

(解説)

# 大入熱溶接用高強度厚鋼板

## High Tensile Strength Steel Plates for High-heat Input Welding



安部研吾\*  
Kengo Abe



泉 学\*  
Manabu Izumi



柴田光明\*  
Mitsuaki Shibata



今村弘樹\*  
Hiroki Imamura



川野晴弥\*\*  
Haruya Kawano



畑野 等\*\*\*  
Hitoshi Hatano

Large thickness and high tensile strength steel plates are key materials in shipbuilding, high-rise building construction and bridge construction. And consequently, the demand for large heat input, 1-pass welding for large thickness steel plates is very high. Corresponding to this demand, Kobe Steel has newly developed "Technology of Refining Effective Grain Size in Heat Affected Zones (HAZ) (Low Carbon Bainite Substructures)" and has successfully lined up high HAZ toughness steel plate series based on the concept of the technology.

まえがき = 近年、厚鋼板を使用するあらゆる分野において、高強度でかつ厚肉鋼板の使用が拡大している。具体的には、コンテナ船の大型化にともなう板厚 80mm の厚肉高強度鋼板 EH40 や、建築構造物の超高層化や大スパン化に対応した板厚 100mm までの高性能 590MPa 級鋼板などがあげられる。

一方で溶接施工効率向上の観点から、エレクトロガスアーク溶接やエレクトロスラグ溶接の適用が拡大しており、板厚 100mm の厚肉鋼板においても 1 パス溶接が可能な大入熱溶接施工が普及している。

また、構造物の安全性向上を目的とした溶接部の品質に対する要求も厳格化している。

このような背景から、大入熱溶接の適用が可能で、かつ溶接熱影響部 (Heat Affected Zone : HAZ) 靱性の優れた高強度鋼板の開発が強く求められている。

当社では、これまで大入熱溶接対策技術として、微量の Ti 添加により TiN を析出させることで溶接時のオーステナイト ( ) 粒粗大化抑制やフェライト ( ) 析出核増加効果を発揮させる KST (Kobe Super Toughness) 処理<sup>1)</sup> を開発するとともに、大入熱溶接の継手靱性確保に優位な低成分においても高強度を実現できる TMCP 技術を積極的に活用することで、ユーザの期待に応えてきた。しかし、最近では要求がますます高度化しており、これらの技術だけでは対応が難しくなってきた。そこで、これらの技術に加えて新しいコンセプトに基づく大入熱溶接 HAZ 組織の微細化技術である「低カーボン多方位ベイナイト技術」<sup>2)3)</sup> を開発した。

本稿では、この技術を解説するとともに、この技術をもとに新しく開発した優れた HAZ 靱性を有する大入熱溶接用高強度厚鋼板の特性を紹介する。

### 1. 低カーボン多方位ベイナイト技術の確立

従来から HAZ 靱性改善手段として、下記の 3 点が有効

であると言われている。

溶融線近傍の 粒粗大化抑制

粒内の変態組織の微細化

MA (Martensite-Austenite constituent) 低減

の溶融線近傍の 粒粗大化抑制については、TiN の微細分散が有効<sup>1)</sup> であるが、入熱 50kJ/mm を超えるような超大入熱溶接が適用される場合にはその効果は十分に得られない。これは、大入熱溶接により溶融線近傍は 1 400 を超える高温に長時間さらされることにより、TiN の大部分が固溶することから、粒粗大化抑制効果が十分には発揮されないためである。

一方、の MA の低減については、鋼板に含まれる C 量を低減することにより達成される。MA は、溶接により高温にさらされた HAZ がいったん 相となり、その後の冷却中に変態が進行する過程で未変態 への C の濃縮がおこり、が安定化した結果生成するものである。したがって、鋼板中の C 量低減により、未変態 への C の濃縮を抑制することでその生成量の低減が可能となる。

写真 1 に従来鋼 (0.10% C) と大幅に低 C 化 (0.03% C) した鋼について、大入熱溶接を模擬した熱履歴を与えて生成した組織を比較した結果を示す。低 C 鋼では、

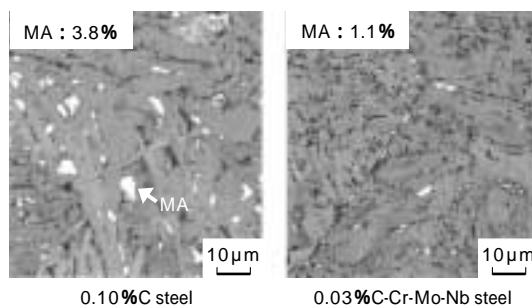


写真 1 再現 HAZ における MA 形態に及ぼす添加 C 量の影響 (溶接入熱 25kJ/mm 相当)

Photo 1 Effect of C amount on morphology of MA in simulated HAZ (Equivalent heat input : 25kJ/mm)

\* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター \*\* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 厚板部 \*\*\* 技術開発本部 材料研究所

MA が微細化されるとともに、体積分率が大幅に低減されていることがわかる。

さらに、粒内の変態組織の微細化については、これまで粒内フェライト生成を促進することなどの手段により、粒内の変態組織の微細化を図ってきたが、HAZ組織がベイナイト主体となる高強度鋼には適用できない。したがって、高強度鋼の大入熱溶接 HAZ 韌性を改善するためには、から生成するベイナイト組織を微細化することが必要である。

そこで当社では、HAZ 組織がベイナイト主体となる高強度鋼の大入熱溶接 HAZ 韌性改善策として、低 C 化することで大幅に MA を低減させた上で、さらに、から生成するベイナイトを微細化させることに取組んだ。低 C 鋼におけるベイナイト組織の微細化に及ぼす合金元素の影響を詳細に調査した結果、写真 2 に示すように、炭化

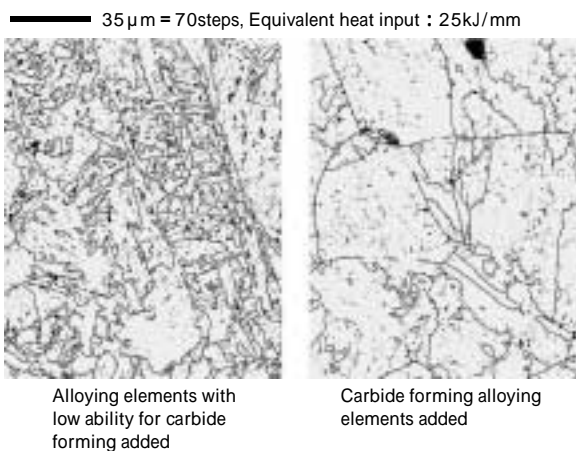


写真 2 再現 HAZ 組織における EBSP 測定結果に及ぼす添加合金元素の影響（結晶方位差 15°以上の粒界マップ）

Photo 2 Effect of alloying elements on EBSP analysis in simulated HAZ (Boundary levels : 15°)

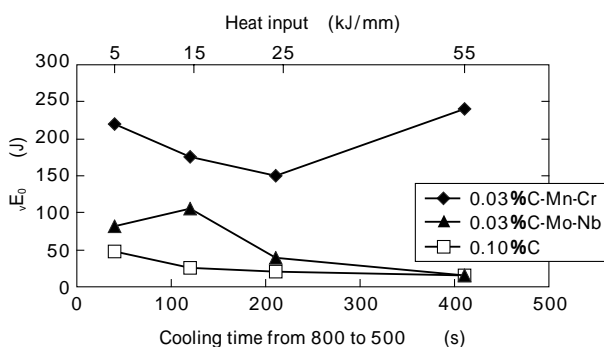


図 1 溶接再現熱サイクル付与後の韌性に及ぼす溶接入熱と添加合金元素の影響

Fig. 1 Effect of heat input and alloying elements added on Charpy V-notch absorbed energy at simulated HAZ (Peak temperature : 1 350 )

物生成能が強い元素（強炭化物生成元素：Mo, Nb など）を添加した場合よりも、炭化物生成能が弱い元素（弱炭化物生成元素：Mn, Cu, Ni, Cr など）を増加させた場合にベイナイト組織が微細化することを見出した<sup>3)</sup>。強炭化物生成元素は、粒界でのベイナイトの核生成頻度を低下させるのに対し、弱炭化物生成元素は逆にベイナイトの核生成頻度を高めるためであると考えられる。

図 1 に、それぞれの鋼の溶接再現熱サイクル付与後の韌性を調査した結果を示す。従来鋼（0.10%C）に対し、低 C 鋼（0.03%C）はいずれも高韌化するが、強炭化物生成元素添加鋼（Mo, Nb 添加）に比べ、弱炭化物生成元素添加鋼（Mn, Cr 添加）の方が顕著に高韌化できており、溶接入熱が 55kJ/mm という超大入熱溶接においても、十分な韌性を確保できている。

以上のように、従来鋼に比べて大幅に低 C 化するとともに、強化元素として弱炭化物生成元素を添加することにより、大入熱溶接 HAZ において MA の低減とベイナイト組織の微細化を達成し、大入熱溶接 HAZ 韌性を大幅に向上させることに成功した<sup>2)3)</sup>。

当社では、この技術（低カーボン多方位ベイナイト技術）を大入熱溶接が適用されるあらゆる需要分野の鋼板に適用し、優れた HAZ 韌性を有する大入熱溶接用高強度厚鋼板のメニュー化を行った。

## 2. 大入熱溶接用高強度鋼板の特性

### 2.1 造船用厚肉大入熱溶接用 EH40 鋼板

世界的な海上輸送量の増加、特にコンテナ貨物輸送量の増加に伴いコンテナ船の大型化が進み、従来の 6 000 個積船から 8 000 個、あるいは 10 000 個積といった超大型コンテナ船の建造が進められてきている<sup>4)5)</sup>。これに伴い、高強度かつ厚肉の鋼板が要求され始めている。さらに、船体建造時の施工効率を上げるため、溶接入熱量が約 60kJ/mm にも及ぶ超大入熱溶接が適用され、また低温での大入熱溶接 HAZ 韌性も具備することが求められている。これらの要求に対して、前述の低カーボン多方位ベイナイト技術を活用し、厚肉、高強度かつ低温での大入熱溶接 HAZ 韌性のすべてを満足する EH40 鋼板を開発した。

#### 2.1.1 品質設計の考え方

本鋼板は、低温での大入熱溶接 HAZ 韌性確保の観点から、前述の MA 低減の考え方に基づき、C 量を従来鋼に比べ 1/2 以下に低減するとともに、弱炭化物生成元素である Mn, Cu, Ni などを船級規格の化学成分範囲内で最大限活用（表 1）した。また、TMCP 技術を駆使することにより高強度の確保も実現した。

表 1 造船用 EH40 鋼板の化学成分

Table 1 Chemical composition of developed and conventional steels (EH40)

Steels	Chemical composition (mass%)					
	C	Si	Mn	Others	C <sub>eq</sub>	P <sub>cm</sub>
Developed	0.05	0.15	1.56	Cu, Ni, Ti, Nb, B	0.35	0.16
Conventional	0.12	0.36	1.49	Ti, Nb	0.37	0.21

## 2.1.2 開発鋼の特性

- 1) 従来鋼の1/2以下のC量にもかかわらず、板厚80mmという厚肉鋼板において高強度を確保できている(表2)。
- 2) 溶接入熱量58kJ/mmの大入熱2電極SEGARC溶接(エレクトロガスアーク溶接)を実施した場合にも、十分な継手強度と-20において優れたHAZ韌性を有している(表3, 図2)。

## 2.2 建築構造用590MPa級および780MPa級鋼板

超高層ビル建設には厚肉・高強度の鋼板が使用されており、その溶接施工には、造船や橋梁分野で適用されている溶接入熱の2~10倍に相当する大入熱溶接が適用されている。さらに、阪神・淡路大震災を契機として、耐震性能の観点から鉄骨構造部材の溶接部に高い韌性値が要求される例<sup>6)</sup>が増えている。これらの要求に対して、前述の低カーボン多方位ペイナイト技術を活用し、溶接性および溶接継手韌性に優れた建築構造用590MPa級および780MPa級鋼板を開発した。

### 2.2.1 品質設計の考え方

本鋼板は、超大入熱溶接におけるHAZ韌性確保の観点

表2 開発鋼(EH40)の機械的性質

Table 2 Mechanical properties of developed steel (EH40)

Thickness	Mechanical properties			
	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Charpy impact property $\sqrt{E_{40}}$ (J)
80mm	491	586	23	281
Specification	390	510~650	20	55

表3 開発鋼(EH40)における継手強度特性

Table 3 Mechanical properties of welded joints on developed steel (EH40)

Thickness	Mechanical properties	
	TS (MPa)	Position of failure
80mm	554	HAZ
	555	HAZ
Specification (EH390)	510	

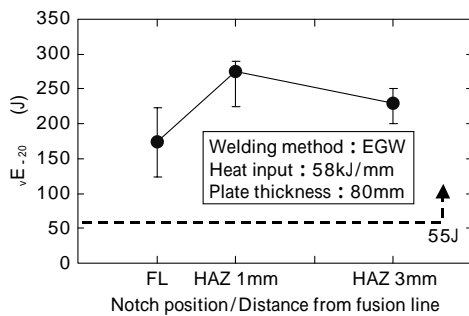


図2 開発鋼(EH40)の継手韌性

Fig. 2 Charpy V-notch absorbed energy in HAZ on developed steel (EH40)

から、前述の考え方に基づき、C量を従来鋼に比べ1/3以下に低減した上で、強化元素としてMn, Cu, Ni, Crなどの弱炭化物生成元素を添加している(表4)。また、建築構造用鋼板に要求される低降伏比を実現するため二相域熱処理を含む熱処理を実施している。

### 2.2.2 開発鋼の特性

- 1) 590MPa級および780MPa級鋼板とも厚肉において十分な機械的性質を有している(表5)。
- 2) y型溶接割れ試験の割れ防止温度は、590MPa級鋼板では0, 780MPa級鋼板では25であり、いずれも良好な耐溶接割れ性を有している(表5)。
- 3) 590MPa級鋼板にはエレクトロスラグ溶接(溶接入熱100kJ/mm), 780MPa級鋼板にはサブマージアーク溶接(溶接入熱40kJ/mm)を行い継手韌性を評価した結果、いずれも極めて良好なHAZ韌性を有している(図3, 4)。

表4 建築構造用鋼板の化学成分

Table 4 Chemical composition of developed and conventional steels for building structure

Steels		Chemical composition (mass%)			
		C	Si	Mn	Others
590MPa	Developed	0.03	0.09	1.44	Cu, Ni, Cr, Ti, B
	Conventional	0.12	0.25	1.45	Cu, Ni, Mo, V, Nb
780MPa	Developed	0.05	0.26	2.00	Ni, Cr, Mo, V, Ti, B

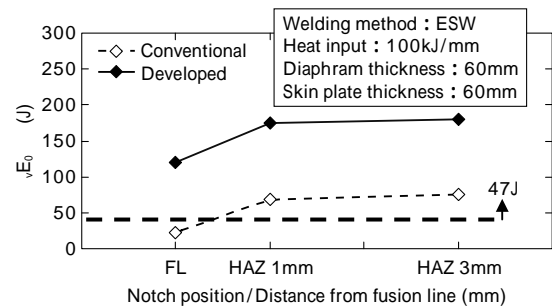


図3 開発鋼と従来鋼の継手韌性比較(建築構造用590MPa鋼板)  
Fig. 3 Charpy V-notch absorbed energy in HAZ of 590MPa developed and conventional steels

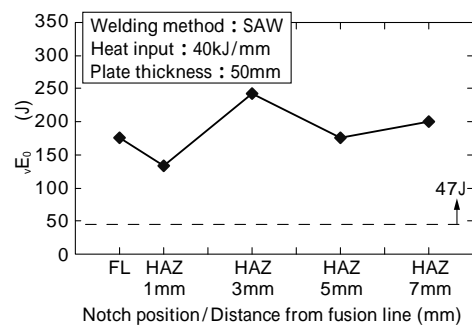


図4 開発鋼(建築構造用780MPa鋼板)の継手韌性  
Fig. 4 Charpy V-notch absorbed energy in HAZ of 780MPa steel

表5 建築構造用鋼の機械的性質および溶接性

Table 5 Mechanical properties and weldability of developed and conventional steels for building structure

Steels	Thickness (mm)	Mechanical properties					Weldability
		YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)	$\sqrt{E_{40}}$ (J)	
590MPa	Developed	485	636	32	76	313	0
	Conventional	467	624	32	75	262	25
Specification (SA440)		440~540	590~740	20	80	47	-
780MPa	Developed	668	846	25	79	204	25
	Specification (KBSA630)	630~750	780~930	16	85	47	-

表6 橋梁用570MPa級鋼板の化学成分

Table 6 Chemical composition of developed (BHS500) and conventional steels

	Chemical composition (mass%)			
	C	Si	Mn	Others
Developed	0.03	0.13	1.51	Ni, Cr, Mo, Nb, Ti, B
Conventional	0.05	0.32	1.54	Cu, Ni, Cr, Mo, V, Ti, B

表7 開発鋼(BHS500)の機械的特性および溶接性

Table 7 Mechanical properties and weldability of developed (BHS500) and conventional steels

Steels	Thickness (mm)	Mechanical properties				Weldability
		YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	$vE_{-5}$ (J)	
Developed	25	542	621	29	308	RT
	50	564	688	26	265	RT
	100	540	607	25	294	RT
Conventional	52	542	641	28	275	RT
Specification (BHS500)	500	570	20	100	-	-

### 2.3 橋梁用高性能 BHS500 鋼板

コンクリート橋に対する鋼橋のコスト競争力強化に向け、溶接性 (Pcm 0.20%)、溶接継手特性に優れた橋梁用高性能鋼 (BHS 鋼) が提案されている<sup>7)</sup>。このたび、これらの特性を満足する 570MPa 級鋼板および耐侯性 570MPa 級、780MPa 級鋼板を開発した。ここでは、570MPa 級鋼板である BHS500 鋼板について述べる。

#### 2.3.1 品質設計の考え方

BHS500 鋼板の開発に当たり、前述の MA 低減とともに耐溶接割れ性向上のために、C 量を従来鋼の 0.05% から 0.03% に低減させた。一方で、前述の弱炭化物生成能元素である Mn, Cr, Ni の添加 (表 6) を活用するとともに、TMCP における冷却を最大限に活用し、溶接継手性能を確保しつつ高強度も確保した板厚 100mm までの鋼板を開発した。

#### 2.3.2 開発鋼の特性

上記の考え方に基いて開発した BHS500 鋼板は、以下のような特徴を有している。

- 1) 母材特性は、全て高性能鋼としての要求特性を満足している (表 7)。
- 2) 室温で y 型溶接割れ試験を実施した結果、割れは認められず、またアークストライクのような小入熱での最高硬さは HV299 と十分低い値であり、ビード長 20mm の仮付溶接時にも割れは発生しない (表 7)。

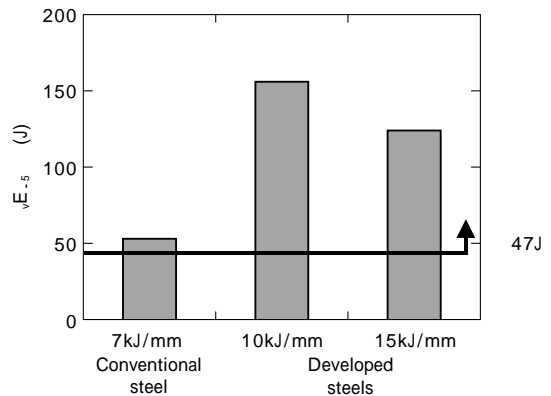


図5 開発鋼 (BHS500) と従来鋼の継手靱性比較 (ノッチ位置: HAZ 1mm)

Fig. 5 Charpy V-notch absorbed energy in HAZ (Notch position: HAZ 1mm)

### 3) 入熱量 15kJ/mm のエレクトロガスアーク溶接時においても優れた HAZ 靱性を有している (図 5)。

むすび=当社独自の「低カーボン多方位ベイナイト技術」を駆使して、あらゆる需要分野のニーズに応える商品群を開発した。これらはいずれも、コウベスーパータフネスシリーズとしてメニュー化したものであり、その品質の良さが認められ順調に受注量が拡大している。これらの商品は、溶接施工効率向上に貢献することはもとより、今後ますます高まると考えられる構造物の安全性向上という社会的な要請にも応えるものであり、今後急速に需要が拡大するものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 笠松 裕ほか: 鉄と鋼, Vol.165, No.18 (1979) p.1232.
- 2) 畑野 等ほか: まてりあ, Vol.43, No.3 (2004) p.244.
- 3) 畑野 等ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2 (2004) p.104.
- 4) 高平智明ほか: 石川島播磨技報, Vol.41, No.6 (2001) p.249.
- 5) 中村 靖: 日本海事協会誌, No.256 (2001) ( ) p.135.
- 6) 稲田達夫ほか: 材料とプロセス, Vol.16, No.2 (2003) p.340.
- 7) 三木千壽ほか: 土木学会論文集, No.738/I-64 (2003.7) p.1.