

学 位 論 文 題 名

The study of carbon cycle in the upper layer
of the North Pacific

(北太平洋表層における炭素循環に関する研究)

学位論文内容の要旨

海洋の亜寒帯域や寒帯域において、海洋表層中の $p\text{CO}_2$ と全炭酸濃度が、夏季に比べて冬季に高い値を示すことが観測されている。すなわち、この海域では冬季の間、海洋から大気へと CO_2 が放出され、夏季には逆に吸収されている。この季節変化は、主に冬季の高濃度の全炭酸を含む深層水との鉛直混合と、夏季の生物生産によって説明されている。一方、亜熱帯域では、冬季の間、海洋が CO_2 を吸収し、夏季に CO_2 を放出している。この変化は、主に水温によって説明される。

本研究の目的は、以下の3つである。(1) 北太平洋表層の全炭酸分布及び栄養塩分布の季節変動と年平均場を再現し、理解すること。(2) 北太平洋表層における炭素フラックス(大気との交換、混合層の発達、生物生産、移流、拡散)の役割を理解する(季節変動、平均場)。(3) 大気－海洋 CO_2 フラックスの不確定性を見積るために、各過程(年々変動、生物生産)の感度実験を行なう。

そこで、本研究では、海洋表層の季節変動(混合層の発達と生物生産)と平均場を再現できる混合層モデルを含む3次元モデルを用いて、北太平洋における全炭酸分布及び栄養塩分布の季節変化を再現と海洋表層における炭素収支の見積り、感度実験をそれぞれ行なった。モデルの初期値として、WOA94から水温と塩分のデータを、駆動力として大気客観解析データを使用している。モデル内の流れの場合は、水温と塩分のデータから地衡流計算(無流面を1000m)で求めた値を用いている。さらに、モデルには、大気客観解析データの風速から求めたエクマン流の効果も入れている。物理量として、水温、塩分、混合層の厚さをモデルで計算している。一方、化学量の初期の値として、Takahashi et al.(1993)から全炭酸とリン酸データを、炭酸アルカリ度の値は、全炭酸と $p\text{CO}_2$ のデータから化学式を用いて計算した値をそれぞれ用いている。混合層内の全炭酸濃度の時間変化は、大気と海洋間の二酸化炭素交換、混合層の発達に伴う下層からの全炭酸の取り込み(エントレインメントによる)、栄養塩(本研究では、リン酸)の関数で表される生物生産による下層への輸送、移流、拡散によって表される。海水中の二酸化炭素分圧の値は、化学平衡の関係から、全炭酸と炭酸アルカリ度の関数として決まる。混合層以深の全炭酸の時間変化は、混合層内で生物生産により除去された全炭酸が沈降しながら溶解する効果と、移流、拡散による。リン酸と炭酸アルカリ度の時間変化は、大気との交換による項を除いた項で決まる。

海洋表層中の全炭酸濃度分布及びリン酸分布の季節変化は、モデルではほぼ再現できる。また、定点観測との比較から、全炭酸とリン酸の最大と最小になる時期もモデルで再現される。全炭酸濃度分布の季節変化は、三つの過程、すなわち、冬の混合層の発達による混合層以深からの取り込み、夏の生物生産による下層への輸送、大気との二酸化炭素交換に依存する。特に亜寒帯域では、混合層の発達に伴う全炭酸の増加は、混合層の深さだ

けでなく、夏の混合層以深の濃度分布にも大きく依存する。さらに、混合層の発達によるリン酸濃度の増加は、夏の生物生産量の大きさを決めるのに重要である。表層の $p\text{CO}_2$ の季節変化は、冬の混合層の発達に伴う混合層以深からの全炭酸の取り込みと夏の生物生産による下層への炭素輸送による。混合層が発達しはじめる秋には、まだ大気中の $p\text{CO}_2$ に比べて低いため、海洋が CO_2 を吸収するが、混合層が発達すると放出域に変わる。春先の生物生産によって、混合層内の $p\text{CO}_2$ が大気に比べて低くなり、 CO_2 吸収になる。冬の混合層の発達に伴う全炭酸の取り込み量は、混合層がよく発達する海域（アリューシャン列島の南や黒潮続流）で最大になるのではなく、夏の混合層以深の濃度勾配が急な海域（ 45°N - 55°N ）で最大となる。すなわち、高い濃度の全炭酸が表層近くにあると、秋の始めの混合層発達によって、急激に表層の $p\text{CO}_2$ が高くなって、大気への CO_2 放出域になる。春の生物生産による下層への輸送は、冬期間に増化した量をまず減らすのに働く。夏の生物生産量は、海洋が吸収する CO_2 量を増やすのに働く。亜熱帯域の $p\text{CO}_2$ の季節変化は、夏の混合層以深の全炭酸の濃度勾配が、亜寒帯域に比べて緩く、かつ生物生産量も少ないので、主に水温の季節変化に依存する。

海洋表層における年平均炭素収支は、移流と生物生産の間ではほぼバランスする。移流と生物生産の差が、大気からの CO_2 吸収量に相当する。大気との CO_2 吸収と移流と生物生産による比を見積もると、おおよそ1対2対3になる。すなわち、生物生産によって下層へ輸送される炭素量は、約2/3が移流によって、下層から運ばれてきた量で、約1/3が大気から吸収した量になる。緯度毎の平均をとると、 50°N 以北では、移流と生物生産によってバランスするので、大気からの CO_2 吸収量は、0になる。 45° 付近では、大気からの CO_2 吸収量と移流による量は、ほぼ同じになる。亜寒帯域では、上向きのエクマン流によって下層から上層へ運ばれる量が多く、その過剰分の炭素が、南向きのエクマン輸送で亜熱帯域に運ばれ、下向きのエクマン流によって、下層へと押し込む。混合層の発達の大きさや生物生産の違いによるモデルの感度実験の結果から、表層の三つの過程（大気との交換、生物生産、移流）による年平均炭素収支の南北分布は、ほとんど変わらないことが分かった。ただし、下層（300m 以深）の不確定性は、炭素循環を変える可能性がある。特に、全炭酸と炭酸アルカリ度の変動は、直接、大気との交換と移流に影響する。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 田 元 美

副 査 教 授 角 皆 静 男

副 査 教 授 乗 木 新一郎

副 査 助 教 授 山 中 康 裕

副 査 教 授 久保田 雅 久（東海大学海洋学部）

学 位 論 文 題 名

The study of carbon cycle in the upper layer of the North Pacific

（北太平洋表層における炭素循環に関する研究）

人為起源の二酸化炭素が地球温暖化気体として認識されていることは言を待たない。大気に放出された二酸化炭素のうちある部分は海洋に吸収されており、しかも炭酸塩を大量に含む海洋と大気との二酸化炭素交換は地球環境の変化に敏感であるため、海洋表層における炭素循環のメカニズムをより正確に把握することは地球環境研究にとって急務である。北太平洋を例にとれば、季節変動は以下のとおりである。亜寒帯域では冬に海洋混合層が発達し炭酸塩と栄養塩の豊富な海水が混合層にとりこまれ、春から夏にかけては生物生産が活発になることで混合層中の二酸化炭素濃度をさげる。すなわち海洋は冬に二酸化炭素の放出源、夏に吸収源となる。いっぽう亜熱帯域では水温変動の効果が大きく、海洋は冬に吸収源、夏に放出源となる。以上に述べた季節変動に関する定性的な理解を定量的なものにし、さらに年平均場の維持に貢献している過程をあきらかにするため、海洋表層（300m）の物理生物化学モデルを構築した。具体的な目標は（1）北太平洋表層の全炭酸分布および栄養塩分布の季節変動と年平均場を再現し、理解すること、（2）北太平洋表層における炭素フラックスを、大気との交換、混合層の発達による鉛直混合、生物生産による下方輸送、鉛直水平移流の成分にわけて理解すること、（3）大気海洋間の二酸化炭素フラックスの現状における不確定性をみつかり、それを小さくするための方針を提起することである。

海洋3次元モデルに全炭酸、炭酸アルカリ度、そして栄養塩を代表するものとしてリン酸をモデル変数として導入した。生物生産はリン酸濃度に比例し、その比例定数は緯度によって決められた春から秋の期間で生物生産が活発になるという季節変化をする。さらに日本近海で比例定数を大きくすることで経度依存性を表現した。混合層においては二酸化炭素分圧を全炭酸、炭酸アルカリ度、水温の関数としてきめた。大気海洋間の二酸化炭素交換を大気海洋間の分圧差に比例するとした。生物生産に比例する炭酸カルシウム生成によってアルカリ度が減少する効果もとりに入れた。生物生産によって混合層から取り除かれた炭酸とリン酸は、混合層以深ではあらかじめ

決められた速度で再分解する。物理モデルでは、時間的に変動するバルク混合層の厚さ・水温・塩分を、大気との熱フラックス、風応力による乱流混合とエクマン輸送、1000mを基準深さとした地衡流による移流によって予測した。ただし混合層以深の水温・塩分は、モデルによる再現に頼ることなく気候値データをそのままもちいた。生物化学量の初期条件は冬の海面データと非常に少ない鉛直分布データに準拠した。このモデルを大気客観解析データによって16年間駆動し、最後の1年について解析した。

このモデルをもちいて、海洋表層の全炭酸とリン酸分布の季節変化、および西部太平洋での鉛直断面分布を再現することができた。全炭酸濃度の季節変化に支配的な過程は冬期の混合層発達によるとりこみ、夏の生物生産による排除、大気との交換である。混合層発達によるとりこみは、混合層深さよりも全炭酸の鉛直勾配に大きく依存していることがわかった。さらに冬期のリン酸濃度が春と夏の生物生産量を決めているので、冬期の鉛直混合が季節変化の必要条件であるといえる。季節変化が最大となるのは北緯45から55度のベルト状海域であり、季節変化に重要である大きな鉛直勾配はエクマン湧昇によって形成されている。亜熱帯域ではエクマン収束となっているので、生物化学活動が低く季節も小さい。年平均炭素バランスにおいてもエクマン輸送が重要であり、移流による下層から表層への輸送が生物生産による下方輸送とほぼつりあっている。両者の差が大気からの吸収量となっており、その量は生物生産による下方輸送の1/3程度である。大気からの吸収が大きくなるのは北緯45度よりも南である。これらの炭素循環像はモデル中の物理生物化学パラメータの不確定性によつては変わらないが、大気海洋炭素フラックスは300m以深の化学量分布によつて50%程度の誤差がでることが示された。

ここに挙げたモデルの結果と示唆は、二酸化炭素変化にはたす海洋の役割を定量的にあきらかにする一助となり、さらに今後のより詳細な定量化にむけて進めるべき研究方針を提言している。炭素循環と海洋生態系の相互作用を包含したモデル研究にも貴重なステップとなった。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として真摯な態度と研鑽する気構えを有しており、大学院博士課程における努力と取得単位などもあわせ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。