

B-9 太平洋域の人為起源二酸化炭素の海洋吸収量解明に関する研究

(5) 海洋表層二酸化炭素観測統合データの利用による太平洋・大西洋の比較研究

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炭素循環研究チーム

同

同

M. Chierici (EFフェロー)

野尻幸宏

A. Fransson

(日本学術振興会特別研究員)

研究協力者

キール大学海洋研究所

同

H. Lueger

A. Koertzing

平成14～16年度合計予算額 4,352千円

(平成17年度予算額 0千円)

※ 上記予算額には、間接経費 1,005千円を含む)

[要旨] 国際共同観測網の展開として、ドイツキール大学海洋研究所と共同で、大西洋の高頻度表層海洋二酸化炭素分圧測定として、定期貨物船へ観測装置を搭載し、その季節変化、海域分布の観測を2002年2月から開始した。2003年1月までの9往復の大西洋横断航海で、片道16回の測定を行うことができた。航路は北緯35度から50度帯であり、西経35度を境に季節性に大きな相違があることが明らかになった。西経35度より西の米国よりの海域では、CO₂変動に与える水温変化項の寄与が大きく、夏の高水温時にCO₂分圧が高くなり、年間のCO₂分圧振幅が大きい。西経35度より東の欧州よりの海域では、生物過程項の寄与が大きくなり、夏の高水温時のCO₂分圧増大を打ち消すように作用して、年間のCO₂分圧変動幅が小さくなる。

観測データを利用する海域のCO₂フラックスの解析によると、中緯度北大西洋海域は、夏の季節には、ほぼ放出はないか弱い放出であり、秋から冬にかけて吸収があることがわかった。CO₂フラックスを算出するひとつの方法は、観測された二酸化炭素分圧差($\Delta p\text{CO}_2$: 海洋-大気)と、航路上の風速(QuickSCAT衛星観測)の関係からの計算に基づく。もうひとつの方法は、緯度4度 x 経度5度のピクセルで平均化した $\Delta p\text{CO}_2$ と平均化した風速(QuickSCAT衛星観測およびNCER/NCARによる客観解析)に基づく。両者の方法間では47%のフラックス差を生じ、その原因が風速値の違いによることがわかった。 $\Delta p\text{CO}_2$ の変動の時間スケールは風速変動の時間スケールよりはるかに長いので、ピクセル平均の風速を用いるのが適当である。北大西洋中緯度海域では、北米よりの西部海域が欧州よりの東部海域より大きなCO₂吸収源であった。海域の吸収量は50.5 GtC/yと見積もられたが、これは、Takahashiらの解析による気候値を用いた結果との違いは少なかった。また、衛星観測と客観解析という2つの風速場の違いはフラックス推定に大きな差を与えなかった。

[キーワード] 海洋表層二酸化炭素分圧、定期貨物船、北大西洋、海域比較、国際共同観測

1. はじめに

海域の二酸化炭素吸収放出について、全球海洋のフラックスを評価することが求められており、広大な海洋を観測でカバーするために、国際協力が必要なことはいうまでもない。1995年以来の国立環境研究所の貨物船を利用した北太平洋の二酸化炭素観測（日加共同研究）が長期継続に成功して以来、このような手法での観測拡大が、国際的に真剣に議論されてきた。特にEU諸国では新たな研究計画が認められて発足し、2000年以来、可能な航路から実際の観測が始められた。本課題では、太平洋データ解析、測定法の正確さ確保の課題を立てて研究を進めてきたが、このEU観測との協力を開始したことから、平成14年度からサブテーマを加え、国際共同研究を行うこととした。その結果、2002年2月から約1年の通年観測でデータセットを得て、共同でデータ解析を行い、北大西洋中高緯度海域のCO₂フラックスとその季節変化を明らかにした。

2. 研究目的

北太平洋と北大西洋は、二酸化炭素観測の面では、赤道太平洋と並んで、これまでにデータ蓄積の最も進んだ海洋である。従来からのデータ集約でも、吸収・放出域分布に関する一応の知見のまとまりはあったが、同じ海域を年間に何回も繰り返すような観測例はほとんどなく、このような集中的観測が、より詳細な二酸化炭素の吸収放出現象を解明することは、環境研の北太平洋観測例からも明らかとなった。

そこでEU各国は、ship-of-opportunity 観測（SOOP観測：必ずしもその項目の観測を目的とはしていない航海で、観測を行うこと、商船で観測するのは全てSOOP観測である、広義には、他の観測目的の観測船航海で測定機器を運転してデータを得ることもSOOP観測を含む）計画(CAVASSO, Carbon Variability Studies by Ships-of-opportunity)の予算を得て開始した。計画では、ノルウェーによるデンマークーグリーンランド航路、イギリスによるイギリスーウィンドワード諸島（カリブ）航路、ドイツによる欧州ーアメリカ航路、スペイン（スペイン海洋研究所）による南極航路が提案された。

本課題では、太平洋・大西洋の高頻度海洋表層二酸化炭素分圧データの比較解析から、両海洋の二酸化炭素吸収・放出の理解を進めることを目的として、プロジェクトに協力し、共同データ利用を行う。

3. 研究方法

CAVASSOプログラムでは、南極補給船による観測がもっとも早く開始され、2000年10月から測定装置を搭載した航海が実現し、年1往復ではあるが、定常的にデータ取得されている。イギリス（東アングリア大学）は、自製の自動装置開発を進め、2001年12月からサンタルチア号で観測開始、ただし、同船の航路変更で2002年8月にサンタマリア号に搭載替え、観測継続を図った。ドイツキール大学海洋研究所では、Wallenius Wilhelmsen社所属貨物船Falstaffでの観測開始を準備したが、現有の観測船仕様二酸化炭素分圧測定装置は、自動化が進んでおらず、常時乗船研究者による運転を行うことができるわけではない貨物船環境での長期観測に問題があり、検討を進めていた。そこで、国立環境研究所との共同観測として、貨物船観測により適した装置を用いて観測を行うこととなり、2002年12月か

ら2月にかけて、船内工事、機器設置を行った。

設置機器は、国立環境研究所と(株)紀本電子工業の共同開発による、タンデム型平衡器と、赤外分光光度計による自動二酸化炭素測定システムを用いた海洋表層二酸化炭素分圧測定装置である。その性能については、サブテーマ4の相互比較実験で確認されている。GPS測位信号の取り込みと塩分水温計(サーモサリノグラフ)の運転制御部分はキール大学で準備された。Wallenius Wilhelmsen社所属の自動車運搬船Falstaffは、主として英国・サウザンプトン港から米国・ニューヨーク港への西向き航路、米国チャールストン港からスペイン・サンタンデル港もしくは英仏海峡へ向かう東向き航路で自動車運送にあたっている。図1に1年間9往復の観測航路を示す。2003年1月までの9往復の大西洋横断航海で、片道16回の測定を行うことができた。半分の航海では、ドイツキール大学から船上要員が派遣されて装置運転を行い、あわせて、炭酸系、栄養塩などの化学データ測定用の試料採取を行った。残る半分の航海では、乗組員の協力で基本データを取得することができた。船上二酸化炭素分圧測定装置では、大気、海洋の切り替え測定を行い、大気測定値はバックグラウンド大気の濃度として妥当な測定値であることが確認された。

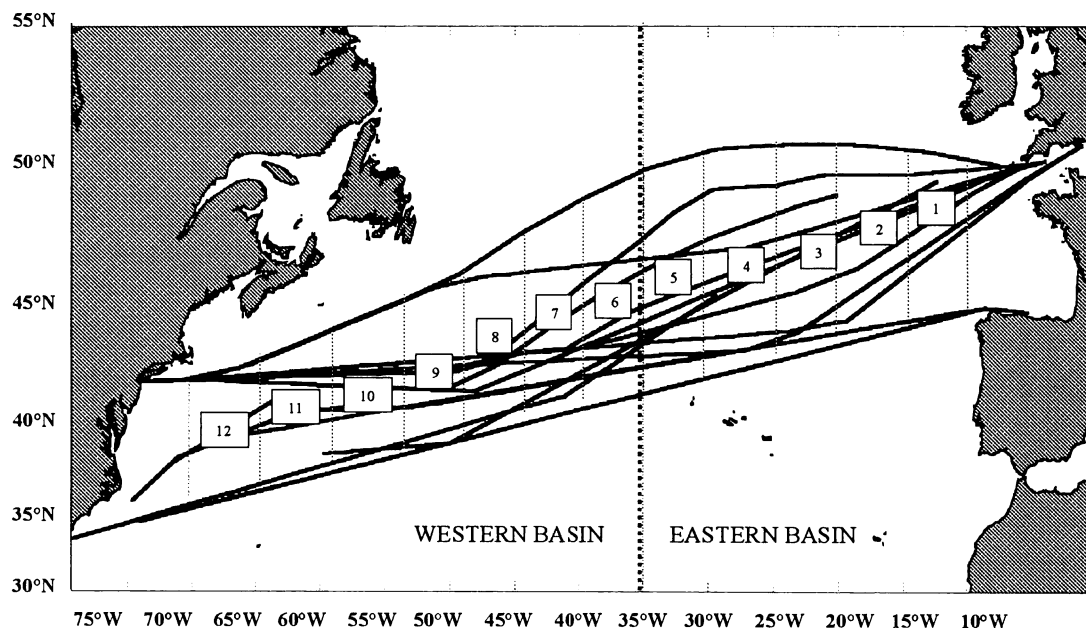


図1 キール大学海洋研究所と国立環境研究所の共同による北大西洋定期貨物船CO₂分圧観測航路(2002年2月から2003年2月)図、1から12の経度帯分けに基づき季節変化の解析を行った。

4. 結果・考察

4 (1) 海域の表層二酸化炭素分圧の変動解析

米国東岸から西経45度にかけては北緯37度から42度の緯度帯に航路が集まり、欧州西岸に向けて北上し、北緯46度から51度の緯度帯の航路で欧州に達する。米国沖は、南からのメキシコ湾流の高温・高塩分の海水と、北からのラブラドル海流の低温・低塩分の海水の両者が拮抗し、夏と冬の水温・塩分の変動が大きい。しかしながら、Falstaff航路の北大西洋西部、西経45度から欧州

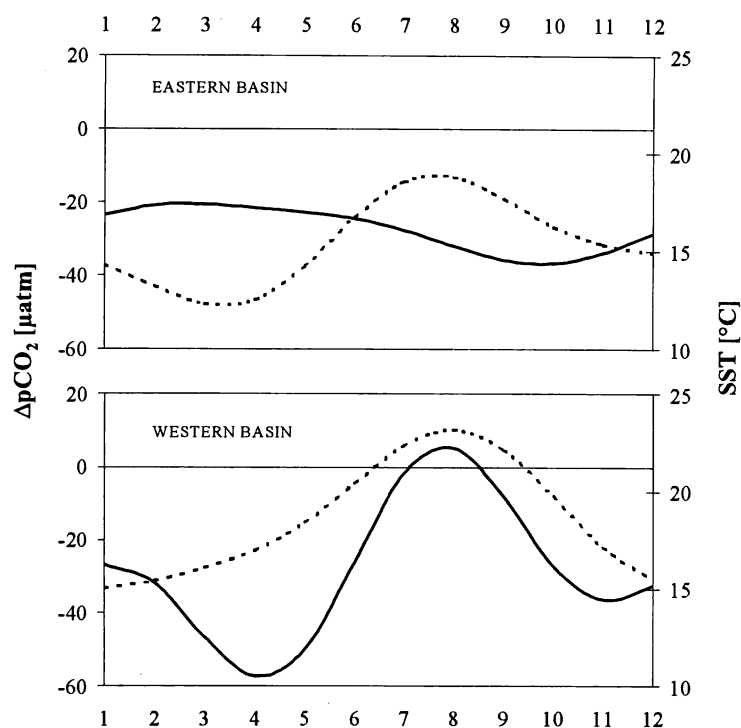


図2 北大西洋定期貨物船FalstaffによるCO₂分圧観測(2002年2月から2003年2月)結果、東部海域と西部海域の典型的な $\Delta p\text{CO}_2$ 変化(海洋-大気のCO₂分圧差、実線)と水温変化(破線)を示す。

西岸までは、安定な北大西洋海流の海域で、水温年間変動が小さい海洋である。図2に西部海域の典型的なCO₂分圧季節変動と表面水温季節変動を示す。この季節性は西経35度を境界として、変化する。CO₂分圧の季節変動は東部海域と比較して、西部海域で小さい。このCO₂分圧変動のパターンを最大・最小が現れる季節の違いで分別したところ、西経35度を境に西部では夏に最大値が現れ、東部では冬に最大値が現れることが分かった。

そこで、本報告書サブテーマ(1)で示したのと同様な方法で、月毎のCO₂分圧変化を与える要因を水温変化項、生物過程項、ガス交換過程項に分別した。結果を東部海域と西部海域のそれぞれについて、月毎に示したものが図3である。この図においては、ガス交換過程項(ASE)は海域のCO₂吸収を負で表わしてあり、水温変化項(Thermodynamics)、生物過程項(Biology)とは、海洋のCO₂収支の意味では反対方向であることに注意する必要がある。東部海域も西部海域も共に、大西洋中興緯度海域は通年ほぼCO₂吸収源として作用しており、東部海域で夏の生物生産によるCO₂固定の効果が顕著である。その効果は5-8月にかけて生ずる。これに対して西部海域では、生物過程項による変化は比較的小さく4-6月という早い季節に起こる。西部海域では、水温変化項が相対的に大きく、夏の水温上昇の効果で7-8月の季節には、海洋表層CO₂分圧は大気とほぼ平衡に至るまで増大する。

海洋CO₂データの統合は、1960年代以来の蓄積データのまとめとしてTakahashiら(2002)によってなされている。その統合データセットは、存在するデータを全て利用したものであるので、い

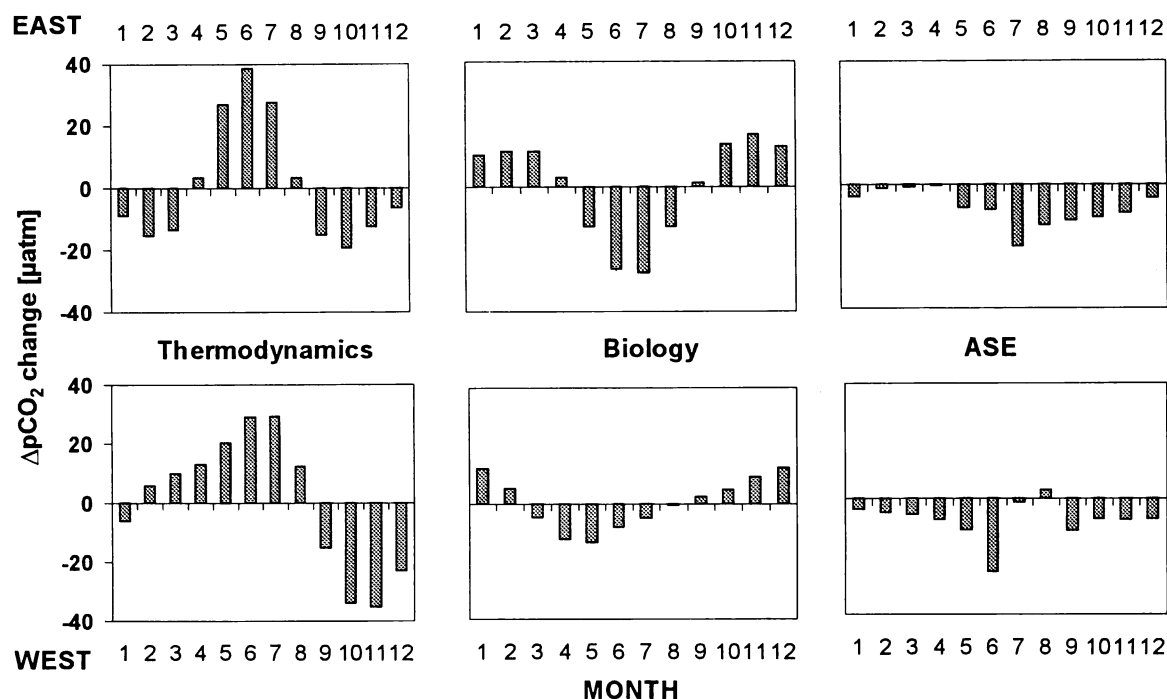


図3 北大西洋定期貨物船FalstaffによるCO₂分圧観測(2002年2月から2003年2月)結果から、CO₂分圧変化に及ぼす水温変化項(Thermodynamics)、生物過程項(Biology)、ガス交換過程項(ASE)を分別した結果。東部海域(上)と西部海域(下)について示す。

いわゆる気候値として扱われるべきものである。これに対し、海域の集中観測データで季節を通した観測を行うことで、特定の年、あるいは年範囲のデータが得られる。この研究課題で実施した北太平洋について、Takahashiらによる気候値と比較を行った例があるが、今回の北大西洋観測は、年間でその比較ができる数少ないデータセットを与えた。図4が海洋-大気CO₂分圧差と水温について、Takahashiらの気候値と、今回のFalstaff観測を比較した結果である。緯度帯毎に見たとき、高緯度で今回観測のCO₂分圧が高く、中緯度の40度帯でやや低い。また、東西を比較すると、東部海域で気候値が低く、今回観測が高い。これが、2002年1年の観測によることが理由であるかどうかは、観測継続を行わない限り結論できない。しかしながら、このような気候値との差を求められるような観測を継続することで、年々変動や経年変動を明らかにする研究観測が必要とされている。

さらに、今回の観測データと気候値の両者について、ガス交換量(CO₂吸収・放出量)を算出して、それぞれを示したものが図5である。観測データをTakahashiら(2002)の気候値解析と同じグリッドに分け、各月の海洋CO₂吸収フラックス(吸収を負で表現した)をECMWF客観解析による風速データを用いて算定した。図4のCO₂分圧差で示されたように高緯度帯でその差が大きい。中緯度帯ではその差は極めて少ない。Takahashiらによる気候値は、海洋炭素循環モデル検証のために広く用いられているものであるが、その気候値の確からしさ、最近の気候変動を反映した変化が最近の観測値に現れているか、など、観測から明らかにされることが期待されるものは大きい。

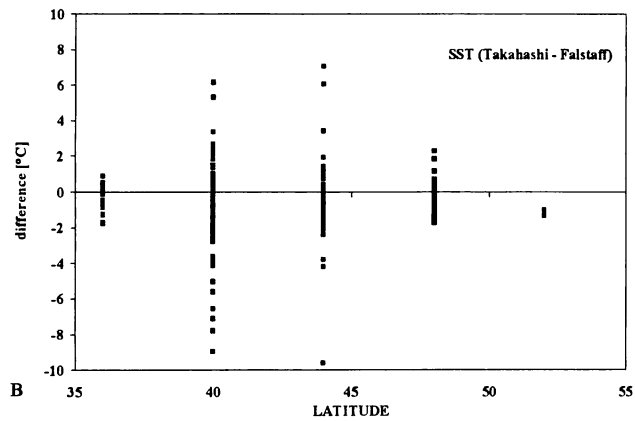
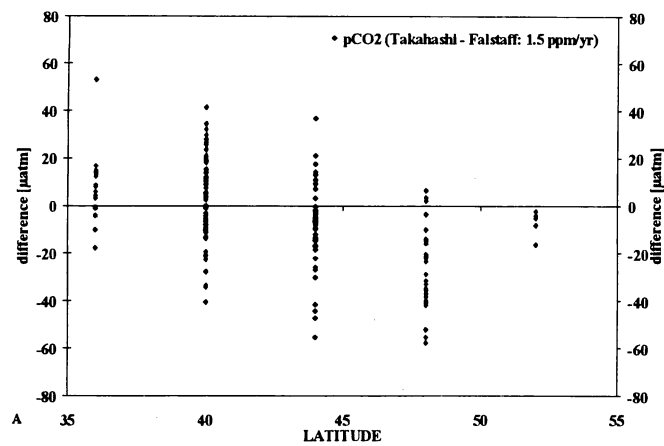


図4 北大西洋定期貨物船FalstaffによるCO₂分圧観測(2002年2月から2003年2月)結果と、Takahashiら(2002)による気候値の比較、海洋-大気CO₂分圧差(上)と水温差(下)を示す。

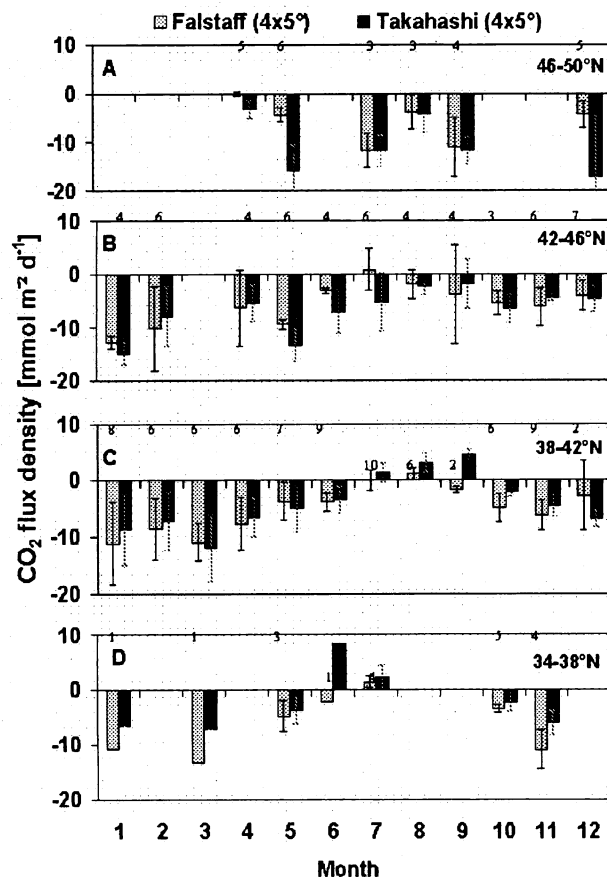


図5 北大西洋定期貨物船FalstaffによるCO₂分圧観測(2002年2月から2003年2月)結果から、緯度帯毎に推定した海洋CO₂放出・吸収フラックス、負が海洋CO₂吸収を示す、Takahashiら(2002)による気候値に基づくものと比較した。

4 (2) 海域の二酸化炭素フラックス解析

大気海洋のCO₂のガス交換は一般的に二酸化炭素分圧差 $\Delta p\text{CO}_2$ 、ガス交換速度 k 、溶解度 K_0 で表現される。

$$F = (p\text{CO}_{2\text{sw}} - p\text{CO}_{2\text{atm}}) k K_0 = \Delta p\text{CO}_2 k K_0 \quad (1)$$

ここで、ガス交換速度 k は

$$k = 0.31 U^2 (Sc/660)^{-1/2} \quad (2)$$

のように、海上10mの風速 U とシュミット数 Sc で表現される。しかし、平均される場において、風速に変動がある場合、時間平均された交換係数 k_{av} は

$$k_{av} = 0.31 U_{av}^2 ((\Sigma U^2/n)/(U_{av})^2)(Sc/660)^{-1/2} \quad (3)$$

のように表現されるものであり、 $((\Sigma U^2/n)/(U_{av})^2)$ を非線形項 R として、従来はRayleigh分布を仮定して $R = 1.26$ として扱われてきた(Wanninkhof, 1992)。現在、密な風速データが得られる場合、非線形項の計算が行えるようになったので、解析にはこれを計算する方法を用いた。

この研究では、緯度4度 x 経度5度のグリッドの海洋CO₂フラックスを求めることとしたが、2つの方法の比較を行うこととした。

第一の方法では、観測船の航跡に従った貨物船による風速衛星観測値を用いたので、式(2)に相当するガス交換式を使用した。 $\Delta p\text{CO}_2$ 観測値は、測定で得られる1分値を用いる。第二の方法では、グリッドの平均風速とその変動係数を用い、式(3)から誘導される風速の変動を考慮するガス交換式を使用した。 $\Delta p\text{CO}_2$ 観測値はグリッドの平均値とその変動を用いる。衛星風速はQuickSCATによるが、航路の25km以内、5時間以内の地点のデータを使用して、必要に応じてデータを内挿した。QuickSCATでは降雨によってデータが除かれることもあり、この操作で、航路の48%をカバーする衛星風速データセットを得た。

海洋のCO₂フラックスを $\Delta p\text{CO}_2$ の観測から求める場合、航路上の風速値によって算出することが通例行われたと思われる。しかしながら、この場合、海域グリッドにおける風速の変動の効果を考えないことになる。今回比較した結果では、航路上の1分値による第一の方法が与えるフラックスは、平均値を用いる第二の方法より低くなり特に風速の大きな月の解析でその差が最も大きくなった。変換を通じて比較すると、航路上の風速をグリッド平均した風速と、グリッド全体の平均値として求めた風速との間には0.2 m/sの差しかなかったが、CO₂フラックスを求める場合の差は著しく大きかった。海洋のCO₂分圧変化の時間スケールが風速の変化の時間スケールと比べてはるかに長いことを考慮すると、グリッド平均の風速を用いることが適当と考えて考察を進めた。

図6に得られた北大西洋のCO₂フラックス分布を示す。北大西洋では、夏は東西ともCO₂フラックスはほぼゼロに近づく。北米に近い最も西部では、夏はわずかに放出に変わることがある(7-8月頃)。最も大きな吸収は12月頃にカナダ沖で見られる。単位面積あたりフラックスは+3から-51 mmol/m²(プラスが放出、マイナスが吸収)であった。西部海域では夏の水温上昇効果が東部海域より大きく現れる。

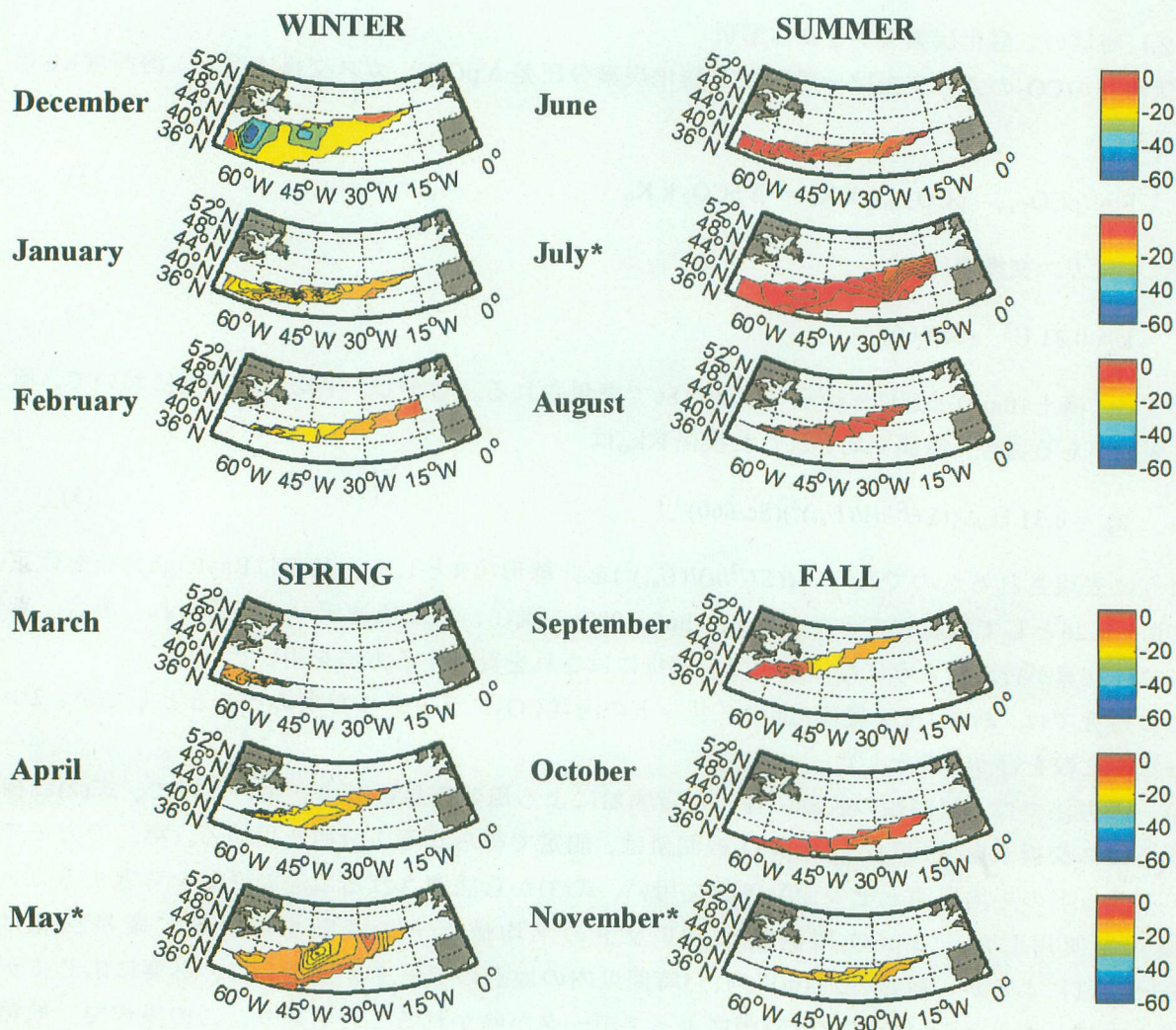


図6 北大西洋定期貨物船FalstaffによるCO₂分圧観測(2002年2月から2003年2月)を用いて算出した海域のCO₂フラックス、緑から青は強い吸収海域を、黄色からオレンジは弱い放出海域を、赤はCO₂収支がゼロに近い海域を示す。

図7には東西海域の比較を月ごと変化として示した。北米よりの西部海域は、12月から5月ころまで、比較的大きな海洋吸収が継続し、夏の7-8月にはほぼゼロフラックスから極弱い海洋放出に転ずる。一方欧州よりの東部海域では、今回の観測データによると、11月から5月にかけてほぼ一定の海洋吸収が継続し、夏に吸収がやや弱まる。

一方、図7の三角で示したデータが、Takahashiら(2002)による気候値を用いて同じ風速場を持って計算した結果である。気候値は1995年基準のpCO₂で表現されているので、その後、大気濃度増加と追従してpCO₂が上昇して行き、 ΔpCO_2 は変化しないという一般的な考え方で計算した結果が薄い色の三角である。Takahashiらの考え方によると、北緯45度以北の高緯度海域では、pCO₂増加が大気濃度の増加を追従しないとされ、その場合、黒三角のフラックスが算出される。西部海域は観測海域が北緯45度以北をほとんど含まないために、三角のデータはほぼ重なるが、東部海域では、有意の差になる。ただし、最近の北大西洋pCO₂データ解析の結果によると、1995年以

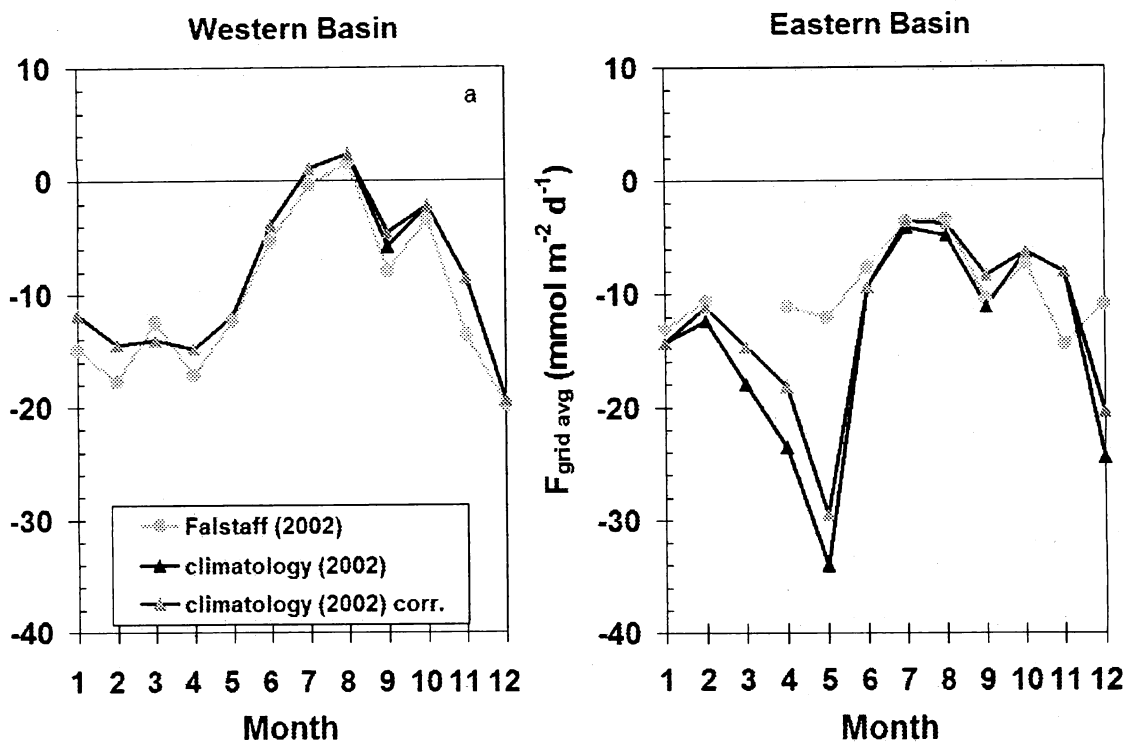


図7 北大西洋定期貨物船FalstaffによるCO₂分圧観測(2002年2月から2003年2月)を用いて算出した西部海域と東部海域のCO₂フラックス、丸が貨物船観測値による結果、三角が気候値(Takahashi, 2002)によるデータに基づく、黒三角と薄い色の三角については本文参照。

降の高緯度海域において、pCO₂増加は大気濃度増加よりむしろ大きいという報告もあり、Takahashiらによる扱いは必ずしも適切でないと思われる。

そこで、海域全域のCO₂フラックスをこの2つの考え方で算出してみた。CO₂分圧気候値を用いる計算において、-53.2 TgC/y(表1)が1995年以来高緯度海域のpCO₂増加が大気濃度増加を追随しないと考えた場合であり、-49.4 TgC/yが追随すると考えた場合である。これに対し、貨物船観測値による計算では、CO₂データは観測値に基づいた緯度4度 x 経度5度グリッド平均値、風速は衛星観測値を用いたところ、-50.5 TgC/yとなった。表1には、加えてCO₂分圧船上観測値(1分値)と航路上風速を用いた場合、風速を全球気象の客観解析データに変えた場合のフラックスも示した。

このように、貨物船観測による解析結果は気候値から算出したフラックスと同じ風速場を用いた場合ほぼ同等の結果を与えた。しかしながら、海域ごとに見た場合、それらには明らかな差があった。図7に示したように、東部海域の5月頃の差は最も顕著であり、貨物船観測によるフラックスは気候値からのものの半分ほどであった。これに対し西部海域は貨物船観測フラックスがやや大きな値となり、これらの効果で海域全域の値がほぼ等しい値となった。これらのことは、観測時期の異なるデータセット間の比較に関して知見を与え、その困難さを明らかにした。

5. 本研究により得られた成果

表 1 北大西洋定期貨物船FalstaffによるCO₂分圧観測(2002年2月から2003年2月)データから算出した北大西洋のCO₂年間収支(TgC/y)、船上観測1分値と航路上風速を用いた場合、グリッド平均CO₂分圧値と緯度4度x経度5度のグリッド平均風速場を用いた場合、風速場をNCEP/NCAR客観解析場に変えた場合、Takahashiら(2002)によるCO₂分圧気候値データを用いた場合の比較。

	Falstaff F _{1-min} 2002	Falstaff F _{grid avg} 2002	Falstaff F _{grid avg} 2002	Takahashi * 2002
Lat	36-52°N	36-52°N	36-52°N	36-52°N
Lon	10-70°W	10-70°W	10-70°W	10-70°W
Flux (Tg C yr ⁻¹ area ⁻¹)	-32.1	-50.5	-48.4	-53.2
Wind speed	QuikSCAT	QuikSCAT	NCEP/NCAR	QuikSCAT
Area (10 ⁶ km ²)	17	17	17	17
Parameterization	W92	W92	W92	W92

海洋CO₂データの統合は、1960年代以来の蓄積データのまとめとしてTakahashiら(2002)によってなされている。その統合データセットは、存在するデータを全て利用したものであるため、いわゆる気候値として扱われるべきものである。これに対し、海域の集中観測データで季節を通した観測を行うことで、特定の年、あるいは年範囲のデータが得られる。この研究課題で実施した北太平洋について、Takahashiらによる気候値と比較を行った例があるが、今回の北大西洋観測は、年間でその比較ができる数少ないデータセットを与えた。観測時期を限ったデータと気候値との差を明らかにする観測を継続することで、年々変動や経年変動が明らかになる。Takahashiらによる気候値は、海洋炭素循環モデル検証のために広く用いられているものであるが、その気候値の確からしさ、最近の気候変動を反映した変化が最近の観測値に現れているか、など、観測から明らかにされることが期待されるものは大きい。

6. 国際共同研究等の状況

本研究は、キール大学海洋研究所A. Koertzing教授との共同研究である。EUによる観測計画には、イギリス、フランス、ノルウェー、ドイツ、スペインが参加し、2001年から2003年の3年次の予算が確保され、観測が行われた。一部の観測は継続されているが、本課題で行ったドイツとの共同観測は、観測協力船の航路変更のため中断中である。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表(学術誌・書籍)

<論文(査読あり)>

- ①H. Lueger, D. W. R. Wallace, A. Koertzing, and Y. Nojiri, The pCO₂ variability in the mid latitude North Atlantic Ocean during a full annual cycle, Global Biogeochem. Cycles, 18, GB3023, doi:10.1029/2003GB002200 (2004)

(2) 口頭発表

- ①M. Chierici, A. Fransson, and Y. Nojiri, Factors controlling the seasonal CO₂ cycle in the surface waters of the North Pacific Ocean: Western subarctic Gyre and the Alaska Gyre, Annual meeting of European Association of Geophysics, Nies, France, April 2004.

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

この観測によるデータは、大西洋の海洋CO₂データベースであるCARINA (Carbon Dioxide in the North Atlantic)で取りまとめられるが、太平洋の海洋CO₂データ統合計画であるPICNIC (PICES CO₂ related data integration for the North Pacific)と連携を進めており、データ相互利用を検討している。2004年1月にはGCP (Global Carbon Project)ワークショップをつくばで開催し、海洋CO₂分圧測定相互比較実験の議論とあわせて、海洋表層CO₂分圧データの相互利用を進めるための、統一データフォーマットの議論、国際データベースの議論を行った。このような各国協力が進んで貨物船利用を含むいわゆるSOOP観測などのデータ統合利用を進めることに有効に働くと、各国の観測が有効に連携し、地球物質循環モデルの構築を通して気候変動予測の進歩に貢献することができる。