

Additive Manufacturingがサプライチェーンに 及ぼす影響に関する研究

—データが動く時代のサプライチェーン—

道 用 大 介

アブストラクト：

本論文では、3Dプリンターを用いた製造方法である Additive Manufacturing を導入することによりサプライチェーンがどのように変化するかを考察した。デジタル生産時代の設計・生産・消費の距離という観点で物理的な移動とデータの移動に着目し、Additive Manufacturing の技術・環境が普及すれば、サプライチェーンの中でのデカップリングポイントは状態と場所という2つの側面が鮮明化され、問題のレベルは投機・延期の問題から原材料と3Dプリンターをどこにどれだけ配置するかという場所と量が中心の単純な問題に置き換わることを指摘した。また、3Dプリンターの「造形物の多様性を実現する工作機」としての側面だけでなく、「ネットワークの末端に位置する出力装置」としての側面（生産端末としての3Dプリンター）を指摘し、消費者が設計データをダウンロードして3Dプリンターで出力するスタイルを End User Manufacturing と定義した。さらに、COVID-19下において本研究の一環で公開した設計データを利用して、4ヶ月間で少なくとも49,072個のフェイスシールドが3Dプリンターを用いて生産された事例をもとに End User Manufacturing の可能性を指摘した。

キーワード： Additive Manufacturing、3Dプリンター、サプライチェーン、
End User Manufacturing

1. はじめに

1-1. Additive Manufacturing とは

立体物の加工は加算的に材料を積み上げていく Additive Manufacturing（付加加工）と減算的に材料を削り取っていく Subtractive Manufacturing（除去加工）、加工材料に力や熱を加えて変形させることで成形する変形加工に大別できる。本研究で取り扱う Additive Manufacturing は ASTM（American Society for Testing and Materials）で次のように定義されている^[1]。

材料を結合させ層の上に層を重ねることにより3Dモデルデータから立体形状を製造するプロセスであり、通常は除去加工法と対比される

なお、3Dプリンティングと Additive Manufacturing（以後AMとよぶ）は、ほぼ同義語として使用されており、本研究でも同義語として扱う。

1-2. ものづくりのパラダイムと

Additive Manufacturing

Chenらは、ものづくりのパラダイムを次の4つに分類した^[2]。

- Craft manufacturing
- Mass manufacturing
- Mass customization
- Direct digital manufacturing

企業視点においては、AMはMass customizationで活躍するであろうと考えられていた^[3]。実際にSmile Direct Club(米国)は3Dプリンターを使って24時間体制で顧客に合った口型を作り、その口型を使って歯列矯正具を製造・販売している。また、FitMyFoot(米国：旧Wiiivv)は個人の足に合わせたインソールを3Dプリンターで製造し、販売している。このように顧客によって異なる加工が必要な製品においてAMは有用であると考えられていたが、近年はMass manufacturingに使われ始めている。例えば、BMW(ドイツ)のi8 Roadsterという車種のドア後部に搭載されているウィンドウガイドレールの製造には3Dプリンターが使われており^[4]、フォルクスワーゲン(ドイツ)もシフトレバーなど強度がそれほど必要のない部品からAMでの大量生産を検討している^[5]。ランボルギーニ(イタリア)は2万点以上の3Dプリントされた最終部品を量産車両に採用した^{[6][7]}。航空業界では3Dプリント品が既に最終製品に使われ始めている^[8]。

1-3. 本研究の目的

前節で示したように、近年AMがMass customizationだけでなくMass manufacturingで使用され始めている。本研究はMass manufacturingでの利用も現実的になってきたAdditive Manufacturingがサプライチェーンに与える影響を考察することを目的とする。

2. Additive Manufacturingの概観

本章では3Dプリンティングの方式と、3Dプリントのデメリット・メリットなどに関して概観する。

2-1. 主な3Dプリンティング方式

• 熱溶解積層法／FDM

樹脂を熱で溶かし、ソフトクリームのようにノズルから押し出して積層造形する方式である。3Dプリンターの構造がシンプルであり、2009年の基本特許期限切れに伴い小型化・高性能化・低価格化が急速に進んでおり、入手しやすい。そのため現在、個人用として流通している3Dプリンターの多くはFDM方式のものである。サポート材の除去以外の後処理は必要ないため手軽である一方で、表面の積層痕が目立つ。

• 光造形方式 (SLA)

古くからある造形方式で、敷き詰められた液状の光硬化性樹脂の造形したい部分に紫外線レーザーを照射し硬化させるプロセスを一層ずつ繰り返して積層造形する方式である。FDM方式より表面は滑らかになり、精細な仕上がりになる一方で、造形後に洗浄や硬化などの後処理が発生する。近年はFDM方式の3Dプリンターとほぼ同価格帯の個人向けのSLA方式のプリンターも流通している。

• マテリアルジェット方式

インクジェットヘッドを使って光硬化性樹脂を噴射して、紫外線で固めながら積層造形する方式である。高精細で精度は高いが、SLA方式同様に後処理として洗浄が必要である。また、FDM方式やSLA方式のように小型の3Dプリンターはなく、主に産業用である。

• バインダージェット方式

粉末素材にインクジェットヘッドを使って

バインダーとよばれる結合剤を噴霧して一層ずつ固めて積層造形する方式である。バインダーに着色することでカラー表現ができた。造形速度が速いという特徴がある。残った粉末の後処理が必要であり、主に産業用である。

• 粉末焼結積層方式 (SLS)

敷き詰められた粉末状の素材の造形したい部分にレーザーを照射して焼結するというプロセスを一層ずつ繰り返して積層造形する方式である。金属素材を扱うことができ、造形物に耐久性がある。主に産業用である。

2-2. Additive Manufacturingの問題点

以下に示す3点は品質や生産性に影響を及ぼすAMの一般的な特徴である。

1) 異方性

3Dプリンターは、1層ずつ積層しながら造形するため、積層方向 (Z方向) に引張力がかけられると、積層面が剥離しやすいという異方性が存在する。

2) 造形速度

一部の造形方法を除いて、3Dプリンターは基本的には立体物をスライスした断面を線で塗りつぶす様に、積層していくため、造形時間は長く、プリントヘッドが動く距離が長いほど造形時間は長くなる。本研究の予備実験として、同じ形状のものを射出成形と家庭用のFDMプリンターを使って造形したところ、射出成形では1個あたり約30秒、家庭用のFDMプリンターを1個あたり約60分かかった。

3) 造形精度

焼結を伴う3Dプリンティングでは温度変化による素材の収縮があり、正確な精度を必要とする部品には機材の特性を考慮した設計が必要となる。

2-3. Additive Manufacturingの

設計・製造面でのメリット

前節ではAMの問題点を挙げたが、本節では設計・製造面でのメリットを列挙する。

1) 金型を作るコストの削減

金型を作る必要がなくなるため、金型の製造・管理にかかっていたコストの削減が期待できる。

2) 金型による設計制約の解消

AMでは複雑な形状の部品を製造できる。そのため、金型を使った製造で別々に作って組み立てている部品でも、AMでは既に組み立てられたような形状で設計・製造することが可能である。それにより、部品点数を大幅に削減したり、部品管理工数も削減される。

また、ラティス構造やトポロジー最適化によって複雑かつ強度を保った設計が可能になるので部品の軽量化を図ることができる。ラティス構造とは3次元格子を連続的に並べた構造のことであり、トポロジー最適化とは、CAD上にある3Dモデルをベースとして、他の部品の干渉する空間、固定すべき位置、荷重負荷などの制約条件を設定することによって、形状の最適化を行うものである。

3) 設計変更の容易性

金型を作る必要がないため設計データの変更を容易に反映できる。

4) 生産柔軟性

3Dプリンターは一種類の形を作るための専用機ではないため、量産するための専用設備・ツールの設計開発が不要になる。そのため、生産の立ち上げが容易であり、生産柔軟性が高くなる。

5) 開発から量産への円滑な移行

試作制作を3Dプリンターで行い、その後の量産も3Dプリンターで行えば、量産への

移行が円滑になる。

6) 材料廃棄の削減

除去加工は造形された箇所以外の部分は廃棄となるが、AMは必要な造形だけを行うので、廃棄される原材料が削減される。

7) 工場の省人化

トラブルが発生しなければ、3Dプリンターを動かしてから停止するまでの間、人が張り付く必要はないので、工場の省人化が期待できる。

8) 開発リードタイムの短縮

射出成形や鋳造などのように金型をつくる必要がないため開発リードタイムを削減できる。そのため、市場投入を加速させたり、生産の延期戦略をとることができ、直前まで設計に時間を使えるというメリットがある。

9) カスタマイゼーションへの対応

3Dプリンターは様々な形を造形できるので、注文ごとに異なる形状のカスタマイゼーションに対応できる。

2-4. 効率化に関する周辺技術

本節ではAMのオペレーション上の生産性を向上させる可能性のある2つの周辺技術について取り上げる。

1) 製造準備リードタイムの短縮

3Dプリンターの生産性を向上させるためには、一度の稼働でどれだけ多くの部品や製品を製造できるかが課題の一つである。これは、大型の3Dプリンターにどれだけ多くのものを詰め込めこんで製造できるかという問題である。単純な形状の造形物を複数製造であれば、規則正しく並べて整列させればよいが、複雑な形状の異なった種類の造形物を一度に製造する場合は、3Dプリンター内での効率的な配置を考える必要がある。そのため、

限られた造形エリアの中で造形物を効率的に自動配置するシステムも開発されている。

2) データ作成の工数削減

AMの長所の一つとして、カスタマイゼーションへの対応が挙げられたが、形状が異なる部品の場合、各注文に対して設計に時間がかかるという問題も生じる。この設計リードタイムの問題に対しては、ジェネレーティブデザインなどの技術が確立されつつある。ジェネレーティブデザインとは、制約条件、材料、製造方法等を指定し、ベースとなる3Dモデルがない状態から、自動的にいくつかの形状の候補を生成する技術である。

2-5. SCMという観点での

Additive Manufacturing

AMの設計・製造段階でのメリットについては前述したが、サプライチェーンという観点で考えると次のようなメリットが考えられる。

1) サプライチェーンのスリム化

インターネットを介してデータを移動させ、必要な場所で部品や最終製品を製造できるため、サプライチェーンの工程を削減することが期待できる。

2) 需要に応じた生産による在庫費用の削減

一個作りが可能のため、需要に応じた生産量の調整が容易になり、在庫費用の削減が期待できる。

3) 製造拠点の分散

3Dプリンターという汎用的な工作機を使った製造は場所を選ばない。例えば都市部の狭い場所でも製造が可能のため、製造拠点を分散し消費地に近い場所で製造することも可能であると考えられる。ただし、組立工程が存在する場合は製造拠点の分散は限定的となる。

4) 物流コストの削減

物理的な部品の移動の代わりにデータを移動させることができるため、使われる場所の近くで部品を出力することで、物流コストの削減が期待できる。

以上のように製造コストだけでなくサプライチェーン全体のコストを考えると、AMの導入は場合によっては大きなメリットが得られると考えられる。逆説的に考えると、AMのメリットを最大限に活かそうとするならば、製造現場だけでなく設計から配送までのサプライチェーン全体で考えるマクロ的な視点が必要である。

3. デジタル生産時代の

Additive Manufacturing

本章では設計情報がデジタルデータであることと、それらを生産するデジタル工作機が存在することを前提とした場合の“設計・生産・消費の距離”という観点でAMとサプライチェーンの関係を考察する。

3-1. デジタル生産時代の

設計・生産・消費の距離

設計情報がデジタルデータである場合、

1) 設計と生産される場所が近いかな

2) 生産と消費される場所が近いかな

という観点では図1のような4つのパターンが考えられる。これらはAMに限った分類ではなく、あくまでデジタルデータをもとに生産が行われる場面での設計・生産・消費の距離によって分類しているため、除去加工でもこの分類は適用される。

点線の白丸はデジタルの状態であり、塗りつぶされた黒丸はデジタルの状態から物質に変換された後の状態である。AMでいうと3DCADで作られた設計データは点線の白丸であり、3Dプリンターから出力されたモノは黒丸となる。

①は製品メーカーのように生産主体が設計データを作成、生産し、生産主体と消費主体の場所が離れているようなパターンである。社内で設計データが作られ、生産拠点で生産された製品が物流拠点などの中継点を經由して、消費するポイントまで届けられる現在の主流の生産・物流形態といえる。

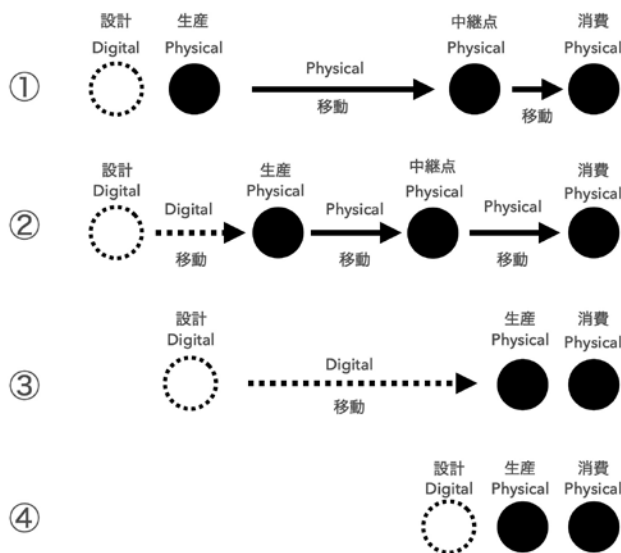


図1 データの移動と物質の移動

②は生産主体とは物理的に離れた場所にいる設計主体が設計を行い、設計データを受け取った生産主体によって生産された製品が物流拠点などの中継点を經由して、消費するポイントまで届けられるパターンである。設計拠点と生産拠点が異なる企業や、グローバル企業、サプライヤーなど①と同様に現在主流の生産・物流形態といえる。

③は生産主体と消費主体の場所が近い（または同じ）パターンである。このパターンは①②よりも物質的な移動が少ないというメリットがあり、従来の生産・物流形態とは異なるものである。消費する場所と非常に近い場所で生産が行われるため、モノが移動する代わりにデータが移動するという意味合いが強く、現地で作り、現地で消費するという意味では地産地消型生産とも言える。オープンソースを利用した個人生産もこのパターンに分類される。

④はDIYのように生産主体が設計データを作り、自らが生産し、生産主体と消費主体の場所が近い（または同じ）パターンである。この場合は、材料購入のための物質的な移動は発生するが、生産した物の物質的な移動はほぼ発生しない。クリス・アンダーソンがMAKERS^[9]で指摘した個人的なものづくりを行う人々を日本では製造業のメーカーと区別して、メイカーと表記することがあるが、メイカーがCADなどのデザインソフトを使って自宅で設計し、それらの設計データをデジタルファブリケーション機器の利用によって自宅で制作する形態のものづくりはこのパターンに分類される。メイカーが自分で設計したデータをもとに製造を委託する場合は②のパターンとなる。

3-2. AM時代のデカップリングポイント

サプライチェーンマネジメントでは需要と供給のバランスを取ることが求められ、これは延期、投機のどちらの戦略を取るかという問題でもある。延期というのは意思決定を

できるだけ遅らせる戦略であり、サプライチェーンにおいては需要の確定にできるだけ近い時点まで生産を遅らせる戦略で、需要と生産の同期が図られるので在庫リスクを軽減する効果がある。一方で投機戦略は予測に基づく生産戦略であり、過去の傾向や環境要因などに応じて需要量を予測して見込み生産を行う戦略である。納品までのリードタイムが短くなり、大量生産による規模のメリットを確保しやすい。サプライチェーン全体で投機戦略もしくは延期戦略に統一されていることは少なく、サプライチェーンのどこかで投機戦略と延期戦略がわかるポイントが発生する^[10]。これがデカップリングポイントである。つまり、デカップリングポイントはどの状態で在庫を持つかという問題に帰着する。さらには、デカップリングポイントの問題は“生産と消費の距離”から生じる問題でもある。生産、物流には時間がかかるので、製品や部品の在庫を持たないと顧客に納品されるまでのリードタイムが長くなり、売り逃し損のリスクが高くなる。しかし、在庫を持つと在庫管理費用がかさみ、売れ残りのリスクも発生する。よって、デカップリングポイントは、“生産と消費の距離”に起因する時間と費用のトレードオフの関係の中でメリットとデメリットのバランスをとった妥協点ともいえる。極端な例ではあるが、仮に水道の蛇口を捻るかのように製品が顧客の手元に届けば、デカップリングポイントをどこにするかという問題は生じない。AMが前提のサプライチェーンの場合、原材料の状態在庫を持っていれば需要に応じて生産するということが可能なため、“状態としてのデカップリングポイント”は原材料側にシフトすると考えられる。また、一つの場所で一括して生産するという形態ではなく、図1の③のようにインターネットを介してデータが移動し、消費ポイントに近い拠点で生産する形態をとれば、データの移動によってサプライチェーン内の物質的な移動を最小限にとどめること

ができ、「場所としてのデカップリングポイント」を消費者側にシフトすることも可能である。AMの技術・環境が普及すれば、デカップリングポイントは状態と場所という2つの側面が鮮明化され、問題のレベルは投機・延期の問題から原材料と3Dプリンターをどこにどれだけ配置するかという場所と量が中心の単純な問題に置き換わる。ただし、これらは組立を考えない場合である。2-2で述べたような品質に関わる問題が存在するため、既存の製品においては製品設計全体がAMに最適化されるまではサプライチェーンの置き換えは現実的ではなく、BMWやフォルクスワーゲンの例のように部分的にAMを利用しながら、その活用場面の拡大を思索するというプロセスが現実的であろう。

3-3. End User Manufacturing

現在、図1の①②は企業、③④は高度なものづくりを楽しむメーカーと言われる人々やファブラボなどの施設で行われる生産の形態である。企業が消費者のニーズを満たすため商品を企画、設計、生産、販売する①②のような生産-消費スタイルが主流の現代では③④の形態は普及しているとはいえない。18世紀に起きた産業革命以降、産業の分業化が進み、「モノを作る」という行為の多くはそれを生業とする企業によって行われるようになってきた。その中で、③④は「モノを作る」主体の変化という大きなパラダイムシフトの可能性を含んだ形態である。ヨーゼフ・シュンペーターは「経済発展の理論」の中で

問題はつねに、もろもろの物および力の相互関係を変更すること、現在分離されている物及び力を結合すること、物および力を従来の関係から解き放つことである

と述べ、イノベーションの概念を当初「新結合」という言葉で表現していた^[11]。この

新結合とは下記の5つの場合を含んでいる。

- 1) 新しい財貨の生産
- 2) 新しい生産方法の開発
- 3) 新しい販路（市場）の開拓
- 4) 原料や半製品に関する新しい供給源の獲得
- 5) 新しい組織の実現

「モノを作る」主体の変化という大きなパラダイムシフトが起これば、それに伴って1)、3)、4)の変化は必然的に起きてくる。なぜなら、もし生産主体が現在の消費者になるようなことが起これば、提供する商品（財貨）は材料やデータに変化する。また、データの販売ということになれば、これまでとは異なる販路が必要になり、それらの開拓がはじまる。また、設計データがデジタル化して流通するようになれば、誰でもデータを供給できる可能性もある。一部の商品でサプライチェーンが極端にスリム化する、もしくはサプライチェーンという概念がほぼ消滅しインターネット上のいたるところに設計データがある状態になり、それらをまとめるためにAmazonのようなショッピングサイトや共有サイトができるということも考えられる。このように、今後の可能性への展望という意味で現在の商業形態である①②だけではなく、③④の形態にも目を向けることは意義のあることである。そこで、3Dプリンターなどの機材を利用して消費者が設計データを自らで出力して利用するスタイルをEnd User Manufacturing（以後、EUMとよぶ）と定義し、EUMの実現のために必要な条件について考察する。

3-4. EUMの条件

1) ネットワークに関して

供給のためのネットワークが生活者の地域に網羅されているかどうかという観点が必要である（ネットワークの網羅性）。例えば、

水道管、送電線、電話網、物流ネットワークなどは我々の生活に必要なインフラネットワークとなっており、それらを利用することで生活に必要なモノやエネルギーを利用できる。これらのネットワークは生活者の生活範囲の中に網羅的に張り巡らされていることが望ましい。また、ネットワークにアクセスできる状況にあるかどうかという視点も必要である（ネットワークへの接続容易性）。ネットワークへの接続に制限がかけられていることによって、限られた者しかアクセスできないような状況では、インフラとしてふさわしくない。インターネットは、既に世界中に張り巡らされて生活の一部となっているネットワークであるため、網羅性と接続容易性をもったネットワークであるといえる。

2) 3Dプリンターについて

3Dプリンターは造形物の多様性を実現する工作機としての側面を持つが、インターネットを介して移動したデータを出力する、「ネットワークの末端に位置する出力装置」として側面も持つ（生産端末としての3Dプリンター）。生産端末としての3Dプリンターの操作者は工業的なオペレーターではなく、一般の生活者である。そのため、高いユーザービリティが求められる。ここでいうユーザービリティとはヤコブ・ニールセンが述べた、学習しやすさ、効率性、記憶しやすさ、エラー、主観的満足度という特性からなる多角的要素である^[12]。現在の家庭用3Dプリンターにはまだ家電ほどのユーザービリティはない。生活者の中に3Dプリンターに対するメンタルモデルが形成されていないため、ある程度の時間をかけてメンタルモデルが形成されるとともに、ユーザービリティも向上していくと考えられる。

3) 設計データについて

家庭用として普及しているFDM方式の3Dプリンターは下層から素材を積み上げるよ

うに造形する。そのため、下層に積み上げられた層がない場合、サポート材という造形物の完成形とは関係のない補助的な柱を造形することで、それより上層の造形を可能にして、造形終了後にサポート材は除去される。EUMでは、できるだけサポート材が必要ない設計が望ましいと考えられる。消費者の3Dプリンターは特定の機種に固定することは困難であるため、造形時の不確定要素はできるだけ排除した設計が必要である。g-codeファイルのような3Dプリンターの動きを指示するファイルでデータファイルを配布するか、stlファイルのような3Dモデルを配布してスライサーソフト（g-codeを作成するソフトウェア）を使ってg-codeファイルの作成を消費者に任せるかによって、不確定要素の責任の所在は変わるが、サポート材の存在は、造形の成功率に影響を与え、後処理の必要性、造形物の表面の美しさにも影響を与える。そのため、サポート材が必要な形状はできるだけ避けるべきである（造形時の不確定要素の低減）。

また、組立が必要な場合はできるだけ特殊な組立技術や特殊工具を必要としないことが望ましい（組立の容易性）。現在3Dプリンターを使用している個人は、ものづくりを楽しむ層であるが、EUMで使用するためには消費者に向けた設計を考慮する必要がある。

3-5. コロナ禍におけるEUM例

コロナ禍では一時的にEUMに近い現象が観察された。2020年4月頃、医療現場における個人防護具（PPE：Personal Protective Equipment）の不足が深刻な問題となった。新たな設備投資には、需要変動が一時的なものかどうか、設備投資額に見合ったリターンの有無などの経営判断と設備導入の時間がかかる。そのため、あまりにも急激な需要変動が起きた直後は需要に対応しきれないという事象が発生する。コロナ禍でのフェイスシールド不足の解消には約3ヶ月程度の時間を要

した。(3ヶ月という期間の根拠は、後述する公開データをもとに金型を制作し、生産していた7つの企業・団体へのアンケートをおこなった結果、2020年7月上旬には4つの企業・団体は十分な在庫を抱えたことで生産を終了したと回答したことを根拠としている。)

PPEの一種であるフェイスシールドは普段、頻繁に使用されるものではなかったため、医療機関で保管していた在庫は少なく、急激な需要変動によってすぐには入手できない状況が続いたため、3Dプリンターを使ってフェイスシールドを生産するという世界的なムーブメントが起きた。この背景には、生産立ち上げ時のコストの安さと個人や企業の社会貢献意識の高まりがあったと考えられる。金型を使った生産に比べて、3Dプリンターを使った生産では新たな製品を設計・生産するための初期コストが低いため、企業にとっては急激な需要変動への一時対応に適した生産設備であった。また、世界的な危機に対して社会貢献したいと考えた人々にとっては個人でも容易に作ることができるPPEはフェイスシールドぐらいであったため、行動を起こしやすい対象でもあった。そこで、設計技術のある者はデータを利用可能な状態でインターネット上に公開し、3Dプリンターを所有している者は設計データをダウンロードし、場合によっては改変して3Dプリンターで出力するという行動をはじめた。また、そのような動向をニュースなどで知った者の中には3Dプリンターを購入してフェイスシールドを生産した者もいた。本研究でもフェイスシールドフレームのstlデータをdoyo-modelとしてCC-BY-SAライセンスで2020年3月31日にgitHub上で公開し^[13]、その後改良を重ねて合計で5種類のstlデータを公開した。青木らの調査^{[14][15]}によると、2020年7月23日までに日本国内では14万個以上のフェイスシールドが3Dプリンターを使って生産され、その内の約1/3にあたる49,072個はdoyo-modelであった。

急激な需要変動への対応に多くの企業が3Dプリンターを使ったことから、AMの生産柔軟性を実証できたと言える。また、医療メーカーでない企業、個人がフェイスシールドを生産したことは大変興味深い。3Dプリンターは産業用から個人用まで存在し、性能・仕様の幅が広い工作機であるが、製品の要求品質という点で考えると、必ずしも産業用の工作機器を使って製造する必要のないものも存在する。個人用の3Dプリンターを使って製造されたフェイスシールドは世界各国で使用され、消費者からの大きな品質的な不具合は報告されていない。生産者から消費者への譲渡で、寄付・寄贈・無償配布という形をとられた場合、善意によるものなので不具合があっても消費者側からは大きな声を上げられないという状況も考えられるが、販売されたものについても大きな不具合の指摘がなかった点からも、ある程度の要求品質は満たしていたといえ、個人用3Dプリンターによる3Dプリント品の実用性を示すことができたと考えられる。

サプライチェーンという観点では、従来のサプライチェーンがほぼ存在しないパターン③の形態が実現し、消費者や消費者に近い者が生産者となった。これまで消費者だった者が生産端末としての3Dプリンターを使って生産者となるという現象が一時的にでも実現したと言える。このように消費者が生産するという現象は1980年にトフラーが「第3の波」で生産消費者(プロシューマー)という概念として示している^[16]。トフラーが第3の波を執筆した当時は、3Dプリンターは発明されていなかったため3Dプリンターを利用した生産消費には述べられていなかったが、

生産=消費(プロシューミング)は、少なくとも一部行為の「脱市場化」を伴い、社会における市場の役割を大きく変える。ということは、未来の経済は、もはやAセクターやBセクターのいずれかに

一方的に偏る経済ではない。第一の波の経済、第二の波の経済のどちらにも似ず、両者の性格を融合し、新たに歴史的統合をしたような経済が出現するからである。

と述べられており、消費者が生産するという行為により、市場に大きな変化が生じることは既に指摘されていた。ここでいうAセクターとは無給の仕事から成り立つ経済であり、Bセクターとは消費やサービスの生産は、すべて市場を通じて交換される経済のことを指す。第一の波の経済はAセクター中心の経済、第二の波の経済はBセクター中心の経済である。

3-6. 限界費用とコスト

労働力という観点からみるとEUMは労働コストの外部化という側面もある。これはトフラーもプロシューミングにおいて指摘している点である。企業内で行う労働の一部を消費者に移管することによって、DIY (Do It Yourself) 商品のように製造コストを抑えることができる。EUMの場合、コストが抑えられるというよりも、企業の立場からすると限界費用がほぼ0になると言ったほうが正しい。限界費用とは、生産量を一単位増加させた際の総費用の増加分である。データで商品が販売されれば、企業側の限界費用はほぼゼロになる。音楽業界はCDからストリーミングのようなコンテンツ財の提供に移行することにより、その限界費用はほぼ0になったといえる^[17]。同じように、消費者がインターネットを介して入手したデータを元に生産端末としての3Dプリンターを使って生産したものは企業側からすると限界費用がほぼ0となる^[18]。ただし、専用の3Dプリンターを使ってフィラメントなどの原材料も企業側が負担するようなサービスを提供する場合は、大量生産をしない分、限界費用は上昇すると考えられる。また、企業側としては限界

費用が0になったとしても、消費者側が支払う費用が抑えられるかは別問題である。データを有料で販売した場合、限界費用はほぼゼロであるため、データの価格は非常に安価なものになると考えられる。しかし、3Dプリンターやフィラメントの購入に費用がかかるため、大量生産された商品の販売価格と比べて、消費者が負担するコストは高くなる場合があることも想定する必要がある。

4. おわりに

本研究では、Additive Manufacturing技術を概観したうえで、デジタル生産時代の設計・生産・消費の距離という観点からAdditive Manufacturingがサプライチェーンに与える影響に関して考察した。また、3Dプリンターを造形物の多様性を実現する工作機としてだけでなく、インターネットの端末としてとらえることによって、今後のサプライチェーンに影響を与える可能性を示した。現時点では、急激な変化は起きていないが、導入のメリットも大きいため、要求品質が満たされ、製品設計がAdditive Manufacturingに最適化されれば今後、漸次的にサプライチェーンの再構築が進むであろう。

本研究はSBS鎌田財団の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Standard ASTM:F2792. 2012 Standard terminology for additive manufacturing technologies, West Conshohocken, PA:ASTM International. See www.astm.org. (doi: 10.1520/F2792-12), 2012
- [2] Chen, D., Heyer, S., Ibbontson, S., Salonitis, K., Steingrimsson, J. G., & Thiede, S. Direct digital manufacturing:

- definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*, 107, p615-625, 2015
- [3] Mojtaba Khorrarn Niaki, Fabio Nonino
The Management of Additive Manufacturing, Springer, 2018
- [4] <https://www.pesmedia.com/3d-printing-components-bmw-group/>
(最終アクセス日 2021/6/26)
- [5] <https://www.metal-am.com/hp-metal-jet-hp-launches-its-first-metal-additive-manufacturing-system/>
(最終アクセス日 2021/6/26)
- [6] <https://www.3dprintingmedia.network/lamborghini-3d-printed-over-20000-final-parts-in-2020/>
(最終アクセス日 2021/6/26)
- [7] <https://idarts.co.jp/3dp/lamborghini-over-20000-3d-printed-parts/>
(最終アクセス日 2021/6/26)
- [8] Francis Froes, Rodney Boyer:
Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, Elsevier (2019)
- [9] クリスアンダーソン：MAKERS 21世紀の産業革命が始まる（訳：関美和），2012
- [10] 秋川卓也, 矢澤秀雄：サプライ・チェーンにおける活動ネットワーク，日本物流学会誌，Vol.2001(9)，p.53-60, 2001
- [11] Joseph A. Schumpeter: 経済発展の理論（上）（訳：塩野谷祐一，東畑精一，中山伊知郎），岩波文庫，1977
- [12] ヤコブ・ニールセン：ユーザビリティエンジニアリング原論，1994
- [13] <https://github.com/doyodoyo/facesheild>
(最終アクセス日 2021/6/26)
- [14] 青木まゆみ, 常盤拓司, 宮川祥子, 吉岡純希, 道用大介, 田中浩也: COVID-19下における3Dプリントによるフェイスシールド製造のムーブメントの調査, Conference on 4D and Functional Fabrication 2020,
<https://sig4dff.org/conference/2020/proceeding/OP11.pdf>, 2020
- [15] 青木まゆみ, 常盤拓司, 田中浩也, 宮川祥子, 道用大介: COVID-19下における3Dプリントによるフェイスシールドのデータ変更の調査, 第7回人工知能学会 市民共創知研究会,
<https://sigcci.github.io/sigcci/conf7/pdf/SIG-CCI-007-09.pdf>, 2020
- [16] Alvin Toffler: The Third Wave, Bantam Books, 1980
- [17] 山口真一：コンテンツ産業におけるフリー型ビジネスモデルの有効性, 情報通信学会誌, Vol.35(3), p.29-40, 2017
- [18] ジェレミー・リフキン 柴田裕之訳：限界費用ゼロ社会, NHK 出版, 2015