

解 説

技術開発賞を受賞して*

桑野 博明**

*平成 26 年 6 月 9 日原稿受付

**日本エアロフォージ(株), 〒713-8103 岡山県倉敷市玉島乙島字新湊 8264 番 7

1. はじめに

筆者は現在, (株)IHI から 2011 年 1 月に発足した日本エアロフォージ(株)へ出向し, 同社倉敷工場にて, 5 万トンの加圧能力を持つ世界最大級の油圧鍛造プレスの調整運転を担当している. この機械は 5 年ほど前から筆者が旗を振り, NEDO の助成金を元にして all Japan 体制で開発を進め, 予定通り昨年 4 月から稼働を開始した. 本プレスはチタンやニッケル合金などの超高強度の金属材料を鍛造して形を造るもので, 日本には今までなかった 5 万トンという強大な加圧能力を有している. 油圧的に見ると, 定格圧力 44.1MPa, 新開発の 4 連大型ポンプを 6 台搭載した本プレスは, 今回, 技術開発賞を受賞した機械の 20 倍近くの制御流量を有し, まさに筆者の油圧技術の集大成となる機械である.

ただ, 本稿はこのプレスを紹介するものではない. 筆者が IHI に入社して最初に関与した大きな開発テーマで, 平成 25 年度本学会の技術開発賞を受賞した機械について記述するものである. ただし, 機械の技術的な内容についてはすでに別稿にて述べた¹⁾. したがって, ここでは機械を開発するに至った背景など, 別稿には書き切れなかった内容を中心に紹介したい. 本稿は文献 1 と対をなすものである.

対象となった機械は, 当時実現が技術的にかなり難しいと考えられており, また, 据え付ける環境は過酷で, 筆者を含め, 多くの IHI の担当者の手を煩わせてきた. しかし, 10 年ほど前に「エンドレス熱間圧延ライン」の重要機種として再度ブラッシュアップし²⁾, さらに今回は, 名誉ある学会賞を頂くことにより, ようやくここに, この機械が自分の手を離れたという実感を持つことができた. 機械名は, “電気油圧サーボ式ダウンコイラ”で, このエレガントな日本名は, 東京工業大学精密工学研究所の横田眞一先生に名付けていただいたものである³⁾.

2. ダウンコイラとは

ダウンコイラは, 古い昔は熱間帯鋼巻取機と呼ばれていた. その名が示す通り, 製鉄所の熱間圧延ラインの最終工程に位置し, 6 台から 7 台の熱間仕上げ圧延機群で薄く延ばされ, 最大時速 70 キロメートルもの速度で飛び込んでくる厚さ 1.5 mm から最大 25 mm のストリップ (500°C~700°C の熱延鋼板) を巻き取ってコイル状の製品にする機械である. 従来のエアシリンダで押し付ける無制御の巻取り機では, マンドレルに巻かれたストリップ先端部が 2 巻き目と重なってできる段差部 (図 1) とラッパーロールが衝突して大きな衝撃力が発生し, 同時にラッパーロールは跳ね上げられ, 跳ね上げられたラッパーロールの振動が持続するので, ストリップの押し付け時間が減少していた. すなわち, 衝撃力によって, ①ストリップに傷が生じ品質不良が発生する, ②機械の損傷により保守費用が増加する, ③ラッパーロールの押し付け時間が短いため, ラッパーロールをなかなかリトラクト (開放) できず, 操業が不安定になる, などの問題が日常的に生じていた.

ダウンコイラの巻取り作業を以下説明する.

ストリップがマンドレルと呼ばれる巻き取りドラムに巻き付くまでは, ストリップの方向を切り替えるピンチロール, ストリップをマンドレルに押し付けるラッパーロールおよびマンドレルは, 共にストリップの速度よりも 10%前後速い速度で回っている. これはラッパーロール, マンドレルで, ストリップをたぐり込むためである. 図 2 に示すように, ストリップ先端がピンチロールに噛み込むと, 下方へ進行方向を変えられる. そうして, 図 3 に示すように, ストリップ先端部分は #1 (No.1) ラッパーロールとマンドレルの間へ

進み、ラッパーロールとエプロンガイドとマンドレルから力 A, B, C を受け、3 点曲げによりマンドレルにそった形に曲げられる。したがって、ラッパーロールはストリップの材質、厚み、幅に応じた適正な力で、ストリップを押し付けていなければならない。ストリップは、ラッパーロールで押し付けられ、マンドレル、ラッパーロールでたぐり込まれて、マンドレルにタイトに巻き付けられる。

ストリップがマンドレルに巻き付き、ラッパーロールで押えなくとも緩まない状態になると、ラッパーロールは、待機位置にリトラクト（開放）され、ストリップはピンチロール、マンドレル間に発生した張力でマンドレルに引っ張られながら巻き取られていく。

従来のダウンコイラは、エアーシリンダでラッパーロールを押し付けるだけで、ラッパーロールの位置決め制御を行っていなかったため、図 2 に示すように、別に初期ギャップを設定するギャップ設定装置を設けていた。初期ギャップを設定する時、ギャップ設定装置のモータでスクリュを回して、ストッパーレバーを回動させる。モータの回転数は回転数計測器（図示していない）で測定され、その回転数からストッパーレバーの移動量が検出される。ストッパーレバーにストッパーで保持されているアジャスティングロッドは、ラッパーロールのフレームを引っ張り、その結果、ラッパーロールのフレームに保持されているラッパーロールは、マンドレルに対して一定量のギャップを設定される。この時、エアーシリンダは所定の押し付け力でラッパーロールのフレームをマンドレル方向に押し付けているが、ギャップ設定装置はその力に抗してラッパーロールのフレームを動かし、ギャップを保持する。そして、巻き取り中はストリップがマンドレルに巻かれるごとに、ラッパーロールは巻かれたストリップに押されて強制的に後退させられる。

以上のように、電気油圧サーボ式ダウンコイラが出現する以前のダウンコイラは、ギャップ設定装置で、ラッパーロールのフレームを介してラッパーロールの初期ギャップを設定し、エアーシリンダで押し付け力を与えていた。ラッパーロールの位置は、初期ギャップ設定時のみ考慮されるだけで、巻き取り中はラッパーロールの位置に関係無く、エアーシリンダがラッパーロールをマンドレルへ押し付ける方向に力を印加するという原始的な機械であった。今から考えると恐ろしくなるが、このような機械で高速で“飛んでくる”ストリップを巻き取っていたのである。

3. 電気油圧サーボ式ダウンコイラ

ラッパーロールとストリップ段差部が衝突するという問題を解決する唯一の方法は、段差部通過時点のみ各ラッパーロールを順次退避させ、通過後ただちに押し付けに行く制御手段を有するダウンコイラを開発することである。しかし、話は簡単でなく、重さが 5 トン程度もあるラッパーロール機械系を、0.01 秒のオーダの時間内に、数ミリメートルから数十ミリメートル（対象の厚みによりその量は変わる）持ち上げるといふ制御を実現することは容易ではなかった（文献 1 参照）。

その頃、N 社 Y 製鉄所で新しい熱延工場建設の計画が進められており、ここに適用すべく新型ダウンコイラの開発にゴーがかかった。しかし、開発に使える時間は 1 年ほどしかなく、短時間で機械の形をまとめるために、可能な限り理論のメスを入れ、シミュレーションを多用した。当時、MATLAB などの汎用ソフトは行きわたっておらず、主に BASIC インタプリタで、後には Windows 上で動く F-BASIC を使用してプログラムを自作した。自作 BASIC のプログラムによるラッパーロールのステップ応答のシミュレーション例を図 4 に示す。電気油圧サーボ式ダウンコイラは、まさに BASIC によって造られたと言っても過言ではない⁴⁾。理論計算と室内での実験機で性能を検証し、最終的には製鉄会社で稼働中の従来のエアーシリンダ方式のダウンコイラに装備されている複数のラッパーロールの 1 本を、電気油圧サーボ式に変えて実機における実証テストを行った。

こうして、ラッパーロールに電気油圧サーボシステムを導入し、鋼板の先端位置をトラッキングするシステムと組み合わせて、図 5 に示すように、コイルの段差部通過時のみトラッキングシステムの指令に応じて、各ラッパーロールを位置制御でステップ状に逃がしてラッパーロールとコイル段差部との衝突を回避し、その後即座に、力の制御で鋼板をマンドレルへ一定の力で押し付けることができる段差回避制御機能を有する電気油圧サーボ式ダウンコイラを完成させた（図 6）。本機ではストリップ段差部とラッパーロールとの衝突が防げるので巻き取り作業が安定化され、図 7 に示すように、ストリップをマンドレルに、平均的に従来の 2 分の 1 以下巻き付けると、ラッパーロールを開放できるようになった。

操業中のダウンコイラの周りは、ストリップを冷却するための冷却水が大量に噴出され、また、ストリップが冷やされてできる酸化スケールが空中を舞っており、さらに、激しい振動を常時受けるという過酷な環境である。サーボ弁や変位計、レーザーセンサーなどの精密機器を搭載した電気油圧サーボ式ダウンコイラはその性能もさることながら、各機器の耐久性を維持することも開発の対象となった。特に、精密機器であるサーボ弁を、応答性の確保のために機械の直近に置く必要があったので、従来のノズルフラップ方式よりも構造がシンプルで耐環境性の高い直動型サーボ弁を開発した。その外観を図8に示す。その当時、世に無いものはすべて造り出すという意気込みで開発に邁進したのである。

幸いに、電気油圧サーボ式ダウンコイラは製鉄機械としてはベストセラー機種となり、現在、日本：28、中国：11、米国：5、韓国：4、台湾、トルコ、ブラジル：計8、合計56基が稼働中である。

電気油圧サーボ式ダウンコイラの出現によって、熱延工場最後まで近代化がなされてこなかった巻取り機、ダウンコイラの近代化、制御化が実現したのである。

4. 参考文献

- 1) 桑野博明：電気油圧サーボ式ダウンコイラ，フルードパワーシステム Vol.43, No.4, (2012).
- 2) 桑野博明：エンドレス熱間圧延ラインにおける巻取り設備の概要，第112回圧延理論部会，圧理 (2000), pp.112-2.
- 3) H.Kuwano and S.Yokota: Application of Electro-Hydraulic Servo Systems to Hot Strip Down Coilers, Int.J.of Automation Technology, Vol.6, No.4, (2012) pp. 445/449.
- 4) 桑野博明：圧延プロセスとコンピュータシミュレーション，石川島播磨技報 Vol.33, No.4,(1993).

著者紹介



くわの ひろあき

桑野 博明君

1949年10月28日生まれ。

1975年九州工業大学大学院修士課程卒業。

同年石川島播磨重工業(株) (現(株)IHI) 入社。2011年日本エアロフォー
ージ(株)技監 兼 (株)IHI 産業・ロジスティックスセクター技監。

IHI 認定高度専門家 (油圧制御技術分野)。

日本フルードパワーシステム学会，計測自動制御学会などの会員。

博士 (工学，東京工業大学)。

E-mail:kuwano.hiroaki@japan-aeroforge.com

URL: <http://www.japan-aeroforge.com/>

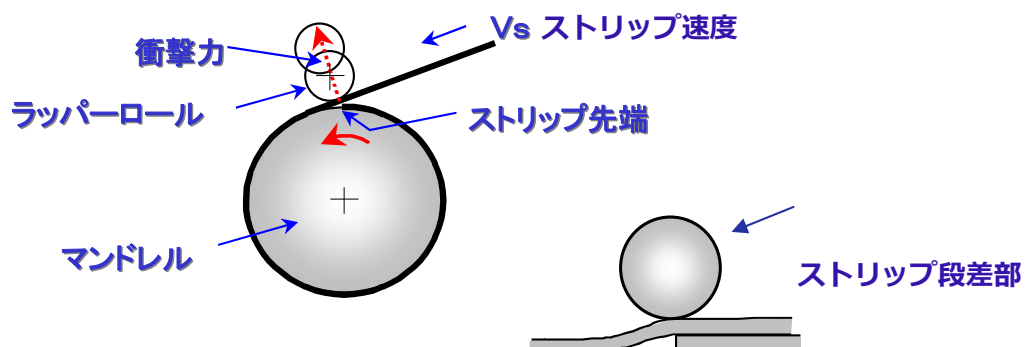


図1 ストリップ段差部とラッパーロールの衝突

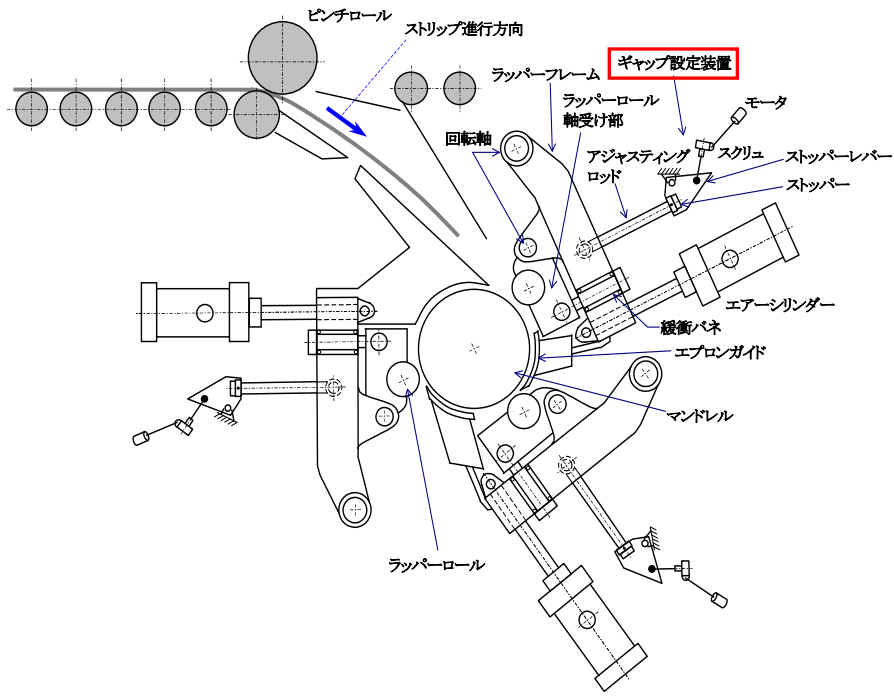
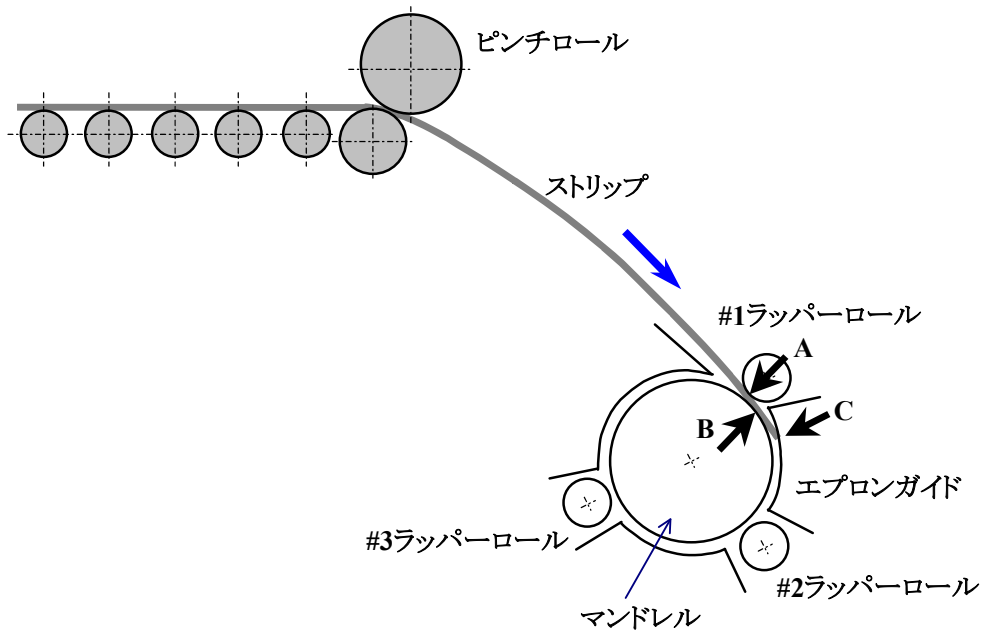
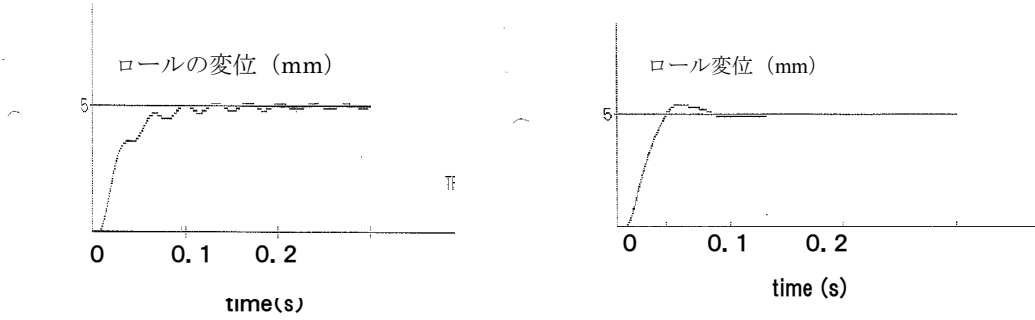


図2 従来のダウンコイラ



- A : #1 (NO. 1) ラッパーロールからストリップに加わる力
- B : マンドレルからストリップに加わる力
- C : エプロンガイドからストリップに加わる力

図3 ストリップ先端の曲げ



(a) ステップ応答：補償無し
 $\omega_n = 184\text{rad/s}$ (29Hz)

(b) ステップ応答：新補償法適用
 $\Delta T = 0.017\text{s}$, $n = 2$,
 $f_s = 2/0.017 = 117\text{Hz}$, $M = 0.98$

図4 ラッパーロールのステップ応答 (BASICプログラムによるシミュレーション例)

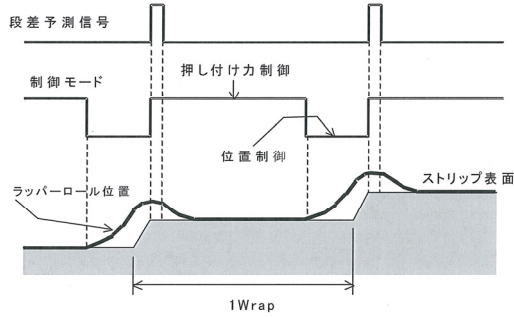


図5 ストリップ段差回避制御

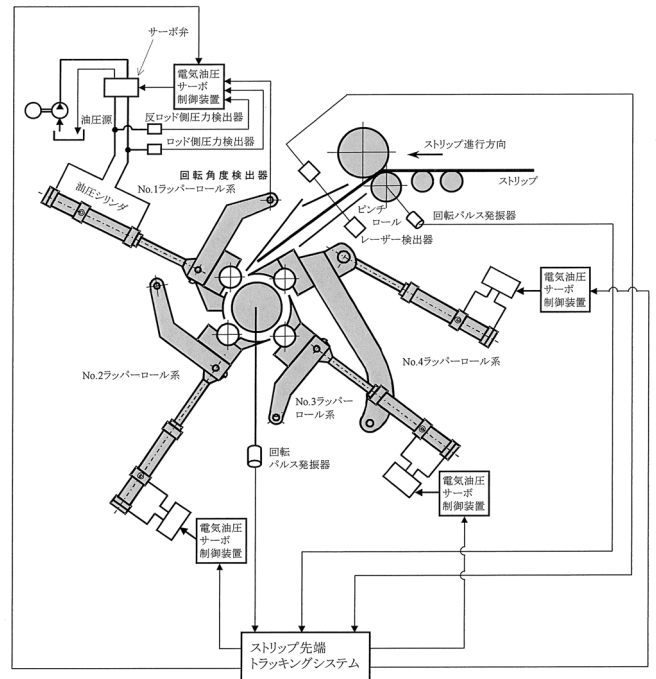


図6 電気油圧サーボ式ダウンコイラ

ラッパーロール開放巻き数

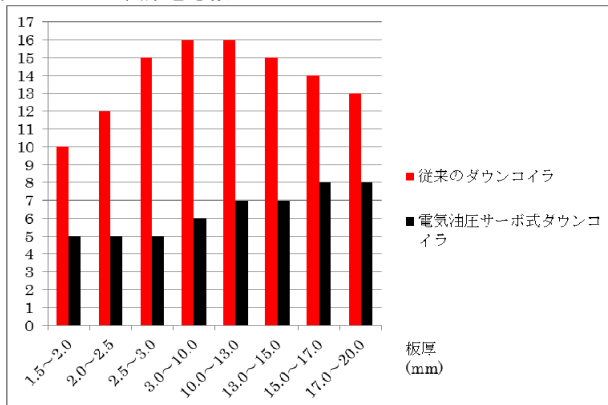


図7 ラッパーロール開放巻き数の比較

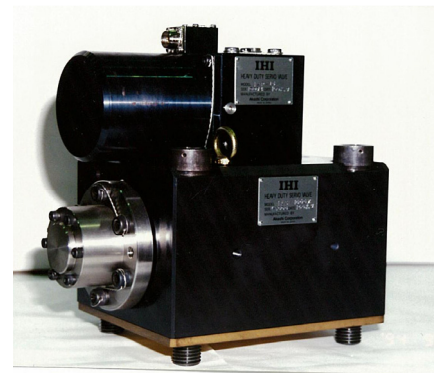


図8 直動型2段式サーボ弁