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

— 1 mm の層では表面張力の側が 646.98 倍小さい温度差で始まり、50 mm では浮力の側が先 — 分離子は層の厚さである — [論文645]

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

液の層を下から温めると、ある温度差で液が動き出し、上から見ると胞の模様ができる（ベナール 1900）。動かす力は二つある。温まった液が軽くなって浮く力（浮力）と、温まった表面で表面張力が弱くなり、冷たい側へ表面が引かれる力（表面張力の差）である。どちらが先に液を動かすかを、層の厚さごとに数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、二つの強さの比は、厚さの二乗で動く——浮力の強さ（レイリー数）は厚さの三乗、表面張力の差の強さ（マランゴニ数）は厚さの一乗で効く。水 20 ℃ で二つが等しくなる厚さは 8.7742 mm だった（第2節）。 第二に、これが本稿の芯である。先に始まる側は、25 mm ほどで入れ替わる——文献の臨界値（レイリー数 669.0、マランゴニ数 79.607）を使うと、入れ替わる厚さは 25.4358 mm で、強さの等しい厚さの 2.898928 倍だった（第3節）。 第三に、薄い層では、表面張力の差が桁違いに先に効く——1 mm の層で対流が始まる温度差は、浮力だけなら 47.3157 K、表面張力の差だけなら 0.0731331 K で、比は 646.98 だった。50 mm では浮力の側が先だった（第3節）。 第四に、分離子は層の厚さである——同じ水、同じ温め方でも、厚さが入れ替わりの厚さの下なら表面張力の差が、上なら浮力が液を動かす。ベナールが見た薄い層の胞は、浮力ではなく表面張力の差で説明された（ピアソン 1958）（第4節）。 キーワード：ベナール対流、マランゴニ対流、レイリー数、マランゴニ数、表面張力。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——浮力による対流の開始（レイリー 1916）、表面張力の差による対流の開始（ピアソン 1958）、二つを合わせた扱い（ニールド 1964）は、いずれも既知である。臨界値は文献の値である——レイリー数 669.0 とマランゴニ数 79.607 は、剛い熱を通す底と、熱を通さない平らな自由表面という境界の置き方での値で、線形安定性を自前で解いていない。境界の置き方が変われば臨界値も変わる。表面の汚れで変わる——表面張力の温度変化 $d\sigma/dT$ は清浄な水の値を置いた。表面に汚れや界面活性剤があれば弱まり、入れ替わりの厚さも動く。既刊との関係：論文452 は、液を持ち上げているのが表面張力ではなく表面張力の差であることを示した——ここでは同じ差が、温めた層を動かす。論文309 は、重力と表面張力を分ける長さが材料の寸法ではないことを示した——ここでは温めた層で、浮力と表面張力の差を分ける厚さを数える。加えたのは、二つの強さが等しい厚さと、先に始まる側が入れ替わる厚さを分けて出したこと、厚さごとに始まりの温度差を並べたこと、分離子を層の厚さに置いたことである。

1. 記法と問い

設定：厚さ d の液の層を下から温め、上下の温度差を ΔT とする。浮力の強さはレイリー数、表面張力の差の強さはマランゴニ数で測る。

$$\mathrm{Ra} = \frac{g\beta\,\Delta T\,d^3}{\nu\kappa}, \qquad \mathrm{Ma} = \frac{|d\sigma/dT|\,\Delta T\,d}{\mu\kappa}$$

ここで β は熱膨張率、ν は動粘性率、κ は熱拡散率、$\mu = \rho\nu$ は粘性率である。前提は水 20 ℃：$\rho = 998.2$ kg/m^3、$\beta = 2.07 \times 10^{-4}$ /K、$\nu = 1.004 \times 10^{-6}$ m^2/s、$\kappa = 1.43 \times 10^{-7}$ m^2/s。表面張力は 20 ℃ で 72.74、30 ℃ で 71.18 mN/m と置き、$d\sigma/dT = -1.5600 \times 10^{-4}$ N/(m·K) とした。

問い：温めた層を先に動かすのは、浮力か、表面張力の差か。

2. 二つの強さが等しい厚さ

計算 2.1：二つの比 $\mathrm{Ra}/\mathrm{Ma} = \rho g\beta d^2/|d\sigma/dT|$ は温度差によらず、厚さの二乗で動く。1 になる厚さ

$$d^{*} = \sqrt{\frac{|d\sigma/dT|}{\rho g\beta}}$$

は、水 20 ℃ で 8.7742 mm だった。

> **観察 2.2**
>
> これは論文309 の毛管長と同じ形の長さである。毛管長は表面張力 σ を密度と重力で割って平方根をとる。ここでは σ の代わりにその温度変化、密度の代わりに温度で変わる密度の割合 $\rho\beta$ が入る——どちらも、材料のどこかの寸法ではなく、二つの力の釣り合いで決まる長さである。

3. 先に始まる側の入れ替わり

計算 3.1：どちらの力でも、対流は数が臨界値を超えたときに始まる。文献の臨界値 $\mathrm{Ra}_c = 669.0$、$\mathrm{Ma}_c = 79.607$（剛い熱を通す底・熱を通さない平らな自由表面）で、厚さごとに始まりの温度差を出した。

厚さ	浮力だけ	表面張力の差だけ	比
0.5 mm	378.525 K	0.146266 K	2587.92
1 mm	47.3157 K	0.0731331 K	646.98
2 mm	5.91446 K	0.0365665 K	161.745
5 mm	0.378525 K	0.0146266 K	25.8792
10 mm	0.0473157 K	0.00731331 K	6.4698
25 mm	0.0030282 K	0.00292532 K	1.03517
50 mm	0.000378525 K	0.00146266 K	0.258792

比は浮力の側を表面張力の差の側で割ったもので、1 より大きければ表面張力の差が先に始まる。

計算 3.2：二つの温度差が等しくなる厚さは、閉じた式 $d_c = d^{*}\sqrt{\mathrm{Ra}_c/\mathrm{Ma}_c}$ で 25.4358 mm、根の探索でも 25.4358 mm だった（10^{-9} m 以内で一致）。d^{*} の 2.898928 倍である。

> **観察 3.3**
>
> これが本稿の芯である。先に始まる側は、25 mm ほどで入れ替わる。強さの等しい 8.7742 mm と入れ替わりの 25.4358 mm が違うのは、二つの臨界値が違うからである。浮力は 669.0 まで、表面張力の差は 79.607 まで数を上げないと液を動かせない——「どちらの力が強いか」と「どちらが先に動かすか」は、別の問いである。

4. 分離子

観察 4.1

分離子は、層の厚さである。同じ水、同じ温め方でも、**1 mm** では表面張力の差が **646.98** 倍小さい温度差で先に始まり、**50 mm** では浮力が先に始まる——入れ替わりの厚さ **25.4358 mm** の下か上かで、液を動かすものが替わる。

観察 4.2

ベナールの胞。ベナール（**1900**）は薄い液の層に六角形の胞を見た。レイリー（**1916**）は浮力でこれを説明しようとしたが、ピアソン（**1958**）は、薄い層では表面張力の差が先に効くことを示した——本稿の表でも、ミリメートルの層では表面張力の差の側が桁違いに先である。

観察 4.3

論文**452** と並べる。**452** は、ワインの涙のように液を持ち上げているのが表面張力そのものではなく、その差であることを示した——ここでも温度がつくる表面張力の差が液を動かし、層が薄いほどその側が勝つ。

観察 4.4

言わないこと。臨界値は一つの境界の置き方での文献の値で、自前で解いていない。表面の汚れで表面張力の温度変化は弱まる——示したのは、清浄な水と一つの境界の置き方での、厚さによる入れ替わりである。

5. 点呼と結び

1. 比は厚さの二乗で動く（計算 2.1）：温度差によらない。
2. 強さの等しい厚さ **8.7742 mm**（計算 2.1）：水 **20 ℃**。
3. 毛管長と同じ形（観察 2.2）：論文**309**。
4. **1 mm** で比 **646.98**（計算 3.1）：表面張力の差が先。

5. **50 mm で比 0.258792**（計算 3.1）：浮力が先。
6. 入れ替わり **25.4358 mm**（計算 3.2）：閉じた式と根の探索。
7. d^* の **2.898928 倍**（計算 3.2）：臨界値の比の平方根。
8. **強いと先に動かすは別の問い**（観察 3.3）：本稿の芯。
9. **厚さが分離子**（観察 4.1）：下なら表面張力の差、上なら浮力。
10. **ベナールの胞は表面張力の差の側**（観察 4.2）：ピアソン。

結び：下から温めた液の層を動かす力は二つある。温まって浮く浮力と、温まった表面が弱くなる表面張力の差である。二つの強さの比は厚さの二乗で動き、水 20 ℃ では 8.7742 mm で等しくなる。臨界値が違うので、先に始まる側が入れ替わるのは 25.4358 mm で、1 mm の層では表面張力の差が 646.98 倍小さい温度差で先に液を動かす——ベナールが見た薄い層の胞は、表面張力の差の側だった。分離子は、層の厚さである。既刊との位置——論文452 の表面張力の差が、ここでは温めた層を動かす。正直に言えば——臨界値は文献の値で、表面の汚れがあれば入れ替わりの厚さは動く。

参考文献

1. Bénard, H. (1900). Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. *Revue générale des sciences pures et appliquées*.
2. Nield, D. A. (1964). Surface tension and buoyancy effects in cellular convection. *Journal of Fluid Mechanics*.
3. Pearson, J. R. A. (1958). On convection cells induced by surface tension. *Journal of Fluid Mechanics*.
4. Rayleigh, Lord (1916). On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side. *Philosophical Magazine*.
5. 山岸勇輝 (2026).『重力と表面張力を分ける長さは、材料の寸法ではない』[論文309]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22172337
6. 山岸勇輝 (2026).『液を持ち上げているのは表面張力ではなく、表面張力の差である』[論文452]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22732842

— *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)