

地球温暖化の原因と対策について

大 嶋 和 雄 (海洋地質部)

Kazuo OHSHIMA

1. はじめに

産業革命以来 人類による化石燃料の大量消費によって放出された炭酸ガスは 大気中の炭酸ガス濃度を1700年代の280ppm前後から 1986年の345ppmに迄上昇させ 地球全体を覆ってしまった。大気中の炭酸ガスや水蒸気は 太陽の光は良く通すが 地表や海面を暖めて放射する波長の長い熱線の大部分を吸収して通さない。そのため 大気中の炭酸ガスや水蒸気量が増加すると 地上への日射量は変化しなくとも 地上から出ていく熱の量が減るので 地表付近の温度は上昇する。すなわち 炭酸ガスや水蒸気は 温室のガラスと同じような効果がある。これを炭酸ガスや水蒸気による温室効果という。この温室効果の基本的な考えは チンダル現象を発見したイギリスの物理学者 John Tyndall によって百年以上昔の1861年(文久元年)に発表された。当時は寒冷な小氷河期で テームズ川にも厚い氷が張り凍った川の上には多数の見せ物小屋が立ち並んでいたと記録されている。したがって 炭酸ガスによる温室効果説は 温暖化が待望されていた社会に歓迎されたであろう。その後 日本でも冷害の打ち続く東北地方で農民と共に苦勞していた 宮沢賢治は「グスコブドリの伝記(昭和7年)」の中で 次のような地球温暖化説を採用している。

グスコブドリ:「先生 気層のなかに炭酸ガスが増えてくれば温かくなるのですか。」

クーパー大博士:「それはなるだろう。地球ができてからいままでの気温は 大抵 空気中の炭酸ガスの量できまってきたと言われる位だからね。」

グ:「カルボナード火山島がいま爆発したら この気候を変える位の炭酸ガスを噴くでしょうか。」

博士:「それは僕も計算した。あれがいま爆発すればガスはすぐ大循環の上層の風にまじって地球全体を包むだろう。そして下層の空気や地表からの熱の放散を防ぎ 地球全体を平均で5度位温かにするだろうと思う。」

しかし この学説は 期待されたような温暖化現象が観測されなかったこともあって 何時の間にか忘れ去ら

れてしまった。

本格的な地球全体の気象についての研究は 太陽活動が極大となる年の気象 地磁気等の地球物理現象を世界的に協同観測した国際地球観測年(IGY1957~1958)に始まった。その観測事業の一環としてハワイのマウナロア山で 大気中の炭酸ガス濃度変化の観測が開始された。そして 炭酸ガス濃度の顕著な増加傾向が報告され 国際的に注目されることになった。さらに 南極やグリーンランドの氷河中に掘られた氷の試料に含まれる炭酸ガスの分析結果からも 大気中の炭酸ガス濃度の増加傾向が報告され 地球規模での現象として認識されるようになった。その一般的傾向は 1900年以前の炭酸ガス濃度は 280~290ppm でほぼ一定し 1940~50年頃には320ppm前後まで上昇した。そして 1958年以降は 毎年約1.5ppmの割合で確実に増加している。この増加傾向は 石油 石炭等の化石燃料消費量と良く対応することから 近年の炭酸ガス増大の主原因は 化石燃料消費によるものとされている。急激に増加しつつある炭酸ガス濃度は 地球環境に対して何らかの影響を与えているに違いない いや 影響している筈であると考え 気象学者が増加してきた。そして 炭酸ガスの温室効果による地球温暖化現象は 観測されていないにもかかわらず マスコミ報道を通じて 真実であるかのように一般社会に浸透しつつある。もし 大気中の炭酸ガス濃度が地球の気温上昇を支配しているのならば これは大変な事になると 日本人なら誰でも心配せざるを得ない。なぜなら 東京 大阪 名古屋などの大都市は海岸平野に集中しているため 温暖化によって南極の氷床が溶けて海水準が上昇すると 大都市の水没は必然の事である。その被害の程度は 関東大震災の比ではないからである。地震の災害は一過性であるが 海面上昇による都市の水没は そのまま都市の放棄にもつながる。

地震や火山噴火活動は地域的な現象であっても その活動時期やその規模を予知することは難しく 未だ その予知技術は実用段階に達していない。ましてや 防災計画の中で 地震や火山噴火を止めてしまおうと考える人はいないであろう。しかし 自然現象としては その規模が地震や噴火よりも桁違いに大きな地球温暖化

を その原因が特定もされない前から 炭酸ガス濃度を減少させることだけで解決できるかのような錯覚が 世界中に広げられつつある。炭酸ガス濃度を減少させるだけで 果たして 地球の気候管理が可能なのであろうか。このような風潮に抵抗を感じるのは 地質学を研究する私のような立場の人間だけではないだろう。そして 炭酸ガス濃度の削減技術だけに眼を向ける国際的な風潮に対して もどかしさを感じる裏には 被害に対する対症療法だけでは 問題の根本的な解決にはならなかった 昭和40年代の産業公害防止技術研究での経験が重なる。病人の診断なくして 治療はないという診療手順は 地球の温暖化問題でも同じである。それでは 地質家の一人として 地球の温暖化についてどんな風に考え何をしなければならぬのだろうか。

2. 気候変動の長期予測研究の背景

気候変動の長期予測は 地球規模での生産活動の基盤である自然環境資源の有効利用計画を策定する上での基本課題であるため 国際的な関心を集めてきた。そして 「気候変動についての長期予測は 過去の気候変動の原因が解明された時に 始めて可能となる(地球大気研究計画 GARP 1976)」というのが 研究者の共通認識である。したがって 気候変動の原因と その因果関係の解明なしに 地球温暖化の主要原因を炭酸ガスなどの温室効果ガスだけに特定するのは 科学的な態度とは言えない。また 温暖化による環境への影響を評価もせずに その対策技術の開発のみに猪突猛進するのは 科学的にも 経済的にも意味のある事とは考えがたい。仮に 炭酸ガス濃度の増加が地球温暖化の主要原因であっても その対策を検討する場合に必要なのは 地球規模での炭酸ガスの循環系及び大気組成の地史的变化から その変動幅に対応する温室効果の影響予測である。しかし 最近の炭酸ガス濃度観測データを基にしたモデルの計算による地球温暖化長期予測は そのモデルの構築に用いられた多くの仮定や 適応限界が検証されていないにもかかわらず ショッキングな計算結果だけが一人歩きして 世界的な問題となってしまった。

地質学の基本的テーマの1つである「地球環境の地史的変遷過程の解明」は 地球誕生以来の大気組成 気温 水温及び降雨量の変化等を 化石群集や地層の記録から研究されてきた。その中でも 人類の時代と言われる第四紀(約160万年前以降)は 氷河期(氷期)～間氷期の繰り返しを基にして時代が細分されるため 氷河時代に関する気候変動についての研究が 国際第四紀学連合(INQUA, 1928年創立)を中心として進められてきた。

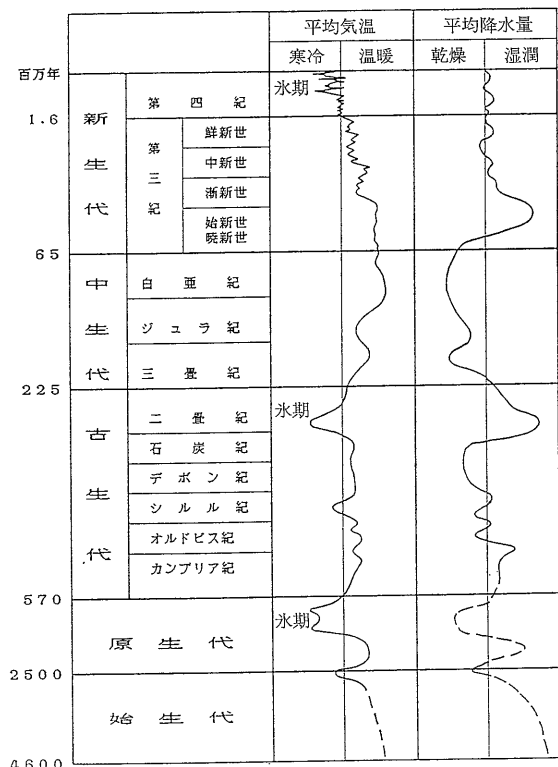
そして なぜ 第四紀に繰り返し氷期が訪れたのかが解明されるならば 地球の長期的気候変動の理論的予測が可能となるので 数多くの氷河時代原因説が提起され 検討されてきた。

大気中の炭酸ガス濃度が2倍になると 地球の気温上昇は $3\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ で 海面上昇量は0.4～1.5mと予測されている(全米科学アカデミー, 1983)。この変化量は 5～6千年前(縄文時代前期)のヒブシサーマル(高温)期の環境変化よりは小さい。したがって 縄文海進期の環境条件を正確に復元し それを根拠として 地球が温暖化した場合の環境に対する影響を事前に予測評価し その対策方針を策定することが可能である。

3. 地質時代の気候変動

地質時代の大部分は 現在よりも温暖であったことは 第三紀の日本海沿岸の富山県下には熱帯に見られるマングローブが発達し 古生代の南極大陸には石炭層が形成されていたこと等から推定されている。また 逆に 現在よりも寒冷な時期のあったことは 現在は氷河の発達していない温暖な地域から 氷河に関連する堆積物(氷堆石、氷縮粘土など)や地形(カール 氷食平原など)の分布することから証明される。このような氷河作用の証拠がある地質系統に認められた場合 その時代を氷河時代という。氷河時代は第四紀だけではなく 約26億年前の始生代から幾度も繰り返して訪れたことが 地層に記録されている。これらの氷河時代の特徴は ただ一回こっきりの氷期によって代表されるのではなく 何れの場合も氷期～間氷期の繰り返し認められることである。詳しく研究された第四紀や二畳紀の氷河時代は 寒冷な氷河堆積物とその反対の温暖な気候を示す堆積物とが交互に発達し 幾度かの氷期～間氷期の周期的な交代のあったことを推定させる(第1図)。

大陸の広い地域が厚い氷の層(氷床)で覆われた氷期には海面が低下し 逆に 間氷期には大陸氷床の融解した水が海に注いで海面を上昇させたことは 良く知られた地質学的な事実である。そして 氷期～間氷期の海面変化に伴って 海岸線は海岸平野と大陸棚との間を大きく移動してきたという事実は 地球温暖化に伴う海面上昇によって 海岸平野の水没を予想させる。15万年前のリス氷期の海面低下時には 日本列島とアジア大陸との間の大陸棚は陸地となり 旧石器人やナウマン象などの陸生哺乳動物は自由に往来することができた。そして 10万年前の間氷期の海面上昇によって 日本列島とアジア大陸との間の陸地は 海面下に水没してしまった。この大規模な気候及び地形変化は 人類文化を発



第1図 40億年間の全地球的な平均の気温と平均降水量の変動曲線 (Frakes, 1979)

展させる引き金となってきた。すなわち 約10万年前の間氷期に栄えていた旧人類が 約5万年前の最終氷期には われわれの直接の祖先である新人類に進化し アメリカやオーストラリア大陸へも舟を発明して移住を開始した。また 約15万年前に大陸の一部であった日本に生活していた旧人類は その後の海峡形成によって大陸から孤立させられた。しかし その日本列島にも 約3万年前に新人類の一群が舟で移住してきた。この複合した日本人ルーツの関係が 現在の日本人のミトコンドリアDNAの分子生物学的研究(宝来1986)及び日本列島の地名研究(木下1987)から検討され 興味ある結果が提起されている。

気候変動に対応して自分の体を進化(適応)させる代りに 生活技術を進歩させることによって生き抜いて来たのが われわれの祖先である。したがって 旧石器人が対応することのできた自然環境の変化に 21世紀の人類が対応できないとは考えられない。それなのに現在の社会的風潮としては 自然環境変化の停止だけを要求している。そこには 先進国の経済社会体制を最良のものと断定し それを頑固に守ろうとする社会の末期的心情を読み取るのは 私だけの取り越苦勞であろう

か。自然環境は四季折々移り変わるから 常に清新な豊さを維持することが可能なのである。

4. 気候変動(氷河発達)の原因

氷河時代の逆は温暖な時代であって その関係は一對のものである。したがって 氷河時代の原因が解明されるならば 気候変動の実態解明にもつながる。約百年前に Agassiz (1840) によって氷河時代の存在がヨーロッパアルプスで確認されて以来 数多くの氷河時代原因説が提起され検討されてきた。これらは 大きく二つの説に分ける事ができる。

i) 地球外原因説

宇宙塵反射率説: 太陽系が宇宙塵濃度の異なる宇宙空間を運行することによって アルベド(反射率)の変化が起こり 地球に達する日射量が変化するため。周期は惑星の進化単位10億年。

太陽放射熱変動説: 太陽の放射熱がいろんな周期で変動する現象。周期 $10^1 \sim 10^9$ 年。

公転軌道変動説: 地球の公転軌道パラメータとしての離心率 10^8 年 地軸の傾き 10^4 年 歳差運動 10^4 年の周期的変化によって 地球のうける日射量が変化する。

ii) 地球上の原因説

プレート説: 大陸漂移によって 地球表面の海陸分布が変化することによって 海洋や大気の大循環に影響する。 10^8 年。

海洋大循環説: 海流の大循環の変化。黒潮蛇行 エルニーニョ等 $10^1 \sim 10^3$ 年。

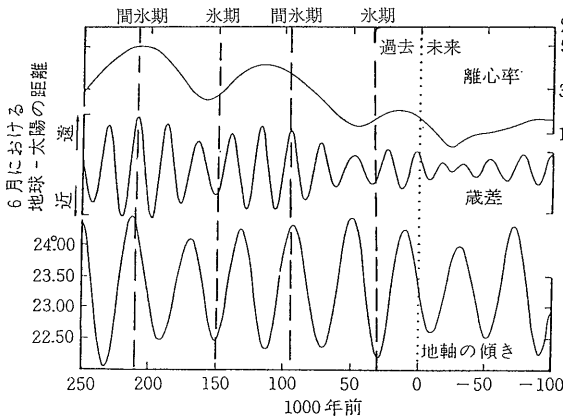
大気大循環説: 大気大循環の変動による極前線の変化。

大気組成説: 大気中の温室効果ガスの量的変化。

火山活動説: 火山噴出物の大気中拡散による反射率及び温室効果の変化。天明の大飢きは浅間山の噴火に関係すると言われている。

人類活動説: 化石燃料資源の大量消費による温室効果ガスの排出。都市のヒートアイランド化による大気循環への影響等。

惑星の進化単位(10^8 年)よりも短い周期($10^8 \sim 10^6$ 年単位)で訪れる地質時代の氷期の原因は 大陸プレートの運動による地球表面の海陸分布に支配された海流及び気流大循環の変化によるものと考えられている。恐竜の時代と言われる中生代に大規模な氷河の発達しなかった理由は 赤道域に広大な陸地が存在せず 赤道海流が地球の気温を一様化していたからであると説明されている。 10^6 年よりも長い周期で引き起こされる気候変動は未だ 現象そのものについても推測の域を出ていない。ましてや 宇宙における太陽系の運動や 地震の原因で

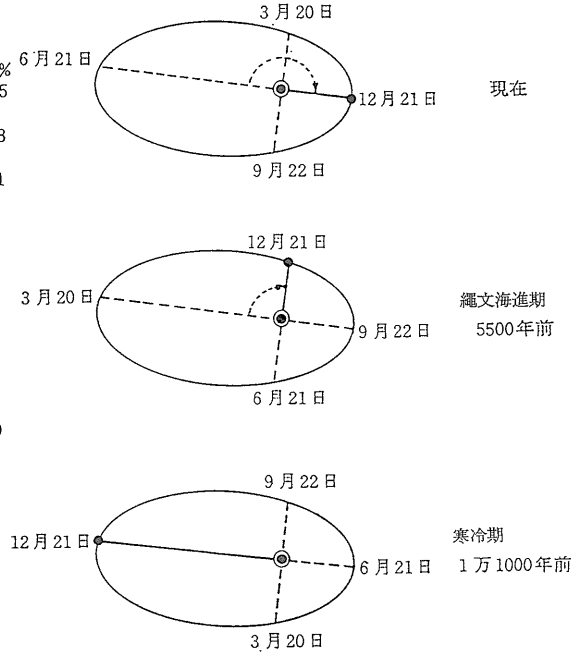


第2図 離心率 地軸の傾き 歳差運動の変動

もある大陸プレートの動きを 人間の力でコントロールしようとする考えは 将来とも出て来ないであろう。それに対して 人類の時代と言われる第四紀の氷期～間氷期の原因については 地球の公転軌道周期(10⁴年単位)に対応して 地球が受ける太陽からの放射エネルギー量の変化から説明されている (Milankovitch 説 1941)。

地球の受ける太陽エネルギーの分布は i) 地球の地軸の傾き(黄道傾角: 現在23.5°)の変化 周期約4万年 ii) 地球の公転軌道(楕円)の離心率の 変化 周期約9.3万年 iii) 太陽及び月の引力による地軸の歳差運動 周期約2.2万年等のスペクトルの合成によって決定される(第2図)。 周期的変動の谷の部分(三つ重なった15万年前がリス氷期 3万年前がウルム氷期の最寒冷期)に対応している。そして峰の部分(三つ重なった20万年前10万年前及び1万年前以降の現在は温暖な間氷期)に対応している。ミランコビッチ説は サング礁や深海堆積物の詳しい化石 地磁気 年代測定研究によって検証され 第四紀学会では定説として受け入れられている。

地球の四季の経年的変化は 歳差運動を基にした冬至点の位置を公転軌道上に追跡すると理解しやすい(第3図)。分点(春分3月20日, 秋分9月22日)と至点(夏至6月21日, 冬至12月21日)の位置は 地球の楕円軌道をゆっくりと移動し 約2.2万年で一周する。寒冷な1.1万年前の冬至点は軌道の端の遠日点にあった。温暖な5500年前の縄文海進期の冬至点は分点にあり 現在の冬至点は近日点に一致している。また 北半球の冬至は 南半球では夏至に相当する。すなわち 地球全体で見ると 現在は南半球の夏に太陽と地球との間の距離が一番短くなる。地球表面の71%は海洋 29%は陸地からなるが 北半球と南半球とでは その比が大きく異なる。



- 12月21日の地球
- ◎ 太陽

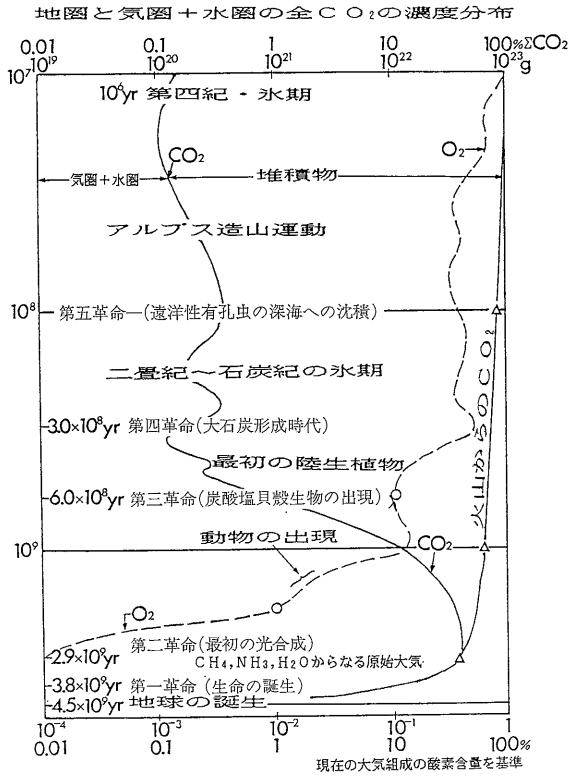
第3図 分点の歳差運動

北半球の陸地面積: 海洋面積 = 39.4 : 60.6 であるのに対して 南半球での陸地面積: 海洋面積 = 19 : 81 である。この条件は 南半球の海洋を暖めた太陽エネルギーは 水蒸気の温室効果からみても保存されやすい。すなわち 冬至点が近日点側にある時代は 温暖な気候が維持される。したがって 歳差運動の周期を根拠にすると 5500年前の縄文海進期から現在 更に 将来数千年間は 温暖な気候状態が続くものと予測される。一方 離心率及び地軸の傾きの変化傾向(第2図)からは 寒冷期に向いつつあると予測される。これらの変数の内 何が最も支配的であるかは良く分っていないが これらの変数は人為的に変化させられるものではない。また 氷期～間氷期よりも短い周期(10³年単位)の気候変動 例えば江戸時代後期(天明 天保の飢きん)の小氷期は 太陽放射熱の変化に支配された現象と考えられている。それでは 大気中の炭酸ガス等の温室効果ガスは 気候変動とどんな関係にあったのだろうか。

5. 大気中の炭酸ガス濃度の変遷と石灰岩の形成

地球形成当初の大気組成が 現在の組成にまで変化した過程は 生物進化とその環境変遷とに密接に関係している (Fairbridge 1967 第4図)。

- i. 生命の誕生: 約38億年前に 最初の生命がメタン



第4図 地史における生物進化の大革命

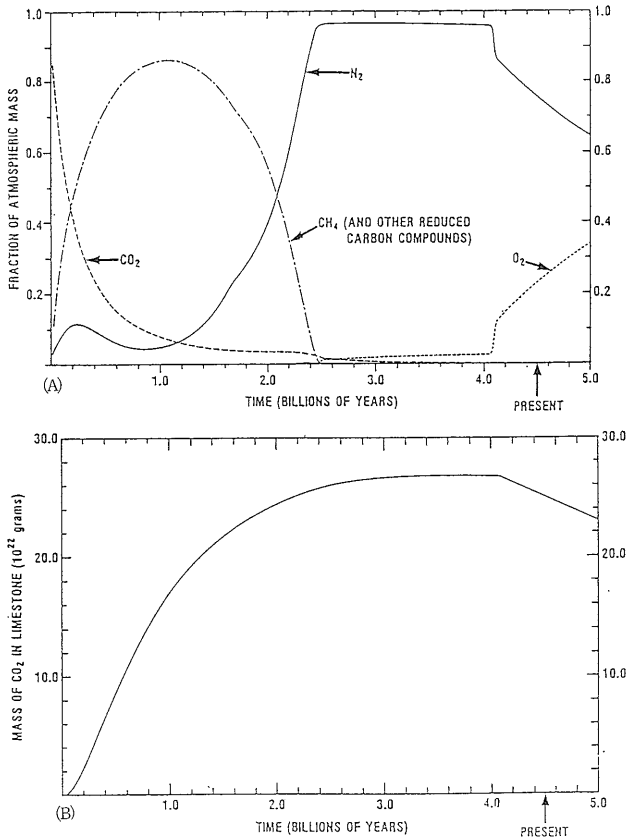
アンモニア及び水蒸気からなる大気組成下で誕生した。当初から大気中に炭酸ガスが存在していたか 否かは確定していない。水素は 当初から大気圏の上層やその外側へと拡散していった。そのため メタン アンモニアは不安定となり アンモニアは現在の気組成成分である窒素へと変っていった。火山活動は 塩素 亜硫酸及び炭酸ガスを大気中へ放出し続けた。陸上には土壌が存在していなかったため 雨水による溶解物は少なく 河川の流れは滝のようであった。海洋へのカルシウムやナトリウムイオンの供給量は かなり多かったものと推定される。原始海洋の海水は若干酸性で 塩分濃度は非常に低かったため 石灰岩の無機化学的な形成は不可能であった。水の光解離によって放出された酸素は すぐに鉱物の酸化によって回収され 遊離の酸素は存在しなかった。

ii. 最初の光合成: 約 29 億年前に 原始的な葉緑素生物 (多分バクテリアの自家栄養型) が炭酸ガスを使用して光合成を行い 副産物として遊離酸素を出し始めた。海水中の炭酸ガスの消費によって 海水の pH は上昇するので 光合成が浅い沿岸潟湖で起こっていたとしたならば そこには石灰岩の化学的沈殿が見られたであろう。

しかし 最も古い石灰岩の堆積構造には 無機化学的な沈殿または蒸発岩の特徴を発見することはできない。そこに観察されるのは ストロマトライト (Stromatolite) による藻構造である。藻構造を持つストロマトライト石灰岩は 世界中の先カンブリア紀層から発見されているので 生命圏は地球上全体に拡大していたと判定できる。このストロマトライト石灰岩には 多細胞植物によって分泌された骨格質構造は見られないが 現在のアメリカのフロリダ海岸やオーストラリアのシャーク湾で観察されるような 単細胞緑藻群体の外表に沈積した炭酸カルシウムのシワ状マットが見られる。浅い潟湖におけるストロマトライトの成長は 原始的なランソウを強い紫外線から守ることになった。この光合成によって 大気中の酸素は徐々に増加していったであろうが 酸素の大部分は鉱物の酸化によって回収されていた。約 10 億年前になって 大気中の酸素が現在の 1% (Pasteur level) に達し 原始的な動物群の進化を可能とした。

先カンブリア紀末期の 10~6 億年前は 無脊椎動物の進化にとって重要な時期であった。カンブリア紀を代表する三葉虫は 大まかに言うと現在の瀬戸内海に生息するカブトガニの祖先で 高度に発達した神経系: 脳 眼 捉脚器官 消化系 有体節骨格系 複雑な筋肉そして両性生殖系で特徴づけられる。このように複雑な生物が 新しく作られた生態的地位を満たすために 先カンブリア紀終末に 突然 単細胞の原始的な動物から進化したとは考えられない。それゆえ 先カンブリア紀終末の海洋は 現在の無脊椎動物の祖先型を受け入れる環境にあったと推定される。しかし この段階でも 潮間帯や潟湖の藻類だけが 石灰岩を沈殿することが可能であった。現在の湖沼や河川等の酸性環境 (pH5~7) に生息する節足動物は 生物体自身の体液の pH を上昇させることによって 炭酸カルシウムの凝塊を含むキチン質の殻を分泌している。したがって 先カンブリア紀末の海洋の pH は 7 付近まで上昇していた可能性がある。

iii. 石灰質の貝殻を持った動物の出現: 約 6 億年前に始まるカンブリア紀に 石灰質の殻を持った貝やウニの仲間が出現した。この事実も 炭酸カルシウムの殻を持った生物の生存を許す程度に 海水の pH が上昇したことを推定させる。また この時代の岩塩堆積物が ヨルダン イラン インドで発見されていることから 海水の塩分濃度も高くなってきたと推定できる。そして 古生代前期の石灰岩は 北米から西ヨーロッパを経てオーストラリア迄 帯状にその分布を広げている事実は 赤道帯の形成を示すものであろう。古生代前期まで



第5図 (A) 地質年代を通じての大気組成の変化
(B) 石灰石 苦灰岩および堆積性炭酸塩岩類に固定された CO₂ 量の地質年代を通じての変化

に 大気圏～水圏から大量の炭酸ガスが 石灰藻やサンゴ等の生物代謝過程を通じて 石灰岩として沈積した。藻類の光合成の副産物として 大気圏や水圏に遊離酸素が供給され 動物の進化に好適な環境が形成されていた。

光合成の産物である炭水化物は石炭 石油として また 生物体の骨格を形成した炭酸塩は石灰岩として 半永久的に地底深くに埋積されることになった。地球上の炭酸ガスは 石灰岩の形成によって固定されてきたという歴史的事実は 炭酸ガスの約90%が石灰岩として存在することから証明されている(第1表)。したがって石灰岩の形成過程抜きに 炭酸ガスの地球的規模での循環は考えられない。また 石灰岩の形成量と大気圏の炭酸ガス総量とは 反比例の関係にあつて(第5図A, B) 石灰岩の沈積形成によって 海水から放出される炭酸ガスが大気圏の炭酸ガス総量を増加させるかもしれないという仮説は 地質学的な事実から否定される。

植物の光合成に必要な炭酸ガスを 全て火山ガスなどの地球内部からの脱ガス量に求めることは 火山活動の

異常変化でも仮定しない限り不可能である。この時代に入ると 土壌有機物のバクテリアによる分解が活発になり 分解された有機物が雨水によって溶脱され 河川水は 連続的に炭酸イオンを海域に供給することになった。すなわち 河川水に含まれる陽イオンは Ca²⁺>

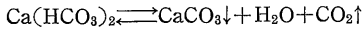
第1表 地球表層部における炭素の分布

(単位はCO₂として10²⁰g)

大気	0.0233
海水と陸水	1.30
生物とその遺骸	0.145
炭酸塩岩	2,240
堆積物中の有機物	250
石油及び石炭	0.27

(A.Poldervaartによる)

$\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ の順であるのに対して 海水では $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ である。また 河川水の陰イオンは $\text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ であるのに対して 海水では $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-}$ である。河川水が海水に変化するということは 河川水から Ca^{2+} と CO_3^{2-} とが除去される過程ともいえる。この除去過程は 河川水と海水との物理化学的反応によって支配されていると考えられてきた。しかし 暖海域の海中には CaCO_3 が 500~600% も過飽和な状態で溶解しているのに 下に示すような CaCO_3 の無機化学的な反応による沈殿を観察することはできない。海洋における CaCO_3 の沈殿形成には 全て生物の代謝過程が関与している。



サンゴ礁における CaCO_3 の沈殿は サンゴのポリプ中に共生する褐虫藻が サンゴの細胞内で光合成を行うことによって 細胞内の CO_2 炭酸ガスを消費する。その結果 体液中の Ca^{2+} と CO_3^{2-} の平衡関係が壊されることによって CaCO_3 の沈殿が起こり易くなる。したがって サンゴ礁における CaCO_3 の沈殿にとって 最も重要な代謝過程は 褐虫藻の光合成である。すなわち反応は褐虫藻の光合成による CO_2 の消費された結果として CaCO_3 が沈殿するのであって 無機化学的に CaCO_3 が沈殿してから CO_2 が放出されるのではない。

iv. 大炭田の形成: 約 2 億 5 千万年前の羊歯植物の繁茂によって 陸上岩石の風化及び土壌化は急速に進み 岩石や土壌から溶脱されたアルカリ金属が 海水のアルカリ度を上昇させた。この時代になって 海水の pH は 7 から 8 に上昇したのであろう。そして 古生代前半から繁栄してきた三葉虫や古いタイプのサンゴ(四射及び八射サンゴ)は その生態的地位をアンモナイトや新しい六射サンゴに明け渡していった。Rutten (1966) は繁茂した羊歯植物の光合成によって 酸素濃度は現在よりも高く 炭酸ガス濃度は低くなったと考えている。この炭酸ガス濃度の低下が温室効果に影響して 二疊紀氷河時代の原因となったとも考えられる。現在でも地球から炭酸ガス等の温室効果ガスが無くなったとしたら 地球の平均気温は約 -15°C 以下となって 現在のような豊かな生物相の維持は不可能となる。生物は 炭酸ガスという大気の保温毛布に包まれることによってのみ生存することが可能なのである。

v. 深海への遠洋性有孔虫殻の沈積: 約 1 億年前の白亜紀に 最後にして最大の生物地球化学的な出来事である炭酸塩の殻を分泌する浮遊性有孔虫が海洋に出現した。古生代から引き続くアルカリ金属の供給によって 海水の炭酸塩濃度が上昇したことは 異常に殻の厚い厚歯二枚貝が群生して作った貝殻礁 殻が異常成長したアンモ

ナイトの繁栄等から推定される。このような海水成分の地球規模での調整機能として 大発生した浮遊性有孔虫の殻が 海水から大量の炭酸塩を回収し 石灰岩として海底に沈積した。

古生代の石灰岩には 浅海及び大陸縁辺域に沈積したものが多く 再循環系に取り込まれやすかった。一方 グロビゲリナ軟泥のような遠洋性堆積物は 一度沈積すると ほぼ永久的に表層海水の循環系から取り除かれ 海水の炭酸塩濃度を低下させる。だが グロビゲリナ軟泥の分布域よりも更に深い 炭酸カルシウム補償深度 (CCD 太平洋で約 4000m) 以深では炭酸カルシウムは溶解し 深海湧昇流によって生物再生産の水域へと回帰させられている。この深海における炭酸カルシウム溶解過程は 海洋の自己調節機能の一つであろう。炭酸カルシウム補償深度は 気候変動に対応して変化してきたことは 深海堆積物中の微化石研究からも解明されている。

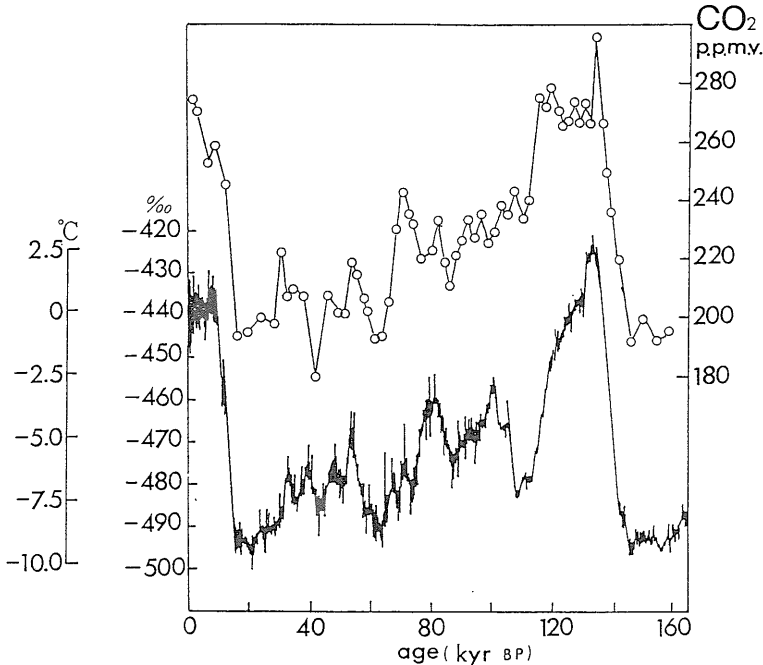
以上のような環境の歴史の変遷過程を理解すること無くしては 地球の気候変動と物質収支との関係を把握することは不可能である。

地球の歴史上に起こった 5 つの生物による環境革命が現在の地球圏—生物圏の環境条件を形成してきた。すなわち 生物群の代謝機能が環境に働きかけ 環境を変化させてきたのである。その中でも 生物源の炭酸ガスとカルシウムの収支が 地球規模での生物環境条件の決定に主要な役割を演じてきたことが注目される。

6. 炭酸ガスの温室効果

氷期~間氷期の炭酸ガス濃度変化の記録は 4000m 以上の厚さで発達する南極大陸の氷床に残されている。ソ連及びフランスの共同調査隊は Vostok 基地で 約 16 万年前に達する 2083m の氷のボーリング試料を採取し 試料の年代測定 炭酸ガス及び重水素濃度の分析を行った (第 6 図)。その結果 15 万年前及び 2 万年前の氷期の氷試料分析値から推定される当時の炭酸ガス濃度は 220ppm 以下で 温暖な 12 万年前の間氷期のそれは約 300ppm である事が明らかにされた。

この調査によって 現在よりも平均気温が $3 \sim 4^\circ\text{C}$ 高かった 10 万年前の間氷期にも 南極大陸には氷河が存在していたことが明らかにされたので 将来の温暖期にも南極大陸の氷河が融解して海面上昇を引き起こすことはないかと推定できる。次いで 現在の炭酸ガス濃度 350ppm は 最終間氷期の炭酸ガス濃度 300ppm を越えているのに 世界的な温暖化現象は確認されていない。炭酸ガスの温室効果によって 地球の温暖化が支配され



第6図
 (上) Vostok 基地の水柱状試料の年代
 と炭酸ガス濃度
 (下) 同位体プロファイルから推定され
 た気温の変化
 (J. M. Barnola et. la. 1987)

ているのならば 現在の気温は間氷期のそれを越えていなければならない。自然状態において 温暖期には世界的に降雨量は増加し 陸上植物の光合成が盛んになって炭酸ガスが消費されるのに なぜ 大気中の炭酸ガス濃度は増大するのだろうか？ 陸上の森林による炭酸ガスの吸収能力は 問題にならない位小さいのか？ 一方寒冷期には氷河が発達することによって 森林域は縮小し 植物の光合成能力は低下しているはずなのに なぜ炭酸ガス濃度は減少するのか？ このような質問に対して 以下のようないくつかの解答が可能のように 決定的な解答はまだ得られていない。

i. 大気中の炭酸ガス濃度は 表層海水の炭酸ガス溶解度によって決定されるから 海水温が低い時には炭酸ガスの溶解量が大きくなるので 大気中の炭酸ガス濃度が減少する。その反対に 海水温が高いと溶解度が減少するので 大気中の炭酸ガス濃度が増加する。しかしこの物理化学的な説明では 地球環境の歴史的な変遷から解明された炭酸ガス濃度変化と生物生産量との関係が無視され 地史的な事実関係を説明することができない。とくに 温暖化に先駆けて大気中に増加する炭酸ガス濃度は 説明することのできない現象の一つである。

ii. 温暖化に伴う海水準変化による陸地面積の変化が原因である。海面が上昇すると 生産性の高い海岸平野が水没し 土壌有機物の分解によって放出された炭酸ガ

スが処理できなくなるので 大気中の炭酸ガス濃度が増大する。一方 寒冷期の海面低下によって 大陸棚は陸地となり 植物育成適地が拡大して炭酸ガスの固定能力が増大する。したがって 大気中の炭酸ガス濃度が低下する。

一見合理的な説明のようだが サング礁など浅海生物の生息環境から見ると 逆の関係にあることに気がつく。海面が上昇すると 海岸平野が水没して浅海域が拡大し サング礁や浅海底生生物の生息適地が増加するので 大気中の炭酸ガスが海洋中で固定される量が増える。逆に 寒冷期には大陸棚が陸化することによって浅海底生生物の生息環境が破壊されるので 炭酸ガスの固定量は減少する。正逆二通りの考えが成立する。

iii. 炭酸ガスの増加は 温暖化による海水準上昇 降雨量増加等と同じような 温暖化の結果であって 温暖化の原因ではないのではないのか？ 現在の炭酸ガス濃度の増加は 温暖化の前兆現象ではなく 化石燃料消費の結果である。それを 地球の温暖化現象に結びつける科学的な根拠は何に求められるのか？ 回り回って 最初の問題 温室効果とは何かに戻ることになってしまった。

iv. 温室効果：日射光の下で 温室内の気温が外気温よりも著しく高くなる現象は 19世紀後半から「鼠とり理論」によって説明されてきた。温室の天井や外壁に使用されるガラス板は 比較的短波長の光に対しては透過性が高く 日射光の大部分を透過させる。温室内に透

過した日光は 温室内で大部分は吸収されるが 温められた物体の表面からは対流と放射によって熱が出て行く。この放射は温度放射と呼ばれる波長の長い熱線(赤外線)で ガラス板を透過出来ない。したがって日射光の大部分が温室内に閉じこめられるために 温室が昇温すると説明されてきた。1909年 英国の物理学学者 Wood は この説明に疑問を持って ガラス板で作ったモデル温室と 長波放射も良く透過する岩塩板で作ったモデル温室での比較実験を行った結果 有意の差がないことを実測によって示した。さらに 1910年 Van Gulik は 夜間における ガラスと岩塩板温室の放射実験を行い 岩塩温室内の気温が僅かに速く低下していくことを示した。以上の実験結果から 温室効果は放射収支だけで説明されるよりも ガラス板で覆われることによる気流の停滞による対流熱損失の低下による方が大きいことが結論されている。すなわち 伝熱現象は 伝導 対流 放射の三形態で同時に起こっているもので その中の比較的理解しやすい形態(例えば放射)のみで 温室効果を説明するのは間違いであるとされている。この事は 海岸地方の海風 山風の交替によって気温差が小さくされている現象を思い出せば理解しやすいであろう。したがって 地球上の7割りが海洋で占められていることを考えれば 温室効果はそれほど大きいものと考えする必要がないのではなからうか。しかし 温室効果における放射現象は有意のものであるから その影響を無視することはできない。

以上のように 第四紀の気候変動は 地球の公転軌道変化に支配されて地球が受ける日射量の変化から説明される。もし 人為的な炭酸ガス濃度の増加が 地球環境に悪影響を与えているのならば 炭酸ガス濃度を低下させなければならない。大気中の炭酸ガス濃度300ppmが 間氷期の気温上昇をもたらしたのならば 350ppmに達した現在 温暖化現象が起こっていないのはなぜか。未解決の問題は多いが とにかく 第四紀になってから一度も経験したことがない炭酸ガスの高濃度レベルを 自然基準値に近づくことは 地球環境の正常状態を維持する点からは 当面の人類にとっての課題であろう。しかし 200年以上もかけて 大気中に拡散させてしまった炭酸ガスを 人工的に回収することは至難の業である。この回収には 生態系を通じての自然浄化機能を利用するのが最良の方法であろう。

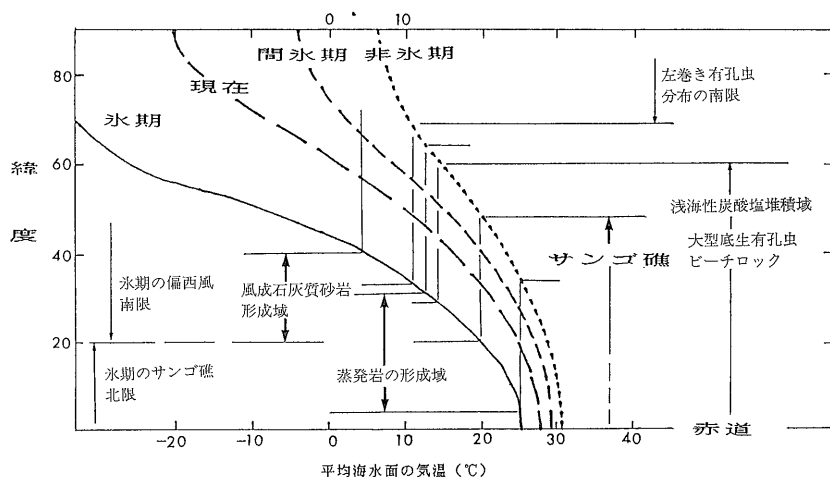
7. 炭酸ガスの循環系を活用した処理技術

化石燃料の消費によって放出される炭酸ガスの年間総量50億トン(炭素として)の内 大気中に滞留するのは約

半分で その残りは陸上の森林及び海洋中へ吸収されてきたと考えられてきた。しかし 森林による固定能力は予想されたものより低いどころか 過去百年間は 森林破壊や農地開発によって 炭酸ガスの収支はゼロもしくは 炭酸ガスの供給源になっているという説さえも発表されている(Gribbin 1979)。一方 海水の無機化学的な吸収量は表層海水が炭酸ガスによって飽和されているため 期待されるほど大きなものではないと 海洋化学者によって主張されている。とくに 海洋中の溶存炭酸ガス総量は大気中の50倍以上もあって 海洋の深海湧昇流による炭酸ガスの放出量の方が問題であるという考えさえも示されるに至った。しかし 大気中に放出された化石燃料起源の炭酸ガス総量の約半分は 大気中から何処かへ移動しているのは事実である。

海洋への炭酸ガス吸収量については 大気と海水との境界面における交換現象として把握するものと 海洋生物生産量 とくに炭酸カルシウムの沈殿形成を考慮する場合とでは大きな差がある。炭酸カルシウムの沈殿固定を考慮した場合の方が 炭酸ガス固定量が多いことは言うまでもないが 定量的な評価は今後の問題である。このような事は 地球上の炭酸ガスの約90%が石灰岩として存在し 石灰岩を抜きにして炭酸ガスの物質収支は考えられないという地質学的事実からも支持される。ここに 炭酸ガスの処理対策として 海棲の炭酸塩骨格生物の代謝過程を活用することの重要性が再確認される。

産業革命以来 化石燃料の消費によって放出された炭酸ガスは 自然値を約20%増加させた。しかし 化石燃料を消費する人類の総数は 1750年の約7億人から 1987年7月11日に世界人口50億人の日を迎えたことは 記憶に新しい。すなわち 生態系ピラミッドで食料を消費する一方の人類は7倍にも増加したことによってピラミッドは不安定となり 世界の食糧事情は楽観を許さない状況にある。この食糧問題を考える時 炭酸ガスを如何にして 速やかに食物として再利用できる系に取り込むかが 緊急課題となっている事は言うまでもない。現在の海洋において 最大の炭酸カルシウム消費者は 遠洋性石灰質有孔虫であるが 遠洋性有孔虫を直接餌とする有用水産動物は確認されていない。しかし 浅海域のサンゴ礁や石灰藻礁は 暖海域の重要な漁場となっている。海洋中に拡散した炭酸ガスを効率よく処理し 蛋白質資源として再利用するには サンゴ礁動物群の活用は有効である。炭酸ガス処理対策は 単なる起源(source)と処理固定(sink)として捉えるだけではなく 陸上の森林資源や海洋生物資源のように 環境の正常化を図る生物資源量(stock)として認識する必要



第7図 北半球に置ける氷期・現在・間氷期・非氷期の表面水温分布 赤道～北極間の気温勾配 (Fairbridge 1976 原図)

がある。

江戸時代の東京は、世界最大の都市人口 150 万人を抱えていたが、その食糧事情は悪いものではなかった。それどころか、江戸前の食文化（東京湾の魚貝類を材料とした料理）を発達させてきた程である。東京湾の豊かな漁業生産は、東京湾に排出された都市下水が海水を富栄養化したことによって維持されてきたものである。品川から浅草沖に始った海苔養殖は、その漁業生産を通じて東京湾の浄化に貢献してきた。そして現在、東京湾干潟の生態系による環境浄化機能が再認識され、人工干潟を利用しての東京湾浄化工事が実施されるまでになった。このような経験から、サンゴ礁の活用は、炭酸ガスの固定化のみならず、水産資源のストック確保に重要な意義が見出される。地底深くから苦勞して取り出した化石燃料の最終産物を単なる廃棄物として考え、 -70°C 以下のドライアイスとして深海（水温約 1°C ）に投棄しようと言う提案もある。しかし、この発想には、目の前に見えない環境なら破壊してもかまわないという生態系無視の環境破壊が気になるのは、私だけの心配だろうか。

地質調査所では、海洋のオアシス「サンゴ礁」の物質収支と成長過程の現地調査を基にした「サンゴ礁による二酸化炭素の固定能力の研究」（工業技術院指定研究平成元年～3年度）を開始した。その研究目標は、地球規模での生物圏の正常な代謝機能を活用をすることによって人為的に増加させた炭酸ガスを生物資源（stock）として固定し、豊かな生物圏の中でのバランスを維持する手法の開発を図るものである。本年度の調査研究のために石垣島サンゴ礁で3本のボーリングを実施するにあたって、沖縄県、石垣市、八重山漁業協同組合関係各位の御理解、御協力を得たことを記して感謝の意を表す。

8. 地球温暖化による環境影響の事前予測評価

地球規模での気候変動は、話を分りやすくするために地球上、何処でも同じように変化するかのようの説明されがちである。しかし、実際はそれほど単純ではない。たとえば、第三紀の非氷期、第四紀の氷期、間氷期及び現在の表面海水温の分布だけでも、各気候帯によってその変化量が異なる（第7図）。氷期でも赤道域では水温の変化は小さくサンゴ礁が発達していたが、熱帯と温帯の境界域は大きく南に移動し、北緯60度以上の環境変化は森林相を破滅させるほどであった。水温変化に地域性があるように、海面変動の地域性も大きい。かつては「隅田川の水はテムズ川に通ずる」という言葉で代表されるように、地球上の海は全て連結して海面の高さは世界で何処でも同様であると直感的に捉えられてきた。しかし、潮汐の干満を考慮するだけでも、時間的にも場所によっても海面の高さは常に一定ではない。有明海の奥のように干満差の大きな海域は、毎月、縄文海進よりも大きな規模（3m以上）の海面変動下にある。また、温暖化によって溶けた大陸氷河の水が海面を上昇させると、縄文海進の関東平野のように、平野の奥深くまで水没すると考えられる。しかし、北米ハドソン湾やスカンジナビア半島の沿岸では、陸上の氷河が溶けるとそれまでの厚い氷河による荷重から解放されるため、陸地はゆっくりと隆起を始め、海岸線は沖合いへと後退しだし、これまでの舟着場は陸地となってしまった。すなわち、大陸氷河の発達する海岸では、重い氷河で押さえ込まれていた氷期の海岸が相対的な高海面であって、間氷期には海岸が隆起するために低海面となる。このような海面変動の実態が明らかになるにつれて、これまで地球上では一様であ

ると考えられて来た第四紀海面変動の地域性が注目されてきた。現在は、地殻の粘弾性的特徴と大陸氷河の影響との関係から最終氷期以降の海面変動過程は7つの地域的なタイプに区分されている(Clark & Lingle, 1979)。このような地殻の粘弾性的特徴が理論的に解明されてきたのは1970年代の後半に入ってからで、実際の海面変動との比較対象研究はこれからである。したがってわが国の第四紀海面変動の実態についてもそれを正確に把握することが温暖化対策にとっての基本的な課題となる。そこで地質調査所では環境庁特別研究として「地球温暖化に伴う沿岸環境の影響評価手法に関する研究」を平成2年度から計画している。

研究の背景：人為的な影響による温暖化とそれに伴う海面変動の規模は約5千年前の縄文海進期の変動量に対応するものと予想されている。この縄文海進期に海面下にあった海岸平野は再び水没する危険性がある。したがって縄文海進期の古環境を正確に復元評価することは沿岸域に大都市の集中するわが国及び東南アジア諸国の国土保全政策にとっての最重要課題である。この気候温暖化と海面変動の影響を敏感に反映するモデルフィールドを選定して人類の生産活動が本格化した過去1万年前以降の気候変化データを整備することは国際的な課題としても位置づけられている(IGBP, 1990年から10年計画で開始)。

北海道オホーツク海沿岸は縄文海進期の気候変動の影響が世界的に見ても大きな地域であったことが当時の自然貝殻層や貝塚の研究から明らかにされている。また現在最も低緯度における流水の漂着する海岸としても知られている。したがって北海道オホーツク海沿岸域は気候変動に対応する生態及び堆積環境の変化を把握するに好適な研究フィールドであって北西太平洋の地球温暖化による環境変動の前兆現象の把握及び評価のためにはこの沿岸域に残された完新統の調査研究資料が不可欠である。

研究の概要：縄文海進期の気候変動を沿岸水温、海面上昇量、気温及び降雨量等の環境因子から定量化しその時間及び空間的な動態解析から未来環境を予測する。

- i. 沿岸水温因子は自然貝殻層から標徴種を選びその生息環境要因としての生息適水温及び産卵水温等から評価する。
- ii. 海面上昇量は貝殻層の産状及び生息深度、平野の地形及び堆積物の分布調査から古地理環境を復元した上で評価する。
- iii. 気温及び降雨量は古土壌中の花粉、植物化石から植生を復元し生物気候学的に研究する。また完新世に噴出した火山灰の土壌化段階から古気候のクロス

チェックを行う。

期待される成果：過去18,000年前以降の3,000年間隔での海岸地形図、最高及び最低沿岸水温図、気温分布図及び降雨量分布図の作成

地質学の研究は「現在は過去の鍵なり」という齊一説の立場から進められて来た。しかし現在要求されている温暖化による影響の事前予測評価はこれまでの地質学では取り上げられてこなかった新しい分野である。このような将来予測には現状の詳しい解析が必要な事は言うまでもないがそれだけでは不十分である。自然界の現象にはそれぞれ生い立ちの記録があり未来は過去からの延長上にある。すなわち「過去の環境履歴は未来環境予測の導標である」。とくに人間の産業活動が顕著となった数千年前以降の地質現象についての体系的な調査研究は将来の環境変動予測評価を行うにあたって不可欠である。しかしこの分野は研究対象及び手法が確立していないため殆ど未開拓な研究分野として残されてきた。

9. まとめ

現在の地球平均気温15℃は第四紀の気候変動の中で見ると間氷期よりは平均して2℃程低く、氷期に比べれば3℃程高い状態にある。また地球に生命が誕生して以来の平均気温変化は6～22℃にあって現在は温暖な側にある。地球の大気組成はメタンや炭酸ガスを主成分とした原始大気から約10億年前に窒素と酸素を主成分とする現在の大気組成成分に近くなった。その後組成、気圧及び気温は驚く程安定した状態を保ってきた。そこにはなにか地球全体の環境を調整する意志が働いているかのようにさえ見える。このように安定した生命の楽園「地球」の環境を人間の利己的な活動によって乱すことを宇宙船「地球号」の他の同乗者は許してくれるであろうか。

地球の生命圏(生態系)は温室効果ガスが問題となっている大気圏ばかりではなく生物の生息する水圏及び地圏との間の相互作用による微妙なバランスによって維持されてきた。そしてこのバランスの中を時間～空間的に生き残ってきたのが宇宙船「地球号」の同乗者(全生物群)である。炭酸ガス問題を解決するだけでは地球環境のバランスを維持することはできない。酸性雨、沿岸海域汚染、森林破壊、砂漠化等とそれに伴う野生生物の絶滅、どれもが相互に密接に係わりあっている。これらの環境問題は総体として機能する生命の楽園地球号の調整器に欠陥の発生したことを示す危険シグナルである。シグナルの示す根本的な情報を理解するこ

となく 信号機の安全装置を取り替えたり 信号を無視することで対応するならば 事態を深刻な状態に落込ませるだけである。地球規模の環境問題に対応する最も合理的で 有効な方法は 地球環境変遷の歴史的なデータバンクから 環境機能の特質を正確に把握した上で未来予測モデルを作成し 全地球が正常に機能するような調整法を確立することである。そのためには i. 第四紀の地球現象を総合科学的な立場から解明し そのデータバンクを整備する事。ii. 歴史的な記録及び現在の観測データを基にして 未来環境予測モデルを作成し

作成したモデルの精度 適応限界を第四紀の地質学的事実によって検証すること。iii. 検証されたモデルを用いて 地球の長期気候予測とその対応策を提案すること。iv. 望ましい地球環境のデザイン作成と そこへ向かう国際的な同意をとりつけること。

小手先の対症療法技術の開発だけでは 根本的な問題の解決にならないことだけは強く主張したい。そして これを機会に われわれは地球のプロセスについて何を知っているのか また 何を知らなければならないのかを整理して 真剣に考えるべきである。

地学と切手

砂金採掘の切手

P. Q.



砂金の採取は恐らく人類にとって最も古い鉱業活動だっただろう。砂金採りは常に開発の尖兵だった。比較的採取が簡単で個人でも出来 収益が大きいともなれば直ちに人が群がってくる。土地から砂金を産出することが分ったために 平和が乱れ 悲劇が起きた例は数多い。アメリカインディアンやカリフォルニアのブッターなどはその例である。

砂金は機械的堆積鉱床に属している。この中の砂鉱床は岩石や鉱床が風化作用によって破碎され 運搬され 金・白金・タングステン・錫などの有用鉱物に変質することなく また一般に比重が重いために分級作用を受け川床や海岸に堆積して生成した鉱床である。ダイヤモンドを初めとする宝石類もほとんどこうして採取された。ちなみに「ひすい」は中国雲南の川において採取されていたものであり 地山の産出が発見されたのは日本の姫川が最初である。砂鉱床は金・白金など経済的に高い価値のある鉱物の砂粒が堆積した鉱床で 濃集度が低く 小規模であっても 逆にそれ故に個人的に稼

行の対象となりやすい。普通の造岩鉱物の比重がせいぜい3.5までにくらべて 金は16-19 白金で14-19であり 宝石類は3.5-5である。

砂金はカリフォルニア アラスカ カナダのクロンダイク シベリアのコリマ オーストラリア ニューゼaland 南米西海岸諸国 アジア アフリカ諸国とほとんど世界中に知られている。日本においても万葉に「黄金花咲く」と謳われた奥羽地方は 平泉の繁栄をもたらした 遣唐使が持参した旅費はほとんど砂金だった。しかし砂金の生命は短い。遣唐使も後期には砂金の産出が少なくなったことを言いわけしなければならなかった。

砂鉱床は川や海ばかりとは限らない。長い地質時代に生成した鉱床はあらゆる時代の地層に含まれてよい。南アフリカの金鉱床は先カンブリア時代の含金石英礫岩から産する。そして次第に採掘は個人の手から 資本と技術の必要な組織へと移って行く。現在ではソ連のウラル地方の砂白金は世界の砂白金の過半数を供給し マレー半島の砂錫は世界でも重要な砂鉱床の一つである。

各国の切手はそれぞれの風俗を示していて興味深い。コロンビア 1956年発行 Narino 川における採取状況

エクアドル 1937年発行 5種うち一つ

モザンビク 1931年ベルギーのモザンビク会社によって発行されたもの

ニューゼaland 9p 1940年発行英国統治宣言100年記念13種のうち ニューゼalandの砂金は1853年に発見された。昔と今の砂金採掘を画いている。3d 1960年発行ウエストランド100年記念。