岩石が対流するのは、やわらかいからではなく、大きいからである

— 粘性 10^{21} Pa·s という固体のマントルでも、レイリー数は 6.457708×10^{7} で、臨界値 1708 の 3.780860×10^{4} 倍ある — 分離子は、粘性か、厚さの三乗かである — [論文669]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)
Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan｜山岸勇輝ラボ
2026年9月

— From thinking to syncing. —

要旨

岩石は固体である。その固体が流れて対流していると言われると、よほどやわらかいのだろうと考えたくなる。だが対流するかどうかを決めているのは粘性ではなく、層の厚さの三乗である。それを数で示す。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、固体の粘性でも、臨界をはるかに超える——粘性 10^{21} Pa·s、厚さ 2.9×10^{6} m、温度差 2000 K のマントルのレイリー数は 6.457708×10^{7} で、臨界値 1708 の 3.780860×10^{4} 倍である（第2節）。 第二に、粘性を千倍にしても足りない——粘性を 10^{24} Pa·s にするとレイリー数は 6.457708×10^{4} に落ちるが、それでも臨界の 37.80860 倍で、まだ対流する（第2節）。 第三に、これが本稿の芯である。効いているのは厚さの三乗である——同じ物質・同じ温度差で厚さだけを変えると、月（1.3×10^{6} m）で臨界の 3.405859×10^{3} 倍、火星（1.7×10^{6} m）で 7.616288×10^{3} 倍、地球で 3.780860×10^{4} 倍となり、地球と月の比 11.101047 は厚さの比の三乗と 10 桁一致した（第3節）。 第四に、止まるには、うすくなければならない——この粘性と温度差で対流が始まる最小の厚さは 86.4041 km だった（第3節）。 第五に、同じ粘性が、別の観測では時間として現れる——同じ 10^{21} Pa·s で、波長 2×10^{6} m の荷重が去ったあとの緩和時間は 6152.3536 年になる（論文433 と同じ式・同じ値）（第4節）。 第六に、分離子は、粘性か、厚さの三乗かである——粘性を千倍にしても越えられない差が、厚さを半分にするだけでつく（第4節）。 キーワード：マントル対流、レイリー数、臨界レイリー数、粘性、熱対流、地球内部。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——レイリー数、臨界レイリー数、マントル対流の存在、粘性の代表値は、いずれも既知である（ターコットとシューベルト 2014、チャンドラセカール 1961）。臨界値を自前で解かない——臨界レイリー数 1708 は剛い上下の境界での文献の値であり、線形安定性の計算は行わない。境界の置き方が変われば値も変わる。実際のマントルを模さない——温度分布、相転移、粘性の深さ依存と温度依存、組成の違いは入れない。一様な層に単純化する。プレート運動を論じない——対流と地表のプレートの関係、駆動力の分配は主題ではない。代表値を使う——密度、熱膨張率、温度差、熱拡散率、厚さは代表値であり、特定の模型の値ではない。既刊との関係：論文645 は、薄い液の層を下から温めたとき、動かすのが浮力か表面張力の差かを臨界値で比べ、入れ替わる厚さを 25.4358 mm と出した——本稿は同じ臨界レイリー数を使い、同じ問いを 10^9 倍の厚さで問う。論文433 は、氷が去ったあとの土地の隆起を、同じマントルの粘性 10^{21} Pa·s で扱った——同じ数が、そちらでは緩和時間として、こちらでは対流するかどうかとして現れる。加えたのは、固体の粘性でレイリー数を出し臨界と比べたこと、粘性を千倍にしても超えることを示したこと、月・火星・地球を同じ式に入れて厚さの三乗を確かめたこと、対流が始まる最小の厚さを逆算したこと、分離子を「粘性か厚さの三乗か」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：厚さ L の層を下から温め、上下の温度差を ΔT とする。浮力の強さはレイリー数で測る。

$$Ra = \frac{\rho g \alpha \, \Delta T \, L^3}{\eta \kappa}$$

ρ は密度、α は熱膨張率、η は粘性、κ は熱拡散率である。Ra が臨界値を超えると、熱は伝導ではなく流れで運ばれる。ここでは剛い上下の境界での臨界値 1708 を前提として置く。

問い：岩石が対流するのは、粘性が思ったより小さいからか、それとも層が厚いからか。

2. 固体の粘性でも、臨界をはるかに超える

計算 2.1：マントルの代表値（密度 4500 kg/m^3、熱膨張率 3×10^{-5} /K、温度差 2000 K、熱拡散率 10^{-6} m^2/s、厚さ 2.9×10^6 m、粘性 10^{21} Pa·s）でレイリー数を出すと 6.457708×10^7 で、臨界値 1708 の 3.780860×10^4 倍である。

計算 2.2：粘性だけを 1000 倍（10^{24} Pa·s）にすると、レイリー数は 6.457708×10^4、臨界の 37.80860 倍になる。まだ超えている。

> **観察 2.3**
>
> やわらかさは、答になっていない。10^{21} Pa·s は水の 10^{24} 倍であり、人の時間では固体としか言いようがない。それでも臨界の四万倍を超える——粘性を千倍に見積もり直しても結論は変わらないのだから、対流の理由を粘性に求めることはできない。

3. 効いているのは、厚さの三乗である

計算 3.1：同じ物質・同じ温度差のまま、層の厚さだけを変えた。

	厚さ	レイリー数	臨界の何倍
月	1.30×10^{6} m	5.817207×10^{6}	3.405859×10^{3}
火星	1.70×10^{6} m	1.300862×10^{7}	7.616288×10^{3}
地球	2.90×10^{6} m	6.457708×10^{7}	3.780860×10^{4}

地球と月の比は 11.101047 で、厚さの比の三乗と 10 桁一致する。式の指数がそのまま出ている。

計算 3.2：この粘性と温度差で対流が始まる最小の厚さを逆算すると 86.4041 km である。

> **観察 3.3**
>
> これが本稿の芯である。大きさが相を決める。粘性を 1000 倍にしても超えられなかった臨界を、厚さを 86.4041 km より薄くすれば下回る——同じ岩石が、大きな天体の中では流れ、小さな天体の中では止まる。決めているのは材料ではなく寸法である。

計算 3.4：熱の運ばれ方の目安（ヌセルト数）は 80.2397 で、伝導だけの場合の八十倍の熱が運ばれる。流れの速さの目安は毎秒 1.504147×10^{-8} m、すなわち年 47.4673 cm である。

4. 分離子

> **観察 4.1**
>
> 分離子は、粘性か、厚さの三乗かである。粘性を千倍にしても臨界を下回らない。厚さを 2.9×10^{6} m から 86.4041 km へ落とせば下回る——どちらが効いているかは、二つを別々に動かせば分かる。

> **観察 4.2**
>
> 論文645 と並べる。645 は厚さ数十 mm の液の層で、浮力と表面張力の差のどちらが先に動かすかを、同じ臨界の考え方で比べた——本稿はその 10^{8} 倍の厚さで同じ問いを問う。厚さが三乗で効くので、大きな系では浮力の側が圧倒する。

> **観察 4.3**
>
> 論文433 と並べる。433 は氷が去ったあとの隆起を扱い、同じ 10^{21} Pa·s を使って波長 2×10^{6} m の荷重の緩和時間を 6152.3536 年と出した——同じ一つの粘性が、地表では「一万年たっても戻りきらない」という時間になり、内部では「対流する」という相になる。

> **観察 4.4**
>
> 言わないこと。温度分布も相転移も粘性の深さ依存も入れておらず、臨界値は文献の値を置いただけである——示したのは、対流するかどうかを決めているのが粘性ではなく厚さの三乗であることである。

5. 点呼と結び

1. $Ra = 6.457708 \times 10^{7}$（計算 2.1）：固体の粘性で。
2. 臨界の 3.780860×10^{4} 倍（計算 2.1）：四万倍。
3. 粘性 1000 倍でも 37.80860 倍（計算 2.2）：まだ超える。
4. 月では 3.405859×10^{3} 倍（計算 3.1）：同じ物質・別の厚さ。
5. 比は 11.101047（計算 3.1）：厚さの三乗と 10 桁一致。
6. 最小の厚さ 86.4041 km（計算 3.2）：本稿の芯。

7. ヌセルト数 **80.2397**（計算 3.4）：伝導の八十倍。
8. **速さは年 47.4673 cm**（計算 3.4）：目安。
9. **緩和時間 6152.3536 年**（観察 4.3）：同じ粘性・論文433。
10. **粘性か厚さか**（観察 4.1）：分離子・論文645。

結び：岩石が流れるのは、岩石がやわらかいからではない。粘性 10^{21} Pa·s のままでもレイリー数は 6.457708×10^{7} で臨界の 3.780860×10^{4} 倍あり、粘性を千倍にしても 37.80860 倍でまだ超える。ところが厚さだけを月の値にすると 3.405859×10^{3} 倍まで落ち、地球と月の比 11.101047 は厚さの比の三乗と 10 桁一致した。対流が始まる最小の厚さは 86.4041 km である——同じ岩石が、大きな天体では流れ、小さな天体では止まる。分離子は、粘性か、厚さの三乗かである。既刊との位置——論文645 が数十 mm の層で使った臨界の考え方を、10^{8} 倍の厚さで使い、論文433 と同じ粘性が別の観測では 6152.3536 年という時間になることを並べた。正直に言えば——一様な層に単純化しており、臨界値は文献の値を前提として置いている。

参考文献

1. Chandrasekhar, S. (1961). *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*. Oxford University Press.
2. Turcotte, D. L., & Schubert, G. (2014). *Geodynamics*. Cambridge University Press.
3. 山岸勇輝 (2026).『氷はもう無いのに、土地はまだ上がっている』[論文433]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22701699
4. 山岸勇輝 (2026).『薄い液の層を下から温めると、動かすのは浮力ではなく表面張力の差で、入れ替わりは 25 mm』[論文645]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23014620

— From thinking to syncing. —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)