

常時微動観測による地熱地域での 熱水流動モニタリング

岡本 京祐¹⁾・浅沼 宏¹⁾・二宮 啓²⁾

※本稿は 2021 年 4 月に、産業技術総合研究所が行ったプレス発表を修正・加筆したものです。

1. はじめに

再生可能エネルギーはわが国にとって貴重な国産エネルギー源であるとともに、脱炭素社会の実現にも不可欠なため、早期大量導入が期待されています。再生可能エネルギーの一つである地熱発電は、天候や時間帯に左右されずに安定した発電ができるメリットがあります。しかし、長年操業している国内外の地熱発電所では、雨水などを起源として地下に浸透し、地熱貯留層に滞留する熱水の量が徐々に減衰し、発電に必要な蒸気を得るための熱水量が減少することが問題となる場合があります。

このような問題の解決策の一つとして、地下へ人工的に注水し熱水量を回復させる涵養注水^{かんよう}という方法があります。この方法では、地熱貯留層へ効率的に注水するとともに、貯留層を冷却することや、断層を刺激して地震を惹起^{じやくき}することなどに注意を払う必要があります。直接目で見ることのできない地下の熱水の流れ(熱水流動)の把握は困難ですが、持続的な地熱発電のためには、地下の熱水流動をリアルタイムに把握し、地熱資源を適正に利用することが重要です。

産総研は、地熱発電に利用可能な地下の熱水流動をリアルタイムに把握することを目的として、奥会津地熱地域(福島県柳津町)で、世界でもトップクラスの精度を持つ高感度地震観測網を 2015 年から運用してきました。この観測網は高感度振動センサーを備えた 9 観測点から構成されており、熱水の流動により岩盤内の亀裂^{きれつ}が刺激される現象(微小地震)を捉えることで、地下の熱水流動を明らかにしてきました。

この微小地震から熱水流動を捉える手法は、地下数 km の深さにおいても、数十 m オーダーの分解能で熱水流動の経路を可視化できる強みがあります。しかし、もともと熱水の流れやすい場所(例えば、断層や割れ目の発達した部分)や、既に微小地震が発生して流動性が増加した場所では、熱水が流れても微小地震が発生しない場合があります。現在、そのような場所の熱水流動をリアルタイムに検

出する手法は存在せず(第 1 図 a)、熱水流動の全容把握への課題となっていました。

そこで今回、微小地震のような熱水流動により直接的に生成する揺れではなく、海の波浪や風といった自然現象や、日常の人間活動によって絶えず生じているごく小さな揺れ、すなわち常時微動に着目しました。それらのごく小さな揺れは足し合わされ、地下構造に応じて固有の横揺れと縦揺れの振幅スペクトル比(H/V スペクトル比)を持つ常時微動を形成します。今回、地下で熱水が流れることによって、疑似的に地下構造が変化し、一時的に H/V スペクトル比が変化することを期待して観測を行いました(第 1 図 b)。ここで紹介する内容は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層評価・管理技術開発」の一環として行われた、貯留層モニタリングに関する研究成果(Okamoto *et al.*, 2021)を紹介するものです。

2. H/V スペクトル比の変化を用いたモニタリングシステムの基礎検討

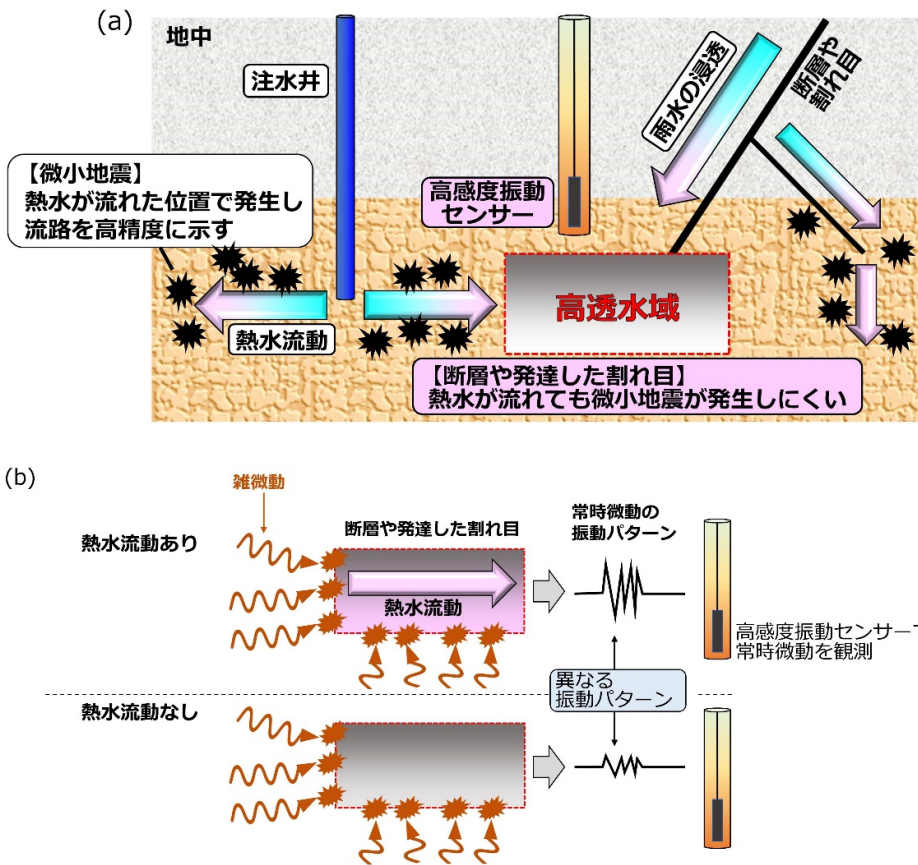
今回、複数設置している観測点のうち、熱水が貯えられ、活発な微小地震活動が生じている地熱貯留層領域に隣接した井戸内の地下約 400 m に設置されている観測点を常時微動モニタリングに利用しました(第 2 図)。この対象観測点付近では、微小地震の発生頻度は低く、従来の微小地震を追跡する手法では十分に熱水の流れを把握できていませんでした。

対象観測点での常時微動の H/V スペクトル比は、通常は横揺れの方が大きいため 1 より大きい値を示しますが、時折縦揺れが大きくなり、H/V スペクトル比が大幅に 1 を下回る場合があることを発見しました(第 3 図 a)。この H/V スペクトル比が低下する(以下、「揺れ方の変化」という)要因を、数値計算で検証しました。その結果、観測点の直下で熱水流動が発生した場合に、観測された揺れ方の変化が生じ得ることが分かりました(第 3 図 b, c)。

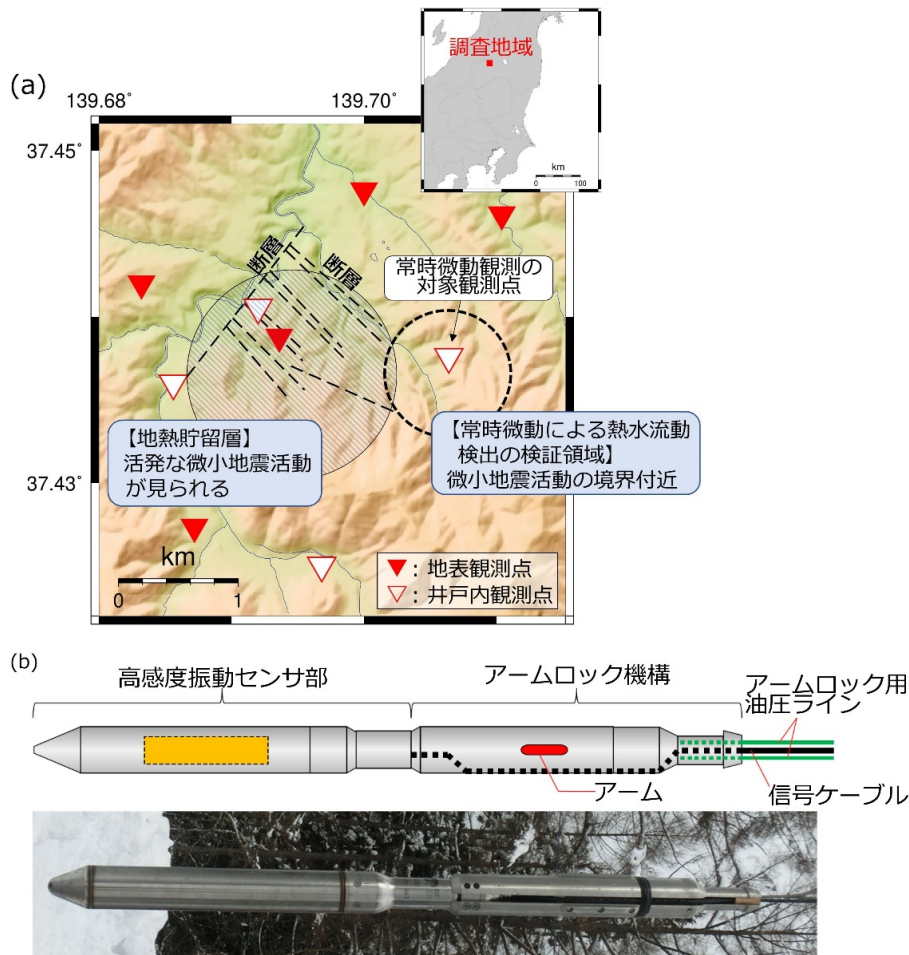
1) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター

2) 産総研 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門

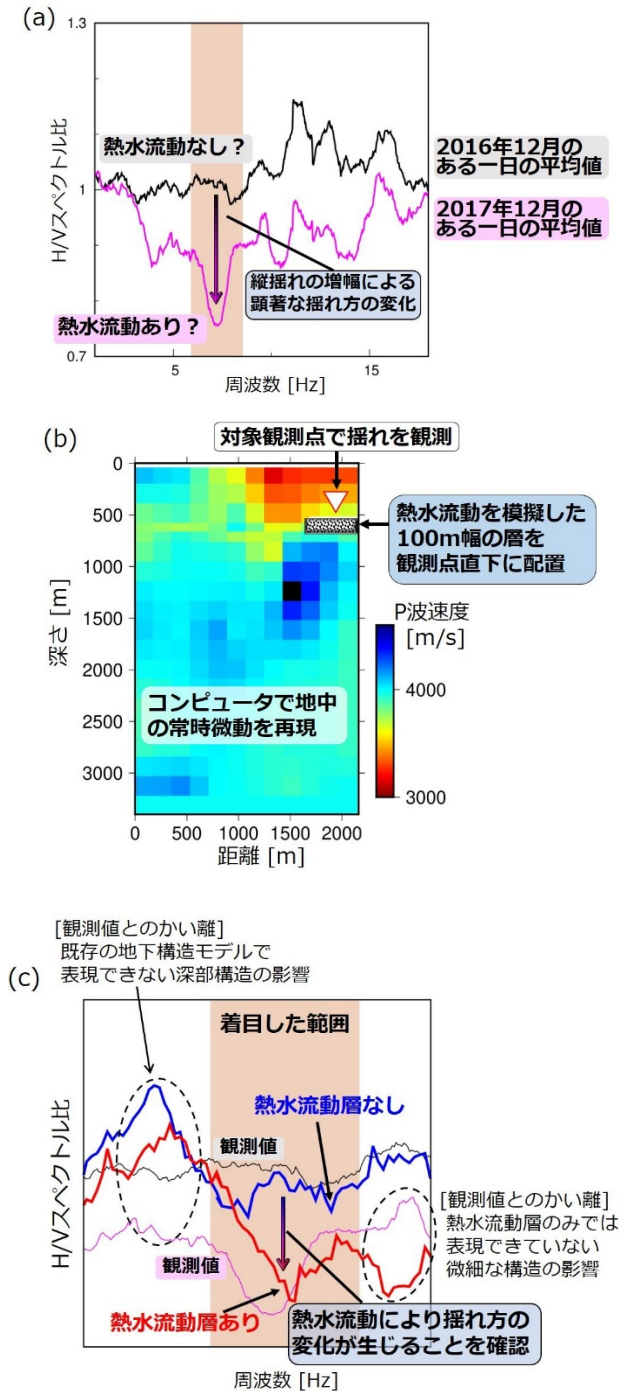
キーワード：地熱発電、熱水流動モニタリング、微小地震、常時微動



第1図 地中の熱水流動と熱水流動を検出する手法のイメージ
 (a) 熱水の流動に伴って岩盤が刺激される現象(微小地震)が、流動経路に対応します。しかし、もともと流動性が高い場所(高透水域)では、微小地震が発生しにくいので、流動の全容把握ができませんでした。(b) 高感度振動センサーを使用して、熱水流動が存在する場合としない場合でそれぞれ異なる常時微動のパターンを検出します。



第2図 奥会津地熱地域での高感度地震観測網の概要
 (a) 通常は全9点の観測点を用いて、地下の微小地震の震源位置を高精度に追跡し、熱水流動を検出しています。今回は、井戸内に設置した1観測点で常時微動を観測し、熱水流動の検出を試みました。
 (b) 井戸内に設置した高感度振動センサー(全長約1.5m、直径約9cm)の模式図と写真です。アームを井戸の壁に押し付けて固定します(写真左側が下方向)。



第3図 (a) ある2期間に対象観測点で観測された常時微動のH/Vスペクトル比 (b) コンピュータシミュレーションに用いた地下構造モデル (c) コンピュータシミュレーションにより計算された常時微動のH/Vスペクトル比 (a) 日によって、縦揺れが増幅することで、H/Vスペクトル比が大幅に1を下回ることがあり、地中で何らかの変化が生じている可能性を示唆します。(b) このモデル内の常時微動を再現しています。既存の研究 (Okamoto et al., 2020) で提示された地下構造に加え、新たに熱水流動を模擬した層を観測点直下に考慮しました。(c) 観測点直下に熱水流動層がある場合、実際に観測された揺れ方の変化が生じることが示されました。

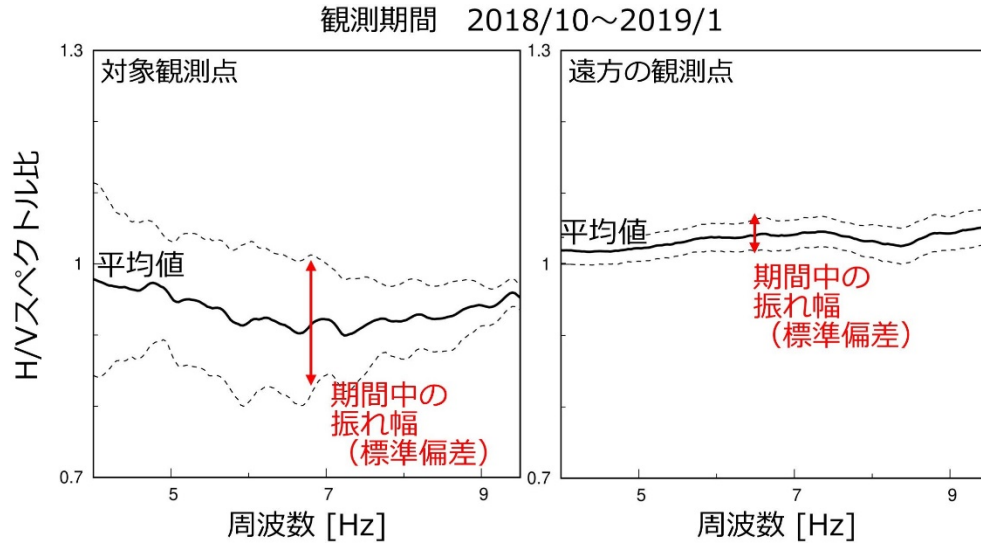
第4図は、実際に観測された対象観測点でのH/Vスペクトル比の揺れ幅を示したものです(2018年10月~2019年1月の期間を表示)。比較のため、地熱貯留層から遠く離れ、微小地震が発生していない、つまり従来手法で熱水流動が検出されていない点(第2図aで最も南の観測点)の記録も表示しています。対象観測点では、H/Vスペクトル比が大きな揺れ幅を持っています(第4図左)。一方、地熱貯留層から遠く離れ、熱水流動がないと考えられる点では、H/Vスペクトル比はほとんど変化していないことが確認されました(第4図右)。

2016年4月から2020年10月の期間で、対象観測点の近くで発生した「注水由来と思われる微小地震数の高まり(ETAS解析(Ogata, 1988)と呼ばれる統計解析で検出)」,つまり、従来手法で検出された熱水流動の発生日数は184日でした。このうち、約40%の72日で、常時微動の揺れ方の変化からも熱水流動を検出しました。一方で、従来手法では熱水流動を検出していない残りの期間(約1,500日)では、常時微動の揺れ方の変化が生じた日数は20%に至りませんでした。つまり、従来手法で熱水流動を検出した期間を対象にすると、本方法で検出される熱水流動の発生確率は2倍以上となります。2群間のデータの差を統計的に検定するフィッシャーの正確検定(両側検定)を行うと、従来手法と本手法で検出した熱水流動の間には、有意な関係があることが認められました。

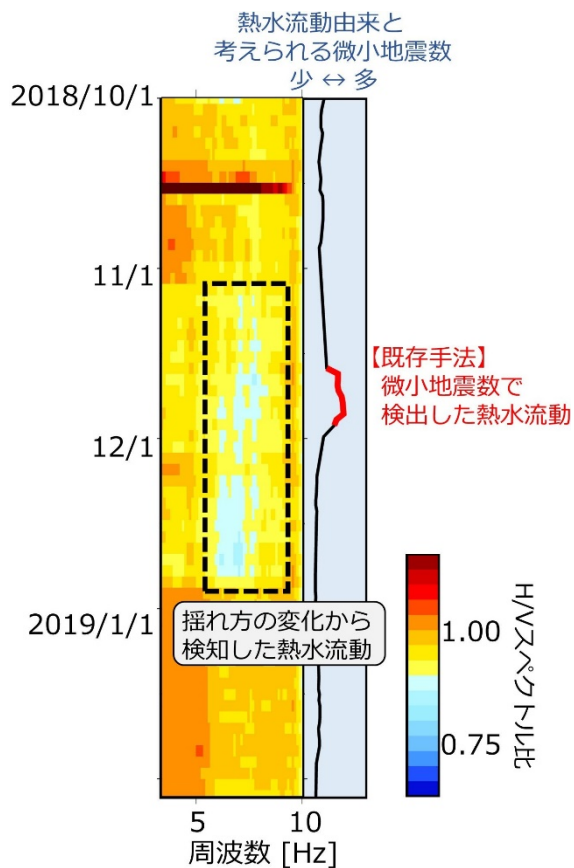
これらの結果から、コンピュータシミュレーションに加え、実際の観測データからも揺れ方の変化と熱水流動の間に相関が存在することが確認されました。第5図に、2018年10月~2019年1月の期間を例に、H/Vスペクトル比の変化と従来の手法である微小地震数の変化の比較を示しています。H/Vスペクトル比変化は、微小地震数の高まりにより検出した熱水流動の期間を同様に検出できています(第5図)。また、H/Vスペクトル比の変化は、微小地震が増加した期間の前後でも続いていることから、微小地震を発生させないような熱水の流れも検出していると考えられます。

3. 実際の涵養注水のモニタリングへの適用

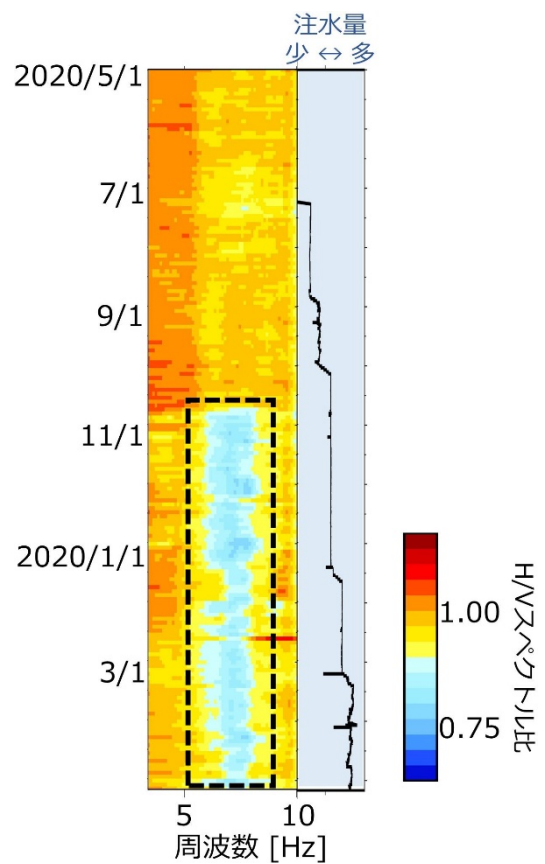
奥会津地熱地域では人工涵養技術開発の実証試験として、連続的な涵養を開始した2020年7月から2021年6月現在も地熱貯留層への涵養注水を継続して実施しています。涵養注水に用いた井戸(涵養井)の位置は、第2図に示した地熱貯留層領域の中心付近に位置しています。注水開始後のH/Vスペクトル比の変化を、注水量の推移とともに



第4図 対象観測点(左)と、地熱貯留層から遠く離れた観測点(右)での常時微動のH/Vスペクトル比
 2018年10月~2019年1月の期間の振れ幅を示しています(11月から12月にかけて常時微動の揺れ方の変化を観測)。対象観測点(左)では、熱水流動に由来すると考えられる揺れ方の変化が発生し、振れ幅が大きいです。地熱貯留層から遠く離れた観測点(右)では、振れ幅は小さいです。



第5図 H/Vスペクトル比と従来手法の微小地震数の変化(線グラフで表現)を比較した図
 前者では、黒破線で囲んだ部分が熱水流動を示し、後者では、微小地震が多発する赤線で示した期間が熱水流動を示します。



第6図 2020年7月から実施している長期涵養注水試験中のH/Vスペクトル比と日々の注水量を示した図
 長期間の涵養注水に対応するような、継続的な常時微動の揺れ方の変化が見られ、熱水流動を示唆します。

第6図に示しています。H/V スペクトル比は、注水開始の数か月後から、継続的に揺れ方の変化を示しており、長期的な流動の存在を示唆しています。過去に実施したトレーサー試験(トレーサー物質を注水し、地下での水の流動を測定する試験)によると、涵養井と今回のモニタリング領域との間では、水の流動に数か月程度の期間を要し得ることが示されており、H/V スペクトル比の反応が遅れたことを説明できます。また、今回検出された揺れ方の変化は、モニタリング開始以来、最も長い継続期間を示しており、長期の涵養注水との関係性が示唆されます。現在も涵養注水は継続されているため、詳細な解析や解釈は今後行う予定ですが、H/V スペクトル比の変化をモニタリングすることで、微小地震の発生に依存せず、涵養注水効果をリアルタイムに確認できる可能性を示すことができました。

4. まとめと今後の展望

今回、微小地震の発生に依存する従来の地下熱水流動モニタリング手法の枠組みを超えた、常時微動の揺れ方の変化に基づく新たなモニタリング手法の可能性を示しました。

奥会津地熱地域での観測を今後も継続し、より長期間のデータを用いて常時微動観測に基づいた熱水流動モニタリング手法の確立を目指す予定です。さらに、他の地熱地域や、CO₂ 地中貯留サイトなどでのモニタリング手法の適用実験を実施し、この手法の一般化を図りたいと考えています。将来的には、地震・火山活動域での地下水流動の監視などへの適用方法についても検討していきたいと考えています。

謝辞：本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層評価・管理技術」で実施されました。地熱技術開発株式会社、および奥会津地熱株式会社から現地観測に関して多大なるご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- Ogata, Y. (1988) Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes. *Journal of the American Statistical Association*, **83**, 9-27.
- Okamoto, K., Yi, L., Asanuma, H., Okabe, T., Abe, Y. and Tsuzuki, M. (2020) Activation and inactivation of seismicity: The terminations of two injection tests in Okuaizu geothermal field, Japan. *Seismological Research Letters*, **91**, 2730-2743.
- Okamoto, K., Asanuma, H. and Nimiya, H. (2021) Fluid activity detection in geothermal areas using a single seismic station by monitoring horizontal-to-vertical spectral ratios. *Scientific Reports*, **11**, 8372.

OKAMOTO Kyosuke, ASANUMA Hiroshi and NIMIYA Hiro (2021) Fluid flow monitoring based on microtremor observation in geothermal area.

(受付：2021年8月6日)