

閉鎖生態系実験の示唆する環境遷移問題

森山 茂・高原光子（教養・基礎科学系）

1. はじめに——“持続可能な”地球環境はあるのか？

人間活動に伴う地球環境変化と、それが及ぼすであろう多大な影響に関し議論されて久しい。特に、人間社会のための“持続可能な（sustainable）”地球環境や生態系を求める声が多い。

しかし、地球環境はどれほど持続可能であるか。生命システムと一体化した地球環境（「生命－環境－体系」）の本性である“生成展開する世界”の中で、そもそも“持続可能な”地球環境はありうるのか。あるいは、持続可能な地球環境と固定的環境とは、その維持のために余りに膨大なエネルギーを要するのではあるまいか。

とすると、多大なエネルギーを要する固定的環境維持よりも、むしろ環境遷移のポテンシャルの“谷”を深くするような施策によって、緩やかな環境変移を指向し対応していった方が良いのではないか。なぜなら、人による（森林破壊などの）急激な生態系改変はポテンシャルの“谷”を浅くしてしまうがゆえに、小さな内／外因に対してさえドラスティックな環境遷移（レジームシフト）を引き起こす可能性が憂慮されるからである。

例えば実際に最近、湖沼、海洋、森林、砂漠などの各生態系において、ある状態から一気に別の状態へ遷移するカタストロフィック・レジームシフトが存在することが指摘されているし、われわれの閉鎖生態系実験（ミニ地球）でもそのよう

なレジームシフトの存在が実証されている（図1）。生命と一体化した地球環境（「生命－環境－体系」）では、互いに別の安定なレジームがあつて、ある外因に対して連続的に状態変化することなくカタストロフィックにそのレジームをシフトさせるし、また、外因なしでも系内部での絶えざる揺らぎによって、その状態を突如遷移させ、新たな生成展開を繰り返している。本来、諸状態を一意に持続することのない動的システム、それが「生命－環境－体系」の本性である。

2. 閉鎖生態系実験

地球環境問題では、特に地球の“有限性”と世代間倫理が問題となっている。前者は有限空間内での生命体へのホリスティックな資源の分配（ヒトを含めた）、及びそれによる生態系の動態やその安定性問題が将来を左右することになるだろう。一方、後者は倫理問題への背景として、共時的なシステム論より寧ろ通時的なシステム論への移行を強く要請しているであろう。例えば、現在主眼点が置かれているような共時的な生態系コントロールではなくて、むしろ次世代へ、環境変遷と矛盾しないどの様な（変化しつつある）生態系を残してゆくのか、維持するのかが環境論では重要課題となつてきている。この様な視点における実験的研究として自律的閉鎖生態系実験が要請されている。

日本大学生産工学部に設置されたハイ

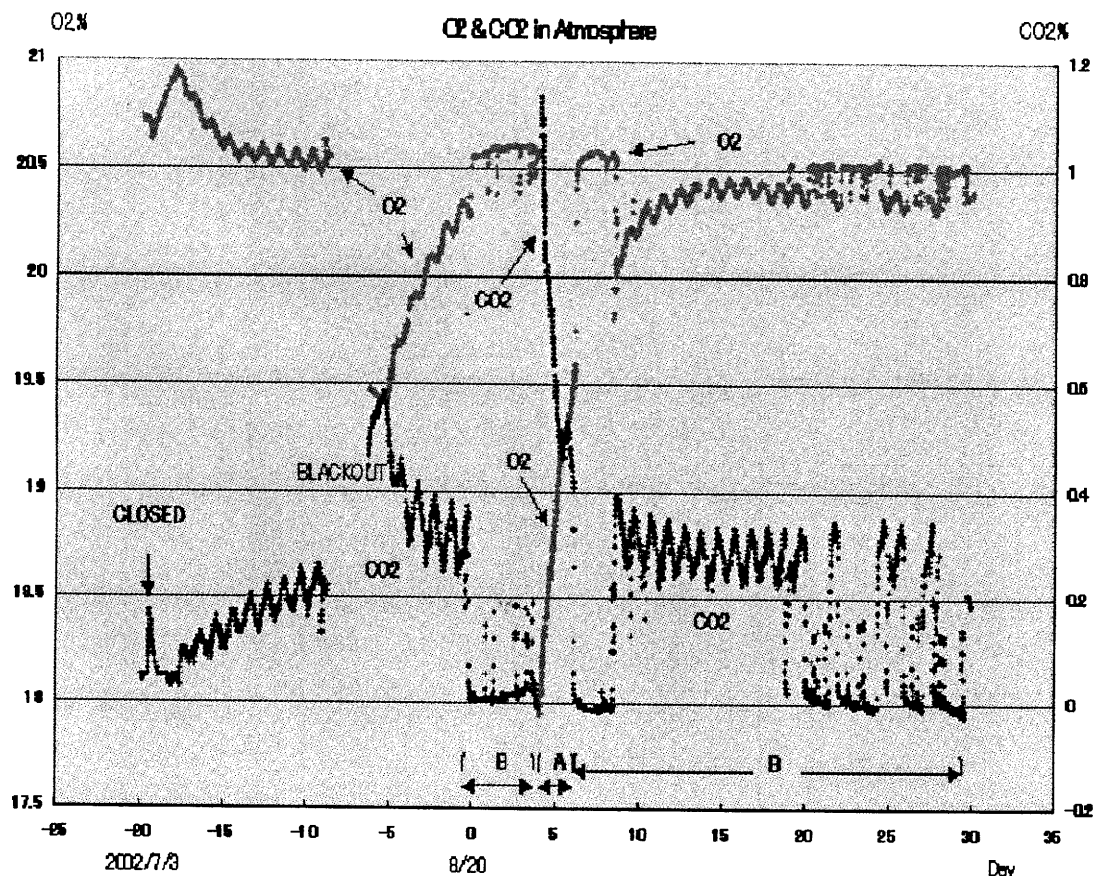


図1. 完全閉鎖後 (Day=-20)、50日間の閉鎖生態系の動態。気圏の O_2 及び CO_2 濃度変動を示す。Aは非常に大きなレジームシフトの出現を、Bは小レジームシフトの発生を示している。データの1点は10分平均値を示している。BLACKOUTは停電による欠測。

例えば、Bを見ると、閉鎖生態系は2つの状態間を殆ど一気に、しかもランダムに他の状態へと遷移している。2つの状態の一つは、光合成を目一杯、大気 CO_2 量限界まで作動させる生態系モードであり（当然、 O_2 生成も多い）、他は光合成活動がやや抑制されたモードであることが分かる。また、Aは光合成活動の激減といった生態系内の急激な構造変化によっている。つまり、生命圏の構造変化によって、環境が激変しうることを示している。

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 $25^{\circ}C$ 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の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。

現在、同時進行する2機のミニ地球の動態（大気、水圏での CO_2 や O_2 、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。

3. カタストロフィック・レジームシフトと遷移への環境弾性力

地球生態系には互いに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、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)。例えば、地表面利用環境 (人工要因など)、生命への栄養物のストック状態、土質、長寿命生物量の急激な変動等々が、環境のカタストロフィック・レジームシフトを引き起こすだろうと指摘されている。

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、初めて当実験で確かめられ、明瞭に取り出された (森山&高原,2003)。

図1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や、また、図1のAのような生命システム内の急激な構造変化 (ここでは光合成生物ネットワークの崩壊) による全く別モード (低 O_2 かつ高 CO_2 大気環境) への環境大シフトが、外因に依らず生起することが自律的閉鎖系の特徴のひとつとして浮かんできている。

この様なレジームシフトは、閉鎖後の生態系へのストレス状況下や閉鎖後の未だ安定しない生態系状態での、システム不安定場中で生起するようである。いわば、絶えず動きつつある生態系の安定状態に向けての調整作用の一環とも考えられる。

生態系は小擾乱で揺らぎながらも、ある定まった環境状態サイクル曲線を描いているが、シフトによってその状態

を大きく変える (Apps,2003)。

一般的に生態系シフトは、

(1) 内・外因による摂動の大きさに左右されるし、また、(2) シフトを引き起こすための吸引力のサイズ (“谷”の深さ) に依っている、と考えられる (図2)。

このように、閉鎖生態系は、ストレスのある不安定状態や安定状態へ向けての調整中では、上記 (1) (2) に依存してレジームシフトを引き起こすことがあり得るものと思われる。

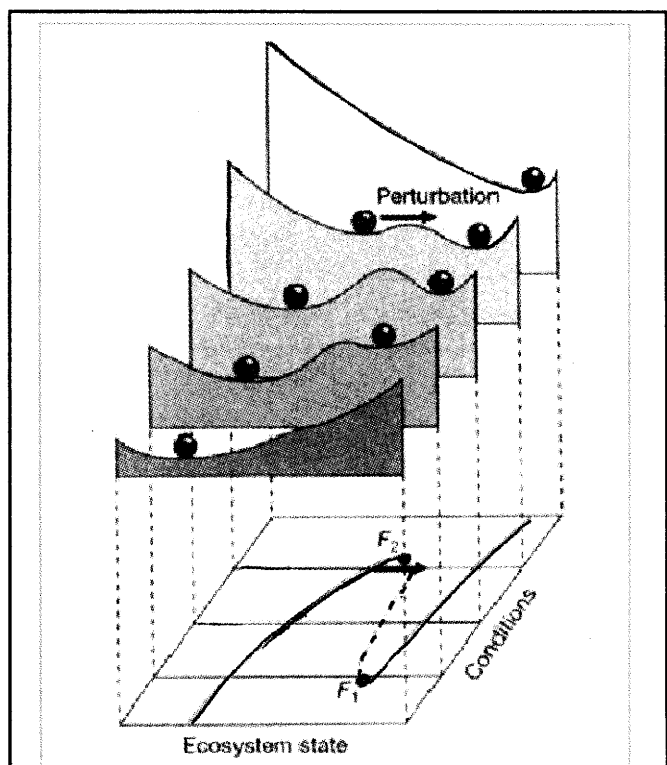


図2. エコシステム状態の発現と外部擾乱は安定なエコシステムが持つ“環境弾性力”に依存している。図の下面は環境状態とエコシステム状態の平衡曲線を示す。エコシステムの安定平衡状態は図の“谷”に対応している。もしも“谷”のサイズが小さいと“環境弾性力”は小さく、緩やかな環境擾乱でも、システム状態を(状態の分岐点近くでなくとも)他の“谷”へと飛ばしてしまうであろう。

4. まとめ

当実験から次のように考察される。

- 1) 閉鎖生態系で、未だ定まらない不安定場では、環境大シフトや小シフトがあり得る。
- 2) 生態系の破壊（系内部および外因から生起する）が、環境大シフトを誘引することがあり得る。
- 3) 環境問題から見ると、不安定要因（既存の安定的生態系の破壊など）を小さくすることが、レジームシフトへの「谷」を深めるゆえ（これは、「環境弾性力；シフトが起こらない臨界摂動の大きさ」を強めることを意味する）、レジームシフトによる変動被害を小さくし得る。生態系の内因・外因による摂動は、生態系の多様性 (diversity) や再生過程 (renewal processes) の促進にとって実は不可欠なものであり、それらを抑

制するのは環境政策上好ましくないだろう。むしろ、「環境弾性力」を強めて、急激な環境のレジームシフトを回避するような施策の方が望ましいであろう。

参考文献

- Apps M., 2003: Disturbances and Earth System Dynamics, Global Change IGBP News Letter, No.55 (2003 October), pp.4-8.
- Hall J., R.Harris, M.Barange and K.Lochte, 2002: Ocean research in IGBP II., Global Change IGBP News Letter, No.50 (2002 June), pp.19-23.
- 森山茂, 高原光子, 2003: 自律的閉鎖生態系の動態と地球環境生成研究, 日本気象学会誌「天気」, 50, 6, pp.483-489.
- Scheffer M, S.Carpenter, JA.Foley, C.Folke and B.Walker, 2001: Catastrophic shifts in ecosystems, Nature, 413, pp.591-596.