

した報告書「Our Common Future」は⁹⁾、持続可能な開発（SD: Sustainable Development）という概念を提示し、「将来世代のニーズを損なうことなく現代世代のニーズを満たす開発」をその定義として示した。この提言は、環境保護と経済発展を対立的に捉える従来の枠組みを転換し、両者を統合的に設計するという新たな思想を提示した点において画期的であった。

その後、1990年代から2000年代にかけて、持続可能性の概念はさらに具体化していく。気候変動問題の科学的知見の蓄積とともに、京都議定書に代表される国際的枠組みが整備され¹⁰⁾、省エネルギー技術や再生可能エネルギーの導入が進展した。この段階では、環境問題は単なる公害対策の枠組みを超え、地球システムの限界という科学的概念へと拡張し¹⁰⁾、持続可能性は社会全体の長期的安定性を確保するための基本原理として位置づけられるようになった¹¹⁾。

2015年には、国連総会において持続可能な開発目標（SDGs）が採択され¹²⁾、サステナビリティはさらに社会全体の共通課題として制度化された。SDGsは

17の目標を掲げるが、その本質は数値目標そのものではなく、サステナビリティを政府・企業・研究者・市民すべてが関与する統合的課題として共有した点にある。この段階において、持続可能性は環境問題に限定される概念ではなく、経済、社会、技術を含む包括的設計思想として認識されるに至った¹³⁾。

近年、サステナビリティはさらに新たな段階へと進展している。持続可能性概念はSDを基本理念とし、SDGsによって国際社会の共通目標として制度化されてきた。近年では、これらを社会システム全体の統合的転換として再設計する概念としてSXが提唱されている¹⁾。

SXの視点に立てば、持続可能性は単なる環境問題への対応にとどまるものではなく、資源循環（CE: Circular Economy）を含む資源利用、エネルギー供給、産業構造、社会制度を統合した社会システム全体の転換として理解される^{14),15)}。GXが主としてエネルギー転換および産業の脱炭素化（カーボンニュートラル）を中心とする構造変革を対象とするのに対し、SXは

表1 持続可能社会を構成する主要概念の定義と階層構造

概念	略語	定義	位置付
Anthropocene	—	人間活動が地球環境および地球システムに支配的影響を与える新たな地質時代概念	地球システム認識
Planetary Boundaries	PB	地球システムが安全に維持される環境限界を示す科学的枠組み	地球システム限界
Sustainable Development	SD	将来世代を損なわずに発展する考え方	基本理念
Sustainability Transformation	SX	社会・経済・環境システムを統合的に変革し持続可能社会へ転換する概念	最上位統合概念
Green Transformation	GX	脱炭素化と資源効率化を軸とする産業構造転換	社会構造変革
Digital Transformation	DX	データ・AI・デジタル技術により社会・産業構造を変革する概念	技術基盤
Sustainable Development Goals	SDGs	持続可能社会の実現に向けた国際社会目標および指標体系	国際社会目標指標体系
Circular Economy	CE	資源循環を前提として製品・材料の設計と再資源化を統合する経済概念	資源循環設計思想
Net Zero	NZ	温室効果ガス排出量を実質ゼロにする概念	脱炭素目標
Environmental, Social and Governance	ESG	環境・社会・ガバナンスの観点から企業活動を評価する枠組み	社会評価・投資指標
Life Cycle Assessment	LCA	製品・材料のライフサイクル全体における環境負荷評価手法	環境評価基盤
Life Cycle Cost	LCC	製品・材料のライフサイクル全体にわたる総コスト評価手法	経済評価基盤
Life Cycle Sustainable Assessment	LCSA	環境・経済・社会をライフサイクル全体で評価する手法	統合評価基盤
Materials Informatics	MI	AI・データで材料開発を効率化する手法	材料開発基盤
Processing Informatics	PI	データ解析で製造プロセスを最適化する手法	プロセス設計基盤
Cyber-Physical Systems	CPS	情報空間と物理空間を連携しプロセスをデータ駆動で統合制御する概念	デジタル製造・社会基盤
Material Fabrication Design	MFD	材料構造・創製プロセス・資源循環を統合する設計思想	材料科学の学理 (提案概念)

資源循環、社会制度、技術システムを含むより包括的な持続可能社会の設計を指向する概念である。

この概念の変遷は、材料研究の対象を環境機能材料の開発から、資源調達・創製プロセス・ライフサイクルを統合的に設計する材料創製科学へと拡張させた。ここで、持続可能社会に関連する主要概念を整理し、それぞれの定義および位置づけを明確化する(表1)。

3. 材料分野における Sustainability の三位構造

材料分野のサステナビリティは、創製・利用・循環から成るライフサイクル全体を対象とする多次元的设计概念である^{16),17)}。従来のLCA的視点が主として環境負荷の評価枠組みに焦点を当ててきたのに対し、本稿では材料創製を成立条件の観点から捉え、その構造を三位の設計位相として再定義する。この観点に立つと、材料分野におけるサステナビリティは、相互に関連する三つの位として整理できる。すなわち、それは材料の利用段階における機能的持続性、材料構造設計における資源・性能持続性、そして材料創製プロセスにおける創製持続性という三位の統合で理解される。

3.1 材料利用におけるサステナビリティ (第一位)

第一の位は、材料の利用段階におけるサステナビリティである。これは社会的に最も認識されている側面であり、材料機能がエネルギー効率向上や環境負荷低減に直接寄与する場合を指す。例えば、電気自動車用電池材料や太陽電池材料、省電力デバイス材料、環境浄化触媒は、使用時に温室効果ガス削減や省エネルギーに貢献する。この層のサステナビリティは物性・機能に基づくアウトプットとして現れるため、従来の材料研究が主に貢献してきた領域である。しかし、この視点のみでは材料創製全体の持続可能性は十分に評価できない。利用時に環境負荷を低減する材料であっても、製造過程で多量のエネルギーを消費したり希少資源に依存したりする場合、ライフサイクル全体の持続可能性は高いとは言えない。さらに、使用後処理は重要である。電気自動車用LIBや太陽光パネルは、利用時には温室効果ガス削減に寄与する一方で、使用後には分離困難性や回収コストの問題を抱える。つまり、利用段階で環境価値を生む材料でも、使用後処理が困難であれば時間軸全体での持続可能性は低下する。

このことは、材料研究における価値基準が単なる機能性能の指標から、ライフサイクル全体を考慮した総合的評価へと移行しつつあることを示している。

3.2 材料構造設計におけるサステナビリティ (第二位)

第二の位は、材料構造設計におけるサステナビリティ

である。材料の結晶構造、組成、組織、形態は物性発現の根源であり、この設計段階において持続可能性を考慮することが重要となる。

近年とくに重要視されているのは、資源地政学的観点に基づく材料設計である。希少元素や特定地域に偏在する元素への依存は、サプライチェーンの脆弱性を高める要因となる。そのため、ユビキタス元素を活用した材料設計や、元素使用量の削減、高効率構造による性能発現といった設計指針が重視されるようになってきている。構造設計では、長寿命化・耐久性向上が資源消費削減と廃棄物抑制に直結する。さらに、近年ではマテリアルズインフォマティクスの発展により、データ駆動型の材料探索が可能となり¹⁸⁾、試行錯誤の開発に伴う資源・時間の浪費を低減するという新たな意味でのサステナビリティも生まれている。

このように、材料構造設計におけるサステナビリティは、単なる元素選択の問題にとどまらず、性能発現の効率性、耐久性、探索プロセスの効率化を含む広範な設計思想として捉える必要がある。

3.3 材料創製プロセスにおけるサステナビリティ (第三位)

第三の位が、材料創製プロセスにおけるサステナビリティである。この層は従来の材料研究において相対的に議論が少なかつただけでなく、従来の材料研究者の関心は主として材料機能や構造設計に向けられることが多く、創製プロセスそのものをサステナビリティの視点から研究対象として前面に据える例は必ずしも多くなかった。しかし、SX時代においては、この領域の重要性が最も高まっている。

材料合成には多大なエネルギーと資源が投入される。高温焼成、長時間熱処理、多段階の化学反応、洗浄・廃液処理などは、環境負荷の主要因となる。そのため、低温・短時間プロセスの開発、高収率反応の実現、廃棄物の最小化、安全な原料の使用といった要素が重要な設計指針となる¹⁹⁾。さらに本質的に重要なのは、反応場そのものの設計である。すなわち、反応エネルギーの選択、物質移動の制御、非平衡状態の利用などを統合的に設計することで、従来の熱平衡的制約を超えた材料創製が可能となる。この視点は、単なるプロセス改良ではなく、材料科学の設計対象を構造から反応場へと拡張する概念転換を意味する。

3.4 三位構造の統合的理解

以上に述べた三位は、単に材料研究の対象領域を区分したものではなく、材料の持続可能性を成立させる相互依存的な設計条件として位置づけられる。材料利用段階における機能的持続性は、構造設計および創製

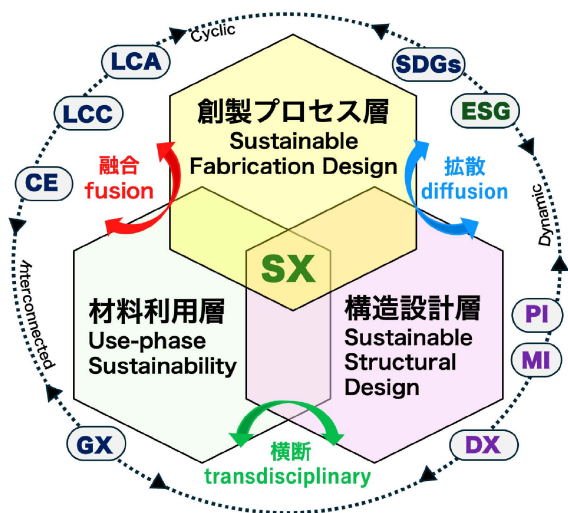


図2 サステナブル材料設計の三位統合フレーム（階層関係ではなく、相互依存的設計位相を示す）

プロセスの制約のもとで初めて実現され、また創製プロセスのエネルギー効率や資源利用条件は、構造設計および利用特性の要請によって規定される。このように三位は独立して存在するものではなく、相互に制約し合いながら材料創製の成立空間を形成している。その統合的關係を模式的に整理したものを図2に示す。材料の持続可能性は、三位を統合した設計視点によって初めて成立する。材料の持続可能性を成立させるためには、創製・利用に加え、使用後の回収・再資源化を含む循環段階を設計対象として組み込むことが不可欠である。すなわち、循環は単なる廃棄処理の問題ではなく、分離可能性、再資源化適合性、元素回収効率といった設計条件として、構造設計および創製プロセス設計と同時に最初から考慮されるべき要素である。

このような循環を内包した時間軸的閉ループ設計は、社会・資源・技術システムの統合的転換を指向するSXの設計思想を材料創製に具体化するものであり、三位を統合する視点が、材料創製を成立条件の設計科学として再定義する基盤となる。この統合的設計思想が、本稿で提唱するMaterial Fabrication Designである。

4. セラミックス分野における特有の課題

セラミックス材料は、高耐熱性、高耐久性、化学的安定性に優れることから、使用段階において極めてサステナブルな材料として位置づけられる。金属や高分子材料と比較して劣化が少なく、長期にわたり性能を維持できることは、資源消費の削減や製品寿命の延長に直結する。この意味において、セラミックスは本質的に持続可能性の高い材料群であると言える。

しかしながら、セラミックス分野におけるサステナビリティには特有の課題も存在する。第一に挙げられるのは、製造プロセスのエネルギー集約性である。セラミックス材料の多くは高温焼成を必要とし、製造段階において多大なエネルギーを消費する。とくに焼結プロセスは数百度から千度を超える温度領域で長時間処理が行われる場合が多く、製造工程における環境負荷の主要因となっている。低温焼結技術や短時間プロセスの開発、非平衡反応場の利用による省エネルギー創製技術の確立は、セラミックス分野における重要なサステナブル課題である。

第二の課題は、複合化によるリサイクル困難性である。現代の電子デバイスやエネルギーデバイスにおいて、セラミックスは単独で使用されることは少なく、金属や高分子と複合化された多材料システムの一部として組み込まれることが多い。このような複合構造は高機能化を実現する一方で、使用後の材料分離を著しく困難にし、結果として有用元素の散逸や廃棄物増大を招く要因となる。

第三に、原料資源の問題が挙げられる。セラミックス材料は一般に安定な酸化物を基盤とするため、ユビキタス元素を主成分とする場合が多いが、高機能化に伴い希少元素や高純度原料への依存が増加する傾向がある。とくに電子セラミックスや機能性材料においては、資源供給の安定性や精製プロセスの環境負荷が重要な設計課題となっている。

さらに、セラミックスの高い化学安定性は、長寿命化という利点を持つ一方で、使用後の分解・再資源化を困難にする側面も持つ。すなわち、「長持ちする材料」であることと「循環しやすい材料」であることは必ずしも一致せず、ここにセラミックス特有のサステナビリティのジレンマが存在する。

これらは性能中心の研究枠組みでは解決できず、構造設計と創製プロセスを統合した低エネルギー・循環適合設計が不可欠である。すなわち、セラミックス分野におけるサステナビリティは、単なる材料特性の問題ではなく、創製から循環までを包含したMaterial Fabrication Designの視点により実現される。

5. Material Fabrication Designという統合概念

前節までに述べたように、材料分野におけるサステナビリティは、材料利用、材料構造設計、材料創製プロセス設計という三位構造の相互関係の中で成立する。この三位構造を統合的に捉える設計思想こそが、本稿で提唱するMaterial Fabrication Designである。

MFDは、材料創製を多様な学術領域と社会的要

請を統合する横断型設計科学である。本概念は、Integrated Computational Materials Engineering (ICME)²⁰⁾ や Materials Systems Design²¹⁾ などの統合的材料設計アプローチとも関連するが、材料構造設計のみならず、反応場設計に基づく材料創製プロセスを中核とし、ライフサイクル条件を含めた設計要素を統合的に扱う点に特徴がある。MFD の概念構造を模式的に整理したものを図3に示す。

従来の材料科学は、主として「構造が物性を決定する」という視点に基づき発展してきた^{13),14)}。すなわち、結晶構造、組成、組織といった材料内部の構造因子を設計し、それに対応する物性を制御することが研究の中心課題であった。この枠組みは材料科学の基盤を形成してきた一方で、構造を現実の材料として具現化する創製過程の設計は、しばしば二次的要素として扱われてきた。しかしながら、材料が実社会において機能するためには、構造設計だけでは不十分である。材料は必ず創製プロセスを経て初めて実体化される存在であり、その過程におけるエネルギー投入、資源消費、反応場制御、スケールアップ性などが社会的成立性を大きく左右する。すなわち、材料科学は「構造設計の科学」であると同時に、「創製設計の科学」であると言える。MFDはこの二つの設計領域を統合し、さらに材料利用段階およびライフサイクル全体を含めた包括的設計思想として位置づけられる。

ここでは、材料創製は単なる製造工程ではなく、物質・エネルギー・反応場を統合制御するシステム設計として捉えられる。特に重要なのは、反応場そのものを設計対象とする視点である。MFDは特定の設計領域を指す概念ではなく、反応場設計を中核として Material Layer と Societal Layer を横断的に接続する Design Integration Layer の中心軸を成す基盤設計思想である。従来の材料合成は、熱平衡に基づく高温処理や長時間反応を前提として発展してきた。一方、近年では超音波、マイクロ波、レーザー、プラズマなど

の非平衡反応場の活用により、低温・短時間・高効率の材料創製が可能となりつつある。これは、局所の高エネルギー密度の生成、非平衡界面反応の誘起、瞬間的極限場の形成といった反応場特有の物理化学的特性に起因する。これらは単なるプロセス改良ではなく、反応エネルギーの選択と制御によって材料創製の自由度を飛躍的に拡張する概念転換をもたらしている。

すなわち、非平衡プロセスは最終平衡状態を前提とする従来の熱力学的設計とは異なり、平衡に至る過程そのもの、すなわち動的反応場の制御を設計対象とする MFD を実現する有効手段の一つとして位置づけられる。

MFD 概念の本質は、創製プロセスのエネルギー・資源効率、廃棄物抑制、スケールアップ性やコストを含む社会実装条件を統合的に設計する概念であり、材料科学を物性中心から実装前提の設計科学へと転換する枠組みである。このような統合的視点は、SX 時代における材料研究の基盤思想として不可欠である。

イノベーションは、全く新しい要素から生まれるというよりも、既存要素の新たな結合によって生じる。MFD はまさにそのような統合概念であり、構造設計、プロセス設計、資源循環設計を結びつけることで、次世代材料科学の新たな展開を切り拓く枠組みとなると考えられる。

従来の Materials Design が主として構造-物性関係に基づく設計概念であるのに対し、Material Fabrication Design は構造設計に加え、反応場設計、資源循環条件、社会実装条件を統合した材料創製の成立条件を扱う設計科学である。

6. おわりに

本稿では、サステナビリティ概念の歴史的展開を踏まえ、材料分野におけるサステナブルを、材料利用、材料構造設計、材料創製プロセス設計の三位構造から成る統合設計枠組みとして整理し、それらを統合する設計思想として Material Fabrication Design の重要性を論じた。サステナビリティの本質は、社会システムの持続性を成立させる統合設計思想にある。SX 時代には、材料は資源安定性、創製効率、ライフサイクル環境負荷、社会実装性を同時に満たすことが求められ、材料科学は物性中心から実装前提の設計科学へと拡張される。MFD は、材料構造設計、創製プロセス設計、資源循環設計を統合する横断型設計科学である。それは単なる製造プロセスの改良ではなく、反応場の理解と制御、投入エネルギーの選択、資源利用効率の向上を統合した総合的設計枠組みである。材料創製は

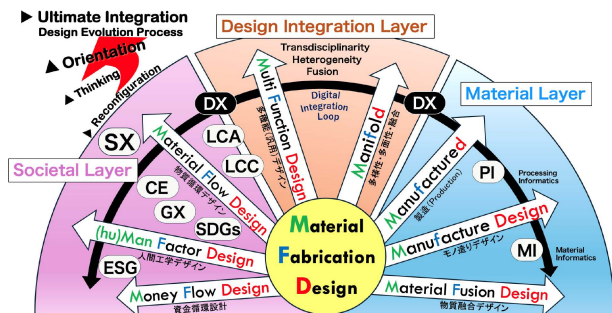


図3 Material Fabrication Design (MFD) の統合概念モデル

単一分野の深化のみでは成立せず、多様な学術領域と社会的要請の統合によって初めて成立する。今後の材料研究では、要素技術の高度化と同時に、異なる設計層および学術分野を横断的に統合する視点が不可欠となる。さらに重要なのは、材料創製を「結果としての物性」からではなく、「成立条件の設計」という視点から捉え直すことである。材料が社会の中で持続的に機能するためには、創製段階から循環段階までを見通した時間軸的設計が求められる。ここにおいてプロセッシングデザインは、周辺技術ではなく材料科学の重要な学理の一つとして再定位される。

すなわち、サステナブル材料創製の未来は、単なる技術革新ではなく、材料を創るという行為をどのように捉えるかという思想の深化によって切り拓かれる。その意味において、プロセッシングデザインは、材料科学の「思考」を再構築し、研究の方向性を「指向」し、持続可能な社会における材料創製学の「至高」を目指す学理的基盤となる。

謝 辞 本稿の執筆にあたり、Material Fabrication & Production Design (MFD) 研究会の活動を通じて貴重なご議論およびご助言を賜りました関係各位に深く感謝いたします。また、本研究会の活動を支えてくださったすべての皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 経済産業省, サステナビリティ・トランスフォーメーション (SX) に関する指針 (2021).
- 2) 経済産業省, GX 実現に向けた基本方針 (2022).
- 3) 林 大和, セラミックス, 55[1], 6-9 (2020).
- 4) 林 大和, 化学工学, 85[4], 250-253 (2021).
- 5) 林 大和, 鋳山, 75[4], 89-97 (2022).
- 6) 林 大和, マテリアルステージ, 23[6], 53-58 (2023).
- 7) 林 大和, 溶射, 60[3], 170-174 (2023).
- 8) D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers and W. W. Behrens III, *The Limits to Growth*, Universe Books, New York (1972).

- 9) World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford (1987).
- 10) United Nations, *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change* (1997).
- 11) J. Rockström et al., *Nature*, 461, 472-475 (2009).
- 12) United Nations, *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development* (2015).
- 13) T. E. Graedel and B. R. Allenby, *Industrial Ecology and Sustainable Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River (2010).
- 14) W. Stahel, *Nature*, 531, 435-438 (2016).
- 15) M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken and E. J. Hultink, *J. Cleaner Prod.*, 143, 757-768 (2017).
- 16) M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford (2011).
- 17) M. F. Ashby, *Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice*, Butterworth-Heinemann, Oxford (2009).
- 18) K. T. Butler, D. W. Davies, H. Cartwright, O. Isayev and A. Walsh, *Nature*, 559, 547-555 (2018).
- 19) P. T. Anastas and J. B. Zimmerman, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 94A-101A (2003).
- 20) National Research Council, *Integrated Computational Materials Engineering: A Transformational Discipline for Improved Competitiveness and National Security*, National Academies Press, Washington, DC (2008).
- 21) G. B. Olson, *Science*, 277, 1237-1242 (1997).

筆 者 紹 介



林 大和 (はやし やまと)

東北大学大学院工学研究科准教授。大阪大学大学院工学研究科博士後期課程終了。日本学術振興会特別研究員 (DC, PD), NEDO フェローを経て現職。同大学レアメタル・グリーンイノベーション研究開発センター及びグリーン未来創造機構、オープンイノベーション戦略機構PJ責任者を兼任。専門分野は、ナノ材料の非平衡プロセッシングと産学・産学官連携の推進・実用化。
[連絡先] 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-07 東北大学大学院工学研究科応用化学専攻
E-mail: yamato.hayashi.b6@tohoku.ac.jp