

日立テーパロール (高粘度処理機)

Hitachi Taper-Roll Processor

平塚 幸哉* 蜂谷 昌彦*
 Kôsai Hiratsuka Masahiko Hachiya
 丸子 盛久* 福森 宏昌*
 Morihisa Maruko Hiromasa Fukumori

要 旨

最近、化学工業界で高粘度物質処理機は、高粘度化と連続化の傾向に進んでいる。特に、合成繊維、合成樹脂業界においては、10,000ポイズを越える高粘度物質の連続処理が必要となってきた。この高粘度化の情勢に対処して、日立独自の構想に基づき、日立テーパロール (高粘度処理機) を開発した。本文はこの日立テーパロールの基本特性、構造、仕様、用途などについて述べたものである。

1. 緒 言

日立製作所では、これまで合成繊維、合成樹脂を主体とした5,000ポイズ程度の高粘度処理機については、多くの設計製作実績をもっているが、最近、高粘度処理機の高粘度化と連続化の傾向は著しいものがある。上記業界に限らず食品、染料、油脂業界などにおいても、高粘度処理の連続化が強く要望されている。この高粘度処理機の傾向に対処し、日立独自の構想に基づき、「日立テーパロール」を開発した。日立テーパロールは、二軸強制薄膜式処理機であり、シンプルな構造を持つ二軸式混練機である。高粘度処理を薄膜にて行なうことは、処理時間を短縮することに有効である。また二軸式混練機であるため、超高粘度物質を処理することも可能であり、最低100ポイズより、最高100,000ポイズ程度までその処理可能粘度範囲も広い。これら各種特長をもつ日立テーパロールについて、以下その基本特性、構造、仕様、用途などについて述べる。

2. 構造および仕様

日立テーパロールは、二軸多段テーパロール式連続高粘度処理機であり、日立テーパロールの構造は図2に示すように、多段テーパロールを2本背中合わせに、水平に並べたシンプルな構造で、二軸は相互に内転する方向に回転する。ロール内部に蒸気、熱媒、温水、冷却水などを、プレッシャロータリジョイントより供給し、加熱、冷却を行なう。日立テーパロールは、熱膨張に対しじゅうぶんな対策が行なわれているので、-20℃から300℃の範囲で使用することができる。処理ロールの段数は適用プロセス条件により決定されるが、ロールの形状に関しては各形式ごとに基準ロール形状を採用する。各形式は、最大ロール径により、160、250、400、630、1,000の5種類であり、形式別のロール表面積および概略処理量は表1に示すとおりである。テーパロールの回転数は変速可能であり、回転速度を変えることにより表面更新速度を変え、最適な処理条件を設定できる。日立テーパロールは一般に外周密閉形であり、真空状態で運転することも、また加圧状態で運転することも可能である。図3、4は日立テーパロールの形式別概略寸法図である。

3. 日立テーパロールの特性

3.1 流動特性

テーパロールは、図5に示すように2本のテーパ付きロールを方向を逆に、軸を平行に設置し、両軸を異なる角速度 ω_1 、 ω_2 で逆方向に回転させることを特長とする。ロールの平均周速はロールの平均径を R_0 、こう配を α とすると

* 日立製作所笠戸工場

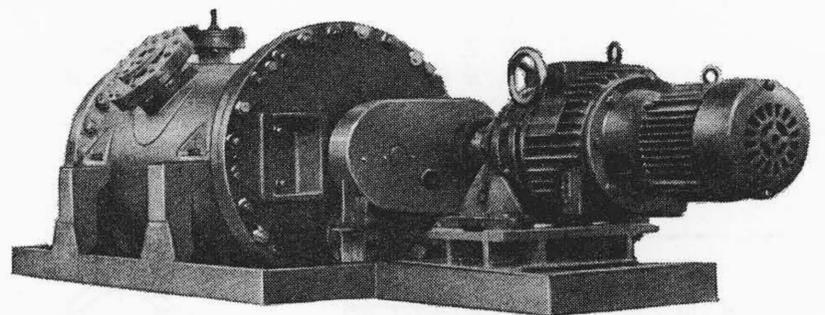


図1 日立テーパロール

表1 日立テーパロール標準仕様

| 項番 | 形 式 | ロール表面積 (m ²) | 動 力 | | 処 理 量 (kg/h) | |
|----|--------------|--------------------------|-----------|-------------|--------------|-----------|
| | | | 使用モートル馬力 | 許容伝達トルク | | |
| 1 | TP-160-3(6) | A | 0.25~0.50 | *2.2~5.5 kW | 50 kg-m | 5~35 |
| 2 | TP-250-3(6) | A/B | 0.6~1.2 | 5.5~11 | 200 | 12~80 |
| 3 | TP-400-3(6) | B | 1.6~3.2 | 11~35 | 800 | 30~200 |
| 4 | TP-630-3(6) | B | 4.0~8.0 | 35~90 | 3,000 | 80~560 |
| 5 | TP-1000-3(6) | B | 10.0~20.0 | 90~200 | 10,000 | 200~1,400 |

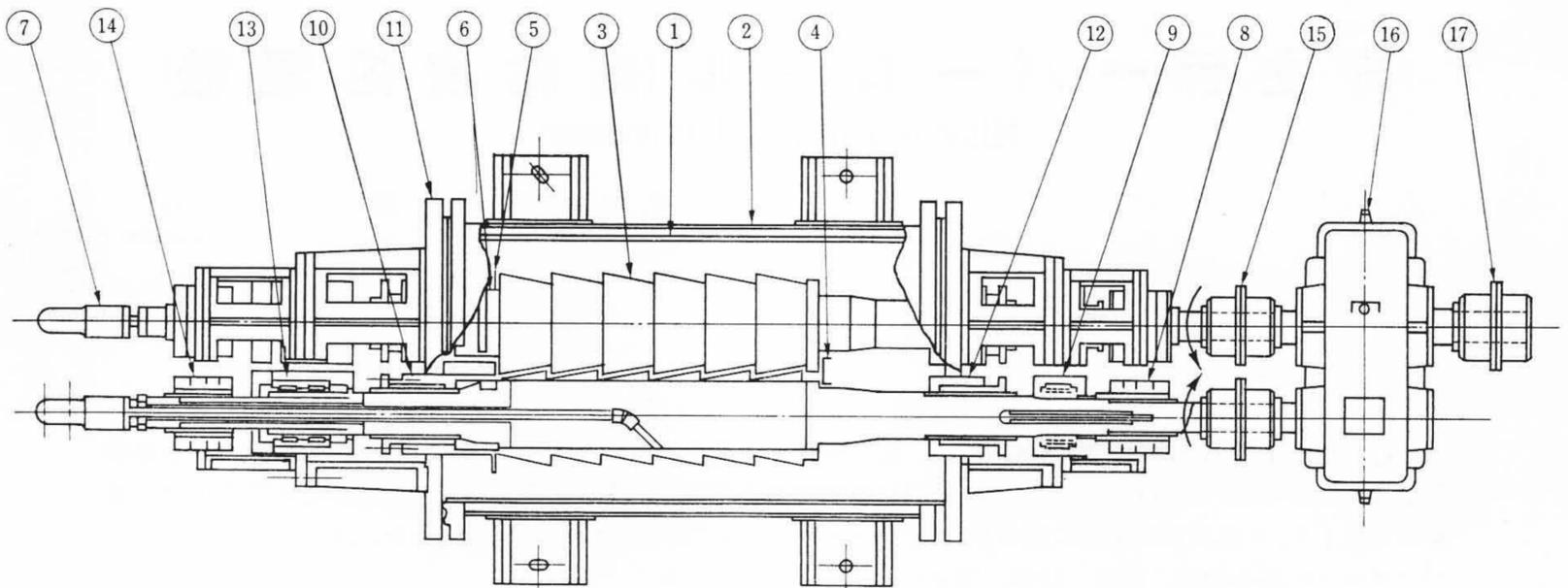
$$\bar{V} = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) = \frac{1}{2} \left[R_0(\omega_1 + \omega_2) + \alpha(\omega_1 - \omega_2) \left(z - \frac{L}{2} \right) \right] \quad \dots \dots \dots (1)$$

となり、 $d\bar{V}/dz = \alpha/2(\omega_1 - \omega_2)$ となって軸方向に平均周速が変化する。ロール上に粘性物質を供給すると、ロール表面にロールすき間 S の約半分の厚さの膜が形成され、同時に2本のロールが構成するV形みぞに液が停滞する。この停滞液はロールよりせん断力 τ_1 、 τ_2 を受け圧力が発生する。 $\tau_1 = \mu V_1 \beta(y)$ 、 $\tau_2 = \mu V_2 \beta(y)$ ($\beta(y)$ はロール形状、停滞液深をパラメータとする y の関数) と考えられるから発生する圧力は

$$p \doteq -\frac{1}{b} \int_0^y (\tau_1 + \tau_2) dy + \frac{p_0}{S} = -\frac{2\mu\bar{V}}{b} \int_0^y \beta(y) dy + \frac{p_0}{S} \quad \dots \dots \dots (2)$$

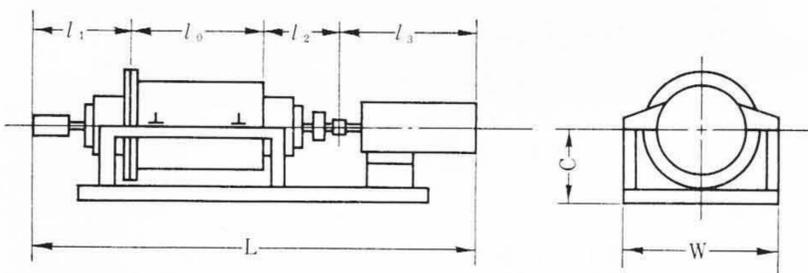
となって平均周速度に比例する。したがってロール間の保持液深が等しい場合にも軸に沿って圧力こう配が生ずる。この圧力こう配が液を移動させる原動力となる。ロール表面に付着した液膜は停滞液と混合して表面更新を行なう。実際のテーパロールは図8に示す多段の構造となるので、段数を多くすることによって混合特性は押出流れに近づく。

テーパロールの停滞液量、消費動力の表示式を求めるため、流動方程式の近似解を求めた。図6に示すように、 x 、 y 、 z 座標を定



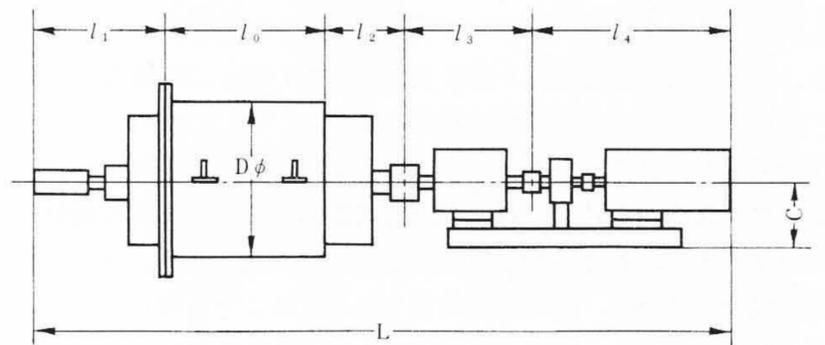
- | | | |
|-------------|-------------------|--------------|
| ① 本体 | ⑦ ロータリープレッシャジョイント | ⑫ グランドパッキング |
| ② ジャケット | ⑧ 冷却スインツ | ⑬ ベアリング(2) |
| ③ テーパーロール | ⑨ ベアリング(1) | ⑭ 冷却スインツ |
| ④ カキトリ | ⑩ グランドパッキング | ⑮ ギヤカップリング |
| ⑤ 逆流どめ板 | ⑪ 本体カバー | ⑯ 2軸駆動ギヤボックス |
| ⑥ 逆流どめスクリュウ | | ⑰ ギヤカップリング |

図2 テーパーロール構造図



| 項目 | 形式 | l_0 | l_1 | l_2 | l_3 | L | C | W |
|----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| 1 | TP-160 | 750 | 800 | 750 | 1,100 | 3,400 | 400 | 850 |
| 2 | TP-250 | 1,200 | 1,000 | 1,100 | 1,400 | 4,700 | 700 | 1,050 |

図3 A形テーパーロールの概略寸法図



| 項番 | 形式 | l_0 | l_1 | l_2 | l_3 | l_4 | L | C | D |
|----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-----|-------|
| 1 | TP-250 | 1,200 | 1,000 | 750 | 1,000 | 1,120 | 5,070 | 450 | 800 |
| 2 | TP-400 | 1,900 | 1,200 | 950 | 1,200 | 1,330 | 6,580 | 700 | 1,100 |
| 3 | TP-630 | 3,100 | 1,450 | 1,200 | 1,300 | 1,550 | 8,600 | 800 | 1,500 |
| 4 | TP-1000 | 5,000 | 1,800 | 1,600 | 1,400 | 1,820 | 11,620 | 900 | 2,200 |

図4 B形テーパーロールの概略寸法図

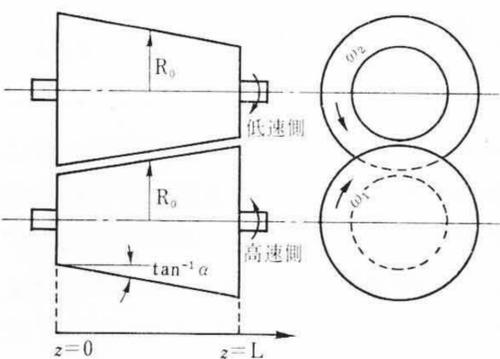


図5 テーパーロール高粘度処理装置の概念図

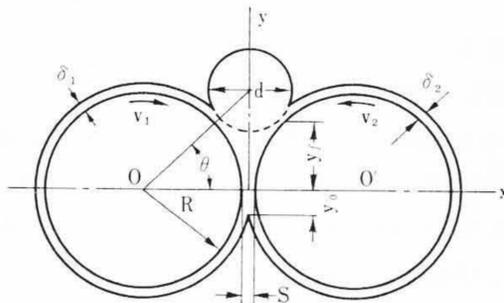


図6 ロール上に停滞する液の形状

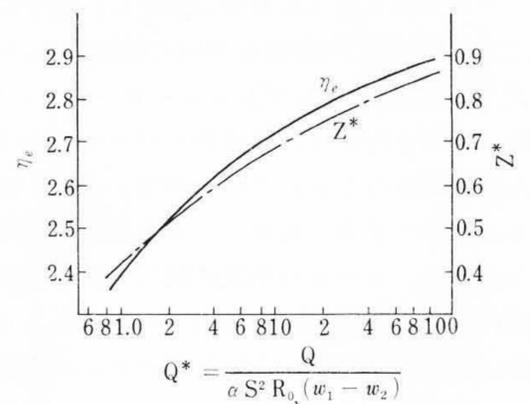


図7 テーパーロール設計図表

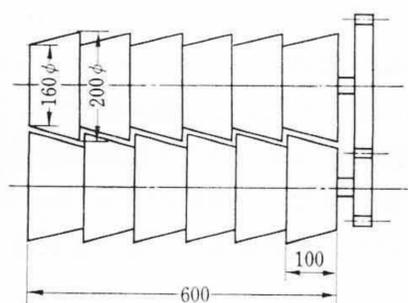


図8 実験装置の概略図

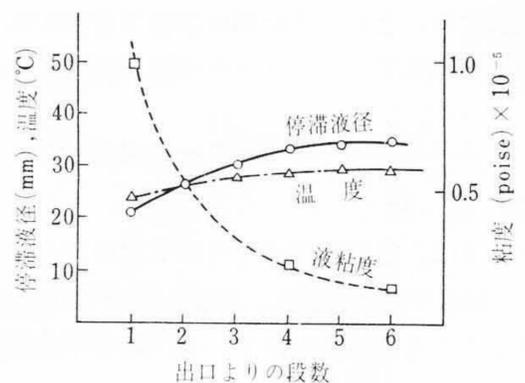


図9 蒸発実験の際の流動特性

め、さらに (x, y) を双極座標系 (ξ, η) に変換する。すなわち

$$x = \frac{a \sinh \xi}{\cosh \xi + \cos \eta}, \quad y = \frac{a \sin \eta}{\cosh \xi + \cos \eta}, \quad a \doteq \sqrt{R_0 S} \quad \dots (3)$$

とする。ロール表面は $\xi = \xi_1, \xi = -\xi_2$ で与えられる。 $\xi \ll 1$ の場合には Navier-Stokes 式は簡略化されて次式となる。

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} = \frac{\mu}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\mu}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \quad \dots (5)$$

ただし、 $g = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi}\right)^2}$

停滞液の二つの自由表面が $\eta = \eta_1$ (上面)、 $\eta = -\eta_0$ (下面) で与えられると考え、与えられた境界条件のもとで(4)式を積分すると

$$p = \int_{-\eta_0}^{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} d\eta = p(\eta) - p(\eta_0) \quad \dots (6)$$

なる解が得られ、 η_1, η_0 との関係が定まる。(4)式に(6)式を代入すると η 方向の速度 $v(\eta)$ あるいは消費動力 Z が η_1 の関数として与えられる。次に(5)式に(6)式を代入し積分を行なうと η_1 に関する次の形の定微分方程式が導かれる。

$$\frac{d\eta_1}{d\zeta} = J_2(\eta_1) \{Q^* - J_1(\eta_1)\}, \quad \text{ただし } \zeta = \frac{Z}{L^*} \quad \dots (7)$$

ここで Z は出口端を原点としたロール軸方向の距離を表わす。また J_1, J_2 は η_1 に関する正の関数である。 $Z \rightarrow \infty$ のとき(7)式の解 η_1 は $Q^* - J_1(\eta_1) = 0$ の根 η_e に収束する。換言すればロール長さがじゅうぶん大きければ入口における停滞液深 η_1 は、ロール形状および流量によって定まる定数 η_e に近づく。図7は無次元流量 Q^* と η_e および無次元動力 Z^* の関係を計算した結果を示している。なお自由表面の接触角 θ_e は次式により算出される。

$$\sin \theta_e \doteq \frac{\sqrt{S/R_0} \sin \eta_e}{1 + \cos \eta_e} \quad \dots (8)$$

テーパーロールの流動特性の確認のため図8に示す6段の装置を製作し、粘度300~20,000ポイズの水飴(あめ)を用いて流動実験を行なった。ロールすき間1~2mm, 回転数比1/2~1/4, 低速ロール回転数12~36rpm, 流量4~2.5kg/hの範囲で実験した。

ロール間に停滞する液の自由表面の形状は図6に描いたようにロールに外接する円に近い。二つのロールに付着する液の膜厚比はほぼ回転数比の平方根に近い。膜厚の和とすき間の比は1.15~1.2であり理論値 $(\delta_1 + \delta_2)/S = 2/(1 + \cos \eta_0)$ に近い。液流量を増加させると保持液量が増す。また乾燥空気の流れ中で水飴の流動実験を行なうと水分が蒸発し、出口に向かって上昇する粘度こう配が生ずる。図9はこの場合の実測結果の一例を示したものである。粘度こう配が存在しても液の送りは可能である。

図10は入口段(出口側より6段目)における停滞液の接触角の実測値と $\eta_1 = \eta_e$ と仮定して求めた接触角の計算値との比較を行なったものである。接触角は操作変量(流量, すき間, 回転数比)を変えて測定したが、これらの実測値とよく一致している。図11は動力の実測値と計算値の比較を行なったものであるが、良好な相関が認められる。なお、計算に当たっては、ほぼ平均粘度に近いと思われる出口より3段目の液の粘度を用いた。

3.2 蒸発特性

テーパーロールで高粘度物質を処理した場合の揮発成分の蒸発特性を調べるため、図8に示した実験装置を用い水飴中の水分の蒸発実験を行なった。すなわち水飴にあらかじめ水を加えて、含水率を22~23%に調製したものをフィードタンクに入れ、所定の流量で図8に示した装置の6段ロールに供給した。ロールを所定の回転数で駆動し、これに乾燥空気(湿度=2.6V%)を流し、ロール表面の水飴

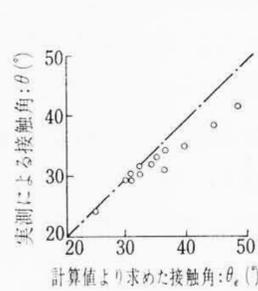


図10 停滞液量の実測値と計算値の比較

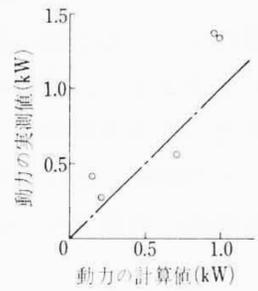


図11 消費動力の実測値と計算値の比較

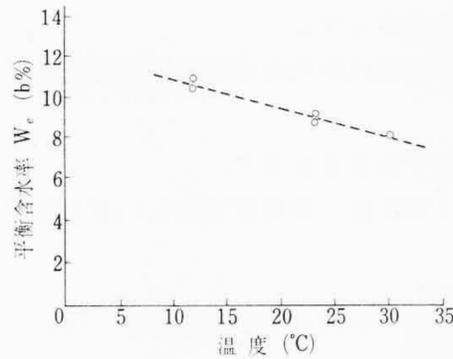


図12 水飴の平衡含水率 (気圧=1 atm, 湿度=2.6V%)

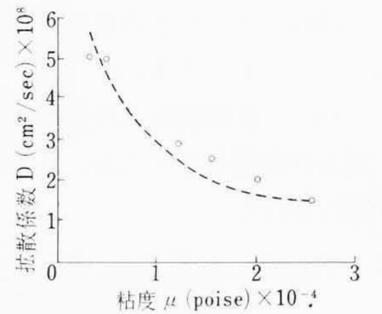


図13 水飴中の水分拡散係数 (温度 23°C)

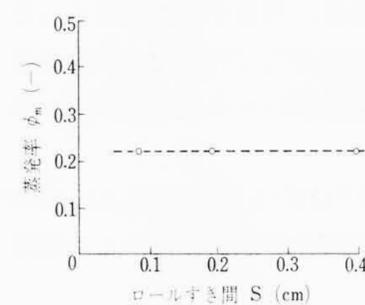


図14 ロールすき間と蒸発率の関係

{

 ロール平均回転数=24 rpm

 流量=1.8g/s

 平均粘度=7×10³ poise

 蒸発率表示=1段ロール

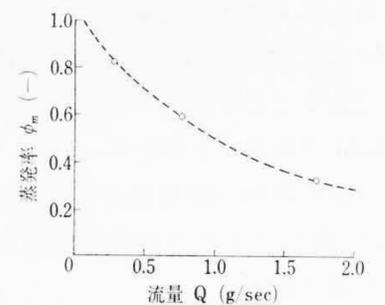


図15 流量と蒸発率の関係

{

 ロール平均回転数=48 rpm

 ロールすき間=0.185 cm

 平均粘度=7.5×10³ poise

 蒸発率表示=1段ロール

の薄膜より水分を蒸発させた。ロール入口、出口の水飴の含水率変化はカルフッシャー法により測定した。テーパーロールの蒸発特性を求める場合、被処理物中の揮発成分の平衡濃度、拡散係数をあらかじめ知る必要がある。そこで水飴につき実験条件下における平衡含水率、拡散係数を実験により求めた。その結果を図12, 13に示す。平衡含水率は直径70mmのシャーレに水飴を約2mmの厚さに充てんし所定の温度、湿度、圧力下で数日間放置し重量変化のなくなったときの含水率を平衡含水率とした。また拡散係数は同様な方法により一定時間後の水分蒸発量を測定し下記の式により算出した。蒸発率 ϕ を $\phi = (W_0 - W)/(W_0 - W_e)$ で定義すると放置時間 t と ϕ の関係は(9)式で表わされる。

$$\phi = 1 - 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+1/2)^2 \pi^2} \exp\left[-\left(i - \frac{1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2 D t}{\delta^2}\right] \quad \dots (9)$$

ここに W_0 は処理前含水率、 W は処理後含水率、 W_e は平衡含水率である。また D は拡散係数、 δ は被処理物のロール表面の膜厚を表わす。したがって実験により放置時間 t とそのときの含水率 W を測定すれば(9)式により拡散係数 D が求まる。

次にテーパーロールによる水飴の水分蒸発実験結果につき述べる。まずほかの条件を一定にしロールすき間のみ変えた場合の蒸発率変化を示すと図14になる。図14より蒸発率はこのすき間範囲では一定であることがわかる。流量と蒸発率の関係を図15に示す。流量と蒸発率はほぼ反比例の関係にあることがわかる。

テーパーロールにおける揮発成分の蒸発機構を明らかにし、蒸発量を数量化するため下記の蒸発モデルを考えた。ロール上の被処理物は図6に示すように、左右の回転ロール表面に一定のかたさの膜と、V形のみぞにまゆ玉状のホールドアップを形成する。膜状の被処理物はロールの回転ごとにまゆ玉付近で混合し、再び混合する間に揮発成分を外部に放出する。いま解析を容易にするため下記の仮定をおく。

- (i) 高速、低速の左右ロール上の被処理物の挙動は同一とする。
- (ii) まゆ玉からの蒸発は膜からの蒸発に比べ小さいので無視する。
- (iii) まゆ玉部での混合は完全混合とする。
- (iv) ロール上の被処理物の物性値は中央段の物性値で代表できるとする。
- (v) 被処理物の外気側表面は平衡濃度を示す。

以上のモデルを考えると、ロール1回転後の蒸発率 ϕ_1 は、(10)式で表わされる。

$$\phi_1 = 1 - 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+1/2)^2 \pi^2} \exp[-(i+1/2)^2 \pi^2 D t_0 / \delta^2] \dots (10)$$

ここに t_0 はロール1回転の時間である。

n 回転後の蒸発率 ϕ_n は(11)式で表わされる。

$$\phi_n = 1 - \exp(-\epsilon \phi_1 n) \quad (n \geq 2) \dots (11)$$

ここに ϵ は表面更新度であり、 $\epsilon=0$ の場合は表面が全然更新されないことを意味し、 $\epsilon=1$ の場合は膜のまゆ玉付近での混合が完全混合であることを意味する。水飴の蒸発実験結果からは表面更新度 ϵ は0.33であることがわかった。

被処理物の揮発成分の拡散係数が $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度に小さい場合は(数千ポイズの高粘度物質中での揮発成分の拡散係数はこの程度の値である)

$$\phi_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D t_0}{\delta^2}}$$

で近似できるから、蒸発率が低い範囲では(11)式は近似的に(12)式で表わされる。

$$\phi_n = \frac{2 \epsilon n t_0}{\sqrt{\pi} \delta} \sqrt{D N} \dots (12)$$

ここに N はロールの回転数を表わす。

さらに停滞時間 $n t_0$ は $n t_0 = A \delta \rho / Q$ の関係があるから、(12)式は

$$\phi_n = \frac{A \rho \epsilon}{Q} \sqrt{D N} \dots (13)$$

(13)式で表わされる。(13)式より蒸発率 ϕ_n は流量 Q に反比例し、ロールすき間 S には無関係であることがわかる。この結果は先に述べた、テーパーロールにおける水飴の蒸発特性とよく一致し、テーパーロールにおける蒸発機構がここで述べた蒸発モデルに近いと考えられる。

以上テーパーロールの流動特性、蒸発特性につき述べた。本報告では特に水飴を用いた実験結果につき述べたが、ほかの有機高分子溶液においても、またロール径を変えた装置においても同様の特性であることをほかの実験で確かめた。

したがってテーパーロールのスケールアップにおいては、駆動動力、液ホールドアップ、処理面積、蒸発率などに関し上記の特性式が利用できる。さらにテーパーロールを設計する場合、ロール径、ロール回転数の組合せの選び方で装置コストが大きく変わる場合がある。この場合の最適計算にはここで求めた特性式が有効に使用できる。

4. 用途

日立テーパーロールは、次のような各種高粘度物質の連続処理に

使用可能である。

(1) 高粘度物質の反応

特に、揮発分を除去することにより反応が進む種類の高粘度物質の連続反応装置として利用できる。反応により液の粘度が著しく変わるような場合でも、本機はホールドアップが安定しており、問題なく特性を発揮する。たとえば、ナイロン・ポリカーボネートなどの縮重合反応機として利用できる。

(2) 高粘度物質の濃縮

高粘度物質中に含まれる揮発分を除去する操作、たとえばポリ酢酸ビニルなどの最終乾燥工程に利用できる。

(3) 高粘度物質の均質混練

高粘度物質を連続的に均質に混練することができ、混練過程では、任意に溶剤、触媒添加などの操作が可能である。

(4) 高粘度物質に微細固体が含有されているものの処理

固体のみの処理は不可能であるが、流動性のある高粘度物質中に、ある程度の微細固体が含有されているような液の攪拌(かくはん)混合などの処理に使用できる。

5. 結 言

日立テーパーロールについて、基本的な特性および設計仕様、構造について記述したが、結論として

- (1) 日立テーパーロールは、常に表面更新された薄膜を形成するので、高粘度物質からの揮発成分を除去する機械としてあるいは反応機として適切である。また使用粘度範囲は数百ポイズから数万ポイズまで非常に広い。さらに混合が非常に良いので混練機としても使用できる。
- (2) このテーパーロールの流動特性につき実験検討した結果、停滞液量、消費動力について求めた理論式により、実験結果をうまく説明できた。また蒸発特性についても水飴を用いた蒸発実験より、ロールすき間、流量と蒸発率の関係が明らかとなった。
- (3) 現在これらの特長を生かし具体的な用途を広げるため、実液テスト機を設備し、実液テストを行ない、プロセス設計のデータをは握できる体制を整えている。

記号説明

| | |
|--------------------------|--|
| A : ロール表面積 | α : ロールこう配 |
| b : ロール間のみぞ幅 | δ : ロール上の膜厚 |
| D : 揮発成分の拡散係数 | ϵ : 表面更新度 |
| n : ロールの総回転数 | ζ : Z/L^* |
| N : ロールの回転速度 | ρ : 液密度 |
| Q : 体積流量 | μ : 液粘度 |
| R_0 : ロール平均半径 | ω : 回転角速度 |
| S : ロールすき間 | $L^* = \frac{R_0(\omega_1 + \omega_2)}{\alpha(\omega_1 - \omega_2)}$ |
| t : 時間 | $Q^* = \frac{Q}{\alpha S^2 R_0(\omega_1 - \omega_2)}$ |
| t_0 : ロール1回転の時間 | $Z^* = \frac{\sqrt{S/R_0} \cdot Z}{6 \mu V R_0 L}$ |
| V : ロール周速度 | |
| v, w : η, z 方向の流速 | |
| W : 含水率 | |
| Z : 消費動力 | |

参考文献

- (1) 平塚, 蜂谷: C114 化学工学協会第34年会要旨集
- (2) R. C. Forney et al: C. E. P. 62, (3), 88 (1966)
- (3) Bird, R. B: "Transport phenomena" Wiley (1960)