



Title	宇宙実験がついに私たちの手に！ : 「きぼう」での氷結晶成長実験
Author(s)	古川, 義純
Description	特集 宇宙と化学のつながり. 宇宙ステーションでの研究紹介
Citation	化学, 64(8), 38-42
Issue Date	2009-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42571
Type	journal article
File Information	urukawa_chemistry.pdf



宇宙実験がついに我々の手に！—『きぼう』での氷結晶成長実験—

古川義純（北海道大学低温科学研究所）

2008年11月14日午後7時55分（米東部時間）、私たちの宇宙実験装置を搭載したスペースシャトル「エンデバー」が、NASA ケネディスペースセンターの35A発射台から打ち上げられた。この装置は、国際宇宙ステーション（International Space Station; ISS）に設置された日本の唯一の有人宇宙施設である「きぼう」に運ばれ、微小重力環境（一般には無重力環境と呼ばれることが多いが、実際には重力がないわけではないので、研究の世界ではこう呼ぶ。）で氷の結晶を作ってみようというものである。（図1）

結晶というと、ダイヤモンドや鉱物に代表されるように、平らな表面で囲まれた対称性の良い多面体が頭に浮かぶ。しかし、結晶は最初からある形を持っているわけではない。何もない空間に小さな赤ちゃん結晶が誕生し、それが“成長”することで形が作られるのだ。結晶はまさに生きていたのであって、その証しとして結晶の形も時間とともにどんどん変化していく。では、我々のもっとも身近にある結晶である氷の形は、どのようにして作られるのだろうか？この素朴な疑問に答えを出すのが、私たちの行った宇宙実験の目標である。

結晶の形はどう決まる？

さてはじめに、結晶の形はどのようにして決まるのかをおさらいしておこう。結晶は、過冷却あるいは過飽和の状態（すなわち、非平衡状態）におかれると、結晶界面（表面）で分子（原子）を取り込み、界面は前進する。これが結晶成長である。この時、界面がもとの平らな形を保ったままで移動するのか、それとも時間とともにより複雑な形へと発展していくのかで、結晶の外形は大きく変化するであろう。前者は安定成長、後者は不安定成長と呼ばれ、安定から不安定への移り変わり（形態不安定化という）が、結晶の形を決めている。

形が安定か不安定化かは、結晶の界面に生じた凹凸をさらに大きな凹凸へと発達させようとする力（不安定化の力）と、凹凸を減衰させてもとの平らな状態に戻そうとする力（安定化の力）のせめぎあいによって決まる。この力が何によって生じるのかを考えることが、結晶形の問題を考える第一歩である。

一般に、不安定化の力は、結晶化するとき発生する凝固の潜熱が、どのようにして周囲に逃げていくかに関係する。潜熱のために結晶の温度は上昇し、結晶周囲には温

度分布（すなわち、熱の拡散場）が生じる。界面に凹凸があると、出っ張りの部分では、局所的に温度勾配が急になるので熱が逃げやすくなる。このため、さらに結晶化が促進されて、その部分はさらに前に出っ張るであろう。これに対して、窪みの部分は逆に結晶化が抑制されるので、結局凹凸はますます発展することになる。

この不安定化の力だけしか働かないと、結晶形は際限なく複雑化するので、これを抑制するのが安定化の力である。この力は、結晶界面が丸い場合（ラフ面）と平らな場合（ファセット面）では異なる。ラフ面の場合は、界面の出っ張りが大きくなると表面積が大きくなり界面自由エネルギーの不利が大きくなるので、面積を縮小しようとする力（ギブス・トムソン効果と呼ばれる）が働く。ファセット面の場合は、界面で分子を取り込むときの抵抗を変化させることで平らな面を維持しようとする。このような結晶界面の形態不安定化は、安定化の力の違いで前者をマリNZ・セカーカ不安定、後者をチェルノフ不安定と呼ぶ。

なぜ氷なのか

氷の結晶ではどのような不安定化が起こるのであろうか？ 過冷却水中で成長する氷のパターンの時間発展を見ると、成長開始時は薄い円盤であるが、やがて円盤の縁で生じた凹凸をきっかけに不安定化が起こり、最終的に六方対称の発達した樹枝状となる（図2）。結晶形が完全に二次元であるとする、結晶の縁は丸いのでマリNZ・セカーカ不安定の典型的な例のように思える。しかし、実際には厚みの分布をもち、平らな円盤面と縁の丸い面で囲まれた複雑な三次元パターンである。すなわち、一つの結晶で平らな面と丸い面が存在し、それらの不安定化を決めるしくみが異なる。氷の結晶では、マリNZ・セカーカ不安定とチェルノフ不安定が連動して形態不安定化が起こると考えられる。このような複雑な不安定化は、他の結晶ではほとんど見られない大きな特徴で、そのしくみを明らかにすることは大変興味深い。

過冷却水中での氷の成長は、金属や半導体と同じように融液からの結晶成長であり、その成長のしくみは共通と考えられる。しかし、金属や半導体を融かすには極めて高温が必要で、そのような環境で結晶成長の様子を観察することはほとんど不可能であるが、氷では簡単に実現できる。すなわち、氷の融ける温度は、我々には冷たいが氷にとっては灼熱の温度なのだ。氷の結晶成長のしくみを探ることは、より良質の金属や半導体結晶を生成するためのヒントを与えることになる。

一方、氷は地球上でもっとも普遍的に存在する結晶体であり、寒冷圏で起きるさまざまな自然現象の多くは、氷の相変化の進行に伴って起きることは容易に想像できよ

う。たとえば、気象現象、南極や北極での氷の生成、地球環境、生物の耐寒戦略など、あらゆる局面で氷は重要な役割を果たす。氷の結晶成長の研究は、これらの自然現象の基本原理を探ることにも役割を果たす。

なぜ宇宙を目指すのか

では、私たちが宇宙での実験を目指す理由はどこにあるのだろうか？もちろん、宇宙で実験を行うことで、問題がすべて解決するなどとは考えていない。宇宙と地上の最も大きな違いは、重力の有無である。宇宙での実験は、重力の効果により陰に隠れてしまったり、あるいは改変されてしまったりして、地上では観察することが難しい現象に有効である。このような現象の代表格は、熱や物質の拡散、表面・界面張力などに関連する現象であろう。これらの複合的な現象として、結晶成長やパターン形成、流体现象、さらに燃焼などがある。“すぐれた実験条件の一つとして微小重力環境を上手に利用する”、宇宙実験ではこのような視点が重要である。

微小重力環境というのは、密閉した容器を自由落下させることで実現できる。数秒から 20 秒程度の短時間であれば、落下実験塔や航空機のパラボリック飛行でも実現可能である。しかし、これ以上長い時間を得るには宇宙に飛び出すしかなく、落下軌道が地球の ISS はその究極の施設である。

どのように実験を行うのか

過冷却水の中で氷を作ると結晶化の潜熱が出るので、結晶の温度が上がり温度の分布(熱拡散場)が生じる。このため、地上では必ず熱対流が発生し、流れの上流側と下流側では結晶の成長の様子が大きく変化し、結晶が本来持つ対称性が損なわれてしまう。これでは、結晶パターンの精密な解析を行うことは難しい。微小重力では、完全に熱対流を排除できるので、わずかな熱拡散場や温度勾配の変化などが結晶パターンに与える効果を見ることができる。氷結晶の成長には条件によっては数 10 分から数時間もかかるので、ISS の利用が不可欠である。

有人宇宙施設である「きぼう」での実験とはいっても、宇宙飛行士が実験作業に割ける時間は限られている。私たちの装置は、このことを十分に考慮して設計・製作がなされている。図 3 は、この装置に組み込まれた氷結成長システムの基本構造を示している。円筒形の結晶成長セル(直径 24mm、奥行 24mm)と核形成セル(直径 10mm 厚み 1mm)が、外径 1mm の細いガラスの管で結ばれている。結晶成長の試料としては、重水(D₂O)を使った。これは、H₂O より融点が少し高めで、密度や屈折率の温度依存

性も H₂O より大きいため、装置の設計や結晶成長の観察がわずかでも有利になると考えたからである。試料は、2つのセルとガラス管の中に完全に充填されている。また、2つのセルは、熱電冷却素子を使って電氣的に簡単に冷却でき、独立して温度制御が可能である。

結晶の生成は、地上から送信されるコマンドにより、次のような手順を踏むことで実現させる。まず、結晶成長セルの試料を所定の温度(過冷却状態)まで冷却する。試料全体の温度が安定し一様になったら、もう一方の核生成セルを一気に冷やして、この中で氷結晶を発生させる。その氷結晶は、核形成セルに接続したガラス管の中で成長を続ける。ガラス管の中では隣り合った結晶粒の成長にせめぎ合いが起こり、成長とともに少しでも前方に出た結晶粒が勝ち残る。その結果、ガラス管の中では最終的に1個の結晶だけになり、それがガラス管の先端まで達すると、結晶成長セル内部で氷の自由成長が開始する。隣りにある結晶からの影響を避けるために、結晶成長セルの中では結晶を1個だけ生成することが非常に重要である。私たちのシステムは、ガラス管に沿って氷を成長させることで、この作業を自動的に行っている。

この宇宙実験装置は、「きぼう」に設置してある溶液結晶化観察装置(SCOFと呼んでいる)に取り付けると、始めて稼動が可能になる。結晶のパターン発展の様子は、実験装置に内蔵した干渉計とSCOFの持つ干渉計により、二軸で同時観察できるようになっている。

この実験装置の最大の特徴は、可動部分がなく、セルの温度を制御するだけで結晶を自由に成長させることができることである。また、温度を上げて氷をすべて融かしてしまえば、完全にもとの状態に戻すことができ、何度でも実験が繰り返せる。宇宙で使用する実験装置はいったん故障を起こすと修理することも持ち帰ることも困難である。いかにシンプルで故障のない装置を工夫して作り上げるか、これが宇宙実験成功の鍵を握る。(図4)

いよいよ実験!

12月2日早朝(日本時間)に宇宙空間で初めての氷の結晶成長実験に成功した(図5)。得られた実験画像は、ただちに地上にダウンリンクされ、JAXAの筑波宇宙センターの「きぼう」管制室に届けられる。地上から実験の制御コマンドが発信されると、ほとんど数秒のうちに結果が反映された映像が手元に届く。まるで、実験装置が隣の部屋に置いてあると勘違いするほどで、宇宙で実験を行っているという感覚にはなかなかなりにくい。しかし、装置に何らかの不具合が生じると、その瞬間に” やっぱり、

宇宙”と実感する。

実験は、宇宙飛行士が動き回ることにより生じる重力のわずかな変動を避けるため、彼らの就寝時間帯をねらって実施した。最終的に予定を上回る 134 回の実験を繰り返し、今年 3 月に終了した。取得した画像データは、現在詳細な解析中であるが、すでにいくつかの注目すべき成果が予測されている。まず、樹枝状結晶では枝の長さや形も非常に同一性が高く、対称性が著しく改善された。しかし、それでもなお詳細に見ると 1 本 1 本の枝は少しずつ異なっている。すなわち、対流の効果ではなく、結晶成長セルの形や枝の配置、さらにはセルを作る材料の熱伝導率などに伴うわずかな熱流のゆらぎが結晶外形に反映される。また、円盤氷の底面は、微小重力環境では極端に抑制され、円盤の厚みがほとんど増加しない。このため、結晶の不安定化が抑制され、地上よりもより安定な成長の領域が広い。さらに、円盤の縁の形状が地上では常に厚み方向に非対称であったが、宇宙では対称的な場合も観察される。

これらの結果から、宇宙での結晶成長では結晶のパターンがより安定していて、形態不安定化が起こりにくい傾向が明らかである。もちろん、これはある程度予想はされていたのだが、もしかすると私たちは結晶パターンに対する熱対流の効果を見積もっていたのかもしれない。今後より定量的に詳細な解析が進むと、氷の結晶成長におけるパターン形成のしくみが明らかになっていくであろう。

宇宙実験の未来

これまでは宇宙実験というところかなり敷居が高く、そう気軽に使える実験環境ではないというのが印象であった。しかも、微小重力の中で科学実験を行うことの意義についても決して分かりやすいとはいえない。日本の唯一の有人宇宙施設である「きぼう」が本格的な稼動を始めたいま、宇宙実験の未来に一条の光がさしたことは確かである。しかし、この光を確かなものにしていくには、若い研究者の柔軟な発想が重要である。微小重力という魅力ある環境ではどんな新しい現象が見えるのだろうか？これを想像力豊かに探っていくこと、宇宙実験の未来はこの一点にある。

本実験の公式 web site:

http://kibo.jaxa.jp/experiment/theme/first/ice_crystal_start.html

図 1 : 宇宙ステーション「きぼう」(JAXA/NASA 提供)

図 2 : 結晶の形の不安定化のしくみ

図3：氷結晶パターンの発展過程を示す模式図

図4：氷の結晶成長システムの概念図

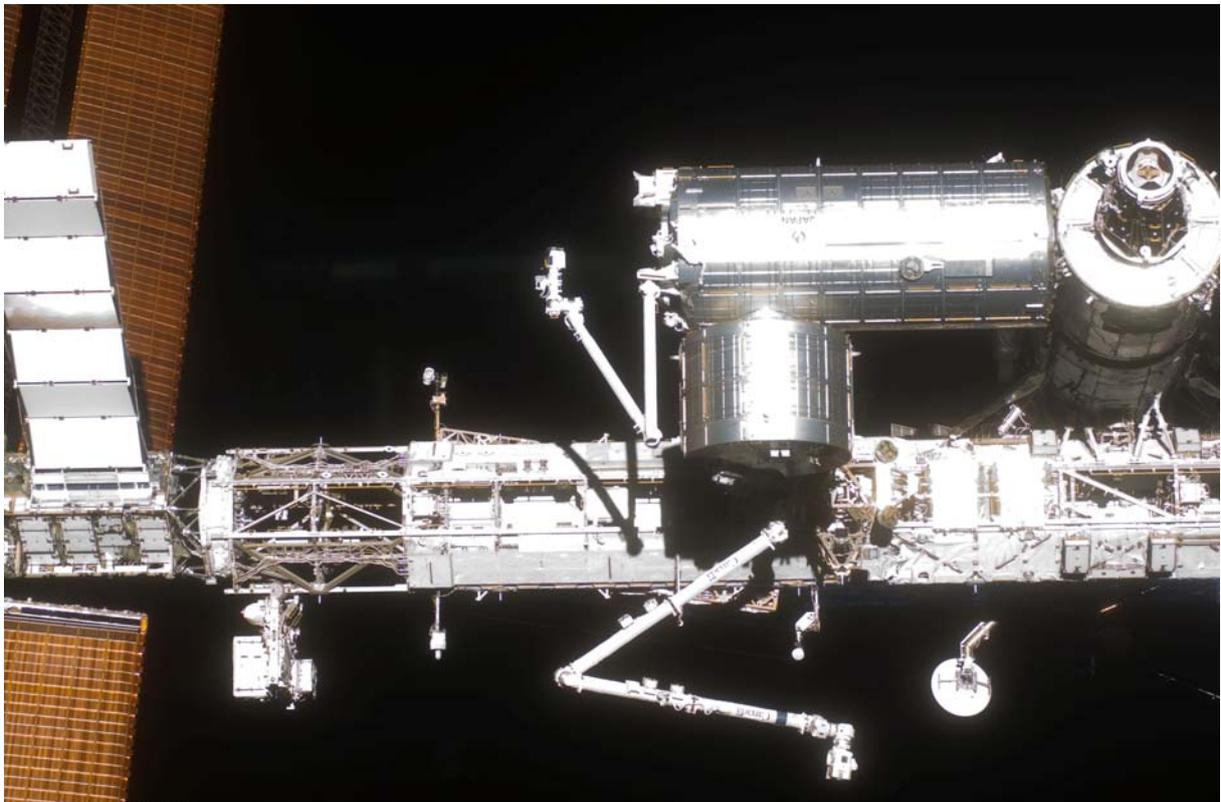
図5：「きぼう」船内に浮かぶ我々の実験装置。装置の大きさは、25cm×30cm×21cm。

(JAXA/NASDA 提供)

図6：宇宙で生成した氷結晶



ISS017E016225

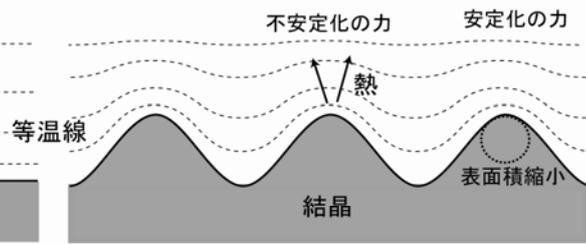


S124E010211

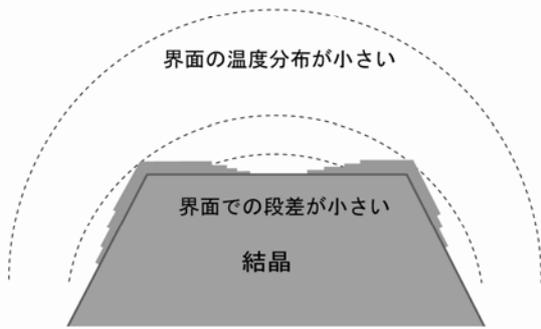
過冷却状態の温度



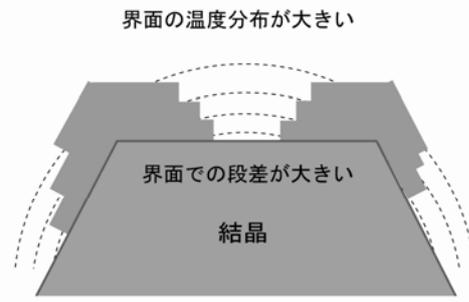
ラフ面の安定成長



ラフ面の不安定成長

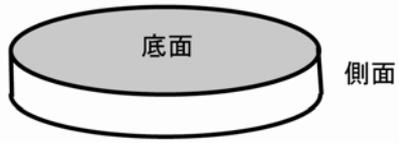


ファセット面の安定成長

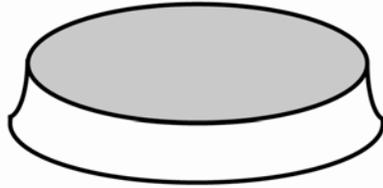


ファセット面の不安定成長

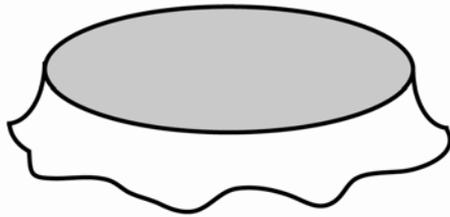
円盤成長



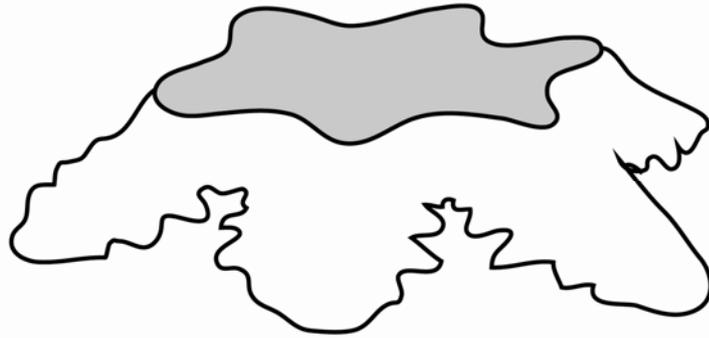
円盤の側面で不安定化

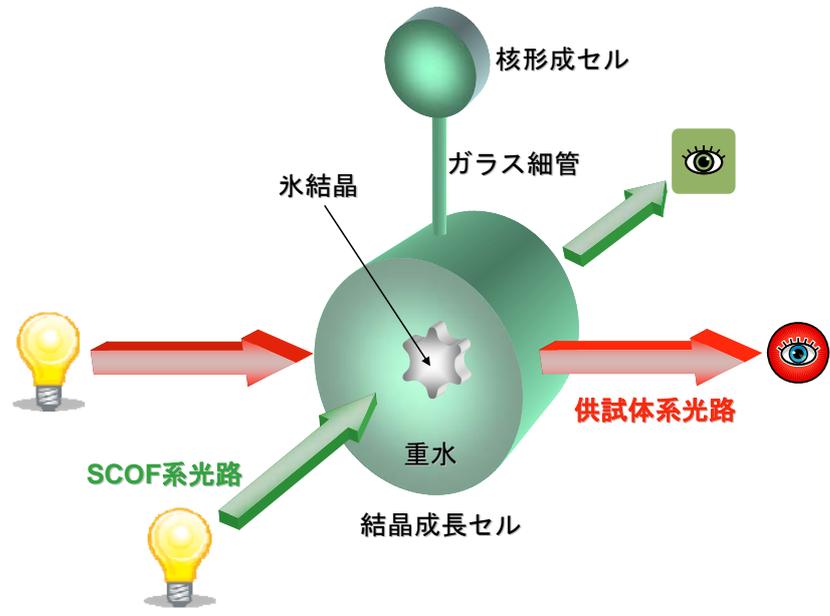


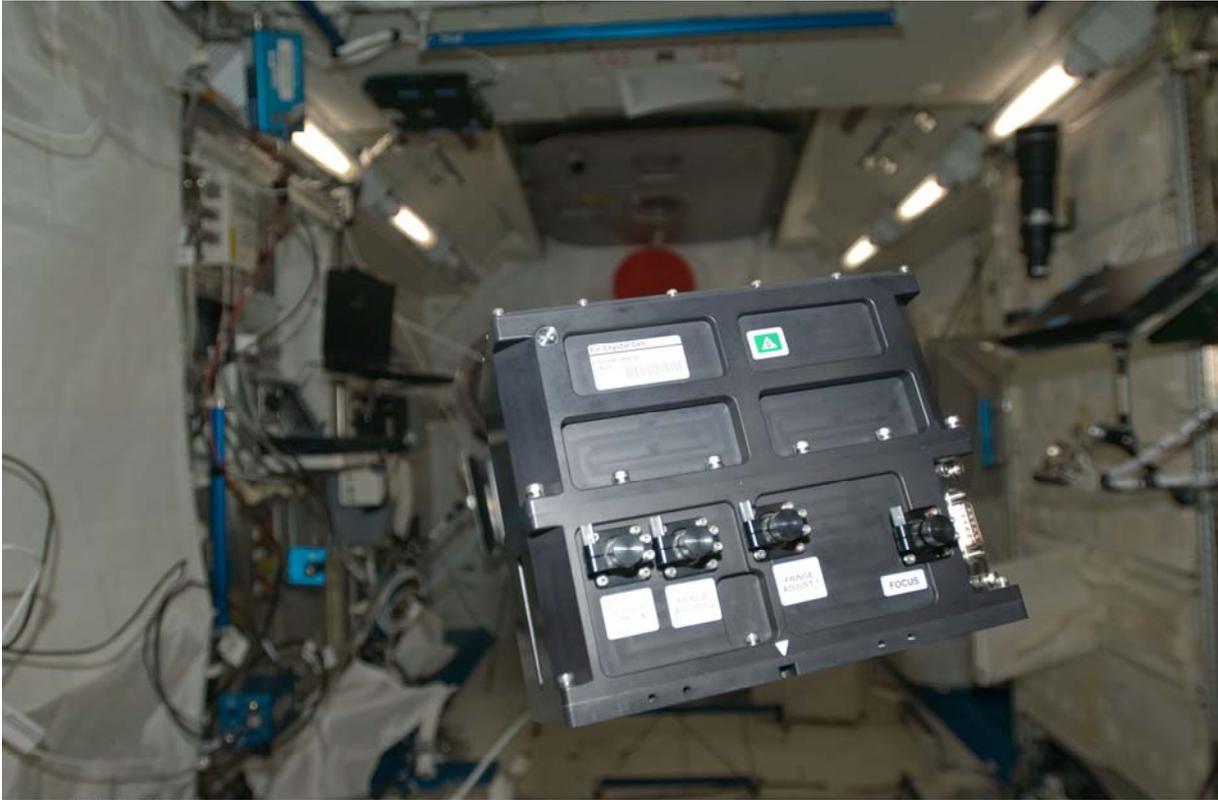
円盤の縁に沿って不安定化



樹枝状成長







ISS018E044440

