

令和 4 年 8 月 26 日現在

機関番号：23401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2018～2021

課題番号：18KK0428

研究課題名（和文）海底湧水が創出する生物生産ホットスポット：気候帯レベルでの比較

研究課題名（英文）Hotspots of biological production created by 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） 12,000,000円

渡航期間： 10ヶ月

研究成果の概要（和文）：本課題では、世界中の海底湧水と生物生産過程の研究成果をまずレビューした。その上で、異なる特徴を有した国外を含む4サイトでフィールド調査を実施した。その結果、海底湧水による栄養塩輸送は、植物プランクトンの現存量や一次生産速度を総じて増加させていた。しかし、淡水性地下水が噴出するような場所では、水温が低下するなど、局所的には負の影響を及ぼしているとも確認された。一方、再循環性地下水は、顕著な一次生産の増大に繋がりがやすかった。海域全体を考慮すると地下水を含む陸水が、制限栄養塩を効率的かつ安定的に供給していることが、沿岸海域の高い一次生産を維持する仕組みとして重要である可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海域全体の栄養塩供給源としては、外海からの輸送が卓越する場合も多いが、地下水を含む陸水が、制限栄養塩を効率的かつ安定的に供給していることが、沿岸海域の高い一次生産を維持する仕組みとして重要であることを科学的に実証した。沿岸海域の高い生物生産力の恩恵を永続的に享受するためにも、地下水の持続可能性も考慮した沿岸海域全体の生態系保全や利活用が重要となる。

研究成果の概要（英文）：At first, we reviewed the 136 articles focusing on the relationship between submarine groundwater discharge (SGD) and biological production. Then, we conducted the field surveys at four sites with different SGD properties in Australia and Japan. As a result, nutrient transport via SGD stimulated biomass and productivity of phytoplankton. However, we ascertained the negative impact on primary production where fresh SGD was dominated local site, because colder water input decreased primary productivity. On the other hand, the dominance of recirculated SGD easily provoked high primary production. We conclude that terrestrial water inputs including SGD play an important role in sustaining primary production through an effective and constant supply of limited nutrients into coastal seas.

研究分野：海洋生物環境学

キーワード：海底湧水 一次生産 浅海域 ラドン ラジウム 砂浜 マングローブ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2000年代以降、河川水に匹敵する量の栄養塩を地下水が海底湧水として沿岸海域に輸送していることが次々と明らかになってきた。しかし、沿岸海域の物質循環や生物生産に及ぼす影響は地域固有性が高く、依然としてよく理解されていない。研究代表者らは、生物量と生産速度の調査を組み合わせることで、海底湧水が沿岸海域に生物生産力の高いホットスポットを創出していることを、世界に先駆けて明らかにし始めている (Sugimoto et al. 2017; Fujita et al. 2019 など)。しかし、これらの研究は日本国内に限られた地域でのみ行われたものであり、一般性・普遍性を持たせるためには、異なる気候帯を含むより多くの沿岸海域で同一の調査を実施する必要がある。グローバルに考えた場合、海底湧水が創出する生物生産ホットスポットの形成機構にも差が生じる可能性がある。特に、湧出する地下水の温度や塩分の違いは、沿岸海域の生物生産に対し大きな影響を及ぼしている想定されているが、その実態が科学的に評価された例はない。

2. 研究の目的

本研究では、熱帯から温帯の気候帯を有するオーストラリアと日本のいくつかのサイトも加えながら、多様な気候帯で統一的なフィールド調査を実施する。また、ラジウム (Ra) を用いた評価手法を海外共同研究者の協力のもとに導入することで、海底湧水の組成 (淡水性 or 再循環性) の識別も新たに加えながら、海底湧水が沿岸生態系に及ぼしている影響を評価する。

本研究課題は、COVID-19により当初予定していた2年目以降の海外調査を行うことができなかったため、世界各地で行われている海底湧水と生物生産過程に関する研究論文のレビューも急遽執り行うこととした。

3. 研究の方法

(1) レビューによる研究動向把握

2020年ごろまでに報告されている海底湧水による栄養塩輸送が生物に及ぼす影響を評価した136報の論文をレビューした。

(2) 実海域での事例研究

異なる特性を持つ4カ所の沿岸海域 (国外2カ所、国内2カ所) において、調査方法を統一して野外調査を行った。海底湧水の評価にはラドンもしくはラジウムから推定した湧水量もしくは物質濃度の空間的差異を、一次生産量の評価には現存量指標としてクロロフィル a 濃度、生産速度指標として現場培養実験で推定する炭素取り込み速度 (13C 法もしくは明暗瓶法) を用いた。

(3) 実験的検証

海底湧水による栄養塩輸送が、植物プランクトン増殖にどのように寄与しているのかを評価するため、培養瓶中での栄養塩添加実験を行い、河川水・淡水性地下水・再循環性地下水の役割の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 海底湧水が生物生産に及ぼす影響のレビュー

136報の論文を生物研究のスケールごとに3種類 (種・群集・生態系) に分類し、その上で応答パラメータごとに論文を整理した。その上で、海底湧水がそれぞれのパラメータ応答に対してポジティブに働いていたのか (Increase: 増加)、ネガティブに働いていたのか (Decrease: 減少)、不明確もしくは両方の影響がみられたのか (Unclear/mixed: 不明確) とした。その結果、69%の論文で、海底湧水が生物応答を増加させる方向に働いていると報告していた。このことは、海底湧水による栄養塩輸送は、沿岸海域の生物量や生産速度などを総じて増加させていたと結論付けられる。しかしながら、残り31%の論文では生物応答を減少させる、もしくは影響が不明確であった。一方で、生物応答に対して、海底湧水の組成 (淡水性 vs 再循環性) やタイプ (噴出 vs 浸出) に対する議論はほとんど行われておらず、影響の実態が世界的にも未解明な課題であることが確認された。

Biological response		Response to SGD nutrients		
		Increase	Decrease	Unclear/mixed
Species scale	Organism abundance	17	2	9
	Growth and biomass	9	1	2
	Tissue N:P ratio	5	1	2
	Disease	1	-	-
Community scale	Richness	1	1	1
	Chlorophyll a	20	-	6
	Diversity	3	5	2
	N sourcing	21	-	1
	Benthic density	-	1	3
Ecosystem scale	Productivity/photosynthesis	11	-	2
	Respiration	2	1	1
	Anoxia/deoxygenation	1	-	-
	Calcification	3	1	-

表1 異なるスケール・生物応答ごとに、海底湧水が生物応答に及ぼしている影響について調べた136報の論文の結果を“増加”“減少”“不明確”で分類した。表中の数字は論文数。(Santos et al. 2021)

(2) 実海域での事例研究

サイト1：オーストラリア温帯沿岸域

2019年6月末に、シドニー湾内の4サイト(砂浜×2、マングローブ、砂泥干潟)、ポタニー湾内の1サイト(砂浜)において調査を実施した。すべてのサイトは最干潮時に調査を行った。ここでは、砂浜での地下水採取および汀線から沖合50mまでの浅海域での一次生産量(¹³C法)と海底湧水量(ラジウム法)のサイト間での違いを評価した。²²⁴Raから推定された海岸線1m当たりの地下水湧出量(SGD)はサイト間で大きくばらつき、砂浜や干潟で0.43-1.47 m³ m⁻¹ d⁻¹ (0.04-2.94 cm d⁻¹)程度であったのに対し、マングローブでは0.02 m³ m⁻¹ d⁻¹と極端に小さかった。地下水湧出量と植物プランクトンの現存量(Chl-a)には有意な正の相関関係が認められた(図1)。一次生産速度も湧出量の増加に伴って有意ではないものの、増加する傾向は認められた。特に、最も高いChl-a濃度(8.6±2.0 μg/L)と一次生産速度(56±21 μgC L⁻¹ h⁻¹)は再循環性地下水の湧出(1.1 m³ m⁻¹ d⁻¹)が卓越する干潟域で認められた。

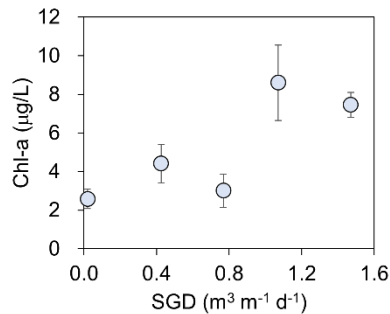


図1 海底湧水量とクロロフィルa濃度の関係

サイト2：オーストラリア亜熱帯沿岸域

2019年8月上旬に、アグネスウォーターズ近郊の原生マングローブ域において、24時間連続観測を実施した。ラドンの連続観測から海底湧水量(間隙水交換量)を推定した。植物プランクトンの一次生産速度は、¹³C法を用いて2時間後ごとに計12回の疑似現場法による培養実験を行った。培養実験で得られた一次生産速度と光強度の関係からPI曲線を作成し、水柱での一次生産量を算出した。²²²Rnから推定される海底湧水量は平均で47±32 cm/dであり(図2)、溶存態無機窒素(DIN)とリン(DIP)の輸送量はそれぞれ8.46 mgN/m²/d、0.94 mgP/m²/dであった。一方、一次生産速度は13.61 mgC/m²/dであった。レッドフィールド比から推定されるNとPの同化量は、Nで28%、Pで35%が海底湧水によって賅われている可能性が示唆された。原生マングローブ域においても、再循環性地下水(間隙水交換)による栄養塩供給は、水柱一次生産量に無視できない栄養塩供給源であることが明らかになった。

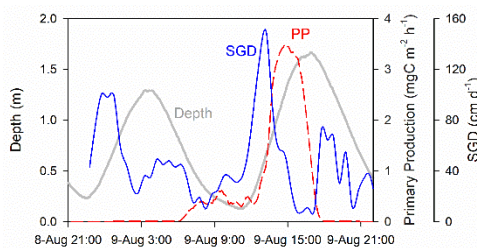


図2 25時間連続観測の結果。データは水深、海底湧水量(SGD)、一次生産量(PP)。

サイト3：山形県釜磯海岸

2019年6月に鳥海山沿岸部の砂浜で噴出する淡水性地下水の一次生産への影響を評価するために、²²²Rn濃度が異なる(湧水の影響強度が異なる)3測点(岸・沖を含む計6か所)で、¹³C法を用いた現場培養実験(in situ)により一次生産速度を測定した。その結果、²²²Rn濃度が増加し、塩分が低下するほど栄養塩濃度(DIN・DIP・DSi)は増加するものの、一次生産速度は顕著に低下する傾向にあり、淡水性地下水の湧出が一次生産を低下させている可能性が認められた。淡水地下水の湧出影響が極端に強い場所(K1-1・K1-2)は、周囲よりも水温が低かったため、温度条件を変えて行った培養実験(ex situ)の結果と比較したところ、培養水温が+2.6℃になったことで、一次生産速度は有意に増加した(図3)。このことから、海底湧水の噴出域では、塩分や栄養塩濃度ではなく、地下水の温度が、海域の一次生産の制限要因として重要であることが明らかになった。

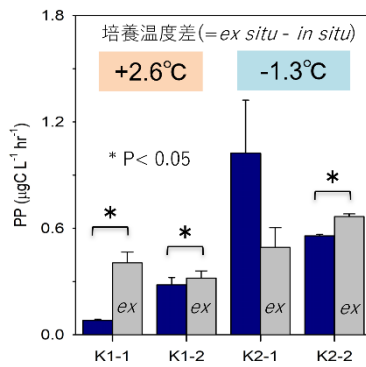


図3 25時間連続観測の結果。データは水深、海底湧水量(SGD)、一次生産量(PP)。

2020年8月には、砂浜域全域において、地下水による栄養塩輸送が、一次生産にどの程度寄与しているのかを定量するために、対象海域を網羅するように6測点を設け、24時間調査(6時間ごとに4回のサンプリング)を行った。²²²Rnと²²⁴Raの収支モデルから推定された淡水性地下水(FGW)の流入量は248 m³/d、再循環性地下水(RGW)の流入量は2881 m³/dであった。地下水(FGW+RGW)による栄養塩輸送量は、溶存無機態窒素(DIN)で20.5 mol/d、リン(DIP)で1.2 mol/d、ケイ素(DSi)で

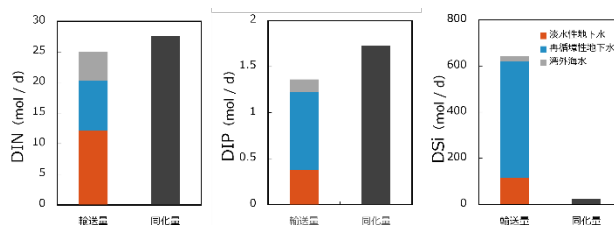


図4 地下水による栄養塩類(DIN・DIP・DSi)の輸送量と植物プランクトンによる栄養塩類の同化量。

で 619.7 mol/d であった。このうち、DIP と DSi のそれぞれ 62% と 78% を RGW が占めていたのに対し、DIN の 49% は FGW 由来であった。一方、対象エリアにおける植物プランクトンの純一次生産量 (NPP) の平均値は 0.35 mgC/L/d であった。レッドフィールド比をもとに推定される栄養塩同化量は、DIN で 27.6 mol/d、DIP で 1.7 mol/d、DSi で 25.9 mol/d であり、DIN と DIP の輸送量が同化量の約 70% に相当していた。以上のことから、釜磯海岸の生物生産の大部分が、地下水が供給する栄養塩をベースに成り立っている可能性が強く示唆された。ただし、DIN は淡水性地下水が、DIP は再循環性地下水が最大の栄養塩ソースであり、地下水の組成の違いは、一次生産への重要なファクターとなることも示された。

サイト 4 : 宮津湾

若狭湾の枝湾の一つである宮津湾奥部に位置するトリガイ養殖筏の一つを調査サイトとし、海底湧水が一次生産環境に及ぼす影響の季節変化を捉えることを目的に、2021 年 6 月から 2022 年 4 月にかけて調査を毎月実施した。海底湧水の影響は ^{222}Rn と ^{224}Ra を、一次生産速度は明暗瓶法により評価した。TS ダイアグラムを用いた水塊構造解析から、本海域は秋季から冬季にかけて対馬暖流水の影響が卓越し、それに伴って輸送される栄養塩類が主要な栄養塩供給源になっていた。一方、春季から夏季は、栄養塩が枯渇している長江希釈水が海域へ流入している。この時の底層水では、 ^{222}Rn や ^{224}Ra が著しく高く、栄養塩濃度とも有意な正の相関関係が認められ、地下水による栄養塩供給が重要であることが確認された。夏季においては、クロロフィル a 濃度は 2 mg/L 以下と低かったものの、水柱あたりの総一次生産量 (7-9 月平均で 3.9gC/m²/d) は他海域の二枚貝養殖場と比較しても高く、成層期においては GPP の 17-59% が海底湧水の影響が顕著な水深帯でのものであり、養殖場の一次生産環境に大きく貢献していることが示された。

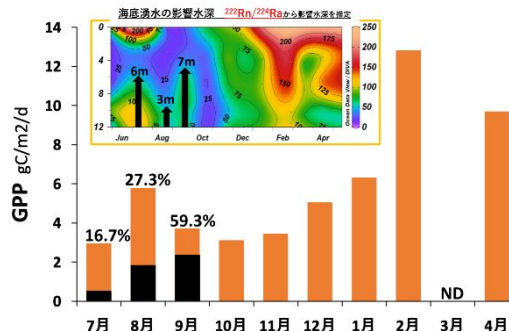


図 5 総一次生産速度の経月変化。下記の黒塗りは、海底湧水の影響が顕著な水深帯での一次生産量の割合を示す。

(3) 実験的検証

三陸沿岸の気仙沼湾奥部に位置する舞根湾では、研究代表者らによる事前研究が行われており、地下水による英栄養塩輸送の重要性がすでに示されている (Nakajima et al. 2021)。この知見に基づいて、陸起源栄養塩の負荷に対する植物プランクトンの応答を実験的に評価するために、表層海水を採取し栄養塩およびそれぞれの陸水(河川水 RW・地下水 FGW・再循環性地下水 RGW)を添加し、クロロフィル a 濃度の増減を調べた。本実験は 2020 年 6 月 (Exp.1) と 11 月 (Exp.2) に 2 回実施した。窒素を含む添加液や湾外水と比べて窒素を多量に含む陸水の添加区では対象区と比較し有意に高い Chl-a 濃度(3 日培養後)を示した。このことは、舞根湾へ支配的に流入する湾外水へ窒素を豊富に含む陸水が追加的に負荷されることで効率的に植物プランクトンが増殖していることを意味している。

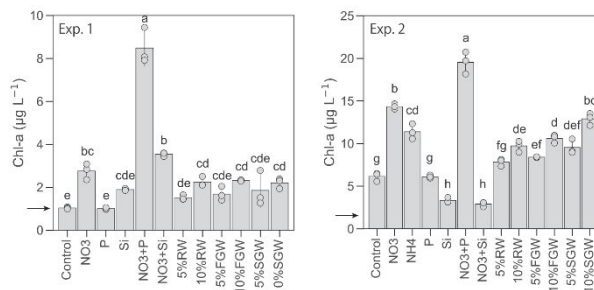


図 5 Exp.1 および Exp.2 における培養開始 72 時間後の平均 Chl-a 濃度 (n = 3). エラーバーは標準偏差, 矢印は培養前 Chl-a 濃度を示す。

(4) まとめ

本課題では、世界中の海底湧水と生物生産過程の研究成果をまずレビューした。その上で、海底湧水と一次生産の関係に地域固有性が高いこと、地下水の組成やタイプを比較した研究が実施されていないことを踏まえ、異なる特徴を有した国外を含む 4 サイトでフィールド調査を実施した。その結果、海底湧水による栄養塩輸送は、植物プランクトンの現存量や一次生産速度を総じて増加させる傾向にあることが明らかになった。しかし、淡水性地下水が噴出するような場所では、水温が低下するなど、局所的には負の影響を及ぼしているとも確認された。一方、再循環性地下水は、顕著な一次生産の増大に繋がっていた。このことは、栄養塩添加による実験からも指示されていた。海域全体の栄養塩供給源としては、外海からの輸送が卓越する場合も多いが、地下水を含む陸水が、制限栄養塩を効率的かつ安定的に供給していることが、沿岸海域の高い一次生産を維持する仕組みとして重要である可能性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 McKenzie Trista, Holloway Ceylena, Dulai Henrietta, Tucker James P., Sugimoto Ryo, Nakajima Toshimi, Harada Kana, Santos Isaac R.	4. 巻 160
2. 論文標題 Submarine groundwater discharge: A previously undocumented source of contaminants of emerging concern to the coastal ocean (Sydney, Australia)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Pollution Bulletin	6. 最初と最後の頁 111519 ~ 111519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marpolbul.2020.111519	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 該当する
1. 著者名 Dulai Henrietta, Santos Isaac R., Taniguchi Makoto, Sugimoto Ryo, Shoji Jun, Mukherjee Abhijit	4. 巻 8
2. 論文標題 Editorial: Submarine Groundwater Discharge: Impacts on Coastal Ecosystem by Hidden Water and Dissolved Materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Environmental Science	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) 10.3389/fenvs.2020.629509	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 該当する
1. 著者名 Santos Isaac R., Chen Xiaogang, Lecher Alanna L., Sawyer Audrey H., Moosdorf Nils, Rodellas Valent?, Tamborski Joseph, Cho Hyung-Mi, Dimova Natasha, Sugimoto Ryo, Bonaglia Stefano, Li Hailong, Hajati Mithra-Christin, Li Ling	4. 巻 -
2. 論文標題 Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Reviews Earth & Environment	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) 10.1038/s43017-021-00152-0	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 該当する
1. 著者名 Nakajima Toshimi, Sugimoto Ryo, Kusunoki Takahiro, Yokoyama Katsuhide, Taniguchi Makoto	4. 巻 66
2. 論文標題 Nutrient fluxes from rivers, groundwater, and the ocean into the coastal embayment along the Sanriku ria coast, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Limnology and Oceanography	6. 最初と最後の頁 2728 ~ 2744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lno.11785	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 杉本 亮、角野 悠太、中島 壽視、富永 修
2. 発表標題 若狭湾内の砂浜域における地下水湧出と食物網構造
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 原田佳奈、杉本 亮、中島 壽視、富永 修
2. 発表標題 火山性砂浜域における淡水性地下水湧出が植物プランクトンの一次生産速度に及ぼす影響
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 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 Trista McKenzie, Ceylena Holloway, James Tucker, Ryo Sugimoto, Toshimi Nakajima, Kana Harada, Henrietta Dulai, Isaac Santos
2. 発表標題 Submarine groundwater discharge as a source of contaminants of emerging concern to the coastal ocean (Sydney, Australia)
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 倉賀野真央、中島壽視、杉本亮
2. 発表標題 海底湧水が宮津湾内のトリガイ養殖場の一次生産環境に及ぼす影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022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

1. 発表者名 石田 健大、富永 修、杉本 亮、吉舎 直輝、木庭 啓介、福島 慶太郎
2. 発表標題 Estimate the origin of nutrients supplied to coastal areas using <i>Ulva pertusa</i> 's nitrogen and carbon stable isotope ratios
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

〔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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	サントス アイザック (Santos Isaac)	サザンクロス大学・National Marine Science Centre・教授	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	タイト ダグラス (Tait Douglas)	サザンクロス大学・Southern Cross GeoScience・助教	

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			
オーストラリア	サザンクロス大学			