

厚鋼板の高張力化とその溶接技術について

JFE スチール株式会社 スチール研究所

早川 直哉

1. はじめに

近年の社会の安全・安心に対する関心の高まりにより、鋼構造物の安全性に対する要求が厳しくなっている。また、構造物の大型化に伴い、鉄鋼材料の高強度化による軽量化とともに、製作の高効率化、工期短縮など、溶接技術に対する要求も厳しく、高強度と高効率の両立を求められる。例えば、造船分野では載荷コンテナ数 10,000TEU (twenty-foot equivalent unit) を超える超大型コンテナ船が登場し、この製造にこれまで以上の極厚高強度鋼材が必要¹⁾となっている。また、エネルギー分野においては輸送の効率化などのため、厚肉高強度化が進んでいる。建築分野においては構造物の高層化、大空間化、耐震性の向上といった観点から、厚肉高強度化に加えて、溶接部の健全性が求められる。本稿では上記構造物に適用される高張力厚鋼板の開発トピックスとそれら鋼板に適用される溶接技術について紹介する。

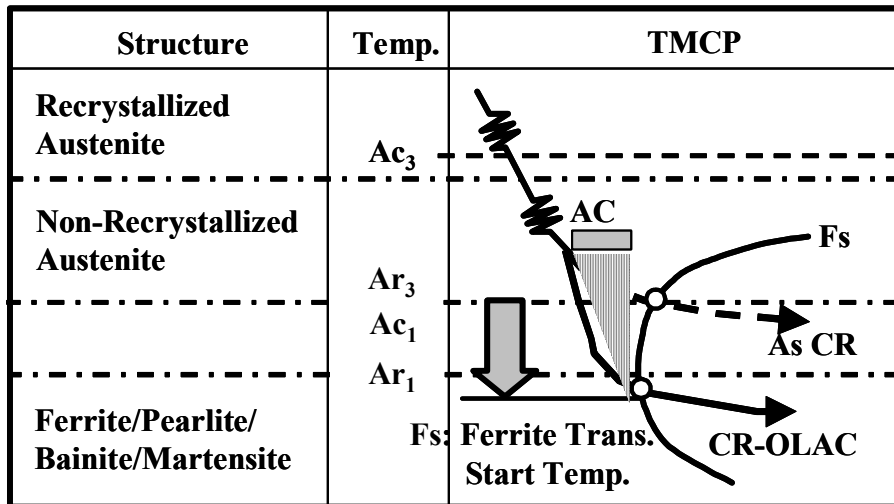
2. 造船分野に適用される高強度鋼材と溶接技術

船舶の安全性確保、脆性破壊防止の観点から、造船用鋼材には優れたじん性が要求される。また、軽量化・高速化、建造能率の向上、長寿命化という多岐にわたる課題の克服が求められる。高強度・高じん性といった要求に答えるべく、厚鋼板の製造技術として TMCP (Thermo Mechanical Control Process : 熱加工制御) 技術が発達してきた。TMCP 技術による鋼材の高強度・高じん性化は、基本的に制御圧延によるオーステナイトの細粒化、加工歪の導入と、その後の制御冷却による変態組織制御と変態生成組織の微細化によってもたらされており²⁾、組織微細化による高強度化は添加する合金元素量の低減をもたすため、溶接熱影響部硬化の抑制による低温割れの抑制や熱影響部じん性の向上など、溶接性も向上するなど、幅広く性能が向上するメリットがある。

図 1 に TMCP 技術の模式図²⁾を示す。TMCP 技術ではオーステナイトの結晶粒を微細化し、あるいは、加工ひずみを蓄積させて、引き続き行われる変態の核生成サイトの密度を増加させることを目的として、低温側に圧延温度をシフトする制御圧延 (CR : controlled rolling) が行われる。制御圧延後、引き続き加速冷却を適用すると、より均一、微細にフェライトが生成する。このような変態組織の均一・微細化を通して、鋼材の高強度化、高じん性化が図られている²⁾。

近年は加速冷却の高冷却速度化³⁾により、高強度と高じん性・高溶接施工性を満たす高性能鋼が開発されており、YP460N/mm² 鋼 (570MPa 級鋼) のような高強度厚鋼板でも TMCP 技術で製造される⁴⁾⁵⁾ようになり、大型コンテナ船へ適用され始めている¹⁾⁶⁾。

コンテナ船はコンテナを積み込むために、上甲板に大きな開口部を有する船体構造を有しており、輸送効率向上のための大型化に伴い、船体上部に位置するハッチサイドコーミングの強度・板厚が増加する¹⁾⁶⁾。この極厚鋼板の溶接には溶接能率が高い立向きのエレクトロガスアーク溶接 (EGW : electrogas arc welding) が適用される。



Temp.: Temperature CR: Controlled rolling

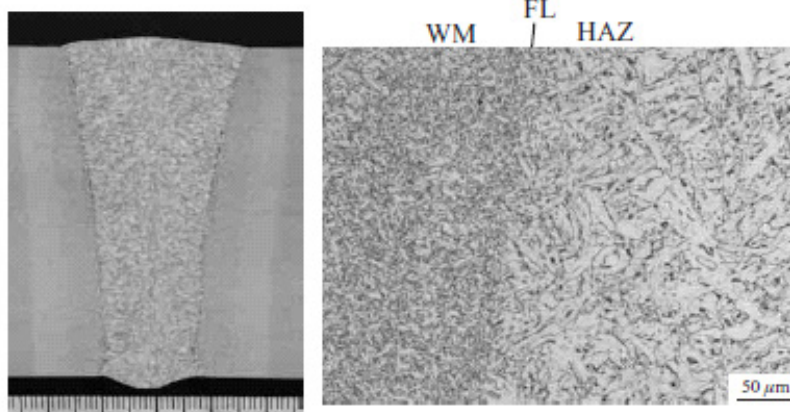
AC: Accelerated Cooling

*鹿内ら: JFE技報No.18(2007.11)

図1 TMCPの熱加工履歴の模式図

EGWには最大600kJ/cmに及ぶ大入熱溶接が適用され、通常板厚65mmまでは1電極溶接が、これを超える板厚では2電極溶接が実施されている⁷⁾。このような大入熱溶接においては、溶接熱影響部(HAZ: heat affected zone)の組織は著しく粗大化し、溶接熱影響部のじん性が劣化するという問題がある。また、母材強度確保のためには炭素当量の増加は不可欠であり、YP460N/mm²鋼では、HAZじん性が劣化する問題が生じる。このような課題に対応するために、高度なマイクロアロイング制御を用いた大入熱溶接熱影響部じん性向上技術⁴⁾⁸⁾が開発され、大入熱溶接継手特性に優れたYP460N/mm²鋼が開発⁴⁾されている。

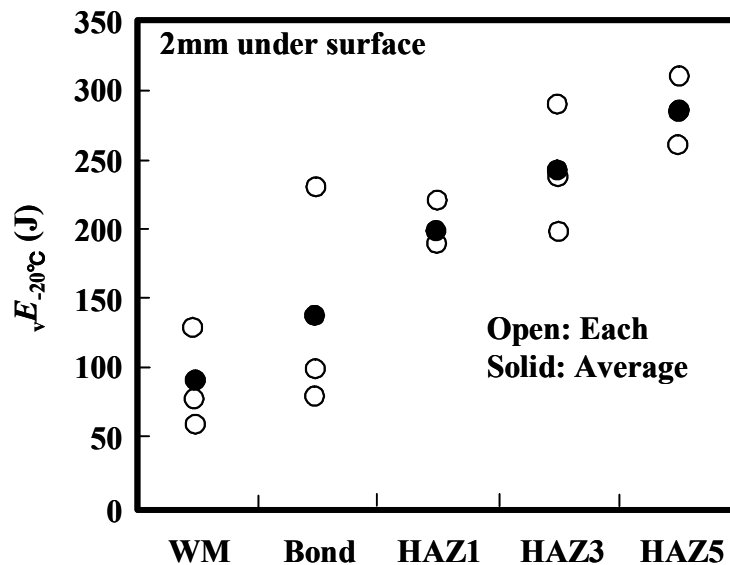
こうした新しい鋼材と大入熱溶接条件に対応する溶接材料も同時に開発⁷⁾されており、大入熱EGWが適用された厚肉YP460N/mm²鋼溶接継手においては良好な機械的性能が得られている。図2はEGWを適用した溶接断面マクロと溶接金属溶融線付近のマイクロ組織の一例であり、図3は溶接部のシャルピー試験の結果、および表1はCTOD試験の結果である。YP460鋼の大入熱溶接部においては-20°Cにおいて良好なシャルピー衝撃吸収エネルギー(図3)⁴⁾、CTOD値(表1)⁴⁾が得られている。



WM: Weld metal, FL: Fusion line, HAZ: Heat Affected Zone

*一宮ら: JFE技報No.18(2007.11)

図2 EGW溶接継手のマクロ組織およびFusion Lineのマイクロ組織



\sqrt{E} : Absorbed energy

WM: Weld metal HAZ: Heat affected zone

*一宮ら: JFE技報No.18(2007.11)

図3 EGW 溶接継手のシャルピー衝撃試験結果

表1 EGW 溶接継手 CTOD 試験結果

Thickness (mm)	Test temperature (°C)	Notch location	δ (mm)	Fracture mode
60	-10	Bond	0.705	u
			0.725	u
			0.403	u

*一宮ら: JFE技報No.18(2007.11)

鋼板同士を突き合わせて溶接する板継溶接には、片面サブマージアーク溶接や、ガスシールドアーク溶接が適用される。ソリッドワイヤを用いた炭酸ガスアーク溶接は溶着効率が高く、スラグの発生が少ないことから、厚鋼板の多層溶接や長尺継手の溶接等、自動溶接を適用した溶接能率向上に有効な手段であるが、スパッタ発生量が多く、ノズルや鋼板表面に付着するスパッタの除去工程が必要なのが課題であった⁶⁾。近年、炭酸ガスアーク溶接において低スパッタ化を実現する溶接法(図4)が開発⁹⁾され、船舶の板継溶接に適用されている¹⁰⁾。この溶接法はワイヤ側を陰極とする正極性とし、微量のREM(Rare Earth Metal)を添加した溶接ワイヤを用いることで利用でき、(1)スパッタが少ない(2)アークが集中し溶け込みが深い(3)スラグの剥離性がよい(4)新規設備投資が不要などのメリットを有する。図5および図6は本溶接法をタンカーのインナーボトム(図7参照)の片面溶接に適用した例である。高電流化、狭開先化、手入れ減少などにより、全体の溶接時間は2/3に低減される¹⁰⁾。図6は実際のインナーボトムの溶接状況であるが、従来法は大きなスパッタが飛散しているのに対し、開発法ではスパッタが細かく、少ない様子が示されている。

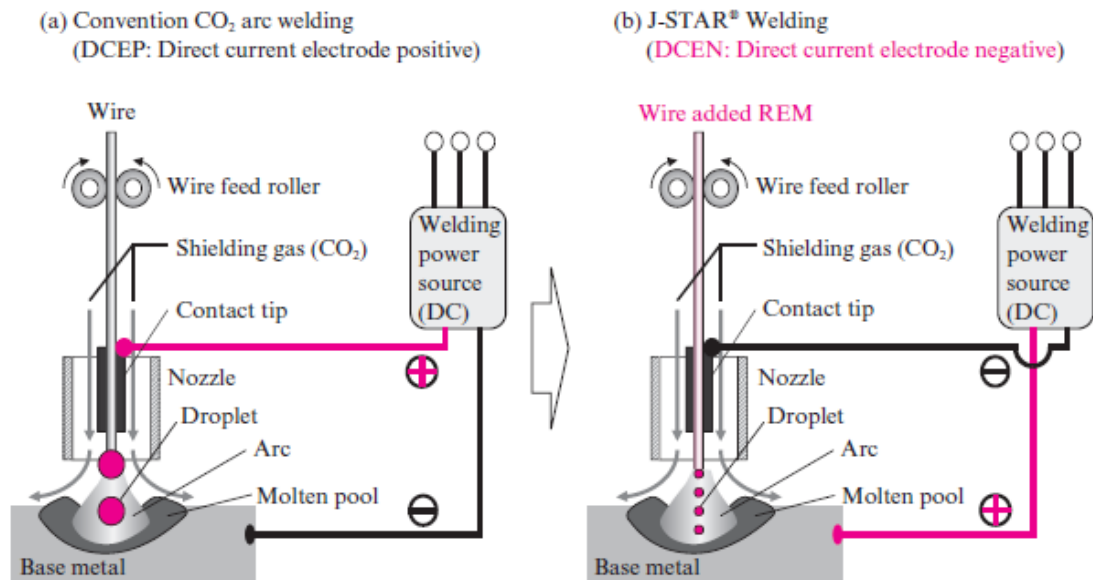
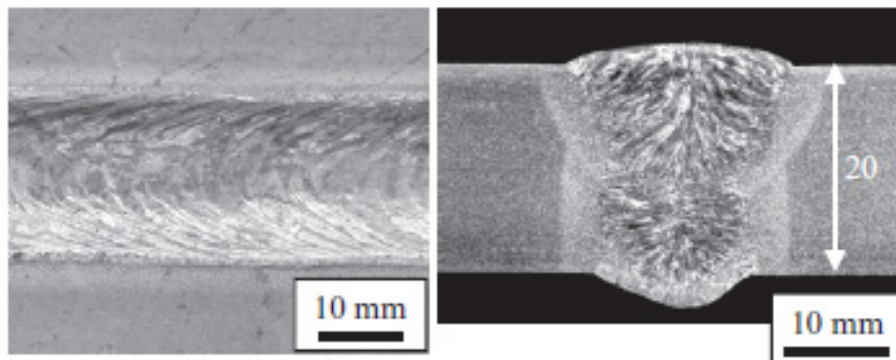


図4 従来の炭酸ガスアーク溶接と新溶接法との比較



One side welding of butt joint, Groove:V40° ,Gap=0mm,KC-550, DCEN (Direct current electrode negative), 2pass,100%CO₂, Welding current: 380A *角ら: JFE技報No.18(2007.11)

図5 新溶接法を用いたインナーボトム溶接部の外観と断面マクロ組織

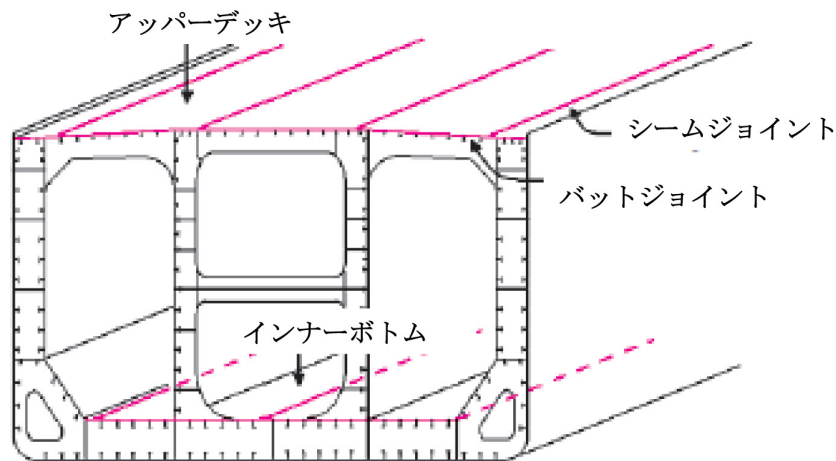


(a) Conventional welding, DCEP(Direct current electrode positive), Welding current:280A

(b) “J-STAR® Welding”; KC-550,DCEN(Direct current electrode negative), Welding current:380A

*角ら: JFE技報No.18(2007.11)

図6 インナーボトムの溶接の状況



*角ら: JFE技報No.18(2007.11)

図7 タンカーの構造 (模式図)

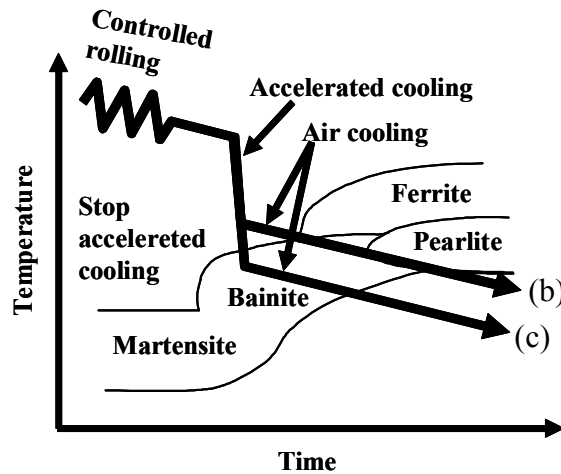
3. 建築分野に適用される高強度鋼材と溶接技術

近年の高層建築物では、商業スペース、オフィス、ホテルなどの重層化などに伴い大スパン化や構造の複雑化が進み、鉄骨柱の厚肉化や大断面化が進んでいる。このような鉄骨柱の大断面化による重量増加を抑制し、鋼材製造、鉄骨加工、運搬、建方など各過程での環境負荷とコストを低減するため、高強度鋼材の必要性が高まっている。一方、建築構造物の鉄骨部材には、大地震による倒壊を防ぐため、塑性変形によってエネルギーを吸収することが求められる。そのため、柱や梁などの建築鉄骨部材に用いられる鋼材には、多くの場合、降伏比 (YR : yield ratio、YR = (降伏強度 (YS)) / (引張強度 (TS))) が 80% 以下の低降伏比 (低 YR) 特性が要求される。さらには、阪神・淡路大震災以降、被災後も建築物を利用できるよう、地震時の変形を弾性範囲内とする設計も増加しており、益々高強度化のニーズが高まっている。しかしながら、一般的に鋼材強度の増加に伴って YR は上昇するため、高強度化と低 YR 化の両立は困難であり、建築用の 590MPa 級鋼である SA440 鋼では複雑な多段熱処理により、低 YR 特性と 590MPa の強度を両立していた。しかし最近、TMCP 技術の進歩により高強度と低 YR を両立し、従来の調質鋼である SA440 鋼と同等の機械的特性を有する非調質 590MPa 鋼が製造されるようになってきている¹¹⁾。図 8 および図 9 は非調質 590MPa 鋼を製造する加速冷却条件の模式図と応力-歪曲線である。低 YR とするためには硬質相と軟質相の 2 相組織にする必要があるが、図中 (b) の加工熱処理を行った場合、ベイナイト + パーライト + MA (Martensite-Austenite constituent) が生成して高強度と低 YR が両立される。表 2 には鋼板の機械的性能を示す。図 8 に示すような高度な TMCP 技術による組織制御は引張強度の向上と降伏強度の低下を可能にした¹¹⁾。

表 2 開発鋼の機械的特性

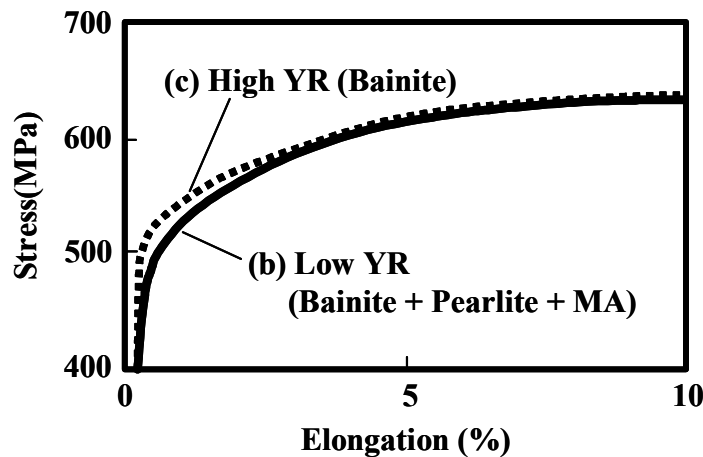
	Thickness (mm)	Specimen	Tensile properties				Impact properties	
			YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	El (%)	vE _{0°C} (J)	vTrs(°C)
Developed steels	19	JIS 1A	490	619	79	18	358	-95
	25		487	613	79	21	371	-65
	40		485	614	79	27	364	-45
	50	JIS 4	484	612	79	31	380	-105
	60		482	631	76	29	347	-50
	80		471	601	78	27	348	-85
	100		471	603	78	28	340	-80
Target of HBL440	19 ≤ t ≤ 32	JIS 1A	440~540	590~740	≤ 80	≥ 15	≥ 70	-
	32 < t ≤ 40					≥ 16		
	40 < t ≤ 100	JIS 4				≥ 20		

YS: Yield strength TS: Tensile strength YR = YS/TS El: Elongation
vE_{0°C}: Absorbed energy vTrs: Brittle to ductile transition temperature



*大森ら: JFE技報No.33(2014.3)

図 8 加速冷却による複相マイクロ組織制御 (模式図)



*大森ら: JFE技報No.33(2014.3)

図 9 応力-ひずみ曲線の例

上述の鋼を用いた 4 面ボックス柱の製造には 500kJ/cm を超える SAW と内ダイアフラムの溶接に最大 1000kJ/cm のエレクトロスラグ溶接 (ESW : electroslag welding) の 2 種の大入熱溶接が適用される (図 10) ため、前記コンテナ船のハッチサイドコーミングと同様に大入熱溶接部のじん性確保が重要な課題となる。特にボックス柱内ダイアフラムの ESW においてはダイアフラム厚さが 60mm の場合、溶接入熱は 1000kJ/cm にもおよび、鋼材への熱影響も極めて苛酷となる。このような大入熱溶接熱影響部のじん性向上技術として、TMCP 技術による鋼板低成分化や、TiN 最適添加などのマイクロアロイング技術に加えて、鋼板成分の低 Si 化や低 P 化が適用されている。これら技術の複合化により、熱影響部に生成するベイナイト中の MA 生成を大幅に抑制し、熱影響部の高じん性が図られている。図 11 に継手の溶接部シャルピー吸収エネルギーの例、表 3 にその溶接条件を示す¹¹⁾。0°C で平均 70J 以上の優れたじん性が得られている。また、表 4 に y 形溶接割れ試験の例を示す¹¹⁾。TMCP 技術による低合金化により、予熱なしでも割れが認められず、良好な耐低温割れ性が示された。

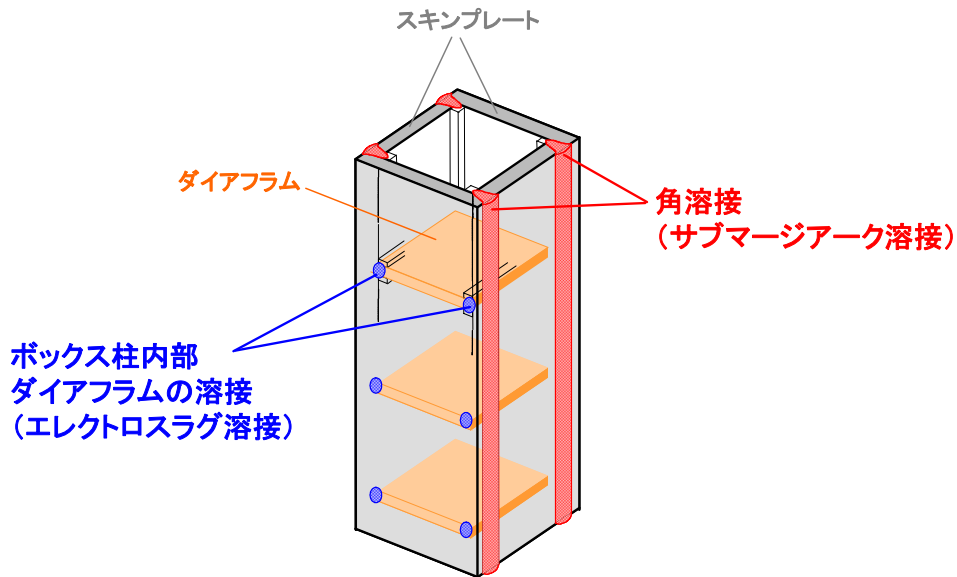
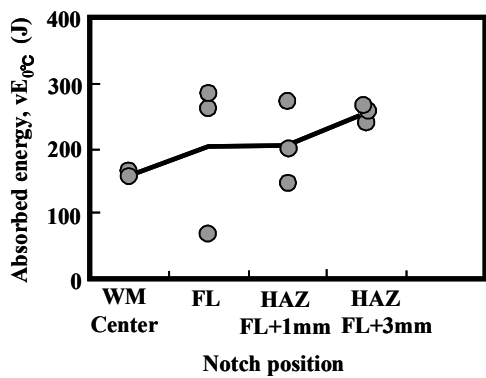
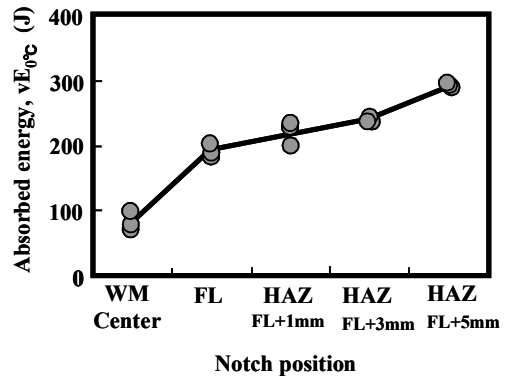


図 10 ボックス柱の模式図



(a) Submerged arc welding (SAW) joint



(b) Electroslag welding (ESW) joint

*大森ら: JFE技報No.33(2014.3)

図 11 溶接継手シャルピー試験結果

表 3 溶接条件

Welding method	Thickness (mm)	Pre-heating	Groove shape	Consumable Welding conditions	Heat input (kJ/cm)
Submerged arc welding	60	no(17°C)		Wire(L):KW-101B Wire(T):KW-101B Flux:KB-551 (L):2300A-38V (T)2800A-52V 19cm/min	572
Electroslag welding	100	no(8°C)		Wire:KW-60AD Flux:KF-100AD 380A-52V 1.2cm/min	960

*大森ら: JFE技報No.33(2014.3)

表 4 y 形溶接割れ試験結果

Thickness (mm)	Welding method	Test condition		Cracking ratio (%)		
		Consumables Welding condition	Pre- heating	Surface	Section	Root
100	GMAW (CO ₂)	MG-60,φ1.2 250A-30V-26cm/min (17kJ/cm) Atmosphere: 5°C,60%RH	no (5°C)	0	0	0
				0	0	0

*大森ら：JFE技報No.33(2014.3)

ボックス柱角継手に適用される SAW は板厚 60mm まで 2 電極での片面 1 ラン溶接が実施されており、SAW として世界最大級の 500kJ/cm を超える溶接入熱が適用されている。溶接材料として、通常 20mass%以上の鉄粉を含むフラックスと太径ワイヤ（6.4mm）との組み合わせにより、板厚 60mm までの 1 ラン溶接を可能にしている。一方、内ダイアフラムの ESW では、1.6mm φ の細径ワイヤを用い、溶着効率に優れる非消耗ノズル式が主流になっている。近年では ESW 金属に対しても 0°C で 70J 以上の高じん性を求められる場合があり、Ti-B 複合添加によるアシキュラーフェライトの微細化と粗大な粒界フェライトの抑制により、上述の要求値を満足する溶接材料が開発¹²⁾されている。最近では溶接金属特性やワイヤ送給性など、総合的な特性に優れるコアードワイヤを適用¹³⁾する動きがあり、2013 年に改定された JIS 規格（Z3353：軟鋼及び高張力鋼用のエレクトロスラグ溶接ワイヤ及びフラックス）においても ESW 用ワイヤとしてフラックスコアードワイヤが追記された。

4. 鋼管分野に適用される高強度鋼材と溶接技術

パイプラインに対しては、高圧化や低温環境下・腐食環境下といった厳しい使用条件に適応する性能の要求に加え、地震地域や海底での長距離ラインパイプの敷設にともなう外力を想定した高変形性能といった新たな要求がでてきている。その結果、パイプラインに求められるパイプ性能は、高強度、厚肉、低温じん性、高変形、耐サワーといった性能が複合仕様として付加される傾向が高まっている¹⁴⁾。高強度化の観点からは API（アメリカ石油協会）X120（約 1000MPa 級鋼）までの開発¹⁵⁾が進められており、実用強度としては API X80（約 630MPa 級鋼）までの普及が進んでいる。管厚 40mm までの厚肉化や、-30～-40°C の低温じん性、高変形、耐サワーの仕様が複合化された高強度ラインパイプが要望され、この難仕様鋼材の製造に、造船、建築分野と同様に TMCP 技術が大いに寄与している。

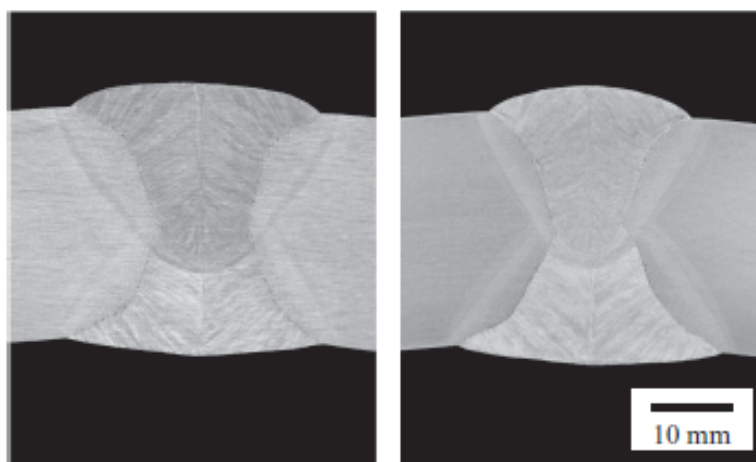
厚肉高強度の UOE 鋼管の製造用シーム溶接技術として、国内では 3～4 電極の SAW が実施されている。内面側を 1 層、外面側を 1 層溶接する両面 1 層溶接であり、高生産性を支えるため、例えば管厚 16mm 程度の UOE 鋼管では、2m/分を超えるような高速溶接が実施される。

このシーム溶接技術については近年、厚肉高強度鋼の HAZ じん性確保の観点から、従来 4.0～4.8mm のワイヤ径を用いていたものを、第 1 電極に 2.4～3.2mm のワイヤ径を適用し、溶け込み深さの増大と溶着速度の増大により、溶接入熱を低減する溶接技術が開発¹⁶⁾され、実用に供されている。表 5 と図 12 は溶接条件と断面マクロの例である。図 13 は溶接熱影響部のシャルピー試験の結果であるが、溶接入熱の低減により、HAZ じん性の向上が図られている。

表 5 4 電極 SAW の溶接条件例

Process	Electrodes	Electrode diameter (mm)	Heat input (kJ/mm)	Travel speed (m/min)
Conventional	1st	4.0	7.2	1.3
	2nd	4.0		
	3rd	4.0		
	4th	4.0		
Developed	1st	2.4	5.5	1.6
	2nd	4.0		
	3rd	4.0		
	4th	4.0		

*上月ら: JFE技報No.34 (2014.8)

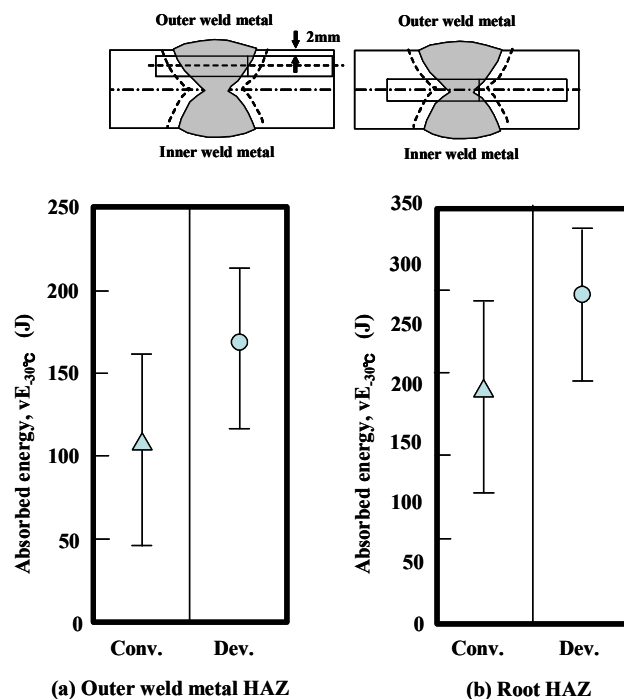


(a) Conventional

(b) Developed

*上月ら: JFE技報No.34 (2014.8)

図 12 従来法および開発法の断面マクロ組織



*上月ら: JFE技報No.34 (2014.8)

図 13 従来法ならびに開発法のシャルピー衝撃試験結果

5. おわりに

最近の高強度厚鋼板の開発状況、特に TMCP 技術を中心とした高溶接施工性の鋼板とその溶接技術に関して紹介した。ここでは紹介できなかった海洋構造物用鋼材や、橋梁用の BHS 鋼材、建産機用鋼材、低温貯槽用鋼材などでも新しい機能をもった鋼材開発が進められている。今後は省エネルギー、省力化、低コストの観点から高張力鋼の適用はさらに拡大していくと考えられ、これらの性能を生かせる、高能率・高性能な溶接技術を合わせて開発していくことが重要である。

参考文献

- 1) 豊田昌信, 木治 昇, 猪瀬幸太郎: コンテナ船の大型化と溶接の取り組み, WE-COM マガジン, 第 13 号 (2014 年 7 月)
- 2) 鹿内伸夫, 三田尾眞司, 遠藤茂: 最近の TMCP による厚板組織制御技術の進展と高性能化, JFE 技報, No. 18 (2007 年 11 月)
- 3) 遠藤 茂, 中田直樹: JFE スチールの TMCP 技術の進歩とそれによる高性能厚板, JFE 技報, No. 33 (2014 年 2 月)
- 4) 一宮克行, 角 博幸, 平井龍至: 「JFE EWEL[®]」技術を適用した大入熱溶接仕様 YP460 級鋼板, JFE 技報, No. 18 (2007 年 11 月)
- 5) 長谷和邦, 半田恒久, 衛藤太紀: 脆性亀裂伝播停止性能に優れたコンテナ船用極厚 YP460N/mm² 鋼板の開発, JFE 技報, No.33 (2014 年 2 月)
- 6) 木治 昇, 荻野剛正: 溶接技術の変遷と最近の動向, 日本船舶海洋工学誌, No. 51 (2013 年 11 月)
- 7) 笹倉秀司, 末永和之: 溶接材料の進歩 —溶接材料の近年の開発動向—, 日本船舶海洋工学誌, No. 51 (2013 年 11 月)
- 8) 木村達己, 角 博幸, 木谷 靖: 溶接部靱性に優れた建築用高張力鋼板と溶接材料, JFE 技報, No. 5 (2004 年 8 月)
- 9) 片岡時彦, 中川郷司, 石井 匠: 「J-STAR[®] Welding」を用いた高能率溶接技術の開発, JFE 技報, No. 18 (2007 年 11 月)
- 10) 角 博幸, 片岡時彦, 木谷 靖: 「J-STAR[®] Welding」の造船, 建築への展開, JFE 技報, No. 34 (2014 年 8 月)
- 11) 大森章夫, 中川 桂, 室田康宏: 建築構造用高性能 590N/mm² 級 TMCP 鋼板「HBL[®]440」, JFE 技報, No. 33 (2014 年 2 月)
- 12) 木村達己, 角 博幸, 木谷 靖: 「溶接部靱性に優れた建築用高張力鋼板と溶接材料」, JFE 技報, No. 5 (2004 年 8 月)
- 13) 早川直哉, 角 博幸, 大井健次: エレクトロスラグ溶接用メタルコアードワイヤの開発, JFE 技報, No. 34 (2014 年 8 月)
- 14) 荒川武和, 西村公宏, 矢埜浩史, 鈴木信久: ラインパイプ用高性能 UOE 鋼管, JFE 技報, No. 29 (2012 年 2 月)
- 15) 石川信行, 鹿内伸夫, 近藤 丈: 超高強度工変形ラインパイプの開発, JFE 技報, No. 17 (2007 年 8 月)
- 16) 上月渉平, 早川直哉, 大井健次: 省入熱サブマージアーク溶接技術: JFE 技報, No. 33 (2014 年 8 月)

<略歴>

早川 直哉 (はやかわ なおや)

- 1991年 東北大学大学院工学研究科 材料加工学専攻 博士前期課程 修了
- 1991年 川崎製鉄株式会社 (現 J F E スチール株式会社) 入社
鉄鋼研究所 鋼材研究部 強度・接合研究室 配属
- 2001年 独立行政法人物質材料研究機構 フロンティア構造材料研究センター
(後に超鉄鋼研究センター)
構造化ステーション 特別研究員 (3年間)
- 2004年 J F E スチール株式会社 スチール研究所 接合・強度研究部
主任研究員 現在に至る