ライフサイクルデザイン (LCD) と新製造技術戦略

古川 勇二*

Product Life Cycle Design (LCD) & Strategy for Manufacturing Technology

Yuji FURUKAWA*

*東京都立大学大学院工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

*Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University (1-1 Minami-Osawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397)

1. 機械文明のあり方

18世紀後半に始まった産業革命は、J.ワットの蒸気機関に代表されるように、人類史上初めて“人工エネルギー機関”をもたらした。それまでは人間自身の人力、動物の力、さらには水力・風力などの自然エネルギーの利用に限られていたのだが、蒸気機関の開発を契機として、その後、内燃機関、電気機関、そして今日、原子力エネルギー機関へと展開してきている。この産業革命の恩恵によって、われわれ人類の生活は飛躍的に向上した。すなわち人工エネルギー機関の応用によって、石炭、石油の掘削が可能となり、森林を伐採して農地を開墾し、あるいは船を駆使して漁業を展開し、さらには機械的畜産業によるなどして多くの食糧を得、また住居、衣料なども産業革命の大きな成果としてわれわれ人間の生活利便性を向上せしめた。その結果として、中世まで10数億人とほぼ安定していた世界人口は20億人を超えるまでに急増傾向を見せ始めた。しかし人工エネルギー機関の開発や各種工業製品が実用し始めたとはいえ、それらは依然として高価な対象であって、一般人民を十分に支えるまでには至っていなかったのも事実である。その理由は、当時の製造手法は、服屋が一着ずつ服を作る、いわゆるテーラーメイド方式であったので、その生産効率は相当低かったのである。

そこで工業製品の最終組み立てにおいて、たくさんの部品を作っておいて、それらのいずれかの1つを取り出して、他の部品と組み立てることができないか、すなわち部品の互換性ができないかが生産技術上の課題となってきた。これを可能にするには、それぞれの部品が指定した寸法精度内におさまっていなければならない。すなわち、それぞれの部品に許される寸法誤差としての“公差”を規定すべきであることが明らかにされた。それを現場で実現するためには、それぞれの部品の寸法が許容値内に入っているか否かを検査する必要性が生じ、そのため最小許容寸法と最大許容寸法に設定した“ゲージ”が考案された。例えば部品が軸であれば、最小許容寸法ゲージは通らない (Not Go

Gage) が、最大許容寸法ゲージは通る (Go Gage) 軸が許容範囲とする検査方式が確立された。これをもとに許容寸法内にある同一部品をたくさん作っておいて、そのいずれを取り出しても別の部品群との組み立てが可能な“互換方式”、あるいは“ゲージ生産方式”が確立された。これは絶大な効果をもたらし、例えば1912年に生産開始されたT型フォードは、ゲージ生産方式に基づく大量生産 (マスプロダクション) の最大の成功事例である。これに引き続いてあらゆる工業製品が量産化され、今日のわれわれの生活を支えている。しかしこの量産と消費経済の影響として、世界人口は急増し、ついに20世紀中に60億人に達し、土地を開墾して都市化したために、世界の陸地総面積に占める緑地の割合は18%までに激減し、結果としてCO₂は350ppmにまで上昇している。図1に示すように、人工、緑地、CO₂の代表パラメータは、このわずか2世紀半の間に指数関数的に上昇ないしは減少してきて、このまま放置してお

(資料：NHK地球汚染、NEXT'91-9など)

CERCLA : Comprehensive Environmental Responsibility Compensation & Liability Act (検討中)
厚生省・廃棄物処理法、通産省・廃棄物再資源化法、環境庁・リサイクル法

図1. 指数の警告

けば人類の将来はおぼつかないまになっている。これらの指数的現象に対する産業革命および量産革命の影響に関する定量的・総合的説明はいまだなされていないと考えるが、しかし2つの機械文明に依拠する革命が、何らかの、かつ、大きな因果関係を持つであろうことは容易に推察されるところである。多分、われわれ製造技術にかかわる者は、結果としてこのような地球規模の問題が発生するとは考えていなかったはずだし、ただ人類の利便性向上に資するとの思いで産業革命を実現し、今日、依然として量産革命中にあるともいえる。しかし、図1に示したマクロ現象が発する警告を回避できるのも、製造技術にかかわる者以外にはないこともまた事実であって、まずこのことを深く認識しなければいけないであろう。

それではこの指数の警告をどのように乗り越えるべきか、その方針を求めなければならない。科学的に明確な根拠はないものの、このような総合的・マクロ的現象の傾向を、即座に元の状態に戻すことはおよそ不可能であろう。したがって採られるべき戦略は、この指数的現象をいかにゆるやかに減衰させていくにかかっている。多分この2世紀半で急増した人口を中世レベルまで下げることは不可能であるし、むしろ21世紀においては、さらなる人口増加にも増して、発展途上国民の先進国民化と、それに伴う工業製品の利用増こそ明示されている。したがってわれわれ人類の採るべき道筋は、徹底した省エネルギー化と自然エネルギーへの回帰、そして省資源と資源の再利用しかあり得ないのである。一般的に言われている循環型社会、エコ社会、ゼロエミッションの実現、リサイクル可能な設計、インバースマニュファクチャリングなどは、いずれも上記思想に立った施策の1つといえよう。

ところで産業革命と量産革命を実現してきたわれわれ製造技術者は、上記諸施策のすべてに関係しているが、しかし21世紀の長期的課題として「LCD革命」を目指し、実現しなければならない責務があるであろう。なぜならば、地球環境保全を目標とする活動の大半は、“消費の抑制”という消費者側の立場にあるように思われる。もちろんこのことは大変重要ではあるのだが、他方、供給者側、生産者側としての工業製品のあり方を根本的に検討し、実現しなければならないのは製造技術者こそだからである。

2. 人工物のライフサイクルデザイン

以上の視点に立ち、日本学術会議生産システム学専門委員会では、「人工物のライフサイクルデザイン (LCD) のために振興すべき基礎学術」と題して報告書を取りまとめた。本稿に関連する重要部分を引用すると以下のとおりである。

現代の人工物の問題は、それらが人工的に作り出されたものであるにもかかわらず、工場から出てしまうと、利用者の中に埋没してしまい、製造者の目からは見えなくなる

ことである。これらの人工物は、やがて廃棄物となって、社会に現れてくる。このように、途中で未管理状態におかれた人工物を、環境に適切に管理し処理していくことは困難である。現代の多くの人工物には、そのライフサイクルにリンクの欠落があって、循環型の閉ループライフサイクルとはなっておらず、ライフサイクルを適切に管理することが困難になっている。この状況を根本的に改善するためには、人工物の基本概念まで立ち返って、さまざまな製品の関係も含めた統合的な人工物のライフサイクルを議論することが必要であろう（特定製品群については、複写機などで、適切なライフサイクル管理がなされている例を見ることができる）。このようなライフサイクルの構築と管理をも製造業の範疇に含めていくことにより、新たな製造業の可能性も開けてくるのではないかと期待される。既存の製品やシステムを前提として、製品ライフサイクルを管理し製品を循環させていくことは、環境負荷減少の観点からも、必要な費用の観点からも正当化しにくいであろう。（「レンズ付きフィルム」のように）製品あるいはそのサービス自体に循環の仕組みが組み込まれており、リースやレンタルのような利用形態が普通になっていくような変化が望まれる。

このような視点に立ったとき、従来の設計・生産技術では考えられていなかったような課題が多く発生する。その基幹は、広い範囲での人工物のシステム化とそのライフサイクルデザインであろう。従来のような「いかに効率よく作るか」から脱却して、「要求されるサービスを満足させ利益を確保しつつ、いかに作らないで済ませるか」が課題である。家電品や自動車なども、その製品概念を大きく変えて、廃棄物になりにくい機能に変容していくことが求められる。

このようにライフサイクルデザインとは、モノ、エネルギー、お金・価値、情報・知識の製品ライフサイクルにわたる循環を設計、管理することである。そのような循環に適合した製品やサービスは従来とは異なるものとなり、新しい設計・生産技術を要求する。例えば、製造工程のリーン化とコスト削減はかなり限界近くまで推し進められているが、ライフサイクル全体から見たときの使用、メンテナンス、逆生産段階のリーン化はまったくの手つかずと言ってよい。さらには、ライフサイクルという視点で見た場合、これまでの製造のリーン化の方向はかたよったものであった可能性すらある。今後は、このライフサイクルの設計、管理という視点を学術対象とし、より合理的に実装していくための基礎技術の振興を図るべきであり、そのトピックスを表1に示す。

3. 新製造技術戦略

以上に述べたLCD革命が社会の大部分に効果を及ぼすまでには、少なくとも四半世紀は要するであろう。すなわ

表1. LCDの学術的トピック

トピック	キーワード
a) モノからサービスへ	
サービス設計	Customerの立場から何が求められているか？ 提供すべきサービスの設計, QFD, VE
ビジネス設計	要求サービスを満たし、循環生産によってビジネスを成立させるための戦略策定, 経営管理
b) ライフサイクル設計と管理	
ライフサイクル設計	製品ライフサイクルのプランニング, シミュレーション, 最適化, ライフサイクル戦略の策定
製品設計	プロダクトモデリング, 劣化評価, 機能アップグレード, 部品共用化, DfX (Design for X), DfXの統合化, 設計ガイドライン, 成長する人工物, 循環型製品
プロセス設計	ライフサイクルの各プロセスの設計, 最適化, 生産技術, FA, 生産システム工学
インフラ設計	ロジスティックス, エコタウン設計, 交通設計, 社会システム設計, ゼロエミッション
ライフサイクル管理・メンテナンス	モニタリング, 遠隔メンテナンス, 個体トレース, 運用履歴管理, 環境マネジメントシステム (ISO 14000シリーズ), オペレーション支援, メンテナンスの自動化/ロボット化
ライフサイクル評価	LCA, EP, LCC, PL, 環境ラベル
情報共有化技術	ネットワーク技術, CALS, ecoCALS, 環境情報システム, 情報開示, コンカレントエンジニアリング
c) ライフサイクル要素技術の高度化	
材料技術	リサイクル可能材料, 無毒化材料, 材料リサイクル技術, 鉛フリーはんだ, 軽量化, リサイクル材を使用した材料設計, 製造
メンテナンス要素技術	センサ技術, 寿命予測, 劣化診断, 信頼性工学, メンテナンス工学, メンテナンス・ロボット
プロセス技術	生産加工学, 分解技術, 点検・検査技術, 品質管理, 生産管理, 廃棄物処理技術, 洗浄技術, 補修技術
エネルギー技術	省エネルギー技術 (プロダクト, プロセス, システム, インフラ), エネルギー回収技術, 非枯渇エネルギー利用技術

(日本学術会議第17期生産システム学専門委報告書による)

ち20世紀を量産革命の時代と捉えるならば、21世紀頭初の25年は、LCD革命への過渡期間とみるのが妥当である。前述した人口増、エネルギー、食糧増、CO₂増、緑地減などの多くの因子を総合的に考慮したときの地球・自然環境の悪化指数（概略値）は、1975年を1とした場合、現在（2000年）は1.2～1.3程度といわれているが（図2）、これを現在のまま放置すれば、2025年には1.5～1.6まで増加すると案じられている。COP3京都議定書の実現、環境税等の導入、リサイクル設計、など個別の取り組みが着手され始めているが、それらが総合されてLCD革命がなされ、やがて2025年になって完全循環モノづくりのパラダイムが実現されたとしても、悪化指数は現在よりも悪いレベルでしかあり得ないのである。いわゆるソフトランディング施策としてはやむを得ないところであり、その結果を受けて、2025年以降のさらなる新しい取り組みが展開されることが期待される。

このような状況にあって、先進工業国である日本としては、国家産業技術戦略を2000年4月に策定し、これを受け

図2. 自然環境悪化指数の予測

て次期科学技術基本計画、同基本法を現在とりまとめ中である。その機械産業・新製造技術と上記LCDとの関連について以下にまとめたい。

まず国家産業技術戦略としては、短期的に2010年までに実現すべきことと、中長期的に2025年を目標とすべきことにはスタンスに差があることを述べておきたい。短期的には、90年代の世界的な市場経済化とそれを技術的に支えたIT技術の活用において、わが国製造業は米国企業に若干の遅れをとっており、このことが競争力の低下につながっているとの認識のもとに、とりあえず製造業の業績の回復を図って競争力強化を実現すること。またこの50年における欧米技術のキャッチアップに成功した今日、わが国製造業にはフロンティア創造が望まれ、この実現のために高度製品の開発（プロダクトイノベーション）が従来製品の製造（プロセスイノベーション）に増して必要なこと、なかなか情報、バイオ、新素材などの先端分野製品の産業化が重要であると指摘し、これを具現化させるための国家施策が提言されている。この短期的戦略の中で、2025年以降の中長期的課題ともいえる、地球自然環境とモノづくりとの調和についても研究・開発に着手し、結果を2025年以降の実業に結びつけるべきであるとしている。すなわち産業技術をめぐる配慮事項として、第1に地球的課題への対応として、世界の15%の生産を担うわが国としては、地球的規模の課題への先行投資は、わが国産業の制約条件であると同時に世界への貢献でもあるとの認識、そして第2に技術を利用し管理する意識の涵養として、巨大化・複雑化した技術をいかに適切に管理して、人と社会に単なる豊かさをもたらすのみではなく、あわせて安全と安心をももたらさなければならない、との認識である。以上の視点に立って、社会的ニーズの高い技術開発に傾注すべきであるとして技術が、

（通商産業省 新製造技術戦略 環境・安全WG報告書）

図3. 製品環境情報システムのイメージ

- ・高齢社会における安心、安全で質の高い生活の実現
- ・経済社会の新生の基盤となる高度情報化社会の実現
- ・環境と調和した経済社会システムの構築
- ・エネルギー・資源の安定供給確保

の4つの目標を達成できることとしている。

前の2項がやや至近の目標であるのに対して、後の2項は21世紀頭初に芽を出しておくべき技術だが、本格的実用化は2020～2025年を想定している。特に第3項の環境と調和した経済社会システムの構築では、循環型社会づくり、環境ホルモン等化学物質の極小化、および地球温暖化抑制施策が重要であって、この実現に向けて、3つのR、すなわち、Reduce（廃棄物発生抑制）、Reuse（製品等の再利用）、Recycle（廃棄物等の再生）に対してバランスよく取り組むべきであるとしている。

以上を考慮しての機械産業・新製造技術分野としては、技術革新の方向性として、

- ・機械のエネルギー・環境との調和
- ・機械のマイクロ化
- ・機械の人間との調和

の3つを示し、特に第1の方向性の具現施策として、中長期的にエミッションフリーマニュファクチャリング（エネルギー・資源最少・廃棄物ゼロ生産システム）、インバースマニュファクチャリング（高度リサイクル対応生産システム）を中心に研究開発を進め、また単に国内のみでなく国際的展開を図る上で、IMS国際共同研究プログラムの枠組みを積極的に活用することとしている。

また、前述した学会会議報告とも歩調を合わせて、環境対応知的基盤の確立が不可欠としている。具体的にライフサイクルエンジニアリング（LCE）技術の知的基盤の確立には、図3に示した製品環境情報システムを基礎として、

- ・材質・部品コード表示技術
 - ・部品表示コード体系、材質IDシステム
 - ・マーキング技術
- ・履歴トラッキングID技術
- ・ライフサイクルサポート情報システム

- ・余寿命判定技術
- ・エミッションフリーマニュファクチャリングおよびロジスティクス情報システム

を整備すること、さらにはインバースマニュファクチャリングに関する静脈物流システム化技術の知的基盤の確立には、

- ・産業別、メーカー別回収システム
- ・分解・再利用／リサイクルレベル判定技術
- ・低価値品大量運搬仕訳技術

が不可欠としている。

4. むすびに代えて

この1年間、筆者が関係してきた学会会議、国家産業技術戦略会議、産業技術審議会、IMS国際共同研究プログラムなどを通して、モノづくり・製造技術に関する研究者として、21世紀のあり方に関心をもたざるを得ない状況になっている。先駆者の叡智で実現されてきた今日の工業化社会を、いかに地球・自然環境と調和させて行くかもまた、モノづくり・製造技術者に課せられた課題である。その中核的考え方として、人工物のLCD（ライフサイクルデザイン）がきわめて重要であるとの認識をもっている。多くの方々がLCDを社会的合意（パラダイム）と捉えることこそが重要であって、そのとき、LCD革命がなされることを切望する次第です。

なお本編執筆にあたり、本学、梅田靖助教授のご支援をいただき、また筆者の関連した委員会での議論を利用させていただいた。ここに記して深甚の謝意を表します。

（2000.5.15-受理）

古川 勇二（ふるかわ ゆうじ）

昭和18年生まれ。昭和43年、東京都立大学大学院修士課程修了。現在、東京都立大学大学院都市科学研究科長、同工学研究科教授。マイクロ加工学、生産システム学、都市産業論の研究に従事。