— 特集 21世紀の海洋学の展望 1 —

危機に立つ地球環境——海洋学は人類を救えるか *

鳥羽 良明†

要 旨

まず地球環境の危機の意識の歴史を振り返り、海洋学の立場からの危機回避の模索の必要性を提起する。次に、現代海洋学にデータ革命的変革をもたらし得る Argo 計画の時代に、物理・化学・生物・水産・工学・地学などの異なる分野の協力関係の更なる重要性を強調する。その時代に不釣り合いに研究の不完全な海面境界過程のパラメーター化に関連して、CO₂の海面フラックス評価を含むわれわれのグループの最新の研究に触れる。

1. 地球環境の危機の意識小史

人類は永遠に進歩を続けるものではないという意識を、古い時代にはっきりと述べたものに、18世紀終りのマルサス (Thomas R. Malthus) の「人口論」があった。学生時代の1949年、京都大学教養部で、私たちのクラスの英語の教科書の一つがこれだったので、当時非常に印象的であった。マルサスは、幾何級数的に増加する人口の方が、それを支える地球上の糧より絶対的に多くなると論じた。

1962年に、Rachel Carsonは、癌に犯されながら歴史的な警告の書「沈黙の春」を発表し、人為的な合成物質が化学的に安定で、その汚染で沿岸や極域の生物が継続的に危害にさらされている現実を報告した。

人口爆発、天然資源の枯渇化、環境汚染の進行などによる人類の危機を、おそらく初めて数値モデルを用いて系統的に予測し警告したのは、民間組織のローマクラブであった。1971年に私が東北大学に海洋物理学講座を担任して2年後に定年を迎えられた気象学の山本義一教授が、その定年講義でローマクラブのレポート「成長の限界」の内容を紹介されたのは卓見であった。

このレポートが出された1972年からちょうど30年が過ぎようとしている。この現時点で、世界の人口、および、大気中の二酸化炭素濃度が、「できるだけ早く対策を講じなければこうなるであろう」と予測された、ほとんどその通りに進行しているという現実、予測の正確さと、その警告を社会がまともには受けとめなかったと見なされ得る今の現実との、二点において、まさに驚くべきことと言わねばならないであろう。

人口は1970年の35億から60億になった。大気中の二酸化炭素濃度は当時の320 ppmから370 ppmになった。「成長の限界」は、地球温暖化や、いま世界的に直面しつつある水不足のことはあまり論じていないが、それでも、食糧不足や天然資源の枯渇などによって、2010年代に重大な限界が表面化することを予測している。そして、最新の国連のデータによれば、アジアおよび世界の水稻栽培による米の生産高は、2000年にはすでに減少に転じている。

現在は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が活動しており、2001年9月には、現時点で人類が入手しうる最も確かな知見・科学的基礎を持つものであるとして、「IPCC地球温暖化第3次評価報告書」が発表されている。これには、過去50年間に観測された温暖化のほとんどが人間活動によるものであるという証拠

* 2001年12月25日受領；2002年1月15日受理。

著作権：日本海洋学会，2002

† 岩手県環境保健研究センター，宇宙開発事業団地球観測利用研究センター

が得られたこととともに、21世紀には、生態系の崩壊、干ばつの激化、食糧生産への影響、洪水・高潮の頻発、熱帯病の増加等の、広範な分野における大きな影響が予測されることが指摘されている。

約一万年以前以降、現在の地球の気候は非常に安定しており、それは海洋の深層循環の存在によると考えられている。北太西洋のグリーンランド東方の海で形成される重い海水が沈み込み、深層から世界を循環する2000年規模の海洋循環である。最近のGanopolski and Rahmstorf (2001)のシミュレーションによる研究は、約十萬年前から一萬年前までの最終氷期に何度も起きた20°Cに近い気温の急激な変化が、深層水形成海域への多量の淡水の流入によって上記の深層循環の変化が起きることによる可能性を示している。上記の気温変化は数十年の短い時間規模で生じうるのである。

地球温暖化の進行によって北極海周辺は特に高温となり、降水も増えて北大西洋北部に多量の淡水の流入が起きれば、上記の深層水の形成が妨げられ、深層循環の流量が落ち込む。そのシミュレーションによれば、地球温暖化が現状のまま進行すると、2010年代から、深層循環が急激にいったん落ち込み始めることになる(Manabe and Stouffer, 1994; 真鍋, 2001)。このことについては、本論の最後に再び触れる。

人類の危機とそれを救う手段には、さまざまな側面があろう。もっとも深刻なものは地球上に戦争があることである。ウイルスなどは非常に早く、日の単位で進化するが、人類の生物学的な進化は10万年の単位かもしれない。しかし、個人の獲得形質としての哲学や思想は、年、いや日の単位で進化しうる。問題はマスとしての人類の哲学、および社会構造の進化の速度である。

ただ、われわれ海洋学者は、専門とする海洋学の立場から、人類の危機を救う手段があるかを模索せざるを得ない。

2. 海洋学の現況についての二、三

まず、いま世界でArgo計画が進行中である。海水とともに流れながら、表層から中層にかけての温度と塩分のプロファイルをリアルタイムで監視するフロート

が、世界の海に3,000個展開される計画である。そうになると、比較的高精度のCTDデータが、10日に3,000点、1年で10万点以上得られることになる。客観解析など種々のデータ処理を経て、また、将来さらに発展するはずの衛星海洋観測とともに、GODAEが発展させるであろう4次元同化システムを経て、全球規模から海盆規模までのさまざまなデータセットが形成され、一種の海洋のデータ革命の様相を呈するであろう。沿岸域に関しては、世界海洋観測システムGOOSの沿岸域モジュールが進行中である。このような革命的な時代に研究者は如何に対応するのか、若い研究者は十分考えておく必要がある。

将来は、Argoフロートでも、化学成分や生物のデータも取れるようにすることが考えられているという。そこで大切なのは、物理・化学・生物・水産・工学・地学などの異なる分野の協力関係である。本当は今でもそれは大切であるが、今後さらに重要になるであろう。関連して、日本ではまだ予算化されてはいないが、係留型海面ブイで、物理量とともに二酸化炭素の海面フラックスを含む物理・化学・生物関連の諸量の変動・変化を連続モニターする大型ブイの配備が計画されている。カナダなどでは、生物地球化学・物理を含む大気海洋相互作用の研究であるSOLAS計画のもとに、すでに予算化されたと聞く。わが国でも十分考慮する必要がある。

関連して、いま海に、鉄、あるいは、窒素(アンモニア)などの、海洋生物生産の事実上の制御因子となっている化学成分を人工的に加えて海洋を涵養し、それによって大気中の二酸化炭素を海に取り込ませて、同時に人類の食糧を増やすという、一石二鳥をねらった研究の実験計画が計画されている(窒素についてはProject ONA, 2001)。これについては、正に海洋のいろいろな分野の密接な協力による十分な先導研究が不可欠である。

さらに、数値モデリング、データ同化に関連して、まだ研究が非常に不完全と思われるのが、海面フラックスのパラメーター化の問題である。海面の境界条件を与えるこの重要な部分が、データ革命の時代に不釣り合いに、非常に不十分であると考ええる。このことに関して、次節に筆者らの新しい研究の状況を少し紹介する。

3. 二酸化炭素を含む海面フラックス評価の新しい試みと当面の課題

風の海面応力を与えるのに、通常海上風の関数としての摩擦係数 C_D が用いられる。しかし海でのそのデータは測定誤差以上に非常にばらついている。二酸化炭素の大気海洋間交換も、海上風の関数としての CO_2 交換速度 k でパラメータ化されて来たが、提案されている k の表現式のどれを用いるかによって、 CO_2 の海洋による吸収量の見積もりは相当変わる。

C_D についてはいろいろな試みがなされて来て、その一例は、最近 SCOR ワーキング グループ 101 のモノグラフ (Jones and Toba, 2001) に記されている波齢の関数としての無次元粗度パラメータによる表現であるが、これも十分成功しているとは言えない。

一方、風の摩擦速度と代表的な風波のピーク角周波数を使って定義される碎波パラメータ R_B (Toba and Koga, 1886) は、最近までの白波の面積率のデータを最もよく表現するものであることが示された (Zhao and Toba, 2001)。白波率は海面付近の乱れを代表する量であり、 R_B はその乱れの程度を代表し得るレイノルズ数とみなされる。

この R_B の関数として C_D を表わすと、うねりのない風洞水槽のデータは揃ってきれいに表され、 R_B が 10^3 のところに強い乱流に移行する (白波が始まる) 臨界値があることが分かる。そして k のデータについてもよく似た挙動を示すことが分かる (Toba *et al.*, 2001)。

ところが、いろいろな海の現場観測のデータでは、上記の R_B の臨界値が R_B の大きい方にずれたり、 C_D の値が小さい方にずれたりする。そして k についても同様によく似た挙動が現れる。この海の現場におけるずれは、いろいろな方向や大きさを持つうねりの存在や、風の変動による風と風波との局所平衡からのずれによるものであるとみなされる。うねりの存在やこの非平衡性が、 C_D や k に定量的にどのような影響を与えるのかは、今後詳しく研究されなければならない (Toba *et al.*, 2001)。

これを進めれば、前節に記した海洋のデータ革命の時代には、衛星観測と、優秀な現代の波浪モデル、大気海洋数値モデルによる 4 次元同化手法と組み合わせ

て、海面フラックスのリアルタイムの精緻な見積もりが可能になるのではないかと考える。

われわれのグループは R_B の関数としての k の現実的な表現式を提案し (Zhao *et al.*, 2001)、全球的な季節ごとの大気海洋間の CO_2 交換量の見積もりを行った (Suzuki *et al.*, 2001)。それによると、北大西洋北部 ($60^\circ E \sim 20^\circ E$; $40^\circ N \sim 80^\circ N$) の海洋の CO_2 吸収は世界の約 $1/3$ で、 1 Gt C yr^{-1} の程度である。ところが、年間のグリーンランド東側の深層循環による CO_2 沈み込み、および、北大西洋のサブダクションによる CO_2 沈み込みは、ともに 0.1 Gt C yr^{-1} の程度と評価されて、何となく辻褄が合わない。深層循環がもっと多く CO_2 を持って行ってくれる場合は、地球温暖化による深層循環の低下との結合で正のフィードバックがかかることになる。いま私の頭の中でもやもやしているこの辺の研究も、これからの重要な課題であろう。

4. 結 語

イギリスの S. W. Hauking 博士は、災害や地球温暖化によって人類は千年以内に滅亡すると警告している。東北大学の花輪 公雄教授は、このまま行くと人類は二百年持たないであろうというのが持論である。2001 年 1 月の「朝日歌壇」に、

人類はあと五十年存(ながら)えるか聖夜の街
の灯は点滅す(美帆シボ)

という短歌が載っていた。フランスに永く住んでいるこの作者は、いま地球環境の危機の認識が最も進んでいると思われるヨーロッパ社会の雰囲気の中にいるから、上記の歌を作ったのではないかと私は考えている。最後に、私の短歌を一首引用させていただく。

人類の終焉いかに来るらむ地球環境変動はた
科学の暴走(「群山」1997 年所載)

ここに言う科学の暴走の中にはさまざまなことが含まれよう。終焉が早々に来ないように、現実をよく見極めながら、その時々最善の努力をして行かねばならないと思う。

References

- ドネラ H メドーズら著, 大来 佐武郎監訳 (1972): ローマ・クラブ「人類の危機」レポート, 成長の限界. ダイヤモンド社, 203 頁.
- Ganapolski, A. and S. Rahmstorf (2001): Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature*, **409**, 153–158.
- Jones, I. S. F and Y. Toba, eds. (2001): “Wind Stress over the Ocean”. Cambridge Univ. Press, UK, 306 pp.
- 真鍋 淑郎 (2001): 大気・海洋・陸面結合モデルによる温暖化予測. 月刊海洋号外 24 号「大規模大気海洋相互作用—数十年スケール変動の実体と機構」, 186–193.
- Project ONA (2001): An International Symposium on the Ocean’s Role in Climate and Food Security for Asia. 19 Nov. 2001, Univ. Tokyo, 25 pp.
- Suzuki, Y., S. Komori, D. Zhao, and Y. Toba (2001): Global mapping with seasonal variation of air-sea CO₂ exchange by using wind and wind-wave distribution. Extended Abstracts, 6th International Carbon Dioxide Conference, Sendai, Oct. 1–5, 2001, 756–759.
- Toba, Y., and M. Koga (1986): A parameter describing overall conditions of wave breaking, whitecapping, sea-spray production and wind stress, In: *Oceanic Whitecaps*, edited by E. C. Monahan and G. MacNiocaill, D. Reidel Pub. Co., 37–47.
- Toba, Y., Y. Suzuki, S. Komori, and D. Zhao (2001): Unusual transfer coefficients: Similarity of air-sea momentum and gas transfers with outstanding questions, Extended Abstracts, 6th International Carbon Dioxide Conference, Sendai, Oct. 1–5, 2001, 699–712.
- Zhao, D. and Y. Toba (2001): Dependence of white-cap coverage on wind and wind-wave properties. *J. Oceanogr.* **57**, 603–616.
- Zhao, D., Y. Toba, Y. Suzuki, and S. Komori (2001): Effect of wind waves on air-sea gas exchange: proposal of an overall CO₂ transfer velocity formula as a function of breaking-wave parameter. Extended Abstracts, 6th International Carbon Dioxide Conference, Sendai, Oct. 1–5, 2001, 535–638.