

連続熱間圧延における板クラウン制御性能向上に向けて

— CNP[®] ミルによるボディとエッジのクラウン両立制御 —

Improvement on Strip Crown Control Performance in Hot Strip Mill — Hot Strip Mill Set Up System for Body and Edge Crown with CNP[®] Roll —

本 城 恒 元 機械事業本部産業システム事業部 技師長
佐 藤 全 佳 IHI メタルテック株式会社 技術部 部長

薄板熱間の連続圧延で、板クラウン制御の精度向上のため、板幅方向の中央領域のボディ板クラウンと板幅端のエッジドロップ板クラウンの両方を、ロールシフト手段のみで同時に設定制御する方式を開発した。上流スタンドと下流スタンドで異なった形状のシフトロールを配置し、シフト量を設定することによって、2種の板クラウンを同時に満足できることを解析的に示した。ワークロールベンディング機能はフィードバック形状制御にフルに使用できるメリットも生まれ、板形状制御性能が向上する。

A set-up control method for hot strip mills has been developed to simultaneously achieve the desired strip body crown and edge drop crown using only specified curved shift rolls. Two different roll shapes are arranged in the upstream stands and downstream stands. Then the roll shift that satisfies both desired crowns at the exit of the final stand is calculated based on consecutive rolling theory. The performance of this combination of shift rolls has been confirmed analytically. This new method allows work roll bending to be fully used for flatness feedback control.

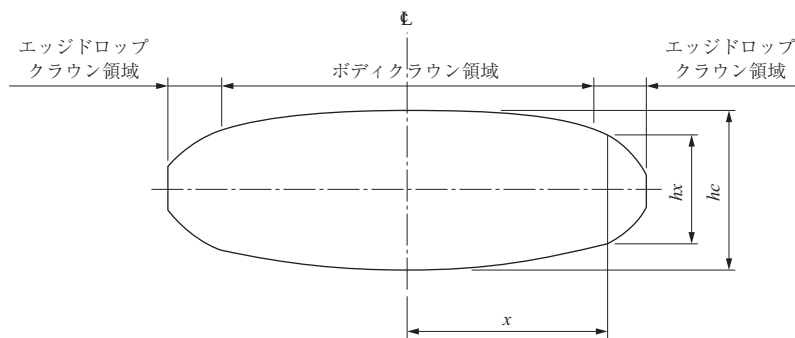
1. 緒 言

薄板熱間の圧延では、幅方向の板厚み分布を所定の分布形状に収めることが重要である。幅方向の板厚み分布は、幅方向の板厚み変動を表す板クラウン値で評価される。幅方向中央領域であるボディクラウン領域と、幅端領域であるエッジドロップ（以下、ED と呼ぶ）クラウン領域とは圧延特性が異なるので、板クラウン値は、第1図に示すような、ボディクラウン値と ED クラウン値で代表される。圧延では、双方の値を同時に管理制御することが難

しいため、どちらか一方の目標クラウン値で制御を行い、他方はできなりとされることも多いが、この双方の値が所定の値に入ることが望ましい。

ボディクラウン値と ED クラウン値を両立して同時に制御するための圧延設備の新しい方式を開発したので報告する。

本稿では板クラウン値を Cr_x で表し、 x は板幅端からの幅方向位置を表す。たとえば Cr_{100} は板幅中央の厚みから、板幅端から 100 mm 内側の厚みを差し引いた値を示す。本稿ではボディクラウンを Cr_{100} で代表させ、ED



(注) x 地点の板クラウン $Cr_x = hc - hx$

第1図 圧延板の幅方向板厚み分布
Fig. 1 Thickness distribution along width

クラウンを Cr40 または Cr25 で代表させている。ED 領域内のみでのクラウンを表すときは、ED 領域クラウン値 (Cr100-Cr25) で代表させた。

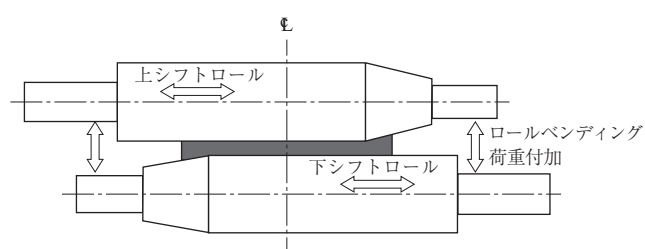
2. 開発の経緯

帯板連続熱間圧延設備（ホットストリップミル）では種々の板クラウン制御アクチュエータが使われるが、当社では作業ロールベンディング（以下、WRB と呼ぶ）装置とロールシフト装置を適用する圧延設備（ロールシフトミル）の場合が多い⁽¹⁾。ロールシフトミルは特殊ロールカーブを付けたロールをシフトするミルである。この 2 種のアクチュエータの設定値を演算装置で演算して初期設定値を指令して圧延を行う⁽²⁾。

塑性変形理論からは、薄板の熱間圧延では、ボディクラウン制御は仕上げホットストリップミルの上流ないしは中流のスタンドで行うのが望ましく、ED クラウン制御は下流のスタンドで行うのが望ましい⁽³⁾。

ロールシフト方式で ED 制御を行う方式として、テーパロールをシフトする方式が報告されている⁽¹⁾。第 2 図に示すテーパロールを装備して、ロールのテーパ開始点を板幅の内側に合わせて圧延する方式である。この方式は以下の欠点をもつ。

- (1) 幾何学的には ED クラウンをマイナス側（エッジアップ）にしか制御できない。下流スタンドでは、入側板には大きい ED クラウンが付いた板がくることが多く、テーパ開始点が板幅内側にあると、エッジドロップした板をエッジアップすることになり、ED クラウン領域での板の伸び率不均一が大きくなり、薄板圧延では大きな平坦度不良を起こす。
- (2) 板幅内側にテーパ開始点があるため、板表面性状に影響がでる。
- (3) 板が蛇行したときに蛇行側の方がエネルギー的に小さいため、通板、戻り時の蛇行の進行が激しくなる。



第 2 図 テーパロールシフト圧延機
Fig. 2 Roll shift mill with taper rolls

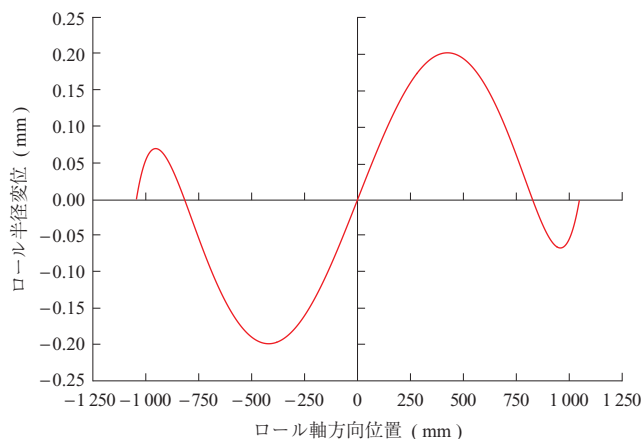
- (4) 中幅、狭幅板で ED クラウン制御効果をだすためにはシフト機構をロングストロークとする必要があり、機構的な複雑さが増す。

これらの欠点を防ぐためにテーパ開始点を板幅の外に置くと、テーパ噛み効果が失われ、ED クラウンを制御する能力が失われる。テーパ開始点を板幅の外に置いてシフトストロークする方式でも、いわゆる HC 効果⁽⁴⁾でクラウン制御効果はあるが、作業ロールの軸芯たわみを制御していることになり、ボディクラウン制御効果が主となる。また蛇行不安定の傾向は残るので、第 2 図に示すミルは通板戻り時の多いホットストリップミル下流スタンドでの ED クラウン制御には不向きである。

当社は板クラウン制御を行うシフトミルとして、CNP[®]ミルを提供している⁽¹⁾。CNP[®]ミルは第 3 図に代表される特殊ロールカーブを付けたロール（CNP[®]ロール）をシフトするミルであり、ショートストロークシフト構造で、クラウン制御が可能であり、生産量の多い板幅レンジで、特に板クラウン制御効果が大きくなるように工夫されている⁽¹⁾。第 3 図で、縦軸のロール半径変位とはロール胴長中心での半径を基準とした胴長方向での半径差を示す。

CNP[®]ミルのロールカーブが各スタンドで同一あるいは相似形であると、下流スタンドのロールシフトで ED クラウンを独立に制御するのは難しく、ED クラウン制御は WRB 装置での設定制御に頼ることになる。

一方、下流スタンドの WRB 装置は下流でのフィードバック平坦度制御に使われる度合いが大きく、ED クラウン設定制御のための使用は大きく制約される。ED クラウンを小さくするためには下流スタンドのロール径を上流とは異なる小径として、圧延荷重を小さくするのが良いとも言われる理由である。



第 3 図 CNP[®]ロール形状例 (B-CNP[®])
Fig. 3 Example of CNP[®] roll profile (B-CNP[®])

本稿では、CNP[®]ミルのロールカーブを各スタンドで同一あるいは相似形とせずに、別形状にすることによって、ロールシフトのみでボディクラウンとEDクラウンを両立して設定制御する方式を開発した。上流スタンドには、ボディクラウン制御効果が大きく、EDクラウン制御効果が小さめの形状ロールを配置し、下流スタンドには、EDクラウン制御効果が大きく、ボディクラウン制御効果が相対的に小さい形状ロールを配置し、シフト設定制御のみで、ボディクラウンとEDクラウンを両立して設定制御し得る方式とした。

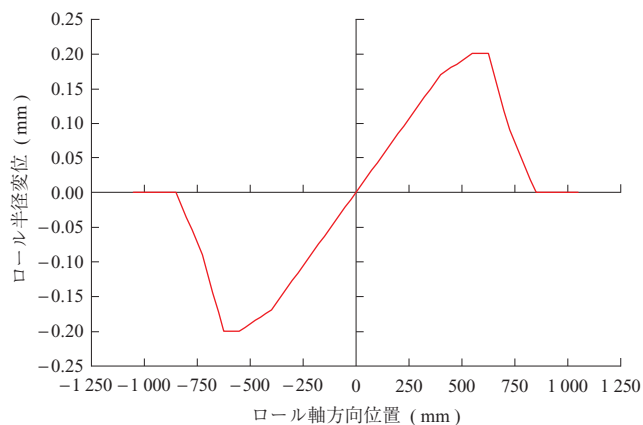
3. 鉄鋼用仕上げホットストリップミルにおける板クラウン性能解析

以下に鉄鋼熱延仕上げ連続圧延機で本方式の機能を解析的に確認した事例を述べる。第4図に検討対象ホットストリップミルと圧延条件を示す。

本条件のもとで、ボディクラウン (Cr100) を固定するとき、EDクラウン Cr40, Cr25 がシフト配置のみでどの程度の変化領域をもつかを算出して、ボディクラウン値とEDクラウン値両立制御の機能を評価する。

3.1 シフトミルによる単スタンドでのクラウン制御効果

ボディクラウン効果を大きくほしい上流、中流スタンドのロール形状は第3図に示す形状 (B-CNP[®] ロール) とした。EDクラウン効果を大きめにほしい下流スタンドのロール形状は第5図に示す形状 (E-CNP[®] ロール) とした。第5図において、ロール胴長位置 500 ~ 600 mm 近辺でロール形状に折れ線点があるかのように見えているが、これは図が胴長方向には縮尺され、半径方向には拡大して表示しているためで、ロールグラインダの砥石端の曲率半径が数百 mm の場合の丸みついた形状を表している。



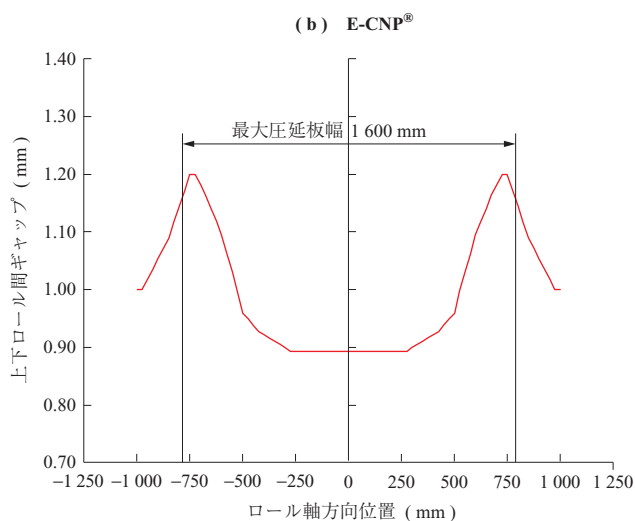
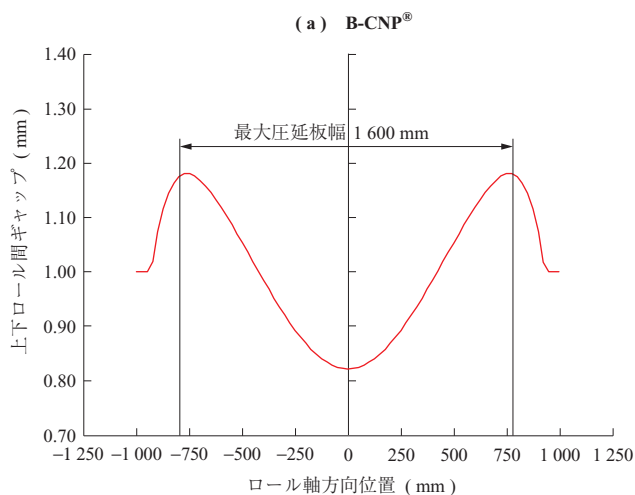
第5図 別種CNP[®]ロール形状 (E-CNP[®])
Fig.5 Another CNP[®] roll profile (E-CNP[®])

それぞれのロール形状で、1 mm の基準上下ロール間ギャップで、上下ロールを反方向にそれぞれ 125 mm シフトさせたときのロールギャップクラウン形状を第6図に示す。ここでロールギャップクラウン形状とは、軸芯たわみのない上ロール下面と下ロール上面の胴長方向の間隙分布が示す形状クラウンである。E-CNP[®]形状では、B-CNP[®]形状よりも、ボディクラウン領域ではクラウン変化が少なく、ED領域内ではクラウン変化効果が大きくなっていることが分かる。

ロールギャップクラウン値を基に、B-CNP[®]形状とE-CNP[®]形状のメカニカルクラウン (幅方向圧延力を均一とするときの板クラウン値) 変化特性の計算結果の比較を第7図に示す。ED領域クラウン変化量とは、基準状態に対して、ロールシフト位置のみを +100 mm 変化させたときにED領域内クラウン値 (Cr100-Cr25) が変化した量を示す。図中のED領域クラウン変化率とはED領域クラウン変化量を基準状態でのED領域クラウンで割った値を示す。ボディED運動率とは、ED領域クラウン変化率をボディクラウン変化率で割った値を示し、その

スタンド No.	F1	F2	F3	F4	F5	F6	
配置構成							
板厚 (mm)	30.00	→ 14.31	→ 7.71	→ 4.79	→ 3.23	→ 2.45	→ 2.00
圧延荷重 (kN)	19 990	20 010	18 030	15 920	13 890	10 790	
圧延機主仕様 (全スタンド共通)	控えロール: ロール直径 1 500 mm, ロール胴長 1 800 mm						
	作業ロール: ロール直径 750 mm, ロール胴長 2 100 mm						
	作業ロール可能シフト量: ±150 mm, 作業ロールベンディング装備						

第4図 想定仕上げホットストリップミルと圧延条件
Fig.4 Specification of finishing train and rolling condition

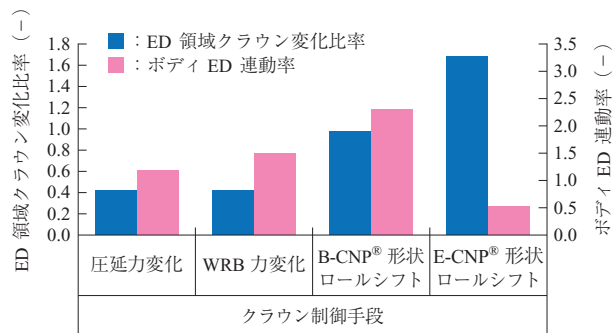


第 6 図 ロールギャップ変化分布図 (+125 mm シフト時)
Fig. 6 Roll gap distribution along width (after 125 mm shift)

アクチュエータがボディクラウンを変化させずに ED 領域内のクラウンのみを変化させ得る度合いを示す。

第 7 図中にはクラウン制御手段としての WRB が 1 000 MN 変化および圧延荷重が単位板幅 (1 mm) 当たり 5 MN 変化の時の特性値も示した。

第 7 図から、B-CNP® ロール、WRB、圧延力配分といっ



(注) 条件: 1 200 mm 板幅

第 7 図 メカニカルクラウン特性比較図

Fig. 7 Comparison between mechanical crown characteristic by actuators

たクラウン制御手段では、ボディクラウンが ED 領域内のクラウンに運動してしまい、ED 領域内クラウンのみを選択的に制御することが難しいことが示されている。しかし、E-CNP® 形状でシフトすれば、ED 領域内クラウンのみを選択的に制御できる度合いが大きいが示されている。

3.2 連続スタンドでのシフトミルによる板クラウン設定制御効果

連続スタンド板クラウン計算は、第 1 表に示すような 4 種のロール形状配置によって行った。ケース J は実圧延での操業状態に近いケースである。鉄鋼熱間圧延では、板表面性状の点からロール摩耗分散シフト作業も重要であり、最終スタンドはクラウン制御のためのロールシフトは行わないことにした。これによって最終スタンド (F6) でのエッジドロップ成長があるので、F4、F5 スタンドでの ED クラウン改善を大きめに達成しておくことが必要になる。

第 2 表に各スタンドでの板クラウンに影響するロールクラウン値を示す。各種要素値 (圧延荷重、WRB、シフト位置など合計 m 種類) によって、各スタンドのメカニカルクラウンが変動する度合いに影響係数として、いわゆる分割モデル計算⁽⁵⁾で求めておく。第 3 表に主要な要素についての今回の各スタンドでの影響係数表を示す。

第 1 表 ロール配置とロールシフト条件

Table 1 Arrangement of roll profile and roll shift position per stand

スタンド No.		F1	F2	F3	F4	F5	F6	
設定 WRB 荷重	kN / 軸箱	800	870	600	590	500	300	
ケース記号	G	B-CNP® のみ	シフトロール形状	ストレート	B-CNP®	B-CNP®	B-CNP®	B-CNP®
			シフト位置 (mm)	0	40	40	25	10
	H	B-CNP® と E-CNP®	シフトロール形状	ストレート	B-CNP®	B-CNP®	E-CNP®	E-CNP®
			シフト位置 (mm)	0	40	40	40	40
	I	B-CNP® と E-CNP®	シフトロール形状	ストレート	B-CNP®	B-CNP®	E-CNP®	E-CNP®
			シフト位置 (mm)	0	40	30	55	40
	J	B-CNP® と E-CNP®	シフトロール形状	ストレート	B-CNP®	B-CNP®	E-CNP®	E-CNP®
			シフト位置 (mm)	0	70	70	0	0

第2表 作業ロールクラウン
Table 2 Work roll crown per stand

項目	初期研削ロールクラウン (ロール胴長内放物線形) (μm)	熱クラウン (板幅内4次曲線形) (μm)	
スタンド No.	1	-100	100
	2	-100	100
	3	-50	100
	4	-50	100
	5	0	100
	6	0	100

$$C_{rmj} = \sum_{i=1}^m \alpha_{i,j} \cdot y_{i,j} \dots\dots\dots (1)$$

C_{rmj} : j スタンドメカニカルクラウン

α_i : 第 i 種影響係数

y_i : 第 i 種影響要素値

要素合計としての各スタンドでのメカニカルクラウン値に各スタンドでの転写率 $\beta_{j,x}$ を掛けるとそのスタンドで転写される板クラウンが求まる (x は幅端からのクラウン定義位置). 厚みごと, 幅方向位置ごとの転写率の実測

値は報告されておらず, 筆者らは CORMILL シミュレータ⁽⁶⁾で転写率を求める計算を実施したが, 全条件でまとまりのある結果とはなりにくかったので, 他者の数少ない公表計算報告例 P⁽⁷⁾, Q⁽³⁾をも加えて推定することにした. 第8図に示す, これら計算結果と報告例を基に想定した今回の転写率 $\beta_{j,x}$ 組み合わせを第4表に示す. 各スタンド入側板クラウンが出側に残る率としての遺伝係数 $\gamma_{j,x}$ は下式とした.

$$\gamma_{j,x} = 1 - \beta_{j,x} \dots\dots\dots (2)$$

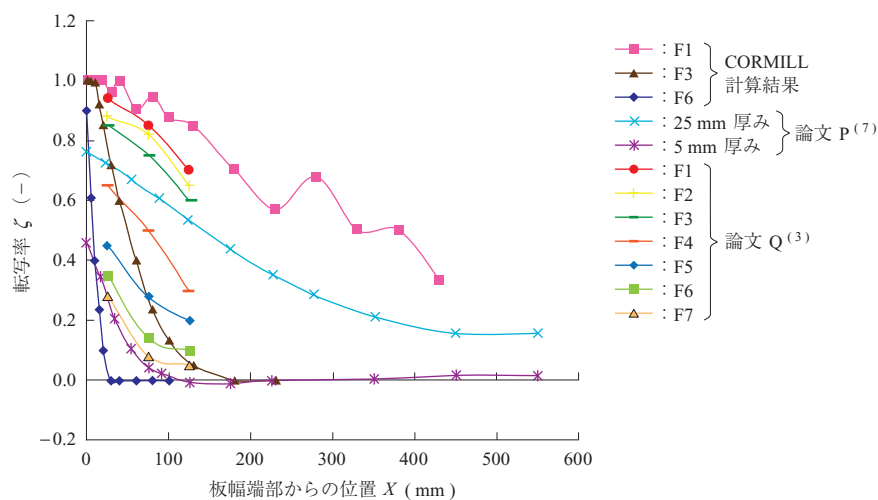
第4表 想定転写率
Table 4 Assumed stamping factors

項目	転写率: 比率表示			
Cr 位置 (mm)	Cr25	Cr40	Cr100	
スタンド No.	1	0.9	0.8	0.7
	2	0.8	0.65	0.55
	3	0.7	0.5	0.4
	4	0.55	0.35	0.25
	5	0.4	0.25	0.2
	6	0.25	0.2	0.15

第3表 主要影響係数
Table 3 Influence coefficient of principal factor

影響係数	CNP [®] シフト影響係数 ($\mu\text{m}/\text{mm}$)			圧延荷重影響係数 ($\mu\text{m}/\text{tf}$)			WRB 影響係数 ($\mu\text{m}/\text{tf}$)			ロールクラウン影響係数		
	Cr 定義位置	Cr100	Cr40	Cr25	Cr100	Cr40	Cr25	Cr100	Cr40	Cr25	初期研削分	熱クラウン
											($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	
スタンド 位置	F1	0	0	0	0.090 2	0.12	0.131	0.39	0.48	0.51	0.472	0.68
	F2 (B-CNP [®])	2.098	2.47	2.56	0.090 2	0.12	0.131	0.39	0.48	0.51	0.473	0.694
	F3 (B-CNP [®])	2.098	2.47	2.56	0.090 2	0.12	0.131	0.39	0.48	0.51	0.473	0.707
	F4 (E-CNP [®])	0.854	1.52	1.726	0.090 2	0.12	0.131	0.39	0.48	0.51	0.472	0.703
	F5 (E-CNP [®])	0.854	1.52	1.726	0.090 2	0.12	0.131	0.39	0.48	0.51	0.472	0.739
	F6	0	0	0	0.090 2	0.12	0.131	0.39	0.48	0.51	0.472	0.726

(注) ケース H, I, J の場合を示す.



第8図 各スタンドの転写率 (CORMILL 計算 1, 3, 6 スタンド) と主要論文値との比較
Fig. 8 Stamping factor comparison between calculated results and reported figures

各パス出口の板クラウンは入側板クラウンに遺伝係数を掛けた値に前記転写板クラウンを加算して求まる。Cr100, Cr40, Cr25 に対してこの計算を行った。

各パス板クラウンを求める方式として、ここに述べた方式以外に、幅方向板厚み分布を考慮した圧延モデル計算を各パスごとに繰り返す方式によることも理屈としては可能である。しかし、内部張力分布の影響のもとで、転写率や影響係数といった特性要因を各 Cr の位置ごと、パスごとに正しく算出されることが業界の薄板に関する現理論レベルでは難しく、設定計算システムに適用するのは無理と判断してこのような連段板クラウン計算方式をとった。

第 4 表の各ケースで各スタンドロールシフト量は、F6 スタンド出口の Cr100 がほぼ共通に 15.5 μm になるように定めた結果である。

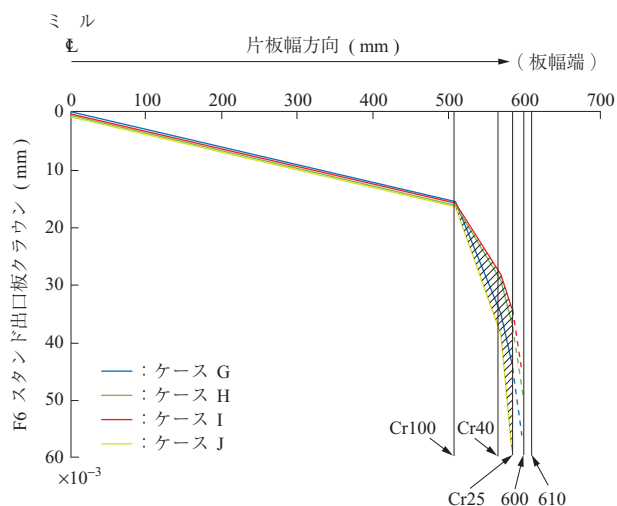
第 9 図に、第 1 表に示す各ケースの F5 スタンド出口板クラウンを示す。

第 10 図に F6 スタンド出口板クラウンを示す。

第 9 図、第 10 図で、ケース I とケース J の差（斜線領域）がボディ板クラウン一定（Cr100 が 15.5 μm ）のまま、ロールシフトのみで ED クラウンを制御し、変化し得る量を示す。

第 9 図、第 10 図は板クラウンがケース J よりも小さくなる方向での変化領域であるが、圧延材によっては板クラウンを大きくすることが必要なときもあり、シフトをケース J よりもマイナス方向に動かせば、第 9 図、第 10 図でケース J の下にクラウン制御領域がもう一つできることを意味する。

前述のように、F6 スタンドでシフトによるクラウン設



第 10 図 F6 スタンド出口板クラウン
Fig. 10 Strip crown at exit of stand F6

定制御を実施していないため、F6 スタンドでは、F5 スタンドより ED 板クラウン変化量が小さくなっているが、業界での ED 板クラウンが 2% 程度であるので、設定制御能力としては十分と判断する。

今回の解析ではボディクラウン（Cr100）を一定として、ED クラウンをロールシフトの設定制御のみで変化できることを示した。本結果は、ボディクラウンと ED クラウンをそれぞれ同時に指定されたときに、ロール形状の異なる CNP[®] ロールを配置することによって、対応可能であることを示す。

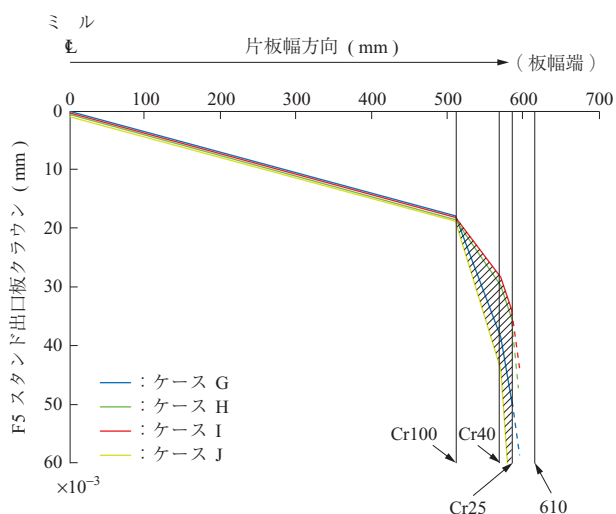
4. 結 言

鉄鋼熱延仕上げ連続圧延機（仕上げホットストリップミル）の薄板圧延で、ボディクラウンと ED クラウンをそれぞれ同時に指定されたときに、ロール形状の異なる CNP[®] ロールを配置することによって、シフト手段のみで対応可能であることを示した。これによって以下の効果も生まれる。

- (1) 形状制御手段としての WRB の初期設定値を固定値として、エッジドロップ設定制御に使用しないので、WRB をフィードバック形状制御に全面的に使用することができる。
- (2) 作業ロールを小径にしなくても、大径のまま ED クラウンを低減できる。

— 謝 辞 —

本稿における CORMILL シミュレータの使用法については、東京大学生産技術研究所柳本潤教授からご指導を



第 9 図 F5 スタンド出口板クラウン
Fig. 9 Strip crown at exit of stand F5

受けました。ここに記し、厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 本城 恒, 佐藤全佳, 口 誠寛: 板圧延における IHI 形状制御装置 IHI 技報 第 48 卷 第 2 号 2008 年 6 月 pp. 93 - 100
- (2) 佐藤全佳, 口 誠寛: 熱間板圧延における形状制御技術の開発 — 板クラウン・平坦度制御システム PFSU の開発 — IHI 技報 第 48 卷 第 2 号 2008 年 6 月 pp. 101 - 106
- (3) 本郷裕一, 梁井俊男, 常田 弘: 熱間圧延材の幅方向のクラウン比率遺伝特性を活用したクラウン制御の検討 塑性と加工 第 38 卷 第 433 号 1997 年 2 月 pp. 165 - 170
- (4) 西 英俊: ロールシフト装置を有する圧延機 第 92・93 回西山記念技術講座 1983 年 9 月 pp. 89 - 126
- (5) 木崎皖司, 佐藤一幸: 圧延機のロール変形解析 石川島播磨技報 第 23 卷 第 1 号 1983 年 1 月 pp. 6 - 13
- (6) 柳本 潤: 数値圧延機の開発と応用 生産研究 1991 年 11 月 pp. 46 - 53
- (7) 藤田文夫: 板圧延簡易 3 次元変形解析モデルの作成と転写率の特性 塑性と加工 第 51 卷 第 594 号 2010 年 7 月 pp. 685 - 689