

金属学と材料科学・工学の進歩

モーリス・コーエン

はじめに

宇宙に存在する物質の中で、人類にとって有益な用途があるもの、または研究用に供することができるのは、そのごくわずかな量でしかありません。この自然界の現実には、一般にいう物質と、特別な材料とをはっきりと区別します。したがって、材料といわれるものには、自然の物質と人造の物質との両方が含まれており、それが物をつくることに使用されます。例えば、建造物、機械、装置、道具、器具、衣類、武器、装飾品、その他あらゆる種類の製品です。

歴史的にみれば、材木、石材、繊維、セラミックス、金属等の材料は、文明の進展に密接な役割を果たしてきております。そして、人間の存在のためのみならず、その生活の質の向上にも終始、密接なかかわりをもつようになりました。それゆえ、明らかに材料というものは、社会にとって不可欠な活動媒体とみなされねばなりません。これらは、生活空間、食糧、エネルギー、情報、人的資源と共に、人類の基礎資源を構成しているものの一つなのです。

このように、材料は自然界において、社会的な目的に利用できる重要な部分を構成するものであるため、材料の特性、用途を見きわめるために、社会的、知的な力が様々な学問分野や学問分科を統合して、一貫した知識体系をうち立てようとするのは、何も不思議なことではありません。この発展段階において生まれたのが材料科学・工学です。ごく自然ななりゆきで、すでに学問として確固たる地位を確立している金属学、すなわち金属の状態に関する科学と工学は、より新しく、より広い分野である材料科学・工学に適切な範例を示してきました。現在では、金属学は材料科学・工学の中で、他の種類の材料の学問と協調して、重要かつ模範的な一員としての役割を果たしているのです。セラミックスの分野も、金属学と同様に、一つの学問分野として独自の地位を確立し、今では同様に材料科学・工学の重要な部分を占めていると認められております。

材料科学・工学の概念と活動の重要性を検討する前に、まず材料の全体像を描くことにします。

地球規模の材料サイクル

天然資源の採鉱・採掘、または陸・海からの収穫により、原材料（鉱石、鉱物、石炭、原油、天然ガス、岩石、砂、木材、ゴム、その他）は、年間約 150 億トンが採取されております。これらは素材、あるいは工業材料（金属と合金、セラミックスとガラス、薬品、セメント、木材、誘電体、半導体、プラスチックとエラストマー、紙、複合材、その他）として加工され、やがて社会の需要に応じて商品として生産されています。これらの材料は使用され、それぞれの役割を果たしたあとは、スクラップとして捨てられるか、何度も再利用されるか、あるいはいくらかは元の自然界へ戻されることとなります。かくして、全体としての材料システムは全地球的尺度で「ゆりかごから墓場まで」のサイクルを形成し、これには国家間や社会間での競合と相互依存とを伴います。1974 年のコスマット報告⁽¹⁾で、地球規模の材料サイクルと名づけられたように、経済的・戦略的理由によって国際問題にも国内問題にも深く関与していることは明らかです。この調査によって、例えば材料サイクルはアメリカ合衆国の食糧と燃料の生産を除いた GNP の 5 分の 1、雇用の 5 分の 1 に関係しているといったことが判明しました。

材料サイクルは社会的要求によって駆動し、そのサイクルを回る材料の流れには、次第に価値が付加されてゆきます。この付加価値の重要な部分は、エネルギーというかたちをとります。アメリカ合衆国の製造業界で消費されるエネルギーの約 2 分の 1 が、生産、精製、加工および材料を完成品に組み立てることに費やされています。逆に、材料は有効な形態のエネルギーを供給するためにも必要です。エネルギーを発生させるための燃料材が不可欠であることに加えて、事実上、すべての高度なエネルギー転換技術は効率、信頼性、安全性、あるいはコスト効率性からみると、材料によって限定されざるをえません。例えば、ガスタービン、核反応炉、太陽エネルギー装置、MHD 発電機、高エネルギー電池、燃料電池にそれがみられます。

材料サイクルにおける材料の流れは、世界の別の場所で起こるかもしれない経済的因子（例・競合性）、政治的行為（例・禁止令）、あるいは社会的判定（例・環境規制）により、どの点においても大きく乱される可能性があります。そして材料の欠乏は、地球上の天然資源の不足よりも、むしろ人為的な理由に

よることのほうがふつうです。材料サイクルの動きは、廃棄物の処理、汚染、風景の醜悪化により、不可避免的に環境に対して負荷を与えます。かくして清浄な生活空間の利用度を妨げ、評価することは困難なのですが、実際に社会的負担をもたらす結果となります。これらは、材料科学・工学が人類にもたらすすべての恩恵にかかわる者たちが直面せざるをえない大きな問題なのです。金属学は、過去数十年ものあいだ、この問題に取り組まねばなりませんでした。

材料科学・工学の本質

材料科学・工学はいくつかの学問（知識分野）を混合したもので、自然の一部である材料をいかに取り扱い、それを人類のためにいかに利用するかを学問的に追究するものです。前述のコスマット調査によって得られた材料科学・工学のモデルは、図1のようなものです。これは、知識生成系と知識移転系とによってなっており、移転系は基礎科学と基本的な理解（左側）から始まり、社会的必要性和経験（右側）まで及んでいます。材料科学・工学は、加工（材料の合成）、研究のための試料作成、材料サイクル内での大量生産、最終目的のための製作と、それらの内部構造（すべての尺度での構造と組成を包含する）と示される性質（関連するすべての種類の）とを結びつけ、さらに応用における究極の機能を結びつけようとするものです。

コスマットは、材料科学・工学を類似した言葉で、もっと簡潔に定義しています。すなわち、「材料科学・工学は、材料の組成、構造ならびに加工と、それらの性質と用途とを結びつける知識の生成と応用に関するものである」としています。金属学はミクロ構造という重大な事実を発見して以来、100年以上もこのように機能してきたのですが、材料科学・工学がこのようなやり方をするようになったのは、約30年前からのことではありません。

材料科学・工学は、材料の世界においては、科学、工学、技術と社会の必要性とのあいだに連続性があると主張している点で全体論的です。このようにして、材料科学・工学は、材料の基礎知識によって人類に開かれる道を明示しており、また逆に材料の科学的理論と実験の結果を、人類の要求と経験に応じて示してくれるのです。事実、新しい方法や材料を発見し、最も効果的に作用するのは、研究から得た科学知識と経験から得た実証的知識という互いに反対方向の流れ（図1）が緊密に混じり合って触媒作用するときなのです。今までの

ところ、材料科学・工学はそれに貢献してきた学問分野、または分科にとって代わったり、それを排除したりはしていません。むしろ、材料科学・工学は材料に光りを与えることができるすべての知識分野に対する学際的舞台の役を果たしています。そうすることによって、材料科学・工学は、個別の学問分野では得られない、分野間の相互作用を推進し、学際的な目標を達成しようとしているのです。

金属材料、セラミック材料、高分子材料、電子材料といった特定の材料の革新に関する事例研究については、かなり詳しく報告されています。⁽²⁾ 一般的にいうと、これらの進歩は、科学的「押し」よりも、むしろ社会的「引き」によって始まったものです。科学は常にうまく利用される方向へと進歩してきましたが、よく引用されるトランジスタによる局面打開——素晴らしい理論と基礎研究、ならびに新しい加工法による目覚ましい発展は、実は最初は社会的必要性の認識のもとに、ベル電話研究所で考案されたのです。つまり、将来の通信体系のためのもっと複雑なスイッチングと多重チャンネル伝送回路を達成するには、当時の真空管技術をはるかに超えるものが必要とされていたのです。これは材料科学・工学における、経験と科学的発見との相乗的相互作用を、特にはっきりと示した事例です。これは、材料科学・工学の活動のしかたを特徴づける機能形態の一つですが、金属科学・工学の活動においては、すでにずっと前から示されていたことです。

材料科学・工学におけるごく最近の事例をみても、このことは引き続き成り立っています。図2は、強力な永久磁石で達成された「段階的（量子的）」な進歩の状況を示したものです。特に、Nd₂Fe₁₄B型金属間化合物とその適切な加工法の発見による進歩には注目すべきものがあります。⁽³⁾ この進歩は、実験的研究と社会の「引き」とから生じたもので、磁氣的に強い化合物について予言したり、またそれらを改良するために指針となるような理論はありませんでした。必要な理論的研究は、疑いなくやがて現れて、これらの技術的に重要な材料についての理解と、より以上の発展のために、かなり有益に貢献するでしょう。しかし、材料科学・工学も社会も、そのような望ましい出来事を待つ必要はありません。この材料の開発が、すでに新しいモーターや電子装置の設計に、さらに高い効率と、小型化という大きな影響を及ぼしていることはすぐにわかります。

層状銅酸化物、明確に言えば (La, Sr)₂CuO₄ と YBa₂Cu₃O_x の高温超電導性の劇

的な発見は、この点についてのもう一つの例を提供しています。図3⁽⁴⁾に、 T_c （臨界温度）の顕著な増加の様子を示しています。ここにおいてもまた、この驚くべき固体の挙動についての予測どころか、ヒントを与えてくれる理論すらありませんでした。そして、引き続いて世界中で起きた興奮の爆発は、画期的な新技術に対する見込み（社会的「引き」）によるばかりではなく、超電導のような注目すべき物理的性質に対する既存の理論が明らかに不十分であったことにもよります。しかるに、材料科学・工学の本質からみて、これらセラミックス材料についての加工、構造、特性の関連性についての実験的研究は、いち早く進行しており、図4⁽⁵⁾に示されているように、候補材料の超電導状態の達成と安定化のための温度、磁界、電流密度の組み合わせの影響について、当然の注意が払われています。

さらに、材料科学・工学の目は、材料の性能や最終製品にまで及ぶので、有効な形への成形加工性の向上、あるいは使用時の応力に耐えるための適当な機械的特性の向上も、臨界温度 T_c をさらに上げることと同等に重要な目標となっています。このように、実用のための最終的性能を得るため、多くの因子のバランスをとる必要があり、材料科学・工学ではそれを考慮するという点で、材料科学・工学と固体物理学との顕著な違いを際立たせています。

材料科学・工学における「予言性」対「相互性」

材料科学・工学においては、われわれは理想としては材料の構造から材料特性を予測し、その特性から性能を予測しようとし、結局は合理的なコストで望みの材料、および内部構造を得るための一連の加工処理法を選びます。しかし、材料科学・工学における科学と工学の着実な連続性という点では、この単純な理論を妨げるものが多くあります。材料が使用時に他の材料の多様な性能と調和して、それぞれに課せられている性能を実現できるために持っているべき特性は数多く、また複雑なものです。また、それらは目的とされた用途の多様な要求を満たすとともに、独自の特性をも十分に保ってゆかなければなりません。研究室において特性の完全な模擬実験をするために、すべての作用変数と環境変数を項目別に分ける方法はまったくありません。さらに、測定できる特性は、いいところ、使用時の性能の単純なイメージでしかありません。

ほんとうの意味では、使用時の材料の挙動は特性だけからではわからないの

です。⁽⁶⁾ 特性は、蓄積された経験と結びついたとき、貴重な指針を提供できますが、特性がどんなに正確に知られていようとも、実績のない最初の段階では予測に頼ることはできません。楽器の場合と同様に、それが実際に演奏されるまでは、どのような働きをするかの予告はできないのです。事実、機能と相互関連させるために、どの特性を評価すべきかを決定するのに、まず最初に必要とされるのは経験に基づいた知識です。これは予測性ではなく、科学・工学の実用的成果にうまく寄与することができる特性と機能とのあいだの相互性によるもので、互いに補強しあっているのです。図1の材料科学・工学モデルには、選ばれた特性（機械的、化学的、電気的、その他）に関係する科学的知識と使用経験から生まれる経験的知識のあいだの有意義な混合が示されています。

同様の道理が、物質の構造との材料の特性のあいだの関係でも成立します。材料科学・工学における研究の多くは、材料の内部構造に基づいて観測された特性を説明することに方向づけられています。このような関連づけは、典型的には理論、モデル、あるいは仮定された機構をとおして行われます。しかしながら、この構造という概念は、種々の尺度の微細な構成要素、すなわち規則的あるいは不規則的な組織を作っている「建物の群れ」のようなものを包含しています。図5に示した巨大分子複合体の構造——ここに示したのは人間や動物の筋肉と骨とを結合する腱——は、特に示唆的です。ここには、いくつかの階層に分けて、それぞれの寸法尺度、名称、検出の方法が示してあります。⁽⁷⁾

図5に示されている種々の接続部分もまた、特性を与える重要な構造要素として考慮されなければなりません。さらに、ここには示されていませんが、分子、原子、電子、および原子核から原子核の段階、さらに理解できないような原子核内にわたる幽霊のような素粒子という極微な構成要素があります。こういう状況のもと、また材料科学・工学の背景から、人はきっと第1原理、あるいは構造だけから、人類のために材料を役立たせることに関係する比較的複雑な特性を予測できるのだろうかという疑問に思うにちがいありません。

幸い、材料科学・工学はこの重大な問題を、他から他への第1次予測性に依存せずに、内部構造と測定される特性との相互関連性に依存することによって避けることができます。ここでもまた、材料科学・工学はそれぞれ独自に関与している物質構造と材料特性についての科学的情報と経済的情報との相乗的混合を促進して、両者についてより深く、またより有用な理解をさせるのです。

ヘンリー・クリフトン・ソルビーが、岩石学用顕微鏡を用いて研磨・腐食し

た鉄と鋼のマイクロ構造を観察することによって、金属組織学という科学を開拓してから 100 年以上、金属学において展開されてきた情報の前後移動のやり方を、材料科学・工学はそれが出現してきてから比較的短期間のうちにやってきたことは明白です。⁽⁸⁾ 科学的理解を、材料科学・工学を經由して社会的福祉へと最終的に転換することは、知識から実用への一方向の流れによって表すことができないことは明らかです。それは、材料科学・工学の構成要素である加工、構造、特性、そして機能のあいだの、入り乱れて、互いに作用しあった流れに、一層強く依存します。

材料科学・工学は、その要素が緊密に結合し、それらがまた人間の要求に基づく駆動力を受けた場合には、知識の創造と活用のダイナミックな体系として、最も効果的に役割を果たすものと思われます。

材料科学・工学の活動の一例——急冷凝固プロセス

材料科学・工学では、金属学と同様に、構造と性質の関係における進歩が——そして新材料の開発の場合も同様ですが——新しい加工法の出現に決定的に依存することがしばしばあります。そういう例、急冷凝固プロセスがあります。

ある合金系では、液相を秒速 $10^4 \sim 10^6$ K の冷却速度で冷却することによって、ふつう見ることができない結晶核形成、すなわち凝固を阻止することができて、準安定な非晶質固体、いわゆる金属ガラスが形成されます。この現象は、1960 年にスプラット焼き入れという新しい実験技術が始められたときから知られています。⁽⁹⁾ これが、金属ガラスの構造と性質についての盛んな科学技術を招来させたのです。同時にまた、これは例えば薄帯鋳造用の溶融紡糸法（メルト・スピニング）や粉末製造のための微粒子化のような大規模な急冷凝固プロセスの開発を促しました。ひいてはまた、高速度冷却や過冷却下での凝固の速度論に対して、科学的な視野での注意を大いに促しました。

特性測定に関していえば、鉄—ホウ素—ケイ素合金と、鉄—ホウ素—ケイ素—炭素合金のアモルファス固体は強磁性であるばかりでなく、履歴現象と渦電流損失とがたいへん低いことが見いだされています。これは主として、それらの高い電気抵抗によるものであり、また結晶磁気異方性が存在せず、またふつう結晶状態で存在するようなマイクロ構造の欠陥が存在しないためです。エネルギーの節約という優勢な社会的牽引力（この場合、電気変圧器内の鉄損の減少

を通じてのもの) は、金属ガラスに関する加工法および合金の開発を一層推進させようとする強い駆動力となりました。その結果もたらされた鉄損減少の改良は、図 6 に示されているとおりで、これは新しいアモルファス材料を、もっとよく知られているケイ素鋼と比較したものです。⁽¹⁰⁾ 現在、実用試験が行われている配電変圧器の金属ガラスの 60Hz 鉄損は最高性能のケイ素鋼の 3 分の 1 より少なく、さらに 20 分の 1 にまで減少させることに成功しています。⁽¹⁰⁾

材料科学・工学の活動において、変圧器に金属ガラスを有効に活用できるかどうかは、適当な磁気特性の具備はもちろんのこと、機械的性質、成形性、時間および温度に対する安定性、そして、いうまでもなく全体としての経済性に依存することが明白となるでしょう。このような相互作用を持った因子を解明して、最も適当な因子を決定することは、科学的発見と経験的発見とを緊密に相互作用させることによって促進させます。すでに前記の変圧器について行われた性能試験では、期待どおりの実用的改善が報告され、またその他重要な追加情報も得られています。そして、実際の生産は目下進行中です。今アメリカ合衆国では、配電変圧器だけでも鉄損は、年間 7 億 5000 万ドルになると推定されており、金属ガラス芯を使えば、このうちの約 3 分の 1 が節約できます。⁽¹⁰⁾ さらに大きな電力変圧器がやがて利用可能になる一方では、より小さな磁石装置においても、いろいろな面へのアモルファス合金の応用がすでに始まっています。

このような材料の進歩の一例は、かつては新しい加工法が入手困難だった材料の詳細な研究と開発を推し進めて、社会の必要とするものを満たすための新しい技術や製品をいかに生み出してゆくかをはっきりと示しています。

結晶性材料に急冷凝固法が施されると、他の方法では得られない、広く変化に富んだミクロ構造が得られます。これには母相のミクロ構造の微細化、析出粒子の異常分散、高度の過飽和固形体化や準安定状態の形成などが含まれます。ここでは分散粒子が特に興味深いものです。なぜなら、それはたいへん微細で広く分布しており、母相への溶解度が極めて小さいからです。後者の状況のために分散した析出粒子の高温での粗大化が抑止され、それに引き続いて行われる加工熱処理時において、結晶粒の成長を抑えるための粒回ピン止め効果を保持することができるのです。同じような理由で、さらに高い温度での分散強化が維持されます。さらに、溶体化が液相において行われるため、分散相の体積分率を高くすることができます。また、急冷凝固によって析出物が粗大化して、

脆い介在物となることも防止できます。

急冷凝固によって、高速度鋼内に 1 次カーバイトを均一に分散させるためにアトマイジング法を用いることは、1970 年以來、⁽¹¹⁾ 実用化されており、高硬度状態での靱性の向上に役立っています。しかし、その後の遠心アトマイジング法⁽¹²⁾の改善と、その新超合金への応用の可能性によって、アメリカ合衆国空軍が宇宙航空材料への広い応用に興味をそそられて、新しい合金系のより広い視野での研究開発に資金援助をするようになり、ここに社会的「引き」のもう一つの古典的な例が示されました。特に、超微細尺度での構造を調べなければならないので、最も複雑で高度な分解能を持つ電子顕微鏡とマイクロ分析機器の必要性が生じ、そこに科学的探求への自然発生的な衝動が噴出したのです。図 1 に示した知識移転機構全体をとおして、互いに刺激しあう作用が役割を果たすようになり、科学的解釈、特性の向上、加工法の改良、また先端技術の達成等に強力に反発する一方、政府、企業体、学術研究期間の共同参画をも促しました。

アルミニウム合金を急冷凝固することによって得られたいくつかの特性を、図 7⁽¹³⁾ にまとめて示しています。ふつう見られない範囲の組成と金属間化合物相の異常分散が、急冷凝固によって可能になりました。図 7 に示すように、この種の材料は高温でも強度が保持される長所を持っていますが、これは比較的安定して分散相が粗大化に対して抵抗力を持つためです。密度を補正して比較すれば、これらのアルミニウム合金はチタン合金の高温強度に匹敵するか、凌駕することに注目しなければなりません。図 8 に示すように、これらのアルミニウム合金は、同時に塩化腐蝕に対して著しい耐蝕性がありますが、これはおそらく急冷凝固によってもたらされた合金の科学的特性と、マイクロ構造の均一性によるものでしょう。⁽¹³⁾

これまでのところ、急冷凝固法の実用化は、そのコストのために最終製品の付加価値の高い場合を指向する傾向があり、一般社会にはまだお目見えしていません。しかし、材料科学・工学が持っている特徴が作動していることは明らかです。

結び

世界的規模での材料サイクルの作動を見ると、今や材料は社会の基礎資源

を構成しており、これは地球上において人や政府を結びつけるだけでなく、人類を自然の仲間として結びつけるものです。材料科学・工学の高い目的は、自然界の物質を十分に研究し、同時に材料を賢明な方法で使用するることによって、人間が自然と調和して生存することを助けることにあります。知的であると同時に、実用性をも備えるというこの二重の目的は、人類の向上と社会の進歩という大きな目標に向けて科学と工学とがもたらす貢献のアーチの、不可欠な部分を形成しているのです。

現在、材料科学・工学は、いろいろな学問分野が混じり合って、その役割を果たしています。すなわち、物理学、科学、金属学、セラミックスというような単独の学問ではなく、むしろ学際的学問です。もちろん、これらの学問分野も、最初は研究努力のためのまとまった学問分野とは、社会から見られていませんでした。社会がこの学問分野を認知する時点がくれば、そのことは社会による知識の再体系化あるいは再包装を導くものであるし、それは大学での学科の新設、新しい講義内容、学位、さらには新しい職種、学協会、専門家の団体などの出現というかたちで、特徴的に映しだされるでしょう。

材料科学・工学が明らかに、このような固まった状態に到達しているとは、まだいえません。しかし、成り行きは、その方向に向かって動いていることをはっきりと示しています。材料科学・工学は、登場してくる新しい種類の材料に魅力的な枠組みを提供するに足る完全性を、すでに備えているのです。金属とセラミックスとが、かつては個別の学問分野であったように、高分子材料、電子材料、光子材料、生物学的材料が、それら自身で別々の学問分野を形成することはもはやありえないと思われれます。材料科学・工学に貢献しているこれらの様々な学問分野が合体して、単独の学問になってゆくかどうかを社会が決定するには、もう1世代、2世代を要するでしょう。このような進化の一例は、医学の分野で見られます。医学は、多くの異なった専門分野や分科に分かれているにもかかわらず、一つの学問分野として認められるようになっていきます。材料科学・工学も、自然を深く探究し、自然を上手に利用するための新たな挑戦をする分野であることを社会に示すことによって、医学と同様に知的かつ専門的に確立された学問分野とすることができるでしょう。

今のところ、材料科学・工学は動揺と変化の激動期を通過しつつあります。知る知らずにかかわらず、世界の技術界のかなりの部分は、この激動に引き込まれており、いかなる場所においても、人類の幸福はこれにかかっているのだ

す。

■謝辞

筆者はこの特別な機会において、京都の稲盛財団がこの論文をとりあげてくださったことに対し、深く感謝の意を表します。また、私の秘書であり、長年にわたって私の分身ともいうべき存在であるマーガレット・メイヤー女史に、心から感謝の意を表す特別な機会を与えてくださいました。彼女の長年にわたる絶えざる助力は、私の履歴書においてもはかりしれないほど大きく、価値のあるものでした。

また、この原稿の準備に際しても、惜しみない協力をしてくださった、マサチューセッツ工科大学のロイス・マローン、ミリアム・リッチ、そしてジョン・マラの諸氏にも謝意を表します。ケース・ウエスタン・リザーブ大学のエリック・ベア教授は、この論文のために図 5 を提供してくださり、それを引用することに快諾くださいました。

そして、長期にわたってマサチューセッツ工科大学での私の研究を支援し、また何十人もの学生に対して援助を続けてくださったアメリカ海軍研究本部ならびにアメリカ科学財団(NSF)に変わる事のない謝意を捧げます。

Materials Science and Engineering

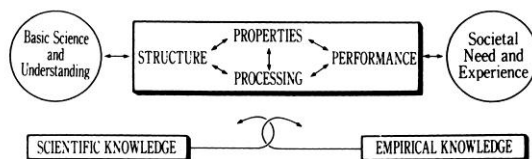


図1. コスマット報告 (1974年)⁽¹⁾に基づく材料科学・工学モデル。材料に関連した科学的知識と経験的知識は、互いに反対方向の流れとして示される。

Figure 1. A model of materials science and engineering, indicating countercurrent flows of scientific and empirical knowledge relative to materials. Based on COSMAT Report of 1974(1)

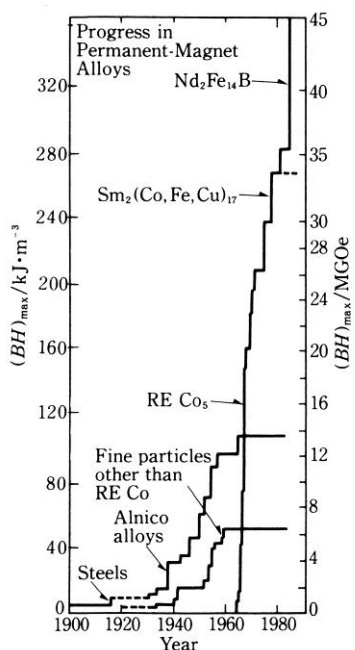


図2. 1900年以降の永久磁石材料に関する進歩。性能を表す数字としての最大エネルギー積($(BH)_{max}$)を用いて示した。1985年のMNAB報告⁽³⁾による。

Figure 2. Advances in permanent-magnet materials since the year 1900, according to the energy product $(BH)_{max}$ as a figure of merit. From NMAB Report of 1985(3).

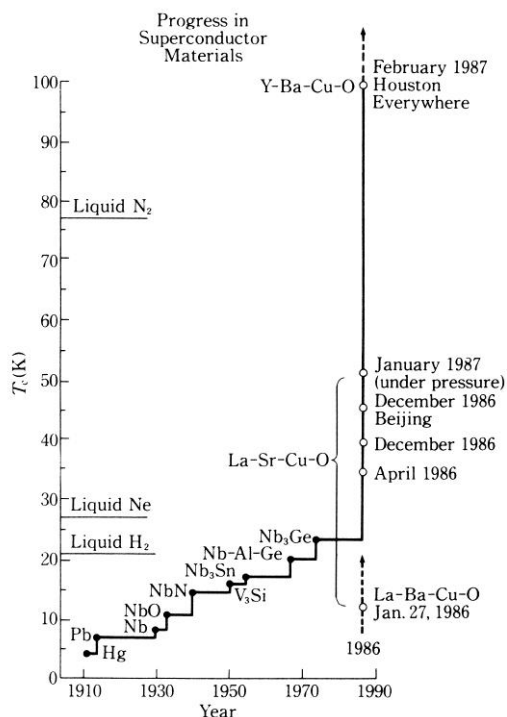


図3. 超電導材料の臨界温度 (T_c) の向上。ミュラーとベドノーズによる集録⁽⁴⁾より抜粋。
Figure 3. Advances in the critical temperature (T_c) for superconductivity.
From compilation of Müller and Bednorz(4).

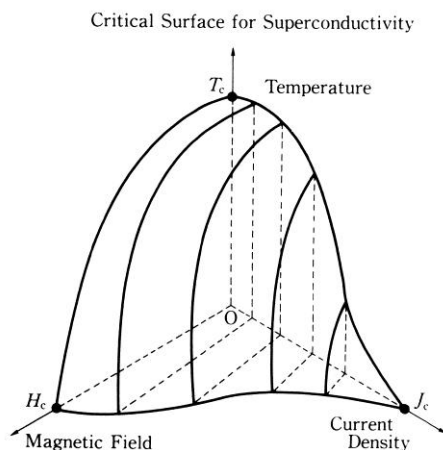


図4. 超電導状態の存在範囲の決定する温度、磁界および電流密度の相互作用。リビングストン⁽⁵⁾による学説。

Figure 4. Interplay of temperature, magnetic field, and current density in defining the regime of superconductivity. After Livingston⁽⁵⁾.

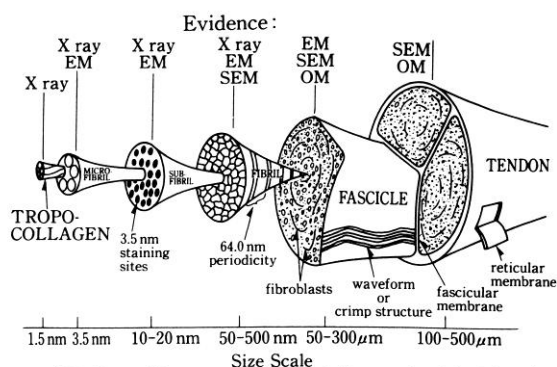


図5. 生体物質（腱）の階層的構造の模式図。寸法尺度、名称および観察方法を示す。略語：DSC—示差走査熱量測定、EM—電子顕微鏡、SEM—走査電子顕微鏡、OM—光学顕微鏡。カステリック、その他⁽⁷⁾による。
Figure 5. Schematic illustration of the hierarchical structure of a biological material (tendon), showing size scales, terminology, and methods of observation. Abbreviations: DSC—differential scanning calorimetry; EM—electron microscopy; SEM—scanning electron microscopy; OM—optical microscopy. From Kastelic et al.⁽⁷⁾

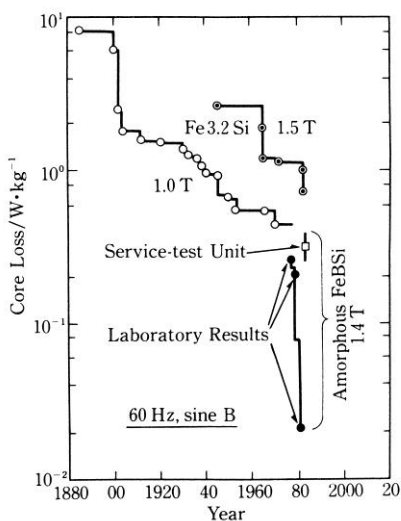


図6. 過去100年間における電気変圧器材料の鉄損の減少に関する進歩。ルボルスキー⁽¹⁰⁾による。

Figure 6. Advances in the reduction of core-losses in electric-transformer materials during the past century. From Luborsky⁽¹⁰⁾

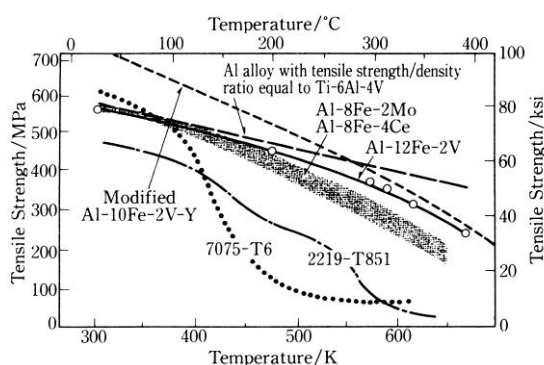


図7. 急冷凝固アルミニウム-鉄基合金の高温強度を、従来の普通工程による2種類の高力アルミニウム合金(7075-T6と2219-T851)と比較して示している。破線は、実用チタン合金と密度で補正した強度が同じになるのに必要なアルミニウム合金の強度を示す。アダムとルイス⁽¹³⁾による。

Figure 7. High-temperature strength of rapidly solidified aluminum-iron-base alloys, compared to two conventionally processed high-strength aluminum alloys (7075-T6 and 2219-T851). Dashed line denotes strength required of aluminum alloys to have the same density-compensated strength as a commercial titanium alloy. From Adam and Lewis⁽¹³⁾.

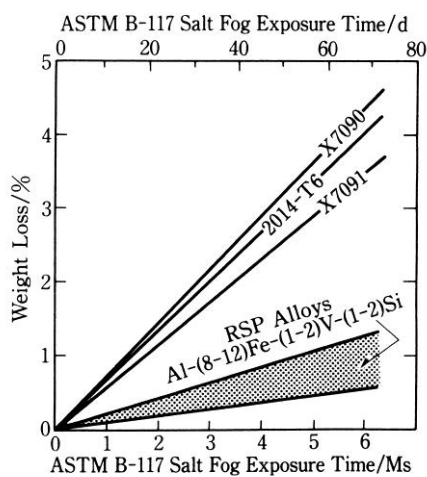


図8. 急冷凝固アルミニウム-鉄基合金の耐蝕性を、従来の普通工程による3種類のアルミニウム合金と比較して示している。アダムとルイス⁽¹³⁾による。

Figure 8. Corrosion resistance of rapidly solidified aluminum-iron-base alloys, compared to three conventionally processed aluminum alloys. From Adam and Lewis⁽¹³⁾.