

「地球温暖化」と生物圏

安成哲三

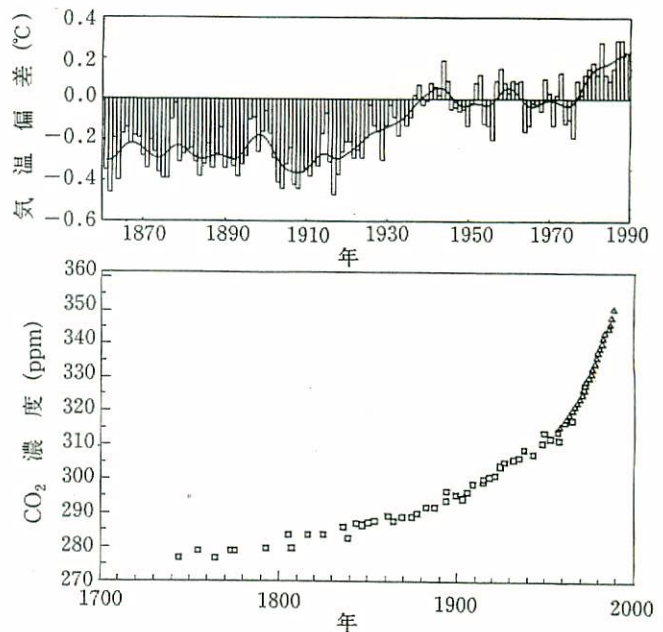
地球におけるさまざまな時間スケールの気候変動において、CO₂などの温室効果ガスの変動は、気温に対するフィードバックとして大きな働きをしている。その温室効果ガスの変動には、多くの場合、生物圏が密接に関与している。すなわち、地球気候システムの変動と生物圏の変動の間には、密接な相互作用があり、地球生命圏「ガイア」として理解できる側面がある。しかしながら、生物圏の中のヒエラルキーとしての地球生態系と気候環境との関係は、より多重構造的である。栄養学的地位のより低い生物は気候環境とより相互作用的であるが、高位の生物ほど気候環境に、より依存적であるといえる。人類は、その意味で環境に最も依存적である立場にしながら、その発生以来、環境の改変を続け、現在の「地球環境問題」を引き起こすに至っている。しかし、この矛盾を認識し止揚することこそが、人類という生物の存在理由なのかもしれない。

はじめに

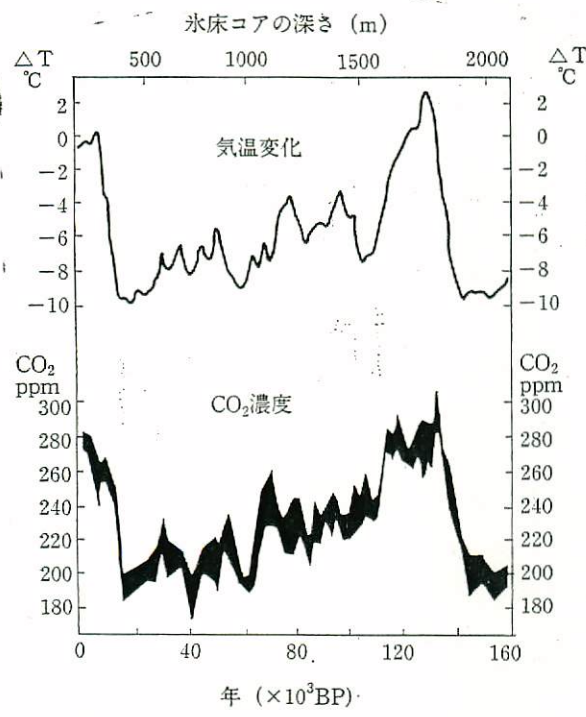
いま、人間の産業活動に伴う化石燃料の消費と森林破壊による温室効果ガスの増加、その結果としての地球大気の「温暖化」、さらにそれが引き起こす（であろう）環境変化をめぐる論争が、まさにグローバルな問題として取りあげられている。確かに、第1図に示す北半球気温の変動と大気中のCO₂濃度の変動のカーブは、これら二つの要素の間に密接な因果関係のあることを示唆しているようである。世界各国の合意によって結成されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）は、この問題に対する世界の動きを象徴するものであった。しかし、この問題の科学的評価は、地球の気候システムに対する理解の不足とデータの不足の故にいまだに大きな不確

実性を伴っており¹⁾、良くも悪くもそのことがこの「温暖化」問題の政治的論議の中心に据え置かれている。

しかしながら、この問題の真の理解には、人間と自然、あるいは地球と生物の間の相互関係に関する根源的な問いかけが必要であるように筆者には思われる。言い方を換えるならば、46億年といわれる地球史において、大気圏・水圏と人間を含む生物圏の相互に絡み合った進化過程への理解なしに、現在私たちが直面している「地球環境」問題を語ることはできない、ということである。この小論では、このような視点で私たちの当面している「地球温暖化」問題を考えてみたい。



第1図 1860年以降の地球全体の年平均地上気温の推移（上）と1700年代半ばからの大気中のCO₂濃度の推移（下）。気温は1951-1980年の平均からの偏差で、曲線は平滑化した値である。CO₂濃度は1958年以前は南極サイプルの氷床コア中の気泡から測定した濃度である（文献1から改変）。



第2図 過去16万年間の水素同位体比から推定された気温変動(上)とCO₂濃度(下)、南極ポストーク基地での氷床コアからの解析による(文献1から改変)。

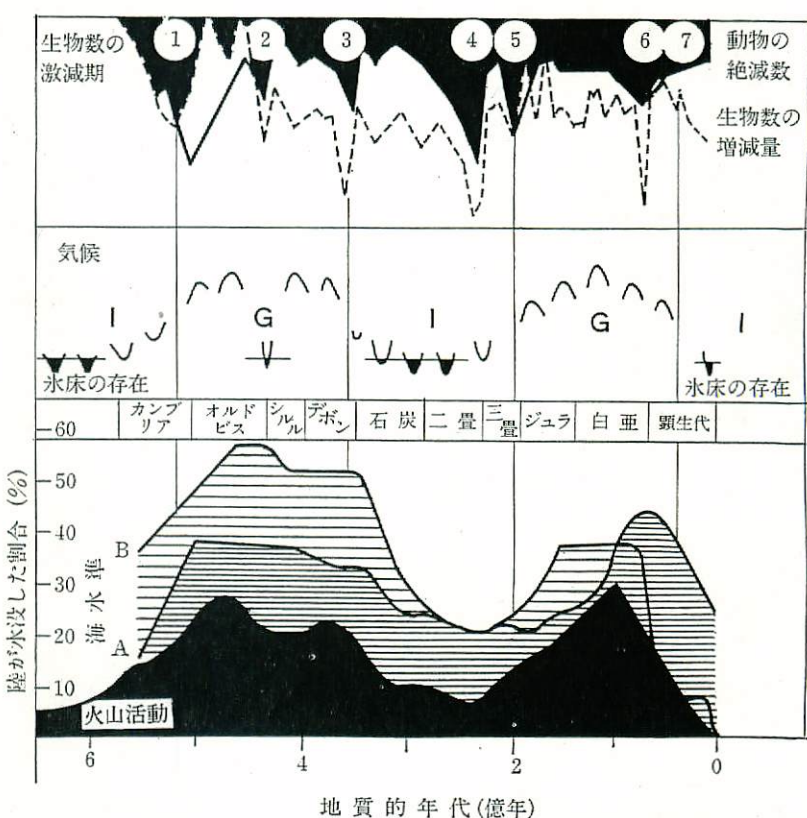
1. 地球大気における気温変動と炭酸ガスの変動

地球表面の気温は、地球の歴史を通じて大きく変動してきたことがわかっている。その気温変動のメカニズムは、時期により、時間スケールにより、当然異なったものであったと推測される。地球外に起因する変化(たとえば太陽の進化に伴う太陽エネルギー強度の変化)、ミランコヴィッチ説に代表される地球軌道要素の変化、大気組成の変化、海陸分布の変化、火山活動の変化等々、さまざまである。しかし、どのような他律的、自律的な気候変化のメカニズムにせよ、その多くの(あるいはほとんどの)場合、水蒸気や炭酸ガスといったいわゆる温室効果ガスの変動を通して初めて大きな振幅をもつ気温変動として現われているようである。その典型的な例が、過去約100万年の氷期・間氷期のサイクルであろう。

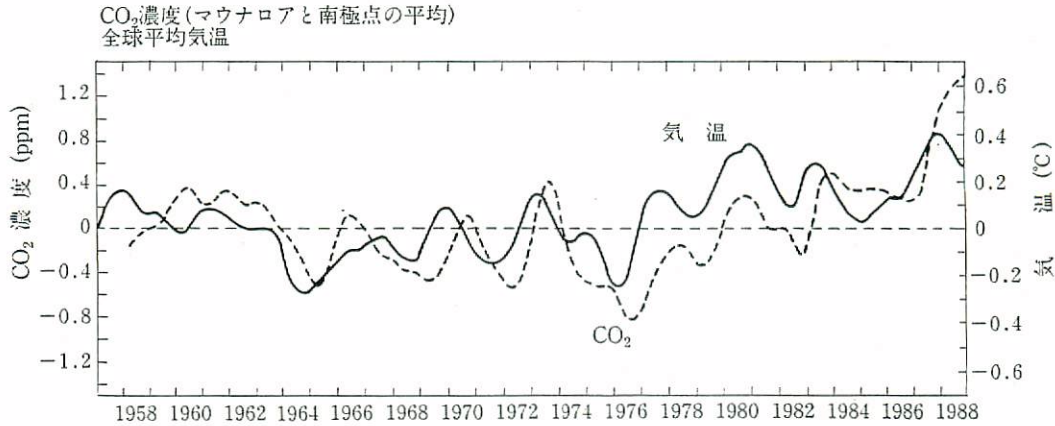
第2図は、南極ポストーク基地の氷床コア解析から得られた過去約12万年

の地球の気温(酸素同位体比)と大気の炭酸ガス(CO₂)濃度の変動である。この図は、氷期・間氷期に対応して気温が大きく変動していることと同時に、気候とほぼ同位相でCO₂濃度が約100ppmの幅で大変動していることを示しており、氷期論に大きなインパクトを与えた。それまでの氷期論では、白い雪氷域のもつアルビード(反射率)効果が大きな気温変動を説明する主役であったが、大気のCO₂濃度変動に伴う温室効果の強弱が、アルビード効果にまさるとも劣らない正のフィードバックとして気温変動に働いていることが強く示唆されたからである。

より時間スケールの長い地質時代の気候変動においても、温室効果ガスの果たす役割は非常に大きいことが示唆されている。第3図は、過去約6億年の地球気候がグリーンハウス期(温暖で温室効果が卓越し氷床のない気候)とアイスハウス期(寒冷で温室効果が弱く氷床の存在する気候)の二つの時期に大きく分けられることを指摘したフィッシャーによるものである²⁾。彼の主張は、大陸移動に伴う地殻変動に約4億年の周期があり、これに伴う火山活動



第3図 過去約6億年における動物の絶滅数と生物の激減期(上)、気候の変動(アイスハウス期(I)とグリーンハウス期(G))(中)、および海水準と火山活動の変動(文献2から改変)。



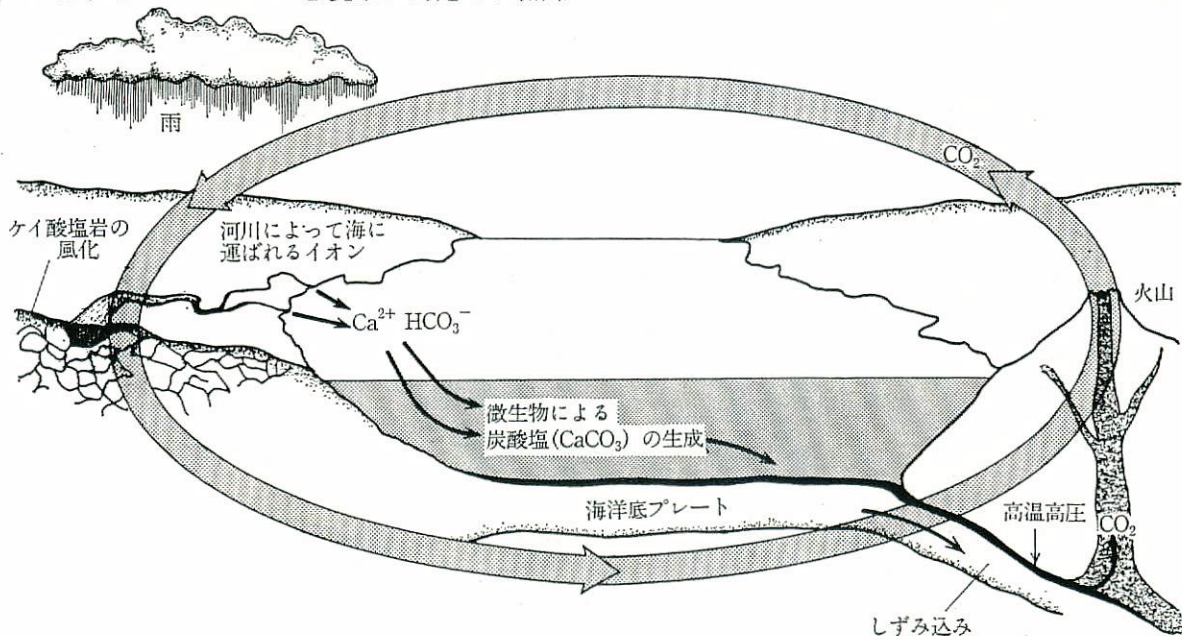
第4図 1958年以降の全球平均気温の変動(実線)と大気中のCO₂濃度の変動(破線). 長期的な傾向はあらかじめ取り除いてある(文献3から改変).

の変化が大気中の水蒸気とCO₂濃度を变化させた結果、温室効果の程度を大きく変え、ひいては気温の大きな変動を引き起こし生物も大変化させたというものである。

一方、最も時間スケールの短い、2、3年から数年周期の気温変動でさえも温室効果ガスの変動を伴っていることが、つい最近の観測結果から指摘されている(第4図)。この図を示したキーリング³⁾は、ハワイのマウナロア島での長期間の観測から、大気中のCO₂濃度が一方的に増え続けていることを示したことで有名である。この図に示されるように、地球全体の平均気温とCO₂濃度は2年から数年の周期で、気温がCO₂濃度に少し先行するかたちで変動していることがわかる。この時間スケールの変動は、いわゆるエル・ニーニョ現象に対応した熱帯

での大気・海洋相互作用に伴うものである。したがって、海洋表層での炭酸ガス交換がこの濃度変動に関与しているという考えもあるが、キーリングは、同様に変動する¹³Cの結果から、むしろ東南アジアを中心とする熱帯の(主として乾湿の)気候変動が熱帯雨林の活動に影響しているからではないか、と指摘している。

温室効果の重要性は、地球大気の起源と進化というさらに過去にさかのぼった時期にもいえることが指摘されている(文献⁴⁾など)がここではふれない。いずれにせよ、どのような時間スケールにせよ、地球規模の気候変動のメカニズムには温室効果ガスの変動によるフィードバックが非常に重要な働きをしているといえそうである。



第5図 地球におけるCO₂(炭素)循環の模式図(文献9から改変).

2. 地球気候システムと生物圏

ここで注目すべきことは、温室効果ガスの変動には、多くの場合生物活動が密接に関与しているということである。たとえば、第2図に示した氷期・間氷期サイクルに伴うCO₂変動は、北大西洋を中心とする海洋バイオマスの変動がその直接的な原因ではないかともいわれている⁵⁾。すなわち、氷期に至る時期には、寒冷化とともに北大西洋の海洋の循環が弱まる。海洋表層の植物プランクトンは、低水温によるバイオマスの増加と鉛直混合の弱化により「生物学的ポンプ」を活発にし大気中のCO₂濃度を低下させる。その結果温室効果が弱まり、寒冷化はさらに促進され氷床が拡大する。すなわち、正にフィードバックが働くことになる。間氷期に至る過程ではまったく反対のことが起こる。

より長い時間スケールの気候変動でも、第5図で示すように、大気・大陸・海洋間のCO₂(炭素)循環の中で、海洋の植物プランクトンは非常に重要な働きをしているようである⁶⁾。すなわち、火山活動などにより大陸内部から大気に放出されたCO₂は、雨水に溶けて陸地に降り注ぐ。その雨水は陸面を風化することによりカルシウムや炭酸水素イオンを形成し、これが河川を通して海に運ばれる。海の植物プランクトンはこれらのイオンを炭酸塩(CaCO₃)として固定し海洋底に沈澱させる。沈澱した炭酸塩は海洋底プレートにより大陸地塊の下に運ばれ、最終的にはCO₂は大陸に戻ることになる。

すなわち、海洋微生物を中心にみる限り、生物圏(biosphere)は気候の影響を一方的に受けるという受動的な立場ではなく、自らも気候の変動に与し、いわば気候システムと共生的な関係にある、あるいは気候システムの一部として存在しているという見方もできる。

3. 「ガイア」仮説と生命の進化

地球の気候制御に生物圏が積極的にかかわっているという考えをもっと突き進め、生物圏は実は生命存在のために地球の気候環境を形成し維持していると主張するのが、ラヴロックが提唱している「ガイア(Gaia)」仮説である。ガイアは「地球生命圏」と日本語では翻訳されている⁷⁾。すなわち、宇宙科学・惑星科学的に与えられたある初期条件のもとで地球

上に生命が発生して以来、太陽定数(単位時間に単位表面積あたりに降り注ぐ太陽エネルギー量)の変動など地球外の宇宙・惑星系における変動(あるいは進化)に対し、生命に最適な物理・化学的環境を追求する一つのフィードバックシステムをなす総体としてのガイアが存在し、その変化の軌跡が地球と生命の進化である。というものである。したがって、地球という惑星の属性を決定づけているのは、生命の存在そのものにほかならない。この説は研究者の間で、賛否を含め多くの議論を呼んでいる。それだけになかなか魅力的で示唆に富む説ではある。

さて、この説を背景においた場合、最近の「地球温暖化」に代表される地球規模の環境改変はどうとらえることができるであろうか。ラヴロック自身は、ガイアの自己調節機能の中核を担っている海洋と土壌表層の微生物活動が健全である限りなんとかなると、比較的楽観的に考えているようである。この視点から、大陸棚の生態系を破壊する可能性があるとして、コンブなどの海洋農場の危険性を指摘している点などは非常に説得力がある。一方で、ハロカーボン類による成層圏のオゾン層破壊に関しては、生物起源の亜酸化窒素や塩化メチルによるオゾン層の調節作用が卓越している可能性を指摘して、騒ぐほどのことはないと言っている。しかし、最近の南極成層圏におけるオゾンホールが発見と、その原因としてのクロロフルオロカーボン増加という決定的な証拠の検出は、時間スケールの議論が非常に希薄なガイア説の欠点を指摘したように筆者には思われる。

4. 地球生態系における階層構造と環境変動

「ガイア」という魅惑的な概念に、さらにもう一つ何か欠けている、と素人ながらに感じたものがある。

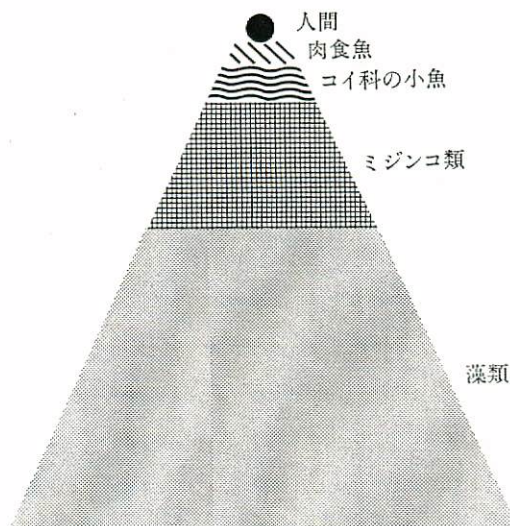
それは、生態系における階層構造のダイナミズム、言い換えれば、人間も含めた高等生物の進化とその結果としての生態系が全体として地球環境とどう相互作用をしているかという議論が、「ガイア」説ではほとんどなされていないことである。確かに、生物圏の基層を支配している微生物と地球の大気・水圏系との相互作用に関する「ガイア」という概念は、一つの説得力のある作業仮説ではある。しかし、微生物に依存しつつも、同時に微生物の活動

に影響を与える他の多くの生物も、地球環境の進化と常に調和的であるのか、あったのか。

地球の歴史における生命の進化、あるいは生態系の進化という大問題を、ここで軽々しく取り扱うことはできないが、進化が（地球科学的）環境の変化に対する広い意味での適応過程であるということは、現代の生物学者のかなり共通した認識と考えるもいだろう。人類の起源と進化に対しても、第三紀から第四紀における気候・環境の変動が大きな役割を果たしていることが、最近の分子人類学の成果からも示唆されている⁸⁾。もちろん、種間、種内、あるいは個体群間の相互作用とそれが作り出す生態学的環境も進化にとって重要であることは周知の通りである。

そこで、主として生物圏外のダイナミズムで変化（進化）する地球の気候システムに総体としては適応しつつ、しかも気候システムをより安定化させる方向に環境をつくり変えていこうとするのが地球生態系の進化である、という一つの仮説を立ててみよう。この場合、植物プランクトンに代表されるような、栄養段階は最も低いがエネルギー的には最も大きい部分を占める微生物群（第6図、文献⁹⁾参照）の進化は、気候システムとより密接な関係を持ち、場合によっては「ガイア」ともいえる共生、一体関係を大気・水圏系ともつに至っているといえよう。

これに対し、多くのより“進化”した動物群は、生物圏での総エネルギーでは小さい部分しか占めない



第6図 生態系におけるバイオマスと太陽エネルギー量を示す模式図（文献9から改変）。

いにもかかわらず、栄養段階のより低い地位の生物群が作り出した生態学的な環境に対しより依存的存在である。実際には、生物圏自体が作り出したこの生態学的な環境と個々の生物群（種や個体群）とは、常にエネルギー的に安定な平衡関係にあるのではなく、むしろ「平衡から遠く離れた状態」から平衡状態へ常に移行しようとする過程における自己組織化¹⁰⁾という内的なダイナミクスで、生物の進化と、結果としての生物圏の多様化が進んできたのかもしれない。したがって、栄養段階の上位を占める生物の進化ほど、その生態学的環境を保証するために、気候環境はよりゆっくりと変動する、という前提が必要なのではないか。逆の言い方をすれば、より上位の生物ほど、急激な気候変化には弱いということにもなる。

5. 地球と生命における「人間原理」

前述の議論では、地球進化の流れの中における生物系の進化には、エネルギー的に重心を担っているその下部構造の気候変化に直接対応した変化と、そのゆっくりとした気候変化をペースにつくりだされた生態学的な環境における内的なダイナミクスに依存した変化、という二つの側面がありうることを指摘した。

以上の視点からすると、われわれ人類は非常に特殊な地位にある。栄養段階の頂点に立っているという生物学的視点からは、人類はトータルな環境の変動に対し、ある意味で最も依存的で弱い立場にあるはずである。しかしながら、人類は、その人類たる由縁でもある知能によって技術を発達させ、発生時点からすでに、以前の天変地異とはまったく異なる性質のインパクトを生物圏を含む地球環境に与え続けてきた。すなわち、生態系の最も上の立場から、エネルギー的には支えてもらっているはずの下部構造に対し改変を、しかも人類の「進化」とともに加速度的に大きくなる改変を加え続けてきた。とくに産業革命以後この改変の度合は急激となり、現在のように気候システムそのものにまで手を加えるところまで来た、ということである。われわれ人類とは何か。改めて考えざるをえない。

さて、第1図にある最近約100年の北半球平均気温は、第2図にみられる最終氷期から間氷期への「急激な」戻りのときの平均増加率と比べても、ほ

