地球史から見た資源および環境問題*

正 路 徹 也¹ 金 田 博 彰²

Resources and the Environment: their Problems Viewed from the Earth's History

by Testuya SHOJI¹ and Hiroaki KANEDA¹

1. School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

The Earth has evolved since the birth at 4.6 Gy B. P. Especially, the evolution has been remarkable on the surface that is the boundary between the fluid sphere and the solid sphere. Many kinds of mineral and fuel deposits were formed in the process of the evolution, and are used as resources by human being. For most of the resources, reproduction rates in the Earth's history are slower than consuming ones in the human activity. This is the resources problem. All of the materials mined are dumped after using them. This process is a bypass which is added on the material cycle in the Earth. The bypass changes the evolution of the Earth. This is the environmental problem. The increasing carbon dioxide is one of the big environmental problems. In order to solve the problem many ideas are proposed, such as fixing by calcium carbonate, deep-sea disposal of liquid carbon dioxide, fixing by carbon dioxide hydrate, and storage in abandoned natural gas reservoir. Any idea among them has not been evaluated from the viewpoint of the Earth's history. The lack of the evaluation based on this point of view should not guarantee the safety of the disposal processes of carbon dioxide.

KEY WORDS : Resources, Environment, Carbon Dioxide, Earth's History, Evolution

1. 緒 論

地球は、その誕生以来 46 億年間、絶えず変遷し続けている。特に、地圏（あるいは岩石圏）、水圏、気圏が接する地球表層は、これら 3 圏が相互に作用し合って、激しく移り変わってきた。なかでも、水圏と気圏の相互作用は大きいので、両者は一体として議論すべき場合が多い。この場合、両者を併せて流体圏 (Fluid-sphere) と呼ぶとよい。この用語法に従うならば、岩石圏は固体圏 (Solid-sphere) と呼ぶ方が適切であろう。この流体圏と固体圏の境界付近に、われわれ生物は生息し、生物圏を構成している。このため、生物は地球変遷の影響をまともに受けてきた。と同時に、生息しているという理由で、変遷の原因を作り出してもきた。

地球変遷の過程で、多くの鉱床が生成され、それを人類は資源として利用している。鉱床とは、地殻の平均的化学組成（地殻存在度あるいは地化学存在度）に比べて、元素ないし化合物が 10 ないし 10,000 倍濃集した地質体である (Shoji, 1989b)。各種資源を採掘し、それを利用したのち廃棄するという過程は、空間的に変動している化学組成を平均化する行為である。鉱物資源の場合、この平均化が不十分だと再利用される。ただし、再利用、すなわちリサイクルにはエネルギーを必要とする。エネルギー資源は、その性質上、リサイクルできない。この結果、エントロピー

は必ず増加する。

鉱床は地球の変遷の過程で生成され、しかも地球は絶えず変遷しているので、あるゆる資源は再生される。しかし、一般に再生速度は、人類による消費速度に比べて遅い。鉱物資源や化石エネルギー資源の再生速度は、消費速度と比べると零といえる。エネルギー源としての森林資源の再生速度は、はるか昔に、消費速度を下廻ってしまった。歴史時代を通じて、食糧資源の再生速度は、常に消費速度とほぼ等しく保たれてきた。ただし、再生速度を加速するために、鉱物やエネルギー資源の投入量が毎年増加している。現在人類の努力なしに再生速度が消費速度を上廻っている資源は、水のみである。このため、地球全体で見た場合、水資源の量は減少していない。ただし、地下水はこの限りではない。資源の再生速度と消費速度の関係から、基本的に、資源はすべて有限という結論が容易に得られる。これが最も単純な資源問題である。

資源の消費と環境の保全は、地球システムに対する人類の相反する欲望である。1 生物種としてのヒトは、その種の数が増えることを望む。ヒトはこの欲望を、他の生物種にはないエネルギーおよび鉱物資源を利用するという手段で達成してきた。地球システムから見ると、この資源の利用、すなわち採掘から廃棄までの過程は、自然の物質循環系に人工的バイパスを挿入したことを意味する (Shoji, 1989b)。人工的バイパスの流束が、自然の物質循環系の流束に比べて、無視できないほどに大きくなると、人工的物質循環の影響を受けて被害を被るヒトそして生物がでる。従来、その影響範囲は比較的狭い地域に限られ、公害問題として捉えられていた。しかし、現在はその影響が地球規模に拡大し、環境問題として捉えなければならなくなった。

地球環境を変遷させる要因は、その発生源から 3 大別できる。

* 1996 年 4 月 25 日受付 11 月 5 日受理

1. 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻

2. 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻

〔著者連絡先〕 FAX 03-3818-7492 (東大・地球システム)

キーワード: 資源, 環境, 二酸化炭素, 地球史, 変遷

第1の原因は、太陽活動や他天体の衝突など地球外に起源をもつ。例えば、氷河期は太陽活動の変動に起因すると考えられている。中生代末の大量の生物種の絶滅は、惑星の衝突が原因であるという主張がある。第2の原因は、大陸移動や火山活動など、地球内部に起因する現象である。大陸移動の結果、ベーリング海が広がると、北極海と太平洋の間で海水の循環が起これ、地球環境は大きく変わると予想されている。中生代末の生物種の大絶滅は、このような大陸移動による海水循環の変化に伴う気候変動が原因であるという主張もある。より身近な例では、浅間山の天明の噴火が天明の飢饉の原因である。第3の原因は生物活動である。現在の環境問題自身、ヒトという生物種の活動に基づく環境の変化に起因している。

ヒトという種を増やすためには、地球の変遷の過程で生成した資源を消費しなければならない。一方、その結果生じる物質循環系の乱れに起因する被害は食い止めなければならない。地球が絶えず変遷している以上、これらの資源問題および環境問題は、変遷する地球の歴史の中で捉えておく必要がある。以下、この観点に立って、資源問題と環境問題を論じる。なお、ここではヒトという生物の活動と地球環境との関係を論じるので、以下の議論では、主として生物活動に起因する資源の生成および環境の変化を用例とする。

2. 流体圏と資源の生成

2・1 流体圏の形成

地球誕生のとき、地球は固体圏のみであったと考えられている。その後、地球内部からH₂OやCO₂などの揮発性成分が表面に移動し、流体圏が形成された。この初期流体圏の主要成分はH₂O、CO₂、N₂であった。これが、H₂Oを主とする水圏と、CO₂およびN₂を主とする気圏に分かれた。

揮発性成分の地球内部から地表への移動、すなわち脱ガス作用は現在も続いているはずである。ただし、火山地帯等に普遍的に見られる噴気は必ずしも処女物質の放出現場ではない。なぜならば、安定同位体等のデータは、火山ガスに限らずわれわれが観察できる多くの地下起源の流体（例えば、流体包有物中の水など）の多くは、地表と地下とを循環している物質であることを示している（例えば、Taylor, 1977）。すなわち、われわれが観察している流体には、初めて地表に現われた処女物質が当然含まれているはずではあるが、その量は、わずかであるため、現在のところ決めることはできない。

いくつかの証拠から、初期の流体圏には多量の二酸化炭素が存在していたと考えられている。一方、現在の流体圏に含まれる二酸化炭素の量は極めてわずかである。例えば、証拠の1つとして、先カンブリア時代産の試料では多量の二酸化炭素を含む流体包有物がしばしば観察される（例えば、正路・山田, 1994）が、新しい時代の試料では稀にしか観察されないという事実を挙げることができる。この事実、①先カンブリア時代には、流体圏がまだ十分に形成されていず、しかも②一度地表へ出た物質が地下へ戻るのに十分な時間はまだ経過していなかったのに対し、③新しい時代の流体は既に二酸化炭素の少なくなった流体圏からの物質が多量に混入していると考えられることによって説明できる（ただし、このことに関して、系統的研究は未だ行われていない）。

2・2 生命の発生とエネルギー資源

流体圏が気圏と水圏とに分かれた当初、①分子状態の酸素はいずれの圏においても主要成分でなかった（すなわち、遊離酸素は存在しなかった）という事実と、②気圏にCO₂が多量に存在する以上、その分圧の関係でかなりの量の二酸化炭素が水圏に溶解

していたという事実注目しておく必要がある。初期流体圏に存在した二酸化炭素は、現在生物体や化石燃料を含めた固体圏の構成物になっている。このため、現在の流体圏では、二酸化炭素の量が少ない。この二酸化炭素の流体圏から固体圏への移動に生物活動が大きく関与した。

生物体の化学組成を簡略化して、(CH₂O)_nで表すと、光合成は、

と書くことができる。光合成を示す上の反応(1)で、左辺から右辺への移行は吸熱反応である。すなわち、生物体の生成によってエネルギーが蓄えられ、そのときのエネルギー源が太陽光であることはよく知られた事実である。生物が死ぬと、その体は分解され最終的にはCO₂とH₂Oとなる。多くの生物体はこの過程で元の原料物質に戻る。しかし、過去に生成された生物体の一部は完全には分解されずに残存している。これが石炭、石油そして天然ガスの原料物質である^{a)}。したがって、これらの物質に蓄えられているエネルギーは過去の太陽エネルギーである。この故に、石炭・石油・天然ガスは化石燃料と呼ばれる。

2・3 遊離酸素の発生と鉄鉱床

初期大気の主成分は窒素と二酸化炭素である。このため、初期の生物は嫌気性であった。ところが、反応(1)により、二酸化炭素と水を原料に生物体が生成されると、酸素が発生する。この結果、現在の大気と同じように、流体圏に遊離酸素が存在するようになった。この遊離酸素の量は、その後、30億年前から20億年前にかけて徐々に増加した。地球史から見て、この遊離酸素の出現とその増加こそ、地球環境における最大の変化である。なぜならば、これ以後、好気性生物が全盛となり、嫌気性生物は土壌中あるいは深海底など酸素の乏しいところで細々と暮さなければならない境遇に陥った。

遊離酸素の発生は、地球史上に別の大きな記録としても残されている。岩石が風化されると、その構成鉱物が分解して一部の元素が水へ溶出する。通常、造岩鉱物中の鉄は2価である。2価の鉄の溶解度はかなり高いので、風化の結果溶出した鉄は海へ運ばれ、海水中の溶存成分となる。一方、3価の鉄の溶解度は低い。そこで、酸素分圧の高いところでは、水中の溶存酸素量も多いので、例えば、

という反応により、鉄が還元されて酸化鉄（磁鉄鉱あるいは赤鉄鉱）が沈殿する。反応(2)と(3)における鉄イオンと酸素の係数を比較すれば明らかなように、反応(2)は反応(3)より、酸素分圧の低い条件で起きる。先カンブリア時代に生成した世界の鉄鉱層は大きく、アルゴマ（Algoma）型とシュペリオル（Superior）型に分けられる（例えば、島崎, 1993）。前者は、主な鉄鉱物が磁鉄鉱で、35～30億年前の生成である。これに対し、後者は、主な鉄鉱物が赤鉄鉱で、25～20億年前に生成した。この違いを生じた原因の1つとして、この間に地球大気の酸素分圧が上昇したことが考えられる^{b)}。

30億年前から20億年前にかけて大気中の酸素量が増加した証

a) 実際には、生物の発生から石炭の主原料となる羊歯植物の出現まで、30億年以上の時間が経過している。

b) ①通常の水溶液系で、磁鉄鉱が生成するのはかなり難しく、また②アルゴマ型鉄鉱層は火山活動に伴う噴気に関して生成したと考えられており、実際にはこの議論ほど単純ではない。

拠は、ウラン鉱床にも記録されている（例えば、Robertson et al., 1978）。世界のウラン鉱床は、主に 30～22 億年前、20～15 億年前、6 億年前～現在という 3 時期に生成した^{c)}。カナダのエリオットレイク（Elliot Lake）に代表される礫岩型鉱床は、このうち最も古い時期の生成である。この型の鉱床は碎屑性物質からなり、一種の砂鉱床と考えられる。同種の鉱床としては、南アフリカ、ウィットウォーターズランド（Witwatersrand）の含金礫岩がある。この含金礫岩は、世界の金の 30 % を供給する金鉱床であるとともに、副産物としてウランも供給している。20 億年より若いウラン鉱床の鉱石鉱物は水溶液からの沈殿物である。ウランには、可溶性の 6 価のイオンと、難溶性の 4 価のイオンがある。地球大気が嫌気性の時代には、岩石が侵食されたとき、そこに含まれていたウラン鉱物は酸化されることなく、碎屑物となって流失し、低地で礫と一緒に堆積した。これが、礫岩型鉱床の成因である。一方、大気の酸素分圧が上昇すると、岩石中のウランは、侵食過程で酸化されて 6 価のイオンとなり、溶質となる。ウランを含む溶液が、地表あるいは地下で石墨や炭質物などの還元剤に出会うと、ウランは 4 価に還元されて沈殿する。これが、20 億年前より新しい時代のウラン鉱床の成因である。

2・4 二酸化炭素の消費と石灰石鉱床

大気中の二酸化炭素を消費するもう 1 つの過程として、炭酸カルシウムの沈殿がある。大気中の二酸化炭素は、分圧が上がると、水に溶解して炭酸水素イオン、さらに炭酸イオンとなる。この二酸化炭素を溶解した水溶液にカルシウムイオンが存在すると、炭酸カルシウムが生成する。これらの化学反応式は次の通りである。

貝や珊瑚はこの反応(6)によりその殻を作っている。現在われわれが見ている石灰岩の大部分は、この過程で生成した過去の炭酸カルシウム沈殿物である。なお、無機化学的には、主として反応(7)により炭酸カルシウムが生成する。

上記の反応(6)あるいは(7)で炭酸カルシウムが沈殿するためには、水溶液中に炭酸イオンとともにカルシウムイオンが存在していなければならない。このうち、炭酸イオンの起源は既に論じた。では、カルシウムイオンの起源は何か。主な造岩鉱物は、石英、長石、雲母、角閃石、輝石、カンラン石の 6 種である。議論を単純化するために、岩石をこのうちの長石、しかもその 1 種である灰長石で代表させる。このとき岩石の風化は、

という化学反応式で表される。この反応(8)により、水中にカルシウムイオンが存在するようになる。なお、上式の左辺にある水素イオンは、例えば反応(4)や(5)により生成される。つまり、風化の進行に、水のみならず流体圏の二酸化炭素が大きく貢献している。

反応(8)は別のもう 1 つ重要な事実を示している。すなわち、風化産物として、カオリナイトが生成する。この生成したカオリナイトが原地に留まった場合、風化土壌を構成する。河川によっ

て運ばれる途中で沈積すると、湖沼堆積物を構成する。さらに海まで運ばれて堆積すると、泥岩を構成する。泥岩はその固結程度により、頁岩とか粘板岩と呼ばれる。それがいずれの名で呼ばれるにしろ、地球史の過程で生成され、しかも現存しているカオリナイトの大部分は泥岩に含まれている^{d)}。

3. 資源の消費

3・1 資源の大量消費

1750 年以降の世界人口の推移を片対数グラフ上で見ると、1940 年で交わる 2 本の直線で近似できる（正路, 1993a）。この近似直線から求められる人口増加率は、1940 年以前が 0.54 %/年、以降が 1.90 %/年である。ここで 2 直線の交点が 1945 年でないことは注目に値する。すなわち 1940 年から 1945 年の第二次世界大戦での人口抑制より、より大きな人口増加要因が存在し、それが今も継続しているということである。

1940 年以降の急激な人口増加は必ずしも単一の要因にのみよるのではないだろう。しかし、あえてそれを挙げるならば、石油利用の一般化とそれを賄える資源の確保である。石油の利用は前世紀、すなわち 19 世紀後半から一般的になりだした。今世紀に入ると、世界各地で多数の油田が発見され、一般化がさらに進んだ。石油資源の確保と利用の一般化は、より僻地に存在する鉄など他の鉱物資源の開発を促進した。このようにエネルギーおよび鉱物資源が十分に確保されると、当然それは農業の機械化と施肥量の増加をもたらした、これが食糧の増産につながる。1940 年以降人口増加率が大きくなったということは、石油を十分に使える転機が 1940 年に訪れたことを意味する。これによって、多くの高度技術の開発が可能になり、またそれらが一般的に利用されるようになった。すなわち、このときから高度技術社会に入ったといえる。

世界各国の国民 1 人当たり GNP とエネルギー消費量との関係は、経済協力開発機構（OECD : Organization for Economic Cooperation and Development）加盟国を除いて、両対数グラフで、

$$\log E = 1.5 \cdot \log P - 0.8 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\log E = 1.5 \cdot \log P - 1.6 \quad \dots\dots\dots (10)$$

という 2 本の直線に挟まれる領域に入る（正路, 1992）。ここで、 E と P はそれぞれ国民 1 人当たりのエネルギー消費量と GNP である。直線の傾きが 1.5 であるということは、GNP が 1 % 伸びると、エネルギー消費量が 1.5 % 増加するということである。したがって、今後多くの国の GNP が伸びることにより、より多くのエネルギー資源が消費されると予想される。なお、OECD 加盟国の GNP とエネルギー消費量は、グラフ上でともに最も高い部分を占めるが、その位置は式(10)よりエネルギー消費量の少ない側である。

3・2 資源予測

高度技術社会を特徴づける大きな因子に資源の大量消費がある。少なくとも現在の高度技術社会は、この資源の大量消費なくしては成り立たない。そこで、いつまで資源の大量消費を続けることができるのだろうかという疑問が生じる。

マルサスの人口論以来、資源の有限性は絶えず強調されてきた。しかし、現実にはこれらの悲観的予測はすべて裏切られた。その

c) カナダ、アサバスカ盆地には不整合に関連した高品位ウラン鉱床が分布する。この鉱床の鉱石鉱物の年令は、15～12 億年という若い値から、10～2 億年、さらに 1 億年以下という若い値まで、非常にばらついている。つまり、ウラン鉱床の主要生成期に入らない値も存在する。しかし、いずれの値にしろ、生成年代は 20 億年前より新しい。また、主な鉱石鉱物は、熱水に溶存していたウランが変成岩中の石墨により還元されて生成したと考えられている。

d) 泥岩を構成する主な粘土鉱物には、カオリナイト以外に、イライト、スメクタイト、緑泥石がある。なお、泥岩とは粒度が 1/16 mm 以下の粒子を主構成物とする堆積岩である。したがって、粘土鉱物以外に石英の粒子なども含まれる。一方、砂岩は石英を主要構成物とするが、ときに相当量のカオリナイトが含まれる。このような砂岩はカオリン資源として利用されている。

理由は、地球科学的立場および資源論的立場から説明できる。ここでは、そのうち次の3点が特に重要である。1)耐用年数(=確認資源量/年生産量:例えば石油はあと50年)は、資源の枯渇の目安にならない。なぜならば、耐用年数が短くなると、資源不足に対する危惧から、探査への意欲が高まり、新しい鉱床が発見される。一方、耐用年数が長くなると、新鉱床を発見しても開発の望みがないので、探査意欲が減退する。2)この数10年間石油の耐用年数は常に30~50年であり、上の推論を支持している。しかし、各種のデータに基づいて多くの機関が推定している究極埋蔵量(確認埋蔵量+未発見への期待値)は、この30年間、それまでの増加傾向から離れて、ほぼ300 Tt (10^{12} リットル)と一致している(例えば、石和田, 1992)。3)既知鉱床の統計モデルによると、開発する鉱床の品位を下げることににより、より多くの金属量を得ることができる楽観的資源と、開発する鉱床の品位を下げて金属量はさほど増加しない悲観的資源とがある(Shoji, 1989b; Shoji, 1993b)。前者の資源はニッケル、後者の資源は銅、鉛、亜鉛、タングステン、モリブデンである。なお、金と銀は十分に楽観的な資源である。

3・3 もう1つの資源問題

資源の争奪が、国際紛争の原因となっていることはよく知られた事実である。イスラエルとその周辺のアラブ諸国との紛争は、民族紛争の典型と考えられている。しかし、ここでも、ヨルダン川の水利権さらにシナイ半島の石油が、1つの争点である(Westing, 1986)。そこで、人類が十分な資源を確保するならば、国際紛争はなくならないまでも、減らすことができると期待される。

第二次世界大戦後の50年間は、他の時代と比べて、比較的平和な時代であった。その理由として、東西2大陣営による冷戦と核兵器による戦争抑止力が挙げられてきた。社会主義圏の崩壊により冷戦が終結し、それに伴って東ヨーロッパの各地で紛争が勃発した。しかし、これが世界的紛争に拡大することはないだろう。筆者はこの50年間の平和は、十分な資源が確保されていたからだと考えている(Shoji, 1991)。今後も平和な世界を維持するためには、したがって、十分な資源の確保が不可欠である。

十分な資源を確保するためには、探査を十分に行えばよい。ところで、ある1つの探査プロジェクトが成功する確率を p 、実施するプロジェクトの数を n 、成功するプロジェクトの数の期待値(成功件数)を S 、すべてのプロジェクトが失敗する確率(危険率)を f とすると、

$$S = n \cdot p \quad \text{..... (11)}$$

$$f = (1 - p)^n \quad \text{..... (12)}$$

なる関係式が成り立つ(正路, 1989a)。ある企業にとって、成功するプロジェクトは最低1件必要で、しかも1件あればよいとする。この前提から導かれる第1の条件は、平均成功件数が少なくとも1以上でなければならないことである。これは、式(11)で $S = 1$ となる条件である。ところが、この条件で $p = 0.1$ 、 $n = 10$ とすると、式(12)で与えられる危険率は0.35である。このことは1/3の確率で、すべてのプロジェクトが成功しないことになる。これではリスクが大きすぎて困る。そこで、危険率が0.05以下になる程度にプロジェクトの数を増やすと、式(11)で与えられる成功件数は3となる。すなわち、1件成功すればよかったはずなのに、3件も成功してしまう。

リスクを回避するために、プロジェクトの数を増やすと、成功件数が多くなり、十分な量の資源が確保される。これはいかにも喜ばしい結果のように思える。しかし、需要と供給のバランスの関係から、資源の価格が下がる(資源産業に携わる者にとっては、

これが大問題である)。価格の低下の結果、当然大量の資源が消費される。このような状況が継続するならば、結局1940年以降の人口の急上昇が今後も持続する。これに対する結果は、地球環境の破壊としてわれわれの上に降り懸かってくる。これがもう1つの資源問題である。

4. 二酸化炭素問題

長年にわたる大気組成の観測によると、大気中の二酸化炭素の量が増加している(Keeling et al., 1976)。その最大の原因は、化石燃料の消費によって発生する二酸化炭素であるという。この過程は反応(1)の逆反応である。二酸化炭素は温室効果ガスであるため、二酸化炭素の増加は地球表面の気温を上昇させる可能性がある。そこで、大気中に二酸化炭素を放出させないためのいくつかの方法が提案されている。これらを、地球史の観点から検討してみる。

4・1 炭酸カルシウムによる固定

二酸化炭素問題の解決案の1つに炭酸カルシウムとしての固定がある。これは反応(7)の利用である。ところで、反応(7)を起こさせるためには、カルシウムイオンが必要である。

工業におけるカルシウムの原料は石灰岩である。石灰岩の構成鉱物である方解石を焼くと、生石灰が得られる。これを水に入れると、カルシウムイオンが得られる。この過程の化学反応式は、

である。この方法でカルシウムを得ようとすると、二酸化炭素が発生する。したがって、これでは、二酸化炭素を固定することはできない。

二酸化炭素の工業的固定が無理なので、サンゴに固定への期待が集まっている。反応(6)のところで説明したように、サンゴは海水に溶存しているカルシウムイオンを使って、炭酸カルシウムを合成する。このため、サンゴが反応(6)により二酸化炭素を固定するためには、なんらかの方法でカルシウムイオンが海水へ供給されなければならない。地球史において、海水中のカルシウムの本源的供給元は岩石であり、それ以外には存在しない。岩石の風化によって、カルシウムイオンが生成する。このとき、カオリナイトなどの粘土鉱物が副産物として生成する。このことは、自然界における石灰岩の生成速度は、サンゴの活動度ではなく、カオリナイトの生成、すなわち①岩石の風化あるいは②泥岩の堆積で律せられている可能性がある^{e)}。現在の「サンゴによる二酸化炭素の固定」という考えには、この観点が欠落している。もう一度、この観点から、地球史における岩石の風化、石灰岩の生成、泥岩の堆積という3つの過程の関係を調べる必要があろう。

4・2 液体二酸化炭素の深海隔離

二酸化炭素の臨界温度は31℃、臨界圧力は7.4 MPa (73 atm)である。水深4,000 mの海底の温度は約4℃、圧力は40 MPa以上である。そこで二酸化炭素を深海底へ入れると、液体状態が保たれるはずである。この物理化学的性質を利用して二酸化炭素を隔離しようという考えがある。

含CO₂包有物と呼ばれる流体包有物がある。最も一般的な流体包有物は、気・液2相からなる。この包有物を顕微鏡下で観察すると、円が1つ見える。この円の中が水蒸気を主とする気相、周囲が水を主とする液相である。一方、含CO₂包有物では、2

e) 遠洋性堆積物では、構成物の50%以上がイライトである。しかし、その生成年代が堆積物の形成年代よりはるかに古いので、これらのイライトは陸源の碎屑物と考えられている(例えば、小林, 1997)。したがって、岩石からのカルシウムイオンの溶出に、イライトは直接には関与しない。

重の円（ほぼ同心円）が観察される。この場合、内円の中が気体の CO_2 、内円と外円の間に液体 CO_2 、外が水溶液である。

あまり多くはないが、いくつかの地域で二酸化炭素の噴気が知られている。これら含 CO_2 包有物や二酸化炭素噴気の存在は、地下に二酸化炭素に富む流体が存在することを示唆している。ただし、それが液体二酸化炭素として存在しているという保証はない。

1986年8月、アフリカ、カメルーンのニオス湖付近で1,700人もの住民が死亡する事故が起きた。死亡の原因はニオス湖から噴出した二酸化炭素による窒息とされている。ニオス湖では、湖底から二酸化炭素が常時供給されており、これが湖水に濃集、過飽和になった時点で噴出したと考えられる（例えば、日下部・大隅, 1987; 日下部, 1991）。なお、現在の湖水は二酸化炭素に飽和していない。湖水が二酸化炭素に過飽和であったか、あるいは未飽和であるかにかかわらず、ここにも液体二酸化炭素は存在していない。

現在の自然界において、液体二酸化炭素が確実に存在する場所は、含 CO_2 包有物の中のみである。地球史上でどの時代かに液体二酸化炭素が存在していたかも知れない。しかし、残念ながらその化石はない。これらの証拠から得られる最も蓋然性のある推論は、地球史を通じて、液体二酸化炭素は極めて限られた条件の箇所에서만存在し得ないということである。すなわち、地球科学的証拠は「深海底への液体二酸化炭素の閉じ込め」の安全性を保証していない。

二酸化炭素の深海隔離にはもう1つ、炭酸カルシウム補償深度という問題がある。前述の式(6)あるいは(7)は、溶液から炭酸カルシウムが沈殿する反応を示している。一方、その逆反応、

で、炭酸カルシウムが溶解する。現在の海洋環境では、浅海で反応(6)あるいは(7)が、深海で反応(15)が起きている。このため、石灰質殻をもつ底棲有孔虫は、比較的浅い海底でしか生息できない。浮遊性有孔虫は生きているとき、浅海に漂ってその殻をつくる。その個体が死んで、遺骸が海水中を沈降するとき、ある深度で深になると、反応(15)により、その死骸は溶解・消滅する。以上の理由により、ある深度で深には、石灰質殻をもつ生物の遺骸が存在しない。この深度を、炭酸塩補償深度という。通常、その深さは3,000～5,000 mである（例えば、Berger and Winterer, 1974）。このことは、深海に投棄された液体二酸化炭素が徐々に海水中に拡散して、炭酸水素イオンや炭酸イオンが生成した場合、海水中にカルシウムイオンが存在しても、炭酸塩は形成されないということである。

炭酸塩補償深度以下では、炭酸カルシウムは沈殿しない。このことは、このような深海では、炭酸イオンや炭酸水素イオンを現在濃度以上に溶解できることを意味する。すなわち、海洋は、表層付近で炭酸カルシウムの飽和濃度に達しているが、深海では未飽和である。そこで、大気中に放出される二酸化炭素を深海に投入すれば、仮にそれが海洋表層に移動したとしても、それに必要な時間だけ、大気への放出を遅らせることができる。ただ、この過程は事態の発生を遅らせるだけで、二酸化炭素増加の本質的解決にはなっていない。仮に時間稼ぎにこの滞留時間を使うとしても、心配なことが1つある。前述のニオス湖では、現在の二酸化炭素濃度が飽和濃度よりかなり低いにもかかわらず、二酸化炭素の突出が起きた。したがって、このような状況で、なぜガスの突出が起きたのかを説明したあとでなければ、海洋による二酸化炭素の滞留効果に期待することはできない。

4・3 二酸化炭素水和物による固定

ある種の気体分子と水が共存すると、水分子でできる籠状の構造の中に、気体分子が取り込まれた結晶ができる。これを、結晶構造の立場からは包摂化合物、化学組成の立場からは気体水和物（ガスハイドレート：gas hydrate）という。二酸化炭素をこの包摂化合物の形にして、固定しようという考えがある。

気体水和物の1つであるメタン水和物は、近年世界各地で発見され、次世代の天然ガス資源として注目されている（例えば、松本, 1992; 松本ほか, 1993）。気体のメタンと水からメタン水和物が生成することは、19世紀初頭に分かっていた。1930年代にシベリアの化学工業プラントでパイプラインの閉塞事故が起き、その原因を調べた結果、搬送ガス中に含まれる少量の水と気体が反応してメタン水和物が生成していたことが判明した。1950年頃になると、相図に基づいて、北極圏の永久凍土層の下にメタン水和物が安定に存在し得る温度・圧力条件があることも分かった。ただし、実際に天然のメタン水和物が確認されたのは、1964年に発見されたシベリアのメソハヤ（Messoiakh）ガス田である。その後、カナダやアラスカの凍土の下からもメタン水和物が発見された。

海洋底でもメタン水和物は発見されている。国際深海掘削計画（DSDP/IPOD：Deep Sea Drilling Project/International Phase of Ocean Drilling）の一環として海底堆積物の音響探査を進める過程で、海底面にはほぼ平行で、層理面と斜交する音響反射面、BSR（Bottom Simulating Reflector：海底疑似反射面）の存在が明らかとなった。1970年、フロリダ沖で行われたDSDPの掘削でこのBSRを貫いたところ、多量のメタンガスを含む堆積物が採取され、海底下のBSRにメタン水和物が存在する可能性が示唆された。その後10年ほどして、圧力岩芯容器が開発された結果、黒海とカスピ海の海底下からメタン水和物が採取された。その後、コスタリカやグアテマラ沖の中米海溝、前述のフロリダ沖やメキシコ湾、北海道西方の奥尻海嶺などからもメタン水和物試料が採取・回収されている。

気体分子が二酸化炭素の包摂化合物も存在する。二酸化炭素を多量に含む流体包有物を冷却すると、氷のような透明の固体結晶が生成する。この結晶は、その生成温度から、二酸化炭素水和物であることが分かる（武内, 1971）。

①凍土の下や海底下にメタン水和物が存在すること、②含 CO_2 包有物を冷却すると二酸化炭素水和物が生成することから、二酸化炭素を水和物として地下に固定する方法が考えられる。ところで、鉱床程度の規模の地質体として現在知られている天然の気体水和物は、すべてメタンと水の化合物である。地球大気にも海水中にも、絶対量としてはメタンよりはるかに多量に二酸化炭素が存在する。しかし、未だに地質体を構成する二酸化炭素水和物の例は報告されていない。この事実は何を意味するのか。二酸化炭素は、水に気体として溶存しているのではなく、炭酸水素イオンあるいは炭酸イオンとして溶解しているために、自然界の一般的条件では水和物が形成されないだけなのだろうか。二酸化炭素を水和物として地下に隔離する前に、二酸化炭素水和物を主成分とする地質体が報告されていない理由を解明する必要がある。

4・4 二酸化炭素の地下貯蔵

人類が必要とするエネルギー資源のかかなりの部分が、現在天然ガス鉱床から供給されている。天然ガス鉱床は、その産状および性質から、①石油に伴う型、②石炭に伴う型、③水溶性に大別できる。現在利用されているほとんどの天然ガスは、このうち石油に伴う型である。典型的な石油鉱床では、貯留槽中で下部に塩水、その上に液体の石油、そして頂部に気体の天然ガスが存在する。ただし、液体の石油が存在せず、天然ガスのみの鉱床もある。石

炭に伴う天然ガスは、石炭層の割れ目等にかんりの圧力をもって、閉じ込められている。石炭の採掘が進むと、このガスが突出して、事故原因となることがある。この事故を防ぐために、炭坑では、切羽のかなり先までガス抜き用の孔を掘削する。水溶性天然ガス鉱床は、主としてメタンを溶解した地層水ないし化石水である（地下水ではない）。千葉県茂原地域の水溶性天然ガス鉱床は、多量のヨウ素を溶解している。このため、汲み上げた水から天然ガスとともにヨウ素を回収している。

いずれの型の天然ガス鉱床にしろ、堆積岩中に気体が閉じこめられている。このことは、気体を地層中に封じ込められる可能性を示唆している（例えば、小出，1993）。そこで、回収の終了した天然ガス鉱床に二酸化炭素を挿入する方法が検討されている。これが、二酸化炭素の地層内貯蔵である。気体が封じ込められていた地層に、気体の二酸化炭素を入れるのであるから、漏洩する可能性は低いと推定される。しかし、1つ気になる点がある。世界中に多数の天然ガス鉱床が存在しながら、二酸化炭素ガスを胚胎する地層は皆無ではないものの（例えば、福田，1973；小出ほか，1993），極めて稀である。その1つの理由として、二酸化炭素を多量に含む地層が存在しても、鉱床として稼行できないので報告されていないということが考えられる。しかし、何らかの地質学的理由で、二酸化炭素は地層中に閉じ込められにくいのかもしれない。二酸化炭素水和物の場合と同様、二酸化炭素を地層中へ圧入する前に、二酸化炭素鉱床の探査を進めて、その報告例の少ない理由を解明する必要がある。

5. 結 論

地球は46億年間絶えず変遷してきた。特に、変遷は固体圏と流体圏の境界である表層部で激しい。この変遷の過程で、各種の鉱床が生成し、それをわれわれ人類は資源として利用している。ほとんどの資源は、地球による再生速度に比べて、人間による消費速度の方が速い。これが資源問題である。採掘された鉱床の構成物は、利用されたのち廃棄される。これは、自然における物質の循環過程にバイパスを挿入する行為である。このバイパスのために、地球環境の変遷の様相が変化する。これが環境問題である。環境問題の大きな課題として、二酸化炭素の処理がある。現在提案されている処理方法、例えば、炭酸カルシウムによる固定、液体二酸化炭素の深海隔離、二酸化炭素水和物による固定、採掘が終了した天然ガス鉱床への圧入のいずれをとっても、地球史的観点からの評価が欠落している。この点からの評価なくして、安全性は決して保証されないであろう。

謝辞 本研究は、平成4～6年度文部省科学研究費補助金を受けて実施した重点領域研究(1)「高度技術社会のパスpekティブ」(研究代表者：竹内啓)の計画研究2、「地球環境のゆらぎと

サイクル」(平成4年度；研究代表者：綿柁邦彦；課題番号：04210203)，「地球環境と資源・生物の変動」(平成5年度；研究代表者：濱田隆士；課題番号：05201203)，「地球環境の揺らぎおよび変遷とその高度技術社会への係わり」(平成6年度；研究代表者：正路徹也；課題番号：03201101)の成果の一部である。これらの研究を通して、多くの方々から有益な意見をいただいた。特に、立正大学の綿柁邦彦教授、放送大学の濱田隆士教授、東京大学の高野穆一郎教授からは、草稿を読んだ上で、貴重な意見をいただいた。記して感謝の意を表する。

引 用 文 献

- Berger, W. H. and Winterer, E. L. (1974): Plate stratigraphy and the fluctuating carbonate line. Spec. Publ. Intern. Assoc. Sediment. (eds. Hsu, K. J. and Jenkyns, H. C.), (1), p. 11-48
- 福田 理 (1973): 日本地方地質誌「関東地方」, 朝倉書店 (東京), p. 449-460
- 石和田靖章 (1992): 石油資源の将来. 地質ニュース, (449), p. 26-41
- Keeling, C. D., Bacastow, R. B., Bainbridge, A. E., Ekdahl, C. A., Jr., Guenther, P. R. and Waterman, L. S. (1976): Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Tellus, Vol. 28, p. 538-551
- 小出 仁・田崎義行・野口嘉一・飯島正樹・伊藤和逸・新藤勇治 (1993): CO₂の地下貯留について, エネルギー・資源学会, 第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, p. 377-382
- 小出 仁 (1993): CO₂の地下貯留. 概要と可能性, 地質ニュース, (462), p. 6-12
- 小林和男 (1997): 海洋底地球科学. 東京大学出版会, 東京, 312p.
- 日下部 実・大隅多加志 (1987): カメルーン・ニオス湖ガスマ災に果たした湖の役割, 地球化学, Vol. 21, p. 39-47
- 日下部 実 (1991): カメルーン・ニオス湖におけるCO₂の蓄積, 科学, 61(5), p. 307-310
- 松本 良 (1992): 天然ガス資源としてのメタンハイドレート, 資源と素材, Vol. 108, p. 511-520
- 松本 良・奥田義久・青木 豊 (1993): メタンハイドレートー21世紀の巨大天然ガス資源. 日経サイエンス社, 東京, 253p.
- Robertson, D. S., Tilsley, J. E. and Hogg, G. M. (1978): The time-bound character of uranium deposits. Econ. Geol., Vol. 73, p. 1409-1419
- 正路徹也 (1989a): 探査リスクの回避に起因する供給過剰, 資源・素材学会春季大会講演要旨集, p. 393
- Shoji, T. (1989b): Resources and the environment: which does limit economic growth? MMIJ/IMM Joint Symposium, Kyoto, Oct. 2-4, 1989, p. 109-114
- Shoji, T. (1991): Preface. 情報地質, Vol. 2, p. 95
- 正路徹也 (1992): 1991年度の資源探査, 資源地質, Vol. 42, p. 131-144
- 正路徹也 (1993a): 基本的な資源の節約と消費, 「有限の地球と人間活動」(石谷久編), 地球環境セミナー7, オーム社 (東京), p. 35-75
- Shoji, T. (1993b): Optimistic and pessimistic resource estimates, 1st Intern. Conf. Process. Mat. Properties (eds. Henein, H. and Oki, T.), TMS, p. 463-466
- 正路徹也・山田佳範 (1994): 先カンブリア時代の大气の源ーカナダ, アサバスカ砂岩の石英中の流体包有物ー, 東大資料館ニュース, (30), p. 4-5
- 島崎英彦 (1993): 先カンブリア縞状鉄鉱層, 地学雑誌, Vol. 102, p. 685-697
- 武内壽久 (1971): 冷却顕微鏡によるCO₂流体包有物の研究, 鉱山地質, Vol. 21, p. 286-300
- Taylor, H. P., Jr. (1977): Water/rock interaction and the origin of H₂O in granitic batholith. J. Geol. Soc. London, Vol. 133, p. 509-558