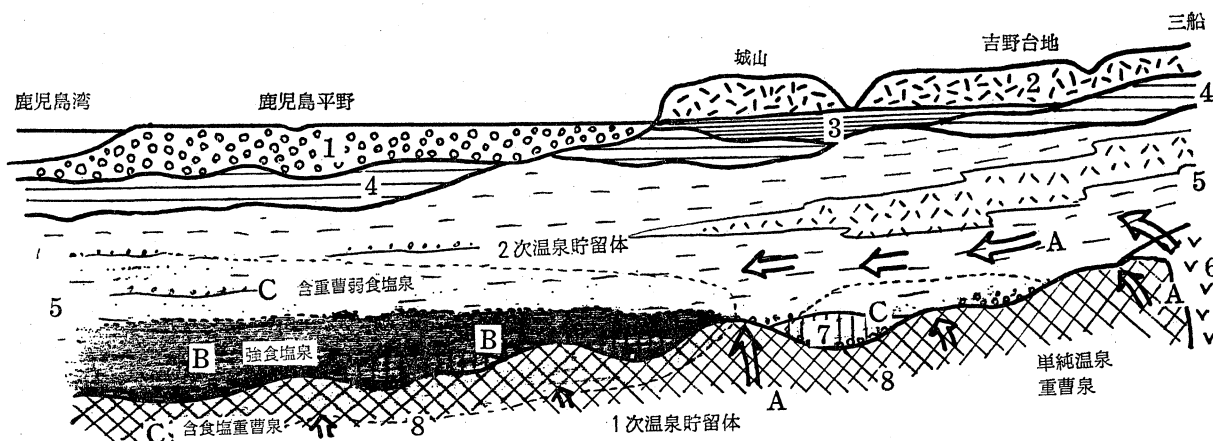
でも 200 m, 鹿兒島市周縁の沖合では 150 m をこえることはない。

(iii) 流動 (migration) の問題

孔隙性媒体 (porous media) 内の流体は圧力傾動によって流動する。したがって地盤の隆起・沈降・傾動などにより,あるいは地震などの際には,平衡状態を保ち静止していた水体も,圧力の増減,水体相互間の圧力平衡の破壊などをきたし,媒体内において流体の移動・混入・置換などの現象を生ずる。

鹿兒島市内の温泉は,その開発の初期においてはB型の温泉ですら自噴力をもち地上3~5mの静止水頭を示していた。その後開発がすすみ源泉数が増すにつれて,自噴力も衰え1960年頃以降には平野部での自噴井はほとんど消滅し静止水頭は海水準以下に低下している。しかし,現在,温泉分布地域の北部吉野および甲突川沿いの河頭,伊敷,郡山など西北部低地においては,静止水頭は高く自噴し,また台地部坂元では自噴はしないが静止水頭は海水準面上 No. 10 泉において 40m の位置にある。このように,一般的に温泉水頭は明らかに北及び西,北西部に高い傾向を示し,南及び南東に向ってきわめて緩かに傾斜している。このことは一つは基盤をなす四万十層群の上面の傾向と類似し,またこれをおおう上位の花倉層,吉野軽石流などの地層が南および南東に緩斜し,いわば市街地の平野下に突っ込んだかたちで分布していることも一致する。

これらの事実を考慮しつつ,A,B,C型を含めた地域地下水としての温泉を考えると,温度差や比重差によって生ずる水体相互間の水頭差以上に,温泉水体は地下において圧力傾動をもつことは明らかであり,このため平野中心部B型水体の分布する地区の方向にむかって水頭勾配による緩慢な流動が考えられる。このために水体の置換が花倉層中で行なわれ,かつて花倉層の生成時に存在した海水型の高塩地層水は,その後有圧のA型温泉水により交替され現在みられる部位に残留しているものと解釈できる。第5図はこれを模式的に表現したものである。つまり,A型地層水はそれ自体の圧力が小さい場合は,四万十層中においても上部にあるB型高塩泉の汚染の影響を受けC型の弱食塩泉のかたちとなり広い範囲に分布する。また逆にB型高塩泉が劣勢な場合やA型温泉水が優勢な場合にも,混合現象によりほとんどがC型泉に変わるものと考えられる。結局,A,B両水体が現在の時点でも比較的圧力が優勢で量的にも多量に賦存している平野部中央においてのみ,それぞれ特徴ある型の2水体とし相接して存在し



第5図 鹿兒島市の地下地質断面および温泉の賦存形態を示す概念図

- 1: 未固結砂礫層 2: 竜尾層, 坂元軽石流 3: 城山層
- 4: 吉野軽石流・荒田軽石流 5: 花倉層 6: 三船流紋岩, 横井安山岩
- 7: 照国軽石流 8: 四万十層群

うるものであり、いずれか一方が劣勢な場合には優勢な方の単独温泉型か、両者の混合型としてのC型がみられるということになる。

鹿児島市の温泉にみられる異質温泉水体の存在についての以上のような解釈は、その生成時に存在していた地層水がきわめて徐々に緩慢な流動・置換・混合の現象を示し、現在の賦存状態に至ったことを物語っているものである。

(iv) 温泉化の問題

温泉の成立条件として温度すなわち熱の問題がある。しかしこの問題については活火山性の温泉についてはかなり直接的に実証されうるが大部分の温泉では必ずしも明解にされていない。鹿児島市内温泉の場合もその後者に属し、今後の研究にまよところが多く、現段階では何れともいえない。

現在鹿児島市内には平野部を中心として南北およそ14km、東西平均8kmの広い範囲に、少なくとも地下300mにおいて30~35°、深さ500~900mの基底岩においては孔底温度45~55°以上という温泉の存在が知られている。基盤岩中のもは蒸発残量は少なく、かつ上層中のものと比べてより高温である。一方、現在までの当地域周辺で行なわれた掘削資料中にみられる最高孔底温度は、北部三船で測定された82°Cである。しかしここでは800mの深さにおいて三船流紋岩類および安山岩を確認し四万十層群には到達せず、また水量不足で温泉としては成功していない。鹿児島市北部吉野、竜ヶ水地域には大木・早坂(1970)により竜ヶ水安山岩、平松玄武岩、白浜玄武岩、牟礼ヶ岡安山岩などと名づけられた花倉層以前の噴出にかかる火山岩類がみられるが、花倉層の堆積後においても寺山玄武岩、横井安山岩の噴出がみられるという。しかしこれ以後の激しい火山活動としては当地域では大量の軽石流を噴出したカルデラ火山の活動がある。この軽石流(シラス)、溶結凝灰岩については山口謙次(1938)以降、太田良平(1967)、荒牧重雄(1968)など多数の報告があるが、最後期の入戸軽石流の大量噴出は、23,000 B. P. 前後の時代である。また始良火山の中央火口丘としてわずかに3kmの対岸に位置する桜島にいたっては有史以降もしばしば活発な活動をつづけている。

現在地表にみられる熱源としては一応上の諸原因によるものがその可能性として考えられるが、さらに潜頭式火山の存在も北部吉野台地域においては推定できる。

ただ温泉分布範囲がきわめて広域に及ぶこと、南部および西部にかけての縁辺には漸次低温域がみられるが、その中心平野部においても極端な高温部はまだ発見されず、基盤岩中の地温も比較的均等化されていることなどから、ある特定の個所から大量に湧出しているものではない。また、ほぼ南北方向に走る基盤岩等深線にそって温泉水体の伸びが伺われる傾向を示すが、これも特別な構造線に沿ってのみ豊富に上昇していることには直接結びつけ難い。ただ、三船地域における80°以上の地温の存在、A型の単純泉の分布が中心部より北部に集中することなどからA型温泉の中心はむしろ北部にあるとも考えられる。前述の如く、このA型泉の一部が四万十層群中に貯留され下方から湧出し、花倉層その他のなかに存在する化石海水中に混入し、これを温泉化しているのであろう。

いずれにしても、温泉化の時期およびその機構については今後の研究をまたなければならない。

(7) ま と め

現在鹿児島市内には、市街地平野を中心に90に達する源泉が分布する。これらの温泉はいずれも400~900mの掘削により採湯されているものである。

筆者は、地下地質と温泉の性質より、その地下における賦存状態について考察を行ない、次のような結論をえた。

- (i) 温泉は南北 14km, 東西 8km の広い範囲に分布し, 45~55°C のものがほとんどである。その泉質により, 蒸発残量のきわめて少ないもの (A型), きわめて多いもの (B型), 中間型 (C型) と区別でき, それらがそれぞれ特徴ある分布をしている。
- (ii) A型温泉は蒸発残量 1g/kg 以下のアルカリ性単純泉をよぶことにする。多くのものは 0.3g/kg 程度できわめて蒸発残量が少なく, HCO₃⁻ の含量に比較的富み, 腐植物質を含んでしばしば黄褐色を呈する。B型とよぶものは蒸発残量 5g/kg 以上の食塩泉, C型はその中間のもので多くは 1.5~2.0g/kg の値の範囲に入る重曹泉である。
- (iii) これらの分布をみると, 平面的には城山地区を中心に, 北部及び伊敷方面には A型の温泉が, 海岸部に B型がみられ, 他の地域一般には C型が多い。しかし, これを立体的にみると基盤岩 (四万十層群) 中のものは A型, C型であり, B型の分布はその上に不整合にのる花倉層, 照国軽石流中に限られる。
- (iv) B型温泉は, 海成の花倉層が堆積した当時の海水の残留塩分を含んだ地層水 (Connate-water) と考えられ, 周辺から有庄の A, C型のものにおされ, 現在の貯留場所に位置しているものである。したがって, 現在花倉層中に存在する A, C型の温泉は花倉層堆積後, 本層中の B型地層水を置換したものといえる。
- (v) 当地域の温泉は基盤中に胚胎し, かつ高温な A型温泉が本来のもので, 当地域周縁部ことに北部を中心にみられる火山活動に関係して生成したもので, これが平野部地下にまでおし出している。一方基盤中からも同型温泉が上昇し, 地層水の混合が行なわれて C型を生じたものである。ただし C型については, 現在よりさらに温泉活動の激しかった時期に生成された温泉の残留温泉水である可能性も否定し難い。

参 考 文 献

- 荒牧重雄 (1968), 鹿兒島県国分地域の地質と火砕流堆積物, 地質学雑誌, Vol. 425~442.
- 大木公彦・早坂祥三 (1970), 鹿兒島市北部地域における第四系の層序. 鹿兒島大学理学部紀要 (地学・生物学) No. 3, 67~92.
- 大木公彦 (1974), 鹿兒島市西部地域における第四系の層序. 鹿兒島大学理学部紀要 (地学・生物学), No. 7, 15~22.
- 大城健次 (1956), 北部鹿兒島市の地質. 鹿兒島大学文理学部卒業論文.
- 太田良平 他 2 (1967), シラスの地質学的分類, 鹿兒島県, 1~43.
- 福田 理 (1966), 超深層地下水 (I). 地下水と井戸とポンプ, Vol. 8, No. 12, 2~10.
- ” (1967), 超深層地下水 (II). 地下水と井戸とポンプ, Vol. 9, No. 2, 2~10.
- 福富孝治 (1965), 地下水起源の温泉の温度. 北大地球物理研究報告, Vol. 13, 53~70.
- 早坂祥三・大木公彦 (1971), 鹿兒島市地域のボーリング資料にもとづく二, 三の地質学的考察. 鹿兒島大学理学部紀要 (地学・生物学), No. 4, 15~29.
- 佐藤幸二 (1972), “非火山性温泉” について. 岩井淳一教授記念論文集, 557~565.
- 露木利貞・鎌田政明・黒川達爾雄 (1967), 鹿兒島県の温泉, ——湯之元・吹上温泉. 鹿兒島県, 1~52.
- 露木利貞 (1969), 九州地方における温泉の地質学的研究 (第5報), 鹿兒島地溝内の温泉——特に温泉貯留体について. 鹿兒島大学理学部紀要 (地学・生物学), No. 2, 85~101.
- 露木利貞・鎌田政明・黒川達爾雄 (1970), 鹿兒島県の温泉——鹿兒島市周辺の諸温泉. 鹿兒島県, 1~86.
- 山口鎌次 (1938), 鹿兒島湾の周縁地域における灰石類の岩石学的研究 (1~5). 地質学雑誌, Vol. 45, Nos. 527, 533, 534, 535, 538.