鉄 鋼 材 料 技 術

南 雲 道 彦*

1. は じ め に

戦後の荒廃から自由世界第1位の生産量に達した日本鉄鋼業は、歩留り・原単位等の技術指標においても世界最高のレベルを確保した。この間、新鋭製鉄所の建設に伴う設備の巨大化、生産性の向上から、技術の特徴は高度化する市場要求の充足、省エネルギーなど社会環境の変動への対応、さらには工程省略・連続化などの生産効率の向上など高度な独自技術の開発へと多彩化してきた。そして現在、鉄鋼需要の飽和化と中進国との競争激化に直面して新たな技術展開を迫られている。

この間の多岐にわたる成果の個々の詳細はより専門的な報文にゆずることにして、ここでは技術の流れとして特徴を捉えてみたい。

2. 一貫製造工程としての有機的な技術構築

各工程の技術が専門的な深まりをとげる反面で、一般的には各分野間の壁は高くなりがちである。しかし近年の鉄鋼技術の特徴の1つは、各工程からの要求に応えて一貫した技術体系が構築されてきたことといえよう。その原動力として3つの観点が考えられる。第1はコスト競争力強化のための省工程および工程連続化である。たとえば我が国の連続铸造比率は1986年には約95%に達したが、連铸適用鋼種を拡大するために多くの技術開発が行われた。従来リムド鋼あるいはキャップド鋼で製造されていた鋼板の連铸化に微量のAlあるいはB添加による脱酸技術、真空処理による脱酸技術が開発された。またNbやTiなどの析出元素をふくむ低合金鋼の連铸で生じやすい表面割れ対策には、割れ発生機構の解明から適切な冷却パターンの制御がとられた。さらに高靱性溶接用高張力厚板ではスラブの内部割れや中心偏析が問

題になるが、その生成機構の解明が進められ、低温铸造、溶鋼湯面レベル制御、電磁攪拌、軽圧下など多くの铸造技術が開発された。これらは成分設計、取鍋精錬や真空処理などの高純度化・介在物制御技術とともに一貫した製造技術体系となっている。

同様な例は冷延鋼板の連続焼鈍にもみられる。連続焼鈍ではバッチ焼鈍にくらべて急熱急冷であるので、一般にはすぐれた加工性が得られにくい。しかし連焼温度パターンの最適化とともに、精錬工程におけるC, N, Sなどの不純物元素の低減あるいは固定化、さらに熱延工程における加熱温度や圧延条件の制御に対策がとられている。

第2の観点は高度化する市場要求への対応である。厚板、パイプ、線材等の各品種にわたって従来のレベルをはるかに超える要請が出され、これに応えるために各品種の工程にとどまらず、精錬凝固工程にさかのぼった一貫製造技術の開発が必要であった。たとえば、砕氷タンカー用の鋼材仕様では板厚75 mmで引張り強さ490 MPa級の鋼板の母材(193 K)、溶接部(198 K)には48 Jのシャルピー値が要求されている。溶接部靱性や耐ラメラティア性などの改善にはP, Sの低減が必須であり、転炉精錬前の溶銑予備処理、精錬後の真空処理やフラックス吹込みなどの技術が開発された。図1は近年の鋼の高純度化の推移を示したものである。

非金属介在物の低減にたいしてはさらに連続铸造工程でも溶鋼のArシール、タンディッシュ内での浮上促進対策などがとられる一方、介在物の組成をS, O, Caな

図1 鋼の高純度化の変遷。

* 新日本製鉄株式会社参与
Recent Trends in Steel Technology; Michihiko Nagumo (R & D Laboratories-I, Nippon Steel Corporation, Kawasaki)
Keywords: steel, technical review, integrated production process, performance, peripheral technologies for steel

1987年2月27日受理

どのバランスによって制御する形態制御技術が開発された。これらはとくに水素誘起割れが問題になる耐サワガス用ラインパイプや、伸線時の断線が問題になるスチールコード用線材の製造に不可欠の技術となっている。

一貫製造技術体系への第3の原動力は、おそらく最近の鉄鋼技術の最大の特徴といえるが、従来鋼材の形状を出すための熱間加工を材質付与の目的に活用する視点の拡大である。いわゆる制御圧延や制御冷却の組合せであって、塑性加工と熱処理との同時効果をねらったものである。図2はそれらの工程とそこでおこる金属組織の変化を模式的に示したものである。この処理の主な効果は、低炭素化および合金元素の量を減らしながら強靱化して、とくに溶接性を改善することである。当初歩留りの向上が主なねらいであった連続 casting も、スラブの組成の均一

図2 加工熱処理制御プロセスにおける組織変化の模式図。

さや圧延の容易さから、製品の高性能化のための積極的な意義が与えられた。

この手法の適用例としては、Ti 添加によって圧延前の結晶粒を微細化するとともに、オーステナイトの未再結晶域で圧延加工を行なって加工誘起変態をおこさせ、比較的高温で微細な針状フェライトを生成させた極低炭素ベイナイト鋼がある。連続 casting スラブは凝固後の冷却速度が比較的大きいので、TiN や AlN などの析出物を粗大化することなく、有効に利用するのに適している。またスラブの低温加熱は圧延前の結晶粒を微細化するのに有効であるが、鋼塊に比べて圧延機の負荷が軽減される連続 casting スラブの特徴が注目され、活用された。

圧延後の強制冷却は組織を微細均一化して強化し、炭素当量の一層の低減に有効である。造船用のみならず、海洋構造物用の高級鋼もこの技術によって開発された。強制冷却の大きな効果として中心偏析部の組織が一様化することが挙げられ、水素誘起割れを大幅に軽減することが可能になった。

これらの例は製鋼～圧延～熱処理の工程を総合的にとらえて材質形成をさせる現在の鉄鋼技術の特徴を示すものといえよう。

3. 鋼材性能の高度化

近年の社会・産業構造の変化に伴って、鋼材にたいする要求機能も大幅に変化しつつある。鋼構造物にたいし

表1 わが国における高張力鋼の発展と研究開発。

	1950	1960	1970	1980
新製品・		調質型高張力鋼シリーズ (例) WEL TEN IN 鋼	TiN 利用の大入熱鋼の開発 (例) WT60-S	極厚 HT100 高 Mn 鋼
新技術の		低温用鋼 (例) YND シリーズ (後の N-TUF) 9%Ni 鋼 etc.	スラブ低温加熱技術と新製品 (例) NIC, SHT, etc.	
具体例			加速冷却技術の開発と新製品 (例) CLC, OLAC, etc.	
			Ti-B 大入熱溶接用鋼	
			各種の耐食性鋼 (例) CORTEN S-TEN etc.	Ti-O/HAZ 高靱性鋼
		溶接割れ性の改良研究	自主開発技術	
技術・	T-1 鋼の技術導入			
研究の	調質鋼の基礎と応用研究 ・合金元素と焼入れ性 ・B の焼入れ性の利用	Ti-N による HAZ r 粒制御の研究	新しいプロセス制御技術開発研究の展開 (高純鋼量産溶製, スラブ低温加熱, 加工熱処理)	
要素・重点	導入技術	欧米で開発された高張力鋼の 追従・改良研究	制御圧延の実用化研究	微細な析出物を利用した r→α 変態挙動の研究
市場の動向	戦後日本経済の本格的復興 →高張力鋼需要の萌芽	産業界での高張力鋼の 使用経験のちくせきと 新たなニーズの派生 →低温用途, 耐食性(耐候性 etc.), 溶接作業性	日本鉄鋼業ラインパイプの供給基地化 さらに海洋開発関連鋼材へ乗り出す 溶接継手の破壊靱性への関心高まる 先端技術の自主開発(深海, 超電導, etc.)	

ては経済設計とともに、使用環境の苛酷化と安全基準の厳格化によって、信頼性が一層重視されるようになった。石油や天然ガスの掘削、輸送、貯蔵に使用される鋼材仕様の高度化の例は前に述べたが、脆性破壊の発生と停止の両特性の同時要求もある。表 1 は我が国における高張力鋼の発展の経緯を示したものである。米国の T1 鋼に触発された高張力鋼の研究開発は我が国において調質型高張力鋼シリーズとして展開され、さらに前述したように制御圧延や加速冷却を組合せたプロセス制御が開発された。そして市場要求に応じて微細な酸化物を分散させて溶接部の靱性を一層改善するユニークな技術が直近の成果として得られている。

一方、本格的なモータリゼーションとともに自動車用鋼材が多彩化し、大きな進歩をとげている。その 1 つは車体軽量化のための高強度鋼板化である。技術的な課題は高強度化と加工性のバランスをとることとコストである。このために析出強化や固溶体強化を利用した成分設計に加えて、熱延時の冷却パターンや巻取り温度の制御、また冷延鋼板では連続焼鈍時の温度パターンの制御を組合せた種々の鋼板が開発されている。

自動車用を主な対象として最近の進歩が著しいのは表面処理鋼板である。とくに欧州や北米で冬季の融雪のために塩の路上散布が増え、車体の腐食が深刻な問題となってきた。これに応じて車体防錆鋼板の開発がめざましく行われた。車体用には防錆性能に加えてプレス加工性、良溶接性が兼備されねばならない。防錆鋼板の開発はユーザーの車体設計方針に対応して 2 つの観点から行われた。

1 つは車体組立て後に施されるリン酸塩化成処理や電着塗装等の防食皮膜が不十分になりがちな部分の耐食性を重視する考えであり、第 2 は防食皮膜と鋼板との密着性を重視する考えである。

前者にたいしては鋼板上に耐食性のすぐれた Zn-Ni 系合金めっきをした後にクロメート処理および金属粉を含有した塗料を薄く塗布した塗装鋼板の特性の鋼種が開発された。また後者の観点からは鋼板上に Fe-Zn(リッチ)合金めっきを施した後に Fe(リッチ)-Zn 合金めっきを薄く施した 2 相めっき鋼板が開発された。これらを図 3 に示した。これらの製品の工業化にあたっては新しい横型流体支持電解槽、めっき条件のコンピューター制御、高速均一薄塗装技術など多くの技術が開発され、めっき組成や厚みの均一化、塗膜の均一化、高生産性などが達成された。

石油危機を契機としたエネルギー問題は最近の技術動向への大きなインパクトになったが、発電・送電時の電力損失を極小化するための電磁鋼板についても新しい技術が開発された。1965 年代から方向性電磁鋼板として結晶方位の集積度を高める製造技術が大きく進歩したが、1975 年代にいたってさらに薄手化、高 Si 化、さらにレー

図 3 Fe-Zn 2 層合金めっき鋼板および有機複合めっき鋼板の構造。

ザー照射などによって一層の低鉄損化がはかられた。鉄損の要因はヒステリシス損と渦電流損とがあるが後者の寄与が大きい。渦電流損の軽減には磁区を細分化して磁壁移動距離を短かくすることが有効であり、これをレーザー処理で達成する技術が開発され実用化された。

すなわちパルスレーザービームを珪素鋼板表面に照射すると表面の絶縁皮膜が瞬間的に蒸発する。この際に高い衝撃圧力が鋼板に作用して表面直下に局所的な弾塑性歪領域が形成され、そこで磁化が不連続となって静磁エネルギーが増加することになる。磁区の配列はこの静磁エネルギーをふくめた内部エネルギーが最小になるようにおこり、磁区が細分化することが確められた。この処理によって鉄損は約 10% 低減することが可能になった。この技術は従来の金属学的な手法に代って物理的な手法を活用した例として注目される。

4. 周辺要素技術の進歩

近年の鉄鋼技術の進歩は、微量分析技術や局所領域のキャラクタリゼーション技術の発達に負うところが極めて大きい。従来経験的に蓄積されてきた知見がこれらの解析手法によってそのミクロ的な実体が解明され、理論的な理解を助けるとともに的確な対策を可能にした。

鋼材の連铸化にともなう問題の 1 つは前に触れたように中心偏析である。この実体の解明に大きな役割を果たしたのが CMA(Computer Aided X ray Micro-analyzer)である。これは基本的には従来の EPMA に高度のコンピューターを組合せて画像解析を行わせたもので、各元素別、濃度別の表示が得られる。図 4 は電磁攪拌処理をした連铸片の中心部等軸晶帯を分析した結果で、等軸晶間の Mn の偏析の状態が示されている。原図はカラーで 5 段階の濃度区分がされている。連铸の操業条件とこれらの結果を総合することにより、偏析の生成機構が解明されるとともに海洋構造物用鋼材や耐サワーガス用パイプの製造技術開発の指針が得られた。

不純物元素の偏析が決定的な影響を持つ特性に粒界脆化があり、調質鋼の焼もどし脆性や水素脆化割れなどをおこす。これらの機構解明にオージェ電子分光(AES)、X 線光電子分光(XPS)などが活用され、P, S, As などの

図4 電磁攪拌鋳片中心部等軸晶帯のCMA分析結果。

供試鋼レド成分(質量%) : 0.19C, 0.29Si, 1.36Mn, 白: $\text{Mn}/\text{MnO} > 1.15$, 黒 $1.15 > \text{Mn}/\text{MnO} > 1.0$, グレー(濃) : $1.0 > \text{Mn}/\text{MnO} > 0.9$, グレー(薄) : $0.9 > \text{Mn}/\text{MnO} > 0.8$.

粒界偏析度と脆化度との定量的な関係、不純物元素とMn, Siなどの合金元素との相互作用、さらに微細炭窒化物の析出が脆化を助長することなどが解明された。

AESやXPSはまた鋼板の表面分析に活用されている。冷延鋼板の塗装後耐食性が鋼板のロットによってかわることが指摘され、鋼板の表面性状との関係が解析された。冷延鋼板は冷延後に圧延油の除去、焼鈍の工程をとるが、この間に鋼板表面にC, Mn, Si, Alなどが濃化する挙動が解析され、化成処理時にりん酸結晶が析出するサイトが影響することが見出された。同様にステンレス鋼の不動態皮膜の組成についても分析が行われ、Mo添加鋼では皮膜中のCr量の増加がおこることが見出されている。

鋼材のミクロ的な観察は分解能では原子オーダーに達しているが、最近個々の原子を識別しながらその原子の質量分析を行うことも可能になった。アトムプローブ電界イオン顕微鏡がその例である。鋼の強化機構に微細炭窒化物の析出強化があり、調質モリブデン鋼の強化因子と考えられていた。ところが強度が最高になる焼もどし条件ではMo炭化物以外に微細なMo原子のクラスターが生じていることがこの装置によって見出された。これらの知見が新しい強化手法の開発につながる可能性がある。

最近の解析技術として発展しつつあるものに放射光(SOR)を用いた手法がある。従来のX線源の約千倍の強さの白色光が得られるのでその場観察が可能である。最近の例として3%珪素電磁鋼板の2次再結晶進行の状況をX線トポグラフで動的に観察することに成功している。2次再結晶の界面移動が開始されるサイト、移動

の進行状況、さらに副結晶粒が作られる様子も捉えられている。電磁鋼では2次再結晶で結晶方位を制御することが中心的な課題であり、このような観察結果から重要な指針が得られよう。

以上のような分析・解析技術だけではなく、近年のハイテクノロジーが鉄鋼製造技術の随所にとり入れられている。パルスレーザーを用いた電磁鋼板の鉄損低減はさきに述べたが、高エネルギーのレーザービームを用いた溶接、表面改質が試みられている。プラズマもまた高エネルギー密度の熱源であり、従来から溶射技術があるが最近真空中で溶射を行う方法が開発されている。真空中のために活性な金属の溶射が可能であり、たとえば Ar-H_2 のプラズマとTi粉末を用いて鋼の上に1mm程度の厚さのチタン層を形成させることが出来、耐食性のよい材料が得られる。同様に $\text{H}_2\text{-N}_2$ の混合プラズマを用いてTiNやAlNの耐摩耗性被覆が得られる。

最近の鋼の表面処理の分野では、従来の熔融金属への浸漬めっきや電気めっきに加えて、ドライコーティングと総称される新しい技術が開発されつつある。物理的に皮膜を蒸着して形成するPVD(Physical Vapor Deposition)には種々の方法があるが、ZnやAlを真空中で蒸着する方法は実用化されている。一方、蒸発源から発生した粒子をイオン化して加速し、材料表面に注入するイオン注入法やイオンブレーティング法が異種元素を材料表層直下に富化させる手法として試みられている。これらのドライコーティングは対象材の大きさが限定され、またコストの問題もあるが、耐食性、耐摩耗性、装飾性の改善手法として普及しつつある。

5. お わ り に

最近の鉄鋼材料技術の特徴を概観してみた。社会情勢の変化と周辺技術の進歩によってこれらの流れは今後また変化していくであろう。現在我が国の鉄鋼業は中進国に対してコスト競争力を強化することと、大量生産から多品種小量生産への対応技術を確認する課題を担っている。また各種の新素材との複合化も1つの流れである。一方コンピューターの一層の高度利用、高密度エネルギーの活用も進むであろう。成熟したといわれてからもなお鉄鋼技術の進歩は著しかった。今後もこの流れは変わらないであろう。

文 献

個々の文献は省略させていただき、以下の総説を参照されたい。

- (1) 鉄鋼技術の進歩特集号：鉄と鋼，71(1985)，No.3.
- (2) 表面処理特集号：鉄と鋼，72(1986)，No.8.
- (3) 金属学会セミナーテキスト，「表面・界面の制御技術」，日本金属学会，(1983).
- (4) 金属学会セミナーテキスト，「局所領域のキャラクター化」，日本金属学会，(1985).
- (5) 西山記念講座テキスト，「特殊鋼精錬技術の最近の進歩」，日本鉄鋼協会，(1981).