

# 最近の熱間薄板圧延機用作業ロール

## New Work Rolls for Hot Strip Mills

HC-MILLなどの高度な機能をもつホットストリップミルで使用される圧延用作業ロールは、ミル機能を発揮させるために形状的に細長く、加えられる圧延トルクやベンディング力などの負荷が大きい。したがって、ロール全体に強靱性が要求されるとともに、耐摩耗性や耐事故性のニーズは在来の4段圧延機の場合よりもはるかに強い。

耐摩耗性に優れる高クロム鋳鉄ロールは、耐肌荒れ性と耐事故性の改良点が評価され、ホットストリップミル仕上前段作業ロールに多用され始めた。HC-MILL後段用高合金グレンロールは、内層材の強靱ダクタイル化で在来ロールのおよそ2.5倍の強度をもたせ、外殻使用層に対してはマイクロ組織の微細・均質化を図った。

これらのロール特性は、超音波探傷などの非破壊検査手段により品質保証される。

佐野義一\* *Yoshikazu Sano*  
 杉村幸彦\*\* *Yukihiko Sugimura*  
 枝 徹也\* *Tetsuya Eda*  
 平田一雄\*\* *Kazuo Hirata*

### 1 緒 言

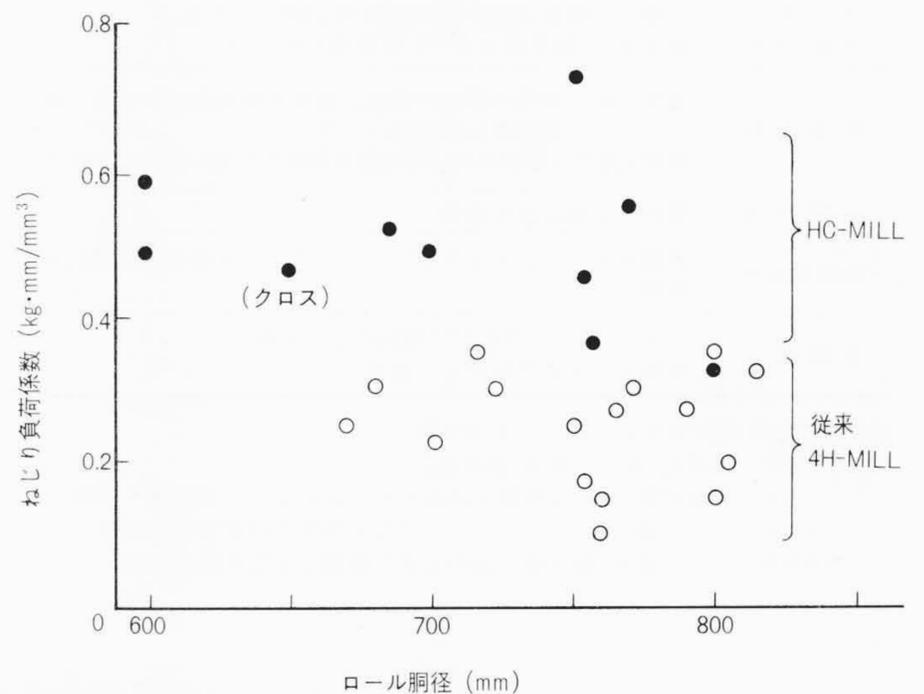
成熟産業である鉄鋼業での近年の課題は、製品の高級化とコストの低減である。このうち熱間圧延は、その設備規模の大きさ、品質や製造コストへの影響度合の大きさなどの点で重要な位置づけにあり、この数年間に急速な技術改革や設備の新設、改造がなされつつある。連続鋳造からホットストリップミルへの直送圧延が、熱間圧延での技術革新の中核をなすもので<sup>1)</sup>、これを可能とするために開発されたホットストリップミルの代表的なものがHC-MILLである<sup>2)</sup>。

最近のホットストリップミルでは、省エネルギーのためにバー厚を厚くする傾向にあり、仕上ミルでの高圧下圧延が必要とされる。この結果、増大する圧延荷重や圧延トルクを抑制するために、作業ロールが小径化される。HC-MILLは圧延鋼種、板幅、板厚などの圧延スケジュール上の制約を排除できる機能をもっているため、高圧下圧延が可能である。このため、HC-MILLの導入により、バー厚の増大にもかかわらず、仕上ミルのスタンド数を7台から6台に減少できる。作業ロールは、小径化とともに、加えられる圧延トルクやベンディング負荷が過酷となるため、ロール軸部の強靱化が必要とされる。また、耐事故性の向上に対する要求度合も従来の4段ミルの比ではない。

このような最近のホットストリップミルの動向での作業ロールに対するニーズに立脚して、現状の対応ロールの特性と品質保証技術を中心に取りまとめた。

### 2 HC-MILL用作業ロールの必要条件

HC-MILL用作業ロールの長さは、作業ロールの軸方向シフト(HCW-MILL, HCMW-MILL)<sup>3)</sup>や軸受の構造に関連して、従来の4段圧延機(4H-MILL)より長くなるのに対し胴径が小径化される結果、形状は細長いものになる。また、省エネルギーをねらって仕上ミル入側バー厚をより厚くする一方で、熱間圧延製品の板厚を薄くする傾向にある。このため、圧延機1基当たりの圧下率が大きくなりロール軸部に大きなねじりモーメントが負荷される。加えて、板クラウン調整のため大きなベンディング力がロール軸に付加される結果、軸各部での応力が高い。例えば、ウォブラー部でねじり応力の



注：ねじり負荷係数 =  $\frac{\text{定格トルク/ロール}}{(\text{ウォブラー直径})^3}$

図1 仕上後段ロールのねじり負荷係数 HC-MILL用ロールのウォブラー部の応力は、在来ミルのおよそ2倍に達する。

相対値をねじり負荷係数とすれば、図1に示すようにHC-MILLのそれは4H-MILLより高くなり、平均的におよそ2倍に達する。

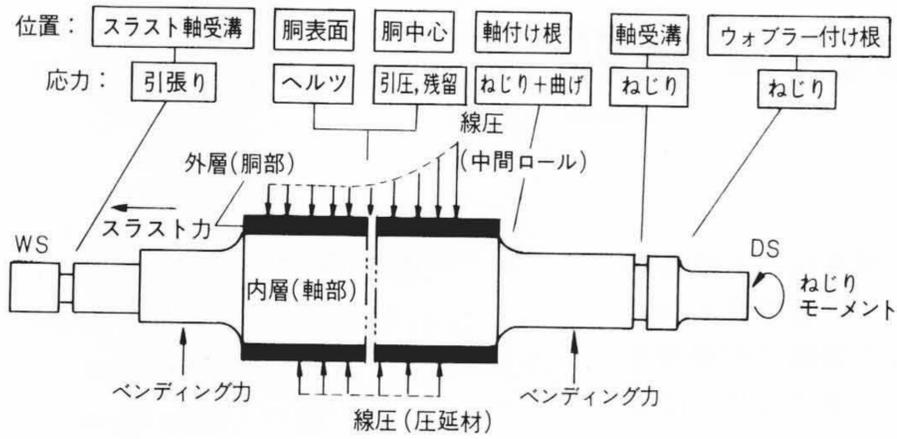
スケジュールフリー圧延への制約要因のうちで、HC-MILLのクラウン・形状制御能力によって解消困難な問題に作業ロールの段付摩耗がある。作業ロールシフトや熱間潤滑あるいはインライングラインダなどはロール摩耗対応技術であるが、ロール材質改善による摩耗減少はロールメーカーの重要課題である。

HC-MILL作業ロールの各部に生じる負荷と応力を図2に、HC-MILL作業ロールの具備すべき特性を表1に示す。

### 3 HC-MILL用作業ロールの特性

ホットストリップミル仕上列の作業ロールは、前段(FW)後段(FHW)とで通常、適用材質が異なる。

\* 日立金属株式会社若松工場 \*\* 日立金属株式会社ロール事業部



注：略語説明 WS(Work Side), DS(Drive Side)

図2 HC-MILL用ロールの負荷と応力 HC-MILL用ロールでは、在来ミルで許容できたベンドینگ力、スラスト力、線圧などの増加に伴う強度問題への対応が必要となる。

表1 HC-MILL用ロールの特徴と具備特性 HC-MILLの適用は仕上後段が先行したので、本表の内容は大部分が仕上後段用ロールに関するものである。

項目	内容
ロールの寸法、形状	胴径：小径化 $\phi 600 \sim \phi 800$ (在来 $\phi 660 \sim \phi 800$ ) 細長比*：細長化 6.5~8.5 (在来 5.0~6.5)
耐事故性	通常圧延：軸部の高疲労強度，胴部の高転動疲労強度，高塑性流動抵抗* 異常圧延**：胴部の高い熱衝撃き裂抵抗*，高い絞りき裂抵抗
耐摩耗性	現状の2倍以上を目標
耐肌荒れ性	流星さず，バンディング，小ピットなどの肌荒れが軽微*
表面性状	マクロ***，ミクロ****偏析がなく均質 有害なミクロ欠陥がなく健全

注：※は主に前段FW用ロールに対する性質

\* 細長比(ロール全長/胴直径)

\*\* 異常圧延(コイルの絞り込みやかみ止めなどの圧延トラブル)

\*\*\* マクロ偏析(マクロエッチングなど肉眼で判定可能な偏析)

\*\*\*\* ミクロ偏析(数十倍以上のミクロ組織で判定可能な偏析)

### 3.1 前段用ロール

前段で稼働中のHC-MILLは、現状では新日本製鐵株式会社八幡製鐵所と日新製鋼株式会社呉製鐵所であるが、今後適用拡大の計画が各所で進められている。ミル形式によらずFWロールは耐肌荒れ性が最も重要な性質であり、在来の4H-MILLで実績をもつロール材質がHC-MILLでも使用される。図3に、アダマイトと高クロム鑄鉄のミクロ組織及び特性を示す。在来ミルでは必要のなかったHC-MILL用ロールとしての特性は、 $200\text{kg}/\text{mm}^2$ を上回る高接触圧力に対する塑性流動抵抗と軸部の強度である。後者は内層材へ的高级ダクタイルの適用により対応でき、前者は高クロムロールの適用で問題の解消が図られている。図4に示すように硬さがおおよそHs65を上回る材質ではHC-MILLで予想される最大接触

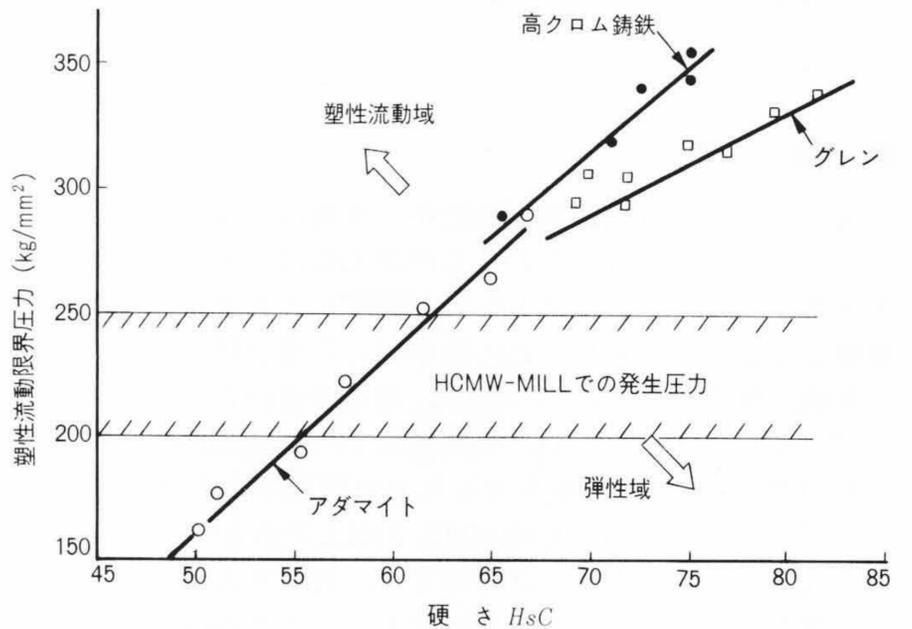
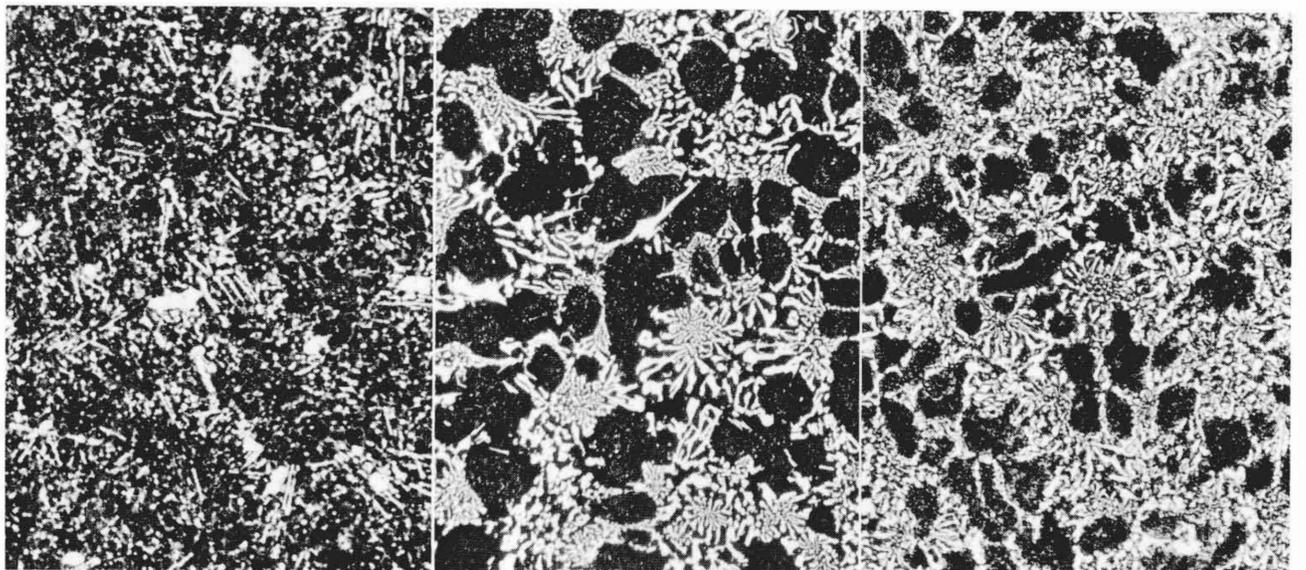


図4 各種ロール材の硬さと塑性流動限界圧力 HCMW-MILLでの発生圧力に対し、硬さHs65以上あれば塑性流動が生じない。高クロム鑄鉄やグレン材は全く問題はない。



(a) アダマイト

(b) 高クロム鑄鉄

(c) 高クロム鑄鉄(改良)

材質	材質記号	硬さ Hs	化学成分(%)		炭化物		備考
			C	Cr	種類	(%)	
アダマイト	H2S (単体)	50~55	1.6~1.8	0.8~1.5	Fe <sub>3</sub> C	4~8	HCMW-MILLでは、 Hs65以上必要
高クロム鑄鉄	W2HC (内層ダクタイル鑄鉄)	65~75	2.5~2.8	13~16	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	16~22	—
高クロム鑄鉄 (改良)	W2HC (内層ダクタイル鑄鉄)	70~78	2.7~3.1	17~20	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	20~28	炭化物の分散化 基地微細化

図3 FWロールの組織と諸特性 HC-MILL仕上前段用FWロールには、改良形高クロムロールが中心に適用されていくものとみられる。

圧力250kg/mm<sup>2</sup>でも塑性流動を起こさず、これに基づく損傷は生じない。しかし、従来適用してきたロール材の延長としてHs65の高硬度アダマイトをHC-MILLに適用を試みたが、黒皮の付着が不安定なために<sup>3)</sup>肌荒れが多発した。高クロム鑄鉄ロールは、我が国での適用当初、深い熱き裂や肌荒れが生じ不評であった。しかし、ロール使用者側の使用方法の改

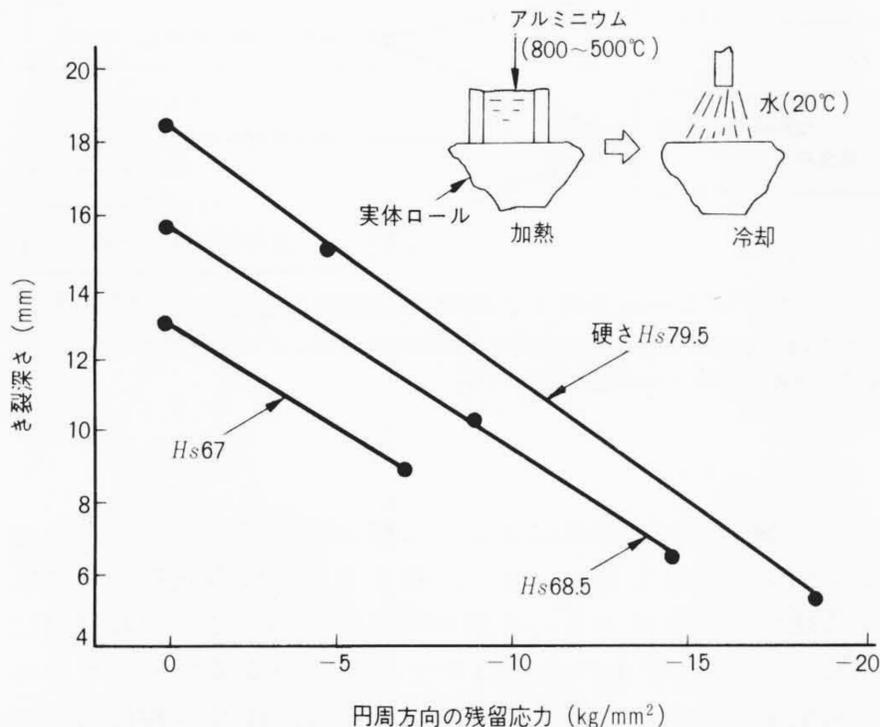
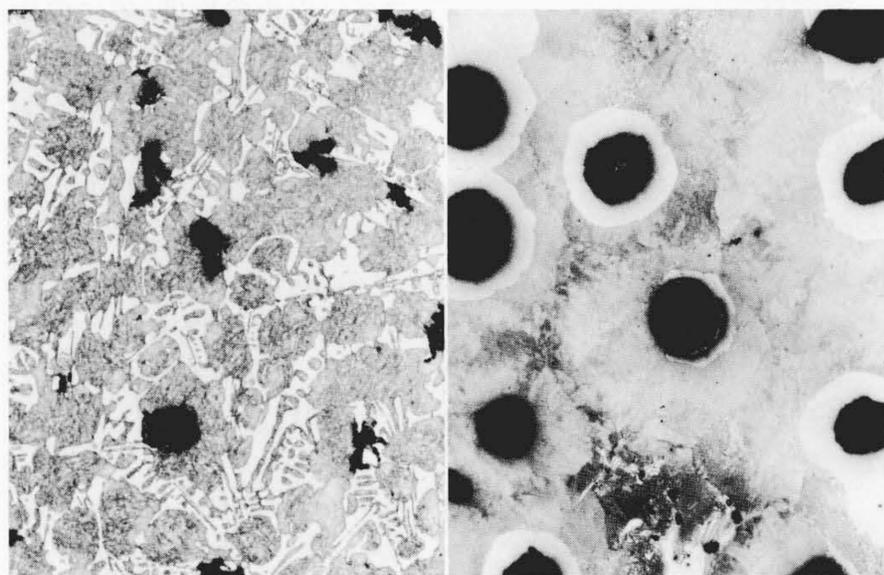


図5 高クロム鑄鉄ロールの圧縮残留応力と熱き裂深さ 高クロム鑄鉄ロールの熱き裂深さは、硬さを下げるよりも圧縮残留応力を大きくしたほうが、浅く止めることができる。



材質 WTDC	硬さ Hs	化学成分(%)		マイクロ組織			強さ(kg/mm <sup>2</sup> )	
		C	Ni	炭化物 (%)	黒鉛 (%)	基地 寸法 (μm)*	引張 強さ	引圧 疲労 限**
外層 合金グレ	77~83	3.0~ 3.4	4.3~ 4.8	Fe <sub>3</sub> C (25~35)	粒状 (2~4)	25~35	40~50	12~15
内層 ダクタイル 鑄鉄	35~40	3.3~ 3.6	0.8~ 1.2	Fe <sub>3</sub> C (~5)	球状 (10~20)	—	40~55	13.5~ 18

注：\* 初晶オーステナイトの平均切片長さ  
\*\* 引圧疲労限=回転曲げ疲労限×0.85

図6 FHWロールの組織と諸特性 グレノール材の性質は、マイクロ組織構成要素の分布状態に依存するので、それらの調整が重要である。

善、図3に示したマイクロ組織の改善や図5に示す圧縮残留応力の活用などにより高クロム鑄鉄の欠点が解消され、アダマイトにとって代わりつつある。今後更に材質改善の余地をもつロール材として期待されている。

### 3.2 後段用ロール

在来ミルに使用されているFHWロールは、遠心鑄造による複合合金グレで内層材は高級ねずみ鑄鉄である。HC-MILL用に開発したFHWロールは、図6に示すように内層材は強靱ダクタイル鑄鉄である。

#### (1) 胴部

グレノールの性質はマイクロ組織に強く依存し、HC-MILL用ロールとしての必要な特性は、製造時でのマイクロ組織の適切な制御によって付与される。図7に合金グレノール材の性質とマイクロ組織との関係を示す。ロール摩耗への基地組織の大きさの影響を図8に示すが、基地組織の微細化により耐摩耗性は向上する<sup>3)</sup>。炭化物の増量や黒鉛の減少によっても摩耗は減少するが、鑄造組織の微細化による効果より小さく、しかも耐事故性を劣化させる副作用があるので得策ではない。

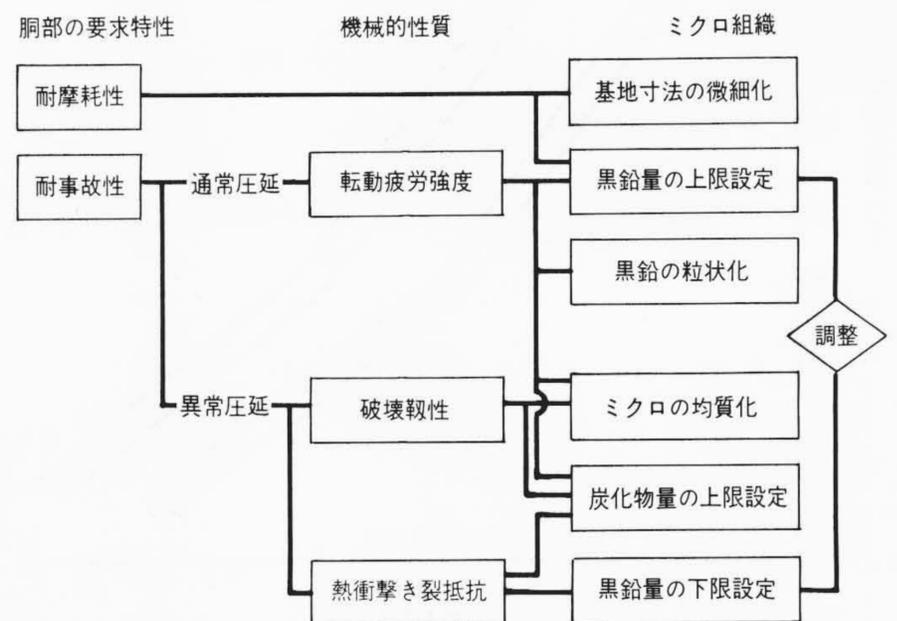


図7 仕上後段用FHWロールの胴部要求特性とマイクロ組織の関係 グレノール材の諸特性は、黒鉛、炭化物、基地のマイクロ組織に依存して変化する。

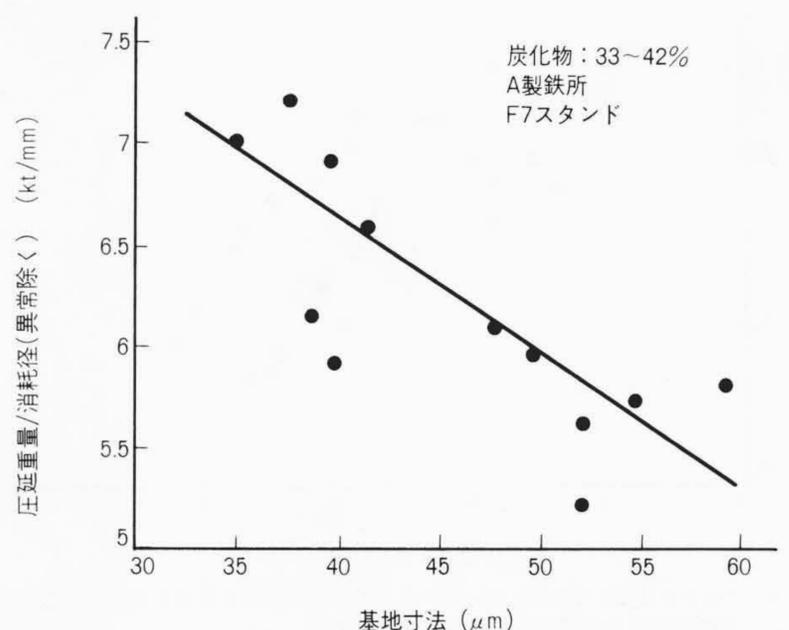
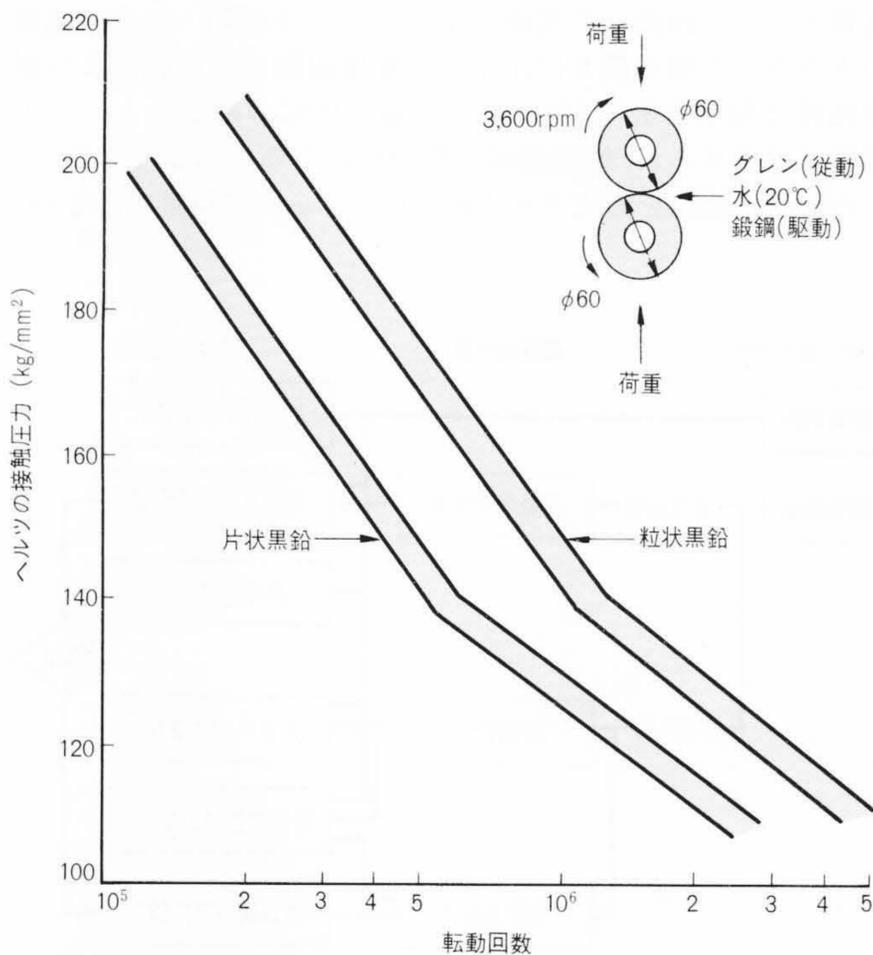


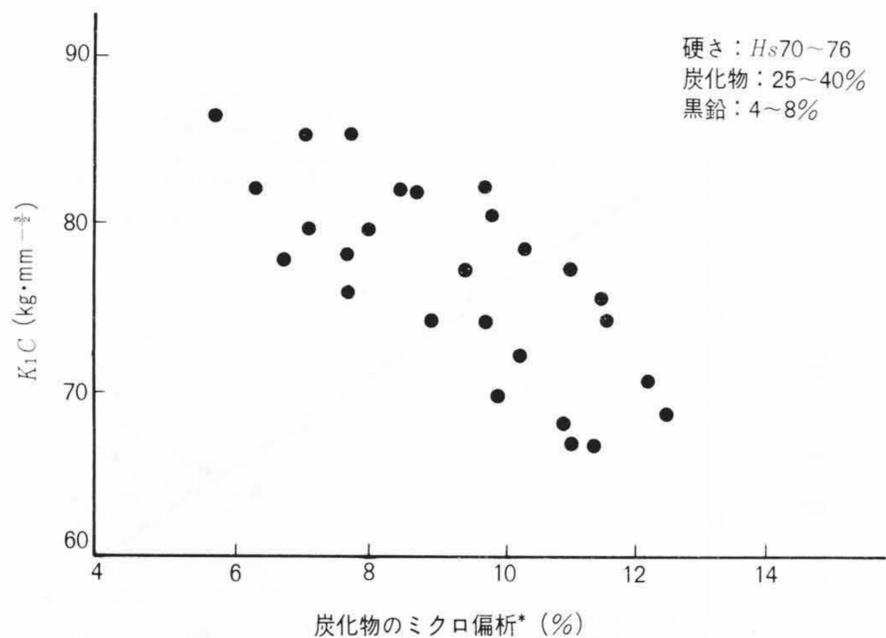
図8 グレノールの基地寸法と圧延成績の関係 異常を除いたロール消耗は、ロール摩耗に比例するため、(圧延重量)/(消耗径)は(圧延重量)/(摩耗径)に比例する。基地寸法が小さいほど耐摩耗性に優れる。

HC-MILLの中でもHCMW-MILLでは中間ロールとの接触圧力が200kg/mm<sup>2</sup>を超える場合があり、転動疲労に起因するスポーリングが懸念されたので、転動疲労寿命を延長させるため黒鉛形状を応力集中の大きな片状から粒状に変え、黒鉛量も減少させた。この結果、**図9**に示すように、耐久寿命がおよそ2倍に延長できた。

絞り込みトラブルは、熱間薄板圧延では避けることができないものであり、絞り込みに伴うき裂除去のためのロール消耗が全体消耗量の20%を占めるミルもある。この異常消耗をいかに減少させるかは、在来の4H-MILLでも重要な課題であるが、連続鋳造と熱間圧延を直結したHC-MILLでは、絞り

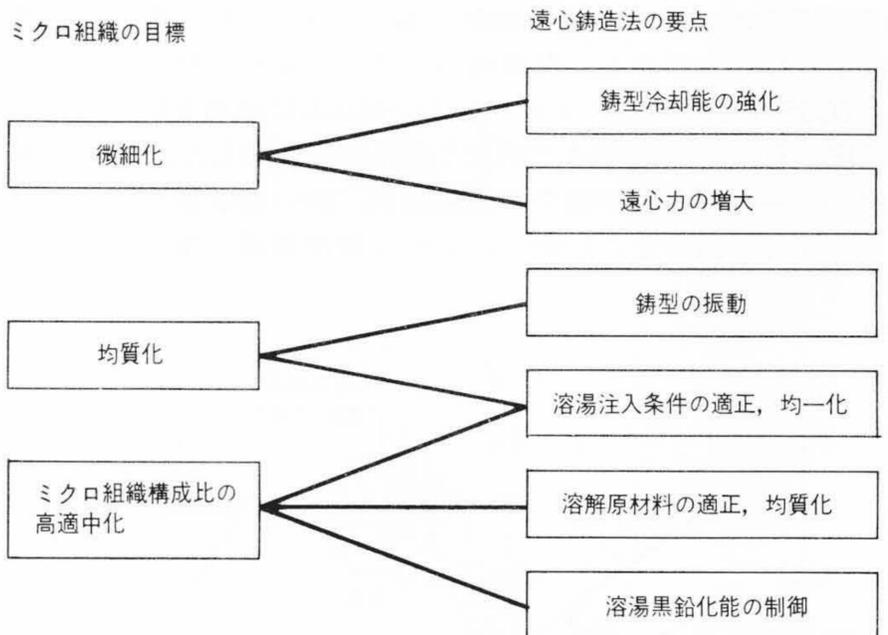


**図9** グレンロールの転動疲労特性の改善 黒鉛の粒状化とともに黒鉛量を減少させたものは、転動疲労寿命は約2倍に延長できた。



注：\* 1モニタ面積0.75mm×1.0mmで10×10箇所連続的に走査して得られる炭化物面積率の最大・最小側各3箇所平均値の差

**図10** 炭化物のマイクロ偏析とK<sub>1</sub>Cとの関係 グレンロール材でマイクロ偏析の減少、すなわちマイクロ組織の均質化によりK<sub>1</sub>Cが増大し、絞り込みき裂に対する抵抗が増す。



**図11** グレンロールでのマイクロ組織の目標と遠心鋳造での主要点  
マイクロ組織に及ぼす多くの影響因子を制御することにより、目標とするマイクロ組織、すなわちロール特性が得られる。

込みき裂やロール破損によるミル停止の影響は、ミルだけでなく前後工程にも及ぶ。また、絞りき裂の残存状態でそのまま圧延が進行されると、き裂が内部に進展して、チルはげに発展し<sup>4)</sup>、ミル停止のほかにロールきずが多量のミスコイルの発生原因となる。日立金属株式会社は、絞りき裂に対するロール材の抵抗を評価する尺度として、破壊靱性値K<sub>1</sub>Cが比較的良好に適合することを明らかにしてきた。**図10**に炭化物マイクロ偏析とK<sub>1</sub>Cの関係を示す。K<sub>1</sub>Cに対するマイクロ組織因子の中でも炭化物偏析の影響が大きく、マイクロ組織の均質化によるK<sub>1</sub>Cの上昇、すなわち耐事故性の向上を図っている。

耐摩耗性や耐事故性のほかに、マクロ偏析の程度(単に偏析と称することが多い。)がロール品質の重要な評価要素として取り上げられるようになった。偏析部は正常部分に対して組織が微細で、炭化物が富化されていることが特徴で、そのために圧延摩耗が正常部より少なくなり、その部分が凸となった模様を呈する。この模様が圧延製品肌プリントされ表面品質を劣化させるので、圧延製品肌の高級化指向に伴い、ますますロール偏析の許容程度が小さくなりつつある。

これらの胴部に必要な諸特性を満たすマイクロ組織を得るための遠心鋳造法での主要点をまとめて**図11**に示す。

#### (2) 軸部

ロール軸部の強化は、内層材を在来4H-MILLのねずみ鋳鉄からダクタイル鋳鉄化することによってなされる。ダクタイル鋳鉄でもHC-MILL用ロールの実体での引圧疲労限は13.5kg/mm<sup>2</sup>以上(回転曲げ疲労限16kg/mm<sup>2</sup>以上)で、ステッセルミルなどの従来4H-MILL用ロールで必要とされたダクタイル鋳鉄の9kg/mm<sup>2</sup>を50%上回る。**図12**に各種軸材の疲労強度特性を示す。更に、軸部の引圧疲労限20kg/mm<sup>2</sup>以上を目標に開発を進めている。

### 4 品質保証

目標とするロール品質は原材料をはじめとする各製造工程での品質の作り込みによって達成される。板圧延用ロールの品質保証は、非破壊法により徹底した一品検査によって実施されている。板圧延用ロールは、圧延製品を数十キロメートル圧延するごとに、直径で0.1~0.5mm研削され、直径800mmのロールではおよそ100mm消耗するまで使用される。この間前述したマイクロ組織の不均質や製品肌に影響を及ぼす欠陥は

許容されない。このことは、顧客先で精密な破壊調査を受けることに相当し、このような顧客の検査に耐えるためには、高度な非破壊検査技術によって品質保証を行なう必要がある。

#### 4.1 画像処理技術

ロール材質を構成する各種のマイクロ組織因子の構成比や形態は、顕微鏡組織を用い官能的な相対比較により判定していた。しかし、マイクロ組織と物性あるいはマイクロ組織と製造条件との相関性を解析する上で、マイクロ組織の定量化は不可欠と考えたので、日立金属株式会社は昭和51年に画像解析装置を導入した。現在ではオンライン、オフラインに各1機ずつ設置し、板圧延用ロールを主体に稼動中である。オンラインでは炭化物量(%), 黒鉛量(%), 黒鉛分布密度(個/cm<sup>2</sup>), 基地寸法(μm), オフラインではマイクロ偏析, 黒鉛形状の定量化に使用している。

#### 4.2 超音波技術

##### (1) 微小欠陥の検出

特殊端触子の導入と探傷条件の開発により、検出不可能であった0.5mm前後の空孔状欠陥の検出が可能になっている。

##### (2) 内層材の強度測定

固体中の音波の伝搬速度が(弾性係数)/(密度)の平方根に比例すること<sup>9)</sup>、及び鋳鉄材の弾性係数が引張強さに比例するという実験事実から、内層材の引張強さを非破壊的に測定することは可能である。ロールへの適用は、今後の重要課題である。

##### (3) 残留応力の非破壊測定

X線、磁気ひずみ及び超音波の利用などがあり、なかでもX線法は鍛鋼ロールでの残留応力や転動疲労の検出などに活用されている。鋳鉄ロールのように、結晶が粗大で配向性の強い材料に対するX線法の利用は困難とされている。このため現状では、応力解放法による集積データから類似品の残留応力を推定している。日立金属株式会社では超音波<sup>9)</sup>や磁気ひずみの利用を検討中である。

#### 4.3 渦流探傷による不均質組織の評価

マイクロ組織の不均質などのように、被検査体の透磁率の位

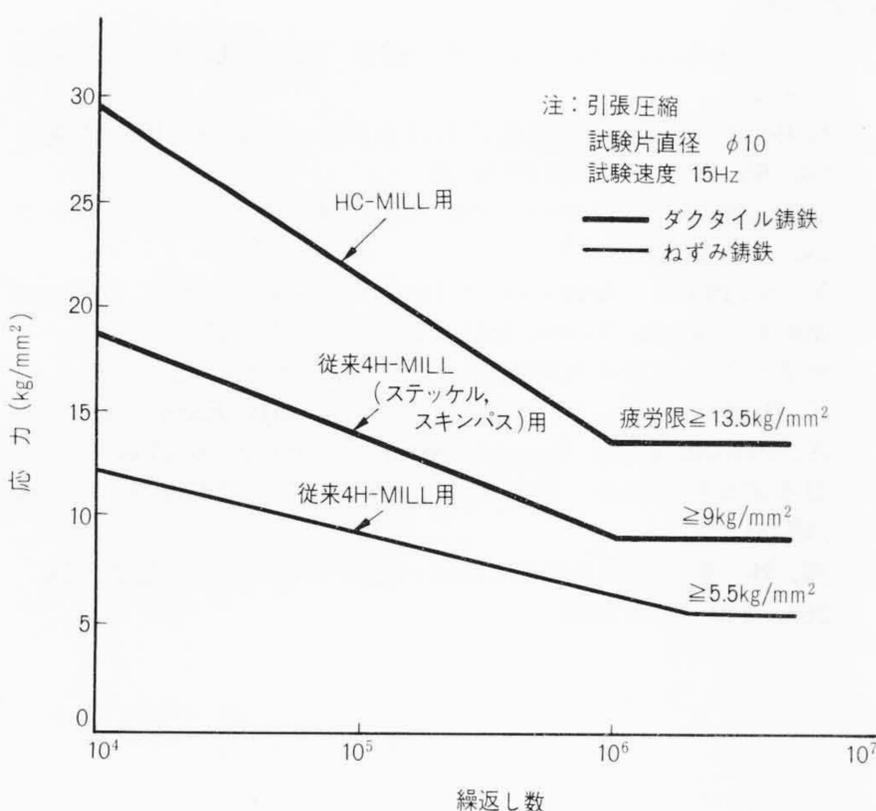


図12 グレンロール軸材の疲労強度特性 HC-MILL用ロール軸材の疲労限は、従来4H-MILL用ロールのおよそ2.5倍必要であり、微細な球状黒鉛をもつ高級ダクティル鋳鉄により得られる。

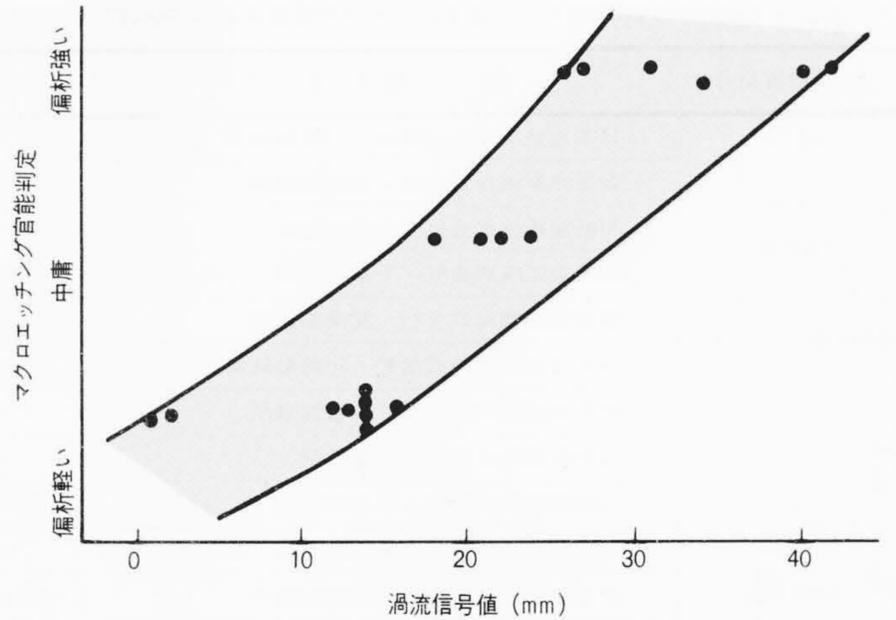


図13 偏析のマクロエッチング判定と渦流判定の関係 グレンロールでのマクロ偏析は、目視による官能判定に代わり渦流法による定量判定が可能である。

置による変化があれば、その変化度合に対応して電磁誘導に基づく渦電流が生じる<sup>7)</sup>。渦流法はこの原理を利用し偏析度合を評価しようとするもので、図13にみられるように従来のマクロエッチングによる目視判定法とほぼ比例関係にあることが分かった。この渦流法は、ロールの表面き裂や熱影響層などの検出を目的に、既に熱間圧延工場のロール研削盤に設置され実用化されているが、組織の不均質度合の判定にも利用できる。

#### 4.4 ロールショップにおける保守

絞り込みなどの圧延トラブルにより生じるき裂の検出技術の重要性については前述した。き裂の検出精度は、目視<染色探傷<渦流探傷の順で優れている。最近、渦流探傷の導入が急速に拡大されつつあり、その成果が期待される。

### 5 納入実績と課題

表2に熱間薄鋼板圧延機でリプレースあるいは改造を行なった順序に、日立金属株式会社納入ロールの実績を取りまとめて示す。総数500本を超えているが、ロール材質や製造条件に起因するロール破壊事故は皆無である。なおHC-MILLの機能をより増幅させ、かつロール消耗を最小限にする上で残された問題点として、

- (1) FWロールでの高クロム鋳鉄ロールの耐肌荒れ性の向上
- (2) FHWロールの耐摩耗性の向上と組織の均質化
- (3) 主にFHWロールでの胴端部形状不適切に起因する破壊、又は絞りき裂の残存によるスポーリング破壊などがあるが、前二者はロール材への本質的ニーズであり、今後いっそうの改良、開発が必要である。

### 6 高性能ロールの研究開発

HC-MILLをはじめとする高性能熱間圧延機は、将来UC-MILL<sup>8)</sup>へと更に発展し、作業ロールは直径500mm以下への小径化も予想される。現状の問題点や圧延機の将来動向に対応できる作業ロールの高性能化を図る必要がある、耐摩耗性と軸材の強化が基本命題と考える。図14にロールの高性能化とその関連技術についてまとめた。小形ロールやローラでの実績をベースに、粉末技術や肉盛技術からの展開が図られつつある。

表2 高性能ミル用作業ロールの日立金属株式会社納入実績 昭和59年9月末現在、FW65本、FHW446本を納入し、他ロールメーカーの納入数量を大きく上回っている。なおFW用ロールはダクタイル中抜高クロム鑄鉄(W2HC)に限定し、従来4HC-MILL納入分も含めている。

用途(材質記号)	顧客(工場)	ミル形式(メーカー)	スタンド	ロール寸法 $\phi \times L$	硬さ Hs	本数
FW (W2HC)	日本冶金工業株式会社・川崎製鉄所	HCM*	PL-F	430×1,850	80~90	3
	新日本製鐵株式会社・八幡製鐵所	HCMW, 4H	F1~3	775×1,750	72~77	24
	川崎製鐵株式会社・水島製鐵所	4H	F1~4	820×2,300	70~75	12
	川崎製鐵株式会社・千葉製鐵所・1熱延	HCW, 4H	F1~4	700×1,700	70~75	14
	新日本製鐵株式会社・室蘭製鐵所	4H	F1~3	680×1,422	72~78	12
FHW (WTDC)	日本冶金工業株式会社・川崎製鉄所	HCM*	PL-F	430×1,850	75~81	102
	新日本製鐵株式会社・八幡製鐵所	HCMW	F4~6	600×1,750	77~83	68
	日新製鋼株式会社・呉製鐵所	HCMW	F4~6	600×1,810	77~83	162
	川崎製鐵株式会社・水島製鐵所	HCMW	F5~7	685×2,380	77~83	66
	川崎製鐵株式会社・千葉製鐵所・1熱延	HCW	F4~5	700×1,700	80~84	8
	新日本製鐵株式会社・広畑製鐵所	CROSS(三菱重工業)	F4~6	650×1,840	77~83	2
	住友金属工業株式会社・和歌山製鐵所	HCW(IHI)**	F4~5	758×2,500	77~83	18
	日本鋼管株式会社・福山製鐵所・2熱延	HCW	F5~7	750×1,830	77~83	16
	日本鋼管株式会社・京浜製鐵所	HCW(三菱重工業)**	F5	800×2,800	77~83	10
	川崎製鐵株式会社・千葉製鐵所・2熱延	HCW	F5	755×2,482	80~84	4

注： \* プラニッシング仕上ミル1基、6段ミル中間ロールシフトタイプ  
 \*\* HCWタイプのミル

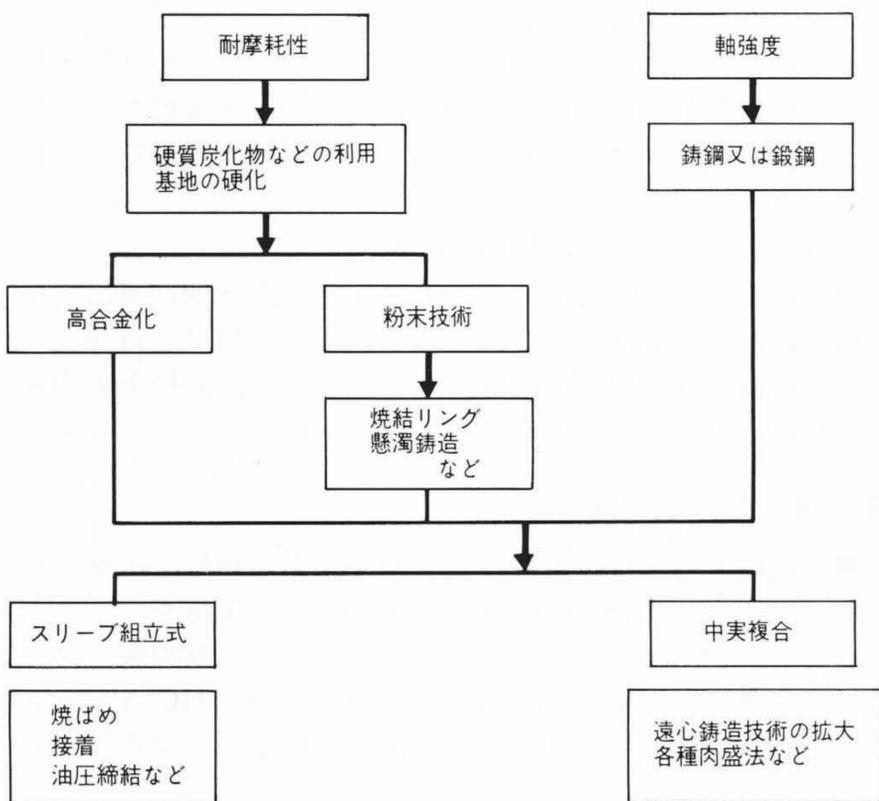


図14 高性能ロールのニーズと関連製造技術 粉末、肉盛など先端技術の応用は、小形ロールには既に適用されており、今後板用ロールへの展開が図られるであろう。

7 結 言

HC-MILLを中心とする最近の高性能圧延機用作業ロールに要求される性質や品質保証技術を重点に述べた。仕上前・

後段用にそれぞれダクタイル中抜高クロム鑄鉄、及び合金グレノロールを主体に適用してきたが、現状ではHC-MILLの機能をフルに発揮させるために必要な作業ロールとしての役割を十分に果たしていないかもしれない。今後の新たな圧延機の動向につれて付加されるニーズなど、ロールメーカーとしてなすべき研究課題は多い。今後ともミルメーカー及びロールユーザーとの関係を密にし、長短期の課題を明確にしながらかその解消に努めていきたい。

参考文献

- 1) 福田：日本における圧延技術の進歩，製鉄研究，304，129~142 (1981)
- 2) 福井，外：熱間帯鋼圧延におけるHC-MILLの応用，日立評論，65，2，97~102(昭58-2)
- 3) 佐野：熱延ワークロールの耐久化，81回塑性加工シンポジウム，1~14(昭57-10)
- 4) Y. Sekimoto：Analysis of Hot Strip Work Roll Damage due to Cobble, Trans. ISIJ, 10, 341~349(1970)
- 5) 実吉，外：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，12(昭43)
- 6) F. Bach, et al.：General Stress-Velocity Expressions in Acoustoelasticity, Experimental Mechanics, 69(Feb-1979)
- 7) 日本破壊検査協会：非破壊検査便覧，日刊工業新聞社，45，624(昭48)
- 8) 西，外：新型圧延機UC-MILLの基本特性，塑性と加工，24，268，449~455(1983)