

熱間用HCX-MILLの実機特性

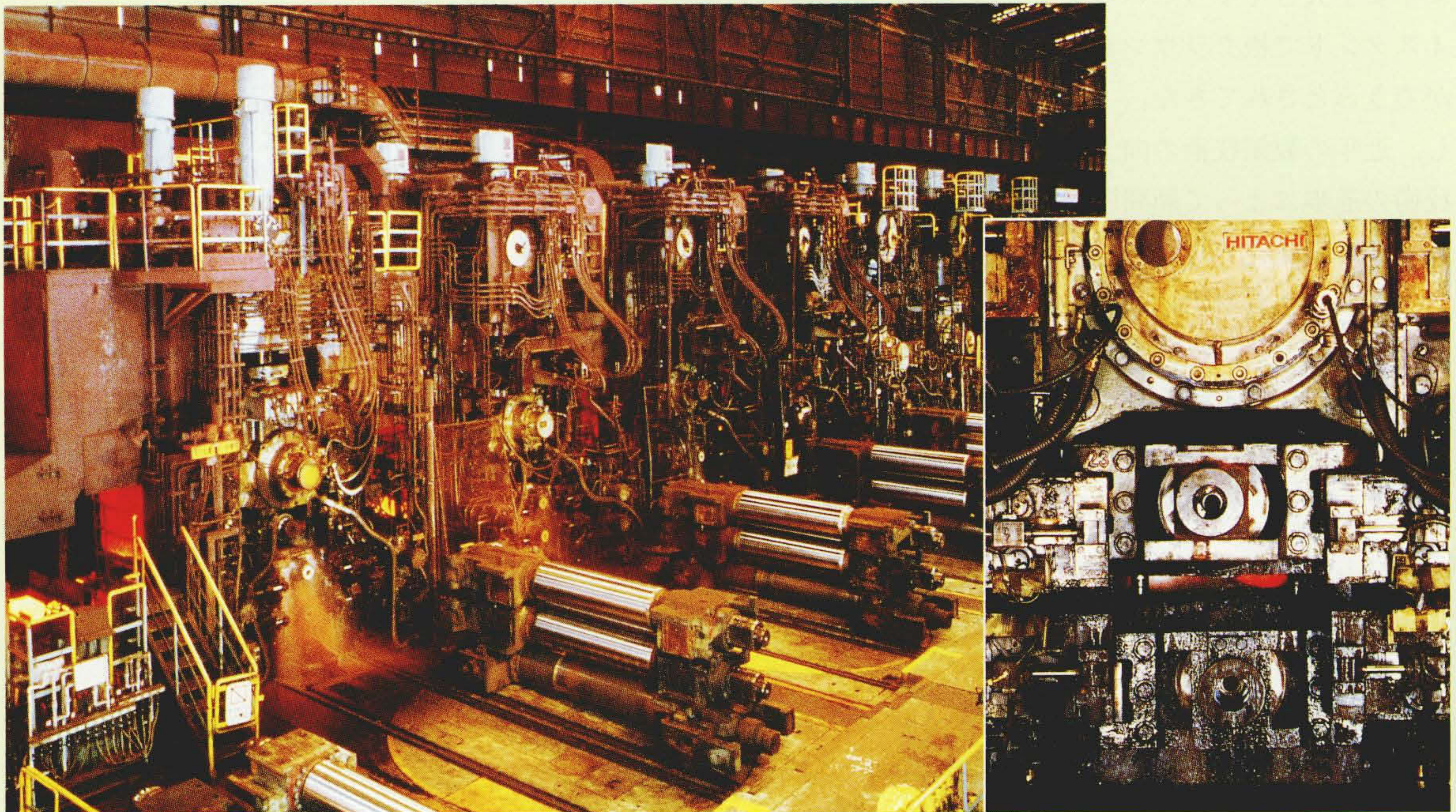
Industrial Application of HCX-MILL to Hot Strip Mills

尾野 博* *Hiroshi Ono*

吉本健一** *Ken'ichi Yoshimoto*

渡辺 勉* *Tsutomu Watanabe*

加賀慎一** *Shin'ichi Kaga*



日新製鋼株式会社呉製鉄所のHCX-MILL実機1号機

この設備は、7スタンドタンデムミルであり、F1、F2スタンド(HCW-MILL)、F3スタンド(HCX-MILL)、およびF4～F7スタンド(HCMW-MILL)のミル型式を採用した高性能熱間仕上圧延設備である。

熱間圧延材の板形状および板クラウンの造り込みは、従来、仕上げミルの後段3、4スタンドで同時に造り込むことができるとされてきた。しかし、近年、熱延材のいっそうの硬質化、薄肉化によって板クラウンの造り込みは後段スタンドが形状制御に優先的に用いられて板クラウン制御が制約を受けるため、前段スタンドでの板クラウン制御能力の拡大が要望されてきた。大きな板クラウン制御能力を持つミルとして、6段のHC-MILL(High Crown Control Mill)があるが、前段も6段のHC-MILLとすることは作業ロール小径化が困難なためにミルが大型となり過ぎて、特に改造の点で得策ではない。

この要望にこたえるため日立製作所は、4段ミル

でHC-MILLの機能を追求し、板クラウン制御機能の大きいミルとして、作業ロールだけをクロスするHCX-MILL(High Crown Control Work Roll Cross Mill)を開発した。従来このミルは作業ロールだけをクロスするため、補強ロールとの間での相対滑りによる過大なスラスト力が発生して実用化がこれまでは困難とされてきたが、新しいロール間潤滑技術を開発したことにより、作業ロールの単独クロスを可能にした。

HCX-MILLの実機1号機は日新製鋼株式会社呉製鉄所2熱延仕上ミルで1994年8月に稼動を開始し、その優れた板クラウン制御特性が実証され、以来、順調に稼動を続けている。

* 日新製鋼株式会社 ** 日立製作所 日立工場

1 はじめに

熱間圧延材の板形状および板クラウンは製品の品質上はもとより、歩留り、さらに圧延作業性の点でも重要であり、熱間圧延での板クラウンの高精度な造り込みのニーズはますます大きくなっている。従来は仕上ミルの後段3、4スタンドで板クラウンと板形状を同時に造り込むことができるようになってきた。

しかし、近年の製鋼技術の向上、熱延工程での製品造り込み技術の進歩によって熱間圧延材の特性が著しく多様化され、かつ軽量化の趣(すう)勢に伴って熱延材の硬質、薄肉化が推進されている。この硬質、薄肉材の板クラウンの造り込みでは、後段スタンドが形状制御に優先的に用いられて板クラウン制御が制約を受けるため、前段スタンドでの板クラウン制御能力の拡大が要望されてきた。大きな板クラウン制御能力を持つミルとして、6段のHC-MILLがあるが、前段も6段のHC-MILLとすることは作業ロール小径化が困難なためにミルが大型となり過ぎて、特に改造の点で得策ではない。

この要望にこたえるため日立製作所は、4段ミルでHC-MILLの機能を追求し、板クラウン制御機能の大きいミルとして、作業ロールだけをクロスするHCX-MILLを開発した。従来このミルは作業ロールだけをクロスするため、補強ロールとの間での相対滑りによる過大なスラスト力が発生し実用化が困難とされていた。これに対して日立製作所は、これまでのHC-MILLでの多数のテストから新しいロール間潤滑技術を開発し、作業ロールの単独クロスを実現した。

ここでは、HCX-MILLを実現するための技術、基本特性、および日新製鋼株式会社呉製鉄所での実機1号機で確認した特性について述べる。

2 HCX-MILLの原理と実用化のための課題と解決法

2.1 HCX-MILLの板クラウン制御原理

4段ミルのロールクロス方法には3方式がある(図1参照)。

各ロールクロス方式に伴うロール間隙を図1に示す。作業ロールの剛性を考慮し、作業ロールと補強ロール間から上下作業ロール間への転写率を β とすると、上下作業ロール間換算の等価クラウン C_o は以下の式となる。

作業ロールクロス方式

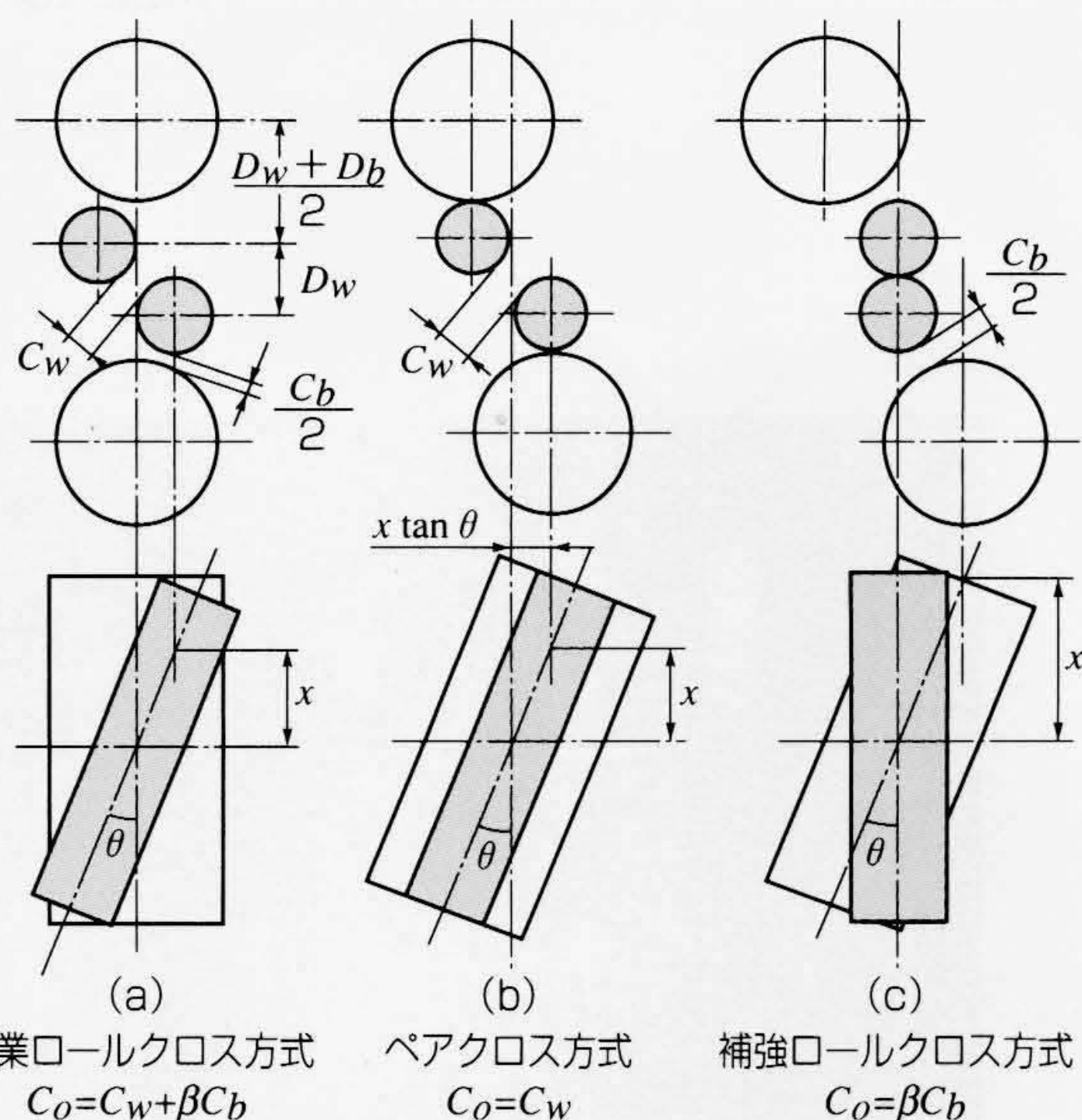


図1 ロールクロス方式の種類

4H-MILLのロールクロス方式には、作業ロールクロス方式、ペアクロス方式、補強ロールクロス方式の3種類がある。

$$C_o(x) = C_w(x) + \beta C_b(x) =$$

$$\frac{2 \times (x \times \tan \theta)^2}{D_w + G(0)} + \beta \times \frac{2 \times (x \times \tan \theta)^2}{D_w + D_B} \dots (1)$$

補強ロールクロス方式

$$C_o(x) = \beta C_b(x) = \beta \times \frac{2 \times (x \times \tan \theta)^2}{D_w + D_B} \dots (2)$$

ペアクロス方式

$$C_o(x) = C_w(x) = \frac{2 \times (x \times \tan \theta)^2}{D_w + G(0)} \dots (3)$$

ここに、 x ：クロスポイントからの距離

$G(0)$ ：クロス角0度時の上下作業ロール インシタル ギャップ

$C_o(x)$ ：上下作業ロール間換算の等価クラウン

D_w ：作業ロール径

D_B ：補強ロール径

β ：転写率

θ ：クロス角

ここで、上式から、ロール中央とロール端部の無負荷時の等価クラウン C_o とクロス角 θ との関係を、代表的熱間仕上ミルの仕様〔作業ロール径 $\phi 760$ mm、補強ロール径 $\phi 1,520$ mm、転写率 $\beta = 0.35$ 、 $G(0) \approx 0 < D_w$ 〕の条件での計算結果を図2に示す。同図から、作業ロールクロス方式が最も大きな板クラウン制御能力を持っていることがわかる。

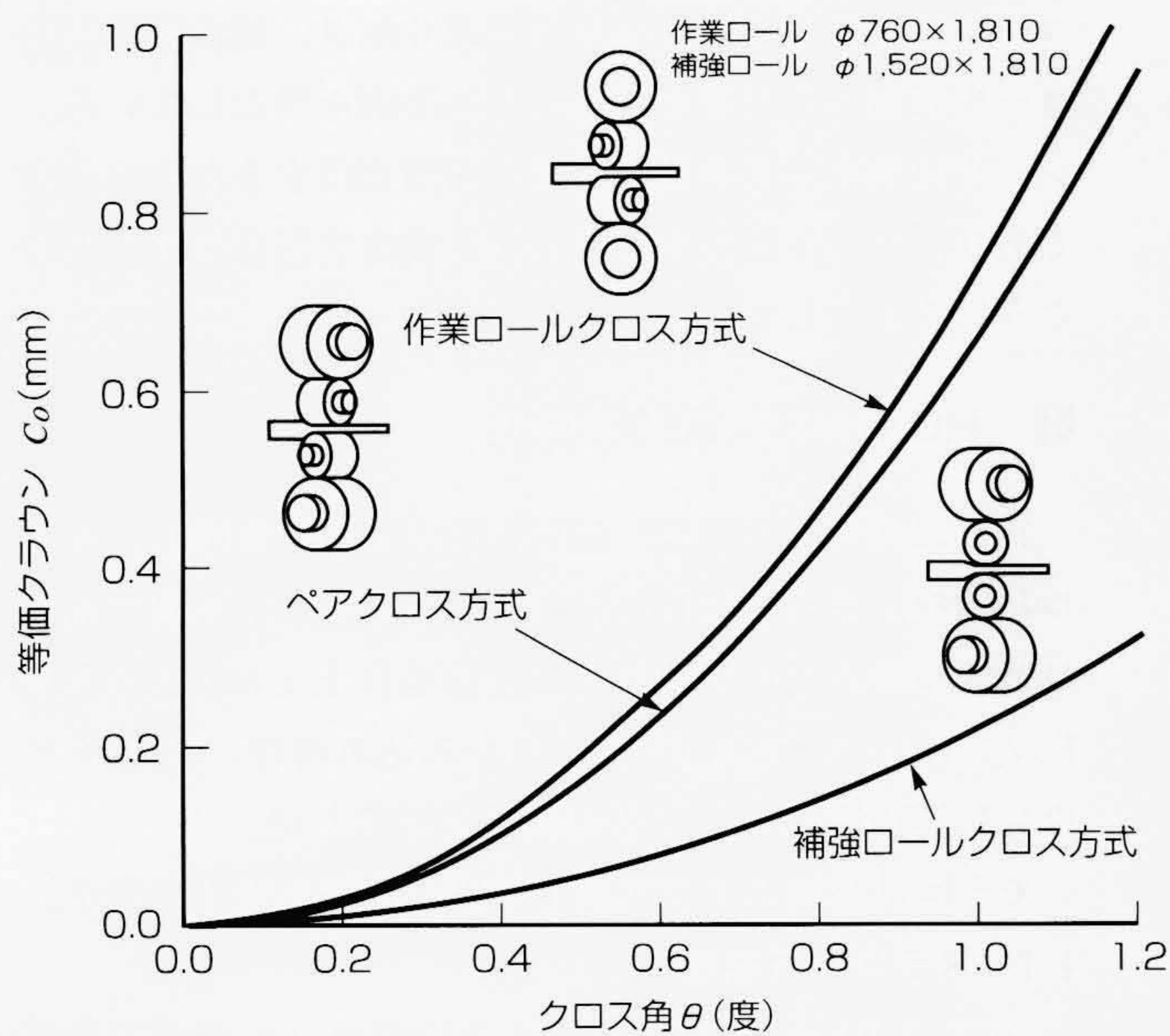


図2 各ロールクロス方式の等価クラウン
4H-MILLの3種類のロールクロス方式の中で、作業ロールクロス方式が最も等価クラウン制御能力が大きい。

2.2 HCX-MILL実用化のための課題と解決策

上下作業ロールをクロスして、板クラウンを制御する技術は古くから知られている。この技術を4段ミルに適用する場合、作業ロールだけをクロスさせると補強ロールとの間に過大なスラストが発生して機械強度の面で問題が生じるので、実用化は不可能とされていた。これを避けて実用化に成功したのがペアクロスミル²⁾であり、補強ロールも作業ロールと並行にペアでクロスさせる方式である。作業ロールだけ単独でクロスすることが可能となれば構造も簡単となり、圧延中のクロス角制御も容易に行えるのできわめて望ましいといえる。

HCX-MILL実現のための課題とその解決策を図3に示す。

作業ロールクロスミルは、ロール間潤滑を行えばスラスト力を低減できることはわかっているが、以下の理由で実用化は不可能と考えられていた。

- (1) 熱間圧延ではロール間に潤滑油を供給しても、大量のクーラントによって洗い流される。したがって、潤滑効果を発揮するためには、粘度の高い付着性の良い油を用いる必要がある。
- (2) この粘度の高い付着性の良い油を用いてロール間潤滑を行うと、ノズルの目づまりが頻発し、潤滑状態を均一、かつ安定な状態で保持することができないため、安定操作が困難となる。
- (3) 粘度の高い潤滑油では圧延材の先端かみ込みを著し

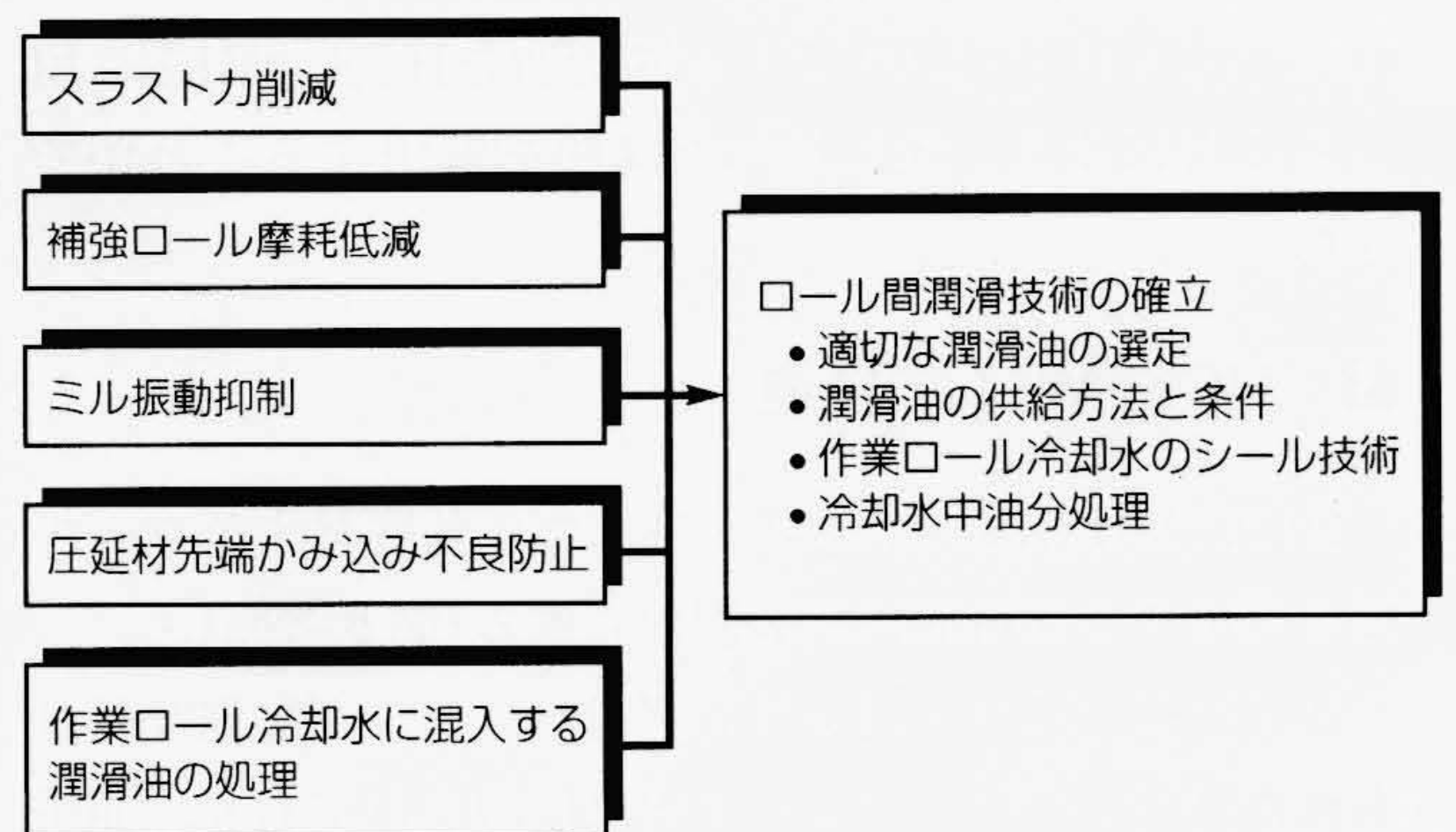
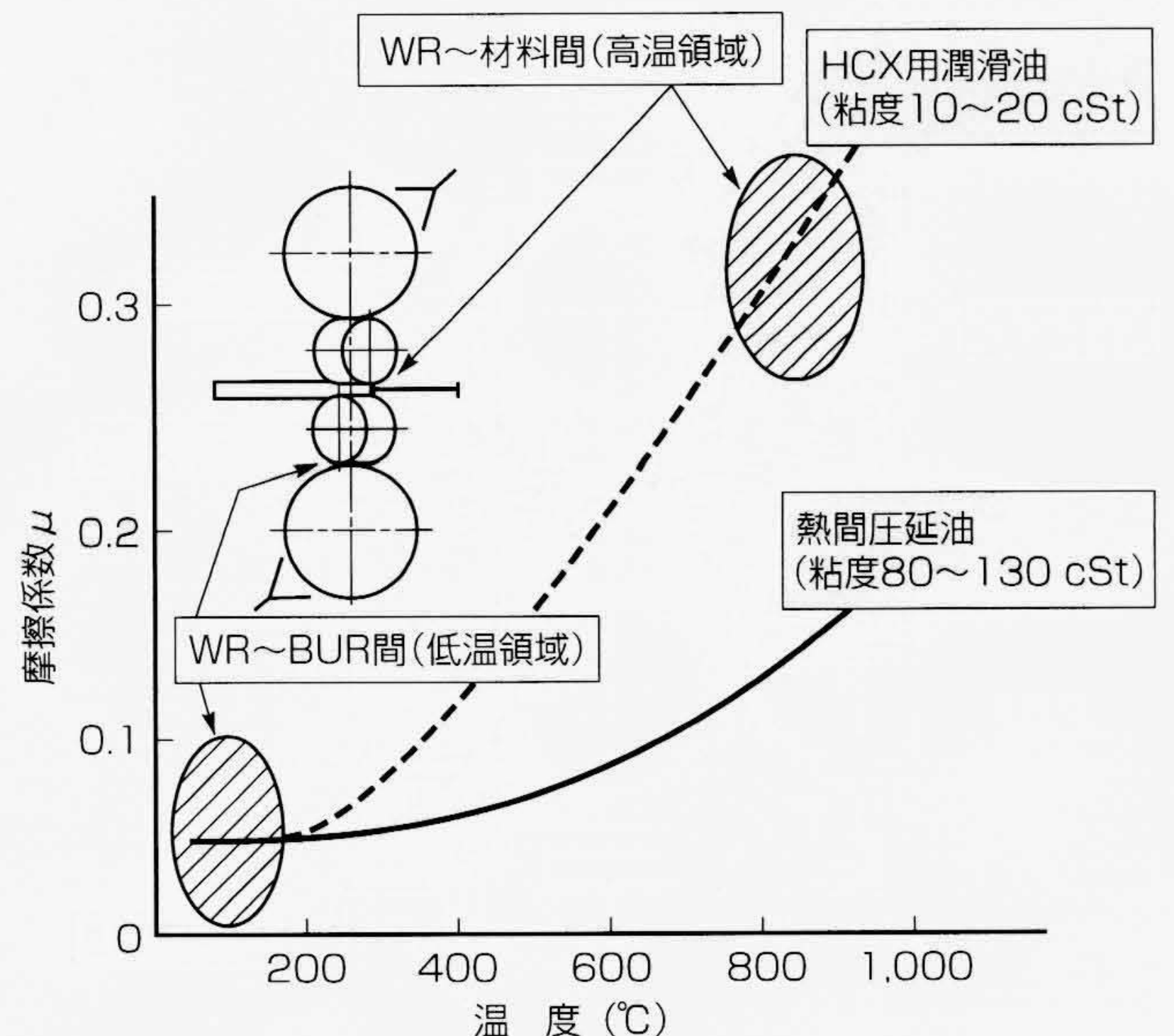


図3 HCX-MILL実現のための課題と解決策
HCX-MILLの実現はロール間潤滑技術の確立によって可能である。

く損ねる。そこで、圧延材表面性状改善やロール摩耗軽減を目的として熱間油圧延の場合でも、実機操作では先行材の後端には潤滑油をかけずに、作業ロール表面の潤滑油を焼き切ることによって油分を除去し、次材のかみ込み時の摩擦係数を高く確保し、操作しているのが実状である。

これらの問題を詳細に検討した結果、HCX-MILLではロール間潤滑の必要な個所は表面温度が200℃以下のロール間であり、高温である圧延材との接点ではないということがわかった(図4参照)。したがって、低温領域では潤滑性を発揮するが、高温領域では潤滑特性を失



注：略語説明 WR(Work Roll), BUR(Back up Roll)

図4 HCX-MILLのロール間潤滑とかみ込み性
HCX-MILLで低粘度の適正な潤滑油を供給すると、かみ込み性を阻害せずに十分なロール間潤滑が可能である。

い、かつ流動性が良好である潤滑油をHCX-MILLに用いることにより、先に述べた課題を解決することができた。

3 HCX-MILLの構造

HCX-MILLは、作業ロールクロス装置およびロール間を潤滑する潤滑油供給装置から成る(図5参照)。

作業ロールクロス用シリンダはハウジングに取り付けられたプロジェクトブロック内に内蔵されており、油圧作動によって迅速クロス動作が可能のため、圧延中のダイナミックな板クラウン制御(走間クロス角変更)が容易である。

さらに、補強ロールチョックにはチョック セット シリンダを設け、がた取りを行っている。このがた取りは、通板性向上以外に補強ロール軸心の動きによるクロスポイントのずれの発生を防止するためである。

作業ロール、補強ロールチョックの双方ともハウジングとのがたが殺されているため、かみ込み・尻抜け時などの衝撃が小さく、良好な通板性が確保できる。

潤滑油供給装置は補強ロール表面に取り付けられており、潤滑油の供給部はヘッドで覆われている。このヘッドにはワイパとシールが設けられている。ワイパは補強

ロールに付着している冷却水を取り除き、潤滑油の補強ロール表面への付着を確実にする役割を果たしている。シールは過剰の潤滑油を回収し循環使用するためのものであり、ロール冷却水に混入する潤滑油量を微少とするようにくふうしている。

4 HCX-MILLの基本特性

新たに開発したHCX-MILL用潤滑油を使用し、モデル試験機、さらにはHCX-MILLの実機第1号機である日新製鋼株式会社呉製鉄所の2熱延仕上ミルF3の実機操業で、(1)スラスト特性、(2)かみ込み特性、(3)板クラウン制御特性、(4)ミル振動特性を確証した。

モデル試験機および実機1号機の仕様を表1に示す。

4.1 スラスト力特性

HCX-MILLでは作業ロールと補強ロールをクロスして圧延するため、ロール間で滑り速度ΔVが発生する(図6参照)。

この滑り速度ΔVにより、スラスト力 F_B が作業ロールおよび補強ロール間に発生する。

$$F_B = f_B \times P \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 f_B ：補強ロールスラスト係数

P ：圧延荷重

スラスト力は補強ロールスラスト係数 f_B と圧延荷重 P によって支配される。

パイロットミルでロール間スラスト係数を測定した結果を図7に示す。通常の水潤滑状態では、作業ロールと補強ロール間のスラスト係数が $f_B=0.2\sim0.3$ にも及ぶため、圧延荷重の20～30%ものスラスト力がロール、軸受およびキーパプレートに作用する。従来、作業ロールクロスミルが実用化しなかった原因は、この大きなスラスト荷重を保持するスラストベアリングを軸受箱、特に作業ロール軸受箱内に設置することが、構造上非常に困難であったためである。

表1 設備仕様

HCX-MILLの特性試験に使用したモデル試験機および実機の主な仕様を示す。

機 械	基礎試験機	パイロットミル	実機Ⅰ号機
段 数	2	4	4
ロール寸法	φ170×64L(mm)	φ300/φ630×750L(mm)	最大φ815/ φ1,542×1,810L(mm)
荷 重	最大294 kN	5,900 kN	39,240 kN
クロス角度	0～2°	0～2°	0～1.2°
モータ容量	45 kW	250 kW	3,330 kW×2台

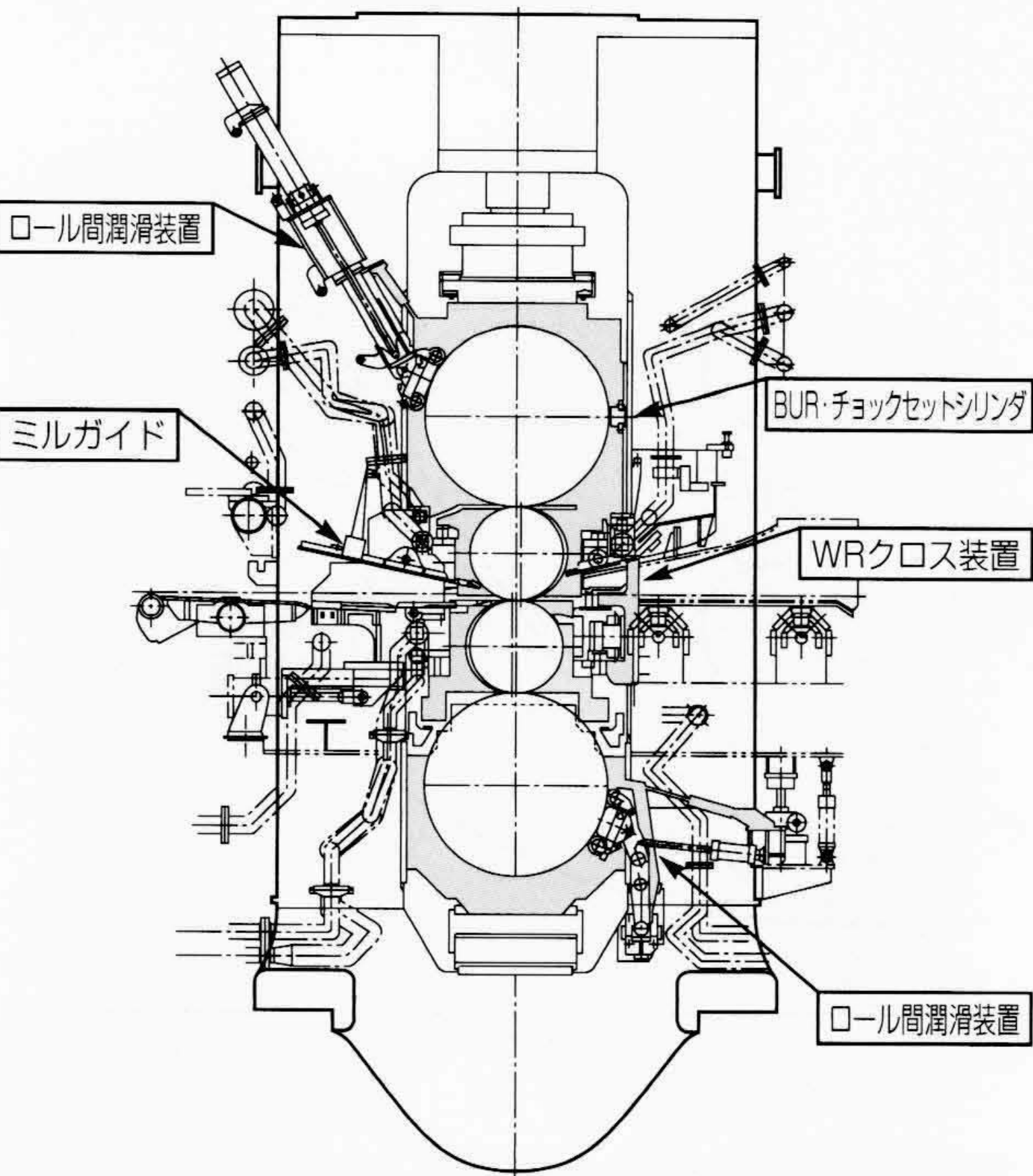
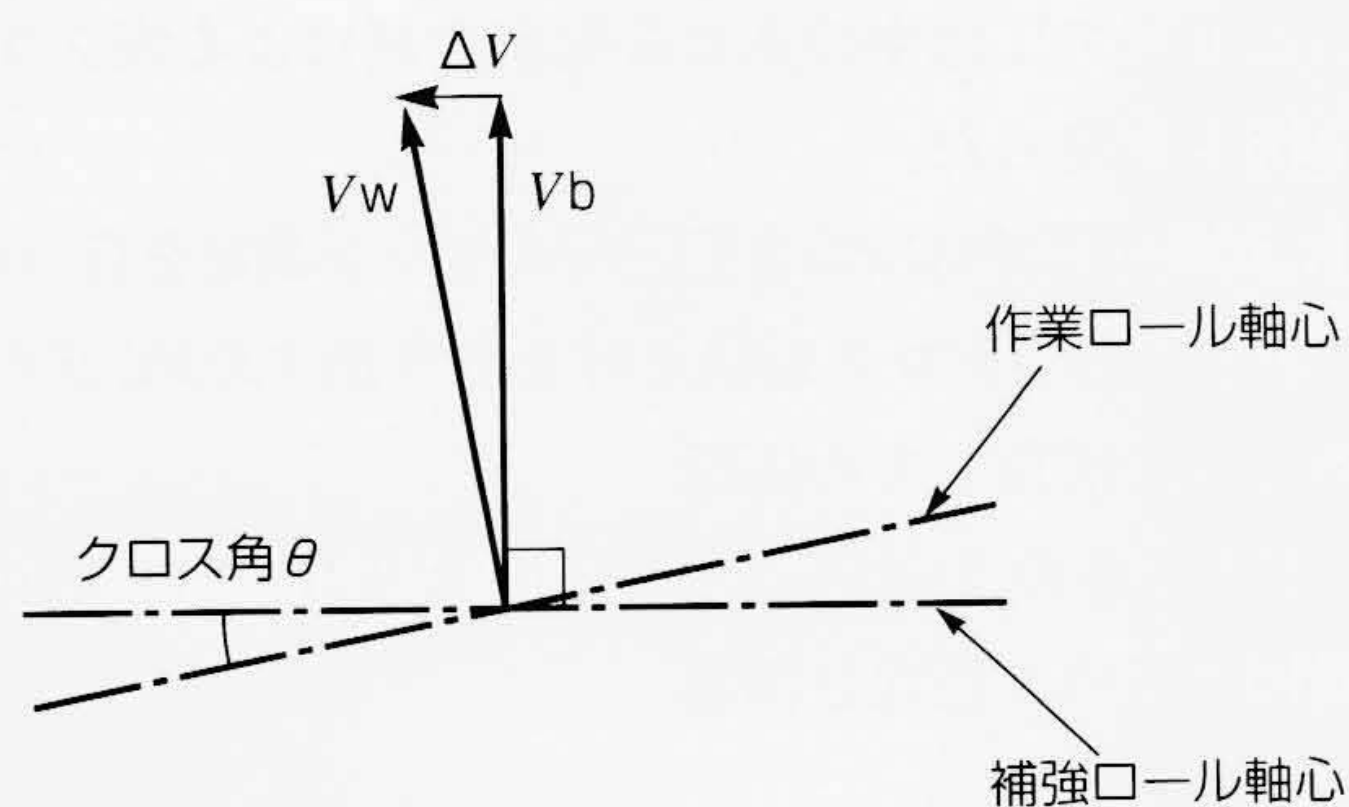


図5 HCX-MILLの構造
HCX-MILLは高機能を持ちながら構造がシンプルであり、新設はもとより改造にも適している。

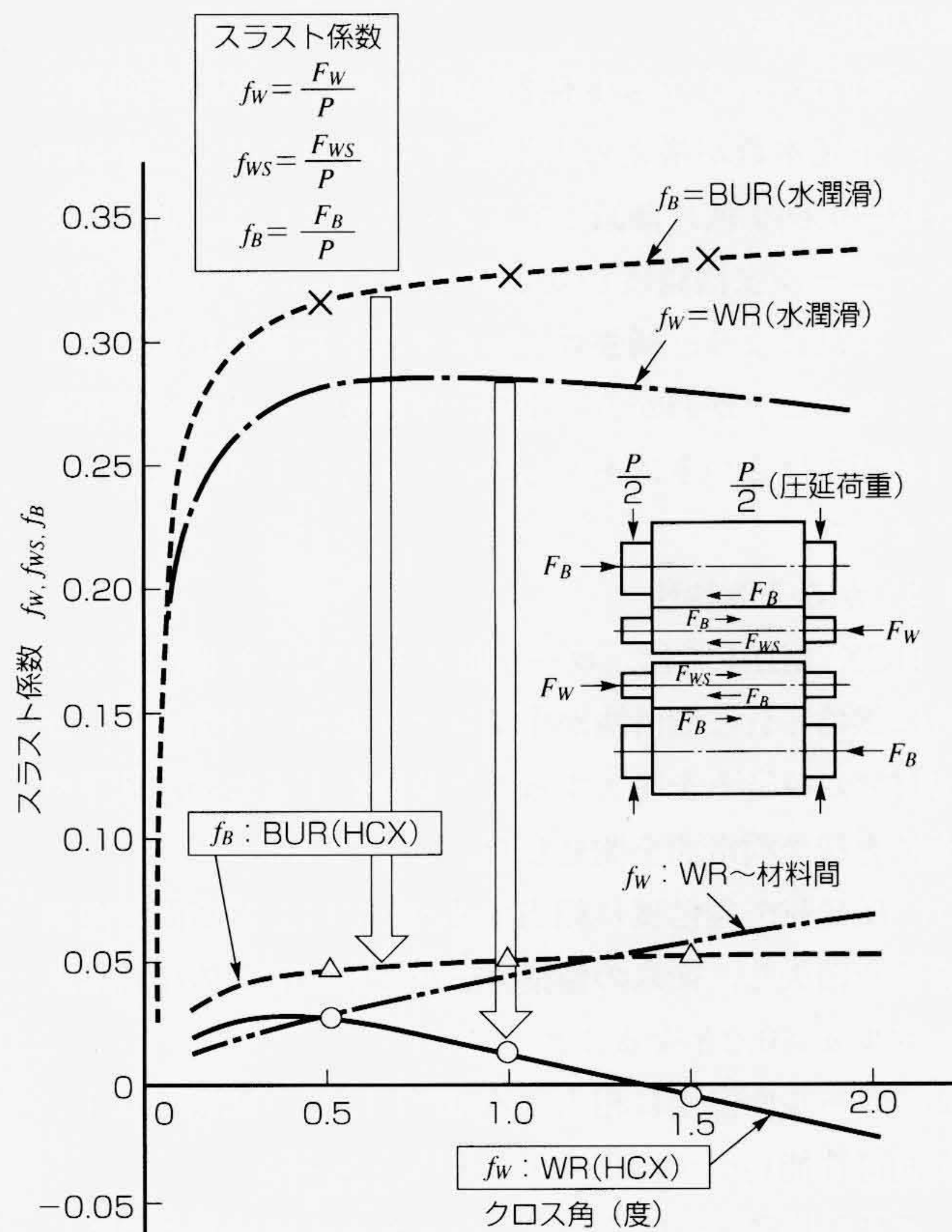
図6 ロールクロス時の滑り速度 ΔV

作業ロール軸心と補強ロール軸心がクロスすると、ロール軸心方向に滑り速度が発生するためにスラスト力が生じる。

一方、HCX-MILLはロール間潤滑油供給装置を備えており、ロール間を油潤滑することにより、作業ロールと補強ロール間のスラスト係数 f_B は水潤滑の場合の $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{7}$ 、すなわち0.04~0.08程度に激減する。また、ロール間を油潤滑しているため、補強ロール摩耗量も通常の4Hミルと同程度に抑えられる。

特に、作業ロールへは補強ロールから作業ロールへ作用するスラスト力と、圧延材から作業ロールへ作用するスラスト力の向きが反対で互いに相殺する(図7参照)。このため、作業ロール自身には圧延荷重の3%程度以下のスラスト力しか作用せず、従来の4Hミルに近いスラスト力のレベルに抑えられる。

実機の補強ロールスラスト係数および作業ロールスラスト係数の測定結果を図8に示す。測定中の圧延の条件



注：略語説明

f_w (作業ロールスラスト係数), F_w (作業ロールスラスト力)

f_B (補強ロールスラスト係数), F_B (補強ロールスラスト力)

F_{ws} (材料-作業ロール間スラスト力), P (圧延荷重)

図7 HCX-MILLの原理(ロール間スラスト係数)

HCX-MILLでロール間に適正な潤滑油を供給すると、各ロールのスラスト力は実用化レベルまで十分に小さくなる。

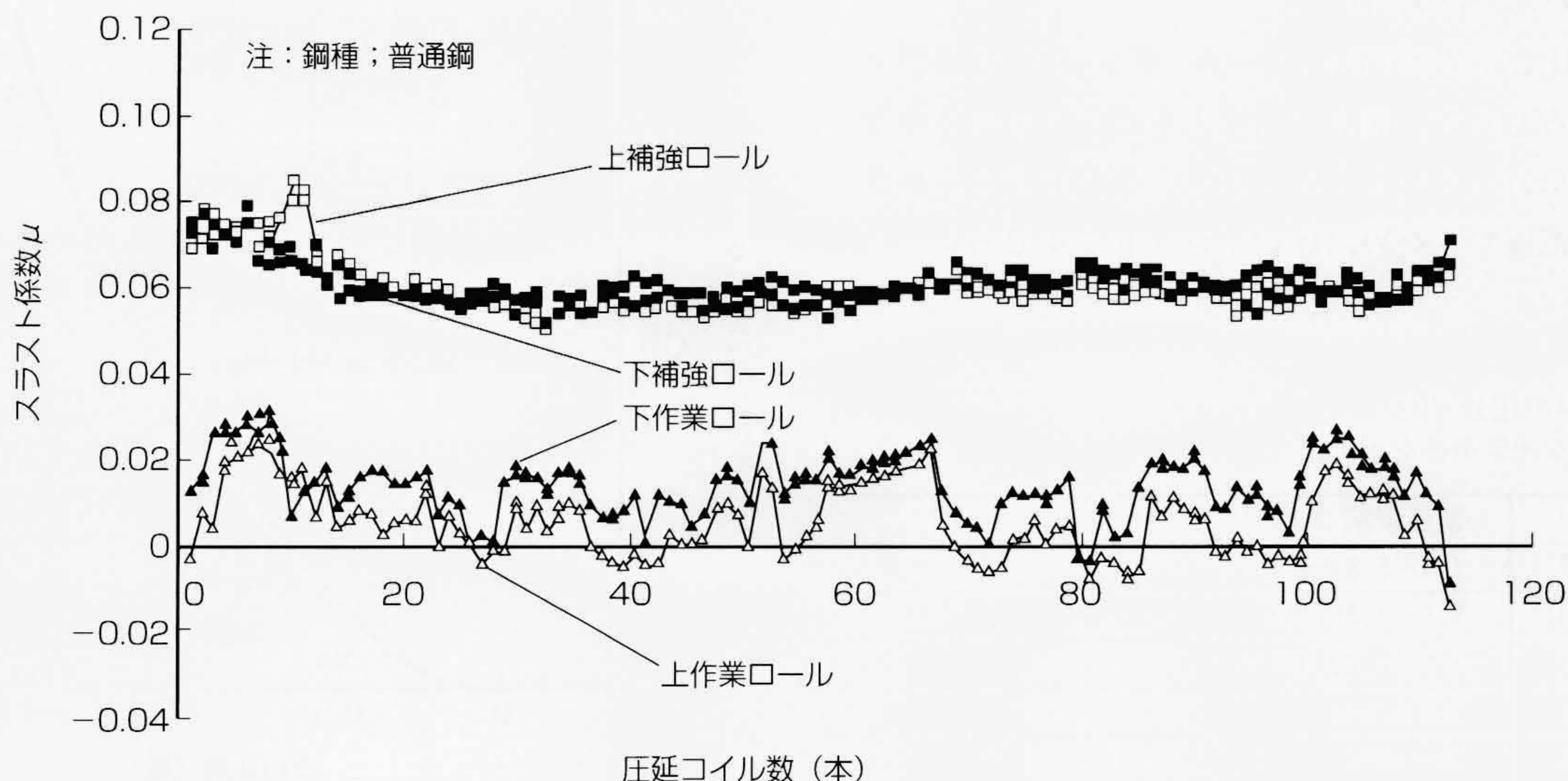


図8 実機スラスト係数

HCX-MILLでロール間に適正な潤滑油を供給すると、実機でも各ロールのスラスト力は実用化レベルまで十分に小さくできた。

を表2に示す。

補強ロールスラスト係数は圧延荷重や板幅に関係なく、圧延本数が増えると漸減する傾向を示し、当初の0.08～0.06程度に漸減して安定した。これは、時間とともにロール表面粗度が安定することによるものと考えられる。これにより、補強ロールスラスト係数は0.08程度以下となることがわかる。また、作業ロールスラスト係数は若干のばらつきはあるものの、3%以下のレベルにとどまった。

4.2 かみ込み特性

HCX-MILLでは、ロール間スラスト力を低減するために供給される潤滑油が作業ロール表面に付着して、圧延材のかみ込みを阻害することを防止するため、以下の特性を持つ潤滑油を開発した。

- (1) 圧延材先端温度に相当する500℃以上の高温では潤滑性を消失し、従来の作業ロールと圧延材間の摩擦係数レベル $\mu > 0.2$ となること
- (2) ロール間温度に相当する200℃以下の低温では十分な潤滑性能($\mu = 0.04 \sim 0.08$)を持つこと

2Hの基礎試験機で行ったかみ込み試験結果を図9に示す。HCX-MILL用に開発した潤滑油は、500℃以上の高温領域ではかみ込み摩擦係数 $\mu > 0.3$ となっている。一般的なホットストリップミルで要求されるかみ込み摩擦係数は0.15程度であり、この値は実機でのかみ込み性を損ねることがないほど十分大きな値であることがわかる。実際、実機でもスムーズなかみ込みが達成されており、通板上の問題はない。

4.3 板クラウン制御特性

HCX-MILLは幾何学的にロールギャッププロフィールを変えるもので、図2に示すように大きな板クラウン制御能力を持っているミルである。その作業ロールクロス効果を把握するため、(1)パイロットミルでのシート

表2 測定中の圧延条件
測定した主な圧延条件を示す。

圧延材	低炭素鋼
板厚	1.4～5.8 mm
板幅	915～1,251 mm
圧延荷重	8,000～20,000 kN
圧延速度	250 m/min
压下率	35～40%
クロス角度	0.8°
潤滑油	鉱油系3%濃度エマルジョン
潤滑油量	30 L/min

圧延、(2)実機で圧延中のクロス角度変更による板クラウン変化量を測定した。

- なお、実機圧延では次の2種類のクラウン測定を行った。
- (a) F3ミルのクロス効果だけを取り出すため、F4以降のミルを解放しての圧延
- (b) F3ミルのクロス角度だけを圧延中に変更し、F7出側板クラウン変化を測定

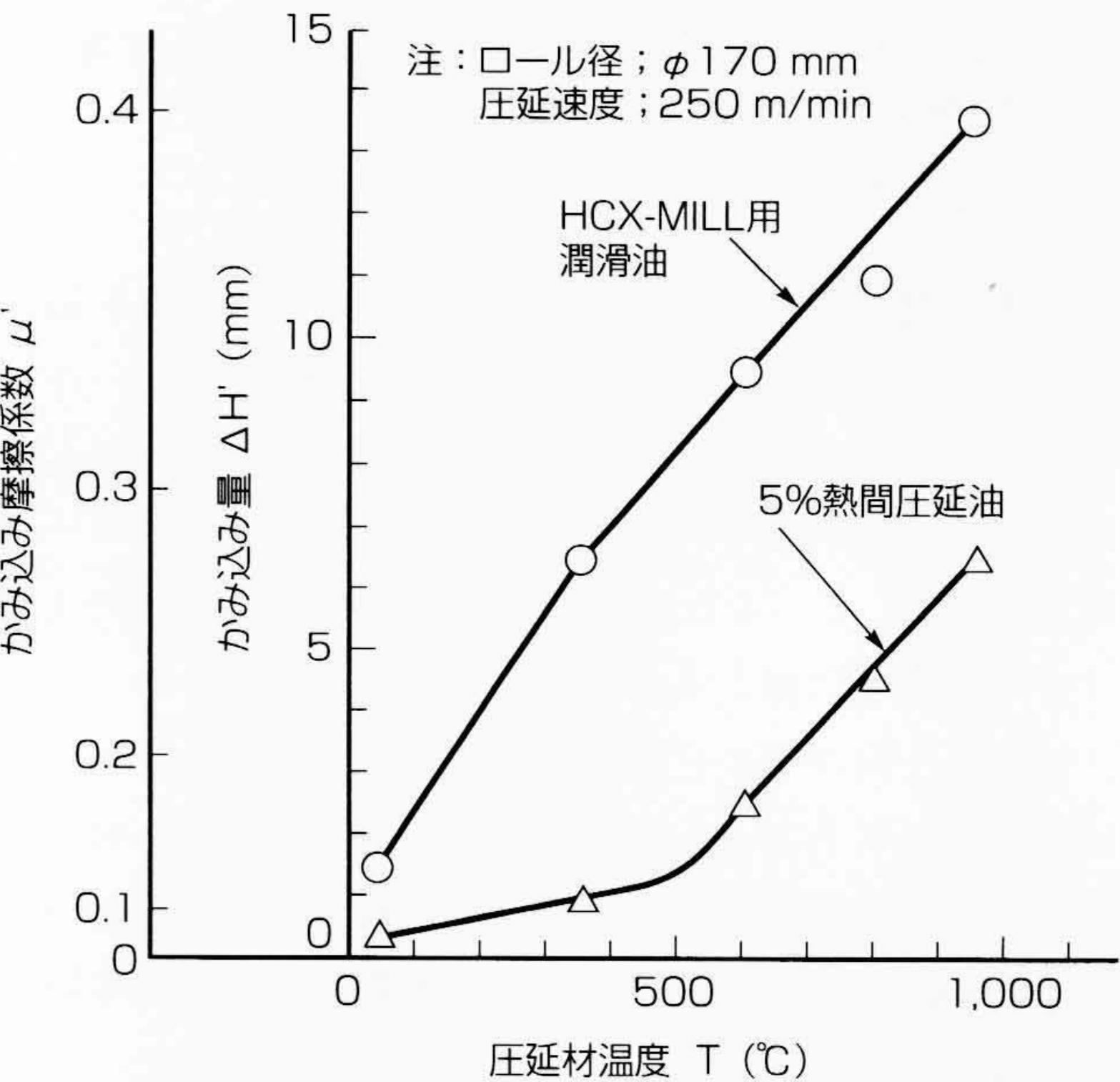


図9 かみ込み試験結果
HCX-MILL用潤滑油は低温領域では潤滑性を持ち、圧延材と接する高温領域では潤滑性を消失するので、圧延材の十分なかみ込みが可能である。

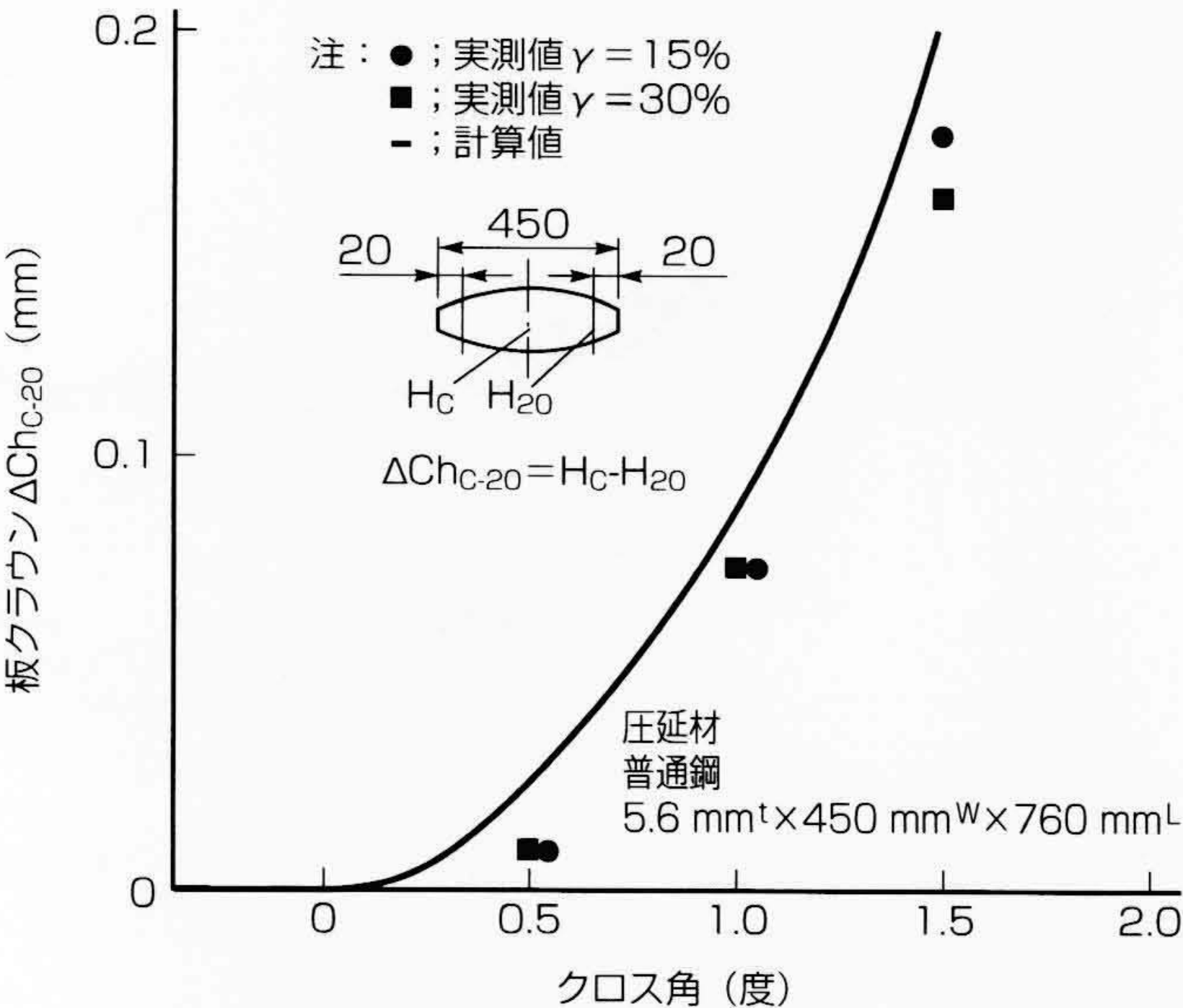
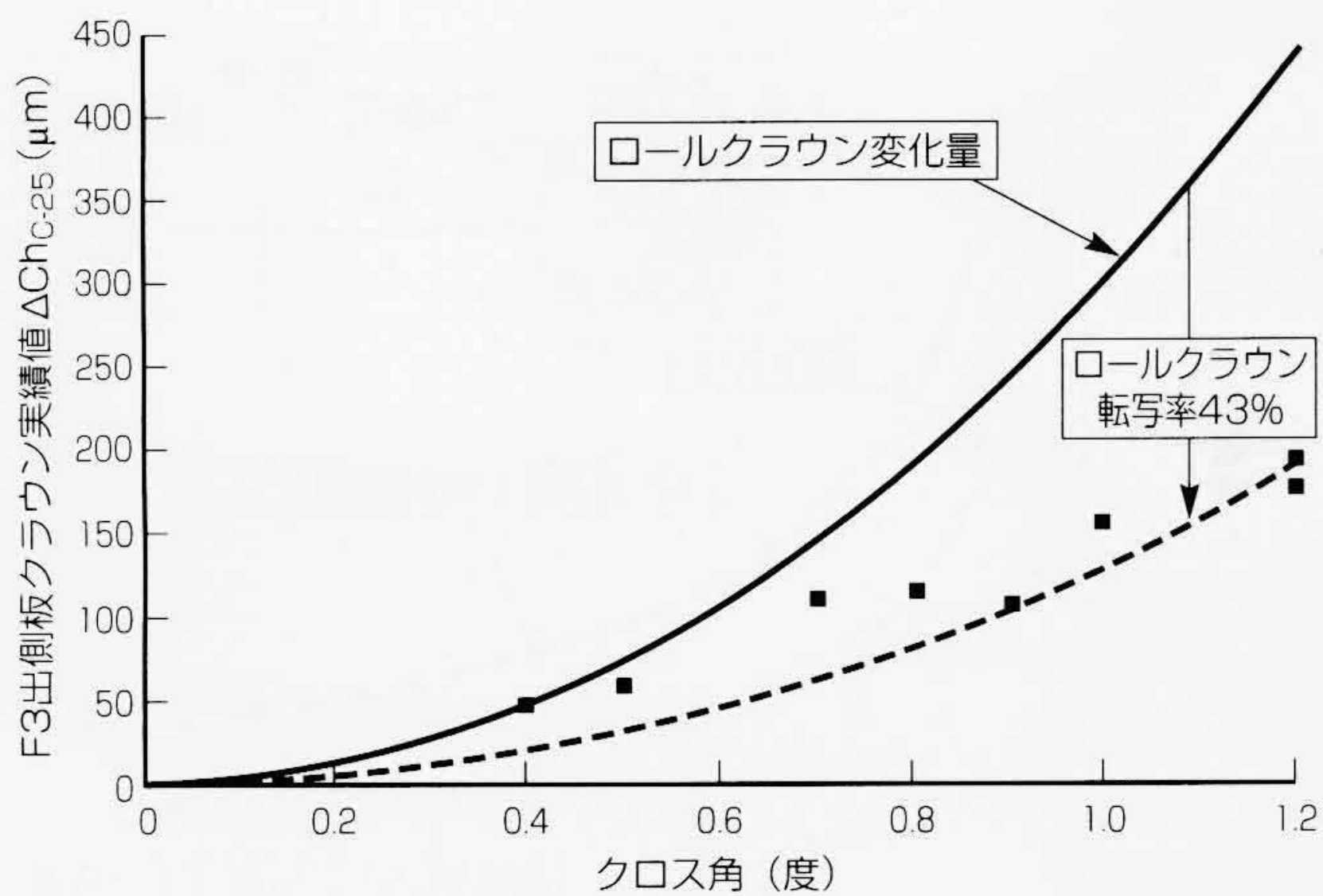
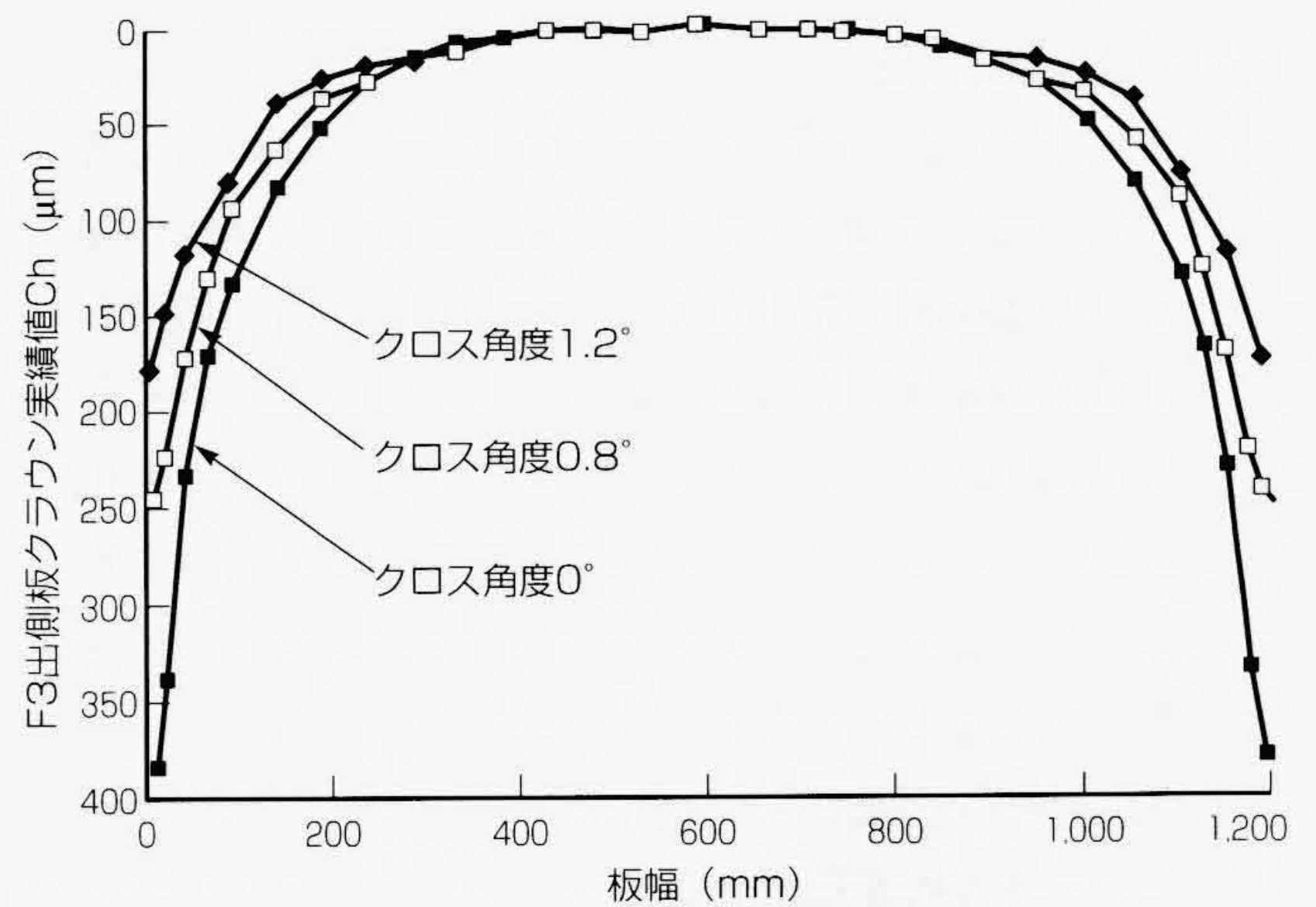


図10 シート圧延結果
作業ロールクロス角を変更することによって板クラウンの制御は可能である。



(a) 走間クロス角度変更圧延時のF3出側板クラウン実測値(25 mm点)



(b) 走間クロス角度変更圧延時のF3出側板クラウン実測値

図11 実機クロス角変更による板クラウン変化

実機でも作業ロールクロス角の変更により、板クラウンを制御することは可能である。

4.3.1 パイロットミルでのシート圧延

パイロットミルでのシート圧延試験結果を図10に示す。

シート圧延では板長さが760 mmと短いため、板クラウンは長手方向の伸び差に変換されやすく、したがって、クロス角度変更分のほぼ全部が板クラウンの変化量となって表れている。

4.3.2 F3クロス角変更によるF3出側の板クラウン変化

圧延中クロス角度を0度から1.2度まで変化させたときの板クラウンを図11に示す。ロールクラウン変化量に対する板クラウン変化量の割合は0.43であり、ロールクラウン変化量の43%が板クラウンへ転写されたことになる。これは、パイロットミルのシート圧延と異なり、前・後方張力が作用していることなどの要因によって、板ク

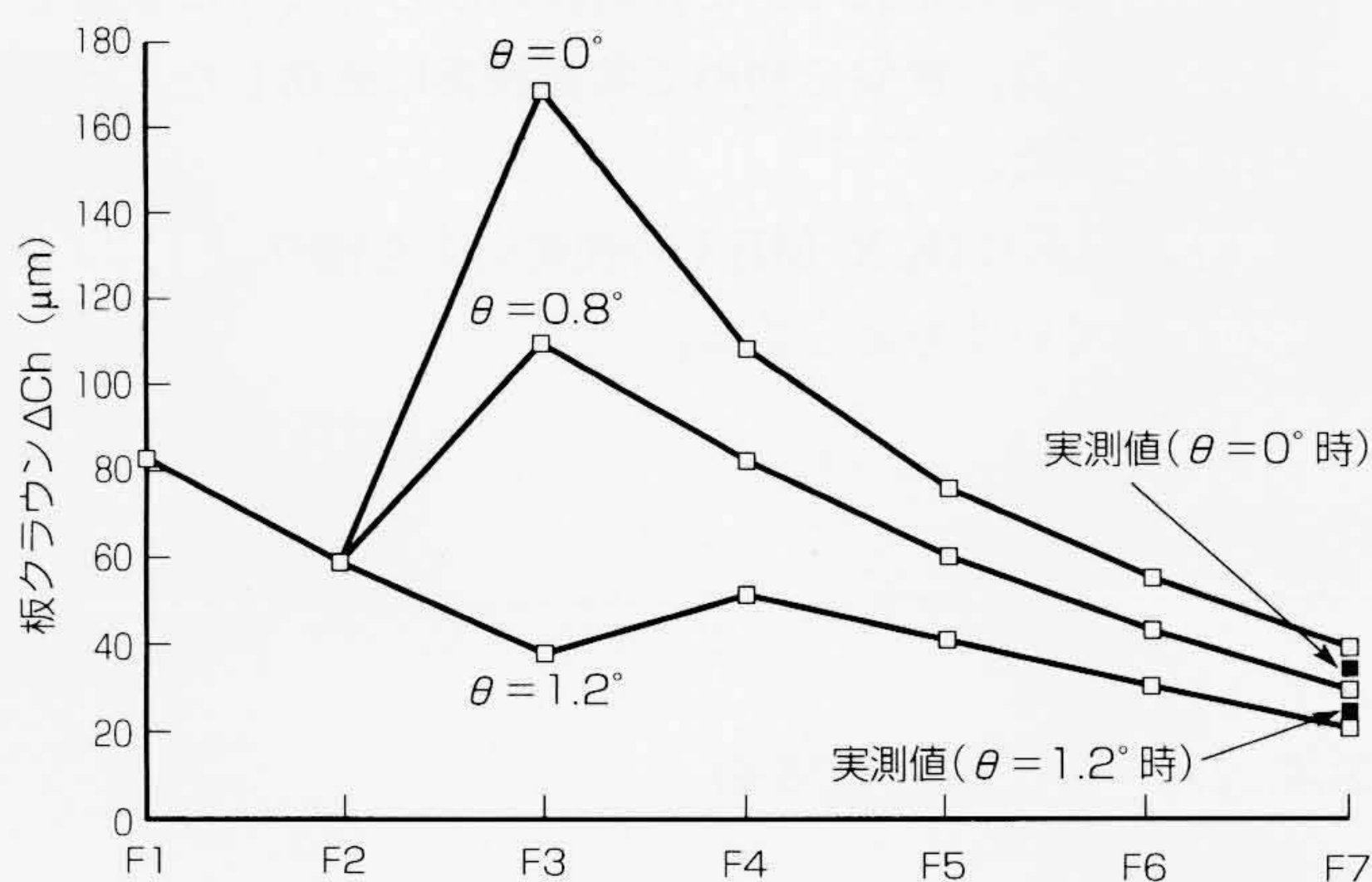
ラウン変化が拘束されたことによる。

4.3.3 F3クロス角度変更によるF7出側板クラウン変化量

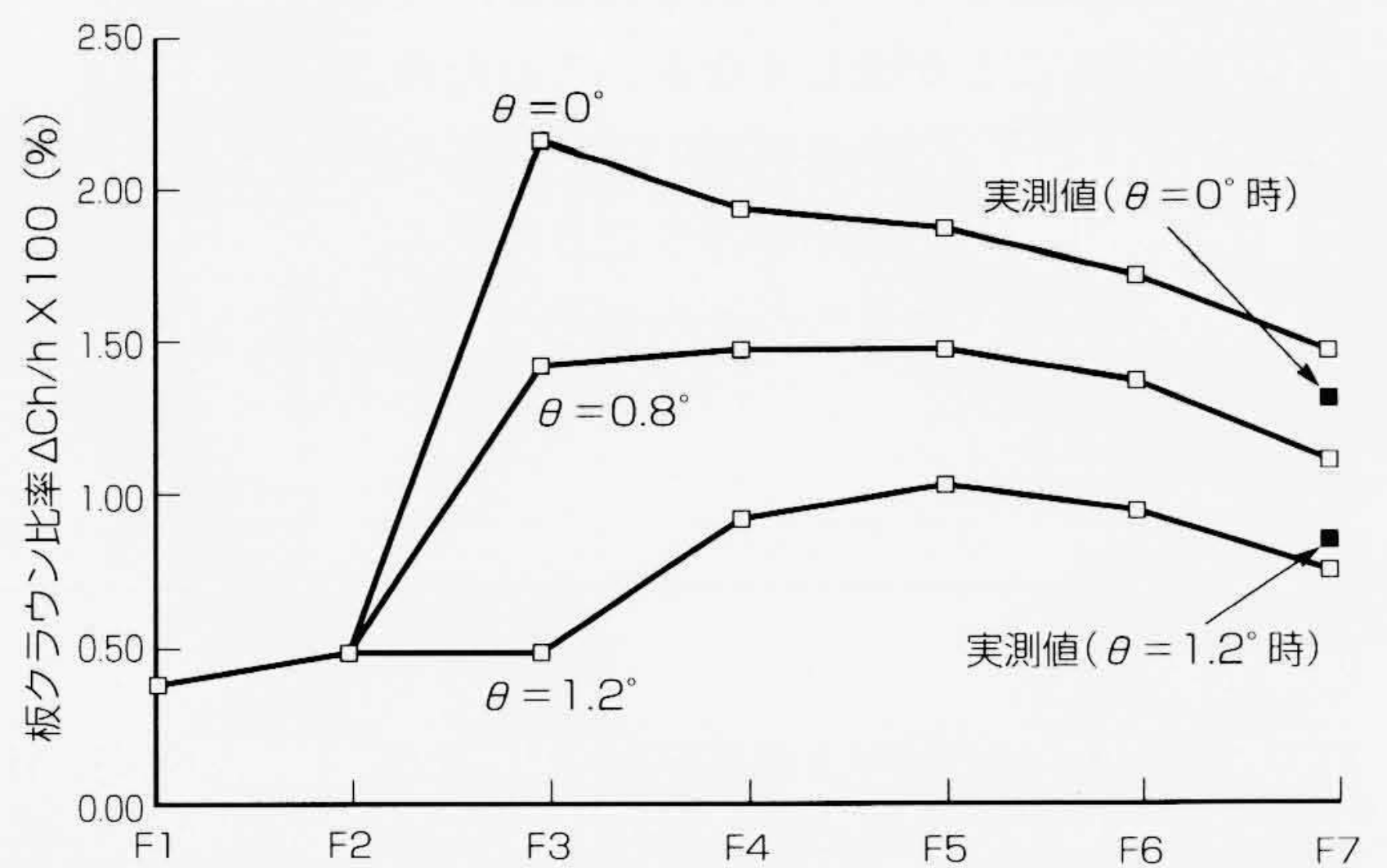
圧延中にF3のクロス角度だけを変化させ、F3のクロス角度以外の他スタンドでのすべてのシフト、ベンダなどの設定値を一定としたときのF7出側での板クラウン変化量を図12(a)に、板クラウン比率変化量を同図(b)にそれぞれ示す。

F3のクロス角度を0～1.2度まで変化させた結果、F7出側で板クラウンは12 μm、板クラウン比率は0.46%変化した。実機での実測値はシミュレーションによる予測値と良く一致している。

以上により、F3でクロス角を変更することによってF7出側の板クラウンを変更することができることを確認した。



(a) 実機 シミュレーションと板クラウン実測値



(b) 実機 シミュレーションと板クラウン比率実測値

図12 実機シミュレーションと板クラウン実測値、板クラウン比率実測値(F3走間クロス圧延時の三次元板クラウンシミュレーションの結果)

HCX-MILLでは圧延中のクロス角変更によるダイナミック板クラウン制御が短時間で容易にできる。

4.4 ミル振動特性

HCX-MILLでは作業ロールと補強ロール間の相対滑りのため、軸方向に滑りが発生する。この滑り速度が変化しなければ振動は発生しない。しかし、潤滑条件が悪く、摩擦力が大きくなると、ロール表面変形に基づく変形力と摩擦力のバランスによって滑り速度が大きく変化し、振動、いわゆるスティックスリップ現象が発生するようになる。これは、圧延荷重が大きく、また摩擦係数が大きくなると発生しやすいという傾向がある。

この振動は、作業ロールと補強ロール間の接触部のロール内部のせん断変形に大きく依存するものであり、実験および理論的に検討した結果、この振動発生限界は次式で表されることがわかった。

$$\mu \sqrt{p} = C_L \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 μ ：作業ロール～補強ロール間の摩擦係数

p ：作業ロール～補強ロール間の線圧(N/mm)

C_L ：潤滑油、特に油膜強度によって決まる定数

2種類の潤滑油での振動発生限界についての実験結果を図13に示す。冷間圧延用のソルブル油は低分子量系の合成エステルを含み、油膜強度が弱く、ミルの振動発生限界は低いところにある。一方、HCX-MILL用の潤滑油は振動発生限界は高く、少なくとも20,000 N/mmの線圧でも振動発生は見られず、 $C_L > 14$ を得、熱延前段の高荷重下でも振動発生を抑止できるものと考ええる。実機圧延でもミル振動の発生はなかった。

5 HCX-MILLの応用例

少スタンド数で必要な製品品質を造り込むミニミルのニーズが増大している。少スタンド数での高圧下圧延は設備費の削減などのメリットもあるが、一方では良好な板形状を得ることが難しくなる。このため、仕上後段スタンドには形状制御性の良いHC、UCミルなどを主として設け、形状の造り込みを行うことになる。

したがって、板クラウンの造り込みは前段スタンドに

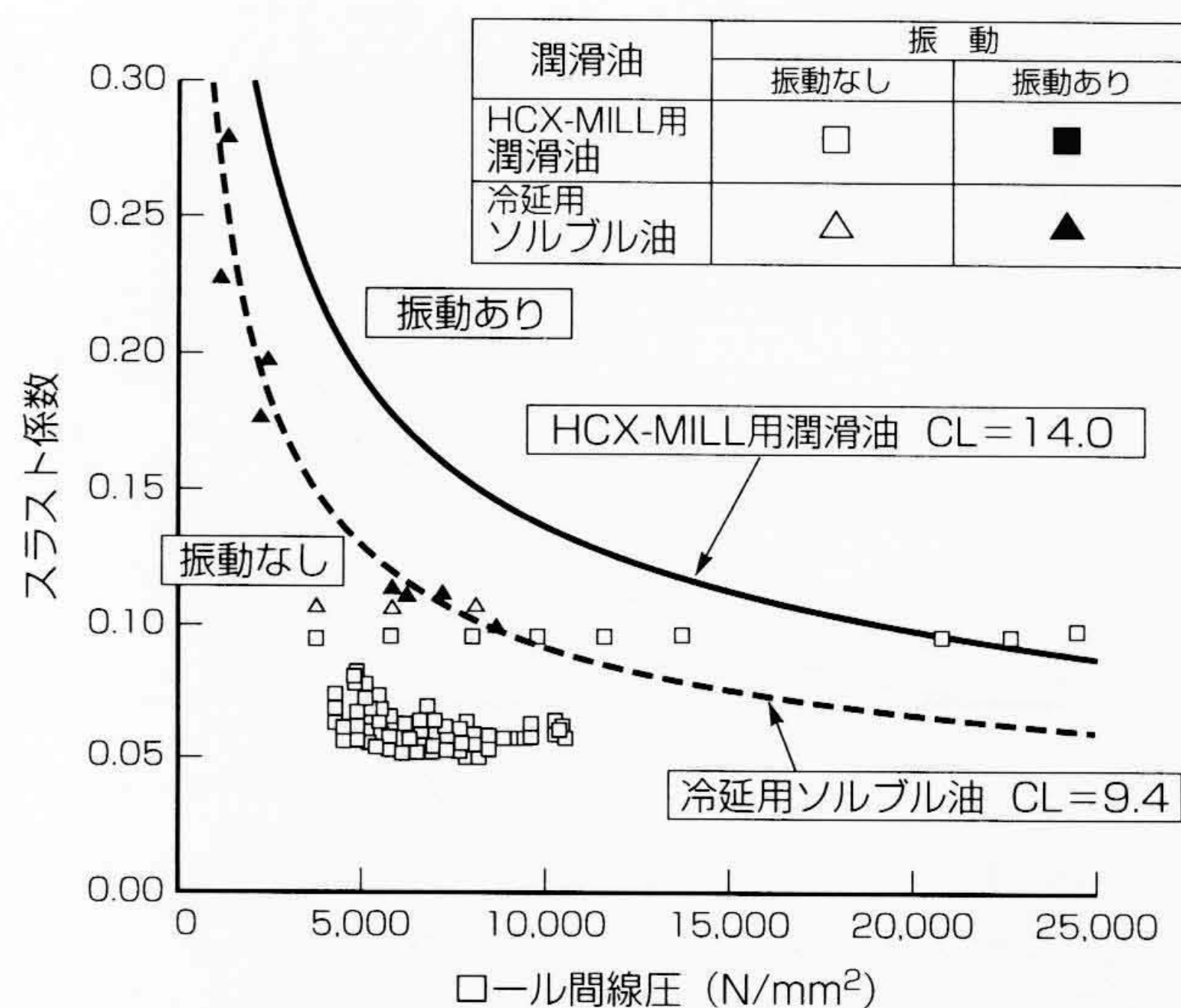


図13 ミル振動特性

HCX-MILL用の潤滑油は振動発生限界が高いため、熱延前段スタンドの高圧延荷重下でも振動発生は抑止できる。実機圧延でもミル振動の発生はなかった。

頼ることとなるので、熱間圧延仕上ミルの前段スタンドを主体に開発したHCX-MILLは、まさにミニミルの要求を満たす圧延機であると言える。

また、HCX-MILLは圧延中、自在にクロス角を変更して板クラウン・形状制御が可能であるため、後段スタンドにも適していることがわかった。さらに、作業ロールシフト機能を付与させたり、ロールシェーピングマシンと組み合わせることにより、理想的なスケジュールフリー圧延の実現を可能にするものである。

6 おわりに

ここでは作業ロールクロスミルに関して、これまで実現不可能と考えられてきた技術課題がどのように克服できたか、また、世界で初めて実機操業に成功したことについて述べた。

今後、さらにHCX-MILLの性能向上を図り、適用分野を拡大していく考えである。

参考文献

- 1) 梶原, 外: 生産効率と品質向上を目指す圧延設備の動向, 日立評論, 75, 6, 388~394(平5-6)
- 2) S.Nishibayashi, et al.: AISE Congress, Spt. (1985)