

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02010

研究課題名(和文) 次世代イメージング装置を用いた生命化石探査法の革新 偶然の発見を必然にする

研究課題名(英文) Innovations in fossil imaging methods using next-generation tomography equipment

研究代表者

伊庭 靖弘 (Iba, Yasuhiro)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：80610451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,560,000円

研究成果の概要(和文)：40億年の生命進化・生物多様性の直接的証拠は、化石として地層の中に閉じ込められている。しかしながら、古生物学の誕生以来、人類は過去の生物多様性のわずかししか捉えることができていない。この要因は、150年もの間、岩石から化石を抽出する方法に技術革新がなかったことにある。本研究は、高解像フルカラー3Dイメージング法を開発することで、「岩石中の化石をありのまま無差別に抽出する」ことを目指した。地球生命史解読に重要な研究課題を実践しながらこの有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

周辺分野の手法や視点をブラウジングして、個別研究を推進するのではなく、古生物学の研究上・構造上の障壁に対峙する姿勢が、本研究の強みである。本研究によって、従来手法を圧倒する化石可視化精度・抽出速度・産出量・多様性増大が実現された。これには、これまで抽出できなかった硬組織を持たない生物およびその構造や未知の生命も含まれる。デジタル画像を用いたデータリサイクル構築に伴う新たな分類研究の仕組みが創られたのも、本研究の独創性である。古生物学研究の根幹に関わる方法論を飛躍させるものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：Direct evidence of 4 billion years of life evolution and biodiversity is hidden in the strata as fossils. However, paleontology has so far been able to capture only a small fraction of the biodiversity of the past. This is due to the lack of technological innovation in methods for extracting fossils from rocks. In this study, we developed a new method to extract fossils from rocks as digital models with minimal bias. This innovative technique has been applied to various paleontological studies, demonstrating the high potential of this technology.

研究分野：進化古生物学

キーワード：進化古生物学 イメージング 画像解析 レンダリング

## 1. 研究開始当初の背景

**化石記録の不完全性:** 40億年にわたる生命進化の直接的証拠は、化石として地層中に閉じ込められている。しかしながら、従来の古生物学において地層・岩石から化石を抽出する方法は、極めて限定的である。これが、生命進化史解読を妨げる主要因の一つであると指摘できる。これまでの化石抽出法は、1)物理的な剖出と2)化学的な溶解の2つに大別され、抽出された化石類は大きなバイアスをうけている。これに対して、近年、シンクロトロンX線CTを用いる試みがなされてきた(Sutton et al., 2014)。しかし、X線を用いる方法は、各内部構造に十分な密度差が必要なため、岩石への応用が困難である。

**古生物学の構造的欠陥:** 生命科学分野などでは画像データやゲノムデータに誰でもアクセス・利用でき、新たな研究を生む好循環が存在する。一方、古生物学研究は“モノ(実物化石標本)”に強く依存するため、データリサイクル/リユースが構造上困難である。この構造はデジタル情報を使うCT研究でも打破されていない。CTを用いた研究ではデータ取得者の興味に従って、必要な部分のみが3D抽出され、残りは循環されずに埋没する。このようなインフラ不整備が、古生物学全体のボトルネックとなっている。

**次世代トモグラフィ装置:** 研究代表者らは、これまでの研究において高精度に試料表面の除去加工とその加工面のフルカラー撮影を繰り返す「次世代トモグラフィ装置」の制作に成功した。この装置を用いると岩石の内部構造をフルカラーで詳細にスキャンすることが可能になる。本装置で得られた断層像を適切に解析できるシステムを構築できれば、岩石中の生命化石を無差別にありのままかつデジタルに抽出できる可能性があり、上述の古生物学の研究上・構造上の障壁を大きく超えるポテンシャルをもつ。

## 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究は、次世代トモグラフィ画像を用いて化石を無差別かつデジタルに抽出・可視化・公開する生命化石探査システムの創生を目指す。

## 3. 研究の方法

次世代トモグラフィ装置で得た画像からあらゆる化石を2D(A)および3D(B)で抽出する生命化石探査画像解析法を開発する。次に、(C)これを効果的なモデル岩石を用いて検証・実践する。最後に(D)全てのデータを体系的に公開するシステムを構築する。研究の詳しい方法については、下記の「4.研究成果」においても記述する。

## 4. 研究成果

### (A)リアルタイム2D探査システムの構築

動画処理ライブラリを用いて、得られた画像データセットを高画質のアニメーション動画に変換するpythonスクリプトを開発した。これにより、大量の2D断層像を動画ファイルとして容易に遠隔地の共同研究者と共有することが可能となった。さらに、動画共有サイト上のアノテーション機能を用いることで、動画の閲覧と記載・探索を同時に実行することが可能となった。また、画像データセットをコンピュータ上で合成し、直交する向きから再切断して、あらたな断層画像(オルソスライス)を生成するpythonプログラムも開発した。これにより、岩石試料を3方向の2D画像から探査することが可能となった。

## (B) フルカラー3D 探査システムの構築

(B-1)あらゆる生命化石の可視化：既存の X 線 CT 画像解析用のソフトウェアをフルカラー画像データに応用し、化石をフルカラー3D 可視化するシステムを構築した。まず、画像中の岩石基質部分を透明化する処理法を確立した。次に、これらの処理を経た画像を積層させることで、岩石に含まれる化石（基質以外）を無差別にフルカラーで3D化することが可能となった。また、8K 解像度のディスプレイに描画結果を出力し、モデルを自在に回転・拡大縮小・断面切断して観察するシステムを構築した。さらに、得られたデータをエクスポートし、可視化ソフトウェアと VR ソフトウェアを組み合わせることで、ヘッドマウントディスプレイを用いた VR でのフルカラー3D 観察も可能となった。これらのシステムにより、過去の地球生命を「ありのまま」高解像度に可視化することが達成された。

(B-2)抽出された化石の形態解析：ここまでの 2D・3D 探査結果において発見された注目すべき化石の形態を詳細に解析するシステムを構築した。カラー画像のセグメンテーション可能なソフトウェアを用いて、ピクセル値を用いた正確な領域抽出を行った。このセグメンテーションからサーフェスモデルを作成した。このサーフェスモデルでは、任意の部位の長さや角度などを 3D 上で計測できるほか、体積や表面積の算出も可能であり、化石個体や個体群の定量的・統計的な解析が可能となった。さらに、このデータを STL 形式で出力することで、3D プリンターを使った実物モデルの作成できるようになった。また、サーフェスモデルの表面上に、元のフルカラー画像データの色を着色して表示することも可能となった。

## (C)開発手法の検証と実践研究

(C-1)開発手法の検証：本開発技術を粘土岩～礫岩までの様々な粒度をもつ碎屑岩と生物岩（石灰岩、チャート、泥炭層、琥珀）を材料に、すなわちあらゆる堆積岩種への応用を行った。これらの堆積岩試料は、エディアカラ紀～現生までおよぶ。研究の結果、取得画像は、合計で 20 万枚にわたり、700TB ほどのデータサイズとなった。従来手法では可視化・抽出できなかった数ミリサイズ（肉眼では認識しづらく、光学・電子顕微鏡観察では大きすぎる体サイズ）の体化石から多様な生痕化石まであらゆる化石の様式を抽出・可視化することに成功した。また、原地性産状を保ったまま無差別に可視化することにも成功した。ある軟体動物のグループに注目し、本手法のベンチマークを算出したところ、従来探査・抽出手法に比べて、約 1 万倍の発見確率をもつことがわかった。シンクロトロン X 線 CT 画像を用いた従来の可視化方法との比較も行い、その有用性を明確にした。

(C-2)実践研究：開発手法の優位性を明らかにした後に、特定のトピックに注目した実践的な古生物学的研究を行った。具体的な成果例として エディアカラ紀のストロマトライトにおける原地性シアノバクテリアの無差別可視化、カンブリア紀の刺胞動物である *Cambroctoconus* の出芽部位および群体の最初期個体の固着様式、隠棲空間の拡がり即ち成長様式の解明、デボン紀ライニーチャート内の植物相の無差別可視化と分類、ペルム紀の裸子植物 *Glossopteris* 胚珠の解剖学的研究、白亜紀後期の浅海二枚貝類（厚歯二枚貝および *Condrodonta* 属）の複雑化した殻内面の形態の可視化と非造礁性生物における生物礁形成プロセスの復元、白亜紀後期の炭酸塩ノジュール中における被子植物における複数の新タクサの発見と無殻性頭足類の初期進化史の解明、白亜紀前紀の琥珀中の昆虫化石における微小感覚器官の可視化と知覚システム/生態の高解像度復元などが挙げられる。以上の成果の一部は国際誌に出版済み、投稿中、および投稿準備中である。

## (D)オンライン探査インフラの構築

国際動物/植物命名規約に準拠し、画像を証拠標本とすることで、任意画像群を用いて新たな分類学的研究を行える仕組みを整備した。具体的には、全画像に体系的命名をし、標本情報などメタデータ、タイムラプス動画と 3D モデル(8K)を格納し、コレクション化した。ディープアーカイブには磁気テープを用いて低コスト化した。一方、研究(C)の、の全データにアクセスで

きる生命化石探査におけるプラットフォームも作成した。この2年におけるクラウドストレージ利用料の高騰から、自作サーバーを用いて公開する方法に切り替えた(このため、2022年5月現在、セキュリティコストの問題から共同研究者への限定的な公開にとどめている)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Joerg Mutterlose, Peter Alsen, Yasuhiro Iba, Simon Schneider	4. 巻 131
2. 論文標題 Palaeobiogeography and palaeoecology of Early Cretaceous belemnites from the northern high latitudes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the Geologists' Association	6. 最初と最後の頁 278-286
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pgeola.2019.06.001	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 該当する
1. 著者名 Dirk Fuchs, Yasuhiro Iba, Alexander Heyng, Masaya Iijima, Christian Klug, Neal L Larson, Guenter Schweigert	4. 巻 6
2. 論文標題 The Muensterelloidea: phylogeny and character evolution of Mesozoic stem octopods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Papers in Palaeontology	6. 最初と最後の頁 31-92
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/spp2.1254	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 該当する
1. 著者名 Ryo Taniguchi, Hiroshi Nishino, Hidehiro Watanabe, Shuhei Yamamoto, Yasuhiro Iba	4. 巻 108
2. 論文標題 Reconstructing the ecology of a Cretaceous cockroach: destructive and high-resolution imaging of its micro sensory organs.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Science of Nature	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00114-021-01755-9	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 該当する
1. 著者名 Mehmet Oguz Derin, Takahiro Harada, Yusuke Takeda, Yasuhiro Iba	4. 巻 19
2. 論文標題 Sparse Volume Rendering using Hardware Ray Tracing and Block Walking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Technical Communication, SIGGRAPH ASIA	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3478512.3488608	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 該当する

1. 著者名 Mehmet Oguz Derin, Takahiro Harada, Yusuke Takeda, Yasuhiro Iba	4. 巻 accepted
2. 論文標題 Compression and Interactive Visualization of Terabyte Scale Volumetric RGBA Data with Voxel-scale Details	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SIGGRAPH 2022	6. 最初と最後の頁 accepted
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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11件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 竹田裕介, 笹木慎太郎, 池上森, 久保田彩, 西田治文, 伊庭靖弘
2. 発表標題 次世代トモグラフィ技術による形態情報の多次元デジタル化
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第63回シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹田 裕介, 田井中一貴, 星野健, 深井稜汰, 臼井寛裕, 笹木慎太郎, 池上森, 伊庭靖弘
2. 発表標題 JSS3大規模チャレンジによる大規模画像データの3次元可視化
3. 学会等名 第53回流体力学講演会/第39回航空数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口諒, 西野浩史, 伊庭靖弘
2. 発表標題 微小感覚器官の高分解能可視化による化石ゴキブリの生態復元
3. 学会等名 日本古生物学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口諒, 伊庭靖弘, 西野浩史, 渡邊英博, 立石康介
2. 発表標題 微小感覚器官が明らかにする白亜紀ゴキブリの知覚システムと生態
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mehmet Oguz Derin, Takahiro Harada, Yusuke Takeda, Yasuhiro Iba
2. 発表標題 Compression and Interactive Visualization of Terabyte Scale Volumetric RGBA Data with Voxel-scale Details
3. 学会等名 SIGGRAPH 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Harufumi Nishida, Aya Kubota, Yusuke Takeda, Yasuhiro Iba
2. 発表標題 A possible new gymnosperm order based on a megasporophyll bearing numerous ventral ovules from the Albian of Hokkaido, Japan
3. 学会等名 11th European Palaeobotany and Palynology Conferenc (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Ito, S. Sano, Y. Iba, P. W. Skelton, Y. M. Aguilar, R. De Ocampo, T. Kase
2. 発表標題 A new hippuritid rudist bivalve from the Caramoan Peninsula, the Philippines, sheds new light on the evolutionary history of the Hippuritidae
3. 学会等名 World Congress of Malacology 2022, Munich Germany (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Ito, S. Sano, Y. Iba, P. W. Skelton, Y. M. Aguilar, R. De Ocampo, T. Kase
2. 発表標題 Hippuritid rudist bivalves possibly originated in the Pacific: an enigmatic new taxon from the Philippines with primitive and “derived” morphological characters
3. 学会等名 Cretaceous Symposium, Warsaw, Poland (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤綾花, 佐野晋一, 伊庭靖弘, P. W. Skelton, Y. M. Aguilar, R. De Ocampo, 加瀬友喜
2. 発表標題 赤道太平洋域からの新たなヒップリテス科厚歯二枚貝とその起源
3. 学会等名 日本古生物学会2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤綾花, 佐野晋一, 伊庭靖弘
2. 発表標題 赤道太平洋域産ヒップリテス科厚歯二枚貝のオクラのような「折りたたみ構造」の形成過程
3. 学会等名 日本古生物学会第171回例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江崎洋一, 岸田明生, 竹田裕介, 足立奈津子, Liu Jianbo, 伊庭靖弘
2. 発表標題 カンブリア紀サンゴCambroctoconusの原地性生活様式の三次元復元 隠棲生息場に即応した無性増殖と群体成長
3. 学会等名 日本古生物学会 2022年年会
4. 発表年 2022年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	足立 奈津子 (Adachi Natsuko) (40608759)	大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授  (24402)	
研究分担者	江崎 洋一 (Ezaki Yoichi) (60221115)	大阪市立大学・大学院理学研究科・教授  (24402)	
研究分担者	西田 治文 (Nishida Harufumi) (70156082)	中央大学・理工学部・教授  (32641)	
研究分担者	竹田 裕介 (Takeda Yusuke) (50838852)	北海道大学・理学研究院・特別研究員 (PD)  (10101)	

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			
ドイツ	Ruhr University Bochum			
ドイツ	Ruhr-University Bochum			
デンマーク	Geological Survey of Denmark			