

環境科学シンポジウム 2016

5. ローカルレベルにおける水・エネルギー・食料ネクサスのマネジメント： 大分県別府湾におけるケーススタディ

1. シンポジウムの趣旨

本シンポジウムは、総合地球環境学研究所（地球研）実践プロジェクト「アジア環太平洋地域の人間環境安全保障——水・エネルギー・食料連環」の研究成果発信の一環として開催した。本プロジェクトの目的は、水とエネルギーおよび食料のネクサス（連環）による複合的な地球環境問題（持続可能な開発）に対し、環境ガバナンスの構造と水・エネルギー・食料政策の最適化を通して、持続可能な社会のあり方を提示することである。

本シンポジウム企画では、大分県別府湾（別府市・日出町）を事例として、科学と社会との共創（環境ガバナンス）を踏まえ、水とエネルギーネクサスの解明、水と食料（水産資源）ネクサスの解明を通して、ステークホルダーとの合意形成及び統合指標とネクサス解析の各サブグループから、最新の研究成果を報告し、各資源とその統合的なマネジメントのあり方について、フロア参加者とともに議論を行った。

2. シンポジウム講演の概要

2.1 「科学と社会の共創のための科学的エビデンス共有化に向けた取り組み—地熱資源をめぐる温泉と発電利用のコンフリクトをケースとして—」

話題提供者：馬場健司（東京都市大学）

政策形成における科学の役割、エビデンスベースの政策形成の重要性が国内外で高まっており、Future Earthにおいても、科学者とステークホルダー、そして市民との協働によるCo-designとCo-productionといった共創のフレームワークが提唱されている。これらの背景を踏まえて本発表では、地熱資源を巡る温泉と発電利用のコンフリクトを題材として、これまで実施してきたいくつかの調査結果を用いて、科学と社会との共創の可能性について報告された。

世界的にみて地熱資源の賦存量の多いインドネシア、フィリピン、日本に居住する一般市民を対象としてウェブサイトで実施した質問紙調査結果では、地熱資源を巡るコンフリクトの解決方法として、日本では科学的エビデンスやそれをベースとした社会的

意思決定方法が支持されず、住民投票が最も多く支持されており、フィリピンやインドネシアとは対照的な傾向が観察された。しかし、日本全国のテークホルダーを対象として実施したオンラインでの熟議実験結果では、住民投票が最も多く選択される傾向は一般市民と同様であるものの、「共同調査や科学的根拠の確認」が次いで多い傾向がみられた。また、大分県別府市における小規模分散型の地熱発電（温泉発電）を題材としたステークホルダー分析の結果では、潜在的なコンフリクトの回避に向けて、温泉の湯量・泉質・温度の変化など、新規掘削の際に懸念を持っている温泉資源の現状について、モニタリングを行い、科学的エビデンスを共同で確認していく試みも1つの方法として多くのステークホルダーから支持された。

同市では、現在、次からの報告にあるような様々な科学的エビデンスが専門家によって提供されつつある。このような科学的エビデンスがどのような方法で科学と社会の共創に向けて活用され得るか。1つには、多くの人々が共創のプロセスにオーナーシップを感じるためには、自ら何らかの「共同調査や科学的根拠の確認」作業に関与すること、例えば市民科学の分野で行われてきた市民参加型モニタリングにより、泉源所有者などが湯量・泉質・温度の変化などについて専門家と共同調査を行うことが想定される。もう1つは、確認された科学的エビデンスを用いて「起こりうる複数の未来の姿」をシナリオとして描き、ワークショップなどを通じて、将来の不確実性に対応するための地域戦略を練ることも考えられる。

2.2 「別府湾奥部における統合型水循環解析モデルの構築」

話題提供者：石井 明
（八千代エンジニアリング（株））

別府湾奥部では、近年、新たに温泉水を揚水して温泉発電開発が進んでおり、陸域における食料・エネルギー生産のための水利用が、沿岸域の生態系（水産資源）に影響を与えるという仮説のもと、流域の水循環機構を解明、定量的に把握することが必要になっている。本研究では、地圏流体挙動を完全に連

成させた流体シミュレータ GETFLOWS を用いて別府湾奥部の水循環解析モデルの構築を行った。

水循環解析モデルは、地形起伏や主要河道流域等を参考として別府湾奥部の水循環域を水平解像度約 50m、垂直方向は流体移動がモデル底部と干渉しない十分な距離として 10,000m 迄とし、地形は国土地理院の 5m メッシュ基盤地図情報（数値標高モデル）、地質構造は産総研の 20 万分の 1 シームレス地質図をベースに第三紀層は風化・緩みゾーンと新鮮部に区分し、主要平野に分布する第四紀層に対して分布域と基底面標高を設定し、厚さ 1m の表土層を設定した三次元格子モデルを構築した（図 1 参照）。また、水理物性値（間隙率、透水係数）は地質区分毎に、粗度係数は国土数値情報土地利用細分メッシュの土地利用区分毎に応じたマニング粗度係数を設定した。

解析の気象条件は、近傍の気象観測所（大分、杵築、湯布院、院内）の 2005～2014 年の 10 ヶ年の平均雨量をグリギング法により空間分布させ、平均気温は標高による低減率（ $-0.7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ）を考慮し、蒸発散はハーモン式で評価を行った。また、熱条件は、モデル底面に活動度指数による地下温度の推定した温度、大気には上記の平均気温を与えた。

以上の条件で定常計算（モデル初期化）を実施し、流量観測のデータがある 2013 年～2014 年を再現検証期間とし、2012 年を助走期間として、3 ヶ年の自然状態における非定常計算を実施した。計算結果は、観測流量のオーダーと一致し、良好なモデルであることを確認した。

本解析は、今後、微動探査結果を用いた地質構造、マグマからの熱エネルギーを考慮した境界条件、および、温泉水揚水等の人為的な水利用を考慮したモデルを得るための基礎情報であり、モデルの改良と機能追加を図っていく予定である。

2.3 「大分県別府温泉における繰り返し精密重力測定を用いた温泉帯水層モニタリング」

話題提供者：西島 潤（九州大学）

大分県別府市は、日本有数の温泉地であり、最近では温泉資源の有効活用の一環として小規模温泉発

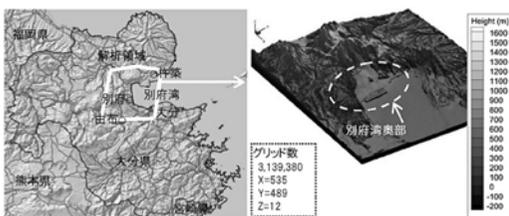


図 1 構築した解析対象地域の三次元モデル

電の導入も進行している。このような状況で、温泉資源の持続可能性を評価することは非常に重要な課題のひとつである。一方、温泉地域においては泉温、湧出量などの持続可能性を評価するためのモニタリングが行われることはほとんどなく、湯量の低下や泉質の変化などが生じた場合に原因を究明することが難しい状況にある。本報告ではこれまでに幾つかのモニタリングが行われた大分県別府市鉄輪温泉周辺において、温泉水の生産量と周囲からの涵養量のアンバランスを微小な重力変化として捉える重力変動観測の適用例を紹介した。重力変動観測は、これまでに国内外の大規模な地熱発電所で行われた観測結果より、貯留層内の質量変化を捉えるのに非常に有効であることが明らかになってきている。

本研究での観測点は鉄輪温泉周辺及びその南側に 8 観測点を設置した（図 2）。現地での観測は A10-#017（Micro-g LaCost Inc.）絶対重力計と CG-5-#549（Scintrex Inc.）を組み合わせたハイブリッド測定を行った。絶対重力計の観測点は、BGRL、TERUYU、C3 の 3 点を使用し、基準点の変化を観測することに加え、相対重力計のドリフトや感度についても検討を行った。基準点（BGRL）における重力変化は、浅層地下水位変化と非常に良い対応が見られ、基準点変化の影響を補正した後の重力変化を見ると、観測地域全域で季節変化と考えられる重力変化が見られた。ただし、鉄輪地域（C1、C2、C3）については観測開始後約 2 年間にわたって緩やかに増加する傾向も見られた。観測された重力変化の原因は観測点の標高変化、浅層地下水位の季節変化、温泉帯水層の水位変化などが考えられるが、現在これ

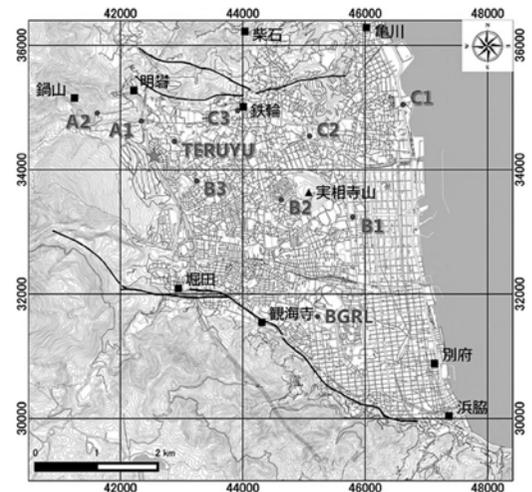


図 2 重力変動観測点配置図

らの変化を検証するデータが得られていない。今後これらの検証データを入手し温泉帯水層の水位変化による重力変化を抽出することが課題となる。

2.4 「別府湾沿岸域における海底地下水湧出の空間分布調査」

話題提供者：本田尚美（地球研）

近年、「海底地下水湧出」が沿岸域へと栄養塩を供給していることが世界各地で報告されている。別府市の中央部に形成された火山扇状地の地下を流れる地熱水は北縁と南縁の断層に沿って別府湾沿岸方向に流動し、流動系の末端では、地下地熱水の一部が海底からも湧出していることが予想される。一方で、別府湾の北部に位置する鹿鳴越火山群の麓では、海底から淡水性の地下水が湧出している。しかしながら、別府湾沿岸域における地下水流入が海域生態系にどのような影響を及ぼしているのかはよく分かっていない。本発表では、別府湾奥部（地熱地帯）と別府湾北部（日出町）における海底地下水（温泉水）湧出の2つに焦点を当て、海底地下水湧出の空間分布調査の結果を紹介した。

海域で地下水を検出するために、放射性物質のラドン²²² (^{222}Rn) を用いた。同時に海水中の水温・塩分・栄養塩を測定した。日出町上深江から高崎山沿岸付近までの範囲で測定された ^{222}Rn 濃度の分布（図3）から、南部では境川以南、北部では亀川-豊岡間において、高濃度の ^{222}Rn が検出され、温泉流動系の末端部に位置する海底からの温泉水湧出の影響を捉えることに成功した。境川以南の高 ^{222}Rn 域では、水温が高く、高温の温泉水が湧出していると考えられた。豊岡-亀川間の高 ^{222}Rn 域は明瞭な水温変化は認められないものの、塩分がやや低下していたことから、海岸部まで分布する比較的低温の温泉水湧出の影響を受けていることが示唆された。日出町沿岸

では、地下水湧出が複数箇所から生じていることが示され、 ^{222}Rn と塩分の収支計算から推定された地下水の流入量は、一日当たり約9000 tであった。地下水が供給する淡水量は、河川水を含めた全淡水供給量の約2割に相当した。また、海底から湧き出す地下水のケイ素濃度は河川水の約1.7倍であり、地下水によって供給されるケイ素の量は、全陸水由来の栄養塩輸送量の約3割を占めていた。今後、別府湾沿岸域における地下水湧出量およびそれに伴う栄養塩供給量を広域的に推定し、沿岸域における生物生産への影響を評価していく必要があると考えられる。

2.5 「別府における温泉資源の開発と分配」

話題提供者：王 智弘（地球研）

大分県別府市は「泉都」と形容される観光地で、戦前と戦後を通じて療養温泉地から温泉観光都市へと発展してきた。資源が人・資本・技術・政策の呼び水となり、地域社会が変容してきた側面は、社会と資源・環境との関係を考察する上で興味深い事例である。他方で「資源の呪い」仮説のように、天然資源に恵まれた条件が、政治の腐敗や経済の低成長を招く要因となり、必ずしも豊かな社会の実現につながるわけではないとの指摘もある。そこで資源の多寡から資源の分配や共有に視点を移して、重層的な資源ガバナンスのモデル構築が求められる。

別府市の温泉地としての特徴は2000を越える泉源の存在以外にも、温泉を「川下」へ供給する配湯業者や源泉所有者の存在が挙げられる。地域社会の高齢化や後継者の問題、また、地域外からの資本の流入などによる源泉の所有・管理面の変化と分配への懸念も生じている。温泉熱発電事業への投資機運の高まりも潜在的な影響因子となっている。今後の利用方針の検討のためにも歴史的視点から温泉資源の分配や開発の論点を再検討した。

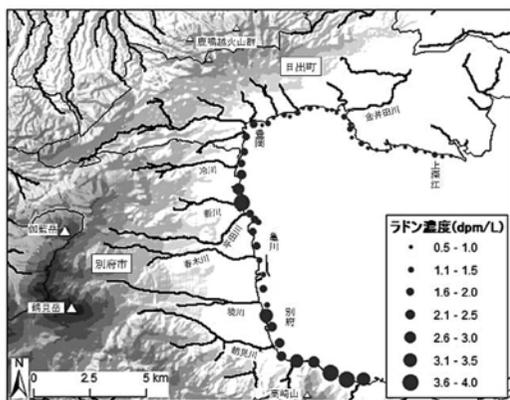


図3 別府湾沿岸域のラドン濃度の分布



写真1 配湯設備（堀田）

江戸期の利用が厳しく制限・管理されていた状況から、明治期に入ると別府は保養温泉地として多くの療養客や観光客を集めるようになる。インフラ・土地・温泉開発には多くの立身出世型人材が域外から参入している。温泉が地域振興の柱として開発政策に組み込まれていくと同時に、明治32年の「湯屋営業取締規則」に象徴されるように、近代化を目指す明治政府による入浴様式の指導（混浴の禁止など）も行われた。「開化の良民」に相応しい入浴法を指導することは温泉の恩恵の分配に与る適格者を規定することを意味する。明治45年には風俗・衛生面に加えて泉源保護の意図から「鉱泉取締規則」が公布され、警察行政がこれを所管した。他方で、温泉資源は国民の健康や保健の観点からもその価値が認識され、別府市には陸軍病院や傷痍軍人の保養所が設置された。温泉資源の分配の観点からは、開拓精神に溢れること、規律が守れること、健康になることが重視されたと考えられる。温泉資源開発の一方で、歴史を振り返ることで浮かび上がる人間形成の側面は、現代的な課題である資源ガバナンスのあり方にも示唆を与えたと考えられる。

2.6 「大分県別府市の温泉資源ステークホルダーの共通認識に着目した社会ネットワークの可視化」

話題提供者：木村道徳
(滋賀県琵琶湖環境科学研究センター)

大分県別府市は、湧出量および源泉数ともに日本を代表する温泉地であり、近年では新たな利用方法

としての小規模分散地熱発電の導入が進められている。このような中、ステークホルダーは、従来の泉源所有者や温泉旅館経営者、観光業者のみならず、発電事業者、掘削業者など地熱発電にかかわる分野へと拡張され、その関係性や想定される 이슈も変容していると考えられる。そこで本研究では、別府市温泉ステークホルダーを対象に、小規模分散地熱発電に対する関心事項の共通認識に着目し、社会ネットワークとして構造的に可視化することを目的とする。

本研究では、大分県別府市に関連した小規模分散地熱発電の導入を含む温泉資源を活用しているステークホルダー 33 名を対象に、15 の関心事項に対し、関心を持っている場合は 1 をそうでない場合は 0 とするマトリックスに整理し、ネットワーク分析手法により図 4 に示すネットワークグラフとして可視化を行った。本ネットワークグラフは、関心事項にステークホルダーが属するという関係性を持つ 2 部ネットワークグラフであり、円ノードがステークホルダーを四角ノードが関心事項を表す。任意の関心事項に対し複数のステークホルダーがつながっている場合、その関心事項は共通して認識されていることを示し、ステークホルダー間の潜在的な関係性を表現すると考えられる。本グラフ可視化の結果、「3 大分県」の 1 ステークホルダーを除くステークホルダーが 1 つ以上の関心事項につながり、また全ての関心事項は複数のステークホルダーがつながっていることから、何らかの共通関心事項を介してステ

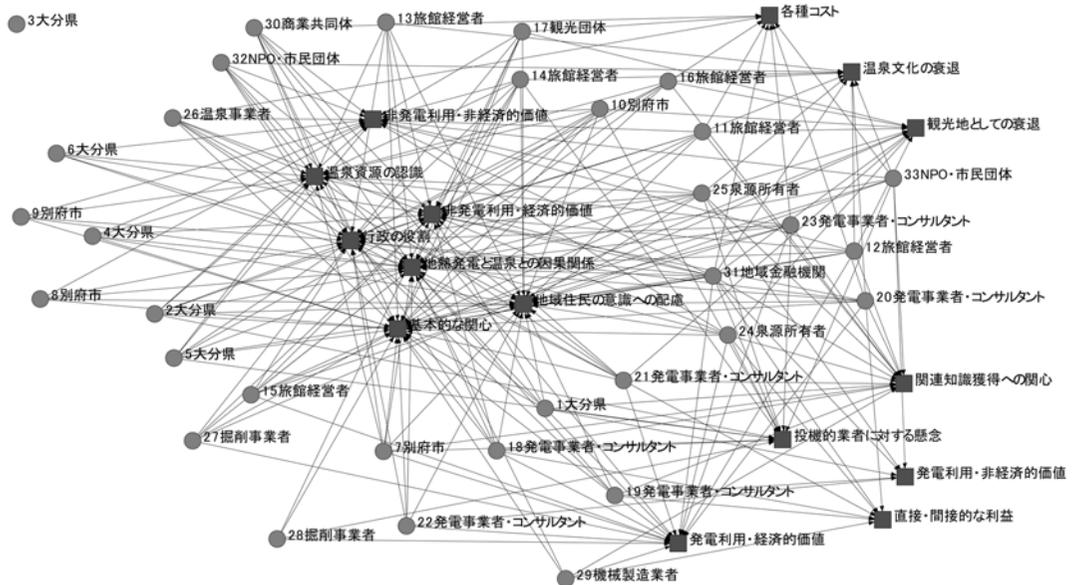


図 4 別府市温泉ステークホルダーの関心論点 2 部ネットワーク

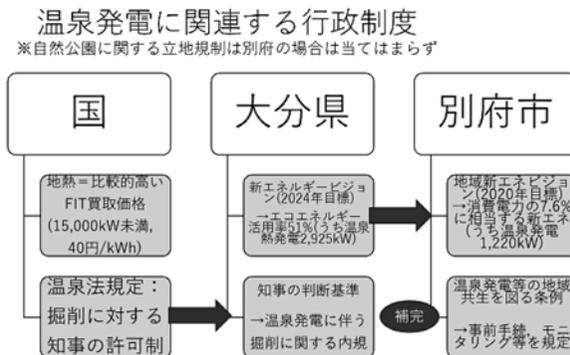


図5 温泉発電に関する再エネ推進と温泉保護行政の政府間関係

クホルダーが一つのネットワークを形成していることがわかった。

質疑では、ヒアリング調査項目によってネットワーク構造が全く異なったものになってしまう可能性があるのではないかという点において議論を行った。本研究の手法は、関心事項を介してステークホルダー間の潜在的な関係性を可視化するものであり、ヒアリング調査の結果より設定する関心事項の分類の方法によっては、まったく異なったステークホルダーネットワーク構造になる可能性がある。分析結果の提示においては、どのようなヒアリング調査の結果から得られたネットワークであるのかを明示し、潜在的な関係性を表すものである点について注意する必要があることの確認を行った。

2.7 「地域社会と温泉発電の共存共栄に向けたガバナンスの課題」

話題提供者：増原直樹（地球研）

2012年7月から施行された再生可能エネルギー（以下、再エネと略）電力固定価格買取制度の影響で、別府市内では、小規模な地熱発電（温泉発電）の新規導入が進んでいる。市内で急激に温泉発電の導入が進む場合、温泉の量や質といった環境面のみならず、観光業など地域社会への影響が懸念される。本研究では、地熱発電に関する行政制度を「エネルギー政策と自然保護政策の交錯エリア」として位置づけ、

エネルギー政策としての再エネ推進策並びに自然保護政策としての温泉掘削許可制度の両側面（図5参照）に焦点を当て、各政策の時系列的な変遷を明らかにし、地域社会と温泉発電が共存共栄するために必要なガバナンスに関する課題を整理した。

国・県レベルの行政文書の内容分析及び大分・岐阜県担当者に対するヒアリング調査の結果、国レベルの再エネと自然保護政策の交錯について、経済産業省と環境省間では対立的な関係から連携に移行しつつあること、県レベルでは地熱発電目的の温泉掘削に対応する先進2県間で、財政的・情報資源の投入レベルに差異が観察された。しかし、その差異の要因特定には至っておらず、今後、調査事例を増やし、要因の精査を進めることが必要である。

総合討論では、食料ネクサスが若干見えにくいことや別府市の特殊性と研究成果の普遍性に関する課題をめぐって意見交換がおこなわれ、同じく温泉発電と小水力発電に取り組みされている富山県宇奈月温泉の事例紹介など活発な議論が展開された。本プロジェクトでは、総合討論で提起された課題にも留意しながら、成果のまとめに向けて、さらに研究活動を前進させる予定である。

オーガナイザー 増原直樹（地球研）
馬場健司（東京都市大学）