

金属粉などの無公害処理と高付加価値利用に関する研究

Investigation of Separating Oil from Chips with no-pollution and Recycling the Metal chips with the High Value

中原崇文*¹ 吉川俊夫*² 戸伏壽昭*¹ 松岡慎也*¹ 山田英介*³ 宮崎誠道*⁴
Takabumi NAKAHARA Toshio YOSHIKAWA Hisaki TOBUSHI Shinya MATSUOKA Eisuke YAMADA Masamichi MIYAZAKI

Abstract: The advanced treatment for the grinding chips, industrial waste discharged from high speed grinding process, was investigated. This report consists of two parts, the first is the recovery of grinding metal chips and the other is the utilization of these grinding metal chips.

The recovery process separates the metal from the grinding chips using an energy saved closed system. Experimental research on the grinding oil in the extractor is needed because there is no data in the field. Isopropyl alcohol was selected as extracting fluid.

The second part of the study is the utilization of the grinding metal chips. New solid material made from the metal chips and epoxy resin is proposed. The new characteristic which grinding metal chips arranges was found out by giving a magnetic field while having solidified. The solid is researched electric resistance and strength. As the content of metal chips in the material increases, electric resistance decreases. Also electric resistance decreases at high magnetic flux field. The theoretical model was considered to estimate, the specific electric resistance from the content of metal chips in the material. Young's modulus of the solid was measured and the modulus shown high value to compared with raw resin. Considering the characteristic of new material stated above, it is possible to use electric heating device, such as toilet seat.

1. 緒言

1・1 研究背景および目的

近年、製品の高精度化に伴い研磨加工が行われる場面が増え、仕上げ加工として重要視されている。これに伴いその廃棄物である研磨粉の量も増大している。本研究ではエンジン用ピストンリング製造工程から80[t/month]で排出される研磨粉を研究対象として取り上げる。環境面、省エネルギー、低コストを考慮した研磨粉洗浄プロセス回路の検討と洗浄後研磨粉を使った付加価値の高い材料を作り、それを使った製品化を目的に行った。

1・2 研究対象

研磨は金属材料に比べ硬い砥粒を用いた砥石を使い、研磨油を注ぎながら砥石を高速に回転させて工作物に押し当て研削するものである。したがって研磨粉には金属粉、砥石粉、研磨油分が含まれている。

今回対象とした研磨粉は

金属粉：砥石粉：研磨油分=60：25：15 (wt%)
であることがわかった。

なお本研究では金属粉と砥石粉の混合物を研磨金属粉として説明を行う。

2. 研磨油処理プロセスの検討

2. 1 洗浄溶剤の選定

排出される研磨粉には多量の研磨油が含まれおり、固化处理をするに当たりそれを除去する必要がある。そのために研磨油を除去する洗浄溶剤の選択を行った。洗浄溶剤には次の条件に適合することが望ましい。

*1 愛知工業大学 機械工学科 (豊田市)
*2 愛知工業大学 総合技術研究所 (豊田市)
*3 愛知工業大学 応用化学科 (豊田市)
*4 帝国ピストンリング株式会社 (東京都)

- 1) 水と自由混合する.
- 2) 炭化水素（研磨油）を溶解する.
- 3) 沸点が常温から 100[°C]以下とする.
- 4) 毒物、発癌性物質ではない.

この条件に適合した溶剤を表1に示す.

表1 条件に適合した溶剤

	単位	イソプロピ ルアルコール (IPA)	アセトン	エタノール	テトラヒドロ フラン (THF)
沸点	°C	82.3	56.1	78.3	65
引火点	°C	12	-15.4	13	-14
価格	円/kg	100	130	138	500~900

上記の溶剤を比較するとほぼ同じ特性を持っているのでどれを選定しても良いと考えられるが、最も廉価なイソプロピルアルコールを使用することにした.

2・2 プロセスの検討

これまでの研究により廉価で効率が良く、環境面を考慮し、中間排出物のない研磨油処理プロセス回路として図1に示した閉回路無公害処理プロセスが考案されている.

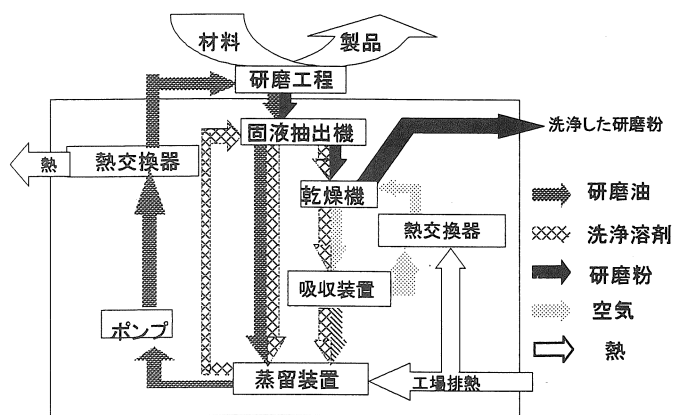


図1 閉回路無公害処理プロセス

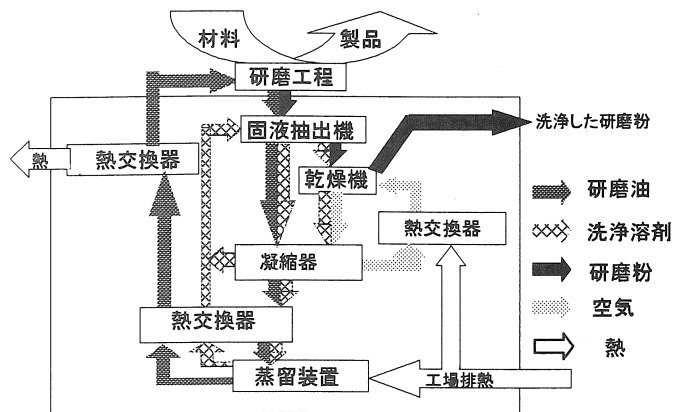


図2 改良した閉回路無公害処理プロセス

図1の回路の利点を生かしながらより省エネルギー性を重視した処理プロセスを考案した.それを図2に示し,その回路の仕組みを以下に示す. 研磨工程から排出された未洗浄研磨粉を固液抽出機により研磨油分を除去し,乾燥機で 100[°C]の排熱で暖められた空気により乾燥し,研磨金属粉を回収する. 乾燥機からの空気および洗浄溶剤は固液抽出機からの洗浄溶剤および研磨油の混合液と熱交換を行い凝縮させ回収する. 混合液は蒸留装置に入り沸点の違いにより溶剤と研磨油に分離し,回収する. 回収した研磨油, 洗浄溶剤は研磨工程, 固液抽出機で再利用が可能である. この回路の特徴は熱以外の排出物が生じない無公害なことである.

2・3 固液抽出機の検討

無公害処理プロセス中の固液抽出機で効率的な洗浄を行う方法を確立するため以下の事柄について明らかにする必要があり,それらについて研究を行った.

- 1) 最低限必要な洗浄溶剤量
- 2) 攪拌方法の検討
- 3) 温度による洗浄能力の検討

2・3・1 洗浄に最低限必要な IPA 量の算出

効率的な洗浄を行うにあたり,適切な洗浄溶剤量を明らかにする必要がある.そこで洗浄溶剤である IPA と研磨油の関係を検討する.図3は未洗浄研磨粉 50[g]について IPA 量を変化させ1回洗浄した時の研磨油除去割合を示す.図3の縦軸は1回の洗浄で除去された研磨油の全研磨油量に対する割合,横軸は研磨粉と IPA の重量割合である.

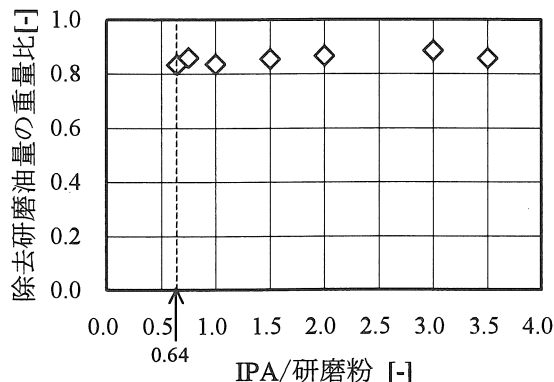


図3 IPA 量による除去研磨油量

研磨油量は IPA/研磨粉比 0.64~3.5の間では約 85%とほぼ一定の値になった.このことから除去研磨油量に対して IPA 量は影響しないことがわかる. IPA/研磨粉比 0.64 以下では研磨粉が IPA に十分沈まないため十分な攪拌を行うことができない. 十分沈む量から少しずつ IPA の量を増やしても図3を見てわかるようにあまり効果が見られない. 従って一番少ない量で洗浄を行った方が効率的に洗浄が行えるので,供試体としての研磨粉の洗浄

は研磨粉との比0.64のIPA量を用いて実験を行った。

2・3・2 攪拌羽根と容器回転による洗浄の検討

攪拌方法を決定するため、攪拌時に用いられる攪拌羽根による洗浄と図4に示す容器回転による洗浄の比較を行った。

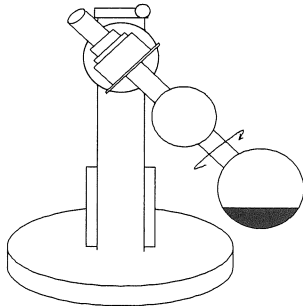


図4 容器回転による洗浄装置

未洗浄研磨粉とIPAを25:16の重量割合で入れ、約20分間攪拌した。その混合物をろ紙(3A)を敷いた直径9[cm]のガラスフィルターに入れ吸引ろ過した。ろ液(洗浄液)中の研磨油重量は蒸留によって測定した。以上の操作を全部で4回繰り返し行った。なお、実験装置及び器具は総合技術研究所、吉川研究室のものを使用した。

実験の結果を図5に示す。

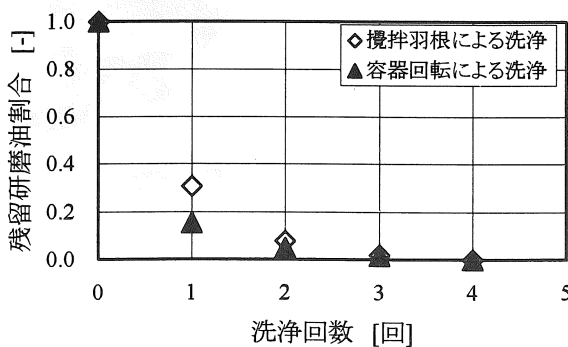


図5 洗浄方法による比較

攪拌羽根による洗浄と容器回転による洗浄を比較する。3回目の洗浄でどちらの洗浄も約98[%]の研磨油を除去することができた。今回の目的は研磨粉の再利用のための洗浄なので、完全な洗浄をする必要がないため3回の洗浄で十分であることがわかる。また攪拌羽根は1回目の洗浄で研磨油全体量の約70[%]除去したのに対して、容器回転洗浄は約85[%]の除去と2つの洗浄には15[%]の差が生じている。これは容器回転による洗浄が研磨粉全体を均等に洗浄したのに対して攪拌羽根では金属粉が存在するために十分に巻き上げることができず、均等に洗浄ができなかったためと考えられる。従って、総合的に考えると攪拌羽根による洗浄よりも容器回転による洗浄の方が洗浄能力が高いと考えられ、固液抽出機では容

器回転による洗浄を使うことにする。3章以降の試験片には容器回転による3回洗浄したものを使用した。

2・3・3 IPAの温度変化による洗浄能力への影響

閉回路無公害処理プロセスを考案する中で、IPAが約70[°C]になるということが明らかになった。このため、IPAの温度により、研磨粉の洗浄能力の変化に関する実験を行った。

実験方法はIPA120[ml]を入れたフラスコを所定の温度にした湯につけ加熱する。IPAが所定の温度になったところで研磨粉100[g]を入れ、それを容器回転により5分間洗浄を行った。洗浄後、フラスコ内の研磨粉が沈殿するまで放置し、上方の混合物を25[ml]取り、その後蒸留でIPAと研磨油を分離させ、それぞれの質量を計測した。実験結果を以下にまとめる。

表2 IPAの温度変化による洗浄能力

	IPA温度	°C	27	35	50	70
	蒸留前	研磨粉	g	100.01	100.00	100.02
	IPA	ml	120	120	120	120
	IPA+研磨油	g	18.08	18.63	18.35	18.33
蒸留後	研磨油	g	2.11	2.19	2.26	2.18
	IPA	g	13.55	14.06	13.13	12.90
混合液に対する研磨油の重量割合		wt%	11.67	11.76	12.32	11.89

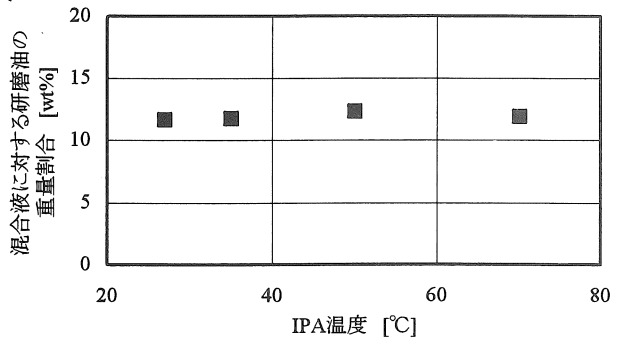


図6 温度の変化による洗浄量の変化

図6からIPAの温度を変化しても混合液に対する研磨油量はほぼ一定になっていることがわかり、IPAの洗浄能力は温度に依存しないと考えられる。

したがって、閉回路無公害処理プロセス中の固液抽出機への温度の影響はほとんどないと考えられる。

2・4 洗浄モデルの検討

洗浄のメカニズムを明らかにするために洗浄モデルを考案する。

各回における洗浄量の計算は以下のように考えた。

未洗浄研磨粉中に含まれる研磨油重量を W_0 [g]とし、研磨粉中の空隙は常に V_0 [ml]一定であるとする。

毎回 V [ml] の IPA で洗浄を行うと、洗浄後の研磨粉に含まれる液体部分 (IPA と研磨油の混合液体) の体積は洗浄回数 n にかかわらず V_0 [ml] であり、その中の研磨油濃度は洗浄液中の研磨油濃度と等しいとする。 n 回洗浄の洗浄液の研磨油濃度を C_n [g/ml], 洗浄液中の研磨油重量を E_n [g], n 回洗浄後の研磨粉に含まれる研磨油重量を W_n [g] で表した以下のような計算式を考案した。

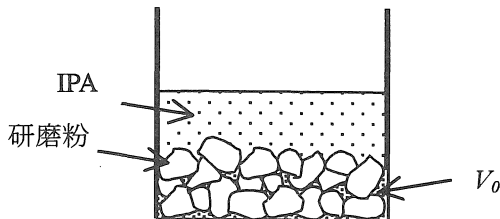


図7 研磨粉の状態

n 回目の洗浄の C_n, W_n, E_n は次のようになる。

$$C_n = \frac{W_{n-1}}{V_0 + V} = \frac{W_0 \cdot V_0^{n-1}}{(V_0 + V)^n} = \frac{W_0}{V_0 + V} \cdot S^{n-1} \text{ [g/ml]} \quad (1)$$

但し $S = \frac{V_0}{V_0 + V}$ と定義する。

$$W_n = C_n \cdot V_0 = \frac{W_0 \cdot V_0^{n-1}}{(V_0 + V)^n} \cdot V_0 = \frac{W_0 \cdot V_0^n}{(V_0 + V)^n} = W_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 + V}\right)^n = W_0 \cdot S^n \text{ [g]} \quad (2)$$

$$E_n = W_{n-1} - W_n = W_0 \cdot (S^{n-1} - S^n) = W_0 \cdot S^{n-1} \cdot (1 - S) \text{ [g]} \quad (3)$$

これを用いて未洗浄研磨粉に含まれる研磨油量の推定を以下のように行った。

上記の式(3)の両辺に対数をとると、

$$\log E_n = \log S \cdot (n-1) + \{\log(1-S) + \log W_0\} \dots (4)$$

となり E_n と $n-1$ の関数となる。したがって実験値から S, W_0 を求めることで研磨粉に残留する研磨油量を推定することができる。

研磨粉 150[g] と IPA125[ml] における実験値をもとに計算を行い、全研磨油量で無次元化を行った結果を表3に、実験値との比較を図8に示す。

表3 洗浄後の研磨粉に含まれる研磨油の割合 (未洗浄基準)

洗浄回数	回未洗浄	1回目	2回目	3回目	4回目	
残留研磨油割合	-	1.000	0.199	0.040	0.008	0.002

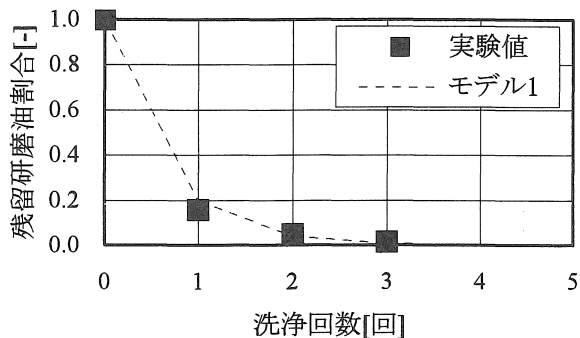
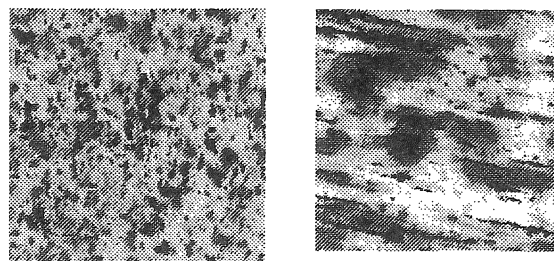


図8 実験値と未洗浄を基準としたモデル1の比較

図8からわかるようにモデル1はほぼ実験値を近似していることがわかり、これにより各回に残存する研磨油量を推定することができる。

3. 固化成型

これまでに研磨粉の再利用を目的に樹脂による固化が行われてきた(図9 a). その固化途中に磁場を付与することで研磨金属粉が配向する特性を見出した。(図9b) この新しい特性について研究を進める。



(a)無磁場状態 (b)磁場付与

図9 樹脂中の研磨金属粉

3・1 電気特性

3・1・1 固化方法の検討

洗浄した研磨粉を混合したエポキシ樹脂の固化する前に磁場を付与することで固化体の導電特性に新しい現象を見出した。そこで成型方法による電気抵抗の変化について検討を行った。

このための成型方法は以下の通りである。

- ・ 試験片

1. 長方形モデル

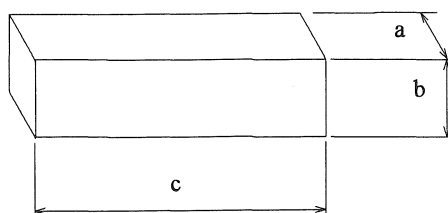


表4 試験片の長さ

	単位	長さ
a	mm	10
b	mm	2, 4, 6, 8, 10, 12
c	mm	70, 140, 210, 280

但し、bは成型時に変化するのが目標値である

- ・ 磁場付与方法
 - A 両端に永久磁石をつける方法
 - B 400巻きのソレノイドコイルに電流を流す方法
電流は1[A]~10[A]を変化させる。

表5 電流と磁束密度の関係

電流	A	1	2	3	4	5
磁束密度	Gauss	45	90	135	180	225
電流	A	6	7	8	9	10
磁束密度	Gauss	270	315	360	405	450

研磨粉混合割合

23.1, 21.8, 20.5, 19.1, 17.6, 16.2, 14.6, 13.0, 11.4 [volume%]

また長方形モデル10×10×70[mm]を用い、磁場の付与方法、脱気処理、加熱するまでの時間を変化させることにした。

1) 磁場の付与方法による影響

磁場の付与方法について検討するため磁石と400巻きのソレノイドコイルに電流を流す方法の比較を行った。磁石による磁化は型の両端に異なる極の400[Gauss]の永久磁石を常温状態で1分間与えたもの、ソレノイドコイルは160[Gauss]の磁場を1分間付与した。その結果を表6に示す。ここで示す結果はともに長方形モデル10×10×70[mm]、混合率は23.1[volume%]のものである。

表6 磁石とコイルの比較

	400[Gauss]の磁石による磁化	160[Gauss]の磁化
電気比抵抗[Ω・cm]	261.9	128.3

この結果から低い磁束にもかかわらずコイルによる磁場の付与の方が低い電気比抵抗を示した。これは磁石による磁化では両端に研磨金属粉を引き寄せられ、中央付近での抵抗が大きくなったためと考えられる。磁石による磁化した固化体の断面写真を図10に示す。この写真では端の厚さは中央部の1.3倍程度になっている。したがってソレノイドコイルによる磁場の付与の方が電気比抵抗を小さくすることができることが明らかとなった。



図10 磁石による固化体

2) 脱気処理による検討

固化体の製造過程で気泡が混入することが考えられるので500[mmHg]まで減圧を行い、脱気処理を行った。脱気処理を行ったものを行わなかったものの比較を図11に示す。

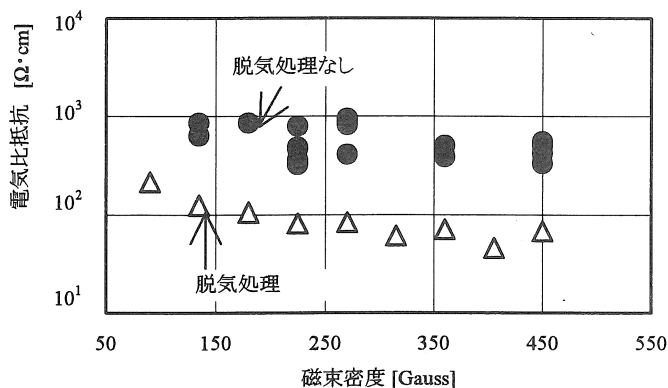


図11 脱気処理有無による比較

この結果から脱気処理を行ったものの方が常に電気比抵抗が小さいことがわかり脱気処理の有効性が明らかとなった。

3) 加熱するまでの時間

固化体の製造時に90[°C]、120[°C]、150[°C]の加熱を行ったが、常温の状態でも主剤と硬化剤の化学反応は行われている。そこで加熱までの化学反応の進み具合によって電気比抵抗が変化するかを検討する。そのために樹脂の主剤と硬化剤を攪拌してから加熱するまでの時間を変化させて、電気比抵抗の変化を調べた。その結果を図12に示す。

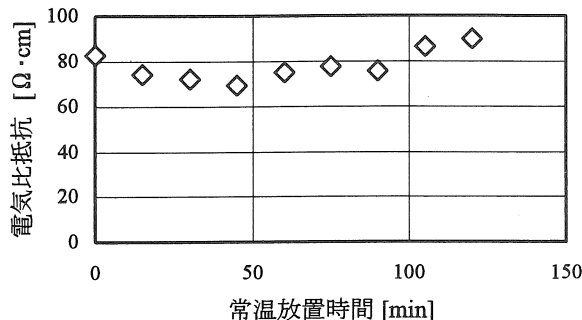


図12 加熱までの時間と電気比抵抗の関係

実験は 0~120 分まで行ったが全体として大きな変化が現れなかったが, 0 分や 105 分以上では電気比抵抗が大きくなっていることがわかる. 0 分に関しては加熱による化学反応が活発になりすぎ膨張が生じたためと考えられる. 105 分以上に関しては常温での化学反応が進んだためと考えられる. また 15~60 分付近で一番電気比抵抗が低下している. したがってこの範囲で加熱を行った方がより電気比抵抗が低下することが明らかになった. 以降, 本研究での常温の放置時間は 15 分として実験を行った.

以上のことから次のことがわかった.

- ・ 磁場を与える方法はソレノイドコイルの方が電気比抵抗は低下する.
- ・ 脱気処理により電気比抵抗が低下する.
- ・ 加熱は 15~60 分常温で放置してから行う.

本研究で行った中で最も電気抵抗を低くする成型方法を示す. 樹脂の主剤と硬化剤を所定の割合で 2 分間攪拌し, 研磨粉を加えて 3 分間攪拌する. そして型に流し込み, すぐに 500[mmHg]まで減圧し 1 分間保持する. そしてソレノイドコイルにより磁場を付与し, 主剤と硬化剤を攪拌してから 15 分経過次第, 炉に入れ, 90[°C], 120[°C], 150[°C]を各 1 時間ずつ加熱する. 加熱後一晩炉冷した.

3・1・2 研磨金属粉混合割合と磁束密度の検討

樹脂固化体は絶縁体と導電体の複合材料であるので, 研磨金属粉の混入割合によって電気抵抗が変化することが考えられる. また付与する磁束密度によっても変化することが考えられる. その実験結果を図 13 に示す.

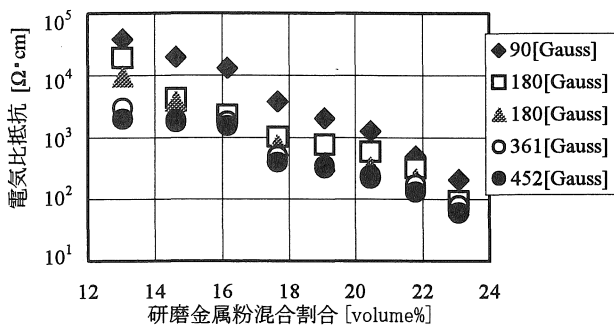


図 13 混合割合と磁束密度の影響

この結果から研磨金属粉混合割合の増加, または磁束密度の増加により電気比抵抗が低下することがわかった. したがって研磨金属粉混合割合を 13~23[volume%], 磁束密度を 90~452[Gauss]まで変化させることで電気比抵抗を 50~50000[Ω·cm]まで自由に变化させることが明らかとなった.

また研磨金属粉混合割合を一定にして磁束密度を变化

させた結果を図 14 に示す.

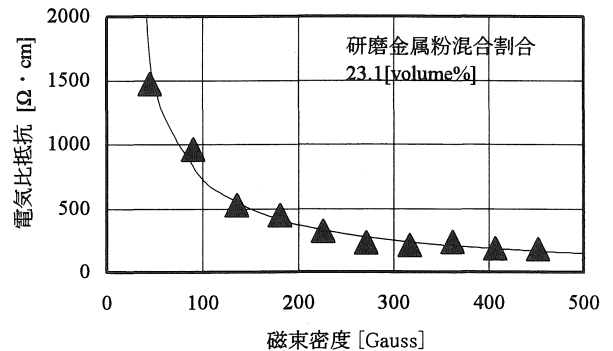


図 14 磁束密度の影響

この結果から磁束密度を变化させたときの実験値は反比例の関係にあると考えられる. 研磨金属粉混合割合 13~23[volume%]の実験範囲ではこの関係が確認できた.

3・1・3 固化体のモデル化

研磨粉混合割合と磁束密度の関係について考察する. そのために固化体の微小部分を取り出した図 12 に示すような単純なモデルについて検討した. このモデルは磁場の付与により研磨粉が配列した部分と樹脂の部分から成っている. また研磨粉の配列した部分の接触抵抗を考慮して研磨粉部は磁界方向に垂直な面の片方だけに接した形にし, 残りの部分を樹脂部としている.

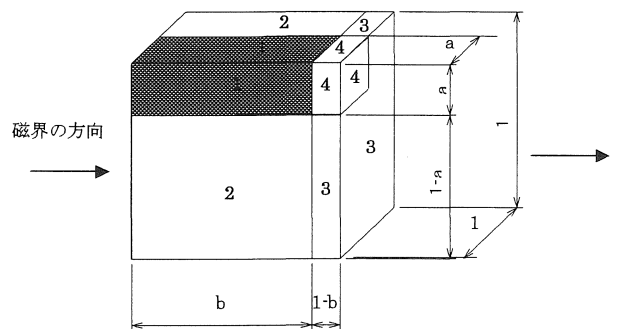


図 15 配向した固化体のモデル化

またこれまでの実験から研磨金属粉混合割合を一定にすると磁束密度と電気比抵抗の間には反比例の関係が成り立つことが明らかとなっているのでその定数を C としてモデルの各部の抵抗を順次考慮していくと電気比抵抗は次式により求められる.

$$R = m_r(1-b) \quad (5)$$

m_r : 樹脂の電気比抵抗 [Ω·cm]

m_m : 研磨金属粉の電気比抵抗 [Ω·cm]

また式中の b は次式により求められる.

$$b = \frac{K\{m_r^2 - m_r m_m - \frac{C}{G}(m_r - m_m)\}}{m_m(\frac{C}{G} - m_r) + m_r K(m_r - m_m)} \quad (6)$$

G: 磁束密度
K: 研磨金属粉混合割合
C: 比例定数 = GR

(6)式において研磨金属粉混合割合と磁束密度の他にCが含まれているためこれを決める必要がある。そこでこの値に関しては実験値より求めることとする。その結果を図16に示す。

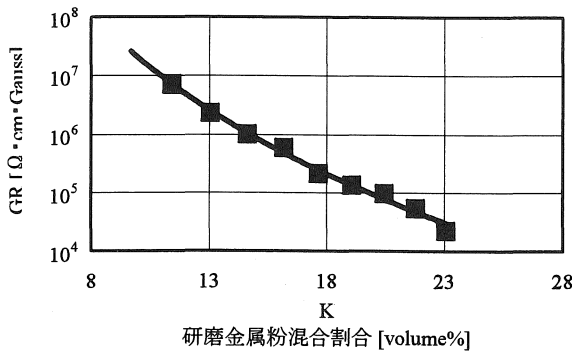


図16 GRの近似

実験値の近似式として次式が求められる。

$$GR = 1.12 \times 10^{15} \times K^{-7.75}$$

この式を式(6)に代入すると式(7)になる。この式によりbを求めることができる。(5)式、(7)式から推定した値を図17に示す。

$$b = \frac{K\left\{m_r^2 - m_r m_m - \frac{1.12 \cdot 10^{15} \cdot K^{-7.75}}{G}(m_r - m_m)\right\}}{m_m\left(\frac{1.12 \cdot 10^{15} \cdot K^{-7.75}}{G} - m_r\right) + m_r K(m_r - m_m)} \quad (7)$$

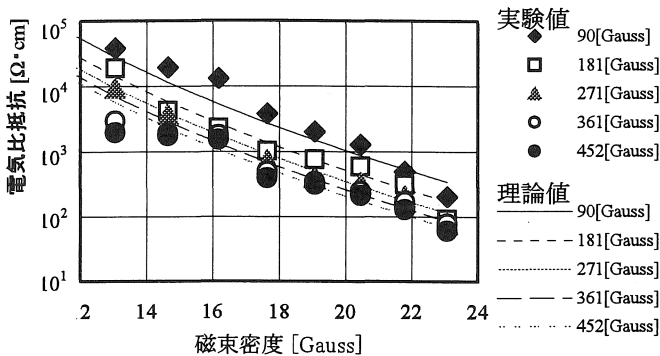


図17 モデルによる推定線

この結果から実験値とほぼ同様の傾向を示しており、

(5)式および(7)式から固化体の電気比抵抗を推定することが可能となった。

3・1・4 脱気処理を行わなかった固化体のモデル化

脱気処理を行ったものに関しては研磨金属粉混合割合と磁束密度を決定することで電気比抵抗を推定する方法を見出した。脱気処理を行わなかったものについても推定する方法を明らかにするために以下のような検討を行った。図15に示したモデルにおいて脱気処理を行ったことによって気泡の影響が減少したので、磁界方向に対して研磨金属粉と直列になっている樹脂の部分に気泡の影響を増加させる必要がある。その影響を樹脂で換算し、その厚さを L_a とし、気泡の影響を変化させた結果を図18に示す。

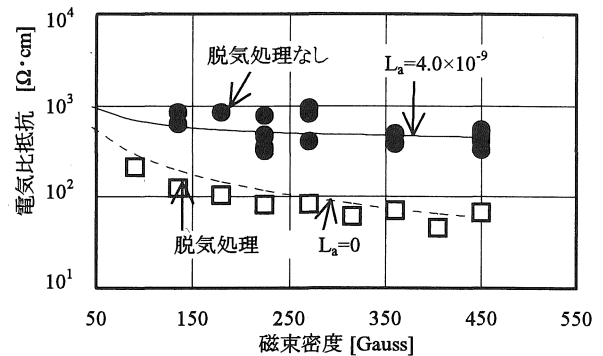


図18 脱気処理のモデル化

L_a を 4.0×10^{-9} にすることによって実験値を近似することができたので脱気処理を行わなかったものに関しては式(7)により推定できると考えられる。

$$R = m_r \cdot (1 - b - L_a) \quad (8)$$

L_a : 脱気により減少した空気層の厚さを樹脂の厚さで換算したもの

3・1・5 固化体の形状による影響

固化体の形状による影響を考慮する必要があるため、長方形モデルの長さによる影響を調べた。研磨粉混合割合を 23.1[volume%]とし、ソレノイドコイルにより磁束密度 180[Gauss]を 10 秒間与えた時、固化体の長さ c を変化させた測定値を図19に示す。

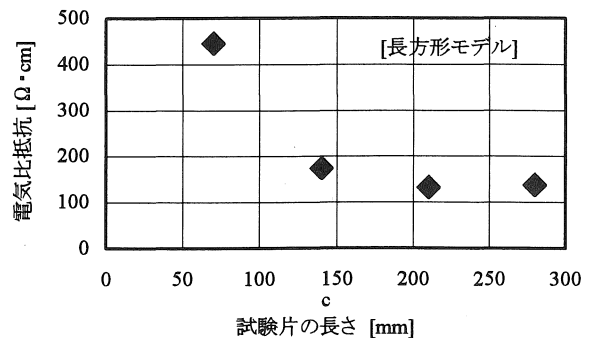


図19 長さによる影響

図 19 から試験片が長くなるにつれて電気比抵抗が低下していることがわかる。これは長さが長くなったことによって固化体の中央部の影響が大きく作用したためと考えられる。

次に断面の影響を検討するため試験片の厚さ b を変化した実験結果を示す。長方形モデル $10 \times 10 \times 70$ [mm], 研磨粉混合割合 23.1 [volume%], ソレノイドコイルにより 180 [Gauss] の磁束密度を与えた。その結果を図 20 に示す。

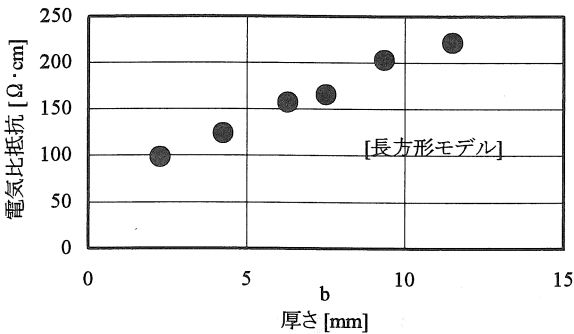


図 20 試験片の厚さの影響

試験片が厚くなるにつれて電気比抵抗が高くなる比例関係にあることがわかる。この原因は固化成型時に重力の影響で縦方向に研磨金属粉の偏りが生じたためと考えられる。またこのような影響があったためデータを補正する必要がある。電気比抵抗と厚さの関係は

$$\text{電気比抵抗} = 13.8 \times \text{厚さ} + 66.5$$

によって近似できるので、厚さを 10 [mm] のものを基準として次の補正を行った。

$$\text{電気比抵抗} [\Omega \cdot \text{cm}] = \text{実験値の電気比抵抗} [\Omega \cdot \text{cm}] \times (10 - \text{厚さ} [\text{mm}])$$

曲がりの影響を検討するために円弧モデルによる測定を行った。研磨粉混合割合 23.1 [volume%], ソレノイドコイルにより 35 [Gauss] を 10 秒間与えた固化体の測定を行った。曲率半径は 90 [mm] である。厚さによる影響を見るために電気比抵抗と試験片の厚さの関係を図 21 に示す。

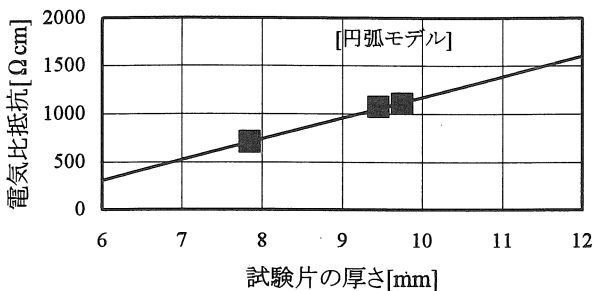


図 21 円弧モデルの補正

この結果長方形モデルと同様に比例関係になったので厚さ 10 [mm] に補正を行い、その結果を表 21 に示す。

また 3・1・3 節において確立した推定法から求めた推定値と比較する。

表 6 曲率半径 90 の結果

	単位	実験値	推定値
電気比抵抗	$\Omega \cdot \text{cm}$	1173	1285

実験値と推定値がほぼ等しくなったことから曲げによる影響はほとんどないと考えられる。

3・2 強度特性

3. 2. 1 曲げ試験

磁界の付与により配向した固化体の力学的特性を明らかにするため、代表値としてヤング率の測定を行った。曲げ試験では、試験片寸法は $2 \times 10 \times 50$ [mm] のものを使用し、磁場を付与しなかったものと 10 秒間 451 [Gauss] の磁束密度を与えて研磨粉を配向させたものの両方について実験を行った。実験方法はあらかじめ試験片の幅 (b [mm]), 厚み (h [mm]) をマイクロメータにより測定を行い、断面二次モーメント I を算出する。試験片を図 22 に示した試験装置にセットし、直線マイクロメータを回し徐々に負荷を加える。ダイヤルゲージからたわみ量を測定する。直線マイクロメータの先はアクリル円柱になっており、その側面にひずみゲージを貼り付け、アクリル円柱のひずみ量から試験片に加えられる荷重の量を求める。そのためにアクリル円柱に所定の荷重をかけ、それぞれのひずみ量を測定した。たわみ δ , 荷重 W , スパン距離 L , 断面二次モーメント I を式(8)に代入しヤング率を求める。

$$E = \frac{WL^3}{48\delta I} \quad (9)$$

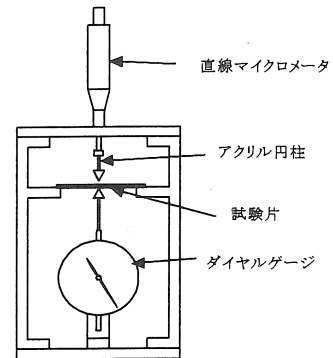


図 22 曲げ試験機

曲げ試験の実験結果を以下示す。図 23 の縦軸はエポキシ樹脂単体を基準とした相対ヤング率を示し、横軸は固化体内に混入した研磨粉の体積割合を示す。

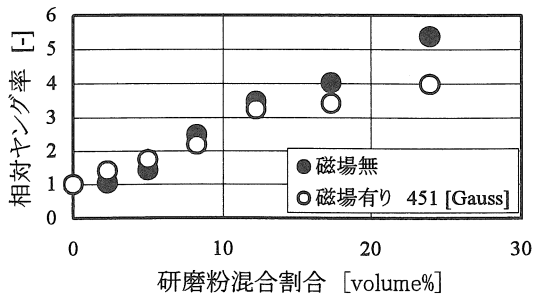


図 23 曲げ試験の結果

図 23 から磁場の有無に関係なく研磨粉混合割合が増加するにしたがってヤング率も増大していることがわかる。研磨粉混合割合 13[volume%]までは磁場の有無に関係なくほぼ同じ値を示しているが、それ以上になると磁場なしの方が高いヤング率を示した。したがってヤング率を求める時に研磨粉混合割合が 13[volume%]以下までは磁界を考慮する必要はないと考えられるが、13[volume%]以上では磁界を考慮する必要があると考えられる。

3. 2. 2 固化体内部のモデル化

研磨粉混合割合が増加することにより相対ヤング率も増加する傾向を示す原因を明らかにし、ヤング率を推定するために固化体のモデル化を行った。

磁場なしの固化体のモデル化を行う仮定として研磨粉の存在状況が均等に分布した混合物であるとした。またどの方向からも同じヤング率を示すことを考慮し、図 24 に示すように樹脂と研磨粉、樹脂と樹脂が荷重方向に対し直列と並列に並んでいる状態に混合しているモデルを考えた。

図中の a は固化体中の研磨粉の混合割合から求める。

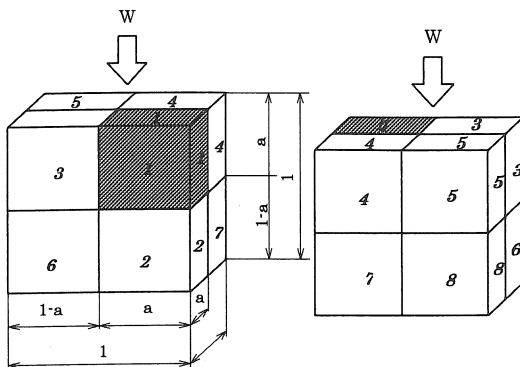


図 24 ヤング率のモデル化

このモデルのヤング率は、1~8 の各部の直列部、並列部のヤング率について全体に対する影響を計算し、それらを加算することで求め、その結果次式が得られる。

$$E = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\frac{a}{E_m} + \frac{1-a}{E_r}} a^2 + E_r(1-a)^2 + 2E_r a(1-a) \right\} + \frac{1}{4} \left[2\{E_m a + E_r(1-a)\} a^2 + 4E_r a(1-a) + 2E_r(1-a)^2 \right] \quad (10)$$

E_m : 研磨金属粉のヤング率

E_r : 樹脂のヤング率

同様に磁場を付与した固化体のモデル化を行う。そのために図 25 に示すモデルによりヤング率を求めると式 (11) のようになる。

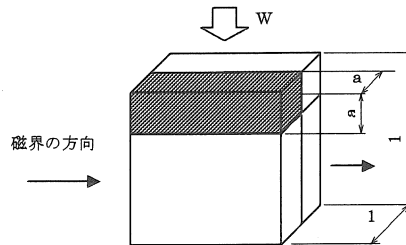


図 25 配列した固化体のモデル

$$E = (E_m a + E_r(1-a)) \cdot a + E_r(1-a) + \frac{a}{\frac{a}{E_m} + \frac{1-a}{E_r}} + E_r(1-a) \quad (11)$$

これらの結果を図 26 に示す。

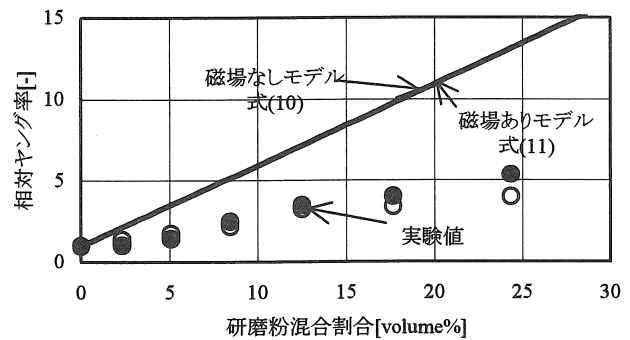


図 26 モデルとの比較

図 26 から実験値と推定モデルの値に大きな差が生じている。その原因として次のことについて検討した。

- 研磨粉混合割合のばらつきによる影響
- 空気の混入によるヤング率の低下
- 固化体の直列部と並列部の影響の違い

ヤング率の低下の原因が固化体内に存在する研磨粉の分散状態の中で研磨粉の最も少ないところでのヤング率を測定したと考えられるので、固化体中の研磨粉の分散状態を明らかにする。そのために乱数を用いたモンテカルロ法による検討を行った。

一辺が 200[μm]の正方形を考え, その中に研磨金属粉を混入していき, 所定の研磨粉混合割合になるまで混入していく. 研磨金属粉は実際の粒径分布にしたがって発生させ, 位置は乱数によって決める. その時研磨金属粉同士は接触させないようにした.

表7 計算結果

研磨粉混合割合[volume%]	2.33	5.08	8.41	12.5	17.6	24.3	33.3
最小混合割合[volume%]	1.60	3.46	5.73	9.50	12.1	18.7	25.3
研磨粉最小面積率[%]	69.0	68.0	68.1	76.0	68.6	76.8	75.9

この結果から研磨粉混合割合によるばらつきはあるが, 混合割合の最小部はおおよそ 70[%]程度の配合率であり, 平均値より 30[%]減少することが推定される. したがって研磨粉の分散を考慮したモデル値は式(9)を次のように補正し, 求めることとした.

$$E = \left[\{E_m a + E_r(1-a)\} \cdot a + E_r(1-a) + \frac{a}{\frac{a}{E_m} + \frac{1-a}{E_r}} + E_r(1-a) \right] \times 0.7 \quad (12)$$

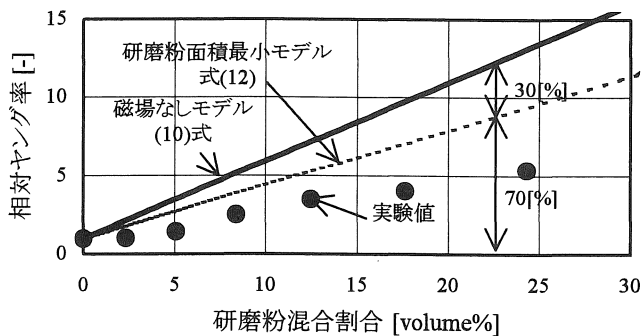


図27 磁界なし研磨粉面積最小モデルのヤング率

固化成型時に空気が混入することが考えられるために空気混入モデルを考える必要がある. そのモデルを図28に示す. このモデルにおいてヤング率を求めると式(13)のようになる

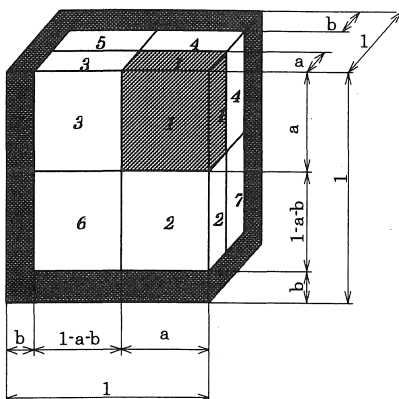


図28 空気混入モデル

$$E = \{(1-b)E_f + (2(1-b)^3 E_f) / 2\} / 2 \quad (13)$$

式中の E_f は次式により求められる.

$$E_f = \frac{1}{2(1-b)^3} \left\{ \left[\frac{a^2(1-b)}{\frac{a}{E_m} + \frac{1-a-b}{E_r}} + 2E_r a(1-a-b) + E_r(1-a-b)^2 \right] + \left[2\{E_m a + E_r(1-a-b)\} a^2(1-b) + 4E_r a(1-a-b)(1-b)^2 \right] \right\} / \{2(1-b)^3\}$$

同様に磁場を付与した固化体のヤング率は

$$E = \frac{1}{2} [E_f(1-b) + \{2(1-b)^3 E_f\} / 2] \quad (14)$$

$$E_f = \frac{1}{2(1-b)^3} \left[\frac{a(1-b)^2}{\frac{a}{E_m} + \frac{1-a-b}{E_r}} + a(1-b)^2 \{E_m a + (1-a-b)\} + E_r(1-b)(1-a-b) + E_r(1-b)^3(1-a-b) \right]$$

となる.

その結果を図29, 図30に示す.

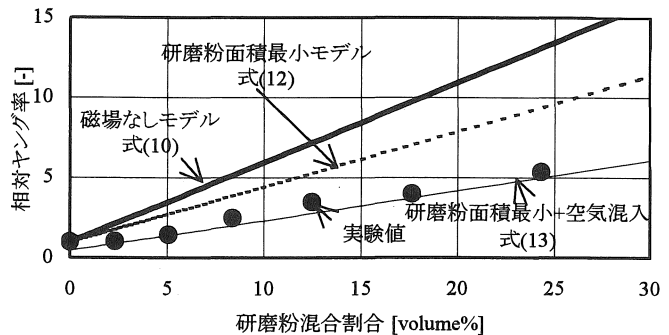


図29 磁界なし空気混入モデルのヤング率

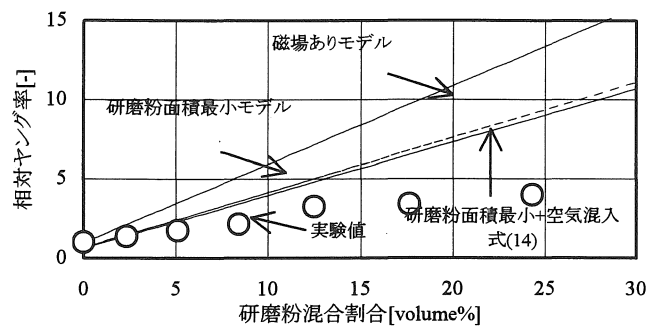


図30 磁界あり空気混入モデルのヤング率

図29から磁界なしの実験値を近似することができた. しかし図30の磁場を付与した固化体では差が生じている. この原因は磁界の有無によって直列部と並列部の影響が変わってくるのが考えられる. そこで直列部と並列部の比率を変化させた. その結果を図31に示す.

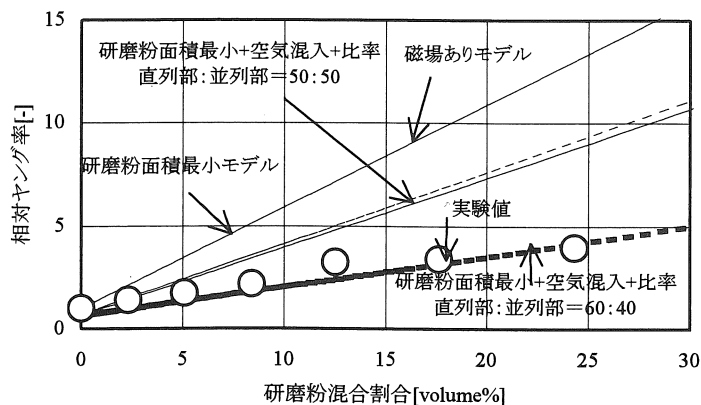


図 31 直列部と並列部

この結果直列部と並列部の比率を 60:40 にすることによって近似できた。これは固化体に磁場を付与することによって直列部と並列部の比率が変わったためと考えられる。

4. 固化体による製品化

樹脂による固化体の特性を考慮して樹脂の耐熱温度以下での低温熱源としての利用が可能であると考えられる。その一例として暖房便座の熱源としての利用についての検討を行う。

4・1 強度に関する検討

現在の暖房便座には ABS 樹脂が使用されている。そこで ABS 樹脂との比較を行った。その結果を図 32 に示す。

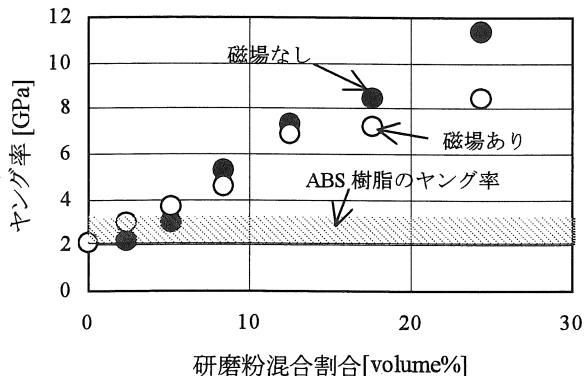


図 32 ABS 樹脂と固化体のヤング率による比較

ABS 樹脂のヤング率は 2~3[GPa]として比較する。図 4.2.2-1 から固化体の混合率 8[volume%]以上からは ABS 樹脂より高いヤング率を示した。このことからヤング率の観点から見れば、混合率 8[volume%]以上であれば固化体単体で便座を作るだけの強度があり、現在の便座よりも薄い厚みの便座を作ることができる。さらに ABS 樹脂の厚さを薄くできるので、便座の発熱量を減らすことができると考えられる。また混合率 8[volume%]以下におい

ても ABS 樹脂と同等程度であるのでヤング率から見れば十分便座を作る強度があると考えられる。以上のことから固化体単体でも便座を作ることではできると考えられるが、固化体単体では固化体を流れる電流が人体に流れる可能性があるため絶縁を行う必要があり、今回は固化体単体では便座を作らないこととした。

4・2 エネルギー面からの検討

市販されている便座を輪切りにしたところ、図 33 に示すように ABS 樹脂、空気、アルミ箔、ビニル被膜、導線の各層に分けることができる。あらかじめ各部分の寸法を測定し、市販の便座を暖めるときの電流を測定した。測定値を使い、固化体での作ったときの体積比抵抗、電力を算出した。算出結果を表 8 に示す。固化体による便座は固化体の厚みを 6[mm]とし、その断面の様子を図 34 に示す。

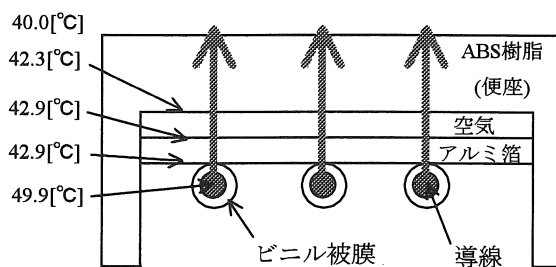


図 33 市販の便座の断面

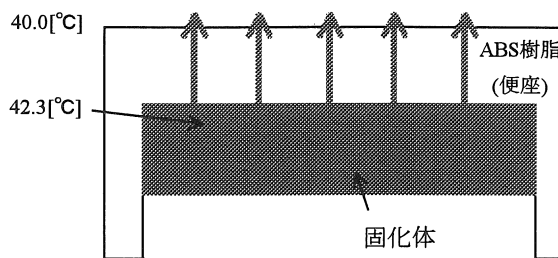


図 34 固化体を使った便座の断面

表 8 温度推定結果

従来		樹脂固化体		
電流	0.16 A	電流	0.063 A	
電気抵抗	316 Ω	電気抵抗	1600 Ω	
電気比抵抗	0.256 Ω・cm	電気比抵抗	53.8 Ω・cm	
消費電力	16 W	消費電力	6.3 W	
発熱体(導線)	49.9 °C	発熱体(樹脂)	43.4 °C	
発熱体(固化体)	43.4 °C	発熱体(固化体)	43.4 °C	
ビニル被膜	49.9 °C			
空気	42.9 °C			
アルミ箔	42.3 °C			
ABS樹脂	42.3 °C	ABS樹脂	42.3 °C	
表面温度	40 °C	表面温度	40 °C	

表8に固化体の厚みを6[mm]としての結果を示す。この結果から樹脂の電気比抵抗が53.8[Ω・cm]であることがわかる。また、電力に関しては市販の便座が16[W]必要であるのに対して 固化体で使ったものは6.3[W]と約10[W]節約することができる。このように市販の便座と固化体の便座で消費電力に差が生じたのは市販の便座の加熱は導線を加熱し、それが被膜、アルミ箔、空気を通して、いるのに対して、固化体の便座は図34に示すように固化体自身が加熱し、それが直接便座を暖めているためと考えられる。便座を24時間運転すると一年間で85.0[kWh]削減することができる。

またこれをCO₂に換算すると一年間で136[m³]削減できることになり、環境面からも樹脂による便座の有効性が明らかとなった。

5. 結言

本研究により以下の結論が得られた。

- 1) 固液抽出機では洗浄方式として最適な IPA 量「研磨粉 : IPA = 25 : 16」であることを明らかにし、容器回転による洗浄の有効性を示した。研磨粉の洗浄は温度依存性がないことを明らかにし、洗浄モデルを考案して洗浄中の研磨粉中に残存している研磨油を推定する手段を確立した。
- 2) 洗浄後研磨粉を樹脂中に混入させた固化体について、固化する前に磁場を付与することで研磨粉を配向させることがわかった。磁場の付与は磁石よりソレノイドコイルの方がより電気比抵抗を下げられることがわかった。電気比抵抗は磁化時間に影響されず、固化前に脱気することで低くなることもわかった。

- 3) 固化体の電気比抵抗は研磨粉混合割合の増加すること、与える磁場を強くすることで50~5000[Ω・cm]までの自由な電気比抵抗をもつ固化体を作製できることがわかった。研磨粉混合割合、磁場の強さを決めることで電気比抵抗を推定する方法を確立した。電気比抵抗は固化体の長さが長くなれば低くなり、高さが高くなれば高くなり、円弧であってもほぼ等しくなることが明らかとなった。
- 4) ヤング率は磁場の付与の有無に関わらず研磨粉混合割合を増加させることで高くなった。またヤング率は磁場を付与していないものでは固化体中の研磨粉のばらつき、空気混入の影響で低くなり、磁場を付与したものではそれに加え直列部と並列部の比率の影響で低くなることがわかった。
- 5) 暖房便座の熱源としての再利用法の目途をつけた。

6. 謝辞

本研究の一部は愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト研究費の補助で行われたことをここに記し、謝意を示す。

参考文献

1. 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, pp130-131
2. 西川兼康, 藤田恭伸 : 伝熱学, pp24-26, 1982.

(受理 平成14年4月10日)