地球環境と炭素循環—地質学は地球温暖化問題に貢献できるか—

Global environmental problems and global carbon cycle —What should geologists do? —

Abstract

西村 昭*
川幡穂高*
中尾征三*

Akira Nishimura*
Hodaka Kawahata*
Seizo Nakao*

1994年5月18日受理.

* 地質調査所 海洋地質部.

Marine Geology Department, Geological
Survey of Japan, Higashi 1-1-3, Tsukuba,
Ibaraki 305, Japan

Global warming caused by carbon dioxide (CO₂), a greenhouse gas, is one of the most serious problems regarding the global environment. We reviewed the global carbon cycle, especially in the ocean. The ocean is one of the largest carbon reservoirs and has played a significant role in global scale carbon cycle through the geologic age. Our knowledge on the global environmental change is far insufficient for prediction of global change on the time scale of 100-200 years, because our meteorological data were accumulated in only the last 100 years and the analytical errors of geologic records are generally more than several hundred years. For the estimation of the future global environmental and climatic changes and the discrimination between the natural and artificial global change, we need to make clear the mechanism of environmental changes in natural state and also to establish the basic framework of the environmental change based on geologic records. Moreover, we need to estimate the ability of the ocean to absorb anthropogenic carbon dioxide and its impact to global and local environment in the future. Also the effect to the global environment exerted by the technology for reducing anthropogenic carbon dioxide must be studied. The above can only be achieved by a thorough understanding of the global carbon cycle.

The expected contribution of geologists to the global warming would be; to integrate the knowledge obtained by new scientific fields of global change, namely meteorology, computer simulation, earth system science and others; then to clarify the limitations of the natural feedback system to artificial impact to the earth; and thus to assess the effectiveness of the policies and technology for reducing atmospheric carbon dioxide. This is the role to be played by geologists who understand the history of the earth.

Key words: global warming, carbon cycle, Quaternary climatic change, carbon dioxide, missing sink

はじめに

地球環境問題が社会的な問題として考えられるようになって、約十年が経過した。地球環境問題といっても地球温暖化・熱帯雨林の減少・野性生物種の絶滅・酸性雨・オゾン層の破壊・砂漠化など多くの課題があり、それらは相互に関連をもっている。また、人類の存亡をかけた問題として、その解決には、継続して考え行動していかなければならない。この地球環境問題の中でも、二酸化炭素などの温室効果気体の増加による地球温暖化の問題は、地球規模の物質循環の問題であり、また後に述べるように、炭素の循環は、地球の気圏・水圏・地圏のすべてにわたっての物質循環であることから、地球の特に地圏を対象にして発展してきた地質学が大い

に貢献できる課題である。

二酸化炭素による地球温暖化を考えるにあたっては、二つの象徴的データがある。一つはハワイのマウナロアにおける長期にわたる大気中の二酸化炭素濃度の観測データであり、人類の活動に伴い大気に放出された二酸化炭素が過去30年にわたり大気に蓄積されてきており、現在も年々増加していることを事実として示した。もう一つは南極のボストーク氷床コアのデータであり、最終間氷期を含む過去16万年間に氷期／間氷期という大きな地球環境の変動と同調した大気中の二酸化炭素濃度のきわめて大きな変動を明らかにした。このことは、大気中の二酸化炭素濃度の変化が地球温暖化の原因であることを示したものではないが、この百年間の気温の観測値が上昇傾向にあり、すでに温暖化が始まっている指摘がある

第1図. 現在の炭素循環のリザーバーと流量 (Siegenthaler, 1993). リザーバーの数字は GtC (炭素に換算した重量, $Gt = 10^9 t$). 矢印の横の数字は流量 (GtC/年). +印が人為的な増加分.

ことを考え併せれば、大気中の二酸化炭素濃度の増加が地球環境に関係した重大事であることは認めざるを得ない。

現在われわれは、地球環境とか、地球の温暖化といったように地球全体を一つのまとまりと考えている。このような観点の出発点として、人工衛星画像が果たした役割は大きい。衛星からの地球の映像や、衛星の得た種々のデータの地球規模のマッピングは、地球が一つであること、宇宙の中に存在していること、そして、すでに人間の存在が地球を大きく変貌させていることを印象づけた。その結果として、地球を一つのシステムとして扱い、またその中にいくつかのサブシステムを考えそれらの相互関係や内部構造から地球環境の構造を考察しようとする地球システム科学や、物質循環や熱収支を数値実験でシミュレーションする方向での研究も発展してきた。

この報文では、これらの研究動向の中で、地球環境問題で特に問題となっている二酸化炭素による地球温暖化に関連した炭素循環の問題を、特に現在われわれが研究の対象としている海洋を中心に紹介する。

炭素循環の全体像

地球規模の炭素循環を考える時に、地球を気圏・水圏（海洋）・地圏に分けて考えて、それぞれの蓄積量と流量で考えるのが一般的である (Siegenthaler, 1993; 第1図)。水圏においては海洋表層におけるプランクトンなどの生物、地圏においては陸上の植物とその生成物（土壌や腐植）も炭素循環に大きな役割をもっているが、生物圏を一括せずそれぞれの場に配置して考察している。地圏は炭素リザーバーとして最も大きい、自然の状態では気圏との物質交換に関与しない部分がほとんどである。現在の地球環境問題となっている化石燃料の石油石炭は、本来地圏にあって自然状態では現在の炭素循環にほとんど関与しないものを人類が燃焼して気圏に輸送している。大気には 750 GtC (炭素量に換算した重量; $Gt = 10^9 t$) が二酸化炭素として存在している。大気は混合し一様になりやすいために、濃度の観測値から全体量や人類活動からの付加による変化量を求める精度は高い。一方、海洋

には大気の 60 倍以上の炭素が存在する。

炭素循環において、気圏・水圏・地圏のそれぞれの間の物質の交換のプロセスにおいて、生物の関与が重要である。気圏と陸域の生物の間では、植物の光合成と生物の呼吸、微生物による分解といった過程が、また海洋と大気の間では、同じく海洋表層の生物が重要な役割をしている。また海底においても有機物の分解などを通してバクテリアなどの生物が炭素循環に関与している。

人類による二酸化炭素の付加と環境変動

大気中の二酸化炭素濃度は 1958 年以來、ハワイのマウナロアで測定されてきた (Keeling, 1993; 第2図)。その結果は、5-6 月に最小、9-10 月に最大という季節変動をしながら 1958 年の 315 ppm から現在 355 ppm に増加していることを示している。大気中二酸化炭素濃度の観測は現在世界の各地において実施されており、北半球の濃度が高く季節変動も北半球で顕著であることが明らかとなっている。このことは、二酸化炭素の人為的な発生源が北半球中緯度にあり、季節変動は陸域の広い北半球の陸上植物の光合成と植物遺体の分解によると解釈される。1958 年以前の二酸化炭素濃度については南極の水氷に閉じ込められている空気から明らかにされており (Neftel et al., 1985)、1800 年頃には 280 ppm でこれはボストークコアの間氷期の値とほぼ等しい。これ以来現在に至る大気中の二酸化炭素濃度の増加は、産業革命以降の人類の活動が原因であり、直接には石炭・石油・天然ガスなど化石燃料の燃焼がかなりの部分を負っている。現在自然の炭素循環でなく人類活動によって大気に付加される二酸化炭素は、化石燃料の燃焼と森林破壊のため年間約 7 GtC と推定されている (Siegenthaler, 1993; 第1表)。大気に残留している二酸化炭素は大気の観測による年間の増加率から計算されており、その量は 3.4 GtC である。海洋が吸収している二酸化炭素は海洋循環モデルなどの試算によれば、2.0 GtC と推定されている。差し引くと 1.6 GtC が不明であり、これを missing sink と呼んでいる。その行き先の可能性としては、海洋と陸上植物がある。陸上植物と海洋とどちら

第2図. ハワイのマウナロアの大気中の二酸化炭素濃度の観測結果 (Keeling, 1993).

が missing sink については、重要で解決すべき問題である。陸上植物においては、大気中の二酸化炭素濃度の増加が有機物生産を高める肥料効果として作用していて、大きな寄与をしている指摘もある。陸上植物とその腐植物の蓄積量を求めることはかなり困難なので、海洋の吸収のほうを評価してその差から陸上植物の評価をする方が有効である。

現在地球が人為的な二酸化炭素の影響などで温暖化しているかどうかについても、まだ議論されている段階である。過去約 100 年の気象データを蓄積してきており、その統計処理による全体傾向はいくつかの短い周期の変動が認められるものの全体として上昇傾向にあり、最近の 10 年間は其中最も気温の高いところにある事を示す。しかし、それらのデータから現在が地球全体の気温上昇傾向にあるかどうかについて評価するにはいくつかの問題がある。その最も大きな問題は、観測値が示す上昇傾向が自然の傾向であるのか人為的な影響によるものかの区別ができないことである。また、観測点が都市に偏在していてエネルギーの集中消費による都市周辺の局所的な温度上昇傾向を観測値が含んでいる可能性があることなども考慮する必要がある。しかし、温度上昇傾向とその大きさは自然のサイクルとしては変動が時間的に短く温度変化が大きすぎると考えられ、人為的な変化としてこの 100 年に約 0.5 度の温度上昇があったとする見方が支配的である (Intergovernmental Panel on Climatic Change, 1990)。

また、温暖化により懸念されている海面上昇についても気温上昇と同様に、現在の傾向を評価するのはきわめて困難である。大気中の二酸化炭素濃度の増加とそれによる温暖化の影響については、気温や海水準だけでなく、降雨量、風系などの変化、季節変化、災害のような突発的な現象の頻度の変化、またそれらの地域的な影響の差異なども人類の生活に与える影響としては大きい。どれも人為的な環境変化であるかどうかについて評価できていない。

第1表. 1980-1989年に人類の付加した二酸化炭素の収支 (Siegenthaler, 1993)。

放出	
化石燃料	5.4 ± 0.5
森林破壊	0.6 ~ 2.5
蓄積	
大気	3.4 ± 0.2
海洋	2.0 ± 0.5
不均衡	1.6 ± 1.2

単位: GtC / yr

海洋の炭素循環

海洋は地球表面の 7 割を占め、地球表面の自由水の 97% を満たしている。その海水の量の大きさと物質を溶かす性質から、海洋は物質循環と熱の輸送においても大きな役割をもっている。すでに述べたように炭素のリザーバーとしての大きさは大気約 60 倍以上である。海水中では二酸化炭素は溶解すると溶存態無機炭素である CO_2 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} と種々の形態をとるために溶解度が大きい。それに生物の生産した有機物の分解過程で無機態にまで分解されていない溶存態有機炭素が、リザーバーとして大きいことも最近明らかになってきた (Siegenthaler, 1993; 第1図)。海洋と大気中の二酸化炭素の交換は、その分圧の差の正負により決定される。大気よりも海水の二酸化炭素の分圧の小さな海域は海洋への二酸化炭素の吸収域、また、海水の二酸化炭素分圧が大気より大きければ放出域となる (第3図)。海洋の二酸化炭素分圧の大きさは、海洋大循環に関連する海洋表層の海水の性質と海洋表層の生物生産によって決まる。

海洋は、大気と接し、よく混合される表層水と、中・深層水に分けて考えられる。表層水は、有光層も含み生物の生産の場である。生物は太陽の光を利用し有機物を形成する。生物生産には栄養塩が不可欠であるため、高生物生産の海域は栄養塩を豊富に含む深層水の湧昇する海域や陸域に近く陸源

第3図. 大気-海洋間の二酸化炭素の分圧差 (Broecker et al., 1986). +が放出域, -が吸収域になる. 単位は ppm.

の栄養塩の供給がある地域である(第4図). 有機物の形成の際には生物が二酸化炭素を利用するため, 表層海水中の二酸化炭素の分圧が下がり, 大気中の二酸化炭素を吸収しやすくなる. しかし, 湧昇域においては二酸化炭素分圧の高い深層水が表層まで上昇するために, 表層海水中の二酸化炭素の分圧が必ずしも低くなっていない(第3図). 生物が生産した有機炭素は粒子状物質として中・深層へと沈降するが, 有機炭素は海水中で分解しやすく, 1000 m を越える海底で堆積物として保存されるのは, 表層海水中で生産された有機炭素の1%以下といわれている.

外洋域での炭酸カルシウムの生産は熱水沈殿物を除くと, 海洋表層の植物プランクトンの円石藻(コリスなど)・浮遊性有孔虫などにより形成される. 炭酸カルシウムは海洋の表層水において過飽和で深層水において不飽和であるために, 深海では溶解する. 炭酸カルシウムの急激に溶け始める深さがリソクラインで, 赤道太平洋では約3.7 km である. 炭酸カルシウムの供給と溶解がつりあって堆積物中に存在しなくなる深度が炭酸カルシウム補償深度(CCD)で, 赤道太平洋において約5.0 km である. 炭酸カルシウムの堆積物での含有量の変化は, 表層水における生物生産と海水の化学的性質に関係した二つの作用によっている.

海洋表層において生産された生物源の有機炭素や無機炭素である炭酸カルシウムが粒子状物質として沈降し, 表層から中深層に炭素を運搬する過程を生物ポンプ(biological pump)と呼んでいる. この生物源の沈降粒子による炭素の運搬やその堆積物への寄与についての検討は, セジメントトラップによる沈降粒子の採取, 海底堆積物との比較検討などによって研究されている. フィーカルベレットなどの大型の沈降粒子は, 一日に数100~1000 m も沈降し, 分解・溶解をまぬがれたものが堆積物表層(海底)に達する. さらに, 海底での分解・溶解を免れて堆積物として固定されてしまえば, 現在の炭素循環から隔離され, 大気へ回帰しない. 海底

に達した沈降粒子はかなりの部分が海底において分解・溶解していく. この過程は, いわゆる初期続成作用であるが, 海底付近での底層水の物理化学的性質・生物の擾乱作用・間隙水の性質・微生物による分解などが関係しているが, まだ不明な点が多い. これは, 今後, 検討すべき重要な課題の一つで, 海底堆積物に残された環境変動記録の復元などの古海洋学的研究にも大いに貢献する. 現在の循環から切り離され海底堆積物に固定された炭素量($\text{g}/\text{cm}^2\text{y}$)は, 堆積物中の炭素(無機炭素・有機炭素)量(%)・堆積速度(cm/y)・堆積物の乾燥密度(g/cm^3)をかけあわせて求められる. さらに, その点が代表する海域の面積をかけて合計するとその海域の総固定量が求められる. 実際の海域において十分なデータが蓄積できて, この値が試算されているところはほとんどない. 各海域での炭素固定量も炭素循環のモデルの構築には必要である.

生物の生産に関係した炭素の運搬過程とは別に溶解ポンプ(solubility pump)と呼ばれる二酸化炭素を海水に溶存させ海水の移動により運搬するものがある. この溶解ポンプにより効果的に炭素を中深層に運搬することができるのは, 概して, 深層水の形成されるところに限られる. 深層水は北大西洋で形成され, 大西洋を南下し, 南極海周辺で一部の深層水が新たに形成されてインド洋太平洋を北上していく. この深層水循環に表層の流れも含めた海洋の大循環は, 物質と熱の循環を支えるベルトコンベアとして地球を一周する(第5図). その深層水の一周には1000年を超える時間を要し, 深層水は移動する間に, 表層水から供給された生物源粒子の分解のために変質していく. 湧昇域では, 栄養塩に富んだ海水が上昇するが, それは溶存炭酸系イオンを多く含むので, 結果として二酸化炭素を放出することになる.

海洋表層に溶存している二酸化炭素の量と人類の付加により毎年蓄積していく二酸化炭素の量の比は10000:4と考えられている(Siegenthaler, 1993; 第1図)が, 現在の海水の

第4図. 海洋表層における生物生産量 (Berger et al., 1987).

分析精度からすると今後のモニタリングにより数年間の蓄積量を海洋においても大気と同様に実測値として求めることが可能になってきた。しかし、同一地点での海洋観測を年間を通して行うことは困難であり、大気の混合の速度に比べ海洋ではその速度が小さく、表層海水の二酸化炭素の分圧に大きな影響を与える生物の生産の偏在性や季節性も観測において障害になることから、海洋全域についての蓄積量の把握には組織的な観測が必要と考えられる。季節変動以外にも、エルニーニョなどの数年規模の大きな変動も影響するが、海洋全域の生物の生産の変動などについては観測衛星によるモニタリング技術との組み合わせなどにより、炭素の海洋吸収分の総量が精密に把握できて missing sink が明らかになることも期待できる。

上で述べた外洋域の炭素循環は、全海洋の75%以上の基礎生産を担っているといわれるが (Romankevich, 1984), 堆積速度が大きくまた陸域からの有機物の堆積や栄養塩の供給によるプランクトンの繁茂による有機炭素の堆積の大きい沿海域や、珊瑚虫などの生物により炭酸カルシウムの生産の場として大きい役割をもつ珊瑚礁も炭素循環において重要である (茅根, 1993)。

炭素循環の歴史の変遷

炭素循環は地球環境の自然の変動の中でも大きな変動を繰り返してきた。現在は第四紀の水氷期/間氷期の大きな気候変動のサイクルの温暖期の中にある。現在問題になっている人為的な二酸化炭素の大気への付加が、地球環境に与える影響を評価するために、第四紀の気候変動のサイクルのなかでの自然の変動の範囲、自然の変動傾向、自然の変動のメカニズムを明らかにすることが極めて重要である。さらに、今後の人為的な二酸化炭素の増加が地球環境に与える影響が、現在のフィードバックを超えて異なる段階を迎えるような“しきい値”があるかどうかについての評価も重要である。また、

第5図. 海洋大循環のベルトコンベア (Steele, 1989).

温暖化の影響について、縄文期の hypsithermal 期のような現在より温暖であったときの地球環境についてのデータも将来の温暖化の影響予測のために重要である。二酸化炭素濃度の変動や気温の変動について過去22万年についての変遷は、南極の氷床コアの記録も得られてきたが (Jouzel et al., 1993), 海底のコア試料はより長い年代の全地球的な環境変動のデータを提供しており、10万年周期をも含むミランコビッチサイクルなどの解析の研究には最良で唯一の研究対象である。海洋の炭素循環については、前章で述べたように生物生産と海洋の大循環が大きな役割をもっており、その歴史の変遷においてもこの両者の変遷を明らかにすることが重要である。

南極のボストーク氷床コアに記録されていた過去16万年间の大気の二酸化炭素濃度変化が気候変化と極めてよい一致をしたことが明らかになった。気温の低い氷期には大気の二酸化炭素濃度は約200 ppmであり、気温の高い間氷期には約280 ppmと80 ppmの濃度変化があった (第6図; Barnola et al., 1987)。そのため、大気の二酸化炭素濃度の変

第6図. 南極ボストーク氷床コアの過去16万年間の大気二酸化炭素濃度と気温 (Barnola et al., 1987).

化と海底堆積物に記録されている環境変化を統一的に説明すべく、塩分濃度假説 (Broecker and Peng, 1986)、栄養塩仮説 (Boyle, 1988)、珊瑚礁仮説 (Berger, 1982)、鉄仮説 (Martin, 1990)、生物ポンプ強化などの仮説が提唱された。これらどの仮説も生物生産と海洋の大循環の双方あるいは一つに重点を置いた仮説である。最近では、大気二酸化炭素濃度の変動は一つの要因でなく、氷期の生物生産量の増加・温度の変化・塩分濃度の変動・炭酸イオンの濃度変化の複合した要因であるとして、それぞれの寄与の割合を検討している (Broecker and Peng, 1993)。

生物生産の歴史的変遷については、有孔虫殻の炭酸カルシウムの酸素同位体カーブによる詳細な年代決定が可能になったこと (Martinson et al., 1987) と、有機炭素量・炭酸カルシウム量・オパール量・炭素の同位体比などを生物生産の変動の指標に使うこと (Berger et al., 1989) で、堆積物から生物一次生産量を精度高く復元する研究が進められている (Sarnthein et al., 1988)。それらの研究から、氷期/間氷期の変動の中で、海洋全体が同時に高生産となったのではなく、生物生産にかかわる要因の地域による違いや変動の時間のずれが存在していることが明らかにされつつある (川幡ほか, 1994)。生物生産量の変化について、高緯度と低緯度、太平洋と大西洋、インド洋の違い、太平洋の東西における違いなど地域における変化をもたらした要因を明らかにすることにより、精度の高い炭素循環像とシミュレーションに束縛条件を与えるデータとなる。

深層水循環を含む海洋の大循環が、氷期に現在と異なっていたことが明らかになってきた。底生有孔虫の分布によると

氷期に北大西洋での深層水の形成が止まっていた (Schnitker, 1974)。浮遊性有孔虫と底生有孔虫の殻の加速器質量分析計による放射性炭素の年代差から見積もると氷期の深層水循環速度は現在より遅かった (Shackleton et al., 1988)。Cd/Caの化学トレーサーから栄養塩の分布を復元すると、氷期には現在深層水の起源である北大西洋では深層水形成が弱まり、南極起源の深層水が強化されていた (Boyle and Keigwin, 1987)。最近、同様の手法で、より精密な深層水の循環に関するデータの蓄積がされており、氷期/間氷期という時期だけでなくその中の変動やその遷移期の変動が明らかにされてきた (村山ほか, 1993; 安田ほか, 1993)。そのなかで、太平洋の深層水は10万年の周期性が卓越するのに対して大西洋においては4万年周期が卓越することから、現在のような全海洋一連の海洋大循環でない別の循環が起っていた可能性の示唆 (岡田・大河内, 1992) や、北太平洋での深層水の形成の可能性は、今後の研究の重要な方向性を示している。

未来予測と地質学

大気の大気二酸化炭素濃度の増加に伴う地球環境の変化の予想が出されている。その気温上昇や海面上昇について、その変化に要する時間スケールの短さと変化の度合いの大きいことに我々は危機感を抱いている。また、それらの急激な変動が人類の生活にどのような影響を与えるのか、また、植生を始めとする自然の動植物が適応能力を発揮して自然の変動の時と同じように変化に追従していけるかどうかとも危機されている。気象観測の歴史もまだ100年程度しかなく、未来の数10年を予測するために長周期の変動の中で現在を評価することはできない。外洋域の海底堆積物からの古環境研究は数万年という長周期の変動を明らかにしてきたが、数100年より精度を上げての議論は困難である。それらには、堆積速度の大きな陸域に近い海底堆積物や湖沼堆積物の解析が間をつなぐものとなろう。現在の地球環境を正しく自然の変動の中に位置付け、人為的変動を評価していくために、過去の地球環境の変遷を堆積物からより精度よく、種々の周期の変動の実態と要因を解析することが地質学者に課せられている。また、ボストーク氷床コアの記録から、過去において大気の大気二酸化炭素濃度の増大が気温上昇に関係していることは明らかであるが、気温と大気の大気二酸化炭素濃度の変動が過去において、どのように連動していたかは、二酸化炭素濃度上昇による地球温暖化の予測のために解決すべき重要な問題である。現在の環境につながる過去の長周期の変動、近未来に予測されるような劇的な過去の変動、現在より気温の高かった過去の環境の解析から、現在の環境問題に地質学者からの提言があってもよいのではないだろうか。また、二酸化炭素の海洋貯留など海洋の炭素循環に関係する対策技術も考慮されている。このような大規模な対策技術に対しても、地球環境に与える影響の検討に地質学者も重要な役割を担う必要があるのではないだろうか。

おわりに

地質調査所では、海洋の炭素循環の問題のいくつかの課題

について研究を進めている。その一つに新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が関西総合環境センターに委託実施している「海洋における炭素循環メカニズムの調査研究」というプログラムがあり、その中でわれわれは、海洋の炭素循環に関連して、海洋の物質循環の中で堆積物の形成や海底堆積物の役割を明らかにする研究を進めている。このプログラムでは、海洋表層の海水の観測、大気・海水の二酸化炭素の濃度、表層の生物構造の解析、表層海水から深層への粒子状物質の輸送の問題、さらに観測データと数値シミュレーションの開発を組み合わせる研究なども、資源環境技術総合研究所や大学の研究者も参加して行っている。堆積物に関しては、堆積物の形成過程の問題、堆積物への炭素固定量の試算、炭素循環の歴史的な変遷の解明を柱として、第四紀後期の堆積物の古海洋学的解析と表層堆積物・セジメントトラップの粒子状物質の流量を解析している。第四紀後期は氷期/間氷期の大きな変動を含んでおり、その中では、気候変動、海水循環の変動などが、氷期には現在と異なったシステムであった可能性も指摘されている。海洋を一つの単一システムとして論じる時代は過ぎており、海洋の中での地域的な環境や物質流量の変化の支配要因の違いを明らかにすることが重要であり、それらの解析からシステムの変化を明らかにし、それらを再現するシミュレーションへの束縛条件を与えるような研究を目指したいと考えている。

人類は人為的な二酸化炭素の炭素循環への付加という「実験」を地球において行ってきた。しかしその影響が大きいことがわかりつつある現在、さらに地球を相手にただあるがままの人間活動にゆだねて「実験」を行い続け、地球環境を人類の身勝手さで取り返しのつかないものにしてはならない。とすれば、人間活動によるインパクトが地球環境に与える結果を予測し、未来の環境をあるべき姿に近づけるべき方策をとらなければならない。その方法の一つは数値実験である。その数値実験に使うモデルや解析法の妥当性については、地質学的なデータにより過去において、また過去から現在がシミュレーションでできるか否かで評価する必要がある。このことは、地質学が「現在は過去を解く鍵である」と過去の歴史の解明をめざしてきた時代から、「過去は未来を知る鍵である」と、未来を知るために過去の歴史を研究する時代に移行したことの一つの表われである。われわれは、現在の地球環境を地質学的に歴史の中に正しく位置付け、過去の精密なデータを蓄積することが重要である。

炭素循環について海洋に関連した部分を中心に簡単に紹介してきた。環境問題について、地質学に携わってきた研究者がその枠を超えて環境問題の解決に向けて考慮される一助になれば幸いである。炭素循環に関する解説は、最近まで数多くの優れたものがありそれらも参照されたい (角皆, 1989; Intergovernmental Panel on Climatic Change, 1990; 北野, 1993)。また、地質学的な地球史の中での炭素循環についての解説も参照されたい (大嶋, 1991)。

謝 辞

本報告の執筆を勧めていただいた千葉県水質研地質環境研

究室の楢井 久博士と、本報告の改善のため適切な御指摘をいただいた査読者に感謝いたします。

文 献

- Barnola, J. M., Raynaud, D., Korotkevich, Y. S. and Lorius, C., 1987, Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, **329**, 408-414.
- Berger, W. H., 1982, Increase carbon dioxide in the atmosphere during deglaciation: the coral reef hypothesis. *Naturwissenschaften*, **69**, 87-88.
- , Fischer, K., Lai, C. and Wu, G., 1987, Ocean productivity and organic carbon flux I. Overview and maps of primary production and export production. Univ. California, San Diego, SIO Reference 87-30, 67p.
- , Smetacek, V. S. and Wefer, G., 1989 eds., *Productivity of the ocean: Present and past*. Life Sci. Res. Rep., 44, John Wiley & Sons, 471p.
- Boyle, E. A., 1988, Vertical oceanic nutrient fractionation and glacial/interglacial CO₂ cycles. *Nature*, **331**, 55-56.
- Boyle, E. A. and Keigwin, L. D., 1987, North Atlantic thermohaline circulation during the past 20,000 years linked to high-latitude surface temperature. *Nature*, **330**, 35-40.
- Broecker, W. S. and Peng, T.-H., 1986, The oceanic salt pump: does it contribute to the glacial-interglacial difference in atmospheric CO₂ content? *Global Biogeochemical Cycles*, **1**, 251-259.
- and ———, 1993, What caused the glacial to interglacial CO₂ change? In Heimann, M., ed., *The Global Carbon Cycle*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 95-115.
- , Ledwell, J. R., Takahashi, T., Weiss, R., Marlivat, L., Memery, L., Peng, T.-H., Jahne, B. and Munnich, K. O., 1986, Isotopic versus micrometeorologic ocean CO₂ Fluxes: A serious conflict. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 10517-10527.
- Intergovernmental Panel on Climatic Change, 1990, *Climatic Change*. Cambridge Univ. Press., Cambridge, 365p.
- Jouzel, J., Barkov, N. I., Barnola, J. M., Bender, M., Chapeelaz, J., Genthon, C., Kotlyakov, V. M., Lipenkov, V., Lorius, C., Petit, J. R., Raynaud, D., Raisbeck, G., Ritz, C., Sowers, T., Stievenard, M., Yiou, F. and Yiou, P., 1993, Extending the Vostok ice-core record of paleoclimate to the penultimate glacial period. *Nature*, **364**, 407-412.
- 茅根 創, 1993, 後氷期のサンゴ礁への炭酸カルシウム堆積速度. 地球化学, **27**, 37-42.
- 川幡穂高・阿波根直一・江口暢久・鈴木 淳, 1994, 西カロリン海盆の堆積物中の有機炭素沈積流量に記録された後期第四紀のミランコビッチサイクル. 月刊海洋, **26**, 367-370.
- Keeling, C. D., 1993, Global observation of atmospheric CO₂. In Heimann, M., ed., *The Global Carbon Cycle*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1-29.
- 北野 康, 1993, 地球化学者の目でみる炭素循環. 地学雑, **102**, 664-684.
- Martin, J. H., 1990, Glacial-Interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, **5**, 1-13.
- Martison, D. G., Pias, N. G., Hays, J. D., Imbrie, J., Moore, Jr., T. C. and Schackleton, N. J., 1987, Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Res.*, **27**, 1-29.
- 村山雅史・安田尚登・松本英二・中村俊夫・平 朝彦, 1993, 過去 35,000 年における北西太平洋の深層水循環変遷—加速器質量分析法による¹⁴C年代からのアプローチ—. 月刊海洋, **25**, 337-343.
- Neftel, A., Moor, E., Oeschger, H. and Stauffer, B., 1985, Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries. *Nature*, **315**, 45-47.
- 大嶋和雄, 1991, 二酸化炭素濃度と気候変動史. 石油技術協会誌, **56**, 300-309.
- 岡田 誠・大河内直彦, 1992, 氷期・間氷期変動と深層水循環. 科学, **62**, 648-653.

- Romankevich, E.A., 1984, *Geochemistry of organic matter in the ocean*. Springer-Verlag, Berlin, 334p.
- Sarnthein, M., Winn, K., Duplessy, J. -C. and Fontugne, M. R., 1988, Global carbon variations of surface ocean productivity in low and middle latitudes : Influence on CO₂ reservoirs of the deep ocean and atmosphere during the last 21,000 years. *Paleoceanography*, **3**, 361-399.
- Schackleton, N. J., Duplessy, J. C., Arnold, M. Maurice, P., Hall, M. and Cartledge, J., 1988, Radiocarbon age of last glacial Pacific deep water. *Nature*, **335**, 708-711.
- Schnitker, D., 1974, West Atlantic abyssal circulation during the past 120,000 years. *Nature*, **248**, 385-387.
- Siegenthaler, U., 1993, Modelling the present-day oceanic carbon cycle. In Heimann, M., ed., *The Global Carbon Cycle*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 367-395.
- Steele, J.H., 1989, The message from the Oceans. *Oceanus*, **32**, 5-9.
- 角皆静男, 1989, 炭素などの物質循環と大気環境. 科学, **59**, 593-601.
- 安田尚登・村山雅史・大場忠道・Schnitker, D., 1993, 北西太平洋における最終氷期以降の深層循環変動—北大西洋との底生有孔虫群集比較—. 月刊海洋, **25**, 344-349.

(要 旨)

西村 昭・川幡穂高・中尾征三, 1994, 地球環境と炭素循環—地質学は地球暖温化問題に貢献できるか—. 地質雑, **100**, 409-416. (Nishimura, A., Kawahata, H. and Nakao, S., 1994, Global environmental problems and global carbon cycle —What should geologists do ?—. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **100**, 409-416.)

二酸化炭素などの温室効果気体の人為的な大気への付加による地球の温暖化がきわめて大きな関心事となっている。この問題は地球における炭素循環の問題と第四紀の気候の変動の問題ときわめて密接に関連しており、地質学の貢献が大いに期待される。海洋における炭素循環の中での堆積作用の役割の評価や炭素循環の歴史的な変遷を明らかにすることは、この問題に関連して、人為的変動と自然の変動の区別、地球規模の環境変動の変動要因の把握のために重要である。これら地球環境問題はきわめて多くの分野の関連する問題であるが、地球の歴史的な過程について認識がある地質学者が、自然現象の時間や空間の関連性と地球や地域環境の人間のインパクトへの許容性に対する予測ができるよう努力を重ね、これからの政策や対策技術へ提言できる力をもつ必要がある。