

過酷環境材料が切り拓く未来

原子核工学専攻 矢野 豊彦 研究室

矢野 豊彦 教授 東京工業大学大学院理工学研究科無機材料工学専攻博士課程修了。2002年より、原子炉工学研究所教授（理工学研究科原子核工学専攻協力講座教授）。



矢野研究室では、過酷な環境で使われる材料を開発している。材料の性質は、その材料を構成するミクロな組織に起因している。このミクロな組織の変化に注目することで、材料が過酷な環境でどのように変化するかを予測することができる。先生は、透過型電子顕微鏡などの最先端の技術を用いることによって、結晶の並びなどの材料のミクロな世界を観察し、過酷な環境に耐えられる材料を開発している。

ミクロとマクロを結ぶ材料科学

科学技術の発展は目まぐるしく、私たちの身近なところでも実感することができる。例えば、携帯電話は日々小型化、軽量化が進み、今や10年前では考えられなかったような、高機能な端末が売られている。このような私たちの生活を便利にする製品は、主にそれに使われる材料の改良によって生まれている。矢野先生が研究を行なっている材料科学という分野では、こうした材料の開発を行なっている。

実際に製品として使われている材料は、原子が整然と並んでいるような純粋なものではなく、組織が乱れていたり不純物が含まれていたりする。材料科学ではこのような実際に使われるような純粋でないモノを研究対象としている。

材料科学と対を成す言葉に物質科学がある。同じ物質を対象にしても、物質科学では不純物などが無い理想的な物質を研究対象としている。

例えば、鉄であれば単結晶のような状態について調べている。しかし、現実に使われている材料は純物質とは異なり、より複雑な内部組織をもっている。材料科学では、こうした複雑な内部組織に焦点を当てて調べている。

私たちが実物として見ている多くのものは、実は小さな結晶粒の集まりである。結晶粒が何百万何千万と集まって、何cmという大きさの材料になっている。この結晶粒一つひとつの大きさは数 μm である。そしてこの結晶の粒子を一つ取り出してみると、その中では原子が規則正しく並び、繰り返し構造を形成している。結晶構造の繰り返し単位である単位格子の一片の長さは1nm以下であり、このような単位格子が多数並んで一つの結晶粒ができている（図1）。

このように、材料はさまざまなスケールにおいて微細組織が集まった複雑なものである。そして、材料全体としての性質は、微細組織の様子と密接に関わっている。材料の性質を左右する要因は大

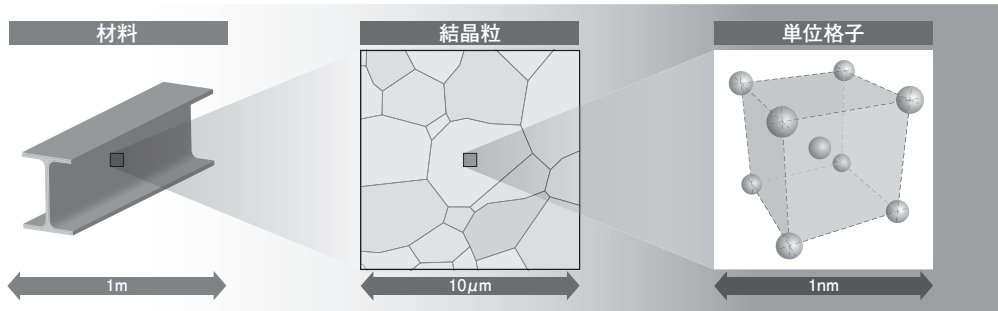


図1 材料内の微細組織

材料は小さな結晶粒の集まりで、結晶粒の中では原子が単位格子という繰り返し構造を形成している。

大きく分けて2つある。ひとつは結晶粒レベルの大きさの乱れで、粒子の形や不純物、粒子と粒子の間の粒界によるものである。もうひとつは結晶構造レベルの大きさの乱れで、結晶内の欠陥や他原子への置換によるものである。こうした微細組織の要因すべてが材料全体としての性質に影響を及ぼしている。

実際に製品が作られるとき、それに使われる材料にはさまざまな性質が要求される。例えば高温にさらされる製品であれば、そこに用いられる材料には耐熱性が要求される。材料科学ではそうした要求に対して、微細組織を制御することで材料全体の性質を求められるものへと変化させている。こうした手法をとる上では、材料の性質と微細組織の関係を知ることが非常に重要である。そこで矢野研究室では、材料の性質と微細組織の関係を明らかにする研究を行なっている。

先生の研究室では材料内の各スケールの組織を見るために、光学顕微鏡をはじめとする、さまざまな装置を用いている。

その一つは透過型電子顕微鏡という装置である。これは物質の中に電子線を透過させて、その像を見ることで試料の内部を高倍率で観察することができる装置である。この顕微鏡を用いると結晶内部の原子の並びを見ることができる。透過型電子顕微鏡では物質を透過してきた電子線の影のようなものを撮影していて、透過型電子顕微鏡で得られる画像は白黒の斑点が並んだようになっている(写真1)。白い部分は原子が存在していないため電子が透過してきて明るく映っており、黒い部分には原子が存在している。これは原子で電子

線が散乱されてしまうため、原子のある位置では電子線が透過せず影のように映るのである。そのため、結晶レベルの組織の乱れを観測することができる。

そしてもう一つの装置は走査型電子顕微鏡である。これは、試料の表面を細い電子の針でなぞり、表面から得られるいろいろな情報をもとに描画するだけで、材料の表面を見ることができる電子顕微鏡である。これらのさまざまな装置を用いることにより、材料を構成する基本的な組織から実際に見える大きさの組織まで、それぞれ観察することができる。そして各スケールの組織の観察とは別に材料の物性を測定することにより、材料の性質と微細組織の関係を調べている。

この関係がわかると、それをもとにして、その性質を引き出すために必要な微細組織の条件を定めることができる。研究で得られた材料の性質と微細組織の関係のデータから、目的の性質をもつ

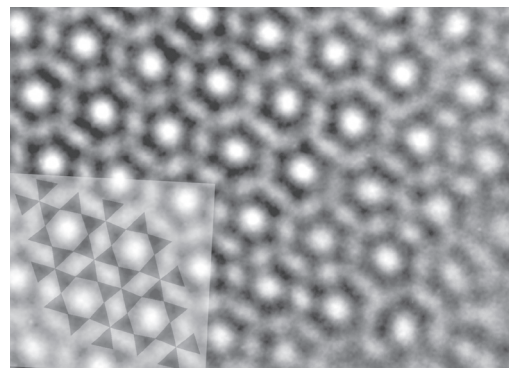


写真1 透過型電子顕微鏡写真

画像の黒い領域に原子が存在している。左下には、結晶の原子配列モデルを重ねて表示してある。

材料を作ることも可能なのである。先生は得られた相関関係から、微細組織を制御して新しい材料を作る研究も行なっている。

繊維複合体セラミックスの設計

微細組織制御による新規材料開発の一例として繊維複合体セラミックスの開発がある。セラミックスとはケイ素などの天然原料を熱処理して作った非金属の材料で、身近な製品では土器、陶器、磁器などの焼き物がそれにあたる。

セラミックスは化学的な性質が優れた材料である。例えば、他の材料よりも優れた耐熱性をもっており、金属材料が耐えられない高温下でも使用することができる。また、優れた絶縁材料として広く用いられている。

しかし、このような焼き物などのセラミックス材料は力を加えると変形せずに割れてしまうという欠点がある。金属やプラスチックは延性を示すため、力を加えていくと徐々に変形し破断する。一方で、セラミックスは脆性を示すため、力を加えていってもほとんど変形せず、ある大きさまで力を加えたところで突然破断してしまう。

セラミックスのような脆性を示す材料は、製品の設計においては非常に扱いにくい。延性を示す材料は破断の兆候として変形が見られるため、破断の兆候である変形を目安にして補修や交換ができるが、脆性を示す材料はそれができないため、製品の安全性が確保できないからである。また、セラミックスは焼き固めるという複雑な反応を伴う過程を経て作られているため、一つの材料の中に、局所的に脆い部分がどうしてもできてしまう。このような材料では使用限界を厳密に決めることができず、安全に製品を設計することが難しいのである。逆に言えば、セラミックスを強化し脆性を克服できれば、より多くの場面で化学的に性質の優れたセラミックス材料を用いることが可能になるのだ。

材料の一般的な強化方法として複合化という手法がある。複合化とは、2つの材料を混ぜ合わせ、それぞれの材料の利点をあわせもった新しい材料を作る方法である。このとき強化材として繊維状

の材料がよく用いられる。繊維状の材料は欠陥がほとんど無く、通常のプロセスで作製された多結晶体と比べると10倍以上の強度を示すことが多い。

繊維状のセラミックスを作る研究は日本で進んでおり、繊維状のセラミックスを工業的に供給することができるようになっている。繊維強化材としてこのセラミックスの繊維を使えばセラミックス材料を強化することができる。しかし、複合化もただ2つの材料を混ぜればよいというわけではなく、それぞれの良い部分を最大限に生かすためには多くの試行錯誤が必要である。矢野研究室では組織の絶妙な制御を行い、脆性を克服したセラミックスを作ることに成功した。元のセラミックスに強化材としてSiCを用いることで、セラミックスの利点である耐熱性、絶縁性を維持しつつ、脆性を克服した新規セラミックス材料を開発したのだ（写真2）。

この新しい繊維複合体セラミックスは力を加えていっても突然破断することはない。まず母材に亀裂が入り、次に繊維が切断され、繊維が母材から抜ける過程で金属のような変形が起こる。そして最後に繊維が完全に抜け落ち破断に至るのである（図2）。

このように材料を複合化することによって、それぞれの単体では脆性という欠点をもっているセラミックス材料を、力が加わると徐々に変形していく材料へと改良した。脆性を克服したセラミックスは、力がかかり、耐熱性も求められる部品、例えばスペースシャトルやジェット機のエンジンなどに使うことができる。将来はこういった脆性

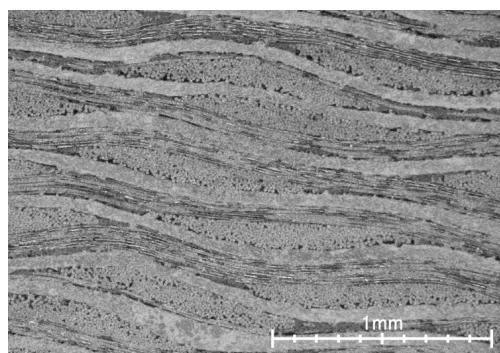


写真2 複合体セラミックスの断面

実際には強化材の繊維が縦横に積み重なって材料を形成している。

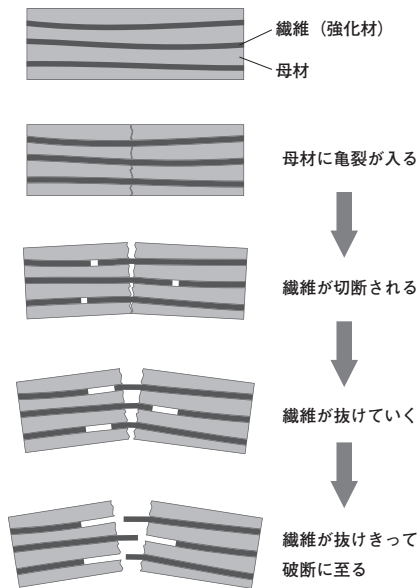


図2 複合体セラミックスの変形過程

初めに母材に亀裂が入り、次に繊維が破断する。その後繊維が抜け落ちて材料が破断する。

と耐熱性の求められる航空宇宙材料などに利用することを視野に入れて、矢野研究室では開発を行っている。

物質には人がコントロールできる性質とできない性質がある。融点などの化学的性質は制御することはできないが、材料の硬さや強さに関する性質は人が手を加えることにより制御できる。このような材料の硬さや強さに関する性質は機械的性質と呼ばれ、材料の微細組織が密接に関わっている。よって、材料の性質と微細組織との相関関係を調べ、適切に組織を制御することで、目的の機械的性質をもった材料を作ることができるのだ。結晶粒レベルの大きさの組織には、繊維状、粒子状、複合体などのさまざまな形の結晶粒やそれらの複雑な立体配置がある。こうした組織を適切に制御することで、さまざまな機械的性質をもった材料を開発することができる。

組織の制御によって材料の性質をうまくコントロールした例としてIC基板がある。IC基板は絶縁体でなければならないため、セラミックスで作られている。しかし、現代の集積密度の高くなった基板では回路の発熱が大きな問題となっている。この問題を解決するために、結晶格子中の乱

れをできるかぎり減少したり、粒径や粒界の制御を行ったり、場合によっては複合化をすることで、従来より何倍も熱伝導の優れたセラミックスが作られている。

繊維複合体セラミックスの成果からもわかるように、材料は組織を変化させることで、全体としての性質をずいぶん調整することができる。また材料の性質と微細組織との相関関係をあらかじめ調べておけば意図した性質を引き出すことも可能なのである。

原子核分野への応用

現在、微細組織と材料全体の性質の相関関係を調べるという先生の研究は、新しい発電システムの材料にも広がっている。

東日本大震災では、原子力発電所の危険性が明るみに出た。現在の原子力発電では核分裂反応の際に放出される熱を利用して発電しており、燃料としてウランなどを用いているため、反応後の廃棄物が問題となっている。

核反応からエネルギーを取り出すもう一つの方法として、核融合反応を用いた発電方法がある。核融合反応とは、身近な例で言えば太陽などの恒星中で起こっている反応である。太陽などの恒星では陽子と陽子が核融合反応を起こしてエネルギーを放出している。地上に降り注ぐ太陽のエネルギーはこの時に放出されたものである。

人工的にこの反応を起こすには、水素の質量数が2の同位体である重水素と質量数が3の同位体である三重水素を用い、真空の中で1億℃の超高温状態にして両者をプラズマ状態にすることで核融合反応を起こしている。超高温下では、分子はプラズマ状態という電子をはぎ取られた原子核と電子とがバラバラに飛び回っている状態になり、核融合反応が起こる。このような核融合反応では水素と水素が核融合しヘリウムが生成されるだけなので、反応後の廃棄物として有害なものが排出されない。核融合反応を用いた発電はクリーンな発電方法として期待され、実際に核融合反応を用いた発電を行う施設、核融合炉の開発が数十年前から行われてきた。

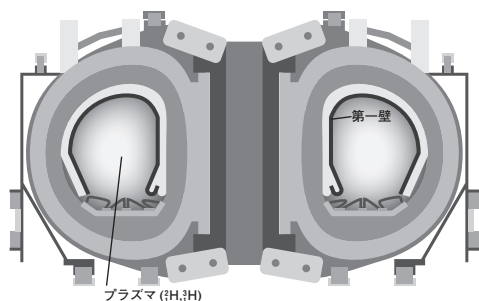


図3 核融合炉の断面

ドーナツ型の真空容器の中で核融合反応が起こっている。

現在、この新しい原理で動く原子力発電所、核融合炉の実験炉がフランスに作られつつある。核融合炉は中心にドーナツ型の真空容器があり、その周囲の電磁石から発せられる磁場によって真空容器の内部のプラズマを制御している。この核融合炉は中心のドーナツ型の真空容器内部に、超高温の水素プラズマを強力な磁力で容器内部に閉じ込めるという方法で動作している（図3）。このような大がかりな装置には絶縁材料、超電導材料、壁の材料などとしてさまざまなセラミックス材料が用いられている。

核融合炉の中で最も過酷な状況におかれるのは、ドーナツ型の真空容器の内側に配置された、プラズマから出るエネルギーを受け止めたり、核融合の燃料となる三重水素を作ったりするための箱である。この箱のプラズマ側の表面を第一壁と呼んでいる。ここは、プラズマから核融合反応によって発生する中性子線や α 粒子などの高エネルギー粒子が雨あられと衝突してくる。このため、第一壁はこれらの粒子の衝突に耐えられる材料でなければならない。

第一壁は当初、金属材料で作ることが考案されていた。しかし、第一壁は高エネルギー粒子が衝突し熱を発生するため、金属材料では耐えられないことがわかった。さらに、金属は中性子線の照射を受けると材料そのものが放射化してしまい、金属で第一壁を作ると第一壁が放射性廃棄物になってしまうということもわかった。これでは放射性物質が廃棄物として出てしまい、クリーンな発電方法ではなくなってしまうのである。

大量の中性子線が降り注ぐ第一壁の表面温度は

1000℃を超える過酷な環境であるが、セラミックス材料であればこのような過酷な環境にも耐えることができる。さらに、セラミックスには放射化しにくいという特徴もある。セラミックスを構成するような軽い元素は放射化してもすぐに元の状態に戻るため、放射性物質として長い間存在するという危険性がないのである。そこで矢野先生は核融合炉の第一壁材としてセラミックスを用いた新規材料の開発に注目した。

しかし、中性子線によって引き起こされる問題は放射化だけではない。核融合炉内部のプラズマから発生する高エネルギーの中性子線が第一壁材料に衝突すると、第一壁材料の内部の結晶構造が壊れるということがわかってきた。中性子が材料を構成する原子に衝突すると、その原子がその位置からはじき出され、さらに別の原子に衝突する。このような衝突が次々に起こり、結晶が連鎖的に壊れていくのである。最終的には、一つの中性子の衝突により何百何千という原子の位置が移動してしまう。こうした結晶構造の崩壊は、当然材料全体の性質にも大きな影響を及ぼし問題となっている。

一方で中性子線の照射で崩壊した結晶には再び元に戻ろうとする性質があることが知られている。結晶という状態は他の状態に比べて安定な状態なので、中性子線の衝突によって位置がずれた原子もまた元の位置に戻ろうとするのである。このような回復現象はある条件で起こりやすくなり、一度崩壊した結晶構造が特定の条件で回復することがある。

矢野研究室では結晶構造が中性子線によって崩壊する様子を透過型電子顕微鏡によって観察している。その結果、中性子線の照射によって結晶構造の中に乱れが生じ、体積も1～3%、場合によっては10%も増加し材料全体の強度が失われることがわかってきた。強度が失われた材料はぼろぼろになってしまう。

このように中性子線照射によるセラミックス材料への影響は徐々に明らかになってきている。しかし、目的のセラミックスができたとしても、実際に核融合炉のような大きなシステムに使う材料を製造するためにはさらに研究開発を進めなければ

ばならない。セラミックスは溶接や曲げといった加工が難しいため、大きな材料を作るためには装置や製造プロセスの開発も行なっていかなければならないのである。

また矢野先生は、過酷な環境で材料がどのように変化するかを調べる研究の一環として、宇宙空間における材料被曝実験を行なった。これは国際宇宙ステーションの外部にさまざまな材料のサンプルを取り付け、3年間宇宙環境で放置するという壮大な実験である。被曝後のサンプルの変化から、宇宙環境で材料が受ける影響について調べたのである。

宇宙環境は地表に比べると極めて過酷な環境である。宇宙空間では太陽から放射線などのさまざまな粒子が飛び交っている。これらは私たちが生活する地表ではオゾン層や空気にさえぎられて大きな問題にはならないが、宇宙ステーションの表面では材料を変化させる原因となる。また、宇宙は昼と夜で100Kから400Kまで変化する温度差の激しい過酷な環境である。

このような環境に3年間置かれたサンプルから、過酷な環境での材料の変化がわかった。例えば、サンプルの中でもプラスチックは宇宙空間でぼろぼろになってしまっていたのに対して、セラミックスは形が崩れるほどの変化はしていなかった。しかし、このセラミックスも表面をよく観察すると、内部に酸素を取り込んでしまっていた。宇宙空間には微量ではあるが酸素原子が存在している。この微量の酸素原子が漂う空間の中を、宇宙船が高速で移動しているため、材料に酸素原子が高速で衝突することになる。これによって材料の表面に酸素が取り込まれていたのだと先生は考えている。

この研究で宇宙という過酷な環境が材料に及ぼす影響がわかってきた。こうした実験結果を解析していくことで、宇宙空間で用いられるデバイスの老朽化の原因が解明されていくのだ。

過酷な環境における微細組織の変化と材料全体の性質の変化との相関関係がわかり、大きな材料を作るプロセスの開発が進むことにより、いずれ地上の太陽と呼ばれる核融合炉の建設も実現するであろう。

総合工学としての原子核工学専攻

核融合炉を含め、原子力発電所は一つの巨大な化学プラントであると言える。原子力発電では炉心の核反応によって放出された熱で水を沸かし、タービンを回すことで電気エネルギーへと変換している。このようなエネルギー変換の工程にはさまざまな分野が関わっており、原子力発電所は多くの分野に支えられて成り立っていると言える。

原子力発電所という一つの大きな化学プラントを作るためには多くの分野の知識が必要になるため、原子核工学は総合工学であると言われている。例えば、核反応そのものについては物理であり、発電のための熱の取り出し方や水の流れについては機械系の知識が必要となる。また、放射性物質を扱っているので、放射線の人体への影響を調べるために、生物系の知識も必要になる。そして材料の分野も発電所開発の土台を担う分野として重要な位置を占めている。

材料開発は日常のさまざまなところで私たちの生活を支えている。新しい材料の開発は、こうした微細組織と全体の性質との相関関係を地道に調べていくことによって生まれているのである。材料全体の性質と微細組織の関係を調べるという先生の研究スタイルは今後多くの新規材料を生み、より便利で新しい社会を構築していくだろう。

執筆者より

本稿の執筆にあたり、矢野先生には材料の微細組織と材料の性質の関数に関するさまざまなお話を伺いました。過酷環境で変化する材料の性質や目に見えないミクロな世界の変化など、材料工学を専攻している私にとってもとても興味深い話ばかりでした。また、取材で実際に電子顕微鏡や複合材料のサンプルを見せていただいたことはとても貴重な経験でした。

末筆になりますが、お忙しい中、取材に快く応じてくださいました矢野先生に、厚く御礼申し上げます。矢野先生始め研究室の皆様のより一層のご活躍を心よりお祈りいたします。

(劉 芽久哉)