

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400456

研究課題名(和文) 磁性流体を圧入した岩石試料の磁化率異方性に基づく岩盤物性の研究

研究課題名(英文) Rock properties based on anisotropy of magnetic susceptibility of sedimentary rock samples impregnated with ferromagnetic suspension

研究代表者

伊藤 康人 (Itoh, Yasuto)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20285315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、岩石の浸透率異方性を評価する実験手法を確立することを目標とした。そのため、堆積学およびテクトニックなバックグラウンドの明らかなフォアランド堆積盆のタービダイトについて、減圧および加圧含浸法に基づく磁性流体実験を実施した。処理を行った試料のすべてについて、マイクロフォーカスX線CTスキャナーを用いて試料の断層画像を取得し、三次元的な孔隙・フラクチャーネットワークを可視化して解析を行った。さらに実験対象とした地層年代をフィッシュトラック法ならびにウラン-鉛法で決定し、イベントの時空分布を明らかにすると共に、磁性流体実験が示す岩石ファブリックとの相関解明に成功した。

研究成果の概要(英文)：The present study aimed at establishment of the experimental procedures of quantitative assessment of anisotropy of permeability of rocks. To achieve the mission, ferrofluid experiments based on low- / high-pressure treatments were executed on a turbidite sequence burying a foreland basin, of which sedimentological and tectonic backgrounds had been elucidated. For all of the processed samples, tomographic images were obtained utilizing a micro-focus X-ray CT scanner that succeeded in visualization of the three-dimensional pore and fracture networks in rocks. Geologic ages of the analyzed rocks were determined by means of fission-track and U-Pb dating methods. Thus we clarified spatiotemporal distribution of various tectonic events and successfully evaluated their impact on microscopic rock fabrics envisioned through the ferrofluid impregnation experiments.

研究分野：地質学

キーワード：岩石磁気 浸透率 異方性 活断層 テクトニクス 磁化率 磁性流体 変動帯

1. 研究開始当初の背景

(1) 上部地殻を構成する堆積層は、初期的には水などで満たされた孔隙に富み、埋没が進むとともに圧密が進行してタイトな岩石に変化していく。火成岩の場合は、初期孔隙率は(発泡の著しいものを除いて)低いが、変質に伴う造岩鉱物の溶脱や断層運動に伴う破碎などで孔隙が形成される。一般に岩石中の孔隙は、堆積構造や割れ目分布に成長を規制されており、大なり小なり卓越方位には異方性がある。

(2) 地下資源探査の分野では、岩盤の孔隙ネットワーク卓越方位は、炭化水素などの移動集積をコントロールする最も重要なパラメータとして早くから注目されてきた。大都市圏で影響を予測することが焦眉の課題とされる地盤沈下・液状化などの地盤災害に関しても、浸透率異方性はシミュレーションを行う際の支配的パラメータであることが知られている。また、最近では汚染地下水がどのような経路で移動して、どの地域に濃集するかをモニタリングすることが、環境保全の点から強く要求されている。

(3) 以上の背景に鑑みて、岩石の微細ファブリックに関しては極めて多くの先行研究がある。古くは顕微鏡を用いた定方位薄片観察による記載が行われていたが、効率よく精度の高いデータを得ることが可能な手法として、磁化率異方性 (Anisotropy of Magnetic Susceptibility; AMS) 測定が注目されている。磁化率異方性テンソルの固有ベクトルから最大・中間・最小の直交する磁化率軸が求められる。それらの比は微細ファブリックの異方性度や形態を表し、方位は鉱物粒子の配列に関連している。たとえば、川村ほか(2002)は海洋調査で採取された堆積物試料の磁化率異方性測定に基づいて、タービダイトの供給方向を論じている。Itoh and Amano (2004) は、一般的には異方性度が低いとされるカコウ岩試料が、断層運動に伴って形成されたフラクチャー卓越方位に平行に磁化しやすい性質を獲得しており、その原因が割れ目に沿って析出した微細マグネタイト(磁鉄鉱)粒子であることを電子顕微鏡観察に基づいて立証した。

(4) このように、磁化率異方性は堆積学・構造地質学等の分野で広く活用されているが、これまでの研究はほとんどが岩石構成粒子の異方性を論じたものであり、直接的に孔隙の異方性を評価したものではない。上述のような地層流体の移動プロセスを研究するためには、全く新しい見地から実験手法を開発することが必要である。Baas et al. (2007) は岩石の異方性解析法について、従来の地質学的手法を含めて広範なレビューを行い、"magnetically enhanced AMS"の有用性を強

調した。これは、岩石試料にマグネタイトを主体とする強磁性鉱物の懸濁液を圧注入することで、直接孔隙異方性を評価するものである。試薬(磁性流体)中のマグネタイトは図1に示すように極めて細粒で、超常磁性を示す。その結果、磁化率は高いが常温保磁力は極めて低く(図2右)結晶構造に規制された異方性を持たない。これは、磁性流体を圧入した岩石のバルク磁化率異方性が孔隙の形状異方性すなわち孔隙ネットワークに支配される浸透率異方性を反映したものであることを意味している。

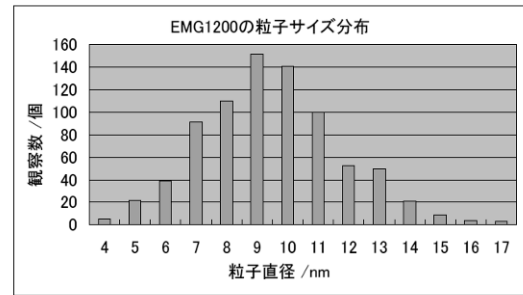


図1：代表的な磁性流体中のマグネタイト粒子サイズ

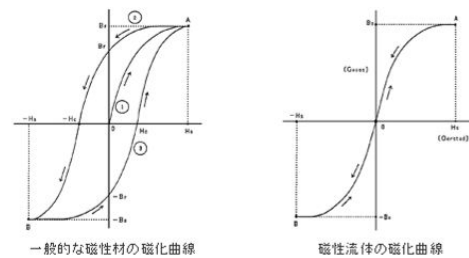


図2：粒子サイズによる磁化履歴曲線の相違

2. 研究の目的

磁性流体を用いた解析手法は、いまだ萌芽的な段階にあり、実地での有用性が十分に検証されているとは言えない。本研究では、先行研究によって岩石構成粒子の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を用い、磁性流体圧入の実験方法確立を第一の目的とした。その成果に基づいて、堆積学的・構造地質学的な意義を解明するとともに、活断層近傍での岩石の破碎とフラクチャー伝播プロセスの解明など、近年その重要性が指摘されている『断層周辺のダメージゾーン形成のメカニズム』というテーマについて事例分析を試みた。Baas et al. (2007) などの先行研究で対象としたのは、主として安定大陸周辺の堆積岩であり、日本列島などの変動帯(プレート収束境界に沿う地殻変動の激しいゾーン)で、系統的な検討を行った例はない。変動帯で頻発する自然災害たとえば地震による被害を軽減化するためには、地盤の異方性を定量的に評価し、強震動領域を予測することが有効である。本研究はそのよ

うな未開拓の問題に挑むものであり、実験手法の確立によって地盤評価に資する情報が急増することが期待される。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では、まず解析手法の確立がもめられるので、各種の岩石に試薬(磁性流体)を圧入し、磁性流体の浸透度を測定・評価して実験に関する技術的課題を克服した。磁性流体には、炭化水素系オイルベース・炭化水素系溶剤ベース・水ベースの三種類があり、岩石孔隙の表面物性(oil-wetかwater-wetか)によって親和性が異なると予想されるので、数多くの組合せについてデータを集める必要があった。作成した試料については、KappaBridgeを用いて磁化率異方性を測定し、分析・評価を行った。その後、堆積システムに関する研究の進んだ地層を対象として磁化率異方性データと従来の地質学的解釈との整合性をチェックした。さらに、活断層周辺で採取した岩石試料について、新たに開発した手法で磁化率異方性を測定し、割れ目ネットワーク分布を記載すると共にこれまでに実施された反射法地震探査などに基づいて評価された断層の活動度と異方性データとの相関を考察した。

(2) 分析試料は、道央の穂別地域に分布する中新統・川端層を構成するタービダイトから採取した(図3)。同地域では、川上ほか(1999)が詳細な層序学的検討を行っている。また、岩石磁気に関する先行研究もあり(Itoh et al., 2013), 磁性流体圧入の前後でのAMSパラメータ変化について考察することができる。川端層は、日本海の拡大後、日高山脈が急速に隆起する圧縮イベントに伴って、南北に伸びる狭長なフォアランド堆積盆を急速に埋積したタービダイトより構成されている。その堆積の後期には、側方陸域からの碎屑物供給が大きく寄与する側方流卓越型の堆積システムが成立していた可能性が、川上ほか(1999)によって指摘されている。

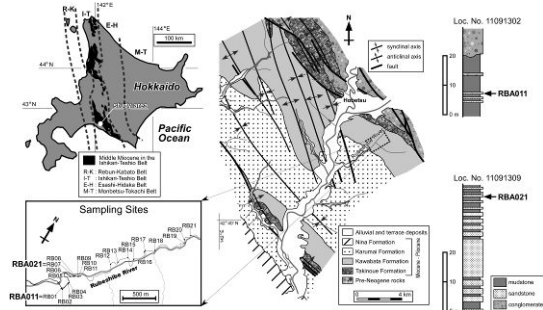


図3：試料採取を行った地層の概要

### 4. 研究成果

異方性評価に先立って、初磁化率(スカラー)を測定して、磁性流体含浸の前後での値を比

較した。試料RBA011では、磁性流体含浸前に平均 $1.5 \times 10^{-4}$  (SI)だった初磁化率が平均 $5.9 \times 10^{-3}$ となり、試料RBA021では平均 $1.9 \times 10^{-4}$ が $9.4 \times 10^{-3}$ と変化した。このように、顕著な初磁化率増加が確認されたことから、加圧含浸には一定の効果があることが明らかになった。作成した測定用試料片すべてについて、AGICO社製KappaBridge KLY-3を用いてAMS測定を行った。その結果を図4にまとめる。

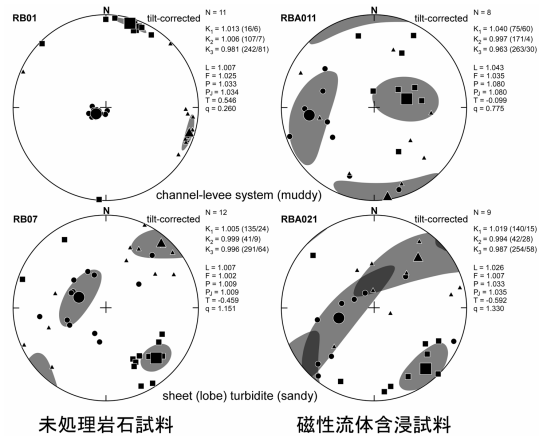


図4：川端層のAMSデータ比較。(右)磁性流体浸透試料のAMS主軸方位。(左)近傍からItoh et al. (2013)が報告している未処理岩石のAMSデータ。等面積投影図はすべて下半球への投影であり、大きいシンボルは各AMS主軸( $=K_1$ ,  $=K_2$ ,  $=K_3$ )の平均方位を、灰色着色部はビンガム統計に基づく95%信頼限界を示している。

この図は、磁性流体浸透試料のAMS主軸方位(右)を、近傍からItoh et al. (2013)が報告している未処理岩石のAMSデータ(左)と比較したものである。まず、タービダイトの砂質部を採取したRBA021を見ると、AMS主軸方位は未処理岩石のものとは大きな変化はない。異方性度( $P_1$ )が有意に上昇しており、従来手法で観察されたAMSトレンドが「強調された」ように見える。一方、タービダイト泥質部のRBA011に関しては、磁性流体浸透試料のAMS主軸配置は、未処理岩石の地層面に束縛された扁平型トレンドと全く異なっている。磁化率最大軸( $K_1$ )は地層面と高角をなしており、これまでに報告されていないトレンドになっている。その成因については、今後さらに検討を加える必要がある。図5は、今回実験を行った2地点でのAMSパラメータ変化を示している。両者に共通して、磁性流体浸透後は異方性度( $P_1$ )が上昇し、ファブリック形状( $T$ )が扁平型に遷移する傾向がある。今回のバルク分析では磁性流体の浸透によるAMSファブリックの変化が実測されたが、微細領域の浸透状況については評価することができない。そこで、高知大学海洋コア総合研究センターに設置されたマイクロフォーカスX線CTスキャナ

ー(テスコ株 HMX225-ACTIS+3)を用いて、磁性流体含浸試料の断層撮影を行った。図6にその成果を纏める。AMS測定用の全試料片につき、解像度 $30\mu\text{m}$ で601枚の画像シーケンスを取得した(a)。試料片の三次元表示(b)では、高密度の磁性流体浸透部が無数の輝点として観察された。図6cに示すように、流体移動経路が高輝度の条線(画像上部)として確認されたケースもある(画像を連続投影すると、磁性流体の移動がアニメーション的に観察できる)。試料片によっては、岩質の不均一性を反映して、浸透効率が変化する問題点も指摘されている。図6dの画像は、上部で明らかに輝度が高く、含浸効率が良い部位と考えられる。画面右下の切込み(黒色の磁性流体を浸透させた後で試料片IDを識別するために施したマーク)周辺で、特に浸透が促進される傾向が見られないことは興味深い。地層中の流体移動を支配する要因を評価するには、さまざまな実験条件(岩質・磁性流体タイプ・封圧条件)のもとで、事例を集積することが必要である。

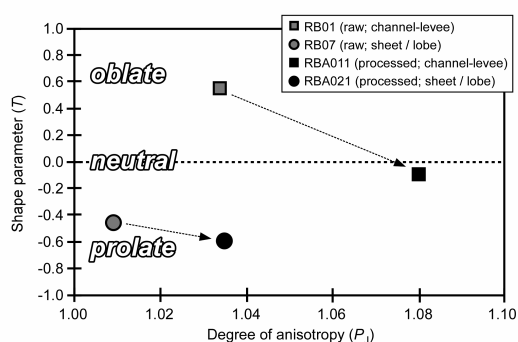


図5：川端層の2地点(RBA011, RBA021)で採取した堆積岩の、磁性流体浸透前(灰色)と浸透後(黒色；本研究)のAMSパラメータ比較。

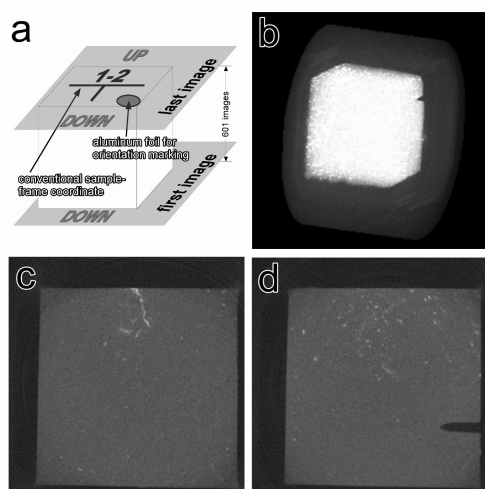


図6：マイクロフォーカスX線CTスキャナによる磁性流体含浸試料の断層撮影結果。

## 引用文献

- Baas, J.H., Hailwood, E.A., McCaffrey, W.D., Kay, M., Jones, R., 2007. Directional petrological characterisation of deep-marine sandstones using grain fabric and permeability anisotropy: Methodologies, theory, application and suggestions for integration. *Earth-Science Reviews* 82, 101-142.
- Itoh, Y., Amano, K., 2004. Progressive segmentation and systematic block rotation within a plutonic body: palaeomagnetism of the Cretaceous Kurihashi granodiorite in northeast Japan. *Geophysical Journal International* 157, 128-140.
- Itoh, Y., Tamaki, M. and Takano, O., 2013: Rock magnetic properties of sedimentary rocks in central Hokkaido - insights into sedimentary and tectonic processes on an active margin, in Itoh, Y., ed., *Mechanism of Sedimentary Basin Formation - Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins*. InTech, Rijeka, 233-253.
- 川上源太郎・吉田孝紀・白杵直, 1999: 北海道中央部穂別地域の中中部中新統川端層 - 堆積システムと供給源に関する予察的検討 - . *地質雑*, 105, 673-686.
- 川村喜一郎・池原研・金松敏也・藤岡換太郎, 2002. パレスペラ海盆から採取されたタービダイトの帯磁率異方性による古流向解析. *地質学雑誌* 108, 207-218.

## 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)

(雑誌論文)(計8件)

- Itoh, Y., Takano, O., Tamaki, M., 2016. Evaluation of micro-fabric network within marine sediments based on a rock magnetic technique. In: S. Williams (Editor), *Marine Sediments: Formation, Distribution and Environmental Impacts*, 1-14. (査読有)
- Itoh, Y., Kusumoto, S., Takemura, K., 2015. Tectonically controlled asymmetric basin formation and evolution: an example from an active plate margin. In: B. Veress, J. Szigethy (Editors), *Horizons in Earth Science Research*, 14, 123-141. (査読有)
- 伊藤康人・高野修・玉置真知子, 2014. 磁性流体を用いた岩石中の孔隙ネットワーク定量分析 - 岩石磁気データの石油探鉱への応用 - . *石油技術協会誌*, 79: 339-348. (査読有)
- Itoh, Y., Kusumoto, S., Takemura, K., 2014. Evolutionary process of Beppu Bay in central Kyushu, Japan: a quantitative study of the basin-forming process controlled by plate convergence modes. *Earth, Planets and Space*, 66, 74. doi:10.1186/1880-5981-66-74. (査読有)

有)

Itoh, Y., Takano, O., Kusumoto, S., Tamaki, M., 2014. Mechanism of long-standing Cenozoic basin formation in central Hokkaido: an integrated basin study on an oblique convergent margin. Progress in Earth and Planetary Science, 1, 6. doi:10.1186/2197-4284-1-6. (査読有)

Itoh, Y., Kusumoto, S., Takemura, K., 2013. Characteristic basin formation at terminations of a large transcurrent fault - basin configuration based on gravity and geomagnetic data. In: Y. Itoh (Editor), Mechanism of Sedimentary Basin Formation - Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins. InTech, Rijeka, Croatia, pp. 255-272. http:// dx.doi.org/10.5772/56702. (査読有)

Itoh, Y., Tamaki, M., Takano, O., 2013. Rock magnetic properties of sedimentary rocks in central Hokkaido - insights into sedimentary and tectonic processes on an active margin. In: Y. Itoh (Editor), Mechanism of Sedimentary Basin Formation - Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins. InTech, Rijeka, Croatia, pp. 233-253. http:// dx.doi.org/10.5772/56650. (査読有)

Itoh, Y., Takemura, K., Kusumoto, S., 2013. Neotectonic intra-arc basins within southwest Japan - conspicuous basin-forming process related to differential motion of crustal blocks. In: Y. Itoh (Editor), Mechanism of Sedimentary Basin Formation - Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins. InTech, Rijeka, Croatia, pp. 191-207. http:// dx.doi.org/10.5772/56588. (査読有)

[学会発表](計1件)

Sasao, E., Yuguchi, T., Itoh, Y., Inoue, T., Ishibashi, M., 2015. Formative mechanism of inhomogeneous distribution of fractures, an example of the Toki Granite, Central Japan. 10th Asian Regional Conference of IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment (26-29 September 2015, Uji Obaku Plaza of Kyoto University, Kyoto, Japan).

[図書](計3件)

Itoh, Y., Kusumoto, S., Takemura, K., 2016. Research Frontiers of Sedimentary Basin Interiors: Methodological Review and a Case Study on an Oblique Convergent Margin. Nova Science Publishers, Inc., NY, 100 p.

Itoh, Y., 2015. Gunchu Formation - An Indicator of Active Tectonics on an Oblique Convergent Margin. LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 76 p. ISBN 978-3-659-39898-8.

Itoh, Y. (Editor), 2013. Mechanism of Sedimentary Basin Formation -

Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins. InTech, Rijeka, Croatia, 304 p. (http:// dx.doi.org/10.5772/50016) ISBN 978-953-51-1193-1.

[産業財産権]  
出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 康人 (ITO, Yasuto)  
大阪府立大学理学系研究科・准教授  
研究者番号：20285315

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：