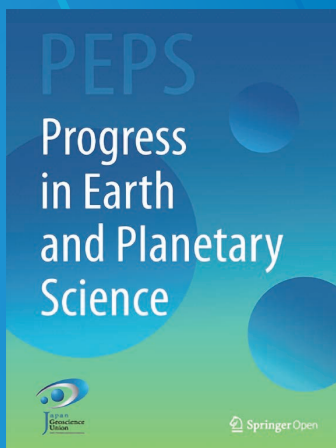


Review 論文要旨集

Progress in Earth and Planetary Science

(第五版・論文出版年度 2023年~2025年)



日本地球惑星科学連合 (JpGU) Open Access journal
<https://link.springer.com/journal/40645>



目 次

宇宙惑星科学

Space and atmospheric physics on Svalbard: a case for continued incoherent scatter radar measurements under the cusp and in the polar cap boundary region.....	1
--	---

大気水圏科学

その場観測に基づくブラックカーボンエアロゾルの気候関連特性の解明：レビュー	2
温室効果ガス観測技術衛星2号（GOSAT-2）：ミッション概要.....	3
Recent global nonhydrostatic modeling approach without using a cumulus parameterization to understand the mechanisms underlying cloud changes due to global warming.....	4
日本の主要樹木のイソプレンとモノテルペン基礎放出速度：種間及び種内の変動	5
スーパーコンピュータ「富岳」を用いた大規模アンサンブル・高解像度予測研究による大気科学における成果.....	6

固体地球科学

日本海溝におけるスロー地震に関する総説.....	7
ガスハイドレート高圧物性と構造進化の水天体内部構造推定における重要性	8
2011年東北沖地震の余効変動から推定する東北日本弧の不均質レオロジー構造.....	9
大洋を横断する津波の波形合成法の発展とその応用.....	10
地殻－マントル境界における Si 交代作用と Mg 交代作用の相対的影響：実験、天然観察、地化学モデリングからの考察	11
沈み込み帯の熱構造に関する入門レビュー：I－その意義と代表例	12
東北沖超巨大地震発生サイクルとそれに伴う地殻変動のモデル化における進展	13
沈み込み帯インプットとしての太平洋プレートの実像 ～ 海洋プレートの進化と不均質.....	14
周波数帯（0.003-1.0 Hz）地震波ノイズの分類学.....	15
沈み込み帯の熱構造に関する入門レビュー：III－モデルと観測の比較.....	16
津波データを用いた巨大地震の震源過程研究の進展.....	17
沈み込み帯の熱構造に関する入門レビュー：II－モデルと観測の比較.....	18
地震断層運動におけるエネルギー収支についての再考察	19
常時微動マルチモード表面波トモグラフィー	20
台湾の斜め収束にともなう島弧－大陸衝突による造山帯中核変成帯の構造的上昇機構.....	21
Review of experimental and analytical techniques to determine H, C, N, and S solubility and metal-silicate partitioning during planetary differentiation	22
Cenozoic history of the Australian Monsoon.....	23
スラブとその周辺マントルのダイナミクスへの水の役割	24
Rheology of the lower mantle: a review	25

地球生命科学

海底下生命圏研究の今までとこれから：超貧栄養など極限環境試料中の微生物解析を可能とする技術と課題..	26
沖縄諸島と宮古諸島（琉球列島）の間に存在した陸域の地史と、それが両諸島に分布する陸上生物の生物系統地理の解明に果たす重要性	27

横断的分野

Review of radiolarian microfossils as a tool for reconstructing sea surface temperature of the past in the Northwest Pacific.....	28
---	----

Review articles : 宇宙惑星科学

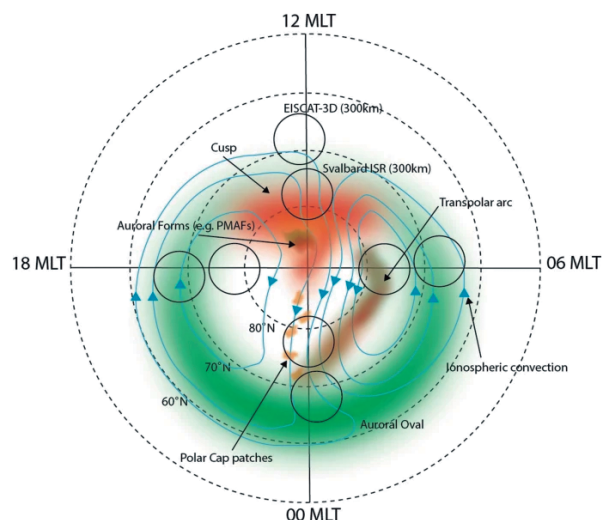
Space and atmospheric physics on Svalbard: a case for continued incoherent scatter radar measurements under the cusp and in the polar cap boundary region

Lisa Baddeley, Dag Lorentzen, Stein Haaland, Erkkka Heino, Ingrid Mann, Wojciech Miloch, Kjellmar Oksavik, Noora Partamies, Andres Spicher, Juha Vierinen

Keywords: Ionosphere, Atmospheric science, Space weather, Cusp, Polar cap, Plasma turbulence, Space debris, Incoherent scatter radar, Atmospheric escape

Incoherent scatter radars (ISRs) represent the only instrument (both ground and space based) capable of making high temporal and spatial resolution measurements of multiple atmospheric parameters—such as densities, temperatures, particle velocities, mass flux—over an altitude range covering the entire mesosphere/lower thermosphere/ionosphere (MLTI) system on a quasi-continuous basis. The EISCAT Svalbard incoherent scatter radar (ESR), located just outside Longyearbyen (78.15°N) on Svalbard, is the only currently operating facility capable of making such measurements inside the polar cusp—an area of significant energy input into the atmosphere and characterized by heating instabilities and turbulence. The ESR was built in the mid-1990s and has provided valuable data for the international experimental and modelling communities. New radar technologies are now available,

in the form of phased array systems, which offer new data products and operational flexibility. This paper outlines the achievements and current research focus of the ESR and provides scientific arguments, compiled from inputs across the international scientific community, for a new phased array ISR facility on Svalbard. In addition to the fundamental scientific arguments, the paper discusses additional benefits of continued ISR observations on Svalbard, building on the key findings of the ESR. Svalbard has a large network of complementary instrumentation both focused on the MLTI system (e.g. the Kjell Henriksen auroral Observatory, the Svalbard SuperDARN radar and the Svalrak sounding rocket launch facility) with synergies to other research fields, such as meteorology and oceanography. As a further holistic system science view of the Earth becomes more important, a new ISR on Svalbard will be important also in this respect with its ability to provide datasets with a wide range of scientific applications. Increased activity in space has highlighted problematic issues such as space debris. A changing Arctic has also seen increased human activity via the opening up of new shipping routes, which are reliant on GNSS technology that is effected by severe turbulence in the MLTI system. As such, societal applications of a future ISR are also presented. The accessibility and logistical support for such a facility is also briefly discussed.



論文出版日 : 2023/9/4

<https://doi.org/10.1186/s40645-023-00585-9>

■ その場観測に基づくブラックカーボンエアロゾルの気候関連特性の解明：レビュー

茂木 信宏

Keywords: Atmospheric chemistry, Atmospheric radiation, Climate, Aerosol, Light-absorbing aerosols, Black carbon

光吸収性エアロゾルは、大気中や積雪中において太陽放射を吸収することにより、大気放射、力学、降水量に影響を及ぼしている。ブラックカーボン（BC）は、光吸収エアロゾルの中で、グローバルな短波吸収に最も大きく寄与していると考えられている。BCの気候影響の要因分析・予測に用いられるモデルの検証・改良のためには、単一粒子から全球分布まで幅広いスケールのフィールド観測が必要である。本稿の焦点である「その場観測」は、リモートセンシングやフィルター採取試料のオフライン分析により得られる観測情報のギャップを埋めるものである。本稿では、BCのその場観測手法についての背景と最近の進歩、そして気候モデルやリモートセンシングの検証・改良に利用されている観測的知見をレビューする。最後に、再考と研究が必要な未解決問題をいくつか提案する。

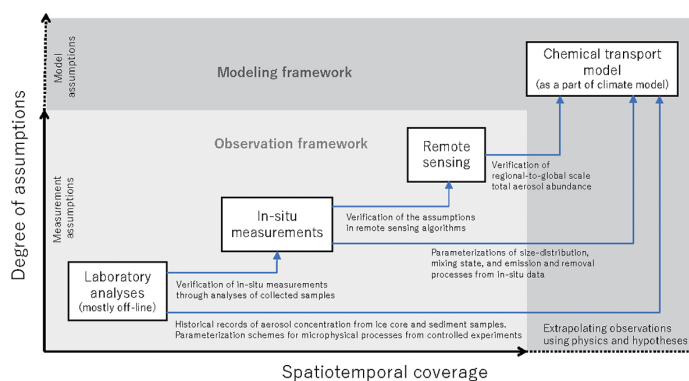


図1. エアロゾルの気候影響に関する研究における4つの異なるアプローチの役割と関係。大気化学輸送モデル（気候モデルのサブモジュール）の仮定・パラメタリゼーションを検証・改良するために、採取試料の実験室分析、その場観測、リモートセンシングから得られる観測情報が用いられている。

日本語原稿執筆者：茂木 信宏（東京大学）（敬称略）



温室効果ガス観測技術衛星2号 (GOSAT-2) : ミッション概要

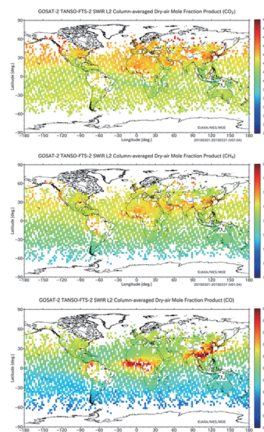
今須良一, 松永恒雄, 中島正勝, 吉田幸生, 塩見 慶, 森野 勇, 齋藤尚子, 丹羽洋介, 染谷 有, 大石 優, 橋本 真喜子, 野田 響, 彦坂幸毅, 内野 修, Shamil Maksyutov, 高木宏志, 石田春磨, 中島 孝, 中島映至, Chong Shi

Keywords: GOSAT-2, GOSAT, Carbon dioxide, Methane, Carbon monoxide, Black carbon, Solar-induced, chlorophyll fluorescence, TANSO-FTS-2, TANSO-CAI-2, Intelligent pointing mechanism

2009年に打ち上げられた温室効果ガスの観測に特化した最初の衛星である温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) の後継機として, GOSAT-2が2018年10月に打ち上げられた。

GOSAT 搭載センサーと比較して, GOSAT-2に搭載されたセンサーは, ほとんどの点で性能が向上しており, それに応じて観測データの質と量が向上することが期待されている。信号対雑音比 (SNR) は, GOSAT-2のメインセンサーである TANSO-FTS-2の SWIR 帯域と TIR 帯域の両方で改善されており, 温室効果ガス濃度測定精度が向上する。また, SWIR 帯の SNR の改善により, 信号強度が弱く観測データが得られなかった冬の北半球高緯度域でデータ取得の北限が北に移動し, より多くのデータが取得できることで, 高緯度域にお

ける炭素循環研究の進展が期待される。一方, TIR 帯の SNR の改善は顕著であり, 特に CO_2 と CH_4 の鉛直濃度分布の分解能が大幅に向上している。GOSAT にはなく GOSAT-2で初めて導入された機能に, TANSO-FTS-2のフィールドカメラを使用した雲域回避機能であるインテリジェントポインティングメカニズムが挙げられる。この機能により, 全球的に観測データ量が増加し, CO_2 排出量・吸収強度の推定精度が向上すると考えられる。一般的に出現頻度が高い雲の種類は積雲であり, これをインテリジェントポインティングで効果的に回避できるため, 特に熱帯ではその効果が大きいと期待される。TANSO-FTS-2のもう1つの大きな変更点は, 一酸化炭素 (CO) を測定するために SWIR のバンド3の波長範囲が拡張されたことである。CO は燃焼に由来する物質であるため, 都市部での人間活動や野外でのバイオマス燃焼の影響を評価するために使用される。特に, ブラックカーボンタイプのアロゾールに感度があるサブセンサー TANSO-CAI-2と, CO_2 と CO の測定をする TANSO-FTS-2とを組み合わせることで, バイオマス燃焼に伴う炭素収支を評価できることが期待されている。



左上：軌道上のGOSAT-2のイメージ, 左下：TANSO-FTS-2センサーの外観イメージ。右：観測された CO_2 (上), CH_4 (中), およびCO (下)のカラム平均乾燥空気モル分率の例。値は2019年3月の各 2.5° メッシュ領域での平均値。

日本語原稿執筆者：今須良一（東京大学大気海洋研究所）（敬称略）



Review articles : 大気水圏科学

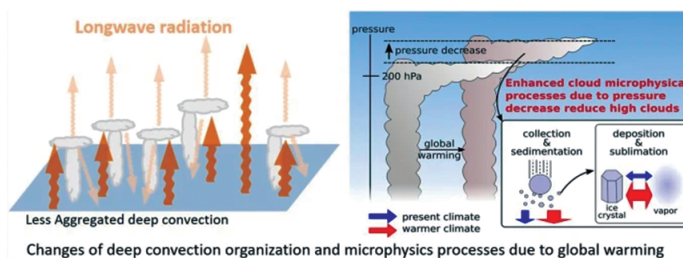
Recent global nonhydrostatic modeling approach without using a cumulus parameterization to understand the mechanisms underlying cloud changes due to global warming

Akira T. Noda, Tomoki Ohno, Chihiro Kodama, Ying-Wen Chen, Naomi Kuba, Tatsuya Seiki, Yohei Yamada, Masaki Satoh

Keywords: Clouds, Global nonhydrostatic model, Global warming, High-resolution climate simulation, Model improvement

Clouds are the primary source of uncertainty in the prediction of climate change. To reduce the uncertainty of cloud simulations and overcome this difficulty in prediction, many climate modeling centers are now developing a new type of climate model, the global nonhydrostatic atmospheric model, which reduces the uncertainty arising from a cumulus parameterization

by computing clouds explicitly using a cloud microphysics scheme. Among the global nonhydrostatic atmospheric models used in recent intercomparison studies, NICAM aims to project climate change by improving our understanding of cloud changes due to warming and related physical processes. NICAM is the first global nonhydrostatic model and was developed by our research team. This review summarizes the outcomes of a recent major five-year research program in Japan for studying climate using NICAM, as well as providing an overview of current issues regarding the use of global kilometer-scale simulations in high-resolution climate modeling.



論文出版日 : 2023/8/18

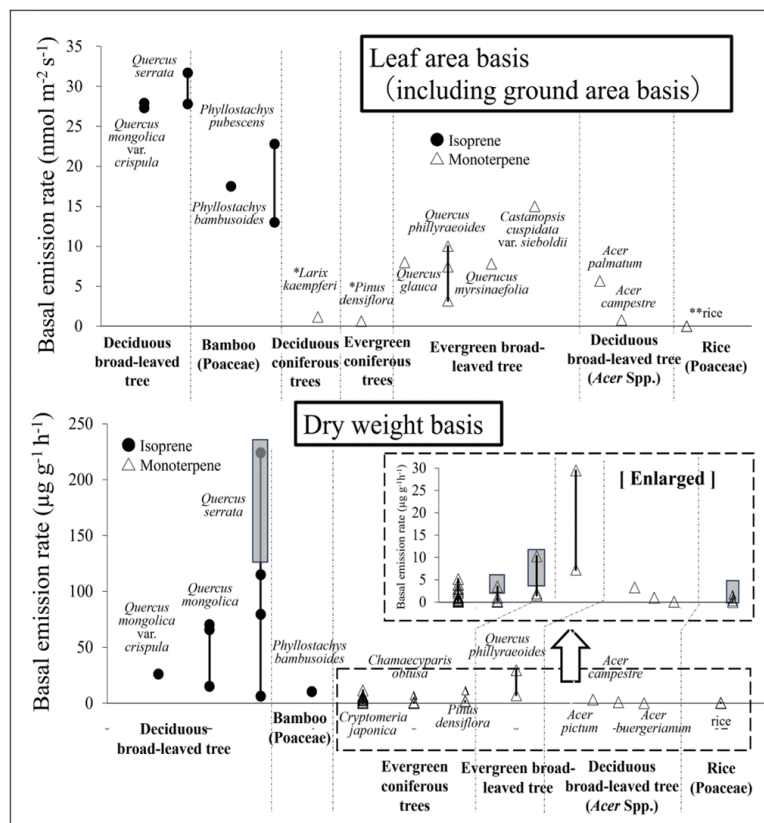
<https://doi.org/10.1186/s40645-023-00583-x>

日本の主要樹木のイソプレンとモノテルペンの基礎放出速度：種間及び種内の変動

谷 晃, 増井 昇, Ting-Wei Chang, 奥村 智慧, 國分 優孝

Keywords: Tower flux measurement, Flow-through chamber, Static chamber, Temperature, Light intensity, Quercus, Bamboo

日本の森林から、その放出が制御できない自然起源のテルペン類が、都市やその近郊で観測される高いオゾン濃度に寄与してきたかもしれない。大気化学モデルを用いてNO_xとテルペン類との一連の反応によるオゾン生成を推定するため、日本の主要樹木について報告されたテルペン類放出の全データを収集し、その信頼性を検討することによって、テルペン類放出インベントリを作成することが重要である。このレビューでは、最初に植物の3つの異なるテルペン類放出タイプについて述べる。つまり、イソプレン放出タイプ、貯蔵組織を持つモノテルペン放出タイプおよび貯蔵組織を持たないモノテルペン放出タイプである。次に、最近開発された簡易法を含む、植物のテルペン類放出を測定する様々な方法について記述し、それらの信頼性について説明する。ここでは、テルペン類放出タイプによって、適用できる測定方法が異なることを強調する。閉鎖チャンバー法によって得られたデータは、テルペン類の測定に不適な通常のチャンバー素材の使用や湿度制御がなされていないことによる高い不確実性のため、インベントリ用データとして妥当でないと判断する。最後に、収集した放出データの絶対値を示し、種間差や種内の差異について述べる。落葉コナラ属であるコナラやミズナラ、タケ類のモウソウチクやマダケは、大量のイソプレンを放出する。モノテルペン放出種の中では、コナラ属などの常緑広葉樹が高い基礎放出速度（BER）を示す。モノテルペン貯蔵タイプであるカラマツやアカマツのBERは比較的低い。森林の優占樹種上位20位までの中でツブラジイのBERに関する文献データはなく、放出速度の季節変化については数種で未報告である。同じ種においても、報告された放出速度は文献によって3倍程度異なる。この差異は、測定法や分析システムの信頼性や樹齢、葉の形態、環境条件および遺伝的多様性によるものであろう。日本の主要樹木種に関して、より高精度のテルペン類放出インベントリを作成するためには、信頼できる測定法の採用が必要であることを強調する。



日本の主要樹木のイソプレンと全モノテルペンの基礎放出速度（BERs）

日本語原稿執筆：谷 晃（静岡県立大学）（敬称略）

論文出版日：2024/7/30

<https://doi.org/10.1186/s40645-024-00645-8>

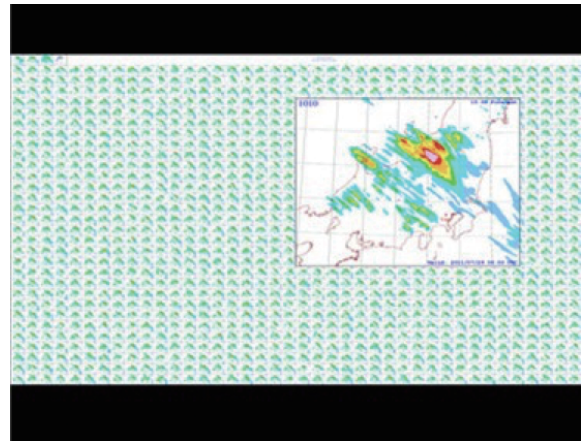
Review articles : 大気水圏科学

スーパーコンピュータ「富岳」を用いた大規模アンサンブル・高解像度予測研究による大気科学における成果

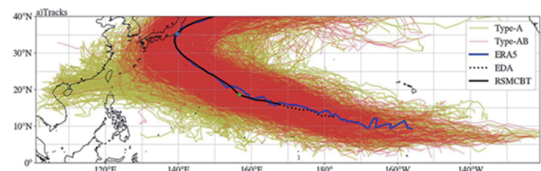
佐藤 正樹, 川畑 拓矢, 宮川 知己, 中野 満寿男, 八代 尚, 三好 建正, Le Duc, Pin-Ying Wu, 大泉 伝, 前島 康光, James Taylor, 吉村 僚一, 寺崎 康児, 山田 洋平, 升永 竜介, 川崎 高雄, 田上 雅浩

Keywords: 富岳, 高解像度シミュレーション, アンサンブルシミュレーション, 数値天気予報, 確率予報, 極端気象現象, 防災, メソスケールモデリング, 観測ビッグデータ, トレーサー気体輸送

本論文は、日本のフラッグシップスーパーコンピュータ「富岳」を活用し、日本とその周辺地域および全球を対象に、大気モデルまたは大気-海洋結合モデルによる大規模アンサンブル・高解像度シミュレーションを実施した3年間のプロジェクトの成果をレビューする。プロジェクト名は「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」であり、主な目的は数値天気予報の精度向上と確率的予測情報の提供である。地球温暖化に伴う集中豪雨や熱帯低気圧などの極端気象の激甚化に対応するため、数分から数週間、さらには季節スケールまでを対象に、高解像度の大規模アンサンブル予測実験を行った。本プロジェクトでは、高性能計算を活用し、効果的な防災・減災に資する事前情報の提供を可能とする確率的予測の実現を目指し、①メソスケールおよび領域モデルによる研究、②グローバルから季節スケールまでの研究、③環境研究における革新的アプローチの3つのサブテーマを推進した。取り組みの核心は、観測ビッグデータにより改善された初期条件を用い、極端気象予測に不可欠な積乱雲やメソスケールシステムを正確に再現する高解像度シミュレーションである。これにより予測精度が向上し、確率情報の精度向上と統合を通じて、災害リスク管理の強化と予測の実用性向上が期待される。また、本研究では、従来の気象データに加えて微量ガス観測のビッグデータを活用し、革新的な数値気象予測および大気環境予測技術の開発を目指した。



2020年7月4日に熊本県南部で発生した豪雨に関する1,000メンバーのアンサンブル予測の例。



台風 Faxai 大規模アンサンブルシミュレーションによる類似台風の経路。黄色線は実際の台風の発生に類似した台風経路 (Type-A), 赤線はそのうちの現実の経路に類似して日本に接近した台風経路 (Type-AB) を示す。Yamada et al. (2023) の図1による。

日本語原稿執筆者：佐藤正樹（東京大学）（敬称略）

論文出版日：2025/8/6

<https://doi.org/10.1186/s40645-025-00730-6>

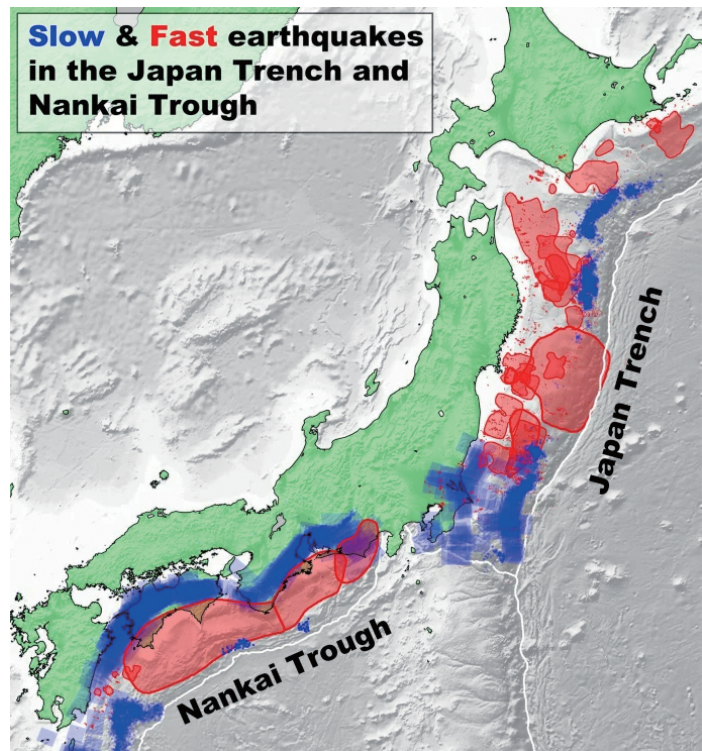


日本海溝におけるスロー地震に関する総説

西川友章, 井出 哲, 西村卓也

Keywords: Japan Trench, Slow earthquake, Tectonic tremor, Very-low-frequency earthquake, Slow slip event, Megathrust earthquake, Tohoku-Oki earthquake, Subduction zone, Crustal structure, Geological environment

スロー地震は、ゆっくりとした間欠的な断層滑り現象であり、通常地震（速い地震）と並んで、プレート境界変形プロセスの基本的な構成要素である。2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）が発生した沈み込み帯、日本海溝では、最近の地震・測地観測により、詳細なスロー地震活動が明らかとなった。本論文では、日本海溝沿いのスロー地震に関する観測、実験、シミュレーション研究とその歴史をレビューする。我々は、スロー地震（テクトニック微動、超低周波地震、スロースリップイベントなど）と、スロー地震に関連する断層滑り現象（小繰返し地震、群発地震、プレート境界大地震の前震など）の観測結果を総合し、日本海溝沿いの統合的なスロー地震分布図を提示する。スロー地震と海溝型巨大地震は空間的に相補的に分布し、スロー地震はその周辺で速い地震を誘発することがある。プレート境界面の走行方向約200kmに及ぶ地震学的スロー地震（テクトニック微動及び超低周波地震）の空白域は、日本海溝中央部の巨大なプレート間固着域に対応する。東北沖地震はこの固着域を破壊したが、その破壊は日本海溝の北部と南部のスロー地震発生域には深く伝播することなく停止した。スロー地震は、日本海溝における巨大地震の破壊開始と停止の両方に関与している。次に、我々は、スロー地震分布と日本海溝の地殻構造（プレート境界の堆積物ユニット、沈み込む海山、プチスポット火山、ホルスト・グラベン構造、残差重力、地震波速度構造、プレート境界反射強度など）を比較した。さらに、スロー地震発生域の地質環境（水の供給源、温度-圧力条件、変成作用など）について述べる。我々の統合的なスロー地震分布図により、東北沖地震の発生過程におけるスロー地震の役割を包括的に議論することが可能となった。また、スロー地震分布と地殻構造・地質環境の対応は、日本海溝におけるスロー地震発生メカニズムに関する洞察をもたらし、高圧な流体が複雑なスロー地震分布を理解するための鍵であることを示唆する。さらに、我々は、スロー地震活動を詳細にモニタリングすることで、日本海溝におけるプレート間地震活動の予測を改善し得ると提案する。



日本海溝および南海トラフにおけるスロー地震とファスト地震（通常地震）の分布。青色がスロー地震の発生域を、赤色がファスト地震の発生域を示す。

日本語原稿執筆者：西川友章（京都大学防災研究所）（敬称略）

論文出版日：2023/1/3

<https://doi.org/10.1186/s40645-022-00528-w>

ガスハイドレート高圧物性と構造進化の氷天体内部構造推定における重要性

平井 寿子, 門林 宏和

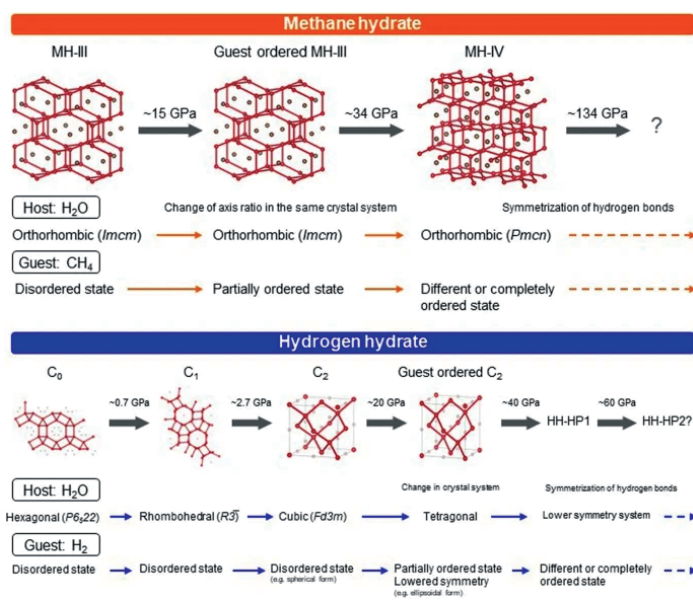
Keywords: Methane hydrate, Hydrogen hydrate, High-pressure properties, High and low temperatures, Structural evolution, Transition mechanism, Guest orientational ordering, Molecular dissociation, Icy bodies, Diamond-anvil cell (DAC)

水素やメタン、水の氷は宇宙に最も多く存在する物質で、これらからなるガスハイドレートは宇宙に広く存在していると実験や理論、探査機の観測によって予測されている。ガスハイドレートは低圧下ではクラスレート（ケージ）構造を取り、高圧下では充填氷構造をとる。いずれの構造も水分子の水素結合により形成されたホストとこれに取り込まれた分子や原子のゲストよりなる。ホスト-ゲスト間には化学結合はなく、特異な相互作用が生じており、そのためユニークな物性を呈している。これらのガスハイドレートに圧力が加えられると多様な構造変化をすることから、圧力とゲストサイズ依存の構造変化の一般則が提案された。

次いで、構造変化のメカニズムをメタンハイドレート（MH）について時分割 X 線回折（XRD）、及び、ラマン分光によって調べ、クラスレート間では“ケージ組み換えメカニズム”ともいべき独特の転移メカニズムが存在することが明らかとなった。即ち、ケージが次の構造の別のケージに漸次組み替えられていくというものである。

ゲストは低圧、室温下では自由回転しているが、MH と水素ハイドレートの充填氷では低温・高圧下でゲスト分子の配向秩序化が段階的に進行し、それに誘発されて構造が変化し、より安定化する。理論計算では、さらに高圧下でホストに水素結合対称化が生じることが予測されている。このようにハイドレートは周囲の環境（圧力）に応じて、ゲストの配向秩序化やホストの水結合対称化という自己組織化を達成して高圧下で安定な構造へと変化していく。この様相はまさに“構造進化”と捉えることができる。

タイタンや海王星内部に匹敵する条件での高温高圧実験により、MH はタイタン氷マンツルの限られた領域に熱力学的に存在できることが、一方、海王星の氷マンツルには高温のため存在できないことが示された。MH は 2.5 GPa 以上で固体メタンと氷 VII に固相分解し、高温下では固体メタンは融解し、さらに分子乖離しダイヤモンドが生成することがその場 XRD、ラマン分光、走査型電子顕微鏡で示された。これらの結果は、氷惑星内部構造のモデリングや、磁場形成や熱収支の理解に貢献する。



充填氷構造転移後の構造進化の概略（上段：メタンハイドレート、下段：水素ハイドレート）。圧力の上昇に従ってゲストの配向秩序化が段階的に進行し、それに誘発されホスト構造が変化する。さらに高圧下ではホストの水素結合対称化が理論計算によって予測されている。

日本語原稿執筆者：平井 寿子（愛媛大学）（敬称略）

論文出版日：2023/1/13

<https://doi.org/10.1186/s40645-023-00534-6>

2011年東北沖地震の余効変動から推定する東北日本弧の不均質レオロジー構造

Sambuddha Dhar, 武藤 潤, 太田 雄策, 飯沼 卓史

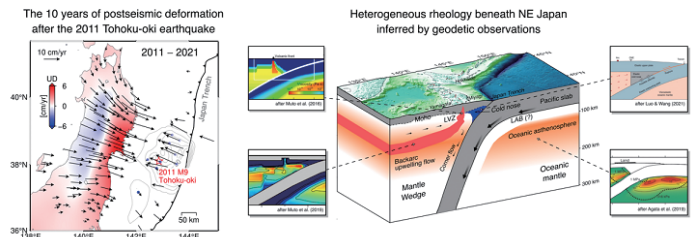
Keywords: Postseismic deformation, GNSS observations, viscoelastic relaxation, afterslip, nonlinear rheology, earthquake deformation cycle, rheological heterogeneity

2011年に発生した東北沖地震（マグニチュード9.0）から10年が経過した現在も、東北地方は活発に変動している。大地震の後に現れる地殻変動は「余効変動」と呼ばれ、その主な原因は上部マントルの流動による「粘弾性緩和」と、震源断層周辺のスロースリップである「余効すべり」である。

この論文では、過去10年間の東北沖地震の余効変動観測から、東北日本島弧—海溝系のレオロジー特性をまとめた。実験室での岩石の流動変形実験から知られているように、粘弾性緩和を引き起こすマントルの状態や流動性は複雑であり、粘性率などのレオロジー特性は空間的にも不均質であることが想定される。しかし、このようなレオロジー特性の不均質性が余効変動にどのように寄与するかはいまだ十分に理解されていなかった。

そこで、沈み込み帯を模擬した簡単な2次元モデルを使用して、マントルの非線形な流動特性やマントルウェッジに存在する低粘性体などの様々なスケールのレオロジー不均質性が地表変動にどのように影響するかを調べた。また、東北沖地震後10年間に発表された20以上の余効変動モデルを比較して、観測とモデルから推定される地下の不均質レオロジー特性をまとめた。これらの研究から、東北日本弧の背弧と前弧側のマントルウェッジの粘性度差が明らかになり、火山フロント近傍で見られる小規模な沈降は、活火山直下のマグマ活動に関連する低粘性体での局所的な変形で説明することができる。

近年の岩石の複雑なレオロジー特性を考慮した余効変動モデルでは、余効すべりと粘弾性緩和の力学的相互作用の重要性が指摘されている。それによると力学的相互作用は時間とともに増大していく。今後、次の大地震につながるプレート固着の回復状況を詳しく評価するには、不均質なレオロジー特性を含んだ地震サイクルモデルにより、余効変動の局所的影響を評価することが重要になる。これらの研究から、これまでの研究ではうまく説明できなかった余効変動の垂直成分が地下のレオロジー特性の不均質性を解明するための鍵であることが明らかになった。今後、稠密観測と岩石の複雑なレオロジー特性を考慮した余効変動モデルによって、東北の地下で何が起きているかを詳細に明らかにすることができるだろう。



東北沖地震後10年間の余効変動観測（左）とそれから推定される地下の不均質なレオロジー構造（右）。

日本語原稿執筆者：（武藤 潤 東北大学）（敬称略）

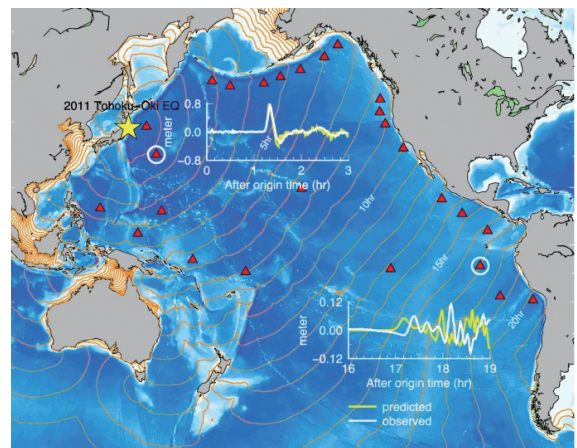


大洋を横断する津波の波形合成法の発展とその応用

綿田 辰吾

Keywords: Trans-oceanic tsunami, Historical tsunamis recorded in tide gauge, Tsunami in the gravitationally coupled Earth system, Tsunami phase delay, Tsunami travelttime delay, Tsunami in the eformable Earth, Earthquake fault parameters studied by tsunami waveforms, Tsunami simulation by the phase correction method, Eulerian and Lagrangian variables, Free oscillation and forced oscillation of the Earth with an ocean layer, Compressible density-stratified ocean

2010年チリ地震と2011年東北沖地震で発生し、太平洋深海域で観測された豊富で高品質の遠地津波記録には、震源から離れるにつれ、津波の到達時刻は遅れ、津波の初期位相が反転する特徴が現れた。これら二つの特徴は従来の津波長波理論では説明できず、新しい津波理論が求められた。津波伝播中に海面が上昇すると、海水の荷重で海水が圧縮され、海底と固体地球が変形する。伝播する津波は地球の質量分布を変化させ、重力の時空間的变化を引き起こし、伝播する津波自体を変化させる。これらの物理過程を取り入れた、津波を固体地球層と海洋層から構成される重力・弾性結合した地球系の波として扱う新たな津波伝播理論が構築された。新しい津波伝播理論に基づき、2つの異なる津波シミュレーション手法が開発され、ほぼ同一の津波波形を生成することが確認された。一つのシミュレーション手法は津波を、重力・弾性結合地球系に内在する自由波として扱い、もう一つの手法は津波を、重力・弾性変形する固体地球の表面を伝播する固体地球への外部圧力源と重力源として扱った。新しい津波シミュレーション手法を用いると、観測された遠地津波とシミュレーション津波の波形と到達時刻の違いが解消した。これまで、到達時刻や波形の不一致の問題があったため、沿岸の潮位計によって記録された遠地津波は、定量的な津波波形研究の対象ではなかったが、新しい津波シミュレーション手法が、過去19の巨大地震で発生した津波波形の解析に適用され、各巨大地震の断層滑り分布が明らかにされた。また、江戸時代末期の1854年に日本付近で発生し、米国の潮位計に記録された太平洋横断津波イベントの地震発生時刻が特定された。



2011年東北沖地震で発生した津波は太平洋をほぼ1日かけて横断し、その仔細は深海底に設置された津波計（赤三角）により記録された。白丸で囲まれた2箇所で、観測された津波（白線）と旧来の線型長波理論に基づく予測波形（黄線）を比較している。予測波形は日本に近い津波（震発生後1時間）をよく再現しているが、太平洋を横断した津波（17時間後）は予測より15分遅れ、初動が反転し引波で始まっている。

日本語原稿執筆者：綿田 辰吾（東京大学）（敬称略）



地殻—マントル境界における Si 交代作用と Mg 交代作用の相対的影響：実験，天然観察，地化学モデリングからの考察

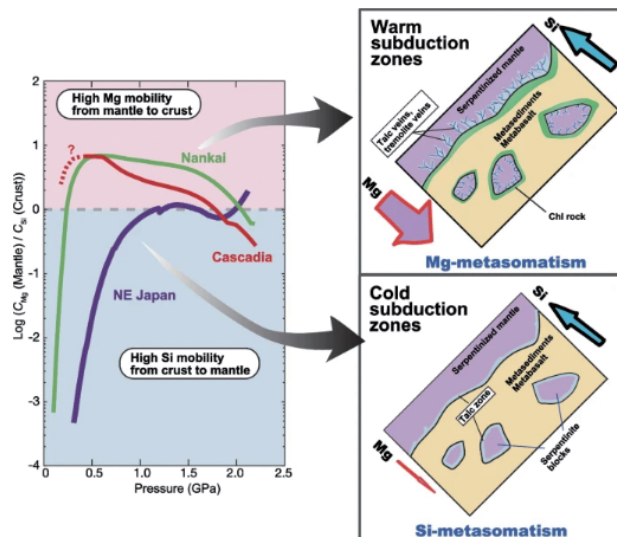
岡本 敦, 大柳 良介

Keywords: Element mobility, Metasomatism, Crust-mantle interface, Fluid, Chloritization

固体地球において地殻は Si に富み，上部マントルは相対的に Mg に富む化学組成をもつ。沈み込み帯のマントルウェッジは，海洋プレートと共に持ち込まれる地殻物質と上盤マントルが接する特異な場であり，地殻—マントル境界で流体を介した元素移動による「交代作用」が著しく起こる。従来，地殻からマントルへの Si の移動によって引き起こされる Si 交代作用について知られてきたが，マントルから地殻への Mg の移動に伴う Mg 交代作用についてはよくわかっていない。本論文では，水熱実験，天然の変成岩の産状，そして，最新の熱力学データを用いた地化学モデリングをもとに，地殻—マントル境界における交代作用，特に Si と Mg の相対的移動度と CO₂ 流体の与える影響について最新の研究を含めたレビューを行った。

地殻—マントル境界を模したアナログ実験は，主に地殻物質として石英や長石を，マントル物質としてかんらん石を用いて，200–300°C の飽和水蒸気圧で行われてきた。これらの実験では，地殻側から Si が移動して，マントルに滑石などを生成する Si 交代作用が進行するのに対し，石英などは溶解するのみで Mg 交代作用は進まないことが示されている。

一方で，天然の変成帯に産する地殻—マントル境界には様々なタイプの反応帯が報告されている。比較的低温低圧の蛇紋岩メランジェでは Si 交代作用により，蛇紋岩体（含水したマントル）内部に滑石や角閃石の脈が発達している。これに対し，高圧変成帯の多くには，マントル岩石の Si 交代作用のみならず，地殻岩石側に Mg が移動して緑泥石を形成する Mg 交代作用も顕著に起こっている。また，天然と実験共に CO₂ 流体が加わると，Si 交代作用とは無関係にマントルには滑石が効果的に形成される。このような交代作用のバリエーションを理解するために，代表的な沈み込み帯の温度圧力条件に沿って，地化学モデリングを実施した。マントルに平衡な流体と，地殻（堆積物）に平衡な流体の化学組成を熱力学的に計算した結果，冷たい沈み込み帯や低圧条件では地殻中の流体の Si 濃度の方が，マントル中の流体の Mg 濃度よりも桁で大きく，マントルの Si 交代作用が起こりやすいこと，温かい沈み込み帯の深部ではマントルの Si 交代作用に加えて，マントルから地殻への Mg の移動が卓越し，地殻の Mg 交代作用が進行することが示された。交代作用は，異なる種類の力学的に弱い含水鉱物を作り出すとともに，体積膨張に伴うマントルの破壊などを加速させる。したがって，沈み込み帯の流体の化学組成（pH，溶存種，錯体など）は，これまで考えられている以上にプレート境界の力学的な挙動を大きく変化させる可能性がある。



代表的な沈み込み帯の温度構造に沿った Mg と Si の相対的な移動度に関する地化学モデリングの結果（左図）と温かい沈み込み帯（右上）と冷たい沈み込み帯の地殻—マントル境界（右下）における Si 交代作用と Mg 交代作用の模式図。

日本語原稿執筆者：岡本 敦（東北大学）（敬称略）

論文出版日：2023/7/18

<https://doi.org/10.1186/s40645-023-00568-w>

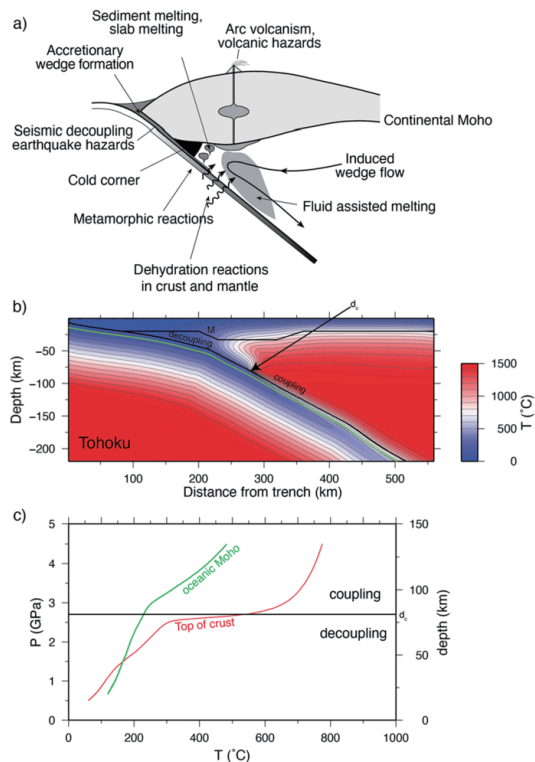
沈み込み帯の熱構造に関する入門レビュー：I—その意義と代表例

Peter E. van Keken, Cian R. Wilson

Keywords: ジオダイナミクス, プレートテクトニクス, 有限要素法, 沈み込み帯変成作用, 島弧火山作用

沈み込み帯の熱構造は、活動的なプレート収束縁で起こる物理的および化学的プロセスを理解するための基礎である。これらのプロセスには、マグマの生成と関連する島弧の火山活動、地下浅部および深部の地震活動、流体を放出する可能性のある変成反応が含まれる。計算モデルは、その記述が完全な場合、熱構造を高い数値精度で予測できるが、これはそのモデルの正確度や適用性を保証するものではない。本論文を含む一連の3論文では、沈み込み帯の熱構造モデルの構築、その沈み込み帯研究への適用、そして地球物理学および地球化学的観測との関連を考察する。この第一論文では、熱構造を理解する意義を実験および観測に基づいて示す。さらに、日本の沈み込み帯に適した熱構造モデルの選択についても考察する。

日本語原稿執筆者：大谷栄治（東北大学）（敬称略）



沈み込み帯のプロセスと熱構造の例。a 沈み込み帯プロセスの模式図 (van Keken (2003) から修正)。b 東北地方の沈み込み帯の熱構造モデル (van Keken et al. (2012))。c このモデルの圧力および深さの関数としての海洋地殻上部（赤色）と海洋モホ（緑色）の温度分布



東北沖超巨大地震発生サイクルとそれに伴う地殻変動のモデル化における進展

芝崎 文一郎

Keywords: 2011年東北沖地震, 数値モデル, 海溝型巨大地震発生サイクル, 階層アスペリティモデル, 動的弱化, 余効変動, 粘弾性緩和, 余効すべり, 長期的垂直変動

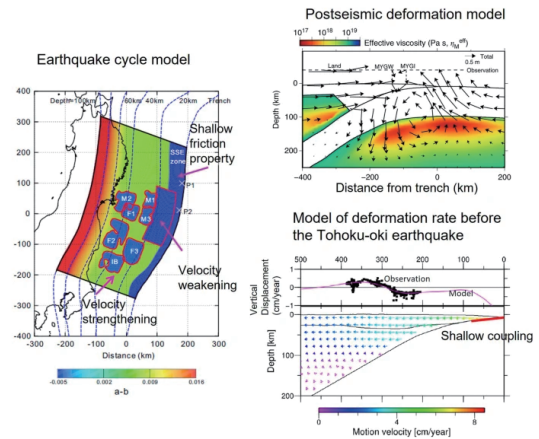
本論文は、2011年東北沖地震に関して、超巨大地震発生サイクルとそれに伴う地殻変動のモデル化について10年間の研究成果をまとめたものである。

東北日本沈み込み帯で、何故、超巨大地震がおおよそ600年間隔で発生するのか、何故、沈み込み帯浅部で巨大すべりが生じたのかを解明するために、幾つかの地震発生サイクルモデルが提案されてきた。具体的には、すべり速度状態依存摩擦則を用いたモデル化が行われてきたが、浅部で強いアスペリティを設けるモデルや、臨界変位量のスケール依存性を考慮した階層アスペリティモデル（M7クラスの地震は小さな臨界変位量、M9クラスの地震は大きな臨界変位量を有するモデル）が提案されてきた。また、高すべり速度での断層の動的弱化を考慮したモデル化も提案された。さらに、東北地方太平洋沖地震調査掘削（JFAST）で得られた浅部断層摩擦特性を用いたモデルでは、深部からの破壊が海溝まで伝播し、浅部で大きなすべりが起こり得ることが示された。

東北沖地震に伴う地殻変動では、内陸地殻変動の稠密な観測に加え、海底地殻変動が初めて観測された。余効変動のモデル化では、海溝近傍の海底地殻変動の観測から、海溝周辺の短期余効変動において粘弾性緩和が重要な役割を果たしていることが示された。また、余効変動における粘弾性緩和過程に関して、海洋リソスフェアとアセノスフェア境界の低粘性領域と冷たい前弧マントルウェッジ（コールドノーズ）の影響について議論されてきた。さらに、ひずみ速度が応力のべき乗に比例するマントルの岩石の非線形流動則とプレート境界における断層摩擦則を用いた余効変動のシミュレーションにより、東北沖地震が大きな応力変動を引き起こし、その結果、海洋リソスフェアの下のアセノスフェアで急激な粘性低下と流動が生じることが示された。

東北沖地震発生前の地殻変動に関しては、東北沖地震発生サイクルに伴う地殻変動のシミュレーションから、地震サイクルの後半になると、プレート境界深部ですべり欠損率が増加するため、太平洋沿岸域が沈降し始めることが示された。この結果は、東北沖地震の約100年前から観測された東北地方太平洋沿岸の沈降を説明するものである。

今後、東北沖地震発生サイクル全体における長期的な地殻・マントルの変形過程を再現するモデルを構築する必要がある。



本稿で紹介する東北沖地震の発生サイクル、余効変動、地震発生前の長期的変動のモデル化の例。（左）地震発生サイクルモデルに使われた摩擦パラメータの分布（Shibazaki et al. 2019）。a-bが負の領域は速度弱化的アスペリティを示す。JFASTで得られた浅部断層摩擦特性を考慮している。（右上）余効変動のモデル化（Agata et al. 2019）。東北沖地震から2.8年後の地殻・マントルにおける変位とマントルの粘性率。東北沖地震が大きな応力変動を引き起こし、その結果、海洋リソスフェアの下のアセノスフェアで急激な粘性低下と流動が生じる。（右下）東北沖地震前の垂直変動速度と島弧地殻・マントル内での運動のモデル化（Sasajima et al. 2019）。このモデルは、東北沖地震前の約100年間に観測された東北地方太平洋沿岸の沈降を再現している。

日本語原稿執筆者：芝崎 文一郎（建築研究所 国際地震工学センター）（敬称略）

論文出版日：Published: 2023/7/31

<https://doi.org/10.1186/s40645-023-00575-x>

沈み込み帯インプットとしての太平洋プレートの実像 ~ 海洋プレートの進化と不均質

藤江 剛, 小平 秀一, 尾鼻 浩一郎, 山本 揚二郎, 一瀬 建日, 山田 知朗, 野 徹雄, 中村 恭之, 三浦 誠一

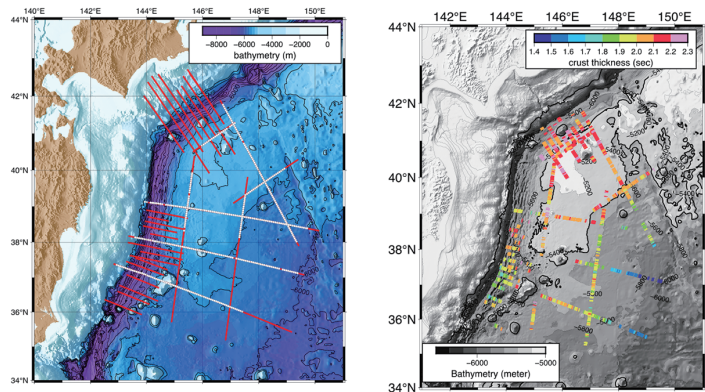
Keywords: Incoming oceanic plate, Oceanic crust, Controlled-source seismic survey, Japan Trench, Outer rise, Tohoku earthquake

日本列島のようなプレート沈み込み帯では、島弧（大陸プレート）と海洋プレートの衝突に伴い巨大地震からスロー地震まで多様な地震が発生している他、海洋プレートが含水鉱物として深部に輸送する水によって生成されるマグマが島弧火山活動を惹起するなど、さまざまな地殻変動現象が発生している。

沈み込み帯へのインプットである海洋プレートの性質（形状、温度構造、物性、含水率など）は、沈み込み帯における地殻変動現象の発生と密接に関係しているはずだが、従来、一般に海洋プレートは均質性が高いと考えられてきたこともあり、沈み込み帯へのインプットである海洋プレートの実態にはあまり関心が払われてこなかった。転機となったのは、沈み込み帯直前に海洋プレートが急激に折れ曲がる際に形成される正断層（アウターライズ断層）によって海洋プレート内に水が取り込まれる可能性が指摘され

始めたことである。21世紀初頭に開始された中南米の比較的若いプレートが沈み込み場所で始まったアウターライズ断層付近における先行研究に続き、我々は2009年から非常に古いプレートが千島海溝と日本海溝から沈み込む北西太平洋海域において、沈み込み帯インプットの広域な実態把握を目指した大規模構造探査観測研究に着手した（左図）。その結果、沈み込み帯直前のアウターライズ断層により海洋プレートが変質し含水化が進んでいる可能性が高いこと、また千島海溝よりも日本海溝の方が顕著に変質していること、その違いはプレート形成時の海嶺の走向と現在の海溝の走向によって説明できることなどが分かってきた。さらに、日本海溝域ではプレート形成時の古傷付近やブチスポットと呼ばれる海洋プレート上の若い火山が密集している海域などでは地下構造が大きく乱されていることや、海洋地殻の厚さも顕著な地域性を持っていること（右図）などが明らかになった。さらに、それらの海洋プレートの構造不均質が沈み込み後の巨大地震やスロー地震の分布と興味深い相関を示すことも分かってきた。

これらの成果は、沈み込み帯で発生するさまざまな変動現象の理解には、沈み込み帯インプットの実態把握も重要であることを改めて示すものである。



（左図）2009年以降に北西太平洋において海洋研究開発機構の地震探査船を用いて実施した地震構造探査。各探査測線（赤線）で反射法データを取得した他、海底地震計（白）を設置した測線では屈折法データも取得した。これらのデータを解析することで、プレート沈み込みに伴う海洋プレート構造の進化や、プレート形成時の古傷など、海洋プレート構造の様々な不均質性が明らかになった。（右図）反射法データによって明らかになった海洋地殻の厚さマップ（厚さは往復走時）。場所によって海洋地殻の厚さが2倍近くも異なることが分かってきた。

日本語原稿執筆者：藤江 剛（海洋研究開発機構 地震発生帯研究センター）（敬称略）



■ 周波数帯 (0.003-1.0 Hz) 地震波ノイズの分類学

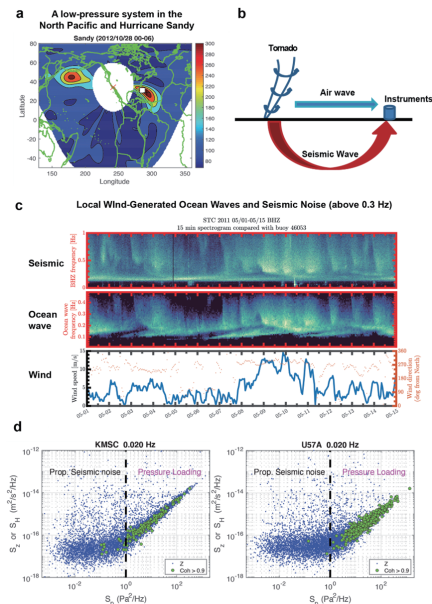
谷本 俊郎, Aaron Anderson

Keywords: Low-frequency seismic noise, Ocean–solid earth interaction, Wave–wave interaction, Quasi-static deformation

低周波数帯 (0.003-1.0 Hz) の地震波ノイズを分析すると、主なノイズは Primary Microseism (PM 0.05-0.07 Hz), Secondary Microseism (SM 0.1-0.4 Hz), Hum (Background oscillations, 0.003-0.015 Hz) である。PM の励起は遠地からの海洋波浪 (Swell) と固体地球の海岸付近での相互作用 (Direct interaction), SM は海洋波浪どうしの非線形相互作用 (Wave-wave interaction), Hum は海洋波浪どうしの非線形作用から生まれる海洋の長周期波と固体地球の相互作用 (Direct Interaction) によること知られている。ただしこの3つ以外でも、短期的には (数時間から2-3週間) ノイズ源となるいろいろな現象が存在している。たとえば台風等の熱帯低気圧、ウェザーボム、ストームクエイク、竜巻などである。

これらの現象は励起のプロセスにより、大きく4つに分類することができる。海洋波浪と固体地球の Direct interaction (PM, Hum, ストームクエイク), 海洋波浪どうしの Wave-wave interaction (SM, 海上での熱帯低気圧, ウェザーボム), 地表での大気圧の急激な変化 (竜巻, 上陸後の熱帯低気圧), ゆっくりとした気圧変化による荷重変形である。最後の荷重変形は地震波の励起というよりは準静的な変形である。この現象そのものは1970年ごろより知られているが、地震計のすぐそばに気圧計がなければ確認できないので、最近になるまで気づきにくかったと思われる。

SM の起源は近海なのか遠海なのか、という議論がさかんになったことがあるが、この周期帯 (0.1-0.4 Hz) にはあらゆるところからのシグナルが来ているというのが答えである。なぜなら、通常は近海での Wave-wave interaction による表面波の影響が大きい、遠くの低気圧によって励起される実体波も存在していることがアレー解析で確認できる。将来的にこのアレー解析を突き詰めれば、遠海での海洋波浪の季節変化等をモニタリングすることも可能になるとと思われる。



図

(a) 南カリフォルニアの地震アレー解析によって決めた P 波の励起源。米国東海岸をハリケーン Sandy が北上した際 (白いマーカー), P 波が伴っていたが、同時に北太平洋の低気圧からも P 波が励起されていた。低気圧付近では海洋波浪の wave-wave interaction により実体波が励起されている。

(b) 竜巻内は気圧が低いので、地表面にタッチした際に、地震波が励起される。震源インバージョンで決めた励起源の強さは、竜巻の強さを表す Fujita scale と相関を示す。

(c) 周波数 0.3-1.0 秒には、風によって起こされた近海の波の wave-wave interaction により励起された地震ノイズが見られる。これは Secondary Microseism の周波数領域 (0.1-0.4 Hz) より少し高いところで見られる。地震波 (上), 海洋波 (中) の振幅の高いところは白で示されていて相関が高い。風のデータ (下) も風速の高いところでは地震波, 海洋波と相関が認められる。

(d) 上下動地震計と気圧計を解析すると、地震ノイズ中の遠くから伝わってくる波とローカルな気圧変化で起こされる加重変形を分離することができる。データは EarthScope Transportable Array の 2 点 (KMSC, U57A) から得られた。縦のダッシュの左側が遠くから伝わってきたノイズ, 右側が地表の圧力によって準静的に変形している時のデータである。各点は 1 時間ごとに計算した地震波 (縦軸) と圧力 (横軸) の PSD であり、2014 年の一年分がプロットされている。

日本語原稿執筆者: 谷本 俊郎 (University of California, Santa Barbara) (敬称略)

論文出版日: 2023/9/11

<https://doi.org/10.1186/s40645-023-00587-7>



沈み込み帯の熱構造に関する入門レビュー：III モデルと観測の比較

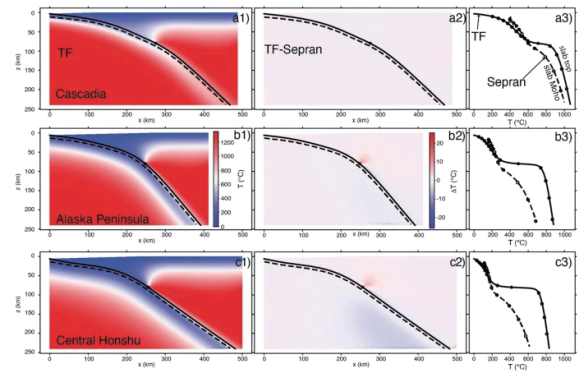
ピーター・ファン・ケーケン, シアン・R・ウイilson

Keywords: 地球動力学, プレートテクトニクス, 有限要素法, 沈み込み帯変成作用, 島弧火山作用

沈み込み帯の熱構造は、活動的な収束プレートの縁で起こる物理的および化学的プロセスを理解するための基礎である。これらには、マグマの生成と関連する島弧の火山活動、浅部および深部の地震活動、流体を放出する可能性のある変成反応が含まれる。

モデルが完全に記述されている場合、計算モデルは熱構造を高い数値精度で予測できるが、これは正確性や適用性を保証するものではない。この3部作の論文では、沈み込み帯熱構造モデルの構築、沈み込み帯研究への適用、および地球物理学および地球化学的観測との関連が議論されている。3部作の最後となる本論文では、異なる有限要素法を用いた数値実験が地球の沈み込み帯の熱構造をどのように予測するのかについて論じ、これらの予測が地球物理学、地球化学、岩石学的観測情報とどの程度一致しているのかについて議論する。

日本語原稿執筆者：大谷栄治（東北大学）（敬称略）



有限要素法コード TerraFERMA および Sepran による (a 欄) カスカディア, (b 欄) アラスカ半島, (c 欄) 中部本州の熱構造モデルの比較。スラブ上面とスラブのモホ面を比較している。1列：TerraFERMA で計算されたスラブの温度分布。スラブ上面を実線で、スラブのモホ面を破線で示す。2列：TerraFERMA と Sepran コードによるスラブの温度差。スラブ最上面とモホ面は1列に示したものの同様。3列：スラブ上面とモホ面の温度の比較。TerraFERMA によって計算した温度分布を線（スラブ最上面を実線、モホ面を破線）で示し、Sepran による計算結果を丸印で示す。

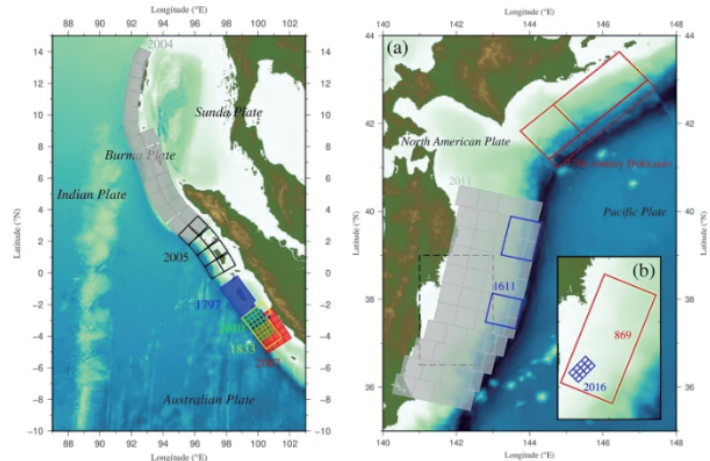


津波データを用いた巨大地震の震源過程研究の進展

谷岡 勇市郎, 山中 悠資

Keywords: Research on source processes, Great earthquakes, Progress in tsunami research

2004年スマトラ・アンダマン巨大地震と2011年東北地方太平洋沖巨大地震を契機にさまざまな津波関連データを用いた巨大地震震源過程の研究が大きく進展した。特に2004年スマトラ・アンダマン巨大地震では衛星高度計により津波が観測され、津波解析から破壊伝搬速度が議論できるようになった。2011年東北地方太平洋沖巨大地震による津波については、海底電磁気観測により流速が捉えられ、また津波による上空の電離層のゆらぎ（TEC）がGPSデータの解析により捕らえられ、面的に津波が観測された。さらには、地球を伝播する遠地津波には固体地球の効果が津波の分散性に影響することが解明され、遠地津波波形を利用した巨大地震震源過程の研究を進展させた。これら2つの巨大津波による津波堆積物も詳細に調査され、津波堆積構造から津波の流速等の把握、それらから震源の把握につなげる研究も芽生えた。そこ結果、これらの多様な津波観測データを解析することにより、地震波形解析から得られる震源過程と津波解析から得られる震源過程の違いを議論できるまでに進展した。また、1700年北米カスケード巨大地震や17世紀北海道沖巨大地震の研究を契機に、歴史津波記録や地質学的津波痕跡データを用いた研究が進展した。地震記録が少ないまたは存在しない歴史地震や歴史記録すら存在しない古地震の震源過程が、歴史津波記録や地質学的津波痕跡データを解析することにより把握されるようになってきた。本論文では、これらの巨大地震の震源過程の把握に向けた津波解析技術の開発研究が近年どのように進展してきたかをレビューする。それらの研究成果を受けて、近い将来、津波関連データを用いた巨大地震の震源過程研究がどのような進展することが期待されるかを議論し、研究のさらなる進展への鍵を提供する。



本論文で紹介するスマトラ島及びその北部（左）と日本北部（北海道沖・東北沖）（右）で発生した巨大地震の震源の位置。

日本語原稿執筆者：谷岡 勇市郎（北海道大学）（敬称略）



沈み込み帯の熱構造に関する入門レビュー：II—モデルと観測の比較

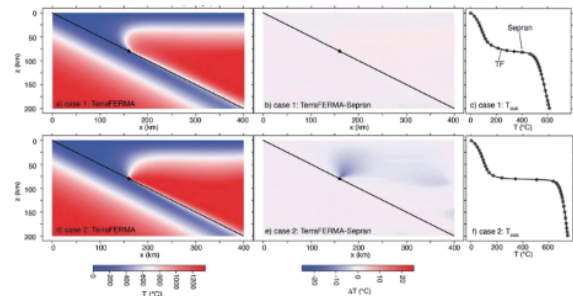
シアン・R・ウイルソン, ピーター・ファン・ケーケン,

Keywords: 地球動力学, プレートテクトニクス, 有限要素法, 沈み込み帯変成作用, 島弧火山作用

沈み込み帯の熱構造は、活動的な収束プレートの縁で起こる物理的および化学的プロセスを理解するための基礎である。これらには、マグマの生成と関連する島弧の火山活動、浅部および深部の地震活動、流体を放出する可能性のある変成反応が含まれる。

モデルが完全に記述されている場合、計算モデルは熱構造を高い数値精度で予測できるが、これは正確性や適用性を保証するものではない。この3部作の論文では、沈み込み帯熱構造モデルの構築、沈み込み帯研究への適用、および地球物理学および地球化学的観測との関連が議論されている。第二作目の本論文では、熱構造を予測するために使用する有限要素法の有効性を示しながら、この方法の入門的な解説を行う。

日本語原稿執筆者：大谷栄治（東北大学）（敬称略）



最新の沈み込み帯の定常状態の熱構造の基準図（ベンチマーク）。a) ケース1（粘性一定 $\eta=1$ ）の場合においてTF (TerraFERMA) で計算した温度。b) ケース1の場合において、TFによる計算結果とSepranによる計算結果との温度差。ここでは、カップリングポイントでの有限要素法の最小グリッド^{*} (fm) を $fm=1$ としてペナルティ関数法を用いて計算している。c) ケース1の場合のスラブ最上面の温度分布を示す。実線はTF、点はSepranによる結果を示す。ケース2（粘性係数が温度と歪速度に依存する場合）の計算結果。d), e), f) はそれぞれ、ケース1のa), b), c) に対応している。星印は、カップリングポイントの場所および温度を示す。



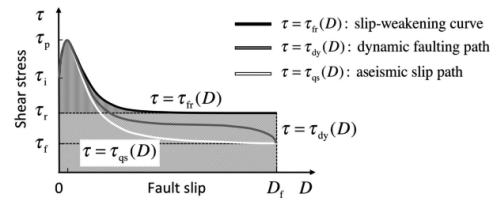
地震断層運動におけるエネルギー収支についての再考察

松浦 充宏

Keywords: Theoretical seismology, Background stress field, Earthquake faulting, Moment tensor, Inelastic strain, Elastic potential energy, Radiated seismic energy, Work done for shear faulting, Fault constitutive law, Rupture growth rate

地震の発生は地球内部に蓄えられた弾性ポテンシャルエネルギーを解放する脆性剪断破壊として理解されている。地震断層運動のエネルギー収支については1950年代以降多くの研究がなされてきたが、それらの中には辻褃の合わないことが幾つかある。その本質的理由はこの60年間に様々な概念的枠組みの変化が生じたことにある。具体的には、1960年代のプレートテクトニクスという新たなパラダイムの登場、1970年代の震源の一般的表現としてのモーメントテンソルの導入、そして1990年代の破壊過程を支配する断層構成則の確立である。してみれば、これまでの地震断層運動に関するエネルギー論を現在の視点から再考察してみる価値はあるだろう。本稿では、まず、弾性ポテンシャルエネルギーとモーメントテンソルという基本概念について概説した後、地震の震源の一般的表現と地殻応力の起源について考察し、地球の自己重力が断層すべり運動のエネルギー論に及ぼす影響は無視し得ることを示す。次に、議論の出発点として、動的断層すべりの力学的エネルギー収支に関する基礎方程式を、テクトニック起源の偏差応力が働いている弾性物体の運動方程式から直接的に導出する。そして、広く受け入れられている簡略化されたエネルギー収支方程式から地震放射エネルギーを間接的に見積もる公式について考察し、点食い違い源による変位場の解析解に基づいて直接見積もった結果と比較して、両者の間に論理的不整合があることを指摘する。この不整合の原因は、簡略化されたエネルギー収支方程式では破壊成長速度の影響が省略されていることにある。そこで、最後に、進展する剪断亀裂の先端部におけるエネルギー収支について考察し、それが地震破壊過程を支配するすべり弱化的断層構成則の自然な導入へと導くことを示す。さらに、開始-加速-高速伝播-減速-停止から成る地震破壊の全過程をエネルギー収支の視点から議論する。

Difference in rupture growth path between dynamic faulting and aseismic slip:



Total seismic energy escaping from the mechanical system:

$$-E_R/S = \int_0^{D_{max}} [\tau_{dy}(D) - \tau_{qs}(D)] dD$$

動的な場合と準静的な場合の破壊成長パスの違いを示す模式図。太い灰色の曲線 $\tau = \tau_{dy}(D)$ 及び白色の曲線 $\tau = \tau_{qs}(D)$ は、それぞれ動的及び準静的な破壊成長パスを表す。参考のため、すべり弱化的構成関係曲線 $\tau = \tau_{fr}(D)$ も黒の太線で示してある。記号 τ_p , τ_r 及び τ_f は、それぞれ剪断応力 τ の初期、ピーク、残差、および最終値を示す。動的な破壊成長パスは、初期のすべり弱化的フェーズ、中期の高速破壊伝播フェーズ、および最終期のすべり減速と過渡的な調整フェーズによって特徴付けられる。灰色と白の太線で囲まれる面積、 $\int_0^{D_{max}} [\tau_{dy}(D) - \tau_{qs}(D)] dD$ が地震断層を含む力学系から外へ逃げていく地震波エネルギーの総量を与える。

日本語原稿執筆者：松浦 充宏（東京大学）（敬称略）

論文出版日：2024/1/9

<https://doi.org/10.1186/s40645-023-00602-x>

常時微動マルチモード表面波トモグラフィー

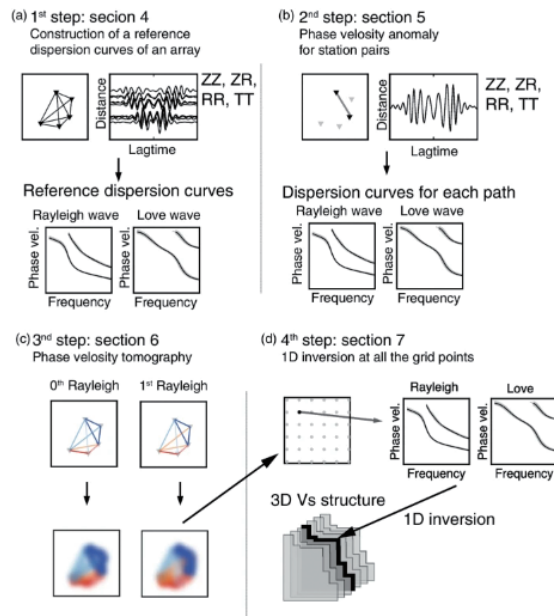
西田 究, 高木 涼太, 竹尾 明子

Keywords: Ambient seismic noise, Multimode surface wave, Seismic interferometry, Surface wave tomography

地球の内部構造を推定するためには、地震によって励起された地震波を利用した探査手法が有効である。しかし、その空間分解能は、地震の発生分布に制約される。近年これらの制約を改善するために、地震以外の現象により励起される地震波動場すなわち常時微動が利用され始めている。典型的な常時微動として、海洋の波浪活動により励起される脈動が知られている。本論文では、常時微動を用いた地球内部構造の探査手法として、常時微動面波トモグラフィーを解説する。

常時微動表面波トモグラフィーは地震波解析の一手法である地震干渉法に基づく。具体的には、2観測点で観測された地震波形記録の相互相関関数を計算することによって、観測点間を伝播する地震波を抽出する。計算された相互相関関数は、一方の観測点を仮想的な震源とみなした場合の他方の観測点での撃力応答として解釈できる。この手法は、2010年代以降、高密度地震観測網の発達とともに標準的な解析手法となった。

本論文では、まず地震干渉法の理論を概観する。続いて、常時微動表面波トモグラフィーを観測データに適用するために、相互相関関数を計算する実用的なデータ処理手順を解説する（解析手法の理解のため、簡単な Python コードも併せて公開した）。トモグラフィー手法は、一般に、(1) 基準1次元モデルの構築、(2) 各波線経路の位相速度異常測定、(3) 2次元位相速度インバージョン、(4) 各地表点において、測定された分散曲線から直下の1次元構造を推定し、3次元S波速度トモグラフィーモデルを構築、という4段階から成る（図参照）。本論文では、深さ方向の分解能向上のための多モード表面波分散曲線測定の実現可能性を示す。また、常時微動面波トモグラフィーの適用条件や、その推定誤差要因についても包括的に議論する。



(a) 基準1次元モデルの構築 (b) 各波線経路の位相 / 群速度測定 (c) マルチモードに対する2次元位相 / 群速度インバージョン (d) 全グリッド点での局所的1次元インバージョンの集合から3次元S波速度トモグラフィーモデルを推定。Takagi and Nishida (2022) より改変

日本語原稿執筆者：西田究（東京大学地震研究所）（敬称略）

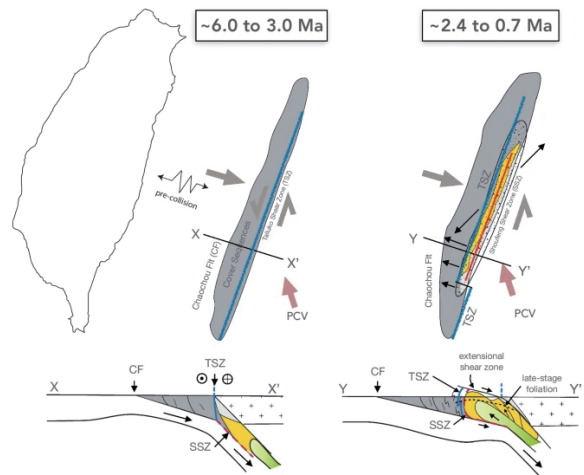


台湾の斜め収束にともなう島弧—大陸衝突による造山帯中核変成帯の構造的上昇機構

Timothy Byrne, Michael Chojnacki, Jonathan Lewis, Jian-Cheng Lee, Gong-Ruei Ho, En-Chao Yeh, Yuan-Hsi Lee, Chin-Ho Tsai, Mark Evans, Laura Webb

Keywords: 上昇, 島弧—大陸衝突, 延性薄化, 絞り出し機構, 台湾

過去数十年にわたる多くの造山帯の調査により、高圧条件下に埋もれた岩石の構造的上昇機構、つまり延性薄化と正断層の重要性が浮き彫りになった。台湾は、埋没深度50km以上の高圧変成作用を経験した岩石が地表に露出している世界でも数少ない活動的な造山帯のひとつであり、高圧変成岩の上昇プロセスについての理解を深めるための天然の実験室となっている。我々は、台湾造山帯に関するこれまでに発表された研究と、新たに得られた構造地質学的、地質年代学的、流体包有物温度計データを統合して、台湾においては、ごく最近の70万年前頃までの地殻変動と構造的薄化が、造山帯中核変成帯の上昇に重要な役割を果たしていたことを明らかにした。この論文では、玉里帯の高圧変成岩の上昇過程を説明する2ステージのプロセスを提案した。すなわち、第1ステージでは主に沈み込みチャンネル内の圧力勾配によって上昇が進行し、第2ステージには、造山帯に平行な広域横ずれ帯である太魯閣剪断帯が、造山帯に垂直な横ずれ帯によってオフセットされる。これによって、上部地殻が構造的に薄くなるにつれて絞り出された高圧岩石からなる湾曲構造が形成された。地殻厚減少の証拠は、主に大きな垂直方向の縮みを記録している低角度の顕著な面構造と、後期に形成された一連のほぼ垂直な鉱物脈から得られている。放射性同位体年代測定によると、第2ステージは240–310万年頃に始まり、北部の脊梁山脈の対曲構造が形成され始めた70万年ころに終わった。この低角度の面構造は、前弧下東部に存在する広域的な伸長剪断帯の下盤で形成されたと考えられる。地殻変動と浸食の複合的なプロセスによって、造山帯の地形的成長は約300万年から100万年未満に限られていた可能性がある。



~6Ma から3Ma の沈み込みに伴う海溝堆積物（灰、黄）の集積とマントル物質（緑）の絞り出しと~2.4Ma から0.7Ma 間の沈み込んだ物質（灰、黄、緑）の強い絞り出し。絞り出しは、TSZ（太魯閣剪断帯）をオフセットして地殻の伸長による湾曲構造を形成した。それは潮州衝上断層と伸長剪断の運動に対応する。

日本語原稿執筆者：大谷栄治・辻森 樹（東北大学）（敬称略）

論文出版日：2024/4/17

<https://doi.org/10.1186/s40645-024-00627-w>



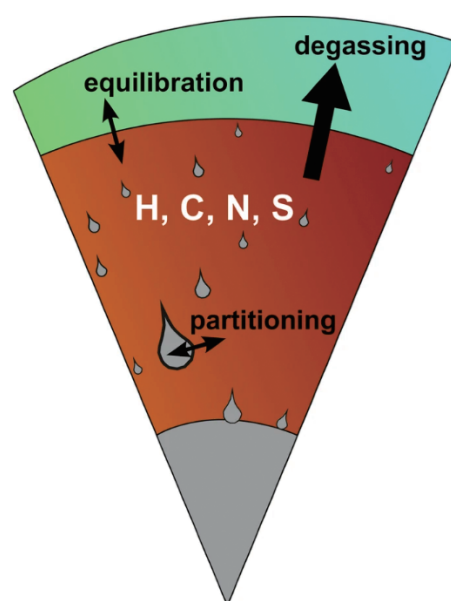
Review articles : 固体地球科学

Review of experimental and analytical techniques to determine H, C, N, and S solubility and metal–silicate partitioning during planetary differentiation

Celia Dalou, Terry-Ann Suer, Laurent Tissandier, Weronika L. Ofierska, Alice Girani, Paolo A. Sossi

Keywords: Differentiation, Magma ocean, Core formation, Evaporation, Experimental techniques, Low-pressure, High-pressure, Oxygen fugacity, Analytical techniques, Partition coefficients

During their formation, terrestrial planets underwent a magma ocean phase during which their metallic cores segregated from their silicate mantles and their early atmospheres formed. These planetary formation processes resulted in a redistribution of the abundances of highly volatile elements (HVEs, such as H, C, N, and S) between the planets' metallic cores, silicate mantles, and atmospheres. This review presents the numerous experimental techniques used to simulate the conditions and identify the parameters that influenced the behavior of HVEs during planetary formation. We also review the analytical techniques used to characterize the different types of experimental samples and quantify the distribution of HVEs between metallic and silicate phases, as well as their solubilities in silicate glasses. This exhaustive review targets students and young researchers beginning their work on the subject, or, more generally, scientists seeking a better understanding of this field of research.



論文出版日：2024/5/7

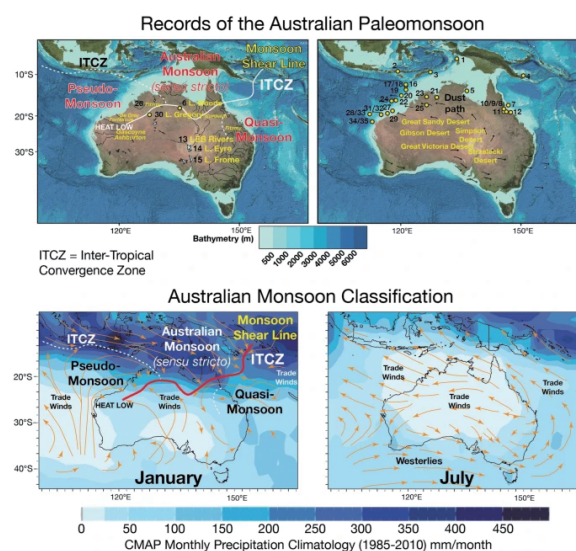
<https://doi.org/10.1186/s40645-024-00629-8>

Cenozoic history of the Australian Monsoon

Stephen J. Gallagher, Vera A. Korasidis, Gerald Auer, David De Vleeschouwer, Jeroen Groeneveld and Beth Christensen

Keywords: Paleomonsoon, Pseudo-Monsoon, Quasi-Monsoon, Cenozoic, Quaternary, Proxies

The Australian monsoon is part of the global monsoon and often included as a component of the Asian Monsoon system although they operate out of phase. Due to their hemispheric positions, the dry (wet) Australian winter (summer) monsoon coincides with the wet summer Asian monsoon and vice versa. The Australian monsoon controls rainfall distribution in northern tropical Australia where over 80% of the median annual rainfall occurs from December to March, the summer wet season. Three types of the Australian monsoon are distinguished based on distinct atmospheric circulation and heating patterns: a northwest Pseudo-Monsoon, a northeast Quasi-Monsoon and an Australian Monsoon (*sensu stricto*) north of Australia. While the modern climatology of the Australian monsoon has been extensively documented, its paleohistory is poorly constrained, especially in Australia's continental interior where harsh arid climatic conditions have degraded almost all physical evidence of monsoonal activity. However, reassessment of northern and central Australian terrestrial and marine sequences reveals a fairly robust Cenozoic history of this monsoon, especially for the Neogene, which we synthesize for the first time here. Evidence for a Paleogene Australian paleomonsoon is equivocal due to the small number of sites, their limited age control, and the poor preservation of flora with ambiguous affinities. Modeling and tectonic evidence suggest the northern part of the Australian Plate migrated to the (sub)tropical region (north of 30°S) creating "modern" boundary conditions for monsoonal onset by ~10 Ma. Cores off northwest Australia reveal arid late Miocene and humid Pliocene conditions were followed by the Pseudo-Monsoon at ~3.5 Ma when northern hemisphere glacial expansion "forced" the ITCZ (Inter Tropical Convergent Zone) south. Subsequently, variable humid and arid periods typify Quaternary high-amplitude glacio-eustatic cycles until ~1 Ma, when arid conditions expanded across Australia. Glacial/interglacial cyclicity and obliquity/precession insolation during terminations modulated Pseudo-Monsoon intensity when the ITCZ migrated northward (during glacial) and southward (during interglacial periods) from ~1 Ma to present. From ~1.6 to 1 Ma, precession paced Pseudo-Monsoon variability. Mega-lake expansion in central Australia and fluvial intensification generally correspond to wetter interglacial periods. Lake Eyre monsoonal shorelines may have been influenced by abrupt millennial events. Monsoonal conditions re-established near the base of Holocene as the ITCZ migrated across northern Australia. The Australian Monsoon (*sensu stricto*) and Quasi-Monsoon (a) initiated from 12.5 to 11 ka; (b) intensifying from 9 to 2 ka; then (c) weakened, possibly due to the onset of ENSO intensification. The Pseudo-Monsoon was established at ~14.5 ka off northwest Australia intensifying from 11.5 to 7 ka. It weakened after ~7 ka north of 15°S and ~5 ka to the south. In the absence of a topographic influence, insolation (precession/obliquity), abrupt millennial events and/or ITCZ variability across northern Australia were important controls on Quaternary Australian monsoon intensity. Further investigations of deeper time pre-Quaternary records off northwest and northeast Australia will reveal the paleohistory of this important domain of the Global Monsoon.



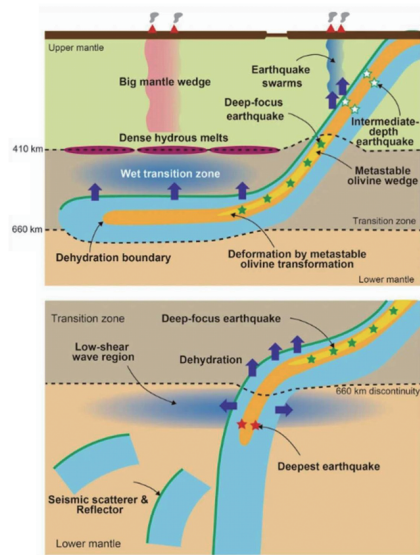
スラブとその周辺マントルのダイナミクスへの水の役割

大谷 栄治, 石井 貴之

Keywords: 水分配, 名目上無水鉱物, 高密度含水マグネシウムケイ酸塩, 脱水, スラブ, 流体, 地震波散乱体, 稍新発地震, 深発地震

水はさまざまな含水鉱物に含まれ、スラブの沈み込みによってマントル深部まで運ばれる。蛇紋石は地殻および上部マントル浅部における最も重要な含水鉱物の一つである。沈み込むスラブの蛇紋岩化の程度は、マントル深部に運ばれる水の量を制約している。含水鉱物と名目上無水鉱物 (Nominally Anhydrous Mineral, MAM) の間での水の分配は、スラブの物理的性質やダイナミクスを制御する重要な要因である。水の分配に関する最近の実験によると、水に飽和していない湿ったスラブにおいては、水は含水鉱物に強く分配され、これと共存するカンラン石やその高压多形のような名目上無水鉱物 (NAM) は、含水量が限られほぼ無水の状態になっている。無水のカンラン石は、スラブの低温条件では相転移の速度が遅く、高压相が安定な条件でも準安定に存在する。このことから、スラブ内部にみられる準安定なカンラン石からなるくさび領域 (Metastable olivine wedge) は、湿ったスラブにも存在し、決してスラブが乾燥しているという証拠ではない。すなわち、無水のカンラン石の相転移は、深発地震を引き起こし、スラブ内で大きな変形をもたらすが、これらの過程は湿ったスラブでも生じるのである。含水鉱物に結びついた水は、スラブによってマントル遷移層や下部マントルへと運ばれる。660 km より深い位置で滞留するスラブ中の含水鉱物は、スラブが加熱される過程で水を放出し、局所的に水和したマントル遷移層を作り出し、上部マントルとマントル遷移層の境界部に高密度の含水マグマを生成する。高温の領域はさらに上昇し、プレート内部の火山活動も引き起こす。

下部マントルの深さ700~1900kmの領域には、地震波の散乱体や反射体が観測されている。これらの散乱体や反射体は、下部マントルの上部で、高密度含水マグネシウムケイ酸塩 (DHMS) のような含水鉱物が分解し、水を放出することにより引き起こされる可能性がある。また、アルミニウムと水を含む SiO_2 がステシヨバイトから CaCl_2 型相への二次相転移を起こす際のせん断不安定性も、原因になっている可能性がある。下部マントルに存在するアルミニウムを含む SiO_2 の高压多形は、1重量%以上の大量の水を含み、下部マントルの重要な水の輸送物質となっている可能性がある。



マントル深部でのスラブの脱水にともなう諸過程。(A) 上部マントルにおける含水鉱物の脱水によって、マントルウエッジ内部での群発地震が生じている。湿ったスラブ内部においても、水が含水鉱物に分配されるために、カンラン石はほぼ無水になり準安定に存在する。準安定なカンラン石が相転移することによって、深発地震の引き金になり、スラブの大変形をもたらす。(B) 下部マントルに存在する地震波の散乱体や反射体は、下部マントルに沈み込んだスラブ内の含水鉱物の分解に伴う流体や含水マグマの存在が、含水シリカ相のステシヨバイト- CaCl_2 型シリカ相への相転移が原因となっている可能性もある。

大谷 栄治 (東北大学大学院理学研究科) (敬称略)

論文出版日: 2024/12/13

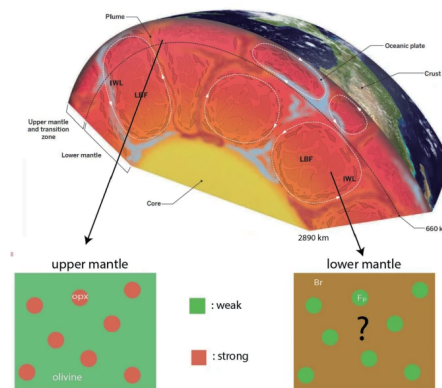
<https://doi.org/10.1186/s40645-024-00670-7>

Rheology of the lower mantle: a review

Shun-ichiro Karato, Jennifer Girard, Heechen E. Cho

We review our current understanding of the rheological properties of the lower mantle based both on materials science and geophysics points of view. We assume a simple model of the lower mantle that is made of only two minerals: bridgmanite (Br) ($(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$) and ferropericlase (Fp) ($(\text{Mg,Fe})\text{O}$), and address a question of (i) which mineral is weaker (lower viscosity), (ii) how does lower mantle viscosity change with depth and location, and (iii) discuss implications for shear localization. We first review plausible mechanisms of deformation based on the deformation mechanism map on the normalized stress and temperature space. We conclude that likely mechanism of

deformation in the lower mantle is either diffusion creep or power-law dislocation creep. Based on this review, we discuss recently proposed models by Cordier and his group (Cordier in *Nature* 481:177–181, 2012; Cordier in *Nature* 613:303–306, 2023) where either athermal creep (i.e., low-temperature plasticity) or pure climb creep (not power-law dislocation creep) would play an important role. We conclude that these models are not acceptable because (1) many aspects of their models are incompatible with experimental observations and theoretical models of deformation of most materials including oxides and metals and (2) these models are not consistent with the distribution of seismic anisotropy. Hence, we focus on power-law dislocation creep and diffusion creep. We review previously published results on deformation (by dislocation creep) and diffusion, we conclude that Fp is weaker than Br. The radial (depth) and lateral variation of viscosity is discussed based on the estimated activation volume and estimated variation of grain-size. Geophysical studies suggest only modest depth variation of viscosity that demands relatively small activation volume ($V^* < 3 \times 10^{-6}$ m³/mol). Plausible models to explain small activation volume are discussed including the role of extrinsic diffusion. Grain-size also controls viscosity if deformation is by diffusion creep. Okamoto and Hiraga (*J Geophys Res*, 2024. 10.1029/2023JB027803), Solomatov et al. (*Phys Earth Planet Inter* 129:265–282, 2002) estimated the grain-size evolution in the lower mantle based on the kinetics of grain-growth and the role of a phase transformation. In contrast, there are other papers (e.g., Paul et al. in *Prog Earth Planet Sci* 11:64, 2024; Rozel in *Geochem Geophys Geosyst*, 2012. 10.1029/2012GC004282) where grain-size distribution is estimated assuming that grain-size is controlled by dynamic recrystallization. The validity of assumption is questionable because dynamic recrystallization occurs due to deformation by dislocation creep but not by diffusion creep and the absence of seismic anisotropy indicates that diffusion creep dominates in most of the lower mantle. Finally, we review the published models of shear localization that would explain the long-term preservation of geochemical reservoirs in the lower mantle. Accepting that two minerals (Fp and Br) in the lower mantle have largely different viscosity, Ballmer et al. (*Nat Geosci* 10:236–240, 2017) proposed that the presence of regions of compositional difference (difference in Fp/Br ratio) leads to localized deformation (deformation mainly in the weaker regions). However, in addition to the ad hoc nature of this model, there is no strong evidence for the presence of large variation in Fp/Br in the lower mantle that makes the validity of this model questionable. There are some papers where processes of shear localization are explored without invoking the presence of regions of large rheological contrast. Thielmann et al. (*Geochem Geophys Geosyst*, 2020. 10.1029/2019GC008688) presented the results of theoretical study of deformation of initially homogeneous two-phase mixture (Fp and Br) and showed that deformation causes the elongation of a weak Fp that promotes shear localization. In this model, the rheological contrast between Fp and Br was assumed to be independent of strain. However, Cho and Karato (*J Geophys Res* 2022. 10.1029/2021JB022673; *Phys Earth Planet Inter*, 2024. 10.1016/j.pepi.2024) showed that when deformation is by diffusion creep, the rheological contrast increases with strain due to the evolution of stress concentration caused by grain elongation. They showed that this will promote strain weakening particularly in simple shear that would lead to shear localization. Consequently, the tendency for shear localization is stronger in their model than a model where rheological contrast is assumed to be independent of strain.



論文出版日 : 2025/03/25

<https://doi.org/10.1186/s40645-025-00695-6>



Review articles : 地球生命科学

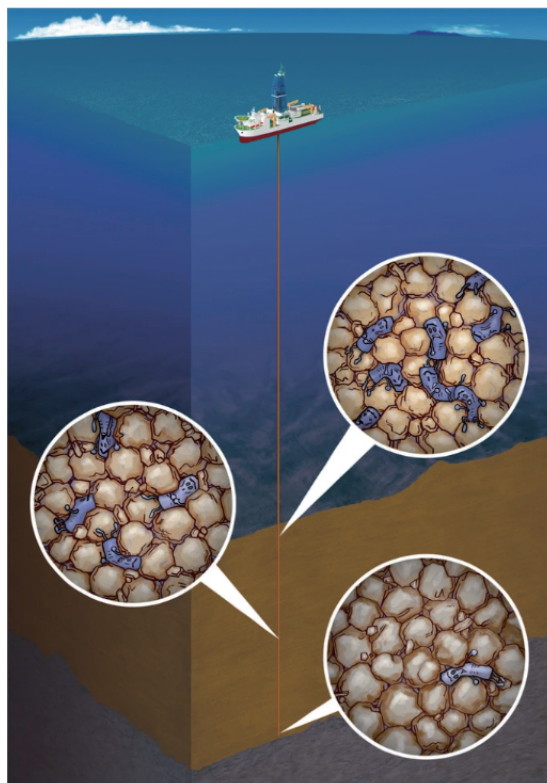
■ 海底下生命圏研究の今までとこれから：超貧栄養など極限環境試料中の微生物解析を可能とする技術と課題

諸野 祐樹

Keywords: Subseafloor biosphere, Low energy habitat, Technical developments, Limits of life

海底下の堆積物中に存在する微生物は、アクリジンオレンジなどの核酸染色剤による染色を行うことで可視化・検出されてきた。これらは現在でも利用可能な技術ではあるが、細胞濃度が減少する深部海底下や栄養に乏しい大洋中心部の海底下などに存在する微生物に対して、感度を上昇させるために新たな技術開発が行われてきた。その技術開発の成果は、深部海底下、生命圏の限界に近づく環境における微生物細胞の検出や、一億年前に形成した堆積物にも生きて微生物が存在していることを実証することにつながり、さらに最近では孢子状態の細胞が海底下深部に存在していることを明らかにすることにもつながった。一方で、DNAなどの分子生物学的解析は現在でも海底下深部において実現することが困難であるなどの課題も存在している。本レビューでは海底下の微生物生命圏を紐解くために実施されてきた技術開発の概要、そして分子生物学的解析など、海底下深部生命をよりよく理解するために必要とされつつも、現状で解決できていない課題等について概説する。

日本語原稿執筆者：諸野 祐樹（海洋研究開発機構）（敬称略）



海底下生命圏と生物の生存を示す模式図。海底面から深くなるにしたがって栄養環境がより乏しくなり、微生物の数が減りながら栄養欠乏状態に入る様子を表現している

論文出版日：2023/4/10

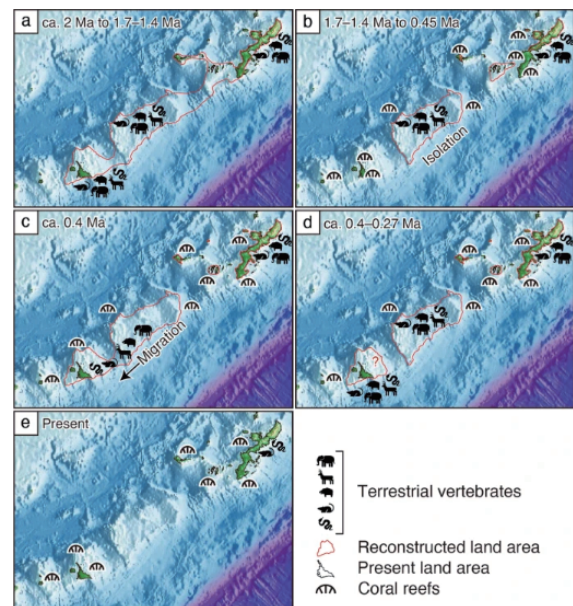
<https://doi.org/10.1186/s40645-023-00551-5>

沖縄諸島と宮古諸島（琉球列島）の間に存在した陸域の地史と、それが両諸島に分布する陸上生物の生物系統地理の解明に果たす重要性

渡邊奈々, 荒井晃作, 大坪 誠, 戸田 守, 富永 篤, 千代延 俊, 佐藤時幸, 池田忠広, 高橋亮雄, 太田英利, 井龍康文

Keywords: Ryukyu Islands, Kerama gap, Okinawa-Miyako submarine plateau, Pleistocene, Shimajiri Group, Ryukyu Group, Vertebrate, Phylogeography, OMSP hypothesis

琉球列島南西部に位置する宮古島と隣接する島々（宮古諸島）の現世および後期更新世の陸上動物相には、沖縄本島と隣接する島々（沖縄諸島）に最近縁な分類群や個体群が分布する固有種や遺伝的に特異な個体群が含まれている。後者の分類群や個体群には渡海能力が極めて限定的な系統が含まれていること、宮古諸島と沖縄諸島は現在少なくとも300 kmも海で隔てられていることを考慮すると、沖縄諸島と最近縁な分類群や個体群を含むという系統地理学的パターンが形成されたことは不可解である。本研究では、宮古諸島、沖縄本島南部、沖縄-宮古海台（Okinawa-Miyako Submarine Platform, OMSP）、およびOMSPと沖縄本島の間にある凹地である慶良間ギャップの後期新生代の地質について概説する。次に、宮古諸島の現世および後期更新世の陸上動物（多数の飛翔能力を欠く脊椎動物を含む）の起源について考察する。最後に、宮古諸島の現代および後期更新世陸生脊椎動物相の謎に満ちた組成を説明する新しい仮説（OMSP仮説）を提案する。本仮説の概要は、以下のようにまとめられる。沖縄島南部は約2 Ma後に隆起して陸域となり、同所よりも早く陸域となっていたOMSPと一時的に連結し、沖縄島から宮古諸島まで北東-南西方向に約400 kmにも及ぶ大きな島が形成された。その後、1.7-1.4 Maにサンゴ礁や礁前縁~陸棚で形成された堆積物からなる第四系琉球層群が沖縄島周辺に堆積し始めると、沖縄島はOMSPから隔離された。2.0 Maから1.7-1.4 Maの間に、飛翔能力を欠く脊椎動物を含む多くの陸上動物がOMSPに分布を広げた。宮古諸島は、琉球層群主要部の堆積期（1.25 Maから0.4 Ma）には完全な水没を繰り返したが、約0.4 Ma以降に隆起して陸地化した。一方、OMSPは約0.4 Ma以降に沈没し、0.27 Ma以降にはほぼ完全に水没した。約0.4 Maから0.27 Maの間に、陸上動物はOMSPから宮古諸島に移動した。



沖縄・宮古地域の古地理の変遷と陸上脊椎動物の移動。1. 島尻層群堆積後から琉球層群堆積前までの期間（約2 Maから1.7-1.4 Ma）。b 琉球層群主要部堆積時（1.7-1.4 Maから0.45 Ma）の間水期（海水準期）。サンゴ礁の形成は、沖縄本島では1.7~1.4 Maに始まったが、宮古諸島の形成開始はこれより遅かった（伊良部島で1.25 Ma、宮古島で0.96 Ma）。c 琉球層群主要部が堆積した直後の時期（約0.4 Ma）。d 琉球層群主要部が堆積した後の時期（約0.4-0.27 Ma）。0.27 Ma以降、OMSPはほぼ完全に水没した。e 現在。

日本語原稿執筆者：井龍康文（東北大学）（敬称略）

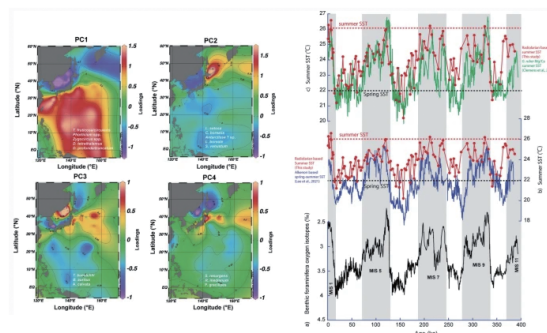


Review of radiolarian microfossils as a tool for reconstructing sea surface temperature of the past in the Northwest Pacific

Kenji M. Matsuzaki, Takuya Itaki, Yoshimi Kubota, Kyung Eun Lee, Isao Motoyama, Takuya Sagawa, Keiji Horikawa, Masafumi Murayama, Hajime Obata

Keywords: Radiolarian, Sea surface temperature (SST), Radiolarian-based SSTs, *G. ruber* Mg/Ca-based SSTs, Alkenone-based SSTs, Northwest Pacific, Water masses

In this review we re-evaluated the potential of radiolarian species as palaeoceanographic proxies in the Northwest Pacific Ocean relying on 33 new samples collected since 2021, combined with already published datasets. Our re-evaluation revealed significant differences between Sea of Japan and Northwest Pacific radiolarian assemblages, leading to the exclusion of the Sea of Japan dataset for further sea surface temperature (SST) reconstructions in the Northwest Pacific. By employing factor analyses, we were able to identify four distinct radiolarian assemblages characterizing the Northwest Pacific and East China Sea as follows: the Subtropical, the Sea of Okhotsk-related subarctic, the Oyashio Current to transitional zone-related, and the coastal water assemblages. Each assemblage showed specific species associations with different water masses and SST ranges. Species like *Tetrapyle circularis/fruticosa* and *Dictyocoryne tetrathalamus* were associated with waters above 24 °C, while *Lithomelissa setosa* and *Ceratospyrus borealis* were associated temperatures below 14 °C. Based on a review of the literature about modern radiolarian species blooming conditions in the Northwest Pacific, we suggest that radiolarian species-based reconstructed SSTs more likely infer summer SSTs. Applying weighted averaging partial least squares transfer function on selected radiolarian species showing strong affinities with changes in summer SST, we re-evaluated past summer SSTs at IODP Site U1429 in the northern East China Sea with high accuracy ($R^2=0.97$, error margin ± 1.4 °C). Our radiolarian-based summer SST reconstruction is similar to *Globigerinoides ruber* Mg/Ca-based summer SSTs, though showing minor disparities during glacial periods, while constant disparities were observed with alkenone-based SST estimates at the same site, which is likely due to seasonal biases. Notably, we identified *L. setosa* as a potential proxy for East Asian Winter Monsoon intensity.





発行日：2026年3月

Correspondence: peps_edit@jpgu.org

Copyright ©2026 PEPS Editorial office All rights reserved.

PEPS is supported by a Grant-in-Aid for Publication of Scientific Research Results (25HP2004) from Japan Society for the Promotion of Science.