

令和 2 年 7 月 30 日

愛 媛 大 学

地球のマントル遷移層はどのように変形するか？

【ポイント】

- 地球マントル遷移層の鉱物の塑性変形モデリングを行い、卓越する変形メカニズムを明らかにした
- 沈み込む冷たいスラブは周囲のマントル遷移層より柔らかい可能性がある
- マントル対流の様式や地球化学的な進化の解明につながる

【概要】

愛媛大学とフランス・リール大学の研究者の共同によるこの研究は、地球の地下 410~660km のマントル遷移層の変形に関するもので、Earth and Planetary Science Letters 誌に最近発表したものです。この研究では、マントル遷移層の主要鉱物であるウォズレアイト、リングウッドイト、メジャーライトガーネットのレオロジー（物質の変形や流動に関する性質）を精確に再検討するために、転位滑りの理論数値計算と原子拡散実験を組み合わせ、塑性特性のモデリングを行いました。

【詳細】

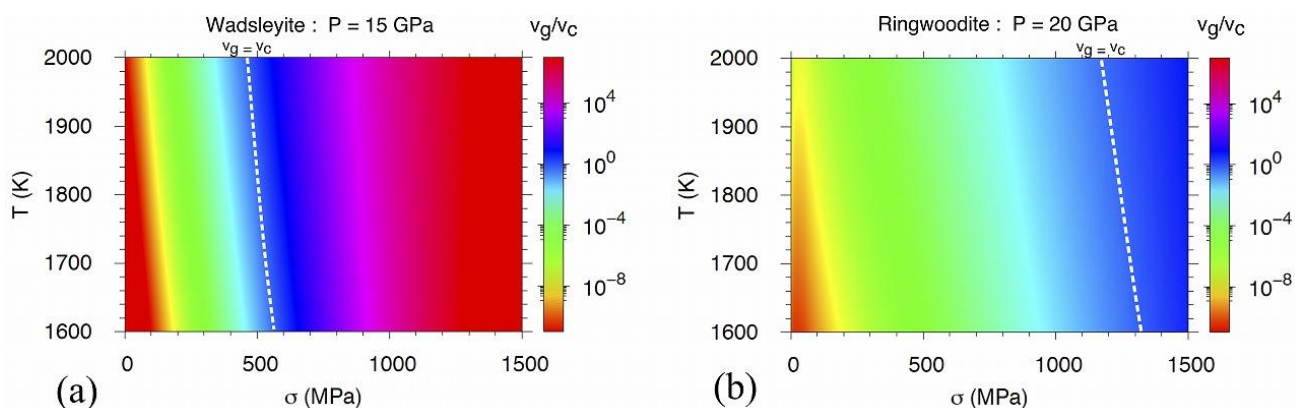
地殻の下から深さ 2890km に渡る地球のマントルは固体の岩石で構成されているにも関わらず、地球内部の放熱のために対流運動を行っています。この対流運動では、地表から冷たいプレートが沈み込むとともに熱いブルームが湧き上がるといった物質の移動であり、地震や火山活動といった地質学的な現象の原因となっています。これまでの地震学や鉱物物理学の先行研究によって、地球のマントルは（鉱物学的には）上部マントルと下部マントルの 2 つに分かれており、深さ 410km から 660km のマントル遷移層がその境であることが知られています。このマントル遷移層は上部と下部マントルの間の物質の移動を支配しており、マントル全体の対流の度合に影響を及ぼしています。地震波トモグラフィ（地震波を用いた地球内部の CT スキャン）によって、沈み込むプレート（スラブ）はマントル遷移層を突き抜けるものもあれば、遷移層の内部や直下で滞留するものもある、ということが分かってきました。しかし、なぜこのような違いが生じるのかは今のところ明らかになっていません。また、マントル遷移層の力学的特性の理解が十分ではないため、遷移層をはさんだ地球マントルのダイナミクスの理解は乏しいのが現状です。



愛媛大学の先端研究が世界をリードします！

<https://research.ehime-u.ac.jp/>

この力学的特性は、「粘性率」というパラメータで典型的に記述される「クリープ」という鉱物の性質に依存しています。「クリープ」とは、比較的低い力学的応力に対する物質のゆっくりとした塑性的変形のことです。上部マントルのダイナミクスは、その主構成物質であるカンラン石 (Mg_2SiO_4) の塑性変形の仕方です。上部マントルの浅い部分の上部 300km は、「地震波異方性」として知られる、地震波速度の大きな方向依存性で特徴づけられます。それゆえ、上部マントル全体としては「転位クリープ」による変形が支配的であると一般的に考えられています。この転位クリープは結晶格子の回転、ひいては、鉱物の弾性的異方性の原因である、結晶の一定方向への選択配向をもたらします。転位クリープは結晶内の変形メカニズムで、「転位」と呼ばれる線欠陥が伝わっていくことによる変形です。この変形は、ある特定の方向や面に沿った転位のすべり運動と、すべり面から外れる向きへの原子拡散を伴う転位の上昇運動の両方が合わさったものです。実際に、2015 年の Boioli らによる数値シミュレーションでは、上部マントル条件下での Mg_2SiO_4 カンラン石の結晶内塑性は Weertman 型の転位クリープで説明でき、そこでは転位の上昇運動が転位のもつれを解消することにより塑性歪が効果的に生成される、ということを示しました。

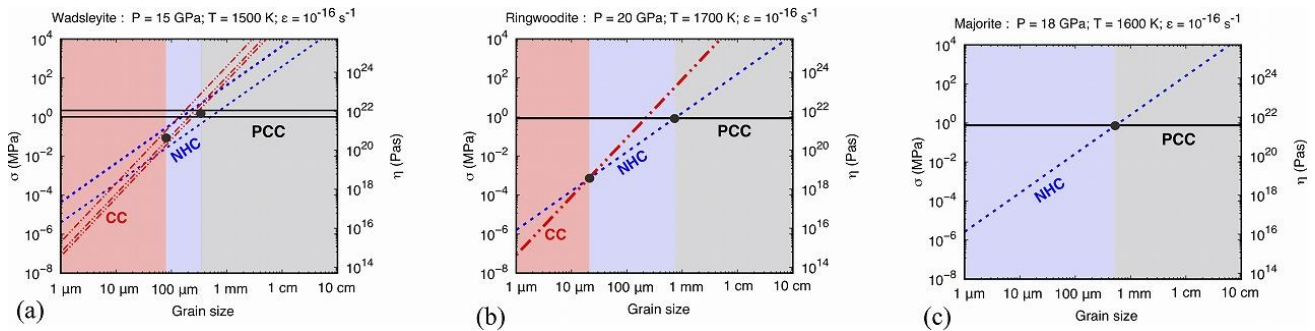


(図1 ウォズレアイトとリングウッドイトにおける転位すべりと上昇速度の比)

マントル遷移層の深さ 410km より下では圧力と温度が上昇し、カンラン石はその高压相であるウォズレアイトに相転移します。そして深さ 520km より下ではさらにリングウッドイトに相転移します。より高密度な結晶構造を持つこれらの高压相の変形の様式がカンラン石と同じかどうかは未だに明らかにされていません。この問いに答えるために、リール大学の塑性研究グループと愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターの研究者の共同チームは、実験による原子拡散データと熱によって活性化される転位すべり移動の数値計算を組み合わせました。そして、上部マントルのカンラン石とは異なり、カンラン石の高压相の転位上昇速度は転位すべり速度を上回ることを示しました。これは、地質学的に適當

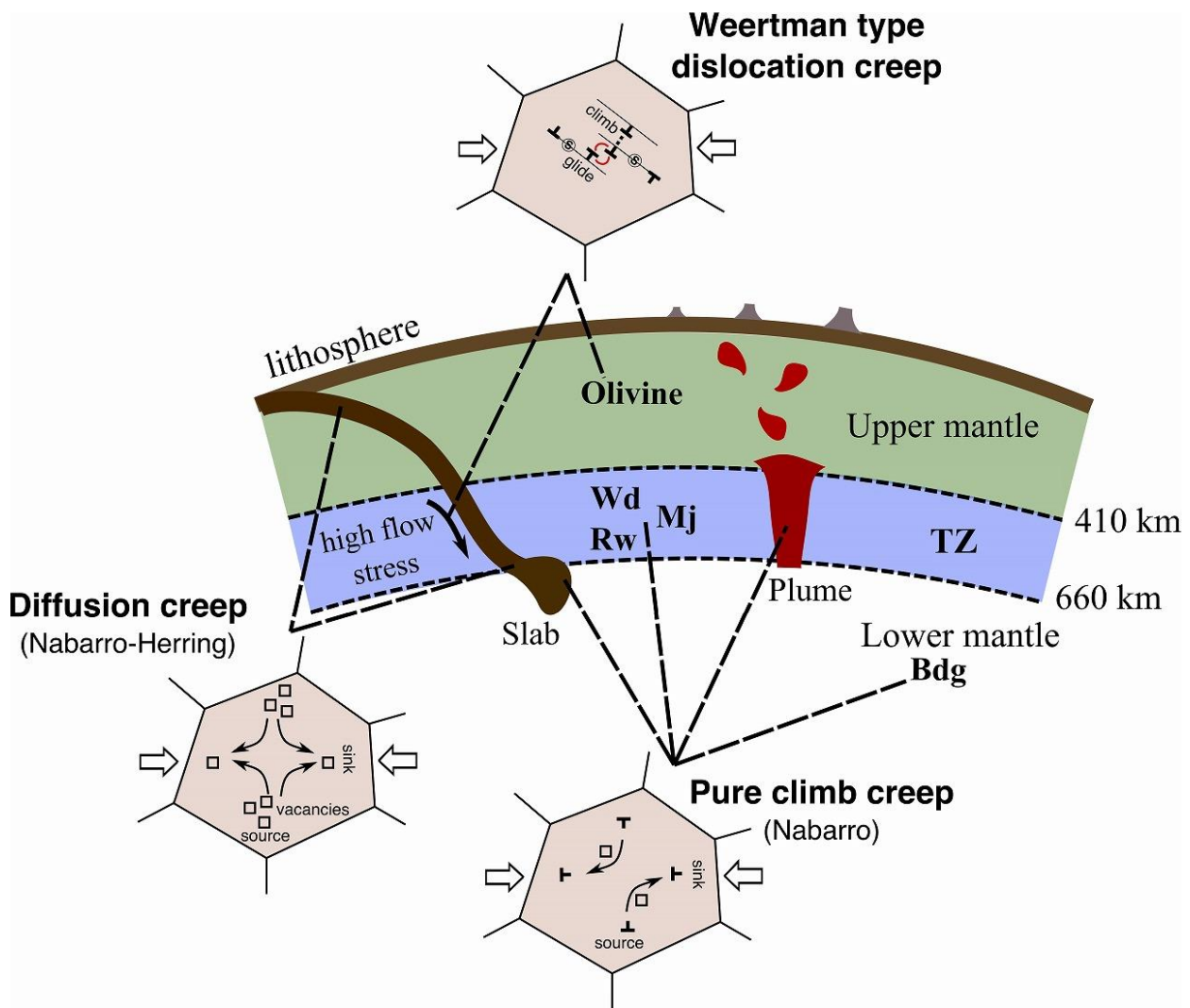


な応力状態下においては、カンラン石の高圧相の転位クリープの様式は、Weertman 型クリープではなく純上昇クリープ型が実現することを示唆します（図 1）。塑性モデリングと実験による原子拡散データに基づき、今回の研究では、マントル遷移層の主要鉱物であるウォズレアイト、リングウッドイト、メジャーライトガーネットについて、粒子サイズに対する定常状態の変形様式を定量化しました（図 2）。



（図 2 マントル遷移層条件下におけるウォズレアイト、リングウッドイト、メジャーライトガーネットの変形メカニズム（PCC: 純上昇クリープ、NHC: Nabarro-Herring クリープ、CC: Coble クリープ））

これらのモデリングによって、マントル遷移層に関連するいくつかの重要な知見が説明可能になります。地質学的応力下での純上昇クリープによるウォズレアイト、リングウッドイト、メジャーライトガーネットの結晶内塑性から、それぞれの結晶粒子サイズが 0.1mm 以上であれば、マントル遷移層の粘性率が $10^{21\pm 1}$ Pa s と見積もられます。この値は、氷河期からの地表リバウンドなどから地球物理学的に推定される地球マントルのレオロジー特性とよく一致します。純上昇クリープは結晶格子の回転を起こさないため結晶の選択配向をもたらしません。それゆえ、このメカニズムによるマントル遷移層の変形様式は、上部マントルに比べると地震波速度が比較的等方的であるマントル遷移層の特徴と調和的です。また、遷移層内部においても、Weertman 型クリープが卓越する特定の応力集中領域においては、結晶の選択配向が発達することも示しました。その領域例として、冷たい沈み込みスラブの周辺があげられます。そこでは沈み込みへの抵抗が発生するので、いくつかのスラブが遷移層の底部で滞留する理由として説明できます。一方、「拡散クリープ」と一般的に表現される、原子拡散による変形様式が卓越するような、粒子サイズが 0.1mm 以下の領域は、低い粘性率であることが予想されます。これは、冷たい沈み込みスラブの内部や、鉱物の相転移面周辺での流動ダイナミクスに影響すると思われます。



(図3 マントル遷移層での変形メカニズムの模式図)

今回の研究で新たに明らかとなったこれらの粒子サイズ依存の変形メカニズムをマントル対流モデリングに組み込むことにより、上部マントルと下部マントルの相互作用や地球の化学的進化などの理解が大きく進むと期待されます。

【論文情報】

掲載誌：Earth and Planetary Science Letters

題名：Deformation across the mantle transition zone: A theoretical mineral physics view

[理論鉱物物理から見たマントル遷移層の変形]

著者：Sebastian Ritterbex, Philippe Carrez and Patrick Cordier

DOI：10.1016/j.epsl.2020.116438



愛媛大学の先端研究が世界をリードします！

<https://research.ehime-u.ac.jp/>

【研究サポート】

本研究は、以下のサポートを受けて行われました。

- ・ European Research Council (ERC) under the Seventh Framework Programme (FP 7) Grant Number 290424 RheoMan
- ・ Horizon 2020 research and innovation programme Grant Number 787198 TimeMan.

【本件に関する問い合わせ先】

(研究に関すること) ※英語のみ

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター 特定研究員

RITTERBEX SEBASTIAN ARTHUR WILLEM

電話：089-927-8256

E-mail：ritterbex.sebastian_arthur_willem.us@ehime-u.ac.jp

(報道に関すること)

愛媛大学総務部広報課広報チーム

電話：089-927-9022

E-mail：koho@stu.ehime-u.ac.jp



愛媛大学の先端研究が世界をリードします！

<https://research.ehime-u.ac.jp/>