

先達からのお便り

金属材料の発展の歴史と将来

東北大学名誉教授

公益財団法人電磁材料研究所相談役 増本 健

1. 金属材料の歴史と現状

歴史を振り返ってみれば、地球上に人類が誕生して以来、石器-青銅器-鉄器と時代が移り変わり、これらの金属が文明を表現して時代を特徴付けて来た。ことに20世紀は“物質文明”の時代であり、優れた機能を持つ新しい材料が次々と出現し、人類の生活を潤して来た。例えば、20世紀前半に発明された特殊鋼、高分子、半導体、セラミックスなどの多様な材料の出現は、18世紀の産業革命以来発展してきた鉄中心の基幹産業から、社会に密着した交通機器・生活機器・エネルギー機器・通信機器などの民需産業へと拡大させ、これによって生活が豊かになり、大量消費社会へと移行する結果となった。

一方、この目覚ましい工業の発展の結果、資源の枯渇、異常気象、環境汚染などの地球規模での深刻な問題が発生して、今やこれらの問題解決なくして人類の繁栄はあり得ないと言われ始めている。これらの地球規模の諸問題を解決するには、資源の有効利用、再生エネルギーの利用、環境の保全などのための科学技術の発展が重要な課題となることは言うまでもない。特に、材料を研究する科学者は、“資源は有限である”という観点の下で材料を効率的かつ有効に利用することを考慮しなければならない時代になった。そのためには、各物質がもつ材料機能を最大限に発揮させる基礎研究とそれを有効に利用する応用研究が極めて重要になっている。

金属材料分野の研究でも従来に無い新たな視点が求められ、希少元素や有害元素を含まず、しかもリサイクルが容易な金属材料の開発、ゼロエミッションを考慮した材料設計・プロセスの開発、適材適所の総合的判断による製品開発が重要になっている。従って、研究者は、単に新しい材料の発明・発見に努力するだけではなく、その開発した材料が人間、社会、地球へどのような波及効果があるかを十分に考慮した俯瞰的な視点での研究開発が必要になると考えられる。

このような観点からすると、これからの金属材料研究は、俯瞰的な視点で設定された目標に向かって進める目的追求型の研究が重要になる。例え偶然に発見された材料であっても、その材料の利用価値と様々な波及効果を総合的に考慮する責任を持たなければならなくなるであろう。“研究者は発見する喜びを求めて熱中する”と言われるが、これからは単に発見することのみを目指のではなく、その発見がもたらす

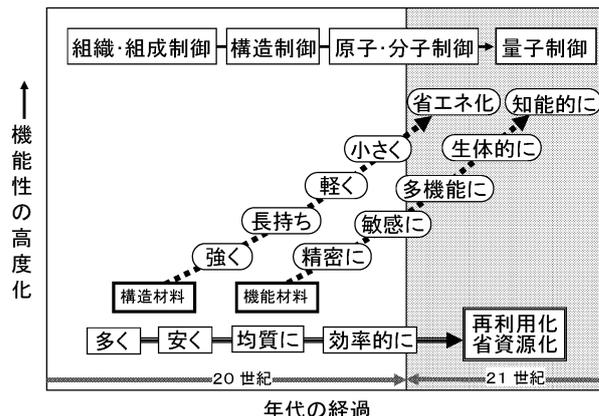


図1 次世代材料の開発方向。

人間・社会・地球への波及効果についても十分に考慮することが必要になってくる。特に、希少元素や有害元素を含む材料分野の研究では、この視点が研究者に強く求められる。

2. 次世代金属材料に求められる材料機能

金属材料を構成する主な元素は60余種類に過ぎなく、地球上に存在するこれらの元素量も限られている。しかし、これらの元素を組み合わせた材料は、人為的に自由に原子・分子を操作することが可能になれば無数にあることになる。従って、新しい機能を実現させるためには、分子動力学の物質設計法の確立と原子・分子操作法による構造制御技術が21世紀における材料研究の最重要課題になるだろう。また、最近では、ITを駆使した人工知能 AI の材料開発への利用が有効な手段となり始めている。

今日までの材料開発と機能性の変遷を俯瞰して見よう。図1に示すように、20世紀初期に追求されてきた材料開発の視点は「多く」、「安く」、「均質に」、「効率的に」が中心であったが、後期になると省資源化と再利用化が重要課題になった。また、求める機能性は、構造材料では「強く」、「長持ち」、「軽く」、「小さく」が主な視点であったが、現在では省エネが重要視されている。一方、機能材料では「精密に」、「敏感に」、「多機能に」から、21世紀は「生体的に」、「知的に」へと高度化し、開発材料は「環境に優しく安全な」ことが重要な目標となっている。

材料開発において有用な新機能発現のための手法は、ナノ組織化に加えて高度な構造制御や原子・分子制御から量子制御へと進化している。特に、最近の無機・有機の広い物質の研究分野において、原子・分子レベルの構造制御および量子機能の相互作用と融合化による高度な機能性材料の開発を目指す研究が潮流となっている。

3. 組成・組織・構造の制御による新たな金属材料の開発

高機能で高性能の金属材料の創生において、研究者はどの

ような指針で研究を進めれば良いのであろうか。材料開発の方向は、大別して3つが考えられる。図2に示すように、1つは既存材料の高度化であり、材料の組成、組織の最適化による最大性能の発現を目指す研究である。これには、高純度合金、組織微細化合金、ナノ組織合金、複合組織合金などがあり、これらは特に構造材料の研究として重要である。

2つは、新しい組成、組織、構造を生成することによる新機能の発現を目指す研究である。その例として、鉄-希土類磁石、超伝導酸化物、人工格子、準結晶、アモルファス相、ナノグラニューラー(NG)相などの材料があり、新機能材料の研究として注目されている。

3つは、量子制御、量子相互作用を利用した新機能化の研究である。図3は、平成8年から16年(1996年から2004年)にかけて著者が領域代表者として提案し、実施した文部省の未来開拓研究推進事業「次世代人工物質・材料の探査的研究」の説明図である。すなわち、新物質・材料を探索する研究の基本的要素として、電子、イオン、スピン、フォトンに注目し、これらの量子機能の相互作用と融合機能の発現に注目して、新規な物質の合成と機能性の発現を実現しようとする探査的な研究である。この研究の例として、光半導

体、超伝導素子、トンネル型磁気抵抗材料(TMR)、トンネル型磁気誘電材料(TMF)などの研究が注目されている。

4. 新しい構造から生まれる新機能の例

新機能材料の一例として、筆者が1970年に発表した「アモルファス合金」の研究の動機と研究開発について紹介しよう。当時の1970年代は、我が国が戦後の復興を果たし、正しく先進国に仲間入りを果たそうとする時期であった。当時は、鉄鋼業の大企業が挙って鉄鋼材料の基礎研究に乗り出し、最新の大型研究所を次々と新設しており、大学の一研究室がこれらの巨大な研究機関と対等に戦うことは不可能であった。この理由から、筆者は鉄鋼以外の新しい金属材料の開拓を目指すことを決心し、“新しい構造から新しい物性が生まれる”の発想に立ったのである。

この着想から生まれたのが「アモルファス合金の研究」であった。最初に興味をもったのは「強さ」であった。一般に金属材料の強化法は加工により結晶中に多くの格子欠陥を導入する手法であるが、結晶でないアモルファス合金の場合はどうなるのだろうかという興味を持った。常識的には、“ガラスと同様に脆い材料である”と予想していた。

この疑問を解決することができたのは、偶然にアメリカで研究する機会があったからである。当時のアモルファス合金は微小な粉末か薄片であり、物性の定量的測定は不可能であった。この点に着目して、自製の液体急冷装置を用いて、均質なテープ状アモルファス合金を作製した。早速その強度を調べたところ、驚くほどの高強度と明瞭な塑性変形組織を見出したのである。さらに帰国後、熱安定性が高く安価な組成である「アモルファスFe-B-Si合金」と、省エネで大量生産が可能な「単ロール法」の開発に成功し、作製したアモルファス鉄合金の優れた強度・耐食性・軟磁性の三大特性を明らかにした。

正しく、新しい構造から新しい物性が発見された例である。その後、この研究は実用的な新素材としても注目され、日本と欧米との間で開発競争が行われた。現在では、軟磁性材料を主体として高強度材料、高耐食材料、接合材料、電熱材料などの多分野で広く実用化されている。このようにアモルファス合金が実用材料として発展したのは強靱な材料であったからであり、もし脆い材料であったならば実用化は困難であったに違いない。

その後、アモルファス合金の研究は、鉄合金からアルミニウム合金、マグネシウム合金、チタン合金へと拡大すると共に、図4に示すように、アモルファス相を低温加熱することによって生成する「ナノ結晶材料」の開発、ガス元素(O, N, F)を含む「ナノグラニューラー合金」の開発へと進展した。ナノ結晶相は粒界に薄いアモルファス層が残留した組織であり、またナノグラニューラー相はセラミック相中にナノ金属粒子が微細分散した組織であり、何れも通常の製法では得られない特殊な組織を持つ新規な合金である。これらの合金は、図に示すような様々な機能材料として実用化されている。

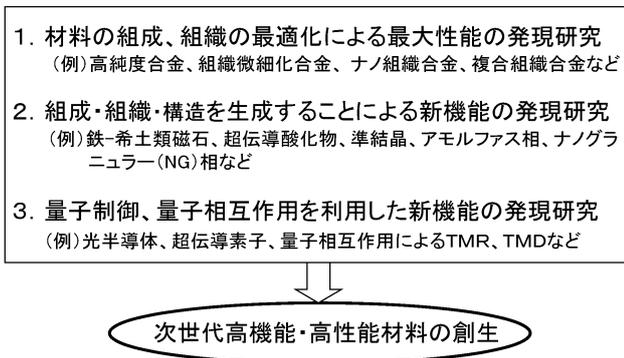


図2 金属材料の開発における着眼点。

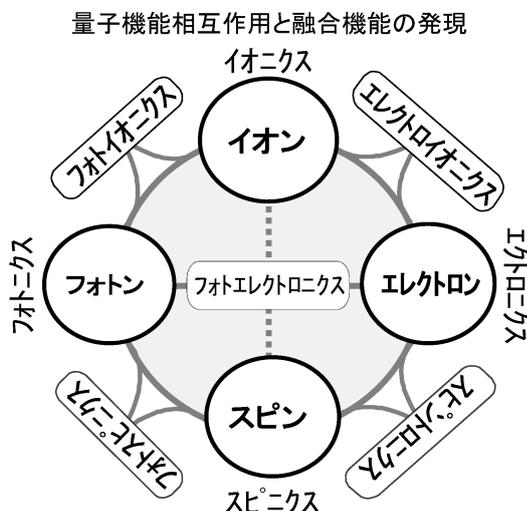


図3 次世代の機能材料として期待される研究分野。

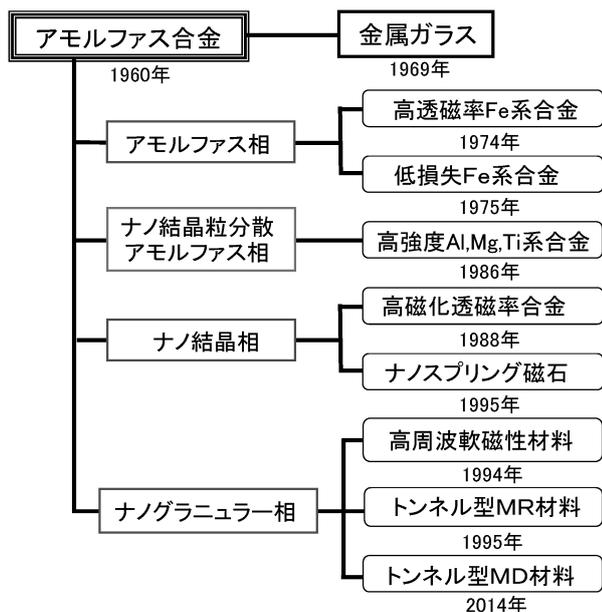


図4 液相急冷したアモルファス相から派生した新材料.

5. 日本金属学会に対する感謝と期待

日本金属学会は1937年に本多光太郎先生により創立され、それ以来、日本の金属研究の中核として大きな役割を果たしてきた。また、本誌の「まてりあ」は、初期の会報以来60年にわたり、金属の知識を広く啓蒙する役割を果たしてきた。

筆者も1955年以来、日本金属学会を中心に研究活動を行



図5 日本金属学会で発表する筆者(86歳の秋).

い、多くの研究成果と有益な知識を得てきた。特に忘れられないのは、1970年の春の講演大会において「アモルファス合金の強度と変形」に関する最初の発表を行ったこと、また2018年の春秋の講演会で「Fe-Mn系合金のインバー・エリンバー特性について」の最後の発表を行ったことである。図5は、日本金属学会春期講演大会で発表する86歳の筆者の姿である。正しく筆者の研究人生は、48年に亘って日本金属学会により育成され、熟成されたといえる。

最後に、日本金属学会において、日本発の新しい優れた金属材料が開発され、21世紀の厳しい環境の社会を支える重要な役割を果たすことを期待したい。そして、地球上に存在する貴重な物質資源が枯渇することがないように努力されることを望みたい。

(2020年12月1日受理)[doi:10.2320/materia.60.122]