

# TMCP (加工熱処理) を活用した 靱性に優れた高強度 H 形鋼の開発

## Development of High Strength H-Shapes with Excellent Toughness Manufactured by Advanced Thermo-Mechanical Control Process (TMCP)

木村 達己 KIMURA Tatsumi JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員 (課長)  
山本 晃輝 YAMAMOTO Kouki JFE スチール 西日本製鉄所 労働人事部倉敷安全衛生室 主任部員 (副課長)  
青木 秀未 AOKI Hidemi JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部形鋼室 主任部員 (課長)

### 要旨

加工熱処理 (TMCP) の適用により、強度、靱性に優れた高性能 H 形鋼を開発した。粗大オーステナイト ( $\gamma$ ) 粒を細粒化するには、加熱  $\gamma$  粒の微細化や  $\gamma$  の再結晶を促進させるための成分設計を行い、熱間圧延の適正化を図る必要がある。微細化した  $\gamma$  粒から加速冷却設備 (*Super-OLAC*<sup>®</sup> S) を用いることにより、微細なベイナイト組織となり、高強度で靱性に優れた TMCP 型 H 形鋼を得ることができる。この技術を活用して、耐震性と溶接性に優れた高層建築構造物用 SM520 級低降伏比の外法一定 H 形鋼 (最大フランジ厚 40 mm) を開発した。さらに、溶接熱影響部の組織制御技術である JFE EWEL<sup>®</sup> 技術を適用して、多パス溶接部の低温靱性に優れた SM490Y 級の H 形鋼も開発した。

### Abstract:

JFE Steel has developed high performance H-shapes applying an advanced thermo-mechanical controlled process (TMCP). To obtain high strength H-shapes with excellent toughness, it is important to obtain refined bainite microstructure, through suitable alloy design, hot rolling under the optimum rolling conditions, and accelerated cooling after hot rolling. This paper introduces examples of recently developed high performance H-shapes, such as 520 MPa grade (in tensile strength) H-shapes for high-rise building construction application with excellent toughness, weldability and earthquake-resistant properties, and 490 MPa grade (in tensile strength) H-shapes with superior low temperature toughness. Alloy designing to obtain refined microstructure under the specific hot rolling conditions to H-shapes, and the accelerated cooling facilities for shapes (*Super-OLAC*<sup>®</sup> S: On-line Accelerated Cooling for Shapes) are essential for the development of high performance H-Shapes.

## 1. はじめに

建築物、工場や各種プラントの構造物に H 形鋼は広く適用されている。近年、構造物は高層化、大型化と大スパン化が進んでいる。高層建築においては、ショッピングセンターなど商業スペースとオフィスやホテルの複合構造など、構造様式が複雑化する傾向にある<sup>1)</sup>。このようななかで、圧延 H 形鋼にはより大形サイズの H 形鋼が求められており、JFE スチールではウェブ高さが 1 000 mm の大断面外法一定 H 形鋼 (スーパーハイスレンド) を開発、製造している<sup>2)</sup>。

他方、構造部材の高強度化による設計基準強度の増加は、板厚減少やサイズダウンによる鉄骨重量の削減など、経済

的・効率的な設計の選択肢が広がるために、鋼材の高強度化ニーズは高い。

阪神淡路大震災などの巨大地震では、構造物の梁端溶接部に多くの被害もたらされた。その教訓として、鋼材には降伏比 (降伏強度/引張強度) が低く、溶接部も含めた良好な靱性と溶接性を有する高性能な鋼材が求められている<sup>3)</sup>。

構造物の柱となるボックス柱やコラム、円形鋼管に用いられる厚鋼板は、加工熱処理 (Thermo-mechanical control process: TMCP) を適用することにより製造されており、圧延や加速冷却技術の発展<sup>4)</sup>とともに、より高強度で高性能な厚鋼板が開発されている<sup>5,6)</sup>。

H 形鋼の高強度化に対しても、TMCP は有効な技術である。しかし、熱間圧延プロセスによって複雑で多様なサイズの H 形鋼を造形するため、厚板とは異なる H 形鋼固有の

TMCP を構築する必要がある。

本報告では、H 形鋼の製造技術に配慮した TMCP 技術について検討するとともに、その技術を適用した低降伏比 SM520 級外法一定 H 形鋼、 $-40^{\circ}\text{C}$  低温仕様の SM490Y 級 H 形鋼の母材性能、溶接性および継手性能について紹介する。

## 2. H 形鋼における TMCP 技術

### 2.1 H 形鋼圧延の特徴と オーステナイトの再結晶挙動

大形 H 形鋼の圧延プロセスでは、孔型圧延やユニバーサル圧延時の成形性を確保するために、厚板よりも高温の  $1250^{\circ}\text{C}$  以上で加熱されるので、素材の高温加熱にともない、オーステナイト（以下、 $\gamma$ ）は急激に粗大化する（写真 1）。また、熱間圧延工程では、厚板と比較してパス圧下率や累積圧下量は相対的に小さい。したがって、延靱性を確保する上で、粗大な初期  $\gamma$  粒を熱間圧延プロセスにより、十分に微細化させることが重要となる。

写真 2 は、SiMn 鋼と Nb 鋼を  $1300^{\circ}\text{C}$  で 0.5 h 加熱し、

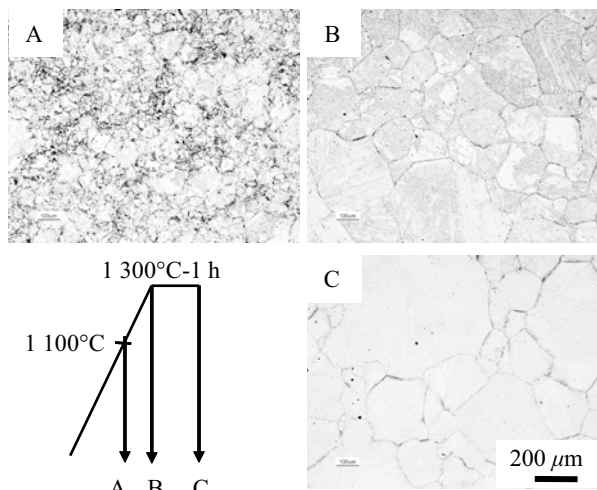
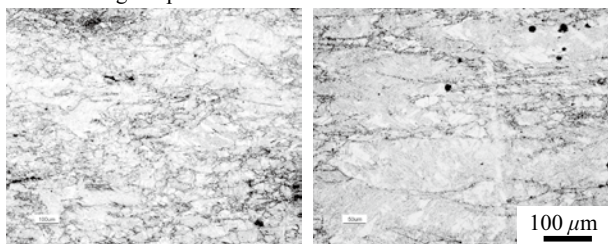


写真 1 加熱過程における  $\gamma$  粒成長挙動

Photo 1  $\gamma$  grain growth behavior during reheating

Total reduction : 52%  
Finish rolling temperature :  $970^{\circ}\text{C}$

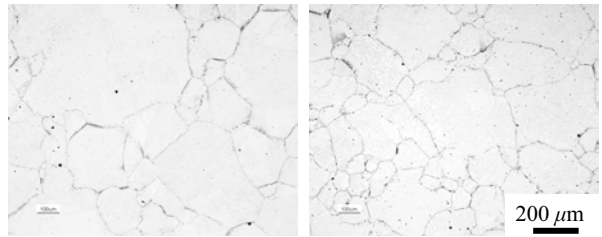


(a) Nb free steel (b) Nb bearing steel

写真 2 熱間圧延後の光学顕微鏡組織；(a)Nbフリー鋼，(b)Nb 添加鋼

Photo 2 Optical microstructures after hot rolling; (a)Nb-free steel and (b)Nb bearing steel

Reheating at  $1300^{\circ}\text{C}$  for 1 h

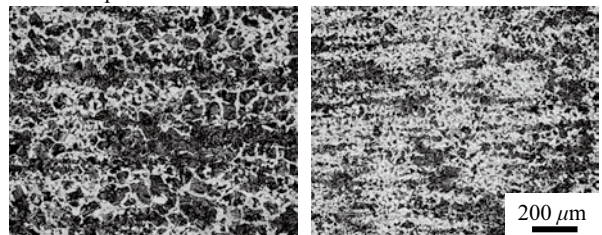


(a) Conventional steel (b) TiN treated steel

写真 3  $1300^{\circ}\text{C}$  - 0.5 h 加熱後の  $\gamma$  粒組織：(a) 通常鋼，(b) TiN 処理鋼

Photo 3  $\gamma$  grain structures after reheating at  $1300^{\circ}\text{C}$  for 0.5 h; (a) Conventional steel and (b) TiN treated steel

Total reduction at 48%  
Finish temperature at  $1070^{\circ}\text{C}$



(a) Conventional steel (b) TiN treated steel

写真 4 熱間圧延後の  $\gamma$  粒組織：(a) 通常鋼，(b) TiN 処理鋼

Photo 4  $\gamma$  grain structures after hot rolling; (a) Conventional steel and (b) TiN treated steel

$970^{\circ}\text{C}$  以上の温度で 10%/パスの熱間圧延を最大 7 パス（累積圧下量 52%）を行った後、水中へ焼入れしたものの光学顕微鏡組織である。SiMn 鋼（Nb フリー）では微細な再結晶  $\gamma$  が観察される。一方、Nb 鋼では、 $\gamma$  の再結晶が抑制されたまま展伸したため、粗大扁平な  $\gamma$  と微細な  $\gamma$  が混在した組織となっている。この状態から加速冷却を行うと、粗大なベイナイト組織となり、延靱性を害する。

$\gamma$  のいっそうの微細化には、素材を高温加熱する際に、高温で安定な微細析出物を鋼中へ分散させ、 $\gamma$  粒界をピン止めして微細化することが有効である。写真 3 (b) は TiN を分散させた鋼を  $1300^{\circ}\text{C}$  で 0.5 h 加熱した場合の  $\gamma$  粒組織であり、通常鋼（写真 3 (a)）と比較して微細である。TiN を鋼中へ分散させることにより、熱間圧延を通していっそう微細な  $\gamma$  組織となっている（写真 4）。

### 2.2 H 形鋼に適した TMCP 技術

H 形鋼固有の製造技術を考慮した TMCP の模式図を、従来の制御圧延プロセス（Controlled rolling：以下、CR）と比較して図 1 に示す。初期  $\gamma$  粒の微細化と熱間圧延時の  $\gamma$  の再結晶を促進するために適切な成分設計を行う必要がある。特に、Nb は厚板 TMCP 鋼では有用な元素であるが、H 形鋼では添加量や圧延スケジュールに注意が必要である。熱間圧延では、粗大な初期  $\gamma$  を十分に再結晶させるために、高温域で

の圧下量を確保し、その後、加速冷却を行うことによって、高強度で延韌性に優れた H 形鋼を製造することができる。

H 形鋼の製造プロセスを模擬した圧延を実験室にて行い、従来の CR 材と TMCP 材の強度および韌性を調べた。従来

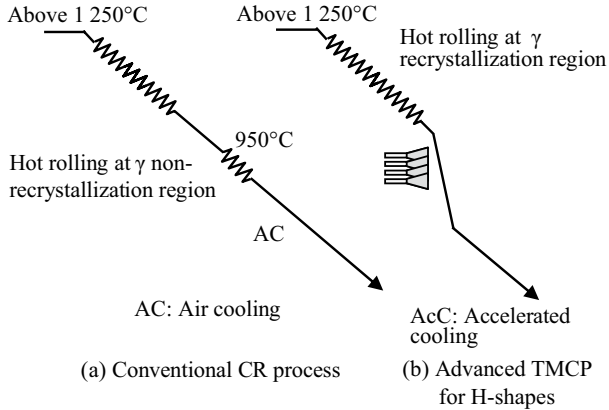


図 1 H 形鋼の TMCP (加工熱処理) 技術の模式図

Fig. 1 Schematic illustration of Thermo-mechanical control process (TMCP) for H-shapes; (a) Conventional controlled rolling (CR) process and (b) Advanced TMCP for H-shapes

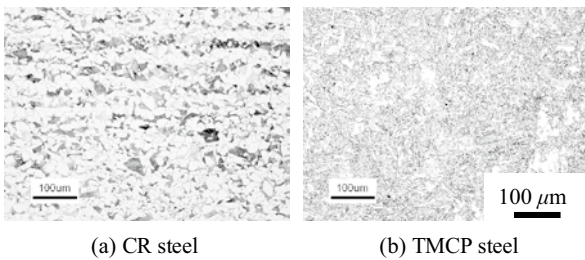


写真 5 CR 材 (a) と TMCP (加工熱処理) 材 (b) のマイクロ組織の比較

Photo 5 Microstructures of controlled rolling (CR) steel and thermo-mechanical control process (TMCP) steel; (a) CR steel, (b) TMCP steel

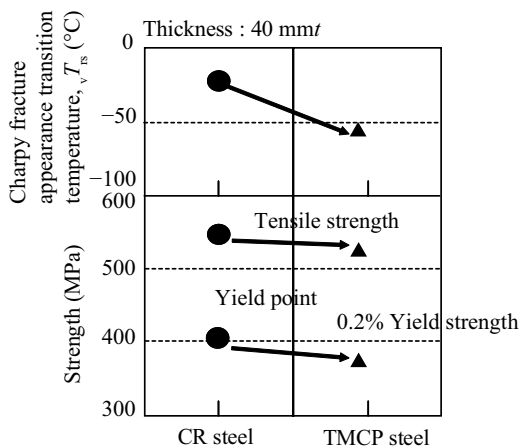


図 2 TMCP 材と CR 材の強度と韌性の比較

Fig. 2 Strength and toughness of thermo-mechanical control process (TMCP) steel compared with conventional controlled rolling (CR) steel

の CR 材は、0.15C-1.45Mn 鋼で Nb, V のマイクロアロイを含んでいる。一方、TMCP 材は 0.13% C-1.55% Mn 鋼で Nb や V のマイクロアロイは無添加である。TMCP 材は熱間圧延後、 $\gamma$  域から水冷による加速冷却を行った。TMCP 材のマイクロ組織を CR 材と比較して写真 5 に示す<sup>7)</sup>。CR 材はフェライト+パーライト組織であるが、TMCP 材は微細なベイナイト組織を呈している。強度、韌性を図 2 に比較して示す<sup>7)</sup>。強度に関しては、CR 材と TMCP 材とで同等の水準であるが、TMCP 材は優れた韌性を有する。

### 3. TMCP を適用した高強度 H 形鋼

TMCP 技術を適用して高層建築物や大規模工場の梁材に適用される低降伏比の SM520 級広幅外法一定 H 形鋼 (以下、SHH 形鋼) や低温韌性仕様の H 形鋼を工場で製造し、母材性能、溶接性および継手性能について調査した。

#### 3.1 建築梁用低降伏比 SM520 級 SHH 形鋼

##### 3.1.1 供試材

代表化学組成を表 1 に示す。素材は、汎用 490 MPa 級鋼と同等の炭素量および炭素当量である。1 250°C を超える温度で加熱後、高温での圧下率と圧延温度に配慮した熱間圧延を行い、形鋼加速冷却装置 (Super-OLAC<sup>®</sup> S) を用いて加速冷却を行った。製造した H 形鋼のサイズは、H900×400×19×40 mm および H1000×400×16×32 mm の外法一定 H 形鋼である。

##### 3.1.2 母材性能

フランジ厚 40 mm の SHH 形鋼のフランジ 1/6 幅 -1/4 t 部のマイクロ組織を写真 6 に示すように、微細なベイナイトを呈

表 1 供試材の代表化学組成

Table 1 Typical chemical composition of steel used

(mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Others	$C_{eq}$
0.17	0.33	1.28	0.020	0.003	Ti	0.40

$$C_{eq}(\%) = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

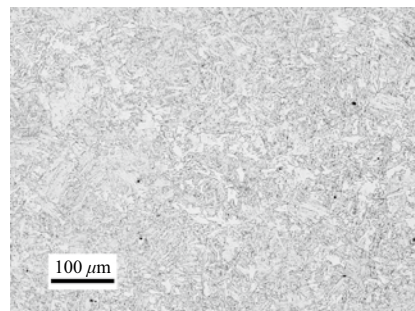


写真 6 開発した H 形鋼のフランジのマイクロ組織

Photo 6 Microstructure of developed H-shape (Flange portion)

表 2 開発 H 形鋼の引張試験結果  
Table 2 Tensile test results of developed H-shapes

Size	Position	YP or 0.2% YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	El (%)
Spec.		355-(475)	520-640	(<80)	(>21)
H900×400×19×40	F1/6	409	553	74	31
	Fillet	446	573	78	29
	W1/6	402	531	76	27
H1000×400×16×32	F1/6	401	543	74	32
	Fillet	414	566	73	30
	W1/6	442	562	79	25

YP: Yield point    YS: Yield strength    TS: Tensile strength    YR: Yield ratio    El: Elongation

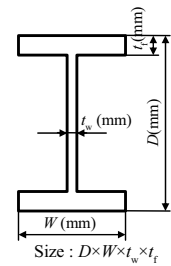
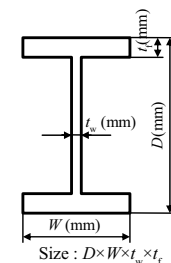


表 3 開発 H 形鋼のシャルピー衝撃試験結果  
Table 3 Charpy impact test results of developed H-shapes

Size	Position	Dimension	$\sqrt{E_0}$ (J)	$\sqrt{T_{rs}}$ (°C)	
Spec.			>27		
H900×400×19×40	F1/6	Outer surface	L	237	-45
		Inner surface	L	248	-42
	Fillet		L	208	-33
		W1/6	L	214	-53
H1000×400×16×32	F1/6	Outer surface	L	232	-23
		Inner surface	L	232	-35
	Fillet		L	187	-32
		W1/6	L	225	-68



$\sqrt{E_0}$ : Charpy absorbed energy at 0°C     $\sqrt{T_{rs}}$ : Charpy fracture appearance transition temperature

している。引張試験結果を表 2 に、シャルピー衝撃試験結果を表 3 に示す。フランジ 1/6 幅部、フィレット部およびウェブ部ともに、規格を満足する高強度が得られており、降伏比は 80% 以下である。さらに、シャルピー吸収エネルギーは 200 J 以上であり、良好な母材強度と靱性を有している。

### 3.1.3 溶接性

CO<sub>2</sub> 溶接により予熱温度 5°C、湿度 60% の環境で JIS Z 3158 に準拠した y 形溶接割れ試験を行った。溶接材料は MG-56 (1.2 mm φ) である。その結果を、表 4 に示す。予熱温度 5°C の環境において、溶接割れは認められず、優れた溶接性を示した。

表 4 y 形溶接割れ試験結果

Table 4 Results of y-groove weld cracking test in accordance with JIS Z 3158

Welding electrode	Humidity (%)	Pre-heat temperature (°C)	Surface (%)	Root section (%)	Cross section (%)
MG-56 (1.2 mφ)	60	5	0	0	0
			0	0	0
		25	0	0	0
			0	0	0

ショートビード溶接における溶接熱影響部の最高硬さ試験を JIS Z 3101 に準じて行った結果、溶接長さが 20 mm 以上では溶接熱影響部の最高硬さは HV350 以下であり、建築施工基準 (JASS 6)<sup>8)</sup> を満足する良好な溶接性を有している (図 3)。

### 3.1.4 多パス溶接継手特性

フランジ厚 40 mm の SHH 形鋼について CO<sub>2</sub> 溶接により多層盛溶接を行い、その継手性能を調べた。溶接材料には MG-56 (径 1.2 mm φ) を用い、予熱なし、最高パス間温度 250°C 以下の条件で 9 層 16 パスの溶接を行った。溶接入熱

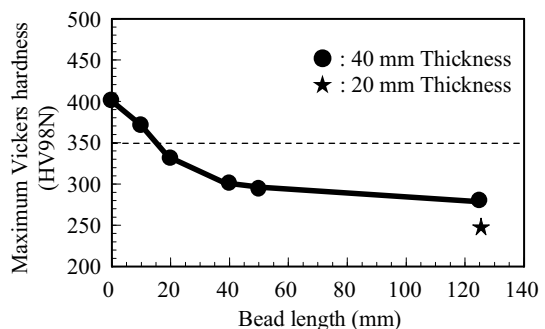


図 3 開発鋼の最高硬さ試験結果

Fig. 3 Maximum hardness test results for developed H-shape

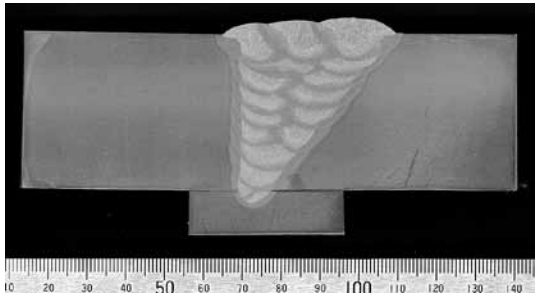


写真7 CO<sub>2</sub>溶接継手のマクロ組織

Photo 7 Macro-structure of CO<sub>2</sub> welded joint

表5 継手引張試験結果

Table 5 Tensile test results of CO<sub>2</sub> welded joint

Weld material	Heat input	TS (MPa)	Break position
MG-56	30 kJ/cm	552	Base metal
1.2 mφ		575	Base metal

TS: Tensile strength

は 3 kJ/mm である。継手マクロ写真を写真 7 に示す。溶接部には、融合不良や割れなどの有害な溶接欠陥は見られなかった。継手引張試験結果を表 5 に示す。破断強度は 550 MPa 以上であり、母材部で破断していることから、十分な継手強度を有していることを確認した。

継手シャルピー衝撃試験結果を図 4 に示す。溶接金属 (WM)、溶接接合部 (FL) および溶接熱影響部 (HAZ) ともに 100 J 以上の良好なシャルピー吸収エネルギー値が得られている。

### 3.2 低温韌性に優れる H 形鋼

#### 3.2.1 供試材

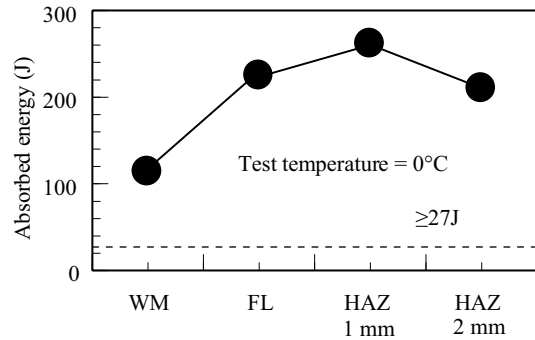
代表化学組成を表 6 に示す。溶接部も含めて低温韌性を満足するために、HAZ 高韌化技術 (JFE EWEL<sup>®</sup>)<sup>9,10</sup> を活用して成分設計を行った。TMCP プロセスを適用して、H 形鋼最大サイズである H918 × 303 × 19 × 37 mm と SHH

表7 CR材とTMCP材の強度、韌性

Table 7 Mechanical properties of H-shapes

Process	Size	YP, 0.2% YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Temp. (°C)	Absorbed energy (J)	$\sqrt{T_{rs}}$ (°C)
Controlled rolling (CR)	700×300×13×24	394	551	27	-20	166	-20
Thermo-mechanical control process (TMCP)	903×300×19×37	411	536	29	-40	215	<-50
	900×400×19×40	427	538	28	-40	200	-67

YP: Yield point YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation  
 $\sqrt{T_{rs}}$ : Charpy fracture appearance transition temperature



WM: Weld metal FL: Fusion line  
 HAZ: Heat affected zone

図4 継手シャルピー衝撃試験結果

Fig. 4 Charpy impact test results of gas metal arc welding (GMAW) joint

形鋼の最大フランジ厚となる H900 × 400 × 19 × 40 mm を製造し、Nb や V, Ni などを添加している CR 型の H 形鋼 (フランジ厚 24 mm) と比較した。

#### 3.2.2 母材性能

CR 材と TMCP 材の強度、韌性を表 7 に示す<sup>7)</sup>。TMCP 材はフランジが厚肉化しているにもかかわらず、SM490Y 級の高強度が得られている。さらに、-40°C におけるシャルピー吸収エネルギーは 200 J 以上あり、破面遷移温度 ( $\sqrt{T_{rs}}$ ) は -50°C 以下と優れた低温韌性を有している。

#### 3.2.3 多パス溶接継手韌性

YGW-23 グレード (ワイヤー径 1.2 mm φ) の溶接材料を用い、MAG 溶接 (シールドガス: Ar-20% CO<sub>2</sub>) により、7 層 13 パスの溶接を行った。最大溶接入熱は 3 kJ/mm、パス

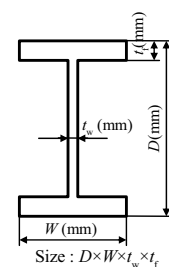
表6 供試材の代表化学組成 (mass%)

Table 6 Typical chemical compositions of steels used (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Others
CR type	0.15	0.35	1.45	0.015	0.005	Ni, Nb, V
TMCP type	0.13	0.27	1.56	0.017	0.003	TiN treated

CR: Controlled rolling

TMCP: Thermo-mechanical control process





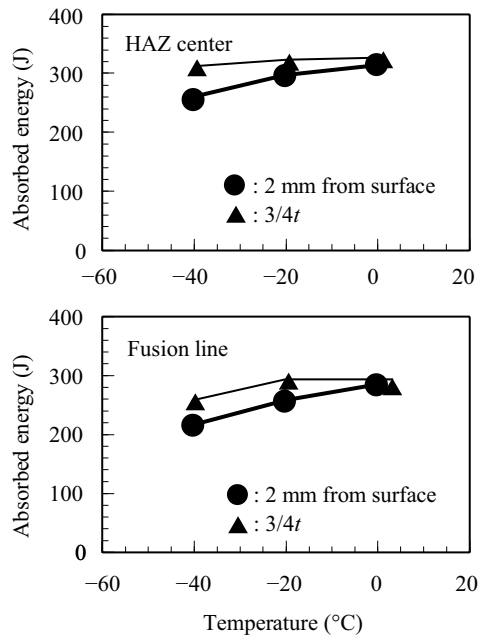


図5 継手シャルピー衝撃試験結果

Fig. 5 Charpy impact test results of welded joint

間温度：350℃以下である。継手韌性を図5に示す。溶接接合部 (FL) および溶接熱影響部 (HAZ 中央) とともに -40℃の低温においても 200 J 以上の高いシャルピー吸収エネルギー値が得られており、溶接部についても優れた低温韌性が確認された。

#### 4. おわりに

形鋼の製造プロセスを考慮した TMCP を適用して、耐震

性と溶接性に優れた建築構造用の低降伏比 SM520 級 SHH 形鋼 (最大フランジ厚 40 mm) を開発した。さらに、HAZ 組織制御技術 (JFE EWEL<sup>®</sup>) を活用して、多パス溶接部の低温韌性に優れた SM490Y 級 H 形鋼を開発した。低降伏比 SM520 級 SHH 形鋼は、すでに国内の高層建築物に適用されている。

#### 参考文献

- 1) 稲田達夫, 小川一郎. CAMP-ISIJ. 2003, vol. 16, p. 340-343.
- 2) 河村有秀, 山本晃輝, 今村晴幸. 川崎製鉄技報. 2001, vol. 33, no. 3, p. 128-131.
- 3) たとえば. 日本建築学会構造委員会鋼構造運営委員会. 鉄骨の破断現象はどこまで解明されたか. 2000 年度日本建築学会大会 (東北) 構造部門. パネルディスカッション資料.
- 4) 鹿内伸夫, 三田尾眞司, 遠藤茂. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 1-6.
- 5) 林謙次, 藤沢清二, 中川一郎. JFE 技報. 2005, no. 5, p. 45-50.
- 6) 末石信行, 荒川武和, 大森章夫, 松井篤美. JFE 技報. 2008, no. 21, p. 8-14.
- 7) 木村達己, 鈴木伸一, 鹿内伸夫, 山本晃輝, 有村鶴和. CAMP-ISIJ. 2007, vol. 20, no. 2, p. 362.
- 8) 建築工事標準仕様書 JASS(6) 鉄骨工事. 日本建築学会. 2007, 130 p.
- 9) 鈴木伸一, 一宮克行, 秋田俊和. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 19-24.
- 10) 木村達己, 角博幸, 木谷靖. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 38-44.



木村 達己



山本 晃輝



青木 秀未