

最近の溶接技術の進歩と今後の展望

Latest Advances in Welding Technologies and Prospect in Future

大 北 茂^{*(1)} 及 川 初 彦^{*(2)}
Shigeru OHKITA Hatsuhiko OIKAWA

抄 録

構造物で使用される素材の特性に対する要求は、強度、靱性、疲労特性、耐食性、耐熱性等、多岐に渡っており、最近では、ますます高度化している。一方、それに伴い、溶接技術に対する要求も厳しいものになってきており、高能率、高品質、高機能、省力化、低コスト等、多種多様である。本章では、これらニーズに応じて開発された最近の鋼板、チタンとその溶接技術について述べた。まず、厚板、薄板、鋼管、ステンレス鋼、チタン分野でのニーズと開発動向、開発鋼種例について述べた。次に、造船、建築、橋梁、自動車、家電、建築機械・産業、貯槽・圧力容器、パイプライン・発電分野で開発された代表的な溶接技術について述べた。溶接技術課題は、カスタマーでの新開発鋼板適用、製鉄所溶接ラインでの安定操業、エンジニアリング部門での溶接施工等、非常に幅広く、今後も、さらなる技術開発が必要とされる。

Abstract

Demands for properties of materials used in structures include many things such as strength, toughness, fatigue property, corrosion resistance and heat resistance, and these become to be higher level. On the other hand, demands for welding technologies become to be severe with these demands for properties, and these are wide variety such as high efficiencies, high qualities, many functions, labor saving and low cost. In this chapter, recent steels and titanium corresponded to these needs, and its welding technologies were described. At first, needs and development tendency in the fields of plates, sheets, pipes, stainless steels and titanium, and the examples of developed materials were described. Next, representative welding technologies in the fields of ship buildings, buildings, bridges, automobiles, home appliances, machines for building, tanks, pressure vessels, pipelines and power plants were described. Problems in the field of welding technologies are very wide, for example, application of newly developed steels in customers, stable operation of welding lines in steel works and welding procedures in the field of engineering. Further development is needed continuously in the field of welding.

1. 緒 言

構造物に使用される材料には、その使用環境、構造設計、デザインや組立て方法などに応じて多様な特性が必要とされ、その溶接部にもそれ相当の特性が要求される。したがって、金属材料には、溶接構造物としての多様で高い品質が求められ、また、溶接施工時には、省力化、低コスト化が求められる。この傾向は、前回、本技報で溶接特集が刊行された1995年に比較してますます強まり、従来は必要とされなかったような新しい品質特性の要求が加わるなどさらに高度化し、留まるところを知らない。

新日本製鐵では、これらの要求に合わせて、高機能、高品質の鋼をはじめとして種々の素材を開発し提供してきた。例えば、厚鋼板で例をあげると、建築分野では、火災時に高温での強度を維持することが可能な耐火鋼や、地震時の安全性を確保しかつ超大入熱の溶接にも耐えうる建築用高靱性鋼などを開発し、また、造船分野では、輸送効率化を目指した大型コンテナ船用の高強度厚鋼板を、橋

梁分野では海浜地域の塩害に耐えうるようなNi系耐候性鋼を、さらにパイプライン用途に耐力120ksi級の鋼などを開発している¹⁾。

一方、薄鋼板で例をあげると、自動車分野では、環境汚染防止を可能にする鉛フリーの燃料タンク用Sn-Zn合金めっき鋼板、アルミニウムめっき鋼板等²⁾や、車体の軽量化、衝突安全性向上を可能にする高強度鋼板³⁾を開発した。また、家電分野では、環境汚染防止を可能にするクロメートフリー後処理鋼板⁴⁾や環境汚染防止、工程省略によるコスト低減、意匠性向上を可能にするプレコート鋼板⁵⁾を開発した。さらに、建材分野では、高い耐食性を有するスーパーダイマ⁶⁾を開発した。同様に、ステンレス鋼やチタン分野においても、その特徴を生かす商品を開発し市場に提供している。

構造物の使用性能は、しばしば、その素材の特性ではなく溶接部の特性で支配されることがある。新日本製鐵グループは、各産業分野における世界の動向やカスタマーからの要望をいち早く取り込み、必要特性を満たす素材開発を行い、同時に、新しい溶接・接合技術の提案も実施している。

*⁽¹⁾ 鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2291

*⁽²⁾ 鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員 工博

溶接・接合技術分野においては、上述の新開発鋼材の溶接技術開発のみならず、鋼管の製造、製鉄ラインの溶接技術支援、さらにはパイプラインの敷設や海洋構造物の建造など、エンジニアリング部門の溶接・接合技術の研究開発も行ってきた。また、これらに加え、カスタマーでの多様な接合技術課題を解決し、設計自由度の拡大を可能とするソリューション技術を提案し、直接的にカスタマーでの加工技術の支援を行ってきている。

ここでは1995年以降に開発、実用化され、各産業分野で適用された素材とその溶接技術を例として取り上げ、その動向と将来展望を紹介する。

2. 最近の鋼板開発の動向

2.1 厚板

厚鋼板利用分野においては、構造物の大型化に伴う建造コスト増

に対する製作コスト削減や高能率操業のための高強度化と高能率溶接施工性の向上、および使用環境の苛酷化に伴う溶接部高靱性化や長寿命化のための疲労や腐食による損傷の軽減等が継続的な課題となり、高度化する市場からの要求特性を満たすために新鋼材の研究が精力的に行われ、多くの厚鋼板が開発され使用されてきている(表1)。

このような状況の中で、近年最も大きな影響、効果をもたらしたのは1980年代後半に始まったTMCP(Thermo-Mechanical Control Process)による鋼材の製造技術であり、このTMCP技術の特長を生かし、種々の厚鋼板が製造されている。例えばTMCP鋼においては、軟鋼と同程度の炭素当量(Ceq)で引張強さが490MPa級の鋼材を製造したり、同一強度レベルの鋼板ならば、アズロール材と比較して合金量を少なくできるため、溶接時の予熱を省略したり、予熱温度を低減でき、溶接工程が簡略化することができるようになったことで

表1 各産業分野におけるニーズ、要求特性と開発鋼例
Needs, demands for properties in each industry field and examples of developed steels

Industry fields	Needs, Back grounds	Demands for properties	Examples of developed steels
Ship building	Liquefied gas carrier ship Container ship Corrosion resistance for crude oil carrier	HAZ toughness Arrest property High heat input weldability High tensile strength Small distortion High efficient fabrication Corrosion resistance Fatigue strength	Low temperature steels for LPG, LNG tanks Heavy plates by erectorgas welding for container ship High arrest steel New corrosion resistant steels High corrosion resistant SUS for chemical tanker
Architectures and its materials	Skyscraper Brittle failure resistance Fire resistance Corrosion resistance for building steel sheet	High strength High heat input High efficient welding fabrication High toughness Fire resistance High corrosion resistance	Low YR 490 to 780 MPa steels High HAZ toughness - high strength steels for high heat input welding Fire resistant 400-490 MPa class steels, Super Dyma
Bridges	Reduction of construction cost Reduction of life cycle cost	High efficient welding fabrication Corrosion resistance Fatigue strength	BHS steels Titanium-clad steel Ni type weathering steel
Automobiles	Reduction of environmental load materials Weight reduction Improvement of stiffness Improvement of safety in crashing	Lead-less High strength	Sn-Zn alloy coated steel sheet for fuel tank Aluminum coated steel sheet for fuel tank High strength steel sheet
Home appliances	Reduction of environmental load materials Reduce in cost by process abbreviation Design	Hexa valent chromium-less Appearance	Coated steel sheet with chromate-free treatment layer Prepainted steel sheet
Construction and industrial machinery	Reduction in weight Longer operating life	Higher strength Wear resistance	HT950 steel for crane Wear resistance steels
Boiler Pressure bessels	High temperature operation High pressure operation	Higher strength High efficient welding fabrication Creep resistance	Advanced 2.25Cr-1Mo steel
Tanks	Growth in size Lowering temperature	Higher strength Corrosion resistance	Steels for combination tanker of LPG and liquid ammonia 9%Ni thick plates High corrosion resistant SUS steel
Pipe lines	High pressure operation Operation at arctic region Corrosion resistance	Higher strength Low temperature toughness Sour gas resistance	X-100, X-120 steel pipes High HAZ toughness-high strength thick line pipes Sour gas resistant steel pipes
Penstocks	Growth in size	High strength Reliability High efficient welding fabrication	HT950 steel plate
Offshore structures	Growth in size Operation at arctic region	High strength High efficient welding fabrication Low temperature toughness	YP460, 500 MPa steels YP355, 420 MPa steels for arctic use

ある。最近では、この技術はペンストック用のHT950鋼やX120クラスのパイプ用鋼素材にも適用されその強度レベルは大きく拡大してきている。

また、鋼構造建設の省力化、低コスト化、高効率化などの要求を背景に高強度鋼板の実用化ニーズも高い。従来、圧延のままや焼入れ焼戻しなどで製造されていた鋼板はTMCPではそれぞれ制御圧延(TMR)、加速冷却(AcC)に変化し、これらのTMCPで製造される鋼のミクロ組織は従来に比べて非常に微細な組織を呈し韌性が向上する^{7,8)}。図1は厚板溶接部の断面形状を模式的に示したものであり、溶接施工を簡略化するためには入熱を大きくする方法と開先断面面積を狭くする方法がある。その際、鋼材の炭素量や合金成分が高いと溶接金属と隣接するオーステナイト結晶粒が粗大化した領域(粗粒域)とその粗粒域が次パスにより加熱され硬化組織に変態する領域(粗粒+2相加熱域)の韌性低下が著しいことが知られている。

特に大入熱で溶接する場合には、粗粒化が顕著になり粗粒域の幅が大きくなるためその脆化の度合いも大きくなるが、TMCP技術の適用により炭素、合金成分量を低減することが可能となり、これらの領域の脆化を大きく軽減できるようになった。また、超大入熱溶接時にこの溶接熱影響部(HAZ)粗粒域のミクロ組織を微細粒子(Ti窒化物、Ti酸化物、Mgの析出物等)を利用して微細化し、韌性改善を図る鋼材(HTUFF鋼)を開発し、建築分野、造船分野などへ超大入熱用鋼として提供している。

さらに、構造物の長寿命化のために、各種腐食環境に対しては高耐食鋼板、耐疲労強度を考慮した鋼材が開発実用化されている。耐候性鋼では海浜地区においても無塗装で使用できるNi系高耐候性鋼板が開発、実用化された。また、耐硫酸性に加え耐塩酸性を向上させた新耐食鋼S-TEN1が開発され産業機械用途で採用されるようになった。

2.2 薄板

地球温暖化や環境負荷物質による汚染等、環境問題に対する世界的な関心は高まる一方である。これに対して、ハイブリッドカーの普及や燃料電池車の登場、車体軽量化、環境負荷物質の使用低減

等、自動車分野の対応は積極的である。一方、現代のような車社会の中で、歩行者と搭乗者の保護は必須であり、自動車分野では、衝突安全性向上の問題に真剣に取り組んでいる。これら自動車分野における環境保全、衝突安全性向上のニーズに対応すべく、鉄鋼分野でも新しい鋼板が開発された。

まず、環境保護の観点から、鉛の使用を控える動きが活発化し、これに対して燃料タンク用Sn-Zn合金めっき鋼板、アルミニウムめっき鋼板等が開発された²⁾。

一方、地球温暖化防止のために、燃費向上やCO₂排出量削減が求められ、車体の軽量化が検討された。軽量化のためには、アルミニウムやマグネシウム等軽量材料の使用が効果的であるが、材料費の高さと加工の難しさから大量採用には至っていない。アルミニウムを鋼製車体の一部に使用したハイブリッド構造も検討され、一部は実用化されている。

これに対して、鉄鋼業界は、高強度鋼板使用による軽量化を提案した³⁾。また、時を同じくして、衝突安全性向上へのニーズが高まり、高強度鋼板への期待が高まった。その結果、引張強さが590MPa級以上の各種鋼板が開発され、最近では1470MPa級の鋼板も開発されている。

車体の軽量化と衝突安全性向上に対して、高強度鋼板の使用は有効であるが、これ以外にも車体構造の変革が有効な手段となり得る。その代表例が図2(a)、(b)に示すテーラードブランク(TB)部品やハイドロフォーミング(HF)部品の使用であり、また、レーザ等を用いた連続溶接である。これらは、ULSABプロジェクトでも検討がなされている。

高強度鋼板の適用や構造変革に伴って、溶接に対するハードルは高くなる一方であるが、それに対抗する技術も開発されつつある。高強度鋼板の成分・組織最適化と溶接プロセスの開発(電源、施工法)によって溶接部の信頼性が向上し、必ずや安全性の向上と軽量化の両立が達成されるものと期待される。衝撃吸収特性や剛性の向上を可能とする最適構造の提案をも含め、高強度鋼板を如何に上手く使いこなすかが大きな課題となっており、溶接技術の開発もこの

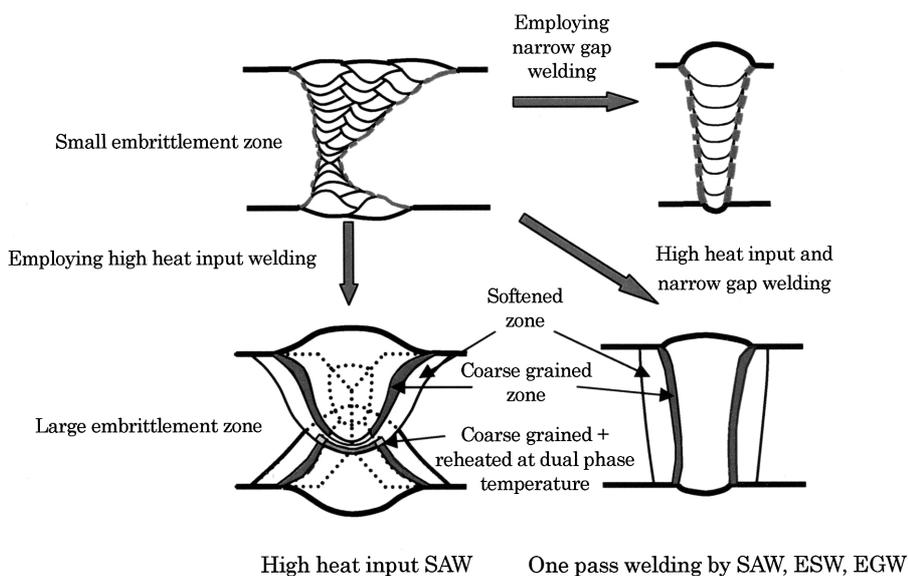


図1 溶接の高能率化と脆化域
High efficiency welding and the embrittlement zone

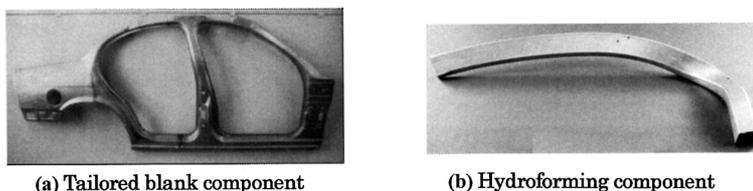


図2 TB部品とHF部品の一例
Example of Tailored blank and Hydroforming component

観点に基づいて進められている。

一方、環境負荷物質による環境汚染の問題は家電分野でも大きく取り上げられ、溶接性も考慮されたクロメートフリー後処理銅板が開発されている⁴⁾。また、環境汚染防止、工程省略によるコスト低減、意匠性向上を目的として、プレコート銅板が開発されている⁵⁾。

薄板建材分野では、耐食性確保の観点から亜鉛めっき銅板が用いられることが多いが、近年開発されたスーパーダイマは、ステンレス鋼に匹敵する高耐食性めっき銅板として、今後適用拡大が見込まれている⁶⁾。

2.3 銅管

銅管は、自動車、産業機械、各種ボイラー・プラント用、構造・配管用、ラインパイプ・油井管用など多くの産業分野で利用されている。この銅管は、UO銅管、スパイラル銅管、電線銅管、鍛接銅管、シームレス銅管等と製造法によって分類されるが、シームレス銅管以外は溶接、接合によって製造される。

まず、自動車・産業機械分野においては、上述の薄板と同様のニーズから、高強度銅管を開発し、市場に提供してきている。また、自動車の排気系材料ではエキゾーストマニホールド用途には耐熱性と加工性を備えたフェライト系ステンレス鋼管、マフラーには高耐食性を持つステンレス鋼管が開発された。

プラント用途では海水淡水化や高塩分食品プラント向けにスーパーオステナイト系ステンレス鋼NSSC®270銅管を開発し提供してきている(NSSC®は新日鐵住金ステンレス(株)の登録商標)。

ボイラー用銅管分野では、発電効率を高めるため高温高圧化が進み、NF709やXA704などの高強度・高耐食銅管の開発を行い市場に提供している。また、低コスト化のニーズに応えるためボイラーチューブ用として高品質な電線銅管を開発し、実用化している。産業廃棄物やごみ処理ボイラーでは非常に腐食性が高い場合が多く、特に高Cr-低Cで耐粒界腐食性に優れたNF709Rを開発した。耐塩酸性を改善した耐硫酸性銅である新S-TEN1鋼の銅管も製造し、使用されている。

一般の土木・建築用途には耐食性、耐震性、高強度特性、景観性などの多様な特性が必要とされこれに応える銅管を製造、供給している。最近では照明柱等の用途に銅管にテーパ加工を加えたり、ボール基部の疲労による倒れ防止のためにU字リブを溶接により付与した構造体としての商品も供給し、社会のニーズに応じている。

ラインパイプ分野においては、その開発地域の、深海化、寒冷地化の傾向は依然として継続しており、そのため、鋼材重量の低減や施工コスト低減、輸送の高効率化のために厚肉かつ高強度鋼を採用する傾向が強い。現在、X-100級をメニューに加え、更にExxonMobile社と共同でX-120級のラインパイプを開発し、供給体制を整えつつある。また、腐食性が高い環境での開発、輸送に耐える

ために高耐食性の銅管素材を開発し供給してきている。

以上のように新日本製鐵では、溶接処理技術や上述の酸化物・析出物制御技術、TMCP技術などを駆使して実現し、市場で必要とされる多様な銅管に対し、メニューを取り揃えニーズに応じている⁷⁾。

2.4 ステンレス鋼

ステンレス鋼には、低合金鋼に比較して、耐食性に優れるのみならず多様な長を有する。オーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系、2相系等と多様なステンレス鋼はそれぞれの特長をいかして、用途に応じて最適なものを選択できることから、世の中のあらゆる産業分野で使われている。

最近のステンレス鋼開発の動向として、耐食性などの品質の更なる向上、顧客からの要望にタイムリーに応える新しい市場拡大のための技術開発、ニッケル、モリブデンの高騰に対応するためのフェライト系ステンレス鋼によるオーステナイト系ステンレス鋼の代替技術開発や生産性向上のための技術開発等があげられる⁸⁾。

たとえば、ケミカルタンカー用NSSC®260A、高塩分食品タンク向けのNSSC®270はその溶接技術と共に耐食性を改善し新しく開発された。また、自動車の排気系に使用されるNSSC®180は加工性を改善したフェライト系ステンレス鋼であり、ニッケル、モリブデンを添加しないためオーステナイト系に比べ安く製造できるようになった。

新日本製鐵では、新日鐵住金ステンレス(株)設立後も従来と同様にその素材開発、溶接等の利用技術開発を支援している。

2.5 チタン

チタン、チタン合金は耐食性に優れ、軽量で強度が強いことから、熱交換器や化学プラント、航空機等に使用される。また、従来は特殊な用途に限られていたが、最近では生産性が向上してきたことから、住宅屋根や自動車用材料など一般の構造用にも用途が拡大してきている。新日本製鐵では、チタンの製品として冷間圧延薄板、厚板、溶接管、線材等を市場に提供してきている¹⁰⁾。

このチタンの溶接には、TIG溶接、プラズマ溶接等の不活性ガスシールド溶接が行われてきた。これは従来、チタン薄板の用途が殆どであったため、現在では、海洋構造物や船舶など、その適用が拡大しつつあり、MIG溶接、電子ビーム溶接等の高能率溶接法の適用の今後の更なる拡大が期待される。

3. 各種産業分野における溶接技術開発

一般に、溶接部の性能を一言で表す言葉として、“溶接性”という表現が使用される。元は鉄鋼材料の溶接し易さを意味し、溶接時に発生する高温割れや低温割れなどの欠陥発生に対する抵抗力などを指す言葉として曖昧に使われていた。しかし、最近では、“溶接性”

とは、使用する鋼材の溶接の能率を含めた溶接のし易さとその溶接部の健全性、その溶接部の使用性能を意味するようになり、さらに、溶接材料の整備状況や溶接作業時の安定性なども含めて広い意味で使われるようになってきている。ここでは、いくつかの産業分野において、鋼材の“溶接性”改善・向上の視点から研究、開発された技術の例をあげてその動向とともに紹介する。

3.1 造船

まず、造船分野においては、大板継ぎやブロック継ぎなどの工程で生産性を上げるために、片面1パスSAWやエレクトロガス溶接法の要望が強い。近年、コンテナ貨物を大量、高速に輸送することを目的に、コンテナ船は大型化の傾向にあり、シャーストレイキやハッチコーミングに板厚50mm以上のYP390MPa鋼の厚鋼板が使われるようになった¹¹⁾。この溶接には、高能率施工のために大入熱1パスの2電極エレクトロガス溶接方法が開発、適用され、現在さらに高強度化を目指して開発が行われている。

なお、大入熱溶接時のHAZ韌性改善は上述のように、TMCP技術による低炭素当量(Ceq)化、TiNなどの析出粒子を利用した結晶粒粗大化の抑制、種々の酸化物を利用した粒内変態組織の微細化、脆化組織の低減など手段を組合わせて達成している。また、LPGガス船の低温用鋼¹²⁾および溶接部は $-53^{\circ}\text{C}\sim-68^{\circ}\text{C}$ の韌性が要求され、経済性の点から高能率溶接などの要求もあり非常に厳しいものとなっている。この鋼材のHAZ韌性改善に対しても、コンテナ船用鋼と同様に高HAZ韌性鋼が適用された。さらに、造船所では溶接歪取りなどの工程省略に対する要望が強く、鋼材および溶接金属の高温強度向上や変態温度の制御という新しい視点から低歪鋼板、低歪溶接材料を提案し、現場適用の可能性が検討された¹³⁾。また、ケミカルタンカーなど腐食環境の厳しい用途に、新耐食ステンレス鋼NSSC[®]260A鋼とその溶接材料を開発し採用された。

3.2 建築

建築分野では、阪神淡路大震災において問題となった鉄骨柱梁接合部での脆性破断現象について、建設省(現国土交通省)主導のもと、関連業界で、その防止への取り組みが行われ、設計、鋼材、溶接材料、溶接施工条件に制限を設けて、鉄骨構造物の性能を規定する提案がなされた¹⁴⁾。また、地震時の安全性を高めるための塑性設計に対応すべく、降伏比(YR:降伏強さ/引張強さ)の上限および降伏強さの範囲が規定された建築構造用鋼(JIS G 3136, SN)が制定され、さらに溶接時の耐ラメラテア性のためにS量上限と板厚(Z)方向絞りの下限を規定したグレードも盛り込まれた。

そして、柱梁接合部においては、設計に応じたシャルピー値を確保するという性能規定が定められ、そのために鋼材成分、溶接材料、溶接条件が制限されるようになった。その結果として、鋼材成分からHAZのシャルピー値を推定できる式($f_{HAZ}=C+Mn/8+6(P+S)+12N-4Ti(\text{mass}\%) \leq 0.577$)が確立された。溶接材料においても、引張り強さが490MPa級の鋼材を高能率(高入熱、高パス間温度)に溶接可能な高韌性ワイヤYM55C(YGW18)が開発された。

最近では柱-梁接合部のみではなくボックス柱の各種溶接接合部にも厳しい韌性要求が規定されるようになってきた。図3はボックス柱ダイヤフラムのエレクトロスラグ溶接部の韌性を示したもので、超大入熱溶接においてもHTUUF鋼に対し、成分適正化したTi-B系溶接金属を適用して微細アシキュラーフェライトを生成させることにより0℃において70J以上の高い値が得られている¹⁵⁾。

高層建築では引張強さが590MPa級の厚鋼板として、予熱フリー

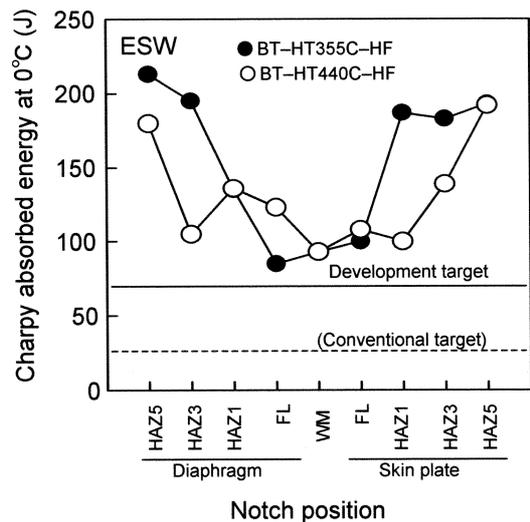


図3 ボックス柱ダイヤフラムのエレクトロスラグ溶接部(ESW)の韌性
Toughness at the welds of diafram of box column of HTUUF steel

の要件とされる $P_{cm} \leq 0.22$ を満たす引張強さ590MPa鋼(SA440)がその溶接材料とともに開発され実用化された¹⁶⁾。また、一部ではHT780の鉄骨も採用され始めている。

建築鉄骨用耐火鋼(FR鋼)は、当初、1988年にSM490-FR鋼として商品化し、600℃での耐力を常温規格値(SM鋼)の2/3以上と高めた鋼材で、火災時の軟化抵抗に優れた鋼材で、耐火被覆厚の軽減や無被覆化が可能で建設コストの削減も可能となるものである。近年、建築物の高層化の動きに伴い高強度鋼のニーズが高まり、引張強さが590MPa級の耐火鋼が開発された¹⁷⁾。この鋼材は、建築用鋼材の基本特性(YR ≤ 0.8)を満たしつつ耐火特性を保証するものであり、圧延、熱処理で組織を制御することにより製造される。このFR鋼用の材料も、合金系成分を基調として品揃えを完了させ、実用に供している。

一方、建材薄板には亜鉛めっき鋼板が多く適用されている。このため、溶接過程での亜鉛蒸気に起因するブローホールやスパッタの抑制が課題となるが、適正溶接条件、溶接材料等の施工技術を適宜提案し、スーパーダイマ等の高耐食性めっき鋼板の適用拡大を推進している。また、溶接部そのものの耐食性確保も重要な課題であり、補修塗装や高耐食溶接材料の開発が期待されている。

3.3 橋梁

橋梁分野では、通常、死荷重を低減させるために高張力鋼化が有利と考えられるが、車両通過時の変動荷重による疲労特性から板厚低減に限界があるため、引張強さが570MPa級までの鋼が多く使用されてきた。一方、明石海峡大橋などの大型橋梁ではHT780鋼が大量に使用された実績¹⁸⁾もある。高強度化に伴う溶接時の課題は、溶接時の予熱低減、大入熱溶接施工性である。これに対して、新日本製鐵では、Cuの析出現象を利用することにより溶接性を確保しつつ強度向上を図ったHT780を開発し提供し、予熱低減を可能とした。

一方、橋梁は大気中での鋼材の腐食が課題であり、Cu, Cr, P, Niなどの耐食性に有効な元素を添加した溶接構造用耐候性鋼がライフサイクルコスト低減ニーズに伴いその適用が増加してきている。新日本製鐵は、最初にNi系高耐候性鋼を開発、実橋適用し、現在、その適用が拡大している。溶接部も同程度の耐食性が要求され、合金

系の溶接材料を適用するが、一般的にNiは高温割れ感受性を助長する元素であることから、溶接材料の調整、溶接施工条件の検討を同時に行ない、Ni系高耐候性鋼が実機採用に至った¹⁹⁾。また、東京湾を横断するアクアラインの橋脚の防食には鋼の表面に耐海水性の強いチタンを貼り付けたチタンクラッド鋼板がその溶接技術とともに初めて採用された。

3.4 自動車

地球環境保全、衝突安全性向上等、自動車分野におけるこれらニーズに応えるため、新しい鋼板が開発され、その溶接・接合技術も検討された。

まず、環境保護の観点から、鉛の使用を控える動きが活発化し、これに応じて、燃料タンク用Sn-Zn合金めっき鋼板、アルミニウムめっき鋼板等が開発された²⁾。この鋼板は、従来のPb-Snめっき鋼板とは溶接性が異なるため、シーム溶接やスポット溶接、はんだ付に関する検討が行われた。その結果、めっきの改善、溶接条件最適化によって、実生産に耐えうる溶接・接合技術が確立された。現在、六価クロムフリー化に対応して、最適溶接条件の検討が進められ、実用化が推進されている。

一方、地球温暖化防止のために、車体の軽量化が検討された。軽量化のためには、アルミニウムやマグネシウム等軽量材料の使用が効果的であり、アルミニウムの接合法に関しても多くの検討がなされたが、信頼性とコストの点で鋼板に比べ劣っている。アルミニウムを部分的に使用したハイブリッド構造も検討され、鋼板とアルミニウム板の異種金属接合法として、Self-pierce rivetingやFriction spot joining²⁰⁾、直接溶接やろう付、アルミニウムめっき鋼板を使用した溶接法²¹⁾、等が提案された。

これに対して、鉄鋼業界は、高強度鋼板使用による軽量化を提案した³⁾。また、時を同じくして、衝突安全性向上へのニーズが高まり、高強度鋼板への期待が高まった。その結果、引張強さが590MPa級以上の各種鋼板が開発され、その溶接技術も急速に検討が進められた。

従来、自動車の組立工程では、スポット溶接を初め、アーク溶接やプロジェクション溶接等が使われてきた。しかし、最近では、作業能率向上や閉断面構造での片面溶接、溶接の連続化を目的にレーザー溶接やレーザーろう付も使われつつあり²¹⁾、高強度鋼板を対象にこれら接合法の検討が進められた。レーザー溶接の進歩は著しく、ファイバーレーザーやディスクレーザーに代表されるように大出力化が進められ、また、リモート(スキャナー)レーザーを用いた溶接法も検討されている²²⁾。衝撃吸収特性や剛性の向上を可能とする最適構造の提案をも含め、高強度鋼板を如何に上手く使いこなすかが大きな課題となっており、溶接技術の開発もこの観点に基づいて進められている。

高強度鋼板の溶接でまず必要とされるのは、継手の信頼性確保である。通常、鋼板の高強度化に伴い炭素当量が増加するため、溶接部とHAZの硬さが増加する。その結果、溶接部で応力が集中する場合には、溶接部近傍で容易に破壊が起こり、継手強度が低下する。継手の信頼性を高めるためには、継手強度に関するデータベースの蓄積や強度を保証する溶接条件の把握、応力状態に対応した継手形態の提案等が必要となる。また、溶接に適した鋼板成分の調整や溶接後冷却速度の緩和、アーク溶接での最適溶材の選択等、継手特性改善策の提案も必要となる。これらニーズに対応し、従来多くの提案がなされ、現在もこの活動が進められている。

高強度鋼板の溶接で次に上げられる問題点はHAZ軟化である。これは、溶接による熱影響によって鋼板中のマルテンサイトやベイナイトが焼き戻されて硬さが低下する現象であり、引張試験時にその部分で破断が起こるため継手強度が低下する。この対策としては、①軟化が起こり難い鋼板を使用する、②小入熱で冷却速度が速いスポット溶接やレーザー溶接を使用する、等の手法が提案されている。鋼板と接合プロセスの最適な組合せによってこれを抑制することが重要であろう。

高強度鋼板の溶接継手では、疲労強度も問題となる。すなわち、鋼板の疲労強度は高強度化に伴い増加するが、継手の疲労強度は増加しないのである。その結果、これが薄板化の阻害要因のひとつとなっている。疲労強度改善策としては、例えばアーク溶接では、①ビード止端部再溶融による止端部曲率半径の増大、②ショットピーニングや低温変態溶材²³⁾による止端部への圧縮残留応力導入、が、また、スポット溶接では、①後通電、②後加圧によるナゲット周囲への圧縮残留応力導入、が提案されている。今後、施工性も考慮に入れた疲労強度改善策が必要とされる。

高強度鋼板の溶接では、これ以外にも、①水素脆化対策、②溶接部の品質保証法確立、が必要とされる。水素脆化対策としては、正確な現象の把握と使用基準の提案が必要とされる。また、品質保証法としては、インプロセス制御技術や非破壊検査技術の確立が必要とされる。

車体の軽量化と衝突安全性向上に対しては、これ以外にも、車体構造の変革が有効な手段となり得る。その代表例がテラードブランク(TB)部品やハイドロフォーミング(HF)部品の使用であり、また、レーザー等を用いた連続溶接である。

TBは鋼板同士を突き合わせ、レーザーやマッシュシーム、プラズマで溶接する技術であり、異厚・異強度材の組合せが可能であるため、部位による板厚、強度の最適化が可能となり、衝突安全性向上、軽量化の有効な手段となっている。TB溶接では、①施工技術の確立(開先精度、ギャップ裕度)、②欠陥発生防止、③品質保証技術の確立、等が課題となっており、現在も検討が進められている²⁴⁾。HF部品は、鋼管や鋼板を静水圧によって成形した部品である。プレス品を溶接して組み立てる従来法に比べ、①部品点数を削減できる、②フランジが不要、③成形精度が高く大変形が可能、等の利点を有し、軽量化に対して有効な手段である²⁵⁾。

ところが、フランジレスであるため、他部品と接合する場合には、レーザー溶接やアーク溶接のような片面アクセス可能な溶接法が必要とされる。レーザー溶接は、溶接速度が速くビード外観に優れ、変形も少ないという利点を持つが、耐ギャップ性に劣るという欠点を持つ。これに対してアーク溶接は、耐ギャップ性には優れるが、溶接時の変形が大きく外観に劣るという欠点を持つ。したがって、目的に応じて使い分けるとともに、新しい片面溶接法の開発も必要であろう。連続溶接の代表例はレーザー溶接とアーク溶接であるが、溶接速度が速く外観に優れかつ変形も少ないというメリットから、最近ではレーザー溶接が目玉され、それを用いた高剛性化が検討されている。

溶接上の問題点としては、①耐ギャップ対策、②めっき鋼板溶接時の亜鉛蒸発による欠陥発生抑制、③継手の信頼性向上、等があり、さらなる検討が進められている。高強度鋼板を使用した構造最適化により高剛性化が実現されれば、板厚低減が可能となり、衝突安全性を確保した上で車体の軽量化も可能となる。

高強度鋼板の適用や構造変革に伴って、溶接に対するハードルは高くなる一方であるが、それに対抗する技術も開発されつつある。鋼板成分や組織の最適化、溶接プロセスの開発(電源、施工法)によって継手の信頼性が向上し、必ずや安全性の向上と軽量化の両立が達成されるものと期待される。

3.5 家電

家電分野では、環境負荷物質低減の観点から、クロメートフリー後処理鋼板⁴⁾が開発され、実用化に至っている。これらのめっき鋼板は、スポット溶接されることが多いが、スポット溶接性にも配慮されているため、溶接条件の最適化によって容易に溶接可能である。

一方、環境保護、顧客での工程省略によるコスト低減、意匠性向上の観点から、プレコート鋼板も開発されている。プレコート鋼板は、塗膜の導電性が低いため、スポット溶接することが難しく、また、仮に導電性を付与してスポット溶接したとしても溶接痕が残るので、その接合には、ねじ止めやTog-lock, TOX, Self-pierce riveting, ブラインドリベット等の機械的接合法が使用されている。当初、機械的接合法における最適接合条件や継手特性に関するデータが不足していたが、その後多くの検討が行われ、現在では数多く使用されている。

3.6 建設機械、産業機械

建設機械・産業機械分野においては、高張力鋼や耐摩耗鋼、耐食鋼など用途に応じた多様なニーズがある。

大型クレーンには1990年頃から軽量化を目的にHT950が適用され、現在に至っている。またショベルカーのアーム部にはHT590級の鋼材が使用されているが、疲労特性が必要とされ高張力化は難しい状況にあるようである。ダンプカーのバケツには耐摩耗鋼板が適用され、溶接割れ性が常に課題となり、溶接の設計に応じて軟質継ぎ手にするなど使用環境を考慮した溶接施工法が採用されている。プラントの排煙装置や煙突等では酸性物質が結露して鋼を腐食する酸露点腐食が問題となる。これらの構造物に対しては、最近、耐硫酸性に加えて耐塩酸性を向上させた新しい耐食鋼(S-TEN1)が開発され、多く適用されている。それに合わせて、溶接材料も従来の溶接材料では耐食性が十分でない場合もあり、新しく共金系の溶接材料を開発した²⁰⁾。

3.7 貯槽、压力容器

ボイラー・压力容器分野では操業効率の向上を目的に、高温で利用できる鋼材の要求が強い。一般に高温で使用される鋼種ほど耐酸化性、高温強度が必要となるためCr, Moの添加量が多くなる。代表鋼種の一つである2.25Cr-Mo(SCMV4)鋼にVを添加してさらに高温強度と耐水素侵食性に優れたAdvanced 2.25Cr-Mo鋼もそのために開発された。近年、9Cr-1Mo鋼(A387Gr91)ではVやNbを添加して析出硬化による高温強度向上が図られており、575℃まで使用される。

最近開発された(9~12)Cr-Mo(-W)鋼等は600℃で利用できる鋼材として開発され、実機に適用され始めている。これらの用途に使用される鋼板の中でもCr-Mo含有鋼は合金成分が多くなるため硬化が著しく溶接時の低温割れを防止するために予熱が行われ、場合によっては溶接直後熱が追加される。使用温度がさらに高くなり700℃を超えるような用途にはオーステナイト系ステンレス鋼が使用されるが、粒界腐食性を改善したボイラー鋼管用材料(NF709, XA704等)が開発されて溶接材料と共に採用されている²¹⁾。

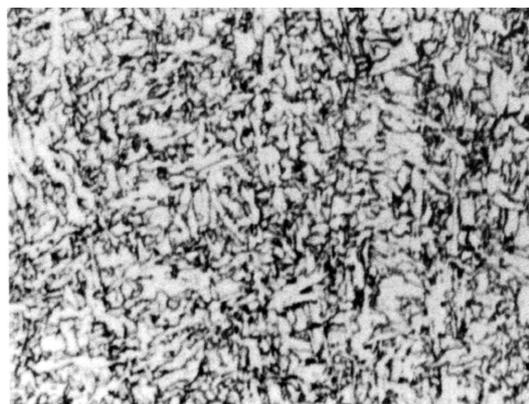


図4 X-120級SAW溶接金属のマイクロ組織
Microstructure of X-120 class SAW steel weld

LPGやLNGなど液化ガスの低温貯蔵タンク用鋼には、破壊靱性とくに亀裂伝播停止特性が要求され、アルミキルド炭素鋼(JIS G 3126:SLA材)とNi含有鋼(JIS G 3127:SLN材, 2.5%Ni, 3.5%Ni, 5%Ni, 9%Ni)が使用される。最近の傾向として、構造物の大型化が進み、板厚の大きい鋼材が使用されるようになった。このニーズに合わせてLNGタンクに使われる9%Ni鋼板は従来30mm程度で使用されていたが、50mmの鋼板まで製造可能となった²⁸⁾。この鋼材の溶接にはインコネル系やハステロイ系等のNi系溶接材料が使用される。

3.8 パイプライン、発電

パイプライン分野では、1960年代後半にAPI 5L X65(降伏強さ65ksi, 445MPa)のUO鋼管が使われ、徐々に強度の高いものが使用される傾向にある。1973年にX70, 1985年にX80, 1990年代に至ってX100の実ラインへのテスト採用、現在ではX-120級のラインパイプが開発され、実ライン試験適用中である^{29,30)}。この造管溶接には比較的高入熱の両面一層溶接(SAW)、現地施工溶接には小入熱のMAG自動溶接が適用される。高強度となるためにいずれの溶接部においても耐低温割れ性、靱性などが課題となるが、鋼材は低炭素化して下部ベイナイト化、溶接金属は図4に示すように、マイクロ組織を微細化(アシキュラーフェライト)して、これらの溶接性を確保している。

ペナストック分野では、国内においては1972年に780MPa級の高張力鋼が使用されたが、近年、950MPa級高張力鋼が開発され、神流川発電所の建設に初めて採用された³¹⁾。大型構造物であるため施工効率を低下させないため780MPa級鋼と同等の溶接管理条件(予熱, 入熱等)で溶接可能にすることが要望された。この鋼材の開発と同時に、靱性や耐低温割れ性に考慮した溶接材料が開発され、780MPa級鋼板と同一条件での溶接が行えるようになった。

3.9 海洋構造物

海洋構造物分野では、大型化と寒冷地開発が進み、高強度鋼、水海域用極低温靱性保証鋼の開発が継続されてきた³²⁾。最近では、前述のHTUFF技術を駆使してCTOD保証付きのYP500MPa鋼を開発し実構造物に適用された³³⁾。この溶接材料も同時に開発し、良好な特性を示した。

4. 結 言

鋼材に対する要求は、単一のものではなく、強度、靱性、疲労特

性、耐食性、耐熱性など多岐に渡っており、最近ますます多様化している。一方、これに伴って、溶接・接合部の品質保証に対する要求はますます厳しくなり、そのハードルは高くなってきている。厚鋼板が使用される構造物においては、依然としてアーク溶接が主流であり、従来からの溶接設備、溶接施工方法がとられることが多い。このため、高能率な溶接方法として、高入熱化、狭開先化、溶接自動化等の検討が進められている。一方、薄鋼板の溶接・接合分野では、レーザー溶接の進歩が著しい。レーザー溶接の高出力化の動きも活発化しており、一部で厚板への実適用も行われている。

このような状況の中で、新日本製鐵グループは、鋼材開発とともに種々の溶接・接合技術の開発を行い、市場に提供してきた。高能率で使い易く、かつ高品質な継手を得ることが可能な溶接技術開発のためには、溶接機器、施工方法、溶接材料の3方から十分な検討を行い、将来のあり形を考えることが重要であろう。

本稿では、鋼材開発とその溶接技術開発の動向について、いくつかの例をあげながら紹介した。今後、信頼性の高い鋼構造物を効率良く製造していくためには、溶接、接合の基本的な現象を深く理解し、鋼材・溶材開発を行っていくとともに、設計・管理技術、施工技術等、顧客側を正確に理解し、それに応えていくことがますます重要になると考えている。

参考文献

- 1) 厚板特集, 鋼管特集, 新日鉄技報. (380), 1(2004)
- 2) 黒崎将夫: 新日鉄技報. (378), 46(2003)
- 3) 高橋学: ふえらむ. 7(11), 870(2002)
- 4) 森下敦司 ほか: 新日鉄技報. (377), 28(2002)
- 5) 金井洋 ほか: 新日鉄技報. (371), 47(1999)
- 6) 森本康秀 ほか: 新日鉄技報. (378), 22(2002)
- 7) 百合岡信孝, 大北茂: 溶接接合選書“鉄鋼材料の溶接”. 産報出版
- 8) 植森龍治: 高性能厚鋼板の技術動向. 第182, 183回西山記念技術講座, 2004, p.89
- 9) Nippon Steel Monthly, 2005. 11
- 10) チタン特集, 新日鉄技報. (375), 1(2001)
- 11) 皆川昌紀, 石田浩司, 船津裕二, 今井嗣郎: 新日鉄技報. (380), 6(2004)
- 12) 永原政明, 深水秀範: 新日鉄技報. (380), 9(2004)
- 13) 糟谷正: 鋼材, 溶接材料を用いた溶接変形低減について. (財)溶接接合工学振興会, 第14回セミナー, p.67
- 14) 建築研究所: 鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン. 解説. 第1版. 日本建築センター, 2003, p.39
- 15) 児島明彦, 吉井健一, 秦知彦, 佐伯修, 市川和利, 吉田讓, 志村保美, 東清三郎: 新日鉄技報. (380), 33(2004)
- 16) 渡部義之, 石橋清司, 吉井健一, 井上肇, 吉田讓: 新日鉄技報. (380), 45(2004)
- 17) 水谷泰, 石橋清司, 吉井健一, 渡部義之, 千々岩力男, 吉田讓: 新日鉄技報. (380), 38(2004)
- 18) 岡村義弘, 田中睦人, 奥島基裕, 山場良太, 為広博, 井上肇, 糟谷正, 瀬戸厚司: 新日鉄技報. 356, (1995)
- 19) 紀平寛, 田中睦人, 安波博道, 竹澤博, 楠隆, 松岡和巳, 原田佳幸, 田辺康児: 新日鉄技報. (380), 28(2004)
- 20) 玄道俊行 ほか: 自動車技術会学術講演会前刷集. No.18-06, 2006, p.1
- 21) 笹田誠二 ほか: 溶接学会・軽構造接合加工研究委員会資料. MP-391-2006, 2006
- 22) Proceeding of 5th European Automotive Laser Application. 28/29, January 2004
- 23) 遠山敬助 ほか: 溶接学会全国大会講演概要. 72, F-39, 2003
- 24) 宮崎康信 ほか: 新日鉄技報. (378), 35(2003)
- 25) 栗山幸久: 塑性と加工. 45(524), 715(2004)
- 26) 宇佐美明, 奥島基裕, 坂本俊治, 西村哲, 楠隆, 児嶋一浩: 新日鉄技報. (380), 21(2004)
- 27) 石塚哲夫, 三村裕幸, 森本裕, 松本光弘, 永島光二, 水本学, 岡本順一: 新日鉄技報. (380), 91(2004)
- 28) 星野学, 齊藤直樹, 村岡寛英, 佐伯修: 新日鉄技報. (380), 17(2004)
- 29) Fairchild, D.P. et al.: Proceeding of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2003, p.26
- 30) 朝日均, 原卓也, 都留英司, 森本裕他: 新日鉄技報. (380), 70(2004)
- 31) 西脇義文, 前島俊夫, 久保田克寿: 土木学会論文集, No.672/V1-50, 37-56(2001. 3)
- 32) Kojima, K., Ohkita, S., Aihara, S., Imai, S., Motomatsu, R., Umeki, M., Miura, T.: 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAIE). St. John's, Newfoundland, Canada, July 1999
- 33) 長井嘉秀, 深水秀範, 井上肇, 伊達昭宏, 中島隆雄, 児島明彦, 足達智彦: 新日鉄技報. (380), 12(2004)