

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21654073

研究課題名（和文） X線 CT 技術を用いた海洋の炭酸イオン濃度指標の確立

研究課題名（英文） Development of proxy for oceanic carbonate using Micro-X-ray CT technique

研究代表者

木元克典（KIMOTO KATSUNORI）

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・技術研究副主幹

研究者番号：40359162

研究成果の概要（和文）：

マイクロ X 線 CT スキャナを用いた海洋の炭酸塩溶解の定量化のための手法を確立した。炭酸塩の溶解量は体積の関数である全 CT 値と平均骨格密度の関数である平均 CT 値によって表現される。天然及び実験環境下での試料においても本研究手法が有効であることが確かめられた。

研究成果の概要（英文）：

Quantitative evaluation methods of dissolution for marine carbonates (foraminifera) using Micro-focus X-ray Computing Tomography (MXCT) has developed. Quantity of carbonate dissolution is expressed by total CT value as shell volume, and mean CT value as shell density. Availability and usefulness of this method was confirmed for natural and laboratory samples.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,400,000	0	1,400,000
2010 年度	1,100,000	0	1,100,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	150,000	3,150,000

研究分野：微古生物学

科研費の分科・細目：地球惑星科学層位・古生物学

キーワード：炭酸塩溶解、炭酸イオン濃度、海洋酸性化、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナ、浮遊性有孔虫

## 1. 研究開始当初の背景

海洋表層に生息する有孔虫や円石藻に代表される一部の石灰質プランクトンは、その外骨格となる炭酸塩の形成時に海洋の二酸化炭素分圧を上昇させるが、死後海底における溶解は深層水のアルカリ度を上昇させ、大気二酸化炭素を海水中への溶解度を高めるため、炭酸系におけるバッファとしての役割を担っている。大気二酸化炭素の海洋への溶解は、

海水中の炭酸イオン濃度 ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) と堆積物から溶解する量によって決まるため、石灰質プランクトンの生産性と溶解量を正しく復元し、過去のグローバルな気候変動との関連性を明らかにすることは、炭素サイクルを中心とした地球環境システムを正しく理解するための最優先課題である。

過去数十万年間の炭酸イオン濃度の復元は従来、海底堆積物中の炭酸塩骨格の保存の良

否、炭酸塩含有量の測定や、生物起源粒子の重量比などの方法が検討されてきた。しかし、いずれの方法も試行的検討にとどまり、溶解の定量化は達成できていない。深海における炭素リザーブとしての重要性は認識されつつも、実質的な炭酸塩溶解の研究の進展は90年以降ほとんど無く、包括的検討が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、定量的な炭酸塩溶解指標を確立するため、海底に沈積した有孔虫骨格の内部構造に記録されている溶解の履歴に着目する。石灰質有孔虫の骨格は、炭酸カルシウム（カルサイト）である。化学平衡論的にはカルシウムイオンと炭酸イオン濃度の積を溶解度積で除した溶解度指標  $\Omega_{cal}$  (1.0で平衡) が1.0以下の水深では溶解が進行する。カルシウムイオン濃度は滞留時間が長く、海洋中でほぼ一定の濃度であるため、 $\Omega_{cal}$ の分布は炭酸イオン濃度の変化と見なせる。強い溶解を受けた炭酸塩の粒子は空隙率が大きくなり、脆く崩れ易くなることが顕微鏡観察により判明している。この空隙は炭酸塩溶解量に比例することが予想でき、有孔虫骨格の微小な構造欠損を正確に定量化することができれば、 $\Omega_{cal}$ すなわち炭酸イオン濃度に対する溶解量をこれまでになく詳細に、かつ定量的に求めることが出来るはずである。

## 3. 研究の方法

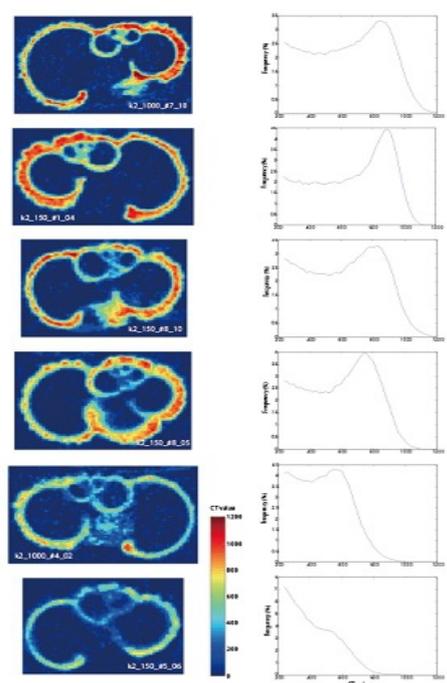
本研究の方法論は、(1)マイクロフォーカスX線CTスキャナー（以下MXCT）を用いた有孔虫骨格の3次元構造解析を行い、そのX線透過率から有孔虫骨格の密度を求める指標の開発、(2)有孔虫骨格の密度変化と海水の炭酸イオン濃度の関係を明らかにし、過去の海水の炭酸イオン濃度を求める換算式を確立、そして(3)現在の海洋における水柱での溶解現象の把握と炭酸イオン濃度の関係を明らかにし、(4)堆積物中の浮遊性有孔虫骨格を用いた、炭酸塩溶解の定量を行う。

## 4. 研究成果

(1)MXCTを用いた骨格密度定量のための基礎実験では、X線吸収係数を定量的に計測する手法を開発した。実験当初、X線検出器である光電子倍增管（パネル）の検出感度の測定ごとのドリフトが問題となった。このため、空隙率0%のち密な天然の炭酸塩試料（ピノスガイの殻）と常に同時に検量することで補正を行った。これにより空気層を0、ピノスガイを1000とし、この間に分布する浮遊性有孔虫のX線吸収係数を正確に求めることができるようになった。さらに、測定時の断層

像の画質向上のため、ソフトウェア上でのデータプリプロセッシング技術の向上を行い、アルゴリズムの構築を行った。

(2)自作のCO<sub>2</sub>連続曝気装置を作成し、これを用いて浮遊性有孔虫 *Globigerina bulloides* の骨格の溶解実験を行い、CT値の測定を行った。7時間のCO<sub>2</sub>曝気によるpHの変動は、7.8から5.3であり、重量の損失は平均60%であった。重量から求められる溶解量（溶解前と溶解後の重量差）とX線吸収係数（全CT値）、平均CT値は明瞭な直線関係を示した。このことより全CT値を体積、平均CT値を密度として有孔虫骨格密度を評価する関数とするのが妥当であることを確認した。

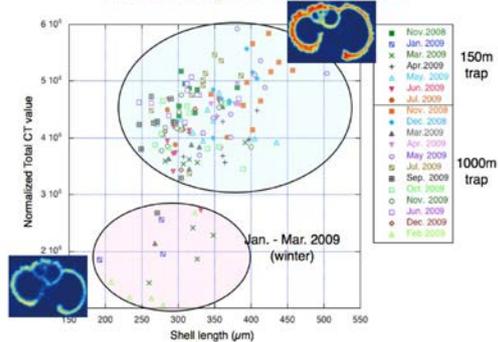


(3)これらの基礎実験結果をもとに、現在の海洋の水柱で起きている溶解現象を知るため、北西部北太平洋に係留されたセジメントトラップ（150mと1000mに係留）試料中に含まれる浮遊性有孔虫 *G. bulloides* の骨格を用いてそれぞれ合計156個体について分析を行った。現在北西部北太平洋では、 $\Omega_{cal}$ =1.0となる水深が150mに位置しており、それ以深では海洋化学的には溶解が進行していることが考えられる。

MXCT分析の結果、有孔虫の体積を示す全CT値は大きく分けて高いものと低いもの、2つのクラスターに分かれることが明らかとなった。

### Total CT values vs. Shell length

Shell dissolution increases in the winter (Jan. - Mar.) seasons.



さらに両者の水深間で炭酸塩溶解の明確な差異はほとんどないことが判明した。これはそれぞれの水深において、浮遊性有孔虫骨格が未飽和な海水に異なる時間さらされているにもかかわらず、1000mの水深に置いても溶解していないことを意味している。

この理由として、以下のことが考えられる。炭酸塩殻は海水中の懸濁粒子でもっとも重く、 $>200\text{m/day}$ の沈降速度があるため、1000mの水深には数日で達してしまい、捕集瓶の中ですみやかに周囲の海水と隔離して保存される。このため、短時間には炭酸塩溶解が進まない可能性がある。これは炭酸塩に未飽和な海水に晒されても炭酸塩粒子はごくわずかしか溶解しない可能性がある。炭酸塩をより効果的に深海底に輸送する機能として有孔虫骨格は効果的に働いていることを示す結果であると判断される。一方で、明らかに溶解が認められた個体群も存在した。これは骨格の大きさが $200\sim 350\mu\text{m}$ の大きさのものに限られ、またこれは150m, 1000mの水深に関係なく、2009年1月～3月に生成された浮遊性有孔虫の粒子に限られることが明らかとなった。これは試料の顕微鏡観察による溶解の進行具合の見積りとも一致する。さらにこの時期は混合層が深くなる冬期に一致していた。すなわち、冬期における有孔虫骨格の溶解は、低pH、低全アルカリ度 (At)、そして高い全炭酸 ( $\text{TCO}_2$ ) をもった海水が表層海水にもたらされることに起因すると考えられる。このことは、水柱でも沈降粒子中の炭酸塩の溶解が起こりうることを示唆すると同時に、炭酸塩溶解には季節性が存在する可能性を強く示唆している。季節性の炭酸塩溶解についてはこれまで報告が無い。炭酸系の季節性 (seasonality) は、現在の観測手法ではAtやDIC (溶存無機炭素濃度) の季節的な変動を検出するのは困難であるからである。本研究の結果は、浮遊性有孔虫骨格が海水の溶解度に敏感に反応している可能性を強く示唆していた。浮遊性有孔虫骨格は海洋酸性化の微小な変化をモニターする天然

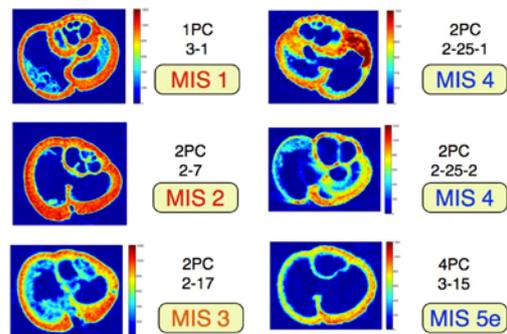
のもっとも優れたセンサーとなる可能性を示唆するものであり、今後のさらなる研究が必要である。

(4) 海底堆積物を用いた炭酸塩溶解の定量化について、予察的であるが着手することができた。用いた海底堆積物は南大洋タスマン海台の斜面からデプストランセクトで得られた海底堆積物であり、過去15万年までの記録を保持する2PC (2400m) と4PCコア (2900m) である。

このコアに豊富に含まれる浮遊性有孔虫骨格 *Globorotalia inflata* の骨格密度を時系列で測定した。その結果、タスマン海台の浮遊性有孔虫骨格は過去15万年間で顕著に変化していた。

### 海底堆積物試料 KH94-4 TSP cores

*Globorotalia inflata* (Southern Ocean)



すなわち、海洋酸素同位体比ステージ (MIS) 1から2にかけては保存が良く、MIS3～5eにかけて保存が悪くなっている傾向を示した。この変動は、同じコアの円石藻化石から復元された溶解変動曲線と大局的に一致していた。さらに、2PCに比べて、4PCのほうが平均CT値で約10%低下しており、水深の違いによる炭酸イオン濃度の違いの効果が現れているものと思われる。本コアについては引き続き研究を実施してゆく予定である。

### まとめ

本研究では、これまで定量化が難しかった炭酸塩溶解量の推定に向け、マイクロフォーカスX線CTスキャナーを用いた手法の開発を行った。現生の浮遊性有孔虫試料および化石試料に応用し、炭酸塩溶解の推定に本手法が十分に有効であることを確認することができた。本研究で明らかになったことは、以下である。

1. X線吸収係数から見積られるCT値が骨格の密度と良い関係がある。
2. 沈降課程にある炭酸塩粒子の溶解は、水柱の $\Omega_{\text{cal}}$ で示唆される炭酸イオン濃度の勾配が直接骨格の密度変化に現れていないが、長期的なトレンド、とくに季節的な水塊の変化とは関係がある可能性がある。

3. 海底堆積物中に含まれる浮遊性有孔虫骨格の密度は、炭酸塩溶解を示している。

4. 本研究で確立した手法は、海洋酸性化に対する生物への影響評価に有効であると考えられる。

今後は、現生試料についてさらなる研究を継続し、現在懸念されている海洋酸性化の生物への影響の定量化に向けた手法の確立を実施する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 6 件)

① 木元克典, 佐々木理, 原田尚美ほか. マイクロフォーカス X 線 CT 法による海洋酸性化の影響調査. 日本海洋学会シンポジウム. 2012 年 3 月 30 日. 筑波大学 (つくば市).

② 木元克典, 佐々木理, 鹿納晴尚, 岩下智洋, 入野智久, 多田隆治. 炭酸塩溶解指標としての浮遊性有孔虫の X 線トモグラフィ. 地球惑星科学連合大会. 2011 年 5 月 27 日. 千葉幕張メッセ (千葉).

③ 木元克典, 佐々木理, 鹿納晴尚, 岩下智洋, 入野智久, 多田隆治. 炭酸塩溶解指標としての浮遊性有孔虫の X 線 CT トモグラフィ. MRC 微化石研究会. 2011 年 3 月 5 日. 東北大学 (仙台).

④ 木元克典. 浮遊性有孔虫の 3D トモグラフィ: 炭酸塩溶解指標の定量化に向けて. 東大大気海洋研究所シンポジウム. 2011 年 2 月 9 日. 東京大学大気海洋研究所 (柏).

⑤ 木元克典, 中村由里子, 原田尚美, 川上創, 本多牧生. 北西部北太平洋 K2 ステーションにおけるセジメントトラップ中の浮遊性有孔虫群集と安定同位体比の変化. ブルーアースシンポジウム. 2011 年 2 月 5 日. 東京海洋大学 (品川).

⑥ 木元克典, 佐々木理, 鹿納晴尚, 岩下智洋, 入野智久, 多田隆治. マイクロ X 線 CT 技術による有孔虫骨格破片を用いた海底堆積物中の炭酸塩溶解定量法の開発. 日本地球化学会. 2010 年 9 月 6 日. 立正大学 (埼玉).

[その他]

日経ナショナル ジオグラフィック社、ナショナルジオグラフィック特別編集版「ワールド・イズ・ブルー 未知なる海」、2010 年・7 月、P.34~37

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

木元 克典 (KIMOTO KATSUNORI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・技術研究副主幹

研究者番号: 40359162

(2) 研究分担者

佐々木 理 (SASAKI OSAMU)

国立大学法人東北大学総合学術博物館・

准教授

研究者番号: 60222006

入野 智久 (IRINO TOMOHISA)

国立大学法人北海道大学大学院地球環境科学研究院・助教

研究者番号: 70332476