

(論文)

極薄ステンレス箔用KTミル

KT Mill for Ultra Thin Stainless Steel Foil



上杉憲一*
Kenichi UESUGI



長野啓太郎*
Keitaro NAGANO



前田恭史***(工博)
Dr. Yasushi MAEDA

Recently, the electronics industry is requiring ultra-thin stainless foils with even thinner gauges at higher qualities. Higher performance rolling-mills are required to meet these needs. KT Mill, Kobe Twelve-high Rolling Mill, is a rolling mill developed for improving foil flatness. The system design is optimized by theoretical calculations for work-roll size & mill structure; also by the simulation of actuators for achieving desired flatness. KT Mill is the most commonly used rolling mill in the world for ultra-thin stainless foils.

まえがき = 近年の電子機器のコンパクト化に伴い、圧延製品の薄物化や品質向上の要求がステンレス業界において年を追うごとに高くなっている。さらに、そうした要求を満足するために使用する圧延設備に対しても、必然的に厳しい性能が要求されてきている。

当社は、こうした要求にこたえるべく独自に開発した12段圧延設備の実機1号機を1984年に納入して以来、極薄ステンレス箔用冷間仕上げ圧延機のパイオニアとして常に業界をリードしてきた。現在、板厚0.03mm以下の極薄ステンレス箔を350mm幅以上の工業的規模で生産できる圧延設備は、筆者の調査によると世界で6社が20台の設備を納入している。その半数以上である11台を当社が納入しており、世界ナンバーワンの実績を誇っている。

極薄ステンレス箔用圧延設備において最も重要視されるのは良好な板平坦度が得られることである。一方、加工硬化の大きなステンレス材を効率的に圧延するためにはワークロールの小径化が必須となるが、小径ワークロールはロールたわみが発生しやすいため、良好な形状を得ることが難しく、ロールたわみを最小化できる構成の圧延設備が必要である。

これら極薄ステンレス箔圧延に対する要求を満足している圧延設備が当社の12段圧延設備である。また、新サイズの圧延設備を計画する場合には、実形状を予測するための形状シミュレータが必要である。当社では、これら圧延設備の設計に必須となる諸条件を理論的な解析技術を駆使して求め、さらに、実機からのフィードバックによって理論計算の精度を向上させ、ブラッシュアップしてきた。

本稿では、極薄ステンレス箔用圧延設備でナンバーワンの実績を確立している当社製ステンレス箔用12段圧延設備の特徴を理論計算の結果を踏まえて紹介する。

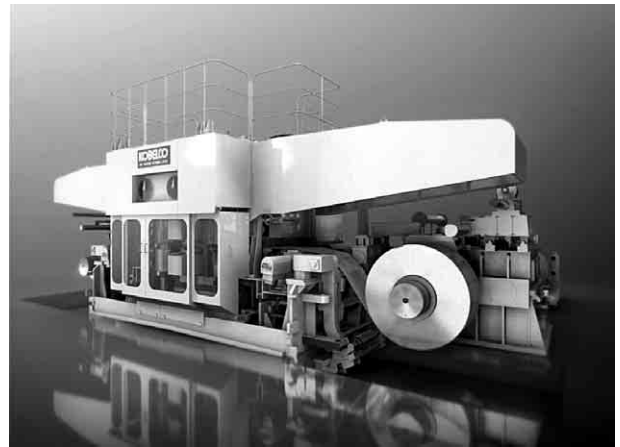


図1 最新のKTミル全体図
Fig. 1 General View of advanced KT mill

なお当社では、当社製ステンレス箔用12段圧延設備を、Kobe Twelve-High Millの頭文字をとりKTミルと呼んでいる。最新のKTミルの全体図を図1に示す。

1. ステンレス板および箔用圧延設備の歴史

ステンレス板の生産は、1950年代まではシートを4段圧延機で圧延するのが一般的であった。しかしながら、ステンレス鋼はアルミ、銅、普通鋼、Ni合金など素材として一般的に使用されているその他の材料と比較すると最も硬度の高い材料であり、1パスあたりの圧下率が大きく取れなかったため、生産性の向上が課題であった。

この課題に対し、小径のワークロールを使用する20段圧延設備が導入され、ステンレス板の生産性は飛躍的に向上した。当社は20段圧延設備を1970年から製作・納入しており、当社製20段圧延設備をKobe Super Twenty-High Millの頭文字をとりKSTミルと呼んでいる。

1980年代に入り、より薄くかつ高精度の平坦度を求め

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 重機械部 **技術開発本部 材料研究所

る電子材料などの新規の用途が伸長し始め、薄物対応、高精度の板平坦度（以下、板形状という）の達成が重要なテーマとなった。当社は、この要求にこたえるべく20段圧延設備の特質を生かし、かつアルミ箔圧延設備で培った数々の薄物対応技術を盛り込んだ極薄箔用12段圧延設備（KTミル）を開発した。実機1号機は1984年に納入している。

KTミル1号機を納入して以来、当社は板厚0.05mm以下の極薄ステンレス箔圧延設備業界では常に開拓者であり、とくに最小板厚0.01mmの仕様では当社の独壇場となっている。

2. 極薄箔圧延用ワークロールの選定

前述のように、ステンレスのような高硬度材では、圧延荷重の制約から小径ワークロールが必要である。最適なワークロール径を決定するために従来、Tong & Sachsの理論¹⁾（ロール変形はHitchcockの式）やStoneの式などが用いられてきた。しかし、実際の箔圧延ではこの圧下限界以下の圧延も実現しており、実際の箔圧延と対比するとそれらの計算精度は十分といえるものではなかった。

そこで、極薄ステンレス箔圧延に最適なワークロール径を決定するためにABAQUS/Standardを用いた弾塑性FEM解析を行った。

解析対象領域は板厚中心線を境界とする上下対称とし、板厚に比べて板幅が十分に広いことから2次元平面ひずみ応力場問題として扱った。境界条件および物性値は表1に示すとおりとし、ワークロール径を30mmから360mmまで変化させて圧延荷重を求めた。

30mmおよび60mmのワークロールで21.0μmから20.6μmまで（2%）圧下させた場合の圧延荷重および板厚分布を図2に示す。板厚分布からわかるように、塑性変形はロールバイトの入側および出側で発生しており、圧延バイト出側近傍では板厚方向の弾性復元による板厚増加も見られる。さらに、ロールバイトの中央では板厚が減少しない弾性領域が発生しており、この部分では材料とロールの相対すべりが発生しない固着領域であるため、応力分布は通常のフリクションヒルから放物線型のヘルツ応力に近いことがわかる。

このように、非円弧変形によりロールバイト内部で板厚減少が起こらない弾性域の発生は、ワークロール径に対して圧下量が小さい場合にしばしば見られる現象であ

る²⁾。

図3に、30mmのワークロールで21.0μmから20.6μmまで（2%）圧下させた場合の材料変形を、剛塑性FEM³⁾（ロール変形はHitchcockの偏平変形）によって解析した結果と弾塑性FEMによって解析した結果を示す。両者を比較すると、弾塑性FEM解析では相対すべりが発生しないためフリクションヒルが滑らかになるとともに、ロールバイト中央で板厚が減少しない非円弧変形により接触長さが長くなっていることがわかる。

表2は、剛塑性FEM（ワークロールはHitchcock変形）および弾塑性FEMで計算した線荷重を示す。30mmのワークロールでは、弾塑性FEM解析による線荷重は剛塑性FEM解析に比べて若干高くなっている。これは、弾塑性解析ではロールバイト内で板厚減少が起こらない領域（非円弧変形）で接触弧長が増加しているためである。

60mmのワークロールの場合は、Hitchcockの偏平

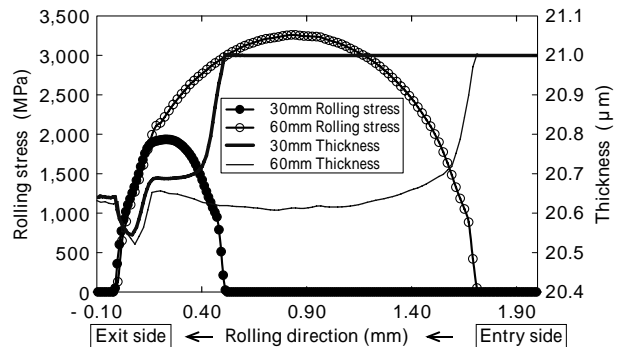


図2 弾塑性FEMによる圧延圧力と板厚分布の計算結果
Fig. 2 Rolling stress and thickness in the roll bite by elastic-plastic FEM analysis

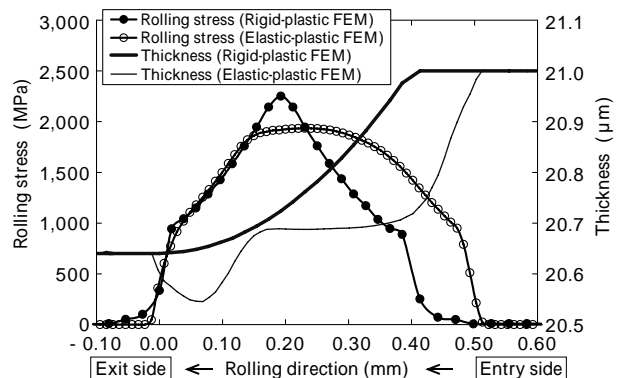


図3 剛塑性および弾塑性FEM解析による圧延圧力と板厚分布の比較
Fig. 3 Rolling stress and thickness in roll bite by rigid-plastic and elastic-plastic FEM analysis

表1 FEM計算に用いた計算条件
Table 1 Parameters for FEM analysis

Roll diameter (mm)	30 ~ 360
Friction coefficient by coulomb's law	0.06
Front and back tension (MPa)	340
Initial thickness (μm)	21
Yield stress (MPa)	1,040
Young's modulus (GPa)	205.8
Poisson's ratio	0.3

表2 弾塑性FEMと剛塑性FEMによる圧延線荷重の比較
Table 2 Comparison between rigid-plastic and elastic-plastic FEM analysis for unit rolling stress by 30mm and 60mm work roll

Work roll diameter (mm)	Rigid-plastic FEM Unit rolling stress (N/mm)	Elastic-plastic FEM Unit rolling stress (N/mm)
30	580	759
60	N.A.	4,322

変形を仮定した剛塑性FEMでは計算が不可能であった。この原因は、Hitchcockの偏平変形は、ワークロールが円弧変形することを前提としているため(図2に示すような非円弧変形が起こらないため)ロールバイト全面でフリクションヒルが発生し、圧延圧力が過大に計算される。さらにその過大な圧延圧力によりワークロールの偏平変形が著しく大きく計算され、計算が発散する結果となった。この現象がまさに、Tong & Sachsの理論による最小限界板厚計算が発散するメカニズムである。大径ロールあるいは強圧下状態では非円弧変形領域が長くなり、その部分の面圧が下がることによって圧延荷重自体が低下するため、接触弧長はHitchcockの偏平変形式による計算値より短くなると考えられる。

上述のように、硬質材の箔圧延の荷重予測をする際、接触変形や接触弧長、フリクションカーブ(応力分布)を従来式では十分に評価することができなかった。このため、最適ワークロール径は経験的に決めるしか方法がなかったが、本手法により理論計算が可能となった。

本手法を用いて表1の条件で種々のワークロール径での出側板厚と板幅500mmの場合の圧延荷重の関係、および20 μ mまで1パスで圧延を行った場合の圧延荷重の計算結果を図4に示す。30mmから360mmまで、ワークロール径の増加に伴い、圧延荷重が大幅に増加していることがわかる。

圧延荷重の増加に伴って圧延設備の耐荷重性を向上させることは、圧延設備の構成要素における限界(各種ロール、ベアリングの強度など)と経済性も考慮して判断すべきである。その一例としてワークロールの耐荷重性を以下に考察した。図5は、21.0 μ mから20.6 μ m(圧下率2%)まで60mmのワークロールで圧下した場合と120mmワークロールで圧下した場合のワークロール内部のMises応力の分布を示す。120mmの場合には、2%の圧下率でもワークロールのMises応力は部分的に3,000MPaを超え、通常のワークロールの使用限界を超えてしまうため圧延設備として構成できなくなる。

また、実用上は有限のミル剛性の中で圧延を行うこととなり、そのためには材料の塑性定数が問題となる。図6にワークロール径と塑性定数の関係を示す。ワークロール径が大きくなると急激に塑性定数が増加する。このため、ワークロール径が大径化するにしたいが、有限の耐荷重では1パスあたりの圧下量も小さくなってしまふ。例えば、厚さ21 μ m、幅500mmのステンレス箔を980kN(100tonf)の圧延荷重で圧下できる量は、ワークロール径が30mmでは4.2 μ m、60mmでは0.7 μ m、120mmでは0.08 μ m、240mmでは0.01 μ m、360mmに至っては0.006 μ mとなる。このため大径のワークロールで圧延すると作業効率が著しく低下する。さらに、21 μ m厚さからのような極薄箔を圧延する場合には、圧延材料の板幅外でワークロール同士が接触するいわゆるワークロールキス荷重が発生するため、実際の圧延では上記解析結果よりもさらに圧下できる量は小さくなる。

上記を整理すると、最適ワークロール径の決定は、耐荷重としての圧延設備(各種ロール、ベアリングの強度

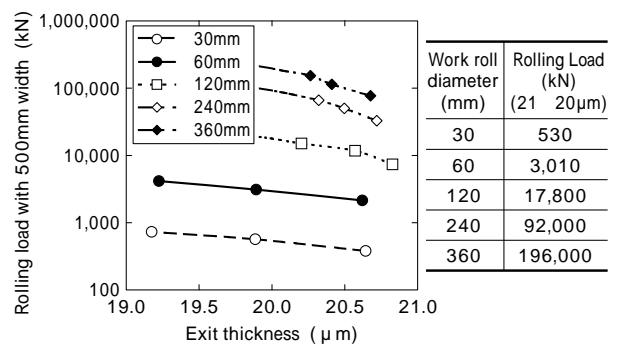


図4 種々のワークロール径での出側板厚と圧延荷重の関係
Fig. 4 Relationship between exit thickness and rolling load by various kind of work roll diameter

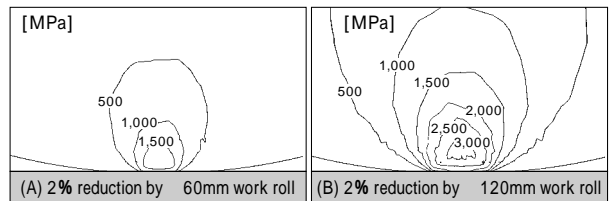


図5 60mmと120mmワークロールでの2%圧下におけるロール内部のミーゼス応力分布
Fig. 5 Distribution of Mises stress in roll for 2% reduction by 60mm and 120mm work roll

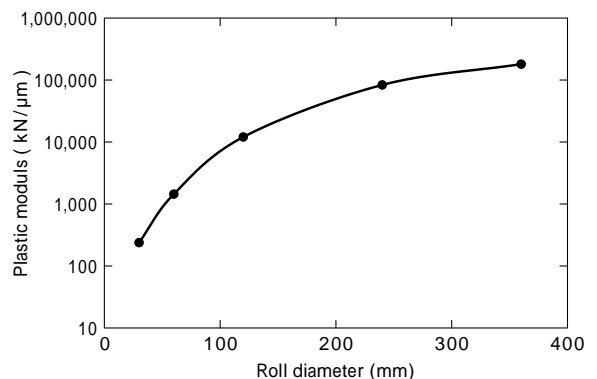


図6 塑性定数とロール径の関係
Fig. 6 Relationship between work roll diameter and plastic modulus

など)の限界と塑性定数の増加による1パス圧下量の限界により制約を受けることとなる。これらにより、通常の圧延条件を考えると20 μ m程度の箔圧延では、30mm程度のワークロールが必要となってくる。また、60mmのワークロールではスキンプス程度の軽圧下圧延しかできず、120mm、240mm、360mmのワークロールは使用することができない。

実際の圧延現場においても、50 μ m以下のステンレス箔を圧延するためには60mm以下のワークロールが使用され、20 μ m程度では30~40mmのワークロールが使われる場合が多い。

3. 縦型ミルとクラスタ型ミル

2章で述べたように、極薄ステンレス箔圧延においては60mm以下といった非常に小径のワークロールを使用する必要がある。しかしながら、小径ワークロールはロールたわみが発生しやすいことから良好な形状を得ることが難しい。一方で、極薄ステンレス箔用圧延設備にお

いて最も重要視されるのは良好な板形状の確保である。

すなわち、圧延設備としては、小径のワークロールのロールたわみを最小化できる圧延設備を構成する必要がある。このため、ワークロールを別のロールで保持する方式が採用されている。ロールを保持する方法としては図7に示すように、ロールを垂直方向に配列した縦型ミル(6段ミル)と、ワークロールに対して中間ロールと分割式のバックアップロールをクラスタ(ブドウの房)状に配置したクラスタ型ミル(12段ミル, 20段ミル)がある。

同一径のワークロールを使用した場合の縦型ミル(6段ミル)とクラスタ型ミル(KTミル)のワークロールたわみを評価するため、表3に示すサイズ⁴⁾でのたわみ変形をFEMによって解析を行った。なお、縦型ミルでは、小径ワークロールの位置を安定化させる目的でワークロールを軸心から圧延入側または出側にオフセットし

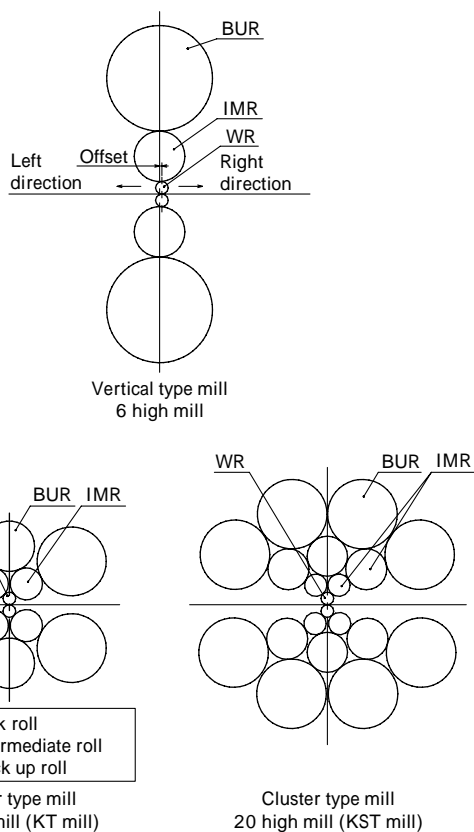


図7 縦型ミルとクラスタ型ミル

Fig. 7 Vertical type mill and cluster type mill

表3 FEM解析に用いた各ロールのサイズ
Table 3 Each roll sizes for FEM analyses

	6 high mill	12 high mill (KT mill)
Roll barrel length (mm)	600	600
Work roll diameter (mm)	55	55
Intermediate roll diameter (mm)	220	140
Upper back-up roll diameter (mm)	460	220
Side back-up roll diameter (mm)	-	300
Work roll offset (mm)	10	-

た配置がとられることも考慮して解析した。計算では、板幅 550mm, 入側板厚 0.25mm, 圧下率 20%, 入出側張力 245MPa とし、全張力差が板幅方向に均一に作用するとしてワークロールに作用する水平方向の力を接線力として与えた。また、圧延荷重は 980KN (100tonf) を幅方向に均一荷重として与え、たわみ量(メカニカルクラウン)を求めた。中間ロールからワークロールに作用する水平力による水平方向のたわみは、ワークロールを端部で固定し(水平・垂直方向変位 = 0), 中間ロールの回転によって発生するロール間摩擦力を水平力として与えることによって計算した。

なお、6段ミルの場合、水平たわみが発生すると圧延方向によってたわみ量が異なるため、ワークロールオフセット方向を図7の方向として右行の場合と左行の場合の両者を計算した。また、中間ロールの回転による水平力は摩擦係数に依存するため、ロール間の摩擦係数はクーロン則を用いて $\mu = 0.1$ とした。

この解析の垂直方向たわみ(ロールバイトの変位)の計算結果を図8に、水平たわみ(入出側方向への変位)の計算結果を図9に示す。なお、それぞれのたわみ量は、ロール幅中心を基準(ゼロ)として表す。

大径バックアップロールを有している6段圧延機でも垂直方向たわみは 0.023mm 程度発生しているが、12段ミル(KTミル)はバックアップロール径が小径であるにもかかわらず垂直方向たわみは 0.019mm と同程度である。これは、KTミルのバックアップロールが分割式であり、分割ロール間にあるサドルで支持されていること

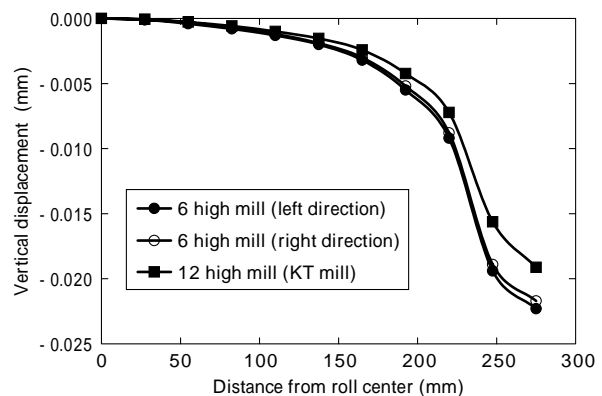


図8 6段圧延機と12段圧延機のロールバイトの垂直方向変位
Fig. 8 Vertical displacements of roll at 6 high and 12 high mill

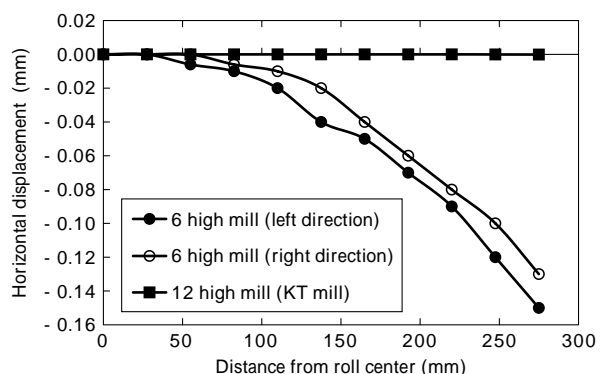


図9 6段圧延機と12段圧延機のロールバイトの水平方向変位
Fig. 9 Horizontal displacements of roll at 6 high and 12 high mill

と中間ロールおよびバックアップロールの小径化により、ロール偏平変形が小さくなったことによるものである。

他方、水平方向たわみは、6段ミルでは0.15mmと大きな値を示しているのに対して、KTミルではほとんど見られない。これは、KTミルでは、バックアップロール間にあるサドルで板幅方向に複数点で支持されていることと、ワークロールが前後から中間ロールにより保持されている効果である。大きな水平たわみが発生するとステンレス箔を圧下する部位が板幅方向で変化するため、板形状に影響を及ぼすことが指摘されている。

このため、小径6段ミルでは圧延機の片側にワークロールの水平たわみを防止するサポートロールを設置するだけでなく、ワークロールのオフセット制御や水平ベнда制御で水平たわみの制御をも実施している。しかしながら、このような制御を用いても、小径6段ミルでは板幅の0.1倍以上のワークロール径が必要と報告されている⁴⁾。したがって、6段ミルで例えば30mmのワークロールを使用する場合の最大板幅は300mmとなってしまう、幅狭なため生産性が悪く工業的規模での生産機としては適したものとはいえない。

以上により、圧延荷重制約により小径ワークロールを使用する必要のある0.05mm以下のステンレス箔の圧延では通常、縦型の圧延機ではなくクラスタ型の12段、20段ミルが使用されている。KTミル(12段ミル)では、板幅の0.04倍近くのワークロール径でも使用することができ、700mm幅近くのステンレス箔を30mm程度のワークロールで圧延している。

4. 12段ミルと20段ミル

KTミル(12段ミル)は極薄ステンレス箔に必要な良好な板形状を得るために開発されたミルである。本章では、KTミルの主な形状修正アクチュエータであるクラウンコントロール装置とラテラルアジャスト装置の効果を20段ミルと比較し考察する。

KTミルの形状修正アクチュエータを図10に示す。上両側バックアップロールにクラウンコントロール装置、上下中間ロールにラテラル調整装置、上ハウジングにテイルティング装置があり、さらに、クラウンコントロールを補い板幅全体のクラウン量を調整する目的で下両側バックアップロールに支持ロール偏心装置がある。また、板厚制御用のアクチュエータとして下中央のバックアップロールの下部にウエッジ式油圧下装置が具備されている。

4.1 バックアップロールによる形状制御(クラウンコントロール装置の効果)

クラスタ型ミルにおいて、バックアップロールのたわみ制御を行うことによって板の形状を制御する代表的な方式がクラウンコントロールである。以下に、KTミル(12段ミル)のクラウンコントロールとKSTミル(20段ミル)のクラウンコントロールの効果を比較する。

KSTミルのクラウンコントロールは、KTミルと同じく上両側のバックアップロールに具備されている。クラ

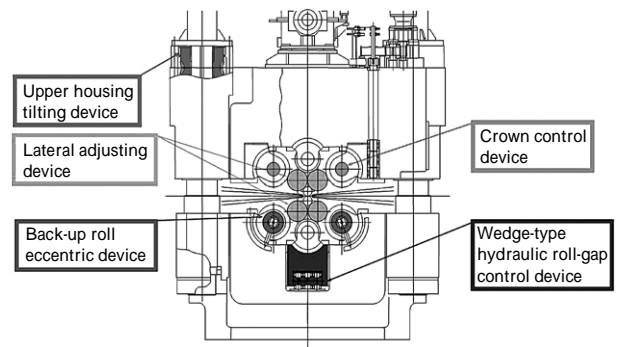


図10 KT 12 段ミル板厚・形状制御用アクチュエータ配置
Fig.10 KT 12 High mill thickness and flatness actuator arrangement

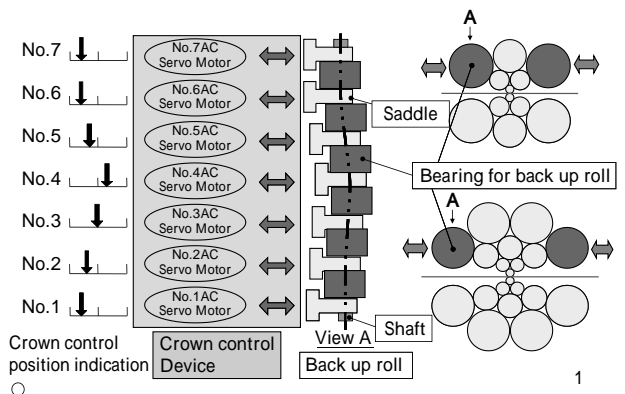


図11 クラウン調整装置
Fig.11 Crown control device

ウンコントロール装置は、図11に示すように、ベアリングとサドルで構成された分割型バックアップロールのサドルをACサーボモータにより個別に押し出し、バックアップロールに曲げ力を加える方式である。この仕組みによりロールの曲げ曲線の選択範囲が極めて広く、クラウンコントロールに有効なアクチュエータとなっている。とくに、圧延開始時の加速中のサーマルクラウンの形状修正などに有効である。

図12に示すように、KTミル(12段ミル)のクラウンコントロールの効果は、バックアップロールから中間ロールワークロールを経由して圧延材に伝達するのに対し、KSTミル(20段ミル)の場合は、バックアップロールから第2中間ロール第1中間ロールワークロールを経由して圧延材に伝達される。

KTミル(12段ミル)は、KSTミル(20段ミル)に比べてロール間の接触点が少なくロール偏平の影響を受けにくいいため、クラウン調整装置の効果が大きくなり形状制御性に優れている⁵⁾。

ステンレス箔圧延におけるKTミルとKSTミルのクラウンコントロールによる効果の比較例を図13に示す。図13の縦軸は、中央部のクラウンコントロールを単位量(1mm)作動させたときの板の形状に対する影響度(I-Unit)を示す⁶⁾。図13のKTミルの中伸びは約220I-Unitであるのに対し、KSTミルの中伸びは約90I-Unitとなり、KTミルのクラウンコントロールの効果はKSTミルに比べて約2.5倍大きい。

当社は12段ミル・20段ミルにおける形状制御性を評価するため形状シミュレータ⁷⁾を構築してきた。形状シミ

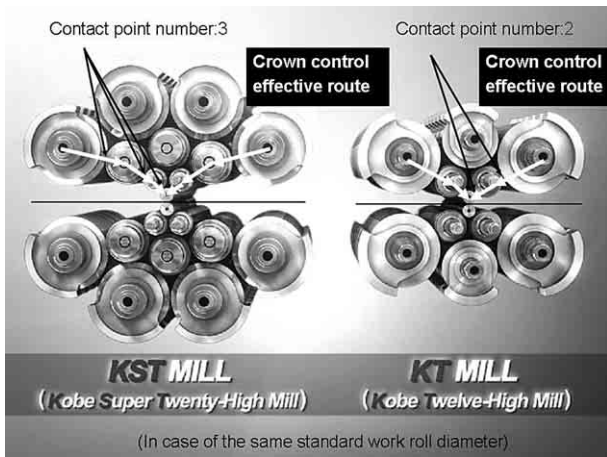


図12 KT ミルと KST ミルのロールアレンジメント比較
Fig.12 Comparison of roll arrangement between KT mill and KST mill

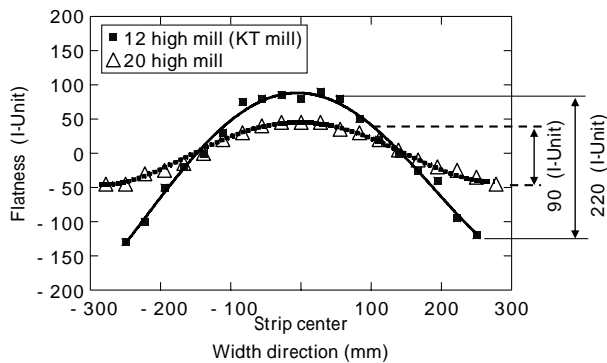


図13 KT ミル・KST ミル板中央のクラウン調整による形状影響係数比較 (WR = 40mm)
Fig.13 Comparison of center crown control flatness effect between KT mill and KST mill (WR = 40mm)

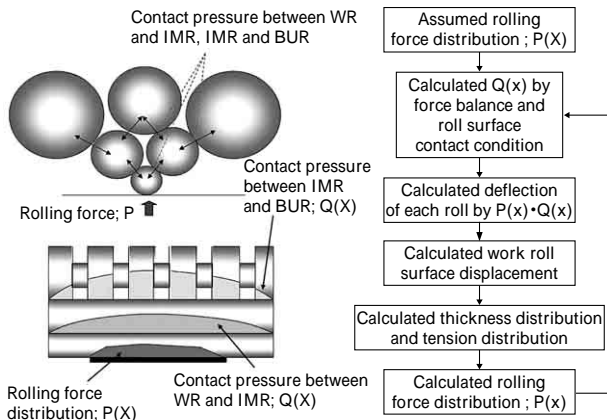


図14 KT ミルロール変形・材料変形モデル
Fig.14 KT mill roll deflection and strip deflection model

シミュレータは図14に示すようにロール変形・材料変形モデルに基づき、力の釣合いとロール表面の適合条件から各ロールのたわみ量を計算し、ワークロールの表面変位を求め形状計算を行っている。

本形状シミュレータを用いた予測形状からも KT ミルと KST ミルのクラウンコントロールの効果の差異が裏づけられている。

4.2 中間ロールによる形状制御 (ラテラル調整装置の効果)

中間ロールによる形状制御として、KT ミルと KST ミ

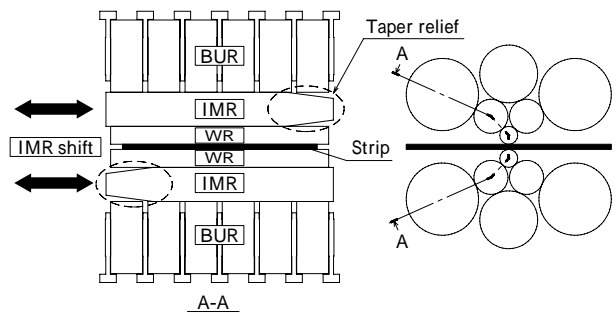


図15 KT ミル ラテラル調整装置
Fig.15 KT mill lateral adjusting device

ルは、図15に示すように軸端部にテーパリリーフを設け、軸方向に移動させることによりワークロールおよびバックアップロールとの面圧分布を変化させ、ロールたわみ曲線を制御するラテラル調整 (中間ロールシフト) 装置を具備している。

このラテラル調整装置は高トルク油圧モータにより駆動され、力の伝達経路にボールねじを採用してしゅう動抵抗を低減した機械効率の高い機構としている。同じ標準ワークロール径の12段ミル (KT ミル) と20段ミル (KST ミル) を比較すると、図12に示すように20段ミルの第1中間ロール径よりKTミルの中間ロール径の方が大きいため、ラテラル調整装置自体をサイズアップでき、とくに負荷容量の大きなスラストベアリングを使用することができるため、KTミルは20段ミルに比べラテラルシフト力を約2倍大きくすることができる。その結果、KTミルの中間ロールの移動速度は20段ミルの中間ロールの移動速度より早く、形状修正をより速やかに行うことができる。

むすび = 極薄ステンレス箔を対象に、最適ワークロール径の選定に関する理論的考察を行った。また、ワークロールたわみの計算を行って、KTミル (クラスタ型の12段ミル) と他形式ミル (縦型の6段ミル) と比較し、さらに、形状制御能力を20段ミルと比較した。これらの結果を整理すると以下となる。

- 1) 極薄ステンレス箔圧延用の最適ワークロール径を弾塑性FEMにより解析し、従来方式より精度よく決定することができた。また、最適ワークロール径の決定には、耐荷重としての圧延設備の限界と1パス圧下量の限界による制約を受けることが明らかになった。
- 2) クラスタ型ミル (12段ミル) と縦型ミル (6段ミル) のワークロールたわみをFEMによって解析した結果、垂直たわみは両者ほぼ同等であるが、水平たわみは、12段ミルではほとんど見られないのに対して6段ミルでは0.15mmと大きいことが判明した。このため、極薄ステンレス箔圧延には、縦型ミル (6段ミル) よりもクラスタ型ミル (12段ミル、20段ミル) の方が適していると考えられる。
- 3) クラスタ型ミルであるKTミル (12段ミル) と20段ミルの形状制御能力を比較した結果、KTミルの形状制御能力は20段ミルよりも優れており、形状制

御性が重要な極薄ステンレス箔用ミルとしては20段ミルよりもKTミル(12段ミル)の方が適していると考えられる。

理論的な解析と実機によるフィードバック結果を踏まえて開発したKTミルは、極薄箔ステンレス圧延に最も相応しい品質と高性能を有する圧延設備としてユーザから高い評価を得ており、業界ナンバーワンの地位を確立した。

今後とも、極薄箔ステンレスの生産にはさらなる薄肉化と品質の向上が求められると同時に、対環境、省エネ対策が顧客における重要なテーマになると考えられる。

当社は、こうした顧客のニーズを的確・迅速に取入れた圧延機の開発を進め、業界をリードしていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会：特別報告書 No.36 板圧延の理論と実際，p.43-45.
- 2) 明石 透ほか：第58回塑性加工連合講演会，(2007) p.151.
- 3) 豊島史郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.48, No.1 (1998) p.31.
- 4) 笠井俊作ほか：日立評論，Vol.78, No.6 (1996-6) p.20.
- 5) 鈴木 弘：圧延百話，(2000) p.122，養賢堂．
- 6) 上杉憲一：METEC InSteelCon, 2007 (2007) p.141.
- 7) 上杉憲一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.58, No.2(2008) p.14.