

熱間帯鋼圧延におけるHC-MILLの応用

Application of HC-MILL for Hot Strip Rolling

ホットストリップミル製品の品質・歩留まり向上のためには、圧延機の板クラウン制御能力の格段の向上が必要である。一方、連続鋳造の普及に伴い、燃料費の大幅な低減を目指した直送圧延の実現に不可欠なスケジュールフリー圧延が可能なホットストリップミルが渴望されている。この目的に対して、中間ロールシフトに加え作業ロールをもシフトできるHC-MILLを開発し、実用化に成功した。

その結果、圧延条件の大幅な変更に対しても十分なクラウン制御能力があり、また、従来不可能であった狭幅材から広幅材へのスケジュール変えも可能となり、鉄鋼界念願のスケジュールフリー圧延を達成するための技術が確立された。

福井嘉吉* Kakichi Fukui
 中西恒夫* Tsuneo Nakanishi
 杉山徳治* Tokuji Sugiyama
 西村貞夫** Sadao Nishimura

1 緒言

近年、鉄鋼需要の減退傾向を背景として、鉄鋼業での最重要課題は高級品質製品を低コストで製造することにある。鉄鋼圧延設備中最大の生産量をもち、かつ下流工程の品質に対する影響度が大きなホットストリップミル(図1)に対しては、特に重点的に新たな技術開発が進められている。それらの中でも連続鋳造からホットストリップミルへの直送圧延やホットチャージは、省エネルギー及び省工程の効果が著大であり、今後の低コスト化のために最大の目標となっている。

この目標を達成するためには、鋼種、板幅、板厚などの圧延スケジュール上の制約を解消して、ロール組替えなしに任意の圧延を可能とするスケジュールフリー圧延が行なえるホットストリップミルが不可欠である。

一方、品質面では、板クラウンすなわち板幅方向の板断面の厚さプロフィールが最重視されており、熱延板として使用される製品に対しては、全く平坦な圧延ができ、次工程用の素材としては、所望の板クラウンに精度よく制御が可能な圧延機が望まれている。

ここでは、以上述べた技術的課題を一挙に解決するため開

発・実用化したHC-MILLを中心として、最近の日立製作所による新技術について述べる。

2 ホットストリップミルのニーズと対応技術

ホットストリップミル(図1)に対するニーズは、省エネルギー、品質・歩留まり向上、生産性向上などのコスト、質、量に関するものであり、特にホットストリップミルの中心設備となる仕上ミルでの市場ニーズの具体例としては、図2に示す例が挙げられる。

これらの市場ニーズに対応し、日立製作所が推進してきた具現技術の主なものはHC-MILLであるが、これを起点にして、新たなニーズと対応技術が創成されていることが分かる。

3 ホットストリップミルの新技術

3.1 スケジュールフリー圧延

従来の4段ミルでは、次のワークロール組替えまでの圧延順は、鋼種については類似又は同一のものに限定して圧延し、また同一ロールサイクル内では、狭幅材から広幅材へと移行

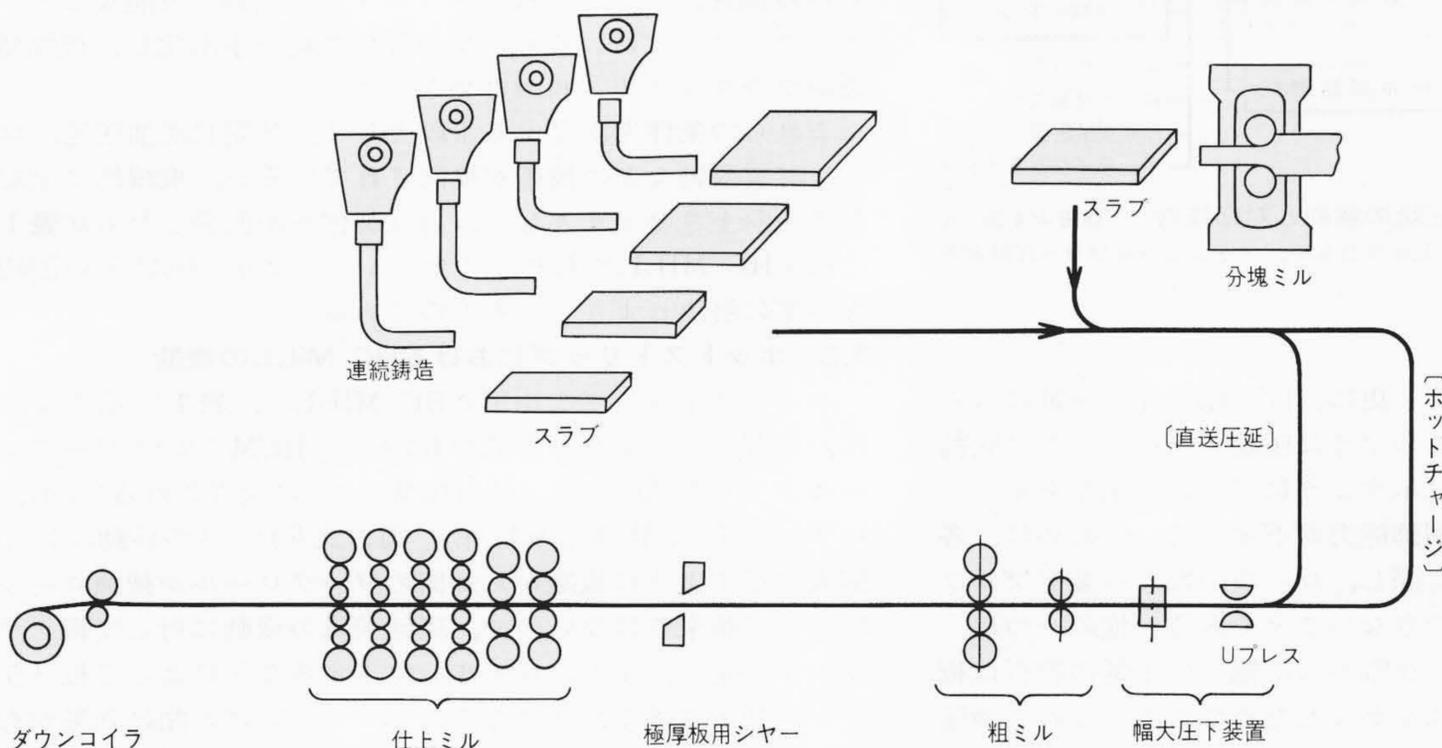


図1 ホットストリップミルの配置 ホットストリップミルの配置の一例を示す。連続鋳造—ホットストリップミルの直送化のためには、スケジュールフリー圧延(圧延の制約条件の大幅な解消)が必須条件の一つである。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所機電事業本部

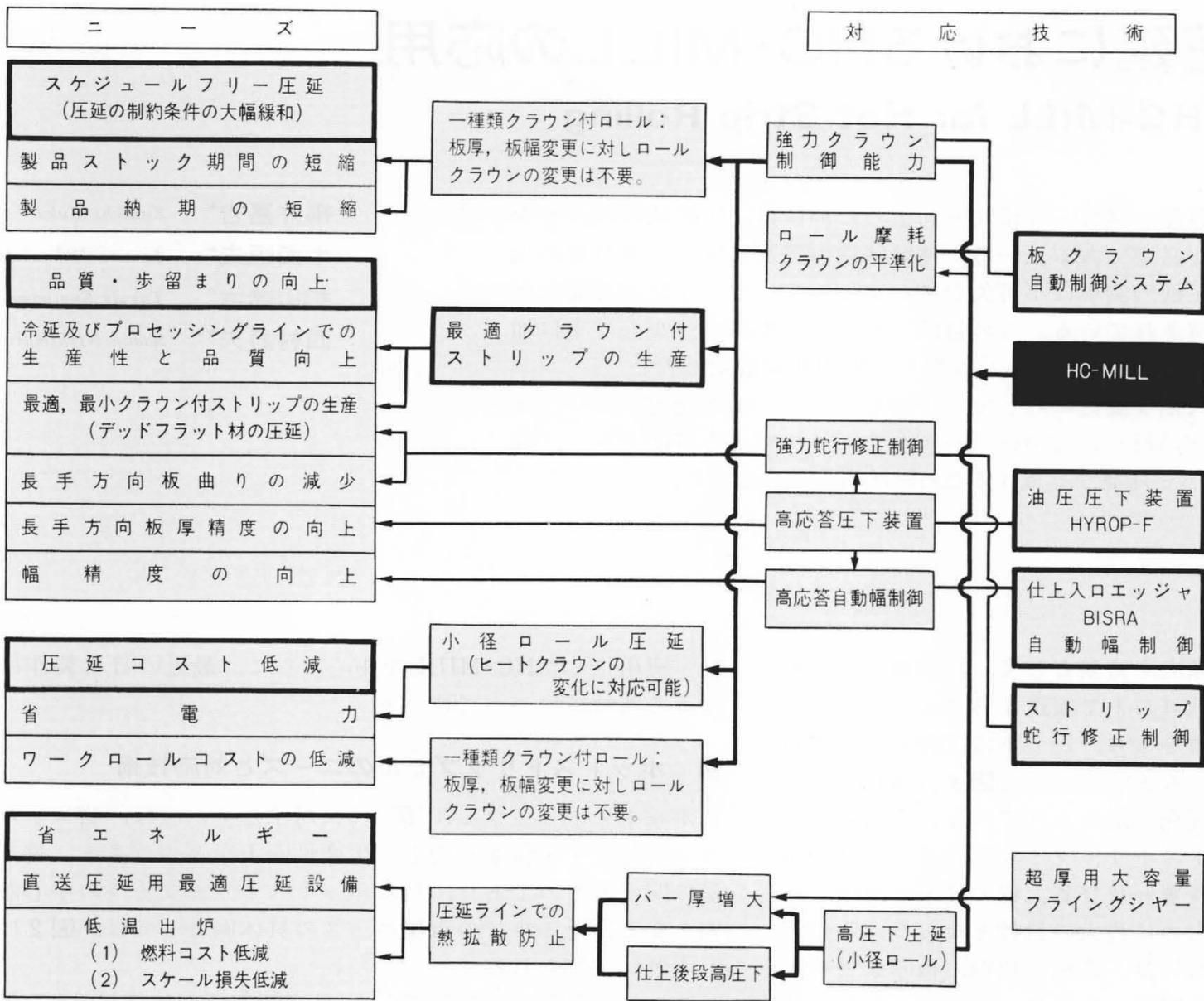


図2 新ホットストリップミルのニーズと対応技術
HC-MILLは広範囲のニーズに対応し、格段の効果が期待される。

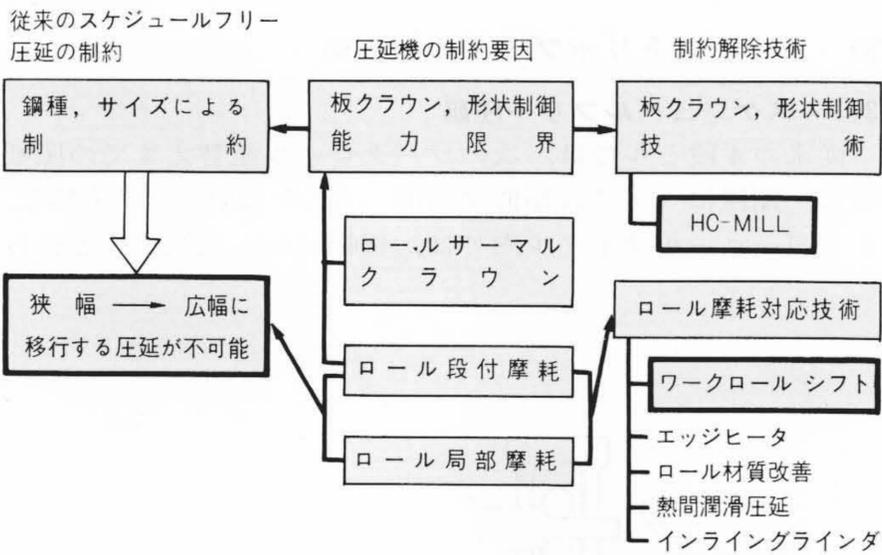


図3 スケジュールフリー圧延の制約と対応技術 従来の4段ミルでは、狭幅から広幅に移行する圧延ができなく、スケジュールフリー圧延が不可能である。

する圧延は不可能であった。更に、同一幅の連続圧延にはその数量に制限があった。このように圧延スケジュールに制約を設けているのは、図3に示すように二つの理由がある。一つは圧延機の板クラウン制御能力が不足しているために、各種の鋼種、サイズの圧延に際し、ロールのたわみ変形プロファイルの大幅な変化に対応できないことである。他の一つは、ロールの段付摩耗により、狭幅から広幅への圧延の移行は板プロフィールの品質上許されなかったためである。これらの圧延スケジュール上の制約を解除できれば、連続鋳造とホットストリップの直送化の達成が可能となり、次の効果が期待できる。

- (1) 直送圧延・ホットチャージによる飛躍的な燃料節減
- (2) 製品納期の短縮
- (3) 製品の在庫、仕掛期間の短縮

スケジュールフリー圧延達成のために、仕上ミルでは、次の性能が要求される。

- (1) 同一のロールカーブで、ロール組替えサイクル内で発生するサーマルクラウン及び摩耗クラウンの変化に対応し、あらゆる鋼種、サイズの板クラウン・形状制御が可能なこと。
- (2) ストリップによるロールの段付摩耗を平滑化し、板幅変更がプラスマイナス自由にできること。

これらの条件を満足する手段として、熱間潤滑油圧延、ロール材質改善などの技術が検討されているが、飛躍的に上記条件を向上させようとして、日立製作所が開発したのが表1に示すHC-MILLであり、スケジュールフリー圧延上の制約を一挙に解決しようとするものである。

3.2 ホットストリップにおけるHC-MILLの機能

ホットストリップミル用のHC-MILLは、表1に示すように、中間ロールシフト方式の6段ミル(HCMミル)とワークロールシフト方式の4段ミル(HCWミル)に大別される(なお、いずれも日立製作所基本特許)。両方式共ロールの移動により、同表に示すように板端から外側のワークロールが補強ロールによって拘束されないため、圧延荷重の変動に対して板クラウンが安定し、また、ロールシフトすることによって板クラウンを制御できるだけでなく、ロールベンダの曲げ効果が有効に作用し、優れた板クラウン制御性を発揮する¹⁾。その理論解析例を図4に示す。計算条件は表2の(b)の圧延機仕様と(c)のスタンドNo.5の圧延条件で比較した。同図からHCMミル

表1 HC-MILLの分類 スケジュールフリー圧延を達成するためには、ワークロールシフト方式6段ミル(HCMWミル)が最適である。

	(a) 理想クラウン制御ミル	(b) HCWミル* (4段ワークロールシフトミル)	(c) HCMミル* (6段中間ロールシフトミル)	(d) HCMWミル* (HCW+HCM)
構造				
特色	L_B (有効長) を圧延条件により任意に制御できるミル (ただし、実機化は困難)	板クラウン制御 エッジドロップ減少 ロール摩耗の平滑化 - 局部摩耗防止 - 段付摩耗防止	板クラウン制御 エッジドロップ減少 形状制御 強圧下圧延 省エネルギー	スケジュールフリー圧延

注：* 日立製作所基本特許

が格段に広い板クラウン制御能力をもっていることが分かる。HCWミルについては計算してないが、ロール位置 δ (表1参照) を小さくすることには制約があるものの、ワークロールの胴端部をテーパ状、例えば200mmに対し0.1mmにすることにより板クラウン制御能力が大きくなるだけでなく、エッジドロ

ップの改善効果が著しいことが分かっている。

HCWミルの他の機能として特筆すべきは、圧延材によるロールの摩耗の平滑化に利用できることである。従来はこのロール摩耗のため、板幅の変更は広幅より狭幅に限定されていたが、図5に示すようにワークロールのシフトにより、ロー

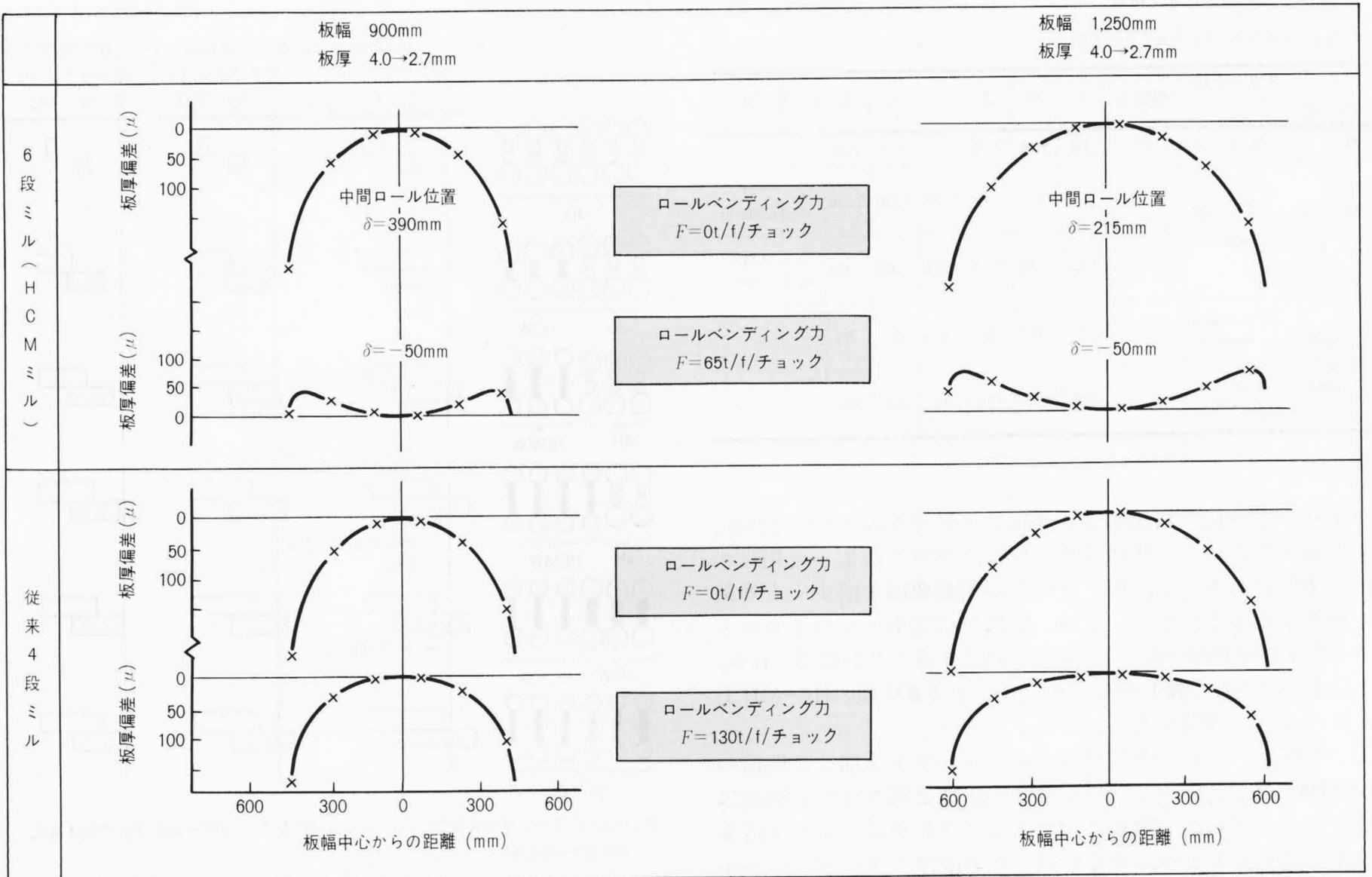


図4 6段ミルと従来の4段ミルの板断面プロファイルの制御範囲比較 中間ロール位置 δ 、ロールベンディング力 F の効果により、6段ミルでは従来の4段ミルに対し、板幅、板厚、圧延荷重が変わっても、共通する制御範囲が格段に広いので、板クラウン制御用圧延機として極めて優れている。

表2 板クラウンシミュレーション用圧延機仕様と圧延スケジュール HC-MILLに最適な圧延機の仕様とし、圧延スケジュールは高圧下の例をとり、板クラウンの理論シミュレーションを行なった。

(a) 圧延機仕様(前段F1~F3スタンド)

	BUR	IMR	WR
ロール径 (mm)	1,630	775	775
ロール胴長 (mm)	1,680	1,680	1,680
ロールベンダ (t/f/チョック)	—	—	0~130
ロールシフト (mm)	—	0~440	0~340(0)

(b) 圧延機仕様(後段F4~F6スタンド)

	BUR	IMR	WR
ロール径 (mm)	1,430	775	600(775)
ロール胴長 (mm)	1,680	1,680	1,680(1,680)
ロールベンダ (t/f/チョック)	—	—	0~65(0~130)
ロールシフト (mm)	—	0~440	0~340(0)

注：()は、従来4段ミルの場合を示す。

(c) 圧延バススケジュール(その1)

項目	スタンドNo.	粗仕上	スタンドNo.						備考
			1	2	3	4	5	6	
板厚 (mm)		40	21.4	11.2	6.4	4.0	2.7	2.3	—
圧延荷重 (t/f・mm)**		—	—	—	—	1.06	1.08	0.62	ワークロール径600mm
		—	2.03	1.80	1.64	1.21	1.22	0.70	ワークロール径775mm
WRクラウン (μ)	イニシャルクラウン	—	0	0	0	0	0	0	—
	サーマルクラウン	—	135	135	135	85	85	65	—

注：** 1mm幅当たりの荷重

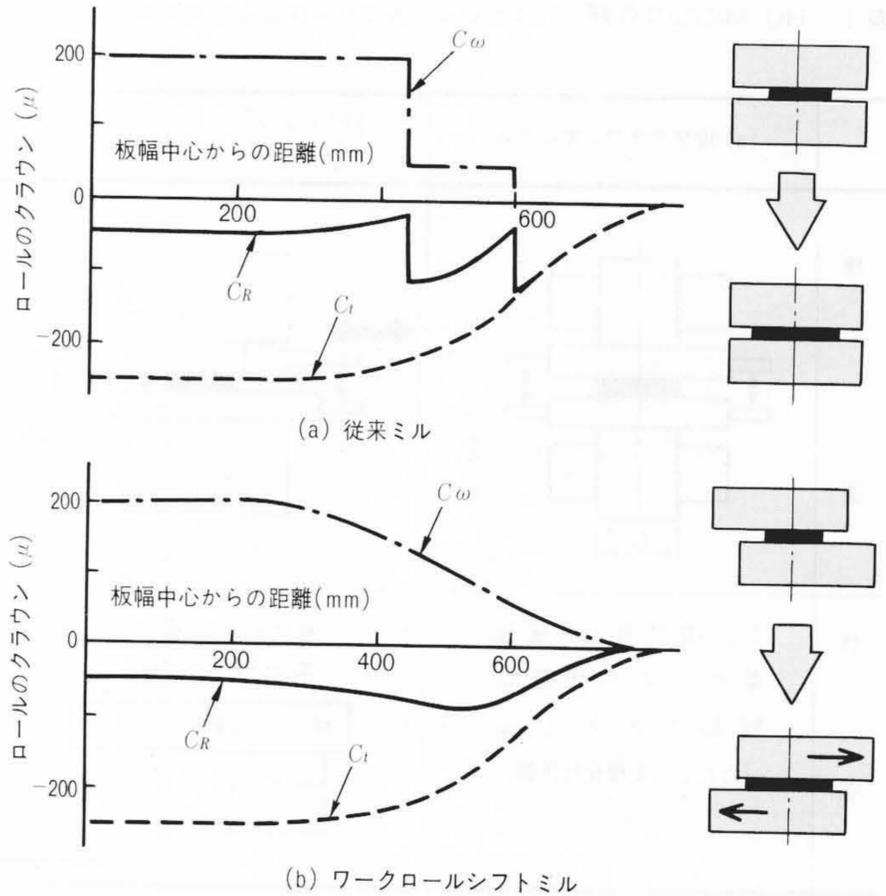
(d) 圧延バススケジュール(その2)

項目	スタンドNo.	粗仕上	スタンドNo.						備考
			1	2	3	4	5	6	
板厚 (mm)		37	18	8.8	4.9	3.1	2.1	1.6	—
圧延荷重 (t/f・mm)**		—	—	—	—	1.39	1.30	0.96	ワークロール径600mm
		—	2.52	2.56	2.19	1.58	1.48	1.09	ワークロール径775mm
WRクラウン (μ)	イニシャルクラウン	—	0	0	0	0	0	0	—
	サーマルクラウン	—	135	135	135	85	85	65	—

ル摩耗が平滑化され狭幅より広幅に圧延できることが分かる。また同図からロール摩耗はサーマルクラウンによって相殺される関係にあるので、板クラウンの変動要因を減少する効果も存在することになる。なお、圧延材に発生するハイスポットと称する突起状の板クラウンをも防止することが期待される。

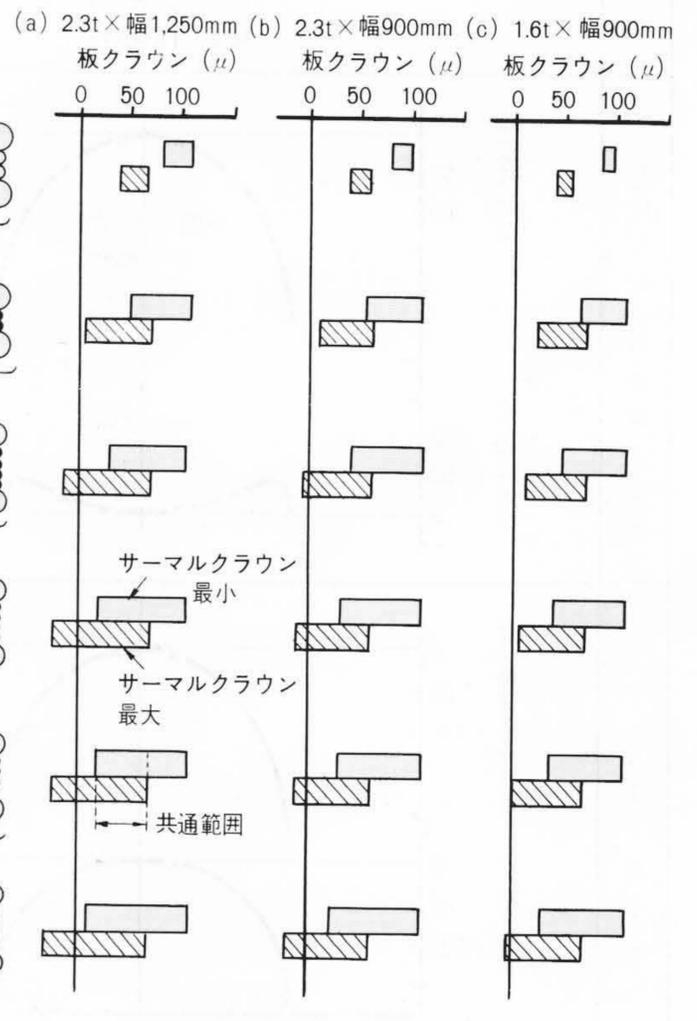
以上のことから表1の(b), (c), (d)に示す3種類のHC-MILLは次のような適用が考えられる。

(1) 中間ロールシフトにワークロールシフトを加えた機構のHCMWミルは、スケジュールフリー圧延と板クラウン制御に最適なミルであり、図6に示すようにタンデムミルの後段3~4台に配置するのが望ましい。なお前段スタンドのロールの段付摩耗が後段での板クラウンに影響するのを防止し、スケジュールフリー圧延を確実にするためにHCWミルを前段ス



注：板幅900→1,200mmまで各50コイルを圧延し、シフト量3mm/コイルの場合
 C_{ω} = ロールの摩耗クラウン
 C_t = ロールのサーマルクラウン
 $C_R = C_{\omega} + C_t$

図5 ワークロールシフトミルの効果 ワークロールのシフトにより、ロールの摩耗クラウンが平滑化され、スケジュールフリー圧延を可能とする。なおサーマルクラウンは、摩耗クラウンを相殺する関係にある。



注：HCMW(ワークロールシフト式6Hミル), HCW(ワークロールシフト式4Hミル), 4H(従来4Hミル)

図6 HC-MILL適用配置と板クラウン制御範囲 タンデムミルの後段に、HC-MILLを3~4台以上設置することにより、実操業に必要な板クラウンの制御が可能である。

タンデムに追加配置するのは更に望ましい。

(2) HCWミルを後段に3～4台配置して、板クラウン、特にロール胴端部のテーパの作用によるエッジドロップの改善あるいはスケジュールフリー圧延として使用するのも有効である。ただし、HCMWミルのように、両方を同時には機能できないのはやむを得ない。したがって、既存設備への改造に際し、エッジドロップ解消に重点をおく場合とか、設備上あるいは工程的にも大きな障害がある場合には有効である。

さて以下では、HC-MILLを実機ホットストリップミルの仕上タンデムミルに適用する場合について、シミュレーションによって検討を行なった結果を述べる。タンデムミルのスタンド数は6台、圧延機の仕様及び圧延スケジュールは表2に示すものを用いた。なお、後段の3スタンドはすべて小径ロールの直径600mmとしてあるが、全スタンドが従来の4段ミルの場合は直径775mmとしてある。またロールシフト量は、HCMミルは $\delta = -50\text{mm}$ ～最大、HCWミルは $\delta = +50\text{mm}$ ～最大とした。シミュレーションの方法は、日立製作所が開発した理論解析法^{1),2)}により、圧延材の板幅方向のいわゆる横流れを考慮した3次元モデルで計算した。

図6にホットタンデムミル内へのHC-MILLの組込み台数及び組込み機種と板クラウン制御範囲の関係を、板幅900mm, 1,250mm, 板厚2.3mm, 1.6mmについてサーマルクラウンの変動を考慮した場合の結果を示す。なお実機での円滑な操業という観点から、途中スタンド間では通板上の形状許容限度は、急峻度3.0%以下、また最終スタンドの出側では形状が平坦であるとした。同図から、後段の3～4台にHC-MILLを配置すれば、全スタンドに配置した場合と効果があまり変わることなく、実操業に必要な板クラウンの制御が可能であり、またサーマルクラウンの変動に対しても、共通な板クラウンの制御範囲が十分に広いことが分かる。なお、前述したワークロールシフトによる摩耗クラウンとサーマルクラウンの相殺効果を考慮すると、共通な板クラウン制御範囲は同図に示すものよりも拡大することになる。

3.3 高品質・歩留まりの向上

3.3.1 板厚精度

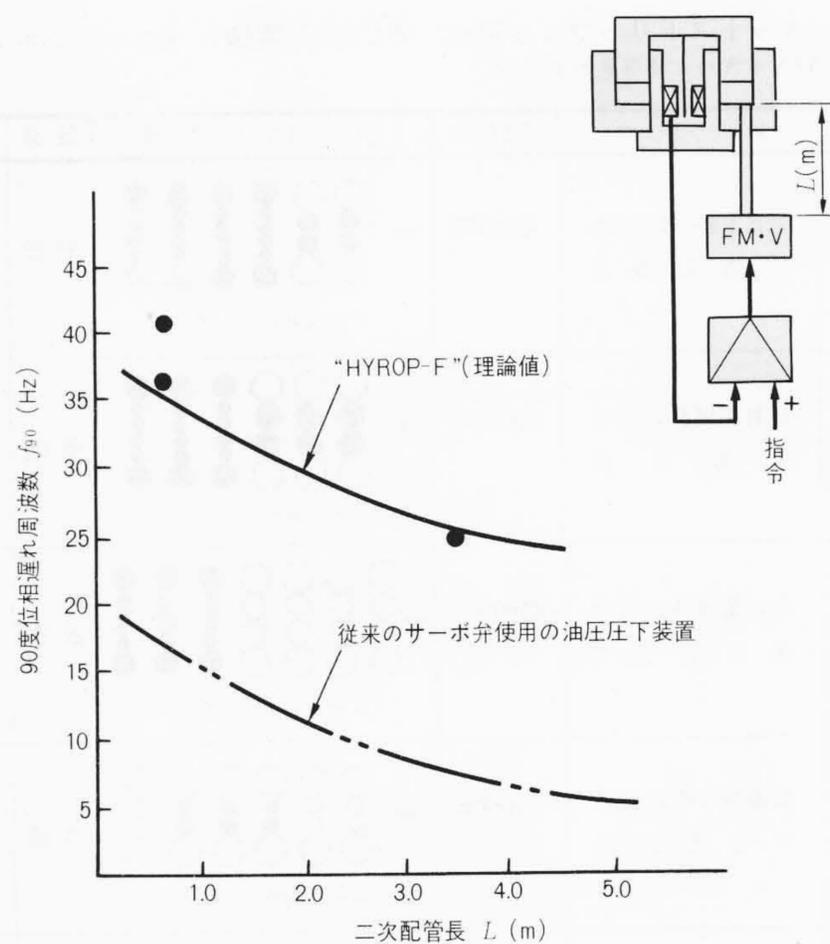
最近のホットストリップミルでは、極めて高い板厚精度と歩留まりの向上が要求されており、特に圧下装置の応答性の向上は重要である。これに対し、多数のコールドミルの分野で実績のある日立式油圧圧下装置“HYROP-F”をホットストリップミルに適用するため開発実用化し、既に3プラントに納入し順調に稼動している。

“HYROP-F”の特徴は次に述べるとおりである。

- (1) 直動形サーボバルブでフォースモータによりスプールを直接駆動する方式であるため、作動油の汚染に対して強く、フィルタの数を減少し、スタンドバイのサーボ弁の設置が不要なため保守管理が容易で、かつ保守費が低減する。
- (2) 難燃性又は不燃性の作動油に使用できる。
- (3) 高圧、大容量をもっているとともに、サーボ弁単体応答性は200Hzと高応答性を達成している。

図7は“HYROP-F”の応答性が従来方式に比べて2～3倍であることを示す。また、サーボ弁の信頼性が高いほど保守回数が少なくなり、サーボ弁を圧下シリンダの近くに設置可能となるため、二次配管長が短縮し応答性が向上することを示す。

この“HYROP-F”は、圧下装置以外に、ロールベンダ、油圧ルーバ、ダウンコイラ用ラップローラなどに適用拡大が図れる。



注：●印は実績値を示す。

図7 ホットストリップミル用油圧圧下装置の応答性 サーボ弁の単体の高性能以外に、二次配管の短縮により応答性が向上する。

3.3.2 蛇行修正制御

板クラウン制御により平坦な板を得る場合、圧延現象上必然的に圧延材が蛇行しやすくなるという問題がある。この解決策として、前述した高応答・大容量の“HYROP-F”を用いた蛇行修正制御を既に実用化しているが、詳細は本特集号の別論文中で述べているので参照されたい。

3.4 省エネルギー

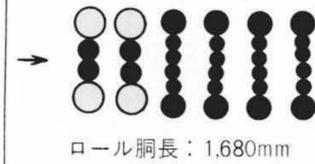
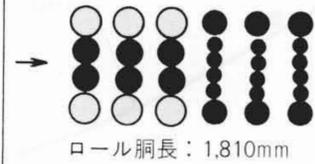
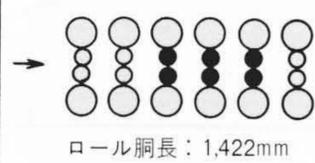
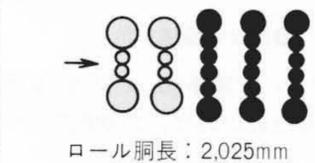
HC-MILLの採用による省エネルギー効果を図2に示す。本ミルは板クラウン制御範囲が大きくまた圧延荷重の変化に対して板クラウンの変動が小さいミルであるため、小径の作業ロールによる圧延動力の減少が図れるだけでなく、高圧下圧延が可能である。その結果、バー厚の増大を図れるため圧延ラインでの熱拡散防止及び低温出炉を可能にし、燃料費やスケール損失を大幅に低減できる。これらの効果をいっそう発揮するための新技術としては、超極厚用フライングシャワーの実機化が既に完了している。

4 ホットストリップミルへの応用

HC-MILLの性能は、冷間圧延機での多数の実績以外に、ホットストリップミルの分野でも広く世界に認められ、昭和55年から現在までのタンデムミルの製作台数は5プラント・16スタンドに及んでいる。表3にその主な仕様と設置目的を示す。新設の設備以外に既存設備にも採用され、また非鉄分野にも適用拡大されている。

図8に、新設の仕上ミルとして新日本製鐵株式会社八幡製鐵所に納入の後段4スタンドにHCMWミルを、また前段2スタンドにはロール段付摩耗対策用HCWミルを配置した例を示す。本設備は昭和57年4月に順調に稼動を開始した。図9に、既存設備をHC-MILLに改造した例として、日新製鋼株式会社呉製鐵所向けの後段3スタンドHCMWミル、前段3スタンドHCWミルの配置例を示す。

表3 ホットストリップミル用HC-MILL納入実績 HC-MILLのホットストリップミルへの適用例を示す。新設以外に既存設備にも応用拡大され、また非鉄分野をも含めて使用されている。

No.	納入先	稼動開始	HC-MILL 主仕様	区分	HC-MILL 適用目的と主な効果	圧延速度, 圧延材	ミルタイプ
1	新日本製鉄株式会社 八幡製鉄所	昭和57年	 ロール胴長: 1,680mm	新設	(1) スケジュールフリー圧延 (2) 省エネルギー (a) 小径ロールによる後段の強圧下と温度低下防止 (b) パー厚増大と出炉温度の低下 (3) 高品質製品 板クラウンと形状の改善	1,438m/min 普通鋼 合金鋼 ステンレス鋼 電磁鋼	F1~2: HCW F3~6: HCMW
2	日新製鋼株式会社 呉製鉄所	昭和57年	 ロール胴長: 1,810mm	改造	同上	1,148m/min 普通鋼 合金鋼 ステンレス鋼	F1~3: HCW F4~6: HCMW
3	川崎製鉄株式会社 水島製鉄所	昭和58年	 ロール胴長: 2,300mm	改造	同上	1,485m/min 普通鋼 合金鋼	F5~7: HCMW
4	川崎製鉄株式会社 千葉製鉄所	昭和58年	 ロール胴長: 1,422mm	改造	(1) 板クラウンの改善 (特に, エッジドロップ) (2) スケジュールフリー圧延	684m/min 普通鋼 合金鋼 ステンレス鋼	F3~5: HCW
5	カイザーアルミ (アメリカ)	昭和59年	 ロール胴長: 2,025mm	新設	(1) 高品質製品 (a) 板クラウンの改善 (b) 形状の改善	335m/min アルミ及び アルミ合金	F3~5: HCM

注: ● の4段ミルはワークロールシフト式ミルを意味する。ミルタイプの記号の意味は表1を参照。

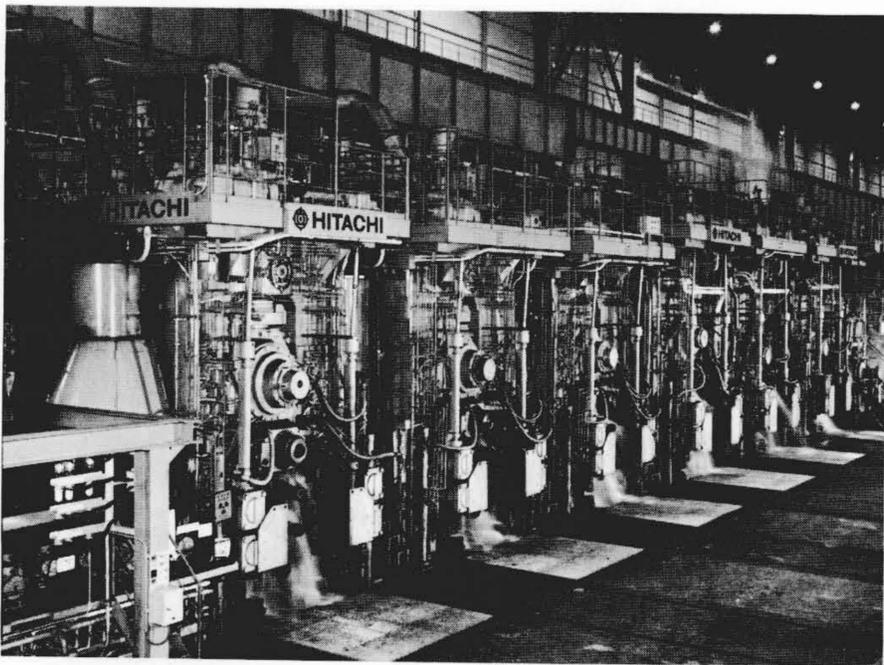


図8 新設ホットストリップミル用HC-MILLの全景 新日本製鉄株式会社八幡製鉄所の新設仕上圧延機は、昭和57年4月から稼動を開始し、現在順調に稼動中である。

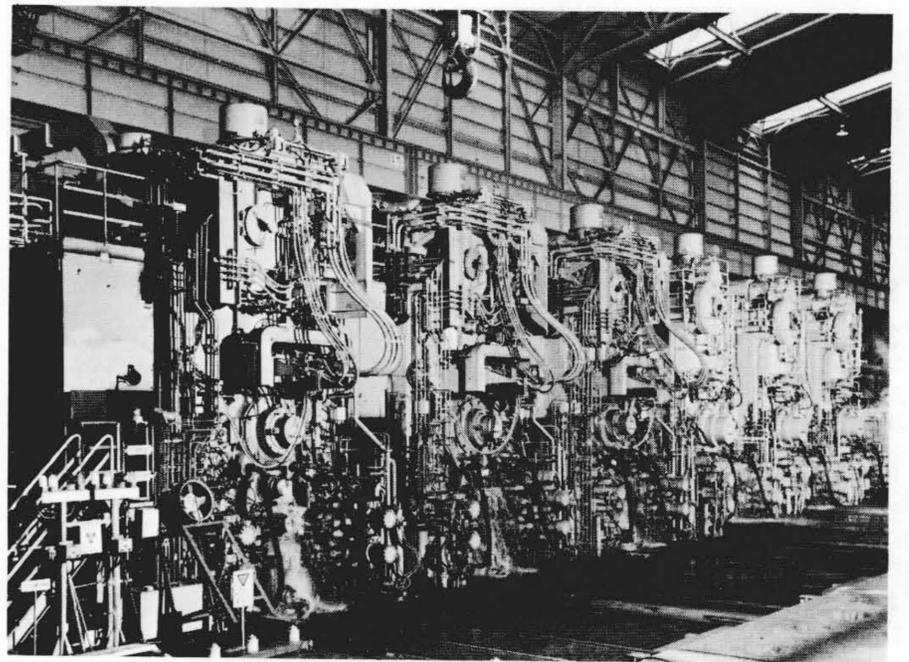


図9 改造ホットストリップミル用HC-MILL全景 日新製鋼株式会社の既設備仕上圧延機に採用されたHC-MILLを示す。

5 結 言

中間ロール移動に加えワークロールをシフトするHC-MILLは、連続鋳造とホットストリップミルの直結化に不可欠なスケジュールフリー圧延に最適なミルであり、また、品質・歩留まり向上のために最重要な板クラウン制御能力が、従来の4段ミルに比べて格段に優れている点について述べた。

今後は、HC-MILLの機能を生かすための板クラウン制御システム、省エネルギー、省力化などへのいっそう広い応用を考える一方、実操業での特性・効果については次の機会に述べたいと考える。

終わりに、HC-MILLのタンデムホットストリップミル第1号機の実現を目指して、共同研究と実機化段階を通じて積極的に推進、御指導をいただいた新日本製鉄株式会社殿及び既存設備へ採用をいただいた関係各社に対し深謝申しあげる次第である。

参考文献

- 1) 梶原, 外: "HC-MILL"によるホットストリップの板クラウン・形状制御, 日立評論, 61, 9, 613~618(昭54-9)
- 2) 梶原, 外: ホットストリップのクラウン制御法に関する研究, 第62回圧延理論部会, 13-16(昭54-3)