

(論文)

部分充満の混練解析による密閉式ゴム混練機の分配混合評価方法

Evaluation Method of Distributive Mixing in Internal Mixers by Using Partially-Filled Numerical Flow Analysis



福谷和久*¹ (博士(工学))
Dr. Kazuhisa FUKUTANI



東 孝祐*¹
Kousuke HIGASHI

Two methods have been proposed to evaluate the analysis results of partially-filled flow inside an internal mixer used for mixing rubber compounds. In one method, the flow analysis results are displayed using a coordinate system around the rotation axis of the rotor and many spherical particles representing the fluid. In the other method, the distributive mixing is evaluated by a particle tracking method using minimum particle-to-particle distances and their harmonic mean. Combining these methods with partially-filled mixing analysis facilitates the development of new mixers and rotors in an effective manner.

まえばき = タイヤなどのゴム材料の混練には密閉式の混練機が用いられている¹⁾⁻³⁾。図1にその外観と内部構造⁴⁾を示す。混練される材料は、初期にはブロック状のゴム、フィラーとしての粉状のシリカあるいはカーボンブラック、および液状のオイルなどである。投入後に固体のゴムが可塑化し、シリカなどのフィラーを取り込んで流動する。このように複雑な現象を含むことから、混練機およびその混練ロータの開発やプロセスの改良は実験的に行われるのが主流である。混練機を対象としたロータ形状の影響の報告例としてはKawanishiら⁵⁾が、その内部のロータ周りの流動の可視化を実験的に試みた例としてはMin⁶⁾あるいはLimperら⁷⁾がある。

いっぽう、従来、混練機の内部の混練流動解析が行われている⁸⁾。上述のように複雑な流動現象であるため、解析モデルにおいてすべてを正確に扱うことは難しい。しかしながら、計算機の数値向上とモデル化技術の発達

から、一定の前提をおいた上での解析結果からでも、装置あるいはプロセス設計に役立つ知見が得られるようになりつつあると筆者らは考えている。

たとえば、一つの例としては、混練機のチャンバ内部の部分充満状態を考慮した解析が行えるようになってきたことがある。密閉式混練機は、充満率をある特定の値にすると経験的に混練が良好であること、装置の構成から材料を完全に充満させることができないこと、などから部分充満状態で運転されている。完全充満状態と部分充満状態とでは、空隙(くうげき)の有無によって材料の流動と混練の挙動が異なる。2010年頃までは完全充満状態での流動解析が一般的であったが、最近ではより実際の現象に近い部分充満状態を考慮した解析が行われるようになってきた⁹⁾⁻¹¹⁾。

しかしながら部分充満状態の密閉式混練機の内部では、複数のねじれた混練翼を有するロータの形状とその回転により生じる流動、空隙の移動が3次元的で複雑な流動となる。このため、一般的に用いられる速度ベクトル、圧力分布、温度分布の結果のような2次元的な表示では、チャンバ内に生じる複雑な3次元の流れ場は直感的に理解しにくく、解析結果に基づいて混練の促進方法を検討するのは容易ではなかった。

また、混練性能の一つである分配混合の評価としては、粒子追跡法などの方法が一般的に用いられている¹²⁾。この方法では、たとえば初期にチャンバ内の一部に塊で配置された粒子群がロータの回転によって生じる流れでチャンバ内に分配される状況を追跡して、粒子密

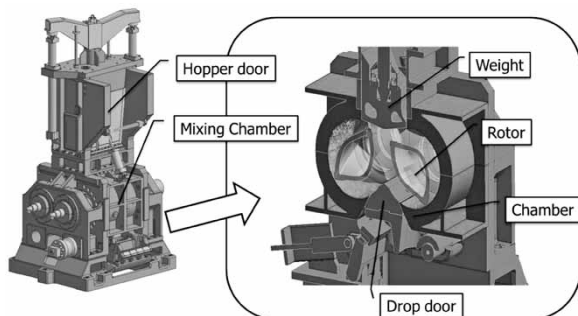


図1 密閉式混練機の外観と構造⁴⁾

Fig. 1 Appearance of internal mixer and its structure⁴⁾

*¹ 技術開発本部 機械研究所

度の均一度によって分配の優劣を評価する。従来、完全充満の前提のときには、ロータの1回転分の流動解析を行い、速度場の繰返しを仮定して粒子の追跡のみを後処理で行うのが一般的である。

しかし部分充満状態では、ロータの累積の回転数によって充満状態が異なる可能性があり、充満状態および速度場の時間的な繰返しが仮定できない。このため、粒子追跡は累積回転の全体について行う必要がある。このとき、通常よく用いられる粒子追跡法によって分配後の粒子密度の均一度を評価する方法では、累積回転数が少ないときの評価の安定度が低いという問題がある。これに対応するため、当社は粒子追跡について粒子間の最小距離とその調和平均値を用いる方法を提案している¹¹⁾。

本稿では、部分充満状態の流動解析によるゴム混練機内部の流動解析結果について、(1)部分充満の3次元混練解析結果を評価するための座標変換、および粒子による表示を用いた解析結果の表示方法、(2)粒子追跡結果について粒子間の最小距離を用いた分配混合の評価方法を提案する。

1. 流動解析の概要

流動解析に用いた解析方法と条件の概要を説明する。この方法は当社のこれまでの報告¹¹⁾と同様である。解析の基礎式は、連続の式、運動量の式、およびVOF (Volume of Fluid) 法による自由表面解析のための流体分率の保存式である。物性値にはゴム相当のものを用いた。非ニュートン流体であるとし、粘性をCarreauモデルにより近似した。解析には有限差分法による汎用流動解析ソフトを用いた。ロータおよびチャンバの表面は滑りなし条件とした。ロータ形状(図2)およびチャンバ形状はYangら⁸⁾を参考に定め、材料の充満率は60%とした。回転数は60rpmで、二つのロータは同速度で異



図2 二翼ロータ
Fig. 2 Two-wing rotors

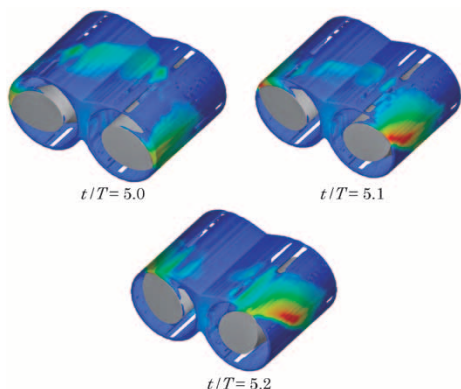


図3 充満状態と圧力分布の変化(原座標による表示)
Fig. 3 Pressure distribution in original coordinate

方向に回転しているとした。このときの計算結果を図3に示す。本図では通常の後処理方法で表示した。tは時間、Tはロータの回転周期である。

2. 提案する評価方法

2.1 部分充満解析結果の表示方法

部分充満の計算結果の表示方法を説明する。特徴の一つは、計算に用いたメッシュの座標とその体積を球の位置と半径に変換して、流体を球により表示することである。各メッシュ(番号i)に相当する各球(番号i)の位置、半径および色を通常の解析結果からつぎのように定めた。

(1) 球の位置

各メッシュの位置を、ロータの回転軸について展開した座標系に変換した。また、解析結果を理解しやすくするために、ロータの翼の位置を固定した座標系から観察することとし、ロータの回転による位相変化も考慮して変換した。座標変換のイメージを図4に示す。元座標(図4左)のx, yおよびzはそれぞれ水平方向、鉛直方向および回転軸方向の座標である。これらの座標をロータとチャンバの間の空間の周方向、厚さ方向、および軸方向の座標(図4右)を表すX, Y, およびZの座標に変換した。元座標の代表点としてa~eの5点を決め、これらをそれぞれ座標変換した点A~Eを図4右に示した。説明を単純にするため、片方のロータについて回転軸に垂直な断面内で説明する。もう一方のロータも必要な場合には同様の処理をすればよい。まず、メッシュ中心(x_i, y_i)とロータ中心(x_c, y_c)との距離R_iおよびこれを結ぶ線の勾配G_iを計算する。

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}$$

$$G_i = (y_i - y_c) / (x_i - x_c)$$

つぎに勾配G_iから角度θ_iを計算する。このとき、線の象限とロータ回転による位相変化ωt(ω:回転角速度, t:時間)、座標変換の方向を考慮して、下のように条件付きで変換する。

$$\theta'_i = \begin{cases} \omega t + \pi - \tan^{-1} G_i (x_i - x_c > 0, y_i - y_c > 0) \\ \omega t - \tan^{-1} G_i (x_i - x_c < 0, y_i - y_c > 0) \\ \omega t + 2\pi - \tan^{-1} G_i (x_i - x_c < 0, y_i - y_c < 0) \\ \omega t + \pi - \tan^{-1} G_i (x_i - x_c > 0, y_i - y_c < 0) \end{cases}$$

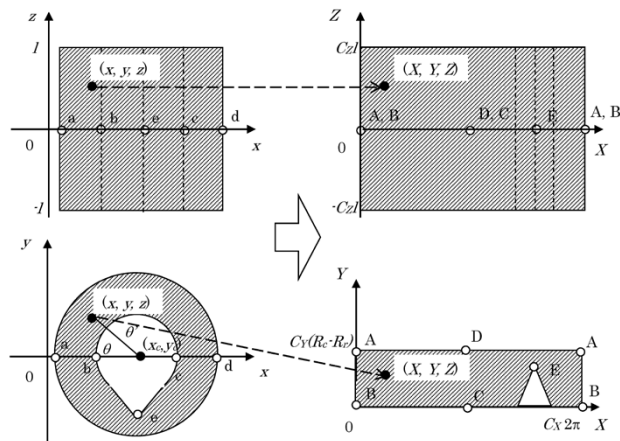


図4 座標変換イメージ
Fig. 4 Image of coordinate transformation

$$\theta_i = \begin{cases} \theta'_i + 2\pi & (\theta'_i < 2\pi) \\ \theta'_i & (0 < \theta'_i < 2\pi) \\ \theta'_i - 2\pi & (2\pi < \theta'_i) \end{cases}$$

このように計算した半径 R_i および角度 θ_i を用いて球を表示する3次元の座標系 (X_i, Y_i, Z_i) に変換する。たとえば下のように変換できる。

$$\begin{aligned} X_i &= C_x \theta_i \\ Y_i &= C_y (R_i - R_r) \\ Z_i &= C_z z_i \end{aligned}$$

ここに C_x, C_y および C_z は表示座標の絶対値の変換のための係数、 R_r はロータの胴部の半径である。

(2) 球の半径

球の半径は、各メッシュの体積 v_i 、およびVOF法による解析結果の流体の分率 a_i から、流体体積が同じ球の半径 r_i として下のように計算する。

$$r_i = \sqrt[3]{\frac{3a_i v_i}{4\pi}}$$

なお、これは基準とする半径であって、表示の際にはこれに比例させた結果が見やすい半径を用いればよい。

(3) 球の色

解析結果の表示の目的により、圧力、温度、速度、成分などで色をつける。

これらの変換を用いて流動解析を含めた手順はつぎのようになる。

- (i) 部分充満の流動解析を実施する。
- (ii) 必要な時間ステップ、変数について、流動解析結果を上記の方法により座標変換し、球による表示用のデータを作る。
- (iii) (ii)のデータを汎用ポスト処理ソフトで読み込み、球形粒子で表示する。

本方法は、球形粒子のみを表示に用いるため、安価な汎用のポスト処理ソフトを用いることができることも利点である。

2.2 分配混合の評価方法

先に述べたように、通常の分配混合評価の粒子追跡法では粒子追跡の後に粒子密度の均一性を評価することが一般的に行われている。しかしながらこの方法は、部分充満状態では累積回転数の少ない場合に評価が安定しないという問題があった。当社は、分配混合の評価方法に対して、粒子間の最小距離の調和平均値を用いることを提案している¹¹⁾。この方法を説明する。

まず、最小の粒子間距離とは、対象とする粒子(番号 i , 位置 \mathbf{x}_i)とその他の粒子(番号 j , 位置 \mathbf{x}_j)との距離 $d_{i,j}$ のうち最も小さい距離(d_i とする)のことである(図5)。式で書くとつぎのようになる。

$$\begin{aligned} d_{i,j} &= |\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i| \\ d_i &= \min_j \left[\begin{matrix} n \\ i \neq j \end{matrix} U d_{i,j} \right] \end{aligned}$$

ここで n は粒子数である。また粒子間距離 d_i の平均値 m としては通常の算術平均距離 m_a が考えられる。

$$m_a = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

しかし、算術平均距離 m_a は粒子間距離のデータの中に

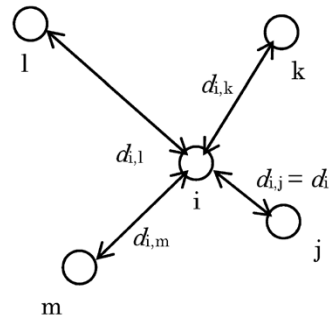


図5 最小粒子間距離 d_i の模式図
Fig. 5 Illustration of minimum distance between particles; d_i

極端に大きい値が少数でも含まれると平均距離が高く出る傾向がある。本稿の目的である分配混合の安定的な評価には適していないと考え、調和平均距離 m_h を用いる方法を提案する。この平均距離は、算術平均のように少数の大距離データの影響を受けにくく、小さい粒子間距離に重点をおいて評価できるため、最小距離の平均値の計算に適していると考えている。

$$m_h = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (1/d_i)}$$

また、粒子間の距離の平均値は、下のように定義される基準長さ L を用いて無次元化して表示する。

$$L = \sqrt[3]{\frac{6V}{n\pi}}$$

ここに V は計算領域内の流体の体積、 n は粒子数である。この基準長さ L は、粒子1個あたりの周囲にある流体体積に相当する球の直径である。分配混合が進んで粒子が均一分配されると粒子間距離はこれに近づき、無次元化した平均距離(m/L)は1に近づくと想定される。この無次元化によって流体の体積、条件による距離の差、数値誤差による体積、粒子数の増減分を補正して評価することができる。

3. 評価結果の例

3.1 部分充満状態の計算結果の表示

先に、部分充満状態の計算結果(図3)を示した。これを提案方法によって変換して示すと図6のようになる。X-Z面に表示し、チャンバ側から見た図である。この充満状態は、チャンバ内の二翼ロータの可視化結果のスケッチ⁶⁾とよく対応している。この図によれば、ロータの二つの翼の前には材料をせき止めて高圧となる部分があり、その部分から材料は翼に沿って軸方向に流れること、その結果翼の後ろには空隙が形成されていることが確認できる。また、ロータを2次元的に固定して見る座標系とすることにより、充満状態の時間的な変化が観察できる。たとえば、破線の丸で囲った部分において、充満状態が変化していることが確認できる。他の領域では充満状態の変化はほとんどないことから、この部分は、もう一方のロータとの間で受け渡される材料を表している。このように二つのロータ間で材料が受け渡される位相やそれが混合される様子、さらには、表示を変更すればせん断応力が高くなり分散混合が促進される位相と位置などを容易に観察することができる。

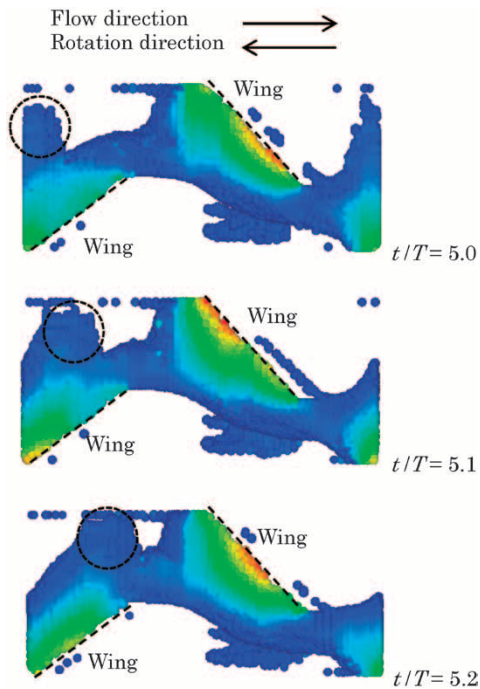


図6 充満状態および圧力分布の時間変化
(変換座標による片ロータ周りの表示)

Fig. 6 Time history of pressure distribution in transformed coordinate

このような解析結果の処理を用いることにより、たとえば翼の枚数や配置を変更したときのチャンバの内部流動の変化を容易に観察することができる。さらに、これらを効果的に検討して、ロータの形状開発に活用することができる。

3.2 分配混合の結果の評価

粒子追跡の結果および提案方法による分配混合の評価結果の一例を図7示す。図7は粒子追跡を行ったときの粒子分配の様子である。ロータの回転が進むにつれて粒子の分配が進み、チャンバ内の粒子の密度が均一化されていくことがわかる。図8は提案した方法で評価した分配の結果である。密度分布を粒子密度の標準偏差で表す従来の評価方法では、少ない累積回転数での評価結果が安定しない問題があった¹¹⁾が、本提案方法では少ない累積回転においても安定して評価指標が増加しており、分配混合を安定的に評価することができることがわかる。また、算術平均と調和平均の比較では、算術平均値の方が6回転以降で勾配が小さくなる傾向にあるのに対して、調和平均はそれ以降もほぼ一定の勾配で増加している。図7においては6回転以降も粒子の分配が進んでおり、分配の途中であると考えられる。最終的に粒子がチャンバ内に均一に分配されるまで安定して評価することも必要であることから、この回転数においても指標が安定して増加している調和平均による評価の方がより望ましいと考えられる。

むすび = 部分充満の混練解析の結果において、座標変換と球形粒子表示を用いた新しい表示方法を提案した。また、粒子追跡による分配混合の評価について、最小粒子間距離とその調和平均値を用いた分配混合の評価方法を提案した。これらの方法は、複雑な混練機内部の流動状

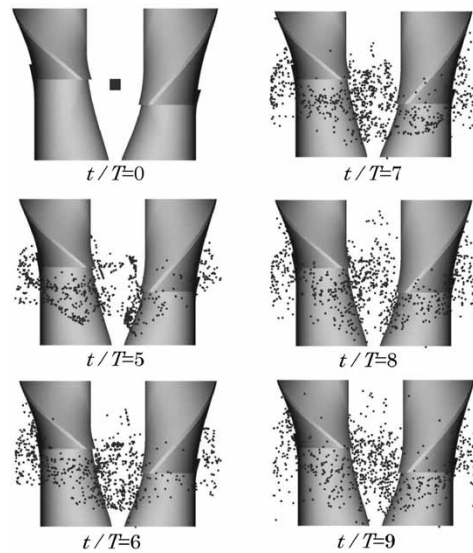


図7 粒子追跡結果
Fig. 7 Results of particle tracking

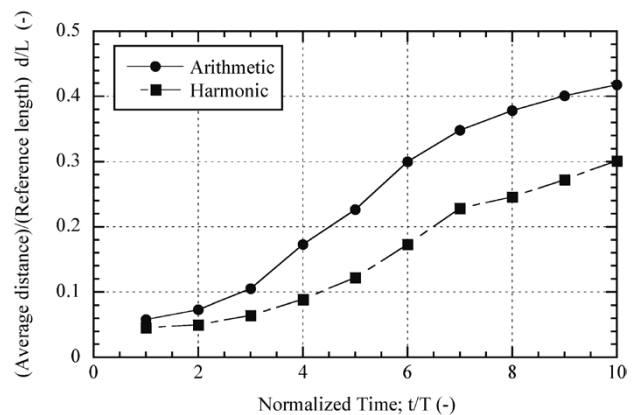


図8 提案手法による分配混合の評価結果

Fig. 8 Evaluation results of distributive mixing by proposed method

態を理解しやすくすると同時に、分配混合を安定して評価するために有用な方法である。部分充満の混練解析と組み合わせることにより、混練機および混練ロータの開発において有効な方法として用いることができる。

参考文献

- 1) 日本ゴム協会編. ゴム技術入門. 丸善, 2004, 144p.
- 2) 日本ゴム協会編. 新版ゴム技術の基礎改訂版. 丸善, 2005, 380p.
- 3) A. Limper. Mixing of Rubber Compounds. Hanser Publisher, 2012, 239p.
- 4) Y. Tanaka. International Rubber Conference 2016. 2016-10-25/28, B-21.
- 5) K. Kawanishi et al. International Polymer Processing. 1991, Vol.6, No.2, p.111-120.
- 6) K. Min. International Polymer Processing. 1987, Vol.1, No.4, p.179-187.
- 7) A. Limper et al. Macromolecular Materials and Engineering. 2002, Vol.220, p.750-757.
- 8) H. H. Yang et al. International Polymer Processing. 1992, Vol.12, No.3, p.195-203.
- 9) J. Liu et al. Journal of Applied Polymer and Science. Vol.2015, p.42496.
- 10) P. Dhakal et al. Journal of Applied Polymer and Science. Vol.2016, p.44250.
- 11) K. Higashi et al. International Rubber Conference 2016. 2016-10-25/28, 2016, C-11.
- 12) C. H. Yao et al. Rubber Chemistry and Technology. 1998, Vol.71, p.690-707.