

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2013～2016

課題番号：25302008

研究課題名(和文)後期太古代氷河期における汎地球的な環境変動の解明：同位体地質学からのアプローチ

研究課題名(英文)Geological and isotopic record of Late Archean glaciation and global environmental changes

研究代表者

M Satish Kumar (M, Satish-Kumar)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：50313929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究期間中に収集したデータを用いて、インドダールワール岩体の29～25億年前の地球表層環境解析を行った。特に堆積岩に地球表層環境を記録するような構造ならびに化学的記録が保存されている。チトラドゥルガ片岩帯の広域的な地質図を作成し、構造発達・テクトニクス場の変化・周辺地域の地質体との比較・詳細な年代測定による層序の決定などを行うことで、インドの太古代地層においてこれまで不可能であった地質・環境解析が可能となった。さらにこれらのデータと基盤岩や火山岩の詳細な地球化学的解析により、太古代ポンゴラ氷期による海洋・大気環境の局所的・広域的变化を評価した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, a systematic geological field survey of the Archaean strata of the Dharwar craton, southern India, and its comparison with same age rocks from South Africa was carried out. Important results obtained include, construction of a geological map of Chitradurga Schist Belt, litho- and chronostratigraphy, regional structural evolution, metamorphic evolution, zircon and monazite age dating, analysis of sedimentary structures, whole rock geochemistry and Nd isotope study of volcanic rock units, geochemical studies of TTG gneisses and granites, multiple sulfur isotopes of sedimentary rocks, C, O and S isotope studies of stromatolites, geochemical studies of BIFs and modelling on tectonic evolution. Based on the above results, we discuss the possible occurrence of diamictites comparable to the Pongola glaciation in South Africa. Combining the above results, we put forward a comprehensive model on the geological evolution of the Archaean western Dharwar craton.

研究分野：数物系科学

キーワード：地質学 岩石・鉱物・鉱床学 太古代 氷河期 同位体地質学

1. 研究開始当初の背景

太古代における地球表層や大気の変遷は生命の起源と発展に連結してきた。生命の源である海洋域は地球創生後の火山熱等による「沸騰海洋」に始まり、やがて生命に適した「静穏な海洋」へと環境を変化させたが、いつ、どのような変化があったのかは定かでない。これを理解する一つの鍵として地球表層の冷却過程を明示する氷河堆積物がある。地球史に記録の残る最初の氷河期として南アフリカのカープファールクラトンのポンゴラ氷河期が報告されている。一方、インド南部の太古代末期ダールワール岩体と、インド北部のシンブン岩体・バスター岩体には、ポンゴラ氷河期と同時代の地層が分布し、これまでの調査から地層の露出状況や堆積層序が太古代の環境変動の解析に適しているか等について検討を重ねてきた。その過程で、インド南部の太古代ダールワール岩体とオーストラリアのピルバラ岩体や南アフリカのカープファール岩体との相違点がしだいに明瞭になってきた。すなわち、ダールワール岩体にはより低温の変成岩類や花崗岩・グリーンストーン帯を特徴付ける岩石が分布し、またストロマトライト、縞状鉄鉱床と氷礫岩といった堆積環境の理解の鍵となる地層の層序と堆積構造の保存が極めて良いことが明らかとなった。このように、インド南部の地質は太古代の地殻進化を検討する上でこれまでに綿密な研究データが報告されているオーストラリアのピルバラクラトンの研究と相補的な関係にあり、その延長として必然的にインド、南アフリカでの海外学術調査という着想を持つに至った。

2. 研究の目的

本研究では、29億年前後に生じた南アフリカのカープファールクラトンのポンゴラ氷期による環境変化を地質学的に解析し、さらにインドのダールワール、シンブン、バスターやオーストラリアのピルバラといった各同時代岩体との比較を行う。具体的には各地域に産するポンゴラ氷期前後の縞状鉄鉱床やチャート、ストロマトライト、氷礫岩の地質学的特徴、同位体年代、全岩化学組成、放射性および安定同位体組成を抽出・比較し、太古代ポンゴラ氷期による海洋・大気環境の局所的・広域的变化を評価する。

3. 研究の方法

本研究では、インド・ダールワールクラトンでの現地地質調査を行い、採集した試料を地質学、地質年代学的解析、また紫外線フェムト秒レーザーの改良と炭素・酸素硫黄安定同位体の地球化学的解析を行った。

具体的には、(i) 現地調査で得られた地質学的データに基づき地質図を作成した。(ii) 構造地質・岩石学的基礎データを収集し変形・変成の履歴を明らかにした。(iii) 地質年

代学の研究は SHRIMP と EPMA 年代法を使用して国立極地研究所にて行った。(iv) 炭素・酸素・ストロンチウム・ネオジウム同位体研究は新潟大学で行った。(v) 四種硫黄同位体研究は東京工業大学の上野研究室と共同で行った。

4. 研究成果

下記の研究成果のもと、29億年前後に生じた地球史上最も古い氷河期に関連する環境変化を地質学的に解析し、世界中の太古代同時代岩体との比較を行った。

(1) 地質層序学的観点

インドの西部ダールワールクラトンの代表的な地質ユニットであるチトラドゥルガ片岩帯の地質調査およびサンプリングを行った。周辺地域との比較を行いつつ、現地調査で得られた地質学的データに基づき地質図を作成した (Fig. 1)。年代値を加えるために、研究分担者 (外田) の所属する国立極地研究所において二次イオン質量分析計 (SHRIMP) ならびに電子線マイクロプローブ (EPMA) を用いたジルコンおよびモナザイトの U-Th-Pb 年代測定を実施した。これによって、太古代末期の詳細な年代時系列での環境変動の解析が可能となった。

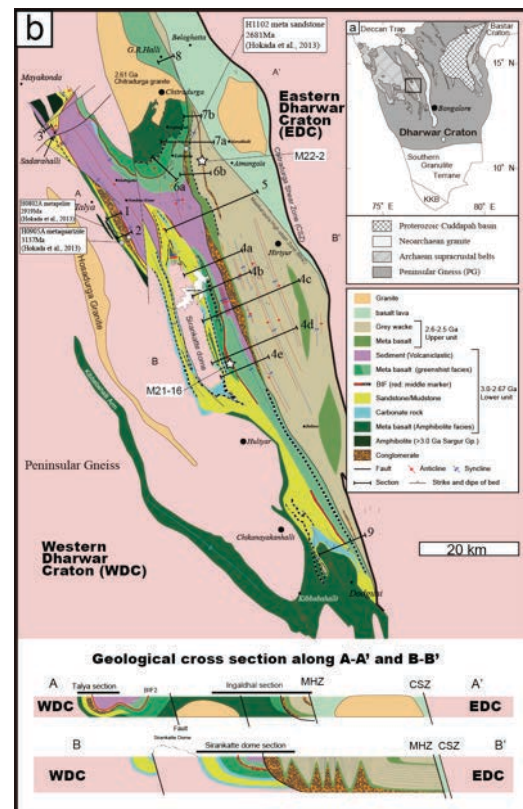


Fig. 1. Geological map and cross section of Chitradurga Schist Belt in the Western Dharwar craton, (after Mishima et al., in prep. & Mishima et al., 2017)

(2) チトラドゥルガ片岩帯の構造発達

チトラドゥルガ片岩帯は波長 10km 以下で NNW-SSE トレンドの西フェルゲンツ非対称褶曲ないし正立褶曲によって強く折り畳ま

れている。このため、東西幅最大 40km で分布する片岩帯の実際の層厚は 11km から 14km (うち Hiriyur 層は 7-9km) であると算出される。また、この褶曲によってほとんどの片理面が高角傾斜を示すが、褶曲包絡面と褶曲の形態などから、片岩帯の大構造は東に向かって緩傾斜ないし水平となる大規模リストリック断層によって規定されていると考えられる (Fig. 1 の地質断面図参照)。主なリストリック断層はチトラドゥルガ片岩帯の西縁と Hiriyur 層の基底に存在する。チトラドゥルガ片岩帯下部を構成する Bababudan 層群と Vanivilas 層、Ingaldhal 層の 3 層と最上位の Hiriyur 層とは元々不整合関係にあったが、現在は東傾斜の断層によって接している。また、Sirankatte ドームの花崗岩と結晶片岩との間の不整合面は同様の大スケール褶曲によって折り畳まれている (Fig. 1)。このことから、ドームの花崗岩は地下深部への連続性が無く、ドーム西側の結晶片岩に衝上した薄い板状を呈していると考えられる。以上のような大構造は大陸衝突帯に特徴的な地質構造であるが、本片岩帯に深部岩石が見られないことから、大規模衝突帯ではないと予想される。Unfolding によって得られる本片岩帯の褶曲前の分布幅、層厚、岩相、堆積盆深度、変成条件などから見て、東西ダールワールクラトンの間にできた狭長な海、あるいは failed リフトに堆積した地層が小規模衝突によって片岩化し、現在の大構造を形成したと考えられる。大陸の小規模な分裂と衝突が繰り返り起こっていた可能性もある。

(3) 堆積構造から見た太古代の古環境

ダールワール超層群の堆積地質学的検討から、ポンゴラ氷河期とほぼ同時期と考えられる堆積環境場の復元を行った。調査地域のダールワール超層群は下位から Bababudan 層群と Chitradurga 層群に細分され、砂岩・泥岩・礫岩・縞状鉄鉱層・チャート・珪岩・玄武岩 (枕状溶岩を含む)・火山碎屑岩などを原岩とする結晶片岩から構成される。とくに Bababudan 層群に挟在する珪岩化した砂岩層には、低角度・高角度の斜交層理が見られ、場合によっては 2 方向の流れを示すヘリンボーン構造が良く保存されており、これらは潮汐作用の及ぶ浅海域の堆積環境を示している。一方で、斜交層理砂岩層周辺のワッケや礫岩層には片理が良く発達する。変成岩帯に産する堆積岩の多くは、変成作用のため構造が変形し、初生的堆積構造が保存されることは極めて稀である。しかしながら、本研究地域では、これら堆積構造が 2 次元・3 次元的にも明瞭に保存されていた。その理由として 1) 潮流の影響を常に受ける堆積場によって、石英粒子が選択的に堆積し、硬い堆積岩を形成した、2) 固い砂岩層はワッケや礫岩層をマトリクスとするブーダンとなってブロック化し、その内部は変形を免れたためと考えられる (Fig. 2, 3)。

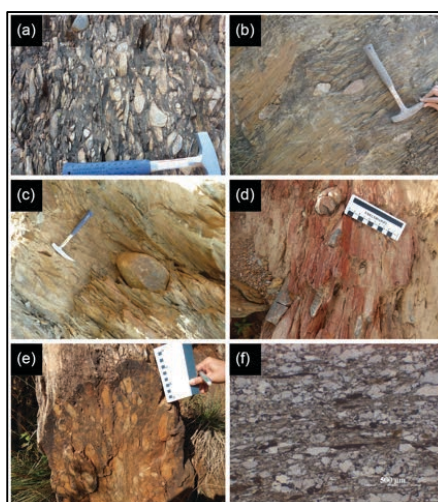


Fig. 2. Possible occurrence of diamictites in the Chitradurga schist belt.

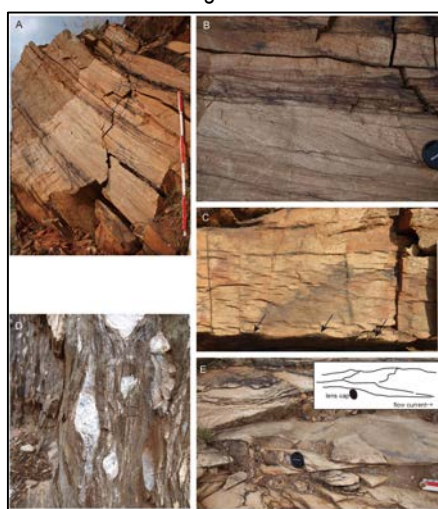


Fig. 3. Alternation of cross-bedded sandstone and ripple cross laminated mudstone (Kataoka et al., 2015)

(4) 四種硫黄同位体の解析

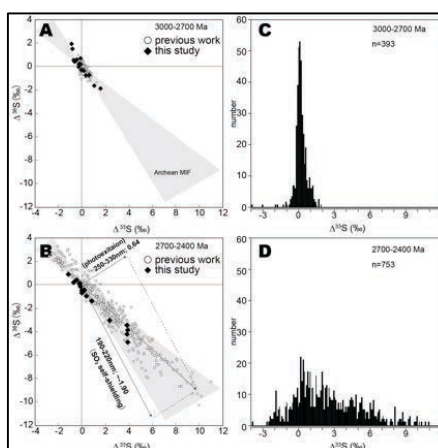


Fig. 4. Relationship between $\Delta^{36}\text{S}$ and $\Delta^{33}\text{S}$ values of the late Archean sulfides (Mishima et al., 2017).

チトラドゥルガ片岩帯から採取した岩石試料に含まれる硫化物の組織観察・化学組成・硫黄同位体分析を行い、 $\delta^{34}\text{S}$ の狭い変動と MIF の存在はどちらも、チトラドゥルガ片岩帯が堆積した当時、貧酸素環境であることを示唆した。本研究では約 32 億年前から 26

億年前という長いスパンで $\Delta^{33}\text{S}$ の値が得られた。オーストラリア西部と南アフリカの同時代地層でこのような長期的な変化が見られたのは初めてであり、 $\Delta^{33}\text{S}$ と $\Delta^{36}\text{S}$ の傾きによる詳細な解析を行い、太古代無酸素大気の時系列組成変化を読み取ることが出来た (Fig. 4)。

(5) 火山岩の地球化学的变化

中～新始生代の緑色岩を対象とし地球化学的手法を用いて研究を行い西ダールワールクラトンにおける始生代の火成活動の進化について検討した。チトラドゥルガ片岩帯における緑色岩類を地球化学的特徴に基づき主に3つのユニットに分けた。これらの源岩はソレアイト質玄武岩～安山岩質玄武岩である。主成分元素組成、微量元素組成、Nd同位体組成ともに明瞭な組成差が確認され、起源となった物質に差があるという結論に至った(Fig. 5)。

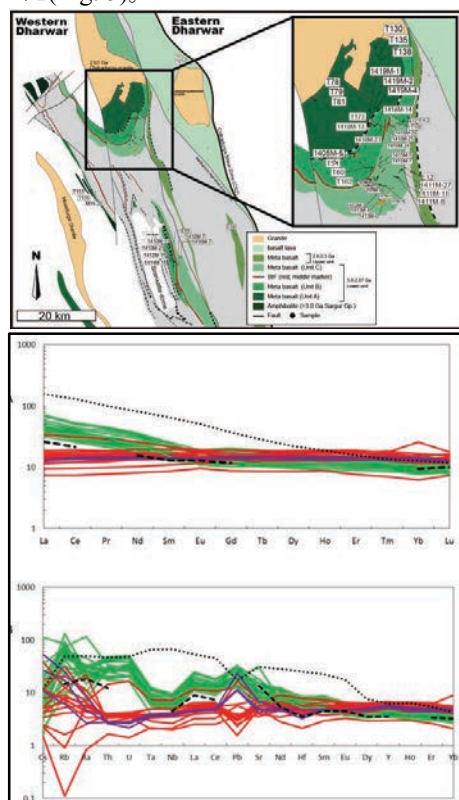


Fig. 5. Distribution of volcanic rocks of the Ingaldhal formation and their chemical characteristics.

(6) 基盤片麻状花崗岩類の地球化学解析

チトラドゥルガ片岩帯周辺において西部ダールワールクラトンの基盤を成す片麻状花崗岩類の性状を把握するために、45地点より90試料を採取し、岩石記載および全岩化学分析を実施した。従来、本地域の片麻状花崗岩類は34～30億年前のTonalite-Trondhjemite-Granodioriteと解釈されてきた。本研究では比較的まとまった試料数で検討を行った結果、片麻状花崗岩類が記載的に花崗閃緑岩質の岩石と花崗岩質の岩石に大別された。化学組成ではTTGの成因的アナログとされるアダカイトに比較して全体

的にSrに乏しいが、花崗閃緑岩質岩の未分化なものは低 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 、高Sr、低Yでアダカイト的な特徴が示された(Fig. 6)。一方、花崗岩質岩は記載的特徴だけでなく、化学組成においてもアダカイト的な性質を示さない(Fig. 6)。花崗岩質岩はSr/Y-Y図で花崗閃緑岩質岩とトレンドが異なり、両者をマグマの分化によるバリエーションとしては説明できない。また、花崗岩質岩は3.5～3.0Gaの世界のTTG平均値とも異なる。これらよりチトラドゥルガ片岩帯の基盤を成している片麻状花崗岩類は少なくとも成因の異なる2つのタイプのマグマ活動に由来し、複数の岩質を有していることが明らかとなった。

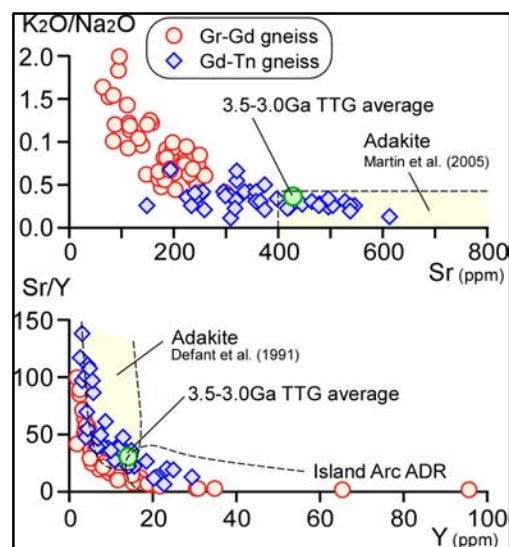


Fig. 6. Geochemistry of granitic gneiss

(7) まとめ

本研究期間中に収集したデータを用いて、ダールワール岩体の29～25億年前の地球表層環境解析を行った。特にインドダールワール岩体には、堆積岩に地球表層環境を記録するような構造ならびに化学的記録が保存されている。チトラドゥルガ片岩帯の広域的な地質図作成し、構造発達・テクトニクス場の変化・周辺地域の地質体との比較・詳細な年代測定による層序の決定などを行うことで、インドの太古代地層においてこれまで不可能であった地質・環境解析が可能となった。さらにこれらのデータと基盤岩や火山岩の詳細な地球化学的解析により、太古代ポンゴラ氷期による海洋・大気環境の局所的・広域的变化を評価した。一部の成果は国際学術雑誌に掲載済みであり、数編の論文に関して準備中である。

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66件)

- [1] Mishima, K., Yamazaki, R., Satish-Kumar, M., Ueno, Y., Hokada, T. & Toyoshima, T. (2017) Multiple sulfur isotope geochemistry

- of Dharwar Supergroup, Southern India: Late Archean record of changing atmospheric chemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 464, 69–83. 査読有 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2017.02.007>
- [2] Nakamura, Y., Yoshino, T. & Satish-Kumar, M. (2017) An experimental kinetic study on the structural evolution of natural carbonaceous material to graphite. *American Mineralogist*, 102, 135–148. 査読有 DOI: <http://dx.doi.org/10.2138/am-2017-5733>
- [3] Satish-Kumar, M., 他 2 名 (2016) Metamorphism and continental growth: Introduction. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 111, 47-49. 査読有 DOI:10.2465/jmps.160420
- [4] Nasheeth, A., Okudaira, T., Horie, K., Hokada, T. & Satish-Kumar, M. (2016) U-Pb SHRIMP ages of detrital zircons from Hiriyur Formation in Chitradurga greenstone belt and its implication to the Neoproterozoic evolution of Dharwar craton, south India. *Journal of the Geological Society of India*, 87, 43-54. 査読有 Doi:10.1007/s12594-016-0372-2
- [5] Kamei, A. (2016) Determination of trace element abundances in GSJ reference rock samples using lithium metaborate-lithium tetraborate fused solutions and inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geoscience Report of Shimane University*, 34, 41-49. 査読無
- [6] Satish-Kumar, M. (2015) Chemostratigraphy as a tool for determining depositional ages of metamorphosed carbonate rocks prior to supercontinent formation. *Journal of Indian Institute of Science*, 95, 125-134. 査読有
- [7] Nakamura, Y., Oohashi, K., Toyoshima, T., Satish-Kumar, M. & Akai, J. (2015) Strain-induced amorphization of graphite in fault zones of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, Japan. *Journal of Structural Geology*, 72, 142-161. 査読有 DOI: 10.1016/j.jsg.2014.10.012
- [8] Nasheeth, A., Okudaira, T., Horie, K., Hokada, T. & Satish-Kumar, M. (2015) SHRIMP U–Pb zircon ages of granitoids adjacent to Chitradurga shear zone, Dharwar craton, South India and its tectonic implications. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 110, 224–234. 査読有
- [9] 片岡香子・豊島剛志・三島 郁・外田智千・Satish-Kumar M.・上野雄一郎・亀井淳志 (2015) インド南西部太古代ダルワール超層群中に保存された浅海環境を示す堆積構造. *地質学雑誌*, 第 121 巻第 12 号, p. VII-VIII. 査読有 DOI: 10.5575/geosoc.2015.0035
- [10] Nakano, N., Osanai, Y., Satish-Kumar, M., 他 6 名 (2014) Paleozoic Subduction – Accretion – Closure Histories in the West Mongolian Segment of the Paleo-Asian Ocean: Evidence from Pressure – Temperature – Time – Protolith evolution of High-Mg and -Al gneisses in the Altai Mountains. *Journal of Geology*, 122, 283–308. 査読有 DOI: 10.1086/675665
- [11] Hiroi, Y., Yanagi, Y., Kato, M., Kobayashi, T., Prame, B., Hokada, T., Satish-Kumar, M., 他 5 名 (2014) Supercooled melt inclusions in lower-crustal granulites as a consequence of rapid exhumation by channel flow. *Gondwana Research*, 25, 226-234. 査読有 DOI: 10.1016/j.gr.2013.04.001
- [12] Satish-Kumar, M., Hokada, T., Owada, M., Osanai, Y. & Shiraishi, K. (2013) Neoproterozoic orogens amalgamating East Gondwana: Did they cross each other? *Precambrian Research*, 234, 1-7. 査読有 DOI: 10.1016/j.precamres.2013.06.010
- 他 5 4 件
〔学会発表〕(計 155 件うち招待講演 6 件)
- [1] Silpa, A.S. & Satish-Kumar, M., Petrology and geochemistry of post-tectonic of dykes in Tiptur area, Western Dharwar craton, Southern India. 第 7 回極域科学シンポジウム, 2016 年 11 月 29 日～2016 年 12 月 2 日, 国立極地研究所 (東京都立川市)
- [2] Enya, Y., Mishima, K., Takahashi, T., Satish-Kumar, M. & Toyoshima, T., Contrasting geochemical characteristics in adjacent units of Archean greenstones in the Chitradurga schist belt, Southern India. 35th International Geological Congress, 27 August – 4 September 2016, Cape Town, South Africa.
- [3] Satish-Kumar, M., Kentaro, K., Mishima K., Enya, Y., Muramatsu, I., Toyoshima, T., Hokada, T., Ueno, Y., Kamei, A., Kataoka, K. & Sajeev, K., Archean volcano-sedimentary sequences in the Chitradurga schist belt, Dharwar craton, southern India. 35th International Geological Congress, 27 August – 4 September 2016, Cape Town, South Africa.
- [4] Mishima, K., Satish-Kumar, M., Hokada, T., Toyoshima, T. & Ueno, Y., The Secular Change of S-Mif in the Late Archean, the Dharwar Supergroup, Southern India. 26th Goldschmidt Conference, 26 June – 1 July 2016, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan.
- [5] Satish-Kumar, M., Mishima, K., Toyoshima, T., Koinuma, K., Enya, Y., Muramatsu, I., Hokada, T., Ueno, Y., Kamei, A., Kataoka, K. & Sajeev, K., Geological evolution of the Archean Chitradurga schist belt, Dharwar Craton, southern India. 日本地球惑星科学

- 連合 2016 年大会, 2016 年 5 月 22 日～26 日, 幕張メッセ国際会議場(千葉市)
- [6] Mishima, K., Satish-Kumar, M., Hokada T., Toyoshima T., Horie, K. & Ueno, Y., A revised tectonostratigraphy for Late Archean supracrustal rocks in the Chitradurga schist belt, Dharwar craton, India 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 24 日～28 日, 幕張メッセ国際会議場(千葉市)
- [7] Satish-Kumar, M., Mishima, K., Koinuma, K., Ueno, Y. & Hokada, T., Archean Dharwar craton in India: An ideal terrane to understand the early Earth's surface environment and origin of life. The 2nd International Symposium on Earth History of Asia, 31 October – 3 November 2014, Niigata, Japan.
- [8] Koinuma, K., Satish-Kumar, M., Mishima, K., Ueno, Y. & Hokada, T., Nd isotope geochemistry of Archean Banded Iron Formations in the Chitradurga Schist Belt, Dharwar Craton Southern India. 日本地質学会第 121 年学術大会, 2014 年 9 月 13 日～15 日, 鹿児島大学(鹿児島市)
- [9] 福寄秀明・亀井淳志・Satish-Kumar M.・豊島剛志・外田智千, 南インド西ダールワール剛塊チトラドゥルガ地域に産する花崗岩質岩石の岩石学的特徴. 日本地質学会第 121 年学術大会, 2014 年 9 月 13 日～15 日, 鹿児島大学(鹿児島市)
- [10] 豊島剛志・Satish-Kumar M.・外田智千・片岡香子・亀井淳志, インド南西部太古代後期ダールワール岩体西部, チトラドゥルガ地域のペニンシュラ片麻岩体・花崗岩体・結晶片岩の変形作用 日本地質学会第 121 年学術大会, 2014 年 9 月 13 日～15 日, 鹿児島大学
- [11] Koinuma, K., Satish-Kumar, M., Mishima, K., Ueno, Y., & Hokada, T., Geochemistry of Archean Banded Iron Formations in the Chitradurga Schist Belt, Dharwar Craton, Southern India 日本地球惑星科学連合 2014 年大会 2014 年 4 月 28 日～ 2 日パシフィコ横浜 (神奈川県, 横浜市)
- [12] Hokada, T., Horie, K., Satish-Kumar, M., Ueno Y., Nasheeth A., Mishima, K., & Shiraishi K., Archean supracrustal sequences of Dharwar Craton, southern India, 第 33 回極域地学シンポジウム, 2013 年 11 月 14 日～ 15 日, 国立極地研究所 (東京都, 立川市)
- [13] Satish-Kumar, M., Nakamura, Y., Murakami, H., Okochi, K., Yamazaki, R., Mishima, K., Ueno, Y. & Hokada, T., Stromatolites from the Archean Dharwar craton, India: Raman spectroscopic, and carbon, strontium and multiple sulfur isotopic characterization. The international biogeoscience conference 2013, 1-4 November 2013, Nagoya, Japan.
- [14] Hokada, T., Horie, K., Satish-Kumar, M., Ueno, Y., Mishima, K., Nasheeth, A., Okudaira, T. & Shiraishi, K., Geologic relationship and metamorphism of the gneiss-schist belts in Archean Dharwar Craton, southern India. 日本鉱物科学会 2013 年年会, 2013 年 9 月 11 日～13 日, 筑波大学 (茨城県, つくば市)
- [15] Mishima, K., Yamazaki, R., Satish-Kumar, M., Hokada, T. & Ueno, Y., Multiple sulfur isotope geochemistry of Dharwar Supergroup, Southern India: late Archean record of changing atmosphere. The 23rd V.M. Goldschmidt conference, 25-30 August 2013, Florence, Italy, Mineralogical Magazine, 77, 1769.
- [16] Mishima, K., Yamazaki, R., Satish-Kumar, M., Hokada, T. & Ueno, Y., S-MIF Chemostratigraphy of the Late Archean In the Dharwar Supergroup, South India. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 05 月 19 日～24 日, 幕張メッセ 国際会議場(千葉市)

他 1 3 9 件

[図書] (計 1 件)

- [1] “Crossing of Neoproterozoic Orogens” (2013) Special issue in Precambrian Research, 234, edited by Satish-Kumar, M. and Hokada, T., p.350.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

エム サティッシュクマール (M. Satish - Kumar)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：5 0 3 1 3 9 2 9

(2) 研究分担者

外田 智千 (HOKADA Tomokazu)

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：6 0 3 7 0 0 9 5

豊島 剛志 (TOYOSHIMA Tsuyoshi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：1 0 2 2 7 6 5 5

亀井 淳志 (KAMEI Atsushi)

島根大学・総合理工学研究科 (研究院)・教授

研究者番号：6 0 3 7 9 6 9 1

片岡 香子 (KATAOKA Kyoko)

新潟大学・災害・復興科学研究所・准教授

研究者番号：0 0 3 7 8 5 4 8