

## ポスト大量生産パラダイムの社会的、経済的、技術的要件と その実現可能性の研究

### A Study on Feasibilities and Social, Economic, and Technical Conditions of the Post-Mass Production Paradigm

代表研究者	富山哲男	東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授 Tetsuo Tomiyama, Associate Professor, Department of Precision Machinery Engineering, The University of Tokyo
共同研究者	馬場靖憲	東京大学人工物工学研究センター教授 Yasunori Baba, Professor, Research into Artifacts, Center for Engineering, The University of Tokyo
	小田宗部衛	京都産業大学経済学部助教授 Soubei Oda, Associate Professor, Faculty of Economics, Kyoto Sangyo University
	石川雅紀	東京水産大学食品生産学科助教授 Masanobu Ishikawa, Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Fisheries
	梅田靖	東京大学工学系研究科インバースマニュファクチャリング・ ラボラトリー講師 Yasushi Umeda, Lecturer, Inverse Manufacturing Laboratory, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

#### ABSTRACT

This report proposes a new manufacturing paradigm called "Post Mass Production Paradigm (PMPP)" and examines social, economic, and technical conditions to realize PMPP. The PMPP aims at qualitative satisfaction rather than quantitative sufficiency of artifacts without over-consuming natural resources and energy. In other words, the PMPP suggests a paradigm shift from current mass production and consumption society to proper quantity of production and consumption and minimum disposal without decreasing the level of economy. In order to examine feasibilities of PMPP, we investigated several companies and social systems in Europe and U.S. which have advanced technologies for remanufacturing. We also executed product life cycle simulation of which results verify the feasibility of the PMPP. Based on these technical discussions, we propose social and economic conditions for the PMPP such as deposit-based waste collection system.

#### 研究目的

ポスト大量生産パラダイム (Post-Mass Production Paradigm, PMPP) は、人工物の質的充足を目指す資源・エネルギーの消費に依存しない新たな人工物の生産様式であり、大量生産・大量消費・大量廃棄ではなく適量生産・適量消費・最小廃棄であっても経済活動のレベルの維持を目指した新たな経済パラダイムである。これは、環境問題を意識するグリーン指向と、激動する国際経済環境での国際競争力の維持という一見相反する命題を内包している。本研究はポスト大量生産パラダイムの技術的要件のみならず、社会的、経済的諸要件の分析、ならびにその実現可能性について検討し、今後の技術開発のための技術政策提言を導出することが目的である。

#### 研究経過

上記目的を達成するために、当初は以下の手順に基づいて調査、研究を行うことを計画した。

- 1) LCA (ライフサイクルアセスメント) をいくつかの製品に対して実施する。
- 2) インベントリ調査の結果を産業関連表と関連づけることで、PMPPをその製品に適用したときに与える経済的、社会的波及効果を分析する。
- 3) リサイクル技術などの現状について国内外調査、分析を行い技術的要件を検討する。
- 4) 人工物の長寿命化などによるPMPPの技術的実現可能性を検討する。
- 5) 以上の調査研究を経て、PMPPを実現可能にするような具体的な政策提言を検討する。

しかし、特に大量のデータを必要とするLCAを短期間に実施することは困難であった。また、種々のLCAデータの利用や産業関連表の利用にも問題があることが判明したため、LCAを利用せずとも(3)以下の項目の研究を実行可能にするために、上記(1)(2)はライフサイクルモデルを用いたシミュレーションに基づいた方法に変更した。

本研究の研究経過は以下の通りである。

- 1) 技術的要件に関しては、国内外メーカー(自動車メーカー、複写機メーカー等)におけるリサイクル技術、リサイクル性設計・生産技術、回収分解技術、廃棄・再利用の実態などに関する文献調査、聞き取り調査、工場見学などを実施した。特に国際比較を行うために、ヨーロッパ諸国における産業界の環境対応策、研究開発状況などの調査を行った。具体的には、BMW(ドイツ、自動車)、Electrolux(スウェーデン、家電)、Volvo(スウェーデン、自動車)、デンマーク工科大学

(LCAに関する研究で有名)、Rank Xerox (オランダ、複写機) を訪問し調査を行った。同様の調査を米国のJonson Controls (ペットボトルの再生)、AER (自動車部品の再生)、カリフォルニア州政府 (リデンプションと呼ばれる新しいデポジット、廃品回収システムを実施) に対して行った。また、オランダ、ドイツにおける廃棄物収集の実態、ドイツの循環経済法の市民生活に与える影響の実態などの調査も行った。

- 2) LCAの結果を直接利用せずとも、ポスト大量生産パラダイムの経済的、社会的波及効果を分析できるようにするために、人工物のライフサイクルモデルを作り、特に製品をモジュール化することで同一規模の市場に対して生産量やトータルでの廃棄量を削減するが、企業の売り上げや雇用を維持することの可能性を検証するためのシミュレーション・ツールを作成した。対象としては冷蔵庫を想定した。シミュレーションの予備的な結果は、消費者の買い換え指向に依存するが、消費者が適切なモジュラメンテナンステータス費用を負担を継続するならば (つまりトータルで見ると冷蔵庫という家庭内資産への投資を現状の非モジュール化製品と同様のレベルで行う)、企業の売り上げの構成が新品の売り上げではなく保守費用に大きくシフトするが現状を大きく下回ることはない。また、廃棄量 (すなわち製造に関わる資源投入量) は削減可能であり、ポスト大量生産パラダイムが実現可能であるという予備的な結論を得た。
- 3) 以上の結果から、ポスト大量生産パラダイムは実現可能であることが分かり、そのための政策的提言を次節に述べるようにまとめた。

## 研究成果

### 1. \_\_\_\_\_ ポスト大量生産パラダイムの位置付け

今後の人類の持続、次世代の発展は、エネルギーや資源、環境制約を抜きにしてもはや語れない。しかし、地球環境問題は、資源問題、エネルギー問題、汚染防止・処理問題、地球温暖化問題、廃棄物問題、廃棄物処理場問題、リサイクル・リユース問題、人口問題や食料問題などが複雑に絡み合っている。そのため一つの問題の解決が決して他の問題の解決にはならない典型的な悪構造問題である。地球環境問題を個別の問題として分解しその部分解を合成して全体の解として求めるアプローチには本質的な矛盾が存在する。

したが、大量生産技術に裏打ちされた大量生産、大量消費、大量廃棄を特徴とする現代文明は、地球環境問題に見るように限界に近づいており、適量生産、適量消費、ゼロ廃棄の方向に転換する手法論 (生産パラダイム) が必要である。しかし現在の工業化社会、産業化社会のメカニズムの変革なしには、資源・エネルギー集約的な現在の人工物の生産様式の転換は不可能である。一方、現代社会は極めてダイナミックな変革の真っ只中にある。経済のグローバル化、高度な情報社会化など、恐らくパラダイムシフトとも呼ぶべき、従来の社会システムと経済システムの発展パターンを根底から覆す大きな変化が生じつつある。この

ような既に生じつつある社会や文明のパラダイムシフトの連続的な延長線上に人工物生産様式の変革を位置付けることができれば、企業の積極的な行動を期待できる。つまり、地球環境問題などの諸問題を解決することが、企業にとって有利な生き残り戦略として作用するであろうことがポスト大量生産パラダイムの基本的な主張である。

### 2. \_\_\_\_\_ 製造業の変化の現状

現在の製造業は様々な側面において急激な変化の真只中にあり、それはまさにパラダイムシフトとも呼ぶべきスケールである。

具体的には、人工物生産力が過剰なまでのレベルに到達し、安価で高品質の製品が大量に供給され地球上に量的に充足した一方で、人工物の更新速度を極端に早くした。つまり、人工物の量的充足と短寿命化とが同時に達成された。その一方で、産業構造の変化は、米国の例を見るまでもなく大方の予測とは異なり、「製造業からサービス産業へ」ではなく「製造業そのものの内容がサービス産業化」する形で起きた。

コストと品質の両立を可能にする日本式生産技術、生産システムの本質は精密化による生産プロセスのリーニ化である。その本質は生産から「むだ、むり、むら」を取り除くことであったが、プロセスから無駄を省きコストを削減することは、プロセスコストとして関与する環境負荷・コストの削減でもある。したがって、生産工学の考え方をライフサイクルのリーニ化に拡大することは、我々にとっても参考になる。

情報のグローバル化や人工物の量的充足によって、市場の変化が急激になり、差別化や個別ニーズへの対応が重要になった結果「早く安くよく」なのではなく「より新しいものをより素早く」提供できるものが勝つことが、新たな競争原理となった。旧い「早く安くよく」は、市場シェア獲得が最大の目標であったが、「より新しいものをより素早く」生産することで競争するには、市場の変化・進化の支配が自己を有利にする条件である。したがって、「シェア支配」からその進化の方向と速度を支配する「進化支配」へ市場支配原理も変化している。さらに、「もの」としての製品ではなく、個別化した製品に関連するライフサイクル全般にわたるサービスを包括的に提供することがより重要になりつつあり、それは「より新しいものをより素早く」というよりも、「より新しいサービスをより素早く」提供することが新たな競争原理である。つまり「もの」からものが提供する「サービス」がより重要になっているのである。

一方、技術としてはネットワーク技術は製造業に多大の影響を与えており、デジタル化、情報化の流れは止まるところがない。また、人工物や技術は単調増加的に巨大化、複雑化するばかりである。(これには、「精密化」、「均質化」なども含まれる。) この結果、人工物は高価になり、その設計製造は極めて複雑であり、事故時のインパクトも大きく、保全にも高度な技術を要する。製造技術に比べて、保全技術の開発が遅れているのが現代技術の特徴でもある。

### 3. \_\_\_\_\_ ポスト大量生産パラダイム

フォード以来の大量生産技術の帰結は、過度の生産

技術開発競争と設備投資による人工物の過度なまでの量的充足であり、それが地球-人間-社会系が本質的に持つ有限性（有限性仮説）に抵触して起因する弊害を「現代の邪悪なるもの」と呼ぼう。有限性は自然環境に関する制約だけではなく、社会的制約として貿易摩擦などの市場の有限性も自明である。人工物の巨大化・複雑化に設計生産技術が追いつかず、いまやどのような巨大システムも一人の設計者で設計できないなどの人的制約もある。

現代の邪悪の解決には、生産における目標を人工物の量的充足ではなく、人工物が提供するサービスの質的拡大に転換し、人工物の生産量を自然な許容量の範囲内に抑える必要がある。現在の生産形態は経済学的には何らかの移行過程にあり、このように将来的には全く異なる原理に基づく生産形態「ポスト大量生産パラダイム」にパラダイムシフトすると考える。

仮に物質的な生産量を現在の半分にすると考えよう。生産やその製品の輸送に関わるエネルギー・資源消費量は半分になり労働時間も半分となる。ここで製品寿命が倍になったとして、価格（利益）を倍にすれば、給料も雇用も維持したまま人工物の更新速度が単純に半分になるだけであるが、少なくともエネルギーおよび資源消費は半減する。しかしわが国だけが製品の価格を倍にすれば、たとえ寿命が倍であっても国際競争力を喪失する。そうならないための技術的な鍵は製品の質を高くする、つまり付加価値を極度に高くすることである。ポスト大量生産パラダイムとは、地球環境、資源、市場が有限であるからこそ、製造業における付加価値率を向上し、かつ良いものなら少量でも高く売る、ものではなくサービスを中心として売るといった思想的変革である。これは物質としての人工物に依存しないと意図する「脱物質化（dematerialization）」である。また、製造業は人工物を単に作りつばなしにするのではなく、環境監査や廃製品引き取りなどのように地球環境保護に対する拡大製造者責任を負わねばならない。製品ライフサイクルの「閉ループ化」を目指すことで、製造業は製造だけでなく人工物のライフサイクル全体に責任を持つべきであり、ライフサイクル全体への関わりから利益を得るライフサイクル産業に変身すべきである。

#### 4. ポスト大量生産パラダイム実現のための社会的・経済的・技術的要件

製造業が量に依存せずに成長可能になるためには、第1に製品のライフサイクル全体（製品企画、資源調達、設計、生産、流通、使用・保全、回収、再利用・廃棄）を今後包括的に新しい製造業の対象とすべきである。第2に従来市場評価されてきていないコストを考慮し、製品にライフサイクル価格を設定する必要がある。現在は多くの耐久消費財の回収・廃棄コストは税で賄っているが、今後はこれを正当に評価した回収・再利用・廃棄コスト込みの価格を考える。第3に生産に付随して発生する知識増殖の価値を重視し正当な形で企業収益／個人収入に反映させる。これはライフサイクル全体での活動に必要な知識が集約・集積されて、相互に緊密に結び付くことが特色であるわが国の製造業の企業間ネットワークの再評価を意味する。

製造業は「製造」だけを担当するのではなく、人工物のライフサイクル全体に亘るサービスを提供するライフサイクル産業として再定義すべきである。

生産量を減少し、資源・エネルギー消費量や廃棄量の減少を目指しても生活の質を維持するには、生産量の減少を経済的に補って人工物のライフサイクル全体での付加価値を増大する必要がある。それはまさに競争原理の変化、「より新しいサービス」による「もの」から「サービス」への移行であり、資源・エネルギーの消費量と経済成長とを切り離す脱物質化である。これを実現する新しい人工物のあり方をここでは「やわらかい人工物」(Soft Artifacts)と呼ぶ。具体的には、機械の状態の再構成を行い劣化に機械が動的に対応する「制御型自己修復」と物理的には故障しても必要機能を挙動の再構成により維持する「機能冗長型自己修復」[4]、物理的再構成による機能の再構成を実現する細胞型機械[3]、技術的進歩や要求の変化に応じてアップグレード、ダウングレードなどの機能保全を行ない成長する「成長可能人工物」、モジュラー保全などの「長寿命化人工物」がある。また、ライフサイクル全体にわたって付加価値を多く創出する高付加価値製品が考えられる。部品や製品のreuse, refurbish, remanufacturingも付加価値の増大に有効である。

#### 5. ポスト大量生産パラダイム実現可能性の検討

以上述べたポスト大量生産パラダイムの実現可能性を検討するために、ライフサイクル・シミュレーション・ツールを試作した。例として、冷蔵庫を想定し、従来型の製品ライフサイクルとモジュラーメンテナンスを行なう製品ライフサイクルを、廃棄物量、資源・エネルギー使用量、売上高について比較した。従来型の製品ライフサイクルでは消費者は製品を購入、使用し、故障が発生したら廃棄する。一方、モジュラーメンテナンスを行なうライフサイクルでは、消費者は製品購入後、保守を行ないながら製品を使用し続ける。ここでは単純化のため、再使用、リサイクルプロセスはモデル化しておらず、故障モジュールは単純に廃棄する。さらに、保全費用が高すぎる場合には、消費者は保全を行わず、新製品を購入し故障製品を廃棄するものとする。

シミュレーション結果は三つのパターンに大別できる。第一は、廃棄量が減少し、かつ売上高を維持する場合である。例えば、廃棄量が従来製品に比較して約1/3に減少し、なおかつメンテナンス手数料により売上は7%しか減少しない結果が得られた。第二は、売上高、廃棄量共に大きく減少してしまう場合（環境にはやさしいが、経済的でない場合）であり、従来の考え方ではモジュール型製品を販売するとこのケースが起きると考えられてきた。第三のパターンは、売上高が減少してはいるにもかかわらず、廃棄量がさほど低減していない場合である。これらの違いはメンテナンス手数料の設定の違い、および、モジュール寿命設計、適度なリプレース需要の喚起に起因する。

以上から、消費者が適切な保守費用の負担を継続するならば、企業の売り上げの構成が新品の売り上げではなく保守費用に大きくシフトするが現状を大きく下回ることはない。また、廃棄量（すなわち製造に関わ

る資源投入量)は削減可能であり、ポスト大量生産パラダイムが実現可能である結論付けられる。このためには、寿命設計技術が一つの鍵を握っている。

#### 6 政策的提言

5章で技術的な面からポスト大量生産パラダイム実現可能性を検討したが、結局このような社会を実現するためには、社会システムの構築、および、それを促進する政策が最重要課題となる。

これまでの議論で明らかになったのは、結局、使用済製品の回収システムの確立と、リユース、リマニュファクチャリング、メンテナンスの活性化のための経済的、社会的インセンティブの提供の二点が急務であるということである。このためには、デポジット制度のような経済原則に則った社会制度、環境負荷コストを正当にコストとして含めたコスト評価、法規制、および、製造者からの製品に関わる情報公開、の四点を適切に組み合わせた社会制度を構築する必要があるという結論を得た。

#### 今後の課題と発展

今後は、技術的には、ライフサイクル・シミュレーションの詳細化、具体的データの利用による具体化が課題であるが、特に社会的、経済的な視点からポスト大量生産パラダイムを実現するための環境作り、および、社会の移行シナリオを作成することが最も大きな課題となる。このために検討すべき課題は、研究成果の第6章で述べたので繰り返さないが、逆に言えば、本研究は21世紀の生産パラダイムに向けての課題を明らかにした研究であるとも言え、今後のさらなる発展的研究が大いに期待される。

#### 発表論文リスト

- [1] T. Tomiyama, T. Sakao, Y. Umeda, and Y. Baba: "The Post-Mass Production Paradigm. Knowledge Intensive Engineering, and Soft Machines," in F.-L. Krause and H. Jansen (eds.): *Life Cycle Modelling for Innovative Products and Processes*, Chapman & Hall, London, (1995), pp. 369-380.
- [2] M. Johansen, Y. Umeda, and T. Tomiyama: "Life Cycle Simulation for Verifying Sustainable Model of Products," in L.M. Camarinha-Matos (ed.): *Re-Engineering for Sustainable Industrial Production*, Chapman & Hall, London, (1997), pp. 247-258.
- [3] 正岡康二・坂尾知彦・梅田靖・富山哲男: 「シミュレーションによるポスト大量生産パラダイムの実現性の検証」, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996), pp. 17-18.
- [4] 富山哲男・梅田靖: 「地球環境問題と産業システムのパラダイムシフト」, 第1回エレクトロニクスにおける環境技術シンポジウム論文集, 回路実装学会, (1996), pp. 175-180.
- [5] 富山哲男・石川雅紀・石田晴彦・香川勉・馬場靖憲: 「21世紀の自動車技術」(座談会), 自動車技術, Vol. 50, No. 1, (1996), pp. 6-13.
- [6] 石川雅紀: 「製品の環境ライフサイクルアセスメント」, 化学工学, Vol. 59, No. 1, (1995), pp. 33-39.
- [7] 石川雅紀: 「LCAから見たリサイクル」, 化学工学, Vol. 60, No. 5, (1996), pp. 292-294.
- [8] M. Ishikawa: "A Logistics Model for Post-Consumer Waste Recycling," *J. Pack. Sci. Technol.*, Vol. 5, No. 2, (1996), pp. 119-130.
- [9] 藤井美文・石川雅紀・乃万一隆・鈴木俊之: 「リサイクル促進のための経済的手段導入の費用と効果-リデンプション方式設計の理論と実証分析-」, 経済分析, 経済企画庁経済研究所, Vol. 147, 8月, (1996).
- [10] M. Ishikawa: "A Theoretical Model of Redemption System when Consumer Inconvenience can be Described as a Linear Function of Distance," *J. Pack. Sci. Technol.*, Vol. 5, No. 4, (1996), pp. 267-277.
- [11] 馬場靖憲: 「次世代製造業のあり方を問う"逆工場構想"」, 機械と工具, Vol. 39, No. 8, (1995).
- [12] 馬場靖憲: 「知識創出メカニズムの革新: 地球環境問題と逆工場」, 通産ジャーナル, Vol. 28 No. 8, (1995).
- [13] 馬場靖憲: 「21世紀に持続可能なモノづくりのあり方: 「逆工場」プログラムの展開」, 研究開発マネージメント11月号, (1996).
- [14] Y. Baba, M. Yarime and H. Hatashima: "Realizing the Shift towards Closed-loop Recycling: Strategies of Japanese Firms," *International Journal of Innovation Management*.
- [15] 馬場靖憲: 「環境技術の将来と今後の課題」, 第1回エレクトロニクスにおける環境技術シンポジウム(ECEE'96)論文集-パネルディスカッション-, (1996).
- [16] S. Oda et al: "Choice of techniques in non-proportionally growing economies: a note on Pasinetti's analysis," *Metroeconomica*, Vol. 48, (1997), pp. 200-204.
- [17] 小田宗兵衛他: 「人工社会: 複雑系の経済学のひとつの研究計画」, *Eco-Forum*, Vol. 16, No. 1, (1997), pp. 14-16.
- [18] 小田宗兵衛他: 「情報化社会と新しい競争原理: The-Winner-Take-All Society」, 日本経済研究センター会報, 4月15日号, (1997), p.37.
- [19] 小田宗兵衛他: 「耐久消費財の長寿命型への移行過程モデル」, (印刷中).