



地熱発電の温泉への影響を科学的に考える

野田 徹郎¹⁾

(平成 25 年 10 月 30 日受付, 平成 25 年 12 月 3 日受理)

Scientific Consideration of Influence from Geothermal Power Generation on Hot Spring Activity

Tetsuro NODA¹⁾

要 旨

地熱発電による温泉への影響は、地熱採取量をコントロールすることによって影響をなくすることができ、逆にコントロールがうまくいかないと影響が起こることがある。我が国では今のところ科学的に明確な影響は発生していない。影響の検討は、まず温泉相互の影響の有無を検討し、それで説明できない有意の変動があるときは、地熱発電を含む他の影響因子の可能性を考えるのが効率的である。適切なモデリングとモニタリングにより影響を判断するが、そのとき、温泉帯水層の水位と総湧出量、地熱については、地熱貯留層の圧力（水位）と総蒸気量あるいは発電量が最も適切な尺度となる。データが十分だと、地熱貯留層と温泉帯水層のつながり方に基づき、水、熱、物質収支の計算による影響予測も可能である。

キーワード：地熱発電、温泉影響、地熱貯留層、温泉帯水層、箱根温泉、筋湯温泉、八丁原地熱発電所

1. はじめに

地熱発電が温泉に影響するかどうかは、地熱発電と温泉の関係についての関心の高い基本的問題である。この問題については、ややもすると思いつみや風聞に基づく誤解もあるように見受けられる。温泉を研究する我々は、しっかりしたデータと科学的に論理性のある正しい考察に基づきこの問題の実態を明らかにしていくべきである。本論では、まず、どのようなときに地熱発電が温泉へ影響するかを述べる。次に、温泉影響の有無を示す実例を、非地熱発電地域の神奈川県箱根温泉と、発電地域の大分県筋湯温泉について示す。さらに、地熱発電による温泉の影響を定量的に見積もる

¹⁾産業技術総合研究所 〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第七。 ¹⁾National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. E-mail noda-tetsuro@aist.go.jp TEL 029-861-2046 FAX 029-861-3717.

方法を紹介します。最後に温泉に影響する因子をまとめて紹介する。

2. どのようなときに地熱発電の温泉への影響は起こるか

地熱発電を行うような地下の高温地熱流体の供給ゾーンを地熱貯留層と呼び、浴用に使うようなそれほど温度の高くない温泉水の供給ゾーンを温泉帯水層と呼ぶ。地熱貯留層と温泉帯水層を合わせて地熱—温泉系と呼ぶが、地熱—温泉系は、水を貯える地下の仕組み、それを温める熱の供給、地表からの冷たい水の浸入を防ぐ遮蔽構造、の条件が整うと火山の周りに発達する。地熱貯留層と温泉帯水層の間には不透水性の帽岩があるのが一般的である。帽岩は地下浅い所から深部への冷たい地下水の侵入を防ぎ、地熱貯留層の高温状態を保つ役割を果たしている。しかし、帽岩は完全には不透水性でない場合があり、部分的に様々な形で地熱貯留層と温泉帯水層とのつながりが生じ、様々なタイプの温泉の成因となることがある (図 1)。

地熱—温泉系における、地熱貯留層と温泉帯水層のつながり方には、図 2 に示すように同一熱水型、熱水滲出型、蒸気加熱型、伝導加熱型、独立型の五つのタイプがある (野田, 2011)。同一熱水型は、地熱貯留層が非常に浅い所にあり地熱発電と浴用温泉が同じ所から採取するケースや、地熱発電の対象となっている地熱貯留層に浴用温泉が坑井を掘進して温泉を採取するケースに当たり、理屈の上ではあり得るが実際には非常に希である。熱水滲出型は、帽岩の働きが完全ではなく、地熱貯留層からの熱水が温泉水に混入している例であり、日本の温泉全体の約 13% を占めると推定される (野田, 2011)。このタイプの温泉は、熱水の混入のため比較的高温であり、ほぼ例外なく NaCl 型である熱水の化学組成を反映して、陰イオンに Cl がある程度含まれるのが特徴である。もっと帽岩の不透水性が増すと、液体としての水は通しにくくなり、地熱貯留層からは水蒸気のみ

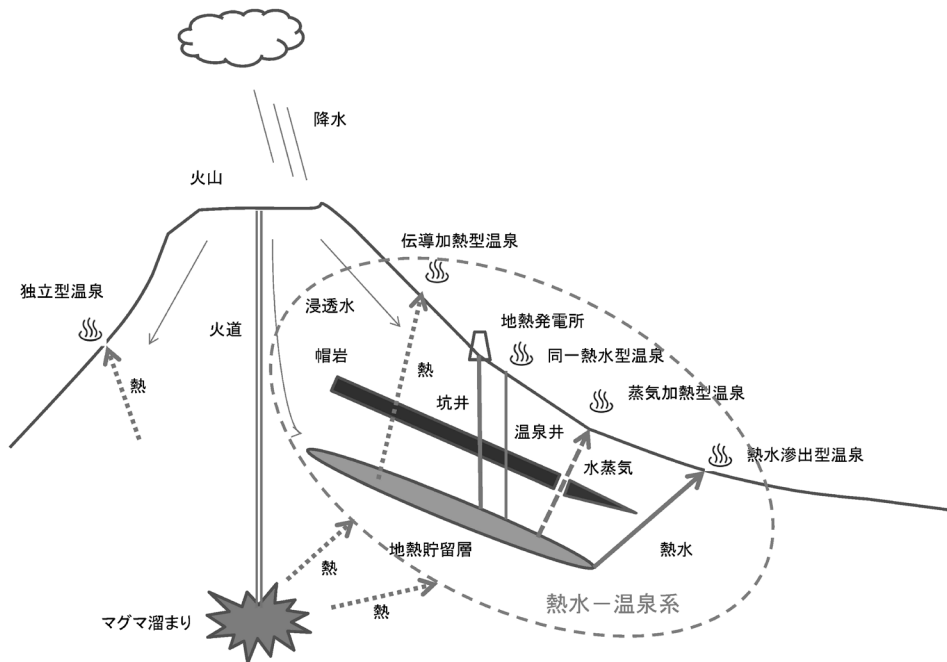


図 1 火山の周辺での地熱—温泉系の発達の様子。

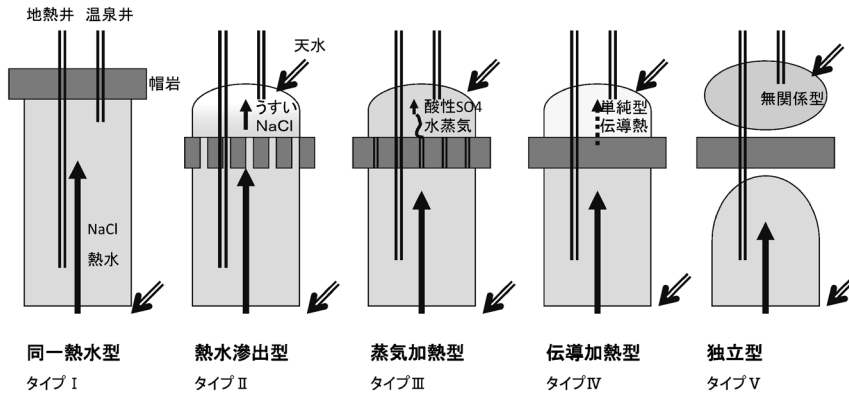


図 2 地熱貯留層と温泉帯水層の関係。

が温泉帯水層に到達し蒸気加熱型となる。そのとき、水蒸気に伴う H_2S が酸化して SO_4 となり温泉成分の特徴となる。伝導加熱型では、さらに帽岩が堅固になり物質を通さなくなるため、地熱貯留層から温泉へは熱が伝導するだけで、温泉の化学組成は希薄である。この他に両者がまったく関係ない位置にある独立型がある。このように、地熱貯留層と温泉帯水層がそれほど遠くない影響範囲（水平距離、深度）にある場合は、両者のつながりが生じ、温泉の温度、水位、泉質によりどのようなタイプかを判定できることが多い。

地熱発電が温泉に影響するのは、地熱-温泉系において、地熱貯留層と温泉帯水層に十分なつながりがあり、しかも、地熱流体の採取が地熱貯留層への自然の供給を上回ってバランスを崩す場合である。地熱発電による温泉への影響が最も顕著な条件にあるのは同一熱水型であるが、この関係にある地熱-温泉系は非常に希で、実質的に最も心配しないといけなは、熱水の温泉への直接供給を含む熱水滲出型である。蒸気加熱型は蒸気だけの供給で液体のつながりはなく、伝導加熱型は流体の供給は伴わないので、影響については大きな心配は必要ない。

熱水滲出型における地熱貯留層と温泉帯水層の関係をモデル化したのが図3である。温泉への影響を考えるとときには、水系単位での変動を見るのが良い。温泉帯水層は温泉にとっての水系である。図から分かるように温泉が最も影響を受けるのは、同じ水系から採取を行っている温泉相互である。水系がはっきりしない場合は、温泉地を一つの水系と考えるしかない場合もある。地熱貯留層は、普通は一つの水系と考えてもよいが、希に異なる複数の地熱貯留層（水系）を考えた方がよい場合もある。なお、この図では地熱貯留層と温泉帯水層を層状に表現しているが、実際は、地熱貯留層は縦型断層系貯留層の集合体であり、温泉帯水層の形態は様々で層状のものもある。温泉への影響は、地熱貯留層と温泉帯水層の水系間相互に発生する現象であり、水系単位での変動に着目しなければならない。

ここでは、温泉への影響の可能性のある熱水滲出型を題材に、地熱貯留層からの流体採取が温泉にどのように影響するかを説明することにする。

地熱貯留層へは地下深部からの熱水の供給 Q_{g0} があり、大部分が地熱井から蒸気として噴出し (Q_{gs})、幾らかは温泉につながっている (Q_{gh})。この間には $Q_{g0} = Q_{gs} + Q_{gh}$ の関係がある（なお、地熱流体から分離した熱水は地下に還元されるため、この収支には関係しないとして除いている）。温泉水 Q_h は他の水系からの水 Q_s に熱水貯留層からの流体 Q_{gh} が混合したもので、 $Q_h = Q_s + Q_{gh}$ の関係がある（なお、他の水系からの水には降水起源の浅層地下水と浅いところまでできる温泉水が含まれるが、簡単化のためにここでは両者を分けてはいない。

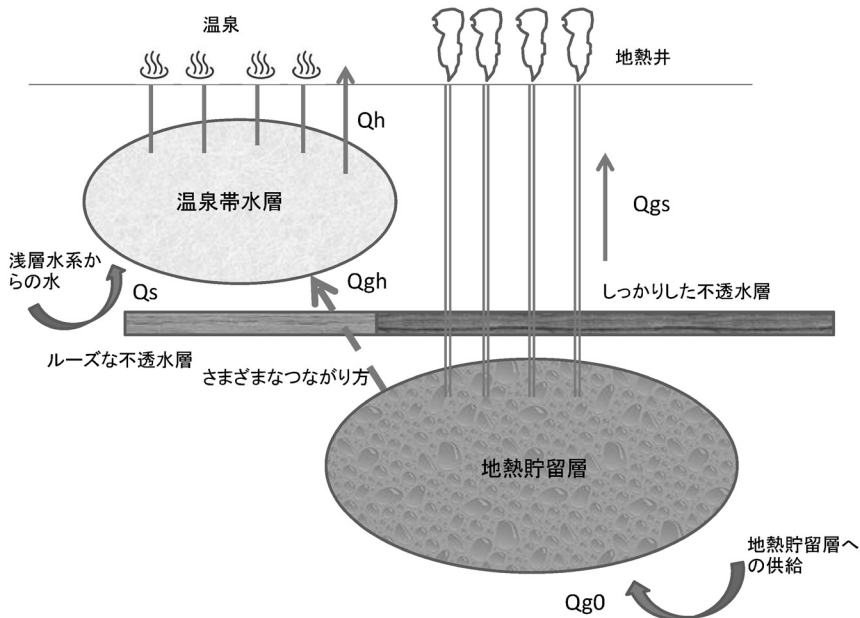


図 3 地熱貯留層と温泉帯水層のつながり方.

掘削による貯留層圧力と噴出量の変化

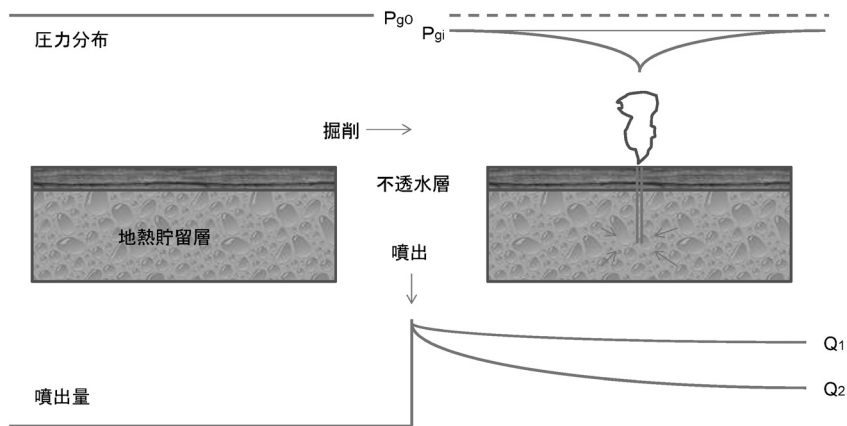


図 4 掘削による地熱貯留層圧力と噴出量の変化.

図 4 には掘削による地熱貯留層の圧力と噴出量の変化を示している。帽岩の下の地熱貯留層は、掘削前は一定 (P_{g0}) であるが、掘削により噴出が始まると、一般に噴出開始直後は、噴出量は大きい時間が経つとある値に収まってくる。このとき、貯留層の圧力分布は、坑井近傍では部分的に低い圧力となり、周りの高い圧力部分から流体が坑井に向かって流れてくる。複数の坑井があると、坑井ごとに同じ状況になり、全域で地熱貯留層全体の平均圧力 (P_{gi}) を示すようになる。地熱貯留層の圧力 P_{gi} は、言わば地熱貯留層から温泉帯水層につながるポンプの吐出圧に相当するもの

である。圧力安定化率 $\alpha P_g = P_{gi}/P_{g0}$ は、地熱貯留層の生産能力にかかわる重要なパラメータであり、安定生産を維持するためにはなるべく αP_g が大きくなるように生産量を管理する。 αP_g は、温泉への影響を考慮する上でも重要であり、その値が1に近ければ温泉への影響は考慮しなくてよいが（噴出量曲線 Q1）、 αP_g の値が小さいときや、 αP_g の値が減り続けるとき（噴出曲線 Q2）のときは注意が必要である。通常は、発電事業は安定発電を維持できないと採算性が悪くなるため、 αP_g が小さくならないように細心の注意を払って資源に見合った採取量を定め、発電所建設時に適切規模の設備を設計する。

3. 温泉影響事例の検証

それでは、温泉がどのような場合に影響を受けるのか、それが地熱発電の有無とどう関係するかを、典型的な二つの例、非地熱発電地域の神奈川県箱根温泉と地熱発電地域の大分県筋湯温泉で検証してみる。このような検証が可能なのは長期にわたる観測データが整っている場合であり、両地域ともそれにふさわしい観測データの集積がある。前者については、神奈川県温泉地学研究所(1983)報告、神奈川県所有データ（私信）、後者については、温泉工学会誌（村井，1966；平岡，1973；八木，1976；塚本，1979，1982）、大分県温泉調査研究会報告（志賀，1967；大野，1989）、大分県ホームページ（2013）、大分県（私信）、地熱発電の現状と動向（火力原子力発電技術協会，2012）を参考にした。

3.1 箱根温泉の事例

箱根温泉の活動状況が昭和56年度（1981）から平成22年度（2010）の30年間にどう変わったか、源泉数と湧出量（自噴、動力）の変化を表1に示す。箱根温泉には全部で18の温泉地があるが、温泉地により変化はまちまちである。うまく管理されている例は湯本と大平台のわずか二つである。箱根湯本温泉を細かく見ると、30年間に源泉数は72から77に増え、自噴量は231から147L/minに減り、動力揚湯量は4,502から4,707L/minに増えている。また源泉数の内訳を調べたところ、昭和56年度には自噴泉2動力泉70であったものが、平成22年度には自噴泉2動力泉75に変わっている。それほど熾烈な揚湯競争にはなっていないが、ここでも、温泉間の競争による相互影響の過程にあることが知られる。最も目立つのは減少の顕著な温泉地であり、塔乃沢、堂ヶ島、宮ノ下、底倉、小涌谷、木賀、強羅、仙石原、姥子・湖尻、芦乃湯で全体の半分以上を占める。減少は湧出量の減少が1割以上（そのほとんどが2割以上）である。これらの温泉地では特に自噴量が当初の2割以下に極端に減っている。動力揚湯量も2割程度減っており、源泉数も6割に減っている。これらのデータから、減少の見られた温泉地では自噴量が減り、湯量を維持しようと動力に切り替えたがそれでも減少は続き、営業できずに源泉を放棄している傾向にあると推測できる。この減少の原因は、他に可能性のある原因はないことから、温泉相互の影響に他ならない。激増した2温泉地のうち湯の花沢は休止していたものを噴出させたケースであり、二の平は源泉数が増えている。蛸川、芦ノ湖は新設の温泉地である。このように、箱根全体が減少傾向にある中で、新たな温泉採取の可能性もあるわけで、一律の規制はなじまないことを示している。

3.2 筋湯温泉の事例

大分県筋湯温泉は古くからある温泉で自噴泉地帯であった。南に約1km離れたところには我が国で最大規模の八丁原地熱発電所（出力112,000kW）がある。筋湯温泉は地熱発電の影響を受けたとして非常にしばしば引用されている。その報告は、中沢（1997）によりまとめられており、1981

表 1 箱根温泉における 30 年間の温泉変動.

| | 昭和 56 年度 | | | 平成 22 年度 | | | 増減 |
|-------|----------|-------------|--------|----------|-------------|--------|------|
| | 源泉数 | 湧出量 (L/min) | | 源泉数 | 湧出量 (L/min) | | |
| | | 自噴 | 動力 | | 自噴 | 動力 | |
| 湯本 | 72 | 231 | 4,520 | 77 | 147 | 4,704 | 増減ナシ |
| 塔乃沢 | 12 | | 929 | 10 | | 727 | 激減 |
| 大平台 | 7 | | 502 | 9 | | 499 | 増減ナシ |
| 堂ヶ島 | 7 | 97 | 362 | 7 | 59 | 259 | 激減 |
| 宮ノ下 | 27 | 392 | 1,683 | 21 | 30 | 1,321 | 激減 |
| 底倉 | 47 | 663 | 182 | 35 | 337 | 176 | 激減 |
| 小涌谷 | 54 | 1,878 | 1,866 | 22 | | 1,446 | 激減 |
| 二ノ平 | 14 | | 889 | 34 | 1,026 | 1,361 | 激増 |
| 木賀 | 17 | 267 | 531 | 14 | 304 | 348 | 微減 |
| 強羅 | 73 | 756 | 2,687 | 32 | 871 | 1,724 | 激減 |
| 宮城野 | 5 | | 327 | 4 | | 282 | 激減 |
| 千石原 | 18 | 3,670 | 192 | 8 | | 512 | 微減 |
| 大涌谷 | ? | ? | ? | 42 | 2,698 | | ? |
| 姥子・湖尻 | 11 | 1,556 | 592 | 14 | 318 | 888 | 激減 |
| 蛸川 | — | — | — | 5 | | 143 | 新設 |
| 芦ノ湖 | — | — | — | 1 | | 72 | 新設 |
| 湯ノ花沢 | 6 | 90 | | 4 | 556 | | 激増 |
| 芦乃湯 | 11 | 1,491 | 445 | 11 | 117 | 370 | 激減 |
| 総数 | 381 | 11,091 | 15,700 | 309 | 3,659 | 14,835 | 激減 |

昭和 56 年度自噴数 136, 動力数 245, 平成 22 年度, 自噴数 75, 動力数 234, 平成 22 年の総数には大涌谷はカウントしていない.

年まで 3 次にもわたり現地を調査し, すべての源泉に湧出量減少または泉温低下という異常が現れているとし, その増減数を表にまとめている. 一方, 大野 (1989) は, 筋湯温泉地帯を調査研究した結果を報告している. それによると, 1976 年から 1988 年まで源泉数, 湧出量, 泉温を調べた結果として, 一部はデータを引用しながら, この数十年さほど変動はなかったとしている.

著者は, 可能なかぎり筋湯温泉と地熱発電所の時系列データを収集し整理した. 温泉データを処理して, その変動の有無を的確に把握するには注意しなければならない点が多い. そこで, ここでは, 今回の整理に当たって直面したことを中心に, データ整理の注意点を表 2 に挙げておくことにする.

一方, 地熱発電については, 分離した熱水は地下に還元しているので, 発電に用い大気中に放出される蒸気量と温泉の湧出量を比較するのが妥当である. ところで, 毎年の発電量のデータは運開以来整っているが, 蒸気量のデータは完備していない. そこで, ここでは, その発電所の最近の発電量と蒸気流量を一定として各年の蒸気量とした. 厳密ではないが, 温泉湧出量との比較には十分使えるものである.

以上のデータを基に, 八丁原発電所の蒸気量と筋湯温泉の総湧出量がどう変化してきたかを図 5 に示した. 八丁原発電所は運開から徐々に増出力し 1981 年に 55,000 kW になる様子が分かり, 次の立ち上がりは 1990 年の 2 号機運開への倍増と続く. その前後の時期はそれぞれ安定ではなく, 出力は相当上下している. 注目すべきは, 八丁原発電所は立ち上がり期に筋湯温泉の総湧出量の数

表 2 温泉データを処理するに当たって注意すべき点.

- データは年当たりの源泉数（できれば自噴と動力の別、もし自然湧出があればそれも）と、それぞれの湧出量が適当である。
 - もっと細かいタイムスパンのデータもあり得るが、実際に収集できるのは年当たりのデータが普通であり、影響による変動は長期にゆっくり出現するのを確認する作業になることから、年ごとのデータを比較するのが適当である。
- 温泉の変動は個々の源泉ではなく、温泉帯水層単位での変動を見るのが良い。温泉帯水層の認定が難しい場合は温泉地を温泉帯水層に準ずるものとして考えるしかない。
 - 各源泉は同じ温泉帯水層から温泉水を取り合っている関係にあるため、個々の源泉では全体を代表しない。また、個々の源泉ではそれぞれを内因とする変化がある。そのため、温泉帯水層全体の変動見るのが最も適当である。温泉帯水層がはっきりしないときは、温泉地を温泉帯水層と考えるしかない場合もあり、筋湯温泉でも温泉地全体を温泉帯水層として扱った。
- データには不適切な統計の取り方や誤りが含まれているので注意を要する。
 - 同じ温泉帯水層にある源泉のデータが欠けている場合は、揃っている温泉帯水層とは同等には取り扱えない。比較に用いる源泉数や総湧出量は当然、すべての源泉のデータを必要とするからである。
 - 複数の温泉帯水層（温泉地）の合算したデータしか無い場合は、対象とする温泉帯水層の分を選び分ける必要がある。それができなければ比較データとしては取り扱えない。
 - 地熱井を温泉の一部として扱っている例があるが、この二つは本検討では区別して取り扱わないといけない。
 - 数字の記入（書き写し）の誤りや、桁の間違い、小数点の位置のずれに注意する。
 - 誤りや不足データについて、前後関係などから正しい値を推測できる場合は、それをデータ化して扱う。

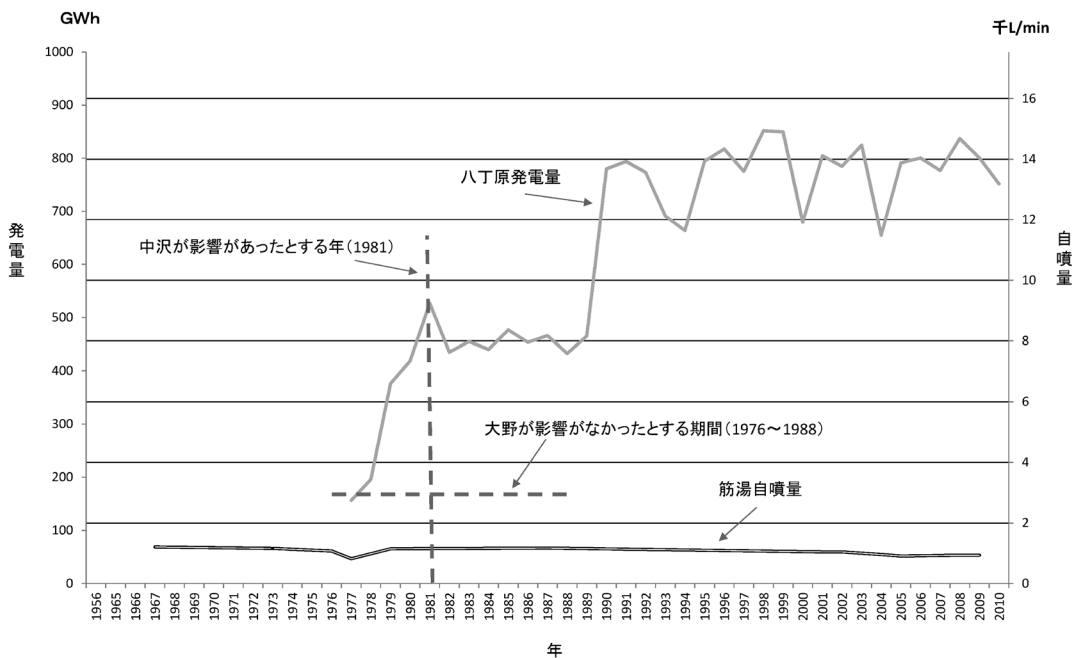


図 5 八丁原発電所の発電量と筋湯温泉の自噴量の変化.

倍、2号機運開時には十倍近くの蒸気量の増生産が見られるのに対し、これに関係するような筋湯温泉の変動はまったく見られないことである。中沢 (1997) が調査したとする 1981 年は、八丁原発電所の発電量の増加期に当たったが、今回収集したデータからは中沢が確認したとする温泉の変動は見られない。

中沢は増減の様子を表にしているが、データを示していないので、いつの時期の何を基に増減を述べているかは分からない。中沢の表を正当化して見ると、筋湯温泉では個別温泉の内因による一時的変動の記憶が調査対象の所有者にはあり、それを聴取して書き留めたことはあったかもしれない。いずれにしるこの種の考察をする場合には、データを時間スケールとともに記載し、データの取得をできるだけ長い期間行うことが非常に重要であり、中沢の報告はその点が不十分である。これに対し大野 (1989) は、主に昭和 51 年度 (1976) と 63 年度 (1988) の大分県の資料を比較し、源泉数に大きな変化が無いとしており、また、湧出量にその間の年も含めて大きな変化がないとしている。さらに、昭和 45 年 (1970) から平成元年 (1989) の泉温は、55~60℃の一定範囲にあるとしている。細かな観測データは示されていないが、全体のデータを実際に俯瞰した評価としての価値は大きく、今回収集したデータも大野の見解が正しいことを裏付けている。

ところで、図 5 を見ると少し気がかりなことがある。筋湯温泉の自噴量がデータをとった約 50 年の間に少し下がり気味に見えることである。図 6 は図 5 の筋湯温泉のデータの縦軸を拡大したものであり、源泉数はほとんど変わらないのに、自噴量が 50 年間に少しずつ約 1 割減少していることが分かる。これは、地熱発電の影響ではないかとの疑念が生じる。しかし、これは次の事実により否定される。図 6 には自噴源泉の数と自噴量に加えて、動力源泉の数と動力揚湯量を示している。筋湯温泉では 1973 年に動力揚湯泉の開発が始まり、特に 2000 年以降その数は急増し、動力揚湯量は大きく増えている。確かに自噴量は減少しているが、動力揚湯量との合計湧出量は増えているのである。箱根温泉の変動で述べたように、温泉地内では個別源泉の温泉採取が相互に影響するのが最も大きい変動要因である。筋湯温泉も、源泉数が増加し、その内訳は動力泉の割合が大きくなり、

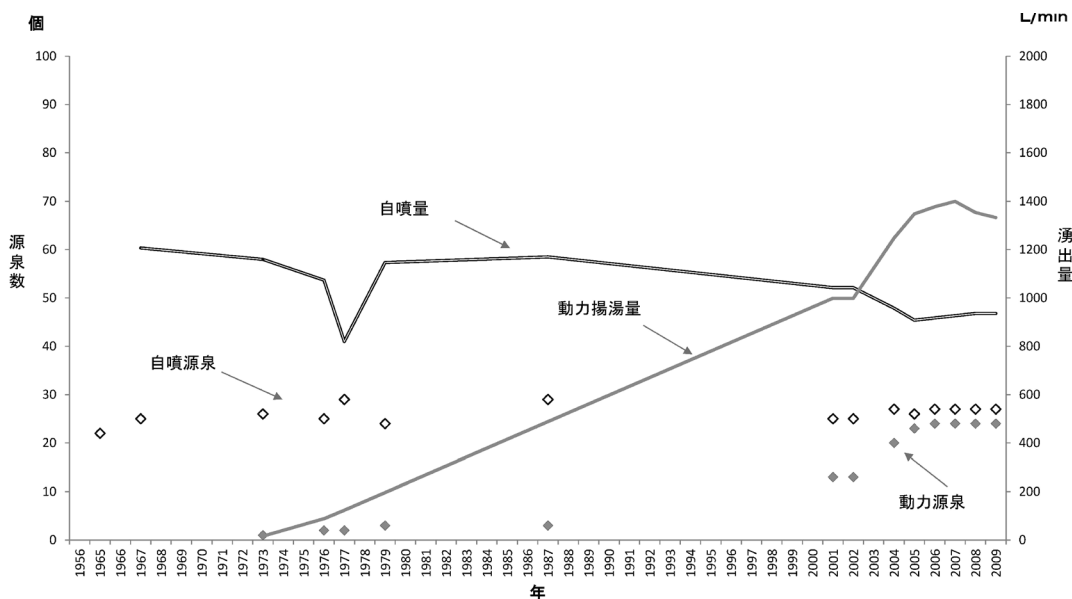


図 6 筋湯温泉の源泉数と湧出量の変化。

自噴量は減少して動力揚湯量が増え、総湧出量が大きくなっている点では箱根温泉と同じで、その変動はすべて温泉相互の採取関係により生じていると説明するのが合理的である。

箱根温泉では30年を隔てた昭和56年度と平成22年度の単年度のデータを比較し、温泉の変動があったことを議論したが、温泉の年年変動に基づく影響を把握し即座に対策を講じるには不十分である。もっと体系的に時系列データを収集するモニタリングと、その都度の影響評価が必要である。

4. 地熱発電による温泉への影響の定量的見積もり

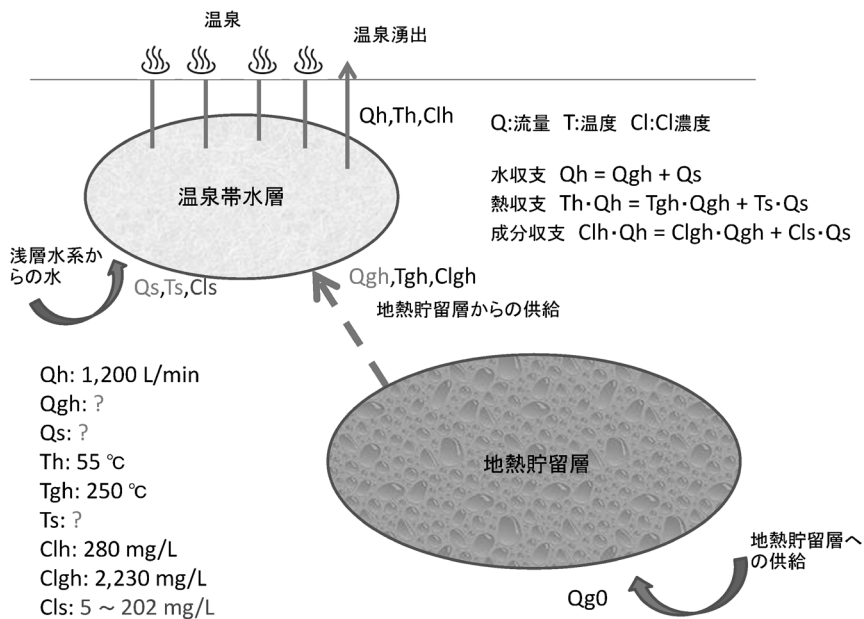
最も温泉への影響の可能性が高い熱水滲出型を例に、発電によりどれくらいの影響があり得るかを定量化することを、図3のモデルにパラメータを与えた図7に基づいて数式により考えてみよう。ある温泉水系は、地熱貯留層熱水と浅層地下水の混合により生じているとする。発電開始前のある温泉水系の総湧出量を Q_h 、温泉水系に混入する地熱貯留層から混入する熱水流量を Q_{gh} 、混入する浅層地下水流量を Q_s とする。また、それぞれの水温を T_h 、 T_{gh} 、 T_s とする。さらに、それぞれの水系を区別する代表的な保存性の成分として塩化物イオン(Cl)を採り上げ、それぞれの濃度を Cl_h 、 Cl_{gh} 、 Cl_s とする。水、熱、成分が保存され、他との出入りがないとすると、これらの間には次のように水収支式、熱収支式、成分収支式が成り立つ。

$$\text{水収支式 } Q_h = Q_{gh} + Q_s \quad (1)$$

$$\text{熱収支式 } T_h \cdot Q_h = T_{gh} \cdot Q_{gh} + T_s \cdot Q_s \quad (2)$$

$$\text{成分収支式 } Cl_h \cdot Q_h = Cl_{gh} \cdot Q_{gh} + Cl_s \cdot Q_s \quad (3)$$

(1), (2), (3)式には全部で9個のパラメータがあるが、観測データや合理的推定により6個を既知



Q_{gh}, Q_s, T_s を求める。さらに Q_{gh} が1割減少するとどうなるかを求める。

図7 熱水滲出型の地熱—温泉系における水・熱・成分の収支解析。

とすると、推定の不確かさは伴うが比較的容易に残りの値を求めることができる。例えば、 Q_h , T_h , T_{gh} , Cl_h , Cl_{gh} , Cl_s が既知であると Q_{gh} , Q_s , T_s を求めることができる。

この数式を地熱貯留層と温泉帯水層が一部つながっている例（熱水滲出型）に当てはめた計算を行った。用いた数値は次のとおりであり、 Q_{gh} , Q_s , T_s を未知数とした。用いた数値のうち、浅層地下水の Cl 濃度は不明であるので、ここでは一般的な浅層地下水の Cl 濃度として 5 mg/L とした。

Q_h : $1,200\text{ L/min}$ (発電開始前の温泉の総湧出量)

T_h : 55°C (発電開始前の温泉の平均泉温)

T_{gh} : 250°C (地熱貯留層の温度)

Cl_h : 280 mg/L (発電開始前の温泉の平均 Cl 濃度)

Cl_{gh} : $2,230\text{ mg/L}$ (地熱貯留層から混入する熱水の Cl 濃度)

Cl_s : 5 mg/L (混入する浅層地下水の Cl 濃度)

これを上に掲げた(1), (2), (3)式に当てはめると次の式が成立する。

$$1,200 = Q_{gh} + Q_s \quad (4)$$

$$55 \cdot 1,200 = 250 \cdot Q_{gh} + T_s \cdot Q_s \quad (5)$$

$$280 \cdot 1,200 = 2,200 \cdot Q_{gh} + 5 \cdot Q_s \quad (6)$$

上式を解いて得られた解は、(A1) Q_{gh} : 150.4 , Q_s : $1,049.6$, T_s : 27.1 である。すなわち、この温泉は地熱貯留層からの 150.4 L/min の熱水と、 $1,049.6\text{ L/min}$, 27.1°C の浅層地下水が混合してできたものということになる。この浅層地下水は温泉地特有の温度の高い地下水であると考えられる。

次に地熱発電により地熱貯留層の圧力が低下し安定しているとき、どのような影響が温泉に現れるかを、同様の式を用いて考察する。先に述べた圧力安定化率 αP_g が、温泉水系に混入する地熱貯留層熱水流量と一次関係にあるとし、その他水系の混入の様子が変わらなるとすると、発電開始後の温泉水系の総湧出量 Q_{hi} , 水温 T_{hi} , 塩化物イオン濃度 Cl_{hi} は次の収支式で表される。

$$\text{水収支式 } Q_{hi} = \alpha P_g \cdot Q_{gh} + Q_s \quad (7)$$

$$\text{熱収支式 } T_{hi} \cdot Q_{hi} = T_{gh} \cdot \alpha P_g \cdot Q_{gh} + T_s \cdot Q_s \quad (8)$$

$$\text{成分収支式 } Cl_{hi} \cdot Q_{hi} = Cl_{gh} \cdot \alpha P_g \cdot Q_{gh} + Cl_s \cdot Q_s \quad (9)$$

(7), (8), (9)式には全部で 10 個のパラメータがあるが、 αP_g , Q_{gh} , Q_s , T_{gh} , T_s , Cl_{gh} , Cl_s が既知であると、 Q_{hi} , T_{hi} , Cl_{hi} を求めることができる。すなわち、発電後の温泉水系の総湧出量、水温、塩化物イオン濃度が求まり、影響の程度が予測できることになる。計算例では、仮に圧力安定化率が 0.9 (田籠ら, 1996) によれば、八丁原地熱地域において、観測井の圧力が当初約 32 気圧であったものが、圧力変動が安定してきた 5 年後に約 29 気圧になっている) とし、先に求めた発電開始の Q_{gh} , Q_s , T_{gh} , T_s , Cl_{gh} , Cl_s が変わらないとしたときどうなるかを計算した。

その結果によると、(B1) Q_{hi} : $1,184.4$, T_{hi} : 52.6 , Cl_{hi} : 256.0 である。すなわち発電開始時のデータと比べて、温泉への影響として心配される温泉の総湧出量は $1,200 \rightarrow 1,184.4\text{ L/min}$ と 15.6 L/min (1.3%) の減少、また泉温は $55 \rightarrow 52.6^\circ\text{C}$ と 2.4°C の低下、 Cl 濃度は $280\text{ mg/L} \rightarrow 256.0\text{ mg/L}$ と 24.0 mg/L (8.6%) の低下となる。このケースでは、混入する浅層地下水の Cl 濃度が分からないため、一般的な浅層地下水の Cl 濃度 5 mg/L を採用したが、これがその地域の温泉的な浅層地下水の Cl 濃度が分かっており、それが適用できれば、この湧出量の減少、泉温の低下、 Cl 濃度の低下はもっと小さくなる。

試みに浅層地下水の Cl 濃度を当時のこの温泉地の源泉の最低濃度を 202 mg/L (志賀史光, 1967) とし、他の数値は変えずに(1), (2), (3)式により計算すると、(A2) Q_{gh} : 46.9 , Q_s : $1,153.1$, T_s : 47.0 と発電開始前の状態が変わる。このとき上記の例と同じように圧力変化率を 0.9 とし、(7), (8), (9)式により計算すると、(B1) Q_{hi} : $1,195.3$, T_{hi} : 54.2 , Cl_{hi} : 272.6 が得られる。すなわち、総湧

出量は 1,200→1,195.3L/min と 4.7L/min (0.4%) の減少, また泉温は 55→54.2℃ と 0.8℃ の低下, Cl 濃度は 280 mg/L→272.6 mg/L と 7.4 mg/L (2.6%) の低下となる. 湧出量の減少, 泉温の低下, Cl 濃度の低下は, (B1) に比べかなり小さい. 以上の計算結果は表 3 と表 4 にまとめている.

実際の状況は, この (A1), (B1) と (A2), (B2) の二つのケースの間にあると思われる. このように計算には推定に伴う不確実性があるため, 実際には発電の前から温泉のモニタリングを開始し, 発電開始後も温泉のモニタリングを続け, 地熱流体のモニタリングも行って確認していかねばならない. その結果を用いたチューニングにより, もっと実態の値に近づけていくことが可能である. ここに述べた方法により発電に取り掛かる前に影響の有無とその程度を予測しておくことは, 温泉への影響を未然に防ぎ, 適正に発電を管理する上での目安となるため, 非常に重要と考えられる.

また, 温泉帯水層に影響する複数の系が存在すると, その影響も考慮しなければならず, その見積もりも必要となる. ここでは, 地熱貯留層と温泉帯水層の関係を 1:1 でとらえ, すべての影響

表 3 地熱貯留層と温泉帯水層が一部つながっている (熱水滲出型) として地熱貯留層の圧力変動を仮定した温泉影響の予測計算結果 I (浅層地下水の Cl 濃度を一般地下水の Cl 濃度 5 mg/L とした場合).

| 検討項目 | 発電開始前 | 発電開始後 |
|---------------|---------------|---------------|
| 温泉の湧出量 | 1,200 L/min | 1,184.4 L/min |
| 温泉の平均温度 | 55℃ | 52.6℃ |
| 温泉の平均 Cl 濃度 | 280 mg/L | 256 mg/L |
| 地熱貯留層からの熱水混入量 | 150.4 L/min | 135.4 L/min |
| 地熱貯留層の温度 | 250℃ | 250℃ |
| 地熱貯留層の Cl 濃度 | 2,200 mg/L | 2,200 mg/L |
| 浅層地下水の混入量 | 1,049.6 L/min | 1,049.6 L/min |
| 浅層地下水の温度 | 27.1℃ | 27.1℃ |
| 浅層地下水の Cl 濃度 | 5 mg/L | 5 mg/L |

発電開始後, 地熱貯留層の圧力が 9 割に低下し, それに伴い地熱貯留層からの熱水混入量が 9 割になるとした.

表 4 地熱貯留層と温泉帯水層が一部つながっている (熱水滲出型) として地熱貯留層の圧力変動を仮定した温泉影響の予測計算結果 II (浅層地下水の Cl 濃度を温泉地の最低 Cl 濃度 202 mg/L とした場合).

| 検討項目 | 発電開始前 | 発電開始後 |
|---------------|---------------|---------------|
| 温泉の湧出量 | 1,200 L/min | 1,105.3 L/min |
| 温泉の平均温度 | 55℃ | 54.2℃ |
| 温泉の平均 Cl 濃度 | 280 mg/L | 272.8 mg/L |
| 地熱貯留層からの熱水混入量 | 46.9 L/min | 42.2 L/min |
| 地熱貯留層の温度 | 250℃ | 250℃ |
| 地熱貯留層の Cl 濃度 | 2,200 mg/L | 2,200 mg/L |
| 浅層地下水の混入量 | 1,153.1 L/min | 1,153.1 L/min |
| 浅層地下水の温度 | 47.0℃ | 47.0℃ |
| 浅層地下水の Cl 濃度 | 202 mg/L | 202 mg/L |

発電開始後, 地熱貯留層の圧力が 9 割に低下し, それに伴い地熱貯留層からの熱水混入量が 9 割になるとした.

を地熱貯留層の圧力低下が原因としたが、他の系による影響が含まれている可能性がある。ここで見積もった影響の程度は地熱発電に伴う最大の影響可能性に相当するものである。

5. 温泉に影響を与える因子

地熱発電が近くに計画され、あるいは存在する温泉地では、温泉へ影響を与える要因として地熱発電だけを考えがちであるが、それはしばしば思い込みや誤った判断に結び付きやすいので注意しなければならない。

温泉の開発は一般に図 8 に示すように、自然湧出期、掘削導入期、動力導入期、バランス・欠乏期の過程をたどる。

- 1) 自然湧出期は自然湧出泉に限られ、湧出量は少量だが安定している。
- 2) 掘削導入期には、自然湧出だけでは満足しなくなり掘削を行うようになる。自然湧出と掘削自噴が共存し、湧出量は飛躍的に増えるが、掘削自噴泉の増加とともに、自然湧出は弱まり場合によっては消滅する。
- 3) 動力導入期には、掘削の増加とともに水位が下がって自噴しなくなり動力揚湯への切り替えが始まる。掘削も最初から動力揚湯を覚悟した掘削が行われる。総湧出量は更に増えるが動力揚湯の増加とともに自噴は消滅する。
- 4) 動力揚湯の増加に危機を感じて規制が行われると、それ以上の水位の低下が止まり自噴と動力揚湯が共存するバランス期となり、総湧出量の変動も無くなる。しかし、規制が行われないと、動力揚湯井の掘削や動力のパワーアップが続き、水位が下がって自噴泉は消滅するだけでなく、動力をアップしても求める温泉量が足りない欠乏期に陥る。

箱根温泉の 30 年間に変化の見られなかった例はバランス期にあるが、激減した温泉地は欠乏期に向かいつつあるものもある。筋湯温泉も長らく自然湧出～掘削自噴の状態にあったが、現在は動力も導入され、掘削自噴量にかげりが見えつつある。これらはすべて温泉相互の干渉によるものである。

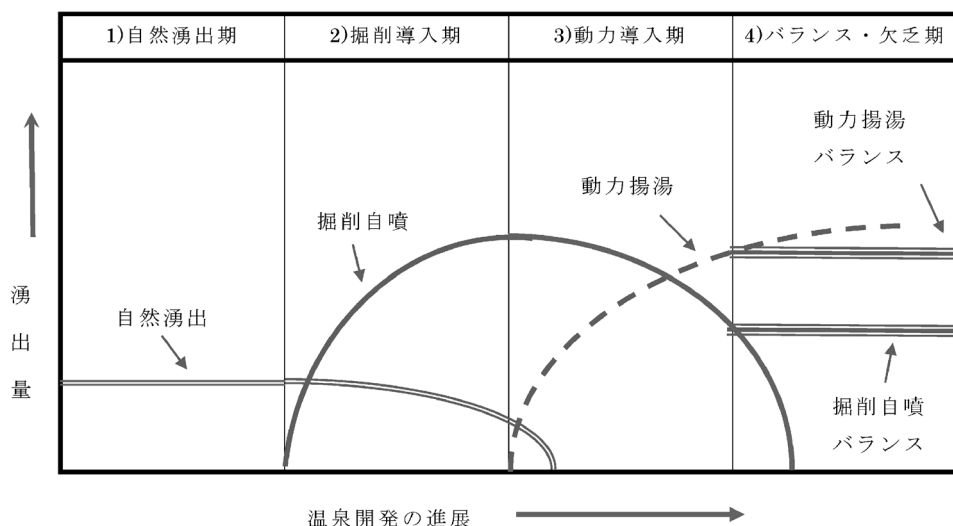


図 8 温泉開発の進展に伴う湧出状況の変化のイメージ。

表 5 温泉に影響を与える様々な因子と影響の特徴.

| 影響要因による分類 | 影響因子 | 影響の特徴 |
|-----------|---------------------------------|--|
| 単独内因的影響 | 坑井トラブル（目詰まり，スケール付着，坑井劣化），揚湯装置損傷 | ・周辺の温泉と関連しない独立の変動 ・突発的で変動幅が大きい |
| 全体内因的影響 | 全体的な採湯傾向（過剰揚湯） | ・温泉地単位と同じ成因の温泉が一斉に変動する ・変動は長期的で緩やか |
| 局部外因的影響 | 土砂崩れ，土木工事，河川・湖沼の水位変化，潮汐変化 | ・全体の温泉とは関連しない特定地域にある同じ成因の温泉群の変動 ・温泉群はそろって同じ変動をする ・変動前に原因となるイベントがある |
| 全体外因的影響 | 降雨・積雪の変化，地震，火山活動，地熱発電 | ・温泉地単位と同じ成因の温泉が一斉に変動する ・変動は長期的で緩やか ・変動前に原因となるイベントがある |

温泉相互の干渉を含め温泉に影響を与える因子は非常に多く，表5にはそれをまとめた。温泉への影響因子は大別して，温泉自身に起因する内因と，温泉以外に起因する外因に分けられる。内因は，変動の生じる源泉自身が原因である単独内因と，温泉水系全体にわたる全体内因がある。単独内因の影響因子は，坑井トラブル（目詰まり，スケール付着，坑井劣化・損傷）と揚湯設備の損傷などであり，周辺の温泉と関連しない独立の変動で，変動幅が大きいのが特徴である。代表的な全体内因は過剰揚湯などの全体的な採湯傾向であり，同じ温泉水系が一斉に変動し，変動は長周期で緩やかなのが特徴であり，箱根温泉の例で示したように温泉変動の主な原因である。外因には，原温泉水系の一部に及ぶ局部外因と全体に及ぶ局部外因があり，いずれも変動前には原因となるイベントがあり，変動は長期的で非常に緩やかである。局部外因は土砂崩れ，土木工事，河川・湖沼の水位変化，潮汐変化などがあり，原因近くにある一部温泉水系にそろって変動が起こる。全体外因は降雨・積雪の変化，地震，火山活動，地熱発電などが原因である。

温泉影響は一般に，表の上位にあるものほど頻発し変動の程度が大きいことから，影響原因の究明は上位因子から先に行い対策するのが効果的である。因子のうち人為的影響は適切な対策により回復可能であるが，自然的影響は回復できないものもある。

6. ま と め

地熱発電による温泉への影響は，今でも関心の高い基本的問題である。影響が起こることはあるが，我が国では明確な影響は発生しておらず，地熱採取量をコントロールすることによって，影響をなくすことができ，逆にコントロールがうまくいかないと影響が起こることがある，というのがこの問題の結論である。

この問題には，適切なモデリングとモニタリングにより，影響の有無とその原因を推定することで対応できる。その進め方は次のようにまとめられる。

1) 個別温泉の変動は影響を見誤る危険性があり，温泉帯水層単位で考えるのが良く，地熱井も地熱貯留層単位で考えるのが良い。そのための最も適切なデータは，温泉は温泉帯水層の圧力（水位）と総湧出量，地熱は地熱貯留層の圧力（水位）と総蒸気量あるいは発電量であるが，自噴温泉では自噴の総湧出量が代わりとなる。

2) まず、温泉相互の影響の有無を把握し、それで説明できない有意の変動があるときには地熱発電を含む他の影響因子を考えると良い。

3) 地熱発電が温泉に影響するのは、両者につながりがあり、蒸気の採取により地熱貯留層の圧力が低下する場合である。どのようなつながり方を把握し、予想される影響の出現状況と地熱貯留層の変動を比較すると良い。両者の水系としてのつながりの程度は、塩化物イオン濃度の類似性が尺度となる。地熱貯留層の圧力が急に低下したり、低下傾向が連続したりする場合に、温泉に変動が出ないかを特に注意しなければならない。

謝 辞

本稿の構想と仕上げに当たっては、地熱情報研究所江原幸雄代表（九州大学名誉教授）のアドバイスが非常に有益であった。また、2名の査読者には、原稿の改良について適切な助言をいただいた。ここに記して感謝の意を捧げることにする。

引用文献

- 平岡千明 (1973) : 昭和 44 年度全国温泉利用状況一覧 (その 4). 温泉工学会誌, 9, 37-58.
- 神奈川県 (私信) 温泉利用状況資料.
- 神奈川県温泉地学研究所 (1983) : 神奈川県温泉誌. 神奈川県温泉地学研究所報告, Vol. 14, No. 4, 216 p.
- 火力原子力発電技術協会 (2012) : 地熱発電の現状と動向 2010・2011 年. 99 p., 東京.
- 村井秀夫 (1966) : わが国温泉地の実態 (その 2). 温泉工学会誌, 2, 105-122.
- 中沢晃三 (1997) : 社会問題としての地熱発電. 温泉第 65 巻臨時増刊号 (通巻 713 号) 特集/地熱開発と温泉, 4-10.
- 野田徹郎 (2011) : 地熱発電と温泉との共生は可能か. 温泉研究, N0. 8, 22-33.
- 大分県ホームページ (2013) 環境白書のページ <http://www.pref.oita.jp/site/hakusyo/> 大分県 (私信) 温泉利用状況資料.
- 大野保治 (1989) : 九重温泉群の現状と問題点 (I) — 筋湯温泉の現状を中心に—. 大分県温泉調査研究会報告, No. 40, 45-57.
- 志賀史光 (1967) : くじゅう火山の温泉群 (1) 化学組成より見た温泉の類型と特徴. 大分県温泉調査研究会報告, No. 18, 37-43.
- 田籠功一・江原幸雄・長野洋士・大石公平 (1996) : 八丁原地熱地帯における重力モニタリング結果からの地熱貯留層の挙動に関する一考察. 日本地熱学会誌, 18, 91-105.
- 塚本忠之 (1979) : 昭和 53 年度全国温泉利用状況一覧. 温泉工学会誌, 14, 24-79.
- 塚本忠之 (1982) : 昭和 55 年度全国温泉利用状況一覧. 温泉工学会誌, 16, 71-135.
- 八木 宏 (1976) : 昭和 49 年度全国温泉利用状況一覧. 温泉工学会誌, 11, 87-162.