

統合学術試論

— 持続可能システムデザイン学を例として —

Discussion on Integrated Discipline

In the Case of Sustainable System Design

○小林英樹 (大阪大学) *1

*1 Hideki Kobayashi, Osaka University,

2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, kobayashi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

キーワード: 統合, 持続可能性, システムデザイン, 人工物工学

1. はじめに

現代社会は様々な問題を抱えており, その持続可能性が問題視されている. 気候変動, 貧困や格差などの地球的課題に対して, 国連の持続可能な開発目標 (SDGs: Sustainable Development Goals) が設定され, 世界各国が目標達成に向けて取り組んでいる. 持続可能性問題のように複雑で見通しの悪い問題に対しては, 関連学術を目的に応じ適切に統合して解決に用いることが要請されている. 持続可能性問題を包括的に理解しようとするサステナビリティ学 (Sustainability science) の出現はその要請に対する解答の一つであろう⁽¹⁾. 本稿では持続可能システムデザイン学⁽²⁾を題材として, 複雑問題の解決を目的とした学術統合の在り方を論じる. かつて吉川は領域の存在を否定した人工物工学を提唱したが⁽³⁾, 持続可能システムデザイン学の試みは人工物工学における実験的研究とみなすことができる.

以下, 2章で学術統合に関するこれまでの議論を概観した後, 持続可能システムデザイン学の関連学術の状況を整理する. 3章で, 持続可能システムデザイン学の基本思想, 枠組, アプローチを示す. 4章で, 持続可能システムデザイン学が定めた視野における学術統合の課題を考察し, 学術統合を導く人材の育成に関して議論する. 5章で本稿における議論をまとめる.

2. 関連研究

2.1. 学術の統合に関する議論

人工物工学は領域を否定した点において学術の統合を正面に捉えた試みである⁽³⁾. 人工物工学の初期にはアブダクションを中心教義として人工物に関する知識適用過程の研究を試みたが, その一般的な性格ゆえに人工物工学それ自身が具体的な統合学術となることはなかった. 一方, 吉川は「領域化が完成した複数の領域を, 各領域で得られた知識を十分に生かしながら統合する実証的な研究」を人工物工学における実験的研究と呼び, 環境学とも呼ぶべき学術分野が成立する予感を示している⁽³⁾.

現在, 複雑化する地球的課題の理解と解決を行うために,

統合的な研究の必要性が急速に増している. 図1に研究の統合度合いと参加者の種類による研究アプローチ分類を示す⁽⁴⁾. ここでは, 複数領域の研究者が集まって問題に取り組むが互いの専門には踏み込まないマルチディシプリナリ・アプローチは非統合型アプローチに分類される. 市民など非研究者を加えた体制による (おそらく研究ではない) 参加型アプローチも同類とみなされている. 一方, 統合型アプローチとして学際的アプローチとトランスディシプリナリ・アプローチが示されている. 後者の起源は1970年頃に遡るが⁽⁵⁾, 持続可能性の分野で注目されている. ここで本稿の主題に立ち戻るならば, トランスディシプリナリ・アプローチによる研究成果を鑑みつつも, 基本的にはアカデミアが学際的アプローチによって学術統合を担う構図が示唆される.

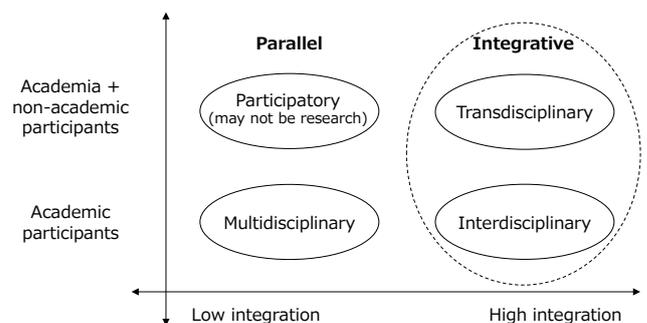


Fig.1 Degrees of integration and stakeholder involvement in integrative and non-integrative approaches⁽⁴⁾

2.2. 関連学術の状況

持続可能システムデザイン学の基盤学術である環境学, 設計工学, ライフサイクル工学の背景と状況を整理する⁽⁶⁾. これらの学術は必ずしも独立ではないことから, 著者の主観を交えた概観を示すことにする.

環境学の母体は化学を基礎とする環境科学である. 環境科学は1960年代に顕在化した環境汚染に対する科学的アプローチをその起源とする. 工業製品の大量生産の進展に伴い, 有害廃棄物などによる環境汚染の問題の数は増して

いった。1990年代に入るとサービスデザイン、ソーシャルデザイン、参加型デザインなどと共にエコデザイン（環境配慮設計）という領域が形成され、当初は製品のリサイクルや廃棄処理に焦点があてられた。その後、環境科学の領域分野としてライフサイクルアセスメントの研究とISO国際規格化が進み、エコデザインの基礎の一部となった。

ちょうど同じ頃、ライフサイクル工学が提唱された。「製品ライフサイクルを通じた利益を増大しつつ環境負荷を低減すること」を目指して、ライフサイクルプランニングやライフサイクルシミュレーションのような領域特有テーマの開拓と共に、メンテナンス工学など関連領域との統合が試みられた。エコデザインへの関心がやや低下したと感じられるのに対して、ライフサイクル工学への関心はむしろ増しているように感じる。その理由は環境と経済という両側面を統合した目標を掲げていることにあると思われる。

2000年代に入ると、自然と人間社会の相互作用を理解しようとするサステナビリティ学が文理混成チームによって提唱され⁽¹⁾、サステナブルデザインも本格的に立ち上がっていった。実はその頃、環境科学も人文科学の視点を取り入れて、まさに環境学への展開が模索されたが、人間社会と地球環境の両者を統合的に捉えようとする点において、サステナビリティ学と環境学の方向性は本質的に同じと言える。

工業製品の大量生産時代からSDGs設定に至る持続可能性に関する世界観には図2に示すような変遷がある。図2a)は経済第一主義の世界観を表し、企業活動において環境問題や社会問題を今ほど真剣に考えていなかった。図2b)は1990年代に出てきたトリプルボトムラインという世界観である。環境問題や社会問題を経済問題と対等に扱う姿勢が当時斬新であったが、経済とのトレードオフが生じて環境問題の根本的な解決は難しいことが明らかになってきた。そこで登場したのが図2c)に示すSDGsの世界観、すなわちネスト構造である。この図は地球の有限性を明示しており、人類の生存基盤である地球環境の制約下でしか社会経済活動はできないことを表している。

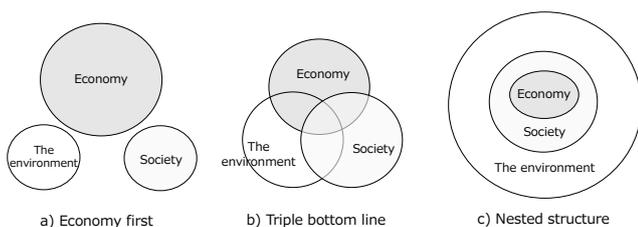


Fig. 2 Paradigm shift on sustainability⁽⁶⁾

持続可能性問題の取り扱いにくさは、世界観の変化に伴うリフレーミングの影響だけでなく、指標レベルの複雑性、すなわちネクサスにも起因している。例えば、松井らはSDGsの17目標、169ターゲット、244指標間の複雑な依存関係、トレードオフ関係を分析している⁽⁷⁾。ネクサスの問題はSDGsを単に目標の集積と見なすのではなく、ネットワークシステム問題として理解すべきことを示唆している。実際には、このような複雑な関係性はプロセスレベルでも存在しており、例えば著者らは超システム（SoS: System of Systems）の概念に基づくライフサイクルプロセスモデリングの方法を提案している⁽⁸⁾。

3. 持続可能システムデザイン学の構想

持続可能システムデザイン学の基本思想と枠組を示す。まず、前提とする持続可能性全般に関する方向性は以下の通りである。

環境的な持続可能性のために

- エネルギー：再生可能エネルギー使用の最大化と化石燃料燃焼の最小化。
- 資源：非再生可能資源採掘の適量化と資源循環の最大化。
- 生態系：自然保護区の拡大と維持

社会的な持続可能性のために

- 人間社会：すべての人々の基本的なニーズを満たす

持続可能システムデザイン学は上記の方向性を頼りとした「持続可能性の目標設定」と「目標に向かうプロセス」に関する統合学術基盤となることを目指す。持続可能性の目標は、依拠する立場によって異なるものの、様々に検討されている。過去にミレニアム開発目標（MDGs: Millennium Development Goals）からSDGsへと地球的目標が更新されたように、今後も目標の更新とそれに伴う問題のリフレーミングは繰り返されるであろう。

一方、地球の目標が更新された際にうまくそれを人工物システムに反映する必要があるが、その方法論は確立していない。持続可能システムデザイン学では、目標に追従するプロセスを重視する。このプロセスは主体（国、地方自治体、産業、企業）が置かれている状況によっても異なる。環境制約内でニーズ充足を達成するイメージを図3に示す。

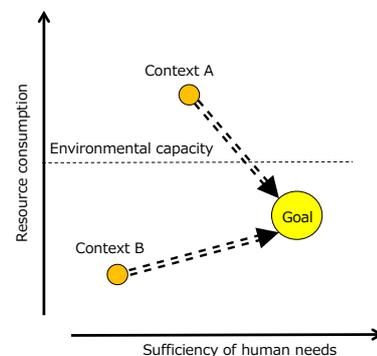


Fig. 3 Goal of the sustainability and processes toward the goal⁽²⁾

図4に持続可能システムデザイン学の枠組を示す。これは、持続可能な人工物システムという視座から視点を定め、それらを包含する視野を設定し、その中ですべきことを示している。図は、1) 人工物のライフサイクル、2) 人工物を創り出す産業、3) 人工物の消費、を問題認識・理解、デザイン、マネジメントの観点から個別、および、全体をシステム化する研究の枠組を表している。なお、ここで述べた人工物という語は製品あるいはプロダクトと置き換えてもよい。本枠組から展開される方法論の具体は必ずしも唯一ではないが、これまでの経験と実績から有望な方法論を展開している。

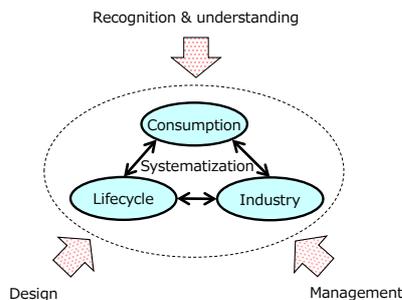


Fig. 4 Research framework of sustainable system design

次に、持続可能システムデザイン学における研究の特徴について触れる。第一は、それがシステムズ・アプローチ (Systems approach) に基づくことである。このアプローチは、さらにシステマティック・アプローチ (Systematic approach) とシステミック・アプローチ (Systemic approach) に分けることができる。前者は対象システムを構成する要素を把握した後、システム全体を再構成して理解するアプローチである。システム思考 (System thinking) はシステマティック・アプローチの基礎となる考え方である。ライフサイクル工学でコアな思考法であるライフサイクル思考 (Life cycle thinking) も、製品の使用段階だけを考えるのではなく、考察対象を時間軸に沿って拡張したという意味で、システム思考の一種である。後者のシステミック・アプローチは、対象を要素還元的に分解して再構成することが困難な場合に適用される。狭義のシステムは何らかの目的を有しているが、現実世界には必ずしも目的が明確でないまま拡大していく、例えば社会技術システムのような複雑システムが存在する。こうしたシステムは超システム (SoS: System of Systems) の様相を呈し、従来の系統的なアプローチとは別の全体的なアプローチも必要とされる。両者は対象、場面、状況に応じて使い分けことが求められる。

第二の特徴は、研究が学際的アプローチによることであるが、詳細は次節で述べる。図5に関連する学術分野を示す。柱として設計工学、ライフサイクル工学、環境学があり、それらの中で特に関連のある学術領域を示してある。上記分野はそれぞれが学際的であるという重層構造も特徴的である。生産工学、システムズエンジニアリング、社会学、経済学、人類学、その他の知見も必要に応じて用いられて、全体を構成するイメージである。

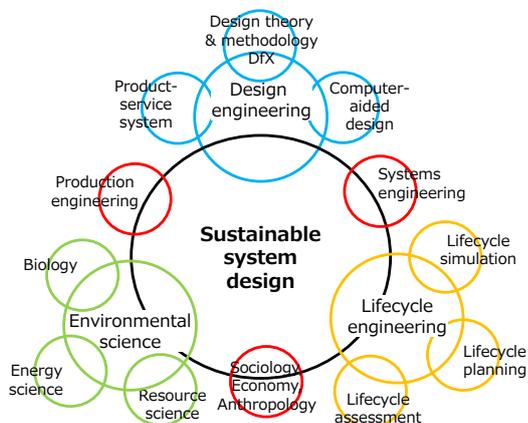


Fig. 5 Base disciplines for sustainable system design

4. 議論

4.1. 学術統合の課題

学際的研究においては、参加研究者の専門領域によって異なる研究枠組を考慮する必要がある。例えば、環境研究は生態系のように状態が変化する自然環境システムを対象としており、そのモデル化、分析、マネジメントに DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impact, Responses) 枠組が広く適用されている⁽⁹⁾。一般に環境問題の解決には人間社会のそれと比べて長い時間を要する。例えば、大気中の二酸化炭素は分解されずに数千年間も残留するため早期の対策が求められている。これに対して設計研究の枠組は、人間の思考プロセスを含む対象の記述と分析、それらに基づく設計支援から構成される⁽¹⁰⁾。現実世界の現象を忠実に記述し、それを人間がどのように認識するかという情報モデル、そして効率化、高度化を実現するための計算機モデルへと展開する。そして、それらを分析的なモデルへと展開した後、それらを用いて実現したい現実を創り上げていく。藤田は現代において design 概念は社会と知識生産を統合するように拡張されるべきとした上で、上記設計研究の枠組の重要性を改めて指摘している⁽¹¹⁾。ここで設計研究のサイクルは DPSIR のそれよりもかなり短い。学際的研究チームにおいて、こうした感覚の擦り合わせは様々な局面で重要と考える。

学術の統合を導く動機、あるいは駆動力にも注意を要する。Max-Neef はトランスディシプリナリ研究の構造を4層で表現した⁽¹²⁾。第2層のプランニング、デザイン、政治、法律は、第3層の建築、エンジニアリング、農業、林業、産業、商業を通じて第4層の数学、物理、化学、地理学、土壌学、生態学、生理学、社会学、遺伝学、経済学の (有形/無形に依らず) 対象に働きかけるのであるが、第2層の方向を導く第1層には価値観、倫理、哲学が位置付けられている。また、単に異なる人々が集まっても統合的なシンセシスを達成することはできず、それを達成するには高等教育が必要であると指摘している。同様に、Carew と Wickson もトランスディシプリナリ研究が成果を生み出すプロセスは、研究者の責任感、プラグマティズム、価値観と信念によって導かれるとした⁽¹³⁾。著者は、これまでに挙げた様々な言葉、すなわち立場、方向性、責任感、価値観、信念、倫理性、哲学などで表される学術統合を導くものを「美意識」と呼ぶことにする。美意識は科学的な分析対象ではなく、むしろ個人の経験を通じて初めて獲得される類のものである。吉川も観察事実から基本法則を推論するアブダクションが「美的感覚」とでも呼ぶ非科学的根拠によって導かれていることに触れているのだが⁽³⁾、人工物工学ではそれも研究対象に含めたように見える。

ここで、比較すべき概念として「ビジョン」がある。ビジョンの語源はラテン語の *videre* であり、本来は見ること、気付くこと、集中することを意味する。これまでも様々な持続可能社会のビジョンが提案されてきた。地球的課題の解決に力を結集するためにビジョンは有効と思われるが、その反面、ビジョンの数だけ問題がリフレームされる可能性がある。このことは学術分野や組織単体としてはあまり問題にならないが、社会全体としては大きな問題となる。例えば、エネルギーや交通などのハードインフラを異なる

社会ビジョンで共有することは難しいからである。このため、実際には社会全体でビジョンの合意に達しないか、ビジョンの妥協が求められる。一方、美意識はビジョンよりも抽象的な概念であり、妥協される必要はない。本稿では学術統合を導く美意識の重要性を指摘するにとどめ、詳しい議論は別の機会に譲りたい。

4.2. 人材育成と高等教育

持続可能性問題に対して統合型アプローチを展開していくには、手法やツールだけでなく、それを担う人材の育成も大変重要である。実際、アカデミアに対する期待は、統合学術そのものの有用性だけでなく、むしろ大学を拠点とした学術統合に関する高等教育やそうした能力を有した人材育成にあると思われる。かつての日本企業は異業種交流を含む独自の高度な社内教育プログラムを用意していたが、もはや多くの企業においてそうした余裕はないからである。

一方、アカデミアで統合型アプローチの教育を担う研究者のキャリア形成については問題も指摘されている。統合型アプローチの必要性はある程度理解されているものの、それに適した人材がアカデミアで昇進していくことが困難という指摘である。大きな理由の一つは社会状況が変化しているにも関わらず、昇進評価は論文数と助成金獲得金額等だけで為されていることにある。例えば持続可能性の研究分野では、旧来の評価指標に加えて公表できない重要な内部報告、アカデミックアライアンス実績も考慮すべきとされる⁽¹⁴⁾。

産業界ではこうしたキャリア形成の問題はまだ目立っていないように見受けられる。産業界が直面している現実の複雑問題は、もはや単独あるいは幾つかの領域学術で対応できる範囲を超えており、したがって、統合的能力を有する人材は厚遇されている、もしくは少なくとも不利ではないからである。このことは産業界が継続的な利益創出を目的とした流動的組織であることに関係がある。一方で特定の優秀人材に強く依存する構造は、今後人材流出や後継者問題がこれまで以上に深刻化するリスクを増長すると予想される。したがって、アカデミアが中心となり大学外で生産された知識も含めて学術の統合を推し進め、生産された統合知の形式化と維持伝達を担うことが要請され、ここで大学における学術統合を担う人材の育成と高等教育の問題に再び立ち返ることになる。著者は統合学術である持続可能システムデザイン学の講義科目を、受講生が工学的基礎を身に付けていることを条件として大阪大学大学院の全研究科に開放している。こうした試みの意義と課題についても別の機会に議論したい。

5. おわりに

本稿では、持続可能システムデザイン学における学術統合の試みは人工物工学における実験的研究とみなすことができること、そしてその基本思想、枠組、アプローチを示した。また、持続可能システムデザイン学が定めた視野における学術統合の課題を考察し、形態的な美とは別次元の美意識、および人材育成に関する問題を提起した。

統合的アプローチに基づく研究は持続可能性問題のみならず様々な複雑問題で実践的に試行錯誤されているが、学

術統合を陽に意識した試みは多くはない。本稿で示した論点を含め、合目的な統合学術をどのように形成するのかについて関心が高まることを期待する。

文 献

- (1) Kates, R., et al.: Sustainability Science, *Science*, 292 (2001), 641-642.
- (2) 小林英樹：持続可能社会に相応しい人工物システムのデザインとマネジメント, *精密工学会誌*, 85-6 (2019), 512-513.
- (3) 吉川弘之：人工物工学の提唱, *ILLUMU*, 4-1 (1992), 41-56.
- (4) Tress G., et al: Clarifying Integrative Research Concepts in Landscape Ecology, *Landscape Ecology*, 20 (2005) 479-493.
- (5) Jantsch, E.: Inter- and Transdisciplinary University: A Systems Approach to Education and Innovation, *Policy Science*, 1 (1970), 403-428.
- (6) 小林英樹：次世代エコデザインの論点, *設計工学*, 56-4 (2021), 180-186.
- (7) 松井孝典, 他：ネクサス・アプローチに基づいた SDGs の目標・ターゲット・指標間の構造解析, *土木学会論文集 G (環境)*, 75-6 (2019), II-39-47.
- (8) Kobayashi, H., et al.: A Simulation Methodology for a System of Product Life Cycle Systems, *Advanced Engineering Informatics*, 36 (2018), 101-111.
- (9) Smeets, E. and Weterings, R.: Environmental Indicators: Typology and Overview, *Technical Report 25* (1999), European Environment Agency.
- (10) Duffy, A. and Andreasen, M.: Enhancing the Evolution of Design Science, *Proceedings of the 10th ICED*, (1995), 29-35.
- (11) 藤田喜久雄：知識生産のモードと design による統合についての試論, *Design シンポジウム講演論文集*, (2019), 55-59.
- (12) Max-Neef, M.: Foundations of Transdisciplinarity, *Ecological Economics*, 53 (2005), 5-16.
- (13) Carew A. and Wickson, F.: The TD Wheel: A Heuristic to Shape, Support and Evaluate Transdisciplinary Research, *Futures*, 42 (2010), 1146-1155.
- (14) Hernandez-Aguilera, J., et al.: Supporting Interdisciplinary Careers for Sustainability, *Nature Sustainability*, 4 (2021), 374-375.