

## 解説

## 次世代エコデザインの論点\*

## Discussion Issues on Eco-design for Next Generation

小林 英樹\*\*

(Hideki KOBAYASHI)

**Key Words** : absolute sustainability, digitalization, system of systems, regionalization, design and art

## 1. はじめに

いま私たちは時代の変革期の只中にある。気候変動をはじめとする地球環境問題は、もはや科学研究の対象であるだけでなく、世界各国の政治、経済に修正を迫るほどの影響を与えている。一方、社会に目を向けるならば、貧困・格差問題など資本主義経済のほころびが目立ってきている。だからと言って今すぐこれに代わり得る経済システムがあるわけでもない。

こうした様々な問題に対処するために国連の持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)は採択された。SDGs以前のミレニアム開発目標(MDGs: Millennium Development Goals)が主に開発途上国の課題に注目していたのに対して、SDGsは先進工業国を含む全人類的な環境課題、社会課題を対象としている。SDGsを境に、世界は持続可能性を共通目標とする新たな段階に入ったと言っても過言ではない。したがって、ものづくりにも、経済的な付加価値を生み出すだけでなく、持続可能性を強く意識することが求められている。その際の要(かなめ)の行為が設計、デザインである。

時代の変革期には、温故知新の精神で物事を歴史的に捉えた上で将来を熟考することが有益であろう。本稿では環境配慮設計、エコデザインに焦点をあて、その歴史をひも解き、今後の論点を示す。なお、歴史的に日本語の設計とデザインとではニュアンスが異なるが<sup>1)</sup>、本稿では場面に応じて適宜使い分けることにする。

\* 原稿受付 2021年1月27日  
エコデザイン推進機構特別講演会(2020年6月29日)にて講演

\*\* 非会員、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻  
(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

## 2. エコデザインの時代背景と進展

## 2.1 時代背景

エコデザインやサステナブルデザインに関連する現在に近い歴史を俯瞰する(図1)。T型フォード生産ラインの登場以降、ものづくりは大量生産体制を築いた。1960年代に入ると、生態系を破壊し人体に被害を与える農薬の散布、残留、濃縮の問題を追及したR. カーソンの「沈黙の春(1962年)」が発刊され、農薬散布の規制値設定に至るという出来事があった。本書は環境汚染に対する科学者からの警告として世界の関心を集めた。また、人口増加と大量生産、環境汚染により人類が危機を迎えることを示したローマクラブの「成長の限界(1972年)」は、持続可能性に関する初めてのシステムシミュレーション研究として私たちに大きな衝撃を与えた。一方、ジオデシック・ドームなど科学的デザインで有名な発明家、思想家であるB. フラーが「宇宙船地球号操縦マニュアル(1963年)」を著し、今でこそ定着した「地

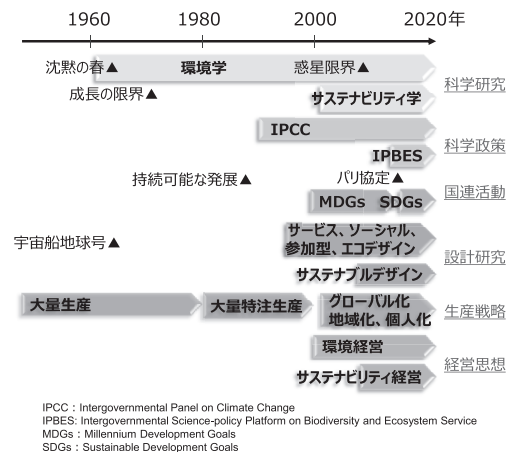


図1 関連分野の歴史的俯瞰

球の有限性」という世界観を初めて打ち出したことは注目に値する。

しかし、無限成長を目指す経済は規模を拡大していき、ものづくり企業は1980年代から多様な顧客要求に効率よく応える大量特注生産(マス・カスタマイゼーション)の戦略を採り始めた。人工物の大量生産に伴い、有害廃棄物など公害と呼ばれるローカルな環境問題も増加した。そうした中で、国連の環境と開発に関する世界委員会は「持続可能な発展(1987年)」という概念を示した。

1990年代に入りサービスデザイン、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という領域が形成されていった。その後、環境マネジメントシステムやライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)のような環境ISOの国際規格が整備されたこともあり、環境経営というキーワードが目立つようになった。なお、初期エコデザインの登場以前に、環境科学(あるいは環境学)やその周辺分野で環境汚染物質の定量評価法やLCAに関する基礎的知見がある程度蓄積されたことがエコデザインの始動を可能とした。

2000年代に入ると、持続可能社会への移行を目指し、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提唱された。その後、サステナブルデザインも本格的に立ち上がり、サステナブル経営を行う気運が高まったが、こうした流れもエコデザインの場合と同様に解釈できる。同時期に、ものづくりの分野では、マザー工場を核とした生産のグローバル化が展開されたが、近年は付加製造のようなデジタル技術を活用した個人化生産や、地域文化を考慮した地域化生産も注目されつつある。

こうして歴史をみると、科学が先行して問題を分析し、それを踏まえてデザインが解決策を提示し、その産業化を見極めながら経営を行う、という大まかなパターンが浮かび上がってくる。科学的知見が科学政策活動を通じて国際協定等に展開されるパターンもある。気候変動問題に着目してみると、気候学、気象学の知見が気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)の活動を通じて集約され、2015年の国連気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)でパリ協定が採択されたことは周知の通りである。同様に、生態学の知見は生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学-政策プラットフォーム(IPBES: Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)で集約さ

設計工学

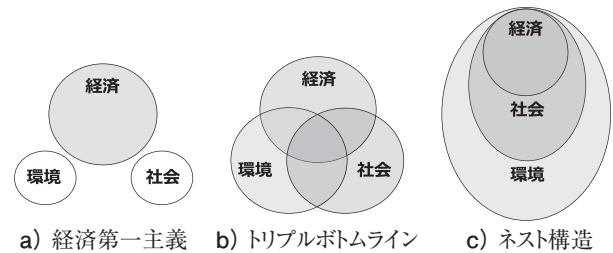


図2 経済、社会、環境の関係性に関する世界観の変遷

れて、政策提言に活かされている。

2009年に発表された地球システムの九カテゴリーに関する惑星限界(プラネタリーバウンダリ)<sup>2)</sup>は、SDGsの世界観形成に影響を与えた<sup>3)</sup>。ここでSDGsに至る世界観の変遷に触れておく(図2)。図2 a)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ことを表している。図2 b)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2 c)に示すSDGsの世界観、すなわちネスト構造である<sup>3)</sup>。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。振り返ると2000年代から環境負荷あたりの経済価値を表した環境効率という概念が世界的に普及し、のちにISOの国際規格にまでなった。しかし、効率向上では環境問題を根本的に解決できないという認識から、Absolute Sustainabilityという総量ベースの概念が提示されている<sup>4)</sup>。現在、この概念をエンジニアリングによってどのように実現するか議論されている。

## 2.2 進展

初期エコデザインの焦点は使用済み製品の処分、すなわち使用済み製品の分解、リサイクル、廃棄処理にあてられていた。現在、エコデザインで重要な考え方は「ライフサイクル思考」である。これは製品使用時だけでなく、資源採掘から廃棄処理に沿って隠れている影響まで考えることを意味する。1990年代後半には国連環境計画からライフサイクル思考に基づくエコデザインのガイドラインが発行された<sup>5)</sup>。その要点は、新概念開発、低環境負荷材料の選択、素材使用量削減、生産技術の最適化、配送シ

表1 ライフサイクルデザインの基礎学術[文献6]から転載]

トピック	キーワード
a) ものからサービスへ	
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 (ISO14000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

ステムの最適化, 使用時インパクトの削減, 寿命の最適化, 製品使用後の最適化, に集約され, 現在でも有効である。

同じ頃, 日本ではインバースマニュファクチャリング(逆工場)フォーラムが発足し, 著者も当初から循環生産システム構築の議論に参加させていただいた。1999年には第1回環境調和型設計とインバースマニュファクチャリングに関する国際シンポジウム(通称EcoDesign国際シンポジウム)が東京で開催された。当時示されたライフサイクルデザインの基礎学術のキーワードを表1に示す<sup>6)</sup>。ここで示されるライフサイクルデザインの対象範囲はエコデザインのそれよりも広いが, 必ずしもエコデザインをすべて包含しているわけでもないことには注意を要する。改めて眺めてみると, 達成度はともかくとして, 提示されたキーワードの多くは実用化されており, 当時の見通しは概して良かったと言える。実際, エコデザインの設計, 評価, シミュレーション技術の進展は, 産業やインフラのグリーン化に貢献した。一方で, いまだ解決されていないトピックもある。例えば, ライフサイクルマネジメントの方法論, 計算機支援, 経営への実装はいまだ不十分であり, 今後の重要課題である。製品ライフサイクルに関わる情報共有も技術的には可能であるが, 利害関係者間

の調整がつかず成功したとは言えない。

### 3. 今後の論点

#### 3.1 デジタル化

現在, あらゆる分野でデジタル化(Digitalization)が進められている。ものづくりの分野でも, 生産システムの状態をモニタリングしながら情報世界で状況を理解, 判断して生産システムを制御するCyber-physical Production Systems (CPPS)<sup>7)</sup>や, 製品ライフサイクルを通じて製品の物理的, 機能的記述を参照するデジタルツイン<sup>8)</sup>のビジョンが提示されている。欧州の新産業戦略においても, 環境対策とデジタル化が強調されている。ものづくり産業のデジタル化は今後ますます具現化され導入されていくであろう。

かつて日本では中央省庁と情報通信業界が主導して「ICTでエコ」というブームを起こしたが<sup>9)</sup>, それ自体は一過性だった感がある。その原因は, 世界のデジタル化という大きな文脈ではなく, ICTによるサービス化だけに注目してしまったからと思われる。それでは, 現在ならばデジタル化とエコデザインの関係が明確化されているかと問われれば, 必ずしもそうとは言えない。デジタル時代のエコデザインについては, より深い議論が必要である。

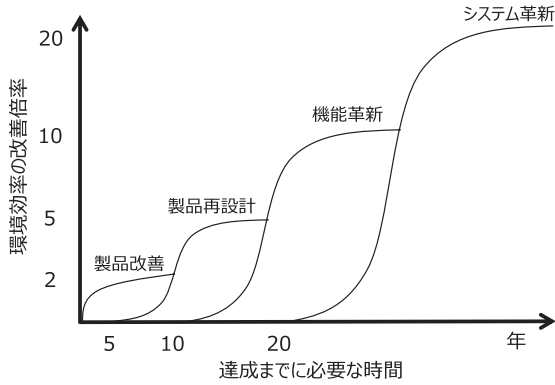


図3 エコデザインの四段階モデル  
[文献10)を元に著者作成]

### 3.2 システム革新

かつてBrezetは製品改善、製品再設計、機能革新、システム革新というエコデザインの四段階モデルを提示した<sup>10)</sup>(図3)。実際、この20~30年間で新素材や新構造を取り入れた製品再設計、サービス化やデジタル化を取り入れた機能革新の事例は蓄積された。しかし、そこから先のシステム革新の事例蓄積はまだ不足している。例えば、エネルギー産業における再生可能エネルギーシフトとスマートグリッド、交通産業におけるCASE (Connected, Autonomous, Shared & Service, Electric)とMaaS (Mobility as a Service)などのコンセプトやビジョンは示されているものの、その社会実装の形態はいまだ不透明である。先ごろ日本政府も2050年脱炭素を宣言したが、そのためにはすべてのエネルギー需要を再生可能エネルギーで賄うようなエネルギー、交通、産業インフラを統合したシステム革新が必須である。システム革新のためのエコデザインは今後の重要な論点である。

そこで超システム(SoS: System of Systems)<sup>11)</sup>という考え方を導入することが有用と考える。超システムとは、複数のシステムから構成される複雑なシステムを指し、個別システムが独立して管理・運用され、進化的に発展していく特徴を有しており、単なる大規模システムとは異なる。近年は、超システムの設計フレームワークも研究されているが<sup>12)</sup>、超システムのエコデザインという視点が今後必要とされるであろう。例えば、著者らは結合型ライフサイクルシステムズ(Connected Lifecycle Systems)と呼ぶ超システムのコンセプトを示し(図4)、その物質フローを計算するシミュレーション方法論を提案している<sup>13), 14)</sup>。本方法論は、超システムを形成する源である個別システム間の相互作用を陽にモデ

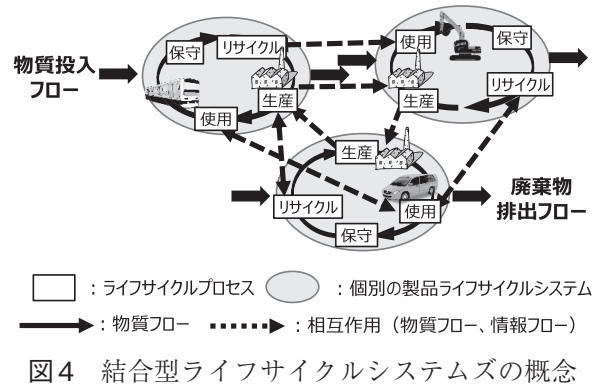


図4 結合型ライフサイクルシステムズ概念

ル化することによって、その特徴的な振る舞いを物質フローに反映することを意図している。超システムに注目したライフサイクル工学的な研究も増えており、期待される分野である。

### 3.3 地域化

SDG12「持続可能な消費と生産パターンの確保」はエコデザインとも関連深く、効率性だけでなく充足性も重視している。最適な充足パターンが対象地域によって異なることは、地域固有のニーズ充足体系の存在を想起させる。仮にそのような体系が存在するならば、生産の地域化戦略とも呼応したエコデザインの地域化が重要な論点となる<sup>15)</sup>。

著者は日頃から、設計方法論(ある種の美意識とも言える)価値観の影響を無意識的に受けて構築されるものと考えている。歴史的に、設計方法論は英国やドイツなど欧州を中心に西洋的なものの見方で体系化されてきた。日本で最初の設計論にも、そうした影響が見て取れる<sup>16)</sup>。エコデザインの本質は機能、コスト、環境側面をバランスさせることにあるが<sup>17)</sup>、こうしたエコデザイン方法論の大枠も、西洋的なものの見方の影響を受けている。

エコデザインの地域化を検討すべき対象地域としては、将来の世界人口で大きな割合を占める発展途上国を含めることが必須である。発展途上国ではLCA原単位データや生産、リサイクルインフラが整備されていないことも多く、これらを前提としたエコデザインは課題である<sup>15)</sup>。

このような地域では、それまであたり前と思いついてきた要求や機能を再吟味する必要がある。著者はこの数年間、ベトナムなど東南アジア諸国と深く関わっており、異文化地域の価値認識は日本人のそれとかなり異なることを実感している。異文化地域の「あたり前」がなぜ「あたり前」なのか理解しがたいのである。このことは英国、ドイツ、米国と関わっ

ていた時にはほとんど感じなかった。地域特有のあたり前要求に着実に応える手頃な価格の基本製品の実現は、地域化されたエコデザインがまず目指すべきことと思われる。これに関連して、著者らは地域固有のニーズ充足体系を考慮したデザインのフレームワークを提案している<sup>18), 19)</sup>。今後、地域化されたエコデザインの事例が蓄積され、その結果としてEco-design for allと呼ぶようなエコデザインの体系に至るのではないだろうか。

### 3.4 芸術との関係性

かつてDixonは工学設計の立ち位置を示す優れた図式を示したが<sup>20)</sup>、ここでは著者なりにデザイン、科学、芸術の関係性を示す(図5)。科学技術に基づくデザインの成果は産業化という手段を通して具体的な選択肢を人々に提示してきた。この図式はエコデザインやサステナブルデザインにもあてはまる。しかし、エコデザイン、サステナブルデザインの社会実装はまだまだ不十分である。このことは選択肢が不十分であることもさることながら、科学技術中心の選択肢提示だけでは人々の心に響かない、したがって世の中に受け入れられないことにも原因があるのではないか。エコデザイン黎明期には工業デザインの貢献が大きかったが、その後は工学設計がエコデザインの産業化を主導した。その際、エンジニアリングの側面が重視され、心の琴線に触れる機会が減っていったように感じる。だが、ここで強調したい点は芸術面を強調すれば良いという単純な話ではなく、むしろ実験的作業を通じてデザイン、科学、芸術の関係性を再考すべきという点である。

ここでは絵画、彫刻、文学、音楽、現代アート、メディアアートなど、芸術的要素を含む行為を一括りに「芸術」と呼ぶことにする。芸術とは言葉で表すことが難しいことを表現する行為であり、これによ

って人々の心は動かされる。これに対して、科学は世界を理解する行為であり、デザインは科学的知見を前提としつつ審美性や経済性も加味して総合的な選択肢を具現化する行為である。近代以降の芸術は特定個人の衝動に基づく創作を指しており、検証可能な理論と実験の積み重ねによる科学とは根本的に異なる。科学と芸術の関係性は古くから論じられている定番のテーマであり<sup>21)</sup>、科学的な世界観から影響を受けた芸術作品は多い。

芸術作品は私たちに希望や喜びを与えてくれる。一方で、芸術は世界の光だけでなく闇をも題材とする。例えば、環境問題に触発された作品も多く発表されており、直近では危機の時代におけるアートの特集も組まれている<sup>22)</sup>。Science Fiction(SF)は科学技術の光だけでなく闇も鋭く描き出す手段の一つである。例えば、私たちはF.ディックのディストピアSFによって、いま目の前に迫っている監視社会を予見していたし、W.ギブスのサイバーパンクSFによってサイバー世界も仮想体験していた。これらを映像表現した映画はさらにリアリティを付加して人々の心に影響を与えた。

いずれにしても、芸術は科学やデザインとは異なる角度から人々の心を動かす力を持っている。時代の変革期にエコデザインと芸術の関係性を改めて考えることが、新しい展開につながるかもしれない。こうした可能性を助長する素地として、今後のデザイン教育の在り方も論点になり得るであろう。例えば、著者が運営に関わっているボローニャ大学のイタリアン・デザイン・サマースクールでは、芸術、歴史、産業とデザインの調和を強調した教育を行っている。

### 4. おわりに

著者の解釈に基づき、エコデザインの歴史を俯瞰し、今後の論点を示した。次世代を担う研究者、実践者を意識して、あえてマイルストーンとなる文献や事象を交えて紹介した。さらに、後半ではやや大胆に著者が日頃感じている芸術との関係性についても触れた。本稿が読者に何らかの示唆を与えることができれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 松岡由幸：二つのデザイン、日本機械学会誌、108, 1034 (2005), 14.
- 2) Rockström J., et al.: A Safe Operating Space for Humanity, Nature, 461 (2009), 472.

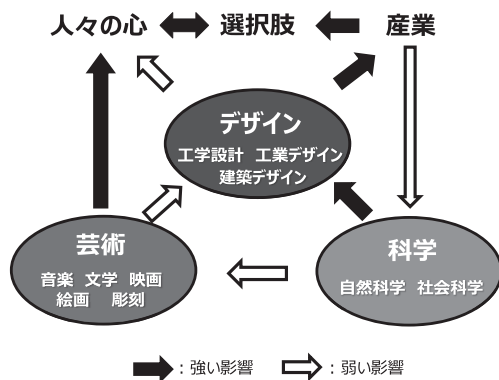


図5 デザイン、科学、芸術の関係性

- 3) Griggs, D., et al.: Sustainable Development Goals for People and Planet, *Nature*, 495 (2013), 305.
- 4) Hauschild M., Kara S. and Røpke I.: Absolute Sustainability: Challenges to Life Cycle Engineering, *CIRP Annals*, 69 (2020) 533.
- 5) Brezet, H. and Van Hemel, C. (eds.): *Ecode-sign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption*, UNEP, (1997).
- 6) 木村文彦：ライフサイクルデザインのカリキュラム, *精密工学会誌*, 66, 12 (2000), 1849.
- 7) Monostori, L., et al.: Cyber-physical Systems in Manufacturing, *CIRP Annals*, 65 (2016), 621.
- 8) Schleich, B., et al.: Shaping the Digital Twin for Design and Production Engineering, *CIRP Annals*, 66 (2017), 141.
- 9) 総務省：地球温暖化問題への対応に向けたICT政策に関する研究会報告書, (2008).
- 10) Brezet, H.: Dynamics in Ecodesign Practice, *Industry and Environment*, UNEP IE, 20 (1997), 21.
- 11) Jamshidi, M. (eds.): *Systems of Systems Engineering: Principles and Applications*, CRC Press, (2009).
- 12) 野間口大, 藤田喜久雄：システム・オブ・システムズのデザインアプローチ, *設計工学*, 52, 12 (2017), 728.
- 13) Kobayashi, H., Matsumoto, T. and Fukushige, S.: A Simulation Methodology for a System of Product Life Cycle Systems, *Advanced Engineering Informatics*, 36 (2018), 101.
- 14) Kobayashi H., Murata H. and Fukushige S.: Connected Lifecycle Systems: A New Perspective on Industrial Symbiosis, *Procedia CIRP*, 90 (2020), 388.
- 15) Kobayashi H.: Perspectives on Sustainable Product Design Methodology Focused on Local Communities, *Sustainability Through Innovation in Product Life Cycle Design*, Springer, (2017), 79.
- 16) 渡辺茂：設計論I, *岩波講座基礎工学*10, 岩波書店, (1968).
- 17) 小林英樹：製品ライフサイクルプランニング, オーム社, (2003).
- 18) Kobayashi, H. and Fukushige, S.: Living-sphere Approach for Locally Oriented Sustainable Design, *Journal of Remanufacturing*, 8, 3 (2018), 103.
- 19) 村田秀則, 小林英樹：生活圏アプローチのための概念モデリング手法, *日本機械学会論文集*, 86, 886 (2020), DOI:10.1299/transjsme.19-00390.
- 20) Dixon, J.R.: *Design Engineering*, McGraw-Hill, (1966), 8.
- 21) 例えば, 特集：科学にとって美とは何か, *Inter-Communication*, 22 (1997).
- 22) 特集：新しいエコロジー, *美術手帖*, 72-1082 (2020).

小林 英樹



1996年3月 東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻博士課程修了。博士(工学)。東芝研究開発センター室長を経て、2015年4月より大阪大学教授。研究分野はライフサイクル工学, 設計工学, 環境学。日本機械学会, 精密工学会, 日本LCA学会各会員。