

新開発厚板用溶接材料および溶接技術の開発

Development of Welding Consumables and Welding Process for Newly Developed Steel Plates

橋場 裕治*
Yuji HASHIBA

児嶋 一浩
Kazuhiro KOJIMA

糟谷 正
Tadashi KASUYA

熊谷 達也
Tatsuya KUMAGAI

抄 録

高強度化や、低温での靱性、疲労特性、耐食性等への要求の厳格化、極厚鋼板の利用拡大など、高度化する要求に応えるべく新たな厚板が開発されてきている。新開発厚板を新商品として世に出す際には、その厚板に適した溶接材料、溶接技術をあわせて提案することが必要である。厚板の開発と連携した溶接材料、溶接技術の最近の開発例として、造船高強度鋼、低温用鋼、高張力鋼、耐食鋼、耐火鋼用途のそれぞれの溶接材料と、低温変態溶接材料、さらに極厚鋼板の高効率溶接プロセスなどについて記述した。

Abstract

Innovative steel plates have been developed to answer social needs getting severer, such as tensile strength, toughness in cryogenic use, fatigue property, corrosion resistance, and expanded use of heavy gauge steel plates. It is necessary to propose welding consumables and welding technology suitable for base metal when newly developed steel plates are launched. As examples of the latest welding consumables related for newly developed steel plates; such as steels for high strength shipbuilding, steels for cryogenic atmosphere, high strength steels, corrosion-resistant steels, fire-resistant steels are described. And low temperature transformation welding consumables and high efficiency welding process for extra heavy steel plates are also described.

1. 緒 言

厚板を、船舶、建設機械、橋梁、建築物、貯槽などの構造物にするには溶接が不可欠である。厚板が有する機能を構造物として発揮するためには、溶接継手においてもほぼ同等の機能を有することが求められ、溶接継手の機械的特性が構造物の仕様を決めてしまうこともある。本号に述べられているように、構造物の大型化に伴う高強度化や設計板厚の増大、より低温での靱性確保、より厳しい腐食環境への対応など厚板の機能、品質への要求はますます多様化、厳格化している。特殊な機能を有する厚板であるほど、汎用的な溶接材料では、その特性が十分発揮できないことが多く、その場合には、新たに専用の溶接材料を開発することが必要となる。さらに、高効率の大入熱溶接技術、高強度鋼溶接時の予熱負荷の低減、溶接部の疲労特性向上など、溶接に関する顧客からの要望は多岐にわたっている。

新日鉄住金(株)では、新たに開発した厚板の機能を最大限生かすべく、厚板の研究開発部門と連携して厚板の開発と一体となった溶接材料の開発を行っている。さらに、グ

ループ会社である日鐵住金溶接工業(株)とは、深い協力関係のもと、溶接材料の開発はもとより、溶接技術の開発、最適な溶接方法の顧客への提案など、顧客からの様々なニーズに応えるための溶接・接合ソリューション活動を実施している。最近の溶接材料および溶接技術の開発成果を以下に述べる。

2. 新開発厚板と専用溶接材料の例

最近の新開発厚板のために開発された、日鐵住金溶接工業製の専用溶接材料の例を表1に示す。これらのなかには、専用溶接材料として開発された後に、一般的な溶接材料として使用されるようになったものも含まれる。図中、SMAW, GMAW, FCAW, SAW, EGWは、それぞれ被覆アーク溶接棒、ガスシールドアーク溶接用ソリッドワイヤ、ガスシールドアーク溶接用フラックス入りワイヤ、サブマージアーク溶接材料(ワイヤ×フラックス)、エレクトロガスアーク溶接材料を示す。

* 鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

表1 開発厚板と専用溶接材料の例
Welding consumables used exclusively for newly developed steel plates

Type of steels	Developed steel plates	Developed welding consumables: Product names
High strength steel plates for shipbuilding	EH47	FCAW : NSSW SF-47E, EGW : NSSW EG-47T
Steel plates for LPG gas carrier	B36F, NV4-4	SMAW : NSSW N-12SN, SAW : NSSW NB-55LS × NSSW Y-3NI
Fire-resistant steel plates	NSFR™400, NSFR™490	GMAW : NSSW YM-40FR, NSSW YM-50FR, FCAW : NSSW SF-50FR, NSSW SM-50FR, SAW : NSSW YF-15FR × NSSW Y-DFR etc.
Seawater-resistant steel plates	MARILOY™	
Ni-added weathering steel plates	NAW-TEN™15	SMAW : NSSW CT-50N, NSSW CT-60N, GMAW : NSSW YM-3N, FCAW : NSSW SF-50WN, NSSW SM-60WN, SAW : NSSW NF-320M × NSSW Y-3NI
Sulfuric acid-resisting steel plates	S-TEN™1	SMAW : NSSW ST-16M, FCAW : NSSW SF-1ST, SAW : NSSW Y-1ST × NSSW NB-1ST
Sulfuric acid-resisting steel plates	S-TEN™2	SMAW : NSSW ST-16Cr, FCAW : NSSW FC-23ST
Corrosion resistant steel plates for crude oil tanker bottom plate	NSGP™-1	FCAW : NSSW SF-1 · GP, NSSW SM-1F · GP
High tensile steel plates for building structures	BT-HT440	SAW : NSSW YF-15I × NSSW YM-55HF
HTUFF 50kHT steels for building structures	BT-HT355C-HF	ESW : NSSW YM-55HF × NSSW YF-15I, SAW : NSSW Y-DL · HF × NSSW NSH-53HF
HTUFF 650kHT steels for building structures	BT-HT440C-HF	ESW : NSSW YM-60HF × NSSW YF-15I, SAW : NSSW Y-D · HF × NSSW NSH-60HF, GMAW : NSSW YM-60C · HF
High-yield-point steel plates for bridges	SBHS700 (W)	SMAW : NSSW L-82, GMAW : NSSW YM-82C
950-980 N/mm ² class high tensile steel plates	WEL-TEN™950, WEL-TEN™980	SMAW : NSSW L-100EL, GMAW : NSSW YM-100A, SAW : NSSW NB270H × NSSW Y-100

3. 造船鋼材用溶接材料および溶接技術の開発

EH47 鋼は、脆性破壊発生特性および脆性亀裂伝播停止（アレスト）特性を十分に考慮して設計された超大型コンテナ船用高強度鋼であり、その実用化においては、厚手鋼板どうしの溶接の高エネルギー率が特に重要な課題であった。図1に、コンテナ船の縦強度部材の代表的な工作例を、適用される溶接方法とともに示す。ハッチサイドコーミングあるいはシアストレーキ（船側外板）どうしは、現場での立向姿勢での施工が必要であり、従来からも高エネルギーなエレクトロガスアーク溶接（以下EGW）法による大入熱1パス溶接が採用されている。また、下向溶接、すみ肉溶接などには、炭酸ガスアーク溶接による多層盛溶接が適用されている。

超大型コンテナ船用厚手 EH47 鋼に適用される溶接材料は、母材と同様に脆性破壊発生特性および脆性亀裂伝播停止特性を考慮した規格²⁾を満足することが必要であり、炭酸ガスアーク溶接用溶接材料としては、シームレスフラックス入りワイヤ（NSSW SF-47E）が開発された。EGWについては、より効率的な溶接技術として開発された2電極 VEGA®（Vibratory ElectroGas Arc Welding）法と、それに使用される EH47 鋼専用溶接材料が開発された。これらは、溶接施工承認の取得を経て、2007年、三菱重工業(株)の EH47 鋼採用シリーズ船に適用された³⁾。

2電極 VEGA 溶接法は、溶接トーチを2本配置し、熱エネルギーの平準化と融合不良の抑止のためこれらを往復運

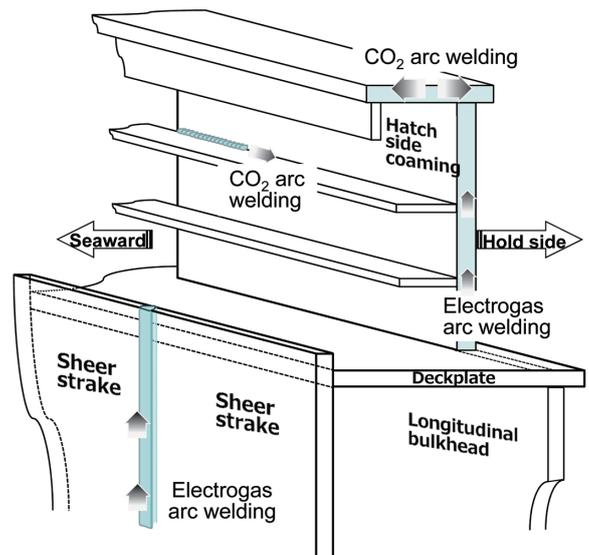


図1 コンテナ船の船倉周囲上部構造と適用溶接法の例
Schematic diagram of upper hull structure around hold of container ship and applicable welding process

動させる機構を備えた立向自動溶接方法である。また、溶接電極を近接させた際の磁場によるアーク干渉を回避するため、互いの電極極性を逆極性とするとともに、適正な極間距離を制御している。図2に示すように、本溶接法は従来型の1電極 VEGA 溶接法の約2倍、炭酸ガスアーク溶接法の約8倍の施工エネルギー向上が見込まれる。

厚手 EH47 鋼（板厚 50～70mm）の適用に際しては、2電極 VEGA 溶接継手部における脆性破壊発生特性（Kc）

を確保する上で、溶接金属と HAZ との強度マッチングが重要であることが新たに知見された⁴⁾。従来は、Kc 値と溶接部のシャルピー吸収エネルギーとの間には一定の相関関係が成立するとされていたが、EH47 鋼の大入熱溶接継手の場合は、図3に示すように、溶接金属と母材の硬さ（強度）の比（ α ）が1.2を超えると、シャルピー吸収エネルギーから予想される破壊靱性に比べ、実際の破壊靱性が大きく低下することが分かった。

この現象は、FEM 解析によって、Bond 部の局所応力が増加することで、継手の Kc 値を低下させているものと推定された。このような知見から、継手の破壊靱性確保のため、EH47 鋼に適用される溶接金属の硬さ（強度）に上限を設けるという従来にはない新たな指針が導出された。EH47 鋼の2電極 VEGA 溶接用の溶接材料として開発された NSSW EG-47T⁵⁾は、この考え方に従って、焼入れ性の最適化とともに微細なアシキュラーフェライトを最大限に活用することで、溶接継手に要求される強度、靱性を十分に満足しつつ、溶接金属の硬さを弱いオーバーマッチングとすることによって溶接継手の Kc 値の確保を達成している。

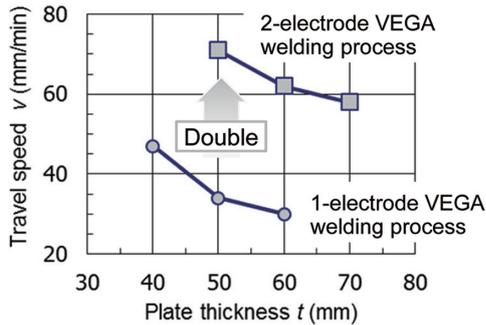


図2 1電極 VEGA 溶接法と2電極 VEGA 溶接法の溶接速度の比較
Comparison of travel speed with single- and two-electrode VEGA welding process

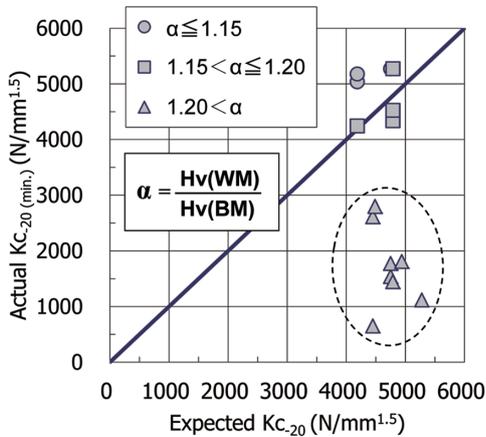


図3 EH47 鋼大入熱溶接部の脆性破壊発生特性 (Kc) と強度マッチングの関係
Dependency of actual brittle fracture toughness (Kc) for EH47 steel welds on the ratio of weld metal to base metal tensile strength α

4. 高能率大入熱溶接技術の開発

鋼構造物は様々な分野において大型化が進み、部材板厚は増大する傾向にある。極厚鋼板の多層盛溶接では、パス数が顕著に増大し、施工時間の問題だけでなく、スラグ巻き込みなどの欠陥を生じる可能性が高くなる。立向の1パス溶接技術である EGW 法は、前項で述べたように、造船分野の厚手材に対して、2電極 VEGA 溶接法が適用されている。2電極法で適用可能な板厚の上限は 80 ~ 90mm 程度であることから、さらに板厚 100 ~ 200mm 程度までの高能率溶接を可能とすべく、4電極 VEGA 溶接技術を開発した。

4電極 VEGA 溶接法は、図4に示すように、表裏面の各2電極がそれぞれ板厚の半分を分担する機器構成である。ルート間隔、ルート面を適正に選択することで、板厚中央部分に溶融溶接金属の導通路を与えて融合不良を防止している。板厚 100mm および 200mm 継手の断面マクロ組織を図5に示す。板厚 200mm の1パス溶接であっても、板

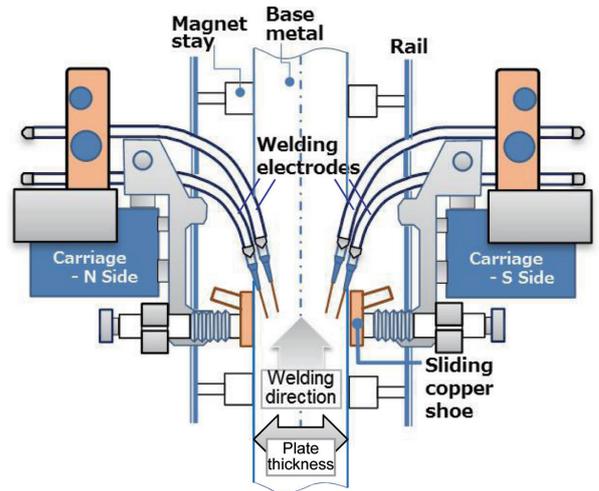


図4 4電極 VEGA 溶接法の模式図
Schematic diagram of four-electrode VEGA welding process

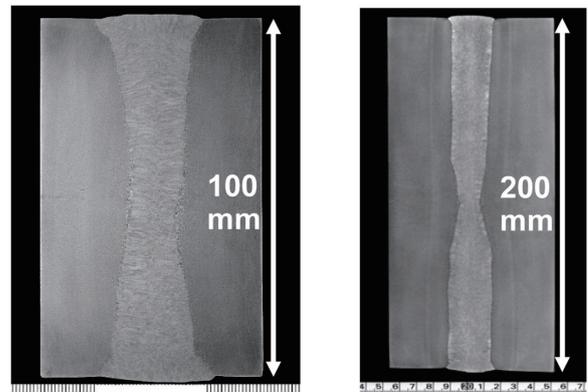


図5 4電極 VEGA 溶接継手の断面マクロ組織
(a) 板厚 100mm, (b) 200mm
Macrostructure of welds 100mm and 200mm thick with four-electrode VEGA welding process

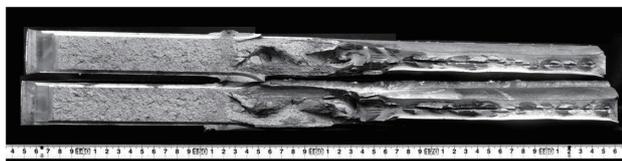
厚の全域にわたり溶接欠陥のない良好な溶込みが得られている。

今後、本溶接技術は、極厚鋼板の接合が必要な鋼構造分野の高効率溶接施工に役立てていけるものと考えている。

5. 低温用鋼材用溶接材料

原油採掘は北海、北極海とより寒冷地へ向けて拡大しており、鋼材への低温靱性への要求厳格化は近年特に進んでいる。低温で鋼構造物を使用する場合、脆性破壊を回避する観点から溶接金属の靱性確保も鋼材並に極めて重要な課題となる。溶接金属の低温靱性確保のために最も重要であるのは、ミクロ組織の微細化である。1980年代に、Ti酸化物などの微小非金属介在物を核とする粒内変態技術⁽⁶⁻⁸⁾が確立され、590N/mm²以下の強度の高靱性溶接金属のミクロ組織は、主に微細アシキュラーフェライトが活用されている。アシキュラーフェライトは大傾角の組織であるため、破壊の伝播において破面単位を細かくする効果を発現し、高靱性な溶接金属が得られる。

粒内変態を応用して、例えば10kJ/mmという大入熱サブマージアーク溶接において、-70℃での2mmVノッチシャルピー吸収エネルギーが100Jを超える高靱性な溶接材料(NSSW Y-3Ni × NSSW NB-55LS)が開発されており⁹⁾、多目的LPG船に使用されている¹⁰⁾。さらに、図6、表2



Test temperature; -50°C, Heat input; 2.4 kJ/mm
σ = 329 MPa; σ_y (SLA365) × 0.9

図6 混成エッソ試験体破面¹¹⁾
Fracture surface after duplex ESSO test¹¹⁾

表2 混成エッソ試験結果¹¹⁾
Summary of duplex ESSO test¹¹⁾

Applied stress (MPa)	Arrested crack length (mm)	K _{ca} (MPa m ^{1/2})	Result
329	248	327	Arrest (no go)

表3 TS 950N/mm² 鋼用溶接材料の溶接金属特性の例
Properties of welding consumables for TS 950N/mm² steel plates

Welding process	Welding consumables product names	Wire dia. (mm)	Preheat temp. (°C)	Heat input (kJ/mm)	Tensile properties (N/mm ²)		CVN properties (J)	y-groove weld cracking test	
					0.2%PS	TS	vE-40°C	Heat input (kJ/mm)	Critical preheat temperature (°C)
SMAW	NSSW L-100EL	4.0	100	1.7	919	980	62	1.7	100
SAW	NSSW NB270H × NSSW Y-100	-	100	3.4	892	997	93	3.5	100
GMAW	NSSW Y-100A	1.2	120	1.8	889	1019	52	1.7	75

に示すように、LPGタンクに使用する溶接材料において、-50℃でアレスト性を有する被覆アーク溶接棒も開発されている¹¹⁾。

6. 高張力鋼用溶接材料

建設産業機械分野では、最近ますます高強度化が進んでおり、引張強度(TS)590N/mm²鋼から780N/mm²鋼(WEL-TEN[®]780)へ、さらには950N/mm²鋼(WEL-TEN950)あるいは980N/mm²鋼(WEL-TEN980)へのシフトが進んでいる。

780N/mm²以上の強度を有する溶接金属は、590N/mm²までの強度の溶接金属のようにアシキュラーフェライト主体組織では強度確保ができないため、細粒ベイナイト主体組織となり、高強度と高靱性両立のためには、溶接金属ミクロ組織の微細化に加え、溶接金属中の酸素量の低減技術も重要となる。

これらの高張力鋼に対応する溶接材料は、特に950N/mm²鋼および980N/mm²鋼用として、被覆アーク溶接材料(NSSW L-100EL)、サブマージアーク溶接材料(NSSW NB270H × NSSW Y-100)、ガスシールドアーク用ソリッド溶接材料(NSSW YM-100A)を開発している。表3に、溶接金属の強度、靱性の一例を示す。いずれも、必要強度を満たすとともに優れた低温靱性を有している¹²⁾。

また、780N/mm²鋼のガスシールドアーク用溶接材料として、フラックス入りワイヤ(FCW)であるNSSW SF-80Aを開発¹³⁾している。この溶接材料は、フラックス入りワイヤの一般的な特徴である、全姿勢溶接性や作業効率に優れることに加え、日鐵住金溶接工業のシームレスタイプのフラックス入りワイヤ技術のメリットを生かした製品である。

一般的なフラックス入りワイヤは、外皮金属の内部に所定のフラックスを充填したワイヤで、外皮部に合わせ目(隙間)が有るが、シームレスフラックス入りワイヤは、この合わせ目を製造過程で電縫溶接することによって、高温脱水素処理や、銅めっきなどの湿式表面処理が可能となり、耐吸湿性、耐錆性に優れる、極低水素の溶接金属が得られる、ワイヤのターゲット性が良好であるなどの優れた特徴がある。日鐵住金溶接工業は国内唯一のシームレスフラックス入りワイヤ製造メーカーであり、NSSW SF-80Aは、高

表4 耐火鋼用溶接材料の溶接金属特性の例
Properties of welding consumables for fire-resistant steel plates

Welding consumables	Wire type	Shielding gas	Plate thickness (mm)	Wire dia. (mm)	Heat input (kJ/mm)	Tensile properties				CVN properties vE0°C (J)
						Room temperature		600°C		
						YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	
						NSSW YM-50FR	Solid	100% CO ₂	40	1.4
NSSW SF-50FR	FCW	100% CO ₂	20	1.4	1.8	564	621	297	337	59
NSSW SM-50FR	FCW	100% CO ₂	20	1.6	2.2	604	666	337	366	86

温脱水素処理によって溶接金属の低水素化を達成し、予熱温度の軽減を可能としたものである。

7. 建築鋼材用溶接材料

建築構造用耐火鋼材 (NSFR® シリーズ) は、600℃の高温においても常温規格耐力 (F 値) の2/3以上の耐力を保証する鋼材である。高温における耐力を規定することにより、例えば自走式駐車場など、建造物に想定される火災の条件や、設計条件によっては、無耐火被覆の鉄骨構造を実現することができる。耐火鋼用途では、SMAW, GMAW, FCAW, SAW, ESW (エレクトロスラグ溶接) の各種溶接法に対応した溶接材料が製品化されている。表4に、GMAW および FCAW の場合の、490N/mm² 耐火鋼 (NSFR490) 用溶接金属における機械的特性の例を示す¹⁴⁾。いずれの溶接金属とも、600℃における耐力は、鋼材 F 値の2/3に比べて十分高い値であり、0℃における2mmVノッチシャルピー衝撃特性も良好な値である。

8. 耐食鋼用溶接材料

8.1 S-TEN[®]1 用溶接材料

S-TEN1 鋼は、耐硫酸腐食性と耐塩酸腐食性を大幅に向上させた低合金耐食鋼材である。S-TEN1 の特徴を最大限に活用するためには、溶接継手部の耐食性を母材と同等以上とするために、専用溶接材料の使用が望ましい。表5に S-TEN1 専用のフラックス入りワイヤ NSSW SF-1ST を使用した溶接金属の成分分析値¹⁵⁾を示す。NSSW SF-1ST は Cr や Ni のような合金元素を多量に含有していないので、低温割れや高温割れが起こりにくい溶接施工性に優れた溶接材料である。

S-TEN1 鋼と NSSW SF-1ST の溶接継手、および比較材として SS400 鋼と通常のフラックス入り溶接材料である、NSSW SF-1 から試験片を採取し、濃度 10.5% で温度 80℃ の塩酸、および濃度 20%、温度 40℃ の硫酸に 24 時間、浸漬した後の断面を図7と図8に示す¹⁵⁾。この結果から、NSSW SF-1ST は、塩酸環境と硫酸環境の何れにおいても母材と同等以上の優れた耐食性を有することがわかる。S-TEN1 の専用溶接材料は NSSW SF-1ST に加えて、被覆アーク溶接棒 NSSW ST-16M, TIG 溶接用ワイヤ NSSW YT-1ST, サブマージアーク溶接用ワイヤおよびフラックス

表5 NSSW SF-1ST 溶接金属の成分¹⁵⁾
Chemical compositions of weld metal with NSSW SF-1ST¹⁵⁾

Welding consumables	Product name	Chemical compositions (mass%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Sb
FCAW	NSSW SF-1ST	0.05	0.60	1.41	0.012	0.013	0.39	0.10

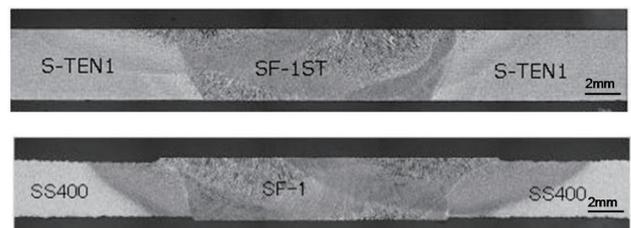


図7 10.5%-80℃の塩酸に24時間浸漬した試験片断面
Cross section of welded joints after 24 hour immersion in HCl 10.5% 80°C

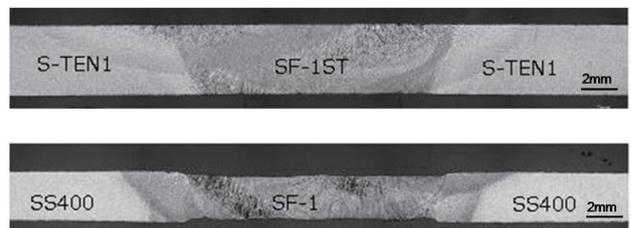


図8 20%-40℃の硫酸に24時間浸漬した試験片断面
Cross section of welded joints after 24 hour immersion in H₂SO₄ 20% 40°C

NSSW Y-1ST × NSSW NB-1ST の各種溶接材料が用意されており、塩化物イオンを含む酸素囲気に曝される環境において、その適用範囲はさらに拡大していくと期待される。

8.2 NSGP[®]-1 用溶接材料

原油タンカー底板用高耐食性鋼板 NSGP-1 は、溶接性、加工性を維持しつつ、塗装することなく鋼材そのもので従来鋼の5倍以上の耐食性を実現した鋼材である¹⁶⁾。日鐵住金溶接工業製のフラックス入り溶接材料 NSSW SF-1・GP および NSSW SM-1F・GP は、シームレスタイプのフラックス入りワイヤの特徴を生かし、優れた溶接作業性、低ヒュームや低スパッタ、溶接金属中水素量の低減といった特性とともに、溶接金属においても、母材と同程度の耐食性を有する、NSGP-1 専用の溶接材料である。

9. 溶接材料を用いたソリューション技術、技術基盤解析

9.1 低温変態溶接材料

新日鐵住金では、疲労亀裂進展を抑制する FCA (Fatigue Crack Arrester) 鋼、溶接後の部材に超音波処理を行って圧縮残留応力を付与する UIT (Ultrasonic Impact Treatment) 技術、変態挙動を活用し圧縮残留応力を付与する LTT (Low Transformation Temperature) 溶接材料を開発し、それぞれ単独および組合せによって疲労寿命を向上させるソリューション技術を提案している。LTT 溶接材料は、一般的な溶接材料では、変態が高温で発生・終了するので、変態後の熱収縮で溶接金属部および溶接止端部に引張残留応力が生じるために疲労亀裂が発生しやすくなるのに対し、合金調整により溶接金属の変態開始温度を低くし、変態膨張時に発生した圧縮応力を室温まで冷却した状態でも残して、圧縮残留応力を生じさせて疲労特性を向上させる溶接材料である¹⁷⁾。

LTT 溶接材料による疲労特性向上効果の一例を示す¹⁸⁾。図9は角回し溶接継手の試験片である。角回し溶接は応力集中が厳しく、溶接構造全体の疲労強度を決定している場合もある。この試験片に本ビード溶接後、LTT 溶接材料で付加ビード溶接を行うことによる疲労強度への影響を評価した。LTT 溶接材料として、10%Ni 添加被覆アーク溶接材料 NSSW N-19 (変態開始温度 350℃) を用いた。

図10は、疲労試験の結果である。荷重を500万回負荷しても疲労亀裂が発生しない場合を疲労限とした。図10より、LTT 溶接材料によって疲労限を大幅に向上できており、特に低応力側では JSSC 等級で、2等級以上向上していることがわかる。このように、疲労亀裂の起点になりやすい溶接止端部への適用が効果的であり、例えば多層盛溶接の最上層止端部に付加ビードとして適用する方法などが簡便で、かつ経済的である。また、UIT 技術との最適な組合せにより大きな効果が期待できる¹⁹⁾。

溶接材料としては、被覆アーク溶接材料 (NSSW N-19) と、ガスシールドアーク溶接用フラックス入りワイヤ (NSSW SM-10N) があり、いずれも主要合金成分は 10%Ni のみであり、従来の同様の溶接材料に比べて、高い靱性と優れた溶接性を有しており、橋梁分野などへの適用が検討されている²⁰⁾。

9.2 低温割れ防止予熱温度の推定指標と、Cu 析出強化型 780N/mm² 高張力鋼の低温割れ感受性

厚板の溶接性という用語は、広義には、機械的特性を含む溶接部の特性すべてを含むものであるが、狭義には、溶接熱影響部 (HAZ) の硬さや、低温割れ感受性を意味する。溶接性を評価する指標として、 P_{CM} や CEN などの炭素当量が一般に用いられる。高張力鋼は、強度が高くなるにつれ

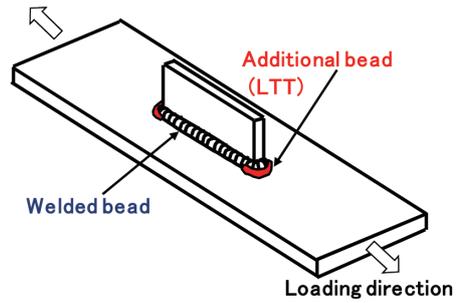


図9 継手疲労試験片
Fatigue test specimen of welded joint

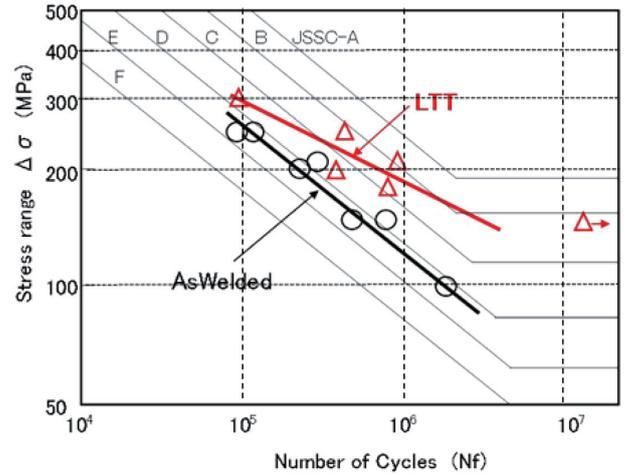


図10 疲労試験結果
Results of fatigue tests

て合金元素含有量が多くなるために、 P_{CM} や CEN 値が高くなり、低温割れの発生を防止するために、より高い温度での予熱が必要となる。特に CEN は、種々の鋼材を用いた JIS Z 3158 の y 形溶接割れ試験のデータにより、低温割れ防止予熱温度の予測手法を確立している²¹⁾。

新日鐵住金では、TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 技術を駆使することにより、合金元素を抑制して、高強度でありながら溶接性に優れる鋼材を開発してきた。そのなかで Cu 析出強化型 780N/mm² 高張力鋼 (以下 Cu 析出鋼) は、引張強度 780N/mm² 鋼でありながら、低温割れ感受性が非常に低い鋼材であり、その優れた溶接性は、 P_{CM} などの従来の炭素当量では説明できない²²⁾。

これについては、最近の研究により、理由が明らかとなった。Cu 析出鋼は Cu を 1% 含有していて、Cu 析出による析出強化を母材の強化に利用し、C を低く抑えた鋼材である。表6に、3種類の 780N/mm² 鋼、すなわち Cu 析出鋼と、比較鋼材として、Cr や Mo 炭化物の析出強化を利用した A 鋼、マルテンサイトの転位強化を主に活用した B 鋼の化学成分を示す。表中の p 値は、下記 (1) 式の McNabb & Foster 方程式²³⁾における 273K でのトラップサイトからの水素散逸速度を表す値である。この p 値は、各鋼材の、溶融線近傍の再現熱サイクル試験片および母材を用いて、昇

表6 鋼材成分と溶融線近傍および母材の p 値
Chemical compositions of materials used and p factor of fusion line and base metal

Material	Chemical compositions (mass%)									$p \times 10^{-5}$	
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	P _{CM}	Fusion line	Base metal
Cu precipitation steel	0.06	0.25	1.33	1.17	1.47	0.60	0.43	0.036	0.28	4.45	1.96
Steel A	0.11	0.24	0.85	0.17	—	0.78	0.42	0.031	0.24	2.55	2.42
Steel B	0.18	0.25	1.52	—	—	0.45	—	—	0.29	2.24	12.2

温離脱法による水素拡散の測定を行った結果から計算したものである。Cu析出鋼の p 値は、他の2鋼種に比べて溶融線近傍では高く、母材では低くなっている。 p 値は水素がトラップサイトから逃げるスピードであるので、この値が大きいほどトラップ効果が小さい、すなわち拡散が速いことを意味している。

すなわち、Cu析出鋼の母材においては析出Cuによる水素トラップ効果のために水素拡散が遅れることを示しており、一方、低温割れが最も生じやすい溶融線近傍のHAZにおいては析出Cuが再固溶してトラップ効果が失われるために、水素拡散が速くなることを示している。したがって、Cu析出鋼は、他の引張強度780N/mm²鋼に比べて溶融線近傍では水素拡散が速く、母材側に拡散した水素は析出Cuによりトラップされるために、溶融線近傍HAZの水素濃度が低くなる傾向があり、低温割れの観点から有利であると考えられる²⁴⁾。Cu析出強化型780N/mm²高張力鋼の技術は、新日鐵住金の橋梁用高性能鋼JIS G 3140 (SBHS 700) や建築用BT-HT630鋼などに適用されている。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + N \frac{\partial \theta}{\partial t} = DV^2c, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = kc - p\theta \quad (1)$$

ここに、 c :トラップされていない水素の濃度、 D :トラップサイトがないときの拡散係数、 N :単位体積当たりのトラップサイト濃度、 k :トラップサイトに捕獲される速度、 p :トラップサイトから解放される速度、 θ :水素原子を捕獲しているトラップサイトの割合、 t :経過時間。

10. 結 言

厚板製品への要求性能は今後ともますます厳格化していくものと考えられ、厚板の機能を最大限生かせる最適な溶接材料、溶接プロセスを、引続き提案できるよう厚板開発と連携して開発を推進していく。さらに溶接負荷を軽減する溶接材料の開発や、溶接能率の向上など、厚板製品を顧客が安心して使用できるように、溶接材料、溶接技術のトータルソリューションの提案をタイムリーに行えるよう今後も一層の努力をする所存である。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 日本海事協会: 大型コンテナ船へのYP47鋼使用に関するガイドライン. 2008

- 3) 廣田一博, 中川隆, 武田信玄, 橋吉美, 多田益男: 三菱重工技報. 44 (3), 28 (2007)
- 4) Ishikawa, T., Inoue, T., Shimanuki, H., Imai, S., Otani, J., Hirota, K., Tada, M., Yamaguchi, Y., Matsumoto, T., Yajima, H.: Proc. of the 17th ISOPE Conf. 2007
- 5) Hashiba, Y., Kasuya, T., Inoue, T., Sasaki, K., Funatsu, Y.: Welding in the World. 54 (1-2), R35 (2010)
- 6) Ohkita, S., Homma, H., Tsushima, S., Mori, N.: Australian Welding J. 29 (3), 29 (1984)
- 7) Grong, O., Matlock, D.K.: International Metals Reviews. 31 (1), 27 (1986)
- 8) Ricks, R.A., Howell, P.R., Barritte, G.S.: Journal of Materials Science. 17, 732 (1982)
- 9) Kojima, K., Ohkita, S., Aihara, S., Imai, S., Motomatsu, R., Umeki, M., Miura, T.: Proceedings of the 18th International Conference on OMAE MAT-2102. 1-8, 1999
- 10) 永原政明, 深水秀範: 新日鉄技報. (380), 9-11 (2004)
- 11) 児嶋一浩, 萱森陽一, 渡部義之, 田中將樹, 奥島基裕, 齋藤佑介: 溶接学会全国大会講演概要 第91集. 2012, p. 125
- 12) 山口将美, 元松隆一, 鈴木友幸, 小山邦夫, 大北茂: 溶接学会全国大会講演概要 第59集. 1996, p. 10
- 13) Shimura, R., Nagasaki, H., Totsuka, Y., Nakamura, S.: IIW Doc. XII-2033-11, 2011
- 14) 新日鉄技報. (385), 97-99 (2006) より抜粋
- 15) 児嶋一浩, 宇佐見明: 配管技術. 3, 41 (2004)
- 16) 伊藤実, 鹿島和幸, 本田貴之, 原宗理, 稲見彰則, 西村誠二: 新日鉄住金技報. (400), (2014)
- 17) Kasuya, T., Sasaki, K.: 溶接学会論文集. 27 (2), 158-162 (2010)
- 18) 新日鉄技報. (385), 92 (2006)
- 19) 鳥貫広志, 田中睦人: 新日鉄住金技報. (400), (2014)
- 20) 館石和雄, 糟谷正, 一宮充, 米山徹, 細見直史, 安藤隆一, 戸塚康仁, 富永知徳: 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集. 2014, p. 919
- 21) 糟谷正, 百合岡信孝, 奥村誠: 新日鉄技報. (355), 6-12 (1995)
- 22) 岡村義弘, 糟谷正, 山場良太, 田中睦人, 為広博: 鋼構造論文集. 1 (1), 53 (1994)
- 23) McNabb, A., Foster, P.K.: Trans. Metall. Soc. A.I.M.E. 227, 618 (1962)
- 24) 糟谷正, 渡邊耕太郎, 熊谷達也: 溶接学会全国大会講演概要 第94集. 2014



橋場裕治 Yuji HASHIBA
鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



糟谷 正 Tadashi KASUYA
鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員
博士(工学)



児嶋一浩 Kazuhiro KOJIMA
鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員



熊谷達也 Tatsuya KUMAGAI
鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員
(現所属：日鉄住金テクノロジー(株))