

連続溶融亜鉛めっき設備の新技术

New Technologies for Continuous Galvanizing Lines

近年、表面処理鋼板の需要の増加に伴い、亜鉛めっき設備の増設が相次いでいるが、同時に自動車・家電などの利用分野の技術進展により、品質向上に対する要求もますます厳しくなっている。

日立製作所では、これらのニーズの中で特に要望の強い、二つの品質向上技術の開発に成功した。

第一のものは、めっき厚みの均一化を図るもので、これは不均一めっき厚みの原因となるめっき厚み制御部でのストリップの変形および振動を減少させる技術である。

第二のものは、硬質材から軟質材までの、各種のめっき後のストリップをスキンプス圧延によって、所定の機械的性質を確保することとストリップの表面外観を向上させる技術である。

以上二つの新技术は、実ラインテストなどによって実用化への検討が行われ、めっき製品品質を大幅に向上させることを確認した。

可児保宣* *Yasunobu Kani*
 飯田芳彦* *Yoshihiko Iida*
 中川師夫** *Mitsuo Nakagawa*
 大河内敬彦*** *Takahiko Ôkouchi*
 木村光男**** *Mitsuo Kimura*

1 緒言

溶融亜鉛めっき鋼板は、その優れた耐食性と経済性から多方面で使用されている。特に近年、自動車用部品にも、その耐用寿命向上のため使用されるようになり、需要が急増している。

このような多様化に加え、利用分野の技術躍進により、亜

鉛めっき鋼板の品質向上が必須(す)となり、これを生産する設備の高性能化が強く望まれている。これらのニーズの中でも、特に強く望まれているものに、めっき装置とめっき後のストリップの表面調整を行うスキンプスミルがある。めっき装置とスキンプスミルの代表的な配置を図1に示す。また、

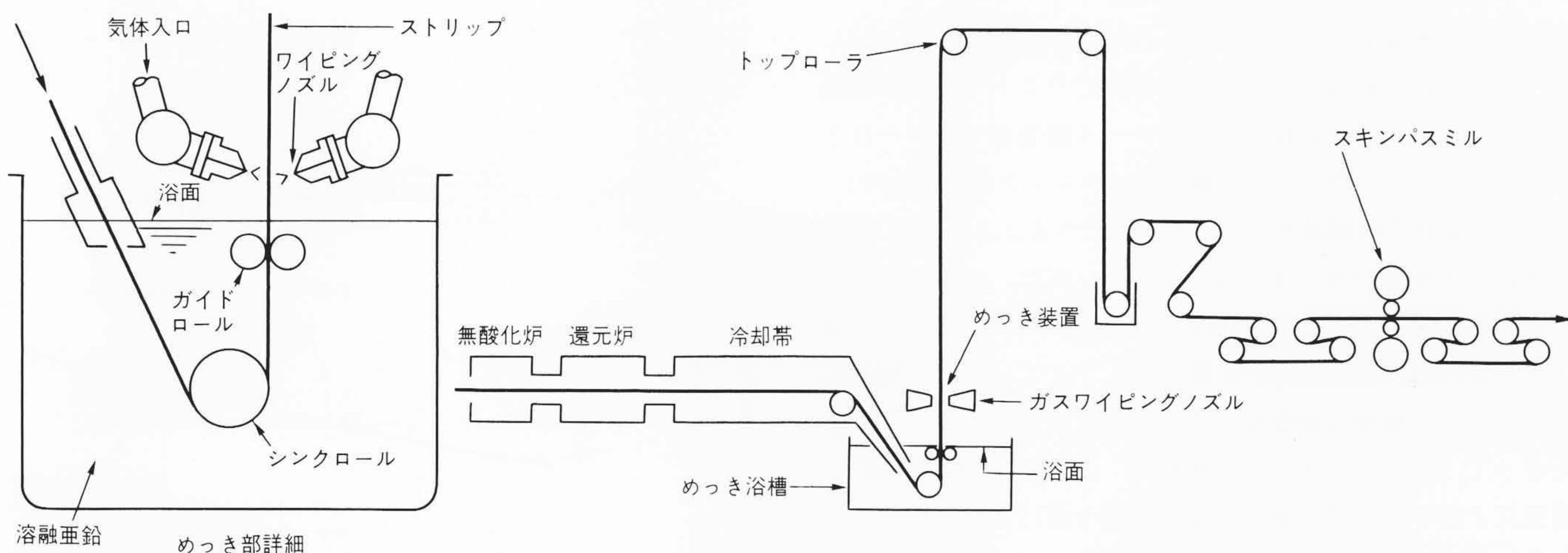


図1 連続溶融亜鉛めっき設備の代表的配置 めっき製品の品質に直接影響するめっき装置と、スキンプスミルの高性能化が大きなニーズである。

* 日立製作所 日立工場 ** 日立製作所 日立研究所 工学博士 *** 日立製作所 勝田工場 **** 日立製作所 機電事業本部

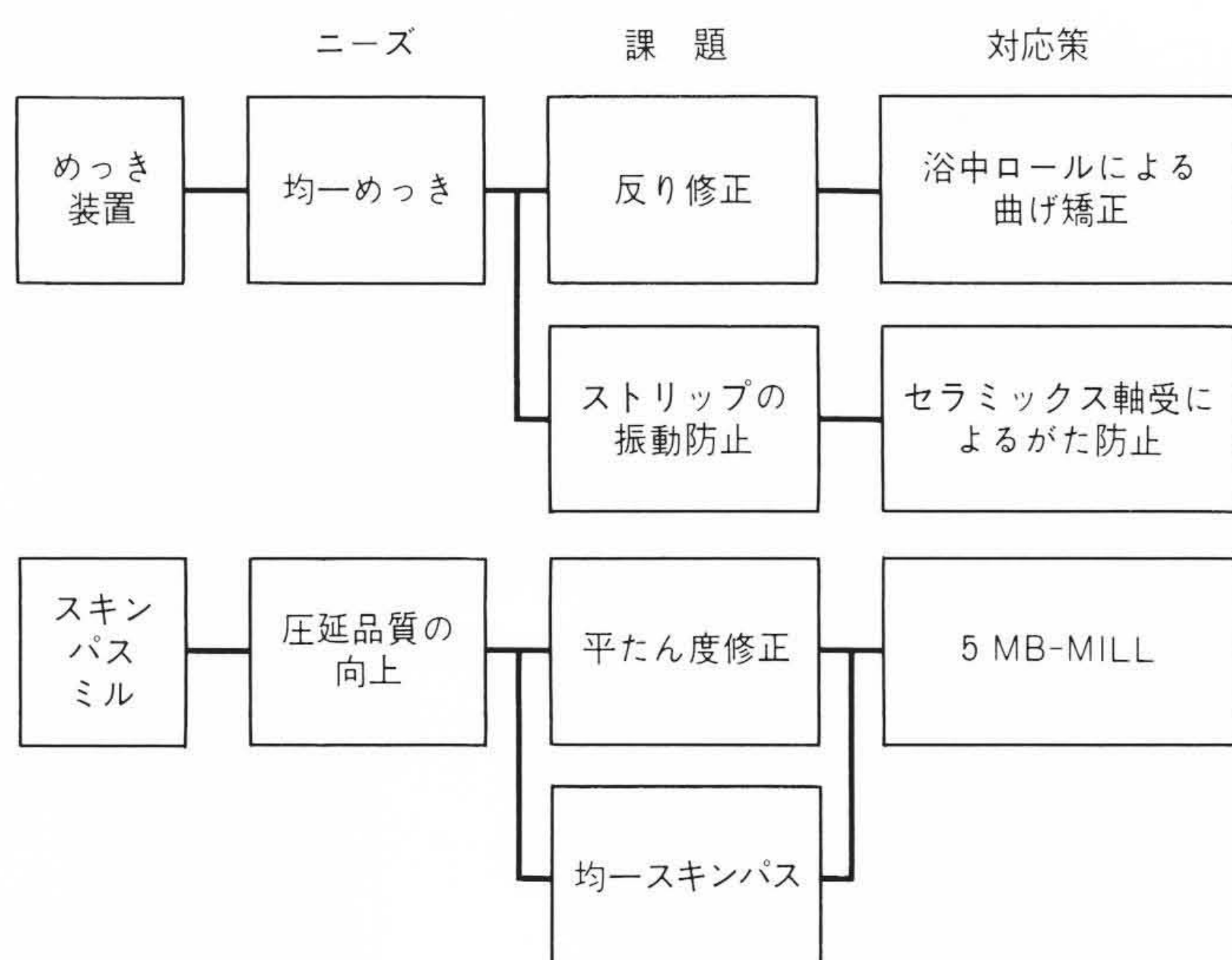


図2 めっき装置とスキnpasミルのニーズ、課題および対応策
最近のめっき設備のニーズを十分に検討し、それぞれの対応策は、品質向上に大幅な効果があることを確認した。

それぞれの装置に対するニーズ、課題および対応策を図2に示す。

めっき装置についてのニーズは、当然のことながら均一めっきである。この点については、これまでに種々研究開発されてきたが、十分満足できるまでに至っていなかった。均一めっきを阻害している原因の一つとして、めっき制御部でのストリップの幅方向反りがある。この部分で反りが発生すると、ノズルとストリップ間の距離が不均一になり、めっき厚みも不均一となる。したがって、この反りを修正する必要がある。この課題に関し、株式会社神戸製鋼所と日立製作所は、浴中ロールによるストリップの曲げ矯正について解析し、浴中ロールの最適なロール径および配置を検討した。さらに、長時間の実機操業テストによってその効果を確認した。また、もう一つの阻害要因として、ノズル間でのストリップの振動がある。ストリップの振動は浴中ロール軸受部でのがた付きが主因であるが、浴中ロール軸受のセラミックス化を検討し、実機と同条件での試験を行い、実用化できることを確認した。

また、スキnpasミルについてのニーズは、近年の多様化しためっき鋼板の圧延品質の向上である。めっき鋼板は多様化されたため、圧延条件が大幅に拡大されている。板幅は広がり、また、鋼種も硬質なものから軟質なものとなった。したがって、スキnpasミルの課題は、これらの条件のもとで、従来以上の平坦度の修正および板幅全面にわたる均一スキnpas圧延を達成させることにある。この課題に関し、日立製作所はHC-MILL¹⁾の原理を応用し、優れた形状制御性を持つ5MB-MILL(5 High-Mill with Effective Bender)を研究開発し、十分対応できることを確認した。

本稿では、以上の高性能めっき装置と5MB-MILLの新機能およびその効果について述べる。

2 めっき装置の新技术

2.1 不均一めっき厚みとなる原因

連続溶融めっき製品のめっき厚み制御の代表的な装置構成²⁾は、先の図1に示したとおりである。通常、溶融亜鉛の温度は460℃前後に調整され、またストリップの温度も同程度に調整される。したがって、高温のためストリップの降伏点およびヤング率は大幅に低下し、浴中ロール曲げによって幅方向に塑性曲がり、すなわち幅方向の反りが発生しやすくなる。幅方向に反りが生じるとノズルとストリップ間の距離が不均一となり、めっき厚みも不均一となる。

また、浴中ロールの軸受は、一般に耐食鋼で製作されているものの、長時間使用すると溶融亜鉛による腐食摩耗により、軸と軸受間のギャップが増大し、ロールのふれまわりが始まり、ストリップも振動するようになる。これにより、不均一なめっき厚みとなる。ノズルとノズル間の距離 δ に対するガスワイピングによるめっき厚みの関係については、図3に示すような例が紹介されている²⁾。

2.2 ストリップの板幅方向反り修正法

張力が負荷された条件でのロール曲げによって発生するストリップの幅方向曲げモーメント M_c は、図4のようになることが説明されている³⁾。塑性曲げモーメント M_{ce} を越える大きな曲率 K_1 で曲げて除荷を行うと残留曲率 a が発生する。これを修正するには、除荷後にOになる曲率 K_2 で逆曲げを行えばよい。また同図から、この K_2 の大きさはO点から M_{ce} までの直線を延長し、全塑性曲げモーメント M_{cp} と交わった点の K_B とほぼ等しい大きさにすればよい。 K_B は次式の関係となる。

$$K_B = \frac{M_{cp}}{M_{ce}} K_A$$

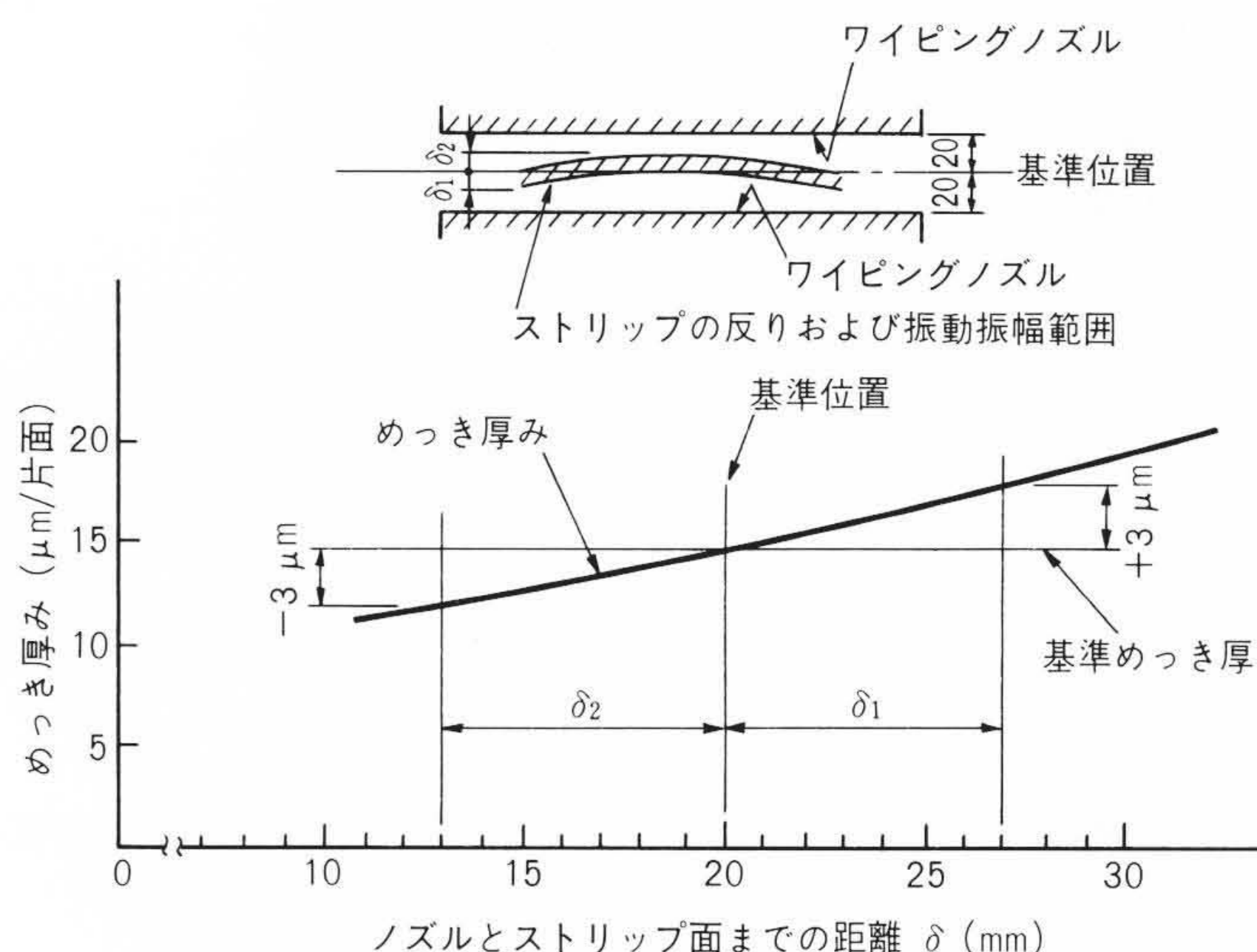


図3 ノズルとストリップ面までの距離に対するめっき厚みの関係
ノズルとストリップ面までの距離が大になるほどめっき厚みが増大する。ストリップは振動および幅方向に反っているため、めっき厚みの誤差が生じる。

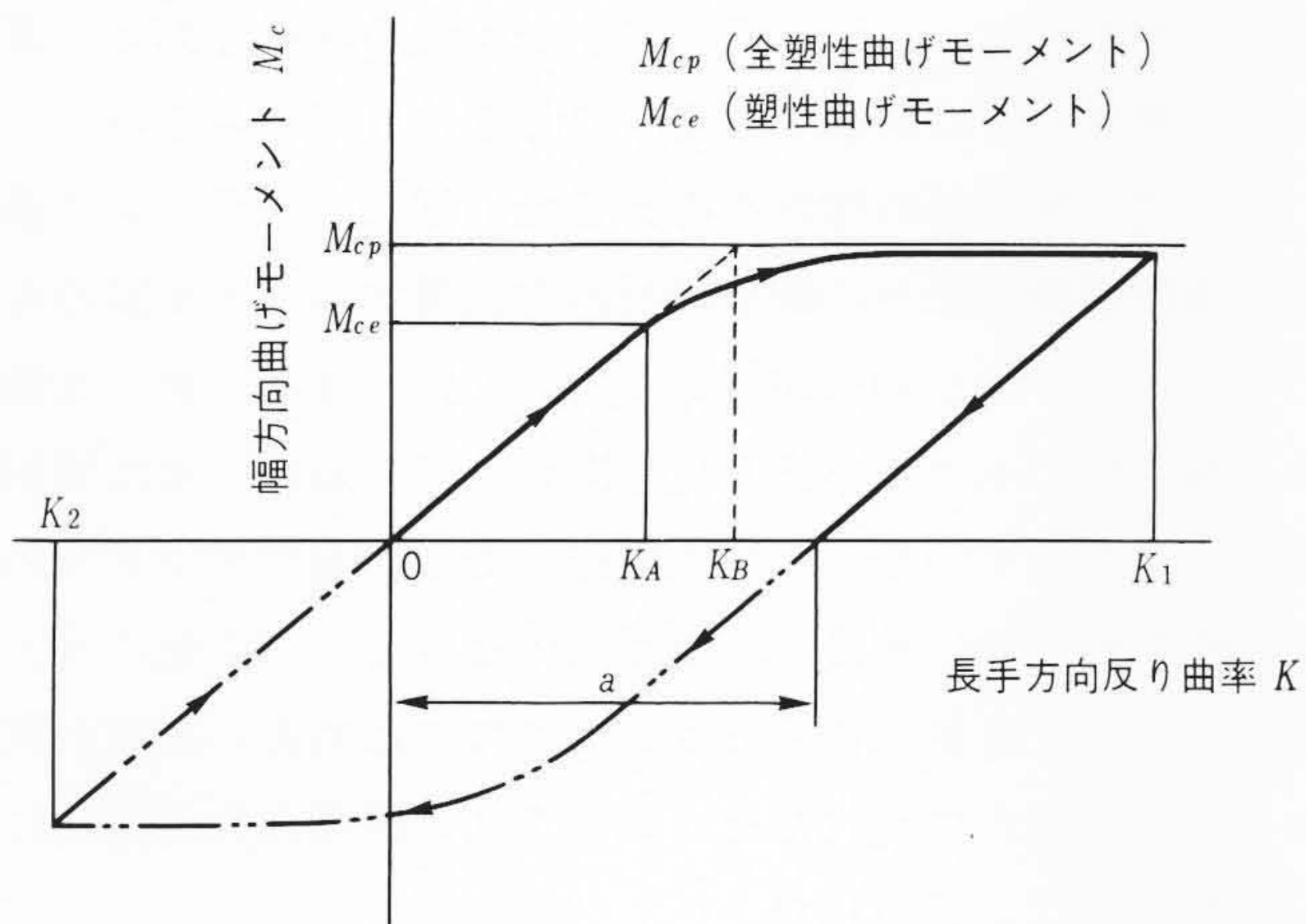


図4 ロール曲げによる幅方向曲げモーメント 塑性曲げモーメントを超える大きな曲率 K_1 で曲げると、残留曲率 a が発生する。

すなわち、この式の関係から K_B を求め、これが得られるようにロール径および配置を検討すればよい。

以上の検討から求めた最適配置および幅方向反り修正の原理を図5に示す。焼鈍炉出側ロールで K_0 に曲げられたストリップは、次のシンクロールで K_1 に曲げられる。この時点で除荷すると残留曲率 a が生じる。すなわち、幅方向反りが生じることになる。そこで、この a が除荷後に0となる逆曲率 K_2 にフロント側ガイドロールを押し込み調整する。次に、バック側ガイドロールで K_3 の逆曲げを受けるが、塑性曲げモーメント M_{ce} より小さいので、幅方向反りは発生しない。

以上の原理に基づいて、シミュレーションした一例を図6に示す。フロント側ガイドロールの押し込みが少ないと、正方向の幅反りが残る。また、多すぎると負方向の幅反りが生じる。さらに、押し込みを増やすと負方向から正方向へ変わる。

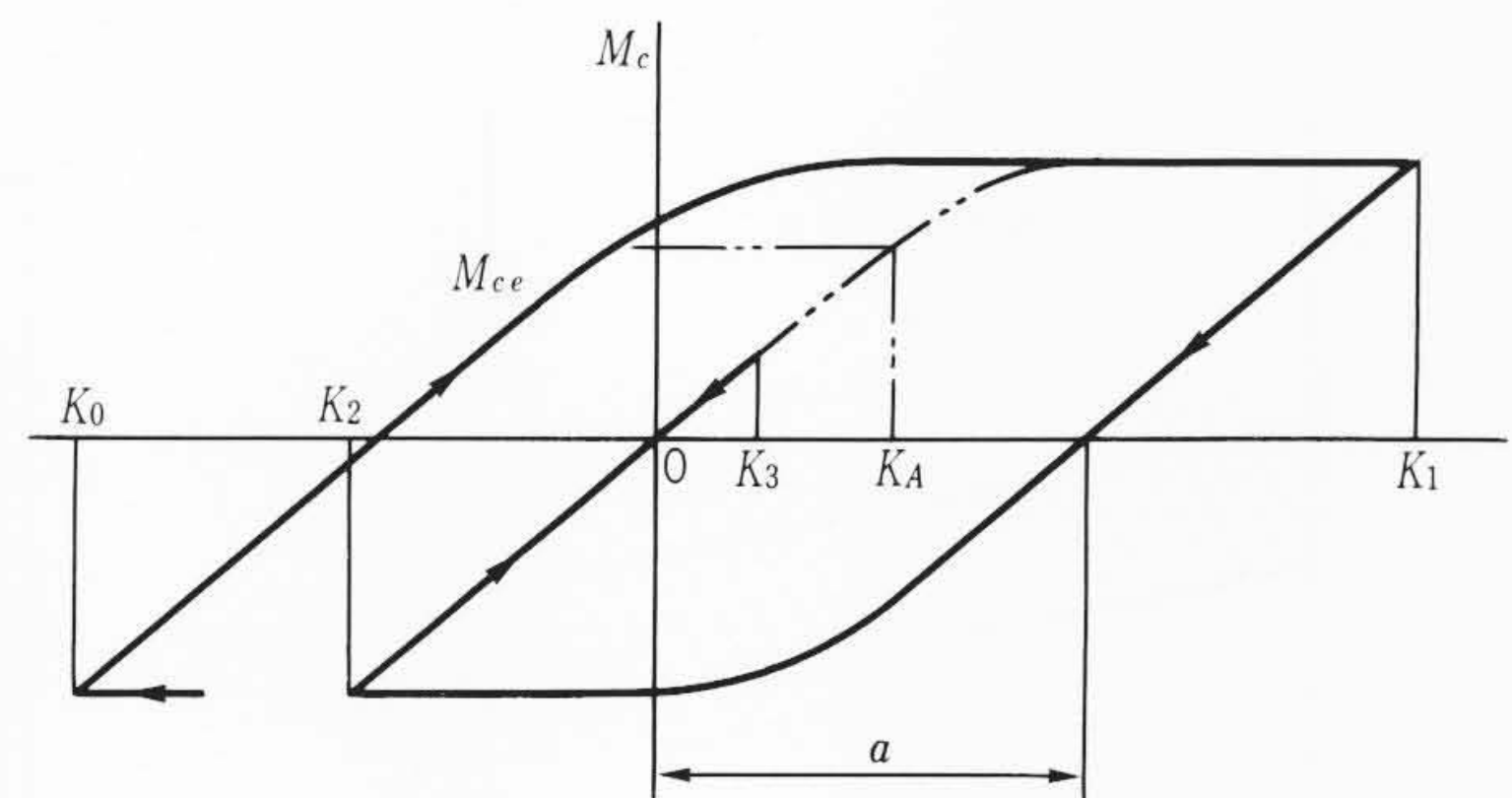
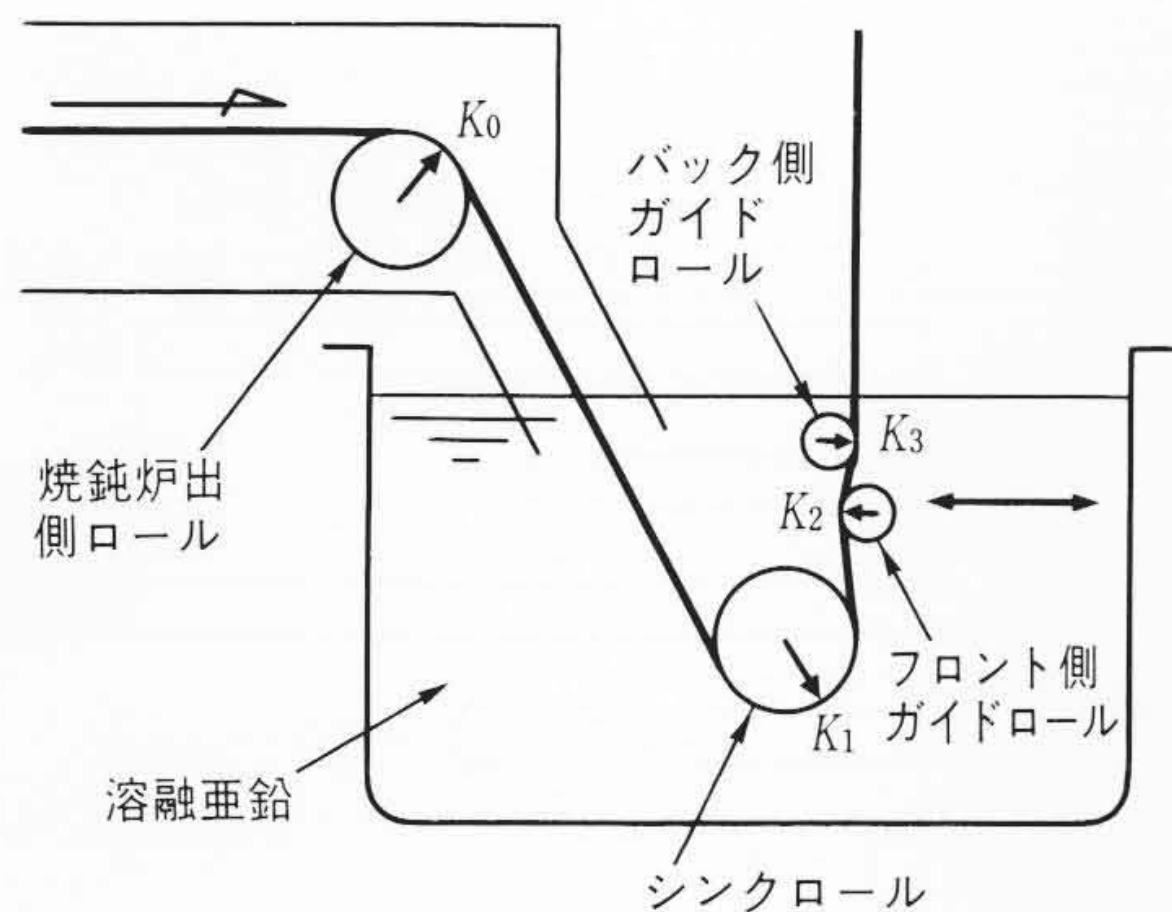


図5 浴中ロールによる幅方向反り修正 フロント側ガイドロール K_2 により幅方向反りは修正される。

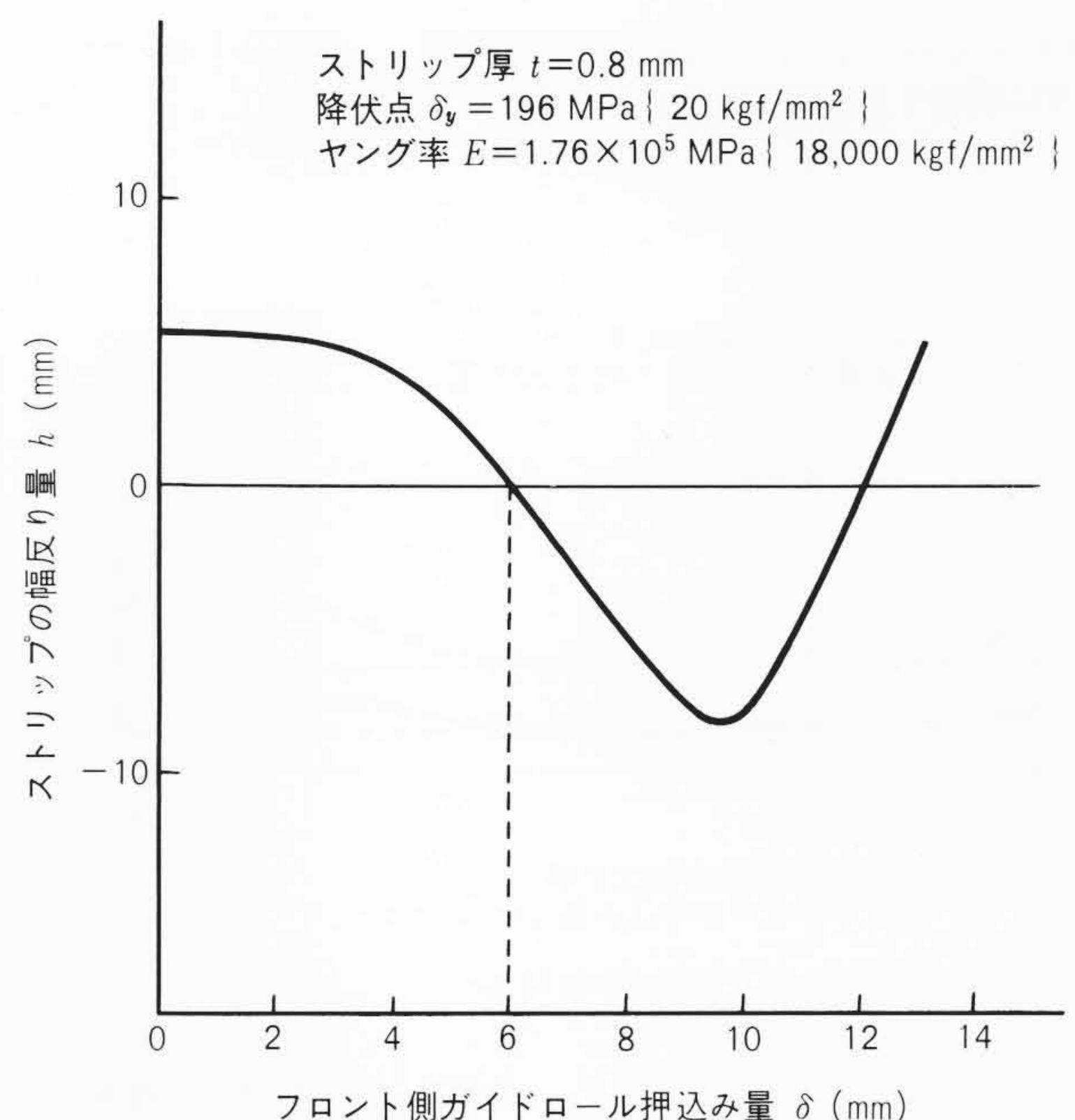
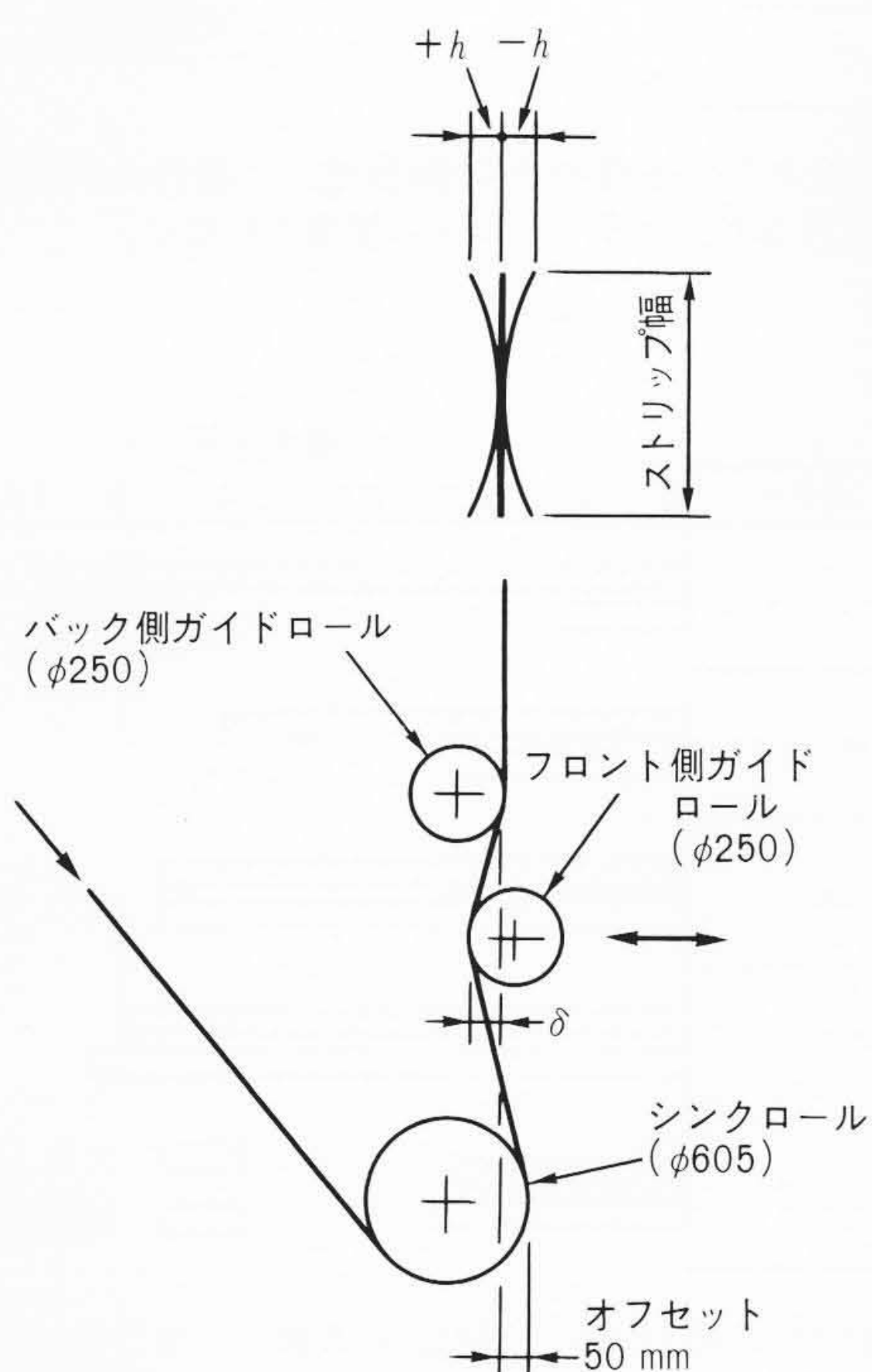


図6 ストリップ幅反り修正シミュレーションの一例 押し込み量が約6 mmで反り修正されることが求められた。

っていく。これは、バック側のガイドロールの曲率が大きくなり塑性曲げモーメントを越えたためである。このシミュレーション結果では、 δ が約6 mmで反りが修正できることを示している。

以上のシミュレーションと同条件で、実ライン操業を行った結果を図7に示す。ほぼシミュレーションと同様な結果が得られた。また、幅反り修正良好域でのめっき厚み幅方向分布の一例を図8に示す。従来10 g/m²発生していためっき厚みのばらつきが、3 g/m²に減少できることを示している。

2.3 浴中ロール軸および軸受のセラミックス化

均一めっきを阻害するもう一つの大きな原因として、ノズル間でのストリップの振動がある。これは、浴中で使用するシンクロールやガイドロールのふれまわりが主因である。このふれまわりは、ロールの軸および軸受の亜鉛の腐食摩耗からがたがが大きくなり発生する。したがって、均一めっきを達

成するためには、ロールの軸および軸受の摩耗を抑え、常にロールが滑らかに回転するようにしなければならない。

そこで、軸受部の摩耗を抑えるため従来のステンレス系材の表面に超硬鋼などの耐摩耗材料を被覆することが試みられているが、十分な効果が得られていない。また、ロール軸および軸受材のセラミックス化も図られているが、まだ実用化されるに至っていない。日立製作所では、セラミックスの耐摩耗性と耐食性に着目し、軸受部のセラミックス化のうえで課題であった金属部材とセラミックスのはめあい技術の開発および耐摩耗性に優れたセラミックスの組み合わせ選定によって長寿命化に成功した。

2.3.1 耐食性

各種材料の亜鉛浴中での腐食試験結果を図9に示す。鋼および表面処理材はいずれも腐食されるが、セラミックスは腐食されていない。したがって、耐食性という点ではセラミッ

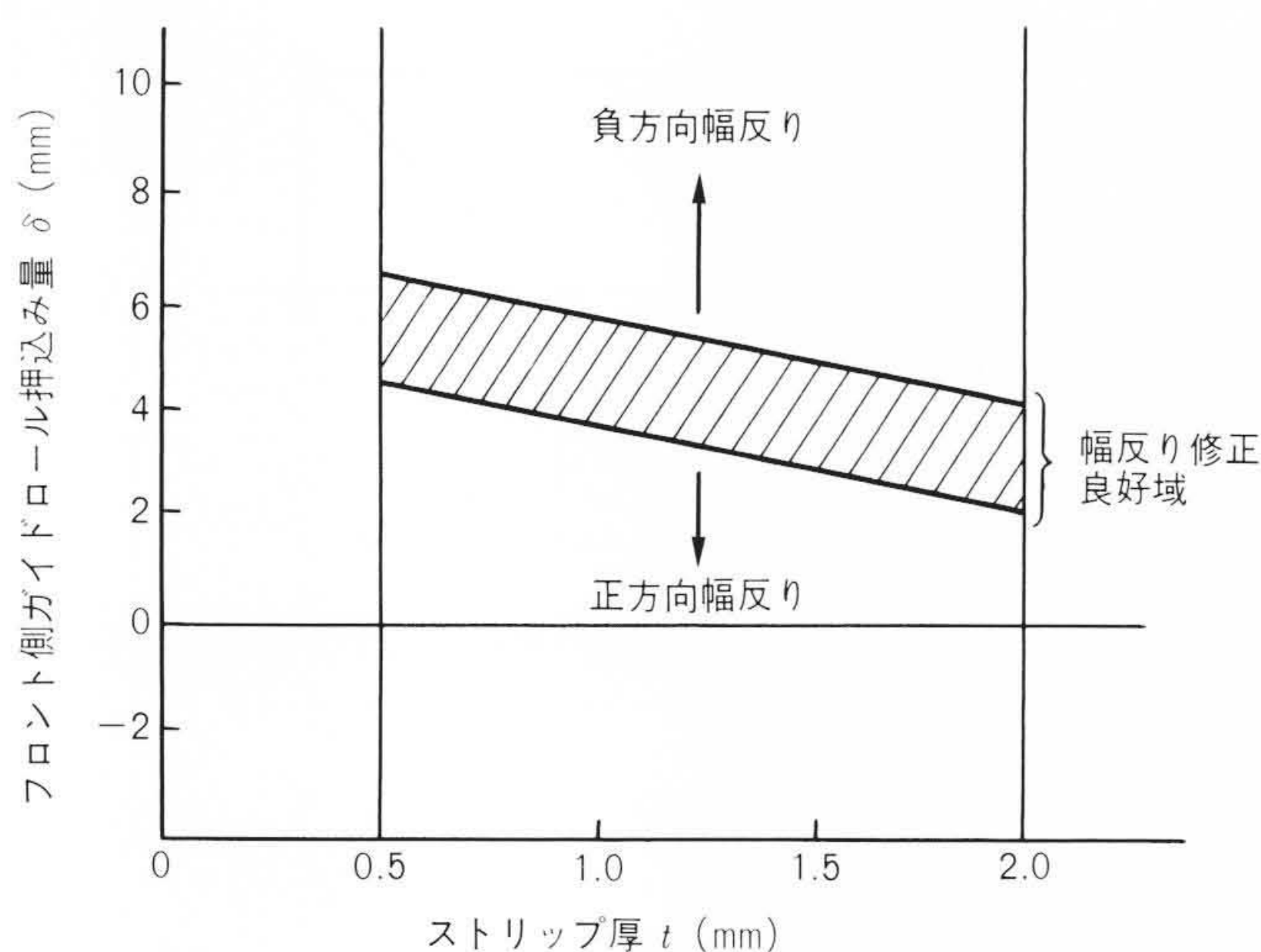


図7 実ラインでのストリップ幅反り修正結果 ほぼシミュレーションの通りに幅反りを修正することができた。

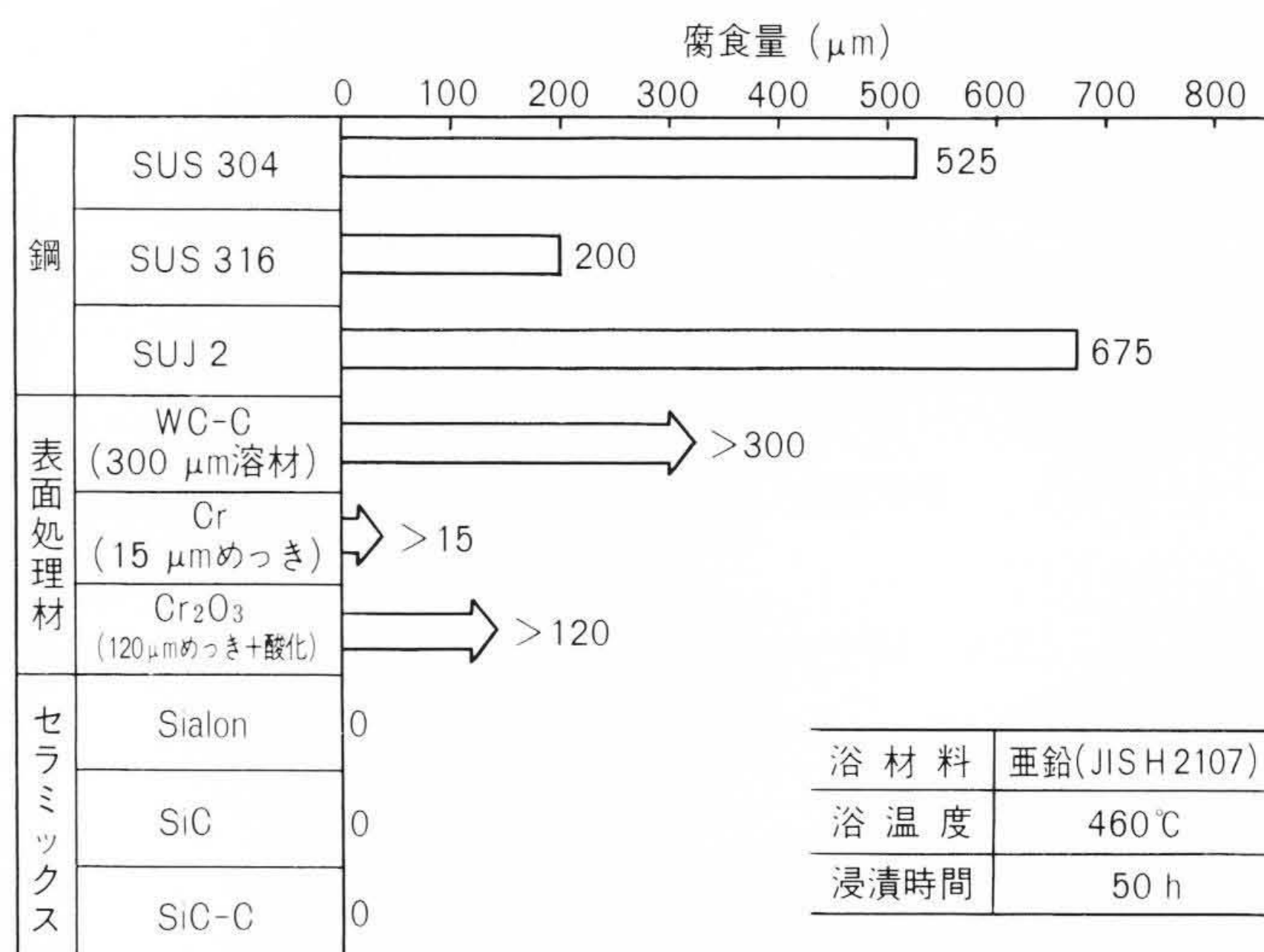


図9 亜鉛浴中での各種材料の耐食性 鋼および表面処理材はいずれも腐食されるが、セラミックスは腐食されない。

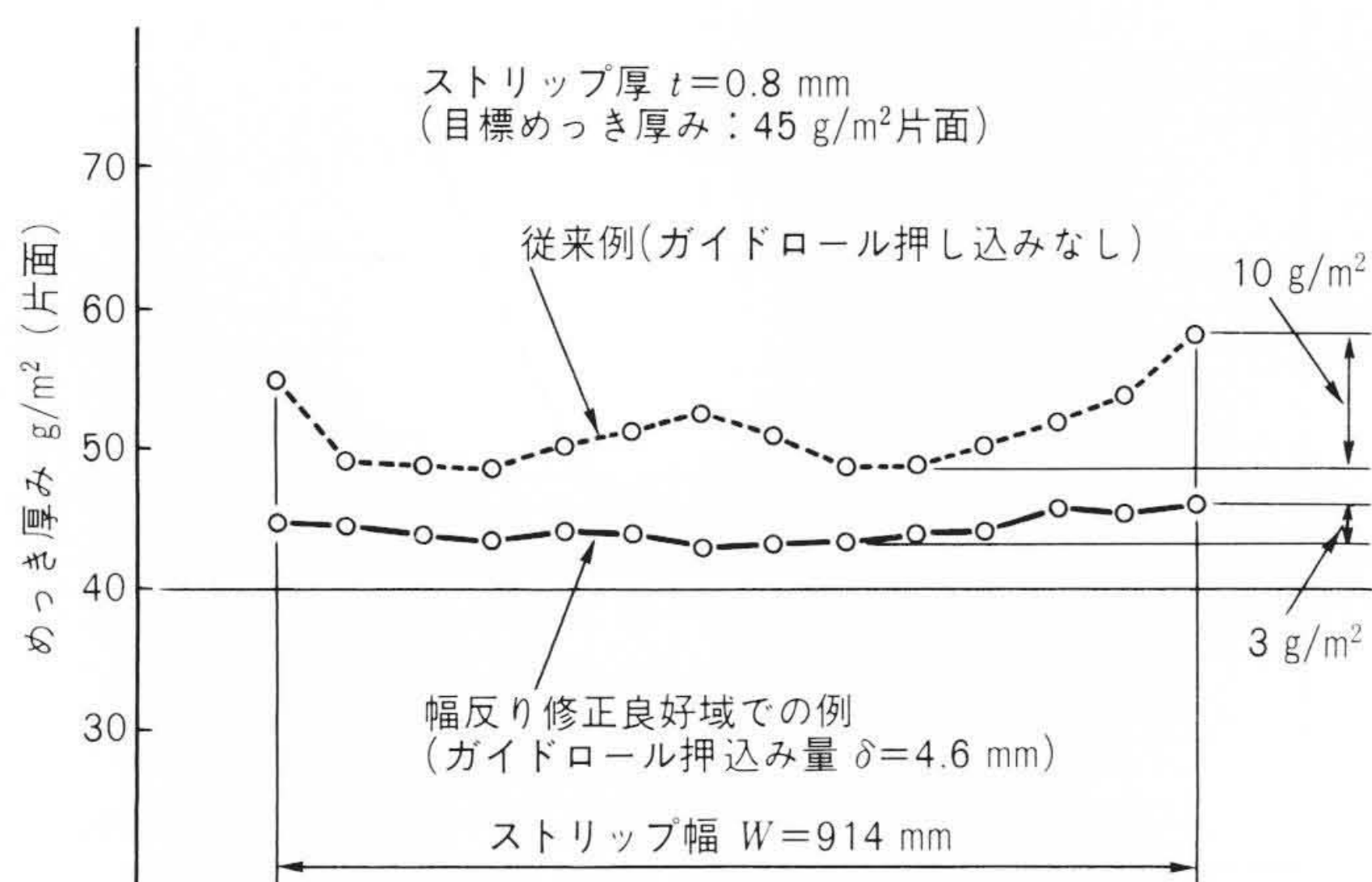


図8 ストリップ幅反り修正に伴うめっき厚みの改善例 従来約10 g/m²近く発生しためっき厚み誤差が、幅反り修正によって3ないし4 g/m²に減少できた。

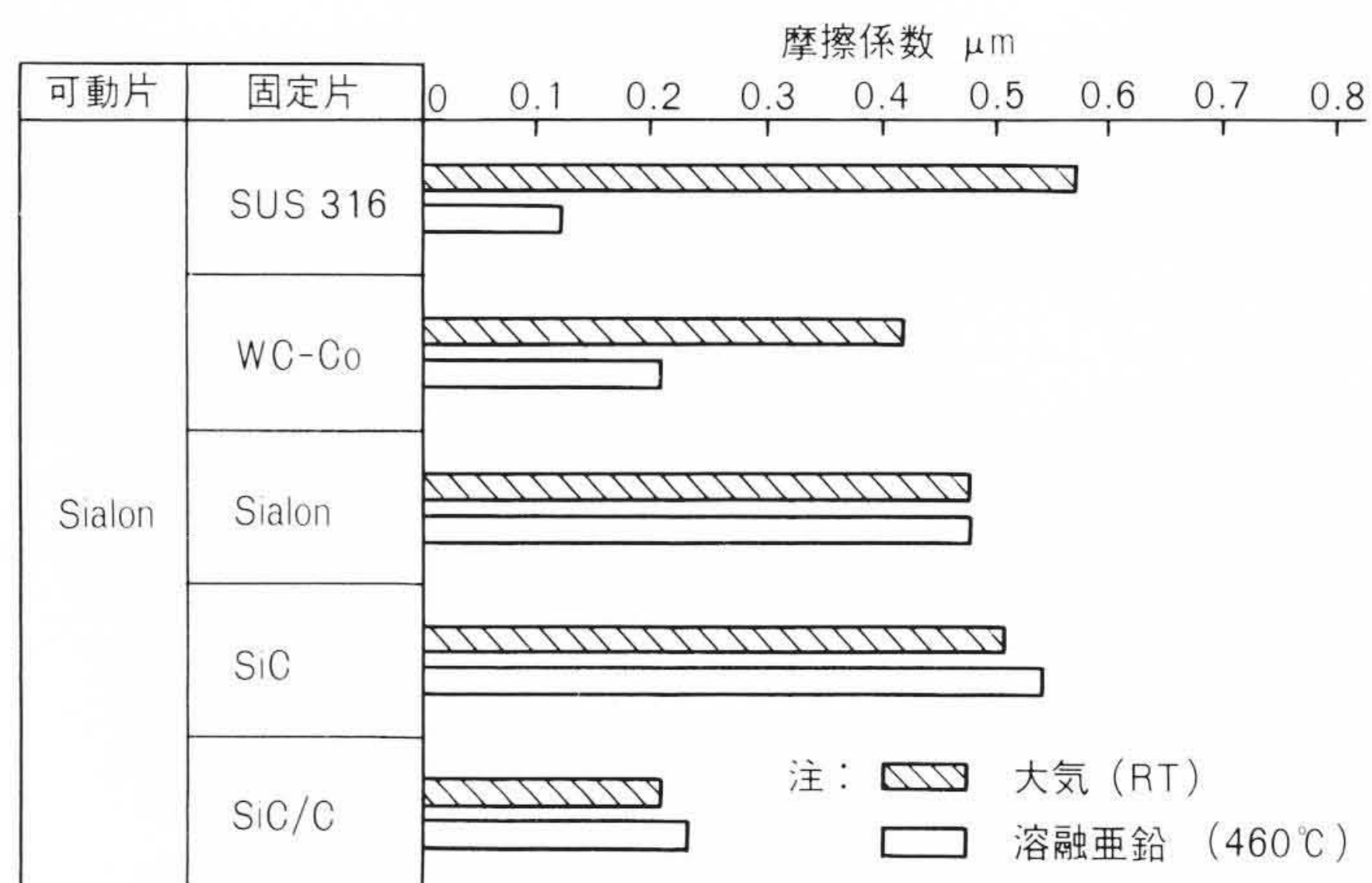


図10 各種材料の摺(しゅう)動摩擦係数 セラミックスは溶融亜鉛浴中で、亜鉛浴に対するぬれ性が劣り乾式摩擦と同程度の摩擦係数となる。

クスが優れている。

2.3.2 摩擦係数

Sialon(可動片)と各種材料(固定片)との摩擦係数を図10に示す。

セラミックスは耐食性に優れる反面、亜鉛浴に対するぬれ性に劣るため、浴中で亜鉛潤滑がほとんどなく乾式摩擦となり摩擦係数が大きく、この摩擦抵抗力が起因しての損傷のおそれがある。セラミックスの中でもSiC/Cは焼結体中に分散したCが固体潤滑剤として作用するため、浴中でも摩擦係数が比較的小さく、摩擦抵抗も小さくなることが期待される。

2.3.3 ロール軸および軸受の構造

以上の実験結果により、ロール軸外周材としてスリーブ状Sialon、軸受にSiC/Cを適用した。

セラミックスをロール軸および軸受部に適用する場合の課題は、熱膨張係数の異なる金属部材とセラミックス部材のはめあいの割れ防止対策である。

ロール軸の割れ対策としては、図11に示すようにSialon製スリーブを一体形ではなく4分割とし、さらに軸材とスリーブのはめあい時の局所的な過大応力を緩和するため、はめあい部に緩衝材を配してはめあいを行った。

また、軸受はSiC/Cの製造上の問題点およびスリーブとの接触時の片当たりを防止するため、図12に示すようにかまぼこ状のSiC/C製ブロックを配置し、ブロックと固定台の間にカーボンシートを挟み緩衝材とした。

2.3.4 耐摩耗試験結果

シンクロール軸および軸受の耐摩耗性を評価するために、実機を模擬した試験装置を製作した。その概要を図13に示す。試験片の寸法は、ロール軸の外径145 mm、長さ145 mm、軸受の肉径150 mm、長さ135 mmとした。試験条件としては、浴温460℃、接触荷重12.7 kN {1,300 kgf}、ロール軸の回転

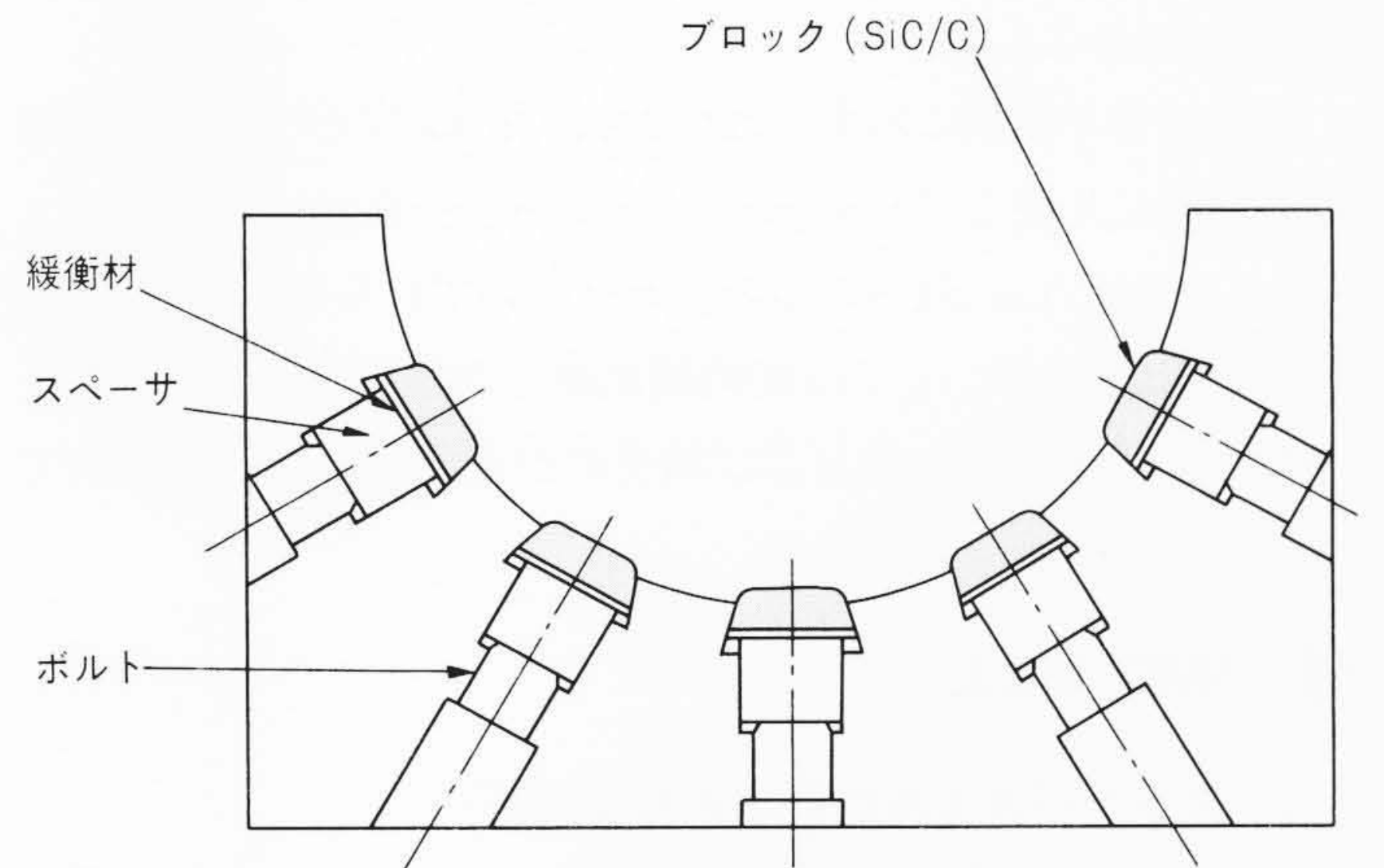


図12 軸受の組立構造 かまぼこ状のブロックを、緩衝材を介して取り付けられた。

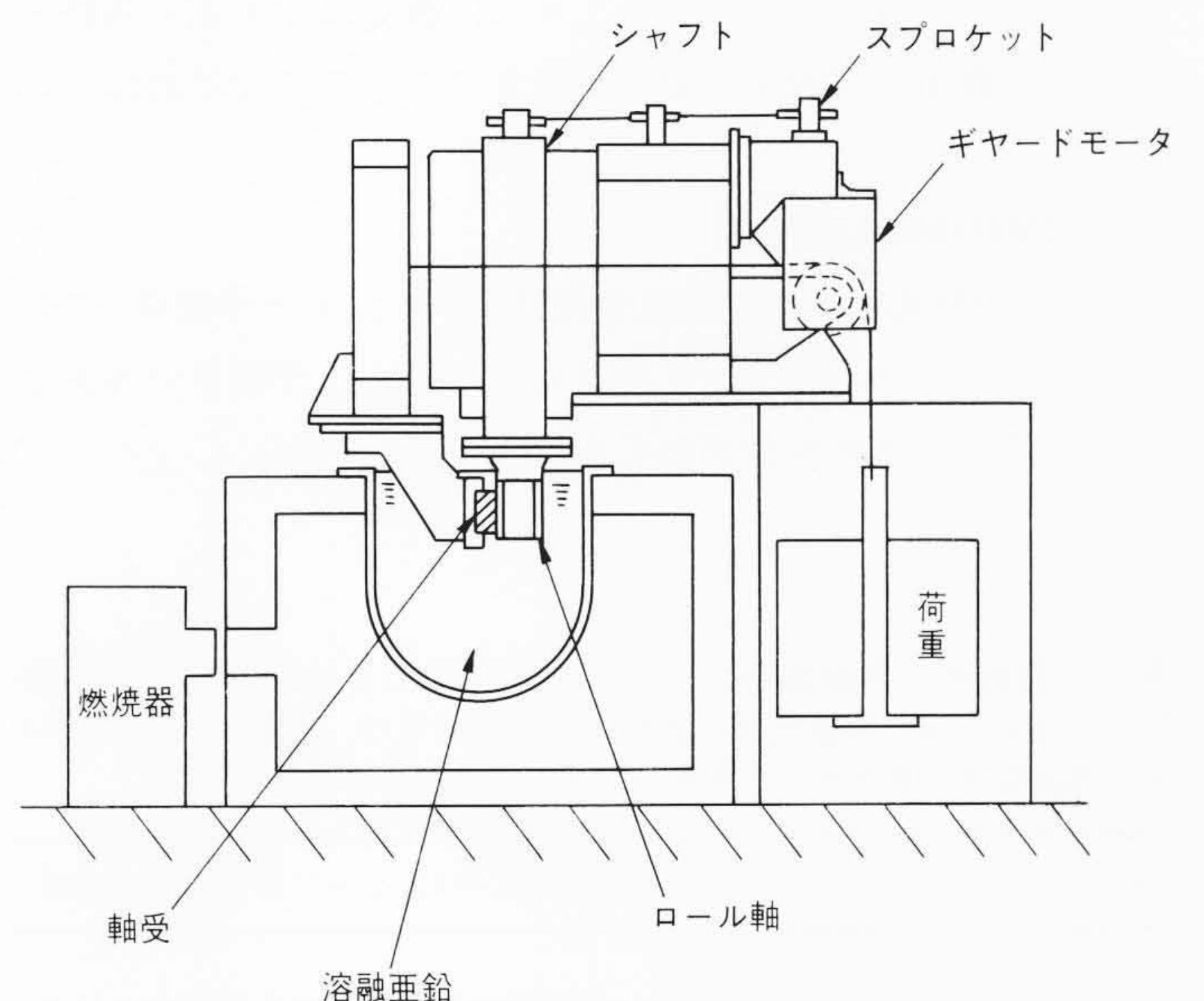


図13 シンクロール軸および軸受寿命評価装置の概要 溶融亜鉛浴中で、軸受とロール軸に実機と同様の負荷を加え、摺(しゅう)動部の摩耗量を測定した。

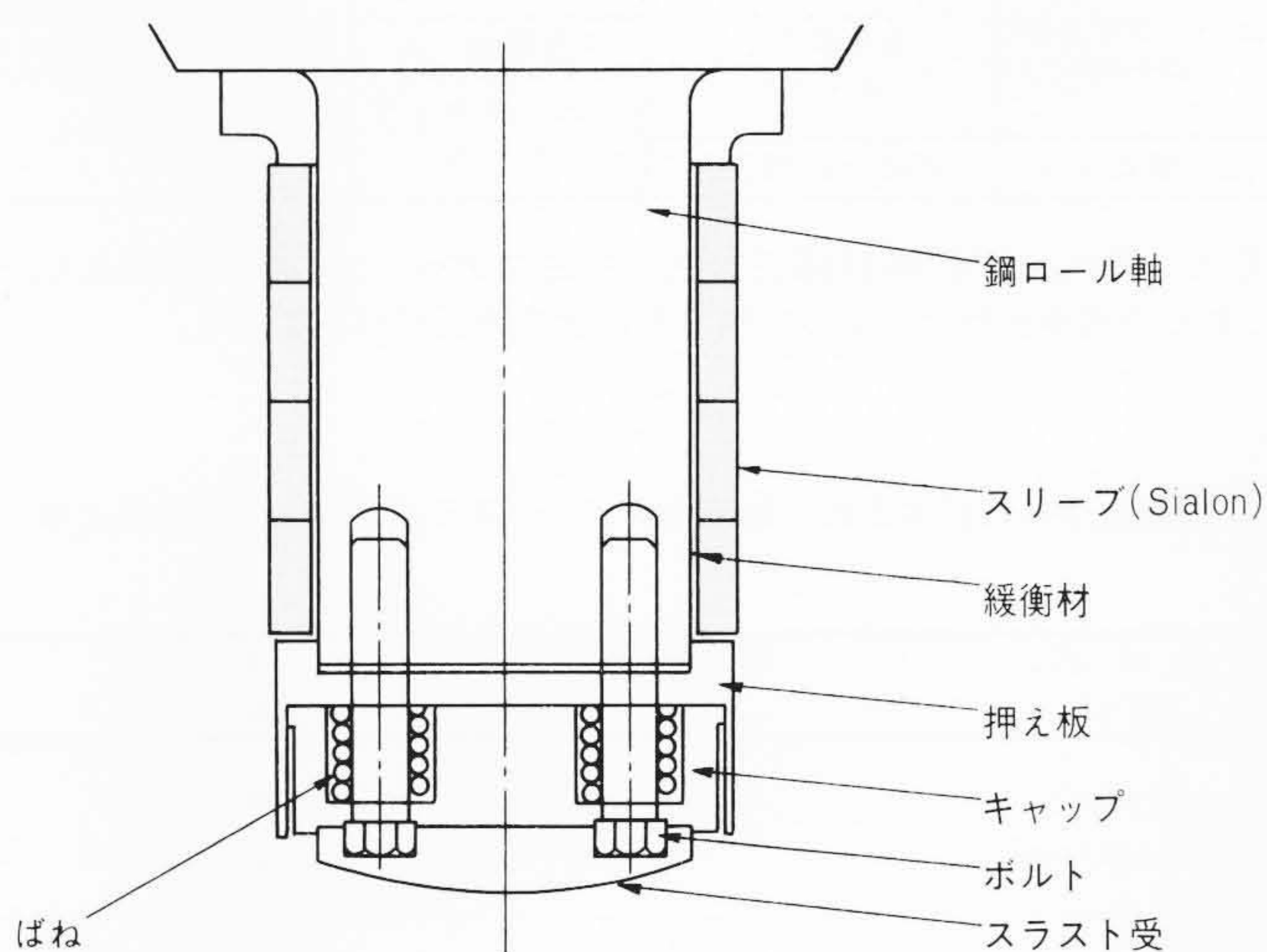


図11 ロール軸の組立構造 割れ対策としてスリーブを4分割とし、さらに緩衝材を介してはめあいを行った。

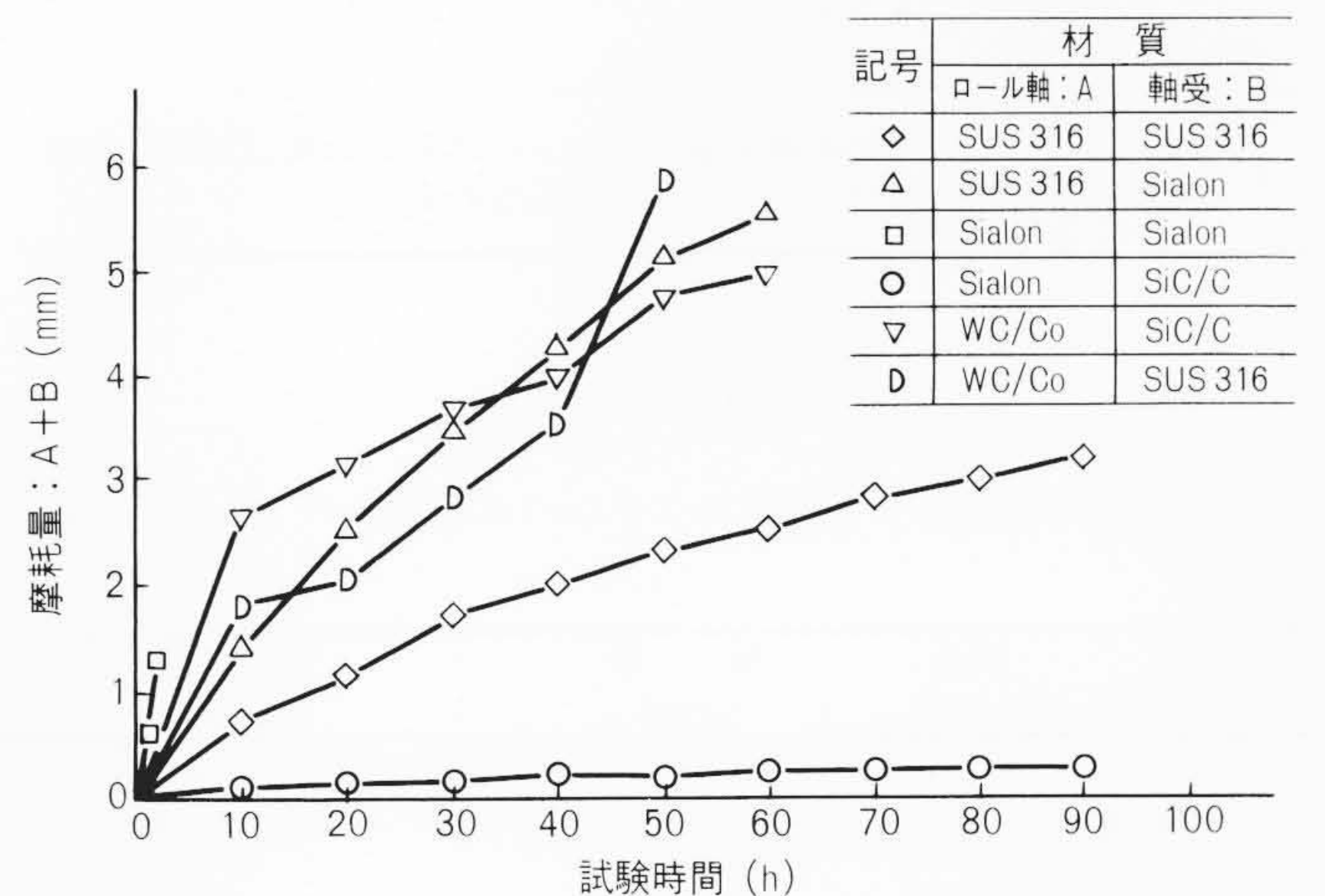


図14 各種材質の組み合わせによるロール軸および軸受の摩耗量 Sialon-SiC/Cの組み合わせが、非常に摩耗が少ないことがわかり、長寿命化へのめどがたった。

数100 r/minとした。

試験結果を図14に示す。これより、従来材のSUS-SUSの組み合わせに比較してSialon-Sialon, SUS-Sialon, WC/Co-SiC/C, WC/Co-SUSの組み合わせはいずれも摩耗量が多い。一方, Sialon-SiC/Cでは90時間試験した後でもほとんど摩耗がなく, 浴中ロール軸および軸受のがた発生の防止が期待できる。

3 5MB-MILL

3.1 スキンパスミルに要求される機能

亜鉛めっき設備用のスキンパス圧延の目的と、これに要求される機能を表1に示す。また、最近の自動車用、建材用および家電製品などの多目的な製品を生産する亜鉛めっき設備でのスキンパス材の諸条件を表2に示す。すなわち、最近の亜鉛めっき設備のスキンパスミルは、表2に示す広い条件のもとに、表1の目的を十分に満足させるものでなければならない。

3.2 5MB-MILLの機能

5MB-MILLの概略の構成を図15に示す。上下作業ロールおよび上中間ロールにベンダを持ち、また、上作業ロールおよび上中間ロールのベンダ効果を拡大させるために、上バック

表1 亜鉛めっき設備用のスキンパス圧延の目的と要求される機能 主として、製品表面の調整が目的であるが、軟質材から硬質材まで適正な伸び率を与える条件で、平坦度の改善要求も強い。

No.	スキンパス圧延の目的	スキンパスミルに要求される機能
1	製品表面の光沢、粗度を調整する。	軟質材から硬質材までのストリップの板幅の全面に、適正な圧延圧力分布を与える。
2	焼鈍後の板材のストレッチャーストレインを防ぎ、用途に適した機械的性質を与える。	ストリップに適正な伸び率を与える。
3	形状を改善し、平坦度の良好な製品を得る。	スキンパス前の形状に対応した形状修正を行える。

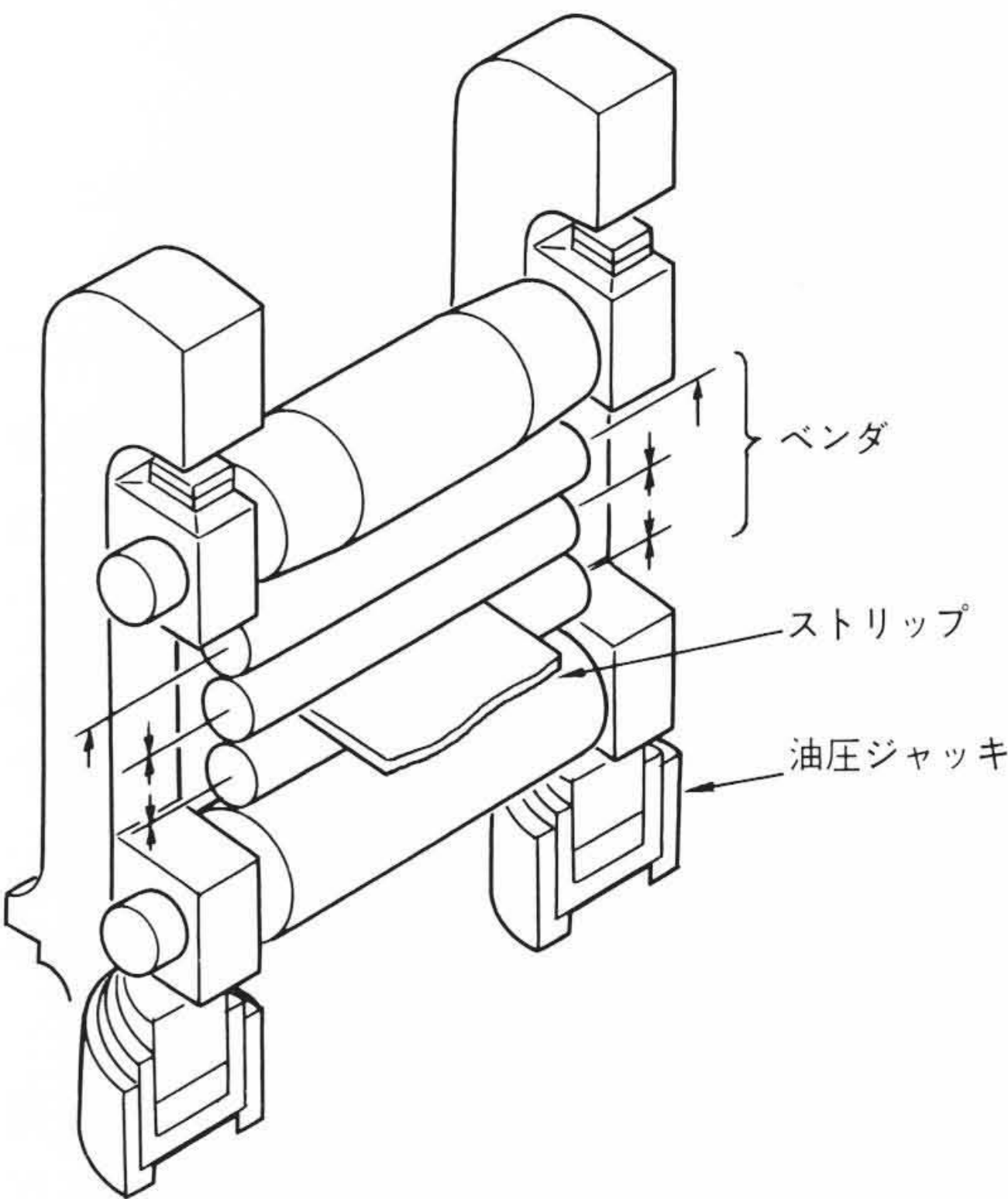
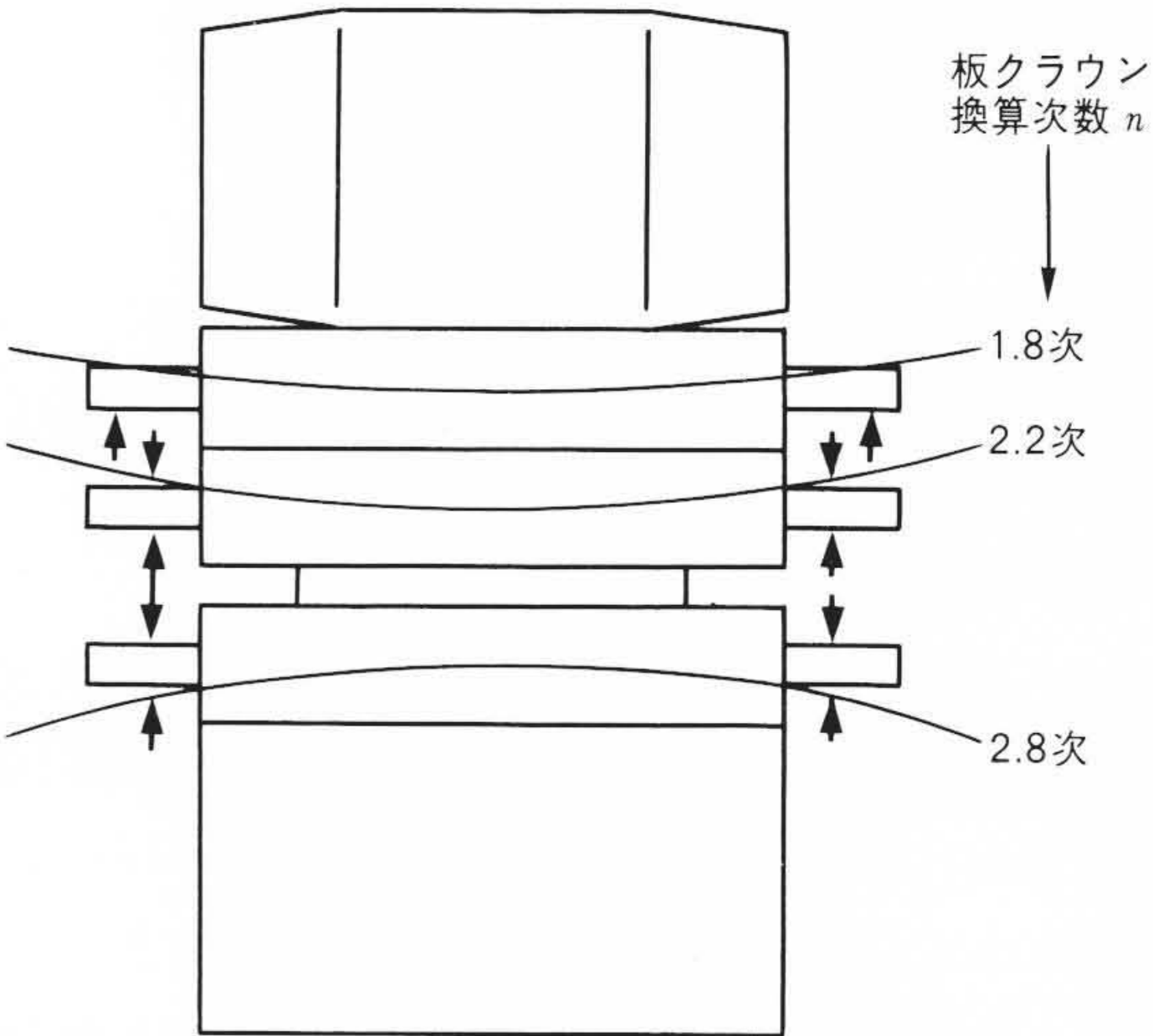


図15 5MB-MILLの概略構成 上下作業ロールおよび上中間ロールにベンダを持ち、ベンダ効果を拡大させるため、上バックロールの有効胴長を短くしてある。



MILLロール寸法			
ロール名	寸法	ロール名	寸法
上バックアップロール	$\phi 1,000-2,050 L$ (有効胴長: 1,400 mm)	上作業ロール	$\phi 475-2,050 L$
		下作業ロール	$\phi 475-2,050 L$
上中間ロール	$\phi 530-2,050 L$	下バックアップロール	$\phi 1,000-2,050 L$

図16 各ベンダの形状修正能力 三つのベンダの特性が異なり、これらの組み合わせによって種々の形状の修正が可能となる。

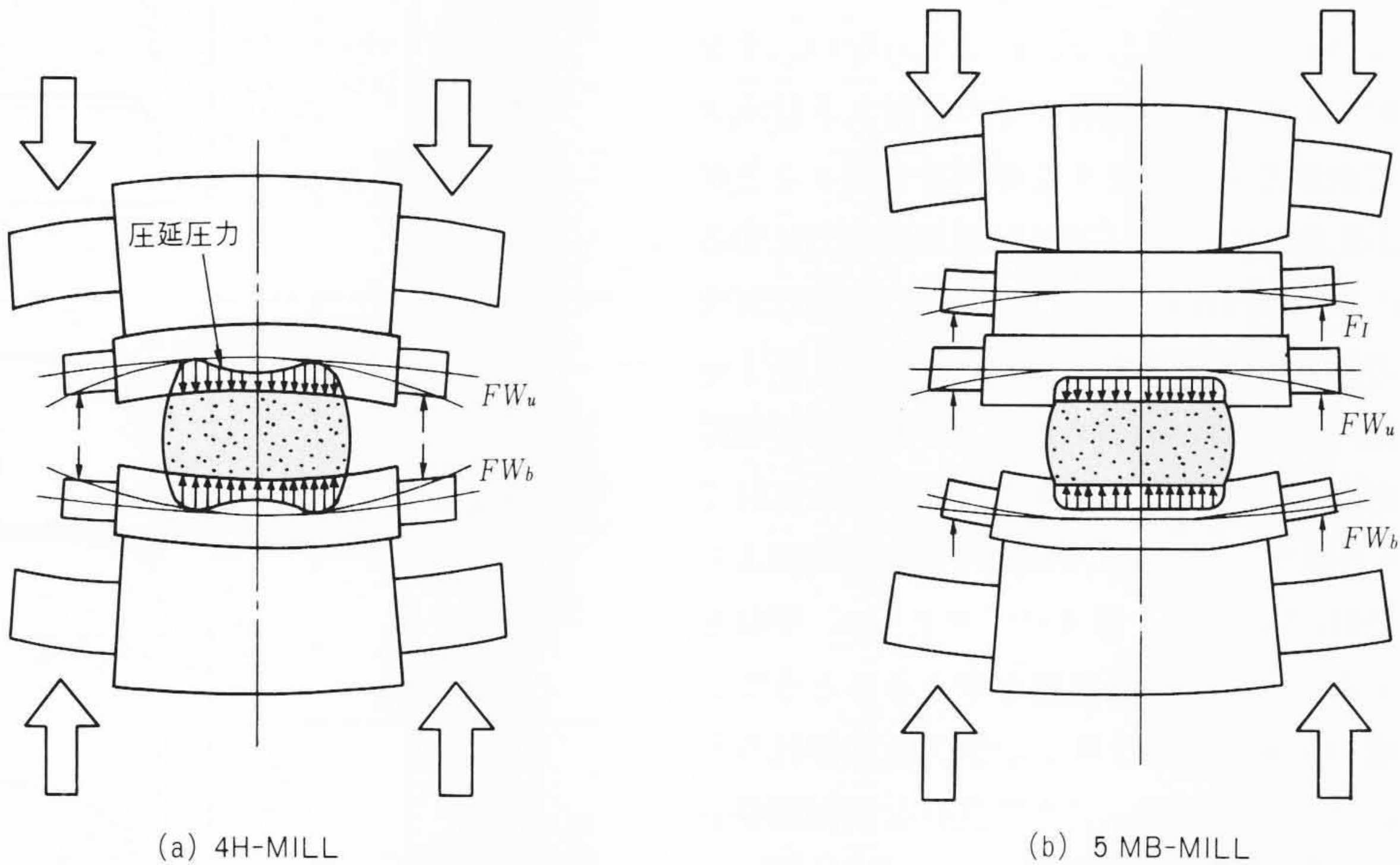
表2 最近の亜鉛めっき設備のスキンパス圧延条件 用途が多様化したため圧延条件は拡大され、従来のスキンパスミルでは、機能不足となっている。

条件 スキンパス材	板 厚 (mm)	板 幅 (mm)	降 伏 点 (MPa)	要求伸び率 (%)	圧延荷重 (kN/mm)
軟 質 材	0.4~2.3	700~1,880	147~392 { 15~40 kgf/mm ² }	0.5~0.9	0.98~1.96 { 0.1~0.2 tf/mm }
硬 質 材	0.4~2.3	700~1,880	441~588 { 45~60 kgf/mm ² }	0.2~1.8	2.94~3.92 { 0.3~0.4 tf/mm }

ロールの有効胴長を短くしたものである。

このMILLで、ロール寸法を図16とし、それぞれのベンダによって変形できるストリップのクラウンを $y=x^n$ のカーブで近似すると、次数 n はそれぞれ同図のように表される。一般にス

キンパス圧延での形状外乱を同式で近似すると次数 n は1.8次から2.5次程度になるものと考えられる。したがって、5MB-MILLはこの外乱に十分対応でき、デットフラットに近い形状が得られることが期待できる。また、4H-MILLと5MB-MILL



注：略語説明 FW_u (上作業ロールベンダ力), FW_b (下作業ロールベンダ力), FI (上中間ロールベンダ力)

図17 従来の4H-MILLと5MB-MILLの特性比較 従来の4H-MILLで困難であった均一な圧延圧力が、5MB-MILLでは三つのベンダの適正な調整によって得ることができる。

表3 4H-MILLと5MB-MILLの形状制御能力 4H-MILLは1種類のWRクラウンだけでは軟質材から硬質材まで良好な形状を得られないが、5MB-MILLは、全範囲で良好な形状が得られる。

スキンパス材 ミル形式	硬質材, 1.2 t×1,219 bmm, 荷重: 2.9 kN/mm ↓ 0.3 tf/mm ↓ (降伏点 $\sigma_y=441\sim588$ MPa) ↓ 45~60 kgf/mm ² ↓	軟質材, 0.7 t×1,880 bmm, 荷重: 2.0 kN/mm ↓ 0.2 tf/mm ↓ (降伏点 $\sigma_y=147\sim392$ MPa) ↓ 15~40 kgf/mm ² ↓
4H-MILL $\phi 475/\phi 1,100\sim 2,050 L$ WRクラウン: 0.025 mm/半径	$FW=1,274$ kN ↓ 130 tf ↓ 	$FW=441$ kN ↓ 45 tf ↓
5MB-MILL $\phi 475/\phi 530/\phi 1,000\sim 2,050 L$ 上FWRクラウン: 0.025 mm/半径 上IMRクラウン: 0.025 mm/半径 BUR胴長: 1,400 mm	$FW_u=706$ kN, $FW_b=706$ kN, $FI=686$ kN ↓ 72 tf ↓ ↓ 72 tf ↓ ↓ 70 tf ↓ 	$FW_u=-167$ kN, $FW_b=-167$ kN, $FI=176$ kN ↓ -17 tf ↓ ↓ -17 tf ↓ ↓ 18 tf ↓

注：略語説明 WR (ワークロール), BUR (バックアップロール), IMR (中間ロール)

の圧延状態の略図を図17に示す。

一般の4H-MILLの場合は、有効にベンダを作用させても図17(a)のように、容易に均一な圧延圧力分布は得られない。

一方、5MB-MILLの場合は、三つのベンダを有効に作用させると、同図(b)のようにほぼ均一な圧力分布が得られる。

3.3 5MB-MILLの効果

最近の亜鉛めっき設備に要求されるスキンプラス圧延は、前述の表1の機能および目的を満足しなければならない。すなわち、軟質の広幅材から硬質の狭幅材までの各種ストリップを良好な平坦度で板幅全面にわたり表面調整を行うことが要求される。これは従来の4H-MILLでは形状制御能力に劣るので、表3のように1種類のWRクラウンだけでは良好な形状が得られない。また、ストリップエッジ部での圧延も不十分である。一方、5MB-MILLは、軟質の広幅材から硬質の狭幅材まで良好な形状が得られる。また表4に、表3の軟質材で広幅のストリップを各種ベンダ操作した場合の5MB-MILLの圧延状態を示す。5MB-MILLは、表4に示すように、形状を平坦に保ちながらエッジ部の圧延状態を変えることもできる。すなわち、一般のスキンプラス圧延で予想される形状外乱にも十分対応して、ストリップエッジまで良好な表面調整を行えることが期待される。4H-MILLの場合、ストリップエッジまで圧延を十分行くと、表3に示す形状がさらに悪くなることが予想される。

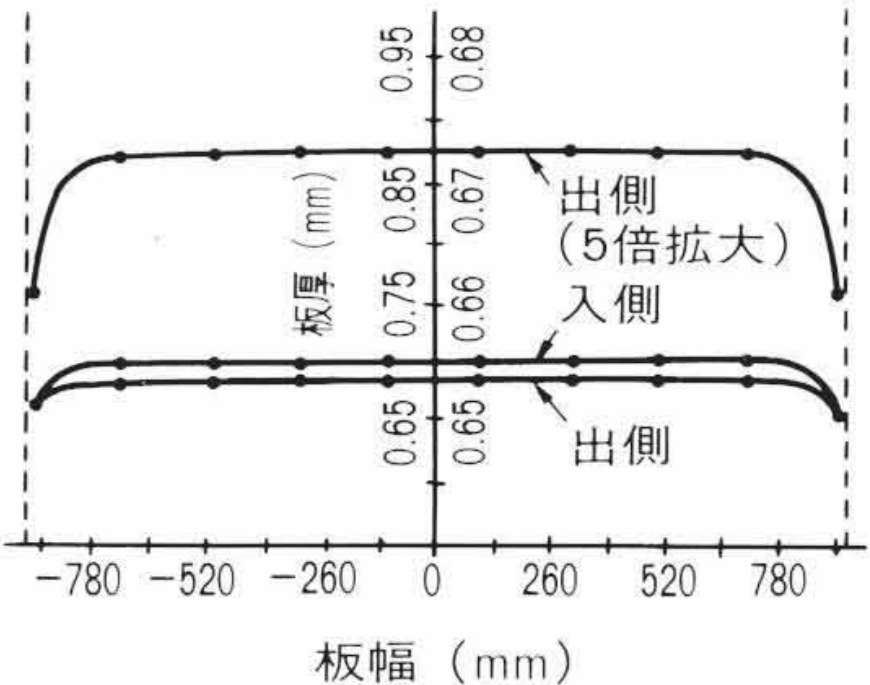
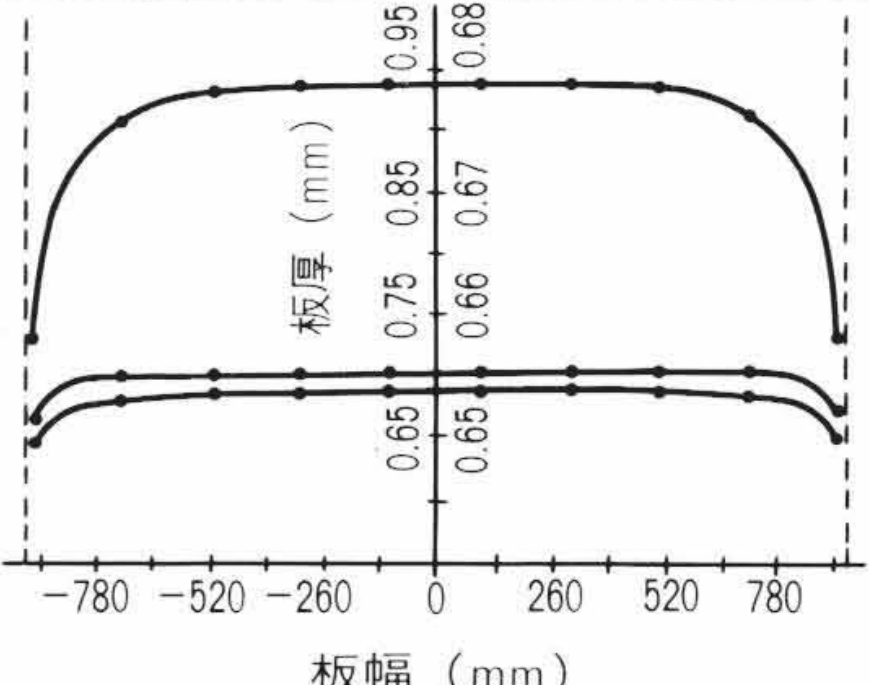
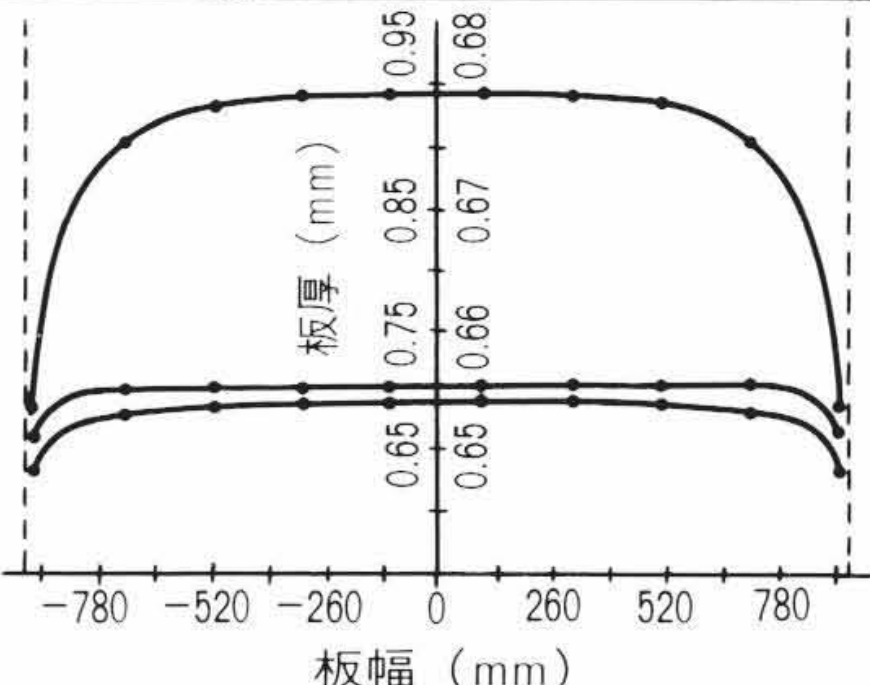
4 結 言

連続亜鉛めっき設備の大幅な品質向上を可能にする高性能めっき装置と、新形スキンプラスミルの最新の技術について述べた。

高性能めっき装置は、めっき厚みの制御部でストリップの幅方向の反りを修正でき、均一なめっき厚みが得られた。また、セラミックス軸受の採用により、軸受の摩耗を減少させ、ロールを滑らかに回転させることが可能になり、ストリップの振動を防止してめっき厚みの均一化に有利となった。さらに、軸受交換頻度が減るなどの保守面での効果も期待される。また、5MB-MILLは、広範囲の複合形状制御能力を持つものであり、最新の設備が求める機能を十分に発揮し、良好な表面調整が可能となり、多様化された製品のそれぞれの品質向上に寄与できるものと考ええる。

今後は、上記のそれぞれの機能を自動化などにより、優れ

表4 5MB-MILLの各種ベンダ操作による圧延状態 5MB-MILLはストリップ中央の形状をフラットに保ちながらエッジ部の圧延状態を変えることができる。母板の各種エッジドロップに対応可能である。

圧延状態	ベンディング力(kN)			形状修正結果
	FW_u	FW_b	F_l	
軽圧延 ストリップエッジ部	-274 {-28 tf}	490 {50 tf}	147 {15 tf}	
全幅ほぼ均一圧延	-167 {-17 tf}	-167 {-17 tf}	176 {18 tf}	
強圧延 ストリップエッジ部	-59 {-6 tf}	-392 {-40 tf}	49 {5 tf}	

た品質を安定して生産するというユーザーの要望にこたえるため、さらに研究を進めてゆく考えである。ユーザーのご指導を切望する次第である。

参考文献

1) 貝原, 外: プロセッシングラインにおける高精度形状制御技術, 日立評論, 70, 6, 645~652(昭63-6)

2) 西村, 外: 連続溶融めっき製品の品質向上に関する新技術, 日立評論, 65, 2, 121~126(昭58-2)

3) 可児, 外: テンションレベラのそり修正に関する検討, 日立地方講演会講演論文集(共催 日本機械学会, 精機学会), 61~63(昭53-9)

4) 服部, 外: 表面処理ラインの板形状矯正技術, 神戸製鋼技報, 39, 4, 85~88(平-1)