

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	第4章 マテリアル科学と失われる資産
他言語論題 Title in other language	Chapter 4, Materials Science: Losing Assets
著者 / 所属 Author(s)	長井 寿 (NAGAI Kotobu) / 国立研究開発法人物質・材料 研究機構名誉研究員
書名 Title of Book	マテリアル科学—最先端と未来への選択肢— 科学技術に 関する調査プロジェクト報告書 (Materials Science: The State of the Art and Future Options)
シリーズ Series	調査資料 2023-6 (Research Materials 2023-6)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2024-3-27
ページ Pages	57-83
ISBN	978-4-87582-924-9
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	構造物等の故障、破壊の最小化を図るには、マテリアルの信 頼性データを取得、蓄積する必要がある。研究者の減少が懸 念される中、マテリアル科学への社会的関心を高めるため の展開策を示す。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

第4章 マテリアル科学と失われる資産

【要旨】

災害や事故などによって数々の貴重な資産が失われてきた。その原因は、巨視的には構造物や製品などの故障、破壊であり、微視的にはそれらを構成するマテリアルの性能劣化に起因する。マテリアルの性能劣化は原理的に不可避なため、構造物等の故障、破壊を完全に避けることはできない。この点を正しく理解し、失われる資産の最小化を図るためには、マテリアルの「つくる側」と「つかう側」が連携して、マテリアルの信頼性データを取得、蓄積する必要がある。特に時間依存型性能劣化の試験は重要であり、我が国はこの点で世界をリードしている。しかし、性能劣化に真正面から取り組むマテリアル研究者層が急速に希薄になっている。そこで、未来への選択肢として、失われる資産の最小化に貢献するマテリアル科学への社会的関心を高めるための展開策を示した。

はじめに

人類はまず石材、レンガ（土を焼いた）、木材などの自然マテリアルを採取して住宅、建造物などの原料とした。19世紀以降は地下資源を原料にして作った金属、セメント、プラスチックなどの人工マテリアルが住宅、建造物の主な原料となった。更に新しい様々な人工マテリアルが次々と開発されている。近年、資源問題、地球環境問題の深刻さの高まりを背景に、再生可能若しくは循環型マテリアル、更にはバイオマス起源のマテリアルなどへの期待も高まっている⁽¹⁾。

ところが、マテリアルの性能が優れているといえども、一つ一つのマテリアルは万能ではない。どんな条件にでも耐えられるわけではない。永遠に耐えられるわけでもない。その結果、自然マテリアルでは、用途に合うようにマテリアルを正しく選択し、使用法を工夫すればより有効に使えるという経験知が積み上がった。人工マテリアルについてもしかりである。長い経験の積み重ねと改良、開発のための絶え間ない挑戦によって、より良い使用法を知り、より良いマテリアルを得てきた。人工マテリアルは、使用法の新しい工夫においても、マテリアルの新しい開発・改良においても、自然マテリアルに比べれば改良の余地が格段に大きい利点を持っている。

1 性能劣化を見定める信頼性評価

このように積み上がった経験知を体系化した考え方に「信頼性」がある（図1）。信頼性は、「アイテムが、与えられた条件の下で、与えられた期間、故障せずに要求どおりに遂行できる能力」と日本産業規格で定義⁽²⁾されている。この定義文を分解してみよう。まず、ここでアイテムをマテリアルと読み、故障を損傷・破壊と読むこととする。

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和5（2023）年11月10日である。

(1) 日本学術会議材料工学委員会『日本の展望—学術からの提言2010—』日本学術会議, 2010; 日本学術会議材料工学委員会『大学教育の分野別質保証のための教育課程編成上の参照基準—材料工学分野 報告—』日本学術会議, 2014.

(2) JIS Z 8115:2019『ディペンダビリティ（総合信頼性）用語（Glossary of Terms Used in Dependability）』

そうすると「故障せずに要求どおりに遂行できる能力」が達成されるための附帯条件が、上記の経験知に基づき二つあることが分かる。

一つ目は「与えられた条件の下」である。すなわち「つかう条件」に制限が付く。

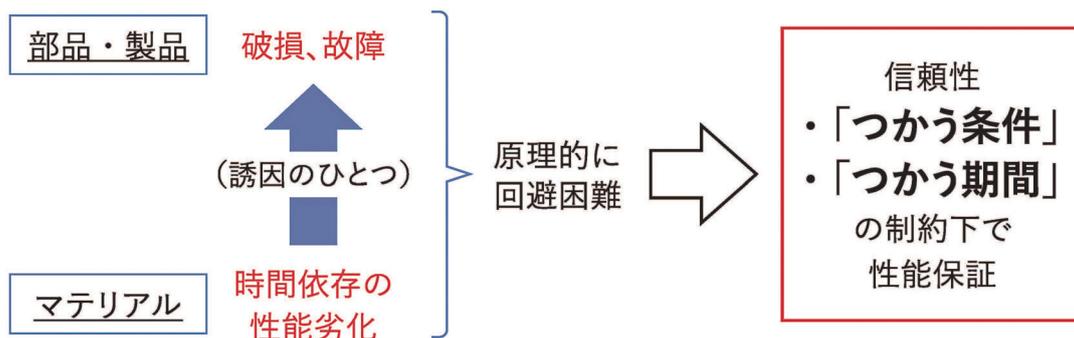
二つ目は「与えられた期間」である。すなわち「つかう期間」にも制限が付く。

「つかう期間」中、「つかう条件」を十分に満たしていたとしても、一時的にでも想定を超えた過酷な条件に晒（さら）されるとマテリアルは性能劣化する。一時的な過酷条件に晒されるのは、自然災害だったり、人為的な行為だったりする。想定を超える条件は「つかう条件」を満たさないとされる。

二つ目は「つかう条件」を満たしていても「つかう期間」、すなわち寿命に限界があることを言っている。性能が時間とともに劣化するので、性能を保証できる「寿命」にも制限があることになる。

このように、信頼性の定義は、マテリアルの性能劣化を総合的に検討するためには、「つかう条件」及び「つかう期間」と性能劣化との関係をしっかりと把握しないといけないことを示している。本章は、この基本認識に沿って論ずる。

図1 マテリアル科学における「信頼性」研究



(出典) 筆者作成。

2 マテリアルを「つくる側」と「つかう側」

マテリアルには「つくる」「つかう」の二つのフェーズがある。マテリアルは、一般的には部品への加工、部品の製品への組立てを経て、消費者へのサービスに供される。消費者から見ると製品の製造者は見えても、マテリアルの製造者は見えにくい。逆もしかりで、マテリアルの製造者から見ると消費者は意識しにくく、最初のカスタマーは部品加工者、製品組立て者となる。そこで、ここではまず、「つくる」はマテリアルを製造する段階を指し、「つかう」はそれ以降のマテリアルを加工し、組立て製品等を製造する段階と消費者が製品を使用する段階を合わせて指すこととする。このフェーズの違いは、信頼性の重要さの認識にギャップを生みやすい。マテリアルは「つかわれてこそ」その価値を発揮できるので、マテリアルの現実的価値は「つかう側」で試されている。よって信頼性は「つかう側」でこそ深刻な問題となる。あえて言えば「つくる側」は「要求仕様を満たすマテリアルの供給責任」があるだけで、「つかう」際の信頼性とは無関係とも言える。一方、「つかう側」はマテリアルの信頼性を保証するための「あら」を見つけて、マテリアルを「つくる側」に「あら」を示して、より信頼性の高いマテリアルの提供を要望する。そうすると一見、「つくる側」はマテリアルのプラス効果を前面

に出し、「つかう側」はマイナス面を指摘し、対立的な関係にあるように見える。そうでなくとも、両者の間に認識の齟齬（そご）が生まれやすい宿命的な壁があると言える。いずれにせよ、マテリアルの現実的価値を最大限発揮・維持させるためには、「つくる側」と「つかう側」が信頼性に係る課題を共有しているかどうかが鍵になる。

3 重要だが研究者から忌避される信頼性研究

ウェルビーイング向上のためには、マテリアルの信頼性向上が重要だと万人が認める。しかし、残念ながら信頼性はマイナス面を扱う地味な研究テーマである。長期間信頼性研究はなおさらである。何年、何十年という長期間で使われる製品が多々あり、製品供給の社会的責任は、研究者の側から見ても、技術者の側から見ても重い。信頼性研究が重要なことは分かって、地味なテーマに長期間縛られることを多くの研究者は忌避しがちである。

研究者の忌避を決定的にするのは、研究者評価、業績評価において、全く不利なことである。何年、何十年という長期間の現場再現実験で実証しなければならないので、短期間に研究成果を出すことはまず期待できない。成果の速やかな社会実装が期待されるので、研究成果を国際的な規準、標準に反映させるためのロビー活動にも関与しなければならない。年度ごとの論文数、特許数などを指標とする業績評価で比較される以上は、毎年、高い評価を得ることを期待できない。

そうこうして「評価されにくい」長期間信頼性研究がアカデミアで廃れてしまう。そうすると、アカデミアの研究者層だけでなく、その分野から輩出される学生の層や質も必然的に薄まり、結果、社会・民間現場での信頼性関連の人材育成も弱体化していく。戦後この分野で活躍してきた人材の多くは既に「後期高齢者」の年代に達しており、その後、研究、試験、技術開発分野のいずれの現場でも人材が希薄になって現在に至っている。

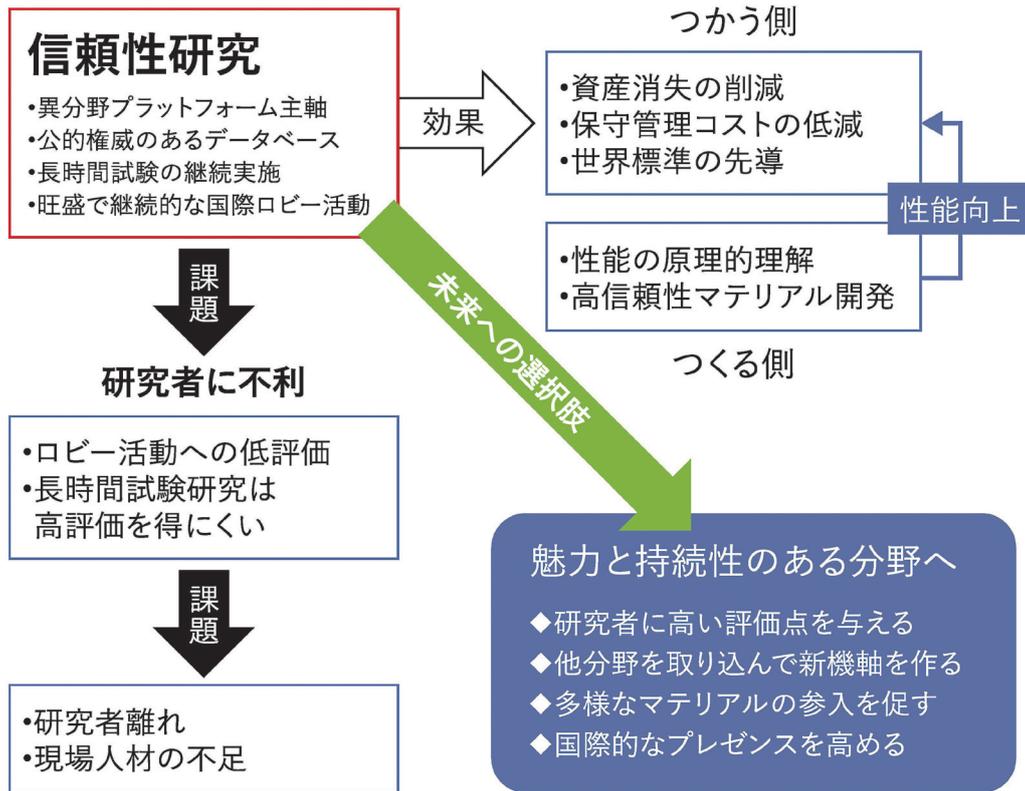
4 「つくる側」と「つかう側」の連携を核に信頼性技術の向上へ

マテリアルの信頼性技術の向上には、学術分野としては力学（材料力学、破壊力学）とマテリアル科学の連携が不可欠なことが経験知になっている。すなわち、産業—力学—マテリアル科学の連携三角形が鍵を握る。現状では、マテリアルを「つくる側」と「つかう側」のそれぞれに連携三角形が形成されていると言えるが、その三角形同士の交流は希薄になりがちである。この二つの三角形を有機的につなげるには、研究者の自覚的活動が起爆剤になるしかないだろう。

豊かで安全・安心で持続可能な社会であり続けるためには、マテリアル科学は、学術分野を従来の枠に閉じこめないで、近年伸長の著しい、数値シミュレーション、データ科学などの他分野との連携を先導して発展させ、新しい総合的学術領域を築き上げていく責務を持つ。

本章ではこれらの論点（図2）について、金属材料を例に以下の節でそれぞれ詳しく述べていく。

図2 信頼性研究の功罪と未来への選択肢



(出典) 筆者作成。

I マテリアルの性能劣化

第1章では、マテリアル性能の、どちらかというプラスの効果に光を当て、取り組むべき課題や展望を述べている。プラス効果の重要性は論をまたない。それに対して、本章は、いわば性能のマイナス効果を見つめた場合に考えるべき課題について整理する。全体としては、プラス、マイナスを総合的に見る立場になる。

辞書的にいうと「性能」とは求められる性質とその能力のことである。マテリアルに全く新しい性質を付与することも、マテリアルの特性（能力を言い換えている。）を従来に比べて格段に高めることもできる。したがって、そういう効果を生む可能性のある未利用若しくは未知の原理の発現に挑戦するマテリアル研究者は多く、実際に新しいマテリアル分野を切り開いたり、特性の飛躍的向上の実績も数々挙げたりしてきた。これが一般的にプラス効果について言われてきたことになる。

ところが、新規マテリアルができたからと言って、長年の大量の使用実績がある既存マテリアルを置き換えることは容易なことではない。大概、原料を含めてマテリアルを安定供給できる安価な製造方法の提供ができず、更に長期間に及ぶ高い信頼性の保証などの要求に短期間で応えることも困難であり、拙速な置換はできない。しかし、「つかう側」の要求は高まる一方なので、「つくる側」は僅かであっても既存マテリアルの特性の改善に挑戦し続けることになる。改善が積み上がればついには大きな飛躍を勝ち取ることになる。我が国の「つくる側」の産業には、そうした成功例が多々ある。プラス効果を説明する従来の論考では、産業側はマテ

リアル性能の「漸増性」を強調し、学術側はマテリアル性能の「新規性、飛躍性」の強調に軸足を置くことが多い。だが残念なことに、この「漸増性」をマテリアル科学が深掘りした例は少ない。

「漸増性」を得るためにもマテリアルの性能劣化の克服が不可避なので、実は「漸増性」の根幹は信頼性向上に通じている。したがって、「成熟期」に入ったこの時代では、プラス効果を伸ばす努力を保持しながら、マイナス効果を減らす「漸増性」の視点を持つのが好ましい。すなわち、プラス効果の飛躍を展望しつつ確実にマイナス効果を減じて、全体プラスを確実に蓄えていく戦略である。

1 マテリアルの性能を決めるもの—マテリアル科学の「四面体」理念—

例えば、硬さ、電気抵抗、磁性、腐食性など、単一のマテリアルであっても様々な性質を持つ。それぞれの性質について、ある定められた方法で測定した値をここでは特性 (Property) と呼ぶ。製品の部品にどのマテリアルを選ぶかは、マテリアルの諸特性を見て決める。マテリアルを単一の性質から選ぶことはまずなく、様々な性質の最適な特性の組合せを持つマテリアルを選ぶ。実際には一つの部品であっても複数のマテリアルの組合せを選ぶことが多い。

「つかう側」では当然のこととして、様々なマテリアルの様々な性質に関心を持ち、知見を広めることが必要になる (Generalist 指向)。ところが、「つくる側」では、ある性質やあるマテリアルに関する深い知見を持つ「専門家」であることが歓迎される (Specialist 指向)。「つかう側」と「つくる側」の間に生まれやすいこのミスマッチの解消も大事であり、両方の属性を総合化した関係性を持つことが全体としては必要である。

第2章で述べたとおり、マテリアルの特性 (Property) を決めるのはマテリアルの内部構造 (Structure) である。したがって、内部構造を変化させると特性も変化する。内部構造は、英語で microstructure と呼ばれるように、顕微鏡的寸法のものであり、肉眼で観察することはまずできない。光学顕微鏡で400倍~1,000倍に拡大して観察する場合もあり、電子顕微鏡で10,000倍やそれ以上に拡大して観察する場合もある。内部構造観察手段の性能を多面的に絶え間なく向上させることがマテリアル科学力の向上に直結する。この認識は、産業側、学術側で共有されている。

ここで、マテリアルを原子の集合体と見て、内部構造を記述する新しい試みを展開してみたい。おそらく教科書で習った原子 (分子) を使って固体を説明することの方が、マテリアルの専門家内で使われている専門用語での説明よりは一般にはなじみやすいと考えるからである。

内部構造を種類の違う原子が空間配置をしている「原子配列構造」と捉えることができる。原子配列構造は、マテリアルをミクロからマクロまで通して想定できる利点がある。さらに、配列は数値的に記述できるし、原子間に働く量子効果を勘案する際にも役立つので、数値シミュレーションにも合う考え方である。

原子配列構造が決まれば特性も決まることになる。この推定をコンピュータでできるのが理想だが、コンピュータの能力自体がその段階にはいまだ遠く、原子配列構造と特性を直接つなぐ論理式も未達である。また、マテリアル科学の到達段階も、原子配列構造を持つ、何らかの配列特徴値と特性の関係について多くの経験知が積み上がっている段階を脱していない。ここで、配列特徴値としては、例えば、注目する原子 (若しくは原子結合体) の平均分散距離や単結晶域の平均的寸法、単結晶内での原子配列の乱れの大きさなどが注目されて、使われている。

未来的にはこの理解が発展し、最終的には原子配列構造が原理的に明白な答えを導くものと期待される。

内部構造の変化は、原子配列構造の変化に対応する。原子の空間位置関係が伸張、収縮したり、回転したりすれば、原子配列構造は変化する。空間位置をそのままにして、原子の種類を変えてもよい。このように考えると原子配列構造の場合の数⁽³⁾は「無限」であることが容易に推察できる。ここから、一つのマテリアルの性質に限ってみても、特性の可能性は「尽きない」ことが分かる。

単一の原子配列構造では、様々な任意の性質について、それぞれの特性を計測できる。原子配列構造の変化に対して、複数の特性もそれぞれ対応して変化するが、原子配列構造の変化の仕方は多様であってよく、そこから得られる特性の組合せの可能性も「尽きない」ことになる。

高校の物理、化学で学んだように1molの物質は 6×10^{23} 個の原子(分子)を含んでいる。この1molの原子の配列の場合の数は文字どおり数えきれない天文学的な数字になる。これが、マテリアルの可能性は無限であることの最も簡単な説明である。可能性をくみ尽くすために、数値シミュレーションなどとの連携を切望する所以(ゆえん)でもある。

脳の中では原子配列構造を任意に変化させることができるが、現実にはどのような手段があるのか。マテリアル科学では、原料を対象に様々な工程を施すことである、製造方法(Processing)によってマテリアルの内部構造が組み込まれるとする。金属を例に挙げれば、

凝固：高温で溶かして、冷却によって所定の形状に固める(液体から固体)

圧延：固体に圧力をかけて、圧縮延伸する(固体の変形)

鍛造：固体に圧力をかけて、任意の形状に変形する(固体の変形)

熱処理：固体を加熱・冷却して、内部構造を変化させる(固体のまま)

などが基本であり、これらの組合せや更にほかの方法もある。内部構造を変化させることを直接の目的にしているのは上記では熱処理だけだが、ほかの方法も必然的に内部構造を変化させている。そのことを理解されやすくするために、専門家は「創形・創質」と呼ぶことがある。原子配列構造の視点から見ると、拡散と呼ばれる原子移動、析出と呼ばれる新しい原子対生成、転位導入(結晶面のすべり)による原子列の相対位置の変化など様々な興味ある現象が金属内部で生じている。外形に手を加えるので「創形」となり、同時に原子配列構造を変化させて「創質」している。

以上をまとめると、マテリアルでは、

製造方法(Processing) → 内部構造(Structure) → 特性(Property)

という因果関係を書くことができる。

単純化すれば

製造方法(Processing) → 特性(Property)

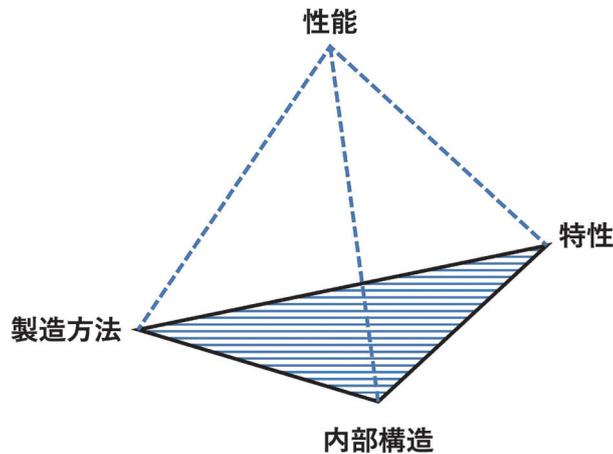
とも言えるので、マテリアル科学では、この三つを頂点に持つ三角形で表し、マテリアル科学が何たるかを説明することが定着している。

さて、この三角形は、今まで明確に言われたことはないが、「新規性」「飛躍性」だけでなく「漸増性」にも適用できる。そしてプラス効果専用でもなく、マイナス効果にも当然、適用可能である。

(3) 場合の数とは、ある事象について、考えられる全ての場合を数え上げるとき、その総数のことをいう。

第2章でも紹介しているが、この三角形を底辺とし、頂点に性能（Performance）を置いたマテリアル科学の「四面体」理念⁽⁴⁾（英語の頭文字をとってPSPP理念と呼ぶことがある。）を図3に再掲した。

図3 マテリアル科学の「四面体」理念



製造方法 → 内部構造 → 特性

（注） 底面三角形の3頂点に、製造方法、内部構造、特性をとり、三角錐（すい）の頂点に性能をとる。
（出典） 筆者作成。

三角錐の頂点に書いた性能とは何を意味するのか。単純に「性質の能力」とするのは戸惑う。マテリアルを「つくる側」のコミュニティ内に限れば、底面三角形だけでお互いの議論を閉じることができる。しかし、マテリアルは「つかわれてこそ」である。繰り返しになるが、性能とは、使われるときに求められる性質とその能力（ここでは特性に当たる。）のことである。しかも総合的性能というように、「つかう側」は一つのマテリアルであっても複数の性能を期待する。製品を設計する際、複数のマテリアルを必要とするのが一般的である。また、様々な問題、社会的問題、資源・エネルギー問題、地球環境問題などを考慮することが不可欠になる。この四面体はそのような諸問題への対応能力も「性能」の一言中にひっくるめて含意させていると言える。かなり強引と言わざるを得ない。

むしろ、この性能を先に述べた信頼性で置き換えた方が、若しくは性能の属性に信頼性を含ませた方が抵抗感は少ない。このようにこの四面体は、マテリアル科学が社会対応を自覚する必要性、重要性を強調する点で極めて大きな意義があるので、広範なマテリアル科学関係者に受け入れられている。だが、性能という一語に、マテリアルが使われる局面で問われる様々な要求に応じることを全て押し込めているのは無理が過ぎる。このままでは、社会対応を自覚しながらも、現実には的確な対応を避ける単なる「免罪符」となる危惧も残る。そこで今後は、性能に総合的な信頼性を正しく含意させることで、マテリアル科学に従事する者は、この四面体の持つ有意義性を更に深め、高めるように、深掘りしていくべきである。

(4) 岸輝雄監修, 新構造材料技術研究組合編『革新構造材料とマルチマテリアル—輸送用機器の軽量化のための材料・接合・設計技術—上』オーム社, 2023, p.3.

以下では、

- ・マテリアルの性能劣化を四面体理念ではどう捉えるか
 - ・特に、時間依存型の性能劣化をこの四面体理念で捉えきることができるのか否か
- について、更に考察を深める。

2 無欠陥なマテリアルはない—性能劣化の内的要因—

マテリアルをその用途から二つに分類する伝統がある。

- ・従来の物質にはなかった新しい物理的、化学的、電子的などの性質を発揮する Functional Materials (機能材料)
- ・所定の構造に加工でき、力学的にその構造を支える Structural Materials (構造材料)

一つのマテリアルに両方の用途がある場合もあるので、これをマテリアルの分類とするのは適切でない。ここでは、用途の違いで性能劣化の問題が違うのではないかという疑問があり得るので、この分類で見てみることにする。

その前に、製品の中で使われるマテリアルが、通常、単一のマテリアルのままでないことを述べておく。もし、主たるマテリアルの表面を別のマテリアルで塗装すれば、もう単一のマテリアルでない。このように一般的に複数の異なったマテリアルの組合せ、複合マテリアルを単位として使う。

構造材料の用途の代表例として金属の溶接構造⁽⁵⁾を見る。同じ金属(「母材」という。)同士の溶接でも、母材とは異なった金属(「溶接金属」という。)を高温で溶かし母材同士の間を埋め、凝固させてつなげる。そうすると母材は溶接熱を受けて、一部は溶解し溶接金属に取りこまれるが、固体のままでも熱の影響で変質してしまう領域(「熱影響部」という。)が生じる。結果、溶接構造は、母材—熱影響部—溶接金属—熱影響部—母材という複合マテリアルとなる。構成要素が不可避的に熱影響を受けて、内部応力分布が構成要素ごとに生じることが多い。力学的な強さから見ると、異種同士の境界は概して弱い。また、急冷される溶接金属は母材に比べて割れやすい性質を持つ。このように溶接構造は、「欠陥の巣」となる。この場合の欠陥は、破損の起点となる内部構造を指す(図4上)。欠陥の寸法は、ミクロン～ミリの領域となる。

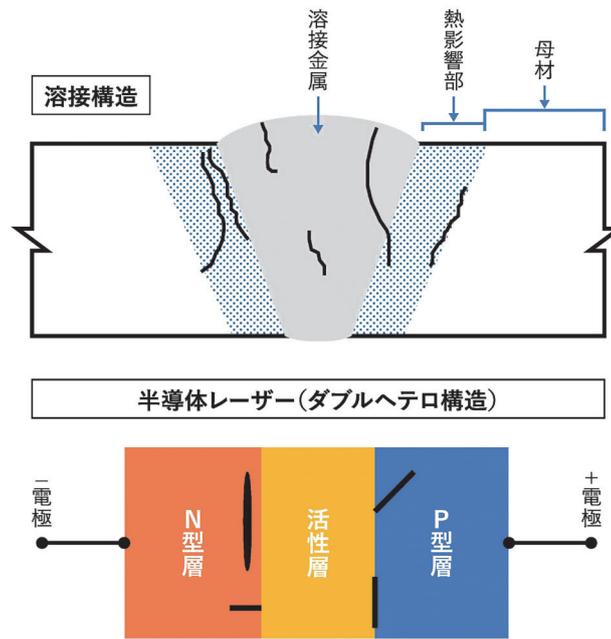
次に、機能材料の代表例として半導体レーザー⁽⁶⁾を見てみる。その構造も簡単に説明すれば、図4下のように複合(多層)マテリアルとなっている。異種マテリアルの界面は欠陥となる。各構成要素内部にも種々の欠陥がある。この場合の欠陥は、破損の起点となる場合だけでなく、電子や光の伝達を妨げ、性能劣化の原因となる内部構造を指す。欠陥が増えたり、成長したりすると劣化度が増す。欠陥の寸法は、ナノ～ミクロンの領域となる。

このように製品中に使われているマテリアルは、構造材料用途であれ、機能材料用途であれ、性能劣化の原因となる欠陥(内部構造)を不可避的に含んでいる。

(5) 三木千壽「溶接欠陥の種類とその継手強度への影響」『溶接学会誌』61巻4号, 1992.6, pp.278-282.

(6) 岸野正剛「半導体レーザーの劣化と格子欠陥(最近の展望)」『応用物理』45巻11号, 1976.11, pp.1074-1080; 「デバイスと品質(後編)～劣化要因を解明する」『日経 XTECH』2007.12.11. <<https://xtech.nikkei.com/dm/article/COLUMN/20071210/143870/>>

図4 無欠陥なマテリアルはない



(注) 上段：構造材料（溶接構造）、下段：機能材料（半導体レーザー）。
 (出典) 筆者作成。

3 安定なマテリアルはない—性能劣化の外的要因：腐食—

マテリアルは固体であるので、内部構造、原子配列構造が外力を受けても、温度を変えても不変、若しくは安定だというイメージを一般の人は持ちがちである。まず、そのイメージを捨ててもらい、原子が内部をかなり自在に動いていることを知ってもらいたい。

金属を例にとる。金属の多くは、地殻が含む化合物（酸化物、硫化物など）などからエネルギーを投入して金属元素を分離する。したがって、地球上では金属は元の化合物よりも不安定である。すなわち、金属から一旦分離された元素である酸素や硫黄などが近くにあると、金属はそれらと再結合して化学的により安定な元の化合物に戻ろうとしている。

ただ、その化学反応にも一定の障壁があり、多くの金属は自動的に化合物に戻るほど活性ではない。だが、何らかの条件が揃（そろ）うと容易に障壁を越える。

その典型的な例が、腐食⁽⁷⁾である。ここで腐食は、電気化学的な反応で変質し（腐）、金属が失われていく（食）現象一般を指すことにする。

(1) 例1：金属がイオン化し、水又は水溶液中に移動する

金属が水又は水溶液中で陽イオンになろうとする性質のことをイオン化傾向といい、図5上のような図が高校の教科書に載っている。この図で（水素）より左側の金属（ここではFeで説明する。）ほど、水又は水溶液中で



の反応を起こしやすいことを示している。

(7) 多田英司・西方篤「金属の腐食のしくみ（正しく理解しておきたい化学のしくみ）」『化学と教育』65巻12号、2017, pp.612-615.

もし、図5下のように、大気中（酸素：O₂がある。）に置かれたFeの表面に水滴（H₂O）が付いて、何らかの原因（表面段差でも原因になり得る。）でA地点とB地点の間に電位差（A > Bとする。）が発生すると、



の反応が同時に発生し、結果、系全体に閉回路の電流が流れ続け、B地点でFeがイオン化して水中に溶け出し、その地点のFeは失われ続けることになる。この反応は局部で起こるが、それが一部に局在する場合も、表面全体で密に多発する場合もある。当然、見た目の腐食の状況は大きく違うが素過程は同じである。

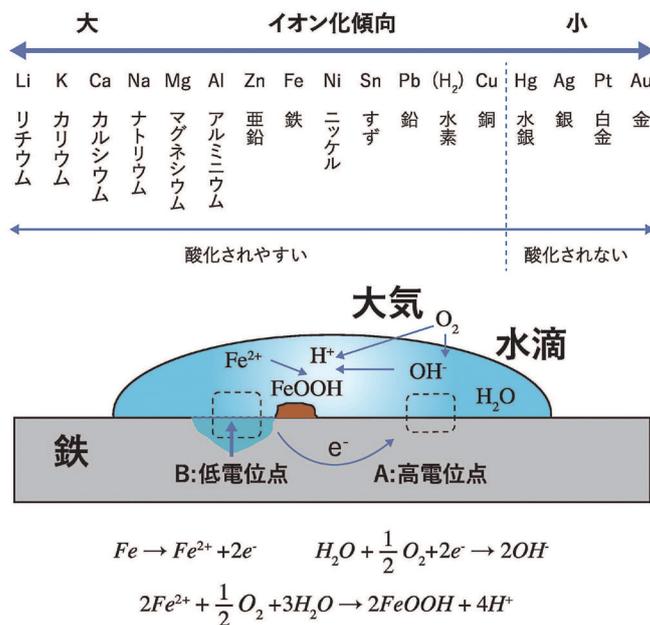
水が存在すれば、酸素によるFe²⁺の酸化が更に進む。



FeOOHの水溶液中溶解度が低いので、金属表面に固体として析出する。これが最も基本的な鉄さび（赤さび）である。この鉄さびは金属表面に緻密（ちみつ）かつ強く接触しているわけではない。

この現象は室温でも起こるが、気温が高いほど促進される。沖縄では北海道よりさびやすい。また、塩（海塩粒子）も促進効果を持つので、海岸近くでは内陸よりもさびやすい。

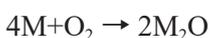
図5 安定なマテリアルはない



(注) 上段：金属のイオン化傾向、下段：大気中で鉄がさびる説明図。
(出典) 筆者作成。

(2) 例2：酸素分子がイオン化し、金属と反応し、酸化物を生成する

一定の高温では、金属（M、一価とする。）表面で



の酸化反応が起こり得る。この金属酸化物と地の金属の密着度は、前例と比べれば、どちらかというと強い。

高温では、金属内部でも、合金酸化物が形成されることがよく観察されている。これは、表面で生成した酸化物中の酸素が金属中を拡散していき、合金元素の原子と化合物を作ると考えられている。内部には酸素がないのに酸化するが、このように酸素が外部から供給されている。この現象を内部酸化という。

腐食に関する現象はここで紹介したものに限らず、多様にある。

4 安定なマテリアルはない—性能劣化の外的要因：自然災害や事故—

我々の行動と生活の空間の安全を脅かし、マテリアルの信頼性を損ねる突然の破壊をもたらす事例は多々ある（表）。

表 マテリアルの性能劣化の諸原因

時間依存性	負荷の種類	原因	性能劣化	説明
なし	力学	自重	破損	座屈・自壊を招く過荷重
		地震		重力加速度を超える振動する体積力
		強風		高い風圧と揺れ
		衝突		高速時の高い運動エネルギー
		低温脆性		低温で生じる脆さ
		高温クリープ		高温で強度低下
		疲労		繰り返し変形、荷重
あり	力学+化学	遅れ破壊	損耗	浸入した水素に起因する脆さ
		摩耗		摩擦による表面損失
	化学	腐食	酸化による表面損失	

（出典）筆者作成。

ここでは具体的に述べないが、表にあるように、鉄道のレールや乗り物のブレーキなどでは摩耗が原因で事故になることもある。機械部品などの硬い材質部が使用とともにすり減って損耗する摩耗は大きな問題である。いずれにせよ、破壊によって、資産の深刻で大きな被害と損失をもたらされる。ウェルビーイング向上のためには真正面から向き合わないといけない課題である。

我が国では大地震が頻発する。例えば、阪神・淡路大震災（1995年1月17日発生）の被害⁽⁸⁾は、死者6,434人、行方不明者3人、負傷者43,792人、建物の全壊104,906棟、半壊144,274棟、一部損壊390,506棟、火災焼損床面積835,858m²となった。東日本大震災（2011年3月11日発生）の被害⁽⁹⁾は、死者19,765人、行方不明者2,553人、負傷者6,242人、建物の全壊122,039棟、半壊283,698棟、一部損壊750,020棟などと、未曾有だった。地震動では加速度が反転振動する。また、加速度による力は質量に比例する。震度計で観測された最大加速度は、阪神・淡路大震

(8) 消防庁「阪神・淡路大震災について（確定報）」2006.5.19. <<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/assets/post1.pdf>>

(9) 消防庁「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）の被害状況（令和5年3月1日現在）」2023.3.9. <<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/higashinihontorimatome163.pdf>>

災で南北 818gal、東日本大震災では南北 2,691.9gal である（実際の最大加速度はこれらを上回る。東西、南北、上下の三方向成分の合成最大値は、前者で 891gal、後者で 2,698.2gal であり、観測点以外で最大となった可能性も無視できない。）⁽¹⁰⁾。今後も地震によって想定を超える負荷が発生する可能性を否定することはできない。

台風、季節風などは、今後更に注意が必要になるだろう。風圧は風速とともに急に増加する⁽¹¹⁾。10m 四方の平面に垂直に当たると、風速毎秒 10m では 0.63t、毎秒 20m では 2.5t、毎秒 30m では 5.6t、毎秒 50m では 15.6t の風力がかかるという。橋梁（きょうりょう）、ロープウェー等では風振動も大きい。

乗り物事故も忘れてはならない。

自動車による交通事故死傷者数は減少傾向だが、それでも年間 36 万人以上（2021 年）の死傷者⁽¹²⁾がある。衝突時の構造変形が、運転者、乗客等の身の安全を脅かしてはいけない。

船舶同士の衝突事故も危険度が高い。船舶では脆性（ぜいせい）破壊が発生し、大音響とともに折損し、沈没した事故例もある。

航空機では離着陸ごとに機体壁に大きな圧力差が生じ、繰り返し変形がかかる。また、橋梁の上を大型トラック等が頻繁に通行するが、その度にある部位には繰り返し荷重がかかる。船舶でも波による繰り返し変形、荷重を考慮する必要がある。繰り返し変形で 10^4 回、繰り返し荷重で 10^6 回程度以上になると、外形が維持されたままで突然起こる疲労破壊が問題となってくる。

鉄鋼の用途拡大によって未体験の事故に遭遇することもある。1930 年前後、シベリア鉄道やカナダ鉄道で、鍛鉄製の車軸破損が頻発し、事故分析の結果、冬季（寒冷期）に集中して現れることが明白になった。1920 年代以降では、液化石油ガスの利用が急速に高まって、石油タンク、圧力容器などの破損が起きるようになった。1944 年の米国オハイオ州クリーブランドの East Ohio Gas 社の圧力容器（液化天然ガス貯槽、 -157°C ）の破損事故では、129 人の死者、32 人の行方不明者、400 人を超える負傷者、116 棟の住宅の全半壊、15 の工場の全半壊、225 両の車両の全壊など多大な被害をもたらした⁽¹³⁾という。

発電、化学プラントなどでの高温、高圧への挑戦も、高温クリープという高温特有の変形現象の洗礼を受ける。

また、腐食の被害も大きい。金属の腐食によるコストは年間国内総生産（GDP）の 1% にも及ぶという専門家の見積り⁽¹⁴⁾もある。直接の災害や事故に結び付かなくても対策コストは膨大である。

腐食とともに金属中に侵入する水素が思わぬ破壊をもたらすことがある。特に材料強度の高いボルトなどでは、設置後数年経って突然破断するという「遅れ破壊」と呼ばれる現象が生じ

(10) 気象庁「強震波形（平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震）」<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html>; 気象庁「地方公共団体震度計の波形データ」<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/110311_tohokuchiho-taiheiyouoki/index2.html> なお、東日本大震災については、防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET 築館（宮城県）では、水平 2,700gal、合成値 2,933gal の最大値が記録されている。

(11) 風圧 ($\text{kg 重}/\text{m}^2$) = $0.05 \times (\text{風速 (m/s)})^2$ が目安

(12) 内閣府編『令和 4 年版交通安全白書』2022, p.40. <https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r04kou_haku/pdf/zenbun/1-1-1-2.pdf>

(13) Cleveland Police Museum, *East Ohio Gas Explosion, October 20, 1944: Police Response and Report*, 20 October 2021. <<https://www.clevelandpolicemuseum.org/historical/east-ohio-gas-explosion-october-20-1944-police-response-and-report/>>

(14) 腐食コスト調査委員会「わが国における腐食コスト」『材料と環境』69 巻 11 号, 2020.11, pp.283-306.

ることがある。

いずれにせよ 100% の安全・安心はあり得ない。直接の人的被害以外にも災害や事故によって交通遮断、断水、停電、ガス供給停止、電話不通などによる生活と経済への影響が大きく経済的損失も大きい。災害、事故に対する防護をより万全にし、失われる資産を最小限化するために、信頼性向上技術の不断の研究と技術開発が求められる。

表は、以上を一覧表にまとめたものである。本章では特に時間依存型の性能劣化に高い関心があるので、その点を強調してある。

II 製品・社会インフラの性能劣化

本章はマテリアルの性能劣化に主な焦点を当てているが、製品や構造物の専門領域では、それらの性能劣化はどのように理解されているのだろうか。マテリアルは構造材料、機能材料問わず、性能劣化する潜在的可能性を持っていることは既に述べたので、製品や社会インフラの性能劣化は当然起こることになる。

そこで本節では、製品の性能劣化については、独立行政法人製品評価技術基盤機構（NITE）の製品安全分野による「製品事故に関する情報を調査、分析し、再発防止やリスクの低い製品開発に向けて必要な情報を発信」⁽¹⁵⁾する事業を参考に概観し、社会インフラの老朽化については、著者らの過去の調査結果を題材に概観したい。

1 製品の性能劣化

製品の故障率を「つかう期間」の関数で表した「バスタブ曲線⁽¹⁶⁾」（図6上）が有名である。これは同じ型番の製品が多数社会に出回っている状況において、故障報告の統計的比率の変化を示している。

「初期故障期間」では、最初高い故障率が急速に低下する。これは性能が規格に十分達しない不良部品が主たる原因の故障を意味すると見られ、不良部品を交換することで製品は正常な機能を発揮するようになり、全体の故障率も低下していく。

しかし、故障率は0%とはならない。この期間を「偶発故障期間」と名付けているように、想定されている上限の「つかう条件」（定格）を超えて使われることで、部品等が確率的に故障に至ることを意味すると思われる。

最後の「摩耗故障期間」というのは、元々想定されていた部品性能の劣化によるもので、本章の性能劣化と通じる現象だと考えられる。

図6下は、NITEなどで使われる部品の性能劣化モデル⁽¹⁷⁾である。初期性能を100%とする。これによると「つかう期間」の初期から部品性能は劣化し始めるものとされている。「つかう期間」の当初は、劣化速度は小さいが徐々に大きくなっていく。ついには「0%」となる。

故障発生までの期間（最短期間を採るか、統計的に平均期間を採るかは場合によるのではな

(15) 「製品安全」製品評価技術基盤機構ウェブサイト <<https://www.nite.go.jp/jiko/>>

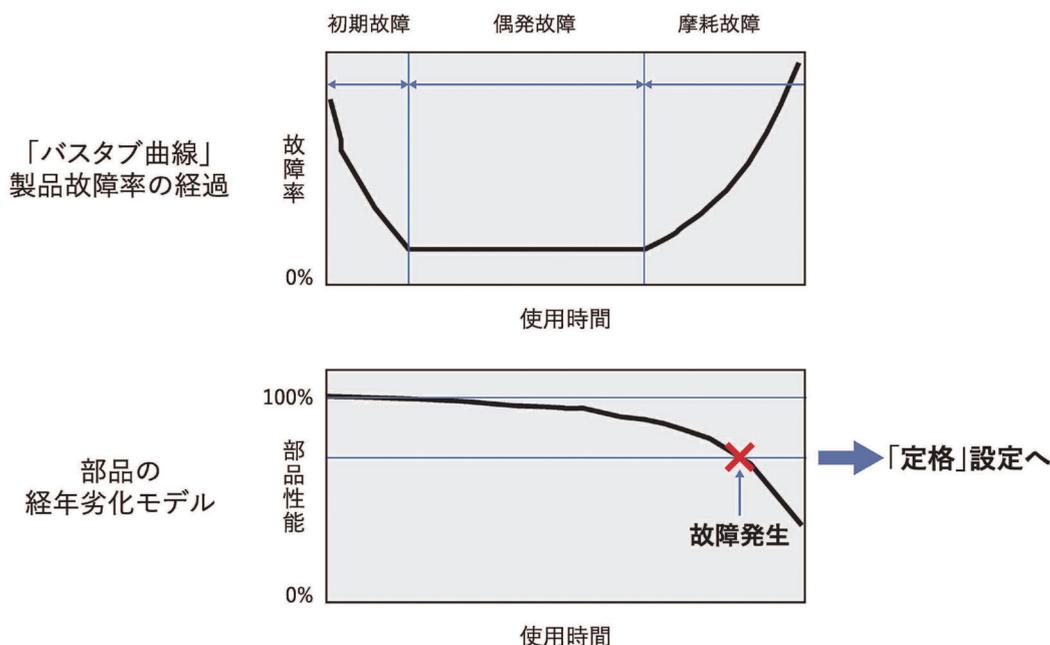
(16) 「バスタブ曲線」「故障率」「故障期間」などの用語は、既に紹介した JIS Z 8115:2019『ディペンダビリティ（総合信頼性）用語』に掲載されている。次の文献も参照のこと。渡部利範「電気製品における製品寿命の設計思想」『安全工学』55巻2号, 2016, pp.93-100.

(17) 例えば、小田泰由「経年劣化事故防止に向けた事故情報の整理と活用について」（平成24年度製品安全センター製品安全業務報告会資料）製品評価技術基盤機構ウェブサイト <<https://www.nite.go.jp/data/000005687.pdf>>

いか。) から、部品性能を使用しながら実測できる場合、一定の余裕を持って、故障前に部品を取り替えるタイミングを定めることができる。又は、使用可能期間（寿命期間）をやはり余裕を持って定めて使用者への取替えの目安として提示することができる。

図6 製品の故障率と部品性能劣化の時間依存モデル

製品の故障—部品の経年劣化を実験で確かめるしかない



(注) 上段：故障率（初期値は通常 1% 以下）の時間変化（「バスタブ曲線」、下段：部品性能の時間変化（初期値を 100% とする。）。

(出典) 「製品安全」製品評価技術基盤機構ウェブサイト <<https://www.nite.go.jp/jiko/>>; 渡部利範「電気製品における製品寿命の設計思想」『安全工学』55 巻 2 号, 2016, pp.93-100 を基に筆者作成。

以上から製品安全設計のためには、

- ・ 各部品の性能の時間変化、性能寿命を十分検証する
- ・ 余裕度を精確に理解し、適切な取替えなどにより、使用中での部品故障率を減少させる
- ・ 製品故障に付随する危害を減少させる

などが不可欠と導かれている。

寿命の十分な検証は、机上の話では対応できない。製品若しくは部品の寿命試験を再現性の良い方法で実施すること、統計的に十分な確度を得られるように重複試験を行うことなどがどうしても必要になる。危害防止も実地実験を行って確かめないと説得力がない。寿命試験、実地試験が大事になるのは、マテリアルと全く同じである。

また、部品の故障率を減少させるためには、マテリアル科学が貢献しなければならない点が多々あるはずである。この点でも、マテリアル側（「つくる」側）と製品側（「つかう」側）が協力しあうべき余地は極めて大きいと思われる。

2 社会インフラの老朽化

社会や生活を支える公共的な基盤や仕組みを意味する社会インフラの老朽化が叫ばれて久しい。老朽化は言葉としては単に年数を経たことを意味するだけでなく、性能劣化を含意する。社会インフラの性能劣化には既に述べた時間依存型の自然現象が多く関係する。性能劣化による被害規模は、要因別に集計すると、それぞれの要因ごとに国民総生産の1%オーダーに相当すると計算されている。それらを加算すると全体としては極めて大きな数字になる。したがって、それぞれの性能劣化の最小化のための中長期的で継続的な取組が必要である。

また、対応策が適切かどうかは被害事例から正しく学ぶのが現実的である。例えば、阪神・淡路大震災の際の高速道路橋脚の破壊例を検討して、腰に巻いているフープ筋の破断は、その設定強度が地震力による負荷に対しては十分でなかったためと判断された。さらに、縦方向の単純な破断は、設置工事に瑕疵（かし）がなければ、縦方向の引張力の想定最大値（設計基準値）が十分ではなかったためなどと、壊れ方を見て反省できる。このような反省事例は社会的に共有され、多面的に検証された後、補修や建築の設計・施工基準に反映されていく。

社会インフラは、公共的政策的事業と密接に関わる。また、規模が大きいためマテリアルを含む様々な産業が絡んでくる。総合的な対応策の長期的な方向性が大事になる。

一般に、政府や公的企業が行う機械設備、建築物などの投資である公的固定資本形成は「住宅」、「その他の建物・構築物」、「機械・設備」、「防衛装備品」、「知的財産生産物」に分類されるが、その7割程度は「その他の建物・構築物」、具体的には社会インフラ対応、と見てよいので、社会インフラへの投資規模が大きいことが分かる。

筆者らが、まず1997年に予測し、ほぼ20年後の2015年に予測を自己検証した結果⁽¹⁸⁾では、1997年では、公的な純固定資産の年々の増加量は鈍化しながらも徐々に増加すると推測したところ、2015年検証では純固定資産は増えていないことが分かった。純固定資産の伸び率は年々下がりゼロ近くなっていた。

さらに、1997年では、それまでに設置した社会インフラの老朽化に伴い、維持補修・更新の費用が増えていくのは必然で、その合計が公共投資計画額を超えそのまま推移すると、数字上は新規投入は無理で更新すらも難しくなると推測した。2015年検証では実際の投資総額は1997年がピークで、その後急激に減っていたことが分かった⁽¹⁹⁾。そうすると、全体観としては、数字的には社会インフラは維持補修対策費のみで、更新も新規も無理というより厳しい状況になっている。このような投資状況では、維持しなくてはならないと判断された既存設備について、年次計画的にユニットごとに「維持補修」することで性能を回復（できれば高機能化）し続け、一巡の年次計画で実質「更新」するような持続性のある対応が合理的になるだろう。

社会インフラへの投資変化は21世紀におけるマテリアル生産にも少なからぬ影響を及ぼしている。社会インフラ需要の大きいマテリアル（鉄、セメント、プラスチック）のうち、鉄（粗鋼）生産については、先の文献での1997年予測では、生産量に大きな変化はないとした。2015年での検証では、その予測はほぼ当たっていたので違和感が残る。鉄スクラップ発生量が年次的に増えていくと予想したが、それを大きく下回った。さらに、それまでは輸入品だった鉄ス

(18) 長井寿・堤直人「新世紀構造材料—超鉄鋼（第2回）超鉄鋼の夢の追求と老朽化大国への応用」『金属』85巻9号, 2015.9, pp.745-751.

(19) 「経済動向とインフラ整備」『平成27年度国土交通白書』2016, p.33. <<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h27/hakusho/h28/pdf/np101200.pdf>>

クラップが輸出品に転換したことが分かった。そうすると、鉄鋼の備蓄量が年々増えていくという予測も大きく外れ、逆に毎年の備蓄追加量が年々減って、備蓄量が増加せずに「飽和」的に推移するようになっていく。これは前述の純固定資産の伸び率がゼロになったことによく対応している。純内需からすると数字上、鉄は「余って」いることになる。

セメントでは、輸出入統計にはあまり大きな変化がなく、単純に生産量が21世紀初頭にピークを持って、その後減少しピーク時に比べてほぼ半減している。社会インフラ内需の減少をそのまま反映していることになる。

プラスチックはどうか。生産量は2000年代には少なくなっているが、鉄やセメントほどの大きな変動はない。すなわち、様々な新規用途開発が働いて生産量が維持されていると推測される。

近年、廃墟（はいきょ）資産や座礁資産という社会問題が表面化してきている。廃墟資産は、原因は多様だが、所有者が利用せずに「廃墟」となる資産をいい、比較的身近な話題になっている。座礁資産（Stranded Assets）⁽²⁰⁾は、まだ耳慣れないかもしれないが、気候変動、水資源制約、シェールガスなどの新たな資源、炭素税などの新たな政府の法規制、エネルギーコストの低下や、社会規範や法解釈の変化などによって、突然、資産価値を失うことである。例えばG7で石炭火力発電所を使わないと決めると、発電所は持てる施設機能がそのままなのに「使えない」資産になる。

このようにマテリアル生産への影響は大きい。全体として社会インフラ需要は大幅に低減している。そうすると社会インフラの老朽化進行とともに、新規マテリアルの投入よりは、マテリアル再利用がより重要性を増すだろう。理想的には資源再利用によって、上記の「維持補修」に対応できることが期待される。鉄スクラップの輸出はそれ自体には経済合理性があるのだろうが、持続可能性、経済安全保障などの観点から見ると、意外と言わざるを得ない。発生するスクラップを国内資源として、国内での消費を推進していくことが期待される。また、マテリアル科学も、むしろ高機能化して再利用する方策を探るなど、新しい挑戦課題を見いだしていくことに意義がある。

以上から、安全・安心で持続可能な社会インフラの整備を継続的に進めるという目標から導かれる課題は以下のようなことになる。

- ・ インフラ寿命を延ばす意義は大きい。したがって、延命に比例して、種々の構造物の信頼性を更に高める基礎・基盤の強化が期待される。
- ・ 「メンテナンスフリー」は理念としては良いが、現実的には無意味である。維持補修のためのコストを更に減じるための技術開発に継続的に取り組むことが適切である。同時に、永続性のある保全体制を構築するために、人材確保を含む長期戦略を持つことが求められる。伊勢神宮の「式年遷宮」のような、先人から受け継がれた日本的な仕組みも参考になる。
- ・ 人口減が顕著な地方では、生活インフラ（電気、上下水道、ガス・灯油、電話など）を電線やパイプのネットワークで供給し続けるか、それともそれぞれ分離自立型技術で置換するかが、現実的な課題になっている。また、現在使われている道路、橋梁などの社

(20) 「座礁資産（Stranded Asset）」2016.5.22. Sustainable Japan ウェブサイト <<https://sustainablejapan.jp/2016/05/22/strandedasset/18377>>

会インフラを維持するか、閉鎖するかも住民の間で検討課題になっている。これらの課題に、マテリアル科学の適切な貢献が期待される。

- ・ 廃墟資産及び座礁資産の発生は、それ自体が大きな資産損失を意味する。廃墟資産、座礁資産を出現させない長期的な展望を持ち、せつかく作った資産をやすやす失わないようにする諸策が求められる。

このような諸課題もマテリアル科学独りが責任を負うべきものではなく、他分野と連携していくのが当然である。また、いずれの課題を見ても、マテリアル側と製品側、つまり「つくる」側と「つかう側」が連携すべき余地は極めて大きい。

Ⅲ 時間依存型信頼性との対峙（たいじ）

実は、我が国には、マテリアル側と製品側が産学官の壁も越えて連携してきた成功例が幾つもある。著者が調査した事例⁽²¹⁾の一部を本節では紹介する。

我が国には信頼性研究の力を蓄えるための長い助走がある。明治期、産業振興とアカデミアの確立が並行して進み、1879年の日本工学会設立を皮切りに、分野別の学会が大体1960年ぐらいいままでに揃い、その後も更に工学系の学会が増えた。大学や官立研究機関も徐々に整備されていった。産業規格も漸次整備された。その結果、信頼性研究の基礎・基盤は1950年代にほぼ整ったと見ることができる。その後、21世紀初頭頃には、産業規格は時代の進歩に合わせて既定のものを適宜改定しながら必要な新規規格を制定する成熟期に達した。長い年月をかけながら、既に伝統的となったこれらの技術・学術分野では、長期的視野で見れば大きな蓄積の上に大きな飛躍を生み出し続けているとすることができる。

マテリアルには様々な時間依存型の信頼性試験があるが、ここでは代表的な二つの例に絞って紹介する。

1 高サイクル疲労試験

高サイクル疲労試験は、試験片破損までの負荷パターンの繰返し回数を数えるという意味で時間依存型の破損である。負荷が材料内部に蓄積若しくは作用し、き裂が発生し、成長、破損に至ると整理されてきた。

金属が繰返し荷重を受けると静的破断荷重よりはるかに小さい荷重で破損することを西欧の現場技術者たちは早くから知っていたようだ。鉄道建設が進むにつれ、機関車の車軸の疲労問題が非常に重要になった。例えば、7万km走行すると鉄道の車軸の断面急変部、特に鋭い凹角部に小さなき裂が現われる傾向があるので、7万km走ったら車軸を注意深く調べるように勧めていたという。

外観は良好な車軸が何年か使用の後、予期せず破損するのは、鍛鉄の繊維組織が次第に結晶構造状態になるからだとして当時の学者から説明されていた。だが現場の技師たちはこの理論に同意できなかった。例えば長く使った軸を観察しても金属の内部構造には変化はなかった。むしろ

(21) 長井寿「鉄鋼の信頼性向上技術の系統化調査」『国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第32集』国立科学博物館, 2023, pp.235-318.

ろ車軸の形状が決定的という気付きが生まれていたようだが、「繊維性から結晶性への遷移」説も根強く残り、19世紀後半から各国の機械学会での主要な議論テーマになった。

我が国では戦前から多くの疲労研究があるが、戦前の試験機には精度に難があった⁽²²⁾。1940年前後から欧米の知見も正しく理解され、データ整理も急速に進んだが、統一試験法がなかったため、出所の違うデータの比較が意味を成さなかった。

戦後、まず試験法の統一に向けて産学連携で動き出した。日本材料学会疲労部門委員会⁽²³⁾は、1962年に「工業技術院より日本材料学会に疲労試験方法のJIS規格原案作成が委託され」ており、その原案が「日本材料学会規格」を母体としていることを紹介している。「日本材料学会規格」の作成の際に、ドイツ、イギリスの関係規格を参考にしようとしたが、十分な参考とはならなかったため、審議、試験を繰り返して、独自の成案を得た。疲労試験法のJIS規格が成立したのは1974年で、その後、広く定着している。

疲労強度（特に疲労限、これ以上繰り返しても疲労破壊しない最大の疲労強度）には、金属学的因子、形状寸法因子、環境条件など多くの因子が関わっていると認識されていたが、それぞれの因子の影響を絞り切れなかった。各所で取得、蓄積されていた膨大なデータからも、有効な知見を導き出せなかった。そこで、同一起源の試験材料について標準試験法に基づいた疲労試験の実施からデータ整理までを、単一の試験機関で行い、全ての関係者が共有できる「試験データ」を得ることとした。試験機関には当時の金属材料技術研究所（現在の物質・材料研究機構の前身の一つ。以下「金材技研」という。）が選ばれ、「金材技研疲れデータシート事業」⁽²⁴⁾が開始された。

(1) 前期の疲労データシート（1974～1995年）

計85冊の疲労データシートが出版された。ほかに類例のない分量の試験データベースであり、国産実用金属材料の疲労特性基準データとなった。同じ試験条件で行ったので、試験法の違いによるばらつきがない。同じ規格で相当数のサンプリング（10程度）を行ったので、試験片準備条件の偏りが少ない。そこから、極めて貴重な基本的な知見が得られた。

当初、リンや硫黄などの不純物の影響を見るために製造番号の異なるサンプリングを意図的に行ったが、試験の結果、疲労限に不純物の影響がないことが明らかになった。疲労限の支配因子が第一には静的な強度であることが示された。さらに、金属組織の種類の違いの影響が明白になった。言葉にすると大したことのないような印象を受けるかもしれないが、幾つもの影響因子が考えられてきた濃い霧の中で、確実な羅針盤を得たような力強い意味がある。

(2) 後期の疲労データシート（1997年以降）

前期は基本的には当初の計画を完遂して終了した。一旦「冷却期間」を置き、人員、投入できる予算などの減少を十分認識したが、本事業の貴重さをなるべく継承すべく、従来のサブテーマを堅持しながら、打切繰返し数を1桁から2桁延長して、より長時間の疲労データ取得

(22) 疲労部門委員会「疲労試験機」『材料試験』3巻13号, 1954.4, pp.154-164.

(23) 日本材料学会疲労部門委員会「日本材料学会疲労試験方法規格および同規格解説について」『材料』12巻115号, 1963.4, pp.250-255.

(24) 科学技術庁金属材料技術研究所疲れ試験部編『国産実用金属材料の疲れデータシート no.0』金属材料技術研究所, 1978.

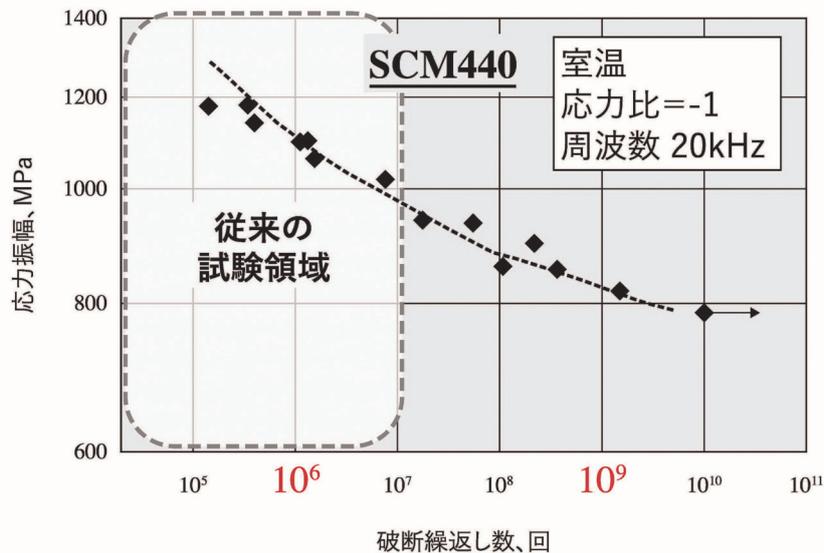
を目指して継続することにした。素材の疲労試験では 10^8 回を 10^{10} 回まで、溶接継手の疲労試験では 10^7 回を 10^8 回へ、素材の高温での疲労試験では、 10^4 回から 10^6 回へ延長した。この計画変更後も順調に疲労データシートを出版している。

長期疲労に着目したのは、様々な用途でより長期での使用が求められるようになったこともあるが、疲労限が $10^6 \sim 10^7$ 回で現れるという「常識」が必ずしも成り立たず、ばね鋼等の高強度鋼では 10^8 回でも疲労限に達しないという事例が多く認識されるようになっていたことなどが背景にある。疲労限の有無の検証は実験でしか得られない。

だが、長期疲労に挑戦するためには、試験の「加速」なしには難しい。超高速を実現する超音波疲労試験法を開発した。当然ながら、従来方法による試験結果の十分な再現ができるかの検証を行って実施された（図7）。

図7 SCM440 鋼の 10^9 回～ 10^{10} 回までの S-N 線図

マテリアルの経年劣化—長時間試験で確かめるしかない



(注) 今までは、従来の試験領域の 10^6 回～ 10^7 回までで十分とされてきた。点線は周波数 20kHz 未満での試験結果をなぞったもの。

(出典) Yoshiyuki Furuya et al., “Catalogue of NIMS fatigue data sheets,” *Science and Technology of Advanced Materials*, vol.20, 2019, pp.1055-1072. <<https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1680574>> を基に筆者作成。

破断繰返し数を 4 桁近く増やしたこの図7は重要なことを教えている。一つは、試験周波数を 20kHz に変えても一つの S-N 線図⁽²⁵⁾となり、周波数依存性はなく、20kHz 試験が妥当であることを示している。また、この高強度鋼では 10^{10} 回に至っても「疲労限」に明白に達しているとは言えないことも示している。

疲労破壊に強い材料設計については、経験的に様々な知見が述べられているが、以上のような新しい知見に鑑みれば、それらの原理的合理的説明については従来のものが完全でないと言

(25) “Stress-Number of cycles to failure” を略した世界共通用語。縦軸に繰返し応力の振幅、横軸に破断までの繰返し数をとると、試験結果を一本の曲線で整理できる。

わざるを得ない。今後は、検討する合金種を拡大することによって、 $10^{10} \sim 10^{11}$ 回までの若しくはそれ以上の繰返し数領域での疲労破壊メカニズムを総合的にかつ合理的に説明できるようになることが期待される。

軽装備となった超音波疲労試験機⁽²⁶⁾を普及すればプラットフォームの意味はなくなるようにも見える。しかしながら、設計基準の参考となるデータの蓄積はオールジャパン体制による第三者的な権威付けが大事である。オールジャパン体制は、しかるべき資源の投入は当然だが、技術的にも学術的にも、より広い関心を集めないと充実しない。専門分野を越えた協力としては、例えばデータ科学、計算科学との交流や新しい計測手段の活用を進めるのはもちろんだが、それにとどまらず、今まで密接な付き合いがなかった他の種類のマテリアル関係者の参加などにより、新しい地平を切り開いていくと新しい可能性を生みやすい。

2 高温クリープ試験

発電プラント、化学プラントや種々のエンジンなどでは、マテリアルを高温に晒して使う場面が多い。そのような高温下におけるマテリアルの耐久性を調べるために高温クリープ試験を行う。「クリープ」は「変形がゆっくり進む」ことを表した用語（かつて「匍匐（ほふく）試験」と称していた。）で、長時間の試験となる。ある試験温度で、負荷荷重と破断までの時間（対数）の関係を整理すると一本の曲線（短時間側ではほぼ直線）になる。

高温クリープ試験は通常大気中で実施される。この環境では一般の鉄鋼は否応なく表面から酸化されて、金属部は表面から徐々に失われていくが、高温材料は耐酸化性を高めてあるので損耗は軽微である。不活性雰囲気での試験も有意義だが、実環境模擬という点では大気中試験を優先している。大気温度と流れ（風）の変動は、試験温度の擾乱（じょうらん）の原因となるので大気変動はできる限り抑制しなくてはならない。このように、高温クリープ試験はそれ自体が「複雑系」現象であることをあらかじめ断っておく。

高温材料は、運転の設計温度をできるだけ高くしたい、設計温度で設計応力をできるだけ高くしたい狙いがある。設計温度を高めることは熱効率の向上、設計応力を高めることはパイプや容器の肉厚の削減に結び付く。

高温クリープは負荷をかけ続けるので正しく時間依存型の破断試験である。負荷による作用によって破断に至ると考えられている。

戦後間もなく、国際入札に参加しようとしたら「長時間実験データ」が付いていないので入札参加資格自体を与えられなかった体験が、このような実験に本腰を入れる決意を固めさせたという逸話⁽²⁷⁾も残っている。

(1) ナショナルセンターを目指した民間主体の活動

戦前から多数の研究があったが、残念ながら国レベルで総合的に取りまとめた権威のあるデータはなかった。上述のように、国際市場に耐熱材料を持ち込むためには長時間データを付けないと相手にされなかった。そこで、1960年に通商産業省工業技術院の要望もあり、日本

(26) 松浦融「超音波利用技術を知る 超音波疲労試験機によるギガサイクル疲労試験」『軽金属』68巻6号, 2018, pp.316-320.

(27) 「ただいま研究中 メタルの寿命試験 金属材料技術研究所」『北海道新聞』1967.1.11.

鉄鋼協会内に「鉄鋼技術開発研究会」クリープ部会を、まずは鉄鋼メーカーの八幡製鐵、富士製鐵、日本鋼管、川崎製鐵、住友金属工業、神戸製鋼所、日本製鋼所、日本特殊鋼の8社で作成、共同研究を開始した⁽²⁸⁾。共同研究はクリープ試験機の標準化、クリープ試験法の確立を目的とした。東北大学金属研究所、日本学術振興会、日本材料試験協会などの協力も得た。将来に「クリープセンター」の実現を期し、その基礎を築こうとするものだった。

共同研究が進むにつれ、速やかに国家的権威ある組織を望む要望が強まった。1961年に前記8社が発起人となり、日立製作所、東京芝浦電気、川崎重工業、日立金属工業、新三菱重工業、いすゞ自動車、三菱製鋼、三菱鋼材、特殊製鋼所、大同製鋼、太平金属、八幡鋼管、島津製作所、東京衡機製造所の14社が新たに加わり、オールジャパンの「クリープ試験技術研究組合」を設立した⁽²⁹⁾。

1963年、組合内に「クリープセンター設立準備委員会」を置き、各学会、団体、火力関係などに働きかけた。折しも科学技術庁が1964年度の予算で、金材技研に材料試験所を設立する計画があるという動きに対応し、1963年、理事長名をもって設置要望書を科技庁、大蔵省に提出した。予算が成立し、世界的にも有数の試験所が実現することになった。

1964年からクリープ試験関係の整備に着手し、1968年に完成した。試験設備の規模は世界的に見て最大級・最高水準のものだった。

(2) データ取得の実績 (2011年まで)

大場敏夫ら⁽³⁰⁾は、2011年までの実績として、

- ・ 試験数：67の材種、370の製造番号、引張試験を含めて約15,000本。うち、10万時間以上が734本、20万時間以上が125本、30万時間以上が18本。最長時間は14,853日（＝約40年8か月）を超え、それまでの世界最長の356,463時間（ドイツ・ジューメンス社）を上回った。積算試験時間は年換算で約3億年に及ぶ。
- ・ データシートの発行：延べで143冊が発行されており、当初は印刷版配布だったが、現在ではデジタル版がインターネットで公開されている。
- ・ 試験設備：総台数998台、実施可能試験片本数3,106本。うち、1台の試験機に1本のみ装着する単式試験機は874台（874本）で、クリープ変形の計測と破断試験の両方が可能。その他は複式試験機で、1台に複数本の試験機を装着できるが、破断試験のみで、クリープ変形は計測不能。いずれも独自の試験機規格を設けて管理している。つくば地区への移転では、単式試験機を500台に集約した。東京地区で試験中の試験片を除荷し、室温まで冷却する中断措置を施した上で、つくばに移設した試験機に試験片を取り付け直し、所定の温度に再加熱した後、負荷し直し、試験を継続している。
- ・ 温度測定：白金・白金ロジウム熱電対⁽³¹⁾で温度監視している。当初、氷零接点使用、起電力の定時アナログ計測などだったが、現在では電子冷却式零度基準接点（精度：0±0.06℃）、1日2回のデジタル自動計測、データ保存となっている。

(28) 俵信次「クリープ研究組合の現状」『鉄と鋼』51巻1号, 1965.1, pp.99-100.

(29) 同上

(30) 大場敏夫ほか「クリープデータシート」『金属』81巻12号, 2011.12, pp.1006-1015.

(31) 熱電対（ねつでんつい）は、2種類の金属線の先端同士の接合点に発生する熱起電力を通じて温度差を測定し、摂氏零度で温度補償して、接合点の温度を測る線状センサー。

- ・ 熱電対校正：約 3,000 対の熱電対を温度標準の国際的トレーサビリティを基準として、校正精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内とし、試験温度は JIS 規格の許容範囲の 1/2 以内の厳しい温度制御を実施している。
- ・ 試験材の選択基準：①国産材料である、②原則として市販材、③複数社で製造されている、④製造実績がある、⑤高温装置・機器用材料として、一般に使用されている規格材、⑥近い将来使用され、かつ重要であると判断される材料（開発中は除く。）。産官学の有識者から成る委員会で審議されている。
- ・ 試験手順：マニュアル化されており、また計測法などの改善に伴い適宜見直しされている⁽³²⁾。

を挙げている。

(3) 主だった研究成果

Kota Sawada ら⁽³³⁾は、50 年に及ぶ事業において蓄積し、得られた知見を以下のようにまとめている。

- ・ 長時間側強度が短時間側強度からの外挿から外れる度合いは鋼種による。
- ・ 同一鋼種でも製造番号による差は生じるが、その度合いも鋼種による。化学成分、粒径、微量元素などの影響を考慮していく必要がある。
- ・ フェライト系耐熱鋼⁽³⁴⁾では、超長時間での「基底（固有）クリープ（破断）強度」があり、その強度が微量の合金元素が鉄に溶け込んで鉄を強化する「固溶強化」と関係している。
- ・ クリープ変形挙動は、クリープ中に析出現象が起きると極めて複雑な変化を示す。この影響は、低合金鋼⁽³⁵⁾やオーステナイト系ステンレス鋼で顕著になる。
- ・ 焼戻しマルテンサイト⁽³⁶⁾を試験前の金属組織とするフェライト系耐熱鋼における長時間側のクリープ強度の判定法として、「領域分割法」と名付けた新しい考え方を提案した。

オールジャパン体制の堅持には、しかるべき資源を投じ続けられない限り、継続は難しい。より効率的効果的に推進する工夫が常に求められる。さらに、専門分野を越えたより幅広い参画を呼び込むことも大事である。例えば、ほかの専門分野である、データ科学、計算科学や新しい計測手段の活用を通じて、新しいより高い地平を切り開いていく必要がある。また、ニーズが高い新しい対象（材料、環境など）を試験対象に加えていくことも大事である。

(32) 『金材技研材料強度データシート資料 10（金属材料技術研究所クリープデータシート作成の試験計画と試験技術）』 科学技術庁金属材料技術研究所材料試験事務所, 1996.

(33) Kota Sawada et al., “Catalog of NIMS creep data sheets,” *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol.20 No.1, 2019, pp.1131-1149. <<https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1697616>>

(34) 鉄鋼には結晶構造の違いによる分類がある。低温側安定構造の体心立方構造をとるものを「フェライト系」、高温側安定構造の面心立方構造をとるものを「オーステナイト系」と呼んで区別する。高温材料である耐熱鋼にも両方がある。一般的に前者より後者を高温側で使う。

(35) 炭素鋼に一つまたは数種の合金元素を添加して種々の目的に適合するようにした鋼を合金鋼という。合金元素の総量が 5%（重量）以下のものを低合金鋼とする。

(36) 鉄鋼を一旦高温に加熱して「オーステナイト」にし、急速に冷却すると硬くなり、その金属組織を「マルテンサイト」と呼んでいる。そのままでは硬すぎてろいので、「焼戻し」という加熱処理をしてもろさを除く。

IV 未来への選択肢—「つくる側」と「つかう側」のギャップを埋める—

マテリアルには「つくる側」「つかう側」の違ったフェーズがある。このフェーズの違いは、関与する産業の分業化や信頼性との関係性の強さの落差を生む。分業には、社会的経済的合理性があり、そこにメスを入れる必要はない。落差を解消するためには、「つくる側」と「つかう側」の円滑連携が鍵になる。信頼性に関する認識を「つくる側」と「つかう側」が共有し、認識の落差をむしろ新しい発展の契機にするのが好ましい。

1 「つくる側」と「つかう側」のギャップを埋めるためのマテリアル科学の展開

信頼性は、「アイテムが、与えられた条件の下で、与えられた期間、故障せずに要求どおりに遂行できる能力」と定義されているように、「つかう側」は避けて通れないが、「つくる側」は提供責任を満たしているとして、傍観者の立場に陥りやすい。

しかし、本章で明らかにしたように、製品の信頼性を揺るがす性能劣化の深因がマテリアルの「つかい方」だけでなくマテリアルそのものの性能劣化にあるので、「つくる側」が無関心ではいけない。マテリアル科学は性能劣化を真正面から捉える立場に立つ必要がある。

性能劣化を真正面から捉えることにマテリアル科学に軛（くびき）があるのか。マテリアル科学の立場から言えば、プラス、マイナスの特性は、いずれも「四面体」理念から記述できることを明らかにした。マテリアル科学は、今まではどちらかと言えばプラス面に軸足を置きがちだったが、マイナス面を含めて認識すれば、支配法則のより包括的でより正確な理解を得ることができる。ここにマテリアル科学が性能劣化にきちんとした関心を払う学術的な意義がある。

性能劣化には、一時的な現象もあるが、多くの時間依存型の現象がある。ところが、「四面体」理念には時間軸がないので、時間依存型の性能劣化を捉えるには有効とは言えない。また、「つかう側」は多面的な性能の理解を求めるが、「四面体」理念はどちらかと言えば、単一性能の説明にこそ効力を持つという弱点もある。これらの弱点をマテリアル科学は自ら解消しなくてはならない。

更に冷静に考え直せば、マテリアルに係る時間には、使用以前には製造（原料採取を含む。）の過程、使用以後には廃棄若しくは再利用という過程があることも見落とさず、入れ込む必要がある。

したがって、信頼性は今のところ使用段階を重視しているが、今後は、全生涯にこの考え方を適用し、拡張していくことが好ましい。「四面体」理念も、資源・エネルギー利用、資源循環ともつなげていく理念に発展するのが好ましい。

- ・ マテリアルは、製造—使用—廃棄の生涯を持つ。
- ・ 製造には、そのための設備と物質（原料、資源）とエネルギーが必要で、副産物も発生する。
- ・ 使用には利用のためのエネルギーが必要で、性能を保持するためにメンテナンスを行うが、そのためにも物質、エネルギーが必要で、不要物の発生もある。
- ・ 使用物質を再利用化、再資源化する場合にも、そのための設備とエネルギーが必要である。埋立処理する場合には、そのための用地とエネルギーが必要である。

最終的には、それぞれのフェーズにおいて、期待される品質や性能が組み込まれたり、損な

われたりすることが、一般常識として理解されるようになることが望ましい。したがって、「性能」は「下限界以上である」ことが要求され、「補修等による性能回復が許容される」という内容を定義に含意されるようにするのが良い。

さて、「四面体」理念は、特に底面三角形は論理性が基本なので、DXとのなじみが良い。更に信頼性や性能に関しては多岐にわたる膨大な実験データが既に取得、蓄積されている。今後ますますデータ取得とデータ蓄積が進む分野であり、DXを取り込みやすく、その必要性も高い。

マテリアル科学は、学術分野を従来の枠に閉じこもらず、近年伸長の著しい、数値シミュレーション、データ科学などの、他分野の研究者との連携を先導して発展させて、新しい学術領域を築き上げていくことが強く期待される。

このように、「四面体」理念の根幹を堅持し、そこに「時間軸」「資源軸」を取り込んで、周辺の諸科学との交流を活発化させれば、マテリアル科学としての信頼性研究もかつてない高い段階に発展していくことができるだろうし、ここに我が国の優位性を示すことが展望される。

安全・安心で持続可能な社会を作り上げて、ウェルビーイングを向上させていくためには、必要度の高い信頼性課題の研究を長期的な視点で推進できる体制の再構築が必要になっている。それには、産業側からは解決が望まれる課題を具体的に提示し、研究者側がそれらを解決する新しい発想や方案を提案し、両者が一緒になって議論し、合意に達した実験計画を実施し、その結果から解決策を探っていく、粘り強い場の構築がまず期待される。

コラム 「つかう側」の要求が、「つくる側」の技術・科学を成長させる

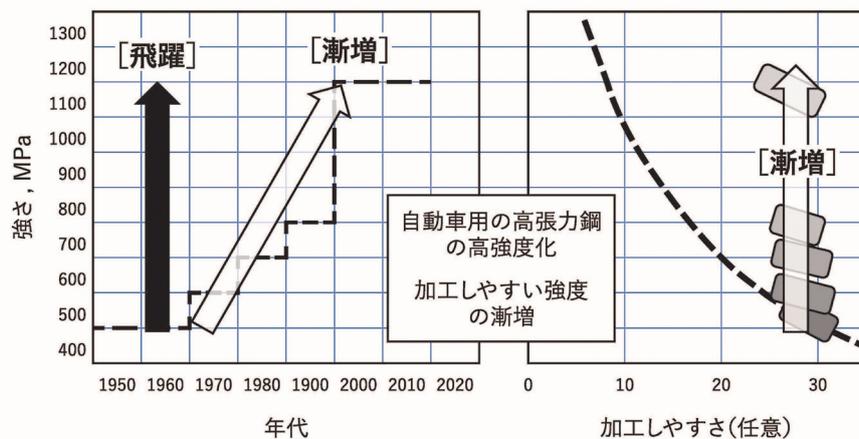
「つくる側」のマテリアル科学の教科書は、「強くすると加工限界は低下する」という経験値をそのまま書いている。ところが、「つかう側」は、自動車用鋼板に「より強く、しかもより加工限界が高い」ものを求めてきた。これは、教科書と真っ向から矛盾する。

そこで、「つくる側」は引張試験の結果から、「高強度で、加工限界が高そうな」ものを選び、試験材として「つかう側」に提供し続けた。「つかう側」は試験材に加工試験を実施した。高い「加工応力」は好ましくないが、加工できてしまえば、加工応力の最高値までの負荷に耐えることに気付いた。すなわち、加工によって高強度になっているわけだ。「つくる側」は、思いどおりの「加工」ができて、その結果「強く」なるものを選んだことになる。

この試行錯誤の挑戦が実を結び、約10年間隔で「より強く、より加工限界が高い」ものが漸増的に次々と開発されてきた（「漸増性」の代表例：図A）。今のところ、「より強く、より加工限界が高い」ことに限界があるようには見えず、漸増が蓄積し、最高強さを30年間で3倍くらいまでに「飛躍」させている。このように、新素材の開発は矛盾克服の歴史で、矛盾があるからこそ成長できるとも言える。

ところが、マテリアル科学の教科書は面目を失ったままである。正しく「指導原理」を与えていたのなら、このようなことは起きるはずがない。マテリアル科学には、有効な指導原理を見出す課題が残されている。おそらく具体的には、「強さ」と「加工限界」が、何らかの明確な関係性を持たず、基本的には「独立」関係にあることから、様々な関係が生み出されると説明することになろう。それができれば、「つくる側」の「指導原理」に縛られず、「つかう側」の要求に応えることが、技術及び科学の発展の推進力となっている好例となる。

図A 漸増性を継続することで、使える高強度上昇を実現する



(出典) 筆者作成。

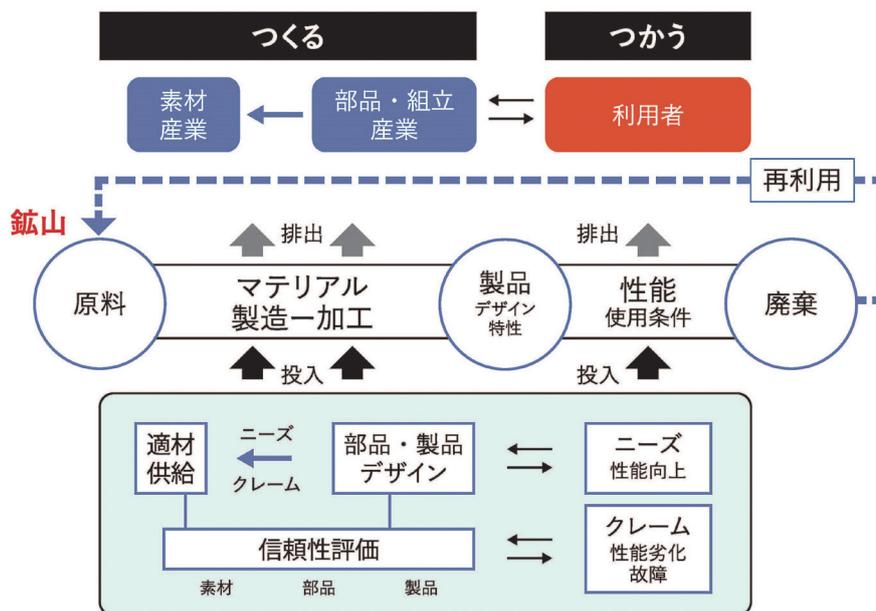
マテリアルの信頼性向上のためには、学術分野としては力学（材料力学、破壊力学）とマテリアル科学の連携が不可欠なことが経験知になっている。これを合わせると、産業—力学—マテリアル科学の連携三角形が不可欠となる。現状では、マテリアルを「つくる側」と「つかう側」の交流は希薄になりがちである。その課題克服には以下のような対策が考えられる（図8）。その基本理念と課題は、次のようになる。

- ・ 「四面体」理念に時間軸と資源軸を加え、物質と関連情報の循環と共有を前提に置く
- ・ より良い製品、部品、マテリアルを目指すために、新技術開発に加えて、「信頼性評価」を共有する
- ・ 研究者の自発的自覚的活動を起爆剤に使う配慮をする

学術面から見た課題、展望は既に述べた。技術的には

- ・ マテリアルの機能を「漸増的」であっても改善し続ける
- ・ その際に、上記のDXの成果をいち早く還元する
- ・ 国際的に、資源の無駄遣いを減らし、有効な利用を進めていく
- ・ 再生マテリアルの性能の向上を追求する（アップサイクルまでも展望する）
- ・ 国際的な規準、規格制定に積極的に関与し、我が国の成果を反映していくなどの課題が挙げられる。

図8 「つくる側」と「つかう側」のギャップを埋めることで、マテリアル科学の新展開



(出典) 筆者作成。

2 グローバル視野を高める人材強化の勧め

信頼性研究の底堅さは、我が国の国際競争力とも直結する。そのためには、国際的な研究リーダー層を輩出し続け、国際ネットワークでの高い存在感を保持する必要がある。

ところが、個人業績評価方法が単年度単位でなされる昨今、時間がかかる長期間信頼性研究ではかの研究者と肩を並べるような成果、業績を単年度ごとに出し続けるのはほぼ不可能だろう。本来的にマテリアル科学は概して「潜伏期」の長い研究という特徴を持つが、その期間に得られるデータ、知見が少ないということではない。それに対して、信頼性研究では、ただ一点のデータを得るのに長時間かかるように、期間中に得られるデータ、知見が少ないと言わざるを得ず、研究成果を短期間で量的に挙げるのは難しい。

研究者が、制度的に見て高く評価されにくい分野を忌避することを非難することはできない。長期間信頼性研究がアカデミアで廃れてしまうと、その分野から輩出される学生の層や質も必然的に薄まり、結果、民間での信頼性関連の人材育成も弱体化していくのは必然である。

その結果、規準、規格などの制定、改定などにおいて指導性を発揮できなくなり、他国の後塵（こうじん）を拝す昔日の悲哀に後退することになりかねない。厚い信頼性人材を産学領域で育成し続ける国家的な戦略が必要である。

信頼性研究に携わる人材層を確保するために、

- ・ 研究者が業績評価で不利にならず、むしろ自負、自任を高めることができるように工夫する
- ・ 国際的なロビー活動に参画する研究者、技術者層を確保するために、長期的に支援し、かつ高く評価する制度を立てる

などの課題が挙げられる。

おわりに

本章は、失われる資産を最小限化することでウェルビーイングを向上させる観点から、これからのマテリアル科学のあるべき姿を体系的に説明した。そのためにマテリアルがもたらすマイナス効果に焦点を当てたが、その際にはプラス効果を生み出す論理を適用して検討した。その結果、その論理を一定補強すれば、プラス効果及びマイナス効果を包括的に説明できることが分かった。この意味で、本章の展開から導かれる結論は、マイナス効果に限られない。また未来への選択肢においても、マイナス効果に限定されずプラス効果にも展開できる。

執筆：国立研究開発法人物質・材料研究機構 名誉研究員 ながい ことぶ 長井 寿