
CPC 装置付ループカーセパレーターの試作について

Development of Separator with Center Position Control System in Horizontal Looper

前山 公夫(Kimio Maeyama)

要旨：

連続プロセスラインの横形カールパー内のセパレーター上で発生する蛇行トラブルを、簡単な制御装置により自動修正する装置を積載した移動式セパレーターを試作した。試作にあたり、既設ラインで実験をくり返し、ライン通板速度およびロール回転角とロール上のストリップ横行速度および変位の関係を表わす実験式を導き、この式を基に装置設計を行った。本装置を適用したラインは、ストリップゲージ 0.27~0.9mm×760~1000 mmの冷延鋼板を扱い、通板速度が max, 60m/min の連続プロセスラインである。実験結果および基本設計にあたって若干の考察とオンラインテスト結果について記述した。

Synopsis：

In order to restrain the occurrence of lateral strip wandering on the separator roll in a horizontal looper of a continuous strip processing line, a movable separator having automatic guiding devices with simple control system has been developed. At first, experiments were made at one of the continuous processing lines already in operation so as to get equations for the calculation of lateral shift rate or lateral displacement of a strip based upon line speed and the pivot angle of the separator roll. Based on the results, an equipment was designed and applied successfully to a continuous processing line with the maximum line speed of 60mpm, in which cold rolled strips of 0.27 to 0.9mm in thickness and 760 to 1000mm in width are processed. The experimental results, some considerations in fundamental design, and the on-line effects are described in this article.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

CPC装置付ループカーセパレーターの試作について

Development of Separator with Center Position Control
System in Horizontal Looper

前 山 公 夫*

Kimio Maeyama

Synopsis:

In order to restrain the occurrence of lateral strip wandering on the separator roll in a horizontal looper of a continuous strip processing line, a movable separator having automatic guiding devices with simple control system has been developed.

At first, experiments were made at one of the continuous processing lines already in operation so as to get equations for the calculation of lateral shift rate or lateral displacement of a strip based upon line speed and the pivot angle of the separator roll. Based on the results, an equipment was designed and applied successfully to a continuous processing line with the maximum line speed of 60mpm, in which cold rolled strips of 0.27 to 0.9 mm in thickness and 760 to 1000mm in width are processed.

The experimental results, some considerations in fundamental design, and the on-line effects are described in this article.

1. 結 言

金属ストリップ、紙、フィルム、織物などのシート状の製品を扱うプロセスラインにおいて、製品の耳端位置を均一にそろえる操作を自動的に行う制御をEPC (edge position control) と称し、シート状製品の巻もどし、巻取りおよび中間工程に広く用いられている。中間工程におけるEPCは、耳端をそろえるというよりはむしろシートがライン中心を通るようにするという目的が一般的であり、その意味からEPCと称するよりCPC (center position control) と称する方が妥当と考え、本稿ではこの用語を用いることとした。

連続プロセスラインにおけるルーバーの形式に

は横形と縦形の2形式があるが、横形ルーバーは縦形ルーバーに比し、装置が安価であること、ライン構成の自由度が大きいこと、容易に大容量のルーバーを実現し得ることなどの利点がある。しかし、ループ形成時にストリップカテナリーを支持するため配置されるセパレーター上でのストリップの蛇行トラブルが発生しやすいという欠点があり、ストリップのロールアウトによるライン停止、スローダウン、製品の損傷という稼働率および歩留まりの低下につながる現象を生じ、しばしば問題となっている。

ストリップ厚1 mm以下の冷延鋼板を扱い、ライン速度も100m/min以下と比較的低速度の連続ラインのルーバー内でのストリップ蛇行を、簡単な制御装置を用いて自動修正を行う機能を有する

* 亜合工場企画部設計課課長

移動式セパレーターの試作テストを実施し、実用化の目途を得たのでこの装置の概要を紹介する。

2. 横形ルーパー内でのストリップの蛇行

横形ルーパー内でのストリップの蛇行の根本原因は、ループ形成時ストリップカテナリーを支持するため配置されるセパレーターロールに対し、ストリップが図1に示すような、ある進入角を

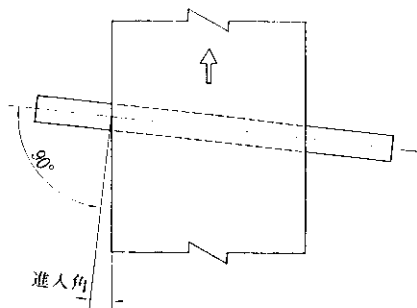


図1 ロールに対するストリップの進入角

もつことによる。

特にルーパー内にあつては、セパレーターの形式が固定式であれ移動式であれ、その配置間隔が時には15mにもおよぶので、進入角のついたロール上での蛇行が起りやすい。

ストリップに進入角のつく原因として、次のようなことが確認されている。

- (1) ストリップの継ぎ目不良、すなわち継ぎ目部の平行度が悪く、くの字状をなすこと
- (2) セパレーターロール軸が、ライン中心線に対し直角に固定されていないこと（特に移動式セパレーターにあつては起りやすい）
- (3) 片伸び、わん曲などのストリップの形状不良
いずれの原因も完全に解消することは困難であり、その対策に苦慮しているというのが実状のようである。

3. ルーパーにおける従来の蛇行修正方法

横形ルーパーでの従来の蛇行修正方法は、ルー

プカーロール自身を中間ガイドロールとしたものの、ルーパーの入口、出口に配置したアイドルロールを中間ガイドロールとしたものの2種類であり、セパレーター部で蛇行修正を試みたという実例は今のところないようである。

従来の方法は、けっきょくルーパー端部における蛇行修正方式であつて、ルーパー内で積極的に蛇行を修正するというのではなく、ルーパー内のストリップ張力を増したり、セパレーターの配置間隔を縮めたり、ある程度の蛇行を許容し得る胴長を有するセパレーターロールを使用するなど、きわめて消極的な対策しかとられていない。

したがって、ルーパークの走行が時には200mにもおよぶ横形ルーパーでは、その効果はルーパー中央部まではとうてい期待し得ない。

4. CPC装置付セパレーターの概要

今回の試作機によるテストを実施したラインの基本仕様とCPC装置の基本仕様は以下のとおりである。

(1) ライン仕様

通板材料	冷延鋼板
板厚	0.27~0.9mm
板幅	760~1030mm
通板速度	60m/min (最大)

(2) ルーパー仕様

ルーパー形式	横形カールーパー
セパレーター形式	移動式台車型
セパレーター配置間隔	15.5m
セパレーターロール	鋼製ロール, 110φ × 1800mm
セパレーター重量	250kg
ルーパー張力	200~700kg

(3) CPC装置仕様

本体	セパレーター共用
ガイディング方式	チルトロール形式
制御方式	3位置動作制御
アクチュエーター	空圧シリンダー
	40φ × 50st
空気圧縮機	27l/min, 5kg/cm ²

リザーブタンク	16l
電 源	AC100V
装置重量	70kg

(4) 機器構成図と外観

図 2 に CPC 装置の構成機器のブロック図を、写真 1 にその外観を示す。

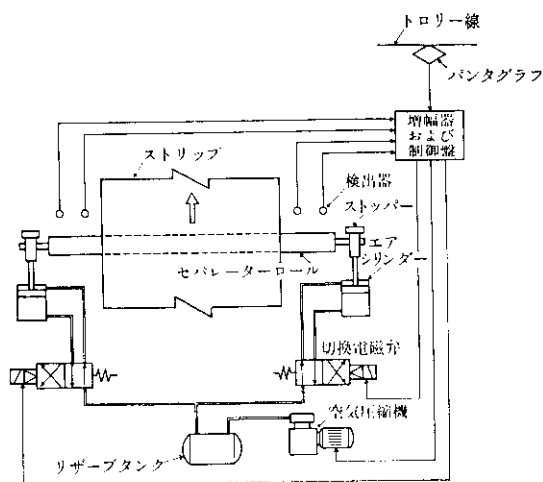
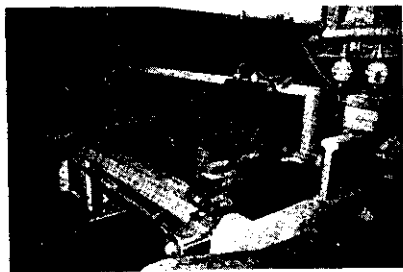


図 2 CPC装置機器構成図



(a) ストリップ上流側から見たセパレーター



(b) 斜後方から見たセパレーター



(c) セパレーター下部

写真 1

5. 回転ロール上のストリップの運動特性

CPC 装置の設計にあたっては、ストリップの横方向の運動ないしは横方向位置矯正ロールの特性の解析が必要である。これらに関する文献も 2, 3 見られる⁽⁴⁾が、ストリップのガイディングロールへの巻き付き角が 90° ないしは 180° の系におけるものであり、セパレーターロールによる CPC の場合のように、ストリップが図 4 に示すようなロール上を通過する場合にはそのまま適用できない。したがって当 CPC 装置の設計に必要なかつ十分な解析を以下に行う。

5.1 蛇行修正の原理と横方向変位の小さな場合のストリップの運動特性

蛇行修正の原理は、図 3 に示すように y 軸に対し θ (rad) だけ回動させて配置したコロ上に物

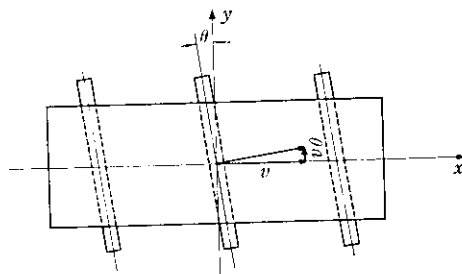


図 3 回転コロ上の物体の速度ベクトル

体を置き、 x 軸方向に移動させると、この物体は y 軸方向の分速度をもつということにもとづいている。

この運動でコロの回動角 θ が小さい時、 y 軸方向の分速度（横行速度） dy/dt は

$$\frac{dy}{dt} = v\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。

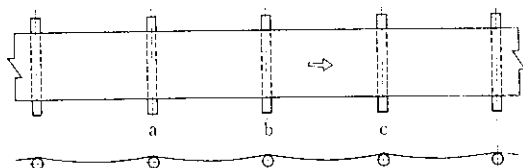


図4 セパレーターロール上のストリップ

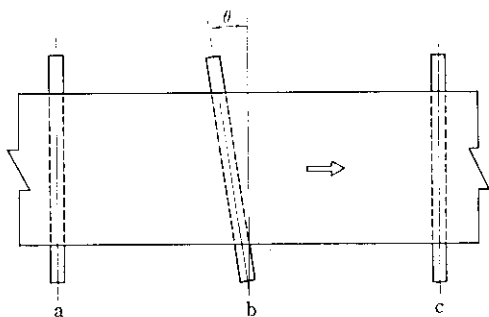


図5 セパレーターロールの回動

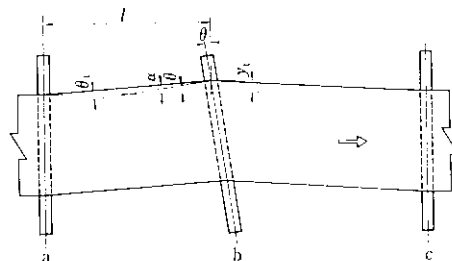


図6 横変位の小さい場合の回動ロール上のストリップの幾何学的関係

金属ストリップを 図4 に示すようなロール上に張力を付与して搬送する系（横形ルーバー内のセパレーター上のストリップの搬送に相当する）において、いま 図5 に示すようにロール b を θ だけ回動させた場合にも、図3 に示した例のように y 軸方向の分速度が生じ、ストリップは y 方向に変位する。

ロール b をはさむロール a およびロール c 上で y 軸方向の変位はないものとして、ロール b を θ (rad) 回動させてから t (sec) 後のストリップの位置を 図6 に示すように y_t (mm)、その時のストリップのロール b への進入角を θ_t (rad)、固定ロール a と回動ロール b 間でストリップ耳端の成す角を α (rad)、その距離を l (mm) とすれば、

α が小さい時には $\alpha = y_t/l$ と表わせるから次式がえられる。

$$\theta = \alpha + \theta_t = \frac{y_t}{l} + \theta_t$$

$$\therefore \theta_t = \theta - \frac{y_t}{l} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ロール b 上での変位 y_t が小さい間は、ストリップに付与されている張力とストリップの曲げ剛性の影響は無視できるから、y 軸方向分速度はストリップの進入角にのみ支配されると考えられる。

したがって、 t (sec) 後の y 軸方向分速度は次式で表わされる。

$$\frac{dy_t}{dt} = v\theta_t = v\left(\theta - \frac{y_t}{l}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

上記微分方程式を解き、境界条件 $(y_t)_{t=0} = 0$ を代入して次式が求まる。

$$y_t = l\theta(1 - e^{-\frac{v}{l}t}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

さらに(4)式を(3)式に代入して次式が求まる。

$$\frac{dy_t}{dt} = v\theta e^{-\frac{v}{l}t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

連続制御を行う場合には、横方向変位が十分小さいから、(4)、(5)式が回動ロール上のストリップの運動特性を表わすものと考えてさしつかえなからう。

5.2 横方向変位の大きな場合のストリップの運動特性

横方向変位が大きくなると、当然ストリップ張力および曲げ剛性の影響は無視できなくなる。

この場合のストリップの横方向の運動特性を表わす式の誘導は、理論解析ではなく実験式によるものとした。

横方向変位の大きな場合の回動ロール上のストリップの耳端の成す線は、図7 に示すように S 字状をしている。そのため回動ロール進入時のストリップ耳端とパスラインの成す角は、(3)式の誘導において y_t/l と表わした値より大きくなる。これを補正係数 k_2 を用いて $\alpha' = k_2 y_t/l$ とする。

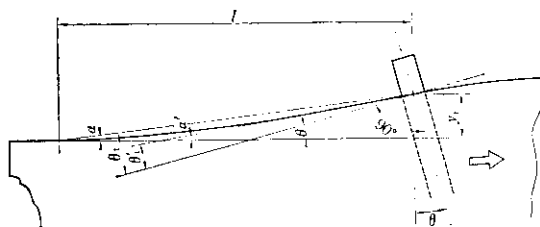


図7 横変位の大きな場合の実際のストリップ形状

ストリップ張力と曲げ剛性は、いずれも横方向の変位を妨げる方向に作用するから、横行速度を減少させる。これも通板速度と進入角で決る値($v\theta'$)に対して補正係数 k_1 を用い $dy_i/dt=k_1v\theta'$ とする。

以上の考察から実験式を次式のように考える。

$$\frac{dy_i}{dt} = k_1 v \left(\theta - k_2 \frac{y_i}{l} \right) \quad \text{.....(6)}$$

上記微分方程式の解と境界条件 $(y_i)_{t=0} = 0$ から次式が求まる。

$$y_i = \frac{1}{k_2} l \theta (1 - e^{-k_1 k_2 \frac{v}{l} t}) \quad \text{.....(7)}$$

この(7)式が横変位の大きな場合のストリップの運動特性を表わすものとして、実験により k_1 , k_2 を定めるものとする。

5.2.1 実験条件と実験結果

(7)式における定数 k_1 , k_2 の決定と回動ロールとその上流側の横変位開始点までの距離 l の確認のため、既設ライン(当CPC装置設置ラインとは別ライン)の横形ルーパー内のセパレーターロールを回動させ、同ロール上におけるストリップの時間-横変位特性の測定を行った。実験ラインのセパレーター配置間隔は14m, セパレーターロールは $110\phi \times 1800l$ の鋼製ロールである。ルーパー内のストリップの単位張力は実操業同様 0.8kg/mm^2 とした。

実験はもっとも一般的な板厚である 0.5mm の冷延鋼板を用い、通板速度($v=10, 20, 30, 40\text{ m/min}$)、ロール回動角($\theta_{\text{deg}}=0.6^\circ, 1.2^\circ, 1.8^\circ$)

をパラメータとして回動ロール上における時間-横変位特性を測定すると同時に横変位の発生位置を確認した。この実験で得た時間-横変位特性の一例を図8に示す。また回動ロールの上流側(ルーパー側)のセパレーターロール(14m間隔で2本)上でも横方向変位が発生しており、固定点はいずれの場合もルーパーロールであった。

5.2.2 実験データの解析

これらの実験で得た時間-横方向変位の特性曲線を(7)式で近似した時の係数 k_1 および k_2 は v , θ_{deg} に対し図9, 10のような関係にある。

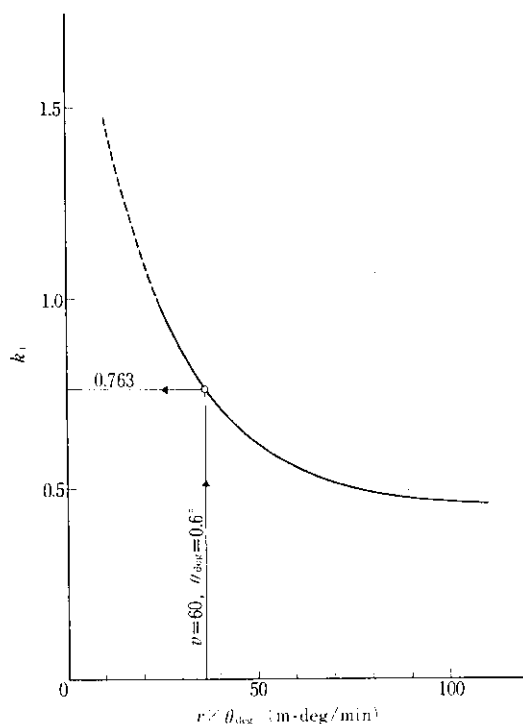
図9 $v \times \theta_{\text{deg}}$ と k_1 の関係

図9, 10から求めた k_1 , k_2 の値を用い、 $l=42\text{m}$ (回動ロールからルーパーロールまでの距離)として(7)式により計算した y_i を図8中に破線で示す。図中実線で示された実測値とよく一致している。

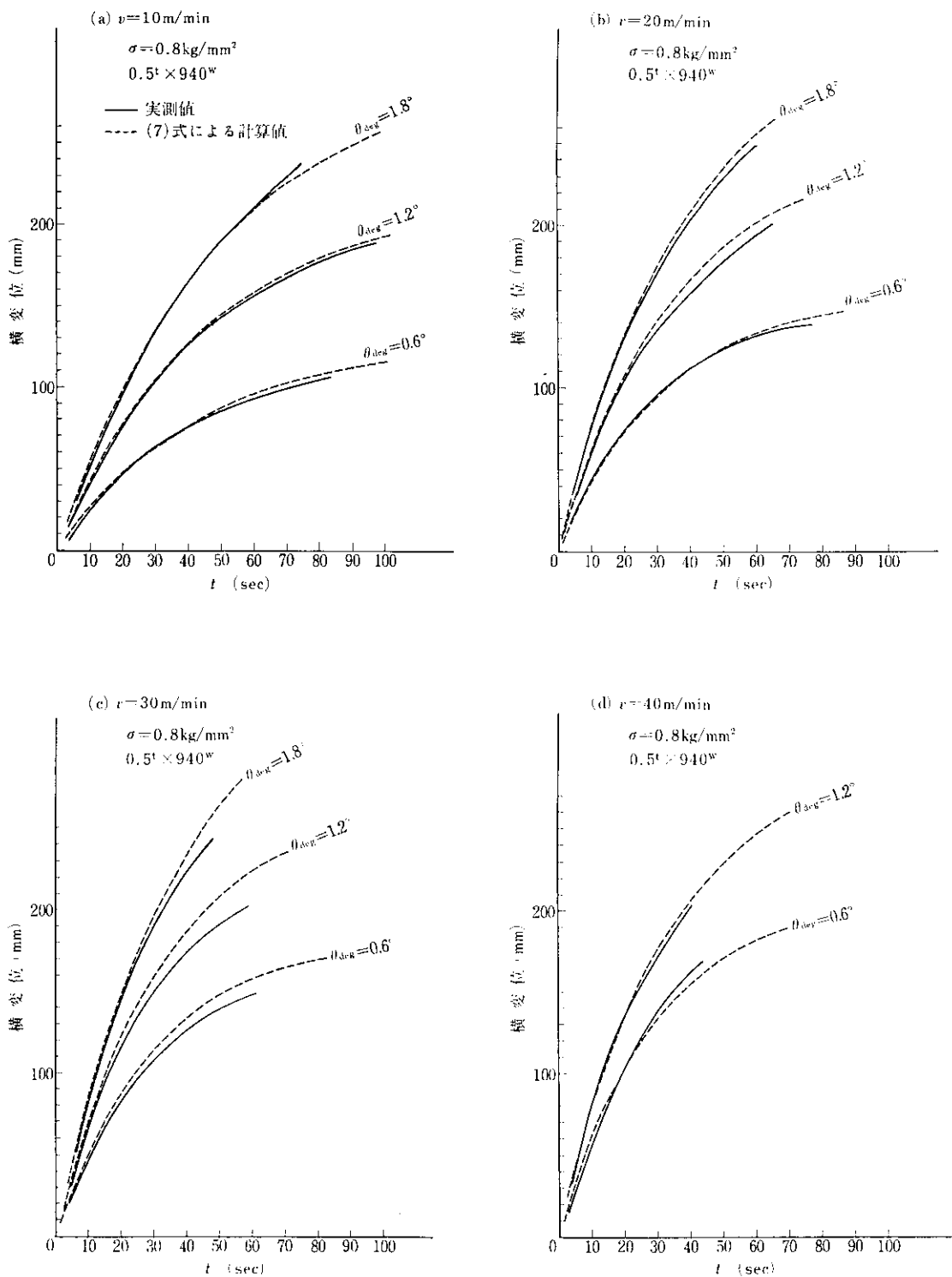


図 8 回転ロール上のストリップの横変位特性

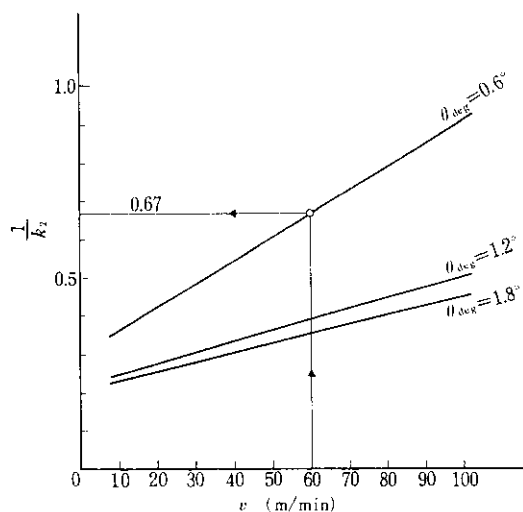


図 10 v と $\frac{1}{k_2}$ の関係

6. 基本設計

6.1 制御方式

ルーパー内の入口ロール、セパレーターロール、ループカーロール、出口ロール等からストリップがロールアウトしないように通板させるためのCPCの要求精度は $\pm 100\text{mm}$ 程度で十分であろう。したがって、その制御方式もできるだけ簡単な、たとえば on-off 制御で満足させることを目指すべきである。しかしながら、この制御系の閉ループ中にムダ時間や高次遅れの要素がはいりこむと、周期的に変動する制御偏差の振幅が増大し、制御が安定して行われなくなるという可能性もあるから、入力偏差の波形、ロールの制御特性を把握し、制御の安定性を確かめておく必要がある。

幸い筆者らが行った実験の結果では、ロールの制御特性については(7)式で表わされる1次遅れの要素とみることができ、考慮を払うほどのムダ時間要素も存在しないことが確かめられた。

一方、入力偏差であるストリップの蛇行特性は、通常はほとんど零か、または非常に緩慢な横行速度で横方向の変位を示すものであるが、継ぎ目部の平行度不良の場合などにこれが急速に増大することがある。このような種類の入力偏差に

on-off制御で対応するために、図12に示すような動作すき間のある3位置動作制御を採用することとした。

この制御方式によるストリップの耳端位置とロールの動作の関係を図13に示す。

6.2 蛇行ストリップの横行速度（蛇行速度）

現実の設備において蛇行が進行している場合を観察できることは非常にまれなため、蛇行速度を求めることはきわめて難しい。そこで蛇行の原因となる継ぎ目部の平行度、ストリップの横曲り量等の実測結果から蛇行速度を推定する。実測では継ぎ目部の平行度誤差は最大 $1/200$ 、横曲りは最大 $1/400$ であったが、安全をみてストリップの横曲り角を最大 $1/100$ (0.6°)とする。

曲りを有するストリップが、ラインパス中心に対してロール軸が直角に配置されたセパレーター上を通過するとき、セパレーターロールに対しストリップの曲り角に相当する進入角をもつことになるから、やはり、すでに解析した回動ロール上の運動特性を表わす(7)式の特性にしたがうと考えられる。したがって、当試作機を適用するラインの最大通板速度である $v=60\text{m/min}$ に対して図9, 10 から $\theta_{\text{deg}}=0.6^\circ$ における k_1, k_2 を求め(7)式に代入し、図11に示すような時間横変位特性を得る。図11において初めの 100mm の変位を与える時間は約 16sec であるから、この間の平均横行速度は 6.25mm/sec となる。この値を平均蛇行速度と想定する。

6.3 ロール回動角

蛇行修正に要するロール回動角は、ストリップの進入角より大きなものとしなければならないのは当然である。

ロールを回動することによりストリップをライン中心側へ戻すときの速度（修正速度）は、主として

$$(\text{ロール回動角}) - (\text{ストリップ曲り角})$$

に影響される。

修正速度を必要以上に大きくすることは、図13の耳端検出器 a a' 間ないしは b b' 間におけるストリップ耳端の往復周期（サイクリング周期）を

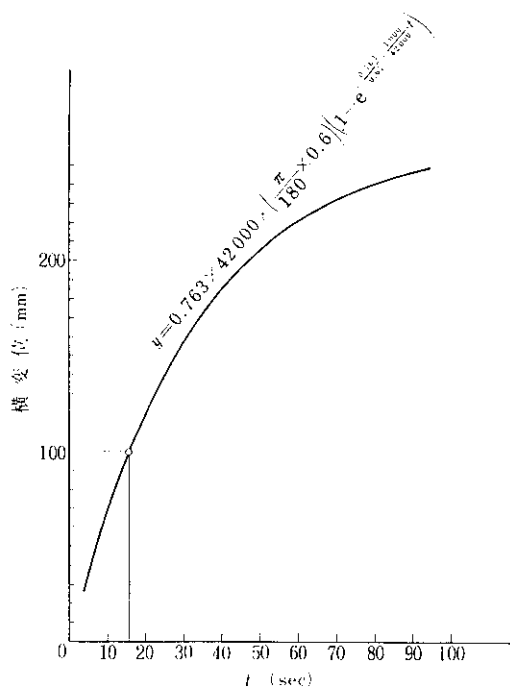


図 11 (7)式より求めた $v=60\text{m/min}$, $\theta_{\text{deg}}=0.6^\circ$ における横変位特性

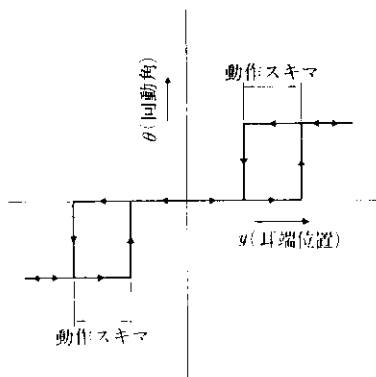


図 12 動作スキマのある3位置動作

短くし、そのため制御機器のくり返し動作頻度を増大させ機器の寿命を短くすることになるので、一応蛇行速度と同程度の修正速度を目標とした。すなわち、想定したストリップの最大曲り角の2倍を所要回動角とした。したがって6章2節で述べたように、ストリップの最大曲り角を1/100 (0.6°)と想定したから、所要回動角として1/50 (1.2°)を見込んでおく。

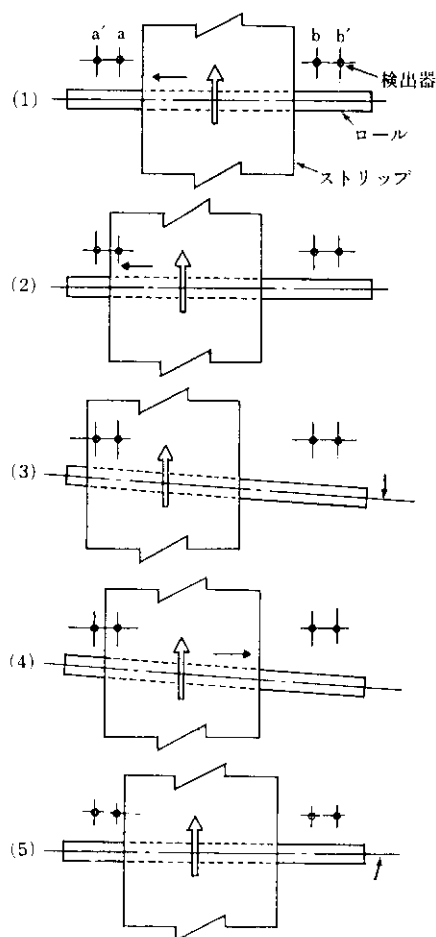


図 13 ストリップ耳端位置とロール動作

6.4 耳端検出器の間隔

ストリップの左右にそれぞれ2個配置する耳端検出器の間隔が図12に示す動作スキマであり、検出器、増幅器、切換電磁弁等の制御系の応答遅れの総和が高々0.1sec以内というこのような系では、サイクリング周期はこの間隔で決まると考えてさしつかえない。したがって検出器間隔を150mmとすれば、蛇行速度、修正速度とも6.25 mm/secの場合のサイクリング周期は約50secとなる。

今回使用した制御機器のくり返し寿命回数として、切換電磁弁については500万回、一般用パワー・リレーについては50～150万回は保証されているようである。

パワー・リレーの寿命回数を100万回、年間

7200 h稼動するラインで蛇行が常に発生しているものとしてもその寿命は約2年となり、制御系の寿命は十分といえる。

6.5 アクチュエーター

定張力制御がなされているカールバーにおいては、ピンチロールの起動、停止時に最大の張力変動が生じる。この変動を小さく押えるために系のGD²を極力小さく設計することが要求される。したがって、セパレーターにCPC装置を搭載するに当っては、過大な重量増とならぬよう装置設計がなされねばならない。

ロール軸端を50mm回転させるアクチュエーターとして、空気圧ないし油圧シリンダー方式、磁石吸引方式、電動機によるナット・スクリュウ方式等が考えられたが、以下の理由により空気圧シリンダー方式とした。

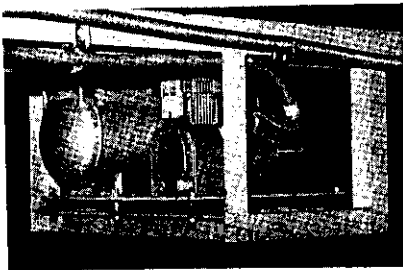


写真2 装置下部にとりつけた圧縮空気発生源

- (1) 圧縮空気供給用コンプレッサー、リザーブタンクを含めてもなお重量的にもっとも有利である。
- (2) 3位置動作制御を実現するにあたり、ロールの左右にシリンダーを配置することで容易に中立位置が得られる。
- (3) ロールの回転角の変更が、位置調節可能な機械的ストッパーで容易かつ確実に実現し得る。
- (4) 切換電磁弁として2ポジション・シングルソレノイド型を採用することにより、CPC装置の電源ダウン時、自動的に中立位置に復帰させ得る。

なおCPC装置としての重量増加分は70kgであ

った。

6.6 その他の留意点

耳端検出器としては、光電管式、空圧ノズル式、近接スイッチ式、超音波発振器式、発光ダイオード式等数多いが、ループの貯蔵・払い出し時にレール上を走行し、ループカーおよびセパレーター同士衝突をくり返すため、耐震・耐衝撃性を有し、張力変動によるストリップの上下変動の影響を受けないものでなければならない。これらを満足させる耳端検出器としては、超音波式によるものと発光ダイオード式によるものがある。

今回超音波式を採用したのは、上記条件のほか、電源が汎用のAC100Vであること、出力信号が100Vの接点出力であるため直接パワー・リレーを作動させること、耐熱性にすぐれていることによる。ただし、2個を近接して設置する場合には、相互の干渉を避けるため発振周波数の違うものを使用することが必要である。ちなみに今回採用した周波数は37kHzと39kHzである。

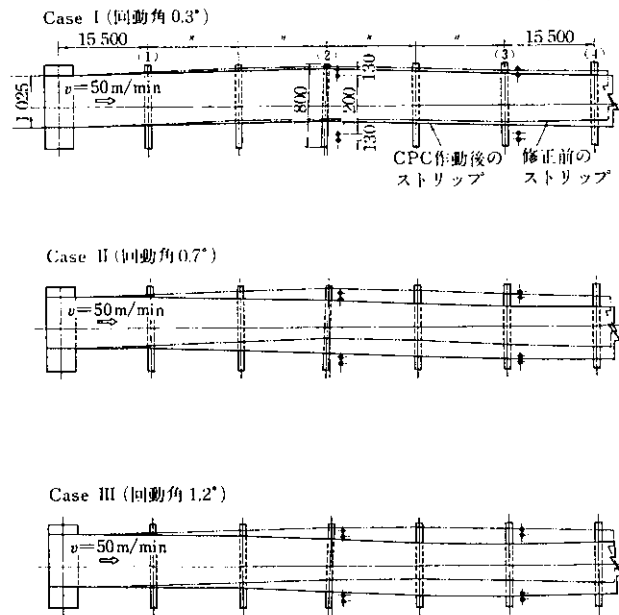
さらに、設備費と安全上の有利性を考慮し、セパレーター停止位置近傍に限って約300mmの電源供給用トロリー線を敷設した。これはセパレーターが停止位置を離れるのはループの貯蔵・払い出し時であり、この時はストリップは直接ループカーロールで支持されるので、もはやセパレーターの必要がなくなるからである。



写真3 電源取入れ部

7. 稼動状況

昭和49年8月、本装置を連続プロセスラインの入側ルーパー内に2基設置し、オンラインテスト



ロール番号		(1)	(2)	(3)	(4)
Case I 回動角 0.3°	修正前の蛇行量 (mm)	230	320	230	
	CPC作動後の最大偏差 (mm)	180	200	120	
	CPC作動後の最小偏差 (mm)	180	200	120	
	振 幅 (mm)	0	0	0	
	サイクリング周期 (sec)	サイクリング せず	サイクリング せず	サイクリング せず	
Case II 回動角 0.7°	修正前の蛇行量 (mm)	280	260	110	60
	CPC作動後の最大偏差 (mm)	260	200	80	50
	CPC作動後の最小偏差 (mm)	230	60	-130	-80
	振 幅 (mm)	30	140	210	130
	サイクリング周期 (sec)		50	on-offせず	
Case III 回動角 1.2°	修正前の蛇行量 (mm)	210	310	220	90
	CPC作動後の最大偏差 (mm)	205	210	120	80
	CPC作動後の最小偏差 (mm)	200	60	-210	-70
	振 幅 (mm)	5	150	330	150
	サイクリング周期 (sec)		50	不規則	

図 14 CPC 装置作動前後のストリップ走行展開図

を開始して以来1年を経過したが、この間蛇行トラブル、装置の故障もなく非常に満足すべき結果を得ている。

本機による蛇行修正の効果を、図 14 に修正前後におけるストリップ走行展開図で示した。本図において2点鎖線であらわした蛇行ストリップがCPC 装置の作動により、実線のように左右検出

器の範囲内を走行している。

オンラインテストの結果からわかるように、修正効果が下流側遠方までおよぶことから、本装置をすべてのセパレーターに塔載する必要はなく、1～3基へ塔載することで十分な効果が得られることも確認できた。

8. 結 言

EPC 装置のようなサーボ機構の設計にあたっては、入力となる蛇行の時間的变化を知ることがまず先決であり、さらにロールの特性についても、ロール径、ロール材質、ストリップ巻付き角、前後ロールまでの距離等、ロール個々の形式とストリップ張力および形状によっても異なるから、これらについては、いずれも実測データの積み重ねに頼らざるをえないというのが実状のようである。

特に中間ガイドロールとしての EPC 装置にお

いては、それを設置しようとする場所における特殊条件を満足する設計でなければならないのもこのような理由からであろう。

以上、今回多分に経験的な要素をもとにして試作した CPC 装置付ループカーセパレーターについてその概要を紹介してきたが、横形カーラーバー内における蛇行修正方法の 1 手段として、蛇行トラブル対策の一助となれば幸いである。

なお、ロールの回転によるストリップの制御動作を表わす運動方程式、あるいは汎用性のある実験式等を求めることについては、さらに研究が必要である。

参 考 文 献

- 1) J. J. Shelton and K. N. Reid : Trans. ASME, 93 (1971) 3, 180
- 2) B. A. Feiertag : Iron Steel Eng., 44 (1967) 9, 147
- 3) J. A. Baring : Machine Design, 25 (1953) Sep, 151
- 4) 電気技術部 : 石川島播磨技報, 6 (1966) 30, 333