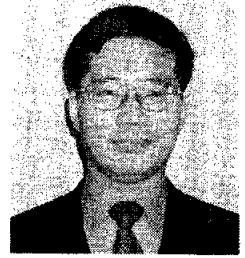


角皆 静男

地球環境を守る海



つのがい しずお

1938年静岡市に生る。1966年東京教育大学理学博士（化学専攻）。直ちに北海道大学の講師、助教授を経て1981年より教授。大気、海洋、海底を通しての物質循環について研究している。

一、大気と海洋

海洋と大気を比べてみよう。全海水の質量（目方）は大気の二七〇倍である。熱を貯える能力にいたっては、海の方が一〇〇倍もある。地球が人間の住める穏やかな気候になっているのはそのためである。つまり、海流や蒸発した水蒸気が低緯度から高緯度に移動するからであり、海がなければ、低緯度地帯はもっと暑く、高緯度地帯はもっと寒くなる。また、天気の長期予報があまりよくあたらないのも、この海水の動きのことが勘定に入っていないからである。つまり、数日以内の天気予報なら大気のことだけ考えてもできるが、時間が長くなればなるほど海洋の効果が大きくなるということである。

二、海洋の炭酸ガス

さて、現在、地球が温暖化する最大の原因とみられている炭酸ガスも海の方に大気の方の五二倍ほどの量が存在する。それゆえ、大気中の炭酸ガスが増増するほどの石炭石油（化石燃料という）を燃して、それが全部海水に溶けたとしても、海の方はたいして変わらないことになる。逆に、海水に溶けている炭酸ガスの二％ほどが大気に出てくれば、大気中の炭酸ガス濃度は二倍になってしまう。すなわち、化石燃料を燃やしてもその炭酸ガスを海が吸収してくれば問題はなし、化石燃料を燃さなくても海から炭酸ガスが出てきて大気中の炭酸ガスが増えるということもありうる。

なお、炭酸ガスが海水に比較的よく溶けるのは、炭酸が炭酸イオンや重炭酸イオンの形になる（解離するという）からである。そして、炭酸イオンや重炭酸イオンの割合は海水のpHで決まる。つまり、海水を酸性にすれば炭酸ガスが出てくるし、アルカ

リ性にすれば溶け込みやすくなる。

三、大気中に放出された炭酸ガス

現在、人間は一年間に炭素にして五〇〜六〇億トンの化石燃料を消費している。このうち約三〇億トンが大気に残って、図一に示すように大気中炭酸ガス濃度を一年間に一・五ppmずつ増加させ、遂に一九八九年には三五〇ppm（一ppmというのは容積比で百万分の一を占めるという意味）を越えてしまった。この増加量は年率にすると〇・四％になる。産業革命が始まった頃の大気中の炭酸ガス濃度

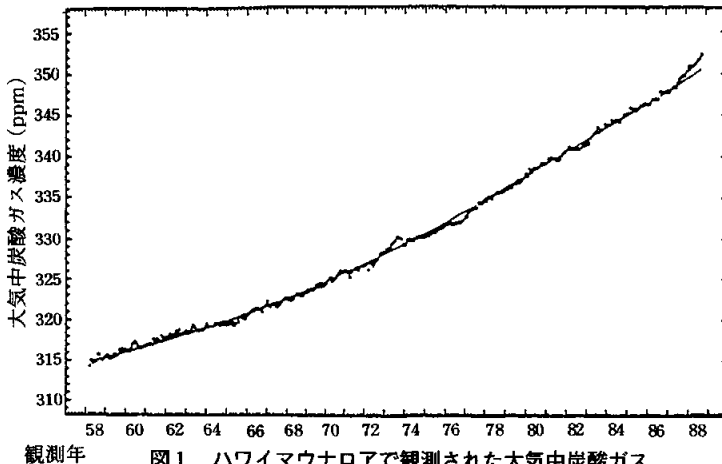


図1 ハワイマウナロアで観測された大気中炭酸ガス濃度の経年変化（1ヶ月間の平均値で、季節変動する部分は除いてある）。

は二八〇ppm程度であったといわれているから、すでにその当時の二〇%以上の増加率になっている。最近、地球の温暖化はすでに始まっており、その原因はこの炭酸ガスともいわれているが、その確たる証拠はない。というのも、海の熱の吸収がどのように変化しているかがはっきりしていないからである。

一方、化石燃料の消費によって大気中に放出された炭素のうち大気圏から消えた二〇〜三〇億トン（一年間に）はどこへ行ったのであろうか。陸の植物が吸収しているという説もあるが、陸は森林破壊によって、むしろ大気中に炭酸ガスを放出しているともいわれている。もし後者なら、その分も含めて海洋が吸収していなければならぬことになる。しかし、今のところ海のどこにどのようにしてどれだけ炭酸ガスが吸収されているのか、科学者には突きとめられていない。一応の試算では、海洋への溶入量は一〇億トン程度にしかない。これに対する私の考えは後述する。

四、温室効果

大気中の炭酸ガスによる温室効果で地球は温暖化するといわれるが、この温室効果という語は必ずしも確かな表現ではない。炭酸ガスなどの透明な気体は太陽からの光（短波）はよく通すが、地表から発する赤外線（長波）は吸収する（酸素や窒素、アルゴンなど一〜三原子で分子となっている気体は除く）。物体はすべてその温度に応じた光を放っており、温度が上がるほど光の波長が短くなる。地表の温度で発する光の波長は赤外線領域になる。この赤外線の吸収は、足下の空気から始まっており、足下の空気はまたその温度に応じた赤外線を発する。すなわち、太陽から地表に届いた熱は、キャッチボールの球の

ように行ったり、来たりしながら、最後はまた宇宙に戻っていく。その結果、地表が受けとる直接太陽からきた熱（全地球を平均すると1㎡あたり一六九Wになる）のほぼ三倍が、長波や水蒸気や空気によって地表から上空へ向って放出されている。もちろん、地球圏外に放出される熱量は太陽からきた熱量に等しい。

実は、この温室効果があるからこそ地表の平均気温一五℃が保てるわけで、もし温室効果がなければ、地球はマイナス二五℃の冷たい星になってしまう。さらに白くて太陽の光をよく反射する金星では、温室効果がなければ、マイナス八五℃である。それが現在、金星の表面は四三〇℃になってしまっている。これは金星を覆っている高圧の炭酸ガスのせいである。つまり、温室効果は少なすぎても多すぎても困るわけであり、金星は熱いから大気中に炭酸ガスが増え、炭酸ガスが増えたからまた熱くなって破局的状態を迎えた星ということになる。地球にも大量の石灰岩があるから、この炭酸が気化すれば、当然金星のように熱くなる。

五、ミランコビッチサイクル

先の温室効果は、炭酸ガスのほか、メタン、オゾン、亜酸化窒素などいろいろな気体の赤外線吸収によって起こるが、現在の地球大気での効果が最も大きなものは、炭酸ガスではなくて、水蒸気である。水蒸気濃度は温度に大きく依存するので、気温が上がって水蒸気濃度が増せば、温室効果も大きくなるということである。

この事実を頭において過去の地球の気候をみてみよう。過去百万年くらいの地球では、冷たい氷河期と暖かい間氷期を繰り返してきた。そして、氷河

期から次の氷河期までおよそ一〇万年であった。この数字は、地球科学者が海底堆積物中の微化石に残された酸素の安定同位体比の記録を読み取って得たものであるが、その詳細は省略する。また、科学者達は炭素の安定同位体比から当時の大気中の炭酸ガス濃度も読み取った。そして、暖かい間氷期に大気中炭酸ガス濃度は二八〇ppm程度、冷たい氷河期には二〇〇ppm程度であったことがわかった。すなわち、地球が暖かい時には炭酸ガス濃度が高く、寒い時には低かったのである。

さて、人類がまだ炭酸ガスを放出していなかった時代に、誰が大気中の炭酸ガスを増やしたり、減らしたり、地球を暑くしたり、寒くしたりしていたのであろうか。実は、先の一〇万年の寒暖の周期の他に、記録をよく解析すると、四万二千年と二万三千年の周期も重なっていることがわかった。要するに、地球の寒暖の変化は、周期の異なる三つの波を合成することによって描けるのである。

一方、一九四一年にユーゴスラビアのミランコビッチは、地表が受け取る太陽からの熱を三つの天文学的要因の周期的変化を組み合せることによって計算した。その一は、地球の公転軌道の離心率の変化で、これは周期が約一〇万年である。その二は、地球の自転軸（地軸）の傾きの変化で、この周期は約四万年である。その三は、太陽および月の引力による地軸の歳差運動の変化で、その周期は二万余年である。すなわち、過去の地球では、地球が受け取る太陽の熱が周期的に変化し、その周期と地球の寒暖が一致していた。つまり、太陽からの熱量の変化がその原因だったのである。しかし、この変化は、最大でも四%程度であり、地球の寒暖の差を説明できるほど大きなものではない。いいかえれば、太陽からの熱

の変化は引き金に過ぎないことである。

それでは、地球に寒暖の差をもたらした真の要因は何であろうか。太陽からの熱の変化も炭酸ガスによる赤外線吸収も、それら単独では地球の寒暖の変化を生じさせることはできなくても、お互に関連しあっている。要するに、地球という複雑な系では、ある変化が起こると、それが次々と他の要因を変化させ、そしてそれがまた元に戻ってくるというメカニズムが働いている。我々はこれをフィードバックとよんでいる。このフィードバックがどのようなもので、どの程度（プラスもマイナスもある）あるかわからなければ、地球の変化の答は出せないのである。しかも、問題とする時間のスケールでフィードバックの程度が異なってくる。それで例えば、現在の三五〇ppmという大気中炭酸ガス濃度の結果が地球のフィードバック回路を経て地球を破局的状態に導くことはないとは断言できないのである。そのようなシナリオがもしあるとすれば、炭酸ガスによる温室効果で気温ばかりでなく水温が上がる。水温が上がると水蒸気ばかりでなく、炭酸ガスも海から出てきて、さらに温室効果を増大させる。また、水温が上がると、深層水が形成され難くなるので、湧昇する深層水も減る。深層水は栄養分に富んでいるので、これが表面に現れなくなると、海の生物が減る。その結果、海は炭酸ガスを吸収しなくなる。こんな具合である。この辺の状況をもう少しよく理解できるように海の話が続けよう。

六、深層水大循環

海水と真水の物理的性質で最も大きな違いは（私だけがそう思っているだけかもしれないが）、真水は四で最も重いのに、海水は温度が下がれば下が

るほど重いということである。その結果、北太平洋に比べて面積の狭い北大西洋では、陸の乾いた空気でより多く蒸発してより高塩分となり、冬季は陸の冷たい風でより冷され、海水ができた時に、残された高塩分低温の水が一挙に海底にまで潜り込んでいく。こうして、北大西洋で深層水は誕生し、南下し、赤道を越え、南極海に入る。冬のウェッデル海もよく冷えるので、新たに潜り込んでくる水を加えて深層水は南極大陸の周りの海を西から東に回り出す。この南極周極流が太平洋のニュージランドの南に来た時、一部分が分かれて北上を開始する。そしてトンガ海溝付近を通り、赤道を越え、水深五千メートルもの海底近くをまっすぐ日本に向かって流れてくる。その後、この深層水はアメリカ大陸の方に向って東に流れるが、大きく広がってしまい、また大小の渦のような流れになってしまい、一方的な流れとはいえなくなる。この間の様子は図二に示した海水の年齢からわかる。

海水の年齢というのは、海の表面にあった水が深海に潜り込んでからの経過時間である。これは考古学的試料の年代を決めるのと同様、放射性の炭素（宇宙線の作用で大気中でできる）を測定して決定できる。ただ、海水は動いたり、混合したりするので、これは混ざった水の年齢の平均値ということになる。図二を見ると、確かに北大西洋の北部で新しい水が海底にまで潜り込んでいくことがわかる。この水が南極海に達するとほぼ千年になっている。そして南太平洋の南端から太平洋の西側を北上した水が赤道を越える頃には千五百年になっている。この水は徐々

に浮上しながら上の水と混合するので、世界で最古の水は北太平洋の水深二千メートルほどのところにあって二千年、つまりキリストが生まれた頃に潜り込んだ水が存在するわけである。しかし、この流れは川の水の流れのような一方向的なものではなく、流れながら周辺の水を加え、また吐き出していることに注意しなければならない。

この深層水が流れている間に、上から降ってきた

粒子の溶解や分解によって、深層水は少しずつ変質していく。つまり、潜り込んだ時に含んでいた溶存酸素が使われ、硝酸やリン酸など植物の肥料になる栄養塩類が増えている。要するに、深層水の流れは、スウェーデンなど北欧の沖合が川上で、日本や北米の沖合の北太平洋が川下ということになる。この流れに二千年を要するということは、海の問題を

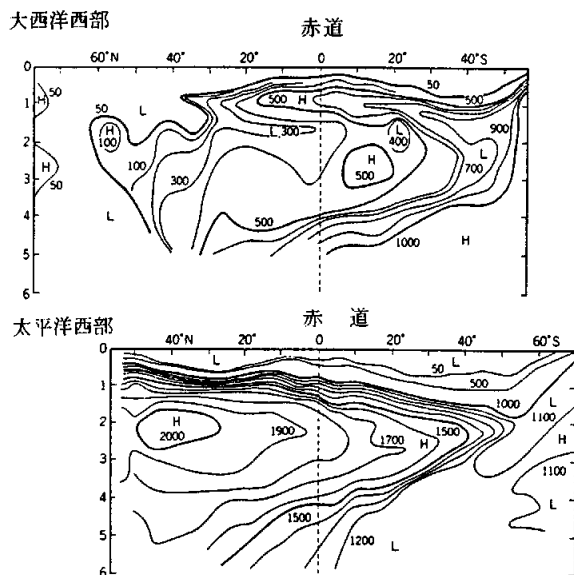


図2 大西洋および太平洋における海水の年齢の南北断面図（単位は年）。

考える時には、少なくとも二千年の時間スケールが必要ということになる。川下にあたる日本の沖合に北欧で流したものの影響が現れるのはずっと先のことといふこともできるし、いったん海が変ってしまふと、千年以上経たないと元に戻らないともいえる。

七、海域の富栄養化

川下にあたる北太平洋や東部の太平洋の深層水に二千年の効果が積み重なった時に問題になりそうなることを一つあげてみよう。

東京湾や瀬戸内海に赤潮が発生したのは、陸から大量にリンや窒素化合物である栄養塩を海に放出したからである。現在は、その放出量を減らしたので、目に見える大きな被害はなくなった。しかし、陸から栄養塩類の放出は続いているし、これらは究極的には外洋に出ていく。そして、この効果は外洋の深層水に蓄積されることになる。

実は、現在でも東部太平洋の水深数百メートルのところは、溶存酸素がほとんどなくなった水が存在する。溶存酸素は魚などの動物にとって不可欠であり、これがなくなると硫化水素が発生すると周囲の状況は一変する。図三に示したこの負酸素水の出現は、年齢が古く、溶存酸素を大きく減らした深層水が湧昇し、上から比較的多量の有機物粒子が降ってきたことによる。計算してみると、現在、人類が掘り出しているリン鉱石のリンが外洋水に蓄積したとすると、この負酸素水の海域は、一〇〇年、二〇〇年と経つうちにどんどん拡大していく可能性が出てくる。

この負酸素水（または無酸素水）が存在する海域と本来のエルニーニョ現象が発生する海域とが一致する。本来のエルニーニョというのは、クリスマスアークの頃、南米のペルーの海岸などで、大量の死んだア



図3 東部太平洋における貧酸素海域。図中の斜線部は $\sigma_t = 26.81$ (水深約400 m) において、酸素濃度が 0.25 ml/l 以下の海域 (Reid, 1965 による)

ンチョビー（いわしの仲間）が打ち寄せられ、海鳥がエサがなくなつて死ぬなどの現象である。これは、貿易風が弱まつて、暖かい表面水が厚くなり、下から深層水が湧昇して来なくなることから起こるとされている。魚が死ぬのはエサがなくなるせいといわれているが、私にはこの無酸素海水が発達し、ここに魚が飛び込んで死ぬような気がしてならない。エルニーニョに似たアグア（青潮）というのと同じ）という硫化水素が発生する現象が同時にこの海岸で起っており、エルニーニョとの直接的関係ははっきりしていないが、この海域が他に比べて無酸素状態になりやすいのは、溶存酸素量の少ない深層水があるからという点には間違いはない。今後、海域の富栄養化が進めば、この東部太平洋のような海域が徐々に広がったり、アグアへのような現象がより頻繁に起こることは確かであろう。

八、生態系の構造変化

富栄養化によって生物量が増えることは、無酸素海水の増大など単に量的な問題を生じさせるだけではない。栄養塩のうち、人類活動によってリン酸や硝酸は増えるが、ケイ酸は増えない。従つて、いくらか富栄養化されても、ケイ酸塩の殻をつくるケイ藻類は増えない。鞭毛藻類とかうず鞭毛藻類というケイ酸を必要としない植物プランクトンが増える。現在、有毒赤潮として問題になっているのは、すべて鞭毛藻やうず鞭毛藻である。従つて、同時にケイ酸も増やしてやれば案外有毒赤潮は発生せずに魚のエサが増えるかもしれない。

さらに、鞭毛藻やうず鞭毛藻が増えると、これらを餌にしている動物が増えることになる。この状況を示したのが図四である。つまり、食物網の高次の段階にまで影響を及ぼすことになる。一般に鞭毛藻などは小さいので、これらは小型の動物プランクトンに食べられ、これを食べるくらげ類などが増える。これが生態系の構造変化である。この時、石灰の殻を持つプランクトン（有孔虫やココリスといわれるもの）も増えるようである。ケイ酸の少ない東部太平洋の方が、西部北太平洋より石灰質（ CaCO_3 ）の割合が大きい。現在、磯焼けという現象が問題にされているが、これは石灰藻といわれる石灰を沈着する藻類が増えて、コンブなどを駆逐してしまふ現象である。これもまた、人類活動によってリンや窒素の化合物が増えたということかもしれない。

石灰の殻を持つ生物が増えることは、炭酸ガス問題にとっても心配の種となる。というのは、植物が有機体をつくと、海水の炭酸が減るので、大気中の炭酸ガスは海に溶け込みやすくなる。しかし、有機物は比較的短時間内に分解してまた元の炭酸ガス

と水に戻ってしまうので、深海や堆積物に有機物を閉じ込めない限り、この効果は消えてしまう。一方、石灰の殻の生成には、海水の炭酸イオンを使うので、これを補う時に、炭酸がつくられ、その一部が海から大気に出てくる。しかも、いったん生成した石灰は表層海中では溶けない。従って、海の富栄養化は、海に石灰をどんどん貯め込ませ、大気の五二倍も存在する海の炭酸塩の一部を大気に放り出す危険をはらんでいるのである。

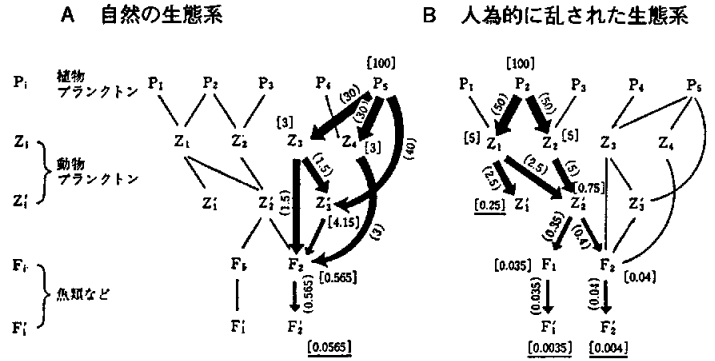


図4 食物連鎖網 [高橋(1977)による]。図中の〔〕内の数字は生産量、()内は次の栄養段階に転移される物質質量であり、下線を引いたものは最終到達点である

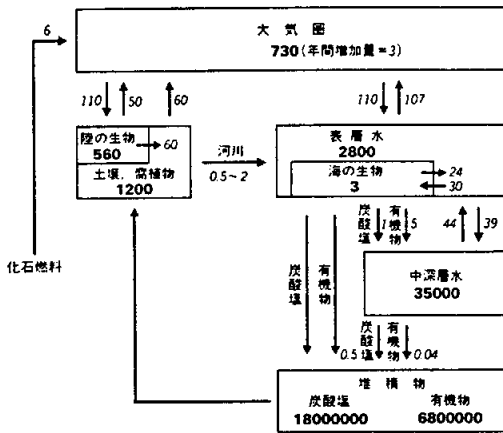


図5 炭素の地球化学的循環。I GBP関係資料などをもとに作製。単位は存在量(太数字)が 10^{15} g, 移動量(斜体数字)が 10^{15} g/年。

九、おわりに…大気中の炭酸ガスの行方

図5に地表に存在する炭素の量と移動する炭素の量(フラックス)が示してある。この単位は、ギガトン、つまり一〇億トンである。先に、人類活動によって大気に放出された炭酸ガスのうち、二〇〜三〇億トンが海水に溶けているはずだが、突きとめられていないと述べた。これは、海の表面で交換している炭酸ガス量に比べて、その差額が正確に見積れない(図ではバランスするようになってある)こと、生物による効果がよくわかっていないこと、中深層水の形成についてよくわかっていないことなどによる。今後の研究によってこれらの正確な見積値が出て、行方不明になった炭酸ガスの行方が突きとめられると思うが、現状では悲観的な見方をする研究者が多い。

これに関し、私は次の二点を考えている。第一は、中層水といわれる深層水と表層水の間にある水の役割である。これは北太平洋では親潮系水といわれ、黒潮の下にある。この水は炭酸ガスが溶けやすい時に千メートル程度まで潜り込むので、炭酸ガスの運び屋として注目している。もう一つは、沿岸や陸近くの海で大量に生産された有機物粒子で、これが分解しきらないうちに海底近くを伝わって外洋へ外洋へ、深海へ深海へと横方向に流れていくものの量である。現在、これに関する観測を開始したところである。

いずれにせよ海で起こる現象は諸因子が複雑に絡み合ったものであり、場所により、水深により、季節的に、また経済的に変わる。従って、先に述べたフィードバックについて知るためには、各種の観測を長期間続けなくてはならない。そうしても一挙にすべてがわかるということにはならない。しかし、一歩一歩の積み重ねで、かなり鮮明な像を浮き上がらせることも可能である。自然の研究には忍耐強さが必要であることを認識してほしいと思う。