

(技術資料)

# 橋梁用高降伏点圧延鋼材 SBHSシリーズ

久保田毅\*<sup>1</sup>

## Higher Yield Strength Steel Plates for Bridges: SBHS Series

Tsuyoshi KUBOTA

### 要旨

SBHSシリーズの厚鋼板について、鋼種設計の考え方とその特性について紹介する。SBHS500はフェライトやMAの生成を抑制した微細ベイナイト組織を形成させることで、優れたじん性と高YPを実現した。SBHS700はMAを含まない上部ベイナイト組織に粒子分散強化を活用することで高YP化を実現した。また、それを実現させるためのプロセス条件として加速冷却条件を適正化することで、平坦度確保と両立した。開発鋼はいずれも母材特性の規格値を満足しており、十分な溶接性および溶接継手特性を有している。

### Abstract

This article introduces the design concept and key characteristics of the thick steel plates of the SBHS series. The SBHS500 exhibits excellent toughness and a high yield point (YP) thanks to the formation of a fine bainitic microstructure, which suppresses the formation of ferrite and martensite-austenite constituents(MA). On the other hand, the SBHS700 attains a high YP by employing particle dispersion strengthening within an upper bainite microstructure that is free of martensite-austenite constituents(MA). The steel also achieves excellent flatness by optimizing the accelerated cooling process conditions. All steels developed in the SBHS series satisfy the base material specifications and exhibit sufficient weldability along with favorable welded joint properties.

### 検索用キーワード

橋梁用高降伏点圧延鋼材, SBHS, ベイナイト, MA, 加速冷却, 溶接継手特性

ま え が き = 橋梁構造物における高性能化・長寿命化・施工合理化のニーズが高まる中、鋼材に求められる性能も年々高度化している。こうした社会的要請に応えるべく、当社は一般社団法人日本鉄鋼連盟「橋梁用鋼材研究会」における産学連携研究プロジェクトに参画し、SBHS (Steels for Bridge High Performance Structure) のJIS規格化 (JIS G 3140) に貢献した。SBHSは、これまで橋梁用鋼材として使用されてきた溶接構造用圧延鋼材 (SM鋼材, JIS G 3106) と比較して、同じ引張強さでも高降伏点 (高YP) の規格となっている。また、じん性および溶接性においても、より優れた性能を有している<sup>1)</sup>。そのため、現時点での汎用的な橋梁用鋼材の中で高性能な鋼材であるといえる。SBHSはその強度クラスごとにSBHS400 (YP  $\geq 400\text{N/mm}^2$ ), SBHS500 (YP  $\geq 500\text{N/mm}^2$ ), SBHS700 (YP  $\geq 700\text{N/mm}^2$ ) の3グレードがあり、耐候性タイプ (W) も加えてJIS規格化されている (表1)。従来SM鋼材に対して高YPであるSBHSの適用は高強度化による鋼橋の鋼重削減に有効である。加えて、溶接作業の効率化 (SBHS400, 500は予熱不要, SBHS700は予熱温度: 100~120℃から50℃に低減) による製作性の向上など、鋼橋の建設コスト縮減も期待される (表2)。

当社はSBHSシリーズの開発・商品化を完了しており、

適用実績を着実に伸ばしている状況である。本稿では、当社開発鋼のうち、まずSBHS500について鋼種設計の考え方とその特性について紹介する。より高強度なSBHS700については、鋼種設計の考え方および平坦度確保のためのプロセス条件の検討内容と特性について報告する。

## 1. SBHS500の鋼種設計の考え方と特性

### 1.1 SBHS500の鋼種設計の考え方

優れた靱性と高YPを実現するために、フェライトやMA (Martensite-Austenite constituent) の生成を抑制した微細ベイナイトを目標マイクロ組織とした。図1に連続冷却変態図の概念図を示す。Nbを添加しフェライト析出を抑制し、かつフェライトノーズにかからない適切な冷却速度で冷却することでフェライト析出を抑制した。また、Mn, Cu, Niといったオーステナイト ( $\gamma$ ) 安定化元素を添加することで変態温度を低下させている。加えて、未再結晶域圧下により粒内からの変態を促進し、結晶粒微細化を図った。

### 1.2 SBHS500の特性

#### 1.2.1 母材特性

表3および表4に開発鋼の成分および機械的特性を示す。開発鋼はC添加量を抑制することで溶接割れ感受

\*<sup>1</sup> 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部

性組成  $P_{CM} \leq 0.20$  を満足しているとともに、要求特性にも十分適合している。また、道路橋示方書・同解説で規定された冷間曲げ加工の内側半径を板厚の5倍以上を想定した場合のシャルピー吸収エネルギー200 J以上<sup>2)</sup>も満足している。

### 1.2.2 溶接性および溶接継手特性

開発鋼に対して、y形溶接割れ試験を実施した溶接条

件および試験結果を表5に示す。 $P_{CM} \leq 0.20$ のため、予熱なしでも割れは発生しなかった。

橋梁製作のフランジ同士の板継ぎ溶接を模擬して、SAW (Submerged Arc Welding) 後の特性を評価した。開先形状および断面マクロ結果を図2、図3に示す。表6に溶接条件および継手特性を示す。パス間温度250℃以下で引張、衝撃特性ともに十分な特性を有している。

表1 SBHSシリーズの機械的特性  
Table 1 Mechanical Properties of SBHS series

Steel	Tensile test		Charpy impact test	
	YP (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	Test temp. (°C)	Energy (J)
SBHS400 SBHS400W	≧ 400	490~640	0	≧ 100
SBHS500 SBHS500W	≧ 500	570~720	-5	
SBHS700 SBHS700W	≧ 700	780~930	-40	

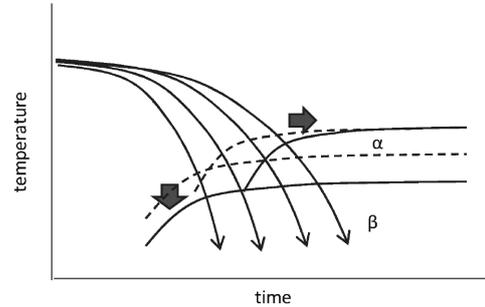


図1 CCT曲線の概念図  
Fig.1 Conceptual diagram of CCT curve

表2  $P_{CM}$ と予熱温度の比較  
Table 2 Comparison of  $P_{CM}$  and preheating temp.

Strength	Steel	Classification	Thickness(mm)			
			t ≦ 25mm	25 < t ≦ 40	40 < t ≦ 50	50 < t ≦ 100
490N/mm <sup>2</sup>	SM490Y SMA490W	$P_{CM}$	SM490Y		0.26(80°C)	
		(Preheating temp.)	SMA490W	0.26(-)	0.27(80°C)	0.29(100°C)
	No preheating required $P_{CM}$	-	0.24	0.22		
570N/mm <sup>2</sup>	SM570	$P_{CM}$ (Preheating temp.)	0.26(-)	0.27(80°C)	0.29(100°C)	
		No preheating required $P_{CM}$	-	0.24	0.22	
	SBHS500(W)	$P_{CM}$ (Preheating temp.)	≦ 0.20(-)			
780N/mm <sup>2</sup>	HT780	Minimum preheating temp.	100		120	
	SBHS700(W)	Minimum preheating temp.	50			

表3 開発鋼の化学成分の一例 (SBHS500)  
Table 3 Example of chemical compositions of developed steel (SBHS500)

Steel	Chemical composition(mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	N(ppm)	Others	$P_{CM}$
Developed Steel	0.04	0.32	1.93	0.004	0.001	40	Cu, Ni, Nb, Ti	0.17
Spec.	≦ 0.11	≦ 0.55	≦ 2.00	≦ 0.020	≦ 0.006	≦ 60	-	≦ 0.20

表4 開発鋼の機械的特性の一例 (SBHS500)  
Table 4 Example of mechanical properties of developed steel (SBHS500)

Thickness (mm)	Tensile test		Charpy impact test
	YP (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	vE <sub>5</sub> (J)
6	551	627	-
25	588	632	365
50	574	652	338
80	538	620	328
100	546	636	318
Spec.	≧ 500	570~720	≧ 100

表5 y形溶接割れ試験結果 (SBHS500)  
Table 5 Results of y-groove weld cracking test (SBHS500)

Thickness (mm)	Welding method	Welding consumable	Welding condition	Heat input (kJ/mm)	Crack(%)			
					Preheating temperature(°C)	Surface	Root	Section
50	SMAW	Wire : LB-62UL	170A-24V -150mm/min	1.6	5	0	0	0
					25	0	0	0

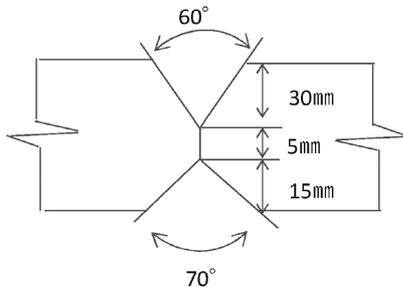


図2 SAWの開先形状 (SBHS500)  
Fig.2 Tip shape of SAW (SBHS500)

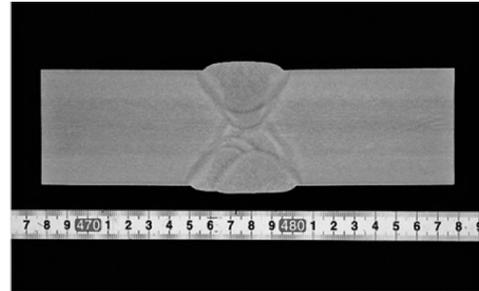


図3 SAWの断面マクロ写真 (SBHS500)  
Fig.3 Macroscopic photograph of SAW (SBHS500)

表6 溶接条件および継手特性 (SBHS500)  
Table 6 Welding conditions and mechanical properties of welded joint (SBHS500)

Thickness (mm)	Welding method	Welding consumable	Preheating temperature(°C)	Interpass temperature(°C)	Heat input (kJ/mm)	Tensile test		Charpy impact test				
						TS (N/mm <sup>2</sup> )	Fracture Area	vE <sub>5</sub> (J)				
								Position	Depo	Fusion line	FL+1mm	FL+3mm
50	SAW	Wire : US-40 Flux : MF-38	-	~250	~9.2	640	Base Metal	t/4	97	116	248	373
Spec.						≧570	-	≧47				

## 2. SBHS700の鋼種設計の考え方と特性

### 2.1 SBHS700の鋼種設計の考え方

#### 2.1.1 鋼種設計の課題

表7に当社溶接構造用高張力鋼板K-TEN<sup>TM</sup>780とSBHS700機械的特性規格値を示す。SBHS700の特徴として、K-TEN<sup>TM</sup>780と引張強度は同じであるがYPが異なる(すなわち高YP化が必要である)ことが特徴である。780 N/mm<sup>2</sup>級の強度を確保するには上部ベイナイト組織を活用することが一般的である。しかし、MAを含むとYPが低下するため<sup>3)</sup>、MAを含まない上部ベイナイト組織を目標組織とし、粒子分散強化による高YP化を図った。それを実現するプロセス条件として、加速冷却時の冷却速度と冷却停止温度を適正化した。

また、今後、SBHS700は道路橋示方書・同解説に追記される予定のため、平坦度基準はJISより厳しい道路橋示方書・同解説で規定された値を満足させることを目標とし加速冷却時の水量条件の適正化を図った。

以上、SBHS700開発における二つの課題(高YP化、平坦度確保)に対し、強化機構およびプロセス条件について検討した。

#### 2.1.2 高YP化のための強化機構の検討

上部ベイナイト変態では、ベイニティックフェライトが析出した後に、未変態 $\gamma$ へ吐き出されたCが濃縮しセメンタイトが析出する。そして、その析出形態は冷却速度に依存することが知られている<sup>4)</sup>。そのため、過去知見から最大厚75mmでも5°C/sec.以上の冷却速度を確保した。いっぽうで、冷却停止温度の影響は不明確なため、セメンタイト析出挙動に及ぼす冷却停止温度影響を評価した。図4に、ベイナイト組織におけるセメンタイト形成過程の模式図を示す。前述のように、ベイナイト変態はベイニティックフェライト析出後に排出されたCの拡散を伴いセメンタイトが形成される。この際、十分に速い冷却速度で変態開始温度(Bs)から終了温度

表7 SBHS700とK-TEN<sup>TM</sup>780の機械的特性  
Table 7 Mechanical properties of SBHS700 and K-TEN<sup>TM</sup>780

Steel	Thickness (mm)	Spec.	
		YP (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )
SBHS700	≦100	≧700	780~930
K-TEN <sup>TM</sup> 780	≦50	≧685	780~930
	50 < t ≦ 100	≧665	

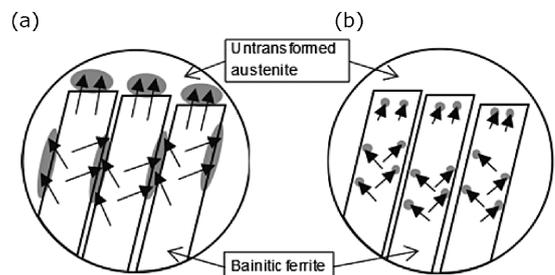


図4 セメンタイト形成過程の模式図  
(a) 拡散距離が長い (b) 拡散距離が短い  
Fig.4 Schematic diagram of cementite formation process  
(a) Long diffusion distance (b) Short diffusion distance

(Bf)の間まで連続的に冷却を行えば、Cの拡散距離が短くなりセメンタイトは粒内に微細に析出する。いっぽう、加速冷却をBf以上で停止しその後空冷した場合、Cの拡散が可能となり、セメンタイトはベイニティックフェライト粒界に析出すると考えられる。図5に示すように、セメンタイト分散状態は加速冷却停止温度に影響を受けることが分かった。そこで、Bs~Bf間のC拡散度合いを図6に示す冷却温度履歴中の斜線部の温度と時間を積分し下記式にて算出したC拡散距離とYPの関係を整理した。

$$C \text{ 拡散距離} = \int_0^t D dt \dots\dots\dots (1)$$

図7にC拡散距離とセメンタイト粒子間距離、図8にセメンタイト粒子間距離とYPの関係を示す。Bs~Bf間のC拡散距離が短いほどYPが高くなることが分かった。

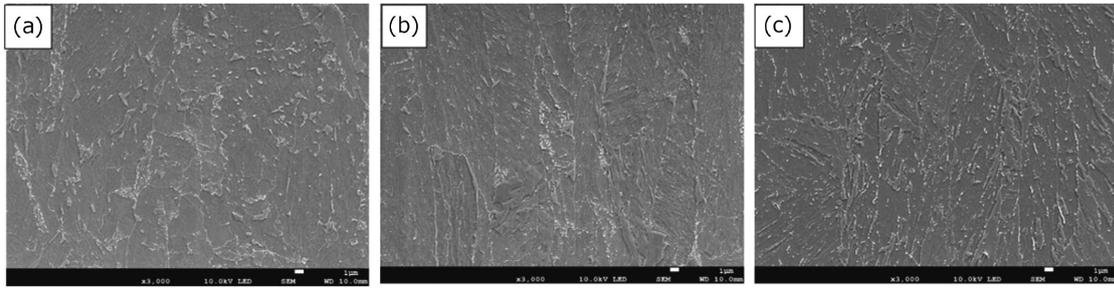


図5 SBHS700のセメンタイトの分散状況 ((a) 500°C停止 (b) 410°C停止 (c) 270°C停止)

Fig.5 Cementite dispersion of SBHS700 ((a) 500°C stop (b) 410°C stop (c) 270°C stop)

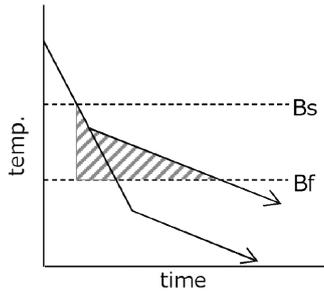


図6 C拡散度合いの模式図  
Fig.6 Schematic diagram of carbon diffusion

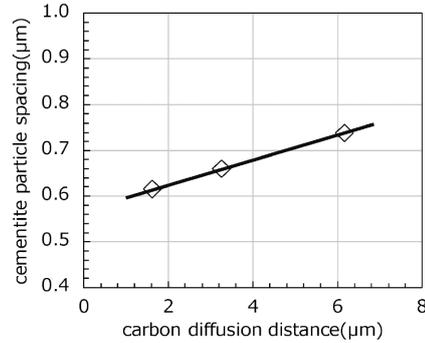


図7 C拡散距離とセメンタイト粒子間距離の関係  
Fig.7 Relationship between carbon diffusion distance and cementite particle spacing

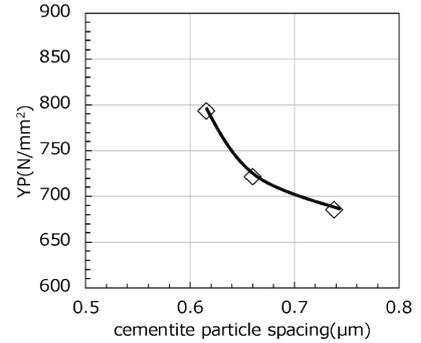


図8 セメンタイト粒子間距離と降伏強度の関係  
Fig.8 Relationship between cementite particle spacing and YP

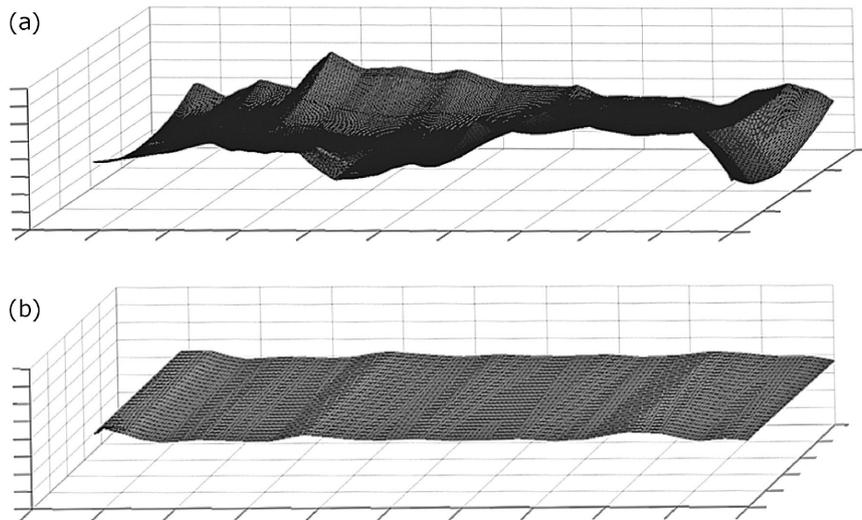


図9 SBHS700の加速冷却後形状のFEM解析結果 ((a) 水量調整前 (b) 水量調整後)

Fig.9 FEM analysis results of shape after accelerated cooling of SBHS700

((a) Before adjusting the water flow rate (b) After adjusting the water flow rate)

以上の結果から、既定のYPを確保するためのセメンタイト粒子分散強化を活用するためには、加速冷却停止温度をBf以下とする必要があることが分かった。

### 2.1.3 平坦度確保のためのプロセス条件検討

2.1.2項で述べたようにMAを含まない上部ベイナイト組織を形成し所定のYPを満足させるためにはBf以下の加速冷却停止温度とする必要がある。したがって、加速冷却直後のホットレバラー矯正は活用できず、冷却ままでの平坦度制御が必要となる。一般的に加速冷却後の平坦度不良の原因として遷移沸騰冷却があげられる。加えて、長手方向温度偏差に起因する圧縮熱応力Pが臨界座

屈応力 $P_{cr}$  ( $\propto$ 鋼板の剛性)を上回って発生する座屈現象も知られている<sup>5)</sup>。そのため、熱応力による座屈を抑制する必要がある。

$$P > P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{W^2} \dots\dots\dots (2)$$

熱応力は、冷却中の鋼板長手温度勾配に起因すると考えられるため、FEM解析により座屈の発生しない温度勾配を算出した。それとともに、加速冷却バンク水量の影響を評価した結果、座屈が生じない適切な水量条件を見出した(図9)。以上の技術を活用することで、SBHS700としての機械的特性と平坦度を両立させるこ

表8 開発鋼の化学成分の一例 (SBHS700)

Table 8 Example of chemical compositions of developed steel (SBHS700)

Steel	Chemical composition(mass%)										
	C	Si	Mn	P	S	Mo	V	B(ppm)	N(ppm)	Others	P <sub>CM</sub>
Developed Steel	0.05	0.24	1.97	0.004	0.001	0.39	0.002	11	40	Cu,Ni,Ti	0.27
Spec.	≦0.11	≦0.55	≦2.00	≦0.020	≦0.006	≦0.60	≦0.05	≦50	≦60	-	≦0.30

表9 開発鋼の機械的特性の一例 (SBHS700)

Table 9 Example of mechanical properties of developed steel (SBHS700)

Thickness (mm)	Tensile test		Charpy impact test
	YP (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	vE <sub>-40</sub> (J)
6	784	831	-
12	748	853	-
32	851	874	159
75	796	845	129
Spec.	≧700	780~930	≧100

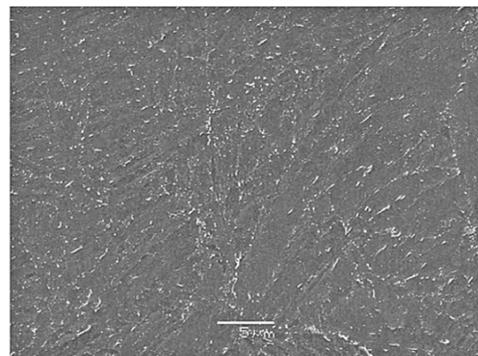


図10 開発鋼のSEM像 (SBHS700)

Fig.10 SEM image of developed steel (SBHS700)

表10 y形溶接割れ試験結果 (SBHS700)

Table10 Results of y-groove weld cracking test (SBHS700)

Thickness (mm)	Welding method	Welding consumable	Welding condition	Heat input (kJ/mm)	Crack (%)			
					Preheating temperature(°C)	Surface	Root	Section
32	GMAW	Wire : MG-S80J	280~300A-30~31V -300~330mm/min	1.7	50	0	0	0
75					50	0	0	0

表11 溶接条件および継手特性 (SBHS700)

Table11 Welding conditions and mechanical properties of welded joint (SBHS700)

Thickness (mm)	Welding method	Welding consumable	Preheating temperature(°C)	Interpass temperature(°C)	Heat input (kJ/mm)	Tensile test		Charpy impact test				
						TS (N/mm <sup>2</sup> )	Fracture Area	vE <sub>-40</sub> (J)				
								Position	Depo	Fusion line	FL+1mm	FL+3mm
32	SAW	Wire : US-80LT Flux : PFH-80AK	100	95~180	5.0	891	Weld Metal	t/4	150	252	259	260
Spec.						≧780	-	≧47				

とが可能となった。

## 2.2 SBHS700の特性

### 2.2.1 母材特性

表8に示す化学成分の鋼を用い、2.1節で述べた指針に基づき制御圧延後、Bf以下の加速冷却を実施し焼き戻しを実施した。表9にその母材機械的特性を示す。機械的特性は引張特性、衝撃特性の規格値を満足している。図10にSEM組織を示すが、セメントタイトが微細分散した上部ベイナイト組織であった。

### 2.2.2 溶接性および溶接継手特性

表10に、y型溶接割れ試験条件と結果を示す。予熱50°Cでも母材に割れが無いことを確認した。表11に溶接条件および溶接継手特性を示す。入熱5kJ/mmで引張、衝撃特性ともに十分な特性を有している。

むすび=今回、橋梁用高降伏点圧延鋼材であるSBHSシリーズについて、当社の鋼種設計の考え方と特性の一例を紹介した。SBHS400(W)、SBHS500(W)の適用実績も増加する中、今後、SBHS700に関しても、特性を踏まえた最適な適用を期待したい。

### 参考文献

- 1) 一般社団法人 日本鉄鋼協会、「橋梁用高性能鋼材(SBHS)」～一般橋梁から長大橋にいたるまで建設コスト縮減に寄与する～、2019, p.5.
- 2) 公益社団法人 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説 鋼橋・鋼部材編. 2017, p.6.
- 3) 山口徹雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.16-19.
- 4) 牧 正志. までりあ. 2007, Vol.46, No.5, p.321-326.
- 5) 吉原直武. 鉄と鋼. 1990, Vol.76, No.6, p.886-893.