

森山 茂・高原光子（教養・基礎科学系）

1. はじめに

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、「マイクロコズム」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。ここでは温度環境を 25C 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。図 1 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行を含む、12 hr 明暗条件下での実験データを示す。主な結果は以下ようになる。

2. 動態解析結果

○ 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。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、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、大気 CO₂ 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 (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。

○ 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。

図 1 の A は、それまでほぼ 5 日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% ほど急減するイベント発生を示している。またそれに伴って、気圏の CO₂ は約 0% モード (次項参照) から一気に 1.1% へ上昇、逆に O₂ 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。

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

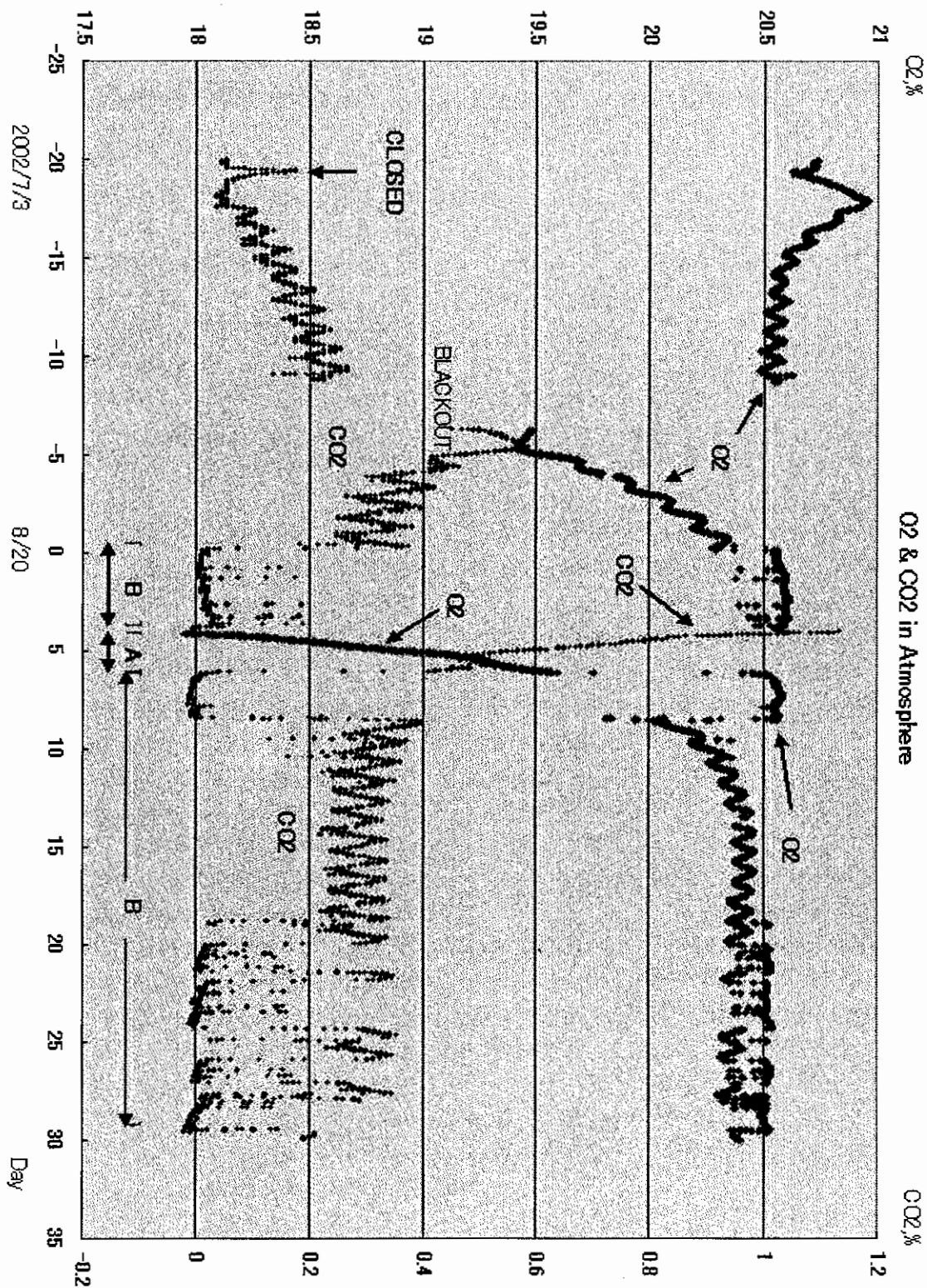


図1. 約半年間の準開放系から完全閉鎖 (Day=-20) 後 50 日間の閉鎖生態系の動態。気圏の O₂ 及び CO₂ 濃度。A は非常に大きなレジームシフトを、B は小レジームシフト発生期間を示している。data の 1 点は 10 分平均値を示す。BLACKOUT は停電による欠測。

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。

○カタストロフィック・レジーム・シフト現象の発現：地球生態系には別の安定レジームがあってその間にカタストロフィック・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タストロフィック・シフトの存在やその再現性は知られていなかったが、初めてここで確かめられた。この事態は、地球生命圏の安定性問題や気候変化探求において、生態系動態研究の必要性を示唆している。

図1のBで示されるように、閉鎖系は2つの状態間をカタストロフィックにシフトしている。その状態の一つは大気CO₂ ~ 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CO₂量限界まで作動させているモード(当然、他モードよりもO₂生成も多い)である。この場合、大気CO₂ ~ 0% (光合成限界)のために、負荷された明暗条件に拘わらず、大気CO₂、O₂値とも余り明確な振動が見られないのが特徴である。

他モードは大気CO₂ ~ 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、発酵酸素量は前者より0.2%乃至0.3%少ない)。このモードでは、明暗条件に応じて大気CO₂、O₂とも綺麗に振動(当然、CO₂とO₂は逆位相振動)を繰り返す。

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(図1のA) LIGHT - ON時の光合成系の一時的弱体化による気圏CO₂ - O₂量の非常に大きな逆位相変化、付随したpH、DO値の急減もまた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CO₂ ~ 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、生命システムの急激な構造変化による全く別モード(低O₂、高CO₂大気環境)への環境大シフトが、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表1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、「宇宙基地型」では、その理想は無駄を出さずに物質循環する“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。

自律的閉鎖生態系に対して表1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。これらは自律的生態系維持のための本質的活動を示している。

a (準開放系の成長期) では、系内の全生物量は増加途中である。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、全菌数を一定に保つことで保持されている。bは無限資源の外部に開かれた状態にもかかわらず、ecosystem全体で抑制的調整が行われていると考えられる。この「抑制型開放系」は所謂「欲望型開放系」である現代人間社会システムと対照的である。

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、多くの死菌をシステム維持のバッファとし

て保存することで、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。

表 1. 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	bよりやや少ない

○ pH と窒素循環 : 開放形でも完全閉鎖系でも、pH 値は明暗条件に対応して、pH=7~9の間の絞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 (pH=7~9) 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のである。

○ 生産量-呼吸量関係 : 栗原康 (1994) は、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。

3. 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振る舞いに多く依存してきたかも知れないし、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、「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真

に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による地球環境生成研究が、切に必要な所であろう。

4. 参考文献

- Hall J., R.Harris, M.Barange and K.Lochte, Ocean research in IGBP II., Global Change IGBP News Letter, No.50 (2002 June), (2002), pp.19-23.
- 栗原康, 有限の生態学, 岩波書店, (1994), pp.209.
- Moriyama, S. and M.Takahara., Dynamic state of a closed ecosystem and its significance to the generation of the earth's environment, MicroBiologia SEM, 13, (1997), pp.37-44.
- Scheffer M, S.Carpenter, JA.Foley, C.Folke and B.Walker, Catastrophic shifts in ecosystems, Nature, 413, (2001), pp.591-596.
- 須藤隆一, 廃水処理の生物学, 産業用水調査会, (1977), pp.638.