

自律的閉鎖生態系の動態と地球環境生成研究*

森 山 茂**・高 原 光 子**

1. はじめに

生命と環境の「共進化」は〈生命の惑星＝地球〉において最も本質的課題のひとつであり、この共進化が火星や金星の非生命系惑星環境形成に対して地球が大きく差異化される本質的所以であることは、現在、例えばガイア論の主張を挙げるまでもなく周知のこととなっている(e.g., Lovelock, 1991; 森山, 2001)。さらに近年、自己組織化論や複雑系、オートポイエシス論、アフォーダンスといった所謂「生命システム論」が「21世紀の科学」として学際的に隆盛となってきており、そこから、生命—環境系に対する新たな知見、及び、(地球科学のキーワードたる)「生命」存在や「環境」の本質に対する理論的示唆が与えられつつある状況が発生してきている。

また、自己創成システムとして「共進化」してきたかも知れない地球環境の生成問題に資する実験である「自律的閉鎖生態系」(所謂、ミニ地球)の動態研究も、〈巨大な「閉鎖生態系」として地球環境の生成を見る〉という視点から、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。例えば、自律的生命—環境一体系としての閉鎖生態系の動態研究から、カタストロフィック・レジームシフトや、その複雑性、安定性など興味深い結果が示されるが、これらから後述の「酸素濃度問題」をはじめ地球環境生成問題解明への新たな示唆が得られ始めている。

2. 地球生命圏と「共進化」問題

現在の地球科学研究では、環境生成に対し重要な役割を果たしている生命存在を、詰まるところ単純因果論的な「刺激—反応」系と見立て、ブラックボックス化・パラメータ化していくことが広く常套手段として行われている。気候モデルパラメータ化のための各種実験における生命—環境観なども例外なくそうである。しかも、その思考法が地質学的時間スケール現象へまでも敷衍されているのが実状であろう。それゆえ現在の地球環境論や環境生成論では、生命—環境系の創発的でダイナミックな動作研究や「共進化」解明が本質的に出来ない研究構造になっているが、殆どその本源的な認識や吟味なしに、生命と環境の「共進化」といった言葉が表層的に語られている現状がある。

しかし、最近の生命システム論では、生命システムとは本来的に刺激—反応系として作動しているのではなく、それとは全く異なった自律的で創発的なシステムではないかと考えられはじめている(e.g., Maturana and Valera, 1980; Rosen, 1991; Mingers, 1995; 河本, 1995)。例えば、生命システムにおいては次のような本質的性質がある(金子, 2002)。

(1)分子あるいは遺伝子の性質は多様で、その機能には単純な因果論が成立しない。(2)その機能や作動の発現自体、場所や状況依存的である。(3)遺伝子や分子の機能や情報伝達経路は代替可能性を有する。(4)生命は多くの要因から成る“複雑な”システムであり、かつ、その構成分子も常にゆらいでいるにもかかわらず、その総体はとても安定である。

一方、科学界においては歴史的に、(i)生命存在を単に環境変化に受動的に適応してきた存在だとする見方と、(ii)能動的で自在な「生命—環境一体系」の自律的な生成展開を重視する見方とがあった。前者は、所謂「適者生存」や「自然淘汰」といった歴史的欧米

* Dynamic States of Autonomic Closed Ecosystem and Study of Generation of the Earth's Environment.

** Shigeru MORIYAMA, Mitsuko TAKAHARA, 日本大学生産工学部.

© 2003 日本気象学会

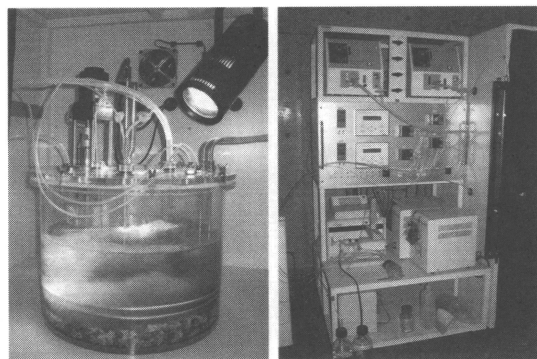
思考に代表されるダーウィニズムやネオ・ダーウィニズム、遺伝子 (or ゲノム) 決定論、また、刺激-反応系思考の一種である「断続平衡説」等の示す生命観が代表的なものであろう。(「断続平衡説」は、生命進化は長い平衡状態の後に、隕石落下や大陸生成のような外的大イベントに励起・誘引されるのだという考えに見られる。)しかし、これらからはその論理帰結上、生命と環境の「共進化」などは当然あり得ないのだが、この非「共進化」でしかないものを「共進化」と多くは喧伝してしまっている (e.g., 丸山・磯崎, 1998; 川上, 2000)。

一方、後者 (ii) に拠れば、環境生成そのものと生命自体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 (これが「共進化」の真意である) を示すことになる。この立場からは、「生命-環境系」の進化は (生命システムへの) ダーウィニズム的な外部調節/制御によるのではなく、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ことになる。その時、生命-環境系における自律的生成の問題や当に「共進化」の研究・解明こそが、理論及び実験の双方から地球生命圏探求の骨子とならねばならなくなる。

更に、現今の生命システム論は、〈生命システムとは何であるか?〉という問題だけでなく、その生命を取り巻く「環境」との関わりにおいて、そもそも〈「環境」とは一体何であるのか?〉という本質的問いを含む問題にまで既に発展している。そして、最近の生命システム論の共通した成果から、生命システムとその「環境」との関係もまた、もはや単純な「刺激-反応」系とはとても言える代物ではないと考えられているのである (e.g., Kneer and Nassehi, 1993; 河本, 2000; Letelier *et al.*, 2001)。

〈「生命システム」や「環境」とは何か?〉の問題は、本当は地球科学にとっても極めて深刻な問いであり、かつ、生命システム論深化の立場から最も興味深い論点であるが、紙幅の関係で詳細の紹介は別紙に譲ることにしたい (e.g., 森山, 1997 & 2001)。

一方、閉鎖生態系研究など自律系に関する研究は、この生命-環境系の共進化の実験的研究という点において重要である。閉鎖系とは、地球表層におけるように、エネルギー的には開放系だが物質的には限られた系をいう。地球生命圏も1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



第1図 閉鎖生態系実験装置と測定器パネル (日本大学生産工学部)。

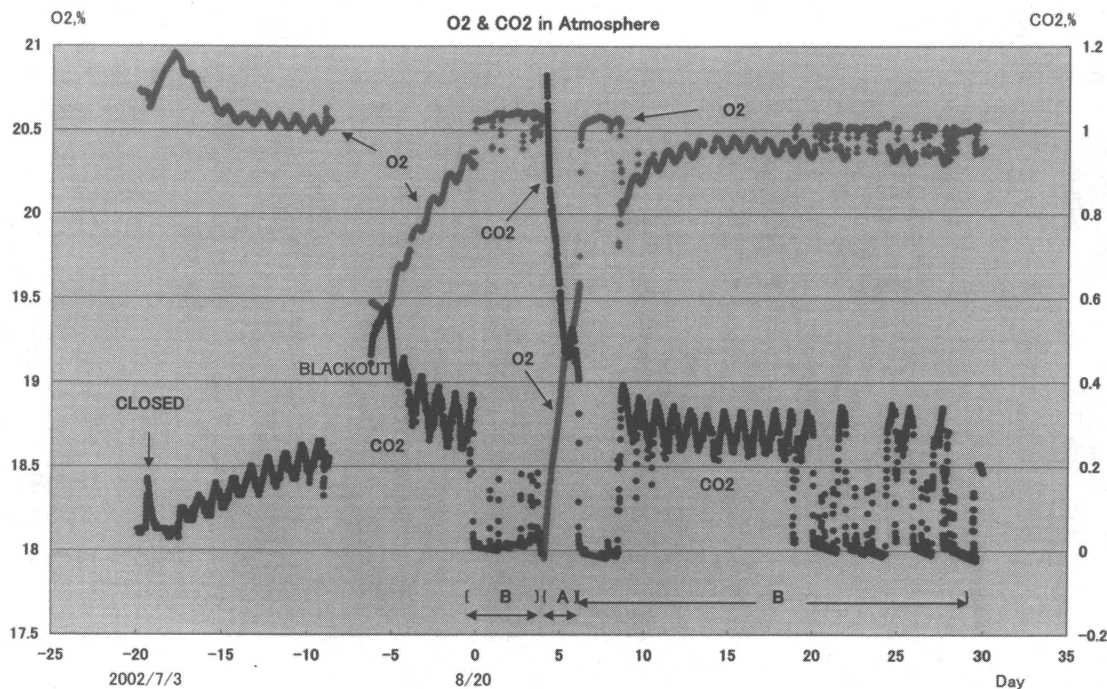
には無限に開いているという物理条件のもとで、いかなる生命-環境系の創発・展開がある (あった) のだろうか?

これまでの閉鎖生態系研究から (e.g., Moriyama and Takahara, 1997), 閉鎖系には、①「環境-生命系の自在な生成展開現象と系の持続のための戦略」にとどまらず、②「閉鎖系固有の振動」という“小変化; リミットサイクル”から、その安定性に関わる予期出来ない“大変動; 急激なレジーム・シフト (regime shifts)”現象まで、複雑な生命-環境動態があることが指摘されている。「自律系」として見た場合、生命と地球環境進化は、このような動態と無縁ではあり得なかったと考えられるのである。

3. ミクロコズム型ミニ地球の動態

日本大学生産工学部に設置されたハイテクリサーチセンターでは、「ミクロコズム」型と呼ばれる自律的閉鎖生態系実験装置 (ミニ地球) を作り、その動態研究を行っている (第1図)。ここでは温度環境を25°Cに設定した以外、全くの自律的な生成展開に委ねて、生態系の動態を精査する実験が行われている。これは生態系の展開を人間生存中心的に制御するのが主たる「宇宙基地型」閉鎖生態系 CELSS (Controlled Ecological Life Support Systems; 管理生態系生命維持システム) とは本質的に全く異なった、自律的閉鎖生態系である (栗原, 1994)。

現在、同時進行する2機のミニ地球の動態 (大気、水圏でのCO₂やO₂, ATP値, pH値等々の測定) を、全自動管理システム中でモニタリングしている。第2図に、当実験装置で得られた (部分) 開放系ミニ地球 (約半年僅かに開放して放置) から完全閉鎖状態への移



第2図 約半年間の準開放系から完全閉鎖 (Day=-20) 後50日間の閉鎖生態系の動態。気圏の O_2 及び CO_2 濃度。A は非常に大きなレジームシフトを、B は小レジームシフト発生期間を示している。data の1点は10分平均値を示す。BLACKOUT は停電による欠測。

行を含む、12 hr 明暗条件下での実験データを示す。これまでの主な結果を列挙すると以下ようになる。

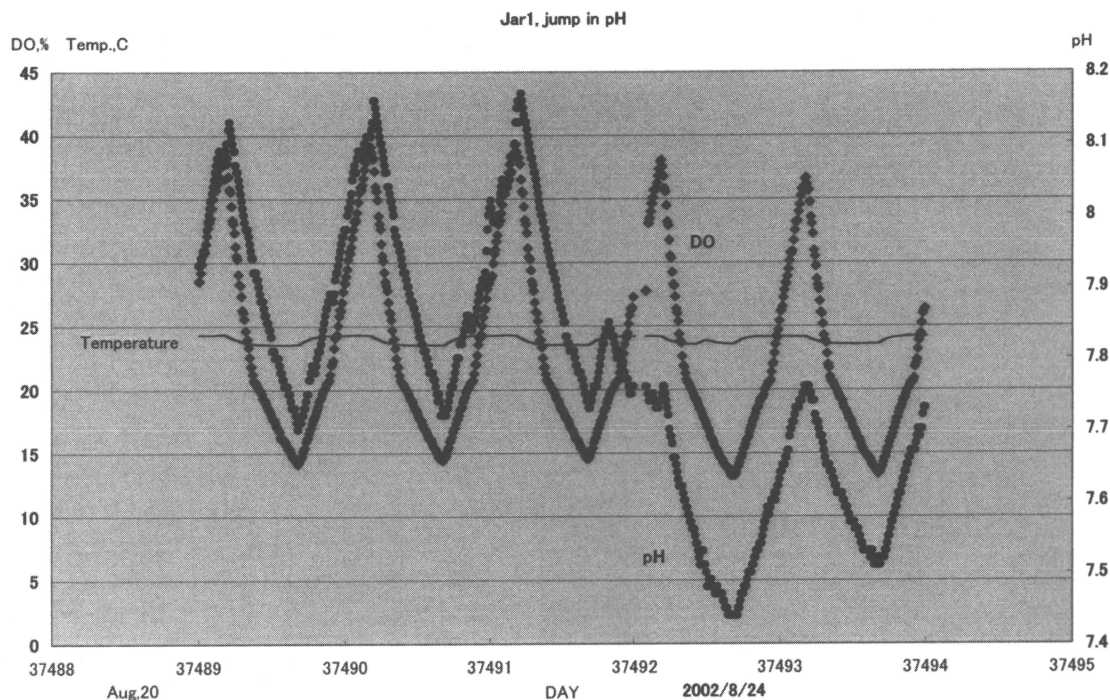
○複雑性 (Complexity)：自律的閉鎖系の動態は「一見安定だが、突如不安定、しかし、強靱かつ予測不可能な復元性を示す」といった、複雑系特有の動態を示す。即ち、僅かな擾乱の中で、一挙に他の状態へ遷移したり、しかしまた水圏や大気圏の状態を強靱に元へ復したり、その振る舞いは非常に複雑である。

例えば、(停電のような)一時的外的擾乱に伴って突如、水圏溶存酸素量がゼロ近くに急減したりする。これは光合成生物の活動が激変する結果であり、気圏は(太古大気に似た)二酸化炭素リッチ状態(ただし、興味深いことに、大気 CO_2 濃度に約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。光合成生物ワールドから、メタン菌のような嫌気菌隆盛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 (Moriyama and Takahara, 1997)。自己創成系としてみた場合、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ことになる。

○閉鎖系の安定性問題：しかし、内因のみによっても環境が激変してしまう例が示される。

第2図のA期間は、それまでほぼ5日の間安定状態を保って作動していた系で、何ら外力に依らず突如 pH 値が0.3ほど下がり、かつ溶存酸素濃度 (DO) も2%ほど急減したイベント発生を示している(第3図)。それに伴って、気圏の CO_2 は約0%モード(次項参照)から一気に1.1%へ上昇、逆に O_2 値は2.6%も激減した。しかも、僅か30分以内での安定レジームから他への大シフトである点が興味深い。一安定システムの一気の崩落である。

これらの観測結果は明らかに、光合成活動の激減といった生態系の急激な構造変化の発生を示している。しかも第3図に見るように、元来、光合成生物の活動に有利であるはずの Light-ON 状態で、突如このイベントが起こった点が意味深い。このように光合成ワールドが、そのシステムの内的構造変化によって環境を激変してしまうという事実は、生命-環境系が単純な入/出力関係の「刺激-反応」系ではない、複雑な構造とシステム機能を持つ自律システムであることを示している。



第3図 第2図のA期間で見られたpH値のjump(激減)現象。2002年8月24日にLIGHT-ON時途中で発生。DOデータにも減少の異変が認められる。通常、明暗条件に対して、これらの値は鯰歯状に変動する。

古生代から中生代、中生代から新生代の境界における生命圏変化を、断続平衡説では、超大陸形成などの外部要因に引き付けて説明しようとするが(e.g., 丸山・磯崎, 1998), 上記実験例は、環境変化が生命圏の激変を与えるのではなく、生命圏の構造変化によっても環境が激変しうることを示している。この様に、閉鎖系の安定性問題やレジーム・シフト問題は、歴史的な地球気候システムの安定性を知る上で、きわめて示唆が大きいと思われるので、さらなる研究が必要である。

○カストロフィック・レジームシフト現象の発見：地球生態系には互いに別の安定レジームがあつてその間にカストロフィック・シフトが存在することは、最近、湖沼、海洋、森林、砂漠などの各生態系において指摘されている(Scheffer *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 2002)。そして、数学的には、最低限簡単な方程式：

$$dx/dt = a - bx + rf(x) \quad (1)$$

で表される生態系で、そのようなシフトが存在可能である(x は生態系のある性質、 a は x を促進する環境ファクター、 b は x がシステム中で崩壊する割合、 r は x が再回復する割合を示す。例えば、 $f(x)$ が急峻な

Hill関数の場合、別の安定状態が存在しうる)。

これまで、閉鎖生態系ではそのようなカストロフィック・レジームシフトの存在やその再現性は明確でなかったが、初めて当実験において確かめられた。この事態は、地球生命圏自体の安定性問題や気候変化探求においても、閉鎖生態系および生命-環境系の動態研究の必要性を示唆している。

第2図のBで示されるように、閉鎖系は2つの状態間をカストロフィックにシフトしている。その状態の1つは大気 $\text{CO}_2 \sim 0\%$ (測定器誤差限界)モードであり、これは光合成を目一杯、大気 CO_2 量限界まで作動させているモード(当然、他モードよりも O_2 生成も多い)である。この場合、大気 $\text{CO}_2 \sim 0\%$ (光合成限界)のために、負荷された12 hr明暗条件に拘わらず、大気 CO_2 、 O_2 値とも鮮明な日振動が見られないのが特徴である。

他モードは大気 $\text{CO}_2 \sim 0.2\%$ 乃至 0.3% であり、光合成活動が前者より抑制されたモードである(従って、発生酸素量は前者より 0.2% 乃至 0.3% 少ない)。このモードでは、12 hr明暗条件に応じて大気 CO_2 、 O_2 とも明確な日振動(当然、 CO_2 と O_2 は逆位相振動)を繰り返す。

第1表 準開放系と閉鎖生態系での生物活性とシステム維持戦略：

a) 準開放系の成長期, b) 準開放系の成熟期, c) 閉鎖系(初期).

<1号機, 2号機のATP観測から>

菌数	a	b	c
生菌数	死菌数より多い	死菌数と同程度	bより減少が顕著
死菌数	少ない	生菌数と同程度	bと変わらず
全菌数	少ない	aより多いが, ほぼ一定数を 持続(生・死菌数の増減 は逆位相関係)	bよりやや少ない

返す。

図の1点が10分平均データを示すことを考えると, これらのシフトは殆ど一気であるし, 一つのリミットサイクルから他のリミットサイクルへのシフトが, 明暗条件によらず随意的に生じることも特徴である。

また, 先に示した(第2図のA)LIGHT-ON時の光合成系の一時的弱体化による気圈 CO_2 - O_2 量の非常に大きな逆位相変化および付随したpH, DO値の急減は, 別の大きなカタストロフィック・シフト現象の顕現といえる。しかし, この変位した先の平衡点は不安定ですぐに上記の $\text{CO}_2 \sim 0\%$ モードへ回帰している。

この様にシステムの内部揺らぎの中で, リミット・サイクル間の随意的小シフトのみならず(第2図のB), 生命システム内の急激な構造変化による全く別モード(低 O_2 かつ高 CO_2 大気環境)への環境大シフト(第2図のA)が, 外因に依らず生起する点が自律的閉鎖系の特徴である。

○活性と抑制(Activity and Control): 系内の生命活動の指標となるATP測定結果をまとめたものが第1表である。自律的閉鎖生態系では, 生物の死がバッファとして系全体の持続的維持に重要な役割を果たしている。閉鎖生態系の安定性は死体を次の生物への再利用資源として, 系内にいかに貯蔵しうるかに掛かっているからである。一方, 人工制御型の閉鎖生態系である「宇宙基地型」CELSSでは, その理想は無駄を出さないで物質循環する“自転車操業”にあるから, 死体の蓄積はエネルギーの無駄として排除される(栗原, 1994)。

自律的閉鎖生態系に対して第1表の結果から, 準開放系と完全閉鎖系での生物活性及びシステム維持戦略として次のことがまとめられる。これらは生態系の持続的維持のための, ecosystemの本質的で自律的な活動を示しているだろう。

a(準開放系の成長期)では, 系内の全生物量は増加途上である。生菌による活性も大きい。またシステ

ムのバッファとしての死菌数も蓄積途中である。つまり, 系の安定化確立が進行中である。

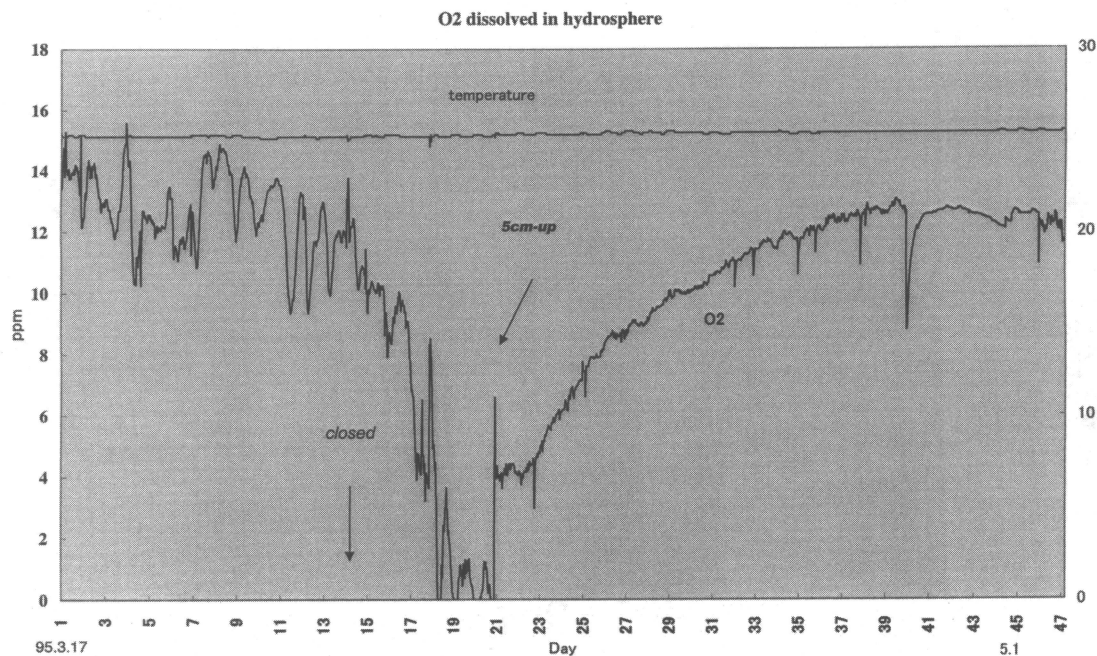
b(準開放系の成熟期)では, システムの恒久的持続が, 生菌数, 死菌数の逆位相的調整によって, 全菌数(生菌数+死菌数)を一定に保つことで保持されている。このbは無限資源の外部に開かれた状態にも拘わらず, つまり, より拡大された生命圏創出が可能にも拘わらず, ecosystem全体で自律的に抑制的調整が行われていることになる。この「抑制型開放系」は, 資源の大量消費で肥大し続ける現代人間社会システムの所謂「欲望型開放系」とは好対照である。

c(完全閉鎖系初期)では, 完全閉鎖(という厳しい条件発生)のため, 生菌数を減らすことで活性を減少させる。しかし, 系維持の再利用資源としての死菌数がbと変わらないことは注目すべきである。即ち, より多くの死菌をシステム維持のバッファとして保存しようとすることで, ecosystem全体の持続的可能性が計られていると考えられる。つまり, “共貧共栄”がここでのシステム維持戦略である。

○pHと窒素循環: 準開放系でも完全閉鎖系でも, pH値は第3図が示すように, 明暗条件に対応して $\text{pH} = 7 \sim 9$ の間の鋸歯状変動を繰り返す。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。このpH値の変動因は, 明期には光合成に起因する炭酸消費による 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値範囲は亜硝酸菌や硝酸菌, 脱窒菌の良好活性範囲($\text{pH} = 7 \sim 9$)と深くリンクしており(須藤, 1977), 窒素循環の円滑化を通しての水圏浄化活動が, ミニ地球システムの継続的維持戦略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。

○生産量—呼吸量関係: 栗原康(1994)は, (開放系である)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



第4図 完全閉鎖前後の水圏溶存酸素濃度動態. 図中の「5 cm-up」までは水底近くでの測定データ. 以後は, それより5 cm 上でのデータ. 閉鎖によって一時的に無酸素状態にまで落ち込んでいる. これは突如の有限空間条件発現にも拘わらず未だ酸素消費する生物量が多いためだが, やがて生物量は“共貧共栄”へと調整されていく.

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.

4. 酸素濃度問題

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に, <現今の環境中の酸素濃度は何故21%へ進化し, そこに落ち着いているのか?>という所謂「酸素濃度問題」がある. 「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)やそれらの関係が時々刻々変化しているにもかかわらず, 種々の攪乱後, 極端環境からでさえ, 酸素濃度や水圏のpH値などの環境条件が結局は, 元へ復していくという“不思議”な回復現象を示す.

例えば, 1995年の実験(第4図: 旧装置)に示すように(Moriyama and Takahara, 1997), 開放系から閉鎖系への遷移において, 完全閉鎖という“外圧”を経験した系は, 一端, 無酸素状態になるが系の立て直しにつれ, そのDO値を以前の状態へ戻していった(なお, この実験は終日 LIGHT-ON 条件である).

また, 先述した完全閉鎖系中の第2図のAでも, 一端激減した大気酸素濃度(及びDO値も), やがて21%

近傍へ結局は回復した. さらに, 34時間停電(第2図: BLACKOUT)で, DOは殆ど0%近傍(1号機: 1.4%, 2号機: 0%)に落下したにも拘わらず, 結局(1, 2号機共), DO(日平均値), 気圏O₂濃度とも20.6%近傍へ回復する. pH値も一端pH=7台に落ち込むが, やがてO₂濃度の回復とともに元の値(pH=8台)へ自律的に回復する.

これらの事実は, ecosystemの構成素(光合成菌, 嫌気菌など)の質・量とも, 刻々変化しているはずであるにも拘わらず, しかも系の外因・内因擾乱にも拠らず, そのシステムは結局, 現実地球環境と同様のO₂濃度21%を作り出すらしいことを示している. 以上の3例が示す強靱な回復現象は, 生命-環境システムにおいては, 例えば溶存酸素濃度0%という別世界的状態からでさえその構成要素の如何に関わらず, pH値回復などが示すようにそれを支える窒素循環システムを含む全生命ネットワークの質全体が, やがて以前の21%という酸素環境回復へ強烈な吸引力を持つこと(アトラクタの存在)を示している. これは地球生態系のもつ生命システムの有機構成の同一性が強固に維持されており, その結果相即的に創り出される(光合成

菌主体の) ネットワーク的環境構成は酸素濃度21%環境への吸引力を持ってシステム作動していくのだということを意味している。

この自律的閉鎖生態系の“不思議な”システム動態はいわゆる「酸素濃度問題」として重要かつ興味深いところであり、太古から現今の地球環境生成問題解明にとって示唆的、かつ、とても本質的な結果とつながっているものと思われる。

5. 結び

巨大な一閉鎖生態系としての地球環境の変化は、以上のような閉鎖系固有の“複雑な”振る舞いに多く依存してきたかも知れないし、所謂「生命誌」や「環境史」とはその反映かも知れない。だが、未だその動態は十分に知られていないのが現状である。そのためには、生命一環境系に対して、「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本質的な理論研究をすること、および自律的閉鎖生態系実験のような手段による地球環境生成研究が、切に必要な所であろうと思われる。

参 考 文 献

- Hall J., R. Harris, M. Barange and K. Lochte, 2002 : Ocean research in IGBP II., Global Change IGBP News Letter, No. 50 (2002 June), 19-23.
- 金子邦彦, 2002 : 生命システムの論理, 21世紀, 物理はどう変わるか, 日本物理学会編, 裳華房, 83-119.
- 川上紳一, 2000 : 生命と地球の共進化, 日本放送出版協会, 267pp.
- 河本英夫, 1995 : オートポイエーシス, 青土社, 340pp.
- 河本英夫, 2000 : オートポイエーシス2001, 新曜社, 318pp.
- Kneer, G. and A. Nassehi, 1993 : Niklas Lumanns Theorie sozialer Systeme, Wilhelm Fink Verlag,

- 205pp.
- 栗原 康, 1994 : 有限の生態学, 岩波書店, 209pp.
- Letelier, J. C., G. Marin and J. Mpodozis, 2001 : Computing with Autopoietic Systems, Computing with Autopoietic devices. WSC-6, 1-11.
- Lovelock, J. E., 1991 : GAIA The practical science of planetary medicine, Gaia Books LTD., 192pp.
- 丸山茂徳, 磯崎行雄, 1998 : 生命と地球の歴史, 岩波書店, 275pp.
- Maturana, H. R. and F. J. Valera, 1980 : Autopoiesis and cognition, D. Reidel, 141pp.
- Mingers, J., 1995. Self-producing systems : Implications and Applications of Autopoiesis, New York, Plenum Press, 264.
- 森山 茂, 1997 : 自己創成するガイア, 学習研究社, 301pp.
- 森山 茂, 2001 : オートポイエーシス, 複雑系の事典, 「複雑系の事典」編集委員会編, 朝倉書店, 51-55.
- 森山 茂, 2001 : ガイア, 複雑系の事典, 「複雑系の事典」編集委員会編, 朝倉書店, 63-66.
- 森山 茂, 2001 : オートポイエーシスとしての生命論, 日本ホリスティック医学協会誌 Holistic Magazine 2001, 37-41.
- Moriyama, S. and M. Takahara, 1997 : Dynamic state of a closed ecosystem and its significance to the generation of the earth's environment, Micro-Biologia SEM, 13, 37-44.
- Rosen, R., 1991 : Life itself : A comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life (Complexity in Ecological Systems Series), New York, Columbia University Press, 320pp.
- Scheffer M, S. Carpenter, J.A. Foley, C. Folke and B. Walker, 2001 : Catastrophic shifts in ecosystems, Nature, 413, 591-596.
- 須藤隆一, 1977 : 廃水処理の生物学, 産業用水調査会, 638pp.



一覧表

第26回極域気水圏シンポジウム開催のご案内	436
第12回近畿東海北陸・酸性雨講演会(岐阜)	446
日本証券奨学財団平成15年度研究調査助成の募集	464