PR0158

大気海洋の酸化還元状態の進化と栄養塩循環

○尾﨑和海[1,2]
（[1]東京工業大学理学院、2 東京工業大学地球生命研究所）

地質学的・地球化学的研究の進展により、地球史を通じた大気海洋酸化還元状態の変遷史について大局的描像が描かれるようになってきた。例えば、約 23～22 億年前に大気中 O_2 濃度の増大が生じたこと、その後の時代も現在に比べて貧酸素な地球環境が持続し現在のような酸化的大気海洋環境が形成されたのは古生代オルドビス紀以降であることなどが議論されている。しかしながら、そうした推定には依然として大きな不確定性が伴い、大気 O_2 濃度についてはオーダーレベルの議論が続いているのが現状である[1,2]。氷床コアから復元可能な過去約 80 万年間よりも古い時代の大気組成については間接的な指標に頼るしかなく、また、たとえ精確な推定ができたとしてもその背後にある物質循環全体としての振る舞いを明らかにすることはできない。この点で、大気海洋酸化還元状態を規定する物質循環過程に着目した定量的研究が必要とされている。

一方で、これまでの物質循環に基づく大気海洋化学進化の理論的研究は、地質学的時間スケールでの大気海洋組成を規定する物質循環について簡素化された枠組みでの検討が行われており、大気海洋酸化還元状態の進化をプロセスベースで議論可能な理論モデルの構築には至っていないのが現状である。たとえば、米国では３次元海洋モデルを用いて原生代の栄養塩の空間分布や大気へのメタン放出フラックスを見積もる研究が行われている[3]が、モデルの複雑性からごく限られたパラメータ設定でしか検討ができず、また海洋生態系の基礎生産を律速するリン循環については閉鎖系として扱うため 10 万年以上のタイムスケールについては議論することができない。このほか、大気海洋系を一つのリザーバとして扱うボックスモデルを用いて物質循環や大気組成の動態を解析する研究も行われているが、空間解像度の低さのため内在する物質循環のフィードバックの強さをアプリオリに与える必要があり、詳細な物質循環過程を定量的に解析することはあまり意味がない[4,5]。また、モデルの簡略化のため地質記録との直接対比が限られるという問題点をもっている。このため、観測と理論の間には大きなギャップが残されており、地質記録や理論予測は半ば独立した研究となっている。この問題解決には、物質循環素過程の理解を組み込みつつ地質学的時間スケールの議論が可能な新しいタイプの理論モデルの開発が必要である。

以上の問題意識のもと、講演者は大気海洋環境の進化を物質・エネルギー循環のフレームワークのなかで理解するための理論モデルを開発し、それを地球史へ応用することで、大気海洋酸化還元状態の進化とそのメカニズムを明らかにするための研究を行ってきた。とくに最近の研究は、地球表層環境をコントロールする重要な大気成分（O_2、CO_2、CH_4）について、地球表層圏（大気―海洋―地殻）での生元素循環（H、C、N、P、O、S）をプロセスベースで表現する物質循環モデルを構築してきた。研究ではモデル計算を主軸としながら、地質記録に基づくフィードバックも行うことで大気海洋の化学的進化を生物圏との関わりを含めて明らかにする姿勢を重視している。

特に地質学的時間スケールでの大気海洋系の酸化還元状態の進化については、リン（P）と鉄（Fe）の物質循環素過程の理解が重要である。これらは約 30 ある必須元素に含まれ、その環境中存在量は地質学的時間スケールでの生物圏活動レベルをコントロー

ルすると考えられている。そのためこれら必須元素の物質循環についての理解は大気海洋の進化や生命の進化と密接にかかわっている。さらに、これら元素の物質循環は酸化還元状態や pH といった水圏の化学状態に応じて相互に影響しあうため、大気 0_2 濃度や気候状態とも関連し、地球システム内の様々なフィードバック作用と関係する可能性がある。このためこれらの物質循環過程を詳細に考慮することが地球史を通じた大気海洋酸化還元状態の進化を理解するうえで重要な研究課題となっている。

本講演では、大気海洋の酸化還元状態の進化に関して著者が行ってきた最近の研究事例について紹介しながら栄養塩循環の物質循環素過程の理解の重要性や将来展望、物質循環素過程の研究と理論モデルのコラボレーションの可能性などを議論する。

[1] Catling and Zahnle, 2020 Science Advances 6, eaax1420. [2] Lyons et al., 2014 Nature 506, 307-315. [3] Olson et al., 2016 PNAS doi/10.1073/pnas.1608549113. [4] Lenton et al., 2018 Earth Science Review 178, 1-28. [5] Laakso and Schrag, 2017 Geobiology 15, 366-384.

Redox evolution of the ocean-atmosphere system and nutrient cycle

*K. Ozaki[1,2] ([1]Tokyo Institute of Technology, [2]Earth-Life Science Institute)