

(技術資料)

# 低温仕様高張力鋼用溶接材料における高じん性化

## Improved Toughness in Welding Consumables for Low-Temperature Service High-Strength Steels



末永和之\*  
Kazuyuki Suenaga



松下行伸\*  
Yukinobu Matsushita



岡崎喜臣\*\*  
Yoshitomi Okazaki



原 則行\*\*\*  
Noriyuki Hara

The use of high-strength steels has increased in recent years as more large structures are built. High-strength steels reduce the overall component weight of each structural element while allowing for high stress conditions. Moreover, the demand for tougher steel structures has also increased recently which has further increased the need for high-strength steels. Extreme low-temperature operating conditions are one of the most important application areas for such steels. This paper introduces methods that can be used to improve steel strength for low temperature conditions and the welding consumables required for such conditions.

まえがき = 構造物の大形化に伴い、板厚の減少、重量の軽減、より高い許容応力をとり得るなど数々の利点から高張力鋼が利用され、その適用分野も拡大している。さらに、高強度化要求に加え、鋼構造物に対する高じん性化の要求も高まっている。特に、低温仕様の高張力鋼の場合、所定の強度レベルを確保することに加え、ぜい性破壊を防止するためのじん性も重要な性能の一つである。本稿では、低温仕様高張力鋼用溶接材料におけるじん性向上手段と最近の溶接材料について紹介する。

### 1. 鋼構造物の強度と設計温度

高張力鋼を用いた各種鋼構造物の強度及び設計温度を図1に示す。強度は0.2%耐力(以下、YSと表す)320 ~ 830MPa,あるいは引張強さ460 ~ 950MPa(以下、HT460 ~ 950MPaと表す)であり、設計温度は0 ~ -100 程

度と用途によって分類される。

過去に溶接構造物がぜい性破壊によって大事故となった事例もあり<sup>1)</sup>、近年、設計段階で弾塑性破壊力学が導入され、安全性の高い設計がなされるようになった。それにともない、溶接部にもより高いじん性が要求されている。以下に、低温仕様高強度鋼を使用する主要な構造物における要求性能例を示す。

LPG 船用途においては、YS375MPa 級以下の強度クラスが主流であり、じん性要求値は -55 前後で27J程度となっている。

液化ガス貯蔵タンクでは、英国 BS7777 規格に代表されるように、設計温度よりも厳しいシャルビ吸収エネルギーを要求される場合もある。例えば、単一容器構造でブタンを貯蔵する場合には -10 の設計温度に対して、シャルビ吸収エネルギーの要求値は -50 で50J以上と規格

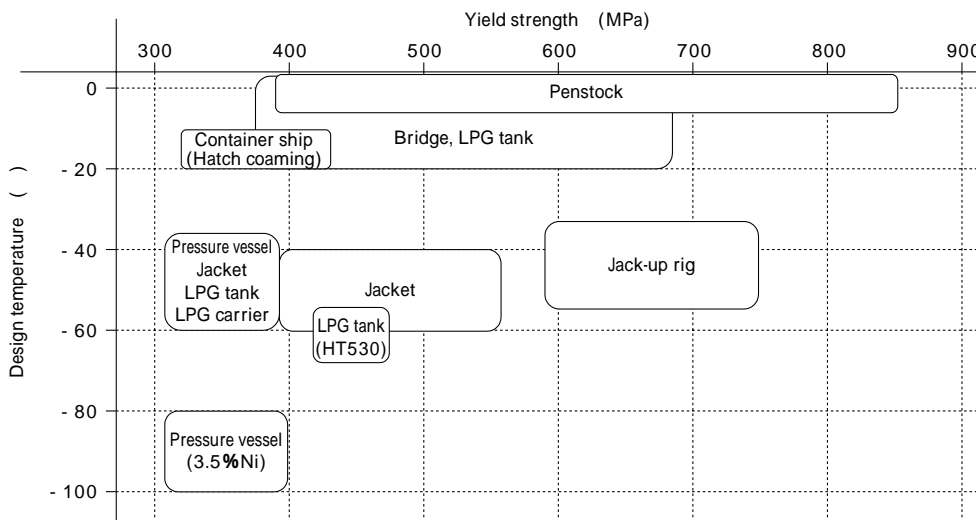


図1 高張力鋼を用いた各種構造物の強度レベルと設計温度  
Fig. 1 Strength level and design temperature for steel structures with high strength steels

\*溶接カンパニー 技術開発部 \*\*技術開発本部 材料研究所 \*\*\*神鋼溶接サービス㈱

化<sup>2)</sup>されている。

ジャケットとは、パイプを多用したレグを特徴とする固定式プラットフォームであり、パイプ同士の接合部（格点部）が数多く存在する。格点部はその形状から溶接施工が難しく、しかも応力集中部となることから、継手部には厳しい性能が要求される。鋼材は従来、主にYS460MPa級以下のものが使用されてきたが、最近では設置工数を削減するため上部構造の軽量化が図られるようになり、上部構造へYS500MPa級鋼も適用されつつある。じん性面ではシャルピ吸収エネルギーに加え、CTOD（き裂先端開口変位；Crack-Tip Opening Displacement）性能も要求されるようになってきている。稼働海域の海象条件にもよるが、例えば0あるいは-10においてCTOD値（ ）0.25mmなどが要求される場合も多い。

ジャッキアップ・リグは、レグに取付けられたラックとプラットフォームに取付けられたピニオンとでプラットフォーム全体を支えるため、YS690MPa級の高強度鋼が使用されている。じん性値としては、最近では-40前後でシャルピ吸収エネルギー69J程度以上が要求されるようになってきている。

## 2. 溶接金属の高じん性化

### 2.1 ミクロ組織制御による強度レベルに応じた高じん性化手段

前章で述べた要求に応えるために、低温仕様高張力鋼用の溶接材料が開発されてきた。溶接金属のじん性向上には、マトリックスの強化、ミクロ組織の微細化、さらにミクロ組織のアシキュラフェライト化が有効であり、これらは強度に関係なく共通の高じん性化手段である。一方、溶接金属ミクロ組織は、YS500MPa以下の溶接金属は主にフェライト+パーライト組織を、またYS600MPa以上ではベイナイトおよび/あるいはマルテンサイトを主体とした組織を呈している。このため、じん性の確保も視野に入れた低温仕様溶接材料においては、YS500～600MPa程度の強度を境として溶接金属の基本的な成分設計は大きく異なっている。強度別のじん性向上手段を表1に示す。現在は、YS500MPa以下の強度クラスでは主にTi-B複合添加によって、またYS600MPa以上では、主にNi添加量の増大によって組織の微細化を図っている。さらに、共通の手段として溶接金属の低酸素化が挙げられる。

YS500MPa級以下の低温用鋼用溶接材料で主に用いられているTi-B複合添加によるじん性向上手段は、前述のCTODをはじめとした高じん性要求に応えるために開発、実用化され、現在この強度クラスの溶接材料に広く

表1 強度別じん性向上手段

Table 1 Methods to improve toughness of weld metals by their strengths

Items	Strength level	
	for YS500 or lower	for YS600 or higher
Strengthening matrix	Addition of Ni	Increasing Ni content
Refining microstructure	Addition of Mo Reducing O content	Reducing O content
Making acicular ferritic microstructure	Combined addition of Ti and B	Addition of nucleation site (ex. Ti oxide, etc.)

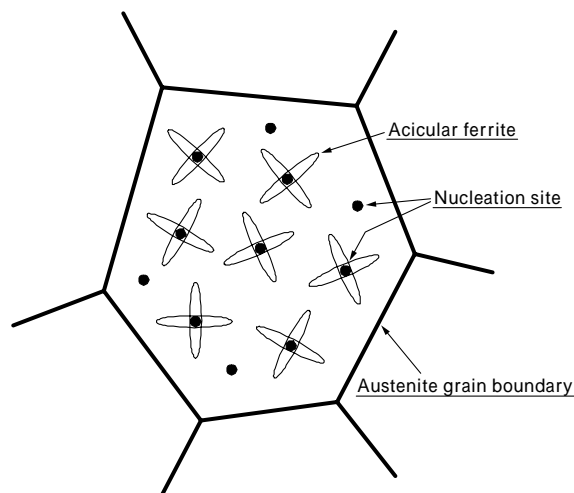


図2 アシキュラフェライト組織の概略図

Fig. 2 Schematic illustration of acicular ferritic microstructure

実適用されている。アシキュラフェライト化による組織微細化の概略図を図2に示す。Ti-B複合添加による組織微細化のメカニズムは、フリーBの旧オーステナイト粒界への偏析による初析フェライト生成抑制作用と、Ti酸化物による旧オーステナイト粒内でのフェライト核生成作用により、微細なアシキュラフェライトを生成することによるものである。溶接法によっては、これに加えてNi添加によるマトリックスの強じん化が図られている場合もある。

一方、YS600MPa級以上の鋼材用溶接材料における溶接金属のミクロ組織はベイナイト～マルテンサイトを主体としているため、フェライト微細化技術であるTi-B複合添加の効果は期待できない。基本的にはマトリックスを強じん化する目的でNi添加が、変態点の低下によるミクロ組織微細化を目的としてNi添加や低酸素化がそれぞれ活用されている。

### 2.2 溶接金属の低酸素化による高じん性化

溶接金属の低酸素化は、変態点の低下によるミクロ組織の微細化や延性き裂抵抗の向上が期待できることから、じん性向上手段の一つとして活用されている。

溶接法別の溶接金属酸素量を表2に示す。溶接金属の低酸素化を図るために、被覆アーク溶接(SMAW)においては低水系系被覆が、サブマージアーク溶接(SAW)に

表2 溶接法別の溶接金属酸素量

Table 2 Oxygen content in weld metals through welding processes

Welding process		Oxygen content (ppm)
SMAW	Ilmenite type	1 000
	Low hydrogen type (basic)	300
SAW	Melt type	600
	Bonded type (basic)	300
GMAW	CO <sub>2</sub> shielding gas	600
	80%Ar + 20%CO <sub>2</sub> shielding gas	300
	95%Ar + 5%CO <sub>2</sub> shielding gas	200
FCAW*	Rutile type	600
	Metal type	400
	Basic type	300

\*80%Ar + 20%CO<sub>2</sub> shielding gas

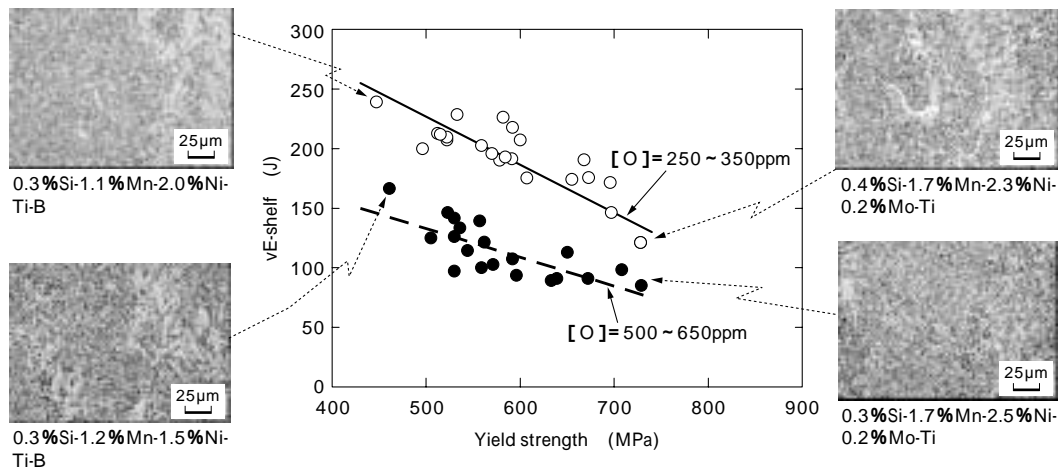


図3 アップシェルフエネルギーに及ぼす溶接金属強度・酸素量の影響

Fig. 3 Influences of strength and oxygen content of weld metals on upper shelf energies

おいても塩基性のポンドタイプのフラックスが、ガスマタルアーク溶接(GMAW)においてはCO<sub>2</sub>分率を低減したシールドガスがそれぞれ採用されている。図3にアップシェルフエネルギーに及ぼす溶接金属の強度及び酸素量の影響を示す。アップシェルフエネルギーは強度の上昇に伴い低下し、酸素量の減少に伴い増大している。すなわち、高強度になるほどじん性向上には溶接金属の低酸素化が必須である。

SMAW および SAW 材料における低酸素化手段を表3に示す。被覆剤およびフラックスにおいては、塩基度を増加することや脱酸剤の種類や添加量が最適化される。また、SAW用ワイヤにおいては、CやSi添加量を最適化することによって、低酸素化が実現されている。

一方、フラックスコールドアーク溶接(FCAW)材料においては、溶接金属酸素量を低減するだけであれば表

表3 SMAW・SAW材料における低酸素化手段

Table 3 Methods to reduce oxygen content in weld metal on SMAW and SAW consumables

Welding consumables		Method to reduce oxygen content
SMAW (Coating flux)		<ul style="list-style-type: none"> <li>Adjustment of base compound (reducing acidic materials)</li> <li>Applying effective deoxidisers (searching and turning to practical use)</li> </ul>
SAW	Flux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adjustment of base compound (changing compound ratio)</li> <li>Applying effective deoxidisers (searching and turning to practical use)</li> </ul>
	Wire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adjustment of carbon and silicon contents (balancing with mechanical properties)</li> </ul>

2にも示すように、塩基性スラグを採用することによって約300ppmにまで低減できるため、じん性を確保するうえでは非常に有効である。塩基性フラックス入りワイヤ(FCW)における溶接継手性能の一例を表4及び図4に示す。2.5%Ni-Ti-B系鋼とすることにより、-50程度のCTOD要求にも対応可能である。しかし、塩基性FCWでは全姿勢溶接が困難であることに加え、溶接時に発生するスパッタ量がチタニヤ系FCWに比べて極めて多いなどの問題があることから、実用化レベルには達しているが、実構造物にはほとんど適用されていない。また、チタニヤ系FCWにおいて脱酸剤量を増加させることにより、溶接金属酸素量を低減させることも考えられるが、チタニヤ系であるがゆえ溶接金属のTi量が脱酸剤量によって大きく影響されるため、強度・じん性バランスの調整が非常に難しいなど課題が多い。このため、

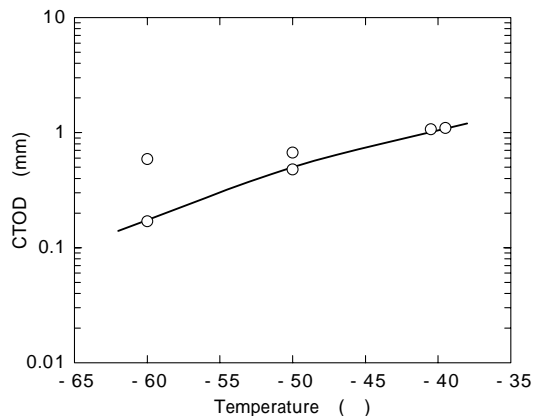


図4 FCWによる溶接金属のCTOD

Fig. 4 CTOD of weld metal with basic type FCW

表4 塩基性FCWによる溶接継手性能例

Table 4 Performances of welded joint with basic type FCW

Location	Tensile properties			Notch toughness				Chemical composition of weld metal (mass%)					
	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy (J)			$\sqrt{v}T_{rs}$ (°C)	C	Si	Mn	Ni	Ti	B
				-100	-80	-60							
1st (1/4t)	569	630	28	78	141	168	-100	0.05	0.3	0.9	2.4	0.03	0.003
Center (1/2t)	582	624	26	148	175	177	< -100	0.05	0.3	1.0	2.2	0.03	0.003
2nd (3/4t)	504	563	30	105	177	186	< -100	0.05	0.3	1.0	2.5	0.02	0.003

Plate thickness : 80mm, Welding position : Flat  
Preheating temp. : 100 , Interpass temp. : 100-150 , Heat input : 1.9kJ/mm

FCAW においてはじん性向上手段として低酸素化手法はあまり適用されていない。

### 2.3 最近の低温仕様高張力鋼用溶接材料

#### (1) HT950MPa 級鋼用 SMAW, SAW 材料

最近、溶接金属酸素量を従来材の 250 ~ 300ppm から、150 ~ 200ppm 程度にまで低減する超低酸素化技術が開発された。さらに、各溶接方法に応じた核生成サイトを付与することにより、ラス状ベイナイトをアシキュラフェライト（粒内核生成型ベイナイト）化した HT950MPa 級鋼用高じん性仕様溶接材料が開発され<sup>3)A)</sup>、水圧鉄管の分野で実用化されている<sup>5)</sup>。SMAW 材料は“LB-100J”、SAW 用フラックスは“PFH-100J”、また、SAW 用ワイヤは“US-100J”である。溶接金属性能の一例として、SMAW 材料における溶着金属の酸素量と吸収エネルギーの関係を図 5 に示す。超低酸素化によって吸収エネルギーが飛躍的に向上している。なお、溶接金属成分は Si-Mn-2.5 ~ 3.5%Ni-Cr-Mo 系である。

#### (2) YS500MPa 級鋼用 FCAW 材料

チタニヤ系 FCAW 材料に関しては、前述のように低酸素化に限界があることから、じん性向上手段として Ni 添加や Ti-B 複合添加あるいは Ti 添加などによる、核生成サイトの付与が採用されている。最近では、低温仕様 YS500MPa 級鋼用として新しくチタニヤ系 FCAW 材料が開発されており、その性能について紹介する。

シールドガス種類に応じた 2 種類の溶接材料であり、シールドガスとして CO<sub>2</sub> を用いる“DW-62L”、また、80% Ar + 20%CO<sub>2</sub> を用いる“DWA-62L”である。これらの溶着金属性能を表 5 及び図 6 に示す。溶接金属成分は、じん性を考慮して Si-Mn-2 ~ 2.5%Ni-Ti-B 系を採用し、破面遷移温度はいずれも -80 以下となっており、-60 程度までの吸収エネルギーの要求にも対応可能である。また、DWA-62L における立向溶接継手の CTOD 性能を図

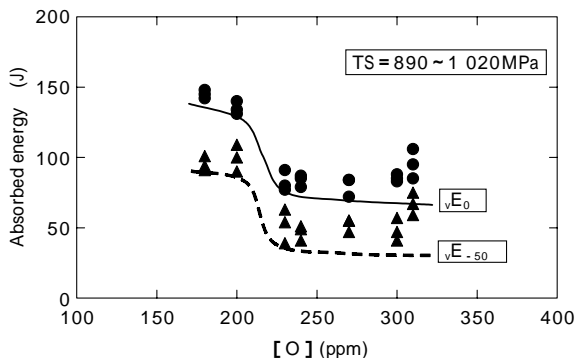


図 5 じん性に及ぼす溶接金属の酸素量の影響 (SMAW)  
Fig. 5 Influences of oxygen content in weld metals on notch toughness (SMAW)

7 に示すが、破壊じん性に関しても良好な性能を有しており、-40 程度までの CTOD 要求（例えば 0.25mm）にも対応可能である。

溶接金属の機械的性質は、溶接の際の板厚、予熱・パス間温度及び溶接入熱によって大きく影響を受ける。理由は、これらの因子によって溶接金属の冷却速度が変化し、溶接金属組織が変化するためである。例えば、FCAW での溶接入熱に関しては、横向姿勢では 0.7 ~ 1.5kJ/mm で施工される場合が多いが、立向姿勢では横向姿勢のような入熱では施工が難しく、1.5 ~ 3.0kJ/mm となる場合が多い。したがって、特に全姿勢溶接が可能なる材料を開発する上では、溶接金属の機械的性質が溶接

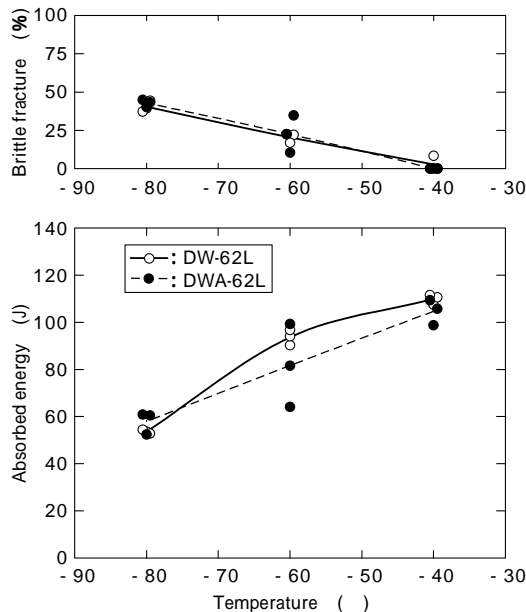


図 6 新開発 FCW 溶着金属のシャルビ遷移曲線  
Fig. 6 Charpy energy transition curves of all-weld metals with new FCWs

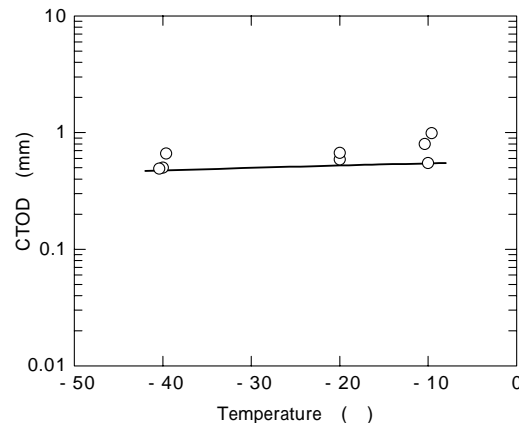


図 7 DWA-62L による溶接継手の CTOD (立向姿勢)  
Fig. 7 Effect of temperature on CTOD in welded joint with DWA-62L (vertical position)

表 5 新 FCW 溶接金属の性質  
Table 5 Properties of all-weld metals with new FCWs

Wire	Shielding gas	Tensile properties of weld metal				T <sub>TS</sub> (°C)	Chemical composition of weld metal (mass%)							
		YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	RA (%)		C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	B
DW-62L	CO <sub>2</sub>	545	626	29	68	< -80	0.07	0.3	1.2	0.007	0.008	2.4	0.06	0.004
DWA-62L	Ar + 20%CO <sub>2</sub>	561	641	27	68	< -80	0.07	0.3	1.3	0.007	0.011	2.1	0.06	0.005

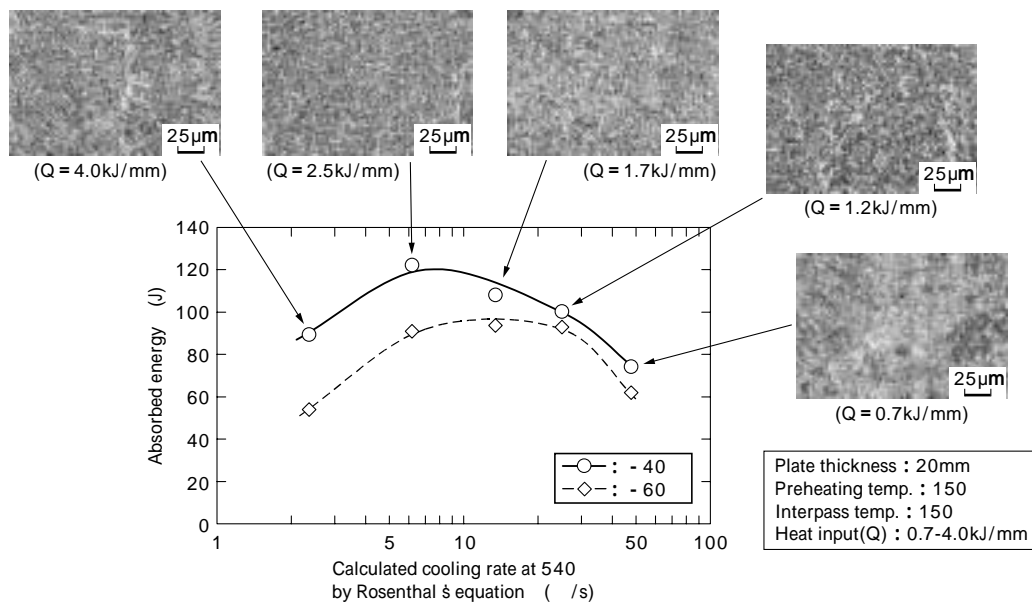


図8 DW-62Lによる溶接金属のじん性に及ぼす冷却速度の影響  
 Fig. 8 Effect of cooling rate on notch toughness in all-weld metal with DW-62L

時の冷却速度にどの程度影響されるか、また、冷却速度に対してより広範囲に対応できるよう考慮する必要がある。図8に、板厚20mm、予熱・パス間温度150の場合、DW-62Lによる溶着金属のじん性に及ぼす540における冷却速度の影響を示す。冷却速度5~50 /秒(溶接入熱0.7~3.0kJ/mm)程度であれば、良好なじん性が得られる。

### 3. 今後の課題

低温仕様高張力鋼用溶接材料における今後の課題を挙げると以下のとおりである。

#### (1) 高強度高じん性化への対応

さらなる高強度化及び高じん性化への対応には、特に破壊じん性の向上が課題となり、遷移温度の低温化とき裂先端における延性き裂抵抗をいかに増大させるかが鍵となる。

ただし、図3からも分かるように、溶接金属の酸素量をある程度低くしなければ高じん性は期待できないことから、例えばシールドガスとしてCO<sub>2</sub>ガスを用いる溶接法(GMAWあるいはFCAW)においては、強度とじん性のバランスをよく見極める必要がある。

#### (2) 大入熱施工法への対応

YS400MPa級以下の強度クラスの鋼においては、30kJ/mm前後までの大入熱施工法が採用されている。また、YS690MPa級程度の強度クラス鋼においては、溶接金属の機械的性質の面から溶接入熱は4kJ/mm程度が限界となっている。最近の建築分野においては、大形化への対応として建築用HT780MPa鋼が開発され実適用が始まっている。さらに、溶接施工の高効率化のニーズに応えるため、大入熱仕様HT780MPa鋼も開発されている。0仕様であるが40kJ/mmの大入熱においても良好なHAZじん性が得られており<sup>6)</sup>、将来、低温仕様への展開も予想されるが、溶接材料に関しては大入熱仕様HT780MPa鋼用溶接材料は開発が始まったばかりであ

り、今後の開発が急がれる。

#### (3) PWHT後のじん性確保

構造物によっては、溶接部の応力除去を目的として、SR(Stress Relief)などの溶接後熱処理(PWHT)が施されることがある。YS360MPa級以下に関しては、多くの溶接材料で適用可能である。現在、YS620MPa級鋼用までは一部ではあるが600 × 1h/inch程度のPWHTにおいて、-30程度までのじん性確保は可能なものもある。しかし、YS690MPa級鋼用においては高じん性仕様となるほど、マトリックスの強じん化を施しているため、粒界強度が弱くなる傾向があり、PWHT後のじん性が著しく劣化する。このため、SRが必要な構造物に対してはYS690MPa級鋼の適用が困難となっており、高強度化の妨げとなっていると考えられる。これに対応できる溶接材料開発も今後の課題となろう。

むすび=高張力鋼用溶接材料における高じん性化に関して概説した。現状の鋼構造物におけるほとんどの要求に対しては、既存の溶接材料で対応可能である。今後のさらなる高強度化・高じん性化あるいは高能率化などの要求に対しても、新技術の検討及びそれに基づく溶接材料の開発に取り組んでいく予定である。

#### 参考文献

- 1) 矢島 浩: 溶接学会誌, Vol.68, No.7 (1999) p.500.
- 2) British Standards Institution: BS 7777 (1993).
- 3) 原 則行ほか: 溶接学会全国大会講演概要, 68 (2001) p.182.
- 4) 畑野 等ほか: 溶接学会全国大会講演概要, 68 (2001) p.162.
- 5) 前島 俊雄ほか: 溶接学会論文集, 21, 1 (2003) p.179.
- 6) 畑野 等ほか: 溶接構造シンポジウム2002講演論文集 (2002) p.323.