

本田財団レポートNo.89

人類に役立つ新材料

シュツツツガルト、マックス・プランク金属研究所名誉所長

ギュンター・ペツォー教授

New Materials in the Service of mankind

Prof. Dr. Günter Petzow

Max-Planck-Institute for Metals Research, Stuttgart

財団法人 **本田財団**

ギュンター・E・ペツォー

マックス・プランク金属研究所名誉所長
シュツツガルト大学名誉教

Günter E. Petzow

Director emeritus the Max-Planck-Institute
for Metals Research

Honorar Professor, University of Stuttgart



■略歴

- 1926 ドイツに生まれる。
- 1956 シュツツガルト大学工学修士
- 1959 シュツツガルト大学理学博士
- 1965～94 マックス・プランク材料科学研究所粉末冶金研究室長
- 1974～ シュツツガルト大学名誉教授
- 1982～95 国立メタログラフイー養成学校校長
- 1984～94 マックス・プランク金属研究所先端セラミックス研究室長
- 1988～91 ドイツ金属学会会長
- 1989～92 マックス・プランク金属研究所所長
- 1994～ マックス・プランク金属研究所名誉所長

■受賞歴

- 1982 米国国際メタログラフイー学会
ヘンリー・クリフトン・ソルベイ賞
- 1984 ドイツ金属学会 エミール・ハイン賞
- 1990 ドイツ連邦共和国 功績十字勲章
- 1995 勲三等旭日中綬章

■会員

- 日本金属学会
- ドイツ金属学会
- 欧州科学技術アカデミー

●著書、論文：「材料組織観察法」他600以上

■Personal History

- 1926 Born in Germany
- 1956 M.S. in Engineering, University of Stuttgart
- 1959 Ph.D. in Materials Science, University of Stuttgart
- 1965～94 Founder and Head of Department of Powder Metallurgy at the Max-Planck-Institute for Materials Science, Stuttgart
- 1974～ Hon. Professor of the University of Stuttgart
- 1982～95 Director of the National School for Technicians in Metallography
- 1984～94 Founder and Head of the Department of Advanced Ceramics at the Max-Planck-Institute for Metals Research
- 1988～91 President of the German Society for Materials
- 1989～92 Executive managing Director of the Max-Planck-Institute for Metals Research
- 1994～ Director emeritus of the Max-Planck-Institute for Metals Research

■Awards

- 1982 Henry Clifton Sorby Award, International Metallographic Society, USA
- 1984 Heyn-Denkmunze, Highest Distinction of the German Society for materials(DGM)
- 1990 1st Class Order of Merits from the President of the Federal Republic of Germany
- 1995 Order of the Rising Sun, Gold Rays with Neck Ribbon from the Japanese Government

■Memberships

- Japan Institute of Metals(JIM)
- German Society for Materials(DGM)
- European Academy for Science and Art

●His more than 600 publications deal with investigations on processing and properties of new inorganic materials.

人類に役立つ新材料

1997年11月17日

第18回本田賞授与式記念講演

1997年度本田賞受賞者

シュツツツガルト、マックス・プランク金属研究所名誉所長

ギュンター・ペツォー教授

人類に役立つ新材料

ー地球にやさしい技術革新ー

ーエコ・テクノロジー的アプローチー

1997年11月17日 第18回本田賞授与式記念講演

シュツツツガルト、マックス・プランク金属研究所名誉所長

ギュンター・ペツォー教授

本田夫人様、川島理事長、大使閣下、ならびにご出席の皆様方。

本日は、私にとって、非常に特別な日であり、非常に大きな喜びと深い感謝の念を抱いております。世界的な有名な本田賞の受賞者の中に加えられることは殊のほか名誉であり、また非常に大きな刺激材料であります。また本田夫人に対して心から感謝を申し上げたいと思います。すばらしいメダルと多額の副賞をいただきまして本当に有難うございます。また、川島理事長に対してはこの上も無いお誉めの言葉をいただき感謝しております。これは恐縮して聞かせていただきましたし、もちろん、すばらしい表彰状に対し御礼を申し上げます。

また、特に、私の母国の大使がこの授与式に出席していただき、本田財団、ならびに基礎科学に対し敬意を表していただいたことを喜んでおります。大使閣下からそのご見識の高いお言葉をちょうだいしたことに対し御礼申し上げます。科学技術会議の特別な地位については聞き及んでおります。この技術会議の高い地位にある森様にご出席していただいておりますことは、さらなる榮譽の印であります。森様、ご出席いただき、またご祝辞をいただきまして有難うございます。

また、私を受賞者に指名していただいた方、またこの指名を厳密に検討され、受け入れられご推薦いただいた各団体の方々に対し御礼申し上げます。また、この素晴らしい行事を非常に手間もかけて手配していただいた方々、特に本田財団の職員の方々に対し感謝いたしますと存じます。

「水を飲むとき、その水源を忘れるな」というのは格言であります。この意味で、私は私の研究を支えていただいたマックス・プランク金属研究所に対しても、お礼を申し上げたいと思います。したがって、この賞は、間違いなくこの研究所への表彰でもあります。この研究所は、本日ご出席の多くの皆様方がご自身の経験を通じてご存じのはずです。

もちろん、私は偉大な創設者の本田宗一郎氏に対し個人的な感謝の気持ちを捧げたいと思います。同氏の名前が付いているこの賞は、私を同氏と特別な形で結び付けております。この賞を寄贈することによって、同氏が心の奥深くで考えていたこと、すなわち、すべての技術は人間性によって形作られるべきだということを後世に伝えたいという氏の意志を充分考慮しなければなりません。

本田賞を受賞した最初の材料科学者として、私は材料を講演の主題とし、これを本田氏のコンセプト、すなわちエコ・テクノロジーという枠の中でお話したいと即座に決定いた

しました。 本田宗一郎氏は鍛冶屋の息子として、若いときからすでに材料に非常に興味を持っていました。“Honda about Honda” [1]という本の中で、少年時代に、赤く熱せられた鋼が加工され、火花が散っていくのを息を殺して眺めていました。「知らず知らずのうちに、材料に対する、またその後、力強い技術の世界に対する私の理解が目覚めてきた。」と書いておられます。

次にここでこれからお話する内容について、触れてみたいと思います。

開発の歴史と人類、技術そして材料の進歩との間の密接な相互作用についてです。また、材料の有効性と限られた資源に関するその重要性についても述べたいと思います。

入手の可能性に限界があるため、我々は限られた資源を大事に使用し、これをできるだけ節約して取り扱うことを余儀なくされております。これは材料の再利用、材料の最適化と新しい材料によって可能であります。これらの現在の挑戦すべき課題は、本田氏の哲学に鑑みながら、またこれから生じるまとめと共に論じることいたします。

開発の歴史

類、材料と技術の間には、数百年間にわたって間断のない相互作用が継続しています。進歩の基本部分は図1と図2に図示されているように、永遠に変わらず三つが相互に関係しております[2]。

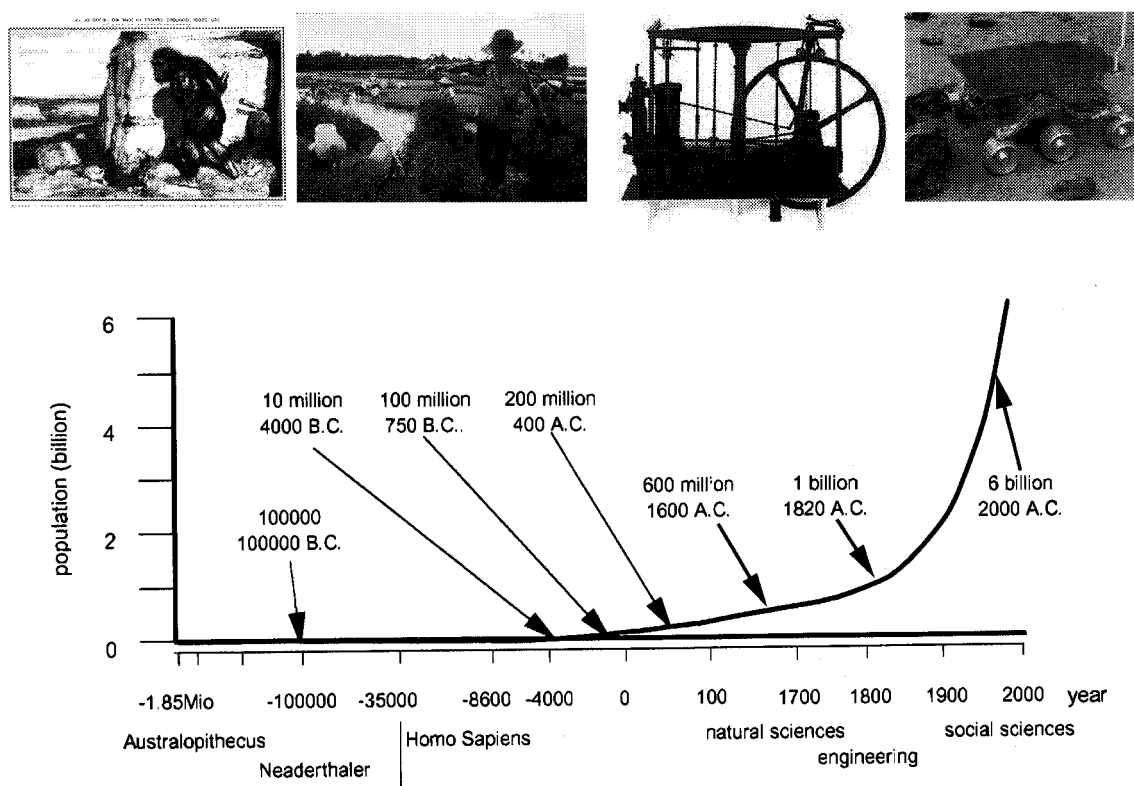


図1 人類の進化

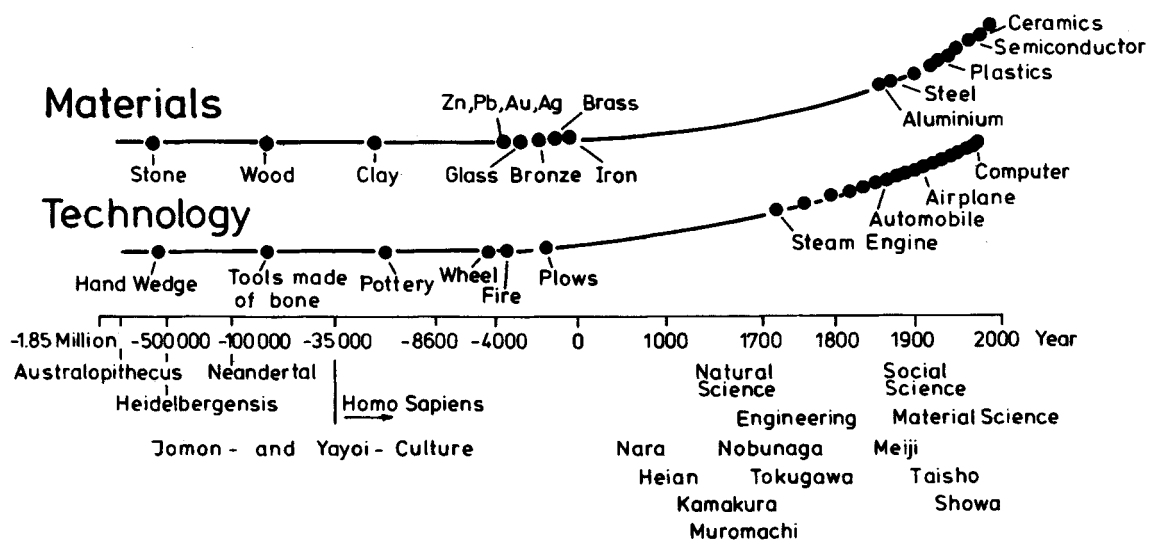


図2 材料と技術の進化

地球の人口は、紀元前約 200 万年前、最初の人間が現れていらい継続的に増え続けております。すなわち、人口は約 10 万年の間に推定 10 万人から 1,000 万人と百倍にふくれ上がっており、これは西暦紀元前 4,000 年に到達されていました。天災、ペストや人を殺戮する戦争があったにもかかわらず、1820 年までには人口は再び 100 倍増加し、10 億人となりました。しかしこれに要した時間は、6,000 年弱でありました。現在約 60 億の人々が住んでいますが、倍増するのには約 33 年の期間にすぎませんでした。したがって、200 年足らずで世界の人口は 1,000 億 (10^{11}) になると考えられます。人口増加が 100 倍になるのに、400 年とかかりませんでした。これは 6,000 年と 10 万年と比較すれば、人口増加のペースは驚くほど早くなっています。

もちろん、これらの統計的な外挿が大部分合理的なものでないことは我々すべて承知しています。しかし、この急激な増加が継続するか、最終段階に来るか否かを問わず、人類は今後、来るべき数十年の間に劇的な人口増加に直面することになっています。

人口の過剰は、ますます我々の生活と我々の考え方に影響を及ぼすことになるでしょう。

上記の図 1 の 4 つの小さな写真は、生活状況の急激な変化を表しています。西暦紀元前 4,000 年頃、初期の人間が狩人としての遊牧民の生活様式から、定着して農業を始めました。その後、18 世紀の中頃に、ジェームス・ワットの最初の蒸気エンジンが象徴した産業革命が起こっております。いずれの場合にも、生活慣習の変化は必要不可欠でありました。これは人口増加のためであります。いずれの場合にも、材料と技術は一定の標準に達し、その結果、人類にこのような劇的な変化が可能となったのであります。我々は、明らかに今日利用できる高い技術的水準に基づき、また火星探査のサバーナーに象徴されている第三の革新の初期の段階にあります。この革新がいやおうなしに生態環境を新しいものにしていくことは間違いありません。

図2で、材料と技術の進歩発展の曲線が描かれています。進歩発展の曲線の上昇は、発見と技術的な出来事の数を含んでおります。ここでは分かりやすくするため、すべてのものは記述してありません。

我々が学校ですでに学んでいるように、材料は我々の最も古い文化的資産の一つであります。歴史上で、時代はその当時支配的であった材料の名前を付けられております。石器時代、銅・青銅時代、それに現在終わりとなってる鉄器時代がこれであります。プラスチック、半導体や超伝導体、先端合金やセラミックスなどが次々に出現し、それらが技術開発を促進させ、しばしば自動車、航空機やコンピュータなどの場合のように遠くの分野までに影響を及ぼしています。

材料と技術との相互作用で、人間はもちろん決定的な役割を演じています。材料と技術は両面の価値を持っています。両者は理論的にいって、良くも悪くもなく、人間のみがその応用と使用について決定します。

材料の有効性

今日、図3に図式化して示したように、広範な種類の材料があります。木材や砂などの天然の材料の他に、広い範囲の工学技術で加工した材料があり、これは金属、有機非金属とポリマーに細分化されています。その全てが、鉄鋼、セラミックスなどのように、下位分類をもっております。複合材料は、種々な材料の非常に複雑な組み合わせの場合が多いのでありますが、特別の用途にますます適したものとなっております。

データバンクに蓄積された材料を数えただけでも、数百万の異なった材料がすでに用いられております。この数は大きいように見えますが、記録されていない材料の数は、後で示すように、もっと大きいのであります。

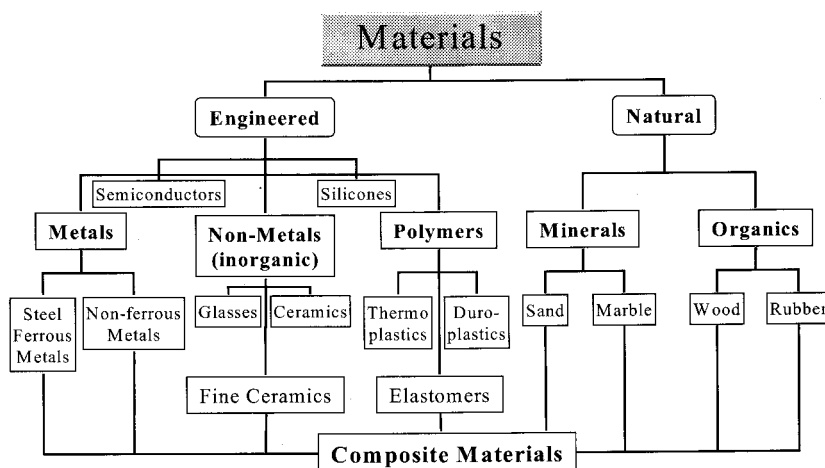


図3 有効な材料の分類

材料は技術と人間の生活にとって欠く事のできない物ではありますが、今日でも、材料はほとんど当然あるものとして受け取られています。これはほとんどの人にとって、自明なことであります。材料なしでは、人類は直ちに非常に困った状態におちいり、約 500 年前にジョージアス・アグリコラが言ったこあのが現実となりましょう。以下の通り述べております[3]。

「．．． 人類が金属を用いるのをやめれば、健康を守り、また維持し、さらに我々の文化的価値に従い生活を送る可能性はすべて消え失せることになるでしょう。人類は、野生動物の間で最もいやらしく最も惨めな生活を送ることになるでしょう。．．． 」

金属について言われているすべてのことは、すべての材料に対し一般化することができます。アグリコラは材料の社会的な面、すなわち、保健と文化の問題、ならびに全般的な生活水準の問題について述べております。その当時の材料、技術と社会の間を関係付けております。当時、日本では織田信長と豊臣秀吉による日本の統一が達成され、また地球の反対側ではコロンブスがインドに向けて航海し、アメリカを発見しております。現代では、材料に対する必要性が増大していることは明白であります。極めて大まかな推定によれば、あらゆる材料の消費量は、10 年間で約 15% 増加しております。その大部分は、金属であります。その金属の消費量は減少しており、これに対してポリマーの消費が増大しております。

材料の消費量が急激に増大しているのは、人口の急速な増大のみならず、人々の需要がより強くなっていること（車が 1 台から 2 台に、ワイシャツが 2 枚から 10 枚へ、など）によって起こっております。消費の増大は、我々の生活への経済的な改善には非常によいものであります。同時に、いずれにせよ限られた資源にたいしては、重い負担を課すものであります。さらに、材料に対する需要の増大は地球の新しく補充できない資源の「略奪」を意味します。これは多くの金属にとって残存期間が非常に短く、警戒すべきほど短いことが明らであります。例えば、鉛は 23 年間、銅は 35 年、ニッケルは 40 年しかありません。

このような例はまだたくさんありますが、ほんの 2、3 の例を上げただけであります[4]。これらのデータは、昨年のある生産率を反映しております。中国やインドが先進工業国並の生活水準に到達すれば、資源はさらに劇的に減少することになります。

我々の進歩発展は長い時間をかけて現在の状況に到達しております。しかし、急速な人口増加の曲線と技術革新のペースが本当の意味で真の進歩を表すか否かについては、疑問が起きます。我々の地球はしばしば宇宙船と比較されております（図 4）がその資源は限られており、その結果、その積載容量は限られております。経済システムとしての「宇宙船」地球は限られた資源と人口の増加によって深刻な問題に直面しております。宇宙規模で考えれば、この惑星・地球はその周囲にエネルギーを放出する部分であります。外部から、すなわち太陽からそれを補うことができます。現在のところ、これはどちらかと言えば、未来のことと思えるかもしれませんが、太陽熱技術は非常によく発達しており

ます。したがって、あまり遠くない将来にエネルギーの損失は図4に図示されているように、少なくとも部分的には均衡させることが出来るようになるかもしれません。

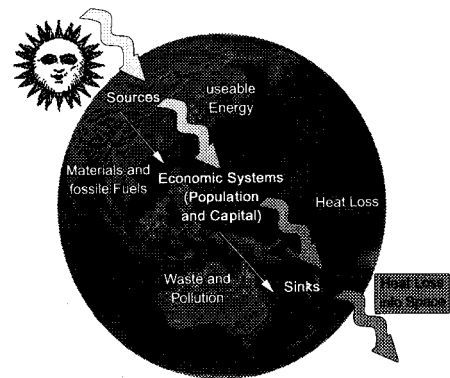


図4 「宇宙船・地球」の全体的なエコシステム

しかし、経済活動により加工された材料については、全く別の問題であります。原材料から製品が生みだされます。まとめて埋蔵された場所から原材料を引き出し、大量生産によってこれを拡散し、またごみ捨て場へ持ってくることは非可逆的損失の増大と見られております。これらの非可逆的損失は避けることのできないものであります。

非可逆性の測定単位は、いわゆるエントロピーであり、これは熱力学の第二基本法則に定義されております。アルバート・アインシュタインによれば、エントロピー法則は科学で最も重要な法則であります。

エントロピー法則は単純な言葉で表現しております。

●非可逆的な材料の拡散については「周囲の環境に影響することなくエネルギーを利用することはできない」。非可逆的な熱エネルギーに関しては「熱は高温から低温に向かって流れ、熱エネルギーを利用するときは必ず周囲環境に熱の一部を捨てることになる」。この法則は本田宗一郎氏にとって重荷となりました。何故ならば、このことによりエンジンの効率は100%より大幅に低くなる（永久運動はあり得ない）からであります。世界中の全生態系における材料のエントロピーは、非可逆性の増大を引き起こします。材料が技術的に用いられるに従い、完全に消滅はしないまでも、その利用可能なポテンシャルは減少します。材料は、ある一定の集中していたところ（エントロピーが小さい状態）から均一な分布（エントロピーが増加した状態）に移ります[5、6]。

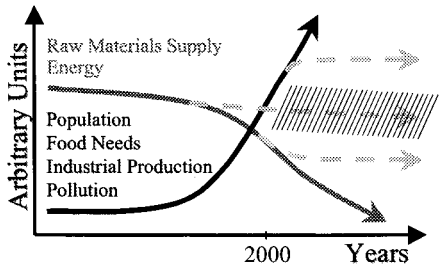


図5 「宇宙船・地球」の状況変化（概要）

図5に図示されているように、人口が増加すれば食料の必要性が増大し、また工業生産も増加し、エネルギーと原材料の必要性が増加して、その結果として環境汚染が増加します。これがすべて次の将来に均衡の取れない状態を作り出し、壊滅的な結果をもたらすということが極めて濃厚となってきます。

このような状態を回避するためには、我々の惑星・地球においてほとんど安定した状態を達成し、生態環境のバランスをさらに改善することによってのみ可能なのです。これは両方の曲線が水平線に近いコースに接近すべきであることを意味します。これは生態環境面を更新していくことに目覚ましく寄与しますが、我々の生活のあり方、考え方により大きく影響を与えることになりましょう。

材料に関して、地球を安定した状態により近づけるためには、3つの方策が重要であります。

材料の再利用—材料の最適化—新しい材料がこれであります。

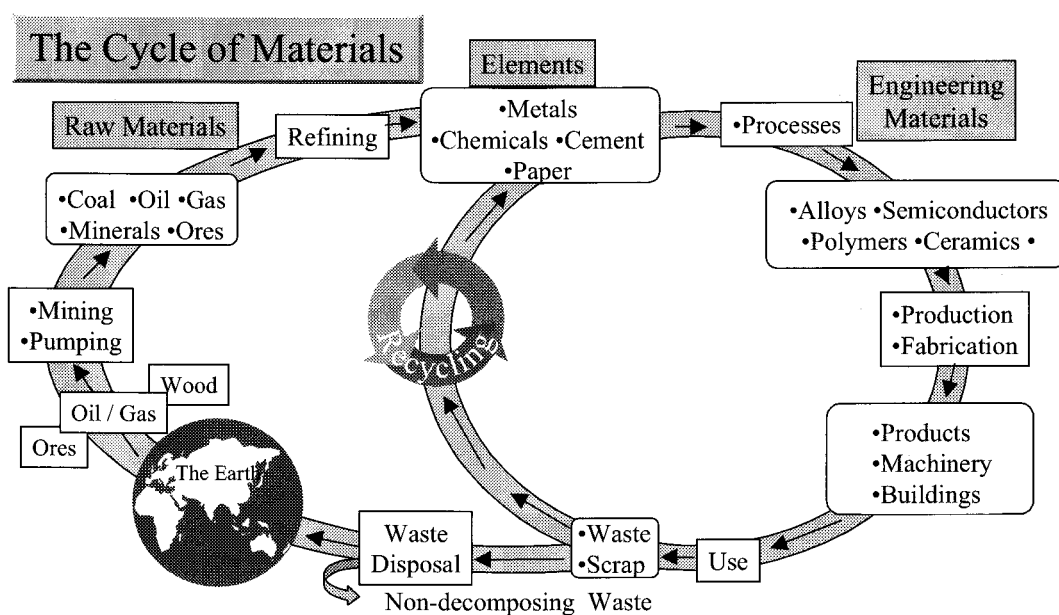


図6 材料のサイクル

材料の再利用（リサイクル）

幸いなことに、材料の消費は完全に回復不能な損失と同意語である必要はありません。しかし、少なくとも、最も有利な場合で、図6に図示されている材料のサイクル内の段階の一つにあると考えなければなりません。物質がたどっていく経路は、資源と原材料から、ここで要素と呼んでいる一次製品に至り、それからさらに工業技術の材料そのものになり、その後、各種の技術分野での製品として使われてから廃棄物となります[7]。

最もうまくいって、廃棄物はリサイクルすることができます。これより好ましくない場

合には、ごみ捨て場に貯蔵せざるをえません。しかし、再利用に適していないこれらの廃棄物でさえも、化学処理あるいは微生物によって分解されず、資源としてフィードバックすることができない限り、このサイクルから外れることはありません。資源の利用を出来るだけ引き延ばすために、ごみさえも簡単に投げ捨てることなく、利用しなければならない物として考えなければなりません。

多くの成功例がこの点を支持してくれます。これは図7に示したように、幾つかの重要な材料の種類別にリサイクルされた比率によって強調できると思います[4]。鉄鋼のリサイクル率は勇気付けられるものがありますが、プラスチックの場合、まだ問題があります。しかし、達成された数字は、初期段階のものであり、近い将来さらに改善されることは間違いありません。

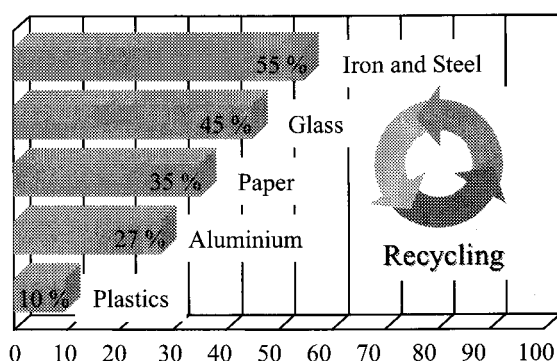


図7 幾つかの材料のリサイクル比率

工業化された社会がその生活水準をほぼ同じままに保とうとすれば、新しく生み出すことができない資源はリサイクルしなければなりません。しかし、熱力学の第二基本法則がエントロピーの形で貢ぎ物を要求しているので、完全に回復させることはできません。

材料の最適化

材料を節約し、資源の利用期間を出来るだけ引き延ばすためのもう一つの重要な方法は、最適化であります。例えば、強さ、伝導性、あるいは寿命を改善し、あるいは重量や腐食感応性を減らすことなど、特性を特定の用途に最適化することです。まだたくさんありますが、材料を節約する最適化の2、3の例を挙げてみました。すべての性質は、材料の内部「構造」によって決まりますので、最適化を行うには、この内部構造を変化させる必要があります。図8から分かるように、材料の内部構造はナノメートルの1/10範囲の原子のサイズから、センチメートル、あるいはメートル単位の構造物の寸法に至るまで非常に広い範囲にわたる特性によって決まります[8]。この膨大な尺度の範囲におけるすべての特性は、その夫々のやり方で特定の材料に特性を与えています。様々なタイプの原

原子結合の相互作用によって決定される結晶構造に加えて、材料のミクロ構造もまた構成部品（ここでは一例としてターボチャージャー・ローター、）のナノ構造からマクロ構造に至る特徴的な特性を決定する際に重要な役割を演じます。

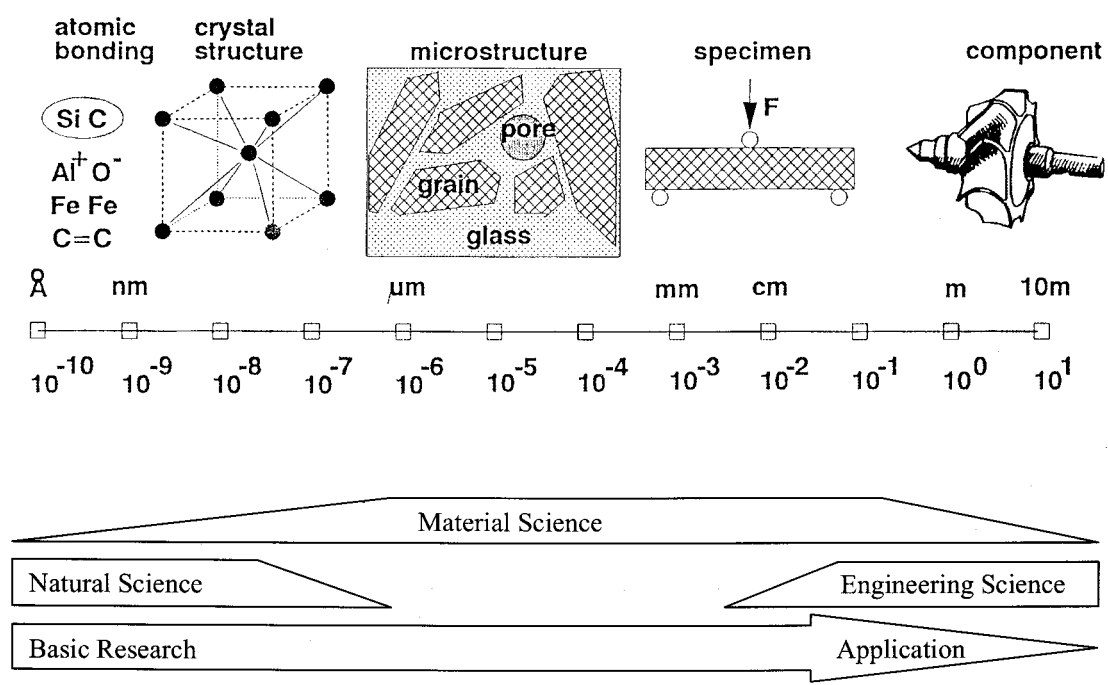


図8 原子から構成部品に到るサイズの広い範囲でのミクロ構造特性

ミクロ構造は材料学において重要な分野であります。これは、その基礎研究分野から思い切って外に出ることがない科学者と、他方その連続体概念のマクロ的な立場から出ることによってほとんど興味を示さぬエンジニアの間でのコミュニケーション・ギャップの橋渡しを頻繁にするようになってきております。材料学の技術的進歩における大きな意義は、これにより内部構造の基礎的な理解に到達することができ、その結果、文字通りミクロ構造的設計と分子設計による新しい材料を発明することができ、また特定の用途にあつらえ向きの材料を作ることができることであります。材料は人類の古くからの文化的遺産であります。その科学的な開発は今世紀始めに始まったばかりであります。現在では、材料の内部構造は、中に含まれている原子のタイプ、ならびにある程度の秩序に従ったその三次元的な配列によって決まることが分かっております。例えば、結晶の場合のように、厳密に秩序だった配列から、例えば、ガラスのように一部の固体化した溶融物の中で発生する極端に無秩序な、あるいは混沌とした配列によって決まります。

2、3枚の顕微鏡写真が言葉よりもうまく材料の内部構造を示してくれます。図9は、比較的の高い原子の秩序を持った材料、銅の単一結晶の断面を示しています[9]。銅の原子は、面心立方構造に配置してあります。おのおのの明るい色の斑点は、一列に配列した原子の全体できております。このイメージは、ナノメートルの厚さの単結晶の銅の薄膜

を高解像度電子顕微鏡にかけて見たものであります。この計測機器の直接の解像度は 0.105 nm で、これは隣接した銅の原子の間の距離よりも短く、このように解像することができます。この電子顕微鏡は、人間の目と比較することでその威力の大きさを示すことができます。我々自身の目が同じ能力を持っていたとすれば、我々は月の表面のテニスボールを見ることができる程の解像度です。

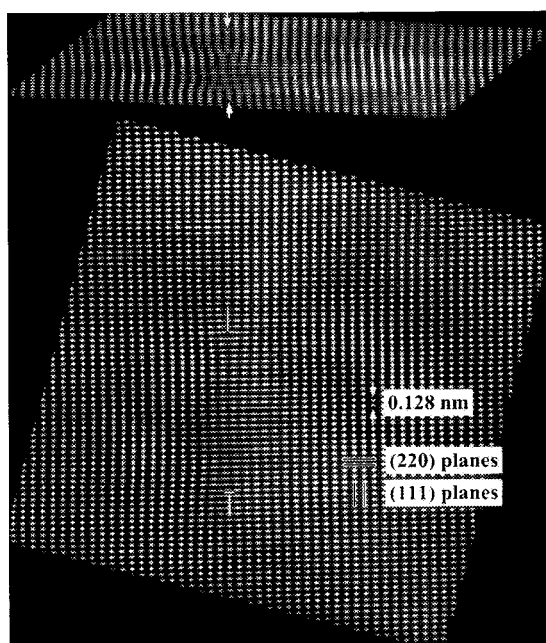


図9 銅の単一結晶の原子配列イメージ図

銅の原子の配列では、理想的な構造からの逸脱として幾らかの不規則な状態が認めることができます（↑と印を付けてある）。これらの逸脱は転位と呼んでおりますが、ある程度の応力場を引き起こし、その結果、機械的な強さや電気的な伝導性などの特質に強い影響を及ぼすことがあります（例えば、1,000 個の原子の中で1個の原子が欠けておれば、測定し得る効果を作り出します）。特質の変化は秩序ある構造からのこれからの逸脱の数量と分布によって大きく異なります。逸脱には幾つかの種類がありますが、ここでは説明いたしません。

ナノメートルからマイクロメートルの領域に移れば、図10に示してあるようなマイクロ構造が典型的なものであります。これは特別な強さと伝導特性を持った先端セラミックである多結晶質ジルコニウムの走査電子顕微鏡写真であります。均質な粒子、すなわち結晶粒と粒子の境界線が見えます。結晶体上の面構造は、結晶構造により引き起こされております。特質は粒子のサイズと粒子サイズの分布によって決まります。この解像度では、前の原子解像写真のように、転位のような格子の逸脱を認めることはできません。

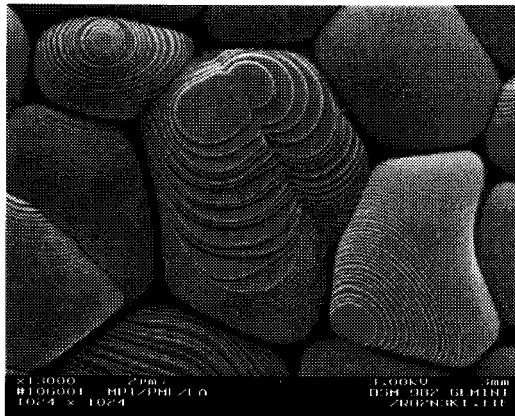


図10 多結晶質ジルコニウムの走査電子顕微鏡写真

一般的にミクロ構造は、外部の変数、例えば、応力、温度、圧力、加工方法などにより強く影響を受けることがあります。これは一例として、図11で説明いたしましょう。有名な切削工具の材料のアルミナ・ジルコニア合金のミクロ構造の走査電子顕微鏡写真を示します。この双方のサンプルは同じ組成であります。

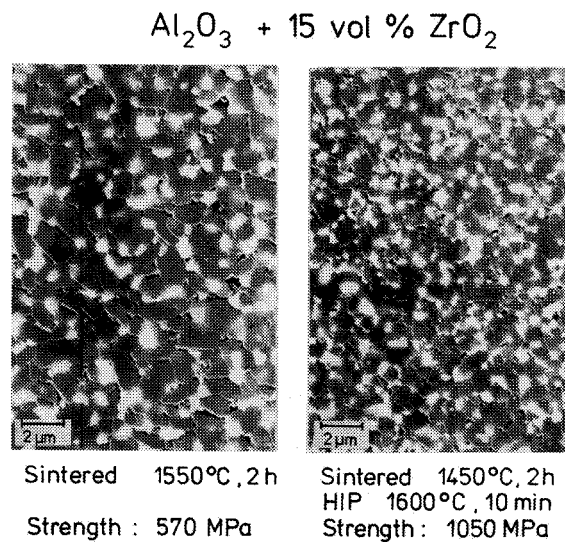


図11 アルミナ・ジルコニア・セラミックの強度が異なったミクロ構造改良の例

明るい粒子は灰色に見えるアルミナのマトリックスの中のジルコニア包有物であります。両方のサンプルは同じ材料を出発として緻密化によって作製しましたが、異なった緻密化工程を用いました。用いた処理方法には大きな違いはありませんでしたが、強度に大きな違いが出ました。ほとんど二桁に近い違いが出ております。この理由は、ミクロ構造の微小な変動であります。左側に示したサンプルは処理の結果、粒子が目立って大きくなり、ミクロ構造的な粗大化が結果として、強度を顕著に減少しました。

図12は構成部品、この場合セラミック・バルブとそのマイクロ構造の間の関係を示しております。バルブはシリコンナイトライド（窒化ケイ素）と幾分のアルミナ・イットリア添加物でできております。現在、これらのバルブを付けた車約2,000台のテストドライブが行われております。金属バルブと比較した場合、このバルブは幾つかの生態環境面での利点があります。軽量であり（2/3）、また高性能をもたらしながら耐磨耗性がすぐれ、燃料消費も少なく、さらに排気ガスも少なくなっており、さらに地球の表面にある大量に利用可能な材料からできております[10]。

このようなバルブのマイクロ構造は、添加混合物の白いマトリックス（図12の中央）にシリコンナイトライド（窒化ケイ素）の結晶を示しております。この部分は、束ね合わせ結晶の上にフォト・モンタージュで重ね合わせ、シリコンナイトライド（窒化ケイ素）結晶の立体的な配置を示しております。

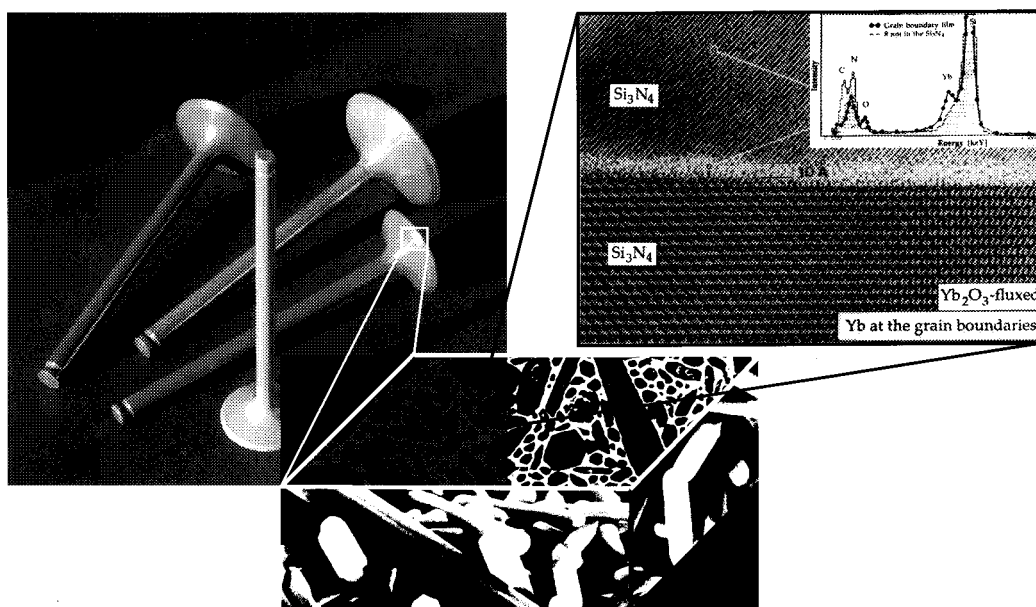


図12 セラミック・バルブの実物、マイクロ、およびナノレベルの構造図

さらに詳細なマイクロ構造の領域から、図12の右側の部分に見られるような更なる情報が得られます。高解像度の電子顕微鏡写真では、窒化ケイ素粒子の直接の格子イメージが明確に見えます。右側の上に挿入してある電子エネルギー損失スペクトラムから分かるように、粒子の間には、組成が結晶質の領域とは大きく異なっている薄い無定形の厚さ0.1nmのフィルムがあります[11]。 イッテルビア（イットリウム酸化物）の焼結補助剤は、無定型の相に集中しております。肉眼で見える領域、顕微鏡で見える領域と電子顕微鏡を使って見える領域からのすべての情報は、最適化にとって重要であります。なぜかと言えば、すべての特性は構成部品の品質に影響を及ぼし、したがって、これらは材料の開発に主要

な役割を有しております。

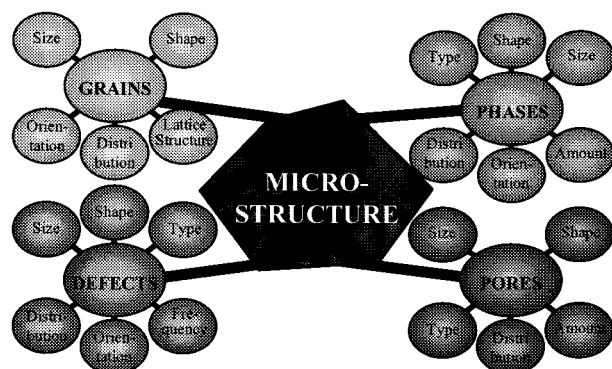


図13 ミクロ構造を形成する種々の相と理想的な原子配列からの逸脱

材料を改良するために、内部の構造、ミクロ構造は決定的な要因となります。ミクロ構造は種々な相と理想的な原子配列からの逸脱をわせたもの以外の何ものでもありません[12]。これは図13に図示されております。種々な相、粒子、欠陥と細孔とサイズ、形、分布、向き、タイプ、配列と数量が材料の実際のミクロ構造を形成し、材料はこのようにして、そのおのおのが含むすべての相、結晶粒、欠陥と細孔のおのおのの組み合わせより生じるのであります。このような欠陥は、ゼロから三次元となり得るし、そのサイズは原子欠落による空位と転位から結晶粒の境界、細孔や収縮の割れ目にまで変化するのであります。これらの要素の種々な組み合わせの結果、非常に興味のある多種多様な可能性が生じるのであります。これらのミクロ構造的な特徴は、図8に示してあるように、ナノメートルからメートルといった10以上の大きさの指数にまたがるサイズで存在することがあり得ます。ミクロ構造は、数百万の異なったメロディーを奏でることができるピアノのようなものであります。

ミクロ構造的変数は、材料の特性の多くに大きな影響を及ぼします。この理由で、材料科学、ならびに材料の開発や試験でミクロ構造に多大な注意が払われております。原則として、各材料はそれぞれの立方センチメートルの中に数百万のミクロ構造的な特徴を含んでおります。材料に求められる要件が高くなればなるほど、そのミクロ構造に対する要件はより厳しくなります。すなわち、そのミクロ構造はより正確な確実性が求められます。狙いは与えられた特質の輪郭を作り出すために、特別にデザインされたミクロ構造を作り出すことができることであります。「ミクロ構造エンジニアリング」と「ミクロ構造的設計」という用語はこの過程を表すために用いられているキーワードであります。与えられた材料の最適化とは、主に特性を着実に改善していくこと、そしてスムーズに進歩発展させていくことであります。しかし、今まで知られていない新しい材料の発明により、真の革命的、驚くべきステップが期待できます。

新しい材料

最近のあらゆる新しい材料が開発されているのを見て、今後更に新しい材料が生まれるの可能性はあるのだろうかという疑問が生じます。すでに利用可能な極めて多種多様な材料があることを考慮に入れば、さらに重要な新しい開発が期待できるのだろうかという質問であります。答えは、率直簡明なイエスであります。

事実、潜在的な材料は豊富にあり、元素は 100 を少し越える程度ではありますが、元素を組み合わせ、また変化させる可能性は、ほとんど無限であります。このことを明確に知るのには以下のような考察が役に立つかもしれません。元素はシステムに合わせて、いわゆる状態図（例えば多くの炭素鋼と鋳鉄を含む良く知られている鉄 - 炭素状態図）に合わせて組み合わせ、あるいはおのおの合金として組み合わせることができます。状態図は様々な相の間の関係に関して、総合的な物質の構造を示したものであります。相の均衡の原則は、多くの科学技術分野を理解する上で中心をなすものであり、材料の生産、行程と応用において重要な手引きとなっております。

我々が知っている 100 個の元素の中で 86 個を検討し、不活性ガスと超ウラン元素は無視してみましょう。これらの 86 個の元素を 2 元系状態図、3 元系状態図、4 元系状態図など 86 元素までの状態図で組み合わせれば、可能な状態図の総数は驚くなけれ、 7.7×10^{25} となります。

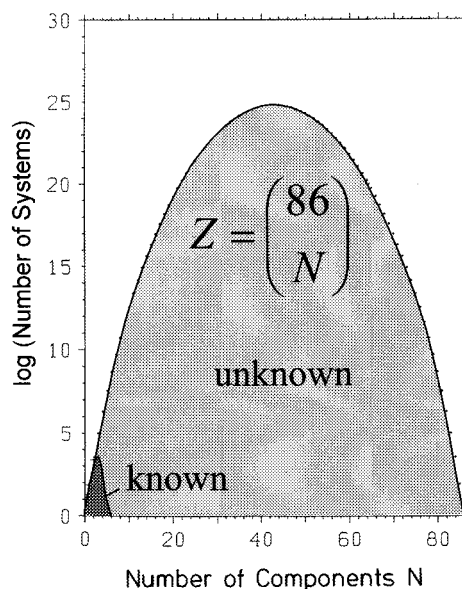


図 1 4 材料の山

図 1 4 では、可能な状態図の数は要素 N の数の関数として表示されております。これは対数目盛りでのみ書き表すことができます。そうでなければ、横座標ははるか遠くの天の川まで延びるでしょう。1 元素からなるシステム（元素）は 86 個しかありません。2 元素

からなるシステムは 3,655 個ありますし、3 元素からなるシステムは 10 万個以上となり、このようにして 43 の元素だけで最大 6.6×10^{24} 個の状態図に到達します。この最高数値から先は可能な状態図の数は減少し、最後にすべての 86 元素を含む状態図が 1 個だけになります（これはその他のすべての状態図をサブシステム、すなわち下位組織として含みます）。

これに反し、調査した状態図の数は、構成部品の数が増加するにつれて急激に減少します。全部で約 1 万の状態図が現在のところ知られており、そのほとんどは部分的にのみ分かっています。これは図 14 の左側の下の小さな部分で記してあります。この部分は分かっているすべての材料を示してあります。分かっている状態図と可能な状態図の比率は 10^{-22} といった小さなものであります。これは簡単には描けませんので、比較により説明したほうがよいと思います。海洋を含む地球の表面をすべての可能な状態図の総数に等しいと仮定すれば、すでに確立されている状態図の数は切手のサイズとなりましょう。

このように「山」のような材料は、新しい材料の巨大な貯蔵庫となります。現在の材料で数多くの元素の組み合わせが用いられているにもかかわらず、より多くの多種多様な知られない可能性が残っております。これらの中には、いつかは今日の鉄鋼、超合金や先端セラミックスなどと同様に重要な役割を演じることが可能な多くの技術的な材料の組み合わせがあり得ます。

多くの技術的な合金を含む状態図（例えば、鉄 - 炭素）がこの図表で 1 回だけ見つかることを考えれば、この貯蔵庫の大きさは増大します。さらに、変態（例えば、黒鉛、ダイヤモンドと炭素）も準安定状態、例えばガラス等、いずれも含まれていないことから、多様化が生じます。さらに、ポリマー材料の場合のように、分子配列の変化によりさらに多くの可能性が生じます。このようにして可能な材料が信じられないほど豊富にあるということは、材料科学の研究者にとってものすごい困難な仕事であります、一方、非常に大きな挑戦すべき課題であります。

しかしながら、可能な元素の組み合わせの多くは、実際的にはそれほど重要でないものもありましょう。同様に、多くの元素の組み合わせから新しい工学技術の材料が生じるでしょう。特に、地殻に豊富にあるシリコン、アルミニウム、炭素、酸素や窒素などの軽い元素の組み合わせは、特に経済的、また生態環境的に重要性を持っています。これに関する研究はそれほど費用のかかるものではなく、また非常に華々しいものでもなく、したがって、政治家にはあまり興味のないものであります。状況は、どちらかと言えば、妙なものであると私は思います。今日、我々は火星に小さな車を持ってゆくことができますが、地上の材料に対しては狭い見識しか持っておりません。

もちろん、すべての状態図を実験的に調査確認することは不可能であります。これは、あまりにも時間と多くの材料を消耗することになります。したがって、「山のような」材料を利用するには、複数の元素からなる材料の状態図をコンピュータの助けを借りて研究することが必修であります。この方法はすでに高い水準まで開発されております。それに

より比較的少数の実験だけでこれらの状態図を確認するのに十分なのであります。複数の元素からなる材料とその複雑な相の均衡を理解する上で、コンピュータ・ソフトウェアはすでに使用されており重要なツールとなっております[13]。状態図の判定は、現在でも、実験と推測に基づいておりますが、コンピュータを用いた熱力学によりますます重要な情報が得られております（図15）。

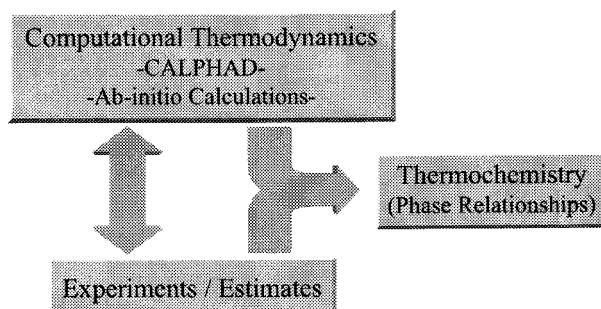


図15 材料における状態の判定

特に、カルファッド（状態図の計算）方法が多く使われるようになってきております。そして最初の計算に入っていきます。最初の計算は、最初の原点である原子のデータから始まります。理想は最初の計算により状態図を入手することであり、これは原則的に可能ではありますが、今のところ基礎データの組み合わせの信頼性は不十分であります。

現在では、ほとんどの相はカルファッド、実験と推測の間の集中的な相互作用によって確立されており、顕著に有利な点が得られております。例えば、10年から20年前は複雑な3元素からなる状態図を実験的に確立するためには、300から500の標本を調査する必要がありました。今日では、カルファッドと実験の間の相互作用を用いることにより10、ないし20の標本で十分であります。

近年、新しい材料により多くの技術的に顕著な進歩が遂げられています。これらの材料は、以前は適当な材料がなかったために不可能であった新しい技術を可能にしていることで、中心的な役割を占めております。図16は、最近の幾つかの目覚ましい進歩を遂げている高温材料の開発状況の概要を示しております。この開発は生態環境における行動に対して大きな影響を与える真の進歩の典型的な一例であります。表面の温度を縦軸に、さらに初期に使用された年度を横軸にして、高温材料の開発の状況を示しております。特殊材料のたゆまぬ発展的な開発、特にマイクロ構造の最適化と新材料によるこのような革新的な方法により開発が進められていることは喜ばしいことであります。

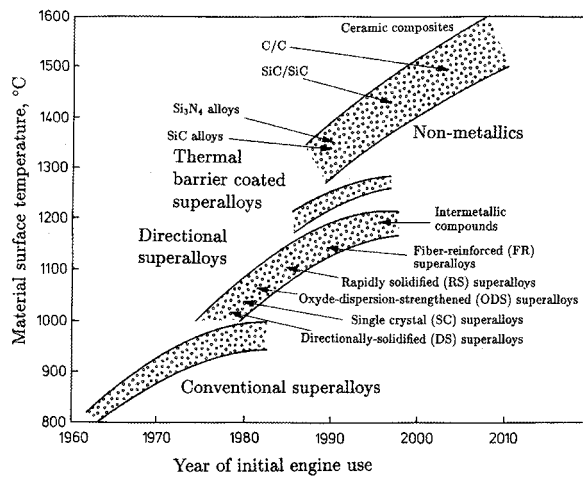


図 1 6 高温材料の発展

新しい先端セラミックスは、まだ完全に最適化されていませんが、新しいタイプの材料が登場しており、これは高温材料の分野であり、次の段階で画期的な開発となりそうです。現在、真剣に研究されている先端セラミックス、特に浸炭窒化シリコンがこれです。したがって、もう一つの化学的な成分が工学技術により作り出された材料になることを予測することができます。

まとめ

材料科学の分野では、まだ多くの挑戦すべき課題が残っております。すでによく知られ認知されている種類の材料に加えて、複合材料、いわゆるインテリジェント・マテリアル、すなわち識別能力、判別能力を持った材料、異方性やまたは多孔性の構造を持った材料などが世界的に研究されており、技術の分野での新しい需要に対する新しい材料を探す努力がなされています。これらの材料のすべては、ミクロ構造と相関係をマスターすることによって構成し、製造し、改良すれば、特別の用途向けに最も優れた特性を得ることができます。図 1 7 の四面体は、材料学と工業技術における最も重要なテーマを表現しています。この四面体の角、縁、面とスペースは、材料の非常に複雑な分野を理解する上で必要な行動の組み合わせを象徴的に表しています。

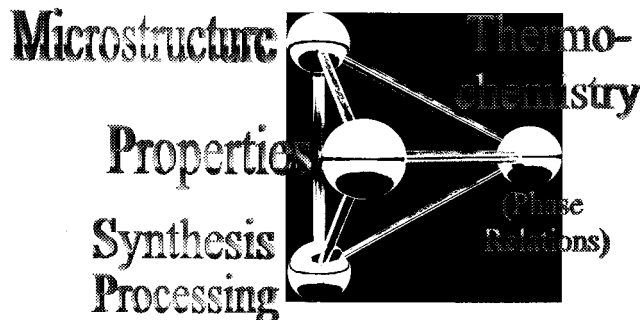


図 1 7 材料学と工業技術の関係を示す四面体

私の講演の始めに、人類は狩人が定着し、農業を始め、さらに産業革命を経て、現在は第三の革新、すなわち生態環境面を更新していく出発点にあると、私は主張しました。

もう一度申し上げますが、技術に変わる方策はありません。生態環境保護は、技術を抜きにして、また技術に対抗して実現することはできません。しかし、産業界にとって選択肢は一つしかなく、それは生態環境的に適応することです。新しい材料と革新的な技術は正にそのための手段を提供してくれます。我々の生態環境問題に対する解決策は、広範に分布した技術と材料の開発以外にないように思われます。材料学は、技術の進歩発展を正しく間違いのない方向に向くように助けることができます。それにより、我々の資源とエネルギーの使用効率が改善され、さらに我々の環境の保護が改善されます。要するに、より少ない資源で、より少ないエネルギーで、また環境に与える影響を少なくしながら、より知的かつ革新的な材料と技術によって、すべての人々が今日の最高水準の生活を享受できるよう努めなければなりません[14]。

さらに簡単に要約すれば、より少ないものでより多くということです(図18)。

あるいは、本田宗一郎氏の言葉を借りれば、「品質に限界はない」であります[1]。

品質に限界は無い。

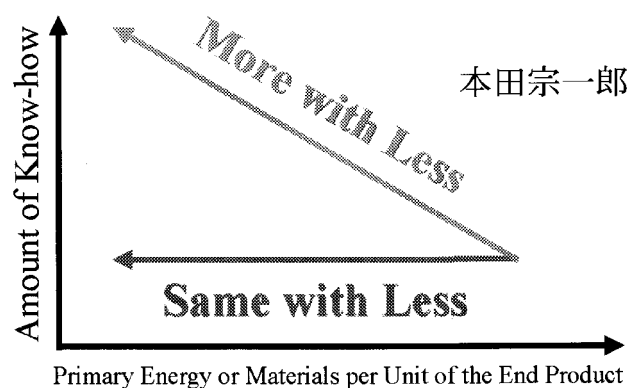


図18 材料の研究と開発の目標

材料学は、より知的で革新的な材料と技術によって、産業文化を変えていくことに大きく寄与することができます。その材料と技術の調和によって、人間が生態環境の将来にもたらすべきものは変化なのであります。この目標に到達するためには高価なプログラムは必要ではありません。ただ、パートナーの特定の利益のみにこだわらず、さらにある程度の新しい考え方との適応のみが必要であります。

あるいはライナス・ポーリング(訳者注:1954年の化学結合の性質の研究によるノーベル化学賞の受賞者)の簡単な言葉で表せば、以下の通りであります。

「もし人類が感覚で捉えるだけでなく理論的に考えるようになれば、物事はもっと簡単になるだろう。」

New Materials is the Service of Mankind

Lecture at the conferring ceremony on the 17th of November 1997 in Tokyo

Prof. Dr. Günter Petzow

Max-Planck-Institute for Metals Research, Stuttgart