インターナルミキサーにおけるチップクリアランス部の役割について

藤 道 治

Roles of Tip-Clearance Zone in Internal Mixers

Michihiro TOH(R & D Department, Kurume Research Park Co., Ltd. 1-1 Hyakunenkouen, Kurume, Fukuoka 839-0864, Japan)

This paper describes the roles of tip-clearance zone between rotortip and chamber wall in internal mixers.

It would be considered that there will be the grinding and dispersion of filler agglomerate or polymer and the removing of heat from the mixers in the tip-clearance zone, the greatest shear zone, mainly.

Rubber mixing processes in the industry scale mixers will be extremely influenced by the heat generated in the tip-clearance zone. There will be the heat removal difficulties by decrease of cooling area with increase of mixer size. The size of tip-clearance and the width of the rotortip of large mixers will be of great importance for these processes.

Key Words : Internal Mixers, Tip-clearance, Rotortip, Heat Removal, Industry Scale Mixer

1. は じ め に

インターナルミキサー内の混練り挙動は、密閉型であるのでオープンロールのように目視出来ずブラックボックスとなっていたが、Palmgren¹⁾ は、さまざまな実験や知見を基にして混練りの進行を次の四つの過程に分けて説明した。

(1) 原料ゴムの大きな塊を取り込みに適した大きさまで粉碎する細分化（細分割）過程，(2) 原料ゴム内部に配合剤を取り込む取り込み（混入）過程，(3) 取り込んだ配合剤を微細化する分散微細化（分散）過程，(4) 取り込んだ配合剤を均一に混合する混合均質化（単純混合）過程，その

図1 チップクリアランス, ランド幅, 鎌状領域とボイド

後、インターナルミキサーのラボ機を可視化しビデオカメラで撮影してゴム同士の混合挙動やカーボンブラックのゴムへの混入挙動を^{2,3)}、あるいは、ミキサー壁面に多数の圧力センサーや温度センサーを取り付けて図1に示するような回転時のローター先端周辺鎌状領域における圧力変化などを測定してゴム流動挙動を明らかにしてきた⁴⁾。しかしながら、生産機の混練りをラボ機で⁵⁾、あるいは、ラボ機の混練りを量産機で再現することの難しさが報告⁶⁾されている。このため、製造現場で使用される大型のインターナルミキサーでの混練りについては、ラボ機で検討されてきた知見を基に混練りに密接に関わっている図1に示するようなローター先端周辺のクリアランス、先端前方に形成される鎌状領域や後方に生成するボイド（空隙）との関連で考えることができる。

生産機でのローターのチップクリアランスやランド幅などは、購入時にミキサーメーカーで設定されているが、使用していくうちに補強剤等により摩耗して変化するため、4、5年毎に行われるオーバーホール時にメーカーに調整

藤 道治；(株)久留米リサーチ・パーク（〒839-0864
久留米市百年公園1番1号）研究開発部，コーディネータ，工博，昭和43年九州大学大学院工学研究科化学機械工学専攻修了，昭和46年国立久留米工業高等専門学校工業化学科講師，平成18年定年退職，名誉教授，専門 化学工学（掻き取り攪拌伝熱，混練，分散，混合，粉砕），(社)日本ゴム協会評議委員，編集委員，平成21年からゴム練り研究分科会主査，(社)化学工学会粒子・流体プロセス部会ミキシング技術分科会評議員。

してもらうのが現状である。このように製造現場では、混練りの最も肝心なローターのチップクリアランスやランド幅の調整を行うことが出来ない。このため、インターナルミキサーを使用する場合には、ミキサー毎に原料ゴムや配合剤等の投入方法、充てん率、回転数や練り時間などの練り条件の適切な設定が重要となっている。

ここでは、生産機における混練り時のチップクリアランス部の役割について考えてみた。

2. チップクリアランス部とは

ゴム練りの素練りや混練りに使用するインターナルミキサーには、コンパウンドを槽下部ドロップドアあるいは側壁閉閉により排出するミキサー、槽を反転させて排出する加圧ニーダーがある。このようなミキサーやニーダーには、二本のローターがある距離を隔てて異方向異速回転あるいは異方向等速回転する接線式ローターを取り付けたバンバリー型ミキサー（接線式ミキサー）や加圧ニーダー（接線式ニーダー）、あるいは、二本のローターが噛み合わさって異方向等速回転する噛合い式ローターを取り付けたインターミックス（噛合い式ミキサー）や加圧ニーダー（噛合い式ニーダー）などがある。

Melotto⁷⁾ は、接線式ミキサーにおいて長短翼からなる2翼ローターのチップクリアランスやランド幅は、分散、せん断や温度上昇に関係するとしているが、これら要因の定量的な関係性は導いていない。

また、Fleakelyら⁴⁾ は、混合槽壁面に圧力センサーと温度センサーを併せて19個取り付け付けた接線式ミキサーFarrel BR (1.6 ℓ) を用いて、SBR（スチレンブタジエンゴム）とカーボンブラックを充てん率70%，50 rpmで混練りし、ローター先端鎌状領域の圧力などを測定している。図2に示すように片側のローターがラム下を通過するときゴム溜まり（Reservoir）からローターの翼によりゴムコンパウンドMを運び出し、回転してゆく過程でMはゴム溜まりに戻るMRと翼に沿って流れるMAとチップクリアランスからリークするMLに分かれるとし、Mはこれらの和 $M = MR + MA + ML$ で表されるというモデルを提案し

図2 ゴム溜まりから運ばれたゴムの流れ⁴⁾

ている。

ここでいうチップクリアランス部とは、翼先端のチップクリアランス h [m]，ランド幅 w [m] とローター長 L [m] からなる空間体積 $V_c (= h \times w \times L)$ [m³] である。

Sehenら⁸⁾ は、容量の異なるバンバリー型ミキサー (1.6 ℓ の Farrel BR から 620 ℓ の F620) においてホースコンパウンド (EPDM, エチレンプロピレンゴム) や V ベルトコンパウンド (CR, クロロプレンゴム) 等への短繊維 (Santoweb^{a/s}, Wood-Cellulose Fiber) の分散を測定し、分散数 $N_{RS} = (V_s / V_o) N \theta$ を定義して繊維分散度に及ぼすチップクリアランスの影響を検討している。ここで、 $V_s = \pi D c h L$ [ℓ] は槽内壁面高せん断領域で、混合槽内径 (シリンダー内径) D_c ，厚さ h ，長さ L の中空円筒容積で、 V_o [ℓ] はミキサーの正味容積である。また、 N [1/s] は回転速度であり、 θ [s] は混合時間である。

河西ら⁵⁾ は、250 cm³ の小さな容量の接線式ミキサーを用いて様々な混練り実験を行い、1.7 ℓ，20 ℓ 及び 9 号機 (9D, 180 ℓ) の大きな容量のバンバリー型ミキサーの練り効果を再現することを試みている。その結果、ラボ機のローター形状は、生産機の相似形よりもギャップ (チップクリアランス) を大きくし、ランド幅も大きく、ふくらみ径についてはほぼ相似形のままでよいとしている。また、練り条件については、ラボ機では、生産機よりも、回転速度を大きく、設定温度を高くして生産機に近いせん断を与えた方が良いことがわかったと述べている。

3. チップクリアランス部は非接触式掻き取り部

高粘度系攪拌槽において数百ポイズ以上の高粘度液を攪拌混合する時には、伝熱面を掻き取り、伝熱促進を図るために接触式掻き取り羽根が使用されている。図3の高粘度液攪拌槽⁹⁾ では、槽壁面上停滞液膜を掻き取るために低

図3 高粘度系攪拌槽⁹⁾

速 n_1 で回転する錨型翼に多数の接触式掻き取り羽根が、また、これと槽内液とを攪拌混合するために中心軸に高速 n_2 で逆回転する大型傾斜多段翼が取り付けられている。藤¹⁰⁾ は、二次元インターナルミキサーに図4に示するような槽内壁面と大きな隙間（クリアランス）があるローターを取り付け、ニュートン流体の高粘度液の水飴と粘弾性流体のBR（ブタジエンゴム）を攪拌混合した場合の流動挙動をビデオカメラで撮影検討している。アクリル製ミキサーにおいて水飴を攪拌した場合、図4（a）のように水飴がアクリル製のローターや内壁面に付着するので、ローターから剥がしたり内壁面から掻き取り混合する必要がある。黄銅製ミキサーにおいてBRを混合した場合には黄銅製ローター先端は伝熱面と接触せずに回転するが、図4（b）のように弾性によりローターや内壁面からゴムが自然に剥がれてローター前後のゴムと混合するので、掻き取り羽根を取り付ける必要がないことを示している。この結果から、インターナルミキサーで粘弾性流体を混合する時には、ローターのチップクリアランス部は掻き取り羽根の役割を果たしている、チップクリアランス部を非接触式掻き取り部と呼んでいる¹⁰⁾。

図4 二次元インターナルミキサー内混合挙動の画像 (a) 水飴と (b) BR¹⁰⁾

(a)

(b)

図5 (a) 二次元ミキサーと (b) 8種類のローター^{12,13)}

4. チップクリアランス部のゴム流動挙動

4.1 鎌状領域の形成、ゴムの剥がれと自己更新性、混合分散と伝熱促進

チップクリアランス部前後のゴムの挙動については、ほとんど明らかにされていない¹¹⁾。

Tohら¹²⁾、藤¹³⁾ は、一個の圧力センサーを槽壁に取り付けた図5（a）に示す二次元ミキサー（容量310 cm³）に図5（b）に示すような形状が異なる8種類のローターを取り付け、BRを充てん率70 %にして10 rpmでゴム同士の混合実験を行い、混合挙動をビデオカメラで撮影して検討している。図6は、それぞれ（d）型、（e）型及び（f）型のローターを取り付けた場合の混合挙動の画像と右側混合槽でのゴム流動図を示す。いずれにおいてもチップクリアランス部前方には、掻き取られたゴムにより鎌状領域が形成され、通過後のローター後方には掻き残されたゴムが内

図6 (d) 型ローターの混合挙動画像と (e) 型及び (f) 型ローターのゴム流動図¹²⁾

壁（伝熱）面から自然に剥がれていることが分かる．このようにゴムの弾性が支配的である場合には掻き残されたゴムは壁面から自然に剥がれる自己更新（self cleaning）性を示す．この剥がれと鎌状領域は、高粘度液の掻き取り羽根と同じようにゴム練りでの伝熱促進を図っていると考えることができる．

図7は各ローター先端前後の圧力変化を示している．高い圧力は鎌状領域のゴム量の多さを示している．また、土岐¹⁴⁾と同様にローター先端が槽内壁の圧力センサー部を通るときに圧力が最大となり、通り過ぎると大気圧まで低下している．大気圧となることからローター後方ボイドでゴムの剥がれがおき、自己更新していると考えられる．

Fleakelyら⁴⁾は、ローター先端が槽壁面を通過してゆく時の圧力変化を測定している．図8に示すようにA2, A3, A4のいずれの位置でもローター先端後方にボイドがあり、ここで壁面からゴムコンパウンドが収縮して剥がれて圧力がゼロになっており、自己更新していることが分かる．

図9に (e)型、(g)型及び (h)型3種類のローターを用いてチップクリアランスが異なる場合のゴム中へのイオン交換樹脂の混合分散挙動（10 rpmで混合開始して5回転後）を示す¹⁰⁾．チップクリアランスhが1, 2, 3 mmと異なる二次元ミキサーにおいてBRを70 %充てんし、ラム下に入れたイオン交換樹脂の混合分散状態を図示したものである．チップクリアランスにより鎌状領域形成状況や後端ボイドの挙動が異なっている．(e)型及び (g)型ローターで2,3 mmの場合は、いずれのローターでも

掻き残されたゴムが自己更新により剥がれ、剥がれたゴムは後方の翼前方に生成した鎌状領域のゴムと混合してイオン交換樹脂が分散している様子が分かる．このことから鎌状領域形成とゴムの剥がれがゴムでの混合分散と伝熱促進に有効であることが分かる．

また、図2のMLはチップクリアランスからリークするゴムコンパウンド量ではなく、チップクリアランス部で掻き残されたゴム量であると考えられる．

4.2 鎌状領域の速度分布

権藤ら¹⁵⁾は、4.1の二次元ミキサーにBRを70 %充てんし、BR中にトレーサー粒子としてガラスビーズ（直径約1.9 mm）を入れ、ミキサーの透明アクリル樹脂製側壁面からトレーサー粒子の動きをローターと同一角速度10 rpmで回転させたビデオカメラで撮影して図10 (a) に示すような画像を得ている．

図7 各ローター先端前後の圧力変化¹²⁾

図8 ローターチップ前後の圧力変化⁴⁾

図9 (e)型、(g)型及び (h)型ローターにおけるチップクリアランスとイオン交換樹脂の混合分散挙動（図中斜線部はボイドを示す）¹⁰⁾

表1 バンバリー型ミキサーの正味容量, 回転速度, ローターのチップクリアランス部等の諸元^{1,16)}

呼称	容量 (ℓ)	回転速度 60N (rpm)	周速 u (m/s)	ローター 翼径 Dt (m)	ローター 一長 L (m)	チップクリ アランス h (m)	ランド幅 w (m)
1D	16	30-120	0.35-1.4	0.22	0.378	0.003	0.0097
3D	60	30-100	0.5-1.8	0.34	0.61	0.005	0.012
9D	180	20-60	0.5-1.6	0.51		0.005	
11D	270	20-60	0.6-1.7	0.56	0.81	0.008	0.025
F370	370	20-60	0.7-2.1	0.68		0.0095	
F620	620	30-60	1.2-2.3	0.74	1.52	0.0095	0.035

図10 (b) に示すようにトレーサーの軌跡から周方向長さ $L\theta$ [m] と半径方向長さ Lr [m] を測定し, 周方向速度 $V\theta$ [m/s], 半径方向速度 Vr [m/s] を求めている. (h) 型と (g) 型ローターの鎌状領域の速度分布を図11に示す. 図右上の矢印の大きさが 1.0×10^{-1} m/s である. 破線はローターと同じ固体的回転速度を示し, 破線を超えた分は加速成分である. (g) 型ローターの場合, (h) 型ローターに比べて鎌状領域のゴム量が多く, 図7のようにゴムとボイドとの大きな圧力差による圧力流動と, 凹面状から凸面状に変わる形状部でゴムを引っ掛けるような牽引流動により鎌状領域に大きな加速成分を持つと考える. これらの結果は, 鎌状領域の速度分布が周方向の流れが主であることを示していると考えられる.

5. チップクリアランス部の役割

5.1 ローター先端の周速とチップクリアランスにおけるせん断速度

回転速度 N は, 混合機の大きさにより異なる. 表1にバンバリー型ミキサーの諸元を示す^{1,16)}. 9号機 (9D) や11号機 (11D) の生産機では40 rpm程度で運転されている. 回転速度とローター翼径 (ローター先端径) Dt [m] からローター翼周速 $u (\equiv \pi DtN$ [m/s]) が求められる. 周速は, 原料ゴムの粉碎, チップクリアランスでの冷却特性, すなわち, ゴムコンパウンド側の熱伝達係数 (混合槽内壁側熱伝達係数) と関係づけられ, (ゴムコンパウンドからの除熱量を求める際の総括伝熱係数 (熱貫流係数) に影響する.

(a)

(b)

図10 (a) ガラスビーズの画像と (b) トレーサー軌跡の解析¹⁵⁾

チップクリアランス部のせん断速度は, 周速とチップクリアランスから (1) 式で与えられて, インターナルミキサーにおいて最大である. 原料ゴム素練り時の粉碎, 混練り時の配合剤の混合分散に深くかわると考えられている¹⁷⁾.

$$\pi DtN/h \quad (1)$$

ここで, h はチップクリアランスである.

入江ら¹⁸⁾ は, 混合槽内径 Dc (小型機で200 mm, 大型機で398 mm) に対して5割程度の小さなローター軸径 $Dr (\equiv 0.5Dc)$ の10 ℓ (D10, $h = 1.5$ mm), 75 ℓ (D75, $h = 3$ mm) と7割程度である大きなローター軸径 $Dr' (\equiv 0.7Dc)$ を持つ7 ℓ (WD7, $h = 3$ mm), 55 ℓ (WD55, $h = 3$ mm) の4種類の加圧ニーダーでSBR, カーボンブラック, オイル等を充てん率75 %で混練りしている. 実験では, カーボンブラックがゴム中に取り込まれて動力が最大となった時間のBIT (Carbon Black Incorporation Time) 後に, 回転数を25 rpmから10 rpmの低速回転にし, 酸化亜鉛を投入してから任意の積算回転数でミキサーを止めて, ミキサー内からサンプリングしたコンパウンド温度や体積抵抗率等を測定している. WD7で10 rpmとした場合, チップクリアランス部におけるせん断速度が, 大型のD75, WD55及び小型のD10の1/2となるため, 同じせん断速度にするために回転数を20 rpmとした実験も行っている. また, 同じ回転数では, 大きな軸径のWD型の場合, 環状部が狭くなり, 環状部せん断速度がD型の2.3倍となるとしている.

図12に示すように大型でせん断速度が同じD75とWD55のコンパウンド温度は, カーボンブラックを投入してから積算回転数に対して, ほとんど大きな差はなかった. しかし, 小型のWD7とD10のコンパウンド温度は, 大型よりも単位面積当たりの伝熱面積が大きくなり除熱が良好となり低くなったと説明している. WD7で10 rpmの場合, せん断速度がD10の1/2と大きな伝熱面からの除熱によりコンパウンド温度は積算回転数700回転以降低下している. WD7で20 rpmの場合には, コンパウンド温度は, せん断速度が同じD10よりも高くなっているが, これは

図11 (h) 型及び (g) 型ローターの速度分布 (図中斜線部はボイドを示す)¹⁵⁾

環状部のせん断速度が4.6倍程度大きくなったことによると説明している。

コンパウンドの体積抵抗率は、図13に示すようにWD型でせん断速度を同一にした大型WD55 (10 rpm) と小型のWD7 (20 rpm) において積算回転数 850回転程度でほぼ同じ値となり、他のニーダーに比べ1000倍高い値を示した。これは、環状部のせん断速度が大きくなったことによりコンパウンドの動きがよくなり、環状部のコンパウンドに取り込まれたカーボンブラックの凝集塊が、最大せん断速度場であるチップクリアランスで取り込まれたカーボンブラック凝集塊よりも壊れやすくなり、分散がより進んで体積抵抗率が大きくなったとしている。また、小型のWD7 (10 rpm) においてせん断速度はD75やD10の1/2であるが、環状部からのカーボンブラックの取り込みにより分散が進み、体積抵抗率はこれらのニーダーと同じ程度になっていると説明している。

5.2 チップクリアランスにおける伝熱

Palmgren¹⁾ は、ゴム練り時とコンパウンド排出後の伝熱壁内と周辺の温度分布変化のシミュレーションを示し、熱伝達係数と総括伝熱係数を検討している。総括伝熱係数 U [W/m^2K] は、(2) 式で表される。

$$1/U = 1/\alpha_1 + d/\lambda + 1/\alpha_2 \quad (2)$$

α_1 [W/m^2K] はコンパウンド側、すなわち、混合槽内壁側熱伝達係数、 α_2 [W/m^2K] は槽外壁冷却ジャケット側熱伝達係数、 λ [W/mK] は槽壁熱伝導度、 d [m] は槽壁厚さである。 $\alpha_1 = 1500$, $d = 0.025$, $\lambda = 50$, $\alpha_2 = 5000$ を代入して $U = 730$ の値を求めているが、 α_1 の1500の値は高すぎると考える¹⁹⁾。 α_1 はゴムコンパウンドの流速 (ローター先端周速 u)、粘度、熱物性 (比熱や熱伝導度) 等に影響され、一般的には (3) 式で表される。このように周速はチップクリアランス部の熱伝達係数の支配因子である。

$$\alpha_1 \propto (u)^\beta \quad (3)$$

ここで、 β は実験定数である。

Nakajimaら²⁰⁾ は、実験の再現性をよくするために予め粉末NBR (ニトリルゴム) とカーボンブラックや他の配合剤をヘンシェルミキサーで混合した後、接線式ミキサーのFarrel BR (1.6 ℓ , $h = 2.4$ mm) で混練りを行い、冷却ジャケットからの除熱を基にして総括伝熱係数 (熱貫流係数) U [W/m^2K] を求めて図14の結果を得ている。練り時間が30~40秒のコンパウンドが弾性支配領域にあると考えられる場合には総括伝熱係数 U は300~400と高い値を示すがバラツキも大きい。しかし、60秒以上になり粘性支配領域になって混練りが終了する場合には総括伝熱係数 U は200程度となりバラツキもかなり小さくなっている。

これらの結果から、量産機や生産機での総括伝熱係数 U [W/m^2K] は容量や回転数などにもよるが200から300と推測される。

5.3 チップクリアランス部の役割

チップクリアランス部の役割として、インターナルミキサーの混練り開始時の原料ゴムの粉碎、混練り中のチップクリアランス前方での鎌状領域形成と配合剤の取り込みと混合分散、チップクリアランスにおける最大せん断速度による分散と発熱、後方ボイド形成、伝熱面からゴムコンパウンド収縮による剥がれと除熱であると考えられることができる。

混練り開始時の原料ゴムの粉碎は、カーボンブラックなど配合剤との混練りに影響を及ぼすので重要である。White²¹⁾、橋爪²²⁾ は、チップクリアランス部におけるNRの初期混練り時の粉碎微粒子化について検討し、Palmgren¹⁾ の細分化過程を確認している。

また、特にローター先端と槽内伝熱面とのチップクリアランスやランド幅は重要である。矢田²³⁾ は、軸方向に翼端から翼中心に向けてランド幅を狭め、ランド幅の広い翼端でのコンパウンドの掻き取り量を多くし、狭い翼中心部での掻き取り量を少なくして翼端から翼中心に翼面に沿うような流れを出すような2翼ローターを開発している。

このため、同一の配合設計に基づいたゴムコンパウンド

図12 各ニーダーにおけるコンパウンド温度の変化¹⁸⁾

図13 各ニーダーにおけるコンパウンド体積抵抗率の変化¹⁸⁾

を、ローター先端形状や槽内伝熱面が異なる、すなわち、チップクリアランス、ランド幅、伝熱面曲率などが異なる他の混合機で練ったり、あるいは、小容量のラボ機をスケールアップした大容量の生産機で練る場合には、チップクリアランス部の役割を十分考慮して行うべきだと考える。

5.4 チップクリアランス部の影響

森部²⁴⁾は、相似形の5ℓと90ℓの噛合い式ミキサーで模擬流体のCMC（カルボキシメチルセルロース）溶液とSBRを混練りして消費動力を測定している。攪拌系で使用されている動力数（ $N_p = P / \rho N^3 D t^5$, Power number）をチップクリアランスhを代表寸法とし、周速 πDtN を代表速度としたレイノルズ数（ $Re = \rho \pi DtN h / \mu$, Reynolds number）と関係づけている。 $N_p \cdot Re = k$ （一定）となり、消費動力Pは、 $P = k \mu N^2 D t^4 / \pi h$ となり、回転数Nの二乗、ローター翼径（ローターチップ径）Dtの四乗に比例し、チップクリアランスhに反比例して増大することが分かる。また、Dtとhのチップクリアランス部に関わる要因からの発熱がゴムコンパウンド温度を上昇させていることが分かる。さらに、5ℓから270ℓまでの伝熱特性をミキサーの熱収支を基にして検討している。チップクリアランス部の総括伝熱係数、冷却水の温度を一定として小容量機から大容量機までの混練り時間によるゴムコンパウンド温度の変化を求めている。噛合い式ミキサーは、接線式ミキサーよりも伝熱面積が大きいので、ゴムコンパウンド温度は低いが、いずれのミキサーでも単位容積当たりの伝熱面積が小さい大容量機のゴムコンパウンド温

度は、大きい小容量機よりもかなり高くなっている。

泉²⁵⁾は、55ℓの接線式ニーダーで混練りする場合の練り時間－電力・温度曲線を基にして生産順位での混練りの安定について述べている。第1、第2バッチでニーダー壁面の温度が低い場合には、ゴムと壁面の摩擦が小さいのでチップクリアランス部におけるゴムの粉碎が進まず混練りが安定せず、壁面温度が上がった第3バッチ目からゴムとの摩擦により粉碎が進み混練りが安定すると説明している。充てん率、回転数、投入方法、練り時間など同じ練り条件で混練しても、混練状態がチップクリアランスhに基づく動力（電力）として練り時間－電力曲線に表れていると考える。

鰐淵²⁶⁾は、3.5ℓ試作機（hは2～3mmと推測する）と184ℓ量産機（hは5mm程度と推測する）の混練りの違いを実際の四つの事例、すなわち、NRのスコーチ、NRとBRのブレンドゴム、EPDM及びIIR（ブチルゴム）の物性低下をあげて説明している。両機とも2翼からなる接線式ミキサーであり、チップクリアランス部寸法、ゴムコンパウンド温度や冷却水温度は与えられていないが、同じ混練り条件（投入方法、練り時間、回転数、充てん率など）での量産機のゴムコンパウンドの物性が試作機の基準値よりも低下していることをあげている。ローター翼径が試作機の3.7倍となる量産機において、それぞれ、老防の後入れ（NR）、BRの後入れと練り時間の短縮、EPDMの投入方法と充てん率などの変更、回転数と練り時間の短縮、により量産機のゴムコンパウンドの物性が基準値をクリアしていることを説明している。

投入方法、練り時間、回転数、充てん率などの練り条件を変えて量産機のせん断速度が試作機の2倍以上となるチップクリアランス部での発熱を抑え、冷却効率を上げ、ゴムコンパウンド温度を下げて対応していることが予測される。

Fleakely²⁷⁾は、Farrel BR（1.6ℓ、hは2～3mmと推測する）とFarrel F40（40ℓ、hは4mm程度と推測する）の接線式ミキサーにおいて補強剤のカーボンブラックや可塑剤のオイルを先に投入した後原料ゴムを入れて練るアップ

図14 混合時間による総括伝熱係数の変化²⁰⁾

図15 EPDMコンパウンドの積算回転数と変動係数

(a) 1.6ℓと (b) 40ℓの接線式ミキサー²⁷⁾

■スコーチタイム、+加硫速度、*加硫時間、□最大トルク

サイドミキシング法でEPDMのマスターバッチを作成し、その後架橋剤の硫黄を入れて練っている。硫黄投入後任意の積算回転数でミキサーからサンプリングした6個のコンパウンドサンプルの加硫曲線を測定し、図15に示すように加硫速度、加硫時間などの変動係数を求めて硫黄の混合分散状態を検討している。この実験では、投入方法、回転数、充てん率、冷却水入口温度を合わせている。ローター翼径が小型機の3倍程となる大型機の変動係数が大きい。大型機のローター先端周速は、小型機の周速の3倍程となるが、チップ

クリアランスがそれだけ広くないようであるので、せん断速度が大きくなりゴムコンパウンド温度が上昇して混練りが進まなかったことが予測される。

以上のように生産機では、せん断速度が最大となるチップクリアランス部において発熱のためにゴムコンパウンド温度が高く、粘性が低下して粉碎が進まず、また、装置が大きくコンパウンド容量が多いので、配合剤の混合分散状態が悪い。さらに、混練り挙動が複雑となるので、ゴムコンパウンドへの混練り履歴が異なる状況が増え²⁸⁾、ゴムコンパウンドのパラツキを抑えることが非常に難しいと考える。

6. お わ り に

生産機の混練りにおいて発熱が一番問題である。低回転数でも大きなローター翼径により動力が増大してコンパウンドは発熱するが、生産機の槽壁伝熱面と冷却ジャケット間の総括伝熱係数は小さい。生産機において単位体積当たりの伝熱面積が小さく、また、非接触式掻き取り部であるチップクリアランス部は、槽内のコンパウンド量に比較して極めて小さく、2翼ローターであれば1回転に1回しか槽内壁面を掻き取らないので、コンパウンドと冷却水との温度差が大きくなっても、コンパウンドの冷却は進まず、コンパウンド温度は急激に上昇する。生産機で温度上昇を抑えて安定したゴムコンパウンドを製造するためには、常にチップクリアランス部の役割と、練り時間、回転数、投入方法、充てん率などの練り条件とを結び付けて混練りすることが重要であると考えられる。

References

- 1) Palmgren, H.: *Rubber Chem. Technol.*, **48**, 462 (1975)
- 2) Min, K.; White, J. L.: *Rubber Chem. Technol.*, **58**, 1024 (1985)
- 3) Min, K.; White, J. L.: *Rubber Chem. Technol.*, **60**, 361 (1987)
- 4) Freakley, P. K.; Patel, S. R.: *Rubber Chem. Technol.*, **58**, 751 (1985)
- 5) Kawanishi, K.; Yagii, K.; Obata, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **64**, 25 (1991)
- 6) Nippon Gomu Kyokai 164th Gomu Gijyutsu Shinpojyumu, 「Gomuneri no Kiso to Ouyou V - Konneri no Scaleup -」, (2010)
- 7) Melotto, M. A.: *Rubber World*, (2), 37 (1986)
- 8) Shen, K. S.; Rains, R. K.: *Rubber Chem. Technol.*, **52**, 764 (1979)
- 9) Tozaki, Y.; Sumita, Y.: Preprint of the 36th Annual Meeting of the Soc. of Chem. Engrs., Japan, E113 (1971)
- 10) Toh, M.: Nippon Gomu Kyokai 165th Gomu Gijyutsu Symposium, 「Kakosei wo Sayuusuru Mikaryugomu no Tokusei」, 14 (2010)
- 11) Nakajima, N.: *Rubber Chem. Technol.*, **54**, 266 (1981)

- 12) Toh, M.; Gondoh, T.; Mori, T.; Murakami, Y.; Nishimi, H.; Mishima, M.: *Handbook of Applied Polymer Processing Technology* (Marcel Dekker Inc.), 523 (1996)
- 13) Toh, M.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **74**, 57 (2001)
- 14) Toki, S.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **62**, 132 (1989)
- 15) Gondoh, T.; Mori, T.; Toh, M.: *Memoirs of Kurume College of Technology*, **23**, 21 (2007)
- 16) Gomu Kougyou Binran (4th ed.) ,Nippon Gomu Kyokai Ed., Nippon Gomu Kyokai, p.1072 (1994)
- 17) Funt, J. M.: *Rubber Mixing*, RAPRA Publications, UK, (1975)
- 18) Irie, M.; Fukuda, H.; Matsumoto, S.; Toh, M.; Furukawa, M.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **79**, 516 (2006)
- 19) Toh, M.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **73**, 442 (2000)
- 20) Nakajima, N.; Harrel, E. R.; Seil, D. A.: *Rubber Chem. Technol.*, **55**, 456 (1982)
- 21) White, J. L.: *Rubber Chem. Technol.*, **50**, 163 (1977)
- 22) Hashizume, S.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **63**, 71 (1990)
- 23) Yada, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **81**, 496 (2008)
- 24) Moribe, T.: Nippon Gomu Kyokai 164th Gomu Gijutsu Symposium, 「Gomuneri no Kiso to Ouyou V - Konneri no Scaleup -」, 46 (2010)
- 25) Izumi, N.: Nippon Gomu Kyokai 164th Gomu Gijutsu Symposium, 「Gomuneri no Kiso to Ouyou V - Konneri no Scaleup -」, 28 (2010)
- 26) Wanibuchi, T.: Nippon Gomu Kyokai 164th Gomu Gijutsu Symposium, 「Gomuneri no Kiso to Ouyou V - Konneri no Scaleup -」, 52 (2010)
- 27) Freakley, P. K.: *Rubber Chem. Technol.*, **65**, 706 (1992)
- 28) Hamada, H.: Nippon Gomu Kyokai 125th Gomu Gijutsu Symposium, 「Gomuneri no Kiso to Ouyou - Gomuneri no Arubekisugata -」, 1 (2006)

日本語表記参考文献

- 5) 河西和雄, 楊井啓吉, 尾畑 寛: 日本ゴム協会誌, **64**, 25 (1991)
- 6) 日本ゴム協会第164回ゴム技術シンポジウム, 「ゴム練りの基礎と応用V-混練りのスケールアップ」, (2010)
- 9) 戸崎康隆, 角田頼雄: 化学工学協会第36回年次大会要旨集, E113 (1971)
- 10) 藤 道治: 日本ゴム協会第165回ゴム技術シンポジウム, 「加工性を左右する未加硫ゴムの特性」, 14 (2010)
- 13) 藤 道治: 日本ゴム協会誌, **74**, 57 (2001)
- 14) 土岐重之: 日本ゴム協会誌, **62**, 132 (1989)
- 15) 権藤豊彦, 森哲夫, 藤 道治: 久留米高専紀要, **23**, 21 (2007)
- 16) ゴム工業便覧(改訂四版), 日本ゴム協会編, 日本ゴム協会, p.1072 (1994)
- 18) 入江 誠, 福田裕之, 松本真一, 藤 道治, 古川睦久: 日本ゴム協会誌, **79**, 516 (2006)
- 19) 藤 道治: 日本ゴム協会誌, **73**, 442 (2000)
- 22) 橋爪慎治: 日本ゴム協会誌, **63**, 71 (1990)
- 23) 矢田泰雄: 日本ゴム協会誌, **81**, 496 (2008)
- 24) 森部高司: 日本ゴム協会第164回ゴム技術シンポジウム, 「ゴム練りの基礎と応用V-混練りのスケールアップ」, 46 (2010)
- 25) 泉 信示: 日本ゴム協会第164回ゴム技術シンポジウム, 「ゴム練りの基礎と応用V-混練りのスケールアップ」, 28 (2010)
- 26) 鰐淵 隆: 日本ゴム協会第164回ゴム技術シンポジウム, 「ゴム練りの基礎と応用V-混練りのスケールアップ」, 52 (2010)
- 28) 濱田 裕: 日本ゴム協会第125回ゴム技術シンポジウム, 「ゴム練りの基礎と応用-ゴム練りのあるべき姿-」, 1 (2006)