

序文：なぜ「リン循環」か？ その意義と今後の課題

小野寺 真一

(広島大学大学院 総合科学研究科)

1. はじめに

今から7年前の2008年は、リン鉱石の生産価格がそれ以前の10倍にまで高騰するという衝撃的な状況が生じた年である¹⁾。その翌年には価格は元に戻ったが、その後も緩やかな上昇傾向が続いている。これらは、当時の社会情勢がリーマンショックの時期であったことに起因するとともに、リン鉱石の最大生産国である中国の生産量に依存する、市場の需給バランスの脆弱性を反映した結果といえるであろう。このいわゆる「リン危機」は、我々に対してリンが貴重な資源で枯渇の可能性がある、食糧生産や生態系の維持に対する制限要因になりうる重要な地球環境問題の一つであることを突き付けた。この問題に対して、(1)どのくらいの資源が残されているのか？(2)リサイクルは可能なのか？(3)利用効率の向上はどのくらい可能なのか？などの疑問に答えていく必要があり、近年では、その答えのいくつかは既に見いだされつつある。

(1)資源の見積りについては、「ピークリン」というリンの最大生産量(限界)がいつ頃になるのかを見積る資源的評価²⁾が進んだ。これによれば、約100年以降には資源が枯渇する可能性があり、現在のペースでの増産は困難であることが推定された。また、(2)廃棄されたリンのリサイクルについても、新たな技術の開発やその利用効率などの見積りが加速的に進んだ^{3), 4)}。

一方で、(3)リン循環の効率化や有効利用のためには、地球規模でのリン循環を俯瞰するとともに、さまざまな時空間スケールで定量的に評価していく必要があり、そのうえで有効利用に適した循環系を見極め、効率的なリサイクルの方法などを提案していくことが重要である。それに反して、近年ではリン資源の最大のユーザーである農業の現場で、化学肥料の利用効率の低下が指摘されており⁵⁾、21世紀にはいってもその課題の解決は道半ばといえよう。また、個別の系(例えば、農地、河川、地下水、沿岸域など)でのリン循環については、これまでもかなり研究が進んできた。特に、前述した2008年以降は後述する関連の研究プロジェクトが始まり、加速的に成果がでてきている。しかし、地球規模でのリン循環の全体像が系統的に評価されてきたとはいえない。

2. リン循環の概要

リン(P)は生物体の遺伝子情報を有する核酸や細胞膜や骨などを構成する主要成分であり、生物にとっての必須元素である。生態系によっては、リンが不足することで生物生産が律速する場合もあり、さらに窒素(N)が過剰に供給される現代の環境では、リンが相対的に不足した状況になる。このように、リンは生態系における生産性の維持にとって必要条件の一つである。

リンはそもそも岩石に由来し、それを構成する鉱物の風化にともない土壌に供給される。一部は生態系に取り込まれ、また一部は土壌浸食により水域に放出され、やがては海洋の堆積物として蓄積され、その一部は海洋生態系に取り込まれていく。自然のリン循環システムの中では、陸域から海域への一方的な輸送が主体となっており(図1上)、海洋堆積物からの岩石・鉱床の生成は、前者と比較して遥かに長いタイムスケール(数億年)で生じるプロセスのため、循環としては無視されることもある(図1中)。

一方で、人口を増やし続けた人類は、食糧生産とその増産のために、農業用肥料としてリン肥料を散布してきた。その資源として、19世紀～20世紀前半は堆肥が利用されてきたが、20世紀後半からはリン鉱石が掘削され大量生産されるようになった。また、20世紀中盤以降加速的に拡大した砂漠化や土壌劣化は、過剰な農業活動にともなう環境問題であり、前述した農業活動の活発化にともなう肥料の作物利用効率の低下(=肥料成分の流出)と連動すると考えられる。すなわち、農業活動とともに土壌浸食量が増え、同時にリンの流亡が増えたと考えられることができる(図1下)。これは、降雨時における沖繩の農地からの顕著な赤土流出などからも明らかである。このようなリンのロスについて、Tilman⁶⁾は農地に散布される肥料の7割程度、Cordellら⁷⁾は5割程度に相当するとそれぞれ見積っている。このように、20世紀は人為的影響によりリン循環が大きく変化した時代であり、結果として、現在のペースでのリン鉱石の増産は困難であることが示されている²⁾。



図1 リン(P)循環概要。

3. 特集号に至る経緯

リンは、沿岸閉鎖性海域及び湖沼における富栄養化についての研究、及び土壌学における肥沃度や貧栄養環境における作物の生育に関する研究の中で、古くから研究対象とされてきた。しかし、富栄養化問題に関連するという以外では、地球環境問題としての位置づけは比較的希薄だった。

2008年以降、広島大学ではリン循環に関わる多様な研究が進行してきた。例えば、著者らによるグループは、日本学術振興会科学研究費補助金の枠組み(期間：2009～2011年、2013～2015年、研究課題番号：21241011、25241014、いずれも代表は福岡正人教授)で流域圏スケールでのリン循環に焦点を当てた研究を、また、大竹久夫教授(現 早稲田大学)らのグループはリン再利用の研究³⁾を、さらに高橋嘉夫教授(現 東京大学)のグループは、レアメタルの回収に付随する分子化学的なリンの回収方法に関する研究を、和崎 淳准教授(広島大学)らのグループは、植物のリン利用に関する根圏スケールでの分子生物学的な研究を、それぞれ推進してきた。

また、京都大学生態学研究センター及び総合地球環境学研究所においても、科研プロジェクト(2012～2014年)に引き続き、総合地球環境学研究所プロジェクト(2014～2019年、いずれも代表は奥田 昇准教授(現 総合地球環境学研究所))に至る生態学的研究から環境科学的研究へと発展させながら、リン循環研究を実施している。

以上の多様な研究シーズを踏まえて、2013年11月2日に生物地球化学研究会広島大会におけるミニシンポジウム「沿岸地下におけるリンのホットスポット」が開催され、高橋嘉夫教授(当時 広島大学)による基調講演及び井岡聖一郎准教授(弘前大学)、早川 敦准教授(秋田県立大学)ほかによる講演が行われた。さらに、同年11月17日に京都大学生態学研究センター公募研究集会「リンは何処へ？ーリン循環研究の現在と将来展望」⁶⁾が開催され、岩田智也准教授(山梨大学)、梅澤 有准教授(長崎大学)、鈴木昌弘グループリーダー(産業技術総合研究所)ほかによる講演と総合討論が実施された。以上を踏まえて、佐竹研一生物地球化学研究会会長の提言のもと、本特集号の企画に至った。

4. 本特集号での焦点

本特集号では、それぞれの個別のテーマにおけるリン循環を整理するとともに、地球全体とのかかわりを位置づけることを目的とした。また、リン循環理解のための最新の手法についてもまとめた。

特に、前半はさまざまな系でのリン循環に焦点を絞った。例えば、陸域生態系については、森林生態系及び土壌中でのリン循環を森林総合研究所の稲垣昌宏主任研究員に、水域については、湖などの淡水域系内での循環を京都大学の杉山雅人教授に、湾などの閉鎖性海域から外洋にかけては前述の梅澤 有准教授及び鈴木昌弘グループリーダーにとりまとめていただいた。また、琵琶湖で大量発生する水草を堆肥としてリサイクルするという循環の可能性について、京都大学の犬園享司准教授にとりまとめていただいた。

さらに、水循環系に注目したリン循環については、流域スケールを前述の早川 敦准教授に、また、流域スケールとしては、河川を前述の岩田智也准教授に、地下水を前述の井岡聖一郎准教授に、地下水ー地表水境界場を岡山大学の齋藤光代特任助教にとりまとめていただいた。

最後に、リン循環を理解するための新たな研究手法についても取り上げた。XAFS(X線吸収微細構造)法を前述の高橋嘉夫教授らのグループに、分子生物学的手法を前述の和崎 淳准教授に、リン酸酸素安定同位体手法を前述の奥田 昇准教授に、流域モデルを用いた解析手法を農業・食品産業技術総合研究機構の清水裕太日本学術振興会特別研究員(PD)にとりまとめていただいた。

以上のように、日本有数の研究者によって総括されたこの特集号は、まさにリン循環研究において画期的な成果であると考えられる。すなわち、前述した地球規模から地域・農村規模に至るまでの、リン資源の効率的利用や再利用に対して有益な情報になるとともに、今後のさまざまな研究分野においても貴重なステップとなることを期待する。なお、本特集号では、環境中でのリンの存在形態(化合物の種類や存在形)の表記方法について、異なる分野を代表する著者の表現方法を尊重している。そのため、同一の物に関する表記が一部異なっている場合があることをご了承いただきたい。例えば、DIP(Dissolved Inorganic Phosphorus)及びPOP(Particulate Organic Phosphorus)については、陸水学の分野では前者を溶存態無機リン、後者を懸濁態有機リンと表記することが多いのに対し、海洋学の分野では前者を溶存無機態リン、後者を粒子状有機態リンと表記することが多く、それらの用語はあえて統一せずに掲載している。

最後に、本特集号をご提案いただいた佐竹研一本誌編集委員、献身的なご協力をいただいた編集担当の森本亮子さん(国際環境研究協会)、及び各論文に対する匿名の査読者の皆様に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) Index Mundi (2015) Rock Phosphate Monthly Price - US Dollars per Metric Ton.
(<http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate&months=360>)
- 2) Cordell, D., J. O. Drangert and S. White (2009) The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19, 292-305.
- 3) 大竹久夫(2011)リン資源枯渇危機とはなにかーリンはいのちの元素. 阪大リーブル, 29, 大阪大学出版会.
- 4) Otake, H. (2015) Development and implementation of technologies for recycling phosphorus in secondary resources in Japan. *Global Environmental Research*, 19, 49-65.
- 5) Tilman, D., K. G. Cassman, P. A. Matson, R. Naylor and S. Polasky (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671-677.
- 6) 齋藤光代(2013)平成25年度 京都大学生態学研究センター公募研究集会「リンは何処へ？ーリン循環研究の現在と将来展望」報告. 日本水文学会誌, 43, 154-155.