

薄板圧延におけるスリーブ付分割バックアップロール (MC ロール) の形状制御特性

Shape Controllability of MC Roll for Strip Rolling

広島製作所 橋本正一^{*1} 松田 裕^{*2}
技術本部 梶原哲雄^{*3}

近年、冷間圧延製品の薄板化、広幅化に伴い、複合形状制御能力を持つ圧延機が望まれている。当社の高い複合形状制御能力を持つ多段クラスタ圧延機 (CR ミル) の原理を生かしつつ、構造を更にシンプル、堅固にしたスリーブ付分割バックアップロール (MC ロール) を考案した。本報では、この MC ロールが、従来の形状制御圧延機に比べ格段に優秀な形状制御能力を保有していることを示す。さらに、今後の実機化について最も重要となるスリーブの強度解析を行い、全く問題のないことを述べる。

These days, there is a strong demand for a cold strip mill capable of higher degree of shape control such as control of combined buckling which is necessary as cold strip has tended to become thinner and wider. MHI has already developed the Cluster Mill (CR Mill) capable of high shape control especially of thin stainless steel, and now MHI has designed the divided type back-up-roll with sleeve (MC Roll) whose mechanism is much simpler than the CR Mill, and whose shape control is as high as the CR Mill. This report describes the MC Roll shape control mechanism, and its better shape control than other shape control mills. It also demonstrates that the sleeve of the MC Roll has sufficient fatigue strength even under severe loading and deformation using strength analysis.

1. ま え が き

近年、冷間圧延製品は薄板化、広幅化がますます指向されており、またワークロール径も小径化の傾向にある。これに伴って圧延された板は複合伸びの形状不良となりやすくなるため、高い複合形状制御能力を持つ圧延機が望まれている。

このような業界ニーズに対応するため、当社は既に小径ワークロールで、複合伸びに対する高い形状制御能力を持つ多段クラスタ圧延機 (CR ミル) を開発しており、ステンレス極薄圧延に代表される硬質特殊鋼向けリバースミルとしての高い評価を得、特殊鋼圧延機のシェアを急速に拡大し、他形式のクラスタ圧延機を駆逐しつつある⁽¹⁾。

さらには、熱間圧延機で定評のある当社 PC ミルを冷間タンデム圧延機の前段に適用し、そのエッジドロップ低減、光沢向上の効果も得ている⁽²⁾。

冷間タンデム圧延機の後段及びリバースミルには、高い形状制御能力と高負荷、大量生産に耐える剛性、構造のシンプル性が要求される。この度、先の CR ミルの原理を生かした高い形状制御能

力を保有しつつ、構造を更にシンプル、堅固にしたスリーブ付分割バックアップロール (MC ロール) を考案した。本報では、この MC ロールの形状制御能力について、従来の形状制御圧延機に比べ格段に優秀な能力を保有していることを示し、今後の実機化についての検討を述べる。

2. MC ロールの構造と特徴

図 1 に MC ロールの基本構造を示す。このバックアップロール (BUR) は、複数個 (図 1 では 5 個) の外輪回転の円筒ころ軸受を軸に対して偏心させて装着し、その上に外輪の包絡線+すきま分の内径を持つスリーブを装着している。スリーブは軸受の外輪とともに、ワークロール (WR) に従動回転する。

個々の軸受は、偏心方向が異なっているので、軸の位相を調整することにより全体の BUR プロファイルが V 型とか W 型に変更することができる。

図 2 に偏心方法の一例及びこの偏心軸を用いて創成されるクラウンパターンを示す。

同図において、サイド軸受 s、クォータ軸受 q 及びセンタ軸受 c

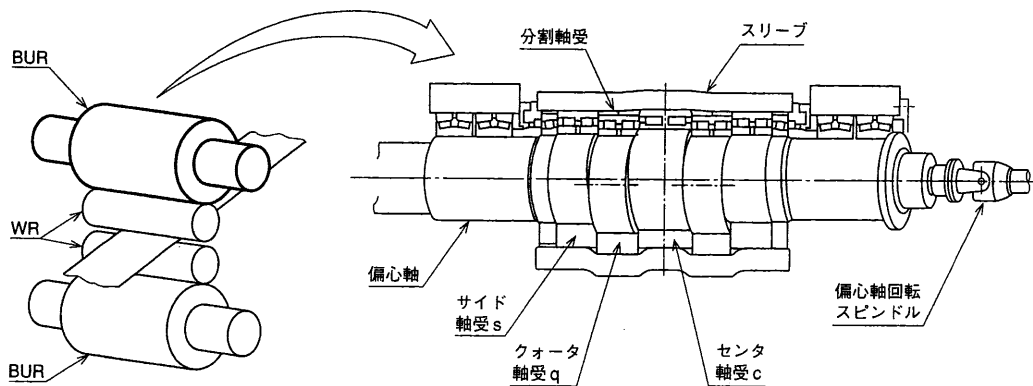


図 1 MC ロールの基本構造 圧延機の BUR として使用される MC ロールの構造を示す。偏心軸の位相を変えると各軸受の突出量が変わり、板の形状を制御できる。
MC Roll mechanism

*1 製鉄機械設計部主査

*2 製鉄機械設計部圧延プラント課

*3 広島研究所物質工学研究室主務

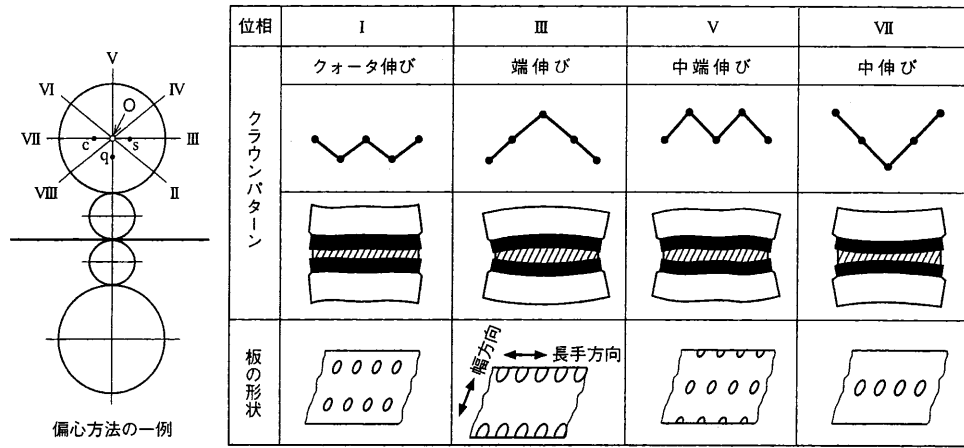


図2 偏心軸の位相とクラウンパターンの関係 軸受が突出した領域の板が相対的に薄く延ばされ、波となって現れる。波の大きさ、範囲が大きいほど形状制御能力が大きいといえる。
Relation between crown pattern and strip shape

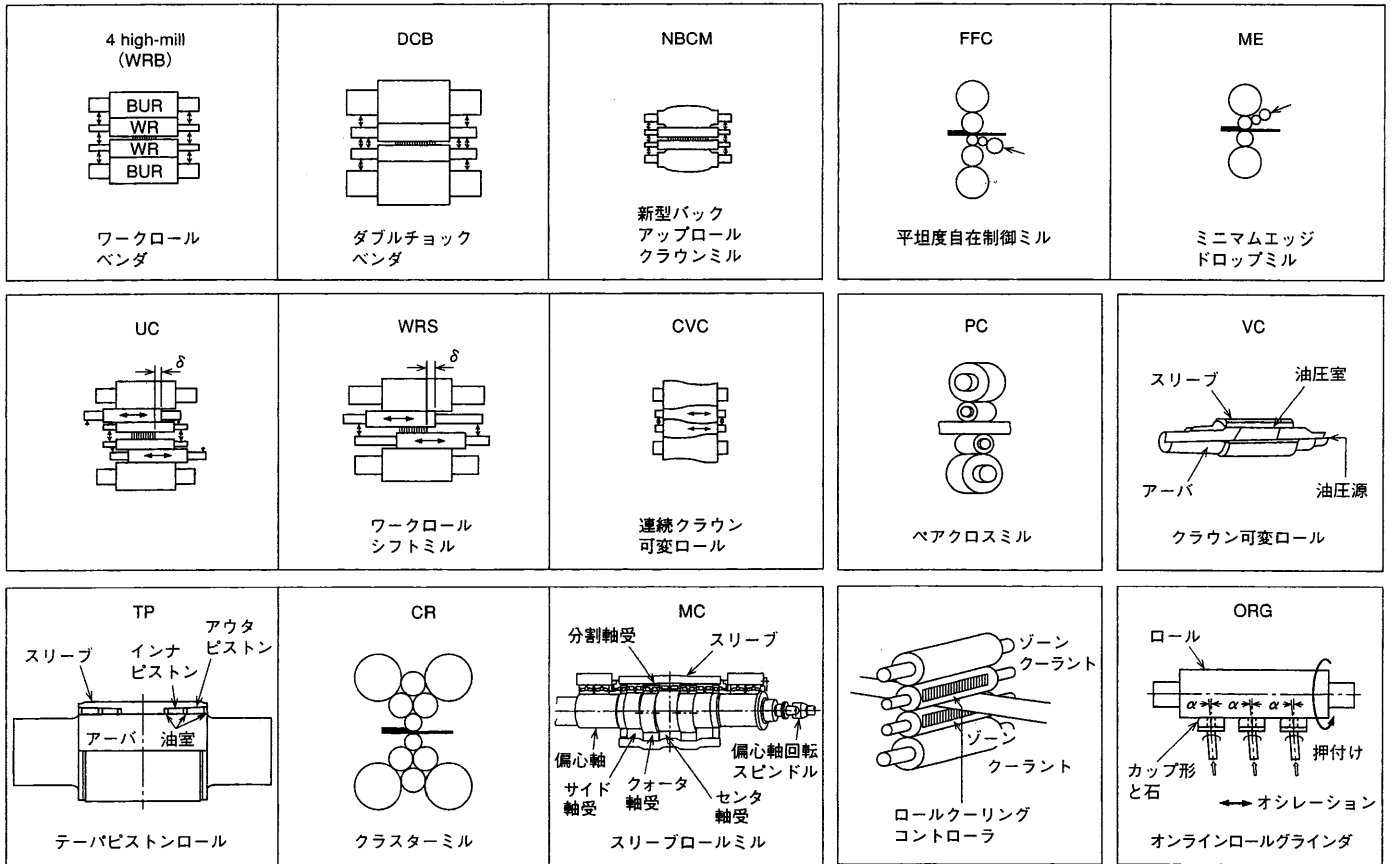


図3 各種板形状制御圧延機、装置⁽³⁾ 各種の形状制御能力を持つ圧延機、装置を示す。
Various shape control mills

は BUR 軸回転中心 O に対し同一量だけ、順に 90°ずつ回転した位置で偏心している。

このクラウンパターンのほかにも、台形状パターン等種々のクラウンパターンを創成することができる。さらには、偏心軸を回転させ位相を調整することにより、各クラウンパターンのクラウン制御量も無段階に調整することができる。

3. 他のミル形式との形状制御能力の比較

図3に現在導入されている各種形状制御圧延機、装置を示す。この中で、タンデム圧延設備に適用される主なミルと MC ロール (MC) についてクラウン・平坦(たん)度制御能力を計算によ

て比較した。

本報で用いるクラウン・平坦度制御範囲は、板からロールに作用する圧延荷重を板幅方向に等分布として与え、圧延機の固有機能によるロール間げきプロファイルの変更可能範囲で定義した。この計算には多段ロールの分割モデル解法を用い、特にロール同士の接触変形には Tsu-Tao Loo の式⁽⁴⁾、材料と WR の接触面の偏平変形には WR を半無限体とした戸澤らの式⁽⁵⁾を使用した。

3.1 計算条件

計算に使用した各種圧延機の主仕様 (WR 径、BUR 径や胴長等) は相対比較のためすべて統一した。BUR に用いられる VC ロール及び TP ロールは、スリーブを膨張させてクラウンを変化さ

せるものであり、最大膨張量は各々 0.53 mm/径及び 1.2 mm/径とした。これらのロールはスリーブの局部変形は無視して、膨張したプロファイルを持つ中実ロールとして取扱った。また、UC ミルと WRS ミルでは、移動ロールの胴長端部は面圧やロールマーク等の制約から板幅端部から 25 mm 外側までしか移動できないものとした。さらに、CVC ミルは IMR のみに 0.7 mm 径差の三次曲線クラウンを付け、移動量は 400 mm、ロールベンダは WR のみとした。MC ロールの各軸受の偏心量は 0.5 mm である。

3.2 クラウン制御能力

図 4 にクラウン制御能力の計算結果を示す。同図では各板幅ごとに、板幅中央部と板幅端部から 25 mm の点のロール間げきの差を板クラウン制御範囲として、各圧延機の固有機能とロールベンダによるものを分離して示している。すべての板幅に対し、零クラウンがねらえるか否かを判定できるよう、各圧延機ごとに 1 種類の最適 WR クラウンを選定した。

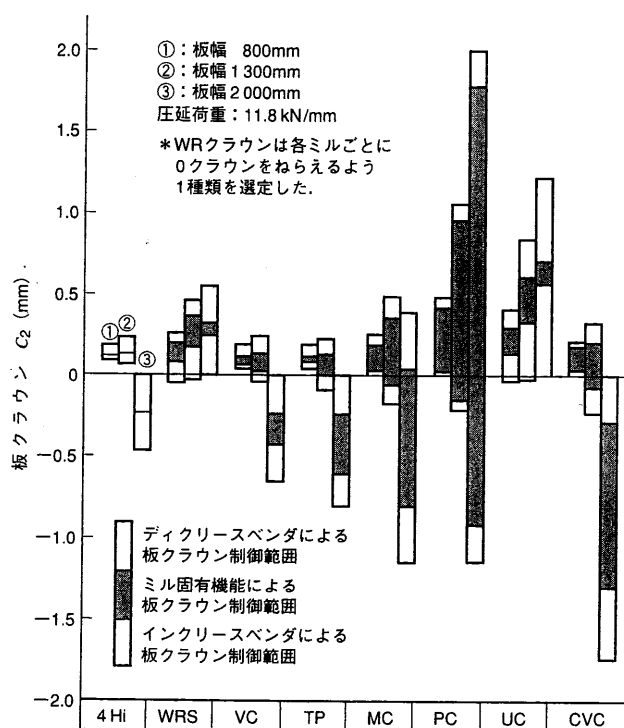


図4 各種圧延機の板クラウン制御範囲 1種類のWRクラウンで制御できるクラウン範囲を示す。縦軸のプラス側が端伸び、マイナス側が中伸びを表す。
Strip crown control range of various mills

すべての圧延機で板クラウン制御範囲は板幅が広がるほど拡大する。これはクラウン制御が二次曲線的なロールクラウンやロール曲げを主体にしているためである。すべての板幅に対し、1種類のクラウン付WRを用いて零クラウンの板が得られるのはWRSミル、MCロール、PCミルとUCミルである。このうち、WRSミルとUCミルは単にロールを移動する効果よりも、それによって増加するロールベンダの効果の方が大きいものに対し、PCミルやMCロールは、ロールクロスやBUR偏心制御による間げきの制御効果が大きく、両者の特徴は異なっている。さらにUCミルでは、零クラウンの板を得るには大きなベンダ力が必要である。すなわち、ロールベンダを主体とすると、高荷重圧延時にはロールへの負荷が厳しく、機能も十分発揮できない可能性がある。

一方、他の圧延機では、すべての板幅で零クラウンを得るためには、数種類のクラウン付WRを使用しなければならない。これ

は、操業中に板幅に応じてロール交換が必要なことを意味し、スケジュールフリー化の障害となる。この観点から考えると、VCロール(片側1本)やTPロール、CVCミルは量産ミルとしては若干能力が不足しているように思われる。

3.3 平坦度制御能力

圧延機には中央と板幅端部の板厚差を制御するクラウン制御機能のほかに、形状を平坦に保つ平坦度制御機能も要求される。両者は、直接的には板のプロファイルを制御するため同じ機能が使用される。例えば、中伸びや端伸びなどの単純形状に対しては、前述のクラウン制御能力がそのまま平坦度制御能力になる。ところが、板の形状は端伸びから中伸びに変わっていく途中で、必ずしも平坦になるとは限らない。クォータ伸びや中端伸びなどの複合伸びがそれである。

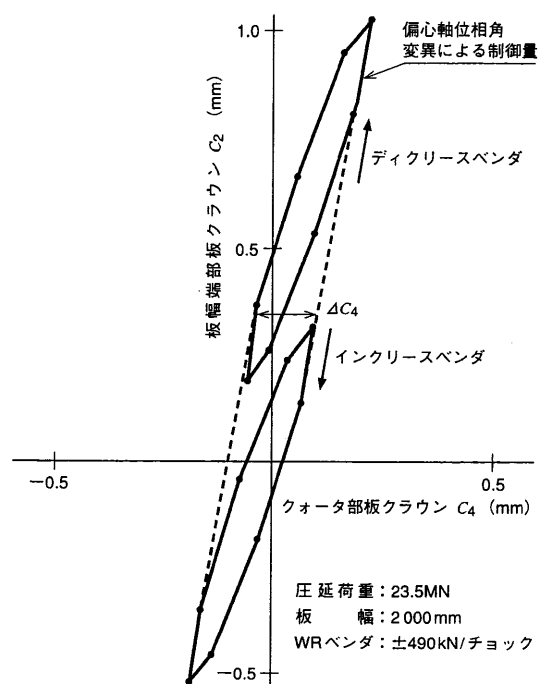


図5 複合伸び制御能力の評価例(MCロールの場合)
 C_2 が中伸び、端伸びの制御能力、 C_4 が中端伸び、クォータ伸びの制御能力を示す。
MC Roll high shape controllability such as combined buckling

この制御には、板幅の1/4点付近と中央部の板厚差 C_4 を独立に制御する能力(以下、複合伸び制御能力と称す)が必要である。そこで2種類以上の制御手段を持つ圧延機について、図5に示すようなクラウン制御ベクトルの計算を行い、複合伸び制御能力 ΔC_4 を比較した。比較結果を図6に示す。

突出した能力を示したのはMCロールである。MCロールが、5分割された軸受を個々にWRに向かって押出す多くのパターンが作れるのは、WRのたわみモードの変更量が大きいためである。この機能によって、MCロールは狭幅の板でも他形式の圧延機の複合伸び制御能力をりようがしている。

4. 実機の構想

MCロールの実機化を図る上で、スリーブの強度が最も大きな課題となる。ここでは実機サイズのスリーブ強度について検討する。

スリーブは分割BURの軸受外輪とWRに挟まれて転動する。特に分割軸受のパターンをV型やW型に押出すと、特定の軸受の

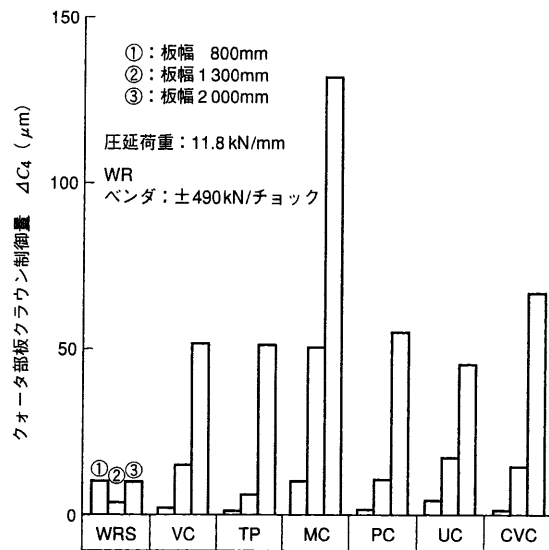


図6 各種圧延機の複合伸び制御能力 各種圧延機の C_4 の制御能力を示す。MC ロールが突出した能力を示す。
High shape control range of various mills

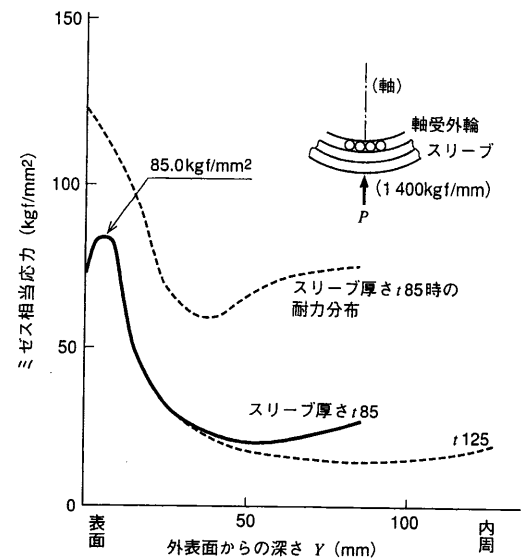


図7 スリーブ断面の相当応力分布 スリーブ厚さ方向の応力分布を示す。スリーブ厚さが変わってもピーク応力の値及び発生位置は変化しない。
Equivalent stress in sleeve

負荷が増大する恐れがある。

一方、スリーブの突然の破壊を防止するためには、スリーブの内部の硬度を低くして靱性を持たせておかなければならない。そこでスリーブは、軸受外輪と WR とで強圧されて、延伸される可能性があると同時に、局部偏平変形による周方向曲げ応力が発生する。

そこで本章では、WR とスリーブ間の線圧を求め、その最も厳しい条件下におけるスリーブの内部応力解析を行った。

4.1 ロール間線圧分布

分割 BUR の偏心パターンをフラット、 Δ 型、M 型と変えたときのロール間線圧分布を計算する。

スリーブに作用するロール間線圧は、ほぼ分割軸受のパターンに対応しており、最大で 1400 kgf/mm (ヘルツ面圧 170 kgf/mm²) となる。面圧的にはこの値は従来形 4 Hi ミルでのロール間許容面圧を下回るもので、大きな問題にはならない。

4.2 応力解析

スリーブの強度評価を行うため、スリーブ断面の FEM 応力解析を実施した。ここでスリーブ軸方向は平面ひずみ状態に近い状態、FEM ではスリーブ、軸受共幅 1 mm の三次元体として取扱い、軸方向ひずみを拘束した。負荷条件は、前節で得られた軸受最大負荷である 1400 kgf/mm を与えた。

図 7 にスリーブ断面の相当応力分布を示す。相当応力の最大値は表面下 6 mm 付近にあり、約 85 kgf/mm² とかなり小さい。図中には参考としてスリーブ厚さが 125 mm の場合の相当応力分布も示しているが、スリーブと WR との接触幅は 10.7 mm とスリーブ肉厚に比べると小さいため、相当応力分布はスリーブ厚さで変化していない。

図 7 中にプロットしたスリーブ厚さ 85 mm 時の耐力分布はスリーブの焼入深度予想曲線から求めた。

初期肉厚 125 mm から使用を始め、肉厚 85 mm になったとき表

面硬度は Hs 63、相当応力が最大となる点では Hs 60 であり、それぞれ耐力は 124 kgf/mm²、115 kgf/mm² と予想されるので、スリーブが延伸されることはないと考えられる。

次にスリーブ内周の曲げ応力の計算結果を示す。スリーブ厚さ 85 mm の場合、軸受外輪とスリーブの接触範囲 ±13° に局部曲げ応力が発生しており、最大値は 20 kgf/mm² である。

この応力に対する曲げ疲労の安全性を評価するため疲労試験を実施した結果、疲労限は 72 kgf/mm² であり、解析で得られた最大応力 20 kgf/mm² に対し、3 倍以上の安全率がある。

5. あとがき

スリーブ付分割バックアップロール (MC ロール) を考案し、そのクラウン・平坦度制御能力を従来の各種制御圧延機と比較検討した。その結果、MC ロールは複合伸び制御能力で他形式のミルをりょうがしていることを示した。

また、MC ロールの強度上最も厳しくなるスリーブについては、実機サイズで強度上何らの問題もないことを示し、本 MC ロールの実機化の可能性を示した。

なお、本 MC ロールは鉄鋼のタンデム冷延設備用のみならず、アルミ冷延、スキンプラス圧延等にも適用可能であり、特に WR のヒートクラウンの影響を受けやすいアルミ冷延において、クォータ伸びを解消し、形状を大幅に改善することが期待できる。

参考文献

- (1) 川並ほか、クラスタ圧延機 (CR ミル) の形状制御特性、三菱重工技報 Vol.21 No.6 (1984) p.103~110
- (2) 鎌田ほか、Iron and Steel Engineer (1996-6)
- (3) 阿高松男、塑性と加工 32 (1991) p.415
- (4) Tsu-Tao Loo, J. Appl. Mech.3 (1958) p.122
- (5) 戸澤ほか、塑性と加工 11 (1970) p.29