

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03704

研究課題名(和文)堆積物の微細三次元構造評価法の開発に基づく海洋古環境の高精度復元

研究課題名(英文) High-resolution reconstruction of the ancient oceanographic environments based on the development of evaluating method of microscopic three-dimensional fabrics of sediments

研究代表者

伊藤 康人 (Itoh, Yasuto)

大阪公立大学・大学院現代システム科学研究科 ・教授

研究者番号：20285315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、石油・ガスなど地層流体の移動経路として機能する微細な堆積岩ファブリックを解明した。従来の手法では、割れ目ファブリックを三次元かつ定量的に評価することは困難であったが、我々はその評価に磁鉄鉱の懸濁液(磁性流体)を用いた。高圧下で、磁性流体は浸透性フラクチャーに沿って岩石に浸透し、流体の移動方向を示唆する。高精度X線CTスキャナーを用いて、堆積物粒子に隠れた無数の微化石が見出された。それは、地球史の大量絶滅と密接に関連した海洋無酸素事変プロセスを示すものである。本研究では、総合的な地質構造解析によって、沈み込み帯に発達する堆積盆における重要な断層群の可視化に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋無酸素事変は、極めて温暖な気候下にあった白亜紀に頻発しており、温室効果ガスの増加による急激な温暖化と環境悪化が懸念される現在の地球と相通ずるところがある。その発生メカニズムを詳細かつ定量的な古生物学的分析で評価することは、持続可能な環境を如何にして維持していくかという喫緊の課題として極めて重要である。また、堆積岩ファブリックと緊密な関連を持つ断層の三次元ネットワークを評価することは、地震など自然災害が頻発する変動帯でどのように防災・減災の取り組みを進めるかという課題の解決に、直接資するものである。

研究成果の概要(英文)：This study aims at unraveling micro-scale fabrics of sedimentary rocks, which act as pathway of formation fluids such as crude oil and/or natural gas. Conventional methods lack three-dimensional quantitative evaluation of small fracture network within rocks. We utilized magnetite-laden colloid (ferrofluid) to delineate fracture networks. Under high pressure, ferrofluid invades into rocks along permeable fractures and indicates directions of migration of formation fluids. Microscopic observation of ferrofluid-treated rocks by using X-ray ST scanner depicts numerous colony of microfossils concealed in sediment particles, and shows process of oceanic anoxic events that are closely related with mass extinctions of the Earth's long history. Our multidisciplinary structural analysis has succeeded in visualization of significant fault systems within sedimentary basins along studied convergent margin of an oceanic plate.

研究分野：固体地球科学

キーワード：地質学 岩石磁気学 古環境 磁性流体

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 堆積岩は、それを構成する砕屑粒子の多様さを反映して、さまざまな岩相を示す。粒子組成・配列の時空変化は、古環境変遷の連続記録であると同時に、地層流体移動を支配する浸透率異方性と密接に関連し、地下資源探査や環境保全・地盤改良といった実利的側面からも重要な情報である。従って、堆積岩ファブリックは多くの研究者によって報告されてきたが、その三次元的分析は多くの断面上で粒子形態を拡大・記載するなど膨大な時間を要すると同時に、定量的かつ恣意性のない評価が困難な欠点が残されていた。

(2) 堆積岩にしばしば含まれる化石は、精密な年代指標であると同時に生命進化のメカニズムを探る手掛かりであり、さまざまな学際的研究が行われて来ている。しかし貴重な化石であるほど、解剖学的なクリーニング(化石の切削を伴う整形)を行うことはできず、三次元的形態を復元できないことが多かった。以上に共通する問題点は「堆積岩が保存している貴重な情報を漏れなく読み取るためには、微細な三次元ファブリックを非破壊かつ高精度で取得する必要がある」ということである。

2. 研究の目的

(1) 研究代表者は、先行研究として岩石を構成する粒子配列に起因する磁化率異方性ファブリックが知られている試料(例えば Itoh et al., 2013)を用い、マグネタイトを主体とする強磁性鉱物の懸濁液(以下「磁性流体」と呼ぶ)圧入の実験方法確立を目指してきた(例えば伊藤ほか, 2014; Itoh et al., 2016)。本研究は、それを発展させ磁化率異方性のパターン解析を行って、広域地殻変動と微細ファブリックの関係を明らかにし、磁性流体を堆積岩試料に含浸させ、その磁化率異方性測定とX線CTスキャンによって得られたデータを解析して、地球と生命の共進化プロセスを解明するために必要な情報の質・量を飛躍的に向上させることを目的とした。

(2) 本研究の古生物学的な展開として、磁性流体を広域イベント層準の堆積岩に含浸させて、高精度のX線マイクロフォーカスCTスキャンデータに基づき、さまざまな生物擾乱の三次元画像を撮影した(Itoh and Tamaki, 2021; 図1参照)。この画像を基に、生痕断面の平均直径や堆積岩中における生痕の占める密度をソフトウェア上で数値化して、古環境を精密かつ定量的に復元した。同時に、画像撮影した試料に対して、ICP-MSを用いてMo, Ce, Mn, Uなどの酸化・還元環境指標となる元素分析を実施すると同時に、CHNS元素分析装置を用いてパイライト化度や有機炭素量を定量し、先行研究で明らかになっている底生有孔虫化石群集と比較した。これらの成果は、生物擾乱と密接に関連する海洋無酸素事変の詳細研究として纏められつつある。

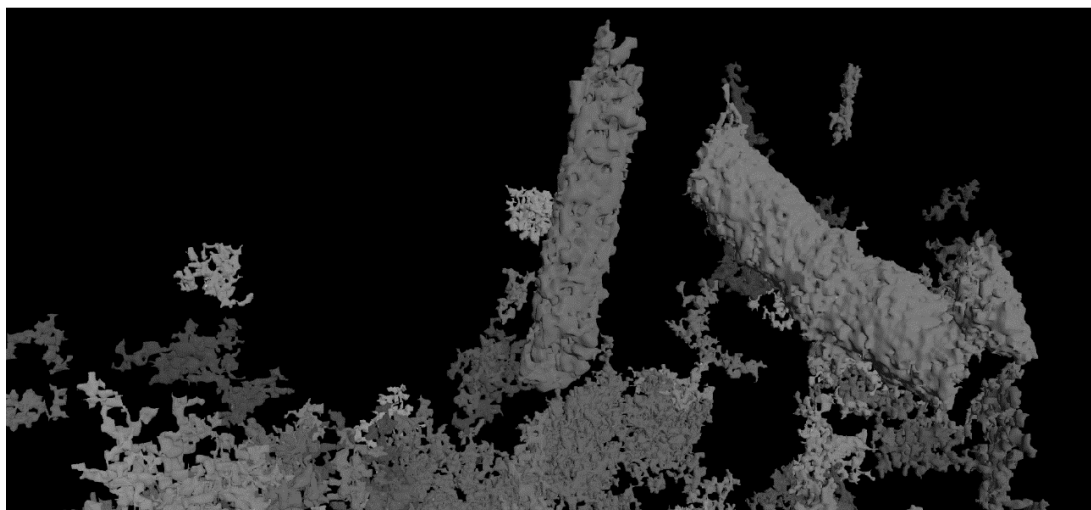


図1：磁性流体含浸試料のX線スキャナー解析で見出された無数の微化石コロニー

3. 研究の方法

(1) 本研究では、令和3年度からの3年間で、西南日本の背弧～前弧堆積盆でドラスティックな地殻変動期に堆積した地層に着目し、その三次元微細ファブリック解明を通じて、広域応力場と古環境の変遷を精密に復元した。

(2) まず、対象となる時代の試料採取及び海盆拡大モデル再検討と、磁性流体含浸試料作成の方法論検討を実施した。本州の背弧側（新潟～北陸）から第一瀬戸内累層群を経て前弧側（田辺層群・熊野層群など）で島弧横断測線を設定し、年代論の確立している地層から分析試料を採取した。磁性流体の含浸手法については、もろく繊細な構造を持つ海成頁岩層（古海洋環境が急変する層準に特徴的に発達）について含浸試料作成の先行事例が乏しく、さまざまな処理パターンを試行し最適な手法を確立した。

(3) その後、磁性流体含浸試料の作成を継続しつつ、背弧海盆拡大に伴う火成活動ヒストリー構築など、基礎となる地質情報データベースを整備した。併せて、磁化率異方性測定とX線マイクロフォーカスCTスキャンデータ取得を完了させた。

(4) 最後に、海洋無酸素事変期の黒色頁岩層について地化学分析を実施して、酸化還元状態を定量評価した。これと同時に、X線CTスキャンデータを三次元化した。具体的にはCTの濃淡画像を積み重ねて立体データ（ボリュームデータ）に変換し、その輝度値から一定の閾値の等値面を可視化した。一方、テクトニックイベントに連動する広域応力場の変化は、磁化率異方性が示す堆積岩ファブリックの解析から定量的に評価した。

4. 研究成果

(1) 研究期間前半においては、対象となる地層の堆積プロセスに関するモデル再検討と、磁性流体含浸試料作成の方法論の検討が、主要な作業内容となっていた。特にその前者に関して、本州の代表的な新期テクトニックベースンである大阪堆積盆で、年代論が確立している第四系・大阪層群の三次元的分布とその層相変化を解明するため、地質調査を行った。大阪層群は、太古の気候変動に伴って海成・非海成の部分が何度も繰り返すシーケンスを示すので、海成粘土層はグローバルな温暖化のタイミングを示唆する非常に鮮明な地震探査の反射面となる。また、それは海盆の拡大と共に堆積盆全体に分布を広げるので、連続性の良い基準面として構造運動解釈にも極めて有用である。一方、非海成層に含まれる礫の給源分析は、堆積盆を区画する分水嶺の成立プロセスの指標であり、断層運動の消長を直接示す貴重な情報である。分析の結果、大阪層群下部には外帯（中央構造線より南の地質体）から変成岩礫が大量に流入していることが明らかになった。その詳細は「主な発表論文等」のItoh and Maekawa (2021) に纏められている。

(2) 磁性流体を用いた実験は、それを岩石中に含浸させるため長い時間（百気圧の高圧化で1ヶ月）を要するため、定められた研究期間に実り多い成果を上げるためには、分析対象とする地層を注意深く選択する必要がある。例えば、断層運動など激しい構造変形によって破壊の進んだ地層は、ダメージの蓄積した方向に試薬が浸透しやすく、一般的な地層と異なるファブリックを示すことも多い。本研究で実施した分析の結果、地層変形の時空分布が明らかとなり、堆積盆を取り巻く活断層の運動フェーズを推定することができた。具体的には、第四紀の日本列島で卓越している東西方向の圧縮応力に伴ってずれを繰り返している南北走向の活断層（今回の調査エリアでは生駒断層や上町断層が該当）の発達プロセスに関して新たな制約条件を得ることができた。これらの断層は人口密集地を通過しているため、大規模な地下探査を行うことは困難なケースが多く、これまでの研究では運動像が十分に理解されていなかった。今回は、大深度ボーリング調査に関してデータ空白域となっていた大阪平野東部を分析対象としたので、地下資源探査や環境保全・地盤改良といった実利的側面からも重要な情報を得ることができた。今回は、地下数キロメートルを可視化する人工地震探査データを活用し、地質学的情報と組み合わせることによって、地球の進化プロセス解明に必要な情報の質・量を向上させるという目的を達成するための、重要な知見を得たと考えられる。

(3) 研究中盤においては、対象となる地層の変形プロセスに関するモデル再検討と、磁性流体含浸試料作成の方法論の検討が、主要な作業内容となっていた。特に前者に関して、本州の代表的な新期テクトニックベースンである大阪堆積盆で、第四系・大阪層群のリアルタイム変形を評価するため、リモートセンシング技術を導入した。合成開口レーダー（SAR）を搭載した人工衛星データは、その差分干渉解析に基づいて、地表変位をミリメートル単位で評価することが可能になる。本来、干渉SARで評価されるのは人工衛星の「視線」方向の一次的な動きであるが、その北行・南行軌道のデータを組み合わせることで、鉛直・水平方向の変位トレンドを分離することが可能になる。この手法で三次元的な地形アノマリー分布を明らかにし、広域イベントの全貌解明を試みた。今回は、国内外で十分な実績を有する分析機関に、鍵となる人工衛星の5年に亘るデータのスタッキング処理を委託した。その結果、地殻変動に起因する変位が正確に抽出され、磁性流体を用いた実験を進めるにあたって必ず試料を採取すべき重要なエリアがどこかを特定することができた。

(4) 磁性流体を用いた実験は、それを岩石中に含浸させるため長い時間（百気圧の高圧化で1ヶ月）を要するため、定められた研究期間に実り多い成果を上げるためには、分析対象とする地層を注意深く選択する必要がある。例えば、断層運動など激しい構造変形によって破壊の進んだ地

層は、ダメージの蓄積した方向に試薬が浸透しやすく、一般的な地層と異なるファブリックを示すことも多い。研究期間の後半までに、地層変形の広域分布が明らかとなり、堆積盆を取り巻く活断層の運動フェーズを推定できていた。具体的には、第四紀の日本列島でフィリピン海プレートの斜め沈み込みに伴って地震を繰り返している東西走向の右横ずれ活断層（今回の調査エリア内では中央構造線が該当）の発達プロセスに関して新たな制約条件を得ることができた。この断層系は、これまでの研究では運動像が十分に理解されていなかったが、今回は詳細な構造解析に基づいて断層セグメント分布を解明した（図2参照）ので、防災や地盤改良といった実利的な側面からも重要な情報を得ることができた。その詳細は「主な発表論文等」のItoh（2022）に纏められている。当該地域では、地表地質調査に基づく堆積岩ファブリックはこれまで多くの研究者によって報告されてきたが、その三次元的な総合評価は膨大な時間を要すると同時に、定量的かつ恣意性のない評価が困難であるという欠点が残されていた。今回は、累積的変動プロセス解明に必要な情報の質および量を向上させるという目的を達成するための、重要な知見を得たと考えられる。

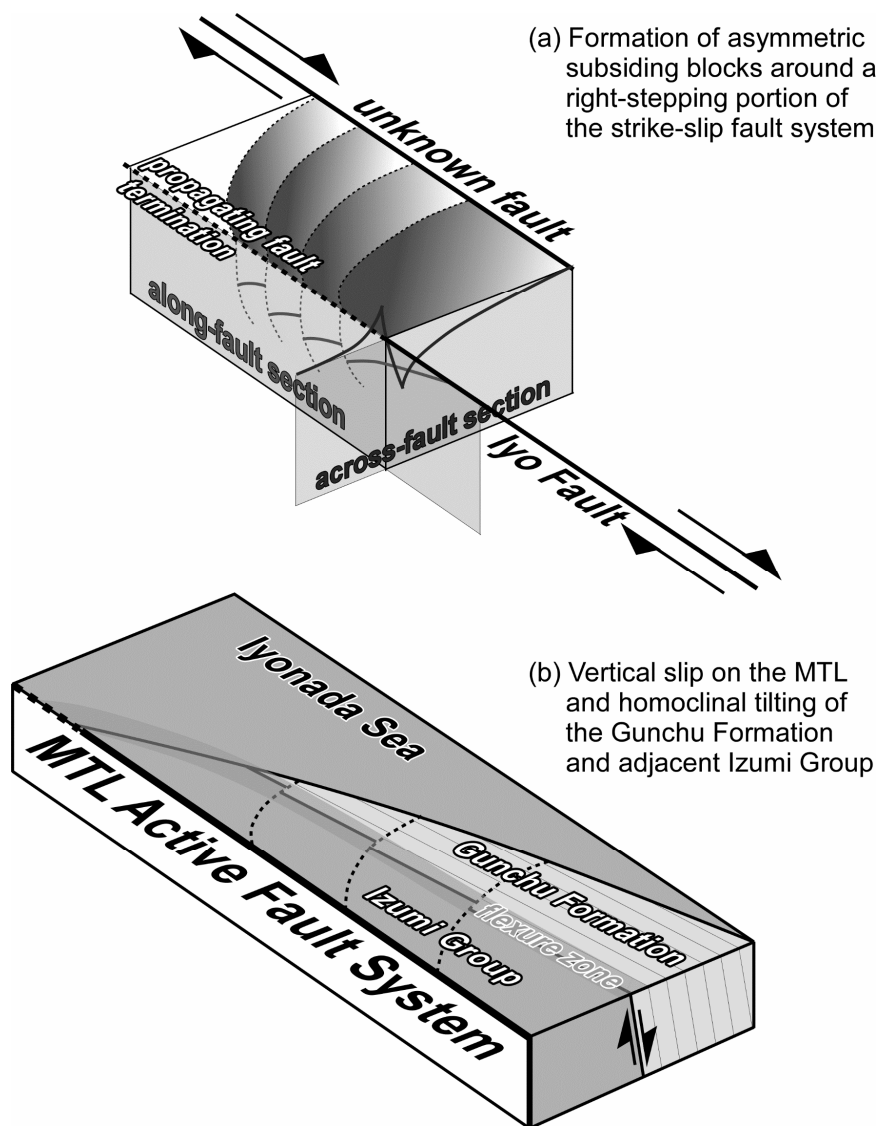


図2：中央構造線近傍の堆積盆を分断する断層ネットワーク

< 引用文献 >

- Itoh, Y. et al., 2013. Mechanism of Sedimentary Basin Formation - Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins, InTech, pp.233-253.
- 伊藤康人ほか, 2014. 石油技術協会誌, 79: 339-348.
- Itoh, Y. et al., 2016. Marine Sediments - Formation, Distribution and Environmental Impacts, Nova Science Publishers, Inc., pp.43-59.
- Itoh, Y. and Tamaki, M., 2021. Horizons in Earth Science Research, Nova Science Publishers, Inc., pp.125-148.

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 1件）

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Yasuto Itoh | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Time-series analysis of crustal deformation on longstanding transcurrent fault: Structural diversity along Median Tectonic Line, southwest Japan, and tectonic implications | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Earth's Crust and Its Evolution - From Pangea to the Present Continents | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5772/intechopen.101329 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計1件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Yasuto Itoh and Hirokazu Maekawa | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 Nova Science Publishers, Inc. | 5. 総ページ数 79 |
| 3. 書名 A Story of Mountain Building - Neotectonic Evolution of a Convergent Margin on the Northwestern Pacific | |

〔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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|