押出成形の IT 化

富山 秀樹*

1. はじめに

プラスチック成形加工工程における高機能、低コストの需要が高まる中、押出機、特に二軸スクリュ押出機の果たす役割は年々大きくなっている。特に近年の多様化、合理化にあわせた押出機の高能力、ダウンサイジングに対する要求は高まっており、各社押出機メーカーはここ数年来、スクリュ回転速度の高速化と運転トルクの増加、処理能力の向上といったハード的性能の向上を目指してきた。しかしながら、最近では押出機に対する市場要求は単なる生産量重視といったハード的性能のみにとどまらず、メンテナンス性や技術サポートの充実などにもニーズの幅が広がってきている。

また、二軸スクリュ押出機での操作においては、その仕様によってはフィーダ、本体（スクリュ）、ギアポンプ、ダイスさらには下流装置と制御すべき機器類が多く、装置の立ち上げおよび運転終了時には手順に沿った操作が必要となり、オペレータはある程度の経験を必要とする。そのため、押出機操作に対するニーズも操作の容易性や自動化といったソフトウェア指向が強まっており、ソフトウェアの充実性も求められるようになってきている。

本稿では「押出成形の IT 化」と題し、近年急速に進んでいる二軸スクリュ押出機およびその周辺機器をより安全にかつ性能を効果的に引き出すためのシステム（ソフトウェアによるハードウェア制御）について解説を行い、二軸スクリュ押出機に求められるトータル技術を紹介する。

2. 押出機本体の制御技術

2.1 ネットワーク通信システム^{1),2)}

コンピュータによるネットワーク利用が一般的になる中、成形加工プロセスにおいてもネットワーク技術を活用したシステムが構築されている。図1は生産ラインの省人化、省力化、高効率化を達成するため、複数の押出機に通信機能を搭載し、1台のPCで集中監視することが可能なシステムである³⁾。これは、イントラネットを介して複数台の押出機の運転状況をくまなく把握することにより、生産運転の省人化、品質管理の省力化、生産管理の自動化を実現

することが可能である。このシステムは射出成形のフィールドによる、多くの設備機器を集中監視するために構築されたシステムに起因するが、現在は小型・中型押出機が複数台稼働する体制にある押出プロセスにおいても浸透しはじめている。このシステムはただ単に監視を行うためだけではなく、以下に示すような豊富な機能を搭載することで生産ラインの集中管理が可能である。

- ①測定値データ収集機能：測定データの収集と統計処理を行い、必要なデータの選択表示・印刷を行う。
- ②押出成形条件管理機能：設定値条件のアップロード、ダウンロードや閲覧を行う。
- ③リモートコントロール機能：コントローラ画面をそのままPC上に表示可能で、操作条件の設定・変更がPC上で行える。
- ④アラーム送信機能：押出機の不具合発生時に指定のメールアドレスへメッセージ送信を行う。

このネットワーク通信システムは、工場内の押出機だけではなく工場間の一括した運転状態の管理も可能なため、生産体制の把握と一局集中管理が行えるメリットがある。

2.2 コントローラの高速・高機能化

押出機の制御を行うコントローラも昨今のコンピュータ機器の性能向上により、CPUの64bit化などへとより高速かつ高機能化が達成されている。コントローラを高速にするメリットとしては、運転時の圧力制御モードなどで精密なスクリュ回転あるいはギアポンプ回転の設定が可能となり、より安定した品質確保の達成が挙げられる。機能面では、コントローラに以下の機能を搭載することで、経験が浅いオペレータの補助や機械の不具合を低減することができ、操作性・作業性の向上を可能にしている。

- ①運転アドバイス：ベントアップやフィードネックなど、押出機の運転中に発生する様々なトラブル発生時にその回避方法をアドバイスする機能
- ②保守点検メッセージ：オイル交換やベアリング交換などの正確なメンテナンス時期を事前通知することで予防保全を実施する機能

また、コントローラの画面は従来の文字や数字だけの表示形式であったものから、最近ではアニメーション表示にするメーカーも増えており、押出機の運転状態が一目で把握しやすいようになっている（図2）。このアニメーションシステムは数字による評価よりもイメージによる評価を好む欧米で好んで採用されており、海外ユーザーの間では

* Tomiyama, Hideki
 (株)日本製鋼所 広島製作所 樹脂機械部
 広島市安芸区船越南 1-6-1 (〒736-8602)
 2003.10.14 受理

図1 二軸スクリュ押出機の通信・制御システム

図2 アニメーションを用いたコントロールパネル

好評を得ている。

2.3 オートスタートシステム

冒頭に書いたように、押出機の立ち上げ時にはオペレータは各計器類の指示値を同時に監視しながら徐々に本体や周辺機器類の設定を行い、最終的に生産運転条件の設定を行うという、それなりの技能が必要となる。オートスタートシステムは、押出機の立ち上げの際、熟練者だけでなく経験が浅いオペレータでも安心して運転が開始できるように構築された制御機能である。図3はフィルム成形装置における二軸スクリュ押出機のオートスタートシステムの概

略図である⁴⁾。このような二軸スクリュ押出機での直接成形システムでは、

- ①押出機でコンパウンドを行うための押出機制御システム
 - ②フィルム厚みの均一性を行うためのダイリップ調整システム
 - ③フィルムを延伸、巻取りのためのロール調整システム
- と非常に多くの制御が必要になる。②③は目的とする製品厚みなどによって都度調整が必要になるが、①に関しては樹脂原料によらずほぼ同じ手順で起動できる。オートスタートシステムはスクリュ、フィーダなどの立ち上げ手順

図3 オートスタート，フィーダ集合制御システム概略図

図4 大型造粒機のオートスタートシステム

をパターン化し，押出機に設置している各センサの応答を見ながら順次最適な運転モードへ自動的に移行し，最終的に安定した生産運転が実施できるようにするものである。また，このシステムは複数の装置の制御を1つのコントローラで行うため，省スペース化にもつながる。オートスタートシステムはフィルム・シート成形装置に限らず造粒機やコンパウンド機へも適用でき，最近需要が膨らんでい

るリサイクル材のコンパウンドや高充填フィラー材のコンパウンドなど，押出機の制御が困難なケースにおいても安全な立ち上げと運転が可能となる。さらに時間あたりの処理能力が数十トンにもおよぶ大型造粒機の場合は立ち上げが非常に困難であるため，この制御システムは絶大な威力を発揮する（図4）。

3. 周辺機器の制御技術

3.1 フィーダ制御システム⁵⁾

コンパウンド分野においては複数台のフィーダを用いることがほとんどであり、そのフィーダもホッパ内の原料の重量を常時検知し、供給量を自動調整する重量制御式が用いられる。現在では、図3に示すようにこれら複数台のフィーダを押出機操作パネル上で同時に制御を行うシステムが確立されている。押出機の生産運転状態においては最終吐出量の安定化を図るため、押出機先端の圧力を一定に保つようにスクリュ回転数とフィーダの供給量を変動させ制御する手法が一般的にとられるが、このフィーダの一括制御システムを用いることで、全体の吐出量を変化させるために個々のフィーダの供給量を同時に変化することができ、常時安定した高精度供給が可能となる。また、このLAN設備を備えた重量制御式フィーダも、最近ではリサイクルプラントや環境関連設備工事にも使用されており、ネットワーク手法による分散制御によって、運転操作の簡便性や遠隔監視システムが実現されている。

3.2 UWC 自動スタートシステム⁶⁾

これまでのコンパウンド分野におけるペレット製造法は主にストランドカッティング (SC) が用いられてきた。しかし、ここ最近の傾向として、アンダーウォーターカット (UWC) 技術の需要が増えている。これは、SCが運転に技術を要し、ストランド切れによる生産ロスを生じやすく常に人間による監視を必要とし、また、ペレット内に真空泡が発生し水分・コンタミの付着が発生しやすい問題があるのに対し、UWCは操作が容易であり、いったん生産運転に入るとほとんど人間による監視は必要とせず、安定したペレット製造が可能になるためである (図5)。ただ、UWC装置は運転開始時に押出機本体への位置合わせやオペレーションの最適操作が煩雑な難点がある。UWC自動スタートシステムは省人化、省力化、安易化に対するニーズに応えるために開発された制御機構で、以下の特徴を有している。

- ①ボタン1つで自動ドッキング：スタート前の切り離し状態から、UWC装置の前進とロック、ダイと循環箱の締結を自動に行う。
- ②ダイと循環箱の均一な締結：手作業での片締めによる芯ずれを防止し、カッター刃の延命化と均一なペレット製造が可能。

流動性が良く均一な球状粒を得ることができるUWC技術は、これまでポリオレフィンやその他汎用プラスチック用途が一般的であったが、最近では高融点エンジニア

リングプラスチックへの適用が求められている。そのため、自動スタートシステムはもとより、熱効率の向上やペレット形状の改善、大容量化といったダイスやUWC装置自体の性能も飛躍的に向上している。

4. CAEによるバーチャルラボ

CAEを用いてコンピュータ上で仮想的に成形運転を実施し、スクリュ形状の最適化や最適押出条件の設定を見いだす手法をバーチャルラボと呼ぶ⁷⁾。これは、以前の解析手法の開発や解析結果の定性評価を実施していたレベルから、定量的な解析・評価手法が確立されてきた最近のCAE技術の向上によるところが大きい。バーチャルラボを実施するには、ある程度の押出成形に関する技術とシミュレーションに関する知識を要するが、フィラー分散や反応、脱揮など最適な装置形状・操作条件設定が困難なコンパウンドの要求が増える現在においては、バーチャルラボは必要かつ重要なプロセスになりつつある。CAEによるアプローチは以下の2通りの手段が考えられるが、双方の同時取り組みと検証実験の3種のデータをリンクさせなければ、スピードと精度が要求される現在では十分な開発が行えないと考えている。その1つはスクリュ構成と運転条件を変化させたときに、押出機内の物性や混練因子分布予測をマクロ的にシミュレーションする方法であり、スクリュ構成の最適化と最適運転条件の設定を可能とする技術。もう1つは、スクリュ個々の混練メカニズムをミクロ的にシミュレーションする手法であり、スクリュ自体の形状変化による混練様式を予測し、最適なスクリュ形状を開発する技術である。以下に、これら2通りのシミュレーション技術を実際の二軸スクリュ押出機制御へ適用する技術について述べる。

4.1 スクリュ構成の最適化と最適押出条件の設定

二軸スクリュ押出はフィーダとスクリュ回転が独立制御であるため、基本的に完全充填領域は混練部にしか生じず、輸送領域においてはほとんどが非充填領域である。混練で要求品質を満たすには、充填領域と非充填領域をうまく作り出し、スクリュ構成によりせん断応力による分散とひずみによる分配を使い分け、最終的に温度、圧力の制御を行わなければならない。ただ、この充填率 (滞留時間) や温度、圧力、混練因子の押出機内分布はブラックボックスであり、スクリュ交換や運転条件の特定などを試行錯誤的に行うには多大な時間と労力を必要とする。これら試行錯誤手段に対し、FAN (Flow Analysis Network) 法を用いて、樹脂原料・スクリュ構成・運転条件下における上記押出機全体の混練因子分布の予測が可能なCAEソフトが活用されている。FAN法による押出理論のCAE展開はTadmor⁸⁾、White^{9),10)}らによって30年以上も前から実施されているが、The University of AKRONより販売された「AKRO-CO-TWIN SCREW」によって世界的に活用されるようになってきた。最近では押出メーカーからもオリジナルソフトウェアの開発・販売が実施されており¹¹⁾、ソフトウェアによるハードウェア (二軸スクリュ押出機) の制御手法が一般化されつつある (図6)。現在のソフトウェアでは可塑性予測やスクリュ表面の温度分布予測が可能なものもあり、押出機の実産能力の指標として十分な機能を備

図5 PA 66のペレット形状

図6 日本製鋼所「TEX-FAN」を用いたスクリュ形状と運転条件の絞り込み解析事例

図7 バーチャルラボによる押出条件の絞り込み

えている。

このソフトのバーチャルラボ用途としては、主にスクリュ径が20～30 mmのラボ機を用いた研究開発に活用されている。この場合、図7に示すように予め計画したスクリュ形状と運転条件をCAEで解析を実施し、いくつかの案に絞り込む。その上でラボ機による実際のテストを実施し、最終的に最適な条件の決定へと絞り込む手段がとられる。この手法は押出メーカーにおいて65 mmサイズ押出機などを用いたお客様依頼テストでも実施しており、実際のテスト前にスクリュ形状案の絞り込みの実施や、シミュレーション結果を用いたお客様との事前打ち合わせをE-mail等で実施することで、テストの高効率化を図っている。また、テスト結果を基にした大型生産機へのスケールアップも、同様のソフトウェアを用いたシミュレーション

図8 CAEを活用した新規混練スクリュの開発

を実施することで、スケールアップ手法の確実性と生産機の信頼性向上に努めている。

4.2 特殊スクリュ・シリンダの開発

スクリュ個々の混練メカニズムを解明するためには、スクリュ形状を具体的に三次元化し、FEM（有限要素法）やFVM（有限体積法）で解析を行う手法が一般的である。この手法では計算負荷の問題により押出機全体の解析は行えないものの、局所的な変形様式の把握による分散・分配の発生メカニズム解明や温度、圧力上昇機構の解明が行え、必要な混練様式に合わせたスクリュの選択やスクリュ自体の開発が可能である。このCAEの歴史は10年程度と比較的短い、完全充満・完全溶融系での解析手法は既にほぼ確立されており¹²⁾、プラメディア社やPOLYFLOW社などから市販品も販売されている¹³⁾。

これらソフトウェアの活用範囲は学術的な基礎理論解明が主体となっているが、バーチャルラボによる活用も行われている。図8はCAEを活用して開発を進めた新規混練スクリュ¹⁾のシミュレーション事例である。このスクリュは反応混練において局所的な反応を抑制するために開発されたもので、一般的なニーディングディスクのチップ部にリードを設けた形状となっている。この開発において、従来の試作とテストを繰り返す手法に対し、CAEを用いてディスクのねじれ角やリードなどを変化させて傾向をつかみ、試作とテストを行うバーチャルラボを実践したことで、時間・労力・コストの抑制が達成されている。

また、このCAE手法を用いた解析対象はスクリュだけではなくシリンダへも展開されている¹⁴⁾。図9は通常のシリンダに溝を設けた特殊混練シリンダの解析結果である。このシリンダの場合はCAEによって開発を実施したわけではないが、ブラックボックスのためテストでは詳細な把握が困難だった混練メカニズムがCAEによって解明され、テストで得られていた分配性能の高さ¹⁵⁾が証明されたケースである。ただ、この場合もただ単にCAEで混練メカニズムを証明するだけではなく、より混練性能を高めるための溝形状の最適化解析を実施し、解析結果による試作とテストの実施といったソフトウェアとハードウェアをうまくリンクさせることで、樹脂原料やコンパウンド様式に合わせた最適装置の適用が可能になるものと期待できる。

図9 三次元解析による特殊シリンダの分配性能評価

5. おわりに

今後のプラスチック材料の製造プロセスは、さらに合理化の方向に向かう傾向があるため、ITを活用した二軸スクリュ押出機の集中管理や自動運転システムなどソフト面の充実に対する要望はさらに高まってくると予想される。また、押出機メーカーにおいても機械を製造・納入した後はスムーズな立ち上げが行えるよう、CAEによる十分な事前検討や精度の高い制御システムを構築し、より信頼性の高い製品を提供する必要がある。CAEや制御技術をはじめとするハードウェア制御のためのソフトウェアシステム化は今後さらに重要になってくることが予想され、その

技術発展のためにメーカーとユーザーが連携した取り組みを進めていくことが重要である。

参考文献

- 1) 井上茂樹：プラスチックエージ, 49(6), 80(2003)
- 2) 井上茂樹：産業機械, 631(4), 43(2003)
- 3) 日本製鋼所：プラスチックプロセッシングテクノロジー ニュースレター, 49
- 4) 日本製鋼所：プラスチックプロセッシングテクノロジー ニュースレター, 60
- 5) 日本製鋼所：プラスチックプロセッシングテクノロジー ニュースレター, 7
- 6) 日本製鋼所：プラスチックプロセッシングテクノロジー ニュースレター, 29
- 7) 辰巳昌典：プラスチック, 54(5), 26(2003)
- 8) Tadmor, Z., Broyer, E. and Gutfinger, C.: *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 660(1974)
- 9) White, J.L. and Szydlowski, W.: *Adv. Polym. Tech.*, **7**, 419(1987)
- 10) Szydlowski, W., Brzoskowski, R. and White, J. L.: *Intern. Polym. Process.*, **1**, 207(1987)
- 11) 日本製鋼所：プラスチックプロセッシングテクノロジー ニュースレター, 53
- 12) Funatsu, K., Kihara, S., Miyazaki, M., Katsuki, S. and Kajiwar, T.: *Polym. Eng. Sci.*, **42**(4), 707(2002)
- 13) 吉川秀雄：プラスチックエージ, 47(8), 119(2001)
- 14) 梶原稔尚, 寺尾義範, 魚谷 晃, 辻 哲治, 富山秀樹, 船津和守：プラスチック成形加工学会 第14回年次大会講演予稿集(2003)
- 15) 小田勝広, 井上茂樹, 柿崎 淳, 新谷浩昭：成形加工, **15**(5), 342(2003)

— お詫びと訂正 —

『成形加工』2003年9月号(第15巻, 第9号)の「明治大学理工学部機械工学科材料強度研究室の紹介」におきまして以下の誤りがありましたので訂正させていただきます。

<p.617 右段下から2行目>
(誤) 製品評価技術研究所

(正) 独立行政法人製品評価技術機構

<p.618 左段上から1行目>

(誤) NEDO

(正) 経済産業省

関係各位にご迷惑をおかけしましたこととお詫び申し上げます。