

水域生態系における炭素蓄積の謎：細菌の群集集合と炭素循環のフィードバック

龍谷大学 三木健

Takeshi Miki

Ryukoku University, Japan,

E-mail address: tks.miki.ecology@gmail.com

Silke Van den Wyngaert, Olivier Vanholsbeeck, Luca Zoccarato, Hans-Peter

Grossart

IGB (Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries), Germany

(背景)

海洋の微生物群集は炭素循環過程に深くかかわっている。Nianzi Jiao らは、微生物群集と微生物食物網内の被食-捕食関係によって難分解性の溶存有機物 (RDOM) が生産されているとの「微生物炭素ポンプ (Microbial Carbon Pump)」仮説を提唱している。生理学的視点からすれば、この微生物炭素ポンプが成立する理由として、細菌が個体の生存を最大にするために RDOM (例えば安定な構造を実現できる細胞膜成分) を産生しているからだと考えるが自然であろう。本研究では、群集集合および群集-環境間のフィードバックという群集生態学の概念に基づいて、生態学的機構も働いている可能性を調べた。細菌-炭素循環間フィードバックを考慮した数理モデルの解析とおよび海洋の有機炭素に関する公表データのメタ解析を通じて、我々は海洋における炭素蓄積に対する群集生態学的機構の潜在的な影響を示すことをめざした。

(方法)

易分解性有機炭素資源と難分解性有機炭素資源の 2 種類についてそれぞれの転換能力と同化能力の有無が異なる $12(=2^2(2^2-1))$ 種類のエコタイプの細菌を想定し、それらの資源転換・同化 (消費) をめぐる相互作用を空間的不均一性のあるケモスタット・タイプのモデルとして記述した。これら 12 種類のエコタイプの在不在によって細菌群集のタイプを定義すると、全部で $2^{12} = 4096$ 種類の潜在的な平衡状態が存在する。これについては、3 種類の有機炭素資源を想定した場合には、計算上現実的でない値となる。具体的には、考慮すべきエコタイプの数は、(転換能力有無によるタイプ数) $\times$ (同化能力の有無によるタイプ数-何も同化できないタイプ) $= 3^2(3^2-1) = 56$ となり、潜在的な平衡状態の数は $2^{56} \sim 10^{16}$ オーダーとなる。本研究では、どのエコタイプの細菌も存在しない無生物平衡状態から、各タイプの細菌の侵入過程のうち可能なもの (侵入適応度が正のもの) をすべて確認し、侵入後のあらたな平衡状態を数値的

に求め、さらに可能な侵入を追跡するという「網羅的な群集集合追跡解析」により、4096 種類の平衡状態のうち到達可能でかつそれ以上の侵入を許さないものを特定した。この状態を、ここでは便宜的に（進化的収束）安定群集状態と呼ぶ。この方法を用いて、モデル中の各種環境パラメータに依存して実現する安定群集状態と実現する炭素フロー・現存量について確認を行った。

（結果と考察）

まず従来の類似の相互作用モデルからの研究成果と矛盾の無い形で、空間的不均一性が弱いとエコタイプ間の相互依存的な炭素フローが存在するような共依存の「共代謝」システムは進化せず、外界から供給される資源を何の転換もせずただ消費する利己的なエコタイプが優占する群集が進化（安定群集状態として実現）することが分かった。同様に、従来の環境—生物間相互作用モデルからの研究成果と矛盾しない形で、多くのパラメータセットで、2 つ以上の安定群集状態が実現することもわかった。これら二つの点から、今回新たに提示した数理モデルは、これまでの関連分野（協力の進化、共代謝の進化、環境・生物間フィードバック）における研究成果と矛盾せず、現実の生態系動態とも定性的に齟齬の無い挙動を占めることが確認できた。

次に、多くのパラメータセットにおいて、わざわざ成長や分解にマイナスの影響が出るような二次的資源にわざわざコストを払って転換する能力を持つエコタイプが安定群集状態に含まれることが分かった。このことは「微生物炭素ポンプ」が普遍的に存在可能な、生態学的機構（空間的不均一存在下でのエコタイプ間の資源競争や相互依存性）が働きうることを示唆している。

最後に、外界からの資源供給量や生態系内で貯留される有機炭素資源の総量が大きければ大きいほど、難分解性の有機物の有機炭素全体に占める割合が大きくなることが予想され、この予想パターンは、質的情報を持った有機炭素量の空間分布に関する過去の研究に対するメタ解析により、グローバルスケールでの難分解性有機炭素の寡多のパターンと矛盾しないことが確認できた。

このように本研究は、網羅的群集集合追跡解析により実現可能な群集状態をすべて見つけ出すことに成功し、その群集で実現している炭素循環のパターンが、過去の観測パターンと矛盾せず、微生物炭素ポンプの普遍性を理論的に支持する結果を得ることができた。

(謝辞)

本研究は Research Fellowship for experienced researchers (Alexander von Humboldt Foundation)および龍谷大学内助成金による助成を受けて遂行したものである。