

プラスチック・ワイヤー企業に

3D プリンター技術導入可能性の考察

中 邨 良 樹

1. はじめに

IoT やビッグデータを活用し、企業経営に役立てるために、国や企業連合体での取り組みが多くみられる。ドイツでは Industry 4.0、アメリカ合衆国はインダストリー・インターネット、中国では中国製造 2025、日本でもインダストリアル・バリューチェーン・イニシアチブ (IVI)、IoT 推進コンソーシアムなどで推進している¹⁾。その一環に、3D プリンターの活用を掲げている。たとえばアメリカ合衆国では、オバマ前大統領が 2013 年 2 月の一般教書演説で、3D プリンターで製造することでイノベーションが起こることを期待していると論じている²⁾。日本政府も「産業競争力強化法案³⁾」で新製品の試作品づくりに使う「3D プリンター」などの先端設備を導入した企業などを減税や補助金で支援することを言っている。つまり、製造業にイノベーションを起こさせる分岐点とも考えられる。ここで 3D プリンターとは、コンピュータ上で描いた 3 次元画像をもとに、樹脂や粉末を積み重ねて立体を造形する装置であり、低コスト・短時間で製品を造形することができる⁴⁾。3D プリンターを企業に取り組んでいる例として、General Electronic 社 (GE) があげられる。GE は金融業を縮小し、“Industrial Internet”という産業用機器と IT の融合に関するコンセプトのもと、製造業に回帰している。具体的には、GE がボーイング社の飛行機に納品しているエンジンにセンサーを付けて、飛行経路や時間、燃費などの大量のデータを習得、分析し、エンジンの効果的な稼働率、消耗からの交換提案などを行っている⁵⁾。そして故障した部品に対して、3D プリンターの活用を提言しており、2020 年までに 3D プリンターの部品を 10 万個生産する予定としている。これはサイバー（コンピュータ空間）にある設計データや制御データを利用して、フィジカル（現実世界）の 3D プリンターで部品を造成し、スマートファクトリーで機械（モノ）を組み上げるという、フィジカルからサイバーへの連携を提唱している。一方、3D プリンターに関わる先行研究を見ていくと、3D プリンターの可能性について⁶⁾、効率的なプリンティング方法⁷⁾、製造業や自動車、医療器具などへの展開⁸⁾⁻¹⁰⁾ など様々ある。経営に関わることでは、Kenny¹¹⁾ の費用に関する研究がある。

このような背景や先行研究の中で、筆者はプラスチックワイヤー企業に 3D プリンターを導入したならば、ということを想定し、経営管理の視点で研究を進めてきた。本報告では、今までの成果を報告しつつ、今後の展開を論じていきたい。

2. 本研究対象のプラスチックワイヤー企業と 3D プリンター導入の想定について

対象のプラスチックワイヤー（以下、PW）企業について説明する。PW 企業は不純物を除去（ろ過）するためのプラスチック性の網を作る企業である。そのプラスチックの緻密度で、除去率が変わってくる。図 1 が製造工程である。PW を 1m × 5m の製品を作る場合の時間や費用、在庫管理について説明する。織継とは、網を機械で織る工程であり半日かかり 1 次仕上げする。現在は Make to Stock の見込生産であり、常時 500～800 枚は在庫している。ユーザーから注文が入ると織継という網を従業員の手作業で継いでいき、オーダ毎のサイズに切出していく。3 日ほど必要で、Make to Order となる。最後の 2 次仕上げは、オーダ毎に異なる加工（端部への強化樹脂塗布等）を 1H 施す。そして、出荷していく。

この PW 企業における現状の課題としては、

- ・ 客の要望を取り入れた製品設計のため、生産段取りに時間がかかる。つまり、リードタイムが長くなる。
- ・ リードタイムの中で、人が織る織継が長い。これが製品在庫増大と人件費によるコスト高を招いてしまう。
- ・ 2 次セットの仕上げにおいて、注文のサイズに切り取るため歩留りが低く、ロスが多い。などがある。作業によって受注形態が異なり、かつ時間も費用、在庫・仕掛管理の必要性が高い企業である。

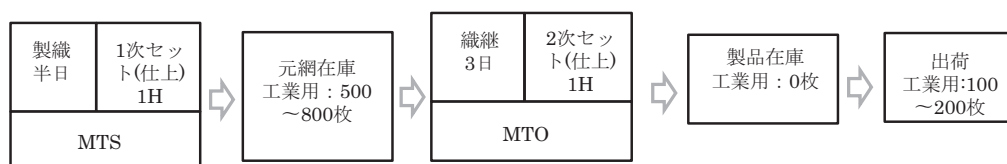


図 1. 現在の PW 生産工程

そして、3D プリンターをこの PW 企業に導入することを考えていく。近年、PW 企業では需要速度を考慮し、生産座席システムを使って、実際に保有する在庫ではなく、生産計画から産出する未来在庫に引き当てる方式を、別製品で取り入れている¹²⁾。生産座席システムとは、列車や航空機の指定席予約システムのようにあらかじめスケジュール（生産座席枠）を作成して、これに注文を顧客が要望する納期に間に合うように割当て生産方式である¹³⁾。この生産座席システムを PW 生産に取り入れた場合と、さらに 3D プリンターを導入した場合の両方について、「販売・需給調整・製造」の関係を分析し、検討事項についてまとめる。

現行の PW の製造システムでは、リードタイムが長く、元網を見込みで作り、後半の織網・2 次仕上げをするために元網をカットする。したがって、注文のないサイズの製品も含め製品在庫を増やし、製品廃棄ロスまで発生させている。しかし、3D プリンターによる生

産は1品生産で、PWが一気に生産できることでロスのない生産が可能となる。今回の対象工程の加工期間を考えると、

$$1D(4H) + 3D + 1D(2H) = 5\text{Day}$$

で、1週間単位で動いている。そして、図2がPW企業の販売・需給調整・製造の関係である。流れは、製織日程計画から元継在庫を算出し、材料枠とする。また、ネック工程の織り継ぎ工程の生産能力から能力枠を作り、販売計画から基準生産計画を作って、これらをベースに生産座席枠を作成する。これに実オーダーを取り込んで生産座席に予約する。納期回答も行い、生産座席確定を1週間単位で行って、翌週の製織、織り継ぎ、仕上げ日程計画を確定させる方式である。

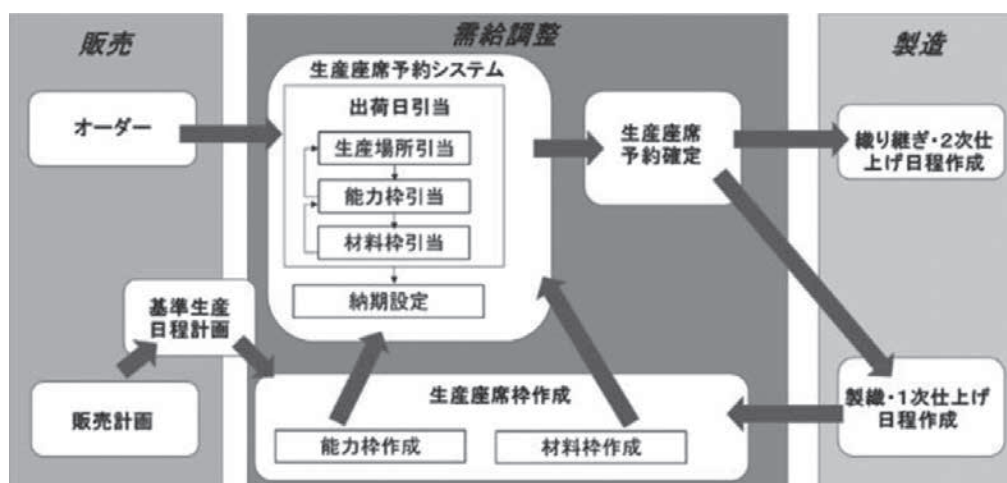


図2. PW企業の販売・需給調整・製造の関係

図3が3Dプリンター導入による生産座席システムの販売・需給調整・製造の関係である。設置場所・機械別の3Dプリンター稼働時間から能力枠を作成する。中間材料がないので、原料枠（量に制約なし）として、販売計画から作った基準生産計画をベースに生産座席枠を作って、開示する。3Dプリンター生産は、オーダー時に生産時間、消費材料、ロジスティクスコストが見積もれるので、これらの総コストを算出するとともに、原料、能力、生産場所を引き当てて、納期・納所設定する。また、総コストを評価してから、生産座席を確定させる。生産座席予約確定から、1週間単位の3Dプリンター稼働日程計画とロジスティクスセンターの出荷日程計画を確定させる。また、3Dプリンターによる生産は、材料積層による付加生産のため、現行の2次セット仕上のような大量のロスは発生しない。

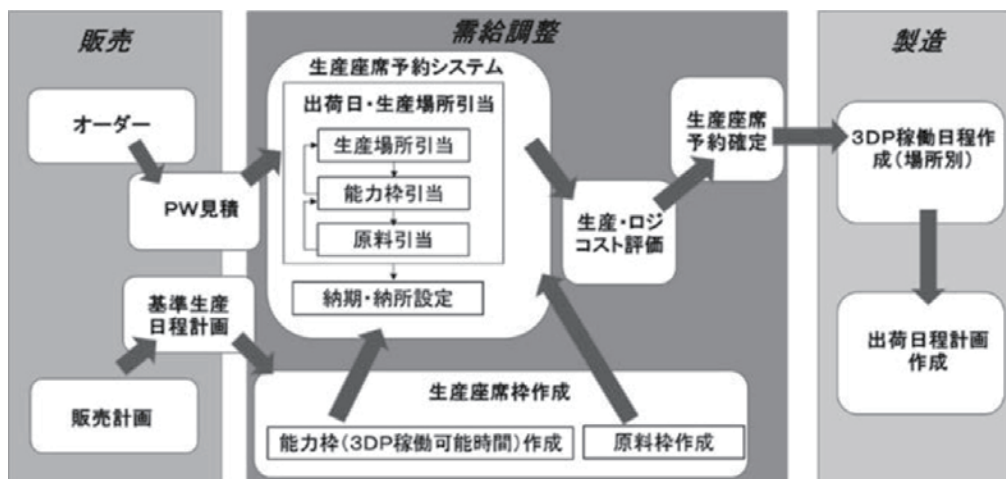


図3. 3D プリンター導入による生産座席システムの販売・需給調整・製造の関係

以上の比較より、3D プリンター導入における検討事項をまとめると、

- ・3D プリンター生産に切り替えることにより、織継の人手工程を無くし、完全機械化が可能になる。また、材料から積層による付加生産のため、ロスによる歩留まりを考慮しないが良い。
- ・3D プリンターはまだ能力が低く高価なため、需要量より大きな生産能力（機械台数）は持てない。
- ・3D プリンターの価格と能力がどのくらい下がれば、現行製造システムの価格と遜色ない導入効果が得られるか、コスト算出システムにより試算する。
- ・前年実績をベースに3D プリンターを配置し、基準生産計画を作り座席枠を反映する。しかし、実際のオーダ発生状況により、納所を優先するか、在庫を持つか検討する。
- ・完成品在庫を多く抱えると納期は短縮するが、必ずしも納所対応はうまくいかない。
- ・3D プリンター生産による人の関わり、情報分析の役割、工程の機能の変化を検討する。
- ・3D プリンター数が無限ならば、当初の需要計画から納所、納期を確保する3D プリンターの設置場所、台数を設定できる。
- ・3D プリンターは、品種・サイズの切り替え時間を考えることは必要なく、時間割り当てのみを考慮すればよいことになる。すなわち、稼働時間だけを考えればよい。
- ・計画にオーダを引き当て、時間をバッファーとした制御方法である生産座席システムを使用することで、3D プリンターの稼働時間だけをコントロール対象として考えればよい。
- ・3D プリンターでは製造中の手間はかからないが、外工数として完成後の交換と準備に人手がかかる。労働時間（8H）を超えると、残業代がかかることになる。
- ・コストの積み上げ型、見積もり方法を検討する必要がある

などがあげられる。

3. 3D プリンター適用時のコストについて

次に、3D プリンターの導入によりコスト構造がどのように変化するのかを分析する。そのために、IDEF0 とコストマトリクスを使用する¹⁴⁾。IDEF0 とは、事業の仕組みをアクティビティ同士の関係を図解したものである(図4)。例えば「3D プリンター」のアクティビティ図は、原材料と STL ファイルを入力(左アロー)し、完成品が出力(右アロー)される。その際、上アローの部品と材料情報が制約条件で、下アローがアクティビティを実施する3D プリンターや PC の機構となる。また、IDEF0 の階層構造を利用し、アクティビティを入れ子構造で表現する。それぞれの階層には対し1つのビューを設定する。ビューは、その階層のプロセスを1回実行することで、出力される製品やサービスの1単位に対応する。図5が対象企業のPW 生産工程の IDEF0 図である。

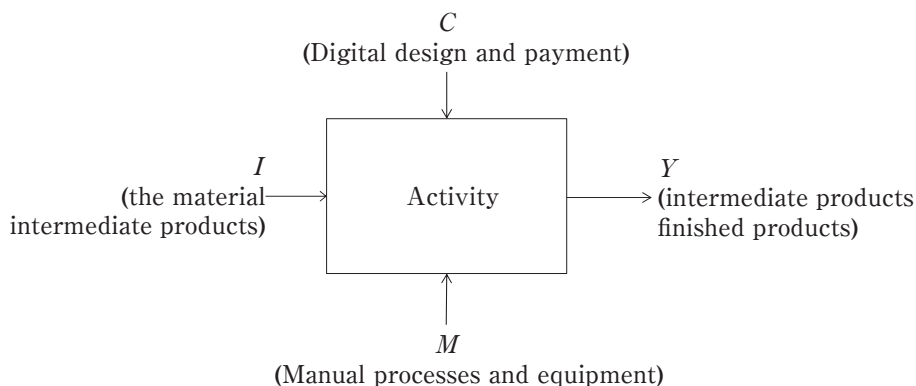


図 4. IDEF0 図

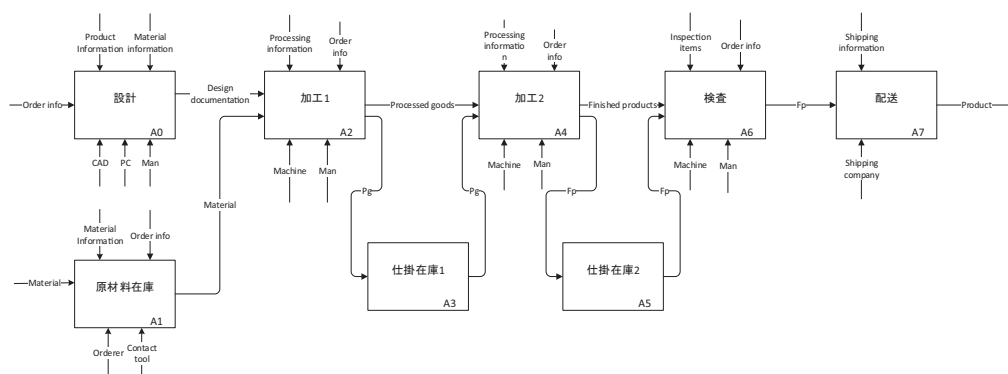


図 5. PW 企業の IDEF0 図

図6が3Dプリンター導入した場合のIDEF0図である。図6は設計、造形、検査の3工程になる。大きな相違点は「設計」である¹⁵⁾。3Dプリンターを使用するために、必要な3Dデータ(STLファイル)を作成する。作成には3DCAD(コンピュータによる3次元設計ソフト)、3DCG、そして3Dスキャナーの3種類のデータ作成方法がある。この設計情報が、造形、検査、出荷までの時間を決定する。したがって、付加価値は、「もの」ではなく「設計情報」に移行する¹⁶⁾。

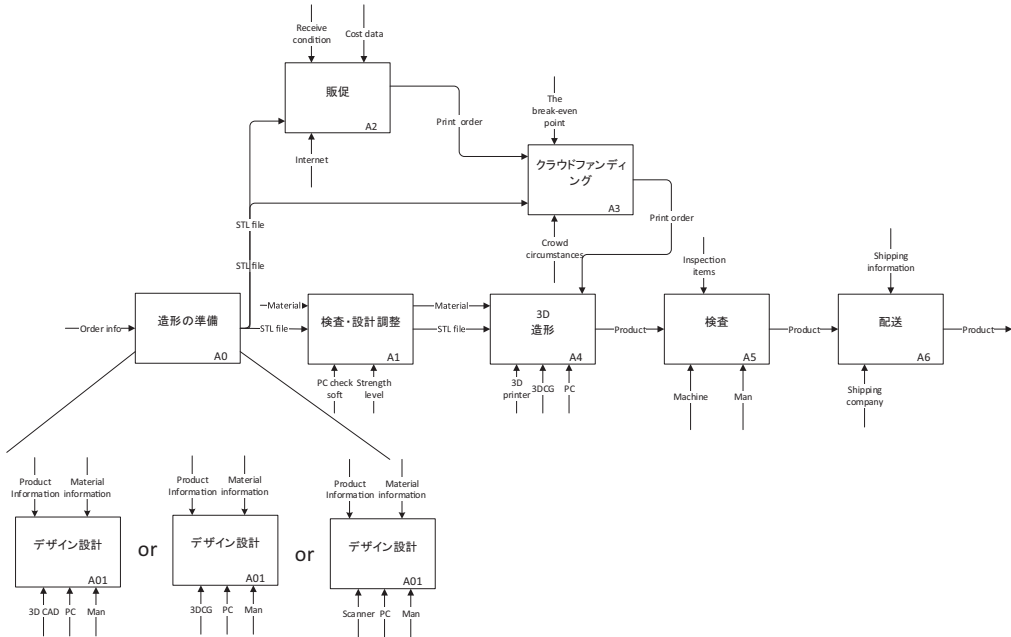


図6. 3Dプリンター導入の場合のIDEF0図

次に、これらの工程のコストを「コストマトリックス」を使い算出し、コストや影響を受けるパラメータの値を算出するパラメータ影響分析モデルを構築する。コスト管理モデルの定式化を以下に行う。各アクティビティの入出力について以下の記号を定義する。アクティビティの産出する製品もしくは半製品 $Y_{y(n)}^n$ のコストは、(1)式となる。

$$C^n = [c(Y_1^n) \ c(Y_2^n) \cdots c(Y_{y(n)}^n)]^T$$

$$= [Q^n | R^n] \begin{bmatrix} SQ^n & 0 \\ 0 & SR^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E^{i(n)} - L^n & 0 \\ 0 & E^{m(n)} - K^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^n & 0 \\ 0 & S^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^n \\ M^n \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、

n : アクティビティ

Q^n : 原材料

R^n : 稼働時間

SQ^n : 注文サイズによる材料行列

SR^n : 注文サイズによる稼働時間行列

L^n : 材料仕損率

K^n : 稼働ロス率

U^n : 単位当たりの材料コスト

S^n : 単位当たりの稼働時間

I^n : 設備量

M^n : 材料量

表1がアクティビティA1のIDEF0図より、コストマトリックスを使って計算した結果である。最終製品のサイズは縦50mm、横100mm、高さ20mmのものである。初期値を設定することで、3Dプリンター導入前と後のコストが計算できる。左列より“Activity”が工程での活動であり、そのときのインプットアウトプットが“ICOM”、“Content”がそのときの消費量である。“Total price”が“Contents”の総計である。総計は“Quantity after the loss”と“Unit price per quantities”を乗算したものである。たとえばA12の製織プロセスの“Unit price per processing”は、500gのワイヤが $2,000\text{mm}^2$ になる。その結果、材料費が $500\text{g} \times 500$ 円で250,000円となる。これが材料費になる。そして、250,000円が $2,000\text{mm}^2$ 割ると単位当たり125円となる。この125円がA13'の入力になる。織継マシンは0.5時間で200,000円になる。最終的に、A12の単位当たりの総計は100,000円となる。他のアクティビティも同様に計算していく。

表2が、PW企業に3Dプリンター導入した場合のアクティビティコストである。

表 1. A1 のアクティビティコスト

Activity	ICOM	Content	Quantity	Quantity after the loss	Unit price per quantities	Total price	Processing time	Unit price per processing	Processing price
A11: Material inspection	Output	Inspected wire	100 g	100 g			2,500 h	20,000 ¥/h	50,000,000 ¥
	Mechanism	Examiners	100 g						
	Control	Inspection info							
	Input	Raw material	100 g		500 ¥/g	50,000 ¥ 50,000 ¥ 500.00 ¥			50,000,000 ¥ 500,000.00 ¥
A12: Warping	Total								
	Unit cost with loss								
	Output	Warping net	2,000 mm ²	2,000 mm ²			2,500 h	100,000 ¥/h	250,000,000 ¥
	Mechanism	Warping machine							
A13: Weaving wire	Control	Manufacturing info	500 g	500 g	500 ¥/g	250,000 ¥ 250,000 ¥ 125.00 ¥		500,000 ¥/h	250,000,000 ¥ 500,000,000 ¥ 250,000.00 ¥
	Input	Inspected wire							
	Total								
	Unit cost with loss								
A14: Heat set	Output	Weaving wires	1,500 mm ²	1,470 mm ²			1,500 h	100,000 ¥/h	150,000,000 ¥
	Mechanism	Loom							
	Control	Manufacturing info							
	Input	Warping net	1,500 mm ²	1,500 mm ²	125 ¥/mm ²	187,500 ¥ 187,500 ¥ 127.55 ¥		250,000 ¥/h	375,000,000 ¥ 525,000,000 ¥ 357,142.86 ¥
A1: Base fabric Manufacturing	Total								
	Unit cost with loss								
	Output	Base fabric net	500 mm ²	500 mm ²			1,000 h	50,000 ¥/h	50,000,000 ¥
	Mechanism	Drier							
A1: Base fabric Manufacturing	Control	Manufacturing info	500 mm ²	500 mm ²	128 ¥/mm ²	63,776 ¥ 63,776 ¥ 127.55 ¥		357,143 ¥/h	178,571,430 ¥ 228,571,430 ¥ 457,142.86 ¥
	Input	Weaving wires							
	Total								
	Unit cost with loss								

表 2. 3D プリンター導入のアクティビティコスト

Activity	ICOM	Content	Quantity	Quantity after the loss	Unit price per quantities	Total price	Processing time	Unit price per processing	Processing price	
A1: Making the design	Output Mechanism	Design files	1 byte	1			115 h	35 ¥/h	4,002 ¥	
		Scanner					115 h	9 ¥/h	1,000 ¥	
	Control	PC					115 h	1,000 ¥/h	115,256 ¥	
		Man								
		Product Information Material Information Sample Product	1 m	1					119,258 ¥ 119,257.90 ¥	
A2: 3D printer's molding	Unit cost with loss									
	Output	Product	100 mm	100 mm	500 V/g	50,000 ¥				
	Mechanism	Package								
		3D printer					173 h	347 ¥/h	60,029 ¥	
	Control	3D soft								
		PC								
	Input	Order information								
		Printer ability								
		Raw material	500 g		10,000 ¥/g	5,000,000 ¥		119,258 ¥/h	59,628,951 ¥	
	Unit cost with loss									
A3: Delivery	Output Mechanism	Design files								
		Delivery machine								
	Control	Delivery person in charge								
		Customer information								
	Input	Shipping information								
		Finished inspected product	100 mm		1,000 ¥/mm	100,000 ¥		10 h	260 ¥/h	2,604 ¥
		Product information						1 h	1,000 ¥/h	1,000 ¥
	Unit cost with loss									
							</			

このコストマトリックスを利用してシミュレーションを行った。シミュレーションは、サイズによる総コストと総作業・プリント時間である。この結果より、サイズ400（×10,000）を分岐点に3Dプリンター導入の方がコストが低くなる。理由としては、サイズが大きくなるほど、人の手が必要になり、人件費が上がっていくことを意味している。

表3. サイズの大きさによる印刷時間・コスト結果

W	D	H	Volume	U-Tcost	3D-Tcost	U-Time	3D-Time
20	50	10	10,000	624.79	1,384.92	675.38	418.93
50	100	20	100,000	1,276.71	2,372.33	11.67	7.18
60	150	40	360,000	2,019.93	3,445.67	733.13	443.49
100	200	50	1,000,000	3,758.16	4,668.54	13.29	7.63
100	400	100	4,000,000	8,235.63	8,462.31	17.25	8.39
200	500	100	10,000,000	18,540.46	11,231.99	24.44	8.94
200	600	150	18,000,000	25,399.96	13,831.86	32.13	9.46
200	700	200	28,000,000	33,333.55	16,346.12	41.48	9.95
300	800	200	48,000,000	55,676.66	19,435.04	61.50	10.57
300	900	200	54,000,000	62,591.90	21,183.21	67.81	10.92
300	1000	200	60,000,000	69,507.11	22,884.31	74.13	11.25

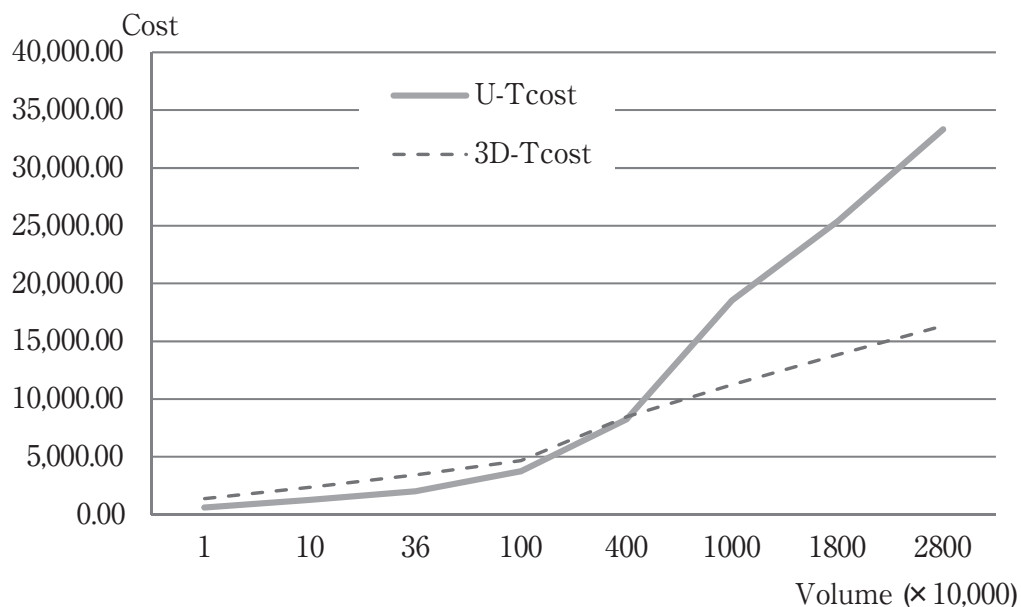


図7. サイズ（体積）によるコスト推移

4. おわりに

本研究では、PW 企業を対象に、3D プリンターを導入したならば、どのような課題や可能性があるのかを検討してきた。その結果、見えてきた課題や検討事項などを列挙する。

スケジューリング：ユーザーが希望する製品をカスタマイズできることから受注生産に向いている。一方、当然ながら見込生産にも対応できるため、稼働率を加味したプリンティングのスケジュール管理が重要になる。

納期・納所：3D プリンターは、工場のような敷地は必要なく、どこにでも配置できることが強みになる。したがって、ユーザーに近いのか、土地代やインフラ系料金が安いのかなど、様々な選択肢を考慮しながら配置することが可能になる。

在庫の考え方：3D プリンターはカスタマイズ、受注生産に向いており、完成品まで1工程で生産できるので、仕掛在庫がなくなる。また、3D プリンターで完成品を生産することを考えた場合、一日の能力が例えば10Hであった場合、注文製品の完成時間が6Hのとき、これ以外の注文がなければ4Hは空いていることになる。これを“空き在庫”として捉え、稼働率の増減を評価として検討していくべきである。

経営の観点：GEの例や納期・納所でも触れたが、部品や仕掛品を3D プリンターで生産できるなら、本社以外の場所や移動式の3D プリンターを準備すればよくなる。また、プロセスの一部を3D プリンターにする意思決定も可能になる。つまり、経営の観点として、ヒト・モノ・カネの経営資源の配分方法、ビジネスモデルが変わってくる。

今後の取り組みとして、コストだけでなく、納期・納所に座席システムなどを取り入れた納期達成率、稼働率などの検討があげられる。また、在庫に関しても3D プリンターの場合は、稼働していない部分＝空き在庫ということが考えられるので、その評価法を検討していきたい。そして、経営管理の視点としてPWをメーカーに売るのではなく、PWを貸し出し、IoTによるリアルタイムなPW稼働データを受けてPWを独自に交換する。そして戻ったPWは、樹脂再生するという環境に優しいビジネスモデルが可能になる。これらの議論には、3D プリンター能力の急速な発展とともに、単に製造革新を行うだけでなく、SCMの改革も併せ持つ武器となる機器として捉えていく必要がある。

参考文献

- 1) 山田太郎, 「日本版インダストリー4.0の教科書 IoT時代のモノづくり戦略」, 日経BP社, 2016年.
- 2) The White House, “Remarks by the President in the State of the Union Address”, <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/02/12/remarks-president-union-address>, 2013.
- 3) Ministry of Economy, Trade and Industry, “FY2014 Key Points of Economic and Industrial Policies”, http://www.meti.go.jp/main/yosangaisan/fy2014/pdf/02_2.pdf, 2014.
- 4) クリス・アンダーソン, 「MAKERS - 21世紀の産業革命が始まる」, NHK出版, 2012年.
- 5) ダイヤモンド社, 「いまさら聞けない IoTの全貌」, ダイヤモンド社, 2015年.

- 6) Foroozmehr E, Lin D and Kovacevic R: "Application of Vibration in the Laser Powder Deposition Process," Journal of Manufacturing Processes, Vol.11, No.1, pp.38-44, 2009.
- 7) Zhang, J. and Khoshnevis, B.: "Optimal Machine Operation Planning for Construction by Contour Crafting," Automation in Construction, Vol.29, pp.50-67, 2013.
- 8) Leukers, B., Güllkan, H., Irsen, SH., Milz, S., Tille, C., Schieker, M. and Seitz, H.: "Hydroxyapatite Scaffolds for Bone Tissue Engineering made by 3D Printing," Journal of Materials Science: Materials in Medicine, Vol.16, No.12, pp.1121-1124, 2005.
- 9) Silva, DN., Oliveira, M., Meurer, E., Meurer, MI., Silva, JV. and Santa-Bárbara, A.: "Dimensional Error in Selective Laser Sintering and 3D-printing of Models for Craniomaxillary Anatomy Reconstruction", Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, Vol.36, No.8, pp.443-449, 2008.
- 10) Parthasarathy, J., Starly, B. and Raman, S.: "A Design for the Additive Manufacture of Functionally Graded Porous Structures with Tailored Mechanical Properties for Biomedical Applications," Journal of Manufacturing Processes, Vol.13, No.2, pp.160-170, 2011.
- 11) Kenney, M.: "Cost Reduction through the Use of Additive Manufacturing (3D Printing) and Collaborative Product Life Cycle Management Technologies to Enhance the Navy's Maintenance Programs," Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2013.
- 12) 林千宏, 山本久志, 大場允晶, "フロー化率の高いジョブショップラインへの生産座席枠システムの導入", 日本経営工学会平成 26 年春季大会, pp.144-145, 2014 年.
- 13) 田村隆善, 藤田精一, 生産座席システムについての一考察, 経営システム, Vol.4, No.1, pp. 5-13, 1999 年.
- 14) 熊谷敏, "IDEFO モデルとその作成プロセス", 経営情報学会誌, Vol.6, No.4, pp.97-100, 1998 年.
- 15) Nakamura, Y., Ohba, M., Kumagai, S., Hayashi, C. and Oomiya, N., "Application of the Activity Cost Model to 3D Printer Technology," The Proceedings of 19th Int. Symposium on Logistics, pp.482-489, 2014
- 16) 中邨良樹, 大場允晶, 熊谷敏, "3D プリンターの普及によるコスト見積もりと付加価値産出方式の一考察", 日本経営工学会平成 25 年秋季大会, pp.158-159, 2013.