

## 冬の crystal

英語の辞書で結晶を意味する crystal を引くと、水晶、水晶製品、クリスタルガラス、専門用語として“結晶”が出てきます。この crystal の語源は、ギリシャ語の“透きとおる氷”という意味の“クリスタロス”に由来しており、氷とは切れない関係にあります。氷の結晶である雪は、温度や湿度によって微妙に形を変えて、角柱や六角形の薄い板になって降ってきます。角の飛び出た六角形も単結晶 (single crystal) だそうです。そうでないものもあるそうですが、雪の形からも分かるように氷の結晶構造は六角形になっていて、条件によって優先的に成長する方向が変化して複雑な形になっています。厚さも場所によって変化していることもあって、光を当てると微妙な濃淡が加わり美しく見えます。また、冷たい洞窟などで見られる滴り落ちる水滴によって成長した氷の柱（氷筍<sup>ひょうじゆん</sup>）も、単結晶のものがあります。氷筍を輪切りにした面では、摩擦係数がかなり小さくなることが知られています。長野冬季オリンピックの際、エムウェーブ（長野市オリンピック記念アリーナ）では氷筍量産装置によって製造された氷筍を薄く輪切りにしてリンクに貼りつけて、滑るリンクを整備したそうです。

## 姿を変える単結晶

単結晶と言われると、雪の結晶以外にも、ダイヤモンドをはじめとする宝石や、半導体で使用されるシリコンの単結晶を思い浮かべる方も多いと思います。単結晶の定義を調べてみました。単結晶の定義は、同じ方向を向いている結晶の部分を単結晶と言うとあります。また、原子・分子が空間的に規則正しい配列になっているということを付け加えている文献もあります。

ジェットエンジンの中でも、単結晶超合金と呼ばれる部品が使用されています。電子顕微鏡で観察すると凝固させた直後にはいわゆる単結晶ですが、強くするための熱処理後の単結晶超合金の組織は、正方形の第二相が同じ向きに配列している組織となっています。この第二相は半分以上を占めますが、主にニッケル (Ni) とアルミニウム (Al) が 3 : 1 に近い割合で規則的に配列した化合物から成っています。実際、成分や厳密に温度を管理した熱処理によってサイズや形状を制御しています。さらに、このサイコロ状の第二相は、使用中に形が変化します。同様に電子顕微鏡で観察すると帯状になった第二相が見えます。図中の模式図で示しましたが、立体的に見れば、第二相は板状になった第二相が積み上がっていることが分かります。サイ

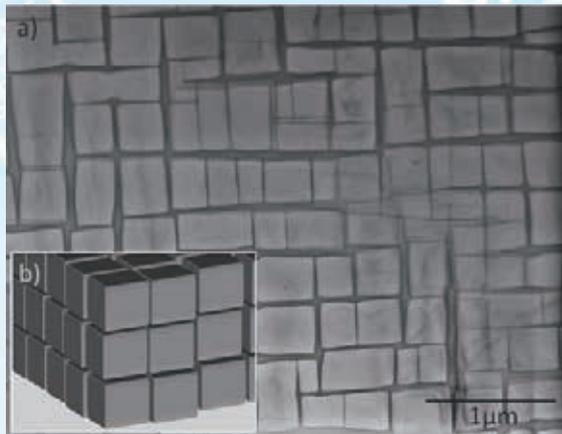
# 生きている単結晶

技術開発本部

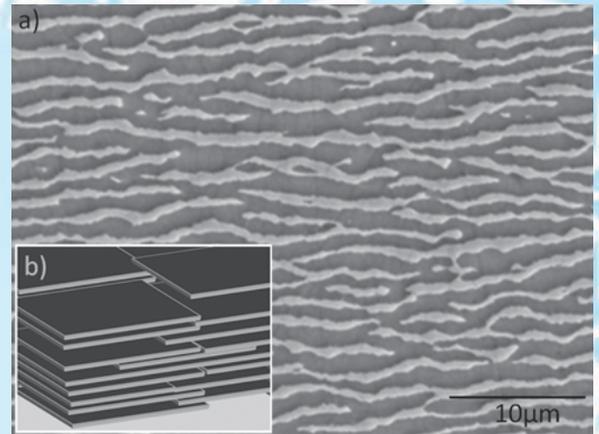
吉澤 廣喜



洞窟で成長した氷筍  
(提供：内田博幸)



a) 正方形になって配列した第二相  
b) 空間では、サイコロ状になっている  
熱処理終了後の組織



a) いかだ状になった第二相  
b) 実際には、板状になっている  
使用中に変化した組織

コロが板に姿を変えるのです。板の向きは使用中にかかる力の方向で決まります。超合金屋の世界では、断面写真から“raft”（いかだ）構造と呼ばれています。高温環境に耐えつつ、いかだになり、生きていくかのように形を変えながら強くなるのです。

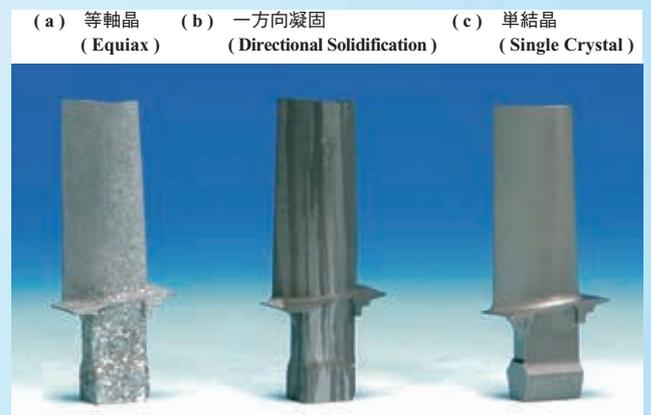
### 高性能な単結晶

燃料コストの増大や環境問題への対応に伴って、新型のジェットエンジンや発電用ガスタービンではガス温度の向上や軽量化が進められています。それに伴って単結晶合金の出番が増えています。現在単結晶合金は、戦闘機はもとより皆さんが快適に搭乗している大型ジェット機のエンジンで、燃料が燃える燃焼器の後ろ側の1000℃を超える高温雰囲気中でジェットエンジンの動力を作る翼（ブレード）として使用されています。

今から30年前、これからは単結晶ブレードの時代だと説明を受けたものです。一般に、金属の結晶はその方向によって材料強度が異なります。また、結晶同士の境目である粒界を強くすることを考える必要があります。単結晶になれば、高温強度の高い方向で結晶を並べて、粒界を考えずに強度だけを考えれば良いことになります。実際、超合金の単結晶ブレード中には、粒界は存在しません。金属の結晶は、その結晶方向によって腐食のされ方が異なるので、結晶を判別することができます。左側が多数の結晶できている等軸晶ブレードです。写真ではブレードの付け根の方が大きな結晶になっています。中央が一方向凝固ブレードと呼ばれ、下側の付け根から幾つかの結晶が長く伸

びているのが分かります。右側が単結晶ブレードで、等軸晶や一方向凝固ブレードとは異なり、一つの結晶になります。単結晶ブレードは高温に加熱したセラミックス型の中へ、こちらも高温で溶解した超合金を流し込み、下側から順に凝固させて作ります。結晶の成長方向によって成長速度が異なることを利用することで結晶を選んだり、あるいは種結晶をはじめに使用したりすることで希望の方向に結晶の向きをそろえます。

超合金の単結晶は主成分がニッケルなのですが、高温での強度向上や酸化防止のため、鼻薬となる添加元素を加えています。現在、クロム、アルミニウム、チタン等々10種類近い元素を加えています。それぞれの元素には役割があり、微妙なバランスを取って調合されています。空気による表面や内面の冷却や耐熱コーティングの進歩もあり、姿を変える単結晶は、環境にも優しい高性能な航空機エンジンの中で活躍しています。



等軸晶・一方向凝固・単結晶ブレードの一例