

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23253007

研究課題名(和文)冥王代の初期惑星進化解読

研究課題名(英文)Decoding of the evolution of the early earth in the Hadean

研究代表者

小宮 剛 (Komiya, Tsuyoshi)

東京大学・総合文化研究科・准教授

研究者番号：30361786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 40,300,000円

研究成果の概要(和文)：初期地球進化解読のため、カナダ・サグレック岩体の地質・地球化学的研究を行い、以下の成果を得た。地球で二番目に古い岩石(39.5億年前)を発見、Iqaluk片麻岩と命名。本地域はIqaluk-Uivak片麻岩とそれに貫入されたNulliak表成岩帯からなり、後者は覆瓦状構造をなす。後者は最古の付加体であり、プレートテクトニクスを示唆。縞状鉄鉱層の希土類元素パターンには正のLa, EuとY異常が存在し、その化学組成は当時の海水がCo, Zn, Niに富んでいたことを示す。最古生命の痕跡となる極めて低い ^{13}C PDB値(-29.8‰)をもつ球状や不定形の炭質物を碎屑岩から発見。

研究成果の概要(英文)：We performed geological and geochemical works on the Saglek Block, northern Labrador, Canada to decode evolution of the early earth, and obtained some new discoveries as shown below. (1) We found the second oldest rock (3,950 Ma) on the earth, and named it Iqaluk gneiss. (2) The block is underlain by the Nulliak supracrustal rocks and the Iqaluk-Uivak Gneiss, which was intruded into the former; thus the formers are the oldest supracrustal rocks in the world. (3) The formers have imbricate (duplex) structure with ultramafic rocks, mafic rocks and sedimentary rocks in ascending order. (4) The structure and stratigraphy indicate that they are the oldest accretionary complexes, suggesting operation of plate tectonics. (5) Geochemistry of banded iron formation with positive La, Eu and Y anomalies indicates paleoseawater was enriched in Co, Zn and Ni. (6) We discovered organic matter with quite low ^{13}C PDB values, down to -29.8‰ in a clastic rock, providing the oldest trace of life.

研究分野：地質学

キーワード：冥王代 初期太古代 ラブラドル サグレックブロック 地質調査 付加体 プレートテクトニクス
大陸成長

1. 研究開始当初の背景

地球は約 45.4 億年の長い歴史をもつ、複雑・多様に進化した惑星とされるが、冥王代よばれる最初の 5 億年の記録は地球上にはほとんど残されていない。しかし、この時代に、マグマオーシャン、核形成、海洋形成、プレートテクトニクスの開始や生命誕生など生命地球を特徴づける様々なイベントが起きたとされる。この昏冥の時代の固体地球と表層環境進化を解読するためには初期太古代の地質体の詳細な地質調査とその時代の岩石試料が要求される。

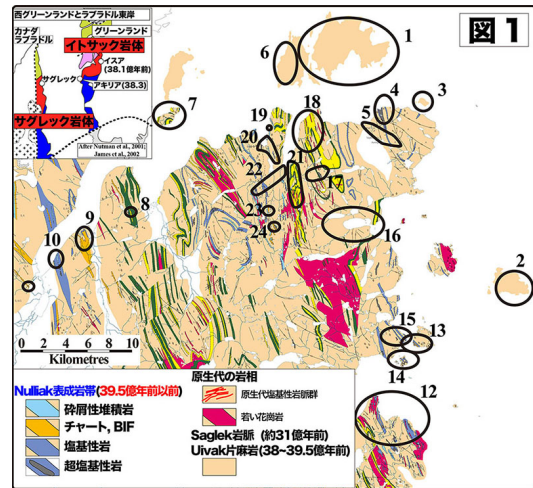
本研究では、現在最古の表成岩とされる 38.3 億年前の西グリーンランド南部の地質体よりも古い可能性のあるラブラドルサグレック岩体の地質調査を行う。本地域は地理的制約により 90 年代以降、詳細な調査がされていない。そこで、綿密な地質調査を行うとともに、90 年代以降確立されたジルコンのカソードルミネッセンス像解析や局所 U-Pb 年代を行い、最古の地質体の探索をする。

2. 研究の目的

冥王代の惑星進化の解読に向け、世界最古の噴出岩や堆積岩が存在するカナダ・ラブラドル・サグレック岩体で地質調査を行ない、最古のプレートテクトニクスの証拠を探すとともに、マントルの温度・組成進化、初期大陸地殻形成プロセスの解明と大陸成長、太古代最初期の表層環境解読、最古生命の研究のための岩石試料を採取する。

3. 研究の方法

従来の研究ではサグレック岩体全体の片麻岩体と表成岩帯の分布を明らかにすることに重きがおかれ、表成岩帯内部の詳細な地質学的研究はされていない。そこで、本研究では、以下の九つの点に着目し、研究を行う。
 ①表成岩帯内部に着目し、サグレック岩体内の 24 カ所で 5000 分の 1 スケールの詳細な地質図を作成する (図 1)。②それぞれの場所で岩相層序柱状図を作成し、後の褶曲や断層の影響を除いた初生的な層序を復元する。③花崗岩質片麻岩体と表成岩帯の境界の構造を調べ、花崗岩質片麻岩が表成岩を構造的に切っていることを実証し、表成岩は花崗岩より古いことを明らかにする。④花崗岩質片麻岩露頭の詳細な記載を行い、見かけ単一に見える花崗岩質片麻岩が、実は複数の起源をもつことを示し、その中から最古のものを地質



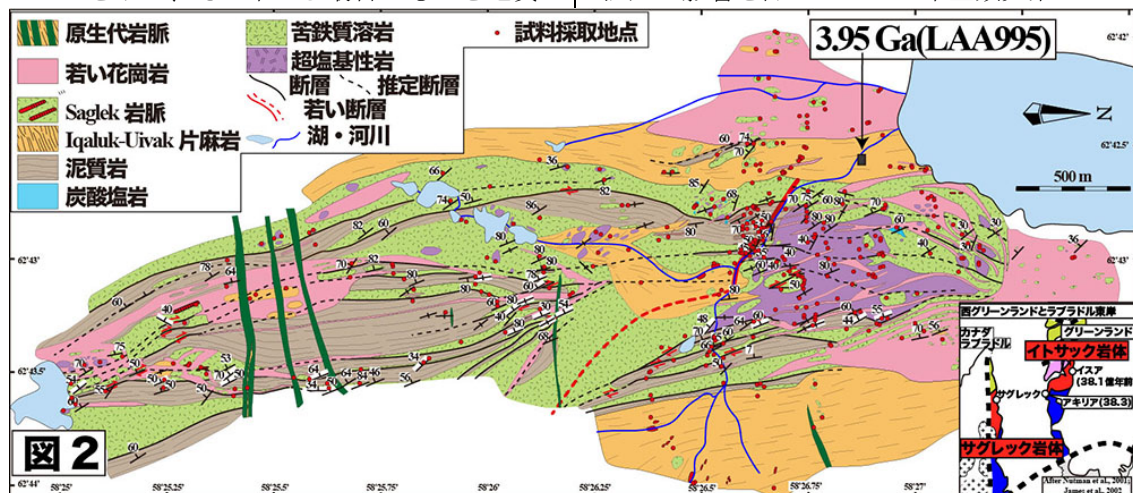
学的産状から選別する。⑤3 年間で約 3000 個の試料を系統的に採取する。⑥花崗岩質片麻岩からジルコンを分離し、そのカソードルミネッセンス (CL) 像や U-Pb 年代を京都大学平田研究室で分析し、母岩の形成年代を得る。⑦得られた花崗岩質片麻岩の年代から、表成岩の年代の下限を得る。⑧堆積岩の組成から、当時の海洋組成を推定する。⑨堆積岩から炭質物を探索し、その炭素同位体組成から生命起源であることを実証する。

4. 研究成果

4.1 研究成果の概要

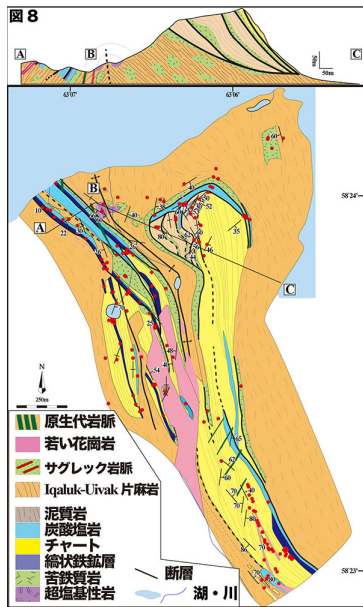
初期地球進化解読のため、カナダ・ラブラドル・サグレック岩体の地質調査、年代決定、地球化学的研究を行った。①地球で二番目に古い岩石(39.5 億年前)を発見し、Iqaluk 片麻岩と命名した。②本地域は Iqaluk-Uivak 花崗岩質片麻岩とそれに貫入された Nulliak 表成岩帯からなり、後者は低角な断層に境界されたサブユニット(下位から超塩基性岩、苦鉄質岩、堆積岩の順で累重)からなる覆瓦状構造をなすことが分かった。堆積岩はチャート、縞状鉄鉱層(BIF)、炭酸塩岩や礫岩・泥岩からなり、オフィライト層序をもつ岩体や泥質岩を基質とするメラランジェも存在する。③覆瓦状構造と上述の層序の存在は本地質体が最古の付加体であることを示し、プレートテクトニクスが既に機能していたことを示唆する。

本地域には塩基性岩を伴うアルゴマタイプと炭酸塩岩を伴う浅海成タイプの BIF が存在する。Zr 量から見積もられる火山砕屑物の混入の影響を除いた BIF の希土類元素パター



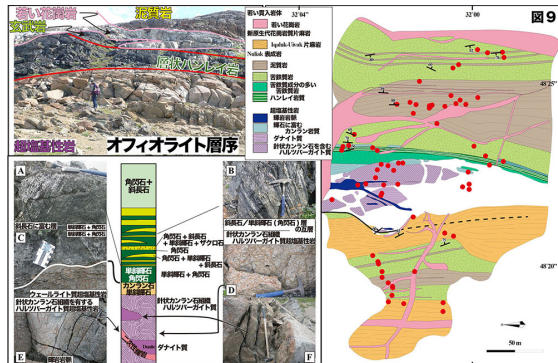
4.2.2.3 Pangertok Inlet (図 1 の調査地 9)

図 8 は Pangertok Inlet 地域の地質図。本地域は北西-南東走向の表成岩とそれを貫入する Iqaluk-Uivak 片麻岩から主に構成される。



表成岩は超苦鉄質岩、苦鉄質岩、縞状鉄鉱層、チャート、炭酸塩岩からなり、一部の炭酸塩岩は変成・変質を受けチャート化している。また、表成岩帯は層理面に対して比較的低角な断層によって境界付けられたサブユニットからなり、各サブユニット内は下位から超苦鉄質岩、苦鉄質岩、炭酸塩岩/チャート、縞状鉄鉱層の順で累重する。堆積岩層が分岐する所が、西側地域で観察され、上述の断層を確認できる。

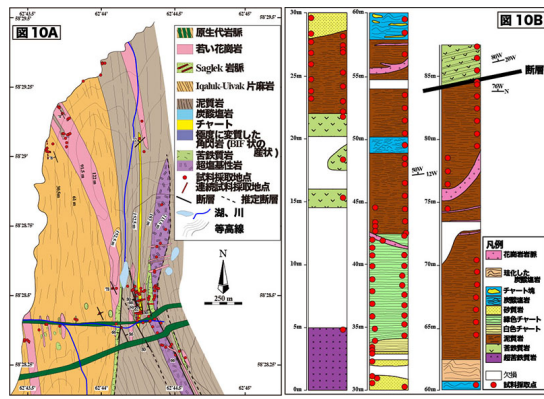
4.2.2.4 Shuldham area (図 1 の調査地 6)



Shuldham 島の西海岸沿いには超塩基性岩帯が点在する。図 9 右はその地質図、左上は露頭写真、左下は層序を示す。下位から超塩基性岩、ハンレイ岩由来と考えられる斜長石に富む粗粒の角閃岩と単斜輝石由来の角閃石に富む粗粒角閃岩の互層、細粒の苦鉄質岩、泥質岩からなり、その層序はオフィオライト由来であると考えられる。超塩基性岩は主にハルツバーガイト質で、ダナイト質や輝岩質の岩脈が見られる。また、変成時の脱水過程で生じたと考えられる巨大 (>50 cm) なカンラン石の針状構造が存在する。

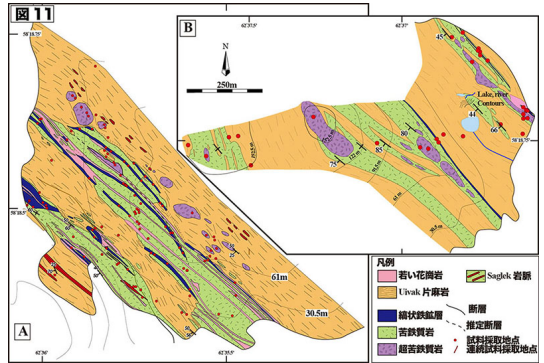
4.2.2.4 St. John's Harbour West (SJHW, 調査地 18)

本地域の東側は泥質岩を主体とした表成岩、西側は Iqaluk-Uivak 片麻岩からなる。その片麻岩体は表成岩のエンクレーブを含み、Saglek 岩脈によって切られる (図 10A)。東側の表成岩体はいくつかのサブユニットに分かれ、それぞれ、下位から超塩基性岩、苦鉄質岩、堆積岩からなる。堆積岩はチャート、泥質岩、炭酸塩岩を含み、泥質岩が卓越する (図 10B)。



4.2.2.4 Nulliak 島とその対岸 (調査地 13,15)

本地域は Nulliak 表成岩の模式地で北西-南東走向・西傾斜の表成岩帯とそれを貫入する Uivak 片麻岩と Saglek 岩脈からなる。Nulliak

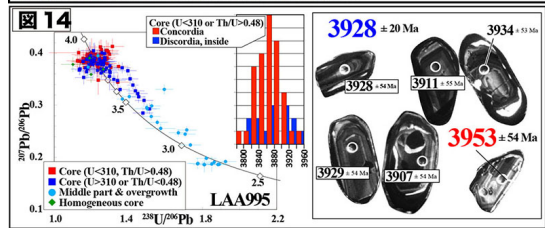
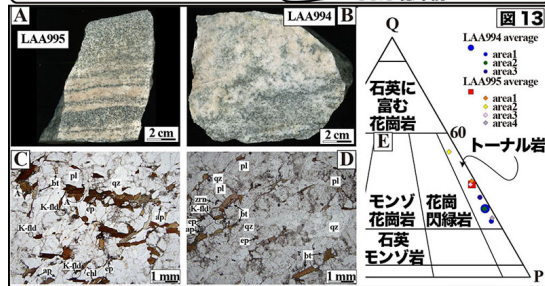
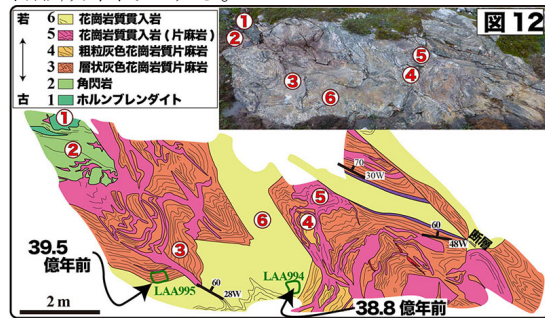


島(左図)では、表成岩帯は、断層で境された、少なくとも2つのサブユニットからなり、それぞれ下位から超苦鉄質岩、苦鉄質岩、縞状鉄鉱層を含む。特に、苦鉄質岩と縞状鉄鉱層が互層する点の特徴で、縞状鉄鉱層は北西側で厚く、南東に向かい薄化・消滅する。

4.3 ラブラドルの年代

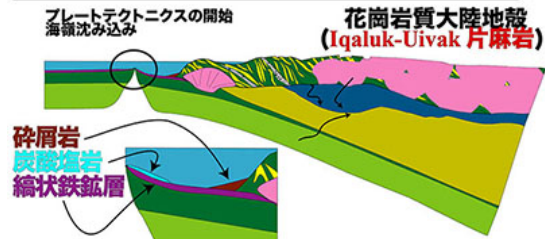
図 12 は SJHS 地域の花崗岩質片麻岩体の露頭写真とスケッチである。この露頭は角閃岩とホルンブレンダイトからなる表成岩とそれを切る花崗岩質片麻岩からなる。後者は一見、単一の岩相に見られるが、地質学的産状から4つに分類され、その産状から③で示したトーナル岩質層状灰色片麻岩(図 13AC, LAA995)が最も古く、⑥で示した塊状のトーナル岩質白色片麻岩(図 13BD, LAA994)が最も若い。図 14 は LAA995 試料から分離したジルコンの模式的なカソードルミネッセンス(CL)像、U-Pb コンコーディア図と核の部分の U-Pb 年代の頻度分布を示す。ジルコンの内部構造は、CL 像を基に、累帯構造が見られるものについては核(core)、中間部(middle part)、外縁部(overgrowth)に分け、さらに、CL 像が暗黒色で累帯構造が見られないものは均質核(homogeneous core)とした。さらに、核は U 濃度と Th/U 比によって、2種に分類した。U 濃度が低く、Th/U 比が高い核(グループ A)は、コンコーディア線上にのものが多く、かつ比較的古い年代をもつ。一方、その他のグループのジルコンは Discordia 線を形成したり、比較的若い年代をもったりする。一般に、火成ジルコンは累帯構造をもち、低 U 濃度、高 Th/U 比を持つので、グループ A のジルコンが原岩形成時に晶出したジルコ

ンであると考えられる。その中で、最古のジルコンの年代は $3953 \pm 54 \text{ Ma}$ 、また、誤差の範囲で最も古い年代をもつジルコンの平均値は $3,928 \pm 20 \text{ Ma}$ となる。前者を LAA995 の原岩形成年代とする。



4.3 39.5 億年前のテクトニクス

図15: 39.5億年前のテクトニクスと地球表面

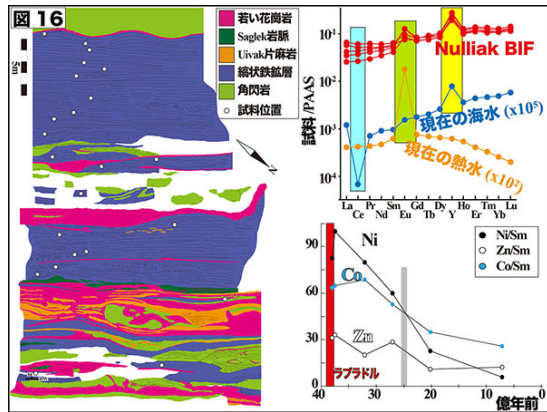


Nulliak 表成岩帯の地質学的研究から得られた覆瓦状構造・デュープレックス構造と岩相層序は、Nulliak 表成岩帯が付加体であったことを示唆する。付加体の存在は地殻の沈み込みがあったことを示し、39.5 億年前にはすでにプレートテクトニクスが機能していたことを示唆する。また、本地域の岩相層序は、苦鉄質岩の直上に泥質岩などの碎屑性堆積岩がのる。その構造は海嶺の沈み込みに伴う海洋プレート層序に類似する。また、オフィオライトが多く存在する点も海嶺沈み込みと調和的である。

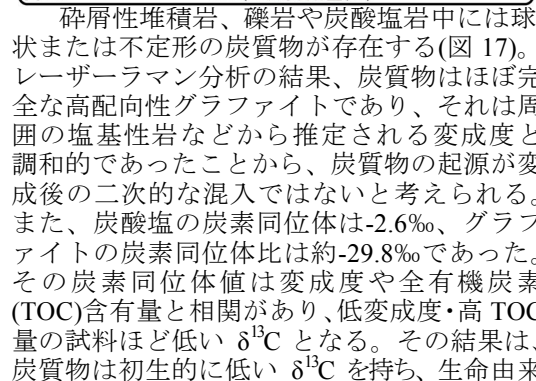
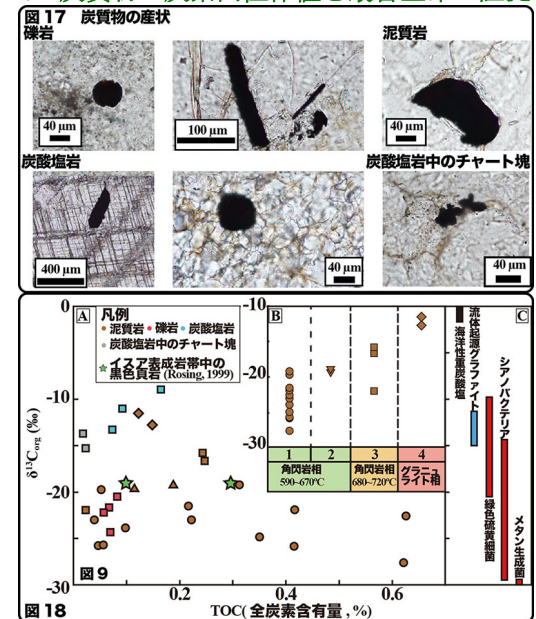
4.4 表層環境解説：海洋組成の推定

本地域には塩基性岩と互層する深海成アルゴマタイプと炭酸塩岩を伴う浅海成タイプの二種の縞状鉄鉱層(BIF)が存在する。その微量元素組成は Zr 濃度と良い相関が見られることから火山碎屑物の混入の影響を受けていると考えられる。その影響が小さい低 Zr 濃度をもつ BIF の希土類元素パターンには

La、Y と Eu の正異常が存在する。それらは現在の海水や熱水で特徴的に見られることから、この最古の縞状鉄鉱層が当時の海水組成を保持していることが期待される。特に、Y と Eu 異常から推定した熱水の混合比は 0.1%以下で、強く海水組成を反映していることが期待される。二種の BIF は Ni/Fe-Fe/Si 図でそれぞれ異なるトレンドを形成し、高 Fe/Si 側で交差する。その交点を海水組成、もう一方を熱水組成であると仮定すると海水から沈殿した鉄酸化物の Ni/Fe 比は 0.00006 となり、現在の鉄沈殿物よりは高いが、先行研究の太古代の推定値より顕著に低い。また、Ce 負異常が存在せず、Ni、Co、Zn に富むことから当時の海水は還元的で、Ni、Co、Zn などの生命必須元素に富んでいたことを示す。



4.4 炭質物の炭素同位体値と最古生命の証拠



碎屑性堆積岩、礫岩や炭酸塩岩中には球状または不定形の炭質物が存在する(図 17)。レーザーラマン分析の結果、炭質物はほぼ完全な高配向性グラファイトであり、それは周囲の塩基性岩などから推定される変成度と調和的であったことから、炭質物の起源が変成後の二次的な混入ではないと考えられる。また、炭酸塩の炭素同位体比は -2.6‰ 、グラファイトの炭素同位体比は約 -29.8‰ であった。その炭素同位体値は変成度や全有機炭素(TOC)含有量と相関があり、低変成度・高 TOC 量の試料ほど低い $\delta^{13}\text{C}$ となる。その結果は、炭質物は初生的に低い $\delta^{13}\text{C}$ を持ち、生命由来

であったことを示唆する。最古の生命の証拠であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者と研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 54 件)

国際誌(査読有): 51 件, 国内誌(査読有): 3 件

- [1] Yoshiya, K., Sawaki, Y., Hirata, T., Maruyama, S. & Komiya, T., *In-situ* iron isotope analysis of pyrites in ~3.7 Ga sedimentary protoliths from the Isua supracrustal belt, southern West Greenland. *Chemical Geology* 401, 126-139 (2015). (査読有)
- [2] Usui, Y., Shibuya, T., Sawaki, Y. & Komiya, T., Rock magnetism of tiny exsolved magnetite in plagioclase from a Paleoproterozoic granitoid in the Pilbara Craton. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems-G3* 16, 112-125, doi:10.1002/2014GC005508 (2015). (査読有)
- [3] Komiya, T., Yamamoto, S., Aoki, S., Sawaki, Y., Ishikawa, A., Tashiro, T., Koshida, K., Shimojo, M., Aoki, K. & Collerson, K.D., 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* in press (2015). (査読有)
- [4] Sajeev, K., Windley, B.F., Hegner, E. & Komiya, T., High-temperature, high-pressure granulites (retrogressed eclogites) in the central region of the Lewisian, NW Scotland: Crustal-scale subduction in the Neoarchean. *Gondwana Research* 23, 526-538 (2013). (査読有)
- [5] Rumble, D., Bowring, S., Iizuka, T., Komiya, T., Lepland, A., Rosing, M.T. & Ueno, Y., The oxygen isotope composition of Earth's oldest rocks and evidence of a terrestrial magma ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems-G3* 14, 1929-1939 (2013). (査読有)
- [7] Yoshiya, K., Nishizawa, M., Sawaki, Y., Ueno, Y., Komiya, T., Yamada, K., Yoshida, N., Hirata, T., Wada, H. & Maruyama, S., In situ iron isotope analyses of pyrite and organic carbon isotope ratios in the Fortescue Group: Metabolic variations of a Late Archean ecosystem. *Precambrian Research* 212-213, 169-193 (2012). (査読有)
- [8] Shibuya, T., Tahata, M., Kitajima, K., Ueno, Y., Komiya, T., Yamamoto, S., Igisu, M., Terabayashi, M., Sawaki, Y., Takai, K., Yoshida, N. & Maruyama, S., Depth variation of carbon and oxygen isotopes of calcites in Archean altered upper oceanic crust: Implications for the CO₂ flux from ocean to oceanic crust in the Archean. *Earth and Planetary Science Letters* 321-322, 64-73 (2012). (査読有)
- [9] Safonova, I.Y., Sennikov, N.V., Komiya, T., Bychkova, Y.V. & Kurganskaya, E.V., Geochemical diversity in oceanic basalts hosted by the Zasukhina accretionary complex, NW Russian Altai, Central Asia: Implications from trace elements and Nd isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences* 42, 191-207 (2011). (査読有)
- [10] Safonova, I.Y., Seltman, R., Kröner, A., Gladkochub, D., Schulmann, K., Xiao, W., Kim, J., Komiya, T. & Sun, M., A new concept of continental construction in the Central Asian Orogenic Belt (compared to actualistic examples from the Western Pacific). *Episodes* 34, 186-196 (2011). (査読有)
- [11] Safonova, I.Y., Buslov, M.M., Simonov, V.A., Izokh, A.E., Komiya, T., Kurganskaya, E.V. & Ohno, T., Geochemistry, petrogenesis and geodynamic origin of basalts from the Katun' accretionary complex of Gorny Altai (southwestern Siberia). *Russian Geology and Geophysics* 52, 421-442 (2011). (査読有)
- [12] Komiya, T., Continental recycling and true continental growth. *Russian Geology and Geophysics* 52, 1516-1529 (2011). (査読有)

[学会発表] (計 64 件)

- [1] Komiya, T., Yamamoto, S., Shimojo, M. & Aoki, S., The oldest accretionary complex and the beginning of the Pacific-type orogeny based on geology of the 3.96 Ga Nulliak supracrustal rocks in Labrador. The International Biogeoscience Conference 2013 Nagoya, Aichi, Japan, 3rd November 2013.
- [2] Komiya, T., The oldest rocks in the world. Japan Geoscience Union Meeting 2013, Makuhari, Chiba, Japan, 20th May 2013.
- [3] Aoki, S., Masanori, M., Sakata, S., Yamamoto, S., Ishikawa, A., Hirata, T. & Komiya, T., Geology, Lithostratigraphy and Geochemistry of the Oldest Eoarchean BIFs, Northern Labrador. The 23rd V.M. Goldschmidt Conference, Firenze Fiera Congress and Exhibition Centre, Florence, Italy, 29th August 2013.
- [4] Ishikawa, A., Shimojo, M., Suzuki, K., Collerson, K.D. & Komiya, T., Search for Early Archean mantle lacking the late-veener component. Goldschmidt 2012 Conference, Montreal, Canada, 26th June 2012.
- [5] Shimojo, M., Yamamoto, S., Maki, K., Hirata, T., Sawaki, Y., Aoki, K., Ishikawa, A., Okada, Y., Collerson, K.D. & Komiya, T., U-Pb zircon ages of Early Archean gneisses from northern Labrador. Goldschmidt 2012 Conference, Montreal, Canada, 26th June 2012.
- [6] Komiya, T., Shimojo, M., Yamamoto, S., Sawaki, Y., Ishikawa, A., Aoki, K. & Collerson, K.D., Geology of the Nain Complex, Labrador, Canada: Occurrence of the Early Archean supracrustals. Goldschmidt 2012 Conference, Montreal, Canada, 26th June 2012.

[その他]

ホームページ等

<http://ea.c.u-tokyo.ac.jp/earth/Members/komiya.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小宮 剛 (KOMIYA, Tsuyoshi)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授
研究者番号: 30361786

(2) 研究分担者

片山 郁夫 (KATAYAMA, Ikuo)

広島大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 10448235