押出成形と不良現象 — 押出機メーカーからの視点 —

富山 秀樹*

1. はじめに

二軸押出機のメーカー各社は、これまでに様々な機械性能を向上させ、押出機の開発・改良を進めてきた。その成果は各社とも二軸押出機の世代数を重ねてきたことから見て取れるが、これは時代とともに高まる生産性向上や品質向上など市場要求に応えるために培った技術の履歴である。現在は、中国市場をはじめとする海外市場の活性化により国内の成形加工関連各社は高付加価値製品の生産へと推移しているが、それに応じて押出機へ求められる性能も厳しい品質を満たすため、よりきめ細かな混練様式の達成へと高度化されている。

高品質化はプラスチックの高付加価値化や市場拡大により常に求められる問題であるが、これには混練の均一性が鍵を握る。最近では制御システムの高精度化やCAEなどのソフトウェア面も高度化されているが、その技術の基盤にあるのはスクリュ混練様式の制御による樹脂品質の安定化にある^{1), 2)}。ここでは、押出機メーカーからの視点で、樹脂品質向上のためのスクリュ混練について技術解説を行う。

2. 混練の均一化

押出成形とは、周知の通り回転するスクリュによって樹脂を前方へ搬送させるネジの原理に基づくものであるが、

その間にニーディングディスクなどを用い、高い充填率で複雑にかき乱しながら十分な溶融可塑化や混練を行う領域が必要である。この混練領域のメカニズムは分散と分配の2つに分けることができ、これらをバランス良く組み合わせたスクリュの構成が必要となる³⁾。

図1, 2に分散と分配の混練様式を、表1にそれぞれの評価基準を示す。分散混合は主にチップ通過によるせん断応力の作用によって促進され、幅広ニーディングディスクの適切な配置や適度なチップクリアランス、高い溶融粘度ほど分散性能は向上する。分配混合は主に非連続形状ディスクの分断流によって促進され、幅狭ニーディングディスクや大きいディスクブラシ角、高いスクリュ回転速度ほど分配性能は向上する。一般的に、アロイ化で代表される非相溶性コンパウンディングや溶融可塑化領域では分散混練を強化し、マスターバッチなどの相溶性コンパウンディングにおいては成分間の比表面積を増大させるために分配混練を強化したスクリュ構成を用いる。

分散性能を評価した例として、図3にPP+80% CaCO₃の混練においてチップクリアランスを変更させた場合のCaCO₃粒子径の測定結果を示す⁴⁾。グラフは縦軸が低い値をとるほど分散性能が向上していることを示す。チップクリアランスが広くなるとチップ通過量が増加するため、効果的に分散が促進される。ただ、チップクリアランスを広

図1 分散混合のメカニズム

* Tomiyama, Hideki
 (株)日本製鋼所 広島製作所 樹脂加工機械部
 樹脂加工機械開発グループ
 広島市安芸区船越南 1-6-1 (〒736-8602)
 2005.3.4 受理

図2 分配混合のメカニズム

表1 混練様式の分類と評価項目

混練様式	作用レオロジー	評価項目
分散	応力	局所せん断応力 (最大値, 断面平均値など) 総せん断応力 (履歴の積分値, 系全体の総和など)
分配	ひずみ	局所せん断ひずみ 総せん断ひずみ

図3 チップクリアランスの CaCO_3 分散粒子径への影響

げすぎると当然ながらせん断速度が低下するため分散性能が低下し、さらにセルフクリーニング性の低下を招くため、品質確保が困難になる。

図4は、分配性能を評価するため、スクリュ回転数を変化させた場合にカーボンブラックマスターバッチの希釈状態と樹脂温度を測定した結果である⁵⁾。スクリュ回転数の増加により局所的なカーボンの凝集部位が減少しており、分配性能が促進されていることがわかる。樹脂温度はスクリュ回転の増加に従い高くなるが、高回転領域になると粘度の低下とせん断応力の低下により発熱量は少なくなる。

ここで、実際の押出成形プロセスにおける品質トラブルの解決策の一つとして、ブツの発生問題(押出物中に異物が混入する現象)を例に挙げる。これは造粒プロセスの1次成形やフィルム、ブロー成形などの2次成形全てにおいてしばしば問題になる現象である。仮にこのブツが未溶融物である場合、十分な可塑化エネルギーが加えられていないことや、溶融樹脂が未溶融樹脂を包み込むことで十分なせん断エネルギーが伝わっていないことなどが考えられる。そ

(a) 押出機先端サンプリング樹脂の濃度分布

(b) 押出機先端の樹脂温度

図4 スクリュ回転数変化によるカーボンブラックマスターバッチ混練への影響

のため、分散混練を強化させるために混練領域の拡張や練りを強めたスクリュ構成への変更、シリンド設定温度の低下などの対策が効果的である。また一方で、架橋物など副反応物の生成や、熱分解した樹脂が発生している場合には、多大なせん断エネルギーが作用していることが原因として考えられる。そのため、せん断応力を抑制するために混練領域の短縮化やスクリュ回転数の低下、分配タイプのスクリュへ置換するなどの対策が必要である。このように品質トラブルが発生した場合、まず原因が何であるかを分析し、それを解消するための混練様式を見いだすことが重要である。

3. 混練の評価手法

実際のコンパウンディングにおいて、樹脂へ作用された混練エネルギーを評価するために比エネルギー (E_{sp} [kWh/kg]) が用いられる。これは、運転時のモーター動力[kW]

図5 比エネルギー (Esp) の簡易計算モデル

と押出量[kg/h]から算出可能であり、理論的にもせん断応力とせん断ひずみ量から計算を容易に行うことができる。

図5にEspの簡易計算モデルを示す。スクリュによる混練場はせん断支配と仮定できるので、流体力学のモデル式へせん断速度 $\dot{\gamma}$ 、樹脂粘度 η 、滞留時間 t を代入することで算出できる。単純な式ではあるが、チップクリアランスとスクリュ回転数から $\dot{\gamma}$ が、樹脂温度と $\dot{\gamma}$ から η が、押出量と流路容積から t が求まるため、押出条件を考慮して計算・評価できる妥当なモデルである。より厳密なEspを求めたい場合は、複雑な計算式やCAEを用いる手段があり、特にCAEは現在では計算精度の向上により予測値の信頼性は高まっている⁶⁾。

Espを用いず、押出機先端の樹脂温度をもって混練エネルギーの評価指針にしているケースもしばしば見受けられるが、実際にはEspと樹脂温度は相関が低い場合もある。たとえば、同じ条件で押出したとき、原料樹脂温度が異なると押出機先端の樹脂温度に変化はほとんど無くEspだけ変動する。これは溶融可塑性エネルギーが異なるため、樹脂温度を20℃から200℃へ上昇するとき、40℃から200℃へ上昇させるときでは、当然前者の方が多大な混練エネルギーを消費するからである。もう一つの例として、化学反応を伴うコンパウンディングでは混練部位における反応熱の大小により樹脂温度のみが変化し、Espには現れにくい場合がある。つまり、自己発熱などスクリュ回転の依存度が低いものは(スクリュ混練による反応時間や反応速度の影響はあるとしても)、樹脂温度とEspを同時に評価しなければスクリュ構成の最適化は困難である。

4. スケールアップ

プロセスの試作段階から生産体制へ移る場合や、増産体制へ拡張する場合には現有機よりも大型の設備を導入することが多い。この場合、必ず直面するのがスケールアップ問題である。スケールアップで最も重要なことは混練性の保持による樹脂品質の確保である。スケールアップは、押出機のシリンダ内径に対する乗数で計算されるが、これをスケールアップ乗数と呼ぶ⁷⁾。

二軸押出機のスケールアップ乗数は、運動量保存を基準に考えた場合つまり押出量一定では3乗が基準となり、エネルギー保存を基準に考えた場合つまり伝熱量一定では2乗となる。そのため、実際には2乗から3乗の間を使い分けることになるが、傾向として3乗に近くなるほど品質の保持が難しくなり、2乗に近づくほど押出量が稼げなくなる。

このことからわかるように、押出量と樹脂温度の両方を保持したスケールアップは理論的に成立しない。そのため、品質が同じプロセスを増設するには現有機と同クラスの押出機を用いることが最善であることになる。しかしながら、実際には押出機メーカーは数々の大型装置を納入しており、小型機で得られた品質を大型機へ保持するためのノウハウが蓄積されている。一見不可能に感じる技術も、超大型機までラインナップされている現状から、蓄積されたノウハウや技術も押出分野には重要な財産であるといえる。

5. おわりに

押出成形における不良現象について、スクリュ混練による樹脂品質の制御について解説した。二軸押出機はスクリュがセグメント化され、シリンダもブロック化されていることから、様々な混練様式を作り出すことが可能である。無限にあるスクリュ構成から最適形状へ収束させるためには、単に数をこなしたテストだけではなく、スクリュの特性を理解し樹脂物性と連携させて理想的な混練様式を導き出すことが重要である。

参考文献

- 1) 富山秀樹：成形加工，**15**(11)，730(2003)
- 2) 富山秀樹：Plastics Age Encyclopedia 2005，185(2004)
- 3) 酒井忠基：日本製鋼所技報，**50**，65(1994)
- 4) 織田典聖，柿崎 淳，石橋正通，栗原正夫：日本製鋼所技報，**49**，58(1993)
- 5) 柿崎 淳，中村和之：日本製鋼所技報，**51**，29(1995)
- 6) 富山秀樹，石橋正通，井上茂樹：日本製鋼所技報，**55**，32(2004)
- 7) Chung, C. I.: Polym. Eng. Sci., **24**(9)，626(1984)