

# 大入熱溶接に対応した建築鉄骨用高HAZ靱性鋼の開発

## Development of High HAZ Toughness Steel Plates for Box Columns with High Heat Input Welding

児島明彦<sup>\*(1)</sup> 吉井健一<sup>\*(2)</sup> 秦知彦<sup>\*(3)</sup> 佐伯修<sup>\*(4)</sup>  
 Akihiko KOJIMA Ken-ichi YOSHII Tomohiko HADA Osamu SAEKI  
 市川和利<sup>\*(5)</sup> 吉田謙<sup>\*(6)</sup> 志村保美<sup>\*(7)</sup> 東清三郎<sup>\*(8)</sup>  
 Kazutoshi ICHIKAWA Yuzuru YOSHIDA Yasumi SHIMURA Kiyosaburo AZUMA

### 抄 録

高層建築物における耐震安全性と高能率施工のニーズに対して、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を開発した。本鋼材は、新しいHAZ細粒高靱化技術「HTUFF®」を適用し、さらに鋼成分の適正化をはかることにより、従来にない良好な大入熱溶接HAZ靱性を実現した高性能厚鋼板である。50～60mm厚みの開発鋼(BT-HT355C-HF, BT-HT440C-HF)を用いて作製した4面ボックス柱のダイヤフラム溶接部(1パスのESW継手)と角溶接部(1パスの2電極SAW継手)の性能を紹介し、0℃のシャルピー吸収エネルギーの平均値が70Jを超える良好なHAZ靱性であることを示した。また、開発鋼に適合する溶接材料を用いることにより、溶接金属部においても良好な靱性が得られることを併せて明らかにした。

### Abstract

For safety against earthquake and for high efficient welding in high-rise building constructions, high HAZ toughness steel plates have been developed. Based on the new technology for HAZ microstructure refinement, HTUFF®, and by optimizing chemical compositions of steel, BT-HT355C-HF and BT-HT440C-HF steel plates possessing high-performance of HAZ toughness have been commercialized. High heat input welded joints of box columns made of the developed steel plates, joined by electroslag welding or submerged arc welding with high efficiency, had excellent HAZ toughness more than 70J at 0 °C. The weld metal had also good toughness by using newly developed welding materials matched to the developed steel plates.

## 1. 緒 言

近年、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、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つつある<sup>1)</sup>。たとえば、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が登場しつつある<sup>2)</sup>。一方で、建築構造物の高層化や大スパン化に伴う鉄骨用鋼材の高強度化、厚手化と、鉄骨製作での高能率な溶接施工の要求が高まっている。高能率溶接の例として、4面ボックス柱のダイヤフラム溶接や角溶接に対して、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)などの大入熱溶接が適用され、溶接入熱量が50～100kJ/mmに及ぶ場合がある。

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、溶接熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)のミクロ組織が著しく粗大化

し、靱性が大きく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ていた。新日本製鐵(株)はこのようなニーズに対して、新しいHAZ細粒高靱化技術「HTUFF®(エイチタフ): Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles<sup>3,4)</sup>」を適用することで建築鉄骨用高HAZ靱性鋼を開発した<sup>5-7)</sup>。

## 2. 開発の考え方

### 2.1 高HAZ靱性鋼の開発の考え方

表1に建築鉄骨用高HAZ靱性鋼の開発目標を示す。SN490C, BT-HT325C, BT-HT355C, BT-HT440C, SM520B-SNCの各規格に相当し、ESWや多電極SAWに対応できる建築鉄骨用鋼材を想定したもものとなっている。最も重要なHAZ靱性の目標としては、0℃のシャルピー吸収エネルギーの平均値として70Jを設定した<sup>2)</sup>。本検討では、建築鉄骨としての基本性能である強度と低降伏比を安定的に確

<sup>\*(1)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2221

<sup>\*(2)</sup> 君津製鉄所 厚板工場 マネジャー

<sup>\*(3)</sup> 大分製鉄所 生産管理部

<sup>\*(4)</sup> 名古屋製鉄所 厚板工場 マネジャー

<sup>\*(5)</sup> 大分技術研究部 主任研究員 Ph.D.

<sup>\*(6)</sup> 厚板営業部 マネジャー

<sup>\*(7)</sup> 建材開発技術部 マネジャー

<sup>\*(8)</sup> 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

表1 建築鉄骨用高HAZ靱性鋼の開発目標  
Development targets of high HAZ toughness steel plates for box columns

|                            |                                                       |
|----------------------------|-------------------------------------------------------|
| Steel standard             | : SN490C, BT-HT325C, BT-HT355C, BT-HT440C, SM520B-SNC |
| Welding method             | : ESW, multi electrodes SAW, etc.                     |
| Maximum welding heat input | : Approximately 100kJ/mm                              |
| HAZ toughness              | : Charpy absorbed energy at 0 70J (average)           |

保する観点から、Cと炭素当量を適正に確保したうえで、大入熱溶接HAZ靱性の向上をはかるものとした。

HAZ靱性向上の基本的な考え方は、有効結晶粒径の微細化、破壊の起点となる脆化相の低減、マトリックスの高靱化、に大別される。大入熱溶接HAZの主な脆化原因は、粒界から変態する粒界フェライトなどの粗大組織が脆性破壊の発生起点として作用することである。従って、この観点からこれらの粗大組織を微細化することが靱性の向上に有効である。そのためには、本特集号に掲載している“微細粒子によるHAZ細粒高靱化技術”HTUFFの開発<sup>9)</sup>で示したように、粒径を小さくすることが有力な手段となる。本検討では、このHTUFFによって酸化物や硫化物を鋼中に微細分散させ、大入熱溶接においても溶融線近傍HAZの粒を従来よりも小さく保ち、粒界から変態する組織を微細化して靱性の向上をはかった。

従来のBT-HT355C級鋼にHTUFFを適用した場合の効果調べるため、工場製造した従来鋼(TiN鋼)とHTUFF鋼に対して、溶接入熱量が70kJ/mmとなるESWの溶融線近傍HAZを模擬した熱履歴を与え、再現HAZの組織と靱性を比較した。図1と図2に両鋼の再現HAZの組織と靱性を示す。HTUFFの適用によって粒の粗大化が著しく抑制されており、粒界フェライトが微細化するとともに靱性が大幅に向上することが確認された。本検討では、このようなHTUFFの効果に基づいて建築鉄骨用高HAZ靱性鋼を開発した。

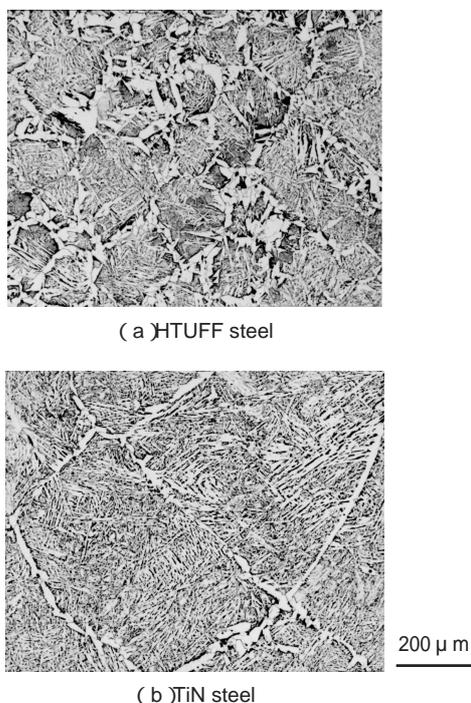


図1 BT-HT355C級鋼のESW相当の再現HAZ組織(相当入熱量:70kJ/mm 最高加熱温度:1400 )  
Simulated HAZ microstructure of BT-HT355C class steels corresponding to ESW (equivalent heat input:70kJ/mm, reheated peak temperature:1400 )

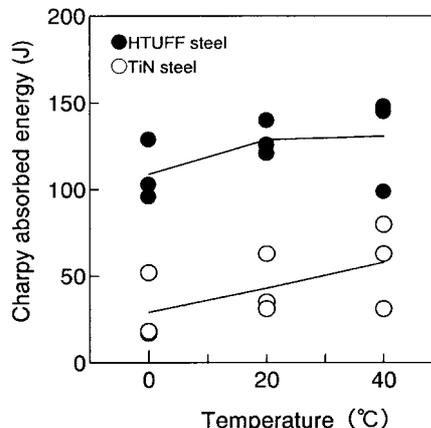


図2 BT-HT355C級鋼のESW相当の再現HAZ靱性(相当入熱量:70kJ/mm 最高加熱温度:1400 )  
Simulated HAZ toughness of BT-HT355C class steels corresponding to ESW (equivalent heat input:70kJ/mm, reheated peak temperature:1400 )

## 2.2 溶接材料の開発の考え方

高HAZ靱性鋼に適合する溶接材料を開発し、溶接金属部も含めて継手全体として高い靱性を確保する必要がある。図3にBT-HT355C開発鋼のESW溶接金属部の機械的性質に及ぼす合金元素の効果を示す<sup>9)</sup>。溶接ワイヤから添加するMo, Ti, Bなどの最適化によって靱性が向上することを確認した。これは、溶接金属部の化学成分的な焼入性を最適化することで、粗大な粒界フェライトの生成を抑制し、組織の微細化をはかったためである。同様に、2電極SAWに対して適正な溶接ワイヤとボンド型フラックスを検討し、溶接金属部のCやMoなどを最適化することで靱性が向上した<sup>9)</sup>。本検討では、このような知見に基づいて建築鉄骨用高HAZ靱性鋼に適合する溶接材料も併せて開発した。

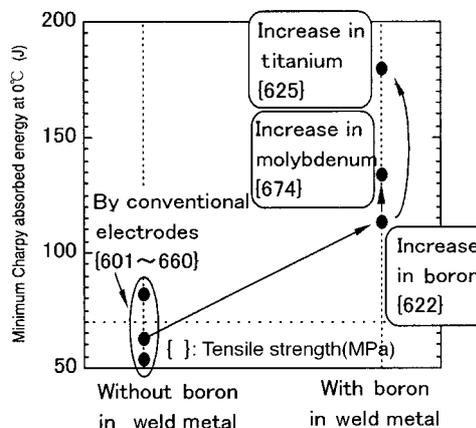


図3 BT-HT355C開発鋼のESW溶接金属部の機械的性質に及ぼす合金元素の効果  
Effect of alloy elements on mechanical properties of ESW weld metal of BT-HT355C developed steel

### 3. 開発鋼の性能

本章では、BT-HT355C-HFおよびBT-HT440C-HFとして商品化した開発鋼の鋼材性能と、開発鋼に適合する溶接材料を用いて作製した溶接継手性能を紹介する<sup>10)</sup>。新日本製鐵(株)はこれらの商品以外にも、表1の各規格に対応する建築鉄骨用高HAZ韌性鋼を商品メニューとして揃えている<sup>10)</sup>。

#### 3.1 鋼材性能

##### 3.1.1 化学成分

表2に開発鋼の化学成分を示す。強度と低降伏比を安定的に確保する観点から、Cと炭素当量を適正に確保することを基本思想とした。大入熱溶接HAZ韌性の観点から、従来鋼よりもCを低減し、その分の強度補償としてMn, Cu, Niなどを増加した。BT-HT440C-HFについては、脆化相であるMA(Martensite Austenite Constituent)の生成を抑制する観点からも化学成分を調整した。以上の基本成分に対して、MgやCaを鋼中に適正に含有させることでHTUFFを適用し、酸化物や硫化物の微細分散をはかった。

##### 3.1.2 機械的性質

TMCR(Thermo-Mechanical Control Process)と熱処理を組み合わせ

て50mm厚みのBT-HT355C-HF鋼板と60mm厚みのBT-HT440C-HF鋼板を製造した。表3に鋼材の機械的性質を示す。両鋼とも規格を満足する強度、伸び、降伏比、板厚方向特性、韌性が得られた。

##### 3.1.3 溶接性

斜めy形溶接割れ試験(JIS Z 3158)を行い、両鋼とも25の予熱で溶接割れは発生しなかった<sup>10)</sup>。また、溶接熱影響部の最高硬さ試験(JIS Z 3101)を行い、両鋼とも25の予熱で最高硬さは300Hv未満であった<sup>10)</sup>。開発鋼の良好な溶接性が確認された。

#### 3.2 溶接継手性能

##### 3.2.1 溶接試験体

開発鋼を用いて3m長さの4面ボックス柱を作製した。スキンプレートとダイヤフラムに同じ規格の開発鋼を用いて、BT-HT355C-HF柱(梁フランジはSN490B)とBT-HT440C-HF柱(梁フランジはBH-HT440C)の2種類の柱を作製した。

柱のダイヤフラム溶接には1パスのESWを、柱の角溶接には1パスの2電極SAWを、柱と梁フランジの溶接には多パスのガスマルターーク溶接(GMAW)を適用した。ここでは、開発鋼に適合する新しい溶接材料<sup>11)</sup>を用いた。表4に溶接条件を、図4に継手シャルピー

表2 開発鋼の化学成分(mass%)  
Chemical compositions of developed steel plates(mass%)

| Steel        | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Others        | HTUFF   | Ceq  | Pcm  |
|--------------|------|------|------|-------|-------|---------------|---------|------|------|
| BT-HT355C-HF | 0.12 | 0.26 | 1.50 | 0.008 | 0.002 | Nb,Ti         | Treated | 0.39 | 0.21 |
| BT-HT440C-HF | 0.10 | 0.16 | 1.56 | 0.006 | 0.002 | Cu,Ni,Nb,V,Ti | Treated | 0.39 | 0.23 |

$$Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$$

$$Pcm=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B$$

表3 鋼板の機械的性質  
Mechanical properties of developed steel plates

| Steel        | Thickness (mm) | Direction | Tensile properties<br>1/4 thickness position |                                          |                   |                    | Charpy properties<br>1/4 thickness position | Through-thickness properties             |                          |
|--------------|----------------|-----------|----------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|
|              |                |           | Yield point<br>(N/mm <sup>2</sup> )          | Tensile strength<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Elongation<br>(%) | Yield ratio<br>(%) | √E <sub>0</sub> min/av.<br>(J)              | Tensile strength<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Reduction of area<br>(%) |
|              |                |           |                                              |                                          |                   |                    |                                             |                                          |                          |
| BT-HT355C-HF | 50             | L         | 450                                          | 574                                      | 32                | 78                 | 298/302                                     | 564,564,562                              | 77,77,76                 |
|              |                | T         | 451                                          | 579                                      | 26                | 78                 | 220/252                                     |                                          |                          |
| BT-HT440C-HF | 60             | L         | 468                                          | 610                                      | 31                | 77                 | 251/254                                     | 607,615,610                              | 69,74,75                 |
|              |                | T         | 466                                          | 603                                      | 32                | 77                 | 234/236                                     |                                          |                          |

L: longitudinal, T: transverse

表4 4面ボックス柱の溶接条件  
Welding conditions of box columns

| Steel for column | Welding portion  | Welding method    | Welding conditions |             |                |                    |                  |
|------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------|----------------|--------------------|------------------|
|                  |                  |                   | Current (A)        | Voltage (V) | Speed (mm/min) | Heat input (kJ/mm) | Welding material |
| BT-HT355C-HF     | Column diaphragm | ESW/single pass   | 380                | 51          | 14.3           | 81.4               | YM-55HF          |
| BT-HT440C-HF     | Column diaphragm | ESW/single pass   | 380                | 51          | 11.6           | 100.4              | YM-55HF          |
| BT-HT355C-HF     | Column corner    | SAW/single pass   | L 2100             | 36          | 230            | 41.0               | Y-DLHF           |
|                  |                  |                   | T 1700             | 48          |                |                    |                  |
| BT-HT440C-HF     | Column corner    | SAW/single pass   | L 2200             | 37          | 200            | 50.3               | Y-DLHF           |
|                  |                  |                   | T 1800             | 48          |                |                    |                  |
| BT-HT355C-HF     | Column-beam      | GMAW/multi passes | 380                | 40          | 220/450        | 2.0/4.0            | YGW18/21HF       |
| BT-HT440C-HF     | Column-beam      | GMAW/multi passes | 360                | 41          | 220/450        | 2.0/4.0            | YGW18/21HF       |

L: leading electrode, T: trailing electrode

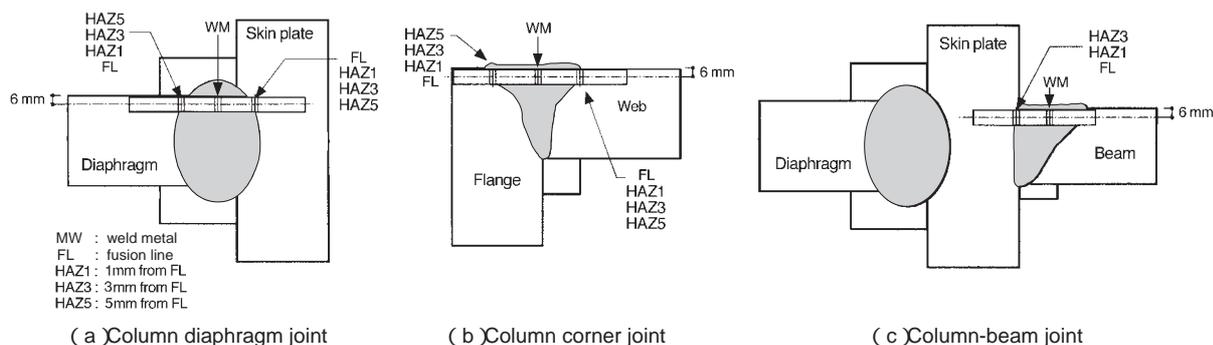


図4 4面ボックス柱の継手シャルピー衝撃試験における試験片採取位置とノッチ位置  
Positions of V-notches and specimens of Charpy impact tests in welded joints of box columns

衝撃試験における試験片採取位置とノッチ位置を示す。

3.2.2 継手性能

(1) 継手マクロ外観

BT-HT355C-HF柱を例として、図5にESW継手とSAW継手のマクロ外観を示す。

(2) 継手韌性

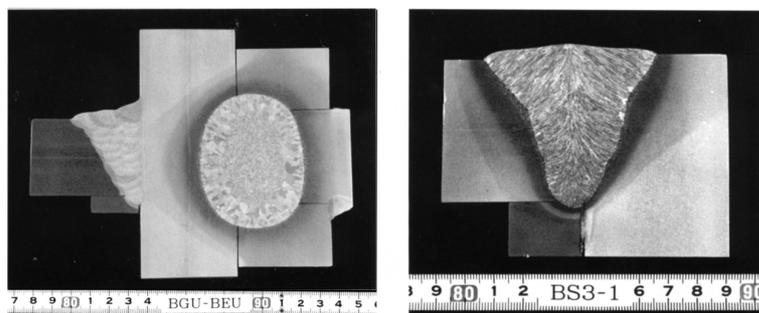
図6に4面ボックス柱の継手韌性をシャルピー吸収エネルギーの平均値で示す。2種類の柱のすべての継手において開発目標を満足する良好な韌性が達成された。脆化が懸念されるESW継手とSAW継手のFL(溶融線)とHAZ1(FLから1mm離れたHAZ)で、目標レベルの70Jを超える良好な韌性が狙い通りに達成された。適正な溶接材料を用いることでWM(溶接金属部)の韌性も良好であった。

(3) 継手強度

ESW継手, SAW継手, GMAW継手の溶着金属引張試験とESW十字継手引張試験を行い、2種類の柱のすべての継手において鋼材規格を満たす十分な強度が得られた<sup>10)</sup>。ESW十字継手引張試験の破断位置は梁フランジ母材であった。

(4) 継手ミクロ組織

BT-HT440C-HF柱を例として、図7にESW継手のミクロ組織を、図8にSAW継手のミクロ組織を示す。大入熱溶接を適用したにもかかわらず、両継手ともHTUFF効果によって溶融線近傍のHAZ組織が顕著に微細化していることが確認された。BT-HT355C-HF柱についても同様であり、開発鋼の良好な大入熱溶接HAZ韌性は、この組織微細化効果に起因して達成されたものと考えられる。



(a) Column diaphragm joint and Column-beam joint (b) Column corner joint

図5 BT-HT355C-HF柱の継手マクロ外観  
Welded joint macrostructure of BT-HT355C-HF column

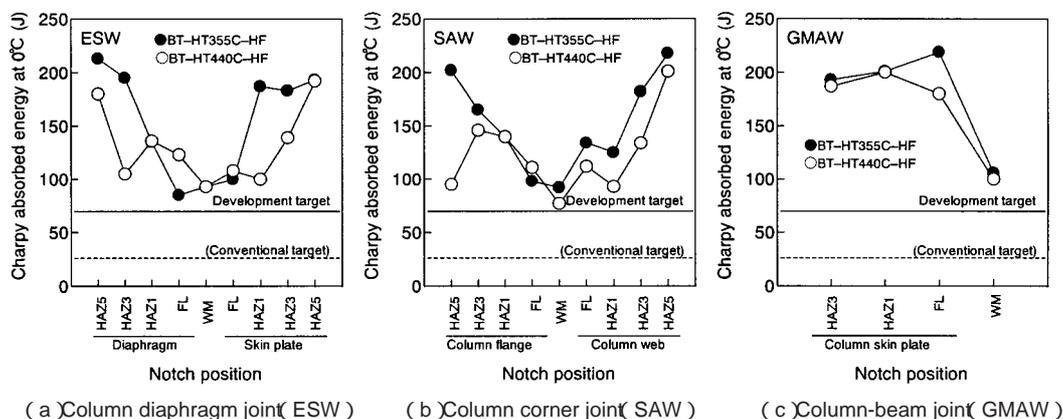


図6 4面ボックス柱の継手韌性  
Welded joint toughness of box columns

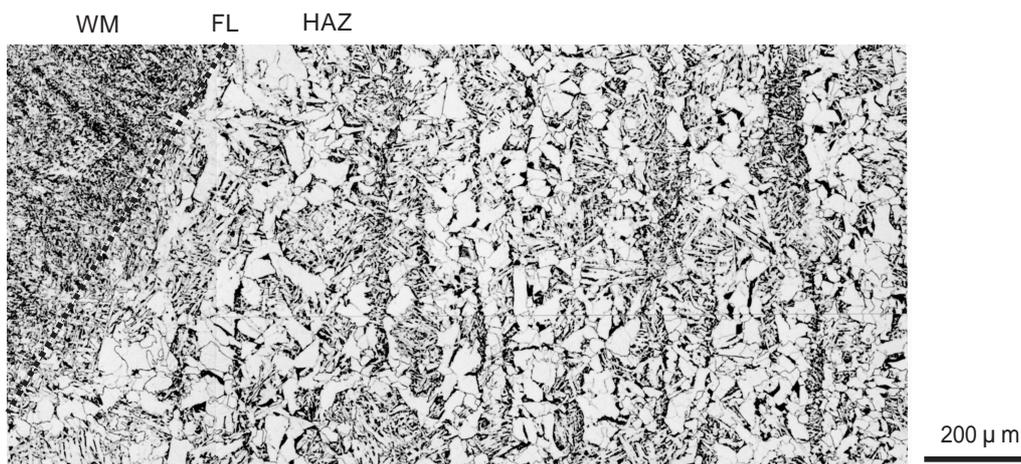


図7 BT-HT440C-HF柱のESW継手マイクロ組織(ダイヤフラム溶接部のスキンプレート側HAZ)  
ESW joint microstructure of BT-HT440C-HF column( Skin plate side HAZ of diaphragm joint)



図8 BT-HT440C-HF柱のSAW継手マイクロ組織(角溶接部のフランジ側HAZ)  
SAW joint microstructure of BT-HT440C-HF column( flange side HAZ of corner joint)

#### 4. 結 言

HTUUFFの適用と鋼成分の適正化によって、大入熱溶接に対応した建築鉄骨用高HAZ韌性鋼を開発した。開発鋼(BT-HT355C-HF、BT-HT440C-HF)とこれに適合する溶接材料を組み合わせで作製した4面ボックス柱の大入熱溶接継手において、0のシャルピー吸収エネルギーの平均値が70Jを超える良好な韌性を達成した。丸の内1丁目1街区計画C棟(仮称)をはじめとする超高層建築物の4面ボックス柱向けに、現在までに約6000トンの開発鋼を出荷した<sup>2)</sup>。高層建築物における耐震安全性と高能率施工のニーズを満足する本開発鋼の需要は、今後急速に増加すると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 建築研究所:鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説 第1版 東京,日本建築センター 2003 p.39
- 2) 福田達夫 ほか:鉄構技術(STRUTEC) (7) 35(2002)
- 3) 児島明彦 ほか:まてりあ 42(1) 67(2003)
- 4) 児島明彦 ほか:新日鉄技報 (380) 33(2004)
- 5) 児島明彦 ほか:日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 2001 p.761
- 6) 櫻井謙次 ほか:宮地技報 .18 53(2003)
- 7) 横山幸夫 ほか:鉄構技術(STRUTEC) (6) 45(2003)
- 8) 市川和利 ほか:溶接学会全国大会講演概要 .69 2001 p.176
- 9) 中澤博志 ほか:溶接学会全国大会講演概要 .71 2001 p.252
- 10) 新日本製鐵(株)バンフレット:新日鐵のHTUUFF steel,建築構造用高HAZ韌性鋼
- 11) 市川和利:CAMP-ISIJ .16 348(2003)