

俯瞰ワークショップ報告書
ナノテクノロジー・材料分野
区分別分科会
「共通基盤科学技術（製造加工）
ー デジタル情報を基にした製造加工の姿 ー」

2018年3月11日（日） 開催



エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が2018年3月11日に開催した俯瞰ワークショップ ナノテクノロジー・材料分野区分別分科会「共通基盤科学技術（製造加工）ーデジタル情報を基にした製造加工の姿ー」に関するものである。

CRDSでは2017年4月に、本分野における世界各国の国家計画、投資戦略、研究ポテンシャル、技術進化そして産業動向、主要な研究開発領域を含む分野全体を俯瞰した俯瞰報告書2017年版を発行した。報告書では、CRDSが抽出した37の主要研究開発領域について研究開発状況や国際比較を取り纏めたが、新たな研究動向や変化・進展のきざしなど、さらなる調査・検討が必要な領域がまだ多数あると認識している。そのため、2017年度より環境・エネルギー、共通基盤技術（計測分析、製造・加工）に焦点を当てた活動を行ってきた。今回は、ナノテクノロジー・材料の進展に不可欠な製造技術・加工技術に関する研究開発動向を広く俯瞰することを目的にワークショップを開催した。製造加工技術は新奇材料の登場や高度化に向けた成熟技術の漸次進展の側面と、材料プロセスと成形がより密接になった新たな技術展開の2つの側面を持つが、ここでは前者の技術として精密機械加工技術、後者の技術としてAdditive Manufacturing技術およびプリンテッドエレクトロニクス技術を取り上げての話題提供と、材料機能の設計・制御とその加工手法、製造加工の新たな方向性、製造加工技術を基盤学術として維持発展させるための仕組みなどを総合討論で議論した。

冒頭にCRDSより、デジタル化が進み製造加工技術やものづくりの形が変わりつつ中で、問題意識や今後の日本における新たな製造を支える仕組みの仮説を紹介し、製造加工技術が今後どのような方向へ向かっていき、それを支える技術として何が必要かなど、議論の視点を示した。

機械加工の領域においては、切削加工分野における研究開発の方向性として高精度化、高効率化、自動化（スマート化）があることを超音波楕円振動切削法での実例で示し、人材育成としての実践教育の場の必要性が示されたほか、自動車への適用を目指した炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の塑性加工の試みと技術的課題、CFRP成形加工ロードマップ、原子レベルから製品レベルまでの各レベルを俯瞰したものづくりの必要性が示された。

Additive Manufacturingの領域においては、金属付加製造（積層造形）の先進動向、航空分野や医療分野での応用例、理想的な付加製造に向けた4つの課題（付加製造装置の高性能化、原料粉末の製造技術開発、プロセスモニタリングと計算機シミュレーションによる組織予測、形状制御と材質制御の両立）が示されたほか、微細な構造が形成できる光造形に関して加工線幅と加工速度との関係、3D造形技術や材料面などの今後の課題が示された。

プリンテッドエレクトロニクス技術の領域においては、印刷プロセスの俯瞰と特徴、高精細・微細印刷技術（親撥パターンニング法）、界面制御技術の重要性、印刷プロセスの技術課題、横断領域を一体的に開発できる体制作り（拠点化）の必要性が示されたほか、印刷によるデバイス（トランジスタ、回路、センサ）の作製例、印刷による微細な有機トラ

ンジスタの特性、自己組織化単分子膜（SAM）によるコンタクト抵抗低減結果などが示された。

総合討論では、上記の趣旨説明および話題提供内容、産業技術総合研究所のオンデマンド製造の取り組み紹介を踏まえ、今後の製造加工の姿や日本の方策について議論し、以下の方向性が示された。

① デジタル化した製造加工の姿と提供すべき価値

- ・デジタル化で構造設計から材料設計、製造までを一体化し、加工技術をフレキシブルに組み合わせて多様なニーズに対応して製造していく。
- ・デジタル化により、データを持っているところとデータから物を作るところに付加価値が存在するようになり、利用者の欲しい機能が製造技術を通して提供される。

② 新しい製造の形に向けた課題

- ・試作から生産への移行に大きなギャップがあるが、これらを融合化してコンパクトにし生産のギャップを埋めることがデジタル製造の課題である。
- ・日本の強みをさらに強くするには、縦の技術であるものづくりプロセスの技術を強くすることに加え、デジタル化で横のバリューチェーンをつなげることにある。

③ デジタルデータにおける価値

- ・データの中にサイエンティフィックな深み（材料の理解、加工現象の理解）を加えることと、製造技術とそのハードウェアにおける付加価値を見出すことが鍵となる。
- ・企業も自前のデータでは追いつかなくなっており、様々な機関のデータベースの活用や戦略的なオープン化を考える必要がある。

④ 製造加工プラットフォームの必要性

- ・プロセスの中のメカニズムやパラメータの情報も含めて、質の高い製造加工技術のプラットフォームが必要である。
- ・大学が開発した技術や装置をオープンに使えるプラットフォームをつくり、それをブラッシュアップしていくことが重要である。

⑤ 人材育成の課題

- ・大学における工学教育の中で、ものづくりに関する基盤的教育が難しくなっており、企業でも工学的基礎知識を持たずに製造に従事するという危機的状況にある。
- ・大学と企業との共同研究を通じて、学生への基盤的教育とともに、社会人による博士号取得を進めるべきである。

これらの議論の結果を踏まえて CRDS でさらに検討を加え、2018 年度末に発行予定の「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2019 年）」に反映させるとともに、今後国として重点的に推進すべき研究領域、具体的な研究開発課題の検討に活用する。

1. 趣旨説明

曾根 純一、伊藤 哲也（科学技術振興機構 研究開発戦略センター）

デジタル情報をベースにした製造技術というテーマを選んだ理由はいくつかあるが、一つには日本は匠の技の国だったはずだが最近はそのポジションが失われつつあるのではという危機感がある。大学の現場を見ていると、ものづくり技術に関係する研究開発を積極的に進める環境にない、新しい時代の波がやってきているときに対応できていない、今までの技術の蓄積がどんどん失われている、といった危機感がある。

ソフトウェアなど情報（ICT）の新しい技術はシリコンバレーで生まれている。日本はそこでのやり方を勉強したが、簡単には追いつき、追い越せそうにない。また、ハードウェアの新しい技術を生み出すことに関しては日本が進んでいると思っていたが、ここでもレーザー加工などの基盤技術はドイツにリードされており、日本のポジションが下がりつつある。

一方で、ICT が良くも悪くも技術全体に様々な影響を与える時代に入りつつある。現在、Society5.0 の実現ということを CSTI が打ち出している。これからサイバー空間とフィジカル空間の融合（CPS：Cyber Physical System）の時代がやってくるということだが、ICT がものづくりのほうへ攻めてくるという危機意識があった。つまり、サイバー領域を踏破したグーグルやアマゾンなどが、いよいよその力を持ってリアルワールドへ入ってくるのではないかということである。しかし、現実にはデジタル技術が入ってくことで、ものづくりが新しいステージに入り、ハードウェアに大きな価値が生まれつつある。

例えば、家電はすでに成熟した技術領域と思われたが、今は家庭内の電子機器がデジタル情報を介して繋がって新たな機能を提供しつつあり、また、お掃除ロボットなどが、家庭内を動き回り、見守りを行ったり、会話を行ったりするスマートロボットに進化しようとしている。デジタル技術がトリガーになって、昔ながらのハードウェアの領域を一新するような、新しい波が起きている。

このワークショップでは製造技術全体をそのような目で議論していきたい。製造の領域は大変広いので、まずやれるところからやっていきたい。様々な機械加工や3Dプリンティングなどを取っ掛かりにして議論を深め、国として何をしたら良いか、どのように方向づけをしたら良いか考えたい。

製造技術と加工技術の動向を広く俯瞰し、製造加工が今後のデジタル化という流れの中でどのような技術になっていけば良いかを、材料の機能設計・制御とその加工法を展望し、今後の研究開発の方向性とその推進方策について考えることが本ワークショップの趣旨である。

製造加工という領域は非常に幅広いものである。ナノテクノロジー・材料の分野では、微細加工、半導体のリソグラフィといったところだけを考えがちだが、今回はもっと範囲を広げて製造加工を考えてみたい。図 1-1 に示すように、製造加工の今後の姿を考えたい。



図 1-1 新たな製造加工の姿は？

サイバー空間とフィジカル空間との関係を示した図 1-1 において、データをもとに実体化するものの例として、「3Dプリンタによる具象化」と書いてあるが、これは一般には製造加工技術といえる。デジタルデータを具体化・具象化していく技術として製造加工が今後どうなっていくのか。Society 5.0 の中では、必要なモノ・サービスを必要な人に必要な時に必要なだけ提供するとされている。デジタル化の中でオンデマンドに対応する製造加工技術としてどのような要素が必要になるかを考えていきたい。

デジタルをベースにした製造では、極端な言い方をすればデジタルデータがあればどこでも誰でも同じものを作ることができる状況となるだろう。その中で、日本の製造業が確たる地位を占めていくために、差別化できるのはどこなのか。何をつくり、どのような価値を与えるのか、などを考える必要がある。設計や基礎のところは非常に重要なことは間違いないが、その上で加工技術についてより高精度化、高効率化をしていく必要がある。加工の対象になる材料自体も新しいもの、高機能なものが出てきており、これらに対応していく必要もある。さらに、素材産業の変化として、素材メーカー・材料メーカーもただ材料・素材を提供するだけではなく、より上流の機能設計というところまで入り込んできていることから、加工と材料製造がこれまでより密接になっていくと考えられる。これを体現する新しい製造技術として、付加製造（Additive Manufacturing）、3Dプリンティングといった技術や、プリンテッド・エレクトロニクスという印刷で半導体デバイス・回路をつくる技術のように、形をつくることと機能をつくることが一体化した新しい製造の姿が見えてきている状況である。

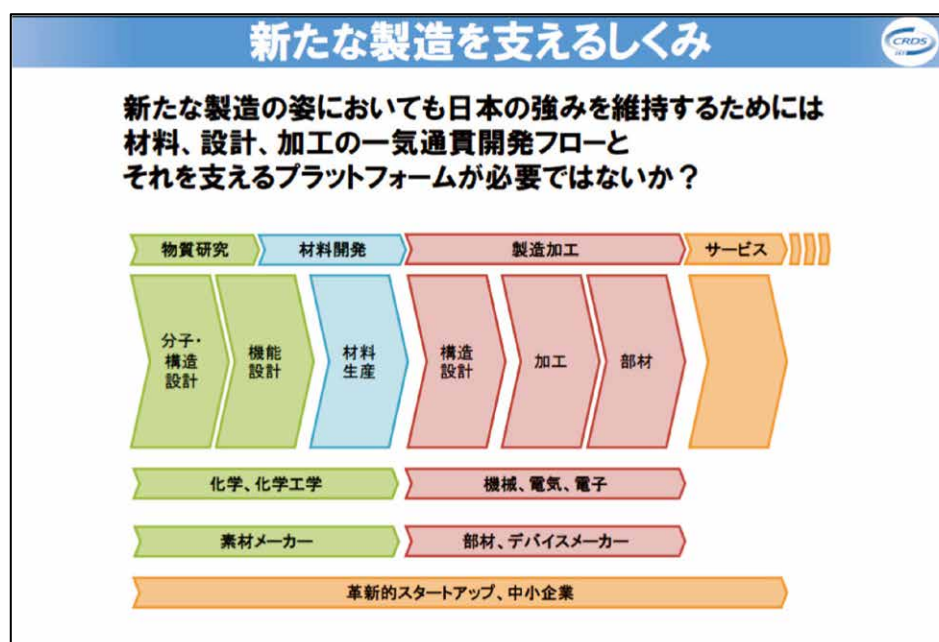


図 1-2 新たな製造を支える仕組み

このような新しい製造の姿において、今後日本の強みを維持していくためには何をすべきか。図 1-2 に示しているのはこれまでの物質研究・材料開発から製造加工を経てサービスまでの一環の流れである。今までは機能設計、材料開発と形をつくる製造加工が分断をされていたが、前述のように今後、これらはより一層密接になってくると考えられる。加工の人も材料を考え、材料の人もその後の加工を考えることが必須になり、これを一気通貫で開発できる開発フローとそれを支えるプラットフォームが必要になってくると考えている。

このような背景を踏まえて、このワークショップではまず話題提供として機械加工、Additive Manufacturing、プリンテッド・エレクトロニクスの最新の技術・動向を紹介いただき、総合討論で今後どのような方向に進んでいけば良いか、新しい製造を支えていくあるいは根幹をなす技術としてどのような姿を求めていったら良いかなどについて議論したい。

2. 機械加工

2.1 加工技術の高精度・高効率化 ー 精密切削加工の例 ー

社本 英二（名古屋大学）

加工技術について、多くの部品からできている自動車の例で説明する。板金部品やボディーのような部品はプレス加工で成形される。このプレス加工に使われる金型は切削加工によって粗加工と仕上げ加工により形がつくられる。その後、その形を転写してプレスによって板金部品がつくられる。これ以外のブロック部品にはエンジンやギアなどがあり、これらはダイキャストあるいは冷間鍛造などの方法でつくられている。その金型も切削で作られている。カムシャフトの場合、ベアリングが嵌まる大事な部分は切削で直接仕上げられている。樹脂部品やタイヤなどのゴム部品は射出成形で量産されるが、その金型も切削で作られる。この自動車の例に限らず、機械産業の部品は直接、間接の違いはあるが、その形は切削加工で作られている。このように切削のプロセスは古い分野であるが様々なところで使われており、少しでも進展があると社会的に大きな影響を及ぼす。例えば、切削の精度が少し上がると、ほとんど全ての部品の精度や性能が上がる。切削のコストが下がれば、ほとんど全ての製品のコストダウンにつながる。

この分野の3つの方向性を図 2-1-1 に示す。1 つは高精度化、2 つめは高能率化、3 つめは自動化であり、工程集約またはその先に智能化といった IoT 対応がある。

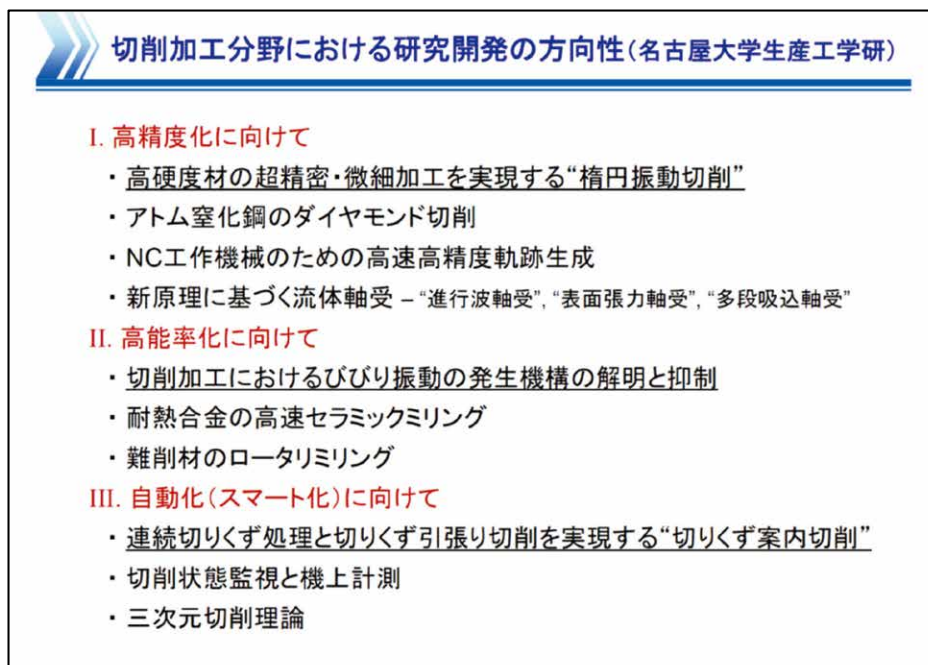


図 2-1-1 切削加工分野における研究開発の方向性

まず、高精度化について説明する。代表的なものに金型の磨きレス加工という高精度化の加工テーマがある。最終的な金型加工仕上げは手磨きで行うことが多いが、手磨きは時間がかかりコストアップにつながる。また、機械加工で高精度に作製しても磨きによって形状を崩してしまう精度悪化の課題もある。さらに、微細形状は磨くこと自体が難しい。

このような課題に対して、磨きレスで直接高精度な切削加工をしたいという要求がある。ここでの課題は、鋭利なダイヤモンド工具の刃先が摩耗することである。精密な切削には単結晶のダイヤモンド工具を使うことが多いが、その理由は単結晶では粒界のような欠陥がなく非常に精度の良い鋭い切れ刃が形成できるためである。（図 2-1-2）しかし、このダイヤモンドの刃先を金型鋼のような材料に適用すると、ダイヤモンドの炭素と反応しやすいという問題がある。これは多くの金属材料で同様であるが、炭素と固溶しやすい材料の切削されたばかりの新生面と触れていると、ダイヤモンドの炭素がそこにどんどん拡散していき摩耗してしまうという問題がある。

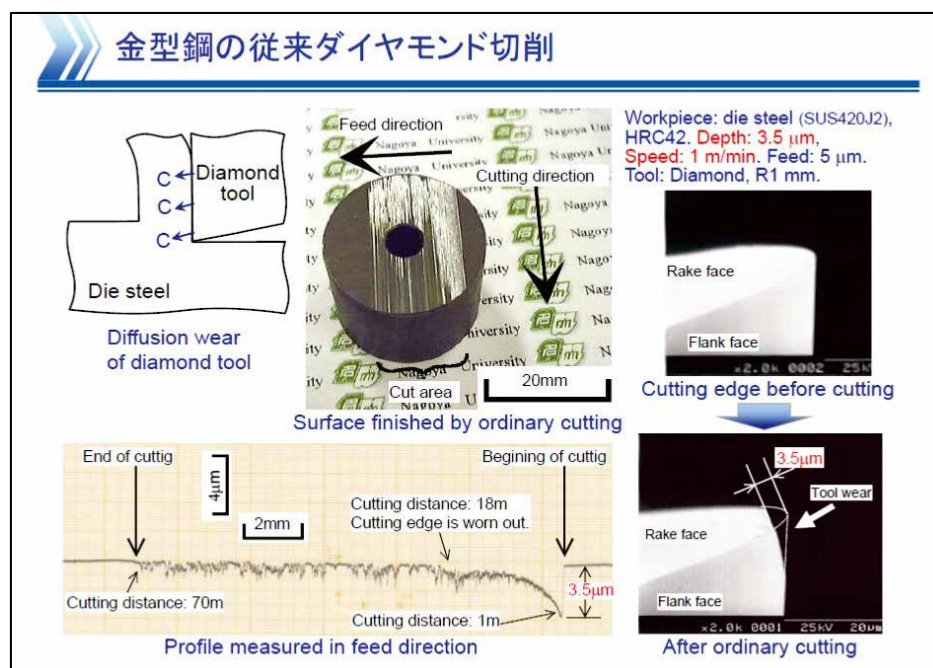


図 2-1-2 金型鋼の従来ダイヤモンド切削

図 2-1-2 右下写真は実験の結果だが、ゆっくりと低速・低温で加工しても、加工前の鋭いダイヤモンドの刃先が加工後には切り込んだ部分がほぼ無くなるくらいに激しく摩耗している。面を見ると、むしろれたようになっており、金型鋼は実際にはほとんど削れておらず、切り込んだ量（3.5 μm ）だけダイヤモンドの工具の刃先がなくなっていた。

これに対して我々が取り組んだ研究の一例を紹介する。切削のプロセスを直接観察するために、電子顕微鏡の中で切削できる小型の装置を作り、切削のプロセスを観察した。この結果を図 2-1-3 に示す。切削中に時々離れると良いと言われていたが、刃先を楕円状に振動させる（削ったり離れたりを繰り返す）振動切削と呼ばれる方法で切削すると、もっと良いことを見いだした。従来のやり方で切りくずは非常に厚いが、楕円状に振動しながら切削すると、切りくずの裏面を上押し上げるように切削し、離れた状態で下に戻ってくるということを繰り返す。すると、切りくずの厚みが非常に薄くなった。従来の方法では、広い面積をせん断変形して分厚い切りくずを作っていたが、この楕円振動切削プロセスの場合は、上向きにせん断をすることで非常に小さな面積しかせん断しなくて良いので、力もエネルギーも発熱も非常に小さくなる。

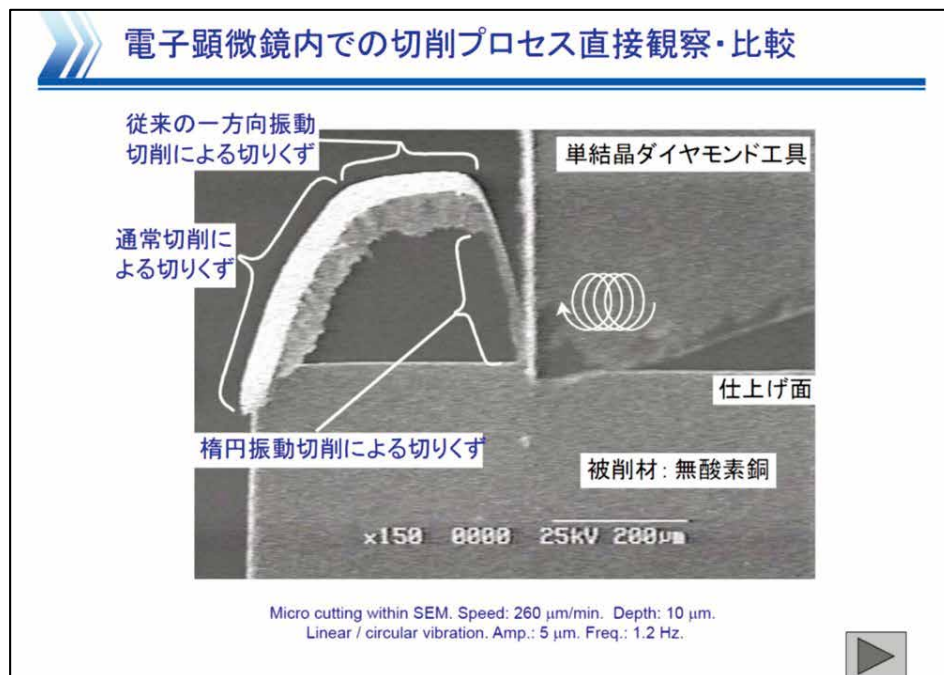


図 2-1-3 電子顕微鏡内での切削プロセス直接観察・比較

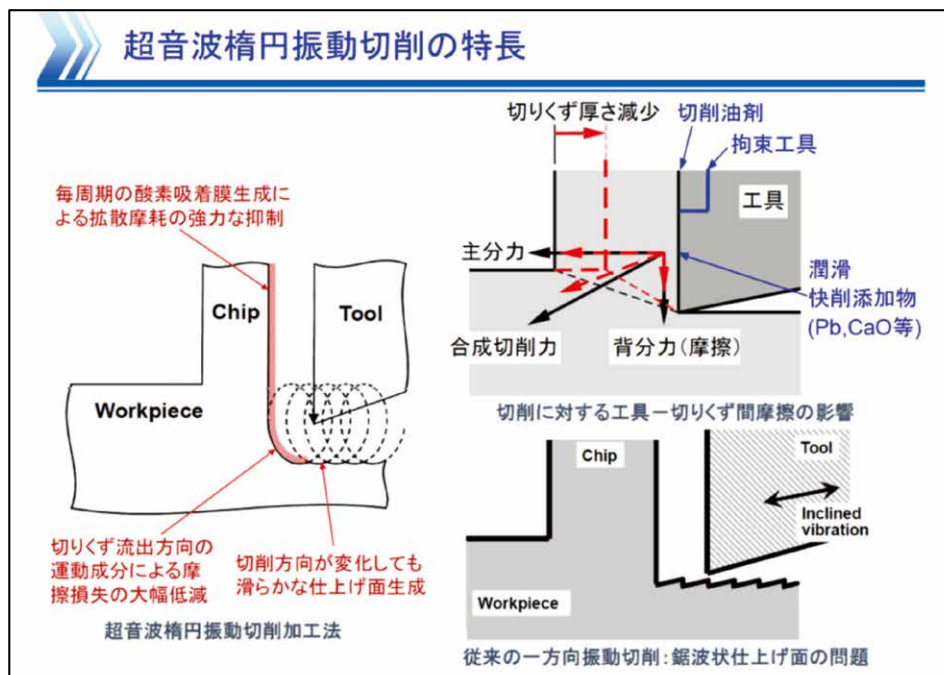


図 2-1-4 超音波楕円振動切削の特長

図 2-1-4 に超音波楕円振動切削の特長を示すが、このプロセスの実用上の利点は3つある。一つは上向きに動くことで力やエネルギーが小さくなること。もう一つは、振動の周期ごとに新生面が空気に触れて酸素吸着膜が生成され、この酸素吸着膜が炭素拡散の保護膜として働き、ダイヤモンド工具の摩耗が抑制されることである。これにより、3～4桁も工具の寿命が延び、実用上の加工が可能になる。3つめは、この仕上げ面には若干幾何学的な粗さが残るが、楕円の軌跡の一部であると滑らかな面が作りやすいことである。

さらに、切削の方向が変化しても、その方向にかかわらず滑らかな面がつかれる。

実用上は、ゆっくりと加工するよりも高速に加工した方が能率が良いので、周波数を上げ超音波領域で楕円振動を精密に起こす装置を共同開発し、実用化した。図 2-1-5 に示すようなフレネルレンズの金型には微細な溝があって磨けないので、従来の方法で作ることは難しかった。また、図 2-1-5 右下のような耐熱合金のタングステン合金は鉄以上に精密加工が難しいが、ガラスの成形ができることから金型加工の用途で使い始めている。自動車の部品として、ライトの一部の金型にもこの技術は使われている。微細な細工が必要であるが磨くことができない金型の用途にこの技術を使ってもらっている。



図 2-1-5 超音波楕円振動切削装置の開発と加工例

今後の課題は、より高精度化することである。例えば、レンズでは動画解像度が 4K、8K と高精細化しているので、精度を高め粗さを低減したい。また、金型の硬度をさらに上げることで、耐久性を上げたい。冷間鍛造で作られるギアのような金属部品を作る金型は無理やり金属を押し込むため硬さが必要であり、非常に硬いセラミック系材料や超硬合金のような材料を高精度に加工したい。耐熱化の課題もある。ガラスの成形には 800℃程度の耐熱性が必要であり、金型鋼以上に耐熱性に優れる材料の高精度微細加工が必要になる。微細形状の高精度加工ができると、例えば表面の濡れ性の制御や反射防止機能を自動車のレンズに付与できる。レンズにサブミクロンオーダーの微細な形状を正確に形成することで、高コストな反射防止コートや防曇塗装のようなコーティングをすべて省くことができる。

2 つめの方向性の高能率化について述べる。切削の高能率化を行うためには、切り込みを大きくするか、送り量を大きくするか、切削速度を大きくするか、この 3 つの方法があるが、どの方法にも限界がある。図 2-1-6 に旋削加工を示しているが、切り込みを大きくすると切刃が関与する部分が増えて自励振動（びびり振動）の問題が起こり、これで高能

率化の限界が決まる。送り量を大きくすると、幾何学的な粗さが大きくなり、主に仕上げ面粗度で限界が決まる。切削速度を上げると、非常に高温になってどこかで工具が耐えられなくなって熱化学的に激しく摩耗するので、限界がある。

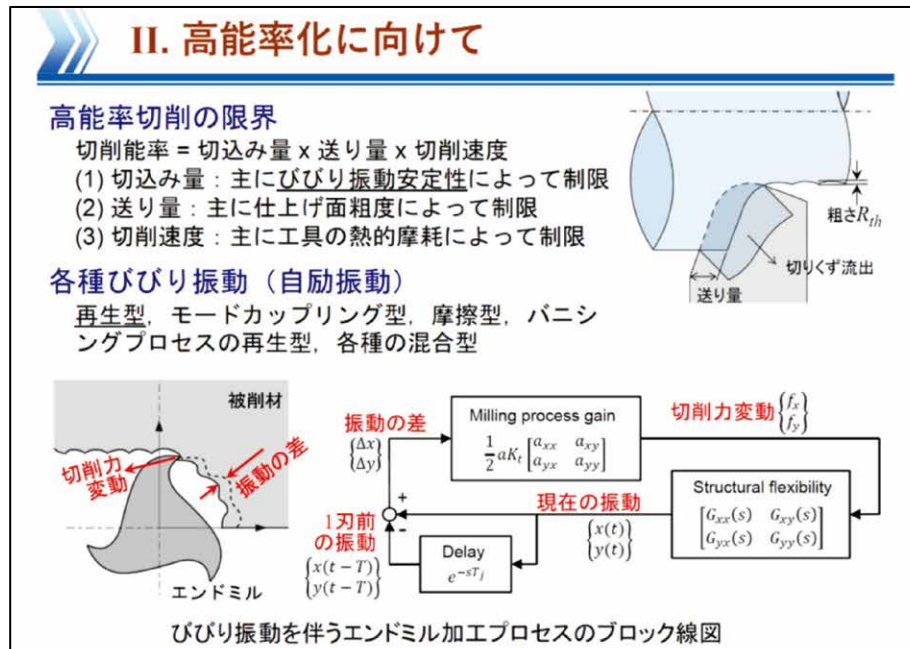


図 2-1-6 高能率化に向けて

図 2-1-6 の下側には、びびり振動（自励振動）の安定性を検討するための解析モデルを示している。自励振動は振動学の中でも難しい問題として扱われるが、この機械加工の中で起こる自励振動の種類は多い。再生型、モードカップリング型、摩擦型などが知られているが、まだ解明されていないものも多いと推測される。その中で一番多く研究され解明されているのは、図 2-1-6 の下図に示す再生型である。エンドミルという回転工具で切削する場合、1 刃前に切削した面を次の刃が削ることを繰り返して加工していく。そのときに振動が発生していると、1 刃前に残した振動の跡を次の刃が振動しながら削り取っていくことになる。すると、前の振動と現在の振動の差が、切り取りの厚さの変動になり、これに比例して力（切削力）が変動する。この力の変動で加振され、現在の振動が位相遅れを伴って起こる。このような閉じたフィードバックループを通して振動が成長する場合が自励振動（びびり振動）である。振動すると切り取る量が変わるので、力が変化して、これによりまた振動が起きるという悪循環であり、マイクのハウリングとよく似ている。この自励振動問題は、難しい現象である上に、切削のプロセス自体がさらに複雑なので、非常に難しい。図 2-1-6 下図のブロック線図の閉じたループから、びびり振動安定限界の式が導かれ、これを解くことで安定の限界が解析できる。安定なところは、不安定なところに比べて、場合によっては数十倍加工の能率を上げられる。最近はこのように現象が解明されてきたことで、10 倍、20 倍というような加工能率の向上が実際に実現している。このタイプのびびり振動を再生型と呼んでいるのは、この 1 刃前の振動の影響が蘇るためにまた出てくるためである。このタイプの自励振動以外にも多くのものが存在すると考えられ、実際にはそれらが混合して起こるので、これを抑え込んで能率を上げててもまた別の問題が出てくる。結局のところ際限のない研究の分野になっている。

3つめの自動化について簡単に触れる。先の例のように、びびり振動を抑えて10倍、20倍と加工能率が上がってもまた別の問題が起こるため、プロセスがまだ完全に理解できていない状態では、次のフェーズには行けず、自動化はできない。プロセスの理解が進むことで初めて情報化の波を取り入れることができる。自動化のもう一つ大きな障害は切りくず問題である。泥臭い課題だが、切削をすると切りくずが長く繋がって出てくる、深い穴をあけると切りくずが詰まるなど、切りくずが絡まったり詰まったりということは、どうしても時々起こるため、自動化にはこれらを解決する研究開発が必要である。

最後に、一つだけ提言したい。これからの日本の社会のニーズは技術革新し続けることであり、工学系の大学の役割は、技術革新を担う人材の育成である。そのために、実践教育の場をつくってもらいたい。この実践教育の場をつくるためには、企業のニーズを自動的に取り込めるような大学のシステムが必要である。一つの方法として、企業からお金が入った場合にだけそれに対応した公的な予算を入れ、その一部でないと学生に対してRA経費が払えないシステムにすることが考えられる。

【質疑応答】

Q：加工の精度や速度など向上しなければいけないパラメータの中で、何が一番律速しているのか。

A：切削加工の目標は、能率を上げるだけでなく、精度を良くする、粗さを低減する、工具費を抑えるなど様々ある。能率を上げることに限定して考えた場合は、3つの方法がある。旋削加工の例をとると、削られる側が回りながら工具がゆっくり送られていくが、切り込む量を増やすか、送る量を増やすか、回転数（切削の速度）を上げるか、この3つである。どれも同じように比例して能率が上がる。

速度を上げるという方法をとると、切削点で発生する熱が増えるので、その場の温度が上がり、工具が耐えられなくなったところが限界である。通常、工具は高耐熱で高硬度のものをを使うが、それでも千数百度になれば軟化してすぐに摩耗する。この問題を解決しようと思えば、材料の問題になり、工具材料の開発ということになる。

切り込み量を増やすと、切削に関与する切れ刃の長さが増えて、自励振動に悪影響を及ぼすが、自励振動問題を抑制できれば切り込みを上げられ、一気に削り取ることができる。実際にこの20年ほどの間に10倍、20倍改善された例が多くある。

Q：切削加工で使われている材料は既に広く使われているので、材料や対象物が新しくなるということではなく、現在使われている材料をいかに高精度、高速、仕上げなしでやれるかが技術開発の中心なのか。物質と工具の相互作用によって何か制限されてしまうということはないのか。

A：相性があり、どの材料を選ぶかも大事である。高温・高強度の工具を使うと、例えばセラミック系がそうであるが、もろくて欠けやすいという別の問題がある。摩耗は起こりにくいけれども欠けやすいとなると、欠けにくい工具の形状や加工の条件を選ぶというように、今度は加工プロセスの問題が加わる。例えば、最近ではセラミック工具を使って、耐熱合金であるインコネルのようなジェットエンジン材料を20倍、40倍

という能率で加工できるようになってきている。ここでのブレークスルーには、セラミック工具の欠けをより抑制できる工具材料の改善、それをどう使うかという工具形状の変化、どういう加工条件が一番適切かという加工条件の最適化が含まれていた。

Q：ワーク材の方にも、例えば結晶粒の粒径のコントロールや、易加工性という方向性はあるか。

A：快削鋼のような話が昔からあり、被削材を改善していくという研究の流れもある。しかし、ジェットエンジンの材料のような耐熱合金では、加工性のために材料を変えることは難しいだろう。

Q：最終的に表面を高精度化したときに、格子欠陥はどの程度まで許容されているのか。表面がきれいになったとしても、どの程度のダメージ層（dislocation、vacancy など）が入っているのか、また、それを無視しても良いのか。

A：非常に高精度化が要求される金型などの話だと、仕上げ面にはそれほど大きなダメージ層はないと思われる。ダメージ層は、通常は加工により硬くなる（加工硬化）部分であり、表面粗さと精度が満足している限り、もろくなって割れにつながらなければ、問題にならないと思っている。一方、例えば高能率と安全性が重要なジェットエンジン部品などの加工をしているときには、ダメージ層は非常に重要であり、ダメージ層は必ず検査し、加工プロセスの最適化がなされている。

C：ダメージ層には格子欠陥が入っているが、加工硬化するということで、これを逆にうまく利用すると理解した。

2.2 新規材料への加工技術の対応 ー CFRP の塑性加工の例 ー

米山 猛（金沢大学）

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）という新しい材料を使うものづくり（塑性加工）について紹介する。従来は樹脂と炭素繊維を混ぜた材料の塑性加工はできなかったが、これを可能にする試みに関するものである。

CFRP の炭素繊維（PAN 系高性能炭素繊維）は日本の発明であり、炭素繊維の製造シェアは日本の 3 社で世界の 60% 程度を占めている。しかし、日本は CFRP を使った製品の製造では遅れており、特に航空機の分野が遅れている。これは航空機産業が日本に育っていないためである。アメリカではボーイング社が機体軽量化のため、機体の 50% を CFRP で造り、ヨーロッパではエアバス社が同様に機体の半分以上を CFRP で造った。このように航空機分野でのものづくり技術が基礎になり、今はドイツを先頭に自動車分野へ CFRP を適用する動きとなっている。これは、自動車の軽量化によりエネルギー負荷を下げ環境負荷を小さくするという、大きな流れの中の一環である。図 2-2-1 に CFRP の製法と適用を示す。

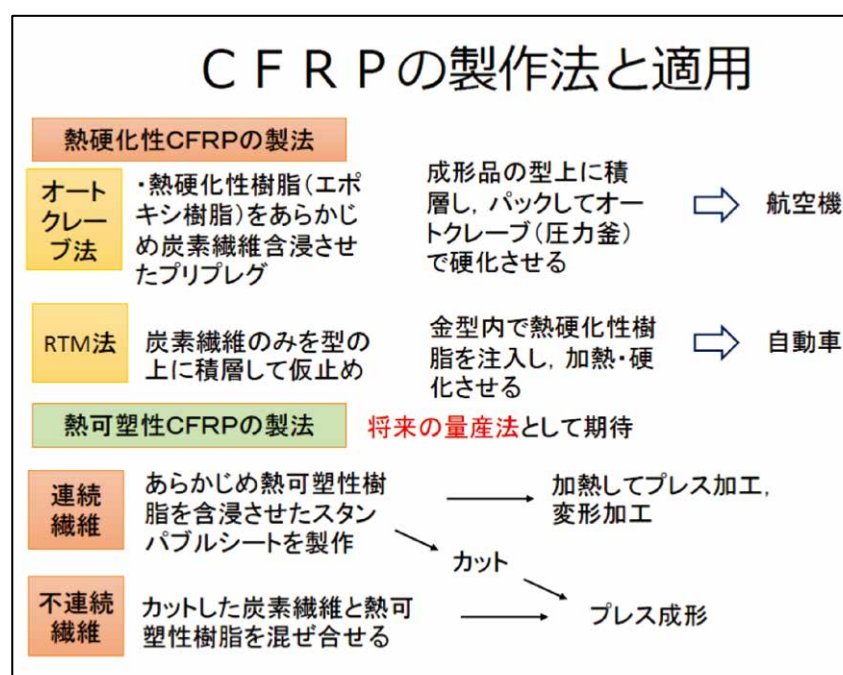


図 2-2-1 CFRP の製法と適用

BMW 社では、CFRP をボディーに使用した電気自動車の工場を作った。さらに軽量化するために、鉄、アルミニウム、CFRP を複合的に構造に取り入れた自動車を開発している。図 2-2-2 に熱硬化性 CFRP の自動車への適用を示す。日本では、明確な目標を示している自動車製造の企業は少ないが、少しずつは進んでいる。例えば、トヨタが昨年発売したプリウス PHV では、バックドア部分に CFRP を採用している。

これまでの技術は航空機技術の延長で、自動車や風力発電のブレードなどに広がっているため、ヨーロッパが日本よりリードしていると言われている。従来の技術である熱硬化性

樹脂であるエポキシ樹脂を使った CFRP 製造方法（図 2-2-2）がまだ主流であるが、射出成形の中で用いられる熱可塑性樹脂を使って CFRP を製造する研究が盛んになってきている。この熱可塑性樹脂 CFRP は、ヨーロッパもはまだできていない分野なので、自動車などへの応用で日本が追いつき、追い越せる分野である。

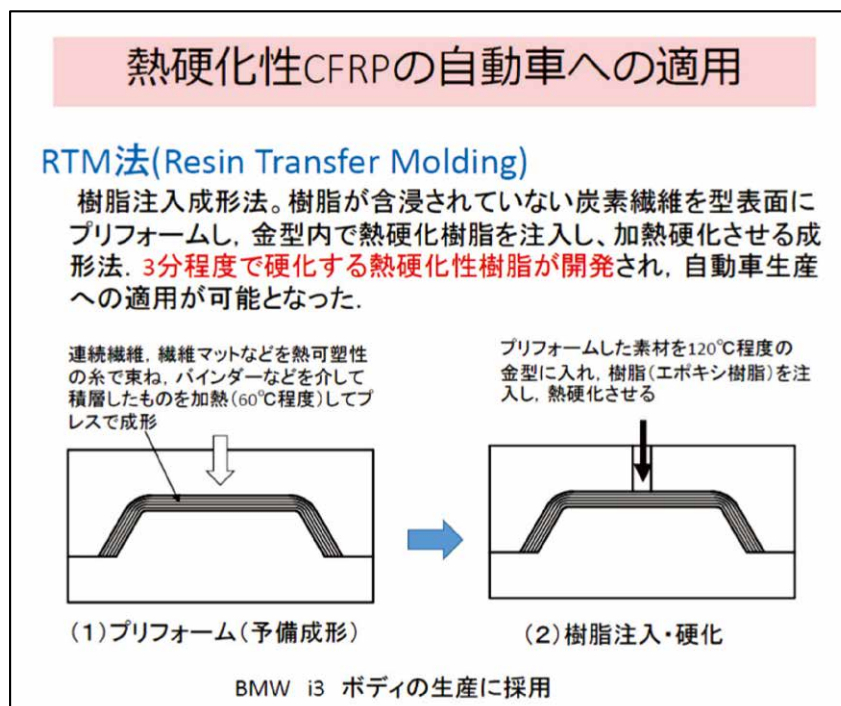


図 2-2-2 熱硬化性 CFRP の自動車への適用

炭素繊維自体は価格が 1kg あたり 3000 円程度だが、樹脂と混ぜた素材にすると価格が 10 倍になる。1kg あたり 3 万円では高価すぎて自動車には使うことができない、ということが自動車メーカーの考えである。このため、さらに安くするようなものづくり技術を開発しなければならない。従来は、熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂などを炭素繊維に染み込ませ、1 時間程度かけて硬化させて飛行機を作っており、この硬化時間を 3 分間程度に早くして価格を下げ、自動車に応用するという流れである。将来の量産技術として期待されているのは、図 2-2-3 に示すような熱可塑性の樹脂を混ぜて成形した材料を用いて短時間に変形加工するものである。

図 2-2-4 は熱可塑性 CFRP スタンパブルシートの構造を示したものであり、連続炭素繊維を使うか、炭素繊維を短く切ったものを使うかという違いがある。現在の熱硬化プロセスで実用的に進んでいるのは、まだ樹脂を含浸させていない炭素繊維そのものを金型でまず成型し、そこへ 2 液硬化の樹脂（接着剤）をインジェクションで染み込ませて、すぐに硬化させる形のものであり、自動車ボディーに実用化されている。しかし、熱可塑性 CFRP はこのような方法ではなく、加熱すれば柔らかくなる熱可塑性の樹脂（ナイロン、ポリプロピレン、ポリカーボネートなど）と炭素繊維を組み合わせるシートを作る、あるいはシートを作らないでいきなり成形するものである。シートを作ると、金属の板材のようなものができるので、今の生産技術で用いられているプレス加工、切削、剪断、接合、3 次元造形などと同様な生産プロセスを実現させていきたい。

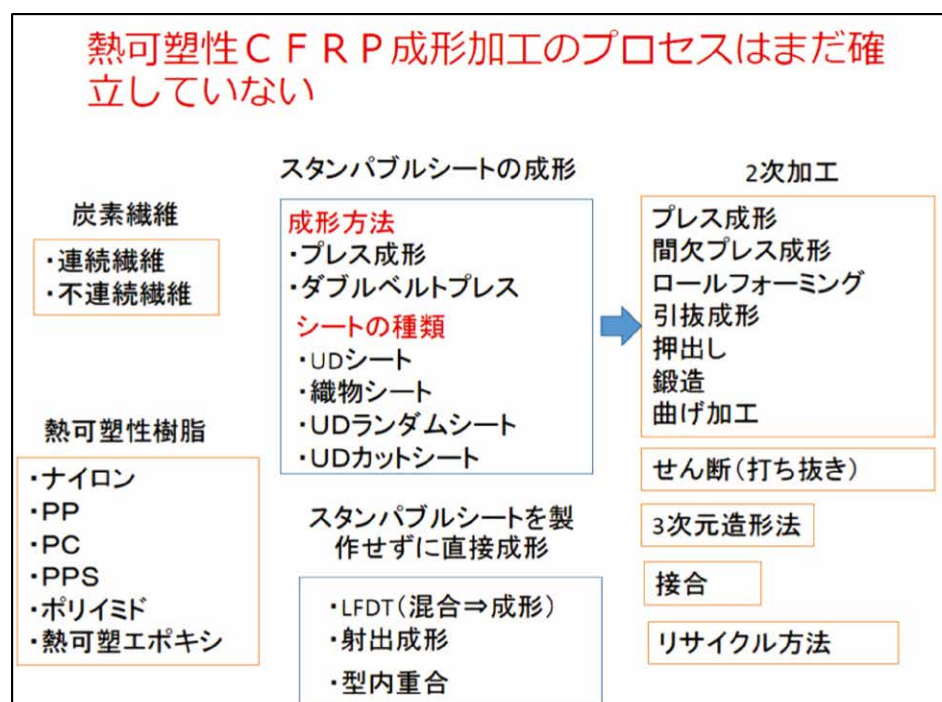


図 2-2-3 熱可塑性 CFRP 成形加工のプロセス

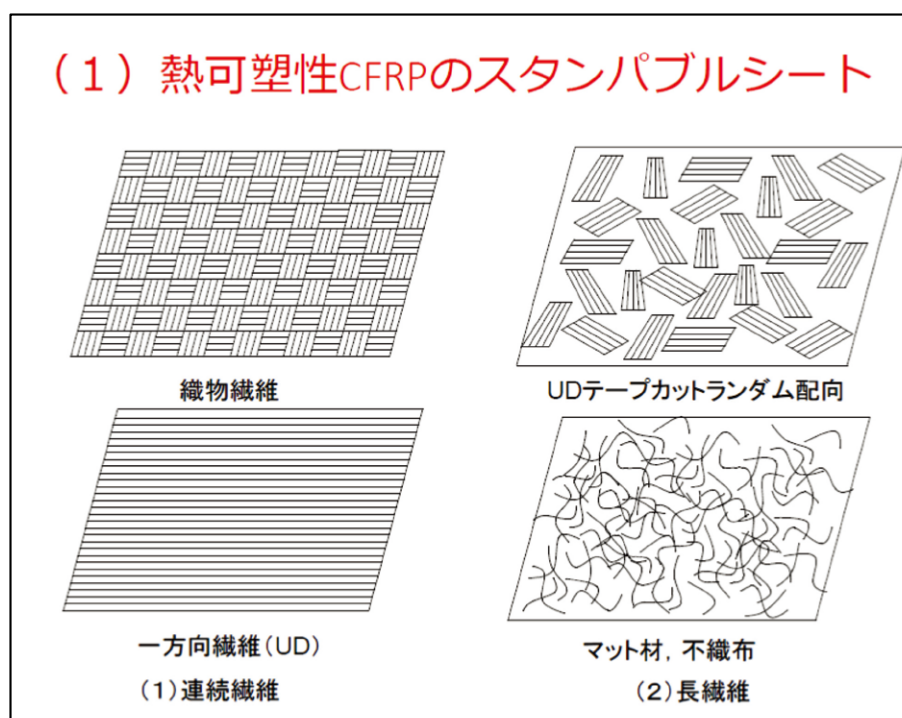


図 2-2-4 熱可塑性 CFRP スタンパブルシート

塑性加工は形を変えてものづくりをする方法である。基本的な特徴として、加工時間が圧倒的に短く、そして材料の無駄がない。これを支えているのは金属材料の転位の移動であり、結晶中の転位が移動して形を変えることが基本となっている。塑性加工をして最後に切削加工で仕上げをすることが現在の基本的な金属の加工プロセスである。

炭素繊維は比重が 1.8 と非常に軽く、強度は鉄よりも圧倒的に大きい。しかし、炭素繊維だけでは布になるだけで、製品にならないため、繊維を何らかのベースで支えて、強化樹脂として使う必要がある。一般の樹脂部品は、主に型に樹脂を流し込む射出成形で作られている。この射出成形の技術では、スクリーを回して加熱し溶かして樹脂を流し込むため、炭素繊維を混ぜた場合は、炭素繊維が切れてしまい、強いものが成形できない。このため、塑性加工的な方法を使い、繊維を切らないで CFRP の量産成形が実現できれば良いと考えられる。材料の変形メカニズムが金属材料とは全く異なるので、これを考慮した量産技術を作る必要がある。

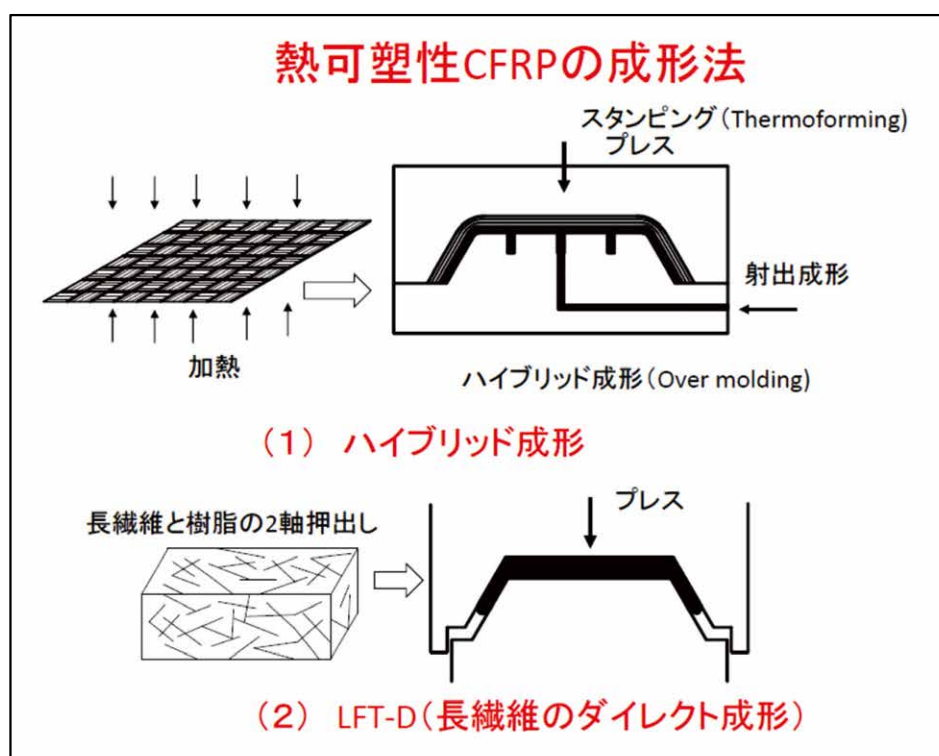


図 2-2-5 熱可塑性 CFRP の成形法

我々が試みているのは、図 2-2-5 に示すような、日本が得意な金属加工の基盤技術である塑性加工から CFRP の量産加工にアプローチすることである。図 2-2-4 に示すように、炭素繊維を織物にして樹脂を染み込ませたものや、一方向繊維、あるいはチップ状にしたものなどで、シート状の熱可塑性 CFRP の素材作りをする。これを加熱して金型にプレスして作る。あるいは不連続な炭素繊維を混ぜた樹脂を組み合わせでリブを作る。または、シートを作らないで、炭素繊維と樹脂を混ぜてプレスするというように、いろいろな考え方があり、まだ加工方法が確立していない。普通にプレスしてできるように思われるかもしれないが、実際に CFRP で実現しようとするプロセスの現象解明をきちんと行う必要がある。材料の作製条件、プレスの条件、金型の設計など様々な条件の中で、実際の成形中にどんな変形が起こるか、繊維がどのように動くのか、温度や圧力の関係はどう変わるか、などのメカニズムを明らかにしていく必要がある。その上で、加工後の寸法精度や表面形状、内部の欠陥の有無、強度などとのつながりを体系的に明らかにしていく必要がある。

このような熱可塑性 CFRP プロセスを検討するために、図 2-2-6 に示すような自動車のフロントサイド模型の成形実験を行った。シートから成形し、これを加熱して接合してビームを作り、さらに衝撃試験を行うという一連のプロセスを実行した。



図 2-2-6 これまで行った成形実験

金型の中に縦壁のある部分（図 2-2-6 上中）は押しつけが非常に難しいため、金型に工夫をした。また、曲げ成形の部分（図 2-2-6 右上）は直角に曲げても直角の成形品にはならない。樹脂の場合はスプリングイン、金属の場合はスプリングバックがあるが、樹脂を直角に曲げようとしても内側に曲がってくるため、このメカニズムを考慮しておく必要がある。将来的には、ロボットを使ったテープ成形（図 2-2-6 下右）で 3 次元的な形状を作りたいと思っている。プレス成形によるリブ（図 2-2-6 下中）作製も行った。さらに、プレスだけでもものができるわけではないので、プレス後のパンチングや、トリミング、穴開け、板金加工、なども試みている。

これから開拓しなくてはならない課題も多い。鍛造でつくられている歯車、軸、ジョイント部品などを CFRP でどのように実現するのか。板材をつくる圧延もまだしっかりとできていない。ビーム材用の引き抜き・押し出し加工、接合方法、3D プリンターに相当するものを CFRP でどのように実現するかも課題である。これらをアカデミックな面で見ると、中の繊維の変形、圧力と温度のプロセス、ひずみ、層と層の間の強度、などの課題がある。特に、炭素繊維はシートを重ねているだけなので層間の強度の問題については重要であり、3 次元的な層間の厚み方向の強度を出さないと製品にはならない。

塑性加工学会の中に CFRP の研究委員会が作られ、そこで検討したロードマップを図 2-2-7 に示す。上段が技術的な課題、下段がサイエンス的な課題を記している。将来的には自動車、ロボット、エネルギー機器など多くの分野で CFRP が使われる。現在の炭素

繊維の生産量は年間 10 万トン程度だが、多くの分野に広がるので、2050 年には 50 倍程度になると予想している。

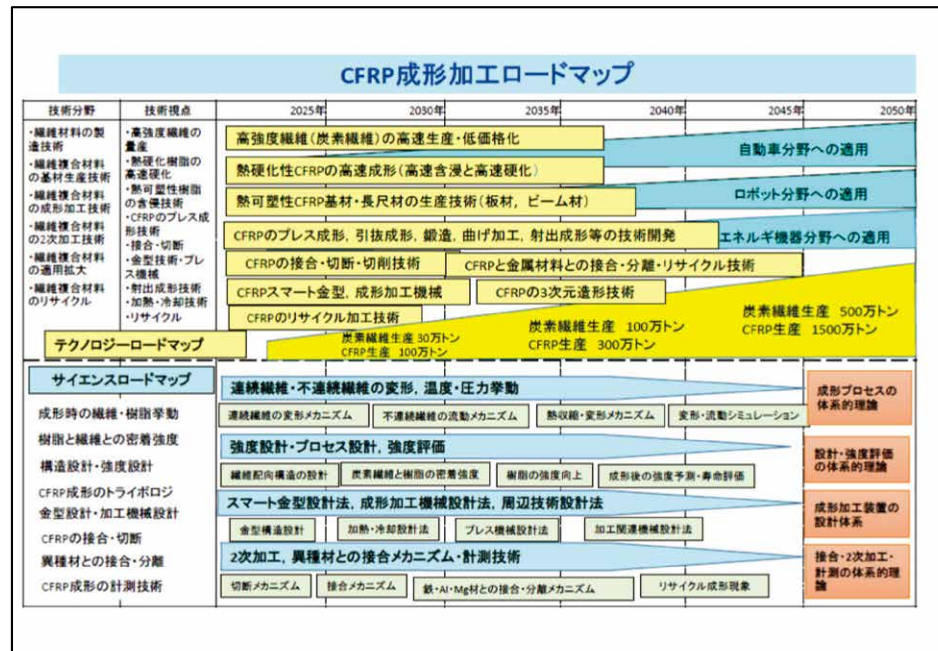


図 2-2-7 CFRP 成形加工ロードマップ

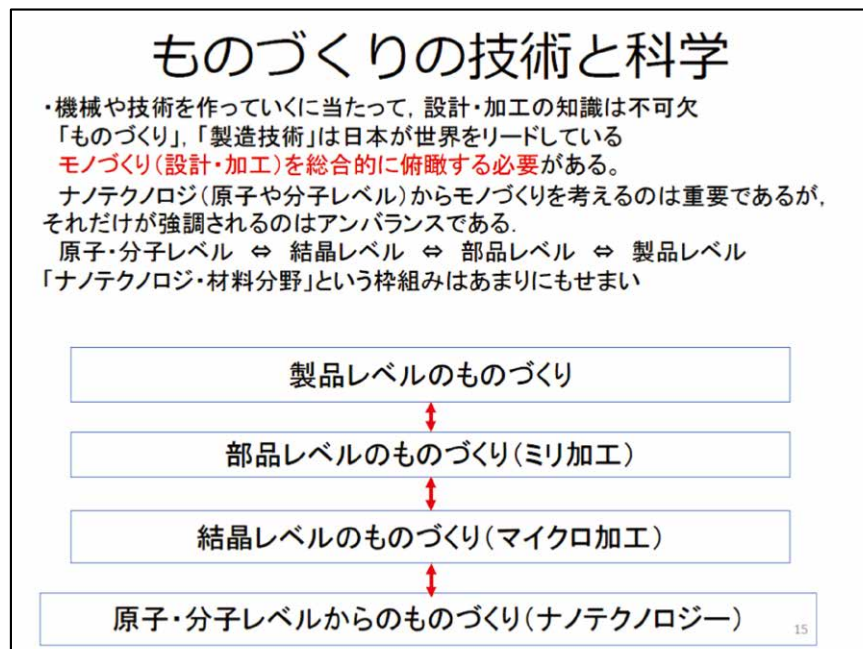


図 2-2-8 ものづくりの技術と科学

図 2-2-8 に示すように、設計と加工の世界であるものづくりは、原子レベル、結晶レベル、製品レベルと様々なレベルのものがある。これを社会の中でどう使っていくか、全体像を俯瞰して分野を位置づけていく必要がある。

例えば、製品レベルからのものづくりの課題として、今後のロボット作りを考えてみる。ロボット研究者は図面が描けない人が多いが、3D プリンターを使いモデルを作れば図面なしで部品を作ることができる。ただし、現在の樹脂の3Dプリンターだけでは軽量で高機能なロボットの量産は難しい。つまり、このようなことに応えられるものづくりを考えることも課題である。また、金型を造れば量産できるが、時間と経費を要するため、金型を簡単に作ることや金型なしで作ることを考えないといけない。

また、ものづくり自体が最終目的ではなく、どういう社会を実現するかが目的であり、そのためのものづくりを考えるべきである。例えば、自動車の「自動運転」が話題になっているが、もっと総合的な交通安全を考えて、歩行者の安全や自転車の安全を実現する技術開発を考えるべきである。

【質疑応答】

Q：この領域は、世界の中で日本はどれくらい強いのか。

A：従来型の切削加工、塑性加工を担う人材は大きく減っている。研究者、大学の研究室も減っており、危機的な状況である。日本の企業は何かよいものができたら使う、という立場が多く、慎重である。そこで、大学の役割として3Dプリンターで金型を造ることや射出成形で新しいものができるなど、アカデミックだけではなくてアプリケーションを示すことにも注力している。

Q：加工の領域に注力して強い国はどこか。

A：一番強いのはドイツである。組織的に大学から企業に人が繋がっている。塑性加工の分野でも世界で一番よくやっているのは日本とドイツである。日本は個別の組織は小さいが産業界とうまく連携してものづくりのレベルを上げている。ドイツとは違う勝ち方はあると考えている。

Q：CFRPでは、繊維の配向を積極的に行って高機能化を果たせるか。

A：従来は、繊維をどのように配向すれば強度が出るかを調べ、繊維を手作業で張って後から樹脂を流し込んだ。飛行機の作り方はこの方法である。しかし、これでは高速化は難しい。金属の場合は等方的なので、プレスで形を変えても性質を保つが、繊維の場合は方向によって強度が変わるため、これを考慮した上で成形しなくてはならない。最終的な製品の繊維配向がどうなるかを考慮した上で、プロセスや加工を考えることになる。

Q：熱可塑性 CFRP に関して、カーボン以外にセルロースなど混ぜる繊維に他の有力候補はあるか。

A：カーボンに比べて10倍くらい高価だが、炭化ケイ素がある。また、カーボンナノチューブ、セルロースナノファイバーなども期待されている。

3. Additive Manufacturing

3.1 積層造形技術のプロセス条件を利用した新材料創成

中野 貴由（大阪大学）

切削加工を引き算による製造法と考えると、積層造形（付加製造）は材料を付加していく手法であることから足し算による方法のため、**additive manufacturing** と言われる。図 3-1-1 に示すように金属付加製造（積層造形）法のメリットは多いが、特に設計の自由度が大きくなること、カスタマイゼーションができること、金型（鋳型）を使うことなく金属材料の造形ができることが挙げられる。その一方で、複雑な金型の製造にも利用される。積層造形では金属の質の良いものではないだろうと思われがちであるが、現状では鋳造よりも力学特性の優れたものを非平衡状態での造形で作ることができる。もはや工業製品が目に見えている状況にあり、既に医療用途などで使われているものも存在する。

金属の積層造形法の特徴は、熱源により 3 次元に溶接（肉盛り）を繰り返す点であり、機能傾斜した造形品をも作製することができる。最も世界的に導入されている金属積層造形法は Powder Bed Fusion というタイプで、数 10 μ m オーダで金属粉末を敷き詰めながら 2 次元のスライスデータで造形し、それを積み重ねて 3 次元の非常に複雑な形状を実現する。Powder Bed Fusion の熱源には電子ビームを使う場合とレーザービームを使う場合があり、それぞれに利点、欠点がある。重要なポイントは、粉末を原料として、製品になるまで一気に作り上げることであり、一気通貫でモノづくりができるところに、革新的プロセスとしての可能性がある。

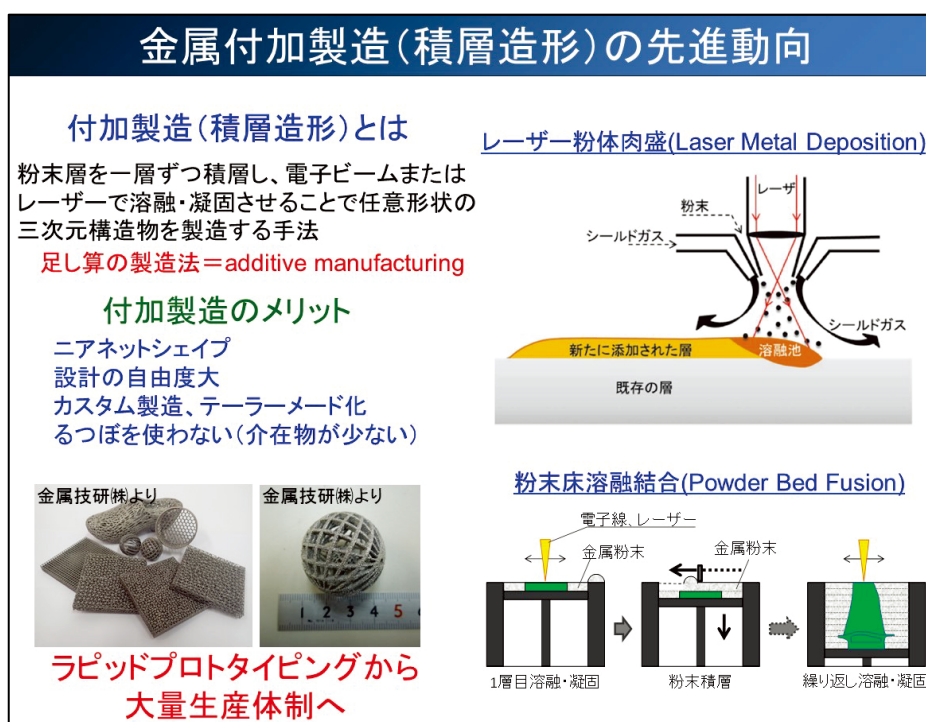


図 3-1-1 金属付加製造（積層造形）の先進動向

現状、付加製造技術は欧米が非常に強く進んでおり、日本は完全に置いていかれている。例として図 3-1-2 に示す航空宇宙分野を挙げると、例えばタービンブレードは、GE が中心となってボーイング等の会社と一緒に開発を進めている。フランスのエアバスもコンソーシアムを作り、他企業と連携して技術開発を進めている。2020 年にはボーイング 777 に搭載予定である。また、燃焼ノズルには付加製造でなければできない形状のものが作られ、燃費向上による CO₂ の削減と、航空機エンジンそのものの軽量化が可能となる。



図 3-1-2 航空機分野での応用例

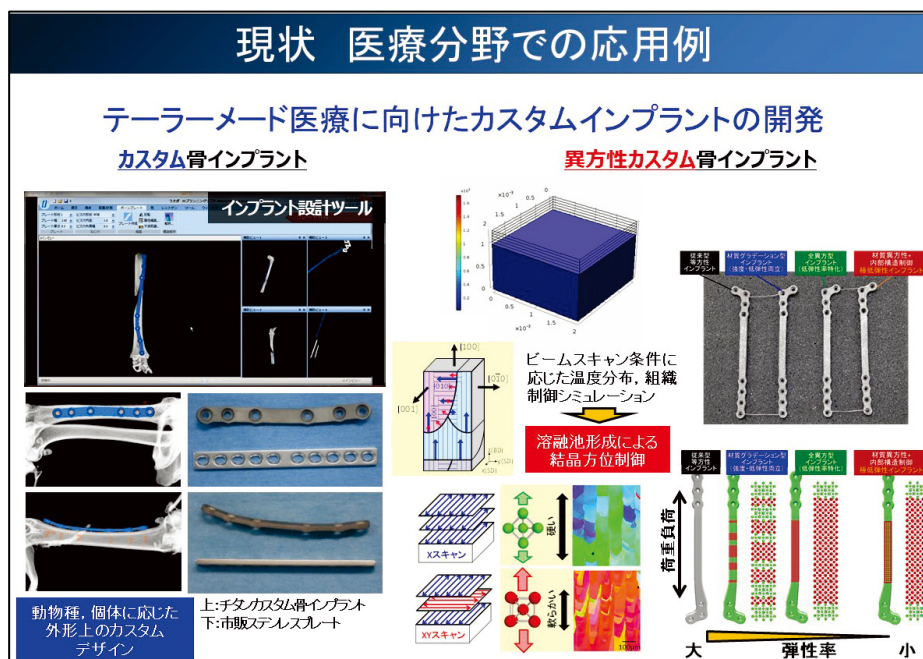


図 3-1-3 医療分野での応用例

もう一つの応用分野として、図 3-1-3 に示す医療への適用が挙げられる。日本で既に承認・認可されている製品もある。人の骨格形状というのは個々に異なっているため、カスタマイゼーションが非常に有効に働く。例としてボーンプレートを示すが、強調したいのは、シミュレーションしながら原子オーダーで材料を制御できることである。ビームの走査方向の組み合わせをスキャンストラテジーと言い、例えば X 方向だけで繰り返しビーム走査しつつ造形したり、X 方向と Y 方向を交互に走査しつつ積層する場合もある。その結果、原子配列を含む結晶方位が制御でき、電子系と格子系を相互作用させることで弾性率を変化させることも可能となる。さらに異方性を与えることができ、例えば、場所によって弾性率を変えながら造形することも試みている。今では、あたかも生体骨として振る舞うような特性を金属に持たせることができるようになってきている。

これらを支える技術で特に重要なのは、フィジカル空間とサイバー空間を連結する、いわゆるデジタルツインの部分である。フィジカル空間では 3D 積層造形の技術、サイバー空間では AI 等を活用しながら順シミュレーションと逆シミュレーションを組み合わせしていく。こうしたメカニズムをきちんと理解した上で、これまでトライアンドエラーで実施していたプロセス条件の設定を、将来的には全自動で行えるようにすることが重要である。3D の設計図に必要な機能を組み込めば、最終製品に適したプロセスパラメータが自動的に算出できるというところまでやっていく必要がある。例えば NIMS ではデジタルデータベースを充実させており、日本はここに匠の技をも加えていくことが重要と思われる。

付加製造装置の高性能化

装置の高性能化、低価格化、海外依存からの脱却

装置メーカーが欧米に集中（電子ビーム：スウェーデン、レーザー：ドイツ）
 装置本体およびそのメンテナンス費用が極めて高価
 プロセス条件の一部がユーザーでは変更できない、ブラックボックス化している
 プロセスの自由度向上と非ブラックボックス化が不可欠

TRAFAM 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構
 （2014～2018年）

産官学の連携による装置の高性能化（日本ではTRAFAMのミッション）
 造形サイズの大型化、造形速度の高速化、装置の低価格化に期待

TRAFAMの装置開発（TRAFAM HPより）試作版は小型

	光源	造形サイズ (mm)	造形速度 (cc/h)	寸法精度 (μm)
電子ビーム	EB	大型 (1000×1000×600)	500	50
電子ビーム	EB	小型 (300×300×600)	500	20
レーザービーム	LB	大型 (1000×1000×600)	500	20
レーザービーム (デポジット方式)	LB	大型 (1000×1000×300)	500	20

Arcam (HTLホームページより)
 Q10: L200 x W200 x H180 mm
 A2X: L200 x W200 x H380 mm
 Q20: 350φ x H380 mm



図 3-1-4 付加製造装置の高性能化

理想的な付加製造を実現するための主な 4 つの課題として、付加製造装置の高性能化(図 3-1-4)、原料粉末の製造技術開発(図 3-1-5)、プロセスモニタリングと計算機シミュレーションによる組織予測(図 3-1-6)、形状制御と材質制御の両立(図 3-1-7)を次に説明する。

装置の高性能化は完全に欧米に負けており、海外依存からの脱却と低価格化が必要である。TRAFAM（技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構）プロジェクトでの成果を期待している。特許やクロスライセンスなどの問題があるとは聞いているが、ハードとソフトの両方が独自開発できなければ日本は付加製造の戦いに勝つことはできない。

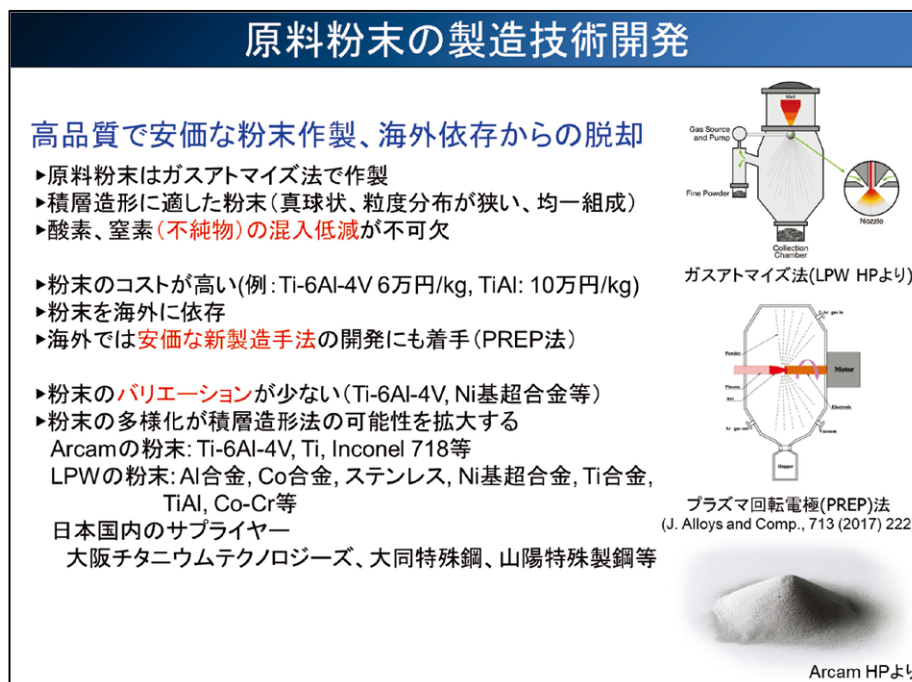


図 3-1-5 原料粉末の製造技術開発

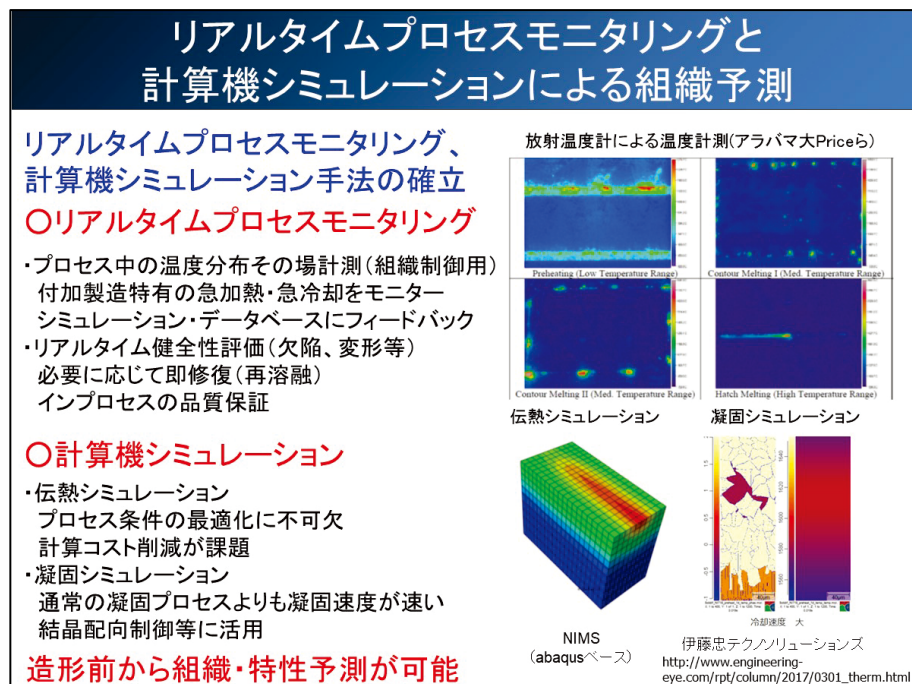


図 3-1-6 リアルタイムプロセスモニタリングと計算機シミュレーションによる組織予測

さらに重要なのはリアルタイムでのプロセスモニタリング、CAE の導入による機能予測である。プロセスが終わったものを見ることは、最終的にカスタム化した状態を品質管理する上で重要であるが、インプロセスで問題点が生じた場所ができたときにモニターした状態で修復をおこなうことができない限り、マスカスタムには対応できないと考えている。計算機シミュレーションに関しては、溶融池の形状の制御が重要である。これによって凝固、結晶成長、さらに原子の配列まで決まってくる。このあたりをしっかりと繋がれると、造形前から組織や特性が予測でき、プロセスパラメータのフィッティングによる機能予測が可能になる。



図 3-1-7 形状制御と材質制御の両立

金属付加製造法で私が最も重要であると考えているのは、形状制御と材質制御の両立である。3D プリンターというと外側の形状制御ができるというイメージを持たれるだろうが、内部の形状も制御できる。加えて、材料の機能に直結する材質の制御が可能である。特に異方性・等方性の制御が重要である。組織制御というのは日本の強いところであり、3D プロセスを日本の強みにしていくことができるのではないかと考えている。図 3-1-7 の 1 つ目の例は航空宇宙材料の TiAl 合金で、冷却状態やビームの走査条件によって大きく組織が変わっている。2 つ目の例は、我々のところで作ったタービンブレード材料で、高クリープな [001] 方向に結晶が揃っている。一方で、つかみ部分は多結晶体であり、低温靱性に優れている。このような、つぎはぎの様な組織を作りあげることが、3D 造形

によって初めて可能になった。医療応用のところで示したように、高弾性の部分、低弾性の部分を共存させることもできる。こうした材料を、やみくもに造形するのではなく、AI を使ってプロセス予測や、正確なデータベースに基づくシミュレーションをしていくことが今後重要になってくると考える。

今後、付加製造に戦略的に取り組むべき社会的意義の一つは、今までの大量生産、大量消費、マスプロダクションから、多品種、少量生産、そして最終的にはマスカスタマイゼーションへ進化していくことである。これは一般的に言われておりこの分野に限った話ではないが、カスタム化は最も 3D 造形にフィットしている技術と考えている。

また、先に挙げた 4 つの研究課題に加えて、3D 造形ならではの高付加価値化を狙うことが重要であり、国を挙げて推進体制を作っていく必要がある。それには拠点化が非常に重要だと考える。国研や大学など中立的な機関が中心となって、オールジャパンでネットワークを組むような体制が不可欠である。

自然界に学ぶバイオミミックな異方性、そういったものをマテリアルサイエンスの観点で捉え、それに基づくデジタル付加製造のサイエンスを構築することが重要である。現状では、日本は応用に力が入り過ぎていて、基礎研究が疎かになっている面があるが、ドイツ等では基礎研究と応用研究が同時並行で進められている。日本も基礎研究の部分にもっと注目しながら、応用研究を進めていくべきであると考える。

【質疑応答】

Q：リアルタイムプロセスモニタリングには様々なデータが必要である。プロセス途中で出てきた微量元素が一体何だったのかというのは、後からでは分からないので、プロセスモニタリングはデータに基づいて最初から計画しておかなければならない。しかし、プロセスデータをデータベース化するのは研究になりにくく、しかも手間がかかる。大学の研究では難しいのではないかな。

A：そのあたりは企業と一緒にやっていく必要があると考えている。日本には解析技術の進んだ会社があるので、そのような会社と一体化してプロトタイプ機をつくっていく。大学はプロセスデータの部分よりも、最終的な組織制御の部分で貢献できると考えている。

Q：3D ならではのモノづくり、製品化ということを考えると、構造設計にまで踏み込む必要があるのではないかな。研究者の間ではどのような議論がなされているか。

A：構造の最適化の観点では、現状ではトポロジー最適化というのが中心になっている。ポイントは、今は形状最適化しかできていないが、そこに異方性を入れて物性値を取り込むところまで考えていくこと。構造の最適化、そしてトポロジー最適化の中に物性値の異方性を入れる必要があると私自身は理解している。海外でもトポロジー最適化は非常に進んでおり、航空機の軽量化などに適用されているが、結晶方位などの組織制御まで考慮した研究はおこなわれておらず、日本で早期に進め、主導権を握る必要があると考えている。また、我々は組織制御を走査方法（スキャンストラテジー）を変えることでおこなっているが、使っている装置は主に外国製のため、インターフェイスのソフトには触ることができない。日本でソフトウェアをしっかりと構築することが必要になっている。

Q：装置が海外製、3D の設計も海外ということになると、日本だけで閉じてできるものなのか。拠点を作るにしても、外国の人達を含めて、スピードを上げていく必要もあるのではないか。

A：もともと我々は、海外製であっても一番性能の高い装置を使って、装置作りの後のモノづくりに関する知見を得たいと考えて進めてきた。しかし、パラメータを変えたりする部分を、海外のメーカはノウハウ等の関係で自由化してくれない。そこで、日本である程度閉じつつ装置を開発して、クロスライセンスを結びながら販売するようなことや、日本独自のソフトウェアを開発することが必要だと考えている。

3.2 3次元微細構造の成形

丸尾 昭二（横浜国立大学）

現在、3D プリンティングは大きなブームになっており、ポリマーから始まり、金属やセラミックスまで様々な材料が扱われるようになってきた。大きさもメートルサイズからマイクロメートルサイズまで、幅広く扱われている。技術的にも様々あるが、我々の取り組んでいるレーザー光を使った方法、いわゆる光造形という分野は、様々な材料に適用可能であり、かつ一番微細な領域での加工が可能である。

図 3-2-1 に光造形の代表的な方式を示す。一つは積層造形法で、樹脂材料を供給しながら一層ずつ積層していく従来型と、引き上げながらつくるタイプがある。引き上げながらつくるタイプは底面側のウインドウからレーザーや LED で照明する。もう一方は、配置した樹脂材料の内部にレーザー光を集光して、ダイレクトに 3 次元を描画していく方式である。この方式では非常に微細なものを作ることができる。光硬化性樹脂を硬化させる原理によって光源にも種類がある。従来方式では、UV や青色のレーザーを使って 1 光子重合で固める。一方、内部で固める方式では、フェムト秒パルスレーザーを使って 2 光子吸収、つまり 2 倍の波長でエネルギーが半分の光を使う方法が一般的である。UV 光では手前で吸収されて表面しか固められないが、パルスレーザーを用いた 2 光子吸収を使うと内部を選択的に固めることができるので、サブミクロンオーダーの加工線幅で高精度な加工が可能になる。また、内部で固める方式に青色レーザーを使用することもできる。この方式では、光硬化性樹脂の硬化反応が光強度に非線形に応答する性質を巧みに利用しており、造形条件が限定されるため、造形に高度なノウハウが必要となる。

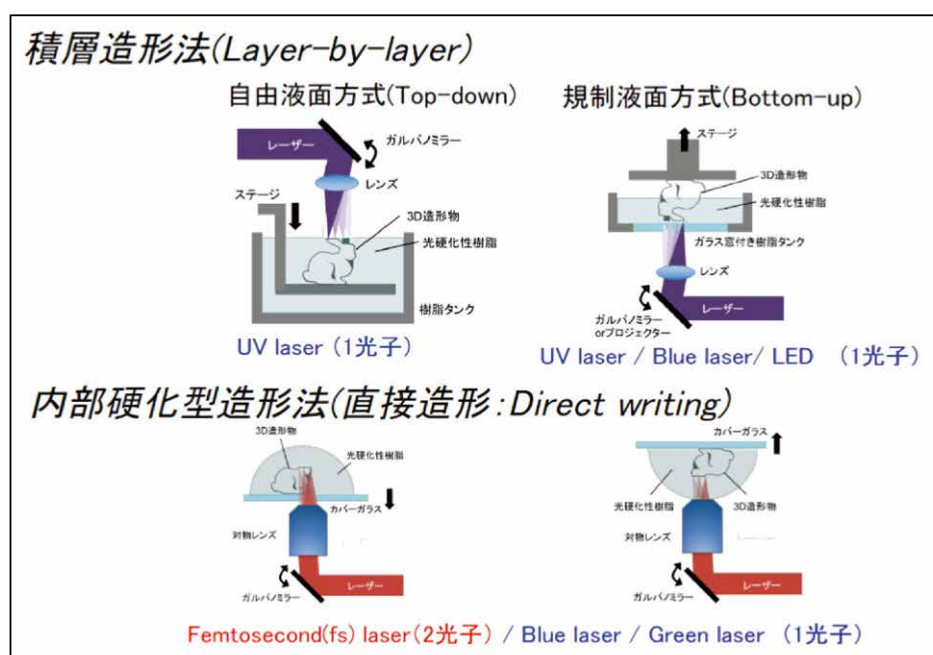


図 3-2-1 光造形の代表的な造形方式

光造形法はもともと日本発の技術であり、パルスレーザーを使った2光子マイクロ造形法も1997年に大阪大学の河田聡教授が世界で初めて提案・実証した（丸尾は当時の実証実験を担当）。その後、どんどん微細化が進み、青色レーザーを使った1光子の方式では線幅100nmを切る3次元造形、パルスレーザーを使ったものでは60nmの加工線幅が実現されている。最先端の技術としては、1つのビームではなく2つのビームを使ってより微細な構造も作られている。固めるレーザーの周りに、固めるのを阻害するドーナツ状のビームを重ね合わせるという方式が研究されており、9nmという非常に細い線を描いた実験例が報告されている。ただし、この研究はまだ2次元的なパターンニングにとどまっている。今後、これを3次元化して使える技術にしていくというのが微細化の流れと思われる。

一方で、マイクロ光造形の技術レベルは、現状のニーズに対して微細過ぎるという面がある。微細な線だと、当然ながら、大きなものを描くのに非常に時間がかかってしまう。これを製造技術にするときには生産性に大きく効いてくるため、高速造形について考える必要がある。

1光子の方で最近大きく注目されたのは、Carbon社が出した方法である。従来の引き上げ法では固まった樹脂が光を照射する底面側に接着してしまうという問題があったが、酸素によって固めるのを阻害することで、引き上げながら連続的に造形できるようにした。積層しないで連続的にできるので、滑らかな側面ができ高速化も可能ということで、非常に注目されている。アディダスがシューズのインソールを作るのに採用したという話題もある。一方、パルスレーザーを用いた2光子造形では、これよりも微細なものができるが、速度は非常に遅い。材料を高感度にして高速化し、数10mm/sで描画を可能にしたという論文発表もあったが、UVレーザーを使う方法では数10m/sでレーザーを動かすことができるので、それに比べると非常に遅い。

図3-2-2に示す加工線幅と加工速度の関係について考えると、当然、太い加工線幅の大型機の方が高速造形に向いており、自動車部品や携帯電話などのモデルが試作されている。中型機では、ジュエリーや歯のモデルなど精細な小型モデルの作製に使われている。一方で、パルスレーザーを使った方法は、0.2 μm 程度の線幅で、フォトニクス結晶やマイクロレンズなど微細なものを作ることができるが、速度が非常に遅い。このようにパルスレーザーでは大きなものが固められない、UVレーザーでは小さく固められないということで、現状ではこれらの中間領域の1 μm 程度の領域に適した技術が欠けている。そこで、我々は内閣府のSIPプロジェクトで、この領域を包含する全ての領域で、マルチスケールに造形可能な光造形装置の開発をスタートした。昨年、フランスの企業から、1 μm まではいかないが5 μm ～50 μm 程度で積層造形する装置の販売が始まった。ただし、我々が目指している全ての加工線幅で造形できるような装置はまだ存在しない。我々は複数のレーザーを使って、例えば0.1 μm ～100 μm くらいまで、幅広い加工線幅で自由自在に造形できるような装置を開発しようとしている。

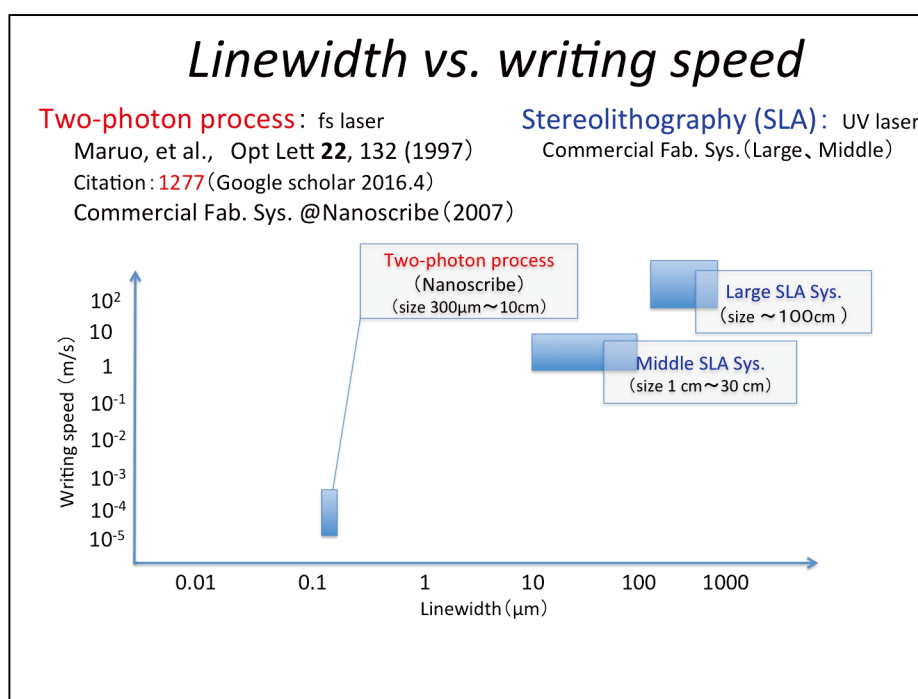


図 3-2-2 加工線幅と加工速度

一方、単品生産というのが 3D プリンティングの一つの課題であり、量産のために鋳型を使うことを 2006 年頃から提案している。例えば 3D プリンティングで作った部品でシリコーンゴムの型取りをする。型は 1 回作れば再利用が可能であり、3D 部品を複製できるので量産に向いている。数 μm の微細構造やマイクロマシンのような可動部品も、シリコーンゴムを使った鋳型技術で複製できる。この鋳型技術は、いわゆるソフトリソグラフィが 3 次元化された技術であると言える。また、ポリマーだけではなく、セラミックスのナノ構造をこの方法で転写する試みも行っている。このように 3D プリンティングの良さを活かしつつ、生産性を上げるための取り組みが、高速化や鋳型技術との融合で進んでいる。

また、3D プリンティングでしかできない応用を広げようという分野もあり、そこで重要になるのが材料である。光造形の特徴として、光硬化性樹脂に他の材料を混合できるので、様々なナノコンポジット材料が使われている。例えばカーボンナノチューブやナノ微粒子が複合化され、微細構造物がつくられている。また、樹脂だけではなく、金属を光還元法でダイレクトに 3D プリンティングする方法や、生体高分子やゲルなどのソフトマテリアルの造形も行われている。光硬化性樹脂を使って 3D 造形物を作製した後に、後処理によって機能を付与するという研究も多数行われている。例えば、熱処理をしてアモルファスカーボンにしたり、最近ではダイヤモンドライクカーボンの微小構造をつくるという研究も発表されている。その他、樹脂構造物を無電解めっきして金属化し、強度を増したり、導電性を付与する研究もあり、材料の複合化と後処理との融合で機能デバイスを創出しようという研究が進んでいる。

具体的な応用分野としては、フォトニクス分野で新しい光デバイスの作製や、バイオとの融合によって新しい再生医療用ツールや先進医療デバイスを作ろうという研究がある。また、我々のように MEMS・マイクロマシンや、ラボオンチップへの応用研究もある。ただし、非常に小さな部品をつくるというところにまだ留まっている。現在できることの一つは付加加工であり、例えば光ファイバーの先端に小さな MEMS・マイクロマシンやセンサーを作製することである。最近では、内視鏡のレンズを 3D プリントで作るという研究が注目されている。小さな複合レンズは組み立てるのが非常に大変だが、光造形なら一体成型で使い捨てのプラスチックレンズを組み立て無しで作ることができる。また、さらに微細な高付加価値の例として、例えば AFM のカンチレバーをデザインして先端を自由な形状で作ったり、カンチレバーに格子構造を付けて共振周波数をチューニングしたりすることが試みられている。また、マイクロ流路の内部に微細なフィルターやミキサーなどを付け加えて、複雑な形状のマイクロ流体素子を作ることでもある。

今後の有望分野は様々あるが、3D プリンティングでしかできないものの一つに、ラティス構造がある。スキャフォールドや、メタマテリアルと言われるような構造の材料は、従来の切削加工では作ることができない。さらに、マルチスケールの 3D プリンティングで、マイクロだけではなく、ミリメートルやセンチメートルオーダーの階層構造をつくることで機能を発現させることができる。例えば人工骨や、あるいは細胞を一方向に移動させる複合構造など、さまざまな階層構造が作られている。バイオミメティックなナノ構造を大面積でつくる鋳型を実現しようとする研究もある。

こうした微細構造は静的なものだが、これをアクティブに動かすということも注目されている。いわゆるメタマテリアルというのは構造に特徴のある静的な材料だが、アクチュエータを内蔵した動くメタマテリアル、例えばチューニングやセンシングができるものが作られている。また、3次元構造のメタマテリアルを作るのは現状技術では困難なので、最近ではメタサーフェスといった 2次元パターンでナノ構造を自由自在につくるという分野もある。従来の湾曲したレンズではなく、平面にさまざまなパターンを施すことで特性の優れたレンズを作ることや、光の位相制御デバイスを作るといった取り組みがある。また、トポロジー最適化と 3D プリンティングの融合という動きもある。我々は京都大学の西脇眞二先生とコラボレーションして、様々な構造最適化に取り組んでいる。例えばマイクロピンセットの形状を最適化して、10 μm 程度の微粒子を安定に把持できるピンセットを作れるようになった。

今後の方向性としては、マルチマテリアル化が考えられる。樹脂と金属、樹脂とセラミックス、あるいは全てを含んだ高度なデバイスを一体造形していく。世界でもいくつか研究が進んでいて、複数の生体高分子を使って細胞を特異的に吸着させるデバイスをつくる試みや、形状記憶ポリマーなどを使った変形する素子など、いわゆる 4D プリンティングの取り組みがある。他の技術とのハイブリッドや、先端医療への応用も今後のターゲットと言える。

今後の課題を図 3-2-3 に示す。光造形はそもそもレーザーを使った加工技術であるが、レーザーは海外製品であり、レーザーの性能に我々はかなり制約を受けている。例えばコンパクトで高出力なファイバーレーザーなど、日本で独自のレーザー光源を開発しながら、他に類のない新たな 3D プリンティング技術を開発できないかと期待している。また、

3D モデリングツールも重要であると考えている。加工線幅や材料を変えた状態で自由自在にデザインできるもの、自分たちのノウハウを内蔵した独自の CAD が必要と考えている。これらを実現するには、材料と設計と加工が一体化して実践しないとなかなか進まない。造形ノウハウを実装した装置や造形方法を理解した上で、最適化ツールを開発することが必要であり、お互いが分かり合えるようにトップレベルの研究者が緊密に連携することが重要である。例えば我々は物理的な距離を大事にして、大学内の CAD や材料の研究者と一緒に共同研究を行っている。また、SIP プロジェクトの共同研究としても、材料、設計、加工と一緒に研究する試みを始めている。同時に、最新技術をオープンにして、活用を広げることが、新しい応用展開を迅速に切り拓き、世界をリードすることに繋がると考える。

今後の課題

3D造形技術の課題

- ・造形速度の向上(生産性UP)
- ・精度(3Dモデルの再現性)
- ・複合材料・傾斜材料の活用
- ・他の加工技術とのハイブリッド技術の進展
- ・レーザー光源の独自開発(ファイバーレーザーなど)

材料面の課題

- ・高感度化・プロセスウインドウの拡大(造形速度・造形安定性向上)
- ・材料特性改善(収縮や変形の抑制・造形精度・機械的強度向上)
- ・機能性材料(形状記憶、自己修復、生体材料、ナノコンポジット)

その他

- ・3D形状計測・評価技術の確立
- ・次世代3Dモデリング・ツールの開発
(マルチマテリアル、階層構造、高精度・造形ノウハウ考慮、AIなど)

図 3-2-3 今後の課題

今後、フォトリソ、エレクトロニクス、MEMS、医療などさまざまな分野で、多様な材料を融合した高精細 3D プリンティングによって、世界中で高付加価値製品が次々と創出されることが予想される。3D プリンティングは今まさに世界中でブームとなっているが故に、世界のブームに流されないで、後追いではなく、先駆的な独自の戦略を出していく必要がある。JST などの研究支援機関に対しては、目先の利益やニーズに注目するだけでなく、未来社会のあるべき姿に対して明確なビジョンを持って、日本の独創的な技術や材料をいかに活用できるかを長期的かつ戦略的に検討していただき、オールジャパンの体制で最先端研究開発を推進していただきたいと思います。

【質疑応答】

Q：ラティス構造のような複雑なものは、鋳型では作ることができないと思う。複雑な構造物を量産するのに良い方法はないか。

A：反転鋳型を作ってそこに材料を流し込んで鋳型を焼いてしまえば、さまざまな材料でラティスのような複雑形状を作ることができる。しかし、それでは鋳型が単品生産になってしまう。装置を複数並べる力わざを使うか、あるいはビームをマルチビームにするといった形で、同じ土台の上で複数を同時に生産していくこともあり得ると思う。ただ、絶対にラティス構造が必要なのかどうかということもある。また、型取りできるわけがないと諦めていたものが、実はできるという場合もあるので、鋳型でできるところは鋳型でやるのが良いと思っている。

Q：造形後の構造物の表面は粗くなっていないのか。磨く必要はないのか。

A：どれだけ高い密度でスキャンするかによって表面の凹凸は変わってくるので、滑らかにしたければ時間はかかる。そこは、ある程度カスタマイズして、やり方を工夫していくと良い。例えば表面張力を使うと勝手に滑らかな表面ができる。いずれにしても、数 10nm のオーダーで造形できるので、そのレベルであれば後処理は必要ないといえる。

Q：今後の戦略で、設計・材料・プロセスの一体改革とオープン化を唱えているが、オープン化というのはスピードを上げるという意味で重要と思う。この分野では、例えば設計ツールなどで、オープンなものはあるのか。

A：いわゆる民生用の 3D プリンタはオープン化されていて、誰でも自由に使えるが、微細造形のところは、まだオープン化されていない。最先端技術をオープン化するのはいろいろと課題もあるが、プロセスの実際を熟知している研究者と、最新の設計手法を知る研究者が連携し、できれば日本独自のオープン設計ツールを世界に先駆けて発信できれば、世界をリードできるのではと考える。

Q：海外の装置メーカーが、リース方式でユーザーからデータを収集するという話があったが、オリジナルな装置を持っているのであれば、それを国内で開放しながら、使い易いやり方、ソフト、設計ツールと一緒に開発していくというやり方があるのではないか。

A：その通りであり、実は SIP では、プロジェクト終了後も永続的にオープンに使用できる装置やソフトの提供が求められている。そこで、我々は神奈川県立産業技術総合研究所（KISTEC）と連携して微細造形装置のオープン化を実施しており、KISTEC が開設しているファブラボの中に、我々が開発した装置も設置している。したがって、一定のルールの下で希望者にはオープンに使ってもらおうという形が、少しずつ広がっていると思う。

4. プリンテッドエレクトロニクス技術

4.1 印刷技術による電子回路製造の新展開

熊木 大介（山形大学）

プリンテッドエレクトロニクスの中でも、主に印刷プロセスを中心に話題提供する。私は、有機半導体や導電インクなどの材料開発を中心とし、それを使う印刷装置の開発まで含めて研究を行っている。ここでは技術的な背景と社会背景、印刷プロセスの最新・最先端の技術開発、様々な技術開発課題を紹介する。

図 4-1-1 に示すように、プリンテッドエレクトロニクスは印刷法を使って電子デバイスを製造する技術である。従来のシリコン半導体の製造では真空成膜やフォトリソグラフィのプロセスを使ってパターンニングするのに対して、新しいパターンニング法として印刷プロセスを考えている。デバイスの製造方法が印刷プロセスにかかわることの一番のメリットは、工程がかなり簡略化されることにあり、コストダウンや生産性の向上が産業的には一番注目されている。材料の利用効率が高いこともあるが、低コスト化が第一だと思われる。



図 4-1-1 プリンテッドエレクトロニクスとは

大学の人間としては、低コストというよりは、学際的な視点で取り組んでいる。大面積のセンサーシート、体に貼って使える生体親和性の高いセンサーデバイスなど、他の技術ではできないものを実現する技術と捉えて、この印刷プロセスの開発をしている。応用分野としては、エレクトロニクス、電子デバイスなど様々なものが対象になる。私は 10 年程度プリンテッドエレクトロニクスに関係しており、当初はディスプレイの技術開発を行っていた。しかし、ディスプレイは昨今の状況を見てもわかるように、技術が韓国や中

国に移っているため、現在はこれから派生する形で、様々な IoT 用のセンサーデバイスに向けた製造技術として開発を行っている。

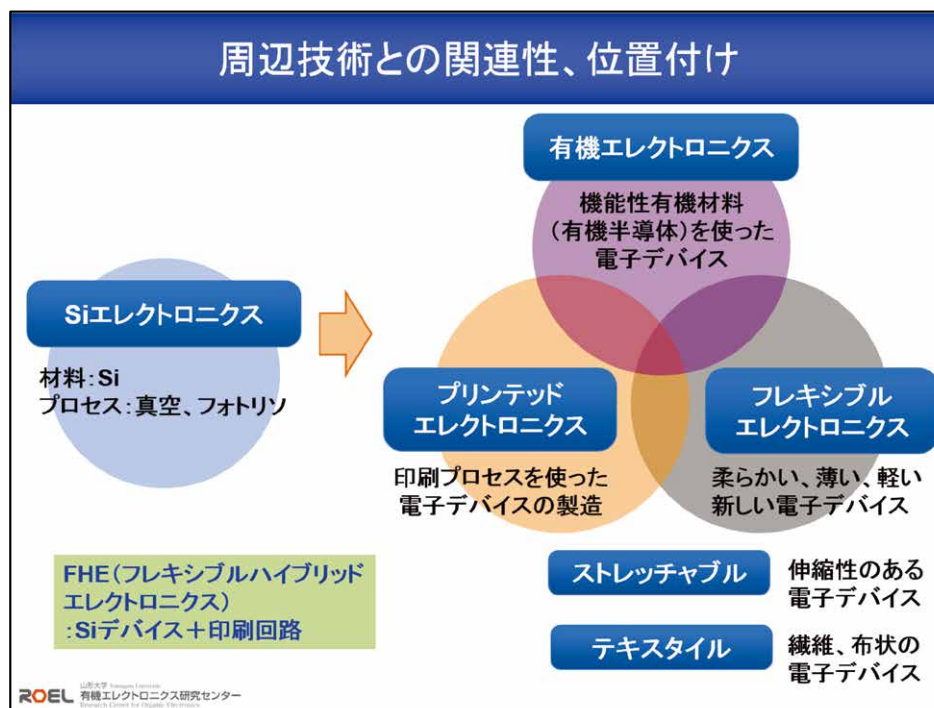


図 4-1-2 周辺技術との関連性、位置付け

プリントエレクトロニクスは様々な技術と密接に関係しており、図 4-1-2 に関連するものを示す。シリコン（Si）のエレクトロニクス、電子デバイスに対して、材料や製造技術を対応させる形にしている。有機エレクトロニクスは、有機材料、特に有機半導体を使った電子デバイスに関する研究分野である。プリントエレクトロニクスは印刷プロセスを使った電子デバイスの製造方法である。フレキシブルエレクトロニクスは、やわらかい、薄い、軽いというデバイス自身の機能を指している。最近では、このフレキシブルエレクトロニクスから派生して、ストレッチャブル（伸縮性のある電子デバイス）や、テキスタイル（繊維、布状の電子デバイス）に関する研究も非常に増えている。広い意味ではフレキシブルであるが、フィルム状のものから、ストレッチャブル、テキスタイルというところにも電子デバイスの形態が広がってきている。

一方、シリコンの技術とプリント、有機材料のそれぞれの良いところを取り入れた技術として、フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス（FHE）が欧米を中心に盛んになってきている。これはシリコンのデバイスと印刷回路の組み合わせが多い。印刷回路の部分は、印刷によるものだけではなく、フォトリソグラフィーを使ったシート型のものもある。欧米では、この FHE という技術をものづくりの基盤技術の革命として捉えており、アメリカではメーカーや研究機関が参画する非常に大きなプロジェクト（National Network for Manufacturing Innovation (NNMI) 中の “Flexible Hybrid Electronics Manufacturing Innovation Institute”）が立ち上がっている。ここでの代表的なデバイスの構造としては、無線通信や情報処理を行う回路はシリコンチップを実装し、周辺のアンテナやセンサーは印刷技術を使ってつくり込む形になっている。様々な印刷方法や、や

わかりかいものに実装する技術といったところを中心に開発が進んでいる。このように欧米の中では、プリントエレクトロニクスを製造法の一つとして捉えている。



図 4-1-3 印刷プロセス技術の俯瞰図

図 4-1-3 は私がまとめた印刷プロセスの俯瞰図である。配線部分にフォーカスし、何（製品、市場）をつくるかが起点になっており、それに対する印刷法と導電材料（インク）の位置づけを示している。従来は、図の左下に示すように、タッチパネルなど配線だけで形成されるデバイスが主流だったが、将来的には、上に示されているトランジスタ（TFT回路）製造へ広がっていくと考えられる。TFT回路では、電極など各層がナノメートルオーダーの薄膜であるため、印刷プロセスで積層してデバイスを形成するには技術的なハードルもかなり上がる。しかし、付加価値が付けやすいことや、差別化の要因にもなるため、こちらを狙っていききたい。最近では、これに並ぶ形で薄膜のセンサーデバイスなどが入ってきている。

この TFT 回路をつくる最適な印刷法は、幾つか条件を絞ることで定まってくる。薄膜の印刷ができるという観点から考えると、インクジェット印刷や、凸版反転印刷、フレキソ印刷となる。これらの印刷法に対して最適な導電材料、導電インクはおのずと決まり、低粘度のナノ粒子系のインクが最適となる。我々はこの図の上の部分について開発目標を定め、包括的な技術開発を進めている。

関連する技術開発の例をいくつか紹介する。まずはロール to ロール印刷技術である。印刷ならではの技術として、大面積というところがあり、どこまで大面積にデバイスを作製できるか研究開発している。この技術はフィルムを連続的に流しながら印刷するというプロセスになり、装置は非常に大きくなる。版を使うような印刷法（有版印刷）では、下層で印刷されたパターンに対して、フィルムの変形によって起こるパターンのずれを補正

して印刷することが難しい。特に大面積になると難しくなる。これを解決する方法として、インクジェット（デジタル印刷）がある。これは下層のパターンを認識しながらパターンを補正し、インクジェットで順次パターンを形成していく形になる。このように、インクジェットは、ロール to ロールの製造方法とも相性が良いことがわかっている。

インクジェットは、微小なヘッドのノズル（穴）から液滴を落として着弾させてパターンを描く方法である。この液滴サイズは、産業用のインクジェットプリンターの中で一番小さいものでも、およそ $15\mu\text{m}$ から $20\mu\text{m}$ ぐらいである。さらに、着弾すると液が広がるため、現状では $20\mu\text{m}$ 以上の配線しか描けない。TFT 回路では、 $10\mu\text{m}$ 以下のパターンが必要であり、微細化が課題になっている。

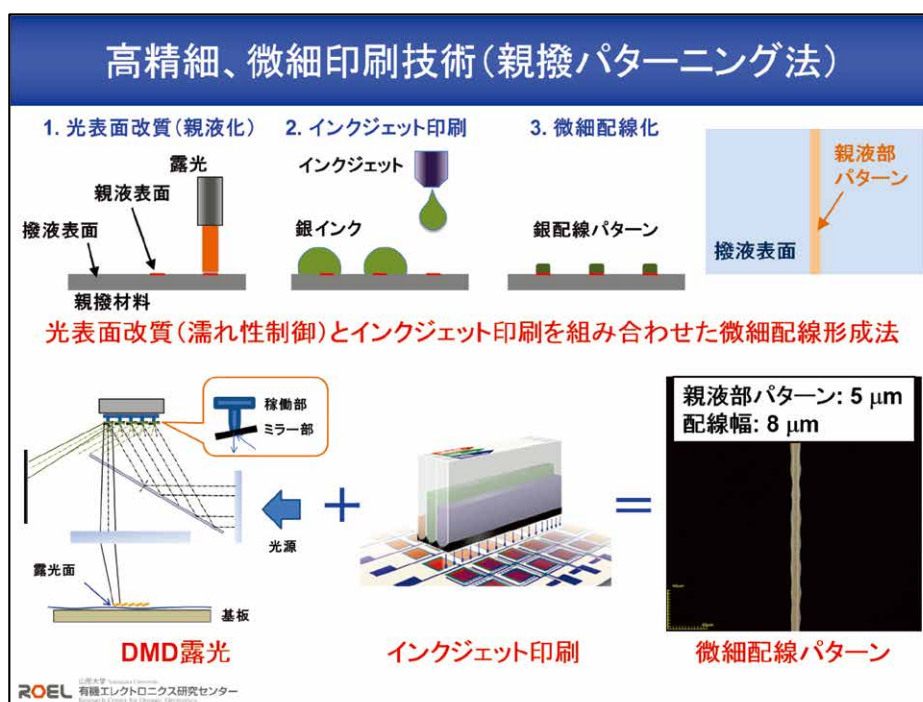


図 4-1-4 親撥パターンニング法

これを解決する方法として、図 4-1-4 に示す親撥パターンニング法を検討している。これは、撥液性の表面を光表面改質で部分的に親液化し、その上に液滴をインクジェット塗布するという方法である。塗布されたインクは光改質された親液パターンに沿って自己組織的にパターン形成される。DMD（デジタルマイクロミラーデバイス）を用いるデジタル露光とインクジェット印刷を組み合わせることで、版を用いないで大面積で高精細なパターンをデジタル印刷する技術の開発を進めている。

立体物への直接印刷技術（曲面印刷技術）も検討されている。これは曲面構造を有するところに、後から印刷で回路を形成する技術で、自動車産業への応用などが検討されている。我々はグラビアオフセットという印刷技術を使った方法と、ロボットを使ったインクジェット方法の 2 種類を検討している。

印刷プロセスを MEMS デバイスの製造に応用する研究も産総研で行われている。従来の MEMS デバイスのプロセスは、シリコンウェハーを深掘りすることで中空構造を形成し、そこに 2 次元のパターンや 3 次元構造を形成していた。これに対し、印刷技術で中空構造やパターンを形成する研究も行われており、この手法を用いた MEMS デバイスの形成法が開発されている。

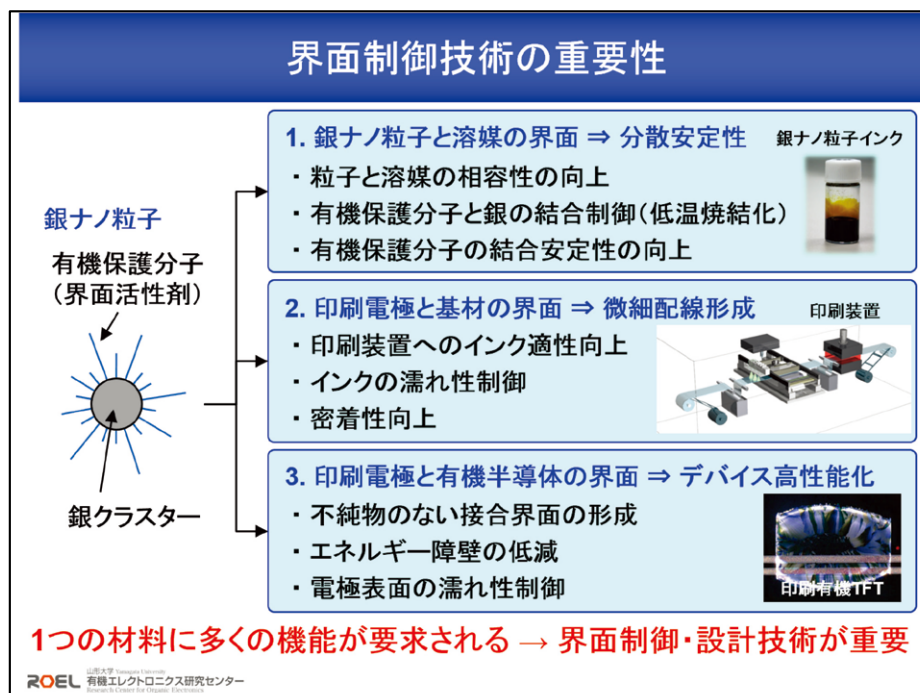


図 4-1-5 界面制御技術の重要性

最後に技術課題について述べる。この研究開発では横断的な技術領域をフォローする必要がある。具体例として銀インクに関連したものを紹介する。ナノ粒子インクの特徴から考えると、インクの状態での分散安定性など界面現象の制御が重要になる。また、それを印刷装置に適用するときには基板との界面設計、さらにデバイスの電気特性を向上させる電極と有機半導体の接合界面の形成など、非常に多くの機能がこの一つの材料に要求される。

このように、界面の設計や制御が非常に重要になってきており、材料だけをいじっていると、なかなか見えてこない部分がある。このため、自分たちで材料からデバイスまでの開発のプラットフォームを持ち、材料とプロセスとデバイスの開発を一体的に回していくように取り組んでいる。これが我々の技術開発の特徴となっている。最近では、センシングデータの解析技術、システム、ネットワークを含んだ、デバイスの機能を高める解析・システム部分までの開発体制を構築しつつある。

以上をまとめる。印刷プロセスの使われ方が多様化しており、それに合わせて様々な開発が必要になっているが、どこが本当の出口なのか見極めにくいところもある。しっかりと見極めて、効果的な成果を出すためには、横断領域をカバーできる研究者の育成、多様な技術者が集まり横断領域を一体的に開発できる体制作り（拠点化）が非常に重要と思っている。欧米はこのような体制が既にできているところが多いと思う。

【質疑応答】

Q：インクジェットで微細なパターンを大面積で形成するということだが、どの程度の大きさまで印刷できるのか。

A：フィルム幅が 90cm のロール to ロール装置のインクジェットのヘッドの部分に DMD の露光装置も一緒に載っており、そちらで露光しつつ、インクジェット印刷する形になっている。このため、フィルム幅が 90cm という非常に大きなサイズでも、このプロセスが適用できる。

Q：この技術の応用として、具体的にはどんな製品になるのか。ディスプレイの話もされたが、ディスプレイがないと応用もかなり限られるのではないか。

A：印刷による TFT に関しては、我々も検討しているところである。主にはセンサーの駆動部に使うことを考えている。シート型のセンサーの場合には多点計測をするが、センサー部のスイッチング回路として TFT が使えると思っている。

Q：最後のところで拠点が重要という話をされたが、これまでも内閣府、文科省、経産省、JST、NEDO も相当やってきたと認識している。これから何が一番問題なのかを言ってほしい。

A：これまでプリンテッドエレクトロニクスのところで開発をしてきたが、デバイスの先にもう一つローリングする技術開発の輪をつくろうとしている。印刷で様々なデバイスをつくっても、それを実際に使って製品化しようとする電機メーカーが少ない。国内の電機メーカーは、ディスプレイの研究開発プロジェクト終了後は、どちらかというとシステムやソフトウェアに軸足があり、なかなかセンサーデバイスの開発までは立ち入ってこない。もちろん、それぞれにある程度やっているとは思いますが、もう少しそこを埋めることが必要だと思っている。

Q：やはりセンサーだけだと限界があるのではないか。ディスプレイも様々な新しいコンセプト出てきており、将来のマーケットという意味では大きいので、それと合体させて何かやることを考えないといけないのではないか。ディスプレイは数十兆円の産業であるので、今は韓国、中国にやられているから手つけないという話はないだろうと個人的には思っている。

A：一緒に開発している企業にはディスプレイメーカーをお客にしている材料メーカー、装置メーカーもいるが、実際に製品をつくっているメーカーがない。開発のプラットフォームとして山形大学を使ってもらっているが、やはり電子デバイスを使うメーカーにうまくつなげていくところが重要と思っている。

Q：出口を担う企業とコンセプトを共有してものづくりをやっていると、つくことはできても、何をつくっていいかわからない状態で終わってしまう。しっかりと出口を見据えた人とパートナーを組んで、やらなければいけないと思う。もう一つ、このプリンテッドエレクトロニクスの大事なところは低コストと言われたが、研究をやる立場では、低コスト化が一番の魅力的な研究というのは寂しい。どこでつくるかによって、コストは変わってくるため、低コストだけでは日本が勝てるとは思えない。

A：おっしゃる通りである。我々も低コストありきではなくて、新しいデバイスを提案し実現できる技術としてプリンテッドエレクトロニクスを打ち出そうとしている。しかし、実際に製造で使われるためには、低コストに大量につくれるというところを見られる。このため、新しい機能を持つと同時に低コストでつくれるという形に持ってい

かないと、なかなか受け入れられないと思っている。

C : 3D プリンティングも同じような状況にある。3D プリンティングも、従来法の置き換えではなく、3D プリンティングでしかできないもの、いわゆる付加価値の高いものをつくっていく必要がある。現状では金属粉末などは高過ぎて、それで量産品をつくることはできず、自家用車の製造には持っていけないが、航空機ならいける。つまり、付加価値の高い製品で使える分野を見定めて、そこに投入していかないといけない。低コストでなければいけないという概念を切り離して、プリンテッドエレクトロニクスだからできることをもう一度見直したほうが、新しい市場を開けると思う。我々も 3D プリンティングで同じように模索しているところであり、3D プリンティングとプリンテッドエレクトロニクスは融合できていると思うので、一緒に勉強させてもらいたい。

4.2 印刷技術による有機半導体デバイスの創製

福田 憲二郎（理化学研究所）

ここでは、デバイス、特にトランジスタと回路に関して、様々なグループの紹介をする。

印刷によるデバイス作製に関しては、回路をつくる研究が多くある。印刷型回路の例として、韓国のグループは RFID タグの回路を全て印刷でつくっており、無線通信でタグ情報を飛ばしたという報告がある（M. Jung, IEEE Trans. Electron Devices, 2010, 57, 571.）。また、同グループは印刷でアレイ状の圧力センサを作製したという報告もある（C. Yeom, Adv. Mater. 2015, 27, 1561.）。ディスプレイでもセンサでも同じであるが、多点（アレイ）にして、何かを見るとか何かを表示するというのは絶対に需要がある。

他の例としては、山形大学の超薄型の印刷回路がある。非常に薄いアレイ（K. Fukuda, Nat. Commun. 2014, 5, 4147.）や論理回路（Y. Takeda, Sci. Rep. 2016, 6, 25714.）を作製して報告しており、私もこれに参画していた。プリンテッドエレクトロニクスの立ち位置での発表だが、フレキシブルという要素もかなり含んでいる。私の主な立ち位置は有機デバイスであるが、有機にこだわらずプリンテッドでフレキシブルなもので何がどこまでできるかに関心がある。極端に薄くして、体に貼り付けても違和感がないものや、簡単なロジック回路ぐらいは印刷でもつくるのが可能になっている。

その他にも様々な例があるが、センサ応用が非常に多い。最近では、物理情報やケミカルな情報などを検出するセンサを印刷技術でつくるのが活発に行われている。現在の所属である染谷研究室での最近の成果として、印刷可能伸縮性導体がある。伸縮性導体をスポーツウェアのような布地に印刷でパターン形成できる。これはただの電極であるが、2つの電極の間隔がきちんと筋肉に沿っていれば筋電が計測できる（H. Jin, Adv. Mater. 2017, 29, 201605848.）。このような筋電センサが電極を印刷するだけでもできるという例である。

この伸び縮みする布地に温度センサや圧力センサを載せることもでき、圧力センサ／温度センサを集積したウェアラブルエレクトロニクスとなる（N. Matsuhisa, Nat. Mater. 2017, 16, 834.）。このような研究アプローチがかなり活発になっている。スクリーンプリントのような印刷プロセスで温度センサのアレイをつくり、これを用いて面の温度の情報を多点的にモニターするような応用も報告されている（T. Yokota, PNAS. 2015, 112, 14533.）。

印刷できるセンサの研究において国内で最も活発に活動しているグループの一つに大阪府立大学の竹井先生のグループがある。このグループでは電極、トランジスタ、センサ（温度センサ、心電図 [ECG] センサ、加速度センサなど）を印刷でつくっており、一部は印刷でないものも入っているが、センサのシステム全体をインテグレーションしている。これを実際に人間の体に貼り付け、各種の情報を得たという報告もしている（Y. Yamamoto, Sci. Adv. 2016, 2, e1601473.）。このグループでは、印刷のセンサシステムとして、使い捨てできる部分だけを印刷でつくることを提案している。使い捨てできる部分

を印刷で安く大量につくり、シリコンのチップなど使い捨てしたくない部分は別に用意しておき、交換が必要なときに使い捨て部分だけを人間の体から剥がして新しいものを貼りつけるというアプローチである。このようなセンサシステムを実現するためには、使い捨ての部分とそうでない部分をどのように接触させれば良いかなど実用的な観点も含めて研究されている。この例のように、最近ではセンサに関する応用例が非常に多くなってきたという印象を持っている。

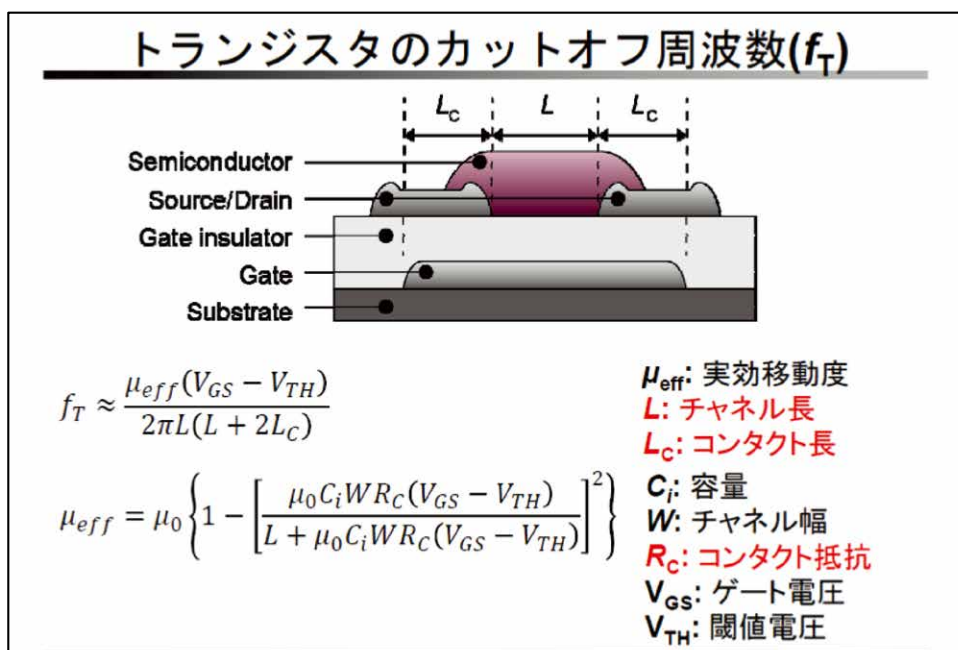


図 4-2-1 トランジスタのカットオフ周波数

トランジスタの高速動作の指標であるトランジスタのカットオフ周波数 (f_T) を向上させるために必要なアプローチについて、図 4-2-1 にまとめている。ここでは、カットオフ周波数 (f_T) の式と、この式の中に出てくる実効移動度 (μ_{eff}) の式が示されている。カットオフ周波数を高くするためには実効移動度を大きくする必要がある。また、実効移動度を大きくするには、真性移動度を大きくすることと、ソース/ドレイン (Source/Drain) のコンタクト抵抗 (R_C) を小さくすることが重要である。カットオフ周波数の式を見ると、その他にも重要なパラメータがある。チャネル長 (L) とコンタクト長 (L_C) であり、これらを短くすること、要するに印刷の解像度を上げることがトランジスタの高速動作には重要である。印刷の解像度を上げると、より多くの素子を並べることができ、動作速度も応答速度も上がるので、できるだけ小さいものをつくるという方向性は、プリンテッドエレクトロニクスでも非常に重要である。

印刷による微細 TFT の性能について、去年に論文を検索して網羅的に調べた。詳細については論文 (K. Fukuda, Adv. Mater. 2017, 29, 1602736, 2017.) を見ていただきたいが、図 4-2-2 に簡単にまとめた。

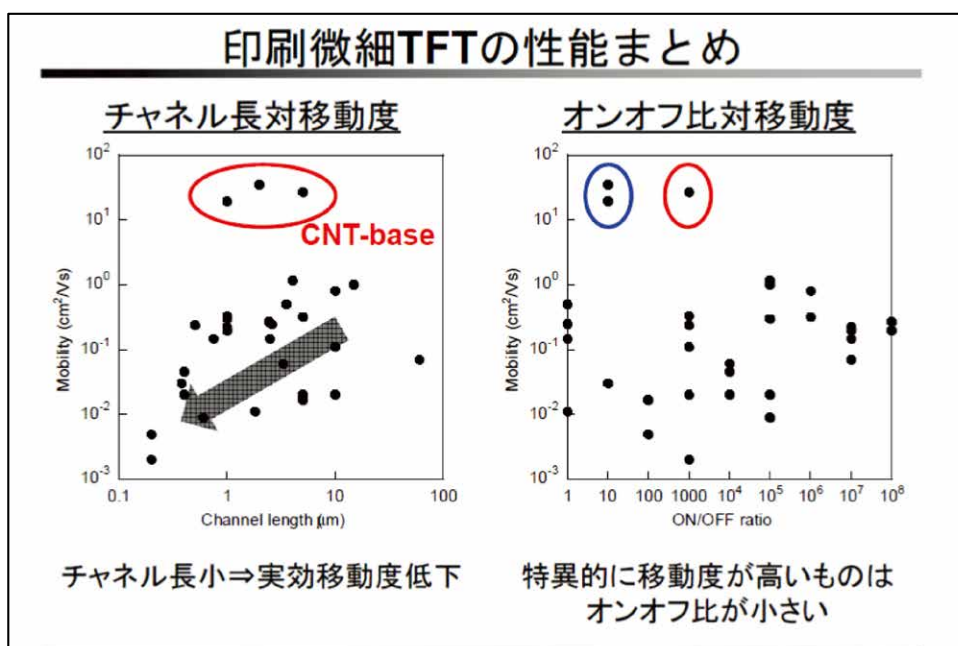


図 4-2-2 印刷微細 TFT の性能まとめ

移動度（実効移動度）とチャンネル長の関係を示した左側の図から、チャンネル長が短くなると移動度が低くなるという傾向が明確に出ている。このため、これを解決しないと動作の速いトランジスタはつくれない。この中に特異的に移動度の高いものが3つあるが、これらは全てカーボンナノチューブ（CNT）ベースである。なお、私が調べた範囲では無機半導体のデータは見つからなかったもので、論文の中の表やこの図には全く載っていないことを補足しておく。

このチャンネル長と移動度との関係からは、CNTを使えば良いと思われるかもしれないが、問題もある。右側のオンオフ比と移動度との関係を示したオンオフ比対移動度の図を見ると、移動度の高いカーボンナノチューブベースのものは、オンオフ比が10程度と非常に低くなっている。オフ状態では電流を流さないようにしたいが、オン電流の1/10程度にしかならないので、消費電力の問題や動作上の問題が出てくると思われる。カーボンナノチューブベースで示唆的なものとして少し注目されるのは、右側の図で赤色の円で囲ったものである。これは、FinFETの構造を使っており、このような構造の利用は調べた限りではこの1つの論文しかない。本当にこの構造がFinFETと呼んで良いのかわからない点もあるが、このような構造を印刷プロセスに持ち込むことで、高移動度かつ高オンオフ比ができるかもしれない。

印刷デバイスに求められる性能についてまとめておく。1つ目は回路の高速動作、安定動作であり、短チャンネル化のための高精細の印刷技術や、高実効移動度実現に必要な真性移動度を向上させる材料開発、低コンタクト抵抗形成技術が重要である。また、トランジスタ性能の均一性向上も回路の安定動作に必要と考えている。2つ目は低電圧駆動である。電圧が高いと使い物にならない。基本的にプリンテッドとフレキシブルはほとんど同時に要求されるので、3つ目として機械的安定性の向上も検討しなければいけない。

まず、真性移動度の向上については、材料開発が主なアプローチになると思う。有機半導体の場合には、結晶性を上げるのが有効なアプローチであり、日本のグループでも検討されている。1つの例は産総研の長谷川先生のグループが報告したダブルショットインクジェットという手法であり、均一な単結晶のような膜をつくり真性の移動度を上げるというアプローチをしている（H. Minemawari, *Nature* 2011, 475, 364.）。もう一つの例は東大の竹谷先生のグループが報告した連続エッジキャストという方法であり、分子の配列を制御して結晶性を上げ、単結晶に近いものをつくって、真性移動度を上げる取り組みをしている（A. Yamamura, *Sci. Adv.* 2018, 4, eaao5758.）。無機半導体に関して、印刷で短チャネルにしたという報告はないが、東工大の細野先生のグループから塗布による p 型の無機半導体で移動度の高いものが作れたという発表（T. Jun, *Adv. Mater.* 2018, 1706573.）がある。もし高移動度の p 型、n 型共に無機半導体を塗布でつくれるようになると、必ずしも有機材料にこだわる必要はなく、適宜有効に利用していけばよいと考えている。

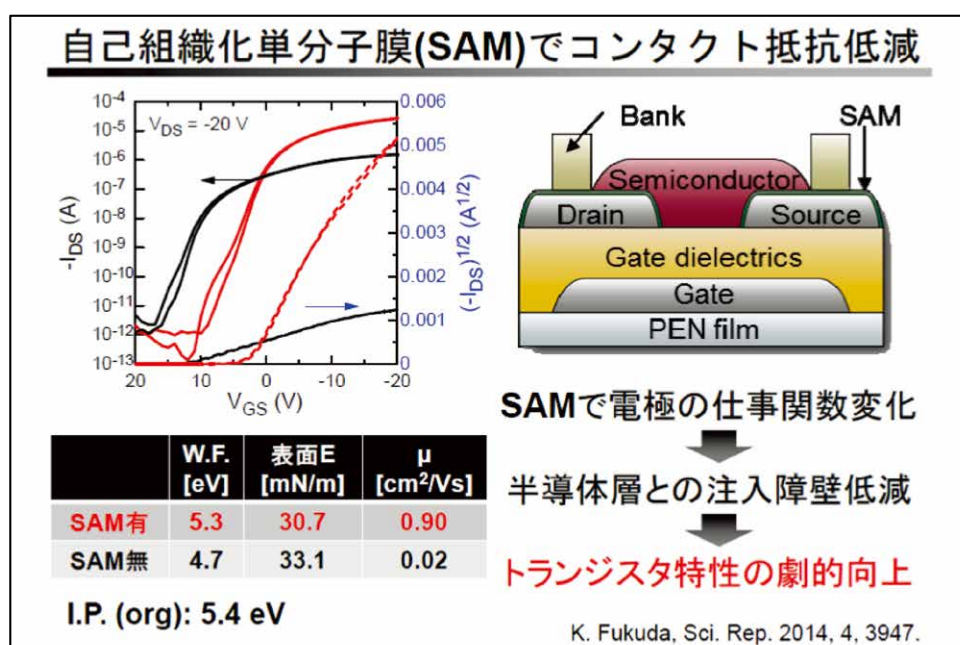


図 4-2-3 自己組織化単分子膜（SAM）でコンタクト抵抗低減

一方、真性の移動度を上げるだけでは不十分であり、コンタクト抵抗を下ることが非常に重要である。図 4-2-3 に自己組織化単分子膜（SAM）によるコンタクト抵抗の低減についての私の研究例を示す。ドレイン／ソースと半導体との界面に自己組織化単分子膜を 1 層ディッププロセスで形成すると、トランジスタの特性が劇的に変わる。左上のグラフの SAM 処理無し（黒線）では移動度は $0.02 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と低いが、SAM 処理有り（赤線）では $0.90 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と高くなる。このように、厚み数 nm の SAM の有無で移動度が大きく変わることがわかってきている。印刷では電極の状態がバルクのものとかかなり異なっている可能性が高く、不純物による電荷注入の阻害などの影響をよく考えて、電荷の注入に関して考慮していないと、導電性は良いが注入が悪くトランジスタの性能が出ないということにもなる。

結晶性の向上に関する研究も行っており、塗布時の半導体溶液の流れを制御することで、半導体の結晶性が揃って性能が均一になることを報告（K. Fukuda, Adv. Electron. Mater. 2015, 1400052.）している。このように、材料開発とプロセス開発でかなり改善できていると思っている。

絶縁膜の改善としては、薄膜化と均一化が必要である。また、材料開発で比誘電率を大きくするアプローチもある。例えば、印刷可能な強誘電体材料を使うアプローチがある。また、酸化アルミや酸化モリブデンなどの金属酸化物もある。このような比誘電率の高い絶縁材料を印刷プロセスに適用させることで、ある程度厚い膜でも低電圧駆動ができるようになる。

機械的な安定性の向上については、単に基板上に印刷で電極を形成すると隙間が多く機械的強度が弱いことがわかってきている。このため、バインダーのような層を間に挿入することで、印刷した電極層を下の層に密着させ何回曲げても壊れない構造にするというアプローチが必要になってくる。

最後にまとめる。印刷によるデバイス作製の研究開発において、電気・電子の知識・専門性を持ってアプローチしている人は少なく、ほとんどの人は化学的なアプローチをしている。しかし、この研究領域は様々な課題が複合的に現れる領域であるため、材料化学、電気・電子、機械工学などの知識と専門性を持った人達が横断的にやっていく必要があると考えている。

【質疑応答】

Q：印刷するということは、何かの液体と粒子をまぜて塗るのか。

A：基本的にはその通りである。粒子を溶媒に分散させ、適切な印刷手法でこの液体を塗ってパターン化し、加熱して（または光等による処理を行うことで）溶媒を飛ばすというやり方である。

Q：その場合、粒子同士はただ接触しているだけで電気を伝えているのか。

A：電極の場合には、粒子を分散させるために、ナノ粒子同士がくっつかないように保護層となる分子がナノ粒子の周りに形成されているものが多い。塗った後に焼くことでその保護層が粒子から外れ、そこで初めて粒子同士がくっついて導電性を発現する。金属のナノ粒子の例としては、銀ナノ粒子がある。この場合、室温でも焼結が進むという報告もあるが、市販のものでも 120℃程度で焼結が完了する。

C：このような方法で立体構造ができれば、電子デバイスとは違う方向での展開があるように思うので、構造形成への発展を期待したい。

Q：有機トランジスタをつくる場合、移動度向上やしきい値制御も大事だが、有機材料は空気に触れたり水に触れたりすると特性が変わってしまうことが懸念されるため、安定性も重要と思う。安定性についてはどのような状況になっているのか。

A：トランジスタの大気安定性は良く、ほとんど問題にならないという印象を持っている。実用化するときにだめと言われる可能性はもちろんあるが、トランジスタの熱に対する安定性や大気に対する安定性は、少なくとも太陽電池や EL に比べると、圧倒的に良いと感じている。

- Q：オンオフ比と移動度の向上に関して、何か具体的な応用側の数値的な要求があってやっているのか。それとも、一般的に性能を上げようとしているのか。
- A：私の印象では、具体的な要求があって研究しているグループはほとんどない。我々のような基礎科学をやる大学では、オンオフ比と移動度の一番良いところを目指している。そんなに良い特性は要らないといった議論は、あまり真剣にされてないと思う。JAPER（次世代プリントエレクトロニクス技術研究組合）には企業が入っているので、必ずディマンドがあって、それに求められる性能の観点でやっているとは思いますが、論文を調べた限りでは、ストーリーとして何かディマンドがあってこの特性で十分といった感じでやっている人はいない。
- Q：製造装置とかいう面で見たときに、例えば通常の半導体と比べてどの程度のクリーン度が必要なのか、その辺の目安を教えてほしい。半導体の微細加工にはクラス1のクリーン度の部屋や真空装置も必要になるが、この印刷技術ではどの程度のものが必要になるのか。
- A：一般的な話では、クリーン度の高いクラス1や10といったクリーンルームではやっていない。世界的に見ても、このような環境でやっているグループはほとんどないと思う。例えば、我々のグループや山形大では、クラス10,000やクラス1,000でやっており、その程度でもできている。ただし、製品の歩留まりという議論になると、この程度のクリーン度では不十分という指摘が産業界から入る可能性はある。

5. 総合討論

本ワークショップにおける総合討論では、趣旨説明および話題提供1～3において共有された各研究開発動向を踏まえ、デジタル技術の利用やデジタル情報の活用が活発化し世界的に異業種からの参入が進む中で、製造加工／ものづくりの方策について議論を行った。以下、トーンセッティングとしての産総研でのオンデマンド製造の取り組みの紹介と、議論の内容について、デジタル化した製造加工の姿と提供すべき価値、新しい製造の形に向けた課題、デジタルデータにおける価値、製造加工プラットフォームの必要性、人材育成の課題、に整理してまとめる。

【トーンセッティング】中野 禅（産業技術総合研究所）

一言で製造現場と言っても、一般顧客向けの例えば自動車会社の工場、車の部品のコンポーネントを作っている会社、素形材化に近いコンポーネントに対する部品を作っている会社、そして最終的に素形材から一次加工品の類を作っている会社、さらに素材産業と全て異なる。製造とひとくくりにされるが、それぞれやっている課題も違えば、やるべき課題も異なっており、このWSで提示された話題も、どう分類できるかと考えながら聞くと、随分印象も変わるだろう。

オンデマンド製造とは何なのか、我々がどのような価値を生み出そうとして研究してきたのかを紹介する。おそらく日本の製造業でミスミを知らない会社はない。また、中小の製造業、また大手でもNCネットワークは結構使われている。ここがないと、日本の製造は動かない、そのぐらい重鎮となっている。やっていることはオンデマンド製造である。ウェブの中に図面があり、そこに数字を入れると次の日には自分でつくった図面のものができあがって届く。そのような製造がもうできている。NCネットワークは情報データベースの会社で、こんな技術があつて、ここがうまくいかないがどうしたらいいかとウェブの中で質問を投げると回答が返ってくるという、サービスを提供している。

オンデマンド製造に関して我々が提唱した生産システムのコンセプトであるミニマルファブに10年ほど関わってきている。小型の装置を使ったどこでも製造であるが、作り過ぎない、必要なときに必要なだけつくるということがポイントである。試作・製造と試作・開発、そして企画営業を一体的に行う、それがオンデマンドである。生産量が少ない、速いからオンデマンドということではない。冒頭CRDSからあつたように、物質研究があり材料開発、製造加工があつてサービスがある。ここがブツブツと切れているからいけないので、全部を一体化して、そこから付加価値を生み出すというのがコンセプト、一番のポイントである。アメリカの大学の先生はすぐそこに気がついて、これはいいコンセプトだねと言う。

分業から連携へ、材料技術や製造が分業状態になっていてはいけない、どうつながっていくか。製造技術はつなげるための技術として有効に活用できる。開発の段階から目的意識を持って技術を正しく俯瞰して、利用者のレベルを向上させることが重要である。

このミニマルファブは今、150機関ぐらいに入っている。海外からの引き合いが大変多い。日本の会社には既に何社かには部分的に導入しているがなかなか手がけられない。一方、海外はこんなにいいコンセプトのものがあるならすぐ導入したいと言う。自分たちが作り

たいものを、どうやって最短で出来るか考えている。

ただし、このミニマルファブはまだ完成したものではない。やるべきことは多い。製造とは最後に商品の価値をつくる技術で、製造技術には終わりが無い。新しい材料が生まれると新しい製造技術が必要になる。新しい製品が欲しいと新しい製造技術が必要になる。新しいものをつくる製造技術をどう選択していくのかが一つの課題である。

オンデマンド製造は時間と空間の短縮である。時間とは開発時間から利用までの時間である。決して、使いたいという人が欲しいといったものをすぐ提供することがオンデマンドではない。欲しいと言われるものはすでに多様化し過ぎている。単に形があればいいものは誰も欲しがらない。人が何か欲しいと思うとき、それが形だけということはない。機能するものとして何かつくるとなったら開発しないといけなくない。B to Bの商品がきちんとしたものができてこない、その先の利用できるものは生まれないだろう。そして分散した技術を集約しないとこれからは生き残っていけなくなる。そこでのデジタル技術はツールとしてどんどん使えばいいだけの技術と考えている。

【議論の内容】

■デジタル化した製造加工の姿と提供すべき価値

- ・デジタル化した製造加工では様々なニーズに対して、それぞれに高付加価値を持ち、それぞれの人に合ったものを大量に生産できるマスカスタマイゼーションが大きなポイントである。
- ・ソフトウェアがオープンになり誰でもが使えるようになると、情報はネットワークでどこでも入手可能になり、付加価値はデータを持っているところと物をつくれるところ（インとアウト）に動いていく。デジタルトランスフォーメーションの中で、デジタルをうまく使った新しい製造技術（アウトの部分）の付加価値を次の時代に向けて用意していく必要がある。
- ・ミニマルファブでは、昔のすり合わせや職人芸に見える化して技術に落とし込んだ形に持っていくというコンセプトがある。また、デジタル製造、オンデマンド製造という考えが根幹に流れている。形だけではなくて、利用者の欲しい機能を製造技術として提供する。
- ・求められていることはフレキシビリティであり、デジタル化で加工技術をフレキシブルに組み合わせて製造していく時期にきている。
- ・製品ライフサイクル、バリューチェーン全体の見える化や俯瞰を可能にするのがデジタル化である。
- ・3D プリンティングが脚光を浴びているのは、上流側の構造設計から材料設計、形状のつくり方などのものづくりまでが一体化できるプロセスだからである。3D ばかりでなく、本来日本が持っているべき、ものづくりの重要な技術、テクノロジーがあり、それも磨きつつ、それを上流設計側にどう渡していくか。それが渡れば、違う視点からの設計ができる。
- ・デジタルをもっと広く捉えて、異分野連携、分野と分野が衝突し、互いに刺激を受け合って新しい分野が生まれるということを期待したい。

■新しい製造の形に向けた課題

- ・機械加工にもデジタル化の流れはあり、デジタル化できるものは既に研究が終わっている。加工でわかっているものがデジタル化できるのであり、一桁加工精度が上がるといった飛躍する技術はデジタルの話ではない。プロセスを理解し、現象を知る、という研究開発があってはじめて大きな進歩がある。
- ・日本がこれから取り組むべきところはデジタル化だけではなく、プロセスを理解し飛躍させる技術開発をやり続けなければ勝てない。設計は盗まれやすいが、どうやってつくったかは簡単に盗まれないので、生産技術は非常に強い競争力になる。売っている工作機械を買ってきて並べるのではなく、自分たちの生産技術として持っている会社は非常に強い。日本のものづくりの基盤を大事にして、技術開発革新を続けていくことが必要である。
- ・3次元の形をつくるツールには、線から作る、面から作る、といった多様な方法があるはずであり、概念的には3Dプリンターはもっと幅の広い製造方法である。炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を3Dプリンターで作るとなると、材料は繊維なので立体的に編み物をつくっていくイメージになる。これは粉からつくる3Dプリンターとは違うつくり方になるが、そのようなハードの技術はまだない。日本がもっと取り組むべきところはそのようなハード的なものを開発することではないか。
- ・機械加工の立場では、ボリュームゾーンが大きく経済効果も大きいため、マスマークションも大事である。部品の型に物を流すつくり方は桁違いに安く、もしこれを塗りかえるような一品ものが安くできるプロセスが現れれば良いが、今のところは非常に難しい。
- ・製造では基本的に試作品をつくるフェーズと生産するフェーズではやっていることは明らかに違う。それぞれ目的がかなり違っており、それを一緒にしてしまうとおかしなことになる。
- ・試作の段階から生産に耐える装置でつくってしまえば、試作と生産のギャップはない。ミニマルファブやオンデマンド製造ではそのギャップをなくし、できるだけ試作でつくったレベルをそのまま生産に投入できるというスタイルを求めている。
- ・求められているのは、多様化の中で多くの小さなニーズをすくい上げる生産システムである。技術が分業化し一つ一つの技術がバラバラになっていて、試作から生産への移行に大きなギャップがあるが、これらを融合化してコンパクトにし生産のギャップを埋めることがデジタル製造の課題である。
- ・積層造形でなければつくれないものは沢山あり、それをつくるべきだが、今まで誰もつくったことがなく、図面を描いたことがないものをつくらなければならないので、そこに課題がある。その課題を誰も見据えてないところが問題である。技術の位置づけを判断しながら、量産に向けた技術は量産技術としてきちんと伸ばしていくことが重要である。
- ・もっと簡単に金型が早くできれば、量は少なくとも量産用のものが使える。ものづくりをトータルで見る科学として工学を位置づけたい。
- ・日本の強みの源泉は縦と横の関係がうまくいっているためである。縦は大学の先生を中心にある技術を深掘りするようなものであり、縦の技術がないともものづくりは強くならない。一方、横はCRDSから話のあったバリューチェーンをつなぐところであ

る。昔は設計や製造の人たちがたばこ部屋で様々な話をして情報の共有をやっていた。いわゆるすり合わせをうまくやって、日本の製造業は強くなっていった。日本の強みをさらに強くするには縦の技術であるものづくりプロセスの技術を強くすることに加え、デジタル化を使ってうまく横をつないでバリューチェーンをつなげることである。縦と横をうまく融合させることによって、日本のものづくりの強みをさらに強くできる。

- ・日本の独自性が生き、日本にしかできず世界に必要とされるある種独自の領域があるとうい。
- ・デジタルによってあらゆる障壁が下がっている。今まで日本の玄人しかつくれなかったものが、その生産装置によって世界中でつくれるようになったら、世界が同じものをつくれるようになる。ミッシングピースとして日本の強みをはめることによって、その同じ装置を使ってもより良いものがつくれるとそれが付加価値になる。ノウハウ、日本の特性が生かされることで、装置が初めて生きるというものがあると良い。ノウハウが日本国内にとどまっていっていき形ができて上がるのであれば、産業界、あるいはアカデミアとしても好循環のサイクルができる。

■デジタルデータにおける価値

- ・原子レベルで、転位の状態あるいは加工によって何が起きているのかといった情報をデジタルデータとして蓄積していくことが強力な付加価値になる。情報のインのところでサイエンティフィックな深さをどのようにデジタル化したデータの中に書き込んでいくかが重要である。書き込めば皆がそれを利用できるようになっていく。
- ・形状だけではなく、物理的な現象やメカニズムなどを考慮した CAM はまだできていない。これには、現象のメカニズムを理解し、解明してデータに入れないとできない。シミュレーションにも現象についてのデータが必要である。
- ・公的研究機関でも、航空機エンジンに使われているような門外不出の技術はデータベースの塊であり、そのデータベースに触れる人は2～3人に固定されている。様々な事柄を継承できる形にする必要があるが、オープンな度合いは戦略になる。
- ・インプラントなど医療機器系は余り特許を取らず、比較的オープンである。また、人の命にかかわる治療法なども共有するということがある。
- ・産総研ではものづくりデータベースを公開しており、企業ユーザーが増えている。企業ユーザーが増えている背景には、自前のデータでは追いつかなくなっていることがある。

■製造加工プラットフォームの必要性

- ・デジタル化でどんな価値が提供できるかは、一人で考えるより世界中で考えるほうが良いものが出てくる。アイデアはオープンに募集して、それをつくれる技術を提供する。ただし、そのつくり方はデジタル化したからといって、どこでもつくれるわけではなく、プロセスの中のメカニズムやパラメータも含めて、メイド・イン・ジャパンのクオリティを持ち、ここに依頼しないとできない、というものづくりプラットフォームが必要である。誰でもが使えるプラットフォームを提供できるのがデジタル化のメリットである。

- ・海外の高い装置をたくさん並べてプラットフォームとしているところもあるが、海外製品は企業でも買えるので、大学が改めてそれを提供するよりは、大学が開発した技術や装置をオープンに使えるようなプラットフォームをつくり、それをブラッシュアップしていくことが本来の役割ではないか。
- ・ドイツでは、例えば熱処理のようなレガシー技術に属するところでは学協会をうまく使って、熱処理のデータベースは大学で作成している。データベースをとるだけでは論文にならないので何か工夫があるのだろうが、役割をある程度分担しながらうまくものづくりを維持している。日本でもどこで何をやるかを考えると、ものづくりはより強くなる。

■人材育成の課題

- ・機械加工では、工具や工作機械、計測制御、あるいは材料といった分野と一緒にプロジェクトを組むほうがイノベーションは起こりやすい。大企業は非常に良いニーズを持っており、学生が企業と一緒に革新へのチャレンジをやることで、その分野の将来の発展に役に立つ。大学の工学部として一番重要なことは、そのような実践教育の場である。
- ・基本的にニーズから始める研究はおおよそでき上がった技術を組み合わせるので、組み合わせで論文はほとんど書けない。少なくとも現状では論文になりにくい研究テーマをポストドクにはとても勧められない。学生ももちろん無理であり、論文を書かないと学位が取れない。それが良いのか悪いのか、どうしたら変えられるかも考えないといけない。
- ・社会人が世界とビジネスしたときに、ドクターを持っていないだけで扱いが全く異なり、悔しい思いをしている人が多数おり、学位を取ろうとしている。このようにモチベーションが高く、現場での実践的なものも知っている日本人のドクターをしっかりと育てていくことが大学のやるべきことではないか。
- ・大学における工学教育の中でものづくりの教育が低下して危機的な状況になっている。切削加工でも塑性加工でも教員公募しても人材がいない。ものづくりの研究者の論文は非常に少なく、国際的な論文も少ないため、ものづくりの研究はレベルが低いと思われてしまうが、英語の論文で出すのはどちらかというと日本が遅れている分野である。ものづくりに対する理解と位置づけをもっとレベルアップしないとイケない。
- ・3Dプリンターの1つのメリットは設計と加工が近づいたことだが、きちんとものをつくるためには寸法の精度、耐久性、強度などを考え、工作機械の構造と工具の動作を考えてつくる必要がある。大学では物理的、力学的なことがわかるものづくりの教育をしなければいけない。
- ・社会人の中でも、ものづくりがわからない人がものづくりをしていることが多くなっていることから、企業と共同研究したらできるだけその人に学位も取ってもらい、企業の中で博士の評価を高めていかないと、ものづくりのレベルも上がっていかない。
- ・国立研究機関では企業の技術相談は数多く来ている。以前は大学の先生が受けていたものが、大学の先生が減って頼れる先が少なくなっているのが原因で有り、日本の社会全体として製造をサポートできる人材が非常に減っている。

【まとめ】

CRDS から提示した 2 つの仮設、(1) 新たな製造においては材料と加工技術とがより一層密接になる、(2) 材料・設計・加工・サービスのそれぞれの分断状況から一気通貫した開発へと転換させるプラットフォームの必要性、および話題提供において共有された各研究開発動向、産業技術総合研究所でのオンデマンド製造の取り組み紹介を踏まえ、5 つの観点で議論した結果を以下にまとめる。

① デジタル化した製造加工の姿と提供すべき価値

- ・デジタル化で構造設計から材料設計、製造までを一体化し、加工技術をフレキシブルに組み合わせて多様なニーズに対応して製造していく。
- ・デジタル化により、データを持っているところとデータから物を作るところに付加価値が存在するようになり、利用者の欲しい機能が製造技術を通して提供される。

② 新しい製造の形に向けた課題

- ・試作から生産への移行に大きなギャップがあるが、これらを融合化してコンパクトにし生産のギャップを埋めることがデジタル製造の課題である。
- ・日本の強みをさらに強くするには、縦の技術であるものづくりプロセスの技術を強くすることに加え、デジタル化で横のバリューチェーンをつなげることにある。

③ デジタルデータにおける価値

- ・データの中にサイエンティフィックな深み（材料の理解、加工現象の理解）を加えることと、製造技術とそのハードウェアにおける付加価値を見出すことが鍵となる。
- ・企業も自前のデータでは追いつかなくなっており、様々な機関のデータベースの活用や戦略的なオープン化を考える必要がある。

④ 製造加工プラットフォームの必要性

- ・プロセスの中のメカニズムやパラメータの情報も含めて、質の高い製造加工技術のプラットフォームが必要である。
- ・大学が開発した技術や装置をオープンに使えるプラットフォームをつくり、それをブラッシュアップしていくことが重要である。

⑤ 人材育成の課題

- ・大学における工学教育の中で、ものづくりに関する基盤的教育が難しくなっており、企業でも工学的基礎知識を持たずに製造に従事するという危機的状況にある。
- ・大学と企業との共同研究を通じて、学生への基盤的教育とともに、社会人による博士号取得を進めるべきである。

付 録

付録 1：開催趣旨・プログラム

開催趣旨

物質・材料および様々なデバイス研究開発の最先端を担うナノテクノロジーやマイクロテクノロジーは、異分野の融合を促進し、多様な応用を実現する技術領域として発展してきました。製造技術や加工技術は、これらの研究開発にとってさらなる進展が不可欠なものであり、デジタル化時代の技術の在り方は大きな注目を集めるところです。

CRDS では 2017 年 4 月に、本分野における世界各国の国家計画、投資戦略、研究ポテンシャル、技術進化そして産業動向、主要な研究開発領域を含む分野全体を俯瞰した俯瞰報告書 2017 年版を発行しました。報告書では、CRDS が抽出した 37 の主要研究開発領域について研究開発状況や国際比較を取り纏めていますが、新たな研究動向や変化・進展のきざしなど、さらなる調査・検討が必要な領域がまだ多数あると認識しています。そのため今年度は、いくつかの領域に注目して本分野の俯瞰をさらに充実させます。こうした経緯から、CRDS では今年度、ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰活動の一環として、本ワークショップを計画いたしました。

今回のワークショップでは、ナノテクノロジー・材料の進展に不可欠な製造技術・加工技術に関する研究開発動向を広く俯瞰することを目的とします。製造加工技術は新奇材料の登場や高度化に向けた成熟技術の漸次進展の側面と、材料プロセスと成形がより密接になった新たな技術展開の 2 つの側面を持ちます。今回は前者の技術として精密機械加工技術を、後者の技術として Additive Manufacturing 技術およびプリントドエレクトロニクス技術を取り上げ、材料機能の設計・制御とその加工手法、製造加工の新たな方向性、製造加工技術を基盤学術として維持発展させるための仕組みなどを議論します。

第 5 期科学技術基本計画の先を見据えて、基礎的な科学技術知見の充実や、未来社会へインパクトを及ぼす研究開発の方向性・課題等を、専門家間で議論し発掘したいと考えています。

なお、本ワークショップの結果はワークショップ報告書として取りまとめるとともに、CRDS 俯瞰報告書 2019 年版にエッセンスを反映する予定です。また、CRDS における戦略立案に活用するとともに、各界における施策立案等に活用いただくことを念頭に置いています。

プログラム

(敬称略)

開催日時：2018年 3月11日（日）10:30－16:00

開催場所：AP市ヶ谷 8階A会議室

- | | | |
|-------------|--|------------------|
| | 司会 | 伊藤 哲也 (JST-CRDS) |
| 10:30－10:35 | 開会挨拶 | 曾根 純一 (JST-CRDS) |
| 10:35－10:50 | 趣旨説明、事務連絡 | 伊藤 哲也 (JST-CRDS) |
| 10:50－11:40 | 話題提供1：機械加工 | |
| 10:50－10:15 | 「加工技術の高精度・高効率化ー 精密切削加工の例」 | 社本 英二 (名古屋大学) |
| 11:15－11:40 | 「新規材料への加工技術の対応ー CFRP の塑性加工の例」 | 米山 猛 (金沢大学) |
| 11:40－12:30 | 話題提供2：Additive Manufacturing | |
| 11:40－12:05 | 「積層造形技術のプロセス条件を利用した新材料創成」 | 中野 貴由 (大阪大学) |
| 12:05－12:30 | 「3次元微細構造の成形」 | 丸尾 昭二 (横浜国立大学) |
| 13:15－14:05 | 話題提供3：プリントドエレクトロニクス技術 | |
| 13:15－13:40 | 「印刷技術による電子回路製造の新展開」 | 熊木 大介 (山形大学) |
| 13:40－14:05 | 「印刷技術による有機半導体デバイスの創製」 | 福田 憲二郎 (理化学研究所) |
| 14:05－16:00 | 総合討論 | |
| 14:05－14:20 | トーンセッティング | 中野 禅 (産業技術総合研究所) |
| 論点 | 1. 加工技術発展の今後の方向性 | |
| | 2. 加工技術の発展に向けアカデミアが取り組むべき共通技術課題 | |
| | 3. 物質研究・材料開発・製造までの開発フローを支援するプラットフォームの必要性 | |
| | 4. 我が国の製造業がグローバルな存在感を保つために、加工技術はどう貢献できるか | |
| 16:00 | 閉会 | 曾根 純一 (JST-CRDS) |

付録 2：参加者一覧

（敬称略、五十音順）

招聘者

（話題提供者）

- ・熊木 大介 山形大学大学院有機材料システム研究科 准教授
- ・社本 英二 名古屋大学大学院工学研究科 教授
- ・中野 貴由 大阪大学大学院工学研究科 教授
- ・福田 憲二郎 理化学研究所 研究員
- ・丸尾 昭二 横浜国立大学工学研究院 教授
- ・米山 猛 金沢大学理工研究域機械工学系 教授

（コメンテーター）

- ・中野 禅 産業技術総合研究所製造技術研究部門 グループ長
- ・宮崎 克雅 （株）日立製作所 材料イノベーションセンタ 主管研究員

JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット

- ・曾根 純一 上席フェロー
- ・永野 智己 フェロー・ユニットリーダー、JST 研究監
- ・荒岡 礼 フェロー
- ・伊藤 哲也 フェロー
- ・小名木 伸晃 フェロー
- ・馬場 寿夫 フェロー
- ・伊藤 聡 特任フェロー、NIMS 情報統合型物質・材料研究拠点 拠点長
- ・清水 敏美 特任フェロー、産業技術総合研究所 フェロー

関係府省・機関

- ・西村 慎也 文部科学省研究振興局 参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）
付 調査員
- ・北澤 英明 物質・材料研究機構 経営企画部門経営戦略室 調査役
- ・西村 睦 物質・材料研究機構 経営企画部門 部門長
- ・逸見 直也 ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局長

■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

曽根 純一	上席フェロー
永野 智己	フェロー／ユニットリーダー
荒岡 礼	フェロー
伊藤 哲也	フェロー
小名木 伸晃	フェロー
河村 誠一郎	フェロー／エキスパート
佐藤 勝昭	フェロー
馬場 寿夫	フェロー
宮下 哲	フェロー
伊藤 聡	特任フェロー
清水 敏美	特任フェロー
竹村 誠洋	特任フェロー
田中 一宜	特任フェロー
田中 秀治	特任フェロー
玉野井 冬彦	特任フェロー
馬場 嘉信	特任フェロー
本間 格	特任フェロー
村井 眞二	特任フェロー

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願い致します。

CRDS-FY2018-WR-02

CRDS 俯瞰ワークショップ報告書

ナノテクノロジー・材料分野 区分別分科会

「共通基盤科学技術（製造加工）－ デジタル情報を基にした製造加工の姿 －」

平成 30 年 6 月 June 2018

ISBN 978-4-88890-600-5

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

ナノテクノロジー・材料ユニット

Nanotechnology/Materials Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds/>

© 2018 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ISBN 978-4-88890-600-5

