

形鋼製造のプロセスメタラジー

山本 広一

新日本製鐵㈱ 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部・堺 主幹研究員

Kouichi Yamamoto

Metallurgical Control Process on Shape Rolling

1 はじめに

圧延形鋼製品には、建築構造部材として用いられるH形鋼、河川・港湾の護岸用の鋼矢板および船体の補強材としての不等辺不等厚山形鋼などがある。これらの内でH形鋼は、およそ年産500万トンと最も多く生産されている。

H形鋼は、建築物の骨格となる柱および梁材として用いられ、耐震性・耐火性など災害時における安全性の観点からも、重要な構造部材である。最近、建築用鋼材として、市場ニーズに応えた高い信頼性と高機能特性を付与したH形鋼が、新しい形鋼プロセスメタラジーにより開発されている。

ここで形鋼プロセスメタラジーとは、厚板分野で発展した金属組織の微細化法である制御圧延技術 (TMCP: Thermo Mechanical Control Process) を基調としマイクロアロイング (Nb、Vなどの微量添加) および最新のオキサイドメタラジー技術 (微細Ti酸化物の分散) との総合化により、圧延ままで組織を微細化する形鋼のための材質制御技術を意味する。

本解説では、この形鋼プロセスメタラジー技術とこれにより開発した、低降伏比外法一定H形鋼、耐火用H形鋼、極厚H形鋼について紹介する。

2 形鋼材質制御技術の歴史

プロセスメタラジー技術で最も重要なTMCPは、圧延温度と圧下条件を制御することにより、鋼材の組織を微細化し、省合金で強度・靱性・溶接性などの材質特性を向上させる技術である。この技術は線材および厚板分野において早くから展開され、優れた材質制御技術として成熟した。形鋼分野へのTMCPの適用は、1980年にH形鋼に適用された例が米井ら¹⁾により公表された。目的はH形鋼の粗圧延において、フランジ幅の中央部でフランジとウェブとが連続

するフィレット部を集中冷却し、この部位の強度・靱性をウェブ部、フランジ部と同等まで向上させることであった。しかし、国内では、H形鋼での冷却制御は形状と残留応力制御のために展開され、材質制御を目的としたTMCP技術は、1990年に開発された外法一定H形鋼²⁾が実用化されるまで大きな進展はなかった。一方、国外では、欧州において開発が進められ、1988年にARBED社³⁾から、圧延中にH形鋼のフィレット部を選択的に冷却しH断面の温度を均一化するためのTM-SC (Thermo Mechanical Treatment with Selective Cooling) と称する圧延中水冷方法、ならびに圧延後の水冷により全断面を急冷し、水冷停止後の冷却中に内部からの復熱を利用して表面の焼入れ硬化層部を焼戻すQST (Quenching and Self Tempering) 法の採用により、材質の均質化と靱性向上・低合金・良溶接性を狙った形鋼TMCP技術を実用化したことが公表された。この技術開発を契機とし、外法一定H形鋼のウェブ変形防止のために開発されたフランジ冷却制御技術をTMCPとして展開する試みがなされ、典型例として1990年に、低降伏点の外法一定H形鋼が開発された。またマイクロアロイング技術は、すでに1970年頃から実用化されており、Nb、V、Mo等の元素の微量添加により、これら元素の炭窒化物の析出強化および固溶体強化を利用している。これによる強化によって、鋼中のMn、Ni等の合金量を10分の1以下に低減することが可能となった。加えて、オキサイドメタラジー技術は、1980年前半に溶接熱影響部の靱性改善を目的に開発された。これは製鋼過程で予め微細酸化物を鋼中に分散させておき、この酸化物を核にしてオーステナイト相 (γ) からフェライト相 (α) を核生成させることにより金属組織を微細化する技術である。このオキサイドメタラジーを圧延ままの鋼材の組織微細化に応用したのは、圧延H形鋼が最初である。これらの技術を総合化した形鋼プロセスメタラジー技術により、1992年から1996年にかけて、耐火用H形鋼および極厚H形鋼が開発された。

3 H形鋼プロセスメタラジの課題と基本概念

3.1 H形鋼の圧延および品質課題

H形鋼は図1に示すように、フランジ板厚(Ft)とウェブ板厚(Wt)の比Ft/Wtが最大で3倍にも達する断面形状を有している。このようなH断面形状のため圧延温度および圧下比がフランジとウェブおよびフィレット部では大きく異なり、例えば圧延温度では、フィレット部はウェブ部に比べ150~200℃もの高温となり、圧延後の冷却速度も他の部位に比べ最も緩冷却となる。H形鋼圧延は、図2に示すユニバーサル圧延機によってH形に圧延造形することから、高温・軽圧下・多パス圧延となり、材質制御のために厚板圧延で行われているような低温・大圧下の条件を満たすことは、現状のミル能力では不可能である。

すなわち、H形鋼圧延におけるTMCPは、H形造形を阻害

しない範囲で、材質劣化の最も大きいフィレット部に対して、加工熱処理効果を発現させ得る、圧延中および圧延後における水冷方式を提示できるか否かがポイントとなる。

また表1には、TMCPをH形鋼に適用する場合に具備すべき品質機能をまとめ、列記した。薄肉外法一定H形鋼では、フランジとウェブとの板厚差に起因する温度差からの内部応力により発生するウェブ変形の防止が、制御圧延よりも優先される。加えて建築では、柱に梁用のH形鋼をボルト接合するためにフランジ部にドリル孔開け加工する場合が多く、この施工上の高効率化のため、フランジ表層部の硬さをビッカース硬さHv200以下にすることが求められる。その他にも、信頼性・安全性を高める必要から低合金化による溶接特性の向上が要求される。

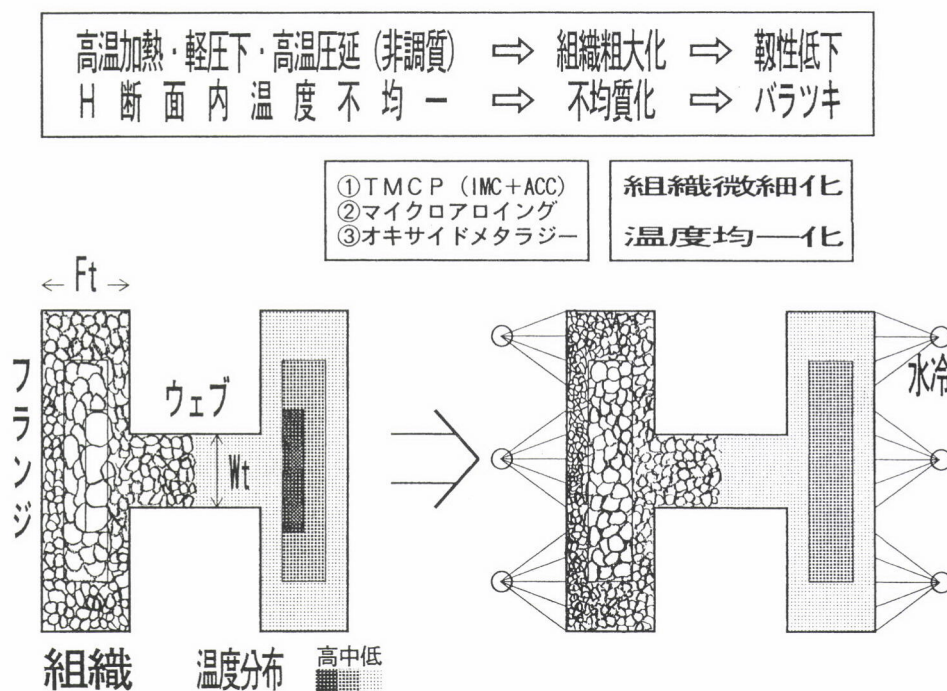


図1 圧延形鋼における材質課題と形鋼プロセスメタラジーによる金属組織制御イメージ

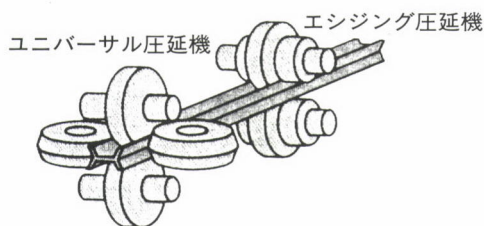


図2 H形鋼ユニバーサル圧延機

3.2 形鋼材質制御の基本概念

図1には、H形鋼における圧延時の材質課題と併せ、形鋼プロセスメタラジーによる組織制御イメージを模式的に示した。

鋼の材質特性は、マイクロ組織によって決定され、この組織微細化により、唯一、高強度化と高靱性化の相反する特性を両立させることが可能となる。

圧延までの組織微細化法にはTMCPが一般的であり、

表1 TMCP適用にあたってのH形鋼固有の課題

課 題	内 容
ウェブ変形防止	ウェブ／フランジ間の温度差に起因するウェブ変形防止
表面硬度低減	フランジ水冷による表面硬化のため孔開け加工困難 これを容易にするため
強度・靱性保証 (均一化)	高温・軽圧下圧延による組織粗大化ならびに ウェブ／フランジ間の圧延温度差による 材質劣化・不均一性への対応
溶接性確保	高強度・厚肉化による高合金化の回避

最も有効なプロセスメタラジー技術である。しかし、形鋼圧延でのロールの圧延反力限界の小さいユニバーサル圧延機では、TMCPの低温・大圧下圧延条件を満たすことは困難である。

したがって、形鋼圧延における高温・軽圧下で、組織微細化と均質化を達成する効率的なプロセスメタラジー技術を開発することが圧延形鋼の材質制御における極めて重要な課題となる。

まず、鋼の組織微細化の原理に基づき、特に形鋼圧延に適用できる組織微細化方法を構築することが必要となる。原理的には、冷却途中で生じる γ 相内から α 相が析出する変態過程において、 α の核生成数の増大と生成した α の粒成長を抑制し細粒化させることである。

その手法の一つとして、 α の核生成サイト数をできる限り増加させることを考え、製鋼過程で铸片中に、予め α 核生成能に優れた微細オキサイドを分散させるオキサイドメタラジー技術を導入することになる。

次いで、採用されたのがマイクロアロイング技術である。ここでの微量Nb添加により、圧延中の γ 温度域での析出Nb(CN)あるいは固溶Nbが γ の加工再結晶化とその粒成長を抑制する。これにより γ 相の細粒化と γ 内への変形帯の導入がなされ、TMCPによる組織微細化効果をより増大化させる。

これに加えて、形鋼圧延に適したTMCPのための冷却技術として圧延中水冷法(IMC: Inter Mill Control)⁴⁾、引き続き圧延後に水冷する加速冷却法(ACC: Accelerated-Cooling)⁵⁾が構築された。すなわち、ここでのTMCPは、加速冷却型TMCPに類型されるIMCとACCとを複合化したプロセスを示している。

IMCは、圧延中にフランジのみを水冷し復熱時に圧延することを繰り返す方法であり、H形鋼断面内の圧延温度差の縮減とフランジ部の制御圧延を圧延能率を低下させることなく実現できる。加えて、フランジの水冷面と板厚内部には温度傾斜が付与され、これにともない強度も傾斜した

分布となる。この強度傾斜分布の存在は、圧下により高温内部の強度の低い領域の変形を容易にし、圧下浸透効果を生じる。これによって γ/α 変態において α 核生成サイトとして機能する転位(亜粒界)を内部により多く導入できる。この α 核生成の促進により、高温・軽圧下圧延のため、組織微細化が困難な内部(フィレット部)においても効率的に組織の微細化が達成できる。また、表層部においては、水冷と復熱時圧延の繰り返しにより γ は微細粒となり、焼入性が低下するため、焼入時の表面硬さを低く抑えることが可能となる。この効果は、厚板でのIMCの特徴である、表面細粒化効果⁶⁾として知られている。

圧延後の水冷は、組織微細化には必須であり、過度の冷却によりフランジとウェブ間の残留応力を増大させない範囲で最大の冷却速度を得る必要がある。

これら、TMCP、マイクロアロイング、オキサイドメタラジーの3つのプロセスメタラジー技術を総合化して、形鋼圧延における組織微細化を目的とした形鋼プロセスメタラジー技術が確立された。

図3に形鋼圧延ラインの略図およびH形鋼に適用したTMCP技術のプロセスイメージを示す。なお、フランジ外側面水冷設備は、第2中間圧延機の前後の9mゾーンと仕上げ圧延機の後面の60mゾーンにスプレイタイプを設置している。

4 形鋼プロセスメタラジー適用 建築用H形鋼

4.1 低降伏比外法一定H形鋼

建築構造用圧延鋼材、SN490鋼では、ウェブ変形の防止、表面硬さHv200以下、に加え、降伏比(YR: 降伏応力/引張強さ)80%以下、0℃でのシャルピー衝撃値27J以上、溶接性を考慮し炭素当量0.44%以下(WES)の特性が求められる。

これらの要求特性の保証とウェブの残留応力の低減は、

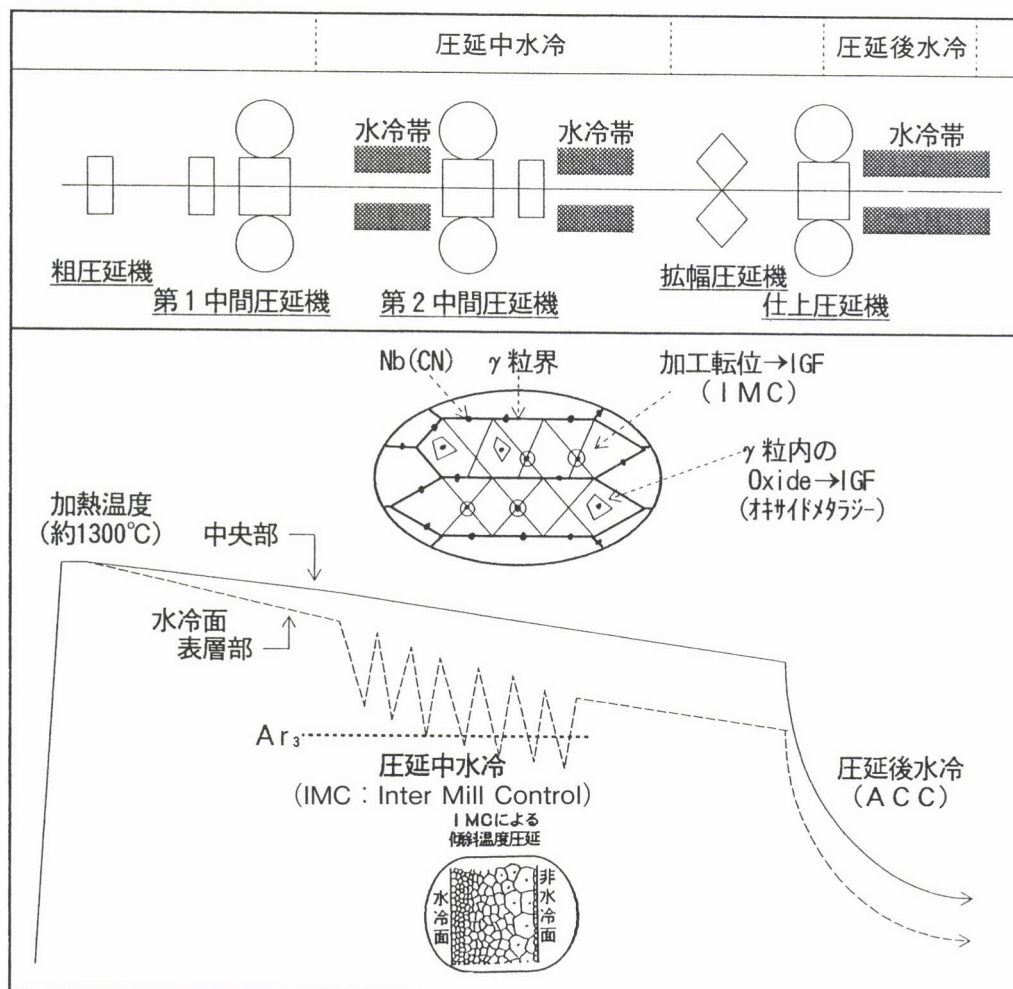


図3 TMCP (IMC+ACC) プロセスイメージとフランジ部の温度履歴 (IGF: 粒内フェライト)

フランジ外側面の圧延中水冷 (IMC) と圧延後水冷 (ACC) を組み合わせたTMCPにより達成できる。

まず、この工程で製造されたフランジ厚12mmの薄手材と、37mm厚の厚手材の成分と機械特性の代表例を表2に示す。次いで、長さ方向の残留応力を低減した実例を図4に示す。H形鋼のウェブとフランジの厚み差から発生する残留応力は、TMCPによりほぼ零に制御でき、ウェブ変形、切断加工後の変形などの防止が可能となる。

加えて、IMC効果により水冷表面の硬さ上昇を抑制した例を図5に示す。上部のマイクロ組織写真に示すように、IMCを経ないで圧延後水冷した鋼材の表面はベイナイト組織を形成し、表面硬さはおよそHv240に上昇するが、

IMCを施した鋼材の表面組織は、微細なフェライト組織となり、表面硬さはおよそHv170に抑制できる。

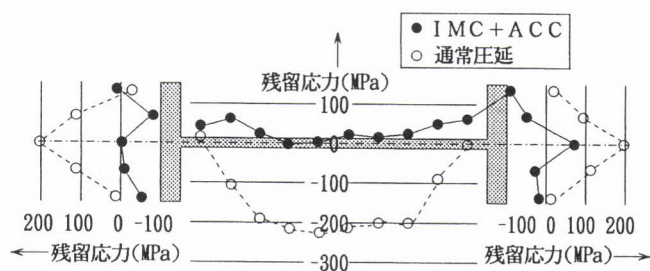


図4 フランジ部冷却制御H形鋼の長さ方向の残留応力分布 (490MPa級鋼、サイズ: H900×300×19/37)

表2 TMCPによって製造された低降伏比外法H形鋼の化学組成および機械試験特性 (490MPa級鋼、フランジ幅1/4部)

サイズ	化学組成 (mass%)				機械試験特性				
	C	Si	Mn	Ceq(WES)	YS, MPa	TS, MPa	YR, %	vE0, J	surface Hv
H900x300x19/37	0.16	0.3	1.3	0.39	352	510	69	205	180
H550x200x6/16	0.16	0.3	1.1	0.36	416	541	77	220	195

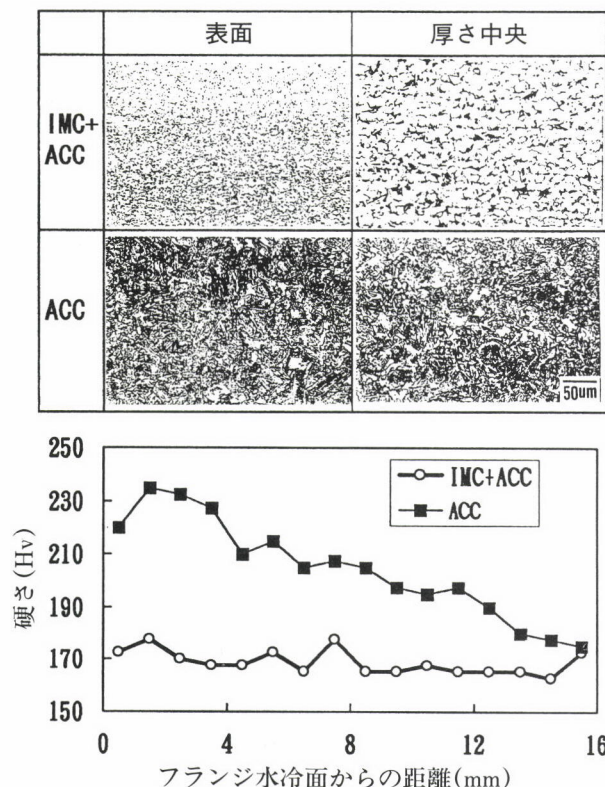


図5 圧延中水冷 (IMC) による圧延後水冷 (ACC) 後の硬さおよびミクロ組織に及ぼす効果 (490MPa級鋼、サイズ：H500×200×6/16)

しかし、フランジ厚が9、12mmと薄手H形鋼では、ウェブ変形を防止するためにIMCにおいて過度のフランジ冷却を行うと表層部に極細粒層を形成し、YRが80%を超えることが判明した。この問題は、ウェブ変形を生じない範囲でIMCの水冷回数を減ずることにより解決できる。

この過度のIMCによりYRが80%以上となる原因をフランジ板厚方向の強度分布を解析し調べた。調査にはサイズH500×200×6/12のH形鋼を用い、フランジ厚さ方向に3分割し、それぞれ厚さ4mmの引張試験片を作製し機械試験をおこなった。図6に示すように、表層から4mm部位では、ミクロ組織から予測されたとおりYRは87%と高いが、非水冷のフランジ内外側面では、これが80%に低下している。この解析結果とミクロ組織から判断して、全厚でYRが84%を示した理由は、IMCにより表層部に形成された極細粒層の存在に起因し、そしてYR値は、極細粒層の厚さに依存することが明らかとなった。そこで、高YR化を防止するために、SM490MPa級鋼を用いIMC条件を変化させ、フランジの仕上げ圧延温度のYRに及ぼす影響を調べた。図7に示すように、YRが80%以下となる仕上げ圧延温度は825℃以上であることが判明し、これを基に、ウェブ変形応力を超えない水冷条件範囲内で、この限界圧延温度以上となるIMC条件を求め、薄手外法一定H形鋼に適用し、YRが

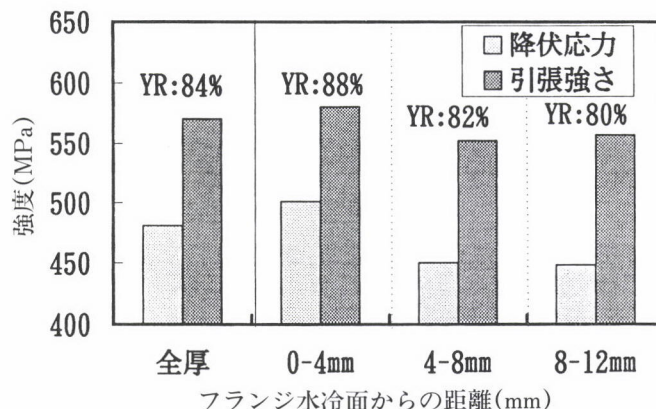


図6 IMCを強化したH形鋼のフランジ厚さ方向の引張強度分布 (490MPa級鋼、サイズ：H550×200×6/12)

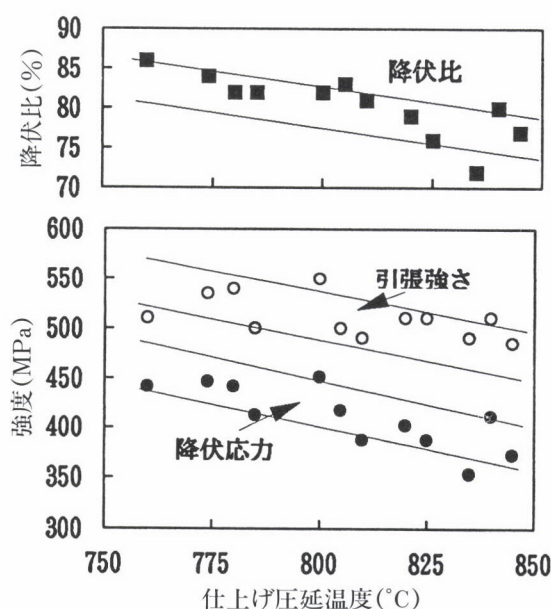


図7 引張強度および降伏比に及ぼす仕上げ圧延温度の影響 (490MPa級鋼、サイズ：H550×200×6/9、6/12、6/16)

80%以下を達成している。

4.2 耐火用H形鋼

耐火用490MPa級H形鋼に求められる600℃での降伏応力、217MPaをクリアするには、0.5mass%程度のMo添加が通例である。Mo添加により、圧延後のミクロ組織にはフェライトとベイナイトとが混在し、このベイナイトの生成割合は、仕上げ圧延温度および冷却速度などの圧延条件によって、大きく変化する。すなわち、圧延ままでは、ウェブ、フランジ、フィレット部位間では、仕上げ圧延温度、圧下率、冷却速度に大きな差が生じるため、これらの差によってベイナイト生成割合は大幅に変化し、それにとりま

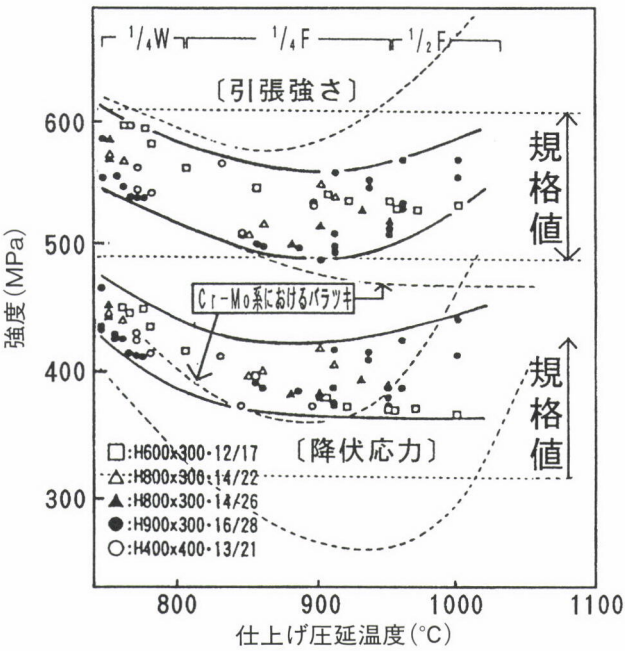


図8 Mo-Ti-O系耐火用H形鋼の引張強度に及ぼす仕上げ圧延温度の影響

い強度が、図8の点線範囲で示すようにH断面内でバラツキ、規格値をはずれる部位が発生し安定生産ができなくなる。

この課題を解決するために、IMCを強化し、フランジ部の仕上げ圧延温度をウェブの仕上げ圧延温度850℃以下に漸近させて、ベイナイトの占有割合を40から60％に制御し、強度のバラツキを縮減している。

しかし、Mo添加鋼では、圧延時の高温強度も上昇するため、IMC低温圧延によって、ロール負荷が増大し、サイズによっては圧延反力限界を超え製造不能なサイズが出現する。これを解決するために、仕上げ圧延温度に対しての強度変化を小さくできる材質制御プロセスが模索された。その結果、鋼中に製鋼工程で予め微細分散させたオキサイド

(Ti-O)を核にフェライトを核生成させ、組織を微細化するオキサイドメタラジー⁸⁾の適用が形鋼圧延プロセスにおいても効果的との結論に達し、その適用が試みられた。結果は図8に実線範囲で示すように、仕上げ圧延温度がフィレット部の1000℃からウェブ部の750℃の広い温度範囲で、強度のバラツキを縮減できることが判明し、この適用により圧延負荷の軽減と耐火用薄手外法一定H形鋼の製造が可能となる。これらのH形鋼について、成分および材質特性を表3に示す。

4.3 極厚H形鋼

極厚H形鋼は、主に高層ビルの柱材として用いられ、建築現場において極厚H形鋼を溶接継手加工し鋼製柱として使用される。したがって、この鋼材においては優れた溶接性能が要求される。このニーズに対応しARBED社は、溶接性能を向上させた低炭素当量型の極厚H形鋼を形鋼TMCP技術の適用によって開発している。

最近、国内において、490MPa級、フランジ厚75mmの極厚H形鋼がIMCとマイクロアロイングおよびオキサイドメタラジーを総合化した形鋼プロセスメタラジーの適用によって開発された。

この鋼の代表成分と機械試験および溶接試験結果を表4に示す。開発された極厚H形鋼は、炭素当量が0.37％であり、V、Nbを添加しマイクロアロイングにより設計された従来材での0.40％(0.18C-1.2Mn-0.07V-0.03Nb)より低減されており、フィレット部と溶接熱影響部の靱性および溶接割れ性に優れた特徴を有している。溶接特性の一例として、斜めy開先溶接冷間割れ性試験の結果を図9に示す。この試験での割れ停止温度は25℃であり、汎用鋼の200℃より大幅に改善されている。溶接割れ感受性指数のPcmも0.20％と十分に低減されており、溶接最高硬さはHv270以下と低く、極めて良好な溶接性能を有している。

表3 TMCP及びオキサイドメタラジーによって製造された耐火用H形鋼の化学組成および機械試験特性 (490MPa級鋼、フランジ幅1/4部)

鋼種	サイズ	化学組成(mass%)							機械試験特性					
		C	Si	Mn	Mo	Cr	その他	Ceq(WES)	YS, MPa	TS, MPa	YR, %	YS at 600℃	vE0, J	
Mo-Cr	H600x300x14/23	0.09	0.3	0.8	0.6	0.4	Ti	0.47	398	564	71	273	182	
Mo-Ti-O	H600x300x12/17	0.11	0.2	1.3	0.5	-	Ti, V	0.47	383	551	70	237	213	

表4 TMCP、マイクロアロイング、オキサイドメタラジーの複合化によって製造された極厚H形鋼の化学組成、機械試験特性および溶接試験特性 (490MPa級鋼、フランジ幅1/4部)

サイズ	化学組成(mass%)							機械試験特性				溶接特性(HAZ)	
	C	Si	Mn	Ti	V	その他	Ceq(WES)	YS, MPa	TS, MPa	YR, %	vE0, J	vE0, J	Max. Hv
H498x432x45/70	0.11	0.2	1.45	0.01	0.07	Cu, Ni	0.37	349	513	68	268	140	265

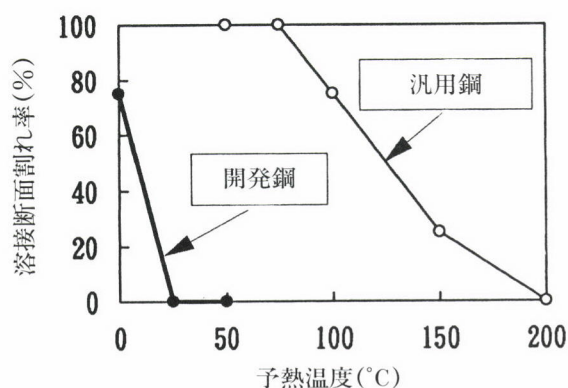


図9 形鋼プロセスメタラジーによって製造された極厚H形鋼の斜めy開先溶接冷間割れ性試験結果

5 おわりに

阪神大震災における被害状況調査の進展にともない、建築用鋼材に対する信頼性が益々重要視されるようになってきた。このような市場ニーズを先取りした高い信頼性と新機能を具備した、低降伏比H形鋼、耐火用H形鋼および極厚H形鋼が開発されている。これらの鋼材は、TMCP、マイクロアロイングおよびオキサイドメタラジーを総合化した形鋼プロセスメタラジー技術の適用により、低合金・高靱性・良溶接性および耐火性など高機能な材質特性を有している。また、H形鋼におけるTMCPは、フランジのみを圧延中・圧延後に冷却することに特徴があり、この効果と、

オキサイドメタラジーとの複合化により一層の組織微細化が可能となり、高品質のH形鋼が生産できることを紹介した。

形鋼プロセスメタラジー技術は、圧延プロセスにおいて軽負荷で高機能材質の付与を可能にし、圧延製品の安定・高生産を実現する総合技術であり、他の鋼材分野への展開も期待される。

文 献

- 1) 米井たけし, 飛田洋史, 鈴木信一, 杉田州男, 織田昌彦, 溝口茂: 製鉄研究, 303 (1980), p.39
- 2) 稲垣彰, 安河内醇, 板橋義則, 青柳幸四郎, 藤本武, 山本洋春, 川田勇: 新日鉄技報, 343 (1992), p.9
- 3) A. Frantz, F. Becker and J. de la Hamette: Metalurgical Plant and Technol., 3 (1988), p.94
- 4) 吉江淳彦, 間瀬秀里, 尾上泰光: CAMP-ISIJ, 7 (1994), p.1840
- 5) 関根寛: 第86, 87回西山記念講座, 日本鉄鋼協会編, (1982), p.154
- 6) 石川忠, 野見山裕治, 萩原行人, 栗飯原周二: 日本造船学会論文集, 177 (1995), p.259
- 7) 黒川征男 (新日本製鐵プロセス技術研究所): 私信, (1992)
- 8) J. Takamura and S. Mizoguchi: Proc. 6th Int. Iron and Steel Congress, Nagoya, 1 (1990), p.591 [ISIJ] (1997年2月21日受付)