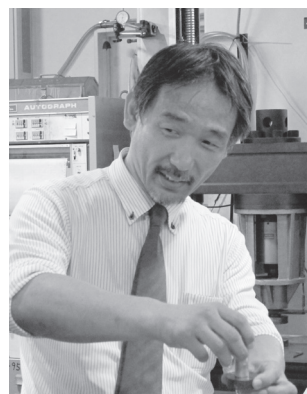


塑性加工で切り拓く ナノテクの世界

機械制御システム専攻 吉野 雅彦 研究室

吉野 雅彦 教授 1960年東京都生まれ。1984年東京工業大学大学院理工学研究科機械物理学専攻修士課程修了。同年日本鋼管株式会社入社。1987年東京工業大学大学院理工学研究科機械物理学専攻助手。2008年より同大学院理工学研究科機械制御システム専攻教授。



材料に大きな力を加えて変形させることで目的の形状にする加工法を塑性加工というが、吉野研究室ではこの塑性加工を用いてナノテクノロジー（ナノテク）製品を作ろうとしている。本稿では先生がどのようにして塑性加工技術をナノテクとして利用したのかについて触れながら、その応用であるナノドットアレイの作製や、光メタマテリアルの製法について紹介しよう。

理想の加工法

現在、私たちの周りにはさまざまなナノテク製品があふれている。その最たる例が集積回路内の半導体素子である。技術の進歩とともに小型化が進み、その情報処理能力は飛躍的に向上した。その結果、開発された当初は巨大だったコンピュータも今では小さくなり、一人一台持ち歩けるような時代となった。さらに、物質を原子レベルで制御する技術も進んでいる。髪の毛に乗るほど小さなワイングラスの画像を見たことがある人もいるだろう。このようにナノレベルで物質を自在に加工する技術が現実のものとなってきている。

しかし、ただ単にナノレベルでモノを作ることだけがナノテクではない。ナノレベルの世界では原子間の相互作用の影響が大きくなるので、今までのマクロな世界では見られなかった特殊な性質が多く見られるようになる。例えば、半導体素材として注目されているカーボンナノチューブは、

幾何学的構造によって電気伝導率などの物性が変化するという性質をもっている。また、ハスの葉の表面には微細な突起が並んでおり、これによってハスの葉は優れた撥水性を示す。このような特徴的な性質を自在に制御する技術として微細加工技術があり、ナノテクの発展を支えてきた。

現在の微細加工技術は、加工の際のアプローチによって2種類に大別することができる。一つはトップダウン方式と呼ばれるもので、原材料全体から不要な箇所を削ることで微細な構造を作る方法である。例えば、集積回路などで使われる半導体素子は一般的に、このトップダウン方式のリソグラフィー法という手法で作られる。リソグラフィー法は、加工に特殊な装置が必要なため製品の単価が高いが、数十ナノメートルという非常に高い精度での加工ができる。もう一つはボトムアップ方式と呼ばれるもので、原子・分子を積み重ねることで目的の構造を作る方法である。例えば、熱を加えたり化学反応を起こしたりすること

で自然と規則性のある構造が出来上がる現象を利用した、自己組織化法という手法がこれに該当する。この手法は反応をうまく制御できれば分子レベルで任意の形状を作ることができるので、リソグラフィー法に代わる微細加工技術として研究が進んでいる。

このようにさまざまな微細加工技術が生まれてきている中、吉野研究室ではナノテク製品の新たな生産方法として、塑性加工を用いた微細加工技術の開発に挑戦している。

まずは塑性加工について説明しよう。塑性加工とは、材料に大きな力を加えて変形させることによって目的の形状にする加工法である。代表的な例としては車のボディを生産するためのせん断加工やプレス加工が挙げられる。皆さんは車のボディが生産される過程を見たことがあるだろうか。ただの金属の板がプレス機によって一瞬で車のパーツに加工される様は圧巻だ。塑性加工は何となくその生産速度が特長である。また、工程が単純な場合が多く、コストが低く抑えられることも塑性加工の長所である。つまり、大量生産技術として塑性加工はとても合理的な方法なのだ。

しかし、塑性加工を微細加工に応用した例は今まで存在しなかった。その理由は、そもそも塑性加工は自動車の部品など大きな製品を作る方法であるという固定観念があり、小さなものを作る微細加工技術とは縁遠いという考えが一般的であったからだ。また、リソグラフィー法のような従来の微細加工技術を用いることで複雑な加工を高い精度で行えるため、塑性加工をナノレベルで行う優位性が見いだされなかった。これらの理由から、塑性加工が従来の微細加工技術に勝る加工法になりうると考えて研究した人は、今まで誰一人としていなかったのである。

だが吉野先生は違った。塑性加工の長所である生産性の高さで他の微細加工技術と勝負できると考えたのだ。塑性加工をナノレベルの加工に応用することができれば、従来よりも少ない工程で安価にナノテク製品を生産することができる。車のボディが一瞬で出来上がるのと同じ要領で、材料を機械に通すだけでナノテク製品が一瞬で作られるというのが先生の目指す理想の加工法だ。

理想の加工法を実現するための第一歩として、先生はまず工具とその制御技術の開発に取り組んだ。それは、塑性加工を応用して微細加工を行うために必要なナノサイズの工具と、その位置をナノオーダーの精度で動かす技術が存在しなかったためである。そこで先生は、ナノサイズの工具に関しては一本刃の彫刻刀のような形状の工具を特注した。また、制御技術に関しては従来の計測装置を組み合わせることで、塑性加工装置として用いた。これにより単純な形状の工具をナノオーダーで制御し、材料表面に微細加工を行う技術の開発に成功したのである。

この技術を利用して、吉野研究室では機能表面を作り出すための微細塑性加工技術の開発を目指している。機能表面とは、表面の構造の特殊性によって、特定の機能を発現している表面のことである。一本刃の工具を武器に、どのような機能表面をどのような方法で作りに出していくのか。吉野研究室の取り組みの一部を覗いてみよう。

ナノドットアレイ

■ 塑性加工によるナノドットアレイの作製

エボラ出血熱が西アフリカを中心として広範囲に感染拡大したことはまだ記憶に新しいことだろう。諸外国の感染拡大が騒がれる中、感染防止の砦となるのが空港や港湾にある検疫所だ。だが現在のウイルス検査は時間がかかるため、検査対象となる人全員に適用することは難しい。そんな時に、簡単に使えてすぐに結果のわかるウイルスセンサがあったら便利だろう。これを実現できるものとして近年注目されているのが、ナノドットアレイと呼ばれる構造をもった機能表面である。吉野研究室ではこのナノドットアレイの作製に関する研究を行なっている。

ナノドットアレイとは、ナノサイズの粒子が材料表面に規則的に配列したものである。そしてこの微細な粒子の構造により、ナノドットアレイはさまざまな光学的特性を発現する。その一つに特定波長の光を吸収する機能がある。ナノドットアレイに光が入射すると、粒子内の電子が共振を起

こす。その結果、粒子の形状に応じた特定の波長の光を吸収し、表面が吸収光の補色に色づいて見える。また、その吸収光の波長はナノドットアレイ表面にタンパク質やウイルスが付着すると変化する。そのため、色の変化の度合いを調べることによって、簡単にウイルスの存在を確認できるセンサへの応用が期待されているのだ。

他にもナノドットアレイは独特の光学的特性を示すため、ウイルスセンサのみならず、太陽電池の効率向上や分子構造解析装置の感度向上など、さまざまな分野への応用が期待されている。これらの技術を実用化するために、ナノドットアレイを安価に大量生産することが求められている。

ナノドットアレイの生産技術に関してもトップダウン方式とボトムアップ方式の2つのアプローチが考えられる。トップダウン方式の加工の場合、前述のリソグラフィー法などの技術を用いることでナノサイズの粒子を規則的に削り出すことができる。だが、ウイルスセンサとしての使用用途を考えると使い捨てできるほどの低コスト化が必要なので、コストがかかるリソグラフィー法は実用的な生産手段としては問題がある。一方、ボトムアップ方式の加工には、焼鈍法という方法がある。この方法は前述の自己組織化法の一つで、材料表面に金属薄膜をコーティングしたものを炉で焼くと金属同士が凝集し、微細な金属粒が多数できるという性質を利用したものだ。しかし、その金属粒の配置やサイズはバラつきが大きく、センサとして利用するには十分な精度ではないのが現状だ。

このように、従来の加工技術でナノドットアレイを生産するには問題があった。先生はこれを解決するために、微細塑性加工と前述の焼鈍法を組み合わせることで十分な規則性をもった粒子の配列を作り出そうと考えた。そもそも焼鈍法による金属粒に規則性がないのは金属薄膜に規則性がないためである。そこで、微細塑性加工で金属薄膜に格子状のパターンを施すことで規則性を与えて炉で焼いた(図1)。すると、溝で金属が分離して凝集し、非常に高い精度の粒子の配列ができたのだ。つまり先生は、微細塑性加工を用いて焼鈍法にひと手間加えるだけでナノドットアレイができるという画期的な手法の開発に成功したのである。

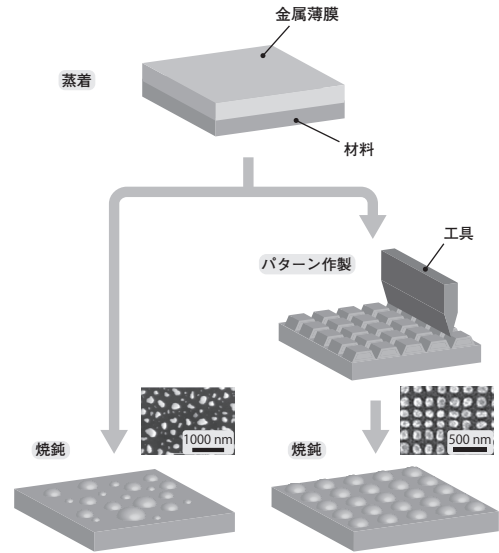


図1 ナノドットアレイの製法

微細塑性加工で格子状のパターンを施すことで、精度の良い粒子の配列を作ることができる。図中の写真は実際に作製したナノドットアレイである。

■ 生産方法の高効率化を目指して

微細塑性加工を組み合わせたナノドットアレイの画期的な生産方法の開発には成功したが、実はこの方法における加工効率率は現状ではあまりよくない。その理由は、現在用いている工具が一本刃のものしかいないため、一本ずつ溝を彫らなければならないからである。これでは生産性が低く実用化どころではない。先生はこの問題を解決するために、刃が何百本もついたスタンプのような工具を作ろうとしている。目的とする工具の具体的な作り方には鑄造の原理を利用しようとしている。一本刃の工具で母型に数百本の溝を彫り、工具の材料を流し込むことで、刃が数百本ついた工具を作り出すという仕組みだ(図2)。

原理自体は非常に簡単だが、これをナノサイズで行おうとすると多くの課題が出てきてしまう。例えば、母型から工具となる材料を剥がす際に刃が欠けてしまうという問題がある。刃が欠けないように母型に剥離剤を塗ると刃の先端部分を正確に転写することができなくなるため、剥離剤を使うことはできない。また、母型を溶かすことで工具を取り出すという手法もあるが、これでは母型を繰り返し使えず効率が非常に悪いいため、この方

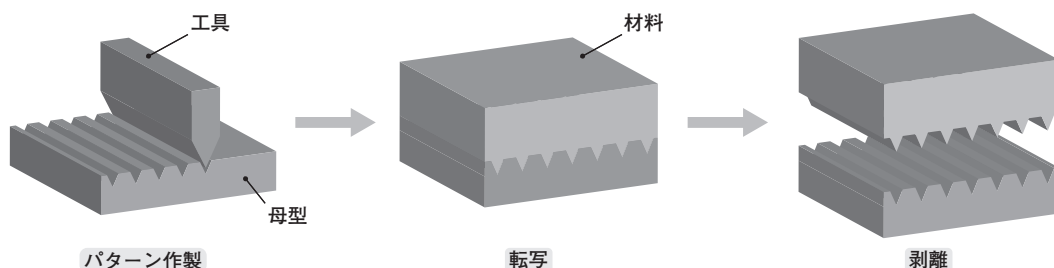


図2 スタンプ工具の製法

法では本来の目的を達成できない。加えて、工具の材料に何を用いるかという問題もある。硬すぎる材料で工具を作ると、剥がす際に母型を傷つけやすくなり、母型を繰り返し使うことができない。一方、柔らかすぎる材料で工具を作ると工具として機能なくなってしまう。このように製法や材質にさまざまな制約があり、それらの制約をすべてクリアすることは難しいと先生は言う。

現在はさまざまな材料で試行錯誤しながら工具作りをしている最中である。実現すれば、ナノドットアレイを効率的に生産することができるようになり、ナノドットアレイを応用したデバイスが発展していくだろう。

光メタマテリアル

ナノドットアレイの簡便な生産方法を考案し、実用化に向けた研究を行なっている吉野研究室だが、同時に、ナノドットアレイの技術をさらに発展させることで新たな機能表面の開発を目指している。その中の一つに、いわゆる透明マントの実

現をも可能とする光メタマテリアルの開発がある。

光メタマテリアルとは、自然界には見られない光学物性を有する人工物質のことをいい、特に負の屈折率をもつものを指す。もし光メタマテリアルを作ることができれば、従来の物質では起こりえなかった現象を利用して、今までの常識を覆すような製品を実現することができるのだ。

その一つが透明マントである。どのような現象が起こるのか、原理とともに説明しよう。光メタマテリアルに入射した光は境界で屈折し、負の屈折率により光メタマテリアルの周囲を迂回するように伝播する。そのため、光メタマテリアルの外部からはその内部の姿を捉えることはできず、奥の景色が透けて見えるのみとなる（図3）。

光メタマテリアルは透明化技術以外にも、理論的予測に過ぎなかった、スーパーレンズと呼ばれる分解能が非常に高い光学顕微鏡や高速光通信など、多くの技術を実現させると期待されており、世界中で激しい開発競争が行われている。光メタマテリアルにはさまざまな作り方が考えられているが、そのうちの一つに微細なC字型の金属素子

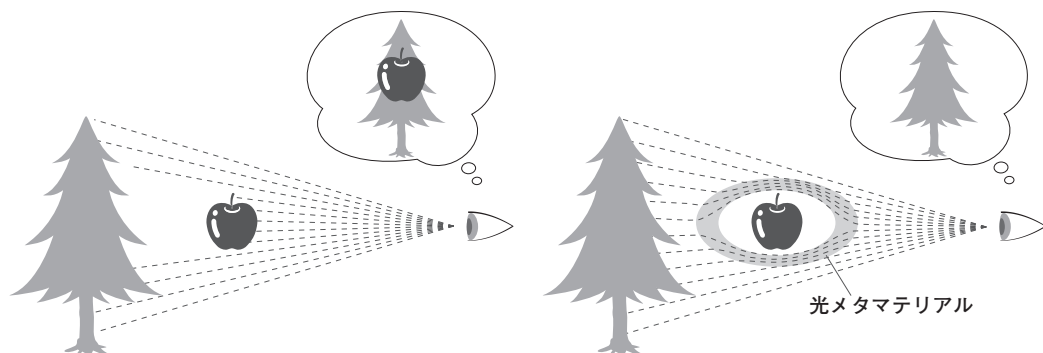


図3 透明マントの原理

光メタマテリアルで物質を囲うと、光はその周囲を迂回するように伝播するため、外からその姿を捉えることはできない。

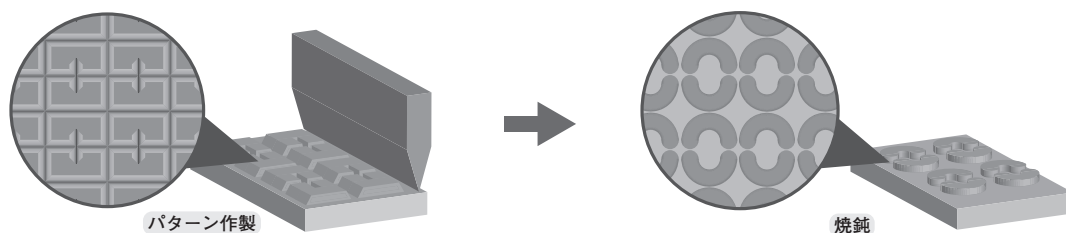


図4 光メタマテリアルの製法

を2つ組み合わせて、光の振動数と等しい固有振動数をもつ共振回路を作る方法がある。その共振回路を平面上に並べ、さらにそれを積み重ねて三次元周期構造にすることで材料の屈折率が負となるというのは理論的に証明されており、マイクロ波などの長波長領域では既に実現している。しかし、可視光などの短い波長領域でも実現するためには、より小さなC字型共振回路を作る必要があり、未だ実現には至っていない。

そこで、吉野研究室では塑性加工を用いて可視光領域での光メタマテリアルの開発を目指している。具体的にはナノドットアレイの作製で用いた技術を応用してこのC字型共振回路を作れないかと試みている。先生が考案した方法では、ナノドットアレイと同様に金属薄膜に格子状の溝を彫った後、各格子の一部に切り込みを入れることで金属をC字型に凝集させる（図4）。

現在はこの溝をつけるところで苦労していると先生は言う。ナノドットアレイのときと違い、溝と溝の間に、C字型に凝集させるためのさらに小さな切り込みが必要になるため、その位置の制御が難しい。実現にはまだしばらくかかりそうとのことだが、成功すれば光メタマテリアル製品を安価に生産できるようになるだろう。もしかすると吉野研究室で開発された光メタマテリアルの製法が世界中で使われる日がやってくるかもしれない。

運・根・鈍

このように吉野研究室では塑性加工を用いたナノテク製品の開発を目指しているが、先生が取り組んでいるものはそれだけではない。プレス加工による自在な結晶方位制御法や、高圧低温などの極限環境下における生物細胞の研究など、その研

究内容は塑性加工の枠を越えて多岐にわたる。なぜそのような多種多様な研究テーマを見つけられるのだろうか。そこには先生の恩師のある言葉が関係している。

研究の心構えとして大切なものの一つに「運・根・鈍」という言葉がある。研究が運に左右されることは仕方ない。でも諦めずに粘り強く繰り返す根性が必要。鋭い感覚や深い考察はもちろん重要だが、一方で失敗に悲観的にならず、周りに左右されず、我が道をゆく鈍感さも必要だ。

アイデアは誰しももつことができる。あとは、失敗を恐れず、なんとかしてそのアイデアを実現してやろうという図々しさや無謀さが必要だと先生は言う。このような行動力こそ、吉野研究室が塑性加工によるナノテク製品開発という未知の領域にチャレンジし続けられる原動力なのだろう。先生はこれからもさまざまなデバイスを、私たちが想像もできないような、あっと驚く方法で作っていくに違いない。

執筆者より

塑性加工を用いたナノテク製品の開発について、加工学に関する深い知識のない私たちに、吉野先生は一から詳しく説明してくださいました。最先端の研究に触れることができただけでなく、研究者としてのあり方についても学ぶことができ、たいへん貴重な経験になりました。ご多用のところ、度重なる取材に快く応じてくださった吉野研究室の皆様へ心より御礼申し上げます。

（齊藤 右京）