

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K20935

研究課題名(和文) 初期地球における隕石衝突率の解読

研究課題名(英文) Decoding impact history in the early Earth

研究代表者

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

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)：本研究課題では、主に月の岩石年代分析から提唱されている「後期重爆撃仮説」について、西オーストラリア・ジャックヒルズ変礫岩中に含まれる碎屑性・衝撃変成ジルコンのインパクト年代分析から初期地球における隕石衝突率の解読を目指した。大量・迅速なジルコン分離技術の改良および年代分析技術向上としてそれぞれ国際誌1編ずつの成果となり、碎屑性衝撃変成ジルコンの組織観察・年代分析の結果は論文投稿中である。また上記初期地球研究に関連して、国際学会および国内学会での招待講演が1回ずつとなった。インパクト年代の累計による「後期重爆撃仮説」の検証までには到達していないものの、今後のデータ蓄積により到達可能である。

研究成果の概要(英文)：Our research proposal aimed to resolve “Late Heavy Bombardment (LHB) hypothesis” originally proposed from studies of the Moon, using detrital shocked-zircon in the metasedimentary rock, western Australia. High amount of zircon separation and high-reliability age dating techniques are developed and the results are published in international journals, respectively. Related topics about the early Earth environment, we present oral presentation (invited) at international and domestic conferences.

Main research finding in our proposal is below; four types of shock-metamorphosed zircons were identified; (1) curvi-planar (non-planar) feature, (2) multiple sets of planar feature, (3) partly granular (polycrystalline) texture, and (4) fully granular texture. Of these four, multiple sets of planar feature are proved for diagnostic evidence for impact origin, and now observed as annealed (decorated) planar feature, probably due to post-impact thermal heating or regional metamorphic overprint.

研究分野：地質学、岩石・鉱物学、年代学

キーワード：初期地球 ジャックヒルズ 碎屑性ジルコン 衝撃変成作用 後期重爆撃

1. 研究開始当初の背景

地球形成初期において、約 38-40 億年前の隕石母天体の集中的な爆撃、いわゆる“後期重爆撃仮説”¹ が主に月溶融岩石の年代分析から提唱されている(図 1)。

しかし、データの少なさや採取試料のバイアス等の問題から未だ大きな論争が続いており、惑星形成理論や地球史研究における重要な研究課題となっている³。初期地球における隕石衝突率の推定は、①初期地殻の形成と破壊(大陸進化)、②大気・海洋など揮発性成分の供給(大気海洋進化)、③初期生命誕生への原材料物質の供給(生命進化)、④最新の理論計算(巨大ガス惑星の摂動)に対する検証など、惑星科学全般における様々な問題に対し重要な制約条件を与える。

現在の地球上において、最古の隕石衝突記録は南アフリカ・バーバートン緑色岩帯に存在する約 35 億年前のスフェリユールベッドであり、40 億年以前(冥王代)の地質体はカナダ・アカスタ片麻岩帯(約 40.2 億)やヌブガキツク緑色岩帯(約 42 億)など、限定された年代地域・岩石種しか残存しない一方で、西豪州・ジャックヒルズ変礫岩からは、約 30 億年前から最大で約 44 億年前の年代値を示す碎屑性ジルコンが多数報告されており、これが冥王代地球を系統的に解読する唯一の鉱物記録である⁴。これまでの数千粒に上る化学分析から、約 39 億年前後のジルコン粒子は後期重爆撃イベントに関連する異常な熱履歴を示すと報告例があるが⁵、隕石衝突との因果関係は不明であり決定的な証拠とはなっていない。

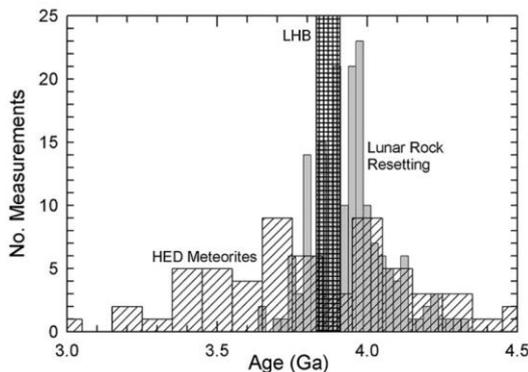


図1 月の溶融岩および HED 隕石の年代頻度
LHB: late heavy bombardment(後期重爆撃)²

隕石衝突に起因する衝撃変成作用の指標鉱物として、planar features (PFs)や granular texture といった特徴的な組織を有する衝撃変成ジルコンが各地の隕石クレーターやイジェクタ層から報告されており、インパクト年代を決定する重要鉱物として知られている⁶。特に衝撃変成ジルコンのうち、Curvi-planar と呼ばれる組織をもつ衝撃変成ジルコンは、単粒子内での複数スポットでの U-Pb 年代分析から、基盤岩の年代およびインパクト年代が推定可能とされる⁷ (図 2)。本研究課題では上記のジャックヒルズ碎屑性ジルコンか

ら、これら衝撃変成作用に特徴的なジルコン粒子を探索し、碎屑性衝撃変成ジルコンの系統的なインパクト年代分析から、初期地球における隕石衝突率の解読をおこなう。

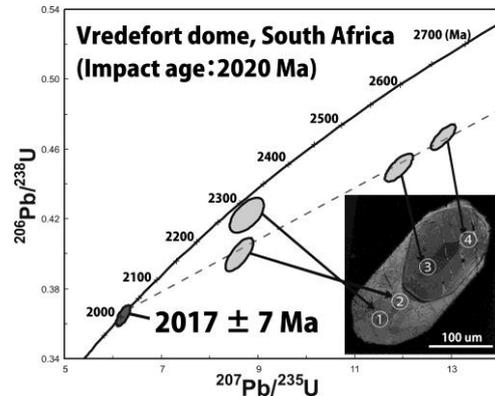


図2 南アフリカ・フレデフォートクレーターにおける衝撃変成ジルコンの U-Pb 年代分析から求められたインパクト年代⁷

2. 研究の目的

初期地球における隕石重爆撃は、生命誕生のゆりかごである地球表層環境に対して重大な影響を与えたはずであるが、物的証拠の少なさからその全容は依然として不明である。本研究課題では、①冥王代唯一の地球試料である西豪州・ジャックヒルズ変礫岩中に含まれる碎屑性・衝撃変成ジルコンを大規模回収し、②LA-MC-ICPMS を用いたスポット分析からジルコン単粒子のインパクト年代を決定し、③初期地球における隕石衝突率を解読することを目的とした。

3. 研究の方法

碎屑性・衝撃変成鉱物は、衝撃変成組織が円摩・癒着・変成・変質により元組織が消失するケースが多いため、ジルコン内部組織を詳細に観察することが重要となる。また、対象とする 40 億年以上の年代をもち、かつ衝撃変成組織を有する碎屑性ジルコンは全ジルコンの 0.01% 以下であるため大量の碎屑性ジルコン観察が必要である。これら一連の研究手法の詳細は以下となる。

研究協力者(後述)と共に、西豪州・ジャックヒルズ地域での野外調査を行い、変礫岩試料を 300kg オーダーで追加採取する。(2) 大規模鉱物分離のために、礫岩試料をジョークラッシャーで連続粉碎し、回転式比重選鉱機を用いて繰り返し選鉱をおこなう。10 万倍以上に濃縮した重鉱物選鉱からネオジウム磁石および SPT 重液(密度 3.0)を用いてジルコン粒子含有率を 80% 以上まで高め、実体顕微鏡下にて専用モールドを用いてジルコン粒子を 1 万粒オーダーにて樹脂埋め研磨する。光学顕微鏡下にてジルコン粒子を観察し 100 粒子レベルで衝撃変成ジルコンを回収する。(3) 衝撃変成ジルコン結晶内部組織を CL (カソードルミネッセンス) や EBSD (電

子線後方散乱回折)で観察し、(4) LA-MC-ICPMS を用いて衝撃変成ジルコンの高精度・微小スポット分析を適用しインパクト年代を決定する。(5)。最終的には100粒程度のインパクト年代分析から初期地球における隕石衝突の頻度分布図を完成させる。

4. 研究成果

砕屑性ジルコン大規模分離と迅速年代測定

岩石試料に含まれる砕屑性・衝撃変成ジルコンの分離を行うため、初期段階として、大量・迅速なジルコン分離技術の改良および年代分析技術向上に取り組んだ。具体的には、重鉍物濃縮のため、サイクロン式重鉍物分離装置を導入し、重鉍物分離の高効率システムを構築するとともに、画像認識プログラムを搭載した鉍物ピックアップシステムを制作し(図3)、砕屑性ジルコンを1週間で数千粒子採取することが可能となった(図4)。またこれらジルコン粒子の迅速年代分析の改良により、約1200粒子の年代分析から、これまで世界最古記録とされる約43.7億年前のジルコン粒子を発見することとなり(図5)、一連の成果は国際誌に掲載された⁸。

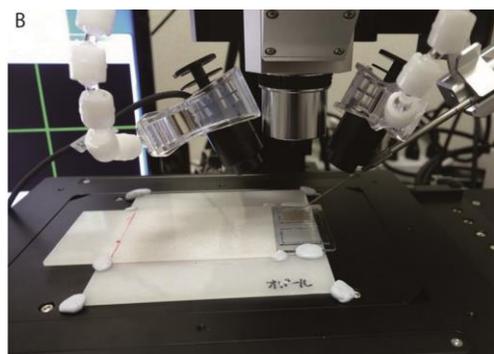


図3 画像認識プログラムを搭載した鉍物ピックアップシステム⁸

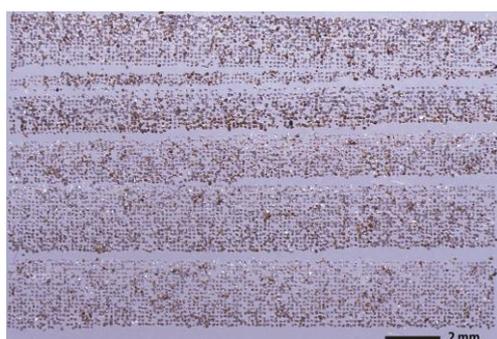


図4 制作した鉍物ピックアップシステムにより回収された約1万粒子のジルコン⁸

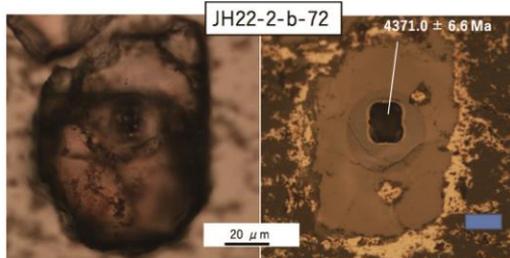


図5 世界最古記録となる43.7億年前のジルコン⁸

砕屑性衝撃ジルコン粒子の回収

西豪州・ジャックヒルズ地域から採取された83の岩石試料の内、半数の約40試料から、光学顕微鏡による観察から衝撃変成ジルコン約50粒が回収された。特に明瞭な衝撃変成組織をもつジルコン粒子を図6に示す。

EBSDを用いた衝撃変成による再結晶の判別をおこないLA-ICP-MSを用いた年代分析の結果、衝撃変成年代および2次的な変成作用(広域変成作用)を区別することができた。これは衝撃変成組織を取り囲む変成リムを見分けることで各年代値の上限及び下限を与える。一方で、本研究課題の対象である豪州・ジャックヒルズ砕屑岩類に含まれるジルコンには、南アフリカ共和国における約20億年前の隕石衝突クレーターに存在する衝撃変成ジルコンの組織とは異なり、その大部分が二次的な熱変成による再結晶組織を示した。このことは衝撃変成作用時およびその後の広域変成作用の温度条件が異なるため、保存される衝撃変成組織も異なり、その結果ジルコンU-Pb年代分析から求められるインパクト年代の解釈には注意を要することが明らかとなった。

上記一連の砕屑性衝撃変成ジルコンの組織観察・年代分析の結果は論文投稿中である。また上記初期地球研究に関連して、国際学会および国内学会での招待講演が1回ずつとなった。インパクト年代の累計による「後期重爆撃仮説」の検証までには至らなかったものの、今後の継続的なデータ蓄積により到達可能である。

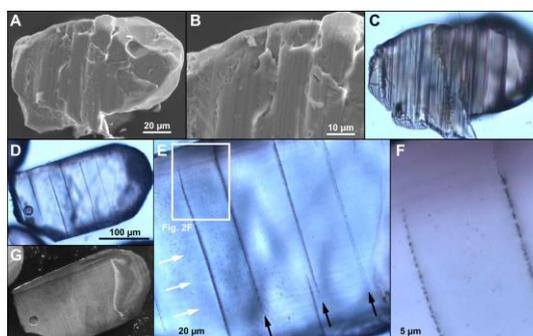


図6 ジャックヒルズ礫岩から回収された衝撃変成ジルコンの組織

<引用文献>

- [1] e.g. Terra et al., 1974. *EPSL* 22, 1-21. [2] Capman et al., 2007. *Icarus* 189 233-245. [3] e.g. Abramov et al., 2013. *Chemie der Erde* 73, 227-248. [4] Valley et al., 2014. *Nature Geo.* DOI: 10.1038/NEGEO2075. [5] Abbott et al., 2012. *PNAS* 109, 13486-13492. [6] e.g. Kamo et al., 2011. *EPSL* 310, 401-408 [7] Moser et al., 2011. *Can. J. Earth Sci.* 48, 117-139. [8] Isozaki et al., 2017. *GeoSci. Frontier*, (in press).

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 7 件)

- ① Isozaki, Y., Yamamoto, S., Sakata, S., Obayashi, H., Hirata, T., Obori, K., Maebayashi, T., Takeshima, S., Ebisuzaki, T., and Maruyama, S. (2017) High-reliability zircon separation for hunting the oldest material on Earth: An automatic zircon separator with image-processing/microtweezers-manipulating system and double-step dating. In press, *Geoscience Frontiers*, in press. 査読有り
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.04.010>
- ② Komiya, T., Yamamoto, S., Aoki, S., Koshida, K., Shimojo, M., Sawaki, Y., Aoki, K., Sakata, S., Yokoyama, T.D., Maki, K., Ishikawa, A., Hirata, T. and Collerson, K.D. (2017) A prolonged granitoid formation in Saglek Block, Labrador: Zonal growth and crustal reworking of continental crust in the Eoarchean. *Geoscience Frontiers* 8, 355-385. 査読有り
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.06.013>
- ③ Azuma, S., Yamamoto, S., Ichikawa, H. and Maruyama, S. Why primordial continents were recycled to the deep: Role of subduction erosion. *March*, (2017) *Geoscience Frontiers* 8, 337-346. 査読有り
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.08.001>
- ④ Shimojo, S., Yamamoto, S., Sakata, S., Yokoyama, T.D., Maki, K., Sawaki, Y., Ishikawa, A., Aoki, K., Aoki, S., Koshida, K., Tashiro, T., Hirata, T., Collerson, K.D. and Komiya, T. (2016) Occurrence and geochronology of the Eoarchean, ~3.9 Ga, Iqaluk Gneiss in the Saglek Block, northern Labrador, Canada: Evidence for the oldest supracrustal rocks in the world. *Precambrian Research* 278, 218-243. 査読有り
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.03.018>
- ⑤ Komiya, T., Yamamoto, S., Aoki, S., Sawaki, Y., Ishikawa, I., Tashiro, T., Koshida, T., Shimojo, M., Aoki, K., and Collerson, K.D. (2015) Geology of the Eoarchean, > 3.95 Ga, Nulliak supracrustal rocks in the Saglek Block, northern Labrador, Canada: The oldest geological evidence for plate tectonics. *Tectonophysics* 662, 40-60. 査読有り
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.05.003>
- ⑥ Aoki, K., Isozaki, Y., Sakata, S., Sato, T., Yamamoto, S., Hirata, T., (2015). Detrital

zircon geochronology of sandstones from Jurassic and Cretaceous accretionary complexes in the Kanto Mountains, Japan: implications for arc provenance. *Engineering Geology of Japan*, 5, 11-27. 査読有り

- ⑦ Asanuma, H., Okada, T., Fujisaki, W., Suzuki, K., Sato, T., Sawak, Y., Sakata, S., Yamamoto, S., Hirata, T., Maruyama, S., Windley, B. (2015) Reconstruction of ocean plate stratigraphy in the Gwna Group, NW Wales: Implications for the subduction-accretion process of a latest Proterozoic trench-forearc. *Tectonophysics* 662, 195-207. 査読有り
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.04.016>

[学会発表] (計 6 件)

- ① 山本伸次 他、冥王代ジルコン研究 ～ジルコン 100 万粒計画～、地球惑星科学連合 2016 年大会 (幕張メッセ)、2016 年 5 月
- ② YAMAMOTO Shinji et al., Shock metamorphosed zircons discovered in Jack Hills metaconglomerate from the Narryer Gneiss Complex, Western Australia. 26th Goldschmidt Conference (Pacífico Yokohama), June 2016
- ③ YAMAMOTO Shinji (Invited), Hadean environment inferred from mineral inclusions in the oldest zircon of the Earth: Application of micro-analysis by laser technologies. Laser Solutions for Space and the Earth 2017 (Pacífico Yokohama), April 2017.
- ④ 山本伸次 他、The Hadean environment inferred from mineral inclusions within the oldest terrestrial zircons.地球惑星科学連合 2017 年大会 (幕張メッセ)、2017 年 5 月
- ⑤ 山本伸次、砕屑性衝撃変成ジルコンの組織学的検討、日本地質学会第 124 年学術大会 (愛媛大学)、2017 年 9 月
- ⑥ 山本伸次、地球最古岩石および鉱物から推定する初期地球環境、レーザー学会学術講演会 第 38 回年次大会 (京都 都めっせ) 2018 年 1 月

[図書] (計 1 件)

山本伸次、海はどのようにしてできたのか。株式会社文理「理科の探検」、2016 vol.21, p.30-33.

〔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

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

小宮剛 (KOMIYA Tsuyoshi)

磯崎行雄 (ISOZAKI Yikio)

坂田周平 (SAKATA Shuhei)