

昭和 45 年 9 月

原 著

温 泉 の 化 学

東邦大学理学部化学教室 岩 崎 岩 次

(昭和 45 年 8 月 21 日受理)

Chemistry of Hot Springs

Iwaji IWASAKI

Department of Chemistry, Faculty of Science, Toho University

1. は じ め に

温泉化学¹⁾は人生を豊かにするために温泉を化学的に研究し、温泉をよりよく知り、それを化学的に説明して行くもので、温泉学²⁾の中の温泉自然科学の部門に属し、温泉水、温泉ガスおよび温泉沈殿物(温泉華)などを一緒に温泉物質系としてその性質およびその生成機構を研究し、それらの利用に基礎を与え³⁾、使用上の障害防止、温泉使用後の温泉場排水や温泉による毒水の処理などまでの広い研究分野をもつものである。

古くから温泉利用、ことに医療関係方面からの研究が盛んに行なわれ、それに伴って温泉水などの性質の化学的研究が多くなり、温泉水の性質の化学的研究が温泉化学の主流をなしてきた、その後温泉利用が急激に増大し、とても自然に湧き出している天然温泉だけでは不足になり、温泉井を掘り、さらに人工的に温泉をつくるようになってきた³⁾。温泉を多量に取出すためには温泉の湧出機構が詳細にわかり、測定技術が正確に精密になることが必要になってきた。すなわち温泉とは何か、何故に、どんな機構で、何処から湧出してくるか、またどこを掘ったらどんな性質の温泉がどれだけの量得られるかなどの温泉生成機構と温泉湧出機構の基本的な重要問題がとり上げられ、それらの研究も盛んになってきた。もちろん温泉生成機構も温泉湧出機構も温泉水の化学的研究で温泉の性質が十分よくわかった上でないと完全にはわからないのである。それで古くから温泉水を構成している水が循環水だとか、または初生水(juvenile water)だとかの議論があり、現在までなほ完全にはわかっていない。また治療方面では湧出後の温泉水の性質の変化が重要であり、“温泉の活性”とか、“温泉の老化”などと呼ばれ、早くから研究が進められてきている。

これらの温泉水の化学的研究は日本では早くから国家が組織的に行なって、先ず石津利作博士による“The Mineral Springs of Japan”. (1915) が出版され、つづいて衛生試験所彙報第 34 号(昭和 4 年) および第 54 号(昭和 15 年)に“日本鉱泉分析表”として、また最近でも厚生大臣官房国立公園部からの“日本鉱泉誌”(1954) が出版されている。なお中央温泉研究所

でも新たな温泉分析の結果をまとめて“温泉分析表”(1965)として出版され、さらに地方自治体および各温泉で個々に行なった温泉水の化学的性質の調査が多数にある。日本では厚生省の調査(1969年3月)によれば温泉源が14000以上もある。実際の化学分析は約5000もあるが、有名な温泉では何回も行なってその性質の変化を見ていたり、また化学分析が不完全であったりして、現在研究用に利用できる分析結果は約2500程度である。しかしながら主要な温泉の化学的性質は大体調査されているので、このように温泉調査の行きとどいているところは世界でもまれであり、日本の温泉研究の誇りである。

これらの温泉の性質を化学的にまとめたものには奥野久輝博士(1942)⁴⁾の“温泉の分類”についてのものがあり、木村健二郎先生と私とでまとめた“温泉の化学”(1942)⁵⁾、私のまとめた“火山の化学”(1948)などがあり、最近では太秦康光教授の著書“Chemical Investigations of Hot Springs in Japan”(1965)がある。なお南英一教授の研究班の温泉全般にわたる“Geochemistry of the Tamagawa Hot Springs”(1963)などの良書が出版され、日本の有名な代表的温泉の全部が、その温泉水の化学的性質の大体的見当がつくようになってきた。

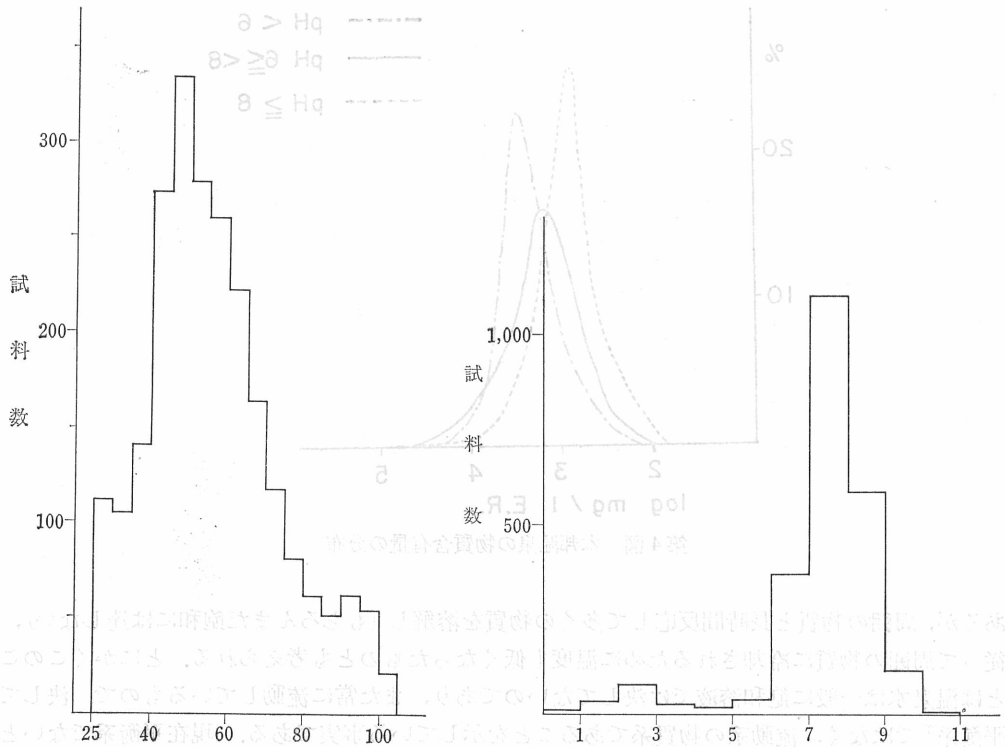
これらの温泉水の化学的研究については昨年夏の温泉科学会30周年記念大会において木村健二郎先生の記念講演があって、日本の温泉化学の進歩発展の様子が明快に示された。私は木村健二郎先生の下で昭和7年以来温泉とは何か、どこからどんな機構で、どこの物質がこのように長期間つづいて湧出してきているものだろうかなどのことを考えながら研究をつづけてきている。温泉の化学的性質がはっきりしてきたので、ここでは主として温泉の湧出機構、温泉中の物質の起源などの方面の研究の様子の御話を“化学温泉学”Chemical Thermofontology¹⁾の立場から申し上げたいと思います。

“この温泉は雨水がしみこんで地熱で温められてできたものだ”、“この温泉は海水起源だ”などと極めてかんたんに説明して、温泉の湧出機構を説明したように思っている人もあるようですが、そんなに明瞭に、またかんたんに一つの温泉の湧出現象が説明できるものでしょうか。これらの問題を解決するにはどうしても温泉水の性質およびその変化、湧出量、地下構造(地質をも含めた)、地下水、雨量などの実態が正確にわかっていないと困まると思います。そしてそれらの実態と矛盾するような湧出機構であってはならないと思います。

2. 温泉とは何か、その実態

現在温泉と呼ばれているものには i) 天然の温泉 ii) 温泉井によるもの iii) 天然の蒸気または温泉華などを利用して地表でつくったものおよび iv) 完全な人工温泉などがある。ここでは天然の温泉および温泉井によるものを対象とし、純然たる人工温泉は温泉生成機構の参考とはするが、温泉水の化学的性質の中には入れないことにする。

1) 温度 一般にその地点の水の沸点より低いものが多いが、米国 Yellowstone 公園⁶⁾や Iceland⁷⁾ などでは沸点以上2~3°C 過熱されているものが多数に知られている。日本の温泉では第1図に示すように40~60°C のものが一番多く(江本義教博士⁸⁾の結果と同じ)、十勝岳新々噴火口温泉では約600g/l という驚くべき含塩量のため100~110°C を示している⁹⁾。これらは日本の地学的地理的および気象学的性質などによる日本の温泉の特性を示しているものであろう。

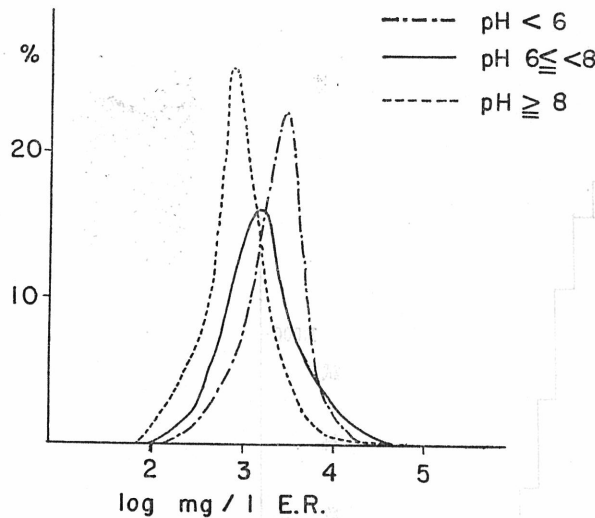


第1図 本邦温泉の温度の分布

第2図 本邦温泉のpHの分布

2) pH 日本の温泉のpHの分布は第2図に示す。pH 0.3の強酸性(十勝岳新々噴火口温泉)⁹⁾からpH 11.1¹⁰⁾の強アルカリ性のももあるが、大部分の温泉は中性およびアルカリ性である。火山性水では約4.5Nの酸性のものが硫黄島(鹿児島県)¹¹⁾の火山昇華物中に、また1951年4月1日の伊豆大島三原山の噴火の際の溶岩湖からのマグマ水¹²⁾中には1.4N以上の塩酸酸性のものが発見されている。温泉でもpH 3以下のものが相当多い。ただ奥野久輝博士⁴⁾によって指摘されたようにpH 4~5付近の温泉が何故か少ないのが第2図でも見られるのである。

3) 物質含有量 温泉中の物質含有量は普通は蒸発残留物の量、または各成分の定量値の合計で求められている。日本の温泉の物質含有量の分布は第3図で見られるように極めて少い0.0633g/kgから約600g/l(十勝岳新々噴火口温泉)⁹⁾まで知られており、大体対数正規分布を示している。何故に対数正規分布になるのかは不明である。そして酸性温泉の方にアルカリ性泉より物質含有量の多いことが第3図でも見られる。この現象は酸性溶液は物質を溶解する能力が中性およびアルカリ性溶液より一般に大きいことおよび中性およびアルカリ性水溶液では多くの成分は加水分解や沈殿をつくり温泉水から除去される性質などのことから理解できる。また一般に温度の高い温泉より温度の低い鉱泉の方に物質含有量が大きいのである¹³⁾。これは第4表の主成分の平均含有量を見てもよくわかる。これらの性質は温度による溶解度の増大ということより、温泉水が一般に飽和溶液でなく、溶解反応の時間の長さにより物質含有量が支配されている性質を示しているものと思われる。溶解度は飽和溶液についての考え方であり、平衡系での考え方である。物質を多く含む温度の低い温泉では溶解度は低温のため小さいので



第4図 本邦温泉の物質含有量の分布

あるが、周囲の物質と長時間反応して多くの物質を溶解し（もちろんまだ飽和には達しない）、従って周囲の物質に冷却されるために温度も低くなったものとも考えられる。とにかくこのことは温泉水は一般に飽和溶液では決してないのであり、また常に流動しているもので、決して平衡系⁹⁾ではなく、流動系の物質系であることを示している事実である。現在平衡系でないといろいろの計算や推定が困難なため、熱力学などの平衡系からの研究が行われているが、これはあくまでも研究の都合上のもので温泉系とは必ずしも同一ではないことを十分に注意する必要がある。特に、600g/lのような高濃度の火山性温泉¹⁴⁾の生成は岩石などの溶解現象だけの説明では困難であると思われる⁹⁾。

4) 化学成分 温泉は地下を流動してきて地表に湧出するので通路の途中の物質との相互作用で多くの物質を溶解することができるのである。ことに3)で述べたようにまだ飽和に達していないことが多いので温度の高いことと相俟って各種の成分を周囲の物質から多く溶解抽出することができるのである。日本では実際には箱根湯の花沢温泉、那須温泉、有馬温泉、別府温泉などでは55以上にも達する多数の成分が測定されている。十分鋭敏な測定方法を使用すれば天然に存在する元素はみな温泉中から検出できるものであろう。

しかしながら普通多くの温泉で測定されている成分は、大体医療関係の立場からのものが多く、第1表に示したようにいわゆる主成分と医療に関係のある特殊の成分だけのことが多い。しかしながら測定方法の進歩発展に伴ない多数のいわゆる微量成分（放射性元素をも含む）や同位体組成までもが測定され、さらに温泉水の性質やその変化の測定にも次第に近代的測定方法が使用されてきている。

第1表には温泉の性質、ことにその成分の濃度の生成機構を考える必要上、奥野久輝博士の求めた平均値⁴⁾と最高濃度を示す温泉を示してある。十勝岳新々噴火口温泉⁹⁾は極めて高濃度を示すもので、第2表にはその化学組成を示す。この温泉は高濃度のため採水後すぐに空気で冷却されて固化してしまっており、温泉水として試料びんに保存することはできない。実験室ではただその温泉水の固化生成物、すなわち温泉のかたまりだけが得られるものである。

第1表 本邦温泉の成分の平均含有量と最高値

| | 平均値 (g/l) | 試料数 | 最高値 (g/kg) * (g/l) | 及びそれを含有する温泉 |
|---------------------------------|-----------|-------|--------------------|--------------------|
| H | 0.0019 | 145 | 1.59* | 箱根大涌谷仙郷桜7B (神奈川県) |
| Li | 0.00003 | 26 | 0.2798* | 九重大岳九電3号井 (大分県) |
| Na | 0.773 | 860 | 114.2* | 九重大岳九電3号井 (大分県) |
| K | 0.045 | 856 | 17.95* | 九重大岳九電3号井 (大分県) |
| NH ₄ | 0.0016 | 366 | 0.3358 | 阿蘇の地獄 |
| Cu | 0.0008 | 48 | 0.2265 | 錦成鉱泉 (兵庫県) |
| Ca | 0.222 | 859 | 5.0* | 天然カルシウム鉱泉 (福岡市) |
| Mg | 0.049 | 853 | 24* | 十勝岳新々噴火口温泉 (北海道) |
| Zn | 0.0009 | 29 | 0.3902 | 焼山温泉 (新潟県) |
| Mn | 0.0023 | 179 | 0.2777 | 豊川温泉 (島根県) |
| Fe ²⁺ | } 0.311 | } 808 | 36 | } 十勝岳新々噴火口温泉 (北海道) |
| Fe ³⁺ | | | 17.3473 | |
| Al | 0.095 | 668 | 53 | 十勝岳新々噴火口温泉 (北海道) |
| OH | 0.00097 | 75 | 0.10131 | 湯の沢温泉 (秋田県) |
| Cl | 1.26 | 857 | 188.8* | 九重大岳九電3号井 (大分県) |
| Br | 0.00085 | 84 | 0.494* | 九重大岳九電3号井 (大分県) |
| I | 0.0012 | 89 | 0.1965 | 茂原鉱泉 (千葉県) |
| NO ₃ | 0.003 | 100 | 0.07627 | 茂原鉱泉 (千葉県) |
| SO ₄ | } 1.65 | } 832 | } 370 | } 十勝岳新々噴火口温泉 (北海道) |
| HSO ₄ | | | | |
| S ₂ O ₃ | 0.00011 | 10 | 0.0371 | 野付牛鉱泉 (北海道) |
| HS | 0.0010 | 60 | 0.1731 | 月岡温泉 (新潟県) |
| CO ₃ | } 0.0015 | } 74 | } 0.7218 | } 新宮鉱泉 (新潟県) |
| HCO ₃ | | | | |
| HPO ₄ | 0.0065 | 331 | 0.5409 | 豊川温泉 (島根県) |
| HAsO ₄ | 0.0008 | 36 | 0.2429 | 豊川温泉 (島根県) |
| HBO ₂ | 0.0382 | 536 | 5.5435 | 嶺鉱泉 (群馬県) |
| H ₂ SiO ₃ | 0.106 | 860 | 1.1189 | 豊川温泉 (島根県) |
| CO ₂ | 0.215 | 591 | 3.149 | 鹿塩鉱泉 (兵庫県) |
| H ₂ S | 0.0032 | 89 | 0.7440 | 万座温泉 (群馬県) |

他方第3表にはただ一つの温泉で高濃度の温泉水が極めて多量に湧出され、さらにこれが少くとも200年間絶え間なく湧出されている温泉の例として玉川温泉 (秋田県) の大沸泉¹⁵⁾を示す。この温泉は強酸性で、Cl に比べて Na が極めて少く (NaCl の溶液とは著しく異なる)、1年間に熱エネルギーとして約 2×10^{22} ergs も放出しているのである。

このように高濃度の温泉および多量の物質を湧出しつづけている温泉が火山性温泉¹⁴⁾¹⁵⁾に見られ、それらの温泉成因機構や温泉中の物質の出所由来 (起源) の考え方に極めて重要な事実を示しているものである。

5) 化学成分 (化学種) の分布 第4図、第5図および第6図にそれらの例を示すように日本の温泉中の化学種の分布は、塩素イオンを除いては多少のゆがみは各化学種ごとに見られるが、

第2表 十勝岳新々噴火口温泉の化学組成
(1964年10月1日採取)

| 温泉固生成物の化学組成 | | 温泉の化学組成の推定値 |
|-------------------------------|--------------------|--------------|
| 比重 | 約 1.4 | |
| 不溶性物質 | 1 % | |
| H ₂ O (Penfield 法) | 55.4 | |
| SO ₄ ²⁻ | 26.5 " | 370,000 mg/l |
| Cl ⁻ | 7.4 ₅ " | 100,000 " |
| F ⁻ | 0.1 ₀ " | 1,400 " |
| SiO ₂ | <0.05 " | |
| Al ³⁺ | 3.8 " | 53,000 " |
| Fe ²⁺ | 2.6 " | 36,000 " |
| Ti ⁴⁺ | <0.01 " | |
| Ca ²⁺ | <0.1 " | < 1,000 " |
| Mg ²⁺ | 1.7 " | 24,000 " |
| Na ⁺ | 0.79 " | 11,000 " |
| K ⁺ | 0.23 " | 3,200 " |

* 温泉固生成物は約 60°C で溶融し始め, 100~110°C で完全に淡黄色の液体となる。

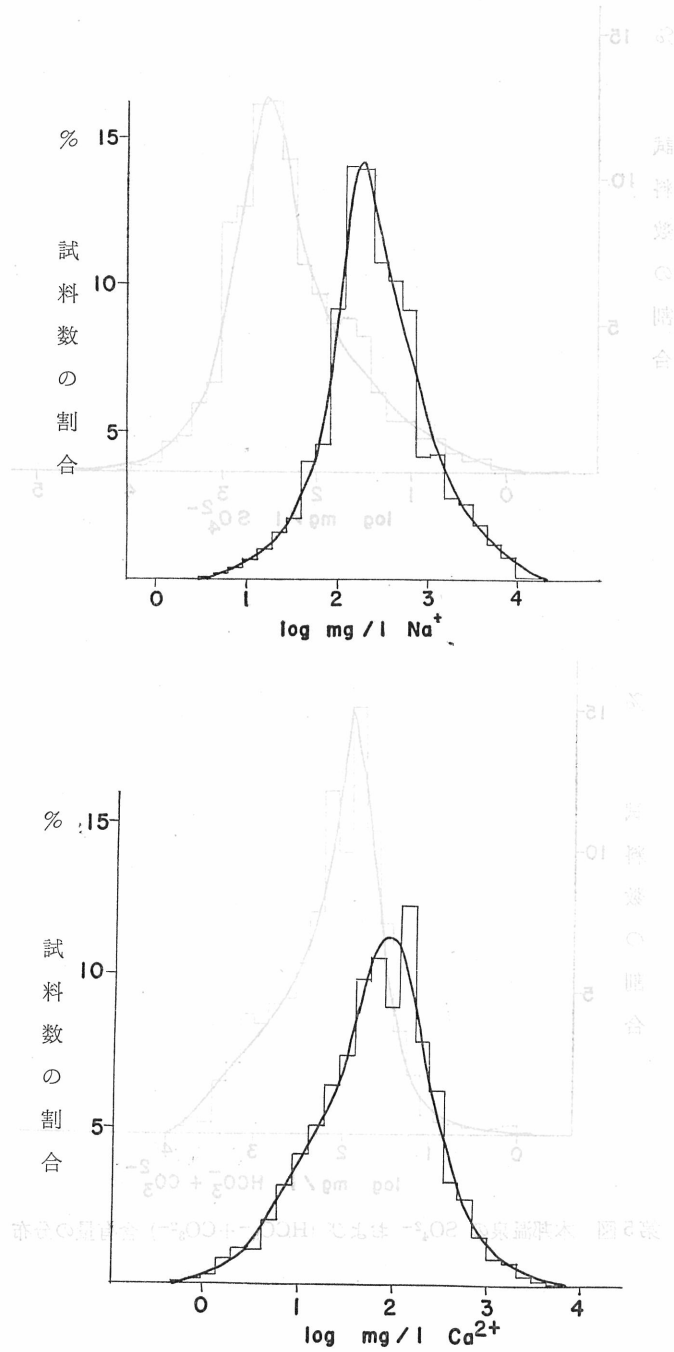
第3表 玉川温泉(秋田県)の性質

温度=98°C
 pH <1.2
 湧出量=9.3×10⁹l/min=1.3×10⁷l/day
 =4.7×10⁹l/yr(4.7×10⁶ton/yr)
 熱放出量=1.2×10⁹kcal/day
 =4.2×10¹¹kcal/yr(≒1.7×10²²erg/yr)

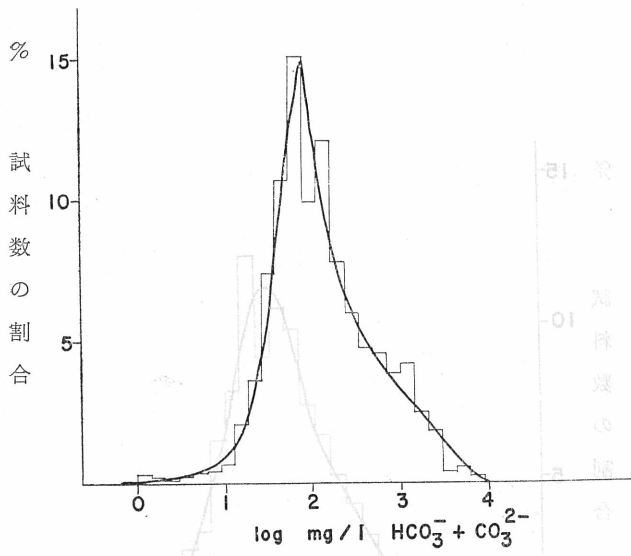
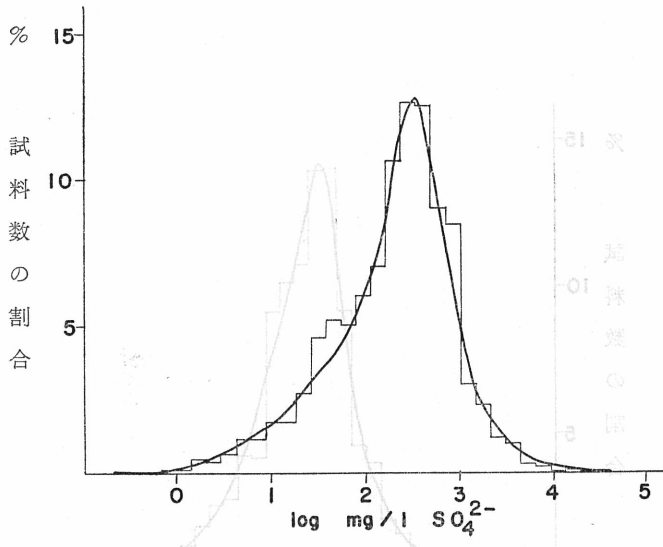
| | 成分含有量 (g/l) | 1 日の湧出量 (g/day) | 1 年間の湧出量 (g/yr) |
|---------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 蒸発残留物 | 3 | 4 ×10 ⁷ | 1.5 ×10 ¹⁰ |
| Cl | 3 | 4 ×10 ⁷ | 1.5 ×10 ¹⁰ |
| SO ₄ | 1.2 | 1.5×10 ⁷ | 5.6 ×10 ⁹ |
| F | 0.1 | 1.3×10 ⁶ | 4.7 ×10 ⁸ |
| H ₂ S | 0.02 | 2.6×10 ⁵ | 9.4 ×10 ⁷ |
| H ₂ SiO ₃ | 0.3 | 4 ×10 ⁶ | 1.4 ×10 ⁹ |
| Fe | 0.1 | 1.3×10 ⁶ | 4.7 ×10 ⁸ |
| Al | 0.2 | 2.6×10 ⁶ | 9.4 ×10 ⁸ |
| Pb | 0.001 | 1.3×10 ⁴ | 4.7 ×10 ⁶ |
| Na | 0.06 | 7.8×10 ⁵ | 2.8 ×10 ⁸ |
| Ra | 2×10 ⁻¹¹ | 2.6×10 ⁻⁴ | 0.09 |

大体対数正規分布を示していると思なしてよい。この現象がただ数学的の理由からか。または他の物理化学的の成因関係から対数正規分布を示すものか理由は不明である。特に第6図に見られるように何故に塩素イオンだけが他と異なる分布形式を示すものか、塩素イオンだけが他のも

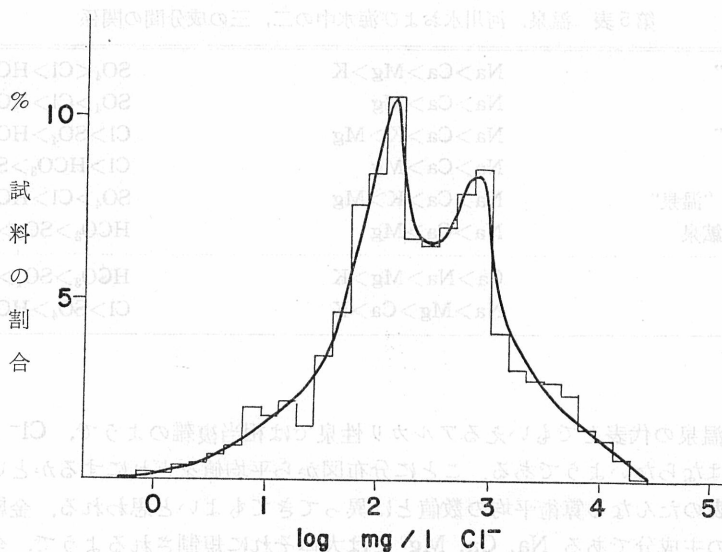
のより複雑な生成機構をもっているものかなども不明である。



第4図 本邦温泉の Na⁺ および Ca²⁺ 含有量の分布



第5図 本邦温泉の SO_4^{2-} および $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 含有量の分布



第6図 本邦温泉の塩素イオン含有量の分布

6) 化学成分間の関係 温泉中の化学種の存在量はそれらの温泉系への導入のされ方、すなわち温泉の生成のし方と温泉水の性質(温度、pH、酸化還元電位、共存物質の種類および量、イオン強度など)と各化学種の性質(イオンポテンシャル、酸化還元電位など)と導入されてから各種反応が完結するか否かの反応時間(分離の完全、不完全など)によって決定されるものと思われる。第一歩として温度とpHとによって温泉を6種類に分類して各化学種の分布状態を調べて見た。それによれば各泉質によりそれぞれの特徴がよく見られる¹⁶⁾。第4表にはそれらの間の関係¹³⁾¹⁶⁾を示した。また第5表には今度試料を多数にとってさらにこれらの関係を確かめて見た結果を示す。今までの経験で試料数が500~600などではまだ関係がかたよったり、またはなめらかな線にならなかつたりするようであるが試料数が1000~2000になると大体なめらかな全般的の性質が出てくるようである。

いずれにしても第4表および5表で見られるように、酸性泉では SO_4^{2-} が Cl^- に対して決定的に多い。第4表では酸性泉と中性泉では第5表と同じ傾向を示しているが、試料数の極めて

第4表 本邦温泉の主要成分の平均含有量 (1942)

| | 試料 | 物質含有量 (g/kg) | Na (g/kg) | Ca (g/kg) | Mg (g/kg) | Cl (g/kg) | SO_4 (g/kg) | HCO_3 (g/kg) |
|-------------------|-----|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|-----------------------|
| 酸性“温泉” (>25°C) | 63 | 2.21 | 0.305 | 0.195 | 0.0537 | 0.787 | 1.51 | 0.257 |
| 酸性鉱泉 (<25°C) | 162 | 6.09 | 0.692 | 0.210 | 0.0833 | 1.07 | 4.51 | 0.547 |
| 中性“温泉” (>25°C) | 25 | 2.76 | 0.631 | 0.247 | 0.0199 | 1.01 | 0.472 | 0.321 |
| 中性鉱泉 (<25°C) | 23 | 4.08 | 0.873 | 0.438 | 0.0829 | 1.98 | 0.471 | 0.532 |
| アルカリ性“温泉” (>25°C) | 331 | 2.19 | 0.534 | 0.192 | 0.0198 | 0.847 | 0.349 | 0.246 |
| アルカリ性鉱泉 (<25°C) | 108 | 6.78 | 2.06 | 0.300 | 0.107 | 3.20 | 0.337 | 1.34 |

第5表 温泉, 河川水および海水中の二, 三の成分間の関係

| | | |
|-----------|------------|---------------------------------------|
| 酸性“温泉” | Na>Ca>Mg>K | SO ₄ <Cl>HCO ₃ |
| 酸性鉱泉 | Na>Ca>Mg | SO ₄ >Cl>HCO ₃ |
| 中性“温泉” | Na>Ca>K>Mg | Cl>SO ₄ >HCO ₃ |
| 中性鉱泉 | Na>Ca>Mg | Cl>HCO ₃ >SO ₄ |
| アルカリ性“温泉” | Na>Ca>K>Mg | SO ₄ >Cl>HCO ₃ |
| アルカリ性鉱泉 | Na>Ca>Mg | HCO ₃ >SO ₄ >Cl |
| 河川水 | Ca>Na>Mg>K | HCO ₃ >SO ₄ >Cl |
| 海水 | Na>Mg>Ca>K | Cl>SO ₄ >HCO ₃ |

多い, 日本の温泉の代表とでもいえるアルカリ性泉では相当複雑のようで, Cl⁻ が SO₄²⁻ より多い結果にはならないようである. こゝに分布図から平均値をどれにするかという問題もあるので, 第4表のたんなる算術平均の数値とは異ってきてもよいと思われる. 金属元素イオンのように岩石の主成分である Na, Ca, Mg では大体それに規制されるようで, 全温泉で大体同一の Na>Ca>Mg となっているが, それと異なり, 普通の火成岩中には極めて微量にしか含まれていない (Cl=0.02%, S=0.01%附近) Cl や SO₄, HCO₃ では, その供給源やその導入機構が金属元素のように似たものでないらしく, 極めて複雑で, 酸性, 中性およびアルカリ性の各温泉の間, および温度の高低の差による温泉と鉱泉とでも分布形式が全く異なり, それらの供給源, 導入機構, 生成機構 (SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ など) および温泉系からの除去機構などに関係する各種の現象が複雑に重なり合って起り, それらが各成分に与える影響が著しく異なるためと思われる.

なほ第5表に示してあるように, どの性質の温泉水でもその中の物質の分布形式は海水および河川とは全く異なる温泉独特のものであることがわかる. この事実も温泉生成と海水および河川のような地表水とは異なる生成機構によるものであることを示しているものである.

7) 成分と放出熱量との関係 福富孝治博士¹⁷⁾の温泉熱の詳細な研究があり, 10⁸~10⁹ cal/min 以下の放出熱量ならばマグマ熱源からたんなる伝導熱だけでも温泉はできるが, これ以上になるとそれだけでは困まり, どうしてもマグマから他の熱伝達を考えなければならないとのことである. それで実際の温泉地方の放出熱量と塩素放出量との関係を見たのが第6表¹⁵⁾に示してある数値である. 各種の極めて異なる性質の地熱地帯のものであるが, それらの数値は1950—1951年の伊豆大島火山三原山の噴火の場合のものに似て, 大体が10⁻⁸ton/kcalの塩素を放出しているようである. これらはいずれもマグマの熱だけでなく, マグマ発散物をも運んできていることを示した事実であると思われる. 温泉生成機構の中で重要な事実であると思われる.

8) 温泉の湧き出し方 温泉はただ温泉水だけでなく, 多かれ少かれ温泉ガス, 温泉沈殿物をも伴って湧出しているものである. その湧き出し方も, 吹き上げるもの, 静かに湧き出すもの, 汲み上げなければならぬもの, またそれらが変動し, 間歇的現象を示しているものもある. 湧出量も大小さまざまで, ガス, 沈殿物, 水の割合も常に一定とは限らないもので, 各個の温泉の特徴を示している.

以上で大体温泉水の実際の性質を見てきた. これらはいずれも大体平均的性質についての大

第6表 日本の地熱地帯の物質移動と放出熱量との関係¹⁵⁾

| 地熱地帯 | 放出量 (ton/day) | 塩化物放出量 (ton/day) | kcal あたりの 塩化物放出量 (Cl ton/kcal) |
|---------------------------|--|----------------------|--------------------------------------|
| 伊豆大島三原山の噴火 (1950-1951) | 7×10^4 | 4×10^3 | 6×10^{-8} |
| 昭和新山亀岩の噴気孔 | 8×10^3 | 3.5×10^{-1} | $< 4 \times 10^{-10}$ |
| 一切経山熱水 | 1.7×10^3 | 1.5×10^2 | $< 1 \times 10^{-6}$ |
| 玉川温泉 | 1.3×10^4 | 4×10^2 | $< 3.6 \times 10^{-8}$ |
| 焼山温泉 | 9×10 | 1.9 | $< 2.8 \times 10^{-6}$ |
| 河原毛温泉 | 7×10^3 | 1.4×10 | $< 2.4 \times 10^{-8}$ |
| 草津温泉 | 4.9×10^4 | 3.9×10 | $< 2 \times 10^{-8}$ |
| 登別温泉 | 8.3×10^3 | 2.5×10 | $< 3.7 \times 10^{-8}$ |
| 酢川温泉 | 1×10^4 | 4.7 | $< 1.3 \times 10^{-8}$ |
| 熱海温泉 | 4×10^4 | 3.7×10 | $< 2.0 \times 10^{-8}$ |
| 定山溪温泉 | $(8.5 \times 10^8 \text{ (kcal/day)})$ | 30 | $< 3.5 \times 10^{-8}$ |
| Wairakei 地方 (New Zealand) | $(2.4 \times 10^9 \text{ (kcal/day)})$ | 6.5×10 | $< 2.7 \times 10^{-8}$ |

略の見当を示してきたものである。実際の温泉を各個に詳細に研究すれば、それぞれ日変化、週変化、季節変化、年変化、その他の変化を示しながら大体その温泉に特徴のある性質を、その存在する局地的条件によって大きく支配されながら示しつづけているのである。すなわち各温泉の性質は多かれ少かれそれぞれ全体の平均値的性質とは異った各特徴ある性質を示しているものである。それで平均値による結論の一般的法則は各個の温泉の性質の説明には必ずしもそのまま適応できるとは限らないし、またある二、三の温泉現象にそのまま適応できないからといって一般的法則が必ずしも間違っているとは限らないものである。各個の温泉はその地方の局地的条件によって大きく支配され、それぞれ特徴ある性質を示しているものである。それで温泉中の物質の起源およびその導入される機構を考える上には各温泉の性質とその局地的条件を十分正確に、精密に研究して、それを説明し、矛盾のないようにしなければならないと思います。温泉の生成機構がわかってきて始めて温泉とは何かということが明瞭になるものと思われる。そして温度とか温泉水中の同位体組成などが何を示しているものかもよくわかっていくと思われる。

3. 温泉中の物質の起源

2 節で述べた千差万別の性質の温泉湧出現象をただ一つのことによって完全に説明しようとするのは極めて困難であると思われる。実際には各種の要因が入り乱れて影響を及ぼし合っていて、それらの総結果が湧出口から各特徴のある温泉として現われてくるものである。地表の河川の大小、清濁併せ飲んで特徴を保ちながら流れて行く模様は直接観測できるのでよいが、地下のことは不明のことが多く、その上直接測定のできない地下の部分をもつ温泉ではそれらの生成機構の説明には一つ一つの模型実験で確めながら推定して行くより外仕方がない。温泉はどこで、何時できて、何時間後に地表に湧出しているものかは現在なほ不明である。なるほど C-14, H-3 などの含有量の測定から多くの温泉では地表水が混合していることは確実であり、酸

素、水素などの同位体組成、熱量の関係および岩石中にあまりない温泉中に多い溶存物質 (Cl, SO₄) などから代表的な温泉の水の大部分は循環水で、50% ぐらいか、ある部分では1% ぐらいがマグマ水であろうとの推論も行なわれている¹⁾³⁾。

地表水が混入することになればその中に溶けている物質は当然温泉中に入ってくることになる。また温泉の高い熱水が通るので通路附近の物質との反応で各種の物質が出入することになる。とくに途中に水成岩を通過することになれば生物質までも入ってくる。さらに実際に地表の降雨が全々入りこまないことも証明が困難である。

それで各種の多数の地層を通るためそれらから温泉中に入る可能性のある材料物質を考えて見ると次のようなことが考えられる。

(1) 材料物質 (各種の性質の多数の地層から供給されると思われるもの)

(a) 固態物質からのものとしては、岩石(火成岩、火山岩、水成岩、変質岩、変成岩など)およびそれらの破片、火山昇華物、温泉沈殿物、鉱物、鉱床(塩類鉱床をも含む)、土壌、沈積物、化石、生物体などからの成分

(b) 液態物質からのものとしては、地表水(淡水、塩水)、海水、地下水(浅部のもの、深部のもの)、化石水(淡水、塩水)、火山性水、マグマ水などからの成分

(c) 気態物質からのものとしては各種の火山ガス、変質現象、交代現象、変成現象などに伴って発生する気体、生物の生活により発生するものおよび生物体の腐敗、分解、変質に伴って発生するいわゆる天然ガスなどからの成分

このように温泉中に入ってくる可能性のある物質には無機物、有機物および生物質(生物体)が考えられ、また実際にもこれらは検出されているのである。この中の無機物としても初生物質でも、マグマ物質でも、また地表の物質でも、生物質からのものでも入ってきてよいのである。

これらは温泉物質系の材料となる可能性があるだけであって、実際には温泉系中への導入機構が天然にでき上っていないければ、突発的に一時は導入されるかも知れないが、長期間にわたって多量に温泉中に常に存在することはできないであろう。岩石中の微量のものが溶け出したとしても、長期間の湧出には相当遠い部分から微量のものがとけて集まり、相当濃度が大きくならなければならないので、材料としての可能性だけでは温泉中の物質の起源の説明にはならないと思われる。それらがどのような機構で、その濃度を保ちながら長期間湧出しつづけるかの説明が必要である。

これらの物質が温泉物質系の中に導入される機構としては次のようなものが考えられる。

(2) 物質の温泉物質系中への導入のされ方

(a) 熱を運ぶ機構と共に導入されるもの、例えばマグマ発散物などと水との混合、蒸留などが考えられる(これはガスと見なしてもよいが特に分けて見た)。

(b) 水と一緒に運ばれるもの、地表水、地下水、海水、化石水、火山性水などとして温泉物質系に混合混入されるもので各種の物質が含まれる。海水や塩水、化石水などが混合すると濃度の高いものができるが混入するものより高濃度にはならない。

(c) ガスとして供給されて水に溶解して行くものがあり、マグマ発散物、火山発散物などの溶解は(a)の項に相当するものもある。空気やいわゆる天然ガスの溶解などはこの部分に入ってくるものであろう。高温高圧の水蒸気に多くの物質がある程度は溶解してくるが、それだけではあまり高濃度のものが出来ないことがわかるであろう。このガスの溶解現象によれば

普通の火成岩中に極めて少い Cl, S, C などの化合物でも火山ガスなどの連続供給になるので極めて高濃度になることができる⁹⁾¹⁸⁾。

(d) 固態物質からの溶解, 抽出現象によるもの, 普通の地下水と異なり, 温泉中には各種の金属元素が多量に存在するが, これらは主として他の物質から溶解抽出されて温泉中に導入されたものと考えられ, 多くの模型実験¹⁸⁾が行なわれている。マグマ発散物や火山発散物中には金属元素はあまりないので, 金属元素は, たとえ火山発散物が温泉生成の主要な役割をしているとしても, 他から導入されなければならないと思われる¹⁵⁾¹⁸⁾。岩石の主成分でもその溶解速度と湧出量やその長期間の供給の関係を考えると少量のものではよいが, 高濃度のものが長期間継続して溶解抽出される機構としては多くの難点がある。岩石と少量の水とが長期間に完全に反応して飽和に近い溶液が多量生成して, それが移動してどこかに多量に集っていて, そこから供給されないと困難である⁹⁾¹⁸⁾。もちろん, 岩石と水との反応であるから普通は中性, アルカリ性の溶液となり, 強酸物の温泉はそのままではできないと思われる。溶解抽出現象では溶解速度が早くない限り, 飽和溶液にはならないで一般にはあまり高濃度のものは期待できないことは模型実験でよくわかる(平衡状態の飽和溶液にする模型実験は除外)。またたとえその物質との溶解平衡が成立しても普通の火成岩などでは Cl, S, C などが極めて微量のため温泉中に見られるような高濃度の生成は困難である⁹⁾。これらの微量のものが拡散現象と逆にある小部分のところを高濃度のものを生成しなければならない現象が含まれているもので, 拡散現象と関係のない特殊な濃縮機構を考えなければならないと思われる。他方, 塩類鉱床など放射性鉱物鉱床からの高濃度の溶液の生成は考えられるし, また模型実験でも証明されている。

濃度が低くて湧出量も小さいならば大抵の機構で説明がつくようであり, またこれらの物質が何処からどんな機構で入りこんできているかを明瞭に区別する方法は現在ほとんどないのである。それで温泉中の性質の出所由来を考える時には, 先ずこれらを全部可能として考えて見て, その主要な特徴的物質を説明するためにはどの機構で, どの起源の性質でなければならないかを決定して行かなければならないと思います。しかしこれはあくまでも主要な特徴だけであって, その他の物質を示す性質の起源や機構のものが少しも入ってこないという証明にはならないのである。地下水が大部分といっても各種の多数の地層を通過する温泉中には各種の起源の各種の機構によって導入された各種の物質が入ってきているものであろう。この温泉は“海水起源”だとか, “雨水起源”だとかいったようなかんたんなものとは考えられないと思われます。とにかくどの起源のものが何%, どの機構で導入されたものが何%というようになって始めて温泉の湧出機構がわかったといえることになると思われます。

ただここで注意しなければならないことは, 今まではただ温泉中の物質の材料になる可能性のある物質およびその導入される可能性のある機構だけを見てきた。温泉はこれらの物質を取り入れる時とその後それらの物質を取り入れたために性質を変化して行くことになり, 酸性の強い他から多量の物質を溶解する能力のあった温泉が溶解反応のために酸は中和されて次第に中性, アルカリ性へと変化して行けば, 一度温泉中に導入された物質でもその中で各種の反応を起し, あるいは沈殿して温泉水から分離してしまうこともある。温泉沈殿物がそれを示しているものである。このように各種の反応で, 一度温泉中に導入されたもので, 途中で, ガス発生, ガス放出, 沈殿, イオン交換, 吸着などで各種の成分が温泉水から除去されている可能性のあるものである。これらの現象も温泉生成機構として十分考慮に入れる必要がある。

それでたとえ海水が入ってきてもそのままの状態では存在できなくて必ず多少は変質を受けているものであり、酸性泉では天然に酸の発生¹⁵⁾を考えなければならないのである。特に十勝岳新々噴火口温泉のような高温度⁹⁾のものや玉川温泉¹⁵⁾のように大量が長年月湧出されているものでは、どの起源でどの機構でなければならないかの見当がつくと思われる。日本のような雨の多い、地下構造の複雑なところでは塩類鉱床が多く考えられないとすると、海水、塩水および火山ガス以外には Cl の高濃度の生成は考えられなくなる¹⁸⁾。海水より濃度が高くなる機構や海水から強酸性の溶液ができる反応などは何に求めるかなど、そんなにかんたんにはいかなないと思われる。Rn などが Ra を含む物質から溶解抽出されて放射能泉をつくることは多数の模型実験でよくわかっているが、これは極めて濃度が低いので都合がよいのである¹⁹⁾。

火山ガスが水に溶けた場合には前の拡散現象とはあまり関係なく、火山熱のため蒸発濃縮が実際に起っていて、火山ガスが絶え間なく供給されているので普通火成岩中に極めて少ない Cl, S, C などでも高濃度のものの生成にも⁹⁾、長期間の供給にもまた熱量の供給¹⁵⁾にも都合がよい。これらの強酸性の溶液が岩石と反応して金属元素を溶解抽出することも普通の水に比べて容易であり、また蒸発などの濃縮も可能で、岩石との反応で中和反応が進み、中性、アルカリ性になって行く間に、火山ガス中の SO₂ が水にとけて H₂SO₄ となり、これが自己酸化還元反応²⁰⁾で H₂SO₄ ができて、また SO₂ や H₂S が酸化されて H₂SO₄ となり¹⁵⁾、一層酸性を強くして岩石などとの反応で金属元素を溶解抽出し、中和され中性、アルカリ性になれば CO₂ が吸収されて HCO₃⁻, CO₃²⁻ が温泉中に導入され、[HCl] 型→[HClH₂SO₄] 型→[ClSO₄] 型→[Cl, SO₄, HCO₃] 型→[Cl, SO₄, CO₃] 型などの陰イオンによる温泉生成系列の生成関係も明瞭になる^{15) 18)}。

4. 結 論

1) 温泉中には自然に発見されている元素は適当に十分鋭敏な方法を使用すれば全部が検出されることと思われる。ただ各個の温泉は局地的条件に多く影響されているためにそれらの性質は多種多様で、いわゆる千差万別であるが、前に述べたように大別した温泉群ではそれらの平均的性質として一般的法則が見られる。これらの一般的法則は各局地的条件によって特徴を示している各個の温泉の性質に対しては必ずしもそのまま適用できるとは限らないのである。適用する場合には各局地的条件によって変えて行かなければならないことも多いであろう。例えば同一温泉地にあっても酸性泉とアルカリ性泉とでは金属元素の分布状態はそんなに異っていないが、陰イオンでは極めて著しく異っているものである。これらがまた河川や海水とは全く異った形式を示し、温泉生成機構の一端を明示しているのである。

2) 温泉中の物質の出所由来を求める場合には、前に述べた温泉の一般的性質、各個の温泉の特徴(その変化をも含めた)を十分に説明でき、その説明が現代の地球科学の知識と矛盾しないことを先づ考慮に入れておかなければならないと思います。一般的の普通の現象の説明の可能性は多種あって、一義的の決定は極めて困難なように思われます。それでできるだけ異常な特殊の温泉現象、例えば放射能泉¹⁹⁾十勝岳新々噴火口温泉などの火山性温泉^{14) 15) 18)}、または間歇泉²¹⁾などの特徴の著しいものの方が、その特徴だけを説明するのはそんなに困難でないような気が致します。

温泉は河川などと異って直接観察、測定できない地下の現象が多いので温泉生成機構の解明

は極めて困難であります，またそれだけ魅力があります。各種の原因が複雑に重なり合って，互に入り乱れて影響しあって，それらの総結果として湧出口から温泉として湧出しているものであり，それらの各要因が温泉水中で完全に平衡状態になっているとは限らないものであり，それらの実際の例も知られているのであります。それで各可能性のある要因をできるだけ考えて，それらの要因と局地的条件とを比較検討して，その中の可能性のないもの，および可能性の比較的少ないものなどと分離し，可能性の大きなものについて模型実験を行なって実証し，その他に，他の方法機構ではこの局地的条件では不可能か，または極めて困難なことを証明しないで，ただこの可能性があるだけでは信頼性がとぼしいと思います。この機構でなければならぬということの証明が欲しいと思います。その結果何々起源の物質が何%，何々機構で導入されたものが何%と決定されて始めて温泉の生成機構の説明ということになると思います。もちろん，極めて少量のものが参加していることの証明は困難であり，各温泉の生成機構を完全に解明することは現在極め困難であると思われませんが，大きな特徴の説明はなんとかしたいものであります。

一日も早く温泉の生成機構がわかり，どこを掘ったら，どんな性質の温泉がどれだけ採取できるか，それが何年つづくか，もしなくなるならばそれを補給し，なくならないようにするにはどうしたらよいか，などがはっきりわかってくる日の来ることを願望し，この総括を終らせていただきたいと思います。

参 考 文 献

- 1) 岩崎岩次：“温泉化学”，温泉工学会誌，**5**，(No. 2)，54～60 (1968)
- 2) 岩崎岩次：“温泉の科学的利用の推進”温泉研究，20～21—22 合併号，43 (1961)；岩崎岩次：地熱の合理的利用，地熱，**No. 8**，17～25 (1966)。
- 3) 岩崎岩次：“温泉とは何か”温泉工学会誌，**5**，(No. 1)，17～23 (1967)。
- 4) 奥野久輝：“温泉の分類”，日化，**62**，669 (1942)。
- 5) 木村健二郎，岩崎岩次：“温泉の化学”，化学綜報，第4輯，77～113 (1942)。
- 6) E. T. Allen, A. L. Day “Hot Springs of the Yellowstone National Park” (1935)。
- 7) T. F. W. Barth, “Volcanic Geology, Hot Springs and Geysers of Iceland” Carnegie Inst. Washington, Publication 587 (1950) p. 45, 49.
- 8) 江本義数：温泉科学，**1**，(No. 3～4)，119 (1941)。
- 9) 吉田稔，小沢竹二郎，岩崎岩次，小坂丈予：“固化する温泉，十勝岳新々噴火口温泉と温泉固化生成物(温泉のかたまり)”温泉科学，**19** (No. 1)，1～14 (1968)。
- 10) 温泉研究，第13号，88 (1958)。
- 11) 吉田稔，小沢竹二郎，小坂丈予：薩摩硫黄島に生成する特異なケイ酸質“火山昇華物”岩石鉱物鉱床学会誌，**55**，201～211，262～271 (1966)。
- 12) 岩崎岩次：“伊豆大島火山の地球化学的研究”，地学，**60**，140—143 (1951)；岩崎岩次，桂敬，下島光，小沢竹二郎，樽谷俊和，佐藤京子：“同上”，火山，**II**，**3**，70～97 (1958)。
- 13) 岩崎岩次：“本邦温泉の主化学成分の分布”温泉科学，**2**，(No. 2—3)，1～14 (1942)。
- 14) 鎌田政明：“温泉”，火山，**II**，**10**，214～220 (1965)。
- 15) I. Iwasaki, T. Katsura, T. Tarutani, T. Ozawa, M. Yoshida, B. Iwasaki, M. Hirayama, M. Kamada: “Geochemical Studies on Tamagawa Hot Spring”. *Geochemistry of the Tamagawa Hot Springs*, p. 7～72 (1963) ed. by E. Minami.
- 16) 岩崎岩次：“本邦温泉に於ける元素分布の総括”日化，**56** (No. 2)，252—262 (1935)；“本邦温泉における主なる元素の分布”，日化，**56**，(No.11) 1427—1439 (1935)；岩崎岩次：“本邦温泉における元素の分布”，科学，**7**，151～152 (1937)。
- 17) 福富孝治：北大地理物理学研究報告，**13**，(2月号)，53～70 (1965)。
- 18) I. Iwasaki, T. Ozawa, M. Yoshida, T. Katsura, B. Iwasaki, M. Kamada “Differentia-

- tion of magmatic emanation", *Bull. Volcanologique*, **27**, 79 (1964) (abstract), *Bull. Tokyo Inst. Tech.*, No. **74**, 1~57 (1966).
- 19) 岩崎岩次: "強放射能泉の地球化学的研究, 温泉におけるラドンの分布" *化学の研究*, **8**, 1~42 (1950); 岩崎岩次: "温泉中のラジウム-226 の分布と強放射能泉の生成機構", **6**, 18, 112, 165 (1968); **7**, 16, 109 (1969).
- 20) I. Iwasaki, T. Ozawa: "Genesis of sulfate inacid hot springs", *Bull. Chem. Soc. Japan*, **33**, 1019 (1960).
- 21) I. Iwasaki; "Geochemical investigation of geysers in Japan" *Bull, Tokyo Inst. Tech.*, No. **46**, 1~60 (1962).

参考文献

1) 岩崎岩次: "温泉化学", 温泉工業会誌, **5** (No. 2), 54~60 (1966).

2) 岩崎岩次: "温泉の科学的利用の指針", 温泉研究, 20~21-22 合併号, **43** (1961); 岩崎岩次: 地熱の合理的利用, 地熱, No. **8**, 17~25 (1966).

3) 岩崎岩次: "温泉とは何か", 温泉工業会誌, **5** (No. 1), 17~23 (1967).

4) 奥野文雄: "温泉の分類", *日誌*, **62**, 669 (1962).

5) 大村謙三郎, 岩崎岩次: "温泉の化学", 化学総論, 海軍編, **75**~118 (1962).

6) E. T. Allen, A. L. Day: "Hot Springs of the Yellowstone National Park" (1935).

7) T. R. Barth: "Volcanic Geology, Hot Springs and Geysers of Iceland" *Carnegie Inst. Washington Publication* 587 (1950) p. 45, 49.

8) 日本地熱: 温泉科学, **1** (No. 3~4), 119 (1947).

9) 吉田誠, 小川竹二郎, 岩崎岩次, 小沢文子: "同一する温泉十種温泉と温泉同位体分布" (温泉研究, **19** (No. 1), 1~14 (1968).

10) 温泉研究, 第13号, **88** (1968).

11) 吉田誠, 小川竹二郎, 小沢文子: "温泉同位体分布と温泉同位体" 温泉研究, **55**, 201~211, 262~271 (1966).

12) 岩崎岩次: "温泉と火山の同位体化学的研究", 地質, **60**, 140~144 (1967); 岩崎岩次: 地質, **62**, 小川竹二郎, 岩崎岩次, 小沢文子: "同一する温泉", *日誌*, **62**, 70~97 (1968).

13) 岩崎岩次: "本邦温泉の同位体化学的研究", 温泉科学, **2**, (No. 2-3), 1~14 (1942).

14) 岩崎岩次: "温泉", *火山*, **10**, 214~259 (1966).

15) I. Iwasaki, T. Katsumi, T. Tsuruta, T. Ozawa, M. Yoshida, B. Iwasaki, M. Hirayama, M. Kamada: "Geochemical Studies on Tamagawa Hot Spring", *Geochemistry of the Tamagawa Hot Springs*, p. 7~12 (1966) ed. by F. Meinand.

16) 岩崎岩次: "本邦温泉に於ける元素の分布", *日誌*, **56** (No. 2), 262~263 (1956); "本邦温泉に於ける元素の分布", *日誌*, **56** (No. 11), 1427~1439 (1957); 岩崎岩次: "本邦温泉に於ける元素の分布", *日誌*, **57**, 151~152 (1957).

17) 岩崎岩次: "北陸道温泉の同位体化学的研究", *日誌*, **53**~70 (1955).

18) I. Iwasaki, T. Ozawa, M. Yoshida, T. Katsumi, B. Iwasaki, M. Kamada: "Differentia-