

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：23401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K07889

研究課題名(和文) 海藻と貝殻中の安定同位体情報を用いて沿岸水産資源への海底湧水の寄与を評価する

研究課題名(英文) Evaluation of the contribution of Submarine Groundwater Discharge (SGD) to biological production of coastal fisheries resources by using stable isotope ratio recorded in the algae and the shell

研究代表者

富永 修 (Tominaga, Osamu)

福井県立大学・海洋生物資源学部・特命教授

研究者番号：90264689

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地下水の供給する栄養塩が沿岸域の生物生産にどの程度寄与するかを評価することを目的とした。貝殻の炭素安定同位体比 $^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ および $^{18}\text{O}_{\text{SHELL}}$ から推定した環境水の $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ と $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ は、実測値とよく一致し、地下水環境を評価するプロキシとして有効であることが示された。2ソースモデルによる地下水評価では、河川水の流入する水域で地下水と河川水の寄与を区別できなかった。しかし、ベイズ統計モデルを用いた地下水・上流河川水・沖合水の3ソースモデルにより、イワガキに寄与する地下水の寄与率を正確に評価することが可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二枚貝貝殻中無機の炭素、酸素安定同位体を地下水トレーサーとして用いることで、地下圏を通した「陸域と沿岸域の生態系」、「環境と生物」の連関を客観的に可視化することが可能になった。この技術は、沿岸域の地下水環境マッピングへの応用のほか、貝殻切片から時間軸に添って微量な切削標本を採取することで、近過去に経験した環境を連続的に復元することを可能にする。過去のイベントと地下水環境を検証することにより、地下水が持つ生態学的意義をより明確にすることができ、沿岸域の生物生産機構の解明および沿岸域の総合管理に貢献すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We investigated two subjects 1) whether the ^{13}C of ambient water reflect the proportion of freshwater flow rate in SGD, 2) whether the ^{13}C recorded in the shell of the sessile bivalve reflect that of the ambient water. There was a positive significant relationship between salinity and the ^{13}C of ambient water ($p < 0.01$). The ^{13}C of the shell was high at high SGD flow rate sites and the positive significant correlation was found between the ^{13}C of the shell and that of ambient water. In order to estimate the proportion of freshwater flow rate in SGD from the ^{13}C of the rock-oyster shell, we used the two end member mixing model including DIC concentration of both sea water and fresh underground water. The estimated average freshwater flow rate in SGD ranged from 4% to 35%. These values are higher than those estimated from the ^{13}C of ambient water. The difference of these results seems to be the difference of local SGD environment around rock-oyster.

研究分野：生産生態学

キーワード：炭素安定同位体 窒素安定同位体 地下水 陸域・海域生態系 貝殻 海藻 生産構造

1. 研究開始当初の背景

沿岸域の水産資源の豊かさは陸域から河川を通して豊富な栄養塩が海へと運ばれるためと考えられている。しかし、近年、河川水の流入だけでは説明できない量の栄養塩が、陸域から海域へ流入していることが報告されている。その供給源として考えられているのが、海底湧出地下水いわゆる“海底湧水”である。一般的に、地下水は河川水に比べて高濃度の溶存物質を含んでいるため、海底湧水による栄養塩の供給量が河川の約 50%におよぶとも推定されている。そのため、Moore(1999)は、海底湧水域を隠れた河口と表現し、地下水により供給される栄養塩が沿岸の生物生産に重要な役割を果たしていることを示唆している。また、河川は河口でのみ局所的に海域とつながっているのに対して、海底湧水域は沿岸の一定の空間範囲で広がっている場合が多い。さらに、河川水は降水量の影響を強くうけて非定常的に流出するが、海底湧水は流出量や水温の変動が小さく安定した環境をうみだす。そのため、海底湧水は特に河川が流入していない海域や降水量が減少する時期に沿岸域の生物生産に重要な役割を果たしていると考えられる。

これまで、陸域での水循環を対象とする水文学では、海域は地下水の出口としてのみ扱われており、生物生産とのつながりは取りあげられてこなかった。一方、水圏の研究者は、河川表流水と沿岸域の生物生産のつながりに着目し、多くの研究成果を挙げているものの、海底湧水と生物生産、とくに水産資源とのつながりを研究対象にすることはほとんどなかった。この要因として、1)海底湧水と沿岸生物資源の連関研究が両分野の境界領域にあり、空白部分であったこと、2)地下水シグナルを沿岸生物から検出する手法が確立されていなかった点が挙げられる。海底湧水環境は、地下水に高濃度で含まれる放射性同位元素の ^{226}Ra (ラジウム) や ^{222}Rn (ラドン) を定量分析することで可視化できるが、動植物から地下水シグナルを検出する手法がないため、生物生産に対する海底湧水の直接的な寄与を科学的に検証した例はない。

現在、環境トレーサーとして、炭素、窒素、酸素などの軽元素安定同位体がよく利用される。これらの同位体組成(重い同位体と軽い同位体の質量比)の多様性は、主に蒸発・拡散・酸化還元といった物理化学過程での同位体分別によって生じる。この分別の違いによって、河川水・湖沼水、地下水、海水中の無機炭素(C)、無機窒素(N)、水(H₂O)などの安定同位体組成は、それぞれ特異的な値を示し、溶存成分の起源情報を反映する”水文トレーサー”として用いることが可能となる。一方、海藻や海草などの一次生産者の窒素安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$)は、それらを取り込んだ溶存態無機窒素の安定同位体比($\delta^{15}\text{N}_{\text{DIN}}$)を反映する。また、申請者の予備的実験でアサリの貝殻中の無機炭素の炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ が環境水中の無機炭素の安定同位体比($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)を反映することが確かめられた(富永ら, 2017)。海底湧水が主要な淡水供給源となっている場所では、海水と淡水性地下水が混合しているため、淡水性地下水成分の割合により環境水中の $\delta^{15}\text{N}_{\text{DIN}}$ や $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ は変化する。その結果、環境水中の $\delta^{15}\text{N}_{\text{DIN}}$ や $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ に応答して海藻や貝殻中の炭素、窒素、酸素の安定同位体比も変化する事が予測される。このことを応用すると、海藻や貝殻に記録された安定同位体比から過去にさかのぼって海底湧水由来の栄養の寄与を推定する事ができる。

このように、安定同位体を地下水シグナルの代替指標として利用することで、海底湧水域の無機環境と生物が共通の指標でつながり、同時に得られる成長速度や現存量などの生物情報(特に定着性の海藻類、貝類)を加えることで、対象生物が生息する海域において生物生産への海底湧水の寄与を定量化することが可能となる。

2. 研究の目的

本研究は、河川表流水という地表圏の空間的次元に、地下圏からの新たな次元を加え、これまで目に見えなかった地下水が持つ生態学的意義を明確にして、沿岸域における水産資源の生産に対する地下水の寄与を定量化することが目的である。日本沿岸には、海底湧水と水産資源の連環が指摘されている海域が多数ある。例えば、北海道利尻島のコンブ、鳥海山麓の岩牡蠣、大分県日出町の城下カレイ、岩手県大槌町のホタテやわかめ、広島県や福井県小浜湾のカキ、宮古のニシンや秋田のハタハタの産卵場所が挙げられる。そこで、本研究では、以下の2点について明らかにする。

(1) 研究対象海域の海底湧水環境の可視化

本研究では、環境と生物に共通の指標を用いて生物情報から環境を推定するため、調査対象とする海藻と貝類が生息する海域の海底湧水環境の特性を把握する。特に、ラドン分析による地下水分布と「環境-生物」の共通指標となる無機窒素と無機炭素の安定同位体比($\delta^{15}\text{N}_{\text{DIN}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)を各海域で明らかにする。

(2) 研究対象海域の海藻と貝殻中の安定同位体分析による生物生産への地下水寄与率の推定

研究対象海域周辺に生息する海藻類(主にアオサ類)とイガイ類を環境調査と同時に採集して安定同位体分析を行い、地下水成分がどの程度含まれているかを推定する。貝殻については成長輪とその部分の安定同位体分析結果から地下水寄与率の季節的变化を明らかにする。

1と2の成果を総括することで、水産資源の生産に対して地下水が寄与する割合を推定し、日本沿岸における海底湧水の役割を検証する。

3. 研究の方法

富永ら(2017)は、環境と生物(アサリ貝殻)に共通する地下水シグナルとして、貝殻の炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ が、環境水中の溶存無機炭素(DIC)の炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ を反映す

ることを示した。海水と淡水性地下水は炭素起源の違いにより、それぞれの $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 値が異なることから、海底湧出域の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 値は、両者の混合割合により変化する。その結果、そこに生息する貝類の殻の $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ 値が $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 値に応答して変化することで、地下水の寄与を評価することが可能になる。

(1) 研究対象海域の特徴

研究対象の山形県遊佐町は、活火山である鳥海山の山麓に位置している。鳥海山西部には主要な河川はみられないが、溶岩と火砕岩から構成される地質特性により、鳥海山周辺には 150 カ所以上の湧水が存在し、地下水起原の淡水が供給されている。溶岩流の末端となる遊佐町の釜磯海岸では、節理と呼ばれる岩の割れ目から地下水が豊富に湧出し、容易に観察することができる。シーページメータを用いて定量した淡水性地下水の湧出量は、小さな空間スケールでも局所的に異なり、メイオベントスの群集特性が、湧水環境に応答して特徴づけられることが報告されている。このような特性から、遊佐町海域は沿岸域における地下水研究を行う上で最適な環境を提供している。

(2) 研究対象生物

環境水の地下水寄与率を推定する指標生物としてイワガキ (*Crassostrea nippona*) を用いた。イワガキは、日本沿岸域の岩場に分布する固着性の二枚貝で、遊佐町沿岸域では、海底湧水がイワガキの生産に寄与することが示唆されている。イワガキ貝殻の主成分は、カルサイト結晶形の炭酸カルシウムで、主に環境水中の溶存無機炭素から形成される。

(3) $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ による地下水寄与率の推定プロセス

二枚貝の殻の $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ は環境水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ だけでなく、代謝（呼吸）によって生成する二酸化炭素の $\delta^{13}\text{C}$ の影響も受ける。そのため、貝殻の $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ 値は、環境水中の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ と代謝由来炭素の $\delta^{13}\text{C}_{\text{CR}}$ および貝殻に組み込まれる代謝由来炭素の寄与率 CM により決定される。McConnaughey et al. (2008) は、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ と環境水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、代謝由来の $\delta^{13}\text{C}_{\text{CR}}$ から単純な 2 ソースモデルを用いて、次の式により CM を算出した。

$$\text{CM} = 100 \times ((\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}} - \varepsilon_{\text{ar-b}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{CR}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}})) \quad (1)$$

ここで、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CR}}$ は主要餌生物である懸濁態有機物 (POM) の $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 、結晶化する際の同位体分別係数 $\varepsilon_{\text{ar-b}}$ はカルサイトの +0.9‰ とした。したがって、貝殻に対する CM を決定することで、次の式 (2) により、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ から環境水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ を推定することができる。

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} = (100 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}} - 100 \times \varepsilon_{\text{ar-b}} - \text{CM} \times \delta^{13}\text{C}_{\text{CR}}) / (100 - \text{CM}) \quad (2)$$

イワガキから推定した $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ および海水と地下水をエンドメンバーとした 2 ソース混合モデル (3) 式を適用することで、炭素安定同位体比により求めた陸生地下水寄与率 (以下 FGR_c) を算出できる。したがって、海水の寄与率は、1 - FGR_c で計算される。

$$\text{FGR}_{\text{C}} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{Coast}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{SW}} \times \text{DIC}_{\text{SW}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{Coast}} \times (\text{DIC}_{\text{SW}} - \text{DIC}_{\text{GW}}) - (\delta^{13}\text{C}_{\text{SW}} \times \text{DIC}_{\text{SW}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{GW}} \times \text{DIC}_{\text{GW}})) \quad (3)$$

ここで、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Coast}}$ はイワガキの $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ から推定した環境水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SW}}$ および $\delta^{13}\text{C}_{\text{GW}}$ は、それぞれ海水と地下水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 DIC_{SW} および DIC_{GW} は、それぞれ海水と地下水の DIC 濃度である。DIC 濃度に差のある 2 ソースを混合した場合、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ は混合比に対して線形ではなく、非線形の関係を示す。実際に DIC 濃度差のある海水と地下水を定量的に混合した試験をしたところ、混合水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ は、混合割合をあらゆる塩分に対して曲線関係を示した (図 1)。調査地の遊佐町沿岸域では地下水の DIC 濃度が海水より低いため、両方の DIC 濃度を考慮した 2 ソース混合モデル式を用いて FGR_c を算出する必要がある。

(4) $\delta^{18}\text{O}_{\text{SHELL}}$ による地下水寄与率の推定プロセス

貝殻の酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SHELL}}$) は、形成時の水温と環境水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ に依存している。古環境研究の分野では $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ を 0‰ と仮定して、生物の炭酸塩の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Carbonate}}$ から過去の気候を復元している。Eretz and Luz (1983) は、石灰質の殻を持つ有孔虫の炭酸カルシウムの $\delta^{18}\text{O}_{\text{Carbonate}}$ と飼育水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、生息環境水の水温 T (°C) に以下の関係式があることを示唆した。

$$T = 17.0 - 4.52 (\delta^{18}\text{O}_{\text{Carbonate}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}) + 0.03 (\delta^{18}\text{O}_{\text{Carbonate}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}})^2 \quad (4)$$

(4) 式で、石灰質の殻の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Carbonate}}$ と形成された時期の生息水温 T がわかれば、二次方程式の解から環境水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ を推定できる。ここで、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Carbonate}}$ にイワガキの $\delta^{18}\text{O}_{\text{SHELL}}$ を使用し、生息水温には仙台管区気象台の沿岸域の海面水温情報を参照して、山形県沿岸海水温の採集前 2 カ月間の平均値から $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ を計算した。

イワガキの $\delta^{18}\text{O}_{\text{SHELL}}$ から推定した環境水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ を以下に示した海水と地下水の 2 ソース混合モデル式に当てはめることで、酸素安定同位体比による地下水寄与率 (FGR_o) を算出できる。

$$\text{FGR}_{\text{O}} = (\delta^{18}\text{O}_{\text{Coast}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}) / (\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{GW}}) \times 100 \quad (5)$$

ここで、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Coast}}$ はイワガキから推定した $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ であり、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ および $\delta^{18}\text{O}_{\text{GW}}$ は、海水と地下水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ である。遊佐町沿岸域の海水と地下水の DO 濃度の差は DIC 濃度より小さい。また、混合水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ は海水と地下水の混合比に対して直線関係を示したため、 $\delta^{18}\text{O}$ を用いた解析では、DO 濃度を考慮しない 2 ソース混合モデルを用いて地下水寄与率を算出できる。

(5) ベイズ混合モデルを用いた地下水寄与率推定

イワガキの貝殻に地下水がどの程度寄与するかを相対的に定量化するために、SIAR を用いてベイズ混合モデルにより解析した。SIAR による解析は、統計解析ソフトウェア R のパッケージ *simmr* を用いた。解析に用いるデータは、(2) 式と (4) 式により推定した個体別環境水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ と $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、各エンドメンバー（海水、地下水、河川水など）の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ と $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、それぞれの DIC 濃度と必要であれば DO 濃度である。ベイズモデルの最大の利点是不確実性を組み込んで、イワガキの貝殻に対する地下水および海水の寄与率の最尤推定値と確率を計算できる点である。*simmr* では、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の単独のトレーサーを用いた推定に加えて、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ を組み合わせることで地下水寄与率の推定も可能なため、エンドメンバーを増やすことが可能である。

4. 研究成果

(1) 山形県遊佐沿岸での地下水寄与率推定の事例

2017 年 7 月 9 日から 11 日の期間に、遊佐町沿岸で実施した試験の結果を紹介する。遊佐沿岸域の 5 か所 6 地点のラドン濃度を高いほうから並べると、女鹿 ≧ 釜磯 A (高湧出域) > 釜磯 B (低湧出域) > 滝之浦 > 鳥崎 > 西浜の順になり、地下水環境の違いがみられた (図 2(a))。この結果は、Hosono et al. (2012) と符合しており、釜磯海岸の高湧出域や女鹿は、地下水の流入が顕著であることを確認できた。

エンドメンバーである海水と地下水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ は、それぞれ 0.52‰ と -18.33‰、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ は、それぞれ -0.97‰ と -6.64‰ であった。また、DIC 濃度は、海水が 21.66 mg/L、地下水が 5.69 mg/L であった。マイクロドリルを用いて採取した、イワガキの貝殻縁辺部の $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ および $\delta^{18}\text{O}_{\text{SHELL}}$ は、ラドン濃度が高い釜磯高湧出域や女鹿で低く、ラドン濃度が低い鳥崎で高い値を示した。これらの結果から判断して、イワガキ貝殻の $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ および $\delta^{18}\text{O}_{\text{SHELL}}$ は、地下水環境を反映していると考えられた。

採集したすべてのイワガキの $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ と環境水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、懸濁態有機物の $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ から算出した代謝寄与率 CM の平均値と標準偏差は、 $10.2 \pm 3.4\%$ ($n=36$) であった。しかし、代謝寄与率 CM は、地点ごとに異なる傾向がみられた。地点内や個体間でイワガキの CM が変動する要因として、イワガキの生息する水温の違いや懸濁態有機物の $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ が一様でないことが挙げられる。そこで、地点別に CM の平均値を計算し、(1) 式により環境水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ を推定した。貝殻から推定した $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 値は、環境水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 値とよく一致しており (図 2(b))、イワガキ貝殻の $\delta^{13}\text{C}_{\text{SHELL}}$ から推定した環境水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 値の有効性が検証された。

イワガキの $\delta^{18}\text{O}_{\text{SHELL}}$ から推定した環境水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ も、実測した $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ とよく似た傾向を示したことから (図 2(c))、環境水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ の推定に有効であると考えられた。しかし、推定値と実測値に約 1‰ の差が認められる点もあった。これは、環境水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ を推定する際に、山形県沿岸海水温の採集前 2 ヶ月間の平均値を使用したが、各地点の環境水の水温は、海水や河川水、砂浜域からの表流地下水または海底湧水等が流入するため一様でないことに起因している可能性が高い。特に、遊佐沿岸で湧出する地下水の水温は、夏季でも約 10℃ と低く、水温環境に強く影響する。貝殻から環境水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ を推定するためには、貝殻の形成期間と一致した時期の環境水の水温を地点別に用いる必要がある。

最後に、ベイズ混合モデルにより推定した地下水寄与率 FGR を図 3 に示した。FGR の中央値は、6.2% (鳥崎) から 30.5% (女鹿) の範囲を示し、西浜を除いてラドン濃度の分布と符合していた。一方、月光川の河口域に位置する西浜は、 ^{222}Rn 濃度が低いにもかかわらず、FGR は 21.8% と釜磯の高湧水域の 24.8% と近い値を示した。月光川の ^{222}Rn 濃度は地下水と比べて低いが、河川水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ と $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ は地下水と同様に海水より低い値を示した。ラドン ^{222}Rn は不活性の希ガスであるため、水中の濃度は、大気への拡散により減少する。そのため、河川水のように大気と接している表流水の ^{222}Rn 濃度は低くなるが、溶存している炭素や窒素は減少しない。したがって、西浜の FGR が高かったのは、河川水を通して地下水が供給されているためと考えられる。エンドメンバーとして河川水を加えた 3 ソースのベイズ混合モデルでは、河川水に流入した地下水の寄与が 15.5% と推定され、西浜の結果を説明できる。

引用文献

- Zektser et al. 1993
Moore 1999, *Nature* 380: 612-614
富永ら 2017, 地下水・湧水を介した陸-海のつながりと人間社会 (小路淳・杉本亮・富永修 編). 恒星者厚生閣, 東京. 2017; 79-89.
McConnaughey et al. 2008, *Geochim. Cosmochim. Acta*; 61: 611-622.
Eretz and Luz 1983, *Geochimica et Cosmochimica Acta.*; 47, 1025-1031.
Hosono et al. 2012, *Environmental Science & Technology.*; 46(10), 5319-5326.

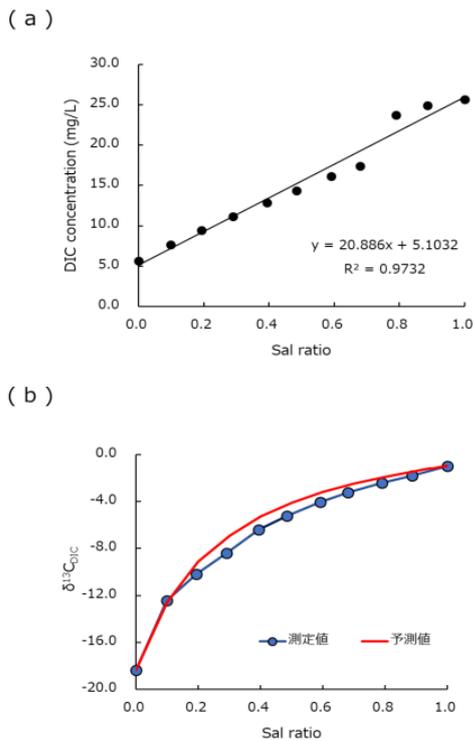


図1 遊佐沿岸域で採集した地下水と沖合水を定量的に混合した塩分比率に対する DIC 濃度 (a), $\delta^{13}C_{DIC}$ (b) の変動.

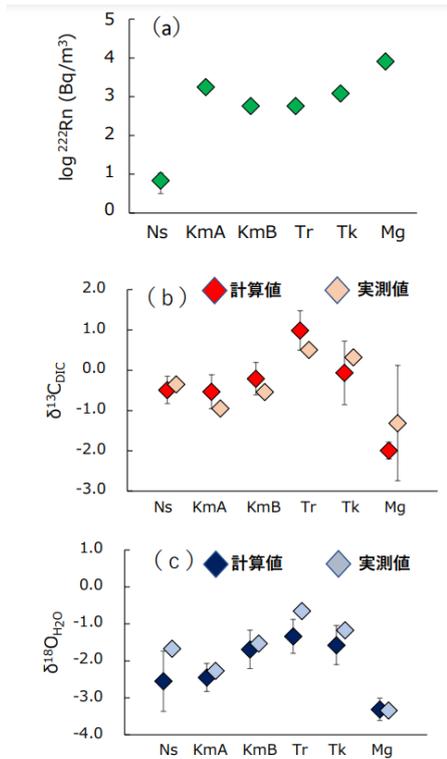


図2 遊佐沿岸域の6地点におけるラドン (^{222}Rn) 濃度 (Bq/m³) (a), イワガキ貝殻の $\delta^{13}C_{SHELL}$ から推定した $\delta^{13}C_{DIC}$ と実際に採水・測定した環境水の $\delta^{13}C_{DIC}$ (b), イワガキ貝殻の $\delta^{18}O_{SHELL}$ から推定した $\delta^{18}O_{H_2O}$ と実際に採水・測定した環境水の $\delta^{18}O_{H_2O}$ (c).

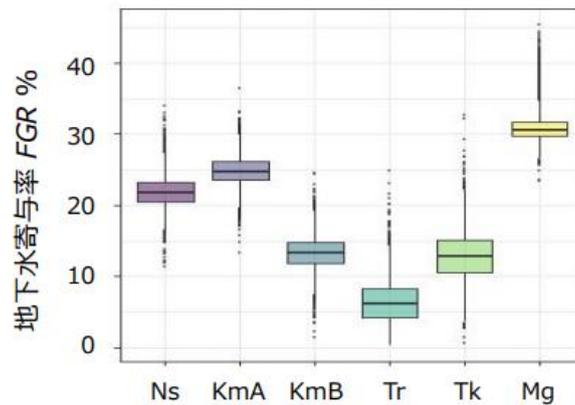


図3 ベイズ混合モデルにより, イワガキ貝殻の $\delta^{13}C_{SHELL}$ と $\delta^{18}O_{SHELL}$ から算出した地下水寄与率 (FGR %). 中央値と 25%および 75%パーセンタイル.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 富永修	4. 巻 146
2. 論文標題 硝酸イオンの高精度同位体測定手法を用いた沿岸海域の生物生産・物質循環に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 京大大学生態学研究センター センターニュース	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujita, Koji ; Shoji, Jun ; Sugimoto, Ryo; Nakajima, Toshimi; Honda, Hisami; Takeuchi, Masaru; Tominaga, Osamu; Taniguchi, Makoto	4. 巻 7
2. 論文標題 Increase in Fish Production Through Bottom-Up Trophic Linkage in Coastal Waters Induced by Nutrients Supplied via Submarine Groundwater	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 FRONTIERS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fenvs.2019.00082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toshimi Nakajima, Ryo Sugimoto, Osamu Tominaga, Masaru Takeuchi, Hisami Honda, Jun Shoji, and Makoto Taniguchi.	4. 巻 5
2. 論文標題 Fresh and recirculated submarine groundwater discharge evaluated by geochemical tracers and a seepage meter at two sites in the Seto Inland Sea, Japan.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Hydrology	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/hydrology5040061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 小林志保, 生田健吾, 杉本亮, 本田尚美, 山田誠, 富永修, 小路淳, 谷口真人.	4. 巻 85
2. 論文標題 山形県釜磯海岸における海底湧水の定量化と栄養塩環境への影響評価.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本水産学会誌	6. 最初と最後の頁 30-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2331/suisan.18-00020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Sugimoto, Katsuhiko Kitagawa, Saori Nishi, Hisami Honda, Makoto Yamada, Shiho Kobayashi, Jun Shoji, Shinji Ohsawa, Makoto Taniguchi, Osamu Tominaga	4. 巻 563
2. 論文標題 Phytoplankton primary productivity around submarine groundwater discharge in nearshore coasts.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Marine Ecology Progress Series	6. 最初と最後の頁 25-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3354/meps11980	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Utsunomiya Tatsuya, Hata Masaki, Sugimoto Ryo, Honda Hisami, Kobayashi Shiho, Miyata Yoji, Yamada Makoto, Tominaga Osamu, Shoji Jun, Taniguchi Makoto	4. 巻 11
2. 論文標題 Higher species richness and abundance of fish and benthic invertebrates around submarine groundwater discharge in Obama Bay, Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology: Regional Studies	6. 最初と最後の頁 139 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejrh.2015.11.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Daichi Nakano, Mitsunobu Kamiya, Osamu Tominaga	4. 巻 83
2. 論文標題 Molecular identification of macroalgal fragments in gut contents of the sea urchin <i>Hemicentrotus pulcherrimus</i> .	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fisheries Science	6. 最初と最後の頁 425-432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12562-017-1080-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi S, Sugimoto R, Honda H, Miyata Y, Tahara D, Tominaga O, Shoji J, Yamada M, Nakada S, Taniguchi M.	4. 巻 4
2. 論文標題 High-resolution mapping and time-series measurements of ²²² Rn concentrations and biogeochemical properties related to submarine groundwater discharge along the coast of Obama Bay, a semi-enclosed sea in Japan.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 6-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-017 -0124-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaru Takeuchi, Osamu Tominaga 1, Ryo Sugimoto, Katsuhiko Kitagawa, Makoto Yamada, Hisami Honda, Jun Shoji, Shiho Kobayashi, Kengo Ikuta and Makoto Taniguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of the environmental condition of Submarine Groundwater Discharge(SGD) by using nitrate stable isotope ratio recorded in sea lettuce(Ulva sp.).	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The JSFS 85th Anniversary-Commemorative International Symposium	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Osamu Tominaga, Ryo Sugimoto, Katsuhiko Kitagawa, Masaru Takeuchi, Makoto Yamada, Jun Shoji, Hisami Honda, Shiho Kobayashi, Makoto Taniguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Contribution of the submarine groundwater discharge (SGD) to sessile bivalve production; estimate by the carbon stable isotope ratio recorded in the shell.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The JSFS 85th Anniversary-Commemorative International Symposium	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 富永 修・戸邊 星良・石田 健大
2. 発表標題 アサリ貝殻の炭素・酸素安定同位体比を用いた近過去の地下水環境復元
3. 学会等名 2020地球惑星連合会議
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 富永修
2. 発表標題 安定同位体トレーサーで環境と沿岸生物をつなぐ
3. 学会等名 令和3年度日本水産学会春季大会 シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 竹内 優・石田 健大・中島 壽視・平井タケル・杉本 亮・小路 淳・本田 尚美・谷口 真人・富永修
2. 発表標題 固着性の2枚貝貝殻の炭素・酸素安定同位体を用いて推定した地下水環境
3. 学会等名 2019地球惑星連合会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田健大・竹内優・杉本亮・中島壽視・小林志保・木庭啓介・福島慶太郎・富永修
2. 発表標題 アナアオサ室素安定同位体比を用いて推定した海底湧水寄与率.
3. 学会等名 2019地球惑星連合会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Fujita, Ryo Sugimoto, Toshimi Nakashima, Hisami Honda, Masaru Takeuchi, Osamu Tominaga, Makoto Taniguchi ,Jun SHOJI
2. 発表標題 Contribution of submarine groundwater discharge on coastal fisheries production: increase in feeding and growth rates of juvenile fishes revealed by a cage experiment
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富永 修、杉本 亮、小林 志保、小路 淳、竹内 優、山田 誠、本田 尚美、谷口 真人
2. 発表標題 海底湧水環境の異なる2海域におけるメイオベントス群集構造の比較
3. 学会等名 地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内 優、石田健大、中島壽視、杉本 亮、本田 尚美、谷口 真人、小路 淳、富永 修
2. 発表標題 二枚貝の貝殻炭素安定同位体を用いた大槌湾と船越湾の海底湧水環境の評価
3. 学会等名 地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田健大・竹内優・杉本亮・中島壽視・本田尚美・谷口真人・小林志保・小路淳・富永修
2. 発表標題 窒素安定同位体比分析による藻類生産に対する海底湧水の寄与率推定
3. 学会等名 平成30年度日本水産学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内優、石田健大、平井タケル、中島壽視、杉本亮、小路淳、本田尚美、谷口真人、富永修
2. 発表標題 イワガキ貝殻の炭素・酸素安定同位体比から推定した山形県遊佐町沿岸の海底湧水環境
3. 学会等名 第8回 同位体環境学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉本 亮、本田 尚美、三島 壮智、大沢 信二、小路 淳、富永 修、谷口 真人
2. 発表標題 別府湾および大槌湾の浅海域の一次生産速度に地下水湧出が及ぼす影響 .
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富永 修、杉本 亮、北川 勝博、竹内 優、山田 誠、小路 淳、本田 尚美、小林 志保、谷口 真人
2. 発表標題 付着性二枚貝の貝殻に記録された炭素安定同位体比を用いた海底湧水環境の評価。
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富永修
2. 発表標題 見える水、見えない水を通した里山・里地・里海のつながり。
3. 学会等名 日本エネルギー環境教育学会第12回全国大会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaru Takeuchi, Osamu Tominaga 1, Ryo Sugimoto , Katsuhiro Kitagawa , Makoto Yamada ,Hisami Honda , Jun Shoji , Shiho Kobayashi, Kengo Ikuta and Makoto Taniguchi
2. 発表標題 Evaluation of the environmental condition of Submarine Groundwater Discharge(SGD) by using nitrate stable isotope ratio recorded in sea lettuce(Ulva sp.).
3. 学会等名 The JSFS 85th Anniversary-Commemorative International Symposium
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Osamu Tominaga, Ryo Sugimoto, Katsuhiro Kitagawa, Masaru Takeuchi, Makoto Yamada, Jun Shoji, Hisami Honda, Shiho Kobayashi, Makoto Taniguchi
2. 発表標題 Contribution of the submarine groundwater discharge (SGD) to sessile bivalve production; estimate by the carbon stable isotope ratio recorded in the shell .
3. 学会等名 The JSFS 85th Anniversary-Commemorative International Symposium,
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島壽視・竹内優・富永修・本田尚美・谷口真人・小路淳・杉本亮
2. 発表標題 Ra 同位体を用いた海底湧水量評価 - 瀬戸内海沿岸域における事例 -
3. 学会等名 平成29年度水産海洋学会研究発表大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内 優・石田 健大・中島 壽視・杉本 亮・小路 淳・本田 尚美・谷口 真人・富永修
2. 発表標題 地下水の豊富な3海域において貝殻中 ^{13}C から推定したカキ生産への海底湧水の寄与.
3. 学会等名 平成30年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 藤田浩司, 杉本 亮・中島壽視・竹内 優・富永 修, 本田尚美・谷口真人, 塩山恭平・小路 淳
2. 発表標題 地下水と水産資源のつながりを検証するための野外実験: マコガレイ稚魚の摂餌・成長から.
3. 学会等名 平成30年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2017年～2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 富永 修、小路 淳、杉本 亮、日本水産学会	4. 発行年 2017年
2. 出版社 恒星社厚生閣	5. 総ページ数 141
3. 書名 地下水・湧水を介した陸-海のつながりと人間社会	

1. 著者名 Shoji J. and O. Tominaga	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 333
3. 書名 Relationships Between Submarine Groundwater Discharge and Coastal Fisheries as a Water-Food Nexus. In The Water-Energy-Food Nexus Human-environmental Security in the Asia-Pacific Ring of fire (Eds. Endo A. ,Oh T)	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------