

閉鎖生態系の動態と地球環境生成

森山 茂・高原光子（教養・基礎科学系）

1. はじめに

本研究では、地球環境の生成とそれに果たしている生命存在の役割を研究する目的で、生命－環境一体系の動態と、地球環境生成に果たしてきた生命存在の動態をもとに、〈生命とは何か？〉という根源的課題に集約する研究を目指している。そのため現在、閉鎖生態系実験と理論的研究（生命システム論）を併行して行っている。〈巨大な閉鎖生態系として地球環境の生成を見る〉という視点は、自己創成システムとして展開してきたと考えられる地球環境の生成問題に対し新しい示唆を与えるが、今後、新地球観の提示や気候変動論・環境論への研究に寄与するはずである。

2. 自律的閉鎖生態系としての地球生命圏

閉鎖系とは、地球表層のようにエネルギー的には開放系だが物質的に閉じている系をいう。つまり地球生命圏も一つの巨大な閉鎖系であり、その閉鎖空間の中で40億年以上、生命と環境の創成が繰り返されてきた。限られた物質空間とエネルギー的には無限に開いた空間という条件のもとで、いかなる生命－環境系の創発があるのか？それが地球環境生成論にとって真に重要な問題であるが、これまでの地球研究では、環境生成に重要な役割を果たしたと考えられる生命存在を、端から外部適応・外部制御のダーウィニズム的前提や生命システムから遊離した超越的視点からパラメタライズし、全くのブラックボックスとして扱ってきているため、生命－環境系の真の実態解明が本質的に出来ない構造になっている。

ところが、生命－環境系の進化はダーウィニズム的外部調節・制御によるのではなく、3. に示すように、その「自律的」作動の中で40億年間の生成展開がなされてきたのではないかという考えがある。40億年というく生命の惑星＝地球〉の歴史を考えると、実はこの生命－環境系における自律的「生成問題」の解明こそが、理論及び実験の双方からなされねばならない地球生命圏探求の骨子だと考えられる。

これまで科学界においては歴史的に、生命（生命圏）に対する見方として、i) その能動的で自在な生成展開を重視する見方と、ii) 生命存在を単に環境変化に受動的に適應する存在だとする見方がある。前者に拠れば、環境生成と生命の自在な生成展開とは決して切り離されたものとはならず、互いに相即不離の展開を示すことになる。一方、後者は、広くダーウィニズムや、刺激反応系思考の一種である「断続平衡説」等の機械論的生命観が今日において代表的なものである。こうした生命論展開は古今東西の生命観を巻き込んでの論争をはらんで今日に至っているわけであり、〈環境とはいったい何であるか？〉という本質的問いを含む生命システム論深化の立場から最も重要かつ興味深い論点ではあるが、ここでは以下の3. で触れるだけにし、その詳細な議論は別の機会に譲ることとしたい。

ともかく従来の研究から、地球のような閉鎖生態系には、①「環境－生命系の自在な生成展開現象」という重大性だけにとどまらず、②「閉鎖系固有の振動」という“小変化”から、その不安定性ゆえの予期出来ない“大変動”まで、閉鎖系ゆえの複雑な動態がある。「自律系」として見た地球環境の変化は、このような巨大な一閉鎖生態系としての動態に多く依拠してきたものと思われる。生命－環境一体系である「自律系としての閉鎖生態系」という視点から、理論と実験の新しい地球研究が切に必要である。

3. 自己創成システムと環境：生命は何故どんな環境にも出現するのか（生命システム論から）

生命システムのようなオートポイエーシス・システムにおいては、システム作動のクローズ性から、その作動領域の境界の外に外部領域「環境」が生成される。その「環境」とは、生命システムが創成したその作動

域の“外側”であるが、それは生命システムが自ら自律的に作動維持する境界の外部であり、(そのゆえに)生命システムにとっては意味を持った領域である(実は、これが「ニッチ;生態的位置」の意義の根拠を与えている)。つまり、環境は(ダーウィニズムの言うように)生命システム作動と無関係にそこに置かれてあるというものではまったくないし、生命システムのようなオートポイエーシス作動が維持されている限り、環境は決して生命システム作動を犯すものではない。

生命システムが現に作動している空間(生命-環境系)では、システムと環境とは相即不離の存在であり、寧ろ一体化し、環境との間に「浸透」という作用関係を示すのである。生命システムは自らの作動によって境界を創り、そのことによってシステム作動に矛盾することのない、「自己にとって意味のある環境」を絶えず創出し続けているのである。つまりシステムは、「環境についての自分に固有な像を絶えず構成している」ことになる。これを逆に言えば、環境は、システムに超越したものではなく、システム作動と相即に、そこへ無辺に「浸透」してくる(これが実は一方で、環境の「複雑性」の根拠を提供することにもなる)。生命システムのようなオートポイエーシス・システムと環境との本質的関係の概略はこのようなものである。

オートポイエーシス・システムは、その作動においては何処までもクローズしている。システム作動のこの閉鎖性と環境への無辺の“開け”(環境の浸透)という事態は、生命システムが維持される限り、実は、環境はどのようなものであってもよいという、「(環境の)可塑性」を招来することになる。現実には、例えば30億年以上前、嫌気ワールド全盛の時代において、好気菌の「生成」によって、地球生命システムを構成している要素間の関係(システムの「構造」)が激変した。しかしその場合でも、核酸・タンパク質を基底とした、生命が生命を生むという生命システムの「有機構成」は依然維持されている。だが一方で、システムの構成素間の変化(構造変化)に相即して「環境構成」が生起する(現に、嫌気ワールドから今日の酸素ワールドへと転換した)。つまり地球生命システムにとって、そのオートポイエーシス・システムの「有機構成」が維持される限り、もともと環境に一意必然性などまったく存在しないのである。

この(生命-環境系のもつ)オートポイエティックな可塑性こそ、生命システムが、酷寒から酷暑、高所から深海底まで、どんな状況にも対応して地上のあらゆる場所に存在し、40億年間環境を改変し続けてきたことの原因なのである。それが今日我々がその中に生み落とされて生活している「世界」の実相であると思

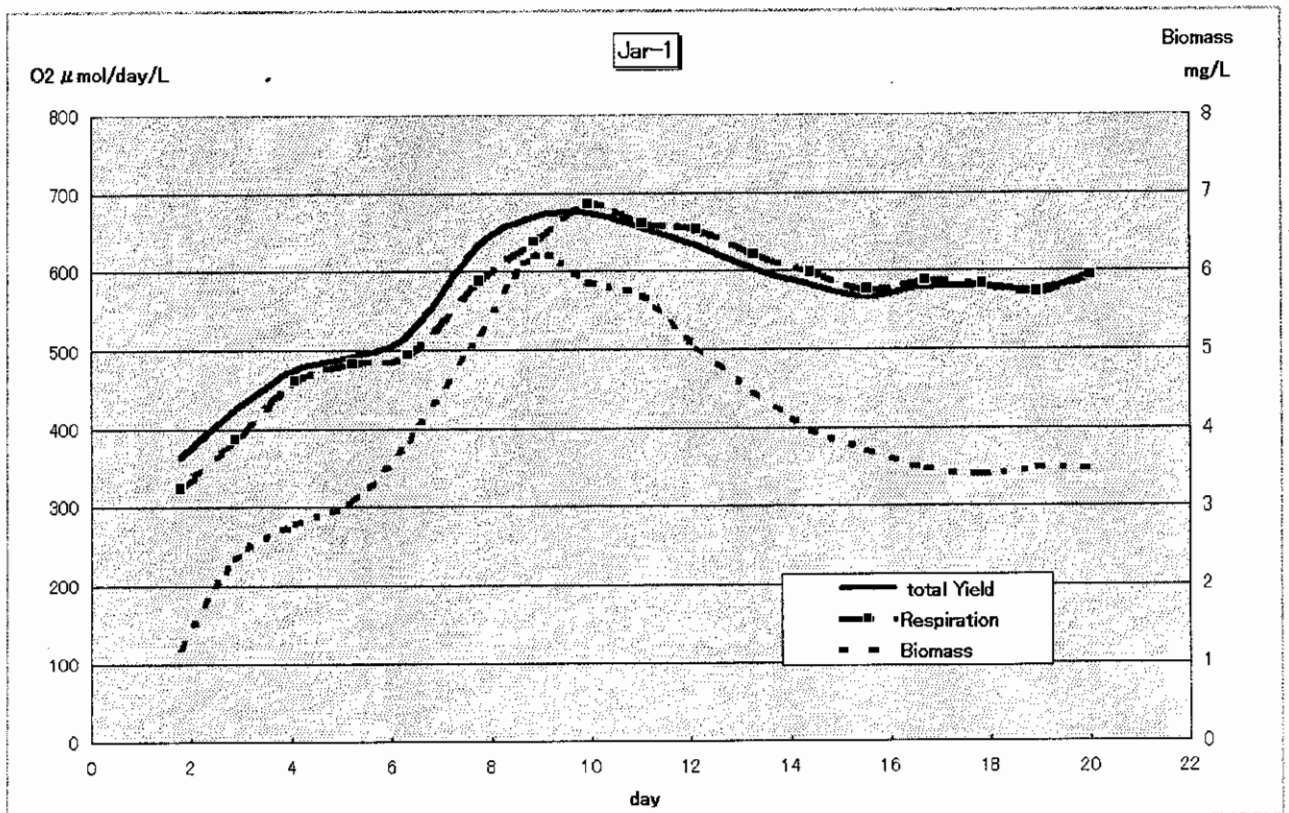


Fig. 1. Jar-1 の総生産量、呼吸量、バイオマスの変動パターン (開放系).

われる。

4. マイクロゾウム型ミニ地球の動態

当センターでは、「マイクロゾウム」型という自律的な閉鎖生態系実験装置(ミニ地球)を作り、その動態研究を2001年4月から開始した。現在、同時進行する2機のミニ地球の動態を、自動管理システム中でモニタリングしている。大気、水圏でのCO₂やO₂、ATP値、pH値・・・等々の24時間全自動測定が行われている。Fig.1に、当実験装置で得られた(部分)開放系ミニ地球の、12hr明暗条件下での実験データ(完全閉鎖前データ取得)を例示しておく。この例はバイオマスが調整されつつやがて安定化する、生命-環境系の典型的な活動期パターンを示している。

栗原康はその著『有限の生態学』の中で、森林の生産量、呼吸量はともに若い相で増加、成熟相では幾分低下か値維持の動態を示すこと、若い相では生産量が呼吸量を上回るが、成熟相では値が近づくことを示している。開放系ミニ地球もこれと同様な動態を示すことが実験から示されている。

また、前回指摘したように、閉鎖系の動態は「一見安定だが、突如不安定。しかしまた、突如、強靱かつ予測不可能な復元性を示す」といったように、複雑系特有の動態を示す。例えば、僅かな擾乱の中で、一挙に他の状態へ遷移したり、しかしまた水圏や大気圏の状態を強靱に元へ復したり、予想がつかない複雑な振る舞いを示す。ミニ地球では、(停電のような)明暗条件の少しの擾乱によって突如、水圏の溶存酸素量がゼロ近くに急減したりする。つまり光合成生物が打撃を受け活動が激変する。これは生命圏の組み換えがいかにか容易に起こるかということを示唆している。その結果例えば、大気は、(太古大気に似た)二酸化炭素リッチなもの(CO₂大気組成約2%という上限が見られる!)へと急変するし、水質もpH値が激減するといった変化を示す。光合成生物から、メタン菌のような二酸化炭素生成菌への生命圏内部の構造変化が容易に起こり、別ワールドへ遷移するのである。

これらミニ地球の示す様相は、古生代から中生代、中生代から新生代の境界時期に発見された(外部要因によるのか、内部要因によるのか不明だが)無酸素海洋の存在とともに、生命圏の激変期への示唆を与える。閉鎖系の安定性問題は、このように現実の地球の気候システムの安定性を知る上でも、きわめて示唆が大きいと思われるので、当実験装置を使用してのさらなる研究を必要としている。

pH値は、明暗条件に対応して、pH=8~9の間の鮫歯状の変動を繰り返す。明期にはpH値はかなり高い値に振れ、暗期には大きく減少する。pH値の変動因は、明期には光合成に因る炭酸消費によるOH⁻イオンの生成によるが、暗期では呼吸による炭酸放出や有機酸生成蓄積によるためである。実験に示されたpH値は亜硝酸菌や硝酸菌、脱窒菌の良好活性範囲と深くリンクしており、窒素循環の円滑化を通して水圏浄化活動がミニ地球システムの継続的維持の一環として自律的に生成されていることを示している。

このように、自己創成系としてみた場合、たとえ外的攪乱があっても生命圏はいかようにも自身の構造を自律的に組み替え(進化)、更にそれが環境を変えることで次の時空へつないで行く。ミニ地球と同様に、現実の地球生命圏もまた自律的にその「構造」を大きく変えつつ(例えば、嫌気菌から好気菌、真核生物の登場など)、また環境を改変するとともに、無限に生命が生命を生むオートポイエーシスを持続しているのではないか。

5. 開放系から完全閉鎖系への遷移動態と酸素濃度問題

更に、閉鎖生態系の動態と地球生命圏の関連で極めて重要な問題は、<現今の環境中の酸素濃度は何故21%へ進化し、そこへ落ち着いているのか?>という所謂「酸素濃度問題」である。

ミニ地球も現実の地球のように、実際には生命圏の構成要素(生物種)が大きく変化しているにもかかわらず、種々の攪乱後、大気中の酸素濃度(21%)や水圏のpH値などの環境条件が元へ復していくという不思議な現象を示す。

例えば、我々の実験(Fig.2)に示すように、開放系から閉鎖系への遷移においては、閉鎖という“外圧”

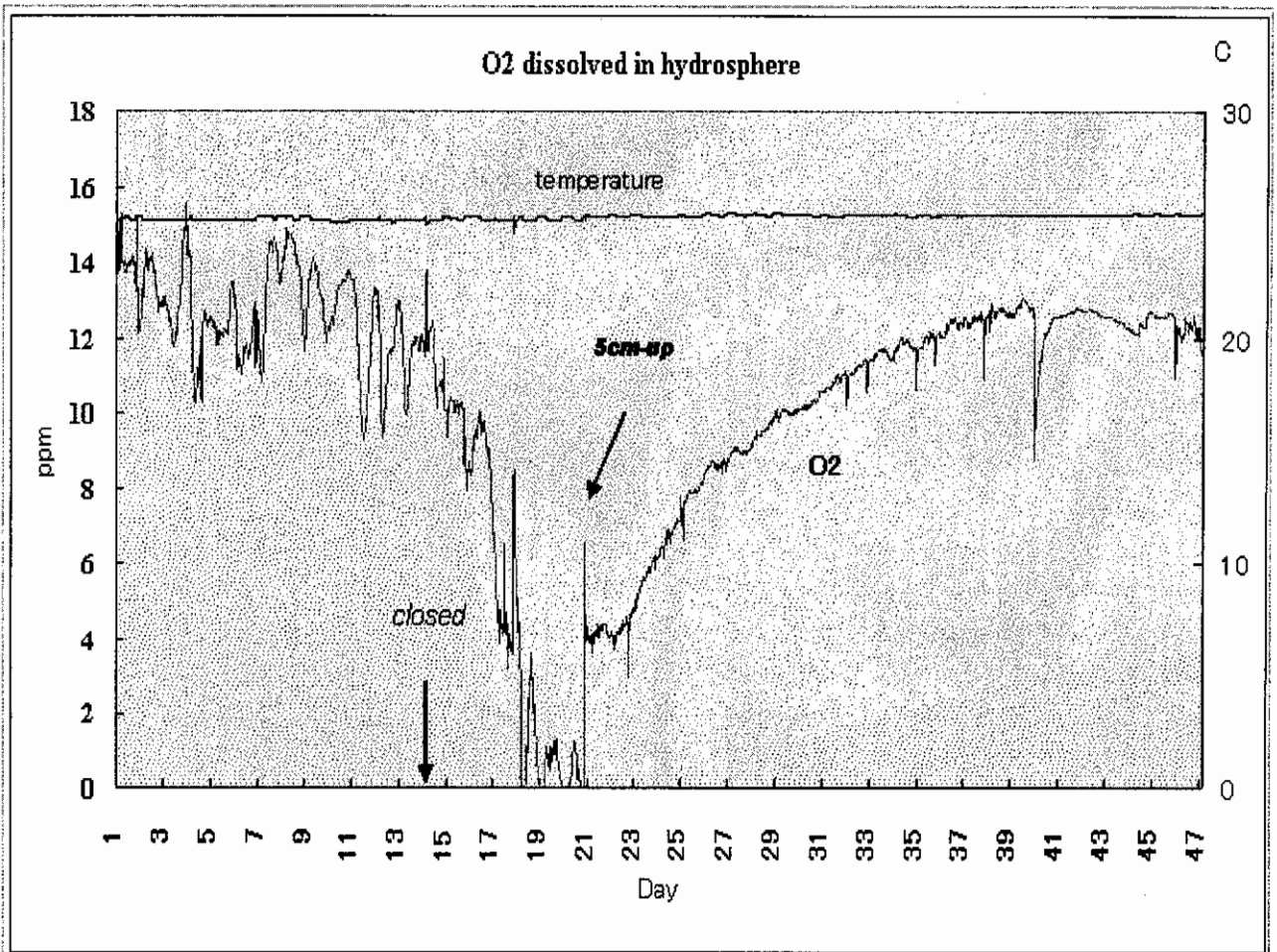


Fig. 2. 閉鎖系から完全閉鎖前後のミニ地球の遷移動態. 完全閉鎖後、DO は一时无酸素状態を経験するが、やがて21%へ向けて“進化”していく。

を経験した系は、一端、無酸素状態に落ち込むが、やがて完全閉鎖状態においても、系の立て直しとともにそのDO値を21%近傍へと戻していく。

このようにミニ地球でも、(微生物も含めて生命圏の構成要素の質・量が全く同じであるはずはないし、べつに大気酸素濃度を21%に戻す必然性がないにも関わらず) 攪乱のあとで、まるで以前の環境を覚えていたかのように、大気酸素濃度は21%前後へ戻していく。こうした事態は、現実の地球の「生命ネットワーク」は、<酸素濃度21%に対するある重要な“意味”>をもっているのではないかということを示唆しているものと思われる。現に、地球環境は30数億年前の酸素生成生物の登場以来、酸素濃度21%へ向けて進化し、奇妙にもこの数億年間殆どその値を維持しているらしいというのが定説である。

以上の閉鎖生態系の不思議な動態はいわゆる「酸素問題」としてとても重要かつ興味深いところであり、また、過去から現今の地球環境の生成問題解明において本質的かつとても重大な結果であるがゆえに、さらなる追試が必要であると思われる。

6. 結び

巨大な一閉鎖生態系としての地球の環境変化は、以上のような閉鎖系固有の振る舞いに多く依存してきたものと考えられる。だが、まだその動態はよく知られていない。「自律的閉鎖生態系」という視点から、生命システム論のような理論展開および閉鎖生態系実験の地球環境生成研究が切に必要な所以である。