

射出成形機の制御技術の変遷と将来展望

Transition and Future Prospect of Injection Molding Machine from Control Technological Point of View



博士(工学) 越智 清史
Dr. Kiyoshi Ochi



横林 武
Takeshi Yokobayashi

要 旨

射出成形機の制御技術は、半導体性能の飛躍的向上、情報通信技術の進化に伴って継続的な進化を遂げてきた。一方、射出成形機ユーザから求められる高付加価値化の要求項目は過去より普遍的であり、時代の技術進化と共に、制御技術は要求項目を実現し、さらに新たなニーズを創出してきた。

本稿では、当社の射出成形機の制御技術に焦点を当て、先人が築いた技術を振り返ると共に、今後の展望について考察する。

— Synopsis —

With the dramatic improvement of semiconductor performance and the evolution of information and communication technology, the demand for further added value creation is increasing in the control technology of injection molding machines. However, the basic requirements for molding machines have been universal since the past, the various requirements have been realized by control technology in that era, and new needs were created.

In this paper, we look back on past Japan Steel Works technical reports, and review the technology that our predecessors have built. And some future prospects are indicated.

1. 緒 言

日本製鋼所が射出成形機事業を開始したのは、1961年4月、ドイツのアンケル・ベルク社との技術提携からである。機械構造の基本原理は現在と同じ、インラインスクリュ式射出機構、トグル式型締め機構であった。この機構に対して、当時は、電気仕掛けに近い方法で自動化が実現されていたが、コンピュータの普及、半導体の技術革新は目覚ましく、制御技術はその技術発展とともに、射出成形機の性能、付加価値を飛躍的に向上させてきた。

これまで制御技術の変遷について解説したものはなかったため、本稿では、過去60年の制御技術の軌跡を辿ってみることとした。表1に示す制御技術のロードマップに沿って、以下に制御技術の変遷を記述する。

射出成形機の歴史の流れについては、技報No.58⁽¹⁾、No.66⁽²⁾を参考とさせて頂き、注目すべきトピックについては随所に引用させて頂いた。なお、2000年代半ば以後についての技術変遷については、本号掲載の「射出成形機の技術変遷と将来展望」を参照されたい。

2. 射出成形機事業の立上げ

2.1 日鋼アンケル・ベルクVシリーズ

初代の射出成形機シリーズである日鋼アンケル・ベルクV10～V42型は、国産初のシングル・スクリュ・インライン式射出成形機(写真1)として市場を席卷し、好評を拍した。初期の射出成形機は、現在の制御技術を基準として考えれば極めて原始的であった。型締力の小さ

表1 制御技術ロードマップ

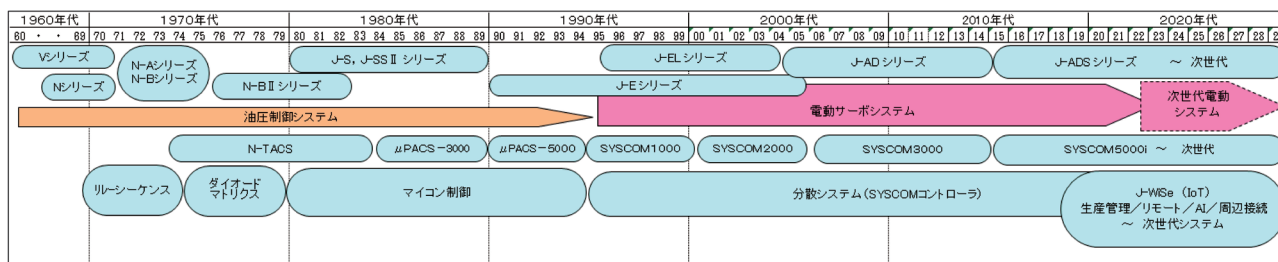


写真1 初代射出成形機 (V シリーズ)

な小型の射出成形機では、ハイサイクル成形(当時の技報では高サイクルの発停と表現)ができるように油圧モータによる速度調整によって容易かつ迅速に速度変換ができる構造であった。電気装置のタイマー、マイクロスイッチ、リレーなどの重要部品は機械の性能、寿命を大きく左右するものと認識され、その選択には特に慎重を期し、いずれもアンケル・ベルク社で実績のある世界の一流メーカの製品を使用した、と当時の技報No8⁽³⁾に記述されている。V42-350型を例にとると、タイマー12個(内特注3個)、リミットスイッチ13個をはじめ、速度や圧力の主な調整弁7個、自動温度調整計5組で構成されており、アンケル・ベルク社のノウハウによって実現されていたようである。電気回路(電気仕掛けに近い)による限られた機器の構成によっていかに安定動作を確保できるかに苦慮していた時代であることが伺われる。

その後、次第に技術を自社に取り込み、Nシリーズ、NAシリーズを経て、1970年前半まで自社技術としての構築・拡充とコストダウンが図られた。

2.2 日鋼クラウスVシリーズ

型締力の大きな大型の射出成形機においては、日鋼クラウス射出成形機として、型締力550～3000トンの形式があり、1963年、V110-700型の販売を開始した。この機械の動作は、スクリュの回転数はチェンジ・ギアと電動機の極数変換により切り替え、過負荷に対する安全装置は電磁クラッチが用いられるなど、機構的な手段に依存していた。

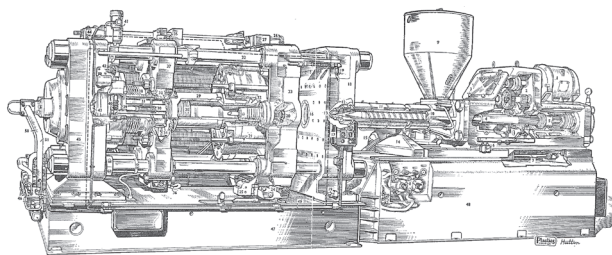
当時の技報No.15⁽⁴⁾には、日鋼・クラウス・マッファイ機の外観(図1)が掲載されており、制御装置としては、操作スイッチ箱(ローカルボックス)が記載されている。3D-CADの無い時代、この図は手書きで精細に書かれており、この機械に対する当時の開発者の思いを感じることができる。一方、主操作盤は、自立式であり、シリンダ部、ノズル部の自動温度調節計、タイマ、緊急停止ボタン、各モータ用ボタン・スイッチ、ヒータ用スイッチ、各種切替スイッチ、電気計測器、パイロット・ランプ類が装着されていた。

操作を行う制御装置(ローカルボックス)は、既に現在の射出成形機と同じ場所(固定盤の前面)に設けられ、金型取り付け時などの調整運転用スイッチ、緊急停止ボタン、パイロット・ランプ類がコンパクトに装着されていた。ローカルボックスが装備されたことは、少しでも作業性を改善したいというユーザーニーズの現れであり、以後の機械においてローカルボックスは高機能なコントローラへと進化していくことになる。しかし、このシリーズは、各種の問題解決に苦勞し、成形性能の旧式化も目立ち始めたことから、1975年に自社技術を確認し、クラウス社技術を脱却している。

3. デジタル式電気制御の導入

3.1 デジタル式制御技術

制御技術導入の大きな変化点として、アナログ式から



- | | | | |
|----------------|--------------------------|--------------------|--------------|
| 1 スクリュー・モータ | 14 シリンダ部分 | 26 エジェクタ配管 | 39 型厚調整ナット |
| 2 ボルト・ボッタス | 15 油圧ポンプ | 27 取替手 | 40 型厚調整フォーム |
| 3 ギヤ・ボッタス・フタ | 16 ホーターリング・リング | 28 型戻りボタン | 41 型厚調整モータ |
| 4 スライド軸 | 17 操作スイッチ箱(ローカルボックス) | 29 型戻りボタン | 42 圧油弁 |
| 5 射出ピストン | 18 固定型 | 30 型戻り油路 | 43 圧力油配管 |
| 6 射出用ピストン・スイッチ | 19 フロット・スイッチ | 31 型戻り油路 | 44 取替手 |
| 7 移動用ピストン軸 | 20 油圧式ノックアウト(ハイドロ・エジェクタ) | 32 型戻りピストン | 45 エンド・ハウジング |
| 8 圧力調整弁 | 21 機械式ノックアウト(ノックバー) | 33 ロッキング・プレート | 46 型戻り用電磁弁 |
| 9 ホット | 22 タンク | 34 ロッキング・ピストン軸 | 47 型戻りヘッド |
| 10 スクリュー | 23 移動型 | 35 ロッキング・シリンダ配管(上) | 48 射出ヘッド |
| 11 シリンダ・モータ | 24 移動型 | 36 ロッキング・シリンダ配管(下) | 49 安全ドア・レール |
| 12 ノズル・ヒータ | 25 移動型 | 37 型戻り油路 | 50 型戻り用配管 |
| 13 ノズル | | 38 型戻り油路 | 51 型戻り用配管 |

第1図 日鋼・クラウス・マッファイ射出成形機

図1 日鋼・クラウス機

デジタル式への移行が挙げられる。図2は、1974年発行の日本製鋼所技報35号「射出成形機の電気制御」に掲載されている電気制御の構想図で、将来の電気制御技術について考察されている⁽⁵⁾。

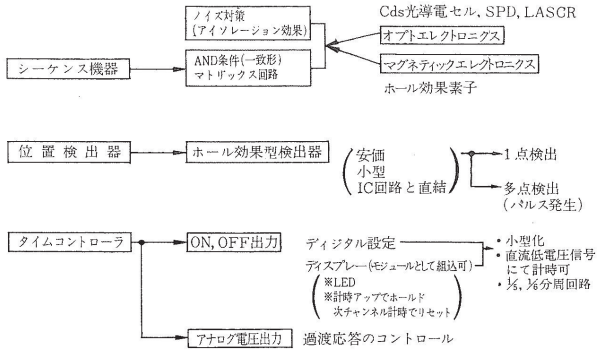


図2 電気制御の構想図

電気制御を搭載する以前の射出成形機では、使用するタイマはアナログ式のものが多かったが、1970年以後、射出成形機を使いやすく、かつ再現性を向上させる目的で、デジタル式タイマが目ざされはじめた。技報の中の記述として、設定分解能は0.1s、無接点出力、LED表示付きであるものが推奨されるとある。当時の将来展望としては、射出成形機でのシーケンス制御、フィードバック制御はますます複雑化することを示唆し、コンピュータの処理能力向上によってきめ細かな制御ができるようになるが、それだけでは射出成形機の大幅な改良は十分でなく、機構やセンサ等全体の最適化設計が重要となると記述されており、現在の課題にも通じる問題点を予見している。

3.2 集中監視技術

同じく日本製鋼所技報35号「射出成形機の成形作業省力化」⁽⁶⁾にて、射出成形機の生産性の改善に必要な生産監視の概念が登場した。不良品を出さず省力化を実現するための要件について考察されており(図3)、成形機に求められる最も根源的な要求性能とともに省力化の実現が検討され、この頃に集中監視の基本的な考え方が確立されたものと思われる。集中監視を行うと、一人のオペレータで複数台の射出成形機を受け持つことが可能となり、集中監視盤(写真2)により、複数の射出成形機の稼働状況、生産量、生産管理に必要なデータの記録、技術管理上の資料の提供も可能とある。異常監視については、射出成形機、金型、補助機器などの自動化を進めると同時に、要所に異状検知装置を設けて集中監視し、故障機、およびその部位を迅速に発見して成形を再開でき、成形休止時間の短縮に効果を上げることができる、と記載されている。この集中監視盤は、制御技術の歴史

の中で、様々な進化改良を重ね、2019年にはJ-WiSe™ Production Managerというソフトウェアパッケージに変貌を遂げている。

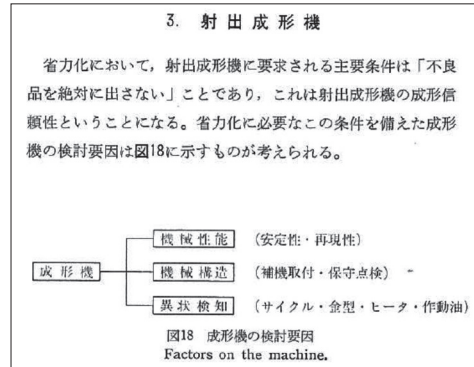


図3 成形機の根源的要求

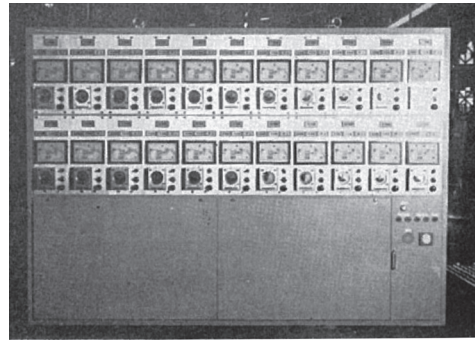


写真2 集中監視盤

一方、「射出成形機、金型、自動化補助機器などに多額の投資を行い省力化の徹底を図っても、それによる削減人件費と省力装置の償却費、維持費が見合わなければ合理化の意味が無い」とも述べられている。これは、現在の新しいIoT技術の実用化において合理化の手段は進化したが、要求と課題そのものは変わらないことを示唆している。

3.3 N-B IIシリーズへのコンピュータ技術の適用

機械部品や電子部品などの精密成形の需要に応えるべく、1975年に当社独自技術による中小型射出成形機N-B IIシリーズを上市した。この機種の特長は、スクリュ駆動に油圧モータを採用し、制御システムN-TACSおよびN-PACSをオプション装置として具備し、制御精度の向上やハイサイクル化などが図られた点にあった。



写真3 N-B IIシリーズとN-TACS

この制御システム N-TACS、N-PACS は、制御、演算部にマイクロコンピュータを用いた。本格的なプロセス計算機制御システムであった。外観を写真 3 に示す(N-B II と N-TACS の写真は合成)。

主目的は、熟練者の代わりに制御装置によって行うことであり、これは 45 年が経過した 2020 年の現在においては、AI 技術を用いた新しいアプローチで商品化を目指している成形条件の自動補正機能と目的を同じとしている。当時の背景としては、人手不足を挙げており、「熟練者の不足は深刻であり、さらには、未熟練者ですら求めにくくなっている。これらのことから、成形業界において人手に代って自動的に射出成形機の制御を行う装置の必要性が痛感せられるようになった。」とある⁽⁷⁾。成形業界においては、常に進化し続ける樹脂の用途や特性に対して対応できる熟練者の獲得が困難であることは、普遍的な課題であり、決してそれが充足することはなく、人間に変わるシステムへの期待は常に変わらず存在する根源的な要求であると推察する。

また、N-TACS は、搭載機能の面でも、現在にも通じる次のような 8 機能を有するプロセス制御装置であった。

- (1) 射出速度パターン制御
- (2) 保圧パターン制御
- (3) 背圧パターン制御
- (4) スクリュ回転数パターン制御
- (5) 自動計量機能
- (6) 金型内圧制御
- (7) 樹脂温度制御
- (8) 金型温度および樹脂温度保圧修正制御

(1) から (7) の機能は、性能・使い勝手などを向上させ、現在の最新型の制御システムにも搭載されている。また、上記の機能の中で、(8) の制御は人手に代わって自動的に成形条件を補正できるフィードバック機能を持つものがある。金型温度と樹脂温度を測定し、樹脂温度の変化に応じて、保圧力を変化させる保圧工程へのフィードバックを行っており、そのショット内で修正することが可能とある。N-TACS を用いて成形を行なった結果、成形品の寸法および重量のバラツキは、ともにフィードバックを行わない場合の約 1/3 になり、また、成形を開始して溶融した樹脂が金型内に射出充填され始めることで金型温度が変化する状況下でも、成形品の寸法および重量が安定するまでのショット数は約 1/3 になっている。45 年が経過した現在においても、真の意味で射出成形に関わる様々なノウハウを自動化する制御装置は実現できていない。だが、当時の成果として、限定的な範

囲とはいえ、成形不良の回避を人手によらず自動制御によって達成できたことは、当時大いなる前進であったと考えられる。

上記の内容が記述されている日本製鋼所技報 37 号のむすびのコメントとして、「我々は射出成形機メーカーとして、現状では十分にこたえているとは言えない。将来、制御装置はオペレータの成形作業の代替から、さらに高度な技術的知見も含めて代替できるものをめざすべきであり、また群管理なども含めて、完全な意味での自動化を実現するべきである。これらを目標として、筆者らは、さらに研究を続けていく所存である。」とある。我々も後に続く者としてこの意思を継承していきたい。

4. コンピュータ搭載マシンへの進化

4.1 機械制御のコンピュータ化 (J-S シリーズ)

1980 年から、全面的にモデルチェンジした J-S シリーズの販売を開始した。本シリーズは、世に先駆けてそのコントローラにマイクロコンピュータを搭載して、成形条件の設定と変更を容易にし、かつ多段射出制御による機械制御精度を大幅に向上させた機種として、業界の注目を浴びた。これまでのコンピュータ制御の導入は、プロセス制御への導入が主体であったが、J-S シリーズからは、機械制御(型開閉動作や型締力調整等)をコンピュータ制御化したところが従来と異なる所であり、このころより、コントローラという表現が使われるようになってきた。

世に先駆けてマイクロコンピュータを装備した μ PACS-2000 コントローラ⁽⁸⁾は、成形条件の設定と変更を容易にし、射出成形機の駆動源である油圧機器を作動させる油の流量および圧力の遠隔設定(コントローラからの設定)を可能とした革新的なものであった。これにより、成形条件の機差が解消され、射出成形機のプラスチック製品の大量生産機としての性能や安定性を向上させた。この J-S シリーズ機種は、オーディオカセットや VHS カセットの成形に多く採用された。

なお、型射出成形機においても、徐々に拡大するエンジニアリング・プラスチックの精密成形に対応するため、1982 年にコントローラにマイクロコンピュータを搭載した J T シリーズの販売を開始している。

4.2 機械とコントローラの一体化 (J-SS IIシリーズ)

中小型射出成形機においては、1985年に、8ビットマイクロコンピュータを用いたコントローラ μ PACS-3000を搭載したJ-SS IIシリーズを発売した(写真4)。 μ PACSコントローラの本体は、射出成形機本体にビルトインされている。本コントローラは、成形条件を一括して集中的に表示させるパネルを採用し、条件設定の容易性・視認性・再現性をより向上させたものとなった。さらに、上位機種として油圧アキュムレータを装備したJ-SS II Aシリーズは、当時、飛躍的に生産量が増加したビデオカセットケースやフロッピーディスクシェルなど、薄肉成形品の成形に広く採用された。

一方、大型射出成形機においては、自動車用バンパー、インストルメントパネルなど自動車部品を中心に、大型化する成形品への対応が進み、J-SS IIシリーズにおいては、世界最大の型締力6,000トン機の販売実績もある。この時期は、コントローラの進化と共に、大型機、超大型機において、確固たる地位を構築した時代であった。

また、堅型機専用のコントローラも開発し、1985年にEPACS-300Tを装備したJT-IIシリーズを上市している。



写真4 J-SSIIシリーズ

4.3 μ PACS-3000 コントローラ

1980年代中盤は、射出成形機のコンピュータ制御化が確立された時代である。ここで、一時代を築いたと言える μ PACS-3000コントローラについての概要や特徴を紹介させて頂く⁽⁹⁾。

表2に射出成形機の各機種とコントローラの形式を、写真5に μ PACS-3000コントローラの外観を示す。これらのコントローラのうち、中核となるのは μ PACS-3000とEPACS-300/30である。射出成形機の工程順序を制御するシーケンス制御は、1ビットプロセッサを使用した高速シーケンサEPAC-HSUで行なっている。

このシーケンサはプログラム呼出しにパイプライン構造を採用して、プログラム処理速度が1.5マイクロ秒/ステップの高速処理を実現しており、制御周期が細分化されることによって、成形サイクルや動作切替タイミングの変動最小化を図り、成形安定性に寄与している。また、ハードウェアはワンボード構造で接触不良等の不具合を削減する観点で信頼性の向上を図っていた。

また μ PACS-3000コントローラに搭載したEPAC-HSUシーケンサは、プログラムにより入出力回路の異常箇所を成形運転中にチェックする機能を搭載し、射出成形機の運転中に故障箇所の診断ができるシステムを採用している。成形品品質の観点から、射出工程から保圧工程への切り替えを精度よく行う必要があるため、プロセッサの算出速度を最小とする割り込み処理を利用し、高精度化・安定化を図っている。さらに、スクリュ位置の検出には磁気誘導式のリニアアプソリュートエンコーダを採用し、高精度化・安定化の一助とした。

射出時間、保圧時間、冷却時間などの“プロセス時間制御タイマ”は、システムクロックを分周したソフトウェアタイマで処理し、タイマの正確さによって成形サイクル精度が確保されるようになった。

プロセス監視機能としては、(1) 時間監視(射出時間、計量時間等)、(2) 圧力監視(射出中のピーク圧力)(3) 位置監視(射出工程から保圧工程に切り替わった時のスクリュ位置と、射出保圧工程のスクリュの最前進位置)これらの上下限を監視し、不良の連続発生回数が予め設定した値に達したら、警報または成形運転を停止させる機能が組み込まれた。これは、現在の品質管理機能に引き継がれ、標準装備されるものとなった。

データの設定(Human Machine Interface : HMI)については、キーボードでの成形条件データの設定を可能とし、入力した設定値の確認用に7セグメント発光ダイオードおよび液晶表示器を備えていた。成形条件データの記憶用に8キロバイトの外部記憶装置を搭載しており、8つの成形条件を記憶できた。これによって成形条件データの一括設定を実現した。

周辺装置との通信ポートも4個備えており、型盤制御装置、温度制御装置、ミニプリンタおよびホストコンピュータとの連携制御ができ、FAシステムの構成を可能とした。

当時は、人間の使いやすいマン・マシン対話方式や生産管理と工場管理など、ブームとなったCIM (Computer Integrated Manufacturing) の概念を意識した開発が取り組まれていた。

その一環として、グラフィック表示画面とキーボードによって、対話式に成形条件の設定が行なえるコントローラとして μ PACS-4000コントローラが開発された。カラーグラフィック、漢字仮名表示による多彩な成形運転情報が表示でき、ユーザフレンドリな監視、操作への対応が進んだ。

表2 1980年代のコントローラ

射出成形機の種類	コントローラ	
横型射出成形機	J-SSII-A J-SSII	μPACS-3000 (EPAC-HSU 内蔵)
	J-SAII	EPACS-300
	J-SBII	EPACS-30
縦型射出成形機	JT-II JT-RII JT-MR	EPACS-300T
特殊成形機	プラマガ射出機 J-50M J-100M	EPACS-300M
	ゴム射出機 JTR	EPACS-300TR



写真5 μPACS-3000コントローラ

1988年には、コントローラμPACS-5000を搭載した。CRTディスプレイを装備し、画面からの完全フルリモート条件設定・射出波形モニタリング・成形条件記憶など、先進的な技術が導入された(J-Eシリーズへ搭載)。縦型射出成形機では、1988年に、コントローラμPACS-300Tを装備したJT-IIKシリーズを販売し、主として中京地区の自動車関連会社に納入されたロングセラー機となった。

1980年代中盤からの射出成形機のコントローラのコンピュータ制御化は、スピーディな操作性や多様な成形条件設定を可能にし、当時の成形作業効率を大幅に改善するとともに、自動制御機械としての大幅な進化を達成し、多様化するプラスチック用途への対応ニーズに答えるべく、制御技術が大きく進展した時期であった。

5. 分散型コントローラへの移行

5.1 SYSCOMコントローラの誕生 (J-EIIシリーズ)

1990年代に入り、射出成形機の多様性が広まる中、射出成形機のコントローラも機種毎に対応したものが必要となってきた。特に、中小型射出成形機では、大型機・電動機・プラマガ機・縦型機などさらに拡大する機種構成に対処する必要が生じ、全ての機種を共通のコントローラで実現する分散型コントローラの考え方⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を導入したSYSCOM1000を新たに開発し、これを搭載したJ-EIIシリーズおよび縦型機JT-EIIシリーズを1994年に上市した。

このコントローラの構成は、従来のコントローラ概念を捨て、多機種コントローラ対応、メンテナンス対応が難しくなる問題を解決した革新的なものであった。また、他社に先駆けて、熟練成形技能者の減少対策に対応する機能として、成形条件出し作業を支援するエキスパートシステム⁽¹²⁾をコントローラ内に組み込んだ。

5.2 SYSCOMコントローラ

SYSCOMコントローラ概念は、現在のコントローラであるSYSCOM5000iにも継承され、進化を続けている。その初代であるSYSCOM1000について以下に紹介する。

SYSCOM1000はそれまでのコントローラ概念とは異なり、分散制御システムを採用した。これは、HMI、シーケンサ、I/O制御の構成要素を、独立した基板で構成し、それぞれを通信によって接続連携して射出成形機のシステム全体を制御するものである。これによって、小、中、大、縦型、特殊機など、様々な射出成形機に柔軟な対応を可能とした。

SYSCOM1000の制御システム構成を図4に示す。コントローラ中心となる制御を行うCPU基板は、シーケンス処理用、通信処理用、システム制御用にそれぞれ専用のプロセッサを搭載したマルチプロセッサ構成とした。これによって、シーケンス処理の安定した実行と通信機能の強化に対応し、自社開発したマルチタスクOSにより従来にない安定した高速処理を実現した。また、ファイル管理機能によりメモリ上に複数のファイルを格納し、各種制御プログラムや、診断プログラム、保守用のユーティリティープログラムなどを必要に応じて呼び出して実行することができたことも成形機のカスタマイズや保守サービスの飛躍的向上につながった。

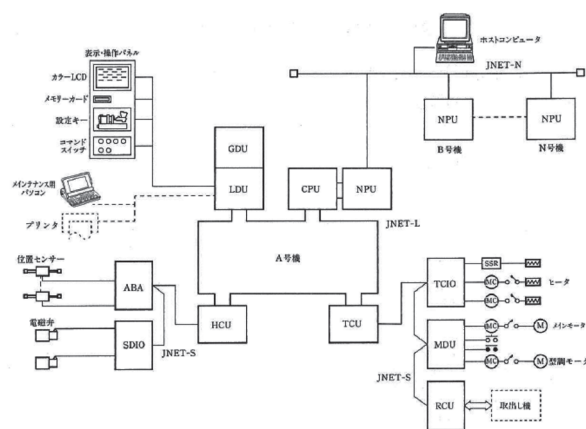


図4 SYSCOMコントローラ構成

油圧式射出成形機が主流の時代、ハイサイクル、高速射出性能の達成には、油圧回路の高速かつ安定した制御の実現が、成形機性能を左右していた。その油圧回路を制御する高性能基板が、HCU 基板であった。当時、革新的なマイコンとして注目された DSP (デジタル・シグナル・プロセッサ) を搭載し、専用の自社開発マルチタスク OS を実装し、油圧の非線形特性の補償、むだ時間補償、クローズド制御などの機能を組み込み、高性能制御を実現した。

その他、シリンダ温度制御、ヒータ断線検出、熱電対断線検出、スクリュ回転速度制御、地絡検出を行なう専用の制御基板を開発し、マルチタスク OS の実装により、システム構成の柔軟な対応を可能としたことも成形機の高機能化に大きく貢献した。

また、電子回路技術としては、デジタル化技術の本格導入によって、従来のアナログ回路による不安定さが解消され、長時間の成形安定性と再現性の向上が図られている。

射出成形機アプリケーションソフトの実装方法についても、従来と比較して大きく改善された。それまでのアプリケーションソフトは基板上の ROM に実装されており、機械動作を変更する場合、実装された ROM を取り外して内容を書き換える作業が必要であった。本システムでは、フラッシュメモリー上にファイル管理システムを構築し、パソコンと同様に通信を介してアプリケーションプログラムファイルを容易に読み書きすることが可能となった。複雑なプログラムを従来のような組み込みプログラム言語で対応するには開発時間および人員を要するが、新たに構造化言語 (CDL, PDL, SDL 等) を開発し、この問題を解決した。これによって、多様な機種にも柔軟に対応できるようになり、組み立て現場や現地でのソフト変更、改造も容易になった。

また、コントローラの演算性能が大幅に向上したことによって、成形品の重量、寸法の変動を予測しリアルタイムで成形機動作を予測修正する高度なプロセス制御の実装も可能となり、成形品への温度変動の影響を最小にする最適保圧予測制御装置 (AD-PAC) ⁽¹³⁾ が開発され長期間の品質安定性の改善も図られた。

HMI として大きく進化した、ローカルボックス (写真 6) は、10.4 インチカラータッチパネルを採用し、成形機の操



写真 6 SYSCOM1000
コントローラ

作性を大いに改善するとともに、現在の成形機コントローラのスタイルが確立された。

1990 年代中盤からの革新的な SYSCOM コントローラのコネクトは、小型～超大型、堅型まで多様なラインナップを強みとする JSW の射出成形機ブランド作りに大いに貢献した。

6. J-EL II シリーズ (油圧駆動から電動駆動へ)

6.1 自社開発サーボアンプの適用

1990 年代中盤からは、もう一つの劇的な技術革新である電動化技術の導入が行われた。当社としては、本格的な電動機シリーズとして 1996 年に J-ELII シリーズを投入した。当時、世界規模で CO₂ を削減させていこうと決議された京都会議、環境に関する規定 ISO14001 の制定なども市場ドライバとなり、特に省エネ効果を発揮できる電動射出成形機への期待の波が業界全体に大きく押し寄せてきた。

しかし、電動化技術のキーテクノロジーは、サーボモータの制御技術であり、これまで油圧制御技術しか有していなかったほとんどの射出成形機メーカーは、その開発をサーボアンプメーカーに依存する必要がある。しかし、当社では産業機械の電動駆動化を予見して広島研究所 (当時の機械電子技術研究所) ⁽¹⁴⁾ でパワーエレクトロニクスの応用研究を進めており、自社開発のサーボアンプを即座に提供する用意ができていた。当時は、実績のない自社製サーボアンプを採用することには反対意見もあったようであるが、開発部門は進退をかけての挑戦と説得を行い、採用が認められた。写真 7 は、自社製サーボアンプを搭載したプロトタイプ 1 号機の立ち上げの様子である。その結果として、サーボアンプメーカーではノウハウのない射出成形機特有の課題を解決した射出成形機専用のサーボアンプの開発に成功し、その後、電動化の未開領域であった大型機、超大型機の全電動化を世界に先駆けて実現した。

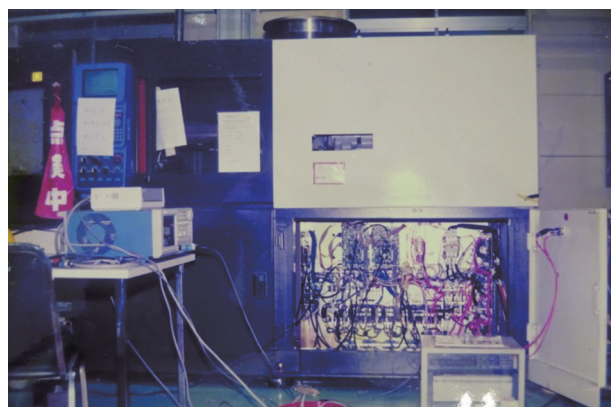


写真 7 自社製サーボアンプのプロトタイプ機立ち上げ

6.2 電動化による技術革新⁽¹⁵⁾

電動射出成形機は射出、可塑化、型開閉・型締、突出の動作軸各々にサーボモータを搭載(図5)し、動作時のみエネルギーを消費するため、消費電力の大幅な低減が実現された。油圧ポンプモータを常時駆動させる油圧式に比べて消費電力は1/3～1/4であり、非常に大きなインパクトがある技術革新であった。

また、電動射出成形機の駆動源であるサーボモータは、フィードバック制御によって動作するため、金型に樹脂を充填する工程での充填速度、位置および圧力を正確にコントロールする追従性能と、環境の変化に影響されない再現性能も大幅に改善された。

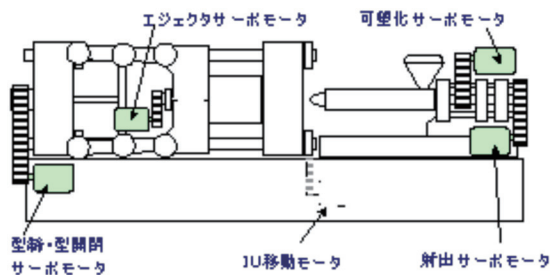


図5 電動射出成形機のサーボモータ構成

当時この様な、電動化が実現できるようになった背景としては、エレクトロニクス分野において、高電圧および大電流を高速でスイッチングできる半導体素子が開発され、また高密度永久磁石、磁界解析技術、電熱解析技術の進歩に伴って、小型ハイパワーレートの電動機がローコストで入手可能になったことが挙げられる。さらにこれらの技術を支えるパワーエレクトロニクス技術の産業応用を、世界に先駆けて日本メーカーが取り組んでいたことも背景としてあった。

また、サーボモータ制御の精確な動きによって、以下のような従来にない当社独自の差別化技術も確立された。

- (1) 樹脂の充填状態を推定する状態推定器を用いた圧力制御 (APC 制御: Advanced Pressure Control)
- (2) 射出圧力制御と速度制御を連続的に切り替えられる電動機に最適なソフトバック制御
- (3) 型締力の大きさを射出タイミングに合わせて精密に調整する多段圧縮制御
- (4) 金型の異物を検知して金型破損を防止する金型保護機能などが挙げられる。特に、これらの機能を実現するための
- (5) 電動射出成形機の動作を記述する専用のプログラム言語 (MDL: Motion Description Language)

を開発したことは、複雑な動作を簡易なプログラミングで実現することを可能とし、電動射出成形機の特徴を生かした新機能の実現に大いに寄与している。

その他、電動化によって、各駆動軸(射出・型開閉等)が独立に駆動することができるようになったため、成形条件

の複合動作(射出完了前に型開閉動作を開始する等)が可能となり、成形サイクルの短縮ができた。また、作動油の管理が不要になったことも大きなメリットであった。

また、電動化は電気設備に対する高調波増加による力率低下が避けられない問題や、電源電圧の安定性が成形機の生産性に影響する問題がある。これに対して、射出成形機に特化した安定化電源装置(PWM コンバータ)を業界に先駆けて開発し、展開した。

これらの技術、背景が相まって、1990年代中盤以後、省エネルギー効果の大きい電動射出成形機への急速な技術転換を、業界をリードするべく推し進めた。

6.3 大型～超大型機の電動化 (J-EL III～J-AD シリーズ)

電動化技術を導入したJ-EL II シリーズは、1999年までに超小型・中型機クラス(35、180～450トン)へ機種拡大を図り、2000年にはJ-EL IIIシリーズへと進化した。コントローラも64ビットRISCプロセッサを採用したSYSCOM2000へ更新している。この間、さらに大きな省エネルギー効果が得られる自動車分野を主流とした大型機分野へも電動射出成形機の領域を拡大した。

サーボモータで駆動しボールネジを利用して回転運動を直線運動に変換させる機構では、中型機のような単軸のボールねじで大型機の推力を発生させることは不可能であり、またサーボアンプも大型専用のものが必要となるなど、これ以上の大型化には、技術的な課題とともに大型専用設計によるコスト問題に直面した。これに対し、単に大型のモータや大容量のサーボアンプの種類を増やして対応するのではなく、基本となる数種類のサーボアンプ(写真9:ブック型サーボアンプ)を並列接続して大容量化を実現する制御方法⁽¹⁶⁾を開発し、中小型から超大型まで全ての機械に共通のサーボアンプを適用するJSW独自のコンセプトを確立した。さらに、装置の大出力化を実現する手段として、中小型で使用しているサーボモータ、およびボールねじを並列で構成し、大型機の推力を得る方法として、多軸同期制御の開発を成功させて対応した。これらの技術によって、多機種にわたるバリエーションへの柔軟な対応を実現するだけでなく、長期間のアフターサービス、部品の長期継続供給の課題を同時に解決することを可能とした。このような独自のコンセプトを確立したことによって、2007年1月には全電動世界最大級の2500トンを上市し、“大型電動射出機のJSW”と言われるまでにシェアを拡大した。

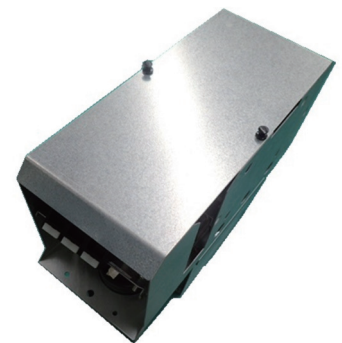


写真8 ブック型サーボアンプ

6.4 制御技術による差別化 (J-AD シリーズ)

2004年には小型精密成形分野の強化を図るためにJ-ADシリーズを市場投入した。コントローラは、SYSCOM3000を搭載し、特に、高速射出成形分野での精密安定成形を狙うべく、制御周期は世界最速の62.5 μ sを業界に先駆けて実現した。操作パネルは、15インチの液晶パネルに大型化し、使い易さも追求した。また、パソコン、インターネットの普及に対応しネットワーク機能の向上を図った。

加えて、成形業のグローバル化ニーズに応えるため、射出成形機用集中管理システムNET100を自社技術により2004年に開発し、オプションとして販売を開始した(図6)⁽¹⁷⁾。本システムは最大100台までの射出成形機を一括して管理することができる。ネットワークを介して機械から離れた場所から稼働状況の確認やサイクル時間や射出圧力等の測定値の分析が可能となった。この技術は、現在製品展開が競われているIoT技術の射出成形機への導入された先駆けの製品であり、JSWは情報技術の導入においても業界に先駆けて製品化を進めた。

これらを搭載、対応したJ-ADシリーズは2005年の機械工業デザイン賞の審査委員会特別賞を受賞している。

1990年代中盤から2000年にかけての電動化は、省エネルギー化だけでなく、これまでの油圧機では満足されることのなかった安定動作に対する不自由さを根本的に解決した。電動化が浸透した2000年中盤からは、さらなる精密動作を求めたステップアップしたニーズとして、高応答化による薄肉製品への対応、さらにはDSI成形、圧縮成形などの複雑な動作を正確に実現することによる従来では実現できなかった成形形状が実現可能となる等、使いやすさの改善において、成形機メーカーの新たな独自性が競われた時代であった。また、次の時代のニーズ、すなわち経営的な視点での生産性改善ニーズに向け、急速な技術革新が行われていたネットワーク技術の適用による、成形生産性のさらなる効率化に向けた技術導入が始まった時代でもあった。

7. 最新技術と今後の技術展望

現在のJ-ADSシリーズから搭載されているSYSCOM5000iは、HMIに着目したさらなる操作性の改善、IoT技術への対応を進めている(現在のシリーズについては、本号(技報71号)に別途掲載されている「射出成形機の技術変遷と将来展望」を参照されたい)。

今後は、IoT化に対応した技術(J-WiSeTM)⁽¹⁸⁾を導入し、成形不良、機械メンテナンスに対する迅速な対応、アフターサービスなどの強化が益々重要となる。その背景としては、情報通信技術の進化(5Gの普及)やクラ

ウド技術の導入があり、それを応用したアプリケーションが産業機械分野全体に浸透していくと思われる。これらを射出成形機に適用することで、使い勝手や生産性の向上を図るのみでなく、通信技術の進化は、射出成形機ユーザとの距離を縮め、かつての技術進化もそうであったように、新たなニーズを創出し、新しいビジネスモデルが拡大、発展していくものと推測する。

制御技術は、今後も射出成形機の差別化の要として益々重要性を増すであろうことは誰もが予測している。当社は、電動化をリードしてきた射出成形機メーカーとして、次なる技術革新の創出、加えて電気機械制御、半導体分野での技術革新を早期に取り込み、世界に先駆けて高性能、高信頼性、さらには成形機ユーザの安定操業に寄与するこれまでにないサービスソリューションを提供できる射出成形機を創出するべく、日々研鑽していく必要がある。

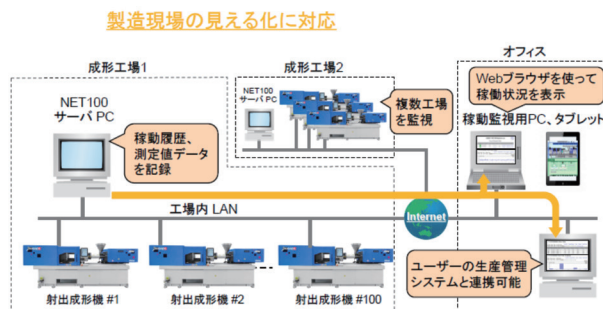


図6 NET100 システム

8. 結 言

先人の築いてきた制御技術の改良発展の軌跡、試行錯誤の歴史などをあらためてたどることで、あらためて過去に学ぶことは多い。

電気制御技術の変遷を振り返ると、射出成形機に求められていることは普遍的である。また、制御技術は時代とともに進化・発展を続けており、その時代の中でユーザーニーズを解決し、ユーザに自由度を与えてきた。その結果、さらに進化した新たなニーズを生み出してきた。今後は、経営的なニーズに対して、技術革新が適用される時代であり、やはり制御技術によるあたらしいソリューションが実現され、次の射出成形機の時代を作っていくものと考えられる。過去の技報を見ても、いろいろな場面でいかに生産性の改善に寄与する手段を利用・具現化することに精力を注いできたか、歴史を振り返ることにより感じる事ができる。一方、コンピュータへの過度な期待だけでは、射出成形機の本質的な進化は困難であることも忘れてはならない。

当社の射出成形機事業の歴史は60年を迎える。この間、先人が培ってきた制御技術開発、さらに射出成形機の性能を根底で支えるプロセス技術開発は当社の強みであり、JSWは、市場の要求に適合する射出成形機の進化をリードしていけるものと確信する。

最後に、過去の日本製鋼所技報を執筆されました諸先輩方々に敬意を表するとともに、今後の100年に向けたさらなる射出成形機の発展に向け、精進して参る所存である。

参 考 文 献

- (1) 菊川健治, 植田祐治, 横林武, 神田幸二, 上園裕正: “射出成形機技術発展の歴史と今後の展望”, 日本製鋼所技報, No.58 (2007), pp.47-58
- (2) 上園裕正, 面林孝英, 藤井勝裕, 越智清史: “射出成形機の技術発展の歴史と今後の展望”, 日本製鋼所技報, No.66 (2015), pp.23-33
- (3) 高林主計, 奈良哲夫: “日鋼アンケルバルク・シングル・スクリュ式射出成形機の紹介”, 日本製鋼所技報, No.8 (1961), pp.29-34
- (4) 広島製作所: “日鋼-クラウス・マッフファイ射出成形機の紹介”, 日本製鋼所技報, No.15 (1963), pp.34-42
- (5) 原齊: “射出成形機の電気制御”, 日本製鋼所技報, No.35 (1974), pp.48-57
- (6) 片野英夫: “射出成形機の成形作業省力化”, 日本製鋼所技報, No.35 (1974), pp.37-46
- (7) 岡井邦男, 末吉敏彦: “射出成形機制御システム“N-TACS”、“N-PACS””, 日本製鋼所技報, No.37 (1976), pp.3-7
- (8) 内田郁夫, 井波俊夫: “射出機新制御装置「 μ PACS-2000」の制御システムとそのプログラム”, 日本製鋼所技報, No.41 (1982), pp.24-35
- (9) 長原正大, 光平国昭, 辰段政照: “射出成形機コントローラとFAシステム”, 日本製鋼所技報, No.42 (1986), pp.31-40
- (10) 光平国昭, 久保田智晶, 横林武, 山田健二, 山本浩毅, 上垣内裕治: “射出機用分散制御システム”, 日本製鋼所技報, No.49 (1993), pp.47-52
- (11) 酒井忠基: “我が国のプラスチック成形加工技術の歩み”, 日本製鋼所技報, No.54 (1998), pp.20-38
- (12) 亀岡誠治, 原本信洋, 酒井忠基, 金岡雅俊, 小坂正昭: “JSW 射出成形機支援エキスパートシステムの開発”, 日本製鋼所技報, No.46 (1992), pp.51-57
- (13) 焼本数利, 白銀屋司, 伊東宏, 酒井忠基: “射出成形における最適保圧予測制御装置の開発”, 日本製鋼所技報, No.54 (1998), pp.139-147
- (14) 社史編纂委員会: “日本製鋼所100年史”, pp.486-487 (2008)
- (15) 光平国昭, 笹村昇, 上垣内裕治, 横林武, 越智清史: “電動射出成形機シリーズの開発”, 日本製鋼所技報, No.53 (1998), pp.70-76
- (16) 越智清史, 横林武, 有江一, 上垣内裕治, 菊川健治, 佐伯正美: “超大型電動射出成形機向けの並列駆動システムの開発”, 日本製鋼所技報, No.57 (2006), pp.30-36
- (17) 小末将吾: “射出成形機集中管理システムNET100の開発”, 日本製鋼所技報, No.55 (2004), pp.139-142
- (18) 花山和寛, 佐伯明彦, 小末将吾, 越智清史, 本城修, 盛井彰: “射出成形機に対するJ-WiSeソリューションの開発”, 日本製鋼所技報, No.70 (2019), pp.63-69

謝 辞

今回の執筆にあたり、これまでの制御技術の発展に携わって来られました下記JSWのOB諸先輩方々に、激励および多大なご支援を賜りました。(株)ニップラの義本啓二社長、中原啓治様、(株)サン・テクトロの光平国昭顧問、久保田智晶技術部長、日鋼 YPK 商事(株)の菊川健治社長、ならびに(株)日本製鋼所社友(現、静岡大学客員教授)の酒井忠基様に心よりお礼申し上げます。