しんいちろう なか おか 恒一郎 中 出 氏名・(本籍) 学位の種類 博 士(理 学) 学位記番号 理博第2288号 学位授与年月日 平成18年9月15日 学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当 研究科, 専攻 東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻 学位論文題目 A Study of Air-Sea Carbon Dioxide Exchange in the Greenland Sea, the Barents Sea and the Southern Ocean (グリーンランド海、バレンツ海および南大洋における大気-海洋間の二 酸化炭素交換に関する研究) 論文審查委員 (主査) 教 授 中 澤 高 清 教授青木周司,川村 宏,花輪公雄 教 授 吉 川 久 幸(客員)

## 論 文 目 次

#### Chapter 1 Introduction

### Chapter 2 Sample Collection and Analytical Procedures

- 2.1 Measurement and calculation of pCO<sub>2</sub>sea and estimation of air-sea CO<sub>2</sub> flux
- 2.1.1 Measurements of pCO<sub>2</sub><sup>sea</sup> in the Greenland Sea and the Barents Sea
- 2.1.2 Measurements  $pCO_2^{sea}$  and  $pCO_2^{air}$  in the Southern Ocean
- 2.1.3 Calculation of pCO<sub>2</sub> and air-sea CO<sub>2</sub> flux
- 2.2 Measurements of DIC and  $\,\delta^{\,13}$ C
- 2.2.1 Collection of seawater sample
- 2.2.2 DIC Analyses
- 2.2.3 Mass Spectrometer Analyses of  $\delta^{13}$ C

# Chapter 3 Temporal and Spatial Variations of pCO<sub>2</sub><sup>sea</sup> and air-sea CO<sub>2</sub> Flux in the Greenland Sea and the Barents Sea

- 3.1 Long-term trend of pCO2 sea and pCO2 air
- 3.2 pCO2 sea-SST relationships
- 3.3 Monthly pCO2 maps
- 3.4 Seasonal variation of the air-sea CO2 flux
- 3.5 Interannual variability of the CO<sub>2</sub> flux

### Chapter 4 Temporal and Spatial Variations of Carbon System in the Southern Ocean

- 4.1 Variation of pCO<sub>2</sub>sea measured on Umitaka-Maru cruise in 2003
- 4.1.1 Fronts and zones in the Southern Ocean
- 4.1.2 Latitudinal and longitudinal distributions of  $pCO_2^{\text{Nea}}$ , SST and SSS

- 4.1.3 pCO<sub>2</sub><sup>sea</sup> -SST relationship
- 4.1.4 Spatial distributions of pCO<sub>2</sub><sup>sea</sup> and air-sea CO<sub>2</sub> flux
- 4.2 Variations of pCO<sub>2</sub><sup>sea</sup> in the western Pacific sector in the summer of 2002
- 4.2.1 Aurora Australis cruise
- 4.2.2 Hakuho-maru (KH-01-3) cruise
- 4.2.3 JARE43 Tangaroa cruise
- 4.2.4 JARE43 Shirase cruise
- 4.2.5 Temporal and spatial variations of  $pCO_2^{sea}$  and air-sea  $CO_2$  flux
- 4.2.6 Comparison of the seasonal variations of  $pCO_2s^{ea}$  and air-sea  $CO_2$  flux in the Southern Ocean, the Greenland Sea and the Barents Sea
- 4.3 Variations of DIC in the western Pacific Sector in summer
- 4.3.1 Spatial distribution of nDIC
- 4.3.2 Temporal variation of nDIC
- 4.4 Temporal variations of  $pCO_2^{sea}$ , DIC and  $\delta^{13}C$  over 10 years
- 4.4.1 Variation of pCO<sub>2</sub>sea
- 4.4.2 Variations of DIC and  $\delta$  <sup>13</sup>C

Chapter 5 Summary

References

## 論 文 内 容 要 旨

全球の炭素循環を解明するうえで、大気-海洋間の $CO_2$ 交換を定量化することや海洋中の炭素の分布や変動を明らかにすることは最重要課題のひとつである。Takahashi et al. (1997)によると、全海洋の70%の海域は大気と海洋表層の $CO_2$ が平衡状態に達しており、一方、南北両半球の高緯度海域は、風が強く、海洋表層の $CO_2$ 分圧( $pCO_2$ で)が大気よりも低いために、主要な $CO_2$ の吸収域となっていると言われている。特にグリーンランド海やバレンツ海は深層水/低層水の形成域として知られており、この海域で吸収された $CO_2$ の多くが深層に直接輸送され、大気との交換が長期間にわたって遮断される点において他の海域とは異なっている(Broecker and Peng、1982)。このため、この海域は炭素循環の定量的な理解にとって特に重要な意味を持っている。また、全海洋面積のおよそ2割を占める南大洋も、巨大な $CO_2$ の吸収源と考えられている(Takahashi et al. 2002)。しかし、これらの高緯度海域は、自然環境が厳しく、観測を基にした年間の $CO_2$ 吸収量の評価は進んでいないのが現状である。

そこで本論文では、東北大と極地研究所が共同で行ったグリーンランド海とバレンツ海の計9回の海洋観測(うち2回の観測は発表者も参加)の結果を解析し、大気海洋間のCO₂交換量の季節変動と年々変動について評価した。さらにCO₂吸収量の変動要因を新たな手法を考案して解析し、考察を行った。また、2002年には東北大と極地研究所、CSIROが共同で実施した南大洋太平洋セクター(140°-150°E)のMultiship観測で得られたサンプルの分析を行い、翌年の東京海洋大学の実習船『海鷹丸』と極地研究所のチャーター船『Tangaroa』に乗船し、夏季南大洋における炭酸系の時空間変動について解析を行った。以下に得られた結果をまとめる。

・グリーンランド海およびバレンツ海で観測された $pCO_2^{**}$ は、 $200-350_{\mu}$  atmの範囲で時空間的に変動した。

これは、大気側の $CO_2$ 分圧( $pCO_2$ <sup>itt</sup>)と比べて低く、この海域が年間を通じて $CO_2$ の吸収源であることを示唆している。観測結果を解析した結果、5-6月を除くすべての期間で $pCO_2$ <sup>itt</sup>と海面水温(SST)の間に正の相関があり、また5-6月には海洋生物活動による $CO_2$ の取り込みによって引き起こされたと考えられる負の相関がある事が明らかとなった。

- ・得られた $pCO_2$  とSSTの関係と、NCEP/NCARのSST再解析データを利用して、グリーンランド海およびバレンツ海の $pCO_2$  では4月と11月に極大値をとり、6月に極小値をとる季節変化を示した。一方バレンツ海西部では2,3ヶ月のスケールで大きな変動を示した。
- ・再現された $pCO_2^{***}$ の時空間分布から、NCEP/NCARの風速データと海氷データおよびニーオルスンでの $pCO_2^{***}$ データを用いて、大気-海洋間の $CO_2$ フラックスを算出した。それによるとグリーンランド海では、夏に最小値37 gC m² yr¹をとり、冬に最大値72 gC m² yr¹をとって、年間52 gC m² yr¹となった。一方、バレンツ海では春に最小値28 gC m² yr¹をとり、冬に最大値63 gC m² yr¹をとって、年間46 gC m² yr¹であった。この結果、グリーンランド海・バレンツ海での年間 $CO_2$ 吸収量は0.050 GtC yr¹であった。
- ・CO<sub>2</sub>吸収量の季節変動と年々変動の要因について考察を行った。その結果、海氷域の変動は、CO<sub>2</sub>吸収量の変動に持続的に影響を及ぼしているもののその効果は小さく、風速と $\Delta p$ CO<sub>2</sub>の季節変動がCO<sub>2</sub>吸収量の変動に与える影響が特に大きい事が分かった。一方、CO<sub>2</sub>吸収量の年々変動は、年間平均CO<sub>2</sub>吸収量に対して± 18%であった。また、風速の偏差は北大西洋振動指数(NAO Index)と正の相関を示し、大気海洋間のCO<sub>2</sub>分圧差( $\Delta p$ CO<sub>2</sub>)と海氷域の偏差はNAO Indexと負の相関を示した。その結果、CO<sub>2</sub>吸収量の偏差もNAO Indexと同様の変動を示した。さらに、CO<sub>2</sub>吸収量の年々変動には、海氷域の変動と、風速の変動が重要であり、pCO<sub>2</sub>での変動による影響は比較的小さい事が示唆された。
- ・南大洋の $pCO_2^{\text{MS}}$ と大気-海洋間 $CO_2$ 交換量の空間分布を調べるために、2003年の1-2月にインド洋セクター( $110^{\circ}$ - $140^{\circ}$ E)と西部太平洋セクター( $140^{\circ}$ - $150^{\circ}$ E)において $pCO_2^{\text{MS}}$ の観測を行った。観測された $pCO_2^{\text{MS}}$ の値は大気よりも常に低い値を示し、空間的に340-365  $\mu$  atmで変動した。また $pCO_2^{\text{MS}}$ はSSTに対して負の相関を示した。そこで、得られた $pCO_2^{\text{MS}}$ とSSTの関係、およびNCEP/NCARのSST再解析データを利用して、1-2月の平均的な $pCO_2^{\text{MS}}$ の空間分布を推定した。再現された $pCO_2^{\text{MS}}$ の空間分布は、南大洋のオーストラリア側で345  $\mu$  atm以下と低く、南極大陸側で360  $\mu$  atm 以上となるような、南北分布を示した。このようにして得られた $pCO_2^{\text{MS}}$ の空間分布と風速データから、対象とした海域での $CO_2$ 吸収量は0.012 GtC month であると計算された。この吸収量を南大洋全域に敷延すると、0.14 GtC month る。
- ・2001年-2002年南大洋の西部太平洋セクターで行われたMulti-ship観測から得られた5ヶ月間のpCO $_2$ <sup>\*\*</sup>の時間変化は、200 $\mu$  atmもの変動を示した。これは、 $CO_2$ や鉄が豊富な深層水の湧昇により、海洋生物活動が活発化したためと考えられる。また、Sub Tropical Frontよりも低緯度側(45°S-48°S)でのpCO $_2$ <sup>\*\*\*</sup>は、Polar Zone内(53°S-53°S)でのpCO $_2$ <sup>\*\*\*</sup>と比べて低い値を示した。
- ・大気-海洋間の $CO_2$ 交換量は、 $pCO_2$ <sup>ea</sup>の緯度分布を反映して、Seasonal Sea Ice Zone(SSIZ) (62°S以南)で36 gC m² yr¹と高く、Polar Frontal Zone (50°S 52°S)では最小値12 gCm² yr¹をとり、Sub Tropical Front (47°S) 以北で再び最大値 36 gC m² yr¹をとるような緯度分布を示した。また海洋の $CO_2$ 吸収量の時間変化は、太平洋セクター(140°E-150°E)で12月に最小値0.018 GtC yr¹をとり、1月に最大値0.055 GtC yr¹であった。さらに、このような吸収が南大洋全域に広がっていると仮定すると、11月から3月までに $CO_2$ 吸収量は0.68-2.0 GtC yr¹の幅で変動したことになる。
- ・生物活動による南大洋のpCOでの低下は、グリーンランド海やバレンツ海での低下と比較して、局所的であり、また持続時間が短いことが明らかとなった。これは鉄供給の不足により南大洋の海洋生物活

動が、グリーンランド海やバレンツ海よりも限定されている事を示唆している。これにより、南大洋の平均的な $\Delta p CO_2$ は、夏季のグリーンランド海やバレンツ海の $\Delta p CO_2$ の4割程度であるが、風は南大洋の方が1.5倍強く、面積あたりの $CO_2$ フラックスとしてはグリーンランド海やバレンツ海の7割程度であった。

- ・2002年1月に行われた白鳳丸航海では、2001年11-12月のオーロラオーストラリス航海時と比較して、南 緯65度以南の表層において、海洋生物活動によって海水中溶存無機炭素 (DIC) の低下が観測された。 (時期を明記すること) また、南緯44度から66度においては深度200m以深で、南緯61度以南では100m 以深で、有機物の分解によるDICの増加が観測期間を通して観測された。
- ・南大洋における、 $pCO_2^{\text{cos}}$  とDIC、そしてDICの炭素の安定同位体比( $\delta^{\text{LS}}$ C)について長期トレンドを調べるために、10年前のデータと比較した。その結果、SSIZを除いた海域で $pCO_2^{\text{cos}}$ の増加率は1.5- $2.2~\mu$  atm yr であることが明らかとなった。これは大気側の $CO_2$ 増加率  $1.4~\mu$  atm yr よりも大きい。一方、SSIZでは、DICの増加率が1.2~mol kg  $^1$  yr である事が明らかとなった。この結果と、DICと $pCO_2^{\text{cos}}$ の関係を利用する事によって、SSIZの $pCO_2^{\text{cos}}$ の増加率は $2.6~\mu$  atm yr であると計算できた。しかし、 $\delta^{\text{LS}}$ Cの変動は、本研究では捉える事ができなかった。これは、海洋中のDICの増加原因がすべて人為起源によるであると考えてもごくわずか(10年間でおよそ-0.04~%)であるからだと考えられる。この事から、南大洋における人為起源 $CO_2$ 吸収の理解のために、今後も長期的な海洋 $CO_2$ 観測が必要であると言える。

### 論文審査の結果の要旨

海洋は主要な炭素の貯蔵庫であり、全球炭素循環の理解にとって大気海洋間のCO。交換を定量化する事が重要である。中間慎一郎は、組織的な海洋観測の結果を基に、グリーンランド海とバレンツ海および南大洋における大気海洋間CO。交換の変動とその原因を解析した。本研究の結果は以下のように要約される。

(1) グリーンランド海とバレンツ海では、 $pCO_2^{sea}$ が $pCO_2^{sea}$ はり常に低く、年間を通して海洋が吸収源となっている事を示した。また、 $pCO_2^{sea}$ とSSTの関係を観測から求め、SST再解析データを利用して両海域の月毎の $pCO_2^{sea}$ を推定し、それを基に大気海洋間の $CO_2$ フラックスを評価したところ、夏あるいは春に最小値、冬に最大値となる季節変化を見出し、年間 $CO_2$ 吸収量を0.05 GtC  $yr^1$ と見積もった。 $CO_2$ フラックスの時間変動を検討し、季節変化に対しては海氷域の影響は小さく、風速と $\Delta pCO_2$ が大きな効果を持ち、年々変動にとっては海氷域と風速が重要となり、 $pCO_2^{sea}$ の影響は小さい事を明らかにした。(2) 夏季の南大洋インド洋・西部太平洋セクターでは $pCO_2^{sea}$ が $pCO_2^{sea}$ はり常に低い事を観測し、両海域での $CO_2$ 吸収量を0.012 GtC  $month^1$ と評価した。夏季の西部太平洋セクターでは生物活動によって $pCO_2^{sea}$ が大きく変動することや、大気海洋間 $CO_2$ 交換量が主に $pCO_2^{sea}$ の違いによって緯度的にも時間的にも大きく異なることを見出した。さらに、南大洋における $pCO_2^{sea}$ の違いによって緯度的にも時間的にも大きく異なることを見出した。さらに、南大洋における $pCO_2^{sea}$ の違いによって緯度的にも時間的にも大きく異なることで見出した。さらに、南大洋の夏季の平均的 $\Delta pCO_2$ はグリーンランド海・バレンツ海の値の4割程度であるが、風は1.5倍強いため、結果として南大洋の $CO_2$ フラックスがグリーンランド海・バレンツ海の約7割となっている事を明らかにした。

以上の結果は、中岡慎一郎が自立して研究活動を行うために必要な高度の研究能力と学識を有していることを示している。したがって、中岡慎一郎提出の博士論文を博士(理学)の学位論文として合格と認める。