

## 昭和63年度日本気象学会春季大会

### シンポジウム「生態系と気候変動」の報告

座長（及びシンポジウム企画委員会委員として）

安田延壽，和田美鈴（気象大学校）

地球はその固有の進化の諸条件のもとで生命を育み、生命は、また地球進化の条件を変えた。そして地球上の生命体の中で我々人類のみが意志を持って自然を利用し、自然を変化させた。地球の歴史はまた新しい条件を取り込んだ。我々が気候変動を研究するに当たってこのことを看過することは出来ない。この様な問題意識のもとで気象大学校内に設けられた「シンポジウム企画委員会」は「生態系と気候変動」というテーマを選択しました。この種の研究は国際的にも日が浅く、日本の研究の歴史とその成果も決して十分とは言えないかも知れない

が、ここに、日本での研究、考え方を、講演者の主体性を十分に尊重した上で紹介して載せ、これがきっかけとなって斬新な研究が次々と生まれてくることを期待したものです。当日の行事が後にずれ込み、その上残念ながら、座長の不手際で本来シンポジウムの命とも言える総合討論に十分な時間を取れなかったことをお詫びいたします。しかし、予想以上の参加者（200余名）があり、幾ばくかの責任を果たせたものとささやかに自賛しております。シンポジウムの講演を快く引き受けて下さった方々には心より御礼申し上げます。

110 : 306 (生命と地球環境の生成)

## 1. 生命の存在と地球環境の生成\*

森 山 茂\*\*

### 1. ガイア説

最近、地球生理学という新しい学問分野が注目を集めている。これはもともと火星探査で地球外生命の発見を目した頃、そもそも生命とは何なのかという根元的な問いかけから生まれたといつてよい。その創始者である J.E. Lovelock (1979) は NASA の Viking 計画での火星上の生命検出研究の要請に対し、次のような疑問に襲われたという。そもそも、生命とは何か。これまでの火星の生命探査へのアプローチは結局のところ、すべて、地球上の生命体にも有効な方法、思想に基づいて行われているに過ぎない。我々は未だ、他の生命体の全存在を知らないにもかかわらず、余りに地球中心的な考えによって、他の惑星の生命体の検出に向かっている

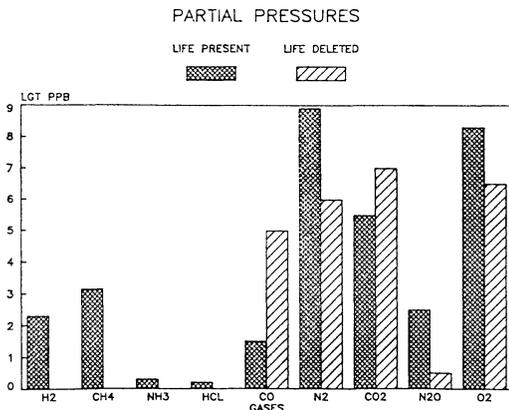
のではないだろうか。その様なアプローチは他の惑星上の生命探査には有効でないばかりか、その検出に失敗する恐れがある。他の惑星上の生命体がいかなるものであっても他に生命を検出するやり方があるに相違ない。そのやり方とはシステム論的な観点から見だされるであろう。特に、もしも、生命が全惑星のシステムと一体化しておれば、それは必ずや、その惑星大気の化学組成の変化という形を取って現われるはずであろう。その変化を、その惑星上での全くの無生物的定常状態における大気組成と比較すれば、それこそ生命の存在の証明に迫ることができるということになる。この生命体による大気組成変化こそ、生命活動が存在すること、つまり、自己に有用な滋養物を環境から取入れ、新陳代謝の末、その生産物を環境に吐き出すという生命体の活動の存在を意味していることになる。そうした作用による環境変化が無生物的定常状態との間に明かな差異を誘発するはずである。このような考えが生命と環境との相互作用に注目

\* Existence of life and creation of the earth's environment.

\*\* Shigeru Moriyama, 日本大学生産工学部.

第1表 惑星大気, 地球の化学平衡

	惑 星				
	金 星	地 球 (無生物)	地 球 (化学平衡)	地 球 (現 在)	火 星
CO <sub>2</sub>	98%	98%	99%	0.03%	95%
N <sub>2</sub>	1.9	1.9	0	78	2.7
O <sub>2</sub>	trace	trace	0	21	0.13
A <sub>r</sub>	0.1	0.1	1	1	2
表面温度 (°C)	477	290±50	15	13	-53
気圧 (bar)	90	60		1.0	0.0064
海洋			63	96	
水					
塩			35	3.5	
硝酸ナトリウム			1.7	trace	



第1図 生命を取り去った時と現在(生命在り)の大気組成の比較。  
(Lovelock and Watson, 1982)

する, その後の思想的背景となったのである。

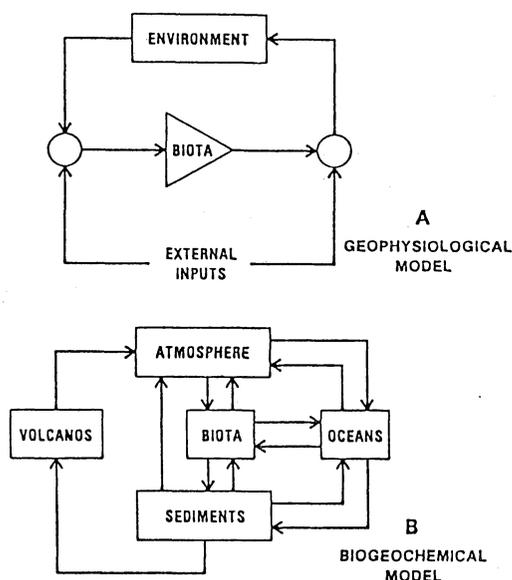
こうした観点から見ると, 第1表に示すように, 火星や金星はまさに無生物状態の地球に似て, 化学平衡状態に近い大気を持っていることが分かる。一方で, 地球大気は, 化学平衡状態からは余りに遠いのである。Lovelock (1979) はこうした現在の地球大気の奇妙さのひとつとして, 酸化的組成と還元的組成の永続的共存を挙げている。他の星から眺めたときそれは奇妙なものとして映るであろう。こうした化学的不安定状態が地球上で, 安定的に長く保たれてきたのは, まさに, それを維持する生命活動によるものなのである。従って, 現大気への生命活動による寄与を除去すれば, 例えば, 安定に存在するものと思われてきた主成分の窒素さえ, 自由酸

素との反応によって硝酸塩化し, やがて海に吸収されるであろう。こうして, 生物を取り去った後の地球大気組成は, ほぼ百万年のオーダーで第1図に示されるようなものに一変するはずである。

Lovelock and Margulis (1974) はこうした観点からいわゆるガイア説を提唱した。それは, 生命体とその環境とは一体化して, 自己調節的システムを構成しており, その気候, 及び, 化学組成は生命体の生存に有効に, かつ, 定常性をもって積極的に維持されている, というものである。生命と環境とは一体性をもって結ばれており, ひとつのシステム(系)をなして進化するのである。例えば, 生命体は大気中の酸素, 炭酸ガス, 窒素を必要とし, かつ, これらを生産している。こうして, 生命体と環境は強力な feedback loop の中に組み込まれたひとつのシステムを形成している。おそらく, 生命体はそのシステムの中で, 変動に対するセンサー(そして, それに結ばれたアンプ)として働いているのではないか(第2図A)。外部や内部からの変動は系の持つ operating point と較べられる。もし差異があれば生命体はその変動に対し積極的に feedback loop を通して抵抗し, 系に恒常性(homeostasis)をもたらし働くであろう。あるいは一方で(これはまた進化ということになるのだが), 系は, 新たな定常状態に向けてその operating point を調整するかも知れない(homeorhesis)。生命体と環境は, こうして一体化して進化するのである。この点がこれ迄の地球生化学的観点と最も異なる点であろう。もちろん, 地球生化学的観点においても系内のそれぞれは link してはいるが(第2図B), feedback

第2表 ガイアから見た各大気成分の機能 (Lovelock, 1979)

ガス	濃度	年間流量 (Mton)	非平衡の程度	ガイアによる機能
窒素	78(%)	300	$10^{10}$	大気圧制御, 消火機能, 海水中の硝酸塩濃度調節
酸素	21	100,000	0 (参照基準)	化学的エネルギー
炭酸ガス	0.03	140,000	10	光合成, 気候制御
メタン	$10^{-4}$	1,000	$\infty$	酸素調節, 嫌気性ゾーンの有毒物浄化作用
亜酸化窒素	$10^{-5}$	100	$10^{13}$	酸素調節, オゾン調節
アンモニア	$10^{-6}$	300	$\infty$	pH 制御, 気候制御
硫黄ガス	$10^{-8}$	100	$\infty$	硫黄サイクルの運搬ガス
塩化メチル	$10^{-7}$	10	$\infty$	オゾン調節
ヨウ化メチル	$10^{-10}$	1	$\infty$	ヨウ素の運搬

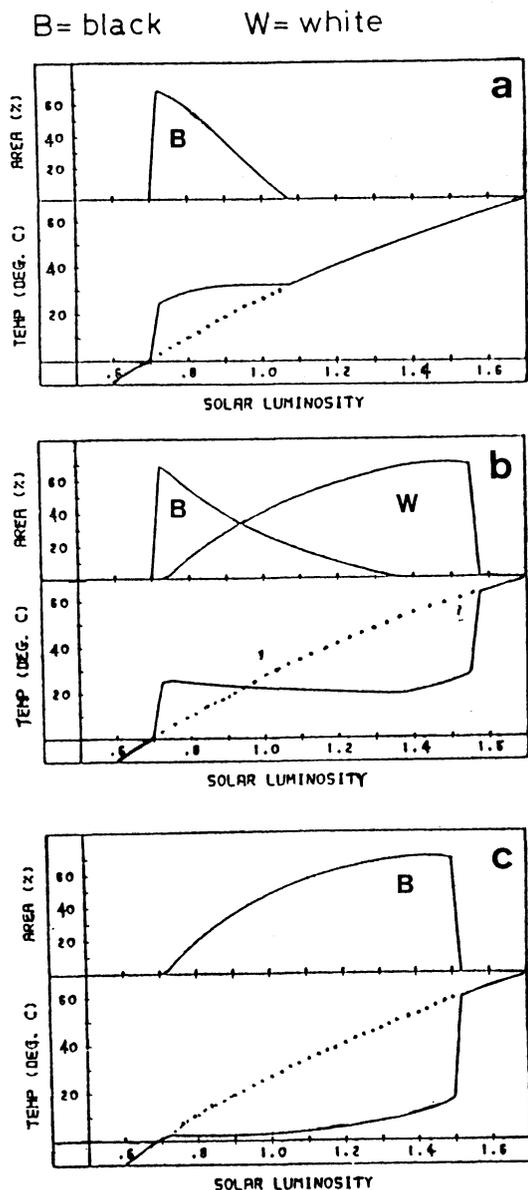


第2図 地球生理学モデル (A) と地球生化学的モデル (B) のダイアグラム。(Lovelock, 1986)

くまで与えられたものであり、その中で、その物理的、化学的に固定された諸条件に適応して行くのである。

こうして、話は哲学的観点の対立にまで行くことになる。ガイア説あるいは、巷でいわれている地球生命圏説に対し、早くも、目的論的であるとか、はたまた、神秘論的であるとかの批判があるが、その証拠を挙げようとの試みはいま始まったばかりであって、早々に可否の判断を下すべきではない。以下に、生命やその進化、地球の大気の見るときの、システム論的の観点が有効であることに気付くからである。その詳細は原論文に譲るが、Lovelock (1979) 等は、いくつかの証拠を挙げて、現在、その説の検証に努めている。例えば、なぜ地球の長い歴史において大気中の酸素濃度は21%に固定されてきたのか、という問題に対し、生命体による調節作用の重要性を主張しているし、更に、その酸素調節に対して、生命起源の微量成分であるメタンや亜酸化窒素の果たす役割がいかに重要であるかも主張している。地球大気成分のいくつかに対するガイア説からみた動作機能を第2表に載せておく。またその他に、ここでは頁数の関係で詳細は省くが、太陽光度が現在までに30%ほど増しているのになぜ地球環境が一定に保たれてきたのかという問題がある。CO<sub>2</sub>量がそれに応じて減少したからと説明されているが (Owen *et al.*, 1979), では一体、なぜ CO<sub>2</sub>量はそんなにうまく調節されてきたのかという奇妙な問題が残る。

は弱く、おのおのは独立した部分と考えられている。つまり、一者が積極的に系全体を変えることをしない。普通、生命の進化と環境の進化とは別物であり、連結してはいないと考えられている。生命にとってその環境はあ



第3図 Daisyworld と生命による homeostasis の成立. 増加する太陽光度に対する雑草(白, 黒)の面積, 及び, 有効温度. 点線は生命なしの温度. (a) 黒雑草のみ存在の場合. (b) 白と黒の雑草が在る場合. (c) 白と黒の雑草が在るが, 黒の持つ負の feedback の方向を故意に変えるために, 常に黒の上を雲が覆うとした場合. アルベド: 白=0.75, 黒=0.25, 裸地=0.5, 雲=0.8. (c) では, 白は生存競争に負けて消滅するが, homeostasis は依然保たれている. (Watson and Lovelock, 1983)

また最近, 気候調節と海洋性 phytoplankton の関わりを主張する論文が *Nature* に出された (Charlson *et al.*, 1987). それは, 海洋上の雲の凝結核の主要なソースは生物起源の dimethyl sulphide (DMS) ではないかというのである. 多くの種類の海洋性 phytoplankton は気体の DMS を生産している. それは大気中に出て酸化され, 硫酸塩エアロゾルを形成する. こうしてできた硫酸塩粒子が雲の凝結核の主要な源となっているというのである. 雲量が増加すれば地球のアルベドが増すので, 地表は冷える. こうして, 原理的には, plankton が急成長すれば, 地球が冷え, この寒冷化は plankton の生育を抑えるという, 負の feedback loop が完成されることになる. つまり, ガイア的には, ある種の plankton は温度センサーとして働いているということになる. この一例の他にも幾つかあるが, 今後これに似た種々の証拠の提出と, その検証が要請されることとなるだろう.

更に, Watson and Lovelock (1983) は, 地球環境の生物学的な homeostasis のモデルとして Daisyworld モデルを提出した. この Daisyworld では, 仮想的生命体として雑草のみしか存在しない. また, その成長率は環境の温度のみに依存し, 一方, その温度環境は World の表面を覆う雑草 (Daisy) のアルベドに応じて吸収する放射量によって左右される. つまり, 裸地に比してアルベドが大きいか小さいかに依る. そうすると第3図に示すように, 雑草が白いか, 黒いかに関わらず, さらには feedback の方向にも依らず, そのアルベドが裸地のアルベドと異なっている限り, 結果は常に homeostasis が成立することを示している. これは雑草の成長率が, ある温度範囲でピークを持つ曲線になることが効いているのだが, こうしたことは生命体にとってはかなり普遍的なことと思えるので, まったく突飛な仮定ではない. 雑草は温度 feedback を通して環境を一定に保つべく, その量を互いに旨く調整するのである. また, こうした homeostasis は内的, 外的な擾乱に対してすばやい回復力を有していることも示されている (例えば, 40%というカタストロフィックな雑草の死に対してすら, すばやい回復力を示す. Lovelock (1986) は, 雑草を食べる兎と, さらにその兎を食べる狐を入れた Daisyworld モデルでそれを示している). この様に, ガイア説が生命体による環境の調節を, ややもすれば目的論的に説明しているとの批判に対して, そうではなくて, たんに適応の問題なのだといふことが示せるのである. その環境を好む種と, その種を好む環境との一体性ということであ

第3表 生物圏の発達と酸素の生成

出来事	年代	証拠	酸素レベル	並行して進んだ出来事
生命の誕生	38億年前?	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 異常	無酸素的	生物圏進化の始まり
無機栄養	35億年前 以前	ストロマトライト, 硫酸塩, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 異常	無酸素的	生物圏の連続性
酸素放出をする光合成	28億年前 以前	ストロマトライト, ラン藻類の前駆生物	1%以下	クロロフィル a とチトクロム b の合成, 縞状鉄鉱層
酸素に耐性を持つラン藻類	20億年前頃	糸状藻類, 大型で細胞壁の厚い細胞	約1%	酸化的代謝, $\text{O}_3$ の遮蔽層, 最初の陸生赤色土層
最初の真核生物細胞	14億年前	大型細胞	1%以上	赤色土層の発達, 多細胞生物
後生動物の出現	6.7億年前	海生無脊椎動物群	約7%	顕生累代の開始, 後生動物化石やその遺跡
骨格を持つ後生動物の出現	5.5億年前	有殻無脊椎動物を含むカンブリア紀動物群	約10%	底生動物による潜穴習性の始まり, 引き続き進化
完全な酸化状態	4億年前	大型魚類, 陸上に最初の植物と無脊椎動物	100%	現在へ向けての生物圏進化

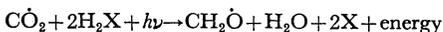
る。

## 2. 酸素生成と自己組織化する生命圏

そもそもこうした生命と地球環境との間の相互的進化の存在は、地球大気中の自由酸素の蓄積の問題を考えるとき非常に暗示的である。第1表に見られるように、地球大気主成分として、他の惑星には見られない特異な組成がこの酸素である。これが大量に存在すること自体が既に、地球外から見れば非常に奇妙なことであり、これこそまさに地球生命圏の存在を明示しているのである。

酸素は、地球の初期から既に生物によって作り出されてきた形跡がある。おそらく、35億年位前には既に光合成をするラン藻によって酸素が作られていたのであろう。ストロマトライトの存在がそれを示している(第3表)。酸素自体、生命体にとっては非常に有毒であるから、この腐食性物質にいかに対応するかが、即、緊急課題となったであろう。そもそも生物圏が光合成において酸素を発生させたことの必然性にはふたつの重要な理由があったと筆者は考える。その一つは周囲に豊富に存在する水を利用、分解することの発見であり、いまひとつは、光合成とそれから発生した酸素を利用する呼吸作用の関連したシステムの確立である。

光エネルギーにより炭酸を同化して有機物を合成する光合成は、一般に次の式で書ける。



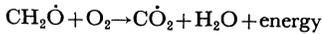
ここで、高等植物やクロレラなどはXとして酸素を利用しているが、細菌の中には、紅色細菌のように硫黄を

利用するものもあるし、Xなし(水素)を利用するものもある。この式から分かるように、以後地球を支配していく生物は、まわりに豊富に存在する水分子の分解をすることによって、遊離酸素を供給する道を開いたのである。

一方、グルコースを食物(燃料)としてそこに蓄えられているエネルギーを取り出すには、嫌氣的な解糖に比べ、酸素を呼吸して取り出した方が遙かに効率がよい。呼吸、即ち、生体における有機物の完全酸化作用で、グルコースは、クエン酸回路により、ATP(アデノシン三リン酸)の形で生物エネルギーに代謝変換される。この際、発酵に較べて19倍のATPが、グルコース1分子を消費する度に生成されるのである。こうした水分解による遊離酸素の生成と、それを利用する呼吸作用の連結システムの確立が生物進化への道を開いたことは疑い得ないことであろう。光合成はまた、生物圏を非平衡システムとして形成するために、宇宙環境がそこに組み込まれたという重要な意味も持つ。もしそれがなかったら、生物圏の entropy は上昇して生命は終焉を迎えていたに相違ないのだ。

もともと生物にとって酸素は有毒であり、それは、エネルギー移送分子であるATPの生産にのみ必要だった。だから呼吸作用によって生産されるだけのATPを、非酸化的過程で生産できていたならば、べつに代謝用の酸素への必然性は全くなかったであろう。この事実もまた、なぜ地球に大量の自由酸素が存在するのかということへの、生命と環境の関わりを示す逆説的な答にな

るであろう。生物圏は、有毒だが魅力ある酸素という背反する課題を抱えつつ、上記システムを確立すべく進化のための自己組織化を進めていったものと思われる。かくして生物は酸素への当面の課題を、酸化的代謝の破壊的副産物である、過酸化水素やスーパーオキシドイオンを還元するために必要な酵素を保持することで、その防御に当てて乗り越えた。例えば、細胞にあるペルオキシソームという顆粒中の酵素がそうである。そうした酵素によって、生物は、有毒な酸素添加を直接行わないで済む巧妙な酸化過程、つまり次式から分かるように、脱水素化という酸化過程によって除去される水素の受容体として、この遊離酸素を使うという、余りにも賢明な道を開いたのである。



こうして、一旦、光合成と呼吸作用の連関システムが確立されると、地球生命圏は確実に変化していったであろう。水圏中の鉄の酸化というような酸素の sink が絶えたおおよそ20億年前頃には、大気中に酸素が洩れ出していったであろう。

更に、真核生物の出現もまた生物圏及び大気圏進化にとって重大な出来事であった。真核生物の起源は内部共生という重要な問題を含んでいる。ミトコンドリア、DNA を内包する核、葉緑体、そして、繊毛といった原核細胞どうしの共生関係が全く新しい生命システムを作り出した。あるいは、嫌氣的な原始細菌が酸素を利用する能力を持った小細胞を取り込んで、相互利益のために共生関係に入ったともいえる。こうした生物圏の新たな展開が、自己触媒的に、ハイパーサイクリ的に地球生命圏進化の速度を早めたであろう。これは環境にとっても、急激な、大気中の酸素濃度の上昇となって現われた。やがて、それまでに要した時間を一挙に縮めた形で、生物進化は加速され、後生動物の出現に到るのである。酸素濃度もそれに応じて加速され、4億年前頃までにはほとんど現在と変わらぬ環境が作り出されて行ったことであろう。

### 3. 生命ということ

この様に、酸素の歴史そのものの中にさえ、生命がいかにか自己組織化を計ることによって地球の様相を変えてきたかが読み取れるのである。生命にとって環境は単に与えられたものでもないし、neo-Darwinism 風に環境にテストされて合格したものが生き残ったというものでもない。地球生命圏(ガイア)は相互に関連し合うシス

テムとして、コヒーレントに進化を続けているようである。生命が単に環境に適応するものでもなければ、生命が環境を支配するものでもない。生命と環境は共に相互作用して行くのである。あるいは、E.Jantsch (1980) の言うように、「生命というものは、更なる進化を引き起こすためのマクロの条件を自ら創り出すものだ」といえるだろう。

この様にして、結局、生命とは一体何であろうかという本質的な問い掛けが、今のわれわれの問題に引っ掛かってくる。その生命の持つ本質そのものが、まさに以下に述べる様に、地球環境の存在と重要な関わりを持つからである。

自己複製を繰り返す、突然変異や遺伝子組み換えで別の形に変わり、その変化を子孫に伝えて行くことのできる機能を持つ細胞組織——生命、それは次のような重要な特徴を持っている。まず第一に、それは単に在る (sein) というよりもむしろ、成ろうとする (werden) 存在なのだということである (Prigogine, 1980)。生命の最も基本的な本質は、Schrödinger (1945) や Nicolis and Prigogine (1977) の主張するように、負の entropy を食べて外部に大きな entropy を吐き出す存在、あるいは、外部から free energy を取り入れて、内部で entropy を生産し、外に代謝して行くことによりある秩序を形成しているような構造を持つ存在である。この生命の本質的に持つ性質からして既に、生命と環境との相互的な対話の存在が必然とされる。生命の持つ散逸構造性からして、生命は周囲の環境と絶えず交流を続けることでエネルギーや物質の流れを自ら維持し、長期にわたってグローバルな安定構造を自己創出しているのである。しかもそれは決して静的なものではありえない。内的、外的なゆらぎに絶えず柔軟に変化し、自らを維持しつつ、適応しているのである。

第二に、この様な生命と環境との相互性は、有機システム論的アプローチからもっと強く支持される。そもそも生命体は、部分と全体を対立的に捉えるような二元論的な捉え方では理解できないものがある。周知のごとく、生命体はその体を構成する器官系、それをつくる器官、組織、細胞、更に、細胞小器官、…とマルチレベルの有機的な階層構造を構成している。各レベルを成す部分はホロンと名付けられるが、それらは上部構造に対しては従属的な「部分」として働き、下部組織には支配的な「全体」としての顔を持つ(まさに、Koestler (1978) のいう Janus 性である)。しかも、こうした階層内で

は、各ホロン間の調和が良くとれていることで生命体全体の秩序が保たれているのである。つまり、ホロンは全体を見ながら自らの振舞いを調節しており、個が全体と有機的に調和する機能を持つ。あるいは、部分の中に全体が刻まれているともいえる。生命体の本質はこうなのだ。しかもこれは何も有機体内部のみに限られたことではなくて、外部との間でもこうした有機的ヒエラルキー関係が成立しているのではないかといわれる。それは、種、属、生物圏、…と拡大されて有機的調和が成立しているのではないか。そして、グローバルに地球生命圏として我々の有機的一体性が成り立っているのではないかというのである。つまり、環境と生物進化は有機的に一体なのであり、地球の歴史を見る限り、またしても我々には、「生命はマイクロ進化のためにマクロ的進化の条件を創り出す」という先の Jantsch の言葉が生き生きとしてくるのである。

#### 参考文献

- Charlson, R.J., J.E. Lovelock, M.O. Andreae and S.G. Warren, 1987: Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326, 655-661.
- Jantsch, E., 1980: *The self-organizing universe*. Pergamon, New York.

- Koestler, A., 1978: *Janus*. Hutchinson, London.
- Lovelock, J.E., 1986: Geophysiology: A new look at earth science. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67, 392-397.
- , 1979: *Gaia. A new look at life on Earth*. Oxford U.P., New York.
- and L. Margulis, 1974: Atmospheric homeostasis by and for the biosphere. *Tellus*, 26, 1-10.
- and A.J. Watson, 1982: The regulation of carbon dioxide and climate: Gaia or geochemistry. *Planet. Space Sci.*, 30, 795-802.
- Nicolis, G. and I. Prigogine, 1977: *Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations*. John Wiley & Sons, New York.
- Owen, T., R.D. Cess and V. Ramanathan, 1979: Enhanced CO<sub>2</sub> greenhouse to compensate for reduced solar luminosity on early Earth. *Nature*, 277, 640-642.
- Prigogine, I., 1980: *From being to becoming Time and complexity in the physical science*. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Schrödinger, E., 1945: *What is life?*. Cambridge U.P., London.
- Watson A.J. and J.E. Lovelock, 1983: Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. *Tellus*, 35 B, 284-289.

1091 (顕熱・潜熱輸送のパラメータ化)

## 2. 植生地の顕熱・潜熱輸送のパラメータ化\*

近藤 純正\*\*

地表面の蒸発散問題では、湿潤地と半乾燥地がある。湿潤地の部類の、水面と平坦地積雪面のパラメータ化はほぼ出来上がった状態にある。ここでは湿潤な植生地を対象とした熱収支のパラメータ化の問題を取り上げる。

### 1. 地表面の熱収支と水循環

最初に、植物の働きは何かを考えてみよう。太陽光のもとでは、植物は気孔を開き、水蒸気を蒸散し、CO<sub>2</sub>をとり込んでいる。植物の葉に入射した太陽エネルギーは赤外放射、顕熱、潜熱に変換される。この際、太陽光

の大部分は蒸散のエネルギーとなり、1%程度が光合成のエネルギーになる。蒸散は植物の体温が上がり過ぎないように冷やすことが一つの役目である。

植物が大気に及ぼす効果として(1)蒸発、(2)地表面のアルベード、(3)粗度、(4)地中の熱伝導係数、(5)その他の影響がある。これらの効果を地表面温度の日変化で調べてみる(近藤・内藤, 1969)。もしも蒸発がなかったとすると、気候は砂漠のようになる。具体的に中緯度の平均的な場合を想定し、境界層上端の条件を与えて地表面温度の日変化を計算し、蒸発がある場合と、ない場合について比較した。蒸発がないとすると、地表面温度は上昇し、日中で約12°Cも高くなる。つぎに、アルベードの影響として、地表面のアルベードが0から0.4になると、日射の吸収が減るので、正午の温度

\* Parameterizations of the sensible and latent heat fluxes above vegetative canopies.

\*\* Junsei Kondo, 東北大学理学部.