

を有する優れた材料であるが、非常に脆いため工業規模での製造は困難であった。しかし最近になり化学気相蒸着法を応用した 6.5%Si 鋼板の連続製造技術が確立された。

また高飽和磁束密度、低磁歪で高周波磁気特性に優れた合金として超急冷法によりアモルファス化後結晶化させた  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  合金が開発された。10 nm 程度の粒径の超微細結晶粒からなり Co 基アモルファス合金に匹敵する軟磁気特性を有し、高周波トランス、各種チョークコイルなどに使用されている。

上述したように軟質磁性材料として工業的に使用できる種類は少なく、純鉄を越える高透磁率が要求される用途にはパーマロイ合金に頼らざるを得ない。このギャップを埋めるべく純鉄の高飽和磁束密度を損なうことなくパーマロイ B に迫る高透磁率を有する Fe-1%Al 合金が開発され、直流電磁石鉄芯用、静磁気シールド用に使用されている。またパーマロイ C は最高級の軟磁気特性を示すが、Ni を 78% と多量に含有し高価な材料である。そこで開発された 38%Ni 系高透磁率合金は極低 S、O 化するとともに適正な磁気焼鈍を施すことによりパーマロイ C に匹敵する軟磁気特性を有し、磁気シールド部品、デジタイザー用部品、時計鉄芯などに使用されている。

メカトロニクス産業の発展に伴い、磁気特性に加えて耐食性、冷鍛性、被削性を具備する材料の要求が高まってきた。そこで耐食性を有する 12%Cr ステンレス鋼をベースに Si、Al を添加し高磁気特性を付与するとともに、Ti 添加、低 C 化により冷鍛性を向上させた鋼、S、Pb など添加し被削性を付与した鋼が開発され、自動車の燃料噴射装置用部品などに使用されている。

#### (4) プラスチックとの競合

鉄鋼にとってプラスチックは最大の競合材ともいえるが、鉄鋼が高強度であるというプラスチックに対する優位性がプラスチックから鉄鋼への転換需要に結び付いた事例として、ここでは家庭用洗濯機内槽を取り上げる。洗濯機内槽には従来のプラスチックに代わり、近年ステンレス鋼が採用されつつある。これはステンレス鋼がプラスチックよりも清潔感があり汚れが付きにくいこと、プラスチックに比べ高強度で薄肉化できるため、内槽の大型化あるいは洗濯機のコンパクト化が可能であること、また高速脱水が可能で乾燥時間が大幅

に短縮できることなどの理由によるものである。個人の生活意識の変化を適確に捕らえた商品の開発に伴い鉄鋼が使用されるようになった注目すべき事例といえる。

#### (5) 高度医療機器材料およびバイオ関連材料

核磁気共鳴を利用して人体の断層写真を撮る CT スキャン装置や心臓、脳、神経系などの機能を診断する生体磁場計測装置が普及し始めた。特に生体磁場計測には高感度な SQUID (超伝導量子干渉素子) 磁束計を使用するが、生体磁場は非常に微弱なため、地磁気を含む環境磁気雑音を除去することが必須となる。その手段として磁気シールドルームが必要であり、その壁材に磁気シールド特性に優れた材料が使用されるようになった。

生体用金属材料として Ti 合金は高強度、軽量でかつ人体との親和性が良好である。しかし Ti 合金は铸造や冷間プレスによる加工が困難であり実用化が遅れていたが、超塑性成形技術の応用により義歯床が製品化されるようになった。

最近アレルギーを起こす金属として Ni が話題になっており、デンマークなどの法令では腕時計、ネックレスなど皮膚に触れる製品には Ni 含有量表示を義務づけている。このような背景から Ni レスの Cr-Mo 系で極低 C、N 化により SUS 304 並の加工性と耐食性を付与したステンレス鋼が開発され、腕時計バンドやボディに使用されている。

#### (6) 宇宙開発関連材料

日本初の純国産の H-2 ロケットの主エンジンの推進力を補助する大型ロケットブースター用材料に高強度で溶接性、靱性に優れた超強力鋼 (9Ni-4Co-3Cr 系鋼) が開発された。また TiAl 合金は軽量でかつ常温から 1,000 K 程度の高温域まで高い比強度を有する優れた耐熱用金属材料であり、ジェットエンジン部品として注目されている。しかし TiAl 合金は塑性加工性が乏しいため、形状付与技術が重要な開発課題であったが、近年恒温鍛造法により実用化されるようになった。

以上、材料開発の新しい流れについて概説したが、今後マルチメディア時代の到来、地球環境保全のための各種規制の強化など社会環境が大きく変化することが予想され、それに伴い材料に要求される特性もますます多様化し、厳しくなるものと考えられる。今後とも世の中のニーズに適合した鉄鋼材料の開発に努めることが我々の責務と思われる。

## 8.4 展望

### 8.4.1 鉄鋼の組織制御の現状および展望と問題点

鉄鋼材料の性質 (特に力学的性質) は組織状態によって大きく変化する。それゆえ、適切な合金元素・組成の選択に加えて、組織を最適に制御することが重要である。組織制御は相変態 (凝固を含む)、析出、再結晶を基礎としているが、特

に、これらの現象を有機的に結合させた加工熱処理は組織制御の最も有効な手段である。加工熱処理を中心とした多くの研究の結果、鉄鋼材料における組織制御の原理に対する理解は深まり、新しいタイプの熱処理法も登場し、より複雑で精緻な組織制御が可能になってきた。しかし、今後、新しい鉄鋼製造プロセスの出現 (例えば、薄肉連铸法など) や、鋼の

高純度化が進むと、現在の組織制御法がそのままでは使えなくなり、新しい組織制御法の確立が必要になるであろう。ここでは組織制御の現状と将来の展望およびいくつかの問題点について考えてみる。

### (1) 結晶粒微細化法の現状と将来

結晶粒の微細化は構造材料の力学的諸特性向上のための基本である。超微細粒を得る方法として、近年、急冷凝固、メカニカルアロイング、超微粒子の焼結、アモルファスの結晶化などの新しい方法が盛んに研究されている。これらはナノメートルの大きさの結晶粒を対象としており、全く新しい機能が発現する可能性を秘めている点に魅力があるが、製品の大きさ、形状に大きな制限がある。大型のバルク材では、今後とも熱処理・加工熱処理で結晶粒の微細化を図っていかねばならない。

相変態、再結晶によって細粒を得るには、できるだけ多くの核を発生させることが重要である。そのためには、核生成サイトの密度を増やすか、核生成の駆動力を大きくすればよい。例えば、低炭素鋼のオーステナイト( $\gamma$ ) $\rightarrow$ フェライト( $\alpha$ )変態時の $\alpha$ 粒微細化には、①できるだけ冷却速度を大きくする、②できるだけ $\gamma$ を微細にしておく、③加工硬化状態の $\gamma$ から変態させる、④ $\gamma$ 粒内に適当な介在物や析出物を分散させる、という四つの方法が考えられる。これらの中で③の $\gamma$ の加工硬化は $\alpha$ 粒の微細化に最も有効である。代表的な加工熱処理である制御圧延・加速冷却法(TMCP)では、熱延工程の中に①、②、③の微細化法が巧みに取り入れられている。

$\gamma$ 粒内の介在物や析出物を $\alpha$ 相の核生成サイトとして利用する④の方法は、現在あまり積極的に用いられていないが、今後は重要な組織微細化手段になると思われる。つまり、現在の厚スラブ連铸-熱延工程に代わる新しいプロセスとして溶鋼から直接薄板を作る方法が近年注目を浴びており、この薄肉連铸法になると熱間圧延で大圧下を施すことが不可能になり、現在のTMCPにおいて最も基本的で重要な微細化原理である②および③の $\alpha$ 粒微細化法がほとんど使えなくなるからである。

①~③の微細化技術は現行のTMCPで最大限に利用されており、その微細化原理もほぼ解明されている。一方、④の方法はその微細化原理に関し未だ不明な点が多く、微細化技術として十分に確立していない。この方法は、薄肉連铸のみならず大入熱溶接熱影響部の $\alpha$ 粒微細化法としても有効であり、本微細化技術の確立は、鉄鋼材料の高機能化や新プロセスの開発に対し大きく貢献するものと思われる。従来嫌われものであった介在物をむしろ積極的に組織制御に利用し、特性を向上させようとする点に面白さがある。同じような意味で、凝固時に必ず起こる合金元素の偏析を、組織制御に積極的に利用する方法を検討するのも意味があるかも知れない。

### (2) 結晶粒微細化の極限の追求

相変態や再結晶を基礎にした熱処理(または加工熱処理)

で得られる最も細かい粒は、現状では大体 $1\mu\text{m}$ 程度である。結晶粒径が $0.1\mu\text{m}$ 程度になると応力集中がなくなり変形が均一に起こるようになり、理想強度に近い材料が得られるという予測がある(藤田広志: 金属, 57 (1987), No. 4, p. 5)。それゆえ、結晶粒径 $0.1\mu\text{m}$ を得ることは構造材料の組織制御における一つの大きな目標となろう。

核生成・成長によって起こる現象を用いて結晶粒の微細化を図る場合、臨界核の大きさが微細化の極限の一つの目安になる。臨界核の大きさは駆動力の関数であり、駆動力が大きいほど臨界核サイズは小さくなる。通常、相変態の方が再結晶の場合より大きい駆動力を有しており(例えば、 $\gamma$ からの初析 $\alpha$ の核生成の駆動力は数 $10\text{ cal/mol}$ 程度、再結晶では数 $\text{cal/mol}$ 程度)、臨界核の大きさは相変態では $0.1\mu\text{m}$ 以下になり得るが、再結晶では通常 $1\mu\text{m}$ 程度と大きい。つまり、相変態の方が再結晶よりも本質的に結晶粒微細化能力が大きい。それゆえ、 $0.1\mu\text{m}$ 程度の超微細粒を得るにはどうしても相変態に頼らざるを得ないであろう。そのためには、できるだけ過冷させて大きな核生成の駆動力を発生させ、さらに優先核生成サイトをできるだけ多くするように加工によって母相中に多くの転位を導入することが必要である。さらに、たとえ超微細粒が得られてもそれらが急速に粒成長すれば無意味であり、粒成長の抑制も大切である。しかし、結晶粒径が小さければ小さいほど粒成長速度(粒成長の駆動力)が大きくなる点に超微細粒の粒成長抑制のむずかしさがある。そのためには、微細な析出物によるピン止め効果を最大限利用する必要がある。

相変態により超微細粒を得ようとする場合に生じるもう一つの問題点がある。それは、変態相と母相の間の結晶方位関係のバリエーションの問題である。従来、変態核はそれぞれ異なった結晶方位(バリエーション)を持つという暗黙の了解のもとに、一つの核が成長して一つの結晶粒になると考えられている。しかし、もし変態核が同じバリエーション(つまり同じ結晶方位)を持っていれば、たとえ多くの微細な核が生成しても成長・合体後は亜粒界を形成するだけでそれらの集団が一つの大きな結晶粒になってしまい、微細粒は得られない。実は、結晶粒界や転位などの格子欠陥上に核生成する場合、それらのバリエーション(結晶方位)は非常に制限されるようになり、限られた数のバリエーションのものしか生成しない。それゆえ、超微細組織の場合にはサブグレインの出現頻度が増し、これらを微細結晶粒と見誤る場合が多くなるので注意を要する。従来、バリエーションは集合組織の観点から重視されてきたが、超微細粒を得ようとする場合には、格子欠陥上に核生成する変態相のバリエーションの選択性とその制御も組織制御上の重要な問題になると考えられる。

### (3) 凝固組織制御の重要性

新しいプロセスとして注目を浴びている薄スラブ連铸あるいはストリップ連铸では、①凝固組織であり粗大な結晶粒(ときには柱状晶粒)を初期組織とせねばならない、②凝固後

の冷却速度が比較的大きいので合金元素の固溶・析出挙動が従来法と大きく異なる場合がある、③熱間圧延を施す場合には従来の厚スラブのような大きな全圧下率がかけられない、ことが組織制御、材質制御の観点からの大きな問題点である。一般に、結晶粒が大きいほど再結晶をおこさせるのに必要な臨界の圧下率が大きくなり、しかも再結晶速度も遅くなる。それゆえ、薄スラブ連铸後再加熱なしに直接熱延される場合、もともと再結晶しにくい初期組織に加えて、熱延時の全圧下率が小さいという制限のため、厚スラブ法のような $\gamma$ の再結晶による微細化はほとんど期待できなくなる。 $\gamma$ 粒を細かくするには、凝固鑄造組織の微細化を図るか、 $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ 繰り返し変態を利用せねばならないであろう。凝固プロセスがニヤネットシェーブ化し、しかも加熱・冷却の熱サイクルをできるだけ無くす省プロセス化が進んでいくと、今までの組織制御の手段であった加工と熱処理がほとんど使えなくなり、凝固そのものが唯一の残された結晶粒微細化手段になる。今後は、今までも増して凝固時の組織制御が重要になり、これからの材料組織に携わる研究者には凝固に関する知識が不可欠になるであろう。

#### (4) 高純度化に伴う組織制御の問題点

不純物元素は種々の割れや脆性の原因になるので、鋼の高純度化は材質向上に有効である。しかし不純物元素の存在は、組織制御、特に結晶粒の微細化に対してはむしろ有効な働きをしている場合が多い。つまり、不純物元素は固溶状態では粒界移動に対する引きずり効果(drag effect)を、また微細析出物(炭窒化物や硫化物など)として粒界移動に対するピン止め効果(pinning effect)を示し、再結晶や粒成長を抑制する。それゆえ鋼が高純度になるほど、再結晶がより低温で起こり、しかも粒成長が速くなり、粗大粒になりやすくなる。 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態に対しても、PやSは $\gamma \rightarrow \alpha$ または $\gamma \rightarrow$ パーライト変態の速度を遅くする作用がある。つまり、鋼の焼入性という点でも不純物元素は好ましい働きをしているのである。それゆえ、高純度化とともに鋼の焼入れ性が低下することになる。このように、不純物元素は組織制御の点から見ればむしろ好ましい働きをしていることが多く、我々はその恩恵を無意識のうちに受けていたとも言える。粒界偏析も介在物(析出物)もない鋼ができれば、組織が超粗大化しかえって強度や靱性が低下し、高純度化のメリットが無くなるおそれもある。

組織制御という観点からみれば、単に超高純度化のみを考えるのではなく、粒界偏析および大きな介在物はできるだけ除去し、一方で組織微細化のためにできるだけ少量の非常に細かい介在物(析出物)を巧みに利用する工夫が必要である。そのためには、炭窒化物を形成する微量合金元素の利用技術(マイクロアロイング技術)がますます重要になるであろう。

#### (5) 埋もれている現象の発掘と利用

鉄鋼材料は成熟した材料であり、過去に莫大な研究の蓄積がある。その中には、優れた原理を有していながら実際に利

用されず埋もれている現象が多くある。それゆえ、新しい原理の探究や新しいプロセスの開発の重要なことは当然であるが、一方では過去に知られている重要な原理、現象を新しい観点から常に見直し、積極的に適用を試みることも必要であろう。

強靱化を例にとると、代表的な加工熱処理であるオースフォームやTRIP(マルテンサイト変態誘起塑性)は25年ほど前に非常に注目を浴び多くの研究が成されたが、結果的には大きな発展は見られず、ほとんど忘れ去られた感がある。これは、当時の状況下においての種々の制約のために工業化に成功しなかったためであるが、鋼の強靱化法としてはいずれも原理的に極めて優れたものである。優れた原理を有する現象は、種々の制約のためたとえ一度は忘れ去られても、必ずある時期がくれば少し姿を変えて再登場するものである。実際、TRIP現象は最近、各種鉄鋼材料のみならず、鑄鉄やセラミックスなどの種々の分野で見直され盛んに利用されるようになってきた。鉄鋼でTRIPが復活したきっかけの一因は、Si添加鋼を適当にオーステンパー処理すると、低合金でも多量の残留オーステナイトが得られることが分かったためである。

ほかに、優れた原理を有しながら種々の制限のために埋もれてしまっている現象は数多くあるはずである。このような過去の重要な研究・技術の蓄積、いわば知的財産を新しいプロセスや材料開発の中に積極的に導入していく工夫が必要であろう。これからの材料を支える若い研究者が過去の多くの知的財産をどれだけ吸収しているであろうか。個人または組織としての研究の継続性、知的財産の伝承も必要なことであろう。

### 8.4.2 超高温材料

ここではまず、超耐熱合金(略して超合金という)の動向を述べ、ついでそれを超える耐熱性が期待されている金属間化合物、セラミックス、炭素繊維強化炭素複合材料(C/C)その他の先進複合材料などのいわゆる超高温材料について簡単に展望することとしたい。

ジェットエンジンの運転温度(タービン入口温度)はすでに1,400°Cを超えており、発電用のガスタービンでも1,350°Cの時代に入ってきた。それらの構成材料の中心である超合金は、よく知られているようにNi基、Co基、およびFe基の3種類に分類されている。

超合金の揺籃期であった1940年代から50年代前半にかけてはCo基合金に強度の高いものが多く開発されてきたが、 $\gamma$ 相[Ni<sub>3</sub>(Al, Ti)]の析出強化が利用されるようになってNi基合金が主役の座を奪い今日に至っている。Ni基の超合金は、ときには十指に余る合金元素が添加された複雑な化学組成のものが合金設計されてきた。AlやTiの添加量が増加されるとともに高温強度も増し、熱間加工が困難になると精密鑄造法が適用され、いわゆるニヤネットシェイブの動翼や