

基調講演 1

## 化学は温泉の成り立ちを解き明かす

野田 徹郎<sup>1)2)</sup>

## Chemistry Unlocks Geneses of Hot Springs

Tetsuro NODA<sup>1)2)</sup>

### Abstract

Once hot spring waters are taken in hand, those chemical analyses allow reliable reconstruction of subsurface origin and condition of them. So far various chemical (geochemical) investigations have been performed on hot springs and the surrounding settings, which beneficially forced, in combination with other scientific fields, not only for illustrating regional hot spring situations but also for solving earth science mysteries. In contrast, hot springs closely contact with human activity often bring about anthropogenic issues, where hot spring chemistry would be expected to provide a key to reduce such issues.

Here taking an example for chemical research on hot springs followed by its application in public, the author would introduce a methodology to determine source water classification for hot springs and estimate the source water chemical compositions as well as those mixing ratios in the hot springs. Furthermore chemistry plays an important role in confirming the degree of linkage between subsurface aquifers which would be practically utilized on consideration of the very recent task "A guideline for conservation of hot springs".

Key words : chemical unlocking, genesis of hot springs, source water, conservation of hot springs

### 要 旨

化学は、いったん温泉水を手にすると、その分析を基に起源や地下での状態を再現できる信頼性が特徴である。これまでに、温泉水や周辺現象を対象に様々な化学的（地球化学的）研究が行われ、その結果は温泉現象の解明だけでなく、他の分野と融合して地球の謎を解くのに大

---

<sup>1)</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第 7.

<sup>1)</sup> Institute for Geo-Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST Tsukuba Central 7 Higashi 1-1-1 Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan.

<sup>2)</sup> 日鉄鉱コンサルタント株式会社 〒108-0014 港区芝 4-2-3 (NOF 芝ビル 5 階). <sup>2)</sup> Nittetsu Mining Consultants Co., LTD., NOF Shiba Building, 2-3, Shiba 4-Chome, Minato-Ku, Tokyo 108-0014, Japan.

いに役立っている。一方、温泉はその利用が人間活動に密着しており、そこから発生する問題についても、温泉の化学的研究は解決の糸口を与えることが期待されている。

本報では、実例として温泉の起源水を取り上げ、起源水の分類方法と数値計算による起源水組成の決定と混合比を求める方法を紹介している。また、実用面への適用として、最近の課題である‘温泉保護に関するガイドライン’を考える上で重要な、水系のつながりを判断するのに化学の役割が大きいことを述べている。

キーワード：化学的解明、温泉の成り立ち、起源水、温泉保護

## 1. はじめに

温泉の実態にアプローチする自然科学分野は、地質学、物理学（地球物理学）、化学（地球化学）が代表的であるが、それぞれ特徴を有する。地質学は、どこでも試料を得ることができ、温泉の存在する地下のモデルを組み立てる基本的分野であるが、正しく地下を想像する優れた洞察力が必要である。物理学は、観測データと理論に基づき、温泉に関係する地下の物性データを得ることができるが、データにより組み立てたモデルは検証が必要である。化学もデータが無いとモノが言えないが、いったんデータ（例えば温泉分析値）を手に入れると、地下での状態を的確に把握できる。

温泉学における化学の役割は研究面と実用面の大きく二つに分かれる。研究面は温泉を化学することであり、化学成分の分布とその意味を調べたり、地球科学を深化したりする手段として使われる。実用面では、温泉の推移を知るモニタリングの項目となり、温泉相互の影響判断や、温泉と自然や人間との相互作用を知るのに役立てられる。

ここでは、その実例として、著者が行ってきた温泉の起源水説明の研究を紹介し、その実用面への適用の可能性について述べることにする。

## 2. 温泉の起源水

### 1.1 温泉の成り立ちを示す起源水の分類

温泉の起源水説明については色々なアプローチがあるが、野田・高橋（1992）は地球化学データの統計処理と地球化学の常識を組み合わせた「起源水の分類」を試みた。

温泉の水質は、様々な要素と過程を経た結果である。元となる水として天水、海水、火山性熱流体（火山活動に伴って火山から放出されるいわゆるマグマ水）があり、これらが地層との反応や混合をしながら変わっていく。その過程で気液相の分離や物質の沈澱、溶解、イオン交換、酸化還元反応が無視できない。この過程は非常に複雑であるが、安定してひとまとまりにとらえることのできる段階がある。それらの安定段階にある水のことを、個々の水のもとになる水系という意味で起源水と呼ぶ。起源水は二種類に区分し、大元になる三つの起源水を基本起源水、その他の修飾された起源水を準基本起源水とする。各起源水の種類と化学的特徴はまとめて表1に示している。

表1に挙げた、深部熱水、海水関連熱水、地熱地域関連水、火山性熱流体、高温蒸気加熱水、低温蒸気加熱水、変質帯関連水、深層熱水、海水、低温変質海水（化石海水）、天水の11種類の起源水のうち、海水、天水以外は温泉となる可能性がある。

それぞれの起源水は、まず、これまでの経験的知識によりある程度化学成分や物理的性質、地質学的背景の区分を示せるものが多い。例えば、深部熱水は高温、中性で、ある程度高いNaCl型といったことである。次に、これまでに集積された温泉データをコンパイルすることにより、分析項目ごとに濃度の頻度分布を求めることができる。図1-1、1-2、1-3、1-4はその例である。自然界の濃度分布は対数正規分布をすることが知られており、その知識を活用してどのような濃度分布で起

Table 1 Species and chemical characteristics of the proposed source waters

表 1 起源水の種類と特徴

基本起源水	
天水 (浅層地下水)	低温中性低成分
海水	低温高塩分 NaCl 型
マグマ水 (火山性熱流体)	酸性 Cl/SO <sub>4</sub> 型
準基本起源水	
深部熱水	高温中性 NaCl 型
海水関連熱水	高温中性高塩分 NaCl 型
地熱地域関連水	多様温度中性多様成分
高温蒸気加熱水	中高温酸性 SO <sub>4</sub> 型
低温蒸気加熱水	中低温中性 HCO <sub>3</sub> 型
変質帯関連水	低温 SO <sub>4</sub> 型
深層熱水	中低温中性多様成分
低温変質海水	中低温中性高塩分 NaCl 変質型

源水を区分すればよいかを考えることができる。図 1-1, 1-2 では二つのピークを中心とした二群の存在が読み取れる。図 1-3 は複雑であるが、複数の正規分布の重なったものとして数値解析すると三群の存在が妥当だと分かる。図 1-4 からの区分は不可能であるが、経験的知識に基づく四段階の区分を設定して対応した。なお、温泉のデータに基づいているので、これらの図には現れにくい、低温、低濃度の天水と低温、高濃度の海水の大きな塊が存在することも、区分の上で考慮しなければならない。

このようにして各起源水の要素を示すことができる。取り上げた要素は、温度、pH、Cl、B/Cl、SiO<sub>2</sub>、化学組成、総濃度、地質、同位体、であり、起源水ごとの各要素の分類基準を表 2 に示した。

### 1.2 起源水の組成と混合比を求める

ところが、実際の温泉水をこれに当てはめてみると、ぴったり当てはまるものもあるが、幾らかずれるものや、当てはめようのないものも出てくる。これは、実際の温泉水は、変化過程の途中にあるもの、中間的な性質のもの、複数の起源水が混合したものが多くからである。そこで、実際の温泉水のデータは、複数の起源水の混合具合を求める計算法を考案した (Noda and Shimada, 1993)。この方法は、対象地域の温泉の中から典型的な化学組成を示す複数の温泉を、起源水の初期値として各化学成分について混合を示す式をつくり、Self-consistent な最小自乗法によって起源水の化学組成と混合比を求めるものである。この計算による起源水の組成と混合率を求める過程の基本骨格を図 2 に示した。実際のアルゴリズムは当該論文を見ていただきたい。この計算では変化過程の途中にあるものや、中間的な性質のものも見掛け上、混合状態にあるものとして解かれる。

九州の豊肥地域 (大分県-熊本県境の九重山周辺の地熱・温泉地域) には、数多くの様々な泉質の温泉が散在しており、温泉の成り立ちの解明が難しい地域である。この地域で採取した温泉水の分析データを基に、上記の計算により求めた起源水の化学組成を表 2 に、実際の試料での起源水の混合割合を表 3 に示す。これによりこの地域にありそうな種類の起源水の化学組成をうまく説明することができている。さらにこの結果を基に、地域内の温泉の生成機構と流動や混合の様子を表現することができる。

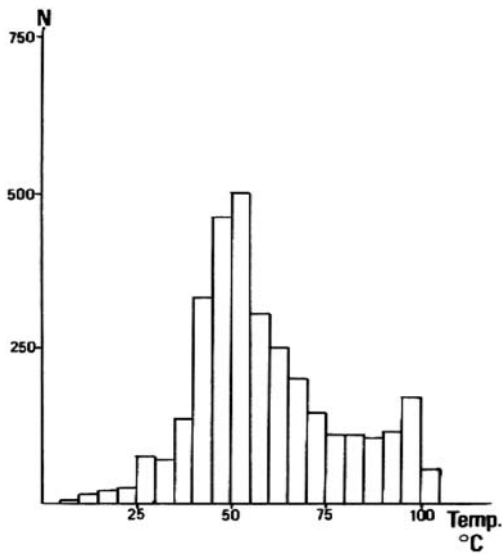


Fig. 1-1 Frequency histogram of hot spring concerning to water temperature  
図 1-1 温泉分析データの累積頻度分布 温度

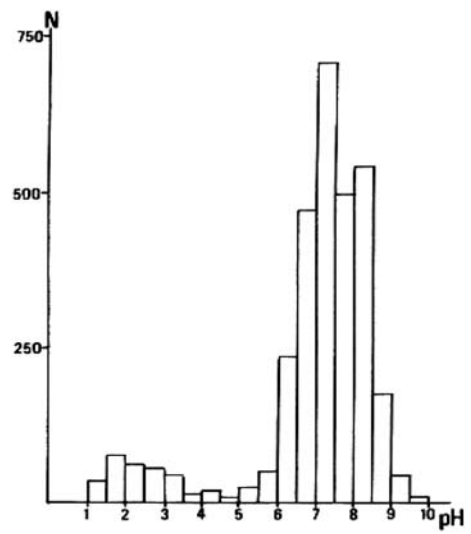


Fig. 1-2 Frequency histogram of hot spring concerning to pH value  
図 1-2 温泉分析データの累積頻度分布 pH

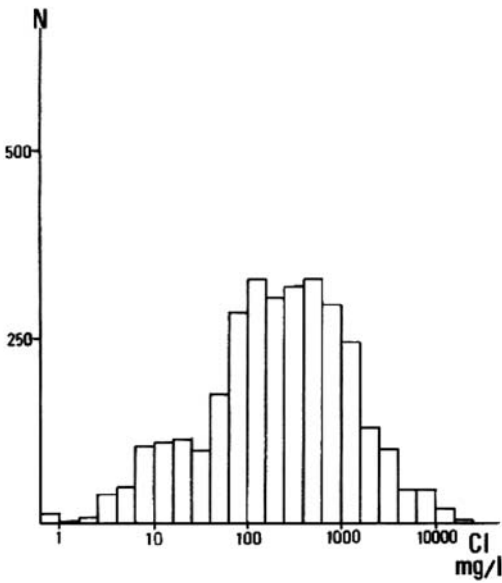


Fig. 1-3 Frequency histogram of hot spring concerning to chloride content  
図 1-3 温泉分析データの累積頻度分布 Cl

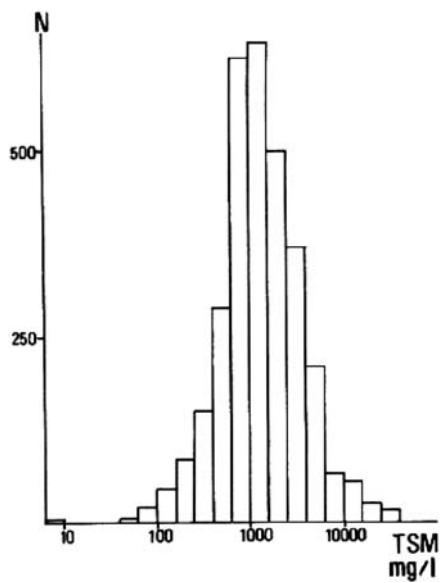


Fig. 1-4 Frequency histogram of hot spring concerning to total soluble material  
図 1-4 温泉分析データの累積頻度分布 TSM

Table 2 Source water classification criteria

表 2 起水源分類表

起水源の種類	温度 °C	pH	Cl mg/L	B/Cl 原子比	SiO <sub>2</sub> mg/L	化学組成	総濃度 mg/L	地質	同位体
① 深部熱水	90~	4.8~	h	0.03~0.1	h	Na-Cl	h	第四紀	~
② 海水関連熱水	90~	4.8~	vh	~0.03	h	Na-Cl	vh	第四紀	~
③ 地熱地域関連水	25~	4.8~	~	~	m	~	~	第四紀	~
④ 火山性熱流体	25~	~4.8	m, h, vh	~	m, h	-Cl/SO <sub>4</sub>	m, h, vh	第四紀	~
⑤ 高温蒸気加熱水	25~	~4.8	l	0.1~	m, h	-SO <sub>4</sub>	m, h	第四紀	~
⑥ 低温蒸気加熱水	~90	4.8~	l	~	l, m	-HCO <sub>3</sub> (≥100 mg/L)	l, m	~	MW
⑦ 変質帯関連水	~25	~	l	~	l, m	-SO <sub>4</sub>	l, m, h	第四紀	MW
⑧ 深層熱水	25~90	4.8~	~	~	l, m	~	~	非第四紀	~
⑨ 海水	~25	4.8~	vh	~0.03	l	Na-Cl, δ<35	vh	~	SW
⑩ 低温変質海水	~90	4.8~	vh	~0.03	l, m	Na-Cl, δ≥35	vh	~	SW
⑪ 天水	~25	4.8~	l	~	l	~	l	~	MW

1) Cl, SiO<sub>2</sub>, 総濃度の閾値

Cl :  $vh \geq 3,162 > h \geq 316 > m \geq 32 > l$

SiO<sub>2</sub> :  $h \geq 200 > m \geq 50 > l$

総濃度 :  $vh \geq 5,000 > h \geq 1,000 > m \geq 200 > l$

2) 化学組成は水中の主要成分組成を示す。/はどちらかが主で他方が副であることを示す。

δは次で定義する海水からの組成の偏りである。

$\delta = \sum |(X/Cl)_{sea\ water} - (X/Cl)_{sample}| \times 100$  ここで X=Na, K, Ca, Mg, SO<sub>4</sub>

3) 単独の~は相当する特定の値や区分要素がないことを示す。

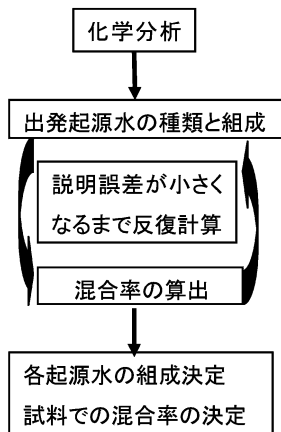


Fig. 2 Determination process of source water compositions and mixing ratios by way of source water-mixing calculation

図 2 起水源混合計算による起水源の組成と混合率の決定

## 2. 実際の温泉問題を考えるときのヒント

温泉を利用していく上で常に心配されるのは、温泉がいつまでも変わらずに使えるかどうかである。そのときに、温泉がどのようにしてできているかを知ることは大変参考になる。天水（地表水）が大きく関与するような温泉では、ゆう出量の変化と降雨の関係を注意しなければならない。また、低温変質海水（化石海水）の要素が大きい温泉水は、やがて温泉が枯渇することを覚悟して使わなければならないであろう。

また、資源保護の観点からは、温泉相互の影響の有無やその一部としての温泉と地熱発電との関係も問題視される場所である。このとき、相互の温泉水がつながりのあるものかどうかを知っておくことは重要である。組成がよく似た水については、つながっている可能性があるので相互の影響を気にしないといけないうし、そうでなければ相互影響は無用の心配だということになる。このときに、本論で述べた起水源の分類やその混合比を求めるやり方は、役に

立つものと考え。

平成 21 年 3 月に環境省自然保護局（2009）が発表した「温泉保護に関するガイドライン」では、

Table 3 Source water chemical compositions obtained by using of numerical calculation for hot spring waters at the Hohi area

表 3 数値解析により得られた起源水の化学組成

	起源水 A	起源水 B	起源水 C	起源水 D	起源水 E	起源水 F
	比較的深部の NaCl 型熱水	比較的浅部の NaCl 型熱水	蒸気加熱型 の浅層熱水	噴気地型の 熱水	地表水	火山ガス吹き 込み型の熱水
Na mg/L	1180	435	224	8.51	20.3	179
K mg/L	133	18.0	71.4	1.19	7.46	25.9
Ca mg/L	5.90	57.4	419	17.3	0	557
Mg mg/L	0	0	227	8.35	0	124
Cl mg/L	1840	659	0	3.58	7.82	852
SO <sub>4</sub> mg/L	118	115	483	124	7.09	1180
HCO <sub>3</sub> mg/L	124	23.1	2180	0	84.5	0
SiO <sub>2</sub> mg/L	731	111	176	89.8	71.5	199
Li mg/L	4.25	2.22	0.40	0.04	0.01	0.11
B mg/L	26.9	5.47	0	0	0.24	1.57
F mg/L	1.90	3.47	0	0.09	0.15	0.64
As mg/L	2.17	0.42	0	0.01	0	0
NH <sub>4</sub> mg/L	0.59	0.67	1.26	8.08	0	0.11
δD ‰	-55.7	-54.3	-58.4	-50.3	-56.1	-56.6
δ <sup>18</sup> O ‰	-4.0	-7.3	-9.1	-7.2	-8.1	-6.8
*地化学温度℃	240~255	114	92	10	low	58

\*地化学温度は化学組成を基に計算したものである。

Table 4 Source water mixing ratios in hot spring waters at the Hohi area

表 4 豊肥地域水試料の起源水混合率 (%)

	起源水 A	起源水 B	起源水 C	起源水 D	起源水 E	起源水 F
	比較的深部の NaCl 型熱水	比較的浅部の NaCl 型熱水	蒸気加熱型 の浅層熱水	噴気地型の 温泉水	地表水	火山ガス吹き 込み型の熱水
ニュー津田牧場	1.6	0	11.2	0	22.8	64.5
大岳地獄	0	0	0	97.5	2.5	0
蜚川荘	15.1	6.9	0.8	0	75.8	1.4
湯沢温泉	2.0	0	14.1	0	13.7	70.2
大將軍谷温泉	0	1.0	3.1	1.6	64.5	29.8
釜口温泉共同浴場	11.5	0	49.2	0	39.3	0
河原湯共同浴場	15.5	57.6	1.0	2.5	21.8	1.6
三光苑温泉	0	0	0	1.7	94.5	3.8
地蔵原キャンプ場	0	0	0	1.3	98.0	0.7
九州横断観光	0	0.3	1.6	1.1	97.0	0
DB-7	0	0	0	6.3	92.6	1.1
DW-3	0	18.5	7.2	0	74.3	0
DB-10	0	0	0.5	1.3	97.8	0.4
DB-11	0	0	58.5	2.3	0	39.2
DW-6	15.1	61.9	0	2.4	20.6	0.1
DY-1	36.2	55.8	0	0.4	7.6	0
DY-5	88.2	0	1.5	0	10.2	0
DY-6	70.9	16.5	0	4.6	0	8.1

アルファベットと数字の組み合わせは坑井からの水試料を示す。

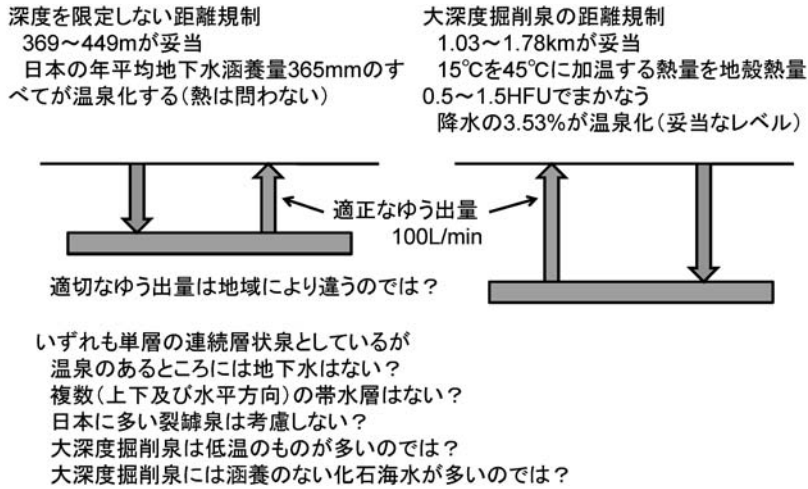


Fig. 3 Hot spring model based on "A guideline for conservation of hot springs"

図 3 「温泉資源の保護に関するガイドライン」に示されている温泉モデル

図 3 に示すようなモデルを想定し、モデル上での距離規制が妥当だとしている。この考察においては、水のつながりについての考慮が欠けているのは大きな欠点の一つであり、実際の温泉への適用がはばかれる理由となっている。このような場合にも、水のつながりを吟味する化学的考察が積極的に利用されなければならないと考える。

### お わ り に

以上、「化学は温泉の成り立ちを解明することができる」との視点から、著者の行ってきた研究を中心に紹介し、実際の温泉問題を考えるときのヒントになることを述べた。もちろん、演者のやり方は一例にすぎず、様々な化学的方法があるであろう。また、化学だけではなく、関連する他の分野の情報も取り入れなければならない。それは、温泉が化学に留まらず総合科学を適用すべき場だからである。そして、研究の成果を社会的に応用して還元していくことが、温泉科学の認識と評価を高める重要な手段であると考ええる。

### 謝 辞

日本温泉科学会第 62 回大会において、西村 進大会運営委員長が同会での講演にセッション制を導入され、著者はセッション 1 (温泉化学) の大沢信二コンビーナから基調講演を依頼された。大会終了後、西村委員長からは本稿の執筆を要請された。本稿執筆のきっかけを作っていただいた、お二人に感謝したい。

### 引用文献

環境省自然環境局 (2009) : 温泉資源の保護に関するガイドライン, 57 頁.  
 野田徹郎, 高橋正明 (1992) : 地熱系に関連する起源水の地球化学的分類とその意義. 地球化学, **26**, 63-82.  
 Noda, T. and Shimada, K. (1993) : Water mixing model calculation for evaluation of deep geothermal water. Geothermics, **22**, 165-180.