

サステナブルシステムデザイン学領域の紹介

大阪大学大学院工学研究科
機械工学専攻 教授

小林 英 樹

1. はじめに

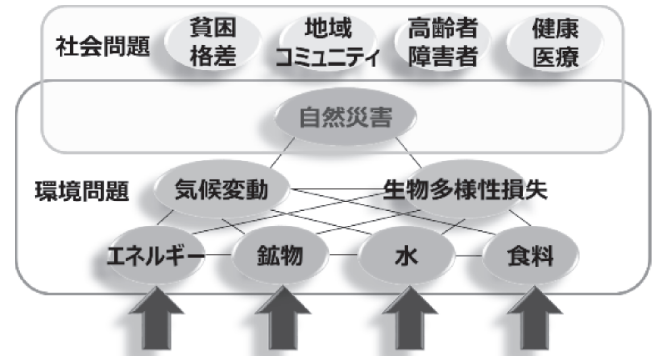
筆者は、企業で設計・開発実務を経験した後、環境配慮設計（エコデザイン）、ライフサイクルデザイン、持続可能性（サステナビリティ）学と、一貫して永続性のあるものづくりのための研究に携わってきました。そして、2015年4月からは大阪大学に研究の拠点を移し、福重真一准教授と共同で研究室を運営しています。

折しも2015年9月の国連総会で2030年までの持続可能な開発目標（SDGs: Sustainable Development Goals）が採択されたところで、今後、サステナビリティの実現に向けた取り組みは益々重要になっていきます。サステナブルシステムデザイン学領域は、こうした世の中のニーズに対して、設計/デザインという立場から貢献を目指す領域です。本稿では、研究の背景、領域の全体像、筆者らによる研究テーマの一端を紹介します。

読者の方々は「デザイン」という語に対して工業意匠というイメージを持たれるかもしれませんが、本稿では、従来の工学設計の守備範囲を超える意味合いで「デザイン」という語を用いることにします。

2. 研究の背景

現代社会は持続可能ではない。これは研究室にきた学生に対して、筆者が最初に語る言葉です。地球環境問題を例にすると、世界人口の増大と経済成長を前提とした大量生産・大量消費・大量廃棄の生活様式が拡大した結果、資源フローは既に地球の許容値を超えていると言われています。そして、このままの状態で推移すると、気候変動や生物多様性損失の問題は悪化し、自然災害もさらに増大すると予測されています（図1）。



世界人口増加と経済成長による過大な資源フロー

図1: サステナビリティを脅かす問題群

サステナビリティという語は、1987年の国連報告書で示された「持続可能な開発」にその起源があるとされる、比較的新しい語です。このため、何をどのレベルでどのくらいの間持続させるのか、という基本的な議論も未だに続いています。持続可能な状態を作ることが目標である、という考え方もあります。現時点でもっとも国際的に認知されているサステナビリティの目標は、先のSDGsで示された貧困撲滅、消費と生産パターン、などの17目標です。SDGsでは、人類の生存基盤である地球環境のサステナビリティを必要条件とした上で、社会活動、経済活動がなされるべき、というネスト構造の考え方を採用しています。これを筆者が図にすると以下ようになります（図2）。

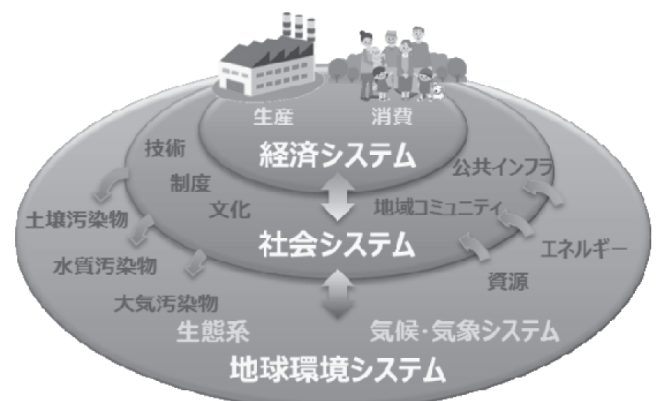


図2: 持続可能社会の世界観

サステナビリティの研究分野では、昨今社会的サステナビリティに対する注目度が高まっています。実際、この20年間で環境と経済を両立するための取り組みが数多くなされましたが、貧困や格差の問題はむしろ悪化しています。真に持続可能な社会を実現しようとするならば、環境側面だけでなく、こうした社会側面も同時に考慮しつつ、経済活動を行なうことが求められます。ものづくりの世界でも、新しい人工物システムの見方が必要とされているのです。

3. 領域の全体像

本領域の最終目標は、持続可能な社会に相応しい人工物システムの設計方法論を生み出す学術基盤を体系化することです。複雑問題の典型であるサステナビリティの問題を解決するには、多くの知識を総合する必要があります。デザイン思考、システム思考、ライフサイクル思考に基づいて、関連分野を学際的（Interdisciplinary）、あるいは超域的（Trans-disciplinary）に再編して適用するアプローチが有効と考えます（図3）。

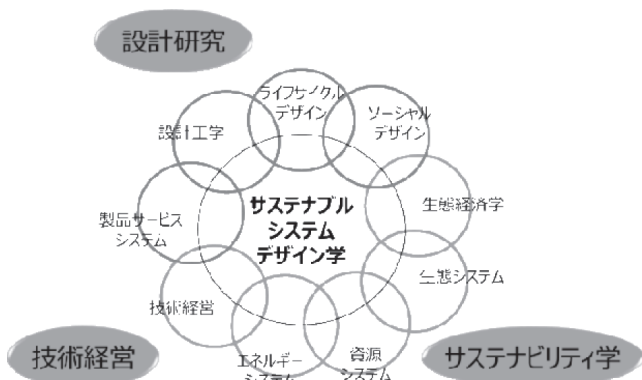


図3：本領域の関連分野

本稿では、便宜上研究テーマを、資源生産性を大幅に向上させるデザインと、地域の制約・状況に即したデザインに大別します（図4）。ここで、資源生産性とは、資源フローあたりで得られるサービスの量を意味します。現在の先進国における個人の生活の質（QoL：Quality of Life）は平均して高いですが、これは大量の資源フローに依存している結果です。地球環境のサステナビリティの観点からは、QoLを維持しながら資源フローを大幅に削減・安定化させることが必須です。このためのアプローチが資源生産性デザインです。

一方、新興国、途上国では社会インフラ整備などによる経済成長は必要ですが、資源フローに依存した先進国の方法は良いお手本ではありません。そこで、対

象地域に適した方法で資源フローの増大はなるべく抑えつつ、QoLを大幅に向上させるための新しいアプローチが必要で、それが地域指向サステナブルデザインです。

なお、資源生産性デザインも地域指向サステナブルデザインも、最終的にはすべての地域で有効な研究です。あくまで現状の優先度を考え、前者はまず先進国で、後者はまず新興国、途上国を対象に進めましょう、と言っているだけのことです。

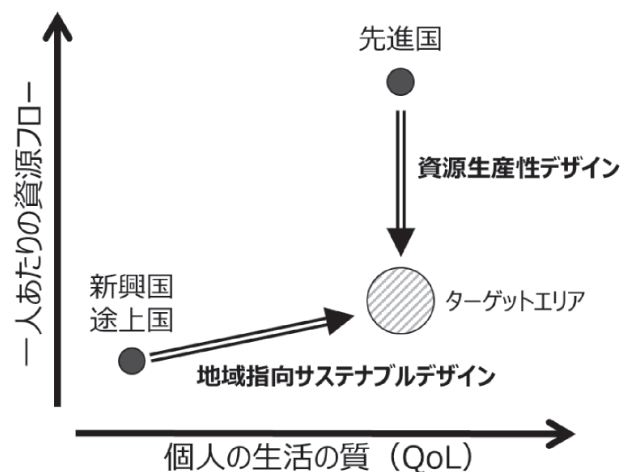


図4：二つの研究アプローチ

4. 研究テーマの紹介

ハードウェアとして持続可能な人工物システムを考える上で、欠かせないのがライフサイクル思考です。これは、資源採掘から廃棄に至る製品の一生（ライフサイクル）を把握した上で全体最適な設計解を決定しようという考え方です。

ライフサイクル思考を支援する良く知られた評価手法がライフサイクルアセスメント（LCA）です。LCAは、代表的な製品ライフサイクルを仮定して、ライフサイクルプロセスの入出力フローを静的評価する手法で、現在では様々な市販ソフトウェアが用意されています。例えば、プロセスへの入力フローとして鉱物消費と化石燃料消費、出力フローとして廃棄物排出と環境負荷排出（大気圏、水圏、土壌圏）を積上げていきます。

LCAで評価した製品ライフサイクルの環境負荷を分母に、製品やサービスの価値を数値化して分子に置いた式は環境効率と呼ばれます。環境効率の意味は、先に述べた資源生産性とほぼ同じで、その定量指標は実

用上意義があります。筆者らは、比較的広い範囲の工業製品を対象とした環境効率指標を提案し [1]、産業界で広く活用されました。ただし、製品の環境効率は、対象製品がどれくらい改善されたかを確認することの役には立ちますが、LCA と同じくあくまで事後的な評価となります。

そこで、資源生産性を向上させる目的で、リユースや保守を重視した循環型生産のためのライフサイクルプランニング (LCP) [2] やライフサイクルシミュレーション (LCS) [3] の研究を進めてきました。これらはいわゆるライフサイクルデザインと呼ばれる分野のコアとなる方法論、ツールです。LCP は、製品開発の最上流段階でライフサイクルオプションのベストミックスを決定するための方法論です。ここでライフサイクルオプションとは、リユース、リサイクル、保守、アップグレードなどの資源循環パスのことです。LCP では、物理寿命と価値寿命という二つの寿命概念と、類似製品の LCA 評価データをうまく組み合わせて利用することで、対象製品あるいは部品にとって最も相応しいライフサイクルオプションを割り当てます。

LCS は、LCP を用いて決定したライフサイクルオプションの妥当性を、環境負荷と企業利益の視点から見積もるための離散事象シミュレーションです。LCS では、製品のライフサイクルオプション情報、構成素材情報に加えて、製品ファミリの生産台数情報やリユースルールを設定します。そして、製品寿命を勘案して廃棄台数分布を予測し、部品リユースなどの計画したライフサイクルオプションがタイミング良く実現できるか動的にシミュレーションしていきます。

ところで、LCS により多数の製品個体のライフサイクルを予測できるようになったのですが、これまではその製品個体情報を設計解の決定に役立てることが困難でした。例えば、コンシューマ製品の場合、ユーザの使い方や使用期間の違いによって製品回収後の部品残存寿命は個々に異なります。これまでは、そうした個体ごとの将来のばらつきは、適当な確率分布を仮定して扱っていました。そうした背景から、本研究室では異なるライフサイクル履歴、状態を持つ製品個体の集合を対象とした設計方法論を提案しています [4]。製品階層構造モデルとライフサイクルフローモデルを用いて、製品ライフサイクル中の劣化や変形などの変動要因を表現しておくことで、LCS によって予測した製品個体の変動情報を製品設計にフィードバ

クすることが可能になります (図 5)。この結果、製品個体の集合として資源フローが小さくなる設計解 (製品構造) を見出すことを支援します。循環型生産が事業運営の鍵となるような製品分野では、本方法論が有効と考えます。

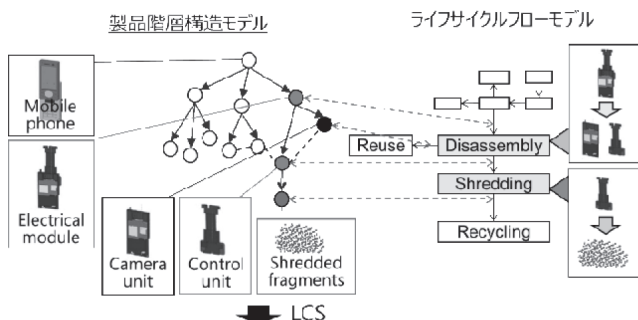


図 5：製品個体の集合を対象としたライフサイクル設計方法論におけるモデル化手法

循環型生産のプロセスを効率化する技術も研究しています。製品の解体はリサイクルやリユースの経済性、環境性の鍵を握るプロセスの一つです。解体プロセスは大きく、分解ベース、切断・破壊ベース、破砕ベースのアプローチに分けることができます。日本では、手作業による細かな分解プロセスを入れることで、より高品質な材料を回収しています。一方、欧州ではコスト効率重視で破砕が主流です。切断・破壊ベースのアプローチはそれらの中間に位置するもので、注目部位だけを素早く無傷で取り出し、残りは破砕するというものです。本研究室では、効率良く注目部位を取り出すための最適な分割線を決定するアルゴリズムを開発しています [5]。図 6 は、エアコン室内機を分割線 (赤線) に沿って切断あるいは破壊することで、注目しているアルミ製フィンを取り出すことができるという例です。現在、従来アプローチとの比較に基づいて、こうした解体プロセスを前提とした製品設計の可能性を検証中です。

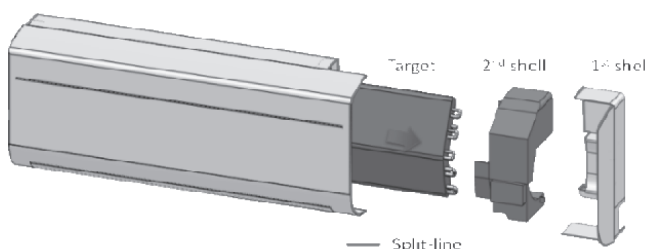


図 6：分割線を用いたエアコン室内機の解体例

次に、地域指向サステナブルデザインの関連を紹介します。日本を例にとると、既に人口減少時代に入っているため国内市場は今後縮小が予想されます。このことから国内のものづくり企業は新興国、途上国市場への進出、展開を図っています。しかし、一部を除けば、現状は必ずしも成功しているわけではありません。筆者は、この原因の一つは、ものづくりの背後にある暗黙の前提や制約を理解できていないことにあると考えています。そこで、地域指向サステナブルデザインの研究では、対象地域の暗黙知とものづくりに必要な製品機能、構造の対応をモデル化することに主眼を置いています。よく言われるように、製品価格はもっとも大事な成功要因の一つです。現地の経済水準の程度に見合った、ユーザが入手可能な価格設定が前提条件となります。ただし、それだけではないところがポイントです。

途上国のもものづくりでも、先進国と同様にライフサイクル思考は必須です。しかし、製品ライフサイクルの各プロセスで関与する人々（ステークホルダ）の置かれている環境は、対象地域によって大きく異なります。文化や制度、ライフスタイルなどの違いにより、製品あるいは製品ライフサイクルのコンセプトが受容されなかったり、当初予定していない使い方をされたりします。

例として、ベトナムの洗濯機の事例を紹介します。ベトナムでは様々な理由により、洗濯は手洗いの方がきれいにできる、という考え方があります。洗濯機だけで洗濯というプロセスを完結することは少ないようで、洗濯機を所有している人々であっても、洗い桶で手洗いしています。こうしたことから、ベトナム現地で販売されている韓国製洗濯機には、洗濯槽上部に洗い桶構造があり、そこで衣服を手洗いした後にそのまま下部の洗濯槽に衣服を落とす、という方式となっています。このようなアイデアは、日本にいたるだけでは出てきませんし、一度このような事情を理解しても、常に一歩先取りした製品開発は容易ではないと想像できると思います。さらに、ボリュームゾーンでは別の考え方もあると思われます。

現在企業では、こうした地域指向の製品開発をするために、特定の現地専門家を雇ったり養成したりして、現地観察に基づいたアプローチを採っています。しかし、このアプローチには、専門家育成の労力や、専門家の能力とパーソナリティに過度に依存するという問

題があります。そこで、筆者らはリバースエンジニアリングと現地観察の組み合わせに基づくアプローチを提唱しています（図7）[6]。リバースエンジニアリングとは、競合製品の分析に基づいて自社製品を開発するときに用いる手法です。既に暗黙的な条件が反映されているはずの現地製品を分析、モデル化する拡張機能構造分析という手法を研究しています。今回は紙面で紹介しませんが、現在精力的に取り組んでいる研究テーマの一つです。

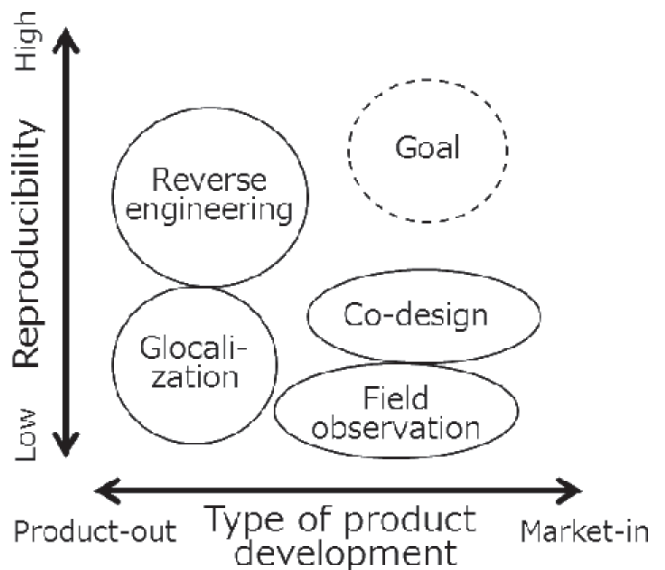


図7：地域指向サステナブルデザインのアプローチ分類 [6]

その他の地域指向サステナブルデザインに関連する研究として、製品ライフサイクルの源流である資源採取と生物多様性の関係を定量化したテーマがあります。生物多様性損失の問題は、環境問題の中でも気候変動問題と並ぶ重要問題です。気候変動の緩和については温室効果ガスの排出量というものづくり企業にとっても比較的分かりやすい指標があるのに対して、生物多様性については広い範囲で適用できる同様の指標がありません。そこで筆者らは、LCAが広く産業界で普及した理由が、信頼できる環境負荷原単位データベースが入手可能だったことと、生物多様性は地域性の強い問題であることの2点に着目して、鉱物採掘による生物多様性へのプレッシャを原単位データベース化しました [7]。

プレッシャ原単位とは、鉱物資源の単位重量あたりのプレッシャ値を意味しており、独自に定義した無次元数 (MiBiD) でプレッシャ値を表しました。このプレッシャ値は、鉱山の採掘影響範囲内の植生種別、保護区種別の地理情報を利用して定式化しました。原単

位データベースは、工業製品で大量に用いられているベースメタル5種（鉄、銅、アルミニウム、亜鉛、鉛）を対象に、世界合計で約700鉱山、全世界の生産量の70～94%をカバーするものとなっています。

図8は、全世界254の銅鉱山のプレッシャ原単位を円の大きさに表したものです。横軸は年間生産量、縦軸は鉱山品位を表します。鉱山品位とは、重量ベースで鉱石に何%の銅資源が含まれているかを表したものです。図8の例では、生物多様性に対するプレッシャは鉱山ごとに大きく異なるが、それは必ずしも生産規模だけに依存するわけではないことがわかります。このような差は、鉱山近くに自然保護区が存在していたり、植生が豊かなエリアが存在していたりすることで生じます。

このことは、産地の異なる鉱物を調達することで製品の環境側面は大きく変わる可能性があることを示しています。地域指向というアプローチは、人間が関わる社会側面だけでなく、このように環境側面でも適用できるものです。地域に存在する自然資源を破壊することなく、適度な地域経済成長とQoL向上を実現するデザインのための要素研究も展開したいと考えています。

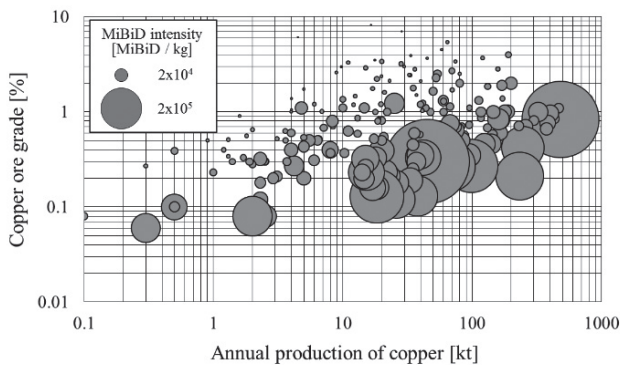


図8：世界の銅鉱山のプレッシャ原単位 (n=254) [7]

5. おわりに

本稿では、サステナブルシステムデザイン学領域の全体像と幾つかの研究テーマを紹介しました。繰り返しになりますが、本領域の最終目標は、持続可能な人工物システムの設計方法論を生み出す学術基盤を体系化することです。そのためには、自分の足場をしっかりと固めつつ、関連分野の垣根を軽々と飛び越えて総合する行動力が必要です。次世代の主役を担う学生達と一緒に、長期的視野に基づく研究を進めていきたいと思えます。

最後に、本稿で紹介した研究テーマの多くは、筆者が（株）東芝研究開発センター在籍時に実施したテーマ、および旧福重研究室におけるテーマです。関係する共同研究メンバーに御礼申し上げます。

<参考文献>

- [1] Kobayashi, Y., Kobayashi, H., Hongu, A., Sanehira, K., A Practical Method for Quantifying Eco-efficiency Using Eco-design Support Tools, *Journal of Industrial Ecology*, 9-4, (2005), 131-144.
- [2] Kobayashi, H., Strategic Evolution of Eco-products: A Life Cycle Planning Methodology, *Research in Engineering Design*, 16, 1-2, (2005), 1-16.
- [3] Kumazawa, T., Kobayashi, H., A Simulation System to Support the Establishment of Circulated Business, *Advanced Engineering Informatics*, 20-2, (2006), 127-136.
- [4] 松山祐樹, 福重真一, 梅田靖, 製品個体の集合を対象とした製品ライフサイクルのモデル化手法, *精密工学会誌*, (2015)、印刷中.
- [5] 宮地直也, 白石優美, 福重真一, 梅田靖, 分割線の付加による製品の易解体性設計手法の提案, *日本機械学会論文集*, 80-819, (2014), p.TRANS0290.
- [6] Kobayashi, H., Perspectives on sustainable product design methodology focused on local communities, In *Proceedings of EcoDesign2015*, (2015), Tokyo.
- [7] Kobayashi, H., Watando H., Kakimoto M., A Global Extent Site-level Analysis of Land Cover and Protected Area Overlap with Mining Activities as an Indicator of Biodiversity Pressure, *Journal of Cleaner Production*, 84, (2014), 459-468.

(学界)