【論文】

生産システムのパラダイムシフト
―3Dプリンタ，ホールガーメント横編機の事例から―

Paradigm Shift of Production System
―From the case of 3D printer, WHOLEGARMENT―

市　田　陽　児
Ichida Yozi

目次

はじめに
1　3Dプリンタ
（1）3Dプリンタの種類と特徴
（2）産業界での3Dプリンタの利用状況
（3）自動車産業におけるAM
（4）医療産業におけるAM
2　ホールガーメント横編機
（1）織物と編物の相違，織機と編機の相違
（2）針の編成動作と編み目
（3）編み針の発展
（4）ホールガーメント
3　考察
（1）ホールガーメント横編機と3Dプリンタの共通点
（2）生産システムのパラダイムシフトがサプライチェーンに与える影響
おわりに

要旨

生産システムのパラダイムがマス・プロダクションからマス・カスタマゼーション，さらにパーソナリゼーションへシフトしているかについて，生産システムのパラダイムシフトの議論を概観する。その後生産システムのパラダイムシフトの事例をあげて議論し，検証する。具体的な産業は自動車産業，医療産業とアパレル産業である。自動車産業におけるローカルモーターズ社で3Dプリンタを用いた車輌製造，医療産業における3Dプリンタを用いた義肢装具や補聴器の製造，アパレル産業ではホールガーメント横編機で編むニットウェアが具体例であ

る。3D プリンタやホールガーメント横編機を利用した生産の現場では，従来の生産ラインで作業する生産システムとは異なる別世界が展開されている。パラダイムシフトの議論に際して，3D プリンタとホールガーメント横編機の仕組みと特徴を理解する必要があるので，それぞれに章を割り当てている。3D プリンタとホールガーメント横編機は外見も機能も異なるが，それらの共通点を議論し，生産システムの特徴とその独創性から利用者と共有する影響を考察する。また、生産システムのパラダイムシフトがサプライチェーン・マネジメントにどのような影響を与えるかについて議論する。

はじめに

S. Jack Hu は製造におけるパラダイムがマス・プロダクションからマス・カスタマゼーション，さらにパーソナリゼーションへと発展していると主張する。すなわち，Henry Ford によって導入された Interchangeability, Moving assembly line, Division of labor, Scientific management の特徴を持つ生産システムがマス・プロダクションである。しかし，1980 年代後半から消費者は製品の多様性を求めるようになり，それに対応するためにマス・カスタマゼーションが現れた。マス・カスタマゼーション は Product Family Architecture（PFA），Reconfigurable Manufacturing System（RMS），Delaying differentiation を含むコンセプトと技術によって可能になった。たとえば，米国では乗用車のモデルが 1969 年に 44 種類だったのが，2006 年には 165 種類に増加した。消費者はパワートレイン，内装の組み合わせを選択することができる。コンピュータとインターネットが一般的になり Additive Manufacturing（AM）のような Responsive manufacturing が登場してきたので，消費者の好みに合わせた製品を製造することが可能になった。彼は，Open architecture products, Personalization design, On-demand manufacturing systems, Cyber-Physical systems の特徴を持つこの生産方式を Personalization と呼ぶ（Hu, S. Jack, 2013, pp.3-8）。

マス・カスタマゼーションは Stan Davis が 1987 年に造語したが，マス・プロダクションを維持しながら個々の消費者のニーズによって，最も適した製品とサービスと提供することである。Mitchell M. Tseng らは競争力の激しい市場で生き残るためにはマス・カスタマゼーションが不可欠であると言い，典型的な事例として Dell の PC のカスタマイズするビジネス（BTO）をあげている（Tseng, Mitchell M, Hu, S. Jack and Wang, Yue, 2014, pp. 836-843）。しかし，Chris Anderson はマス・カスタマゼーションの事例としてあげられているナイキの ID シューズ（既存モデルの上に新しいパターンをデザインする）やチョコレートの上に好きなデザインをするカスタム M&M チョコのレベルに止まっているなら，マス・カスタマゼーションは産業革新とはいえないと反論している。彼はまた，Dell の PC についても，最近は標準モデルがすでにあり，その範囲内でメモリ，CPU，HDD，ビデオカードのオプションを消費者が選択するだけであり，マス・カスタマゼーションではないと指摘している（Anderson, C., 2013, pp.76-77）。

本稿の目的は生産システムのパラダイムがマス・プロダクションからマス・カスタマゼーション，さらにパーソナリゼーションへシフトしているのかを事例で議論し，検証することである。具体的な産業は自動車産業，医療産業およびアパレル産業である。結論を

先に言うと，生産システムがパラダイムシフトしている事例をあげることができた。そこでは従来の生産ラインで作業する生産システムとは異なる別世界が展開されている。しかし，この生産システムのハードウェアとソフトウェアは自動車産業，医療産業，アパレル産業では異なる。自動車産業および医療産業でのハードウェアは3Dプリンタであり，アパレル産業ではホールガーメント横編機である。自動車産業における3Dプリンタの利用状況について市田陽児の研究（ICHIDA, 2015, ICHIDA , 2017）があり，ホールガーメント横編機については，藤村忠司がその独創的な機構について発表（藤村忠司 , 2003）しており，崔 裕眞は島精機製作所の手袋編機からホールガーメント横編機にいたる技術経営史を発表（崔 裕眞 , 2012）している。本稿ではこれらの先行研究を踏まえて，生産システムのパラダイムシフトの視点から考察を加えたい。議論するにあたり，それぞれの仕組みを最小限理解しておく必要があるので1章で3Dプリンタ，2章でホールガーメント横編機についてそれぞれの機能をハードウェアとソフトウェアの両面から詳細に分析する。3章では3Dプリンタとホールガーメント横編機の共通点を議論し，生産システムのパラダイムシフトがサプライチェーンに与える影響を考察する。

1　3Dプリンタ

2009年にASTM（American Society for Testing and Materials, 旧称は米国材料試験協会であり，国際標準化・規格設定機関である）において，委員会が設置されて，いわゆる切削などの除去加工や変形加工に対して，3Dプリンタなどで積層を繰り返していく加工はアディティブマニュファクチャリング（AM: Additive Manufacturing）と呼ぶことが決定された。3Dプリンタはハードウェアで AM は加工方式であるが，以下の説明では3Dプリンタと AM を同じ意味で使用する場合がある。

世界で最初の3Dプリンタは1980年に名古屋市工業研究所に勤めていた小玉秀男が発明した。彼は「立体図形作成装置」として特許を出願した。日本の特許制度では，出願の後に審査請求して，受理されないと特許の権利を取得できない。彼は審査請求をしなかったが，American Institute of Physicsの論文誌 Review of Scientific Instruments に 3Dプラスチックの自動造形方法についての論文（Kodama, H., 1981, pp.1770-1773）を発表したので，世界的に光造形方法が知られるようになった。

1984年に大阪府立産業研究所の丸谷洋二と Chars W. Hull がそれぞれ独自に光造形3Dプリンタの特許を取得した。Hull はその後3Dシステム社を設立し，1987年に同社から世界初の光造形3Dプリンタの販売を開始した。その後，光造形以外の3Dプリンタも開発された。1990年代初めには産業用3Dプリンタが登場し，従来の製造方法では困難な形状でも3DCADデータがあれば造形できるので注目をあびた。

2000年前後には3Dプリンタで工業製品の試作品を作ることが多くなってきた。当時は，3Dプリンタの呼称より「Rapid Prototyping Equipment」の方が一般的であった。米国の3Dsystem社や Stratasys社の3Dプリンタは数千万円から1億円した。

3Dプリンタでの製造は同じ装置とソフトウェアでCADデータを変えるだけで，顧客のカスタマイズに柔軟に応じることができる。「The Experience Economy」の著者であり，デジタルマニュファクチャリングに詳しい B.Joseph Pine II は3Dプリンタが普及すると製造業は従来の単一な製品の「Mass Production」から個人の好みに合わせた製品作りの「Mass Customization」へ移行すると述べている（Joseph Pine II, B., 1999, 2007,

2011)。

米国では，大工仕事や車の修理のDIYの伝統があり，その延長で1970年代の自作パソコンや1980年代の自作音楽に続いて，2000年頃から，3Dプリンタは低廉化と小型化により個人でも入手可能になった。また，中小企業も3Dプリンタを導入すれば，広い土地や生産設備や熟練労働者がなくとも，モノを設計して製造できるようになった。それには次のような背景がある。設計から製造までの各段階での技術がソフトウェア化されてインターネットで公開されており（無料の場合もある），3DプリンタやCADソフトウェアを利用するコミュニティが形成されていて，情報交換されている。このように個人や中小企業がメーカーになるためのハードルが低くなったので，Chris Andersonはこの状況を「The Maker Movement」と呼んでいる。また，3Dプリンタを利用できる場所が増えており，3Dプリンタを所有していなくとも物作りの楽しさを体験できる。オバマ大統領はこの3Dプリンタの Movement をさらに推進するために，2012年に今後4年間で全米の1000の学校に「工作室」（3Dプリンタなどを簡単に利用できる場所）を展開するプログラムを立ち上げた。この目的は，工場労働者の育成や再教育ではなく，新世代のシステムデザイナや製造業におけるイノベータの育成である（Anderson, C., 2013, pp.18-19)。

米国では，草の根レベルでコンピュータと連動した物作り体験をさせて製造業への回帰を目指していることが分かる。

(1) 3Dプリンタの種類と特徴

3Dプリンタの利用した場合の，設計から造形までの一般的な流れは以下である。

- 設計（イラスト，設計図，２次元CADなど）
- 3DCADや3DCGなどの3Dデータを作成
- STLなどの3Dプリンタ用のデータ形式に変換
- 出力の準備（対象の位置，向きの変更など）
- 3Dプリンタが積層するスライスデータを作成
- 3Dプリンタによる出力（造形）
- ラフト（土台）やサポートなどの不要な部分を除去して完成させる

3Dプリンタの種類は色々あるが，本稿では素材の種類とそれをどのように積層するかの視点で分類する。

①光造形法（SLA：Stereolithography）

小玉秀男が世界で初めて制作した3Dプリンタはこの方式である。液状の光硬化性樹脂にレーザーを照射して硬化させながら造形する。光硬化性の液体ポリマーをタンクに満たす。樹脂の表面にレーザー光を照射して硬化させ，タンクを下げて（装置によっては上げる），新しい樹脂の表面にレーザー光を照射して硬化させる。これを繰り返すことで立体物が造形される。日本メーカーが得意とする分野で，装置や関連する技術の特許が多い。また，樹脂の材料についての蓄積がある。積層ピッチは0.05mmから0.15mmである。

②素材射出法

ノズルから熱で溶かした熱可塑性樹脂を糸状に射出して造形する方法とノズルから直接素材を噴射して造形する方法がある。

(a) 熱溶解積層法（FFF: Fused Filament Fabrication）

ABS，PC，PC-ABS，PPSUなどの樹脂をヒーター内蔵のノズルから押し出す。サポート材を使用する場合は，専用のノズルを用意する。積層ピッチが0.1mmから0.3mmで厚めなので，高精度な加工ができない。しかし，材料の取り扱いが容易なので工業用にも個人用にも広範囲に利用されている。この方式は，1980年代後半に米国 ストラタシス社のスコット・クランプによって開発され，この

方式のFDM（Fused Deposition Modeling）は商標登録されている。このため熱溶解積層法の一般的な名称として，他のメーカーはFFF（Fused Filament Fabrication）と呼ぶようにしているが，FDMの方が有名である。

(b)　インクジェット方式（Inkjet）

ノズルから光硬化性樹脂を噴出し，紫外線ランプなどを照射して硬化させて積層する。積層ピッチが0.015mmから0.03mmなので高精度の形状の造形が可能である。FFFに比べると表面がなめらかになるが，この方式で利用されるアクリル系の樹脂はABSに比べると粘りがなく砕けやすい。しかし，樹脂の化学成分を調整することで，ABSlike，PPlike，Ruberlikeのように基の素材に類似したものができるので，素材の機能を評価することができる。ノズルから砂を抽出するタイプもある。この砂はフラン自硬性砂と呼ばれ積層終了後，約3時間で硬化する。

③粉末焼結法（SLS：Selective Laser Sintering）

金属，セラミック，砂，ナイロン樹脂などの粉末をレーザーや電子ビーム（EB: Elictron Beam）で一層分ずつ焼結して固めて造形する方法である。

ナイロン樹脂の場合，造形物は柔軟性がある。表面の仕上がりは光造形ほど細かい造形はできないし，表面が粉っぽい。複雑な形状でない限り，素材の粉末がサポート材の代わりをするので，他の方法と比較してサポート材を考慮する必要がない。セラミックを用いれば，食器やカップの造形をできる。金属粉末を用いた業務用3DプリンタはドイツのEOS社が世界の約70%，スウェーデンのArcam社の約20%を占めている。

④レーザー溶融法（SLM：Selective laser melting）

レーザービームによる照射はSLSと同様だが，溶融することで積層していく技術である。材料は金属粉末を使う。レーザー溶融法は，欧州最大の研究開発機関であり，ドイツのミュンヘンに本部があるフラウンホーファー協会の研究所で開発された。

⑤粉末固着方式

石膏やセラミック粉末など手軽で安価な材料を樹脂で接着して固める方式である。最近の機種には，インクノズルが付帯しており，本体の造形と同期して3DCADや3DCGで指定した立体への色づけをすることができる。接着剤で固めているだけなので，砕けやすく，衝撃で破損するが，セラミック粉末で造形したものをオーブンで焼けば，カップや食器として使用できる。

（2）産業界での3Dプリンタの利用状況

この節では，3Dプリンタの現状を把握し，自動車業界における3Dプリンタの利用状況を把握して，どこで3Dプリンタによる生産システムがシフトしているか分析する。

3Dプリンタ市場規模は，順調に拡大を続けており世界における出荷は2017年で前年比18.4%増の27万台（メーカー出荷数量ベース）となった。欧米では産業用の3Dプリンタが，装置や材料の進化によって航空・宇宙や自動車，医療，家電，金型関連分野などでプロトタイプの試作だけでなく，製品の造形や量産に向けた動きが活発である（図1）（矢野総研経済研究所，2018）。

3Dプリンタの利用分野と3Dプリンタに関連して何が優先されているか，また導入部門は何処が多いかについてSculpteoによる2017年の調査結果も把握しておこう。900以上からのアンケート調査結果であるが，ヨーロッパが60％と最も多く，アメリカ30%，アジア・太平洋9％，アフリカ1％と米国のWohlers Reportに比較すると調査対象がヨーロッパに多いことが特徴である。利用される領域（局面）は試作品（34％），形がないコンセプトを3Dプリンタで形にして確認するため（23％），製品（22％）が上位3位である（図2）。3Dプリンタの利用で最も多

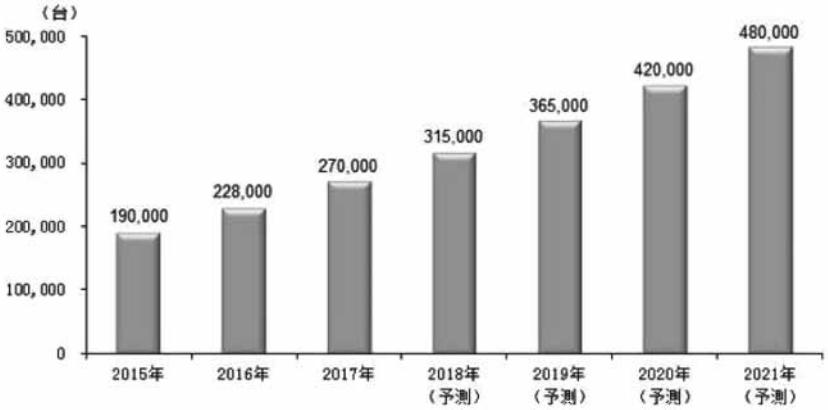

図１　3D プリンタの世界市場規模推移と予測

出所：矢野経済研究所 , 2018

いのが製品開発促進（28%）である。次に製品の特別版の製造とカスタマイズ化された製品の提供（16%）で，三番目が製品の柔軟性を増すため（13%）と続く（図３）。3D プリンタを利用している部門は研究・開発異部門が（62%），設計部門が（53%），生産部門が（40%），技術エンジニアリング（28%）で他は数パーセントに落ちる（図４）（Sculpteo, 2017）。

米国の Wohlers Report 2017 では機能部品の製造が（33.8%）で最も多く，ヨーロッパでの試作品中心と異なり，米国では機能部品が AM で製造が進んでいることが分かる。それまで，3D プリンタ製造による強度と正確さに不安があったが，3D プリンタ自体および材料の発展により解消されつつあることが分かる。二番目は組立と嵌合の確認のために 3D プリンタで製造したものが使われる（16.0%）。教育・開発での利用（10.7%），試作モデル（7.4%），ツール部品（7.4%）が続く（図５）（Wohlers Report 2017）。米国の方がヨーロッパより工業分野での利用が活発化されていることが分かる。

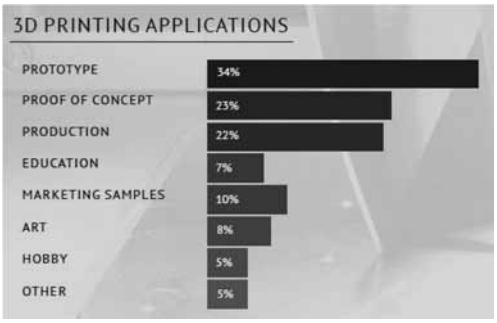

図２　3D プリンタ関連の優先順位

出所：Sculpteo, 2017, p.6

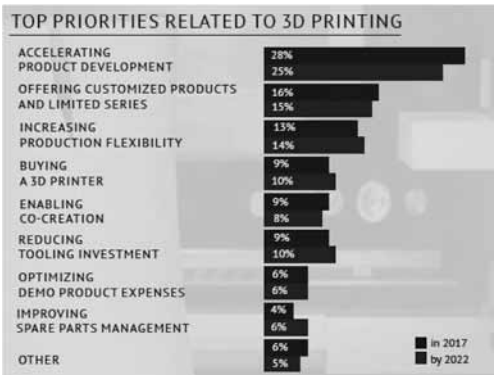

図３　3D プリンタ関連の利用局面

出所：Sculpteo, 2017, p.6

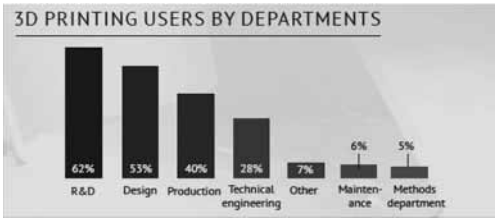

図４　3D プリンタの利用部門

出所：Sculpteo, 2017, p.6,

(3) 自動車産業における AM

産業別の3Dプリンタの導入状況はWohlersの調査では図6, 図7のとおりであるが，自動車業界での利用は2012年21%，2013年20%と最上位を占めている。

自動車業界における AM の活用状況は市田陽児が分析（Ichida, Y., 2015, 2017）しているが，ローカルモーターズ（LOCAL MOTORS: 以下 LM）だけが従来の生産システムと全く異なる。LM 以外の自動車メーカーと部品メーカー（以下サプライヤ）における AM の利用状況を概観する。

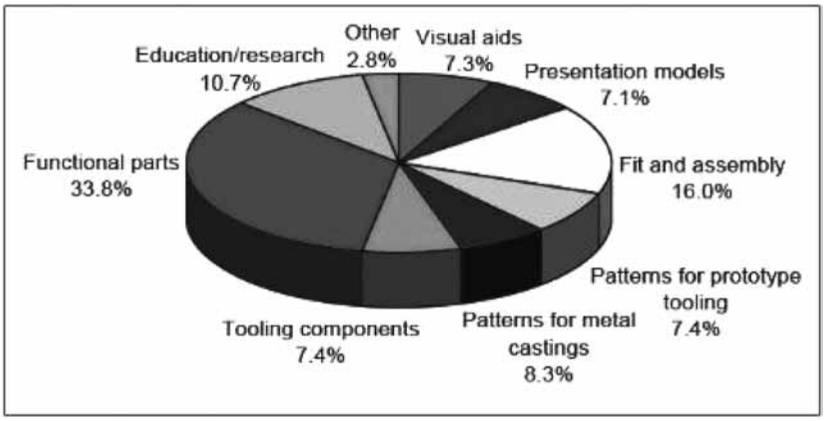

図５　3D プリンタの利用分野

出所：Wohlers Report 2017

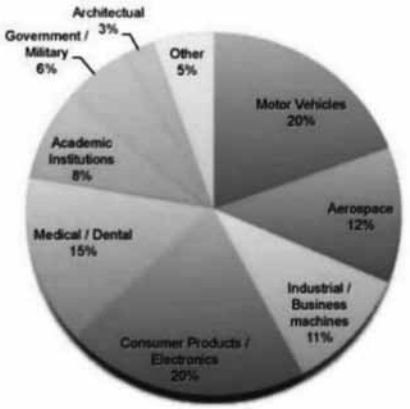

図6　産業別の3Dプリンタの導入状況(2012)

出所：Wohlers Report 2012

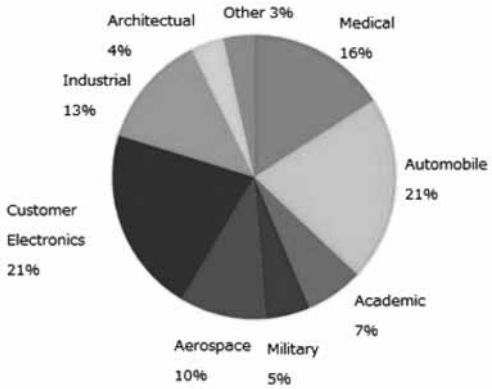

図7　産業別の3Dプリンタの導入状況(2013)

出所：Wohlers Report 2013

著者が外資系の3Dプリンタメーカーに取材した際の情報によると，日本の自動車メーカーは毎年かなりの量の3Dプリンタを購入しているが，トヨタ自動車の場合，主に部品の試作品の作成と工場における人の作業を支援するツールの作成が主である。日産自動車は研究・開発用として研究所に導入されており，各部門で3Dプリンタの利用が必要な場合そこに依頼する。BMW社Regensburg工場で工具の作業を補助するエンブレム治具を3Dプリンタで製造した（図８）。海外のスポーツメーカー社のDivergent Microfactories社では3Dプリンタで製造したスーポーツカー「BLADE」を販売しているが，車全体を3Dプリンタで一体成形しているのではなく，「Node」と呼ばれる3Dプリンタで生産したアルミニウムジョイントをカーボンファイバー製のチューブで結合することで自動車のシャーシを組み立てる方式である。ダイハツ自動車のコペンでは，ボディの外板を樹脂にし，着脱できるようにするDRESS-FORMATION（図９）の新発想により着せ替えを実現した。フロント部分，リア部分とこれらを合わせた車全体を取り替えることができる。クルマのデザインは購入前に決めるという固定概念を覆し，ライフスタイルに合わせ，購入後でも服をコーディネイトする感覚で，いつでも自由に形や柄，空力特性が変えられる，という新しい価値を実現した（ICHIDA, 2017）。

図８　BMWが3Dプリンタで作成した治具

出所：engineering.com（（https://www.engineering.com/ResourceMain.aspx?resid=242）

ダイハツコペンは，2015年度に1000台以上でDress-Formationが採用されているので，マス・カスタマイゼーションの事例に相応しい。しかし，3Dプリンタで外板を製造するが，自動車全体の生産ラインは従来のままである。

鋳造サプライヤのコイワイが行っている薄肉，高精度鋳物製品用の３次元の砂の金型（3Dsand mold）をレーザー焼結積層やインクジェット砂型積層で造形している。この金型は3Dプリンタで量産されており，サプライヤにおける量産型AMの成功例の一つである（図10, 図11）。

米国の１次自動車サプライヤであるデルファイ（Delphi）は，アルミダイカストの従来の機械加工の代わりにレーザー溶融3Dプリンタ（SLM）を使用してアルミディー

図９　ダイハツコペン　ドレスフォーメーション

出所：COPEN DRESS-FORMATION（https://copen.jp/product/dress/report）

図 10　レーザー焼結積層工法
出所：コイワイ会社案内 , 2013, slide 31）

図 11　インクジェットプリンタ積層工法
出所：コイワイ会社案内 , 2013, slide33

図 12　SLM で製造した Delphi のディーゼルポンプハウジング
出所：Additive Manufacturing Technology Assessment - Department of Energy, p.11

ゼルポンプハウジングを製造している（図12）。SLM を使用することで，ポンプを 1 つの部品にすることができただけでなく，部品点数が大幅に削減され，組み立てプロセスが簡素化されたため，全体的な製造コストも削減された。単一部品としてポンプを製造することはまた，Delphi がいくつかの後処理工程を回避するのを助け，結果として漏れが起こりにくい最終製品となった（Additive Manufacturing Technology Assessment - Department of Energy, pp.10-11）。

これまで自動車業界の自動車メーカーとサプライヤにおける 3D プリンタおよびその製品の利用状況を見てきたが，ベルトコンベア上を車台が流れていって，部品を取り付けられていくことには変わりはない。しかし，ローカルモーターズの 3D プリンタで製造された小型の二人乗り電気乗用車「ストラティ（Strati）」の生産過程はそれまでの自動車生産とは大きく異なる。Strati は 2014 年にシカゴで開催された国際製造技術展示会で公開され，3D プリンタで 44 時間かけてその場で製造されたことで有名になった。その後試運転に成功したストラティは，世界で初めて走行に成功した 3D プリント自動車としても名前を刻んだ。

ローカルモーターズによると Strati は次の 3 段階で実現される（Strati: the World's First 3D-Printed Car Project, Project: Handbook）。

① 3D プリンタによる製造局面は，「積層造形（additive manufacturing）」段階である。3D プリンタを使って材料を積層していき，1 台の自動車が完成するには約 44 時間かかる。

②洗練段階は「減法製造（subtractive manufacturing）」になるが，切削加工するフライス盤を使用する。許容値まで車輌を加工するのに約 1 日かかる。

③最終局面では，車輌を完成させるために「高速組立（rapid assembly）」して部品を追加して車輌を完成させる。この最終段階は，開始から終了までに 1 日もかからない。

車名の Strati はイタリア語で積層の「層」を意味する。設計はデザインチャレンジに勝ち抜いたコミュニティメンバの Michele Anoé が行った。車体重量は 1800 ポンドあ

り，3D プリンタの材料は 1100 ポンドの量を使用する。素材は炭素繊維強化アクリロニトリルブタジエンスチレン・プラスチックである。サウジアラビアの SABIC（Saudi diversified manufacturing company）やその他の複数の化学メーカーから輸入している。モーター，バッテリー，パワートレイン，タイヤ，ホイールなどはルノーの電気自動車であるトゥイジー（Twizy）で使用されているものを仕入れており，それ以外の車輌全体を 3D プリンタで積層製造する。積層する層の数は概ね 227 層である。Strati の速度は約 40MPH（時速約 64km）である（Strati: the World's First 3D-Printed Car Project, Project: Handbook）。

CAD で設計された車輌は，3D プリンタの積層用のファイルに変換され，それが 3D プリンタの入力データとなり，3D プリンタで積層される。ベルトコンベアや大量の部品箱の代わりに大型の 3D プリンタ Big Area Additive Manufacturing（BAAM）とモーターやタイヤなど限られた部品があるだけだ。この材料から車台を直接製造する BAAM が自動車産業における生産システムのパラダイムシフトを可能にしたキーテクノロジーである。

シンシナティ株式会社とオークリッジ国立研究所（Oak Ridge National Laboratory 以下 ORNL）が共同開発した BAAM は造形面積が幅 6 フィート（約 1.8m），長さ 12 フィート（約 3.6m），高さ 3 フィート（約 0.9m），1 時間あたりに積層する樹脂の量が 10 ポンド（約 4.5kg）と通常の業務用 3D プリンタより巨大である（Oak Ridge National Laboratory の Web page）。

図 13 と図 14 の BAAM はローカルモーターズで使用されているタイプより新しい次世代の BAAM である。

(4) 医療産業における AM

産業別の 3D プリンタの導入で上位にある医療産業の事例をみていこう。

①義肢装具，義足装具

義足などの義肢装具は従来専門家が手作業で時間をかけて生産してきたので非常に高価であった。東京大学協創プラットフォーム開発株式会社は 3D プリンティングと機械学習技術による義肢装具の提供を目指しているインスタリム株式会社の事業化資金およ

図 13　BAAM の内部

出所：OAK Ridge National Laboratory の Web page

図 14　BAAM の外観

出所：OAK Ridge National Laboratory の Web page

図 15　3D プリンタで出力した義肢装具
出所：Instalimb の Web page

び経営支援を受け，3D プリンティングおよび機械学習技術により価格・納期を約 1/10 に抑える新しい義肢装具（図 15）を開発している。すでにフィリピンでの実証実験で得た 3 次元データを用いた機械学習アルゴリズムの開発を完成させ，事業化を進めている（UTokyoIPC および Instalimb の Web page）。

②補聴器

3D プリンタ業界に詳しい Phil Reeves によると，すでに世界中で一千万台を超える 3D プリンタで製造された補聴器が稼働している。また，補聴器業界向けの 3D プリンタの大手メーカーである EnvisionTEC のマーケティング担当者も世界の大部分の補聴器は 3D プリンタを使用して製造されていると主張している。伝統的な補聴器製造は，鋳型の製造，耳殻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 段階で構成される。これを 3D プリンタによって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。すなわち，聴覚士は 3D スキャナーを使って耳をスキャンし，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 100,000 ～ 150,000 の参照点データを作成し，そのデータは技術者に送信され，テンプレートと幾何学的形状を耳殻のへこみに適用する。このステップでは，技術者が補聴器の複数の組み合わせと幾何学的パターンをテストし，特定の顧客グループ向けにカスタマイズする。その後，耳殻は樹脂を使用して 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る。技術者が耳殻の形状モデリングを終了すると，3D プリンタは補聴器を迅速に製造する（図 16）。例えば，EnvisionTEC の 3D プリンタは 60 分から 90 分以内に 65 個の補聴器または 47 個の補聴器金型を製造することができる（Sharma, R. 2013）。

図 16　3D プリンタで出力した補聴器
出所：Sharma, R. 2013

③義歯床

従来，歯科医院で総入れ歯タイプの義歯を製作する場合，歯の型取りから人工歯の並べ作業，樹脂成形，研磨などの作業があり完成まで約30日間かかっていたが，3Dプリンタは数時間で義歯床を出力し，義歯は約10日間で完成するので大幅な時間短縮を実現した。エフティ・ファインテックプロダクト社は，口新デンタルソリューション社と共同で，3Dプリンタを使って義歯床（入れ歯の基礎部分：図17）を6時間から8時間の短時間で製作できる技術を開発した。3Dプリンタ「FS-320DP」は，義歯床の製作に適したポリメチルメタクリレート（PMMA）の出力に対応したソフトウエアを搭載している。医療認可済みのPMMAを3Dプリンタ用にリール形状にしたフィラメントは材料メーカーと開発した（日刊工業新聞2017年7月20日）。

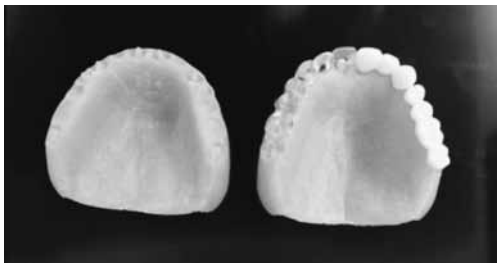

図17　3Dプリンタで出力した義歯床

出所：日刊工業新聞2017年7月20日

④臓器立体模型

手術の際に，安全，確実に行うために3Dプリンタで作成した臓器立体模型を使って手術の予行演習や治癒計画などを検討することが増えてきている。しかし，従来の3Dプリンタの素材の樹脂は高価で，一つの模型制作に数万から数十万円かかっていたので，患者一人一人の立体模型を必要とする臨床への適用は容易ではなかった。筑波大学と大日本印刷株式会社は3Dプリンタを使って安価で，内部構造が見えやすい臓器立体模型を製造した。この模型は，臓器の機能を担う実質部（肝臓の場合は幹細胞部分）の外面に沿うように形成されており，内部のほとんどを空洞化している。樹脂材料を削減したので，従来の三分の一の低コストを実現した。また，内部構造が見やすいので，血管が複雑に入り組んだ箇所の確認しやすくなったため手術チームのイメージ共有，術式のプラニング，術前シミュレーション，手術中の確認作業などの効果を高めることが確認されている。この3Dプリンタよる器立体模型の製造により，費用が低廉化したことと短時間で製造できるようになったので患者にとっても負担が少なくなり，病状説明や手術にあたってのインフォームドコンセント取得時の説明が理解しやすくなった（筑波大学　平成27年7月9日）。

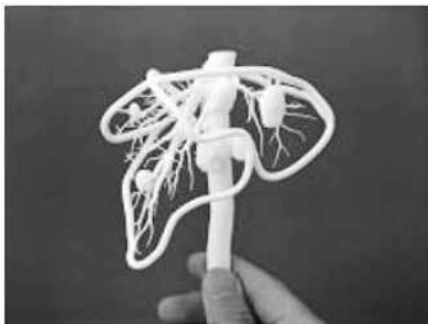

図18　従来の臓器模型（左）と新開発の臓器模型（右）

出所：筑波大学　平成27年7月9日

2　ホールガーメント横編機

（1）織物と編物の相違，織機と編機の相違

織物は経（たて）糸と緯（よこ）糸を相互に一定角度で直線状に交錯させて布地としたものである。糸が交差して「一段ずつ」布地を織り上げていく構造である。糸の種類，太さ，織り方，織り方の密度，用途によって多様な種類がある。織り方は3種類あり，平織，繻子織，綾織が基本的である（SENI-SEARCH.JP および ZUTTO の Web page）。

織物産業の機械化は手織機から始まったが，1785年に英国人エドモンド・カーライトが開発したパワー・ルーム（power loom）が機械動力式の織機（力織機）の嚆矢である。その後，糸から布の製造過程は機械の小型化，省力化，コンピュータ化として発展してきた。裁断工程も CAD/CAM システムの導入で，高速かつ正確な立体裁断が可能になり，手動裁断に比べ作業の安全性や信頼性が高くなった。しかし，縫製工程の自動機械化は困難であるため，人が裁縫機を使って布を縫う。裁縫機は英語で sewing machine であるが，machine がなまったミシンが日本では一般的である。現状では，裁縫工程で人手に頼らざるをえなく，織物産業は労働集約型産業に留まっている。

織物が2次元であるのに対して，編物は3次元である。編物は，1本又は2本以上の編糸で輪奈（わな，loop）をつくり，これに連ねて新しい輪奈を連続的に作って布地を編成するものをいう。糸を直線状に交錯させることなく，編目（loop）をつくる。編物は英語ではニット（knit）であるが，靴下を意味するポルトガル語のメイアシュ（meias）やスペイン語のメディアス（medias）が江戸時代に靴下とともに入ってきた。それらの音が変化したメリヤスが編物を示す単語として一般的になった。1950年代まで機械編みの薄手の編物はメリヤスと呼ばれたが，最近は，メリヤスという表現は肌着に用いられ，編物一般はニットと呼ばれる。以下編物をニットと呼ぶ場合がある（SENI-SEARCH.JP および「日本へのメリヤスの伝来」の Web page）。

1589年に英国人 William Lee が足踏み式靴下編機を発明した。この編機ではひげ針（spring beard needle）が用いられている。ひげ針ではプレスとドローが必要である。1769年に英国で，Samuel Wise が手動横編機を機械化した。しかし，編地の幅を広くしたり狭めたりする成型商品作業は相変わらず人手であった。ひげ針は約250年使用されてきたが，編み目の種類の少なさや編む速度に満足できなかった Matthew Townsend は1847年にラッチニードル（ベラ針）を発明した。ラッチニードルは，編み目自体でラッチ（ベラ）を開閉させるために，編み目の形成が格段に容易になった。1852年にドイツに針メーカーのグロッツ・ベッケルト社が設立され，ラッチニードルの生産が始まった。1863年にアメリカ人の Isaac W. Lamb がラッチニードルを採用した V ベッド型横編機を発明した。この編機は，ひげ針で必要であったプレスとドローを除くことに成功した。また，カムとヤーンガイドを内蔵するキャリッジを付けることにより，針が独立的に制御されるようになり，プレーンステッチだけでなく，リブステッチ，タックステッチまでも可能になった。さらに，この編機は，家庭でもストッキングや衣服が編めるほど操作が簡単であった。ラッチニードルの発明後，約150年経て島精機製作所は2枚のスライダー機構を備えた「スライドニードル」を発明し，4枚ベッドのホールガーメント横編機を開発して，多彩な編み地の編成を実現した（面談（2018年8月9日）による直接取材，島精機製作所［2017］，島精機製作所［2018］）。

(2) 針の編成動作と編み目

ニットウェアは針の編成動作によって編まれていく。編針がループ（編目）を作っていくためには，編針が上昇して，これに糸を供給し，次に編針が糸をくわえたまま下降して，前のループをくぐりぬける。これによって新しいループが作られる。これは編目脱出と呼ばれるが，よこ編とたて編に共通する最も基本的なニット編成の原理でである。よこ編とたて編では，編針の動き方や糸の供給方法などが異なるため，異なった編地となる

針の編成動作には，ニット，タック，ミス（ウエルト）の３位置があり，この組み合わせにより種々の編物が得られる。編成動作の３位置の動きは図 19 である（「ニット機械」の Web page）。この事例の針はラッチニードルである。

(a) ニット：編針が最高位置まで上昇し，編針のべらが，前のループから完全に抜けている状態で給糸を受ける位置。

(b) タック：編針が中間の位置まで上昇し，編針のべらが前のループから抜けでていない状態で給糸を受ける位置。

(c) ミス（ウエルト）：編針に糸がかからないような位置，すなわちループを作らない位置。

(3) 編み針の発展

編み針はひげ針，ラッチニードル（べら針），スライドニードルと発展してきた。編み針の動作と編み目の編成を確認しておこう。

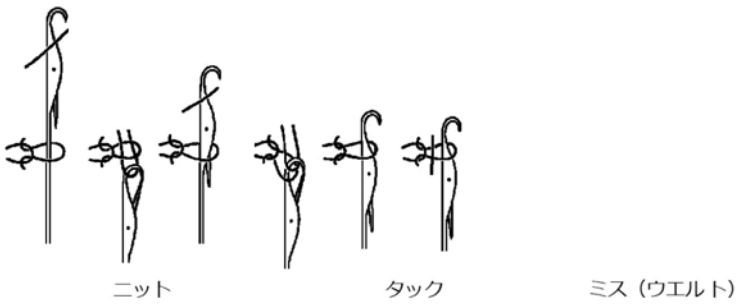

図 19　針の３位置

出所：「ニット機械」の Web page

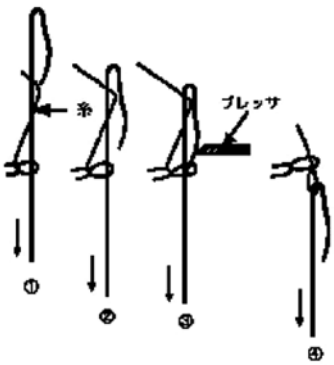

図 20　ひげ針でループ作成

出所：「ニット機械」の Web page

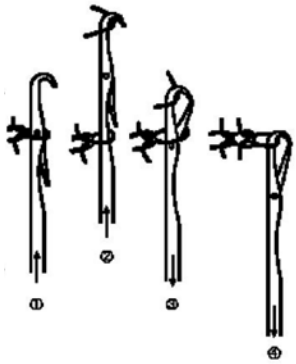

図 21　ラッチニードルでループ作成

出所：「ニット機械」の Web page

1）ひげ針

ひげ針にはべらがないので，プレッサーで押しながら，編目脱出をさせなければならない。図 20 は，ひげ針とプレッサーの関係について説明したものである。

①は，編針が上昇し新しい糸の供給を受けたところ。

②は，編針が下降を始め，新しい糸がフック内に入った状態。

③は，プレッサーが編針のひげ先を押さえ，前のループがひげ先にのった状態。

④は，編針がさらに下降し，前のループが編針から脱出して，新しいループをつくったところ

2）ラッチニードル

図 21 は，ラッチニードルによるループの作り方を示したものである

①は，編針が上昇を始め，べらが開いた状態。

②は，編針が前のループの間を上昇して新しい糸をくわえたところ。

③は，編針が下降してべらが前のループにあたり，閉じられたところ。

④は，編針が糸をくわえたまま，前のループの中を抜けて，新しくループが作られたところ

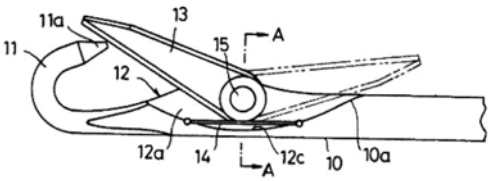

図 22　ラッチニードル

出所：ラッチニードルと asutamuseno の Web page

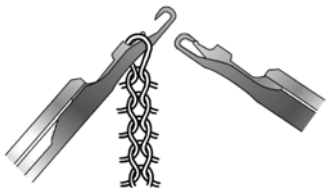

図 23　スライドニードル

出所：日本繊維機械協会「繊維機械について」Web page

3）スライドニードル

スライドニードル（図 23）は島精機製作所が 2000 年に開発した。それまでのラッチニードル（ベラ針）（図 22）とは全く異なる。ラッチに代わる 2 枚組のスライダー機構がニードルフックの上へ突出すことによって複雑な目移しを可能にした。この結果，従来目移しに使用していたトランスファークリップが不要になり，針を溝の中心に配置できるようになった。これにより，ループが左右対称になり，きれいな編み地の編成が可能になる。スライドニードルの優れた機能性は，「ゲージ」[1] という概念を覆し，一着の製品の中に異なるゲージを組み合わせる「ゲージレス・ニッティング」を可能にした。ゲージの種類が複数あるいわゆる「マルチプル・ゲージ」とは異なり，スライドニードル独自の割り増やし技術を活用しているので，ユニークなパターンや風合いを作り出し，製品のバラエティを拡げる。また，ゲージごとに編機を揃える必要 がなくなり，シーズンやトレンドの激しい変化に，柔軟に対応できる（藤村忠司 , 2003, pp.306-307）。

ホールガーメント機 SGW-FIRST はスライドニ ードルを採用することによって，従来 6 種類しかなかった編成テクニックが，12 種類にまで増加した。いままでにない斬新な編組織や複雑なパターンが生み出された（図 24, 図 25）（藤村忠司 , 2003, pp.306-307）。

（4）ホールガーメント

1）ホールガーメントの定義

ホールガーメント（WHOLEGARTMENT）は島精機製作所の登録商標であり，同社が開発した無縫性立体横編機のホールガーメント横編機およびその編機で編成された無縫性ニットウェアを意味する。

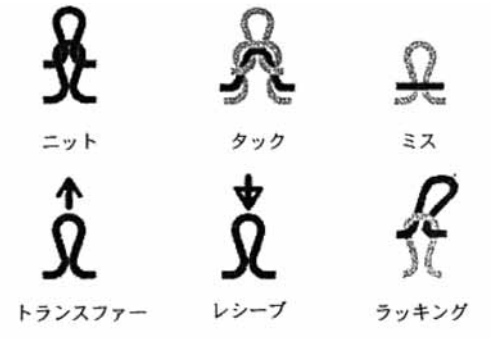

図24　従来のラッチニードルの編成技術
出所：藤村忠司，2003, pp.306-307

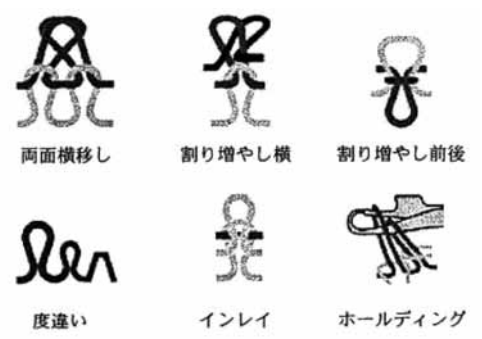

図25　スライドニードルで可能になった編成技術
出所：藤村忠司，2003, pp.306-307

一般的なニットウェアは前身頃，後見頃，両袖，襟に編んだ部分を縫製して合体し完成される。世界の多くのニットウェアメーカーはこの段階である。縫製過程がなく1回の編立てで製品が完成する場合，無縫性と呼ぶが，無縫性のニットウェアの中で次の三つの条件をもつ商品がホールガーメントと呼ばれる（「ホールガーメントについて」Web page）。

①袋状にリブの編み出しができる（前と後ろそれぞれで編み出しが作れる）
②同時に3つの編み出しができる（身頃，袖二つ）
③前と後ろで，それぞれで目移しができる

ホールガーメントは伸縮性があり，縫製部分がないのでシルエットが崩れない。従来の編み地の裁断では30%の素材の無駄が生じていたが，これを解消した。また縫製作業を無くしたので，材料の糸からホールガーメント横編機だけで一気に短時間にニットウェアを編み上げる。すなわち，ホールガーメント横編機はニットウェアを製造するコストとリードタイムを画期的に削減した。

2）ホールガーメントの編立てによる成形順序

ホールガーメントの編立ては次の①から⑤の順序で成形される。

①両袖と身頃が同時に編み出される
②増目，減目によって袖下が身頃にくっつく
③袖山と身頃を筒状に編む
④肩傾斜と襟ぐりが成形される
⑤最後に襟ぐりを編みたてる（図26にはない）

3）ホールガーメント横編機（無縫性立体横編機）に至るまで

島精機製作所の創業者である島正博は1953年に最初の発明である二重環かがりミシンを開発し，販売を始めた。その後作業用

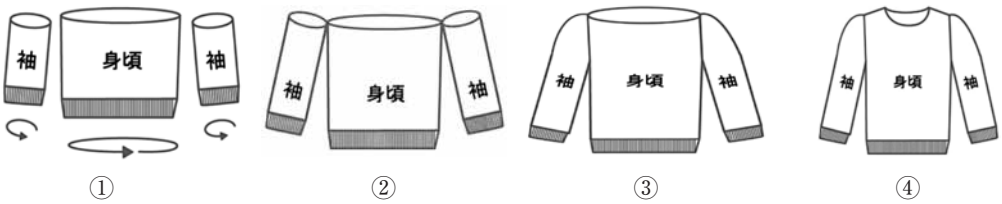

図26　ホールガーメントの編立てによる成形順序
出所：「ホールガーメントについて」Web page

手袋（軍手）に関連する機械の実用新案，特許を重ねながら，長年にわたる編機の技術革新（ほぼ毎年，新技術か新製品を出している）の集大成の一つとしてホールガーメント横編機を完成させた。

靴下と同様に作業用手袋（軍手）は典型的な筒状編物である。作業用手袋の製造は明治時代から機械化されていたが，手動機や半自動機を用いた編成が主流で，各指や手の平，手首部分を接合するためには手作業が必要であった。島正博はゴム糸挿入装置付五指連続手袋編機（1955年開発）などを開発した。1961年に三仲精機株式会社を設立し，1962年に株式会社島精機製作所（以下，島精機製作所）に商号を変更した。1964年に全自動手袋編機（角形）を開発して無縫性の作業用手袋を編み上げることができるようになった。2分15秒で1枚の手袋を編み上げ，編機の操作，管理が容易なので，一人で30台の運転が可能だった。その結果，大量の注文が来た。1967年に全自動フルファッション衿編機（FAC）を開発し，横編物業界に進出した。1970年代はセミジャガード横編機，ジャガード横編機の目移しの自動化の開発を進め，さらに針，ベッド（針床），度目，ループ長などをコンピュータでデジタル制御することを進め1978年にはシマトロニックジャガードコンピュータ制御横編機（SNC）を開発した。デザインのコンピュータ化は1981年のシマトロニクス・デザイン・システム（SDS-1000）の開発から一般的になった。日本で開発したホールガーメント横編機を英国に輸出して稼働を始めた頃，糸切れが発生した。原因を追及したところ，日本と英国の寒暖の差，湿度差によることが分かった。日本の平均的な温度，湿度で給糸装置を設定していたことが原因であった。そこで，糸の供給量，速度，張力を自動調整する機構であるデジタル・ステッチ・コントロール・システム（DSCS）が1982年に開発され，同年特許出願された。1988年に第2世代コンピュータ横編機（SES）が開発され，1995年に世界初の完全無縫性型コンピュータ横編機であるSWG-V/-Wが開発された。1997年には世界で初めてそれまでのラッチニードルに代わりスライドニードルが搭載されたホールガーメント横編機（SWG-FIRST）が開発された。2000年代には，2003年のSW021/041の開発，2006年にコストパーフォーマンスを向上させたワイドゲージ対応のSSG/SIGの開発し，超高速ホールガーメント横編機MACH2Xを2007年に開発した。2013年のループプレッサーベッドと搭載したSRY123LPを経て，2015年に世界初の可動型シンカー搭載4枚ベッドのホールガーメント横編機MACH2XSを開発した（面談（2018年8月9日）による直接取材，島精機製作所［2017］，島精機製作所［2018］）。

4）ホールガーメント横編機で完全自動化を実現している機構（ハードウェア）

ホールガーメント横編機は絶えず発展しているので，定義を述べるのは難しい。たとえば，1995年に開発されたSWG-V/-Wは，2003年に島精機製作所の藤村忠司が学術雑誌に投稿した論文では「ホールガーメント機（無縫性型横編機；形式名SWG-V/-W）と記載されているが，2018年作成の同社の年表では，世界初の「完全無縫性型コンピュータ横編機（SWG）となっている。近年（2013年），島精機製製作所が開発したコンピュータ横編機には，ホールガーメント横編機でない機種SRY123LPもある。本稿での議論はホールガーメント横編機を対象にしているので，「ホールガーメント横編機」の名称がついている最新機種のMACH2XS が持つハードウェアの機構とソフトウェアを抽出し，その特徴をもつコンピュータ横編機を「ホールガーメント横編機」と定義する。

図 27　ホールガーメント横編機 MACH2XS
出所：島精機製作所［2017］

図 28　スライドニードル, 4 枚ニードルベッドおよび可動型シンカーの模式図
出所：島精機製作所［2017］

図 29　ループプレッサーベッド
出所：島精機製作所［2017］

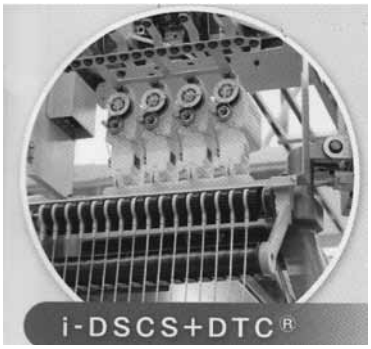

図 30　i-DSCS+DTC
出所：島精機製作所［2017］

図 31　R2CARRIAGE
出所：島精機製作所［2017］

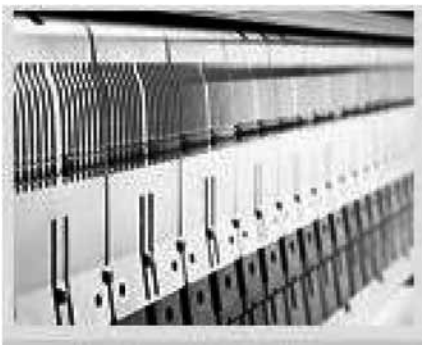

図 32　引き下げ装置
出所：島精機製作所 MACH2XS の Web page

MACH2XS（図 27）で採用されているスライドニードルは伝統的なラッチニードルに比べて綺麗な編み地，高い編成効率を実現する。ニードルベッドを 4 枚にすることにより，無縫性の複雑な編成を可能にした。4 枚ベッド機構に稼働シンカーを採用することにより，デザインの幅を広げ，生産性を高めた。スライドニードル，4 枚ニードルベッドおよび可動型シンカーを模式図にしたのが図 28 である。

織物に比べてニットは編んでいく過程で特有の伸縮が発生する。この伸縮を抑えた編み地を容易に編成する機構がループプレッサーベッドである（図 29）。糸の供給量，速度，張力を機械的に制御しながら自動調整する機構がデジタル・ステッチ・コントロール・システム（DSCS）である。これを発展させ必要に応じて糸送りと戻しの両方向で給糸張力まで正確に電子制御するアクティブなシステムが i-DSCS-DTC（インテリジェント・デジタル・ステッチ・コントロール・システム＋ダイナミックテンションコントロール）（図 30）である。これによって，編成が困難な糸（ストレッチヤーン，ファンシーヤーン，スラブ糸など）やカシミヤなどのデリケートな糸を使用した高速編成が可能になった。糸の種類の相違による伸縮や温度差，湿度差によるばらつきが電子制御によりなくなり，編み上げる際の品質が安定し，最終的なニットウェアの品質の向上に貢献している。キャリッジは生産効率向上の中核となる機構である。R2 キャリッジ（R2CARRIAGE）（図 31）はキャリッジの登録商標であるが，これは各コースの反転速度を上げることにより，キャリッジの加速・減速の性能向上と最高速度の向上を実現したので，ニット製品の編成時間が大幅に短縮された。MACH2XS の引下げ装置（図 32）は，前後の独立したパネルに，編地を引っ掛けるための小さなピンを並べているので，前後の引下げ張力を個別に調整できる。その上，それぞれのパネルは一定間隔で作用範囲が調整可能であるので，引下げ張力をより細かくコントロールできる。これにより，ホールガーメント編成時に三次元的な成型が可能となっている。このように他に類がない機構を備えているのがホールガーメント横編機 MACH2XS である（島精機製作所［2017］）。

要約するとハードウェアとしてはスライドニードル，4 枚ベッド，可動型シンカー，ループプレッサーベッド，R2 キャリッジ，引き下げ装置および i-DSCS-DTC の機能を持つコンピュータ横編機がホールガーメント横編機である。しかし，ハードウェアの他にソフトウェアがなければニットウェアを編むことはできない。

5）ホールガーメント横編機で完全自動化を実現しているソフトウェア

ニットのループの目の大きさは度目値と呼ばれる。度目値が大きくなると目が大きくなり（粗くなる）小さくなると目が大きくなる（詰まる）。糸の太さや糸の混合率を考慮した適正度目値を設定し，編機の針の動作を制御して，標準的な編地を作る。ただし，ニットウェアの風合いを出す際には，度目値を大きくしたり小さくしたりする。この度目値の調整作業は人間が行っていた時代には熟練を要した。

島精機製作所では，1974 年に NC 工作機械を導入して，手袋編機や横編機のデジタル化を進めたきたが，この度目値の調整をデジタル化して制御できるようにしたシマトロニクスジャガードコンピュータ制御横編機（SNC）を 1978 年に開発した。同時にテープメイキングシステム（Tape Making System 以下 TMS）が開発された。TMS は編地の編成や柄のデータを当時使用されていた NC 工作機械で使用されていた紙テープに変換するシステムである。デザインされた柄や編地は TMS で数値化された紙テープに変化さ

れ，それがSNCの入力データとなり，人手を介さずにニットウェアが編み上がる。省力化とタイムログ短縮で他品種小ロットのニットウェアの要求に対応できるようになった。編機の制御のソフトウェアだけでなく，柄模様のデザインに始まり，3次元のシルエットのデザインの至るまで島精機製作所は次に述べるようなデザインのデジタル化に取り組んできた（面談（2018年8月9日）による直接取材，島精機製作所［2017］，島精機製作所［2018］）。

1981年にシマトロニックデザインシステム（SDS-1000）が開発された。この開発によって，TMSからコンピュータ制御に移行していった。その際に，針の3つの編成動作（ニット，タック，ミス）を光の3原色（赤，緑，黄）に対応させて編成ソフトを開発した。これによって針の動作が視覚化され（画面上で検証できる），個別の編成プログラムのデバグとテストが容易になり，生産性が向上した。これは最新版のSDS-ONE APEX3にも踏襲されている。1983年にSDSを核としたアパレル・マルチ・デザイン・システムを提唱した。1984年デジタイザーとペンからの画像入力を可能にし，1985年SDS380シリーズなどCGシステムをテレビ局や自動車業界に納入を開始した。島精機製作所のCGはこれだけでビジネスになるくらいに高度に発展した技術である。1986年にはSDS480アパレル・マルチ・デザイン・システムを開発し，1987年にはニットCAD，ループシミュレーション，ニットペイントが可能なマイクロSDSを開発した。1988年には，トラックキーボード付きサブキーボードを使ってメッシュマッピングが可能になったPGM2（Pattern Grading Marking） を開発した。この機能はCADによる型紙の製図，ニットパーツのサイズ展開（Grading），編み地でのレイアウトのマーキングが可能であるので，アパレルCADと呼んでいる。1993年には，アパレルデザインシステム　商品企画，型紙データ作成，編機用プログラミング，サンプル画像が処理できるTotal Designを発表した。1995年にホールガーメントシミュレーションを開発し，2000年にはAllinONEコンセプトのもと新デザインシステム（SDS-ONE）を開発した。これは，型紙作成を容易にするPGMソフト，編成デー タ作成のためのニットペイント，編機データへの変換ソフトウェア，テキスタイルソフト，そしてスタイル画の描画からバイヤーズカタログ作成のための画像処理まで高品質で行えるペイントソフトを搭載した統合的なデザインシステムである。企画段階における多様な柄模様の編地見本が，CGで代替することが可能になった。ホールガーメントの企画，生産，販売，流通，小売に至るコミュニケーションの基幹となったシステムである。このSDS-ONEは2007年にはホールガーメントの立体表現を可能にした3Dアパレルデザインシステム（SDS-ONE APEX）へ発展し，3Dモデリスト，3Dサブキーボードを使えるようにした。2011年にはシミュレーション機能を強化・高速化を図ったデザインシステム（SDS-ONE APEX3）が発表され，2013年にリアルタイム3Dビューの機能，2015年には高精細バーチャルサンプル作成機能が追加された（面談（2018年8月9日）による直接取材，島精機製作所［2017］，島精機製作所［2018］）。

最新版のSDS-ONE APEX3の機能を確認しておくと，シングルニット，ダブルニットに対応した組織表現が可能である。起毛，プリントなどの加工イメージが作成できる。ボーダー，水玉，アーカイル，ストライプ，チェック，多重織，ジャガード柄などの織物デザインができる。カラーメニューやPantoneから色を選択して配色することができるし，測色計を用いて色見本から直接色を読み取ることも可能である。丸編みCADデータの出力，ビットマップ形式，ストーブ

リ形式でデータを保存したり交換したりすることができる。画面上で現物と変わらないような品質を提供する3Dバーチャルサンプルを提供できるのもこの機種だけである（島精機製作所SDS-ONE APEX3のWeb page）。

SDS-ONE APEX3はホールガーメントの企画から生産までのリードタイムを短縮し，従来のアパレル産業におけるワークフローの無駄を省き，商品の魅力を高める基幹技術であるといえよう。

3　考察

S. Jack Huは製造におけるパラダイムがマス・プロダクションからマス・カスタマゼーション，さらにパーソナリゼーションへとシフトしていると主張したが，具体的な事例を示してパーソナリゼーションを明らかにした訳ではない。本稿では，ホールガーメント横編機と3Dプリンタによって，パーソナリゼーションのレベルの生産システムがすでに完成していること明らかにした。ホールガーメント横編機では材料の糸から最終製品のニットウェアまでを一台の機械だけで完成させる。3Dプリンタだけで義肢装具，義歯床，臓器立体模型を製造することができる。ただし，機能面と構造上から全て3Dプリンタで製造できる訳ではない。3Dプリンタで製造した補聴器には音を増幅する電子回路，スピーカ（レシーバー）を別途取り付ける必要がある。自動車も同様に全てを3Dプリンタで製造するのは無理があるので，ローカルモーターズ（LM）のStratiの場合，全体の70%，すなわちモーター，バッテリー，パワートレイン，タイヤ，ホイールを除いた車体を積層する。

(1) ホールガーメント横編機と3Dプリンタの共通点

ホールガーメント横編機と3Dプリンタは機構が全く異なるが，いくつかの共通点がある。一つ目は材料が入力された後，製品の出力までの製造工程が一台の機械の中で完結していることである。糸とホールガーメント横編機があればニットウェア製品ができる。通常の内燃機関自動車は約4000種類，2万個から3万個の部品で構成されていると言われている。EVの部品数はそれより少ないが，Stratiの部品数はさらに激減する。一般的な自動車メーカーにおける大量な部品の複雑な発注管理，在庫管理を構築するまでもなく少量で限定的な部品管理ですむ。ホールガーメント，Stratiを生産するには今までのようなベルトコンベアは必要なく，ホールガーメント横編機や3DプリンタBAAMを設置できる空間があれば十分である。それを消費者に近い場所に設置すれば，地産地消が可能になる。ローカル モーターズ（LM）ではマイクロファクトリとして全米で展開していこうとしている。

二つ目は，デザインから製造までディジタルデータを用いて直接製造するDDM，すなわちコンピュータで制御されるハードウェア，ソフトウェア，ネットワークの連携である。ネットワークを介してユーザーがデザインしたニットウェアや自動車を作ることができる。ただし，現状では，ホールガーメント横編機の場合，新規デザインの場合，型紙あるいはCADから編み地に変換するプログラムは1週間くらいかけて人間が作業するので，それなりのコストがかかる。ホールガーメント横編機を導入してビジネスとして成功しているのはパリのオートクチュール，ミラノのアルタモーダが知られており，これはパーソナリゼーションに近いといえる。すなわち，極限られた種類のホールガーメントを高価格で販売するブランド戦略である。

しかし日本では，極少量に限定した高級ブランド戦略ではなく，一般消費者も購入できるようにマーケティングが行われている。島

精機製作所とユニクロが2016年の成立した合弁会社イノベーションファクトリがユニクロを中心としたファーストリテイリンググループの，高品質で付加価値のあるホールガーメホールガーメント商品を量産している。さらに両社は連携を強化する予定である（「ファーストリテイリング　島精機製作所と提携強化」繊研電子版，2018/07/13）。ファッションECサイト「ZOZOTOWN」を運営するスタートトゥデイは，採寸スーツ「ZOZOSUIT」を2018年に発表したが，それで計測した体形データをもとに顧客のサイズに合わせた「ホールガーメント®クルーネックニットプルオーバー」を「ZOZO」の新商品として発売を始めている（ZOZOニュース　2018年09月27日）。島精機製作所を取材した際には，担当者がホールガーメント横編機はマス・カスタマイゼーションを推進していると解説してくれたが，このような背景からであろう。

ローカルモーターズでは消費者のグループからなるコミュニティが多くある。そのうちのいくつかはStratiのように3Dプリンタを利用した自動車プロジェクトがあり，デザインの段階から消費者が参加している（LM Labs Ground Mobility, Al Projects の Web page）。伝統的なマス・プロダクションからマス・カスタマゼーションは供給サイドの視点に限定されていたが，ホールガーメント横編機やローカルモーターズでは消費者（ユーザー）が参加する新しいコミュニティからパーソナリゼーションが実現する。

三つ目は両方とも付加製造（AM）方式で，材料の切削工程，裁断工程がないため材料の無駄が生じないことである。島精機製作所の試算では，裁断工程があると材料の30%が無駄になる。材料のコスト削減だけで無く，資源の消費を抑える環境に優しい製品を提供している企業として評価が高まることが期待される。

3Dプリンタとホールガーメント横編機には他にも共通点がある。設計図（CADデータ）が同じなら，製品が1台でも千台でも1台あたりの製造コストは同じである。ホールガーメント機はメカトロニクスの複雑さ精緻さで最上位に位置する機器である。ニットウェアを編むにあたり，機器の初期設定や定期的な保守，トラブル時の対応に高度な技術が必要であり，中小企業での導入と運用は容易ではない。消費者に対して，マス・プロダクションの製品では無い，別の価値観を提供していく必要がある。

（2）生産システムのパラダイムシフトがサプライチェーンに与える影響

生産システムがパラダイムシフトしていくとサプライチェーン・マネジメント（Supply-Chain Management　以下SCM）に影響を与えるかどうかを考察していこう。

SCMに関する最初の学術論文はR. Keith Oliver と Michael D. Webber が 1982 年に発表した「Supply-Chain Management: Logistics Catches Up with Strategy」であると言われている。米国のこの分野のコンサルタントであるWilliam C. CopacinoはSCMを「供給者から消費者まで，資材と製品の流れを管理する技術」と定義している（SCM研究会，1998，pp.16-17）。本稿ではこの定義を採用する。

SCMで用いられる理論の一つが制約理論（Theory of constraints: 以下TOC）である。E. M. Goldrattが1974年に開発した生産管理用ソフトを基にしている理論であり，1984年に彼が執筆したベストセラーの「The Goal」で，理論体系が公開された。TOCは企業目標を達成するためにそれを阻害する制約条件（Constraints）を発見し，そのボトルネックを克服するためのシステム改善手法である。企業の目標である利益最大化のために，「スループット」を最大化すること，「総投資」

を低減させること，「経費」を低減させることを目指す。TOC の考え方を取り入れた i2 テクノロジー社の SCM パッケージソフト RHYTHM は米国の多くの企業に導入されて効果を上げている。（SCM 研究会，1998，pp.39-46）。

SCM 誕生の背景には情報システムと通信ネットワークの発展がある。すなわち，調達の際にコンピュータシステムを利用して単一企業を超えた複数の企業間での情報管理と情報共有の必要性が認識されてきた。また，インターネットのビジネスでの利用拡大に伴い，イントラネットとして社内用途に使用し，さらにエクストラネットとして企業間に用いるようになってきた。そこで，購買調達業務がエクストラネットを足場としてイントラネットと結び付きシステム化が進んだ。SCM は原材料の調達から顧客への製品提供までの一連のプロセスを管理統括する（図 33）。

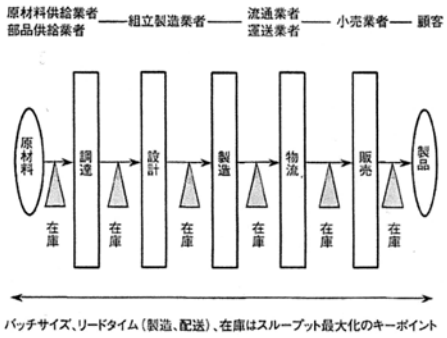

図 33　SCM の構成要素

出所：原　吉伸［1999］, p.69

一般的な製造形態の分類として，MTS（Make To Stock（見込み生産）），ATO（Assemble To Order（受注組立て）），CTO（Configure To Order（受注仕様組立て）），BTO（Build To Order（受注加工組立て）），MTO（Make To Order（受注生産）），ETO（Engineer To Order（受注設計生産））などが挙げられる（山本雅昭，2007，p.738）。最近では，ETO の発展形態として顧客もデザ

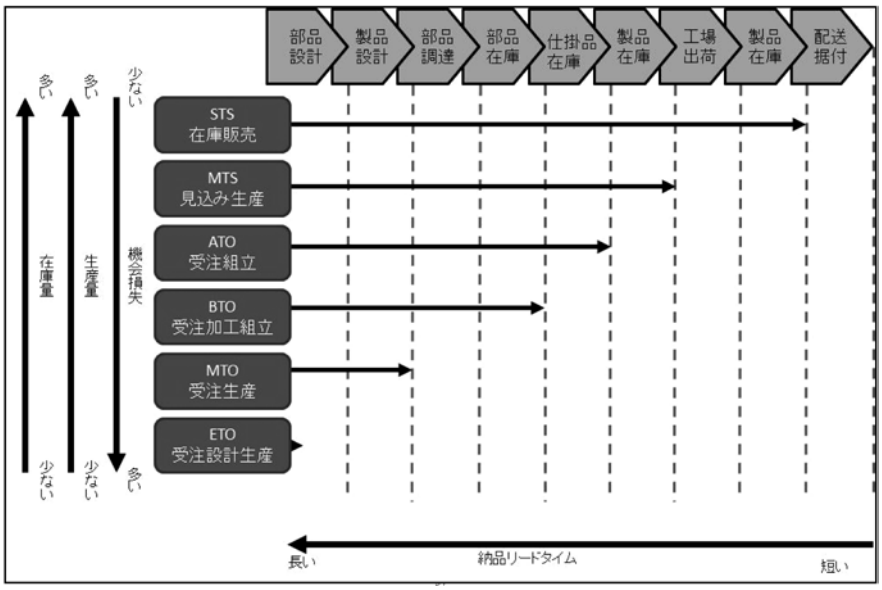

図 34　デカップリングポイントと生産方式

出所：デカップリングポイントの Web page

インの段階から参加するDTO（Design To Order（受注デザイン設計生産））が追加されることがある。

デカップリングポイントはSCMにおいて，「受注に対して，どのポイントで在庫を構えるか」という重要な概念である。よく知られているDellのBTOの場合，デカップリングポイントは，「部品在庫」である。ETOとDTOは在庫を持たない。ETOは顧客からの注文を受けてから仕様決定，設計，生産と移行するのでリードタイムも長くなる。DTOではその上に顧客（または将来の顧客）も設計段階から参加する（図34）。

一般的な自動車の製造形態はMTSである。しかし，ローカルモーターズの3Dプリンタで車輌部分を出力しているStrati　は顧客からの注文が確定してから生産に入るのでMTOに分類できる。Stratiはすでに設計図はできているので，3Dプリンタによる出力と特定の部品の取り付けだけだから，リードタイムは大幅に短縮される。3Dプリンタ用の素材とモーターやタイヤなどの小種類で少量の在庫を持てばよい。ローカルモーターズでは3Dプリンタで作る別の自動車プロジェクトがいくつかあり，顧客はデザインの段階からCADを用いた作業に参加できるので，この事例はDTOといえるだろう。

3Dプリンタで出力した医療用の製品，義足，義肢，義手，義歯床は使う個人に合わせた一品モノであるので，ETOに分類できる。しかし，従来のETOの典型例である航空機，船舶，橋，建物などと異なり，材料から一気に製品を出力するので，リードタイムは短縮される。製品の特性に合わせた3Dプリンタの素材だけを在庫しておけば良い。

一般的なアプレルは典型的なMTSである。しかし，ホールガーメントのニットウェアはパリのオートクチュール，ミラノのアルタモーダではETOに近い。最近の報道によると，ユニクロやZOZOで販売されているホールガーメントのニットウェアは見込み生産のMTSではなく，ある程度実需が確定した時点で生産を開始するMOTを試行しているように思われる。

この節で議論している製造形態のMISはマス・プロダクションに，ATOとBTOはマス・カスタマイゼーション，MTOとETOとDTOはパーソナリゼーションに対応させることができる。

以上の議論からマス・プロダクションからマス・カスタマゼーション，さらにパーソナリゼーションへとシフトが始まっているといえるだろう。しかし，それぞれ生産システムには特徴があるので，一つの生産方式に収斂するのではなく併存するだろう。すなわち，マス・プロダクションでは製品の種類は画一なので，コストが下がるから，商品の単価を下げることができる。マス・カスタマイゼーションでは製品の種類はマス・プロダクションより多くなるが，コストは高くなる。また，マス・カスタマイゼーションでの製品の種類（デザイン，色，寸法）などは供給サイドの視点を反映させたもので，消費者の視点からではない。

マス・プロダクションからマス・カスタマイゼーションへ生産システムがシフトすることは，製品の付加価値が生じる局面が製造ラインの局面から企画，開発，設計局面にシフトすることであるとも解釈できる。製品の競争についても，製造ラインの競争から製品開発の競争にシフトするといえよう。パーソナリゼーションのレベルでは，ローカルモーターズの新しい自動車プロジェクトにみられるように企画，設計の段階から顧客（最終消費者）が参加して製品が完成するまで協同して作業したり，製品に顧客（最終消費者）の視点や要望が反映されたりする可能性が高くなる。パーソナリゼーションの進化した形態では，顧客（最終消費者）は自分の好みを反映した希少性のあるモノとしての製品に対す

る満足だけではなく，製品が完成するまでの共同作業の楽しみ，喜び，感動の共有などに新しい価値を見いだすだろう。このような変化の波に迅速に対応し，新しい付加価値を提供できる企業が競争優位を保つことができると考えられる。

おわりに

生産システムがマス・プロダクション，マス・カスタマイゼーション，パーソナリゼーションへと発展していることが確認できた。マス・プロダクションの生産システムは機械的な設備，機器である。生産ラインの管理は人間が行う。供給側で製品の企画をし，部品を集めて（初期には自社で素材，部品を製造）組み立てる。もっとも，最近のマス・プロダクションはハードウェアにデータ，ソフトウェアを加えて洗練されているが。マス・カスタマイゼーションはカスタマイゼーションのためにはデータとソフトウェアが不可欠である。基本的には供給側の視点で製品がカスタマイズされる。パーソナリゼーションの生産システムはマス・プロダクション，マス・カスタマイゼーションと異なり基本的に生産工程が一つの機械の中で完結する。ただし，自動車や補聴器のように物理的に3Dプリンタだけでは出力できない製品もある。DDMなので，設計データから直接製品が完成する。また，材料から最終製品が完成するので，材料の調達および調達先の管理と顧客管理だけ行えば良い。パーソナリゼーションの生産システムが徐々に増加していけば，製造業やサプライチェーンに対してさらにどのような影響を及ぼすかは今後の研究課題である。さらに，企業は製品の企画，設計段階から参加する顧客（消費者）とどのような新しい付加価値や感動を共有できるかなど生産者と消費者の関係について興味深い研究テーマが待っている。

謝辞

本稿は2018年度日本大学商学部・個人研究費による研究成果の一部である。

取材を快諾してくれた島精機製作所の今井博文氏および亀井孝典氏に感謝申し上げる。

（注）

1）ゲージとは編機の針の密度を表す単位である。1インチ（2.54cm）間に針が何本あるかを表す。例えば7G（ゲージ）であれば，1インチの間に7本の針がある。数値が大きいほど目が詰まった編物ができる。

（参考文献，参考ウェブページ）

以下のウェブページは2018.12.1 ～ 2019.1.5の間に参照した

黒田　充［2011］『納期見積もりと生産スケジューリング』朝倉書店

コイワイ会社案内［2013］

（http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seisan/new_mono/pdf/002_02_00.pdf）

崔 裕眞［2012］「島精機製作所 ニット製品の最先端生産方式開発の技術経営史：手袋編機用半自動装置（1960年）からMACH 2シリーズまで（2010年）」，一橋大学 GCOE プログラム「日本企業のイノベーション実証経営学の教育研究拠点」大河内賞ケース研究プロジェクト（ http://pubs.iir.hit-u.ac.jp/admin/ja/pdfs/file/1342）

島精機製作所［2018］『HISTORY OF SHIMA SEIKI』
島精機製作所［2017］『会社案内』
島精機製作所 MACH2XC（https://www.shimaseiki.co.jp/product/knit/mach2xs/）
島精機製作所 SDS-ONE APEX3（http://www.shimaseiki.co.jp/product/design/sdsone_apex/）
「繊維機械について」（http://www.jtma.or.jp/explanation/5knitting.html）
筑波大学　平成 27 年 7 月 9 日（https://www.tsukuba.ac.jp/wp-content/uploads/150706okouchi1.pdf）
デカップリングポイントの Web page
（https://shikumika.com/index.php?%E3%83%87%E3%82%AB%E3%83%83%E3%83%97%E3%83%AA%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%83%9D%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%88）
ナイガイ「自動編機の発明」『靴下博物館』
（https://www.naigai.co.jp/museum/history/invention/index.html）
ナイガイ「日本へのメリヤスの伝来」『靴下博物館』
https://www.naigai.co.jp/museum/history/introduction/index.html
日刊工業新聞 2017 年 7 月 20 日「入れ歯の基礎，3D プリンタで 8 時間以内に制作できます」
（https://newswitch.jp/p/9757）
「ニットの度目について」『Knittingbird』
（http://knittingbird.com/2011/06/13/586/）
日本繊維機会協会「繊維機械について」（http://www.jtma.or.jp/explanation/5knitting.html）
日本繊維機会協会「５．編組機械」（http://www.jtma.or.jp/explanation/5knitting.html）
ニット機械（http://www.geocities.jp/mikiya_kondo_ybb/knit_museum/knit2/knit2.htm）
原　吉伸［1999］『導入サプライチェーン・マネジメント』ダイヤモンド社
藤村忠司［2003］「無縫製ニットウェア『ホールガーメント』の開発」『繊維工学』Vol.56,No.7, 2003,pp.305-310　（https://www.jstage.jst.go.jp/article/transjtmsj1972/56/7/56_7_P305/_pdf）
「ファーストリテイリング　島精機製作所と提携強化」繊研電子版，2018/07/13 16:12 更新（https://senken.co.jp/posts/fr-shimaseiki-180713 ）
「ホールガーメントについて」, Knittingbird（http://knittingbird.com/2016/11/08/623/）
矢野総研経済研究所［2018］「プレスリリース」N.2056, 2018.12.27
（http://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2056）
山本雅昭［2007］「継続的成長のためのデルの事業補完戦略」『広島経済大学創立四十周年記念論文集』広島経済大学 , pp.727-769
ラッチニードル , astamuse（https://astamuse.com/ja/published/JP/No/2008031587）
（http://harp.lib.hiroshima-u.ac.jp/hue/detail/392520140128153956）
SCM 研究会［1998］『サプライチェーン・マネジメントがわかる本』日本能率協会マネジメントセンター
ZOZO ニュース　2018 年 09 月 27 日（https://corp.zozo.com/news/20180927-5827/）

Additive Manufacturing Technology Assessment - Department of Energy, pp.10-11
（https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/QTR%20Ch8%20-%20Additive%20Manufacturing%20TA%20Feb-13-2015_0.pdf）
Anderson, C. [2013], *Makers: The New Industrial Revolution*, Random House Business Books
COPEN DRESS-FORMATION（https://copen.jp/product/dress/report）

How BMW makes Jigs and Fixtures with Additive Manufacturing - Case Study
（https://www.engineering.com/ResourceMain.aspx?resid=242）

Hu, S. Jack［2013］, “Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization”, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013, Procedia CIRP 7（2013）

ICHIDA, Y［2015］. “Current Status of 3D Printer Use among Automotive Suppliers: Can 3D Printed Parts Replace Cast Parts?”, *IFEAMA SPSCP* Vol.5, 2016, pp.69-82
（http://www.ifeama.org/ifeamaspscp/selected%20papers/13th%20in%20Ulaanbaatar/13th%2006%20%20Y_Ichida_final.pdf）

ICHIDA, Y［2017］. “Competitive Advantage of Additive Manufacturing Strategy in the Design Phase for Automotive Suppliers”, *Knowledge Transfer and Transformation*: *Global and Local Business for Competitiveness Social Justice*, pp.528-548, 2017, Nepalese Academy of Management

Joseph Pine II, B. *The Experience Economy*: *Work Is Theater* & *Every Business a Stage*, 1999, Harvard Business School Pres, *Authenticity*: *What Consumers Really Want*, 2007, Harvard Business School Press and *Infinite Possibility*: *Creating Customer Value on the Digital Frontier*, 2011, Berrett-Koehler Publishers.

Kodama, H.［1981］“Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer” *Review of Scientific Instruments*, Volume 52, Issue 11, American Institute of Physics, November 1981, pp.1770-1773

LM Labs Ground Mobility, Al Projects,（https://launchforth.io/discover/ground-mobility/）

Oak Ridge National Laboratory （https://www.ornl.gov/blog/eesd-review/mdf-new-large-area-multi-material-printer-advance-research）

Richardson, B., Roschli, A., Noakes, M., “BAAM Additive Manufacturing of a Building Integrated Wind Turbine for Mass Production”, *CRADA FINAL REPORT NFE-17-06605*, May 15, 2018（https://web.ornl.gov/sci/manufacturing/docs/reports/web_Hover_Final_Report.pdf）

Sculpteo［2017］, THE STATE OF 3D PRINTING
（https://www.sculpteo.com/media/ebook/State%20of%203DP%202017_1.pdf）

SENI-SEARCH.JP,（https://www.seni-search.jp/knit.html）,（https://www.seni-search.jp/knit2.html）

Sharma, R.［2013］, “The 3D Printing Revolution You Have Not Heard About”, *Forbes*, Jul 8, 2013, 05:05pm（https://www.forbes.com/sites/rakeshsharma/2013/07/08/the-3d-printing-revolution-you-have-not-heard-about/#45366a581a6b）

Strati,（https://launchforth.io/localmotors/strati-the-worlds-first-3d-printed-car/latest/）

Strati: the World’s First 3D-Printed Car Project, Project: Handbook
（https://launchforth.io/localmotors/strati-the-worlds-first-3d-printed-car/handbook/）

Tseng, Mitchell M, Hu, S. Jack, Wang, Yue［2014］“Mass Customization” mckn.eu
（http://www.mckn.eu/wp-content/uploads/group-documents/1/1374491988-masscustomization.pdf）
（http://dougneckersexplores.com/data/documents/1.1136492.pdf）

UTokyoIPC, 2018.06.11 リリース（https://www.utokyo-ipc.co.jp/2018/06/11/%E7%AC%AC%EF%BC%92%E5%9B%9E%E3%80%80%E6%9D%B1%E5%A4%A7ipc%E8%B5%B7%E6%A5%AD%E6%94

%AF%E6%8F%B4%E3%83%97%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0%E3%80%80%E6%94%AF%E6%8F%B4%E5%85%88%E3%82%92%E6%B1%BA/）
Wohlers Report 2012, Norman, C. and Seaman, P, “3D PRINTING EDGE MANUFACTURING”, slide 8（https://www.slideshare.net/patrickseaman/3d-printing-edge-manufacturing-white-paper）
Wohlers Report 2013,
（https://www.meddeviceonline.com/doc/d-printing-in-biomedical-applications-overview-and-opportunities-0001）
Wohlers Report 2017,
（http://www.cadalyst.com/hardware/3d-printers/wohlers-report-finds-slower-overall-growth-more-competition-3d-printing-space-3）
Wohlers Report 2017（https://wohlersassociates.com/blog/2018/02/most-popular-am-application/）
Wohlers Talk , Most Popular AM Application, February 24, 2018, Wohlers Talk
（https://wohlersassociates.com/blog/2018/02/most-popular-am-application/）
ZUTTO,（https://www.zutto.co.jp/blog/category/howtouse/312）

（Abstract）

This paper begins with review of the discussion for a paradigm shift from mass production, mass customization to personalization. Next, a paradigm shift in the production system are discusses using case examples. The focused industries are the automotive industry, the medical industry and the apparel industry. The examples are as follows; 3D printed vehicle manufacturing by Local Motors in the automobile industry, 3D printed prostheses and hearing aids in the medical industry, knitwear knitted with WHOLEGARMENT knitting machine in the apparel industry. Production using 3D printers and WHOLEGARMENT knitting machines is different from production systems working on conventional production lines. In discussing the paradigm shift, the mechanism and features of 3D printer and WHOLEGARMENT knitting machine should be needed, so chapters are assigned to each. The issue is discussed common points between 3D printers and WHOLEGARMENT knitting machines, which have different appearances and functions, and the influence shared with users from the characteristics of the production system and its originality. It also discusses how the paradigm shift of the production system will affect supply chain management.