

2026. 6.30

報道関係者 各位

< 配信枚数 5 枚 >

**世界初、物質を流体として扱える「粘性率」の上限値を推定  
～地球科学データの総合解析から解明する「流れにくさ」の限界～**

立命館大学理工学部の吉田晶樹教授は、流体の「流れにくさ」を表す基本的な物理量である「粘性率」について、さまざまな地球科学データの総合的な解析とマントル対流の数値シミュレーションにより、物質を流体として扱える粘性率の上限値を推定しました。

**本件のポイント**

- これまで未解明であった「物質はどこまで流体として扱えるのか」という問いに対し、流体の流れにくさを表す物理量である粘性率<sup>※1</sup>に着目して研究
- 本研究では、さまざまな地球科学データを総合的に解析し、粘性率の上限値の推定を試みた
- その結果、物質を流体として扱える粘性率の上限値を「 $10^{30\pm 2}$  Pa s」と世界で初めて推定した

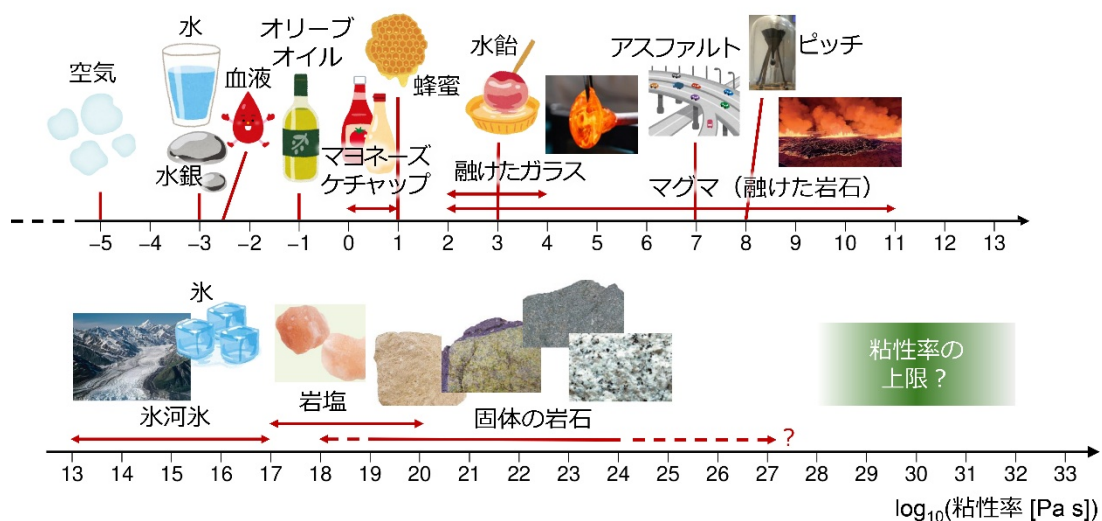
**< 研究成果の概要 >**

水や空気は流れますが、岩石のように一見固体に見える物質も、数百万年以上という長い時間スケールで見ると、ゆっくり流れています。本研究では、「物質はどこまで流れにくくても流体として扱えるのか」という根本的な問いに着目し、流れにくさを示す「粘性率」の実質的な上限値を推定しました。

地球表層の歪速度の観測データや室内での岩石変形実験のデータ、マントル対流の数値シミュレーションデータを総合的に解析した結果、その上限値は  $10^{30\pm 2}$  Pa s と見積もられました。

本研究の成果は、地球内部で起こるプレート運動やマントルの流れの理解に役立つだけでなく、高粘性材料やガラス状物質、ソフトマターなどの流体力学・レオロジー研究にも新たな視点を与えることが期待されます。

**いろいろな「流れる」物質の粘性率**



© 2026 Masaki Yoshida (吉田 晶樹) . All rights reserved.

図 1. 身近な物質と代表的な地球物質の粘性率、ならびに本研究で推定した粘性率の上限値の範囲。粘性率は桁で大きく変化するため、横軸は対数軸で示している。「ピッチ」は常温では固体状のタール由来物質で、写真は豪州・クイーンズランド大学の「ピッチドロップ実験」のライブ映像 (<http://www.thetenthwatch.com/>) より。

## <研究の背景>

粘性率は、液体や気体などの流体の「流れにくさ」を表す基本的な物理量であり、材料科学から自然科学まで幅広い分野で重要な役割を果たします。身近な物質や地球表層の代表的な物質の粘性率としては、例えば、空気が約  $10^{-5}$  Pa s、水が約  $10^{-3}$  Pa s、蜂蜜やケチャップが約  $10$  Pa s、融けたガラスが約  $10^2 \sim 10^4$  Pa s、氷河氷が約  $10^{13} \sim 10^{17}$  Pa s と見積もられます(図 1)。値が大きいほど、物質は「サラサラ」から「ネバネバ」、さらに一見「ガチガチ」に見える状態へと変化します。一方、超低温の液体ヘリウムのように粘性率がほぼゼロとみなせる流体は、非粘性流体(理想流体、または完全流体)として扱われます。

一方で、粘性率がどこまで大きくなり得るのか、すなわちその上限値については、これまでほとんど議論されてきませんでした。氷河氷よりさらに高い有効粘性率<sup>\*1</sup>を示し得る物質の代表例として、岩石やそれを構成する鉱物(造岩鉱物)が挙げられます。これらは、人間が直接観測できる時間スケールの中では固体として振る舞うため、一般的な流体力学の対象としては扱われにくい物質です。

しかし、地球のマントル<sup>\*2</sup>では熱対流運動が生じているように、マントルを構成する岩石も、地球の歴史に相当する地質学的時間スケール(数百万年~数千万年以上)では、ゆっくりと流動します。このため、マントルは「極めて粘性率の高い流体」として扱うことができます。

岩石や鉱物の変形挙動を調べる岩石変形実験では、造岩鉱物に応力を加えた際の歪速度<sup>\*3</sup>を測定し、その結果を経験式で表すことができます。この経験式に含まれる因子は「流動則パラメーター」<sup>\*4</sup>とよばれ、鉱物の変形のしやすさを定量化するために用いられます。

しかし、リソスフェア<sup>\*2</sup>や最上部マントルの主要な構成鉱物であるオリビンの流動則パラメーターを、地表付近の低温・低圧条件にそのまま適用すると、リソスフェアの粘性率は  $10^{70}$  Pa s 以上という、実質的に無限大に近い値になります。この場合、リソスフェアはほとんど変形しない「剛体」として振る舞うこととなります。

それにも関わらず実際には、海洋リソスフェアは主に大陸縁辺などのプレート境界で曲げられ、マントル深部へ沈み込んでいます。この観測事実は、単純な経験式への適用ではリソスフェアの実効的な変形を十分に説明できないことを示しています。

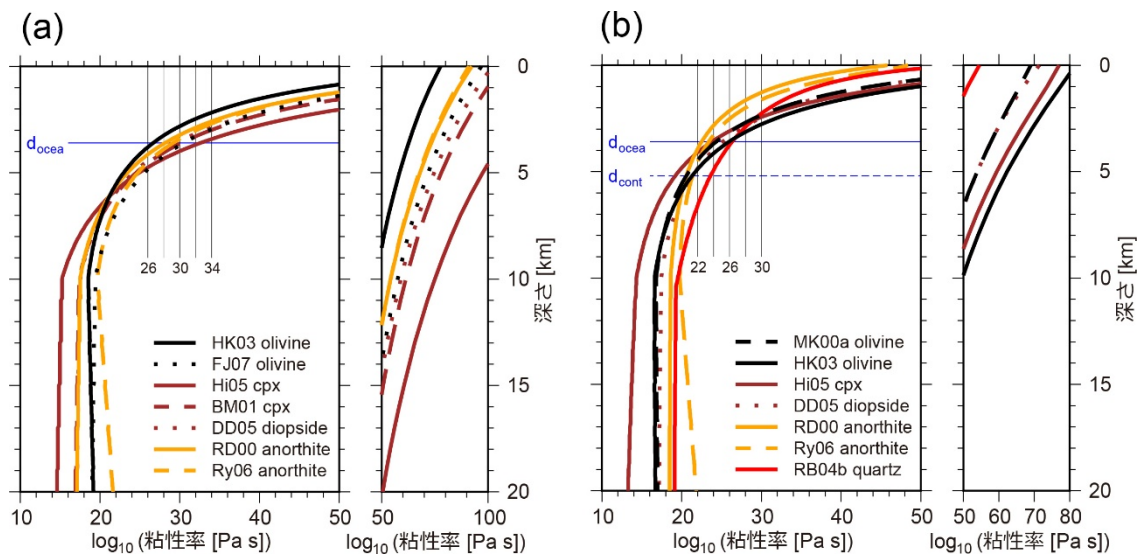


図 2. 地球表層のさまざまな主要な構成鉱物の流動則パラメーターから推定した深さと粘性率の関係。(a)は無水条件、(b)は含水条件での結果を示す。粘性率の表示範囲は、各図の左は  $10^{10} \sim 10^{50}$  Pa s、右は  $10^{50} \sim 10^{100}$  Pa s としている。無水条件の場合(a)、リソスフェアの平均的な温度に対応する深さ(青色の実線)では、オリビン(黒色の実線と点線)の粘性率は、流動則パラメーターの不確かさを考慮すると、およそ  $10^{27} \sim 10^{32}$  Pa s になる。流動則パラメーターのデータは Bürgmann and Dresen(2008)に基づく。

## <研究の内容>

そこで本研究では、測地学的観測(数年~数十年)や室内の岩石変形実験(数時間~数年)といった、人間が直接観測可能な時間スケールの現象から、マントル対流により駆動される地質学的現象(数百万年~数千万年以上)など、地球史スケールで進行する現象までに着目しました。そして、このような桁で大きく異なる時間スケールに関わる地球科学データを総合的に解析し、物質を流体として扱える粘性率

の実質的な上限値を解析しようと考えました。

その結果、リソスフェアの平均的な温度に対応する深さでは、主要な造岩鉱物の粘性率の上限値は  $10^{30\pm 2}$  Pa s (10 の 30 乗<sup>\*5</sup> パスカル秒で、 $\pm 2$  桁程度の不確かさ) と見積もられました (図 2a)。一方、測地的観測や地震学的観測に基づくリソスフェアの歪速度データ (図 3) を用いて、観測可能な歪速度の下限から粘性率の上限を推定すると、その値は  $10^{28}$  Pa s のオーダーとなり、これは  $10^{30\pm 2}$  Pa s の範囲に含まれます。

なお、図 2a は、無水条件<sup>\*6</sup>での造岩鉱物の粘性率を表していますが、例えばオリビンの場合、含水条件<sup>\*6</sup>では無水条件に比べて粘性率が数桁程度かそれ以上小さくなります (図 2b)。

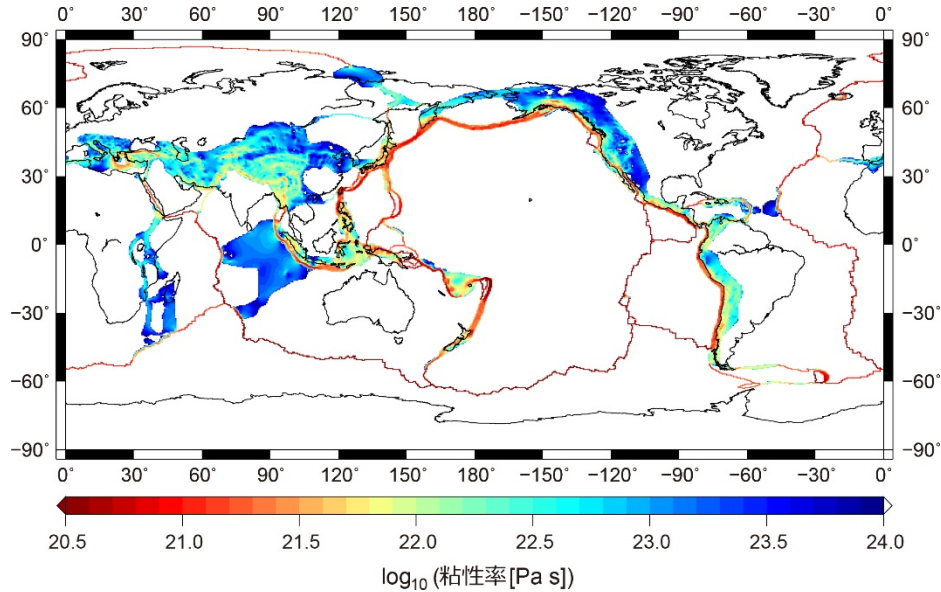


図 3. 測地的観測による全球歪速度モデル (GSRM; Kreemer et al., 2014; 2015) から推定した地球表層のリソスフェアの粘性率分布。黄色から赤色の領域は粘性率が低い領域 (主にプレート境界付近) を示し、およそ  $10^{22}$  Pa s 以下である。白色の領域は  $10^{24}$  Pa s 以上を示す (歪速度のデータがなく、粘性率を推定できない領域も含む)。

吉田教授は 1990 年代後半から、スーパーコンピューターを用いて、実際の地球を模した三次元の全球モデルを用いたマントル対流やプレート運動の大規模数値シミュレーション研究に取り組んできました。そして、これまでの長年の研究により、マントルの粘性率の温度依存性のみによって生じる低温の地表面付近の粘性率が  $10^{26}$  Pa s 以上の場合、対流するマントルの上部に、マントルの流れとは完全に独立した、実際の地球のリソスフェアに似た高粘性層が再現されることが明らかになっていました (図 4)。

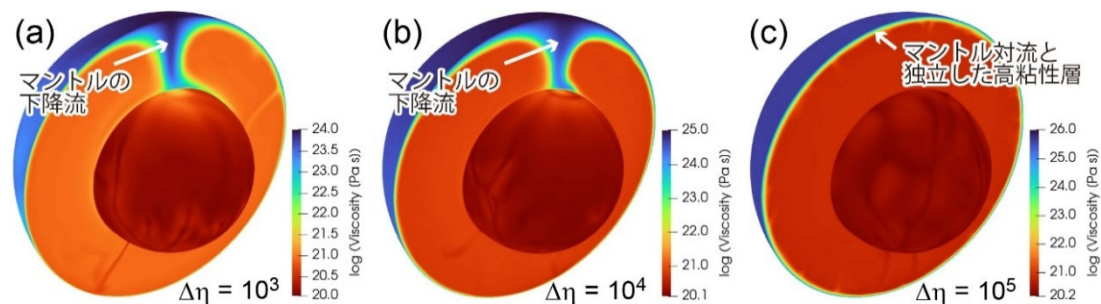


図 4. 三次元の全球モデルを用いたマントル対流の数値シミュレーションの結果。輪切りにしたモデルの表面が地表面、中心の球がマントルの底面を示す。色は粘性率の大きさを示し、赤色から青色にかけて粘性率が大きくなる。マントルの粘性率の温度依存性のみによるモデルの上面の粘性率が (a)  $10^{24}$  Pa s、(b)  $10^{25}$  Pa s の場合では、地表面付近に形成される高粘性層 (青色) は、その一部がマントルに沈み込んでしまうほど軟らかいが、粘性率が (c)  $10^{26}$  Pa s になると、マントル対流と完全に独立した高粘性層が形成される。

そこで、本研究ではさらに、「粘弾脆性」<sup>\*7</sup> の効果を考慮した高解像度の二次元マントル対流モデルを用いて、地殻・マントル物質の流動則パラメーターを組み込んだ数値シミュレーションを行いました。具体

的には、リソフェアの粘性率の上限値を  $10^{26}$  Pa s ~  $10^{32}$  Pa s の範囲で変化させて検討しました。

その結果、いずれの上限値を用いた場合でもリソフェアの沈み込みが起り、その沈み込みの時間スケールにも大きな違いは見られませんでした(図 5)。これは主に、粘性率の上限値に関係なく、リソフェアの曲げに伴って上部に脆性破壊(いわゆる断層)が生じる領域が発達し、リソフェアの粘性率が部分的に低下するためと考えられます。

本研究は米国物理学協会出版局(AIP Publishing)が発行する学術雑誌「Physics of Fluids」に掲載されました。また、同誌の編集部が注目する論文として「Editor's Pick」にも選出されています。「Editor's Pick」は同誌に掲載された論文の中で約 8%の論文が選出されます(2025 年値)。

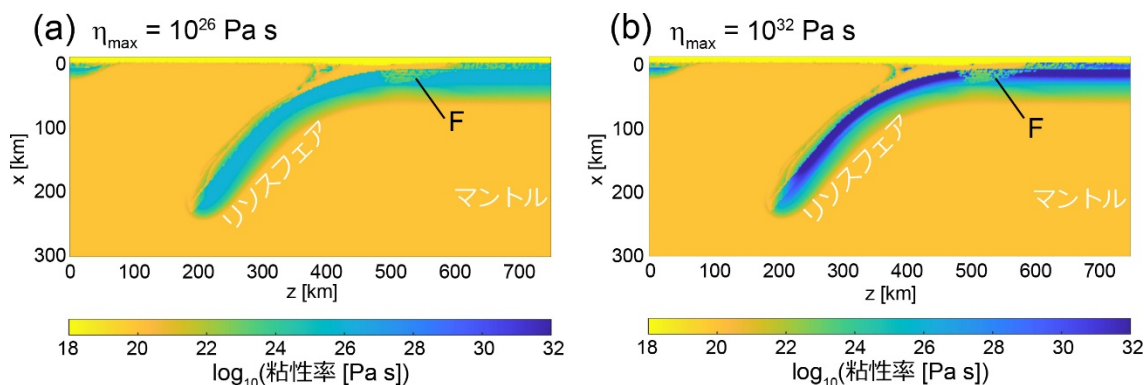


図 5. 粘弾脆性の効果を考慮した高解像度二次元マントル対流数値シミュレーションによるリソフェアの沈み込みの様子。リソフェアの粘性率の上限値を(a)  $10^{26}$  Pa s と(b)  $10^{32}$  Pa s に設定し、計算開始時(沈み込みが起きる前の状態)から約 1500 万年経過した後の状態を示す。カラースケールは計算領域の粘性率を表す。“F”で示した領域は、リソフェアの曲げにともなって発達した脆性破壊領域(断層)を示し、周囲のリソフェアよりも粘性率が小さくなっている

### <社会的な意義>

本研究で推定した粘性率の上限値は、数学的な意味での絶対的な上限ではなく、人間が直接観測できる時間スケールから地球史スケールまでの地球科学データに基づき、流動現象として検証可能な粘性率の実質的な上限値を示すものです。この値は、今後、地球科学的観測や岩石変形実験の精度向上に伴い、更新される可能性があります。それでも、現時点で利用できる複数の地球科学データを統合し、上限値の推定を試みた点に本研究の意義があります。

本成果は、地球物理学におけるリソフェアやマントルの変形の理解に貢献するだけでなく、高粘性材料やガラス状物質、ソフトマターなど、流体力学・レオロジー研究における広い応用可能性を持つものと考えられます。

### <研究者のコメント>

粘性率は、身近な空気や水から地球内部の岩石の流れまでをつなぐ基本的な物理量です。今回の研究は、一見すると日常生活から遠いテーマに見えるかもしれませんが、「物質はどこまで流れにくくなるのか」という素朴な問いに答えようとしたものです。この成果が、地球の長い歴史を理解するだけでなく、材料や高粘性流体の研究にも少しでも役立つことを期待しています。

### <論文情報>

論文名 : Upper bound of viscosity from a geophysical perspective  
著者 : Masaki Yoshida  
発表雑誌 : Physics of Fluids  
掲載日 : 2026 年 6 月 30 日(火) 01:00(日本時間)  
DOI : 10.1063/5.0335802  
URL : <https://doi.org/10.1063/5.0335802>

<用語説明>

- ※1 粘性率: 流体の「流れにくさ」を表す物理量。単位は Pa s (パスカル秒)。英語の viscosity は「粘度」または「粘性係数」と訳されることが多いが、固体地球科学ではもっぱら「粘性率」とよばれるため、本稿ではこの用語を用いる。岩石や氷のように温度、応力、粒径などによって変形のしやすさが変わる物質では、条件に依存する「有効粘性率」として扱われる。
- ※2 マントル: 地殻の下から深さ 2,891 km まで続く岩石の層。地殻と最上部のマントルを合わせた低温・高粘性の岩石層は「リソスフェア」とよばれる。時間的に成長した海洋リソスフェアの厚さは 100 km 程度で、大陸リソスフェアは一般的にこれよりも厚い。
- ※3 歪速度: 物質が変形するときの、単位時間あたりの変形の割合。単位は  $s^{-1}$  (毎秒)。ニュートン流体では、応力は歪速度に比例し、その比例定数が粘性率となる。この定義から、同じ応力のもとでは、歪速度が小さいほど粘性率が高い。
- ※4 流動則パラメーター: 地球の表層や内部の高温高圧環境における地殻物質やマントル物質の歪速度を定量化するため、岩石変形実験から求められる因子。活性化エネルギー (変形・反応を進めるために必要なエネルギー)、活性化体積 (変形・反応が圧力によってどれだけ起こりにくくなるかを表す量)、粒径、含水量やフガシティー (水の取り込みやすさ)、応力指数 (応力依存性の程度)、粒径指数 (粒径依存性の程度) などからなる。
- ※5 10 の 30 乗: 地球科学では、粘性率の単位である Pa s (パスカル秒) について、値が極めて大きい場合でも、MPa s (メガ・パスカル秒) や GPa s (ギガ・パスカル秒) のような接頭語を用いず、 $10^{30}$  Pa s のように 10 の累乗で表す。 $10^{27}$  や  $10^{30}$  という桁の値は、国際単位系 (SI) においても、比較的最近の 2022 年の第 27 回国際度量衡総会でそれぞれ「ロナ (ronna、記号 R)」、「クエタ (quetta、記号 Q)」という接頭語が追加されたばかりであるように、科学一般でもあまり扱うことがない巨大な数である。
- ※6 無水条件・含水条件: 「含水条件」とは、水素や水酸基などの形で微量の水成分が鉱物の内部に含まれている状態を指す。一方、「無水条件」とは、鉱物の中に水成分がほとんど含まれない状態を指す。鉱物中の水成分は岩石を変形しやすくするため、含水条件では無水条件よりも粘性率が低くなることが多い。
- ※7 粘弾脆性: 地震波のような短時間の変形に対しては、マントルは弾性体として応答する。一方、数万年から数百万年以上の長い時間スケールでは、非常に高い粘性をもつ流体としてゆっくり流動する。さらに、低温で高応力のリソスフェア上部では、岩石が破壊して断層運動を起こす脆性的な変形も生じる。このように、マントルの変形は粘性・弾性・脆性の性質をあわせもつ「粘弾脆性」として理解される。

配布先: 草津市政記者クラブ、京都大学記者クラブ、科学記者会、文部科学記者会

以上

●本件に関するお問い合わせ先

(研究内容について)

立命館大学 理工学部 教授 吉田 晶樹

TEL.077-561-3914

Email. masakiy@fc.ritsumei.ac.jp

(報道について)

立命館大学広報課 担当: 大森

TEL.075-813-8300

Email. r-koho@st.ritsumei.ac.jp