

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00715

研究課題名(和文) 社会様態の変化を促し環境負荷を低減する積層造形(AM)技術利用シナリオの設計

研究課題名(英文) Scenario design and evaluation method of Additive Manufacturing technology from the viewpoint of sustainable society

研究代表者

近藤 伸亮(Kondoh, Shinsuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：40336516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：積層造形技術(以下、AM技術)などの新しい製造技術の影響を表現する要素シナリオモデルを構築し、これらを組み合わせて複数の生産様態モデルを作成し、当該様態モデルの元で合理的な製品ライフサイクルを同定し、これをライフサイクルシミュレーション技術を用いて評価することで、製造技術の社会影響をモデル化し、これらに基づいてビジネスモデルや製造技術の使い方を設計する手法を構築した。また、一連の評価に必要となるAM技術のインベントリデータを収集し、AM技術による製品価値向上可能性を評価するモデルを作成した。関連して4件の論文発表、13件の研究発表を行った。

研究成果の概要(英文)：The objective of the study is to propose the method for evaluating AM's potential for realizing sustainable society. We first discussed the possible outcome of introduction of AM from the environmental aspect. Then we have proposed the method for evaluating AM's impact on society considering the multiple interrelationship among factors that represents every stakeholders' behavior driven by societal, economic, and ethical reason. An environmental load basic unit for AM was also collected through intensive literature review as well as fabrication experiments by using a carbon fiber reinforced plastic (CFRP) 3D printer. Through design and evaluation of multiple business models considering the interrelationship, validity and effectiveness of the method are demonstrated.

研究分野：デザイン学

キーワード：ライフサイクル 積層造形 シナリオモデル ライフサイクルシミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

地球環境問題の深刻化に伴い、現在の大量生産・大量消費型の社会システムをより持続可能な社会システムへと転換することが強く求められている。近年注目されている積層造形 (以下 AM) 等の新しい製造技術は、製造工程自身の省資源化が期待できることに加え、以下の観点からも、持続可能な社会への転換に極めて有効であると考えられている [1]。

- (1) 使用段階：既存の除去加工技術では実現の難しかった複雑な形状生成が可能になることで製品の燃費や寿命が向上し、製品使用時の環境負荷を削減しうる。
- (2) 製造段階：サプライチェーンの圧縮・オンデマンド生産 (工場の生産ラインに依らないユーザ自身による生産も含む) により製品製造量を抑制でき、個々のユーザにカスタマイズされた製品を提供することで製品の「過剰機能・品質」の無駄を省くことができる (様々なユーザに単一の製品で対応するためには個々のユーザがあまり使わない機能をも搭載する必要がある)。
- (3) 再生段階：洗浄・再研磨等の除去加工による製品再生に、付加加工である AM を併用することで製品・部品の再生可能性を大きくすることができる。
- (4) ライフサイクル設計、資源効率の観点からは、一般に、製品・部品のリユースはリサイクルよりも望ましいとされている。AM は製品寿命延長や製品部品の再生可能性向上を通じて、リユースを中心とした、より「小さな」資源循環の実現に寄与しうる (図 1 参照)。

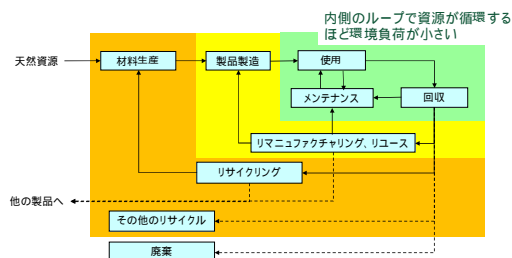


図 1 製品ライフサイクルと資源循環

以上のように持続可能な社会実現に AM は大きく貢献しうると論じられているものの、その環境負荷削減効果や社会変革のインパクト [例えば 2] をシステム全体として、体系的・定量的に評価・分析している研究はほとんどなく、AM 技術の市場性や社会変革の可能性は十分に認識されていない。このことが、社会変革をも見据えた AM 技術の効率的な利用を妨げ、AM 技術の持つ環境負荷削減ポテンシャルを大きく毀損している。

[1] Samuel H. Huang et al., Additive manufacturing and

its societal impact: a literature review, Int J Advanced Manufacturing Technology (2013) 67:1191-1203

[2] C. Anderson, "MAKERS-The New Industrial Revolution", Crown Business, 2012.

### 2. 研究の目的

著者らは社会様態、製造・リサイクル技術、製品設計を相互に関連付けて製品・サービスを設計することが不可欠であるとの認識のもと、様々な設計手法の研究 (シナリオを用いた社会変化トレンドの分析手法、環境調和ビジネス設計手法、ライフサイクルシミュレーション技術、マルチエージェントシミュレーション手法、ユーザ価値の定量化手法) をこれまで実施してきている。本研究では、特に製造技術と社会様態との相互影響をモデル化することを通じて、持続可能な環境配慮社会実現のために AM 等の製造技術をどのように組み合わせると有効であるかを様々な波及影響を含めて評価し、多様な製造技術を適材適所に活用するためのシナリオ、ビジネスモデル、生産システム形態を設計する手法の開発を試みた。具体的には本研究では以下の 3 項目を実施した。

- (1) 文献調査、AM 加工機を用いたエネルギーおよび資源消費量の計測等を通じて AM および既存の製造技術の環境負荷データの取得・比較・評価方法を明らかにする
- (2) 製造技術についての将来予測および技術ポテンシャル予測等の文献から、これらが社会にどのような影響を与えうるかを体系的に抽出しシナリオを作成する手法を明らかにする。
- (3) 以上で得られるデータ、シナリオと、企業や消費者がコントロール可能な属性や振る舞いとを関連づけてモデル化・シミュレートすることで、AM を用いた新しい持続可能な価値提供システム、ビジネスモデル、生産システム形態を設計する。

### 3. 研究の方法

上記 3 項目に対する研究方法を以下に述べる。

#### 3.1 AM および関連製造技術のインベントリデータ収集

文献調査ならびにテストピースを用いた AM 加工機のエネルギー、材料消費量の実際により、AM および既存の他の製造プロセスの環境負荷インベントリデータを作成する。

#### 3.2 AM 技術の社会影響因子の抽出・モデル化 (技術-社会影響モデル構築)

AM 技術を含む、既存の様々な製造技術に関するトレンド予測に関する文献を収集し、AM や他の製造技術 (例えば、Internet of Things (IoT) 等) が、これまでの生産形態・消費形態に与える影響に関する記述を網羅的・体系的に抽出し、これらをシナリオ分析ツールに入力し、製造技術の社会影響因子の集合とそれらの間の因果関係を定性的に明

らかにする。

### 3.3 技術-社会影響モデルを用いた価値提供システム、ビジネスモデル、生産形態の設計

3.2 節で抽出した社会影響因子をライフサイクルシミュレーションを用いて表現し、AM 技術の社会影響を製品ライフサイクルのダイナミズムを考慮して定量的に評価し、様々なAM技術活用のアイデアの持続可能社会実現への貢献可能性を体系的・網羅的に評価する。図2に各研究アプローチの相互関係を示す。

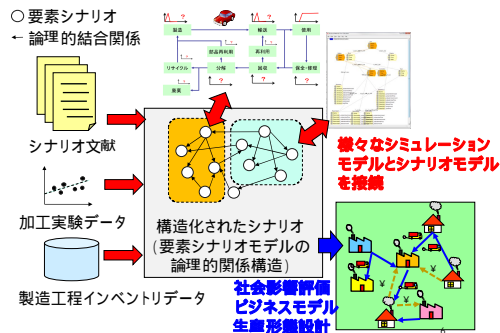


図2 各研究課題の関係

## 4. 研究成果

文献収集及び3Dプリンタを用いた実験を通じて、AM技術活用にかかる環境負荷データ等(スマートフォンにかかる環境負荷データ及び、カーボンAMの使用時環境負荷データ)を収集し、国際会議発表論文にまとめた。

ついで、AMやその他の様々な製造技術が社会や生産様態に与える影響を論じた様々な文献調査を実施した。AMプロセス導入によりサプライチェーンの変化に加え、AMやDirect Digital Manufacturing (DDM)技術の導入により、個人による工学製品の設計・製造が可能になること等を踏まえ、AM導入の効果として以下の項目を要素シナリオモデルとして記述した(図3参照)。

- (1) **適量生産及び軽量化による資源削減効果**  
AMを用いて可能となるオンデマンド生産により、製品、部品の総生産量を抑制することができる。また、AMを用いて可能となる軽量化設計により製品使用時、流通時の環境負荷が低減する。
- (2) **Long use**  
AMを用いて個人の嗜好、体格などに応じてカスタマイズした部品を設計、製造することが可能となる(パーソナライゼーション)。パーソナライゼーションは、製品に対する愛着の向上に寄与し、製品の価値寿命を高める。
- (3) **Reparability 向上**  
AM技術と既存の除去加工を組み合わせることで、修理可能部品の範囲が向上する。
- (4) **交換部品のストック低減**

AM技術やDDMでは設計情報さえ残っていれば、金型等の設備がなくとも直ちに部品を製造することができる。このため、部品や金型等のストックを持つ必要がなく、資源使用量を大きく削減することができる。

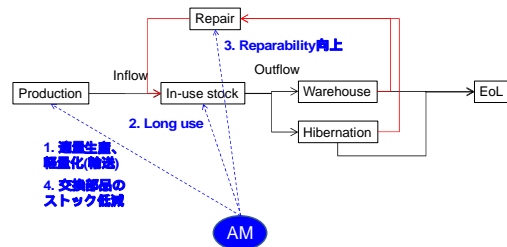


図3 AM技術導入の影響

さらに上記の要素シナリオモデルを組み合わせ、AM導入時に合理的となる製品ライフサイクルシナリオを同定し、そのビジネスモデルをB2C製品(スマートフォン)を対象として設計した(「近くの工務店ビジネスモデル」)。同ビジネスモデルは、製品のOriginal Equipment Manufacturer (OEM)とは独立の小規模事業者や個人が、スマートフォンの修理やカスタマイズ(例えば、筐体)を請け負い、実施することで、より顧客にとって付加価値の高いスマートフォンを提供する。製品ライフサイクルシミュレーションを用いて、同ビジネスモデルでのライフサイクルコスト、環境負荷を評価し、その環境負荷・コスト削減効果を定量的に計算することができた。

この結果、AM等の新製造技術の社会影響評価という問題を、(1)製造技術の影響を生産様態モデルとして表現、(2)各生産様態モデルの元で妥当な製品ライフサイクルシナリオ同定、(3)対象製品のライフサイクル全体を通じての物質、エネルギー、情報(金銭取引など)の流れの記述・評価という複数の部分問題へと分割して実施する一連の手順の有効性を検証することができた。

加えて、上述の例題では取り扱わなかったAM技術による製品価値変化についての分析を行った。具体的には製品価値の減少を故障等による物理的要因と、機能の陳腐化等の価値的要因に分けてモデル化し、AM技術によるリードタイム削減や、より愛着のある製品の提供がライフサイクル全体での製品価値をどのように向上させうるかを簡単な計算例を用いて評価した(製品はより高い価値で、より長く使用されるほど望ましいと考えられるので、製品の使用価値(UV)を図4では彩色された部分の面積として表現している)。例えば、図4は製品提供のリードタイム削減は、単純に製品の価値寿命を延伸するだけではなく、そもそも製品価値がより高い状態からの製品提供が可能となることを示してい

る。これは、製品が企画された時点（図4の原点）から製品の価値寿命は低下していくためである。製品コンセプトを早く実機として投入すればするほど、高い価値を生み出すことができるのである。さらに、製品に対する愛着は、製品の価値寿命低下を抑制するので、結果として製品の使用期間が延伸する。これらの効果から、リードタイム削減と愛着ある製品の提供は、大きく製品の価値を向上させる可能性があることを示すことができた。

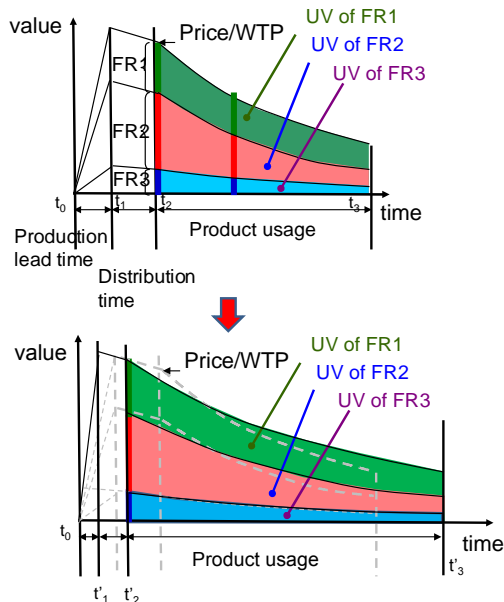


図4 AMによる製品価値向上効果

最後に、以上の手順を一般化し、地球環境全体を評価対象として、Sustainable Development Goals (SDGs)などで表現される地球環境や人類社会の持続可能性を担保しながら適切な生産様態を設計するための理論的設計モデルの構築を行った。この結果、既存の持続可能ビジネス類型は、SDGsなどで表現される評価指標との間で、多対多の関係となっており、持続可能ビジネスを設計するためのビルディングブロックとしては適切ではないことが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Yusuke Kishita, Yuji Mizuno, Yasushi Umeda, Scenario Design Approach to Envisioning Sustainable Manufacturing Industries to 2050, Procedia CIRP, 査読あり, Vol. 48, 2016, pp407-412, 10.1016/j.procir.2016.04.103  
Toshitake Tateno, Shinsuke Kondoh,

Environmental Load Reduction by Customization for Reuse with Additive Manufacturing, Procedia CIRP, 査読あり, Vol. 61, 2017, pp241-244, 10.1016/j.procir.2016.11.219

Shinsuke Kondoh, Hitoshi Komoto, Keiji Masui, Interlinking multiple decision variables over different life cycle stages to realize effective reuse and recycling from a strategic viewpoint, Procedia CIRP, 査読あり, Vol. 61, 2017, pp245-250, 10.1016/j.procir.2016.11.256

Yuta Yaguchi, Toshitake Tateno, Web-based monitoring system on distributed manufacturing Example of environmental load analysis in additive manufacturing, CAX Technologies, Vol. 5, 2017, pp.37-40, 査読あり

〔学会発表〕(計 13 件)

Shinsuke Kondoh, Toshitake Tateno, Yusuke Kishita, Hitoshi Komoto, Shinichi Fukushige, The potential of additive manufacturing technology for realizing a sustainable society, EcoDesign 2015(国際学会, 査読あり), 2015年12月03日, 東京

Toshitake Tateno, Yuta Yaguchi, Shinsuke Kondoh, Bio-Degradable Mechatronic Products by Additive Manufacturing, EcoDesign 2015(国際学会, 査読あり), 2015年12月03日, 東京

Shinichi Fukushige, Kazutoshi Tsuda, Hideki Kobayashi, Design Support System for Product Renovation through Direct Digital Manufacturing, EcoDesign 2015(国際学会, 査読あり), 2015年12月03日, 東京

H. Komoto, S. Kondoh, K. Masui, Simulation-based uncertainty quantification in end-of-life operations for strategic development of urban mines, EcoDesign 2015(国際学会, 査読あり), 2015年12月03日, 東京

近藤伸亮, 持続可能社会実現に向けた積層造形技術利用シナリオの研究, 第6回横幹連合同コンファレンス(招待講演), 2015年12月06日, 名古屋

館野寿丈, 3Dプリンタで製作されるメカトロニクス製品の開発, 第6回横幹連合同コンファレンス(招待講演), 2015年12月06日, 名古屋

近藤伸亮, 木下裕介, 高本仁志, 福重真一, 館野寿丈, 持続可能社会実現へむけた新製造技術利用シナリオの設計,

2016 年度精密工学会春季大会, 2016 年 03 月 17 日, 東京  
高本仁志、近藤伸亮、増井慶次郎, 抽象構文木によるライフサイクルシミュレーションモデルのエラー検出, 2016 年度精密工学会春季大会, 2016 年 03 月 17 日, 東京  
村井雄, 福重真一, 小林英樹, 付加生産技術を用いた自動車生産工程の環境負荷評価, 日本機械学会第 26 回設計工学システム部門講演, 2016 年 10 月 08 日~2016 年 10 月 10 日, 慶應義塾大学  
福重真一, 八島雅史, 小林英樹, 付加製造技術が普及した社会における資源循環シナリオの環境評価, 2017 年度精密工学会秋季大会, 2017 年  
木下 裕介, 本元 俊行, 上須 道德, 野間口 大, 原 圭史郎, 市民ワークショップを通じた地域エネルギービジョンの作成~大阪府吹田市のケーススタディ, 第 27 回日本機械学会設計工学・システム部門講演会, 2017 年  
矢口雄大, 舘野寿丈, 積層造形(AM)技術を用いた加工の環境負荷低減に向けた消費電力計測と分析について, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会, 2018 年  
Shinsuke Kondoh, Hitoshi Komoto, Yusuke Kishita, Toward a sustainable business design: a problem formulation, EcoDesign 2017 (国際学会), 2017 年

〔図書〕(計 0 件)

該当なし

〔産業財産権〕

該当なし

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

該当なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

近藤 伸亮 (KONDOH, Shinsuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・製造技術研究部門・主任研究員

研究者番号: 40336516

### (2) 研究分担者

福重 真一 (FUKUSHIGE, Shinichi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号: 10432527

舘野 寿丈 (TATEN0, Toshi take)

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号: 30236559

木下 裕介 (KISHITA, Yusuke)

東京大学・工学部・講師

研究者番号: 60617158

### (3) 連携研究者

高本 仁志 (KOMOTO, Hitoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・製造技術研究部門・主任研究員

研究者番号: 30613244