

たがって、この項で述べることは21世紀初頭、要素技術としての「表面処理技術」がどのような変化の潮流に洗われ、どちらの方向に進展していくのであろうかという推定である。それゆえ、神のみぞ知るという要素も当然包含される。まず技術の革新を誘発する社会の変化を再認識し、その変化に対応する形で進むであろう「表面処理技術」の動向を考えてみたい。そして次に「表面処理技術」の市場における役割と求められる技術の変革を考察する。そして最後に未来の表面処理技術を支える研究開発の課題に触れたい。

## (2) 変化の潮流

昨今の不況は景気の循環ではなく複合不況だと言われている。土地で代表されるストック商品（資産）および需給のアンバランスから生じたフロー商品（消費財）の調整遅れが主因と言われているが、それに加えて消費者の選択が「もの」から「こころ」へと変わってきたことがあると思う。そこに「地球規模の環境変化」や「資源枯渇」への憂慮、そして「継続可能な発展」を支える技術を社会が選択し始めたことが重なっている。

また円高に対応してフロー商品の生産拠点が発展途上国中心に海外シフトし、日本経済がグローバルな政治経済のうねりに直接影響され始めたことは極めて重要である。

以上述べたことを敢えて技術の言葉に翻訳すれば次のようになるだろう。

- ① 地球環境への負荷（資源問題を含む）を低減させる技術が優先的に選択されるようになる。その兆候としてあらゆる商品のライフサイクルについて、その環境負荷性を定量的に評価するLCAが最近ISOに取り込まれた。またエコマテリアル、エコバランスの考え方を商品の機能設計に加える動きが今後いっそう加速されるだろう。
- ② 経済のグローバル化に伴い、コスト低減は生産者のみならず需要家、流通、消費者も含めたトータルコスト低減の方向に進む。また生活様式の変化が商品の機能設計の考え方を変えていく。例えば近年の「クルマ社会」における飲料缶の飛躍的な増加と多様化からもその傾向が分かる。
- ③ このような「環境への負荷低減」、「人間性豊かな社会」に向けた商品造りの動きは将来「表面処理技術」の重要性が増すことを示唆している。

## (3) 「表面処理技術」の役割

これまでの表面処理技術は建築、自動車、家電、配管などの応用先にもよるが、一般に①金属構造物、製品を使用環境から守る、②美観を創造する、③潤滑剤としての寄与などが主たる役割であった。しかしこれからリサイクルが進みSnやCuなどの元素が鋼板表層に濃化してくると従来の表面処理技術をそのまま適用することがむずかしくなる。また環境保全の立場から、薄板の防食としては主流であったクロメート処理の代替が必要になる。これは表面処理の考え方を根本的に革新することであり、世界的にインパクトのある技術開

発となろう。しかし環境汚染が発展途上国で進むと鋼材の耐候性そのものが根底から覆ってしまう。

表面層に求められる機能としては上記の項目のほかに光波、電磁波、音波、などの遮断、吸収、あるいは反射機能を載せる検討が進むと思われる。特に輸送、貯蔵、居住などのインフラ整備の観点から、高速道路の遮音板透明化や地下構造物の50年、100年の長寿命化、大都市での鉄骨構造物による防災ベルト建設などが進むにつれ表面処理技術が主役を演じる場合が増える。このほかマルチメディア用インフラ整備、産業機器分野での工作刃物のドライコーティングによる寿命延長、超高真空用材料、また生体適合材料など限りなく広がっていく。

フロー商品は素材のリサイクル性が中心的に問われるが、耐久消費財である自動車はリサイクル性のみならず長寿命化も求められている。建築物で代表されるストック商品は快適性、安全性確保と長寿命化が本命である。

## (4) 研究開発の課題

現時点での未解決課題の多くは複数の技術分野に広がっていたり、いくつかの国に関わっていたりする。つまり、一研究者、一企業、一国家のみでは解決できないことが増えてくる。未来の研究開発はいっそう異分野、異文化を結んだネットワーク型のものになっていくだろう。

経済社会における技術の価値は常に相対的であるから環境負荷の低減などの視点から基本条件が変わると伝統的な技術、例えば鋼板スケールの酸洗除去プロセスなどは抜本的に変わる可能性がある。最後にこれから期待される研究開発領域についてを二、三私見を述べる。

- ① 材料の属性が見え始めるメソレベルの現象を解析する機器、その反応を測定する機器の開発とメソスコピック材料科学の構築（有機被覆の機能設計、薄膜機能設計など）、
- ② 使用環境の局所条件下でマイクロ反応がマクロ反応に発展する条件の解明（スケール生成や、めっきプロセス、腐食による劣化過程など）と対策確立、
- ③ 計算科学手法による多変量問題のときほぐしと可視化、
- ④ 環境負荷低減や資源有効利用に対応した表面処理技術の見直し（リサイクルによる鋼板表面層の変化、脱クロメート処理など）。

## 8.4.4 組織と強度の研究・開発の展開

### (1) 組織に関する研究

鉄鋼材料の組織に関する研究の歴史は古く、亜共析鋼におけるフェライト・パーライトなどの拡散型変態組織やマルテンサイトと呼ばれる無拡散型変態組織とその焼戻し過程、また、拡散型変態と無拡散型変態の中間的な機構で生成するベイナイトなどに関する研究は極めて多い。しかしながら、炭素鋼マルテンサイトの焼戻し過程で析出する炭化物の構造一

つを取ってみても十分に解明されているとはいいがたく、六方晶の $\epsilon$ 炭化物か斜方晶の $\eta$ 炭化物か、積層欠陥を含んだセメントタイトか、一つの結晶の中に種々の構造を含んだセメントタイト類似構造かなど高分解能透過電子顕微鏡による詳細な検討が行われている。同時に、その過程で生じる炭化物の分散挙動、すなわち、粒内析出・粒界析出の問題やPFZ形成のほか、合金元素や不純物の粒界偏析なども焼戻し脆性との関連において詳しく検討されている。例えば、結晶粒界に偏析したP原子の電子状態が鉄との化合物のそれに近いというオージェ電子分光の結果など粒界の特異性を理解する上で興味ある事実も報告されている。また、変態組織の形態学的な研究も活発に推進され、マルテンサイトにおいてラス、レンズ、バタフライ、薄い板状形態が見いだされているし、上部ベイナイトも炭化物析出の形態による分類が提案された。このうち、ラス・マルテンサイトや上部ベイナイトなどにおいては結晶方位の近いラス状組織が束になって生成するパケットの概念が導入され、延性/脆性遷移温度がそのパケットを単位とする有効結晶粒、あるいは、 $\{001\}$  劈開面を共有する大きさに対応する破面単位によって解釈できることが示された。

さらに、最近制御圧延を中心とする加工熱処理技術の発展や極低炭素合金高強度鋼の開発により顕微鏡組織は著しく複雑になり、組織の定義に遡る研究の重要性さえも指摘されている。この問題は、日本鉄鋼協会ベイナイト調査研究部会において国際的な協力のもとに検討された。

なかでも、ベイナイトやウィドマンシュテッテン・フェライトを中心とする中間段階組織は実用材料の多くに含まれ、高強度化・高靱性化に活用されているため工業的観点からも関心を集めている。組織学的にみると中間段階組織はTTT図など、その熱力学的な特性において拡散変態的な特徴を持ち、表面起伏、晶癖面や母相/生成相結晶方位関係など結晶学的な特性ではdisplacive変態的な特徴を示す。そのため、中間段階組織がマルテンサイトのように剪断的な機構によって生じるのか、あるいは、レッジ・メカニズムのような原子の独立運動を伴う拡散機構によって生じるのかと言う問題は1971年に行われたAaronsonとHehemannの討論以来、現在に至るまで多くの議論の対象となっている。

このほかの組織学的に興味深い材料として、高温・高圧や腐食性の環境下で強度部材として使用する鉄系やニッケル系高合金がある。これまでは $\gamma'$ や $\gamma''$ 相、 $\sigma$ 相、ラーヴェス相などの金属間化合物の静的析出挙動が詳細に検討されてきた。しかし、長時間使用下での特性変化や熱間加工時の割れなどとの関連において高温に応力や種々の歪速度の塑性変形が重畳する場合の動的な析出挙動なども重要な研究課題となるであろう。

組織研究の中でとりわけ実用的興味の対象となるものに制御圧延過程における変態挙動など、相変態に及ぼす応力や塑性変形の影響も大きな研究分野である。変態前および変態途

中の塑性加工は母相に再結晶や回復を生じたり変形帯を導入するので、それが続く相変態に及ぼす影響は制御圧延工程の進歩とともに多くの研究対象となってきた。この分野で我が国は先駆的な役割を果たしたと考えられるが、それには加工装置を付加した熱膨張測定装置など新しい実験装置の開発も貢献している。最近、上述のように鋼の極低炭素化が加工熱処理に重畳された複雑な組織の解析や、displaciveな変態におけるバリエーション選択の加工や付加応力の方向依存性なども組織制御や後述する機械的性質の圧延異方性などと関連して今後の重要な研究課題であろう。

このような変態や析出挙動に関する研究は、近年の透過電子顕微鏡の弱ビーム暗視野像観察技術や原子レベルでの高分解能観察技術の進歩により著しく進展したが、高温ステージなどを活用して相変態や析出を高分解能でその場観察する方が直接的な実証という点で大きな意味を持ち、将来における研究では不可欠な手法になると考えられる。

一方、これらの複雑な現象を論理的に把握し、プロセスに応じて再構成し、組織制御に活用しようとする試みに、コンピュータを用いた材質予測の研究がある。これは基本となる素過程が十分に解明されている現象に対してはある程度の意味がある。実際、その成果を実ライン制御に適用し成果を得たという報告もあるが、未知な現象に対し新しい知見を与えるものではない。しかも、極微量元素の分析とその詳細な制御、個々の変態現象や塑性変形の素過程、動的な回復や再結晶、静的・動的析出の定性的な理解さえ十分でない現状では実験式の域をです21世紀に残る問題であろう。

## (2) 強度・靱性に関する研究・開発

フェライト鋼の強度・靱性が結晶粒径など組織の微細さと密接に関連することはPetchの関係として古くから知られている。これに対し、マルテンサイトやベイナイトなどラス状組織の延性/靱性の解釈には上述の有効結晶粒、あるいは、破面単位の導入が必要であると示された。一方、各種の組織が入り交じった複雑な材料においても、それらの組織と機械的性質の関連の解明を待つまでもなく、多くの試行錯誤や絨毯爆撃的な開発研究が行われ、現在ではほとんど新材料の開発の余地がないくらいに進展している。

その結果、我が国の鉄鋼製造技術が世界最高レベルに到達して久しく、その研究水準も高く評価されるようになった。材料開発に例をとると、張出し性や深絞り性の優れたインタースティシャル・フリーの超延性鋼板、橋梁や水圧鉄管などに使用される低炭素溶接性高張力鋼、液化天然ガスの輸送や貯蔵など極低温で使用され低温靱性の優れた9%ニッケル鋼、高温压力容器用のクロム・モリブデン鋼など高度の性能をもつ材料の著しい性能向上などがそれである。しかしながら、個々の要素技術を見ると、我が国の独自技術は少なく、ブラッシュアップが多いように見える。例えば、規格値内での炭素量の低減による靱性や溶接性の向上、NbやVなどの

微量の炭化物生成元素やボロン利用における制御技術、P や S などの不純物元素の低減技術などである。

これに対し、我が国の基本的な貢献が著しい分野は、最近の半導体技術がそうであるように、比較的高性能な材料を安価に、かつ、安定した品質で大量に製造する技術で、その典型的な例は制御圧延である。制御圧延は経済の高度成長時代に我が国の鉄鋼製造技術やエレクトロニクス技術がそれに追従できる程度に発展していたと言う幸運な事態によって世界に先駆けて発展したと言える。その基本は加熱温度の制御による初期オーステナイト粒径の制御とその加工による変形帯の導入や回復・再結晶、それらの $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態に及ぼす影響を利用したフェライト結晶粒の超微細化技術である。もちろん、変態後の圧延による集合組織の重畳によって衝撃荷重が付加された場合に板面に平行なセパレーションが発生し、平面応力状態へ移行する結果、衝撃遷移温度が低下する現象も無視できない。上述のように、これらの過程をコンピュータでシミュレートし、材質予測に結び付ける努力もあるが、特に組織感性の大きい延性/脆性遷移温度の評価は困難を伴うであろう。この制御圧延技術が焼入れ焼戻し処理の分野にも拡張され、制御圧延工程における直接焼入れ焼き戻し処理に発展したのも当然の帰結である。しかし、いくら組織を微細化し、鋼材の性能を改善しても溶接部などの接合部でその性能が確保できなければその価値は無に等しい。

そこで、鋼材の利用技術開発も精力的に行われ、我が国はこの分野でも大きな成果をあげることができた。高能率な大入熱溶接を施しても溶接部の靱性が劣化しない鋼材や溶接材料の開発、耐水素脆化鋼材の開発などがそれである。前者は炭・窒化物や酸化物、オキシサルファイド粒子を微細分散し、その高いエネルギー状態にある母相/介在物非整合界面を核としてポリゴナル・フェライトを生成させることによる組織微細化技術、後者は水素のトラップサイトとなり割れ発生の起点となりやすい非金属介在物や不均一な低温変態生成物の分散防止技術の確立であった。

このほか、我が国の鉄鋼技術がユーザーの要望を積極的に取り入れて材料開発を行った面白い例として次のようなものが挙げられよう。例えば C, N 量を制御してプレス成形時には軟らかく塗装工程の昇温によって時効硬化する BH (ベイクハードニング) 鋼、フェライト/マルテンサイト (オーステナイト) 混合組織など不均一な組織を意図的に作り変形時の局所的な応力集中による低い降伏点と高い引張強さを利用したプレス成形性の優れた高張力薄鋼板、脆性破壊よりむしろ延性破断が問題となる建築部材などで降伏開始から破壊に至るまでに大きな加工硬化が期待できる低降伏比高強度材料などがあり、既存技術の組み合わせによる新製品開発は今後とも重要な位置を占めるであろう。

### (3) 今後の研究課題

従来からの基礎的な研究分野として、合金構造の電子論、拡散、相変態や析出、結晶粒界や異相界面の構造と物性、結

晶の核生成・成長、塑性変形の素過程、破壊、疲労のメカニズムなどがあるが、未だ不明な点も多く今後も地味な努力が不可欠である。すなわち、これらの知見がなければたとえセンダストのように革新的な新機能材料を発見したとしても、その延長上にあるより大きな材料開発は期待できないであろう。しかし、鉄鋼材料には経済的な構造部材としての役割が今後とも大きいと考えられ、その意味では上述したように絨毯爆撃的な試験によって開発は、ほぼ、限界に達しているように思える。

したがって、構造材料に限ると、すでに高耐食性表面処理鋼板、Ti やステンレス鋼と普通鋼のクラッド技術や 2 枚の表皮鋼板を特殊樹脂で接着した制振鋼板などで実用化されているように、特徴のある異種材料の複合化が大きな開発課題となるであろう。もっとも、一つの材料でセンサー機能とアクチュエーター機能を合わせ持つような知能材料の開発も新鮮味があり、数多くの研究対象となっているが、それぞれの単独機能を持つ材料を組み合わせ使用の方が安価で明らかに安定した性能を示すことも多い。したがって、闇雲に知能材料という言葉に惑わされず、冷静に判断し、複合化の方が有利と判断される場合はその可能性を追求する方が新材料開発に結びつく可能性が高い。また、それらの性能を左右するのは異相界面であり、学術的には金属/セラミックス界面で精力的に研究されているように原子レベルでの界面構造、すなわち、エピタキシーの問題や界面における転位の運動などの解明が重要である。また、界面のエピタキシーは複合材料ばかりでなく、結晶粒界、相変態における生成相/母相界面、時効過程における析出物/母相界面、鉄鋼材料の不働体皮膜の界面などでも常に観察されるもので、それを通じて材料の特性を支配しており今後の重要な研究課題の一つであろう。

### 8.4.5 鉄鋼系機能材料開発におけるプロセス革新の展望

#### (1) はじめに

機能材料に関する解説書や雑誌に目を通して見てもバルクの鉄鋼材料についてはほとんどふれられていないことが多い。しかし、量的規模から見てもまた現代文明を支える必須の基礎資材ということからしても、珪素鋼板に代表される鉄系電磁材料が機能材料の横綱であることは論をまたないであろう。このほか、制振材料や熱膨張制御材料等々数多くの鉄鋼系機能材料が使われている。

ところで機能性材料と呼ばれるものの中には成分設計がポイントで製造プロセスにおいては既存のシステムの中での最適化で事足りている例も少なくない。

一方、珪素鋼板の歴史は前世紀末の Hadfield による Fe-Si 系合金の発明以来、1934 年の Goss による一方向性珪素鋼板の開発、近年我が国で行われた高級方向性珪素鋼板の開発とプロセス革新の積重ねによってつづられている。またア