

海洋の二酸化炭素吸収の観測と解析に関する研究

独立行政法人 国立環境研究所 地球温暖化研究プロジェクト 総合研究官

野尻 幸宏

CO₂を始めとする温室効果気体類の大気濃度が、人為的要因で増加しつつあり、放射強制力の増加によって地球温暖化が起こるといふ予測は、科学的知見の蓄積から確からしさを加えつつある。起こるであろう気候変動の大きさを予測することは、必要な対策の程度を考えるために重要な情報であるので、それを正確にすることが、今日の地球科学研究に与えられた命題である。計算機技術の進歩で、地球全体の熱と水の循環を物理方程式から解く「気候モデル」研究が大いに進化した。物理方程式から構成される気候モデルにおいては、温室効果気体の濃度はいわば「定数項」であり、一気に増加するように、あるいは、年々増加するように与えられる。化学的・生物学的反応性の乏しいフロン類のような温室効果気体の場合、その大気濃度の与え方は比較的容易であるが、CO₂・CH₄・N₂O など重要な温室効果気体の場合、人為的放出源だけでなく、陸域と海洋に自然の放出源や吸収源があり、気候変化でその強度変化(フィードバック)が起こる。

陸上植物にとって光合成の材料である大気 CO₂ の濃度増加は施肥効果を与えて植物体成長を促進し、陸の吸収は増加する。また、大気 CO₂ 濃度増加は、大気・海洋表面間の濃度差を拡大させるので、海洋への CO₂ 移動量が増加する。これら自然吸収源作用の将来変化は、気候変動予測に極めて重要であって、気候変動予測モデルとして、気候変動(気温上昇、降水量変化など)が発生源・吸収源に与える効果を取り込んだより複雑なもの、すなわち「地球物質循環モデル」が必要となってきた。しかしながら、このような予測(prognostic)モデルはあくまで将来予測モデルであるので、具体的な検証をする方法がない。予測モデルは、現状説明(diagnostic)モデルをもとにして構築されるものであるため、予測モデルのベースとなる現状説明モデルが今日の地球物質循環をよく表現するかどうかでモデルの評価を行う。

地球上の CO₂ 循環における海洋の役割はきわめて大きく、大気存在量の 50 倍の無機炭素が海洋に溶解して存在している。もし、化石燃料消費で大気へ放出された CO₂ が海洋に平衡に溶解する(大気・海洋間の CO₂ 交換が極めて急速)ならば、大気・海洋間の CO₂ 濃度差がなくなるまで大気から海洋に CO₂ が移動するので、存在比の 1:50 の分配比にならないにしても、1:10 程度の分配比で海洋に吸収され(CO₂ の化学平衡に基づく)、大気濃度増加が大いに緩和される。しかしながら、海洋が暖かい表層と冷たい深層という強い層構造をもつこと、大気 CO₂ 濃度増加が極めて急速であることが原因となって、海洋吸収による大気 CO₂ 濃度増加の緩和は十分に進まず、大気・海洋間の CO₂ 濃度(分圧)は非平衡状態となり、大気 CO₂ 濃度が高まった現代は、大気・海洋間の CO₂ 分圧差が生じた(大気が高い)状態となっている。年間 6Gt (G=10⁹) の化石燃料燃焼で放出された CO₂ の海洋吸収量は、その約 1/3 の年間 2Gt である。

物質循環モデルの海洋部分の検証には、人為起源で放出された CO₂ が海洋にどのように分布しているか、海洋の CO₂ 吸収・放出フラックスの海域分布とその季節変化がどうなっているか、の 2 つが鍵となる情報であり、その綿密な観測が求められている。2003 年 1 月に、SCOR (Scientific Committee on Oceanic Research)/IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) CO₂ Advisory Panel と IGBP/WCRP/IHDP による GCP (Global Carbon Project) 合同の活動で、これからの海洋 CO₂ 観測の国際共同をコーディネートするためのワークショップが開催された。その際、1.現在の海洋物質循環モデルの現状、2.海洋断面観測による人為起源 CO₂ 観測、3.海洋表面観測による CO₂ 吸収・放出観測の 3 つの基調講演が用意された。

人為起源 CO₂ の海洋分布を観測から求めるには、大洋を横断する観測線を設定し、観測船航海でできるだけ密な間隔で表層から深層にいたる溶存無機炭素と関連する海洋パラメータ(栄養塩類、溶存酸素など)の鉛直分布を測定する必要がある。この測定を 5 年から 10 年の時間間隔で繰り返すと、海洋表面数百メートルで CO₂ 量の実質的な増加が認められ、人為起源 CO₂ の海洋への浸透が把握される。この観測を太平洋、大西洋、インド洋、南大洋など世界海洋を効果的にカバーして継続すると、その量の把握が正確になる。また、同時に炭素同位体比や大気由来トレーサーであるフロンなど指標成分を測定することも、人為起源 CO₂ 量の把握につながる。

海洋表面の CO₂ 吸収・放出観測では、大気・海洋間の CO₂ 分圧差の測定を、多くの海域で、全ての季節をカバーするように行うことが重要である。海洋の CO₂ 分圧は、CO₂ 溶解度が海洋表面水温で変化すること、植物プランクトンの生産が無機炭素を固定化すること、海洋表面の冷却で表層水に亜表層水から無機炭素が回帰することなどが原因となり、大きく時間変動する。これには、2つの良い観測方法があり、大洋を定期的に横断航海するような商船で毎月・毎季節の観測を行うこと、定置ブイあるいは漂流ブイに自動計測装置を設置し、連続的に測定することである。

海洋断面、海洋表面のそれぞれの CO₂ 観測とも、広大な海洋をカバーするという点で一国の努力で可能なものではなく、各国の観測資源、研究資源をいかに有効活用すること、国際間連携で無駄のない観測網を拡

大すること、観測結果を统一的にデータベース化して解析利用すること、これらの点に絞った議論が進められた。海洋表面観測においては、演者が基調講演に指名され、太平洋における貨物船を利用する CO₂ 観測の実施とその結果、そこから発展した観測の国際協力について発表を行った。

国立環境研究所は、貨物船を利用する太平洋の海洋表面 CO₂ 観測を、1995 年 3 月から 1999 年 9 月までカナダシーボード所属材木運搬船 Skaugran で、1999 年 11 月から 2001 年 5 月まで商船三井所属 Alligator Hope で、2002 年 7 月から(継続中)トヨタ海運所属 Pyxis で行っている。Skaugran の基本運航形態は、カナダの製材を日本に運搬し復路で日本車を北米西岸へ輸送する(約 6 週間周期)なのであるが、貿易状況変化により、製材運搬に専念する時期、自動車運搬だけにあたる時期など、運航状況が変化した。このことが幸いし、北緯 34 度以北の広い範囲にわたる CO₂ 観測を行うことができ、この海域の CO₂ 吸収放出の季節変化を詳細に把握することができた。一方、1999-2001 年にかけての Alligator Hope 観測は、往路東京-シアトル、復路バンクーバー-東京の 5 週間周期固定航路で行われたので、高緯度海域の高頻度観測を行うことができた。両船による 6 年間の継続観測は、商船による海洋 CO₂ 観測として世界最長継続となり、その成果が注目を浴びた。解析から、北緯 34 度以北の太平洋海域は年間 0.26Gt の CO₂ 正味吸収を示していることが求められ、従来データの集積による推定と矛盾しないことが示された。図 1 に吸収・放出フラックスの季節変化と年間平均を示す。また、長期継続の成果として、海域の CO₂ 分圧年々変動が解析できた。これまで、海域の CO₂ 分圧年々変動は、赤道太平洋において知られているだけであり、その他の海域では解析困難であった。赤道太平洋では、エルニーニョ・ラニーニャの海洋循環変化(ENSO)が東赤道海域の湧昇の大きさに作用し、100 μatm(大気濃度の ppm にほぼ相当する)という大きな変化幅を与える。

本観測による北太平洋高緯度海域の CO₂ 分圧は、ENSO と相関を示さず、海域を平均した変動幅は 10 μatm 以下と極めて小さい。

2001 年には EU4 カ国中心の観測計画として、北大西洋海域で 3 隻の貨物船と 1 隻の南極補給船に CO₂ 機器を搭載して、表面 CO₂ 観測を行うプロジェクトが開始された。これは、我々の太平洋観測の成功を受けたものであり、その開始に技術協力した。米国でも観測が予算化され、大西洋と太平洋での貨物船 CO₂ 観測を 2004 年開始に向け準備中である。一方、CO₂ 観測の正確性の保証は、各国、各機関が行った観測結果を統合するためにぜひ必要である。機関間で測定値偏差があると、統合解析による世界の海洋 CO₂ 吸収量評価に誤差を生む。演者のグループは、測定の正確性を保証するための相互比較実験を、水産総合研究センター施設を利用して、2003 年 3 月に実施した。8 カ国 11 機関から海洋表面 CO₂ 測定機器 13 装置が集まり、同時に運転された。これら国際観測協力の推進において演者のグループが中心的役割を果たすことができたのは、本業というべき太平洋観測を長期に維持することに成功したことによる。国立環境研究所の温室効果気体観測プログラムは、地球環境モニタリング事業として 1990 年以來長期に継続されている研究課題であり、地上観測局、航空機、船舶などの多様なプラットフォームを活用した大気・海洋の観測研究である。特に、各国観測網とを考え、補完的なもの、各国に先駆けた先進的なものを中心に展開してきた。本格的開始(1993 年頃)以来約 10 年になろうとしているが、このところ重要な成果が現れてきた。これは、観測的地球科学研究における長期研究実施サポートの重要性を示すものである。また、継続観測には、支援スタッフ育成とそのスタッフの熱心な努力が重要であり、

この場を借りて大いに感謝したい。

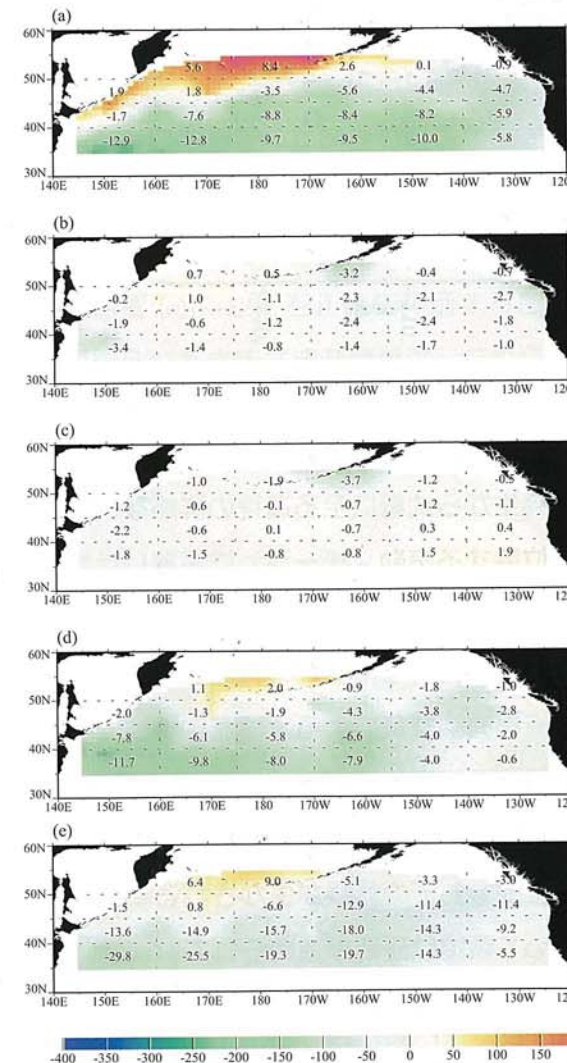


図 1 北太平洋の貨物船観測で得られた CO₂ の交換フラックス、a) 1-3 月、b) 4-6 月、c) 7-9 月、d) 10-12 月、e) 年間平均、カラーバーに示した数字と背景の色が単位面積あたりのフラックス(mgC m⁻² day⁻¹)を示す、数字は 5 度×15 度のグリッドのフラックス(10⁶tC)を示す、正の数字が海洋の放出、負の数字が海洋の吸収を表す。