

課題名	大気中の酸素濃度及び炭素同位体比を指標にしたグローバルな海洋・陸域 CO <sub>2</sub> 吸収量の変動解析に関する研究		
担当研究機関	独立行政法人国立環境研究所		
研究期間	平成13-15年度	合計予算額(当初予算額ベース)	106,000千円 (うち15年度 37,855千円)

## 研究体制

大気中の酸素濃度及び炭素同位体比を指標にしたグローバルな海洋・陸域CO<sub>2</sub>吸収量の変動解析に関する研究 (独立行政法人国立環境研究所、一部東北大学、名古屋大学へ研究委託)

## 研究概要

## 1. 序 (研究背景等)

人為的に放出された二酸化炭素は地球規模での二酸化炭素の濃度上昇を引き起こしているが、地球上の生物や海洋は平均的にはその約半分を吸収し大気中の濃度増加を引きとめている。例えば、現在の大气二酸化炭素濃度の平均の増加速度(約1.5ppm/年)は、実際に大気に供給された人為的二酸化炭素から考えられる速度の半分にしかになっていない。海洋や陸域での吸収量は年々変化することが認められており、二酸化炭素濃度増加速度もエルニーニョ現象が起こったときに急増現象が見られている。ここ最近のエルニーニョ現象のケースでは年増加率で3ppm以上と過去数十年間の最高を記録し平均的な増加速度の2倍以上の速度になった。このような現象は、過去にも見られており、二酸化炭素の自然の吸収量が気候や海洋の変化によってグローバルに変動していることを示している。この変化量は、人為的な二酸化炭素の年間放出量に匹敵する大きさであり、今後の気候変動や海洋の変化のしかた如何によっては加速度的に二酸化炭素濃度増加が起こる可能性を示している。従って、今後の二酸化炭素濃度増加を予測するためには、海洋や陸域の二酸化炭素吸収量がどのようなメカニズムでまた量的にどのように変化しているのかを明らかにする必要がある。

## 2. 研究目的

二酸化炭素の地球上の収支は、いまだにその推定値にかなりの誤差を伴うことがIPCCの報告からも知られている。近年、酸素の濃度変動を用いてグローバルな二酸化炭素の収支を推定するという研究が進んでいる。ここでは、その酸素や二酸化炭素の同位体比の変動をグローバルに測定することで、収支の変動を推定することを目的とする。グローバルなデータを取るために、大気の広域サンプリングを試みる。特に太平洋上で運行する船舶を用いて、これまで行われていない太平洋上大気中の酸素濃度の緯度分布や時系列変動を求める。多くの場合のデータの採取は島や陸上部で、緯度的には間欠的にしか存在しなかったが、船舶を用いることで連続的な細かい緯度分布などが計測できると考えられる。ここでは、特に船舶で使用できるガラスボトルサンプリングシステムの製作を行なう。大気中の酸素濃度や二酸化炭素の炭素同位体比を太平洋上を航行する船舶を用いて広域的に観測することによって、海洋や陸域生態系のグローバルな二酸化炭素吸収量を分離して測定解析する。そのためには安定したサンプリング体制作りが必要となる。

船舶のデータの時系列を補完する意味で、北海道落石岬と沖縄県波照間島の2点で頻度の高い測定を行い、中緯度帯での時系列の変動を観測する。高頻度の測定からは精度のある時系列データや細かい変動のデータが得られるので、それをもとに変動要因の解析が行なえると考えられる。

同位体比データを用いて収支等の解析を行うためには測定の精度の問題を検討する必要がある。また各機関のグローバルなデータを比較するためには、標準の問題がキーになる、ここでは二酸化炭素の同位体比測定のための標準作り、相互比較実験などを通して、世界のデータの相互利用の可能性を探る。

## 3. 研究の内容・成果

## (1) 酸素濃度の広域観測

海洋上大気の広域な酸素濃度測定のために、船用として特別に製作した自動ガラスボトル採取装置を用い、2001年後半から、日本-オーストラリア-ニュージーランド (Golden Wattle (大阪商船三井船舶(MOL)、MOL Glory, Fuji Transworld (フジトランス)) での大気採取を行った。また日本-アメリカ西海岸航路においても (PYXIS(トヨフジ海運)) 高緯度側のサンプリングを行った。大気は、船からの排気ガスの影響を受けないように採り、除湿した後プラス1気圧で2.5リットルガラス容器に取った。

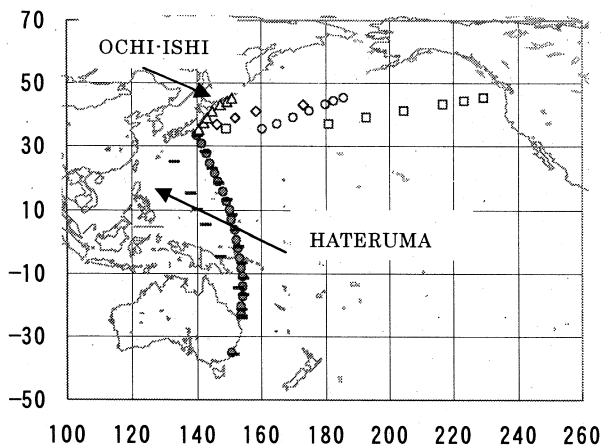


図1 海洋でのサンプリング位置の例と波照間・落石観測所

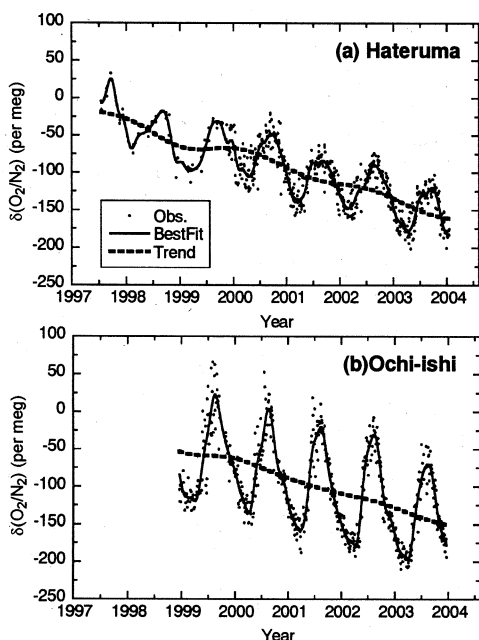


図2 波照間、落石での酸素濃度の減少トレンド観測結果

これまでの観測から $O_2/N_2$ 比の緯度分布や季節変化の緯度による違いなどが分かってきた。平均的には $O_2/N_2$ 比は北にゆくほど低くなっていることが確認されたが、これは化石燃料の消費が北半球に集中しているためである。そこで、APOと呼ばれるトレーサー（二酸化炭素量変動量を酸素に置き換えて現存酸素量との合計を示したものを）を指標にすると、APO自身は南緯20度から赤道域にかけて高く、北に低い結果が得られた。この結果は酸素と二酸化炭素の海洋とのやりとりが、赤道域で高いという観測結果であり、これまでモデル計算で推定されていたことを裏付けるものとなった。

(2) 酸素の減少速度から推定される陸域の二酸化炭素吸収量

波照間・落石ステーションにおける観測から、 $O_2/N_2$ 比が継続して減少する様子が観測された。これをもとに、近似的にこの期間の平均的な陸域の二酸化炭素吸収量を推定した。1998年から2004年の化石燃料起源 $CO_2$ の年平均放出量を6.4GtC/yrとし、波照間・落石の $O_2/N_2$ 比および $CO_2$ の平均経年変化率から陸上生物圏および海洋のそれぞれの吸収量を計算すると、それぞれ $0.2 \pm 0.6$ GtC/yrおよび $2.3 \pm 0.8$ GtC/yrとなった。この結果は、この観測期間での陸域生態系の二酸化炭素の吸収量が過去のものに比べて、非常に少なかったことを示している。一方、海洋はこれまでの推定値より、若干大きな値になっている。このため、大気の蓄積速度は、年間1.9 ppmと非常に早くなっていたことがわかった。

$O_2/N_2$ 比の時系列を詳しく見ると、エルニーニョにあたる1998年と2001年、2003年には減少速度が速まり、1999年には減少速度が遅くなったことが分かる。これとは逆に $CO_2$ は1998年、2003年には増加速度が速まり、1999年には増加速度が遅くなったことが知られている。海洋からの $O_2$ フラックスの年間平均値がゼロと仮定す

ると、陸上植物圏が1998年に $CO_2$ を放出し1999年には吸収したものと推定される。しかしながら、 $O_2/N_2$ 比の変動から年々の炭素収支の定量的な議論をする場合には、海洋からの $O_2$ フラックスの年間収支を正確に見積もる必要がある。これらの推定結果には依然として多くの誤差が含まれるが、観測の継続や観測地点の展開などによって $CO_2$ 収支の精度も高まるものと期待される。特に、連続測定の結果は非常に良好で、二酸化炭素などとの相関が見られることから、細かな吸収や放出の議論ができることが期待された。

(2) 同位体比による二酸化炭素収支の変動の推定

二酸化炭素の炭素同位体比の測定から、炭素の収支を求めるべく、海洋でのサンプリングを継続しそのトレンドを緯度ごとに求めた。これによると二酸化炭素の増加速度と同位体比の減少速度は、1998年と2002 - 2003年に大きくなったことがわかった。緯度ごとに見ても、広い緯度範囲で同様な傾向があった。これをもとに、陸域生態系と海洋との二酸化炭素の収支の変動を推定した。これによると、図に見られるように、1998年と2002 - 2003年の濃度増加は、陸域生態系からの二酸化炭素の放出によっていることが推定された。これらの年は、図にあるようにエルニーニョの指標であるSOI（南方振動指数）と良く合致していることと、そのときの北半球の気温の温度異常ともよく合致していた。これらのことから、このときの生態系は温度の上昇により、呼吸や分解が光合成より活性が高く、全体として二酸化炭素の発生源となってしまったことを示している。

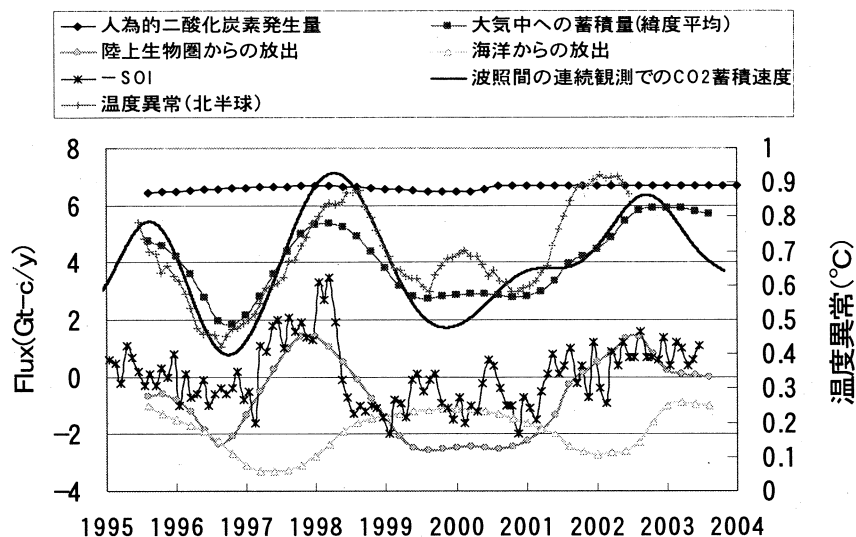


図3 炭素同位体比の全緯度帯データを平均して推定した二酸化炭素収支の年変動

酸素との推定値を比較すると以下の表のようになった。期間が少し異なるが、両者ともこの期間では少ない陸域生態系の吸収量を示した。このため、大気中の蓄積は4Gtと通常よりも1Gt程度も多い速度になっている。これらのことは、小さな気温変動(0.2°C程度)でも、二酸化炭素収支に多大な影響を与えることを示している。

表1 酸素および炭素同位体比から推定されたフラックス

	Gt-C/年			
	人為起源二酸化炭素	大気蓄積	陸域フラックス	海域フラックス
酸素からの推定 (1998-2004)	6.6	4.08	-0.2	-2.3
炭素同位体比からの推定 (1997-2004)	6.63	4.21	-0.58	-1.85

(2) 同位体比の測定標準と相互比較

本研究の中で作成した2種の同位体比研究のための国立環境研究所大気参照用二酸化炭素(NARCIS-IとII)試料と、他の機関で作った参照物質(オランダ同位体比研究所(CIO)、NISTなど)と、実大気試料(ヨーロッパやCSIRO(オーストラリア)で作成)を用いて、機関間の測定値の比較を行った。これによると、純粋な二酸化炭素の

データでは機関間でかなりの一致が見られた。一方大気サンプルになると、純粋な二酸化炭素と異なつたずれを示すことがわかった。これは、大気試料を計る際の標準として大気を用いる研究室で多く見られ、この標準大気のスケールと、純粋二酸化炭素のスケールが異なる、ダブルスタンダードとなっていることが推定された。今後、純粋な二酸化炭素の完全な比較を行えるようにNARCIS-IIを用いての比較を行うことで、計測法側の原因は追究できると考えられた。

4. 考察

海洋大気中の酸素の分析は航路変更等サンプリングの問題があったにせよ、継続的に進めることがわかった。その結果から、緯度毎の酸素濃度分布が明らかになった。二酸化炭素やその他の気体成分も含めて総合的な変動パターンが分かれば、増加速度の変動要因を解析するための重要なデータとなると思われる。また放射性炭素の測定も二つの緯度帯で行われており、この細かい季節変動などが明らかにされつつあるので、二酸化炭素のダイナミックな動きがモデル化されることが望まれる。

二酸化炭素の同位体比のデータからは、強いエルニーニョによる変動では陸上生態系の応答が大きい事などがわかったが、酸素の計測からの収支も、同位体比の計測からも最近の陸上生態系の吸収量の減少が指摘された。この現象は広域的な気温の上昇と良く対応しており、長期的な地球の気象変化に対して、今後この収支がどのように応答するか注目すべきであると考えられた。

同位体比の測定に関する相互比較に関しては、貴重なデータが得られた。大気サンプルの比較において各機関での差が見られたが、これの原因としては測定に用いている二酸化炭素標準の問題と実大気測定用の標準として用いている大気中の値付けの問題が考えられた。測定標準の二酸化炭素については、純粋な二酸化炭素の参照物質2種類を用いる事で、そのずれの幅と方向を知ることが可能であると思われるが、大気中のサンプルでのずれはサンプルの前処理や標準大気中の値がどれだけ真値に近いという多層的な問題を含んでいると思われる。