

vol. 2012-4

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

July 2012



秩父御嶽山, 2011年6月

【特集】 いま材料工学によってもたらされるもの

*FEM Consulting Services for Engineering Practice
Find Innovation in Tradition 2008-2019*

いま材料工学によってもたらされるもの

芝浦工業大学 荻谷 義治

【1】はじめに

現在、持続的社会的の実現が人類の大きな課題としてあげられている。その実現には政治の役割が大きい。資源の枯渇という観点から材料技術つまり材料工学の寄与も大きな割合を占めている。本稿では、資源枯渇など直面する問題を説明するとともに、今後、材料工学が持続的社会的の実現に対して何ができるかを、これまでの材料工学の歴史を振り返りながら考える。そして直面する問題を解決する今後の材料工学のありかたについて考えることにする。

【2】資源供給の限界

現在、人口の爆発的増加とエネルギーの大量消費により、地球温暖化、大気汚染、水質汚濁など人類の安全、安心に関わる環境問題に加え、資源枯渇という現代社会の持続性に係わる問題により、人類社会の成長の限界に直面している。資源はもはや永遠に供給されるという神話は成立しないことが明確になりつつある。

ここで、地球で利用可能な資源について考えてみる。工業材料の大部分は、地殻から鉱石を採掘し、物質を抽出あるいは合成するに十分な濃度にまで濃縮することにより得られる。すなわち利用可能な資源は地殻に存在する。では地殻とはどのような元素で構成されるか考える。表1に深さ1kmの地殻の全質量(3×10^{21} kg)に含まれる元素の存在比率を示す。この表を見ると、まず気がつくのが、地殻重量の47%が酸素であるということである。体積比率にすると全体の97%が酸素という計算となり、地殻は数%の不純物を含む固体酸素であるということなる。これは地殻全体が酸素とその化合物で占められていることを意味する。すなわちそのまま利用ことは出来ず、利用するには物質を抽出するエネルギーが必要であることを示している。

表1 地殻における元素の存在比率(mass%)¹⁾

元素	存在比	元素	存在比
酸素	47	マグネシウム	2
けい素	27	チタン	0.4
アルミニウム	8	水素	0.1
鉄	5	りん	0.1
カルシウム	4	マンガン	0.1
ナトリウム	3	硫黄	0.03
カリウム	3	炭素	0.02

また、ある種の物質(銅、銀、タングステン、すず、水銀など)は極度に偏在しており、その利用には政治的問題も関与する。利用性という観点から資源を考えると、現在の価格と技術によって採掘可能である「有効資源」と、技術や採算に無関係な鉱床を含む「潜在資源」がある。図1に有効資源と潜在資源のイメージを示す。

潜在資源の量は不確かであり、正確な量を見積もることは困難であるが、ある材料が今後どれくらい供給できるかを考えるには有効なものとなる。潜在資源の1/2を消費するころには、価格が急騰し、供給が困難になると考えることができる。資源の寿命を考えるには、消費量を計算する必要がある。資源消費量は指数関数的に増加するという考え方があ。ほとんどの物質の消費量は指数関数的に増加している。現在の消費量をC(トン/年)、年間成長率をr(%/年)とすると、指数成長則は以下で与えられる。

$$C = C_0 \exp\left[\frac{r(t-t_0)}{100}\right] \quad (1)$$

*本稿は2012年7月に東京において開催されたMechanical Design 2012、第5回株式会社メカニカルデザインユーザ会における基調講演を取りまとめたものです。講演をいただいた皆様、また御参加の皆様のお引き立てに改めて御礼を申し上げます。

ここで、 C_0 は時間 $t=t_0$ における消費量である。消費量が現在の2倍となる時間 t_D は、以下の式で与えられる。

$$t_D = \ln 2 \times \left(\frac{100}{r} \right) \quad (2)$$

消費が倍増するころには、価格が上昇し、工業的に問題となる。消費倍増時間の例として、銅を考えると、消費量の伸び（年間成長率）は、2%/年であり、消費量が倍増するまでの年数は35年となる。多くの材料の資源半減期は50年以内となり、資源の限界、成長の限界が見えてくる。

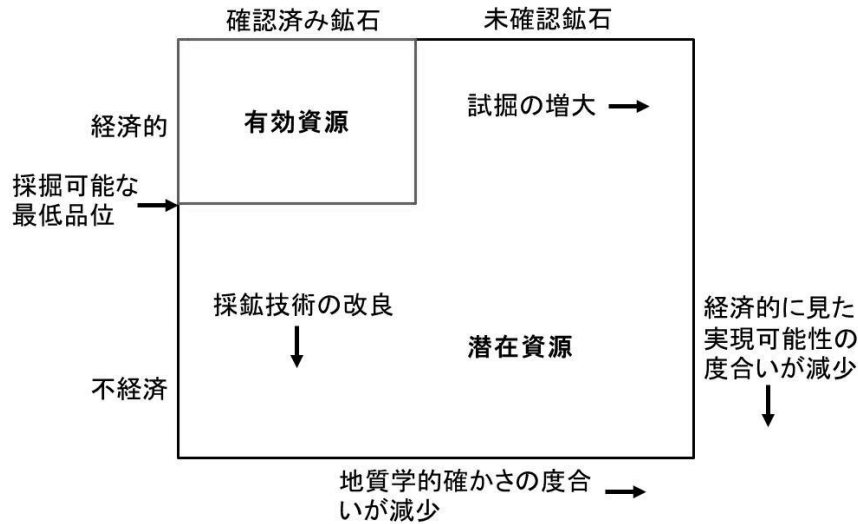


図1 Mackelvey の分類

図2に原田らの試算による金属元素の2050年までの累積需要量（予測）と埋蔵量の関係を示す²⁾。需要予測には一人当たりのGDPと一人当たりの金属消費の関係を用いている。この図でわかるように、資源が比較的豊富とみなされている鉄でも現有埋蔵量に匹敵する量の消費が予想される。2050年に現有埋蔵量（有効資源）を消費する金属材料は、鉄、モリブデン、タングステン、コバルト、白金、パラジウム。また、現有埋蔵量の倍以上の使用量となる金属材料は、ニッケル、マンガン、リチウム、インジウム、ガリウム。さらに、埋蔵量ベース（潜在資源）をも超えるものは、銅、鉛、亜鉛、金、銀、スズとされている。

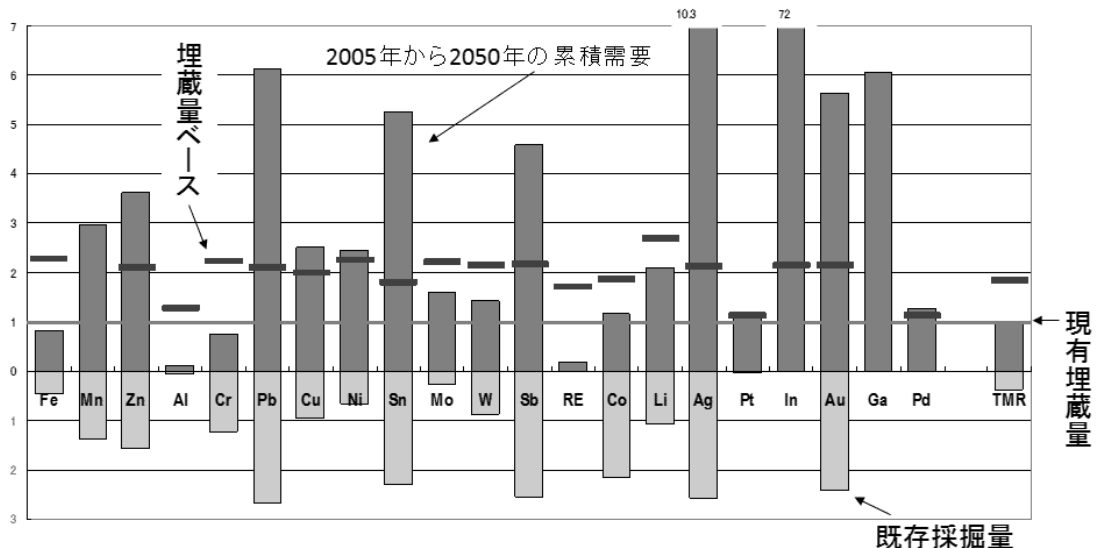


図2 現有埋蔵量に対する2050年までの累積需要量²⁾

資源枯渇に係わる問題として、エネルギーコストが挙げられる。物質の抽出には、当然、エネルギーが必要となり、資源利用の問題に大きな影響を与える。表 2 に材料 1 トンを生産するのに必要なエネルギーを示す。材料により生産に必要なエネルギーは大きく異なるが、この必要なエネルギーは資源枯渇とともに増大する。

前述のように、有効資源が減少すると、潜在資源からの抽出が必要になる。この際、採掘可能である低品位の鉱石からの抽出を行うことになり、採掘から濃縮のための消費エネルギーは増大し、コストが急上昇する。このエネルギーコストの急上昇が資源の利用をますます厳しくする。埋蔵量から試算した石油生産量のピークは 2030 年ごろとされている³⁾。このエネルギー自体の枯渇も、将来の材料の利用を考えたとき、大きな問題となり、その時期が間近に迫っている。

表 2 材料を生産するのに必要なエネルギー

材料	エネルギー (GJ/ton)	材料	エネルギー (GJ/ton)
アルミニウム	280	ガラス	20
プラスチック	85 - 180	セメント	7
銅	140 - 300	木材	2.5 - 7
亜鉛	68	石油	44
鋼	55	石炭	29

【3】 材料工学が目指してきたもの

材料工学という分類は金属工学科がベースとなり、ポリマー、セラミックなどの材料を加え、工学の基盤となる技術習得の必要性という背景から生まれたものである。材料工学は、工業材料を製造するための科学と技術を対象とする学問であり、新しい材料の開発や、材料の物理的・化学的な性質についての評価を行ってきた。材料は文明の柱となるものであり、古代の青銅器、鉄器時代から現代の新素材に至るまで、人類社会の発達において新たな物質・材料の出現が社会の変革をもたらしてきた。「鉄鋼」を中心とする構造材料がイギリスから始まった 18~19 世紀の産業革命を支え、産業の工業化という結果を導いた。20 世紀に突入すると、「ジュラルミン」がドイツで開発され、高分子材料の発達とともに、航空機の開発を可能にし、輸送の革命をもたらした。1930 年代に入りデュポン社によって開発されたポリアミド合成繊維の「ナイロン」は服飾界に革命をもたらした。また、1950 年代に入ると、ベル研究所のショックレイにより「トランジスタ」が開発され、その後の Si 半導体の発展は IT 革命を生み、新たな高度経済成長をもたらした。このように材料工学はその時代の最先端の科学の母体であり、先端科学の成果を工業技術に応用し、文明が発達してきた。

このような 20 世紀における材料の開発は、初期には人類の知的探求心・好奇心を駆動力として発展し、その後、より高機能などの技術的要求を駆動力として発達し、人類の生活に便利さ、豊かさという恩恵、価値観を与えてきた。他方で、材料工学により出現した新しい材料は革新的な技術、産業を生むとともに、資源の大量消費を招き、前述のように、資源枯渇、CO₂ による地球の温暖化、環境汚染等の地球規模で人類社会の持続的発展を危うくする問題を生じさせた。21 世紀に入り、人類の価値観は物質的豊かさを主体とした価値観から、人類の文明活動と環境を両立した環境調和型の価値観へ移行する。今後の材料工学は、環境調和型の価値観を駆動力として、豊かで、安全・安心な生活を可能にすることに貢献することが期待されている。具体的には、循環型製品開発を可能にする材料、資源の枯渇に対処する代替元素戦略、貧困と飢餓の克服を可能にする材料の出現である。

【4】 これからの工業材料と材料工学

以上のように、21 世紀はこれまでの価値観から人類の文明活動と環境を両立した環境調和型の価値観へ移行し、材料工学はそれを実現することを目標とする。人類の文明活動を持続するには前述のように、環境汚染の問題もさることながら、資源枯渇は大きな壁として立ちはだかることになる。当面、資源枯渇の観点から材料工学としては、以下の 3 つの方策をとることになる。

➤ 材料を有効に使う設計

これまでの設計では、必要量を大きく上回る材料が使用され、資源が豊富な材料で間に合う箇所に希少な材料が用いら

れてきた。本当に必要な強度や信頼性とはどれくらいか詳細に検討し、材料を有効に使用する設計を再検討する必要がある。また、材料を組み合わせる技術をより高度に発展させ、希少な材料を必要な箇所に最小量使用するような設計を行う必要がある。

➤ 材料の代替

ある材料の代わりに、より入手しやすいより資源の豊富な別の材料を用いる。資源枯渇が問題となれば代替は不可欠となる。この代替には、化石燃料を太陽、地熱、風力、海洋、水素などのクリーンな再生可能なエネルギーで代替する先進科学・技術も含まれる。しかし、材料の代替には技術的な限界があり、他の材料による置き換えがきかないものもある。また、代替には全面的な技術開発が必要となり、また、代替材料自身の資源枯渇が最終的には問題となる。

➤ リサイクル

従来からリサイクルは行われてきたが、資源の供給に限界が見えてきた現在、リサイクル、つまり材料の循環利用は人類の持続可能性に必要不可欠であり、資源の少ない日本においては極めて重要である。

上記の3つの方策の中でも、資源枯渇の観点から、人類の持続可能性にリサイクルは不可欠であり、今後、より発達すべき材料技術である。廃棄物は、素材産業で製造された物質・材料で構成されている。したがって、廃棄物は材料、つまり鉱床に眠る資源と同じものであり、そこには資源枯渇を解決する可能性を秘めている。現在、先進国では、前述のように、工業製品に使用されている資源の量が、有効資源を上回り、潜在資源量に到達しようとしている。表3に日本の都市鉱山におけるいくつかの元素の蓄積量と世界の資源埋蔵量の割合を示す³⁾。表に見るように、都市鉱山に蓄積される資源の量は、資源埋蔵量の数%~20%にまでにおよび、資源供給に限界が見えてきた現在、この都市鉱山に蓄積される資源の循環に期待がかかる。

かつて、日本は江戸時代から明治にかけて、銀や銅は世界でもトップの産出量を誇り、これらは海外へ輸出されていた。大量に資源を消費している日本における都市鉱山の有効利用は日本がかつてのような資源国となる可能性を秘めている。しかし、リサイクルによる資源循環は容易ではないことはすでに知られているところである。リサイクルは、多くの処理工程が必要であり、現在のリサイクルプロセスでは、鉱床より材料を濃縮するより多くのエネルギーを消費するという矛盾を生じてしまう。この意味では、都市鉱山に蓄積される資源は、先に述べた低品位鉱床にある潜在資源であるともいえ、現在の手法では、資源の濃縮にエネルギーとコストがかかり、市場経済に適さないという問題を抱える。エネルギー消費を抑え、リサイクルを市場経済に適するようになるには、まず、市場から廃棄資源を効果的に集める社会システムが必要である。これに加え、エネルギー消費を抑えたプロセスの実現のため、解体・分離というプロセスにおける技術革新が必要不可欠である。

表3 資源埋蔵量に対する日本の都市鉱山の蓄積量⁴⁾

元素	世界の埋蔵量に対する日本の都市鉱山に蓄積される量の割合(%)	世界の年間消費量に対する都市鉱山蓄積量の割合(%)
Ag	22.42	3.1
Au	16.38	2.7
Sn	10.85	2.4
Cu	8.06	2.5
Ni	2.7	1.1
W	1.97	0.8
Fe	1.62	1.5

これまで、分離・解体は高コストな労働力を用い、さらに多くの回収不可能なエネルギーを投入し行われてきた。これは、これまでの製品設計が解体・分離を考慮しない一方通行のアセンブリー・テクノロジーをベースにしていることほかならない。このような製品設計アプローチを取る限り、リサイクルは市場経済に適合せず、資源循環も可能とはならない。これからの材料工学はこのリサイクルを市場経済に適合させるという課題を解決するものでなければならない。これには、リサイクルし易い構造設計とともに、使用後に分離が容易となるような材料のアセンブリー・テクノロジーの開発が必要であり、この課題の解決に材料工学に期待がかかる。このような設計をインバース・マニュファクチュア

リングと呼ばれる。インバース・マニファクチュアリングでは、いかに、分離が容易となるようなメカニズムを材料に組み込むことが重要である。材料工学としては、可逆的な接合が可能となる材料メカニズムを追求することになる。このような可逆的インターコネクション⁵⁾というコンセプトは近年提唱されてきたものであるが、実際の製品に使用された例はほとんどない。可逆的接合の例として筆者らの研究を紹介する。図3に電子部品のはんだ接合部が、熱による溶融や機械的な負荷によらず、材料のミクロ的な構造変化を利用して分離した様子を示す。この接合に用いたのはんだはSnを主体とし、このSnが使用後に結晶構造が変化し、それに伴い応力が発生するように材料学的に設計されたものである。結晶構造の変化により発生した応力により接合界面で破壊が起こり、電子部品、はんだ、基板に分離する。この手法はすぐに実用化できるものではないが、インバース・マニファクチュアリングというコンセプトのもとに、このような接合技術が発達すれば、リサイクルが市場経済に適合し、都市鉱山からの資源循環が行えるようになる。

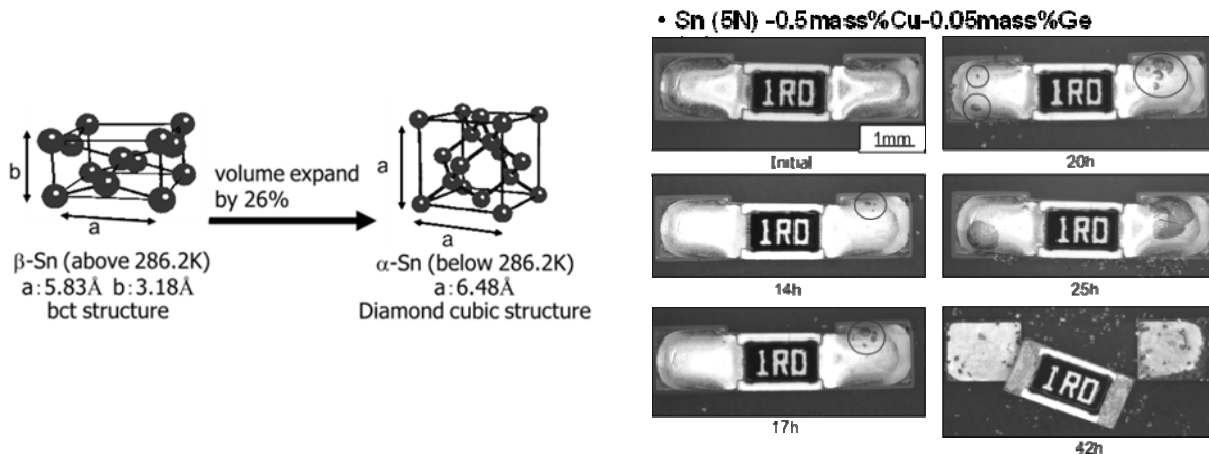


図3 Snの結晶構造変化と結晶構造変化を利用した電子実装部の分離⁶⁾

【5】 おわりに

以上のように、今後の材料工学は、材料科学的にインバース・マニファクチュアリングによるリサイクルを前提とした革新的材料およびプロセスの開発、入手容易な資源による製造技術開発、代替エネルギーを支える革新的材料など、従来の知的探求心・好奇心を駆動力とするのではなく、人類が直面する課題を解決することを駆動力とする方向へシフトする。これには、結晶学、熱力学、反応速度論、結晶塑性学、材料組織学、材料信頼性など従来の伝統的な学問体系では限界が見えつつあると思う。この課題解決型の材料工学では、他分野との連携が不可欠であり、その連携を支える一つの手段が計算科学・工学であるように思える。これまでの材料工学では、材料の分野ごとに専門が分かれ、それぞれの分野ごとに高度に発展し、膨大な知識が蓄積されてきた。その一方で、各領域に高度に発展した材料工学全体を通じた学問体系が構築されているとは言えず、また、一人の研究者の知識許容量の限界もあり、蓄積されてきた膨大な知識を有効に使用できていない状態にあると言える。今後の材料工学は、直面する課題を解決する技術革新のため、これまでの蓄積された各分野における膨大な知識を一つのインターフェースを用いて有効に使用する協調設計が求められる。これにはマルチフィジックス、マルチスケールによる知識の再構築が必要であり、これを実現するためにCAEとの連携に期待がかかる。

参考文献

- 1) M. F. Ashby et. al., “Engineering Materials”, Pergamon Press (1980).
- 2) 原田幸明, <http://www.nims.go.jp/research/elements/rare-metal/probrem/dryness.html>
- 3) 経済産業省 新・国家エネルギー戦略 (2006) より
- 4) 原田 幸明, <http://www.nims.go.jp/research/elements/rare-metal/urban-mine/data.html>
- 5) 須賀唯知, “接合と分離のエコデザイン”, 未来材料, vol.1, No.12, pp.32-36 (2010).
- 6) Y. Kariya et.al, “Basic study on Disassembly of electronic components by allotropic transformation of Sn”, Proc. of 13th International Conference on Electronics Materials and Packaging, EMAP2011FP-34.

株式会社 メカニカルデザイン

〒182-0024 東京都調布市布田 1-40-2 アクシス調布 2 階

TEL 042-482-1539 FAX 042-482-5106 E-mail:comm@mech-da.co.jp <http://www.mech-da.co.jp/>