

温泉のモニタリングとその活用について

あさ ぬま ひろし
浅沼 宏

国立研究開発法人産業技術総合研究所
福島再生可能エネルギー研究所
再生可能エネルギー研究センター 副研究センター長

1. はじめに

温泉は、日本古来の地熱利用形態の代表格として、広く国民に親まれています。温泉が有する疲労回復効果や治療効果に加え、温泉地が持つ「癒し効果」などがあることから、温泉関連産業は国内観光産業のなかでも大きな市場規模を有しており、温泉地を有する地方の経済や雇用に寄与しています。

また、近年、深刻化しつつある地球温暖化の影響を受け、「エネルギー源の脱炭素化」へ向けた動きが様々な分野で起こっていますが、温泉は利用時にほとんど二酸化炭素を排出しない、優れた脱炭素エネルギー源です。未開発の地域を含めると、我が国の利用可能な温泉全体として約8GWのエネルギー（電力相当）を生産可能と見積もられています¹⁾。これは東京都の一般家庭が消費するエネルギーすべてを賄うことが可能な量です。

このように、温泉は経済、環境、そして健康の面で優れた特長を有していますが、温泉資源は無尽蔵に存在している訳ではなく、自然界での温泉水補給能力（涵養能力）を超える過剰な採取を行った場合、温泉水

の現象や枯渇が生じ得ることが知られています²⁾。また、温泉の成分自体も隣接する火山の活動や降水等の様々な要因により、短期的、長期的に変動することが知られています^{3) 4)}。すなわち、温泉の持続的な利用や泉質変化の把握のためには温泉のモニタリングが重要な役割を果たすことになります。

本稿では、筆者らが開発してきた「温泉モニタリング装置」で取得したデータをお見せしながら、温泉モニタリングの重要性、活用法等について論じていきたいと思います。

2. 温泉モニタリングの役割

先に述べたように、温泉の泉質や湯量は様々な要因により変動するのが一般的なので、温泉モニタリングにより、以下のようなメリットがもたらされます。

（1）泉質の保証

これまでの調査等により、温泉の湯量や泉質が数時間から数年という多様な時間スケールで変動している事例が多いことが知られています。特に泉質や効能をセールス

ポイントにしている温泉地にとっては、温泉の変動を的確にモニタリングし、それをお客様に開示することによって、より安心して温泉を利用していただくことにつながります。

(2) 温泉資源の適正利用

源泉から汲み上げた温泉水を複数の温泉利用施設で供給している場合、過剰採取を避けた上で各施設へ十分な温泉水を供給することが重要です。温泉水の生産、給湯量をモニタリングすることにより限られた温泉資源の適正利用につながります。また、多数の温泉井が隣接して掘削されているような地域では、ある源泉からの生産が他の源泉に影響を与える（干渉）ケースがありますが、生産量のモニタリングにより干渉を起こさない範囲での適正な生産が実現します。

(3) 温泉資源の持続的利用

様々な分析により、温泉水の大部分は雨水や河川・湖沼水が地下に浸透したものであることが明らかになっています。つまり、源泉での生産量が地下への供給水量を上回ると、泉質の変化や減衰が生じ得ることになります。

さらに、配管内でスケールが発生すると生産量も減衰します。源泉の湯量や温度を連続的にモニタリングし、データの解析を行うと、このような変化を事前、あるいは発生直後に検出可能になり、早い時期に適正な対策を講じることが可能になります。

(4) 温泉と地熱発電の共生

運転中の地熱発電所あるいは開発予定地域の近傍の温泉所有者のなかには、地熱発電が温泉に与える影響を危惧なされる方が少なからず存在します。温泉の変化を連続的にモニタリングし、地熱発電所での蒸気生産データ等と比較することにより、地熱

発電所が温泉に影響を与えた場合に、それを科学的に合理的な形で検知することが可能になります。

3. 温泉モニタリングに望まれる事項

これまで述べてきたように、温泉モニタリングは様々な意味で温泉資源の適正かつ持続的な利用に結び付くものですが、このために必要なデータを取得するためには、モニタリングの方法や使用する機器について十分検討する必要があります。

筆者は温泉の性質や温泉に影響を与える要素等を鑑み、以下の条件を満たすようなモニタリングを行うことが重要と考えています。

- ①源泉所有者の方が購入可能な価格帯であり、さらに大規模な設置工事を要さないモニタリングシステムを使用すること。
- ②現在、コンサル会社等が実施している温泉水サンプリング・分析と同等の信頼性を有するデータを取得可能なモニタリングシステムを使用すること。
- ③温泉地域の多湿、腐食性温泉水・ガス環境下での長期使用が可能なシステムを用いること。
- ④温泉水の生産、利用形態に合わせてセンサの構成をフレキシブルに変更できること。
- ⑤温泉の基本的データ（温度、流量、圧力、電気伝導度）をデジタルデータとしてほぼ連続的に自動計測すること。
- ⑥インターネット等を介して、源泉所有者の方が簡単にデータのダウンロードやグラフ化を行えること。また、停電やネット接続状態が悪い際にデータの損失を起こさない機能を持ったシステムを用いること。
- ⑦温泉水の変動の原因を科学的に合理的な手法により推定できるソフトウェアを解析に使用すること。

4. 事例紹介

産総研では、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受け、横河電機(株)、地熱エンジニアリング(株)と共同で『簡易遠隔温泉モニタリング装置』(写真1)を開発しました。この装置は、温泉配管に取り付けて使用するもので、温泉水の温度、流量、圧力、電気伝導率を1秒間に1回計測し、LTEやWi-Fiを使用してインターネットへデータを送信する能力を持っています。また、温泉地で使用されている典型的な径の配管へ取り付けることが可能であるとともに、対候性、耐腐食性ガス性等を有しています。

この装置を使って、ある源泉地で取得したデータの例を図1に示します。この源泉地では10月21日から24日にかけて台風による大雨(総雨量237mm)が降りましたが、

その際の流量、泉温、電気伝導率の変化を示しています。図1からわかるように、泉温と電気伝導率は各時刻の降水量と逆のパ



写真1 筆者らが開発した温泉モニタリング装置

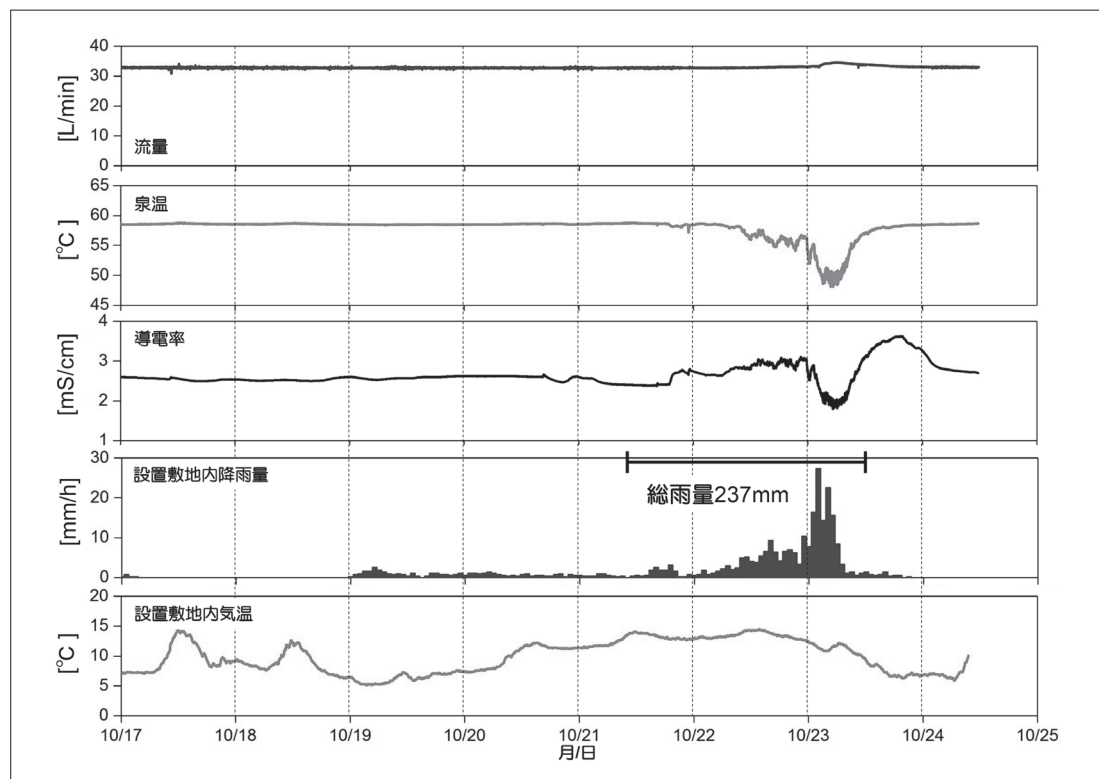


図1 観測したデータの例（降水に対応した変化）

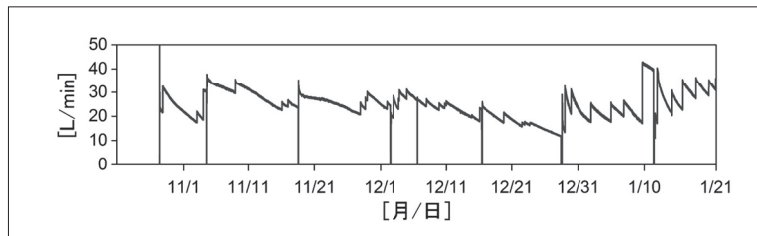


図2 観測したデータの例（バルブ操作に対応した変化）

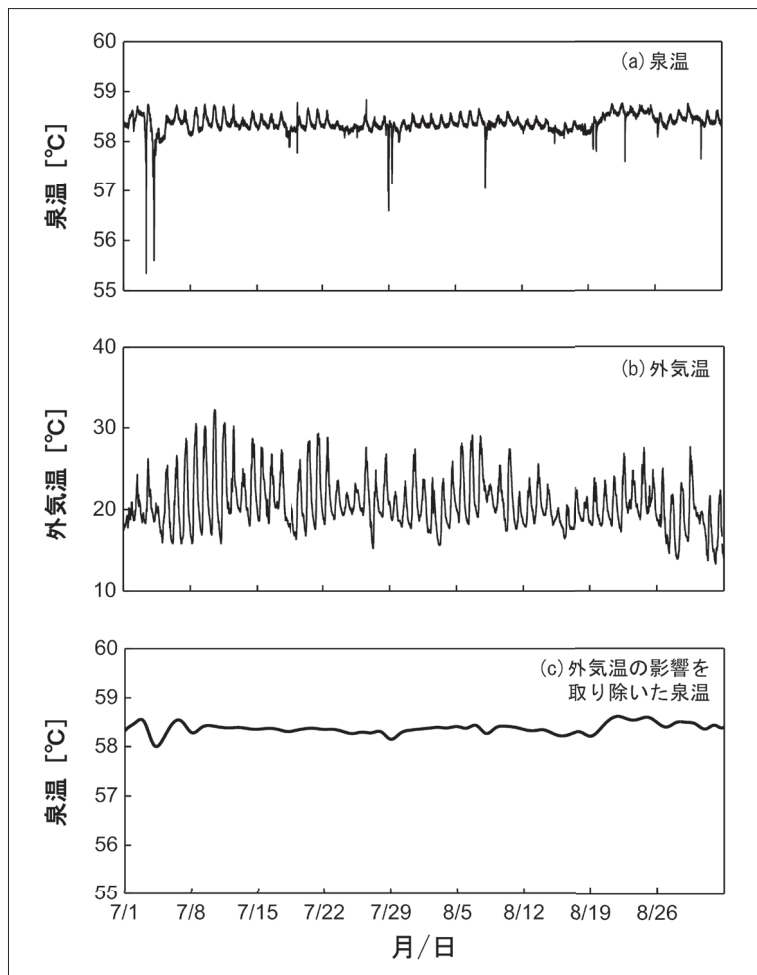


図3 AIによる泉温データの処理例

ターンで変化しています。また、電気伝導率については雨が止んだ後に一時的に大きな値を示し、その後、通常の状態に戻るような挙動を示しています。一方、流量は降雨開始直後にわずかに増大しているものの、その変化は泉温、電気伝導率に比して

極めて小さいものとなっています。

図2には、一つの源泉から複数の温泉施設へ給湯を行っている配管での流量の変化の例を示します。グラフには配管の各所に取り付けられたバルブの操作に対応する流量の急激な変化が多数表れています。また、

この温泉はスケールを発生しやすく、配管の詰まりが生じることが知られており、それに起因する流量の低下傾向、および12月30日等を実施したスケール清掃による流量の回復もグラフに表れています。

このように、本モニタリング装置を使用した取得したデータを見ると、温泉の流量、温度、電気伝導率には様々な時間スケールでの変動が表れており、また、変動は源泉の場所や温泉水の利用方法により異なっていることがわかります。このような温泉水の変動は年に数回の温泉水サンプリングでは検知することが困難であり、ほぼ連続的にデータを取得するモニタリングシステムがあって初めて知ることができるものです。

連続的に取得した温泉データから、変動の原因を知ることができれば、温泉に関する理解が深まるとともに、地下での温泉貯留層の変化や他の要因により引き起こされ

た変動を検知することも可能になります。私たちはAI（人工知能）の一種である、時系列分析と呼ばれる手法を用いて、温泉データの変動原因の推定と除去を目的とした研究開発を行ってきました。図3には、泉温と外気温の関係が見られる場合の解析結果の例を示します。モニタリングシステムで取得したデータには泉温の周期的変化（一日周期）が見られます。このデータに私たちが開発してきたソフトウェアを適用すると、泉温に含まれる「外気温の影響を受けたデータ」を取り出すことができます。さらに、このデータ成分を元のデータから引くと、「外気温の影響を受けていない泉温データ」を求めることができます。

5. 温泉モニタリングの展開

〈2. 温泉モニタリングの役割〉で述べたように、温泉モニタリングは、（1）泉

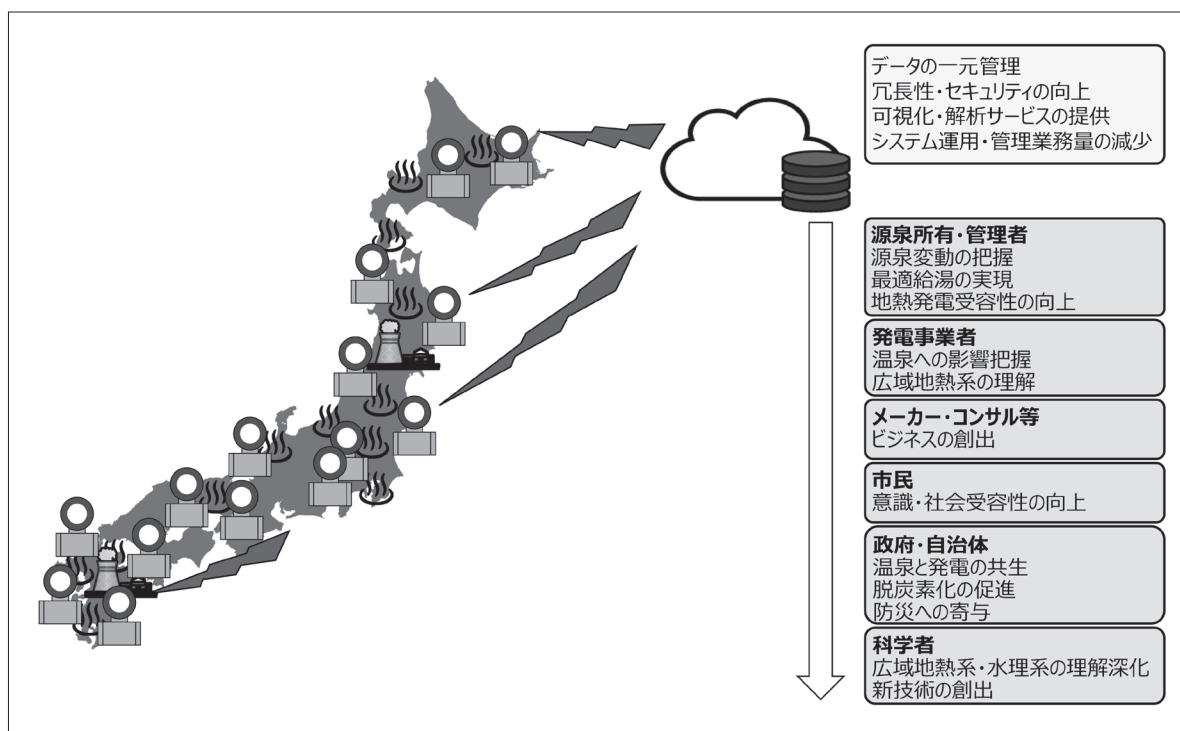


図4 温泉モニタリングの今後の姿

質の保証、(2) 温泉資源の適正利用、(3) 温泉資源の持続的利用、(4) 温泉と温泉発電や地熱発電との共生——を実現するうえで重要な役割を担っています。このなかでもカーボンニュートラルの実現へ向けて、温泉資源の適正かつ持続的な利用、および温泉と地熱発電の共生は最重要な課題と認識されています。環境省は2021年9月に『温泉資源の保護に関するガイドライン(地熱発電関係)』を見直した結果を公表しました。そのなかで温泉資源の保護を図りつつ、地熱開発の推進によるカーボンニュートラル社会の実現を同時達成する観点から「科学的データに基づく順応的管理」を求めており、今後、温泉モニタリングの重要性がより増していくものと認識しています。

図4には、筆者が思い描く温泉モニタリングの将来像を示します。国内の多くの源泉にインターネット接続機能を有した温泉モニタリング装置を設置し、それらで取得したデータをクラウドで一元管理・解析します。このシステムには多数の源泉データや解析結果が保存されますが、認証システム等を使ってデータ所有者が必要なデータにのみアクセス可能になるようにし、セキュリティを確保します。このようなシステムを実現することにより、データや解析結果の品質を確保したサービスの提供が可能になるとともに、源泉所有者の方の経済

的、人的負担を極力少なくした形でデータの提供を行えます。また、このようなシステムで取得したデータは源泉所有者のみならず、発電事業者、自治体、ひいては地球科学者が様々な目的のために使用し、最終的に「安全・安心な社会」実現のために役立つことを期待しています。

謝辞

本稿で述べてきた温泉モニタリングシステムは(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託事業を通じて開発したものです。NEDO新エネルギー部・熱利用グループの皆様、事業への参画者の皆様、および実証試験に御協力いただいた源泉所有者・関係者の皆様へ謝意を表します。

参考文献

- 1) 村岡洋文他：日本の熱水系資源量評価2008、日本地熱学会講演要旨集(2008)
- 2) 昭和52年度環境庁委託研究「温泉資源の保護復元に関する研究」報告書(1988)
- 3) 木川田喜一：温泉の泉質変化と機構、地下水技術、48巻(2006)
- 4) 羽座重男他：温泉の成分変化について、香川県環境保健センター所報、12号(2013)
- 5) 環境省のホームページ
<https://www.env.go.jp/nature/onsen/pdf/guideline20210930.pdf>