

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21898

研究課題名(和文)天然環境で実施するリアルタイム「化石・ノジュール形成実験」

研究課題名(英文)Experimental study on fossilization and nodule formation

研究代表者

ジェンキンス ロバート (Jenkins, Robert)

金沢大学・地球社会基盤学系・准教授

研究者番号：10451824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：生物遺骸の分解過程・化石化過程をリアルタイムに捉えることを目的に、鯨類遺骸の海底設置と観察・化学環境分析、化学環境モニタリング手法の開発などを行った。

その結果、骨外有機物の存在下では遺骸極近傍での酸素濃度低下は起きるものの、骨の鉱化や自生炭酸塩鉱物沈殿は起きなかった。各種試料分析で明らかになった遺骸分解開始から1年以内におきる骨組織の膨潤と鉱化、骨表面および骨内空間への自生炭酸塩鉱物の沈殿の原因解明には、骨内化学環境の把握が欠かせないことが明らかとなった。骨内の水環境モニタリング手法を各種検討した結果、酸素センサーチップや2D酸素反応フィルム(オプトード)が有効であるとの結論に至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生物遺骸の分解は生態系の物質循環において欠かせないプロセスであるが、人類はその実態の一端しか理解できていないのが現状である。本研究では、地球上最大の有機物塊である鯨類遺骸を題材に、遺骸分解プロセスの解明に挑んだ。その結果、骨の内外で有機物の分解速度がまったく異なり、また、骨表面を境とした急激な化学勾配があることを明らかにした。また、新規手法開発によって硬組織(骨)内部の化学環境モニタリングの実現可能性に具体的に迫ることができた。これは、生態系における物質循環(炭素循環)の実態解明や生体硬組織(もしくはその疑似人工物)を利用した炭素固定法などへの応用にもつながることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we measured dissolved oxygen concentration of seawater in/around deployed whale carcass during its decay. Oxygen concentration was measured. As results of measurements, decomposition of whale bones with soft tissue forms less than 1 cm thick dysoxic environment on the bone surface. After removal of the soft tissue around the bones, the dysoxic environment area shrinks to 2 mm thick on the bone surface and the inside of the bone was anoxic. To understand mineralization of bones and precipitation of authigenic minerals on/within bones, it needs to reveal chemical condition within the bones. After we tried and investigated several methods, it has been revealed that using 2D O<sub>2</sub>-Sensor film on a sectioned bone is useful.

研究分野：古生物学

キーワード：化石化過程 化石成因論 鯨骨群集 物質循環 炭素循環

## 1. 研究開始当初の背景

地球史を通じた地球の環境変動と生命の関りの直接的な関係は「化石」からもたらされる。ところが、「化石」の形成過程・メカニズムのほとんどはわかっていない。地球生命の変遷の証拠である「化石」がどのように形成されるのかを解明することは、「化石」の本質を理解して地球生命史を正しく把握することにつながる。

化石の保存にはいくつかのプロセスがあるが、特に重要なのが生物遺骸の初期分解プロセスである。近年になって、有機物の分解とその後の硬化作用が数ヶ月単位の短期間で形成されることが強く示唆されてきた。これは天然環境を模した実験系におけるアルテミア（甲殻類）の分解プロセス観察においても示唆されてきた。しかしながら、天然の海洋環境における有機物分解プロセスの観測例はほとんどなかった。鯨類遺骸に関しては、その遺骸分解過程で形成される特殊な生物群集（鯨骨群集）が着目されて例外的に分解過程の観察／観測が行われていた。その観測事例は、鯨骨群集が深海域に特徴的であると考えられていたが故に、ほとんどの場合は深海域であった。深海における遺骸分解過程の観察／観測には潜水艇／無人潜水機の利用が必須となるため、継続的な観察が難しかった。一方、筆者らは化石鯨骨群集の例などから浅海域でも鯨骨群集が形成されることに着目して、浅海域における鯨類遺骸の設置実験を展開していた。その過程で、浅海域では深海と比較して短期間（1-2年程度）で生物遺骸の初期分解プロセスや遺骸依存群集の成立・遷移が完了し、また、遺骸の鉱化も短期間で起きることを見いだした。これらの予備実験の結果やこれまでの国内外の研究状況から、浅海域に遺骸を設置して、その経過をモニタリングすることで、遺骸の分解プロセスの詳細や化石化作用（鉱化や自生鉱物による遺骸の被覆）、遺骸依存群集の形成過程と遺骸保存への影響などが明らかになると期待された。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究では、浅海底へ設置した鯨類遺骸を対象に、継続的な観察および水質分析による遺骸分解プロセスと解明と各段階における化学反応フロントの特定、観測手法の確立を主目的とした。また、浅海における鯨類遺骸の分解過程を理解するための比較・参考材料として浅海堆積物中から産出した鯨骨化石および鯨類遺骸依存化石群集（鯨骨群集）についても合わせて明らかにすることとした。

## 3. 研究の方法

### 【浅海底における鯨類遺骸設置・観察／観測実験】

能登半島先端近くの九十九湾の海底（水深15m）に鯨類遺骸を設置した。その際、鯨類遺骸をプラスチック枠に半固定した。固定枠には酸素・pH・水深・水温センサを取り付け、水質を継続的に観測できるようにした。また、固定枠に複数の採水チューブをあらかじめ設置し、スキューバ潜水によって遺骸に近づいた際の水塊の乱れを最小限に抑えた。遺骸の観察はスキューバ潜水によって断続的に実施した。特に遺骸設置初期には数日以内の間隔で時系列観測を行った。

### 【水槽内における骨外／骨内の水質モニタリング方法の模索実験】

脊椎動物遺骸においては、遺骸分解プロセスの解明には骨内部の状態・水質把握が重要となる。本研究では、海底に設置した鯨類遺骸において、骨外有機物が消失した骨を回収して、現場海水を満たした水槽内に移設した。移設にあたっては、以下の3手法により骨内環境の計測を試行した。(1) 穴あけ採水法：骨に骨内浸透水を採取する穴（直径3mm）をあけ、穴開口部にセプタムキャップで栓をした。骨外からセプタムを通じて注射針で定期的な骨内水の採水を試みた。(2) 2D酸素センサースポット法：回収した骨を切断し、切断面をあらかじめ直径5mmの酸素センサースポットを貼付した水槽壁面に接着し、水槽外から非破壊酸素濃度計(Fibox3 Trace v3; PreSens社製)を用いて骨内酸素濃度のモニタリングを行った(図1)。

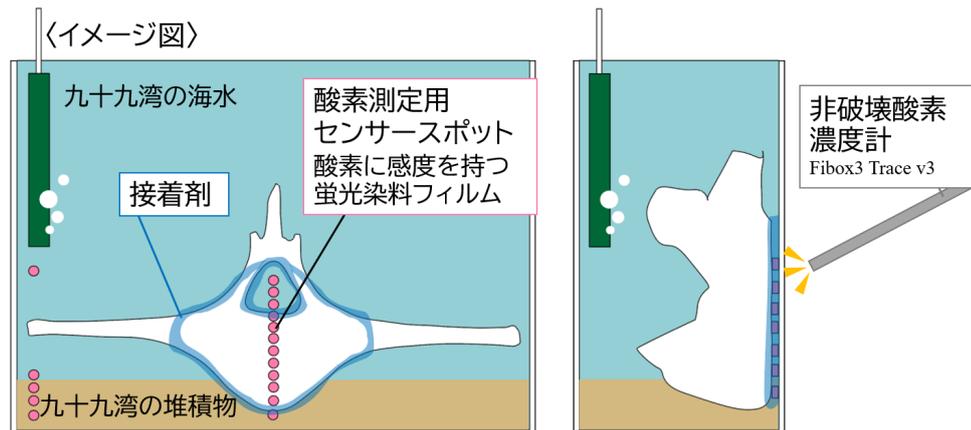


図1. 2D酸素センサースポット法の実験デザイン図

上記に加えて、骨表面を境界とした骨内外の環境把握のために2D酸素センサーフィルム(オプトード)を用いた酸素濃度の2Dプロファイルの取得法について検討をした。これには水槽壁面にセンサーフィルムをシリコン接着剤で貼付し、フィルム上に骨表面が位置するように鯨骨切断面を水槽壁面に密着(接着)した。フィルム貼付部位を対象に、水槽外からVisiSens(PreSens社製)を用いて骨内/骨外酸素濃度のイメージングを行った。

#### 【浅海型鯨骨化石群集の研究】

金沢市内に分布する更新統大桑層から産した鯨骨化石を対象に、骨を被覆する自生炭酸塩鉱物層や骨化石と共産した無脊椎動物化石の産状・種類を調査した。

#### 4. 研究成果

##### 【浅海底における鯨類遺骸設置・観察/観測実験】

遺骸設置後 10 日目までの間には、遺骸から 1cm 離れた地点での海水中溶存酸素濃度が顕著な低下が見られたが、それ以降は遺骸から 1cm 未満においても酸素濃度が周辺海水の酸素濃度と差が見られなかった。鯨類遺骸は巨大な有機物塊として捉えられるが、酸化的な海水環境において、遺骸構成有機物の分解に伴う無酸素領域は遺骸からセンチメートルオーダーの範囲にしか形成されないことが明らかとなった（図 2）。骨外有機物の消失以降の調査期間全期間において、骨表面にイオウ酸化細菌による微生物マットおよびイオウ酸化細菌を外部共生したツリガネムシ類の繁茂が確認できている。これは、骨内から硫化水素が漏出していることを意味しており、鯨類遺骸の分解過程の理解には、骨内環境の詳細把握が必要であることが明確になった。

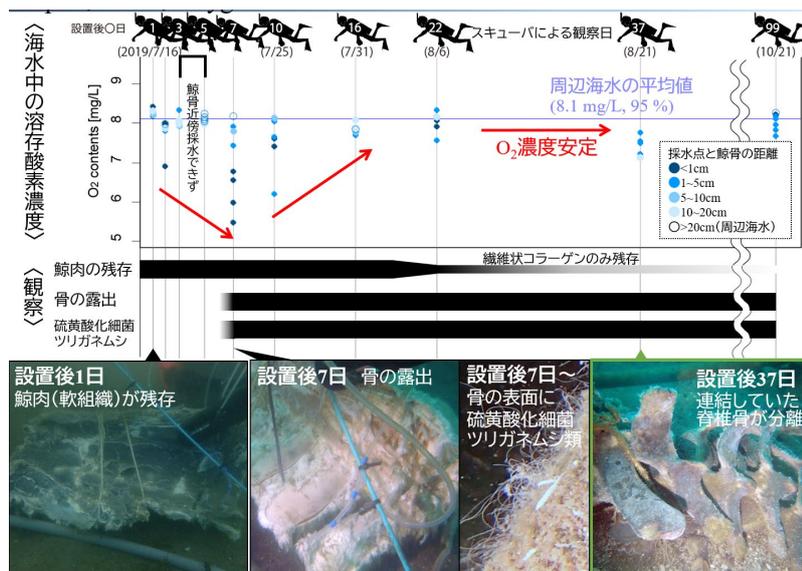


図 2. 現場設置酸素計を用いた鯨類遺骸近傍における酸素濃度の時系列変化

### 【水槽内における骨外／骨内の水質モニタリング方法の模索実験】

(1) 水槽に設置した鯨骨から穴あけ採水法によって骨内水の採取を行ったところ、骨外は天然環境と差の無い酸素濃度(約 97%)だったのに対して、骨内は貧酸素環境(約 37-57%)であった。ただし、注射器による採水時に極度の陰圧になって採水時に骨外海水が骨内に侵入した可能性が排除できない。また、本手法では骨内における深度別酸素濃度を把握することが困難である。

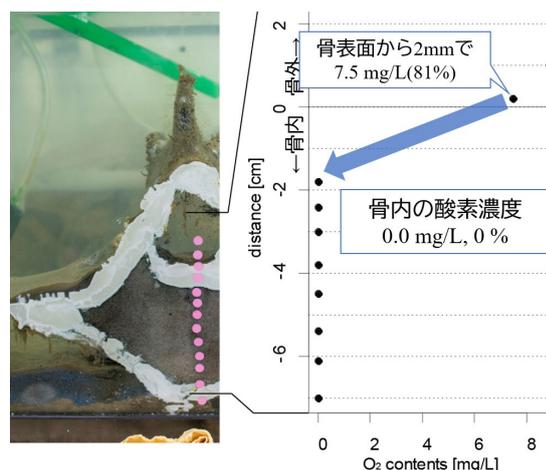


図 3. 2D酸素センサースポット法による水槽実験結果

(2) 2D 酸素センサースポット法においては、骨表面から海水側に 2mm 地点では酸素濃度が約 81%であったが、骨内部（骨表面から 1.8cm 以深）は酸素濃度が 0%であった。この実験により骨内から骨外への酸素濃度プロファイルの取得に成功し、骨内有機物の酸素による分解は骨内浅部で起きていることが判明した。一方で、酸素センサースポットの直径が約 5mm あることから、ミリオーダーでの酸素プロファイルやその時系列変化を捉えることは本手法では困難である。この点を克服するために、2D酸素セン

サーフィルム(オプトード)法の骨内外酸素濃度プロファイル取得への応用を目指した。水槽内壁面に貼付したセンサーフィルムに骨の切断面を密着させるが、フィルム上に海水/骨境界を位置させると、フィルム厚の分だけフィルムが内部分に隙間が生じて海水が骨内に侵入する。この点をセンサーフィルムと同厚の透明フィルムをはさみ、骨表面を紫外線硬化樹脂でシールすることで、海水/骨境界を含む骨内酸素濃度の可視化ができるようになった。

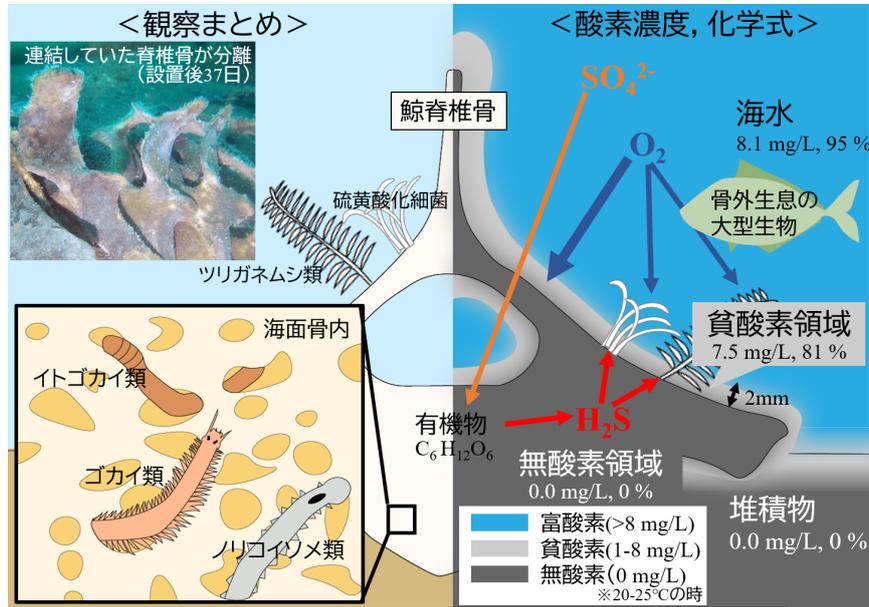


図 4. 浅海鯨骨遺骸分解プロセス解明実験のまとめ

#### 【浅海型鯨骨化石群集の研究】

金沢市に分布する大桑層(おんまそう; 第四紀更新世)から産出した鯨類化石(橈骨1本)を精査し、骨近傍(数cmの距離内)から19個体のツキガイモドキ類化石がほぼ合併で含まれていることを見いだした。殻の方位を計測すると、ほとんど殻頂部を上に向けており、現生で知られるツキガイモドキ類の生息姿勢とほぼ一致していた。以上のことから、ツキガイモドキ類は鯨骨に依存した鯨骨化石群集であると結論づけた。他に個体数は少ないがキヌタレガイ類や保存良好な肉食性腹足類(巻貝)も産しており、これらも鯨骨群集の一員であった可能性が高い。

現生ツキガイモドキ類およびキヌタレガイ類はイオウ酸化細菌を鰓に共生して栄養を得る化学合成二枚貝として、メタン湧水などに生息して硫化水素をエネルギー源とすることが知られている。本研究により、彼らが更新世の鯨類遺骸にも依存して生息していたことが明らかとなった。

大桑層は浅海堆積物として知られ、本鯨骨群集は、共産した他の準自生的産状を示す貝類組成から水深20-60mで形成されたと考えられる。この水深は日本でこれまでに発見されている鯨骨化石群集の中で最浅のものである。つまり、本研究の結果、浅海でも鯨類遺骸の分解過程で鯨骨群集(化学合成群集を含む)が形成されることが明らかとなり、浅海における鯨類遺骸分解プロセスに化学合成生態系による影響を考慮すべきとの結論を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Seki, A. and Jenkins, R.G.	4. 巻 25
2. 論文標題 Pleistocene shallow-water whale-fall community from the Omma Formation in central Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Paleontological Research	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2517/2020PR024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Seki, A. and Jenkins, R.G.
2. 発表標題 Pleistocene shallow-water whale-fall community from the Omma Formation in central Japan
3. 学会等名 2nd International Workshop on Ancient Hydrocarbon Seep and Cognate Communities (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuruta, A., Jenkins, R.G., Ogiso, S.
2. 発表標題 Oxygen concentrations in/around deployed whale bones during decay of a whale-fall
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ジェンキンス研究室ウェブサイト  
<http://www.geobiology.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長谷川 卓  (Hasegawa Takashi)  (50272943)	金沢大学・地球社会基盤学系・教授    (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------