

強くて優しい社会基盤材料をつくる

物質理工学院 材料系 熊井 真次 研究室

熊井 真次 教授 1956年福岡県生まれ。東京工業大学大学院理工学研究科金属工学専攻博士課程修了。東京工業大学助手、助教授を経て2005年より教授。2016年より同大学物質理工学院材料系教授。



熊井真次先生の研究室では主に3つの分野について研究している。材質の劣化を引き起こさない頑丈な接合方法、質の良いアルミニウム合金の casting 方法、合金の成分を視覚化する新しい方法の3つを一つひとつ紹介する。そして材料分野における基礎・基本研究の大切さと研究室で学生を育てるということについてきた。

非鉄金属

世の中にある人工的に作られたものはそれぞれ目的に応じた材料で作られている。たとえば、飛行機の大部分は軽くて頑丈なジュラルミンというアルミニウム合金からできている。なぜなら軽い金属にすることでエネルギーを効率よく使えるからだ。

今回紹介する熊井真次先生の研究室では鉄以外の金属、非鉄金属と呼ばれる材料に関する分野の研究をしている。非鉄金属に該当する金属は、アルミニウム・銅・チタンなど純金属だけでなく、先ほど例に挙げたジュラルミンなどの合金もあり、多岐にわたる。それに伴い非鉄金属に関する研究も数多く存在する。

熊井先生の研究室でも非鉄金属に関するいくつかの研究をしている。それらの方向性は異なるが、どれも他の研究室には無いタイプのものである。

衝撃圧接

金属を接合する方法はいくつか存在するが、よく使用されるのは、加熱して金属を溶かして接合する方法だ。その際に気になる点の1つとして、材質の変化というものがある。接合の段階で劣化させることは極力抑えたい。金属は高温にすると丁寧に作り上げた組織が変化してしまい、材料としての役割を果たさなくなるからだ。そのうえ、溶かしてしまうとそこからガスや汚れが入る可能性もあり、せっかく作った金属材料の材質が劣化してしまう。では、たとえば金属を瞬間的に接合し、接合部分のうち表面のほんの厚さ200 μ m程度しか高温にならないようにするとどうなるだろうか。この場合、接合部の材質の劣化を抑えて強固に接合することができる。このようなメリットがある、衝撃圧接という手法が存在する。

衝撃圧接の仕組みについて説明しよう。金属の板同士を秒速数百メートルという高速で角度をつ

けてぶつくる。角度をつけているのでその瞬間における衝突部分は面ではなくて線だ。その線の部分だけが高温高圧になり、そこからジェットが発生して金属の表面に付着していた汚れや酸化物など結合の邪魔をするものも一緒に吹き飛ばす。それによって清浄で反応しやすい状態の金属原子が表面に現れて、自然と金属結合が起こる。イメージしにくい現象かもしれないが、一般的に、酸化していないきれいな状態の金属表面の原子同士なら真空中で押し付けると結合する。この現象が衝撃圧接のときの金属の表面に連続的に起きるのだ。ある部分が結合した次の瞬間には少し進んだ位置で衝突して結合、以下同様に結合が進んでいき、最終的に金属板の面全体が接合されるのだ(図1)。

このとき高速でぶつかることにより、衝突した金属のごく表面は流体のようにふるまい、このときの衝撃から、板同士の接合面には美しい波模様が発生する。この波模様は金属板同士をぶつける際の角度や速度、金属の組み合わせによって変化する。衝撃圧接の特徴の一つだ。

衝撃で金属板同士を接合できることや、その際に波模様が発生することについては以前から知られていたが、なぜ接合されるのか、なぜさまざまな形の波模様ができるのか、つまりその時に金属板の接合部付近で何が起きているのかはよくわからなかった。なぜなら衝撃圧接は、ほんの数 μ 秒で終わってしまう現象のため実験では測定や観察ができないからだ。

そのため熊井研究室では衝撃圧接の実験と並行してコンピュータによるシミュレーションをすることで、圧接の瞬間に何が起きているのかを解

明することにした。しかし、シミュレーションも簡単ではない。衝撃圧接というものは金属同士がぶつかる速度や角度、ぶつかる瞬間の温度上昇、その後温度が下がるときにおこる金属の変態など、多様で複雑な要素が組み合わさっている。よって、一度にすべてについて調べることは難しい。そのため、先生は要素をいくつかに分けて順番にシミュレーション解析をした。たとえば、衝突のエネルギーによって瞬間的に最高温度がどこまで上昇するかを調べるソフトウェアでは、その後時間をかけて温度がどのように下がっていくのかは解析できない。そのため今度は別のソフトウェアで温度の下がり方を調べる、という具合だ。

そのように4、5種類のシミュレーション解析の手法を重ね合わせることで圧接の瞬間に金属板に何が起きているのかわかるようになった。そしてシミュレーションと同じ条件で実験をすると波模様の形や大きさがシミュレーションと全く同じものになった。これだけたくさんのシミュレーションを重ね、衝撃圧接の瞬間に起きている現象を詳しく解明したのは熊井研究室が初めてだった。

シミュレーションにより衝突条件と波の生成との間に法則性が見えてきた。接着面を波のない直線にするなど、必要に応じて波の形をコントロールできるようにしていくことが今後の熊井研究室の課題だという。

アルミニウム合金の縦型双ロールキャスト

連続鋳造という金属板の製造方法の一つにロールキャストと呼ばれるものがある。連続鋳造は、液体の金属を冷やしながら延ばすことで金属板にする鋳造方法の一種だ。その中でもロールキャスト法は薄い金属板を速く作れる手法だ。

ロールキャスト法にもいくつか種類がある。まず、鋳造した金属が出てくる向きで横型と縦型に分類される。横型の方が先に一般的に使われるようになったが、縦型の方が結晶粒やその中に分散する化合物が細かいものを作れた。また、ロールというパーツの数で単ロールキャスト法と双ロールキャスト法に分類できる。詳しくは後述するが、双ロールキャスト法だと、2つのロールで金属を

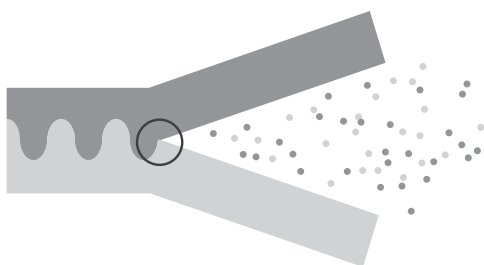


図1 衝撃圧接が行われる金属板

丸印をつけた部分がごく短時間のみ高温になり、接合される。金属板の間にある丸い粒子状のものは、汚れや酸化物である。

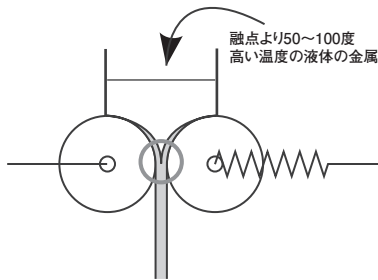


図2 縦型双ロールキャスター

濃い灰色の丸印で囲まれた点で2層の金属板が1枚になる。

挟むことで急冷できるという利点がある。しかし、アルミニウム合金用の縦型双ロールキャスターは今まで作られていなかった。そのため熊井先生は、縦型双ロールキャスト法で作ったアルミニウム合金にはどのような性質があるのか研究することにした。そこで熊井先生はほかの大学の研究室と協力してアルミニウム合金用の縦型双ロールキャスターを試作したが、質の良いアルミニウム合金を製造するのは簡単なことではなかった。

縦型の双ロールキャスト法の仕組みについてみていこう。融点よりも50~100度高い温度の溶かした金属を状態でつぼに入れ用意する。それを回転している2つのロールの間に上から流し込む。すると、水で冷やされた銅製のロールに触れた金属が急冷され、すぐに液体から固体になっていく。そしてその冷やされた固体の金属に接している液体金属が冷やされて個体となり、どんどん厚みを増していく。そしてロール表面に挟まれた空間中のある点で2つのロールそれぞれから成長した薄い金属の層が一つになる。すると下に1枚の金属板として押し出されるという仕組みだ（図2）。

縦型のロールキャスターを作るにあたって熊井先生らが工夫した点の1つが、並んでいる2つのロールのうち一方のロールの位置を完全に固定し、もう一方をばねである程度自由に動くように機械を改良したことである。これにより常にロールに金属が接して、きちんと冷却させることができるようになった。

なぜきちんと冷却することが重要なのかというと、これが良質な金属板を作るために必要不可欠な条件であるからだ。連続的に金属を流している

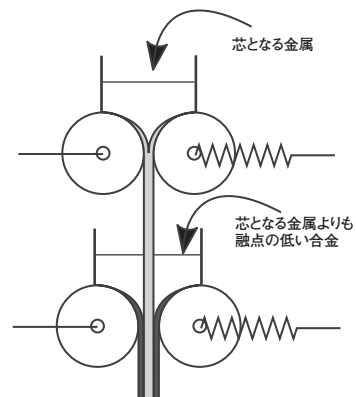


図3 縦型双ロールキャスターによるクラッド材加工

ので、冷却にかけられる時間は限られている。冷やしきれないと、板の中央部が固まらないもの、あるいはロールから剥がれず板にならないものができる。反対に、冷やしすぎるとそれぞれのロールについての金属が合体して一つの層にならず、そのまま2枚の板になってしまう。作りたい金属板の材質や厚さによってロールの回転速度や冷却温度をきちんと調節しなくては目的とする金属板はできない。先生たちは、細かくパラメータを調節し、何度も試行錯誤を繰り返して、ようやく縦型のロールキャスターでアルミニウム合金板を製造できるようになった。

熊井研究室ではこの縦型のロールキャスターが通常の金属板を作ること以外にも使えないか、研究している。一つの装置のすぐ下にもう一つ同じような装置を付けることで、最初に作った金属板に別の金属板を重ねていくクラッド加工が縦型双ロールキャスト法ならできるからだ（図3）。

社会で使用されている金属材料の表面にはさまざまな処理がされている。金属は無垢のままでは環境に弱いことが多いので、塗料を塗ったり異なる種類の金属を何層かに重ねてクラッド材にしたりすることでさまざまな使用環境で使えるようにしている。クラッド材はほかにも、ろう付け、いわゆるはんだ付けのようなことにも利用できる。たとえば、ラジエーターというエアコンの細かい部品などを接着するときだ。芯となる金属板の表面にそれよりも融点の低い合金を付け、成形してから全体の温度を上昇させる。すると表面の合金

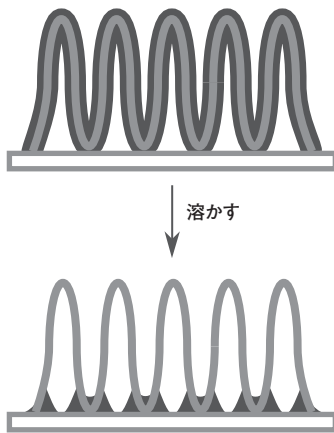


図4 ろう付けに应用されるロールキャスト法のクラッド材加工

表面にクラッド加工した融点の低い合金のみが溶けて金属同士の接着に用いられる。ラジエーターはこれが何層にも重なっているものだ。

のみが溶けてろうとしてはたらき接着されるのだ(図4)。

さらにもう一段階進んだことを熊井先生は目指している。金属板が利用される場合その板の表面と裏面が同じ環境にあることは滅多にない。たとえばドラム缶は、内側の面は液体で外側の面は空気と接している。そのため、それぞれを接する環境に合わせた表面にするのが理想である。現在の双ロールキャスト法では芯となる金属板の両面に同じ種類の金属しか重ねられないが、いずれは別の種類の金属の重ね合わせができるように改良を続けている。

着色腐食

金属というものはどのように冷えて固体になっていくのだろうか。純金属の液体のみの場合でも、融点になった途端に全体が一気に液体から固体になるわけではない。同心円状に広がるように固体になっていくわけでもない。樹の枝が伸びるように樹枝状に固まっていくのだ(図5)。あるところにできた固体の核から枝が伸びるように固体を形成していく。最終的にすべて液体から固体になったときには固体の原子で埋め尽くされた結晶になるので樹枝状の結晶がどのように伸びていったかはわ

からなくなる。

合金の場合も樹枝状に冷え固まっていくが、それが純金属のときとまったく同じ冷え方をしているのかは直接観察するだけではわからなかった。

この問題を解決したのが着色腐食と呼ばれる新しい腐食法の利用である。腐食とは、金属が周囲の環境と化学反応を起こして溶けたり、腐食生成物を作ったりすることである。サビはその一例である。腐食は自然に起こることが多いが、その一方で人為的に行うこともある。着色腐食を用いることで金属を人為的に腐食させると、表面にはさまざまな色彩の不思議な模様が現れる。このことは以前からわかっていたが、不思議な模様が何に対応するのかについて詳しく調べたのは熊井研究室が初めてだ。この着色腐食によって現れる模様と合金の組織の不思議な関連性については、研究室に所属していた修士2年の学生がほかの実験をしている最中に偶然見つけた。その学生は、その後の博士課程3年間でさらに詳しく研究し、さまざまなことを明らかにした。

さて、この着色腐食という手法を用いると、直接の観察や従来の腐食法とは違って、合金の表面はどのように見えたのか。ある合金を腐食させると、表面には半透明の被膜ができる。同じように腐食されても、場所による金属成分の違いによって腐食されやすさが異なり、そのため違いが目に見える形で現れる。被膜の厚さで見える色は変化するのだ。薄ければ白色に、厚ければ厚いほど茶色に見える。腐食した結果同じ色に見える場所の金属成分は同じといえる(写真)。このことから、液体を冷やして固めた合金の塊はどれも成分が同じなのではなく、常に成分に偏りが生じていること、ある元素は合金内をすばやく拡散し、ある元

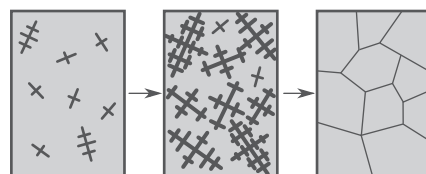


図5 純金属の液体が固体結晶になる様子

液体中にできた結晶の核が樹枝状に成長したのち、他の成長してきた結晶とぶつかったところが他の結晶との境界になる。



写真 腐食した金属の表面

素はゆっくり時間をかけて移動することを色彩の違いにより表現することができた。

現在この研究は他の分野、主に合金開発に活かされている。従来はある温度での固体の形や液体中に占める割合など、固体と液体が共存した組織を調べたい場合に、既存の方法では正確な評価ができなかった。しかし、この着色腐食という方法を用いて観察すると、はっきりと色によって急冷前後の組織の違いを判別できる。その結果、合金の評価が今までよりも正しくできるようになった。色の違いが見えるのは他の合金にも共通することなので、今後さまざまな研究に応用されることを熊井先生は期待している。

研究室の在り方

熊井先生の研究内容はそのまま実用的な材料に活かされることが多く、企業で製品化される話などに非常に近いところにある。材料は使われて初めて意味を成すものなので、産業に用いられることは大切である。しかし、だからこそ熊井先生は学問として材料を研究することを意識している。

基礎研究・応用研究といった言葉で研究内容が分類されることがあるが、着眼点が異なるだけで、この2つに研究としての差はそれほどないのではないかと熊井先生はいう。なぜなら私たちが普段使っている材料は基本的な原理原則が活かされている、つまり実用的な材料を創っているからといって基礎研究をしていないということは決してないからだ。今回挙げた研究内容も非常に実用的だ

が、研究室ではその現象を支配している真理の探究をしている。私たちが身の回りで使っている材料の問題点と金属の原理原則の関係について探っていけたら良いと熊井先生は語る。

熊井先生は研究自体だけでなく、学生がのびのびと育つ研究室を作ることにも力を入れている。熊井研究室には現在大きく分けて3種類の研究テーマがあるが、先生は誰にどの研究をさせるかをあらかじめ決めるのではなく、それらのうちどれを研究したいか、まず学生にきく。自分の好きなテーマを、その研究内容を面白がった学生が実験をすると、熊井先生の想像以上の結果が出てくるそうだ。研究室では同じテーマを研究する学生同士が集まって自主的に勉強会を開くなど、ときには熊井先生が輪に入れなくなるくらい積極的に熱心なこともある。

そのまま学者として研究しない限りは、研究テーマがその学生の将来に直接つながることはほとんどない。しかし、どのようなテーマであれ、それについて時間をかけて楽しみながら研究することは、失敗体験も成功体験もかけがえのないものとなり、そこから得るものは非常に大きいと熊井先生は考える。「少なくとも論文数だとか、あるいはどれくらい研究成果でお金が儲かったとか資金獲得できたとかいうことに関しては、すごい研究室がたくさんあるけど、学生さんがどれくらい喜んで巣立って行ったかっていうことに関してはあんまり負けてないんじゃないかなと思います。」と先生は誇らしげにいう。自分で考えて研究し多くのものを得たて巣立つ学生こそ、価値のあるものである。熊井先生はこのように学問を通じて明日の材料を担う研究者・技術者を育てている。

執筆者より

取材時には実際に衝撃圧接で接合した金属板を見せてくださったり、図を描きながら丁寧に説明していただいたりと言葉以外のものでも研究内容を知ることができて、文章を書くときに大変なためになりました。お忙しい中取材を引き受けてくださった熊井先生に心より感謝申し上げます。

(横山 塔子)