

環境視点からのものづくりの課題と今後の方向性

東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻
教授 梅田 靖



1. はじめに

ものづくり、ここでは広い意味での製品の設計、生産の意味で用いる、が環境との関わりで語られるようになってからおよそ20年が経(た)った。もちろんそれ以前から、公害問題や大気汚染は非常に大きな環境問題であった。しかしそれは、主として工場の排気、廃液の問題であった。一方で、1995年以降は、対象がオゾンホールや地球温暖化といったように地球規模の問題になり、使用段階での温暖化ガス排出、使用後の段階の使用済み製品の問題など、製品そのものが問題とされるようになった。そのため、これ以降、「拡大生産者責任」と呼ばれるように、製品の一生を考えた設計、生産が少なくとも考え方としては広く普及した。この1つの模範例が製品の省エネ化と家電リサイクルということになる。

ところが、2014年頃からヨーロッパからCircular Economy (循環経済) という考え方が叫ばれ始め、環境を考えたものづくりの流れが一段階グレードアップしそうな状況にある。同様の時期に叫ばれ出したドイツ発のIndustrie 4.0や、IoT (Internet of Things), Cyber Physical Systems, Industrial Internet, ビッグデータなど、「情報化・ネットワーク化」の流れと相まって、今後のものづくりの方向性に大きな影響を与える可能性が高い。

本稿では、ものづくりと環境問題の関係のこれからのトレンドを概観したうえで、今後の設計の在り方として「ライフサイクル設計」という考え方を紹介する。

2. わが国におけるものづくりと環境問題の関係

前章で述べたように、1990年代半ば以降、環境を配慮したものが急速に広まって行った。例えば、省エネ設計、リサイクル性設計、鉛フリーはんだへの切り替えなどである。ここでの特徴は、先に述べたように環境問題のグローバル化であり、「拡大生産者責任」、すなわち、生産者が生産した製品の一生に対して責任を負う、という考え方である。さらにその根本にあるのは、もの

づくりを含む人類の活動が、地球の許容量を超えつつあり、これまでのような大量生産・大量消費・大量廃棄を続けて行くことはできないということであった[1]。その流れのなかで、インバース・マニユファクチャリング[2]、循環生産といった、資源を循環させながら、物質の消費と価値の提供を切り離すことにより、生活の質の維持向上と環境問題解決の両立を図るものづくりのコンセプトが提唱されてきた。

この流れのなかで1つの理想的な解が、家電リサイクル法に基づき、家電メーカーが作り上げた家電リサイクル・システムである。確かに、使用済み製品の半分程度しか回収できていない、対象製品が大型家電4品目に限られている、いまだに逆有償(消費者がリサイクル料金を負担しなければいけない)といった課題は残るものの、「拡大生産者責任」を文字通り実現し、家電メーカー自らがリサイクルを実行するというシステムを、欧州に先駆けて作り上げたことは特筆に値する。メーカーがリサイクルを実行することによって、使用済み製品の状態やリサイクル性の善しあしが製品設計にフィードバックされるという情報の好循環が生まれている(と信じている)。また、メーカーがリサイクルを担当することにより、家電リサイクル法施行当時大きな問題になっていたプラスチックのリサイクルについてもコンスタントに技術開発が進み、長足の進歩を遂げている。本稿で議論したいのは、このような、製品ライフサイクルのシステム論なのである。

その当時に作られた「循環型社会」、「3R (リデュース、リユース、リサイクル)」は先進的なコンセプトで広く普及したが、一方で、当時の最重要課題は、埋め立て処分場であり、大型家電品の不法投棄問題であった。その意味で、3R行政は依然としてゴミ問題の解決が発想の原点にある。加えて、目指していた循環生産にしても、家電リサイクルがある種の到達点になってしまい、その後、大きな進展が得られている訳ではない。とすると、大量生産・大量消費・大量廃棄から、大量生産・大量消費・大量リサイクルへ移行しただけであり、それがわれ

われが本来目指すべき、持続可能性、もしくは、持続可能なものづくり^(注1)なのかという疑問が提起されているし、少なくとも国内においては、閉塞感が漂う状況にある。

資源循環と双璧をなす温暖化対策に関して言えば、省エネ法のトップランナー方式のお陰か、各製品の省エネ化が進み、それが顧客への訴求力になるという好循環が生じている。家電製品のリサイクル性が高いことが購買動機にほとんどならないことと大きな違いである。こちらはシステム論というよりは技術論なので本稿はこれ以上触れない。

3. 欧州における循環経済への動き

このような状況のなかで、2014年頃からCircular Economy（循環経済）やResource Efficiency（資源効率）というコンセプトがEUのなかで提示され始めた[3]。2015年12月には政策パッケージ[4]として公開されたが、これらの資料に基づくとその要点は以下のようまとめられる。

- Systemic Eco-Innovation
漸進的でなく大きな変化
- 資源効率（Resource Efficiency）
リマニュファクチャリング、リユース、メンテナンス、アップグレード、材料リサイクルなどにより資源循環を大幅に高度化する（レアメタル・レアアースの代替、持続可能な材料の使用なども含む）
- 持続可能な材料利用
ゴミではなく資源、大量生産ではなくカスタム化、枯渇ではなく再生
- 製品サービスシステム
消費者ではなく使用者、所有ではなくシェア
- 循環経済

これらによって、雇用の確保、EUの競争力の強化、環境負荷削減、資源確保を実現しようという壮大なビジョンなのである。

日本生産性本部の喜多川和典氏によると、ここには2つの大きなポイントがある[5]。1つは、3Rの延長上で考えてはいけないということであり、もう1つは、グローバルの反対語としての地域中心の、地域に根付いた循環ということである。前者については、3Rには前述のとおり廃棄物処理の思考の延長線上であって、どうしても、ゴ

ミをきれいにする、埋め立て処分場を延命化することが目的となり、そのためにはコストがかかるのは仕方がないという発想になってしまう。循環経済は、経済価値を高め、雇用を確保することを資源消費の最少化、循環によって実現しようという発想であって、大きく違う。後者については、グローバル規模での大量生産は大量リサイクルと親和性が高い、もしくはそれしかやりようがないのに対して、リマニュファクチャリング、リユース、メンテナンスは解体、再組み立てに人手もかかり、輸送コストも単なるリサイクルに比べて相対的に高くなるので循環が地域レベルに落ちてくる。基本はリユース部品を使うので最終組み立ては消費地に近い所になり、日本や新興国などの域外からはモジュールを輸入するだけになる。

環境問題を解決しつつ、競争力の強化、雇用の確保になるという魔法のようなことが可能なのか疑問が残つつも、今後の持続可能なものづくりの方向性を示しているのは間違いない。

ここで、IoT、Cyber Physical Systems、ビッグデータなどの「情報化・ネットワーク化」は非常に大きな武器になる。理想的には、コンシューマプロダクトであっても、全ての製品の使用状態・劣化故障のモニタリングができ、使用期間のコントロールができれば、メンテナンスの計画、使用済み製品の再生、リサイクル、再生部品、再生製品の出荷計画などが極めて合理的に行えることになる。例えば、General Electric Company（以下、GE）やRolls-Royce Ltd.などは、航空機エンジンを航空会社に売却せず、所有したまま、メンテナンスを含むライフサイクル管理を一括して請け負っている。それぞれのエンジンの状態をオンラインでモニタし続け、最適な運用のアドバイスと、合理的なメンテナンス、部品の再生、再利用を実現し、高いビジネス性と顧客（航空会社）への価値提供を実現している。

以上の循環経済は、内容的には筆者らが20年前から検討している前述の「インバース・マニュファクチャリング」とほとんど変わらないが、メーカー中心というよりは使用者指向、消費者行動としてのシェアリング、技術としてのIoTの出現が大きいと考えている。

要するに、単純にものを売るだけではなく、顧客への価値の提供者になり、製品のライフサイクル全体をマネジメントして、循環を回す役割（これを筆者らは「ライフサイクル産業」と呼んでいる）を担うというのが今後の方向性である。ライフサイクル産業は、メーカー主導も、リサイクラー主導（ヨーロッパではメガリサイクラーが大きな力をもっている）も、小売業主導もあり得る。これは、iPhone^(注2)、クラウドサービス、これからの自

(注1)「持続可能なものづくり」という概念は、2000年代後半から出てきたと言って良いであろう。

(注2) Apple Inc.の登録商標または商標。

動運転車に見られるような欧米主導のプラットフォームが、循環の世界でもイニシアチブを握りそうな危険性が高い。なおかつ、ここはわが国の技術者の不得意分野と言われている。

4. ライフサイクル設計

ここまでで、ステレオタイプに言ってしまうと、わが国では廃棄物問題の解決を目指して、大量生産・大量リサイクル型の循環システムがある種飽和状態にある一方で、EUでは循環経済の名の下で、顧客との関係を維持して価値を提供し続けると同時に、資源を循環させ、競争力の強化、資源確保を実現しようとするプラットフォーム、ライフサイクル産業の出現が予感されることを述べた。

技術的に最も重要なことは、このような製品ライフサイクルを設計・構築し、マネジメントすることである。本章では、その第一段階である製品ライフサイクルの設計、「ライフサイクル設計」[6]について紹介する。

従来の設計では、コストパフォーマンスの良いモノをいかに効率よく作るかということが基本的な命題であった。一方、リサイクル、廃棄物処理は、出てきてしまった「ゴミ」をいかに処理するかという、受け身のスタンスであった。ライフサイクル設計は、3章で述べたような循環プラットフォームを構築することである。

ライフサイクル設計の流れは、第1図のように整理できる。

1. 現状分析

まず、右側の実世界に現状の製品ライフサイクルがあって、社会的、技術的、ビジネスなどさまざまな外部要因の下で成立している。これら現状の製品ライフサイクル、それを取り巻く外部環境を十分に把握、分析する。

2. ライフサイクル・プランニング

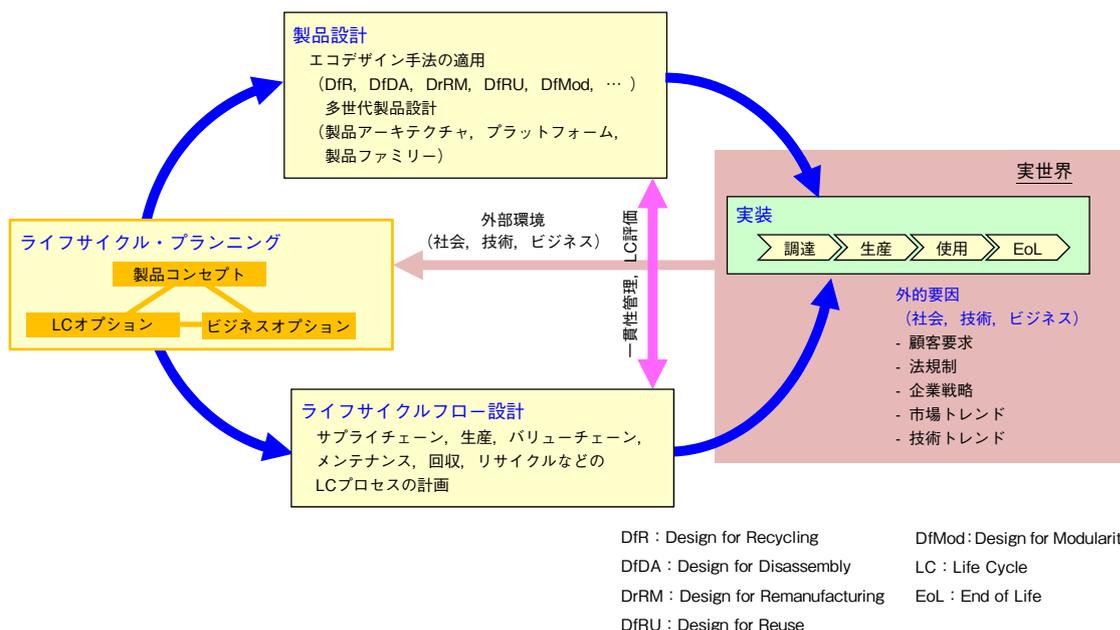
1. の情報に基づき、これから設計する新しいライフサイクルの目的を設定すると同時に、それを実現する基本コンセプト（ライフサイクル戦略）を策定する。これは、設計者がどのような製品ライフサイクルを実現しようとしているのかを示し、以下の3つの要素で表すことが適切であると考えている。

- 製品コンセプト：機能面、環境面、コスト面での要求とそれを満足する顧客に提供する価値を示す。
- ライフサイクルオプション：材料リサイクル、メンテナンス、アップグレード、リユース、リマニュファクチャリング、適正廃棄など、製品やその部品が辿（たど）るライフサイクルの経路。
- ビジネスオプション：製品の提供方法（販売、リース/レンタルなど）、ビジネスモデルなどを示す。

3. 製品設計とライフサイクルフロー設計

2. で策定したライフサイクル戦略を実現するために、製品の設計とライフサイクルの流れの設計を行う。

製品設計は一般の製品設計と変わりはないが、ここで分解性設計、リサイクル性設計など種々のエコデザイン手法が適用される。また、多世代設計や製品ファ



第1図 ライフサイクル設計の全体像

ミリー設計など長い時間尺度で製品を設計する必要がある。

ライフサイクルフロー設計では、流れ、すなわち、サプライチェーン、バリューチェーンなどを計画、設計し、さらに、生産、メンテナンス、回収、リサイクルなどの各プロセスの計画、設計も行う。

多くの場合、製品設計とライフサイクルフロー設計を実施する部署は異なるので、両者の間の一貫性管理は重要なプロジェクト管理事項である。さらに、両者の情報を合わせて、例えば、ライフサイクル・アセスメント（LCA）手法を用いて、ライフサイクル全体の評価を行い、ライフサイクル全体の目的が達成されているかをチェックする。

4. 実装とマネジメント

ライフサイクル評価が満足であれば、製品ライフサイクルを実装し、目的通り循環し、変化に柔軟に対応できるようにマネジメントする。そして次のライフサイクル設計に向けてフィードバックを行う。

5. ライフサイクル・プランニング

ライフサイクル設計のなかで最も重要な段階がライフサイクル・プランニングである。ここで、製品ライフサイクル全体を見渡し、起こりうる変化を想定しながら、ライフサイクル全体としてうまく循環のバランスを取ることができるようにライフサイクル戦略を決定することが重要である。キーワードは、循環のバランスである。現状でも、一見素晴らしいリサイクルに見えても循環のバランスが取れずに失敗したものはたくさんある。

1つの製品においてもさまざまなライフサイクル戦略を考えることができ、ここが智慧の搾りどころである。例えば、ボールペンは一般的には、「a. プラスチック製の安いボールペンを販売し、インクがなくなるまで使用し、その後は単純廃棄」であろう。しばらく前は、「b. 高級感のあるボールペンを販売し、インクカートリッジを交換しながら長期使用する。最後は退蔵」というライフサイクル戦略も多く見受けられた。その他にも「c. リサイクル可能な材料で構成されたボールペンをデポジットを取って販売して、使用後に回収して、高度にリサイクル」、「d. インクを交換できない長寿命ボールペンを作って、機能販売し、インクが切れたら製品を無料で交換。回収したボールペンはリマニュファクチャリングする。」などいろいろ考えられる。そして、それぞれに製品設計、ライフサイクルフロー設計が違ってくる。例えば、この例のボールペンの分解性設計をとっても、b.の場合は使用者がインクカートリッジを交換しやすくすることが重

要であるし、c.はできるだけ分解しないでリサイクルできることが重要であるし、d.では使用者は分解できず、工場ではリマニュファクチャリングのために容易に分解できることが重要である。このように、具体的な製品設計を行う前に、ライフサイクル戦略の基本コンセプトをしっかりと煮詰めることが大切というのが、ここでの主張である。

このライフサイクル・プランニングをどのような手順で実施すれば良いのか、どのように支援すれば良いのか、という研究は、ライフサイクル・エンジニアリングという分野で盛んに行われている[7]。やろうと思えば、手法、ツールはいろいろとある。紙面の都合で詳細を紹介することはできないが、2点だけ指摘しておきたい。1点目は、ライフサイクルオプションの選択に関しては製品の使われ方、捨てられ方が非常に重要であるということである。例えば、製品が使われなくなる理由には2種類ある。1つは、ボールペンのインクのように消耗品がなくなってしまったり、故障して使われなくなってしまったりすることで、筆者らはこれを「物理寿命」と呼んでいる。もう1つは、スマートフォンのように必ずしも故障していなくても、最新機種に比べて見劣りすると使われなくなってしまう場合であり、「価値寿命」と呼んでいる。価値寿命は、製品としては何ら故障がなくても、ユーザーのニーズの方が変化してしまったが故に捨てられてしまうのである。循環させて形を変えて再使用するなどして価値寿命をできるだけ延命化させ、物理寿命まで使い尽くすことが「資源効率（Resource Efficiency）」につながる。逆に、寿命設計をする際に、価値寿命が支配的な製品の物理寿命を延命化させるために材料強度を上げるなどは意味がない。

2点目は、ビジネスオプションの策定に関しては、「製品・サービスシステム」（PSS, Product Service System）[8]という考え方が大変参考になる。これは、製品のみを売るという考え方でなく、製品とサービスを組み合わせることによって顧客に価値を提供するという考え方であり、第3章で述べたGEやRolls-Royceの航空機エンジンビジネスはまさにこれである。もっと先駆的な成功事例は、パナソニックのあかり安心サービス^(注3)である。この辺りのビジネス戦略策定支援の研究も、前述のライフサイクル・エンジニアリングであったり、サービス工学[8]という分野で盛んである。

(注3) 当社の日本国内における登録商標。

6. おわりに

本稿では、ものづくりと環境問題に関係について、わが国では大量生産・大量リサイクルというイメージで安定／閉塞状況にあるのに対して、EUでは大きな変革の兆しが見え、資源循環の在り方、ビジネスを変革するプラットフォームの出現が予感されることを述べた。さらに、第4、5章では、この問題に対応し、製品ライフサイクルシステムを構築するためのライフサイクル設計、ライフサイクル・プランニングの考え方を述べた。

この、私の言葉で言うライフサイクル産業化の流れは、情報化・ネットワーク化の流れと相まって、避けて通れない、持続可能なものづくりの1つの将来像になって行くことは間違いないと思われる。何も、全ての製造業がそちらの方向に行くことはないと思うが、カードとしてもっておくことは必須であると考える。

参考文献

- [1] 富山哲男 他, “人工物工学研究,” 科学・技術・社会, vol. 12, pp. 97-126, 2003.
- [2] 木村文彦 他 (編), インバース・マニュファクチャリングハンドブック, 丸善出版 (株), 東京, 2004.
- [3] 梅田靖, “「国際会議Care Innovation 2014で」, 連載: 持続可能社会に向けた「モノづくり」,” プラントエンジニア, vol. 47, no. 2, pp. 80-81, 2015.
- [4] European Commission, “Circular Economy Strategy, Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy,” http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm, 参照 Oct. 21. 2016.
- [5] 梅田靖, “「PREUSE」, 連載: 持続可能社会に向けた「モノづくり」,” プラントエンジニア, vol. 48, no. 8, pp. 68-69, 2016.
- [6] 梅田靖 他, “ライフサイクルエンジニアリング専門委員会 ライフサイクル設計の研究動向,” 精密工学会誌, vol. 76, no. 10, pp. 1113-1116, 2010.
- [7] Yasushi Umeda, et al., “Toward integrated product and process life cycle planning - An environmental perspective,” CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 61, issue 2, pp. 681-702, 2012.
- [8] 内藤耕, サービス工学入門, (一財) 東京大学出版会, 東京, 2009.

《プロフィール》

梅田 靖 (うめだ やすし)

1987	東京大学工学部卒業
1989	東京大学大学院 修士課程修了
1992	東京大学大学院 博士課程修了. 博士 (工学)
1992-1995	東京大学工学部助手
1995-1999	東京大学工学系研究科 講師
1999-2005	東京都立大学工学研究科機械工学専攻 助教授
2005-2013	大阪大学工学研究科機械工学専攻 教授
2014-現在	東京大学工学系研究科精密工学専攻 教授

専門技術分野:

ライフサイクル工学、シナリオ設計、サステナブル・マニュファクチャリング

主な著書:

逆工場 ((株) 日刊工業新聞) 1999.

エコデザイン革命 (丸善出版 (株)) 2003.

サステイナビリティ・サイエンスを拓く - 環境イノベーションへ向けて - (大阪大学出版会) 2011.