

題名	金属学と材料科学・工学の進歩
Title	Metallurgy and the Evolution of Materials Science and Engineering
著者名	モーリス・コーエン
Author(s)	Morris Cohen
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	The Inamori Foundation: Kyoto Prizes & Inamori Grants
受賞回	3
受賞年度	1987
出版者	財団法人 稲盛財団
Publisher	The Inamori Foundation
発行日 Issue Date	8/20/1992
開始ページ Start page	84
終了ページ End page	107
ISBN	978-4-900663-03-4

## 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、それが物づくりに使用されます。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います。

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

天然資源の採掘・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います。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

## METALLURGY AND THE EVOLUTION OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Morris Cohen

### Introduction

Only a minuscule fraction of matter in the universe is accessible to earthlings for useful purposes as well as for study. This “fact of nature” highlights the distinction between matter in general and materials in particular. Thus, materials consist of those substances, both natural and manmade, that society can employ for producing things, e.g., edifices, machines, devices, tools, utensils, clothing, weapons, ornaments, and products of all kinds. From the perspective of history, materials such as wood, stone, fibers, ceramics, and metals have played an intimate role in the advance of civilization, and have become thoroughly ingrained not only in human existence, but also in the quality of life. Clearly, then, materials must be regarded as an essential working medium of society; they constitute one of the basic resources of the human race — along with living space, food, energy, information, and manpower.

Inasmuch as materials thereby comprise an important part of the natural world that can be adapted to serve societal purposes, it is no wonder social and intellectual forces are tending to pull various disciplines and subdisciplines into a coherent body of knowledge in order to reveal more about the character and utility of materials. What has emerged in this evolutionary transition is Materials Science and Engineering (MSE). In a rather natural way, the well-established discipline of metallurgy — namely, the science and engineering of the metallic state — has provided an appropriate paradigm for the newer and broader field of MSE, within which metallurgy now functions as a vital and exemplary component in coordination with other classes of materials. The field of ceramics, like metallurgy, has also reached the status of a discipline in its own right, and is now likewise recognized as a prominent component of MSE.

Before examining the significance of MSE, in concept and in operation, it is well to visualize the scope of the overall materials enterprise.

### The Global Materials Cycle

Some 15 billion tons of raw materials (ores, minerals, coal, crude oil, natural gas, rock, sand, timber, rubber, etc.) are extracted annually from natural sources by mining, drilling, and harvesting from land and sea, to be processed into bulk and engineering materials (metals and alloys, ceramics and glass, chemicals, cement, lumber, dielectrics, semiconductors, plastics and elastomers, paper, composites, etc.) for fabrication into articles of commerce in response to societal demand. In due course, after these materials have played out their respective



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になります。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、これには国家間や会社間での競合と相互依存を伴います。1974年のコスマト報告<sup>(1)</sup>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)、あるいは社会的決定(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

functions in service, they are discarded as scrap, either to be recycled for use again, or somehow returned to nature whence they came. Accordingly, the total materials system is a cradle-to-grave circuit on a global scale, involving interdependence as well as competition among countries and companies. It is evident that this global materials cycle — so named by the COSMAT Report of 1974(1)— participates significantly in the foreign and domestic affairs of nations for both economic and strategic reasons. That study found, for instance, that the materials cycle accounts for about one-fifth of the gross national product together with one-fifth of the human employment in the United States, not including the production of food and fuel.

The materials cycle is driven by societal demand, with value being added progressively to the materials-flow around the circuit. A substantial portion of this added value is in the form of energy. Approximately one-half of the energy consumed by manufacturing industries in the United States is expended in the production, refining, fabrication, and assembly of materials into end-products. Conversely, materials are necessary for supplying energy in useful form. In addition to the indispensability of fuel materials for generating energy, virtually all advanced energy-conversion technologies are presently materials-limited from the standpoint of efficiency, reliability, safety, or cost-effectiveness. This is the case, for example, with gas turbines, nuclear reactors, solar-energy devices, magnetohydrodynamics, high-energy batteries, and fuel cells.

The flow of materials in the materials cycle can be greatly perturbed at any given point by economic factors (e.g., competitiveness), political actions (e.g., embargoes), or social decisions (e.g., environmental regulations), which may take place elsewhere in the world. Shortages in materials are usually due to man-made disruptions rather than to global scarcities in natural sources. It should also be recognized that the operation of the materials cycle inevitably taxes the environment through waste disposal, pollution, and landscape disfigurement, thus impacting the availability of clean living space and injecting real, but hard-to-assess, social costs. These are major issues which must be faced by those concerned with the overall human benefits to be derived from MSE. Metallurgy has had to cope with this problem for many decades.

#### The Nature of MSE

Materials science and engineering comprises a mixture of disciplines (branches of knowledge) that provide an intellectual approach for dealing with



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求するものです。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年前からのことでしかありません。

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和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

#### Materials Science and Engineering

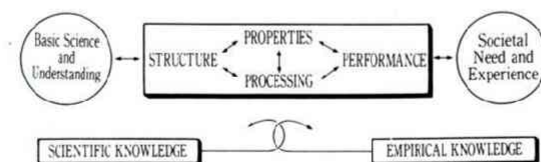


図1. コスマット報告（1974年）<sup>(1)</sup>に基づく材料科学・工学モデル。材料に関連した科学的知識と経験的知識は、互いに反対方向の流れとして示される。

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)

materials as a part of nature, and for harnessing them for human purpose. The aforementioned COSMAT Study(1) arrived at the model of MSE illustrated in Fig. 1. It is a knowledge-generation and knowledge-transfer system which extends from basic science and fundamental understanding (on the left) to societal needs and experience (on the right). MSE attempts to relate the processing of materials (including their synthesis, specimen preparation for research, large-scale production in the materials cycle, and fabrication for end-use) to their inner architecture (comprising all levels of structure and composition) and their manifested properties (of all relevant types), and then to their ultimate performance in service applications. COSMAT defined MSE more succinctly but in similar terms: “MSE is concerned with the generation and application of knowledge relating the composition, structure, and processing of materials to their properties and uses.” Metallurgy has functioned in this way for over a hundred years, since the momentous disclosure of microstructure, whereas MSE came into being in this mode only some 30 years ago.

Materials science and engineering is holistic in the sense that it emphasizes a continuity in the field of materials between science, engineering, technology, and the requirements of society. As such, it exposes humankind to the opportunities opened up by fundamental knowledge concerning materials, and conversely, it exposes scientific theory and experimentation regarding materials to the demands and experience of humankind. In fact, MSE operates most effectively for discovering and applying new processes and materials when the countercurrent flows (indicated in Fig.1) of scientific knowledge gained from research and empirical knowledge acquired from experience are so intimately mixed that each catalyzes the other. Thus far, MSE has not replaced or eliminated any of the disciplines or subdisciplines that contribute to it. Instead, MSE acts as a multidisciplinary arena for all branches of knowledge that can shed light on materials. In so doing, MSE promotes new interactions and interdisciplinary objectives that are not otherwise fostered among the separate disciplines.

Case studies of selected material innovations have been described in considerable detail(2), covering metallic, ceramic, polymeric, and electronic materials. Generally speaking, these advances were initiated by societal “pull” rather than by scientific “push,” although science was invariably brought to bear in the progress toward successful utilization. Even the oft-cited transistor “break-through”—which emanated so spectacularly from brilliant theory, basic research, and novel processing—was actually first inspired (at the Bell Telephone Labora-



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。<sup>(2)</sup> 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実例です。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

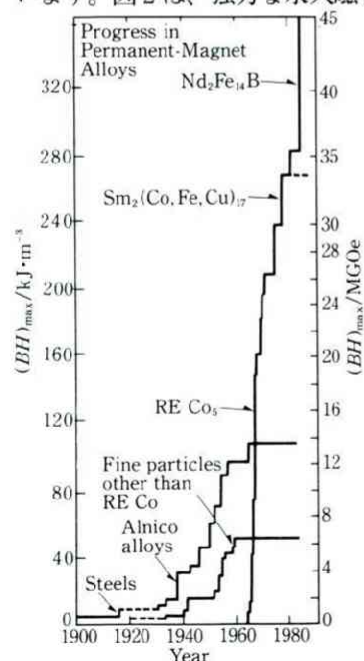


図2. 1900年以降の永久磁石材料に関する進歩。性能を表す数字としての最大エネルギー積 $(BH)_{\max}$ を用いて示した。1985年のMNAB報告<sup>(3)</sup>による。

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).

tories) by a perceived societal need to move well beyond the existing vacuum-tube technology in order to achieve more complex switching and multichannel transmission circuitry for future communication systems. This is a particularly revealing example of the synergistic interplay between experience and scientific findings in MSE. It is a functional style that characterizes the way MSE works, but it has long been exemplified in the operation of metallurgical science and engineering.

More recent examples in MSE continue to be consistent with this theme. Figure 2 portrays the “quantum” advances that have been attained in strong permanent magnets, notably in the discovery of the  $\text{Nd}_{12}\text{Fe}_{14}\text{B}$ -type intermetallic compounds and their appropriate processing (3). This development resulted from experimental research and societal pull. No theory was on hand to predict such magnetically strong compounds or to guide their improvement. Undoubtedly, the necessary theoretical work will be forthcoming in time and will contribute quite beneficially to both the understanding and the further progress of these technologically important materials, but MSE and society do not have to wait for that desirable occurrence. One can already see this materials advance is likely to exert a major influence on new motor and electronic device designs, featuring greater efficiencies and miniaturization.

The dramatic discovery of high-temperature superconductivity in layered copper oxides, more specifically  $(\text{La}, \text{Sr})_2\text{CuO}_4$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ , offers another case in point, as denoted by the striking increase of the critical temperature ( $T_c$ ) in Fig. 3(4). Here again, there was no theory even to hint at, let alone predict, this astonishing solid-state behavior. Indeed, the ensuing burst of excitement throughout the world has been due not only to the prospect of revolutionary new technologies (the societal pull), but also to the demonstrated inadequacy of existing theory for a physical property as noteworthy as superconductivity. And yet, in view of the very nature of MSE, experimental research on the associated processing/structure/property relationships in these ceramic materials is proceeding apace, with due attention to the combined effects of temperature, magnetic field, and current density for accessing and stabilizing the superconducting state of candidate materials, as suggested by Fig. 4(5). Furthermore, inasmuch as MSE carries over to materials performance and end-products, fabricability to useful shapes and suitable mechanical properties to withstand service stresses are also essential objectives, no less important than any further raising of  $T_c$ . This need to balance many factors for eventual performance in service highlights one of the significant differences between MSE and solid-state physics.



したものです。特に、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 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。<sup>(3)</sup>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、磁気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 $(\text{La}, \text{Sr})_2\text{CuO}_4$ と $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 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<sup>(4)</sup>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<sup>(5)</sup>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、この単純な論理を妨げるものが多く

#### Predictability versus Reciprocity in MSE

In MSE, one would ideally like to use the structure of materials to predict properties, then to use properties to predict performance, and finally to select a sequence of processing procedures that will yield the desired material and inner structure at a reasonable cost. However, there is much that interferes with this simple logic, in view of the deliberate continuity of science and engineering in MSE. The properties which enable materials to perform their respective assignments in service, and in harmony with the diverse functions of their companion materials, are numerous and complex, and they must also manifest themselves satisfactorily under the multidimensional requirements of the designated application. There is just no way of itemizing all of the operating and environmental variables for complete property simulation in the laboratory; moreover, the properties that can be measured will, at best, be only simple images of what may be at play in service performance.

In a real sense, then, materials behavior in service is unknowable from properties alone (6). Properties can offer valuable guidance when combined with accumulated experience, but one would not expect to rely on prediction in the first instance, no matter how accurately the measurable properties might be known. As with a musical instrument, no one can truly deduce how well it will perform until it is actually played. Indeed, empirical knowledge is often needed first in order to decide just which properties should be evaluated to correlate with performance. It is not predictability but mutual reciprocity between properties and performance (with each reinforcing the other in a symbiotic interplay) that participates so successfully in the practical output of MSE. In line with the MSE model of Fig. 1, we are referring here to a purposeful intermixing between scientific experimental knowledge relating to selected properties (mechanical, chemical, electrical, etc., as the case may be) and empirical knowledge arising from service experience.

Similar reasoning applies to structure/property relationships. Much of the science in MSE is directed to explanations of the observed properties of materials in terms of their internal structure. Such linkages are typically made through theories, models, or assumed mechanisms. However, the very idea of structure encompasses many levels of fine scale entities or “building blocks” nesting together in hierarchies of regularities and irregularities. The schematic structure of a macromolecular composite material in Fig. 5 — specifically a tendon which connects muscle and bone in humans and animals — is particularly instructive; it



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面的な要求を満たすとともに、独自の特性をも十分に保つ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。<sup>(6)</sup> 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、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

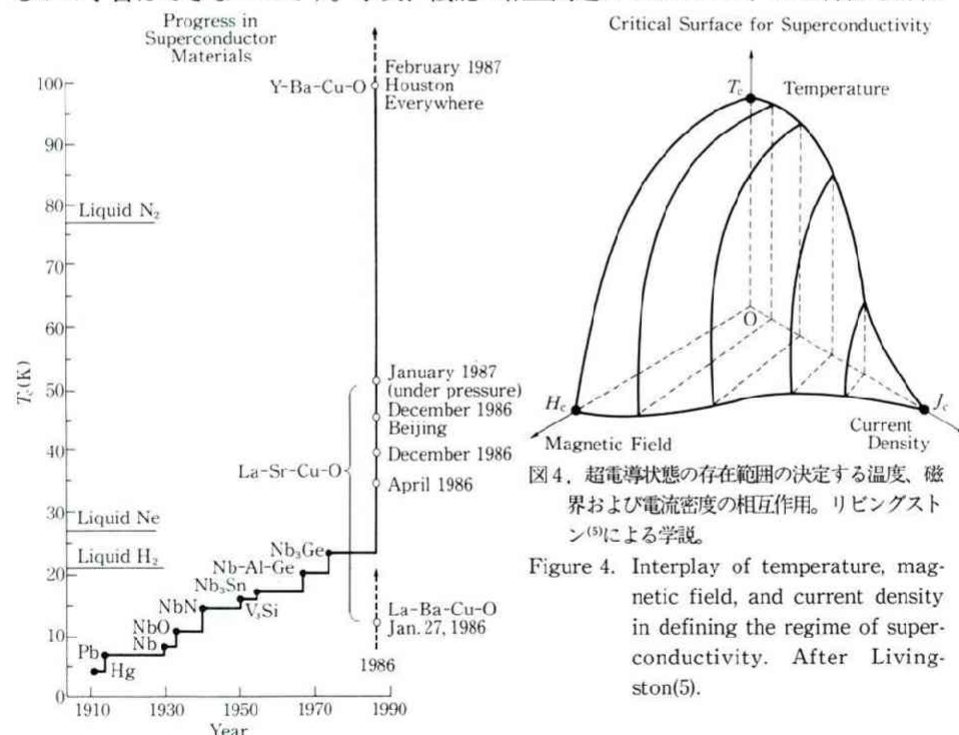


図3. 超電導材料の臨界温度 ( $T_c$ ) の向上。ミュラーとベドノーズによる集録<sup>(4)</sup>より抜粋。  
Figure 3. Advances in the critical temperature ( $T_c$ ) for superconductivity.

From compilation of Müller and Bednorz<sup>(4)</sup>.

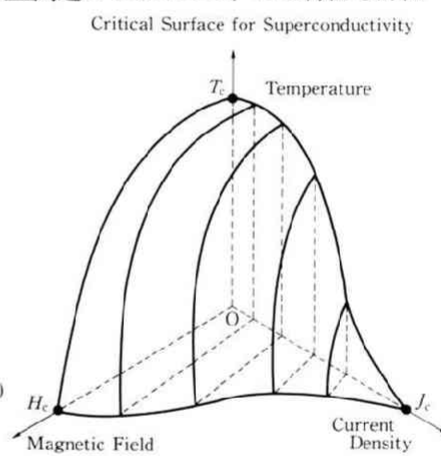


図4. 超電導状態の存在範囲の決定する温度、磁界および電流密度の相互作用。リビングストン<sup>(5)</sup>による学説。

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

illustrates several hierarchical levels, together with their respective size scales, nomenclature, and methods of detection<sup>(7)</sup>. The many kinds of interfaces in Figure 5 must also be considered as important property-influencing elements of the structure. And not shown here are still finer constituents such as molecules, atoms, electrons, and ghostlike particles ranging on down through the subnuclear hierarchies until comprehension is exhausted. Under these circumstances, and in the context of MSE, one must surely question whether it will ever be possible to predict from first principles, or from structure alone, the relatively intricate properties that make materials useful to humankind. Fortunately, MSE can avoid this profound issue by depending on the mutual reciprocity between internal structure and measured properties, and not on a first-order predictability of one from the other. Again, MSE promotes a synergistic mixing of scientific and empirical information—with structure and properties contributing, each in its own way, to a deeper and more helpful understanding of both.

It becomes evident that in its comparatively brief existence MSE has taken on the back-and-forth information-transfer features which have successfully evolved in metallurgy ever since, over a century ago, Henry Clifton Sorby opened up the science of metallography by revealing the microstructure of polished-and-etched iron and steel with the petrographic microscope<sup>(8)</sup>. Plainly, the ultimate conversion of scientific understanding into societal well-being via MSE cannot be represented by a one-way stream of knowledge into practice. It depends more on turbulent, mutually interactive flows among the MSE components of processing, structure, properties, and performance. MSE seems to function most effectively as a dynamic system of knowledge generation and utilization when its elements are closely coupled, and are also subjected to the stimulating and biasing forces of human needs.

### An Example of MSE in Operation: Rapid Solidification Processing

In MSE as well as in metallurgy, advances in structure/property relationships — and likewise in the development of new materials — are often crucially dependent on the emergence of novel processing methods. One such instance is rapid solidification processing.

With certain alloy systems, cooling rates of  $10^4$ – $10^6$  degrees per second from the liquid state can avoid crystal nucleation, or solidification in the ordinary sense, and this results in the formation of metastable noncrystalline solids, otherwise termed metallic glasses. This phenomenon has been known since 1960 when the



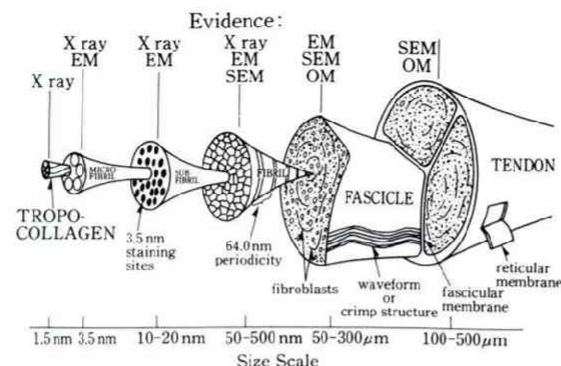


図5. 生体物質（腱）の階層的構造の模式図。寸法尺度、名称および観察方法を示す。略語：DSC—示差走査熱量測定、EM—電子顕微鏡、SEM—走査電子顕微鏡、OM—光学顕微鏡。カステリック、その他<sup>(7)</sup>による。  
Figure 5. Schematic illustration of the hierarchical structure of a biological material (tendon), showing size scales, terminology, and methods of observation. Abbreviations: DSC—differential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

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。<sup>(7)</sup>

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

innovative experimental technique of splat quenching was introduced (9). It led to intensive scientific study of the structure and properties of metallic glasses, and at the same time stimulated the development of larger-scale rapid solidification processes such as melt spinning for thin-strip casting, and atomization for powder making. Correspondingly, much attention of a scientific nature was directed to the kinetics of solidification under conditions of rapid cooling and supercooling.

With regard to property measurements, it was found that iron-boron-silicon and iron-boron-silicon-carbon amorphous solids are not only ferromagnetic, but also exhibit very low hysteresis and eddy-current losses, primarily due to their high electrical resistivity as well as their relative freedom from magnetocrystalline anisotropy and from microstructural defects normally associated with the crystalline state. The prevailing societal pull for saving energy, in this instance through decreased core-losses in electric transformers, provided a strong driving force for further processes and alloy development based on these metallic glasses. The ensuing improvement in core-loss reduction is shown in Fig. 6, comparing the new amorphous materials with the more familiar silicon steels (10). The 60-Hz core losses of the metallic glasses going into the service testing of distribution transformers are less than one-third of the best silicon steels, and further reductions to one-twentieth have been achieved (10).

In the operation of MSE, it will be obvious that the effective utilization of metallic glasses in transformers depends not only on favorable magnetic properties, but also on mechanical behavior, formability, stability versus time and temperature, and, of course, on the overall economics. Such interacting factors can only be resolved and optimized by promoting a close interplay of scientific and empirical findings. It has been reported that the performance tests on the subject transformers have demonstrated improved service as expected, and valuable additional information has been accumulated. Actual production is now underway. Core losses in distribution transformers alone in the United States are estimated to represent a wastage of three-quarters of a billion dollars annually, of which approximately one-third can be saved by using the metallic glass cores (10). Opportunities for the still-larger power transformers lie ahead, while many applications for amorphous alloys in smaller magnetic devices are already at hand.

This example of a materials advance serves to illuminate the way in which novel processing methods can stimulate the detailed study and development of previously unavailable materials and, in turn, lead to new technologies and



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・腐食した鉄と銅のミ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。<sup>(8)</sup>科学的理解を、材料科学・工学を経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る結晶核形成、すなわち凝固を阻止することができて、準安定な非晶質個体、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。<sup>(9)</sup>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個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

products for filling the needs of society.

When rapid solidification processing is directed to crystalline materials, a wide diversity of microstructures, not otherwise attainable, can be accessed. This includes microstructural refinement of the matrix phase, unusual dispersions of embedded precipitates, high degrees of solid-solution supersaturation, and formation of metastable states. The dispersed particles are of special interest here because they are extremely fine, well distributed, and can have limited solubility in the matrix phase. Because of the latter circumstance, the dispersed precipitates resist coarsening at high temperatures, and so tend to remain effective in pinning grain boundaries for inhibiting grain growth during subsequent thermomechanical treatments. For similar reasons, dispersion strengthening tends to be maintained at elevated temperatures. Moreover, rather large volume fractions of the dispersed phases are obtainable because the prior “solutionizing” is carried out in the liquid state, and precipitation into unduly coarse embrittling inclusions on cooling is avoided by the rapid solidification process.

Rapid solidification by nitrogen-gas atomizing for achieving uniform dispersions of the primary carbides in high-speed steels has been in industrial practice since 1970 (11), benefiting from improved toughness at high hardness levels.\* However, with the later innovation of centrifugal atomizing (12) and its potential for advanced superalloys, the U.S. Air Force became intrigued with the wider prospects for aerospace applications and initiated funding for more broadly-based research and development on new alloy systems, thus exemplifying another classic instance of societal pull in action. Because of the ultrafine-scale structures to be investigated, a need arose for the most sophisticated high-resolution electron microscopy and microanalytical instrumentation, and there erupted a spontaneous urge for scientific inquiry. Mutually stimulating interactions throughout the materials knowledge-transfer system of Fig. 1 came into play, rebounding dynamically among scientific explanation, property enhancement, process improvement, and high-technology performance, while concomitantly inspiring the joint participation of governmental, industrial, and academic institutions.

Some property results on rapidly solidified aluminum alloys are summarized in Fig. 7(13). Unusual ranges of composition and exceptional dispersions of intermetallic phases are made possible by rapid solidification. The advantageous strength-retention at elevated temperatures shown in Fig. 7 for this class of materials is a consequence of the resistance to coarsening of the relatively stable dispersed phases. It is significant to note that, on a density-compensated basis,



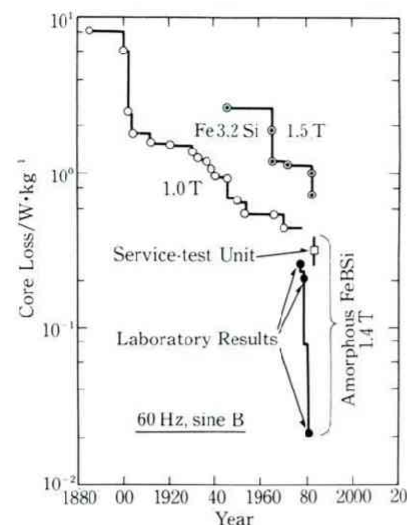


図6. 過去100年間に於ける電気変圧器材料の鉄損の減少に関する進歩。ルボルスキー<sup>(10)</sup>による。

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

ミ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す。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。<sup>(10)</sup> 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。<sup>(10)</sup>

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。<sup>(10)</sup> 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

some of these aluminum alloys now equal or exceed the high-temperature strength of titanium alloys. These aluminum alloys also exhibit marked resistance to saline corrosion (Fig.8), which probably arises from the alloy chemistry and microstructural uniformity attainable by rapid solidification (13).

Up to the present time, the cost of rapid solidification processing has tended to channel its commercial use toward high-value-added end-products that may not yet be in the public domain. But it is clear that the underlying features of MSE are at work.

### Closure

Through the operation of the materials cycle on a global scale, materials now constitute a basic resource of society that only connects peoples and governments on this planet, but also joins humankind into a partnership with nature. The ultimate purpose of MSE is to help advance human understanding of nature by probing its materials thoroughly, and concurrently to help mankind live in harmony with nature by employing its materials intelligently. This dual objective, both intellectual and utilitarian, forms an integral part of the overarching contributions of science and engineering toward the general goal of human betterment and social progress.

At present, MSE functions as a mixture of disciplines, i.e., as a multidiscipline, rather than as an individual branch of learning like physics, chemistry, metallurgy, or ceramics. Of course, these disciplines originally did not enjoy sufficient coherence or identity to be recognized by society as unified fields of inquiry and endeavor. When such recognition does happen to emerge, it usually signals a recodification or repackaging of knowledge by society, and is characteristically reflected in the advent of university departments, curriculum, degrees, job titles, technical societies, and professional groupings. This state of cohesion has not yet been decisively reached by MSE, but events are certainly moving in that direction. MSE has already established sufficient integrity to provide an attractive framework for newer classes of materials coming on the scene. Indeed, it is no longer likely that polymeric, electronic, photonic, and biological materials will form separate disciplines by themselves, as was the case earlier for metals and ceramics. It may take another generation or two for society to determine whether the various fields of knowledge that contribute to MSE will converge into a single discipline unto itself. An interesting example of this kind of evolutionary change is the field of medicine, which became a recognized discipline in spite of its many



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年以来、<sup>(11)</sup>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<sup>(12)</sup>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ミクロ分析機器の必要性が生じ、そこに科学的探究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<sup>(13)</sup>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、ミクロ構造の均一性によるものでしょう。<sup>(13)</sup>

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

disparate specialties and subdisciplines. MSE can attain a similar stage of intellectual and professional cohesion by demonstrating to society that it provides a new challenge for studying nature deeply and for using nature wisely.

In the meantime, MSE is passing through a vibrant period of ferment and wondrous change. Knowingly or unknowingly, a substantial part of the world's technical community is caught up in it; and human well-being everywhere depends on it.

### Acknowledgements

The author is immensely grateful to the Inamori Foundation of Kyoto for inviting this paper on this special occasion. It likewise provides an unique opportunity for him to express his deep appreciation to Marguerite Meyer, his secretary and alter ego for many years, whose constant support has been of inestimable value in his career. He is also thankful to Lois Malone, Miriam Rich, and John Mara, all of MIT, who helped unsparingly in the preparation of this manuscript. Professor Eric Bear of Case Western Reserve University was kind enough to furnish Figure 5, as well as permission for its reproduction here. And lasting gratitude is due the Office of Naval Research and the National Science Foundation for their long-range sponsorship of the author's research and scores of his students over the years at MIT.

### References

1. COSMAT Summary Report, "Materials and Man's Needs," National Academy of Sciences, Washington, D.C. (1974). See also "Materials Science and Engineering: Its Evolution, Practice and Prospects," M. Cohen, Ed., Mater. Sci. and Eng. 37, No.1 (Jan.1979), including papers by M. Kranzberg and C.S. Smith, "Materials in History and Society," Part I, p.1; and R.S.Classen and A.G.Chynoweth, "Materials Science and Engineering as a Multidiscipline," Part II, p.41.
2. COSMAT Supplementary Report, Vol. I, "The History, Scope, and Nature of Materials Science and Engineering," National Academy of Sciences (1975). See also R.S.Classen and A.G.Chynoweth, "Materials Science and Engineering as a Multidiscipline," Mater., Sci. and Eng., 37 No.1 (Jan. 1979) p.51.
3. "Magnetic Materials," MNAB Report No. 426, Committee on Magnetic



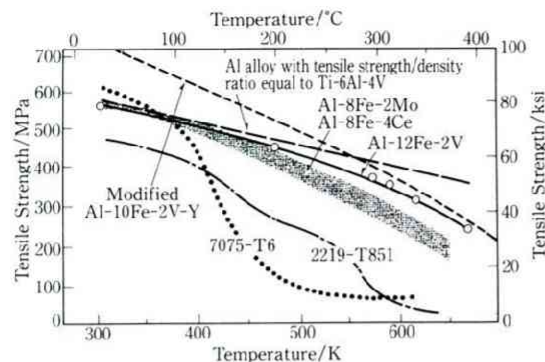


図7. 急冷凝固アルミニウム-鉄基合金の高温強度を、従来の普通工程による2種類の高力アルミニウム合金(7075-T6と2219-T851)と比較して示している。破線は、実用チタン合金と密度で補正した強度が同じになるのに必要なアルミニウム合金の強度を示す。アダムとルイス<sup>(13)</sup>による。

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<sup>(13)</sup>.

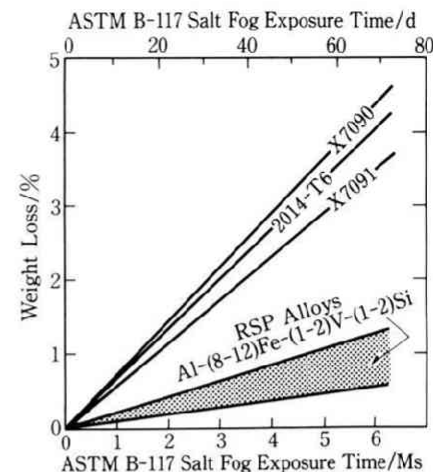


図8. 急冷凝固アルミニウム-鉄基合金の耐腐性を、従来の普通工程による3種類のアルミニウム合金と比較して示している。アダムとルイス<sup>(13)</sup>による。

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

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用を見るとき、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、化学、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

Materials, National Materials Advisory Board, National Academy Press, Washington, D.C. (1985)

4. K. Muller and J.G. Bednorz, "The Discovery of a Class of High-Temperature Superconductors," *Science*, 237 (4 Sept. 1987) p.1133.
5. J.D. Livingston, *Superconducting Materials: Metallurgy*, Encyclopedia of Materials Science and Engineering, M.B. Bever, Ed., Pergamon Press, Oxford and MIT Press, Cambridge (1986).
6. M. Cohen, "Unknowables in the Essence of Materials Science and Engineering," *Mater., Sci. and Eng.*, 25 (1976) p.3
7. J. Kastelic, A. Galeski, and E. Baer, "The Multicomposite Structure of Tendon," *Connective Tissue Research*, 6 (1978) p.11
8. C.S. Smith, "A History of Metallography," The University of Chicago Press, Chicago, IL (1960) Chapter IV on "The Work of Henry Clifton Sorby," p.169
9. W. Klement, R.H. Willens, and P.E. Duwez, "Non-crystalline Structure in Solidified Gold-Silicon Alloys," *Nature*, 187 (1960) p.869.
10. F.E. Luborsky, Proc. NATO Conf. on Glasses — Current Issues, A.F. Wright and J. Dupuy, Eds., Martinus Nijhoff, The Hague (1985) p.139.
11. A. Kasak, G. Steven, and T.A. Neumeier, "High-Speed Tool Steels by Particle Metallurgy," Soc. of Automotive Engrs., SAE Paper No. 720182 (1972) p.1.
12. P.R. Holiday, A.R. Cox, and R.J. Patterson, "Rapid Solidification Effects on Alloy Structures," Proc. First Intl. Conf. on Rapid Solidification Processing: Principles and Technologies, R. Mehrabian, B.H. Kear, and M. Cohen, Eds., Claitor's Publishing Division, Baton Rouge, LA (1977) p.246



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です。

## ■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・ペーア教授は、この論文のために図5を提供して下さり、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）に変わることをない謝意を捧げます。

13. C.M.Adam and R.E.Lewis, "High Performance Aluminum Alloys," Rapidly Solidified Crystalline Alloys, S.K.Das, B.H.Kear, and C.M.Adams, Eds., The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA (1985) p.157.

\* When particulates are produced in rapid solidification processing, consolidation into bulk materials is typically accomplished by powder-metallurgy techniques such as hot extrusion and isostatic pressing.



稲盛財団1987——第3回京都賞と助成金

発 行 1992年8月20日

発 行 所 財団法人稲盛財団

京都市下京区四条通室町東入函谷鉦町87番地 〒600

電話〔075〕255-2688

製 作 (株)ウォーク

印刷・製本 大日本印刷株式会社

ISBN4-900663-03-4 C0000