

技術解説

海運や建設現場を支える鋼材(造船・建産機分野)

Steels for Marine Transportation and Construction

植 森 龍 治*

Ryuji UEMORI

白 幡 浩 幸

Hiroyuki SHIRAHATA

藤 岡 政 昭

Masaaki FUJIOKA

野 瀬 哲 郎

Tetsuro NOSE

井 上 健 裕

Takehiro INOUE

皆 川 昌 紀

Masanori MINAGAWA

1. はじめに

戦後の日本の復興への造船業の寄与は非常に大きく、鉄鋼業も特に厚板分野では造船分野が厚鋼板の主要適用分野の1つであることから、国内造船業の発展とともに大きく進展してきたといえる。具体的には、TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 鋼の実用化に伴う高効率大入熱1パス溶接化への寄与、またYP40 (降伏点 (YP) 390N/mm²) 鋼の実用化に伴う高強度化、軽量化、輸送効率の向上などへの寄与など、鉄鋼業は国内造船業の技術革新の下支えをしてきた。後述するTMCP技術を用いて製造した高強度鋼は、タンカー、バルクキャリアーに用いられ、また溶接熱影響部 (Heat Affected Zone : HAZ) 靱性制御技術はLPG船やLNG船に適用され、国内造船業の競争力向上に寄与してきた。造船分野は厚鋼板を大量に使用し、鉄鋼メーカーは大入熱、高靱性で特徴づけられる鋼をTMCPを用いて大量生産することにより供給してきた。

一方、建産機分野では、第二次大戦後の国土復興から高度成長期の国内インフラストラクチャ整備、更には近年の世界規模での社会基盤整備と、重要な役割を果たしてきた。そのような社会背景の中で、使用される鋼材はさらなる高強度化や耐摩耗性向上 (高硬度化) を軸に特性向上が進められてきた。たとえば強度では引張強度 (TS) 590 N/mm² 鋼から 780 N/mm² 鋼、980 N/mm² 鋼さらにはそれを超える高強度鋼と発展し、高性能化、大型化に寄与してきた。一方で、建産機製造の際の加工性、溶接性に優れた鋼材により効率向上も図られてきた。また鋼材製造に関しては、従来オフラインでの調質処理であったものが、TMCPの発達とともに制御圧延・直接焼入れ処理などが用いられるようになった。

これら2分野の共通点としては、海外材との競争が激しいことが挙げられ、コスト競争力が必要であるとともに、技術的にユーザーに広報できる新商品の開発が重要である。さらに中国を含めたBRICs (Brazil, Russia, India, China

の頭文字) 等の経済発展の著しい国々での需要から極厚化、高強度化、高機能化が進められつつある。

高強度、高機能化では、造船のEH47 (YP460 N/mm²) 鋼、高アレスト鋼、耐食鋼 (NSGP®-1) 等で当社がリードしてきたが、韓国・中国造船の台頭とともに産業構造が変わりつつあり、今後これらの当社技術をもとに、世界シェアを如何に広げてゆくかということが重要な課題となっている。また、建産機分野では、この産業構造の変革がさらに早く、中国ファブリケーターの急速な発展の中、特定海外ミルが寡占して市場をリードしており、如何に技術開発を進めキャッチアップしてゆくかが重要となっている。何れにしろ、造船・建産機分野では市場をリードできる技術開発力が最も重要である。

本報では、造船分野のみならず厚板製造の基幹技術であるTMCP技術とHAZ靱性制御技術 (HTUFF® など) について概説した上で、幾つかの厚板における高性能化技術についてその考え方を紹介し、最後に新しい動きについても言及する。なお、造船・建産機分野に加えて、インフラ分野 (詳細は第1章1-4参照) として、建築分野における取り組み状況についても一部取り上げる。

2. 厚板メタラジー

2.1 TMCP 技術

TMCP (加工熱処理または熱加工制御) は主に制御圧延¹⁾ (Controlled Rolling) と加速冷却²⁾ (Accelerated Cooling) およびこれらを組み合わせたプロセス (図1³⁾) のことであり、新日本製鐵では、これをCLC (Continuous Online Control) プロセス⁴⁾と呼んでいる。制御圧延は、仕上圧延をオーステナイト (γ) の未再結晶温度以下で圧延することであり、塑性変形によって導入された γ の粒界や粒内の欠陥 (粒界レジ構造、変形帯、転位集積体など) が γ - α 変態の核生成サイトとなることによって、結晶粒の微細化を可能とする。一方、加速冷却は圧延後の鋼材を変態開始以前の温度から水冷することにより、 γ - α 変態を過冷

* 鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部長 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

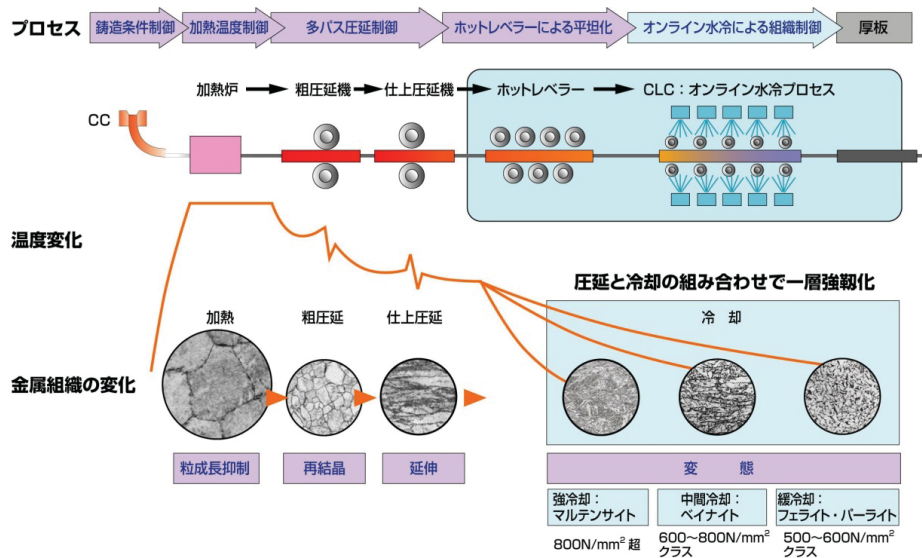


図1 厚板製造プロセス“TMCP”の概要と金属組織の変化の様子

却の状態が生じさせ、結晶粒を微細にすることやベイナイトやマルテンサイトにする事で鋼材の強度の増加や靱性を著しく向上させることができる。

実際のTMCPでは制御圧延や加速冷却に加えて再加熱を低温で行うことやTiやNbといったMAE (Micro Alloying Element) の固溶、析出を利用して粒成長や再結晶を抑制して、制御圧延や加速冷却の細粒化を最大限に得ることが行われている。制御圧延の歴史は、1950年代の欧州における低温仕上圧延（再結晶 γ 低温域圧延）に端を発し、1958年には米国のNational SteelによるNb鋼の実用化⁹⁾により大きく進展した。1960年代にはBISRA（英国鉄鋼公社）や日本の研究者により制御圧延の研究が行われた。これらの成果は1969年に日本の各社によりX65の実用化として結実した¹⁾。

その後、当社では1000℃以下の低温加熱とCR（制御圧延（厳密には未再結晶域圧延））あるいは2相域圧延を行うNIC（Nippon Steel Inter-critical Rolling）⁶⁾プロセスやLCB鋼（Ultra Low Carbon Bainite 鋼、極低炭素ベイナイト鋼）⁷⁾の実用化、圧延中の冷却制御⁸⁾やこのプロセスを利用して造られた高いアレスト性能を有するHIAREST®（表層超細粒）鋼が実用化された。他社では住友金属工業(株)のSHT法（圧延中に冷却、再加熱を行う）⁹⁾という特殊な制御圧延がなされた。一方、加速冷却は制御圧延の発達により広く実用化されることとなるが、その研究開発の歴史は古く、当社では1960年に広畑製鐵所でDQ（Direct Quench, 直接焼入れ）によるHT60（TS590N/mm²鋼）の製造が行われた。また、1970年には熱処理のRQ（Roller Quench）設備を用いた加速冷却による極低Ceq（炭素当量）のクラックフリータイプのHT50（TS490N/mm²鋼）の製造が行われている。

その後、1972～1974年にはDQの総合的研究が行われ、

2つの社内研究プロジェクトを経て1981年には八幡製鐵所にオンライン冷却のパイロットプラントが、1983年には君津製鐵所に本格的なオンライン冷却の製造設備がCLC冷却装置として完成した。このCLC冷却装置は冷却前にHL（Hot Leveler, 熱間矯正機）を有し、ロールによる鋼板の拘束、スプレーによる強冷却、鋼板通過型冷却などを特徴とする当時としては極めてユニークな設備仕様を持つ当社独自のオンライン冷却装置で、冷却の均一性、形状、緩冷却からDQの強冷却まで自在に行うことができる特徴があった。今日の加速冷却装置はCLC冷却装置の特徴のいずれかを導入しているものが多い。

一方、国内では、当時の日本鋼管(株)が1980年にOLACを設置し¹⁰⁾、住友金属工業(株)、川崎製鉄(株)（当時）、(株)神戸製鋼所もそれぞれ独自の冷却装置を実用化した。これにより、TMCP技術は世界に先駆けて日本の技術として確立した。

現在では、CLCの適用鋼材は、造船、建築、海洋構造物、ラインパイプ、建産機、タンク、ペinstockなど全分野に広がり、厚板製造に不可欠の技術となっている。特に、造船分野への適用はCLCの開発と同時に進められ新HT50を開発した。この鋼材は、従来のノルマライジングまたはCRのHT50に比べて細粒化や組織強化により同一成分で100N/mm²程度の強度アップが可能であり、その分Ceqを大幅（0.4→0.3%）に低減できた⁴⁾。これにより溶接部の硬さを低減でき、溶接性が飛躍的に改善した（図2）。

また、CLC冷却装置は広い冷却速度範囲を有しており、強冷却機能を利用した焼入れ-焼戻しのプロセスとして、HT60～HT120（TS570～1180N/mm²鋼）の高強度鋼材に適用されている。また、その発展形のプロセス¹¹⁾も含めて、造船（YP315～460N/mm²鋼）、橋梁（SM570TMC、高性能鋼BHS500/700）、建築（BT-HT325～690）、海洋

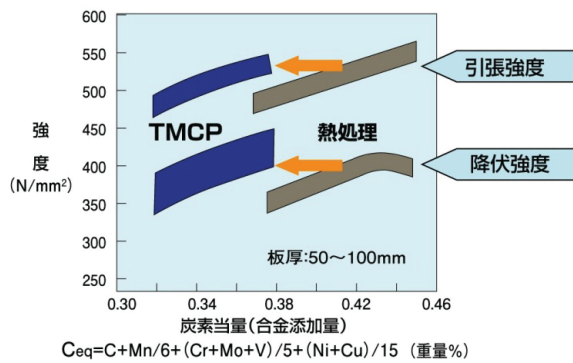


図2 強度と炭素当量の関係

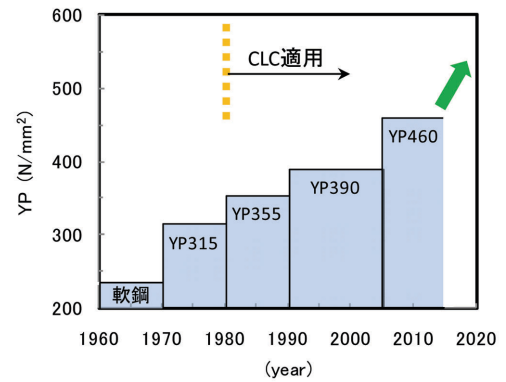


図4 船体用で最も強度の高い鋼板の推移

強度クラス	500	600	700	800	900	1,000~
造船	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®
海洋構造物	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®
ラインパイプ	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®
建機・産機	CLC	CLC	CLC	CLC	CLC	CLC
建築・土木	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®	CLC+HTUFF®
タンク・圧力容器	CLC	CLC	CLC	CLC	CLC	CLC

図3 厚板分野の強度クラスとCLCおよびHTUFF®の適用状況



図5 CLC-μとHLの外観(君津製鉄所)

構造物 (YP355 ~ 550N/mm²鋼)、建産機 (HT80 ~ 120)、ラインパイプ (X65 ~ 120)、タンク・ペンストック (HT80 ~ 100) などがTMCPで製造されている (図3)³⁾。図4に船体用鋼の高強度化とCLC活用の変遷を示す。CLC技術の適用により鋼材の高強度化が進んできたことが判る。

一方で、このようなTMCPを十分に使いこなすためには、 casting, 再加熱, 圧延, 冷却, 焼戻しなどの製造工程における粒成長, 加工と回復, 再結晶, MAEの固溶と析出, 変態といった冶金現象を定量的に把握して、最適に制御することが必要である。また、金属組織と強度、靱性などの材質を関係づけておくことも重要である。この観点から当社では一貫プロセスのメタラジーとして、製造工程で生じる冶金現象をモデル化する“材質予測モデル”の開発^{12, 13)}を行ってきた。

これは、再加熱, 圧延, 冷却中の温度や鋼材中の加工歪みを計算するプロセスモデルと再結晶や変態による組織変化を計算する金属組織モデル、金属組織から材質を予測する組織材質モデルからなる。成分やプロセス条件 (熱履歴, 圧延パスの温度, 圧下量などの圧延条件, 水量, 冷却時間などのCLC冷却条件) を与えることで製造工程での金属組織変化や最終的にえられる強度やシャルピー靱性 (T_{rs}) を計算する。このようなモデルを利用することで、成分や圧延条件を設計したり、最適プロセスを検討することができる。TMCPでは、成分に加えてプロセス条件の設

計も重要な支配因子となるために、材質予測モデルは重要なツールとして使用されている。

近年、当社ではCLCを第2世代のCLC-μ (ミュー)¹⁴⁾へ更新した (図5)。CLC-μでは、これまでのCLCにくらべても冷却時の鋼板の上下面、幅方向にさらに均一な冷却を行えるよう水の核膜沸騰特性や流れの解析、鋼板の変形挙動を考慮した新しい冷却方式を開発した。また、冷却ゾーン細分化による多段冷却の実現やこれまでのCLC以上に広い冷却速度範囲の実現など世界でも最新の能力を持つ加速冷却装置となった。これらの能力を使ってさらに新しい商品開発を行っている。例えば、地震地帯や不連続凍土地帯に敷設されるラインパイプには、地盤変動による曲げ、曲げ戻しに対する変形性能が要求されるが、X80クラス以上の高強度においても充分高い変形性能を有する鋼板を開発し、実用に至っている。また、マイナス40℃以下の極寒冷地においてもこれまでになかった優れた溶接性と溶接継手靱性を有する海洋構造物用鋼板や橋梁用高性能鋼SBHS500の製造など多くの新商品の製造に使われている。

2.2 HAZ 靱性制御技術

厚鋼板は溶接構造用鋼として使用する場合がほとんどであることから、良好な溶接性や溶接継手部の靱性確保は極めて重要となる。特に、溶接熱影響部 (HAZ) の靱性向上技術は厚鋼板開発の最重要技術の1つとしてこれまで多く

の検討がなされており、膨大な知見が蓄積されてきた。その中で、HAZの組織微細化技術として、溶接時の加熱段階におけるオーステナイト(変態前の旧 γ)が粗大になっているにもかかわらず、粒内の非金属介在物(以下介在物)や析出物より核生成する粒内フェライト(Intragranular Ferrite: IGF)を活用することにより実効的なミクロ組織(有効結晶粒径)を著しく微細化することができる技術(IGF技術)と粒内の微細な析出物等をピン止め粒子として利用することにより γ 粒そのものの粗大化を大幅に抑制する技術(γ 粒微細化技術)が重要であり、さまざまな工夫がなされてきた。ここでは、両者の技術の概略を示す。

前者のIGF技術は厚鋼板のHAZ靱性向上において、現時点でも大変有益な技術の1つである。この技術の実用化は、当初は比較的多量の酸化物粒子が存在する溶接金属で進められたが、次第に厚鋼板での適用が模索され、特に溶接時に粗大組織となるHAZやTMCPによる組織改善が困難な材料の組織微細化技術として注目され、製鋼段階での介在物制御技術の発達とも連動し、1970年代後半より厚鋼板のHAZ組織改善への適用が本格的に開始された。まずはTiN¹⁵⁾を利用した実用化が初めて実現された。次いで、1980年代後半から1990年代前半にかけて、Ti酸化物を利用したTi酸化物(TiO)¹⁶⁾やTiN/MnSを利用した高性能TiN鋼¹⁷⁾が開発されるに至っている。いずれも新日本製鐵が独自に開発したもので、それぞれ画期的な高性能鋼厚板である。

IGF変態の機構解明に関しては、第3章で詳細を示しているように、介在物周辺のMn欠乏層が重要な役割を演じていると考えられており、これと介在物/ γ 母相および介在物/フェライト(α)界面の格子整合性(界面エネルギー)などが複雑に作用し、粒界からの α 変態に先んじて粒内から発生するものと考えられている。Mn欠乏層の存在を実証するデータについては以前より透過型電子顕微鏡(TEM)による測定がトライされてきたが、測定部位の薄膜化が難しいなどの理由によりメタラジに意味のある結果が得られていなかった。しかし、最新鋭の分析機能を備えたTEMと近年の高度な薄膜作成技術の発展により精度の高い実測値(第3章)が得られている。

次に、 γ 粒微細化技術について示す。近年では、大入熱溶接あるいは超大入熱溶接(入熱量の目安として30~100kJ/mm程度)を用いた高能率な溶接施工の利用が急激に増えている。このような背景から、厚板母材の高性能化に対応しつつ、大入熱溶接を行った場合においてもHAZ靱性を確保できる厚鋼板の開発が広く求められていた。入熱量が大きくなった場合のHAZ靱性に関しても、母材の靱性確保と同様に、変態前の γ の結晶粒微細化が重要となる。

一般的には、入熱量が大きくなった場合のHAZの熱履歴は、高温での保持時間が長くなることに加えて冷却速度も極めて小さく、長時間高温にさらされることから、特に

溶融線近傍における変態前の γ 粒を微細なままに維持しておくことは困難となる。良く知られているように、変態前の γ 粒の微細化に対して、TiNによるピン止め効果が最も広く利用されてきたが、入熱量が大きくなった場合には、TiNをもってしても粒成長を完全に抑制することはできない。新日本製鐵では、大入熱・超大入熱対応のHAZ靱性向上技術として、TiN等よりもさらに高温でも熱的に安定な微細粒子に着眼し、HAZ細粒化を実現した。

図6は超微細粒子(数10nm~数100nmのMgやCaを含有する酸化物あるいは硫化物)の例であり、図7に示すようにこれらの微細分散したピン止め粒子によって、1400℃の高温でも γ 粒がほとんど成長しておらず、極めて強力なピン止め効果が発揮されていることがわかる^{18,19)}。新日本製鐵では、このような微細粒子を用いたHAZ細粒高靱化技術を“HTUFF®(エイチタフ): Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles”と呼んでいる。ただし、最近ではIGF技術を含めて、広義にHAZ高靱化技術をHTUFF®という場合が多くなっている。

このHTUFF®を適用した厚鋼板は図3に示すように、造船、海洋構造物、ラインパイプ、建築、土木などの広い分野で使用されている^{18,19)}。たとえば、図8は大型コンテナ船用大入熱溶接対応鋼(YP390N/mm²鋼)の溶接継手ミクロ組織を示したもので、溶融線近傍においてもオーステナイト粒の粗大化が抑制されており、HAZ靱性も良好であることが確認されている²⁰⁾。図9にHAZ靱性制御技術と主要な開発鋼材の変遷を示す。

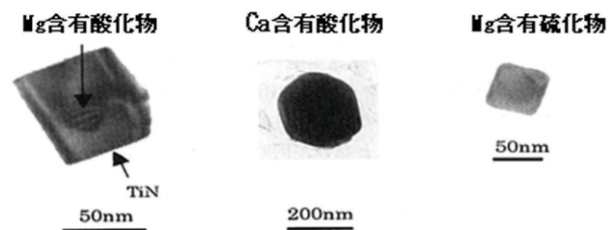


図6 超微細なピン止め粒子の例^{18,19)}

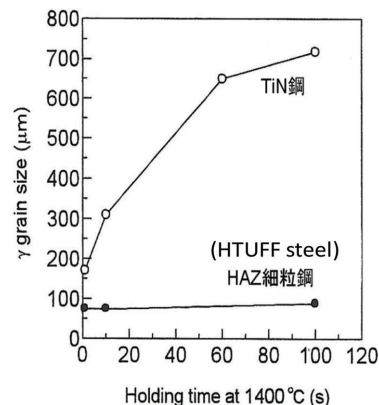


図7 HAZ細粒鋼の1400℃における粒成長挙動^{18,19)}

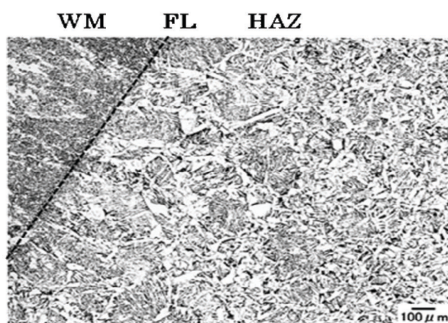


図8 超大入熱溶接条件[39kJ/mm]における造船用鋼の継手ミクロ組織²⁰⁾

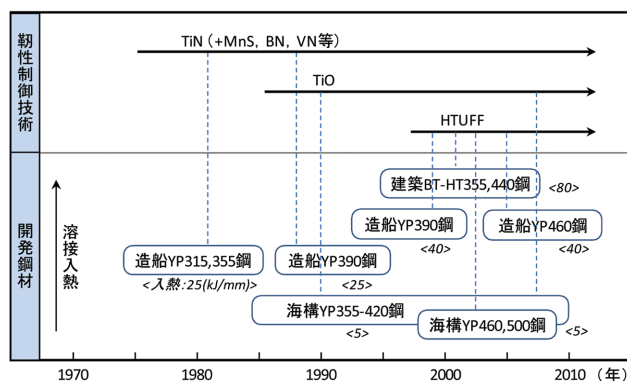


図9 HAZ靱性制御技術と開発鋼材の変遷

HAZ 靱性のさらなる向上を目指すためには、靱性支配因子の明確化、HAZ靱性予測技術の確立も重要である。そこで当社では、HAZ靱性に及ぼす各因子(有効結晶粒径、脆化相、硬さ等)の影響を定量的に把握し、これらに及ぼす合金元素や溶接熱履歴の影響を定式化することによって、鋼材の化学成分と溶接条件から遷移温度を予測するモデルの構築を進めている²¹⁾。

3. 造船分野における取り組み状況

3.1 アレスト特性 “コンテナ船用厚手 EH47 鋼”

21世紀に入り、コンテナ船は急激に大型化した。コンテナ船は、コンテナの積み下ろしのために大きな開口部を有するため、開口部周縁に配置されるハッチサイドコーミングには厚手の高強度鋼が用いられる。図10はコンテナ船のサイズと使用最大板厚の関係を示した図であるが、両者はほぼ比例関係にあり、10 000TEUになると100mm程度の板厚の鋼材が必要になってくる²²⁾。鋼材の脆性破壊特性は板厚を増すほど低下することから、コンテナ船用鋼材の厚手化により、これら厚手鋼材の破壊性能が危惧された。

以下では、造船用鋼の必要特性とコンテナ船用厚手EH47鋼開発の経緯について簡単に示す。

国内造船分野では、脆性破壊の防止に関して1980年代までの研究成果から、①長大き裂のアレストには脆性き

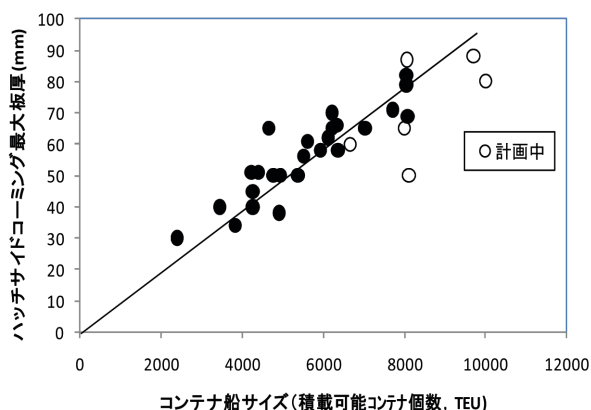


図10 コンテナ船サイズと使用最大板厚の関係

裂伝播停止靱性Kcaとして4 000N/mm^{1.5}～6 000N/mm^{1.5}が必要、②ボンドに沿った伝播亀裂は、入熱にかかわらず継手靱性が十分であれば伝播する間に母材に逸れて伝播停止する、という結論が得られていた²³⁾。そこで、溶接部の脆性破壊発生を防止するとともに、重要部材に高靱性母材を配置してアレスト性を確保することで二重の安全性が実現されており、万が一の脆性破壊発生の場合でも、大規模な船体の破壊は防止できると考えられた。

脆性破壊の発生特性は、中央切り欠きタイプのディープノッチ試験を用いて評価されてきた。また、船級規則の要求シャルピー衝撃値とディープノッチのKc値との整合性が報告されており、船級規則の要求シャルピー衝撃値を満足すれば、破壊の発生特性を確保できると考えられる。

一方、アレスト特性については、前述のアレストに関する既存知見は、板厚40mm以下の鋼板の実験で得られたものであり、検証されていない厚手での板厚効果による脆性破壊特性の低下が推察され、最近のコンテナ船用鋼材の厚手化により、これら厚手鋼材の破壊性能が危惧されることとなった。

そこで、新日本製鐵では三菱重工業(株)と共同で50mm～70mmの板厚の鋼材を用いて、8 000ton (80MN)の載荷能力を有する大型引張試験機を用いたアレスト実験を行った。その結果、厚手材では、脆性き裂が溶接継手部から逸れることが無いこと、50mm以上の厚手材母材では、シャルピー衝撃値が良好でも、脆性き裂が止められないことが有ることを実証し、公表した²⁴⁾。

この研究報告は、従来の船舶設計で想定している脆性き裂伝播停止のストーリーが厚手材では成立しないことを示唆しており、大きな衝撃を持って受け止められた。一方、アレスト特性を確保して、大型コンテナ船の安全性を確保するソリューションとして、当社は三菱重工業(株)、(財)日本海事協会と共同で、アレスト性を具備し、溶接部破壊靱性に優れるEH47鋼を開発した。これは、脆性破壊発生特性向上のために前述したHTUFF®技術を適用して大入

熱溶接HAZ組織を微細化するとともに、アレスト特性向上のために化学成分とTMCP条件（加熱温度、CR温度、圧下率、冷却速度等）の最適化により母材組織微細化を図ったものである²⁵⁾。本鋼材は最低使用温度である -10°C においても、YP460鋼の使用応力下で脆性き裂発生後、短い距離で停止させることができる。このEH47鋼は三菱重工業（株）で建造された（株）商船三井向けコンテナ船に初採用され、発生特性とアレスト特性による安全性の向上と、高強度化による軽量化を両立させた鋼材として大きく注目された。

3.2 耐食性 “原油タンカー用高耐食鋼（NSGP®-1）”

1990年代、図11に一例を示すように、原油タンカー底板に原因不明の最大深さ10mmにも及ぶ食孔が1タンク当たり最大千数百個という膨大な頻度で発生し、穴あきによる海洋汚染の懸念から点検、補修の負荷は急増し、世界的な対策が求められた。

EU諸国は塗装強化の国際条約案を国連国際海事機関（IMO）に提示したが、何らかの原因で塗膜に欠陥が生じた場合の腐食懸念は依然高く、その結果、塗料、有機揮発物質（VOC）の使用量増大という新たな問題が生じている。

2002年に、新日本製鐵と日本郵船（株）は、鋼材による防食対策が実現できれば、海洋汚染リスク低減と同時にVOC抑制等の多大な貢献に繋がると考え、協同で研究開発に着手した。

その結果、独自に孔食過程を解明し食孔内部を再現する試験方法を考案し、試験結果と実船孔食速度の定量的対応を明確化した。さらに漏洩リスク排除、メンテナンス負荷最小化、VOC低減そして経済性を両立する耐食目標を明らかにして、世界初の原油タンカー底板用耐食鋼NSGP®-1（Nippon Steel Green Protect-1）を開発した²⁶⁾。本鋼を超大型タンカーに適用することで実船での効果確認を行い（図12）²⁷⁾、2007年度に市販を開始した。本鋼はこれまでに9隻に適用されている。2010年にIMO第87回海上安全委員会で原油タンカーの貨物タンクの腐食防止措置を規定した条約改正が採択され、塗装とともにNSGP®-1を含む耐食鋼が有効な耐食技術として認められた。腐食評価試験方法およびクライテリアは、IMOルールとなり、船舶

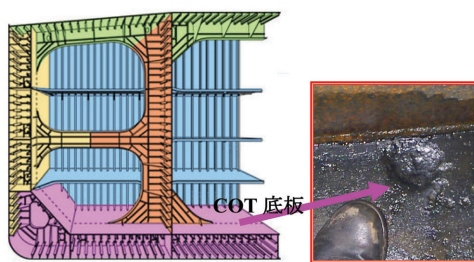


図11 原油タンカー底板に発生する食孔の概要
(COT: Cargo Oil Tank)

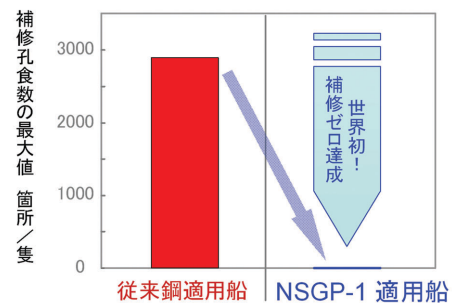


図12 実船適用結果

の安全性向上に大きく寄与している。

3.3 造船疲労ソリューション

多くの溶接鋼構造物の長寿命化のためには耐疲労特性の向上が重要であり、①疲労き裂の発生抑制技術や②疲労き裂伝播阻止技術が求められている。特に船舶においては外洋での厳しい海象条件を考慮した繰り返し負荷に対して各種規定で定められた寿命や定期検査までの期間を考慮した耐疲労性能が求められる。また、①、②のような疲労対策の効果を船舶の疲労設計に合理的に活用していくためには気象、海象などで変動する応力振幅やき裂進展先の残留応力の状態をも考慮して、疲労寿命を高い精度で予想することが必要である。このため造船をはじめとした溶接構造物の疲労問題には、①、②と③疲労寿命推定技術を合わせた“疲労トータルソリューション”が極めて重要であり、この詳細については第3章3-5“原理原則に迫る現象解析-2：疲労トータルソリューション技術”で紹介する。

3.4 造船分野における溶接技術

造船分野における溶接技術の進歩としては、高効率化や継手の高強度、高靱性化に対応する新技術の開発が行われた。まず、コンテナ船の大型化に伴う板厚の増大に対し、高能率なワンパス溶接を可能とする“2電極VEGA®（Vibratory Electro-Gas Arc welding）溶接法”を新日本製鐵、日鐵住金溶接工業（株）および三菱重工業（株）の3社の共同研究を通じて開発した²⁸⁾。本溶接法の概要を図13に示す。2電極VEGA®溶接法は、従来の1電極VEGA®溶接法を2電極化することにより、適用板厚範囲の増大と溶接速度の向上を図ったものである。2電極化の開発にあたっては、①2電極の極性の適正化、②電極間距離の適正化、③溶接材料のフラックス組成の適正化、④2電極の揺動条件の適正化を検討し、アーク干渉やスラグ・スパッタ跳ね現象の抑制を図っている。これらの開発を通じ、板厚65mmを超える厚手鋼板に対する施工においても良好な作業性を備えつつ安定した溶込みを実現し、施工工数の短縮と溶接欠陥の効果的な排除を可能とする立向エレクトロガ

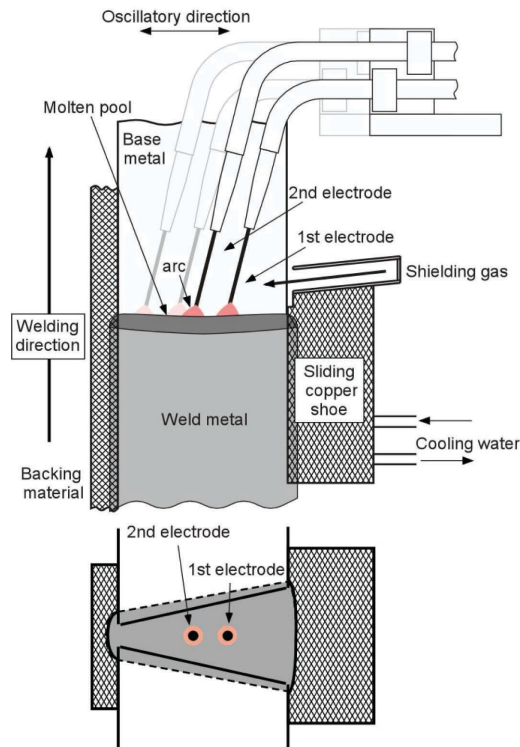


図13 2電極VEGA®溶接法の模式図

スアーク溶接技術として、2001年以来、三菱重工業（株）のコンテナ船建造において適用されてきた。また、前述した高アレスト性を有し、溶接部破壊靱性に優れたEH47鋼の開発にあたっては、同時に、大入熱の適用を可能とする溶接材料開発を行い、YP460N/mm²級高靱性FCW（フラックス入りワイヤ）溶接材料EG-47Tを開発した。本溶接材料を適用することで、2電極VEGA®溶接法により作製したEH47鋼溶接継手の機械的特性は、船級規格の要求水準を十分満足したものが得られている²⁹⁾。

一方、タンカー建造にあたっては、二重構造（ダブルハル、ダブルボトム）法制化の動き等により、板継ぎ工程のより高能率化が必要となっている。造船の大板継ぎには、高能率溶接方法として従来からFCuB（Flux Copper Backing）片面サブマージアーク溶接が各造船所で広く適用されてきたが、更なる高能率化の背景から、FCuB片面溶接の速度を2倍以上にすることを目標に、新日本製鐵、日鐵住金溶接工業（株）、ユニバーサル造船（株）有明工場の共同研究により、4電極による高速片面溶接法（NH-HISAW法）を開発した³⁰⁾。本溶接法は、裏当て銅板上に裏フラックスを散布し、エアースペースによりこれを大板の裏面に押し上げながら、表側より4電極のサブマージアーク溶接を行い、第1、第2電極で裏ビードを、第3、第4電極で表ビードを同時に形成する施工方法であり、たとえば板厚16mmの場合1.5m/minの高速溶接速度が得られる。この新しい溶接方法は既に造船所のブロック組立てラインで実用化されている。

4. 建築分野における取り組み状況

1995年に起きた阪神淡路大震災の教訓をもとに建築構造物の破壊性能に関する研究が進み、鉄骨構造物の品質が見直されて、合理的な実施工に結び付けようとする試みが進んだ³¹⁾。その結果、建築鉄骨の溶接部に対して従来よりも高い破壊靱性が要求されるようになり、例えば、高層建築物に用いられる鉄骨の溶接部に対して、0℃で70J程度の高いシャルピー吸収エネルギーを要求する物件も登場した³²⁾。加えて、建築構造物の複合用途化、大型化や無柱大スパン空間の実現要求による高強度化、厚手化と鉄骨製作での高能率溶接施工の要求が高まった^{31,33)}。日本では特に超高層建築物のもっとも一般的なディテールは4面ボックス柱であるが³²⁾、これに対しては、高能率溶接の例として、ダイアフラム溶接部のエレクトロスラグ溶接（Electroslag Welding：ESW）や多電極のサブマージアーク溶接（Submerged Arc Welding：SAW）などがあり、溶接入熱量は50～100kJ/mmに及ぶ。

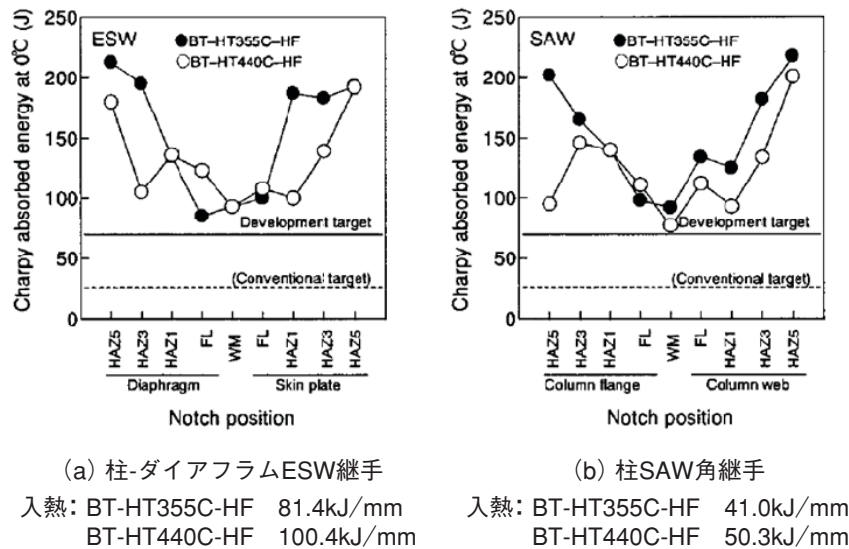
従来の建築鉄骨用鋼材にこのような大入熱溶接を適用するとHAZのミクロ組織が著しく粗大化し、靱性が劣化する懸念があった。そこで、大入熱溶接を適用しても高いHAZ靱性を確保できる建築鉄骨用鋼材の開発が望まれた。新日本製鐵ではこのようなニーズに対しても、既述のHTUFF®を適用することで、建築鉄骨用高HAZ靱性鋼を開発することに成功した³³⁻³⁶⁾。図14にBT-HT355CおよびBT-HT440Cの4面ボックス柱を例として、大入熱継手靱性を0℃におけるシャルピー吸収エネルギーの平均値で示すが、70Jを超える良好な靱性が得られている³³⁾。

現実使用される様々な板厚に対する鋼材開発および新鋼材に適用する溶接技術の開発に際しては、ESWのような大入熱溶接時におけるオーステナイト域での滞留時間に加えて、特にオーステナイトからフェライトへの変態メカニズムに大きく影響する800℃から500℃の冷却時間に代表されるような溶接時の冷却挙動を知ることが重要である。また、実際の施工への適用のためには適正な溶込み形状を得るための溶接条件を提案することも必要になる。そこで当社は、利用技術の一環として、溶込み形状と温度履歴を推定する手法も開発し、実測値と良く一致することを確認している³⁷⁾。

その他、ここでは詳述はしないが、建築分野においては、第1章1-4“社会の発展を支える鋼材と鋼構造（インフラ分野）”で述べられている通り、建築物の安全性向上のため、さらには施工性、意匠性の向上を図るために、耐火鋼や低降伏点鋼等が開発され、広く利用されている。

5. 建産機分野における取り組み状況

近年、新興国における旺盛な産業基盤整備を背景に、油圧ショベル、トラクターショベル、クレーン他の建設機

図14 HTUFF®鋼を適用した4面ボックス柱の大入熱継手靱性の例³³⁾

械、産業機械の生産が伸長している。10年前は約40万台であった建設機械の市場は、欧米市場の安定的拡大と中国市場の急激な拡大により70万台へと増加した。この内中国産機だけでも約10万台の市場となっている³⁸⁾。

これら建産機で利用される鋼板には、機械の大型化、軽量化に対応するため高強度であること、また鉱石や土砂などによる摩耗を軽減するためより耐摩耗性に優れることが要求されている。また、このような鋼材の基本性能に加え、使用環境の苛酷化に耐えうる高靱化や、機械製造過程における切断、曲げ加工、溶接などを容易にする加工性の改善も重要な要素である。

将来的な建産機の課題としては、排出ガス規制基準強化への対応、リサイクル性、石油代替燃料の実用化といった地球環境問題への対応などがある³⁹⁾が、これらの動向に対する鋼材性能への要求は、現時点ではあまり明確になっていない。

したがってここでは以下に、建産機に用いられる高張力鋼の高強度化、耐摩耗性能を中心に概要を紹介する。

5.1 高強度鋼

建設用クレーンは、その作業効率を上げるための大型化の一方で、クレーン重量の軽量化を果たすべく、特にブームやアウトリガーに使用される鋼材には高強度化が求められている。

高強度化に対応すべく、新日本製鐵では、これまでに引張強度780～1180 N/mm²の高張力鋼(例えばWEL-TEN® 780, WEL-TEN® 950など)を開発し生産している³⁹⁾。これらの高張力鋼は所定の強度のみならず、使用環境に応じた低温靱性保証のバリエーションも実現している。また、建産機の設計において、従来引張強度設計であるのに対し、最近では降伏強度設計が標準となりつつあり、これに対応

した高降伏強度を保証するYP960 N/mm²鋼も開発した。

これら高強度鋼の製造にあたっては、従来から圧延後再加熱焼入れ-焼戻し処理(RQ-T)が行われてきたが、1980年代以降TMCP技術の開発とともに、再加熱を省略した直接焼入れ-焼戻し処理(DQ-T)が多く用いられている。DQ-Tプロセスは、その鋼材成分、圧延条件、水冷条件を緻密に制御することで、RQ-Tプロセスよりも強度靱性バランスに優れた高張力鋼の製造が可能である。なかでも未再結晶圧延を活用したCR-DQ-Tプロセスでは、焼入れ性をより慎重に制御することで、さらに高強度・高靱性化を達成した。

いずれのプロセスにおいても、炭素当量、焼入れ指数に影響するCr, Mo, Bなどの合金元素や、加熱、圧延、冷却、熱処理プロセスを最適にコントロールすることで高強度化、高靱性化を図るとともに、溶接割れ感受性組成Pcm (Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B)を低く抑えることで溶接施工性の向上、切断性、曲げ性などの加工性能向上も同時に実現している。例えば曲げ性では、板厚の1.5～2倍の曲げ半径の加工が可能である。今後、クレーンのさらなる高機能化に対応するため、一層の高強度化を目指している。

なお、大型化の傾向はクレーンのみならず、パワーショベル、ブルドーザー、コンクリートポンプ車でも同様である。この中でコンクリートポンプ車については引張強度780, 950 N/mm²の高強度鋼が使われるようになった。

また、これら高強度鋼に対応した溶接材料を開発し、顧客への溶接ソリューションの提供も行っている。引張強度950 N/mm²の高強度鋼の溶接材料として、被覆アーク溶接材料(L-100EL)、サブマージアーク溶接材料(NB-270H × Y-100)、ガスシールドアーク溶接材料(YM-100A)を開発しており、溶接金属についても高強度と低温靱性を確

保している。

さらに、現地溶接では高能率かつ全姿勢溶接が可能な溶接材料が要求される。これら要求に対応するため、高強度鋼用の YP690N/mm²級鋼用全姿勢フラックス入りワイヤ (SF-80A)⁴⁰⁾を開発した。通常、フラックス入りワイヤは溶接金属の拡散性水素が高く、高強度鋼では低温割れを抑制するために実施する予熱が高温化するなど、高強度鋼へのフラックス入りワイヤの適用は困難であった。当社グループ企業の日鐵住金溶接工業では、フラックス入りワイヤの製造工程でワイヤにフラックスを充填した後、ワイヤ外皮を高周波電縫溶接することで隙間を無くし、フラックスを完全に密閉する技術(シームレスフラックス入りワイヤ)を有している。これによりワイヤの高温脱水素処理ができ、溶接金属の低水素化を達成し、高強度鋼であっても予熱作業の負荷を軽減することを可能としている。

5.2 耐摩耗鋼

高強度化と並んで、建設機械用鋼の重要な特性に耐摩耗性がある。油圧ショベル、トラクターショベルのパケット、ダンプトラックの荷台など摩耗部位の耐摩耗性向上は重要な課題である。耐摩耗性は鋼板の表面硬さと強い相関関係があるため、高硬度を主特性とした耐摩耗鋼が使用される。

このような耐摩耗鋼として新日本製鐵では、平均ブリネル硬さで 400 を有する WEL-HARD® 400、500 を有する WEL-HARD® 500 をそれぞれ製造している⁴¹⁾。耐摩耗鋼は高硬度なことから、衝撃特性、耐遅れ割れ特性、溶接性への配慮も重要である。これに対し、WEL-HARD® 400、500 は耐摩耗性に加え、良好な溶接性も有しており、板厚25mm 以下の隅肉溶接においては予熱無しで使用可能である。

さらに岩砂との接触部が摩擦により高温化することにも対応し、高温での硬さを確保するさらに高性能の耐摩耗鋼も開発している。

5.3 その他

薄手高強度鋼板のレーザー切断に対応するため、低 C かつ高 Al 化し、通常の鋼板に比べてブローホールの生成抑制効果を発揮するレーザー切断性鋼板を開発した⁴²⁾。

また、近年の磁気応用技術の発展に対応し、Si、Al 添加量・粒径・製造条件を最適にコントロールすることで電磁厚板、磁気シールド材を開発した⁴³⁾。

6. 新しい動きと将来への展望

6.1 厚手化とさらなる高強度化

造船分野では、CLCのYP355鋼への適用で、大幅なCeqの低減が可能となり、予熱無しで大入熱溶接が可能な高強度鋼の適用が進んだ。このようなTMCPによる造船高強度鋼の開発は、大入熱溶接の確立にも派生し、日本の造船

メーカーと鉄鋼メーカー共同による技術開発のビジネスモデルとなった。その後、アジア諸国などの経済発展と輸送効率の向上のために大型コンテナ船の建造が多く行われるようになった。コンテナ船では荷の積み下ろしのために大きな開口部を有し、強度確保のために YP390 や YP460 鋼の厚手 (70 ~ 100mm 程度) の高強度鋼が用いられるようになった。

今後は、一層の高強度化や厚手化が進むと考えられる。建築分野では、建築物の大型化、高層化にともない高強度化や厚手化が進んできた。SN400、490、BT-HT325、355、385、440、630 さらには高降伏強度の柱部材専用鋼の BT-HT400、500、690 の開発が進み、実用化がなされた。建産機分野では中国における旺盛な需要により、クレーンへの高強度鋼需要が高まっている。特に、中国、韓国ミルの参入により HT780 は汎用化が進み、HT950 以上の鋼材も使われるようになった。

中国、韓国をはじめとする新規参入ミルに対して、新日本製鐵の製造する鋼材にはより技術的に高度なもの(厚手化や高靱性、耐食性、大入熱溶接性、変形特性など)が求められる傾向にある。これらの高い技術をユーザーと共有できる鋼材開発(造船分野などで築いたビジネスモデル)を国内は元より、グローバルにも展開できることが望ましい。しかし、一方では後進ミルとの競合から、高生産性、低コスト化が一層進むと予想され、一貫プロセスメタラジをさらに進化させた合理的な製造法の刷新が必要と思われる。

6.2 大入熱 HAZ 靱性のさらなる向上

大入熱溶接が広く適用されている造船分野では、母材の厚手化、高強度化に伴い、溶接部の靱性確保は次第に難しくなりつつある。今後、さらなる溶接入熱増加や保証温度低温化が要求される中で HAZ 靱性を向上させるには、前述した HAZ 靱性制御技術をさらに飛躍的に発展させることが必要である。そのため当社では、さらに IGF 生成能の高い介在物、ピン止め力の強い介在物の探索を行っている。これを効率的に進めるためには、介在物を制御する技術や溶接制御技術など実用的側面だけでなく、粒内変態機構や γ のピン止め機構など基礎的側面における研究の進展も重要である。

また、HAZ 靱性向上のためには、M-A (高炭素マルテンサイト - オーステナイト混合物)、擬似パーライト、セメントライトといった脆化相に対する配慮も必要である。前述した介在物や析出物もサイズが大きくなれば脆化相として働くことになる。特に極低温環境下では、これまで問題にならなかったサイズの脆化相が破壊を引き起こすこともある。したがって、脆化相を低減する取り組みとともに、靱性に及ぼす各種脆化相の影響を体系化、明確化することも今後の課題である。

参考文献

- 1) 関根寛:第86, 87回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会, 1982, p.123
- 2) Morikawa, H., Hasegawa, T.: Proc. Int. Symp. on 'Accelerated Cooling of Steel'. TMS, 1986など
- 3) 吉江淳彦:鉄の薄板, 厚板が判る本. 日本実業出版社, 2009, p.66
- 4) 尾上泰光, 梅野正紀, 萬谷興亜, 十河泰雄, 酒井和夫, 岩永健, 森川博文:製鉄研究. (309), 18 (1982)
- 5) Beiser, C. A.: Proc. of Ann. Conv. ASM, Chicago, 1959, p.138
- 6) 松田浩男, 為広博, 千々岩力男, 増井浩昭, 十河泰雄:製鉄研究. (309), 35 (1982)
- 7) 寺沢健, 東山博吉, 関野昌蔵:鋼の強靱性. Climax Molybdenum Development Co. Ltd., 1971, p.103
- 8) 石川忠, 間瀬秀里, 長谷川俊英, 野見山裕治, 吉江淳彦:鉄と鋼. 86, 44 (1999)
- 9) 別所清, 藤本光春, 中野直和:溶接学会全国大会講演概要. 第23集, 1878, p.282
- 10) 東田幸四郎, 山崎喜崇, 松本和明, 長嶺多加志, 平部謙二, 有方和義:鉄と鋼. 67(4), S340 (1981)
- 11) 熊谷達也, 星野学, 藤岡政昭, 溝口昌毅, 田中洋一:材料とプロセス. 19, 1187 (2006) など
- 12) Yoshie, A., Fujioka, M., Watanabe, Y., Nishioka, K., Morikawa, H.: ISIJ Int. 32, 395 (1992)
- 13) Watanabe, Y., Shimomura, S., Funato, K., Nishioka, K., Yoshie, A., Fujioka, M.: ISIJ Int. 32, 405 (1992)
- 14) 芹澤良洋, 山本龍司:Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers. 110 (1060), 162 (2007)
- 15) 金沢正午, 中島明, 岡本健太郎, 金谷研:鉄と鋼. 61, 2589 (1975)
- 16) Chijiwa, R., Tamehiro, H., Hirai, M., Matsuda, H., Mimura, H.: 7th Int. Conf. On Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 5, 165 (1988)
- 17) Tomita, Y., Saitoh, N., Tsuzuki, T., Tokunaga, T., Okamoto, K.: ISIJ Int. 34, 829 (1994)
- 18) 児島明彦, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 市川和利:まてりあ. 42, 67 (2003)
- 19) 児島明彦, 清瀬明人, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 中島隆雄, 石田浩司, 安井洋二:新日鉄技報. (380), 2 (2004)
- 20) 皆川昌紀, 石田浩司, 船津裕二, 今井嗣郎:新日鉄技報. (380), 6 (2004)
- 21) 白幡浩幸, 植森龍治, 児島明彦, 田中洋一:CAMP-ISIJ. 22, 1411 (2009)
- 22) 山口欣弥, 北田博重, 矢島浩, 廣田一博, 白木原浩:咸臨. 第3号, 70 (2005)
- 23) 日本造船研究協会:造船研究協会報告書. 第87号, 1978
- 24) Inoue, T., et. al.: Proc. of the 16th ISOPE Conf. 2006, p.132
- 25) Funatsu, Y., Otani, J., Hirota, K., Matsumoto, T., Yajima, H.: Proc. of the 20th ISOPE Conf. 2010, p.102
- 26) Imai, S., Katoh, K., Funatsu, Y., Kaneko, M., Matsubara, T., Hirooka, H., Sato, H.: ISST2007, Development of New Anti-corrosion Steel for COTs of Crude Oil Carrier. Osaka, Japan, Sep. 2007
- 27) Imai, S., Katoh, K., Funatsu, Y., Kaneko, M., Matsubara, T., Hirooka, H., Sato, H.: ISST2007, Onboard Evaluation Results of Newly Developed Anti-corrosion Steel for COTs of VLCC and Proposal for Maximum Utilization Method. Osaka, Japan, Sep. 2007
- 28) 笹木聖人, 須田一師, 元松隆一, 橋場裕治, 大北茂, 今井嗣郎:新日鉄技報. (380), 57 (2004)
- 29) Hashiba, Y., Kasuya, T., Inoue, T., Sasaki, K., Funatsu, Y.: Welding in the World. 54 (1-2), R35-R41 (2010)
- 30) 大山繁男, 槽谷正, 品田功一:新日鉄技報. (385), 16 (2006)
- 31) 稲田達夫, 小川一郎:CAMP-ISIJ. 16, 340 (2003)
- 32) 稲田達夫, 倉持貢, 原田三郎, 志村保美, 吉田譲:鉄構技術 (STRUTEC). 7, 35 (2002)
- 33) 児島明彦, 吉井健一, 秦知彦, 佐伯修, 市川和利, 吉田譲, 志村保美, 東清三郎:新日鉄技報. (380), 33 (2004)
- 34) 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:日本建築学会大会学術講演梗概集. C-1, 2001, p.761
- 35) 櫻井謙次, 中野秀二, 吉川薫:宮地技報. 18, 53 (2003)
- 36) 横山幸夫, 小林光博, 吉田譲, 市川和利, 志村保美, 森田耕次, 稲田達夫:鉄鋼技術 (STRUTEC). 6, 45 (2003)
- 37) Ichikawa, K., Hashiba, Y., Nogami, A., Fukuda, Y.: Ed. Cerjak, H., Bhadeshia, H. K. D. H., Kozeschnik, E.: Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7. Technische Universität Graz, 2005, p.463
- 38) 日本機械工業連合会, 日本建設機械工業会:平成17年度我が国建設機械産業の将来展望調査研究報告書. 2006
- 39) 新日本製鐵株式会社:建設機械用溶接構造用950N/mm²高張力鋼WEL-TEN®950PE, 950RE. 1994
- 40) Shimura, R., Nagasaki, H., Totsuka, Y., Nakamura, S.: IIW Doc.XII-2033-11, 2011
- 41) 新日本製鐵株式会社:新日鐵の耐摩耗鋼WEL-HARD® 400, 500. 1995
- 42) 小野数彦, 安達馨, 堅田寛治, 三代正幸, 児嶋一浩, 大北茂, 都築岳史, 星野学, 竹澤博:溶接学会全国大会講演概要. 第69集, 2001, p.60
- 43) 富田幸男, 熊谷達也, 小川邦夫, 津田幸夫:新機能を有する電磁厚板の開発. 新日鉄技報. (348), 71 (1993)



植森龍治 Ryuji UEMORI
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部長
工博
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



藤岡政昭 Masaaki FUJIOKA
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員



井上健裕 Takehiro INOUE
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員 Ph.D.



皆川昌紀 Masanori MINAGAWA
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員



白幡浩幸 Hiroyuki SHIRAHATA
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主任研究員



野瀬哲郎 Tetsuro NOSE
鉄鋼研究所 接合研究センター所長
工博

執筆協力



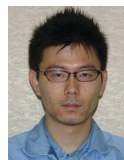
金子道郎 Michio KANEKO
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員 工博



橋場裕治 Yuji HASHIBA
鉄鋼研究所 接合研究センター
主任研究員



市川和利 Kazutoshi ICHIKAWA
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員 Ph.D.



中村修一 Shuichi NAKAMURA
鉄鋼研究所 接合研究センター
研究員



島貫広志 Hiroshi SHIMANUKI
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員 工博



斎藤直樹 Naoki SAITOH
名古屋技術研究部 研究審議役



井上裕滋 Hiroshige INOUE
鉄鋼研究所 接合研究センター
主幹研究員 工博



星野 学 Manabu HOSHINO
大分技術研究部 主幹研究員