

圧延技術の最近の動向

Recent Trends of Advanced Rolling Mills and Mill Control Technology

最近の圧延設備では、製品の多様化・高品質化及び省エネルギー・歩留まり向上の面から工程の連続化に対する要請がますます高まってきた。

このような背景にあって高精度形状制御可能なHC-MILLは、各種圧延分野に対し、各々最も効果的な機能を発揮できるように各種形式への展開が促進され、かつこれらの実用化が進められた。

またHC-MILLの機能を活用して、冷間圧延とこれに前後する工程を直結する各種連続化設備の実現に成功するとともに、更に連続化の範囲の拡張が図られた。

精整設備の面でも、製品の品質向上に対する新技術の開発が進められ、各々優れた成果を挙げることができた。また、上記各設備を駆動する電気システムの高信頼性・高精度化が進められ、圧延設備のなおいっそうの高性能化に貢献することが可能となった。

梶原利幸* Toshiyuki Kajiwara
福井嘉吉** Kakichi Fukui
木村智明*** Tomoaki Kimura
渡辺洋介**** Yôsuke Watanabe

1 緒 言

省エネルギー・軽量化のすう勢、あるいは電子機器など高度技術分野での需要が高まり、圧延製品の板厚は更に薄く、また硬質な製品が求められ、従来の圧延機ではこれらの要求を満たすことが困難になってきている。

このような製品の多様化、かつ高度化の要求にこたえるために、HC-MILL (High Crown Control Mill) は¹⁾各種形式への展開及びなおいっそうの性能の向上が図られた。すなわち、熱間厚板及び帯板圧延では強力ベンダを備えるHCW-MILL (長ストローク方式の作業ロールシフトミル)、冷間帯板圧延ではベンダを備えるUC-MILL (中間ロールシフトミル) が開発された。

また、冷間帯板圧延とこれに前後する工程、すなわちデスケーリング、燃鈍あるいは調質圧延などの工程を、HC-MILLの機能を活用することにより効果的に連続化して、省エネルギー・歩留まり向上に貢献することが可能になった。

精整設備の分野でも、高性能酸洗設備、連続溶融亜鉛めっき製品の品質化技術、あるいは高生産性電縫管設備などの

実用化を図り、各々順調に稼働させることに成功した。

また、これらの圧延設備を駆動制御する電気品の分野でも、可変速ACドライブシステムのいっそうの適用拡大、高性能デジタル制御システム、新形プラントコントローラ、光伝送系を中心とするプラント総合電子化の方向に拍車かけられている。

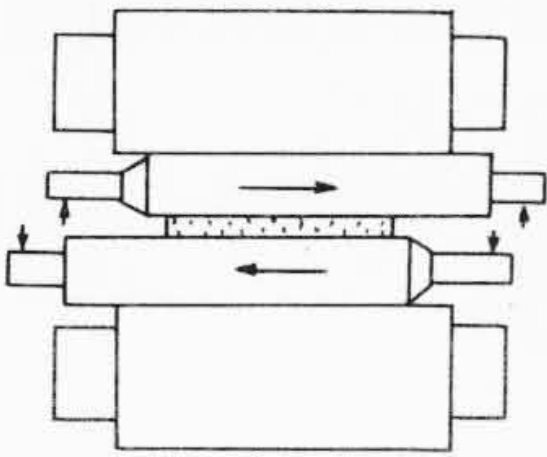
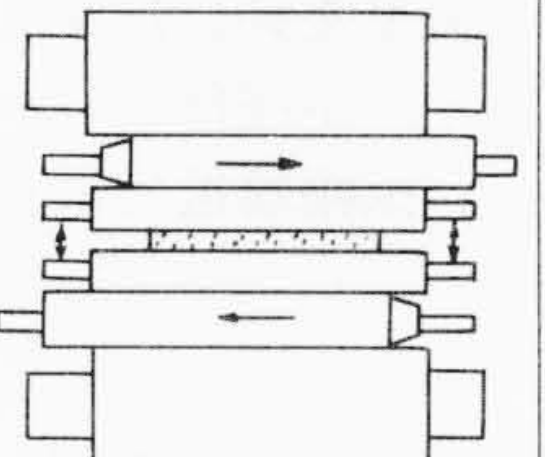
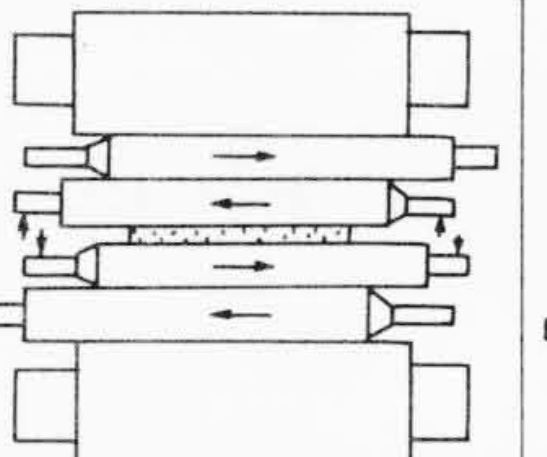
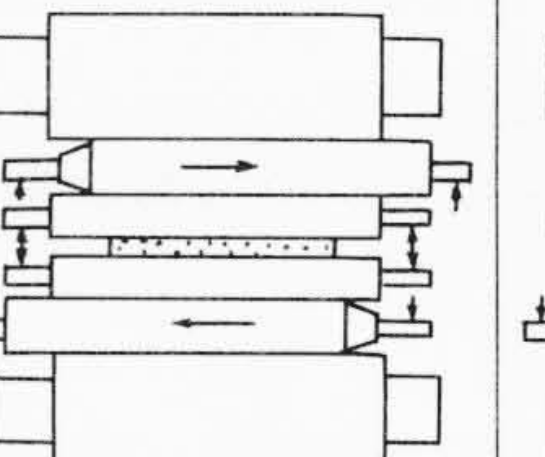
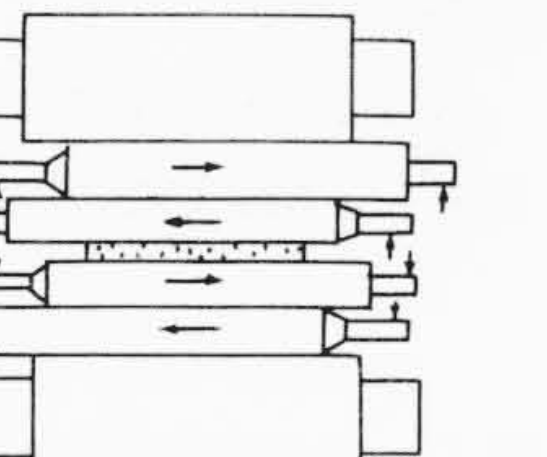
こうした幅広い関連技術に支えられ、圧延プラント全体の生産性と保守性及び製品品質の向上、更には省人化、省エネルギー化が進められている。

ここでは、以上に述べた圧延製品製造設備の機械及び電気システムについて、最近開発した新技術の概要及び今後の動向を紹介する。

2 HC-MILLの各種圧延分野への展開

HC-MILLの各形式に対する機構、機能及び用途を表1に示す。以下に、各種圧延分野に対するHC-MILLの適用状況、効果などについて述べる。

表1 HC-MILLの形式 新しく中間ロールベンダを備えるUC-MILL, UCMW-MILLが開発された。

形 式 名 称		HCW-MILL	HC-MILL	HCMW-MILL	UC-MILL	UCMW-MILL
ロ ー ル 配 置						
機 構	ロ ー ル 移 動	作業ロール	中間ロール	作業及び中間ロール	中間ロール	作業及び中間ロール
	ロ ー ル ベ ン ダ	作業ロールベンダ	作業ロールベンダ	作業ロールベンダ	作業及び中間ロールベンダ	作業及び中間ロールベンダ
制 御 機 能	形 状	単 純	○	○	○	○
		複 合	—	△	○	○
	板 ク ラ ウ ン	○	○	○	○	○
	ロール摩耗、熱膨脹分散	○	—	○	—	○
	エッジドロップ減少	○	△	○	△	○
主な適用圧延分野		厚板、熱間・冷間帯板	熱間・冷間帯板	熱間・冷間帯板	冷間・熱間帯板	冷間・熱間帯板

* 日立製作所日立工場 工学博士 ** 日立製作所機電事業本部 *** 日立製作所日立工場 **** 日立製作所大みか工場

2.1 厚板圧延

厚板圧延では板厚4～200mm、板幅1,000～4,500mmと、厚くかつ広幅の製品が製造される。表2に厚板圧延に必要とされる主項目と、HC-MILLによる対応策を示す。

この分野でも、寒冷地向けの低温高靱性鋼あるいは特殊合金鋼などの高級化製品を、高精度かつ高能率に圧延することが求められてきている。厚板圧延では1台ないし2台の圧延機が配置され、これにより多数の正逆圧延を繰り返し、製品板厚までの減厚圧延が行なわれる。特に前述した高級化製品は硬質なため、製品を得るまでの繰返し圧延回数は数十パスに及ぶので、高圧下圧延を可能にすることが望まれる。特に板厚が薄くなる最終パス近傍では、板の形状を良好に保持しながら高圧下圧延を実施する必要がある。

これに対応するHC-MILLとして、広範な板幅に対応できるように強力ベンダを備えるHCW-MILLが開発された。このHCW-MILLは各圧延パス間に作業ロールを適切に移動し、形状・板クラウン制御を行なうとともに、ロールの熱膨脹及び摩耗を分散し、スケジュールフリー圧延をも可能にすることができる²⁾。

2.2 熱間帯板圧延

作業及び中間ロール移動のHCMW-MILLを適用したタンデム熱間帯板圧延の成果については、本誌第65巻2号圧延設備新技術特集³⁾で報告したが、この分野でもHC-MILLは以下に述べるような新たな展開が促進された。

すなわち、前述の厚板ミルと同様の機能をもつHCW-MILLを、後段に3～4台配置するタンデム熱間帯板圧延設備が実用化された。この設備でのHCW-MILLも厚板ミルと同様の目的で使用される。すなわち、形状・板クラウン制御は強力ベンダにより、ロール熱膨脹及び摩耗の分散によるスケジュールフリー圧延は、作業ロールを圧延本数ごとに随時移動することにより行なわれる。

また、板幅のエッジドロップ減少制御は、作業ロールの移動側肩端にテーパを設け、この部分で板幅端近傍を圧延する方法により行なわれる⁴⁾。

一方、生産量が比較的少ないステンレススチール(SUS)材専用の圧延は、図1に示すように1台の圧延機の前後に保熱コイラを配置し、巻戻し及び巻取りを繰り返しながら正逆圧延を行なうステッセルミルにより行なわれる。この形式のミルに対しても、作業ロール及び中間ロール移動のHCMW-MILLあるいは長ストロークのHCW-MILLが適用され、厚板ミルの項で述べた項目と同様な効果を得ることが可能になった。

以上は鉄鋼業での適用状況について述べたものであるが、非鉄の分野でもアルミ用タンデム熱間帯板圧延設備へのHC-

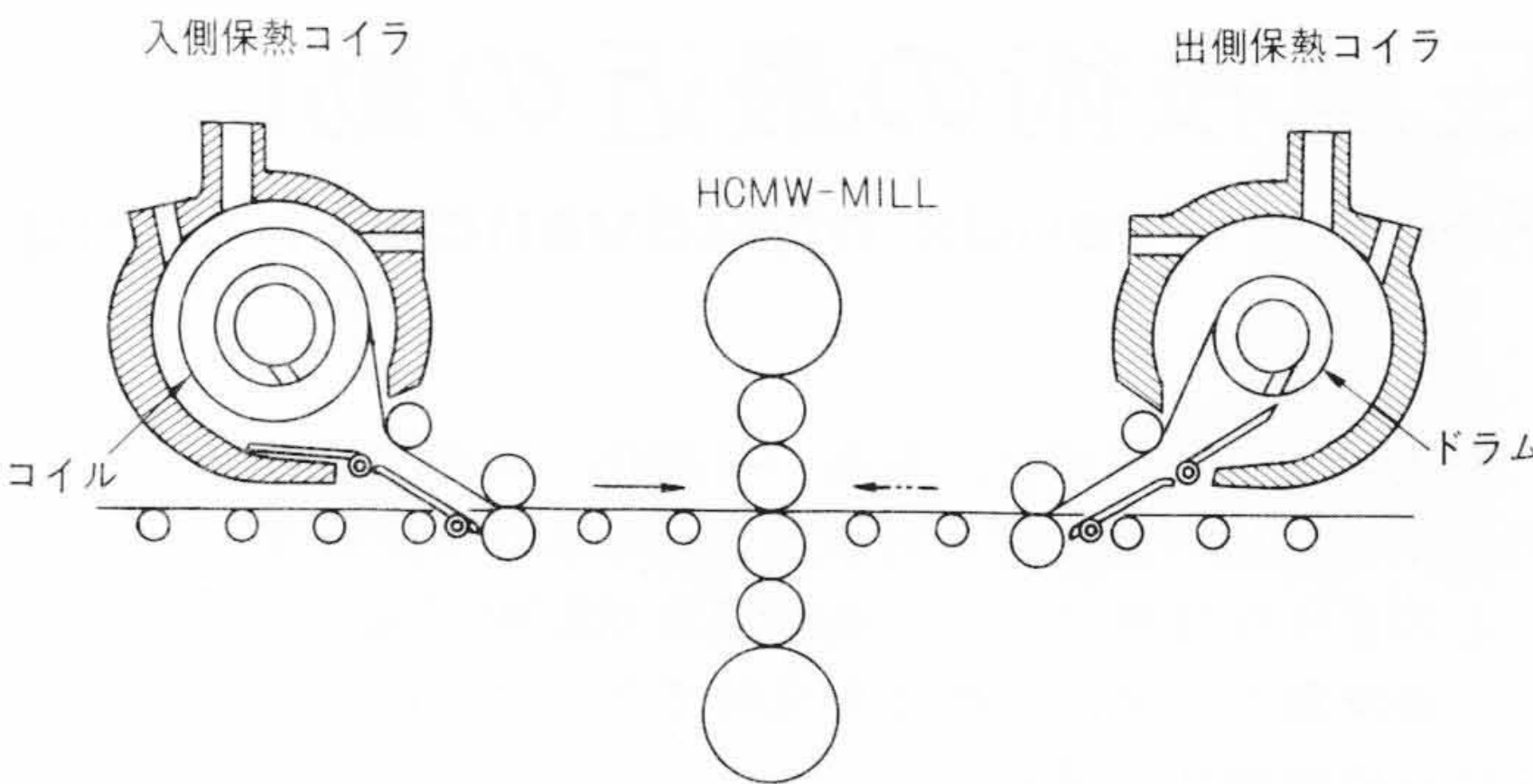


図1 ステッセルミルの配置 1台のHCMW-MILLあるいはHCW-MILLの前後に保熱コイラを配置し、正逆繰返し圧延が行なわれる。

MILLの適用を実現し、形状・板クラウン精度の向上を可能にした。

なお、HC-MILLの機能を十分に発揮させるには板クラウン・形状制御システムを完成させる必要がある。この板クラウンと形状は相互に影響を及ぼすので、予測制御と非干渉フィードバック制御、更に学習制御を基本機能とした板クラウン・形状制御システムが開発され、上記のHCW-MILL及びHCMW-MILLで実用化されるに至った。その結果、板の形状を乱すことなく目標の板クラウンを得ることが可能となった。

2.3 冷間圧延

鉄及び非鉄材の冷間圧延に対するHC-MILLの適用は、最も早くから行なわれ、その適用プラント数も最も多い。

この分野での最近の傾向は、板厚がなおいっそう薄く、かつ硬質な製品を高精度形状に圧延することが求められている。

このような材料を圧延するには、作業ロールを小径にする必要がある。また、板の形状制御機能としては、耳伸び及び中伸びの単純形状不良はもちろん、クォータ伸びを含む複合形状不良を修正できることが望まれる。

これに対応するHC-MILLとして、小径作業ロールを用い、かつベンダを備えるUC-MILLが開発された。

UC-MILLの形状制御機構は以下に示すような機能を発揮する。

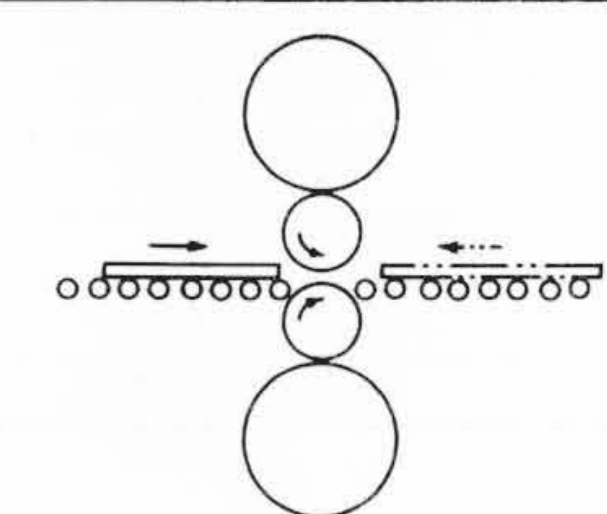
(1) 中間ロールシフト

中間ロールの胴端を板幅端近傍に移動して使用し、作業及び中間ロールベンダの効果を上向きさせるとともに、圧延中の荷重変動に対する形状の安定化を図る。

(2) 小径作業ロールベンダ

板幅端近傍の形状を制御するとともに、エッジドロップ減

表2 厚板圧延にHCW-MILLの適用 厚板圧延に必要とされる項目とHCW-MILLによる対応を示す。

配置及び仕様	必要項目	HCW-MILLによる対応	対応機械仕様
 ロール寸法：φ1,200/φ2,200×4,700L 圧延速度：380m/min	高精度形状・板クラウン	● 長ストローク作業ロールシフトと強力ベンダによる制御	ロールシフト：最大1,000mm ベンダ：最大600tf/chock
	高硬度材の強圧下圧延 (低温高靱性材、合金鋼材)	● 強力構造 ● 高精度形状保持高圧下圧延	最大圧延荷重：9,000tf
	スケジュールフリー圧延 (板幅制限解除)	● パス間毎ロール移動 ● 高精度形状・板クラウン制御	パス間移動：約150mm

少を図る。

(3) 中間ロールベンダ

やや太い径のロールを使用し、板幅中央部の形状を制御する。

以上3項目の機能により、複合形状を修正するとともに、圧延荷重変動に対し安定な圧延が可能である⁵⁾。

なお、UC-MILLはロール径の大小により、表3に示す三つの形式のものが開発された。

UC1-MILLは作業ロール径が比較的太いので、一般に作業ロールが駆動され、主として普通鋼材の圧延に適用される。

UC2-MILL, UC3-MILLは作業ロール径が更に小径化されているので、駆動のためのねじり強度上、作業ロールは非駆動とされ、中間ロールが駆動される。作業ロールには中間ロール駆動による接線力が加わるので、水平方向の支持が必要となる。このミルは普通鋼材はもちろん、中硬度及び高硬度で、かつ極めて薄い材料の圧延などに使用される。

上記UC-MILLのもつ優れた形状修正能力を、十分に発揮させるために、下記のような特徴をもつ形状制御システムを開発した。すなわち、(1)基本数式モデルと与えられた評価関数が最小となる山登り探索法による最適な操作量の決定、(2)前回圧延での最適圧延操作量を基準にするモデル適応修正、(3)DDC用影響係数の設定と必要な操作量の算出、などを行なう制御方法である。UC-MILLとこの形状制御システムの完成により、従来困難とされていた複合形状の修正も可能となった。

以上、UC-MILLの内容について述べたが、これ以外にも熱間圧延と同様に、作業ロールシフト機構を備えたHCW-MILLあるいはUCMW-MILLの適用が行なわれた。これにより冷間圧延の分野でも、エッジドロップ減少制御及びスケジュールフリー圧延が可能になった。

3 圧延設備の連続化

現状での圧延設備の連続化は、冷間圧延とこれに前後する工程に対して進められている。

熱間圧延後の鋼帯から冷間圧延製品を得るまでの工程をすべて連続化すると、図2に示した機器構成の配置となる。デスケーリングは鋼帯表面のスケール除去、燃鈍は冷間圧延後鋼帯の軟質化、また調質圧延（テンパあるいはスキンパス圧延）の工程は板形状の最終仕上げ及び硬度調整などを行なうものである。

当初は焼鈍と調質圧延の二つの工程を連結する連続化設備から開発が進められたが、現状では冷間圧延と調質圧延まで

表3 UC-MILLの形式 UC-MILLは、ロール径の大小により三つの形式に分類される。

形式名称	UC1-MILL	UC2-MILL	UC3-MILL
ロール配置			
作業ロール径/板幅	0.2>	0.2~0.1	0.1<
対象材料	通常材	中硬度材	高硬度材

の工程の連続化設備が完成されるに至っている。冷間圧延にはHC-MILL, UC-MILLが適用され、圧延中に中間ロール移動及びベンダ力制御を行なうことにより、板幅及び圧延荷重などの圧延条件の変化を、圧延を停止することなく連続的に補償制御できるので、高精度形状の圧延製品を得ることが可能である。また、調質圧延は従来4H-MILLで行なわれ、十分な形状精度を確保することができなかった。このためテンションレベラが併設されていたが⁴⁾、HC-MILLあるいはUC-MILLの適用により、これだけで十分な形状精度を得ることを可能にした。

以上の設備にデスケーリング工程を連結し、完全な連続化設備を実現するには、デスケーリング設備の短縮化が望まれる。すなわち、図2に示す連続焼鈍工程により深絞り用鋼帯を製造する際には、熱間圧延での鋼帯を高温で巻き取ることが有効とされているため⁶⁾、鋼帯に生成されるスケールの厚みは、通常巻取り温度での場合に対し約50%厚くなる。このスケールを除去するための酸洗時間は約80秒と増加し、処理速度200m/minの設備でも266mの長大な酸洗槽が必要になる。この問題は、鋼帯を数パーセント伸張するスケールブレーカを配置することにより解決することが可能になった。すなわち、鋼帯の伸張によりほとんど伸びのないスケールにクラックを発生させ、かつ一部分スケールを鋼帯からはく離・脱落させることにより、酸洗時間を約20秒に、また酸洗槽長

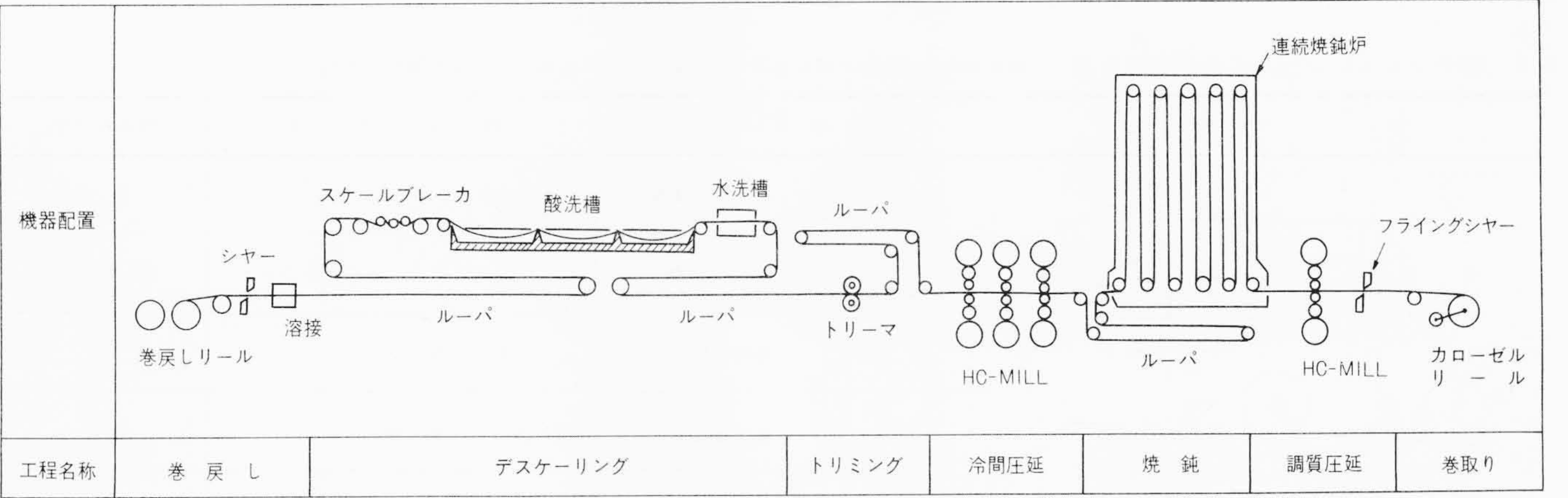


図2 完全連続冷間圧延製品製造設備 熱間圧延後鋼帯から冷間圧延製品を製造するための全工程を、連続化した場合の機器の配置を示す。

を66m程度に短縮することができる。この新しいデスクーリング設備を配置することにより、図2に示す完全連続化設備を実用的設備スペースに収納することが可能になった。

このような連続化プロセスでは、ロール間隙、圧延速度、張力などがバランスを保ちながら、別の圧延スケジュールにダイナミックに移行してゆくことが必要である。このためには走間で、かつスケジュール変更点の前後でのオフゲージ長を最短に保ちつつミル設定を変更しなくてはならない。この技術も、高性能マイクロコンピュータやデジタル速度制御装置を十分に活用することにより、完成することができた。

4 精整設備での新技術

酸洗の分野では、前述した鋼帯を伸張するスケールブレーカを配置した酸洗設備を稼働させ、酸洗時間を短縮できること、かつスケールブレーカでスケールをはく離・脱落させ、酸洗槽へのスケール持込み量を減少させることなどが確認された。

連続溶融めっき設備では、めっき厚みを制御するガスワイピング部の鋼帯の幅方向反り変形及び振動を減少させる非接触式磁力装置を完成させ、めっき厚み精度の向上を可能にした。本装置の実機適用例も増加してきており、各々所期の成果を得ている。

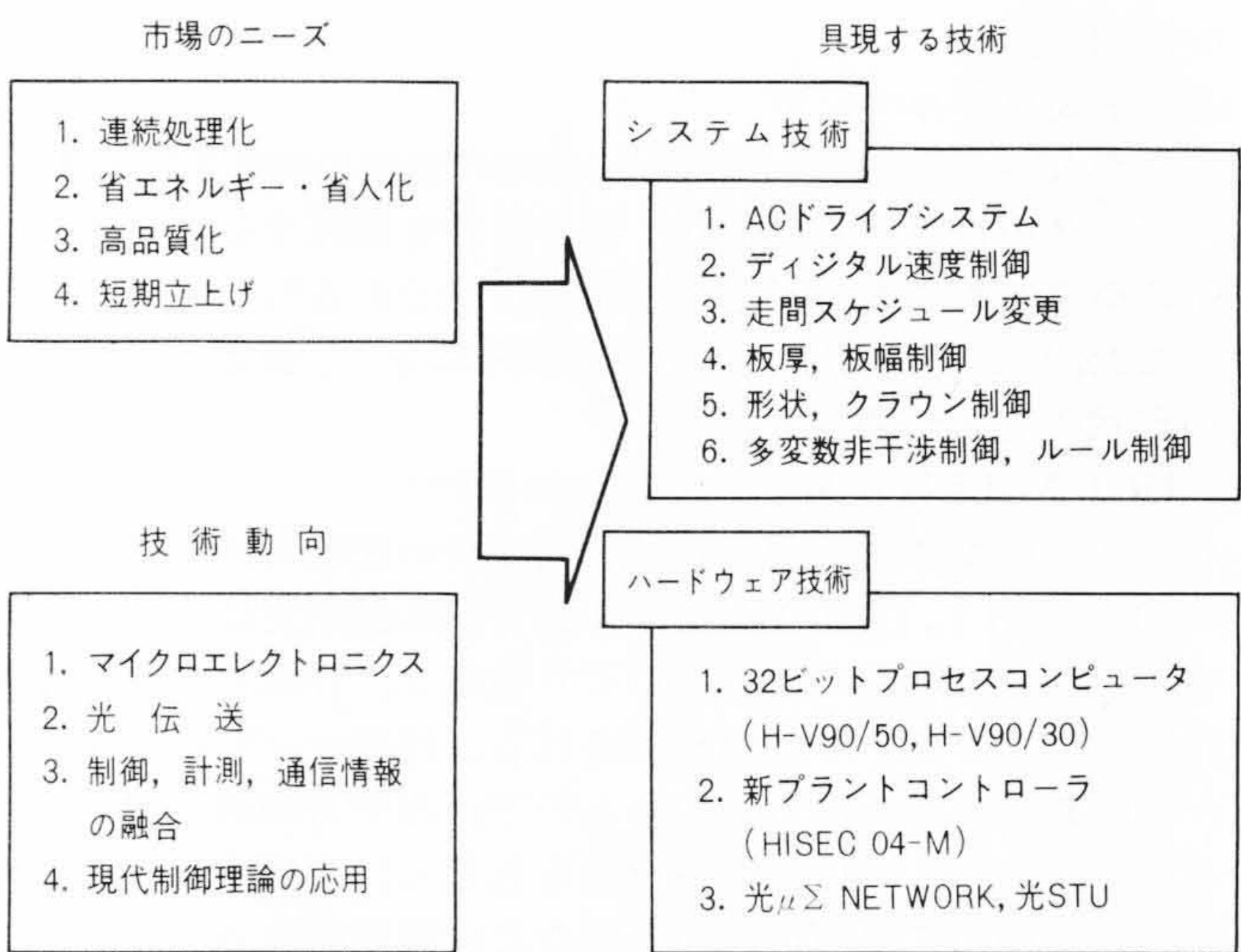
また、めっき後の鋼帯形状矯正に対しては、表4に示す軸方向ローラシフト及び小径ローラのベンディング機構を備える新しいテンションレベラの開発に成功し、製品形状精度を大幅に向上させることが可能になった。このテンションレベラはめっき製品ばかりでなく、硬質で薄い製品の矯正にも適用され、形状修正効果の大幅な改善に貢献している。またテンションレベラの高速化開発が進められ、1,000m/min以上での使用を可能にした。

丸管、角管を製造する電縫管製造設備では、連続生産を可能にするスパイラルルーパ、及び成形ローラの短時間組替え装置を完成し、生産性の大幅改善を可能にした。

5 圧延機用電気設備の動向

圧延機用電気品に対する市場のニーズも、量産を主眼としたものから、複数設備の連続化とそれに伴う省エネルギー、生産性の向上、高品質化の方向へと推移してきた。

一方、現状での技術の動向は、これを簡潔に表現するとプラント総合電子化への指向であると言える。こうした市場のニーズと技術動向を踏まえ、図3に示すような新技術を開発し、またなおいっそうの改善のための開発を進めている。



注：略語説明 STU(Serial Signal Transmission Unit)
図3 市場ニーズとそれを具現する新技術 市場のニーズや技術動向を、システム及びハードとしていかに具現するかを示す。

以下に、共通的な最近の新技術の幾つかについて紹介する。
5.1 可変速ACドライブシステム

保守性の改善、省エネルギーの追求などを主目的としたACドライブシステムは、近年鉄鋼プラントを中心に、広く産業界に用いられるようになってきた。しかし、最近では、単に保守や省エネルギーといった視点だけでなく、極低速圧延のための幅広い界磁制御範囲、電機子製作限界を超えるマシンの単電機子化、対ショック性の改善などAC化の利点を積極的に生かした圧延機主機への適用も図られようとしている。なお、ドライブ方式としては、サイクロコンバータによるかご形誘導電機的全デジタル式ベクトル速度制御も採用される方向にある。この場合、電源に対する高調波や被圧延材に与えるトルクリップルの低減対策も併用される。

また、比較的小容量の可変速ドライブ装置には、ベクトル制御付きインバータが開発されており、全AC化の大形精整ラインも稼働させることに成功した。ベクトル制御方式の場合、制御装置内の電動機モデルを基にトルクと磁束が制御される。したがって、電動機モデルのパラメータが、制御対象となる電動機のそれに正しく一致していることが必要となる。このため、初期調整が複雑になるという難点があったが、これに対しオートチューニングシステムを開発し、インバータの制御定数の自動設定を可能にし、調整を簡素化した。これ

表4 新テンションレベラによる形状修正 薄板材の各種形状不良を修正できる新しいテンションレベラが開発された。

ロ ー ラ 配 置	形 状 修 正 項 目		修 正 方 法	修正ローラ
	不良伸び	全体伸び不良	曲げ張力伸張	②, ③
		端伸び不良	板幅端にテーパローラシフト	⑥, ⑦, ⑧
		中伸び不良	小径ローラベント	⑦
反 り		幅方向反り	圧 下 調 整	⑥
		長手方向反り	圧 下 調 整	⑦, ⑧

により、電動機の定数が不明の既設交流電動機の可変速化も容易になった。

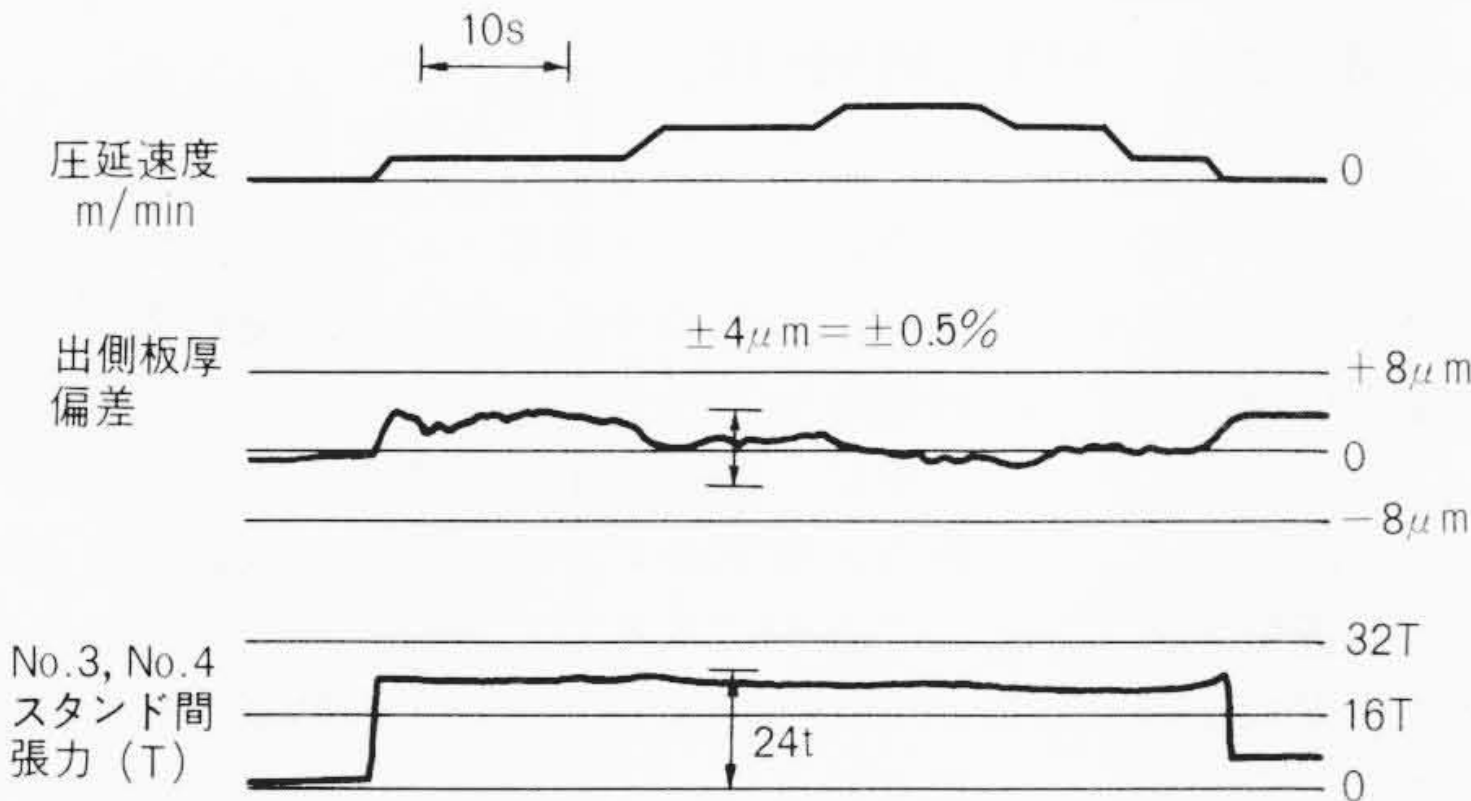
5.2 高性能電動機制御システム

昭和30年代に始まったエレクトロニクス素子やパワー制御素子の技術動向は、その都度、電動機制御の分野にもインパクトを与えながらその発展を促進してきた。また、最近ではマイクロエレクトロニクスの急速な進歩により、高性能のマイクロプロセッサが出現し、高速処理が要求される圧延設備の分野にも応用の道が開けてきた⁷⁾。こうした技術動向を先取りして、世界に先駆けて実用化した全ディジタル化速度制御システムは、既に約300セットに達しており、熱間圧延、冷間圧延、ライン物など、すべての分野に採用され内外で高い評価を得ている。一例として、この高性能ディジタル速度制御システムをタンデムコールドミルに適用した場合の、操業面を主体とした効果を、従来のアナログ制御に比較してまとめると表5及び図4⁸⁾のようになる。

このような操業上の利点が、本システムのもつ極めて優れた速度制御性能により得られることは当然である。しかし、その他にディジタル系は本質的にフレキシビリティに富んでおり、そのために種々の現代制御理論からのアプローチを受け入れる道具立てになりつつある。すなわち、単に入出力関係だけでなく、状態変数や外乱までシステムデザインの対象に採り入れようとする動きである⁹⁾。界磁の非線形補償、負荷

表5 5スタンドタンデムコールドミルでの操業性の比較 従来のアナログ制御に比べて、ディジタル制御を採用すると、優れたせん速性により通板性、加減速特性及びオフゲージ長が大幅に改善される。

No.	項 目	アナログ制 御	ディジタル制 御	備 考
1	通板時間(s)	60.2±24.9	30.3±12.3	0.5~1.5×1,000mm
2	加速時間(s)	25.8±8.2	18.9±2.2	2.8/0.7~0.8×1,500mm
3	オフゲージ長(m)	平均3.38	平均1.96	入側換算長



圧延条件

No.	項 目	条 件
1	バックアップロールベアリング	ローラベアリング
2	入 側 板 厚	2.8mm
3	出 側 板 厚	0.8mm
4	板 幅	1,005mm
5	A G C	OFF
6	スタンド間張力制御	OFF
7	圧 下	定位置

注：略語説明 AGC(自動板厚制御)

図4 4タンデムコールドミルでの圧延特性 デジタル制御を採用すると、AGC(自動板厚制御)や張力制御をOFFした状態でも、板厚や張力を安定させることができる。

トルクオブザーバ、圧下と張力の非干渉制御などがそれである。

5.3 総合電子化プラントコントロールシステム

約10年前に、MACCS-80 (Motor Application Control Complex System-80) を鉄鋼圧延用制御システムに実用化させた。これはマイクロコンピュータの活用と、ビルディングブロック工法による各ユニットの有機的結合を設計概念としたもので、当時の盤製品の性能及び構造を一変させるに至った。

その基本思想を発展継承すると同時に、最近のマイクロエレクトロニクスの分野での数々の新技術を採用入れ、1990年代の技術を先取りすべくMACCS-90を開発した。本システムのねらいは次の3点である。(1) 制御と計測、情報と通信の融合を目的とした高機能な制御と情報伝達。(2) プラントの連続化、複雑化、また情報の集中化と制御の分散化に対応したハードウェア、ソフトウェア両面でのミニマムインタフェース。(3) アプリケーションソフトウェアの増大と多様化に対処できる簡易なプラント計画と建設。

こうしたねらいは、下記項目により着実に具現化されてきている。

- (1) 高性能新プラントコントローラ“HISEC 04-M”(主記憶64k語、シーケンス処理速度1μs)
- (2) 大画面スクリーン、音声出力装置、CRT (Cathode Ray Tube)などを装備したコンパクトなインテリジェント運転デスク
- (3) 光化STU (Serial Signal Transmission Unit) (伝送量16W/チャンネル、伝送速度1Mbps)

6 結 言

以上、圧延設備を中心に最近の新技術の内容について紹介した。

鉄鋼業では品質の向上はもちろん、省エネルギー及び歩留まり向上技術のなおいっそうの革新が必要である。このための工程の連続化に対する検討は、現状冷間圧延製品製造の分野にはほぼ限定されているが、今後は更に大きな効果が期待される連続 casting、あるいは熱間鋼帯圧延の分野にまで広げることが望まれている。このような大形、かつ高度な技術を設備メーカーだけで完成することは困難であり、関係顧客の絶大な指導と協力を要請する次第である。

参考文献

1) 梶原，外：日立新形圧延機(HC-MILL)の特性，日立評論，56，919~924(昭49-10)

2) 木村，外：作業ロール移動式ミルによるロールカーブシミュレーション，第74回圧延理論部会，74-13(昭58-3)

3) 福井，外：熱間鋼帯圧延におけるHC-MILLの応用，日立評論，65，2，97~102(昭58-2)

4) 栗津原：作業ロールシフトミルの板クラウン制御特性，第74回圧延理論部会，74-12(昭58-3)

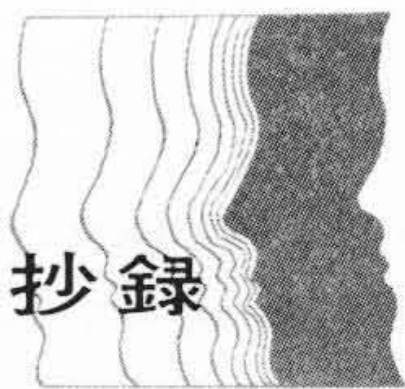
5) 二瓶，外：新形圧延機による高硬材圧延特性，鉄と鋼，70，2，p. A68~71(1984)

6) 武智：冷延鋼板焼鈍技術の最近の進歩，第29・30回西山記念技術講座，p.156~170(昭49)

7) 梓沢，外：ドライブ装置制御回路の信頼性向上，電気学会全国大会シンポジウム(昭59-3)

8) K. Saito, et al.: Application of Fully Digital Speed Regulators to Tandem Cold Mills

9) 大西，外：制御理論の実際の応用，電気学会全国大会シンポジウム(昭59-3)



正弦関数特性の能動素子を用いた多自由度発振器の解析

京都大学 倉光正己・日立製作所 高瀬冬人

電子通信学会論文誌 J67-A, 9, 930~931 (昭59-9)

本論文は、正弦関数で表わされる非線形特性の能動素子を用いた多自由度発振器に生じる多重モード振動を、平均ポテンシャルを用いて解析している。

正弦関数形の非線形性は、角度検出器のレゾルバ、PLLの位相検出部に現われ、重要な非線形特性のひとつである。本論文では正弦関数特性、

$$i = \sin(V)$$

で表わされる電圧電流特性をもつ2端子能動素子(負性抵抗)に、多数のLC共振回路をつないだ多自由度発振器を考える。多自由度発振器には、一つの周波数成分(モード)だけが励起される単一モード振動状態と、複数の周波数成分が同時に励起される多重モード振動状態の二つの動作状態があることが知られている。

従来、このような系に生じる振動の解析は、振動解を正弦波の重ね合わせで近似する平均化法が使われてきた。しかし、平均化

法は、非線形振動系の汎用の解析手法であるため、多自由度発振器の解析に応用すると、煩雑で物理的意味が把握しにくいものとなる。

筆者らは、多自由度発振器の新しい解析法として、平均ポテンシャル法を提案した。回路内の抵抗や負性抵抗の損失分の平均を平均ポテンシャルと定義する。すると、共振回路の振動エネルギーの増減は、平均ポテンシャルのこう配によって表わされ、振動は平均ポテンシャルを小さくする方向へ変化していく。したがって、安定な振動は平均ポテンシャルの極小点となる位相・振幅で生じる。そこで、平均ポテンシャルを作り、その極小点を探すことにより、発振器の安定状態を知ることができる。

更に筆者らは、平均ポテンシャルを導出する時間平均化の操作を、確率的に解釈することにより、振動系に生じる振動の種類と能動素子特性の関係を明らかにした。特

に、多重モード振動が生じる場合について、その振動の各周波数成分ごとの振幅と能動素子特性の関係を簡単に示した。その結果、正弦関数のように、多数の山と谷があり、その大きさがそろっている特性では、それらに依じて多種類の多重モード振動の発生が予想された。

本論文では、この予想を確かめるため、能動素子特性が正弦関数で表わされる発振器を解析した。この場合、系の平均ポテンシャルはベッセル関数の積となり、容易にその極小点を見いだせる。その結果、実際に多くの種類の多重モード振動が見られることが分かった。ただし、この解析では、各モード周波数は互いに共振しない(非共振)という仮定を用いた。正弦関数のように、そのテイラー展開に高べきの項を含む特性では、ここで無視した内部共振が影響する可能性があり、今後の検討を要する。

分布密度関数を用いた多重モード自励振動の発生機構の説明

日立製作所 高瀬冬人・京都大学 倉光正己

電子通信学会論文誌 J67-A, 10, 966~973 (昭59-10)

本論文は、筆者らの開発した平均ポテンシャル法を用いて、コイル、コンデンサ及びトンネルダイオードなどの2端子能動素子(負性抵抗素子)から成る多自由度発振器に生じる多重モード振動を解析している。

多くの振動モードがある発振器を多自由度発振器と呼ぶ。多自由度発振器の動作状態には、単一モード振動と多重モード振動がある。単一モード振動は、一つの周波数成分(モード)が励起された状態で、出力はほぼ正弦波となる。多重モード振動は、複数の周波数成分が同時に励起された状態で、出力は「うなり」を伴う非周期波形となる。

このいずれの発振状態をとるかは、能動素子の特性によることが知られている。すなわち能動素子の特性が3次式、

$$i = -g_1 v + g_3 v^3 (g_1, g_3 > 0) \cdots \cdots (1)$$

で表わされる軟発振特性の場合には、多重モード振動は生じないが、5次式、

$$i = g_1 v - g_3 v^3 + g_5 v^5 (g_1, g_3, g_5 > 0) \cdots (2)$$

で表わされる硬発振特性の場合、これが生じる。しかし、この違いの説明は明確にされていなかった。

従来、これらの振動の解析手法として、正弦波の重ね合わせで振動解を近似する平均法が用いられてきた。しかし、平均法は非線形振動系の汎用の解析手法であるため、計算が煩雑となり、多自由度発振器を物理的に理解することが難しい。したがって、例えば、「ある振動モードを出す能動素子の特性はいかにあるべきか」という問題に対し、簡単な設計指針を与えることが困難であった。

筆者らは、多自由度発振器の新しい解析法として、平均ポテンシャル法を提案した。回路内の抵抗や負性抵抗の損失分の時間平均を、平均ポテンシャルと定義する。すると、安定な振動は平均ポテンシャルが極小になる振幅・位相で生じることが示せる。

したがって、平均ポテンシャルを作り、その極小点を探すことにより、発振器の安定状態を知ることができる。

更に、能動素子の特性と、生じる振動の物理的解釈から、素子特性の設計指針を得ることができる。

発振器に生じさせたい振動電圧を確率変数とみなし、その出現頻度の高いところで能動素子の瞬時的な損失分が最小となるように素子特性を定める。すると、損失分の時間平均である平均ポテンシャルは、この振動で極小となり、振動は安定化する。

この考察から、多重モード振動を生じさせるためには、能動素子は硬発振でなければならないことが示せる。また、非対称な振幅の多重モード振動を生じさせる能動素子特性の形状を予想し、これを検証した。

このように、複雑な計算に先立って、素子特性と現象の関係を予想できるところに、この考え方の特徴がある。