

# 熱間圧延におけるロールとその磨耗

Roll and its Wear in Hot Rolling



山陽工場 工学博士  
橋本 光生  
Mitsuo Hashimoto

## 要 旨

圧延用ロールは代表的な耐摩耗材料であり、本論はロールの歴史の変遷、材質特性および使用条件を踏まえて熱間圧延用ロールの磨耗について研究した。ロール材は高硬度化の方向で変わってきた。炭化物については、セメンタイト( $\text{Fe}_3\text{C}$ )にはじまり、クロム系  $\text{M}_7\text{C}_3$  型炭化物、さらにMCおよび  $\text{M}_2\text{C}(\text{M}_6\text{C})$  型合金炭化物が利用されるようになった。ロールの磨耗は圧延荷重と転動数に比例し、Holmの磨耗式が支持される。炭化物の硬さおよび高温で硬い基地がロールの耐摩耗性を向上させるのに有効である。近年、ハイスロールが日本で開発され、極めて少ない磨耗を示して圧延ロールの新時代を構築した。

## Synopsis:

A rolling mill roll is a schematic wear resistance material, and this paper studies the wear of roll in hot rolling considering traditional changes, material characteristics and using conditions. The roll materials have become harder. Regarding carbides, firstly the cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) has been used, and the chromium carbides of  $\text{M}_7\text{C}_3$  type have followed and recently the alloy carbides of MC type and  $\text{M}_2\text{C}(\text{M}_6\text{C})$  type have been introduced. The wear of roll is proportional to the rolling load and rolling cycles and it depends on the Holm's wear equation. And the use of hard carbides and the high hardness of matrix in high temperatures is effective to improve wear resistance of roll. Recently a high speed steel type white cast iron roll was developed in Japan, and it demonstrated an extremely small wear and marked a new age of rolling mill roll.

Key note: rolling mill roll, wear, alloy, carbide, high speed steel, hot rolling

## 1 はじめに

鉄鋼圧延は圧延用ロールを介して大きな機械的負荷を鋼材に与え、それを塑性変形させることにより種々の形状および寸法の鉄鋼製品に成形する。したがって、ロールの特性は圧延製品の寸法精度や表面性状といった品質および操業能率に直接影響を及ぼし、圧延技術の進歩・発展とともに変化をとげてきた。とくに鋼材と直接接触する作働ロール（以下ロールと称す）には磨耗が少ないことが強く望まれ、代表的な耐摩耗材料である<sup>1~5)</sup>。

しかしながら、前述のとおり熱間圧延でのロールの使用条件は大きく異なるがためにその定量評価

が難しく、ロール材質も多様であるために材質特性についての体系的な整理がなされていない。また、実機での使用試験を通じて改善ならびに開発が行われてきたことより、ロールの設計は主に経験則によっているのが実状である。そのなかで、代表的な鉄鋼製品である薄板を製造するホットストリップミルの粗および仕上げ圧延機用ロールについては比較的その使用条件が類似しており定量化しやすい。近年、この分野で磨耗が極めて少ない高速度鋼型の多元合金系白鑄鉄ロール（一般にはハイスロールと称す）が実用化され、大きな成果がもたらされた<sup>6~9)</sup>。

本論は、ホットストリップミルにおけるロールの歴

史的変遷、材質特性および使用条件を踏まえて熱間圧延におけるロールの摩耗について論じる。

## 2 ロールの変遷とロール材の組成

### 2.1 圧延技術動向とロール材の変遷

薄板製品の代表的な製造工程を、ホットストリップミルを中心として図1に示し、この分野における圧延技術の動向とロールの変遷を対比して図2に示す。本ミルは1941年に国内で初めて設置され、高度成長時代には大型化、高速化およびコンピュータ制御の導入により生産性が飛躍的に向上した。その後、日本経済は転換期を迎え、省エネルギー、省力化および高付加価値製品への移行が進んだ。操業技術面では高圧下圧延、連続鍛造との連続化に加え低温加熱圧延が、設備的には板クラウン（鋼板の幅方向の厚み分布）を高度に制御できる各種圧延機が開

発・実用化された。1988年にはエッジ・ドロップ（鋼板端部で厚みが急激に薄くなる現象）の低減を狙い、小径ロールに曲げ機構を積極的に利用する極小径ワークロール圧延機（Minimum edge-drop mill：MEミル）の実用化試験が実施された。この結果、曲げ応力、ヘルツ接触応力および転動数が著しく増大し、高性能ロールの開発要求が顕在化し、ハイスロールが世界に先駆けて日本で開発され、ロール分野の変革が生じた。図2中にはホットストリップミルにおけるロール原単位、すなわち鋼材1トンの圧延で消費されるロールの質量の推移を例示している。1950年頃に20~30kg/t程度であると推定されるロール原単位は1970年代初頭には1kg/t、1980年頃には0.4kg/tに減少し、さらにハイスロールの導入により現在は0.2kg/t程度へとロールの性能向上に伴って減少した。

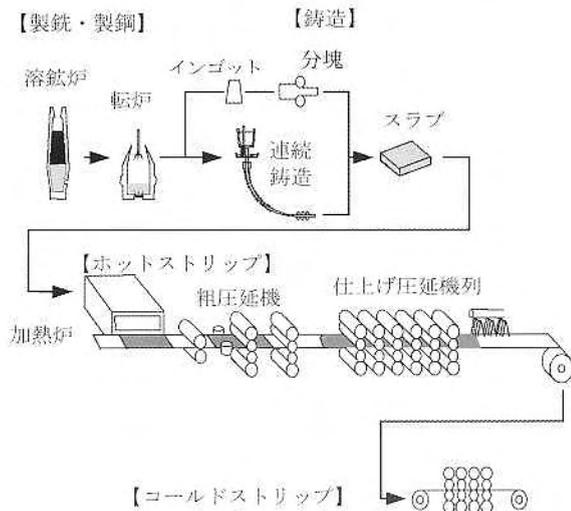


図 1 代表的な鉄鋼製造工程

次に、ロールの製造法について簡単に述べる。ロールの製造は単一材質の静置鍛造法により始まるが、ロールとして最も重要な具備特性であるがしばしば相反する耐摩耗性と強靭性を兼備するため、外殻層に耐摩耗材料、芯材に強靭材料を採用した複合ロールの製造法が開発された。本法は中抜鍛造法を経て、現在は遠心鍛造法が広く普及するところとなる。さらに、ハイスロールの開発に際して連続鍛掛け法（Continuous pouring process for cladding：CPC法）や熱間等方圧プレス法（Hot iso-static pressing：HIP法）など種々の複合ロールの製造法が現れた。なお、鍛造法は高炭素材の製造に難があり、熱間圧延用ロールとしては限られた用途に適用されるに留まっている。

さて、ロール材料は大きく分類すれば鋳鋼、鋳鉄およびその中間的なアダマイトがある。図3<sup>8)</sup>に代表的なロール材の硬さと引張強度を示す。一般的に強靭

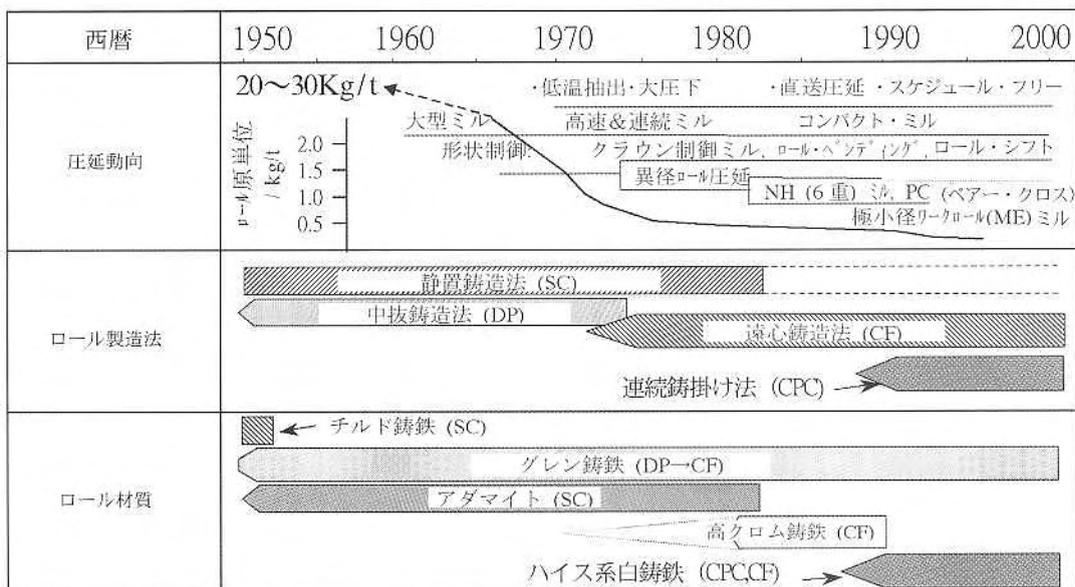


図 2 ホットストリップミル仕上げ圧延用働ロールの材質と製造方法の変遷

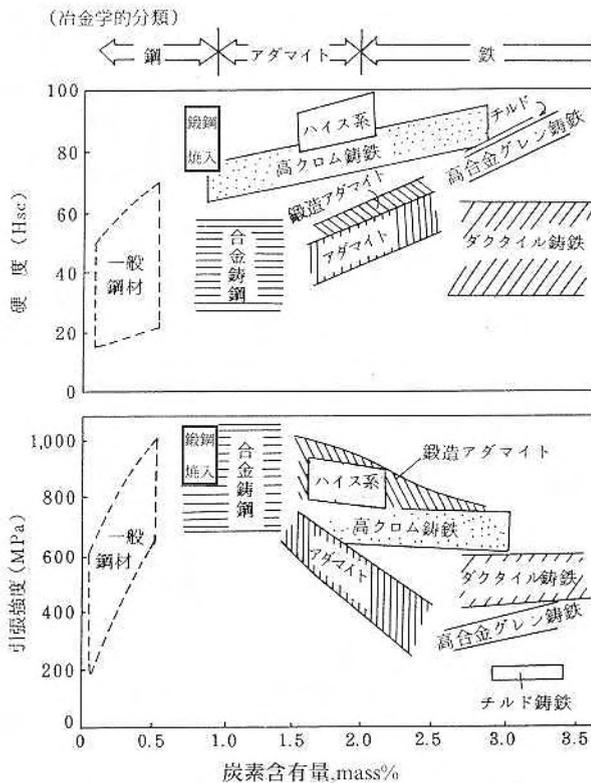


図 3 代表的なロール材の硬さと強度

性が要求される場合は鋳鋼ロールが、耐摩耗性が特に要求される場合は鋳鉄ロールが、両特性を適度に兼備することが要求される場合はアダマイトロールが採用される。二重圧延機が採用されている粗圧延では、圧延荷重による大きな曲げ応力と高温圧延材との低速接触による大きな熱負荷を考慮し、強靱性と耐き裂性に優れた低炭素(C)の合金鋳鋼ロールが主に使用されている。四重圧延機が採用される粗圧延においては、大きな熱負荷条件下で適度の耐摩耗性と耐肌荒れ性を有するアダマイトロールが使用されてきたが、1980年代に入り、耐摩耗性に優れた高クロム鋳鋼 (6~15%Cr, 0.8~1.4%C) に変わった。次に、仕上げ圧延用では後方の圧延機ほど圧延鋼材の温度が低く、薄くかつ高速で圧延されるため耐摩耗性の要求がとくに強く、硬い鋳鉄が一般に用いられてきた。最初にチルド鋳鉄(Fe-Ni,Cr,Mo-2.8~3.7%C)が使用され、1960年代初頭まで長く使用されてき

た。その後、前段圧延機ではアダマイトの普及を経て、1982年の六重圧延機の導入に際し、小径の中間ロールとの間に生ずる高いヘルツ接触応力に耐える高硬度の高クロム鋳鉄 (Fe-15~20%Cr-Ni,Mo-2.5~3.0%C) ロールが採用された。一方、後段圧延機では高速圧延に耐え、最終製品の品質を確保するうえで多量の硬い炭化物と適度の黒鉛を有し、耐摩耗性と耐焼付き性に優れたグレン鋳鉄ロールが採用され、今日まで長年にわたり使用されている。さらに、ハイスロールが開発されてロールの摩耗が飛躍的に減じ、仕上げ圧延機に続き粗圧延機へと急速に普及してきた。図4に各圧延機でのロールの変遷を硬さとの関係で示すが、耐摩耗性の向上を主体に高硬度ロールに移行してきたことが分る。ハイスロールの出現は、圧延作業での大きな制約であったロールの耐久性が向上し、長時間連続圧延や鋼材の圧延順番を規制せず自由に圧延作業を行うスケジュール・フリー圧延 (SFR圧延) が拡大するなど大きな成果をもたらされた。

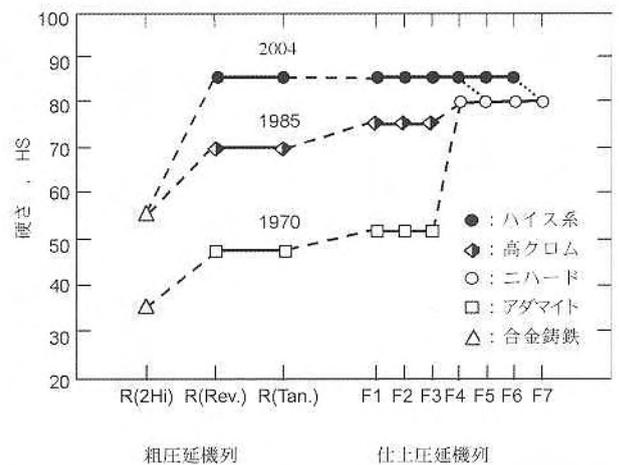


図 4 ホットストリップミル用各種ロールの硬度推移

## 2.2 ロール材の化学成分と材料特性

ホットストリップミルに用いられる代表的なロール材について、その化学成分および材料特性を表1に示す。また、各ロール材の顕微鏡組織を図5に示す。

アダマイトは鋳鉄の耐摩耗性と鋳鋼の強靱性を適度

表 1 代表的熱延ロール材の化学成分,金属組織および硬度

材料	化学成分/質量%										金属組織		硬度	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	黒鉛	炭化物%	基地		
チルド鋳鉄 (CH)	3.0	0.7	0.3	-	-	-	-	-	-	-	なし	Fe <sub>3</sub> C:35%	パーライト	NA(80)
アダマイト (AD)	1.7	0.4	0.9	0.6	1.0	0.4	-	-	-	-	なし	Fe <sub>3</sub> C:5%	パーライト	400(55)
グレン鋳鉄 (GH)	3.3	0.8	0.9	4.4	1.7	0.4	-	-	-	-	なし	Fe <sub>3</sub> C:35%	ベイナイト	535(79)
高クロム鋳鉄(HiCr)	2.7	0.7	1.1	1.3	17.3	1.3	0.2	-	-	-	なし	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub> :25%	焼戻マルテンサイト	590(75)
ハイス系 (HSS)	2.0	0.5	0.5	-	5.0	5.0	5.0	5.0	1.0	-	なし	MC,M <sub>6</sub> C:15%	焼戻マルテンサイト	720(83)

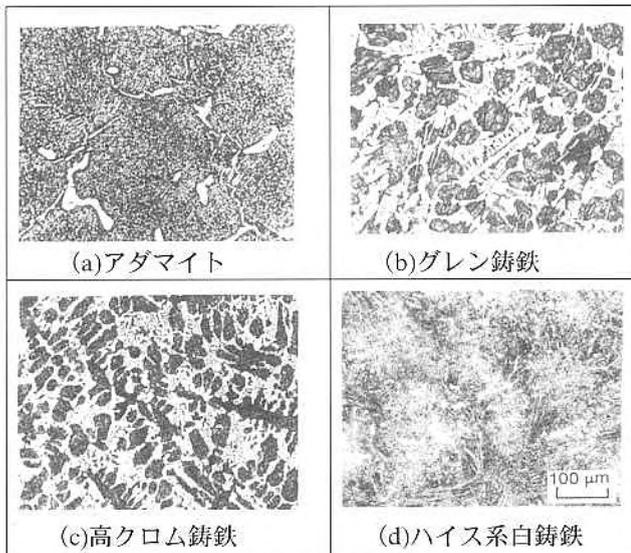


図 5 代表的なロール材の顕微鏡組織

に兼備させる中間的材質として開発され、使用されるようになった。すなわち、鑄鋼から炭素含有量の増加と熱処理の研究により、強靱性を劣化させることなく耐摩耗性を向上させる検討がなされ、同時に鑄鉄からは炭素含有量を低下させて強靱性をもたせる研究がなされた。その結果、C:1.4~2.4%の化学成分のアダマイトが登場した。本ロールは1960年代に粗ならびに仕上げ前段圧延機用として採用され、とくに安定な酸化皮膜の生成により、良好な表面肌と適度の耐摩耗性を発揮して普及した。

グレン鑄鉄はFe-4.0~4.8%Ni-Cr-Mo-3.0~3.5%Cのニハード鑄鉄を基本成分とし、炭化物はセメントイトがレデブライト状に晶出するが、ホットストリップミル用として少量の黒鉛（主として芋虫状黒鉛）を晶出させており、インデフィニットチルド鑄鉄もしくはハイニッケル鑄鉄とも呼ばれる。基地組織はNi,Cr,Mo等の合金元素を添加し、低温での安定化処理によりベイナイトもしくはマルテンサイトにして硬くする。

高クロム鑄鉄はクロム系の硬い $M_7C_3$ 型炭化物を晶出させて利用したもので、基地組織もNi,Cr,Mo等を添加することで焼入れ性を付与し、高温からの焼入れにより硬化熱処理を施しマルテンサイトにした後、焼戻して安定化させる。

ハイス系白鑄鉄は粒状の初晶MC炭化物に続き板状の共晶 $M_2C$ 炭化物（熱処理により $M_6C$ 炭化物に変わる場合がある）を晶出している。製造は本材の特徴をなすV,Cr,Mo,W等の合金元素の種類および添加量を自由に選択できることより、CPC法が最も適した製造法として採用されている。一方、遠心鑄造法による製造も組織偏析を抑制するために化学成分を選んで行われており、この場合は $M_7C_3$ 型炭化物も用いられる。基地組織は高クロム鑄鉄と同様に、高温からの焼入れにより硬化熱処理を施しマルテンサイトにし

て硬くした後、焼戻して安定化させる。

炭化物の硬度はチルド鑄鉄、グレン鑄鉄およびアダマイトで用いられているセメントイト ( $Fe_3C$ ) はHV900、高クロム鑄鉄の  $M(Cr)_7C_3$  はHV1600~2400、ハイス系の $M(Mo,W,Fe)_6C$ はHV1500~2250、 $M(V)C$ はHV2800と順に硬くなる<sup>7)</sup>。基地はいずれも微細パーライト、ベイナイトもしくはマルテンサイトにして硬化する。

図6には代表的なロール材の高温硬度を示す。ハイス系白鑄鉄は他のロール材に比較して、炭化物の量は少ないにもかかわらず高温まで高い硬度を保ち、とくに圧延中にロール表面が到達する温度範囲823~973K (550~700°C)でその傾向が顕著である。さらにハイス系白鑄鉄では基地組織に優先固溶するCoを添加することにより高温で硬化する。

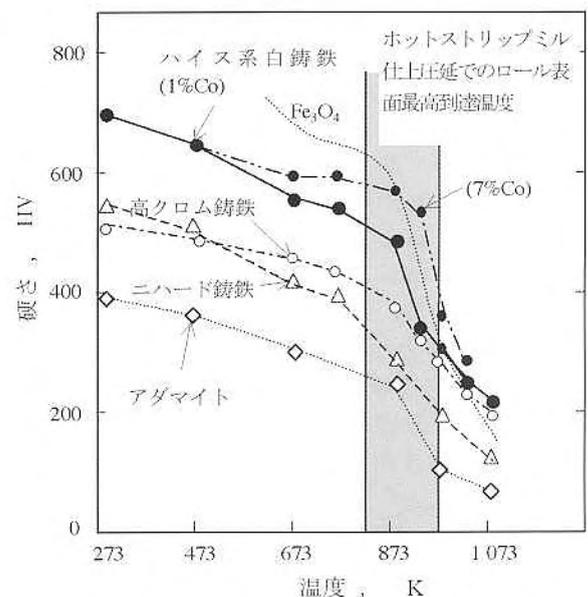


図 6 代表的なロール材の高温硬さ

### 3 ロールの使用条件と負荷

薄板製品の代表的な製造工程を図1に示したが、ホットストリップミルでは1273~1573K(1000~1300°C)に加熱された約250mm厚みの板状鋼塊（スラブと呼ぶ）を1基もしくは数基の粗圧延機を介して25~50mm厚みに圧延する。さらに、6ないし7基の仕上げ圧延機列にて最高1500 mpmにも及ぶ速度で1.0~6mmの厚みの薄鋼板に圧延され、873K(600°C)程度の温度でコイル状に巻き取られる。製造された薄板の一部はそのまま建材等に加工されるが、さらに冷間圧延工程を経て自動車用鋼板等に供される。現在、日本では16ミルが稼働し、その年間生産量は4,000万トン以上に達する。

ホットストリップミルの圧延は2重、4重もしくは6重圧延機で行われ、ロールは圧延作業の中で圧延鋼材、ならびに補強ロールもしくは中間ロールとの間で機械的ならびに熱的負荷を複雑かつ大きな変動を伴って繰り返し受ける。すなわち、圧延鋼材と接触

### 3 ロールの使用条件と負荷

薄板製品の代表的な製造工程を図1に示したが、ホットストリップミルでは1273~1573K(1000~1300°C)に加熱された約250mm厚みの板状鋼塊(スラブと呼ぶ)を1基もしくは数基の粗圧延機を介して25~50mm厚みに圧延する。さらに、6ないし7基の仕上げ圧延機列にて最高1500 mpmにも及ぶ速度で1.0~6mmの厚みの薄鋼板に圧延され、873K(600°C)程度の温度でコイル状に巻き取られる。製造された薄板の一部はそのまま建材等に加工されるが、さらに冷間圧延工程を経て自動車用鋼板等に供される。現在、日本では16ミルが稼働し、その年間生産量は4,000万トン以上に達する。

ホットストリップミルの圧延は2重、4重もしくは6重圧延機で行われ、ロールは圧延作業の中で圧延鋼材、ならびに補強ロールもしくは中間ロールとの間で機械的ならびに熱的負荷を複雑かつ大きな変動を伴って繰り返し受ける。すなわち、圧延鋼材と接触する面では圧延荷重と熱負荷サイクルを受け、補強もしくは中間ロールと接して接触荷重を受け、これらの負荷サイクルがロールの回転により繰り返される。そのため、ロール表面は熱き裂あるいは肌荒れを伴いながらアブレシブ(引っ掻き)もしくはアドヒージョン(凝着)により摩耗していくと考えられる。図7はロール表面上の温度、圧力及びすべりについての経時変化を模式的に示したものである。また、各圧延機における代表的な圧延条件下でのロールの摩耗に影響すると考えられる負荷例を図8に示

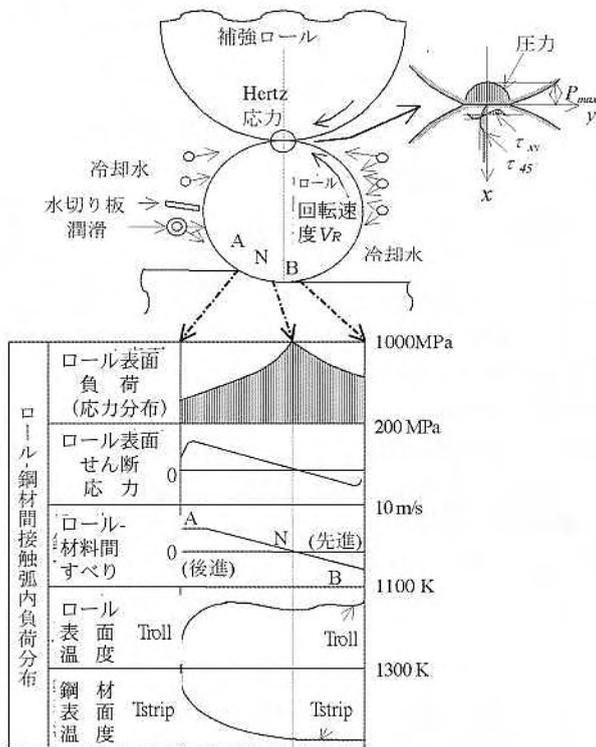


図7 ホットストリップミル仕上げ圧延機におけるロール表面近傍の負荷例

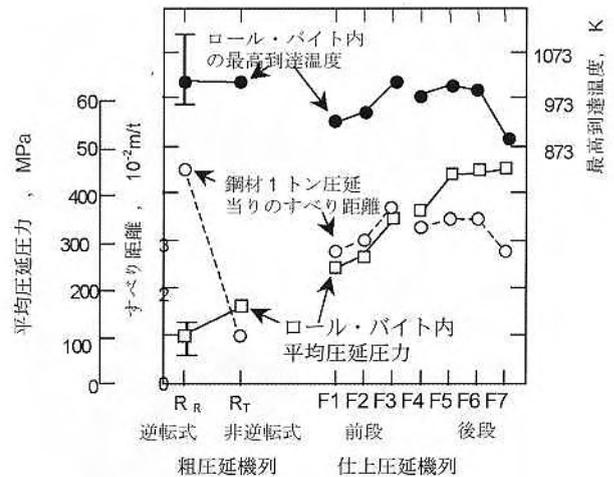


図8 ホットストリップミルにおけるロール負荷例(鋼板厚み3 mm)

す。一般的に圧延圧力はロールと圧延材との接触弧(ロール・バイトと呼ばれる)の内部に入るに従い増大し、中立点で最大となり、その後減少する。圧延圧力は粗圧延機に比べ仕上げ圧延機で大きく、とくに後段圧延機で大きくなる。接線力、すなわちすべりは中立点を境として方向は逆転する。さらに、圧延鋼材からの熱伝導ならびにロール・バイト内の相対すべりから発生する摩擦熱が作用する。ロール表面温度が上昇すると硬さが低下し、塑性流動しやすくなり摩耗が増大する原因になる。低速で接触弧長の長い粗及び仕上げ前段(前方)ほど熱伝導が、高速で接触弧長が短く圧力の大きな仕上げ後段(後方)ほど摩擦熱の影響が大きい。前者ではロール内部への熱浸透が比較的大きいため熱き裂の発生を考慮する必要があり、またロール表面には黒皮と呼ばれる主にマグネタイト( $Fe_3O_4$ )の酸化皮膜が生成してロールの摩耗に影響を及ぼす。

### 4 ロールの摩耗とシミュレート試験

#### 4.1 実機圧延におけるロールの摩耗

ホットストリップミルにおけるロールの摩耗を考えるに当たり、まず各圧延機でのロールの損傷についての主要な影響因子をまとめて表2に示す。また、各圧延機でのロールの摩耗と転動数についての事例を図9に示す。粗から仕上げ後段へと後方の圧延機に

表2 ホットストリップミルにおけるロールの損傷

使用する圧延機		主要な損傷要因		
		摩耗	熱亀裂	肌荒れ
粗	2重式	+	++	-
	4重式	++	+	++
仕上げ	前段	++	+	++
	後段	+++	-	+

注) 影響度 +++: 極めて大 ++: 大 +: 有 -: 小

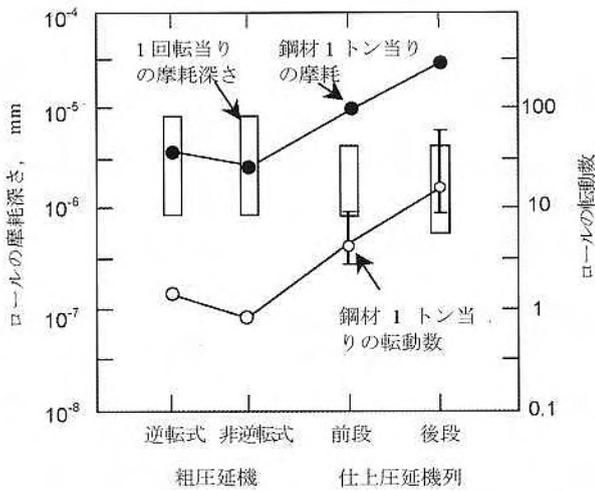


図9 ホットストリップミルにおけるロールの損傷例

なるにつれて、1回転あたりの摩耗はわずかに少なくなるが、転動数は後方に行くほど急激に増加し、その結果後方ほどロール摩耗は大きくなる。

熱間圧延におけるロールの摩耗は肌荒れとともに表面損傷の問題として、1980年代当時の代表的材質であるアダマイト、グレン铸铁について表面温度との関係から研究され、その成果のひとつを図10に示す<sup>10,11)</sup>。ロールは表面温度がある温度より低いときはアブレシブ形態をとり、適正な温度範囲では自己生成または付着黒皮の保護作用により摩耗量は著しく少なくなる。さらに温度が高くなると、母材自体の著しい強度低下により塑性流動や凝着による肌荒れを生ずるようになり摩耗が大きくなる。アダマイトは673~873K(400~600℃)、グレン铸铁は873~1023K(600~750℃)が最も望ましく、前者は仕上げ前段、後者は後段圧延機の使用条件と一致し、それぞれ使用されてきた。

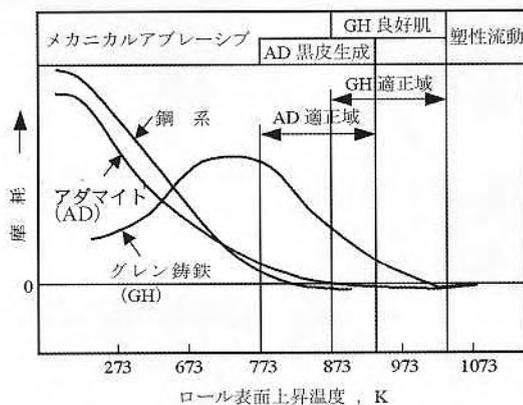


図10 ロール材質別表面温度と摩耗の関係

さて、近年実用化したハイスロールの導入時に際し、実際の仕上げ圧延に供したロールの摩耗について調査した結果を述べる。図11は摩耗が顕著に現れる後段圧延機列のそれぞれの圧延機において、同一

圧延単位での圧延後のハイスロールとグレン铸铁ロールのロール形状を摩耗状況とともに比較して示す。操業性を考慮して両ロールの使用前の形状を変

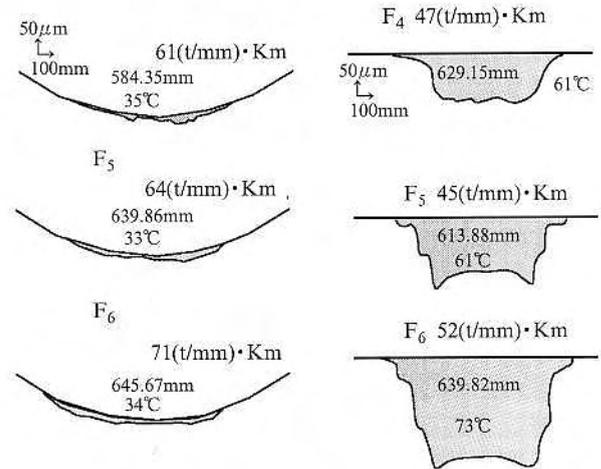


図11 ホットストリップミル仕上げ圧延機におけるロールの損傷例

えているが、ハイスロールでの摩耗は非常に小さく、グレン铸铁ロールはいずれの圧延機においても大きく摩耗している。各ロール形状には使用圧延機(F4,...)、ロール直径(584.35mm,...)、測定時のロール温度(35℃,...)に加えて圧延操業条件のパラメータ(61(t/mm)·km,...)を添えている。Holmによれば、摩耗Wは荷重Pとすべり距離(L)に比例し、硬さHに反比例するとされ、式 $W=K \cdot P \cdot L / H$ で表わされる。操業条件のパラメータとして、ロール軸方向の単位長さ当たりの圧延荷重(線荷重と呼ばれる)とロール転動数の積として定式化した。前者は荷重を、後者はロール・バイト内でのすべりがほぼ同じとすればすべり距離を代表している。図12に本パラメータに対するロールの摩耗について、前段圧延機列で主に使われていた高クロム铸铁を試験的に使用して得た結果を加えて材質別に示した。いずれのロールにおいて

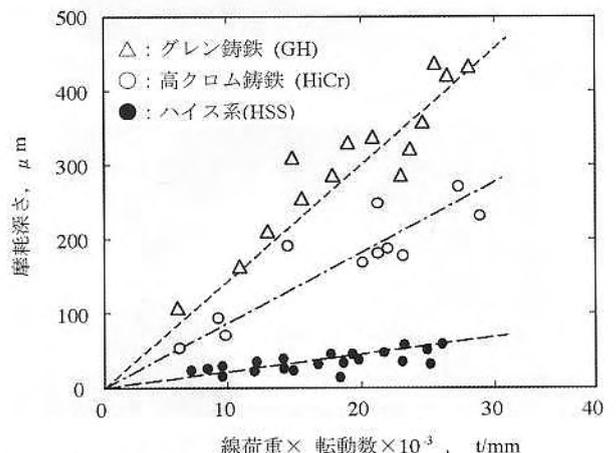


図12 ホットストリップミル仕上げ圧延における代表的ロールの摩耗

も、摩耗は本パラメータの増加とともに直線的に増加する。したがって、Holmにより提案された式に従っていると判断される。グレン铸铁ロールの摩耗と比較すると、高クロム铸铁ロールのそれは約3/5と少なく、さらにハイスロールの摩耗は約1/5以下と極めて少ない。このデータをもとに水野は摩耗係数 (K) の試算結果を紹介しているが、熱間圧延における摩耗は非常に大きいことが定量的に理解でき興味深い<sup>12)</sup>。

さて、前記の式には硬さが考慮されているが、対象の三材質の室温での代表硬さはHV539~717の範囲にあり、差異は小さい。しかしながら、摩耗が生じるロール・バイト内ではロール表面が加熱されていることを考慮すべきで、図6に示すとおり、材質間での高温硬さの差異は顕著であり、とくにハイス系白铸铁材は著しく高く、前記摩耗結果を支持している。また、基地に優先固溶し耐熱特性を向上させると言われるCoを添加したロールで摩耗が減少したことも理解できる<sup>9)</sup>。したがって、一般に知られているように硬い炭化物が多いほど摩耗が少ないことに加え、高温で安定なより硬い炭化物を分散させて用いることと、基地組織を強化することが摩耗を少なくするのに有効である<sup>13)</sup>。なお、摩耗は化学成分および組成に加えて製造法によっても影響され、とくに組織の微細化が有効であることが分っている。

粗および仕上げ前段圧延機においては、純粋な摩耗に加えて、前述のとおりロール表面に酸化皮膜および熱き裂が生じ、これらがロールの摩耗に影響する。以下これらの影響について述べる。一般に鉄系酸化物は比較的硬く、主要な酸化皮膜であるマグネ

タイトは図6に示すとおり873KでHV700程度の硬さを有する。また皮膜には熱遮断効果があるためロールの摩耗を抑制し、アダマイトならびに高クロム铸铁ロールでは積極的にこれを利用してきた。しかしながら、酸化皮膜は圧延の進行とともに厚みを増しながら成長し、限界値をこえると劣化もしくは多孔質となり剥離し、図13に示すような帯状肌荒れ（バンディングと呼ばれる）が大量圧延下で生じる。剥離部は非常に粗いために接触弧面内において大きな摩擦が生じ、その結果局部的に摩耗が大きくなる。さらに、摩擦熱により圧延鋼板の表面が局部加熱されて異常酸化し、生成した酸化物（スケール）が次の圧延機にて鋼材に噛み込まれ、圧延製品においてスケール傷を誘発する問題が生じる。酸化皮膜の主たる化学組成は、いずれのロールもマグネタイト ( $Fe_3O_4$ ) およびヘマタイト ( $Fe_2O_3$ ) である。ハイスロールでの酸化皮膜の厚みは高クロム铸铁ロールでのその約1/2と薄い<sup>9)</sup>。また、剥離部においても酸化皮膜が容易に再生することから、長時間連続して圧延が可能である。このようにハイスロールは酸化皮膜の生成が早く、かつ過度に厚くならず長時間安定なことが実験結果としても報告されている<sup>14)</sup>。

熱き裂はロール内部への熱浸透が大きな粗および仕上げ前段圧延機において表面に生じる。き裂は炭化物に沿って進展し、これにロール・バイト内および補強ロール間で繰り返し機械的負荷が作用することにより表層の一部が欠け落ち、前述の肌荒れが摩耗を助長するとされる。図14に仕上げ前段圧延機における使用後のロール表面近傍の断面写真例を、さらに高クロム铸铁ロールの例での損傷の模式図を図15<sup>4)</sup>に示す。き裂の深さはアダマイト、高クロム铸

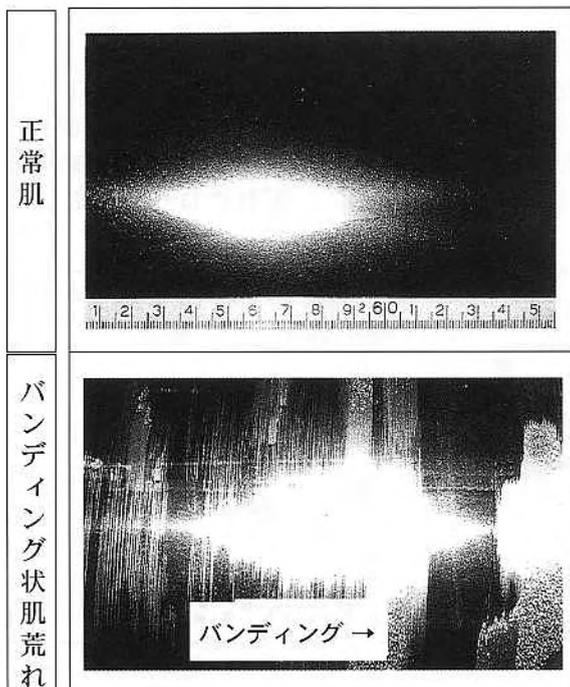


図 13 ホットストリップミル仕上げ前段圧延におけるロールの肌荒れ例

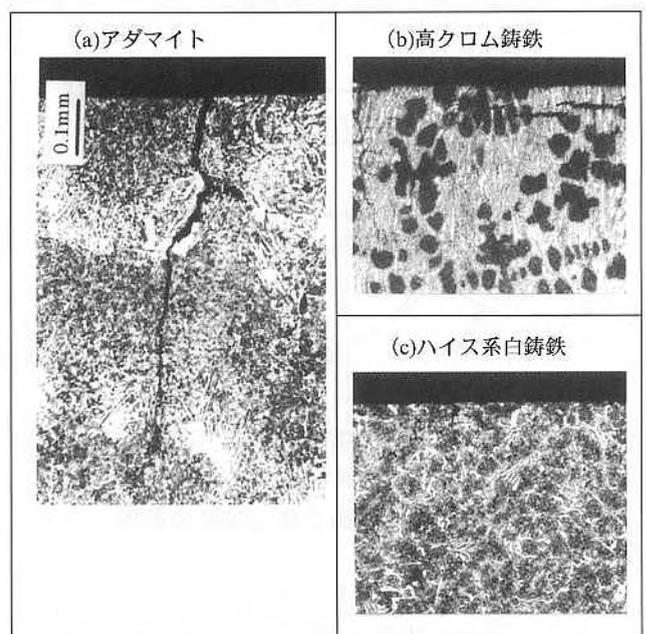


図 14 ホットストリップミル仕上げ前段圧延におけるロールの表面近傍の損傷状況

鉄およびハイスロールの順に浅くなり、実際の使用において観察される熱き裂の緻密さと傾向を同じくする。硬度の低い、すなわち圧縮強度が低いアダマイトロールには表面近傍に塑性流動が認められる。

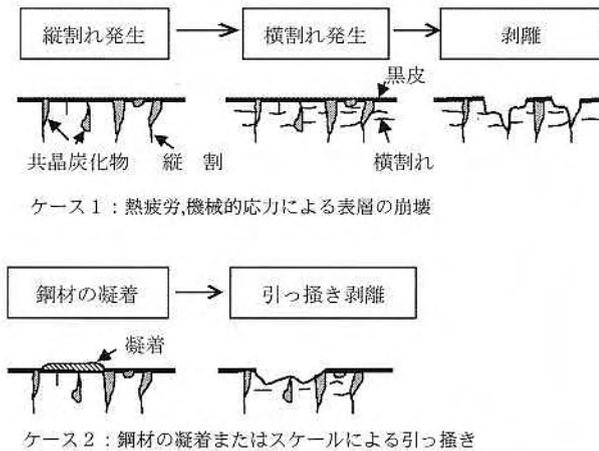


図 15 高クロム鑄鉄ロールの損傷機構

多量の炭化物を有する高クロム鑄鉄には表面近傍にて表面に平行なき裂が生じ、一部で縦き裂と交差し欠け落ちが認められ、摩耗を助長していることが明らかである。ハイスロールにはこれらのような顕著な損傷が認められず、長時間の連続圧延に耐えることが損傷形態からも理解できる。

鋼材圧延量に対するロールの消耗を材質別に比較して図16に示す。酸化皮膜や熱き裂の生成状況やロールの表面肌状況による研削頻度等の因子を含んでいるため、前段圧延機におけるハイスロールの消耗は図12で示した高クロム鑄鉄に対する純粋の摩耗性能比（約1/3）より少なくなっているが、基本的には摩耗で評価できるといえよう。一方、図に併記した後段圧延機でのハイスロールの消耗は、グレン鑄鉄ロールに比べて約1/5となっており、これは純粋な摩耗性能比とほぼ一致している。

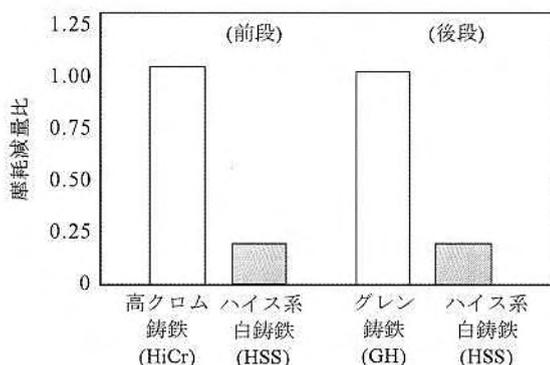


図 16 ホットストリップミル仕上げ圧延機での消耗例

さて、ロールの摩耗に影響する技術として潤滑と水冷条件がある。油潤滑は一般的にはロール・バイト内の摩擦を減少させ、圧延荷重の低減およびそれに伴うロール摩耗の減少を目的に積極的に利用され、その成果が報告されている<sup>15)</sup>。一方、耐摩耗性に極めて優れたハイスロールを仕上げ前段圧延機にて使用する場合には、操業性の観点より不安定な酸化皮膜を特殊な潤滑油により抑制するという新しい試みで成果を得ている<sup>16)</sup>。また、水冷はロール表面温度および熱の内部への浸透を抑制して摩耗を減少する作用があり、とくに通板部での集中冷却および後面側において可能な限りロール・バイトに近づけることが望ましい。

#### 4.2 実験室でのシミュレート試験

ロールの表面損傷をシミュレートする実験方法がいくつか提案されており、圧延方式、転がりすべり方式およびすべり方式に大別できる<sup>17)</sup>。著者らは、図17に示す高周波誘導加熱を利用した転がり・すべり摩擦方式を、簡便で主要な影響因子である温度・接触圧力およびすべり因子を実験条件に反映できることより活用している。ホットストリップ仕上げ圧延のシミュレート試験を試みた事例を紹介する。最大接触面圧235Mpa、すべり率11%、試験材温度773K(500℃)とし、設備上の制約より接触面圧は多少小さいがすべり率・温度はほぼ実際のロール・バイト内の負荷条件とした。転動数 $1 \times 10^4$ 回でその摩耗減量を調査し材質別に比較した実験結果を図18に示す。グレン鑄鉄と比較し、高クロム鑄鉄では約3/5で多元合金白鑄鉄のそれは約1/5であり、実際の圧延で得た結果とほぼ同じ結果を得た。一方、圧延方式の摩耗試験法は設備費用が大きく制御に困難があるとされたが近年実用化され、その結果も報告されている<sup>18)</sup>。

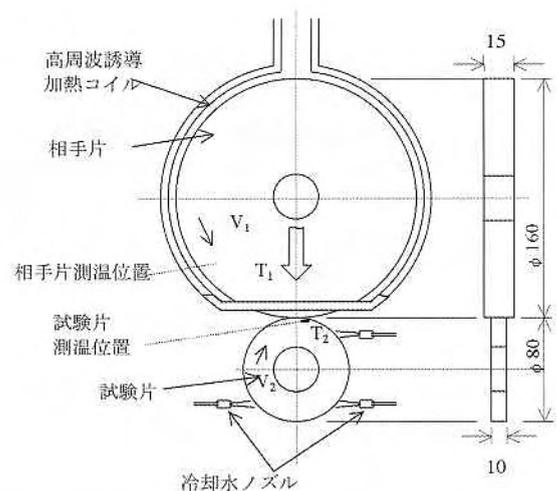


図 17 転がり・すべり摩擦方式の熱間摩耗試験機の構成図

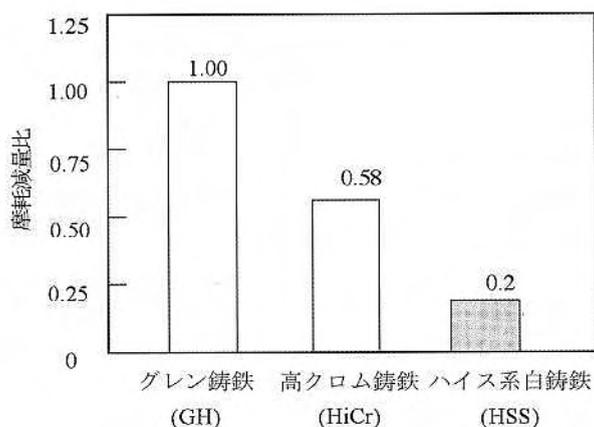


図 18 高温摩擦試験結果

## 5 結論

熱間圧延におけるロールとその摩耗について、ホットストリップミルを例に述べたが、次のように要約される。

(1) ロール材は耐摩耗性についての強い要求により高硬化化の方向で開発・改善されてきた。その歴史の変遷をロール材に利用された炭化物の観点からみると、セメントタイト( $\text{Fe}_3\text{C}$ )にはじまり、クロム系 $\text{M}_7\text{C}_3$ 型炭化物、さらに $\text{M}_2\text{C}$ ( $\text{M}_6\text{C}$ )およびMC型炭化物へとより硬い炭化物が利用されるようになった。

(2) ロールの摩耗と $\Sigma$ (圧延荷重/鋼材板幅) $\times$ (転動数)により定式化されたパラメータとの間には直線関係にあり、Holmの摩耗式が支持される。各ロールの摩耗についてグレン铸铁ロールを基準に比較すると、高クロム铸铁ロールでは3/5、ハイスロールは1/5以下である。

(3) 高温での硬さが高いロール材ほど摩耗は少ない。したがって、炭化物の硬さおよび基地の強化が炭化物の量の影響以上に摩耗の減少に有効である。

(4) シミュレート試験の結果により実際の圧延でのロールの摩耗特性を推測可能であることが確認された。

近年、熱間圧延分野において極めて摩耗の少ないハイスロールが日本で実用化され、圧延ロールの新時代を構築した。熱間圧延においてロールは複雑かつ過酷な条件下で使用されるが、摩耗に及ぼす影響因子の定量化と関連付けを進め、ロール材の特性について体系的に整理することにより、耐摩耗性に加えて耐熱き裂性、耐肌荒れ性および強靱性等を総合的に考慮した損傷の少ない材料開発が望まれる。

本稿は「塑性と加工」誌摩耗特集号(2004年5月)に掲載された依頼解説に加筆したものである。

## 参考文献

- Rolls for the Metalworking Industries, Iron and Steel Society Inc., PA,(1990).
- 宮下格之助：鉄と鋼, 57-5(1971), 696~724.
- 佐野義一：圧延におけるトライボロジー, 鉄鋼協会西山記念技術講座(1993), 193.
- 橋本光生, 石橋修次, 河合徹朗, 飯干宗逸, 綾垣昌俊, 木村和夫, 山本洋春：新日鉄技, 345(1992), 59~66.
- 鉄鋼基礎共同研究会編：鉄鋼材料の摩耗, 日本鉄鋼協会(1984).
- 圧延ロール研究部会編：圧延ロールの技術はどこまで進歩したか, 日本鉄鋼協会(1995).
- 橋本光生, 大友清司, 吉田幸一郎, 倉橋隆朗：製鐵研究, 338(1990), 62~66.
- 橋本光生, 川上保, 小田高士, 倉橋隆朗, 保木本勝利：新日鉄技報, 356(1995), 76~83.
- 大貫輝, 川並高雄, 中島浩衛：鉄鋼材料の摩耗(前掲5), 日本鉄鋼協会(1984), 53~59.
- 矢中速二, 外山弘, 綾垣昌俊, 松田輝雄, 斎藤弘道, 木村和夫, 岡野勲：製鐵研究, 308(1982), 104~121.
- 水野高爾：塑性加工学会プロセス・トライボロジー分科会年間報告書(2002年度), 18~27.
- 倉橋隆朗, 西山泰行, 早稻田孝, 甲賀孝彦, 橋本光生：塑性と加工, 32-359(1991), 1238-1242.
- V. Lanteri, C.Thomas, J.Bocquet, H.Yamamoto and S.Araya：Proc. of 7th Int. Conf. on Steel Rolling (STEEL ROLLING '98), ISII, Chiba, Japan, (1998), 423~428.
- 早稻田孝, 木内学, 宮坂清人, 倉橋隆朗：塑性と加工, 32-359(1990), 1381-1389.
- 伊原肇, 下斗米菜直, 榊原正義：材料とプロセス, 15(2002), 309.
- 圧延ロール研究部会編：ホットストリップ用ロール材質に関する文献調査, 日本鉄鋼協会
- 大畑拓巳, 空野博明, 佐野義一：材料とプロセス, 4(1991), 1572.