

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 29 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610142

研究課題名(和文)川砂ジルコンを用いた新手法による過去40億年間の古地磁気強度記録の復元

研究課題名(英文)Paleointensity experiment using zircon crystal sampled from river sand: toward reconstruction of magnetic field variation during last 4 Ga

研究代表者

佐藤 雅彦 (Sato, Masahiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究員

研究者番号：50723277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模河川の川砂中に含まれるジルコン単結晶に注目し、ジルコン単結晶を用いた古地磁気強度研究手法の開発を行った。研究期間内において、磁気測定用ジルコンの採取・準備手法の確立、微小・微弱なジルコン単結晶の各種磁気測定手法の確立、磁気パラメータの組み合わせによる古地磁気測定試料選別基準の提案、選別基準を満たす試料による予察的古地磁気強度実験の実施を行った。本研究により、ジルコン単結晶を用いた古地磁気測定研究の基礎構築がなされ、川砂ジルコンを用いた古地磁気強度研究の実現可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In this study we focused on zircon crystal sampled from sand of major river, and conducted rock-magnetic and paleomagnetic experiment using single zircon crystal sampled from the sand. During a survey period we established the non-magnetic preparation method of zircon for paleomagnetic study and the rock-magnetic and paleomagnetic measurement technique for single zircon crystal. On the basis of experimental results we proposed the criteria to select suitable sample for paleointensity study, and we also demonstrated paleointensity experiment using the sample satisfying the criteria. We established a ground of paleomagnetic study using single zircon crystal, and the results from this study suggested that single zircon crystal would be applicable to paleointensity experiments.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：古地磁気強度 ジルコン 岩石磁気 丹沢 長江 ミシシッピ川

1. 研究開始当初の背景

地球磁場は金属中心核の対流運動によって生成・維持されている。そのため、固体内核の成長やマントルの対流様式変化といった、地球内部ダイナミクスの状態を反映して変化する事が知られている¹。現在の地球磁場勢力圏(磁気圏)は地球半径の約10倍程度に広がり、生命活動にとって有害な太陽風や宇宙線から地球表層を保護している。地球磁場の強さに伴って磁気圏の範囲が変化する事から、磁場強度の変化は地球表層環境・生命居住環境に大きな影響を与えていると考えられている。従って、地球史を通じた磁場強度の永年変化は、地球内部ダイナミクス進化-表層環境・生命進化をリンクさせる重要なデータでありその解明が急務となっている。これまでの古地磁気研究では、岩石試料を採取し、岩片の年代測定、及び別の岩片の磁気測定、を行う事で過去の地球磁場強度復元が行われて来た。しかし現状の古地磁気データは(図1)、過去5億年以前のデータが圧倒的に少なく²、地球史を通じた磁場強度変化の議論が不可能である事が大きな問題となっている。

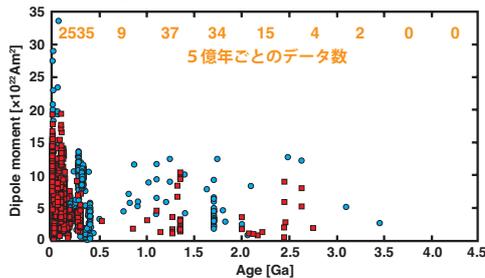


図1. 古地磁気強度データ

2. 研究の目的

本研究では上記問題に取り組むために、大規模河川の川砂中に含まれるジルコン単結晶に注目し、古地磁気強度研究手法の開発を行った。図2にミシシッピ川河口で採取したジルコンの年代分布を示す³。大規模河川の川砂中にはその河川流域に存在する岩石に由来する鉍物片が含まれ、幅広い年代を持つ鉍物試料が効率的に採取出来る。川砂に含まれるジルコン単結晶を用いて、年代測定及び古地磁気強度測定を行う事で、地球史を通じた磁場強度データがこれまでとは桁違いに多く集まると期待され、地球史を通じた磁場強度変化を議論するための十分なデータが得られると期待される。

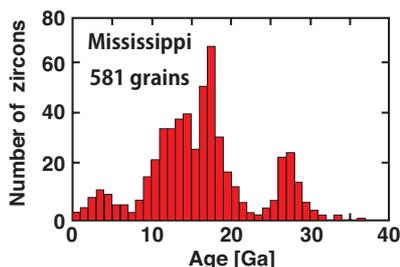


図2. ジルコンの結晶化年代

3. 研究の方法

(1) ジルコン採取

中華人民共和国上海市の長江河口で川砂を採取した。パンニング皿を用いてさらにその砂から重鉍物を濃集する事で、重鉍物が高濃度に濃集した砂を集めた。重鉍物の濃集した砂を、実験室でさらに数段階濃集し、濃集した砂を少量ずつシャーレに入れて、実体顕微鏡下で観察しながら、ジルコン結晶を探してピックアップした。

(2) 磁気測定

① 自然残留磁化・等温残留磁化測定

高知大学古地磁気実験室の超伝導磁力計を用いて、自然残留磁化の測定を行った。自然残留磁化測定後にパルス磁化装置を用いて等温残留磁化を着磁し、超伝導磁力計を用いて残留磁化の測定を行った。自然残留磁化及び等温残留磁化の値を吟味して典型的な試料を選び出し、段階消磁実験を行った。段階消磁では、液体窒素に浸して冷却して低温消磁を行った後、交流消磁装置を用いて段階交流消磁を行った。超伝導磁力計を用いて、各消磁ステップで残留磁化測定を行った。

② 低温磁気測定

高知大学古地磁気実験室の磁気特性測定装置を用いて、ジルコン試料の低温磁気測定を行った。自然残留磁化及び等温残留磁化の値を吟味して典型的な試料を選別して低温磁気測定に用いた。測定詳細は以下の通りである。ZFC-remanence (300 K から 10 K まで無磁場中冷却後に、2.5T で等温残留磁化を着磁) および FC-remanence (300 K から 10 K まで 2.5T で磁場中冷却して着磁) の熱消磁曲線の測定を行った。

③ 磁気ヒステリシス測定

九州大学古地磁気実験室の交番磁場勾配磁力計を用いて、ジルコン試料の磁気ヒステリシス測定を行った。自然残留磁化及び等温残留磁化の値を吟味して典型的な試料を選別して低温磁気測定に用いた。

④ 熱残留磁化測定

自然残留磁化強度、等温残留磁化強度、低温磁気曲線、磁気ヒステリシスパラメータの値を吟味して適切な試料を選び出し、熱残留磁化着磁実験を行った。熱残留磁化の着磁と残留磁化の測定には、高知大学古地磁気実験室の熱消磁装置と超伝導磁力計をそれぞれ用いた。

⑤ 顕微鏡観察

自然残留磁化強度、等温残留磁化強度、低温磁気曲線、磁気ヒステリシスパラメータの値を吟味して適切な試料を選び出し、ジルコンに含まれる包有物の実体顕微鏡観察及び電子顕微鏡を行った。

4. 研究成果

(1) ジルコン採取

平成 26 年 11 月 21 日から 11 月 27 日の期間に、中華人民共和国上海市に行き、長江河口で川砂の採取を行った。本調査は、研究分担者の横浜国立大学・山本伸次准教授と中華人民共和国でのカウンターパートとなる東京大学・杜偉博士と 3 人で行った。長江周辺を調査し、川砂サンプリングを行った。パンニング皿を用いて重鉍物の濃集を行い、1 kg 程度の川砂の採取に成功した。濃集した川砂を用いて実験室で更なる重鉍物濃集を行った。実体顕微鏡下でジルコンのピックアップを行い、約 1000 粒子のジルコン単結晶を採取する事に成功した。

長江の試料に加えて平成 24 年度から平成 25 年度の期間に神奈川県丹沢山地中川及びアメリカ合衆国ルイジアナ州のミシシッピ川周辺で採取した川砂中からも同様の手法で約 1000 粒子ずつのジルコン単結晶を採取する事に成功した。

(2) 磁気測定

①自然残留磁化強度・等温残留磁化強度

丹沢山地中川、長江、ミシシッピ川の川砂から採取したジルコン結晶約 1000 粒子ずつを用いて、自然残留磁化強度の測定を行った。丹沢山地中川のジルコン試料の自然残留磁化強度測定の結果を図 3 に示す。自然残留磁化の強度は、超電導磁力計の検出限界以下 ($4 \times 10^{-12} \text{ Am}^2$) から 10^{-9} Am^2 程度に分布し、全 1037 粒子のうち 85 粒子 (8.2%) が超電導磁力計の検出限界以上の自然残留磁化強度を保持している事が明らかになった。長江とミシシッピ川のジルコン試料では、それぞれ 9.8% と 4.6% の粒子が超電導磁力計の検出限界以上の自然残留磁化強度を保持している事が明らかになった。

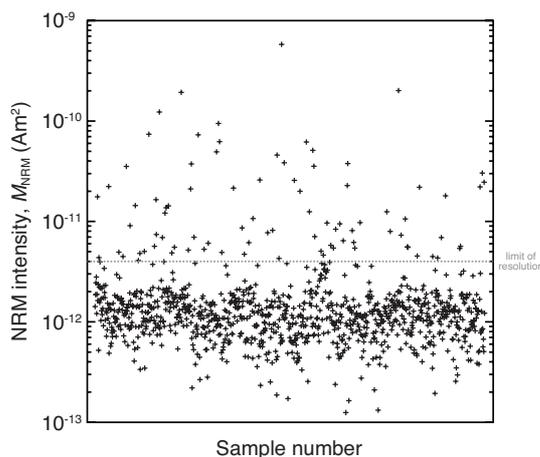


図 3. 丹沢試料の自然残留磁化強度

丹沢山地中川、長江、ミシシッピ川の川砂から採取したジルコン結晶約 1000 粒子ずつを用いて、等温残留磁化強度の測定を行った。丹沢山地中川のジルコン試料の自然残留磁化強度と等温残留磁化強度の関係を図 4 に示

す。自然残留磁化強度と等温残留磁化強度が超電導磁力計の検出限界以上である範囲に注目すると、自然残留磁化強度/等温残留磁化強度の比が約 0.01 から 1 程度と幅広い範囲に分布しており、この結果は、ジルコン試料の中に含まれる磁性鉍物の種類や保持している自然残留磁化の状態が多様であることを示唆している。長江とミシシッピ川のジルコン試料でも丹沢のジルコン試料と同様に、自然残留磁化強度-等温残留磁化強度プロット上で幅広い範囲での分布を示した。

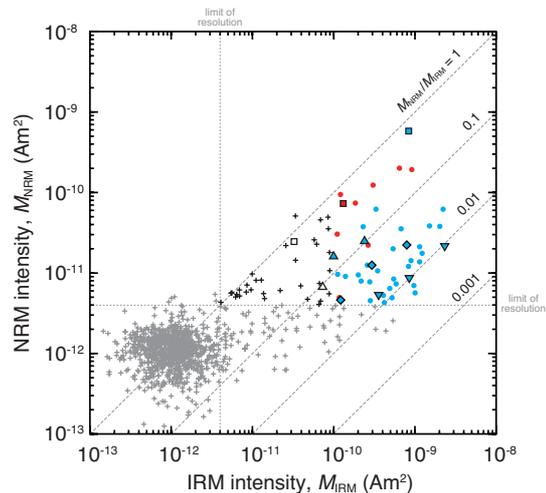


図 4. 丹沢試料の残留磁化強度

②段階消磁・低温磁気測定

丹沢のジルコン試料のうち自然残留磁化強度-等温残留磁化強度プロット上で典型的な試料を選別 (図 4 の四角形、三角形、ひし形、逆三角形のシンボル) して、等温残留磁化の段階消磁処理及び低温磁気測定を行った。段階消磁処理の結果、自然残留磁化強度/等温残留磁化強度の比が同程度の試料では同様の振る舞いを示し、その比が大きくなるにつれて消磁曲線上で不安定な挙動を示す事が明らかになった。

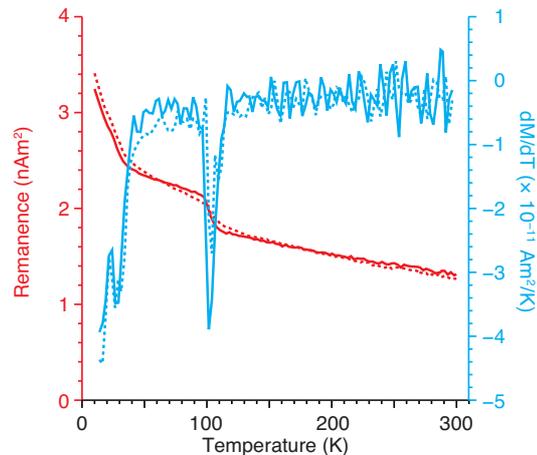


図 5. 丹沢試料の低温磁気曲線

丹沢のジルコン試料の低温磁気測定結果一例を図 5 に示す。図 5 の試料では低温磁気曲線上で、約 35 K 付近と約 120 K 付近におい

て磁硫鉄鉱と磁鉄鉱の低温転移温度がそれぞれ確認できる。別の試料では約 50 K 付近において菱面体相の低温転移温度が確認された。自然残留磁化強度/等温残留磁化強度の比が 0.1 から 1 程度の試料は磁硫鉄鉱を含み、比が 0.01 から 0.1 程度の試料は磁鉄鉱を含む傾向が明らかになり、この自然残留磁化強度/等温残留磁化強度の比と磁氣的性質の間の相関関係は、段階消磁処理の結果と調和的である。長江のジルコン 25 試料に対しても低温磁気測定を行い、その結果は丹沢のジルコン試料と同様に、自然残留磁化強度/等温残留磁化強度の比が大きい試料は磁硫鉄鉱を含み、比が小さい試料は磁鉄鉱を含む傾向が確認された。

③磁気ヒステリシス測定

丹沢のジルコン試料のうち等温残留磁化強度が強い試料 ($>1 \times 10^{-10} \text{ Am}^2$) を選別して、磁気ヒステリシス測定を行った。測定の結果、磁気ヒステリシスパラメータでは磁氣的に硬い試料と軟らかい試料の 2 グループに分かれる事が確認された。硬い試料と軟らかい試料を図 4 中に赤と青のシンボルでそれぞれ示す。段階消磁と低温磁気測定の結果と合わせると、磁硫鉄鉱を含み試料は磁氣的に硬い傾向がある事が明らかになった。

④熱残留磁化測定

自然残留磁化強度測定、等温残留磁化測定、段階消磁測定、低温磁気測定、磁気ヒステリシス測定の結果を踏まえると、自然残留磁化強度/等温残留磁化強度の比が小さい試料では磁硫鉄鉱を含まずに磁鉄鉱のみを含み古地磁気強度測定に適していると考えられる。また細粒な磁鉄鉱試料では、 $50 \mu\text{T}$ で着磁した熱残留磁化と等温残留磁化の比は 0.1 から 0.01 程度であると報告されており⁴、自然残留磁化強度/等温残留磁化強度の比が小さい試料では、自然残留磁化が熱残留磁化である可能性が高い。そこで丹沢のジルコン試料のうち、自然残留磁化強度/等温残留磁化強度の比が 0.01 程度の試料を選別して、熱残留磁化の着磁を行った。

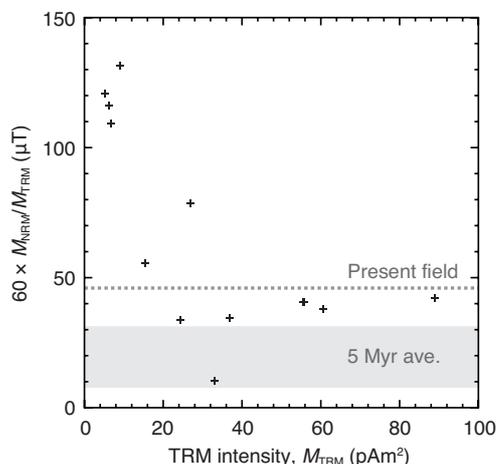


図 6. 丹沢試料の古地磁気強度

熱残留磁化測定の結果を図 6 に示す。熱残留磁化が十分に強い試料では、自然残留磁化強度/熱残留磁化強度の比がほぼ一定値を示した。また、自然残留磁化強度/熱残留磁化強度の比から求めた古地磁気強度は過去 500 万年間の古地磁気強度平均値⁵と同程度であり、ジルコンの母岩である丹沢トーナライトの形成年代⁶とも調和的である。

⑤顕微鏡観察

丹沢のジルコン試料のうち自然残留磁化強度-等温残留磁化強度プロット上で典型的な試料を選別 (図 4 の四角形, 三角形, ひし形, 逆三角形のシンボル) して、実体顕微鏡観察及び電子顕微鏡観察を行った。顕微鏡観察の結果、低温磁気測定により低温転移温度から存在が示唆されていた、磁鉄鉱, 磁硫鉄鉱, 菱面体相の存在が直接確認され、磁気測定の結果を裏付けるデータを得ることができた。

⑥古地磁気強度測定に関する考察

本研究の主たる成果は下記の通りである。

- 磁気測定用の川砂ジルコン採取手法の確立及びジルコン単結晶を用いた各種磁気測定手法の確立
- 超電導磁力計の検出限界以上の自然残留磁化強度を持つジルコン試料が一定数存在する事を示した
- ジルコン中には磁性鉱物として磁鉄鉱, 磁硫鉄鉱が含まれていることを示した
- 自然残留磁化強度/等温残留磁化強度の比が小さい試料では磁硫鉄鉱を含まずに磁鉄鉱のみを含み古地磁気強度測定に適している事を示した
- 上記選別基準を満たす試料を用いて、ジルコンの形成年代と調和的な古地磁気強度を得ることに成功した

本研究では、川砂ジルコンを用いた古地磁気強度測定新手法の確立を目標と設定していた。本プロジェクトの研究期間を通じてジルコン単結晶を用いた古地磁気測定研究の基礎構築がなされ、川砂ジルコンを用いた古地磁気強度研究の実現可能性が示された。また、単結晶試料を用いた古地磁気強度研究は世界的に発展途上であるが、本研究の単結晶磁気測定手法を用いた応用研究が国内において複数開始されており、その点も本研究の大きな成果としてあげられる。

<引用文献>

- ① Stevenson et al. (1983), Magnetism and thermal evolution of the terrestrial planets, *Icarus*, 54, 466-489.
- ② Tauxe & Yamazaki (2007), Paleointensities, pp. 509-563, Elsevier.
- ③ Rino et al. (2008), The Grenvillian and Pan-African orogens: world's largest

orogenies through geologic time, and their implications on the origin of superplume, *Gondwana Res.*, 14, 51-72.

- ④ Yu (2010), Paleointensity determination using anhysteretic remanence and saturation isothermal remanence, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q02Z12.
- ⑤ Yamamoto & Tsunakawa (2005), Geomagnetic field intensity during the last 5 Myr: LTD-DHT Shaw palaeointensities from volcanic rocks of the Society Islands, French Polynesia, *Geophys. J. Int.*, 162, 79-114.
- ⑥ Tani et al. (2010), Syncollisional rapid granitic magma formation in an arc-arc collision zone: Evidence from the Tanzawa plutonic complex, Japan, *Geology*, 38, 215-218.

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 2 件)

- ① M. Sato, S. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y. Okada, M. Ohno, H. Tsunakawa, S. Maruyama, Rock-magnetic properties of single zircon crystals sampled from the Tanzawa tonalitic pluton, central Japan, *Earth Planets Space*, 査読有り, 2015, 67, 150, doi:10.1186/s40623-015-0317-9. <http://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-015-0317-9>
 - ② J. Kawai, H. Oda, J. Fujihira, M. Miyamoto, I. Miyagi, M. Sato, SQUID Microscope with Hollow-Structured Cryostat for Magnetic Field Imaging of Room Temperature Samples, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有り, 2016, 26, 1600905, doi:10.1109/TASC.2016.2536751. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=7425162>
- [学会発表] (計 14 件)
- ① 佐藤雅彦, 山本伸次, 山本裕二, 岡田吉弘, 大野正夫, 綱川秀夫, Rock magnetic study of single zircon crystals sampled from river sands, 日本地球惑星科学連合大会, 2014 年 4 月 30 日, パシフィコ横浜 (神奈川県).
 - ② M. Sato, S. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y.

Okada, M. Ohno, H. Tsunakawa, Rock magnetic study of single zircon crystals: implication for geomagnetic field paleointensity experiment, AOGS 11th Annual Meeting, 30 August 2014, Sapporo (Japan).

- ③ 山本伸次, 小宮剛, 佐藤雅彦, 坂田周平, 服部健太郎, 平田岳史, 砕屑性ジルコン研究の新しい展開:地球表層-地殻・マントル-コアまで, 日本地質学会, 2014 年 9 月 15 日, 鹿児島大学 (鹿児島県).
- ④ 佐藤雅彦, 山本伸次, 山本裕二, 大野正夫, 綱川秀夫, 丸山茂徳, Rock-magnetic study of single zircon crystals sampled from the Nakagawa River, Tanzawa, Japan, 高知コアセンター共同利用・共同研究成果発表会, 2015 年 3 月 3 日, 高知大学 (高知県).
- ⑤ 佐藤雅彦, 山本伸次, 山本裕二, 大野正夫, 綱川秀夫, 丸山茂徳, Rock-magnetic properties of single zircon crystals sampled from the Tanzawa tonalitic pluton, central Japan, 日本地球惑星科学連合大会, 2015 年 5 月 24 日, 幕張メッセ (千葉県).
- ⑥ M. Sato, S. Yamamoto, Y. Yamamoto, M. Ohno, H. Tsunakawa, S. Maruyama, Rock-magnetic properties of single zircon crystals sampled from the Tanzawa tonalitic pluton, central Japan, ELSI Workshop on Geophysical & Geochemical Constraints on Early Planetary Dynamos, 17 September 2015, Fujikawaguchiko-cho (Japan).
- ⑦ 佐藤雅彦, 山本伸次, Wei Du, 山本裕二, 小田啓邦, 河合淳, 大野正夫, 綱川秀夫, 丸山茂徳, Rock-magnetic properties of single zircon crystals sampled from the Yangtze River, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2015 年 10 月 31 日, 東京大学 (東京都).
- ⑧ M. Sato, S. Yamamoto, Y. Yamamoto, M. Ohno, H. Tsunakawa, S. Maruyama, Rock-magnetic properties of single zircon crystals sampled from the Tanzawa tonalitic pluton, central Japan, American Geophysical Union Fall Meeting, 17 December 2015, San Francisco (USA).
- ⑨ 佐藤雅彦, 山本伸次, 山本裕二, Wei Du, 大野正夫, 綱川秀夫, 丸山茂徳, Rock-magnetic properties of single zircon crystals sampled from the

Yangtze River, 高知コアセンター共同
利用・共同研究成果発表会, 2016年2月
29日, 高知大学(高知県).

- ⑩ 佐藤雅彦, 山本伸次, 山本裕二, Wei Du,
大野正夫, 綱川秀夫, 丸山茂徳,
Rock-magnetic properties of single
zircon crystals sampled from the
Yangtze River, 日本地球惑星科学連合
大会, 2016年5月24日, 幕張メッセ(千
葉県).
- ⑪ 山本伸次, 佐藤雅彦, 山本裕二, 大野正
夫, 綱川秀夫, Mineral inclusions and
magnetic properties of single zircon
crystals from the Tanzawa tonalitic
pluton, 日本地球惑星科学連合大会,
2016年5月24日, 幕張メッセ(千葉県).
- ⑫ 山本伸次, 佐藤雅彦, 山本裕二, 大野正
夫, 綱川秀夫, Mineral inclusions and
magnetic properties of single zircon
crystals from the Tanzawa tonalitic
pluton, 日本地質学会, 2016年9月11
日, 日本大学(東京都).
- ⑬ M. Sato, S. Yamamoto, Y. Yamamoto, W.
Du, M. Ohno, H. Tsunakawa, S. Maruyama,
Rock-magnetic properties of single
zircon crystals sampled from the
Yangtze River, American Geophysical
Union Fall Meeting, 14 December 2016,
San Francisco (USA).
- ⑭ 佐藤雅彦, 山本伸次, 山本裕二, Wei Du,
大野正夫, 綱川秀夫, 丸山茂徳,
Rock-magnetic properties of single
zircon crystals sampled from the
Yangtze River and the Mississippi
River, 高知コアセンター共同利用・共同
研究成果発表会, 2017年2月28日, 高
知大学(高知県).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<https://staff.aist.go.jp/m.satou/publication.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 雅彦 (SATO, MAsahiko)

国立開発研究法人産業技術総合研究所・地

質情報研究部門・研究員

研究者番号: 50723277

(2) 研究分担者

山本 伸次 (YAMAMOTO, Shinji)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准
教授

研究者番号: 30467013

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし