

# 工場から排出される研磨粉の無公害処理と新しい利用法

## Investigation on the utilization of the chips discharged from grinding process

中原崇文\*<sup>1</sup> 吉川俊夫\*<sup>2</sup> 戸伏壽昭\*<sup>1</sup> 岡田教嗣\*<sup>1</sup> 稲垣慎二\*<sup>3</sup> 山田英介\*<sup>3</sup>

Takahumi NAKAHARA Toshio YOSHIKAWA Hisaaki TOBUSHI Noritsugu OKADA Shinji INAGAKI Eisuke YAMADA

Abstract: The advanced treatment for the chips, industrial waste discharged from high speed grinding process (about 80ton/month), was investigated. The research consists of two categories, that is, separation technology of machine oil from chips, and formation blending high polymer. Absorbing power of kerosene for acetone, absorption rate in bubbling layer and residence time in spray tower were measured. Henry's constant and Sh-Re relations were calculated. Residence time in spray tower of 2m height with three spraying nozzle was measured. Mechanical and heat transfer characteristics of the high polymer blend were obtained. Young's modulus and thermal conductivity increased with increase in the mixing ratio of chips. Comparing the measured results with theoretical model, arrangement structure of chips in high polymer was made clear.

### 1 緒言

#### 1-1 研究の背景および目的

近年、高速研磨による加工が多く採用されており、発生する研磨粉の量も多くなってきている。本研究では、エンジンのピストンリングを作り出す際に80t/月で排出される研磨粉を取り上げ、地球環境面から見て有効に廉価で処理する技術開発を目的に研究を行う。

#### 1-2 研磨粉の概要

研磨粉には、砥石粉と切削油として使用される軽油が含まれている。

今回対象とした研磨粉は

研磨粉：砥石粉：油分=60：25：15（重量比）

であることがわかった。

砥石はアルミナ系と炭化珪素系のものがあり、主成分として珪素(Si)を含むものであり、研磨粉の平均粒径を顕微鏡写真により測定した。

表 1. 研磨粉の平均粒径

未洗浄研磨粉平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	洗浄研磨粉平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )
14	4

未洗浄研磨粉には、油分や砥石粉の体積が大きく占めることを示す。

\*1 愛知工業大学 機械工学科 (豊田市)

\*2 愛知工業大学 総合研究所 (豊田市)

\*3 愛知工業大学 応用化学科 (豊田市)

2 研磨粉の処理技術開発

2.1 処理の手順

研磨工程から排出される研磨粉には油分を含んでおり、固化処理するにあたって付着油（軽油）の除去が必要であり、従って鉄粉と油に分類してそれぞれを再利用する方法が最善である。

2.2 洗浄技術

研磨粉に付着する軽油分を除去するため、洗浄溶剤には以下に示す 4 種類を対象とし実験した。研磨粉に重量比で 15%含まれている軽油分を洗浄除去する能力\*を示す。

表 2. 各溶剤の洗浄能力の比較

	メタノール	アセトン	ベンゼン	シクロヘキサン
洗浄能力* (%)	56	80	86	81

\* 各溶剤における油分(重量)の抽出率を示す

ベンゼンは、発癌性などの毒性や大気中の許容濃度の点で危険性が非常に高いため、洗浄力に大差がなく前者と比較して安全と考えられるアセトンを洗浄溶剤に選択した。

2.3 処理プロセスの考察

エネルギー問題・環境問題を考慮し、中間排出物ゼロを狙った無公害処理プロセス回路の検討を行い図 1 に示すような方式を考案した。

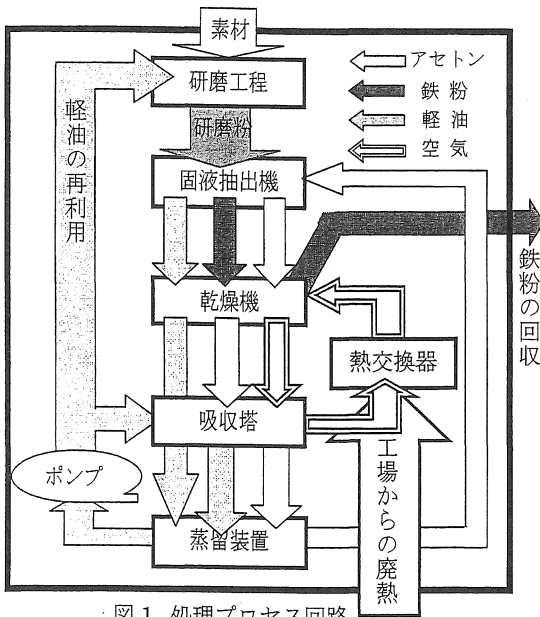


図 1. 処理プロセス回路

このプロセス回路の仕組みは、研磨工程によって排出された未洗浄研磨粉を固液抽出機により軽油分を除去し、乾燥機で乾燥されきれいな研磨粉を作り出す。また乾燥後の空気からアセトンを吸収塔でさらに軽油により吸収し、アセトンの少なくなった空気は再度利用する。その後軽油とアセトンの混合液体は蒸留操作で軽油とアセトンに分離し、アセトンは吸収溶剤として再利用でき、軽油も切削油として再利用可能である。

このプロセスは閉回路であるため完全無公害である。

2.4 軽油によるアセトン吸収装置の開発

アセトンの軽油/空気系に対する吸収は、従来例がないので平成 10 年度から研究として取り上げることとした。

吸収装置として新しい機構のものを考案した。この特徴は、アセトン-空気の 2 流体を動かす動力が、ポンプによる軽油スプレー噴霧のみで、微粒化された高速軽油滴がアセトン-空気と速度差吸収によってアセトンを吸収しようとするものである。これをスプレー式並流吸収方式と名付け研究対象とする。図 2 にその構想を示す。

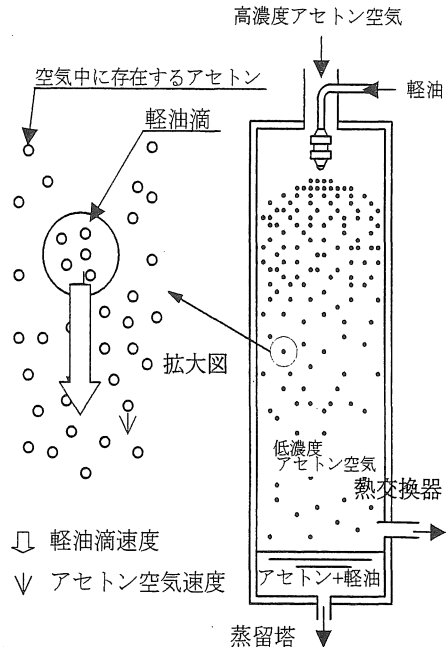


図 2 スプレー吸収装置概要

装置設計の基本データは、この構造の機能を分解し

- 1) 軽油のアセトン限界吸収能力把握実験
- 2) 流動状態の軽油のアセトン吸収率測定実験
- 3) スプレー噴霧状態把握実験

の3実験を総合的にまとめることにより得ることとした。

#### 2・4・1 軽油のアセトン限界吸収能力把握実験

吸収媒体である軽油（本実験では、コスモ石油製の軽油を使用）が気体中のアセトンガスと十分に接触して、軽油中のアセトンが平衡状態に達した時が軽油のアセトン吸収能力の限界といえる。このような平衡状態におけるガス中のアセトン蒸気圧  $P$  ( $N/m^2$ ) と軽油中のアセトンモル濃度  $C$  ( $mol/m^3$ ) の比は濃度の低い領域では比例関係にあるといわれており、この比例定数がヘンリー一定数  $H$  ( $N \cdot m/mol$ ) と定義されている。したがって、この実験によりヘンリー一定数  $H$  を求めることとする。

##### 1) 評価方法

本研究では、軽油中アセトン高濃度時での吸収状況の把握も参考に測定も行うが、吸収効率が良いと思われる軽油中アセトン低濃度時が吸収装置の実用域と考えられるため、低濃度時でのアセトン吸収の評価を行う。

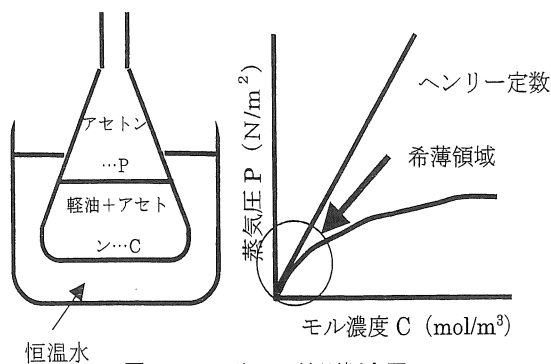


図3. ヘンリーの法則概念図

$$\text{ヘンリー一定数 } H = \frac{P}{C} \quad (N \cdot m/mol)$$

$P$  : アセトン蒸気分圧 ( $N/m^2$ )

$C$  : 液体アセトンのモル濃度 ( $mol/m^3$ )

吸収量を求めるに当たり、軽油が吸収しているアセトンの量を直接求めることはできない。このためアセトンを含んでいる軽油の上部空気のアセトン蒸気分圧を測定し、軽油中に占めるアセトン量を算出することとした。

またアセトンの蒸気圧は温度により変化するため、溶液（アセトンを含む軽油）の温度を変化させ、各温度でのアセトン含有量とアセトン蒸気分圧変化の関係を測定することとした。

##### 2) 測定方法

###### ① アセトン蒸気分圧

気体中の成分量を求めるに当たり、ガスクロマトグラフを使用することとした。

###### ② アセトンの重量%およびモル濃度

各アセトン含有量に応じたアセトン蒸気圧を調べるため、試料中のアセトン含有量を以下の6種類の重量%で混合させて実験を行うこととした。

表3. アセトン混合割合

重量%濃度	1	6	20	50	80	100
モル濃度 ( $mol/m^3$ )	143	860	2860	7150	11440	14300

##### 3) 実験

実験結果を図4に示す。

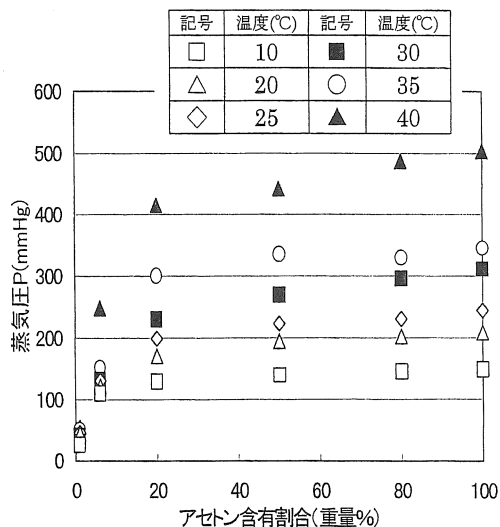


図4. アセトン限界能力実験結果

ヘンリー一定数を算出するため実験値にフィットする式を求め、希薄領域のみ拡大したものを図5に示

す。ヘンリー定数を推算するために縦軸を mmHg から  $N/m^2$  へ、横軸を重量%濃度からモル濃度に変換する。

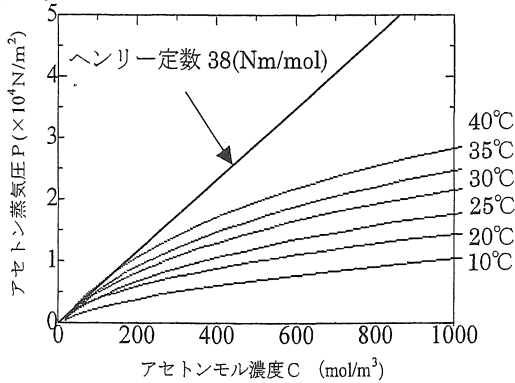


図 5. 希薄領域の拡大

以上の結果より、アセトン蒸気圧は温度依存性があり、かつヘンリーの法則に従うことが明らかである。軽油—アセトン系のヘンリー定数は、 $38(N \cdot m/mol)$ である。

2・4・2 流動状態の軽油のアセトン吸収率測定実験

流動状態および制限された接触時間内における吸収の変化を測定し、吸収速度を求める。

1) 評価方法及び実験概要

一般化するため流れの状態をレイノルズ数(Re)、アセトンの物質移動(吸収)の状態をシャーウッド数(Sh)により評価することとする。

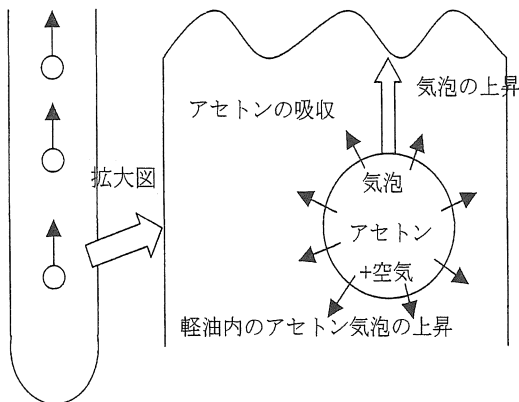


図 6. 流動中におけるアセトン吸収の概念図

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

V : 気泡上昇速度 (m/s)

d : 気泡直径 (m)

$\nu$  : 軽油の動粘度 ( $m^2/s$ )

Re : レイノルズ数 (-)

$$Sh = \frac{k_L d}{D}$$

$k_L$  : アセトンに対する軽油の液境膜物質移動係数 (m/s)

d : 気泡直径 (m)

D : 軽油内のアセトン拡散係数 ( $m^2/s$ )

Sh : シャーウッド数 (-)

2) シャーウッド数の推算

シャーウッド数を推算するに当たり、各項である液境膜物質移動係数  $k_L$ 、軽油内分子拡散係数 D の測定に分け、以降に述べる。

①  $k_L$  (液境膜物質移動係数) の測定

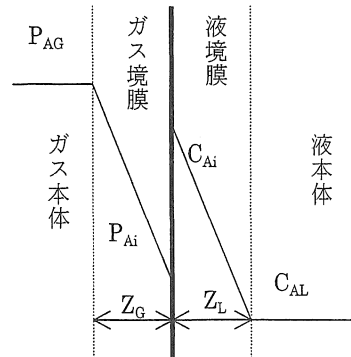


図 7. アセトンと軽油の境膜概念図

本実験ではアセトン、軽油それぞれの有効境膜厚さ ( $Z_G, Z_L$ ) は、測定不能であるため、前節で求めたヘンリー定数を利用し、気液平衡がある範囲(本実験ではアセトン希薄領域)で成り立つ次式から各境膜物質移動係数を求める。

$$P_{AG} = H \times C_A \quad , \quad P_A = H \times C_{AL}$$

$$N_A = K_G (P_{AG} - P_A)$$

$$= K_L (C_A - C_{AL})$$

$N_A$  : 軽油内アセトン分子拡散速度 ( $mol/m^2 \cdot s$ )

$K_L$  : 軽油の液境膜基準総括物質移動係数 (m/s)

$K_G$  : アセトンのガス境膜基準総括物質移動係数 ( $mol/N \cdot s$ )

$P_{AG}$ : アセトン境膜内のアセトン蒸気圧 (N/m<sup>2</sup>)  
 $P_A$ : 希薄状態でのアセトン境膜内のアセトン蒸気圧 (N/m<sup>2</sup>)  
 $C_{AL}$ : 軽油境膜内のアセトンモル濃度 (mol/m<sup>3</sup>)  
 $C_A$ : 希薄状態での軽油境膜内のアセトンモル濃度 (mol/m<sup>3</sup>)  
 $H$ : アセトン軽油系のヘンリー定数 (N·m/mol)

上記の式により、希薄領域にのみ有効な  $K_L$  (液境膜基準総括物質移動係数) を算出し、本実験ではスプレー吸収は希薄領域で行われるためにこれを液境膜物質移動係数としシャーウッド数に用いる。

$K_L$  算出に必要な各項は、以下に示す方法で測定する。

表 4.  $K_L$  算出に必要な各項の測定法

		測定方法
注入アセトン蒸気圧 $P_{AG}$ (N/m <sup>2</sup> )		ガスクロマトグラフ
軽油内アセトンモル濃度 $C_{AL}$ (mol/m <sup>3</sup> )		ガスクロマトグラフ
軽油内アセトン 分子拡散速度 $N_A$ (mol/m <sup>2</sup> ·s)	mol	ガスクロマトグラフ
	m <sup>2</sup>	ハイスピードカメラ
	s	タイマー

#### ②軽油内のアセトン拡散係数 $D$ (m<sup>2</sup>/s)

軽油内のアセトン拡散係数の研究結果は調査した範囲では見あたらなかったため、無限希釈溶液の拡散係数推算法を用いて推算する。

数ある推算法の中で、流体力学により理論的に求めるストークス・アインシュタインの式を基にして、経験的に得た推算式であり最も広く使われているウィルケ・チャン式を使用する。式で求まる  $D_{12}$  は、第 2 成分 (本実験では軽油) 内における無限希釈第 1 成分 (本実験ではアセトン) の第 2 成分中への相互拡散係数である。添え字 1 は第 1 成分であるアセトンを示し、添え字 2 は第 2 成分である軽油を示す。

ウィルケ・チャン式の拡散係数推算式

$$D_{12} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\phi M_2)^2 T}{\eta_2 V_1^{0.6}} \quad (\text{cm}^2/\text{s})$$

$\phi$ : 会合係数 1

$M_2$ : 軽油分子量 (代表値 254) (g/mol)

$T$ : 実験温度 (K)

$\eta$ : 軽油粘度 (cP)

$V_1$ : アセトンの分子容 シュレーダの推算法より 70 (cm<sup>3</sup>/g-mol)

以上全てより、シャーウッド数を算出することができる。

#### 3) 実験装置及び装置の説明

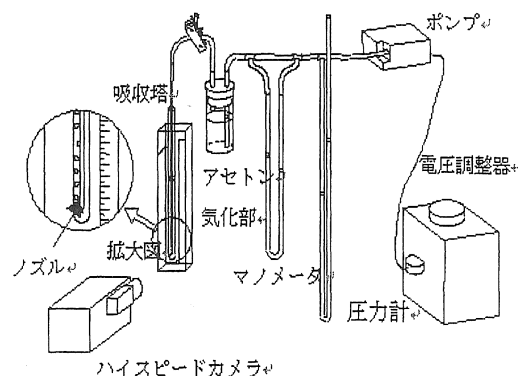


図 8. 実験装置図

軽油の入っている簡易吸収塔に気泡状のアセトン空気を送り込み、吸収塔内部で気泡上昇中にアセトン吸収を行なわせる。

アセトンを含んだ空気を作り出すため、液体アセトン中にポンプで空気を送り込みアセトンを気化させる。

アセトンの分子拡散速度に影響するアセトン空気と軽油の接触面積は、ポンプの使用電圧を変えることでアセトン空気の流入量を変え、軽油内気泡量を制御する。

また、送り込まれる空気の流量はマンメータにより測定できる。

気泡の観察に当たっては、ハイスピードカメラにより気泡直径、単位時間における発生気泡の個数、気泡上昇速度を測定する。

発生する気泡の直径を、ノズル形状を変えることにより変化させ、測定の結果 1.3, 2.1, 3.0mm であることがわかった。

#### 4) 実験結果

同一流量  $Q=1.1 \times 10^{-7}$  (m<sup>3</sup>/s) の結果を示す。図 9 に時間経過と  $Sh$  の関係を示し、グラフより時間経過と共に  $Sh$  は減少し、 $Re$  の変化 (ノズルの違い)

によって吸収率も変化する。Sh と経過時間を両対数にした結果、直線関係を示す結果となった。この傾向を利用することで短時間接触領域のシャーウッド数を外挿した。破線は外挿線を示す。本実験の目標であるスプレー吸収は、短時間内接触吸収が予想されるため、この結果から短時間のスプレー吸収が期待できると言える。

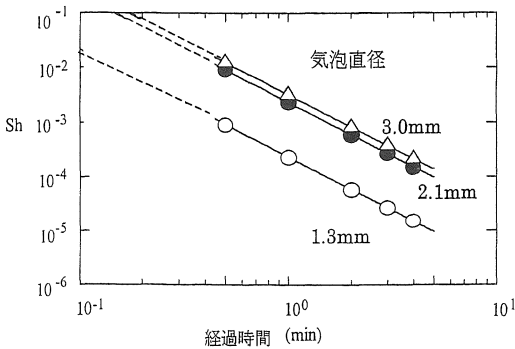


図 9. Sh と経過時間の関係

以上の検討のまとめである Re-Sh の関係を以下にまとめてみる。

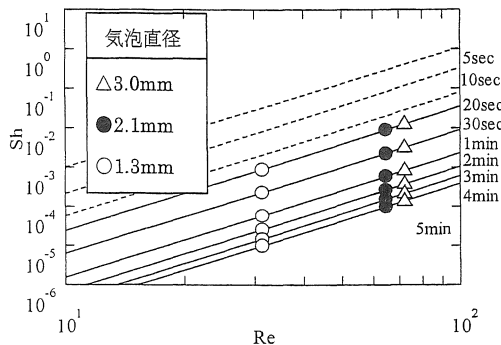


図 10. Sh と Re の関係

グラフより Re の増加につれて吸収率もアップする結果となり、経過時間に関係なく Re-Sh の傾き一定の傾向を示している。予想ではある程度接触面積の影響があり、小気泡の発生する低 Re 域でも吸収は期待していたが、接触面積より流れの影響が大きいと考えられる。この結果から Re の上昇にしたがって Sh は向上している。また図 9 の短時間接触の外挿線から経過時間の速い場合 (5, 10, 20sec) における Sh-Re の関係を外挿した。この図からも短時間接触の Sh は高く、実際の吸収装置の Re は 100

以上と予想されるためスプレー吸収の有効性はこの傾向からは確認できる。しかし、現段階では確定できず更なるデータを取り検討を要し、Re 範囲は層流域であるためもう少し大きな Re で実験を行い傾向が正しいかを見極めていく必要がある。

### 2.4.3 スプレー噴霧状態把握実験

本研究で対象としたスプレー並流吸収方式ではスプレー後の時間が経過すると相対速度が小さくなるため、スプレー塔の高さはあまり高くしても能力は飽和に達してしまう。また大きなスプレーノズルを用いると液滴直径が大きくなり、面積が稼げない等の特徴がある。このため実用規模の 1 ユニットとして直径 200mm、長さ 2m のスプレー式吸収塔を考えた。このユニットでの処理能力を明確にすることにより、実プラントはユニット数を必要数増設することで対応できる。一方実プラントでの被吸収ガスのアセトンと吸収媒体の軽油を実験に用いるのは非常に危険であるので、危険度が低く測定も行い易い水-空気系におけるスプレー液滴流動状態を把握することを目指した。液滴流動状態には、水滴落下速度、空気流入速度、水滴直径、単位時間当たりの有効接触面積を測定する必要がある。

#### 1) 評価方法

水滴の流動状態をレイノルズ数で評価しユニット内での吸収時間、総面積を求め、吸収操作に影響がある有効接触面積との関係からスプレー吸収塔の能力評価を行う。

スプレー吸収での流動状態は、被測定物である水滴の落下速度で評価するのではなく、空気流入速度を考慮した水滴落下速度との相対速度が影響すると考えられるので、本実験では以下のように相対レイノルズ数  $Re_r$  を定義する。

$$Re_r = \frac{d(Ve - Va)}{\nu}$$

d : 代表長さ (水滴直径) (m)

Ve : 水滴落下速度 (m/s)

Va : 空気流入速度 (m/s)

$\nu$  : 空気の動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s)

Re<sub>r</sub> : 相対レイノルズ数 (-)

有効接触面積は、水滴の直径、水の流量から算出でき、水滴直径が大きく影響する。したがって、スプレーノズル出口径を変える必要があり出口径 0.7, 2.0, 3.5mm の 3 種類を用意し実験に用いる。

## 2) 水滴落下と空気流入の間の相対速度測定

### ① 水滴落下速度の測定

水滴落下速度の測定を行なうにあたり、円筒の測定区間 (1.2m) を落下する間の経過時間を測定し落下速度とすることとした。

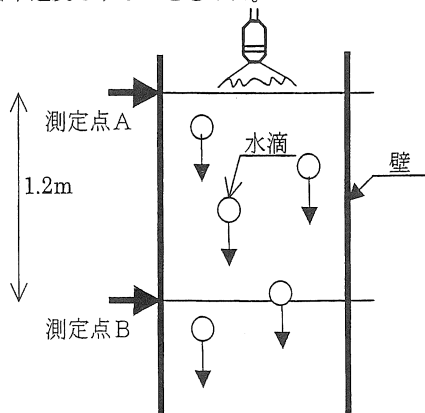


図 11. 落下速度測定概念図

測定点 A, B に、検出器を置き、検出器の出力と時間の関係から各検出器の応答の時間差を測定し、落下速度とする。

検出器は熱線 (ステンレス線を使用) に電流を流し加熱させ、中央部に熱電対を取り付け熱線に水滴が接触することで起きる温度変化を利用した熱線冷却式を用いる。

測定結果を図 12 に示す。

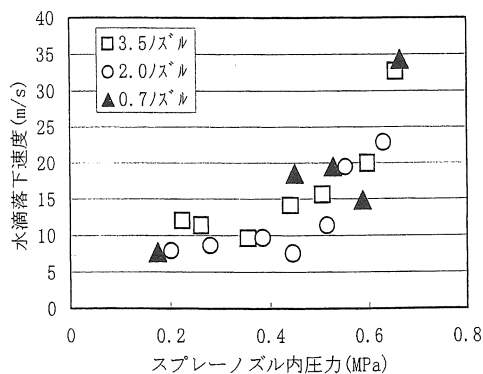


図 12. 落下水滴速度測定結果

### ② 空気の流入速度の測定

水のスプレー噴霧に伴って流入する空気の流入速度測定を行なうにあたり、熱線風速計による流入風速測定を測定した。

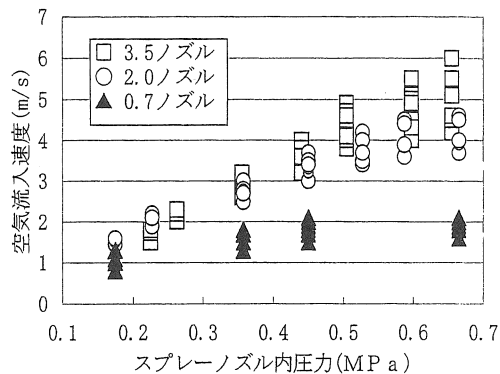


図 13. 空気流入速度とノズル圧力の関係

## 3) 水滴直径及び有効接触面積の測定

### ① 水滴直径の測定

流動状態、吸収状態には水滴の直径は大きく影響するため、本実験ではオリンパス顕微鏡を使用し水滴直径の測定を行なう。

試料採取では水滴を球形で採取するのが望ましいので、シリコンオイルを使用しオイル内に水滴を採取し測定する方法を取る。採取例の写真を以下に示す。

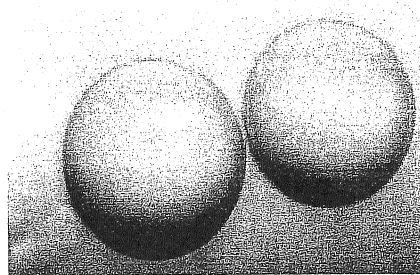


写真 1. 水滴の採取例

また平均直径は以下の式によって求めた。

$$\bar{d}_3 = \frac{\sum nd^3}{\sum nd^2}$$

$\bar{d}_3$  : 平均水滴直径 (mm)

n : 測定個数 (個)

d : 測定水滴直径 (mm)

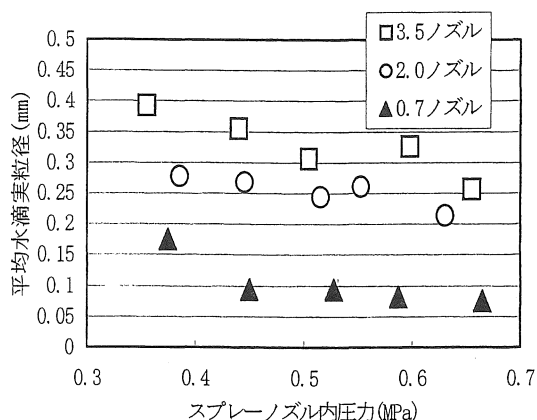


図 14. ノズル圧力と水滴実粒径

## ②有効接触面積の測定

水滴直径を基に水滴の表面積を算出する。単位時間の各ノズルにおける水の流量を測定して水滴の体積で割り、水滴個数を算出する。水滴の表面積と水滴個数から有効接触面積が決定できる。

## 4) 実験結果

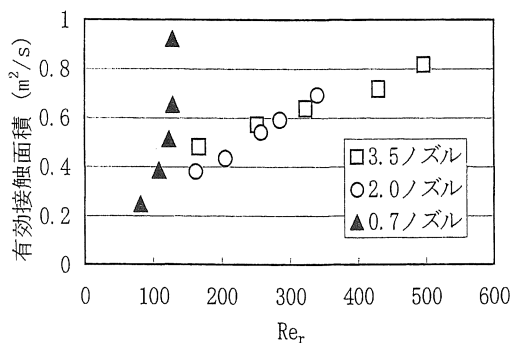


図 15. スプレー噴霧実験結果

0.7 ノズルにおいては、他のノズルに比べ有効に接触面積を増やすことが出来る。これは、0.7 ノズルで発生する水滴の粒径が非常に小さいことに起因している。小粒径噴霧ノズルの利点は、小スペースでも有効に接触面積が稼げることである。一方、3.5 ノズルは傾きから見れば噴霧で起きる流れによって吸収を行う傾向にあり、大粒径噴霧ノズルは大きな流れを起し吸収を行う利点があるといえる。予想する吸収操作に分けてノズルは選ぶべきである。

## 2・4・4 吸収装置の評価

以下の2点からスプレー並流吸収方式の有効性を確認できる。

- 1) 流動中の吸収を行った結果、吸収率は実験開始から数秒間が良い結果となった。また吸収状態の流れによる影響は、 $Re$  を大きくしていくと吸収率が高いことが傾向として判明した。
- 2) スプレー噴霧実験においては、ノズル出口径を小さくすることによって接触面積を稼ぐことが出来、ノズル出口径を大きくすると広範囲の  $Re$  にすることができる、

しかし測定値としてはまだ不十分であり、今後は以下の3点に重点を置いて研究していく予定である。

- 1) 流動吸収実験結果の  $Re$  範囲は非常に低く層流域であるため、装置の予想されるもう少し高い  $Re$  範囲の実験を行い傾向を見極める。
- 2) 流動吸収実験とスプレー噴霧実験の  $Re$  範囲を一致させ評価を行う
- 3) 処理プロセスの使用に適した吸収装置の必要ユニット数等の設計を行う。

## 3 研磨粉固化処理技術

### 3・1 固化処理のねらい

廃棄物としての研磨粉を燃焼や投棄することは、それ自体のエントロピーを増すことにつながるため、本研究では固化体として新しい材料としての利用を行うこととした。

### 3・2 固化法と固化剤の決定

研磨粉を固化することで新物体の開発を目指すに当り、固化するものが環境に悪影響を及ぼしたり有害物であったり、価格の高いものでは実現性がない。そこで容易に手に入る高分子材料による固化成型を行うこととした。固化剤には、熱硬化性樹脂が成型、コストの点から見て最適であると考えた。本研究では、液状エポキシ樹脂 (大日本インキ化学工業(株)製、主剤: EPICLON857 Lot. C371, 硬化剤: ラッカマド WH-108-s) フェノール樹脂 (明和化成(株)製、砥石用粉状フェノール成型粉 MR750 Lot. 63052) を取り上げ成型後の特性を評価する。



### 3・3 成型実験

成型圧力を変えることによる樹脂と研磨粉の接着性の影響と、研磨粉混合割合が成型品の各特性にあたる影響を調べるため、以下の条件で成型した。

表 5. 成型条件

成型圧力 (MPa)	20 と 0.1
研磨粉混合割合 (体積%)	0 ~ 52

### 3・4 強度特性

#### 3・4・1 ヤング率測定実験

研磨粉を混ぜることによりヤング率を上昇させることを目標に引張り実験・曲げ実験を行った。また成型品内の樹脂と研磨粉の存在状態を推定するため、図 16 に示すモデルのヤング率を考える。

このモデルには、内部に加える荷重に対し研磨粉とエポキシ樹脂が直列部と並列部がある状態を仮定する。直列部では両者に加わる応力が等しく、並列部では両者のひずみが等しい。また、それぞれに樹脂と研磨粉とが完全に接着したものとは接着していない状況も考慮した。

このモデルの等価ヤング率は、(1) 式で表わすことが出来る。

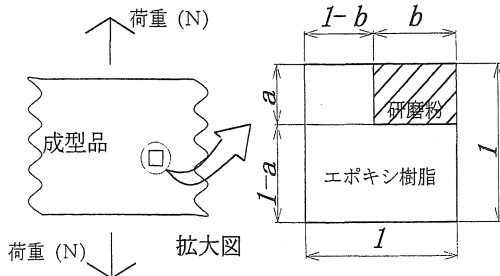


図 16. 検討モデル

$$E_{eq} = (1-b)E_e + b \frac{E_m E_e}{aE_e + (1-a)E_m} \quad (1)$$

$E_e$ : 樹脂のヤング率

$E_m$ : 研磨粉のヤング率

モデル値と全実験結果を図 17, 18 に示す。

加圧成型を行った結果、研磨粉の増加に従いヤング率は高まり目的を達成した。しかし、体積比 40% で樹脂との接着に限界があると考えられる。この原因は研磨粉同士の接触の影響と思われる。

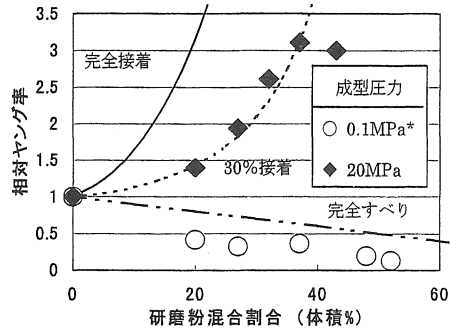


図 17. エポキシ樹脂混入固化体のヤング率

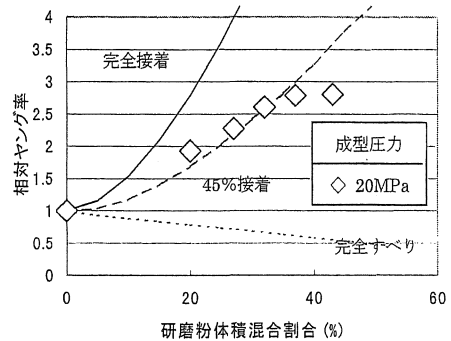


図 18. フェノール樹脂混入固化体のヤング率

研磨粉が完全な球形で成型品内を均質と仮定すると、研磨粉同士が接触する割合は体積比で 52% である。しかし実際には均質でないため、体積比 40% を超えると研磨粉同士の局部接触する割合が大きくなり、ヤング率が低下したと考えられる。

モデルとの比較から 0.1MPa (常圧成型) の結果はすべりがある結果を示しており、20MPa (加圧成型) の結果は完全に接着していないことを示している。20MPa の結果は、完全接着と比較しエポキシ樹脂では 30%、フェノール樹脂では 45% の接着と判断でき、フェノール樹脂成形結果が若干接着率が高い傾向を示している。しかし、相対ヤング率的には差がない結果となった。したがってまだ接触面の滑りによりロスがあることがわかる。

#### 3・4・2 衝撃試験

成型品の粘り強さと脆さの程度を調べるためにシャルピー衝撃実験を行った。全実験結果を次項に示す。常圧成型 (エポキシ樹脂成形 0.1MPa) の結果は、研磨粉と樹脂との滑りが大きいので衝撃エネルギーを吸収したと思われる。それに対し加圧成型

(20MPa)の結果、研磨粉の増加に伴い衝撃値は低下し、一般的なヤング率の高い材料同様の性質を持つことを示す。

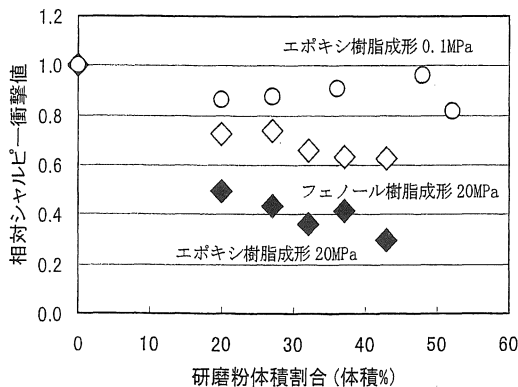


図 19. シャルピー衝撃実験

3・5 熱・電気特性

3・5・1 熱伝導率測定実験

試験片に加える熱は、片面を熱板と接触させるステップ変化とし、試験片温度は対面の熱電対により測定した。

熱伝導率決定には、熱伝導基礎方程式の厳密解(非定常の温度分布) グラフである図 20 上に実験結果をプロットし決定する方法を取る。図 20 の例では、材料の熱伝導率は 0.9W/mk と決定される。

また内部に存在する気泡の影響を考慮するため、ヤング率の検討モデルに空気層を考慮した以下のモデルで検討を行った。このモデルの等価熱伝導率は、以下の(2)式により求めることができる。

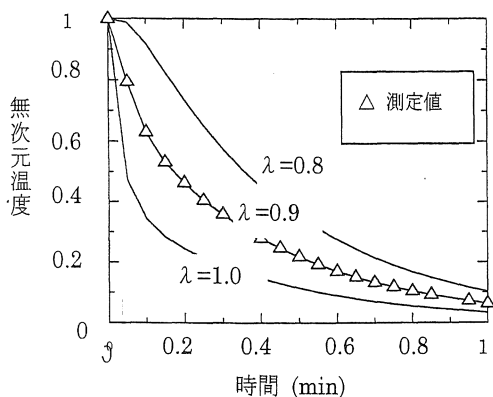


図 20. 熱伝導率の決定例

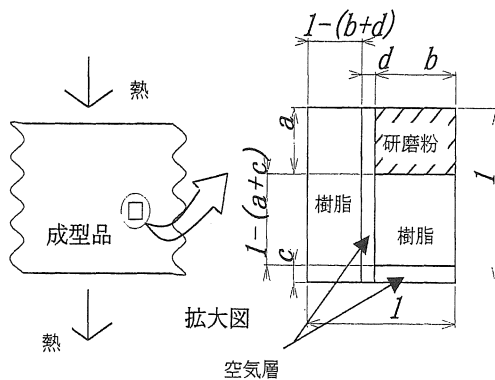


図 21. 検討モデル

$$\lambda_{eq} = \frac{b}{\frac{a}{\lambda_m} + \frac{1-(a+c)}{\lambda_e} + \frac{c}{\lambda_a}} + \{1-(b+d)\}\lambda_e + d\lambda_a$$

$\lambda_m$ : 研磨粉の熱伝導率

$\lambda_e$ : エポキシ樹脂の熱伝導率

$\lambda_a$ : 空気の熱伝導率

モデルには成型圧力 0.1 と 20MPa を加えた状態を仮定し、全実験結果と比較した。

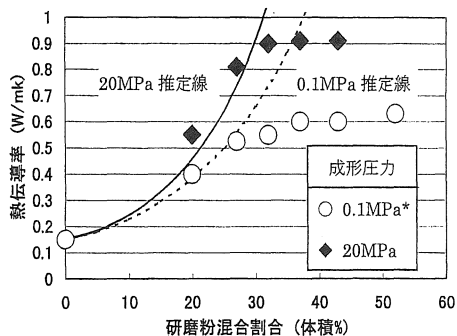


図 22. エポキシ樹脂の熱伝導率測定結果

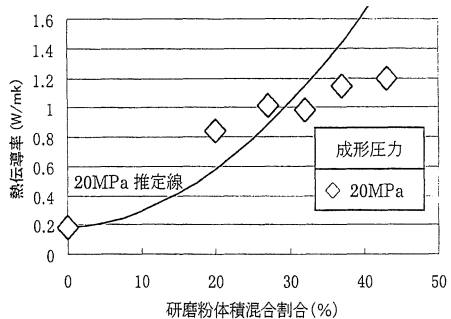


図 23. フェノール樹脂の熱伝導率測定結果

研磨粉の割合を増加させていくに連れて熱伝導率は、増加していく傾向にあり、また加圧成型によりさらに熱伝導率を高められることがわかった。この理由は推定したモデル曲線(図 22)の示すとおり、加圧したことで内部の気泡体積が小さくなり研磨粉同士が接近したことによると考えられる。

### 3.5.2 電気比抵抗測定実験

材料の基礎データである導電性・絶縁性を調べるために実験を行った。

表 6. 電気比抵抗測定の結果

研磨粉混合割合(体積%) 成形圧力(MPa)		比抵抗 ( $\Omega/cm$ )			
		0~37	43	48	52
エポキシ樹脂成形	0.1	$\infty$			2.04
	20	$\infty$	4.9	—	
フェノール樹脂成形	20	$\infty$	4.8	—	

測定の結果、常圧成形(エポキシ樹脂成形 0.1MPa)は研磨粉混合割合 48%までは絶縁性を示しているが 52%では導電性を示した。加圧成形(20MPa)は研磨粉混合割合 37%までは絶縁性を示しているが 43%では導電性を示した。樹脂固化体内の研磨粉混入限界割合は体積比 52%であり研磨粉同士が接触する。常圧成型ではこれが原因であり、加圧成型では加圧したために局部接触が起こったと考え、導電したと考える。

### 3.6 モンテカルロ法による研磨粉混入状態の把握

研磨粉混入状態の把握は、モンテカルロ法により、乱数列を用いた数値実験を多数回行うことで固化体内(0.001mm<sup>3</sup>)の研磨粉混入状態(個数、接触面積)を明らかにする。

計算の手法は、以下の通り

- 1) 研磨粉の粒径分布を考慮に入れた分布関数を求め、研磨粉粒径に相当する乱数を発生させ、その乱数に応じた出現確率を算出する。
- 2) 研磨粉混合割合と出現確率をもとに (X, Y, Z) に相当する乱数を用いて任意に研磨粉を固化体内へ混入し、研磨粉同士の接触判定を行い内部研磨粉の個数、表面積を算出し結果とする。

計算の結果、研磨粉と樹脂との接触面積は、研磨粉混合割合画像化するにしたがって緩やかだが二次曲線的に増加の傾向を示している。研磨粉の増加に

伴って小さな研磨粉の混入量が増し、接触面積を稼ぐ傾向を示している。各実験の結果、強度・熱伝導率の面では、研磨粉混合割合 40%前後で低下傾向を示している。計算結果はデッドスペースをなくし混入できているが、実際の成形には 40%を超えるとうまく混ぜて成形することが難しく、この結果からも実際の成形の不均質さを示している。また、この接触面積の計算結果は、固化体(0.001mm<sup>3</sup>)を均質とした結果である。しかし、内部の断面積は変化しており、大きな研磨粉を含む断面が最小接触面積を持つ。したがって負荷荷重に対してこの面で破壊すると考えられる。今後、各混合割合の断面積の変化を出力して検討する予定である。

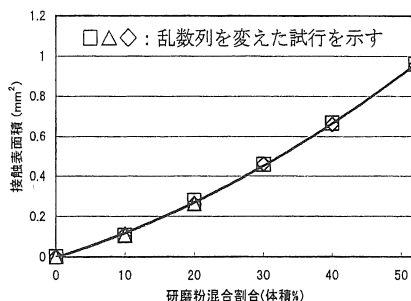


図 24. モンテカルロ法による内部研磨粉表面積

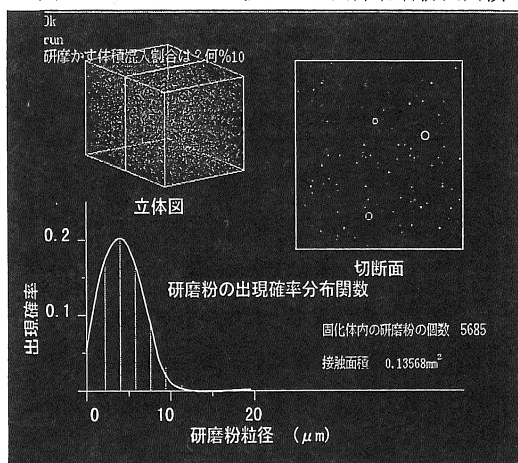


図 25. モンテカルロ法による計算出力例

### 3.7 各実験後の材料特性評価

ヤング率測定実験と衝撃実験の結果から次項のようなグラフを作成した。

この結果から、加圧成型を行うことによりヤング率は高まるが、同時に衝撃値を低下させてしまう。

また常圧成型では、衝撃値に大きな低下は見られないが、ヤング率が極度に低下してしまうという相反することがわかった。

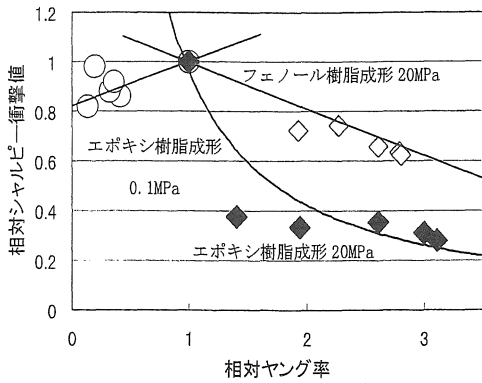


図 26. 衝撃値とヤング率の関係

強度的な分野だけでなく、熱・電気特性の関係を調べるため次項のグラフも作成した。

一般的な材料では、熱の伝わりが良いものは電気を通しやすい傾向がある。しかし、本研究素材は、成型品内の研磨粉が接触するまで導電性を持たない結果を示している。

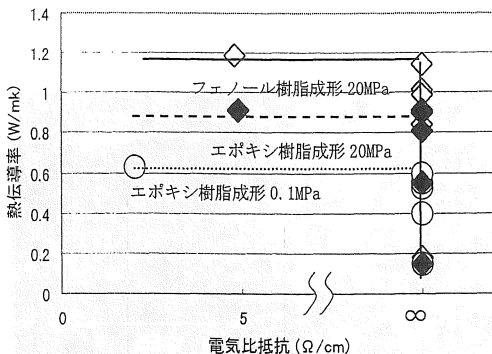


図 27. 熱伝導率と電気比抵抗の関係

以上より、本研究素材は特異的な性質を持つ可能性があると見え、この性質を何かに利用出来るのではと考えている。

#### 4 結言

本年度の研究により以下の結論が得られた。

- (1) 環境問題やエネルギー・資源問題が表面化している現代、産業廃棄物である研磨粉も、排出量が増加しており、低エネルギー処理し再利用

することでの有効性を確認した。

- (2) 研磨粉の処理技術に関する結論は以下の通り

- ① 未洗浄研磨粉に含まれる油分を除去する洗浄溶剤は、環境面と除去能力から見てアセトンが最も適している。また無公害処理プロセスの検討を行い有効性を確認した
- ② スプレー並流吸収装置を提案し、流動状態の吸収仮定を  $Sh-Re$  で評価することができた。吸収率 ( $Sh$ ) は経過時間が短い程よく、流動 ( $Re$ ) が活発なほど吸収率が良い傾向を示している。スプレー噴霧状況把握実験では、水滴径が大きいと  $Re$  を稼ぐことができ、小さいと単位時間の接触面積を稼ぐ傾向が分かった。

- (3) 研磨粉の利用技術に関する結論は以下の通り

- ① 加圧成型した結果、ヤング率は研磨粉の混合割合を増すに伴って増加し、衝撃値は研磨粉の増加に反し低下する。
- ② 熱伝導率は、研磨粉の混合割合に対して増加し加圧成型により更に高められ、体積% まででは導電性を持たないことがわかった。
- ③ 固化体内部の推定はモデルにより内部の状態を説明でき、またモンテカルロ法によって、混合された固化体の接触面積変化をほぼ定量化できた。

#### 5 謝辞

本研究の一部は、愛知工業大学総合研究所プロジェクト研究費の補助で行われた事をここに記し、謝意を示します。

#### 参考文献

1. 疋田 晴夫: 化学工学通論, 150-153, 朝倉書店, 東京, 1982
2. 大江 修造: 物性定数推算法, 45, 292, 日刊工業, 東京, 1985
3. T. Nakahara, T. Yoshikawa, and N. Okada, "Investigation of the Utilization of the Chips Wasted from the High Speed Grinding Process", 2nd International Symposium on Advanced Energy Conversion system and Related Technologies -RAN98, 1998-12, pp. 130-131

(受理 平成11年 3月20日)