

## 地球環境特集 特集記事4

## 環境調和を考えた材料設計

長井 寿

Kotobu Nagai

金属材料技術研究所第3研究グループ サブグループリーダー

## Materials Design for Environment Consciousness

## 1 はじめに

実用金属材料の95%は鉄であるが、鉄の用途は建築、自動車、機械などを中心に極めて多岐にわたる。鉄筋コンクリート、自動車用外板・足回り部品からステンレス流し台、医療用メス、洗濯機の脱水槽・外板、オーディオ製品内ピンチローラーまで、生活の豊かさのために身の回りで鉄は多方面に使われている。

一方、最高強度の鉄ワイヤーなしには作れない長大橋、自重に耐え荒海の中でも安全性を保証する全高400m以上の鉄骨構造石油掘削プラットフォーム、極寒地から数千キロメートルにわたって原油を運ぶ低温用石油ラインパイプ、高温で数10年間電力を供給し続ける発電機など、過酷な条件に耐えなければならないところでも鉄が活躍している。

だが、私達が享受している現在の豊かさと安心に対する重大な懸念が顕在化してきている。これ以上の生産規模の拡大は二酸化炭素排出量を増大させ、地球温暖化を加速するのではないかという心配がある。また、化石資源、地下資源は無尽蔵にあるわけではなく、貴重な資源の余寿命が限られているという推定が「発展の限界」を広範な人々に実感させるようになっている。

鉄鋼の生産は世界で年間約7億トンと言われているほど既に膨大である。そのうち、日本、中国共に約1億トン生産している。しかし、ひとり当たりの鉄鋼年間消費量で比べると、中国は日本のほぼ1/10の水準である。急速に成長しつつある中国経済が現在の日本の水準に到達し、鉄鋼生産が10倍になるとすると、世界生産量は現在の倍以上となる。さらにインドや東アジアの国々が経済成長を同様に遂げるとすると2倍では済まない。現状の技術体系のままでの生産量の拡大は、資源の枯渇危機を加速することになるだろうし、二酸化炭素排出量の地球規模での総量規制を危うくする問題もはらんでいる。

日本の鉄鋼産業は、省力、省エネルギー、環境汚染物質排出低減などの技術でこれまでも世界をリードしてきた。しかし、このような国際的な状況を鑑みても、技術開発の

歩みを止めることは許されず、21世紀に向けて高い経済成長を遂げると推測されている東アジア圏に位置する先進工業国として、果たすべき国際的責任は大きい。

限られた資源の中では後述するように、鉄生産の原料となる鉄鉱石、石炭は比較的資源的に恵まれている。鉄の持つ可能性をいっそう引き出し、いっそう有効に利用しているかどうか、21世紀以降も人類が持続的に成長を遂げられるかどうかを決定するといつて過言でない。長期的な展望としては、資源の有効な利用、節約、リサイクル、およびいっそうの省エネルギー化プロセスの開発などの総合的な対策を講じることが求められている。ところが、材料問題は幅広く、部分的な対応で解決策を得たと思ってもトータルではかえって改善にならないということも起こりやすい性質を持っている。いかに統合的な視点を持ち得るかで、技術的対応の方向性が決まってくる。

## 2 材料工学と総合的視点

ところが、日本人は総合的な視点を持つことが苦手だと言われている。ある単一の特定目標を達成するスタイルに慣れ親しんできた材料研究者には、なおさら取っつきにくい面があるようである。材料の「ゆりかごから墓場まで」を見通す視点はどこから生まれるのだろうか。

## 2.1 「死の医学（サナトロジー）」

医学は人間の健康を保持し、疾病から開放するのが使命と単純に思われてきた。しかし、最近、死期が迫った患者を対象に、死までの時間をより良く生き、精神的肉体的に安らかな死を迎えられるように援助する、人間らしく死なせるための医学（サナトロジー）が生まれている。死後の世界と精神的に結びつけることが目的ではないので、宗教ではない。

助産婦ならぬ助死者が必要と言うわけである。助死者と言っても、武士道を全うするための殉死、切腹の時の介錯人とは、全く反対の視点である。「生きているものの命を大事にする」ことが基本であるので、「命を絶ちきるため」の幫助



と異なるのはいうまでもない。ひとりひとりのライフサイクルを最初から最期まで充実させようという観点は興味深い。

人は大事にするが、ものは大事にしない。ペットなどの生き物であれば、供養してくれ、お墓も作って惜しんでくれるかもしれない。「もの」を代金を払って買い、壊れたり、飽きたり、用がなくなれば、狭い家空間の中に保管もできず、捨てる。「整理の美学＝捨てる美学」という考え方も一時広まったように思われる。「もの」には人に対して主張する術がないから、喜んで捨てられていったのか、断末魔の叫びを上げながらゴミ収集車に吞み込まれていったのかは分からない。人は助死者だったのか、介錯人だったのか。いや死刑執行人そのものではなかったのか。

だが、死刑執行はいやだと言っても、ウサギ小屋を解決できるはずもないので、やはり捨てる。だが、新聞紙、段ボール、ビンなどの廃品・分別回収への協力、バザーやフリーマーケットに出すなどの再生・再利用プロセスに積極的に参加することができる。「捨てる美学」から「捨てる方の美学」へ市民の意識と行動は確実に変化している。

では、最終的に捨てられた「もの」の最期はどうか。「もの」の最期を大事にする「もののサナトロジー」はないのだろうか。「もの」を使う立場の市民には、「もの」を成仏させる術がない。「もののサナトロジー」は学問であり、実践技術でなくてはならない。すなわち、つとめて「ものの専門家」＝材料研究者の課題である。「もの」を産むだけでなく、成仏まで責任を通すことが求められている<sup>1)</sup>。

## 2.2 鉄の循環は人間の使命

人の寿命も、ものの製品としての寿命も有限である。いのちは閉じても、人間を構成する物質や捨てられた製品を構成する物質は不滅である。

物質は不滅であるが、有限の容量を持つ地球の中で循環する。しかし、循環するといっても、自明な自然機能として循環するというわけでない。「鉄は酸化物である鉄鉱石を還元して抽出し、捨てれば酸素と化合してもとの鉄酸化物に戻り、しかも、生命、環境に有害な面はないので、鉄は地球にやさしい物質である。」という意見をよく聞く。間違っていないかもしれないが、説得力はない。宇宙から偶然飛来した隕鉄を集めて鉄を作っているわけではない。鉄の酸化物には自己凝集作用が備わっており、捨てても必ず地球上に鉄濃度の高い場所ができるのが自明な自然現象であると主張しているのなら、自然科学の初歩的知識に乏しい専門家と言われても反論はできまい。自然界で酸化物に還った鉄は一体どれくらいの期間がたったら、確実に鉄鉱床を形成してくれるのだろうか。今度、鉄を捨てる時に教えてもらおう。

地球から抽出した鉄の物質循環は、地球の仕事ではなく

人間の仕事である。

## 2.3 ふたつのスパイラルダイナミズム

研究者は単視眼的になりやすい。その背景となっている事情を考察していくと、材料工学などが本来持っている総合的視点の身に付け方が意外と弱いのではないかと疑うようになる。

### 2.3.1 材料工学の持つスパイラルダイナミズム (図1)

材料工学は、物質の持つ様々な有用な性質を最終製品で利用するために材料化し、なおかつ材料の使用段階での特性の保証のために改良を加えたり、いっそうの特性改善を図るための総合的な学問体系を持つ。すなわち、基礎研究で得られたシーズと実ニーズを結びつけるために、様々なフィードバック機構を持ちながら、対象となる物質を材料として螺旋階段状に発展させていくダイナミズムを持つ。材料工学を構成する各研究領域のバランスが崩れることは、新しい機能物質の実用化、開発材料の改善、実用材料の問題点の克服などによる材料体系の発展を放棄することになりかねない。

個々の研究者が専門領域を持っているのは当然として、関連する他の研究領域について全く関心を持たない状況が許されるのは決して好ましいものではない。教育、研究システムの脆弱性を疑ってみなくてはならない。

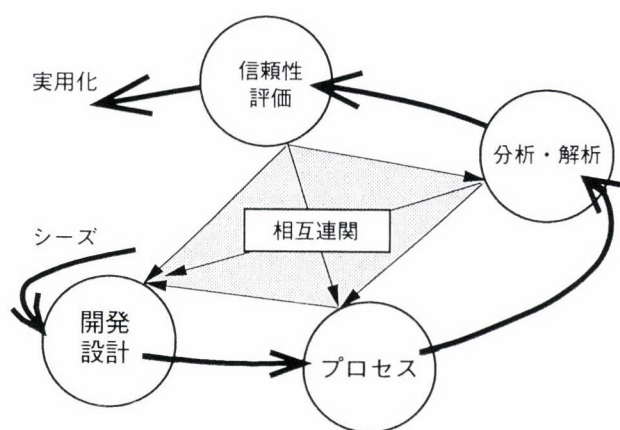


図1 材料工学のスパイラルダイナミズム

### 2.3.2 物質循環のスパイラルダイナミズム (図2)

前記のアナロジーで、人間が地球から抽出した物質の人間による物質循環を見てみると、製造－使用－廃棄（回収）－再生でぐるっと回る。一般人は、最初に製造したところ＝再生するところであり、回収して戻せば元と同じものができると理解しがちである。したがって、社会学者は合理的な回収方法すなわち社会システム面からの解析こそが重要であると考え。これは一理も二理もあるが、材料研究者から見れば、いくら集めても役に立たないものは役にた



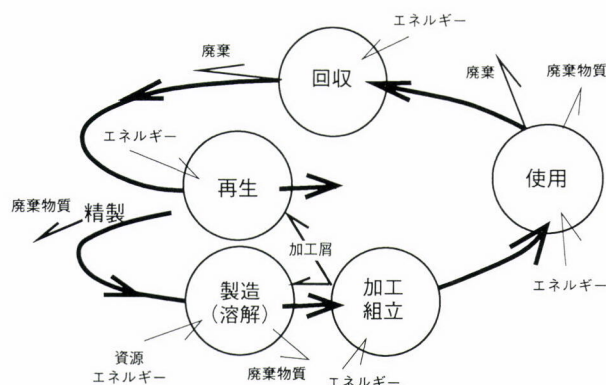


図2 物質循環のスパイラルダイナミズム

たないという事実の方が重大問題である。

ところが、再生＝製造を達成して、物質循環の時間軸を含めたスパイラルダイナミズムを実現できる技術基盤を作ることができるのは材料工学でしかない。再生を前提とすれば、作ったものの再生技術を新しく開発するか、同じ製造技術で再生できるように、製造技術を改善するか、もしくは材料を再生容易化設計するかを選択しかない。回収してもどうしようもないものを作った材料研究者のセンスが疑われている。

### 3 金属材料の環境調和型設計

本稿の主題である環境調和型設計は、資源、エネルギー、地球環境問題への積極的な対応によって、21世紀以降も人類が持続的に成長を遂げていくための挑戦といってよい。それを具現化していくためには、ものの一生に責任を負い、材料工学のすべてを動員する総合的な視点が必要であることが痛感される。

金属はいったん抽出してしまえば、その本来の性質から言えば、再生しやすいものであることは明らかである。しかし、材料として果たすべき性能を備えるために、単体で使用することはほとんどない。なにかを混ぜる、なにかとくっつけることが行われる。そのことが再生のしにくさの原因となる矛盾を内在している。この点を再度、整理し直すところから、本格的な検討を始めるべきである（図3）。

#### 3.1 構成元素の選択

地殻の中にわずかしかないうものを大量に使うことは得策ではない。また、生態系に悪影響を及ぼす元素の使用も慎重にすべきである。

##### 3.1.1 資源的要素

金属資源は生物資源と異なり地殻賦存量は有限であり、採掘を続ける限り枯渇時代は必ず来る。ところが、金属元素ごとに状況は異なっており、大事にすべきものはどれで、比較的に量的に使用できるものはどれかを常々判断する必

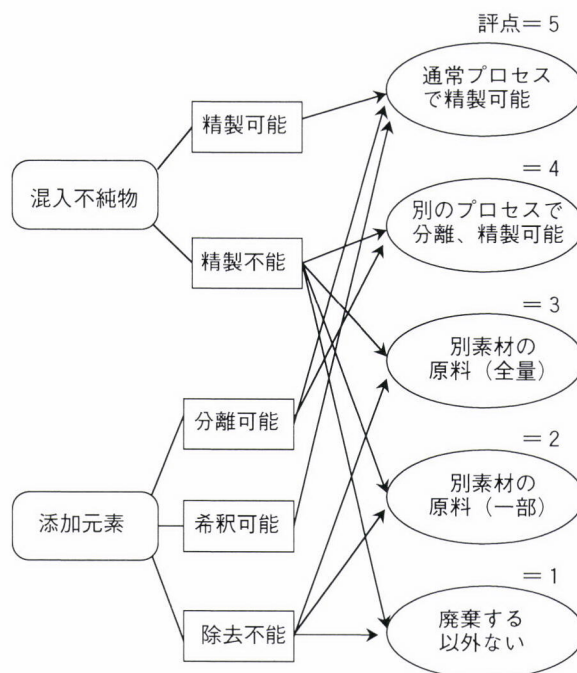


図3 リサイクル容易性チェックリスト

要がある<sup>2)</sup>。

#### (1) クラーク数

地殻中の各元素の推測存在総量を定量化したものがクラーク数である。金属元素ではアルミニウム8.13%、鉄5.00%、マグネシウム2.09%の三元素のみが1%以上で、チタンが0.44%は別として、鉄への貴重な添加元素であるクロムが0.01%、ニッケルが0.0075%などその存在量は極めて少ない。

#### (2) 可採資源量

地殻中の存在量と採掘可能な資源量は一致しない。しかも、今までの歴史の中で既にかかなり掘り進んだものもある。今のペースで掘り進めば何年持つかという数値が可採年数である。新鉱山の発見、新精錬法の開発によって、統計値は変化する性格を持っているが、残存量の一定の目安となる。例えば、アルミニウム192年、鉄67年、チタン27年、クロム16年、ニッケル56年などの数値がある。

#### (3) ペシミスティック元素<sup>3)</sup>

金属元素が単体で存在することはほとんどなく、酸化物、硫化物などの多様な化合物として存在している。構成比は勿論のこと、品位も鉱山によって異なり、その世界的統計もある。その分析によると高品位鉱石から低品位鉱石まで平均品位を中心に度数分布がほぼ対称になる元素と、高品位側と低品位側に分布が分かれる元素がある。前者は採掘、精錬技術の漸進的な開発によって比較的容易に資源確保ができる可能性のあるのに対して、後者では高品位鉱を掘り尽くした後、生産効率の著しい低下を迎えざるを得ない。前者をオプティミスティック元素、後者をペシミスティック元素と呼ぶ所以である。

オブティミスティック元素は12元素あり、金属元素ではアルミニウム、鉄、マグネシウム、チタン、マンガンなどである。ニッケルはどちらにも属さないが、ほとんどの元素はペシミスティック元素である。

#### (4) 副産物

酸化物鉱石か、塩化物、硫化物の鉱石か、またそれらの構成比によって、採掘、精錬過程における副産物、廃棄物も異なってくる。

塩化物、硫化物では塩素、イオウの発生は避けられない。また、それぞれの鉱石には副産物元素がある。それらが有価物である場合もあるが、低価値のものや生態系に悪影響を及ぼす恐れのあるものは困り者である。例えば、亜鉛では金、銀も伴うが、カドミウム、ヒ素などが副産物である。

### 3.1.2 再生除去困難元素

それぞれの金属の再生において不純物を取り除くために精製を必ず行うが、通常の精製プロセスですべての混入元素を除去できない。つまり、再生過程で除去できず残留する元素がでてくることがある。

素材設計において、ある特性を発揮するために添加した元素が往々にしてこの落とし穴に陥ることがある。添加量がたとえ微量であっても、再生材の純度を確実に低下させるために、本来付加価値の高かった再生材が一瞬に無用物に転化する例も多い。

鉄の場合には、酸素との親和力の違いを利用して精製するため、銅、スズ、ニッケルやモリブデンなどは鉄中にほぼ100%残存する（トランブエレメント、循環性元素）。

### 3.1.3 毒性

金属元素が単体そのもので毒性があるものもあるが、多くはイオン化状態や他の物質と結合した状態で毒性を持つことが多い<sup>4)</sup>。したがって、表面を保護して腐食、溶解を防いだり、不要な投棄を止め、リサイクルしたりして、毒性状態への変化を防止することが求められる。大気中の水分などで状態変化し、皮膚、細胞組織などへ影響を危惧される場合の使用はできる限り避けるべきである。

OECDでは、ニッケル、鉛、カドミウムなどの使用規制を検討している<sup>5)</sup>。ニッケルは接触性皮膚アレルギーのため、直接接触危険のある製品、素材が対象となるという。今春、ドイツでの投宿先ホテルの特産物コーナーで、ステンレス製食器に「ニッケルフリー」という手書きの但し書きが付いて、既に市民の反応が始まっていることが確認された。鉛はケーブル被覆などの単体使用が規制される。鉛蓄電池の代替は難しいらしいが、半田合金の無鉛化は欧州のみならず米国でも盛んに研究が進められている。快削鋼への鉛添加も問題視されている。カドミウム含有合金も規制される。

## 3.2 リサイクル性と製造プロセス

金属は、精製、溶解、凝固、合金化、複合化、加工、熱処理、接合、表面処理などの幾多の製造プロセスを経て使用に供される。これらの製造プロセスは使用形状へ変形、成形するだけでなく、金属材料の性質を調整、制御することにも重要な役割を果たしている。種々の製造プロセスについて、多少強引ではあるが、金属の本来持つリサイクル性を損なわないものと損なう恐れのあるものに分類してみる。

### 3.2.1 素材の性質制御プロセス

リサイクル性を損なわないもの

—凝固、加工、熱処理など

リサイクル性を損なう恐れのあるもの

—合金化、複合化、積層化など

### 3.2.2 金属の強化機構

リサイクル性を損なわないもの

—転位密度、微細化、変態組織

リサイクル性を損なう恐れのあるもの

—固溶、析出、複合

以上からすると、凝固、加工、熱処理でもって、金属組織を調整して諸特性を発揮できないかということになる。

### 3.2.3 表面処理

金属のさび発生、金属イオン化を避けることが一般には要求される。表面処理にも多彩な手段があるが、分類を試みると、

リサイクル性を損なう恐れのないもの

—打ち込む、叩く

リサイクル性を損なう恐れのあるもの

—塗る、くっつける

すなわち、表面に別物質を持ってくる方法ではなく、部分的に表面だけを改質できる方法が望まれる。もちろん再生上問題のない別物質による被覆には問題はない。

### 3.2.4 接合

金属の溶接が主流になったのは戦後である。溶接構造では解体分解はなんらかの切断作業を伴う。大型構造物では溶断が主な方法のようである。したがって、製造、分解ともに比較的多くのマンパワーを必要とする。プレス+シュレッターで切断できる程度のものであればこの問題はないのかもしれない。

また、溶接構造は、一般に複数の異なった構成材料を持つ場合、それらへの完全な分離が困難なこと、溶接金属に母材とは異なった組成の材料を使う場合があることなどの



問題も抱える。

今後、高強度が要求される場合では、母材の高強度を維持して溶接することはますます困難になってくる。それに対して、旧来のボルト、ネジ、鋲などによる接合は組立・解体容易性などで合理性を再認識される可能性がある。それにはボルトなどの高強度化が背景に要求されることは言うまでもないが、今後は新しい溶接法の開発も含めて、複眼視的な接合技術の研究開発が求められている。

### 3.3 大量使用基盤材料において考慮すべき生産・技術体系

一つの素材について生産史を概観すれば、生産量の初期低迷期を脱した後、飛躍的拡大期を迎え、成熟、安定期となる。基盤材料であれば安定期の生産量は人口に基づきほぼ一定となる。鉄鋼の先進国における内需は一人当たり年間約500kgであるというが、日本では既にこれをはるかに超えた水準で総生産量は1億トン前後を近年推移している。

素材の平均使用年数（平均寿命）によって到来時期は変動するが、年間に内需に匹敵するスクラップ量が毎年発生する時期が必ず来る。しかし、生産、すなわち一次供給側が最初からスクラップリターンを前提とした生産システムをとって生産を開始することはなく、発生するスクラップを対象にした別の生産システムの産業（二次供給側）が発生する場合が多い。しかし、より長期的には生産、再生が同期化することが不可避なので、一定の過渡期を経て、一次、二次供給の区別のない、再生を前提とする循環システムを形成して行かざるを得ない。

金属における代表的な基盤材料である鉄鋼、アルミニウムは日本においてほぼ安定期に入り、まさに一次供給と二次供給の比が逆転する時期にさしかかりつつある<sup>6)</sup>。そのような背景から、スクラップリサイクルを前提とする生産システムの構築のために、本格的な研究開発の推進が開始されている。

その技術開発の方向は、

- (1) 不純物による悪影響を最小限化する（短期的課題）
- (2) スクラップ中の不純物を有効に除去する（中期的課題）
- (3) 再生を前提とした材料設計と材料体系を創出する（中長期的課題）

があげられる。

最も根本的な対策技術となる再生を前提とした材料技術体系は、

- (1) 枯渇性のなるべく小さい元素を利用する
- (2) 再生過程で除去困難な元素の使用を制限する
- (3) 生態系に悪影響を及ぼす恐れのある元素を使用しない
- (4) 再生過程で分離等の困難さの原因を作り出すような製造プロセスに依らない

ことが前提条件となる。

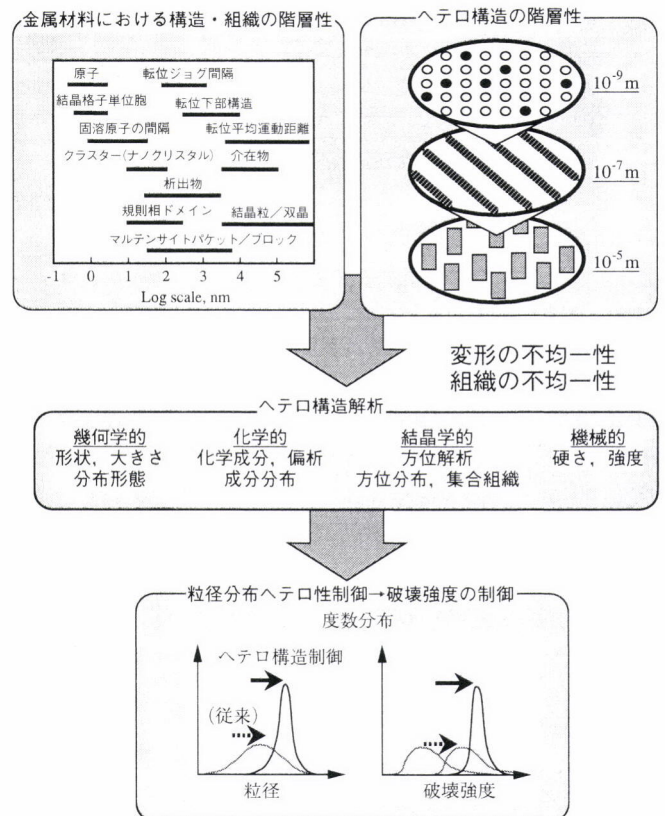


図4 ヘテロ構造概念による材料特性の改善

## 4 事例

金属材料において、リサイクルを前提としてかつ複数の性質をバランス良く実現する方法のひとつとして注目を浴びているのが、複数の組織や部分的変化の利用である（ヘテロ構造<sup>7)</sup>、図4）。鉄鋼材料では変態等を利用して複相組織を出したり、部分的に組織を変化させることができる。強度－延性バランスの改善は、複相組織の種類、構造を制御することによって改善することができる<sup>7)</sup>。ここでは、むしろ合金元素の役割は間接的なものとなる。他の金属でも合金系を選択すれば、ヘテロ構造を前提とした検討が可能である。

ヘテロ構造の基本は、複合材料と同じである。しかし、ヘテロ構造はある単一の合金組成から作り込むことができるという点で、従来の複合材料と全く異なっている。再生上問題のない元素だけで構成されていれば、ヘテロ構造金属は「電気炉で再溶解する」だけで十分で、「溶鋳炉にもどす」必要もない。

- (1) 部分的に結晶粒を微細化し、ニッケルフリーに

大型構造物では、脆性破壊による損害を最少限化することが求められるが、鉄鋼材料においては従来ニッケルの添加が鉄鋼の性質を改善する元素として知られている。しかし、金属組織の面から言えば、結晶粒を微細化すれば同じ効果があることも分かっている。

ある条件下で使用される銅板では表層部がその脆性破壊の進展に抵抗があれば十分である。そこで、加熱中の変態現象を利用すれば組織が微細化する現象をうまく利用して、表層部5mm程度だけが、内部の5分の一以下の細かい結晶粒にできるプロセスが最近開発された<sup>8)</sup>。

これは、鉄鋼の再生にとって邪魔なニッケルを含まない素材を用い、ニッケル含有合金と同等の性質をヘテロ構造を作り込むことによって達成した一例である。

## (2) 難加工性アルミ鋳造合金の可塑性<sup>9)</sup>

今後の材料開発において、従来の枠の中で可能性を探すだけでなく、全く新しい分野、領域を探索、開拓していく必要がある。

アルミ合金は、時効析出を利用した材料として金属組織の可変性に乏しく、開発飽和感のある材料となっている。しかし、資源量などから考えても、鉄と共に将来さらに有効利用が求められているもののひとつである。

著者等は、既に実用化されているAl-Si系合金が鋳造合金として使用されるだけで、展伸合金としては考えられていないが、その組織がシリコン晶とアルミニウム母相の複数の組織から成っていることに着目した。共晶合金と呼ばれるAl-12%Si（シルミン）を室温で加工すると、変形の与え方によるが、変形量で20%から40%程度の加工で割れてしまう難加工性を示す。検討の結果、その割れはシリコン晶の割れに起因していることが分かった。そこで、ある加工熱処理法を用いてシリコン晶を1/5程度に微細化したところ、90%以上の室温加工が可能になり、線材やフォイルへの加工も可能になった（図5）。しかも、強さが元の2倍以上となるなど、従来の常識を破る結果が得られている。

このような例は、過去にもそして現在も多く行われてきたもののほんの一部に過ぎないだろう。要するに、開発目標に適合したシーズを探し求め、それを実用化していく、オーソドックスな材料工学手法の一例に過ぎない。本稿では、地球環境への対応が材料に求めるスペックを大まかにまとめたつもりである。シーズの掘り起こし、実用化のた

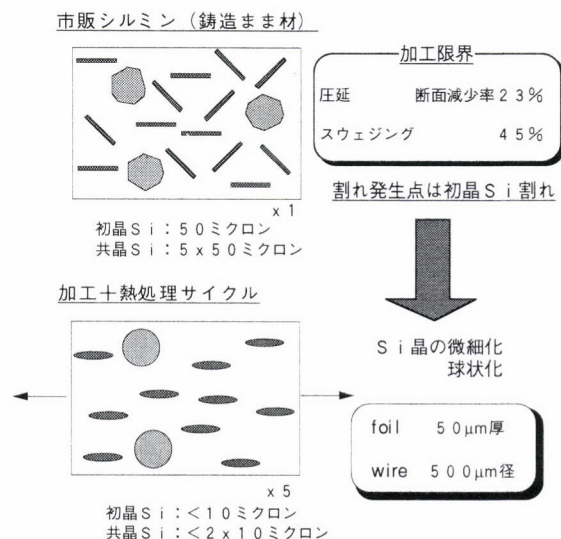


図5 アルミーシリコン共晶合金の可塑性

めのブレークスルーポイントの絞り込みがなされ、地球環境対応型の幾多の新しい技術、研究開発が日本からこそ発展、成長することを期待する。本誌の読者こそがそのフロントランナーとなれる素質と実力を備えた専門家集団であることを確信している。

## 参考文献

- 1) 長井寿：BOUNDARY, (1996.1), p.32
- 2) 長井寿：機能材料, 16(1996), p.111
- 3) 西山孝：資源経済学のすすめ (1993), 中公新書
- 4) 川原春幸ら：化学総説, 13(1978), p.21
- 5) 長井寿編著：持続可能リサイクル設計入門 (1995), 未踏科学技術協会エコマテリアル研究会, 化学工業日報社
- 6) 長井寿：金属, No.10, (1993), p.65
- 7) 平成6年度池谷科学技術振興財団「材料の不均一性」研究会報告書 (1995.9)
- 8) 石川忠, 野見山祐治, 萩原行人, 栗飯原周二：日本造船学会論文集, No.177, (1995), p.259
- 9) 長井寿, 梅澤修, 由利哲美：1996年日本金属学会春期講演大会にて発表

(1996年4月30日受付)