

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：23401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22339

研究課題名（和文）海底湧水の超高解像度マッピングを可能とするハイブリッド観測システムの開発

研究課題名（英文）Development of a hybrid observation method for high-resolution mapping of submarine groundwater discharge

研究代表者

杉本 亮（Sugimoto, Ryo）

福井県立大学・海洋生物資源学部・教授

研究者番号：00533316

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：海底湧水（SGD）を高感度・高解像度で評価できる観測メソッドを構築することを目的に、異なる探査手法を組み合わせたフィールド調査を実施した。物理探査では、サーモカメラを搭載したドローンと曳航型の電気探査システムを用いることで、SGDの有無やSGDが及ぼす影響の空間的範囲を正確に把握することが可能となった。トレーサー探査では、ラドンとラジウムを組み合わせることで、SGDの成分を水塊レベルで識別し、それぞれの湧出量を定量することが可能となった。特徴の異なる2つのメソッドを順序良く組み合わせることで、SGD情報が一切ない沿岸浅海域においても、SGDの実態把握から影響評価までを行えるメソッドが確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海底湧水が沿岸生態系に果たしている役割は理解され始めている、研究が遅々として進まない要因として、地下水の湧出が目に見えず、SGD情報がない地域での研究を行えないことが挙げられる。今後、SGD情報がないような様々な沿岸海域においても本研究で構築した研究手法を導入すれば、SGD情報を広範囲で詳細に入手することができるようになり、生態系研究が活性化するものと思われる。さらに、沿岸海域のSGDマップを構築すれば、海洋保護区の設定や効果的な種苗放流策などへの応用も可能となる。

研究成果の概要（英文）：We developed an observation method to assess submarine groundwater discharge with high sensitivity, precision, and resolution. In the geophysical survey, we used a drone equipped with a thermal camera and a towed resistivity system. The systems enabled us to determine the presence or absence of SGD and its spatial expansion. Also, a geochemical tracer approach combined with radon and radium made it possible to identify the component of SGD at the water mass level and quantify the rate of fresh and recirculated SGD.

By combining these two methods in adequate sequence, we can understand the real SGD phenomenon and evaluate its geophysical and geochemical impact on the coastal seas even if where no SGD information is available.

研究分野：海洋生物環境学

キーワード：海底湧水 電気探査 熱画像 ドローン ラドン ラジウム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

沿岸域は、地球上で最も高い生態系サービスを有する場所の一つである。この沿岸域には、河川水に匹敵もしくはそれを上回る量の栄養が地下水から流れ込んでいるため、沿岸浅海域の生態系はあらゆる面において地下水の影響を強く受けていることが容易に想像できる。しかし、海底湧水(SGD)は視覚的に捉えることが難しく、その影響範囲も不均一であるため、沿岸生態系への影響評価は遅々として進んでいない。現在最も流布しているSGDの可視化法は、船舶で微速航行しながら海水を連続的に汲み上げ、ラドン ^{222}Rn (半減期 3.8 日)の存在量を静電捕集型ラドン測定器(RAD7)を用いて測定し、マッピングする方法である。この方法は2000年代後半から大ブレイクした極めて有用な方法であるが、下記に示すような課題が残っている。

- ・ 異なる ^{222}Rn 負荷源(例えば河川水)が湧水域の近くにある場合は識別が困難である
- ・ 高濃度 ^{222}Rn を検出した場合、次のサンプルに影響が残る(テーリング効果)
- ・ SGDの湧出タイプ(浸出型 or 噴出型)によって検出感度が異なる
- ・ SGDの成分(淡水地下水 or 再循環性地下水)の識別が困難である

これらの問題が克服され、SGDの分布や特性を容易に可視化できれば、沿岸海域へのSGDの影響を正確に評価できるようになる。

2. 研究の目的

本研究課題では、現行の ^{222}Rn 測定で生じる問題を克服もしくは補完できる新しいトレーサー手法(ラドン・ラジウム同位体)を新規に開発し、次世代型の遠隔探査アプローチ(熱・電気)と組み合わせることで、沿岸浅海域におけるSGDの分布や特性(タイプや成分)を高い空間分解能と識別能力を持って容易に可視化できるハイブリッド観測メソッドを構築する。

3. 研究の方法

(1) ドローンを用いた海面温度分布調査法の検討

SGDの湧出域の海面温度異常を検知するための観測手法を構築するため、ドローンを用いた海面温度分布調査における、最適な撮影方法の検討と得られた熱画像の空間配置方法の開発を行った。熱画像の撮影には、DJI Matrice 200 v2を用いた。ドローンに搭載したカメラはZenmuse XT2である。撮影方法の検討では、まず、地上に設置した水温の異なる水塊を高度を変えて撮影し、高度毎の熱画像のデータの検証を行った。次に、実際の海域を飛行し撮影した熱画像のデータと、海水温を直接観測したデータを比較し、熱画像から得られた高解像度水面温度分布について、その精度の検証を行った。これらの検証から、ドローンによる水面温度分布観測の最適な方法を検討した。また、得られた熱画像をGIS上で扱うための空間データへの変換方法の開発を行った。

(2) 複合的な物理探査法の検討とSGDの分布特性の可視化

沿岸浅海域におけるSGDの分布や特性を可視化する方法を構築するために、前述のドローンとサーモカメラを用いた海面温度の高解像度観測、曳航型の海底電気探査システム(Advanced Geosciences, Inc. SuperSting Earth Resistivity, IP & SP System With Wi-Fi)を用いた海底下の比抵抗分布調査、電気伝導計及び温度計を用いた直接測定を、山形県遊佐町の鳥海山沿岸域(釜磯海岸)および福井県小浜市の小浜湾で実施した。これらの観測結果を統合し、SGDの分布とSGDの影響の広がり可視化を試みた。また、超短寿命地下水トレーサーであるラドン ^{220}Rn (半減期 55 秒)との組み合わせについても検討した。

(3) ラドン・ラジウムを組み合わせたSGD成分識別法の検討

淡水性SGDと再循環性SGDの水塊レベル・生態系スケールでの識別・定量法を検討するために、宮城県気仙沼舞根湾および山形県遊佐町の鳥海山沿岸域(釜磯海岸)において、ラドン(^{222}Rn)と短寿命ラジウム(^{223}Ra および ^{224}Ra)を用いたフィールド調査を実施した。

4. 研究成果

(1) SGDの湧出域の海面温度異常を検知するための観測手法の検討を行った結果、次の結論を得た。画像データに記録されたEXIF情報をもとに、熱画像の撮影範囲と向きを調整し、GIS上で得られた水面温度の情報を空間配置することが可能となった。観測した熱画像データは実際の水温とは大きく異なるため、絶対値としては使用できないが、温度差を表現するものとして使用できる。絶対温度を把握するためには、撮影範囲に、撮影期間中の実際の水温を記録するデータロガーをいくつか設置する必要がある。撮影された熱画像の温度解像度は2程度。1枚の画像データのみの場合、1程度の温度解像度での解析は可能。時間の経過とともに水面状況の変化が生じるため、画像の連続性が重要な場合は、連続性を確保したい方向にドローンを移動さ

せる必要がある。SGD と海水の温度差が大きい時期は、この方法で SGD を検知することは可能であり、実測値のデータから、具体的な温度差を表現することも可能である。

(2) 鳥海山沿岸域の釜磯海岸で得られた砂浜部および海水面の熱画像と海底下の比抵抗値分布の結果から、陸域から続く地下水帯が沖まで続いており、沖合で比較的強い SGD の湧出があることが明らかとなった(図1)。また、地下に高い比抵抗値を示す場所があり、その領域が海底面まで達していたとしても、海水面の温度に顕著な影響を及ぼさない場合もあることも明らかとなった。これらの結果から、ドローンとサーモカメラによる観測は高解像度な温度マッピングを可能にし、SGD が存在する場所と周辺の海水面温度の差を捉えるのに最適であるが、必ずしも SGD の現象が水面まで温度の影響を与えとは限らず、海底付近のみで起こっている温度変化については全く検知できないことが明らかとなった。したがって、この方法は、強い SGD の噴出現象が見られる場合にのみ効果を発揮するものと考えられる。

小浜湾で実施した観測では、海水面に顕著な温度異常は確認できず、SGD による海水面温度の変化を捉えることはできなかった。しかし、曳航比抵抗観測の結果(図2)は、海底下に淡水混じりの水が存在することを示していた。特に、汀線に近い場所で比抵抗値が高いエリアが認められた。ただし、これらは海底面よりも 1~2m 程度深い場所にあり、比抵抗値が高い部分は、海底面まで達していなかった。これらのことから、淡水混じりの水が海底下に存在するが、それらは湧出という現象には至っていない可能性があることが考えられた。これらの結果から、曳航比抵抗調査は、淡水と海水の抵抗値の差が顕著にみられるため、海底の SGD の存在の可能性を確認するのに適しており、湧出していない海底下に存在する「潜在的 SGD」の分布エリアを見つけることはできるが、この観測だけでは SGD 湧出の有無を断定することができないことも明白となった。一方、同じ場所で行った電気伝導度および水温の直接測定の結果は、SGD 湧出を示す結果となった。しかし、必ずしも海底下に高い比抵抗値を示す場所に SGD 湧出が認められるわけではなく、高い比抵抗値を示す場所があったとしても、電気伝導度や水温の測定結果では SGD 湧出が認められない場所もあった(図3)。つまり、海底下に潜在的 SGD が存在したとしても、SGD 湧出にいたらない場所も多くある、もしくは、かなり限定的な範囲にしか電気伝導度や温度へ SGD の影響が及ばない場合もあり、点観測である電気伝導度と水温の直接測定では、その影響を捉えきれないと考えられた。

同地域で過去に行った ^{220}Rn の測定結果(図4)と今回の観測結果を比較すると、 ^{220}Rn の有意な検出があった場所(つまり SGD の湧出があると考えられる場所)と今回の直接測定で SGD の湧出の可能性のあることがわかっ

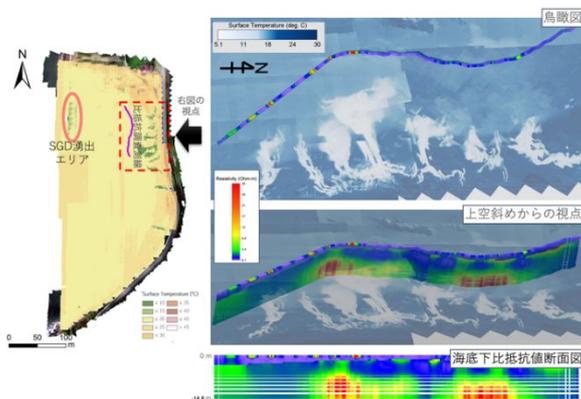


図1 釜磯海岸の砂浜部および海水面の熱画像と海底下の比抵抗値分布の重ね合わせ図

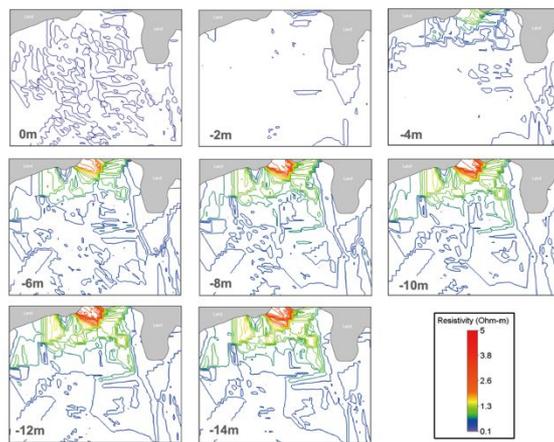


図2 小浜湾若狭地区沖の海底下比抵抗等値線図
対象地域内の比抵抗観測結果を用いた内挿によるグリiddingで作成



図3 海底下比抵抗分布と海底面付近の電気伝導度および水温の直接測定結果

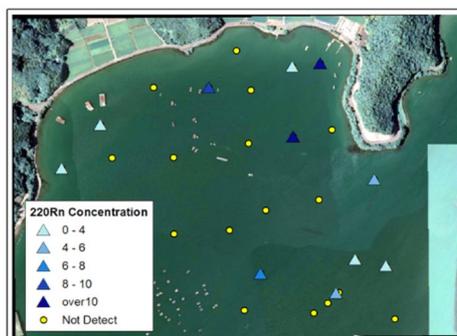


図4 2015年の海底付近の ^{220}Rn 観測結果

た場所について、一部合致するものの、 ^{220}Rn では今回の直接観測では湧出していない場所での湧出の可能性が示唆されている。しかし、 ^{220}Rn で示された SGD の存在の可能性のある場所については、曳航比抵抗観測の結果とは整合的であり、海底に非常に狭い範囲で SGD が湧出している可能性は十分に考えられる。直接観測法は、確実に SGD の湧出現象を捉えることができる可能性を秘めているが、SGD の影響が極めて狭い範囲しか及んでいない場合、調査対象エリアの SGD の存在を確実に把握することができない場合がある。

(3) 気仙沼舞根湾において、複数地点から表層海水を採取し、そこに含まれる ^{222}Rn 濃度と ^{223}Ra および ^{224}Ra 濃度を測定した。別途採取した各端成分の値をもとに、塩分とのミキシングダイアグラムを作成したところ、 ^{222}Rn では淡水性地下水 (FSGW) と再循環性地下水 (RSGW) の識別は困難であるが、 ^{223}Ra (^{224}Ra も同様) では、RSGW を明確に識別することができた (図 5)。この結果をもとに、各端成分の寄与率をベイズ混合モデル (Simmr, R) により推定すると、水塊レベルで端成分寄与率を定量することができ、例えば気仙沼舞根湾の場合は、 $\text{RSGW}/(\text{RSGW}+\text{FSGW}+\text{RW})$ で平均 50% と見積もることが可能であった。沿岸浅海域においては、大気散逸の効果も無視できる短寿命ラジウムの利用は、水塊識別手法としては極めて有効な手法と思われる。

最後に、ドローン観測と電気探査が事前に行われた釜磯海岸において、水塊レベルの地下水識別手法を応用した。SGD の影響の強弱を網羅できるように釜磯海岸内に 6 地点を設け、潮汐変動を考慮して 24 時間のうちに 4 回の試料採取を行った。各試水に含まれる地下水トレーサー (^{222}Rn 、 ^{223}Ra 、 ^{224}Ra) 濃度の測定を行った。 ^{224}Ra と ^{223}Ra の放射能比から水塊の見かけ年齢を算出して海水交換時間を推定した上で、塩分・ ^{222}Rn ・ ^{224}Ra の水収支モデルを構築した。その結果、FGW と RGW の湧出量を定量的に識別することができ (図 6) それらをもとに、栄養塩フラックスまでを簡単に推定することが可能となった。

(4) 本研究課題は、遠隔探査手法とトレーサー探査手法の有用性の検証を詳細に行い、その最適条件を明らかにすることで、SGD の有無や特性、SGD が及ぼす影響の空間的範囲をかなり正確に把握することができるようになった。また、これらの結果を統合しコンピューター上で 3 次元的にマッピングすることで、不均一な現象である海底湧水や海底湧水の影響範囲を可視化することが可能となった。その上で、地下水トレーサー試料を用いた SGD 評価を導入することで、水塊レベルでの SGD 評価およびより広範なスケールでの SGD 評価を行う際の、適切なサンプリング計画を立てることが可能となった。

最後に各手法の適用限界と最適な観測メソッドについて考える。各々の遠隔探査方法には適応の限界があり、これら単体での観測の場合は、SGD が存在しても検知できないことが往々にしてあることが明らかとなった。しかし、これらの観測を合わせて実施することにより、SGD を見落とすことなく観測することが可能であることもわかった。特に、SGD の実態を把握するためには、これらの観測の順序は重要である。より確実に SGD を捉える観測手順は次のとおりである。

1. 俯瞰的にドローンによる観測を行い、強いシグナルがないかどうかを確認し、対象地域と周辺地域との水面温度の差の有無を把握する。
2. 曳航比抵抗調査により、潜在的 SGD を含む SGD が存在する可能性のある場所を把握する。
3. SGD の可能性がある場所について電気伝導度計や温度計、 ^{220}Rn やラジウムなどの SGD のシグナルを直接捉えられる物理量の直接測定を行う。

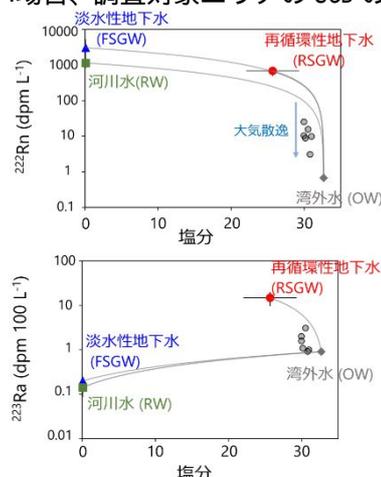


図 5 塩分と ^{222}Rn および ^{223}Ra の関係

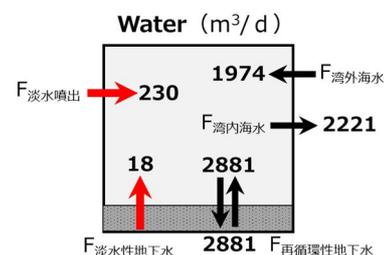


図 6 釜磯海岸の水収支

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田 誠、杉本 亮、中島 壽視
2. 発表標題 火山性砂浜域の沿岸域における地下水由来の熱の空間的広がり
3. 学会等名 日本惑星地球科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田誠、杉本亮、中島壽視
2. 発表標題 小浜湾海底下の淡水性地下水の分布と周辺陸域地形との関係
3. 学会等名 日本惑星地球科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 誠、杉本 亮、宮下 雄次、濱元 栄起、王 智宏
2. 発表標題 海底湧水調査におけるUAVを用いた海面温度測定法の最適化
3. 学会等名 日本惑星地球科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本 亮、八木 亮磨、中島 壽視、石田 健大、山田 誠
2. 発表標題 火山性砂浜域における地下水による栄養塩輸送量と植物プランクトンによる栄養塩同化量の定量
3. 学会等名 日本惑星地球科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島 壽視、杉本 亮
2. 発表標題 気仙沼舞根湾へ流入する地下水が植物プランクトンの増殖に及ぼす影響
3. 学会等名 2021年度水産海洋学会研究発表大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山田 誠 (Yamada Makoto) (50434981)	龍谷大学・経済学部・准教授 (34316)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------