

3D プリンター製品へのアクティビティコストモデルの適用

大 場 允 晶
佐 藤 正 一

1. はじめに

「広義のモノづくり」は「付加価値のある設計情報を媒体に作り込むこと」であると定義¹⁾ (藤本) されるならば、顧客にとっての付加価値は設計情報に宿る。生産において「付加価値が生み出されている時間」とは、顧客に向かって「設計情報が転写されている時間」となる。

近年、話題となっている 3D プリンターとは、コンピュータ上で描いた 3 次元画像情報を基に、樹脂や粉末の薄い層を積み上げ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。3D プリンターによる製品製造は、上述したモノづくりの定義による立体製品設計情報を媒体である材料に一気に作りこむ閉じたシステムによる作り方といえる。ここでは設計情報だけで製品の完成度が決まることになる。

専用の製造装置を複数使用する多段階の従来の製造方法では、設計情報は製造コストとは別に開発費として別計上され、コスト算出には組み入れられていなかった。しかし、3D プリンターは 3 次元設計情報を作れば、専用の製造装置は不要で、消去型のものづくり（有形の固形媒体を加工技術により削り取って形を作る）からロスのない加算型のものづくり（樹脂や金属粉末媒体を積み上げて一気に有形の固形製品の最終形を機械単独で形成する）に変わる。したがって、デジタル化した設計データがあれば、熟練した加工技術が不要になり、材料を手に入ればすぐに完成形として、部品や完成品が提供できる。応用範囲は自動車や家電製品の部品、医療の臓器、ビル設計の模型作など様々である。また多品種少量生産に適しているので、椅子などの家具などの場合、設計情報に消費者が求めるカスタマイズを加えることで、自分だけの製品がすぐに、それほどコストをかけずに作ることができるようになる。即ち、広義のものづくりにおける付加価値のある設計情報の作成から 3D プリンターによる成形までトータルにコスト算出の対象となることになる。そして、設計情報作成に付加価値が占められ、3D プリンターによるモノづくりは、媒体としての材料に設計情報を転写している時間のみがコスト算出の対象となる。

本研究では、市場環境変化影響によるコスト変動を算出するフローを定義し、市場環境変化に即応して、製品やサービスのコストと収益構造を把握するアクティビティコストモデル²⁾ を利用して、3D プリンターによるモノづくりのコスト算出を行う。

特にここでは、3D プリンターを工程として組み込んだ受注設計生産とクラウドファウンディングを使用した手法におけるコスト見積もりと付加価値算出方式を研究する。

2. 目的

本研究の目的は、3D プリンターの製造をモデルケースに、アクティビティコストモデルを適用して、コスト見積もりや付加価値の捉え方を提示することである。

「付加価値についての考え方」とは、3D プリンターによって製造工程での加工作業や金型、試作品が不要になることによって、設計もしくは後工程に付加価値が変わっていくのかを検討することである。「コストの見積もり方」は3D プリンターの導入がどのようなコスト構造に変化するのかをコストマトリクスを使用して行う。

3. アクティビティコストモデル

3.1 コスト管理モデル

アクティビティコストモデルでは、対象とするビジネスプロセスを記述し、アクティビティごとに費用を算出して、マトリクスでアクティビティコストおよびコスト構造を表す。

3.2 コスト管理モデルの作成手順

初めに対象とするビジネスプロセスのモデルを作成し、アクティビティを実行するために必要な人、物、および設備を明らかにする。そのための手法として IDEF0^(3),4) を用いる。

このとき材料、中間製品、製品等のものの流れは、アクティビティへの入力と出力としてアクティビティボックスに接続する左右それぞれのアローで表現し、アクティビティの実行に必要な人員と設備は、アクティビティボックスの下辺に接続するメカニズムアローで表現する（図 1）。

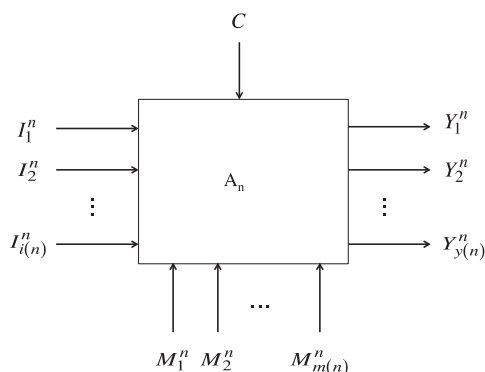


図 1. IDEF0 のアクティビティ

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。

IDEF0 で明らかになったビジネスプロセスと、それを構成するアクティビティ、そしてそ

れらを実行するために必要な人員、材料や中間製品などの物、および設備のコスト、および損益を構造マトリクス手法⁵⁾を用いて、アクティビティ毎に計算する。

本研究では、ビューを固定した1つの階層内のアクティビティの集合を、トランザクションと定義する。本研究のコスト管理モデルでは、トランザクション毎に、限界利益と限界費用を把握する。

以上の手順で、明らかになった各コストをパラメータと定義して、情報が投下された時のパラメータの変化の過程を図示し、さらにアクティビティで発生する製作時間を考慮して、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とする。

3.3 コスト管理モデルの定式化

各アクティビティ An の入出力（図1）について以下の記号を定義する。

I_k^n ：アクティビティ An を一回実行するときに、必要な製品 k もしくは半製品 k の投入量

Y_k^n ：アクティビティ An を一回実行するときの、製品 k もしくは半製品 k の産出量

$i(n)$ ：アクティビティ An の入力数

$y(n)$ ：アクティビティ An の出力数

$m(n)$ ：アクティビティ An のメカニズム数

アクティビティ An の産出する製品もしくは半製品のコストは、(1)式となる。

$$C^n = \left[c(Y_1^n) \ c(Y_2^n) \ \cdots \ c(Y_{y(n)}^n) \right]^T = \left[Q^n \mid R^n \right] \left[\begin{array}{c|c} E^{i(n)} & 0 \\ \hline 0 & E^{m(n)} - S^n \end{array} \right] \left[\begin{array}{c|c} U^n & 0 \\ \hline 0 & S^n \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} I^n \\ \hline M^n \end{array} \right] \quad (1)$$

Y_k^n ：アクティビティ An を一回実行するときの、製品 k もしくは半製品 k の産出量

$c(Y_k^n)$ ： Y_k^n ：のコスト

$$\text{材料行列：} Q^n = \begin{bmatrix} q_{11}^n & q_{12}^n & \cdots & q_{1n}^n \\ q_{21}^n & q_{22}^n & \cdots & q_{2n}^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{y(n)1}^n & q_{y(n)2}^n & \cdots & q_{y(n)n}^n \end{bmatrix} \quad (2)$$

q_{ij}^n ：アクティビティ An において、製品 i もしくは中間製品 i を算出するのに必要な、材料 j または半製品 j の必要量

$$\text{稼働時間行列：} R^n = \begin{bmatrix} r_{11}^n & r_{12}^n & \cdots & r_{1m(n)}^n \\ r_{21}^n & r_{22}^n & \cdots & r_{2m(n)}^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{y(n)1}^n & r_{y(n)2}^n & \cdots & r_{y(n)m(n)}^n \end{bmatrix} \quad (3)$$

r_{ij}^n ：アクティビティ An において，製品 i もしくは中間製品 i を算出するのに必要な，設備 j または人員 j の稼働時間

$E^{i(n)}$ ： $i(n)$ 次元単位行列

$E^{m(n)}$ ： $m(n)$ 次元単位行列

$$\text{材料単価行列：} U^n = \begin{bmatrix} u_1^n & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & u_2^n & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & 0 & u_{i(n)}^n \end{bmatrix} \quad (3)$$

u_k^n ：アクティビティ An における，材料 k もしくは半製品 k の単価

$$\text{材料投入量行列：} I^n = \begin{bmatrix} I_1^n & I_2^n & \cdots & I_{i(n)}^n \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

I_k^n ：アクティビティ An を一回実行するときに，必要な製品 k もしくは半製品 k の投入量

$$\text{稼働単価行列：} S^n = \begin{bmatrix} s_1^n & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & s_2^n & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & 0 & s_{m(n)}^n \end{bmatrix} \quad (7)$$

S_k^n ：アクティビティ An における，設備 k もしくは人員 k の稼働時間単価

$$\text{人員設備行列：} M^n = \begin{bmatrix} M_1^n & M_2^n & \cdots & M_{m(n)}^n \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

M_k^n ：アクティビティ An を一回実行する場合の k もしくは人員 k の必要稼働時間。

4. アクティビティコストモデルの 3D プリンター製造モデルへの適用

4.1 3D プリンター製造の流れ

図 2 のような「個人が消費者からクラウドファンディングを使って商品を受注し，設計情報と QCD をもとに個人所有の 3D プリンターを使って製造して，完成品を消費者に渡す」という①～⑤の流れを前提とする。

- ・個人が 3DCG を使って商品（カードケース）を設計する。
- ・商品は表面のイニシャル文字を個々に変えられる。
- ・個人が消費者からクラウドファンディングを使って商品を受注する。
- ・設計情報と QCD をもとに個人所有の 3D プリンターを使って製造して，完成品を消費者に渡す。

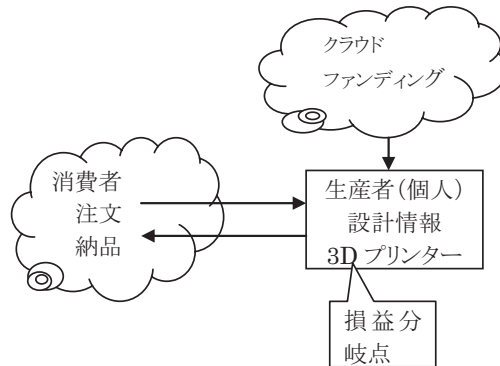


図2. 研究の前提

個人メーカーによる3Dプリンターを利用したものづくりの手順を次に示す。

- ① 3Dモデリング：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。

なお、3Dデータは、コンピュータ上で作られた「立体を表現するためのデータ」で、3DCAD（コンピュータによる3次元設計ソフト）でデータ作成、3DCGでデータ作成、原型を手作りし、3Dスキャナーでデータ化の3種類の作成方法がある。

- ② プロモーション/販売：個人メーカーではクラウドファンディングによりネットを利用した事前販売を推奨している。
- ③ データの品質のチェックと修正：チェックソフトを使ったSTLファイルのチェックと修正をする。またここで、強度等の品質チェックを行う。
- ④ 3Dプリンターでの造形：材料を指定し、3Dプリンターで造形する。クラウドサービスの一環として出力サービスの利用も考えられる
- ⑤ 出荷/送品：宅配便を利用した購買者への発送

設備はパーソナルコンピュータと3次元設計ソフト及び3Dプリンターで、③から⑤の手順は個別対応で繰り返し行うこととする。

4.2 3Dプリンター製造のアクティビティコストモデル

3Dプリンター製造モデルでは、3Dモデリングから出荷/送品まで製造モデル全体を表す生産者のビューでモデリングしたプロセスを最上位に配置する（図3）。

製品トランザクションの範囲は生産者が3Dモデリングによる製品設計から、クラウドファンディングで客を募集し、募集条件が成立して、設計情報をベースに3Dプリンターを使って製品を製造し、客先に出荷/送品するまでである。本モデルでは、このプロセスを繰り返すことで生産活動を行っている。

コスト管理モデルでは、製品トランザクションは、顧客に対する製品提供を1単位とした、一連のプロセスに対するコストの集計範囲である。

提供する製品の単位を変えると、トランザクションは変化する。このとき、ビューを変更して、異なる階層のアクティビティモデルを作成する IDEF0 の階層構造の仕組みを利用して、ビジネスプロセスを入れ子状に記述することで、各トランザクションに対して投入される人、物、および設備を詳細に把握する。

3D プリンターによるビジネスプロセスを IDEF0 とコストマトリックスを用いて明確にし、そこからコスト構造を検討する。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。例えば「3D モデリング」のアクティビティ図は、商品もしくはスキャナー情報を入力（左アロー）し、STL ファイル（三次元形状を表現するデータファイル、右アロー）が出力される。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機構となる。

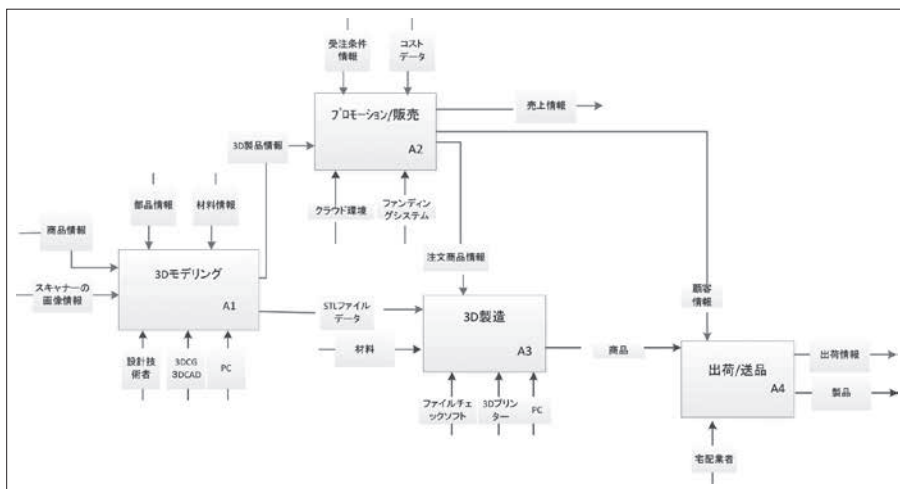


図 3. 設計から出荷までの IDEF0 図

また、図 4 に示す 3D 造形トランザクションを 3D 製造の入れ子構造とする。

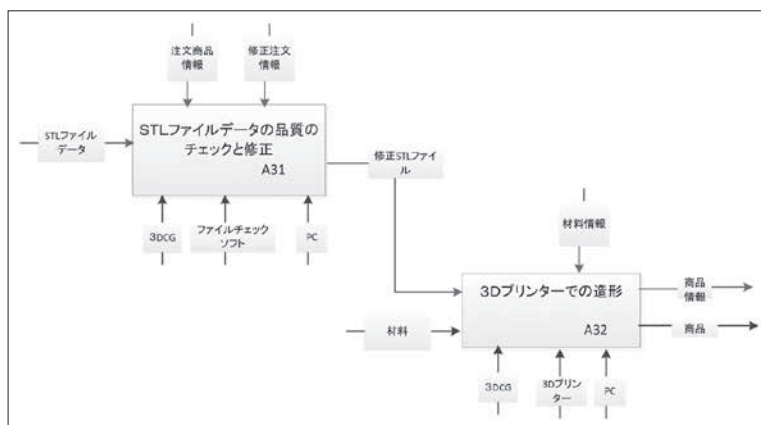


図 4. 3D 造形トランザクション

4.3 構造マトリクスを用いたコスト計算

各トランザクションに対して構造マトリクスを用いて ICOM のコストを表現する。3D 造形トランザクション表現したものが図 5 である。

上辺部の数値を縦方向に対応する中央部の数値と積算を行い、その結果を中央部の横方向に対応する数値と和算を行って、左辺部の数値を算出する。この基本演算を「縦積・横和」という。

構造マトリクスは中央部の左上から計算が始まる。構造マトリクス中央部に示す十字線の左上において、まずは 3D 造形トランザクションのプロセスを逆行して、各アクティビティのアウトプットから、それを提供するのに必要な原材料などのインプットを分解して、対応づける。

プロモーション/販売				④ モデリングリスト		注文を受けるJW リスト		③D 造形するJAC		③D 商品を届けるJAC		製品リスト	製品リスト	製品リスト
				STL ファイル	STL ファイル	ファンディングシステム	クラウド環境			配送費	3D 商品	③D 製造商品の提供	③D 製造商品の提供	③D 製造商品の提供
商品数				1件あたり情報単価(円)	固定費(円)	固定費(円)	固定費(円)	変動費(円)	固定費(円)	変動費(円)	固定費(円)	販売単価(円)	製品別変動費単価(円)	製品別固定費単価(円)
500				0	21,000	16,800	16,800	640	5,409	500	5,409	10,000	680	5,210
注文を受けるJVC	計(円)	0		0.002										
注文を受けるJIC	計(円)	109			0.002	0.002	0.002							
注文を受けるJAC	計(円)	109		0.002	0.002	0.002	0.002							
③D 造形するJAC	計(円)	6,049						1	1					
③D 商品を届けるJAC	計(円)	5,909								1	1			
製品リスト 3D 商品の提供	製品別変動費単価(円)	1,140		1				1		1				
製品リスト 3D 商品の提供	製品別固定費単価(円)	5,409									1			
製品リスト 3D 商品の提供	製品別限界利益単価(円)	9,320										1	-1	
製品リスト 3D 商品の提供	製品別粗利益単価(円)	4,110										1	-1	-1

図 5. コストマトリクス

4.4 クラウドファンディング

クラウドファンディング⁶⁾とは、不特定多数の人が通常インターネット経由で他の人々や組織に財源の提供や協力などを行うことを指す、群衆(crowd)と資金調達(funding)を組み合わせた造語である。クラウドファンディングは資金提供者に対するリターンの形態によって大別される。本論ではプロジェクトが提供する何らかの権利や物品を購入することで支援を行う「購入型」を対象とする。

インターネットと 3D プリンターの登場によって、個人や小企業が新しい設計によるアイデア新製品をネット上に展示して、販売することができるようになった。その際、検討することとして目標注文数が目標額に達したら、「資金調達」し、製造・販売義務を負うという、自己資金、資産の考え方が変わることである。

$$\text{総コスト} + \text{期待稼ぎ高} \leq \text{注文数による粗利益} \quad (1)$$

この条件が成り立たせる資金調達法を「クラウドファンディング」と言い、設計者の資金

リスクが軽減する。このクラウドファンディングが可能になることで、個別受注設計生産ができるようになる。

4.5 パラメータ影響分析

コスト構造マトリクスにおいて、上辺部それぞれの値をパラメータと呼ぶ。本研究では、条件変化による各パラメータの変化と変化の影響を分析する。扱う条件変化は、実際販売量変化、市場仕入価格変化、加工時間の変化、設備数・従業員数の変化である。これらに対してパラメータである原材料費、設備費、人件費がどのように変化するかをフローチャートで示す（図6）。

また、コストマトリクスから算出したデータを使って、投入条件における損益をマトリクス会計によりリアルタイムに算出する（図7）。

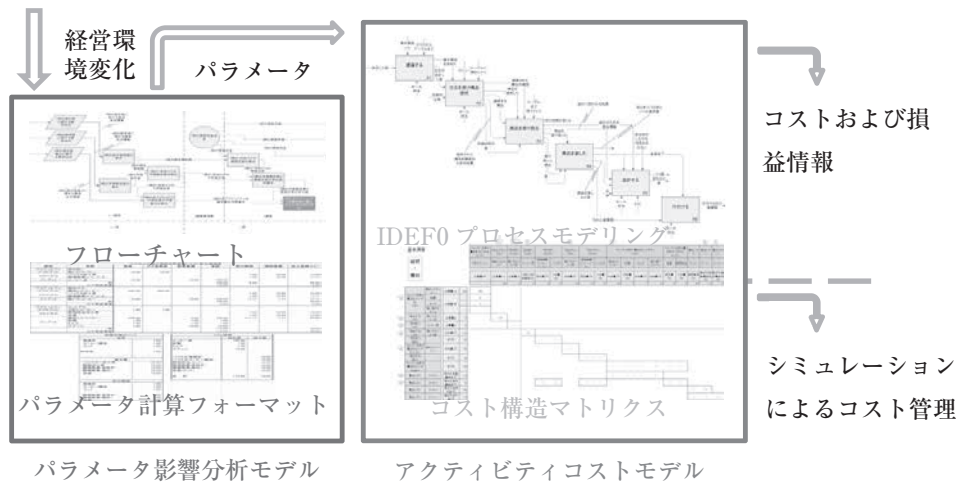


図6. パラメータ影響分析

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図7. マトリクス会計

4.6 3Dプリンターによる製造の付加価値算出

広義のものづくり観においては、お客が喜ぶ付加価値は、「もの」ではなく「設計情報」に宿ると考える。生産現場において「付加価値が生み出されている時間」とは、顧客に向かっ

て設計情報が流れている時間、即ち、「設計情報が転写されている時間＝正味作業時間」に他ならない。例えば、組立現場における実労働時間のうち、作業者や設備から媒体（直接材料や仕掛品）へと設計情報が転写されている時間が「正味作業時間」である。

この広義のモノづくりを正確に実現する 3D プリンターにおけるモノづくりでは、純粋にモノづくりの価値を作っている印刷時間が付加価値を算出していることになる。つまり、印刷性能積層ピッチと印刷時間によって決まってしまう。しかし、3D プリンターによるモノづくり全体を考えると、現在、3D プリンターによるモノづくりでは、機械にもよるが高さ 10cm 程のフィギュアで 1 時間くらいかかっているが、当初 A4 の 1 ページに 1 時間かかっていた 2D 印刷機がどんどん性能を上げ、A4 紙 1 枚数秒で印刷できるようになったように、急速に性能を上げ、短時間に精密で安価な製品ができるようになるだろう。

また、設計も含めた 3D プリンターによるモノづくりを従来の方法と比較すると、図 6 に示ように、画鋸の製造工程で考えると、図の②から⑧の工程が集約される。

しかし、3D プリンターによるモノづくり全体を考えると、以下のことを検討する必要がある。

画鋸の製造工程で考えると、図の現状プロセス②から⑧の工程が 3D プリンターの④工程（モルディング工程）に集約される。×印の工程が 3D プリンターになったときに設計工程等に吸収される工程である。つまり、コストとして削減可能なところということである。したがって、今後はこの×部分の作業を設計に割り振ることで付加価値を上げるのか、もしくはその分、コストを下げるならばどの程度可能なのか、ということを検討する必要がある。

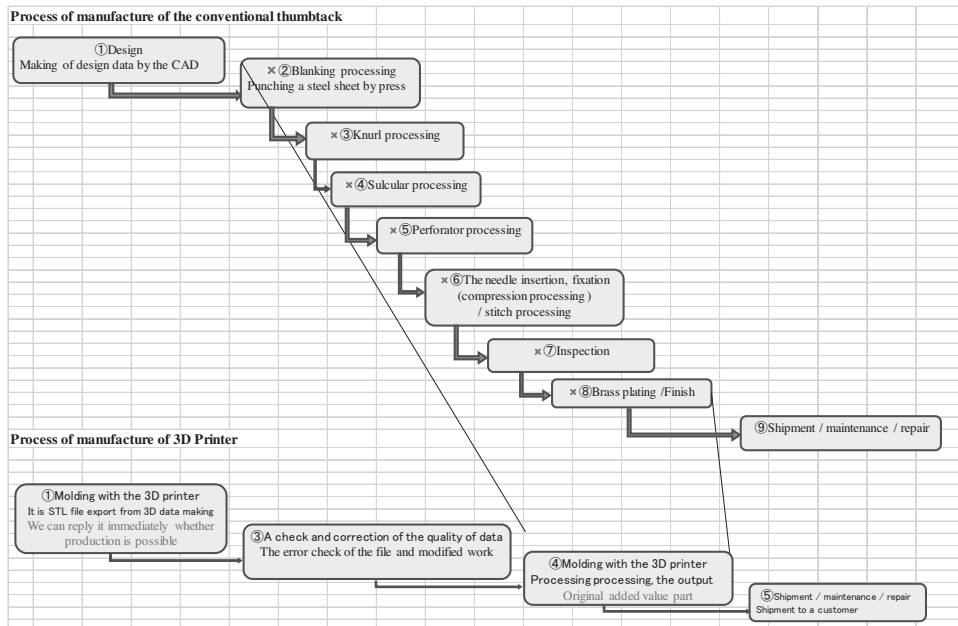


図 8. 3D プリンターものづくりと従来のモノづくりの比較

5. おわりに

本研究は、3D プリンターの可能性と今後の普及について付加価値の捉え方とコストの算出について、プロセスモデルを用いて提示し、比較検討してきた。

アクティビティコストモデルのパラメータは生産者が変更可能である。つまり、生産者はシミュレーションによってクラウドファンディングで募集する製品の数量におけるコストを把握し、総コスト+期待稼ぎ高 $\leq$ 注文数による粗利益の管理を行える。また、実際にプロモーション開始後の実データをパラメータに入力することで、リアルタイムに事前把握可能であり、予想販売量、材料使用量、販売価格、材料の変更などの影響を構造的に表現しながら、アクティビティコストや損益計算が、本研究のコスト管理モデルで可能になる。3D プリンターによるモノづくりのコスト見積もりと付加価値の捉え方について、本プロセスモデルを用いて検討してきた内容を以下に整理する。

3D プリンターによるモノづくりにおいて、設計情報を媒体である材料に作りこむ、設計から送品までの一貫したモノづくり行為を定義することが必要である。このことを IDEF0 プロセスモデリングにより表現した。

3D プリンターによる製造の詳細なコスト構造を把握し、プロモーション開始後の環境変化の影響を捉える必要がある。これをコストマトリクスにより表現した。特に、アクティビティコストモデルでは、IDEF0 によって明らかにしたアイコムとアクティビティを構造マトリクスによりアクティビティのつながりを維持しながらコストおよび損益を表現した。

また、パラメータの影響把握では、マトリクスの各値をパラメータと設定し、予想販売量、材料使用量、販売価格、材料の変更などの影響を構造的に表現しながら、販売数や稼働時間などによるパラメータ変化を把握可能とした。

今後の課題としては、IDEF0 の作業フローの検討、コストマトリクスの項目の検討、ファンディング作業との関係の明確化、実例による数値例の検討等がある。

参考文献

- 1) 藤本隆宏, “「人工物」複雑化の時代—設計立国日本の産業競争力”, 有斐閣, 2013 年.
- 2) 熊谷敏, “IDEF0 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.
- 3) David A. Marc, Clement L. McGowan: “IDEF0/SADT Business Process and Enterprise Modelling”, Eclectic Solutions Corporation (1987).
- 4) 石井智之, 熊谷敏, 大場允晶, “プロセスモデリングを活用したコスト管理モデル—市場環境変化によるアクティビティコストの変動把握方法—”, 日本経営工学会論文誌, Vol.65, No.4, pp.249-259, 1998 年.
- 5) 外山啄之, “Business Structure Modelling 複雑で多面的な経営・社会課題に迅速に 대응”, 日本経営工学会「経営システム」, 第 16 巻第 2 号, pp.101-107, 2006 年.
- 6) 米良はるか, 稲蔭正彦, “クラウドファンディング: ウェブ上の新しいコミュニティの形”, 人工知能学会誌, Vol.26, No.4, pp.1-7, 2011 年.