U.D.C. 621.771.237:681.532.1-522]:681.516.3.033/.034

# 電気油圧サーボ弁を使用した 油圧圧下装置(HYROP-S)の開発 Development of Hydraulic Roll Positioning Device with Electro-Hydraulic Servo Valve

A novel type of hydraulic roll positioning device "HYROP-S" which consists of an electro-hydraulic servo valve and a position detector fit in the hydraulic cylinder has been developed and delivered to Sumitomo Light Metal Co., Ltd. Since November 1973 the system has been in satisfactory operation. It features superior response characteristic. In frequency response, it shows a 90° phase lagging frequency of 15 Hz or upwards.

Presently Hitachi is manufacturing another set of "HYROP-S" for use with 4-high aluminium rolling mill.

This report describes the principle, features and response characteristic of the "HYROP-S". Its position detecting position and theoretical analysis are-also dealt with.

福井嘉吉*	Kakichi Fukui	
一柳 健**	Ken Ichiryu	
桜井孝員***	Takakazu Sakurai	
珍部 弘*	Hiroshi Chinbe	

1 緒 言

\*

N- 7

1- Jr

199K 3

15 2

- 14

×

a. Y.

17 P

F .

- 1

7. +

14:

m al

日立製作所が世界に先がけて、油圧圧下式圧延機(1)を開発し

(2) (c)は、 圧延材をかみ込むときのショックにより、 下バッ

て以来,約10年を経過した。その間,圧延機の高速度化は目 覚ましく,これに伴い,油圧圧下装置に対しては,より高精 度,高応答のものが要求されてきている。

この要求にこたえるべく,従来の油圧圧下装置(HYRO P-M)には幾多の改良が加えられ,その応答性能は開発頭初 のものと比べて,数倍に向上している。

日立製作所は、このHYROP-Mの改良を進める一方、新 方式の油圧圧下装置(以下、HYROP-Sと称す)の開発を行 ない、今回、住友軽金属工業株式会社に納入した。

本HYROP-Sは、電気油圧サーボ弁と、圧下シリンダ内 に設置されたディジタル位置検出器<sup>(2)</sup>(マグネスケール)とを組 み合わせて、位置制御系を構成したもので、高精度、高応答 の油圧圧下装置となっている。

以下に、本HYROP-Sの位置検出位置、原理、理論解析 特長、応答性能などについて紹介する。

#### 2 位置検出位置

ロール ギャップを,いかなる方法で,また,いかなる位置 にて検出するかは,位置制御系を構成するうえで重要なポイントである。通常考えられる実用的な位置検出位置としては, 図1に示すものがある。

すなわち,

- (a) 圧下シリンダの中心線上で, 圧下シリンダとラムとの相 対変位を検出する。
- (b) 圧下シリンダの対角線上において、ラムの相対変位を検 出する。
- (c) ハウジングの両側において、下バックチョックの相対変

クチョックの横移動量が大きく、位置検出器の検出端と測定 面とが、相対的に滑りを発生しやすく、検出器が測定面の表



位を検出する。

上記(a)~(c)の各方式について、その得失を考えてみると、 (1) (b)及び(c)の方式は、位置検出部が、直接圧延中のクーラ ント、熱、スケールなどにさらされ、信頼性の面で問題がある。

図 | 位置検出位置 ロールギャップを検出する位置検出器取付位置を示す。

21

Fig. I Location of Position Sensor

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所大みか工場

面あらさを検出してしまうおそれがある。

(3) (c)は、アルミ圧延機などにおいて、よく発生する火災などに対して、最も近く耐熱性の点で問題が出てくる。

(4) (c)は、バックロール組替え時、検出器を下バックチョックの測定面から着脱する必要があり、更に、着脱の際の測定面の異物の付着などに細心の注意を必要とする。

(5) (c)は、下バックチョックを取り出した状態では、圧下シリンダのラムの位置を制御できない。

(6) (b), (c)の方式は、いずれも、一個所の位置検出に、2個の位置検出器が必要であり、経済的に不利である。

以上述べた欠点に対して、(a)の方式は、(1)~(6)までの欠点 を補うものであり、操作上優れた検出位置であると考える。 そこで、日立製作所は、HYROP-Sの開発に当たり、位置 検出器を圧下シリンダ内部の中心線上に置くことにし、各種 の基礎実験を積み重ねた。

#### 3 HYROP-Sの原理

図2において, 圧下動作は次のようにして行なわれる。指 令aが制御装置bに与えられると, 指令電流cがサーボ弁d に流れ, ポンプeからの圧油は圧下シリンダf内に流れ込み, ラムgは上昇する。ラムgの移動量はマグネスケールhによ り検出され, フィードバック信号iを制御装置bに送り込む。 このフィードバック信号iと指令aが等しくなった所で, 圧下は完了する。操作側, 駆動側の同時圧下は, 指令aを操 作側, 駆動側両方同時に与えることにより行なわれ, 単独圧 下は, 圧下したい側にのみ指令aを与えることにより行なわ れる。



図3 HYROP-Sブロック線図 系を簡略化して、ブロック線図とした 場合である。

Fig. 3 Block Diagram of HYROP-S



図3は、図2を簡単化して、ブロック線図に表示したものである。

#### A HYROP-S応答性能の検討

以上, HYROP-Sの原理について述べたが, このHYR OP-Sの応答性能を決定する主な要素としては, 次のものが 挙げられる。

(1) 圧延機本体の総合ばね常数及びその可動部分の質量

(2) 位置検出器の種類とその取付機構

操作側

駆動側



 $P_3 \bigvee P_2$  $Q_3 \bigwedge Q_2$ 



図 4 HYROP-S解析モデル図 サーボ弁から圧下シリンダまでの略図 を示す。

Fig. 4 Model for Analysis of HYROP-S

(3) 圧下シリンダ内油量

(4) 圧下シリンダのパッキン抵抗などによるヒステリシス

(5) 圧下シリンダから、サーボ弁までの配管長

(6) サーボ弁の応答性

これらの中で、(3)~(6)については、理論解析及び実験により、 応答性能に及ぼす影響度を調べた。この結果を次に述べる。

#### 4.1 理論解析及び実験結果

図4は、解析モデルを示すものである。

(1) 管路の近似的取扱い法

位置サーボ系の応答は,管路長 *l*によって,大きな影響を受ける。

管路長の厳密な取り扱いは,伝達マトリックス法によらねば ならないが,一般には近似的取り扱いが望まれる。以下に近 似法について説明する。

図4において, 圧下シリンダ部は集中定数系とみなせる。 その管路からみた等価ばね常数keは,



と表わされる。

ko: 圧下シリンダ油室のばね常数

図2 HYROP-Sの原理説明図 圧下シリンダ内への油の出入りはサー ボ弁で制御され、ラムの変位はマグネスケールで検出される。

Fig. 2 Schematic Diagram of Principle for HYROP-S

 $\mathbf{22}$ 

km: ミルばね常数
A : 圧下シリンダ面積
a : 管路断面積
図5がこの場合のモデルである。
管端において、







図6 図4のブロック線図 管路の伝達関数をGxとしている。 Fig. 6 Block Diagram of Fig. 4



ここに、  

$$l : 管路長$$

$$C: 音速$$

$$\rho : 油の密度$$

$$E下シリンダラムの変位 y は,$$

$$y = \frac{AP_3}{km} \dots (4)$$
次に、管路出側と管端との間に、流体抵抗Rを考えると,  

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{1}{1+j\omega\tau}, \quad \tau = \frac{A^2R}{ke} \dots (5)$$
ここで、 $\tau : 流体抵抗による遅れの時定数$ 

$$(2)~(5)式よ)$$

$$Gx = \frac{P_3}{Q_1} = \frac{Z\iota}{Z_3(Z_L+R)-Z_1}$$

$$= \frac{-\frac{ke}{j\omega A^2}}{j\frac{ake}{\rho CA^2} \left(\frac{1}{j\omega} + \tau\right) \sin \frac{\omega l}{C} + \cos \frac{\omega l}{C}} \qquad (6)$$

図6が、 $Q_1 \rightarrow y$ までのブロック線図である。 図7は、 $\tau \epsilon$ パラメータにして、配管長l=2.5mの場合に対して、無次元規格化した管路の伝達関数Gxの応答を計算したものである。 流体抵抗が小なる場合、 $\tau=0.01s$ 、又は0.2sにおいては、 応答は $f = \frac{C}{4l} = \frac{1,200}{4 \times 2.5} = 120 \text{Hz}$ の共振点を有する二次遅れ系の

点線は、管路を $\tau=0.2s$ の場合と同等のゲイン曲線を有する 二次遅れ系で近似した場合の位相曲線であり、伝達関数Gxから計算した場合と比較して、よく一致している。これより、  $\tau$ が小で、且つ一次共振点付近までの応答を問題にする場合に は、管路を二次遅れ系として、近似的に取り扱ってもよいこ とが分かる。よって、



図7 管路の伝達関数Gxの周波数応答計算結果 Gxの計算値と, これを二次遅れ系で近似した場合,位相曲線がよく一致している。

Fig. 7 Calculation Data of Transfer Function  $G_x$ 

$$\omega_n = 2 \pi \frac{C}{4l}$$
  
 $K_2 = \frac{ke}{a^2}$ 

・ここに,

S :ラプラス変換演算子

ζ : 減衰比率

ωn:固有角振動数

K2: 圧力ゲイン

図8が、この場合の詳細なブロック線図である。

(2) サーボ系のヒステリシス,管路長が周波数応答に与える 影響の計算結果
図8のブロック線図を,アナログ計算機で計算した結果は,
図9及び図10に示すとおりである。
これより,配管長が長くなるにつれ,また,ヒステリシスの 幅が大きくなるに従い,周波数応答性能が大幅に低下することが分かる。



100.00

従って、周波数応答性能を向上させるには、サーボ弁から

23



図8 管路を二次遅れ系とした 場合のHYROP-Sのブロック線図 圧下シリンダに2*4P*のヒステリシス があるとしてしている。<sup>°</sup>

Fig. 8 Block Diagram of HY-ROP-S by using Second-Order Lag for Pipe

圧下シリンダ間の配管長を可能な限り短くすること、そして、 サーボ系内のヒステリシスを小さくする必要がある。

(3) 圧下シリンダ内油量が、周波数応答に与える影響の実験 結果

圧下シリンダ内油量が周波数応答に与える影響を調べるため、
試験装置を使用して実験した結果は、図11に示すとおりである。圧下シリンダ底からラム下面までの高さHを、20mm、150
mmと変えることにより、油量を変化させた。

図11の実線は、H = 20 mmで制御系ゲインを最適に設定した後、H = 20 mm、H = 150 mmの場合の周波数応答である。

点線は、H = 150 mmで、制御系のゲインをH = 20 mmのときの 設定値より高く設定した場合である。

これらの実験結果より、 $H = 20 \, \text{mm}$ で制御系のゲインを最適に 設定した後、この制御系のゲインを変えずに油量を多くした 場合、すなわち $H = 150 \, \text{mm}$ とすると、圧下系全体のゲインが低 下し周波数応答が悪くなる。 安定となる。

これらの結果より、周波数応答は、圧下シリンダ内油量が増 えると低下し、この低下を補償するには、油量の変化に応じ て、制御系のゲイン設定を変更すればよいことが分かる(特許 出願中)。

### 5 HYROP-Sの特長

以上,位置検出位置,原理,理論解析などについて述べた が、このHYROP-Sの特長について述べる。

5.1 位置検出機構

(1) 位置検出器取付位置を, 圧下シリンダ内部の中心線上と し, 圧下シリンダとラムとの相対変位を検出するようにした。 圧延状態においては, ラムは図12に示すように圧下シリンダ 内周とのギャップの範囲内で, 様々な傾斜状態をとる。しか しながら, 位置検出器を圧下シリンダの中心線上に取り付け ることにより, 1個の検出器でラムの純粋な垂直変位成分の みを検出できる構造となっている(特許出願中)。

このため、H = 150 mmで、H = 20 mmのときより制御系のゲインを高くすると、周波数応答を改善することができることを示している。

しかし、逆にH = 150mmで、制御系のゲインを最適にしてH = 20mmにすると、圧下系全体のゲインが高くなりすぎ、系が不

(2) 位置検出器は, 圧下シリンダ内部に取り付けられている ため, 圧延中の水, 熱, スケールなどから完全に隔離するこ とができ, 位置検出器の信頼性を確実なものにしている。

(3) 位置検出器の部分はカートリッジ化され,保守点検の場



0



ヒステリス幅 △P (kg/cm<sup>2</sup>)

0.4

図9 図8のブロック線図のアナログ計算機による計算結果 配管長が長くなると、応答性が低下している。

Fig. 9 Calculation Data of Fig. 8 with Analog Computer

24

図10 図8のブロック線図のアナログ計算機による計算結果 ヒステリシスが大きくなるにつれ,応答性が低下している。 Fig. 10 Calculation Data of Fig. 8 with Analog Computer

0.2



- 図11 圧下シリンダ内油量が周波数応答に与える影響 制御系のゲ インを一定として油量を増加させると、応答性が低下している。
  - Fig. II Influence of Oil Volume to the Frequency Pesponse Characteristics



- 図13 稼動中の2タンデム四重アルミ圧延設備 圧延機の操作側か ら見た稼動中のアルミ圧延設備を示す。 Fig. 13 4-High 2-Stand Tandem Aluminum Mill
- 合には、ラムの上部より簡単に取り出せる構造となっている (特許出願中)。

部分をディジタル回路でまとめることができ,外部からのノ イズの影響を受けにくく,更に電子計算機とのリンケージが

(4) 圧延時の振動,衝撃などにより,ラムが圧下シリンダ内で揺動しても、位置検出器の検出端と測定面との相対的なすべりが発生しない機構となっており、検出器が測定面の表面あらさを検出することないように考慮されている(特許出願中)。
(5) 位置検出器には、ソニーマグネスケール株式会社製のマグネスケールを採用した。このマグネスケールにより、1µ
単位のディジタル検出が可能となり、圧下シリンダのラムの全ストロークを、高精度で位置制御可能である。

5.2 応答性能の向上

- Y-

T

8 8

Y

1 M

- A.

4 4

\*

(1) 高応答の電気油圧サーボ弁を使用しているため、応答性能が向上する。

(2) 理論解析と実験結果より応答性能を向上させるためには, 配管長の短縮が必要なことが明らかとなったため,保守点検 の便利さを損なわず,且つ配管長が最短なる位置にサーボ弁 を設置した。

これにより、応答性能は大幅に向上した(特許出願中)。

5.3 制御装置

(1) ディジタル位置検出器を使用するため、制御装置は、大



容易である。

(2) サーボ弁の摩耗などによって生ずるサーボ弁の機械的な 中立点変動を,電気的に自動補償するリーク補償回路を採用 した。これにより,サーボ弁の零点調整する手数が省け,且 つ制御系の定常偏差を少なくできる(特許出願中)。

## 6 住友軽金属工業株式会社納め2タンデム四重アルミ 圧延機用HYROP-S

これまで、HYROP-Sの位置検出位置、原理,理論解析, 実験結果及び特長について述べたが、次に住友軽金属工業株 式会社へ納入したHYROP-Sの概要と、その使用結果につ いて触れる。図13は、稼動中の圧延設備を示したものである。 (1) 住友軽金属工業株式会社納め2タンデム圧延機の主な仕様 ミル形式:1,230/485 Ø×1,620 L 四重非逆転式2タンデム 駆動方式:ワークロールドライブ

**压下方式:油压压下方式** 

圧延速度: No. 1 ミル 360~1,080m/min

No.2ミル 510~1,530m/min 圧延材料:アルミニウム及びアルミニウム合金

 $0.2 - 6.0 \,\mathrm{mmt} \times 1,470 \,\mathrm{mmb}$ 

最大8,000kgコイル

製品最小板厚:0.1mmt

主電動機: No. 1 ミル 2 台-D C1,680kW

No. $2 \in \mathcal{N}$	3 台- D C 1	,370kW
卷取機	3 台- D C	450 k W
卷出機	2 台-D C	240 k W

圧下装置

压下速度:12/40mm/min(手動操作時),

図12 位置検出機構 ラムの傾斜運動と位置検出器との関係を示す。 Fig. 12 Position Sensing Device  L + 速度・12/40 mm/mm( j 勤j和(+=s,j), 最大200mm/min(差圧70kg/cm<sup>2</sup>) E下シリンダ:710φ×140ST 位置検出器:マグネスケール,検出単位1μ サーボ弁:MOOG73-104 最大圧延圧力:1,500 t 制御装置:リーク補償回路付

 $\mathbf{25}$ 





図14 圧下シリンダラムのステップ応答 ラムのデッドタイム8ms, 50µ変位に達するまでの応答時間は約55msである。

Fig. 14 Step Response of Ram of Cylinder



位置検出器及び検出機構の信頼性 (2)圧下シリンダ内部に組み込まれる位置検出器により、 ラムの また、ゲイン曲線をみれば明らかなとおり、制御系のゲイン・ はまだ若干高く設定できる余地があり、ゲインを高く設定す

移動量を直接計測する関係上、この位置検出器及び検出機構 の信頼性の確認は、HYROP-Sシステムの絶対条件である。 このため,開発頭初に実機と同一寸法の圧下シリンダを製作 し、この圧下シリンダと位置検出器とについて、単独及び組 合試験を行なった。

この試験は、このHYROP-Sの応用分野が、コールド ミ ルに限らず,その他の分野へも適用され得ることを考えて, 3年有余にわたり特殊試験装置により実圧延時に発生する各 種条件を想定して,過酷なまで信頼性試験を行なった。その 内容の主なものは、次のようなものである。

(a) 検出精度,再現性,ヒステリシス試験

(b) 検出速度限界試験

耐熱, 耐油, 耐水, 耐圧試験  $(\mathbf{c})$ 

耐磁気ノイズ試験 (d)

振動試験  $(\mathbf{e})$ 

 $(\mathbf{f})$ 寿命試験

以上,各試験の結果,位置検出器については一部改良を加 えることにより,実用化に成功した。

(3) 応答性能

(a) ステップ応答

上下ワークロールを, 接触させたキスロール状態で、制 御装置にステップ状の指令を与え、このときの圧下シリン ダラムのステップ応答を求めた。

図14は、その一例を示すものである。この場合の指令値は、 50µである。

これより、指令からラム移動までの、デッドタイムが8ms, ラムが50µに達するまでの応答時間は約55msとなっている。

(b) 周波数応答性能

26

ると応答性能は更に向上する。

図15の中で点線で示す曲線は、図3に示す伝達関数より求め た周波数応答計算の結果である。簡略計算結果と実測値とが 良く一致していることが分かる。

#### 言 7 結

以上,今回住友軽金属工業株式会社へ納入した2タンデム 四重アルミ圧延機用油圧圧下装置HYROP-Sの概要とその 性能につき理論解析、実測結果を基にして論述し、優れた応 答性能を有していることを実証した。現在, このHYROP-S は順調に稼動中であり、その信頼性と、耐久性も慎重な検討 と独特のくふうを講じてあるので、必ずや満足できる結果が 得られるものと確信している。日立製作所は現在、更に改良 を加えたHYROP-Sを製作中であるが、このHYROP-S を積極的に御採用いただき, そのうえ納入後の調査, 測定な どに対しても,多大の御協力と御指導をいただいた住友軽金 属工業株式会社の関係各位に対し,深く謝意を表わす次第で ある。今後,更にHYROP-Sの総合性能を一段と向上させ るべくいっそうの研究を続ける所存である。

1

キスロール状態で、ラムの振幅が±25μとなるように制御 装置に正弦波指令を与えて,周波数応答を求めた。 その結果は、図15のボード線図にて示すとおりである。同 図より、90度位相遅れ周波数は15Hzであり、配管長6mの場 合のHYROP-Mの周波数応答性能に対して,60%高い応答 性が得られた。

### 参考文献

- (1) 梶原, 福井「油圧圧下式圧延機」 日立評論 47, 1593 (昭40-9)油圧圧下式圧延機実用化第1号機について紹介し ている。 (2) 植村,村本ほか「磁気格子による測尺」計測と制御 2, (昭38-10)
  - マグネスケールの理論、原理、構造について説明している。