

中小製造業における技術のデジタル化に関する研究

FUJISAKA, Hiroshi / 藤坂, 浩司

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

150

(発行年 / Year)

2022-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第532号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2022-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(経営学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025224>

法政大学審査学位論文

中小製造業における技術のデジタル化に関する研究

藤坂 浩司

《目次》

序	4
1. 本研究の問い	4
2. 分析対象	6
3. 先行研究の検討	8
4. 分析焦点	19
5. 分析の手順、資料、及び目次構成	20
第1章 デジタル技術の特性と変遷	23
第1節 デジタル技術の特性と変遷	23
1. デジタル技術の定義	24
2. デジタル技術の特性	25
第2節 製造業におけるデジタル技術の変遷	27
1. 製造部門におけるデジタル技術の変遷	27
1-1 NC 装置の登場	27
1-2 CPU 搭載機種 of 登場と ME 革命	29
2. 設計・開発部門における技術の変遷	33
2-1 CAD の登場	33
2-2 デジタルファブリケーションの登場	40
第3節 小 括	42
第2章 デジタル技術の変遷に伴う需要の変化	43
第1節 NC 工作機械の普及と市場形成	43
1. 工業統計から見る市場変化	43
2. 工作機械市場の変化	44
3. 工作機械に技術のデジタル化が与えた影響	50
第2節 デジタルファブリケーションの拡がり	52
1. 3D プリンタの普及とビジネスモデルの変化	52

2. 技術のデジタル化が生産活動に与える影響	56
第3章 技術のデジタル化が製造業に及ぼす影響	58
第1節 技術の平準化	58
1. 技術の平準化の発生	58
2. 事例から見た技術の平準化の影響	59
第2節 設計と製造の相関性	64
1. 調査の目的と概要	64
2. 予備調査の結果	65
3. 本調査の結果	67
4. 調査結果のまとめ	75
第3節 小括	78
第4章 中小製造業への技術のデジタルの影響と対応	79
第1節 中小製造業の実態と受託加工型事業者の関係	80
第2節 技術のデジタル化による受託加工型事業者のビジネスの変化	85
第3節 アンケート調査と事例分析の結果からの示唆点	93
第4節 小括	95
第5章 企業事例の分析	96
第1節 技術のデジタル化の技術的特性領域	96
1. 中小製造業における事例企業の位置づけ	96
2. 技術のデジタル化の技術的特性領域	98
第2節 事例1:株式会社サイトウ製作所	100
1. 切削工具市場の概況	100
2. サイトウ製作所の概要	102
3. 多品種少量生産へのシフト戦略と課題の台頭	103
4. 市場を意識した「多品種品揃え」戦略へ	105

5. 技術のデジタル化への対応	106
第3節 事例2 株式会社アタゴ	110
1. 株式会社アタゴの概要	110
2. アタゴのビジネスモデル	112
3. 技術のデジタル化への対応	113
第4節 小括	118
第6章 産業事例の分析－医療機器を事例にして	120
第1節 デジタル技術の医療機器への展開	120
1. 医療機器の特性	121
2. 医療機器の特性と AM 技術との関係性	125
第2節 AM 技術を活用した中小メーカーの事例	129
1. ケイディケイ株式会社	129
1.1 生産リードタイムにおける切削加工と AM 技術の比較	129
1.2 量産品としての課題	131
2. 有限会社光沢	132
2.1 3D プリンタを活用する着眼点	132
2.2 生産面に見られる AM 技術の優位性	133
2.3 量産加工の課題	134
3. 株式会社 UCHIDA（埼玉県入間郡）	135
3.1 生産リードタイムの圧縮	135
3.2 AM 技術採用の決定判断	135
4. 考察	136
第3節 小括	137
結論	140

序

1. 本研究の問い

第二次世界大戦後、日本の経済発展は世界でも類を見ないスピードで進み、1969年に日本の国内総生産 (GNP) は西ドイツを抜き、米国に次ぐ世界第2位の経済大国へと躍り出た。日本は鉱物資源やエネルギー資源など天然資源に乏しく、経済の長期的発展には、加工貿易を通じて外貨を稼ぐことが求められた。製造業はその重要な役割を果たしたが、高度経済成長期には、自動車、電機・電子、半導体など幅広い産業分野で輸出が拡大し、日本の工業製品は1980年代には、世界市場で高い市場シェアを獲得するに至った¹。

この日本の工業製品の信頼性を高めたものの1つに“技術のデジタル化²”がある。技術のデジタル化は、人間が行っていた作業を、機械やコンピュータに肩代わりさせて、作業の標準化、自動化を進めることで、生産の効率化や安定化、経営の合理化を目指す取り組み全般を指す。具体的には製品づくりに関わる設計や生産など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) 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³がIC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⁴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、OA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⁵。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⁶と呼ばれるデジタル機器に置き換わった事例で説明しよう。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

¹1980年代、日本企業の輸出が増大したことで、欧米との間で貿易摩擦が顕在化した。例えば、半導体では1980年代後半に日本企業の半導体世界シェアが50%を超えたことから米国との間で、不平等とされた「日米半導体協定」の締結を余儀なくされた。

²本稿では同義語として「デジタル技術」を併記して使う。

³わが国で初めて「技術革新」という表現が使われたのは1956年版(昭和31年度版)「経済白書—日本経済の成長と近代化—」である。本書で初めてイノベーションを技術革新と訳され、わが国ではその後、訳語として定着する。

⁴メカニクス(機械工学)とエレクトロニクス(電子工学)を組合わせた造語。安川電機の技術者、森徹郎氏が考案、1972年に商標登録されたが、その後、一般名詞となった。

⁵金容度、2002年、2頁。

⁶NC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。

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。本稿ではこの現象を「技術の平準化」⁷と呼ぶ。

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。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。

本稿は中小製造業⁸を研究対象とするが、中小製造業は大手製造業とは異なり、規模の拡大を指向することで勝ち残りを図ることが難しい。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ず、中小製造業ならではの施策が求められるが、実際、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企業が存在している。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だろうか。本研究では、技術のデジタル化にうまく対応して競争力を発揮している企業は、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、そのマッチングに成功させているからではないかと考える。デジタル技術の特性が中小製造業のパフォーマンスにどのような影響を及ぼすのか考慮した上で、デジタル技術が中小製造業に与える影響と、その影響に対して中小製造業が具体的にどのような施策で臨んでいるのか、本研究では技術変化に伴う設計と製造の関係性の変化やビジネスモデルの変化、事業家の意識の変化、市場改革などに着目して実証する。

1970年代に起きたME革命以降、製造業では技術のデジタル化領域が広がっている。詳細は第2章に譲るが、技術のデジタル化は、かつての製造分野に限定された範囲から、設計分野を巻き込んだ形で一体化が進んでいる。デジタルファブリケーション技術⁹

⁷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。本稿ではケースごとに使い分けている。

⁸本稿では中小企業基本法の定義に従い、同法に該当する企業を中小製造業とする。

⁹総務省『平成28年度版情報通信白書』は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と定義している。デジタルファブリケーションの語源について、「パーソナル・ファブリケーション」の概念を提唱したMITのNeil Gershenfeld教授は『How to Make Almost Anything The Digital Fabrication Revolution』(2012)において、the term “digital fabrication” refers to processes that use the computer-controlled tools that are the descendants of MITs 1952 numerically controlled mill と述べている。

(Digital Fabrication、以下、DFに省略)と呼ばれる3DCADや3Dプリンタ、レーザー加工機などデジタル機器を組合せて製品を加工する新しい取組みも広がっている。設計と製造がシームレスに結びつく技術のデジタル化への対応は中小製造業にとっても無視できない潮流であり、その対応を見誤れば、自社技術や製品が競合企業との競争で劣勢に立たされて、市場から撤退する可能性もある。しかし、逆に技術のデジタル化の特性をうまく捉えて経営に活かすことができれば、その利点を享受できる。前述の通り、技術の平準化では量的な競争を加速させる特性があるが、規模の拡大を指向する製造業は、生産効率の高い製品にシフトしていく傾向が見られる。そのため、大規模な投資を行っても、見合った収益が見込めなければ参入しづらい市場分野や¹⁰、生産効率の悪い製品は敬遠する傾向にある。そうした市場は中小製造業の活躍の場であり、技術のデジタル化に対応できる分野でもある。技術のデジタル化は、一面では中小製造業の経営にマイナスの影響を及ぼすものの、その特性を理解し適切な対策を講じれば、デジタル化の潮流に対して競争力を発揮して持続的な成長を可能にできる。本研究は、技術のデジタル化に対する中小製造業の実態を通して、その課題と施策を分析し、今後の中小製造業の経営向上に貢献できると考える。

2. 分析対象

本稿が中小製造業を分析対象とする理由を明示したが、次に技術のデジタル化について影響を及ぼす機器について、NC工作機械とCAD-CAM、3Dプリンタを選んだ理由について述べたい。NC工作機械は米国発の装置で、1949年にミシガン州トラバースにあるパーソンズ社(Parsons Corp)が世界で初めて開発したことで知られる。その後、1956年に日本最初のNC(数値制御装置)の開発に日立製作所が成功した。1957年に東京工業大学が試作品を完成させたのが第1号とされ、1958年にFANUC NCの商用1号機が牧野フライス製作所へ納入され、同年3月、わが国初のNCフライス盤が発売されている。NC装置黎明期である1950年代から60年代にかけては、NC装置を搭載した国産のNC工作機械は当時の金額で1,000万円近くと高額であった。高級機という位置づけで、中小製造業の技術力向上、経営への影響はほとんど見られなかったが、そうした状況に変革をもたらしたのはCPU(中央演算装置)の開発である。わが国では1970年代に入るとNCの回路にLSI(大規模集積回路)が採用され、工作機械に搭載されるサーボモータ¹¹が旧式の電子油圧モータから電子パルスモータに替わってからNCは安定した性能を示すようになった。NC工作機械の価格低下は小型コンピュータを内蔵したNCが開発されたためであり、半導体の技術進歩が大きな影響を及ぼした¹²。NCに使用されるICがLSI化したこと

¹⁰これら市場はニッチ市場とも呼ばれ、細谷(2014)は、独自のコア技術を保有しそれを生かしながら、次々と既存製品とは差別化された製品を生み出すという形で、極めて高い製品開発能力を発揮する優れた企業をニッチトップ型企业とする。

¹¹産業用モータの一種。物体の位置や速度を自動制御するサーボ機構に使われる。

¹²金容度、2002年、48頁。河崎亜洲夫、1991年、113頁。

によって部品点数は大幅に減少し、NC 工作機械の価格低下が進んだ。この結果、1970 年代後半には NC 工作機械の価格は 300 万円程度にまで下がった。日本における NC 工作機械の発達、同一の機械による多様な形状・寸法の部品加工の容易化という機能を追求する方向へと展開し、旋盤をはじめとする中小型機の NC 化が進行した¹³。1975 年以降、NC 工作機械の中小製造業における購入は年を追うごとに増大し、1980 年代にはいると、日本における NC 工作機械需要の 60%程度を安定的に構成するに至る。これら中小製造業の 7 割以上が従業員 30 人以下の小企業である。このように NC 工作機械の開発と普及が、わが国製造業の裾野を形成する中小製造業の技術のデジタル化に大きく影響を及ぼした点を指摘したい。

次に CAD・CAM を分析対象とする理由を述べたい。前述の通り、技術のデジタル化については NC 工作機械の影響が多大であるが、日本では生産現場を中心に技術のデジタル化に取り組んできた点が大きい事を指摘したい。こうした日本の動きに対して、欧米では設計を中心にコンピュータ技術を多用して工業製品を開発するデジタル化の動きが早くから見られた。すでに 1970 年代には、米国では NASA のロケット解析の手法を使った設計用のソフトウェアが市販され、1980 年代には、製造業で設計用ソフトが使われる動きが見られるようになり、1990 年代半ば頃には 3DCAD が大手製造業を中心に設計現場で普及し始めた。CAD の普及は工業製品を“早く”そして“安く”作ることを念頭にした取組みで、こうした工業製品の開発思想が、CAD、CAM、CAE をつなげ、開発・設計から生産に至る一連のデジタル化の取組みを普及させていく。

日本でも早くから 3DCAD を作るメーカーは存在していたが、設計から生産に至る一連の流れの中で 3DCAD を使って製品開発する動きは限定的で、現在、日本の大手製造業の現場で導入されている 3DCAD がいずれも欧米製であることを考えると、デジタル化の流れが製造業全体を俯瞰し始める中で、日本のデジタル化は 1990 年代以降、世界の潮流から立ち遅れた点を指摘したい。デジタルファブリケーション技術では、設計から生産までの流れをデジタル化の一連の動きと捉えており、設計思想が生産に大きく影響を及ぼす 3D プリンタの登場で CAD・CAM を分析する意義は大きい。

最後に 3D プリンタについて分析対象とする理由を述べたい。3D プリンタは付加製造技術（Additive Manufacturing、略称、AM 技術）を使い駆動する装置の総称である。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だが、従来の生産手法とは全く異なる概念に基づいた技術を採用している。従来、製造業における生産手法は大きく 2 種類に分類されている。加工物を削り出す「切削加工」と、加工物を変形させる「成形加工」である。日本では、前者に使われる機械を工作機械、後者に使われる機械を鍛圧機械と分類している。これに対して 3D プリンタは、前述の 2 種類の生産手法とは異なり、プリントヘッドやノズルなどプリンタ技術を用いて材料を積層させ製品を形づくるという発想のもとに生まれた。3D プリンタの登場で、NC 工作機械を必要とせずとも工業製品を生産す

¹³河邑肇、1995 年、105 頁。

ることが可能になった。3D プリンタは、3DCAD で設計された 3D データのみで駆動する装置で、3D データから直接、積層造形により製品を形作ることが最大の特徴として知られ、金型を必要とせずに製品を生産できる事に加えて、設計により比重が置かれた生産技術である。3D プリンタは従来の生産現場を中心に進められてきた技術のデジタル化とは異なり、設計と生産がデジタル技術で結ばれ、デジタルデータと造形物を直接結び付けるデジタルファブリケーション技術の代表例である。3D プリンタは金型使用による大量生産を前提にした従来の生産方式とは異なり、顧客への対応能力で個別最適化に優れたシステムである。この 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る点で分析対象とする意義は大きい。

3. 先行研究の検討

中小製造業を対象にした技術のデジタル化に関する先行研究は、2点で研究成果が乏しい。1点目は、中小製造業のデジタル化の効果について、プラス、マイナスの両面から研究されているが¹⁴、本研究が重視する、マイナス効果については「労働問題」への影響に焦点が当てられている研究が多く、効果の研究範囲が限定的である。時間の経過に従い技術が平準化されていくというデジタル技術の特性に着目し、中小製造業の経営にどのような影響を及ぼすのか、その影響に対して中小製造業はどのように対処すべきか具体的に言及した研究が見られない。

2点目は中小製造業を対象にした技術のデジタル化について、過去の研究と現在の状況を同じ視点で扱うのは難しい点である。ME化¹⁵の研究が多く行われた1970年代、1980年代は、企業間取引を事例に中小製造業にとってME機器の導入がどのような影響を及ぼしたのか詳細に記述されているが、いずれの研究でもデジタル化の研究範囲が製造現場に限定されている。対して、現在の技術のデジタル化が及ぼす範囲は広い。本研究でも対象として取上げる3Dプリンタや3DCADは、過去のME化研究が行われた当時、市場における普及は見られない。現在のデジタルファブリケーション技術は、先行研究では見られない技術のデジタル化に関する新しい現象で、これまでほとんど取上げられていない設計までを包含しており、技術のデジタル化の研究を行う上で重要な視座と考える。

¹⁴本研究で示す技術のデジタル化における「プラス」「マイナス」とは、ME 機器を活用して製品製造する中小製造業が、自社の経営環境に有利になるかどうかの判断基準の1つとして示す。

¹⁵Microelectronics という表現は、アリゾナ大学の電気工学博士、エドワード・ケオンジャン氏 (Edward Keonjian) の自著「Micropower electronics」のタイトルが由来と言われる。本書は電子機器の運用と、マイクロパワーエレクトロニクス (低電力) に関連する問題を扱った書で、1958 年、米国バージニア州アーリントンで開催された Armed Services Technical Information Agency (現在の Defense Technical Information Center/防衛技術情報センター) 主催のシンポジウム「symposium on microminiaturization of electronic assemblies 1958」の内容をまとめている。

以上2点について、次に研究の検討を述べたい。まず第1点目については、これまで数多くの先行研究が見られる。いずれの研究もデジタル技術の特性をプラス、マイナスそれぞれの観点から着眼して分析が行われている。まずプラス面についてであるが、金（2003）は、工作機械メーカーが1980年代初頭に開発した対話式、対話型CNC¹⁶工作機械の開発が同生産方法の発展に寄与したと指摘する。この機械の登場によって、従来のような座標計算が要らず、新卒の女子工員でも、短い教育を受けるだけで本格的な操作ができる位のもので、またプログラムの修正も容易になり、機械の使いやすさが大きく高まったとする。NC工作機械の出現が、日本の工業製品の製造における加工品質や精度の安定、向上に大きく貢献したと述べている。上野（1988）は、「これまで経験による“カン”や“コツ”を通じて品質・精度の向上と安定化、生産性の向上などに大きく寄与してきた従来の熟練工の“ウデ”の役割は、今や決定的に減じられる段階に到達したといえる」と、NC工作機械の登場が熟練工に代替する役割が高まったと指摘している。

また、技術革新が中小企業に及ぼす影響について岡室（1999）は、「かつては技術導入において企業規模間の格差が著しかったが、ME化と情報化に代表される近年の技術革新は多品種少量生産を効率的に行うことを可能にし、小規模または部分的な導入も可能で、投下資本が少なくすむことから、中小企業にも急速に普及している。そのためME化や情報化はそれまで中小企業を支えてきた熟練技能に大きな影響を及ぼしたと考えられる」と熟練工とME化の関係について分析を示している。筆者によるパイロット調査の結果も、「プラス」面の回答で最も多かった「熟練技能者でなくても生産が安定してできるようになった」ことは岡室の指摘と整合性がある。これは、NC装置が加工物の加工情報を読み込み、それを数値計算した後、その制御情報をモータなどの駆動システムへ伝達することで工作機械を制御するシステムである特性が表れた結果である¹⁷。熟練工など人間が行うアナログの動作を半導体素子に記憶させ、機械に物理的な作業を命令することで、高レベルで一定品質の作業を可能とする機械特性がプラス面として評価されたと言える。この効果は、生産効率や品質の向上ばかりではなく、大手製造業に比べて人材確保に苦労している中小製造業にとって大きな恩恵をもたらすものでもある¹⁸。

他方、マイナス面については、技術の差別化が難しくなった点に着眼して分析する研究と労働問題への影響を取上げる2つの視点から捉えた研究に大きく分かれる。技術の差別化については、堀（1985）は、NC工作機械などME機器は、作業者がその機器の作業内容を数値化することによってはじめて能力を発揮するが、一度数値化されてしまうと、数

¹⁶Computerized Numerical Control（コンピュータ数値制御）の略。

¹⁷柴田友厚、2010年、340頁。

¹⁸例えば、2011年8月3日付の日刊工業新聞26面の連載企画「モノづくりで輝く現場女子」では、製造現場で中核を担う女性社員が増えているとし、現場で加工や改善活動を主導する女性社員の事例を紹介している。加工のデジタル化や自動化が進んで力作業が減る一方、細かな心配りや広い視点を生かして生産性を改善する能力が重要になっていると具体的事例を引き合いにして紹介している。

値化されたソフトウェアは、独立した価値を持つ点を指摘する。藤川（2010）も、中小企業の技術水準が平準化してしまうとの懸念を示し、NC 工作機械を活用するための新たな技能の確保、同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企業間競争の鍵となると指摘している。この点について本研究では、技術の平準化として説明している。詳細は第 3 章に譲るが、技術の平準化とは、デジタル技術の普及が進むことで起きる現象の一つで、製造に必要なデジタルデータを搭載した NC 工作機械や産業用ロボットなどを使って工業製品を生産すれば、特段の技能経験がない現場作業員でも一定レベルの加工品質が保証される。このため、デジタル製造装置を使用して、同様の工業製品を生産した企業同士では差別性がなくなり、汎用製品については時間の経過に従い技術の差別性が見られなくなる現象である。

なおこれらの研究視点は、中小企業に関する「二重構造論」が少なからず影響していると考える。1960 年代には技術革新を背景とする中小企業の階層分化と近代化が論じられたが¹⁹、それは ME 化への適応能力に応じて企業間の経営格差が広がるなど、企業経営への影響を重視するものである²⁰。1963 年に制定された中小企業近代化促進法では、中小企業の設備の近代化、技術の向上、経営管理の合理化など中小企業の高度化政策が重点テーマとなるが、これは同年に制定された中小企業基本法で政策の目標として掲げた「二重構造の解消」と関連している。法律制定当時、大企業と中小企業では賃金格差や生産性格差が存在し、中小製造業を「下請企業」、大手製造業を「元請企業」とする従属的な取引関係で対比させ、中小製造業を大手製造業に対する「弱者」と見たてるイメージが二重構造論の底流にある。過去の ME 化研究では少なからず、二重構造論を意識して研究がなされ、プラス効果としての二重構造論の解消方法の 1 つに ME 化が掲げられ、中小製造業の経営の近代化として ME 化を評価するという研究につながったと考える。ME 化が進むことで中小製造業の経営に様々な恩恵をもたらすという結論が導き出されている。例えば、高度経済成長期において、ME 技術は、人員を増加させることなく、受注量の増加に対応することを可能にした²¹。ME 技術の持つ柔軟性という特徴は、比較的労働集約的な性格を有する多品種生産分野において高効率・高精度の自動生産を可能にし、人件費の節約を実現していったという研究がその代表例である²²。

マイナス面に関する 2 つ目の視点は、労働問題への影響の観点から行われた研究である。図 0-1 は、大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所（NII）が運営する CiNii（NII 学術情報ナビゲータ）を使い、「ME 化」「マイクロエレクトロニクス化」で論文のキーワード検索を行った結果を示したものである。期間は最初にキーワードでヒットした 1978 年から、それ以降、ほとんど検索結果が見られなくなる 1995 年まで

¹⁹岡室博之、1999 年、322 頁。

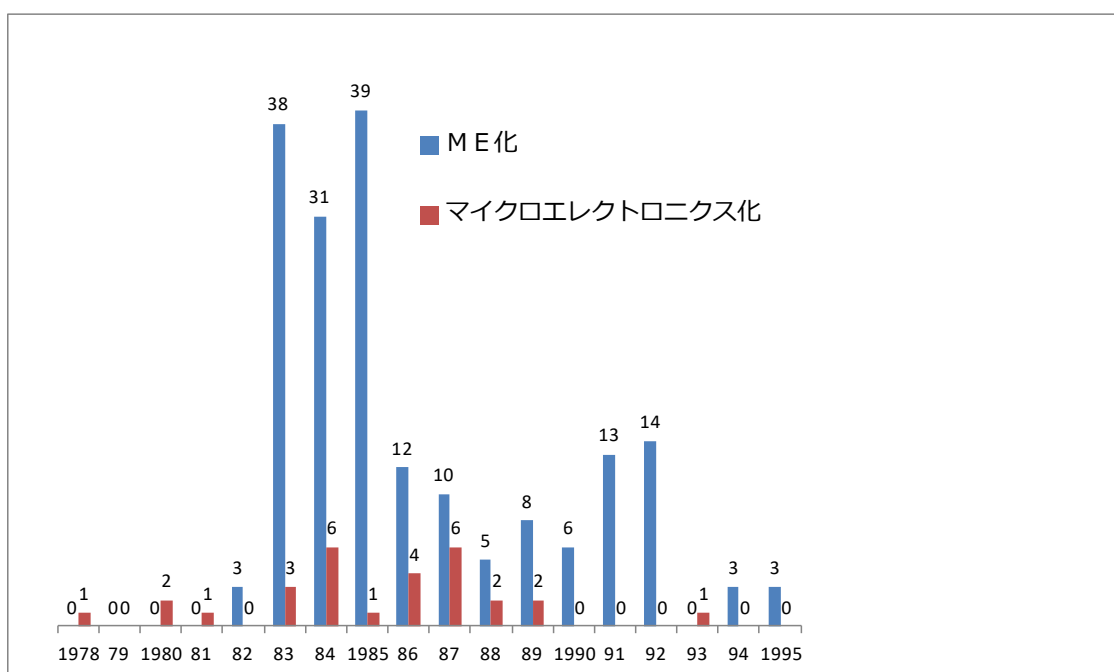
²⁰岡室博之、1999 年、325 頁。

²¹奥村康司、1988 年、22 頁。

²²秋野晶二、1994 年、158 頁。

に区切りまとめた。対象は、副題を含めてタイトルに「ME 化」「エレクトロニクス化」の用語が記載された内容で、幅広く動向を知るために論文以外に技術雑誌、専門雑誌向けレポートなども含めた。1983 年から 85 年の 3 年間に件数が突出しているが、1983 年は全 38 件中 24 件、84 年は全 32 件中、22 件、85 年は 39 件中、33 件に、副題を含めたタイトルに労働、雇用、労組などの用語が記載されている。この時期、労働や雇用の観点から ME 化を研究した例が多いことが分かる。その背景には、①中小製造業への NC 工作機械の普及が進んだこと、②NC 工作機械の普及に伴う弊害としての労働問題が浮上し、それに対して政府や関連学会が調査する例が多かったこと、学会発表することなどがある²³。

図 0-1 論文のキーワード検索に見る結果の推移

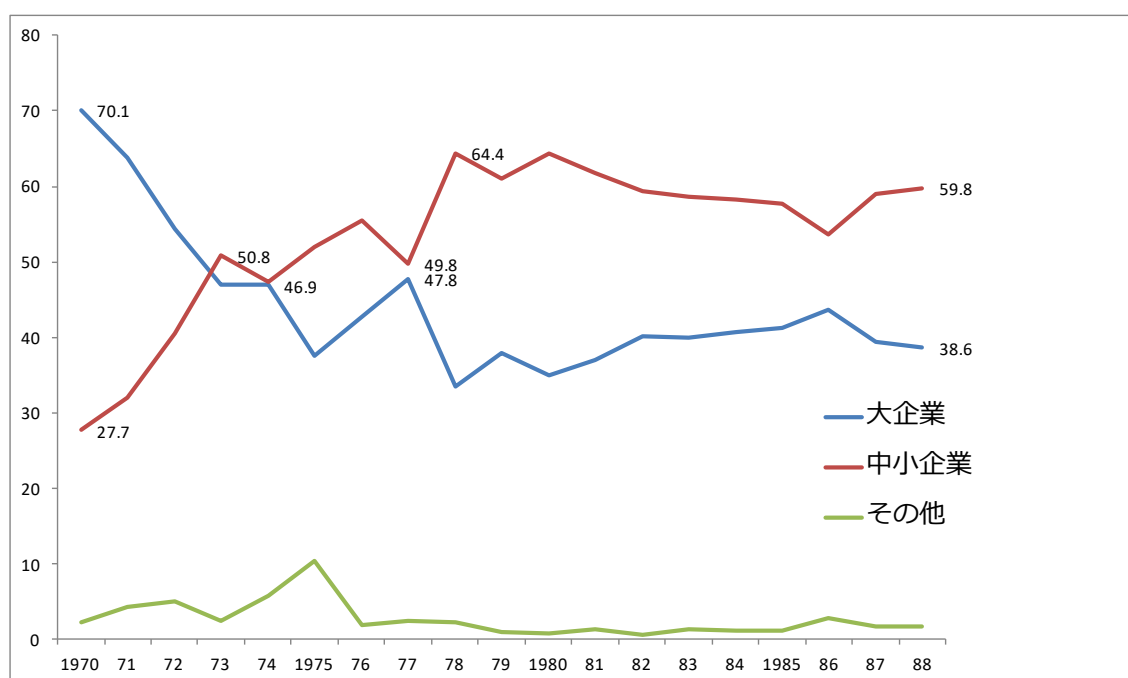


出典：CiNii（NII 学術情報ナビゲータ）。

²³労働省（現、厚生労働省）は 1983 年 7 月、ME 化と雇用・労働問題を対象にした「技術革新と労働に関する実態調査」結果を公表したほか、経済同友会も 1983 年に「ME 化の実態と経営者の意識」調査結果を発表している。また、小野（1987）は、社会政策学会で ME 化が大会のテーマに取り上げられた経緯を次の様に述べている。「労働問題ないし労働政策の研究学会として長い伝統と実績をもつ社会政策学会は、戦後は昭和 25 年に再建され、しばしば技術変化と労働問題をテーマに採上げてきたが、それは実質的には「合理化」という視点であった。これらの中で現在の ME 化を直接対象としたのは、昭和 57 年の第 64 回大会と昭和 60 年掛第 70 回大会であるが、この二つの大会は僅か 3 年の経過ではあるが「急速な変化」を反映し、（中略）昭和 57 年の大会テーマ「現代の合理化」は、オイルショック以降の減量合理化の過程で、ME 技術の導入とからみあいながら雇用調整が進行したことの本質を明らかにしようとする。」このように日本の製造業、とりわけ中小製造業における技術のデジタル化が進展したことで、ME 化が研究対象として関心を集めたと言えるだろう。

①については日本工作機械工業会データに基づいた NC 工作機械のユーザ別規模調査をまとめた図 0-2 が 1 つの裏付けになる。また、別の調査によれば、NC 工作機械の普及が始まった 1970 年代初期は購入先の 7 割が大企業であったが、1988 年になると、大企業の割合は 38.6%に低下し、逆に 300 人以下の中小企業が 60%近くを占めるようになった²⁴。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 ME 化としての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。先行研究の中にも関連する研究は多い。大田区の町工場を調査した西村（1997）は、NC 機は属人的で客観性に乏しいアナログ技能をデジタル化した。機械操作の所在が機械の性能に組み込まれたため、個別機械を扱う技能が評価されなくなったと指摘する。その上で、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ことにあるとした。汎用機から専用機へのシフトは機械の機能的分化であるため技能に連続性があり、職場内で技能の再生産が可能であったが、汎用機から NC 機にはそれがなく技能が分断したと結論づけている。

図 0-2 NC 工作機械の規模別出荷先比率



出典：森野勝好「NC 工作機械の普及と機械体系の変化」（1992 年）37 頁を基に作成。
 中小企業は従業員 300 人以下または資本金 1 億円以下。その他は、官公庁・団体等を含む。

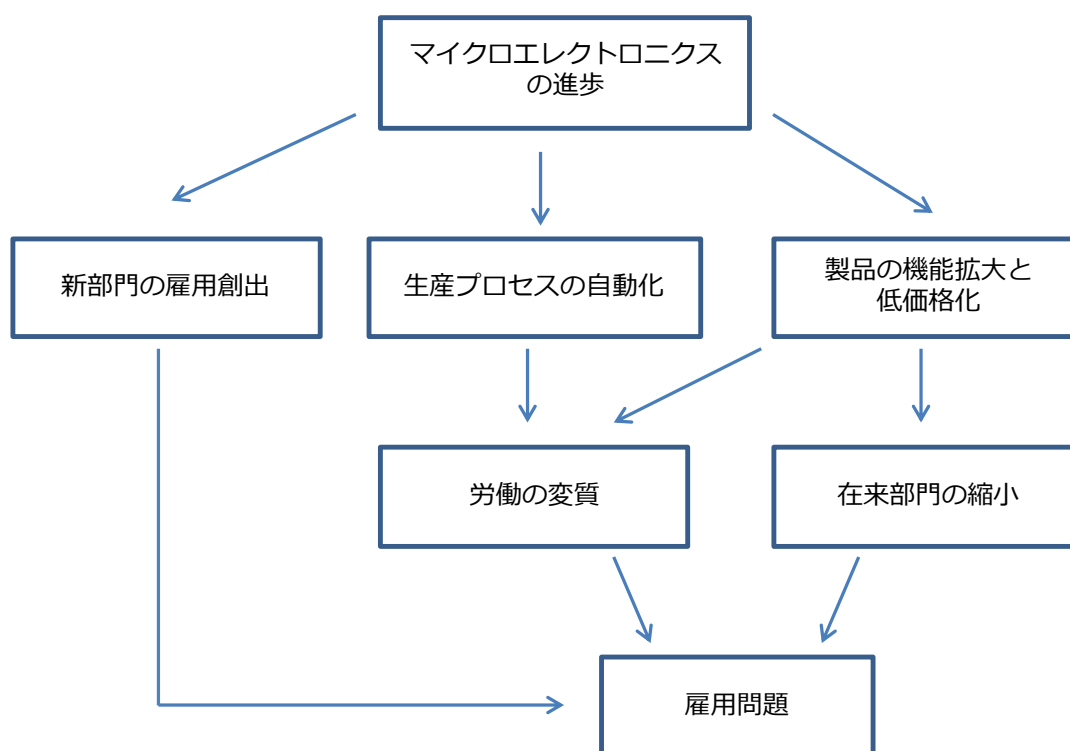
また、ME 化が省力化技術で労働量の削減をもたらし、雇用・失業問題を顕在化させ、

²⁴森野勝好、1992 年、36 頁。

労働環境に影響を及ぼす点を指摘する研究や²⁵、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²⁶。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、技術のデジタル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」²⁷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。

図 0-3 ME の雇用問題に関する国際的議論の概略関連図



出典：通商産業省工業技術院総務部技術調査課編「技術革新の衝撃」を基に作成。

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、1980年代、通商産業省（現、経済産業省）が米国、英国、フランス、西ドイツなど先進各国の関連するレポートを基に図式化した図 0-3 は ME 化による技術革新で、各国の雇用問題にどのような影響を及ぼすことを示している。同図で示されている通り、ME 化の進展は最終的に

²⁵廣江彰、1989年、3頁。

²⁶小田宏信、1997年、555頁。

²⁷津田真微、1986年、10-13頁。

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²⁸。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。また庄谷は、ME 化の普及により、生産プロセスの合理化・自動化による雇用減と、新市場創出による雇用増を同時に実現すると論じている²⁹。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³⁰、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³¹。

ここまで、技術のデジタル化が中小製造業に与える影響について、先行研究からプラス、マイナスの二面性の特性が見られること示したが、マイナス効果については労働問題に言及する先行研究が多く、技術面での評価は数少ない。例えば、技術のデジタル化は中小企業に対して正と負両面の影響を及ぼすと分析した藤川（2010）のように³²、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、その影響について長期的視点から評価した研究はない。

次に第 2 点目の中小製造業を対象にした技術のデジタル化について、過去の研究と現在の状況を同じ視点で扱うのは難しい点について述べてみたい。先行研究では企業間取引事

²⁸中小企業庁編『技術革新と中小企業－中小企業近代化審議会報告』（1985 年）では、中小企業における技術の重要性について、当時の中小企業が置かれた状況を鑑み、「構造的な労働力不足に悩む中小企業において、技能工や専門職等の不足は深刻であり、しかも年々労働力の高齢化が進展し、かつ若年労働力の確保は極めて難しい状況にある。中小企業がこのような問題点を克服していくためには、生産工程のメカトロ化等の技術面での対応によるカバーが極めて重要かつ有効であること」と記述されている。また、技術力向上は労働問題の観点だけでなく、企業としての成長、発展を目指す上でも極めて重要であると位置づけている。

²⁹庄谷邦幸、1984 年、49 頁。

³⁰中央大学企業研究所編、1989 年、71 頁。

³¹河崎亜洲夫、1991 年、129 頁。

³²藤川は技術のデジタル化について、より広義な情報化の観点から中小企業への影響を論じている。自身が専門とする金型分野を事例に、中小製造業が金型製造に 3DCAD を導入することでビジネスモデルを変革する可能性があるとのメリットを強調する一方で、設計に使われる金型図面の 3D データが不当な流出を助長し、取引先企業（大企業）に金型製造に関する技能を漏洩する恐れがあるとデメリットを指摘している。また 1980 年以降に起きた ME 化時代の情報化の議論では、ME 機器を導入した中小企業は加工品質や精度の安定・向上、合理化による生産工数の短縮、省力化による人件費削減、需要の多様化による多品種少量生産への柔軟な対応、労働力不足による不潔・危険な作業の担当など、大企業に適した生産体制を確立できるようになったと指摘する一方で、しかしながら、ME 機器は、プログラムを組めれば自動的に加工を行うため、中小企業の技術水準が平準化してしまうとの懸念があったと述べている。

例として、下請分業構造と ME 化の関連性について数多く分析が行われている。そのうちの 1 つで 1985 年に行われた日大調査³³について述べてみたい。同調査に基づき、内藤（1987）らは、企業が ME 化に取り組む第 1 の理由は「受注や販売をめぐる競争関係を媒介にして進展する」こと、第 2 の理由は「『下請取引関係』『下請構造』はそうした競争関係のひとつの形態」と考えられるとし、それを前提に、「受注先企業の ME 化による影響」と「自社の ME 化による下請・外注先への要請」であるという。こうした調査結果に基づいて、内藤（1987）らは得られる仮説として、第 1 に ME 化の要因が取引先「親企業」の具体的要請があるとは限らないものの、「品質・精度向上要求」「品質検査体制強化」「納期厳守」などの取引関係を通じた実質的要請に「新設備・機械の導入」で対応しようとする経営戦略的選択に求められること。第 2 にこのような経営戦略的選択は取引先「親企業」との競争関係においてだけでなく、下請相互間の競争においても不可欠な「生き残るための数少ない選択肢のひとつ」であること。第 3 にそのような要因による ME 化は「取引関係の縦の構造にそって伝播」してより小規模の企業にまで深く浸透していく³⁴と分析している。表 0-1 は日大調査の中で中小製造業が ME 機器導入と受注との関係性について質問した結果であるが、「ME 機器を導入しなければ仕事が減ると考えた」企業が全体の 58.5%に達しているほか、ME 機器の導入について「要請は全くない」企業群でも 58.2%は受注が減ると「考えた」と回答している。この結果を見る限りでは、下請分業構造において ME 化と受注は相関関係を示していることが分かる。ME 機器を媒介にして受注につながることを理解され、逆説的に考えれば、ME 化が企業間競争の 1 つの要因となることが推察される。

表 0-1 ME 機器導入による「仕事の減少」についての考え

	合計	考えた	考えない	受注はしていない	N・A
合計	123(100)	72(58.5)	34(27.6)	3(2.4)	14(11.4)
直接要請あり	6(100)	4(66.7)	2(33.3)	—	—
間接要請あり	24(100)	22(91.7)	2(8.3)	—	—
要請なし	79(100)	46(58.2)	29(36.7)	3(3.8)	1(1.3)
受注なし	1(100)	—	1(100)	—	—
N・A	13(100)	—	—	—	13(100)

出典：日本大学 経済科学研究所紀要 第 11 号（1987）。単位：社数（カッコ内は％）。

³³日本大学経済学部経済科学研究所が「昭和 59.61 年度総合研究」として実施した「マイクロエレクトロニクス化と中小企業」研究プロジェクトによる「マイクロエレクトロニクス化の現状と効果に関する調査」を指す。調査はアンケートとヒアリングで行われた。対象は、東京都内に立地する金属・機械 5 業種（金属、一般、電機、輸送、精密）。

³⁴内藤英憲、渡会重彦、大森暢之、池田光男、廣江彰、1987年、147-148頁。

表 0-2 ME 機器別最初の導入年 (ME 機器の機種別)

	導入企業数	1973年以前	1974年-1976年	1977年-1979年	1980年-1982年	1983年	1984年	1985年以降
NC工作機械	81(100)	12(14.6)	9(11.0)	16(19.5)	27(32.9)	6(7.3)	6(7.3)	6(7.3)
マシニングセンタ	42(100)	8(19.5)	2(49.0)	7(17.1)	5(12.2)	5(12.2)	4(9.8)	10(24.4)
その他の数値制御工作機械	35(100)	1(2.9)	1(2.9)	11(31.4)	7(20.0)	3(8.6)	5(14.3)	7(20.0)
産業用ロボット	26(100)	2(7.7)	—	2(7.7)	5(19.2)	3(11.5)	6(23.1)	88(30.8)

出典：日本大学 経済科学研究所紀要 第 11 号 (1987)。単位：社数 (カッコ内は%)。

また、表 0-2 は、本調査に関して対象企業が最初に ME 機器を導入した時期をまとめているが、1970 年代後半から 1980 年代前半にかけて NC 工作機械の導入が積極的に行われていることが分かる。一方、産業用ロボットは 1985 年以降に導入が集中している。これはより高度な技術かつ高価な機器であり、中小製造業が引き受ける受注内容や費用対効果の点から、導入の優先順位としては NC 工作機械やマシニングセンタの方がより利便性が高いと判断されたと推察できる。このように ME 化がもたらす影響は、品質・精度向上、生産方式や生産品目の変化として表れ、それはまた「納期厳守」を要請しているように、中小製造業の生産工程を発注先 (親企業) の生産工程にますます深く結び付けている³⁵。

一方、庄谷 (1984) は、中小製造業の業務の発注や受注関係が ME 化でどのように変化するか、労働省 (現、厚生労働省) や商工組合中央金庫調査部、大阪府立商工経済研究所などが行った ME と中小企業に関する調査報告書を基に分析している。この中で、大阪府立商工経済研究所が実施した「大阪における機械工業の技術進歩の実態と問題点」(1983 年 3 月) について、その他の調査と異なり親企業の技術革新³⁶による下請企業³⁷への影響が小さかったことに注目し、調査の取りまとめを行った調査チームの一人である河崎亜洲夫氏が指摘した 5 つの理由を以下のようにまとめている。

- 1：「わが国の機械工業全体の ME 化が進展し、労働生産性、品質、精度が向上し、国際競争力が強化され、輸出増大により、生産が拡大したため下請企業への受注が現段階では減少していない」
- 2：「ME 化の初期段階であるため、各事業所では生産工程の一部にしか ME 機器が入っていないため、現段階では影響が小さい」
- 3：「下請企業自身の技術進歩と受注努力によって影響が小さい」
- 4：「先端的・高度技術分野は親企業が担当し、標準的技術分野は下請中小企業が担当し、

³⁵廣江彰、1989 年、17 頁。

³⁶商工中金が 1987 年に下請企業を対象に行った調査では、発注側企業の技術革新について、「技術革新」とは、ME 化に限定せず「生産工程のメカトロニクス化」「自動化の進展」「製品の IC 化」「ニューセラミックスやエンジニアリング・プラスチックにみられるような新素材の登場」など広くとらえている。

³⁷本稿では受託加工型事業者と同義語で使用する。

この領域は相対的にも絶対的にも広大である」

5:「わが国の労働市場をみると、いまだに企業規模間賃金格差があるため、下請・外注企業の利用のメリットが存在する」。

ここで示す「技術革新による下請企業への影響」は、発注側企業が ME 機器を導入することによってそれまでの外部発注を内製化に切り替える懸念を念頭にしているが、庄谷（1984）は、「現段階では妥当な説明であろう」とした上で、長期的にみると、ME 化の進展度合と、それによる技術力の優劣の差は、それぞれの製品市場における競争力に反映され、企業間、産業間、国別の競争力を変化させると述べている。河崎（1991）も、下請企業の近年の技術進歩は、生産工程に ME 機器を導入することによって実現された工程技術革新であるという。ME 機器は従来の機械に比べて経済的、技術的に優れた点を持っていたため、下請企業が活発に導入され、実際、こうした優れた点は ME 機器の技術進歩によってもたらされたと主張する³⁸。このように、先行研究からは中小製造業にとって ME 機器の導入が、企業間取引に少なからず影響を及ぼしたことが窺える。但し、先行研究が対象とする ME 機器の代表である NC 工作機械は、1970 年代以降に中小製造業も含めて国内の製造業への導入が本格化（表 0-3）していた。先行研究では、それまで汎用工作機械を使って仕事を行っていた中小メーカーにとってデジタル技術を導入後、業務内容がどう変化したのかに焦点を当てている。

表 0-3 ME 技術の導入時期

	導入企業数	1964年以前	1965年～69年	1970年～74年	1975年～79年	1980年以降
合計	59.3	0.6	5.9	24.5	40.6	28.3
1,000人以上	95.6	2.5	22.0	41.7	28.8	4.6
300～900人	77.1	0.5	7.7	31.6	40.2	20.0
100人～299人	51.2	0.4	2.9	18.9	42.2	35.3

出典：労働省情報統計部編『技術革新と労働に関する調査 技術と労働の実態－ME 編』、1983 年。単位：％。

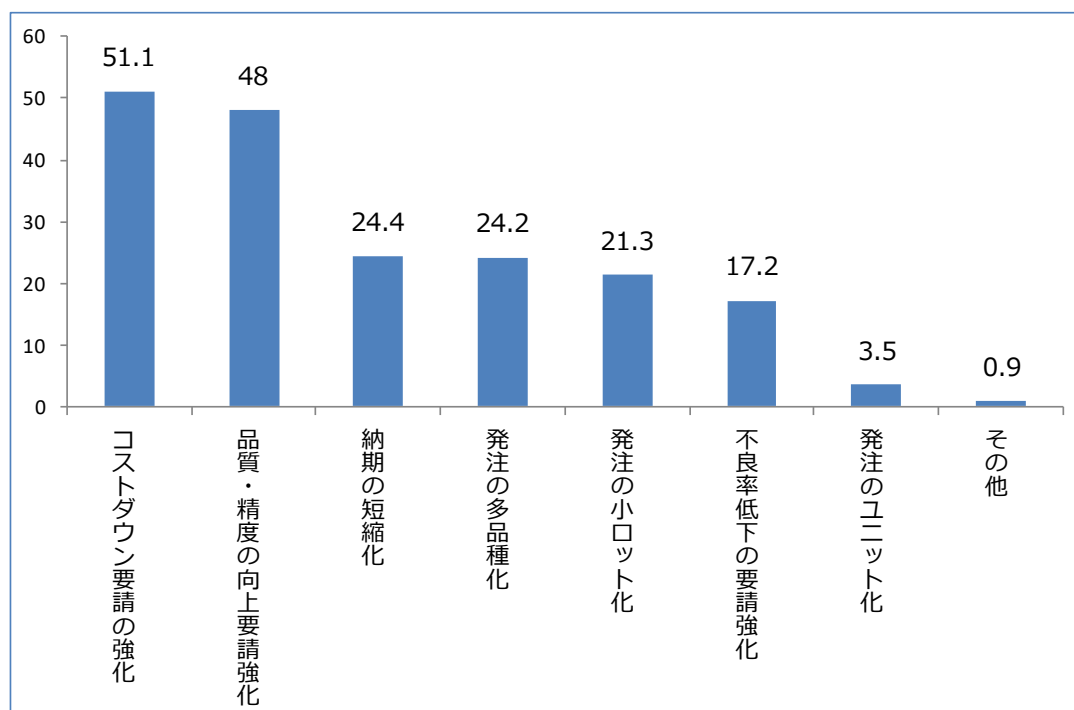
例えば、その効果については「企業間取引関係への影響」や「労働環境への影響」などを考察する研究が多い³⁹。発注側企業の技術革新でも同様の傾向が見られる。発注側企業

³⁸河崎亜洲夫、1991 年、113 頁。

³⁹堀（1985）は、「目覚ましい技術革新の速度は、親企業内でのシステム化から、全生産工程にわたるシステム化をも可能とし、その生産システムに組み込まれた中小企業は、親企業との間に強固な協力関係を作りあげるとはいえ、その企業の独自性はほとんど失われる。もちろんこのような極端な事態が現実には起こっているわけではないが、その徴候は到るところに現われており、マイクロエレクトロニクス技術の持つひとつの特徴を形成している」

がME機器の導入を行ったことで下請企業にどのような変化が起きているかをまとめたものであるが、発注側企業の設備水準やそれに見合う技術レベルの向上、生産スピードの引き上げなどに合わせて、下請企業に自社技術水準との技術の平準化を求めていることが推察できる。これは技術のデジタル化の特性を表したもので、発注側企業の要求水準に対応できない企業は、事業転換や廃業に追い込まれる可能性を意味している。

図 0-4 親企業の技術革新に伴う発注内容変化



出典：中小企業庁『下請企業実態調査』1984年12月。単位：％。

以上の通り、ME技術が国内の製造業に本格的に浸透し始めた1970年代～80年代は、ME技術を媒介にして企業間取引に様々な変化が表れた。その後、国内ではNC工作機械の販売は拡大を続け、日本工作機械工業会の2019年実績データによれば、生産される工作機械に占めるNC化率は約9割に達している。多くの中小製造業ではNC工作機械やマシニングセンタなどデジタル機器が普及し、近年では3Dプリンタの普及により技術のデジタル化が中小製造業に与える影響は1970年代～80年代当時とは異なっている。先行研究では現在の技術のデジタル化の焦点となるデジタルファブリケーション技術や、同技術で重要な設計と製造部門の関係性について分析は見られない。さらには技術のデジタル化の進化が中小製造業のビジネスモデルや経営にどのような影響を及ぼし、企業間取引にど

と述べている。また廣江（1989）は、「生産手段のME化が「下請取引関係」を通じて、加工精度要求をひとつの軸として波及する構造そのものである」と述べている。

のような変化が見られるのか先行研究の範囲では限界がある。そこで本研究は技術のデジタル化を時系列で捉えることで中小製造業に及ぼす影響を分析するものである。

4. 分析焦点

上述の通り、技術のデジタル化では時間の経過に従い、技術が平準化し、競合他社との間で製品の差別化ができなくなる特性が見られると記した。技術のデジタル化の影響を受ける製品は、時間の経過とともに技術がコモディティ化される恐れがあり、そうなれば製品開発競争は、やがて機能や性能といった付加価値から、生産コストや生産スピードに比重が移る。第1章で詳しく述べるが、技術がデジタル化された時、製造業にはプラス面とマイナス面のそれぞれの影響が見られることが明らかになっている。その影響は、事業規模や業種、取扱う製品、従業員構成、経営者の考え方など企業の経営環境により捉え方が異なるはずである。プラス面とマイナス面の両面から分析を試みることで、技術のデジタル化の影響を検証できる。これらの点から、従来、研究範囲などが限定的であったマイナス効果について示す必要があると考える。これが本稿の第一の分析焦点である。

では、技術のデジタル化の影響を受けた際に企業はどうすべきなのか。そうした状況に直面した企業が、技術のデジタル化をマイナスと捉えた場合、技術のデジタル化に対抗する施策が必要になる。過去の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⁴⁰、果たしてそれは何かを具体的に示す必要がある。本稿の研究対象である中小製造業では多くがオーナー経営者であり、短期的な収益を求められるサラリーマン経営者とは異なり、中長期的な視野で差別化、付加価値化の検討、実践が可能である。この点を踏まえて中小製造業ならではの経営的な視点からの技術のデジタル化への対応が求められる。これが本稿の第二の分析焦点である。

なお、技術のデジタル化には“技術的特性領域”（第5章参照）があり、中小製造業にはビジネスで独自の優位性が生まれる余地がある点も強調しておきたい。技術のデジタル化では、技術が平準化し競合他社との間で製品の差別化ができなくなる特性が見られることを指摘した。この特性は構成要素（部品）の規格化や標準化により成立するが、その実現にはICとNC工作機械の存在を無視できない。多くのエレクトロニクス製品でも明らかのように、ICを搭載したプリント基板を製品に搭載することで、同一機能、同一性能を備えた標準品が実現されている。さらに、これら標準品をより効率的に量産する上で、NC工作機械は不可欠な存在である。技術が平準化された製品の生産では徹底した効率性が求められ、その過程では余分な製品ラインナップや余計な作業は排除されていく。本稿ではそれを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と考える。

⁴⁰藤川健、2010年、409頁。

分析焦点の第三点目は、設計と製造の関係である。前述の通り、技術のデジタル化に関する先行研究の捉え方には、現在の事象や課題から見た場合に難点も見られる。結論の一部を予め示すことになるが、技術のデジタル化への対応に必要な視角は、設計から製造に至る一連の流れの中で捉えることである。特にデジタルファブリケーションの考え方に従えば、設計の重要性はますます高まっており、技術のデジタル化における設計と製造の関連性を重視すべきである。日本の製造業では、官民ともに長年にわたり製造現場の強さが製造業の強さであるという考えに依拠していたが、技術のデジタル化を巡る世界的な潮流を見れば、その根拠は変化しており時系列に分析すれば製造現場の強さが製造業の強さであるという考え方は少なからず低下している。これが本稿の分析焦点の1つである。

第2章で示すデジタル技術の変遷に伴う需要の変化ではAM技術を事例に取上げるが、AM技術は金型を必要とせずに設計情報を直接、製造機械である3Dプリンタに送付して製品を造形する。従来の金型製作に基づき工作機械を使って行われる生産方法とは異なる手法である。その際に使用する設計データは3Dデータに限定され、国内の製造現場で主流の2Dデータは使用できない。技術のデジタル化ではこれまでよりも高度な設計技術が求められている。加えて、設計情報がそのまま製造に活かされることから、従来以上に設計思想やその源となる設計アイデアの可否が製品開発、製品生産にとって重要になることは間違いない。この点からも本稿の分析焦点の妥当性を主張できると考える。

以上、分析焦点3点について述べたが、その関連性を整理する。本研究の目的は、技術のデジタル化について、工業製品の生産工程の川上から川下に至る一連の流れの中で、ME化を包含した技術のデジタル化が、中小製造業にどのような影響を及ぼしているのか、それに対して、中小製造業はどのような対応を採っているのか検証、分析することで、デジタル化時代の中小製造業の在り方を考察することにある。この点を踏まえて分析焦点では、まず先行研究では限定的な技術のデジタル化のマイナス効果とその対応について検証を行う。その上で、マイナス効果を包含してデジタル技術の特性の視点から見た中小製造業ならではの経営について分析する。3点目の設計と製造の関係性については、技術のデジタル化が製造から設計に範囲が広がる結果、どのような相関性の変化が見られるのか検証する。設計と製造の関係性が中小製造業の経営に影響を及ぼしている点にも言及する。これら分析焦点を基に企業事例、産業事例で実証することとする。

5. 分析の手順、資料、及び目次構成

(1) 分析手順と資料

前述の分析焦点に照らして、企業事例、産業事例の調査、分析を行った。本研究では、技術のデジタル化にうまく対応して競争力を発揮している企業は、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、そのマッチングに成功させているからではないかと考える。企業事例、産業事例の調査、分析は、技術のデジタル化が実際に中小製造業にどのような影響を与え、その影響に対して中小製造業が具体的にどのような施策で臨んでいる

のかフィールドワークに基づく検証が必要であると考えた。企業事例については、東京都、埼玉県に本社を置く中小製造業経営者へのインタビューと全国の複数の自治体に点在する中小製造業に対してアンケート調査を行い、その記録と関連資料を中心に構成した。インタビューは2014年10月から2020年7月まで、経営者6人と延べ9回（1回に平均約2時間半）にわたって行った。インタビューは原則的に、録音テープとメモに基づいて行い、インタビューア本人に内容の確認と必要な修正を受けて原稿に反映している。また、アンケート調査は、2014年10月から2021年8月までに5回、機械、電機業種を中心に計116社を対象に行った。

他方、補完的には、主に機械、電機、電子、情報通信、中小製造業に関する単行本、雑誌、新聞をはじめ、経済産業省、中小企業庁を中心とする政府、関連業界団体の公式統計、個別企業の記事情報、ホームページなどのWeb情報などを使用している。

（2）目次構成

本稿は、序論を含めて7つの章と結論から構成される。第1章では論文全体を通してテーマの中核となるデジタル技術の特性と変遷を分析した。先行研究で取上げられているME化に関して分析を行い、その傾向と特徴点についてまとめた。その結果、先行研究では本研究が取り組む設計と製造の関係に基づく研究が行われていない点を明らかにしている。また、デジタル技術がどのように進化してきたのか国内製造業の変遷を1950年代からエポックメイキングごとに分類し、各トピックスにおける動向や特徴点を記述した。年代が進むに従い、デジタル技術がどのように変化し、設計と製造の関係性が重要になっている事を明らかにした。第2章では、技術のデジタル化が製造業に具体的にどのような影響を及ぼすのかNC工作機械と3Dプリンタに焦点を当てて分析を行った。NC工作機械と3Dプリンタの発達が生産にどのような変化を及ぼすのか考察することで、技術のデジタル化との相関関係に言及している。第3章では、技術のデジタル化について、先行研究を踏まえながらマイナス効果に重点を置いて分析を行った。パソコンとNC工作機械を事例に技術の平準化の影響について考察し、その上で、技術の平準化が製造業に実際にどのような影響を及ぼすのかを3DCADに関するアンケート調査結果を基に分析した。第4章では、技術のデジタル化が中小製造業の事業形態にどのような変化を与えるのか分析を行った。中小製造業の事業モデルには、取引先企業から設計図の貸与を受け仕様書に基づいて、部品や半製品を加工する受託加工型事業者と、自社で開発した製品を製造するメーカーである自社開発型事業者がある。本章では受託加工型事業者に焦点を当てた。受託加工型事業者は、ME化に関する先行研究でも数多く扱われているが、2000年代以降の技術のデジタル化による進展でどのような変化が見られるのかを分析する研究はなく、第4章では、過去のME化研究と現在の技術のデジタル化の環境で、中小製造業の企業間取引に大きな変化があることをアンケート調査によって検証した。第5章では、先行研究で述べられてきた技術のデジタル化への対応策を検証するために、デジタル化の特性である“効率性”

に着目し、この分析焦点に基づいて 2 社（株式会社サイトウ製作所、株式会社アタゴ）を事例に取上げた。第 6 章では、産業事例の分析として医療機器を取上げた。医療機器独特のカスタムニーズに対応する手法として、技術のデジタル化の一種である AM 技術への関心が高まりを見せており、第 6 章ではニーズの実態を明らかにすると同時に、AM 技術を導入している事例として、中小製造業カー 3 社を事例に医療機器の特性と AM 技術の関係を分析した。なお、本稿では、既に公刊された以下の筆者の論文も利用する。カッコ内は本稿での主たる活用部分である。①「中小製造業のデジタル技術への対応戦略－株式会社サイトウ製作所を事例にして－」『イノベーション・マネジメント』No17、2020 年 3 月（第 4 章の一部）⁴¹②「医療機器における AM 技術の普及－中小製造業を事例にして－」『産業学会研究年報』No36、2021 年 3 月⁴²（第 2 章の一部と第 6 章）

⁴¹2019 年 12 月 13 日、研究ノートとして審査受理。

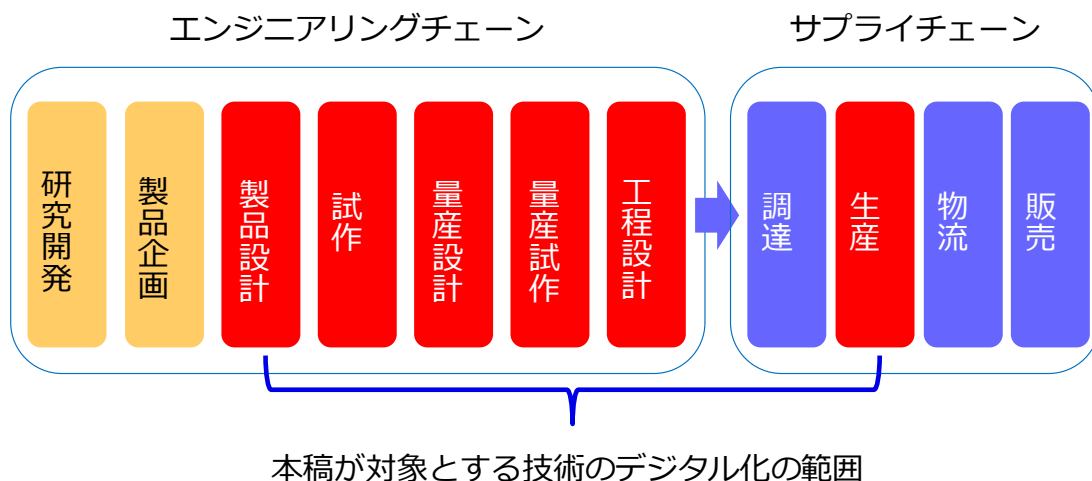
⁴²2020 年 11 月 3 日、査読論文として審査受理。

第1章 デジタル技術の特性と変遷

第1節 デジタル技術の特性と変遷

製造業のビジネスモデルは大きくエンジニアリングチェーンとサプライチェーンの2つのプロセスに分かれている。エンジニアリングチェーンとは企画から生産準備までの流れを指すものであり、サプライチェーンは調達、生産から最終需要（消費）にいたる製品供給の流れである⁴³。本稿はこのうち、エンジニアリングチェーン工程における設計とサプライチェーン工程における生産の技術のデジタル化について研究の対象とするものである。その範囲については図1-1に示す通りである。

図1-1 本稿が対象とする技術のデジタル化の概念図



近藤信一氏「中小企業におけるモノづくりのデジタル化」に記載した「モノづくり企業のデジタル化（概念図）」を基に作成。

従来、技術のデジタル化に関する研究は、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あった。ME化研究に代表される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である⁴⁴。本稿は生産工程に加えて、設計工程までを包

⁴³近藤信一、2009年、34頁。

⁴⁴廣江（1989）は生産工程のME化とは、生産工程総体のME技術によるシステム化ではなく、ME機器の導入による生産工程の「部分的」なME化である。大半の中小製造業における生産工程の技術的編成は、従来型技術とME技術を中心とする革新技術の双方から成っている。また、そのような充用の仕方がME技術、ME技術の技術的・経済的特性であると述べている。また、藤川（2010）はME化研究が盛んになった1980年以降、議論の対象となった情報機器について、CAD、CAM、NC旋盤、NCフライス盤、NCボール盤、マシニングセンタ、溶接ロボット、塗装ロボット、三次元測定器、搬送ロボットなど多岐に渡ると述べている。

含した形で考察を試みる。設計までを対象とする理由は、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。

総務省の平成 28 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 スキャナーや 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お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と言っても過言ではない。しかし、技術革新の時代背景から、ME 化研究を代表にする先行研究では、設計工程を対象に技術のデジタル化を取上げる研究はこれまでにほとんど見られない。

では、そもそも製造業におけるデジタル化とは何であろうか。先行研究でも示されている通り、工業製品の生産にはデジタル技術の使用が不可欠である。“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。

本稿は、デジタルデータを応用したデジタル技術が中小製造業に及ぼす影響を研究することを目的としている。工業製品の生産では、戦後、アナログ技術からデジタル技術へと技術の転換が徐々に進んできたが、デジタル技術が誕生し普及したことで製造業にどのような影響を及ぼしたのか、そのプロセスを概観した上で、本研究の対象となる中小製造業への影響を分析、検証していく。

第 1 章では論文全体を通してテーマの中核となるデジタル技術の特性と変遷を分析する。まず、デジタル技術がどのような技術であるのか本稿における定義付けを行う。その上で、工業製品の生産で使われるデジタル技術の特性を分類する。それぞれの特性についての考察を通して、中小製造業への影響について考えを述べたい。次に国内においてデジタル技術がどのように進化してきたのか変遷を辿ることとする。変遷はデジタル技術が誕生した 1950 年代からエポックメイキングごとに分類し、各トピックスにおける動向や特徴点を述べることとし、年代が進むに従い、デジタル技術がどのように変化し、製造業に広がってきたのか記述することとする。

第 1 項 デジタル技術の定義

前述の通り、デジタルは連続的に発生するデータを数値で表す事象の呼称であるが、製造業で使われるデジタル的な手法を取入れたデジタル技術とはどのようなモノなのか。本稿では、デジタル技術について「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などの経験則や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と定義する。工業製品の設計や生産の場合、デジタル技術を利用することで、それまで人間が行っていた作業を機械やコンピュータに肩代わりさせて、作業の大幅な短縮化を実現することを目指す。さらにその結果として、生産の効率化や安定化、経営の合理化に寄与することが期待されている。

第2項 デジタル技術の特性

次にデジタル技術の特性についてみておこう。デジタル技術は、前述の通り、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、アナログ技術と比べて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、自分で聞き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（中央演算処理装置）⁴⁵とファームウェアが結合して、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⁴⁶。しかし、その技術特性は、工業製品を作る立場になった時に、技術を使うユーザの属性や立場、また、使用目的や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。製造業の場合もデジタル技術の影響は両面的である。その一例を示したものが表 1-1 である。同表は筆者が中小製造業を対象に、技術のデジタル化の実態を調べるパイロット調査を実施し、その結果をまとめたものである⁴⁷。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の結果を示している。

まず全体では、回答企業 9 社のうち 6 社がデジタル化の影響を受けていると回答した。「プラスの影響を受けている」が 3 社、「マイナスの影響を受けている」が 2 社、どちらか回答せず 1 社と分かれた。「プラスの影響を受けている」と回答した企業では、熟練技能者でなくても生産が安定してできるようになったことから「非熟練工の生産性向上」を理由に選んだ企業が 4 社で最多となり、続いて「生産性向上によるコスト低減」、「作業効率改善

⁴⁵Central Processing Unit の略。半導体素子に組込まれたプログラムに従って命令を順番に読み込み、指令を実行することで情報処理する電子部品。同義語で MPU (Micro Processing Unit) と表記するケースも見られるが、本稿では CPU に統一する。

⁴⁶藤坂浩司、2001 年、46 頁。

⁴⁷パイロット調査は 2014 年 10 月に実施した。調査対象企業は 9 社（内訳：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。

による納期短縮」、「新規顧客の開拓」が各 3 社となった。

表1-1 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 ②生産性向上によるコスト改善 ③作業効率改善による納期短縮 ④新規顧客の開拓	①デジタル設備導入費用の負担増 ②製品、技術の優位性の減少、消滅 ③価格競争激化による利益減少 ④市場シェアの減少 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 ②技術の平準化による安定性の向上 ③非熟練工の生産性向上	①他社との技術差別化の困難 ②コア技術の低下、消滅の可能性向上 ③熟練工の減少と技術伝承の困難

出典：中小製造業アンケート調査に基づき作成。

一方、マイナスを回答に選択した企業は、その理由として「他社との技術差別化の困難」が 6 社で最多となり、以下、「類似品の多数出現」（2 社）、「価格競争激化による利益減少」（2 社）が続いた。「他社との技術差別化の困難」と回答した企業からは、今後の目標として「他社が容易に模倣できない新製品・新技術に注力している」（2 社）、「新市場への参入、多角化を目指している」（2 社）というコメントも得られた。

本調査は、サンプル数が少なくアンケート調査としての信頼性が乏しいものの、2 つの点で特徴が見られた。1 点目はデジタル技術の影響について、「プラス」と「マイナス」の両面で特徴が見られたことである。2 点目は、「マイナスの影響を受けている」と回答した企業では、「技術の差別化が難しくなった」が他の回答より多かったことである。以上の通り、技術のデジタル化の特性は、経営的側面、技術的側面でそれぞれ、プラス、マイナスの影響を及ぼすことが分かった。

第2節 製造業におけるデジタル技術の変遷

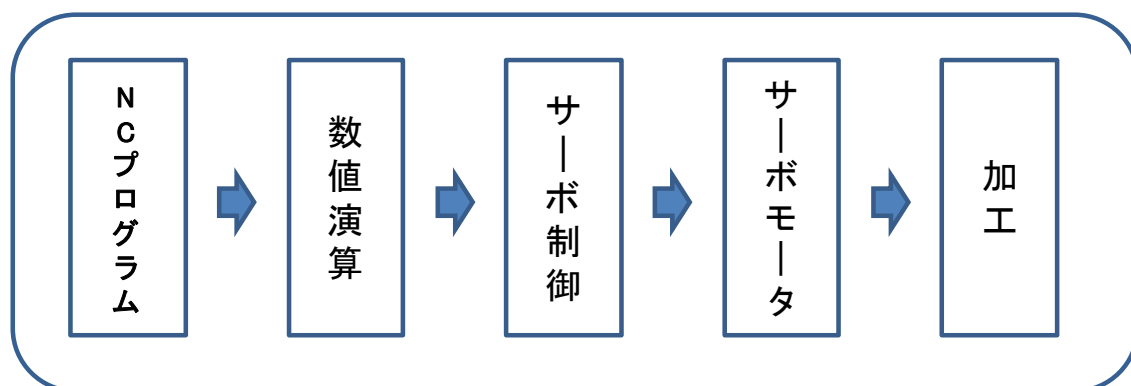
製造業に影響を及ぼしている技術のデジタル化が、どのような経緯で製造業の現場に発生し、その後、どのような過程を経て浸透していったのか。デジタル化の発生時期となる1950年代から、デジタル化が製造業に大きく影響を与えるエポックメイキングごとに区分し、各区分の特徴点と、製造業にどのような影響を及ぼしたのかについて分析する。区分については、①NC 工作機械の登場初期による影響、②半導体技術の進歩による CNC 工作機械の登場とその影響、③3DCAD を代表とする設計分野におけるデジタル技術の浸透、④デジタルファブリケーション技術の登場—としたい。

第1項 製造部門におけるデジタル技術の変遷

1-1 NC 装置の登場

製造業現場におけるデジタル技術の変遷を考察する際、起点となるのが製造業現場へのデジタル技術の浸透で、“マザーマシン”と呼ばれる工作機械のデジタル化である。日本の工作機械産業は明治維新以降、第二次世界大戦終結までは軍事的な要請に基づく受注拡大をベースに発展してきた⁴⁸。工作機械業界が産業として独立的な地歩を固めるのは、第二次世界大戦後、新たに民需と輸出を中心に回復、発展を遂げる1950年代の高度成長期以降のことである。その発展を後押しするメルクマールになったものがNC 工作機械の登場である⁴⁹。NC 工作機械は、NC 装置を装着した機械のことであるが、NC 装置は、加工対象物の加工情報を数値計算後、その情報をモータなどの駆動システムへ伝達することで工作機械を駆動、制御するシステムである。

図 1-2 NC 装置の構成概念



出典：『工作機械副読本』などを基に作成。

⁴⁸竹内淳彦、1973 年、139 頁。

⁴⁹田中（1984）は、生産技術体系における情報処理機能の変化（高度化）には3つの流れがあると指摘している。第1にプロセス・オートメーション技術、第2にトランスファー・マシン技術、そして第3がNC化である。NC化については、情報処理・伝達の仕方における変化として捉えている。

あらかじめ NC 加工用にプログラム化されたデータを入力すれば、適切な作業動作手順を内蔵した情報処理回路に従って加工を行う（図 1-2）。それまで工作機械を使って生産される工業製品は、扱う作業者の熟練度や経験値によって出来上がりの製品精度を左右していた。しかし、NC 装置の開発により、工作機械の加工精度が飛躍的に高まり、その結果、工業製品の生産品質の向上に大きく貢献した。

NC 装置は、それまで扱う作業者の熟練度や経験値によって出来上がる製品精度が左右されていた工作機械による生産を大きく改善させ加工精度を飛躍的に高めることに成功した。わが国では 1970 年代に入り、NC 装置の低価格化、高性能化で同装置を搭載した NC 工作機械の普及が始まるが、その契機が、1970 年代に起きた二度にわたる石油ショックである。製造業の生産現場では合理化が求められ、企業は不採算部門から撤退するのに合わせて、工場の生産性、収益性を引き上げるために、自動化や省力化に積極的に取り組んだ。その方策の 1 つが NC 工作機械の導入である。NC 装置を搭載した NC 工作機械はその後、一大普及期を迎え、1980 年代初期に入るとわが国は工作機械の生産台数で世界 1 位の座を獲得し⁵⁰、今日でも世界トップクラスの地位にある。NC 工作機械の普及が、わが国産業発展の推進力となると同時に、デジタル技術の活用により、世界トップの製造業の地位を獲得することに成功した。

NC 装置は 1949 年にミシガン州トラバースにあるパーソンズ社 (Parsons Corp) の John T.Parsons が世界で初めて開発したことで知られる。1952 年にマサチューセッツ工科大学で NC 工作機械の研究が公表されると、日本では直ちに工作機械メーカー、電機メーカー、さらに産学官で NC 装置の研究開発と工作機械への実用化への取り組みが始まった⁵¹。1952 年に MIT が完成させた NC 試作 1 号機の回路素子には膨大な数の真空管が使われていたが、まもなくトランジスタや IC が登場して真空管に置き換わることとなる。これら半導体素子や電子部品を用いた論理回路をプリント板に実装し、それらを無数の配線でつなぎ合わせて、特定の機能を発揮させるのが NC 装置の基本形であった。その後、1956 年にファナックが民間における日本最初の NC 工作機械、NC タレットパンチプレス⁵²を開発した。1958 年には FANUC・NC の商用 1 号機が牧野堅フライス製作所（現、牧野フライス製作所）へ納入され、同年 3 月、日本初の NC フライス盤が発売されている。ファナックが NC 装置の開発に乗り出すきっかけとなったのは、富士通が、1956 年に従来の通信機からコンピュータとコントロールの分野に進出することを決めたことである⁵³。

⁵⁰一般社団法人日本工作機械工業会統計で、我が国の工作機械の生産額は 1982 年から 2008 年まで 27 年間連続世界第 1 位となった。

⁵¹松野建一、2018 年、472 頁。

⁵²日本工業規格 (JIS) によれば、「形状の異なった多数の金型を円状に配置し、任意の金型をスライド下部に回転させ、素材の所定の位置に所定の打抜き作業ができるクランクプレス」と定義されている。

⁵³1995 年 1 月 27 日の日刊工業新聞に掲載されたファナック社長、稲葉清右衛門氏（当時）へのインタビューによれば、富士通信機製造の尾見左右技術担当常務からコントロールの開発を指示されたが、当時、プロセスコントロールが自動制御の主役で、その分野は富士

NC 装置の開発、登場が、後に日本が経済大国へ発展する礎を築いたと同時に、その裾野を形成する中小製造業の技術力向上に大きく貢献した。しかし、NC 装置黎明期の 1950 年代から 60 年代にかけては、NC 装置を搭載した工作機械は高級機という位置づけで、中小製造業の技術力向上、経営への影響はほとんど見られなかったと言える。

表 1-2 NC 工作機械黎明期の主な開発事項に関する年表

1951年7月	米国マサチューセッツ工科大学で世界初のNC装置開発
1952年3月	米国マサチューセッツ工科大学で世界初のNC工作機械開発
1956年12月	富士通信機製造(現富士通)がNCタレットパンチプレス開発
1957年2月	東京工業大学・精密工学研究所がNC旋盤を試作
1958年3月	牧野フライス製作所(現牧野フライス製作所)、富士通信機製造が共同で国産初のNCフライス盤を開発
1958年11月	日立精機、富士通信機製造とNCフライス盤を試作し、三菱重工業名古屋航空機製作所に納入。国産初の外販NC機になる。
1966年10月	牧野フライス製作所が国産初のマシニングセンタを開発
1966年10月	富士通信機製造が世界初の全IC化のNCを開発
1972年5月	富士通から分離して富士通ファナック(現ファナック)発足
1972年※	富士通ファナックが世界初のCNCを発表

出典：『日刊工業新聞』1995 年 1 月 27 日付けを基に作成。

1-2 CPU 搭載機種が登場と ME 革命

第二次世界大戦後、日本の工作機械業界の発展過程で最も製造業に影響を与えたのが、工作機械の電子化である。その転換点となるのが、マイクロエレクトロニクス (ME) 技術の発展である。ME 化が日本の製造業に与えた影響は大きく、その後の高度経済成長の原動力の一端を担ったと言っても過言ではない。ME 化については、前述の通りに先行研究で多くの蓄積がなされてきた。この ME 化を実現させた技術革新が NC 装置の開発である。NC 装置は 1952 年、世界で初めて米国で開発され、その後、1950 年代後半には日本でも NC 装置を搭載した工作機械が市販されている。しかし、黎明期の国産 NC 工作機械は、NC 装置の価格が工作機械本体の 2～3 倍と高額であった⁵⁴。当時の金額にして 1,000 万円近かったが、高額な価格に反して、性能や機能は高度な内容ではなかった。

電機、日立製作所、横河電機がすでに基盤を作っていて、新規参入する訳にはゆかず、たまたまマサチューセッツ工科大学 (MIT) で数値制御 (NC) が開発された事をリポートで知り非常に興味を持ち、尾見常務に数値制御の開発を進言して許可を得たことが着手の始まりと述べている。

⁵⁴河崎亜洲夫、1991 年、113 頁。

そうした状況に変革をもたらしたのが CPU の開発である。日本では 1970 年代に入ると NC の回路に LSI（大規模集積回路）が採用され、サーボモータも旧式の電子油圧モータから電子パルスモータにかわってから NC は安定した性能を示すようになった。そして、NC 装置の価格低下は CNC⁵⁵が開発されたためだ。CNC は NC の中に数値計算、処理が可能な小型コンピュータを内蔵したもので、ソフトウェアとしてプログラムを入れ替えることにより別の加工機能を担うことが可能となった⁵⁶。

半導体の技術革新をいち早く採用したのが富士通ファナック（現 FANUC）である。富士通ファナックは 1972 年に、世界初のコンピュータを内蔵した CNC 装置「FANUC250」を開発した。従来型の NC 装置は、個別の機種ごとに仕様が異なるのに合わせて、それぞれに設計されるハードウェアとしての「ハードワイヤード NC」方式で、単一の加工しかできなかった。しかし CNC 装置を搭載したことで、NC 装置の技術体系をハードワイヤードからソフトワイヤードへと迅速に転換した⁵⁷。この技術転換は、その後の日本における技術のデジタル化を加速させる大きな要因の 1 つになった事象として指摘しておきたい。つまり、NC 装置が CNC に進化した結果、CAD/CAM⁵⁸と連携してそれまでの一種生産から、複数種中量生産、変種変量生産に対応できるようになり、NC 装置は工作機械を一気に高度化することに成功したと言えるだろう。

また、富士通ファナックは、1975 年にインテルの CPU を搭載した NC 装置を世界で初めて開発した。1976 年には NC 専用のカスタム LSI が開発され、これを組み込んだ CNC が出現した。カスタム LSI は、通常の IC の 250 個~300 個を 1 個の LSI にまとめたもので、部品点数の大幅な削減ができ、一層のコストダウンと信頼性の向上に寄与することと

⁵⁵CNC は Computerized Numerical Control の略で、コンピュータ数値制御を指す。NC が機械動作を決める論理プログラムがトランジスタやリレーなどから構成される論理要素を連結した論理回路によって決定されているため、プログラムの変更ができないのに対して、CNC は機械動作を決める論理プログラムがソフトウェアで決定されるため、オペレータによりプログラムの変更が可能。CNC、NC はともに数値制御される装置であることから、一般的には NC 装置として説明されるケースが多い。本稿では CNC と NC の比較説明部分以外は NC に表現を統一する。

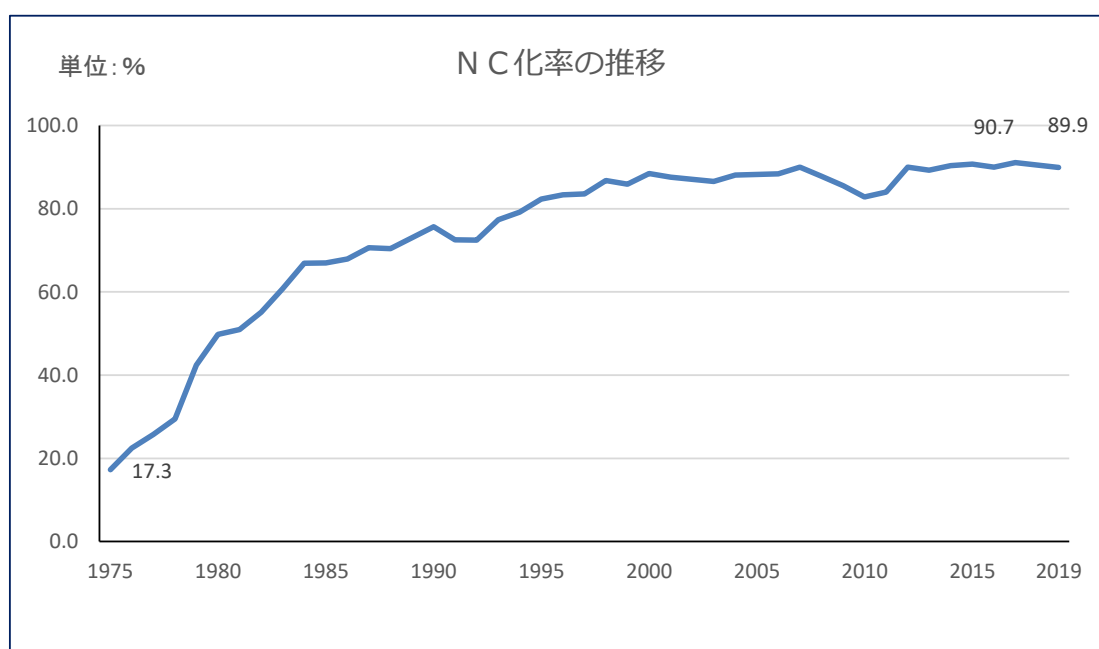
⁵⁶公益財団法人発明協会「戦後日本のイノベーション100選」2016年、「NC工作機械」開発のイノベーションに至る経緯から引用。

⁵⁷柴田友厚、2010 年、340 頁。

⁵⁸CAD は Computer-aided design の略語。コンピュータを使用して設計を行いことで、日本工業規格（JIS）では、「製品の形状、その他の属性データからなるモデルを、コンピュータの内部に作成し解析・処理することによって進める設計」と定義されている。また、CAM は Computer aided manufacturing の略語。工業製品の製造を行うために CAD で作成された製品データを入力データとして、加工用の NC プログラム作成などの生産準備全般をコンピュータ上で行うためのシステム。

なった⁵⁹。この結果、NC 装置に組み込まれる部品点数が大幅に削減され、1970 年代後半には価格も 300 万円程度にまで下がった。このように半導体素子の技術進歩が NC 装置の高性能化と低価格化につながり、それに伴う市場での普及を後押しした。このように、NC 装置の発展には半導体技術の進歩を抜きにしては語れないと言えるものであった⁶⁰。田中（1984）は ME 化を捉えた機械化の歴史について、機械の中に仕組まれた情報処理機能の高度化の歴史であるといっている。（中略）機械は道具と異なって、それ自体 1 つの機構性、統一性をもち、その運動に持続性、自発性をもっているところに、その特質があるといわれている。その機構性なり、運動の持続性・自発性なりを支えているものは何かといえ、機械の中に仕組まれた情報の伝達機能であり、情報の処理機能であると述べている⁶¹。

図 1-3 工作機械の生産に占める NC 工作機械の割合の推移



出典：経済産業省生産動態統計年報・機械統計編各年のデータを基に作成。

前述の通り、日本における NC 装置の開発は NC 装置専門メーカーが主導して開発を行い、工作機械メーカーが製品を調達して工作機械の NC 化を推進する方式が初期の段階から行われてきた。NC 専門メーカーは NC 装置をメーカーに関係なく多くの工作機械で使用可能とするために標準化を進めてきた。そうした取組みもあり、1970 年代、NC 装置の低価格化、高性能化で同装置を搭載した NC 工作機械の普及が日本でも始まるが、工作機

⁵⁹稲葉清右衛門、1981 年、2 頁。

⁶⁰稲葉清右衛門、1981 年、2 頁。

⁶¹田中博秀、1984 年、216-217 頁。

械の市場を拡大させる追い風になったのが、1970年代に起きた二度にわたる石油ショックだ。海外に当時の主要なエネルギー源である石油の輸入を頼っていた日本はこの影響をともに受けて、その結果、製造業の生産現場では積極的な合理化が求められた。

企業は不採算部門から撤退するのと合わせて、工場の生産性、収益性を引き上げるために、自動化や省力化に積極的に取り組んだ。その象徴が工作機械のエレクトロニクス化である。エレクトロニクス化により、日本の NC 工作機械は一大普及期を迎えることになり、1980年代初期に入ると NC 工作機械の生産台数は世界 1 位の座を獲得した。

図 1-3 は、1975 年から直近 2019 年までの国内における工作機械の総生産額に占める NC 工作機械の NC 化率⁶²を示したものである。NC 化率は 1970 年の時点で 7.8%に留まっていたが、75 年に 17.3%、78 年に 29.4%となり、1981 年には過半の 51.0%に達した⁶³。その後も NC 工作機械の普及は順調に進んで、日本工作機械工業会が発表した 1990 年 6 月の統計では、NC 工作機械の受注が 1,050 億 6,300 万円（前年同期比 19.6%増）となり、初の 1,000 億円を突破し、NC 化率も 83.8%となった⁶⁴。さらに 2007 年には NC 化率は 90.0%と初の 9 割に達し、2012 年以降はほぼ毎年 9 割を超える比率で推移している。

このように NC 工作機械の普及が進んだ理由の 1 つには中小製造業への浸透がある。中小製造業への影響では NC 装置の低価格に伴って、中小製造業向けに中小型の量産機を生産する工作機械メーカーが登場したことだ。1970 年代の工作機械はすでに NC 装置の開発で、技術的な差異が以前よりも見られなくなっていた。そのため戦後、発展したヤマザキマザックや森精機製作所（現、DMG 森精機）などの後発の中小・中堅工作機械メーカーは、機械の開発競争と並行して、営業面で新規分野の開拓に力を注いだ。その新分野が中小製造業であった。詳細については第 2 章で述べたい。中小製造業の特性を念頭にして、少量多品種に対応した小型量産機種の開発に力を注いだのがこの時期である。工作機械メーカー側の経営戦略が中小製造業の ME 化を支援した構図が浮き彫りになる。

中小製造業に NC 工作機械が普及するもう 1 つの契機となったものが操作性の向上だ。工作機械メーカーが 1980 年代初頭に開発した対話式、対話型 CNC 工作機械の開発が同生産方法の発展に寄与した。この機械の登場によって、従来のような座標計算が要らず、新卒の女子工員でも、短い教育を受けるだけで本格的な操作ができる位のもので、またプログラムの修正も容易になり、機械の使いやすさが大きく高まった⁶⁵。

NC 装置の開発とその後の CPU の登場で工作機械の性能は飛躍的に向上した。その結果、NC 工作機械の汎用性が高まり中小製造業へ浸透することになるが、同時に ME 機器が持つ特性も浸透していくこととなる。つまり、NC 工作機械を操作する作業者がその機器の作業内容を数値化することで、NC 工作機械は能力を発揮するため、加工内容に関するソ

⁶²NC 化率は工作機械全生産額に占める NC 工作機械生産高の割合を指す。

⁶³『日刊工業新聞』2011 年 12 月 1 日付。

⁶⁴『日経産業新聞』1990 年 8 月 10 日付。

⁶⁵金容度、2003 年、27 頁。

ソフトウェアが十分に完備されていれば、作業者は NC 工作機械に熟知している必要はない。これは、機械の操作性と現場の技術力向上は相関関係にあると考えられ、1990 年代以降、日本のエレクトロニクス産業を弱体化させていく一つの背景になることを指摘したい。

第 2 項 設計・開発部門における技術の変遷

2-1 CAD の登場

1960 年代に入ると欧米では新たな動きとして設計を中心にデジタル技術を多用して工業製品を開発する動きが見られるようになる。1970 年代には、米国では NASA のロケット解析の手法を使った設計用のソフトウェアが市販され、1980 年代には、モノづくりに重ねる動きが見られるようになった。その起爆剤の役割を果たしたのが CAD⁶⁶（Computer Aided Design／コンピュータ支援による設計）である。CAD は 1963 年、米国の科学者、アイヴァン・エドワード・サザランド（Ivan Edward Sutherland）が、2DCAD のコンピュータソフトウェア「Sketchpad」を開発したのが技術の発祥として知られる。

写真 1-1 Sketchpad の操作風景



出典：Ivan Edward Sutherland／「Sketchpad: A man-machine graphical communication system」2003 年、20 頁。

⁶⁶日本工業規格（JIS）は、「製品の形状、その他の属性データからなるモデルをコンピュータの内部に作成し解析・処理することによって進める設計」と CAD を定義している。

それまで、設計図の製作はドラフターと呼ばれる製図専用の機材を使って行われていたが、「Sketchpad」は、ユーザがライトペンとコマンドボックスを使用してコンピュータのディスプレイに直接スケッチを可能にした。ライトペンでポイントの変更も可能で、消去や移動など制御できる特徴があった⁶⁷。Sketchpad は人間が手書きで行う製図作業とは異なり、コンピュータの新しいコミュニケーション媒体として描画できるもので、コンピュータのディスプレイに直接描画された情報を解釈できるようにする入力、出力、および計算プログラムが含まれているほか、正確な図面を簡単に描画したり、以前に描画した図面を変更したりすることもできた⁶⁸。写真 1-1 は Ivan Sutherland 本人がライトペンを持ってディスプレイ前で操作している風景である。ディスプレイに表示される画像サイズと位置は、ディスプレイ手前の 4 つの黒いツマミで決定される。

Sketchpad の登場は、製図作業がコンピュータを活用して行うデジタル作業へと置き換わる契機となり、その後の CAD の普及へとつながった。現在、製造業で使用されている CAD は機械 CAD と一般的に呼ばれるが、2DCAD と 3DCAD の 2 種類がある。2DCAD は設計図面をデジタル化（電子化）したもので、3DCAD は設計図面を基に立体的にモデリングを可能にしたソフトウェアである。

日本では 1980 年代初期から、コンピュータネットワークで統合された経営が行われるようになり、伝票、報告書、口頭による組織内コミュニケーションにさらに強力な手段を付加することになり、環境適応のスピードと組織効率を向上させた。特に技術・設計部門では、CAD による図面設計のデジタル化が進んだ⁶⁹。この潮流に影響を与えたのが相次ぐ CAD 製品の登場である。1980 年、ユニグラフィックス・グループ (Unigraphics Group)⁷⁰が、3D モデリング機能を持つ「Unigraphics」を発売したのを皮切りにして、1981 年にダッソー・システムズ社が設立され「CATIA」を、1982 年にはオートデスク社が「AutoCAD」を発売した。こうした CAD 製品の販売開始を受けて、2DCAD の普及率は、80 年代初頭にはまだ数%に留まっていたが、1990 年には 70%、1992 年には 80%まで上昇し、1990 年代中頃までに急速な普及段階が終わり、以降は 90 数%で飽和状態になった⁷¹。

CAD の登場、普及は工業製品を“早く”そして“安く”作ることを念頭にした取り組みであり、こうした工業製品の開発思想が、CAD、CAM、CAE をつなげ、開発・設計から生産に至る一連のデジタル化の取り組みを普及させていった。しかしながら、日本において、設計から生産に至る一連の流れの中で 3DCAD を使って製品開発する動きは限定的で⁷²、また、

⁶⁷Ivan Edward Sutherland、2003 年、9-10 頁。

⁶⁸Ivan Edward Sutherland、2003 年、9-10 頁。

⁶⁹日本経営診断学会、2010 年、11 頁。

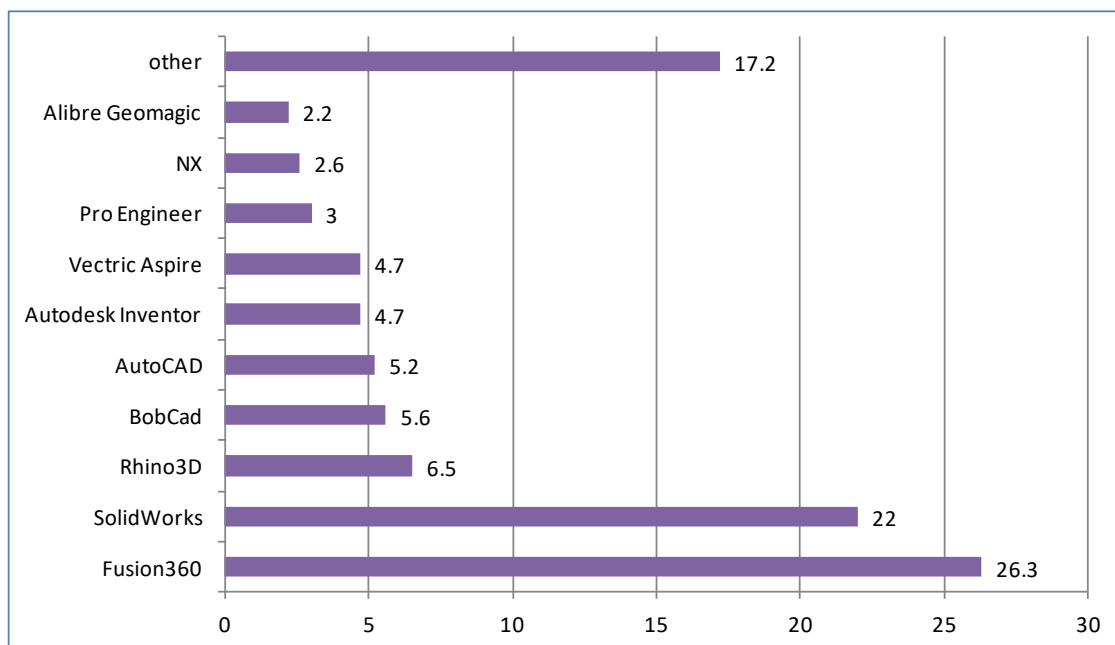
⁷⁰米国のソフトウェア企業、ユナイテッド・コンピューティングが前身。買収を繰り返し、2007 年 1 月、ドイツの Siemens グループ、Siemens PLM Software となる。

⁷¹竹田陽子、青島矢一、延岡健太郎、2004 年、2 頁。

⁷²竹田らの調査によれば、3DCAD は 2004 年時点で 76%の企業で導入している。92 年までは普及はなだらかで、80 年代初盤から 10 年以上をかけて普及率は 20%にしか上昇していなかった。その後、93 年以降 98 年にかけて急速に普及速度が加速された。99 年以降は、

現在、日本の大手製造業の現場で導入されている 3DCAD がいずれも欧米製であることを考えると、デジタル化の流れが製造業全体を俯瞰し始める中で、日本のデジタル化は 1990 年代以降、世界の潮流から立ち遅れたといえる⁷³。図 1-4 は業務用に使われる 3DCAD のマーケットシェアの WEB 調査を示すものであるが、最も多く使われている 3DCAD 製品の上位 10 位以内に日本製はない。

図 1-4 3DCAD のマーケットシェア 単位：％



出典：2021 年 CNCcookbook 調べを基に作成。

3DCAD の開発は、日本では 1980 年代を中心に行われ、自動車産業をはじめ各種産業で独自の CAD システムの開発を行ってきた⁷⁴。しかしながら、工程設計システム、CAE

普及の加速度は鈍り、現在はほぼ安定期に入りつつあると分析している⁷²。一方、技術者派遣大手の株式会社メイテックが 2020 年 1 月に行った調査では、3DCAD/CAM の導入率は 67.2%で、従業員「1～100 人」規模の企業では 55.0%、「1 万人以上」の企業では 71.8%という結果が出ている。2 つの調査は調査時点が異なることと、前者が上場企業、未上場企業から無抽出で 700 社郵送（回答社数 153 社）しているのに対して、後者は研究・設計・開発系（機械関連）の業務に就くエンジニア 500 人を対象に WEB で調査している。両者とも比較対象が異なり、また実際の回答企業の詳細な属性が分からないため、あくまで傾向値として参考にしたいが、2004 年時点よりも 2020 年時点で 3DCAD の導入率が低い結果は、第 3 章の CAD 調査と照らせば、一定規模以下の企業への導入が思うように進んでいない可能性を示唆するものである。

⁷³1970 年代前半には、国内でも NC 工作機械が登場し、その後、世界市場で日本の工作機械メーカーが健闘している状況と CAD の開発状況を比較すると、設計と製造に対する日本企業や政府の姿勢や考えに大きな違いがあることが理解できるだろう。

⁷⁴例えば、1983 年 8 月 22 日号の日経ビジネス、126 頁の「ハイテクポイント CAD/CAM、

システムなど CAD システムの周辺への波及が十分に進まずにその普及が頭打ちになっていた。1990 年代後半から、メモリや CPU などコンピュータのスペック向上、プリンタの進化と低価格化が進んだことで、市販 CAD システムへ移行が進み始めた。その結果、生産技術部門とのデータの共有が進んでいった。その主な原因は、独自 CAD システムの開発によって特徴あるシステムを実現できる反面、開発とシステムの維持に膨大なコストと労力がかかり、プロダクトライフサイクル全体に関わるシステムを開発、維持することの限界が見えてきたためである⁷⁵。

本稿が CAD を研究対象にする理由は 2 つある。第 1 に、従来、製造現場を中心に構成されていた NC 装置がコンピュータ技術の発達により CNC 装置に進化した結果、CAD/CAM と連携して、それまでの一種生産だけから、複数種中量生産、変種変量生産にも対応できるようになったことなど、設計と生産のリンケージがデジタル技術を通じて強まったことである。第 2 に、上流の CAD と下流の CAE が統合され、これにエンジニアリング機能をもたせることでトータル・エンジニアリング・システムが完成されたことである⁷⁶。

これは時系列的に見た時に、第 1 の動きの延長の動きといえることができる。トータル・エンジニアリング・システムとは、それまで個々のデジタル機器を単独で生産に活用した状態から複数の機器で構成された生産へとシステムが発展していく様相である。従来の ME 化は高度情報化の影響から、例えば建設業界では 3DCAD を活用して CIM⁷⁷と呼ばれる生産業務に関連する企業間に及ぶシステム利用へと発展を遂げることになる。製造業では FMS⁷⁸と呼ばれる複数の生産業務における、複合機器で構成されているシステム利用へと展開されていった⁷⁹。市場に 3DCAD が登場したことで、コンピュータ上で仮想的な 3D 空間を作り上げ、入力したデータから 3D 情報を形成し、モニター画面に表示することができるようになった。これに加えて、形状を表現するだけでなく、重量や表面積など物理

国産の高性能機種も登場」では、CAD/CAM システムはコンピュータ・システムの本場である米国でまず開発され、1960 年代前半に自動車メーカーや航空機メーカーで、自社用として最初に普及が始まったとし、日本では、まず造船会社や自動車や半導体メーカーが自社用システムの開発に取り組み、1960 年代後半から実用化が始まったと記述している。

⁷⁵福田好朗、2003 年、9 頁。

⁷⁶津田真微、1986 年、10 頁。

⁷⁷CIM は Construction Information Modeling の略称。国土交通省の定義では、「測量・調査、設計段階から 3 次元モデルを導入し、その後の施工、検査、維持管理・更新の各段階においても 3 次元モデルを連携・発展させ、併せて事業全体にわたる関係者間の情報共有を容易にし、一連の建設生産・管理システムの効率化・高度化を図るもの」とされている。

⁷⁸Flexible Manufacturing System の略称。多品種製造に対して、複数の機器を使うことで柔軟に対応できる生産システムで、産業用ロボットや CNC などで構成されている。秋野（1994）は、FMS について、ME 技術の体系化の流れとして捉えているが、1950 年代に普及したトランスファーマシンに見られるメカニカル・オートメーションと異なり、複数の品種の生産の自動化が可能となるという意味で、より柔軟性を持つシステムと記述している。

⁷⁹藤川健、2010 年、409 頁。

情報の入力や計算を通じて、それらを画面上に反映させることも可能になった⁸⁰。2DCAD が手書き図面で書かれた 3 面図を電子化するために利用されたのに対して、3DCAD は、形状において任意の点座標の位置およびベクトル情報を持っており、設計業務の効率を向上（図 1-5）させ、商品開発プロセス全体の改革を促進する能力を秘めた⁸¹。

図 1-5 設計から製造に至る流れ（アナログとデジタルの違い）

製造プロセスの「アナログ」から「デジタル」への移行				
プロセス	アナログシステムの流れ		デジタルシステムの流れ	デジタル化で得られる効果
設計	手作業による製図作業	➡	CAD (computer aided design) による設計	①作業の効率化 ②設計スピードのアップ ③設計のオープン・ネットワーク化
	手作業などによる設計変更の繰り返し	➡	CAE (computer aided engineering) を使った事前検討の支援	①作業の効率化 ②設計スピードのアップ
試作	木型や粘土による製品試作	➡	「試作なし」または3Dプリンターによる試作品製造	①作業の効率化 ②試作コストの圧縮 ③試作期間の短縮
加工準備	熟練技能者による指示	➡	CAM (computer aided manufacturing) を使った加工指示	①非熟練工でも作業可能
生産	作業者が汎用工作機械を手動で操作	➡	NC工作機械による生産	①生産品質の安定化 ②不良率の改善 ③非熟練工でも作業可能 ④生産のオープン・ネットワーク化

出典：各種資料を基に作成。

また、新世代 3DCAD が登場してからは、設計プロセスだけでなく、製品開発プロセス全体に 3D データをベースにする試みが現れた⁸²。図 1-6 は 3DCAD の 3 種類の表現法を比較したものであるが、竹田（2000）が述べるように、1980 年代末に立体の内部構造をデータとして持つソリッド・モデラーと呼ばれる新世代の 3DCAD が初めて商品化された。

図 1-6 3DCAD の表現方法と特徴

表現法	特徴	利点
ワイヤーフレームモデル	立体図形を輪郭線のみで表現するモデル	データ量が少ないため表示速度に優れる
サーフェスモデル	ワイヤーフレームモデルに面情報を加えたモデル	形状の把握が容易
ソリッドモデル	サーフェスモデルの中身が詰まったモデル	体積、質量計算や干渉チェックが可能

出典：各種データを基に作成。

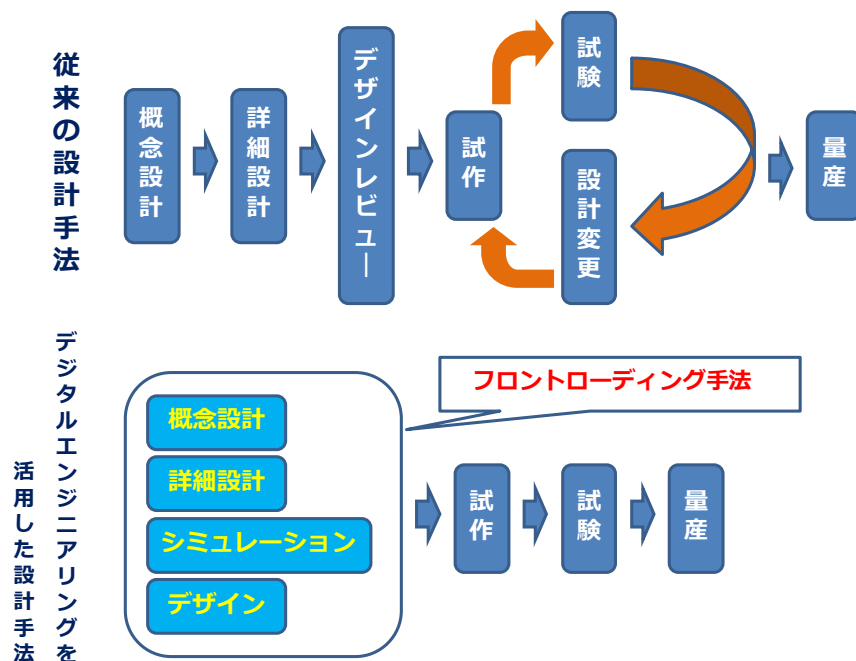
⁸⁰塩澤豊、2014 年、64 頁。

⁸¹日本経営診断学会、2010 年、11 頁。

⁸²竹田陽子、2000 年、9 頁。

1990年代に入ると、設計から製造に至る一連の工程をデジタル技術で結合される動きについて「デジタル・エンジニアリング」という表現が使われるようになった。デジタル・エンジニアリングは製品開発に必要なデータを一元管理して、3DCAD を使って製品設計する取組みの総称として使われる⁸³。デジタル・エンジニアリングは製品データを中核にして、3DCAD や CAM を有機的に結合することでメリットを発揮することができる⁸⁴。その基本コンセプトはコンカレントエンジニアリング⁸⁵とフロントローディング⁸⁶にある⁸⁷。図 1-7 は従来の設計手法とデジタル・エンジニアリングによる設計手法を比較したものである。デジタル・エンジニアリングではフロントローディングを使うことで、製品開発の前工程に経営リソースを投入し、後工程における変更を最低限に抑えて、コストを抑えながら品質の高い製品づくりを図る。

図 1-7 従来の設計手法とデジタル・エンジニアリングによる設計手法の比較



出典：各種資料を基に作成。

⁸³『トヨタ自動車 75 年史』（2013 年）、同社専用 WEB サイトによれば、トヨタ自動車の「V-Comm」は、車両設計データや仕入先からの部品データをもとに、新車モデルをコンピュータ上の仮想空間で、3 次元の状態を組み立てるシステムとして知られると記述されている。

⁸⁴高橋勇、2014 年、172 頁。

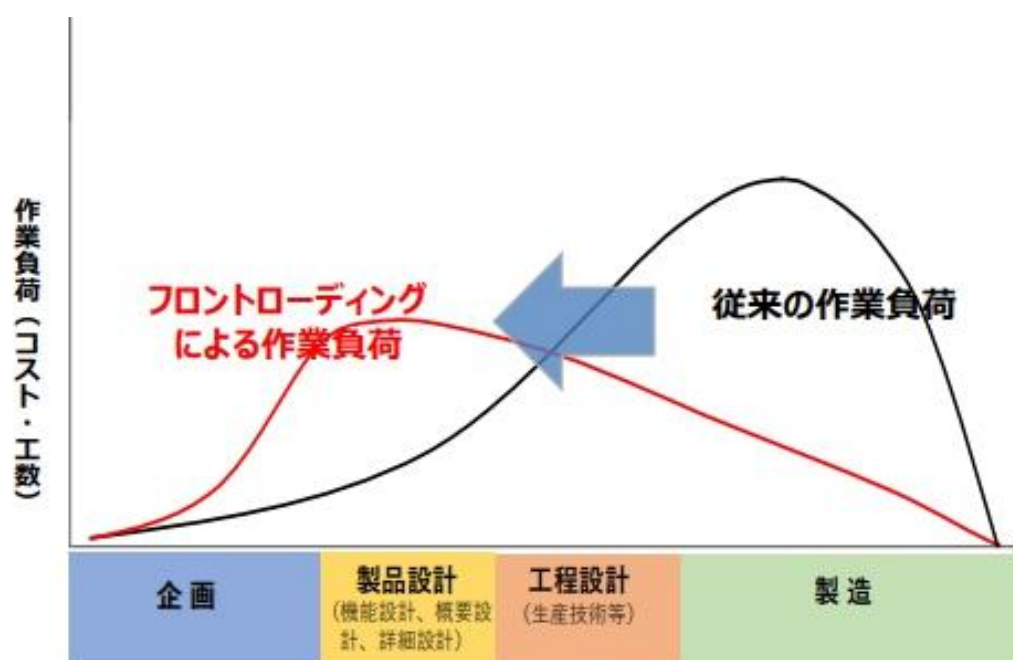
⁸⁵基本設計、詳細設計、試作など各種開発工程を同時並行的に行う事で、製品開発の効率化を目指す手法。

⁸⁶Thomke and Fujimoto(1998)は、フロントローディングについて、設計上の諸問題を製品開発により早い時期に認識し解決することによって、開発期間とコストの削減をはかる戦略と定義している。

⁸⁷高橋勇、2014 年、172 頁。

また、図 1-8 はフロントローディングに示されるように、フロントローディング手法に 3DCAD を使うことで設計段階における製品づくりに注力していくというものである。このようにコンピュータの性能向上と 3DCAD の高度化を通じて、設計プロセスに加えて、3DCAD を活用することで製品開発プロセス全体にデジタル技術が広がっていることが分かる。近年では 3DCAD で作られた 3D モデルをもとにバーチャルで設計品質を高めていく手法としてバーチャルエンジニアリングに関心が集まる。例えば、自動車の新車開発の場合、バーチャルエンジニアリングの登場により、大掛かりな実車テストを用いずに済むようになり、設計品質もまた、様々な想定のもと誰でも素早く高めていくことができる環境が整ってきた⁸⁸。

図 1-8 フロントローディングによる作業負荷の軽減



出典：経済産業省『ものづくり白書 2020 年版』。

以上の通り、3DCAD の登場と進化は製造業における技術のデジタル化に大きな影響をもたらした。こうした動向は、かつての ME 化研究では見られない事象であり、設計と製造を一体的に捉えることが技術のデジタル化を考察する上で極めて重要であり、この点からも本研究の意義は大きいと考える。

⁸⁸内田孝尚、2019 年、7 頁。

2-2 デジタルファブリケーションの登場

3DCAD の普及が、製造業における技術のデジタル化に大きな影響を及ぼしたことを前述の通りであるが、この延長に見られるのがデジタルファブリケーション⁸⁹ (Digital Fabrication、以下、DF に省略) である。DF は 3DCAD や 3D プリンタ、レーザー加工機などデジタル機器を組合せて製品加工する技術の総称を指すもので、大きく 2 つの新しい取組みとして広がっている。1 つは一般的に“ファブラボ⁹⁰”と呼ばれるものである。

DF の発想思想は企業による工業製品の生産ではなく、消費者である個人が自分のアイデアに基づく製品づくりの環境を提供するもので、それらは“ファブラボ”で作業が行われる。現在、日本を含めて世界各地にネットワークが広がっている。この取組みは 2003 年 12 月、米国の CBA⁹¹チームが、ボストンの都心部にあるサウスエンドテクノロジーセンター(SETC)に最初のファブラボを設立したことに始まった⁹²。もう 1 つは“サービスビューロー”の取組みである。サービスビューローは、3D プリンタを自社導入せず、主に工場も持たない企業から造形についての依頼を受け、有償で受託造形出力サービスを提供するサービスの総称を指すものである。現在、日本国内でサービス事業者が増えている⁹³。両者を比較すれば、前者は個人向けサービス、後者は法人向けサービスが主要な市場として考えられるが、後者のサービスビューローは、本研究の視点では技術のデジタル化が進展したことで発生する新たな受託事業として捉えることができる。詳細は第 4 章に譲るが、サービスビューローの登場について 2 つの背景がある。1 点目は第 3 章でも述べたが、コストや人材教育などの観点から、技術のデジタル化に中小製造業が対応することができず、3D データの設計および後工程の加工工程を自社でできない現象が見られること。2 点目はサービスビューローにおける受託サービスの対象となる金属製 3D プリンタの価格が高く

⁸⁹総務省『平成 28 年度版情報通信白書』は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と定義している。デジタルファブリケーションの語源について、「パーソナル・ファブリケーション」の概念を提唱した MIT の Neil Gershenfeld 教授は『How to Make Almost Anything The Digital Fabrication Revolution』(2012)において、the term “digital fabrication” refers to processes that use the computer-controlled tools that are the descendants of MITs 1952 numerically controlled mill と述べている。

⁹⁰Fabrication Laboratory”の略称。名称の通り、デジタル工作機械を備えた工作室、工房的色彩が強い。

⁹¹The Center for Bits and Atoms の略。2001 年、MIT (Massachusetts Institute of Technology) Media Lab 内に設置された。2021 年 8 月現在、Neil Gershenfeld 教授が責任者を務めている。

⁹²Neil Gershenfeld、2012 年、47 頁。

⁹³例えば、2017 年 1 月 17 日付け日刊工業新聞 5 面の連載企画「変わるモノづくり 3D プリンタの活用 (30)」によれば、国内のサービスビューロー事業者の先駆的存在である DMM.com では、2013 年から 3D プリンタによるサービスビューロー事業を始動し、記事掲載時点では、引き合いのある法人顧客は製造業、デザイン事務所、アパレルなど 400 社以上に及び、うち法人依頼は 7 割を占め、中でも製造業が最多と紹介されている。

中小製造業への普及が進んでいない点を指摘する⁹⁴。単純比較はできないが、NC 装置黎明期の 1950 年代から 60 年代にかけて、NC 装置を搭載した工作機械は高級機という位置づけで、中小製造業の技術力向上、経営への影響はほとんど見られなかった当時の状況に似ている。一方、現在、サービスを展開する国内のサービスビューローを概観すると事業運営者に中堅企業が見られ、技術のデジタル化を背景にして新たな企業間取引が生まれていることも窺える（第 4 章を参照）。以上の通り、デジタルファブリケーションは技術のデジタル化の進展により生まれた新たな現象である事を述べておきたい。

⁹⁴松下隆、2019 年、21 頁。

第3節 小括

近年、技術のデジタル化は新たな展開を見せている。IoT (Internet of Things) やインダストリー4.0 と呼ばれ、製造業に関わるあらゆる情報がインターネットを介してネットワーク化を図る取組みである。すでにドイツや米国では国を挙げて取組みが進められており、日本で活発な議論が始まった。例えば、近年では 3DCAD で作られたデータを 3D プリンタに接続して、簡単に試作品を作る環境が整備され始めた。当初は 3D プリンタの用途として、工業製品の試作品づくりや小ロットの工業製品の生産に向いていると考えられ、この点で、3D プリンタの存在は、大量生産を志向しない中小企業の現場ニーズに合致していると考えられてきた。しかし、最近では、大規模な量産品の生産に 3D プリンタを活用しようとする動きも出てきているとともに、工場や研究施設を持たない企業でも、3D で製品を作れる時代に突入した。研究・開発から設計、生産、販売に至る一連の製造業のサプライチェーンは、インターネットやクラウドコンピューティング、ビッグデータなどを通じて 1 つに統合管理されつつある。少量生産から大量生産に至るまで、デジタル化の波が製品の製造業に押し寄せる中で、本稿の研究対象である中小製造業がデジタル化にどのように取り組むべきか、重要な経営課題となっている。第 2 章以降では、デジタル技術が製造業にどのような影響を及ぼすのか、デジタル技術の特性に着眼して分析すると同時に、本稿の主張である設計と製造の関係性について事例調査を基に分析を述べることにする。さら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、事業形態別、個別企業の事例、産業事例など多面的に検証を行う。

第2章 デジタル技術の変遷に伴う需要の変化

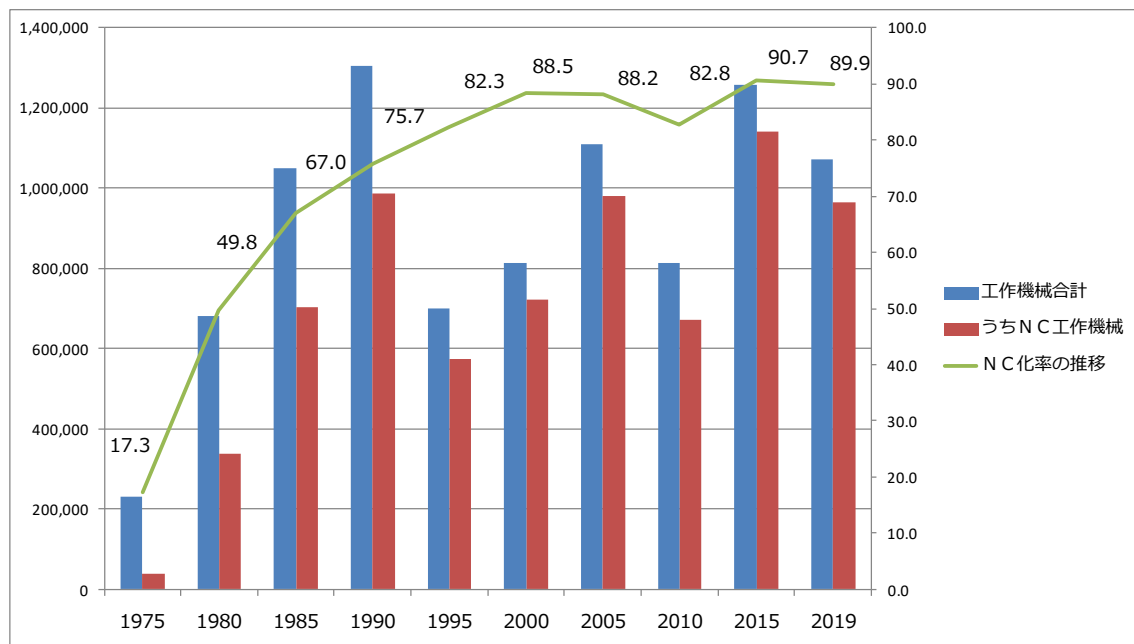
第1章では論文全体を通してテーマの中核となるデジタル技術の特性と変遷を分析した。デジタル技術の特性ごとに工業生産にどのような影響を及ぼすのか考察した。さらに、日本国内においてデジタル技術がどのように進化してきたのか、デジタル技術が誕生した1950年代からエポックメイキングごとに変遷を辿った。第2章では、技術のデジタル化が製造業に具体的にどのような影響を及ぼすのかNC工作機械と3Dプリンタに焦点を当てて分析を行う。NC工作機械と3Dプリンタの発達が工業生産にどのような変化を及ぼすのか考察することで、技術のデジタル化との相関関係を述べてみたい。

第1節 NC工作機械の普及と市場形成

第1項 工業統計から見る市場変化

第1章で述べた通り、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、高度経済成長期の1960年代以降、急速な発展、普及を見た。図2-1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年時点までは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ル化が着実に進んだことが分かる。

図2-1 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。工作機械、NC工作機械の単位は百万円。
NC化率の単位は%。

特に 1975 年以降、急激に NC 化率が上昇していることが分かる。表 2-1 は 1975 年から 1984 年まで工作機械の生産と、うち NC 工作機械の生産推移を比較したものであるが、1975 年を基準にすると 1984 年には工作機械全体では生産金額で 3.82 倍、生産台数で 1.97 倍なのに対して、NC 工作機械は生産金額で 14.82 倍、生産台数で 19.0 倍にまで拡大している。1958 年 3 月、国産初の NC フライス盤が牧野堅フライス製作所（現、牧野フライス製作所）から発売されて 20 年程度で NC 工作機械が市場を席捲しようとする状況が分かる。

表 2-1 工作機械、NC 工作機械の生産推移

	1975 (A)	1978	1980	1982	1984 (B)	B / A %
合計	2307	3655	6821	7828	8815	3.82
NC 機	398	1076	3394	4218	5899	14.82
非 NC 機	1909	2579	3427	3610	2916	1.53
合計	88	136	179	146	173	1.97
NC 機	2	7	22	24	38	19.00
非 NC 機	86	129	157	122	135	1.57

出典：日本工作機械工業会統計データ。上段の生産金額で単位は億円、下段は生産台数で単位は千台。

第 2 項 工作機械市場の変化

登場初期の NC 工作機械⁹⁵の目的は、複雑な形状の素材を容易に高精度で加工することを目的としたため、適用機種としてはフライス盤⁹⁶や中ぐり盤の販売が多かったが、その後、生産性向上を目的に NC 旋盤やマシニングセンタ⁹⁷の需要が高まっていった⁹⁸。ちなみにマシニングセンタが開発されたのは 1958 年であるが、それまではドリル加工を行うボール盤、中ぐり加工を行う中ぐり加工機、フライス加工を行うフライス加工機というように、基本的に工作機械は 1 機械で 1 機能であった。マシニングセンタは 1 台でドリル加工、中ぐり加工、フライス加工などの様々な加工を可能とするが、これらの加工を制御、統合するには NC 装置が不可欠であった⁹⁹。

原田は 1970 年代に入り、NC 旋盤の比率が飛躍的に上昇していることに着目し、用途の限られていた NC 旋盤が、1975 年頃から急速に汎用化していったのは、汎用・専用技術の相互転換で技術的学習の帰結であると指摘している。さらには、オイルショックを起

⁹⁵NC 装置を利用して、切削工具や工作物（ワーク）の位置を正確に動かしながら機械加工を行う工作機械。

⁹⁶回転する機械の先端に切削工具を取り付けて素材を加工する機械。

⁹⁷自動工具交換機能を備えた NC フライス盤。

⁹⁸北浦孝一、1986 年、92 頁。

⁹⁹鈴木信貴、2010 年、639 頁。

因とし、NC 工作機械のさらなる汎用化に加えて、要素技術レベルでの新たな汎用・専用技術の相互転換が促進されたと述べている¹⁰⁰。

表 2-2 工作機械市場の市場シェア推移

	1975		1980		1985	
工作機械	東芝機械	7.1	ヤマザキマザック	7.2	ヤマザキマザック	7.6
	ヤマザキマザック	4.5	大隈鉄工所	6.7	大隈鉄工所	6.8
	日立精機	4.4	森精機	5.2	森精機	5.4
	豊田工機	4.3	豊田工機	4.8	牧野フライス	4.8
	牧野フライス	3.9	日立精機	4.6	三菱重工業	4.3
	大隈鉄工所	3.5	東芝機械	4.6	日立精機	3.9
	池貝鉄工	3.1	牧野フライス	3.7	豊田工機	3.5
	森精機	2.4	大阪機工	3.3	東芝機械	3.4
	大阪機工	1.5	池貝鉄工	2.9	大阪機工	2.7
NC 旋盤	池貝鉄工	18.9	森精機	21	大隈鉄工所	15.9
	大隈鉄工所	10.7	大隈鉄工所	11	森精機	14.2
	ヤマザキマザック	9.2	池貝鉄工	9.7	ヤマザキマザック	12.5
	日立精機	8.7	ヤマザキマザック	6.8	日立精機	6.9
	東芝機械	7.1	日立精機	6	ミヤノ	5.3
マシニング センタ	日立精機	13.2	三井精機	11.2	ヤマザキマザック	8.2
	大阪機工	9.9	大阪機工	10	大隈鉄工所	7.3
	牧野フライス	9.1	大隈鉄工所	9.3	森精機	6.8
	安田工業	8.3	ヤマザキマザック	8.9	牧野フライス	5.7
	ヤマザキマザック	2.5	日立精機	7.6	三井精機	5.6

出典：YongdoKim、『The interfirm relationships in the Japanese machine tool industry, 1910s-1980s: the market and organizational principles』、17-18 頁を基に作成。

NC 工作機械の台頭は工作機械市場にどのような影響を与えたのであろうか。表 2-2 と表 2-3 は、NC 工作機械市場の拡大初期の市場シェアの推移を示している。表 2-2 は 1975 年、1980 年、1985 年の 3 時点で、当時の ME 機器の主力製品である工作機械、NC 旋盤、マシニングセンタを製造、販売する企業の市場シェアを比較しているが、ヤマザキマザックや森精機製作所などが工作機械市場で飛躍していることが分かる¹⁰¹。

¹⁰⁰原田勉、1998 年、98 頁。

¹⁰¹金（2016）は、1960 年代まで工作機械市場で目立たなかったヤマザキマザックは、NC 工作機械の開発を積極的に推進した。1964 年に NC 旋盤の研究開発チームを、1966 年には技術開発センターを設立しているほか、1970 年には、大型 NC 旋盤や MC の先進技術を持つ米国の工作機械メーカー 2 社と技術提携を結んだ。その結果、1970 年代前半には年

表 2-3 工作機械市場序列の変化（売上高ランキング比較）

1975 (A)			1987 (B)		B / A
1	東芝機械 (1)	156	ヤマザキマザック (2)	670	6.8
2	ヤマザキマザック	99	大隈鉄工所 (1)	614	7.8
3	日立精機	97	森精機	565	10.9
4	豊田工機 (1)	95	牧野フライス	381	4.4
5	牧野フライス	86	豊田工機 (1)	378	4.0
6	大隈鉄工所 (1)	77	日立精機	281	2.9
7	池貝鉄鋼 (1)	68	東芝機械 (1)	248	1.6
8	森精機	52	大阪機工 (1)	114	3.5
9	大阪機工 (1)	33	池貝鉄鋼 (1)	50	0.7

出典：三浦東『国際化時代に勝つ新企業戦略』日刊工業新聞社を基に作成。

注：(1) は工作機械以外の売上を除く。(2) のヤマザキマザックは 1986 年 9 月期決算。

その要因として、ヤマザキマザックと森精機製作所は、NC 旋盤やマシニングセンタを戦略機種とし量産体制を確立して生産を集中させたことが市場シェア獲得につながった。もう 1 つ、当時の中堅工作機械メーカーは、中小企業に焦点をあてた中小型機の生産に特化したことが指摘できる。半導体技術の著しい発展や石油危機後の原材料高・人件費上昇による中小企業での合理化志向の高まりなどの要因にも支えられ、中小企業の潜在ニーズの掘り起こしに成功した¹⁰²。その結果、国内外市場の拡大を図った日本の中堅工作機械メーカーは大きく企業成長を遂げた。日本メーカーの手がけた中型 NC 機は、技術的にみても産業や市場に大きな影響を与えた点からみても、イノベーションと呼んで良いであろう。そして、こうしたイノベーションを達成した結果、工作機械業界の市場秩序は大きく変化した¹⁰³。1970 年代後半になって NC 工作機械の普及が進んだもう 1 つの理由は NC 装置の低価格である。NC 装置のトップメーカー、富士通ファナック（現 FANUC）が 1976 年に発売した NC 装置は、部品点数を 60%削減し、価格は 250～300 万円程度と 1970 年当時（推定

間平均 10 種類程度の工作機械を開発し、NC 工作機械の売上を飛躍的に伸ばしていった。一方、森精機製作所は、1983 年に貿易摩擦のために緊急輸出管理制度を導入してから、工作機械のアウトサイダーであったが、アウトサイダーであるがゆえに、生産も価格も自由にでき、マシニングセンタ、NC 旋盤市場では最大級のメーカーとなった。その一方で、池貝、日立精機、東芝機械、トヨタ工機などの旧来の工作機械メーカーは、工作機械市場における支配的な地位を失った。工作機械市場の競争が激化し、各社のシェアが急激に変化したことは市場原理が機能していたことを示している。

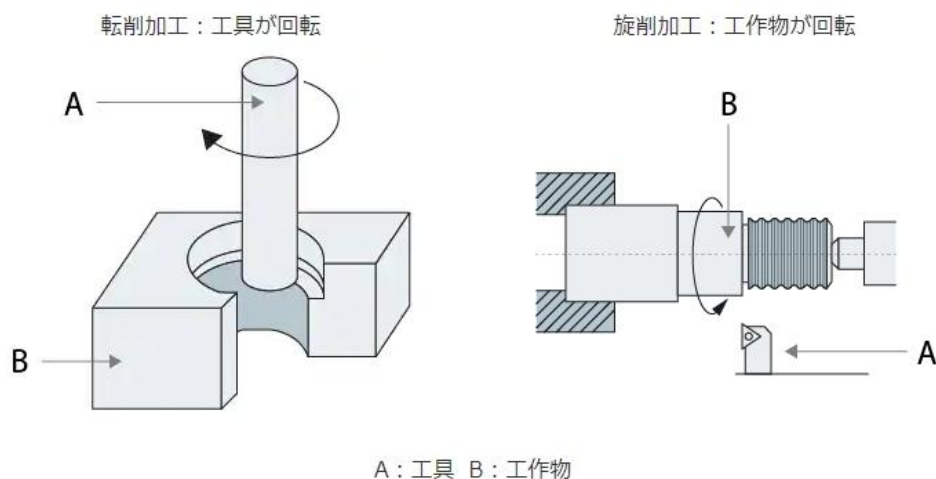
¹⁰²河崎亜洲夫、1991年、120頁。

¹⁰³原田勉、2002 年、65 頁。

600～750 万円) の 60% も安かった¹⁰⁴。また NC 装置を搭載した NC 旋盤の価格は 1970 年から 1979 年の間に 1,500 万円から 1,200 万円へと 300 万円低下し、NC 工作機械全体では 1,676 万円から 1,449 万円へと低下している¹⁰⁵。詳細は第 1 章に譲るが、小型コンピュータを内蔵した NC (CNC) が開発されたため、CNC に使用される IC が LSI 化したことによって部品点数は大幅に減少し、価格低下が進んだことが最大の要因である。

前述の通りに、ヤマザキマザックと森精機製作所は、NC 旋盤やマシニングセンタを戦略機種とし量産体制を確立して生産を集中させたことが市場シェア獲得につながったと指摘したが何故なのか？ 1 つは日本国内に NC 旋盤やマシニングセンタを活用する潜在的な市場があったためである。旋盤は機械に固定されたバイトと呼ばれる工具で切削加工する工作機械 (図 2-2) で、回転する工作物 (金属材料) に切削工具を当てて、不要な部分を削り取りながら目的の形状に仕上げていく金属加工の加工工法では最も一般的な技術である¹⁰⁶。

図 2-2 旋削加工と転削加工の違い 右側が旋盤加工の工法



出典：キーエンスHP、切削加工の種類より引用。

一方、マシニングセンタは複合加工機と呼ばれ、旋削機としての旋盤と主軸回転型工作機械（フライス盤、ボール盤、中ぐり盤など）の機能を備えた高性能の工作機械である。多種類の加工を 1 台で行う機械で、フライス盤、中ぐり盤等を統合した複合ミリングマシンである¹⁰⁷。1 台の機械で複数の作業をこなせる利便性に加えて、作業効率性や小所帯の中小

¹⁰⁴河崎亜洲夫、1991 年、113 頁。

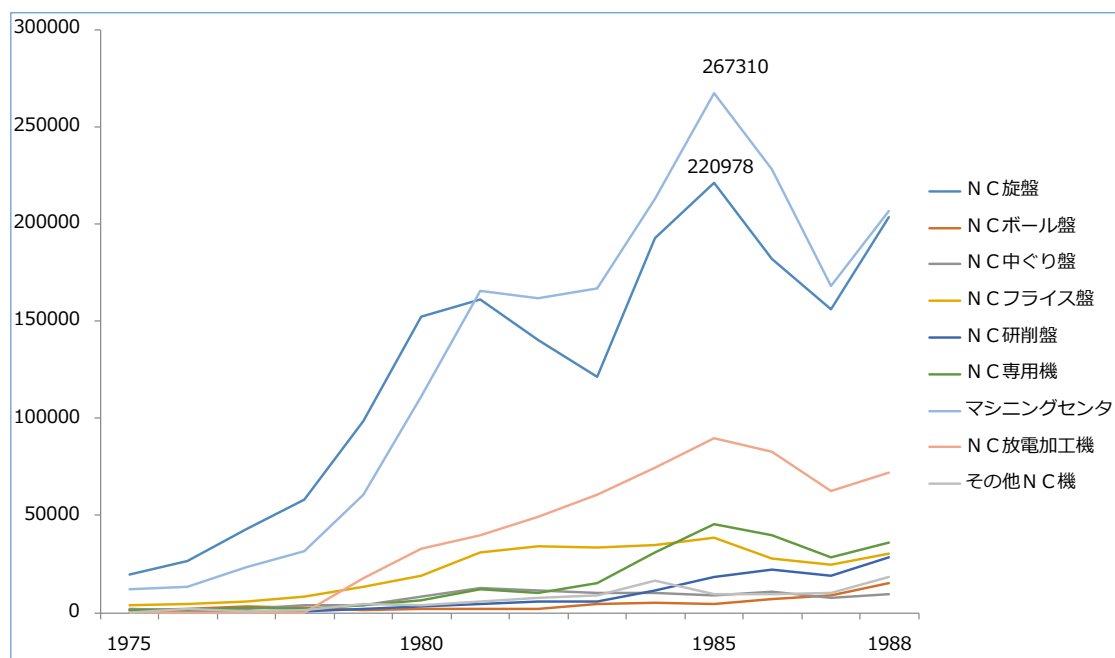
¹⁰⁵中央大学企業研究所編、1989 年、4 頁。

¹⁰⁶日刊工業新聞、2016 年 12 月 22 日付、「別刷特集 旋盤加工 安全作業のポイント」では、旋盤は主に円柱や円筒形状の工作物を加工する機械であり、機械加工の最初の工程から仕上げの工程に至るまで、多くの加工現場で使われている。旋盤加工はフライス加工などと比べて加工量が大きく、加工速度が速いといった特徴があると記載されている。

¹⁰⁷鈴木信貴、2010 年、636 頁。

製造業で使用する場合、用途ごとに専用機種を備える必要がなく、省スペース化にも適していた。こうしたマシニングセンタの開発、生産にヤマザキマザックは業界の先導役を果たしてきた¹⁰⁸。図2-3は、バブル経済が崩壊する直前の1988年までのNC工作機械の生産状況を示したものであるが、マシニングセンタとNC旋盤の2機種が他のNC工作機械よりも圧倒的に生産量が多いことが分かる。

図2-3 NC工作機械の機種別の生産推移



出典：機械統計年報各年データを基に作成。単位：百万円。

1980年までNC旋盤が金属工作機械全体の中で最も生産金額でトップであったが、1981年以降はマシニングセンタがNC旋盤を大きく上回り、金属工作機械の最大機種となっていることが分かる。NC旋盤とマシニングセンタの生産数量が伸びたのは、それまでの工作機械はそれぞれの作業に合わせて細分形と工程単一形であったものが、機電一体化した全く新しい設計に基づく新しいコンセプトの出現により、総合形と工程集約形に180度転換が行われたからで、研削や歯切りなど特定作業を除けば、NC旋盤とマシニングセンタで機械加工のほとんどが足りる状態になったことが理由として大きい¹⁰⁹。NC旋盤の需要が多いもう1つの理由は作業で丸物加工が多いからである。丸物加工品は、自動車産業をはじめ、精密機器、産業機器など幅広い産業で利用されている¹¹⁰。

¹⁰⁸長尾克子、2002年、334頁。

¹⁰⁹森野勝好、1992年、56頁。

¹¹⁰経済産業省の「工作機械長期動向分析」では、1987年時点で産業別工作機械設備に占める専用機の比率では、自転車が24.7%で最も高く、自動車(18.6%)、一般機械(8.2%)

表 2-4 工作機械に関する主要国の輸出入額と輸出特化係数（2018 年時点）

	輸出	輸入	収支	輸出特化係数
ドイツ	9,350	3,307	6,043	0.48
日本	8,817	906	7,911	0.81
台湾	3,341	897	2,444	0.58
スイス	3,251	618	2,633	0.68
中国	2,943	8,919	-5,976	-0.5
イタリア	2,498	1,745	753	0.18
アメリカ	2,377	5,259	-2,882	-0.38
韓国	2,302	1,124	1,077	0.34
イギリス	552	740	-188	-0.15
フランス	432	1,046	-614	-0.42
インド	128	1,583	-1,455	-0.85

出典：日本工作機械工業会「工作機械統計要覧 2019」（2019）を基に作成。数値は貿易統計ベース。1 ドル＝110.42 円で換算。単位：億円。

NC 工作機械が、金属加工の作業で自動化や省力化に貢献しただけでなく、多種多様で複雑な加工をプログラムに基づき自動で行うという技術のデジタル化で大きな貢献をしていると言える。現在、国内で生産されている工作機械の 9 割が NC 工作機械であることを考えれば、中小製造業にとっても技術のデジタル化による恩恵は十分、受けていると判断できるだろう。NC 工作機械の普及に伴う ME 化は製造業全般の生産水準、品質水準を引き上げることに成功したもの、一方では技術の平準化¹¹¹が危惧されていた¹¹²。

以上の通り、マシニングセンタや NC 旋盤を牽引にして、日本の工作機械メーカーは経済成長と比例して国際競争力を持つようになっていった。戦後、壊滅状態に陥った日本の

と続いている。輸送機械に占める比率が高く、NC 旋盤の生産量を牽引する 1 つの要因になったと分析できる。

¹¹¹本章では NC 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を示している。

¹¹²全国中小企業団体中央会が 1984 年に行った「中小企業におけるマイクロエレクトロニクス導入の実態と方向」では、マイクロエレクトロニクス化の進展は、ハード面の技術水準を平準化してくる。使用している IC も同一水準の汎用 IC であり、情報化社会によってメカニック部分にも大きな差は見られなくなってくる。その分、周辺技術や製品の企画・開発力、個々のプログラミング能力などソフト面での技術力が重要な要素となってくるが、部品加工を中心とする中小工業には、ますます独自性を発揮する余地が狭められてきていると指摘している。

工作機械産業は、1982年に工作機械の生産量でアメリカを抜き、以後、2009年まで生産量世界1位の座を維持し続けた。技術面においても、日本の工作機械は高い評価を得ており、その発展は、自動車、電子機器など日本の製造業の躍進を支える原動力ともなった¹¹³。

表2-4は工作機械の国際競争力を比較する指標として輸出金額と輸出特化係数¹¹⁴を示したものである。輸出金額が多いほど製品の国際競争力が高いと考えられる。また、国により工作機械の市場規模などが異なり、そうした事が輸出入額の規模の差に反映されるため、輸出特化係数でも合わせて示す。2018年時点の統計では、日本の工作機械輸出金額はドイツに次いで世界第2位であり、輸出特化係数では世界1位となっている。

第3項 工作機械に技術のデジタル化が与えた影響

工作機械は日本の製造を代表する産業へと発展したが、これは機械のNC化による技術のデジタル化の貢献が大きい。原田（2002）は日本でNC化が成功した理由について次の5点を挙げている¹¹⁵。①NC装置メーカーのファナックの果たした役割（仕様統一・低価格化）、②中小企業をターゲットにしたNC機の開発、③異業種間での協力体制、④多品種少量生産への要求、⑤柔軟な職制・作業組織である。また Carlsson（1989）¹¹⁶は、工作機械の日米比較でアメリカでは、少量・高精度・高汎用性のマシンが比較的多く求められたのに対して、日本では競争圧力の高まりを背景にして、生産性が高く、信頼性の高い標準機を求めるニーズが強かったと指摘する。さらに工作機械のモジュール化が進展すると、多くの日本の工作機械メーカーは、7割以上の部品を外部から調達し、組立てを行うアセンブリメーカーになっていったとし、そうした事が日本の工作機械メーカーの国際競争力を高めたと分析している¹¹⁷。

もう1つ技術のデジタル化の観点で付け加えなければならないのは複合加工機の開発、発展に際してもNC装置の存在が重要であった点である。1980年代に入って市場で躍進を続けるヤマザキマザックは独自のNC装置「マザトロール」を開発している。前述の通り、マシニングセンタは複数の加工作業を1台でこなす装置であるが、それを自動制御す

¹¹³鈴木信貴、2010年、641頁。

¹¹⁴特定品目の輸出額から輸入額を差し引いた純輸出額を、その品目の輸出額と輸入額を足した総貿易額で割った数値。通常、プラス1からマイナス1の範囲内にあり、プラス1に近づくほど外国に対する輸出競争力が強く、逆にマイナス1に近づくほど外国に対する輸出競争力が弱い。

¹¹⁵原田勉、2002年、82頁。

¹¹⁶Carlsson、1989年、254頁。

¹¹⁷Carlsson(1989)は、日本の工作機械メーカーが国際競争力を付けた点について以下の様に述べている。As indicated already, the leading Japanese machine tool firms are large by international standards. When it is also taken into consideration that Japanese machine tool firms are basically assemblers (buying over 70% of their components from outside specialized firms) (Sprow, 1985, p. 48), it becomes apparent that by measuring firm size in terms of employment, we are underestimating the size difference between Japanese and Western firms.

る場合、高度な NC 装置が求められる。当時、ヤマザキマザックの NC 装置コードは、旋盤系とマシニング系で異なっていた。また、NC 装置メーカーであるファナックがプログラムの開発もほぼ独占し、安易に開発ができる状態ではなく、複合加工機の開発に当たって、旋盤系とマシニング系のコードを統一させる必要が生じた。こうした事情から 1981 年に、マザックが対話型 NC 装置「マザトロール」を開発した。この開発がその後の複合加工機の開発に大きなメリットをもたらした¹¹⁸。工作機械業界はパソコンに代表されるエレクトロニクス産業同様に、NC 装置のモジュール化が進んだことで収益が悪化する時期もあったが、国産の NC 装置を装着した信頼性の高い工作機械メーカーは、産業界における生産の合理化ニーズの需要の高さや海外市場における NC 工作機械の需要など複合的な理由から、市場の拡大を続けてきた。

¹¹⁸鈴木信貴、2010 年、653 頁。

第2節 デジタルファブリケーションの拡がり

第1項 3Dプリンタの普及とビジネスモデルの変化

表 2-5 AM 技術の種類

造形方式名称	特徴	メリット	デメリット	主な材料
材料押出法 (熱溶解積層法)	造形材料をノズルから押し出すことで立体モデルを造形する	①比較的強度がある ②価格が安い	①層の断層が目立ちやすい	ABS樹脂、PLA樹脂
光造形法 (液槽光重合)	光硬化性樹脂にレーザーを当てて一層ずつ硬化させて積層する	①表面の仕上がりが滑らか	①太陽光での劣化が早い ②温度に弱い	エポキシ系樹脂
材料噴射法 (インクジェット方式)	光硬化性樹脂やワックスなどをインクジェットノズルから噴き出して硬化させ積層させる	①材料素材が多い ②材料同士の混合が可能 ③表面の仕上がりが滑らか	①太陽光での劣化が起きやすい ②サポート材が必要	アクリル樹脂、ABSライク、PPライク
結材材噴射法 (インクジェット方式)	粉末材料に対して、材料を固めるための接着剤（バインダ）を噴射して固める	①フルカラー造形が可能 ②サポート材が不要	①仕上がりが粗い	石膏、デンプン
粉末床熔融結合法	レーザーや電子ビームを粉末材料に照射して断面形状を熔融、結合させる	①耐久性がある ②金属材料が使用できる ③サポート材が不要	①仕上がりが粗い	ナイロン樹脂、セラミック、金属
シート積層法	シート状の材料を断面形状で切断し、隣接する層を接合しながら積層させる	①比較的安価で高精度	①廃棄物が大量発生する場合がある ②紙の場合、吸湿による寸法変化が起きる	紙、樹脂（PVC）、金属
指向性エネルギー堆積法	レーザーを照射した位置に、粉末材料を吹き付けることで肉盛溶接する技術をベースにする	①耐久性に優れている ②金属材料が使用できる ③サポート材が不要	①仕上がりが粗い	金属粉末

出典：各種データを基に作成。

1990 年代に入ると技術のデジタル化の流れは生産現場から設計プロセスのデジタル化へと進展する。設計と生産がデジタル技術で結ばれ、デジタルデータと造形物を直接結び付けるデジタルファブリケーション技術¹¹⁹が登場したからだ。その代表的技術が AM 技術である。AM 技術の正式名称である“Additive Manufacturing”は 2009 年に ASTM¹²⁰で、その名称と 7 種類の方式分類（表 2-5）が統一されている。このように AM 技術は単一の技術ではなく、技術的な成熟度が異なる多数の異なる技術が存在し、それぞれが異なる材料を使用して異なる品質の出力を提供している¹²¹。AM 技術では設計、材料、生産が技術向上の 3 要素として重要なポイントであるという研究もある¹²²。従来の工作機械を使って行われる切削加工とは異なり、3DCAD で作成した 3D データをコンピュータから直接、

¹¹⁹デジタルファブリケーション技術とは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を指す。

¹²⁰正式名称は American Society for Testing and Materials。旧名称を米国材料試験協会とする世界最大の国際標準化・規格設定機関。

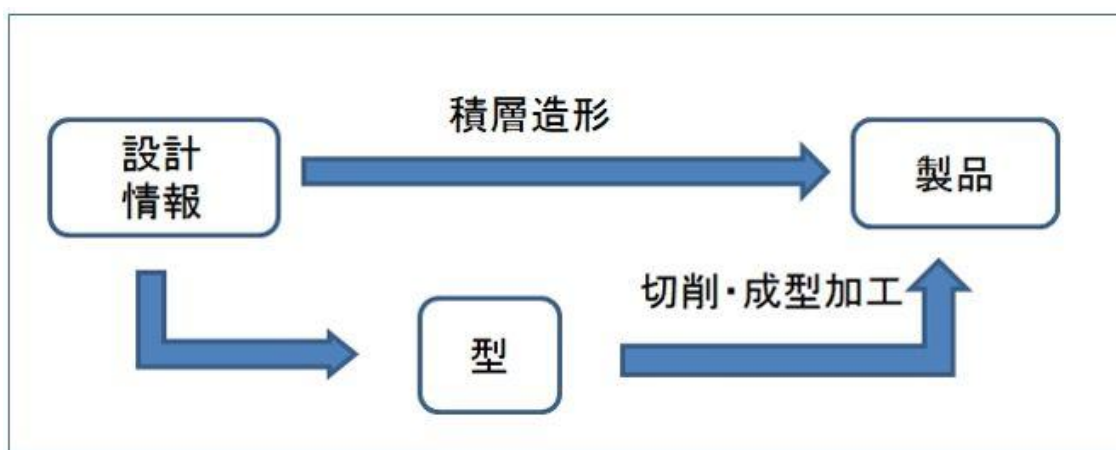
¹²¹Simon Ford, Letizia Mortara, Tim Minshall、2015 年、2 頁。

¹²²*Additive Manufacturing: A Framework for Implementation* では AM 技術についてデザイン性では自由度が高くなったとする反面、使われる材料素材や生産方法については既存の加工方法とは異なり新たなアプローチに向けた教育が重要であると説いている。

3D プリンタに送り、材料となる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。

データから直接的に製品を作る（図 2-4）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、かつ設計から生産に至るトータルの生産時間を短縮できる特徴がある。そのため、従来の大量生産方式に比べて経済的に魅力的な、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¹²³。

図 2-4 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。

また、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 2-5）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¹²⁴。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¹²⁵。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¹²⁶、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。この新たな製造方法は、1981 年に名古屋市工業研究所の小玉秀男氏が世界初の光造形理論を発表したことに始まる日本発の技術である。光造形とは光硬化樹脂と呼ばれる樹脂に 紫外線を当てて樹脂を固めて造形する手法で、

¹²³Simon Ford, Letizia Mortara, Tim Minshall、2015 年、2 頁

¹²⁴筆者論文「医療機器における AM 技術の普及—中小製造業を事例にして—」『産業学会研究年報』No36、2021 年 3 月より引用。

¹²⁵R. Phaal, E. O'Sullivan, M. Routley, S. Ford and D. Probert（2010）は、新たな産業創発の過程では、市場（需要側）と技術（供給側）の力と事象の相互作用が、共進化のプロセスとして、産業勃興の重要な推進力であると述べている。

¹²⁶日経ビジネス（2019）6 月 3 日号、88 頁参照。ドイツの金属プリンタメーカー、EOS（エレクトロオプティカルシステムズ）社は、2021 年に従来（2018 年実績対比）の 10 倍の生産性を持つ 3D プリンタを実用化させると発表。

1987 年、この技術手法に基づいて米国の 3D システムズ社¹²⁷が世界初の光造形機実用機を発表して 3D プリンタの市場が立ち上がった。

図 2-5 切削加工と比較した AM 技術の優位性、劣位性

優位性	
①金型を不要とし設計データから直接、製品を製作できる。そのため、アイデアがあれば容易に試作品の製作が可能	
②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	
③切削加工と比較して無駄になる材料が少ない	
劣位性	
①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	
②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	
③切削加工と比較して材料費が高い	

出典：各種データを基に作成。

翌 1988 年に同社が光造形法の商用機「SLA」を発売した。日本でも同年、三菱商事（後のシーメット株式会社）が国産の積層造形機として第 1 号となる「SOUP」を、翌年には JSR（後の株式会社ディーメック）がソニーの開発した「SCS」を販売開始した。その後、粉末樹脂を用いる粉末積層法や樹脂をフィラメント状（糸状）にして熔融させながら造形する熔融樹脂堆積法、紙やフィルムを積層する薄板積層法など多くの方法が実用化された¹²⁸。1990 年代以降、国内の製造業でも積層造形機の名称で海外製 3D プリンタを導入するケースは見られたが、当時、1 台数千万円という価格の高さと技術レベルのバランスから、導入は大手製造業など一部に留まっていた。本格的な普及が進んだのは 2010 年以降だ。

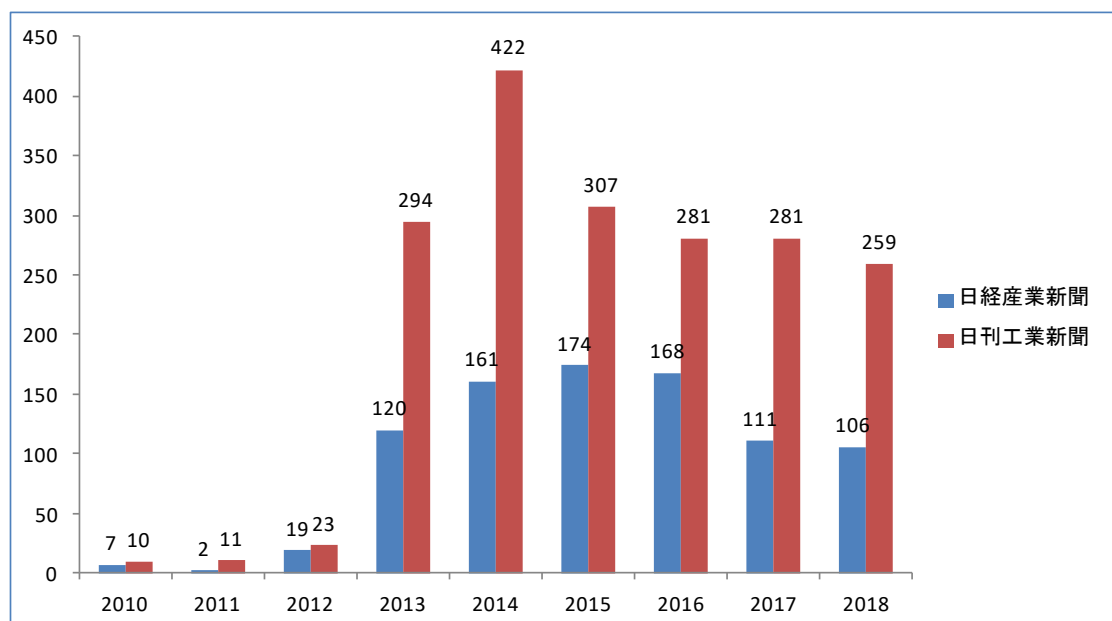
2009 年に米国の 3D プリンタメーカー、ストラタシス社が所有する熱溶解積層法（ノズルから樹脂を噴出して固める手法）の特許が失効したことや、その後材料に関する特許が切れたことで、使用できる材料の選択肢が広がり、また、製品開発コストが下がったことから、3D プリンタの市場が急速に拡大し始めた¹²⁹。図 2-6 は本格的な普及が始まった 2010 年以降に日本の代表的な産業紙 2 紙に取上げられた 3D プリンタに関する記事の推移をグラフで示した。2013 年に入って掲載記事数が急増しているが、これは 2013 年 2 月 12 日に米国のオバマ大統領（当時）が一般教書演説で、積層造形法を「3D プリンタ」と表現したことで、世界的に認知度が高まったことも背景の 1 つにある。その後、「3D プリンタ」に関する掲載件数は横ばいを見せているが、この間、AM 技術は進化を続けている。

¹²⁷米国サウスカロライナ州ロックヒルに本社を置く。創業者であるチャック・ハル氏により設立された世界初の 3D プリンタメーカー。

¹²⁸田上英二郎、2006 年、256 頁。

¹²⁹『ぶぎんレポート』2018 年 7 月号、先端産業レポートⅡ「第 1 回 3D プリンタ」。

図 2-6 「3D プリンタ」をキーワードに産業 2 紙に記事化された件数の推移



注：件数は日経テレコンを使って検索。各年は 1 月 1 日から 12 月 31 日の期間で検索、但し 2018 年は 1 月 1 日～12 月 19 日までの期間で集計。

ME 化に代表される通り、製造業の技術のデジタル化は NC 工作機械や産業用ロボットなどの製造機器が対象であった。しかし AM 技術が登場し、関連する 3D プリンタ製品が相次ぎ登場したこと、使われる材料開発が進んだことを理由に急速な価格低下が起きている。本稿でも第 4 章、第 6 章で紹介しているが、3D プリンタの普及が進んだことで中小製造業でも利用するケースが広がっている。

技術のデジタル化が新たな技術へと波及する事例として注目されるが、本稿のテーマである技術のデジタル化が中小製造業に及ぼす影響について考慮しなければならない点がある。それは NC 工作機械（切削加工）と 3D プリンタ（積層造形）を組合せたハイブリッド機種の開発動向である。欧米の金属 3D プリンタが AM 機能に特化した単機能機なのに対して、国内の工作機械メーカーは「切削+AM」のハイブリッド機が主流になろうとし、工作機械メーカー各社がハイブリッド機種の開発を進めている¹³⁰。この背景には AM 技術の課題である造形精度を補うため、切削加工を加えるという発想がある¹³¹。国内の工作機械メーカーも新たなデジタル化技術である AM 技術に着目しており、今後、ハイブリッド機の需要が高まることが予想される¹³²。

¹³⁰ 松浦機械製作所では、金属粉末を材料として用いるレーザ焼結積層と切削加工を同一装置内で行う金属光造形複合加工方法に取り組んでいる。これは、積層造形法の 1 つである「金属光造形法」と松浦機械製作所の「高速・高精度切削加工」技術を融合させたハイブリッド加工方法。

¹³¹ 『日刊工業新聞』2018 年 11 月 1 日付。

¹³² 『日刊工業新聞』2016 年 10 月 24 日付け「JIMTOF2016（1）オークマ社長・花木義

第2項 技術のデジタル化が生産活動に与える影響

前述の通り、切削加工と積層造形を1台の装置に組込んだハイブリッド機種と呼ばれる新たな工作機械が今後、金属加工分野での普及が予想される。この結果、技術のデジタル化が新たな段階へと進むことが考えられる。それまで切削加工を中心としていた製造業の現場で、切削加工では難易度の高い加工や一品物の加工については3Dプリンタを活用するという用途に応じた使い分けが製造業の現場に生まれていたが、ハイブリッド機種が普及すれば1台の機種で積層造形と切削の2つの役割を果たすことが可能になる¹³³。複数の専門作業を1台のマシンに集約する考え方はかつてのマシニングセンタの開発思想に似ているが、そうした考えに基づく製品の普及が進んだ時、何が起きるのか。中小製造業への影響について、プラス面、マイナス面について以下に著者の考えを述べる。

『考えられるプラス効果』

試作品の製造、少量多品種を中心に手掛ける受託加工型事業者にとって1台の機械を導入することで、従来以上に受注機会の拡大が見込まれる可能性がある。何故ならば、受託事業者のビジネスでは、長期におよぶ企業間取引が一般的であり、既存の取引先から新たな発注が発生する可能性が見込まれるからだ。また、受託事業者は受注製品ばかりではなく、独自のアイデアからサンプルとなる試作品を取引先企業へ提案する活動や、メーカー機能を持つ事（または強化）も可能になる。

『考えられるマイナス効果』

それまで試作品や少量多品種製品を外注していた企業がハイブリッド機種を導入することで自ら内製化を進め、その結果、受託加工型事業者にとってビジネス機会の損失になる恐れが考えられる。事実、3Dプリンタは、コンパクトで広いスペースを必要とせず、ワン・プロセスで製品化でき、熟練労働は3次元データ作成以外では必要ない。こうした特性は、企業間分業関係に革命の変革をもたらし、幅広い分野で外注から内製への転換が進

鷹氏『『スマート工場』前面に』では、AM技術の今後について、「（日本は）AM単体の機械は米国に比べて少ないが、日本メーカーの特徴として、切削加工と新加工法を組み合わせたハイブリッドマシンが増えるだろう。AMはレーザーの技術を活用しているが、それをもっとうまく使って、複合加工の度合いを深めた機械が生まれるのではないかと発言している。また、『日経ものづくり』2019-12月号、「日欧大手、デジタルと自動化にまい進 欧州工作機械見本市「EMO2019」報告」の中で、DMG森精機の森雅彦氏は「工作機械は10年ごとに（技術的な）大変革が起きる」とした上で、「今後10年（2020年代）は、自動化とアディティブマニュファクチャリング（AM）、プロセスイノベーションの技術革新が起きる」と発言している。

¹³³例えば、Barry Berman（2012）は、3Dプリンタに関連した金属アプリケーションの廃棄物は、機械加工／減算技術と比較して40%削減され、さらに、3Dプリンタでは、廃棄物の95～98%をリサイクルすることができると述べている。

展すると思われるという指摘もある¹³⁴。また、ハイブリッド機種は金属材料を加工する機種で、現状、使われる金属材料や機種自体の高額な価格も普及の足かせになっている¹³⁵。そのため、現状では中小製造業が容易に設備投資できる環境にはない。近年、国内では金属製 3D プリンタによる受託加工を手掛けるサービスビューローと呼ばれる事業者が登場し、現在、国内で 20 社程度活動を行っているが、現時点では比較的中堅規模の事業者であり、町工場と呼ばれる家族経営による中小製造業と異なる。第 4 章のアンケート調査でも明らかなように、現在、3D プリンタを導入する中小製造業では、業務用製品の価格が数十万円から数百万円規模の樹脂製 3D プリンタを購入するケースが圧倒的に多い。

また、3D プリンタは、高速化や高精度化の要求が常につきまとう。特に高精度化については、材料と機構メカニズム、ソフトウェア制御の 3 つが揃ってはじめて実現可能となる点で各分野の専門家の協力が不可欠な技術である¹³⁶。現状のハイブリッド機種は 3D プリンタで加工する製品精度が工作機械に比べて荒く、その精度を補う目的で複合化している。3D プリンタの生産スピードや精度が向上した場合、複合機の必要性はなくなる可能性も考えられる。今後、技術の推移次第では、中小製造業に及ぼす影響が大きく変化するかもしれない。

¹³⁴港徹雄、2015 年、2 頁。

¹³⁵松下（2019）によれば産業用金属 3D プリンタに使用する各種金属粉末材料は、総じて一般に販売されている展伸材のそれよりも高く、加えて、メーカーの指定金属粉末材料は一般的な金属粉末材料より高価であると指摘している。併せて、3D プリンタ装置本体価格についても、EOSM290 を事例に稼働のために必要な付帯装置を含めて一式で約 1 億円の価格を挙げている。

¹³⁶檜原弘之、2015 年、384 頁。

第 3 章 技術のデジタル化が製造業に及ぼす影響

本章では、技術のデジタル化が製造業に及ぼす影響について分析する。前述の通り、技術のデジタル化の特性は製造業にプラス効果とマイナス効果をもたらすが、本章では技術の平準化¹³⁷に着目する。技術の平準化については、第 1 章でも触れたが、本章ではそのマイナス効果に重点を置いて分析を行う。何故ならば、従来、技術のデジタル化についてはプラス効果を強調する先行研究が多く、マイナス効果が製造業にどのような影響を及ぼすのか分析する研究が少ないからである。技術の平準化は、企業が持つ技術力や製造に関する経験、ノウハウといった経営の根幹を形骸化してしまう危険性があり、本章では先行研究を踏まえて分析する。その上で、技術の平準化が製造業に実際にどのような影響を及ぼすのかを 3DCAD に関するアンケート調査結果を踏まえて考察する。

第 1 節 技術の平準化

第 1 項 技術の平準化の発生

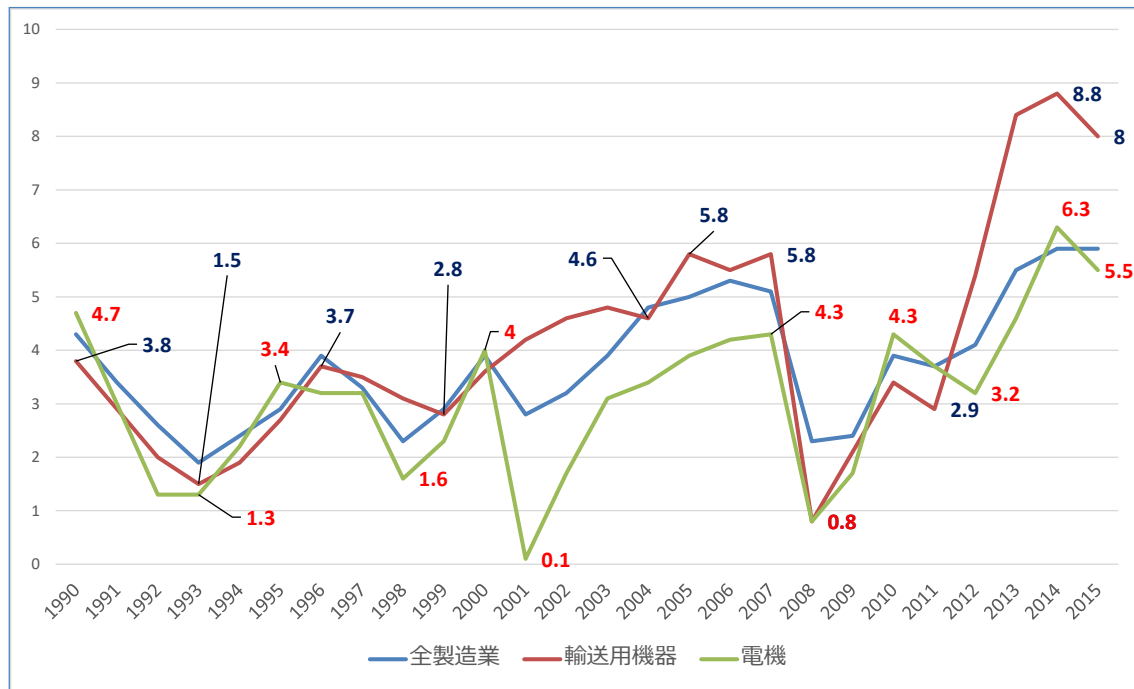
本稿では、技術の平準化を「企業が製品¹³⁸を生産する際、類似品を生産する企業との間で完成した製品の品質レベルに技術的な差異が見られなくなる状態」と定義する。製造業では製品を加工する際、多くの場合には切削加工を行うが、切削加工に使用する工作機械の多くには NC 装置が装着されている。技能者、技術者の経験に基づいて使用される汎用工作機械とは異なり、NC 装置を装着した NC 工作機械をマニュアルに従い適切に使用すれば、操作者の熟練度に左右されずに一定程度の加工品質が保証される。

あらかじめ NC 加工用にプログラム化されたデータを入力すれば、適切な作業動作手順を内蔵した情報処理回路に従って加工を行う。このため、異なる企業が NC 工作機械を使用して同一の製品をマニュアルに従い加工すれば技術的な差異が見られなくなる。これが技術の平準化である。NC 工作機械と同様にコンピュータプログラムを制御して駆動する産業用ロボットにも同様の現象が起きる。技術の平準化が起きる製品では時間の経過と共に企業の技術レベルを同質化させてしまう。すると、企業における製品競争の軸足は、機能や付加価値といった質的な競争から、コストやスピードなど量的な競争へと移る。この競争は、地域性を考慮しないために国境を越えて企業を巻き込み、企業間競争はグローバルに展開されるようになる。また、技術の平準化では、技術水準が下位の企業や異業種からの市場参入が容易に起きる現象が見られる。図 3-1 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。

¹³⁷本章では NC 工作機械を使って加工された製品の品質が平準化するユーザの立場で起きる現象を概念として示す。

¹³⁸製品とは最終製品、部品など半加工品などの総称を指す。

図 3-1 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 単位は%

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¹³⁹。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。

第 2 項 事例から見た技術の平準化の影響

次に技術の平準化の影響を受けた製品事例として、パソコンと NC 工作機械を示す。パソコンは、CPU¹⁴⁰やハードディスクなど、ほとんどのデバイスが業界標準に準じており¹⁴¹、

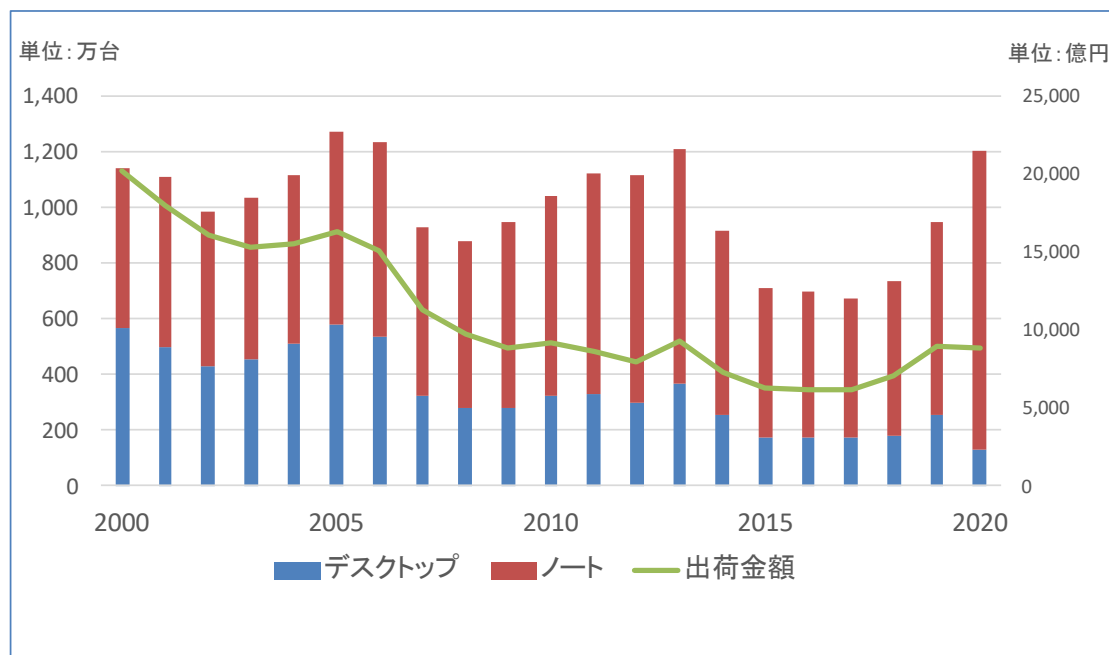
¹³⁹全自動変速機は、自動車のエンジン回転数や速度を調節するための機器で、1939年に米国ゼネラルモーターズ社が全自動変速機「ハイドラマチック」を開発、市販車に搭載したのが世界初とされている

¹⁴⁰Central Processing Unit の略、中央演算処理装置と訳される。

¹⁴¹1981年にIBMが発表したIBM-PC。PC本体は最小限度の部品しか装備しない代わりに、拡張スロットを設け、ビデオカードやシリアル・ポートまで外部で作ることを前提にしたオープン・アーキテクチャが採られた。システムの中核となるOSとCPUを外注し、その

それらのデバイスを組み合わせれば、求められる機能を実現できる¹⁴²。

図 3-2 パソコン製品の国内出荷実績の推移



出典：社団法人電子情報技術産業協会（JEITA）統計を基に作成。

表 3-1 パソコン出荷台数、出荷金額及び平均単価(2000 年、2019 年、2020 年)

	2000 (A)	2019(B)	2020 (C)	B / A	C / A
デスクトップ	565	257	130	▼54.6	▼77.0
ノート	576	690	1,077	1.19	1.86
累計	1,141	947	1,208	▼17.1	1.05
出荷金額	20,233	8,926	8,862	▼55.9	▼56.3
平均単価	17.7	9.4	7.3		

単位:出荷台数は万台、出荷金額は億円、平均単価は万円。

出典：社団法人電子情報技術産業協会（JEITA）統計を基に作成。

図 3-2 は 2000 年から、2020 年まで国内におけるパソコンの出荷台数の推移を表したものである。この 20 年間でパソコンの出荷台数は変動しながら逡減しているが、出荷金額はほぼ一貫して右肩下がりとなっている。この図と表 3-1 を照合してみると、2019 年は

仕様が公開され、BIOS さえあれば、本体のクローンは誰でも作れるようになった。

¹⁴²延岡健太郎・伊藤宗彦・森田弘一、2006 年、20 頁。

2000 年より出荷台数が 17.1%下がっている。一方、出荷金額ベースで見ると、対 2019 年比較で出荷金額は 55.9%下がり、対 2020 年比でも 56.3%下がっている。その結果、パソコンの平均単価は 2000 年の 17.7 万円から 2020 年には 7.3 万円にまで下がっている。

一般的に工業製品は、生産数量が増えることで製造単価が下がり、それが販売価格に反映される。パソコンでは、さらに部品が標準化されることで、企業間競争が激化して次第に収益が取りにくい製品になっている。その結果、日本メーカーは相次いでパソコン事業から撤退（表 3-2）した。

表 3-2 10 年単位で見た国内パソコン出荷台数シェア（上位 5 社）

	1990	2000	2010	2020
1	NEC (51.0)	NEC (21.7)	NEC (19.3)	NECレノボ (34.6)
2	富士通 (12.7)	富士通 (20.4)	富士通 (19.0)	日本HP (16.1)
3	東芝 (12.5)	日本IBM (9.8)	東芝 (11.2)	デル (14.5)
4	セイコーエプソン (10.0)	ソニー (8.8)	デル (9.7)	富士通 (12.1)
5	日本IBM (7.0)	東芝 (6.2)	HP (9.6)	Dynabook (6.1)

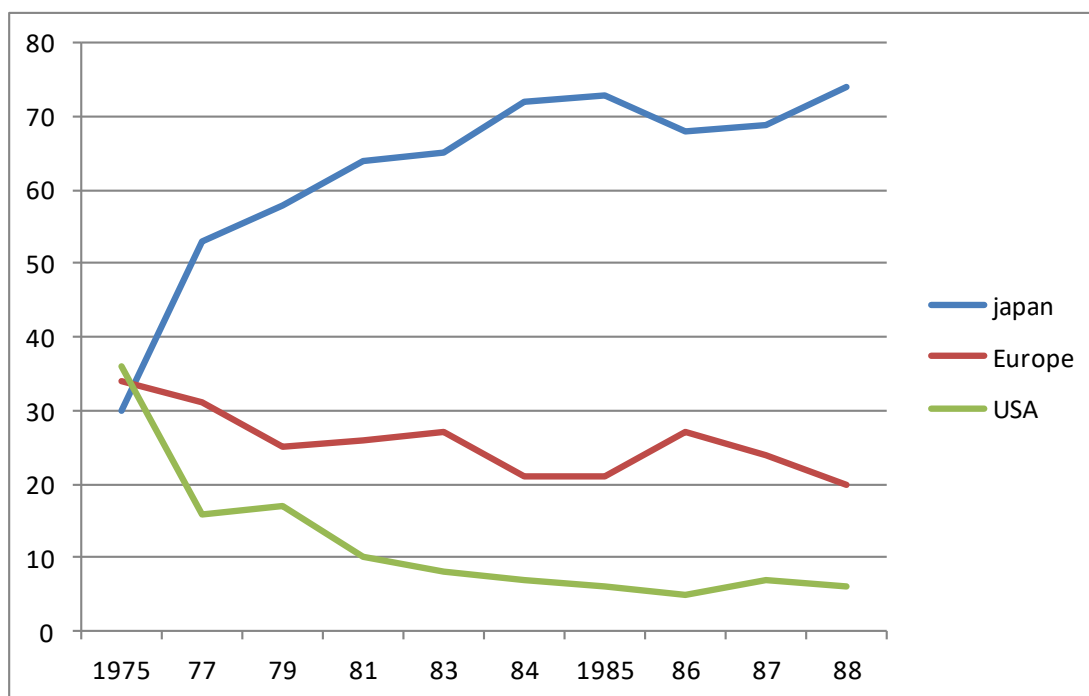
出典：MM 総研調査データを基に作成。

一方、パソコンとは対照的な事例が NC 工作機械である。パソコンが構成部品が標準化したことで価格競争が激化し、日本企業の競争力が低下していったのとは対照的に、NC 工作機械も機械性能の中核を担う NC 装置の標準化が進んだが、日本は 1982 年から 2008 年まで 27 年間、工作機械生産で世界一となった。NC 工作機械は、NC (numerical control machining、数値制御) 装置¹⁴³を装着した機械のことであるが、NC 装置を内製化していた欧米に対し、日本は NC 装置を内製化せずその開発を NC 装置メーカーへ託した。その結果、NC 工作機械の製造は、工作機械メーカーと NC 装置メーカーとに分離し進められることになったが、それが工作機械の標準化につながり、工作機械、NC とともに急速に進歩した。NC 装置メーカーは多数の NC 工作機械メーカーに対して汎用品的な NC 装置を販売し、この汎用装置を次第に標準化した¹⁴⁴。日本では NC 装置の開発を富士通や安川電機等の電気メーカーが先導した歴史的経緯があり、開発した NC 装置を多くの工作機械で使えるようにするために NC 装置と工作機械とのインタフェースのルール化に取り組んだ。

¹⁴³日本工業規格 (JIS)「産業オートメーションシステム-機械の数値制御-用語」では、「工作物に対する工具経路、加工に必要な作業の工程などを、それに対応する数値情報で指令する制御」と定義されている。

¹⁴⁴金容度、2021 年、273 頁。

図 3-3 CNC 旋盤の生産台数における日米欧の市場割合



出典：Ehrnberg and Jacobsson (1997)、114 頁を基に作成。単位：％。

その結果、NC 装置と工作機械との間に明確なルールで分割され、NC 工作機械の製品アーキテクチャがモジュール型設計に向うことになる¹⁴⁵。これは NC 装置を初めて開発した米国とは極めて対照的である。米国では、工作機械メーカーと NC 装置メーカーの間は緊密ではなかった¹⁴⁶。その結果、市場における NC 工作機械の普及に大きな差が生まれるようになった。図 3-3 は NC 旋盤の生産台数における日米欧の市場割合の推移を示している。詳しくは後述するが、CNC 装置が開発された 1975 年以降、急速に日本企業の市場シェアが高まっている。NC 旋盤をはじめとして、日本で NC 工作機械の比率が急激に伸びた理由は、「機械メーカーとファナックを中心とする NC メーカーが、うまく役割分担をして製品開発に邁進したこと。また、オイルショック以後、省力化、省エネ化が叫ばれ、中小メーカーを含めて NC 機の導入が進んだことも大きい」ことがあげられる¹⁴⁷。1970 年代に起きた 2 度の石油危機を背景に企業の合理化に伴う生産性向上への取組みと NC 工

¹⁴⁵柴田友厚、2010 年、338 頁。

¹⁴⁶金容度、2021 年、408 頁。金、2021 年は米国における工作機械メーカーと NC 装置メーカーの関係について、企業間取引の差として説明している。米国では工作機械メーカーが特定の NC 装置メーカーへの高い依存を恐れたことが重要な理由として挙げているほか、1950 年代後半以降の米空軍による大量調達により NC ブームを巻き起こし、多くのメーカーが独自の NC 装置の開発に乗り出し、各社各様の互換性のない NC 装置を作り始めた。NC 装置メーカーごとに装置が多様になり、NC 装置の互換性がなくなったと説明している。

¹⁴⁷『日刊工業新聞』1995 年 1 月 27 日付。

作機械の登場が日本における NC 工作機械の普及を促進させたと言えよう。

次に技術の平準化について、製造業の現場で実際にどのような影響を及ぼすのか、設計と製造の関係性の観点から考察を行う。なぜならば、これまで技術の平準化については製造現場に限定されたスタンドアロンの現象として捉えられるケースが多いが、技術のデジタル化が進んだことにより、製造部門に対する設計部門の影響が大きくなったからだ。

第 2 節 設計と製造の相関性

技術のデジタル化について、先行研究では ME 化の研究が代表的であるが(第 1 章参照)、本稿のテーマである技術のデジタル化については、1970 年代と 80 年代の先行研究と同一の視点で扱うのは難しい。それは、ME 化の研究が多く行われた 1970 年代、1980 年代は、デジタル化の研究範囲が製造部門に限定されていたためである。現在の技術のデジタル化が及ぼす範囲は広く、製造部門に加えて設計部門まで対象とする研究が必要である。現在、普及が進んでいるデジタルファブリケーション技術は、技術のデジタル化に関する新しい現象で、これまで注視されていない設計も包含しており、技術のデジタル化の研究を行う上で重要であると考える。第 2 節では、筆者が中小製造業を対象に行った 3D アンケート調査を基に、技術のデジタル化を考える上で設計と製造の関連性、技術のデジタル化が製造業に及ぼす影響について分析する。

第 1 項 調査の目的と概要

第 2 章で取上げた通り、AM 技術は設計部門のデジタル技術が製造部門までを含め生産全体の流れに影響を与える。AM 技術は、中小製造業の現場でも活用が広がり始めているが、その活用には 3DCAD が必要で中小製造業の設計現場で広く普及する 2DCAD では機能しないことが特性の 1 つである。そこで、筆者は技術のデジタル化が進む中で設計と製造の関係性を探るために調査を実施した。3DCAD の導入とその利用状況から、AM 技術と 3DCAD に相関性が見られるのかどうか、また、中小製造業が設計作業でどの程度 3DCAD を使用しているのか調査を行った。調査はアンケート形式で、予備調査(2017 年)と本調査(2018 年)の 2 回に分けて実施した。予備調査は、東京、埼玉、群馬、山梨、新潟、岩手に本社を構える中小製造業を対象に実施し、3DCAD の導入実態を調べた。

(予備調査の概要)

- 調査期間：2017 年 9 月－10 月
- 依頼方法：郵送方式
- 回答数：21 社（調査依頼社数 32 社）、回答率 65.6%
- 対象企業の規模：売上高 15 億円未満の中小製造業
- 業種：機械、電機、樹脂、金属
- 調査地域：東京都、埼玉県、群馬県、山梨県、新潟県、岩手県

2017 年 9 月から 10 月にかけて本調査を実施した。本調査は、予備調査結果を踏まえて、中小製造業における設計と製造の関係性についてさらに詳細な実態を調べる目的で行った。調査地域は、平成 29 年工業統計速報(平成 30 年 2 月・経済産業省発表)を基に全国の都道府県の中で工業製品出荷額が多い上位 5 都府県および東京都である。調査対象企業につ

いては、各都道府県の商工会議所が公表する会員企業データを基に選定し、業種は総務省の日本標準産業分類・中分類に基づく機械器具製造業、電気機械器具製造業、樹脂成型の3業種から選んだ。3業種に絞って選んだ理由は、3DCAD および 3D プリンタの利用が多いと見込まれることであった。対象となる中小製造業の業態は受託加工とメーカー機能を持つ企業から構成した。

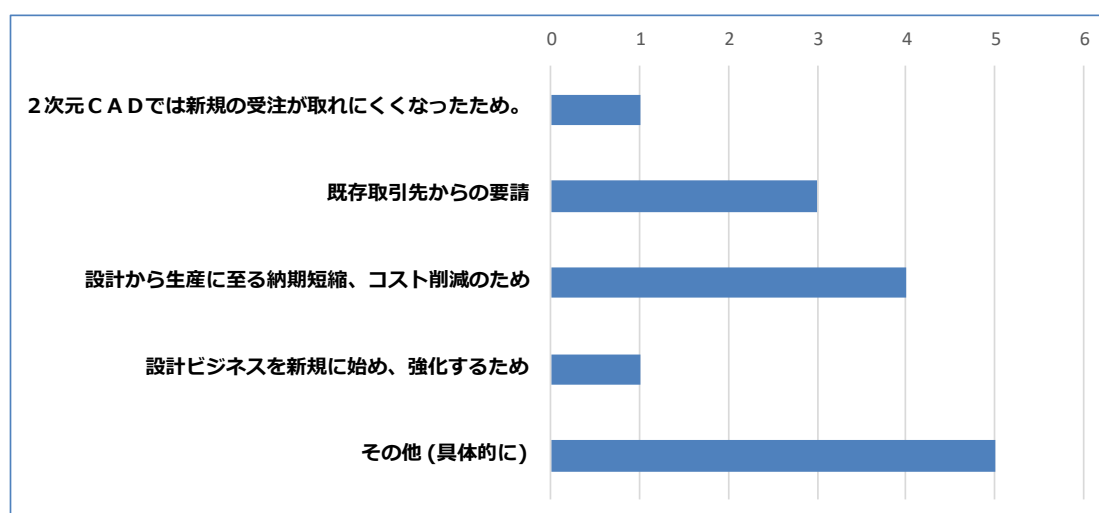
(本調査の概要)

- 調査期間：2018 年 8 月-10 月
- 依頼方法：郵送方式
- 回答数：54 社（調査依頼社数 160 社）、回答率 33.7%
- 対象企業の規模：資本金 1 億円未満の中小製造業
- 業種：電気機械器具（17）、機械器具（29）、樹脂（8）カッコ内は社数
- 調査地域：東京都、大阪府、兵庫県、神奈川県、愛知県、静岡県

第2項 予備調査の結果

予備調査では、AM 技術が主に利用される 4 業種 32 社を対象に調査を実施し、21 社から回答を得た。21 社のうち 14 社が設計業務に 3DCAD を導入し、うち 13 社が 2DCAD と 3DCAD を併用していた。3DCAD を導入した企業のうち 9 社が 2010 年以降に導入、3DCAD を導入した理由（図 3-4）については、「設計から生産に至る納期短縮、コスト削減のため」（4 社）、「既存取引先からの要請」（3 社）を挙げる企業が多かった。3DCAD を導入した理由で最も多かった「設計から生産に至る納期短縮、コスト削減のため」（4 社）については、全社が売上高 15 億円未満の機械事業者で、4 社とも 3DCAD の活用に「製品の基本設計」を挙げている。

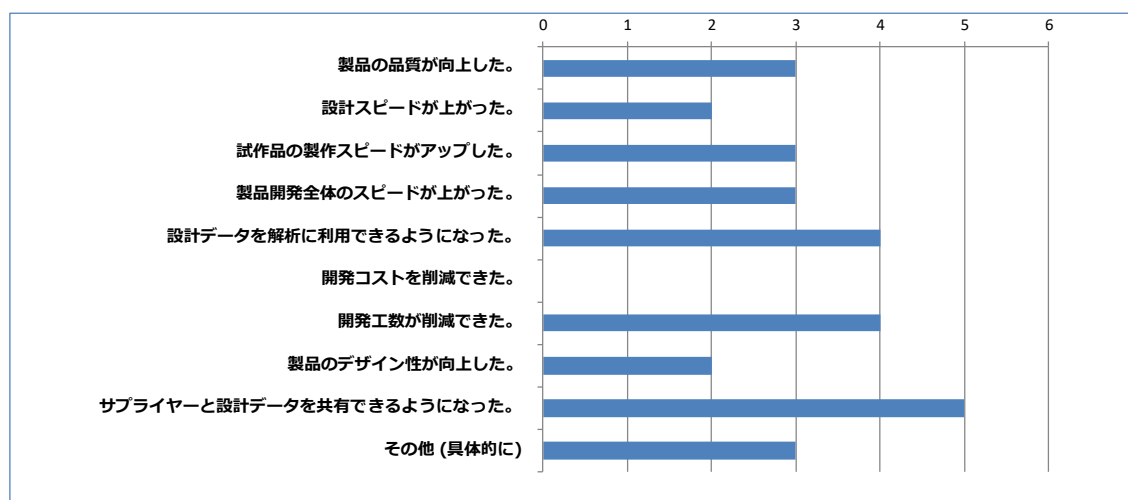
図 3-4 3DCAD を導入した理由



単位：社。

従来、2DCAD を使った設計では、出来上がったデータをもとに試作品を作成し、試験チェックを行っていた。これに対して、3DCAD を利用すれば、試作品加工の前段階で構造や流体の解析も行える。2DCAD と比較し、3DCAD は試作回数の削減や開発コスト、時間短縮に効果があるとされるが、アンケートでは4社とも「製品開発のスピードが上がった」「開発工数が削減できた」と回答を得た。

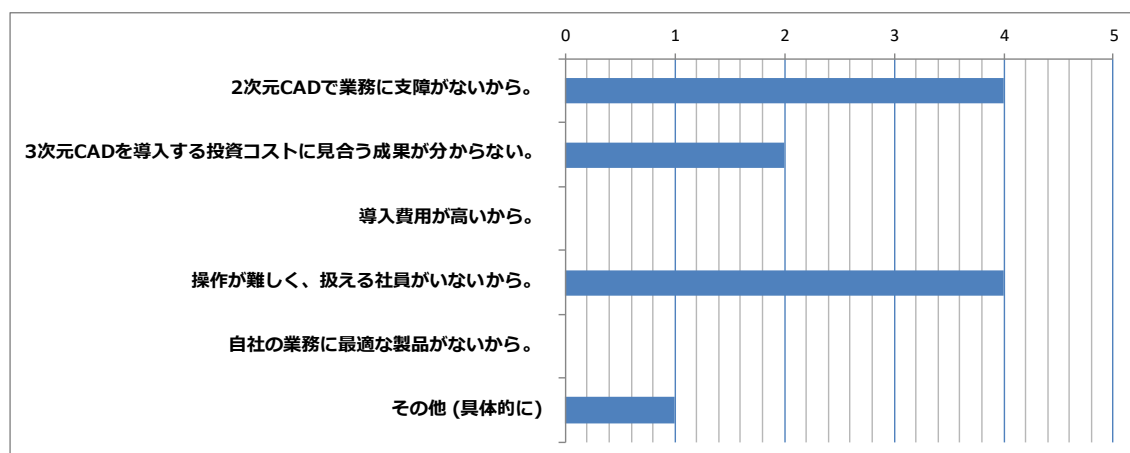
図 3-5 3DCAD の導入効果（複数回答可）



単位：社。

設計段階でコストを下げるにより、工程全体のコストを下げられるようになる。このことから中小製造業にとって設計作業がより重要になってきていることが分かる。2 番目に回答が多い「既存取引先からの要請」(3 社)については、2 社が「サプライヤーとの設計データ共有」を挙げている。この回答結果と関連するものとして、問 7 で尋ねた「3DCAD の導入効果」で、効果が得られた項目として「サプライヤーとの設計データを共有できるようになった」と回答する企業(図 3-5)が最も多かった。取引企業との関係からも設計に対する要望が高まっていたことが推測できる。このことから中小製造業にとって設計の重要性が高まっていることが窺える。「その他」と答えた 5 社のうち、3 社が「3D プリンタ」活用を挙げている。3DCAD の導入と、3D プリンタの導入にはシステム上の相関関係があることは第 2 章で述べたが、アンケート結果からもその点を確認することができた。3 社のうち 2 社が樹脂加工事業者、1 社が機械加工事業者で、3 社とも売上高 5 億円未満で外注により受託加工を行う企業であった。3 社のうち 2 社が試作品の設計を 3DCAD 導入の実際の活用目的に挙げており、小規模の中小製造業が 3DCAD と 3D プリンタを活用して試作品の製作に力を入れている。また、3DCAD の活用目的に試作品の設計を挙げないもう 1 社は NC 工作機械で使用する治具を 3D プリンタで製作すると回答しており、前 2 社と用途は違うが 3DCAD と 3D プリンタを生産に活用していた。

図3-6 3DCADを導入しない企業の理由（複数回答可）



単位：社。

一方、設計業務に2DCADだけを使っている企業も6社あった。3DCADを導入しない理由（図3-6）については、「操作が難しく、扱える社員がいないから」と「2DCADで業務に支障がないから」がともに4社で最も多く、「3DCADを導入する投資コストに見合う成果があるか分らない」（2社）という企業もあった。仮に3DCADを導入する企業を、2DCADだけを設計に利用する企業と何が異なるのか。3DCADのみ、または3DCADと2DCADを併用している企業14社のうち6社が設計オペレータについて、2人に1人、3人に1人以上の割合で3DCADの設計に携わっている回答を寄せた。2DCADだけを利用する企業で「操作が難しく、扱える社員がいないから」と回答した企業と対照的で、人員体制や人材教育で両者に差が生じていると推測される。このことから、3DCADの利用には必要な設備を導入しただけではなく、一定程度の操作能力を持つ人員を用意して初めて有効な機能を発揮することが分かる。

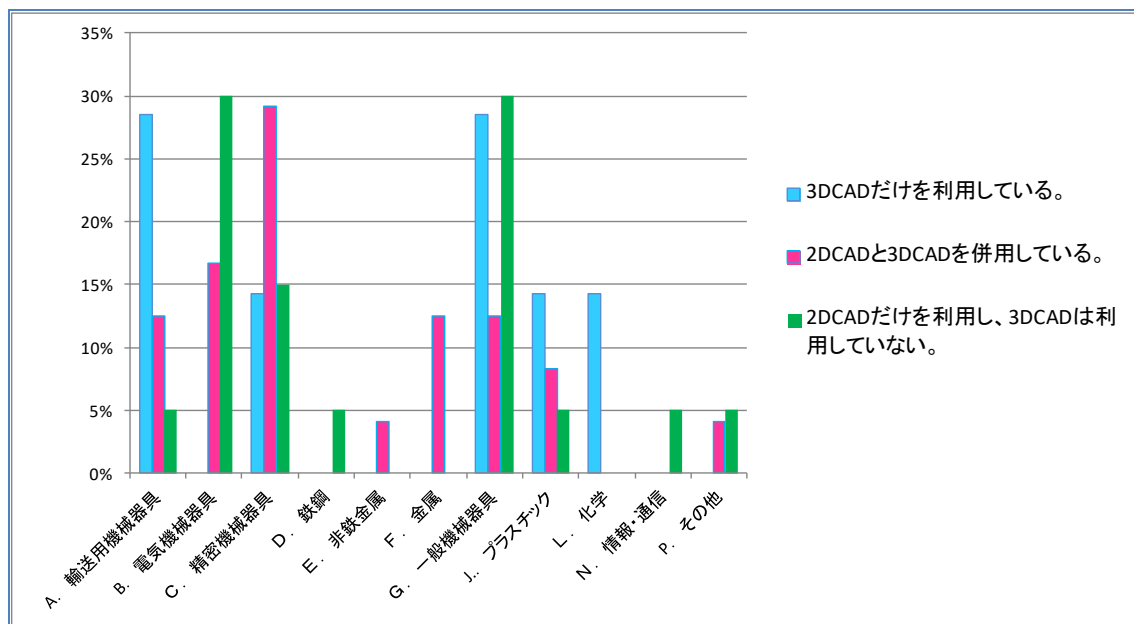
第3項 本調査の結果

次に本調査の結果について考察する。アンケートに回答した企業属性を見ると、回答全体のうち、売上規模で3億円未満が38%、従業員数で20人以下の企業が49%と最も多かった。事業規模から自社製品を開発するメーカー機能を持つ企業より、取引先の指示に従って製品を加工する受託型企業が中心になっている可能性が高い。それら企業では、大企業と比較して、3DCAD、3Dプリンタを活用するニーズが少ない、あるいは導入のタイミングが遅れている可能性も考えられる。

「現在、3DCADを活用していますか」の質問では、回答企業の47%が「2DCADと3DCADを併用している」と回答し、「3DCADだけを利用している」（13%）企業と合わせると、全体の6割が設計に3DCADを活用していることが分かった。2DCADのみを利用している企業も40%あり、「2DCADと3DCADを併用している」企業と併せると9割近くにな

り、現状では 2DCAD が設計の中心になっていると考えられる。では、具体的にはどのような企業が 3DCAD、2DCAD を利用しているのだろうか。

図 3-7 CAD の導入企業と業種の関係



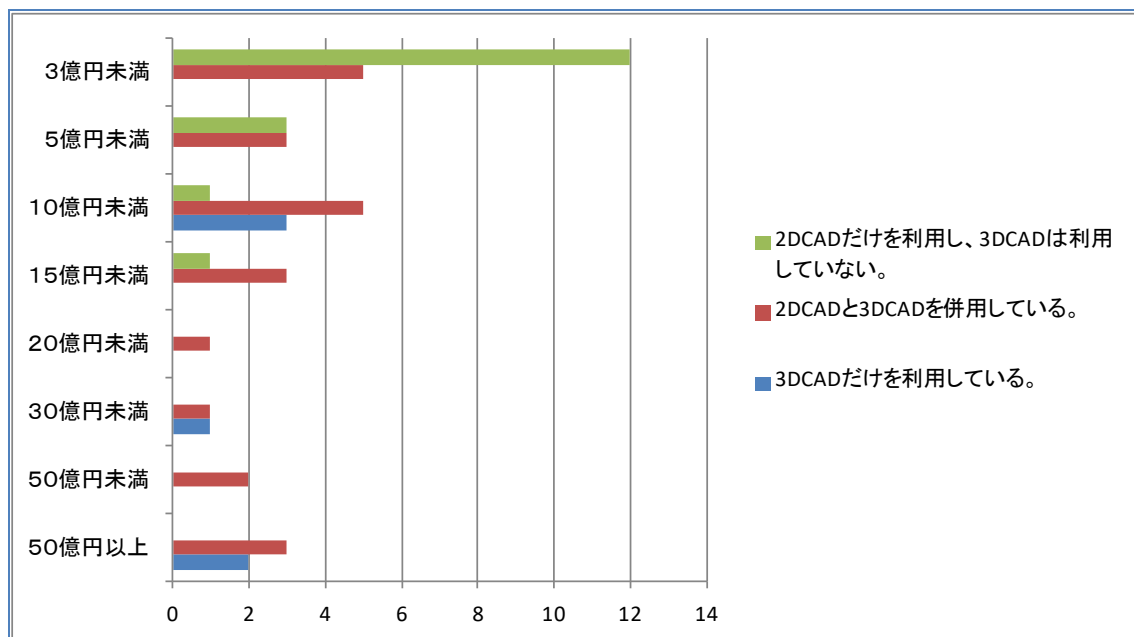
単位：％。

図 3-7 を見ると、輸送用機械器具、一般機械器具で「3DCAD だけを利用している」企業が多く、電気機械器具では「2DCAD だけを利用し、3DCAD は利用していない」という企業が多かった。輸送用機械器具で 3DCAD の利用が多い背景には、自動車メーカーにおける 3DCAD 導入が早くから進んだことが考えられる。関連取引先企業からの要請や中小企業側の自主判断に基づく設計設備の共通化に経営者が前向きに取り組んでいる実態を反映していると思われる。これに対して、電気機械器具で 3DCAD の利用がないのは、取り扱う製品で 3DCAD 利用の必要性がないためと考えられる。電気機械器具は、日本の工業製品出荷額全体の約 15% を占める業種で、産業のすそ野は広い。図 3-8 の売上高との関係で見ると、「2DCAD だけを利用し、3DCAD は利用していない」企業は売上高 3 億円未満で、電気機械器具を取り扱う中小部品事業者のイメージが浮かぶ。また、売上高 15 億円以上の企業では、「2DCAD だけを利用している」企業は 1 社もなかった。企業規模が大きくなるほど、3DCAD の導入、活用が進んでいるのである。

現在、2DCAD のみ使用している企業に 3DCAD を導入しない理由を訊ねた質問(図 3-9)では、「2DCAD で業務に支障がないから」(81%)と回答した企業が圧倒的に多かった。回答数では「3DCAD を導入する投資コストに見合う成果が分からない」(29%)、「操作が難しく、扱える社員がいないから」(24%)と続いている。企業規模別には、「2DCAD で業務に支障がないから」と回答した企業の 79% (社数 11) が売上高 3 億円未満、残り 21%

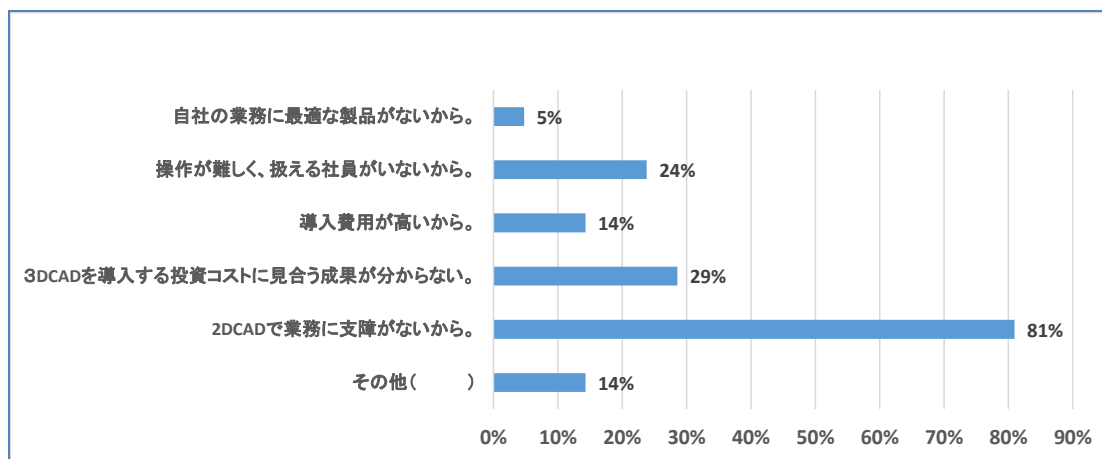
は売上高 5 億円未満の企業となった。売上規模が小さい企業ほど 3DCAD の必要性を感じていない。

図 3-8 CAD の導入企業と売上高の関係



単位：社数。

図 3-9 3DCAD を導入していない理由



単位：％。

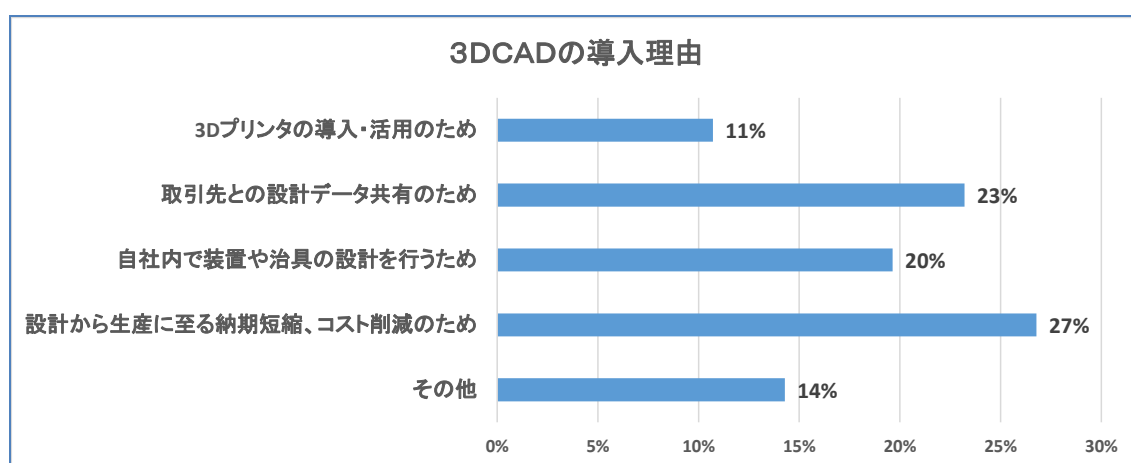
売上規模の小さな企業の場合、元請け企業から渡された設計図通りに製品加工する、いわゆる“賃加工”を中心に業務を行う事業者が多く、自社で設計を行わないケースなどから 2DCAD で十分と考えている企業が多いことが推察される。小さい企業ほど 3DCAD の利用が低いことを、3DCAD を導入しない理由で 2 番目に回答の多かった「3DCAD を導入

する投資コストに見合う成果が分からない」(29%)と照ら合わせると、現時点では 3DCAD の導入に踏み切れない理由が理解できる。注目すべき点は、2DCAD だけを利用する企業では「操作が難しく、扱える社員がいないから」と回答した企業も多かったことである。政府の統計調査¹⁴⁸などでも、3DCAD の操作に限らず、中小製造業では IT 設備の導入については人材不足が指摘されている。この点から中小製造業の経営者が 3DCAD の導入を計画しても、マンパワーの関係から容易に導入できないケースも考えられる。

この結果は予備調査で、2DCAD だけを利用する企業が 3DCAD を導入しない理由として「操作が難しく、扱える社員がいないから」と回答した企業が多かったことと整合的である。次に 3DCAD の導入時期と導入機種について訊ねた質問では、2006 年～2010 年と 2016 年以降に導入した企業の割合が最も多かった。最も早く導入を決めた企業でも 1996 年～2000 年であった。製造現場で使われる NC 工作機械の普及率が 9 割を超え、中小企業から大企業に至るほとんどすべての製造業者に普及しているのに対して、中小製造業の 3DCAD 普及はまだ始まったばかりと言えそうである。

3DCAD を導入した理由について訊ねた設問（図 3-10）では、「設計から生産に至る納期短縮、コスト削減のため」（27%）と回答した企業の割合が最多で、「取引先との設計データ共有のため」（23%）、「自社内で装置や治具の設計を行うため」（20%）の順になっている。また数は少ないが「3D プリンタの導入・活用のため」を選んだ企業も 11%あった。

図 3-10 3DCAD の導入理由

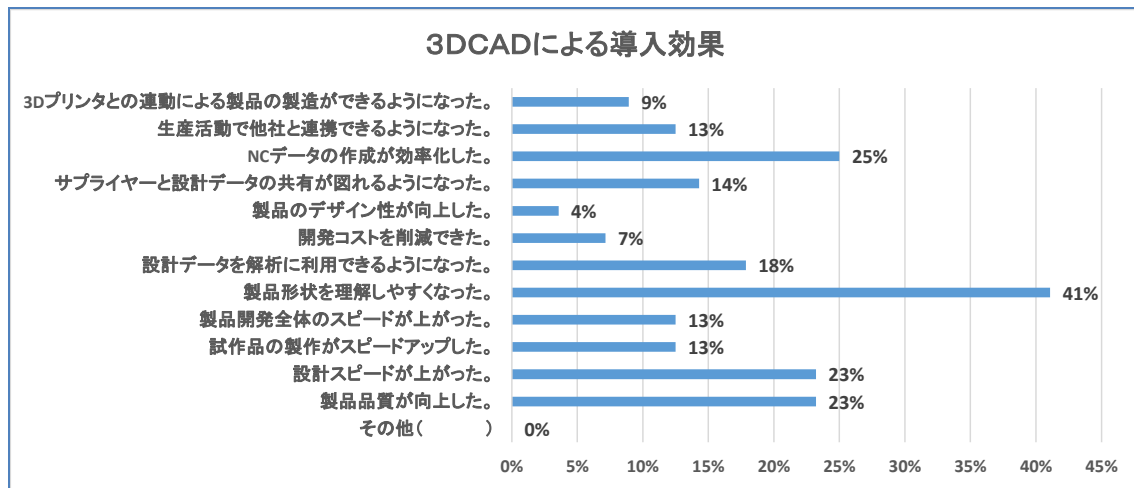


単位：％。

これも予備調査の結果と整合性がある。このことから、3DCAD の導入と、3D プリンタの導入には相関関係がある。3D プリンタは 3DCAD で作成された 3D データのみで稼働する特性から、3D プリンタを活用する企業は、設計のデジタル技術にもより注力しなければならない可能性が高い。

¹⁴⁸経済産業省『2020 年版ものづくり白書』

図 3-11 3DCAD の導入効果



単位：％。

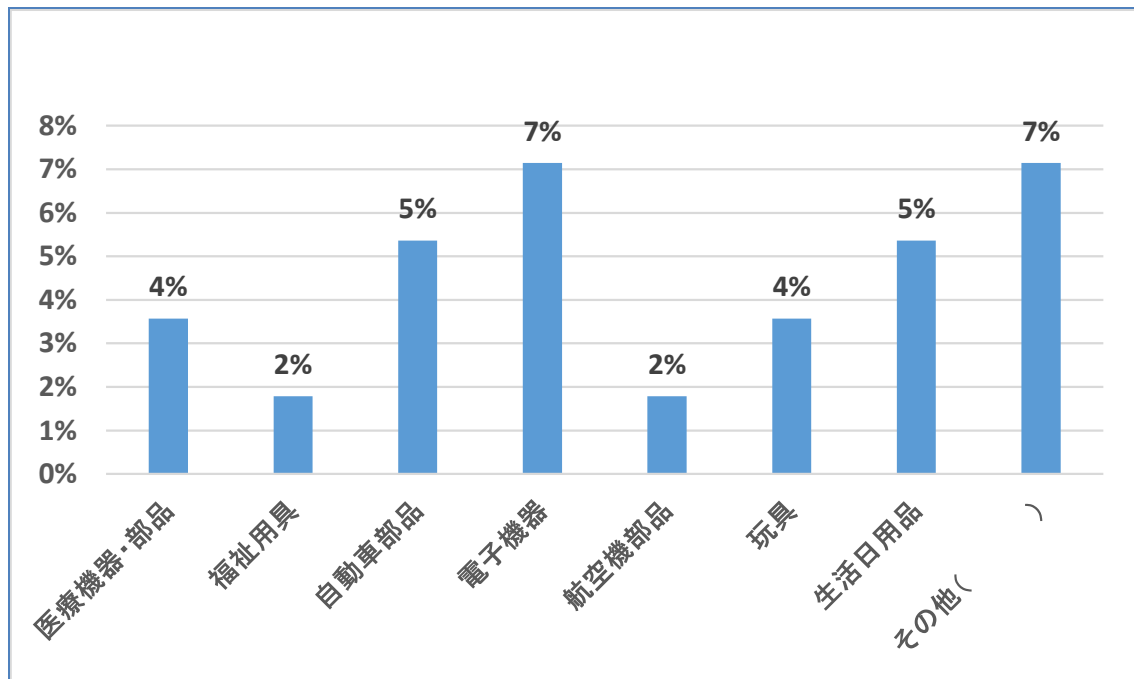
次に 3DCAD の導入効果について（図 3-11）は、回答が多い順に「製品形状を理解しやすくなった」（41%）、「NC データの作成が効率化した」（25%）となり、「製品開発全体のスピードが上がった」、「製品品質が向上した」がともに 23%と、それに次ぐ。設計図面を 3D データ化することで、製品形状が可視化され、2DCAD による設計よりも製品形状が直感的に分かる点を、ユーザが導入効果として評価していることが分かる。可視化されることで、設計スピードが上がり、製品開発全体の効率を上げていることが分かる¹⁴⁹。

一方、3DCAD を導入する際の課題については、「3DCAD を操作するオペレータが不足している」と回答した企業が最も多かった。これは前述の 2DCAD のみ使用している企業に 3DCAD を導入していない理由を訊ねた質問（図 3-9）で、3 番目に回答が多かった「操作が難しく、扱える社員がいないから」（24%）と同様の問題が 3DCAD 導入企業でも起きているのである。本調査では、3D プリンタの導入についても訊ねているが、「3DCAD を導入する際、併せて 3D プリンタも導入しましたか」との質問では、「既に 3D プリンタは導入済である」が全体の 7 割となった。2 番目に回答が多かった「3DCAD の導入に合わせて 3D プリンタも購入した」（20%）と合わせると、3DCAD を導入している 9 割の企業で 3D プリンタも導入、活用している実態が分かる。このことから、3DCAD と 3D プリンタの活用には一定の相関関係があることが裏付けられる¹⁵⁰。

¹⁴⁹Katja Bley.Christian Leyh.Thomas Schäffer(2016)によれば、中小企業はデジタル技術を使えば、コストが削減され、日々の事業活動をより効率的に行うことができると述べている。

¹⁵⁰今後、3D プリンタの性能が向上し“工作機械”として存在感が台頭すれば、中小製造業における 3DCAD の導入、活用はさらに活性化していく可能性もある。

図 3-12 3D プリンタを活用して製造する主な製品



単位：％。

3D プリンタの導入理由を訊ねた設問では、回答が多い順に「試作品の製作のため」(10 社)、「治工具製作のため」(4 社)となった。3D プリンタは金型を使わずに製品の加工ができる特性があるが、その特性を生かせば短時間、かつローコストで製品加工ができる。試作品加工には適した機能を持つため、中小製造業のビジネスモデルに適していると言える。実際にどのような用途で 3D プリンタが使われているかについては、電子機器をはじめ、自動車部品、生活日用品、医療機器・部品など広い製品の製造で 3D プリンタが使われている(図 3-12)。

3D プリンタの導入時期については、回答企業の 60%が 2016 年以降に導入していると回答した。残り 40%も 2011 年から 2015 年に導入している。また、前述の 3DCAD の導入時期について訊ねた質問では、2006 年～2010 年と 2016 年以降に導入した企業の割合が最も多かったが、この導入時期の結果から、3DCAD と 3D プリンタにはある程度の関連性が分かる。なお、予備調査と本調査を比較すると幾つかの共通点が見られた。

■共通点 1：3DCAD の活用が進んでいない。

予備調査、本調査のいずれの調査でも、3DCAD は使わずに 2DCAD のみ使用するユーザや、3DCAD と 2DCAD を併用するユーザが存在することが確認できた。その理由については両調査ともに「2DCAD で業務に支障がないから」が最も多かった。この点について

て、経済産業省の調査¹⁵¹と照らすと興味深い。

本調査では、発注先企業が協力企業に設計を指示する方法について、全体の 54.3%が未だに図面で行われ、3D データによる指示は 15.7%に過ぎない¹⁵²。また、その理由について、全体の過半数を超える 51.7%が「主な設計手法は 2D/図面のため」と結果が出ている（図 3-13）。経済産業省の調査を本調査と照らせば、依然、3D 設計に必要な 3DCAD を活用した設計を実施している企業が少ないことが明らかで、3DCAD の活用が遅れている。

■ 共通点 2：3DCAD の導入した理由では「納期短縮、コスト削減」が最多

3DCAD を導入した理由について、「設計から生産に至る納期短縮、コスト削減のため」を選択する企業が両調査共に最多であった。3D データは 2D データに比べて、設計の初期段階から設計内容を 3次元で把握することが可能なため、CAM や CAE との連携により、後工程の作業を大幅に短縮することができる。その利便性が選択理由に反映されていると考える。図 3-4「3DCAD を導入した理由」では、「納期短縮、コスト削減」を回答した 4社が 3DCAD の活用に「製品の基本設計」を挙げたが、4社とも「製品開発のスピードが上がった」「開発工数が削減できた」と回答している。

■ 共通点 3：導入効果では「サプライヤーとの設計データ」の共有が最多

3DCAD の導入効果について、「サプライヤーとの設計データの共有」を選択する企業が両調査共に最多であった。取引先との情報共有ツールとして 3D データでのやり取りが効果的であることを回答企業が認識しているとみられる。3D データは 2D データと異なり、設計情報を 3D 表示することが可能なことから、2D データと比較して形状認識性に優れている。サプライヤーと設計データの情報共有は、企業間の意思疎通をスムーズにでき、結果として、製品開発にかかる時間短縮やコスト低減にも効果が期待できる。これが導入効果を挙げる回答が多い背景にある。

サプライヤーとの設計データの共有は、企業間取引をより強固な関係にするが、こうした特性は ME 化に関する先行研究でも指摘されている。生産部門の ME 化に積極的に取り組んだ中小製造業では、その後の受注量、受注額への影響について、ME 機器導入企業の方が非導入企業よりも売上額の伸びが高いという研究結果も見られる¹⁵³。また、先行研究では、ME 化によって品質・精度向上、納期厳守などの要請に対応していくことが、競争において生き残るための数少ない選択肢のひとつとする。今日のように、設計段階から ME

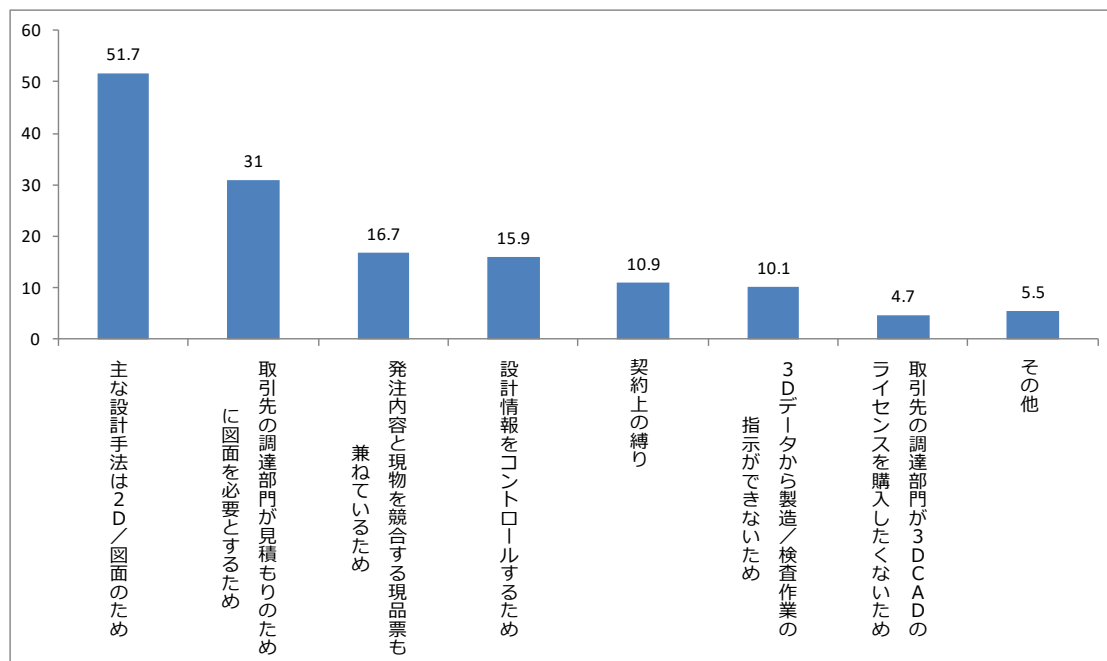
¹⁵¹経済産業省「令和元年度製造基盤技術実態等調査 我が国ものづくり産業の課題と対応の方向性に関する調査報告書」、2020 年 3 月。同調査は三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社に委託し、2019 年 12 月に郵送方式で行われた。データベース会社のデータを用いて、従業員 100 人超の製造業全社と、従業員 100 人以下の企業（機械系製造業を中心）など、全 25,000 社を対象に実施している。有効回収率は 12.9%（有効票 3,224 件）。

¹⁵²経済産業省『ものづくり白書 2020 年版』の第 1 章。

¹⁵³河崎亜洲夫、1983 年、8 頁。

機器による加工を想定するようになると、受注を確保するために ME 化はもはや避けて通れない¹⁵⁴。このような見解は、3DCAD の導入効果について見られる。つまり、設計から生産に至る技術のデジタル化は、生産部門だけの ME 化よりもはるかに取引企業間関係を強固にする効果をもたらすが、同時に中小製造業経営に対するコスト削減圧力をはじめとする各種要請が増幅される契機にもなるとみる¹⁵⁵。

図3-13 2Dデータや図面で設計指示している理由



単位：％。

■ 共通点 4：3DCAD 導入の背景には 3D プリンタ活用が指摘された。

3DCAD の導入理由の 1 つに、3D プリンタの活用事例があった。中小製造業が 3DCAD と 3D プリンタを活用して試作品などの製作に力を入れようとしていることが窺えた。この点は本稿が強調する論点の 1 つであり、詳細は第 2 章および後述の調査の結論に譲るが中小製造業でもデジタルファブリケーションの流れが進んでいる点を指摘したい。調査結果から 3DCAD と 3D プリンタの活用には相関関係があることが分かった¹⁵⁶。

■ 共通点 5：3DCAD 導入の課題に人材問題が指摘された。

¹⁵⁴ 廣江彰、1986 年、177 頁。

¹⁵⁵ こうした動向を見据えて廣江は「ME 化と受注量、又は出荷額との関連は、単に相互の対応関係がどうなっているのかということだけでなく、ひとつの「中小企業論」にまで発展し得る重要性を秘めている」とコメントをしている(廣江彰、1986 年、178 頁)。

¹⁵⁶ 今後、3D プリンタの性能が向上し、NC 工作機械と同様の生産性を上げる工作機械として存在感が台頭すれば、中小製造業における 3DCAD の導入、活用はさらに活性化していく可能性を指摘したい。

予備調査、本調査ともに、3DCADを導入する際の課題として、「操作するオペレータが不足している」と回答した企業が多かった。これは企業側が3DCADの導入を望んでいるが、人材教育や人材採用などがネックとなり、容易に導入が実現されない中小製造業の実態を表している。この点は次の第4項で述べるが、中小製造業におけるIT投資と人材の活用は大きな課題であり、3DCADの導入もIT投資の一環として捉えた時に、人材の課題が今後の普及に向けたネックの1つであると考ええる。

第4項 調査結果のまとめ

本調査は、製造業における技術のデジタル化が生産から設計に広がる中で、両者の相関性が強まっている実態を調べた。その1つが、中小製造業で活用が広がる3Dプリンタと3DCADの関係性で、以下の3点から製造と設計の相関性が強まっていることが分かった。

第1に、2010年代以降、中小製造業において3DCADの普及が本格的に始まったことである。中小製造業に3DCADの本格的な導入が始まろうとしていることはアンケート調査に見られる2つの回答から推測できる。1つは3DCADの導入時期、もう1つは3DCADのオペレータ不足である。予備調査、本調査ではいずれも3DCADの導入時期と導入機種を設問で訊ねているが、2010年以降に導入した企業は予備調査で6割、本調査で8割に達している¹⁵⁷。2010年代以降に本格的な普及が始まったいくつかの理由が考えられる。1点目は、先行して大手製造業への3DCADが進む中で、中小製造業でもその利便性を理解するようになったことである。2点目は業界シェア4割を持つSolidworks¹⁵⁸が近年、中小製造業への営業を強化していることである。3点目は3Dプリンタの主要特許が2009年以降に失効し、その結果、3Dプリンタの開発コストが下がり低価格の製品が登場、3Dプリンタを使いたいというニーズが3DCADの普及に連動したことである。本格導入が始まろうとしているもう1つの背景は3DCADのオペレータ不足である。アンケート調査では、3DCADを導入する際の課題を訊ねているが、最も回答の多かったのが「3DCADを操作するオペレータが不足している」であった。すでに述べたように、2DCADのみ使用している企業に3DCADを導入しない理由を訊ねた質問でも、「操作が難しく、扱える社員がいないから」と同様の結果を得た。中小製造業が設計のデジタル技術への高度化に腐心する中で、3DCADの導入を巡る対応で見られる特徴点の1つとして言える。CADオペレータとして必要な人員を確保できない、教育が十分に整っていないという現状から、企業の中で3DCADの導入が本格的に始まっていることが判明した。

第2に、3DCADの導入理由に「3Dプリンタの導入・活用のため」と回答した企業が予備調査、本調査ともに複数存在したことから、3DCADの導入と3Dプリンタの活用には相関性が見られると判断できる。3Dプリンタの基盤技術であるAM技術は、2DCADでは機

¹⁵⁷3DCADを導入した企業では両調査ともにSolidworks社の製品を導入する企業が最も多かった

¹⁵⁸機械設計用CADメーカーの世界的大手。

能せず、3DCAD との連動で機能を発揮する技術であることは前述の通りであるが、調査結果からは、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、活用する実態が明らかになった。前述したように、先行研究で数多くの ME 化の研究が行われてきたが、ME 化の研究が多く行われた 1970 年代、1980 年代は、デジタル化の研究範囲が製造部門に限定されていた。現在、普及が進むデジタルファブリケーション技術は当時、存在していないことが背景にあり、設計と製造の関係性から ME 化について論じようとする本稿の意義を見出す上で調査結果は重要な根拠を示すと考える。つまり、ME 化の視点に立脚すれば、調査結果は設計と製造の相関性が強まっていると判断でき、中小製造業は製造部門のデジタル化に加えて、設計のデジタル化により注力しなければならぬ点を指摘したい。

第 3 に、予備調査、本調査いずれのアンケートでも 3DCAD を導入した効果について、「サプライヤーとのデータ共有」を挙げる企業が多かった。取引先がすでに 3DCAD による設計を行っていること、設計のみ自社で行い、製造は別の企業に委託する際に 3D データで設計情報を交換しているのである。また、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。以上、3 点の理由から、デジタル技術に関して設計と製造の相関性が強まっていることが明らかになった。

同時に、生産活動全体を通じて、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。経済産業省の調査では、国内の製造業で 3DCAD を活用した設計を行っている企業が調査時点で全体の約 2 割弱しか存在しない。加えて、そもそも設計をデータ化していない企業が全体の約 4 割を占めるなど、その普及、活用がかなり遅れている。協力企業への設計指示の半数以上が未だに図面で行われているなど、設計情報のデータ化も進んでいない¹⁵⁹。

積極的に 3DCAD を活用する企業とそうでない企業の差の背景には費用対効果と人材活用への戦略の違いがある。まずは、中小製造業の経営者が 3DCAD を導入することで受注機会の拡大やコスト削減に効果があるか考えるかが第一の判断になる。仮に現時点で 2DCAD の運用しかしていない企業でも、3DCAD を運用することで費用対効果が見込めるのであれば、新たに 3DCAD を運用するための人材育成や人材確保について前向きになるはずである。この点について京浜地区のプラスチック金型製造業を事例に、1980 年代に起きた ME 機器による技術革新が機械加工部門に波及する影響を調査した先行研究¹⁶⁰では、中小機械工業に階層分化が生じ、立地分散が顕著になったことを指摘すると同時に、技能集約型の中小製造業では、ME 機器導入への対応で、「熟練工が定着し安定した取引関係を有する業者は、技能労働を活用し、積極的な設備導入を必ずしも図らなかった」と指摘している。それら企業では、従業員の役割分担は未分化であり、熟練多能工に依存していると結論づけた。3DCAD の調査でこの点を比較した場合、既存の 2DCAD で取引が継続され

¹⁵⁹経済産業省『ものづくり白書』2020 年版』、2021 年の第 1 章。

¹⁶⁰小田宏信、1997 年、564 頁。

る中で、新たな操作技術の習得が必要な 3DCAD の導入とそれに必要な人材採用、人材育成に躊躇する中小メーカー経営者の判断が窺える。さらに本調査の図 3-8 の結果では、売上高が小さい企業ほど 3DCAD を活用していない傾向が見られた。売上規模の小さい中小製造業は、自社製品を持たない発注元の設計指示に従って部品や製品を加工する事業者が日本では多い。つまり現状の企業間取引を行う範囲では、より高度な 3DCAD の導入や活用は不要と考えていることが分かる。

第 2 に、多くの中小製造業が技術のデジタル化について理解していない、あるいは理解できない現状がある。本調査の結果を示した図 3-9 では、3DCAD を導入しない理由で「3DCAD を導入する投資コストに見合う成果が分からない」（29%）が 2 番目に回答が多かった。この回答は、実際に 3DCAD を導入して活用しても、費用対効果に見合う受注機会の拡大につながるか判断できないという経営者の考えが背景にある。そもそも企業経営者が IT 投資になる 3DCAD 技術を理解していない可能性もある。中小企業は大手企業と異なり、IT に詳しい人材層が少ない点やシステム専門部署を持たない企業が多い。そうした事情が費用対効果での判断ができないことにつながり投資の抑制に影響を与えと考えられる。

第3節 小括

本章では技術のデジタル化が製造業に与える影響について、技術の平準化と設計と製造の関係性から考察を行った。技術の平準化は中小製造業にとってメリット、デメリットの両面の影響をもたらすが、その背景には CPU の開発とファームウェアの組合せによる標準化がある。標準化はエレクトロニクス産業の競争激化の一因に挙げられるモジュール化を引き起こす要因にもなっている。

技術の平準化は製品のみならず技術力にも影響を及ぼすことから、企業規模に関係なく製造業全般に影響を及ぼす。パソコンと NC 工作機械の事例のように、技術の平準化で企業間競争は質的競争から量的競争に変化した。大手企業と比べて量的競争に物理的に劣勢に立たされる中小製造業は大手企業とは異なる対応策が必要であり、第4章以降で企業の対策について具体的に分析する。

一方、筆者が2017年、2018年に行った3DCADに関する調査では、技術のデジタル化上で設計と製造の関連性が重要であった。特に、技術のデジタル化への対応として、設計から製造に至る一連の流れの中で捉えることが重要であることが明らかになった。戦後、日本の製造業は生産現場の強化に政策の重点が置かれた結果、1990年代以降の日本の製造業は世界的な潮流である設計力強化に産学官いずれもが遅れてしまったことは第2章で示した通りである。デジタルファブリケーションの流れに従えば、設計の重要性はますます高まっており、設計と製造の関連性を重視すべきである。

第4章 中小製造業への技術のデジタルの影響と対応

第3章までは日本における技術のデジタル化の流れを検証するために、製造部門から設計部門へと製造業にデジタル技術が浸透してきたプロセスを分析した。第4章から第6章では、技術のデジタル化が進展した際、中小製造業にどのような影響を及ぼすのか、また、影響を受けた企業はどのように対応するのかを中小製造業全体、個別企業事例、個別産業事例の3つのカテゴリ別に分析する。

このうち、まず、第4章では、技術のデジタル化が中小製造業の事業形態にどのような変化を与えるのか分析する。中小製造業の事業形態には大きく2種類のビジネスモデルが存在している。1つは取引先企業から設計図の貸与を受けて仕様書に基づいて、主に部品や半製品を加工する受託加工型事業者¹⁶¹である。もう1つが自社開発した製品を製造するメーカー機能を有する自社開発型事業者¹⁶²である。このうち、本章では前者の受託加工型事業者に焦点を当てる。受託加工型事業者はしばしば下請事業者¹⁶³（単に下請けと呼ばれることも多い）と呼ばれるが、従来のME化研究でも受託加工型事業者を対象にした数多くの先行研究があるものの、2000年代以降の新たな技術のデジタル化が中小製造業にどのような影響を及ぼしているのかを分析した研究はない。本章では、とりわけ、過去のME化研究と現在の技術のデジタル化では、中小製造業の企業間取引にどのような変化が起きているのか調査を通じて検証する。

技術のデジタル化の新たな潮流であるデジタルファブリケーションでは、製造業に2つの大きな変化をもたらしている。1つは製造プロセスの変化に伴う「生産の在り方の変化」であり、2つ目は「生産の在り方の変化」が起きる事で、ビジネスの発想が変わる「ビジネスの在り方の変化」である。

「生産の在り方の変化」については1章、2章、3章、5章に譲り、本章では、受託加工型事業者を主な分析対象にし、「ビジネスの在り方の変化」に焦点をあて、技術のデジタル化が中小製造業の企業間取引に現れる変化を分析する。

¹⁶¹取引先から加工を依頼される製造事業者についてはケースに応じて様々な呼称が使われる。下請事業者、協力企業、賃加工事業者、サプライヤー、サポーティングインダストリーなど多彩だが、本稿では受託加工型事業者に統一する。但し、歴史的経緯を踏まえて「下請け」「下請事業者」などを表現として混在して表記する。また、下請中小企業振興法では、「下請中小企業」とは、「自社よりも資本金又は従業員数の大きい他の法人から、製品・部品等の製造・加工や、発注企業が他社に提供する役務等を受託している中小企業」と定義されているが、本稿で示す受託加工型事業者のビジネスモデルは「下請中小企業」の定義に即する。

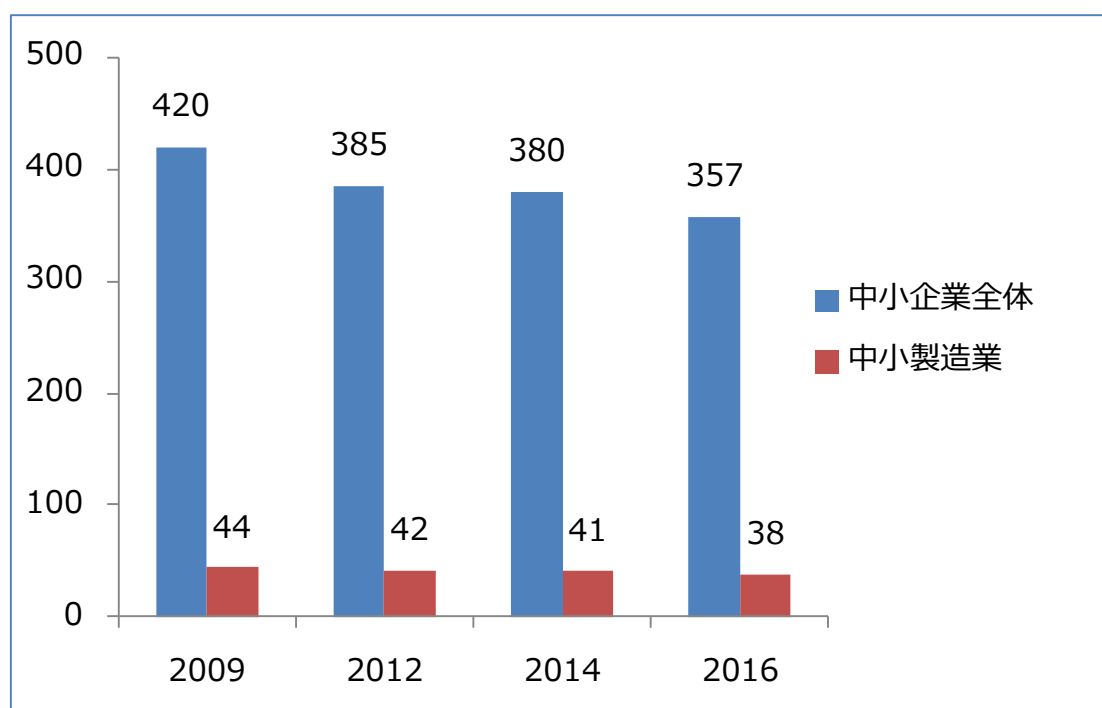
¹⁶²本稿では製品の設計、開発のみ自社で行い、製造は第三者に委託する所謂“ファブレス”と呼ばれる企業は含まない。

¹⁶³2020年版『中小企業白書』では、大手企業を頂点とした重層的な取引構造は「系列取引（構造）」と呼ばれ、このような取引の階層構造の中で、中小企業はしばしば「下請事業者」として位置づけられ、相対的に立場の弱い存在として認識されることがあると記述されている。

第1節 中小製造業の実態と受託加工型事業者の関係

技術のデジタル化が受託事業にどのような影響を及ぼすのかを分析する前に、日本の中小企業と受託事業を概観した上で、両者の関連を見ておこう。総務省と経済産業省が公表した最新統計によれば、日本国内の企業数は358万9,000社にのぼり、うち99.7%にあたる357万8,000社が中小企業・小規模事業者である¹⁶⁴。このうち、「非製造業・中規模企業」と「非製造業・小規模企業」を足した非製造業の割合は89.3%で、残り10.7%が製造業（製造業・中規模企業¹⁶⁵と製造業・小規模企業）となっている。図4-1は、過去4回分の経済センサスの調査結果から中小企業全体に占める中小製造業の割合の推移を示したものであるが、2009年調査を基準にすると2016年調査では、中小企業全体で15%、中小製造業で14%の企業数減少が見られる。一方、各調査年では全体に占める中小製造業の割合は約11%で、中小製造業が常に中小企業全体の約1割を占めている。

図4-1 中小企業全体に占める中小製造業の割合の推移



出典：総務省・経済産業省『平成28年経済センサス-活動調査』、2018年6月28日データを基に作成。単位：1万社。

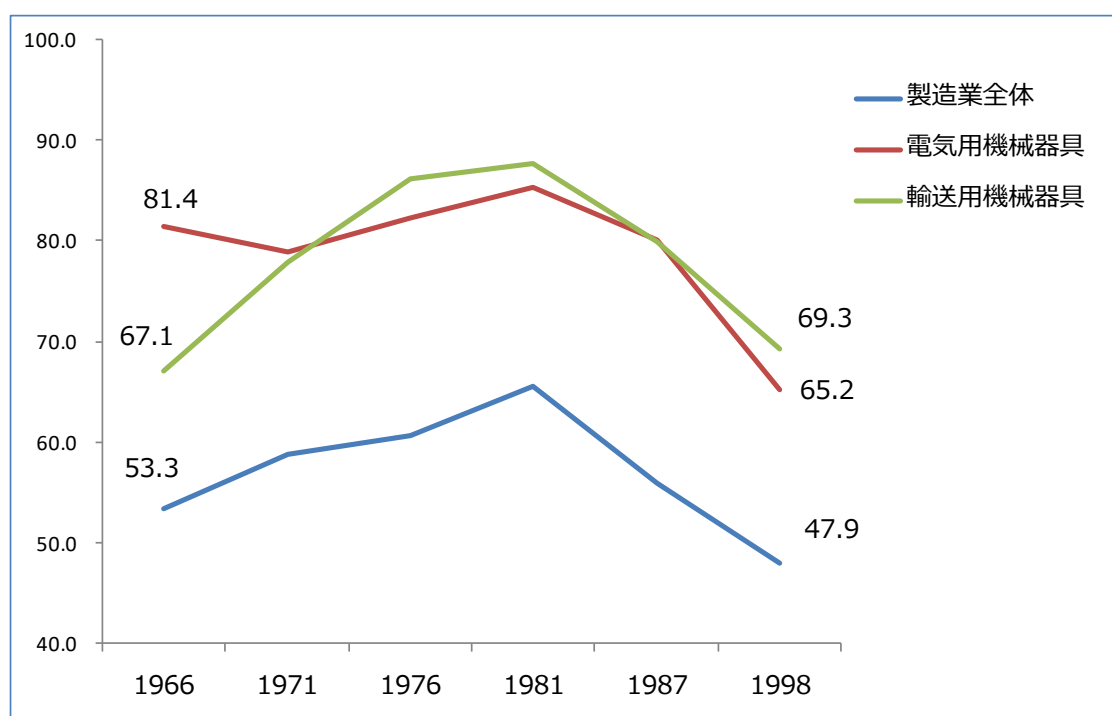
次に本章が焦点にする受託加工型事業者との関連をみておこう。受託加工型ビジネスは生産の分業構造を念頭に行われ、下請分業構造とも言われる。日本の下請分業は、戦前、

¹⁶⁴2018年6月28日公表『平成28年経済センサス-活動調査』による。

¹⁶⁵「中規模企業」は中小企業基本法上では「中小企業者」に該当する。

軍による軍需工場への転換要請に伴う下請化への強制が構造的な発生起源として挙げられる¹⁶⁶。その後、1950年代前半において、工業製品の生産量の増大を背景として、製造業を中心に需要変動に対応して生産を柔軟かつ効率的に行う企業間取引として下請分業構造が発達した。さらに1960年代から1970年代にかけて、大企業を頂点とするピラミッド型の系列取引や企業城下町等の産業集積地域内での取引が活発化する中で、下請分業構造が定着していく。下請分業構造の発達背景について岡田（1991）¹⁶⁷は、受託加工型事業者は「研究開発の必要がない」とする性格が強く、親企業から技術指導や指示書を与えられて生産活動を行っている企業と述べている。

図 4-2 下請中小企業比率の推移（製造業全体と2業種）



出典：経済産業省『中小企業実態基本調査』、『商工業実態基本調査』を基に作成。

単位：％。

図 4-2 は、1960 年代後半から 1990 年代後半に至る中小企業の下請比率の推移を示している。製造業全体、電気用機械器具、輸送用機械器具いずれも 1966 年調査時点から 1981

¹⁶⁶植田浩史、1999 年、3 頁。また佐竹（2008）は、第 2 次世界大戦前後に行われた下請制・系列化論争を中心とした中小企業存立形態論（所謂、藤田、小宮山論争）を念頭ににして、戦時経済体制下にあつて、元請工場と下請工場が対等の立場に置いて国家の要請する生産に協力し、資本・資材等は原則として軍・官庁によって配慮されていたという下請け制の属性に注目し、それを産業資本確立という視点から「範疇としての下請」制という形で理論化したと考えられると述べている。

¹⁶⁷岡田浩一、1991 年、237 頁。

年調査時点まで下請中小企業比率が上昇している。日本経済全体が成長する過程で、製造業の生産量が拡大し、下請分業構造は、その担い手を量的に拡大すると共に、2次、3次下請へとすそ野を広げていく。高度経済成長は、中小企業の下請受注のチャンスを増大させ、下請への新規参入を促進したのである¹⁶⁸。しかし、1980年代以降、下請中小企業比率は減少に転じている。

最近の状況をみておこう。表4-1は、経済産業省が毎年実施する「中小企業実態基本調査」から受託事業者の割合を抜き出したものだ¹⁶⁹。受託事業者は5年度分の加重平均で4.7%となっているが、中小製造業の割合は2013年度の14.1%に対して、2017年度は17.4%になる¹⁷⁰。

表4-1 受託事業者数と割合の推移

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度
母集団事業者数	2,835,532	2,777,597	2,745,600	2,750,699	2,793,711
受託事業者	127,554	131,655	122,403	138,998	136,843
受託事業者割合	4.50%	4.70%	4.50%	5.10%	4.90%

出典：中小企業庁『平成30年中小企業実態基本調査』を基に作成。受託事業者割合は「各業種の受託事業者数／各業種の母集団事業者数×100」で算出している。

このうち、2017年時点の受託事業者の内訳を抜き出したものが図4-3であるが、情報通信機械器具製造業¹⁷¹が第1位を占め、電気機械器具製造業が続いている。第1位の情報通信機械器具製造業は、精密機械と電子デバイス以外の機械、装置、設備に分類される製造業で、大きく通信機械、映像・音響機械、電子計算機に大別される。対象製品は幅広いが、インターネットの普及や5G通信サービスの開始などデジタル化社会の広がりを背景に市場が拡大している製品が多いのが特徴である。

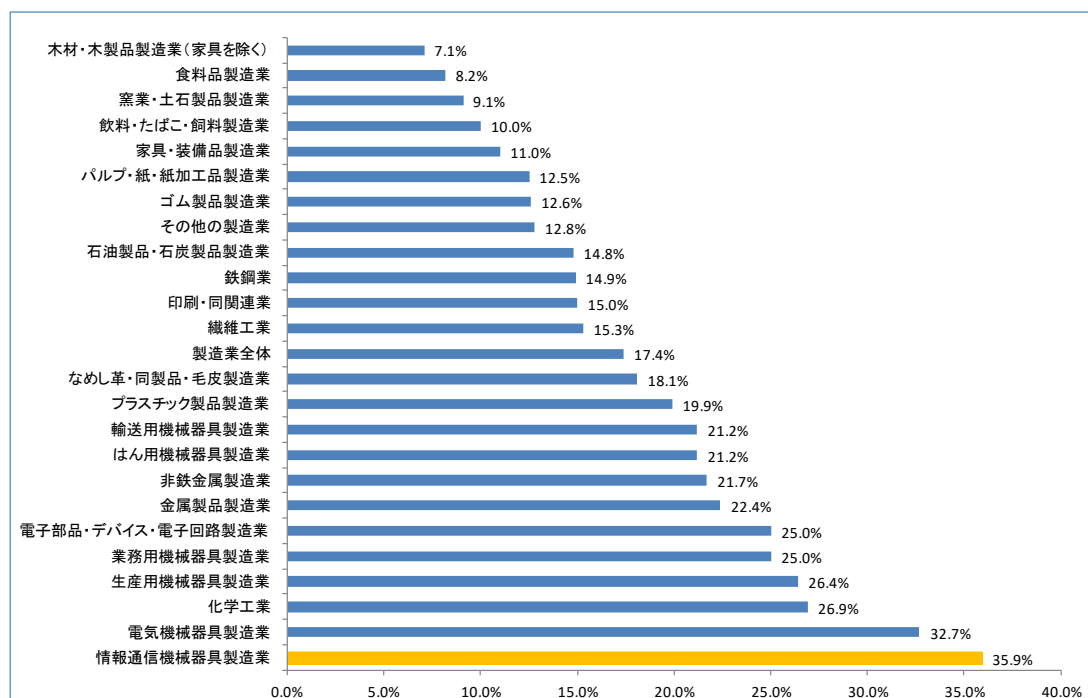
¹⁶⁸植田浩史、1999年、3頁。

¹⁶⁹約11万社の中小企業に対する標本調査。ここで利用する数値は、標本調査の結果を基に、総務省・経済産業省「経済センサス・活動調査」などを母集団として拡大推計を行った結果を集計している点に留意が必要である。「農林漁業」、「鉱業、採石業、砂利採取業」、「電気・ガス・熱供給・水道業」、「金融業、保険業」、「教育、学習支援業」、「医療、福祉」、「複合サービス事業」は含まれない。母集団事業者数全体が1.5%程度減少しているのに対して製造業は増えている。図4-1の経済センサスの調査に見られる中小企業、中小製造業全体が減少している傾向とは対照的である。

¹⁷⁰2020年版『中小企業白書』、「第2部 新たな価値を生み出す中小企業」。

¹⁷¹総務省は日本標準産業分類に関して、平成2002年3月改定で「情報通信機械器具製造業」及び「電子部品・デバイス製造業」を情報技術の進展とこれに関連する産業の拡大等に伴い、製造業の中分類「電気機械器具製造業」から分離して、中分類として新設した。

図 4-3 製造業（中分類）における受託事業者の割合（2017 年）



出典：中小企業庁『平成 30 年版 中小企業実態基本調査』、2019 年を基に作成。

表 4-2 情報通信機械器具に占める生産額の多い上位 10 品目（2017 年）

	生産額（A）	社数（B）	A／B
無線応用装置	933,465	79	11,816
パーソナルコンピュータ	500,198	19	26,326
デジタルカメラ	280,942	9	31,216
デジタル伝送装置	240,501	40	6,013
他に分類されない通信関連機械器具	212,657	139	1,530
携帯電話機、PHS 電話機	198,161	15	13,211
印刷装置	189,499	61	3,107
印刷装置の部分品・取付具・附属品	175,587	133	1,320
その他の移動局通信装置	169,883	73	2,327
その他の端末装置	169,633	38	4,464

出典：経済産業省 2017 年工業統計表品目別統計を基に作成。単位：百万円、社。
A／B に示す数字の単位は百万円。

表 4-2 は、2017 年の経済産業省調査・工業製品出荷額調査から情報通信機械器具製造業のうち生産額の大きい上位 10 品目をまとめたものであるが、パソコンやデジカメ、携帯電話機（スマートフォン）など国際競争の激しいデジタル機器が含まれている。なお、生産額 1 位の無線応用装置はレーダ装置、無線位置測定装置、テレメータ・テレコントロールなどが代表的製品である¹⁷²。

情報通信機械器具は電気機械器具製造業と並んで歴史的に最も早く技術のデジタル化の影響を受けてきた産業である。他の産業と比べて、標準化が進んだことから下請企業の割合の減少幅が大きいことがかつては指摘されていた¹⁷³。ただし、図 4-3 でも示す通り、2017 年時点では製造業全体で 17.4%、輸送用機械器具が 21.2%、情報通信機械器具が 35.9%までそれぞれ下請比率は下がっている。下請比率が下落した背景として、1980 年代以降に加速する製造業のグローバル化に伴う海外生産の拡大、1990 年代以降の経済不況の長期化下、下請環境の激変などが指摘される。大企業の生産拠点の移転や、大企業自身の業績悪化等により、「系列」を維持していくメリットや体力が失われ、中小下請企業にとっても下請けのメリットが失われてきたと言える¹⁷⁴。このように、下請分業構造が変革し受託率の減少につながったが、一方では、輸送用機械器具や電気機械器具、生産用機械器具など産業を支える主要業種においては、依然、中小製造業が分業構造の担い手として役割を果たしている。

¹⁷²一般社団法人 電波産業会『2020 電波産業調査統計』、情報通信産業・電波産業の市場規模の推移による。

¹⁷³経済産業省『中小企業白書 2005 年版』、第 1 部：中小企業の動向、第 1 章：中小企業を取り巻く環境と中小企業の動態では、当時、脱下請がみられる背景として、製品アーキテクチャのモジュール化を指摘している。

¹⁷⁴経済産業省『中小企業白書 2005 年版』、第 1 部：中小企業の動向、第 1 章：中小企業を取り巻く環境と中小企業の動態。

第2節 技術のデジタル化による受託加工型事業者のビジネスの変化

中小企業白書でも指摘される通り、過去の受注割合のトレンドではエレクトロニクス産業では下請企業の割合の減少幅が大きい。しかし近年では、インターネットやスマートフォンの普及を通じて、通信機器、通信環境に関する市場拡大が追い風となり、再び受託事業の割合自体を増やしている。では実際に受託事業に技術のデジタル化はどのような影響を及ぼしているのだろうか。そこで、アンケート調査の結果に基づき、受託事業を手掛ける受託加工型事業者にどのような変化が見られるのかを分析する。

本章ではデジタルファブリケーション技術の代表的技術である AM 技術に焦点を当てて、3D プリンタを日常業務で活用する事業者にはアンケート調査を行った。前述の通り、3D プリンタは既存の工作機械とは異なる機能や性質を持つデジタル機器であるが、3D プリンタが受託加工型事業者の商習慣に変化をもたらし、その結果、企業間取引に変化をもたらしている。具体的に、受託加工型事業者は、金型を作らずに容易に試作品を作り出せる 3D プリンタの特性を活かして、従来以上に試作品の開発や自社新製品の開発に積極的に取り組むことによって、提案型営業を軸とする新たな企業間取引関係を構築している。こうした変化を詳細に分析するために、3D プリンタを日常業務に活用する中小メーカー21 社に対するアンケート調査を実施した¹⁷⁵。

■WEB 調査の概要

【調査期間】2021 年 8 月下旬－9 月上旬

【依頼方法】Microsoft Forms を活用しアンケート調査票を作成、個別企業に電子メールで依頼した。

【回答数】21 社（調査依頼社数 21 社）、回答率 100.0%

【業種】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】東京都、神奈川県、埼玉県、新潟県、岩手県

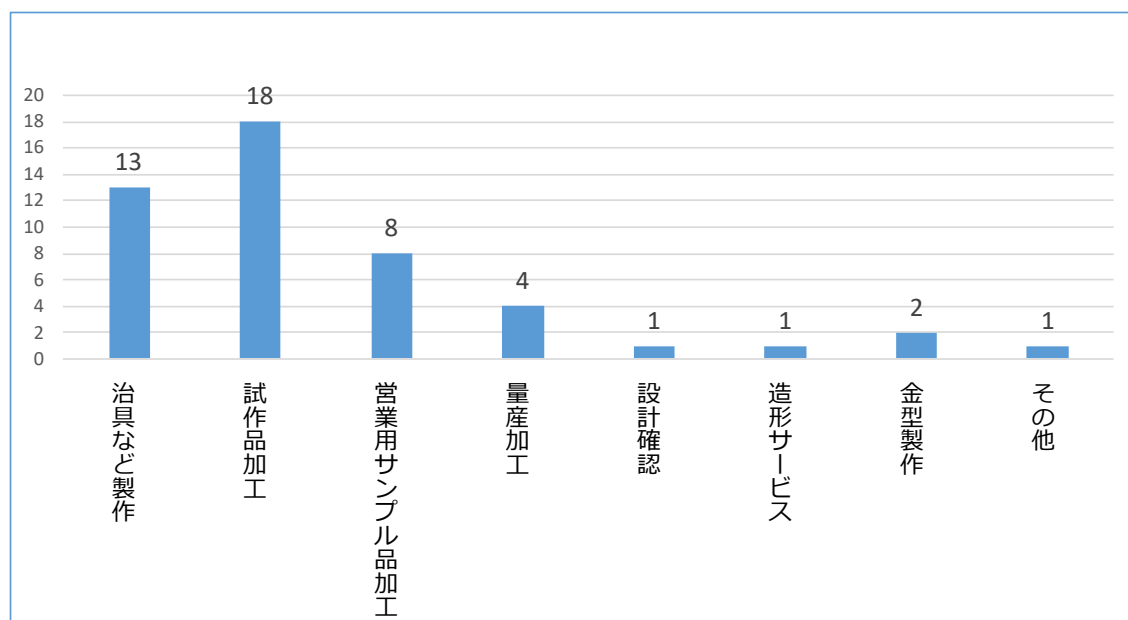
アンケートの回答企業 21 社中 13 社が受託加工型事業者で、残り 8 社中、7 社が自社製品の製造と受注加工の 2 つのビジネスモデルで構成する企業であった。

3D プリンタの用途（図 4-4）を訊ねたところ、21 社中 18 社が試作品加工を選び、最も多かった。3D プリンタは金型製作が不要で容易に試作品製作が可能なことから、積極的に利用されていると考えられる。それは「営業用サンプル品加工」の選択が 3 番目に多い

¹⁷⁵調査は 2021 年 8 月下旬から 9 月上旬にかけてインターネットを活用して行った。調査対象企業は筆者がこれまでの取材経験を通じて、3D プリンタを業務に活用する企業に直接依頼したことに加えて、3D 設計開発技術支援施設、『いわてデジタルエンジニア育成センター（岩手県北上市）』の小原照記センター長の協力を仰ぎ、小原氏の人材ネットワーク経由で調査協力企業から回答を得た。

ことから推察される。受託加工型事業者が試作品製作について新たなアイデアを提案したとしても、従来の NC 工作機械を活用した方法では金型の製作費や製作期間がボトルネックとなり試作の判断をためらうケースも考えられるが、3D プリンタであれば容易に試作が可能なることから活用されている。

図 4-4 3D プリンタの用途（複数回答可）



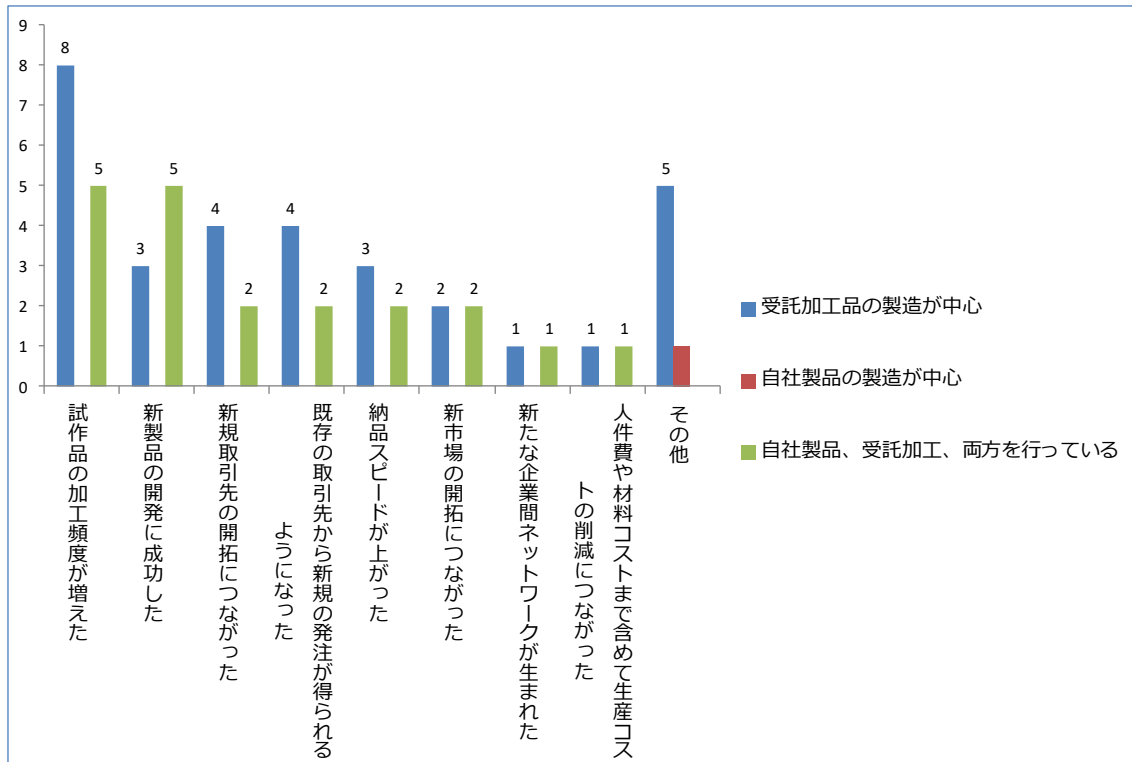
単位：社。

また、最も回答数の多い「試作品加工」をどのような分野で活用しているのかクロス集計したものが図 4-5 である。回答では「医療機器、福祉機器」が最も多く見られ、「自動車」が 2 番目に多い。「医療機器、福祉機器」が多い理由は、同分野では患者個々人の症状や体形に合わせカスタマイズ性の高いニーズが存在していることから、3D プリンタの特性と合致性が高い点が利用につながっているためである。例えば、複雑な形状の人間の心臓モデルの加工は、従来の機械加工では難しいが、3D プリンタを使えば容易に製作できる¹⁷⁶。

図 4-5 では、受託加工品の製造が中心の企業、自社製品、受託加工、両方を行っている企業いずれも「試作品の加工頻度が増えた」の回答が最も多く見られた。

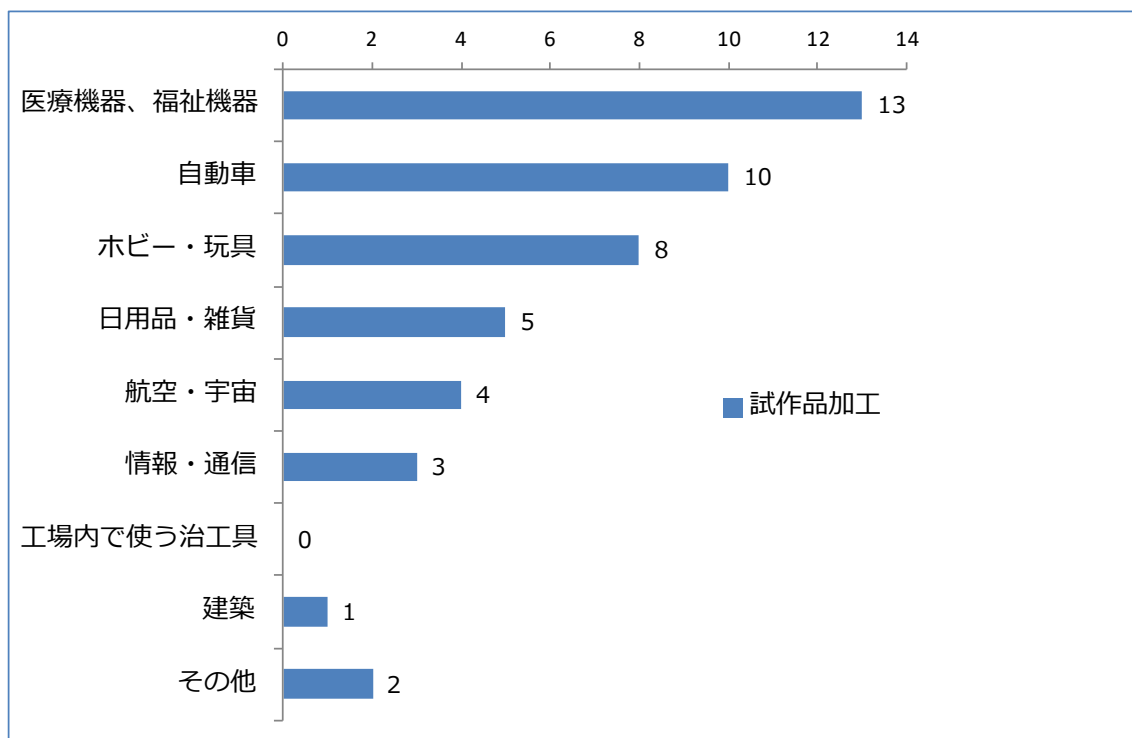
¹⁷⁶医療機器分野の産業事例については第 6 章に詳細を譲ることとする。

図 4-5 事業形態別に見た 3D プリンタの利用によるビジネスの変化



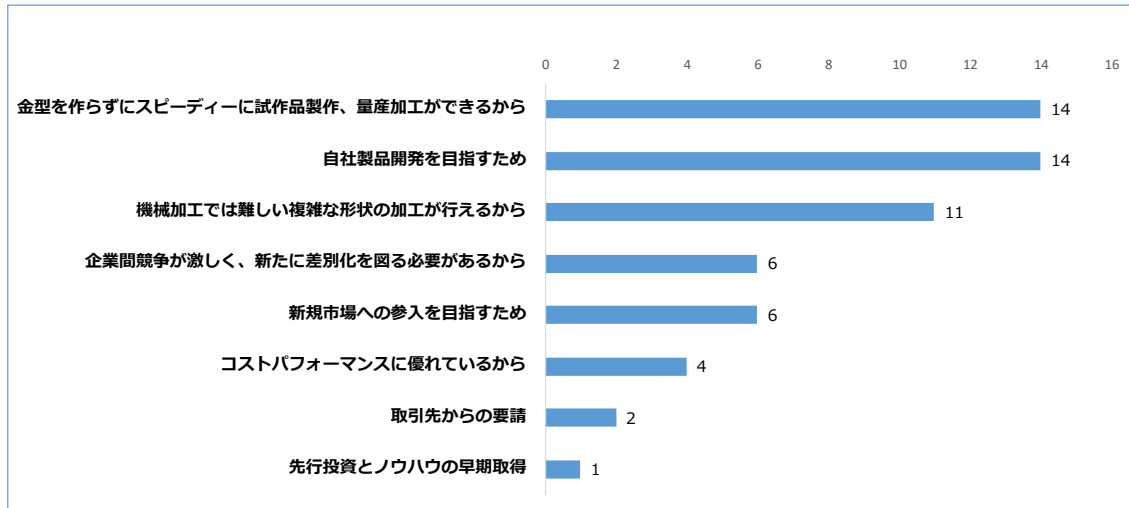
単位：社。

図 4-6 試作品加工を用途別にクロス集計した結果（複数回答可）



単位：社。

図 4-7 3D プリンタを利用する理由（複数回答可）



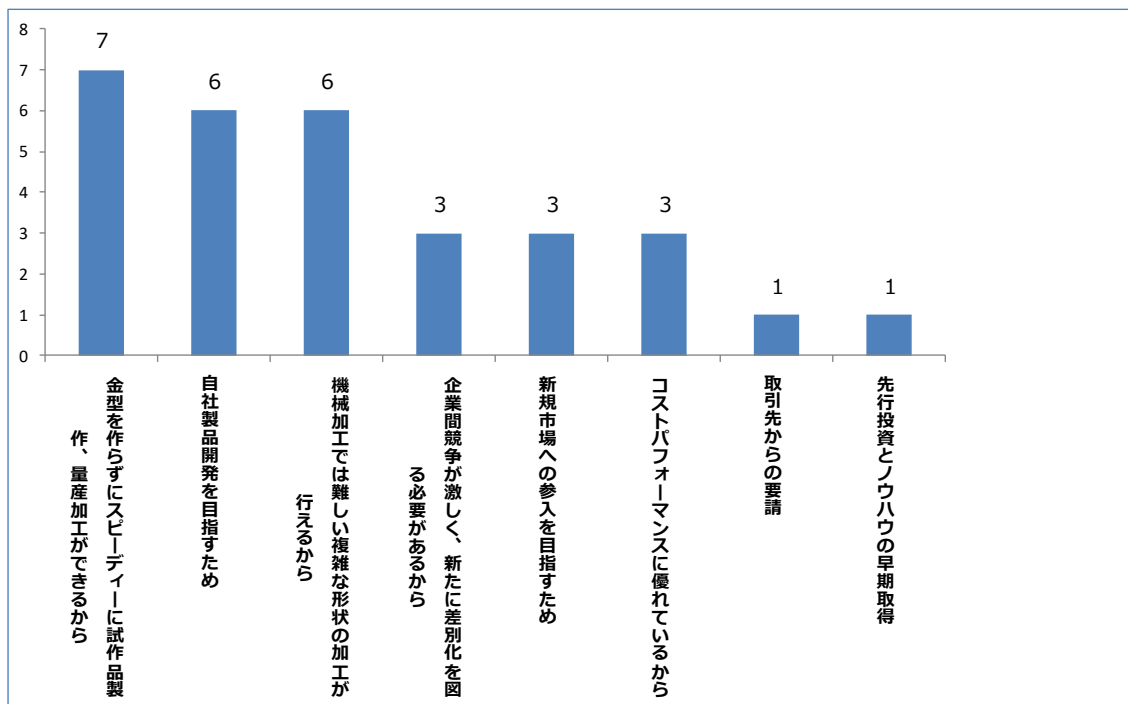
単位：社。

図 4-7 は 3D プリンタを利用する理由について訊ねた。回答では「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」と「自社製品開発を目指すため」が 1 番目の理由として選ばれ、次いで「機械加工では難しい複雑な形状の加工が行えるから」を選ぶ企業が多かった。この回答は図 4-4 の「3D プリンタの用途」についての回答と重なっている。つまり、3D プリンタを利用する企業の多くは、3D プリンタの特性を活かしたビジネスを手掛けている。NC 工作機械は試作品生産ではコスト高になるのに対して、3D プリンタは NC 工作機械を使った従来の製造方法を補う点で優れている。そのため、日本では NC 工作機械と 3D プリンタを組合せた複合機の生産、活用が主流になろうとしている¹⁷⁷。受託加工型事業者が積極的に 3D プリンタを使い始めているのは、3D プリンタがすでに実用的な工作機械であると認知、普及が広がっていることが背景にある¹⁷⁸。3D プリンタの実用性について訊ねたところ、21 社中 10 社が「既に実用的な工作機械で必要な設備であると考えている」、7 社が「用途や性能、生産量などを限定すれば、実用的な工作機械で必要な設備であると考えている」と回答した。

¹⁷⁷例えば 2018 年 11 月 1 日付の日刊工業新聞最終面「深層断面／JIMTOF に集う、進化する金属加工」では、欧米の金属 3D プリンタは、AM 単機能機なのに対し、日本勢は「AM＋切削」のハイブリッド機が主流であると紹介されている。AM 技術の課題である精度を補うため、切削加工を加えるという発想が新たな技術のデジタル化を生み出している。

¹⁷⁸Barry Berman (2012) は、「3-D Printing: The Printed World」(2010 年) の市場調査のデータを引用し、3D プリンタによる造形物の 20%以上が試作品ではなく最終製品になっているとし、2020 年にはこの割合が 50%になると予測を述べている。

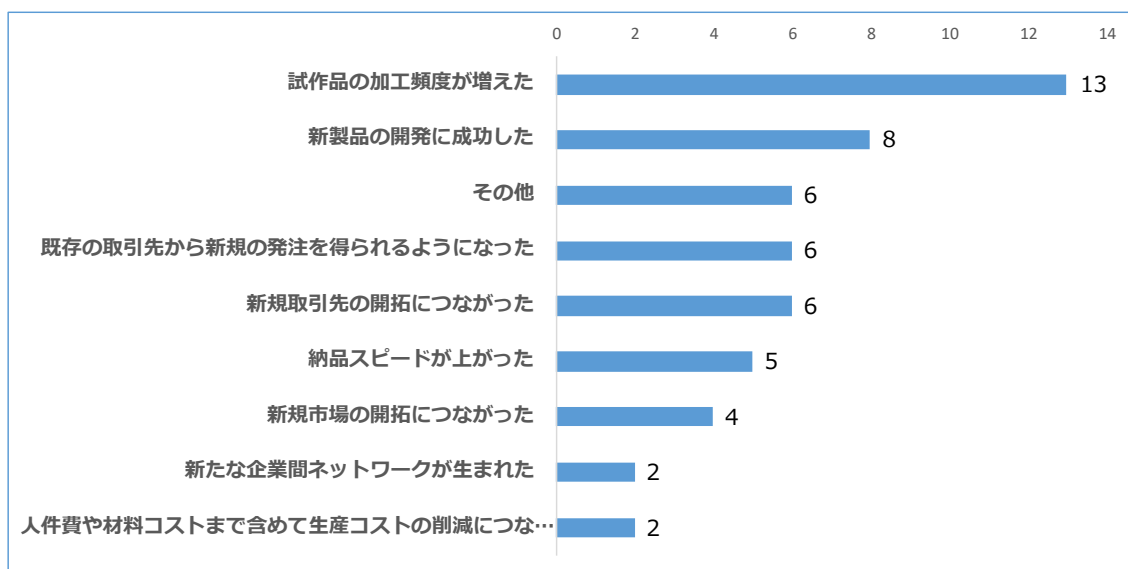
図 4-8 3D プリンタを実用的な工作機械と捉えた企業の利用理由（複数回答可）



単位：社。

このうち、「既に実用的な工作機械で必要な設備であると考えている」と回答した企業が3Dプリンタを利用する理由についてクロス集計したものが図4-8である。図4-7と同様に「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」が最も多い回答である。

図 4-9 3D プリンタを利用することでのビジネスの変化（複数回答可）



単位：社。

次に、3D プリンタの利用に伴うビジネスの変化について訊ねた。図 4-9 は回答を示したものであるが、上記の回答同様に「試作品の加工頻度が増えた」が最も多いが、それ以外に「新製品の開発に成功した」（8 社）、「新規取引先の開拓につながった」（6 社）の回答が注目される。技術のデジタル化の進化が、受託加工型事業者の企業間取引にどのような変化を与えるのか確認されるからである。この結果を用途別結果とクロス集計すると、医療機器、福祉機器分野が最も多かった。

この結果について、医療機器、福祉機器分野で「新製品の開発に成功した」「新規取引先の開拓につながった」を選んだ企業のうち、R 社と Q 社、2 社の事例を取り上げより詳しく分析してみよう。

■回答企業 R 社の事例分析

【事業概要と 3D プリンタの導入】

R 社は樹脂、アルミニウムなどの加工を専門に手掛けている。家庭用電気製品をはじめ、事務機器、通信機器、医療機器、自動車関連などの工業デザインモデルの製作を中心に、省力化機械装置、半導体製造装置などの精密樹脂部品、治工具類の加工製作を得意としている。同社は他社に先駆けていち早く 2004 年にシーメット¹⁷⁹製 SOUP II（HS696 材料 ABS ライク）を導入した。当時はまだ、積層造形機が高額であったため、メーカーや同業他社で 3D プリンタを導入している企業が少なかったものの、家電、通信機器、自動車関連メーカーから試作品製作の依頼や、同業他社からの注型用のマスターモデル製作などの依頼が多数、舞い込んだからであった。しかし、現在は、外部からの案件は月に 1 件から 2 件程度である。理由としては、3D プリンタ関連の特許が切れ、安価な 3D プリンタが数多く発売されたことと、ものづくり補助金等の助成金で開発メーカーや受託加工型事業者での導入が広がったためと考えている。

【他分野への進出】

同社は、2017 年に新型の 3D プリンタ（キーエンス製アジリスタ-3200）を導入した。X 大学から医療用心臓モデル製作の共同研究案件が寄せられたため、シリコンゴムで造形品が作れる同機の導入に踏み切った。X 大学では、心臓外科手術予定患者の CT データから心臓モデルを製作し、術前シミュレーションに基づく手術計画の策定に 3D プリンタが利用された。心臓立体モデルを術前シミュレーションに使用することにより、画像データだけでは得られない奇形部分の位置関係、手術部位の見え方を理解し、術者同士で共有することができ、術前検討モデルとして有用性が高かった。また、R 社は同プロジェクトを通じて、同じ X 大学とネットワークができた。現在はそのネットワークを生かして同大学の他研究者と助成金を活用した研究開発案件でモデル製作を行っている。

¹⁷⁹精密機器などを手掛けるナブテスコ株式会社子会社の 3D プリンタメーカー、シーメット株式会社を指す。

また R 社は 3 年前、ハンドメイドで造形物を製作できる人材の入社を機に自社製品の開発を構想し、地元の観音像をモチーフとした“立体お守りフィギア”を製作し、自社製品として販売に乗り出した¹⁸⁰。

■回答企業 Q 社の事例分析

【事業概要と 3D プリンタの導入】

Q 社は電気機械器具及び各種精密機械器具の製造、販売を手掛けており、2014 年 8 月から 3D プリンタを活用した造形サービスを開始した。同社は元々、製造業であることから、製造関係者や資材等を販売する事業者との企業間取引が多く、そのため、入手する情報も製造業に特化したものが多かった。しかし、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。

【新たな企業間取引の開始】

同社は 3D プリンタの導入以前から、生産技術部門で 3DCAD を使っていた。そのため、新規事業として造形サービスにいち早く対応ができた。医療分野では、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持つ。また、そうした実績を買われて 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ている¹⁸¹。

【3D プリンタを活用した新製品開発】

また Q 社は、3D プリンタを活用して新製品開発も手掛けている。例えば、大学の医学部や、県の産業技術センターと産学官による共同研究を行い製品開発に成功（特許出願済）している。この開発品は、3D プリンタで形状を決める「型」¹⁸²を 3D プリンタで製作したものであり、試作品を短期間で何度も製作するためには 3D プリンタは不可欠であったという。

【新たな企業間ネットワークの広がり】

同社は、3D プリンタの導入で、製造業以外の異業種へとネットワークを広げている。3D プリンタは、素材や製作方法の種類（機種）が複数あり、企業によって何の機種を導入しているか、また 3D データの編集には、3DCAD が得意、ドローンで撮影したデータを編集するのが得意など、それぞれ得意な分野を持つ企業同士で情報や製作を相談、紹介

¹⁸⁰さらには地元、観光協会から「お土産品」の相談を受け、地元特産品のホヤのストラップを製作するなど、ホビー分野での自社製品開発を強化している。

¹⁸¹同社は「これらすべての実績は、3D プリンタの導入や 3D データの編集作業ができれば、現在でも取引はなかった」とコメントしている。

¹⁸²射出成型などに使われる金型とは異なる製品。

し合える新しいネットワークが生まれている。例えば、Q社は、当初、北東北のネットワークに属していたが、現在では首都圏や愛知県、関西圏までネットワークを広げて、それぞれの強みを理解しながら相談し合えるネットワークを形成している。

第3節 アンケート調査と事例分析の結果からの示唆点

アンケート結果では、3D プリンタを利用する理由について、「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」と「自社製品開発を目指すため」が理由として最も選ばれた。また、その効果についても、自社製品の製造が中心の企業以外、「試作品の加工頻度が増えた」が最も選ばれている。

このことから金型を使わずに容易に積層造形により製品の製造が行える 3D プリンタの特性に受託加工型事業者が着目してビジネスに取り組む姿勢が分かる。先行研究でも示される通り、NC 工作機械の登場では、それまで汎用工作機械を使って仕事を行っていた中小製造業が導入以前と比較して、デジタル技術を導入後、導入企業の業務内容がどう変化したのかに焦点が当てられている。「省力化」や「製品品質・精度の向上」「コストダウン」などが受託加工型事業者、業務の発注者両者ともに当初、関心の中心にあった。それは、汎用工作機械で行っていた作業をデジタル化された NC 工作機械に変更した点では切削加工の業務の範疇の中で起きうる変化であり、技術のデジタル化の関心の方向性は「効率化」を指向していたと言える。しかし、3D プリンタの活用では、先行研究に見られる「効率化」の深耕を念頭にしながらも、従来の切削加工では物理的に難しい複雑な形状の製品製造も容易に行うことができる。R 社、Q 社の個別事例からも、明らかに従来の ME 機器とは異なる性質を持つもので、受託加工型事業者の企業間取引に新たな変化をもたらしていると言えるだろう。

また、アンケート調査結果によれば、3D プリンタを導入、活用する企業では「試作品の加工」が最も多い。金型を使わずに手軽に製品の積層造形が可能な点が優位性を発揮する訳であるが、こうした利便性をビジネスとして展開する事業者が増えている。例えば、近年、日本国内でもサービスビューローと呼ばれる 3D プリンタの積層造形サービス事業者が増えつつある。サービスビューローは、外部から持ち込まれた 3D データをもとに 3D プリンタで積層造形を行う受託加工サービスである。製品の受託加工では、従来から工作機械や鍛圧機械を使っのサービスが存在する。従来の受託加工の場合も、顧客から提供された設計データを基に製品加工する点では似ているが、独自のパラメータ¹⁸³に基づいて受託加工する技術のデジタル化を用いたサービスと言える。

金型を使わずに手軽に製品の積層造形が可能な 3D プリンタの優位性に着目する際、ポイントの 1 つになるのが提案型営業の強化である。3D プリンタの用途として、3 番目に回答が多い「営業用サンプル品加工」が該当する。従来、受託加工型事業者をはじめ中小製造業では、金型の製造コストやリードタイムがボトルネックになり、仮に良いアイデアが

¹⁸³例えば、工作機械を使った切削加工では、切削条件を決める要素として、「送り」「切り込み」「速度」が挙げられるが、一方、3D プリンタを使った積層造形では、造形条件を決める要素として「エネルギー出力」「造形軌跡」「走査速度」「造形槽内温度」など、工作機械と異なる条件設定が必要である。

あっても容易に試作化ができず、設計図面やイラストなど 2 次元情報で提案が行われていた。受託加工型事業者では、業務の委託先との取引関係が長期継続的になりがちであり、マイナーな部分も含めて製品のモデルチェンジが繰り返される場合、中小企業側が既存の製造方法や設計に対して問題を発見し、発注側に提案することがある。受託加工型事業者が特定の分野の加工や製造に特化して、専門化することで得てきた知識やノウハウによるもので、提案は発注側によって検討され採用の可否が決められる¹⁸⁴。こうした活動は受託加工型事業者にとって重要であり、3D プリンタはこうした従来の提案活動をより“見える化”する手段であり、容易に試作品を作成することができれば、既存取引先に対する新規提案や新規取引先の開拓にプラスに働く。こうした活動は新たな企業間取引に変化を与えるものであり、既存の ME 化研究では見られないものである。

¹⁸⁴植田浩史、1999 年、7 頁。

第4節 小括

本章では、技術のデジタル化が中小製造業の事業形態にどのような変化を与えるのかを分析した。具体的には取引先から設計図の貸与を受けて仕様書に基づいて、部品や半製品を加工する受託加工型事業者の企業間取引の変化について、ME化研究の対象となるNC工作機械と、3Dプリンタについて比較検討を行った。両者は使用する技術の概念という点で大きく異なるものであるが、もう1つの決定的な違いは、使用できる設計データにある。3Dプリンタの活用では3D設計による3Dデータのみ使用できる点でNC工作機械とは異なる。本稿でも第3章で3DCADに関するアンケート調査で、設計と製造の相関関係を明らかにしたが、技術のデジタル化が高度化されるに従い、企業側も製造技術に焦点を当てた経営努力だけでは競争に打ち勝てず、設計に対する経営強化が必要な事実も明確化している。

3Dプリンタの普及以前にも下請企業における改善活動には限界があることはしばしば指摘されてきた。山田（1993）は、日本の製造業の競争力を支える要因の1つとして、安価で高品質の材料・部品を供給する下請メーカーの存在があったとはいえ、製造現場の改善努力（工程改善）だけでは投入資源に対するQCDの改善効果は次第に小さくなるため、設計能力の充実を図り、自力で部品の設計変更を行なう等の対応が不可欠となりつつあると指摘している¹⁸⁵。デジタルファブリケーション技術が今後も普及し、サービスビューローに見られるような新たな形での受託加工スタイルが定着していく場合、3Dデータの設計を誰が行うのかという問題を避けて通ることはできない。技術のデジタル化が中小製造業の事業形態に与える変化は取引関係に留まらず、中小製造業の人員体制、人材教育などより内面的な課題にも影響を及ぼすものである。

¹⁸⁵山田基成、1993年、74-75頁

第 5 章 企業事例の分析

本章では技術のデジタル化を意識して経営に取り組む中小製造企業 2 社を取り上げ、技術のデジタル化に中小製造企業はどう対応すべきかを分析する。

従来の ME 化研究では、プログラムを組めば ME 機器が自動的に加工するため、企業の技術が平準化¹⁸⁶してしまう懸念を示している。そのため、ME 機器を活用するための新たな技能の確保や、ME 機器に適さない生産規模での対応が求められるなど、対策の必要性が論じられてきた¹⁸⁷。しかし、実証に基づいてその具体的対策を提示する研究は少ない。

技術のデジタル化の影響は、影響を受ける企業が属する業界や業種、事業規模や経営環境など、個々の条件により異なり対応策も異なる。本稿が対象とする中小製造業の場合、中小製造業ならではの視点に基づく技術のデジタル化への対応が求められる。本章では、先行研究で述べられてきた技術のデジタル化への対応策を検証するために、技術のデジタル化の特性の 1 つである“効率性”に着目し、「株式会社サイトウ製作所」（以下、サイトウ製作所）と「株式会社アタゴ」（以下、アタゴ）を事例に分析を行う¹⁸⁸。

第 1 節 技術のデジタル化の技術的特性領域

第 1 項 中小製造業における事例企業の位置づけ

技術のデジタル化に中小製造業はどのように対応すべきか、第 4 章では受託加工型事業者に焦点を当てて分析を行った。第 5 章では中小製造業のもう 1 つの事業形態である自社開発した製品を製造するメーカー機能を有する自社開発型事業者¹⁸⁷に焦点を当てて考察する。事例で取上げるサイトウ製作所とアタゴは、自社製品の開発、製造、販売を自社で手掛けているが、両社はデジタル技術の特性をうまく利用して業績を伸ばしている。

2 社を「選定」した理由は、技術のデジタル化の特性である“効率性”を逆手に活かした経営を取入れているためである。デジタル技術を活かした過去の製品事例では、生産の効率性を徹底的に追求し、収益性の高いボリュームゾーンの製品に経営資源を投下することで市場シェアを確保する事例が多く見られる。Pine（1999）が指摘するように、大量生産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まらない製品は排除されていく傾向が見られる¹⁸⁹。しかし、そうした分野

¹⁸⁶本章では NC 工作機械をを使って加工された製品の品質が平準化するユーザの立場で起きる現象を概念として示す。

¹⁸⁷第 1 章、第 1 節、第 2 項 デジタル技術の特性を参照。

¹⁸⁸筆者論文「中小製造業のデジタル技術への対応戦略－株式会社サイトウ製作所を事例にして－」『イノベーション・マネジメント』No17、2020 年 3 月より引用。

¹⁸⁹P.R. Dean, Y.L. Tu & D. Xue、2009 年、1072 頁。

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。本稿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。事例として取上げる 2 社の経営ではこの技術的特性領域をうまく経営に活かした製品ラインナップや新製品開発を積極的に進めている。サイトウ製作所では、効率性とは明らかに正反対のビジネスモデルを追求している。超硬小径ドリルと言われる特定市場で年々、製品のラインナップを増やし業績を伸ばしている。また、製品ラインナップが増える事で多品種生産となり、その結果、製造における段取り替えが複雑になる。一見、非効率的な対応に思われるが、技術のデジタル化では効果を上げて競合の市場参入を防いでいる。もう 1 社のアタゴもサイトウ製作所と同様に多品種の製品ラインナップを進める一方、製造について内製化を強化している。多品種化により生じる生産効率の低下を内製化率の引上げでカバーし、その結果高い利益率を実現し、競合との市場競争で優位性を発揮している。

この事例 2 社はニッチトップ企業と呼べるレベルの企業でもあることを付け加えておきたい。これまで中小企業は大企業との直接的な競合を避けるために、大企業が事業としての魅力を感じない市場規模の小さな分野ーニッチ市場で事業展開を図るべきとされてきた¹⁹⁰。ニッチ市場で活躍する企業については「ニッチトップ企業¹⁹¹」と呼ばれるが、優れたニッチトップ企業がニッチトップ製品市場で高いシェアを確保している背景には、いずれの企業も大企業が参入を躊躇するなど潜在的参入者の少ないことが予め予想される市場を意図的に選んで製品を開発している¹⁹²。細谷（2014）は、グローバルニッチトップ企業¹⁹³に見られる共通の特性として、「製品開発パターン」、「競争優位を保持し他社の模倣等を防ぐ方法」、「輸出を中心に自然体で進む海外市場への浸透」の 3 点を指摘しており、このうち 2 番目の特性である「競争優位を保持し他社の模倣等を防ぐ方法」で大企業との市場の差別化を述べている。ニッチトップ戦略については多くの先行研究が見られるのが、その定義

¹⁹⁰山田基成、2010 年、200 頁。また、中内（1977）は、中小企業の存立条件に関わる問題について、大資本による小資本の駆逐が緩慢にしか進行せず、全体として中小企業が広汎に存在する部門は、「他の諸事情」を否定し去る程に生産力の発達していない、生産性と生産規模との相関関係の低い部門であると述べている。

¹⁹¹経済産業省・厚生労働省・文部科学省編『2003 年版 製造基盤白書ー日本製造業の復権に向けた戦略的取組』によれば、限定された特定分野ではあるが、国内市場、更には世界市場において高いシェアを有する企業を「ニッチトップ企業」とし、同企業の製品で個別のニッチ市場でシェア 50%以上を獲得している製品を「ニッチトップ製品」と定義している。

¹⁹²細谷祐二、2014 年、48-49 頁。

¹⁹³細谷（2014）はニッチトップ型企業の中で、特に製品開発能力が高いなど優れたパフォーマンスを示す企業を「グローバルニッチトップ企業」と呼んでいる。また山田（2010）は、使用する技術や生産する製品としては極めて限られた分野であり、市場規模としてはそれほど大きなものではないが、その限られた市場でトップを目指し地球規模にまたがる分野で事業を営む企業をグローバルニッチ企業と定義している。

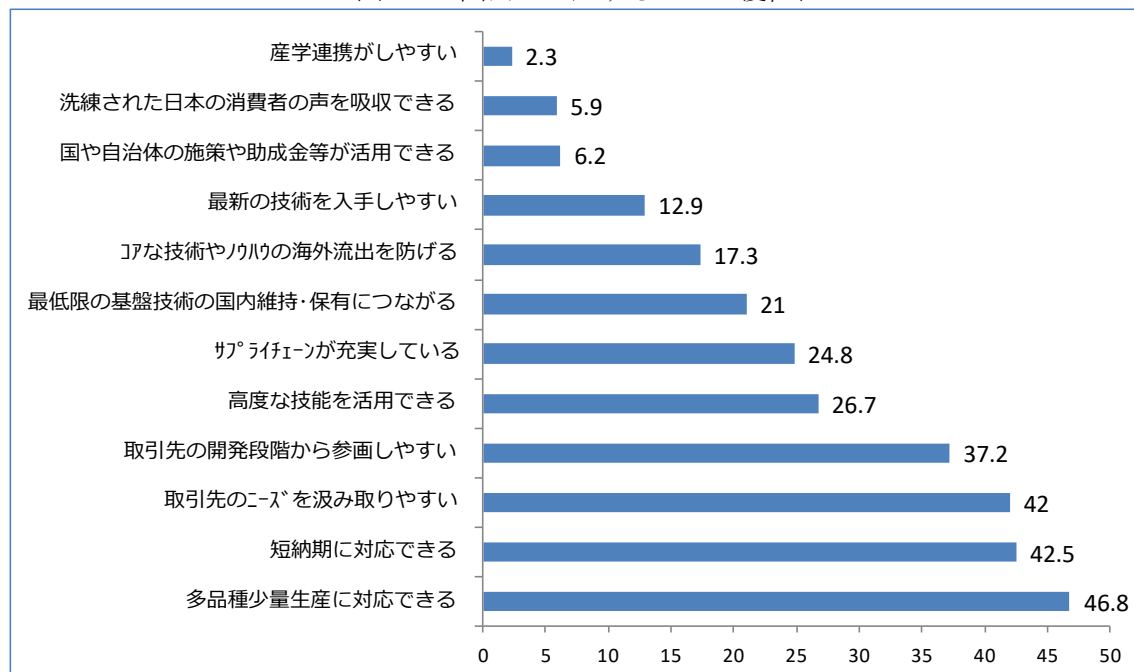
について、後藤¹⁹⁴は、近年の主な調査・研究での扱いをみると、大企業と競合しない限定的な市場（ニッチ市場）を作り出し、その分野で高い競争力を持つ、という点では共通しているという。また、高橋¹⁹⁵は、2003 年版の「製造基盤白書（ものづくり白書）」で記述されているニッチトップ企業が、限定された特定分野ではあるものの、国内市場、世界市場において高いシェアを有する企業とし、個別のニッチ市場でシェア 50%以上を獲得している製品がニッチトップ製品、同製品を持つ中小企業がニッチトップ企業と引用している。

ニッチトップとは企業が自ら目指すべき戦略の「結果」であるが、事例 2 社ではそのアプローチの方法が技術のデジタル化に対しても有効性を発揮している。

第 2 項 技術のデジタル化の技術的特性領域

本章では多品種少量生産の施策について分析する。技術のデジタル化で、生産効率が低く収益性の上まらない製品は排除されていく傾向にあるが、多品種少量生産は規模の経済性と対照的な特性を持つためである。

図 5-1 国内で生産することの優位性



出典：経済産業省製造産業局、2016 年 3 月『製造業をめぐる現状と課題への対応』。

多品種少量生産¹⁹⁶は、1970 年代以降、日本の製造業に普及してきた生産方式であり、特

¹⁹⁴後藤康雄、2015 年、43 頁。

¹⁹⁵高橋美樹、2015 年、57 頁。

¹⁹⁶同一工場内で製品種類は同一カテゴリーではあるものの、機能や性能、用途別に異なる種類の製品を生産する生産方式を指す。

に中小製造業が志向するビジネスモデルとして一般的に見られるようになった¹⁹⁷。日本の中小製造業には多品種少量生産を指向する企業が多い。理由としては受託加工型事業者が多く、発注者から試作品の製作や少量生産などの要望にきめ細かく対応できるビジネスの需要が存在していたことが挙げられる。図 5-1 は経済産業省が 2015 年に行った調査で、中小製造業が国内で生産を行うことの優位性として、「多品種少量生産に対応できる」、「短納期に対応できる」といった要因を挙げる企業が多いことを示している。

多品種少量生産を行う場合、必ず製品ごとの加工条件に合わせて段取り替え¹⁹⁸と呼ばれる作業が必要になるが、製品数が多いほど段取り替え時間が増え、1 製品当りの製造時間、タクトタイムに影響を与える。さらには段取り替えの良し悪しは生産稼働時間の低下を招くほか、切り替え時に不良品が出て、歩留りが低下するなど生産全体に影響を及ぼす。

規模の経済性を追求する企業が多品種少量生産を敬遠する理由にはこうした“面倒な作業”と作業自体をロスと考えているためである。技術のデジタル化が進むことでエレクトロニクス産業などに一般的に見られるモジュール化生産では、複数の製品間や製品世代間で部品の共通化が実現される。その目的は製品開発コストの削減や製造工程のコストダウンによる量産コストの削減、リードタイム削減にある。こうした取組みの追求と多品種少量生産は親和性が低いと言える。前提として、多品種少量生産に取り組む中小製造業の経営者自らが技術のデジタル化の特性が自社にどのような影響を及ぼすのか適切に理解していなければならない。企業ごとにさらなる付加価値を付けた取組みがなければ対応策としては弱いだろう。こうした問題意識から本章では多品種少量生産に取り組む 2 社の中小企業事例を通じて、技術のデジタル化に対する対応策を分析することとする。

¹⁹⁷黒瀬 (1996) は第 1 次オイルショックを契機に中小企業経営の焦点は量産能力の発揮から、フレキシブルな多品種少量生産の遂行と技術、デザイン、情報など経営資源のソフト化へ移ったと述べている。そして、ソフトな経営資源と ME 技術によりフレキシブルに多品種少量生産を行う企業をソフト型中小企業と定義している。

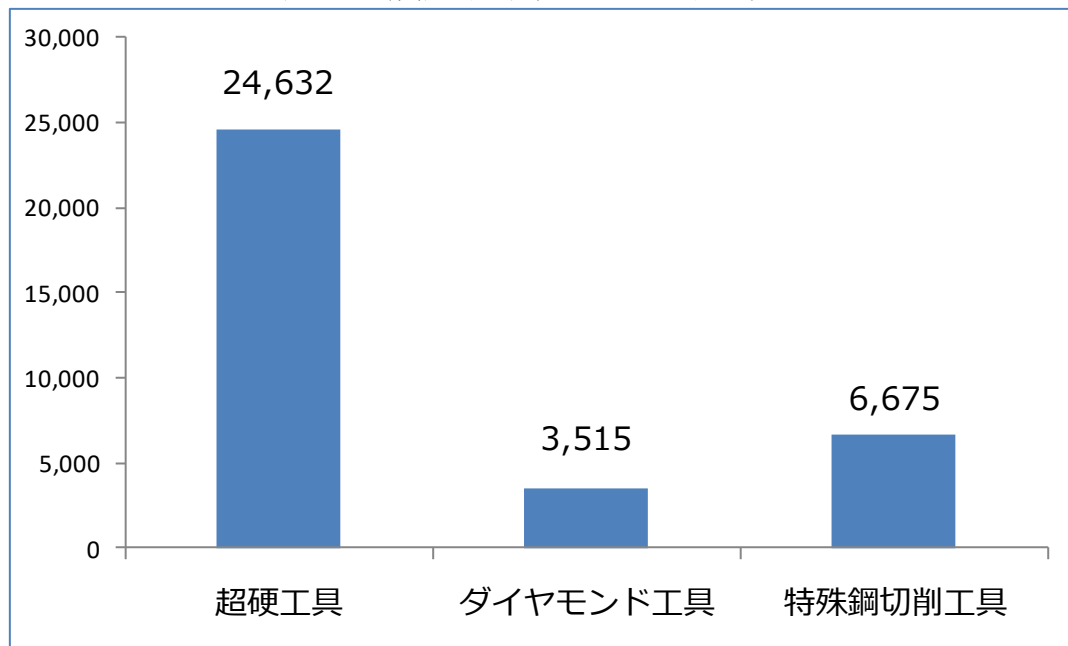
¹⁹⁸株式会社キーエンス HP、FA 用語辞典によれば、「生産ラインに流す製品に合わせて、加工機や治具・装置の設定を変更する作業のこと」と記載。

第2節 事例1:株式会社サイトウ製作所¹⁹⁹

第1項 切削工具市場の概況

株式会社サイトウ製作所（以下、サイトウ製作所）は東京都板橋区に本社を置く精密切削工具²⁰⁰の専門メーカーである。同社の概要を説明する前に、まず切削工具業界の概況を確認したい。切削工具は、工作機械により金属材料を削り出す道具で工業生産に不可欠である。国内の市場規模は約4,098億円であり、全体の約7割を超硬工具が占める（図5-2）。その内訳を図5-4に示すが、超硬工具²⁰¹のうち、超硬チップが超硬工具市場全体の約5割を占め、超硬エンドミル、超硬ドリルがこれに続いている。

図5-2 機械工具市場における工具別売上



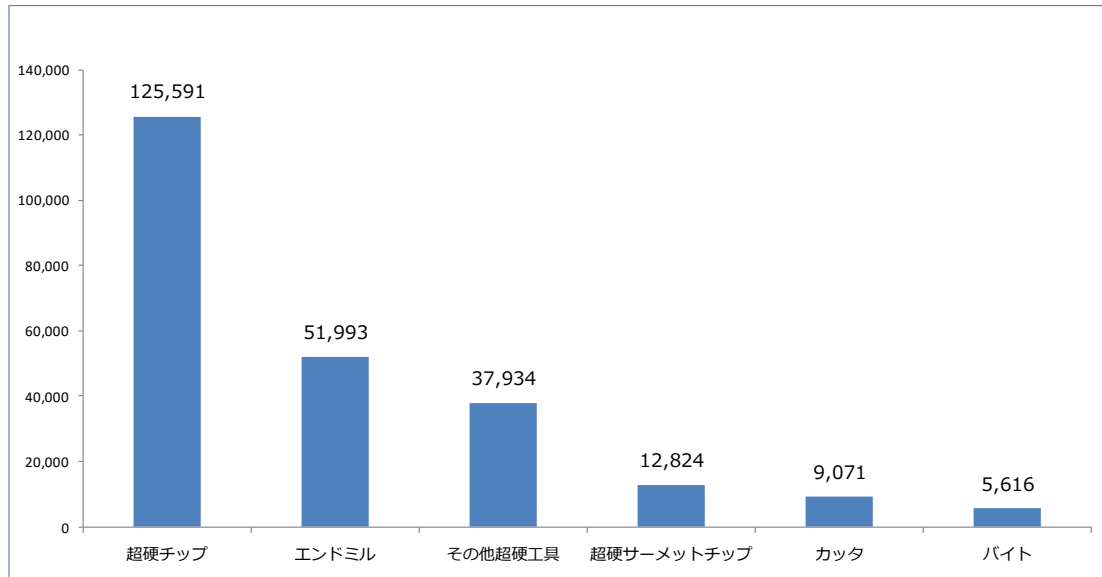
出典：経済産業省『生産動態統計年報（機械統計編 2019 年度）』に基づき作成。単位：百万円。

¹⁹⁹第2節は「中小製造業のデジタル技術への対応戦略－株式会社サイトウ製作所を事例にして－」『イノベーション・マネジメント』No17、2020年3月の論文に依拠している。

²⁰⁰切削工具とはあらゆる物を加工する時に使用される工具で、製造に不可欠なものである。大きな物は、石油の掘削、トンネル工事などに使われる物も切削工具である。小さな物では、半導体業界に供給される微細な加工に使用される物も切削工具と呼ばれる。

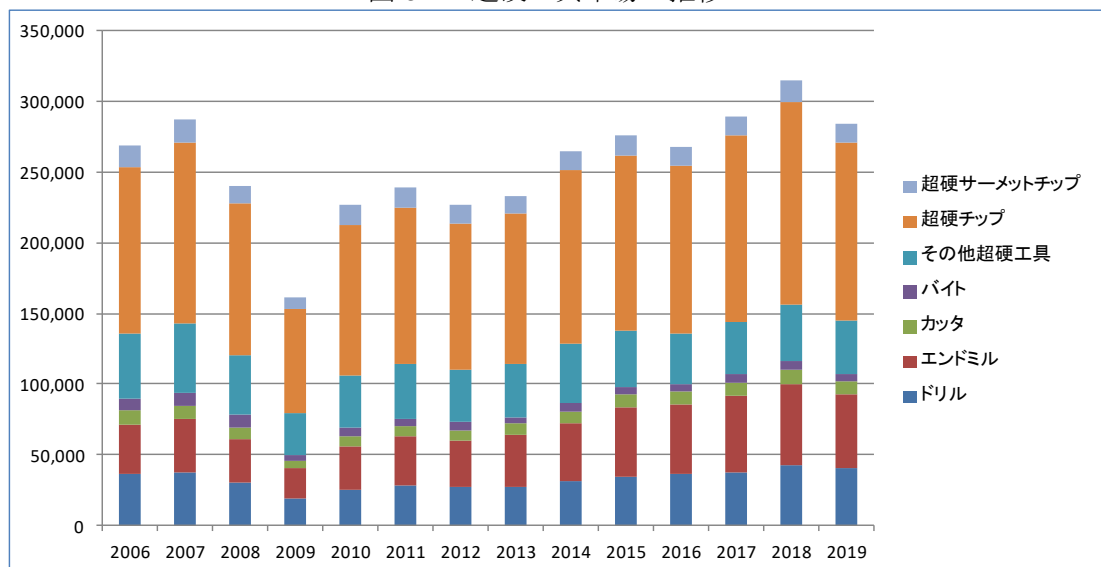
²⁰¹コバルト等の鉄系金属と、炭化タングステン等の炭化物を化合し作成した高強度を保つ超硬合金を用いた切削工具の総称。MMC リョウテック株式会社 HP によれば、超硬合金は1923年、ドイツの K.Schröter によって製法が開発された。これを製品化したのがドイツの Friedlich Krupp 社で「Widia」と名付けて1926年に世界初の超硬工具が発売された。

図 5-3 超硬工具市場の内訳



出典：経済産業省生産動態統計年報（機械統計編 2021 年 6 月）を基に作成。単位：億円。

図 5-4 超硬工具市場の推移



出典：経済産業省『生産動態統計年報（機械統計編 2019 年度）』に基づき作成。単位：百万円。

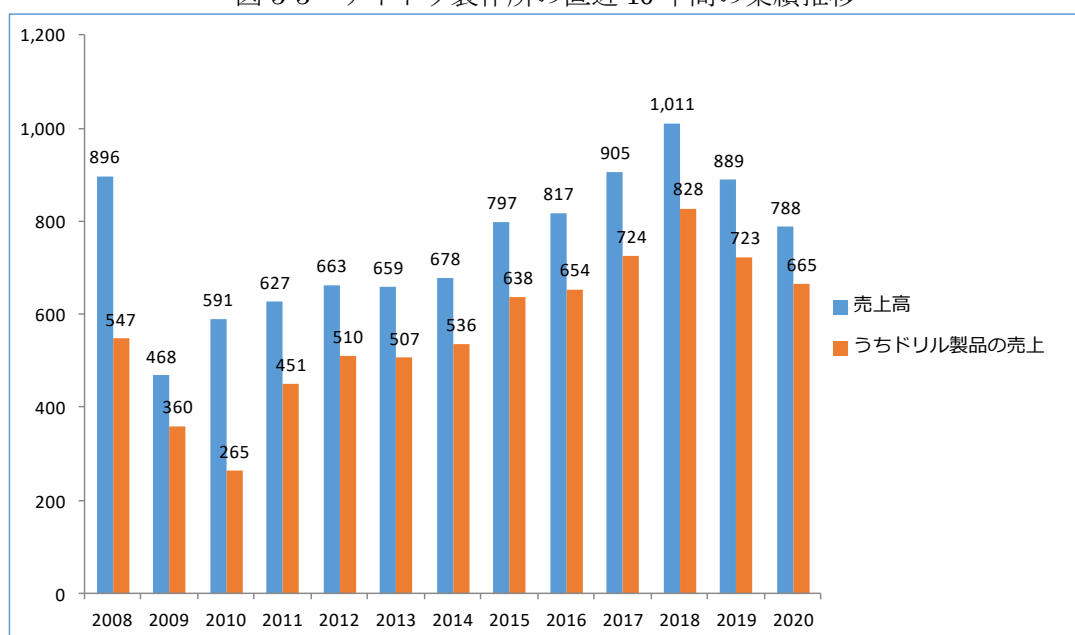
また図 5-4 は国内における超硬工具市場の推移を示したものであるが、2012 年以降、市場が拡大していることが分かる。超硬工具は自動車、機械、電機など幅広い市場で使われているが、自動車産業では電気自動車（EV）の普及や電装化率の上昇でパワーデバイス用途に需要が高まっていることや半導体産業ではパワーモジュールの生産が増えていることなどが背景として挙げられる。

第2項 サイトウ製作所の概要

サイトウ製作所は、超硬工具のうちドリル、エンドミル、特殊工具の3種類の製品を取扱い、その数は約6,000種類に及ぶ。製品単価は1本1,000円から7万円程度まで幅広く、平均6,500アイテムの製品を合計で月産5万本生産している。

図5-5はサイトウ製作所の直近13年間の業績推移を表したものだが、新型コロナウイルス感染症発生前の2018年度（2018年12月期）の売上高は10億1,100万円を記録しているが、超硬工具市場全体の市場シェアで見れば1%にも満たない。しかし、売上高の80%以上を占める超硬小径ドリル市場におけるシェアは十数%に達しており、残り数十社が1%～2%で市場を占有しているといわれる²⁰²。超硬小径精密ドリルの分野ではライバルのいない“ニッチトップ”のメーカーである²⁰³。

図5-5 サイトウ製作所の直近10年間の業績推移

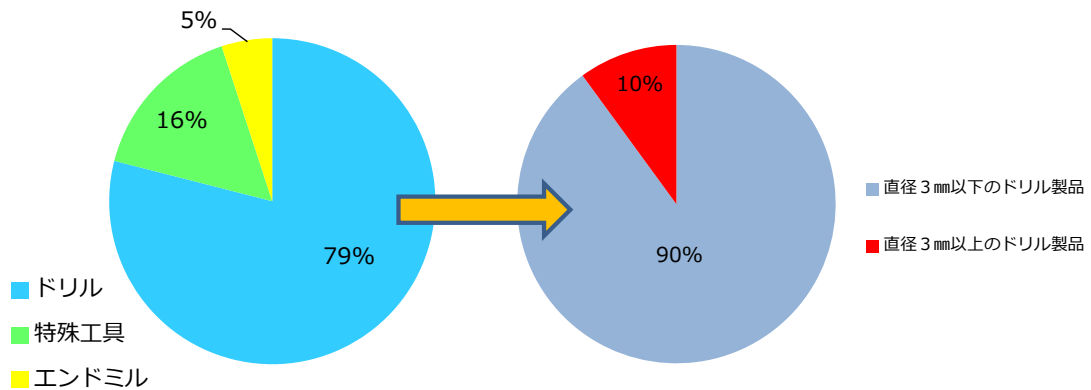


出典：東京商工リサーチ、帝国データバンクの調査データを基に作成。単位：百万円。

²⁰²国内外を見て、同社の規模で同様の小径ドリル専門企業はないが、小径工具製品のラインナップで、部分的に同社と競合する企業が存在している。例えば、主要な競合メーカーとして、日本国内では住友電工、菱高精機、海外企業としては、グーリング(ドイツ)、MIKORONTOOL(スイス)があげられる。

²⁰³本稿の作成にあたって、サイトウ製作所の齋藤裕会長と齋藤智義社長にヒアリングを行った。同社本社に3回（2014年12月18日、2015年1月23日、2019年2月13日）訪問して、それぞれ2～3時間程度、直接話を伺った。ヒアリングはサイトウ製作所の企業経歴をはじめ、事業の全体像やコア技術、ビジネスモデルを把握するために行った。そのほか、同社より提供を受けた資料、新聞、雑誌などに掲載されたサイトウ製作所に関する記事情報、企業信用情報会社が行った同社の調査情報などを補助的な情報源として用いた。それらデータに関しては、齋藤社長に直接、メールや電話で内容に関する真偽の確認を行った。

図 5-6 サイトウ製作所の製品別売上構成(2020 年度)



出典：サイトウ製作所の資料を基に作成。

同社の特徴は上記の通り、わずか 10 億円の売上高で、6,000 種類にも及ぶ多品種を製品ラインナップしていることと、小径精密工具の製造を得意にし²⁰⁴、超硬小径ドリルのうち 90%が直径 3 ミリメートル以下の製品で占められていることである。

第 3 項 多品種少量生産へのシフト戦略と課題の台頭

サイトウ製作所は、1934 年 4 月、創業者の齋藤留次郎氏が日本初の金切鋸刃（ハクソー）の専門メーカーとして設立され(表 5-1)、1954 年に初めて超硬バイトの研究開発に着手し、その後、超硬切削工具メーカーへと転身していく。

1975 年に二代目社長に就任した齋藤裕氏は、メーカーとして毎年、設備投資を続ける一方で、それまで全ての受注品がオーダーメイドで、受注生産を主体に行ってきた事業体制に加え、1976 年に同社として初の標準品となるストレートドリルの製造販売を開始する。製品は 0.3 ミリメートルから 1 ミリメートルまで 100 分の 1 ミリ単位で製品を用意した。ストレートドリルの開発を契機に、量産品を生産する精密切削工具メーカーへと更なる進化を遂げた。齋藤裕氏は、メーカーとして、どこまで細いドリルを開発できるのか挑戦を続け、1987 年には日本初の 100 分の 5 ミリメートルサイズのドリルの開発に成功し、製品として発売したものの、残念ながら発売当初は 1 本も売れなかったという。そのサイズのドリルで、穴を空ける製品が当時はまだなかったためである²⁰⁵。

同社は 1980 年代後半のいわゆるバブル景気を境にして、ドリル製品の開発に経営資源を集中投資し、とくに、開発する製品を 6 ミリメートル以下の小径サイズに絞った。当時、全売上高に占めるドリル製品の比率は 10%程度であったが、ドリル製品への重点傾斜によって、現

²⁰⁴主力製品である超硬小径ドリルは、髪の毛の太さよりも細い最小径直径 0.02 ミリメートルをはじめとした製品を揃えている。

²⁰⁵齋藤智義社長へのインタビューに基づく。現在では、同製品は半導体の製造工程で使用されている。

在では売上高の約 80%がドリル製品となり、ドリル製品の 90%が幅直径 3 ミリメートル以下の小径サイズの製品になった。小径サイズに焦点を当てて製品開発を行った重要な理由は、小径ドリルを使用する市場が広がっていったことである。携帯電話やスマートフォンでは年々、小型化、高機能化、高性能化が進んでおり、これら情報端末に使われる部品加工に同社のアプリケーションが標準品として使われるようになってきている。

表 5-1 サイトウ製作所の沿革

1934	金切鋸刃の製造販売を目的として創設
1948	初代社長、齋藤留次郎、個人経営により株式会社サイトウ製作所に改組
1954	精密超硬バイトの製造開始
1955	超硬エンドミル、リーマ、カッター他各種超硬工具の製造を開始
1964	本社工場新設
1974	資本金2,000万円に増資
1976	標準品ドリル（ストレートドリル）の製造を開始
1978	宮城県角田市に角田工場を開設
1982	資本金4,000万円に増資
1984	角田工場増設
1986	本社ビル新設
1989	北米インディアナ州にAtom Precision of Americaを設立
1989	角田工場、新社屋、工場新設
2007	角田工場増築
2015	北米現地法人、イリノイ州ローリングメドウズ市に移設

出典：サイトウ製作所 HP。

小径ドリル製品の市場拡大に伴い、同社は生産の効率化、安定化を目指して 1990 年代初頭から順次、最新鋭の NC 工作機械を導入した。かつては汎用機と限定的な NC 機の活用により太径の工具を切削するのに半日、刃を付けるのに 20 分ほどの時間を要していたが、NC 工作機械の導入により、溝加工に約 1 時間、刃付けは最短約 3 分で出来るようになった。さらに、生産ロット数が多い製品でも安定して同一性能の製品を生産することが可能になるなど効率性が向上、砥石や治工具など製造に必要な消耗品の改善・改良も相まって生産性も品質のレベルも安定する様になった。

しかし、NC 工作機械の導入による弊害も台頭してきた。同社が扱っている小径ドリルは市場規模が小さいうえ、6,000 を超える多品種、個別製品の出荷量が少ない物が多かった。多品種少量生産という特徴を有していた。顧客の注文に応じて多様なドリル製品を製造するためには、自動化を進めたとしても段取り替えの時間が必要であった。とりわけ、同社では、1 日あたり数十本しか製造しないドリル製品も少なくないため、結果的に段取り回数が多くなった。生産量が上がり、生産効率が上げにくかった。最新の工作機械で生産を行ったとしても、1 人の作業員が同時に何台もの機械を操作することには物理的な限界があり、設備投資に見合う採算が十分に取りにくかった。採算性を獲得する為には越えなくて

はいけないハードルが多かったのである。加えて、長年かけて熟練作業者に蓄積されてきた技能をデジタル技術が駆逐してしまう恐れもあった。デジタル化が進むことによってこれまで人に蓄積されてきた物、新しくデジタル技術に載せ替えなくてはいけない物等、有形・無形の資産の洗い直しをする必要に直面する事になった。デジタル領域の進歩は、工具や機械などの知識が無くても製造できる環境を作り出す事になり、オペレータの育成にも大きな転換を求められる様になった。

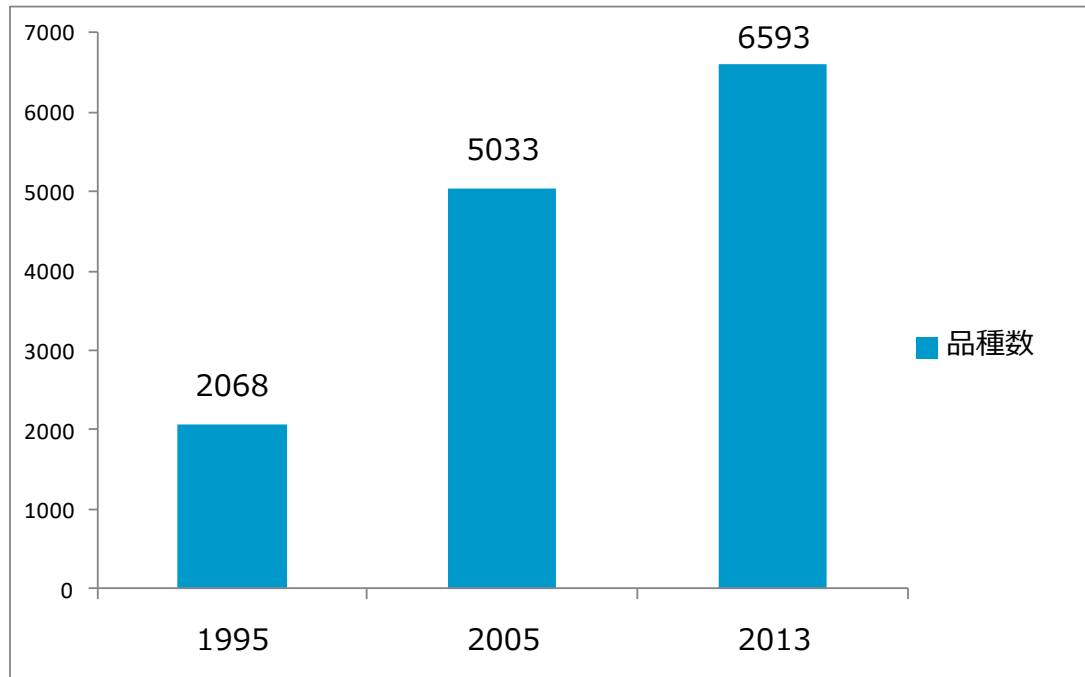
第4項 市場を意識した「多品種品揃え」戦略へ

こうした課題に対応して、2009年に3代目社長になった齋藤智義氏は、作業者の手作業を残し、自動化しにくい“面倒くさいモノづくり”に取組んだ。積極的にデジタル技術を導入する一方で、常に高い手作業と関連する技術を有する施策を行った。例えば、あえて、段取り替えに必ず人が介在する作業を残していた。作業者をNC工作機械の操作だけではなく、ローテーションで汎用機を使って手作業で研削作業に当たらせることによって、砥石をどのように動かせばワークを削れることができるのか身を持って理解できるようにした。自社のビジネス領域であるニッチ市場向けにそれらの技術を役立たせるために、デジタル技術を自社でアレンジして、手作業による技術とデジタル技術を融合させたのである。

それは人材育成を図るものでもあった。具体的に、売上高の2割が受注品及び、特注品の受託加工である同社にとって、その業務フローを利用して、人材育成や技術蓄積に活用した。現場作業員一人一人の能力を最大限に発揮することで競争力の維持、向上を図ったのである。デジタル技術と手作業の技術を融合することによって、同社独自の強みを失わずに業界首位の立場を維持することができた。

さらに、同社はデジタル技術の特性を逆手にとる戦略を進めた。「多品種品揃え戦略」である。一般に、デジタル技術が進むと、技術レベルや作業工程がフラット化され、製品はメーカーにとって作りやすい、儲かりやすいモノに収斂される「標準化論理」が働く。しかし、サイトウ製作所は、その特性を逆手にとり、販売数量が見込める売れ筋商品に特化するのではなく、細かい顧客ニーズをすくい上げる形であえて品揃えを増やしていた。図5-8は同社が取扱う製品数の推移を示したものであるが、同社は意図的に品種数を増やしてきており、小径ドリル領域における製品数で見た場合、同社は競合他社を大きく引き離した。いずれの製品も標準品として販売されていた。決められたサイズの穴を加工しなくてはならないというドリル製品の性格上、多くの細かいサイズの製品を用意することは顧客が製品を選ぶうえで重要な要素となった。多品種の製品を製造して、各製品を1本からばら売りを行ったことが同社の強みになった。

図 5-7 販売製品数（品種数）の推移



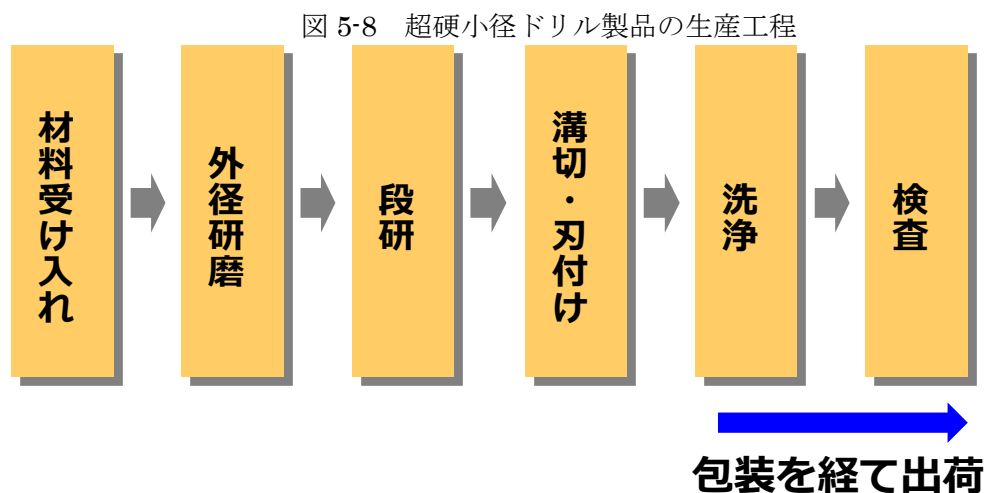
出典：サイトウ製作所のデータを基に作成。単位：数。

特定分野製品での「多品種品揃え」戦略が成功的に進められた理由は、同社が他社に先駆けて小径ドリルを作り始めたことにある。同社は、まだ小径と呼ばれる市場が存在しなかった時から、個々の企業ニーズに応じた製品を開発し、必要な製品の在庫を常に揃えることによって、他社が容易に真似できない参入障壁を築いた。つまり、早く小径ドリルという特定製品市場に絞り製品開発、生産、販売を進めてきたことで、ライバルメーカーの参入を抑えることに成功している。技術的には製品開発が可能だとしても、採算性でライバル企業の参入を留まらせる形で、事実上の参入障壁を作り上げることに成功したのである。さらには、持続的に同事業に取り組んで来たことにより、技術力も設備も長期間かけて蓄積したことも重要であった。特に“微細精密研磨技術”を柱にした生産技術を確立し、この研磨技術をメインにした製品開発を行い、小径ドリルのさらなる小径化製品の開発に挑んできた。そうした取組みが後述する技術のデジタル化の対応策につながる背景となる。

第 5 項 技術のデジタル化への対応

上記の通り、サイトウ製作所は他社に先駆けていち早く超硬小径ドリルという特定製品市場に絞り製品開発、生産、販売を進めてきた一方で、6,000 種類にも及ぶ製品アイテム数を取り揃える「多品種少量品揃え」戦略を構築してきた。この取組みの過程でライバル企業の市場参入を抑え込めた理由に生産の段取り替えがある。多品種生産の場合、小ロット生産になりがちであり、企業は製品ごとに作業のための設定変更を行うために時間を割かなければならない。図 5-9 はサイトウ製作所の主力製品であるドリル製品の生産工程をフロ

一化したものであるが、材料の受入れから製品加工し、検査を経て出荷するまでに大きく 6 工程がある。段取り替えは、材料受け入れ後の製品加工で必要になり、製品単位での段取り替えが必要になる。基本的には段研、溝切・刃付け等の工程ごとに少なからず段取りが発生する。加工の順番なども段取り効率に影響を及ぼす。



出典：サイトウ製作所のデータを基に作成。

次に実際の段取りについては、NC 工作機械の暖機運転²⁰⁶を通じて、砥石の選定と成形から試し削りまでの工程を行う。試し削り後、必要に応じて①～⑥の部分の調整を出来るまで行う必要がある。その後、特に問題がなければ本生産に入る。基本的には段研、溝切・刃付け等の工程ごとに段取りが発生する。加工の順番なども段取り効率に影響を及ぼすものである（図 5-9）。実際には機械に材料を取り付け、形状を成形した砥石（ミクロン単位で砥石を成形する）を装着し、NC 工作機械により加工を行うが、セッティング後すぐに製品が出来る訳ではなく、試し削りをして既定の寸法と公差で製品が出来ているか確認を行い、その後本生産に着手する。一連の段取りには、製作するサイズの繋がりによってフル段取りから一部分の段取りまで幾つかのパターンがある。段取り作業時間には平均 10 分～60 分を要している。

超硬ドリルの段取りは、砥石の成形や、機械に複数ついている軸をプログラムで動かす中で指定された形状や精度で製品を加工できる事を確認して本生産に入るまでの工程をさす。径が小さく、精度が高いドリルに於いて、この段取りは完全に標準化されている訳では無い。同社は小径ドリルという狭い市場に多くの製品を投入する戦略を取っているために、その生産体制は多い物は 500 本／ロット、少ない物は 20 本／ロットという環境で、50 本以下のロットの構成が圧倒的に多いという多品種少量生産の特性を有している。

²⁰⁶工作機械が本来の性能で稼働するために必要な初動操作。

図 5-9 切削工具の段取り

『切削工具の段取り』

暖機運転

- ① 砥石の選定と成形
- ② 砥石の取り付け
- ③ ワーク（途中加工の工具）の取り付け
- ④ 治工具類の正確な位置出し
- ⑤ プログラムの選定とセットアップ
- ⑥ 試し削り
- ⑦ 本生産
- ⑧ 加工中の寸法変化の補正

出典：サイトウ製作所のデータを基に作成。

品質の安定性や、一定量の生産ではメリットをもたらすデジタル技術も、段取りが多い環境では実際の加工時間よりも段取りに費やす時間の方が長いという現象も起きてしまう。サイトウ製作所では工場内に複数台の NC 工作機械を配置してドリルの生産を行っているが、機械を掛け持ちした場合、段取り回数も増える。掛け持ちできる機械の数には限界があり、少量多品種の条件での生産効率の引き上げには様々なハードルが存在する。

この段取り替え作業は製品毎に必要なため、同業他社が仮にサイトウ製作所の市場に魅力を感じたとしても、段取りに膨大な手間と時間を要し、また小径サイズのドリルを簡単に段取りが出来ない事が障壁になる。結果的に、経済規模が小さすぎて、同業他社が市場参入したとしても採算が取れない。技術的に、かつ、採算面で、デジタル化しにくい工程を構築することによって同業他社の市場参入を阻んできたが²⁰⁷、サイトウ製作所の齋藤智義社長は、2009 年の社長就任時点でデジタル技術の特性に気が付き、「規模の経済性」を逆手に生かした取組みを積極的に行ってきた。同社が手掛けているビジネスドメインにおいて、この特性は参入障壁にもなっているが、他方、自社のモノづくりに於いても不確

²⁰⁷ 齋藤社長は段取り工程について、「厳密に言えば、類似品と近接サイズによって必要な段取り工程が変わるとする。段取りに①②③④⑤⑥というステップがあると仮定すると、フル段取りと呼ばれる物は①～⑥までのすべての工程を行う必要がある。しかしながらサイズがある範囲の中にあれば⑤⑥という 1/3 の工程の段取りで加工が出来る事になる。時間で換算すると 60 分以上掛かるフル段取りと 10 分前後の違いが出てくる。こうした作る製品の流し方で段取りの効率が上げられるのは、当社が小径ドリルという狭い範囲の中に、多くの製品を供給し、その環境である一定量の商売を実現している環境が優位性を作っている」と話す。

定要素を抱えての生産体制になる。デジタル技術に置き換えられにくい部分を人に頼ることと同社の強みを形成している反面、人を担い手にした伝承のアキレス腱というジレンマも抱えている。この段取りの問題について同社は、治工具類の工夫等による段取り時間短縮化、安定化を図る事を推進し、効率アップを果たしている。更に小径ドリルに特化することによって、段取りを効率化する事も実現している。

また、技術のデジタル化への対応とは関係はないが、サイトウ製作所が自社の競争力向上に長年にわたり取組んできた施策にブランディングがあることを明記したい。同社創業者である齋藤留次郎氏は、金切鋸刃の製品開発に没頭する一方、自社製品を広く市場で認知、販売していくために 1949 年に現在も同社のブランド名である「ATOM」を商標登録している²⁰⁸。「ATOM」の名の由来は、これ以上分割できない最少単位としての精密性を念頭にブランドを付けたと言われている。また、社名の「サイトウ」も「齋藤製作所」では差別化が図れないと考え、設立当初から社名をカタカナで登記している。齋藤留次郎氏は経営者として時代の先を読む先進性に富んでいた様だ。現在では、精密工具業界で「ATOM」ブランドの知名度は高く、国内外で高い評価を受けている。このように同社は設立間もない時期から独自製品の開発を行った上、技術開発以外にもブランド力の向上に力を入れるなど、差別化に取り組んできた。

長い年月をかけて顧客を開拓し、顧客単位の製品を少量から生産、販売する戦略により、業界における信頼性を確固たるものとし、製品やブランドの付加価値を高めることにより、技術のデジタル化の影響を最小限に抑える経営体質の構築につながっていることが分かったのである。

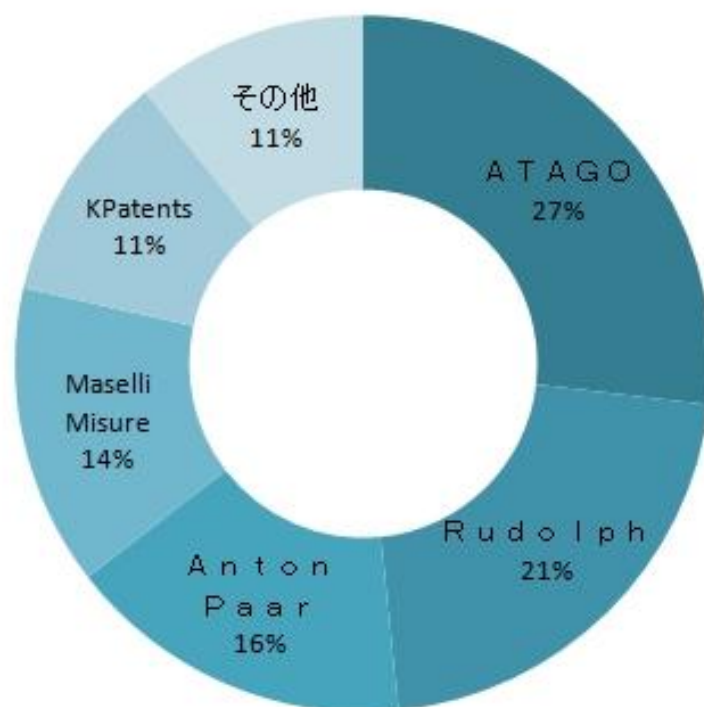
²⁰⁸「ATOM」ブランドは漫画「鉄腕アトム」よりも早く商標登録されている。現在では“小径工具の ATOM”ブランドとして業界で定着している。

第3節 事例2 株式会社アタゴ

第1項 株式会社アタゴの概要

株式会社アタゴ（以下、アタゴ）は、光の屈折現象を応用した屈折計と呼ばれる測定機器のメーカーである。同社は1940年、東京都豊島区で雨宮喜平治氏が「雨宮精器製作所」として設立したことに始まる。創業以来、業務用の屈折計、濃度計の開発に特化し、「使いやすい」「分かりやすい」「壊れにくい」をテーマに製品開発に注力してきた。同社は、製品のフルラインアップ戦略を採用しており、1台100万円を越えるハイエンド機種から1台1万円台のアナログローエンド機種まで顧客ニーズに合わせた製品開発を手掛けている。製品アイテム数は屈折計の主力製品「PALシリーズ」だけでも120種類に及ぶ。いずれの自社製品にも「ATAGO」ブランドの称号を付けて、全世界154ヵ国（2021年9月現在）で販売している。現在、アタゴの売上高の65%が海外輸出で占められており、数量ベースでは全体の75%を海外市場で販売されている。

図5-10 アタゴの世界シェア（2018年時点）

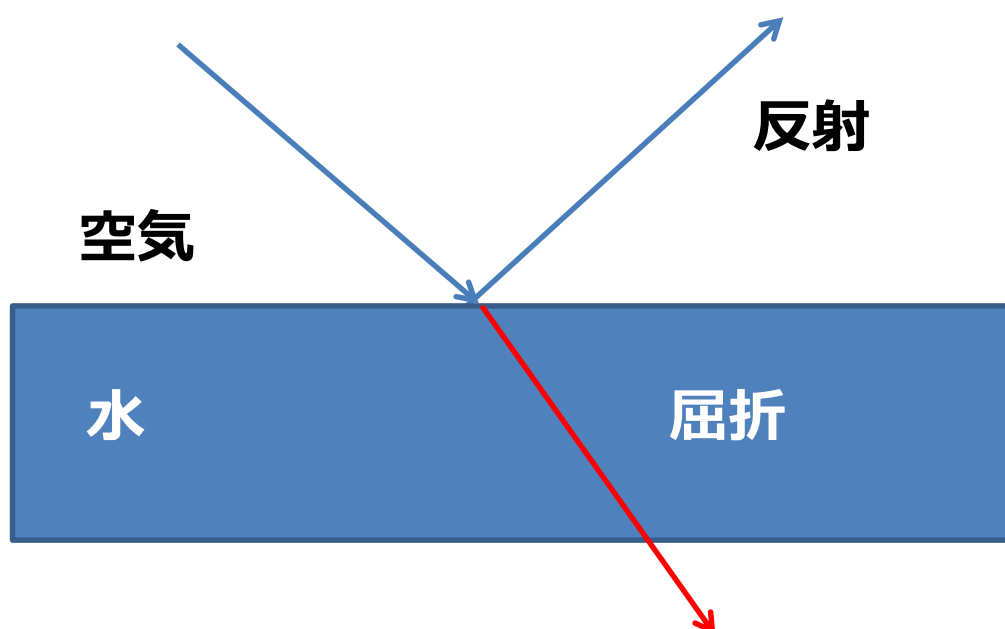


出典:アタゴ調査に基づき作成。

屈折計の一種である糖度計の世界市場(年間約100億円)の25%をアタゴが占有(図5-10)し、手持ち屈折計と糖度計を合わせた国内市場シェアでは90%(同社比)を押さえている。同品質の小型モデル(他社は据え置き型)ではライバル製品が存在していないニッチトッ

プ企業である²⁰⁹。アタゴの主力製品である屈折計は光の屈折現象を利用した機器である。液体に光を当てると、透過する光が曲がって見られる現象を起こす。これを屈折現象（図 5-11）と呼ぶ。屈折計は、この光の曲がり具合を屈折率として%などの単位に置き換える発想から生まれた²¹⁰。光の曲がる屈折率の割合に応じて、液体の濃度や成分を数値換算する。屈折計を使えば、手軽に飲食物の甘さや美味しさを判定することができることから食品産業を中心に幅広く利用されている²¹¹。

図 5-11 光の屈折現象



出典：インターネット資料を基に作成。

²⁰⁹本稿の作成にあたって、アタゴの雨宮秀行社長にヒアリングを行った。同社の本社兼工場に訪問（2016年7月15日）して、約2時間程度、直接話を伺った。また、電話およびメールによる質疑応答を数回にわたり行った。ヒアリングはアタゴの企業経歴をはじめ、事業の全体像やコア技術、ビジネスモデルを把握するために行った。そのほか、同社より提供を受けた資料、新聞、雑誌などに掲載されたアタゴに関する記事情報、企業信用情報会社が行った同社の調査情報などを補助的な情報源として用いた。それらデータに関しては、雨宮社長に直接、メールや電話で内容に関する真偽の確認を行った。

²¹⁰日本機械学会誌 2011年12Vol. 114 No. 1117、『味をはかる糖度計』では、コップに水を入れ、その中に箸を入れてみると、箸の先が曲がって見える。次に、水の代わりに濃い砂糖水を入れて同じことをしてみると、水の時よりもさらに曲がって見える。これが「光の屈折」という現象である。屈折計はこの原理（液体の濃度が高くなると、その屈折率も比例的に上昇する）を応用した測定器であると記載されている。

²¹¹ぶぎんレポート No.204 2016年11月号、『彩の国企業探訪 株式会社アタゴ』。

第2項 アタゴのビジネスモデル

アタゴの代表的製品の手持ち屈折計は、1951年、当時、学術用に開発された屈折計を誰でも手軽に使えるように小型化し、手持ち屈折計として売り出したのが始まりである²¹²。その後、1956年には海外への輸出販売に乗り出している。1950年代、当時の屈折計は欧米製品が主流であったが、机の上に載せて使う大型の据え置き型がスタンダードタイプで使い勝手が悪かった。そこに着眼したアタゴの創業者、雨宮喜平治氏は、既製品を分解し、プリズムやレンズなど必要な部品だけに絞って、シンプルな製品に仕立て直し、自社製品として売り出した。当時、ユーザが手に持って場所を選ばずに測定するという発想はなく、新市場における販売が現在に至る市場獲得につながった。

図 5-12 新市場向けに開発した製品群



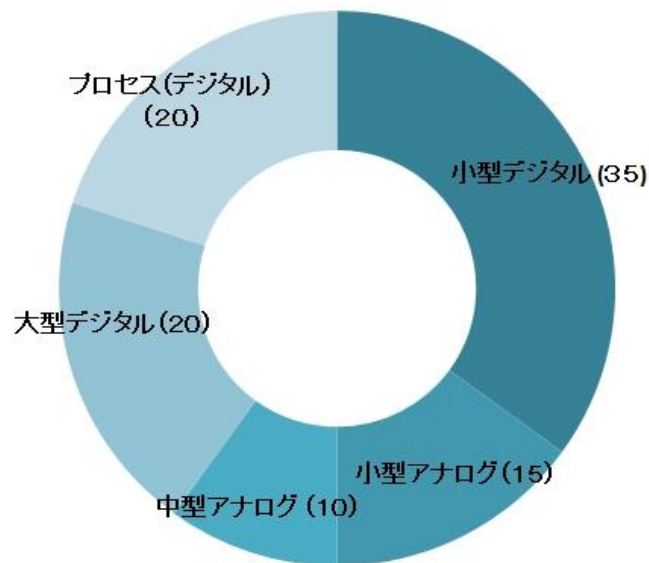
出典：アタゴへのヒアリングを基に作成。

手持ち屈折計の開発をはじめ、アタゴは創業時から先駆者を意識し新たな市場を創造してきた。個々の市場規模は大きくないものの、1つ1つ新たな市場を開拓すると同時に、オンリーワン、ナンバーワンにこだわる経営に取り組んできた。図 5-12 は同社がこれまでに取組んできた製品である。図 5-12 は、ニッチ市場であるものの、各市場ではほぼ 100%に近いシェア（同社比）を持ち、毎年安定的に販売を続けている²¹³。

²¹²日経ビジネス 2003 年 7 月 14 日号『小さなトップ企業』62 頁。

²¹³週刊東洋経済 1993 年 3 月 20 日号『VENTURECLUB 不況に立ち向かう起業家たち』連載 26 によれば、1950 年代から 1960 年代にかけて日立製作所、東芝が屈折計市場に参入してきたが、市場規模が小さいため採算ラインに乗らずに 1960 年後半に市場から撤退したと記述されている。

図 5-13 アタゴの製品構成比



出典：アタゴのデータを基に作成。単位：％

第3項 技術のデジタル化への対応

上記の取組みを踏まえて、技術のデジタル化に対する同社の戦略が進められた。ポイントは2点である。1点目はデジタルとアナログを組み合わせた生産であり、2点目は内製化率向上に対する取組みである。1点目のデジタルとアナログを組み合わせた生産について同社は、磨きの工程など、複数の工程に、意図的に人間の作業を介在させることで、差別化を図っている。多品種になることで課題になる段取り対策では、マシニングセンタ、NC工作機械それぞれの作業員の行動を細かく分析し、各作業員の機械操作の習熟度や行動スケジュールを組合せて、可能な限りの無駄の排除を徹底化している。

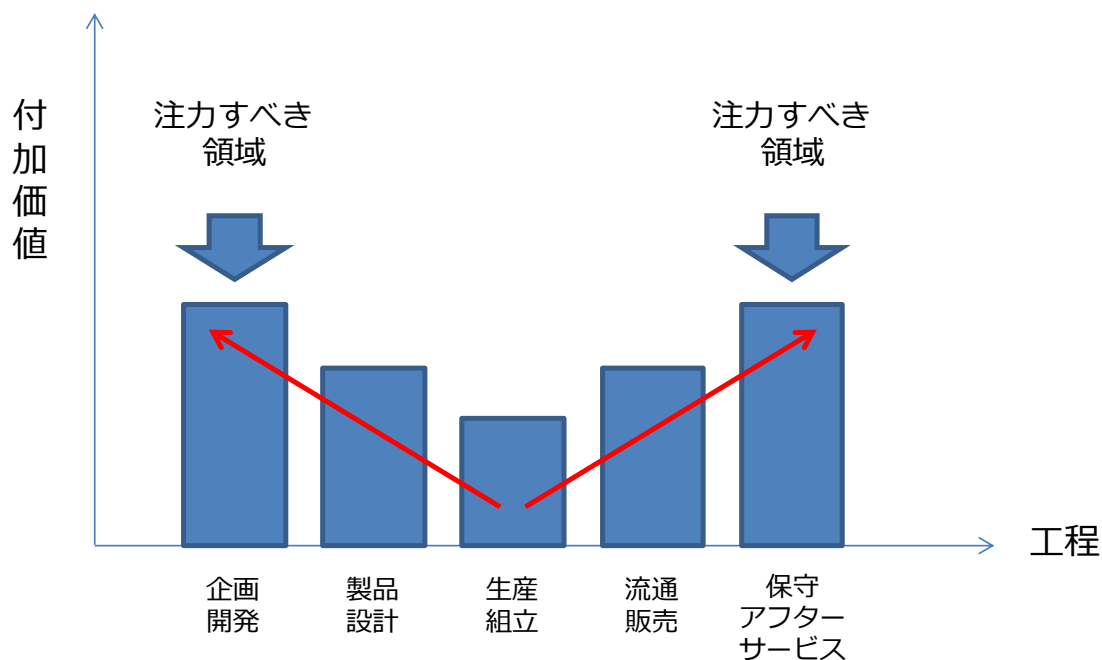
2点目の内製化率の向上では、現在、アタゴは全製品の平均内製化率は9割を超える。屈折計の信頼性を担う測定機能は、光の屈折作用を独自のアルゴリズムに基づいて数値化することを担保にしているが、数値の信頼性は光の屈折を起こす光学素子「プリズム²¹⁴」の精度と、測定されたデータを数値化するファームウェアに依存する。同社はプリズムの原料、サファイヤガラスの自社加工や、測定、分析機能を制御する電子回路も自社で設計・製造できるようマザーボードの生産も行うなど屈折計の生産に必要な工程の内製化を実現している。また、「金属部品」「モールド」「化粧箱」「内装材」「シートパネル」の5つの工程を社内で行い、計7種類のパーツを本社工場内で製造して最終組み立てを行っている。社内で行わずに外注化しているのは環境対策の観点から鍍金や塗装、アルマイトなどの処理工程、騒音問題からプレス板金工程、そして製品包装用の段ボールの製造のみで

²¹⁴光を屈折する平らで研磨された表面を持つ透明な光学素子。

ある。原料段階からコストをコントロールすることで競争力を高めて多品種生産の安定化に寄与している。

アタゴが内製化率にこだわり徹底したコストダウンを図る背景には市場のトップリーダーとして価格決定権を持つことで競合の進出を抑え込む狙いがある。具体的に、以下の 4 点のメリットが期待された。「短納期、棚の回転日数などを自社管理できる」「コストに余裕ができ、その結果、販売キャンペーンを頻度高く行える」「後進国に対して安い価格で製品を供給でき、未来の市場を確立できる」「コストは益々下がり、その利益幅を確実に管理できる」ということがそれである。内製化率向上に取り組むアタゴの戦略と日本の製造業の趨勢を比較したい。日本の製造業は技術のデジタル化の影響を受ける形で、年々、国際競争力が落ち込んでいることが指摘されている。こうした状況を受けて経済産業省では 5 年ほど前から、製造業は製造だけでは付加価値を維持できないため、製造業に対して企画・開発やアフターサービスへの注力を促し始めている。

図 5-14 スマイルカーブと付加価値の関係性



出典：経済産業省 2019 年版『ものづくり白書』124 頁、図 231-13 を基に作成。

図 5-14 は 2019 年版『ものづくり白書』に記載されたスマイルカーブ²¹⁵と付加価値の関係性を示したものである。政府は日本の製造業の弱みであり、取り組みが進んでいないのはスマイルカーブで付加価値が高いとされる企画・開発部分や流通・販売や付随するサービス部分で、製造業の生産性向上のためには、品質や製造工程の強みを維持・強化しつつ、

²¹⁵スマイルカーブは、台湾のエレクトロニクス企業、acer（エイサー）社の創業者、Stan Shih（スタン・シー）が初めて提唱した。

これらを強化していくことが求められるとされる²¹⁶。一般的にスマイルカーブは、エレクトロニクス産業における収益構造を例えで示すモデルの名称で、製造業のバリューチェーンの上流工程と下流工程の付加価値が高く、製造工程や組立工程にあたる中間工程の付加価値が低いという考え方を示している。アタゴが属する測定機器業界は製品の構造上、エレクトロニクス産業の製品に近く、スマイルカーブに似た影響を受ける。

図 5-15 光度計、光束計、照度計、屈折度計の生産推移

	従業者数4人～9人		従業者数10人～19人		従業者数20人～99人		従業者数100人以上	
	産出 事業所数	出荷額 (百万円)	産出 事業所数	出荷額 (百万円)	産出 事業所数	出荷額 (百万円)	産出 事業所数	出荷額 (百万円)
年次								
2010	5	62	3	165	4	2,618	4	24,777
2012	1	X	4	X	7	2,198	4	26,418
2013	2	X	5	206	5	2,138	4	X
2014	2	X	5	227	5	3,457	4	X
2016	–	–	2	X	8	1,443	5	X
2017	1	X	3	X	7	945	4	18,795
2018	–	–	5	337	8	1,192	4	19,139
2019	1	X	5	469	7	912	4	X

脚注：なお、2011 年、2015 年は経済センサス活動調査実施のため通常の統計調査実施していない。「X」印は、1 又は 2 の事業所に関する数値で、そのまま掲げると個々の申告者の秘密が漏れるおそれがあるため秘匿した箇所、3 以上の事業所に関する数値であっても、1 又は 2 の事業所の数値が前後の関係から判明する箇所も秘匿となっている。

出所：経済産業省工業統計を基に作成。

アタゴの取組みはこうしたスマイルカーブの影響を受けることを念頭に、最も付加価値の低いとされている生産や組み立て工程を社内に取り込むことで、技術のデジタル化への対応を進めている。図 5-15 と表 5-3 を比較してみよう。図 5-15 は、経済産業省工業統計表の「品目別統計表データ」からアタゴが取扱う製品分野の過去 10 年分の生産推移に従業員数別に見たものである。アタゴが取扱わない製品も含まれていることからアタゴの生

²¹⁶経済産業省製造産業局『2005 年版ものづくり白書（製造基盤白書）』、「第 1 部 我が国のものづくり基盤技術の現状と課題、第 1 章 我が国製造業の特徴の分析とグローバルな展開、第 3 節 我が国製造業の特徴の分析」では、経済産業省が 2004 年 12 月に、日本の店頭公開、上場している製造業企業を対象にしたアンケート調査（有効回答数は 394 社）を行い、その結果、日本の製造業の事業段階別の利益率の特徴として、最も利益率の高い工程として製造・組立と答える企業が 44.4%と最も多かったと記されている。

産動向と必ずしも連動はしないが、広義で光学製品の生産動向は理解できる。この表では、アタゴが属する従業者数 100 人以上の事業所数は、過去 10 年 4 事業所で変更はないが、時系列で見ると出荷額が減少している。同様に従業者数 20 人～99 人の事業所数は増えているにも関わらず出荷額は減少し続けている。このことから同分野における製品の販売競争が激しく 1 事業所あたりの収益性の減少につながっていることが分かる。

一方、表 5-2 は、アタゴの過去 9 年間の業績推移を示したもののだが、売上高、営業利益、経常利益いずれの指標でも右肩上りで業績を伸ばしている。新型コロナウイルス感染症の感染拡大から 2020 年度は売上高項目で前年度実績を下回っているものの、本業の儲けを示す営業利益は前年度実績を上回った²¹⁷。中小企業庁が行う中小企業実態基本調査令和元年の統計によると、中小企業 1 企業当たりの「経常利益」は、中小製造業で平均 1,443 万円となっており、同年のアタゴの経常利益は約 72 倍に相当する。

表 5-2：過去 9 年間で見るアタゴの業績

年度	売上高	営業利益	売上高 営業利益率	経常利益	売上高 経常利益率
2012	22,0	4,0	18.1	4,2	19
2013	23,6	4,1	17.3	4,4	18.6
2014	24,8	4,2	16.9	4,7	18.9
2015	26,7	5,3	19.8	6,3	23.5
2016	29,5	8,8	29.8	8,9	30.1
2017	31,8	9,6	30.1	11,9	37.4
2018	32,8	7,5	22.8	9,5	28.9
2019	32.9	7	21.2	10.5	31.9
2020	30.4	8.6	28.2	10.1	33.2

出典：アタゴより提供されたデータを基に作成。単位：億円、%。

技術のデジタル化が進めば、製品の技術的な差異が小さくなり、製品は価格競争に巻き込まれる。企業はコスト競争力を高めるため、より販売量が期待できる製品に種類を絞り込むか、価格競争の影響を受けにくい製品に注力するか、デジタル技術の特性に合わせた対応策が求められる。アタゴは 9 割を超える内製化率を強みとする多品種生産に基づくフルラインナップ戦略と市場シェアトップを押さえていることで技術のデジタルへの対応で

²¹⁷日経トップリーダー2020 年 3 月号『ランキングから読み解く 高収益を出し続ける製造業の知恵』によれば、アタゴは「5 期連続営業利益率の高い中小製造業ランキング」で第 10 位に選ばれている。

成功を収めているのである。

第 3 章で述べたように、パソコンに代表されるエレクトロニクス製品では技術の平準化が進んでいる。平準化が進んだ製品の生産は垂直統合による一貫生産から主要パーツを得意なメーカーに発注する方式で水平的なネットワークが形成される。パソコンの生産では、製品の性能を左右する OS（基本ソフト）や CPU（中央演算装置）の開発や生産の付加価値が高く、パソコンの組立は収益性が低い。アタゴはこうした流れと逆行する形で生産の垂直統合を進めることで高収益を出しているといえる。

第4節 小括

本章では自社開発型事業者 2 社を事例に、技術のデジタル化への中小製造業の対応について考察した。それぞれの事例について、分析を通じて得られた発見と本論文の問いに対する見解を以下に述べることにする。まず、サイトウ製作所については、同社が取り組んできた製品ラインナップの多品種化が、デジタル技術の特性に見られる規模の経済性に対して相関性を持たず、技術のデジタル化への対応策として有効性が高いことが分かった。サイトウ製作所は業界に先駆けていち早く小径ドリルという特定製品市場に絞り製品開発、生産、販売を進めることによって、ライバルメーカーの参入を抑えることに成功しているが、それは特定市場への特化とその市場の中でフルラインナップ化という事業戦略の組合せが、技術のデジタル化にうまく対応して競争力を発揮していると考えられる。また、サイトウ製作所では製品の生産工程の中で、あえて作業者の手作業を残し、自動化しにくい工程に取り組んできた。NC 工作機械を中心に積極的にデジタル技術を導入する一方で、手作業と関連する技術を有する施策を行ったことに加えて、多品種生産により段取り替え作業が複雑化することも、効率化を追求する技術のデジタル化に対して効果を発揮している様だ。同社の事例を通して、中小製造業は技術のデジタル化の特性をうまく利用すれば、逆に「規模の経済性」が苦手とする「ニッチ市場」でビジネス機会を獲得、拡大することが発見できたことも付け加えておきたい。

一方、同社の事例ではデジタル化に伴う課題も浮上した。NC 工作機械に加工を依存する生産現場では、個人に蓄積される知識や経験とは別にモノづくりのノウハウの蓄積の仕組みが異なる。製造業における競争力の源泉である生産技術の蓄積や改良と仕組みを大きく変革する必要がある。しかしながら、人間の能力とデジタル技術は取って代わられる部分と相互補完の両面がある。現在製品に要求される精度や品質は人が汎用機で実現できる水準を超えている。採算性の得られない領域でデジタル技術を活用することは難しい。人間に蓄積されてきたモノづくりのノウハウを人とデジタルの融合した環境の中で最適化させることは高いハードルである事は間違いなく、今後、同社製品の品質や効率の継続的な維持や新製品の開発の行方を大きく左右する事になる。

次にアタゴについて述べたい。アタゴでは 2 つの事例で技術のデジタル化に対応していることが分かった。1 点目はサイトウ製作所と同様にデジタル技術とアナログ技術の組み合わせで生産を行っていることである。中核で付加価値の高い光学部品については、研磨など、複数の工程に、意図的に人間の作業を介在させることで、差別化を図っている。差別化に関する従来の視点は、機械加工では難しい付加価値の高い作業を人間の技術で行うことで差別化を図ることにあるとされていたが、デジタル技術による効率化の視点において障壁となることが分かった。2 点目は内製化率の向上である。アタゴは全製品の平均内製化率は 9 割を超える。経済産業省「企業活動基本調査」によれば、日本の製造業では付加価値の低い部品の製造については内製化せず複数の企業にアウトソーシングを行っている

述べられている²¹⁸。これは製造工程を外部委託する下請け生産システムを反映したものであるが、アタゴはこうした傾向とは逆行した取組みを行っている。屈折計の信頼性を担う光学素子「プリズム」の原料やサファイヤガラスの自社加工、測定、分析機能を制御する電子回路も自社設計・製造できるようマザーボードの生産も行っている。こうした内製化率の引上げは製造原価の低減に直結する。アタゴは技術のデジタル化が引き起こす製品のモジュール化による作業の標準化と、その結果起きる競争に対して内製化率を引上げることで、競争力を維持し事業を拡大していることが明らかになった。こうした取組みにより、アタゴは個別製品市場の規模は数億円と小さいながらも、それぞれの市場で 100%近いシェアを確保している。以上 2 社の事例からは、デジタル技術の特性とニッチ戦略の考え方をうまく合致させていることが分かった。技術のデジタル化の持つ特性と中小製造業のビジネスモデルの特性をうまく適合させれば、自社の経営の推進力になることが示された。

²¹⁸内閣府『平成 25 年度年次経済報告』181 頁。

第6章 産業事例の分析－医療機器を事例にして

第1節 デジタル技術の医療機器への展開

技術のデジタル化が中小製造業に与える影響について、第4章では経営形態別に具体的にどのような違いがあるのかを分析し、続く第5章では企業事例分析を行った。本章では、産業事例から技術のデジタル化が中小製造業に及ぼす影響を分析する。新たなデジタル技術として普及が進んでいるAM技術（本章ではAM技術を実用する機器である3Dプリンタを用語として併用する）に焦点を当ててデジタル技術を活用する産業事例を分析する²¹⁹。

AM技術ならびに3Dプリンタを事例に取上げることが2つの点で学術的に意義がある。1点目は、AM技術の登場は設計と製造の関連性を従来の生産スタイルよりもシームレスな関係にしたことである。3Dデータがなければ製造できないという限定化された環境を作り出した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、本研究が分析対象とする中小製造業の3Dデータへの親和性を高める契機を作り出した。2点目は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ことだ。金型を不要として製品を積層造形するAM技術は、中小製造業のビジネスの視点を変えた。第4章の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貢献した影響は大きいと考える。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技術は与えたと考える。以上2点について、中小製造業を対象にした技術のデジタル化に関する先行研究では、設計と製造の相関性およびビジネスの変化に焦点を当てた内容のものは皆無である。

以上の点も踏まえて本章では、対象産業としては医療機器を取上げる。その理由として、医療機器の特性と技術のデジタル化の関係性が重要であると考えからである。他産業の機器と同様に、医療機器には汎用製品が存在する一方で、患者個人の身体的特性や病状に応じて、カスタマイズ性の高い機能を要求される製品も多い。こうした医療機器独特のカスタムニーズに対応する手法として、技術のデジタル化の一種であるAM技術への関心が高まりを見せている。また、医療機器市場は、中小製造業が新規参入する数少ない魅力的な市場であり、こうした新市場参入をAM技術が後押ししている。ME機器に関する先行研究では、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などが中小製造業間競争の鍵であると言われてきたが²²⁰、本章ではME機器が質的に適

²¹⁹筆者論文「医療機器におけるAM技術の普及－中小製造業を事例にして－」『産業学会研究年報』No36、2021年3月より引用。

²²⁰藤川（2010）は「ME機器は、プログラムを組めば自動的に加工を行うため、中小企業の技術水準が平準化してしまう懸念があった。そのため、ME機器を活用するための新た

さない場合、有用な技術として AM 技術を導入している事例として医療機器産業を分析する。また、本章で取上げる中小製造業 3 社は、医療機器の特性と AM 技術の相関性をうまく活かして製品開発、製品加工を行っているケーススタディとして分析した²²¹

第 1 項 医療機器の特性

製造業の現場で、AM 技術（Additive Manufacturing、付加製造技術、本稿では AM 技術とする）による生産活動が広がっていることは第 2 章で述べた通りである。この AM 技術は 1981 年に基本理論²²²が発表され、1980 年代後半に実用化されたデジタル技術であり、2010 年代に入り、本格的な普及が国内外で見られるようになった²²³。現在、AM 技術は様々な分野でその利用が広がっているが、医療機器は利用もその 1 つである。

前述の通り、AM 技術が医療機器で普及している背景には、医療機器の特性と関係がある。医療機器産業は、国が定めた医薬品医療・機器等法（略称：薬機法）に基づいて、一般的名称で 4,000 種類以上（30 万品目以上）にのぼる製品が存在する多品種の市場構造をもつ。その種類は大きく「予防（検査）」、「診断」、「治療」、「リハビリ」に分類（図 6-1）されるが、大手の医療機器メーカーが量産品や高度医療機器などを開発・製造する一方で、中堅・中小の製造業も数多く市場参入している特性を持ち合わせている。また、中堅・中小製造業はカスタム製品の開発、製造にも注力している。

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企業間における競争の鍵となる」と指摘する。

²²¹医療機器は、許認可規制や高度な安全性の担保などの観点から、一般的に参入障壁が高い市場と言われる。本稿でケーススタディとして示した 3 事例のうち、ケイディケイ株式会社のフェイスシールドマスクは医薬品医療機器等法の医療機器には該当しない。加えて、新型コロナウイルスの感染拡大で医療現場におけるフェイスシールドマスクの需要増を背景に、多数企業が製造に着手していることから市場への参入障壁は高くないと考える。また、有限会社光沢が開発した曇り防止機器は、最終製品に組込まれる部品として開発したもので、薬事法では医療機器に組込まれる部品の生産であれば認可を必要としない。許認可の点では医療機器市場への参入障壁は高くはないが、AM 技術を活用し初の一体成型で高精度の製品づくりに取り組むなど新市場参入への障壁は低くはないと考えられる。株式会社 UCHIDA が開発中の「C-FREX」は最終製品で、許認可取得や繰返しの実証データ収集に基づく製品開発への反映などが必要。この点から医療機器市場への参入障壁が高いケースと考えられる。

²²²AM 技術は 1981 年、名古屋市工業研究所の小玉秀男氏が光造形に関する理論を発表、同理論が AM 技術の原理として考えられている。

²²³2013 年に米国のオバマ大統領が一般教書演説で、積層造形法を「3D プリンタ」と表現したことで、世界的に認知度が高まる。

図 6-1 医療行為と医療機器の種類（代表例）

予防（検査）	（例）心電計、血圧計、血液検査装置
診断	（例）内視鏡、レントゲン装置、超音波診断装置、MRI、X線－CT
治療	（例）レーザーメス、ペースメーカー、人工心臓、人工透析、人工心肺装置、人口骨
リハビリ	（例）自動牽引装置、マイクロ波治療器、マッサージ器

公益財団法人医療機器センター（JAAME） 医療機器産業研究所などの資料を基に作成。

表 6-1 は、従業者規模別の医療機器の産出事業所数及び出荷額（従業者 4 人以上の事業所）を示したものであるが、この表によれば、事業所数では全事業所数の約 84%を従業者 100 人未満の企業が占めている。

表 6-1 従業者規模別の産出事業所数及び出荷額（従業者 4 人以上の事業所）

	従業者数4人～9人		従業者数10人～19人		従業者数20人～99人		従業者数100人以上	
	産出事業所数	出荷額 (百万円)	産出事業所数	出荷額 (百万円)	産出事業所数	出荷額 (百万円)	産出事業所数	出荷額 (百万円)
理化学用・医療用ガラス器具	13	580	11	1,324	16	3,750	6	8,848
医療用機械器具、同装置	58	2,822	59	6,152	155	86,603	86	714,334
病院用器具、同装置	24	926	24	5,519	43	12,625	18	59,096
医療用機械器具の部分品・取付具・附属品	163	5,325	143	9,174	247	48,232	44	56,081
歯科用機械器具、同装置	25	792	12	1,065	32	17,182	11	56,787
歯科用機械器具の部分品・取付具・附属品	34	619	21	1,368	32	4,997	7	9,520
動物用医療機械器具、同部分品・取付具・附属品	10	243	16	962	15	2,225	4	1,281
医療用X線装置	-	-	-	-	14	5,762	9	146,514
医療用電子応用装置	1	X	-	-	25	7,897	17	X
医療用電子応用装置の部分品・取付具・附属品	23	644	27	2,673	46	11,013	10	10,135
医療用計測器の部分品・取付具・附属品	44	1,520	34	1,313	62	19,884	18	29,211
	395	13,471	347	29,550	687	220,170	230	1,091,807

出典：経済産業省、2019 年産業統計を基に作成。

また、医療機器は、人体に与える影響やリスクに応じて 4 分類（表 6-2）されており、国が定めた「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律」（医薬品医療機器等法）に基づき厳密に管理されている。同法では、必要に応じて許可や登録をしなければ医療機器の製造も販売もできないが、「試作型」と「部材供給型」については認

可が不要で、表 6-1 の従業者 100 人未満の企業では「医療用機械器具の部分品・取付具・附属品」に産出事業所数が集中している。中小製造業が医療機器のサポーター分野に多い理由の 1 つとして挙げられる。

表 6-2 医療機器に携わる製造業の分類

試作型	基本的に製造許可は不要。但し、自社での量産受注はできない
部材供給型	医療機器の製造に部材を提供する。製造許可を取得しなくても生産可能なケースが多い
製造業型	完成品を量産供給(委託生産含む)する。製造業の登録が必要。 自社開発機器は、承認申請を担う製造・販売業者を探す必要がある
医療機器メーカー (製造販売業+製造業)	最終製品を製造し、自社ブランドで販売できる。医薬品医療機器等法上対処すべきことが多く、製品の承認申請、販路開拓など自社が主体的に行わなければならないことが多い

出典：厚生労働省などのデータを基に作成。

医療機器産業への中小企業の市場参入姿勢は旺盛である。また、国内各地で医療機器クラスター形成の動きもが活発化し、その殆どが産業集積地に存在する中小企業の新事業展開や自治体の地域産業振興策としての意味合いが強い²²⁴。例えば、表 6-3 は埼玉県が新産業育成を目的に実施した「先端産業創造プロジェクト²²⁵」の育成 5 分野に対して、補助金申請の動向をまとめたものであるが、平成 27 年から令和元年まで、補助金申請件数、採択件数いずれも医療機器がトップである。製品の共同開発で大手企業との連携も一部見られるが、申請者の多くが中小企業である。

表 6-3 先端産業創造プロジェクトに関する補助金申請件数の推移

	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度	合計
ナノカーボン	5 (9)	4 (8)	5 (8)	3 (10)	3 (6)	20 (41)
医療イノベーション	10 (37)	12 (28)	11 (30)	10 (31)	7 (14)	50 (140)
ロボット	4 (15)	6 (11)	5 (12)	4 (18)	2 (4)	21 (60)
新エネルギー	3 (12)	5 (6)	3 (7)	1 (6)		12 (31)
航空・宇宙	5 (9)	5 (6)	3 (4)	1 (1)		14 (20)
合計	27 (82)	32 (59)	27 (61)	19 (66)	12 (24)	117 (292)

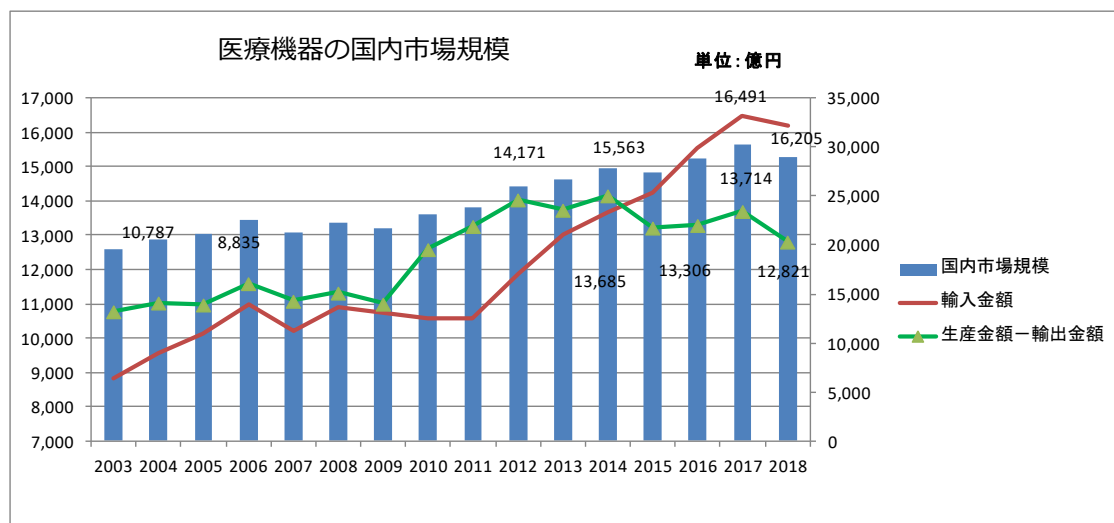
出典：埼玉県データを基に作成。

²²⁴北嶋守、2021 年、58 頁。

²²⁵原資 100 億円の「埼玉県産業振興・雇用機会創出基金」を活用したプロジェクトで平成 26 年にスタート。当初、ナノカーボン分野、医療イノベーション分野、ロボット分野、新エネルギー分野、航空・宇宙分野の 5 分野を重点支援分野に定め、集中投資を行った。

医療機器産業への関心が高い理由は市場規模の拡大にある。日本の医療機器の市場規模は年々拡大の一途を辿る市場である。2004年に初めて2兆円を突破し、その後も治療系医療機器を中心に市場拡大が続き、2017年には初めて3兆円を突破する産業へと成長している。図6-2では医療機器の国内生産と輸入の推移を示した。点線の折れ線グラフは、国内の医療機器の生産金額から輸出金額を引いた値で、実線の折れ線グラフは、輸入額の推移を示している。医療機器の輸出額は、2003年実績で4,202億円であったものが2018年実績では6,676億円に2,474億円増加（58.8%増）している。対して輸入額は2003年実績の8,835億円から2018年実績の1兆6,205億円にまで7,373億円増加（83.4%増）している。その結果、2015年時点では輸入金額が、輸出分を除いた国内生産額を抜き、2018年時点で9,529億円の輸入超過となっている。現在もその差は拡大を続けている。データからは、医療機器の国内市場の拡大は輸入製品が牽引していることが理解できる²²⁶。

図6-2 日本の医療機器市場の推移



出典：厚生労働省「薬事工業生産動態統計調査」を基に作成。

このような輸入超過の現状から判断すれば、海外の企業が日本の医療機器市場を成長市場として捉えている証であると言えるが、国内企業が新製品、新技術の開発を進めることで、海外製品から市場の代替化が期待できる分野でもある²²⁷。

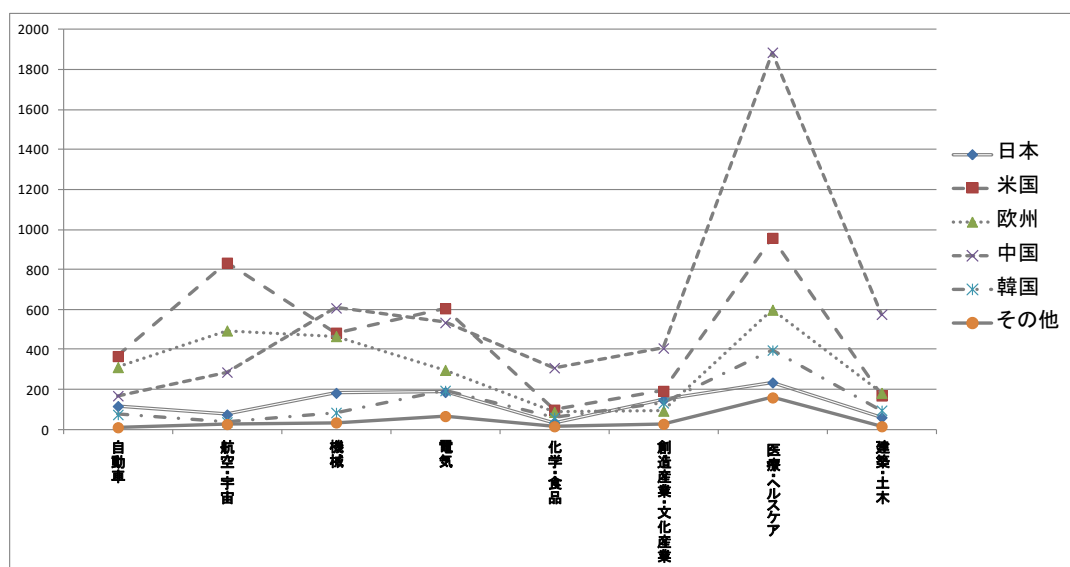
²²⁶厚生労働省「薬事工業生産動態統計」の平成29年度実績によれば、輸入金額のうち、最も構成比率が高いのは治療系医療機器で、注射器やPTCAカテーテルなどの処置用機器が全体の27%、4453億円となっている。

²²⁷政府は「日本再興戦略2016」で2015年4月に発足した日本医療研究開発機構(AMED)を軸に日本発の革新的な医薬品・医療機器の開発を推進することにした。医療機器の開発については「医療機器産業重点5分野」(手術支援ロボット・システム、人口組織・臓器、低侵襲治療、イメージング(画像診断)、在宅医療機器)を設定し技術開発支援を行っている。

第2項 医療機器の特性とAM技術との関係性

次に、医療機器の特性とAM技術の関係性について検討しておこう。図6-3は3Dプリンタに関する日本を含めた6ヵ国（地域）の特許出願の技術動向であるが、アプリケーションとしては全ての調査対象国（地域）で、医療（本調査では医療・ヘルスケアと区別）分野に関する出願数が最も多い。このことから、AM技術の活用分野として医療分野への関心が高く、医療機器にAM技術の活用が進んでいることが窺える。

図6-3 3Dプリンタに関する特許出願の技術動向



出典：特許庁『令和元年度 特許出願技術動向調査結果概要「3Dプリンタ」』を基に作成。

では、何故、医療機器市場でAM技術の活用が進んでいるか。第1に、AM技術を活用して製品を開発するニーズが元々存在していた。第2に、3DCADや画像処理技術、イメージング装置など3Dプリンタを利用するための周辺のデジタル機器の普及が進んでいる。本稿ではこのうち第1点目のAM技術を活用して製品を開発するニーズが存在していたことに着目する。とりわけ、前述の通り、医療機器には、患者の身体的な特徴や状態に応じて、形状や機能が異なるカスタマイズ性の高い製品の潜在需要が存在していた。これは、他の産業には見られない医療機器独特の特徴の1つに挙げられる。

表6-4は3Dプリンタで製造される製品群を表したものであるが、医療分野では人口骨、歯列矯正などが挙げられる。いずれの用途もカスタマイズ性が求められるものである。AM技術の特性を活かした市場が医療機器の中に存在していることが分かる。AM技術では金型が不要なため、既存の生産方法よりもコストパフォーマンスに優れたケースも見られるようになっている。こうした状況をみて、高木（2014）は製品の複雑さの程度に応じて、AM技術がコスト合理性をもつ領域が出てくるという²²⁸。

²²⁸高木聡、2014年、6頁。

表 6-4 3D プリンタで製造される製品用途

産業分野		医療分野	その他
試作・マスターモデル	型・製品	診断・治療	一般用途
デザインモデル	木型	手術検討用	CADの出力
ワーキングモデル	鋳型	損傷部復元	コミュニケーション
・機能評価	精密鋳造用モデル	教育用臓器模型	教育
・組付検討	ダイカスト金型	クラウン・入歯	芸術
マスターモデル	射出成型金型	人口骨	立体地図
・真空注型	製品本体	補聴器	靴型
・樹脂型・溶射型		歯列矯正	レプリカ作成
製品模型		再生医療	

出典：株式会社アспект資料を基に作成。

AM 技術は、カスタマイズ性の高い製品ニーズにきめ細かく対応できる技術であり、顧客ニーズに対して製品の多様化を図る方法としてはマス・カスタマイゼーション（以下、MC）の技術と知られている²²⁹。MC は、マス・プロダクション（大量生産）とカスタマイゼーション（顧客別設計と生産）の組み合わせで、小ロット生産においても利用される技術になっているのである。MC については、事例に基づいた先行研究が多く見られる²³⁰。

²²⁹Selladurai (2004)によると、マスカスタマイゼーションとは、大量生産の原理とカスタム製品を生産するプロセスを統合することである。

²³⁰市田（2019）は、マス・カスタマイゼーション（MC）について「生産システムのパラダイムシフト」で起きる発展プロセスの1つに位置付けている。MC の具体的特徴について臼井（2005）は、MC 研究の戦略論における諸説を整理しながら、既存の MC 研究は顧客の異質性や製品の多様化、製造技術の柔軟性・進化、情報技術の進化を背景に、MC 行動への移行の特徴があると指摘している。その上で、臼井自身は MC について、競争市場の中で企業が保有する資源と競合が保有する資源との相対的な関係によって変化するコンティンジェントな概念であると示し、最終顧客への対応能力が市場における成功要因である場合に、実行する傾向があると指摘する。競争市場における優位性の源泉から MC の有効性、行動の内容、戦略的な経営成果という戦略的 MC 研究の分析枠組みを提示している。また高（2012）は、企業における MC の有効性について、製品ラインや製品世代間において土台となるプラットフォームや主要システムの共通利用を考慮した製品設計を行う。自社の技術的強みを搭載したプラットフォームを全社的に利用することで、他社の追従を牽制し、コスト効率を高める、と説明している。

また、AM 技術が、MC の広がりの後押しする技術であるというレポートも見られる²³¹。MC は、製品をメーカーの意思に基づいて生産するマス・プロダクションよりも、ユーザーニーズに基づいて製品がカスタマイズされることから、AM 技術の特徴に見られる設計データから直接的に製品を製造できるシステムは、よりユーザーニーズに近く競争市場での優位性が考えられる。この点について臼井（2004）は、最終顧客への対応能力が市場における成功要因である場合に、MC を実行する傾向があると指摘している。

AM 技術と MC は、多様なニーズへの技術対応という点で共通性が見られるが、両者には異なる点もある。従来の MC は金型を利用したマス・プロダクションに基づいて製造された基本形状の製品をベースに、製造の後工程で顧客ニーズに沿う形で製品をカスタマイズさせることを基本にしている。これに対して AM 技術では、金型を使用しないため製品の基本形状を最小 1 個単位でカスタマイズでき、製造の後工程でマス・プロダクションに基づいて生産された部品などを組み込み最終製品化できる。この点から、AM 技術は金型使用による大量生産を前提にした従来の MC より、顧客への対応能力で個別最適化に優れたシステムであると言える。表 6-5 は、ダベニーが示した AM 技術に基づき行われるビジネスを 6 分類したものであるが、MC については医療機器でも一部の製品に適合できる分野が存在している。

表 6-5 ダベニーが分類した AM 技術の用途

1	マス・カスタマイゼーション（大量カスタマイズ生産）	顧客単位の製品を提供する
2	マス・バラエティ（大量多品種生産）	小数の基本デザインをベースに豊富な製品バラエティを用意する
3	マス・セグメンテーション（大量セグメント生産）	製品のバラエティを大幅に減らし、1つの製品につき、わずか数十種類のバージョンしか用意しない
4	マス・モジュライゼーション（大量モジュール化生産）	1製品の別バージョンを複数用意する代わりに、製品本体を1種類だけにして、交換可能なモジュールを差し込んで使う生産
5	マス・コンプレキシティ（大量複雑化生産）	1製品の多様なバージョンを低コストで生産する。
6	マス・スタンダーダイゼーション（大量規格品生産）	従来型生産方法と同様の生産

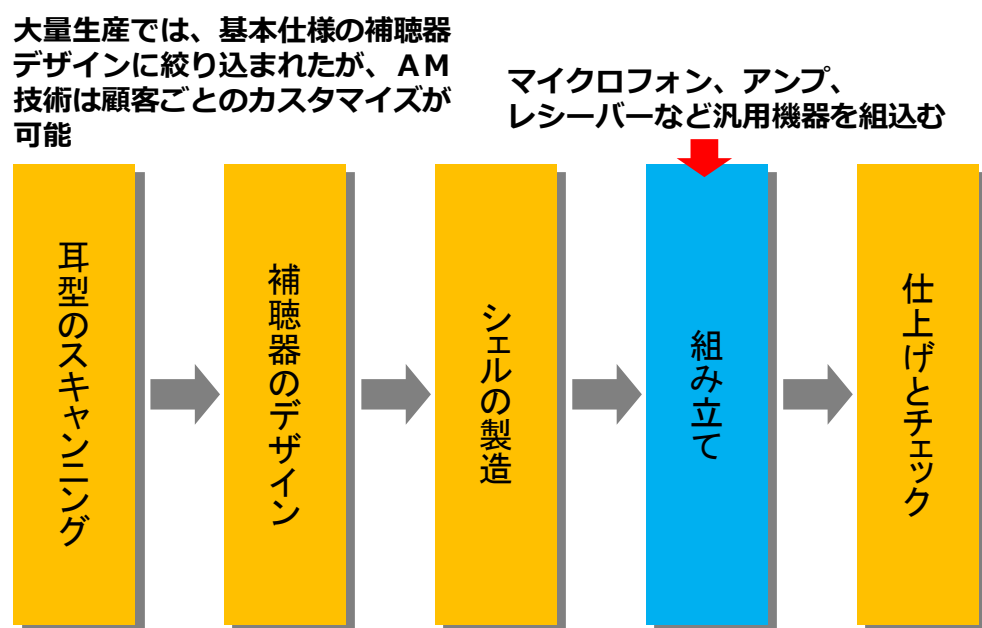
出典：ダイヤモンド社『DIAMOND ハーバードビジネスレビュー』2019 年 4 月号「3D プリンティングの進化がものづくりの常識を覆す」を基に作成。

その事例の 1 つに「補聴器」を挙げることができる。補聴器の種類は大きく、耳の穴にはめる「耳あな型」と、耳にかけて使用する「耳掛け型」がある。いずれの形状の製品にも音を拾う「マイク」、集めた音を増幅する「アンプ」、音を出す「レシーバー」の 3 つの基本的機能が備わっている。このうち、「耳あな型」は、ユーザごとに異なる耳の大きさや

²³¹日経ビジネス（2019）6 月 3 日号，p86-p88 参照。ジレット社のシェーバーやアディダス社のスポーツシューズの靴底（ミッドソール）がマス・カスタマイゼーション手法で作られているが、その製造に AM 技術が使われている。

サイズに合わせて最適な形状で作るオーダーメイド補聴器²³²が一般的であるが、補聴器メーカーでは、オーダーメイド補聴器の製造に AM 技術を活用するケースが次第に広がっている²³³。従来のオーダーメイド補聴器の製造方法は、耳に合うように鋳型の形状調整から最終的な製品の縁取り（トリミング）まで 9 段階で構成されていた。これに対して AM 技術では、補聴器の製造工程を「スキャニング」「モデリング」「プリンティング」の 3 段階に短縮した。3D スキャナーを使って耳をスキャンする一方、レーザーを使って耳の形状を作成し、デジタルカメラを使用して約 10 万から 15 万の参照点データを作成、そのデータが送信されてテンプレートと幾何学的形状をシェル(耳殻)のへこみに適用されている。シェルは樹脂を使用して 3D プリンタで出力され、必要な音響通気口と電子機器が取り付けられ最終製品として出荷される。

図 6-4 AM 技術によるオーダーメイド補聴器の製造方法



出典：各種資料を基に作成。

AM 技術を活用したオーダーメイド補聴器の製造では（図 6-4）、まず需要側のニーズに基づき、ユーザの耳の形に合わせたシェルのデザインが 3D プリンタで行われ、その後、量産品である電子部品が組み込まれる。大量生産を前提に基本仕様を形作り、その後、顧客ニーズに基づきカスタマイズする従来の MC とは異なるケースである。

²³²日本初のオーダーメイド補聴器（HI-15）は 1984 年、リオネット補聴器から発売される。

²³³例えば補聴器メーカー大手のリオネット補聴器では、2004 年にオーダーメイド補聴器のシェル自動生産システム「リオネット夢耳（ゆめじ）工房」を稼働している。

第2節 AM技術を活用した中小メーカーの事例

実際に医療機器作業の製造現場ではどのようにAM技術が活用され、企業はどのような成果を得ているのか、中小メーカーを事例に分析する。

第1項 ケイディケイ株式会社

ケイディケイ株式会社（東京都大田区）は、1969年7月に佐藤武志社長の実父である佐藤定昭氏が絶縁材料の加工販売を目的に創業した受託加工事業者である。1971年6月に法人格、有限会社協和電材工業を設立し、2004年9月に現社名に名称変更した。創業以来、汎用樹脂からエンジニアリング樹脂など各種樹脂材の切削加工を専門に手掛けており、現在は半導体関連をはじめ食品、医療、電子機器、印刷機など幅広い分野の部品などの加工を行っている。

2020年、世界的に新型コロナウイルス感染症が拡大する中、同社は飛沫感染を予防するための器具、フェイスシールド150セットの加工を歯科医院から依頼を受けた。人間の顔を覆うアクリル板を支持する樹脂製フレーム部分を3Dプリンタで生産した。同社は2016年、フュージョンテクノロジー社製の3Dプリンタ「L-DIVO M4040TP」を導入した。これまでは、日常業務で使用する治具の加工でAM技術を利用していたが、新型コロナウイルス感染症が急速に拡大し、医療機関を中心に感染防止用具が不足する中、同社はボランティアでフェイスシールドを量産した。

以下では本事例から、同社の佐藤武志社長へのヒアリングをもとに、従来の切削加工による方法と比較した場合、AM技術の強みについて分析する²³⁴。

1.1 生産リードタイムにおける切削加工とAM技術の比較

同社は今回、3Dプリンタを活用した製品造形で初の量産を行った。歯科医院から製作の要望を受けた4月上旬から準備を行い、4月中旬には注文数の150セットの加工を完了し、納品を終えた。3Dプリンタの稼働に必要な3Dデータは、インターネット上に研究機関などが無償公開している設計データを活用した。

表6-6はフェイスシールド150セットを従来の切削加工と3Dプリンタによる造形を比較したものである。切削加工は実際には行っておらず、試算上のデータである。両方法とも設計データは、公開データを使用することから設計に係る日数、コストは除外している。所要日数では、切削加工が切削に必要な治具製作を1日要するが、製造日数は1日で終わられる。このため、4日間で作業を終えられる。これに対して3Dプリンタでは、治具製作を不要とするものの、製造日数に6日間を要した。結果として、全体の製作日数は3Dプリンタが切削加工の2倍の8日間を必要とした。このことから、生産スピードでは圧倒

²³⁴2020年7月3日に佐藤武志社長へのヒアリングを行った。ヒアリング以外に、メールによる質問、事実確認を行った。

的に切削加工が優れていることが分かる。これを時間換算すると、切削加工の計 26 時間に対して 3D プリンタでは計 162 時間となった。3D プリンタでは、治具製作を不要としプログラムの設定時間も切削加工の 4 分の 1 で済むものの、生産スピードが切削加工に比べて大幅に遅いことが生産リードタイム全体に大きな影響を及ぼした。

表 6-6 医療用フェイスシールド 150 セットの加工条件の比較

医療用フェイスシールドマスク150セットを作成した場合の比較						
	切削加工			3Dプリンタ		
	工程	所要日数	コスト (人×時間)	工程	所要日数	コスト (人×時間)
1	プログラム	1	1人×8h	プログラム	1	1人×2h
2	治具製作	1	1人×8h	治具製作	0	ナシ
3	製造	1	6h (@25/h)	製造	6	150h (@1/h)
4	手仕上げ	1	4h	手仕上げ	1	10h
	計	4	26h		8	162h (注1)
5	工程数		3	工程数		2
6	材料コスト (注2)		200円/個	材料コスト (※)		20円/個

出典：ケイディケイ株式会社よりデータ提供を基に作成。

一方、生産コストで両者を比較すると、3D プリンタが切削加工よりもコストパフォーマンスに優れていることが分かる。表 6-7 は、両加工方法をコスト比較したものだが、人件費、材料費ともに切削加工の方が高コストとなる。但し、生産個数が 200 個以上になる場合では、人件費も含めて切削加工に優位性があると同社は試算している²³⁵。

表 6-7 切削加工とAM技術によるコスト比較

	人件費	材料費
切削加工	1人×26時間	200円×150個 = 30,000円 治具製作費 = 50,000円
AM技術	1人×12時間	20円×150個 = 3,000円

出典：ケイディケイ株式会社よりデータ提供を基に作成。人件費単価は非公表。

²³⁵Barry Berman (2012) は、3D プリンタは、50～5,000 個の生産量であれば、プラスチック射出成形と比較してコスト効率が高いと示している。

人件費については、最終工程の仕上げ加工以外は 3D プリンタよりも作業者が介在する時間が長く、また切削加工の場合、加工用の治具が必要になるためその製作作業も必要になる。製造工程で、加工時間は 3D プリンタの 150 時間に対して 6 時間で済むものの、3D プリンタの場合、材料とプログラムをセットすれば 24 時間自動運転するため人件費はかからない。また、材料費は、1 個あたりの材料コストが 3D プリンタに比べて切削加工の方が 10 倍高い。同社社長によれば、「切削加工では、加工寸法を工夫してもある程度余分なサイズの大きさを購入せざるを得ない」という。さらには、今回のケースでは治具製作コストとして約 5 万円を見積もるため、材料費全体では、3D プリンタによる加工が切削加工に比べて 10 分の 1 以下で済み、人件費削減効果も出ている。

1.2 量産品としての課題

ケイディケイ株式会社がフェイスシールドの製造を 3D プリンタで手掛けた理由は、精密な加工精度が必要ない製品であったことである。フェイスシールドは医療機関を含めて、社会生活の様々なシーンで使われているが、使用者がアクリル板を支持する樹脂製フレームを頭にセットすれば、体を動かしても“たわみ”や“しなり”が発生しないため、3D プリンタによる造形製品でも十分、使用に耐えられると判断したことが製作の決め手となった。同社のケースは、国内で急速に拡大する新型コロナウイルス感染症に医療現場を中心に感染予防対策が逼迫していた事情からボランティアとして製造を請け負った。調査時点しかしケイディケイ株式会社は今後、ビジネスとしてフェイスシールドの製造、販売を考えてはいない。その理由として、第 1 に、所有する 3D プリンタの生産能力、生産スピード、材料コスト、人件費などを総合的に試算すると、フェイスシールドの販売単価が 1,000 円程度になりコスト競争力がないという。第 2 に、設計データがインターネット上で無償提供されており、3D プリンタなど必要な機材があれば誰でも製造できる。第 3 に、他社よりも早く加工でき、設計力やアイデアなど付加価値の高い製品でなければ商売としては成立できないという。

フェイスシールドの量産では切削加工より 3D プリンタによる造形がコストパフォーマンスに優れていることが明らかになったものの、コスト競争力で同社はビジネスとして成立しないとみているのである。3D プリンタによるフェイスシールドの製造は、ケイディケイに留まらず、民間企業や産学連携による開発事例が数多く見られる²³⁶。これは表 6-3 のマス・コンプレキシティ（大量複雑化生産）に相当すると考える。3D プリンタで製造するフェイスシールドは、マスクの支持板となる樹脂製フレームはデザイン重視や簡易に

²³⁶例えば、2020 年 4 月 6 日付『日刊工業新聞』によれば、産学連携でフェースシールド作成にいち早く取組んだ事例として、大阪大学大学院医学系研究科の中島清一特任教授と室崎修招聘教員らが、眼鏡フレームメーカーのシャルマン（福井県鯖江市）と低コスト型の製品を考案している。

造形できる形状など多様性が見られる一方で、顔を覆うマスク部分は市販の亚克力板を使用するケースが多い。3D プリンタを使って前工程で支持板を造形し、その後、量産品である亚克力板を接合することでシールドとしての機能を果たすが、この製造方法は従来の MC とは異なる新たなモデルとしても考えられるのではないかと。

第 2 項 有限会社光沢

有限会社光沢（埼玉県川越市）は、1998 年 7 月、佐藤亘社長の実父、佐藤巖氏が創業し、受託加工を中心に事業を展開してきている。真空の状態でシリコン型に樹脂を流し込んで製品を複製する真空注型と呼ばれる加工法を得意としている。現在の生産方法では、真空注型以外に切削加工、成形、3D プリンタなど幅広い加工法を手掛けている。

このうち、3D プリンタによる造形では、これまでに多くの試作品の製作を手掛けているが、光沢は次のステップとして 3D プリンタによる量産を強化しつつある。2014 年には眼科用の斜視検査装置を一部 3D プリンタで量産した実績を持つが、現在、次の量産品として、ドイツ、カールツァイス社が開発した眼科向け手術顕微鏡「OPMI Lumera700」に使われる曇り防止機器の量産計画を進めている。同顕微鏡では、患者の目元にレンズを当てるが、瞼を開閉した際に人間の目から二酸化炭素が排出されるためレンズが曇ってしまうという問題があった。光沢はこの課題解決策として、レンズ部に脱着式でエアーを吸引する樹脂製の機器を 3D プリンタで開発した。

以下では本事例から、従来の射出成形＋切削加工による方法と比較した場合について、佐藤亘社長へのヒアリングをもとにまとめた²³⁷。

2.1 3D プリンタを活用する着眼点

光沢が開発した曇り防止機器は、大学教授のアイデアから生まれたもので競合部品は現存しない。本製品に合った最適な板素材がないために、射出成形によりブロックを製作し、その後切削加工により 2 分割の製品を作り、後工程で 2 つの部品を接着し、1 つに貼り合わせていた。そのためコストが高くなり、製造単価が 1 個あたり 1 万円以上掛かってしまうのが難点とされていた。また 2 つの部品を接着剤で貼り合わせることから製品としての信頼性にも課題を残していた。光沢は、こうした課題を克服するために一体成型の可能な 3D プリンタに着目した。大手光学機器メーカーが持っていた製法に関する特許の譲渡を受け、従来品の代替品を 3D プリンタで造形するため異業種企業と共同開発を進めてきた。2019 年 11 月に試作に成功し、さらなる改良を重ね、2020 年中に大量生産を開始する計画を進めている。

²³⁷2020 年 7 月 14 日に佐藤亘社長へのヒアリングを行った。ヒアリング以外に、メールによる質問、事実確認を行った。

表 6-8 曇り防止機器の工数とコスト比較（生産数量は 100 個）

曇り防止機器の工数比較(100個生産)※利益分は含んでいない					
素材成形＋切削			3Dプリンター(光造形RM6000)		
素材成形	射出成形(ブロック成形)	3 day			
CAM工程	プログラム	1 day	前工程	プログラム	0.5 day
切削	MC(1台)切削2種両面加工	12 day	造形	100個同時造形	1 day
後工程	仕上げ＋接着工程＋検査	3 day	後工程	仕上げ＋検査	1 day
合計		19 day	合計		2.5 day
	原料(単価2000x25Kg)	50000 円		原料(単価35000x2Kg)	70000 円
	金額	810000 円		金額	274000 円
	単価	8100 円		単価	2740 円
素材80x80(4個取り)1テーブル6個					
MC製作代 1Day x 4万円			光造形製作代 1Day x 14.4万円(6000円/h)		
本製品は、透明かつ高耐熱の素材が必要である。			靱性と理想の耐熱を兼ね備えた光造形素材は、現存しない。		
そこで、射出成形によりブロックを製作し、切削により			そこで、10回程度のオートクレープに耐えうる製品コンセプト設計を行った。		
2分割の製品を得る。後工程で2部品を接着し検査を行う。			これにより、低価格であるが、買換え需要を見込んだ製品設計である。		
懸念事項			懸念事項		
最適な板素材が無いため、射出成形によりブロックを製作する⇒コスト高			実験により20回のテストをクリアしているが、破損の可能性あり⇒安全性		
高価な原料だが、製品部以外は産廃となる⇒低環境			必要素材のみの製造方法⇒高環境		
中空形状の為、2分割で製作し、接着を行う⇒信頼性低下			少ロット製造でも低コスト製造が可能⇒コストメリット		

出典：有限会社光沢よりデータ提供を基に作成。

2.2 生産面に見られる AM 技術の優位性

表 6-8 は曇り防止機器を従来の射出成形と切削加工を組み合わせで量産する場合と、3D プリンタで量産する場合の工数と必要なコストを比較したものである。まず、生産リードタイムでは、射出成形と切削加工の組合せによる従来工法では 19 日間の生産日数を要するのに対して、3D プリンタではわずか 3 日間で製造が終了することができる。

両者の生産日数の差は、前者が異なる加工の組み合わせを繰り返し 1 個単位で加工するのに対して、3D プリンタでは 1 度に 100 個の製造を終えることができる。開発した曇り防止機器のサイズ（タテ×ヨコ×高さ）は 30×30×11mm であり、同社が保有する小型光造形機「RM-6000」でも対応可能な製品であった。一般的に 3D プリンタを活用する AM 技術では、加工スピードの点で NC 工作機械などによる従来の加工法よりも「遅い」ことから量産に不向きである点が指摘されていた。しかし、今回の機器を例にする小型サイズの製品であれば、並列状態で一度に大量数を加工することで時間の制約をクリアすることが可能であることが判明した。

一方、生産コストは、材料費が従来工法では 5 万円であるのに対して、3D プリンタでは 7 万円と試算している。しかし、生産コスト全体で見ると、従来工法が総額 81 万円になるのに対して 274,000 円に収まることが分かる。図表上に示したように、従来工法では切削加工に 12 日間を要するため、1 日あたりの MC（マシニングセンタ）による製作費用 4 万円の 12 日間使用分がコスト全体の約 6 割を占めている。この結果、製品単価では、従来工法では 1 個あたり 8,100 円に対して、3D プリンタでは 2,740 円となり、本ケースで

は生産日数、生産コストともに 3D プリンタによる工法がパフォーマンスに優れていることが分かる。同社は、新開発の曇り防止機器が一体成型による製造では初となることから、現状は人件費を含めて何個以上になれば従来工法が優れているという試算は行っていない。

2.3 量産加工の課題

上記の通り、本ケースでは生産日数、生産コストともに 3D プリンタの量産効果を明らかにすることができた。しかし、一方では、3D プリンタによる AM 技術が技術進化の過程であることから、課題も浮き彫りになった。表 6-8 では懸念事項として 4 点（コスト、環境、安全性、信頼性）を示したが、このうちコストでは表 6-7 の通り、原料単価が射出成形＋切削加工では 2,000 円であるのに対して、3D プリンタでは 3 万 5,000 円になった。その差は 17 倍にのぼる。一方、信頼性については、光沢の佐藤社長は「現時点では、靱性と耐熱性を兼ね備えた造形素材は現存しないため信頼性に課題がある。今後、耐熱性に優れた 3D プリンタの材料が市販されれば、量産化されるケースが一気に増えるだろう」という。光沢のケースは表 6-3 の産業分野の製品本体に該当し、表 6-5 の「マス・スタンダイゼーション（大量規格品生産）」に相当する。

表 6-9 従来工法と 3D プリンタによる工法それぞれの懸念事項

	コスト	環境	安全性	信頼性
射出成形 ＋ 切削加工	最適な板素材がないため、射出成形によりブロックの製作が必要	原料が高価だが、製品部以外は産業廃棄物になる	生産方法として一般的であり、安全性は 3D プリンタより高い	中空形状のため、2分割で製作し接着が必要なため、信頼性の点で課題がある
3D プリンタ	原料単価は切削加工に使用する樹脂原料より高額なものの、使用量が少ないため、総額では安い	積層加工のため、必要な素材のみで製造可能。バリの発生はあるが、ゴミの排出量が少ない	実験により 20 回のテストをクリアしたが、破損する可能性あり	靱性と耐熱性を兼ね備えた造形素材は現存しないため、信頼性の点で課題がある

出典：有限会社光沢よりデータ提供を基に作成。

第3項 株式会社 UCHIDA（埼玉県入間郡）

株式会社 UCHIDA は、1968 年に造形物製造のため個人事業主「内田工芸」として創業した。2 輪、4 輪の試作部品、レース用部品などの製作を経て、現在は樹脂製品製造業・CFRP（炭素繊維強化プラスチック）による試作から中ロット多品種の設計から塗装工程に至る製品をワンストップサービスで提供するビジネスモデルを確立している。

同社は 7 年ほど前から国立障害者リハビリテーションセンター（所沢市）と共同で、二足歩行アシスト装具「C-FREX」の開発を進めている。「C-FREX」は、脊髄を損傷して自力歩行できなくなった人のための、動力を用いないひざの関節機構で、人間の大腿部に相当するパーツを AM 技術で製作した。ナイロン樹脂とカーボン繊維の 2 つの材料を互いに積層させて製作したもので、製品は現在、機能プロトタイプの最終段階まできている。同社は今回の製品開発で初めて AM 技術を活用したが、その理由は、内田敏一社長の証言によれば、以下の 3 点である²³⁸。

3.1 生産リードタイムの圧縮

「C-FREX」は男女、小児用、成人用など、様々なバリエーションの展開を想定している。そのため、ユーザ単位で都度、金型を製作していたのでは、コストが高くなってしまい、またユーザの手元に届くまでに時間がかかる。

3.2 AM 技術採用の決定判断

同社が 3D プリンタでの製作を決めたのは、対象部分となる大腿部は人間が体を動かしても“たわみ”や“しなり”が少ないため、3D プリンタで製作した部品でも十分に精度が高く製品化に耐えられると判断したためである。表 6-9 は、金型を製作して行う従来の切削加工による方法と AM 技術を使用した方法によるコストパフォーマンスを比較したものである。従来の切削工法では、金型の設計、製造日数と製品の加工日数を加えて 14 日を要するのに対して、3D プリンタではわずか 3 日に短縮された。その結果、材料費、製造費を含めたトータルコストでは 100 万円以上削減できた。試作段階ではあるものの、両者の比較では明らかに AM 技術活用の効果が出ていることが分かる。なお、UCHIDA のケースは、表 6-3 の医療分野の「損傷部復元」に相当し、表 6-4 の「マス・カスタマイゼーション（大量カスタマイズ生産）」に相当する。

²³⁸2018 年 5 月に内田社長へのヒアリングを行った。ヒアリング以外に、新聞、雑誌など各種公開情報を参考にしている。

表 6-10 従来の加工方法と AM 技術のコストパフォーマンス比較

C-FREX 大腿部片側のみを想定			
従来製法+成型型製作		3Dプリンタ	
工程	所要日数	工程	所要日数
仕様検討	1日	仕様検討	1日
製品データ・設計	3日	製品データ・設計	3日
成型型設計	1日	成型型設計	不要
成型型製造	3日	成型型製造	不要
製品製造	1週間	製品製造	2日
製品追加工	3日	製品追加工	1日
合計日数	17日	合計日数	7日

出典：株式会社 UCHIDA の資料を基に作成。注：従来製法+成型型製作のコストおよび工数は、現状の試作開発段階で試算しているため、量産時とは異なる。トータルコストは “従来製法+成型型製作” の金型費用を含めて算出している。

第4項 考察

ケーススタディから AM 技術は、低コストかつ短納期で多様なニーズに対応が可能な技術であることが分かった。この特徴は、カスタマイズ性が求められる医療機器の加工に優位性が見られる。株式会社 UCHIDA の例では、「C-FREX」について男女、小児用、成人用など、様々なバリエーションの展開を想定しており、ユーザ単位で都度、金型を製作していたのでは、コストが高くなってしまう。同社はこの課題を AM 技術でクリアしようと試みている。現在、「C-FREX」は開発段階にあるが、製品化されれば、コスト競争力の発揮が期待される。また、ケイディケイ株式会社の例では、感染症拡大という緊急事態の中、フェイスシールドを短期間で製造したが、金型が不要で材料費のみで済む AM 技術であったことがスピーディーな決断を行った背景にある。同社のケースはボランティアのため、収益性は評価できないが、1 日でも早い製品提供ニーズに対応できた点で AM 技術の優位性が指摘できる。以上の点から MC において AM 技術は「速さ」と「バリエーション」で新たな基軸をもたらしたといえる。

第3節 小括

本章ではAM技術に焦点を当ててデジタル技術を活用する産業について医療機器を事例に取上げて分析した。その結果、以下の通り、2つの分析結果を示すこととする。

・第1点は、AM技術は金型使用による大量生産を前提にした従来のMCより、顧客への対応能力で個別最適化に優れたシステムである。従来のMCでは、概観やデザインなどは基本設計に基づいて量産された製品を使用することがベースになっており、カスタマイズの範囲には制限が課せられていたが、AM技術は金型を使用せずに製品を造形できる特性を有するため、製品の基本形状を最小1個単位でカスタマイズできる。事例でも示した補聴器の様に、前工程で個々のユーザーニーズに合わせて製品形状についてAM技術を使い加工し、その後、製造の後工程でマス・プロダクションに基づいて生産された部品などを組込むことで最終製品化することができる。この要素をうまく使えば、カスタマイズ性の高い医療機器や福祉機器あるいは嗜好品などを低コストで開発、生産できるため、中小製造業として新たな市場創造につながられる。さらにケーススタディからも分析した通り、MCにおいてAM技術は「速さ」と「バリエーション」で新たな基軸をもたらしたといえる。

・第2点目は中小製造業のビジネスの視点を変えたことだ。本章では、中小製造業3社を事例に、医療機器の特性とAM技術の関係性も分析した。3社共に医療機器（部品）の製造にAM技術を使うことによって、コストや加工スピードを加味して、従来の生産方法とは異なる成果が見られた。

第1に、AM技術が医療機器の開発や生産で有効性の高い技術であることである。AM技術は、中空部品の加工や一体成形など、従来の生産方法では実現できない形状を造形できる上、異種金属素材を組み合わせた部材の成型も可能である特性をもつ。こうした特性をうまく活かすことによって、従来は形状が複雑で加工が難しかった心臓モデルや補聴器なども容易に造形ができる²³⁹。AM技術ならではの積層造形の特徴（一体成形や複雑な形状）を活かす新たなアイデア（発想）を適切に設計に落とし込めれば、ビジネスチャンスの拡大にもつながる。これは筆者が学術的意義として示した設計と製造のシームレスな関係を示すと同時に、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ことを示している。第4章のアンケート調査の事例でも見られたが、AM技術をビジネスに活用する事例では医療関連製品の開発事例が多く見られる。カスタマイズが要求される医療機器と金型を使わずにサンプルや試作品を容易に積層造形で作りだせるAM技術の特性がうまく合致したケースであり、こうした需給関係が中小製造業に新たな市場開拓の機会を与えたと言える。光沢やUCHIDAのケースはそうしたモデルを実証し

²³⁹例えば、2019年3月26日付の日刊工業新聞18面の記事「本物の質感に近い心臓レプリカ、クロスエフェクトが開発」によれば、同社はSCREENホールディングス、共栄社化学（大阪市中央区）と共同で3Dプリンタなどを活用して、心臓の質感に極めて近く、幅0・2ミリメートルの微細形状も再現する立体構造の心臓レプリカを開発したと報じている。

ている。

医療機器にはアイデア段階で潜在的ニーズがあったとしても採算性が取りづらく、結果的に製品化が難しい場合が多いが、AM 技術を活用することによって課題解決が可能である。量産品の生産に関して、現在の AM 技術は、製品の造形スピードやコスト、また造形品質で工作機械を使った従来の生産方式と同レベルに到達していないと言われるが、本章の事例分析によって、加工条件によっては量産対応できる技術として一層の普及可能性があることが明らかになった。

量産品を生産するケースでは、一般的に生産スピードや品質の点で、AM 技術より既存の機械加工が優れていると言われる。しかし、本章の事例分析を通して、AM 技術は生産の条件次第では量産に優れた技術になり得ることが分かった。

有限会社光沢のケースに見られるように、3D プリンタで一度に大量のものを造形でき、既存の機械加工による切削は 3D プリンタより大幅に生産コストが膨らむ場合は、3D プリンタの優位性が見られた。具体的に、3D プリンタの造形能力によって、造形品のサイズや形状、生産数量などを照合し、既存の機械加工方式よりも生産コストが抑えられるなど、条件が揃えば AM 技術が量産対応可能な技術になる。ケイディケイ株式会社の例でも、切削加工より 3D プリンタによる造形がコストパフォーマンスに優れていることが分かる。

表 6-11：NC 工作機械と 3D プリンタの特性の比較

	プラスポイント	マイナスポイント
NC 工作機械	①開発からの歴史が長く、製品としての信頼性と性能実績に対する評価が定着している。 ②製造現場への普及が進んでおり、普及率は工作機械全体の 9 割を超えている。	①普及率が高いため、デジタル化による技術の平準化を生み出す。 ②複雑な加工が必要な場合、加工時間が長くかかる。
3D プリンタ	①金型が要らないため、設計データから直接、積層造形できる。 ②機械加工に比べて、加工に必要な材料を最小限にすることができる。 ③機械加工と比べて、製品加工のカスタマイズ性に優れている。	①開発から歴史が浅く、製品としての信頼性や性能実績に対しての評価が安定していない。 ②機種によっては工作機械より価格が高く、また材料費も全般的に高い。 ③工作機械と比べて生産スピードが遅く、量産対応では現時点で劣位性が見られる。

出典：各種資料を基に作成。

第 2 に、NC 工作機械など従来のデジタル技術と比較した場合、加工製品や加工の生産条件次第では、AM 技術が中小製造業にとって有効な技術になりえる。表 6-11 は、NC 工作機械と 3D プリンタの特性を比較したものであるが、同じ製造現場で使われるデジタル機器も、その特性が大きく異なることが分かる。

技術のデジタル化に関する先行研究で、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が示され、そのため、中小製造業には技術の平準化を回避する施策が求められた。しかし、3D プリンタの場合、金型を必要とせず、最小 1 個から製品加工できる利点を活かすことによってビジネスチャンスを広げられる。特に、MC との関連性では、従来の量産品の組み合わせを前提にした MC よりも、より簡便に顧客ニーズを満足させることができる。カスタマイズ性が求められる医療機器において 3D プリンタの一層の活用が期待され、中小製造業の新たな競争の鍵になると考える。

AM 技術の産業事例からは、中小製造業が技術のデジタル化に直面した際、どのように対応すればよいか 1 つの事例を示すことができたと考える。試作品製造や少量多品種の生産など、大手企業に比べてきめ細かな対応が特徴的な中小製造業にとって、AM 技術はプラス効果の高いデジタル技術であることを本章では示すことができたと考える。

結論

1、分析結果の要約

デジタル技術は、人間が行うアナログ作業をデータに置き換えて、機械に物理的な作業を命令することで、人間に代わり正確に作業を行う極めて利便性の高い技術である。しかし、デジタル技術には、アナログからデジタルにデータが置き換わることで、それまでの経験やノウハウを通じて得た差別化や付加価値などの情報を平準化してしまう特性を持ち合わせている。そして、技術の平準化が進むと、企業が持つ固有の技術は次第に差異がなくなり、企業間競争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変化する。こうした事態が起きた時、中小製造業の活路はどこにあるのだろうか。

本研究は、デジタル技術の特性が中小製造業のパフォーマンスにどのような影響を及ぼすのか考慮した上で、デジタル技術が中小製造業に与える影響と、その影響に対して中小製造業が具体的にどのような施策で臨んでいるのか明らかにすることを目的とした。中小製造業は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企業が存在している。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、その実態を多面的に検証した。具体的には、受託加工型事業者を中心とする中小製造業へのアンケート調査、自社開発型事業者へのヒアリング調査、そして医療機器産業を事例に同分野でデジタル機器を活用して製品開発、製品加工に取り組む中小製造業へのヒアリング調査の3つのカテゴリーを対象にフィールドワークを通じて分析した。

中小製造業へのアンケート調査は、3DCADの利用実態調査と3Dプリンタの利用実態調査を行った。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。また、3DCADを導入した効果について、「サプライヤーとのデータ共有」を挙げる企業が多かった。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、同時に、生産活動全体を通じて、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。2DCADに比べてより高度な設計技術が求められる3DCADの導入と活用に臨む中小製造業が競争力を発揮している実態を考察した。

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り組むことで、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。受託加工型事業者にとって金型を使わずに容易に積層造形できる利点は、コスト削減や納期短縮もさることながら、最も重要な点は造形の自由度を上手に活用することで提案型営業を強化できる点である。こうした活動は受託加工型事業者にとって重要であり、中小製造業にとり 3D プリンタは新たな競争力を発揮するためのデジタル機器であることが分かった。現在、製造業の現場で普及が進んでいる 3D プリンタに代表されるデジタルファブリケーション技術は、設計と製造を一体的に捉えたシームレスな製造技術であり、3D 技術をプロトコールにして設計と製造の関係が成立する。3D プリンタは 3D データのみ利用が可能より高度な設計技術への対応が求められる AM 技術を採用し、先行研究に見られる ME 化とは大きく異なる。設計と製造の関係性から ME 化について論じようとする本稿の意義を見出す上で 2 つの調査結果は重要な根拠を示すと考える。つまり、ME 化の視点に立脚すれば、調査結果は設計と製造の相関性が強まっていると判断でき、中小製造業は製造部門のデジタル化に加えて、設計のデジタル化により注力しなければならない点が先行研究とは大きく異なる点であることを強調したい。

自社開発型事業者 2 社へのヒアリング調査では、中小製造業は技術のデジタル化の特性をうまく利用すれば、ビジネス機会を獲得、拡大することが可能であることが分かった。サイトウ製作所は、特定市場への特化と市場の中で製品ラインナップの多品種化が、技術のデジタル化にうまく対応して競争力を発揮していることが調査を通じて判明した。また同社は、生産工程の中で手作業を残し、自動化しにくい工程に取り組んでいる。さらに多品種生産により段取り替え作業が複雑化することも、効率化を追求する技術のデジタル化に対して効果を発揮している。一方、アタゴも付加価値の高い光学部品について、研磨など、複数の工程に、意図的に人間の作業を介在させることで、技術のデジタル化の特性である効率性と一線を画して差別化を図っている。さらには製品製造の内製化率を上げることで、競争力を維持し事業を拡大していることが明らかになった。ヒアリング対象の 2 社は、独自技術を持つオンリーワン、ナンバーワン志向の高い企業で、製品や技術を通じて市場での優位性を高める技術オリエンテッドなケースだが、製品開発に対する固有のアプローチ方法が、技術のデジタル化について副次的効果をもたらすことも発見した。

最後に医療機器を事例にしたデジタル技術の活用調査では、中小製造業 3 社を事例に、医療機器の特性と AM 技術の関係性を分析した。医療機器にはカスタマイズ性が要求される製品があり、この医療機器のニーズと AM 技術の特性をうまく適合させることで、中小製造業に新たな市場開拓の機会を与えた。AM 技術の産業事例からは、中小製造業が技術のデジタル化に直面した際、どのように対応すればよいか 1 つの事例を示すことができたと思う。試作品製造や少量多品種の生産など、大手企業に比べてきめ細かな対応が特徴的な中小製造業にとって、AM 技術はプラス効果の高いデジタル技術であることを本章では示すことができたと思う。同時に、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ことを示している。さらに AM 技術はその使い方次第では、

量産対応が可能であることを本研究は明らかにした。

先行研究では中小製造業の ME 化対応を数多く取上げているが、いずれの研究も製造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、設計の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。また、新たなデジタル技術である AM 技術に関する技術はなく、また 1970 年代、80 年代の ME 化から、その後の技術のデジタル化の変遷を時系列で分析した研究も存在しない。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稿は中小製造業研究に新たな視点をもたらしたと考える。

2、今後の研究課題

最後に今後の研究課題を述べたい。本稿では着眼点の 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。本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。一方、国内の工作機械メーカーは既存の NC 工作機械と 3D プリンタを組合わ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あると考えられる。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。

(1) 日本語文献 (50 音順)

- 秋野晶二「日本におけるME技術の開発・普及過程とその経済性－Development and Diffusion of Microelectronics Technologies in Japan－」、立教経済学研究第17巻第3号、1994年
- 青木昌彦、安藤晴彦編著『モジュール化 新しい産業アーキテクチャの本質』、東洋経済新報社、2002年
- アспект 3D プリンタ資料
- アンダーソン、クリス『MAKERS 21世紀の産業革命が始まる』、NHK出版、2012年
- 市田陽児「生産システムのパラダイムシフトー3Dプリンタ、ホールガーメント横編機の事例からー」『商学集志』、2019年
- 稲葉清右衛門「最近のNCシステムの進歩」、精密機械47巻10号、公益社団法人精密工学会、1981年
- 医療機器センター (JAAME) 医療機器産業研究所 HP
- 植田浩史「中小企業とサプライヤ・システム」、企業環境研究年報 中小企業とサプライヤ・システム 1 No.4, Nov. 1999、1999年
- 上野紘「中小企業における生産のME化と熟練問題--人材育成の側面を中心にして」、中小季報、大阪経済大学中小企業・経営研究所、1988年
- 臼井哲也「戦略的マス・カスタマイゼーション研究の分析枠組みー戦略論、マーケティング論、生産管理論を結合するパースペクティブよりー」『明治大学社会科学研究所紀要』、2005年
- 内田孝尚『バーチャルエンジニアリング』、日刊工業新聞社、2017年
- 内田孝尚『バーチャルエンジニアリング2』、日刊工業新聞社、2019年
- MMC リョウテック HP
- 岡田浩一「下請・中小企業の成長と中小企業問題の展開・独占・大資本による「支配方法」の変化-」、経営論集38巻1号、1991年
- 岡室博之、八幡成美、金子能宏、青山和佳「リーディングス日本の労働」第11巻「技術革新」、日本労働研究機構編、日本労働研究機構、1999年
- 奥村康司『ME技術革新下の日本的経営』、中央経済社、1988年
- 小野恒雄「技術革新と労使関係:文献による日米比較」、城西大学大学院研究年報(3)1987-3、城西大学大学院経済学研究科、1987年
- 小田宏信「ME技術革新下における大都市機械工業の変容ー京浜地域のプラスチック金型製造業を事例にしてー」、1997年
- 岡本康雄、若杉敬明『技術革新と企業行動』、東京大学出版会、1985年
- 加瀬部強「マス・カスタマイゼーション化による競争力強化の方向性ーフィルムコンデンサ企業を事例としてー」『岡山大学大学院社会文化科学研究科紀要』、2015年
- 川口市「令和2年度市内事業者実態把握調査」
- 河邑肇「NC工作機械の発達を促した市場の要求ー日米自動車産業における機械加工技術

一」、経営研究第 47 巻第 4 号、大阪市立大学経営学会、1995 年

河崎亜洲夫「ME 化と中小企業の技術進歩ー下請中小機械金属工業を対象にしてー」、四日市大学論文集第 3 巻第 2 号、四日市大学、1991 年

河崎亜洲夫「技術進歩と下請中小企業ー機械工業を中心にして」、大阪経済大学中小企業・経営研究所、中小企業季報、1983 年

神田幸彦「補聴器の進歩と聴覚医学 補聴器の歴史と変遷ー最新補聴器の紹介ー」『Audiology Japan』、2017 年

北浦孝一『産業メカトロニクス』、東洋経済新報社、1986 年

北嶋守「医療機器クラスターを軸にした中小企業の新事業展開ー優位になる能力と必要になる能力ー」、一般財団法人機械振興協会、機械経済研究 No46、2021 年

金容度『日本の企業間取引』、有斐閣、2021 年

金容度「日本の IC 産業の初期発展過程に関する研究ー1960 年代と 70 年代を中心にしてー」東京大学大学院経済学研究科、2002 年

金容度「石油危機後の工場自動化と企業間関係ーNC 工作機械の導入を中心にー」、経営志林第 40 巻 3 号、2003 年

黒瀬直宏「市場創造と中小企業の新パラダイム」、三田商学研究 第 38 巻第 6 号、1996 年

経済産業省・厚生労働省・文部科学省編『2003 年版 製造基盤白書ー日本製造業の復権に向けた戦略的取組』

経済産業省『2005 年版中小企業白書』

経済産業省『2005 年版ものづくり白書（製造基盤白書）』

経済産業省『2016 年 製造業をめぐる現状と課題への対応』

経済産業省『2017 年工業統計表品目別統計』

経済産業省『2019 年 生産動態統計年報（機械統計編）』

経済産業省『2019 年版ものづくり白書』

経済産業省『2018 年版中小企業白書』

経済産業省『2019 年版産業統計』

経済産業省『2020 年版中小企業白書』

経済産業省『2020 年版ものづくり白書』

経済産業省『2021 年 生産動態統計年報（機械統計編）』

経済産業省・厚生労働省・文部科学省編『2003 年版 製造基盤白書ー日本製造業の復権に向けた戦略的取組』

経済産業省『生産動態統計年報・機械統計編』

経済産業省『令和元年度製造基盤技術実態等調査 我が国ものづくり産業の課題と対応の方向性に関する調査報告書』

経済同友会「ME 化の実態と経営者の意識」、1983 年

公益財団法人発明協会「戦後日本のイノベーション100選」HP

高永才「マス・カスタマイゼーション戦略における部品サプライヤーマネジメントの在り方ー温度補償型水晶発振器市場における製品開発の事例を通してー」『イノベーション』

ン・マネジメント』、2012 年

厚生労働省『薬事工業生産動態統計調査』

國領二郎『オープン・ネットワーク経営』、日本経済新聞社、1995 年

後藤康雄「我が国のニッチトップ企業のマクロ的概観～分布特性の把握と地域活性化の視点からの考察～」、経済のプリズム No142 2015.8、2015 年

近藤信一（2009）「中小企業におけるモノづくりのデジタル化」、日本政策金融公庫、調査月報 2009 年 12 月、No015、2009 年

近藤正彦「国際競争力の強い日本の工作機械（統計で読む“ 経済・産業の動き”）」日本機械学会誌 123 巻 1225 号、2020 年

埼玉県『先端産業創造プロジェクト』HP

財務省『法人企業統計調査』

塩澤豊「3D デザインと 3D プリンティングの未来」、赤門マネジメント・レビュー、非営利活動法人グローバルビジネスリサーチセンター、2015 年

漆崎幸憲「金属光造形複合加工法の開発とアプリケーション」、日本機械学会、2013 年

四宮あや「インクジェット紫外線硬化方式 3D プリンタの医学・医療分野への実用化」『医機学』、2016 年

柴田友厚「日本工作機械産業の技術発展メカニズム モジュール化による NC 装置と工作機械の共進化」、研究・技術・計画 24、研究・イノベーション学会、2010 年

庄谷邦幸「マイクロエレクトロニクス（ME）化と中小企業」、桃山学院大学経済経営論集・25（4）、1984-3、桃山学院大学経済経営学会、1984 年

『週刊東洋経済』、1993 年 3 月 20 日

新宅純二郎、小川紘一、善本哲夫「光ディスク産業の競争と国際的協業モデルー擦り合わせ要素のカプセル化によるモジュラー化の進展ー」、赤門マネジメント・レビュー 5 巻 2 号、2006 年

鈴木信貴「モジュール型産業におけるインテグリティーの獲得ー日本工作機械産業の事例ー」、赤門マネジメント・レビュー 9 巻 9 号、2010 年

Stefan Thomke・藤本隆宏「フロント・ローディング型問題解決による製品開発期間の短縮」、東京大学経済学部ディスカッション ペーパー、1998 年

関満博「東京城南地域における中小機械金属工業の新たな展開」、同志社大学人文科学研究所、1985 年

全国中小企業団体中央会「中小企業におけるマイクロエレクトロニクス導入の実態と方向」、1985 年

総務省『日本標準産業分類』

総務省『平成 28 年度版情報通信白書』

総務省・経済産業省『平成 28 年経済センサス・活動調査』

田上英二郎「3D プリンタの現状と将来」、日本画像学会誌第 45 巻第 3 号、2006 年

高木聡「付加製造技術にみる新たなものづくりの可能性」『産学連携学』11(1)、2014 年

高木聡「3Dプリンタからみる新たなものづくり 付加製造技術の可能性」『情報管理』57(4)、2014年

高橋勇「CAD／CAM／CAE／RP 概論」、鑄造工学、第86巻第2号、2014年

高橋美樹「中小企業によるニッチ戦略に関するノート」、三田商学研究、2015年

瀧澤菊太郎、小川英次編『先端技術と中小企業』、有斐閣、1988年

竹内淳彦『日本の機械工業』、大明堂、1973年

竹田陽子『プロダクト・リアライゼーション戦略－3次元情報技術が製品開発組織に与える影響』、白桃書房、2000年

竹田陽子、青島矢一、延岡健太郎「3次元CADの普及と製品開発プロセスに及ぼす影響」、技術マネジメント研究(4) 1-12、横浜国立大学技術マネジメント研究学会、2005年

ダベニー、リチャード・A (2019)「3Dプリンティングの進化がものづくりの常識を覆す」『ハーバードビジネスレビュー』、2013年

中博秀『解体する熟練』、日本経済新聞社、1984年

中央大学企業研究所編『ME 技術革新と経営管理一日・西独・英にみる工作機械企業の国際比較－』、中央大学出版部、1989年

中小企業庁『平成30年中小企業実態基本調査』

中小企業庁『1984年版下請企業実態調査』

中小企業庁編『技術革新と中小企業－中小企業近代化審議会報告』、財団法人通商産業調査会、1985年。

通商産業省工業技術院総務部技術調査課編『技術革新の衝撃』、日本能率協会、1983年

津田真徹「現代技術革新と人事労務の問題」、社会学研究(24)、一橋大学、1986年

寺川眞穂、古田武、小林敏男「事業の展開と存続 グローバル・ニッチ戦略の重要性」、大阪大学経済学、2008年

電波産業会『2020 電波産業調査統計』

特許庁『令和元年度 特許出願技術動向調査 結果概要 3Dプリンタ』

トヨタ自動車『トヨタ自動車75年史』

内閣府『1956年版経済白書－日本経済の成長と近代化』

内閣府『日本再興戦略2016』

内閣府『長期経済統計』

内藤英憲、渡会重彦、大森暢之、池田光男、廣江彰「中小金属・機械工業における生産工程マイクロエレクトロニクス化の企業経営に及ぼす影響」、日本大学経済科学研究所紀要第11号、1987年

内藤英憲、廣江彰、大森暢之、太田一郎「中小企業とME革命－第3次産業革命のインパクトを探る－」、中小企業リサーチセンター、1989年

中内清人「中小企業の「存立条件」について」、立教大学経済学研究会、立教経済学研究、

1977 年

長尾克子『工作機械技術の変遷』、日刊工業新聞社、2002年

ニュースダイジェスト社『工作機械副読本』、1987 年

檜原弘之「日本におけるAdditive Manufacturingの概要とこれからの課題」、計測と制御第
54巻第6号、2015年

『日刊工業新聞』1995 年 1 月 27 日、2008 年 1 月 22 日、2011 年 8 月 3 日、2011 年 12
月 1 日、2016 年 10 月 24 日、2016 年 12 月 22 日、2017 年 1 月 17 日、
2018 年 11 月 1 日、2019 年 3 月 26 日、2020 年 4 月 6 日

『日経産業新聞』1990 年 8 月 10 日

『日経トップリーダー』、2020 年 3 月

『日経ビジネス』、1983 年 8 月 22 日、2019 年 6 月 3 日、2003 年 7 月 14 日号

『日経ものづくり』、2019-12 月

西村幸満「中小零細企業の生産システムと脱技能化過程—大田区機械工業を事例として—」、
教育社会学研究第 60 集、東洋館、1997 年

日本機械学会『日本機械学会誌』2011 年

日本機械学会『2013 年度年次大会』

日本経営学会『経営學論集』

日本経営診断学会「中小企業における 3 次元 CAD システムを導入したビジネスモデルの
検証」、日本経営診断学会論集 9(0), 11-16, 2010、日本経営診断学会、2010 年

日本工業規格『産業オートメーションシステム—機械の数値制御—用語』

日本工作機械工業会、1990 年 6 月統計

日本工業規格 (JIS) HP

日本大学『経済科学研究所 紀要第 10 号』

日本大学経済学部経済科学研究所「マイクロエレクトロニクス化の現状と効果に関する調
査」、1986 年

延岡健太郎、伊藤宗彦、森田 弘一「コモディティ化による価値獲得の失敗： デジタル家
電の事例」、RIETI Discussion Paper Series 06-J-017、独立行政法人経済産業研
究所、2006 年

原田勉「汎用・専用技術の相互転換プロセス：日本工作機械産業における技術革新の分析」、
国民経済雑誌、177(4)、1998 年

原田勉「汎用・専用技術の相互作用と経済成長」、神戸大学経済経営学会、国民経済雑誌、
202(5)、1998 年

原田勉「技術吸収能力の再検討—NC 工作機械の技術普及と旧技術によるスピルオーバー
効果—」、組織科学 Vol136 No2、2002 年

廣江彰「中小製造業における生産工程マイクロエレクトロニクス化の進展と影響」、日本
大学経済学部経済科学研究所紀要、1986 年

『ぶぎんレポート』、2016 年 11 月、2017 年 6 月、2018 年 7 月、2019 年 3 月

福田好朗「デジタルエンジニアリングの現状と動向」、日本機械学会誌、2003.4 Vol.106

藤川健「中小企業における情報化の意義」、同志社商学、同志社大学商学会 403-420、2010年

藤川健「中小企業の情報化に関する研究の成果と課題」『日本中小企業学会論集』、同友館、2010年

藤坂浩司『EMS がメーカーを変える！』、日本実業出版社、2001年

藤坂浩司「中小製造業のデジタル技術への対応戦略－株式会社サイトウ製作所を事例にして－」『イノベーション・マネジメント』No17、2020年3月

藤坂浩司「医療機器における AM 技術の普及－中小製造業を事例にして－」『産業学会研究年報』No36、2021年3月

藤本隆宏「製品アーキテクチャの概念・測定・戦略に関するノート」、RIETI Discussion Paper Series 02-J-008、2002年

細谷祐二『グローバルニッチトップ企業論』、白桃書房、2014年

堀恒一「マイクロエレクトロニクス化と中小工業」、社会科学、1985年3月、同志社大学人文科学研究所、1985年

山田基成「日本的生産システムの特性と変容(新しい企業・経営像と経営学)、日本経営学会、1993年

山田基成『モノづくり企業の技術経営』、中央経済社、2010年

松下隆「デジタルものづくりによる付加価値向上イノベーション－設計開発フェーズに注目して－」、大阪府第1回経済動向報告会資料、2019年

松下隆「産業用金属3Dプリンタの普及への阻害要因と対応策に関する一考察」、産開研論集第31号 2019年

松野建一「日本の工作機械産業発展史－日工大工業技術博物館の紹介と共に－」、2018年

三浦東『国際化時代に勝つ新企業戦略』、日刊工業新聞社、1989年

水野操『3D プリンタで世界はどう変わるのか』宝島社新書、2013年

港徹雄「3次元プリンタはモノづくりの革命児か」、商工金融、2015年7月号、2015年

三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング「人手不足対応に向けた生産性向上の取組に関する調査」、2017年

三藤利雄「支配的デザイン論」の出現、発展、そして普及」、立命館経営学、第55巻第1号、2016年

メイテック『仕事で利用するツール／システム アンケート調査』

森野勝好「NC 工作機械の普及と『機械体系』の変化」、立命館大学人文科学研究所、第55号、1992年

労働省『1983年 労働省情報統計部編『技術革新と労働に関する調査 技術と労働の実態－ME編』

労働省『1983年 技術革新と労働に関する実態調査』

(2) 欧文

- Abernathy, W.J. and Utterback, J.M. (1978) *"Patterns of Industrial Innovation."* Technology Review,
- Armed Services Technical Information Agency (1958) *"symposium on microminiaturization of electronic assemblies 1958"*
- Barry Berman (2012) *"3-D printing: The new industrial revolution"* Business Horizons Volume 55, Issue 2, March–April 2012, Pages 155-162
- Bo Carlsson (1989) *"Small-Scale Industry at a Crossroads: U.S. Machine Tools in Global Perspective"*, Small Business Economics, December 1989, Volume 1, Issue 4, pp 245 - 261
- Clayton M. Christensen (1997) , *"The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail"*, Harvard Business Review Press
- Clayton M. Christensen, Fernando F. Suárez, James M Utterback (1998), *"Strategies for Survival Fast-Changing Industries"* MANAGEMENT SCIENCE / Vol.44 No12, Part2 of2, December 1998
- Christian Matta, Thomas Hessa, Alexander Benlianb (2015) *"Digital Transformation Strategies"* Digital Transformation Strategies, Business and Information Systems Engineering, 57(5), 339–343,
- Deloitte Touche Tohmatsu Limited. (2013) *"Digitalisierung im Mittelstand"*
- Duncan McFarlane, Svetan Ratchev, Alan Thorne, Ajith Parlikad, Lavindra de Silva, Benjamin Schönfuß, Greg Hawkrigde, German Terrazas, Yedige Tlegenov (2019) *Digital Manufacturing on a Shoestring: Low Cost Digital Solutions for SMEs*
- Ehrnberg, E. and S. Jacobsson (1997) *'Technological discontinuities and incumbents performance: An analytical framework'*, in: C. Edquist (Ed.) Systems of innovation – Technologies, institutions and organizations, London: Pinter Publishers.
- Ivan Edward Sutherland (2003) *"Sketchpad: A man-machine graphical communication System"*
- Katja Bley., Christian Leyh., Thomas Schäffer. (2016) *"Digitization of German Enterprises in the Production Sector – Do they know how "digitized" they are?"*, Digitization of German Enterprises in the Production Sector Twenty-second Americas Conference on Information Systems, San Diego, 2016
- Neil Gershenfeld (2012) *"How to Make Almost Anything The Digital Fabrication Revolution"* Norway on August
- P.R. Dean, Y.L. Tu & D. Xue (2009) *"AN INFORMATION SYSTEM FOR ONE-OF-A-KIND PRODUCTION"* International Journal of Production Research Volume 47, 2009, Pages 1071-1087

- R. Phaal*, E. O’Sullivan, M. Routley, S. Ford and D. Probert (2010)
“A framework for mapping industrial emergence”
 Technological Forecasting and Social Change February 2011
- Stephen Mellor, Liang Hao, David Zhangkakko “*Additive Manufacturing: A Framework for Implementation,*” International Journal of Production Economics Volume 149, March 2014,194-201.
- Simon Ford..Letizia Mortara..Tim Minshall. (2015)
“The Emergence of Additive Manufacturing Introduction to the Special Issue of Technological Forecasting and Social Change”
 Technological Forecasting and Social Change102(4):156-159
- William J Abernathy, James M Utterback (1978) “*Patterns of Industrial Innovation*” ,Technology Review June/july,1978
- YongdoKim、 『The interfirm relationshipsin the Japanese Machinetool industry, 1910s-1980s:the market and organizational principles』、 WCBH 2016in Bergen,