

三陸沿岸海域への栄養塩輸送経路としての地下水湧出に関する研究

所属 東京大学大気海洋研究所 氏名 中島壽視

ショートアブストラクト【要旨】

本研究では、気仙沼湾奥部の舞根湾を対象として、栄養塩供給源としての地下水の重要性を評価した。地下水の栄養塩輸送量は河川水のそれを上回り、重要な栄養塩供給源であった。また、地下水に対する植物プランクトンの増殖応答を現場培養実験から評価し、地下水に含まれる窒素が一次生産を活性化することを明らかにした。以上より、地下水による栄養塩輸送は三陸沿岸海域の高い生物生産性の維持に貢献していることを示した。

アブストラクト【本文】

河口域や沿岸海域は地球上のあらゆる生態系の中で最も生物生産力の高い海域である。その高い生物生産力の維持には河川や外海からの栄養塩供給が重要であるとされてきた。しかし、海底から流入する地下水も沿岸域への栄養塩輸送経路として不可欠な役割を担っていることが近年明らかになってきている。地下水による栄養塩輸送量が河川水と同等または上回ると推定されている海域が世界各地に存在し、沿岸海域の栄養塩動態や一次生産に及ぼす影響に注目が集まっている。

沿岸域へ流出する地下水には降水に起源をもつ淡水性地下水と、海水が海底下へ一度浸透し、波浪や潮汐により駆動する再循環性地下水が存在しており、両者は流出量や栄養塩特性が大きく異なる。また、地下水による栄養塩輸送の重要性は、河川だけでなく

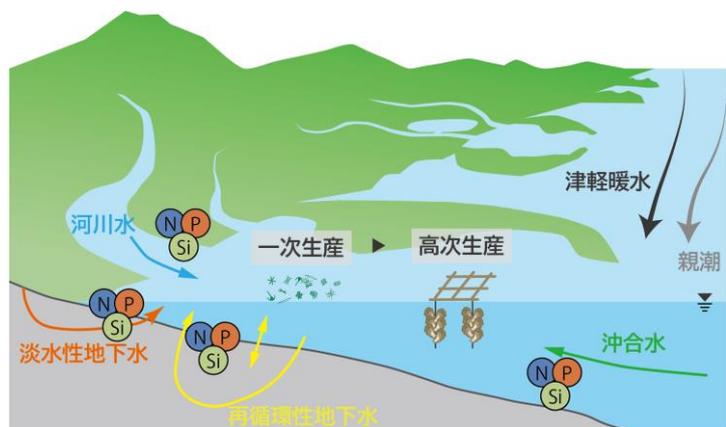


図 1. 本研究地域の概念図。

外海から供給される栄養塩量の時間変化によっても大きく変わる。豊かな沿岸域生態系がもたらされる要因を解明する上で、栄養塩起源としての地下水の役割を明らかにする必要があるものの、地下水起源を区別した上で、河川だけでなく外海からの栄養塩供給とも定量的に比較した研究はほとんどない。

本研究の対象地域である三陸沿岸海域は、湾が入れ子状に存在するリアス海岸地域であり、急峻な後背地形や湾曲した湾形状を特徴とする。三陸沿岸海域の近傍を流れ

る津軽暖水や親潮などの影響を強く受ける海域であり、外海からの栄養塩供給との比較を行う上で最適なフィールドである。加えて、河川や地下水、外海からの栄養塩輸送を含めた栄養塩動態の包括的な評価は、無給餌養殖が盛んに営まれている三陸沿岸の豊かな生態系の維持機構を理解する上でも重要な知見となりうる。

そこで本研究では、気仙沼湾奥部に位置する舞根湾を対象に、栄養塩供給源としての地下水の重要性および地下水の輸送する栄養塩が一次生産へ及ぼす影響を評価した。

① 地下水による栄養塩輸送量とその割合の定量評価

(Nakajima et al. 2021, Limnology and Oceanography に掲載)

地下水による栄養塩供給量を定量するとともに、湾内への総栄養塩流入量に占める地下水の貢献度を評価した。本研究では、水文学的手法（ダルシー則）および、再循環性地下水のトレーサーとなるラジウム同位体（Ra）の物質収支法を組み合わせることで、各地下水成分による栄養塩輸送量を明らかにした。

4つの季節を含む、2018年6月、8月、10月、2019年1月、3月に海洋観測および河川水、地下水サンプリングを実施した。湾内に設定した9測点および湾外1測点において、測器を用いて鉛直的な水温・塩分を測定するとともに、表層水と底層水を採水し、 ^{223}Ra （半減期：11.4日）、 ^{224}Ra （3.66日）、 ^{228}Ra （5.75年）および栄養塩である溶存態無機窒素（DIN）、溶存態無機リン（DIP）、溶存ケイ素（DSi）濃度を測定した。また、湾奥部から舞根湾へ流入する河川水を採取し、上記の分析に供すとともに、河川流速及び断面積を別途測定し、河川流量を算出した。さらに、地下水の物質特性を調べるために、湾奥部の干潟および陸上に存在する浅井戸から再循環性地下水および淡水性地下水をそれぞれ採取し、上記の分析に供した。2018年6月以降は浅井戸に水位計を設置し、地下水位の連続測定を行った。淡水性地下水の流出量は、ダルシー則に基づき、測定した地下水位および海面水位の勾配から算出した。再循環性地下水の流出量は ^{224}Ra の物質収支解析により推定した。

季節に関わらず地下水位は海面水位より高く、陸側から海側への地下水の輸送が生じていることが認められた。また、舞根湾内で採取された海水中のRa濃度は流入する河川水や湾外水の混合だけで説明される値よりも高く、湾内へ再循環性地下水が流入していることが認められた。

湾内への栄養塩流入量に占める各起源からの栄養塩輸送量の割合を算出すると、湾外から流入するDIN、DIP、DSi量が平均86%、97%、84%を占め、沖合からの輸送が舞根湾への主要な栄養塩供給源となっていた（図2）。次いで、再循環性地下水による栄養塩輸送量が大きく、DINで13%、DIPで2%、DSiで10%を占めていた。また、陸側の栄養塩起源（河

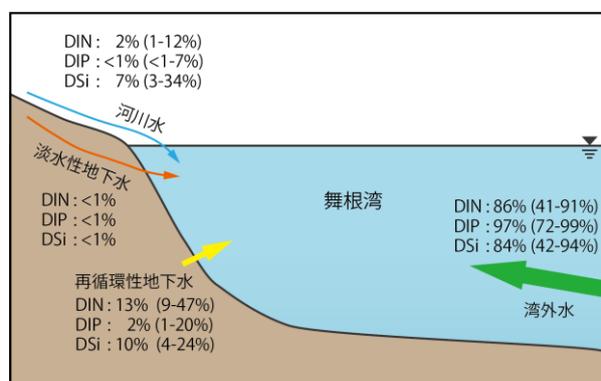


図2. 舞根湾へ流入する栄養塩量に占める各起源の割合. 5回の観測の平均値と範囲を示している.

川水・淡水性地下水・再循環性地下水)に着目すると、再循環性地下水が平均 88%, 85%, 58%を占め、最も主要な栄養塩供給であった。湾外からの栄養塩輸送量は時間変化が大きく、湾外からの輸送量が最も小さくなるタイミングでは、再循環性地下水による栄養塩輸送量の割合が 20-47%にまで増大した。

舞根湾では湾外から流入する海水が主要な栄養塩供給源としての機能を果たしているが、地下水(特に再循環性地下水)による栄養塩輸送量は、河川からの栄養塩輸送量を大きく上回り、陸から海への重要な栄養塩輸送経路として機能していることが明らかとなった。このことは、生物生産にも大きな影響を及ぼしている可能性がある。

② 地下水流入が沿岸域の一次生産に及ぼす影響

(Nakajima et al. 2023, Marine Ecology Progress Series に掲載)

量的な重要性が認められた再循環性地下水による栄養塩輸送が植物プランクトンによる一次生産に影響しているのかを明らかにすることを目的とし、2種類の野外培養実験を実施した。

実験 1 2018年の夏季(9月)と秋季(11月)に海洋観測と培養実験を実施した。舞根湾周辺に設定した6測点において表層水を採取し、Ra活性や栄養塩濃度を分析した。また、採取した海水に ^{13}C で標識された炭酸水素ナトリウム($\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$)溶液を添加し、野外培養前後の ^{13}C の取り込み量から、一次生産速度を推定した。

夏季は密度成層が発達し、DIPが枯渇(検出限界値以下)していた一方で、秋季には鉛直混合が生じており、DIPが十分に存在していた($\sim 0.24 \mu\text{mol L}^{-1}$)。また、単位クロロフィル a (Chl-a)当たりの一次生産速度は夏季よりも秋季で高い値が認められた。そこで、塩分と Ra 濃度から表層海水の栄養塩に占める各起源水(淡水、再循環性地下水、湾外水)の寄与率を推定すると、再循環性地下水の割合のみが全ての栄養塩において夏季よりも秋季で高い値を示した。このことは、再循環性地下水による栄養塩輸送が舞根湾表層における高い一次生産速度をもたらす要因の一つとなっている可能性が示唆された。

実験 2 舞根湾表層における植物プランクトンの増殖を制限している栄養塩および、地下水や河川水の添加により現場の植物プランクトンの増殖が活性化し得るのかを評価するために、2020年の夏季と秋季に栄養塩および各起源(河川水、淡水性地下水、再循環性地下水)を添加する現場培養実験を実施した。

湾中央部に位置する栈橋から表層海水を採取し、 $100 \mu\text{m}$ メッシュを通した(動物プランクトンの除去)試料海水を作成した。添加用の河川水は湾奥部から流入する2河川、淡水性地下水は汀線から70m陸側に位置する浅井戸、再循環性地下水は干潟から採取し、濾過処理をした。栄養塩添加実験では、コントロール(図3、添加無)および各種栄養塩(硝酸: NO_3 、アンモニウム: NH_4 、リン酸: P 、ケイ酸: Si 、硝酸+リン酸: NO_3+P 、硝酸+ケイ酸: NO_3+Si)を表層海水の栄養塩濃度の約10倍となるように試料海水を入れたボトルへ栄養塩を添加した。また、実験1で推定した舞根湾表層海水に占める各起源水の寄与率を基に河川水、淡水性地下水、再循環性地下水を試料

海水容積に対して 5% および 10% となるようにそれぞれ添加した。これらのサンプルは野外において現場の表層海水をかけ流しながら 72 時間培養を実施した。培養開始 0、24、48、72 時間後にサンプルを回収し、サンプルの Chl-a 濃度および栄養塩濃度を分析した。

2018 年同様、夏季と秋季で採取した表層海水はそれぞれ DIP 枯渇 ($< 0.1 \mu\text{mol L}^{-1}$) および存在 ($0.27 \mu\text{mol L}^{-1}$) 条件下であった。72 時間後のクロロフィル a 濃度を比較すると、季節に関わらず窒素を添加した処理区でコントロールに対して統計的に高い Chl-a 濃度を示した。

このことは、植物プランクトンの増殖は窒素により制限されていることを示している。また、硝酸+リン酸の処理区で最も高い Chl-a 濃度が認められ、リンが存在する環境下に窒素が負荷されることで植物プランクトンによる一次生産がより活発化しうることが示唆された。また、地下水や河川水の添加に対してもコントロールに対して統計的に高い Chl-a 濃度が認められた。表層海水の DIN 濃度と比較して 5 倍以上高い濃度を有する河川水や地下水の添加によって表層海水の窒素制限が緩和され、植物プランクトンによる増殖が活性化されていたことが考えられる。

実験 1 および実験 2 を踏まえると、量的に主要な栄養塩起源である再循環性地下水による窒素供給は植物プランクトンの窒素制限を緩和し、特に、鉛直混合が発達し DIP が十分量存在する時期に一次生産を大いに活性化すると考えられる。

まとめ

三陸沿岸に位置する内湾の一つである舞根湾を対象として、沿岸域の栄養塩動態や一次生産に対して地下水が示す生態学的役割を示した。地下水（主に再循環性地下水）を介した栄養塩供給は河川のそれを大きく上回り、重要な栄養塩供給源としての役割を担っていた。また、地下水が供給する豊富な窒素は、一次生産を活性化することが示された。類似した後背地形（急峻な地形や湾曲した湾形状）や環境条件（潮位変動）を考慮すると、三陸沿岸のリアス海岸では地下水が生態系に及ぼす影響は無視できないものと想定される。

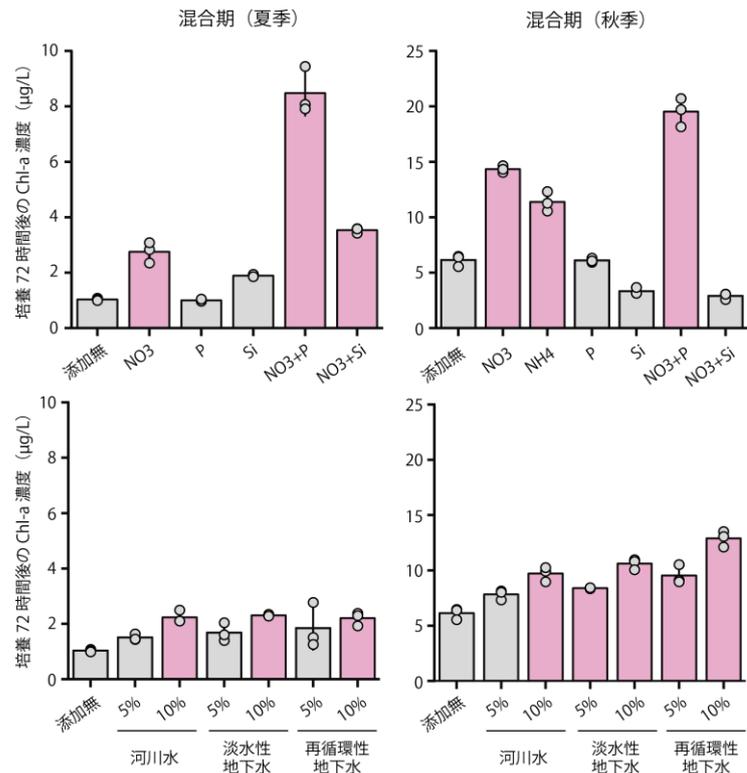


図 3. 培養開始 72 時間後の平均 Chl-a 濃度 (n=3). エラーバーは標準偏差を示す. コントロール (添加無) に対して統計的に高い値を示す処理区は色で示している.