

材料科学に基づく機能から見た材料と社会の関係

(一社)未踏科学技術協会 エコマテリアルフォーラム 幹事 醍醐 市朗

1. 研究の背景と目的

現在、社会で求められるニーズは多様である。その社会におけるニーズを満たすための機能を提供する材料が、生産され、製品に組み込まれ、使用されている。実際には、提供すべき機能が発現できる材料の中から、機能性の高さ、コスト、規制、標準等を勘案し、最も適した材料が選択され用いられる。つまり、社会と材料の間には、社会のニーズを満たすための“その時点”で最適な材料が選択されるという関係性が常に存在している。一方で、材料科学や材料技術の発展に伴って、評価する“時点”が変化する。例えば、照明という機能を得るために、昔は燃焼時の炎を利用し、その後、白熱電球から蛍光灯へ、さらには半導体 LED や有機 EL まで様々な異なる原理に基づいた材料技術が、照明の機能を担保してきている。材料科学の発展に寄与している研究者の多くは、各材料の専門家であり、当該材料の持つ様々な機能については把握しているものの、同機能を発現する異なる原理の材料について全て把握している訳ではない。著者らの知る限りでは、多様化した社会ニーズと材料機能の中で、それらの関係性を縦覧できる資料は、世の中に存在していない。材料科学者が著した書籍ですら、1つの材料という切り口で、様々な機能が記されているのが現状である。

持続可能な社会における材料使用を考えると、非再生可能な資源に頼った材料使用は望まれない。つまり、再生産可能な物質を、再生産可能な容量に応じて環境圏から得て利用する材料使用システムでなければならない。そのような社会では、多くの材料は、有機物に依存することが想定される。あるいは、金属材料であれば、ほとんど完全に近い循環利用を実現し、鉱物資源が限りなくゼロに近いような消費になる使用が想定される。理解の一助として、時間的な説明をするならば、1000年先の社会は、このような持続可能な材料使用をしていなければ、人間のニーズを満たす材料の供給は成り立たないのではないかと考えられる。本調査研究の視点としては、実際の1000年先を予測しようとしている訳ではなく、今の技術や社会システムからは想像できない将来という意味と、現在消費している金属鉱物資源等を現在の技術と社会システムにおいて消費している限りでは現行の材料使用は実現しないであろう将来という意味で、1000年先の社会における持続可能な材料利用とすることとした。

物性に応じた材料の機能が組み合わせられて社会のニーズを満たしていることを鑑みると、材料機能という視点から整理することで、材料と社会との関係性をうまく整理することができるのではないかと考えられる。しかし、今まで、材料機能の観点から社会と材料との関係性を明確に整理する取り組みはなされてこなかった。材料機能の観点から社会と材料の関係性を明確にする枠組みを構築することを本調査研究の目的とする。この構築する枠組みにより、材料科学の研究開発に対する示唆と、社会システムの発展に対する示唆が得られるものと考えている。

本調査研究では、6名の検討委員会委員と、それに5名加えた11名の研究会委員により、3回の検討会と3回の研究会を実施するとともに、第3回研究会にて招待した講演者、Granta Design社のAahby先生ならびにCebon先生と東京農工大 熊谷義直先生への訪問と第8回SAM国際会議での発表を通じた議論により枠組みを構築した。

2. 機能から見た材料と社会の関係性を表現する枠組み

社会の中で製品として使用されているものの多くは、部品ごとに必要な材料を選択し、それら材料の発現する機能を組み合わせることで、製品として必要とされる機能を発現するように設計されている。材料は、提供する機能を製品として組み込み、製品が人間の活動で必要とされる機能を発現しているという関係であると言える。また、携帯電話と固定電話のように、同じ機能を提供する製品であっても、その製品が利用される社会システムに応じて、必要とされる部品の機能が異なり、製品自体も異なる。このように、製品は、社会システムを通して人間の活動を支え

ている。そこで、部品、製品、社会システム、人間のニーズの4つの階層が考えられる。

次に、製品から求められる機能と、それを提供する材料との関係を考える。製品から求められる材料の機能は1つではないことがほとんどであるが、簡単のために、本調査研究では、求められる複数の機能のうち主要な1つの機能に着目することとする。フィラメント、蛍光体、LEDは、同じ機能として可視光を発光するものの異なる物理的な基本原理に依っていると考えられる。材料と(主要な)機能の関係と考えた際に、その機能を担う物理的な基本原理も重要な情報であると考えた。

ここまでで検討した要素を、発光という主機能に着目して図1に整理した。部品、製品、社会システムの切り分けが曖昧になったため、明確に階層構造として示していないが、右から順にみると、「人間のニーズ」を満たすために整備された「社会システム」を通して「製品」が機能を提供し、「製品」に組み込まれた「部品」が要求する「主機能」である発光を、様々で異なる「基本原理」に従った多様な「材料」が提供している、という構造が構築できた。先述のように材料の専門家が、材料という切り口で、その材料が提供できるいくつもの機能を解説するのは異なり、ここでの例示は「発光」であるが、主要となる機能を切り口に整理したことに意義があると考えている。それにより、材料機能より右側に、社会ニーズにつなげるためにその機能を実装するための社会の仕組みが構造化され、材料機能より左側に機能を支える科学的情報が構造化されている。つまり、材料と社会の関係性を構造化する中で、本調査研究事業にて着目した「材料の機能」は、社会の仕組みと科学的情報を結びつける鍵となる接合点であると考えている。まとめとして、図1の情報から例示を除き、構造部分だけ表現したものが図2である。

3. 発光機能を事例にした物理的原理と材料機能の関係

本調査研究事業では、材料機能という切り口で材料と社会の関係性を整理したことが、今まで考えられてこなかった特長である。また、材料の機能を材料科学における研究開発にとって有意義な情報とするために、その機能を担保する物理的な基本原理を明らかにする構造を提案した。しかしながら、機能を発現する物理的な基本原理といったときに、多くの機能については、その原理が何であるのか明記されたもの、明確に議論された文献は、ほとんど見当たらない。これは、前章まででも少し触れたが、多くの材料科学において、その材料を基本として、その材料が発現する多様な機能を整理するものの、1つの機能に着目して、機能を軸として整理されたような議論があまりないのが現状である。過去から用いられてきた発光方式が大きく変遷してきている、その分かり易さから、1章や2章においても、例示として発光現象を繰り返し取り上げてきた。本節では、発光機能を事例として、発光機能を発現する物理的な基本原理について科学的な議論を深め、発光機能を担保する物理的な基本原理を明確にすることを目的とする。

発光を生じさせる原理を探るために、光を発する光源に関しての情報収集を行った。この情報収集では、原理やメカニズムに端を発して発光発現を探るのではなく、現在までに使用されてきた各種の光源を参照し、その機能や特性を発現させるために用いられている材料、具体的な製品、その性能などの情報を収集し、整理することから始めた。まず、照明学会が編纂した書籍の分類に従って、各種光源に関する情報を収集した。主要な情報源として、1996年から2014年までの照明学会誌に掲載されている解説や論文430件についてすべて目を通し、本調査に関する情報を拾い出した。情報を整理した上で、各種光源の発光に至る過程・メカニズムを整理した。蛍光灯では、①タングステン線に塗布された電子放出物質から熱電子放出によるアーク放電、②水銀による紫外放射、③蛍光体、そして発光に至る。このようにして、各種光源について材料が関わる過程を整理した。次に、それぞれの現象について、その物理的な基本原理として理解する

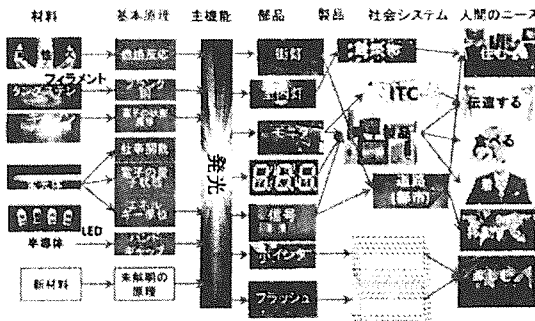


図1 発光という主機能に着目した材料、基本原理、主機能、製品、社会システム、人間のニーズの関係

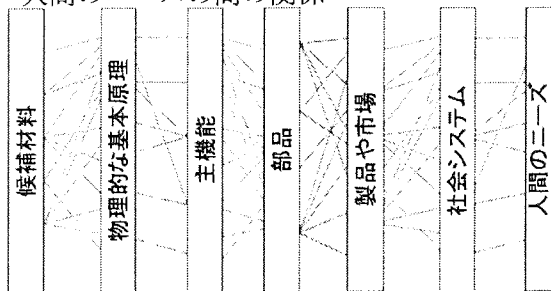


図2 材料機能を中心とした、材料と社会の関係性を表現する枠組み

ことを試みた。その結果、発光を生じさせる原理には、図3に示すように、エネルギー準位間の遷移に伴う放射と熱放射の2種類しかないことが分かった。たいそう単純な結果であるものの、今までにこの単純な原理原則が明確に記されたものは、本研究調査において調べた限りにおいては見当たらなかった。唯一、小林による整理が、発光現象の物理的原理を総合的に解説しているものの、その整理は、本稿において結果として得た最も基本となる原理に基づいておらず、図4に示すように、励起方式や材料の違いにより異なる発光システムであり、異なる原理とした整理をしており、工学的な整理と言えよう。なお、本稿で扱った発光現象は、照明のために使用される可視光を主に想定したが、発光機能には、可視光以外の紫外や赤外の波長域についても含まれる。

本事例研究を通して、材料機能を、その物理的な基本原理に立ち戻って材料とその機能を見直すことにより、従来の材料科学・材料工学において考えられてきている方向とは、別の方向からの切り口であり、材料科学の発展に対して、新たな示唆を与える可能性があることが分かった。

4. 各階層における考察

本調査研究において構築した枠組みは、材料の科学技術的論点から、社会ニーズの社会科学的論点まで幅広く含んでおり、1人の研究者によってすべてをカバーすることは、大変困難である。そのため、各研究会メンバーの専門領域から、少しずつ材料側あるいは社会側に広げて、各章において議論し、パーツごとに議論を深めた。

4章においては、材料に求められる特性や機能が実際には主機能だけではなく、複数の機能であることを考え、複数の異なる次元の機能を包括的に評価する手法を、DEA（包絡分析法）を適用して開発した。5章においては、材料科学に基づいた機能と製品から見た材料機能について議論した。まず、用語において、性能が特定能力ごとの最大値や有効値といった定量的なものを示すのに対して、機能または機能性は特定能力の有無を示す定質的なものを示すのが一般的である。本調査研究においては、性能としての定量的分析ではなく、機能としての特定能力の発現の有無で整理している。従来の材料科学における研究開発とは、製品機能を発現あるいは製品性能を向上させることを目指すために、材料の新機能発現と性能向上を図ることと整理できる。一方で、社会や製品からの受入れ性（ロバスト性）を考慮した材料機能の発現を、鉄鋼材における不純物の許容限度を事例に考えると、今までの材料科学において、あまり目的とされてこなかった研究の方向性を見出すことができる。「材料機能」と「社会」の関係性を通して見えてくるロバスト性等の要素を考慮した融合的研究分野の開拓がこれからの社会材料研究において今後強く求められると考えられた。6章では、製品設計や製品機能を主題として、材料と社会の関係を議論した。電気自動車用高効率モータに用いられる電磁鋼板とその影響を与える電力需要の関連性を見える化したツールが既に開発されている等、製品設計の観点から、社会と材料を結びつける研究は、発展してきていることがうかがえた。一方で、製品においても製品機能の複合化（追加、統合）による進歩がある。近年、普及が進んでいる多機能製品（代表例として、古くはラジカセ、近年では洗濯乾燥機やテレビチューナー内蔵パソコン、音楽再生やカメラ機能を備えた携帯電話やスマートフォンなど）の普及により、ひいては材料の使用も変化することを明らかにした。7章では、「移動する（Mobility）」という人間のニーズの一つに着目し、「製品や市場」、「社会システム」、「人間のニーズ」の3層における関係性を考察した。Mobilityに関わる交通工学、自動車産業、旅客需要の考え方、取り組み、研究事例を通じて、社会と製品の関係を、人間のニーズ、社会システム、製品の3層で整理することで、それらの関係性を定量化、あるいはモデル化できる可能性が明らかになった。このような可能性により、本枠組みを社会実装することにより、社会システムを発展させる上で重要な示唆が、本枠組みから得られると考えられた。

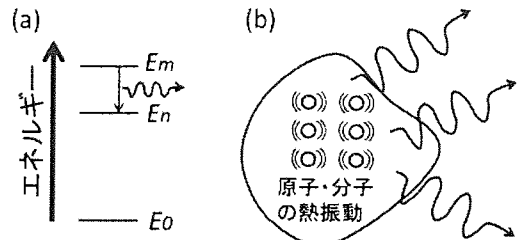


図3 (a)エネルギー準位間の遷移に伴う発光と(b)高温物体からの発光（熱放射）の模式図

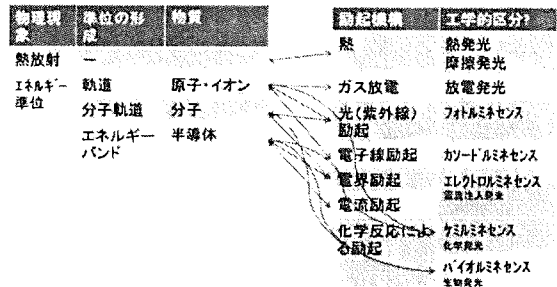


図4 エネルギー準位を形成する物質等の区分と励起機構や工学的区分との関係

5. まとめ

社会と材料の関係を、社会を人間のニーズとし、材料を候補材料として、その間に、社会システム、製品や市場、部品、主機能、物理的な基本原理と順に5層の階層構造とすることで、その間の関係性がうまく表現された枠組みを構築できた。他の構造による表現の枠組みもあると考えられるが、当初の目的である持続可能な材料使用に向けた社会システムにおける今後の発展ならびに材料科学における今後の研究開発に対する示唆を得るための情報整理の枠組みとして、構築した。この階層構造は、材料機能より社会側にその機能を実装するための社会の仕組みが構造化され、材料機能より材料側に機能を支える科学的情報が構造化されていると言えよう。つまり、材料と社会の関係性を構造化する中で、本調査研究事業にて着目した「材料の機能」は、社会の仕組みと科学的情報を結びつける重要かつ無二の接合点であると考えている。

構築された枠組みにおける、3章から7章の位置づけは、図5のように示される。本調査研究において構築した枠組みは、材料の科学技術的論点から、社会ニーズの社会科学的論点まで幅広く含んでおり、1人の研究者によってすべてをカバーすることは、大変困難である。そのため、各研究会メンバーの専門領域から、少しずつ材料側あるいは社会側に広げて、各章において議論し、パーツごとに議論を深めた。

さらに、発光機能を通じたケーススタディにより、本調査研究において構築した枠組みにおいて設定された「機能」では、一般的な材料科学における整理や解説で考慮されるよりも更に根本的な原理まで考える必要があり、発光現象以外の機能を対象にした際にも、同様に今までの整理では不十分であることが考えられた。本事例研究を通して、材料機能を、その物理的な基本原理に立ち戻って材料とその機能を見直したことは、従来の材料科学・材料工学において考えられてきている方向とは、別の方向からの切り口であり、材料科学の発展に対して、新たな示唆を与える可能性があることが分かった。また、社会システムに対しても、Mobilityに関わる研究事例を通じて、社会と製品の関係を、人間のニーズ、社会システム、製品の3層で整理することで、それらの関係性を定量化、あるいはモデル化できる可能性が明らかになり、本枠組みを社会実装することにより、社会システムを発展させる上で重要な示唆が、本枠組みから得られると考えられた。

本年度の調査研究により、材料と社会の関係性を議論するための新しい枠組みが構築された。しかしながら、構築された本枠組みを、実際の材料科学や社会システムの発展につなげるためには、まだ多くの課題が残されているとも考えられた。本年度は『発光』という機能に着目して調査研究することで、一定の成果を得た。ただし、材料の機能は多様であり、機能により特徴は異なるため、他の機能においても同様に整理できるかどうか確かめる必要があると考えられる。また、5章で議論したように、本枠組みでは非定量的な機能を論じてきた一方、定量的な性能についても評価することで得られる示唆もあると考えられる。さらには、本枠組みの鍵である材料機能について、今まで材料科学は、あまりに俯瞰的な理解をしてこなかったように思われた。例えば、「材料が発現してきた機能はいくつあるのか」という質問に、現在の材料科学は回答を持っていない。また、人間のニーズとして7章で議論したように、Mobilityは目的によって派生的に生じる需要であり手段として見なされるものであるため、それ自体がニーズではない。つまり、社会として設定すべき人間のニーズについても明確化していく必要があると考えられた。

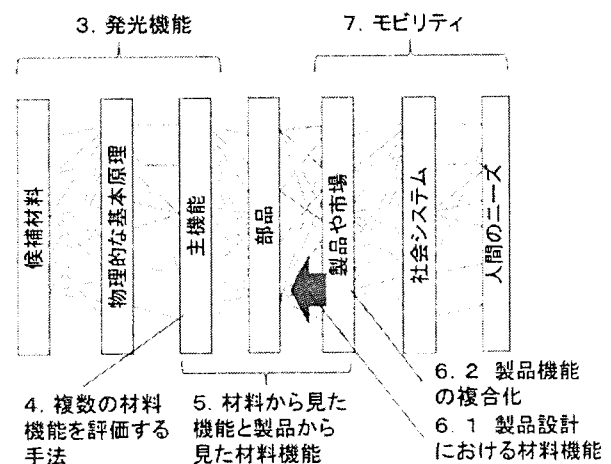


図5 本調査研究で構築された材料と社会の関係の枠組みにおける3章から7章の位置づけ