

# 泥状金属粉末の圧密固化に関する研究

神奈川工科大学工学部機械工学科  
教授 水沼 晋  
(平成 14 年度研究助成 AF-2002006)

キーワード：研削スラッジ，固液分離，スクリー式加圧装置

## 1. 研究の背景と目的

精密加工分野で工場から排出される研削スラッジは、微細な研磨くずに研削液を含んだ泥状物質である。これまで産業廃棄物として埋め立て処理されることが多かったが、研削スラッジに含まれる金属成分と研削液を固液分離して再利用する技術が検討されるようになってきた<sup>1)~2)</sup>。2000年代に入ってからにはベアリングの研磨工程で排出される研削スラッジのリサイクル技術の実用化も行われている<sup>3)</sup>。この技術では凝固剤などを使用せずに圧搾して研削スラッジの固液分離を実現している。しかしながら、この加圧式ろ過装置はパッチ式のため生産性が必ずしも高いとはいえない。また、比較的大型で高価である。そこで筆者らは機械メーカーのニコテック社と共同で、簡易な構造で連続圧搾が可能なスクリー式加圧装置による研削スラッジの固液分離を試みた。

本研究では、

- (1) 金型圧縮による固液分離機構の解明
- (2) スクリー式加圧装置による最適分離条件の把握
- (3) スクリー式加圧装置の基本設備仕様の決定

を目的として共同研究を行った。

## 2. 研削スラッジ金属粒子の諸特性

まず、研削スラッジ中の金属粒子がどのような特性を有しているか調査を行った。以後の議論では研削スラッジ中の金属粒子を単にスラッジと呼ぶことにする。

### 2.1 粒子形状

目視では粉末の集合体のように見え(図1)、手に触れた感触は繊維のように柔らかであるが、拡大してみると切削切りくずのような形状をしている(図2)。本研究では工具鋼を平面研削盤で加工した際に生じた研削スラッジを用いた。

### 2.2 粒度分布

まず電磁振動ふるい器を使用して粒度分布を調査した。



図1 スラッジ外観

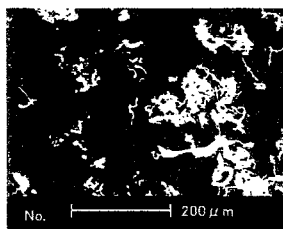


図2 スラッジSEM像

しかし、非常に細長い繊維状粒子がすぐに絡まりあつて団子状になってしまうため、振動ふるい器での分離は困難と判断した。そこで、シャーレ上に分散させたスラッジの長さを顕微鏡で測長することにした。図3に投影最大長さから粒度分布を求めた結果を示すが、8割程度が75μm以下の粒子であることがわかる。

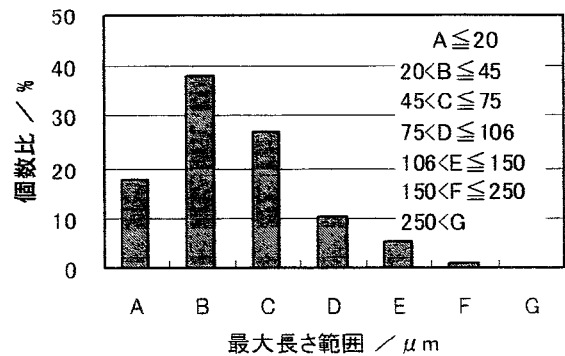


図3 粒度分布(サンプル数約 500)

### 2.3 圧縮特性

断面直径 12mm のダイスにスラッジを充填し、1mm/min の一定速度で100MPaまで単軸圧縮したときの成形圧力と高さ減少率の関係を図4に示す。参考として、アルミニウム粉末(-140/+200メッシュ)および電解鉄粉(-200メッシュ)の結果も示した。スラッジの高さ減少率は僅かな成形圧力で急激に大きくなり、100MPaでは電解鉄粉のおよそ3倍になっている。

さらに、100MPaで圧縮中のスラッジブリケット高さを基準として、除荷した場合のダイス内での高さおよび

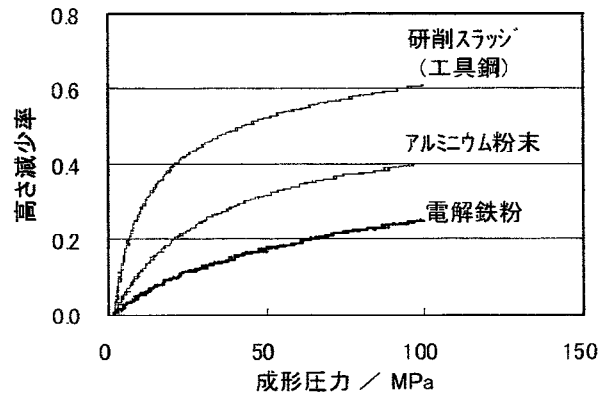


図4 成形圧力と高さ減少率(重量 2g)

離型後の高さの増加割合を求めたのが図5である。アルミニウム粉末はほとんど弾性回復していないが、スラッジは除荷時で約12%、離型時で50%以上の弾性回復をしていることがわかる。なお、電解鉄粉は離型時に破碎してしまったためブリケット高さは計測できなかった。

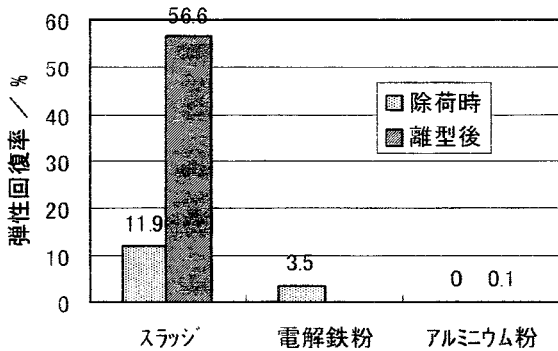


図5 弾性回復率

### 3. 金型圧縮による研削スラッジの固液分離

#### 3.1 実験方法

図6のように、鉄板製プレートに孔をあけたスクリーンとステンレス製メッシュ式フィルタを円筒状金型内に設置して実験を行った。スラッジは脱脂・乾燥後、分級せずに水と混合したものを利用した。

#### 3.2 スクリーン孔形状と配置

スクリーンプレートの孔の大きさや配置は、図7および表1に示す条件で含水スラッジの圧縮、脱液を行い、最も相対密度が高く、孔の目詰まりも生じにくかったbパターンのNo.4に決定した。このパターンは、

孔数が多く孔径は小さい

ため、孔総面積を小さくせずに孔上のフィルタに加わる力を分散し、フィルタの破断やスラッジの抜け落ちを防いでいると考えられる。

#### 3.3 フィルタ目開き量および圧縮速度の影響

フィルタ目開き量および圧縮速度を変化させて圧搾したときのスラッジブリケットの含水率を図8に示す。含水率はブリケットを120℃で真空乾燥して、乾燥前後の重量の差から求めた。フィルタ目開き量が小さいほど含水率は小さくなったが、その差は45~300μmの範囲で平均3%程度と小さかった。また、今回の実験範囲内(1~20mm/min)では圧縮速度が含水率におよぼす影響はほとんどみられなかった。

フィルタの目開き量を大きくした場合、スラッジ粒子の流出量が問題になる可能性がある。図9は図8の実験時に流出したスラッジの割合を充填量を基準にして求めたものであるが、目開き量300μmでやや多く約1.6%であるが、212μm以下ではほとんど同程度であり平均0.6~0.8%と小さくなっている。実際には、圧搾を繰り返すうちにフィルタに付着するスラッジが増加し、付着スラッジがフィルタの働きをするため流出量はさらに減少す

ると考えられる。

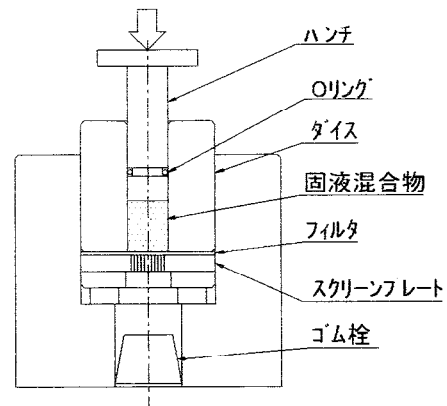


図6 固液分離用金型

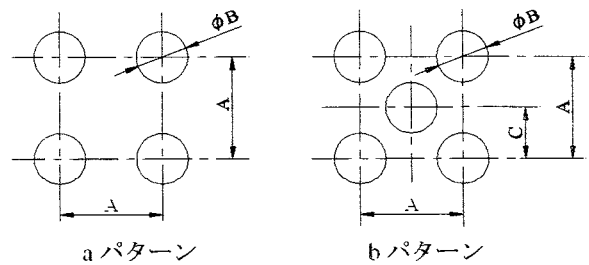


図7 スクリーン孔の形状と配置

表1 試験条件

| No | A(mm) | B(mm) | C(mm) | パターン |
|----|-------|-------|-------|------|
| 1  | 2     | 1     | —     | a    |
| 2  | 2.5   | 1.5   | —     | a    |
| 3  | 3     | 2     | —     | a    |
| 4  | 2     | 1     | 1     | b    |

#### 3.4 圧縮圧力の影響

図10は圧縮圧力が含水率におよぼす影響を調べたものである。圧縮の進行とともに金属粒子の加工硬化の影響が大きくなり、脱液効果は小さくなると考えられるが、200MPaを超えた付近から含水率は飽和する傾向がみられる。

### 4. スクリュー式加圧装置による研削スラッジの固液分離

#### 4.1 試作加圧装置

図11に試作したスクリー式加圧装置の概略図を示す。投入口2より投入したスラッジは、ギアードモータ1により駆動されたスクリー3で搬送され、排出部加圧ブロック5との間で圧縮・脱液される。廃液は円筒状スクリーン4から、スラッジは圧縮力が油圧シリンダ6により設定した荷重値を超えると加圧ブロックが開いて排出される。スラッジ搬送、排出中のスクリー軸推力を

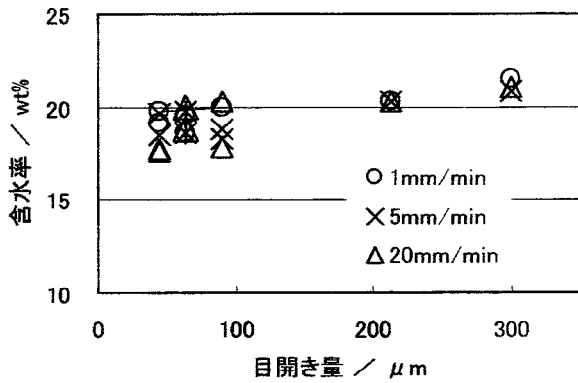


図8 目開き量と圧縮速度の影響(100MPa)

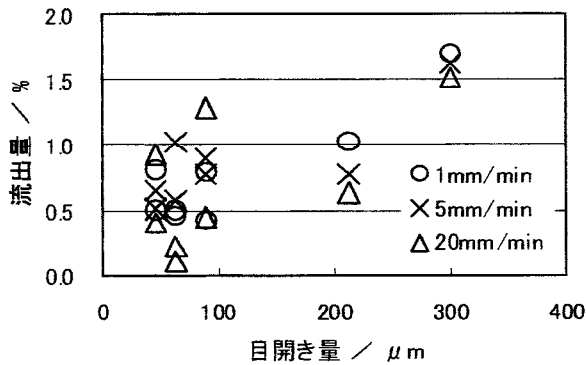


図9 流出量

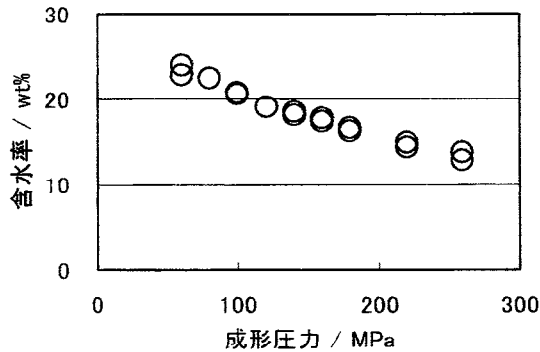


図10 成形圧力の影響(圧縮速度 1mm/min)

計測するために、軸端部にロードセル7を設置している。

#### 4・2 排出部圧力の影響

油圧シリンダの油圧を調整することにより排出側油圧力を変化させ、排出側圧縮圧力が軸推力およびスラッジ含水率におよぼす影響を調査した。

図12はスラッジ投入から排出終了までの軸推力を測定した結果である。図中の破線①～④は排出側油圧力を示している。投入したスラッジが排出側に一定量以上搬送されると、荷重は一気に上昇し排出直前に最大になる。スラッジが排出され始めるとほぼ一定になり搬送が終了すると減少する。しかし、一部のスラッジは加圧ブロックとスクリー軸端部間にはさまれたまま残るため荷重は0にはならない。油圧力が大きくなるにつれて、スラ

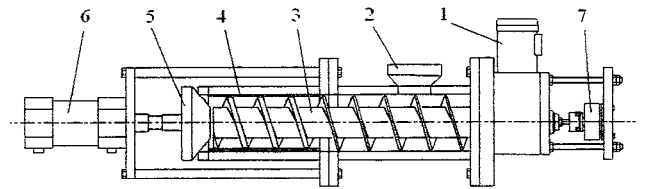


図11 試作スクリー式加圧装置

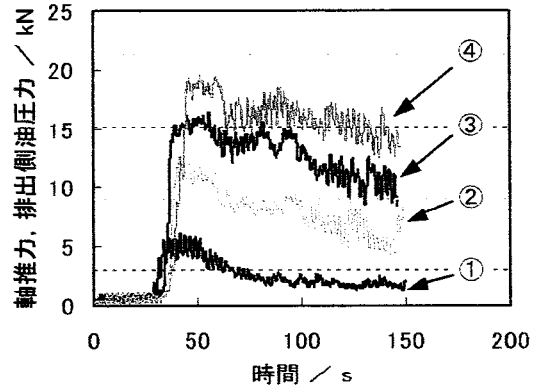


図12 軸推力の変化

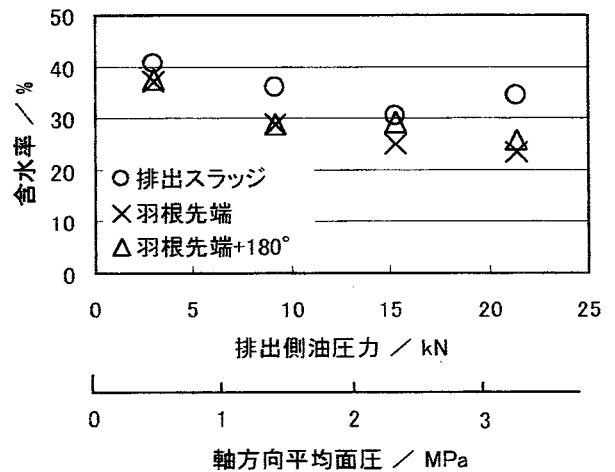


図13 試作機の固液分離性能

ッジ排出時の最大荷重が油圧力に対して相対的に小さくなっている。

図13は排出側油圧力を変化させた場合のスラッジの含水率を調査した結果である。横軸には油圧力をスクリー軸方向実断面積(羽根部の面積)で除して求めた平均面圧も併記しているが、金型圧縮の場合の図10と比べるとおよそ20分の1の面圧で同程度の含水率になっている。スクリー式の場合、脱液のほとんどがスクリー軸端部の羽根と加圧ブロック間で行われているためと考えられるが(後述図15のxが小さい範囲)、図13のように軸端部から180°奥の含水率も軸端部の含水率と同程度になっている。これはスクリー式の場合、高压で圧縮されているのは羽根先端部だけであるが、羽根が回転する

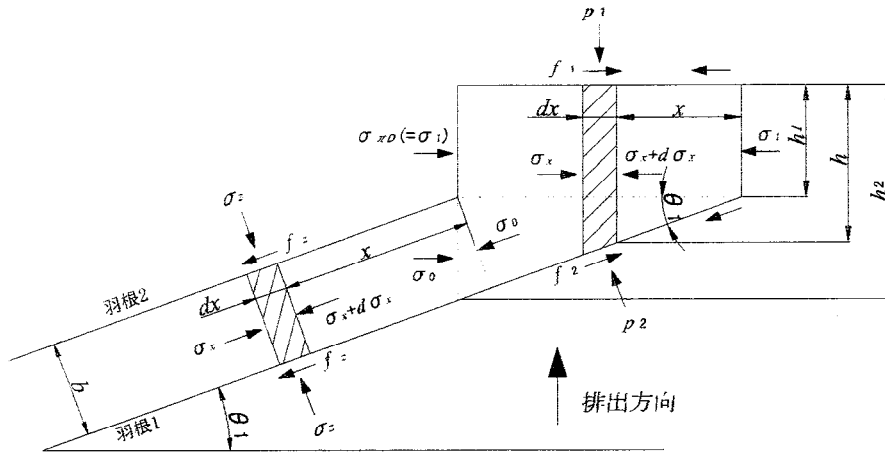


図 14 排出側および羽根間応力状態

ことにより全周にわたって高圧で圧縮されたのと同じ効果が得られているためと考えられる。また、もっとも含水率が低くなっていると予想していた排出スラッジの含水率が大きくなった。これは分離された水分を再吸収してしまったためと考えられる。

#### 4・3 コンテナ内スラッジの応力状態の推定

図 14 のように、スクリー軸の周りに羽根を展開した状態を仮定して、羽根間および軸端と加圧ブロック間の二つに分けてスラブ法により考察する。ただし、加圧ブロックテーパ部は平均高さの円筒状と仮定する。また、スラッジに作用する重力の大きさは、圧縮圧力に比べて極僅かと考えられるので無視する。

排出側応力  $p_1$  は中立点を境にして

$$p_{1L} = \alpha \sigma_1 \left( 1 + \frac{x \tan \theta_1}{h_1} \right)^{B_{2L}} \quad (1)$$

および

$$p_{1W} = \alpha \sigma_2 \left( \frac{h_1 + x \tan \theta_1}{h_2} \right)^{B_{2W}} \quad (2)$$

とあらわされる。ただし

$$B_{2L} = 1 - \frac{(\mu_1 + \mu_2 + \tan \theta_1) \alpha}{\tan \theta_1 (1 - \mu_2 \tan \theta_1)} \quad (3)$$

$$B_{2W} = 1 - \frac{\{ -(\mu_1 + \mu_2) + \tan \theta_1 \} \alpha}{\tan \theta_1 (1 + \mu_2 \tan \theta_1)} \quad (4)$$

であり、 $\alpha$  は  $p_1$  と  $\sigma_x$  の応力比、 $\mu$  は摩擦係数である。

図 15 は羽根先端部に 50MPa の応力が作用していると仮定し、羽根角度を変化させた場合の応力分布の一例である。羽根角度を大きくするにしたがって中立点位置が羽根先端部に近づいていくことがわかる。

羽根間の羽根に垂直な方向の応力  $\sigma_z$  は

$$\sigma_z = \sigma_0 \alpha \exp \left( -\frac{2\mu_z \alpha}{b} x \right) \quad (5)$$

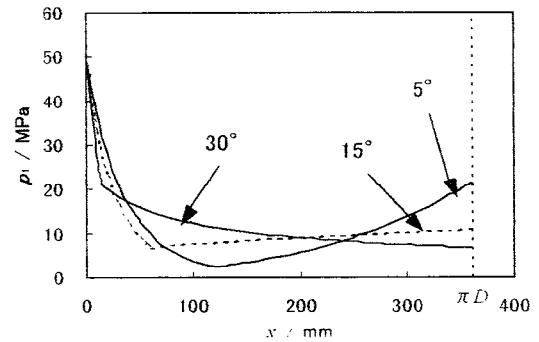


図 15 軸方向応力分布(排出側)

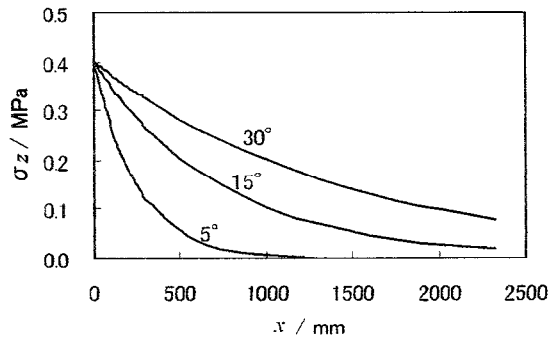


図 16 羽根面垂直方向応力分布

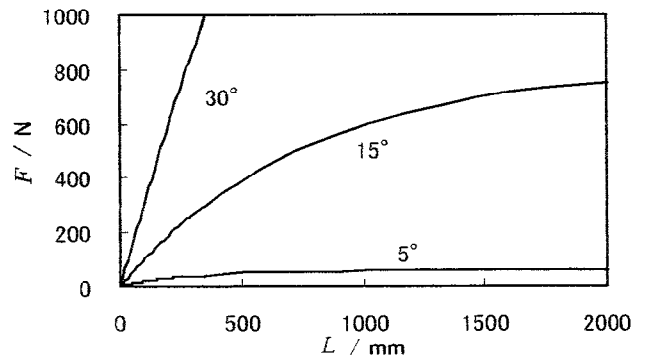


図 17 軸方向荷重(羽根間)

$x=L$  の位置までスラッジが羽根間を満たしている場合の軸方向荷重は

$$F_2 = \frac{(2\mu_z t + \mu_y \beta b) \sigma_0 b}{2\mu_z} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2\mu_z \alpha}{b} L\right) \right\} \sin\theta_1 \quad (6)$$

と表される。 $t$ はスラブの厚さ、 $\beta$ は $\sigma_y$ と $\sigma_z$ の応力比である。それぞれの計算例を図16および図17に示す。羽根角度が大きくなるにしたがって羽根表面に垂直な応力値、軸方向荷重ともに大きくなる傾向がみられる。特に、軸方向荷重は羽根角度の増加とともに $L$ が小さい範囲で急激に大きくなる傾向がある。圧縮圧力が大きい排出側の影響を受けるためと考えられるが、試作機分解時の羽根の磨耗状態やスクリーンの変形状態、羽根間スラッジの含水率測定結果などから、スラッジの脱液はほとんどが排出部加圧ブロックと軸端1ピッチ分の羽根の間で行われていると推定される。

また、羽根角度が小さいほど1ピッチの送り量は小さくなるので、排出速度を下げないためには軸回転数を大きくしなければならず、結局、動力を下げることはできない。羽根強度の観点からは、羽根角度を小さくして軸回転数を上げるのが良いと考えられるが、羽根角度を小さくした試作スクリーではスラッジが滑ってうまく搬送できなかった。図16において羽根角度が小さいほど羽根表面に作用する応力が小さいため、スラッジに作用する摩擦力が小さくなったことが原因と考えられる。

#### 4・4 構造の簡略化

加圧ブロックに油圧でプリロードを与えておくのではなく、図18に示すように隙間調整ブロックを設置し、排出前から加圧ブロックとスクリー軸端部との隙間を一定に固定することで、油圧ユニットを省略し機構の簡略化が行えないか検討した。その結果、隙間を固定してもオーバーロードでモータが停止することなく、図13と同程度の含水率が得られる条件が存在することが確認できた。図19に油圧ユニットを省略して本体外側から加圧ブロックの位置調整を行えるようにするとともに、スクリー軸を短くして装置全体を簡易な構造にした例を示す(縮尺は図11と同じにしてある)。

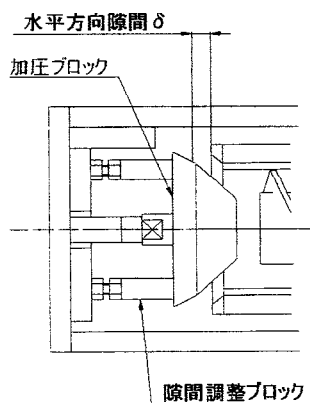


図18 排出隙間固定化

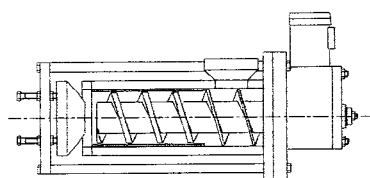


図19 簡易構造化

主仕様

全長：約770mm，高さ：約390mm，

モータ容量：0.75kW，羽根角度：約16°

最大排出量(投入時体積換算)：約0.6m<sup>3</sup>/h

## 5. 結言

研削スラッジを再利用するために、効果的に固液分離が行える装置の開発を目的として、金型圧縮および試作したスクリー式加圧装置で、固液分離機構の解明、装置仕様の検討などを行った。主な結果を以下に記す。

- (1) 研削スラッジ中の金属粒子は、繊維状粒子が複雑に絡み合っているため、平均粒径よりもかなり大きな目開き量のフィルタを用いても流出量は僅かである。スクリー式装置では直径2~3mmの孔を有するスクリーのみでも実用上問題のない程度の流出量であった。圧縮圧力が大きい排出部はフィルタとの併用が考えられる。
- (2) (1)の理由により、フィルタの目開き量が研削スラッジの固液分離特性におよぼす影響は比較的小さい。
- (3) 圧縮圧力が固液分離特性におよぼす影響は大きいことがわかったが、今後さらに効果的な固液分離が行える圧縮圧力の検討が必要である。
- (4) スクリー式装置は金型圧縮の1/20程度の軸方向応力で同程度の含水率が達成された。
- (5) スクリー式装置による固液分離は、ほとんどが排出側軸端部の羽根と加圧ブロック間で行われているため、羽根の強化は軸端部の2~3ピッチ分で充分であり、本体長さもさらに短くできる。また、排出側軸端を固定式にすることも必要である。
- (6) スクリー式装置排出部を固定隙間にすることでさらに構造を簡略化できる見通しができた。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、装置の設計製作や実験でご協力いただいた株式会社ニコテックの松本孝志氏、助成金を交付いただいた財団法人天田金属加工機械技術振興財団に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Kissler H : Metalloberflaeche, 53-12(1999), 11-15
- 2) 西村泰紀・高木均・田中達夫・半田勝人・山本満 : 日本機械学会中国四国支部総会・講演会講演論文集, 38-02(2000), 43-44
- 3) 中村完爾 : 機械と工具, 47-07(2003), 81-83