特別レポート

# 中小製造業における技術のデジタル化に関する研究

調査事業部長兼上席研究員 博士（経営学）**藤坂　浩司**

本レポートは技術のデジタル化が中小製造業の経営に及ぼす影響を多面的に研究した博士論文「中小製造業における技術のデジタル化に関する研究」を要約したものである。本論文は、デジタル技術が持つ特性に着眼し、その特性が中小製造業の経営にどのような影響を及ぼすのか、先行研究との違いや、デジタル技術の特性を視野に入れた中小製造業の事業戦略の実態調査に基づき明らかにしている。本レポートでは論文のエッセンスを要約の形で紹介する。

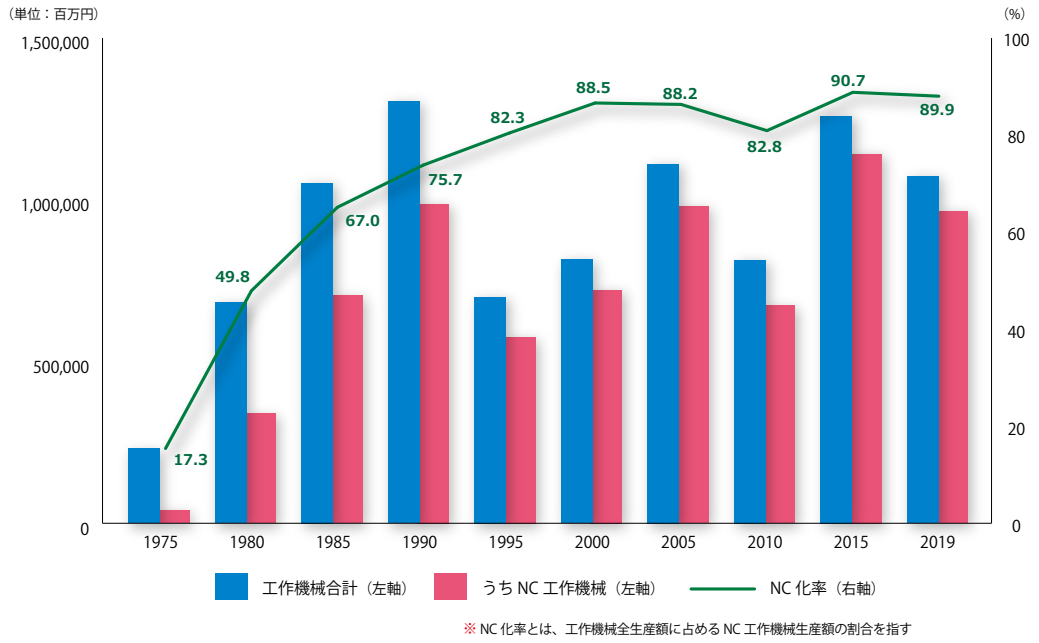
## 1 研究の問い

第二次世界大戦から高度成長期を経て現在までに至る過程で、日本の工業製品の信頼性を高めた要因の 1 つに“技術のデジタル化”がある。技術のデジタル化とは、人間が行う作業を、機械やコンピュータに肩代わりさせることで、作業の標準化、自動化を進め、その結果、生産の効率化や安定化、経営の合理化を目指す取組みを指すものだ。具体的には製品づくりに関わる設計や生産の工程で使われる技術が「アナログ」から「デジタル」に置き換わる事象や、製品自体の「アナログ」から「デジタル」への転換を意味している。

技術のデジタル化は、産業の ME（microelectronics＝微細電子工学）化＝産業の情報化が代表に挙げられるが、この ME 化を実現させた代表的な技術革新が IC（Integrated Circuit ＝集積回路）を中心とした電子情報通信技術の発展である。電子情報通信技術の発展が、それまでの機械系技術と融合してメカトロニクスという新しい製造技術として誕生した。また、IC の導入により、新たな FA（Factory Automation ＝工場の自動化）、OA（Office Automation ＝事務作業の自動化）機器の登場、既存機器のコストパフォーマンスの画期的な改善、それに伴う資本財の相対価格の一層の下落などがもたらされたことから、IC が FA 化、OA 化を中心とする ME 革命の技術的な牽引役を果たした。これら一連の動きは日本の製造業の生産性向上に大きく貢献した。

このように技術のデジタル化は製造業にプラス効果をもたらした一方、マイナス効果も見られるようになった。工業製品を生産する工作機械が NC 工作機械と呼ばれるデジタル機器に置き換わった事例で説明したい。NC 工作機械の NC とは「Numerical Control ＝数値制御」の略称で、X・Y・Z の 3 軸で構成される座標位置をあらかじめセットしたデータ（NC データ）に基づいて工具が移動して対象物を加工する工作機械を指す。第二次世界大戦後の工業製品の開発、生産は NC 工作機械に大きく依存した。NC 工作機械は製造現場における技術のデジタル化の中核を担う装置であるが、1970 年代以降、急速な発展、普及を見た。**図表 1** は工作機械における NC 化率の推移を示したもので、1975 年を起点とすると直近の 2019 年時点までほぼ一貫して割合を高めていることが分かる。現在、日本で生産される工作機械の約 9 割が NC 工作機械であり、製造現場における技術のデジタ

図表 1：工作機械の生産額と NC 化率※




出典：日本工作機械工業会資料を基に作成

ル化が着実に進んだことが分かる。

この NC工作機械を使えば、経験を積んだ熟練工でなくても、機械の操作マニュアルに従えば一定レベルの品質で製品加工ができるが、同業者が同種の NC工作機械を使い製品加工すれば、出来上がる製品の品質に技術的な差異が小さくなる現象が生まれる。また、中枢機能や性能を IC に依存するデジタル機器は、機器の汎用化を促し、差別化できない製品が生まれるようになった。その結果、汎用化された製品は価格競争に巻き込まれていく現象が起きる。

本研究ではこの現象を「技術の平準化」と呼ぶ。技術の平準化には、NC装置を搭載し、工作機械自体の性能が平準化する供給者の技術の平準化とそれらデジタル機器を使って加工された製品の品質が平準化するユーザの技術の平準化があるが、本研究ではケースごとに使い分けている。

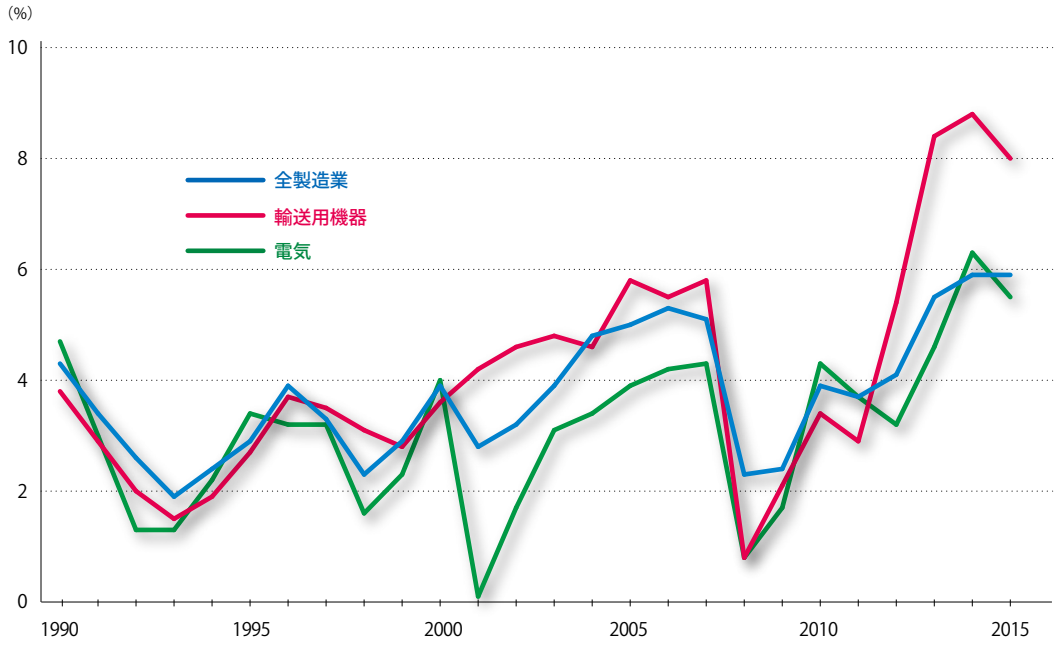
技術の平準化は、技術のデジタル化に見られる特性の 1 つで、技術の平準化が起きると、製品開発競争の軸足は機能や性能など付加価値を追求する質的競争から、コストや生産スピードなどの量的競争へと比重が移っていく。

**図表 2** は、輸送用機械器具と電機の 2 つの産業の売上高経常利益率の推移を全製造業平均と併せて示したものだが、1990 年代以降のトレンドを見ると、電機が輸送用機械器具の利益率を下回っていることが分かる。

輸送用機械器具の代表である自動車は、1908 年に発売された T 型フォード以降、エンジンで駆動する乗り物として 100 年以上にわたり世界中で利用されてきたが、その間、自動車の基本構造で革新的な変革は、全自動変速機の登場以外起きていない。一方、電機では、1990 年代に入ると DVD や薄型ディスプレイ、デジタルカメラといった多くの革新的製品が市場に登場している。いずれの製品も日本発の技術であるが、トレンドからは、そうした革新的技術に基づく製品が開発され市場投入されても利益率に反映されにくい実態が窺える。この背景にあるのが技術のデジタル化である。技術がデジタル化されたことで技術の平準化が進み、製品が汎用化する現象が生まれている。

そうした状況に直面した際、企業は何らかの対応を採らなければならない。販売量が多い製品に種類を絞り込み、コスト競争力を高めて市場シェ

図表 2：わが国基幹産業の売上高経常利益率の推移




出典：財務省「法人企業統計調査」を基に作成
（売上高 10 億円以上の企業が対象）

アを獲得し、価格決定権を握り市場で優位な立場に立つか、既存市場には存在しない付加価値の高い新製品を開発するのか、いずれかの方法で市場間競争に勝ち残る術を企業は持たなければならない。本研究が対象とする中小製造業は大手製造業とは異なり、規模の拡大を目指すことで勝ち残りを図ることが難しく、中小製造業ならではの施策が求められる。様々な物理的制約条件の中で技術のデジタル化の特性に対応しなければならないが、技術のデジタル化の影響を受けながらも、好調な業績や新市場開拓で成功するなど競争力を発揮する中小製造業が存在している。

では、それら中小製造業はどのようなプロセスに基づいて競争力を発揮しているのか。筆者はデジタル技術の特性を自社のビジネスモデルと照合させ、そのマッチングにうまく成功させているからではないかと考えた。本研究では、技術のデジタル化の発展を時系列で追いながら先行研究との違いを示すと同時に、技術のデジタル化が中小製造業に及ぼす影響について、従来の研究の中心である生産工程に加えて、設計工程までを包含した形で考察し、その実態を多面的に検証した。検証に際しては、受託加工型事業者を中心とする中小製造業への 4 回に及ぶアンケート調査、メーカー型中小製造業者へのヒアリング調査、医療機器産業を事例にデジタル機器を活用して製品開発、製品加工に取組む中小製造業へのヒアリング調査の 3 つのケース別に調査し、実態把握を通じて仮説を検証した。

## 2 デジタル技術の定義と特性

そもそも製造業におけるデジタル化とは何であろうか。“ デジタル ”（digital）とは、連続的な量を数値で表す事象を指すもので、数値の記録はデジタルデータと呼ばれている。数値を連続的に変化する物理量で表す “ アナログ ”（analog）との比較事象で、デジタルデータはアナログの事象を数値に置き換えたものである。デジタル技術について本研究では「製造業の設計・開発から生産に

至る範囲にわたり、現場に従事する技術者、技能者の経験や技能、知見などを数値化した技術」と定義する。つまり、デジタル技術とはその技術を適用する対象物にとって、最適な結果を与えるべく人間の所作動作や人間の考えをパッケージとしてまとめて数値に置き換えたものである。

次にデジタル技術の特性について述べたい。デジタル技術は、従来の経験値に基づくアナログ技術を数値変換したものだが、デジタル技術はさまざまな特性を持ち合わせている。最大の特性は“曖昧さがない”ことである。分かりやすい例としてラジオのチューナーを挙げる。デジタル式チューナーであれば、選局したいラジオ局のセレクトボタンを押すだけで、即座に指定されたラジオ局を選択してくれる。これはラジオに組込まれた基幹部品であるCPU（Central Processing Unit ＝中央演算処理装置）とファームウエア（システムを制御するためのソフト）が結合して、あらかじめ決められた条件通りに周波数を選ぶデジタルインターフェースが規定された仕組みになっているためである。自分で周波数を探すアナログ式チューナーとは大きく性質が異なる。このようにデジタル技術は曖昧さがないことから精度が高く、均一性に優れている。しかしその技術特性は、工業製品を作る場合に、技術を使うユーザの属性や使用目的、使用する企業の市場環境など諸条件により、プラスにもマイナスにも働く二面性を持ち合わせる。その一例を示したものが**図表 3** である。

**図表 3** は筆者が中小製造業を対象に、技術のデジタル化の実態調査を行うための参考としてパイロット調査を実施し、その結果をまとめたものだ。デジタル技術が中小製造業にどのような影響をもたらすのか、経営的側面と技術的側面に分けて、それぞれにプラスの影響とマイナスの影響について回答結果を示している。このうちマイナスの影響については、回答企業のうち６社が「他社との技術差別化の困難」と回答したほか、「類似品の多数出現」、「価格競争激化による利益減少」といった回答が得られた。

技術の平準化が進めば汎用化された製品は価格競争に巻き込まれていくことは、エレクトロニクス産業の歴史を見れば明らかであるが、価格競争は技術や製品を売れ筋商品に収れんさせていく。技術のデジタル化のメリットは規模の経済にある。大量の原材料を割安な価格で購入し、標準的な製品を大量に作ることで、生産効率を高め、無駄を省くことができる。その過程では、生産効率が低く収益性の上がらない製品は排除されていく傾向

**図表 3：デジタル技術が製造業に与える影響**

| | プラスの影響 | マイナスの影響 |
|---|---|---|
| 経営的側面 | ①人手不足の解消<br>②生産性向上によるコスト改善<br>③作業効率改善による納期短縮<br>④新規顧客の開拓 | ①デジタル設備導入費用の負担増<br>②製品、技術の優位性の減少、消滅<br>③価格競争激化による利益減少<br>④市場シェアの減少<br>⑤類似品の多数出現 |
| 技術的側面 | ①作業標準化に伴う不良率の減少<br>②技術の平準化による安定性の向上<br>③非熟練工の生産性向上 | ①他社との技術差別化の困難<br>②コア技術の低下、消滅の可能性向上<br>③熟練工の減少と技術伝承の困難 |

調査は 2014 年 10 月に実施。調査対象企業は９社（機械５社、金属２社、その他２社）で、調査対象地域は都内７社、埼玉１社、広島１社。調査対象となるデジタル機器は NC 旋盤やマシニングセンタなど NC 工作機械全般を指す。

が見られる。しかし、そうした分野や市場は中小製造業にとっては魅力的なビジネスである場合が考えられる。本研究はそうした領域を技術のデジタル化がもたらす“技術的特性領域”と捉え、中小製造業の経営の在り方を考察する上で重要であると考える。

## 3 先行研究との違い

技術のデジタル化の影響を受ける状況に直面した企業が、デジタル化をマイナスと捉えた場合、対応措置が必要になる。ME化に関する先行研究でも、ME機器は、プログラムを組めば自動的に加工を行うため、中小製造業の技術水準が平準化してしまうとの懸念を示している。そのため、ME機器を活用するための新たな技能の確保、ME機器が適さない規模での対応を可能にする従来の技能の維持が中小製造業間における競争の鍵になると言われていたが、果たしてそれは何かを具体的に示す必要がある。

技術のデジタル化のマイナス面に着眼した先行研究では、労働問題への影響の観点から行われた研究が多い。1970年代後半から中小製造業へのNC工作機械の普及が急速に進んだ結果、先行して普及が進んだ大企業と合わせて技術のデジタル化が労働問題として浮上する流れを作った。NC機の登場により、職場で獲得できた「勘とかコツ」が不要となり、従来の見習工（徒弟制度）が実質的に消失した結果、職業が再編成されたという研究が一例だ。

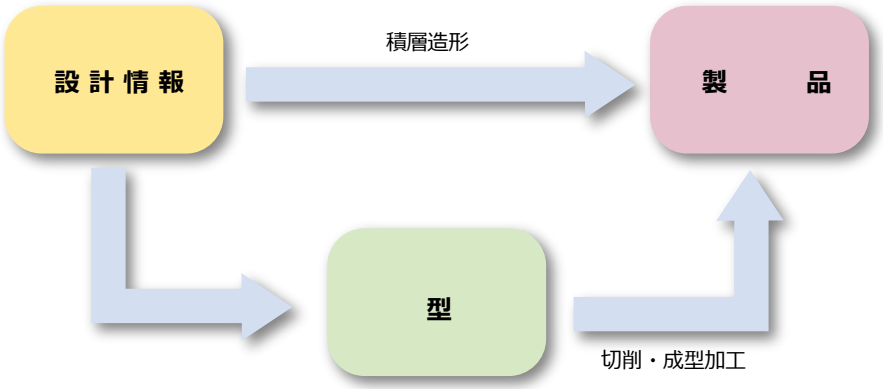
また、ME化が省力化技術で労働量の削減をもたらし、雇用・失業問題を顕在化させ、労働環境に影響を及ぼす点を指摘する研究や、熟練工に生産を多く依存する技能集約型の中小製造業ではME化への対応が遅れた結果、中小機械工業に階層分化を生じさせたという研究も見られる。技術のデジタル化によるME化は、業種や企業が置かれた経営環境次第で、労働量を削減する省力化技術になる一方、熟練労働を確保できない企業にとっては、ME化が労働を代替する補完技術になる実態を明らかにしている。ME化が労働問題に与える影響についてはもう1つ「労働の二極分解」をもたらす説がある。例えば、工場労働における従来の熟練および技能が解体され、工場労働はFA技術の知識と経験をそなえる「知識労働者（ナレッジ・ワーカー）」と単純な機器設置の操作をするだけの「単純労働者（オペレーター）」の両極に分解するという説である。

そもそも技術の進化と労働問題は切り離すことができない問題であるが、ME化の進展は最終的には労働問題に帰結する要素を強く持ち合わせている。中小製造業は、慢性的に人員不足という問題を抱えており、ME化が労働の二極分解を引き起こしたにせよプラス効果を得られる素地も持ち合わせている。東京、城南地域の中小機械・金属工業を調査した関満博は、中小零細企業の集積地域における企業の階層分化の実態分析を通じて、家族的規模を脱した中小企業にとっては、徹底的なME化は存続のための1つの選択の方向であると論じている。さらにME化は旧来の熟練を崩壊するのではなく、熟練をME技術というツールで具現化していく新たな技術が必要になった結果で、新たな視点での技能、技術の習得、向上が求められると判断すべきであるという研究や、ME機器の低価格化が、中小企業の存立条件を弱体化させず、その技術水準を向上させて存立条件の維持・確保に役立つことを強調する研究もある。

このようにME化に関する先行研究については労働問題に言及する先行研究が多いが、一方では技術面での評価は少ない。時間の経過に従い技術が平準化されていくデジタル技術の特性に着目し、中小製造業にマイナスの影響を及ぼすという研究が見られるが、その影響について技術のデジタル化の変遷との関係から評価した研究は見られない。

またME化に関する先行研究では、サプライチェーンの生産工程を対象にした研究が中心で、NC工作機械や産業用ロボットなど生産工程のデジタル機器を対象にしたものだ。生産技術の高度化とそれに伴う効果（プラス効果、マイナス効果の両面）に焦点が当てられており、設計まで包含し

図表 4：3D プリンタを用いた生産の流れ




出典：経済産業省データを基に作成

た観点から技術のデジタル化の影響を捉えた研究は見られない。さらには近年、急速に普及する付加製造技術（Additive Manufacturing、略称、AM 技術）について中小製造業への影響を取上げた研究は皆無だ。勿論、技術のデジタル化に関する過去の研究と現在の状況を同じ視点で扱うのは難しいが、研究範囲が製造現場に限定されていた先行研究とは異なる視点で技術のデジタル化の影響を分析した点で本研究は中小製造業研究に新たな視点をもたらしたと考える。

本研究が設計と製造の関係性に着眼したのは、デジタルファブリケーションの概念に基づき、近年、設計と製造の関係性が強まりを見せていることが大きな理由である。総務省の 2016 年度版情報通信白書によれば、デジタルファブリケーションについて「デジタルデータをもとに創造物を制作する技術のこと」と定義し、具体的には、「3D スキャナや 3DCAD などの測定機械により、自分のアイデアや個人の身体データ等をデジタルデータ化した上で、そのようなデジタルデータを 3D プリンタやレーザーカッタなどのデジタル工作機械で読み込んで造形する」と示している。現在の製造業では設計と製造がデジタル技術を通してシームレス化してつながり両者は切り離せない関係にある。製品開発や生産において設計工程の位置づけが重要性を増している。

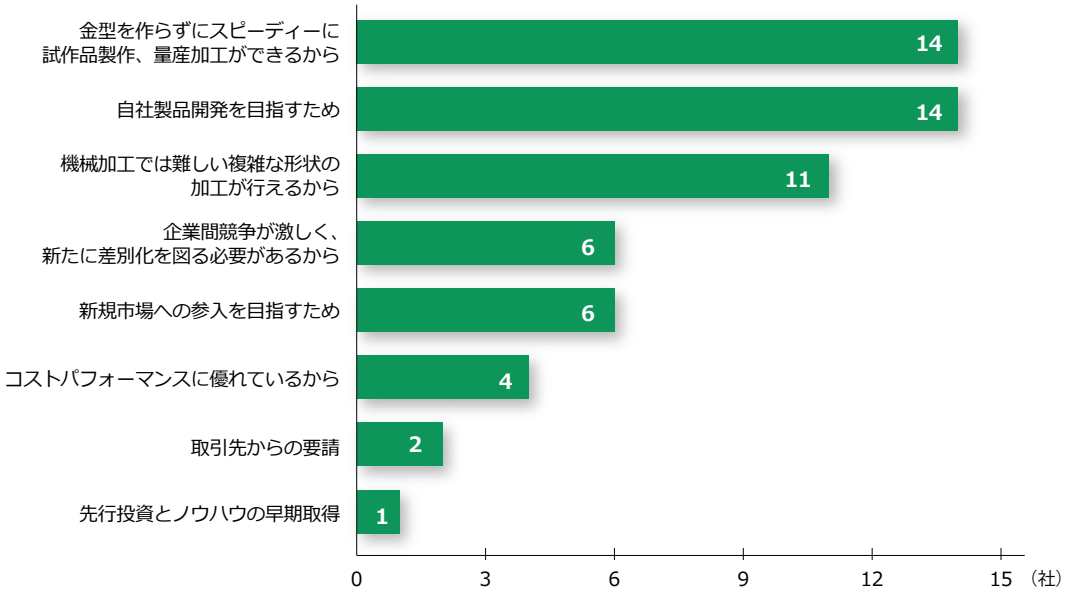
## 4 設計と製造の関係性

上記の通り、製造業では設計と製造の関係性が強まりを見せているが、本研究では中小製造業におけるその実態を調査するため、3DCAD と 3D プリンタに関するアンケート調査をそれぞれ行った。3DCAD の調査では、設計と製造の関係性について相関性を調べたが、中小製造業が 3D プリンタを活用するために、設計機能がより高度化した 3DCAD の導入を進め、活用している実態が明らかになった。3DCAD の導入効果については、「サプライヤとのデータ共有」を挙げる企業が多かった。これは受注側である中小製造業にとり、発注側とデータの共有を通して安定した取引関係につなげる意図もあるが、生産活動を通じて、設計により注力しなければならなくなっている中小製造業の実態も明らかになった。

一方、3D プリンタの活用調査では、金型を使わずに容易に積層造形できる 3D プリンタの特性に受託加工型事業者が着目して積極的にビジネスに取組むことで、既存取引先に対する新規提案や新規取引先の開拓に成果を挙げている実態が明らかになった。

3D プリンタは AM 技術を使い駆動する装置の一般総称である。本装置は工業製品を加工するために開発された工作機械の一種で、従来の生産手

**図表 5：中小製造業が 3D プリンタを活用する理由**




調査は 2021 年 8 月下旬から 9 月上旬に Microsoft Forms を活用し WEB で実施した。調査依頼社数 21 社（回答率 100.0%）。調査業種は、精密機械、電気・機械器具、樹脂、金属、非鉄金属、輸送用機械。調査地域は、東京都、神奈川県、埼玉県、新潟県、岩手県。

法とは異なる概念に基づいた技術を採用している。有史以来、製造業における生産手法は、加工物を削り出す「切削加工」と、加工物を変形させる「成型（成形）加工」で行われてきたが、3Dプリンタは、3DCADで作成した 3Dデータをコンピュータから直接、3Dプリンタに送り、樹脂粉末や金属粉末をプリントするように目的の形状に一層ごとに積層することで立体物を作り出すデジタルファブリケーション技術（物質を情報化したり、情報を物質化したりする技術の総称）の代表例（**図表 4**）である。

3Dプリンタは金型を使わずに製品を生産できることから、大量生産を前提にした従来の生産方式と異なり、顧客への対応能力で個別最適化に優れている。さらにデータから直接的に製品を作るため、金型から製品を作る既存の生産手法よりも安いコストで、オーダーメイドのカスタム製品をオンデマンドで製造することができる。本研究では3Dプリンタの特性が、中小製造業の商習慣に変化をもたらし、取引先との企業間関係に変化をもたらすと考えた。**図表 5** は 3Dプリンタを活用する中小製造業に対して 3Dプリンタを活用する理由について訊ねた結果を示している。

最も回答が多い「金型を作らずにスピーディーに試作品製作、量産加工ができるから」は 3Dプリンタの特性を示すもので、すでに多くの中小製造業が比較的手軽な金額で購入可能な樹脂用 3Dプリンタで実践している。注目点は「自社製品開発を目指すため」や「新規市場への参入を目指すため」に関する回答で、これは 3Dプリンタの活用を通じて中小製造業が従来とは異なる企業間取引を始めようとしている実態を示している。本調査でも複数企業が 3Dプリンタ導入後、造形サービスを業務として行っていくうちに、製造業以外の異業種との交流が増加し、新たな企業間取引が始まったと回答している。中には医療分野で、インフォームドコンセント用の臓器モデル製作のほか、手術室に持ち込んで手術を行ったモデルの製作まで手掛けた実績を買われて JAXA（宇宙航空研究開発機構）と造形サービスの新規取引を行い、

3Dプリンタの造形方法で共同特許を取得したケースも見られた。

3Dデータがなければ製造できない環境を作り出したAM技術は、2Dデータ、3Dデータのどちらでも使用可能なNC工作機械とは異なり、中小製造業の3Dデータへの親和性を高める契機を作り出した。また、金型を不要として製品を積層造形するAM技術の登場で中小製造業のビジネスモデルに新たな市場開拓の機会を与えた。アンケート調査でも明らかにしているが、“モノを生産する”視点から“発想を生み出す”視点にビジネスの視座を移すことに成功した。この点でAM技術が技術のデジタル化に与えた影響は大きい。中小製造業に従来よりも気軽に製品試作に挑戦する環境を作り出し、成功事例も見られることで、中小製造業に技術のデジタル化に対応する新たな企業間取引を生み出す機会をAM技術は与えた。

## 5 今後の研究課題

最後に今後の研究課題を述べたい。本研究では着眼点の1つとして、先行研究では見られない設計と製造の関係性に力点を置いた。研究でも明らかにした通り、技術のデジタル化の進展により、製造業の製品開発、製品製造では製造技術に加えて設計技術への注力の比重が強まっている。その背景には3DCADの普及と新たなデジタル機器である3Dプリンタの存在がある。とりわけ3Dプリンタは技術進化の過程にあり、今後、その進化が中小製造業にどのような影響を及ぼすのか継続して研究する必要性がある。事例分析でも明らかな通り、中小製造業は3Dプリンタの利用途について多くが試作品製造や少量品種の製造に活用しているが、今後、量産可能な工作機械として技術水準が上がることで、中小製造業の活用方法に変化が起きることが予想される。

AM技術は従来の製造方法と異なる技術であることから、切削加工とAM技術を比較（**図表6**）した場合、優位性、劣位性が見られる点も特徴の1つである。AM技術は1個単位に製品を加工できる優位性がある反面、生産スピードや加工精度の点で切削加工より劣位性が指摘される。しかしAM技術は、製造技術としての歴史が浅く日々進化している。今後、生産性に優れた3Dプリンタの登場も期待されており、中長期的にはNC工作機械と同様に製造現場での普及が期待されている。

**図表6：切削加工と比較したAM技術の優位性・劣位性**

| | |
|---|---|
| 優位性 | 金型を不要とし、設計データから直接製品を製作できるため、アイデアがあれば容易に試作品の製作が可能 |
| | 製品の形状に関係なく加工可能なため、カスタマイズ性に優れている |
| | 切削加工と比較して無駄になる材料が少ない |
| 劣位性 | 使用できる設計データは3DCADで作成された3Dデータに限られる |
| | 切削加工と比較して加工にかかる時間が長く、加工精度も劣る |
| | 切削加工と比較して材料費が高い |

各種データを基に作成

一方、国内の工作機械メーカーは既存のNC工作機械と3Dプリンタを組合せた複合機種の開発、販売に力を入れ始めている。3Dプリンタの技術が進歩した時、切削技術と造形技術をデジタル技術で制御する新たな製造モデルが普及することも考えられる。技術のデジタル化の一層の進化が中小製造業の経営にどのような影響を及ぼすのか重要な研究課題と考える。

◇　　◇　　◇

■本レポートは博士号（経営学）の審査論文「中小製造業における技術のデジタル化に関する研究」（2022年3月、法政大学にて学位授与）の内容をまとめたものである。