

海の砂漠の謎に迫る！
—ほんのわずかなリンの供給が活発な生物生産を駆動—

1. 発表者

橋濱 史典	(東京海洋大学 准教授)
安田 一郎	(東京大学大気海洋研究所 教授)
隈部 あき	(研究当時：東京海洋大学 学部 4 年生)
佐藤 光秀	(研究当時：東京大学大学院農学生命科学研究科 助教、現：長崎大学)
笹岡 洋志	(研究当時：東京海洋大学 博士前期課程 2 年生)
飯田 洋介	(気象庁大気海洋部 技術専門官)
塩崎 拓平	(東京大学大気海洋研究所 准教授)
齊藤 宏明	(東京大学大気海洋研究所 教授)
神田 穰太	(東京海洋大学 教授)
古谷 研	(研究当時：東京大学大学院農学生命科学研究科 教授、現：創価大学)
Philip W. Boyd	(タスマニア大学海洋南極学研究所 教授)
石井 雅男	(気象庁気象研究所 研究総務官)

2. 発表ポイント

- ◆「海の砂漠」と呼ばれる亜熱帯外洋域において、最新の敏感度分析技術を駆使して海洋表層の生物生産を支える栄養塩供給プロセスを明らかにした。
- ◆従来法では表層の生物生産に必要な下層からの栄養塩供給が把握できなかったが、敏感度分析法により表層まで届くナノモルレベル（注 1）の窒素・リン供給を捉えることに成功した。
- ◆大気および下層からの窒素・リン供給と生物学的窒素固定（注 2）のデータを用いて生物生産に必要な窒素とリンの供給量を計算した。窒素については生物要求を十分に満たす供給があったが、リンについては生物要求の 1 割程度の供給しかないことが確認された。
- ◆海洋表層では生物に利用された栄養塩をリサイクルして再利用する仕組み（再生）がある。亜熱帯外洋域では生物に含まれるリンは窒素に比べて再生されやすいため、ほんのわずかなナノモルレベルのリン供給であっても活発な生物生産を維持できることが示された。

3. 発表内容

亜熱帯外洋域は「海の砂漠」と呼ばれ、表層の生物生産に必要な栄養塩の濃度が通常の方法では検出限界以下となる超貧栄養海域です。この「海の砂漠」では活発な生物生産があるのにそれを支える栄養塩の供給が検出できず、この謎は 1990 年代に指摘されて以来 30 年にわたり未解明のままでした。

東京海洋大学、気象庁気象研究所、東京大学、タスマニア大学の国際共同研究チームは、気象庁観測船「凌風丸」「啓風丸」を用いて西部北太平洋亜熱帯域 24°N 線（図 1）の時系列観測を実施し、最新の窒素・リンの敏感度分析技術を駆使することにより生物生産を支える栄養塩供給プロセスの解明に挑みました。この敏感度分析では通常の方法の検出限界よりも 2~3 桁低いナノモルレベルの窒素・リン濃度を定量することができます。計 13 回の観測航海よりナノモルレベルの窒素・リンの季節変動を捉えることに成功し、特に水温が 28°C を下回る低温期に下層からの栄養塩供給が表層まで届くことを初めて明らかにしました（図 2）。

亜熱帯外洋域表層の生物生産を支える窒素・リンは、下層からの供給に加えて、大気からのエアロゾル（注 3）沈着や生物学的窒素固定によっても供給されています。我々のチームは北太平洋亜熱

帯域でこれまで観測されてきた大気からの窒素・リン沈着と窒素固定のデータを整理し、下層からの窒素・リン供給も併せて、植物プランクトンの光合成が行われる 0~100 m の水柱内への年間の窒素・リン供給量を調べました（図 3）。亜熱帯外洋域では経年的に水柱内の炭素・窒素・リン量がほとんど変わらないため年間スケールでは定常状態が仮定できます。この仮定に基づくと、水柱内への炭素・窒素・リン供給量は消費・沈降によって水柱外へ移送される正味の生物生産分と一致します。ここで下層からの炭酸イオン供給と大気からの二酸化炭素の供給の合計は炭素で見た正味の生物生産そのものとなります。植物プランクトンの平均的な炭素・窒素・リン保有量をベースに正味の生物生産（=炭素供給量）に必要な窒素・リン要求量を算出し、供給量と比較すると、窒素については供給量と要求量が対応していましたが、リンは要求量の 1 割程度しか供給されていませんでした。窒素は下層からの供給に加えて大気からの沈着や窒素固定による供給が大きいです、リンは下層からの供給がほとんどで大気からの沈着は無視できるほど小さいことがわかりました。

亜熱帯外洋域の表層では生物が利用するリンは窒素に比べて再生されやすいことが知られています。このため、我々の解析結果から、水柱内でリンが炭素や窒素に比べて迅速に再生循環することで生物生産が円滑に行われているという結論を導くことができました（図 3）。今後、人間活動によって大気から海洋への人為起源窒素沈着が増加し、地球温暖化によって生物的窒素固定が増加することも予測されています。そうすると現在は効率的なリン循環によって活発な生物生産が維持されている「海の砂漠」でも、今後は窒素供給の増加によってリンが不足して生物生産が抑制されていく可能性があります。全海洋の 6 割を占める亜熱帯外洋域の生物生産は大気中の二酸化炭素濃度の調節と水産資源の維持に大きく貢献しています。国連の持続可能な開発目標（SDGs）における「13. 気候変動に具体的な対策を」と「14. 海の豊かさを守ろう」の取り組みとして、我々はリン循環を含めた「海の砂漠」の実態を引き続きモニタリングし、地球温暖化や水産資源問題への対応策を早急に検討していく必要があります。

4. 研究助成

本研究は、JSPS/MEXT 科研費 24121001、24121003、24121005、24121006、15H02802、15H05817、15H05818、16H01594、17H01852、20H05598 の交付を受けて実施しました。

5. 発表論文：

雑誌：*Nature Communications*（6 月 8 日付）

タイトル：Nanomolar phosphate supply and its recycling drive net community production in the subtropical North Pacific

著者：Fuminori Hashihama, Ichiro Yasuda, Aki Kumabe, Mitsuhide Sato, Hiroshi Sasaoka, Yosuke Iida, Takuhei Shiozaki, Hiroaki Saito, Jota Kanda, Ken Furuya, Philip W. Boyd, Masao Ishii

DOI：10.1038/s41467-021-23837-y

URL：<https://www.nature.com/articles/s41467-021-23837-y>

6. 問い合わせ先

東京海洋大学 学術研究院 海洋環境科学部門

准教授 橋濱 史典（はしはま ふみのり）

Tel：03-5463-0731

E-mail：f-hashii@kaiyodai.ac.jp

7. 注釈

注1：ナノモルレベル

$10^{-9} \text{ mol L}^{-1} = \text{nmol L}^{-1}$ の栄養塩濃度レベル。従来法ではマイクロモルレベル ($10^{-6} \text{ mol L}^{-1} = \mu\text{mol L}^{-1}$) が測定できるが、高感度分析法ではそれよりも2~3桁低いナノモルレベルを高精度で測定できる。

注2：生物学的窒素固定

窒素固定は窒素分子 (N_2) を還元して多くの生物が利用できるアンモニア (NH_3) を生成するプロセスである。海洋では主に植物プランクトンの藍藻類やバクテリアが窒素固定の担い手である。無機窒素イオンが枯渇した亜熱帯外洋域表層では窒素固定が生物生産を支える窒素源として重要な役割を担っている。

注3：エアロゾル

大気中に浮遊している粒径 $0.001\sim 100$ マイクロメートルの微粒子。自然由来や人為起源の微粒子からなり、外洋域表層へ沈着することがある。この微粒子に含まれている窒素やリンの一部が亜熱帯外洋域表層の生物生産における重要な窒素・リン源となる。

8. 参考図

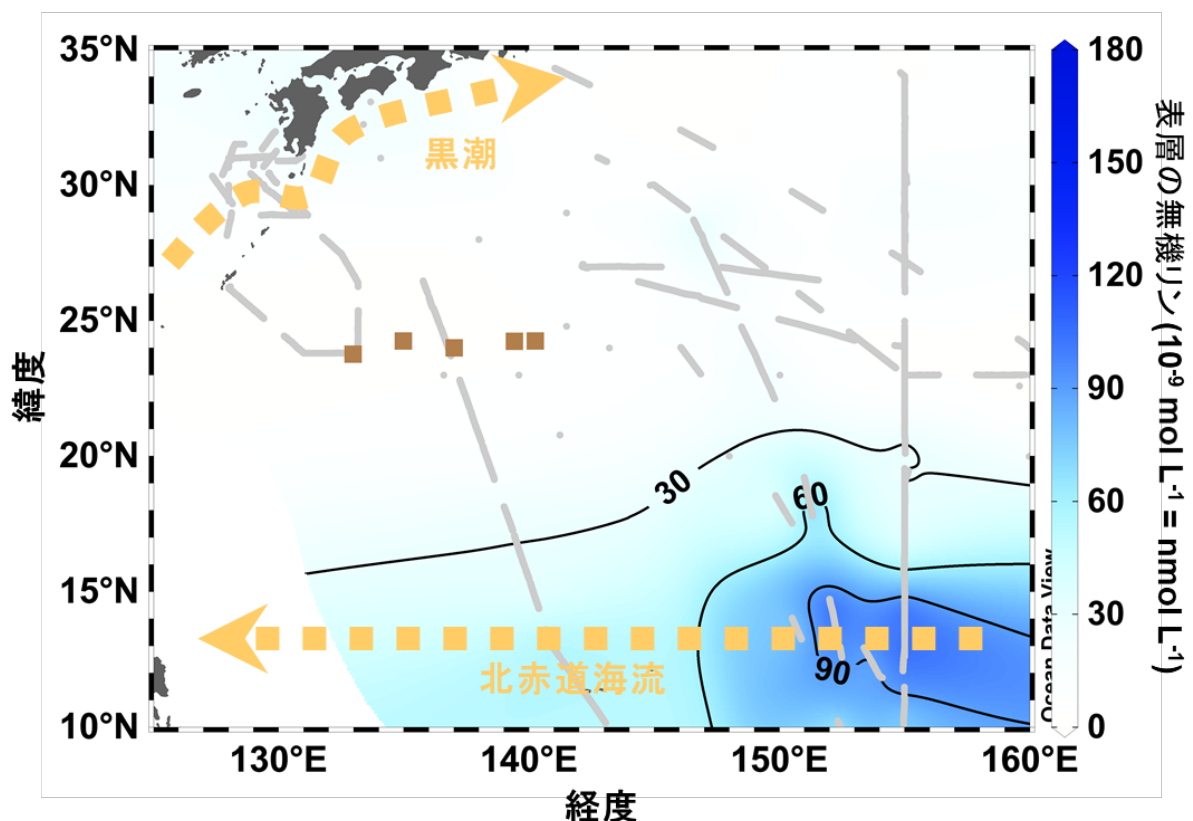


図1：観測点と表層の無機リンイオン濃度

茶四角が24°N線の観測点を示している。白～青のグラデーションは発表者らがこれまでの研究で明らかにした表層 (<10 m) のナノモルレベルの無機リンイオンの分布を示している。黄点線矢印は主要海流である北赤道海流と黒潮を示している。観測点は北赤道海流と黒潮の時計回りの循環の内側で表層の無機リンイオン（無機窒素イオンも）が周年枯渇した領域に位置している。

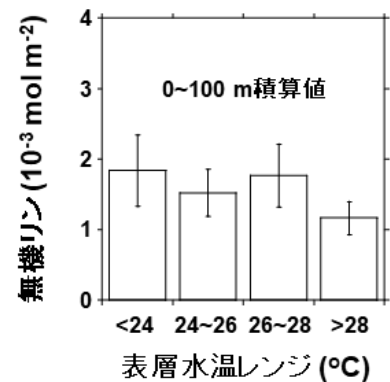
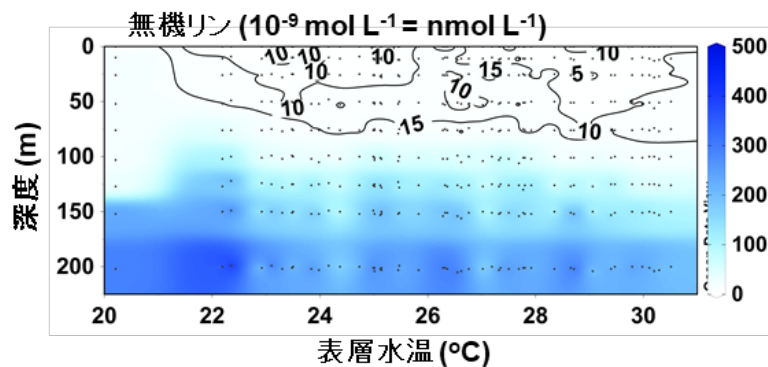
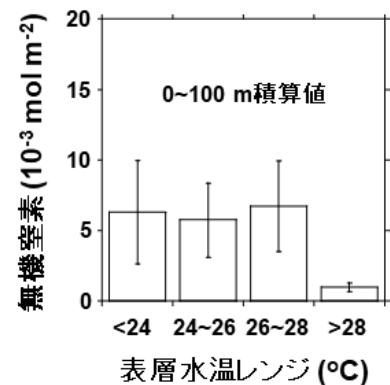
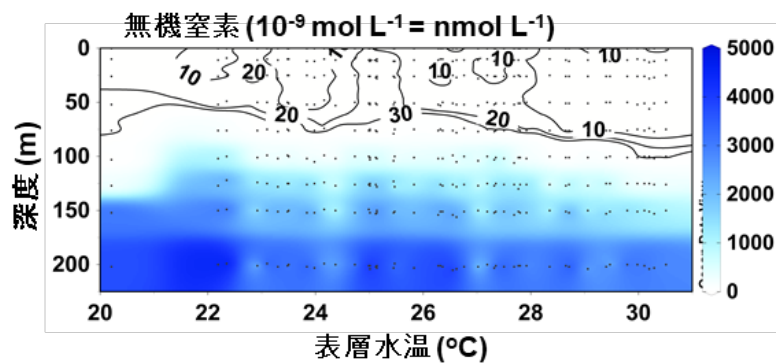


図 2：無機窒素イオンと無機リンイオンの季節変化

(左) 表層水温に対してプロットした 0~200 m の無機窒素イオンおよび無機リンイオン濃度分布。白~青のグラデーションは無機窒素イオン濃度および無機リンイオン濃度を示しており、黒実線のコンターはナノモルレベルの無機窒素イオン濃度 ($\sim 30 \text{ nmol L}^{-1}$) および無機リンイオン濃度 ($\sim 15 \text{ nmol L}^{-1}$) を示している。

(右) 4 つの表層水温レンジにおける 0~100 m の無機窒素イオンおよび無機リンイオンの積算値。棒グラフは各水温レンジにおける観測点の水柱積算値の平均を示している。エラーバーは 95% 信頼区間を示している。

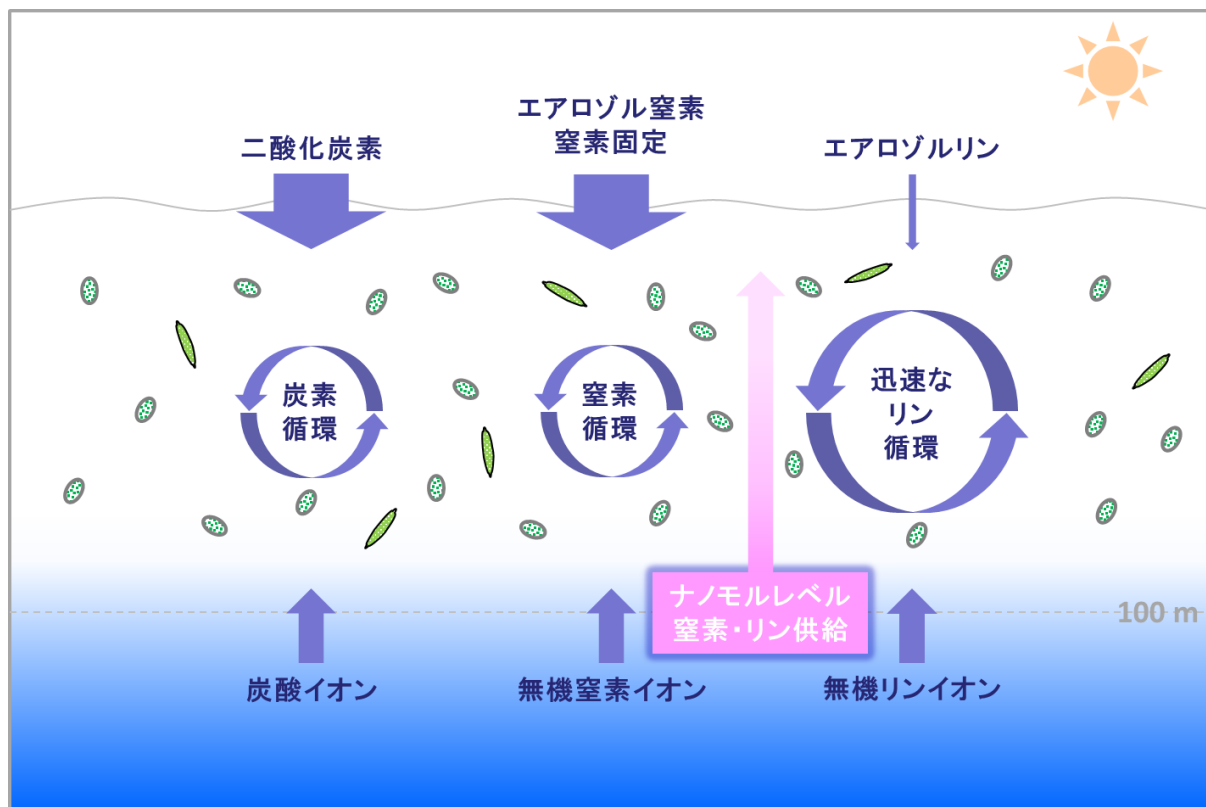


図 3：西部北太平洋亜熱帯域における炭素・窒素・リン循環の模式図

植物プランクトンが光合成する 0~100 m の水柱に供給される炭素、窒素、リンそれぞれの年間供給量を紫矢印の大きさを示している。ナノモルレベルの窒素・リン供給（ピンク）は表層まで届いており、表層の生物生産に寄与している。ここで定常状態を仮定すると炭素供給量は正味の生物生産そのものとなる。生物要求量から計算すると窒素供給量は炭素供給量（正味の生物生産）に見合っており（矢印の大きさが同じ）、炭素循環と窒素循環はほぼ同じ速さで駆動されている。窒素は大気からのエアロゾル沈着や生物学的窒素固定による供給が大きい、リンについては下層からの供給以外は無視できるほど小さい。結果的に、生物要求量を基準とした場合、リン供給量は炭素供給量（正味の生物生産）に見合っておらず、水柱内でリンが炭素や窒素に比べて迅速に再生循環することで生物生産が円滑に行われている。