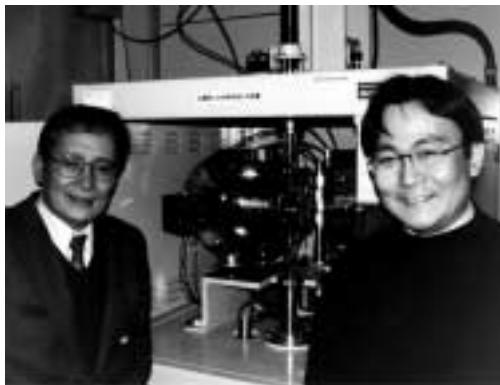




# 熱と力に負けない強さを…

—— 松尾・竹山研究室～金属工学科 ——



(左)松尾 孝 教授 (右)竹山 雅夫 助教授

軽くて丈夫な材料は、さまざまな工業製品に利用される。その中でも航空宇宙機器や原子炉などで用いられる構造材料は、軽くて丈夫なだけなく、高温使用時に高い変形抵抗を持っていなければならない。そのような過酷な条件下で使われる材料に、金属間化合物といわれる材料がある。この材料にはかつて、使いものにならないだらうと言われる不遇な時代があった。しかし、最近の基礎研究の結果に基づいた工夫により一躍夢の合金として注目を浴びるようになった。いかにして金属間化合物は生まれ変わったのだろうか。

…その答えは、ここ松尾・竹山研にある。…



## 21世紀の合金 金属間化合物

軽くて丈夫で熱に強い金属間化合物の中の代表的なものの1つに、 $Ni_3Al$ という物質がある。 $Al$ は非常に軽い金属であるが、融点が660℃と低いため熱に弱いという欠点がある。ところが、その融点の低い $Al$ を $Ni$ と混ぜたこの材料の融点は1385℃である。 $Al$ の利点である軽さを生かした、軽くて丈夫で熱に強い材料になったのだ。しかもこの材料は温度の上昇につれて硬くなるという驚くべき性質を持っている。

さて、この材料は高温時にどれくらいの強度を発揮できるのだろうか。実際に、この金属間化合物を $Ni$ に溶かし込んだ材料はジェット機のジェットエンジンの動翼として利用されている。それが高温でも丈夫であることの何よりの証拠となるだろう。動翼とは、飛行機のエンジン内で爆発した燃料に直接衝突して、超高速回転している羽根である。エンジン内は高温になるが、動翼は1000℃という特に高温になる所に位置しているのだ。より軽く、より高温時に高い変形抵抗を持つ材料が開発されれば、それだけエンジンの性能は向上する。つまり動翼用材料の進化は、ジェット機の高

速化につながるといえる。

B(ボーイング)-777型機というジェット機のジェットエンジンの動翼に使われている合金と、B-747型機の動翼用合金とを比べてみよう。B-747の機体を飛ばすにはエンジンが4発必要だが、B-777のエンジンは、ほぼ同じ大きさの機体を2発で飛ばせるほど性能が良い。エンジンの性能が良いということは、動翼はより高温で、より速く回転しているのである。B-777の合金がB-747の合金よりも高温で変形しないのは、金属間化合物 $Ni_3Al$ の体積率が65%から70%に増量しているためである。

このような条件に耐えうる金属間化合物とは、一体どのような物質なのだろうか。例えば $Ni_3Al$ という金属間化合物ならば、 $Ni$ と $Al$ からできている物質であることは明らかだ。しかし、それを「合金」といわずに、わざわざ「金属間化合物」という理由は何だろうか。図1を見て欲しい。一言でいうならば、原子の配置の仕方が違うのである。どちらも結晶格子点上に原子が並んでいることは同じである。ところが、金属間化合物は結晶

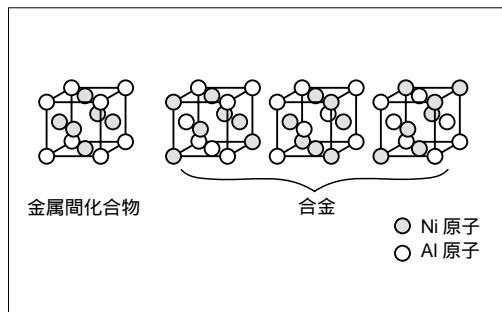


図1 金属間化合物と合金

格子点の中のどこにどの元素が入るという規則性を持って並んでいるが、合金はランダムに並んでいるのである。この結晶格子点の中の「どこ」に「どの元素」が入るという規則性を持っているからこそ「金属間化合物」なのである。化合物とよばれるものはみな、原子が規則性を持って結合しているため、組成式で表される。一方合金は、どの金属元素が何%混ざっているという表し方はできるが、原子の結合に規則性がないため、組成式で表せない。常に単位格子の角にNi、面の中心にAlが並ぶという規則性を持っているから、この物

質は化合物なのであり、 $\text{Ni}_3\text{Al}$ という組成式で表せるのである。

この規則的な配列は、人の手を加えて原子を1個1個積み上げて作るのではない。金属を簡単な原子比で混ぜ合わせて固めると自然にできるのだ。つまり、それは規則性を持って並ぶことがいかにエネルギー的に安定な状態であるかを意味している。しかし、どんな金属同士でも簡単な比で混ぜ合わせれば必ず金属間化合物ができるか、といえばそうではない。混ぜ合わせる金属の原子半径や、凝固させるときの温度など、様々な条件がそろってはじめて金属間化合物ができるのだ。どの金属同士を混ぜると、金属間化合物ができるのか、それを調べるのもこの研究室の主要なテーマの一つである。

金属間化合物と合金との違いは原子の並びの規則性の有無であることがわかった。しかし、なぜ規則的に原子が並ぶと変形しにくくなるのだろうか。そもそも金属材料が変形する時に、原子レベルでは一体どのようなことが起こっているのか。まず、そこから考えてみることにしよう。



## 金属材料の変形とは？

金属材料の変形には、結晶中の格子欠陥というものが大きく関わっている。格子欠陥とは図2のように、結晶格子点上に並ぶべき原子配列に、穴や隙間などの乱れが生じている部分のことである。ちなみに、その形から図2の右の格子欠陥を線欠陥、左の格子欠陥を点欠陥という。材料の変形とは格子欠陥が移動することなのである。逆に、欠陥の移動を止めれば金属材料は変形しないのである。金属間化合物は、合金に比べて欠陥が移動しにくいので、ある温度以下になると、点欠陥は移動できなくなる。このため温度が高い場合の塑性変形は、線欠陥の移動で起こる。この線欠陥の移動による材料の変形を例にそのメカニズムを説明しよう。

基本的に金属材料の変形は、図3-aに表すように進む。まず、始めに材料に力が加わると、線欠陥ができる。次に、その線欠陥は一遍ではなく、一列ずつ移動していく。この線欠陥の移動していく面を「すべり面」という。最終的には、線

欠陥が外に追い出されて、すべり面を境に結晶格子全体が1列ずれて変形は完了する。この状態にさらに力が加われば、再び線欠陥ができ、結晶格子全体がもう1列ずれる。さらに力が加われば、もう1列…という具合に変形は進むのだ。純金属や合金は、このように変形する。ところがNiとAlの金属間化合物の結晶格子を同じように1列ずら

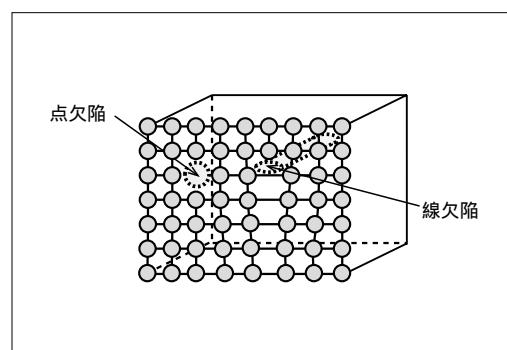


図2 格子欠陥

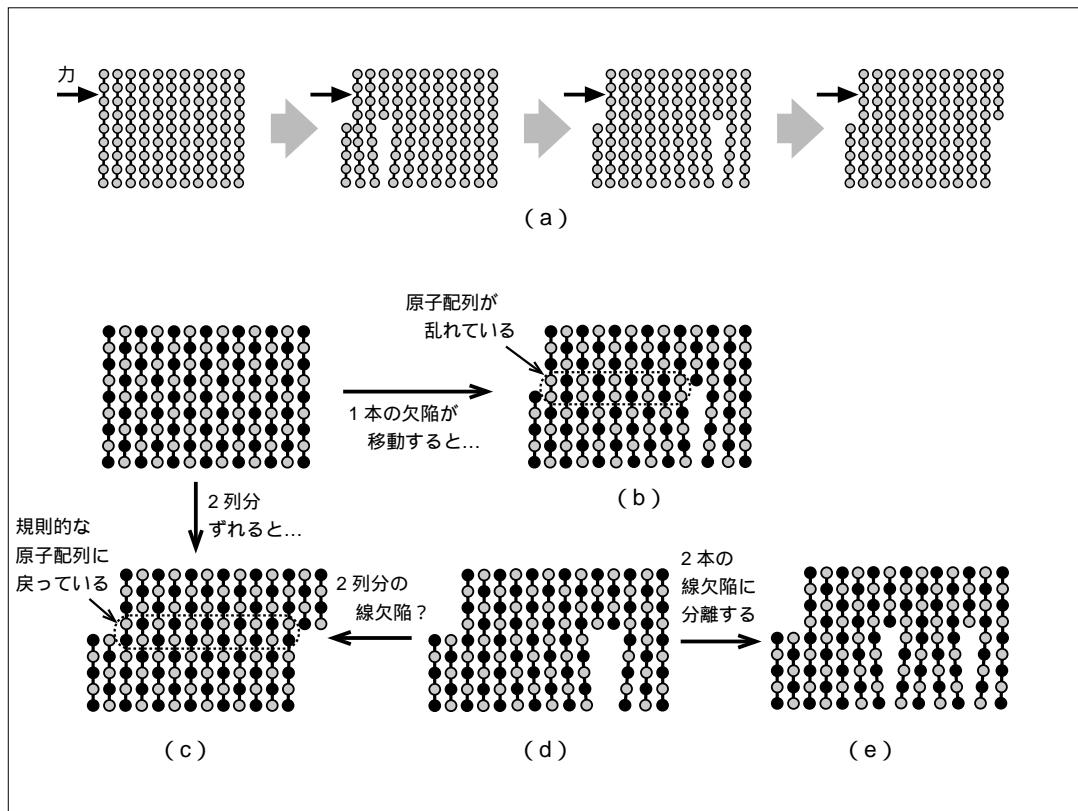


図3 金属材料の変形と線欠陥

すと、規則的で安定な原子配列に乱れが生じることになる。それは非常に不安定な状態だ。その様子を2次元的な模式図で表わしたのが図3-bである。本来ならば3次元なので、規則的な並びの乱れた面が、誌面の垂直方向に広がっていることになる。この状態からもう1列ずれれば元の規則的な原子の配列に戻ることができる。最終的に2列ずれると変形前の原子配列と同じになる。つまり、2列分の原子が抜けた欠陥が移動すれば変形後も安定な状態になるのである(図3-c)。しかし、結晶中にそのような大きな隙間は不安定で出来にくいい(図3-d)。そのため、2本の線欠陥に分離して同じ平面上に平行に並ぶことになる。すると図3-eに表すように、原子配置が乱れているのは、2本の線欠陥の間だけである。先程より不安定な部分は少なくなっている。この状態で材料に力を加えると、どうなるだろうか。先に進む線欠陥は、原子配列を反転させてしまう。ところが、これから来る線欠陥が再びその原子配列を反転させる

ので、2本の線欠陥の通り過ぎたあとの原子配列は元の規則的な状態に戻るのである。このような考え方から、金属間化合物が変形するには、同じ平面上に平行に並んだ2本の線欠陥が必要と考えられている。それならば、合金も線欠陥の移動で原子配列が乱れるのではないか、と思う方もいるかもしれない。合金は、元々の原子配列がランダムなので、線欠陥が通過した前後の原子配列はどちらもランダムであることには変わりない。結局、変形の前後の原子配列に根本的な違いはないのである。変形させるのに、1本の欠陥を移動させる力が必要な材料と、2本の欠陥を移動させる力が必要な材料とのどちらが変形しにくいかは、いうまでもないだろう。

というわけで、金属間化合物は合金より変形しにくい、つまり硬いということは分かった。しかし、このままだと確かに硬いが、非常にもろいのである。これこそが冒頭に紹介した使いものにならないと言われる理由であった。ところが、ここ

にひと工夫を加えたことで、もろいという欠点を克服できたのである。

その「ひと工夫」とは、金属間化合物を単結晶にしてしまうことだ。単結晶とは、文字通り1つの結晶だから、どの部分でも結晶格子の方向が同じである。通常の金属材料は、多結晶である。多結晶とは多くの単結晶が寄り集まってできた状態のことである。その様子は発泡スチロール材の様子に近い。発泡スチロール材の丸い粒一つを単結晶、その粒が寄り集まつたものが多結晶(=発泡スチロール材)と考えてもらうとよいだろう。なぜ、通常の金属材料は、多結晶になるのだろうか。それは、溶けた金属材料が冷えて固まるときの条件で決まるのである。通常、溶けた金属材料をそのまま冷やすと、固まり始めに小さな結晶の核があらゆるところに無数に出てくる。その核をもとに金属の結晶は成長し、1つの固体になる。そのため多結晶という状態になる。最初に出てきた核の向きが、ばらばらであるため、それをもとに成長した各結晶の結晶格子の向きもばらばらになる。ちなみに、身の回りにあるほとんどの金属材料は多結晶体であるにもかかわらず、一つ一つの結晶が見えないのは、目に見えないほど細かいものである。もちろん大きな単結晶からできている多結晶を作れば、その様子は肉眼でも見ることが



## なぜ、高温で強くなるのか

これまでの話で、なぜこの金属間化合物が軽く丈夫なのか、という謎は解けたと思う。次は、高温時に弱くならずに、逆に強くなる理由を考えてみよう。「逆に」というのは、金属材料だけでなく、一般に固体は温度が上がると原子の熱運動が活発になり、軟化が起こる。軟化の原因は最初に述べた点欠陥が動き出すからである。すると、どのようなことが起こるのだろうか。点欠陥が線欠陥の隣の原子に入れ替わると、線欠陥が今まで移動していた面とは別の面にジャンプできるようになるのだ(図4)。つまり、低温では線欠陥はそれぞれの所属する面上で一方向にしか移動できなかつた線欠陥が、高温ではあらゆる方向に進めるようになってしまふのだ。そのため変形する速さが、けた違いに速くなるのだ。

さて、金属間化合物はどうなるか。もちろん温

できる。

ではなぜ、単結晶にするともろくなくなるのだろうか。多結晶のもろさの原因是、結晶同士の境目なのである。その境目は結晶格子の向きが違う結晶同士が、無理矢理つながっているところなので結晶格子が歪んでいる。線欠陥は、結晶格子がきれいにできているところしか進めないので。そのため、線欠陥は結晶同士の境目より先へは進めないので。したがって、結晶格子ができている部分とは異なり、結晶同士の境目は変形ができる。変形できないのなら、硬い材料になって好都合…というわけにはいかない。確かにある程度までは変形せずに硬くなる。しかし、次々に線欠陥が詰まつてくると、その境目に力が集中し、しまいには力に耐えきれなくなる。つまり、割れてしまうのだ。高温時はこの境目から割れが生じ、さらに割れが伝わっていくのもこの境目だ。この境目のない単結晶は割れが生じるところもなければ、伝わるところもない。こうして、Ni<sub>3</sub>Alという金属間化合物は、単結晶化することで、そのもろさを克服したのである。同じように単結晶化することで、もろさを克服して使えるようになった金属間化合物がいくつもあり、その活躍が期待されている。

度が上がれば点欠陥の運動は活発になり、線欠陥はあらゆる方向に進むようになる。ところが、線欠陥が自由に動けることが裏目に出で、変形しづらくなるのだ。線欠陥が自由に動けるのに変形しづらいというのは、なんだか矛盾しているようだ

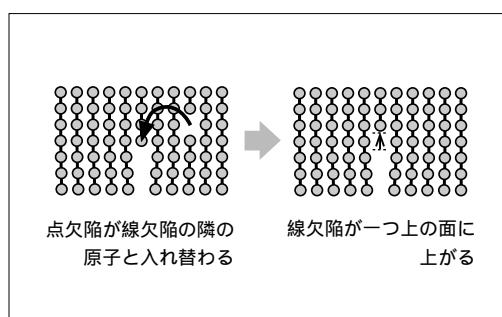


図4 ジャンプする線欠陥

が、少しも矛盾していない。先程、金属間化合物では2本一組の線欠陥が動いて変形が進む、と紹介した。ここにもう一度着目してみよう。線欠陥が自由に動けるようになると、組になっていた線欠陥のそれぞれが、違う平面上に進もうとするのだ。結局、一方の線欠陥が、別のすべり面へ突っ込んでしまい、2本一組の組が解消されてしまう。



## 材料の寿命を予測する

今まで述べてきたように、徹底的に材料が変形しづらくなるような工夫を幾重にも重ねていくと非常に丈夫な材料ができる。しかし高温では、これだけ強化を計っても、材料に加わる力がある限り、材料の変形を止めることはできないのだ。なぜなら高温である以上、原子の熱運動そのものである点欠陥の移動を止めることはできないからだ。したがって高温で使用される合金では耐用年数を予測することが必要となってくる。

丈夫な材料の耐用年数を実際に使われるときと同じ条件で調べようすると、当然時間がかかってしまう。しかもそれが100年、200年というレベルになると、実際に調べることは可能であっても現実的ではなくなる。その理由は、色々あると思うが、調べている間にもっと良い材料が開発されてしまうかもしれない、というのも一つの理由だろう。また、本当に良い材料ならば、すぐにでも使いたいところである。しかし、耐用年数を確かめないまま、新しい材料を使ってすぐに壊れてしまったら大変である。特に、冒頭で紹介した航空機器や原子炉で、そのようなことはあってはならない。そこで材料に実際に使われる条件よりも大きな負担をかけて耐用年数をはじき出す、という方法をとらざるを得なくなる。

それでは、どのような負担をかければよいだろ

このほかにも、興味深い話をたくさん伺った。ここの研究室のテーマは多岐に渡り、金属間化合物に限らず、高温時の様々な合金の変形や、温度によってその合金がどのような結晶構造になるのかを調べるなどの研究もなさっている。しかし、誌面のスペースの都合もあり、今回は金属間化合物に焦点を当てて高温における材料の変形のしく

すると、もう一方が動けなくなるのだ。つまり動ける欠陥の本数が減ってしまうことになる。そのため、変形しづらくなるのだ。温度が高くなればなるほど、そのような現象の起こる確率は高くなる。そのため、金属間化合物は低温の時よりも高温の時の方が硬くなるという現象が起こるのだ。

うか。一つ考えられるのは、材料に加える力を増やすことである。実際に機械系ではこのような方法を用いることが一般的である。しかし、ここでちょっと考えて欲しい。先程から説明してきたように、材料の変形は外力だけに影響されるものではなく、材料そのものの構造も大きく関わっている。加える力を実際の何倍にしたときに、どれくらい変形しやすくなるかが簡単に分かるような単純なものではないのである。

それならば、材料に加える力はそのままで、温度を上げるという負担のかけ方をしてみてはどうだろうか。すると、実際に使われる条件と異なるのは温度のみ、すなわち点欠陥の移動速度のみが異なる。点欠陥の移動速度はエネルギー、つまり温度に依存するから温度を変数にした簡単な式で表せる。そして、点欠陥の移動速度に依存する高温度での材料の変形速度も温度を使って簡単な式で表せるようになるのだ。

欠陥の動きを見れば、材料の寿命を知ることができ、制御すれば、材料の硬さを変化させることができる。このように、材料を組成からだけでなく、原子レベルの動きからアプローチすることが、いかに重要であるか、分かっていただけたのではないだろうか。今後の材料開発には欠かせない要素となっていくに違いない。

---

みを紹介した。全てを紹介することができなかつたことが、非常に残念でならない。

最後に、私たちの質問にOHPやホワイトボードを使って分かりやすく説明してくださった松尾先生と竹山先生に感謝すると共に、今後の益々のご活躍を期待しております。

(起橋 美夏)