精密ろ過膜による加工液のろ過* (第3報, 切りくずの大きさが膜透過流束に及ぼす影響)

佐藤 秀明^{*1}, 土井 雅博^{*1}
永山 晶久^{*2}, 笠原 英司^{*1}

Filtration of Machining Fluids by Microfiltration Membranes (3rd Report, Influence of Chip Size on Permeation Flux)

Hideaki SATO, Masahiro DOI,
Akihisa NAGAYAMA and Eiji KASAHARA

In the second report, the experimental and theoretical analyses of the cross-flow filtration of machining fluids were examined and the effect of turbulence promoter on the permeation flux was clarified. The result obtained was that the creation of turbulence on the membrane surface is one of the more effective ways to prevent the decrease in permeation flux. In this report, the influence of chip size on permeation flux is examined. Filtration of machining fluids is carried out with the machining fluids which contains three sizes of abrasive grains using the cross-flow filtration system that was developed as described in the second report. The steady permeation flux decreases with the decrease of the mean size of the abrasive grain because the cake layer resistance increases with the decrease in the mean size of the abrasive grain. At the same time, the calculation of permeation flux is carried out using the modified standard filtration model that was proposed in the second report. In the case of small-sized abrasive grains, the calculated results do not agree with the experimental results.

Key Words: Grinding, Abrasive Grain, Machining Fluids, Ceramics, Chip, Precision Machining, Chemical Engineering Equipment, Cross-Flow Filtration, Permeation Flux, Turbulence Promoter

1. 緒 論

近年, セラミックスが機械構造用材料として多く使用されており, それに伴い, セラミックスの精密研削技術に対する要求は厳しくなっている。しかし, セラミックスの切りくずは非磁性で微細な粒状であり, 比重も小さく, その除去が極めて困難であるため, 研削液中に切りくずが混入し, 加工面にスクラッチを発生させ, 研削仕上げ面粗さ精度の低下などを招くという問題が生じている。そこで, 佐藤はモデル研削実験により, セラミックスの研削仕上げ面粗さ精度の低下に及ぼす研削液中の切りくずの大きさおよび濃度について検討した⁽¹⁾。その結果, 切りくずの大きさに関係なく, 研削液に混入した切りくずが研削仕上げ面粗さ精度を劣化させることを確認した。

また, 研削加工と同様に, 半導体材料のダイシングマシンによる加工や, 放電加工においても, 加工液中に混入した切りくずは, 加工精度や加工能率に悪影響を及ぼす。

この問題を解決するため, 微細な切りくずを加工液中より効率よく除去する方法の開発は急務である。これまで, 加工液に関する研究として, 加工精度, 砥石寿命, 熱損傷などに対する, 加工液の作用や効果については, 深く追求され, その重要性は実験, 経験的に十分認識されている。しかし, この加工液の効果を最大限に発揮させるための, 加工液の供給, および切りくずの除去に関する研究は, 現在, 研削液の接触弧内への供給方法に関しては, いくつか報告^{(2)~(6)}されているが, 切りくずを加工液より除去するためのろ過に関する報告⁽⁷⁾⁽⁸⁾は少ない。この見地から, 著者らは前報⁽⁹⁾において, 精密ろ過膜を用いたクロスフロー方式のろ過装置を開発し, 実験条件と膜透過流束の関係について報告した。また, 処理液に乱れを与え, ケーク層の形成を防止することを目的として, 膜面上にタービュレンスプロモータ(乱流促進体)を設置し, それが, 膜透過流束に及ぼす影響についても検討した。

セラミックスの研削加工においては, 研削条件により, 生成される切りくずの大きさは一定ではなく, 分布を持つ⁽¹⁰⁾。加工液のろ過を行う場合, 加工液に含まれる切りくずの大きさは, ろ過効率に大きな影響を及ぼす因子のひとつである。このため, 本研究では, 加工液に含まれる切りくずの大きさが, 膜透過流束に及ぼ

* 原稿受付 平成5年11月4日。

^{*1} 正員, 武蔵工業大学工学部 (〒158 東京都世田谷区玉堤1-28-1)。

^{*2} 学生員, 武蔵工業大学大学院[現: オリンパス光学工業(株)]。

す影響を検討する。また、前報⁽⁹⁾で提案した膜透過モデルを用いて、膜透過流束の経時変化の過程を算出し、実験値と比較する。

2. 記 号

- a : 係数
 A : 膜面積 m^2
 b : 係数
 B : タービュレンスプロモータの高さ
 $\quad = (d_t - d)/2 \text{ m}$
 C : タービュレンスプロモータの閉そく率
 $\quad = 2B/D_m$
 C_b : 加工液のバルク濃度 g/L
 d : 流路の内側円筒の外径 m
 D : 流路の外側円筒の内径 m
 D_m : 時刻 $t=0$ における流路内径 $= D - d \text{ m}$
 d_p : 粒子径 m
 d_t : タービュレンスプロモータの外径 m
 $D(t)$: 時刻 t における流路内径 m
 D_∞ : 平衡状態における流路内径 m
 H : 時刻 $t=0$ における流路内径の $1/2 \text{ m}$
 J : 膜透過流束 $= V/AT \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 J_w : 純水の膜透過流束 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 J'_w : ケーク層を膜面から除去した後の純水の膜透過流束 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 J_∞ : 平衡状態における膜透過流束 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 L : 円筒形精密ろ過膜の長さ m
 M : 流路壁の影響を表すためのパラメータ⁽¹⁴⁾
 P : 膜間差圧 Pa
 Q : 循環流量 L/min
 R_c : ケーク層(膜面へ付着した層)の抵抗
 $\quad = R_T - P/J'_w \text{ Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/m}^3$
 $R_c(t)$: 時刻 t におけるケーク層の抵抗
 $\quad \text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/m}^3$
 Re : 時刻 $t=0$ におけるレイノルズ数
 $\quad = (\rho u_{B0} D_m)/\mu$
 $Re(t)$: 時刻 t におけるレイノルズ数
 $\quad = \{\rho u_B(t) D(t)\}/\mu$
 R_m : 膜自体の抵抗 $= P/J_w \text{ Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/m}^3$
 R_p : 膜細孔内への目づまり抵抗 $\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/m}^3$
 R_T : 膜の全透過抵抗 $\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/m}^3$
 t, T : 時刻 s
 u_{B0} : 時刻 $t=0$ における膜面平均流速 m/s
 $u_B(t)$: 時刻 t における膜面平均流速 m/s
 $u_{B\infty}$: 平衡状態における膜面平均流速 m/s
 V : 透過液量 m^3

- $V_L(t)$: 時刻 t におけるリフト速度 m/s
 $V_{L\infty}$: 平衡状態におけるリフト速度 m/s
 y : 指数
 $\dot{\gamma}_w$: ケーク層の表面近傍における流体のせん断速度 $1/\text{s}$
 $\delta_c(t)$: 時刻 t におけるケーク層の厚さ m
 $\delta_{c\infty}$: 平衡状態におけるケーク層の厚さ m
 ε : ケーク層の空げき率
 λ : 管摩擦係数
 μ : 流体の粘性係数 $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 ρ : 流体の密度 kg/m^3
 ρ_p : 粒子の密度 kg/m^3

3. 膜透過モデルの解析

膜の全透過抵抗 R_T は、膜自体の抵抗 R_m 、ケーク層の抵抗 R_c 、膜細孔内への目づまり抵抗 R_p の和として与えられるので⁽¹¹⁾、膜透過流束は、次式で表される。

$$J = P/(R_m + R_c + R_p) \dots\dots\dots (1)$$

本研究では、前報⁽⁹⁾と同様に、各抵抗のうち R_p は考慮せず、 R_T は、 R_m と R_c に支配されているとする膜透過モデルを設定し、解析を行った。すなわち、ケーク層の形成速度を考慮することにより、ケーク層の抵抗 R_c の時間変化 $R_c(t)$ を計算し、膜透過流束の経時変化を求める。

時刻 t における膜透過流束 J は、次式で与えられる。

$$J = \frac{P}{R_c(t) + R_m} \dots\dots\dots (2)$$

また、ケーク層の抵抗は、Kozeny-Carman 式⁽¹²⁾より、次式で与えられる。

$$R_c(t) = \frac{180(1-\varepsilon)^2 \delta_c(t) \mu}{d_p^2 \varepsilon^3} \dots\dots\dots (3)$$

Green-Belfort⁽¹²⁾ は、時刻 t におけるケーク層の厚み $\delta_c(t)$ を、粒子の主流への逆移動を意味するリフト速度 $V_L(t)$ を導入し、次式で表している。

$$\delta_c(t) = \frac{C_b}{\rho_p(1-\varepsilon)} \int_0^t \{J - V_L(t)\} dt \dots\dots\dots (4)$$

粒子の主流への逆移動が、ケーク層の表面近傍における流体のせん断速度 $\dot{\gamma}_w$ に比例したリフト効果によるものと仮定し、また加工液のバルク濃度 C_b の影響も考慮すると、 $V_L(t)$ は、次式のように表せる。

$$\begin{aligned}
 V_L(t) &= a C_b^y \dot{\gamma}_w + b \\
 &= a C_b^y \frac{\lambda}{\mu} \cdot \frac{\rho u_B^2(t)}{8} + b \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

ここで、 a, b, y は加工液の性質や流れの状態によって定まる係数である。

図1 ろ過装置本体の概略

流れが乱流の場合、摩擦係数 λ は Blasius の式より表されるので、 $V_L(t)$ は次式のように表せる。

$$V_L(t) = aC_b^y \left\{ \frac{u_B(t)}{D(t)} \right\} Re(t)^{3/4} + b \quad \dots\dots\dots (6)$$

ろ過時間の経過に伴い、膜透過流束が減少していき、平衡状態になった場合、ケーキ層の形成速度は零であるから、

$$\left\{ \frac{\delta_c(t)}{dt} \right\}_{t \rightarrow \infty} = \frac{C_b}{\rho_p(1-\varepsilon)} (J - V_L(t))|_{t \rightarrow \infty} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

すなわち、

$$J_\infty = V_{L\infty} \quad \dots\dots\dots (8)$$

膜透過流束が平衡状態になった場合、ケーキ層の厚さ $\delta_{c\infty}$ は、次式のように表せる。

$$\delta_{c\infty} = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2 \mu} \left(\frac{P}{J_\infty} - R_m \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

また、時刻 t において、流路内径 $D(t)$ はケーキ層の形成に伴い縮小し、膜面平均流速 $u_B(t)$ は時刻 $t=0$ における膜面平均流速 u_{B0} に対して増加しており次式のように表せる。

$$D(t) = D_m - 2\delta_c(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$u_B(t) = \left\{ \frac{D_m}{D_m - 2\delta_c(t)} \right\} u_{B0} \quad \dots\dots\dots (11)$$

膜透過流束の経時変化の計算方法は前報⁹⁾と同様である。

4. 実験装置および方法

4・1 実験装置 図1にろ過装置本体の概略を示す。本体は、透明アクリル樹脂製の外側円筒(内径 $D=130$ mm)および、その中心部に設置した円筒形の精密ろ過膜と、ろ過膜の両端を支持する内側円筒(外径 $d=70$ mm)より構成されている。使用した膜は、セルロース製の円筒形精密ろ過膜(孔径 $1 \mu\text{m}$ 、東洋濾紙株式会社製)¹³⁾である。その形状は、外径 $d=70$ mm、長さ $L=240$ mm、膜面積 $A=528 \text{ cm}^2$ である。透過液は、膜

図2 タービュレンスプロモータの取付状態

表面より円筒形のろ過膜の内部方向へ透過し、透過液室へ流入する。ろ過されない加工液は、外側円筒と内側円筒のすきまを膜面と平行に流れて循環する。

図2に示すように、流路内に設けたタービュレンスプロモータには、厚さ 1 mm の黄銅製の円盤を用いており、その取付けは、円筒形精密ろ過膜の上流側の端部に密着させ、取付角度は流れ方向に対して直角にした。タービュレンスプロモータの寸法は、外径 $d_t=88, 97, 100, 106, 112, 118 \text{ mm}$ の6種類である。これより、タービュレンスプロモータによる流路の閉そく率 C は、 $C=0.3, 0.45, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ となる。なお、本研究で用いた C には、既報¹⁴⁾で提案した流路壁の影響を表すパラメータ M を用いた。本研究の二重円筒形流路に配置された円盤の、流路壁の影響を表すパラメータ M の値を算出すると、 $M=2B/D_m$ となり、これを C として用いた。また、タービュレンスプロモータに流入する近寄り流れを整流し、発達した流れを生成するため、門ら¹⁵⁾の報告による方法で整流装置を設計し、流路の入口に設置した。

4・2 実験方法 図3に実験装置の概略を示す。加工液には、水に WA 砥粒(Al_2O_3 の微粉)を加えた液をモデル加工液として用いた。実験に使用した砥粒の粒

度は粒度番号#1500(平均粒径 $8\ \mu\text{m}$), #4000(同 $3\ \mu\text{m}$), #8000(同 $1.2\ \mu\text{m}$)の3種類である。これらは、別途に行った研削実験⁽¹⁾において研削仕上げ面粗さ精度に影響を及ぼす切りくずの大きさを調べ、さらに前述の切りくずの大きさの分布⁽¹⁰⁾も考慮した上で選択したものである。加工液のバルク濃度 C_b は、実用上の膜透過流束が得られる濃度を、各粒度ごとに3種類ずつ選択した。#1500の場合、 $C_b=6, 7.5, 9\ \text{g/L}$, #4000の場合、 $C_b=4.5, 6, 7.5\ \text{g/L}$, #8000の場合、 $C_b=3, 4.5, 6\ \text{g/L}$ である。液温は約 25°C とした。

実験は、ポンプで加工液をろ過装置本体に送り、バルブを調整することにより、一定の膜間差圧および循環流量に設定し、クロスフローろ過を行った。実験中は、供給する加工液の C_b を一定に保つために、ろ過装置本体より流出した加工液および透過液は、すべてフィードタンクへ戻した。膜透過流束 J は透過液量を重量法により測定し、算出した。

膜間差圧は $P=49.0\ \text{kPa}$ とし、圧力は精密ブルドン管式圧力計で測定した。循環流量は $Q=40\ \text{L/min}$ とし、流量は浮子式面積流量計で測定した。これより、時刻 $t=0$ における膜面平均流速は $u_{B0}=0.0707\ \text{m/s}$,

レイノルズ数は $Re \approx 4700$ となる。また、透過液の濃度の測定は分光光度計(島津製作所 UV-190)を用いて行った。

5. 実験結果および考察

5.1 純水の膜透過流束 実験に使用したろ過膜は、前報⁽⁹⁾で使用したものと同じであり、前報⁽⁹⁾の図5に示すように、 $P=49.0\ \text{kPa}$ において J_w は、 $2.76 \times 10^{-3}\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ である。

5.2 リフト速度 膜透過流束が平衡状態に達したあと膜面上を観察すると、膜面上にケーキ層が付着し、流路内径が縮小していることがわかった。そこで、実験で得られた平衡膜透過流束 J_∞ を用いて式(9)より、ケーキ層の厚み $\delta_{c\infty}$ を計算した。ケーキ層の空けき率は、杉本⁽¹⁶⁾による値を参考に $\epsilon=0.84$ とした。次に式(10), (11)において $t=\infty$ として、平衡状態における流路内径 D_∞ および膜面平均流速 $u_{B\infty}$ を計算し、その値を用いてリフト速度を与える式(6)の係数 a , b と指数 y を最小二乗法により求めた。図4は、粒度番号#1500, $C=0$ の場合におけるリフト速度を示す。また他の粒度番号、閉そく率についてもほぼ同様な傾向となった。本実験では流れが乱流であり、次の関係式を得た。

図3 実験装置概略

図4 リフト速度(閉そく率 $C=0$, 粒度番号#1500)

表1 式(12)の係数 a

C	#1500	#4000	#8000
0	2.17×10^{-5}	1.08×10^{-5}	3.87×10^{-6}
0.3	2.02×10^{-5}	1.03×10^{-5}	4.00×10^{-6}
0.45	1.84×10^{-5}	0.98×10^{-5}	4.03×10^{-6}
0.5	2.06×10^{-5}	1.06×10^{-5}	4.13×10^{-6}
0.6	1.95×10^{-5}	1.02×10^{-5}	4.09×10^{-6}
0.7	2.04×10^{-5}	1.05×10^{-5}	4.01×10^{-6}
0.8	2.05×10^{-5}	1.05×10^{-5}	3.94×10^{-6}

表2 式(12)の係数 b

C	#1500	#4000	#8000
0	-2.74×10^{-3}	-8.91×10^{-4}	-2.07×10^{-4}
0.3	-2.30×10^{-3}	-7.23×10^{-4}	-1.73×10^{-4}
0.45	-1.93×10^{-3}	-5.59×10^{-4}	-1.56×10^{-4}
0.5	-2.46×10^{-3}	-8.21×10^{-4}	-2.13×10^{-4}
0.6	-2.23×10^{-3}	-7.16×10^{-4}	-2.20×10^{-4}
0.7	-2.45×10^{-3}	-8.13×10^{-4}	-2.14×10^{-4}
0.8	-2.59×10^{-3}	-8.15×10^{-4}	-2.06×10^{-4}

$$V_{L\infty} = aC_b^{-0.57} \frac{u_{B\infty}}{D_{\infty}} Re^{0.75} + b \quad \dots\dots\dots (12)$$

表1, 2に実験より求めた係数 a , b の値を示す。

式(12)は, 本研究で用いた加工液に対するものであり, リフト速度が粒子径によって異なる⁽¹⁷⁾ ことより, 処理液や膜の性質に応じて式(12)に相当した関係式を求める必要があろう。

5.3 膜透過流束の経時変化 図5～7にタービュレンスプロモータを設置しないで, 粒度番号#1500, #4000 および#8000の砥粒を加えた加工液をろ過した場合の, 膜透過流束の経時変化を示す。パラメータは C_b である。

これより, いずれの砥粒の粒度番号, および濃度の場合にも, ろ過時間 T の増大に伴って J は減少していき, 一定の値に近づくようになる。 T の経過に伴う J の変化は, T が初期におけるほど大きく, この傾向は砥粒の粒径が小さい条件ほど表れている。また, 濃

度が高い条件ほど, J は減少する。粒度番号#1500 および#4000の場合は $T=60$ minにおいて, また#8000の場合は $T=80$ minにおいて J はほぼ一定の値となっている。また他の条件においても同様な結果が得られたので, 以後は, この J を平衡膜透過流束として使用した。

濃度が一定の場合($C_b=6.0$ g/L), 砥粒の粒径が小さい条件ほど, J が減少していく。これは式(3)より明らかのように, 砥粒の粒径が減少するほど, ケーク層の抵抗が増加していくためである。

図5～7の実線は, 実験と同一条件として膜透過流束の経時変化を計算した結果である。いずれの砥粒の粒度番号においても, 実線で示した計算結果は, 膜透過流束の経時変化の様子を定性的に表しているが, 計算値と実験値の差異は, 砥粒の粒径が小さい条件ほど大きくなっていく。この理由として以下に示すことが考えられる。砥粒の粒度番号が大きくなるにしたがい, すなわち砥粒の粒径が小さくなる条件ほど, 粒径の分布が平均粒径に対して小径側に広がっており, 均一粒径粒子からなる単分散粒子として見なせなくなる⁽¹⁸⁾。ところが, 本研究の膜透過モデルでは, 均一粒径粒子の充てん層の抵抗の計算に用いる, 式(3)にこの平均粒径を代入し, ケーク層の抵抗を計算している。式(3)より明らかのように, 砥粒の粒径が小さくなるほど, ケーク層の抵抗の値が大きくなる。計算においては, 実験に使用した砥粒の粒度分布は考慮しておらず, 平均粒径を用いて算出しているため, 実験におけるケーク層の抵抗の値よりも小さく計算されている。このため, 膜透過流束の計算値は実験値よりも大きくなっており, 砥粒の粒径が小さい条件ほど, 計算値と実験値の差異が大きくなったものと考えられる。

また, 本実験の範囲では, 透過液の吸光度は純水の吸光度とほぼ一致しており, これより見掛けの阻止

図5 膜透過流束の経時変化
(閉そく率 $C=0$, 粒度番号#1500)

図6 膜透過流束の経時変化
(閉そく率 $C=0$, 粒度番号#4000)

図7 膜透過流束の経時変化
(閉そく率 $C=0$, 粒度番号#8000)

率⁽⁹⁾はほぼ100%であった。

5.4 タービュレンスプロモータの閉そく率と膜透過流束の関係 図8~10は粒度番号#1500, #4000および#8000の砥粒を加えた加工液をろ過した場合の、タービュレンスプロモータの閉そく率 C と膜透過流束 J の関係を C_b をパラメータとして示す。ここで縦軸は実験値、計算値ともに定常状態における平衡膜透過流束 J_∞ である。

図8 閉そく率と膜透過流束の関係
(粒度番号#1500)

図9 閉そく率と膜透過流束の関係
(粒度番号#4000)

いずれの砥粒の粒度番号においても、特定の C において J は極大値を示すことがわかる。ここでは $C=0.45$ において J は極大値を示しているが、この傾向は前報⁽⁹⁾と同じである。既報⁽¹⁴⁾⁽¹⁹⁾において報告しているように、 C が大きくなると膜面上の乱れは大きくなり、ケーキ層が形成しにくくなるために⁽²⁰⁾, J が増加するものと考えられる。しかし、その反面、タービュレンスプロモータを設置した場合、流れに圧力損失が発生し、 C が大きくなるほど、膜面上に作用する圧力(静圧)は低下するため、 J は減少するものと考えられる。このように C が大きくなると、ケーキ層形成の抑制効果は増大するが、同時に膜面に作用する圧力(静圧)も低下するので、両者がつり合う C において J が極大値を示すものと考えられる。

また、実験を行った砥粒の粒度番号、 C_b の範囲では、いずれの C の場合にもタービュレンスプロモータを設置した場合のほうが、設置しない場合($C=0$)よりも J は増加している。また、砥粒の粒度番号が一定な場合、タービュレンスプロモータの効果が大きく表れる C_b が存在することがわかった。

実線は計算結果であるが、実験値に見られる傾向を定性的に表していると考えられる。

5.5 膜自体の抵抗、ケーキ層の抵抗および膜細孔内への目づまり抵抗 図11~13には、 $C_b=6.0$ g/L, 粒度番号#1500, #4000および#8000の砥粒を加えた加工液をろ過した場合の、タービュレンスプロモータの閉そく率 C と全透過抵抗 R_T に対する膜自体

図10 閉そく率と膜透過流束の関係
(粒度番号#8000)

図 11 閉そく率と R_m/R_T , R_c/R_T および R_p/R_T の関係(粒度番号# 1500, $C_b=6.0$ g/L)

図 13 閉そく率と R_m/R_T , R_c/R_T および R_p/R_T の関係(粒度番号# 8000, $C_b=6.0$ g/L)

図 12 閉そく率と R_m/R_T , R_c/R_T および R_p/R_T の関係(粒度番号# 4000, $C_b=6.0$ g/L)

図 14 砥粒の粒径と R_m/R_T , R_c/R_T および R_p/R_T の関係(閉そく率 $C=0$, $C_b=6.0$ g/L)

の抵抗 R_m 、ケーキ層の抵抗 R_c および膜細孔内への目づまり抵抗 R_p それぞれの比率を示す。各抵抗の成分は、平衡状態において膜面を洗浄し、ケーキ層を除去した後の純水の膜透過流束 J_w を測定することにより算出した。

これより、前報⁽⁹⁾と同様に、 C_b , C に関係なく、 R_p/R_T はほとんど零である。これは、膜細孔内への目づまり抵抗は無視でき、膜の全透過抵抗 R_T は、膜自体の抵抗 R_m とケーキ層の抵抗 R_c に支配されていることがわかる。これより、3章で述べた膜透過モデルの設定はほぼ妥当であることがわかる。

図 14 は、 $C=0$, $C_b=6.0$ g/L, 粒度番号 # 1500, # 4000 および # 8000 の砥粒を加えた加工液をろ過した場合、砥粒の粒径と、 R_m/R_T , R_c/R_T および R_p/R_T の関係を示す。図 11~14 より、砥粒の粒度番号が小さい場合、すなわち砥粒の粒径が大きい条件ほど、 C に関係なく、 R_m/R_T は R_c/R_T より大きな値を示しているが、砥粒の粒度番号が大きい場合、すなわち砥粒の

粒径が小さい条件ほど、 C に関係なく、 R_m/R_T は減少し、反対に R_c/R_T は増加していき、 R_c/R_T は R_m/R_T より大きい値を示すようになる。これより、砥粒の粒径が小さい条件では、全透過抵抗に対するケーキ層の抵抗の割合が増加していくことがわかる。

6. 結 言

微細な切りくずを含む加工液のろ過効率向上のための基礎研究として、セルロース製の精密ろ過膜を用いて、加工液のクロスフローろ過を行い、実験条件が膜透過流束に及ぼす影響について検討した。本報では加工液に含まれる切りくずの大きさが膜透過流束に及ぼす影響について検討し、加工液のろ過装置の設計に必要な基礎資料として、次の結論を得た。

(1) 粒度番号の異なる砥粒を加えた加工液をろ過した場合、膜透過流束の経時変化を明らかにした。本研究の範囲では、濃度が一定の場合、砥粒の粒度番号が大きくなるにしたがい、すなわち砥粒の粒径が小

さくなるほど、膜透過流束は減少する。また、時刻の経過に伴う膜透過流束の変化は、時刻が初期におけるほど大きく、この傾向は、砥粒の粒度番号が大きくなるほど顕著に表れる。

(2) 砥粒の粒度番号が大きくなるほど、すなわち砥粒の粒径が小さくなるほど、計算値と実験値の差異は大きくなる。本実験の範囲では、全透過抵抗に対する膜細孔内への目づまり抵抗の割合がほとんど零に近いことより、膜透過モデルの設定はほぼ妥当であると考えられるため、その原因は、砥粒の粒度番号が大きくなるほど、均一粒径粒子からなる単分散粒子として見なせなくなるためと考えられる。

(3) 砥粒の粒度番号、バルク濃度に関係なく、タービュレンスプロモータを設置した場合、その効果が認められ、膜透過流束は増大した。また、砥粒の粒度番号が一定な場合、タービュレンスプロモータの効果が大きく表れるバルク濃度が存在することが明らかになった。

(4) 粒度番号の大きい砥粒ほど、すなわち砥粒の粒径が小さくなるほど、全透過抵抗に対するケーキ層の抵抗の割合が増加していく。

本研究の結果、タービュレンスプロモータを用いて処理液に乱れを与える方法は、精密ろ過膜を用いて大きさの異なる切りくずを含む加工液をクロスフローろ過する場合のろ過効率向上に有効である。また、本実験の場合、砥粒の粒度番号に関係なく、膜細孔内への目づまり抵抗はほとんど零であり、この場合、ケーキ層を除去すれば、膜の再利用に有効であると考えられる。

終わりに、本研究に対し、終始ご指導、ご協力いた

だいた、慶應義塾大学理工学部 機械工学科 稲崎一郎教授、砥粒加工学会 砥石ラッピング専門委員会委員各位、武蔵工業大学工学部 土木工学科 綾日出教授、機械工学科 安味貞正教授、経営工学科 藤田実講師、機械工場技術職員各位、静岡県静岡工業技術センター 食品・化学技術部 松本豊主任研究員、クレノートン株式会社関係各位、および当時の卒研、現在カルソニック株式会社、本橋季之氏に深く謝意を表す。

文 献

- (1) 佐藤, 砥粒加工学会 砥石ラッピング専門委員会第14回講演会資料, (1993-10), 61.
- (2) 綱沢・青山・稲崎・米津, 精密機械, 48-11(1982), 1526.
- (3) 綱沢・青山(英)・青山(藤)・稲崎, 精密機械, 50-7(1984), 1075.
- (4) 後藤・柴田, 精密機械, 50-9(1984), 1494.
- (5) 穂山・柴田・米津, 精密機械, 51-7(1985), 1453.
- (6) 松井・庄司・厨川, 精密機械, 49-6(1983), 772.
- (7) 三橋・江田・貴志・小宅・富田, 精密工学会誌, 53-7(1987), 1128.
- (8) 鈴木・赤司, 砥粒加工学会誌, 33-2(1989), 14.
- (9) 佐藤・土井・永山・笠原, 機論, 59-558, B(1993), 433.
- (10) 新井, 機械技術, 36-12(1988), 53.
- (11) 松本・中尾・木村, 化学工学論文集, 13-1(1987), 100.
- (12) Green, G. and Belfort, G., *Desalination*, 35(1980), 129.
- (13) ADVANTEC 総合カタログ, 46(1989), 136.
- (14) 川嶋・笠原・佐藤, 機論, 54-500, B(1988), 812.
- (15) 門・藤原・細川・森川, 機論, 52-477, B(1986), 2094.
- (16) 杉本, 汙過のメカニズム, (1985), 161, 地人書館.
- (17) Segre, G. and Silberberg, A., *J. Fluid Mech.*, 14(1962), 115.
- (18) (株)フジインコーポレーテッド, 技術資料.
- (19) 川嶋・佐藤・笠原, 機論, 54-507, B(1988), 3022.
- (20) 日本膜学会編, 膜技術の基礎, (1983), 53, 喜多見書房.