

Title	イノベーションの普及プロセスにおける社会システムの構造が及ぼす影響 — 金属AM(Additive Manufacturing)技術における事例研究 —
Author(s)	辻, 大輔
Citation	
Issue Date	2021-09
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/17510
Rights	
Description	Supervisor: 内平 直志, 先端科学技術研究科, 修士(知識科学)

修士論文

イノベーションの普及プロセスにおける社会システムの構造が及ぼす影響

— 金属 AM（Additive Manufacturing）技術における事例研究 —

辻 大輔

主指導教員 内平 直志 教授

北陸先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

（知識科学）

令和 3 年 9 月

Abstract

A study on the effects of social system's structure in the diffusion of innovation

– Case study on metal additive manufacturing technologies –

1930406 TSUJI Daisuke

Keyword: *Additive Manufacturing, 3D printing, Innovation, Diffusion, Social system*

There are high expectations for metal AM (Additive Manufacturing) in the industrial world. AM is regarded as one of the key innovations in the Industries 4.0 to achieve high value-added products and services. In order to diffuse this innovation, it is necessary to discuss not only the technological issues but also discuss the issues about diffusion of innovation to social system. However, social systems have been discussed from a macro perspective that can be seen as an one group, there is a lack of discussion about the effects of the internal structure of social systems. Thus, there is a lack of research on how the structure of social systems affects the diffusion of innovation.

The purpose of this paper is to survey the issues pertaining to diffusion of metal AM technologies, especially discusses the relationship between the structure of social systems of shaped raw material industry and features of metal AM. This study applies a journal survey and qualitative analysis by interview with 6 AM experts.

This paper shows that the uneven distribution of knowledge and know-how built by existing technologies in the social systems affects the diffusion of innovation.

目次

Abstract	1
第1章 はじめに	4
1.1 研究の背景	4
1.2 本研究の目的とリサーチクエスチョン	5
1.3 研究の方法	5
1.4 論文の構成	6
第2章 金属 AM 技術の動向調査	8
2.1 金属 AM 技術について	8
2.2 金属 AM 技術の市場動向	11
2.3 金属 AM 技術の設計・製造プロセスと関連技術	11
2.4 金属 AM 技術の普及を担うアクター	14
2.5 金属 AM 技術の特徴（まとめ）	15
第3章 先行研究	16
3.1 イノベーション普及理論の概要	16
3.2 イノベーションと社会システムの関係	17
3.3 社会システムの内部構造や役割	18
3.4 新旧イノベーションの比較に関する研究	19
3.5 金属 AM 技術の普及に関する研究	19
3.5.1 コストに関する研究	19
3.5.2 生産性に関する研究	20
3.5.3 Design for AM に関する研究	20
3.5.4 施工条件の構築プロセスに関する研究	20
3.5.5 デジタル技術との連携に関する研究	20
3.5.6 日本と海外の差異に関する研究	21
3.6 先行研究の課題および本研究で明らかにしたい事項	21
第4章 金属 AM 技術の普及課題に関する調査	24
4.1 インタビュー調査の概要	24
4.2 分析手法：機能的テーマティック・アナリシス法	26
4.3 分析手順	27
4.4 TA 法により抽出したテーマとカテゴリー	27
4.5 分析結果	31
4.6 考察と発見事項	42
4.6.1 金属の素形材産業におけるレイヤー構造化した知識と金属 AM 技術の関係	42
第5章 結論	46

5.1 リサーチクエスチョンへの回答	46
5.2 理論的貢献.....	48
5.3 実務的貢献.....	48
5.4 本研究の限界と将来研究への示唆.....	49
参考文献.....	50
学界発表実績および予定.....	53
付録.....	54
インタビューデータ	54
謝辞.....	67

図目次

図 1 PBF 技術の発展の歴史.....	10
図 2 PBF 装置（左）とその造形原理（右）	10
図 3 金属 AM 装置の販売台数	11
図 4 金属 AM の設計・製造プロセスと関連技術	12
図 5 PBF 方式の入力因子と結果因子.....	13
図 6 日本の素形材産業の概要	14
図 7 素形材産業において素材の製造知識・ノウハウを保有するレイヤー.....	43

表目次

表 1 AM 技術の歴史	8
表 2 AM 技術の分類	9
表 3 イノベーションの普及に関する要素.....	16
表 4 インタビュー対象者	25
表 5 インタビューの質問事項.....	26
表 6 TA 法により生成したテーマとカテゴリー	27
表 7 素形材産業の各レイヤーに求められる知識・ノウハウ.....	44
表 8 インタビューデータとコード一覧.....	54

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

デジタルとハードの融合がこれまでに無い価値を生み出す時代を迎えている。18 世紀末の第一次産業革命における蒸気動力の獲得、1900 年前後の第二次産業革命における電気の利用は共にハードウェアを主体とする軽工業および重工業の誕生と発展、つまりは大量生産が社会や経済の発展を牽引した云わば“物質”の時代であったのに対し、20 世紀後半の情報通信技術に基づく第三次産業革命は、デジタル技術が発展の原動力となった云わば“情報”の時代であったと言える。そして現在、ハードとデジタルの融合が進む第四次産業革命は、これまでに無いビジネスや産業、そしてライフスタイルを我々に齎そうとしている。また、産業革命が齎した社会全体の変化として、知識社会への変容がある (Drucker 1993)。第三次産業革命以降のデジタル技術による変化は、我々の社会を工業社会から知識社会へと変貌させた。このことは、社会において知識こそが中核の資源であること、そして知識労働者が社会の中核的な存在となったことを意味しており、今後のイノベーションが連鎖する不確実性の高い社会において、イノベーションを単なるテクノロジーの視点のみならず、関与するアクターが創り出す知識創造の産物として捉えていくことが重要である。

このようにかつてない速度で変化が進む現代、デジタルとハードが結実した次世代のもののづくり技術として AM (Additive Manufacturing) への期待が高まっている。AM は、一般的には「3D プリンタ」の言葉で人口に膾炙しており、2009 年に米国材料試験協会 (ASTM) 内に設置された 3D Printing に関する専門委員会 (F42 委員会) が 3D プリンタを「Additive Manufacturing : AM」と定義したことで生まれた言葉である。現在進行中の第四次産業革命においても AM は重要な要素の一つとされており (Giovanna et al. 2020)、今後の Cyber Physical System 時代を構成するキーテクノロジーであり、我が国日本の産業競争力強化にとっても重要である。

中でも近年、産業界で本格的な実用化が期待されているのが金属 AM 技術である。従来の鋳造や機械加工といった既存製法では実現不可能だった高付加価値な金属部品やサービスの実現に期待が高まるが、普及に向けた議論の中心は、技術的課題を論じる自然科学領域における研究が中心となっている。しかしながら、新たな金属の素形材技術である金属 AM 技術が産業界へ普及していくためには、現状の産業構造や知識構造に起因した社会科学的な課題も存在することが想定されるが、素形材技術領域においてそのような研究は少なく、学際的な視点からの議論が求められている。

また、欧米に比べ日本の普及の遅れを危惧する声も多い (MONOist 2018; 日経 xTECH 2014)。これらは日本の今後の産業競争力を議論する上で重要な問題提起だが、その議論は AM 技術 (3D プリンタ) の現時点における技術的な特徴と既存技術のギャップから生まれ

る、「品質が悪い」や「印刷速度が遅い」と言ったユーザの否定的な認識を指摘するものが殆どであり（ビジネス+IT 2020）、産業構造全体との関係性やその中に存在する知識構造がどのように影響するかを明らかにしていくことが、金属 AM 技術も含め、今後のイノベーション普及メカニズムを明らかにするためには重要である。

1.2 本研究の目的とリサーチクエスション

本研究では、イノベーション普及の導入期を迎える金属 AM 技術の普及に向けた課題を調査・分析する。特に金属 AM 技術の普及と密接に関連する社会システムである金属の素形材産業との関係性について明らかにすることを目的とする。

本研究におけるリサーチクエスションを以下のように設定する。

MRQ：金属 AM 技術の普及プロセスにおいて、金属の素形材産業という社会システムの構造がどのような影響を及ぼしているか？

SRQ1：金属 AM 技術の特徴は何か？

SRQ2：金属の素形材産業とその構造はどのようなものか？

SRQ3：金属の素形材産業において金属 AM 技術が直面する課題は何か？

本研究はイノベーション（テクノロジー）側および社会システム側の双方の特徴を調査し考察する必要がある。よって、MRQ/SRQ の構成として、まずはイノベーション側である金属 AM 技術の特徴を調査・整理し（SRQ1）、次に社会システム側である金属の素形材産業の特徴や構造を調査・整理する（SRQ2）。最後に金属の素形材産業において金属 AM 技術が直面する課題を SRQ1,2 の結果も踏まえ整理・考察することで、MRQ の回答を導出する。

1.3 研究の方法

本研究の手順と方法を以下に述べる。

まず、SRQ1 及び 2 として金属 AM 技術と金属の素形材産業に関する特徴を整理するために、学術論文や各種調査レポート等の公開データによる調査を実施する。金属 AM 技術については、装置、材料、アプリケーション等いくつかの構成要素が存在するため、調査結果が偏ったものにならないよう調査対象に留意し、金属 AM 技術の全体像を把握しつつその特徴と課題を把握する。

次に、SRQ3 として日本の金属 AM 技術の業界に従事する企業の実務者 6 名を対象にインタビューを実施し、その結果を分析することで金属 AM 技術の普及の課題を調査する。

インタビュー対象者は、金属 AM 業界のアクターであるテクノロジーの提供側（装置メーカーや材料メーカー、ソフトウェアメーカー等）か、もしくはテクノロジーの採用側（ユーザ企業又はサービスビューロ等）の2つに大別できるため、今回の対象者もそのどちらかに属していることを基準とし、且つ、アクターの事業領域に偏りが出ないように人選することで、合目的的サンプリング（purposive sampling）となるよう留意した。インタビューは半構造化インタビューを採用し、得られた意見をテーマティック・アナリシス法（TA:Thematic Analysis）によって分析する。TA 法は質的分析手法の一つで、質的データの中にパターンを見出すための体系的なプロセスであり（Boyatzis 1998）、幾つかのバリエーションが存在するが、本研究では Boyatzis（1998）が提案した TA 法を土屋（2016）が解釈・解説した方法に従って分析を行なう。TA 法の特徴として、分析手法としての柔軟性が挙げられる（土屋 2016）。他の質的分析手法と比べた場合、例えばグラウンデッド・セオリー・アプローチ（GTA:Grounded Theory Approach; Strauss & Corbin 1998; 戈木 2013）は厳密な“方法論”であるのに対し、TA 法は研究者の哲学的な立ち位置に依存しないという点で柔軟な“分析手法”と言える。本研究では、著者の AM 技術に対する先入観や予備知識が結果に影響することを最小限とするため、帰納的 TA 法を採用し、金属 AM 技術の課題を抽出し、SRQ1,2 の結果も踏まえ、総合的に考察することで MRQ の回答を導出する。

1.4 論文の構成

第 1 章：はじめに

本章では、研究の背景や目的、MRQ/SRQ の定義、研究手法を述べることで、本研究の全体像と必要性を示す。

第 2 章：金属 AM 技術の動向調査

本章では、金属 AM 技術の技術的な動向、市場動向や普及先となる素形材産業について調査し、その特徴を示す。

第 3 章：先行研究

本章では、本研究の土台となる先行研究について調査・整理して示す。

第 4 章：金属 AM 技術の普及課題に関する調査

本章では、日本国内の金属 AM 技術に携わる企業所属の有識者 6 名に対し、半構造化インタビューを実施することで、金属 AM 技術の普及に向けた課題を調査し、先行研究も含めた分析と考察を示す。

第 5 章：結論

本章では、本稿で得られた結論からリサーチクエスションへの回答および本研究の理論的および実務的貢献、そして本研究の限界と将来研究への示唆を示す。

第2章 金属 AM 技術の動向調査

本章では、本研究の調査対象である金属 AM 技術金属の技術的および市場的な動向を調査することで、金属 AM 技術の特徴を把握する。

2.1 金属 AM 技術について

AM 技術は樹脂の 3 次元構造を形成する技術として 1980 年代からスタートし (表 1)、現在では金属をはじめ、セラミック、コンクリート、食品、細胞など生体組織といった様々な材料で実用化またはその期待が高まるテクノロジーである。その製造方法や原理は AM 業界の企業毎に独自の解釈もあるが、国際的には材料の接合方法や材料の形態及び材料の供給方法によって整理された ISO/ASTM (2015) による 7 つの分類が存在する。ISO/ASTM が定義した 7 つの方式を表 2 に示す。なお、近年になってこの 7 方式に分類できない新たな方式を考案し市場参入するベンチャー企業も相次いでいる (例えば、高速に粉末を吹き付ける際の運動エネルギーを材料接合に用いる SPEE3D 社等)。これは、当該分野のテクノロジーが未だ発展途上であり、表 2 に示した分類は今後、技術進歩と共に修正されていく可能性が大いにある点に留意する必要がある。

表 1 AM 技術の歴史

1980	名古屋市工業研究所の 小玉秀男 氏がUV硬化樹脂を使った 光造形法 を個人で 特許出願 → 審査請求せず
1984	-米UVP Chuck Hull 氏が米国で 光造形法の特許 を取得 -大阪府立工業技術研究所 丸谷洋二 氏が 光造形法の特許 を取得
1986	- Chuck Hull 氏とUVP社取締役のレイモンド・フリード氏が共同で『 3D Systems 』を創設 -米 Texas大 が 樹脂を添加した金属粉末をレーザ焼結 する方式の開発を開始
1987	米 3D Systems 世界初の市販用光造形装置 (SLA-1)を発表
1988	-米 Stratasys 熱溶解積層法 (旧FDM,現MEX)の 特許を取得 - 三菱商事 、 丸谷氏 (当時:大阪府立工業技術研究所)が 光造形装置 を開発、発表 (この頃から、様々な方式が開発される)
1989	独 EOS 設立、 金属粉末を直接レーザ焼結 する装置を開発
1995	独 EOS 世界初の金属レーザ焼結装置を製品化
2005	英 Bath大学 Adrian Bowyerにより Reprapプロジェクト が開始
2009	米Stratasysが保有する FDMの基本特許が期限切れ (多くの企業が参入 コストは数百万円→数十万円に)
2012	Chris Anderson 氏の著書『 MAKERS 』が 大ヒット “ものづくりの民主化”による新たな産業革命を予想
2013	米 Obama大統領 『 一般教書演説 』 製造業復活の鍵として 3Dプリンタに言及
2014	米3D Systemsが保有する レーザ焼結法 (現在のL-PBF)の 基本特許が期限切れ (多くの企業が参入 コストも1/10レベルに)

表 2 AM 技術の分類

略称	名称	接合方法	原材料の形態
VPP	Vat photopolymerization (液槽光重合)	光重合	液体
PBF	Powder bed fusion (粉末床熔融結合)	溶接	粉末
BJT	Binder jetting (結合剤噴射)	接着	粉末
MEX	Material extrusion (材料押出)	溶接	フィラメント
MJT	Material jetting (材料噴射)	溶接、光重合	個体、液体
DED	Directed energy deposition (指向性エネルギー堆積)	溶接	粉末、個体
SHL	Sheet lamination (シート積層)	接着、溶接	シート

このうち、金属材料が造形可能な方式は表 2 の PBF (Powder Bed Fusion)、DED (Directed Energy Deposition)、BJT (Binder Jetting)、MEX (Material Extrusion) の 4 つだが、現在、金属材料で最も主流な造形方式は PBF (Powder Bed Fusion) 方式であり、本稿でも技術的な説明や考察については、PBF 方式について行う。

金属の PBF 方式に関する技術的な発展の系譜を図 1 で概観する。PBF 方式はその名の通り、粉末を造形エリアに敷き (Powder Bed)、必要な場所に熱源となるレーザもしくは電子ビームを照射し溶融凝固 (Fusion) させるプロセスを繰り返す技術である (図 2)。この基礎的な概念や原理は 1980 年代後半に構築された。但し、当時の PBF 方式は現在のような金属粉末を直接的に溶融凝固させるものではなく、樹脂でコーティングされた金属粉末を用い、レーザで樹脂成分を溶融・接合することで「仮焼結」した後、脱脂・焼結もしくは銅やブロンズを含浸処理するという 2 段ステップを経るものであり、現在ほど実用性が高いものでは無かった。その後、2000 年代にファイバーレーザが実用化され、これまでの CO2 レーザに取って代わると、熱源の高出力化と高品質化が進み、造形の生産性や造形物の密度が向上した。また、粉末の製造技術や装置のハードウェアを中心とする完成度の向上も 2000 年代の特徴と言える。現在の PBF 方式に関する装置技術や粉体技術の基本的な形は、2000 年代に構築されたと言える。その後、2010 年代はデジタル技術とハードウェアの融合が急激に進み、現在の PBF 方式を構築した時代であったと言える。装置に組み込まれたソフトウェアの改善、造形プロセスデータの分析による品質モニタリング技術の開発、AM のアプリケーションを設計する構造最適化ソフトウェアの進歩など、デジタル技術との融合が急速に進んだのが至近の 2010 年代であったと言える。

以上、これら約 30 年の PBF 方式における技術発展の系譜を改めて概観すると、1990 年

代に基礎技術や概念が構築され、2000年代に実用性が向上し、2010年代はデジタル技術との融合によって高度化し、アプリケーションの適用検討が本格化した時代であったと言える。

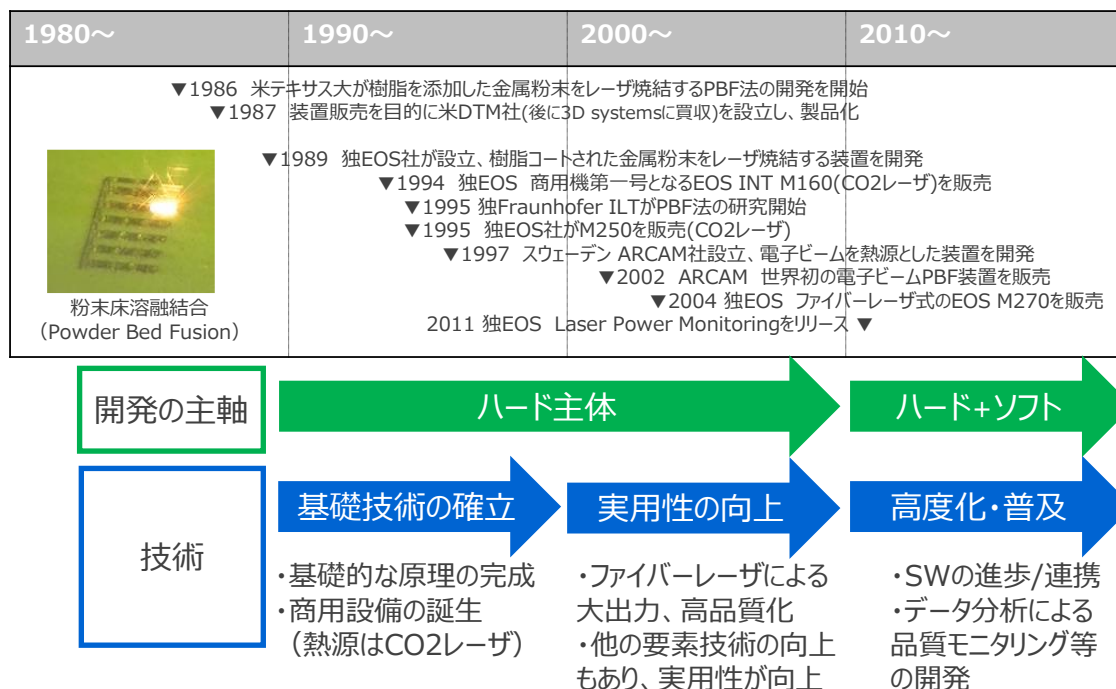


図 1 PBF 技術の発展の歴史



図 2 PBF 装置（左）とその造形原理（右）

(左写真は GE 社 HP: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/m2series5>
 (accessed 2021-07-25)より引用)

2.2 金属 AM 技術の市場動向

世界全体で見た金属 AM の市場規模は、AM 装置、金属粉末、金属 AM によって生み出された部品、金属 AM に関連する設計・製造サービスの合計が 2018 年で 26 億ドルとなっており、規模としては小さいが 2010-2028 年の年平均成長率（CAGR）は 20%と急激な成長が見込まれている（PwC コンサルティング合同会社 2020）。

金属 AM の市場動向、特に近年の急激な成長を端的に示すものが金属 AM 装置の販売台数トレンドであり、そちらを図 3 に示す。これを見ると、販売台数が 2010 年代から急激に増加していることが分かる。この要因として、一つには特許切れの影響で廉価な MEX 方式の金属 AM 装置の販売が開始されたことや、2012 年に Chris Anderson 氏が「3D プリンタによるものづくりの民主化によって新たな産業革命」を予想した著書「Makers」の大ヒットや、翌年 2013 年には米国 Obama 大統領（当時）が一般教書演説にて製造業復活の鍵として 3D プリンタに言及するなど、3D プリンタ＝AM に注目が集まった時期と言える。

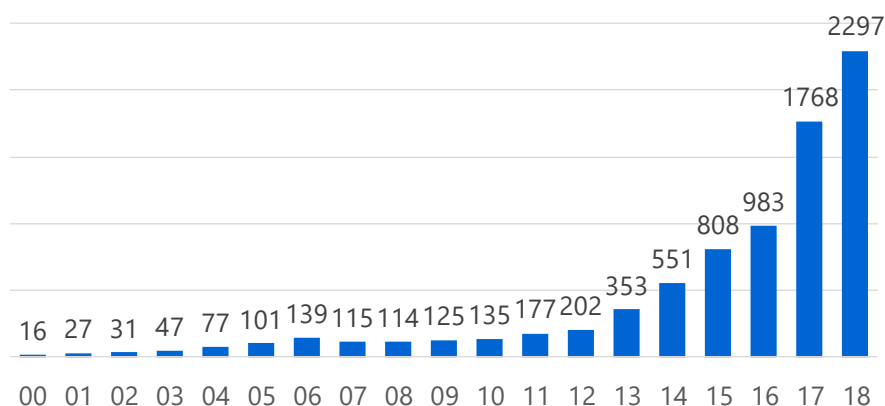


図 3 金属 AM 装置の販売台数
(Wohlers Associates (2019) より著者作成)

アプリケーションの動向は、現時点では後述するコストの課題もあることから、航空宇宙、医療、F1 等のモータースポーツ、ミリタリー分野、ガスタービン等の一部の発電機器といった重量単価（円/kg）の高い高付加価値な製品や短納期製造や少量生産のメリットが活きる領域から適用が開始されている状況である。

2.3 金属 AM 技術の設計・製造プロセスと関連技術

金属 AM は、狭義の意味では金属の積層造形プロセスを中心とする素形材技術を指すが、広義の意味では、前工程である製品の企画・設計や、後工程である熱処理や表面処理も含めた一連のバリューチェーンを示すと考えるのが妥当である。それは、金属 AM が素形材技

術のみならず、後述する多くの要素技術によって構成された複合技術であることから言える。

金属 AM の設計・製造プロセスの概略を図 4 に示す。金属 AM は 3D モデルデータを基に物体を作る技術であり、製品設計プロセスでは AM のメリットや制約を考慮した設計（所謂、Design for AM）、AM プロセスでは造形時の材料品質向上に資するプロセス技術や変形シミュレーション等、そして造形の後工程ではブラストや各種研磨といった表面処理や強度に影響する熱処理等、多岐にわたる要素技術が関連する複合技術であると言える。

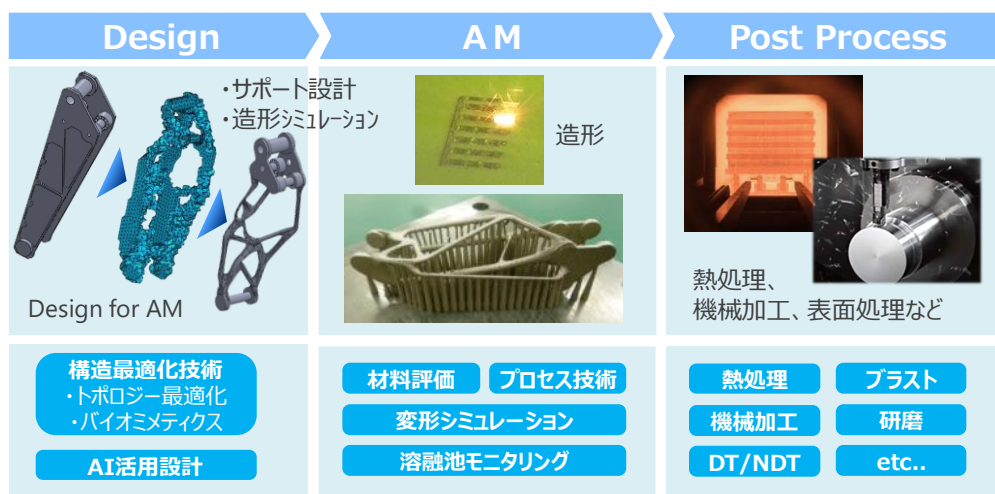


図 4 金属 AM の設計・製造プロセスと関連技術

金属 AM の造形原理は表 2 に示した各方式によって異なるが、代表的な手法である PBF 方式を例に説明する。PBF 方式における金属の溶融凝固現象は、基本的にはレーザー溶接（熱源が電子ビームの場合は電子ビーム溶接）と同じと言える。但し、粉末材料を数十 μm の厚さで敷き、熱源となるレーザーの走査速度が約 1m/sec 、レーザー焦点径が数百 μm オーダーという非常に微細且つ高速なメルトプール（溶融池）が支配する現象であり、一般的な溶接や鋳造と言ったプロセスに比べ、急熱急冷な溶融凝固を繰り返すプロセスであると言える。このことは金属 AM、特に PBF 方式の原理原則から生じる特徴と言えるが、この特徴によって金属 AM により製造された金属材料は、既存の圧延や鋳造と言った金属材料とは異なる微細な結晶粒組織を呈する。その意味では、新しい素形材の製造手法であるとも言えることができる。

また、金属 AM の特徴として、上述のように非常に微細なメルトプールによって物体を形成するため、従来型の素形材技術に比べ、部品の最終形状を直接作る、所謂ニアネットシェイプな素形材技術であることも重要な特徴と言える。

これまで、金属 AM の一連のプロセスと特徴を概説したが、製造プロセスと品質の関係性についても簡単に述べる。金属 AM は上述した原理で造形物が形成されるが、その品質

には多くの入力因子が影響しており、それら施工条件の最適化や現象の解明が品質維持・向上には必須である。これは造形プロセスのみならず、図 3 に示した金属 AM の一連のプロセス全体にも言えることであり、プロセス全体としてデータやノウハウの蓄積が乏しい金属 AM は、現時点で製品設計から造形や後工程処理まで様々なトライ & エラーや調整が必要な擦り合わせ技術であると言える。参考に、PBF 方式における施工条件と品質の関係性を図 4 に示す。

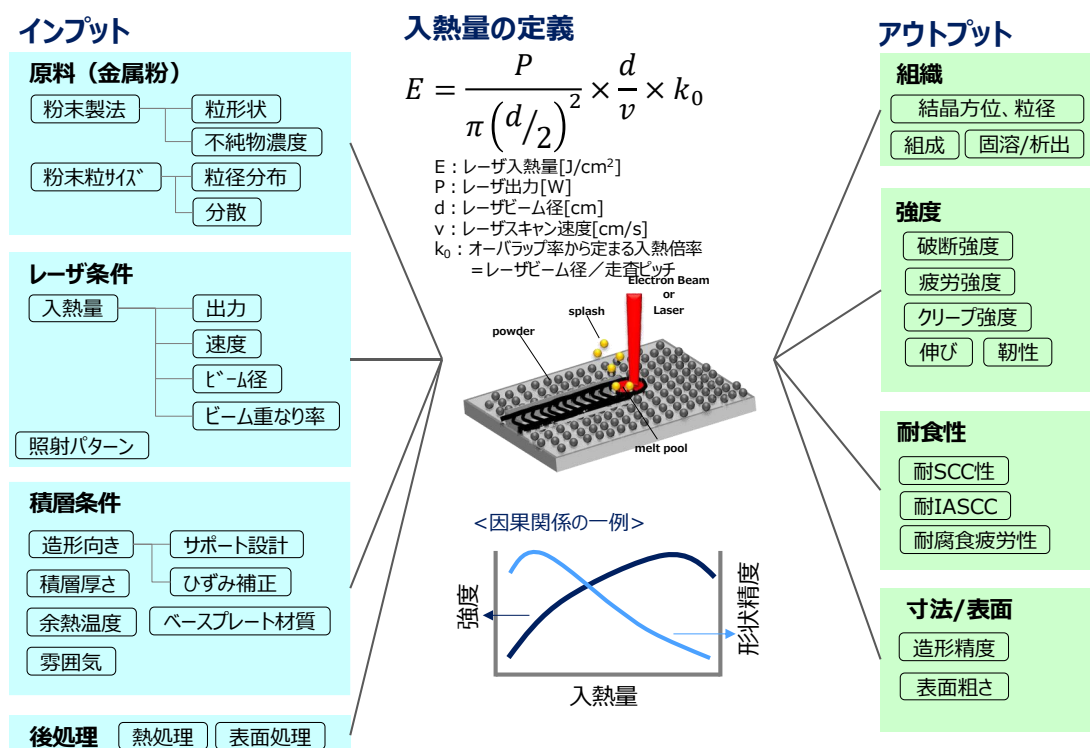


図 5 PBF 方式の入力因子と結果因子

金属 AM の生産性についても紹介する。上述の通り、金属 AM の製造プロセスは微細複雑な形状を作ることによって長けている反面、生産性については既存の素材製造方法よりも劣る。PBF 方式の場合、熱源となるレーザーを多光源化（マルチレーザー化）することで生産性の向上が図れるが、一方で装置のコスト増加やレーザーの制御が複雑化すること等から、現時点の主流なレーザー本数は 1～2 本である。金属 AM の生産性を表す指標として造形速度があり、京極（2014）によれば、PBF 方式の標準的な造形速度は、～20[cm³/h]と既存の素形材技術に比べ生産性の面では劣る数値が示されている。このことは、金属 AM 技術が少なくとも現時点で量産製品には向かず、一品モノや少量多品種の製造に向いていることを示している。また、量産技術では例えば金型などが必要であり、金型の製造に納期を必要とするが、金属 AM は金属粉末と装置さえあれば生産可能なことから、少量生産品については短納期のニーズにも対応可能な技術であると言える。

2.4 金属 AM 技術の普及を担うアクター

金属 AM は金属の素形材を製造する技術であることから、普及の主たる舞台は金属の素形材産業と言える。経済産業省（2013）によれば、「素形材産業とは、あらゆる金属等の素材に、鋳造や塑性加工等の方法によって形状を付与し、組立産業等に部品として供給する産業」とされており、自動車や産業機械、電子機器など多くの産業領域へ部品を製造・供給する重要な基幹産業であり、日本にとっても欠くことのできない産業である。

日本の素形材産業の概要を図 5 に示す。素形材産業は、大きく 3 つのレイヤー（川上・川中・川下）に分かれており、川上から川下に向かって素材製造、成形、部品組み立てという流れが存在する。

本章で説明した通り、金属 AM は最終製品形状（ニアネットシェイプ）が可能な素形材技術であり、且つ少量生産に適している技術である。この特徴から、川上産業のような素材の大規模な大量生産を行うアクターは金属 AM 装置を直接保有しビジネスをすることは考えづらく、現時点で金属 AM 装置を保有し部品を製造するアクターは、素形材産業において最終製品を担当する川下、もしくは川中の一部の部品製造業であると言える。

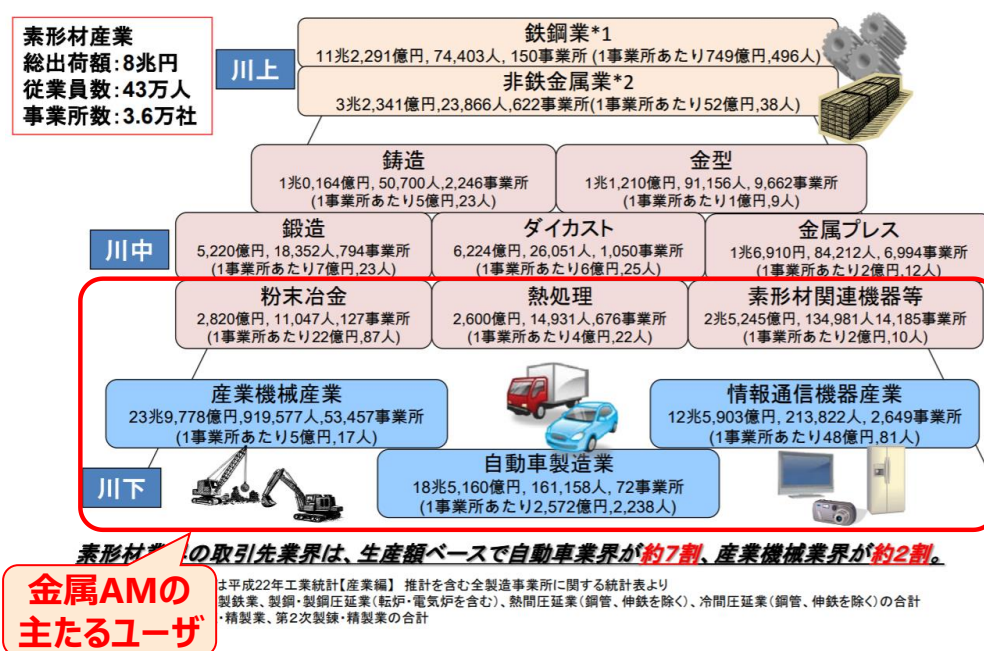


図 6 日本の素形材産業の概要
(経済産業省（2013）の図に著者加筆)

2.5 金属 AM 技術の特徴（まとめ）

本章では、金属 AM の特徴を整理・概説した。その結果を以下にて簡潔に纏める。

- 金属 AM は部品の最終形状を形成しながら同時に素材としても製造するニアネットシェイプな素形材技術である。
- 金属 AM の設計・製造プロセスは、適用する部品の構造最適化（Design for AM）や、造形工程及び後工程における施工条件や熱処理条件などの最適化が必要であり、それら調整には多くのトライ&エラーを必要とするため、現時点ではプロセス全体を通して擦り合わせ要素の強い技術である。
- 金属 AM は生産性や技術的な特徴から、少量生産や短納期製造に適した技術である。
- 金属の素形材産業において、製品の最終工程を担当する川下レイヤーもしくは川中レイヤーの一部の部品製造企業が金属 AM 装置を保有し、実用化を推進している。

第3章 先行研究

本章では、本研究と関連するイノベーションの普及理論や、イノベーションと社会システムの関係性、金属 AM 技術の普及に関する先行研究を整理し、イノベーションの普及プロセスにおける社会システムの役割や関係性について、先行研究で明らかにされた事項や課題について述べる。

3.1 イノベーション普及理論の概要

イノベーションの普及に関する調査研究は、主にコミュニケーション研究といった社会学において研究の蓄積があるが、イノベーションの普及を体系化しようとした嚆矢的存在に Rogers (1962) による研究が挙げられる。その後に Rogers は新たな知見を盛り込む形で、2003 年に「Diffusion of Innovations」の第 5 版を発表しており、今日のイノベーション普及研究における中心的な存在となっている。

Rogers (2003) は、イノベーションの過程を「社会的なコミュニケーションのプロセス」と捉えた上で、「普及とは、イノベーションが、あるコミュニケーション・チャンネルを通じて、時間経過の中で社会システムの成員の間に伝達される過程のことである」と説明しており、それを踏まえて、イノベーションの普及に関係する要素として、以下の表 3 に示した 4 つの要素を挙げている。

表 3 イノベーションの普及に関する要素
(Rogers (2003) より著者作成)

イノベーションの普及に関する要素	概要
イノベーション (テクノロジー)	新しいイノベーション (テクノロジー) が既存のイノベーションと比べ、相対的な知覚の度合いが普及に影響を及ぼす。 具体的な視点としては以下。 1) 相対的優位性 (これまでのイノベーションと比較し、良いと知覚される度合い) 2) 両立可能性 (既存の価値観や体験等と一致している度合い) 3) 複雑性 (理解や利用するのが困難と知覚される度合い) 4) 試行可能性 (経験することの難易度) 5) 観察可能性 (イノベーションの効果を他人が目に触れる度合い)

コミュニケーション・チャンネル	Rogers は「普及過程の本質は情報の交換」と指摘。TV やラジオといったマスメディア・チャンネルや、人同士の対人チャンネルといったコミュニケーション・ネットワークの存在や、その中で行われるイノベーション採用者と非採用者、あるいは説得者と非説得者の間のインタラクションが普及に影響を及ぼす。
時間	イノベーションのダイナミクスに注目した視点であり、時間軸と関連した要素。イノベーションを採用する個人や企業といった採用単位の間で採用時期が異なり、イノベーターやアーリーアダプター、アーリーマジョリティ等の採用者カテゴリーに分けられ、横軸を時間軸、縦軸を累積の採用者数とすると、そのグラフはS字曲線を描く。各採用者カテゴリーの特性が普及に影響を及ぼす。
社会システム	社会システムとは「共通の目的を達成するために、共同で課題の解決に従事している相互に関連のある成員の集団」であり、社会システムの構造がイノベーションの普及に影響を与える。構造とは、「社会システム内部の成員のパターン化された配置」である。社会システムに構造が存在することによって、社会システム内の個々人の行動に規則性と安定性が齎される。

3.2 イノベーションと社会システムの関係

イノベーションの普及プロセスにおいて社会システムは一つの重要な要素である。Rogers (2003) は社会システムを、「イノベーションの普及に関与する成員（イノベーションの提供者や採用者など）によって構成される集団」と定義しており、社会システムの構造がイノベーションの普及に影響を与える、としている。社会システムにおける構造とは、「社会システム内部の成員のパターン化された配置」であり、社会システムにこの構造が存在することによって、社会システム内の個々人の行動に規則性と安定性が齎されるとしている。

イノベーションと社会システムの関係性に関する研究として、三藤 (2007) は「イノベーション・プロセスが進行するなかで、イノベーションと社会システムは共進化しつつ動的に発展する」と指摘し、双方は独立したものではなく、互いに影響を及ぼしあいながら変容していくものであるとして、社会システムがイノベーションの普及に影響を与える存在であるという Rogers (2003) の理論を踏襲しつつ、イノベーションと社会システムは共に影響を受け合いながら動的に発展するという理論を構築することで、Rogers (2003) のイノベ

ションと社会システムの理論を補強・拡張している。

SCOT (Social Construction of Technology; 技術の社会的構成主義) に関する研究では、Pinch & Bijker (1987) が 19 世紀における自転車の普及・発展を調査することにより、「技術が形成されるまでには多くの社会集団が様々な形で相互干渉し合う」ことを指摘しており、発明された人工物が普及するプロセスでは、その開発者のみならず、多くの社会集団 (social group) が関与していることを指摘しており、その中で、技術と社会の関係は云わば「継ぎ目のないクモの巣 (seamless web)」であると述べている。

これらの先行研究から、イノベーション (テクノロジー) と社会システムは互いに独立しておらず、共に影響を及ぼし合いながら動的に発展していくことを明らかにしており、イノベーションの普及にとって社会システムが果たす役割や影響は大きいと言える。

3.3 社会システムの内部構造や役割

社会システムの構造や各アクターの特性に関する研究、または社会システムの内部構造とイノベーション普及の関係について調査した研究を以下に示す。

まずは、社会システムの構造に関する指摘として、Callon (1987) は、新技術を開発してから普及するプロセスでは、新技術の開発者のみならず物質や装置、企業や公的機関などアクターが相互に連結したアクター・ネットワーク (actor network) を形成しており、このアクター・ネットワークの構造を明らかにすることが、科学や技術と社会の関係を分析する上で重要であると指摘しており、社会システムを構成しているアクターの役割と、アクター間のインタラクションやネットワーク構造の重要性を述べている。

Dyer & Nobeoka (2000) は、日本の自動車産業における自動車メーカーとサプライヤの関係性に着目し、信頼に基づいた長期的な継続取引関係によって形成された日本の自動車産業における系列には、「知識の共有・配分ネットワーク」が存在するとして、産業構造内のアクターの役割などを指摘している。

また、武石 (2003) は同じく自動車産業において、中核企業 (組立メーカー) とサプライヤの夫々の保有知識・ノウハウの違いとその境界線に着目し、中核企業が新製品を開発するプロセスにおいて、サプライヤが保有するコンポーネント知識を常に評価できる能力を中核企業が保持することがネットワークの全体を有効に機能させるのに重要と指摘している。

具ら (2008) は、自動車産業における新技術 (エアバックや樹脂素材、CVT) の普及プロセスに着目し、中核企業がイノベーションを普及させるためには、自社で製造していないサプライヤからの調達部品に関する知識まで保有することが必要で、自社のエコシステム全体に関わる知識を活用することがイノベーションの実現にとって重要であるとして、中核企業となるアクターの保有する知識に着目した指摘をしている。また合わせて、プロダク

トライフサイクルによってアクターの役割の境界は変化していくことも指摘しており、革新的なイノベーションのコンセプトを構想して行くドミナントデザインの形成前までは中核企業（組立メーカ）が中心になるが、システムの機能性を向上させるための要素技術開発が中心となる成長期には、サプライヤと共同開発が選択される、と述べている。

イノベーションと社会システムの組織単位が持つ知識の関係性について、田路（2005）は、組織には既存の主流製品を扱う上で必要となる知識が暗黙的に埋め込まれており、従って変化を認識して対応することが難しいとしており、組織は現在のビジネス構造に対して最適化する、と述べている。

3.4 新旧イノベーションの比較に関する研究

延岡（2006）は、イノベーションのプロセスモデル（S字カーブ）を用いて、既存技術から新技術への移行を阻害する要因を、「新技術の普及初期段階は、既存技術に対して短期的に性能が落ちること」及び「新技術が将来的に S 字カーブを登っていくか分からないこと（新技術の技術的な不確実性）」の 2 点を挙げている。

原田（2000）は、新技術の普及プロセスにおいて旧技術が補完的な役割も担うとし、「旧技術における学習、知識の蓄積が新技術の採用を促進する要因である」と指摘している。

3.5 金属 AM 技術の普及に関する研究

近年、金属 AM 技術は活発な研究活動が行われているが、その主な研究領域は材料、プロセス技術、レーザ技術、あるいは製品の構造最適化といった自然科学領域が主体であり、社会科学領域、特にイノベーションの普及という視点に立った研究蓄積は少ない。

ここでは、金属 AM の技術的な特徴から普及に向けた課題を整理している幾つかの先行研究を紹介する。

3.5.1 コストに関する研究

採用主体が導入を躊躇う要因の一つに、当然ながら初期投資コストや運用コストが挙げられる。金属 AM は前述の通り幾つか方式があり、各方式でコストは異なるが、代表的な方式である PBF 方式について、松下（2019）は、熱源がレーザの場合で約 1 億円、電子ビームの場合で約 2 億円が標準的な価格帯であることに加え、比較対象として 5 軸 NC マシニングセンタを挙げ、その価格が約 3,000 万円であることから、現状の装置価格が普及の障壁になっていることを指摘している。また、材料となる金属粉末が高額なことも同様に課題であると指摘している。

3.5.2 生産性に関する研究

松下（2019）は、生産性の低さが普及の課題であると指摘している。金属 AM はその製造プロセス上、大量生産には不向きである。PBF 方式の場合、搭載されるレーザ数にもよるが一般的な造形速度は数十 cc/h であり、機械加工や MIM（金属射出成形）と比較した場合、現状では生産性に劣ることを指摘している。

3.5.3 Design for AM に関する研究

Gibson et al. (2021) は、AM を適用する製品には、AM の特徴や制約を活かした設計、所謂 Design for AM (DfAM) の概念が重要であることを指摘している。製品の形状生成に AI を活用した設計技術や、自然界の構造（例えば、葉っぱの葉脈構造や骨の異方性構造等）を模倣して形状を生成する生態模倣（biomimetics）の設計技術を実装したツールも登場しており、従来では生成不可能であった有機的・機能的な構造設計が可能になりつつあるが、このような高度な設計技術自体もまた発展途上であり、設計ツール自体の進歩と、こういった高度な設計ツールを使いこなす人材育成が必要となる。

3.5.4 施工条件の構築プロセスに関する研究

金属 AM 技術の製造プロセスにおける施工条件の最適化に関する指摘もある。石出ら（2018）は、レーザ出力やスキャン速度、レーザピッチ幅と言った膨大な施工条件の組み合わせの中から、複数のステップ（直線のみ⇒平面⇒立方体⇒複雑形状）を経て施工条件の最適化をする必要性を述べており、その最適化に膨大な時間と費用がかかっていることを課題に挙げている。

3.5.5 デジタル技術との連携に関する研究

AM 技術はデジタルデータを基点とした設計・製造技術であり、AM のプロセス全領域に渡って様々なデータが入出力されることから、近年発展が目覚ましい ICT（情報通信技術）、所謂、デジタル技術との連携やデータ利活用の視点も、AM 技術の普及には重要である。

田中ら（2017）は、AM 技術において一般的に目に触れやすいことから注目されがちな物質領域（プロセス・マテリアル・マシン）の課題に対し、物質として認知できないため軽視されがちな情報領域（データ、ソフトウェア）にも多くの課題があり、且つその情報領域はハードウェア等の実態が無いと物質領域の課題ほど重要視されていないため、AM 技術の水面下の課題として存在していることを、「3D プリンティングの冰山モデル」として指摘している。データフォーマット形式、3D モデリング技術、膨大なデータ分析への AI 活

用など、AM 技術やその周辺領域にあるデジタル技術に関する課題を指摘している。

3.5.6 日本と海外の差異に関する研究

日本と海外における金属 AM 技術の普及状況の差異を考察している幾つか先行研究も存在する。

その国の生産技術に対する文化や慣習と、金属 AM が持つ特性との関係性に着目した考察として、檜原（2017）は、日本の製造業の特徴である品質第一主義が金属 AM の採用を阻害していると指摘しており、既存技術と同等レベルの部品品質を要求する日本の製造業と、未成熟な金属 AM の技術レベルとの間に現時点でギャップが存在することを言及している。また、これに加え海外では、中程度の品質でも良しとする顧客向けに、サプライチェーンを含めた形で AM をビジネスへ活用する動きがあることを指摘している。（例えば、製品製造レベルは低い事を許容した上で、AM の柔軟性を重視した部品配信システムや、既に保守管理の時期が過ぎた製品に対するサービスパーツの提供等）

松下（2016）も同様に、除去加工（機械加工）の精度追及型で世界と競合してきた日本の特徴を挙げている。

上記 3.5 節で整理した金属 AM 技術の普及に着目した先行研究は、その大部分が自然科学領域に関するものであり、社会科学領域の研究は相対的に少ないと言えるが、特にイノベーションの普及に関する視点の考察は不足していると言える。AM 技術の普及に関する先行研究の多くは、コストや品質、あるいは技術的特徴から普及への課題を指摘しているが、その殆どは金属 AM の技術的特徴や技術の完成度に起因した普及の阻害要因を指摘するものであり、金属 AM の特徴と社会システムの関係性に関する研究は見当たらない。特に、イノベーション普及の導入期である金属 AM は、今まさにその社会実装が進む過程にあり、ダイナミックな問題に直面していると思われるが、普及の舞台となる社会システムや産業構造との関係性に着目した研究は管見の限り見当たらない。

3.6 先行研究の課題および本研究で明らかにしたい事項

まず、イノベーションの普及理論において今回着目している社会システムは、これまで個人消費者またはその集団であるコミュニティをベースとした概念であったと言える。これは、(Rogers 2003) が示した事例研究でもその多くが個人消費者へのイノベーション普及を調査したものであったように、これまでのイノベーション普及研究は対象が個人消費者を主体としていたためであり、採用主体が企業となる B2B 製品の普及メカニズムの議論は相対的に少ない。この要因として、イノベーション普及研究がマーケティング論や経営戦略論

と言った分野での議論が中心であったことが挙げられる。よって、研究の視点や対象が、個社の経営視点におけるイノベーション創出や事業化プロセス、あるいは個々の顧客にどのように普及するか、という「個社」や「個人」が中心となり、「産業界全体への普及メカニズム」や「産業構造とイノベーションの関係」についての研究蓄積は少ない。

イノベーションの普及における社会システムの存在について、Rogers (2003) は社会システムを「イノベーションの普及に関与する成員（イノベーションの提供者や採用者など）によって構成される集団」と定義した上で、社会システムの構造がイノベーションの普及に影響を与えることを示している。ここで、社会システムにおける構造とは、「社会システム内部の成員のパターン化された配置」であり、社会システムにこの構造が存在することによって、社会システム内の個々人の行動に規則性と安定性が齎されることも指摘している。

イノベーションと社会システムの関係性に関する研究として、三藤 (2007) は「イノベーション・プロセスが進行するなかで、イノベーションと社会システムは共進化しつつ動的に発展する」と指摘し、双方は独立したものではなく、互いに影響を及ぼし合いながら変容していくものであるとして、社会システムがイノベーションの普及に影響を与える存在であるという Rogers (2003) の理論を踏襲しつつ、イノベーションと社会システムは共に影響を受け合いながら動的に発展するという理論を構築することで、Rogers (2003) のイノベーションと社会システムの理論を補強・拡張している。

これら Rogers (2003) 及び三藤 (2007) による先行研究は、イノベーション（テクノロジー）と社会システムは互いに独立しておらず、共に影響を及ぼし合いながら動的に発展していくことを明らかにしており、イノベーションの普及にとって社会システムが果たす役割や影響が大きいことを明らかにしている。一方、これら先行研究は、イノベーション側における支配的設計（ドミナントデザイン）の誕生と、社会システム側におけるクリティカルマスの形成という両事象が相互に影響を及ぼし合っていることを指摘するものであり、社会システムを一つの群として捉えるマクロ的な視点が中心の理論となっている。しかし、社会システムの構成要素には個人や組織、企業や公的機関など様々なアクターが存在し (Callon 1987)、それらが互いの利害関係やエコシステムなどによって構造化しているが、この「社会システムの構造」がイノベーションの普及にどのような影響を及ぼしているかの研究が不足している。

自動車産業を対象にした事例研究として、武石 (2003) や具ら (2008) の自動車メーカーと部品サプライヤが保有する知識やノウハウに着目した研究が存在するが、これらは、イノベーション（新たなテクノロジー）を創出するために、社会システムにおける中核企業（自動車メーカー）が自社の領域を超えて部品サプライヤ領域の知識やノウハウを保有することが求められることを示したものであり、イノベーションの普及プロセスよりもイノベーションの創出プロセスとアクターの知識・ノウハウの関係に焦点が当てられた、云わばイノベーションの黎明期（研究開発フェーズ）に対する理論であり、本研究が扱うイノベーション

普及の導入期における社会システムの内部構造の影響を明示的に説明していない。

また、イノベーションの普及プロセスを動的に捉える研究では、延岡（2006）などがプロセスモデルによってイノベーション普及を動的に捉え描写する研究蓄積がなされており、その中でイノベーションの普及に関しても言及しているが、これらは新技術が旧技術に対し短期的に性能が落ちることや、新技術の技術的な不確実性に基づく議論で、イノベーションの普及を阻害する要因をテクノロジー自体にフォーカスし考察したものであり、イノベーションの普及先となる社会システムとの関係については明示的な説明がなされていない。

さらに、これまでのイノベーション普及理論における社会システムの議論は、B2C 向けの一般消費者またはその集団であるコミュニティをベースとした概念であったのに対し、本研究の事例のような B2B 向け製品における社会システム内のアクターの主体は企業であるため、これまでの個人消費者を中心とする理論では、企業同士のビジネスによって形成された「社会システムの構造」が齎す影響を説明できないと考える。

よって本研究では、先行研究のイノベーション普及理論で示されてきた、イノベーションと社会システムは相互に影響を及ぼし合いながら動的に発展するという理論を踏襲しつつ、これまでの先行研究で明らかになっていない、イノベーション普及の導入期において、主体となるアクターが企業となる B2B 領域における社会システムの構造が、イノベーションの普及にどのような影響を与えるかを明らかにする。

第4章 金属 AM 技術の普及課題に関する調査

本章では、金属 AM 技術の業界関係者に当該技術の課題や普及に向けた取り組みをインタビュー形式で調査し、その結果を分析することで、金属 AM 技術の普及プロセスにおいて、金属素形材産業という社会システムの構造がどのような影響を及ぼしているのかを明らかにする。

4.1 インタビュー調査の概要

インタビューは、金属 AM 技術の業界に従事する企業の実務者 6 名を対象に実施した。インタビュー対象者は、金属 AM 技術の知識および実務に精通していることを前提に選定している。また、金属 AM 技術の社会システムを構成する成員は、基本的にはテクノロジーの提供側（装置メーカーや材料メーカー、ソフトウェアメーカー等）か、もしくはテクノロジーの採用側（ユーザ企業又はサービスビューロ等）の 2 つに大別できるため、今回の対象者もそのどちらかに属していることを基準とし、且つ、アクターの事業領域に偏りが出ないように人選することで、合目的的サンプリング（purposive sampling）となるようにした。表 4 にインタビュー対象者 6 名を示す。

なお、今回のインタビューで得られた情報は、匿名性の確保と特定の企業名や組織、製品やサービスに係る情報については非公開とすることを条件に、本研究への情報提供について了承を得ている。

表 4 インタビュー対象者

対象者	AM 技術業務 の従事年数	所属企業の 事業分類	担当事業・業務	インタビュー 一日時	場所・形式
A	5	重工メーカ	航空宇宙機器の 設計・開発	2021-6-29 18:00-19:00	オンライン
B	5	総合電機メ ーカ	材料技術の研究 職	2021-6-30 18:00-19:00	オンライン
C	7	自動車メー カ	材料・プロセス技 術の研究職	2021-7-1 15:00-16:00	X事業所 (対面)
D	5	装置代理店 兼サービス ビューロ	造形エンジニア、 装置オペレータ	2021-7-2 19:00-20:00	Y事業所 (対面)
E	13	工作機械メ ーカ	(元)AM 装置開発 職、(現)営業職	2021-7-5 20:00-21:00	オンライン
F	6	材料メーカ	粉末材料の開発 職	2021-7-6 19:00-20:00	オンライン

インタビューは、あらかじめ検討した質問事項に沿って行い、その中で適宜質問を投げかける中で対象者に自由な意見を述べて貰う“半構造化インタビュー”を採用した。各インタビュー対象者には、インタビュー冒頭にて、インタビューの目的、匿名での内容公開、ボイスレコーダーでの録音等を伝えた。

今回のインタビューで事前に準備した質問事項を表 5 に示す。質問事項は特定の回答を誘導することが無いよう、抽象度の高い質問事項 3 つを設定し、各質問について対象者の総合的な見解や本音を導き出せるよう、「なぜそう思うか?」や「具体的には?」といった質問を重ねる形式とした。

表 5 インタビューの質問事項

	質問	狙い
Q1	AM 技術の課題はなにか？ (業界や企業固有の視点ではなく、純粋に AM 技術というテクノロジーとして見た場合)	全般的な課題を確認する。
Q2	あなたの業界で AM 技術を採用する上での課題はなにか？	業界における課題を確認する。
Q3	あなたの企業で AM 技術を採用する上での課題はなにか？	企業内における課題を確認する。

インタビューは全てボイスレコーダーで録音し、その後に文字起こしを行なった。次に、文章の意図や文脈を変えないよう注意しながら、内容とは直接関係のない間投詞の削除や分かりやすい文章への修正を行い、合わせて個人や企業名、製品名といった情報を匿名化することで、分析用データとして前処理を行った。

4.2 分析手法：機能的テーマティック・アナリシス法

得られたインタビュー結果の分析手法として、テーマティック・アナリシス法 (TA: Thematic Analysis) を選択した。TA 法は質的分析手法の一つで、質的データの中にパターンを見出すための体系的なプロセスである (Boyatzis 1998)。TA 法には幾つかのバリエーションが存在するが、本研究では Boyatzis (1998) が提案した TA 法を土屋 (2016) が解釈・解説した方法に従って分析を行なった。なお、Boyatzis (1998) が示した TA 法は、分析的厳密さ (analytic rigour) を見据えた、質的研究の立案と実施を行うことを強調している点が挙げられる (土屋 2016)。

TA 法の特徴として、分析手法としての柔軟性が挙げられる (土屋 2016)。他の質的分析手法と比べた場合、例えばグラウンデッド・セオリー・アプローチ (GTA: Grounded Theory Approach; Strauss & Corbin 1998; 戈木 2013) は厳密な“方法論”であるのに対し、TA 法は研究者の哲学的な立ち位置に依存しないという点で柔軟な“分析手法”と言える。

TA 法には、先行研究結果や既存の理論をベースにデータ分析を行う“演繹的分析手法”と、生データをベースに分析してテーマを抽出する“帰納的分析手法”、そしてこれら 2 つを組み合わせた“ハイブリッドアプローチ”等、幾つかの分析アプローチがあり、研究目的に応じて研究者自身が手法を選定できる。本研究では、著者の AM 技術に対する先入観や予備知識が結果に影響することを最小限とするため、帰納的分析手法を採用した。

4.3 分析手順

分析手順は、土屋（2016）に記載された流れや注意事項を参考に、以下 1～4）に従って TA 法を実施した。

1) インタビューデータの切片化

今回は質問の抽象度が高いため、質問に対して得られた回答の中に幾つかの話題が含まれる場合も多かったので、インタビューデータを切片化の際の分割単位（コーディングユニット）を話題毎に切片化した。

2) 切片データをコーディング

切片化した各インタビューデータに対し、それらを端的に表す短いコードをタグ付けの要領で付けていく。（コードを付ける作業のことをコーディングと呼ぶ）

3) 関連するコードを纏めて、カテゴリーを生成

カテゴリーはコードを集めて抽象化されるので、肯定および否定の両論を包含することが良いカテゴリーの条件とされる。（なお、土屋（2016）では旧コード、新コードという表現であったが、本稿では分かり易くするために、新コードをカテゴリーと呼ぶ）

4) カテゴリーをさらに抽象化して、テーマを生成

各カテゴリーを比較し、抽象化することで纏められるカテゴリーをテーマとして生成する。

4.4 TA 法により抽出したテーマとカテゴリー

分析手順に従い、インタビューデータの帰納的 TA 法による分析を行った結果を表 6 に示す。

表 6 TA 法により生成したテーマとカテゴリー

テーマ	カテゴリー	コード	
人材や知識	AM の全般的な知識や	B1-3	AM で出来ることに対する誤解がある。
	ノウハウ	D1-1	技術的な情報が正しく認知されていない。

		A3-1	材料研究者に比べ、製品設計者の AM に関する知識が不足または誤解している場合がある。
		B1-5	AM は材料、プロセス技術、表面処理、シミュレーション、構造最適化など多数の要素技術で構成されており横断的な知識が必要。
		F1-2	造形作業を実際に体験する機会が少ない。
	素形材製造の知識やノウハウ	A3-2	社内に造形物の材料品質を管理・保証する知識、ノウハウが乏しい。
		C2-2	系列サプライチェーンの中で素材の製造ノウハウが十分と言えない企業が AM をやらざるを得ない。
		C3-5	社内に素材の品質管理の人材やノウハウが不足。
		E2-1	工作機械は素材を削る業界なので、ゼロから素材を作ることにに対して知識やノウハウが無い。
		E2-4	機械加工がメインのユーザにとって素形材製造のハードルが高い。
		F1-3	粉末の段階と造形後で素材としての特性が変わるため、ユーザには材料を評価する知識やノウハウが必要。
		B2-2	社内に材料の品質管理ノウハウが無い。
	デジタル技術の知識やノウハウ	D2-4	一般的な工作機械よりも 3D データ等を扱うスキルや知識が必要。
		E3-3	従来の工作機械に比べオペレータやエンジニアがデジタル技術に精通している必要がある。
	人材育成や確保	B1-2	産学ともに AM 人材が不足しており、大学で AM 技術の人材育成を行い、産学連携を強化する必要がある。
		C3-1	AM は幅広い技術で構成されるが、社内に必要な人材を必ずしも確保できない。
		D3-2	材料やプロセス技術、3D データ編集など一通り習得する必要があるため人材育成が必要。
		D3-3	材料評価のノウハウが無いため、外注化しているが社内の人材育成が必要。
		E1-3	日本は AM 人材の絶対数が足りていない。
		F3-3	社内で AM の横断的な知識を持った人材の育

			成が必要。
企業内または産業全体の構造	社内の組織構造	B3-1	既存技術を前提に作られた縦割り組織ではAM推進が困難。
		E1-2	設計技術、造形技術、後処理など連携した組織横断的な開発が必要。
	産業構造やサプライチェーン	C3-4	将来的にはサプライヤーから調達したいが、AMのサプライチェーンが未発達。
		B2-3	素形材産業の中でAMのサービスビューロ等のサプライチェーンが脆弱。
	オープンイノベーション	E3-2	異なる業界との積極的なオープンイノベーションが必要。
		F3-1	装置メーカーやユーザ企業と連携したオープンイノベーションが必要。
	市場動向や規模	A2-2	日本の航空宇宙市場がそこまで大きくないので、投資に慎重になる。
		F2-1	従来の素形材事業と比べ生産量が少ないため、将来の事業性を不安視する意見もある。
企業の経営マネジメントや風土	企業文化や風土	B1-1	企業内のチャレンジする風土や経営層のAMへの理解が欠如しており、アプリケーション開発が遅れている。
		B2-1	材料や設計仕様を実績重視で選定する慣習がある。
		A2-1	航空宇宙は実績重視なので新技術の適用に膨大な部品検証が必要。
	リーダーシップやトップマネジメント	C3-2	決して諦めない強いプロジェクトリーダーが必要。
		C1-3	AMに対する理解がマネージャ以上の管理職クラスに不足している。
		C3-3	経営層が悲観的な場合が多い。
		D3-1	AMのビジネスに対して経営層に懐疑派が存在する。
		B3-5	社内の経営層に懐疑派がいて、投資や開発の推進力が弱い。
	経営判断の柔軟性	E3-1	新規事業としての柔軟な経営判断が必要。
		F3-2	従来型の素形材事業よりユーザ企業の懐に飛

			び込んでアプリケーションのニーズを開拓する必要がある。
テクノロジー	品質管理、品質保証	A1-1	材料の品質保証プロセスや仕組みが未整備。
		D2-3	製造プロセス全体の品質評価の手法やガイドライン等が未整備。
	製造条件の確立	A3-5	製品設計から材料開発まで社内で一貫した開発が必要。
		B3-2	造形条件の最適化には多くのトライ＆エラーが必要。
		B3-3	造形プロセスの最適化にデータサイエンス人材やノウハウが必要。
		B1-4	製造条件の最適化に膨大な時間と労力が必要。
		F2-2	製造条件と粉末の関係が複雑であり、最適化や品質維持にコストがかかる。
	テクノロジーの成熟度	A1-2	新たな製造プロセスも出てきており、全体として技術が発展途上。
		E1-1	魅力的なアプリケーションを作る DfAM のツールが実用的なレベルに達していない。
	既存技術との対比	A1-3	日本では量産技術の品質と比較してしまうため評価が低い。
		D2-1	製品の品質要求が機械加工や鍛造品質を踏襲するケースが多く、適用の検討が進まない。
		E2-2	従来の工作機械の顧客は機械加工の精度に慣れており、AM の使い道を模索している。
	Design for AM	B1-6	出来そうなものからトライするのでメリットが訴求できないジレンマがある。
		A3-4	AM でなければ作れない構造や付加価値を見つける必要がある。
		C1-2	DfAM の視点が欠如してメリットを訴求できない。
		C2-3	DfAM の成功体験が業界全体で不足。
		D1-2	既存製品の置き換えで検討するためメリットが出ない。
		F1-1	従来設計にとらわれない機能的なアプリケーション開発。

	生産性やコスト	A3-3	製造技術なので投資回収を上手く説明できない。
		B3-4	装置が高額で簡単に投資できない。
		C1-1	装置や粉末が高額で、生産速度も遅いため製造コストが高い。
		C2-1	製造コストが高く適用に至らないケースが多い。
		D1-3	製造コストが高いため、コスト的にペイできる製品が少ない。
		D2-2	装置や粉末が高額なので、特に中小企業は設備投資に踏み切りづらい。
		F2-3	製造コストの低減に向けた材料の歩留まり改善。
	ソフトウェア	E2-3	装置のハード面はある程度成熟してきたが、データ分析などソフトウェアの改善による進歩が必要。
		B1-7	構造設計ソフトや造形プロセスのシミュレーションが今後より実用的になる必要がある。

4.5 分析結果

分析結果の詳細を抽出したテーマ単位で紹介する。なお、《 》はテーマ、【 】はカテゴリー、[] はコード、イタリック体はインタビューデータ、() はコード番号を示す。

テーマ1：《人材や知識》

AM 技術の普及に対する課題として《人材や知識》が抽出され、その中から以下の 4 つのカテゴリーが挙げられた。

一つ目は、【AM の全般的な知識やノウハウ】である。[AM は材料、プロセス技術、表面処理、シミュレーション、構造最適化など多数の要素技術で構成されており横断的な知識が必要] であり、既存技術の境界線に縛られない知識やノウハウが必要であること、また、[造形作業を実際に体験する機会が少ない] 等、実際に金属 AM 技術の現場やプロセスを体験する機会が少ないため、[AM で出来ることに対する誤解がある] ことや [技術的な情報が正しく認知されていない] と言った情報の断片化あるいは断絶によって AM 技術への誤解が存在するという指摘がなされている。

- AM は材料、プロセス技術、表面処理、シミュレーション、構造最適化など構成している要素技術が幅広いので、AM を実用化しようと思うと既存の要素技術だけではない横断的な知識が求められる。私も専門と全然違うことを覚えたりしました。勉強のし甲斐があって面白いですけどね。(B1-5)
- 実際の製造プロセスや設備がどんな感じで、どういう付帯設備が必要なのかや、造形後にどういう処理が必要なのか等、実際の造形作業を経験する機会が少なく、知識はあるけど、まだ見たことがないという人も意外と多い。実際に造形作業を体験すると、粉末や造形物の課題も見えてくると思うが、やはりまだ日本国内に体験する場が少ない気がする。(F1-2)
- そもそも AM で出来ることに対する誤解があるケースが多いですね。社内のマネージャ層や顧客とか色々ですが、AM でなんでも出来ると思っているような酷いケースは少ないにしても、構造設計の制約とか材料の制約とか現実的なところは意外と理解されていないことが多く、その誤解を解くことから始まることが多い。(B1-3)
- 展示会でいろんな問い合わせがあるが、正確な情報を持っている人はごく一部の AM 業界関係者だけで、そうでない企業の方には正しい情報が認知されていない。設備や材料の制約もあるし、設計的な制約もあるので、我々としては正しい情報を伝えるよう、現物を見て貰ったりして体験してもらっている。(D1-1)

カテゴリーの二つ目は、【素形材製造の知識やノウハウ】である。[社内に造形物の材料品質を管理・保証する知識、ノウハウが乏しい] ことや [機械加工がメインのユーザにとって素形材製造のハードルが高い] という素形材を製造する知識やノウハウに関する指摘が複数なされている。

- 素材のプロセスとして AM を見ると、やはり最後は素材の品質保証という話になる。AM に携わると改めて実感するが、今まで素材というのは買い物だったということに気付かされる。今まで品質が保証されている材料を買ってきて、それに手を加えていたが、AM の場合は素材自体も自分たちで作るので、素材として求められる品質管理も自分たちでやる必要があるが、そういう知識や、そもそも素材自体の製造ノウハウも乏しいので、かなり手探りな状態でやっている。(A3-2)
- 装置を購入頂くメーカーは機械加工メーカーが多いが、素形材を製造するということに慣れていないので、今までの機械加工部品を販売するのとは、ちょっと勝手が違うという話を聞く。つまり部品の形だけ出来れば OK、というお客さんなら良いが、実際はそんな顧客は試作レベルでもほとんどいなくて、材料品質のデータが欲し

いとか、強度の実績データが欲しい等、素材としての仕様を気にする顧客がほとんどだが、そういうことに答えられる AM ユーザはごく一部だと感じる。(E2-4)

カテゴリーの三つ目は、【デジタル技術の知識やノウハウ】であり、[一般的な工作機械よりも 3D データ等を扱うスキルや知識が必要] なことや [従来の工作機械に比べオペレータやエンジニアがデジタル技術に精通している必要がある] と言った 3D-CAD や解析ソフト等デジタルツールを使いこなす必要性について指摘されている。

- ユーザが苦勞されているのが、3D データ等を扱うスキルや知識が思っている以上に必要だということ。部品を 3D でモデリングしたり、造形するためにサポートを設計したりと造形の前にデータを扱う作業がかなり多く、一般的な工作機械よりもオペレータやエンジニアの方がデータを扱うスキルが必要と感じる。(D2-4)
- 従来の工作機械を扱うのに比べ、操作する装置オペレータやエンジニアがデジタル技術に精通していて、3D データの作成や編集とか、造形結果のデータ処理とか、3D スキャン作業とかのスキルが求められている。従来の工作機械は、設計図面が CAD 図とかデータであったとしても、それがそのまま製造に使われるケースは意外と少なかったが、AM の場合はデジタルデータが無いとそもそも何も始まらないので、デジタルフレンドリーな人が求められている。(E3-3)

カテゴリーの四つ目は、【人材育成や確保】である。[日本は AM 人材の絶対数が足りていない] ことの指摘があり、[産学ともに AM 人材が不足しており、大学で AM 技術の人材育成を行い、産学連携を強化する必要がある] と言った産学連携による AM 人材の育成輩出が必要という指摘がなされている。また、AM は [材料やプロセス技術、3D データ編集など一通り習得する必要があるため人材育成が必要] であり、[社内で AM の横断的な知識を持った人材の育成が必要] という指摘がある一方、[AM は幅広い技術で構成されるが、社内で必要な人材を必ずしも確保できない] という企業内の実態も把握することが出来た。

- 欧米に比べると、日本の AM 人口は少ないというのは、海外と国内の展示会の様子とか学会の様子を見てても感じる。最近では日本もだいぶ注目されてきており、装置の導入台数も伸びて来たが、他の技術に比べると絶対数は凄いのので、我々ももっと宣伝しないとイケないが、これから日本が AM で頑張るためには日本人の AM 人材をどれだけ育成できるかにかかっていると感じる。(E1-3)
- 日本全体で AM 関連の人材が少ないと感じる。大学で AM の工学系教育を行えば、その人材が産業界で活躍して日本の AM 人材の層も厚くなり、産学の連携も進む

と思うので、人材育成を産学で意識して進めていく必要があると思う。(B1-2)

- AM を本格的に活用して貫うためには、材料やプロセス技術、3D データ編集など必要な知識やノウハウを一通り習得しないといけないので、すぐに使いこなしているユーザは少なく、皆さん実際にやりながら少しずつ覚えていってます。話を聞くと、やはり普通の工作機械よりオペレータの人は覚えることが多くて、半分エンジニア的なこともやる必要があるので、そういった人材育成の点は苦勞されていると思います。(D3-2)
- 弊社は粉末という形で AM に携わっているが、造形性や材料特性を評価するために装置も入れており、なるべくユーザの課題を理解しながら進める体制を取っている。ただ、粉末製造に詳しい人間はいるが、やはりアプリケーション寄りの話は人材がいないのでユーザと付き合いながら吸収していった。社内で AM の横断的な知識を持った人間が今のところ少ないので、そういった人材育成を進めて、ユーザへ価値提案できるような営業ができる体制にしたいと思っている。(F3-3)
- AM は幅広い技術領域の人を巻き込む必要があるが、AM のプロジェクトに必要な人材が必ずしも社内にはいないケースがある。例えば、装置で造形をするエンジニアは確保できるが、データ分析をするような人材がいらないなど。(C3-1)

テーマ 2：《企業内または産業全体の構造》

次のテーマとして、《企業内または産業全体の構造》が抽出され、その中に 4 つの視点が挙げられる。

カテゴリーの一つ目は、【社内の組織構造】である。AM はテーマ 1 でも指摘されたように複数の要素技術からなる複合技術であるため、[設計技術、造形技術、後処理など連携した組織横断的な開発が必要]であるが、[既存技術を前提に作られた縦割り組織では AM 推進が困難]という指摘がなされている。

- AM のアプリケーション開発には、製品の設計技術や AM の造形技術、後処理の表面改質処理など多くの技術を連携して作り込む必要があるため、企業内で組織を横断した開発が必要。少人数で良いので、各部門からキーマンを出すような小回りの利くチームで進める必要がある。(E1-2)
- AM は色々な技術の集合体であり、且つアプリケーション開発も必要なので、例えば研究所の組織が既存技術をベースに作られた縦割り組織であったり、工場組織がそうであったりすると、横断的な活動が取りづらく個別最適化するので、AM の推進に苦勞する。(B3-1)

カテゴリーの二つ目は、【サプライチェーン】である。現状では「素形材産業の中で AM のサービスビューロ等のサプライチェーンが脆弱」であることが指摘され、加えて、「将来的にはサプライヤーから調達したいが、AM のサプライチェーンが未発達」であることも挙げられた。このことから、現時点では競争原理が働くような AM サプライチェーンが規模や実力の面で成立していないこと、及びサプライチェーンの未発達が一部のユーザ企業にとって AM の採用を阻害している要因であることが確認された。

- 素形材の産業で、例えば元々は機械加工をやっている受託メーカが AM 装置を導入して造形受託サービスをやっているという感じで最近ではサービスビューロも増えてきたが、まだまだ絶対数が少ないのと、特に機械加工の感覚でやっているところは素材の技術的な知識が少ないので、実力が不足しており、製品のサプライチェーンに組み込める実力があるようなサービスビューロはごく一部と感じる。(B2-3)
- 自動車の場合、部品のサプライチェーンを構築することが将来的には求められるが、現状のサービスビューロの実力や規模を考えると、まだサプライチェーンが成立するような規模ではない。これはまだ本格的なアプリケーション適用がこれからなので鶏と卵だが、自動車産業以外の用途も含めてサービスビューロのニーズが増えてサプライチェーンが成立するかは AM 業界全体にとって重要と思う。(C3-4)

カテゴリーの三つ目は、【オープンイノベーション】である。自社だけでは対応できない技術的な課題やアプリケーション開発推進のために「異なる業界との積極的なオープンイノベーションが必要」と指摘されている。

- 我々は装置メーカなので、粉末メーカやアプリケーション業界など異なる業界とオープンイノベーションをもっと積極的にやっていかないといけないと思っている。特に、顕在化してないニーズを掘り起こすことは装置販売に直結するので、アプリケーション業界の関係者とは定期的に意見交換をしたり、試作評価をしたりしているが、より積極的な異業種とのオープンイノベーションが必要。(E3-2)

カテゴリーの四つ目は、【市場動向や規模】である。「日本の航空宇宙市場がそこまで大きくないので、投資に慎重になる」と言った日本の市場規模に関する指摘や、「従来の素形材事業と比べ生産量が少ないため、将来の事業性を不安視する意見もある」と言った既存の素

材ビジネスと AM の規模感の違いが挙げられた。

- アプリケーションとして適した産業がその国に大きく存在するかも重要と
思っている。例えば航空宇宙は世界的には AM のアプリケーションとして注
目されているが、日本は欧州や米国ほど航空宇宙ビジネスが大きいとは
お世辞にも言えない。日本の場合は民間プレイヤーが少ないので、例
えば米国のように民間で安く人工衛星を挙げるので、AM で軽量部品を
作りましょう、というような話が起こりづらい。あと例えば旅客機だと
日本も製造プレイヤーはいるが、全体の設計や重要部位の設計は欧米が
握ってたりするので、なかなか上流の設計から AM を適用するような
検討がやりづらい。(A2-2)
- 弊社は所謂、素材メーカーだが、現在メインの事業である素材の製造と
販売はかなりのボリュームがあるのに対し、AM 用の粉末は一回に必要な
量が数十 kg から百 kg 程度と少ないので、今後どの程度の規模のビ
ジネスになるのか業界全体でも不安視する声はある。社内でもいろ
んな意見がでているが、従来の素材ビジネスとはボリューム感がかなり
違うが、現時点では大口顧客を探しているようなフェーズなので、仕
方ないとは言える。(F2-1)

テーマ 3：《企業内の経営マネジメントや風土》

次のテーマとして、《企業内の経営マネジメントや風土》が抽出され、その中に 3 つの視点が挙げられる。

カテゴリーの一つ目は、【企業文化や風土】である。新しいテクノロジー故に「企業内のチャレンジする風土や経営層の AM への理解が欠如しており、アプリケーション開発が遅れている」ことの指摘や、「材料や設計仕様を実績重視で選定する慣習」と言った実績重視の企業風土が普及を阻害しているという指摘がなされている。

- 日本の会社や業界はその傾向が強いかもしれないが、大きな会社ほどチャレンジできる風土が無い、というかチャレンジする雰囲気が無い気がする。研究開発の現場でもそういう雰囲気があり、あまりにも凄いチャレンジをして失敗するより、小刻みにいくことが定石になってしまっており、チャレンジし辛いのではないかと
思う。私は大きな会社のことしか分らないが、経営層が AM をどう捉えているか、好意的に受けて
めているか、AM を理解してくれているかが実働部隊の動きやすさに直結しており、もし経営層の AM
に対する理解が乏しいと、アプリケーション開発は遅れてしまう。(B1-1)
- アプリケーション開発をする段階で、材料や設計仕様を既存の仕様から持ってくる

る実績重視なところがあり、前の設計を踏襲する設計のルーチン的な慣習がある。それが悪いことはないが、AM みたいに新しい技術の時は実績重視の文化が邪魔してしまう。AM 用に仕様を変えていくことを前向きに考えないと成立しないですね。(B2-1)

カテゴリーの二つ目は、【リーダーシップやトップマネジメント】である。複数の技術領域や組織を纏めきれ「決して諦めない強いプロジェクトリーダーが必要」という点が挙げられた一方で、「経営層が悲観的な場合が多い」という指摘や「社内の経営層に懐疑派がいて、投資や開発の推進力が弱い」と言った経営層との認識の違いやギャップも指摘されている。

- 新しい技術なので、課題もいっぱいあるし失敗ばかりで批判も出るが、それに負けない、決して諦めない強いプロジェクトリーダーが必要。これは AM に限ったことではないが、長期戦を戦わないといけないので、経営層との折衝や予算獲得など開発以外の泥臭いことも引っ張っていくリーダーが必要。(C3-2)
- 少し穿った見方かみしれませんが、経営層が AM のデメリットばかり見て長期的な可能性を無視している、というか見ようとしていない感じがしますね。これは AM だけではありませんが、経営層が AM に対して悲観的な場合が多いような気がする。(C3-3)
- 弊社の事情だが、一部の経営層に AM に対する懐疑派がいて、社内的に大きな稟議を通したり開発プロジェクトを進めるのに苦労している。応援してくれている人もいたので色々だが、経営層の巻き込み方が難しい。(B3-5)

カテゴリーの三つ目は、【経営判断の柔軟性】である。「従来型の素形材事業よりユーザ企業の懐に飛び込んでアプリケーションのニーズを開拓する必要性」や「新規事業としての柔軟な経営判断が必要」など、アジャイル且つ柔軟な経営戦略が必要であるという指摘がなされている。

- 既存の素形材事業も顧客ニーズは大切だったが、AM 用の粉末ビジネスは、よりユーザ企業のアプリケーション動向や課題に沿ってビジネスを展開しないとなかなか上手くいかない。懐に飛び込んでアプリケーションの開発を一緒にやるくらいの感覚が必要。(F3-2)
- 弊社としても AM 装置の事業は新規事業だが、小さなベンチャーではないので、経営判断をもっと柔軟にして、時代のニーズを敏感に汲み取っていくようなスタ

ンスでいかないと今後はまずいと思っている。どうしても既存事業の経営スピードや商習慣のバイアスがあって、いつもそっちに引っ張られてしまうので悩ましいが、新規事業として相応しい事業の運営スタイルで行く必要があると思ってる。
(E3-1)

テーマ4：《テクノロジー》

最後のテーマとして、《テクノロジー》が抽出され、その中に7つの視点が挙げられる。

カテゴリーの一つ目は、【品質管理、品質保証】である。[材料の品質保証プロセスや仕組みが未整備]であり、工業製品として重要となる[製造プロセス全体の品質評価の手法やガイドライン等が未整備]であることの指摘がなされている。

- AM で製品を作っていくときの品質管理や保証ルールや具体的なプロセスがまだどの業界も手探り状態とを感じる。進んでいると言われる航空宇宙業界でさえ、ケースバイケースで判断している。ご存じの通り大量のパラメータがあり、造形プロセスだけ見ても駄目で、後工程の熱処理や表面処理も含めて評価する必要がある。
(A1-1)
- 製造プロセス全体の中に AM を組み込んだ場合、品質評価の手法やガイドライン等をどう整備するかは、ほとんど全てのユーザでまだ検討が深掘りされていないとを感じる。これは我々の課題でもあるので、ユーザと一緒に検討をサポートしているが、具体的なアプリケーションを設計から製造までスルーして評価して確立していくことが必要と思ってる。(D2-3)

カテゴリーの二つ目は、【製造条件の確立】である。[造形条件の最適化には多くのトライ&エラーが必要]や[製造条件と粉末の関係が複雑であり、最適化や品質維持にコストがかかる]等が挙げられ、[製造条件の最適化に膨大な時間と労力が必要]という点が指摘されている。またこの点については[造形プロセスの最適化にデータサイエンス人材やノウハウが必要]と言ったデジタル人材の必要性や[製品設計から材料開発まで社内で一貫した開発が必要]と言った垂直統合的な開発の必要性も挙げられている。

- AM の課題でも言ったが、造形条件の最適化に多くのトライ&エラーが必要であり、ある程度のお金と時間が必要。社内でも色々な分析手法や最近ではAIを活用したりしており、やり始めた頃に比べるとかなり合理化してきた感じはするが、まだ研究のレベルを脱していない感じがする。(B3-2)

- 造形する際の製造条件は粉末メーカー毎の特性によって一から評価する必要があり、製造条件と粉末特性の関係も複雑なので、ユーザ自身でのデータ蓄積が必要です。条件出しの最適化は苦勞されていると思います。それが品質維持にも直結するので、コストがかかるが今のところは結構泥臭くやっているといます。(F2-2)
- AMの製造プロセスで特に造形や後工程の熱処理も入れた一連のプロセスは、大量の製造条件があり且つ現象として良くわかっていないことも多く、条件を最適化するのに多くのテストをやって結果との相関データなど蓄積が必要であり、膨大な時間と労力が必要なので、AMをやられている企業は品質を気にしている場合はかなり苦勞されていると思う。(B1-4)
- 造形プロセスには多くのパラメータがあり、最終的に望む品質を達成する必要があるが、パラメータの多変数分析や、メルトプールの大量の画像データのディープラーニングによる分析など、材料屋の知識とは異なるデータサイエンスのノウハウが本格的なAMの取り組みには必要と感じる。(B3-3)
- 製品設計と材料開発の一体化が必要で、社内で一貫してやらないと実用化までいかない。製品設計者をどう巻き込むか、特に製品設計者が最初は否定的なケースも多いので、材料や造形技術だけで進めるのではなく、製品開発の視点もしっかり入れて担当者もアサインして進める必要がある。(A3-5)

カテゴリーの三つ目は、【テクノロジーの成熟度】である。AM技術が成長段階にある技術であることに触れ、[新たな製造プロセスも出てきており、全体として技術が発展途上]であることや、[魅力的なアプリケーションを作るDfAMのツールが実用的なレベルに達していない]という意見が挙げられ、ハード及びソフト面の成熟度が発展途上である点が指摘されている。

- 製造原理が意外とまだ発展途上という気がする。例えば見た目はDED見たいだが熱源にジュール熱を使って高速で造形する装置メーカーが出てきたり、バインダーージェットティングとかも各社で少しずつ異なる原理が出てきてることを考えると、まだ完成した技術という風には思っておらず、恐らく世界中の関係者もそういう認識なのではないかと思う。(A1-2)
- AMで作るアプリケーションがどれだけ魅力的に設計できるかが鍵だと思うが、よく言うDesign for AMの設計ツールがまだ改善の余地が大幅にあると思うし、評価した限りだとまだ実用的にバリバリ使っていけるレベルのソフトという感じは正直しない。悲観的な意見ではなく、凄い可能性を感じているし、大変面白いと思うが、現状はまだ色んなパラメータを調整しつつ結果を評価する必要があるので、そこら辺のデータ蓄積が今後進めば、実際に多くの設計者が使っていくツールに

なると思う。(E1-1)

カテゴリーの四つ目は、【既存技術との対比】である。[日本では量産技術の品質と比較してしまうため評価が低い]ことや[製品の品質要求が機械加工や鍛造品質を踏襲するケースが多く、適用の検討が進まない]と言った既存技術をベースに設計製造された製品仕様や性能との比較がなされ、適用が進まないという指摘がなされている。

- 日本の製造業は品質トップレベルなのは間違いないが、それが災いしてか、品質に対する捉え方が他国よりも厳しい感じはする。特に品質レベルが安定している成熟した量産技術の品質とベンチマークしてしまうことが多く、AMの良い点よりも品質上の不安点がどうしても注目されてしまい、やっぱり今のほう、つまり現状の量産技術のほうが良いね、となってしまう。ある意味ではオーバースペックで過剰品質なところもそのまま使っている、そういった高いスペックに対する新しいテクノロジー特有の品質面でのビハインドがAM全体の評価を下げてしまっていると感じる。(A1-3)
- ユーザの方から持ち込まれる案件が、元々が機械加工品や鋳造品であることが覆く、その時の表面粗さや機械強度と言った品質要求事項と同じスペックに出来るか?という問い合わせがあり、色々と試行錯誤するがAMのデメリットばかり目立ってしまい、検討が進まないことが多い。発想を変えて貰ってAMのメリットを生かした設計仕様に変更して貰うよう呼びかけている。(D2-1)

カテゴリーの五つ目は、【Design for AM】である。[AMでなければ作れない構造や付加価値を見つける必要がある]というDesign for AMの重要性を指摘する意見がある一方、業界あるいは企業内としては[DfAMの成功体験が業界全体で不足]しており、[DfAMの視点が欠如してメリットを訴求できない]という課題を指摘している。

- 社内で検討する時に、どうしても現実的な検討になってしまう。例えば、現場からはAMに対する不安感もあるが、どうしても既存の設計形状がAMで出来たら次に進もうという考えが多いが、本来は既存の製造技術で作れないものにこそAMの価値があると思う。(A3-4)
- 自動車だけでは無いかもしれないが、AMの成功体験が業界全体で共有されておらず、そういった情報をオープンに発信していくコミュニティや団体があると望ましいかもしれない。(C2-3)
- 適用する製品を検討する際に重要になってくるのが、AMで作る価値があるかどうか

かだが、この視点が実際の検討では欠如しているケースが多いと感じる。*Design for AM* を十分に理解したエンジニア自体もかなり少ないが、AM のメリットを生かした設計提案が出来ず、AM を使う必要性を示すことが出来ないでいる。(C1-2)

カテゴリーの六つ目は、【生産性やコスト】である。[装置が高額で簡単に投資できない]ことや[装置や粉末が高額で、生産速度も遅いため製造コストが高い]等、装置や粉末など初期投資額やランニングコストが高額な指摘が多く、よって[製造コストが高いため、コスト的にペイできる製品が少ない]と言ったアプリケーション開発が進まないという指摘が挙げられた。

- 社内的な投資回収のネゴかもしれないが、装置のコストが1億円以上するのは、やはり簡単に投資承認を得るのは難しいと思う。すぐに生産に使える設備というよりは、まだ研究開発用という感じでもあるし、少なくとも弊社の感覚からするとすぐ投資決定されるような金額ではないのは確か。(B3-4)
- これはAMの特徴かもしれないが、造形速度は今後も劇的に伸びることはないでしょうし、装置や粉末の金額も劇的に下がることもないと考えると、やはり現状の製造コストはかなり高いというのは事実だと思う。自動車でも少量の高級車種をまずはターゲットにしていたり、他の業界でもまずはコスト的な現実の壁はかなり大きいと思う。いきなり現実的な話で申し訳ないが、コスト的に検討を断念するケースが一番多いと思う。(C1-1)
- 色んな製品を造形試作するが、製造コストを評価して貰ってペイできる製品はかなり少ない。小型で複雑形状で、その部品を使うことで全体にメリットがあるような部品を抽出しないといけないので、ユーザの方はいつもアプリケーション選定を苦勞されている印象がある。(D1-3)

カテゴリーの七つ目は、【ソフトウェア】である。[装置のハード面はある程度成熟してきたが、データ分析などソフトウェアの改善による進歩が必要]や[構造設計ソフトや造形プロセスのシミュレーションの実用性向上]と言ったソフトウェアの進歩が普及を促進するのではないかとする指摘がなされている。

- 弊社でやっているレーザのPBF方式は、各社で特色があるように見えるが、ハードの構成要素は技術的にはある程度成熟してきた感じはする。大きな原理はそこまで変わらない。一方で、ユーザの使い易さに直結するソフトウェアはかなり改善

の余地があると思ってる。例えば造形プロセス中の大量のデータを分析して装置の故障予測をしたり、次回の造形の条件案を提示したりとユーザの使い勝手が向上するポテンシャルはまだ大いにあると思っている。(E2-3)

- ソフトウェアの進歩が非常に大切だと思うし、ここ数年進歩している分野はハードよりもソフトウェアだと感じる。DfAM を実際にやるには具体的な構造設計ソフトが今よりももっと実用的になる必要があるし、造形中のプロセスシミュレーションも、今の市販ソフトは実態と合ってるかと言われると微妙なので、もっと実用性が増す必要があると感じる。使いやすくなれば、一気に広まると思う。(B1-7)

4.6 考察と発見事項

AM 技術業界の有識者 6 名に対しインタビュー調査を実施し、そのデータを帰納的 TA 法を用いて分析した。その結果として、インタビューデータを基にした 66 件の切片及びコードが得られ、そこから 18 のカテゴリと 4 つのテーマが抽出された。

今回の分析で抽出されたテーマ及びカテゴリの内容から、金属 AM 技術の普及に向けた課題を、業界レベル、企業レベル、或いはテクノロジーレベルで幅広く網羅的に把握出来たと考える。特に、抽出したテーマである《テクノロジー》の全てのカテゴリや、《人材や知識》の一部のカテゴリについては、先行研究が示す普及の阻害要因と整合的であり、先行研究の理論を裏付けるものである。

また、今回の調査目的であり、先行研究では明示的に示されてこなかった「金属 AM 技術の普及プロセスにおける金属素形材産業という社会システムの構造の影響」について、今回の分析で抽出した《人材や知識》の【素形材製造の知識やノウハウ】や、《企業内または産業全体の構造》における【産業構造やサプライチェーン】に示された結果から、金属 AM 技術の普及先となる金属の素形材産業において、「既存の素形材産業の各レイヤーが保有する知識・ノウハウと、金属 AM 技術の普及に求められる知識・ノウハウの間に存在する不整合」が確認された。本節では以降、本発見事項の内容やメカニズムについて説明と考察を行う。

4.6.1 金属の素形材産業におけるレイヤー構造化した知識と金属 AM 技術の関係

金属の素形材産業が川上、川中、川下に分かれたレイヤー構造であることは 2.4 節で説明したが、この素形材産業のレイヤー構造はその国の経済発展の歴史と共に成長し形成され

てきた産業構造であり、そこには長い歴史の中で各レイヤーに固定化された知識やノウハウが存在しており、その存在が金属 AM 技術の普及に必要な知識やノウハウと不整合がある可能性が、事前調査およびインタビューデータの分析結果より示された。

金属の素形材産業で生産される部品は、その多くが自動車や産業機器といった工業製品として利用されることから、材料の強度や寸法は川下の最終製品メーカーが指定する仕様を満足していることが求められる。特に材料の強度不足や欠陥は最終製品のトラブルと直結することから、素材の製造プロセスに関する品質管理は重要であり、金属 AM においても同様のことが言える。

金属 AM の普及においても、素形材の産業構造においてその品質管理ノウハウが蓄積し、安定した製造品質を実現する仕組みやデータベースを構築していく必要があるが、既存の素形材産業において素材の製造やそれに伴う品質管理を担ってきたレイヤーは、川上もしくは川中でも上流側に位置する「素材メーカー」であり、川下の「最終製品メーカー」や川中でも川下寄りに位置する「加工メーカー」は現状の素形材産業において素材の製造や品質管理に関する知識やノウハウが十分ではないと言える。一方で、インタビュー結果から金属 AM 装置を導入し活用するプレイヤーは川下もしくは川中でも川下寄りの「最終製品メーカー」や「造形サービスビューロ（造形を受託する企業）」であり、これらプレイヤーは素材製造に関する知識やノウハウが不十分であることが普及を阻害している要因であることが示された。

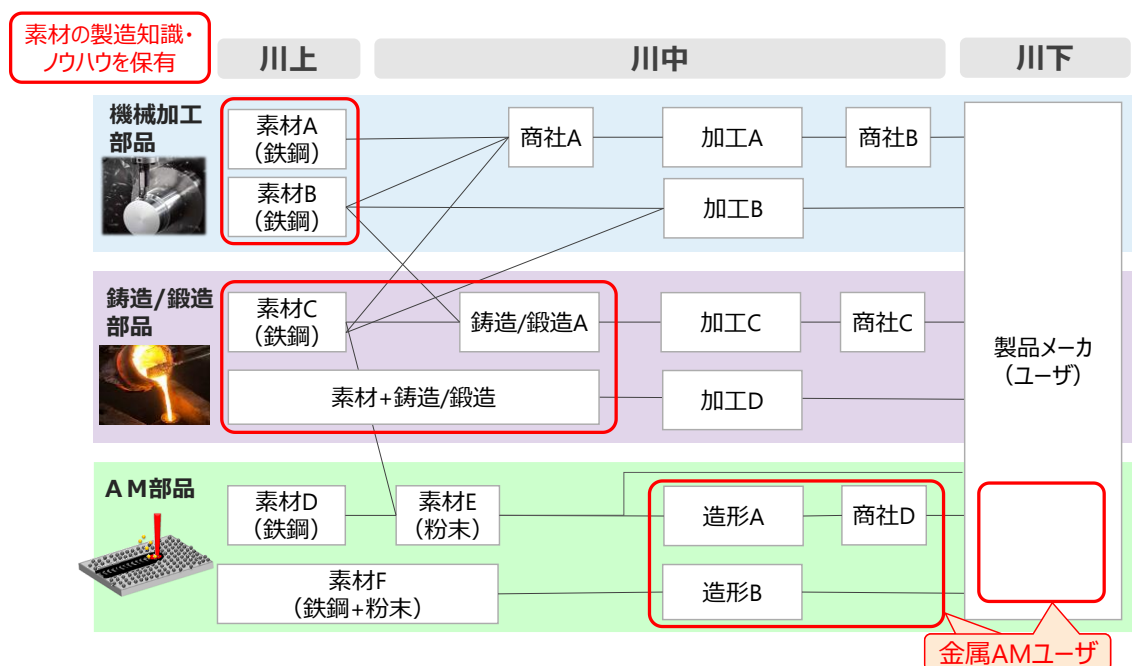


図 7 素形材産業において素材の製造知識・ノウハウを保有するレイヤー

上述の金属の素形材産業における素材製造の知識やノウハウと各レイヤーの関係を図 7 に示す。既存の素形材技術の代表例として「機械加工」や「鋳造/鍛造」を挙げており、それらと金属 AM 技術を比較している。

金属 AM 装置を保有するプレイヤーが素形材産業において川下もしくは川下寄りに位置するプレイヤーとなるのは、金属 AM 技術が「精密な素形材の製造技術」であるという特徴と密接に結びついており、素材を作ると同時に部品としての最終形状も作る技術であることから、完成状態の部品を必要とする川下のレイヤーで注目されているためである。また、少量生産に適した技術であることも、川上よりも川下のプレイヤーが金属 AM 装置を保有する傾向の理由と考える。川上のプレイヤーが金属 AM 装置を保有しないのも同じ要因と推定され、従来の単純形状の規格寸法を大量生産するビジネスモデルと金属 AM 技術は対極の存在と言える。

素形材産業の各レイヤーに求められる知識・ノウハウを比較したものを表 7 に示す。前述のように金属 AM 技術では素材製造に関する知識やノウハウが川下のレイヤーで必要となっていることが分かる。

表 7 素形材産業の各レイヤーに求められる知識・ノウハウ

	川上	川中	川下
既存の素形材技術	・資源調達 ・素材製造	・素材製造 ・変形加工 (鋳造、鍛造、機械加工等)	・製品企画/設計 ・組立/試験等の最終プロセス
金属AM	・資源調達 ・AM原材料の製造 (金属粉末)		(上記に加え) ・素材製造

また、金属 AM 技術の場合、製品の設計・製造から AM による素形材製造や後処理まで一つの企業内で一連の技術開発を行い、自社で AM 部品を製造するような垂直統合的な体制となることがインタビューの分析結果からも分かる。既存技術の素形材産業が水平分業構造であったのに対し、金属 AM 技術の登場によって垂直統合化の動きが確認できる。この水平分業から垂直統合への変化の兆しは、Fine (1998) が示したサプライチェーンで水平分業化が進むと垂直統合化への変化が生じ、垂直統合化が進むと水平分業へ変化する揺り返しが起こり、これらの変化が循環して起こるとする指摘と整合的である。Fine (1998) は水平分業構造から垂直統合化へシフトするための条件を「1. サブシステム（サプライチェーンを構成する部品）が技術的に傑出することに伴った製品の貴重性の向上と市場支配力の強化。2. 市場支配力が強いサブシステムが他のサブシステムを統括し、支配力をより強化しようとする動きの発生。3. サブシステムの1つによる市場支配が、他のサブシステムとの技術的統合による独占構造を促進させるような動きの発生」と述べており、これを金属

AM 技術に当て嵌めて説明すると、金属 AM 技術によって製品の一部が高機能化し、製品全体に対する重要性、支配力が増すため、これまで外部から調達していたが、製品全体の競争力確保の観点から自社製造（垂直統合化）を選択する、という説明が成立する。このことから、今回の調査結果で確認された金属 AM 技術における川下プレイヤーの垂直統合化の動きは、先行研究が示した理論と整合的であり、本調査結果の妥当性を示すものである。

本節の纏めとして、本研究の発見事項を改めて整理する。なお、先行研究に対して新規性があると考えた発見事項については、下線を引いて示す。

- 金属 AM 技術の普及先となる金属の素形材産業において、『既存の素形材産業の各レイヤーが保有する知識・ノウハウと、金属 AM 技術の普及に求められる知識・ノウハウの間に存在する不整合』が確認された。
- 成熟した素形材産業が形成される過程で、各レイヤーに固定化（構造化）されたアクターの知識・ノウハウが新技術である金属 AM 技術の普及を阻害していることが確認された。
- 導入期の現時点では、金属 AM 技術の導入を進める川下プレイヤーに垂直統合的な研究開発と製品製造の動きが見られる。

第5章 結論

5.1 リサーチクエストションへの回答

本節では MRQ/SRQ に対する回答を示す。まず、各 SRQ の回答を導出するために行った各調査結果を改めて整理する。

まず、SRQ1 及び 2 の回答導出のために、第 2 章にて金属 AM 技術の特徴と課題、及び金属の素形材産業の内容とその構造的な特徴を調査した。その結果を以下に整理する。

<第2章の調査結果>

- 金属 AM は部品の最終形状を形成しながら同時に素材としても製造するニアネットシェイプな素形材技術である。
- 金属 AM の設計・製造プロセスは、適用する部品の構造最適化（Design for AM）や、造形工程及び後工程における施工条件や熱処理条件などの最適化が必要であり、それら調整には多くのトライ&エラーを必要とするため、現時点ではプロセス全体を通して、すり合わせ要素の強い技術である。
- 金属 AM は生産性や技術的な特徴から、少量生産や短納期製造に適した技術である。
- 金属の素形材産業において、製品の最終工程を担当する川下レイヤーもしくは川中レイヤーの一部の部品製造企業が金属 AM 装置を保有し、実用化を推進している。

次に、SRQ3 の回答導出のために、第 4 章にて金属 AM 技術の普及の課題をインタビュー調査及び帰納法的 TA 法にて分析した。その結果を以下に示す。

<第4章の調査結果>

- 金属 AM 技術の普及先となる金属の素形材産業において、『既存の素形材産業の各レイヤーが保有する知識・ノウハウと、金属 AM 技術の普及に求められる知識・ノウハウの間に存在する不整合』が確認された。
- 成熟した素形材産業が形成される過程で、各レイヤーに固定化（構造化）され

たアクターの知識・ノウハウが新技術である金属 AM 技術の普及を阻害していることが確認された。

- 導入期の現時点では、金属 AM 技術の導入を進める川下プレイヤーに垂直統合的な研究開発と製品製造の動きが見られる。

これら分析結果から、本研究の MRQ/SRQ に対する回答を以下の通り導出する。

- **SRQ1：金属 AM 技術の特徴は何か？**

回答) 材料、プロセス技術、構造最適化技術など多くの要素技術が関連する複合技術である。また、その技術の特徴は、ニアネットシェイプの素材を作る精密な素形材技術であり、現時点では製品設計から製造完了まですり合わせ型の技術であると言える。また、技術的な特徴から、生産数量は少量生産、製造 LT は短納期、製品形状や機能は複雑微細で AM ならではの付加価値を有するアプリケーションが望ましい。

- **SRQ2：金属の素形材産業とその構造はどのようなものか？**

回答) 機械加工や鋳造と言った技術が存在し、川上、川中、川下という3つのレイヤーに分かれた水平分業構造である。部品は、川上から川下へ向かって素材製造から成形・熱処理、そして最終組立という流れで製造されていく。SRQ1 で示した金属 AM の特徴から、金属 AM 装置を導入するユーザは、素形材産業の川下レイヤーが中心となる。

- **SRQ3：金属の素形材産業において金属 AM 技術が直面する課題は何か？**

回答) 金属 AM 技術の普及の担い手となる素形材産業の川下レイヤーが素材製造に関する知識やノウハウが不十分であること。

- **MRQ：金属 AM 技術の普及プロセスにおいて、金属の素形材産業という社会システムの構造がどのような影響を及ぼしているか？**

回答) 既存の素形材産業の各レイヤーが保有する知識・ノウハウと、金属 AM 技術の普及に求められる知識・ノウハウの不整合という既存技術の普及と共に社会システム内に形成された知識・ノウハウの偏在と固定化が、新たなイノベーションである金属 AM 技術の普及を阻害する要因となっている。

5.2 理論的貢献

本研究では、これまでのイノベーション普及研究において事例の少ない B2B 向け生産財として金属 AM 技術の事例に挙げ、Rogers (2003) 他が示した社会システムとイノベーション普及の間にある理論の補強・拡張を試みた。社会システムについては Rogers (2003) や三藤 (2007) など幾つかの考察があるが、これら先行研究では社会システムを一つの群として捉えるマクロ的な視点で考察しており、社会システムの内部構造との関係を明示的に説明していない。社会システムの内部構造の影響については、建石 (2003) や具 (2008) が自動車産業におけるサプライチェーン構造の事例研究を行っているが、イノベーションの普及プロセスよりもイノベーション創出メカニズムに焦点が当てられており、社会システムの内部構造と普及の促進・阻害要因のメカニズムを明示的に説明していない。特に本研究の対象としている金属 AM 技術が普及することとなる素形材産業において、社会システムの構造やアクターの役割、又はアクターが有する知識との関係を明らかにした研究は、管見の限り見当たらない。

本研究では、金属 AM 技術の普及の舞台となる社会システム（素形材産業）の特徴及び有識者へのインタビュー調査から、金属の素形材産業という社会システムにおいて、既存技術の普及過程でレイヤー構造化し偏在した知識・ノウハウが、新たなイノベーションである金属 AM 技術の普及を阻害していることを明らかにした。これにより、前述した先行研究で示されたイノベーション普及理論を踏襲しつつ、イノベーション普及の導入期において、B2B 領域における社会システムの構造が持つ影響を提示できたことで、イノベーション普及理論における社会システムを中心とした理論の補強・拡張を行えると考ええる。

5.3 実務的貢献

金属 AM 技術に携わる企業や大学など関係者が当該技術の推進を行うにあたり、社会システム（素形材産業）における普及の課題を認識できることで、課題解決に向けた方向性（人材育成、人材補強、垂直統合的な研究開発あるいは他社とのオープンイノベーション等）を提示できたと考える。金属 AM 技術を推進する企業の多くは、本研究が示した既存技術によって形成された社会システムにおける素形材製造の知識やノウハウの不足に直面していると思われるが、その課題に対し、既存事業では社内育成が出来なかった人材の積極的な外部登用や異業種との積極的なオープンイノベーション等、具体的なアクションを検討することは、企業の実務者にとって有益であると考ええる。

また、素形材産業を事例として明らかにした知識構造やアクターの役割は、素形材産業のみならず他産業における新旧イノベーションの交替時に生起する普及の障壁として応用可能と考えられる点も実務的な貢献と考える。

5.4 本研究の限界と将来研究への示唆

本研究のインタビュー対象者は金属 AM 業界の全体像を考慮した合目的的サンプリング (purposive sampling) となるよう抽出したが、著者がアクセス可能な人物に限定されることや、人数が6名と若干少なかったことから、調査結果に偏りが存在する可能性がある。

また、本研究は素形材技術である金属 AM 技術を事例としたが、得られた知見を他の素形材技術の事例（例えば射出成形など）で検証することで、今回提示した知見の妥当性やその他の知見を得られると考える。また、今回は社会システムにおける知識構造とイノベーションの関係に着目したが、それらが時系列的にどのような変化を経て普及が進むのかと言った動的プロセスとしての検討も今後の研究課題の一つと考える。

参考文献

- Anderson C. (2012) “Makers: The New Industrial Revolution”, New York : Crown Publishing Group.
- Boyatzis, Richard E. (1998) “Transforming qualitative information: Thematic analysis and code development”, sage.
- Callon, Michel (1987) “Society in the making: the study of technology as a tool for sociological analysis”, W. Bijker, T. Hughes, T. Pinch (Eds.), The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology, MIT Press, London, pp. 83-103.
- Drucker, P.F. (1993) “The rise of the knowledge society”, The Wilson Quarterly, 17(2), 52+
- Dyer, J. H. and K. Nobeoka (2000) “Creating and managing a high-performance knowledge-sharing network: the Toyota case”, Strategic Management Journal, 21(3), 345-367.
- Fine, Charles. H (1998) “CLOCKSPEED”, International Literary Agents (小幡照雄 訳, 1999, 『サプライチェーン・デザイン』, 日経 BP 社)
- GE, <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/m2series5> (accessed 2021-07-25)
- Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. (2021) “Development of Additive Manufacturing Technology”, Additive Manufacturing Technologies. Springer, pp 23-51
- Giovanna Culot, Guido Nassimbeni, Guido Orzes, Marco Sartor (2020) “The future of manufacturing: a Delphi-based scenario analysis on Industry 4.0,” Technological Forecasting and Social Change, 157: 120092
- ISO/ASTM (2015) “ISO/ASTM 52900:2015 Additive manufacturing — General principles — Terminology”
- MONOist (2018) 『日本の積層造形の取り組みは周回遅れ、今から世界に追い付くには?』, <https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1808/10/news007.html> (accessed 2021-07-25)
- Pinch Trevor J. & Wieve E. Bijker (1987) “The social construction of facts and artifacts: Or how the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other”, The Social Construction of Technological Systems, The MIT Press
- PwC コンサルティング合同会社 (2020) 『3D プリンティングの未来：価値創出とビジネスモデル変革の可能性』
- Rogers, E. M. (1962) “Diffusion of innovations”, Free Press
- Rogers, E. M. (2003) “Diffusion of innovations”, Fifth Edition, Free Press (三藤利雄 訳, 2007, 『イノベーションの普及』, 翔泳社)

- Strauss, A., & Corbin, J. (1998) “Basics of qualitative research techniques”, Thousand oaks, CA: Sage publications
- Wohlers Associates (2019) “Wohlers Report 2019”
- 石出孝, 藤谷泰之, 久我和義, 畑中雅哉, 篠木貴文, 成田竜一 (2018) 「3次元金属積層造型技術実用化に向けた施工技術開発」, 三菱重工技報, vol.55 No.2
- 京極秀樹 (2014) 『金属粉末レーザ積層造形技術の進展』, 溶接学会誌, 83 巻, 4 号, p. 250-253
- 具承恒, 梶山泰生, 高尾義明, 久保亮一 (2008) 「系列型エコシステムの形成とプレーヤーの役割—日本の自動車産業におけるイノベーションシステムと技術移転」, 研究・技術計画学会第 23 回年次学術大会, 23 巻, 961-964
- 経済産業省 (2013) 『新素形材産業ビジョン策定委員会報告「新素形材産業ビジョン～我が国のものづくりを支える素形材産業、今後の目指すべき方向性を考える～」』
- 戈木クレイグヒル滋子 (2013) 『質的研究方法ゼミナール——グラウンデッド・セオリー・アプローチを学ぶ 第2版』, 医学書院
- 田中浩也, 齋藤和行, 守矢拓海 (2017) 「3D プリンティングにまつわる情報学的研究課題: データ標準化, 次世代モデリング環境, AI との連結」, 情報管理, 60 巻, 6 号, p.403-411
- 武石彰 (2003) 『分業と競争』, 有斐閣
- 田路則子 (2005) 『アーキテクチャル・イノベーション』, 白桃書房
- 土屋雅子 (2016) 『テーマティック・アナリシス法——インタビューデータ分析のためのコーディングの基礎』ナカニシヤ出版
- 日経 xTECH (2014) 『欧米から遅れる日本の 3D プリンティング』, <https://xtech.nikkei.com/it/article/COLUMN/20140520/558051/> (accessed 2021-07-25)
- 延岡健太郎 (2006) 『MOT[技術経営]入門』, 日本経済新聞社
- 原田勉, 米川進 (2000) 「NC 工作機械の技術普及: 旧技術による補完的效果」, 通商産業研究所 DISCUSSION PAPER SERIES, (0)
- ビジネス+IT (2020) 『取り残される日本、3D プリンターでの「1 兆円コスト削減」に消極的なワケ』, <https://www.sbbi.jp/article/cont1/37597> (accessed 2021-07-25)
- 松下隆 (2016) 「現代における三次元積層造形技術の普及 - 普及理論による考察 - 」, 産開研論集, 第 28 号
- 松下隆 (2019) 「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
- 檜原弘之 (2017) 「工程設計の立場からの付加加工の使い分け -直接製造と型製造-」, 日本機械学会 2017 年度年次大会
- 三藤利雄 (2007) 『イノベーション・プロセスの動力学 共組織化する技術と社会』, 芙蓉

書房出版

学界発表実績および予定

辻大輔, 内平直志 (2021) 「金属 AM(Additive Manufacturing)技術の普及に向けた課題」,
日本 MOT 学会 第 12 回 (2020 年度) 年次研究発表会 (2021 年 3 月 13 日)

辻大輔, 片山義則, 日野武久 (2021) 「金属 AM 技術の普及に向けて」, 溶接学会 2021 年
度春季全国大会シンポジウム「日本の AM 技術の取組みの現状と課題」(2021 年 4
月 16 日)

辻大輔, 内平直志 (2021) 「イノベーションの普及プロセスにおける社会システムの構造が
及ぼす影響 — 金属 AM (Additive Manufacturing) 技術における事例研究 —」,
研究・イノベーション学会 第 36 回年次学術大会 (2021 年 10 月 30 日発表予定)

付録

インタビューデータ

表 8 インタビューデータとコード一覧

切片番号	インタビューデータ	コード
A1-1	AM で製品を作っていくときの品質管理や保証ルールや具体的なプロセスがまだどの業界も手探り状態とを感じる。進んでいると言われる航空宇宙業界でさえ、ケースバイケースで判断している。ご存じの通り大量のパラメータがあり、造形プロセスだけ見ても駄目で、後工程の熱処理や表面処理も含めて評価する必要がある。	材料の品質保証プロセスや仕組みが未整備。
A1-2	製造原理が意外とまだ発展途上という気がしてる。例えば見た目は DED 見たいだが熱源にジュール熱を使って高速で造形する装置メーカーが出てきたり、バインダージェットイングとかも各社で少しずつ異なる原理が出てきてることを考えると、まだ完成した技術という風には思っておらず、恐らく世界中の関係者もそういう認識なのではないかと思う。	新たな製造プロセスも出てきており、全体として技術が発展途上。
A1-3	日本の製造業は品質トップレベルなのは間違いないが、それが災いしてか、品質に対する捉え方が他国よりも厳しい感じはする。特に品質レベルが安定している成熟した量産技術の品質とベンチマークしてしまうことが多く、AM の良い点よりも品質上の不安点がどうしても注目されてしまい、やっぱり今のほう、つまり現状の量産技術のほうが良いね、となってしまうている。ある意味ではオーバースペックで過剰品質なところもそのまま使っているの、そういった高いスペックに対する新しいテクノロジー特有の品質面でのビハインドがAM全体の評価を下げてしまっていると感じる。	日本では量産技術の品質と比較してしまうため評価が低い。
A2-1	航空宇宙業界は宇宙機器と民間旅客機のようなもので少し考え方が違うが、実績重視の業界であるため、一つの部品を作るのに、例えば民間旅客機であればボーイング等のプライムメーカーを筆頭に、認証機関である FAA 等も入って製造プロセスを検証していき、膨大な試験データを評価して AM 製造プロセスを固定化して認証することが必要であり、どうしても実績重視で見るところもあるので、検証期間や費用がかかる。	航空宇宙は実績重視なので新技術の適用に膨大な部品検証が必要。

A2-2	アプリケーションとして適した産業がその国に大きく存在するかも重要と思ってる。例えば航空宇宙は世界的にはAMのアプリケーションとして注目されているが、日本は欧州や米国ほど航空宇宙ビジネスが大きいとはお世辞にも言えない。日本の場合は民間プレイヤーが少ないので、例えば米国のように民間で安く人工衛星を上げるので、AMで軽量部品を作りましょう、というような話が起こりづらい。あと例えば旅客機だと日本も製造プレイヤーはいるが、全体の設計や重要部位の設計は欧米が握ってたりするので、なかなか上流の設計からAMを適用するような検討がやりづらい。	日本の航空宇宙市場がそこまで大きくないので、投資に慎重になる。
A3-1	AMは当然ながら素形材技術なので材料系の研究者やエンジニアは多く携わっているし知識もあるが、AMをどう使うかはアプリケーション側の問題なので、製品設計者がプロジェクトに深く関与しなくてはいけないが、どうしても材料を主軸とした研究になってしまい、製品適用した時のメリットとかの検討が疎かになってしまうことが多い。これは社内の普及啓蒙の話かもしれないが、一つには製品設計者がAMのことをまだよく分かっておらず知識が不足していたり、あるいは誤解していたりで具体的な適用事例を議論できる人が少ない感じもする。	材料研究者に比べ、製品設計者のAMに関する知識が不足または誤解している場合がある。
A3-2	素材のプロセスとしてAMを見ると、やはり最後は素材の品質保証という話になる。AMに携わると改めて実感するが、今まで素材というのは買い物だったということに気付かされる。今まで品質が保証されている材料を買ってきて、それに手を加えていたが、AMの場合は素材自体も自分たちで作るので、素材として求められる品質管理も自分たちでやる必要があるが、そういう知識や、そもそも素材自体の製造ノウハウも乏しいので、かなり手探りな状態でやっている。	社内に造形物の材料品質を管理・保証する知識、ノウハウが乏しい。
A3-3	AMはイノベティブな技術だが、一つの製造技術であり製品自体ではないので、例えば製品の一部にAMを適用したことによって製品全体にどのようなメリットがあるのか、経済効果はどの程度か、その投資回収を説明するのが難しい。	製造技術なので投資回収を上手く説明できない。
A3-4	社内で検討する時に、どうしても現実的な検討になってしまう。例えば、現場からはAMに対する不安感もあるが、どうしても既存の設計形状がAMで出来たら次に進もうという考えが多いが、本来は既存の製造技術で作れないものにこそAMの価値があると思う。	AMでなければ作れない構造や付加価値を見つける必要がある。

A3-5	製品設計と材料開発の一体化が必要で、社内で一貫してやらないと実用化までいかない。製品設計者をどう巻き込むか、特に製品設計者が最初は否定的なケースも多いので、材料や造形技術だけで進めるのではなく、製品開発の視点もしっかり入れて担当者もアサインして進める必要がある。	製品設計から材料開発まで社内で一貫した開発が必要。
B1-1	日本の会社や業界はその傾向が強いかもしれないが、大きな会社ほどチャレンジできる風土が無い、というかチャレンジする雰囲気が無い気がする。研究開発の現場でもそういう雰囲気があり、あまりにも凄いチャレンジをして失敗するより、小刻みにいくことが定石になってしまっており、チャレンジし辛いのではないと思う。私は大きな会社のことしか分らないが、経営層がAMをどう捉えているか、好意的に受けてめているか、AMを理解してくれているかが実働部隊の動きやすさに直結しており、もし経営層のAMに対する理解が乏しいと、アプリケーション開発は遅れてしまう。	企業内のチャレンジする風土や経営層のAMへの理解が欠如しており、アプリケーション開発が遅れている。
B1-2	日本全体でAM関連の人材が少ないと感じる。大学でAMの工学系教育を行えば、その人材が産業界で活躍して日本のAM人材の層も厚くなり、産学の連携も進むと思うので、人材育成を産学で意識して進めていく必要があると思う。	産学ともにAM人材が不足しており、大学でAM技術の人材育成を行い、産学連携を強化する必要がある。
B1-3	そもそもAMで出来ることに対する誤解があるケースが多いですね。社内のマネージャ層や顧客とか色々ですが、AMでなんでも出来ると思っているような酷いケースは少ないにしても、構造設計の制約とか材料の制約とか現実的なところは意外と理解されていないことが多く、その誤解を解くことから始まることが多い。	AMで出来ることに対する誤解がある。
B1-4	AMの製造プロセスで特に造形や後工程の熱処理も入れた一連のプロセスは、大量の製造条件があり且つ現象として良くわかっていないことも多く、条件を最適化するのに多くのテストをやって結果との相関データなど蓄積が必要であり、膨大な時間と労力が必要なので、AMをやられている企業は品質を気にしている場合はかなり苦労されていると思う。	製造条件の最適化に膨大な時間と労力が必要。
B1-5	AMは材料、プロセス技術、表面処理、シミュレーション、構造最適化など構成している要素技術が幅広いので、AMを実用化しようと思うと既存の要素技術だけではない横断的な知識が	AMは材料、プロセス技術、表面処理、シミュレーション、構造最適化など多数の要素技術で構成され

	求められる。私も専門と全然違うことを覚えたりしました。勉強のし甲斐があって面白いですけどね。	ており横断的な知識が必要。
B1-6	良くあることだが、AM は複雑微細なものが得意で単純なものを作っても意味ないですよ、と分かっているが、結局トライするアプリケーションは単純なものでまず評価してみよう、ということになってしまうケースが多く、結局 AM のメリットを訴求できなくて頓挫するケースが多い。既存の製品から AM 設計に変える難しさの表れとも言えると思う。	出来そうなものからトライするのでメリットが訴求できないジレンマがある。
B1-7	ソフトウェアの進歩が非常に大切だと思うし、ここ数年進歩している分野はハードよりもソフトウェアだと感じる。DfAM を実際にやるには具体的な構造設計ソフトが今よりもっと実用的になる必要があるし、造形中のプロセスシミュレーションも、今の市販ソフトは実態と合ってるかと言われると微妙なので、もっと実用性が増す必要があると感じる。使いやすくなれば、一気に広まると思う。	構造設計ソフトや造形プロセスのシミュレーションが今後より実用的になる必要がある。
B2-1	アプリケーション開発をする段階で、材料や設計仕様を既存の仕様から持ってくる実績重視なところがあり、前の設計を踏襲する設計のルーチ的な慣習がある。それが悪いことはないが、AM みたいに新しい技術の時は実績重視の文化が邪魔してしまう。AM 用に仕様を変えていくことを前向きに考えないと成立しないですね。	材料や設計仕様を実績重視で選定する慣習がある。
B2-2	材料の品質管理をするノウハウが社内にないので、今後そういう人材を育てないといけないのは課題である。粉末の状態の管理もそうだが、造形によって出来る素材は今後製品として使っていくにはどういう品質管理が必要なのか、業界によっては素材の製造管理に関するノウハウ自体が乏しいと思うので、苦労していると思う。サービスビューロさんとかも材料メーカーかというところではないと思いますし、苦労されていると思う。	社内に材料の品質管理ノウハウが無い。
B2-3	素形材の産業で、例えば元々は機械加工をやっている受託メーカーが AM 装置を導入して造形受託サービスをやっているという感じで最近ではサービスビューロも増えてきたが、まだまだ絶対数が少ないのと、特に機械加工の感覚でやっているところは素材の技術的な知識が少ないので、実力が不足しており、製品のサプライチェーンに組み込める実力があるようなサービスビューロはごく一部と感じる。	素形材産業の中で AM のサービスビューロ等のサプライチェーンが脆弱。

B3-1	AM は色々な技術の集合体であり、且つアプリケーション開発も必要なので、例えば研究所の組織が既存技術をベースに作られた縦割り組織であったり、工場組織がそうであったりすると、横断的な活動が取りづらく個別最適化するので、AM の推進に苦勞する。	既存技術を前提に作られた縦割り組織では AM 推進が困難。
B3-2	AM の課題でも言ったが、造形条件の最適化に多くのトライ＆エラーが必要であり、ある程度のお金と時間が必要。社内でも色々な分析手法や最近では AI を活用したりしており、やり始めた頃に比べるとかなり合理化してきた感じはするが、まだ研究のレベルを脱していない感じがする。	造形条件の最適化には多くのトライ＆エラーが必要。
B3-3	造形プロセスには多くのパラメータがあり、最終的に望む品質を達成する必要があるが、パラメータの多変数分析や、メルトプールの大量の画像データのディープラーニングによる分析など、材料屋の知識とは異なるデータサイエンスのノウハウが本格的な AM の取り組みには必要と感じる。	造形プロセスの最適化にデータサイエンス人材やノウハウが必要。
B3-4	社内的な投資回収のネゴかもしれないが、装置のコストが1億円以上するのは、やはり簡単に投資承認を得るのは難しいと思う。すぐに生産に使える設備というよりは、まだ研究開発用という感じでもあるし、少なくとも弊社の感覚からするとすぐ投資決定されるような金額ではないのは確か。	装置が高額で簡単に投資できない。
B3-5	弊社の事情だが、一部の経営層に AM に対する懐疑派がいて、社内的に大きな稟議を通したり開発プロジェクトを進めるのに苦勞している。応援してくれている人もいるので色々だが、経営層の巻き込み方が難しい。	社内の経営層に懐疑派がいて、投資や開発の推進力が弱い。
C1-1	これは AM の特徴かもしれないが、造形速度は今後も劇的に伸びることはないでしょうし、装置や粉末の金額も劇的に下がることもないと考え、やはり現状の製造コストはかなり高いというのは事実だと思う。自動車でも少量の高級車種をまずはターゲットにしていたり、他の業界でもまずはコスト的な現実の壁はかなり大きいと思う。いきなり現実的な話で申し訳ないが、コスト的に検討を断念するケースが一番多いと思う。	装置や粉末が高額で、生産速度も遅いため製造コストが高い。
C1-2	適用する製品を検討する際に重要になってくるのが、AM で作る価値があるかどうかだが、この視点が実際の検討では欠如しているケースが多いと感じる。Design for AM を十分に理解したエンジニア自体もかなり少ないが、AM のメリットを生かし	DfAM の視点が欠如してメリットを訴求できない。

	た設計提案が出来ず、AM を使う必要性を示すことが出来ないでいる。	
C1-3	AM や中長期的な視点で取り組むべきテクノロジーであり、そういう場合にマネージャ以上の管理職クラスがしっかりと AM を理解して開発ロードマップを作る必要があるが、現場はある程度 AM の知識があって現実的な開発ビジョンがあるのに対し、その上の管理職クラスがフワッとしており、強いビジョンがないことが多いと感じる。	AM に対する理解がマネージャ以上の管理職クラスに不足している。
C2-1	自動車業界は車種にもよるが、コスト削減が現実的に求められているので AM の適用検討が少なくとも現時点ではかなり限定的になっている。過去に工場側と適用検討を何回もやっているが、製造コストの問題があり、適用に至らなかったケースが多い。	製造コストが高く適用に至らないケースが多い。
C2-2	自動車はサプライチェーン全体から部品を調達し完成車を作っているが、仮に AM 部品を適用検討しようとなった時、私のような完成車メーカーは部品の仕様を決めることは出来るが、実際に社内で部品製造をやっている訳ではないので、その製造ノウハウ、特に素材の製造ノウハウを持ち合わせていないので、開発ハードルが非状に高い。部品サプライヤーも素材を自社で作ったことが無ければ、同じような課題があるが、圧延材をやっている素材メーカーや材料問屋が AM 部品を製造するのは今やっている素材ビジネスとかけ離れ過ぎててやらないので、サプライチェーンの中で部品メーカーや完成車メーカーが主体となって AM 開発をやっている。	系列サプライチェーンの中で素材の製造ノウハウが十分と言えない企業が AM をやらざるを得ない。
C2-3	自動車だけでは無いかもしれないが、AM の成功体験が業界全体で共有されておらず、そういった情報をオープンに発信していくコミュニティや団体があると望ましいかもしれない。	DfAM の成功体験が業界全体で不足。
C3-1	AM は幅広い技術領域の人を巻き込む必要があるが、AM のプロジェクトに必要な人材が必ずしも社内にはないケースがある。例えば、装置で造形をするエンジニアは確保できるが、データ分析をするような人材がいないなど。	AM は幅広い技術で構成されるが、社内に必要な人材を必ずしも確保できない。
C3-2	新しい技術なので、課題もいっぱいあるし失敗ばかりで批判も出るが、それに負けない、決して諦めない強いプロジェクトリーダーが必要。これは AM に限ったことではないが、長期戦を	決して諦めない強いプロジェクトリーダーが必要。

	戦わないといけないので、経営層との折衝や予算獲得など開発以外の泥臭いことも引っ張っていくリーダーが必要。	
C3-3	少し穿った見方かみしませんが、経営層がAMのデメリットばかり見て長期的な可能性を無視している、というか見ようとしていない感じがしますね。これはAMだけではありませんが、経営層がAMに対して悲観的な場合が多いような気がする。	経営層が悲観的な場合が多い。
C3-4	自動車の場合、部品のサプライチェーンを構築することが将来的には求められるが、現状のサービスビューロの実力や規模を考えると、まだサプライチェーンが成立するような規模ではない。これはまだ本格的なアプリケーション適用がこれからなので鶏と卵だが、自動車産業以外の用途も含めてサービスビューロのニーズが増えてサプライチェーンが成立するかはAM業界全体にとって重要と思う。	将来的にはサプライヤーから調達したいが、AMのサプライチェーンが未発達。
C3-5	社内の課題は色々あるが、AMの素材の品質管理を行う人材やノウハウが現状では不足している。後々で事故が起こるときは、理由が材料に関する時も多いので、社内ですっかりとそれが管理できる人材育成とノウハウ蓄積が必要。	社内に素材の品質管理の人材やノウハウが不足。
D1-1	展示会でいろんな問い合わせがあるが、正確な情報を持っている人はごく一部のAM業界関係者だけで、そうでない企業の方には正しい情報が認知されていない。設備や材料の制約もあるし、設計的な制約もあるので、我々としては正しい情報を伝えるよう、現物を見て貰ったりして体験してもらっている。	技術的な情報が正しく認知されていない。
D1-2	サービスビューロとしていろんな製品を造形させて頂いているが、依頼のある製品の多くは、AMで作らなくても作れてしまう、ちょっと言い過ぎかもしれないが、AMでやる必要性があまり感じられないものが実態としては多い。これはまずAMの実力を見ようという意図があるので仕方ない面もあるが、既存製品の単純な置き換えが多いので、AMのメリットが出ないため、検討が尻すばみしてしまうケースが多い。	既存製品の置き換えで検討するためメリットが出ない。
D1-3	色んな製品を造形試作するが、製造コストを評価して貰ってペイできる製品はかなり少ない。小型で複雑形状で、その部品を使うことで全体にメリットがあるような部品を抽出しないといけないので、ユーザの方はいつもアプリケーション選定を苦労されている印象がある。	製造コストが高いため、コスト的にペイできる製品が少ない。

D2-1	ユーザの方から持ち込まれる案件が、元々が機械加工品や鋳造品であることが覆く、その時の表面粗さや機械強度と言った品質要求事項と同じスペックに出来るか？という問い合わせがあり、色々と試行錯誤するがAMのデメリットばかり目立ってしまい、検討が進まないことが多い。発想を変えて貰ってAMのメリットを生かした設計仕様に変更して貰うよう呼びかけている。	製品の品質要求が機械加工や鍛造品質を踏襲するケースが多く、適用の検討が進まない。
D2-2	装置を導入して貰うユーザの声をヒアリングすると、やはり装置コストが高いことは未だに設備投資の検討をする際にネックになっているという声が多い。確かに一般的な工作機械の倍以上するので、特に中小企業の設備投資として見るとかなり大きな買い物と感じる。また、ランニングコストで製造原価にも効いてくる粉末コストも、例えばステンレス系で標準ラインナップの粉末でも1kg1万円台で高いという声はある。	装置や粉末が高額なので、特に中小企業は設備投資に踏み切りづらい。
D2-3	製造プロセス全体の中にAMを組み込んだ場合、品質評価の手法やガイドライン等をどう整備するかは、ほとんど全てのユーザでまだ検討が深掘りされていないと感じる。これは我々の課題でもあるので、ユーザと一緒に検討をサポートしているが、具体的なアプリケーションを設計から製造までスルーして評価して確立していくことが必要と思っている。	製造プロセス全体の品質評価の手法やガイドライン等が未整備。
D2-4	ユーザが苦労されているのが、3Dデータ等を扱うスキルや知識が思っている以上に必要だということ。部品を3Dでモデリングしたり、造形するためにサポートを設計したりと造形の前にデータを扱う作業がかなり多く、一般的な工作機械よりもオペレータやエンジニアの方がデータを扱うスキルが必要と感じる。	一般的な工作機械よりも3Dデータ等を扱うスキルや知識が必要。
D3-1	装置の導入を検討頂く際に、現場の方はかなり前向きなんですが、社内の経営層の懐疑派の説得に苦労されてますね。結局は投資の決定権を持つ人に必要性を理解してもらわないといけません、不幸なことにAMのビジネスに対して懐疑派がいるケースも結構あります。	AMのビジネスに対して経営層に懐疑派が存在する。
D3-2	AMを本格的に活用して貰うためには、材料やプロセス技術、3Dデータ編集など必要な知識やノウハウを一通り習得しないといけないので、すぐに使いこなしているユーザは少なく、皆さん実際にやりながら少しずつ覚えていってます。話を聞くと、やはり普通の工作機械よりオペレータの人は覚えることが	材料やプロセス技術、3Dデータ編集など一通り習得する必要があるため人材育成が必要。

	多くて、半分エンジニア的なこともやる必要がありますので、そういった人材育成の点は苦勞されていると思います。	
D3-3	弊社のサービスビューロ事業は受託造形や設計検討をやっていますが、材料評価は今のところノウハウがほとんど無いので、外注の検査会社を使って対応しているが、材料の分析をやりたいという依頼も結構あるので、仕事の幅を広げるために社内で材料評価が出来るように人材を育てていく必要があると感じてる。	材料評価のノウハウが無い ため、外注化しているが 社内の人材育成が必要。
E1-1	AM で作るアプリケーションがどれだけ魅力的に設計できるかが鍵だと思うが、よく言う Design for AM の設計ツールがまだ改善の余地が大幅にあると思うし、評価した限りだとまだ実用的にバリバリ使っていけるレベルのソフトという感じは正直しない。悲観的な意見ではなく、凄い可能性を感じているし、大変面白いと思うが、現状はまだ色んなパラメータを調整しつつ結果を評価する必要があるので、そこら辺のデータ蓄積が今後進めば、実際に多くの設計者が使っていくツールになると思う。	魅力的なアプリケーションを作る DfAM のツールが実用的なレベルに達していない。
E1-2	AM のアプリケーション開発には、製品の設計技術や AM の造形技術、後処理の表面改質処理など多くの技術を連携して作り込む必要があるので、企業内で組織を横断した開発が必要。少人数で良いので、各部門からキーマンを出すような小回りの利くチームで進める必要がある。	設計技術、造形技術、後処理など連携した組織横断的な開発が必要。
E1-3	欧米に比べると、日本の AM 人口は少ないというのは、海外と国内の展示会の様子とか学会の様子を見てても感じる。最近は日本もだいぶ注目されてきており、装置の導入台数も伸びて来たが、他の技術に比べると絶対数は凄いで、我々ももっと宣伝しないとイケないが、これから日本が AM で頑張るためには日本人の AM 人材をどれだけ育成できるかにかかっていると感じる。	日本は AM 人材の絶対数が足りていない。

E2-1	日本は工作機械メーカーがAM装置のビジネスをやっている場合が多くて、工作機械で培ったメリットを活かせる点はアドバンテージで、特に加工と組み合わせたハイブリッド方式は日本の独自路線が出てる。ただ、工作機械業界は一般的には素材を削ることに長けているが、素材をゼロから作ることに関しては、正直、知識やノウハウが無いので手探りで開発している。素材が健全に造形できているかを材料の視点で評価することは工作機械メーカーは元々関心が無かったとかやってこなかったことなので、ユーザが望む材料品質を提供できているかという、必ずしもそうとは言えないと思っており、今後の課題と思っている。	工作機械は素材を削る業界なので、ゼロから素材を作ることにに対して知識やノウハウが無い。
E2-2	工作機械の延長線上で売るという思想があまり宜しく無いというのは認識しているが、結果的に工作機械を持っているユーザが顧客となるケースが多い。そういうユーザは、AMの造形精度が機械加工に比べ劣るのは理解しているが、そもそも機械加工の精度に慣れているので、AMの使い道が思ったよりも難しいことに導入してから気付くケースもあり、模索しながらやっている印象がある。	従来の工作機械の顧客は機械加工の精度に慣れており、AMの使い道を模索している。
E2-3	弊社でやっているレーザのPBF方式は、各社で特色があるように見えるが、ハードの構成要素は技術的にはある程度成熟してきた感じはする。大きな原理はそこまで変わらない。一方で、ユーザの使い易さに直結するソフトウェアはかなり改善の余地があると思ってる。例えば造形プロセス中の大量のデータを分析して装置の故障予測をしたり、次回の造形の条件案を提示したりとユーザの使い勝手が向上するポテンシャルはまだ大いにあると思っている。	装置のハード面はある程度成熟してきたが、データ分析などソフトウェアの改善による進歩が必要。
E2-4	装置を購入頂くメーカーは機械加工メーカーが多いが、素形材を製造するというのに慣れていないので、今までの機械加工部品を販売するのは、ちょっと勝手が違うという話を聞く。つまり部品の形だけ出来ればOK、というお客さんなら良いが、実際はそんな顧客は試作レベルでもほとんどいなくて、材料品質のデータが欲しいとか、強度の実績データが欲しい等、素材としての仕様が気にする顧客がほとんどだが、そういうことに答えられるAMユーザはごく一部だと感じる。	機械加工がメインのユーザにとって素形材製造のハードルが高い。

E3-1	弊社としても AM 装置の事業は新規事業だが、小さなベンチャーではないので、経営判断をもっと柔軟にして、時代のニーズを敏感に汲み取っていくようなスタンスでいかないと今後はまずいと思っている。どうしても既存事業の経営スピードや商習慣のバイアスがあって、いつもそっちに引っ張られてしまうので悩ましいが、新規事業として相応しい事業の運営スタイルで行く必要があると思ってる。	新規事業としての柔軟な経営判断が必要。
E3-2	我々は装置メーカーなので、粉末メーカーやアプリケーション業界など異なる業界とオープンイノベーションをもっと積極的にやっていないといけないと思っている。特に、顕在化してないニーズを掘り起こすことは装置販売に直結するので、アプリケーション業界の関係者とは定期的に意見交換をしたり、試作評価をしたりしているが、より積極的な異業種とのオープンイノベーションが必要。	異なる業界との積極的なオープンイノベーションが必要。
E3-3	従来の工作機械を扱うのに比べ、操作する装置オペレータやエンジニアがデジタル技術に精通していて、3D データの作成や編集とか、造形結果のデータ処理とか、3D スキャン作業とかのスキルが求められている。従来の工作機械は、設計図面が CAD 図とかデータであったとしても、それがそのまま製造に使われるケースは意外と少なかったが、AM の場合はデジタルデータが無いとそもそも何も始まらないので、デジタルフレンドリーな人が求められている。	従来の工作機械に比べオペレータやエンジニアがデジタル技術に精通している必要がある。
F1-1	従来設計にとらわれない発想で、機能的なアプリケーションを作っていくことが必要と思っている。トポロジー最適化など色んなソフトメーカーから出始めているが、具体的なアプリケーションとしてのニーズはやはり現場で製品を扱っている人が持っていると思うので、強力なキラーアプリがあれば、それが突破口になると思う。	従来設計にとらわれない機能的なアプリケーション開発。
F1-2	実際の製造プロセスや設備がどんな感じで、どういう付帯設備が必要なのかや、造形後にどういう処理が必要なのか等、実際の造形作業を経験する機会が少なく、知識はあるけど、まだ見たことがないという人も意外と多い。実際に造形作業を体験すると、粉末や造形物の課題も見えてくると思うが、やはりまだ日本国内に体験する場が少ない気がする。	造形作業を実際に体験する機会が少ない。

F1-3	造形プロセスを考えると当然だが、粉末と段階とそれを焼結した後の造形物の特性は当然異なるので、装置を持っているユーザは自分で材料をある程度評価する知識やノウハウが必要になってくる。造形中の不活性ガスが溶融金属に巻き込まれて成分に影響したり、そもそも粉末の時の金属組織と造形後のそれは全く異なるので、AM 材としての評価が必要になってくる。	粉末の段階と造形後で素材としての特性が変わるため、ユーザには材料を評価する知識やノウハウが必要。
F2-1	弊社は所謂、素材メーカーだが、現在メインの事業である素材の製造と販売はかなりのボリュームがあるのに対し、AM 用の粉末は一回に必要な量が数十 kg から百 kg 程度と少ないので、今後どの程度の規模のビジネスになるのか業界全体でも不安視する声はある。社内でもいろんな意見がでていますが、従来の素材ビジネスとはボリューム感がかなり違うが、現時点では大口顧客を探しているようなフェーズなので、仕方ないとは言える。	従来の素形材事業と比べ生産量が少ないため、将来の事業性を不安視する意見もある。
F2-2	造形する際の製造条件は粉末メーカー毎の特性によって一から評価する必要があり、製造条件と粉末特性の関係も複雑なので、ユーザ自身でのデータ蓄積が必要ですし、条件出しの最適化は苦労されていると思います。それが品質維持にも直結するので、コストがかかるが今のところは結構泥臭くやっていると思います。	製造条件と粉末の関係が複雑であり、最適化や品質維持にコストがかかる。
F2-3	粉末メーカーの業界としては、やはり粉末コストの高さをユーザから指摘されるので、その対策として材料の歩留まり改善を色々取り組んでいる。ただ、原理的に限界はあるので、取れる粒径サイズを DED やレーザー PBF、EB-PBF など各方式用に取りすることで、歩留まりを上げる等に取り組んでいる。	製造コストの低減に向けた材料の歩留まり改善。
F3-1	装置メーカーとコラボした材料開発や、ユーザ企業と共同で特性評価をもっとやっていく必要があると思っている。なかなか粉末を使ってもらってるユーザの声が入ってこないの、具体的な課題を把握できていない時がある。オープンイノベーションはオープンとクローズの線引きが難しいが、最近はずっとワーク軽く動くよう心掛けています。	装置メーカーやユーザ企業と連携したオープンイノベーションが必要。
F3-2	既存の素形材事業も顧客ニーズは大切だったが、AM 用の粉末ビジネスは、よりユーザ企業のアプリケーション動向や課題に沿ってビジネスを展開しないとなかなか上手くいかない。懐に飛び込んでアプリケーションの開発を一緒にやるくらいの感じが必要。	従来型の素形材事業よりユーザ企業の懐に飛び込んでアプリケーションのニーズを開拓する必要がある。

F3-3	弊社は粉末という形で AM に携わっているが、造形性や材料特性を評価するために装置も入れており、なるべくユーザの課題を理解しながら進める体制を取っている。ただ、粉末製造に詳しい人間はいるが、やはりアプリケーション寄りの話は人材がないのでユーザと付き合いながら吸収していった。社内で AM の横断的な知識を持った人間が今のところ少ないので、そういった人材育成を進めて、ユーザへ価値提案できるような営業ができる体制にしたいと思っている。	社内で AM の横断的な知識を持った人材の育成が必要。
------	---	------------------------------------

謝辞

本研究を纏めるに当たり、小生の主指導教員である JAIST 内平先生には学界投稿論文の査読や本稿の研究指導など多くの指導を賜り、修士論文の形で纏めることが出来ました。この場を借りて深く感謝の意を表明致します。また、材料関係のイノベーション技術ということで、JAIST 佐藤治先生には様々なアドバイスや示唆を頂き、本稿の研究着目点を構築することが出来ましたことを、この場をお借りして感謝申し上げます。

また、その他 JAIST 教員の皆様、内平研究室のゼミで議論頂けた研究室メンバーの皆様、共に学ぶことが出来た東京社会人コースの皆様から頂いた助言や指導、その存在が、本稿を纏める大きな原動力となりましたこと、誠に感謝致します。

また、大学院における研究生活を全面的に支えてくれた家族に、心から感謝します。

本研究は、小生が公私共に没頭している Additive Manufacturing (3D プリンティング) を今一度学術的な視点で見つめ直し、テクノロジーと社会を科学的な観点から捉えるという大変貴重な経験と得ることができました。本稿の執筆に当たり、AM技術業界の関係者、特にインタビューの機会を頂いた方々には、大変貴重なご意見を賜り、本研究を纏めることが出来たことを、この場をお借りし感謝申し上げます。