

Title	研究成果とイノベーションの橋渡し（「フェーズII」の機能）：持続可能な素材利用システムのモデル化の事例から
Author(s)	醍醐，市朗；後藤，芳一
Citation	年次学術大会講演要旨集，29：121-124
Issue Date	2014-10-18
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/12411
Rights	本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management.
Description	一般講演要旨

研究成果とイノベーションの橋渡し（「フェーズⅡ」の機能） —持続可能な素材利用システムのモデル化の事例から—

○醍醐市朗，後藤芳一（東大）

1. はじめに

シーズ起点の研究における成果と社会的要請の間には、ギャップやミスマッチがあることが課題である。社会の要請は、多くの個別現象が総合的かつ複雑に関与している上に、問題を解くべき評価尺度が多数存在しており、いわば包括的な要請である。それに対し、研究課題は、問題やその対象とするシステム境界が明確であり、個別事象を扱っており、いわば個別的・基礎的な成果である。ギャップやミスマッチの一因は、これら包括と個別の違いにあると考えられる。著者らは、それを接続・翻訳する機能（「フェーズⅡ」）の重要性に注目する。著者らは、次章で簡単に説明する「持続可能な素材利用システム」において研究を進めている。著者らは、当該分野において、新しいモデルの確立等を通じて分野を主導しているが、この延長では素材利用の持続可能性に対する解しか得られない。著者らは、社会の要請と研究課題を橋渡しする機能に注目し、両者を科学・工学・社会的視点から接続する方法論を研究しており、成果は他の分野にも応用可能にすることをめざしている。本稿では、その到達点を整理して論じる。

2. 持続可能な素材利用システムに関する研究分野

著者らが、分析・評価の対象とする持続可能な素材利用システムに関する研究は、産業エコロジー(industrial ecology)という学術分野として、1990年代から形成されてきた領域の一部である。もう少し大きい括りを考えると、本研究分野が対象とする社会的要請は、地球環境問題の1つである資源の有限性であり、資源（特には金属鉱物）の面における、持続可能な発展に向けた研究を遂行している。

持続可能な素材利用を実現するためには、様々な新しい基礎技術が必要になる。例えば、高効率なリサイクル技術、素材製造や製品製造における省資源技術、代替材料等が挙げられる。また、同様に社会における制度等のシステム技術も発展する必要があり、わが国でも既に資源循環利用促

進法、循環型社会形成推進基本法ならびに同計画、各種リサイクル法が施行されている。

3. 社会的要請と技術を結ぶシステム研究—フェーズⅡの提案

実際の社会における包括的課題を解決するのは研究や技術の発展であり、基礎的・要素的な研究や技術を合わせて社会的要請に応えることが望まれる。しかし、要請に応えるためには、どのような研究や技術が欠けているのか、基礎的な研究を社会に実装するためにどの方向に発展させればよいのか、このような包括的な疑問に対する答えはなかなか見つからないのが現状である。

個別の研究成果や技術は、個別の現象に対する機序を明確にし、それを積み上げていくことで、社会的要請に応えようとしている。個別技術により一歩でも要請に近づくことに間違いはないが、その一歩の重要性や実効性は分からず、場合によっては、あまりにも小さな一歩であることもある。一方で、社会学は、包括的な社会的要請を、包括的な状態のまま受け止めるものの、個別の現象までブレイクダウンされることは稀であるため、技術開発にとっての示唆を得るのは困難である。個別の技術を出発点、社会的要請が到着点とし、その道筋を10段の階段と仮定すると、研究・技術の発展は、0段目、1段目と積上げるものの、2段目、3段目までなかなか積みあがらず、社会学は、10段目、9段目と降りてくるものの、8段目、7段目までなかなか降りるのは難しい。これは、個別研究・技術にとっては、社会的要請の全体が明確でないとともに、その中の自分自身の位置づけが明確でないことで、向かうべき道筋が明確にならないことが一因と考えられる。同様に、社会学にとっては、要請を構成すべき要素研究や要素技術が明確でないとともに、それらの関連を明確にできないことで、問題を分解したり、モデル化したり、一般化したり、特定の尺度や対象に投影したりすることが困難な一因と考えられる。図1に、階段の例示も含めて模式化した個別技術・研究と社会的要請の関係を示した。

そこで、本稿で導入するそれらを接続・翻訳す

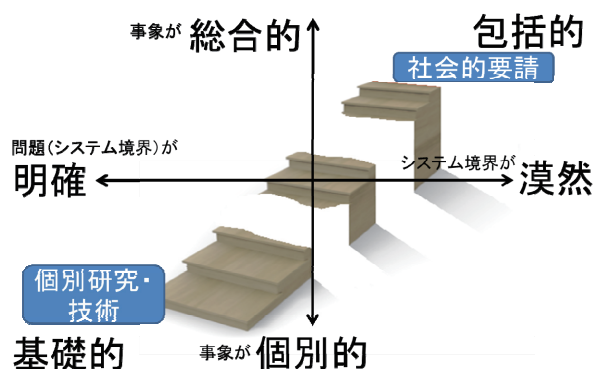


図1 模式化した個別技術・研究と社会的要請の関係。階段の例示は本文を参照のこと。

る機能は、個別の研究・技術とも、社会的要請とも直接は接続していないものの、図1で示す5段目のような飛び石のようなステップを構築するものである。これを、個別技術の積上げ型アプローチをフェーズⅠとし、社会的要請の分解型アプローチをフェーズⅢとしたときに、どちらでもない中間段階を創出するアプローチとして「フェーズⅡ」と称する。

4. 持続可能な素材利用システムにおけるフェーズⅡの実例

4.1 物質ストック分析への新しい展開

2000年頃に循環型社会に資する法制度が整備され、リサイクルに関する仕組みならびにそれに合致したプロセス技術が開発されてきた。2004年から著者らは、資源消費の削減のためには、リサイクルだけでなく、物質ストックの管理も同等に重要であることを提示してきた(図2)¹⁾。2013年5月の循環型社会推進基本計画の見直しにおいても、「今次計画では、循環型社会を形成する上で、物質のフローとともに重要な物質の「ストック」にも焦点を当てることとする。²⁾」として物質ストックに大きく言及されることになった。先の階段の例示で表現すると、5段目のステップは、感覚的にリサイクルだけだと今までは認識されてきたのに対し、対象全体をシステム的に把握することで、もう1つの重要な5段目の要素があることが明確になった、と言えよう。これにより、別途、材料における個別の研究として進められていた、高強度化等の高機能化が、物質ストックの価値を高める技術開発であると言える。今まで明確に位置づけられていなかった技術要素に、持続可能な素材利用の中での指針を与えることができた。さらには、都市鉱山という用語による、二次資源の重要性を示す取り組みについても、この潮流の1つである。

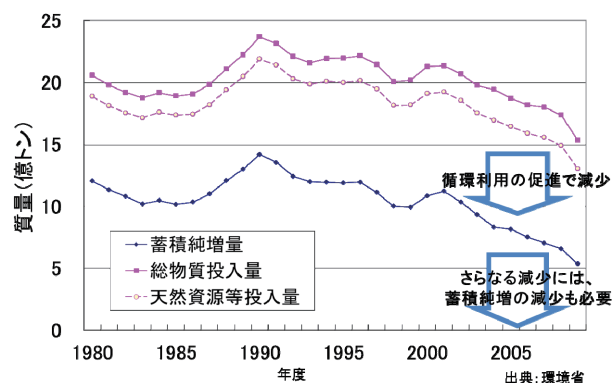


図2 蓄積増分の減少がリサイクルと同等に重要であることを示した我が国の主要な物質フローの時系列変化

4.2 リサイクルの促進に向けた要素技術・制度の包括的研究

リサイクルの促進のためには、個別製品のリサイクル法を施行したり、新しいリサイクル技術を開発したり、あるいは外部環境として資源価格が高騰することによっても資源の回収が進むことが知られている^{3), 4)}。法制度の整備や技術開発に対する施策は、今まで包括的に議論されてこなかった。これは、それらの関係性が明確でないことが大きな事由であると考えられる。著者らの研究では、使用済み製品は発生することを所与の条件とし、その中の特定の素材がリサイクルされるかどうかを判断できる包括的な評価ツールを開発した⁵⁾(図3)。本ツールの個別の要素は、物理則等により不変な要素、意図的に変化させることができる要素、変化するものの随意には変化させられない要素の3種類に分類された。図3では、それぞれの条件が満たされているかどうかで、緑色と赤色に塗り分けられている。上から下まで緑色の要素をつないで通る経路があれば、リサイクルが実行可能な社会ならびに技術が整備されていると判断される。これにより、現行リサイクルが実施されていない製品や素材に対して、どのような施策により、リサイクル可能な社会に転換することができるかを示すことが可能になった。また、個別の要素の緑色/赤色を判断するためには、技術的要素に対しては、その背景となる学理体系が、社会システムに対してはシステム分析が求められた。つまり、技術にも社会システムにも精通して初めて発想でき、構築できたツールであるといえよう。また、部分的に要素の緑色/赤色を判断するためのバックグラウンドに対する現在の知見が不十分であると認められる要素もあった。これは、今後の研究課題が全体観の中から明らかになったことを意味しており、リサイクルにかかわる研究の方針を示すという意味でも大変有効な

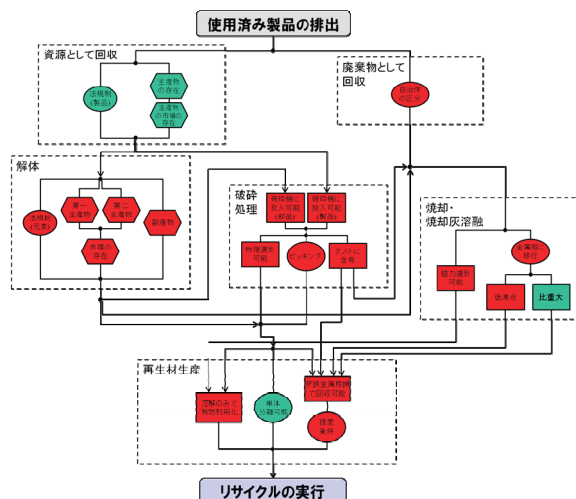


図3 使用済み製品に含まれる素材に対するリサイクル実行可能性判断ツール

アプローチであったと考えられた。先の階段の例示にならうと、本研究は、3 段目から 7 段目くらいまでをカバーし、技術や制度とイノベーションを明確に結びつける堅固な橋になっていると考えられる。

4.3 俯瞰的リサイクルへの展開

従来は、鉄鋼材は鉄鋼材へ、アルミニウム素材はアルミニウム素材へリサイクルを高効率にするための技術開発を進めてきた。著者らの研究⁶⁾では、ガラス等の酸化物系セラミックスに含まれる成分に着目し、主要な 10 種の酸化物成分を特定し、それらを主要な構成成分とする様々な素材にまで対象を広げた分析をおこなった。その結果、ガラス、陶磁器、タイル、耐火物等の窯業における生産物のほとんどの他、鉄鋼スラグや汚泥溶融スラグまでも同様の構成成分であり、各素材間でのリサイクルの可能性が明らかになった。成分制約と需給量を制約要因とした線形計画法による最適化をおこなった結果、今まで想定されていなかった新たなリサイクルルートを発見することができた。図4に得られた最適なリサイクルルートを模式的に表した。本研究では、コストの問題、回収時に混入する不純物の問題、利用時の投入方法等、捨象した事象もあるが、これらは、実際に検討する際に技術開発により解消されるべき課題であると認識している。階段の例示で表現すると、俯瞰的にシステム全体から見渡した分析により、今まで向かっていなかった方向にも 5 段目のステップを示すことができた事例と言えよう。

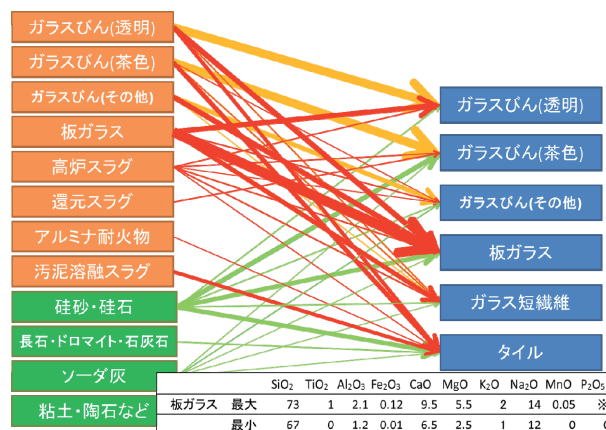


図4 酸化物系セラミックスを構成する10種の成分から考えた最適なリサイクルルート

4.4 リサイクルの質への展開

従来のリサイクル技術は、よりリサイクル量を増加させることが命題であった。しかし実際には、品位の低い素材への再利用（カスケード・リサイクル）では、次に再びリサイクルされることはない。例えば、使用済みコンクリートを路盤材として利用すると、路盤材は回収されない。著者らは、これを平均リサイクル回数という指標で評価することを提案し、定量的に示す⁷⁾ことで、持続可能な素材利用システムの中でのリサイクルの在り方を明確にした。より高い品位への再利用が可能なリサイクル技術の発展に向けたメッセージを送っている。言い換えれば、そのようなリサイクル技術の貢献度を定量的に“見える化”できるモデルを構築した。階段の例示で表現すると、以前は感覚と実際が合致し、よりリサイクル量を増加させることが社会的要請に直結していたものが、リサイクルも進み、時代とともに社会的要請は変化しており、同じステップを登っても、10 段目には必ずしも向かわないことを示し、新たな 5 段目を明確にしたと言えよう。

5. フェーズⅡに必要なこと

著者らの持続可能な素材利用システムに関する研究分野における事例を通じて考えると、個別技術である材料科学の分野の基礎的な知識を有しながら、対象とする社会システム全体を評価対象とすることが、フェーズⅡの実践の必須要素であると考えられた。

社会システムを包括的システムとしてとらえて分析しながらも、その個別要素である研究技術を把握することで、今までにない知見を創出し、より効率的に、研究開発成果とイノベーションを結びつける筋道を明確に打ち出せる可能性がある。

ると言えよう。

アプローチとしては、社会システムの中で当該技術の影響するサブシステムをモデル化することが、本稿で紹介した著者らの研究分野における有効な手段であった。また、モデルが扱う次元としては、貨幣価値による分析では意図しない影響因子（投機、景気変動、政情不安等）を考慮に入れなければならない、個別技術との関係性において誤差項の影響が大きくなり、モデルの中での個別技術の位置づけが明瞭になりにくいと考えられる。そのため、本稿で紹介したような。物理量によって分析するモデル化を用い、個別技術とシステム全体の定量的関係性を記述することが望ましい。単純な例では、100万円の鉄鋼材であっても、高張力と鉄筋棒鋼では技術的にまったく異なる特性であることが明らかであり、各用途での代替性はないが、鉄鋼材という区分で貨幣価値により評価すれば等価とみなされる。このような評価の解像度は、詳細なほど良いがデータの入手可能性から限界もある。そのバランスを考慮し評価モデルの枠組みを決定するためには、技術的知見が必要である。

さらに、モデル化の際の捨象する事象を判断する背景には技術に対する理解が必要であり、モデルにおける現象間の関係性（数理的な関係）を判断するには、システムに対する全体感を持ち合わせる必要がある。例えば、鉄鋼材リサイクルによる鉄鋼材中の銅の濃化モデルに意味はあっても、アルミニウムの濃化モデルに意味はない。学理や技術を知らなければ、同じように見えるが、熱力学的な原則に従って、現行の製鋼プロセス技術の基では、アルミニウムは酸化されやすくスラグに分配され、鉄鋼材中にほとんど残らないためである。

このようなシステムをモデル化することによるシステム分析の研究の重要性の一方で、その分析対象が社会的な事象であることから、再現実験はできず、検証データも十分でなく、時にはまだ起きていない事象を分析することもある。このようなアプローチは、従来の科学的な手順からすれば、不十分と捉えられる可能性もある。しかしながら、従来の確実な検証を積み上げることだけでは、偶発的な目覚ましい成果を待たなければ、社会の課題が解決されない。効率良く研究成果とイノベーションにつなげるためには、本稿で紹介したようなアプローチを、様々な分野において実施すべきであると考えられる。特に、環境問題等の社会全体の（時間軸や空間軸が大きな）社会的要請においては、本稿で提案したフェーズⅡの取組みがより重要であろう。

6. おわりに

本稿では、研究活動とその社会的寄与との間のギャップを乗り越え、研究開発成果とイノベーションを結びつけるための方法論として、成果発でもなく社会的要請発でもない、それらの中間に“飛び石”的なステップを創出することを提案し、フェーズⅡと名付けた。

本稿で紹介した分野以外であっても、フェーズⅡ研究によるシステム分析は、有効であると考えられる。一方で、このような研究に対する評価ならびに研究資金の援助等は、まだまだ低いと言わざるを得ない。成果が直接イノベーションを起こす訳ではないものの、今後の戦略的イノベーションにとっては必須のインフラであると考えられる。その意義ならびに重要性を認識し、各分野においても同様のフェーズⅡアプローチが普及することを願っている。

- 1) 醍醐市朗ら：NIMS-EMC 材料環境情報データ No. 12『社会蓄積量の把握に関する専門家意見調査』独立行政法人 物質・材料研究機構 エコマテリアル研究センター(2006年9月)
- 2) 環境省：第三次循環型社会形成推進基本計画（平成25年5月31日閣議決定），p. 20
- 3) 川原健吾，醍醐市朗，松野泰也，足立芳寛：銅スクラップの回収に対する素材価格の影響分析、日本金属学会誌、75(6) 327-331, (2011)
- 4) Wei-Qiang Chen: Recycling Rates of Aluminum in the United States. J. Industrial Ecology, 17(6) 926-938, (2013)
- 5) 関根伸雄，醍醐市朗，松野泰也，後藤芳一：都市鉱山からの回収を決定する機構のモデル化. 第9回日本 LCA 学会研究発表会，東京，2014.3.4-3.6, D3-13, (2014)
- 6) 清原慎，後藤芳一，醍醐市朗：清原ガラスを中心とした酸化物系セラミックスの循環利用システムの設計. 第9回日本 LCA 学会研究発表会，2014年3月4日-6日，東京，C1-03
- 7) 醍醐市朗ら：マルコフ連鎖モデルを適用した鉄元素のライフサイクルにおける平均使用回数ならびに社会での平均滞留時間の解析手法の構築，鉄と鋼，91(1)，pp.159-166, (2005)