

二軸押出機の樹脂温度一定スケールアップ

仲谷 誠巳*・矢野 一憲*

はじめに

二軸押出機の使用が盛んになって久しいが、そのスケールアップ理論には適切なものがなく、ユーザーにスケールアップ基準をわかりやすく提示できてこなかったといっただけ^{1)~5)}。

本報告では従来理論の問題点を是正した新しいスケールアップ理論を提案する。すなわち漠然たるスケールアップを追い求めるのではなく、特定のスケールアップ目標に焦点を当てた明確な定式化のもとでの理論構築をトライする。

今回はその一例として樹脂温度を一定にするスケールアップについて紹介する。オーソドックスにヒートバランスから出発し、断熱指数と非ニュートン指数というパラメーターを包含した新しい理論により、従来の実験的経験的知見を理論的に補強する有用な結果が得られた。

1. 従来のスケールアップ理論

従来の理論をいくつか参照すると、種々の混練パラメーターの中でせん断速度と比エネルギーを一定にすることを第一優先にするという思想が窺われる。それぞれを混練のインプット、アウトプットと想定し、これら双方をおさえることにより、大小押出機の混練を同等のものに維持しようという考えと推定される。

しかし、実はこの2つのパラメーターを同時に同等にするという方程式は、断熱の前提、ニュートン流体の前提を採用しないかぎり、解をもたない。

現実の押出機運転に熱の出入りがあり断熱運転ばかりでないこと、また対象樹脂固有の特性に見合った最適なスケールアップを望むユーザーの立場を考えるとまったく不完全というよりない。

このような従来スケールアップ理論の実態は、混練

にかかわる因子すべてを同等に保とうという過大あるいは無謀といってもよい目標をもとに出発し、途中で挫折、放置したままというように理解される。

リアクターをはじめとするどんな化学機器においても、すべての関連因子を同等に保つスケールアップなどは不可能であることはよく認識されているところである。したがって押出機スケールアップにおいても、過大な期待を排除し、考え方に現実性を導入することが重要である。すなわち、ステップバイステップであっても、適切な前提のもとで、最後まで解が導かれる、わかりやすいスケールアップ理論が構築されねばならない。

具体的にはスケールアップで不変にしたい最も重要視する因子を特定し、それを一定にするための理論を構築することが適切な新しい目標になる。

その最重要因子は混練ケースごとに異なる。たとえば、脱揮混練における残存モノマー濃度であり、また本題における樹脂温度である。

2. 樹脂温度一定のスケールアップ

スケールアップ前後で樹脂温度を一定にするということは、近年の混練技術の中心であるリアクティブプロセスにおける溶融ポリマーの化学反応、また樹脂の種類の中で樹脂温度に極めてセンシティブな劣化特性をもつものを取り扱う場合に最重要課題となることはいうまでもない。

その他、樹脂のパフォーマンスと直結する因子が解明できていない場合に、とりあえず、樹脂温度を一定にしようとすることは現実のスケールアップで多く行われている。

したがって樹脂温度一定のスケールアップへのニーズは大であるが、その指針と根拠については従来十分な説明はなされてこなかった。

本報告では新しいスケールアップ理論構築の一例として樹脂温度一定のスケールアップについて述べる。

一方それは他の因子について盲目であってよいことは意味しない。樹脂温度を一定にするというなかで許

* Nakatani, Masami/Yano, Kazunori
三菱化学(株) 四日市事業所技術開発センター
四日市市東邦町1番地 (〒510-8530)
1999.9.6 受理

容されている他の因子の増減程度は定量的に評価された上で、その適否が判断されるべきであろう。

3. 断熱指数(予備的考察)

スケールアップ理論を構築する場合、小スケールでの運転状態を過不足なく記述できていなければならない。樹脂温度を一定にするという課題はこれまであまり定量的に取り上げられてこなかったが、そのために必要な新しいパラメーターとして断熱指数を導入することを提案したい。

小スケールでの運転が完全断熱であればスケールアップは機械の相似設計とスクリュ径比の3乗で達成できる。

一方あり得ないことながら、理想的に、混練が等温で推移しているなら、スケールアップは同等の伝熱比表面積を実現できる径比の2乗でしか実現できない。

それぞれにはすでにスケールアップの答えが存在する。現実の混練は両者の中間にあるので、そのどこに位置するかという情報が、正しいスケールアップ解を求めるために重要と推定される。そのために図1のような断熱度合いを示すパラメーターを利用する。

4. スケールアップ解の導出

樹脂温度を求める基本として、図2の押出機のヒートバランスを出発点とする。

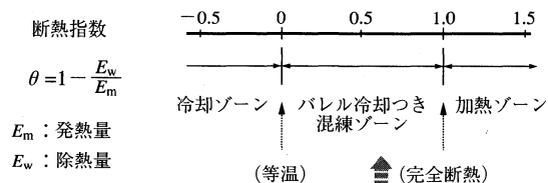


図1 断熱指数 θ

簡単化のためいくつかの前提を置く。最近の二軸押出機設計において定着しているように、大小の押出機は相似設計とする(必須ではないが簡略化のため)。

解を得る順序として、まずスクリュ径比の指数として押出量スケールアップ指数を第1未知数 x としてこれを求めることを考える。

樹脂温度一定という条件だけでは解がユニークでなく、また複数解が存在するあいまいさを避けるため、樹脂温度一定のもとで押出量最大というごく妥当な条件を追加する。大口徑押出機の回転数はやはり未知数であるが、この場合、大口徑押出機において $Q/N = \text{一定}$ という関係があり、回転数は押出量に独立の未知数ではなくなる。

これら前提のもとに解を求めるため、まずヒートバランス式における発熱量、除熱量の項をブレイクダウンする。粘性発熱の基準になる樹脂粘度は指数則粘度を使用した。ここに個別樹脂の非ニュートン指数がパラメーターとして導入される。また除熱にかかわる総括伝熱係数は仮に大小口径の押出機で一定という前提も採用した。

ブレイクダウン、式変形過程の詳細を図3に示す。こうして変形した結果より、スケールアップ前後の押出機で樹脂温度を一定に保つ条件は図4のように与えられる。ここで発熱量/除熱量の比は図1に定義した

$$E_m + E_h = Q \{c(t_2 - t_1) + H_L\} + E_w$$

- E_m せん断発熱
- E_h 外部加熱
- E_w 冷却
- Q 押出量
- c 比熱
- t_2 出口温度
- t_1 入口温度
- H_L 溶融潜熱

図2 押出機ヒートバランス

| | 発熱量(単位重量当り) | 除熱量(単位重量当り) |
|-------------|--|--|
| スケールアップ前後の比 | $\frac{\left(\frac{E_{m2}}{Q_2}\right)}{\left(\frac{E_{m1}}{Q_1}\right)} = \frac{\eta_2 \times \gamma_2^2 \times \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 V_1 / \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^x Q_1}{\eta_1 \times \gamma_1^2 \times V_1 / Q_1}$ $= \frac{K_2 \times \gamma_2^{n+1}}{K_1 \times \gamma_1^{n+1}} \times \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{3-x}$ $= \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)^{n+1} \times \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{3-x}$ $= \left\{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{x-3}\right\}^{n+1} \times \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{3-x}$ $= \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{n(x-3)}$ | $\frac{\left(\frac{E_{w2}}{Q_2}\right)}{\left(\frac{E_{w1}}{Q_1}\right)} = \frac{U \times \Delta T \times \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 A_1 / \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^x Q_1}{U \times \Delta T \times A_1 / Q_1}$ $= \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{2-x}$ |
| スケールアップ前後の差 | $\frac{E_{m2}}{Q_2} - \frac{E_{m1}}{Q_1} = \left\{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{n(x-3)} - 1\right\} \frac{E_{m1}}{Q_1} \dots (1)$ | $\frac{E_{w2}}{Q_2} - \frac{E_{w1}}{Q_1} = \left\{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{2-x} - 1\right\} \frac{E_{w1}}{Q_1} \dots (2)$ |

図3 スケールアップ前後の発熱/除熱量変化

$$\left\{ \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{n(x-3)} - 1 \right\} = (1-\theta) \left\{ \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{2-x} - 1 \right\}$$

発熱 除熱

D_1 : スクリュ径 (小押出機)
 D_2 : 同上 (大押出機)
 x : 押出量スケールアップ指数
 n : 非ニュートン指数
 θ : 断熱指数

図4 樹脂温度一定の条件

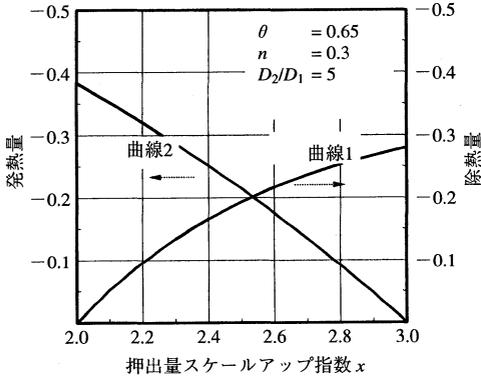


図5 スケールアップ指数の推定

断熱指数で置換えられている。

樹脂温度が発熱/除熱の差として決まるため、スクリュ径比の指数間の一次方程式化というまでの単純化はできないが(スクリュ径比がパラメーターとして残る)、この式より未知数 x は図5に示すように、数値解法や図式解法により容易に求めることができる。

図5の意味を解釈すると、曲線1は未知数 x を変数とする比表面積低下に伴う除熱量の不足を示す。また曲線2は(回転数低下により)発熱を抑制するときの発熱量減少を示す。したがって、両曲線の交点として両者がバランスしたポイントで樹脂温度が一定になる条件を得ることができる。

スケールアップ指数として2.0から3.0の間で答えが得られる。解を規定する要素はスクリュ径比、断熱指数、非ニュートン指数のパラメーターである。押出量が決めれば回転数および他のパラメーターもすべて派生的に定められる。

5. 計算結果、感度分析

上記のスケールアップ計算法により、簡単な感度分析を実施した。図6にスケールアップ指数と断熱指数の関係を示したが、当初の予想どおり、断熱指数が最大の影響因子である。

次に樹脂の非ニュートン指数をパラメーターに用い

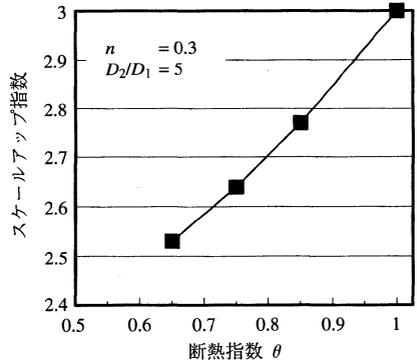


図6 断熱指数の影響

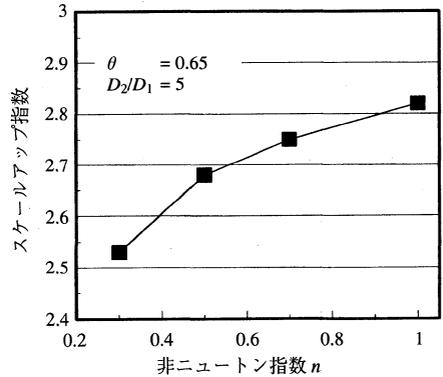


図7 非ニュートン指数の影響

た感度分析の結果を図7に示す。

樹脂温度は発熱、除熱の差として求められるため、スケールアップ比(スクリュ径比)にも依存する。しかし、結果は省略したが、径比をパラメーターとした感度分析の結果、その効果は前2者ほど大きくはない。

スケールアップ指数を決める最大の要素は断熱指数と非ニュートン指数であった。前者はより正確なスケールアップ推定を行うために必要となる追加情報項目であるが、後者は樹脂固有の最適スケールアップを行うために本スケールアップ法ではじめて織り込み可能になった本法のメリットである。

6. 他のパラメーターの挙動

ここでは樹脂温度一定を最優先の基準としてスケールアップする方法について述べてきた。前述のように、他のパラメーターについてはスケールアップ前後で変化を許容することで解が求められた。

樹脂温度を一定することを最優先した結果であるが、その場合他のパラメーターがどのように変化するかについて詳細を表1にまとめ展望した。

回転数を低下させる結果と相似設計により、大口径

表1 樹脂温度一定スケールアップ時他パラメーターの挙動

| 項目 | 記号 | 単位 | 一般式 | 例 | 断熱ケース | 備考 (3.0を除く) |
|--------|----------------|--------------------|--------------------|-------|-------|----------------|
| | | | (断熱指数 θ) | (0.6) | (1.0) | |
| | | | (非ニュートン指数 n) | (0.3) | | |
| 押出量 | Q | kg/H | $x(=f(\theta, n))$ | 2.5 | 3.0 | $2 < x < 3$ |
| スクリュ径 | D | mm | 1 | 1 | 1 | 比例 |
| 長さ | L | mm | 1 | 1 | 1 | 比例 |
| 溝深さ | h | mm | 1 | 1 | 1 | 比例 |
| 体積 | V | m ³ | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3乗 |
| 面積 | A | m ² | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2乗 |
| 回転数 | N | rpm | $x-3$ | -0.5 | 0 | 減少 |
| せん断速度 | $\dot{\gamma}$ | 1/sec | $x-3$ | -0.5 | 0 | 減少 |
| 滞留時間 | R | sec | $3-x$ | 0.5 | 0 | 増加 |
| 総せん断量 | γ | — | 0 | 0 | 0 | 同等 |
| 比エネルギー | E_{sp} | kwH/kg | $n(x-3)$ | -0.15 | 0 | 減少 |
| せん断応力 | τ | kg/cm ² | $n(x-3)$ | -0.15 | 0 | 減少 |
| 粘度 | μ | poise | $(x-3)(n-1)$ | 0.35 | 0 | 増加 |
| 発熱量 | E_m | kcal/kg | $n(x-3)$ | -0.15 | 0 | 減少 |
| 除熱量 | E_w | kcal/kg | $2-x$ | -0.5 | — | 減少 |
| パワー | P | kw | $(n+1)x-3n$ | 2.35 | 3 | Q より低め |
| トルク | T | kg/m | $nx+3(1-n)$ | 2.35 | 3 | Q より高め |
| 輸送能力 | q | m ³ /H | x | 2.5 | 3 | Q に同じ |

押出機でのせん断速度は小口径押出機より低下する。それに伴い、比エネルギー、せん断応力等も少し低下する方向である。

逆に増加するのは滞留時間であり、せん断速度低下により粘度の上昇がある。

混練との関係でいえば、分配混合と密接に関係するといわれる総せん断量はせん断速度と滞留時間の積であることから、樹脂温度一定方式ではスケールアップ前後で不変である。

一方、分散混合を規定する因子は必ずしもひとつに特定されていないが、関係する因子としては、前述のようにせん断速度、せん断応力の低下は分散混合を弱める方向であり、逆に滞留時間とマトリックス粘度の増大はそれを補う方向に作用している。

7. 考 察

容易に推察されるように(既存理論もそうであるが)、本スケールアップ理論の構築は熔融ポリマーをベースとしている。

また、押出機内最重要箇所として混練ゾーンを対象

に解を求めることを行っている。加熱/冷却ゾーンについては断熱指数も異なり、最適解ではない。バレル温度設定などでの微調整が可能という前提になる。

このような制約下でも基本理論としてきちんとしたスケールアップの考え方をもつことは重要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Elemans, P. and Meijer, H. : *MIXING AND COMPOUNDING OF POLYMERS*, I. Manas-Zloczower and Z. Tadmor (Eds), pp. 457-470 (1993), Hanser, New York
- 2) William, M. : *REACTIVE EXTRUSION PRINCIPLES AND PRACTICE*, M.Xanthos (Ed), pp. 274-276 (1992), Hanser, New York
- 3) White, J. L. and Z. Chen : *Polym. Eng. Sci.* **34**, (3), 229 (1994)
- 4) Potente, H., Melisch, U. and Flecke, J. : *SPE ANTEC '96*, pp. 334-347 (1996)
- 5) Sakai, T. : *PPS-10* (Akron), pp. 55-56 (1994)