



# 鑄型振動装置用 電動サーボアクチュエータの紹介



スチールプラントック株式会社  
連続鑄造技術部

技師 門脇 優輝

## 1. はじめに

連続鑄造機の鑄型振動装置に油圧シリンダとサーボ弁、もしくはそれに相当する流量制御弁を組み合わせた油圧サーボによる多彩な波形動作制御を行える振動装置が普及した。油圧サーボの適用によって得られる鑄造中の振幅変更、非サイン波形振動技術は周知のものとなっており、これらの技術によりスラブ連続鑄造機は2.5m/minを超える高速鑄造下においても安定した鑄造を可能

とし、生産性向上につながった。近年、この技術の適用はスラブ連続鑄造機にとどまらず、ピレット、ブルーム連続鑄造機といった中小型の連続鑄造機においても盛んに行われている。

しかしながら、既設鑄型振動装置の駆動部を油圧サーボに改造する場合、導入を阻む2つの問題がある。1つ目は、据え置き型の油圧装置を設置するスペースを要すること。2つ目は、導入に一定期間の工期を要することである。通常設備更新を行う場合、限られた定修期間で

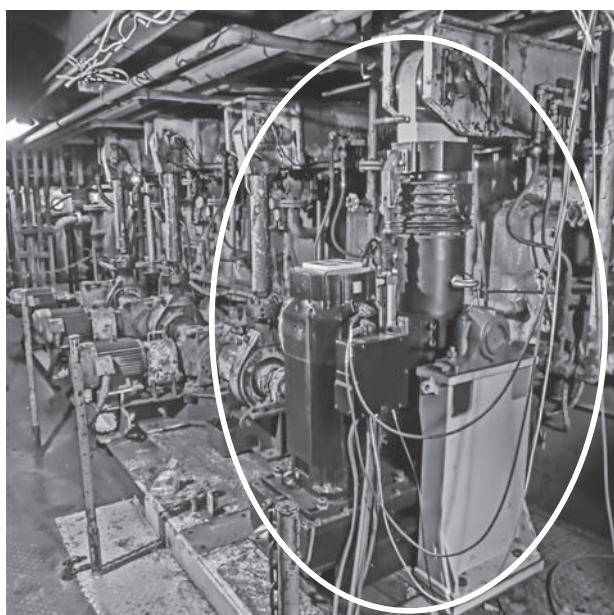


写真1 鑄型振動装置用電動サーボアクチュエータ

現地工事を行うが・装置の設置・配線、配管工事・油圧装置の立ち上げ・振動装置の制御系調整・試運転といった一連の現地工事を行うには近接する他機器も含め、かなり綿密な事前工事を含む定修工程を立てる必要がある。そのため工事期間、費用が見合わないという結果になってしまう場合が多い。上記2つの問題が国内のピレット、ブルーム連続鋳造機への普及の妨げとなっていた。

今回、これらの問題を解消できる大型ACサーボモータと直動駆動系を組み合わせた技術を用いた鋳型振動装置用のアクチエータ（電動サーボアクチエータ）を開発したので紹介する。

これにより、上記2つの問題の要因である据え置き型の油圧装置を排することができ、限られた設置スペース、限られた工期で導入可能となった。写真1は既設ピレット連続鋳造機の鋳型振動装置を電動サーボアクチエータに改造した事例である。

## 2. 鋳型振動装置の変遷

図1～4に鋳型振動装置の変遷を示す。

図1に現在国内で稼働中の振動装置の主流である鋳型

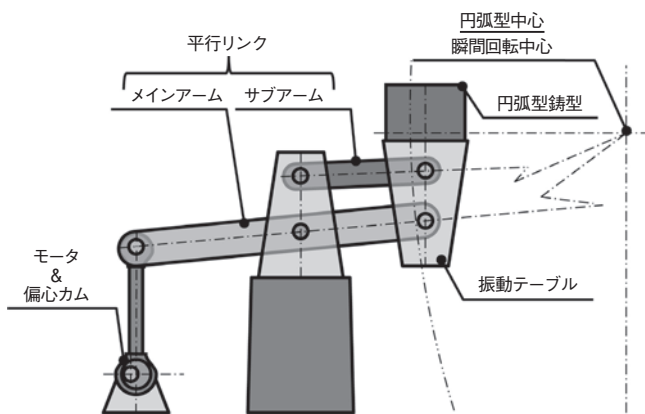


図1 偏心カム型

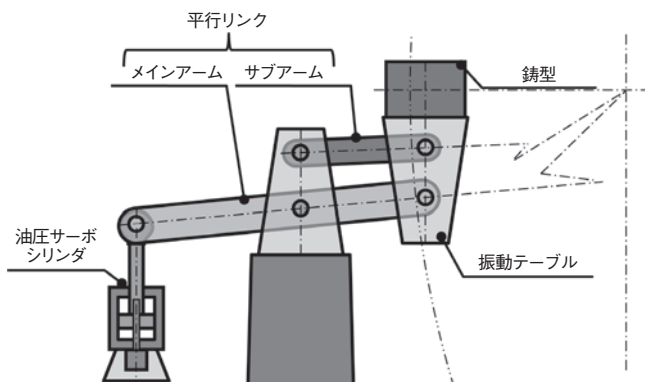


図2 油圧サーボ型

振動装置（偏心カム型）を示す。偏心カム型はインバータモータと減速機、偏心カム、平行リンク機構によって構成される。

平行リンク機構には次の2つの利点がある。

1つ目の利点は、鋳型から離れた場所にモータや偏心カム等、駆動部を配置できる点である。従って、駆動部を隔壁により鋳型直下の劣悪な環境から切り離すことが可能である。2つ目の利点は槓子の原理とカウンターウェイトの使用によりモータトルクを低減することが可能である。

鋳型が円弧状になっている場合、上下平行リンクの軸心線の仮想交点（瞬間回転中心）を鋳型の円弧中心と一致させることで振動を疑似円弧運動にする機能がある。これは自動車のサスペンションの構造として有名なダブルウィッシュボーン方式と同じ原理である。また、鋳型が垂直の場合には平行リンクを完全に平行に配置し、瞬間回転中心を持たせないことで疑似直動運動としている。平行リンクのサブアーム側の構造には次の2種類があり、ボックス構造で両端をピン固定したリジット型と、鋼帯の両端をボルトナットで完全に締結した板ばね型である。この2種類は回転運動と機械的たわみといったガイド方法の違いはあるものの、円弧運動、直動運動を行わせる理屈は共通である。

鋳型の直線運動は偏心カムによってモータの回転運動を変換するため、振動振幅は偏心量一定となる。

次に、図2、3に油圧サーボを用いた振動装置を示す。このタイプは1973（昭和48）年に（株）神戸製鋼所によって振幅変更可能な油圧シリンダを用いた鋳型振動装置<sup>1)</sup>が先駆けとなった。後に日本鋼管（株）の中央研究所の試験連続鋳機によってサイン波とは異なる振動波形（非サイン

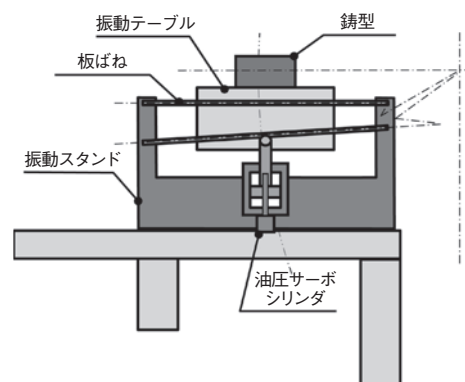


図3 QCタイプ油圧サーボ型

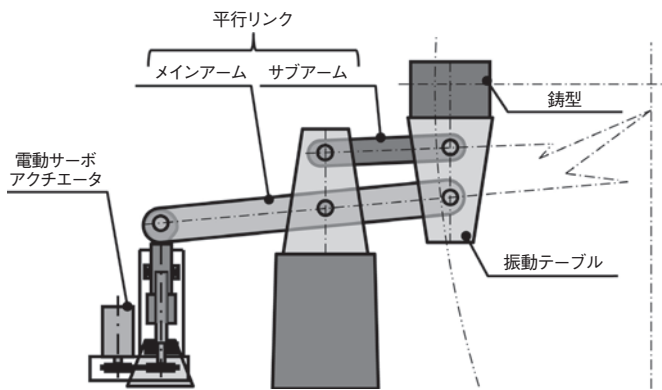


図4 電動サーボ型

波形)の実証実験が行われ、住友重機械工業(株)によって1984(昭和59)年、図2に示す平行リンク機構と油圧サーボシリンダを用いた油圧サーボ型<sup>1)</sup>振動装置が開発された。1989(平成元)年には日立造船(株)によって図3に示す2本の油圧サーボシリンダで直接モールドを加振する振動装置<sup>1)</sup>が開発、商品化されている。このQC(Quick Change)タイプと呼ばれるこの振動装置は、駆動部・振動テーブル・ガイド・固定スタンドが一体となっており、カセット式にて交換可能なのが特徴である。その後、海外含む各社連続鋳造機メーカーが類似の油圧サーボ型鋳型振動装置を開発し、2000年代以降に建設された連続鋳造機では、鋳造中の波形変更技術が標準の技術として導入されている。

最後に、今回開発した電動サーボアクチュエータを用い

た振動装置(電動サーボ型)を図4に示す。このタイプは平行リンクを用いた偏心カム型と油圧サーボ型に対し駆動部分を置き換えることで適用できる。

次章では本章で述べた電動サーボ型と偏心カム型、油圧サーボ型の比較を行う。

### 3. 電動サーボ型の特徴と比較

表1に電動サーボ型、従来の油圧サーボ型、偏心カム型の長所、短所、適用範囲等を具体的に比較して示し、図5にそれぞれの場合のシステム構成を示す。

偏心カム型の駆動部は電動サーボ型、油圧サーボ型に比較し、最も単純な構成である。インバータ制御によるモータ回転数の変更が可能で、鋳造中に偏心カムの回転数を変更することによって振動数の変更を行う。しかし、鋳造中に振幅の変更、非サイン波形振動を行うことはできない。これは、鋳造速度に応じた最適な振動条件で操業することができないということを意味する。その結果、鋳型内の初期凝固が不安定になり、表面品質の悪化に伴う歩留まりの低下、最悪、鋳型直下での湯漏れの原因となってしまうこともある<sup>2)</sup>。サイン波形振動では鋳造速度が高速になるに従い、鋳型と鋳片の間に潤滑剤が流入し難くなることが知られている。そのため、鋳造速度が制限されてしまい生産量が上げられないという問題も生じる<sup>3)</sup>。

表1 振動装置の駆動部比較

(当社比)

	電動サーボ型	油圧サーボ型	偏心カム型
機器構成	サーボモータ 直線作動シリンダ(ボールねじ他) (エア、コイルばね等推力補助装置)	据え置き油圧装置 サーボ弁 油圧シリンダ	インバータモータ 偏心カム
動作方式	サーボモータの回転運動(揺動)を ボールねじによって直線運動に変換	サーボ弁によって圧油を制御し 油圧シリンダを駆動	モータの回転運動(方向一定)で 偏心カムを回転させ直線運動に変換
アクチュエータ最大推力/ (ポンプ)モータ容量	~160kN/37kW	600kN/150kW~1,450kN/250kW	-
アクチュエータ定格速度	210mm/sec	95~140mm/sec	-
長所	鋳造中振幅変更可能 非正弦波可能 油圧装置不要 保守が容易	鋳造中振幅変更可能 非正弦波可能 鋳型の重量に制約がない	シンプル・安価 寿命予測が容易(回転方向一定のため) 偏心カムによるフライホイール効果が 得られるため消費電力は最も小さい
短所	推力制約	据え置き型の油圧装置が必要 導入費、保守費が高い	鋳造中振幅変更不可 正弦波のみ
保守	8,000~16,000HrごとにアクチュエータOH 潤滑油(20L)、フィルタの 定期交換(3~6ヶ月) (推力補助装置の保守)	8,000~24,000HrごとにアクチュエータOH 油圧装置のフィルタ(1年)、 作動油(1,000~2,000L)の定期交換(2年) アキュムレータのブラダ定期交換(2年) 作動油のコンタミ管理(NAS9~7級) その他油圧装置の保守	5~年ごとに駆動部OH(平行リンクと同時) 鋳型交換後の調整作業 振幅変更に伴う調整作業

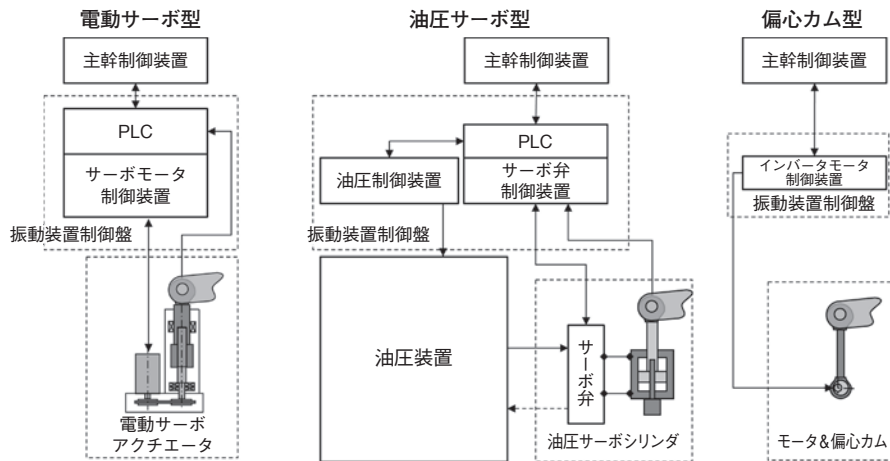


図5 各システムの構成

また、日常の作業の点から偏心カム型は以下の作業を必要とする。

- ① 振幅の変更を行う場合、カムの偏心量変更が必要であり、カムの交換もしくは偏心量変更に伴う機械的な調整作業が必要である。
- ② 鋳型交換後等に鋳型の水平出しを行う場合、プッシュロッドの長さ調整もしくは偏心カム据付座のシム量調整が必要である。

これら2つの作業は電気的に行う術がないため、その都度作業員が行う必要がある。

従って、偏心カム型は駆動部の構成が単純で初期費用が安価であり、装置としての故障も少ないものの、鋳造鋼種・鋳片サイズの変更に伴う振幅の変更、鋳型の交換に伴う調整作業にそれなりの時間と労力が必要であると言える。

それに対し、油圧サーボ型では、アクチュエータの位置制御ができるため、偏心カム型で問題となった調整作業は電気的に行うことができ、振動数、振幅、波形、いずれの振動パラメータも鋳造中、非鋳造中問わず、瞬時に変更が可能である。振動を発生させるためのアクチュエータの推力と速度は油圧ポンプ、シリンダサイズに制約がなければ実質無制限であり、あらゆる鋳型、振動条件に適用することができる。当社では65トンを超える超重量級スラブ鋳型を±0.4Gの重力加速度で振動させることが可能な装置を納入した事例もある。また、高速鋳造に適した非サイン波形も行うことができる。

しかしながら、動力源が電気から油圧に代わったことによる弊害も少なくない。まず、周辺機器として据え置

き型の油圧装置を必要とする。この油圧装置は、油圧ポンプ・タンク・バルブスタンド・ポンプ出力低減のためのアキュムレータ・サーボ弁を健全に動作させる作動油の清浄度を保つための循環フィルターライン・作動油冷却装置等を必要とする大掛かりなものとなる。据え置き型の油圧装置を設置するためのスペース確保は、前述のように更新案件では解決できない致命的な問題となる場合がある。

また、運転費からみると、動力源が油圧の場合、消費電力はポンプの供給能力によって決まるため、ポンプが稼働している時は振動装置が停止中であっても大きな電力が必要となる。従って偏心カムに比べ、初期費用、運転費用が増大してしまう。更に、防災の観点から作動油は難燃性の水グリコール系を使用することが多い。この作動油は一般的な鉱物油系と比較し潤滑性が劣るため、ロッドとシールの接触部やサーボ弁のスプールといった液圧にさらされる摺動部が摩耗してしまう。振幅や波形形状の精度を維持するためには、偏心カム型よりも短い周期でアクチュエータの定期的な交換修理が必要となる。

一方、電動サーボ型では油圧サーボ型と同様に振動パラメータの変更が可能である。油圧装置を必要としないため設置スペースの問題が解消され、更新案件の場合でも偏心カム型と同等の短い工期で導入することが可能である。

運転費からみると、電動サーボ型は油圧装置を介さないため偏心カム型と同様に、機械効率が高い。消費電力も油圧サーボ型のように常時大きな電力を必要とするのではなく、運転中に生じる負荷に応じた消費電力となり、

油圧サーボ型よりも低減することが可能である。

日常保守に関しても、電動サーボ型は偏心カム型と同様、駆動部であるアクチエータの保守のみでよいため、それ以外に油圧装置の保守が必要な油圧サーボ型に対し容易であると言える。

しかしながら、電動サーボ型はサーボモータやボールねじ等の機械部品によって動力伝達を行う都合上、アクチエータ推力に上限がある。ゆえに、鋳型重量に制約を受けることとなる。鋳型重量がおよそ10トン未満のピレット、ブルーム及び小型スラブ用鋳型の場合、アクチエータ単独で運用できるため電動サーボ型に最も適している。また、鋳型重量が10トンを超える場合には、アクチエータを複数配置し同期運転を行うか、圧縮ばねを配置しアクチエータの推力不足分を補う必要がある。この場合、振動条件、鋳型重量によっては油圧サーボ型を選択した方が良い場合もある。

以上のことから、電動サーボ型は中小型の鋳型に適用する場合であれば、油圧サーボ型に対し、機能、費用、保守性等あらゆる面において同等もしくは優位であるといえる。

## 4. 電動サーボアクチエータの機器構成

### (1) 機械的機器構成

電動サーボアクチエータは図6に示す通り、一般的にパワーシリンダと呼ばれる装置とほぼ同じ機器構成である。出力側の機器から順に・ロッドの回転止め及びアキシャル負荷を受けるボールスプライン・回転運動を直動運動に変換するボールねじ・スラスト負荷を受けるアンギュラ軸受・各構成部品を保持するシリンダチューブ・動力伝達行うプリー及びベルト・動力源のサーボモータ・サーボモータとシリンダを連結するベースから構成される。

この電動サーボアクチエータを鋳型振動装置用たらしめる一番の特徴は潤滑方式である。一般にパワーシリンダはグリス潤滑方式であるが、本アクチエータは油浴潤滑方式を採用している。鋳型振動装置の振動条件はおよそ毎分100~300サイクル、±1~10mm振幅である。サーボモータ及びボールねじは振動数に応じた揺動回転を行うことになる。このとき振幅がボール径に比較し小さく、かつ揺動運転であるため、ボー

ルが転動面に対し片当たりすることになる。その結果、グリス潤滑ではボールの回転により転動面からグリスが排出されてしまい、供給が追いつかず油膜切れを生じてしまう恐れがある。油膜切れが生じた場合、フレーキングが発生しボールねじの著しい寿命低下につながる。そこで、今回開発した電動サーボアクチエータでは、油浴潤滑方式を採用することで確実に潤滑油を供給し、油膜切れを防止して連続運転を可能にしている。また、図7に示す潤滑油のタンクと小型電動ポンプ、カートリッジフィルタからなる潤滑油の強制循環ラインを搭載することで、放熱に必要な十分な油量を確保でき、シリンダの内部温度を安定させ潤滑油の劣化を抑制している(特許出願中)。また、この潤滑方式は定期的にフィルタエレメント、潤滑油の交換を行うだけでよく、日常的なグリス給脂作業が不要になる。グリス給脂に集中自動給脂システムを採用した場合と比較しても、潤滑材の消費量を抑えることが可能である。

### (2) 電気的機器構成

電気的構成として図5に示す通り、電気室に本装置用のプログラマブルロジックコントローラ (PLC) とサーボモータ制御盤を配置し、機側にサーボモータとアクチエータの位置を計測するための位置センサを有する。

本装置のPLCは連続鋳造機本体の主幹制御装置とイーサネット等で接続される。あらかじめ設定しておいた鋳造速度ごとの振動パラメータから、現在の鋳造速度に応じた振動パラメータ決定する。その振動パラ

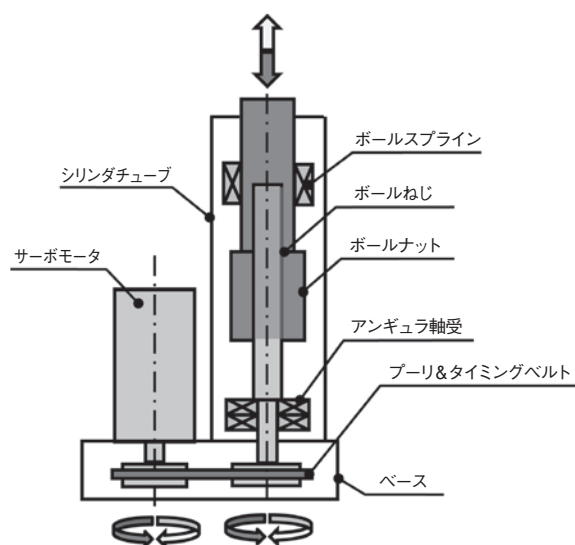


図6 アクチエータの構造

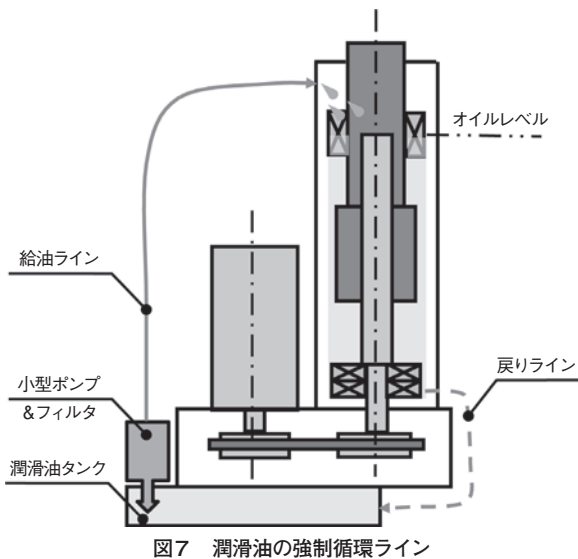


図7 潤滑油の強制循環ライン

メータを基にサーボモータ制御盤へ出力するための速度指令信号を常時計算している。サーボモータの制御方式としてはサーボモータに内蔵されるエンコーダによる速度フィードバック(FB)制御を採用しているが、制御周期と誤差の集積による振動中立位置のずれを補正するために、位置センサの信号をPLCに取り込み、定期的にサーボモータ制御盤に対する指令を補正する形で位置FB制御も並行して行っている。また、電磁攪拌装置等を搭載した重い鋳型の場合は、アクチエータを複数軸配置し同期運転させる必要がある。その場合、同調補償のためのFB制御を追加する。更に、鋳型重量が増えると装置全体の固有振動数が低下するため、振動中の共振が問題となる場合がある。その場合、

共振を抑制するために、油圧サーボ型で培った「状態FB制御<sup>4)</sup>」や機械剛性の補償制御を追加することで、共振の抑制や運転波形の精度向上を図っている。以上が本アクチエータの基本的な装置構成となる。

## 5. その他の期待される効果

従来から鋳造中の負荷と非鋳造中の負荷を比較することで、鋳型摩擦の計測が行われてきた。摩擦力を計測することで、鋳型と鋳片の固着の検出、潤滑状態の監視ができ、その結果を解析・評価することで、鋳造条件に応じた振動パラメータの選択や潤滑剤の選定に用いることができる。従って、鋳型摩擦は初期凝固を診断するための非常に重要な要素と言える。

従来型の振動装置の鋳型摩擦の計測方法について紹介する。偏心カム式の場合、モータが一定方向に回転するためモータトルクのみでの鋳型摩擦の計測が難しい。従って振動テーブル上に設置した加速度センサやフレームに設置した歪センサによって装置の動的な挙動を計測することで負荷を推定し、鋳造中と非鋳造中の負荷を比較することで摩擦力を測定する方法がある。ただし、この方法によって鋳型摩擦を精度よく測定するには機械系を伝達関数として数式で表現し、計測したデータをその伝達関数によって計算処理する必要がある<sup>5)</sup>。

油圧サーボ型ではシリンダ内部の上下圧力室にそれぞれ圧力センサを設置し、「上下受圧面積差×上下圧力差」によって負荷を求めることができる。ただし、圧力は液

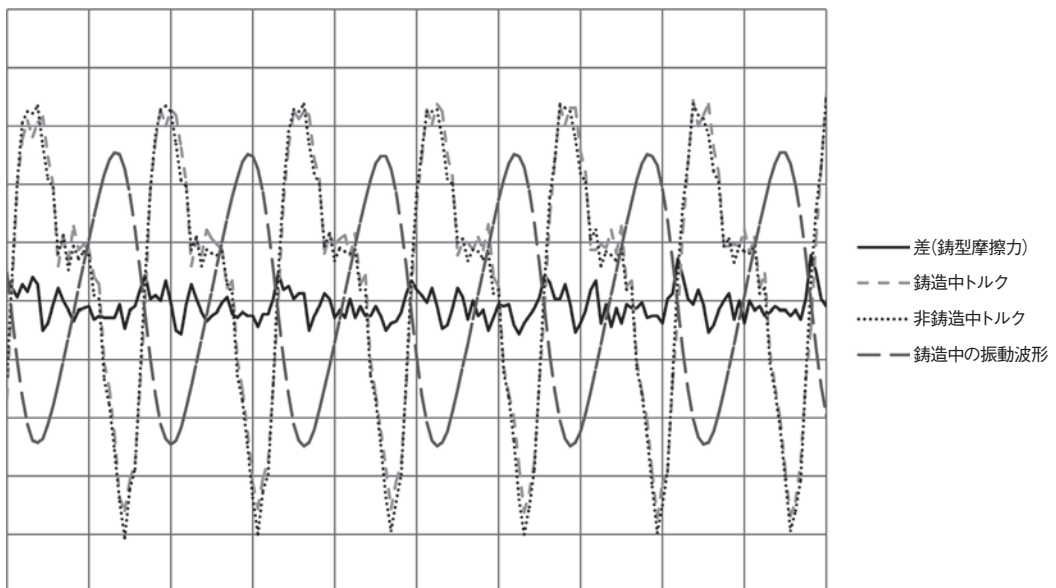


図8 サーボモータのトルク出力機能と鋳物型摩擦力

中の音速で伝播するため、それによる位相ずれの補正や、圧力センサの設置状態によっては圧損も考慮する必要がある。

これに対し電動サーボ型では、サーボモータはモータの出力トルク、回転速度をアナログ信号で出力する機能を持っているため、リアルタイム計測が可能となり、トルク計測が行える。その結果、容易に鋳型と鋳片間の摩擦力（鋳型摩擦）を測定することが可能である。負荷をモータのトルクによって直接計測可能となったことにより、より正確に微細な変化も検知できる。図8はサーボモータのトルクによって計測した鋳型と鋳片間の摩擦力である。

## 6. おわりに

新設、既設、マシンタイプ問わず、あらゆる連続鋳造機に適用可能な鋳型振動装置用アクチエータを開発することができた。この電動サーボ型は油圧サーボ型と同等以上の機能を有し、特に、ビレット、ブルームを生産する中小型の連続鋳造機においては、油圧サーボ型と比較して初期費用、運転費用を大幅に抑えることが可能である。

<参考文献>

- 1) 「我が国における鋼の連続鋳造技術史」、日本鉄鋼協会編pp.288-290
- 2) 特許 特開平9-19751 連続鋳造方法 住友金属工業(株) 村上・他
- 3) 水上・他「鋳型と鋳片間の潤滑現象と高速鋳造時の最適鋳型振動」、「鉄と鋼」第72年 第14号、1986年
- 4) 特許 特開平10-296401 モールドオシレーション制御装置 住友重機械工業(株) 香川
- 5) 中森・他「連続鋳造の鋳型と鋳片間の摩擦計測と解析結果」、「鉄と鋼」第70年 第9号、1984年