

地質調査所における地球温暖化問題への取り組み

小川 克郎¹⁾

1. 地球温暖化ということ

炭化水素資源の燃焼, 森林の伐採などに起因する大気中の炭酸ガス等の温室効果ガスが地球の温暖化を促進するのではないかという危惧が叫ばれ始めてすでに久しい。最近の湾岸戦争でのクウェートの油井火災は毎日, 日本全体の10倍もの炭酸ガスを大気中に放出していることで地球温暖化が一層進むのではないかと論ずるテレビ報道もあった。

確かに, 炭酸ガスが地表に届いた太陽光の宇宙空間への逸散を防ぎ温室効果をもたらすことは科学的事実である。だからといって, 地球が温暖化すると直ちに結論できるわけではない。地球は複雑なシステムであり, ことはそのように単純ではない。例えば, 炭酸ガスの増加によって気温が上昇すると, 海洋中の炭酸ガスが大気中に放出され雪達磨的に気温が上昇する(正のフィードバック)。これと同時に, 海面からの水蒸気の蒸発量が増加して雲量が増え, 太陽光の地表への入射を遮り, 地球の冷却を促すことにより気温が下がる可能性があり, また, 気温の上昇に連れて植生が活発化して炭酸ガスを減らし気温を下げる傾向を持つ(負のフィードバック)。このほかにも地球を構成する気圏, 水圏, 地圏, 生物圏には多くの正負のフィードバックループが存在する。このように多くの要因がお互いに絡み合った複雑なシステムは非線型的に振る舞うので, 入力(この場合は炭化水素資源の燃焼や森林伐採により発生する炭酸ガス量)から出力(気温)を予測するのはなかなか難しい。多くの場合, 直感的な予測は間違いを犯しやすい。数十年後には気温が3-5度上昇すると予測した気象学者(例えば, Manabe et al, 1980, Hansen et al. 1988)に対する反論(例えば, C. C. Marshall Institute, 1989)の多くは, 彼らのモデルがこうした複雑な地球システムを扱うには余りに単純すぎると考える人々からのものである。彼らのモデルでは, 気圏と水圏を対象として, 温室効果を含めた幾つかの微分

方程式(質量, 運動量およびエネルギー保存則)をシュミレーション手法で解くことにより気温上昇量を算出している。地圏および生物圏のもつフィードバック機能は考慮していない。もっとも, 彼らは様々に仮定した大気中の炭酸ガス濃度の場合について, 地球の気温分布を推定しているのであって, 大気中の炭酸ガス濃度はシュミレーションの入力に過ぎず, それがシステムの中で今後どのように推移して行くかについて論じているわけではない。その意味で, 彼らの論文に非があるわけではなく, それからただちに地球温暖化をあたかも既定事実のごとく結論付けた側に混乱が生じていると考えるべきであろう。

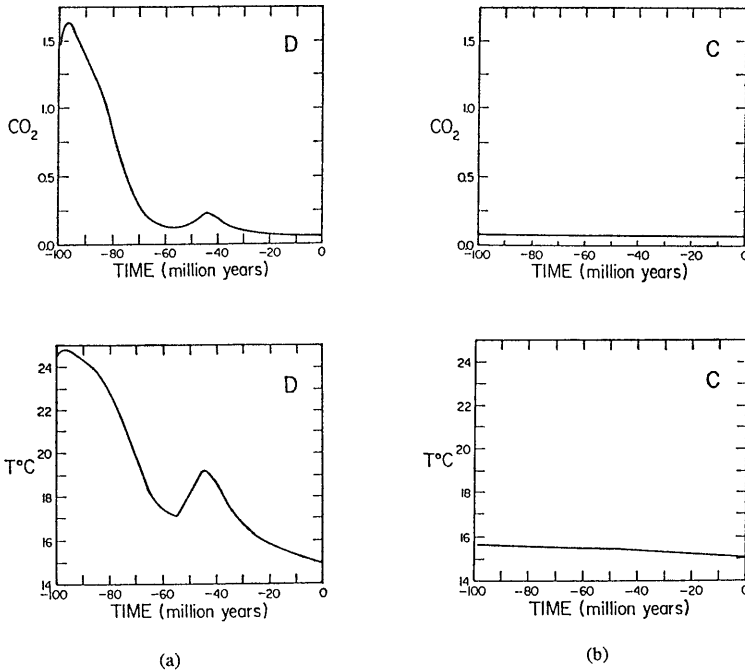
一般論として, 対象とする期間(この場合数十年-一百年程度)に比べて著しく長い遅延特性を持つフィードバックは無視してよい。その意味では, 気圏や水圏に比べてプロセスの進行速度が著しく遅いと考えられている地圏の振る舞いは差し迫った「地球温暖化問題」では無視できると見做されてきたようである。気圏の炭酸ガスを地圏に固定する珊瑚礁珪藻系の生物学的プロセスは, 温暖化に対する意外に速い負のフィードバックを形成しているかも知れないのである。

このように, 「地球温暖化問題」は, まだまだ解き明かすべき多くの科学的課題を残している。しかし, 「地球温暖化」の可能性を否定することはできない。従って, この問題への様々なアプローチを図って行くのは重要なことである。

ところで, 「地球温暖化問題」へのアプローチは, 今のところ工学技術が優勢である。炭酸ガス等の排出量の低減や, その固定技術などの工学技術の開発が急務であることは言うまでもない。しかしながら, こうした技術が有効なのは排出以前の過程に限定される。所謂, 出口規制である。いったん, 大気中に放出され希釈されながら拡散してしまった炭酸ガスへの対応には無力である。たとえ可能であるにしても, 鉱物含有量の低い鉱石の生

1) 地質調査所 所長

キーワード: 地球温暖化, 地球システム, 二酸化炭素濃度, プレート運動



第1図 過去1億年のCO₂濃度と気温変化 (Berner et al., 1983)
 (a) 地質学的知見に最も合致したプレート運動活動度を仮定した場合
 (b) 現在のプレート運動活動度が過去1億年間不変であったと仮定した場合

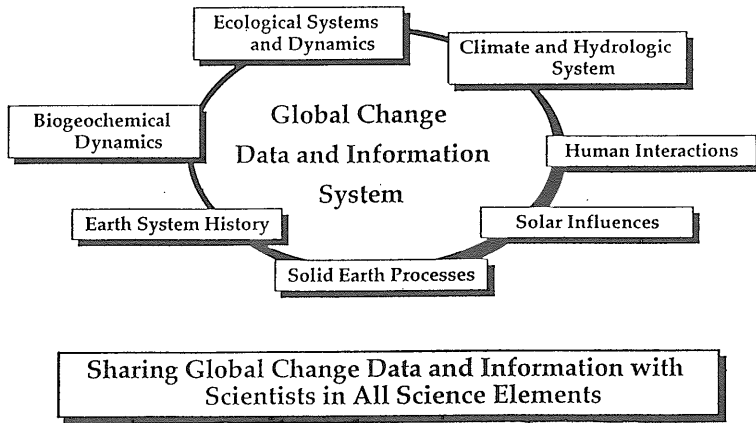
産が資源として経済的ではないと同じように、その回収には膨大な資金が必要とされるであろう。すでに大気中に拡散してしまった炭酸ガスの回収は、地球という自然システム自体が有する治癒の能力に頼るか、あるいは、自然システムの将来挙動予測に立脚した対策を講ずるしかない。それにはまず、地球自然システムへの理解から始めねばならない。この理解に立って、自然治癒に力を貸す手立てや対策を講ずることは可能である。これは、最近流行りの中国気功術による健康増進に似ていると言えようか。

複雑なシステムである地球の「温暖化問題」の謎を解き明かす一つの鍵は地球史それ自体の中に潜んでいるに違いない。ここでは、この謎に正面から取り組んだ地球科学者の一つの論文を簡単に紹介しておきたい (Berner et al., 1983)。題名は「過去1億年間における炭酸塩岩—珪酸塩岩の地球化学的サイクルとその大気中の炭酸ガスに与える影響」である。この論文では、炭酸塩岩—珪酸塩岩系の炭素の循環の中で地圏、気圏、水圏と巡る炭酸ガスのプロセスを、それぞれのプロセスにおける化学反応とそれを引き起こす地球の場での挙動を数値的に解析している。ここでは、炭酸塩岩の生成過程および風化による珪酸塩岩の炭酸塩岩化過程における大気中の炭酸ガスの吸収、これとは逆に、プレートテクトニクスによる火成作用・変成作用による炭酸塩岩の珪酸塩岩化過程における炭酸ガスの大気中への放出が重要なプロセスとして

扱われている。結果は、プレート運動の活動度をパラメーターとした過去1億年間の大気平均気温である。結論として、様々な地質学的知見に整合的な解を導きだしている (第1図a)。現在のプレート運動が過去1億年間継続したとする解 (第1図b) と比較すると、プレート運動が気温に与える影響の大きいことが解かる。この説に拠ると、もし仮に過去1億年の間にプレート活動のゆっくりとした鎮静化が起こらなかったなら、現在の気温は5—10度高い筈であったということになる。これは驚くべき結論ではないだろうか。

この論文が扱った対象は大変長いレンジの変動であり、フィードバックの遅延時間も500年程度 (著者による) とかなり長いので、前述したように、「地球温暖化問題」の対象となる数十年—百年レンジの変動では無視できるとも言えるかも知れない。とはいえ、今後のこの問題への取り組みを考えると、この論文の方法論には示唆に富むものがある。

極めて複雑なシステムの挙動解析への一つのアプローチとして、システムダイナミクスと呼ばれている方法がある。この方法は本来経済分析に用いられたものであるが、自然科学にあっても解析的に記述することが不可能なシステムへの適用は有効である。システムダイナミクスでは全体システムを幾つかの (多数の) ストックからなるサブシステムと、それらを連結するフローの集合体としてとらえる。例えば、「温暖化問題」では、地圏、



第2図 地球規模環境変化の研究の7つの地球科学分野 (Committee on Earth Science, 1989)

気圏、水圏、生物圏を炭酸ガス（あるいは炭素）濃度および温度のストックとして、その間に流れる量（炭酸ガス、熱等）をフローとして表すことによってシステムダイナミックスのモデルができる。各ストックは流入してくるフローと、流出して行くフローの間の因果関係を規定する。また、異種のストックあるいはフロー（例えば、炭酸ガスと気温）をつなげる変換機能を与えることも出来る。この方法の大きな利点は、気象学、地質学、海洋学、生物学といった異分野の研究成果を単独の定量的全体システムにまとめ上げるのが可能なことである。更に、全体システムを構成する多数のストック、フローや変換機能の全体への影響の程度が評価できるという利点もある。この評価により、各分野における研究の現状が明らかになるので、問題解決のために今後重点を置いて研究すべきテーマを絞ることが可能となる。

「温暖化問題」を含め「地球規模環境変化の問題」に対する今後の地球科学分野の研究の在り方を提言した一つの報告書 (Our Changing Planet: The FY 1990 Research Plan) がある (Committee on Earth Science, 1989)。Committee on Earth Science (地球科学審議会) は地球環境問題を扱うために米国政府によって組織された公式の審議会であり、米国の関連政府機関の長がメンバーとなっている (委員長は USGS 所長 Dallas Peck)。この報告書は同審議会が 1989年 1月議会にて提出した “Our Changing Planet: A U. S. Strategy for Global Change Research” の科学的報告書とも言えるもので、本問題に対する地球科学的研究の在り方を詳細に述べている。研究分野は次のように優先順位が付けられた7つに分けられている。

- (1) Climate and Hydrologic System, (2) Biogeochemical Dynamics, (3) Ecological Systems and Dynamics, (4) Earth System History, (5) Human Interactions,

- (6) Solid Earth Processes, (7) Solar Influences.

また、これらのデータと情報が有機的にシェアリングする必要があるとも述べている (第2図)。固体地球に関するものは (4) Earth System History 及び (6) Solid Earth Processes である。この優先順位にはかなりの異論があるであろう。例えば、筆者の私見では、(7) Solar Influences が優先順位の最後に来ているのは解せない。ともあれ、これは当所のように地球科学分野からこの問題に取り組んで行こうとするものにとって大変示唆に富む提案書である。

2. 地質調査所における取り組み—現状と将来

地質調査所においては、「地球温暖化問題」が顕在化する二十年以上も前から第四紀海面変動と気候変動に関する研究を行って来ている。また、最近のこの分野の研究題目は第1表に示したように8テーマである (1989年度については、地質調査所企画室, 1989参照)。これらテーマ名からも明らかのように当所に於ける「地球温暖化問題」へのアプローチは「地球自然システムの理解」を目的とするものである。現在の主要テーマは珊瑚礁の炭酸ガス固定能力の評価に関するものと、海洋における炭酸ガス循環に関するものである。いずれも、地球トータルシステムにおける炭酸ガス移動サブシステムの実態解明を研究目的としている。

言うまでもなく、当所の研究の主対象は固体地球 (地圏) である。海洋を対象とした場合であっても、主対象は海底地質であり、海水を扱うにしても底質との相互作用のある領域に留まって来た。上記の現在進めている研究テーマも総てこの範囲を出るものではない。しかしながら、この問題は幅が広く奥行きも深い。炭酸ガスは地圏、水圏、気圏、生物圏 (地球) を切れ目なく駆け巡る

第1表 地質調査所において実施中の地球温暖化関連の研究（平成3年度）

	研究題目	計画年度	担当研究部
1. 工業技術院指定研究	珊瑚礁による二酸化炭素の固定能力の研究	平成1—3	海洋地質部
2. 地球環境技術国際共同研究	大気中へのメタン放出メカニズムに関する研究	平成2—6	地殻化学部
3. 工業技術院特別研究	物質循環にかかわる海洋地質学的研究	平成2—9	海洋地質部
4. 環境庁地球環境研究—地球温暖化	海洋堆積粒子形成過程とそれに伴う炭素の挙動に関する研究	平成2—4	海洋地質部
5. 環境庁地球環境研究—地球温暖化	古環境解析による地球温暖化に伴う沿岸環境の影響評価に関する研究	平成2—4	北海道支所 首席研究官
6. 科学技術庁科学技術振興調整費	海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究	平成2—6	海洋地質部
7. 経常研究	サンゴ年輪による環境変動解明の研究	平成3—5	海洋地質部
8. 経常研究	サンゴ礁地形の形成機構と海面変動・気候変動に関する研究	平成3—7	海洋地質部

ている。従って、各分野が自分の領分に留まっていたは全体を見失う恐れがある。私どもの分野で言えば、地圏に対象を限定してはかえって地圏自体の理解も不十分なものに留まる恐れさえあろう。こうした事情を考慮して、今後当所は、現在進めている地圏を対象としたテーマに加えて、地球システムをもっとマクロに対象とする研究テーマを実施して行きたいと考えている。

例えばシステムダイナミックスによるアプローチはその一例である。また、最近 NASA との共同研究に着手した EOS (Earth Observing System) 計画もその一つである。EOS は、日本・米国・欧州が地球環境問題に対する科学的検討を行なうため共同して打ち上げる人工衛星計画である。さらに、炭酸ガス問題は資源問題と不可分な関係にあることから、資源を研究の対象とする当所としては両者を一体のものとしてとらえる研究を進めて行かねばならない。現在、こうしたテーマの推進を図る準備を進めているところである。

参考文献

Berner, R. T., Lasaga, A. C., and Garrels, R. M, The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100

million years, *Am. J. Science*, Vol. 283, 641-683, 1983.

Committee on Earth Science, *Our changing planet: The FY 1990 research plan*, pp.118, July 1989.

George C. Marsahll Institute, *Scientific perspectives on the greenhouse problem*, pp.37, 1989.

Hansen, J., et al, *Global climate changes as forecast by Goddard Institute for space studies-Three dimensional model*, *J. Geophys. Res.*, Vol. 193, No. D8, 9341-9364, 1988.

Manabe, S. and R. J. Stouffer, *Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere*, *J. Geophys. Res.*, Vol. 85, No. C 10, 5529-5554, 1980.

Michell, J. F. B, *The "Greenhouse" effect and climate change*, *Rev. of Geophys.*, Vol. 27, 115-139, 1989.

(地球温暖化に関する論文のレビュー。重要文献が網羅されている)

地質調査所企画室、地質調査所における地球環境技術関連研究の紹介、地質ニュース、第422号、32-33、1989年10月号。

OGAWA Katsuro (1991): *Research Activities on the Global Warming Problems by Geological Survey of Japan.*

<受付：1991年6月30日>