

## 2-4

## 溶接構造用鋼\*



白幡 浩幸\*\*

Weldable Structural Steels\*

by SHIRAHATA Hiroyuki\*\*

**キーワード** 強度, 韌性, HAZ, 組織制御, 加工熱処理, TMCP, 制御圧延, 加速冷却

## 1. はじめに

本稿は、金属材料と溶接性の第4回目として、溶接構造用鋼の用途、要求特性、種類、製造方法等について概説するとともに、近年の製造技術の進歩と、それを利用して開発された新製品についても併せて紹介する。

## 2. 溶接構造用鋼の概要

## 2.1 用途

溶接構造用鋼とは、読んで字のごとく、溶接構造物に用いられる鋼材のことであり、製品分類では厚板に該当するものが量的に多く、重要性も高い。用途は船舶、橋梁、建築物、建設・産業機械、タンク、海洋構造物、パイプライン、発電プラント等多岐にわたり、社会インフラそのものを構成する材料として広く使われている。これらの構造物のトラブルは、人命や地球環境に直接影響を及ぼすため、安全性・信頼性の確保は最重要事項である。

## 2.2 要求特性

溶接構造用鋼に要求される特性としては、第一に構造物を維持するための強度が挙げられる。実際に使用されている鋼材の強度は、普通鋼のような引張強度 400N/mm<sup>2</sup> 級（以下 400N 級などと表記）のものから、特殊な用途に使われる 1000N 級以上のものまでである。第二の特性として、鋼材が使用される環境下での安全性を確保するために、粘り強く壊れにくい性質（靱性）も要求される。さらに、鋼材は溶接をした状態で使われるため、溶接部

についても高い安全性・信頼性が要求される。具体的には、溶接欠陥や低温割れ等が発生しにくく施工が容易であること、および溶接継手としての強度、韌性、その他の使用性能を満足することが必要である。

さらに、用途に応じて、疲労強度、耐遅れ破壊特性、高温強度、極低温靱性、耐食性など、様々な環境における耐久性が求められることになるが、いずれの場合も前提となるのは、基本特性である強度、韌性、溶接特性の確保である。

2.3 種類<sup>1, 2)</sup>

JIS 規格において、SS 材と呼ばれる一般構造用鋼 (JIS G 3101) では、不純物元素である P と S 以外の化学成分の規定はないが、溶接構造用鋼では溶接部の特性を確保するために、C 量をはじめとする化学成分や靱性値が規定されている。例えば、SM 材と呼ばれる一般用途向けの溶接構造用圧延鋼材 (JIS G 3106) では、C が約 0.2mass% (以下%と表記) 以下に制限されるほか、Si, Mn や C<sub>eq</sub>, P<sub>CM</sub> が規定される場合もある。靱性要求の厳しい上位グレード (B, C 種) では 0℃ におけるシャルピー衝撃吸収エネルギー値が規定されている。

また、SN 材と呼ばれる建築構造用圧延鋼材 (JIS G 3136) では、耐震性を高めるために、降伏比 (降伏強度 / 引張強度; YR ともいう) の上限や板厚方向引張試験の絞り値等が規定される場合がある。(SM, SN 材の規格については、本連載の第2章 2-1<sup>3, 4)</sup>を参照)

そのほか、橋梁用として大気中での耐錆性を高めるために Cu, Ni, Cr 等を添加した耐候性溶接構造用鋼 (JIS G 3114)、建築用として 600℃ 近辺の降伏強度低下を抑制するために Mo, Cr, Nb 等を添加した耐火鋼などがある。表 1<sup>3)</sup>に種々の溶接構造用鋼の化学成分と機械的性質の例を示す。

特殊な環境で使用される鋼材としては、中高温域で使用するために Cr, Mo 等を添加したボイラー・圧力容器用

\*原稿受付 平成 21 年 1 月 26 日

\*\* 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corporation

表1 種々の溶接構造用鋼の成分と特性<sup>5)</sup>

鋼種	化学成分 (%)														製造法	板厚 (mm)	機械的性質				
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	その他	C <sub>eq</sub>	P <sub>CM</sub>			YS (MPa)	TS (MPa)	vE <sub>0</sub> (J)		
SM400	軟鋼	0.18	0.13	0.83	0.016	0.008									0.32	0.23	AR	40	283	438	150
HT490	一般用鋼	0.19	0.39	1.51	0.022	0.017									0.44	0.28	AR	40	380	550	147
	一般用鋼	0.14	0.41	1.44	0.020	0.006									0.38	0.23	N	32	370	540	196
	造船大入熱	0.10	0.33	1.43	0.012	0.002					0.015	Ti:0.01(TiN)	0.34	0.18	0.38	0.19	CR-ACC	25	451	552	291 <sup>*1</sup>
	海構大入熱	0.09	0.17	1.54	0.004	0.002	0.21	0.24			0.013	Ti:0.01(TiO)	0.38	0.19	0.38	0.19	CR-ACC	60	472	542	330 <sup>*2</sup>
	耐候性鋼	0.14	0.27	1.13	0.018	0.010	0.30	0.10	0.45		0.04		0.45	0.25	0.45	0.25	AR	20	380	520	157
HT590	建築低 YR	0.12	0.23	1.30	0.007	0.002					0.060		0.34	0.19	0.34	0.19	DLQ-T	80	371	515	285
	耐火鋼	0.09	0.10	0.60	0.009	0.004			0.43	0.45			0.37	0.18	0.37	0.18	AR	32	324	541	352
HT780	一般用鋼	0.11	0.23	1.39	0.012	0.003				0.05	0.05	B:10ppm	0.35	0.19	0.35	0.19	DQ-T	38	540	640	274
	建築低 YR	0.12	0.27	1.44	0.006	0.002	0.23	0.19		0.22	0.04		0.44	0.23	0.44	0.23	DLQ-T	100	470	680	205
HT780	一般用鋼	0.11	0.21	0.85	0.015	0.006	0.22	0.97	0.53	0.43	0.05		0.53	0.25	0.53	0.25	QT	50	780	820	196
	産機用鋼	0.10	0.52	1.81	0.019	0.003						0.04	0.40	0.21	0.40	0.21	CR	12.7	716	804	80 <sup>*3</sup>

\*1:-40℃ \*2:-60℃ \*3:-10℃

表2 NK 規格船体用圧延鋼材<sup>7)</sup>  
(a) 種類, 脱酸形式および化学成分

種類	材料記号	脱酸形式	化学成分 (%)														炭素当量 (%)		
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	Nb	V	Ti	N			
軟鋼	KA	リムド	0.21以下	0.50以下	2.5×C以上														
	KB				0.8以上														
	KD	キルド又は細粒キルド	0.21以下	0.35以下	0.6以上	0.035以下	0.035以下						0.015以上						
	KE	細粒キルド	0.18以下		0.7以上								0.015以上						
高張力鋼	KA32	細粒キルド	0.18以下	0.50以下	0.90~1.60	0.035以下	0.035以下	0.35以下	0.20以下	0.40以下	0.080以下	0.015以下	0.02~0.05	0.05~0.10	0.02以下				
	KD32																		
	KE32																		
	KA36																		
	KD36																		
	KE36																		
	KA40																		
	KD40																		
	KE40																		
	KF32																		
KF36																			
KF40																			

(b) 機械的性質

材料記号	引張試験			衝撃試験		
	降伏点または耐力(N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	伸び(%) (L=5.65√A)	試験温度(℃)	最小平均吸収エネルギー値(J)	
					L	T
KA				-	-	-
KB				0		
KD	235以上	400~520	22以上	-20	27	20
KE				-40		
KA32				0		
KD32	315以上	440~590	22以上	-20	31	22
KE32				-40		
KF32				-60		
KA36				0		
KD36	355以上	490~620	21以上	-20	34	24
KE36				-40		
KF36				-60		
KA40				0		
KD40	390以上	510~650	20以上	-20	39	26
KE40				-40		
KF40				-60		

鋼, LPG, LNG など液化ガスの貯蔵タンク用に Ni を添加した低温用鋼などがある。

以上は用途により分類した溶接構造用鋼の種類であるが、強度レベルで区分する場合も多い。引張強度 400N 級鋼を軟鋼というのに対し、490N 級以上の高強度鋼を高張力鋼 (ハイテン) と呼び、慣習的に HT490 などと表記する。1000N 級以上の鋼については超高張力鋼と呼ぶ場合もある。

2.4 主要分野における適用動向<sup>6)</sup>

溶接構造用鋼の使用量としては、橋梁、建築、造船の

3 分野が多い。ここでは、この 3 分野での使用鋼材規格、強度グレード別分類の一端を示す。

各分野の使用鋼材としては、橋梁では JIS の SM 材、建築では SM および SN 材、造船分野では船級協会規格 (日本では日本海事協会: NK) の A~F グレードなどである。これらはいずれも高性能鋼であるほど、靱性値が厳格に規定されている。例えば、SM, SN の高グレード材では温度を 0℃ に固定して吸収エネルギー値が規定されており、船級規格では、表 2<sup>7)</sup> に示すように、エネルギー値を強度レベルに応じて変化させ、さらに靱性グレー

表3 各分野における強度区分別鋼材の割合 (%)<sup>⑧</sup>

	400N 級鋼	500N 級鋼			600N 級鋼
		YP315 / 325	YP355	YP390	
橋梁	37	4	51	—	8
建築	23	68	3	—	1
造船	49	34	16	1	—

ドによって試験温度も変化させている。

表3<sup>⑧</sup>に示した強度別割合を見ると、橋梁が比較的多くの高強度鋼を使用しているのに対し、造船では半分が400N級である。しかしながら、近年大型船舶用を中心に高強度鋼の適用率は高まる傾向にあり、例えばコンテナ船舶としてはYP390級鋼の適用が進み、さらにYP460級鋼の適用も始まっている<sup>⑨</sup>。建築ではYP325の500N級鋼が7割を占めており、他鋼種の割合は少ない。

### 3. 溶接構造用鋼の製造技術

強度、靱性、溶接特性の3つの特性を満たす鋼材を製造するためには、適切な化学成分設計と製造方法の組み合わせが必要である。溶接構造用鋼は要求特性に応じて圧延まま、焼ならし、加工熱処理、焼入れ・焼戻しによって製造されるが、本節では特に加工熱処理に焦点を当て、金属組織制御の観点から、成分設計と製造プロセスについて紹介する。

#### 3.1 化学成分設計

製鋼段階では、不純物としてのP、Sやガス成分として含有されるH、O、N等を適正レベルまで除去すると同時に、要求特性に応じて様々な合金元素を添加して、その後の製造工程で金属組織と材質をつくり込むための環境を整える。高強度鋼では、C、Si、Mnに加えて、Cu、Ni、Cr、Moなどの合金元素や、Nb、Ti、V、Bなどの微量元素（マイクロアロイ）を添加する。後者は通常0.1%以下の添加により、鋼中で微細な析出物を形成し、加熱・圧延・冷却の各工程において組織制御に活用される。微妙な合金元素のバランスが材質に大きく影響するため、製鋼段階での適正な成分設計なくして、その後の工程は成立しない。

ここでは、各合金元素の役割と標準的な添加量の範囲について簡単に述べる。

鋼の性質を決める最も重要な合金元素がCである。Cはパーライトやベイナイト等の硬い相の割合を増加させる安価な強化元素である一方で、添加量の増大にともない、延性、靱性、溶接性を低下させるため、最大でも0.2%以下に抑えられる。

Siは脱酸素元素であるとともに、固溶強化元素としても活用するため、0.5%以下の範囲で添加される。一方、溶接熱影響部（Heat Affected Zone：HAZ）においてM-A混合物（Martensite-Austenite constituent）と呼ばれる硬質相を形成させやすくするために、添加量を制限する場合もある。

Mnは固溶強化元素であるが、Cと比べて延性、靱性

に及ぼす悪影響が小さい。そのため、溶接性や低温靱性が要求される場合にはCを低減した分Mnを増加することが多い。通常0.5~2%程度である。

P、Sは靱性や溶接性を低下させる不純物元素であるため、製鋼工程で必要なレベルまで低減される。

Cuは強度を高めるとともに耐候性にも効果があるため0.2~0.5%添加される。約1%以上添加すると析出強化により大幅に強度が上昇するが、過剰であると熱間加工割れが生じることがある。

Niは強化元素であるとともに、地の靱性を向上させて脆性破壊を起きにくくする元素である。極低温用途の鋼材には最大9%まで添加される。また、耐食性にも効果があり、耐候性鋼やステンレス鋼に添加される。

Crは強度、耐候性、耐食性、耐酸化性、耐熱性の向上に有効である。耐候性鋼などでは通常1%以下であるが、ステンレス鋼、高温用鋼では多量に添加される。

Moは常温だけでなく中・高温域までの強度を上昇させる元素であり、高温ボイラー用鋼では0.5~1%添加される。

Nbは後述する加工熱処理において組織微細化の観点から重要な役割を果たすと同時に、析出強化元素であるため0.005~0.05%の範囲で添加される。

VはVN生成によりフェライト（ $\alpha$ ）変態を促進してHAZ靱性を向上させるとともに、VC析出により強化にも寄与する。通常0.02~0.1%添加される。

Tiは弱脱酸素元素であり、TiOやTiNを生成してHAZ靱性向上に寄与するため0.01~0.02%の範囲で添加される。またTiCによる析出強化を活用する目的で、0.1%近く添加する場合もある。

Alは重要な脱酸素元素であるとともに、AlN生成によりオーステナイト（ $\gamma$ ）粒成長を抑制する効果があるため0.1%以下の範囲で添加される。

Bは $\gamma$ 粒界に偏析して焼入れ性を高める強化元素であるため600N級以上の高強度鋼に添加される場合が多い。また、BN等の析出物を形成しHAZの $\alpha$ 変態促進に効果があるため、大入熱溶接用鋼に添加する場合がある。通常0.002%以下で十分な効果を発揮する。

Caは板厚方向の引張特性を低下させる延伸MnSの生成を抑える（代わりに球状のCaSを生成させる）、あるいは微細酸化物・硫化物を生成させてHAZの $\gamma$ 粒を微細に保つ目的で0.002%以下添加される。

NはTi、Al、B等とともにHAZ組織制御に活用されるが、過剰の固溶Nは靱性を顕著に低下させるため通常0.006%以下とする。

#### 3.2 製造方法<sup>⑩-⑪</sup>

##### 3.2.1 圧延まま（AR）

溶接構造用鋼の中で軟鋼の大部分、および500N級の高張力鋼の一部が圧延まま（As Roll：AR）で製造されている。これは、スラブを再加熱して所定のサイズに圧延した後放冷するプロセスであり、製造上の制約が少なく、生産性が高い。基本的に組織制御を意図したプロセスではないため、高強度化のためには合金元素を添加するしかなく、組織は成分系と板厚から決まる比較的粗大な $\alpha$ とパーライトから構成される。

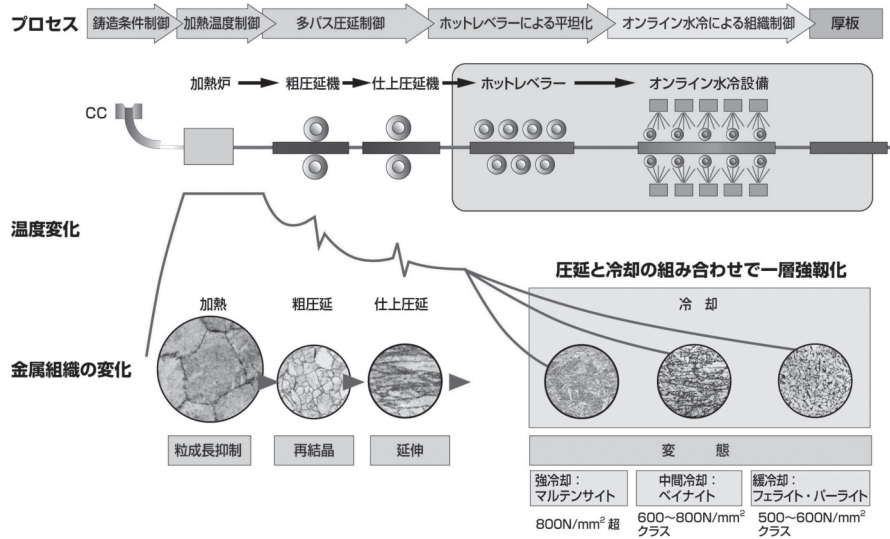


図1 製造プロセスとマイクロ組織の変化<sup>12)</sup>

3.2.2 焼ならし (N)

高張力鋼の製造方法として加工熱処理が普及する以前は、焼ならし熱処理 (Normalizing : N) により製造されることが多かった。これは、 $A_{c3}$ 変態温度直上に加熱して微細  $\gamma$  組織としてから、空冷過程で均一かつ微細な  $\alpha$  粒組織を得るプロセスである。この方法も合金添加と空冷時の  $\alpha$  変態を活用するため細粒化には限度があり、大幅な特性向上は困難である。

3.2.3 加工熱処理 (TMCP)

従来の製造方法と比べて、金属組織の制御範囲を大きく広げ、結晶粒の顕著な微細化を可能とした技術が加工熱処理 (Thermo-Mechanical Control Process : TMCP) である。そのキーテクノロジーは、「適切な温度・压下量の圧延によって  $\gamma$  中に変態の核生成サイトを大量に導入した後、適切な条件で冷却することにより、金属組織を微細化する」ことである。前段の圧延工程を制御圧延 (Controlled Rolling : CR)、後段の冷却工程を加速冷却 (または制御冷却) (Accelerated Cooling : ACC) という。

図1<sup>12)</sup>に鋼材製造プロセス全体観の例と各工程で生じる冶金現象、典型的なマイクロ組織を示す。

最初のステップである加熱工程では、変形抵抗を下げ、圧延しやすくするほか、凝固組織をなくして均一な  $\gamma$  組織とし、圧延以降の工程で活用する Nb, V 等のマイクロアロイを  $\gamma$  中に固溶させるために 1000~1250℃程度に加熱する。このとき  $\gamma$  粒径が小さいほど最終的な組織微細化に有利であるため、加熱温度をできるだけ低くする、あるいは、TiN によるピン止め効果を利用して  $\gamma$  粒の粗大化を抑制する対策が取られることが多い。Ti 無添加の鋼では 200~500  $\mu\text{m}$  の  $\gamma$  粒となるが、Ti および Nb を適量添加すると 50  $\mu\text{m}$  程度まで細粒化できる。

次の圧延工程は、図2<sup>13, 14)</sup>に示すように、①再結晶  $\gamma$  域、②未再結晶  $\gamma$  域、③  $\gamma/\alpha$  二相域という、3つの温度域での圧延に分けることができる。AR プロセスにおける圧延は、通常①の温度域で終了するが、CR では概ね②の温度域、場合によっては③の温度域まで圧延温度を

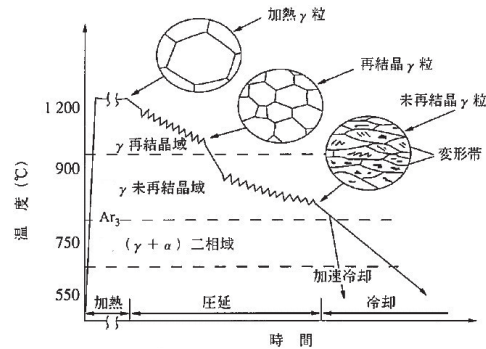


図2 圧延工程で生じるマイクロ組織の変化<sup>14)</sup>

下げて実施される。3つの温度域での圧延の特徴は、以下のように要約される。

①は圧延のパス間で  $\gamma$  が容易に再結晶を起こす温度域である。この温度域での圧延の目的は、再結晶の繰り返しにより  $\gamma$  粒を微細化することである。しかし、到達する  $\gamma$  粒径には限界があり、通常は 30  $\mu\text{m}$  程度である。

②は圧延パス間では再結晶が十分進行しない温度域であり、この温度域での圧延により、 $\gamma$  粒が扁平化するとともに  $\gamma$  粒内に転位や変形帯などの加工組織が導入され、いわゆる加工硬化状態となる。この状態の達成こそが CR の冶金的な意義であり、その後の冷却過程において  $\gamma$  粒界や加工組織から微細な  $\alpha$  粒の生成が促進され、大幅に組織が微細化されることになる。①と②の境界の温度は、特に Nb 量に大きく依存し、Nb 無添加では 800℃くらいであるのに対し、0.05%程度 Nb を含む場合には 900℃を超える。そのため CR の温度待ち時間が短縮され、生産性向上に寄与する。このとき Nb は微細な炭窒化物を形成し、再結晶粒の粒界移動をピン止めすることで、再結晶の進行を抑制する役割を果たす。

③は  $A_{r3}$  変態点以下で  $\alpha$  が生成してくる温度域である。ここでの圧延は、未変態の  $\gamma$  にさらに加工歪を蓄積させるとともに、変態により生じた  $\alpha$  に亜粒界を導入し、最終的な組織をさらに微細化させる。ただし、圧延温度が

低すぎると、 $\alpha$ の加工硬化により靱性が低下し始め、生産性低下や圧延負荷増大といった問題も生じるため、実用上は $Ar_3$ 点よりも40℃程度低い温度範囲に限られる。

圧延に引き続き行われる冷却工程も、TMCPの中で重要な役割を果たす。この工程は空冷の場合もあるが、多くはACCが行われ、適切な冷却速度で適切な温度まで水冷される。冷却速度が大きくなると、変態の駆動力が高まることで、 $Ar_3$ 点よりも低い温度域において多数の $\alpha$ 粒が発生し、顕著な微細組織が得られる。 $\alpha$ 粒径としては、従来のN法では10 $\mu$ m程度が限界であったが、水冷型TMCP適用により5 $\mu$ m程度にまで細粒化が可能となった。

TMCPの最大の効果は金属組織制御によって母材強度・靱性を飛躍的に向上させるとともに、図3<sup>15, 16)</sup>に示すようにARやNで製造する場合よりも合金添加量( $C_{eq}$ )を減らせることである。その結果、溶接性が顕著に向上し、構造物の施工能率向上や安全性・信頼性の確保に大きく貢献している。

3.2.4 焼入れ・焼戻し (QT)

一般に引張強度600N級以上の鋼材については、焼入れ・焼戻し (Quenching, Tempering; QT) 処理によって製造される。このような鋼材を調質鋼と呼び、それ以外の鋼材を非調質鋼と呼ぶ場合がある。

焼入れは通常ACCよりも大きな冷却速度で低温域まで冷却する。これはベイナイトやマルテンサイト等の低温変態相を生成させて、強度を高めることを目的としている。焼戻しは $Ac_1$ 変態点以下の温度域に加熱する処理の

ことで、過剰に導入された転位を減少させて靱性を回復させ、ある場合にはMo, V等の合金炭化物を析出させて強度を高めることを目的に行われる。

焼入れ処理には、古くから行われていた再加熱焼入れ (Reheat Quenching: RQ)、圧延後そのまま焼入れする直接焼入れ (Direct Quenching: DQ) がある。後者についてはCRと組み合わせることもあって、TMCPに含めることが多い。

以上、溶接構造用鋼の代表的な製造方法について述べてきた。図4<sup>17)</sup>にこれらの加工熱履歴を示す。なお、LQT, DLQT (LT, DLTともいう) プロセスは、焼戻しの前に二相域から急冷する処理 (Lamellarizing; L) を行うことにより、例えば $\alpha$ とベイナイト等の二相組織とするもので、建築用低YR鋼の製造に適用されている。図5にはAR, N, TMCP (CR, CR-ACC), QTで製造した鋼のミクロ組織の例を示す。それぞれの製造法でミクロ組織が随分異なることがわかる。

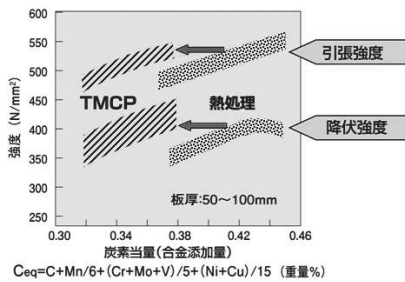


図3 TMCP, N 鋼の  $C_{eq}$  と強度との関係<sup>16)</sup>

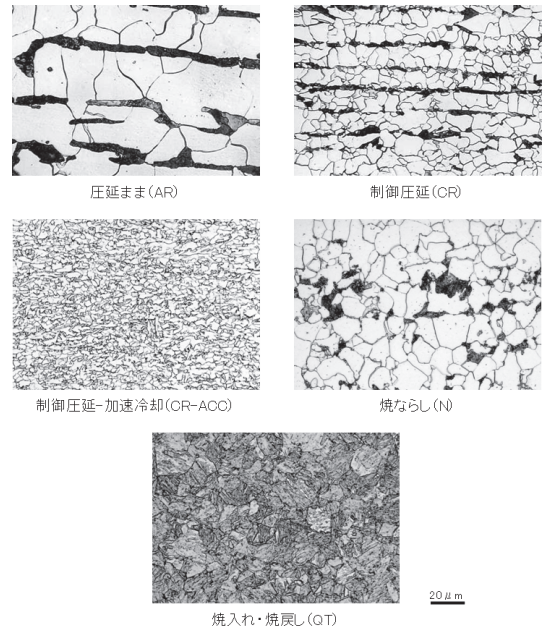


図5 製造法別の鋼材ミクロ組織

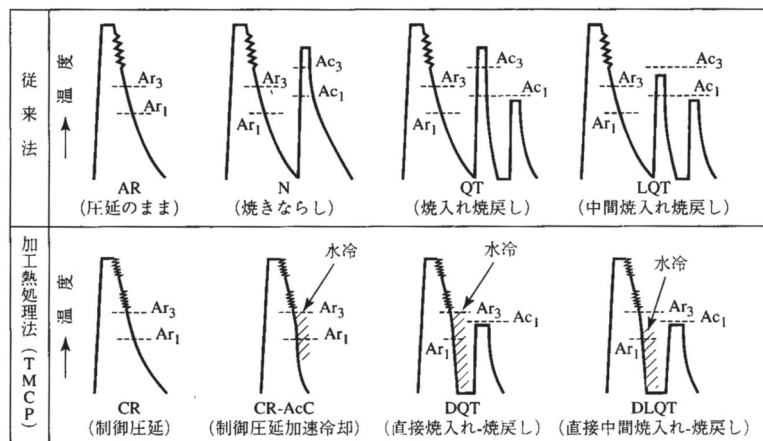


図4 代表的製造プロセスの加工熱履歴<sup>17)</sup>

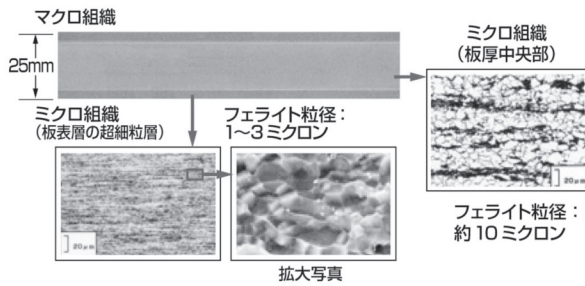


図6 表層超細粒鋼の金属組織<sup>16)</sup>

### 3.2.5 最近のTMCPの進歩

近年需要家からの要求は、ますます高度化、厳格化、多様化する傾向にあり、それに対応するべくTMCPも年々進歩を遂げつつある。以下、トピックス的に示す。

その一例が超細粒鋼の実用化に関するもので、表層超細粒鋼の製造法として開発されたプロセスである<sup>18)</sup>。これは圧延工程の途中で水冷を行い、表層部のみを冷却した後、内部の顕熱を利用して表層部が復熱する過程で圧延を実施することにより、図6<sup>16)</sup>に示すように表層部に1~3 $\mu\text{m}$ 程度の微細 $\alpha$ 粒を生成させるものである。この鋼板の特徴は、万一脆性破壊が発生した場合でも、表層が塑性変形することで、き裂の進展を防ぐことができる点であり、船舶の安全性向上に大きく寄与するものと考えられている。

次の例は、オンライン熱処理プロセス（HOP：Heat-treatment On-line Process）<sup>19)</sup>である。これは、水冷設備の後に誘導加熱方式の熱処理設備を配置することで、600N級以上の鋼板の生産効率を高めるものである。金属学的には、冷却と加熱の組み合わせにより、多様な変態、析出制御が可能である点が特徴的であり、建築、ラインパイプ用の高張力鋼の開発・製造に活用されている。

これに対して、焼戻し処理を付与することなく、ACCままで600N級鋼を効率的に製造できるプロセスも開発されている<sup>20, 21)</sup>。これは、未再結晶 $\gamma$ 域での圧下量確保により、水冷時に微細ベイナイトを生成させて靱性を顕著に向上させることや、水冷停止後の空冷過程におけるNb等の析出活用により、停止温度によらず安定的に強度を確保できるようにした点に特徴がある。

最後に残留応力制御型TMCP<sup>22)</sup>の例を示す。TMCP鋼板では不均一冷却に起因した残留応力分布により、鋼板を切断、溶接する段階で変形が生じて、施工能率を大きく低下させることがある。こうした問題を解決するため、残留応力制御型TMCPが提案された。これは、加熱・圧延・冷却工程での形状制御、オンラインでの残留応力予測に基づく形状評価や出荷判定、後工程での残留応力低減を組み合わせた総合的な残留応力制御技術である。造船分野で高い工作精度が要求される直線ブロック組立等の生産性向上に有効であることが確認されている。

## 4. 溶接構造用鋼のHAZ靱性向上技術<sup>23, 24)</sup>

造船・建築の分野では、溶接施工効率化のため、板厚の厚い鋼材を1パスで溶接する大入熱溶接が実施される

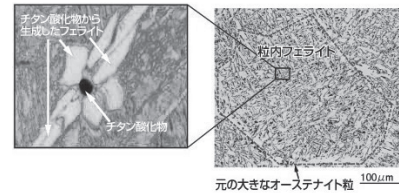


図7 TiO鋼のマイクロ組織とIGF観察例<sup>25)</sup>

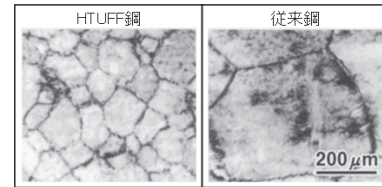


図8 超大入熱溶接時の $\gamma$ 組織比較<sup>25)</sup>

ことが多い。一方で、前述のように近年では船舶の大型化、建築物の高層化にともない、高張力鋼の適用が増えている。一般に、高強度であるほど添加される合金元素の影響でHAZが硬化するとともに、破壊の起点となるような硬質第二相（M-A等）が増大し、大入熱溶接時のHAZ靱性が低下しやすくなる。そのため、高強度かつ大入熱対応が可能な鋼材の開発が強く求められてきた。

TMCP鋼では強度・靱性を確保するための合金元素の量は従来鋼に比べて少なくすむため、大入熱溶接に対しても有利である。しかしながら、大入熱HAZ靱性を確保するためには、硬質第二相の低減だけでなく、大入熱HAZに特有のマイクロ組織の粗大化を抑制することが必要になる。そのため、単純な成分調整だけでなく、組織制御の観点からの改善が必要である<sup>23)</sup>。

大入熱HAZにおけるマイクロ組織の粗大化を抑制するためには、①高温に長時間さらされる場合でも $\gamma$ 粒の粗大化を抑制する、② $\gamma$ 粒内からの $\alpha$ 生成を促進し $\gamma$ 粒を分断する、といった手段が必要である。これらはどちらもHAZ組織の微細化を狙ったものであり、様々なシーズを利用したHAZ靱性向上技術が確立されてきた。

歴史的に最初に実用化されたのがTiN鋼である。これは、TiN粒子によって $\gamma$ 粒を微細に保つとともに、 $\alpha$ の変態核としても活用するものである。しかし、TiNは1200 $^{\circ}\text{C}$ 以上の温度では溶解し始めるため、大入熱溶接用としては適用に限界があった。

それを補うために実用化されたのが、粒内 $\alpha$ （Intra-Granular Ferrite：IGF）を活用した鋼材である。すなわちTiNとMnSの複合析出物や、より高温でも安定なTiの氧化物（TiO）等を変態核として利用し、 $\gamma$ 粒の内部からも $\alpha$ を生成させることで、実質的な組織単位を微細化した鋼材である。図7<sup>25)</sup>はTiO粒子から生成したIGFの観察例である。

しかし、さらに溶接入熱が大きくなると、このような方法でも効果が薄くなり、 $\gamma$ 粒の粗大化を強力に抑制する必要性が生じた。そのためCaやMg等の酸化粒・硫化物を微細かつ高密度に分散させることにより、ピン止め効果をさらに強化した鋼材が開発された。図8<sup>25)</sup>は板厚

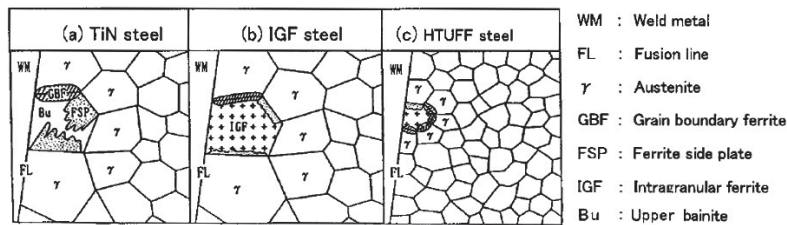


図9 HAZ 組織制御の概念<sup>26)</sup>

60mm の建築用 500N 級鋼を 1,000kJ/cm 程度の入熱で溶接した際の  $\gamma$  組織を開発鋼 (HTUFF 鋼) と従来鋼 (TiN 鋼) とで比較したものである。このような超大入熱溶接時でも開発鋼の  $\gamma$  粒径は微細に保たれ、0°C におけるシャルピー衝撃吸収エネルギーが 70J 以上という良好な靱性を示す。

図 9<sup>26)</sup> に上述した HAZ 靱性向上技術の概念を模式的に示す。こうした高 HAZ 靱性鋼は、造船、建築分野を中心に適用が進みつつある。

## 5. おわりに

本稿では溶接構造用鋼の中でも汎用的に使用される 600N 級以下の鋼を対象として、特に鋼材を製造する際に活用されている金属組織制御技術に重点をおいて、極力平易な解説を試みた。詳細な事柄については、各節の見出しに示した参考文献を参照していただきたい。

## 参考文献

- 1) 百合岡信孝, 大北茂: 鉄鋼材料の溶接, 産報出版 (1998), 35-51.
- 2) 溶接学会: 溶接・接合技術特論, 産報出版 (2005), 13-126.
- 3) 児島明彦: 溶接学会誌, 77 (2008), 237.
- 4) 溶接学会: 溶接・接合技術特論, 産報出版 (2005), 115.
- 5) 百合岡信孝, 大北茂: 鉄鋼材料の溶接, 産報出版 (1998), 40.
- 6) 日本溶接協会鉄鋼部会: より理想的な構造物の設計・製作法を目指して (鋼構造設計・製作法の異分野交流), (2007), 3-41.
- 7) 溶接学会: 溶接・接合技術特論, 産報出版 (2005), 428.
- 8) 山口欣弥ほか: KANRIN 日本船舶海洋工学会誌, 第 3 号, (2005), 70.
- 9) 小指軍夫: 制御圧延・制御冷却, 地人書館 (1997), 17-54.
- 10) 百合岡信孝, 大北茂: 鉄鋼材料の溶接, 産報出版 (1998), 24-30.
- 11) 谷野満, 鈴木茂: 鉄鋼材料の科学, 内田老鶴圃 (2001), 169-178.
- 12) 新日本製鉄(株): NIPPON STEEL MONTHLY, 169 (2007), 8.
- 13) 牧正志: 鉄と鋼, 81 (1995), N547.
- 14) 西岡潔ほか: 新日鉄技報, No.365, (1997), 9.
- 15) 大橋守ほか: 製鉄研究, No.334, (1989), 17.
- 16) 新日本製鉄(株): NIPPON STEEL MONTHLY, 169 (2007), 10.
- 17) 百合岡信孝, 大北茂: 鉄鋼材料の溶接, 産報出版 (1998), 25.
- 18) 石川忠ほか: 新日鉄技報, No.365, (1997), 26.
- 19) 藤林晃夫, 小俣一夫: JFE 技報, No.5 (2004), 8.
- 20) 藤原知哉ほか: 材料とプロセス, 12 (1999), 1014.
- 21) 熊谷達也, 星野学ほか: 材料とプロセス, 19 (2006), 1187-1188.
- 22) 谷徳孝ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.1, (2002), 6.
- 23) 植森龍治: 第 182・183 回西山記念技術講座, (2004), 89.
- 24) 小関敏彦: 鉄と鋼, 90 (2004), 61.
- 25) 新日本製鉄(株): NIPPON STEEL MONTHLY, 170 (2007), 15.
- 26) 児島明彦ほか: 新日鉄技報, No.380, (2004), 2.