浮くか沈むかを決めるのは密度ではなく接触角で、重い鉱物が浮き軽い鉱物が沈む粒の大きさがある

— 半径 **0.225167〜0.836686** mm の粒では、水との密度差が **3.939394** 倍の方鉛鉱が浮き、石英が沈む

— 分離子は、粒を泡に留める表面の濡れが、水中の重さに勝つか — [論文764]

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

鉱石を砕いて水に入れ、泡に付けて浮かせて分ける。重いものは沈むはずなのに、重い鉱物のほうを浮かせることができる。浮くか沈むかを決めているのが密度か接触角かを、泡に留める力と重さの釣り合いで数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、泡が付く得は、接触角が大きいほど大きい——$\gamma(1-\cos\theta)$ は 10 度で **1.093842**、80 度で **59.497331** mN/m（第2節）。 第二に、泡に留める力の係数は $\sin^2(\theta/2)$ である——10 度で **0.007596**、80 度で **0.413176**（第2節）。 第三に、浮く粒の大きさには上限がある——方鉛鉱は 80 度で **0.836686** mm、石英は 10 度で **0.225167** mm（第3節）。 第四に、これが本稿の芯である。重い鉱物が浮き、軽い鉱物が沈む粒の大きさがある——半径 **0.225167〜0.836686** mm では、密度差 **3.939394** 倍の方鉛鉱が浮き、石英が沈む（第3節）。 第五に、同じ接触角なら、密度が効く——浮く半径は密度差の平方根に反比例し、方鉛鉱と石英の比は **0.503831**（第3節）。 第六に、分離子は、粒を泡に留める表面の濡れが、水中の重さに勝つかである——「重いものは沈む」は、表面の濡れを言うまで、どちらが浮くかが決まらない（第4節）。 キーワード：浮遊選鉱、接触角、捕収剤、泡に留める力、浮く粒の大きさ、密度と濡れ。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない――浮遊選鉱が表面の濡れで鉱物を分けること、捕収剤が接触角を上げること、泡に付いた球を留める毛管力の最大が $2\pi R\gamma\sin^2(\theta/2)$ で近似されること、浮く粒の大きさに上限があることは、いずれも既知である（グエン＆シュルツェ 2004、フュアステナウほか 2007）。静的な釣り合いだけを見る――泡に付くまでの時間、乱流で剥がされる力、泡の大きさ、粒の形は扱わない。力の式を近似として置く――平らな界面に置いた球の毛管力の最大を使い、泡の曲がりや浮力の細部は入れない。値は代表値である――密度 7500・2650・1300 と接触角 10・40・80 度は比べるための値である。実在の選鉱を主張しない――個別の鉱山の条件や薬剤は扱わない。既刊との関係：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――その射程注記は「接触角を扱わない――$\cos\theta=1$（完全濡れ）で計算する」と明記していた。ここでは接触角が表面張力の効きを $\sin^2(\theta/2)$ で削り、浮く大きさの上限が接触角と密度差の両方で決まる。論文722 も引く――そこでは接触角が毛管圧の符号を変えた。ここでは接触角が粒を泡に留める力の大きさを決める。加えたのは、泡が付く得と水が付く仕事を並べ、向きが逆であることを示したこと、力の係数の最大を格子で確かめたこと、三つの鉱物の浮く最大の半径を出したこと、重い鉱物が浮き軽い鉱物が沈む大きさの窓を示したこと、分離子を「濡れが重さに勝つか」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：表面張力を γ、接触角を θ とする。水が固体に付く仕事と、泡が水を押しのけて固体に付く得は次の二つである。泡に付いた半径 R の球を留める力の最大と、水中の重さが釣り合う半径が、浮く粒の大きさの上限 $R_{\max}$ になる。

$$W_{\text{水}}=\gamma(1+\cos\theta),\qquad W_{\text{泡}}=\gamma(1-\cos\theta),\qquad 2\pi R\gamma\sin^2\frac{\theta}{2}=(\rho_p-\rho_w)\,g\,\frac{4}{3}\pi R^3$$

$$R_{\max}=\sqrt{\frac{3\gamma\sin^2(\theta/2)}{2(\rho_p-\rho_w)g}}$$

$\gamma=0.072$ N/m と置く。

問い：浮くか沈むかを決めているのは、鉱物の重さなのか。

2. 泡が付く得と、留める力

計算 2.1：接触角ごとに、水が付く仕事、泡が付く得、力の係数を出した。

接触角	水が付く仕事	泡が付く得	力の係数 $\sin^2(\theta/2)$
10 度	142.906158 mN/m	1.093842 mN/m	0.007596
40 度	127.155200 mN/m	16.844800 mN/m	0.116978
60 度	108.000000 mN/m	36.000000 mN/m	0.250000
80 度	84.502669 mN/m	59.497331 mN/m	0.413176
90 度	72.000000 mN/m	72.000000 mN/m	0.500000

> **観察 2.2**
>
> 泡が付く得は接触角が大きいほど大きく、水が付く仕事はその逆に動く。80 度で泡の得は 59.497331 mN/m、水の仕事は 84.502669 mN/m——浮かせる向きの数は、水が付く仕事ではなく泡が付く得のほうである。

> **観察 2.3**
>
> 留める力の係数は $\sin^2(\theta/2)$ である。接触線の位置を角度の格子で動かして最大を探すと、三つの角でその値と差 0 で一致した——接触角 10 度では 0.007596 しか効かず、80 度では 0.413176 まで効く。

3. 重い鉱物が浮く大きさ

計算 3.1：三つの鉱物について、接触角ごとの浮く最大の半径を出した。

鉱物（密度）	10 度	40 度	80 度
方鉛鉱（7500）	0.113446 mm	0.445191 mm	0.836686 mm
石英（2650）	0.225167 mm	0.883611 mm	1.660646 mm
石炭（1300）	0.528064 mm	2.072252 mm	3.894560 mm

観察 3.2

同じ接触角なら、重いほど小さな粒しか浮かない。浮く半径は密度差の平方根に反比例し、40 度での方鉛鉱と石英の比は 0.503831 である——表面が同じなら、密度の順に沈む。

観察 3.3

これが本稿の芯である。重い鉱物が浮き、軽い鉱物が沈む粒の大きさがある。捕収剤で 80 度にした方鉛鉱は 0.836686 mm まで浮き、10 度のままの石英は 0.225167 mm までしか浮かない。その間の粒では、水との密度差が 3.939394 倍の方鉛鉱が浮き、石英が沈む——捕収剤は鉱物を変えず、接触角だけを変えて、浮く順を密度の順から入れ替える。

4. 分離子

観察 4.1

分離子は、粒を泡に留める表面の濡れが、水中の重さに勝つかである。濡れの効きは $\sin^2(\theta/2)$ で 0.007596 から 0.413176 まで 50 倍以上動き、重さの差 3.939394 倍を越えられる——「重いものは沈む」は、表面の濡れを言うまで、どちらが浮くかが決まらない。

観察 4.2

論文309 と並べる。309 は、重力と表面張力を分ける長さを完全濡れで出し、接触角は扱わないと明記した——ここでは接触角が表面張力の効きを削り、浮く大きさの上限が接触角と密度差の両方で決まる。

観察 4.3

論文722 とも並べる。722 は、接触角が毛管圧の符号を変えることを示した——ここでは接触角が、泡に留める力の大きさを決める。

> **観察 4.4**
>
> 言わないこと。付着までの時間も、乱流も、泡の大きさも、実在の選鉱も扱わず、力の式は近似である——示したのは、浮く順が密度ではなく接触角で入れ替わる大きさがあることである。

5. 点呼と結び

1. 泡の得 **59.497331 mN/m**（計算 2.1）：80 度。
2. 水の仕事 **84.502669 mN/m**（計算 2.1）：逆向き。
3. 力の係数 **0.007596**（計算 2.1）：10 度。
4. **0.413176**（計算 2.1）：80 度。
5. 方鉛鉱 **0.836686 mm**（計算 3.1）：80 度で浮く。
6. 石英 **0.225167 mm**（計算 3.1）：10 度で浮く上限。
7. 密度差 **3.939394** 倍（観察 3.3）：重いほうが浮く。
8. 比 **0.503831**（観察 3.2）：同じ接触角なら密度の順。
9. 窓 **0.225167〜0.836686 mm**（観察 3.3）：本稿の芯。
10. 濡れが重さに勝つか（観察 4.1）：分離子・論文309・722。

結び：浮くか沈むかを決めるのは密度ではなく接触角で、重い鉱物が浮き軽い鉱物が沈む粒の大きさがある。泡が付く得 $\gamma(1-\cos\theta)$ は 80 度で 59.497331 mN/m と接触角とともに大きくなり、泡に留める力の係数 $\sin^2(\theta/2)$ は 10 度の 0.007596 から 80 度の 0.413176 まで動く——同じ接触角なら浮く半径は密度差の平方根に反比例し、密度の順に沈む。ところが 80 度にした方鉛鉱は 0.836686 mm まで浮き、10 度の石英は 0.225167 mm までしか浮かないので、その間の粒では水との密度差が 3.939394 倍の方鉛鉱が浮き、石英が沈む——捕収剤は鉱物を変えず、接触角だけで浮く順を入れ替える。分離子は、粒を泡に留める表面の濡れが、水中の重さに勝つかである——「重いものは沈む」は、表面の濡れを言うまで、どちらが浮くかが決まらない。既刊との位置——論文309 は完全濡れで長さを出し接触角を扱わなかった。論文722 は接触角が符号を変えた。ここは接触角が浮く大きさを決めることを数えた。正直に言えば——付着の速さも乱流も泡の大きさも扱わず、力の式は近似である。

参考文献

1. Fuerstenau, M. C., Jameson, G. J., & Yoon, R.-H. (Eds.). (2007). *Froth Flotation: A Century of Innovation*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

2. Nguyen, A. V., & Schulze, H. J. (2004). *Colloidal Science of Flotation*. Marcel Dekker.

3. 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

4. 山岸勇輝 (2026). 『同じ水を止めながら通せるのは、液体と蒸気で孔の半径の効き方が違うからである』[論文722]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23015005

— 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)