

学 位 論 文 題 名

Development of new technique for
estimating the carbonate species to
monitor the change of oceanic conditions

（海洋環境変動モニタリングのための炭酸系成分新規観測手法の開発）

学位論文内容の要旨

大気中の二酸化炭素増加に伴う地球温暖化が問題視されるようになり、二酸化炭素が大気—陸—海洋にどのように分配されているのかを解明することが、今後の地球の気候変動を予測する上で重要になってきた。陸域と比べて海洋は観測が困難なため、海水の炭酸に関わる成分（炭酸系成分：全炭酸、アルカリ度、pH、二酸化炭素分圧（ CO_2 ））のデータの蓄積が少なく詳細は未だ不明な点が多い。そこで、海水中炭酸系成分の連続的な観測システムの構築と継続的なモニタリングが注目されている。本研究では、海洋内部の炭酸系成分をモニタリングするための現場型自動観測機器の開発と、海水表面の広範囲の炭酸系成分を同時期にモニタリングするための衛星データが使用できる炭酸系成分復元アルゴリズムの開発について研究を行った。

現場型自動観測機器の開発としては、pH を測定する手法として精度が高いとされている分光学的な手法（色素法）を応用し、海水中の pH と CO_2 を鉛直的に連続観測できる pH プロファイラーと CO_2 プロファイラーの開発を行った。この色素法は応答性の良さ簡便さという点で試料測定 of 連続化、自動化に適しており、長期モニタリングへの応用も可能である。室内実験の結果、pH、 CO_2 プロファイラーの繰り返し精度はそれぞれ、0.002 pH、15 μatm 、応答速度は 10 秒、1 分となった。さらに、北太平洋において同時観測を行ったところ、既存の観測方法で得た pH の各層採水のボトルデータと pH プロファイラーデータとの差の平均は 0.010 ± 0.013 pH となった。北西部北太平洋における全炭酸増加速度は $2.0 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{yr}^{-1}$ (pH に換算すると $0.04 \text{ pH} / 10$ 年)であるので、数年～10 年の変動をとらえることができる精度を達成できた。また、 CO_2 のボトルデータと CO_2 プロファイラーデータとの差の平均は $15 \pm 17 \mu\text{atm}$ ($n = 31$) となった。この精度では、太平洋の亜熱帯から亜寒帯までの表層混合層における 30

～90 μatm の季節変動をみることが可能である。以上の結果から既存の機器に比べて pH の精度は 6 倍、 CO_2 の応答速度は 5 倍向上し、季節変動や経年変動を検出可能な海洋環境変動をモニタリングするための現場観測機器として有用性が示された。

一方、海洋中の炭酸系成分の時空間的分布を明らかにするため、全球的な観測が 1990 年代から各国の研究機関によって行われてきた。しかし、同時期に広範にわたり観測することは困難であるため、時空間的に詳細な分布を示した例は少ない。そこで、 CO_2 、全炭酸、アルカリ度を表面水温 (SST)、塩分、栄養塩のパラメータで回帰し、これらのパラメータの既存データや衛星データを用いて炭酸系成分を復元する研究が行われてきた。これらのアルゴリズムは季節や海域によらず使用できることが理想であるが、実際は使い分けが必要である。さらに、大気－海洋間の CO_2 交換や海洋の人為起源 CO_2 吸収の見積もりについての研究では、pH は炭酸系成分の中で重要度が低いと考えられており、データ数も少ないためそのアルゴリズムは研究されてこなかった。しかし、pH は観測精度の向上やデータ数の増加によって炭酸系成分データのクオリティコントロールに用いられているほか、生物場環境変動との関わりから海洋の環境変動を表す指標として、近年重要度が増している。

そこで、衛星データが使用できる炭酸系成分復元アルゴリズムの開発として、北太平洋全域において SST (K) とクロロフィル *a* ($\text{Chl}, \mu\text{g l}^{-1}$) から pH を復元するアルゴリズムの作成を試みた。SST と Chl は '92 年から '02 年かけて北太平洋全域で得られた 6 つの航海と 2 つの時系列観測点における表面の pH (pH_m)、SST、Chl 観測値から pH の復元値 (pH_p) は北太平洋全域に対して SST と Chl の 2 つのパラメータの簡単な 1 本の式として、以下のように表すことができた。

$$\text{pH}_p = 0.01325 \text{ SST} - 0.0253 \text{ Chl} + 4.150 \quad (1)$$

$$(\text{RMSE} = 0.025, R^2 = 0.95, p < 0.0001, n = 483)$$

次に、pH の時間変動に 1 式が適用可能かを確認するため、亜熱帯ならびに亜寒帯域における時系列観測点 HOT (23°N, 158°W) と KNOT (44°N, 155°E) の pH_p と pH_m を比較した。HOT における ΔpH ($\text{pH}_m - \text{pH}_p$, '92～'97, $n = 33$) は 0.012 ± 0.011 pH、KNOT における ΔpH ('98～'02, $n = 19$) は -0.005 ± 0.031 となり、観測期間全体では 0.006 ± 0.022 pH となった。この結果から、各海域における pH の季節変動、さらにはすでに述べたとおり北太平洋における炭酸系成分の数年～10 年スケール変動をとらえるのにも 1 式は有用であることが示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 乗 木 新 一 郎

副 査 教 授 吉 川 久 幸

副 査 助 教 授 渡 辺 豊

副 査 室 長 小 埜 恒 夫

(独立行政法人水産総合研究センター北海道区水産研究所)

学 位 論 文 題 名

Development of new technique for estimating the carbonate species to monitor the change of oceanic conditions

(海洋環境変動モニタリングのための炭酸系成分新規観測手法の開発)

大気中の二酸化炭素増加に伴う地球温暖化が問題視されるようになり、二酸化炭素が大気—陸—海洋にどのように分配されているのかを解明することが、今後の地球の気候変動を予測する上で重要になってきた。陸域と比べて海洋は観測が困難なため、海水の炭酸に関わる成分（炭酸系成分：全炭酸、アルカリ度、pH、二酸化炭素分圧（ CO_2 ））のデータの蓄積が少なく詳細は未だ不明な点が多い。そこで、海水中の炭酸系成分の連続的な観測システムの構築と継続的なモニタリングが注目されている。本研究では、海洋内部の炭酸系成分をモニタリングするための現場型自動観測機器の開発と、広範囲に海洋表面の炭酸系成分を同時期にモニタリングするための炭酸系成分復元アルゴリズムの開発について研究を行った。

現場型自動観測機器の開発としてはpHを測定する手法として精度が高いとされている分光学的な手法を応用し、海水中のpHと CO_2 を鉛直的に連続観測できるpHプロファイラーと CO_2 プロファイラーの開発を行った。室内実験の結果、既存の機器に比べてpHの精度は6倍、 CO_2 の応答速度は5倍向上した。さらに、北西部北太平洋において2つのプロファイラーの同時観測を行い、各層採水のボトルサンプルと比較したところ、炭酸系成分の季節変動や数年から10年の経年変動を検出可能な現場観測機器としての有用性が示された。

炭酸系成分復元アルゴリズムの開発として、北太平洋全域において人工衛星で観測可能な表面水温（SST）とクロロフィル a （Chl）からpHを復元するアルゴリ

ズムの作成を試みた。表層の pH、SST、Chl 実測値を用いて相関を取ったところ、pH の復元値を SST と Chl の 2 つのパラメータの簡単な 1 本の式として表すことができた。また、亜熱帯と亜寒帯の時系列観測点において過去 10 年の実測値と pH の復元値を比較した結果、季節に関係なく pH を復元できることが確認された。さらにこの結果から、作成したアルゴリズムは北太平洋で報告されている炭酸系成分の季節変動や数年スケールの経年変動を検出できる精度で pH を復元でき、海洋環境変動のモニタリングに有効であることが証明された。

申請者は海洋における炭酸系成分モニタリング手法を 2 つ開発した。1 つは海洋内部を直接観測できる pH・CO₂ 自動鉛直観測機器の開発、もう 1 つは衛星データを利用して間接的に海洋表面を広範囲に観測できるアルゴリズムの開発である。前者は無人観測ブイなど応用することによって、炭酸系成分の観測データが飛躍的に増加することが見込まれる。後者については衛星データを適用することで、同時期に広範囲の炭酸系成分データが観測可能となる。これらのモニタリングの結果は、海洋による二酸化炭素の吸収・放出過程の影響評価や今後の気候変動予測研究において、必要不可欠なものになると期待できる。得られた知見はオリジナリティが非常に高いものであり、重要な研究である。

審査員一同はこれらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や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。