

# 展望

## 厚鋼板開発の現状と展望

Present Status and Future Perspective of Development of Steel Plate

天野 虔一  
Kenichi Amano

JFE スチール (株) スチール研究所  
理事 主席研究員

### 1 はじめに

厚鋼板\*を用いて製作される溶接構造物は船舶、橋梁、建築、大径パイプライン、圧力容器、建設機械等多岐にわたる。これらの溶接構造物に対する安全性の向上、設計の高度化、製作コストの削減、さらにはライフサイクルコスト低減等の要求は年々厳しくなっており、それらに使用される厚鋼板も高性能化されてきた。

厚鋼板に要求される特性は強度（降伏強度および引張強度）、韌性、溶接性（溶接のし易さと溶接部の特性の両者かあるいは前者のみを意味する）、耐食性、耐疲労等がある。特に厚鋼板の代表的3特性である強度・韌性・溶接性は、一般には二律背反のため、開発もそれらの特性をいかに一方を損なわずに向上させるかに主眼がおかれてきた。

本稿は最近の厚鋼板の開発状況を、ここ数年において開発実用化されたものあるいは開発中の製品あるいは技術について、強度、韌性、溶接性、耐食性、耐疲労、形状の観点からまとめた。厚鋼板の特性を主とするが、それらを実現するための特徴あるメタラジーや製造技術、製造設備の革新についても言及する。また、これらをふまえて今後の厚鋼板開発の今後の展望を述べる。

なお、本稿では詳述しないが厚鋼板の開発と同時に構造物の製造に必要な溶接材料<sup>1)</sup>や溶接技術<sup>2)</sup>の開発も必須であることは言をまたない。最近では厚鋼板と溶接材料を当初から連携して開発する例もみられる<sup>3,4)</sup>。

### 2 厚鋼板の高強度化の趨勢

厚鋼板の高強度化は、マイクロアロイングを主とする組成設計と、制御圧延・加速冷却 (TMCP) や直接焼入れ焼戻し (DQ-T) 法などのプロセスとの組み合わせにより開発が進

められてきた。その結果、従来に比べてより低い炭素当量 (Ceq)、あるいは溶接割れ感受性指数 (Pcm) で、高強度と高韌性を両立した厚鋼板の成分設計が可能となり、同時に溶接施工時に低温割れを防止するため実施される予熱が省略または軽減され、また溶接部の韌性も向上した。

加速冷却はTMCP技術の根幹のひとつをなす技術であり、1980年に実用が開始されたが、最近、熱伝達係数の高い核沸騰現象を冷却開始と同時に実現する水冷却方式<sup>5)</sup>が実用化され、高い冷却能とすぐれた冷却停止性能が実現した。

図1にこれらの技術により製造される橋梁、建築および水圧鉄管 (ペンストック) 用の引張強度 (TS) 570~980 MPa級厚鋼板のCeqと低温割れ阻止予熱温度の関係を示す<sup>6-13)</sup>。いずれのTSレベルの厚鋼板も、主として焼入れ・焼戻して製造される従来厚鋼板に比べて溶接施工時の予熱温度が低下し、TS 570 MPa級厚鋼板では予熱省略が可能となった。

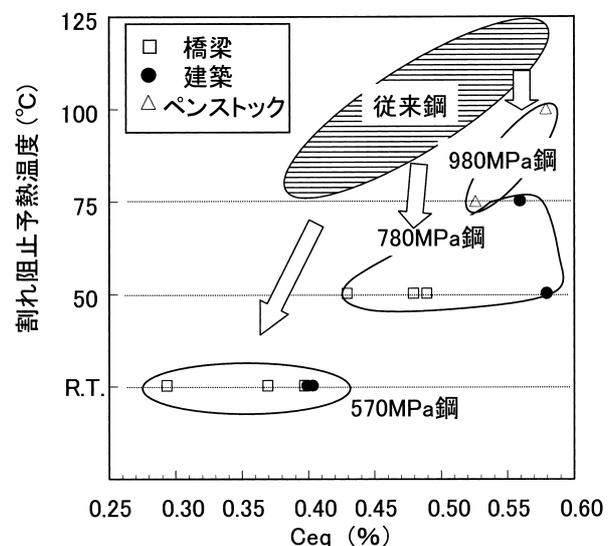


図1 高強度鋼のCeqと低温割れ阻止予熱温度の関係

\*厚鋼板 (厚板) の定義は種々可能であるが、本稿では厚板ミルで製造された鋼板のことをいう。厚みは4.5mmから200mm以上にわたる。

## 2.1 TS 570MPa級厚鋼板

橋梁分野においてはTS400～490 MPa級厚鋼板が主として使用されてきたが、主桁断面の1部材1断面化からなる合理化橋梁に対応した1996年の道路橋示方書の改訂により、鋼板の適用可能板厚が100 mmまで拡大された。その結果、高いTS (570 MPa級) でかつ板厚が厚い鋼板の実用化<sup>10, 13-16)</sup>が加速した。その代表的な鋼が、極低炭素ベイナイト鋼<sup>9, 10)</sup>およびオースフォームドベイナイト鋼<sup>16)</sup>であり、表1にそれぞれの化学組成を従来鋼と比較して示す。0.20%以下の低Pcmの鋼組成で80 mm以上の極厚鋼板が製造可能となり、溶接時の予熱も省略可能となった。

極低炭素ベイナイト鋼<sup>9, 10)</sup>は、実用されている溶接構造用厚鋼板としては例のない炭素量を従来の約1/10以下に低減した上で、マイクロアロイング元素の選択と添加量の最適化によって変態温度を制御した極低炭素ベイナイト単相組織を特徴とする鋼である。この鋼は、Ac3温度以上に加熱後の冷却において、広い冷却速度範囲で極低炭素ベイナイト組織一定となり、その結果図2に示すように硬さがほぼ一定となる特徴を有す。冷却速度が低い領域では従来鋼より高い硬度となるため、TS 570 MPa級の厚肉鋼板が圧延後の空冷プロセスで製造可能となる。一方冷却速度が高い領域では従来鋼に比べて硬化能が抑制されており、小入熱溶接でのHAZの硬化が生じず優れた耐溶接割れ性が確保される。同時に板内の冷却速度差に起因するマイクロ組織変化による強度ばらつきが解消される。また、炭素量が極端に低いベイナイト単相組織のために母材および溶接部靱性に優れるとともに、さらに大入熱でのHAZ軟化の抑制にも有利である。

一方オースフォームドベイナイト鋼<sup>16)</sup>はNbを添加することで未再結晶域圧延を利用する従来のTMCP法をより強化したもので、オーステナイト域での強圧下加工によって多くの転位を導入し、その転位を圧延後の急冷で変態後まで引き継ぐことによって高強度化される。また同時にベイナイト組織のパケットサイズが微細化されるため靱性も向上する。

## 2.2 TS 780および980MPa級厚鋼板

さらなる高強度厚鋼板として、溶接時の予熱温度を低減できる板厚34 mmの橋梁用のTS 780 MPa級厚鋼板がある<sup>6, 17)</sup>。

0.23%以下の低Pcmの鋼組成でボロンの焼入れ性を利用して焼戻しマルテンサイト組織による高強度と高靱性のバランスをDQTプロセスで確保している。また、時効熱処理プロセスによりマトリックス組織中の微細なCuの時効析出強化を利用した技術<sup>6)</sup>も一方で開発された。いずれの場合も、低温割れ阻止予熱温度は従来の100℃以上から50℃に低減され、世界最長の吊り橋である明石海峡大橋の補剛桁に適用された。

また、最近では前節で述べた極低炭素ベイナイト組織をTS 780 MPa級鋼に適用し、非調質(熱処理なし)での製造でかつ低温靱性と溶接割れ性に優れたTS 780 MPa級50 mm厚鋼板<sup>18)</sup>も開発され今後の実用化が期待される。

建築構造物の分野では新耐震設計法で巨大地震時には梁の一部が塑性変形することを前提とした設計が導入され、塑性変形領域の拡大が容易となる低い降伏比(YR)が重要な要求特性となっている。鋼のYRを低下させるためにはマイクロ組織を硬質と軟質の複相組織にすることが重要であり、焼入れ後に2相域へ再加熱し、焼入れその後焼戻しを行うRQ-Q'-T法<sup>15)</sup>や最近では最初の焼入れを直接焼入れ法としたDQ-Q'-T法も適用され<sup>7)</sup>、低いYRのTS 590 MPa級鋼(SA440)が実用化されている。またさらに、従来よりも低Ceq、低Pcm化した組成による最大100 mm厚のTS 780 MPa級の厚

極低炭素ベイナイト鋼: 0.01C-0.01Si-1.75Mn-Cu,Ni,Nb,Ti,B  
従来低炭素鋼 : 0.140C-0.40Si-1.31Mn-Nb,Ti

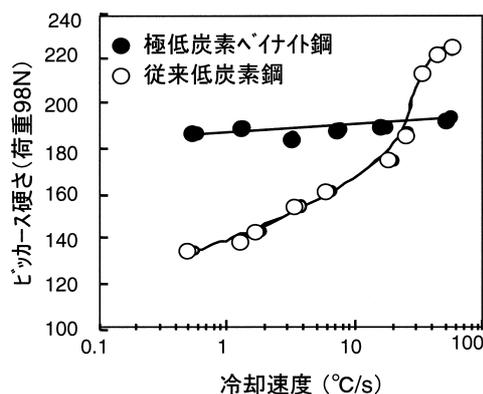


図2 極低炭素ベイナイト鋼と従来鋼の930℃加熱後の冷却速度変化による硬さの変化

表1 革新的570MPa鋼厚鋼板と従来鋼との比較

	化学成分 (mass%)					板厚 (mm)	割れ阻止予熱温度 (°C)
	C	Si	Mn	Others	Pcm		
従来Q-T鋼	0.13	0.25	1.44	Cu,Ni,Cr,Mo,V	0.24	80	100
極低炭素ベイナイト鋼	0.02	0.31	1.54	Cu,Ni,Cr,Nb,B	0.18	83	室温
オースフォームドベイナイト鋼	0.08	0.20	1.46	Cr,Mo,Nb,Ti	0.19	100	室温

鋼板が開発されており、低温割れ阻止予熱温度も125℃から75℃まで低減された<sup>7,15)</sup>。

一方、土木分野では電力需要の増大にともなって揚水発電所の大容量、高落差化が進み、ペンストック下流側の分岐部には厚さ100～150 mmのTS 980 MPa級厚鋼板が必要とされるようになり、高強度化および厚肉化にともなって板厚中心部までの均質な強度・靱性を確保することが課題となった。そのためには高靱性を確保しながら焼入れ性を向上させるためのNi量の制御や圧延時および再加熱時の結晶粒微細化に有効なNbの利用が重要である。これらとともに、繰り返し焼入れ焼戻しあるいは直接焼入れ焼戻しの製造プロセスの最適化によって低成分化が達成され<sup>8,19-21)</sup>、溶接時の低温割れ阻止予熱温度がおよそ100℃以下に低減された最大200 mm厚のTS 980 MPa級の厚鋼板が開発され、スイスを始め日本国内の揚水発電所にも適用されつつある。

### 3 厚鋼板の高靱性化

厚鋼板の靱性は溶接構造物の安全性向上の観点から非常に重要である。この場合溶接部の靱性と母材のそれは、向上のためのメタラジは原則的に同じであるが、求められる目的は異なっている。溶接構造物においては脆性破壊の発生はほとんどの場合溶接部なので、溶接部に対する靱性要求は脆性破壊の発生を防止する観点からなされる。要求靱性として、比較的簡便に求めることができるシャルピー靱性値のみならず破壊力学にもとづいたCTOD (Crack tip opening displacement) 値などが要求される場合も多い。一方母材への靱性要求は、主に溶接部で発生して母材に伝播した脆性き裂を停止させる観点である。

溶接部や母材において靱性を向上させるためのメタラジとして、結晶粒の微細化とNiの添加等がある。特に結晶粒の微細化に関しては溶接部および母材ともその一層の高度化をめざした研究開発が活発に行われている。また最近、阪神淡路大震災による建造物倒壊の事故解析を踏まえ、地震などによる大変形や動的荷重を受ける場合の破壊および要求靱性値についての研究<sup>22)</sup>も進んでいる。

溶接部の靱性要求はほとんどすべての溶接構造物でなされるが、特に厳しい例として海洋構造物用厚鋼板が挙げられ、この分野では、破壊発生を防止する観点で溶接熱影響部 (Heat affected zone, HAZ) において高いCTOD値が要求されてきた。また近年のエネルギー開発における環境は、従来実施されてきた北海などでの使用温度が-10℃程度から、最近のサハリン沖プロジェクトに代表されるような使用温度が-40℃を下回る場合もでてきた。このような低温におけるHAZ靱性向上のため、脆化組織の低減、結晶粒の微細化

等の観点からTMCPの適用を前提に最適な組成、プロセスの開発が行われ、-40℃以下の使用に耐えられる溶接部靱性に優れた降伏強度350 MPa級<sup>4)</sup>、および420 MPa級<sup>23,24)</sup>の海洋構造物用厚鋼板が開発された。

造船分野では脆性破壊が発生した場合でも、船舶にもたらされる被害を最小限度にとどめるための特性である母材の脆性き裂の伝播停止特性 (アレスト性能) が要求される場合がある<sup>25)</sup>。表面超微細粒鋼板はアレスト性能を低コストで高めた厚鋼板であり、鋼板表層部を2 μm以下の超微細フェライト組織 (図3<sup>26)</sup>) として表層部の破壊靱性値を高め、き裂が進展しても表層部の大きな伝播抵抗でき裂を停止する能力を付与している。この表層部の超微細フェライト組織は厚板圧延途中で厚鋼板を強制冷却し表層部を一旦フェライトに変態させ、その後鋼板内部の顕熱により表層が復熱する過程で再び圧延を行うことでおこるフェライトの再結晶により形成される。

### 4 大入熱溶接用厚鋼板

溶接構造物の製作において溶接作業の高効率化は大きな課題のひとつであり、造船や建築を中心に溶接入熱の増大による高効率化が検討されてきた。特に最近の構造部材の厚肉・高強度化にともなって大入熱溶接化の傾向は強い。例えばコンテナ船では甲板の開口部が大きい船側上部に厚肉の高強度厚鋼板を用いて船全体の強度を確保する構造になっており、最近の6000TEU (Twenty feet equivalent unit) を超える大型コンテナ船では最大板厚65 mm、降伏強度390 MPa級の厚鋼板が用いられる。ドックでの製作工程においてはエレクトロガス溶接による高効率の1パス施工が適用され、その入熱は40から50 kJ/mmもの大入熱溶接になる。また建築分野ではエレクトロスラグ溶接による100 kJ/mmもの超大入熱溶接が適用されてきている。

大入熱溶接が適用されたとき高温に長時間さらされる厚鋼

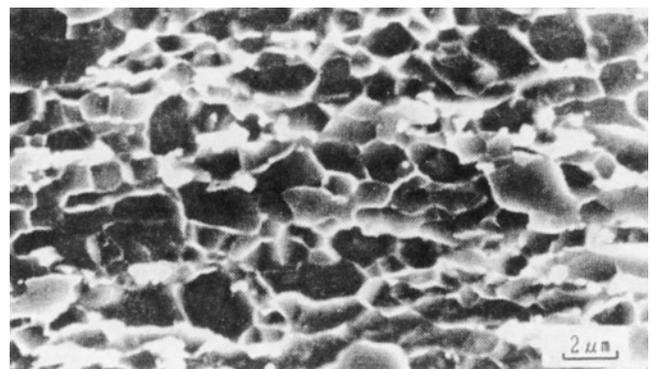


図3 表面超微細粒鋼表層部のマイクロ組織

板のHAZのマイクロ組織を制御して高靱性を確保することが最大の課題であり、従来から研究が行われてきた。大入熱溶接されたHAZの組織制御の重要な点としては高温で粗大化するオーステナイト粒の成長を抑制すること、およびオーステナイト粒内の組織の微細化である。

前者は鋼板中に高融点の粒子を微細分散することによるオーステナイト粒界のピン止め効果を利用する方法で、TiNあるいはREM (O, S) などの分散鋼が開発されてきた<sup>27)</sup>。また後者についてはBN、MnS、Fe<sub>23</sub> (C, B)<sub>6</sub>あるいはTi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などによるフェライト核生成能を有する粒子の利用技術が開発されてきた。その代表例が、溶接金属の組織制御に用いられている、アシキュラーフェライト生成能を有するチタンオキไซด์を鋼中に微細分散させることで、HAZにおいて粒内フェライトを生成させるオキไซด์メタラジである。この技術においては図4<sup>28)</sup>に示すように溶接過程でオキไซด์上にMnSが析出しその結果オキไซด์の周囲にMnの希薄帯が形成されることがオキไซด์上での粒内フェライト(IGF: Intra-granular ferrite)析出を容易にする。

これらのHAZのマイクロ組織制御技術を駆使することで、造船用の大入熱溶接用厚鋼板<sup>29)</sup>や、エレクトロスラグ溶接に対応した超大入熱溶接可能な建築用厚鋼板<sup>30-32)</sup>が開発されている。

## 5 大径ラインパイプ用厚鋼板

寒冷地あるいは深海域を含む海底におけるガス・油田開発が進み、敷設・使用環境ならびに輸送される石油や天然ガスの性状は多様化している。その結果、厚鋼板を用いてUOEプロセスで製造される大径ラインパイプへの要求特性も、敷設・操業のコストダウンの観点からの高強度化および優れた現地溶接性、安全性の観点からの優れた低温靱性はもとより、海底ラインパイプ向けの厚肉化、優れた耐サワー特性など多

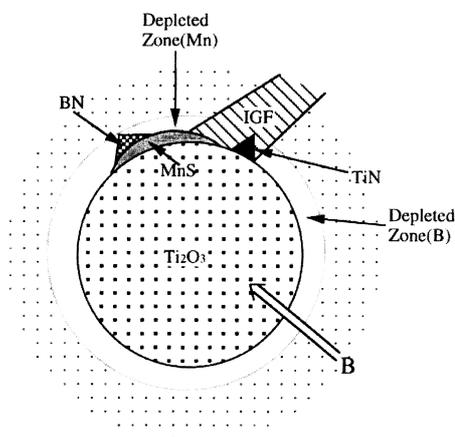


図4 チタンオキไซด์を利用した粒内フェライト生成図

岐にわたる。ラインパイプはプロジェクト毎に短期に大量に供給する必要があるため、一般的にはリードタイムの短い非調質で製造される。前述のTMCP技術も高級ラインパイプ用厚鋼板の発展とともに高度化してきた。

高強度化についてはX80 (API規格、降伏強度=80 ksi=560 MPa) までは既に実用化されており、X100ラインパイプについても高強度材の適用にむけた共同研究プログラムが欧米で盛んに行われている。そして、2002年にはX100相当のGr690がCSAの最新版に規格化され、カナダのプロジェクトで1kmと部分的ではあるが実使用<sup>33)</sup>に至っている。

今後、日本国内では高強度ラインパイプにおいて高強度、高靱性以外に必要な特性として、大規模地震を想定した耐震性・変形吸収能があり、これに対応して、図5に示すように厚鋼板のマイクロ組織制御により連続降伏型で高n値のs-sカーブとすることで高座屈性能を実現した耐震ラインパイプ(図中のDeveloped Pipe)が開発されている<sup>34)</sup>。

## 6 新耐候性厚鋼板

近年、橋梁のミニマムメンテナンス化が注目されており、これに対応する技術として耐候性厚鋼板の無塗装裸使用がある。耐候性鋼は無塗装の状態、時間の経過とともに表面に保護性のさびが形成され腐食の進行が抑制される。普通鋼に塗装する鋼橋の場合、平均1回/10年で塗り替えが必要とされるが、耐候性鋼を使用した場合には塗り替え費用が不要になるため使用年数が経過するほど累積コストが軽減され、40年の場合の試算では、37%の累積コスト減となる<sup>35)</sup>。ただし、無塗装裸使用の耐候性鋼は飛来塩分量の許容値が0.05 mdd (mg/dm<sup>2</sup>/day) 以下とされ、使用できる(正確には飛来塩分量の実測定を省略しても良い地域)日本国内の地域が、海岸からの距離で明示されている<sup>36)</sup>。

最近、0.05 mddを超える飛来塩分量の、いわゆる海浜地

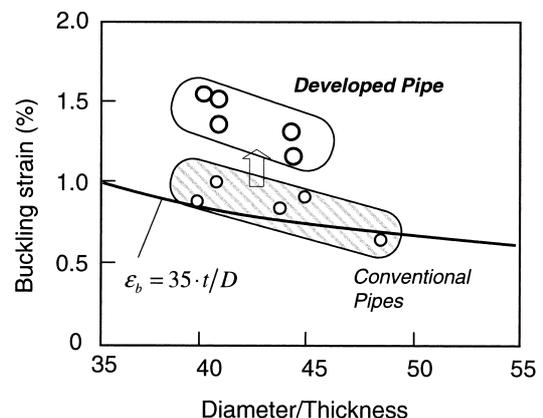


図5 開発パイプと従来パイプの耐座屈性能の比較

域でも使用可能な新耐候性厚鋼板が開発されている<sup>36-41)</sup>。表2に開発された新耐候性厚鋼板の成分系と相当JIS耐候性鋼規格を示す。これらの厚鋼板の海浜地域における優れた耐候性の詳細なメカニズムについては、特にNi添加の有効性が注目されている。Niの添加は鋼板表面に形成されるさびを緻密化し、その結果Clイオンが地鉄界面へ侵入することを抑制する。現在、各鉄鋼メーカーおよび官学も共同で、飛来塩分量など環境因子を変化させた暴露試験を実施中であり、一方で実橋にも使用され始めており、今後の普及が期待される。

耐候性鋼を裸で使用する場合、保護性さびが形成されるまでの期間は、さびの色調や均一性の点で外観は必ずしも良好でない場合がある。また、腐食により生成した鉄イオンを含む雨水はコンクリートなどの着色を引き起こす場合がある。この汚染の軽減と外観を良好にし、実用上優れた保護性さびを形成可能とするさび安定化処理技術が開発され始め、最近では保護性さびを早期に形成するさび安定化処理技術も開発されている<sup>42-44)</sup>。

## 7 残留応力制御厚鋼板

ユーザーにおける厚鋼板の切断、溶接等の施工時に発生する変形に対処するための技術が最近開発された<sup>45)</sup>。TMCP製厚鋼板ではその製造工程で生じる残留応力に起因した形状不良がしばしば問題となる。一般にTMCP製厚鋼板の残留応力は、加熱・圧延・加速冷却プロセスにおける不均一な温度分布に起因するが、現状の技術レベルでは、完全な温度分布制御による残留応力の均一化は困難である。そこで、TMCP工程で発生する残留応力を、ハード・ソフト両面から統合的に制御した残留応力制御型TMCP製厚鋼板が開発された。

## 8 形状制御厚鋼板

近年の合理的な橋梁製作法として、主桁断面の1部材1断面化があり、これにより溶接工数が低減される。LP鋼板<sup>46)</sup> (Longitudinally profiled plate) は、厚鋼板長手方向で板厚を変化させており、これをフランジまたはウェブに使用する

表2 各種新耐候性鋼の成分系と相当JIS規格

鋼材メーカー	成分系	相当 JIS 耐候性鋼種
A	0.3Cu-3Ni 系	SMA400W, 490W, 570W
B	1.5Ni-0.3Mo 系	同上
C	極低 C-0.3Cu-2.5Ni 系	同上
D	0.3Cu-2Ni-0.5Cr-0.3Mo 系	同上(商品化準備中)
E	1Cu-1Ni-0.05Ti 系	SMA400W, 490W, 570W

ことにより、さらに合理的構造とすることができる。LP鋼板を使用することにより、鋼材の重量が低減されるだけでなく、接合部の等厚化によりフィラープレートやテーパ加工の省略など、作業性も改善できる。LP鋼板は厚板圧延時に厚鋼板長手方向の厚さを変化させるため、高度な油圧式板厚制御技術が必要である。またTMCPの適用も可能であり、図6に示すような種々の長手方向断面形状が製造可能となっている。

## 9 レーザ溶接に適した厚鋼板

最近10年程でレーザー発振器の大出力化が急速に進み、それにとまって厚鋼板を対象としたレーザー溶接やアーク溶接を併用したハイブリッド溶接の開発、さらにレーザー溶接部の組織、材質、疲労特性<sup>47)</sup>について検討され始めている。

レーザーによる厚鋼板の溶接では母材が溶融凝固して溶接金属になるため、その部分の靱性向上が実用上の課題のひとつである。ArやHe等の不活性ガスでシールドする通常のレーザー溶接では、マルテンサイトによる溶接金属の硬化を抑制できる低Ceqの厚鋼板で高靱性が得られる<sup>48)</sup>。一方、通常のアーク溶接で実用化されている介在物を起点として生成するアシキュラーフェライトを用いた組織制御を、レーザー溶接の溶接金属に適用して高靱化する手法が開発されている<sup>49,50)</sup>。溶接金属中に微細な酸化物を導入するために、母材にTiを添加し、酸素を混合したシールドガスを用いたレーザー溶接によって、溶接金属中の酸化物量が制御可能であり、図7<sup>49)</sup>に示すように微細なアシキュラーフェライト組織が得られ、靱性も優れている。

厚鋼板のレーザー溶接ではブローホールなどの溶接欠陥を抑制することも重要な課題であるが、レーザー切断面をそのまま

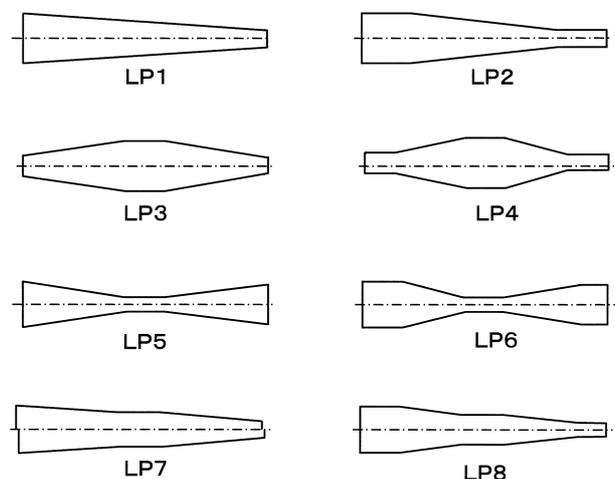


図6 LP鋼板の種類

突き合わせてレーザ溶接すると、切断面酸化層の酸素と鋼板中のCが溶接時に反応してCOあるいはCO<sub>2</sub>ガスとなり、ブローホールが発生する<sup>51)</sup>。このようなブローホール発生頻度は、 $C+O \rightarrow CO(g)$  反応の平衡状態における溶鋼中の炭素活量 ( $a_c$ ) と酸素活量 ( $a_o$ ) の積に依存して増加する。したがって、これを抑制するためにAl、Si等の脱酸素元素量を制御した低炭素厚鋼板が提案されている<sup>52)</sup>。

## 10 厚鋼板および溶接継手の疲労強度向上技術

鋼の降伏強度を上昇させても、それを用いた溶接継手の疲労強度は一般には向上しない。このことが疲労設計される溶接構造物への高強度鋼適用の妨げになってきた。最近、溶接金属の変態膨張を利用した疲労強度向上技術が開発されている<sup>53-58)</sup>。

通常の溶接材料を用いた場合、溶接金属は500℃程度で変態膨張し、その後の温度低下にともない熱収縮するため、室温で溶接部は引張残留応力となる。一方、溶接材料のマルテンサイト変態開始温度 ( $M_s$  点) を室温付近に制御すると、マルテンサイト変態にともなう膨張過程で冷却が終了するので溶接部には圧縮の残留応力が導入される<sup>54)</sup>。

この効果にもとづいて、低変態温度溶接材料 (Fe-10% Cr-10% Ni ソリッドワイヤ) が開発された<sup>56)</sup>。SM490A厚鋼板の角回し溶接継手における引張残留応力は、低変態温度溶接材料では従来溶接材料 (JIS YGW-23) と異なり、溶接止端近傍で残留応力が急激に低減し、図8に示すように、低変態温度溶接材料を適用した継手では疲労強度が大幅に向上しており、今後の実用化が期待される。

ところで、結晶粒の微細なフェライト・ベイナイト2相組織鋼において疲労き裂進展速度が抑制されることが最近報告されている<sup>59)</sup>。図9に示すように、この鋼の疲労き裂進展速度は従来鋼のフェライト・パーライト鋼に比べて抑制されている。この疲労き裂進展速度抑制のメカニズムとして、相境

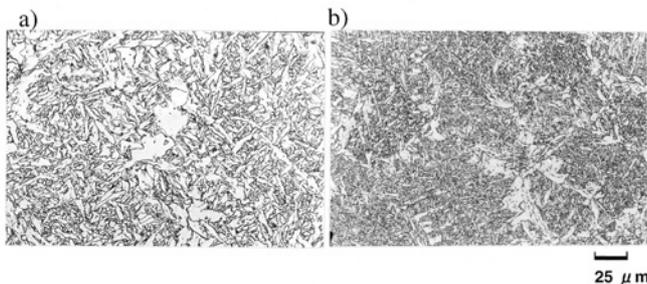


図7 従来SAW (Submerged arc welding) 溶接金属とレーザ溶接金属におけるマイクロ組織  
a) SAW溶接におけるアシキュラーフェライト  
b) レーザ溶接におけるアシキュラーフェライト

界でのき裂進展抑制などが挙げられている。

## 11 展望

以上概説したように最近の溶接構造用厚鋼板の革新は著しい。今後もこの努力は継続されるが、さらなる革新を実現するためには以下に述べる観点が今後重要となるであろう。

第一に、材料に関する制約を前提としない設計の試みの重要性である。このような観点での構造物設計の試みは、厚鋼板への新しい材質要求を産み出す可能性があり、それは材料開発およびそのためのプロセス開発のドライビングフォース

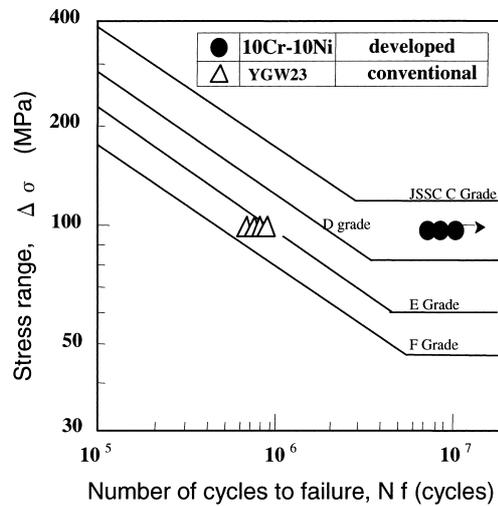


図8 低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労特性 (応力比0, 応力範囲100MPaの正弦波)

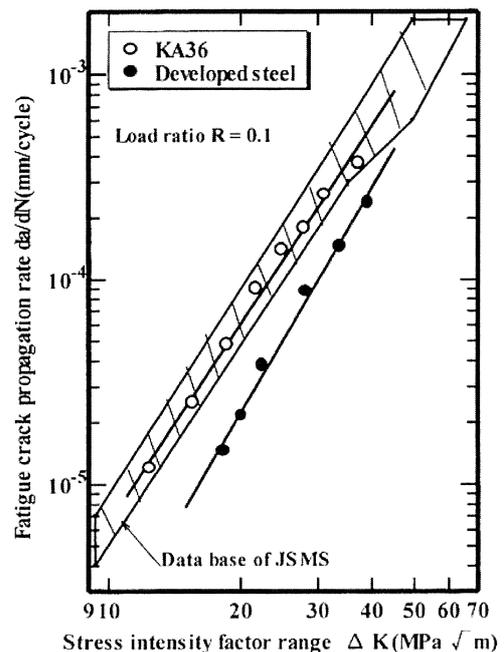


図9 疲労き裂伝播速度の従来鋼と開発鋼の比較

となる。建築用の低降伏比高張力厚鋼板はこの例といえよう。高層建築構造物における終局耐力設計は、鋼材に従来要求されていなかった塑性降伏後の材質特性を要求した。その結果、低降伏比の高張力厚鋼板の誕生をもたらした。開発された低降伏比高張力厚鋼板を使用することにより安全で低コストの高層建築の建造が可能となった。

つぎに、構造物のトータルコストやライフサイクルコストのミニマム化の観点からの設計、材料開発、施工技術および維持管理技術の融合の重要性である。前述した溶接材料・溶接技術と厚鋼板の連携開発は材料開発と施工技術を融合した例であるし、ライフサイクルコストのミニマム化の観点では、橋梁における裸仕様の耐候性厚鋼板の開発は設計・材料開発・維持管理技術の融合例である。後者では裸仕様の耐候性厚鋼板を用いた橋梁の設計製作によりメンテナンスフリーが実現し、100年間のライフサイクルコストで評価すると、多大なコスト低減が可能になる。

最後は、地球環境への配慮である。自動車や家電分野などでは地球環境を考慮したCO<sub>2</sub>削減の観点からの高強度化、有害物質排除の観点から鉛フリー、クロムフリー化の技術開発が競って行われており、鉄鋼材料にもこれらを配慮した開発が行われている。このような鋼材（筆者はグリーンスチールと呼んでいる）の必要性は溶接構造物を対象とする分野ではまだ顕著ではないが、今後考慮すべき課題である。この観点では高強度化以外にも材料のリサイクル性やTMCP利用による枯渇資源である希少元素の添加の極少化等がある。

## 12 おわりに

本稿では、最近開発されたあるいは開発中の厚鋼板およびその周辺技術をとりあげ、概説した。これらの多くは各需要分野における、社会環境や技術の流れからくるニーズに対応しており、製造技術の進歩とあいまって、タイムリーに開発されてきた。

これらを継続しつつ今後は、設計の革新がもたらす材料への新しい要求、設計・材料・施工・維持管理にいたるトータルコストやライフサイクルコストのミニマム化、およびグリーンスチール化がますます重要になるであろう。

### 参考文献

- 1) たとえば、原則行，末長和之：溶接学会論文集，21 (2003)，160.
- 2) たとえば、大北茂：溶接学会論文集，21 (2003)，148.
- 3) 大井健次，池田倫正，川端文丸，天野慶一：溶接学会全国大会講演概要，第60集 (1997-4)
- 4) 富田幸男，栗飯原周二，大北茂，山本智彦，斉藤直樹，都築岳史，児島明彦，吉田謙，今井嗣郎：CAMP-ISIJ，12 (1999)，1190.
- 5) わが国における厚板技術史，日本鉄鋼協会，東京，(2001)，247.
- 6) 岡村義弘，田中睦人，奥島基裕，山場良太，為広博，井上肇，粕谷正，瀬戸厚司：新日鉄技報，365 (1995)，62.
- 7) 徳納一成，岡村義弘，田中睦人，瀬戸厚司，小山邦夫，山下達雄，家沢徹，深沢隆：新日鉄技報，365 (1997)，37.
- 8) 矢野清之助，岡村義弘，井上尚志，田辺康児，前原郷治，村岡寛英，豊福昭典，堀井行彦：製鉄研究，322 (1986)，99.
- 9) 岡津光浩，林透，天野慶一：川崎製鉄技報，30 (1998) 3，131.
- 10) 田畑裕司，吉村修身，工藤純一：川崎製鉄技報，32 (2000) 2，119.
- 11) 谷三郎，金子康弘，石黒守幸，大浜通洋：NKK技報，(1995) 150，1.
- 12) 田川寿俊，渡邊之，作井新，松田泰典，豊田政男，佐藤邦彦：溶接学会論文集，3 (1985) 3，597.
- 13) 壺岐浩，大西一志，大竹章夫，岡口秀治，横山幸夫，波多野勲：住友金属，50 (1998) 1，43.
- 14) 渡辺義之，吉田謙，為広博，船戸和夫，西岡潔，岡村義弘，矢野清之助：新日鉄技報，348 (1993)，17.
- 15) 鹿内伸夫，作井新，田川寿俊，渡邊之，成田宏，長縄裕：日本鋼管技報，(1988) 122，5.
- 16) 藤原知哉，中村浩史，岡口秀治，川畑友弥，永吉昭彦：まてりあ，39 (2000) 3，273.
- 17) たとえば，中川一郎，大井健次，板倉教次：川崎製鉄技報，30 (1998) 3，188.
- 18) 西村公宏，星野俊幸，林透，天野慶一：CAMP-ISIJ，16 (2003)，598.
- 19) 三瓶哲也，作井新，本多孝行，石川博，長縄裕：NKK技報，(1990) 133，37.
- 20) 板倉教次，安田功一，青木雅弘：川崎製鉄技報，30 (1998) 3，174.
- 21) 岡口秀治，有持和茂，渡辺望，岡田斎，堀川浩甫：まてりあ，37 (1998) 6，534.
- 22) たとえば，F，Minami，T.Ochiai，T.Kubo，H. Shimanuki and K.Arimochi：PVP-Vol.404，Fatigue，Fracture，and Damage Analysis 2000，(2000)，81.
- 23) M.Hisada，T.Miyake and F.Kawabata：Kawasaki Steel Technical Report，40 (1999)，49.
- 24) R.Chijiiwa，A.Kojima，T.Tsuruta，A.Date，S.Isoda，

- S.Aihara, M.Saitoh, S.Ohkita and S. Imai : 18<sup>th</sup> Int.Conf. on OMAE, (1999)
- 25) 石川忠, 間瀬秀里, 長谷川俊永, 野見山裕治, 吉江敦彦: 鉄と鋼, 85 (1999), 44.
- 26) 石川忠, 野見山裕治, 荻原行人, 栗飯原周二: 日本造船学会論文集, 177 (1995), 259.
- 27) 船越督巳, 田中智夫, 上田修三, 石川正明, 腰塚典明, 小林邦彦: 鉄と鋼, 63 (1977), 303.
- 28) 山本広一, 長谷川俊永, 高村仁一: 鉄と鋼, 79 (1993) 10, 41.
- 29) 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘: NKK技報, (2002) 179, 57.
- 30) 壺岐浩, 大西一志, 大竹章夫, 岡口秀治, 横山幸夫, 波多野勲: 住友金属, 50 (1998) 1, 43.
- 31) 児島明彦, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 市川和利, 池辺卓, 志村保美, 東清三郎: 日本建築学会学術講演概要集 (関東), (2001年9月), 761.
- 32) 木村達己, 久田光夫, 藤沢清二, 横山幸夫, 香取修治: 川崎製鉄技報, 34 (2002) 4, 158.
- 33) A.Glover, J.Zhou, D.Horsley, N.Suzuki, S.Endo and J.Takehara : 22nd Int. Conf. on OMAE, Paper No. OMAE2003-37429, (2003)
- 34) 三浦寛, 山本定弘: NKK技報, 17 (2002), 63.
- 35) 高性能鋼の概要 (橋梁向け): (社) 鋼材倶楽部橋梁研究会
- 36) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX), (1993年3月)
- 37) 紀平寛, 伊藤叡, 溝口茂, 村田朋美, 宇佐美明, 田辺康児: 材料と環境, 49 (2000), 30.
- 38) 竹村誠洋, 田中賢逸, 鈴木伸一, 森田健治, 藤田栄: まてりあ, 40 (2001) 3, 289.
- 39) 菅俊明, 山内学, 宮脇淳, 潤田保司, 堺雅彦, 中山武典: R & D 神戸製鋼技報, 49 (1999) 2, 31.
- 40) 塩谷和彦, 川端文丸, 天野虔一: 川崎製鉄技報, 33 (2001) 2, 97.
- 41) 鹿島和幸, 幸英昭, 渡辺祐一, 勝元 弘: 第48回材料と環境討論会, (2001), 41.
- 42) 岸川浩史, 幸英昭, 鹿島和幸, 神谷光明, 原修一: 防錆管理, (2000) 2, 45.
- 43) 宮田志郎, 原田泰宏, 竹村誠洋, 古田彰彦: 塗装工学, 36 (2001) 6, 206.
- 44) 小森務, 京野一章, 加藤千昭, 森戸延行: 材料とプロセス, 14 (2001), 1261.
- 45) 谷徳孝, 岡田順応, 大江憲一, 宮崎建雄, 日本造船学会論文集, 189 (2001), 299.
- 46) 弓削佳徳, 堀紀文, 西田俊一: 川崎製鉄技報, 30 (1998) 3, 137.
- 47) N.Konda, T.Kawabata, K.Arimochi : Fatigue Strength of Laser Welded Joints, 7th International Welding Symposium, 2 (2001), 1207.
- 48) 池田倫正, 木谷靖, 安田功一, 山岡弘人, 結城正弘, 土屋和之: 溶接学会全国大会講演概要, 67 (2000), 244.
- 49) 安田功一, 木谷靖: 溶接学会論文集, 18 (2000) 1, 95.
- 50) 沖田泰明, 黒澤伸隆, 池田倫正, 安田功一: 溶接学会全国大会講演概要, 69 (2001), 50.
- 51) 小野数彦, 安達馨, 鮫島泰郎, 宮本勇: 溶接学会全国大会講演概要, 67 (2000), 102.
- 52) 児島一浩, 大北茂, 星野学, 都築岳史, 竹澤博: 溶接学会全国大会講演概要, 68 (2001), 270.
- 53) 溶接用鋼の疲労強度向上に関する基礎検討, 日本鉄鋼協会高強度鋼板の疲労強度向上研究部会, (1995), 79.
- 54) 太田昭彦, 渡辺修, 松岡一祥, 志賀千晃, 西島敏, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏: CAMP-ISIJ, 10 (1997), 1369.
- 55) 久保高宏, 森影康, 天野虔一, 太田昭彦, 毛利雅志, 町田文孝: CAMP-ISIJ, 12 (2000), 423.
- 56) 村田博隆, 加藤昇, 田村博: 溶接学会全国大会講演概要, 51 (1992), 278.
- 57) 藤田敏明, 吉家賢吾, 町田文孝, 湯田誠, 久保高宏: 土木学会第54回年次学術講演会講演概要, (1999), 54.
- 58) Y.Morikage, T.Kubo, K.Yasuda, K.Amano and C.Shiga : Proc.of the 7th Int. Symp., JWS, (2001), 791.
- 59) 菅田登, 藤原知哉, 有持和茂, 永吉昭彦, 稲見彰則, 山下正人, 矢島浩: 日本造船学会論文集, 190 (2001)

(2003年6月11日受付)