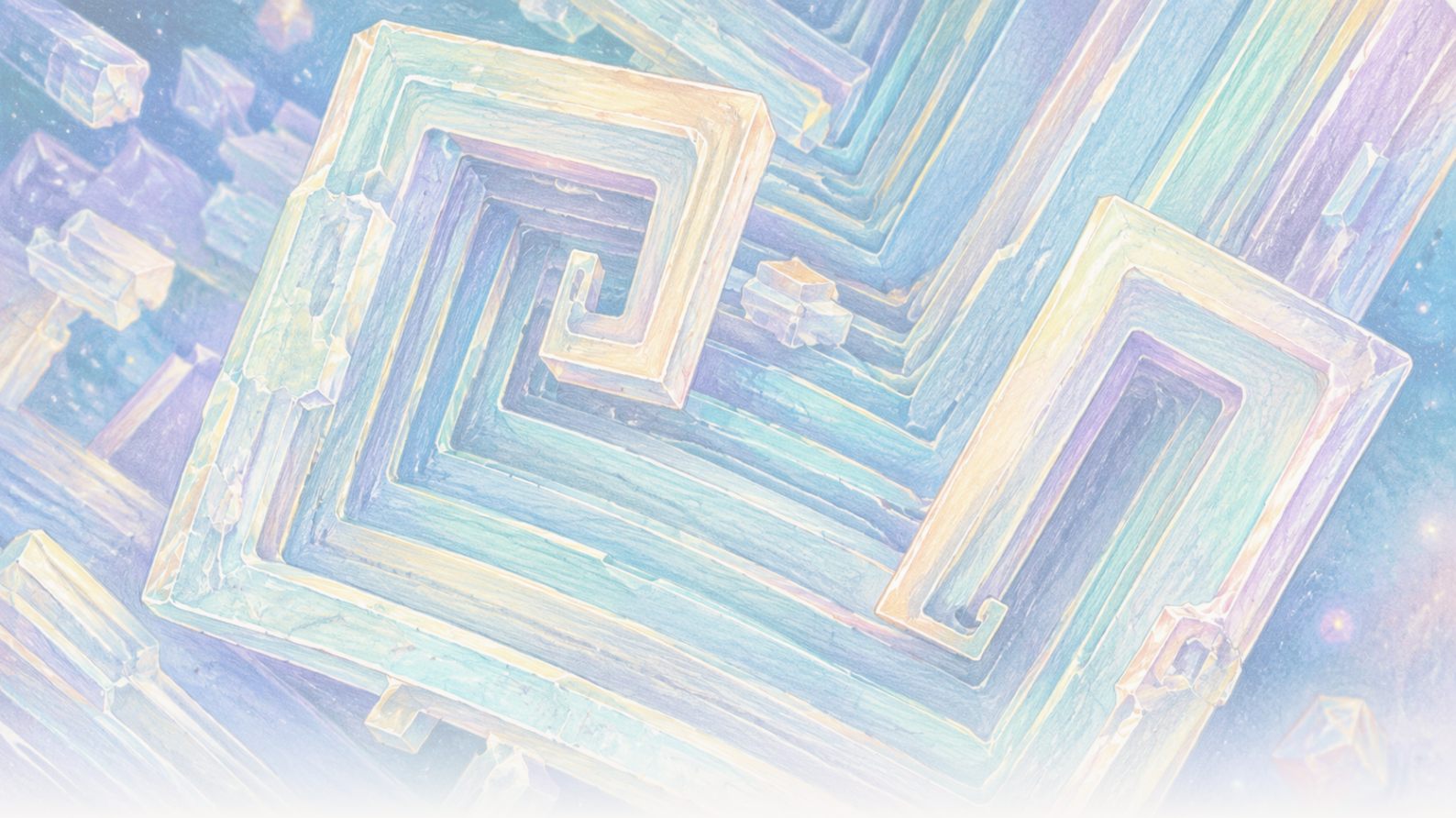


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

軌道上で食塩が中空の立方体に育った。変わったのは塩ではなく、重力がつくる塩水の流れだった

国際宇宙ステーションで成長させた塩化ナトリウム結晶には、一辺 *2〜8 mm* の中空で段差状の立方体が含まれていた。論文群が支持するのは輸送現象による説明だ。通常の沈降や浮力駆動流が大きく抑えられ、初期成長では拡散が支配的になった。結晶格子が新しい種類の塩に変わったわけではなく、工業プロセスが確立されたわけでもない。

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions*, Donald Pettit and Pietro Fontana, npj Microgravity 5, 25 (2019) · DOI: 10.1038/s41526-019-0085-0

軌道上で、普通の食塩が中空の段付き立方体に育った

その結晶は、建築物のように見えた。正方形の枠の内側にさらに正方形の枠が重なり、各面が階段状にくぼんでいる。

材料は普通の塩化ナトリウム、つまり食塩と同じ化合物だった。変わっていたのは物質そのものではない。周囲の塩水だった。

地球上では、センチメートル規模の液体の中で成長する結晶は沈んだり、壁や表面に触れたり、溶液を循環させる密度差の形成に関わったりする。国際宇宙ステーションでは、通常の沈降と浮力による流れが大きく抑えられた。その結果、一部の塩結晶は長い時間浮いたままになり、ゆっくり、より対称的に成長して、一辺 **2〜8 mm** の**ホッパー立方体**になった。

2011 年、2015 年、2019 年に発表された 3 本の論文が、これらの実験を記述している。合わせて読むと、輸送現象のきれいな教訓が見えてくる。溶けた物質が結晶表面へ届く仕方を変えるだけで、原子構造を変えずに目に見える結晶形を変えられることがある。

ただし、宇宙なら完全な結晶ができると示したわけでも、工業プロセスを確立したわけでも、新種の塩を発見したわけでもない。

立方体がホッパー結晶になる仕組み

通常の塩化ナトリウム結晶は、原子が立方晶構造をつくる。**ホッパー結晶**も立方晶であることに変わりはないが、面の中央より角や稜が先に成長する。その結果、各面に中空で段差状のくぼみができ、立方体がまず骨組みを組み立ててから壁を埋めようとしたように見える。

後年の ISS での例では、この成長様式が分かりやすく見える。ただし、これは今回扱う塩化ナトリウム 3 論文そのものの証拠ではなく、背景説明のための例だ。Donald Pettit による下の画像とタイムラプスは、別の塩である**塩化カリウム**が微小重力下で段付きのホッパー形態や巻き状形態をつくる様子を示している。

[figure_pair pending]

ISS で成長させた、巻き状ホッパー形態を示す塩化カリウム結晶の走査電子顕微鏡像 2 枚。これらは形態の後年の参考例であり、本記事で扱う 2011 年、2015 年、2019 年研究の塩化ナトリウム試料や測定結果ではない。

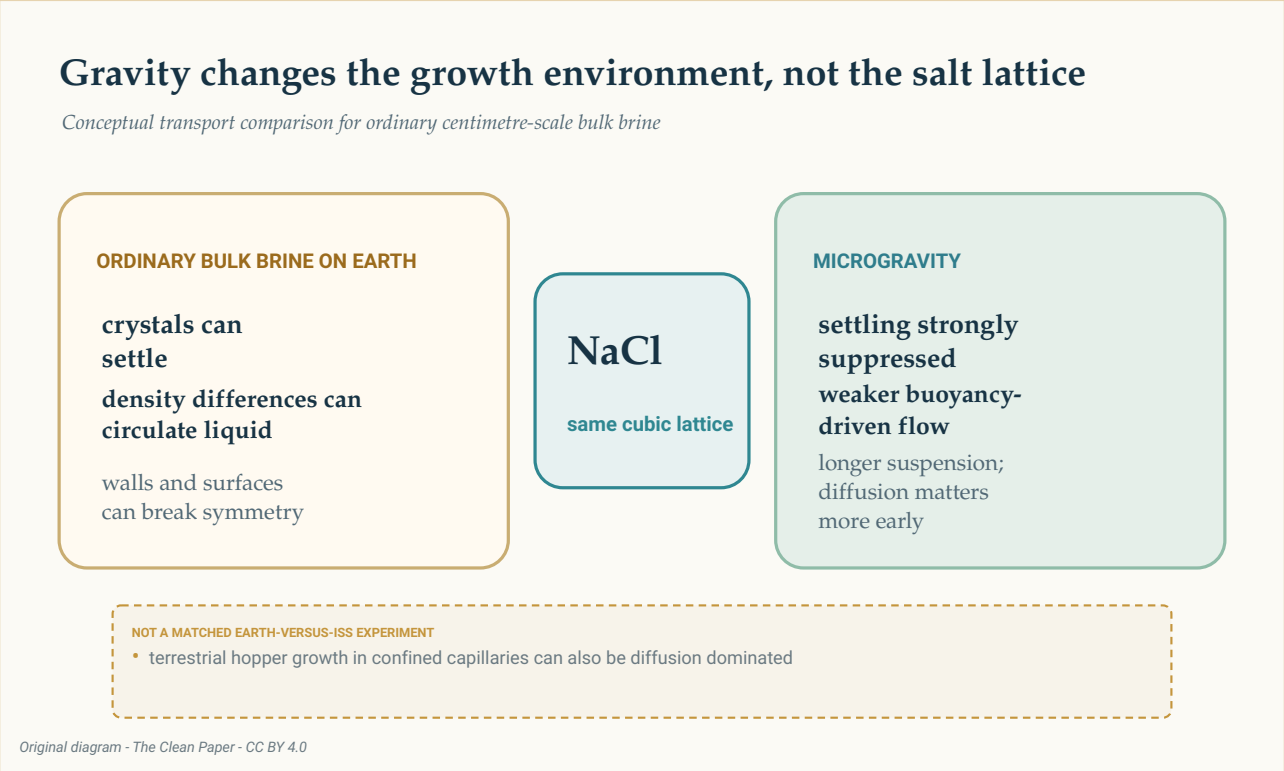
[video pending]

微小重力下の薄い水膜内で塩化カリウムのホッパー結晶が成長する後年のタイムラプス。角や稜が先に成長する様子を示すもので、本記事で解析する塩化ナトリウム実験やデータではない。

結晶は**過飽和塩水**から成長する。つまり、その条件で平衡なら保持できる量を超えて塩化ナトリウ

ムが溶けた塩水だ。ナトリウムイオンと塩化物イオンは液体中を移動し、結晶表面へ到達して取り込まれなければならない。

大まかに言えば、イオンを運ぶ方法は 2 つある。**拡散**は分子のランダムな運動によって、液体全体が循環しなくても濃度差に沿って溶質を運ぶ。**対流**は液体そのものが動くことだ。通常の重力下では、温度や濃度の小さな差でも密度を変え、浮力による循環を生みうる。さらに結晶そのものが**沈降**、つまり液体中を落下することもある。



同じ塩化ナトリウム格子を両環境に置いた概念比較。地球上の通常のバルク塩水では沈降、浮力循環、表面との接触が起こりうる。微小重力では前二者が強く抑えられ、結晶がより長く浮遊し、成長初期には拡散の重要性が増す。これは地球と ISS を条件一致させた比較実験ではない。

The Clean Paper CC BY 4.0

この実験は、軌道上の微小重力実験室である国際宇宙ステーションで行われた。**微小重力**は重力がゼロという意味ではない。2019 年の論文は、地表重力のおよそ 120 万分の 1、すなわち 1.2 マイクロ g 程度の残留加速度と、ゆっくりした周期的な液体運動を報告している。環境は輸送のバランスを変えたのであって、塩水を完全に静止させたわけではない。

ミリメートル級の立方体へ至る、ゆっくりした成長

2019 年研究は、ISS で塩水から水が蒸発する過程で成長したホッパー立方体に注目した。報告された立方体の一辺は **2〜8 mm**。成長速度は**毎分 0.34〜1.0 µm**（約 **1 日 0.49〜1.44 mm**）で、平均は**毎分 0.68 µm**、標準偏差は 0.23 だった。

この平均速度なら、一辺 8 mm まで成長するのにおよそ 1 週間かかる計算になる。ただしこれは推定であり、1 個の結晶の全成長段階をタイムラプスで測定した値ではない。

著者らが推定した過飽和度は **1.002 未満**だった。対して、比較に引用された地上研究では、1.45 を超えるはるかに高い過飽和度のもと、毎秒 10〜110 μm という速度で数秒から数分成長し、通常は 250 μm 未満の立方体ができるとされていた。

この比較は参考にはなるが、条件を一致させた比較ではない。ISS 結晶と地上文献の結晶は、同じ研究チームが同時に、同一条件で地球側と軌道側を走らせた実験から得られたものではない。重力以外にも容器、界面、手法の違いが影響しうる。

したがって最も強く言える対比は記述的なものだ。この ISS 観察では、ホッパー立方体が低い過飽和度のもと、日から週の時間スケールでゆっくり成長し、ミリメートル級に達した。

初期は拡散が支配、後期には流れも関与しうる

2019 年論文は、液体の運動による輸送と拡散による輸送を比較するために**ペクレ数**を使った。1 未満なら拡散の方が重要で、1 を超えるとバルク流れが支配的になりうる。

> **スイッチではなく比率**
>
> ペクレ数は 2 つの輸送速度を比べる指標である。1 未満なら液体が完全に静止し、1 を超えた瞬間に純粋な対流になる、という境界線ではない。ここでは結晶サイズと周囲の塩水に仮定する流速によって値が変化した。最小の結晶では明らかに拡散支配だったが、より大きな容器内の最大結晶では、ゆっくりした液体運動が意味をもつ領域に入った可能性がある。

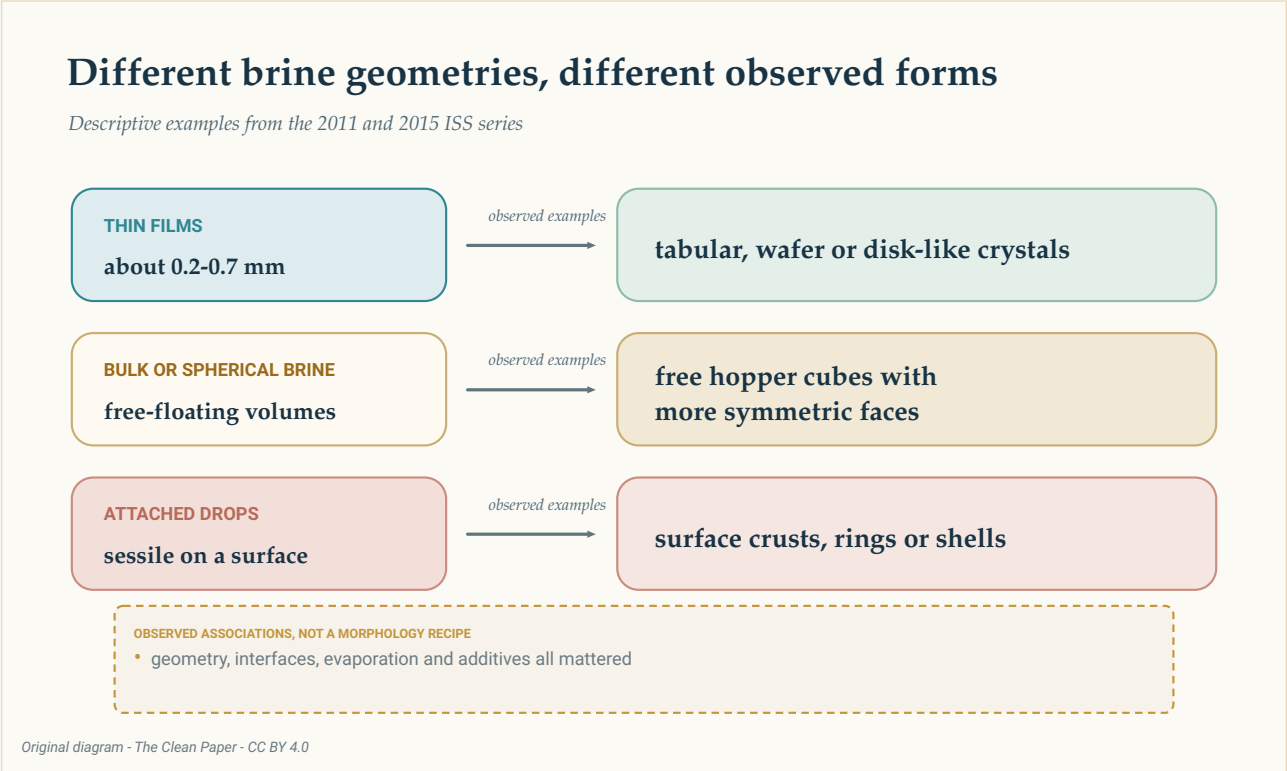
直径およそ 0.8 cm の小さな液滴では、推定ペクレ数は核生成付近の約 **0.0004** から最終測定サイズで約 **0.03** まで上昇した。拡散が支配的なままだった。

2〜3 cm の結晶化容器では、50 μm の核で約 **0.05** だった推定値が、一辺 4 mm では約 **4** まで上がった。初期成長は依然として拡散支配だったが、後半にはゆっくりした周期運動が寄与した可能性がある。

したがって「微小重力が対流をなくした」と言うのは誤りだ。通常の浮力駆動循環と沈降は大幅に減ったが、残留加速度も測定可能な流れも残っていた。

液体の形も重要だった

2011 年論文と2015 年論文は、さらに広い状況を示した。薄膜、厚めの液体層、ほぼ球状の塩水、表面に付着した液滴での塩結晶化が報告されている。



資料群で観察された例を 3 行で要約した図。薄膜では板状または円盤状、バルク・球状塩水では自由に浮くホッパー立方体、付着液滴ではクラスト、リング、殻状形態が見られた。これは記述的な関連であり、レシピや保証ではない。

The Clean Paper CC BY 4.0

2011 年研究では、厚さ約 0.2〜0.7 mm の薄膜から薄いウェハ状・板状結晶ができた。自由に浮く塩水では、より対称的な側面とホッパー立方体が形成された。

2015 年の観察には、厚さ 0.2〜0.7 mm の薄い液層、約 4〜6 mm の厚い層、直径約 20〜32 mm の表面付着半球状液滴などが含まれた。報告された形態には、板状ホッパー、立方体、円盤状結晶、樹枝状結晶、リング、殻がある。ある観察群では、ポリエチレングリコールの添加によってホッパー成長が抑えられた。

著者ら自身、2015 年の研究を、乗員の非勤務時間に在庫管理されていない物品を用いて行った観察と位置づけており、厳密に計画された研究プログラムではない。これらの例は、液体の形状、界面、蒸発、添加物のすべてが影響したことを示す。一つの容器形状が必ず一つの結晶形を生む、という決定論的なレシピを示すものではない。

結晶格子が新しい種類の塩になったわけではない

結晶構造と**形態**の違いは重要だ。

構造とは、繰り返し並ぶ原子配置である。形態とは、外から見える形だ。2011 年論文の中性子回折では、地上試料と比べて塩化ナトリウムの構造や格子定数が変化したとは認められなかった。軌道上の試料には、結晶内部に小さな溶液ポケットが閉じ込められた**塩水包有物**もあった。

したがって、大きく対称的な外観は、より純粋な材料や無欠陥材料の証拠ではない。この資料群のどの論文も、化学純度の向上、機械性能の改善、特定デバイスへの適性を報告していない。

重力は間接的に作用した。沈降、液体循環、向き、表面との接触を変えたのであって、塩化ナトリウム結合の強さを変えたり、新しい原子相をつくったりしたわけではない。

この実験から何が学べ、何は学べないのか

論文群は輸送現象による説明を支持する。通常の沈降と浮力駆動流を強く抑えることで、一部の結晶はより長く浮遊し、より対称的な条件でゆっくり成長できた。測定されたサイズ、速度、形態は直接観察だが、過飽和度、成長履歴、ペクレ数には推定が含まれる。地球との比較も、一部は別の既報実験に基づいている。

この資料群全体をまとめる一つの明確な分母はない。3 本の論文にまたがる個々の結晶、結晶化容器、選ばれた観察例が組み合わされている。それらを一つの総数に足し合わせれば、実際には存在しなかった均一な実験だったかのような印象を与えてしまう。

製造技術を主張するために必要な証拠も報告されていない。処理量、生産コスト、エネルギー使用量、歩留まり、信頼性、有用な材料性能は測定されていない。2015 年シリーズは探索的だった。地上比較は条件一致した対照群ではない。そして、大きいことや見た目が印象的であることは、用途上優れていることと同じではない。

天然の塩鉱床では、センチメートル級のホッパー立方体が見つかることがあり、塩水を含む泥の中に浮いた状態で存在する例もある。2019 年論文は、ゆっくりした拡散支配成長との類似を示唆する。興味深い比較ではあるが、天然と軌道上のホッパー結晶が同じ機構でできることを証明したわけではない。

要点

国際宇宙ステーションで蒸発する塩水から育てた塩結晶には、一辺 2〜8 mm の中空で段付きのホッパー立方体が含まれていた。論文群は輸送現象による説明を支持する。微小重力が通常の沈降と浮力駆動流を大きく抑え、初期には拡散が支配する一方、結晶が長く浮遊してゆっくり成長できた。液体形状、界面、蒸発、添加物も形態に影響した。中性子回折では新しい塩化ナトリウム構造は示されず、塩水包有物も残っていた。これは範囲の限られた材料科学のケーススタディであり、宇宙が完全な結晶を作ることや工業プロセスを可能にすることの証明ではない。

冷静に見ると

論文群が示していること： ISS 上の複数の塩水形状で、ミリメートル級の塩化ナトリウム・ホッパー立方体を含むさまざまな形態が成長した。2019 年のホッパー立方体は、低い推定過飽和度でゆっ

くり成長し、初期には拡散が支配的だった。

解釈されていること：沈降と浮力駆動流が強く減ったことで、より長い浮遊と、より対称的な成長が可能になった。大きい結晶化容器では、後期にゆっくりした液体運動が影響した可能性がある。

示していないこと：新しい原子構造の塩、より純粋または無欠陥な結晶、条件を一致させた地球対ISS 試験、微小重力の普遍的な優位性、商業製造ルート。

主な限界：形状や選択例の異なる 3 つの別研究をまとめた資料群であること。地上比較が研究間比較であること。輸送量の一部が推定値であること。探索的で体系化されていない部分があること。プロセス経済性や性能試験がないこと。

一般の読者はどの程度信頼すべきか？報告された軌道上の形態と遅い成長が実在することには高い信頼を置いてよい。一連の観察を最もよく説明するものとして輸送現象の説明には中程度の信頼がある。この食塩実験から宇宙製造全般への約束を引き出す主張には、ほとんど信頼を置くべきではない。

出典

Pettit and Fontana, Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions, npj Microgravity 5, 25 (2019)
https://doi.org/10.1038/s41526-019-0085-0

Fontana, Schefer and Pettit, Characterization of sodium chloride crystals grown in microgravity, Journal of Crystal Growth 324, 207-211 (2011)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.04.001

Fontana, Pettit and Cristoforetti, Sodium chloride crystallization from thin liquid sheets, thick layers, and sessile drops in microgravity, Journal of Crystal Growth 428, 80-85 (2015)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.026