

廃棄研磨粉の高付加価値利用に関する研究

Investigation on the Characteristics of Formed Resin Mixed with Metal Chips Wasted from High Speed Grinding Process

中原崇文[†] 吉川俊夫^{††} 戸伏壽昭[†] 宮崎誠道^{†††}

Takabumi NAKAHARA, Toshio YOSHIKAWA, Hiszaki TOBUSHI and Masamichi MIYAZAKI

Abstract: The advanced treatment technology for the metal chips, wasted from high speed grinding process, has been investigated. The outline of the research were reported in previous papers^{1),2),3),4),5)}.

This report describes about characteristics of formed resin mixed with metal chips wasted from high speed grinding process. Relation between specific electric resistance and residence grinding oil in metal chips are clarified. Medium value of specific electric resistance between an insulator and an electric conductor are obtained in this investigation. In the long term heating test, self-control performance are confirmed.

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。筆者らの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、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い、すでに報告されている^{1), 2), 3)}。これらの結果を要約すると、廃棄されている研磨粉を熱硬化性樹脂、例えばエポキシ樹脂で固化体に成型する過程で磁気を与えることにより研磨粉を配向させることが出来、この結果絶縁体と導電体の中間の電気比抵抗を持つ新しい物質を得ることが出来た^{4), 5)}。

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で回転させて工作物を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。

なお本論文では金属粉と砥石粉の混合物を研磨金属粉、研磨粉を樹脂で固めた成型品を樹脂固化体と呼ぶこととする。

2. 樹脂固化体の電気比抵抗特性

2. 1 洗浄度合いと電気比抵抗

排出される研磨粉には多量の研磨油が含まれおり、研磨油の残存量は洗浄プロセスに影響を与える。洗浄度合いが固化体の電気比抵抗特性に与える影響を調べた。イソプロピルアルコール(以下IPA)を使った研磨粉の洗浄において、その回数による残油量の違いをまず調査した。

IPAは試薬1級を使用し、切削油、研磨粉は帝国ピストンリング(株)長野工場より提供されたものを使用した。研磨粉1000(g)に対してIPA500(ml)を混入し10分間(75rpm)回転台で回転させ、最後にろ過をして、混合液(IPAと切削油)と研磨粉とに分け、ここまです洗浄回数1回とし、別に洗浄回数2回と3回、無洗浄の研磨粉に対して熱天秤で残油量を測定する。ただし、洗浄したものは自然乾燥2時間、真空乾燥2時間の処理を最後に行ったものとする。実験の結果、Fig.1に示すように洗浄なしに比べ1回でも洗浄すると研磨粉中に残っている研磨油は非常に少ないことが判った。

[†] 愛知工業大学 機械工学科 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 総合技術研究所 (豊田市)

^{†††} 帝国ピストンリング株式会社(東京都)

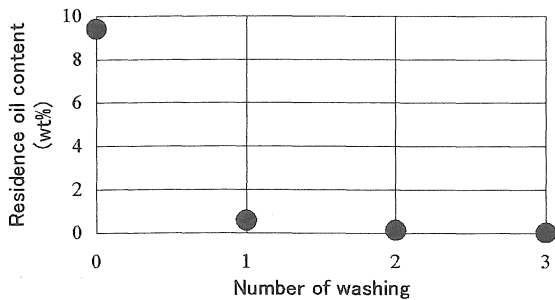


Fig.1 Residence oil content after washing the grinded chips wasted from high speed grinding process

Fig.1の結果より,洗浄回数1回で残油量が微量になり3回でほぼなくなるということがわかった. このようにして得られた研磨油の残っている研磨粉をエポキシ樹脂に混ぜ合わせ型に流し込み,研磨粉の洗浄回数の違いにより,電気比抵抗にどのような変化があるのかを調べた. 試験片の寸法はFig.2に示すものとした.

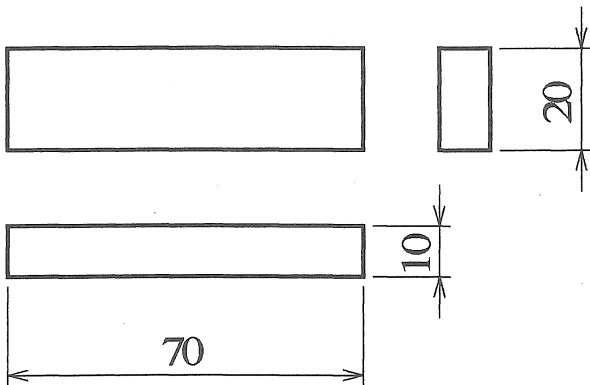


Fig.2 Size of test specimen (mm)

実験装置としては電気炉(樹脂を固化するための加熱装置),ポンプ(減圧処理するための装置),ソレノイドコイル(試験片を磁化するための装置・400巻き)を用いた. 実験の手順を以下に示す.

- (1) エポキシ樹脂と研磨粉[エポキシ樹脂:研磨粉=100:140(重量比)]を混ぜ合わせ型に流し込み(図2.4.2-1参照),減圧処理する.
- (2) 流し込んだ型をソレノイドコイルに入れ,電流(10A)を流し磁界を発生させて10秒磁化をする.
- (3) 磁化した型を電気炉に入れる. 炉の設定温度は最初の1時間を90℃,次の1時間を120℃,さらに次の1時間を150℃,計3時間加熱し,その後炉の電源を切りそのまま炉冷が終わるまで放置する.
- (4) 固化した試験片の幅(mm),高さ(mm),長さ(mm),電気抵抗(Ω)を測定し,電気比抵抗(Ω cm)を算出する.

電気比抵抗の算出方法は,測定したサンプルの電気抵抗

をサンプルの長さで割り,断面積を乗じて求めた. 実験で得られた結果はFig.3に示すように洗浄回数が少ないほど電気比抵抗が少なくなるという傾向が得られた.

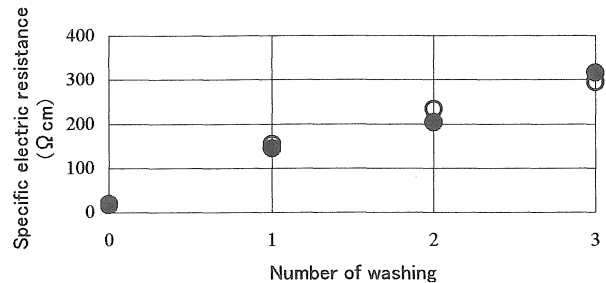


Fig.3 Electric resistance after washing the grinded chips

図中○と●で異なった日に製作したサンプルのデータを示したが再現性のあることがわかる. 未洗浄研磨粉では鉄粉単体を見た時その表面を切削油がおおっていて空気との接触を断っている. このため研磨粉が酸化するのを防いでいるが洗浄した研磨粉は洗浄後徐々に酸化が進行し,酸化すると鉄の電気比抵抗は高くなるので樹脂固化体にしたとき,電気比抵抗にも大きな影響を与えるものと考えられる. また磁場をかけた時にその表面の切削油が鉄粉の移動を容易にさせ,鉄粉の配列が整いやすくなり,電気比抵抗が低くなるようである.

洗浄のための手間やエネルギーを考えるとこのような結果から以降無洗浄研磨粉を使用した樹脂固化体について研究を進めていくこととした.

2. 2 電気比抵抗の方向性

エポキシ樹脂と無洗浄研磨粉の混合物の固化過程に与える磁場の影響が固化体の電気比抵抗の方向性にどのような影響が出るのか調べた.

実験方法はエポキシ樹脂と研磨粉[エポキシ樹脂:研磨粉=100:120, 100:140, 100:150, 100:160, 100:170, 100:180, 100:190, 100:200, 100:210(重量比)]をそれぞれ混ぜ合わせ型に流し込み減圧処理し以下のような手順で行った. 流し込んだ型をソレノイドコイル(400巻き)に入れ,電流(10A)を流し磁界を発生させて10秒磁化をする. 磁化した型を電気炉に入れ炉の設定温度は最初の1時間を90℃,次の1時間を120℃,さらに次の1時間を150℃,計3時間加熱し,その後炉の電源を切りそのまま炉冷が終わるまで放置する. 固化した試験片の幅(mm),高さ(mm),長さ(mm),縦方向電気抵抗(Ω),横方向電気抵抗(Ω)を測定し,縦方向電気比抵抗(Ω cm),横方向電気比抵抗(Ω cm)を算出する.

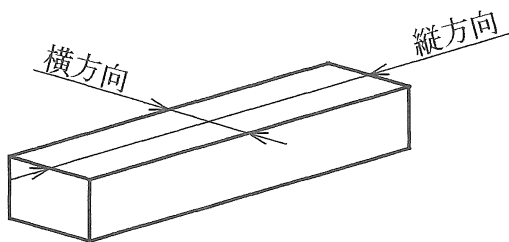


Fig.4 Description on longitudinal direction and transverse direction in measuring electric specific resistance

このようにして得られた実験結果のうち縦方向を Fig.5 に、横方向を Fig.6 さらに縦横比を Fig.7 に示す。

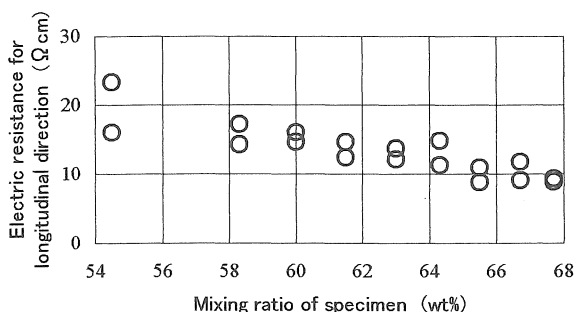


Fig.5 Electric resistance for longitudinal direction

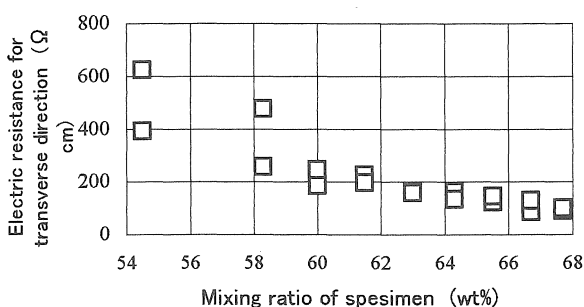


Fig.6 Electric resistance for transverse direction

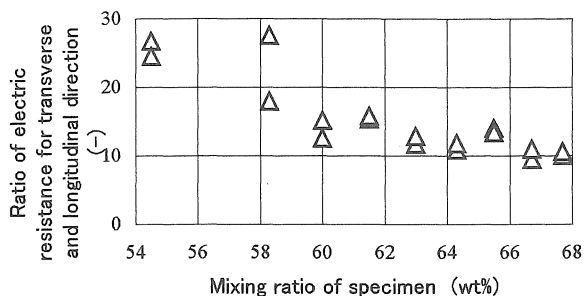


Fig.7 Ratio of electric resistance for transverse and longitudinal direction

Fig.5 と Fig.6 の結果より、エポキシ樹脂と研磨粉の混合率を変化させると、研磨粉混合率が大きいほど電気比抵抗が縦方向、横方向ともに低くなることが分かった。しかも Fig.7 の結果より、研磨粉混合率が大きいほど電気比抵抗縦横比までも低くなることがわかった。この理由は研磨粉混合率が大きくなると、樹脂中の研磨粉の量が増え研磨粉と研磨粉のとぎれが減少し、電気を流しやすくするため、電気比抵抗は低くなると考えられる。低い電気比抵抗を得るには研磨粉混合率を上げればよいといえる。しかし混ぜ合わせた時の流動性は、固体である研磨粉が増加し低下すると考えられ、研磨粉混合率が 67.7(wt%)より上になると、混ぜ合わせて流し込むことが非常に困難となる。

2.3 磁場付与方式の影響

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。

Table 6 Comparison of magnetizing effect between permanent magnet and coil

	Magnetizing with permanent magnet of 400[Gauss]	Magnetizing with coil of 160[Gauss]
Specific electric resistance [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。

2.4 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。

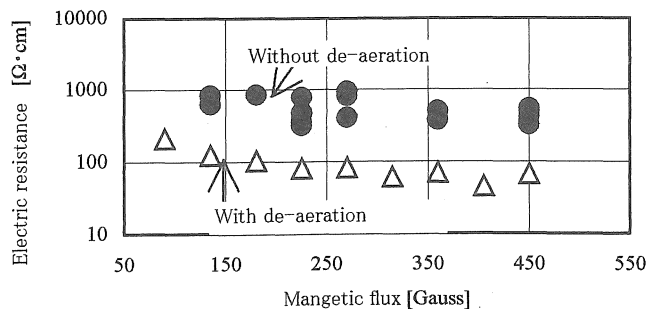


Fig.8 Effect of de-aeration during forming process

脱気処理を行ったものを行わなかったものの比較を Fig.8 に示す. 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.

2. 5 硬化温度を変化させた時の影響

試験片を固化させる時の温度が固化体の電気比抵抗にどのような影響が出るのか調べた. 実験方法は以下のとおりである. エポキシ樹脂と研磨粉[エポキシ樹脂:研磨粉=100:140 (重量比)]をそれぞれ混ぜ合わせ型に流し込み減圧処理する. 流し込んだ型をソレノイドコイルに入れ, 電流を流し磁界を発生させて10秒磁化をする. 磁化した型を電気炉に入れる. 炉の設定温度は最初の1時間を90℃, 次の1時間を120℃, さらに次の1時間を150℃, 計3時間加熱し, その後炉の電源を切りそのまま炉冷が終わるまで放置する. これと同じ方法で最初の1時間の温度だけを80℃, 70℃, 60℃, 55℃, 50℃(Fig.9 参照)と変化させてそれぞれ試験片を製作する. 固化した試験片の幅(mm), 高さ(mm), 長さ(mm), 縦方向電気抵抗(Ω), 横方向電気抵抗(Ω)を測定し, 縦方向電気比抵抗(Ω cm), 横方向電気比抵抗(Ω cm)を算出する.

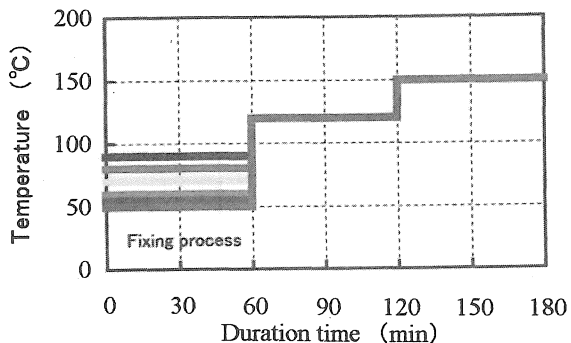


Fig.9 Temperature profile in solidifying

実験結果を Fig.10,11,12 に示す.

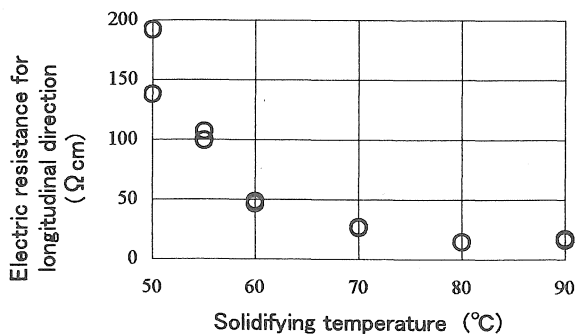


Fig.10 Specific electric resistance of longitudinal direction

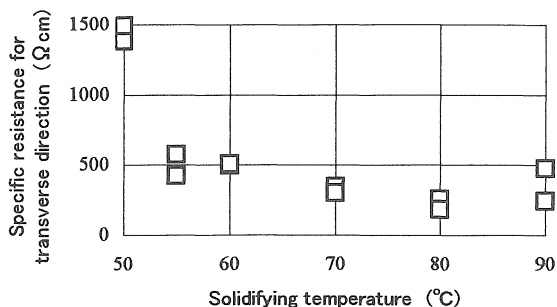


Fig.11 Specific electric resistance for transverse direction

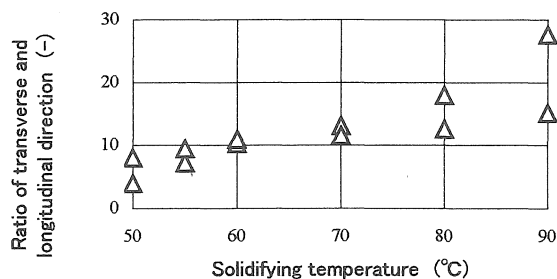


Fig.12 Ratio of specific electric resistance for transverse and longitudinal direction

Fig.10,11 の結果より硬化温度を変化させると, 硬化温度が高いほど電気比抵抗が縦方向, 横方向ともに低くなることが分かった. しかし Fig.12 の結果より, 硬化温度が高いほど電気比抵抗縦横比は高くなるといえる. この理由は次のように考えられる. エポキシ樹脂は3次元の網目構造になる事で硬化し, 研磨粉は固定される. そして, 硬化温度が高いほうが炉冷した際のエポキシ樹脂の熱収縮率が大きくなり, 研磨粉同士の接触が多くなる事によって電気比抵抗が低くなると考えられる. これは一般的に他の樹脂でも同じ現象がみられる. しかし, 樹脂は初めの1時間でほとんどの硬化反応が起こるため, 発熱温度以上には温度を設定することは出来ない. エポキシ樹脂では硬化温度は90℃までとする必要がある. 1時間を越えれば温度を少しずつステップアップ出来るので時間短縮のためには良いと言える.

2. 6 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 Fig.13 に示す.

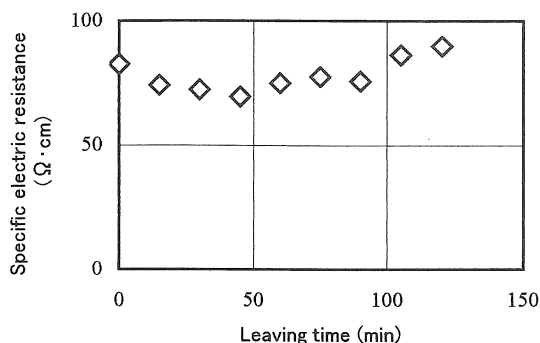


Fig. 13 Effect of leaving time to specific electric resistance

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。

2. 7 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 Fig.14 に示す。

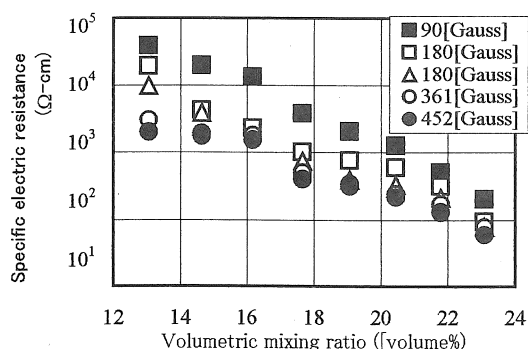


Fig. 14 Effect of magnetic flux on electric resistance

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できることが明らかとなった。

3 固化体の長時間発熱特性

樹脂固化体を電気発熱体として実用化するためには長時間連続使用の試験を行う必要があり、電気発熱体として長時間使用すると樹脂固化体にどのような影響が出るのか調べた。実験方法は電気比抵抗が 123(Ω·cm)の試験片 [20mm×14mm×210mm (幅×高さ×長さ)]に熱伝対を取付け、AC100(V)の電圧を縦方向にかけ、長時間電圧をかけた状態にし、所定の時間で温度と電気抵抗を測定した。60 分の実験結果を Fig.15,16 に示す。

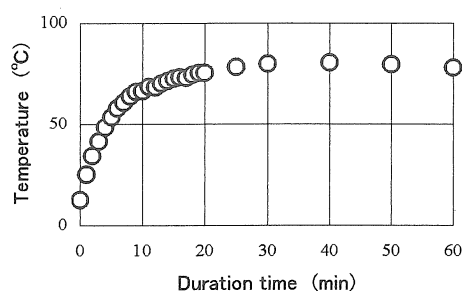


Fig. 15 Behavior of temperature

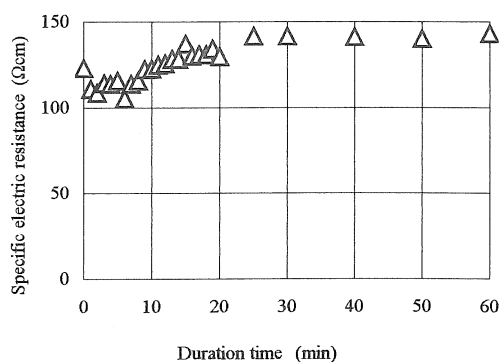


Fig. 16 Behavior of specific electric resistance

Fig.15 の結果より、60 分までの発熱温度は急激に上昇し 80(°C)付近で安定することがわかった。Fig.17 に示すように、電気比抵抗は電圧をかけた直後からやや下がり、温度が安定すると共に 140(Ω·cm)付近で安定することがわかった。この結果をヒントにしてさらに長時間の特性を調べたが、その結果を Fig.17 に示す。最初の 1 時間では急激に温度が上昇するが、その後は 40~65(°C)の範囲で推移することがわかった。また、安定していた後に温度が下がる場合は、急激に下がるという傾向がある。この試験では電圧などの外的条件はまったく制御しない状態で放置したものであるが平均して 50°C 付近の温度に保たれるということがわかった。自律的制御が出来ている

といえる。

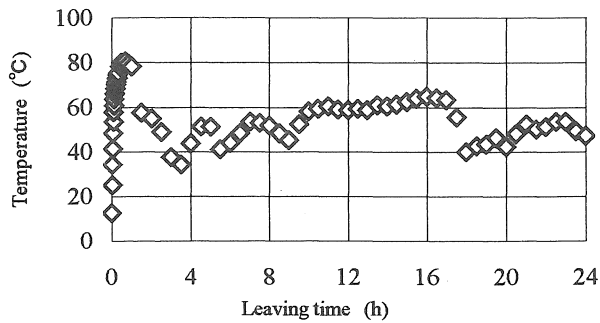


Fig. 17 Temperature behavior without power control

一般的に伝導体は温度が高くなるとその電気抵抗も高くなるということは知られており、樹脂固化体についても同様で今回の実験で、樹脂固化体に電圧をかけ発熱させるとその熱で樹脂固化体の抵抗も高くなる。そして電流が流れにくくなると発熱量が少なくなり放熱量の方が増し、温度が下がり、抵抗が低くなり電流が流れやすくなる。そしてまた、放熱量よりも発熱量が増し温度が上がる。樹脂固化体に電圧をかけるとこの一連のサイクルで温度変化が出てくるものと思われる。

4 固化体を用いた製品の検討

樹脂固化体の特性を考慮した利用について検討する。50°C以下の発熱が可能であるので身近なものとして暖房便座を考えることとした。

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 Fig.18 に示す。

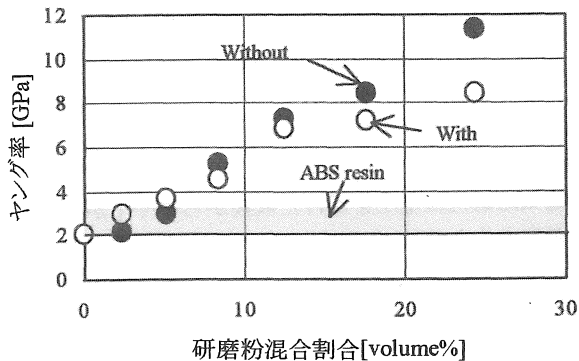


Fig. 18 Young modulus of ABS resin and solidified resin

ABS 樹脂のヤング率は 2~3[GPa]として比較する。Fig.18 から固化体の混合率 8[volume%]以上は 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、Fig. 19 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。算出結果を参考にして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 Fig. 20 に示す。

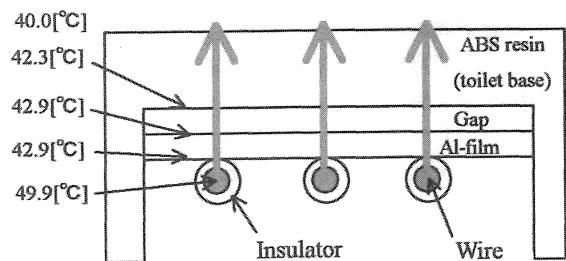


Fig. 19 Section of conventional toilet base

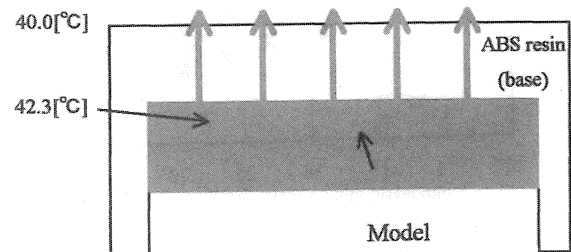


Fig. 20 Section of new model

実測寸法を参考にして算出した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[kW]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。

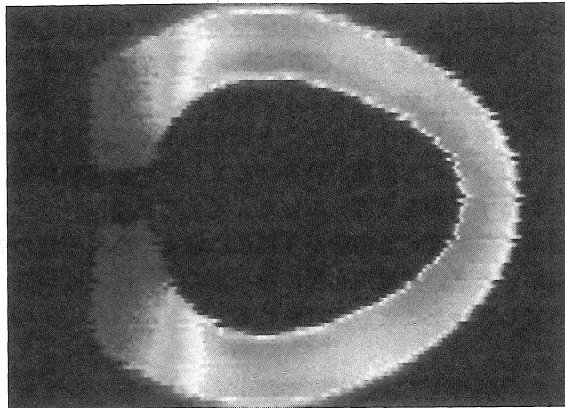


Fig.21 Temperature distribution measured by infra-red

試作便座の温度分布を赤外線により測定した結果を Fig.21 に示す。かなり様な分布であることがわかり、従来の発熱線方式に比べ利用価値が高いといえる。

5 可撓性の付与による付加価値の向上

今まで述べてきた樹脂固化体はヤング率にして 10 から 20 (Gpa) 程度の強さを持っていることがわかっている。利用範囲を拡大するためにエポキシ樹脂をベースにして可撓性を加えた場合の特性について研究した。

5. 1 可撓性付与の方法

これまで使用してきたエポキシ樹脂には弾性が無く、製品化を進めていく上でかなりのマイナス要素となってしまう。そこで、弾性に富んだゴム材料のような材料を探り、製品化の枠を上げられるようにする。

可撓性付与剤の選定条件は以下のようにした

- ・より兼価な素材
- ・省エネで製造できる
- ・環境によい
- ・弾性がある
- ・製造過程が簡略できる

選定条件により以下の 3 つを選定した。

- ①不飽和ポリエステル
室温で効果反応が起きる
反応速度が速い

エポキシ樹脂より兼価
弾性がある

②ジェリーキャスト

弾性がある
有害物質を発生しない
簡単に溶かすことが出来る
マイナス 15℃でも硬くならない

③エポキシ樹脂への可撓性付与剤の添加

弾性がある
エポキシ樹脂のひび割れ防止
粘度が低く扱いやすい

この 3 つのうち、これまで行ってきた本研究と比較をできるということで、エポキシ樹脂への可撓性付与剤の添加を使用し、研究を続けていくことにした。可撓性付与剤についてはエポキシ樹脂に比べ分子の構造が長鎖状であるため、添加することによって粘度が高くなり、ひび割れ防止や撓ませることが出来る。

Table 2 Composition of flexibilizer

Flexibilizer	Manufacturer	Dai-nipon Ink Co
	Name	EPICLON707Lot
	Characteristics	Plypropyrene Gricohl Epoxy equivalent 308(g/eq) Viscosity 57(mPa) at 25°C

エポキシ当量(equivalent)については化学反応性にもとづいて定められた元素(単体)または化合物の一定量のことと、基反応の数が 6×10^{23} 個を 1 当量としている。

- (A)エポキシ主剤(エピクロン 857)200g/eq
- (B)可撓性付与剤(エピクロン 707)308g/eq
- (C)硬化剤.....58g/eq

以後、樹脂を混合させる割合はこのエポキシ当量を考慮しそれぞれの質量を算出している。(A)と(B)の当量の和と(C)の当量とが等しくなるように混合する。例として、混合割合を(A):(B):(C)=200:308:116 (g)としたとき、当量でみると(A):(B):(C)=1:1:2 (eq)となっていることがわかる。このとき、可撓性付与率が 50%であると定義し以後使用していくこととする。

5. 2 可撓性を付与した固化体の電気特性

これまで本実験で使用してきたエポキシ樹脂に可撓性付与剤を添加することで電気比抵抗にどのような影響を及ぼすかを調べる。

実験方法は可撓性付与率を 10,20,30,40,50,100(wt%)の割合で混ぜ合わせたエポキシ樹脂と研磨粉をそれぞれ混ぜ合わせ(このときのエポキシ樹脂と研磨粉の割合はすべて 100:140(重量比)とする)型に流し込み、減圧処理する。流し込んだ型をソレノイドコイルに入れ、電流を流し磁界を発生させて 10 秒磁化をする。磁化した型を電気炉に

ったため 60℃と低めに設定し 3 時間加熱、その後炉の電源を切りそのまま炉冷が終わるまで放置する。これと同じ方法で温度を 70℃、80℃、90℃と変化させてそれぞれ試験片を製作する。次に従来と同じように、設定温度は最初の 1 時間を 90℃、次の 1 時間を 120℃、さらに次の 1 時間を 150℃として計 3 時間加熱し試験片を製作する。固化した試験片の幅(mm)、高さ(mm)、長さ(mm)、縦方向電気抵抗(Ω)、横方向電気抵抗(Ω)を測定し、縦方向電気比抵抗(Ωcm)、横方向電気比抵抗(Ωcm)を算出する。実験結果をいかにまとめて示す。Fig.22 は可撓性付与率を変えた場合に生じる長さ方向の電気比抵抗の変化を、Fig. 23 には幅方向の変化、Fig. 24 には電気比抵抗の長さ方向と幅方向の比の変化を 2. 3 で述べた固化温度をパラメータとして示す。

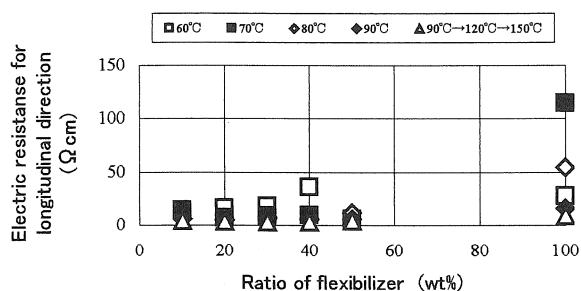


Fig. 22 Electric resistance for longitudinal direction

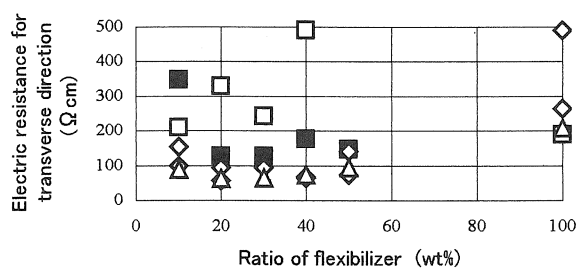


Fig. 23 Electric resistance for transverse direction

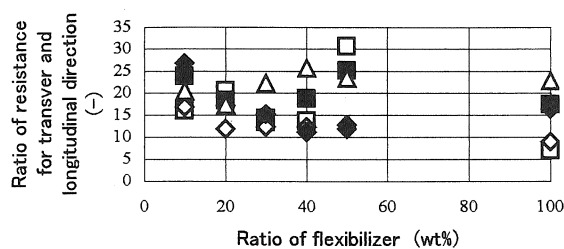


Fig. 24 Ratio of resistance for transverse and longitudinal direction

これらの結果より、全体的に可撓性付与率が高く、さらに硬化温度が高いほうが電気比抵抗は低くなることがわかった。しかし、可撓性付与率が 100%の場合、飛びぬけて高い値を示している。硬化温度の変化による電気比抵抗への影響については可撓性付与剤を添加させたとしても成り立つことがわかった。可撓性付与率の変化による電気比抵抗への影響については、可撓性付与剤(エピクロン 707)の粘度が低い(57[mP])のでエポキシ樹脂に添加することにより、エポキシ樹脂全体としての粘度も低くなる。磁界をかける際に研磨粉の移動が容易になり電気比抵抗が低くなる。しかし、可撓性付与率を高くしてゆくとケント紙を利用して試験片の型を作っていたので樹脂が染み出してしまい、実験結果に少なからず影響を及ぼしていたと考えられる。

問題点として混ぜる樹脂が 3 種類に増え、それぞれの質量において高い精度が必要になったので、再現性が低くなってしまったことがあげられる。

5. 3 可撓性付与による強度の変化

これまで本実験で使用してきたエポキシ樹脂に可撓性付与剤を添加することでヤング率にどのような影響を及ぼすかを調べる。実験方法は以下のとおりである。可撓性付与率を 0,10,20,30,40,50,100(wt%)の割合で混ぜ合わせたエポキシ樹脂と研磨粉をそれぞれ混ぜ合わせ(このときのエポキシ樹脂と研磨粉の割合はすべて 100:140(重量比)とする)型に流し込み、減圧処理する。流し込んだ型をソレノイドコイルに入れ、電流を流し磁界を発生させて 10 秒磁化をし、磁化した型を電気炉に入れる。炉の設定温度は樹脂が型からふきこぼれる恐れがあったため 60℃と低めに設定し 3 時間加熱、その後炉の電源を切りそのまま炉冷が終わるまで放置し、これと同じ方法で温度を 70℃、80℃、90℃と変化させてそれぞれ試験片を製作する。次に従来と同じように、設定温度は最初の 1 時間を 90℃、次の 1 時間を 120℃、さらに次の 1 時間を 150℃として計 3 時間加熱し試験片を製作する。固化した試験片を 10×50×3[幅(mm)×長さ(mm)×厚み(mm)]にカットし、その後曲げ試験を行う。実験結果を Fig.25 に示す。

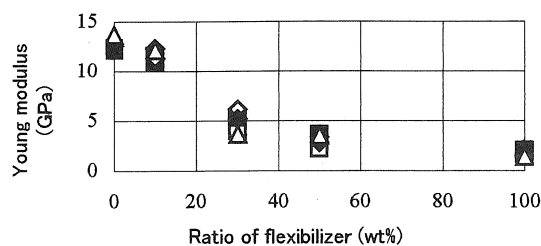


Fig. 25 Young modulus with flexibilizer

Fig.25 の記号は Fig.22 と同じ条件を示しているが、この結果より、可撓性付与率が高いほどその固化体のヤング率

果より、可撓性付与率が高いほどその固化体のヤング率は低くなるとともに、可撓性付与剤を添加した場合でも硬化温度の変化にはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。可撓性付与剤とはエポキシ樹脂に弾性を持たせる働きがあることが証明できた。さらに可撓性付与率を高くすればヤング率を低くさせることができる。しかし、可撓性付与率が40%を越えるころにはヤング率の大幅な低下が見られないだけでなく、もろく壊れやすくなってしまふ。以上よりエポキシ樹脂に可撓性付与剤を添加しヤング率を下げるには、可撓性付与率は10~20%程度での使用が適しているといえる。

5.4 ひずみと電気特性

可撓性を付与したことにより変形しやすくなるが、変形すなわちひずみを与えたときに電気抵抗特性がどのように変化するかを実験的に調べた。実験方法は以下のとおり。可撓性付与率を0,10,20,30,40,50 (wt%)の割合で混ぜ合わせたエポキシ樹脂と研磨粉をそれぞれ混ぜ合わせ(このときのエポキシ樹脂と研磨粉の割合はすべて 100:140(重量比)とする)型に流し込んで銅線を埋め込み、減圧処理する。流し込んだ型をソレノイドコイルに入れ、電流を流し磁界を発生させて10秒磁化し、磁化した型を電気炉に入れる。炉の設定温度は最初の1時間を90℃、次の1時間を120℃、さらに次の1時間を150℃、計3時間加熱し、その後炉の電源を切りそのまま炉冷が終わるまで放置する。固化した試験片を撓ませた状態で気抵抗を測定し、その結果から電気抵抗の変化率を算出する。

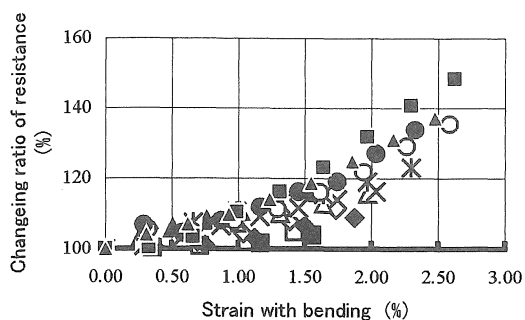


Fig.26 Change of electric resistance with strain

実験結果を Fig.26 に示すが、図中の記号の違いは可撓性付与剤の添加割合の違いを表すがいずれの添加割合でもひずみとともに縦方向の電気抵抗は増加していることがわかる。このようにひずみを与えると電気抵抗が増えるメカニズムは詳しい測定が出来ていないので未知の分野も多いが、今回のように曲げによるひずみの特有な現象であるとも言える。すなわち、試験片の中心に荷重をかけて曲げのたわみを与えると、試験片の各断面が相対的に回転すれば、上側は圧縮され縮み、下側は引張られ伸び

る。樹脂固化体は Fig.27-1 で示すように研磨粉の配列が一樣でありその隙間をエポキシ樹脂が埋めていると考える。

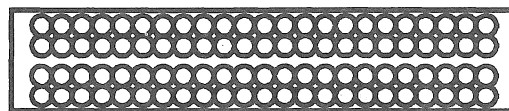


Fig.27-1 Arrangement model of chips in resin

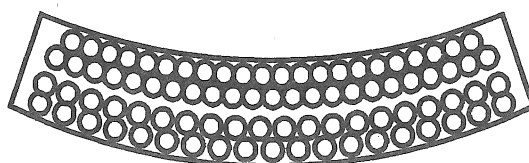


Fig.27-2 Arrangement of chips under bended condition

そこで荷重をかけ、たわませると Fig.27-2 のようになるものと推定される。研磨粉とエポキシ樹脂ではヤング率の大きさの違いによりエポキシ樹脂だけが荷重の影響で大きくたわむと考えられ、研磨粉の配列の変化が電気比抵抗に影響していると言える。Fig.27-2 を見ると、試験片の上側の配列は圧縮により接触面は少しずれるが Fig.27-1 の状態と大差は無いと考えられ試験片上側の圧縮による電気比抵抗への影響はほとんど無いと言える。試験片下側では引張られるので研磨粉の間に隙間が生まれ、この隙間ではエポキシ樹脂のみが引張られており、その影響により電気比抵抗が高くなるものと考えられる。このような特性は観点を変えれば利用価値の上がるものといえる。

この試験を実施中にひずみを与えた後電気抵抗特性が徐々に変化することに気がついた。詳しく測定するために以下のような試験を行った。試験片を撓ませて固定した状態で時間と共に電気抵抗を測定する。実験を開始してから0、10、20、30、40、50、60、90、120、150、180、210、240、270、300秒後にそれぞれ電気抵抗を測定する。実験結果を Fig.28 に示す。

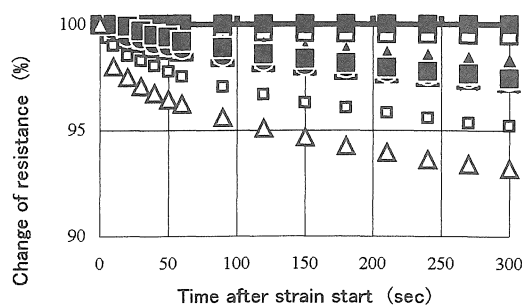


Fig.28 Change of resistance after start the strain

この結果より、樹脂固化体にひずみを与えた直後から電気抵抗が下がり始めるという傾向が得られ、その電気抵抗の値は時間が経つにつれて安定してくると推測できる。また、可撓性付与率が高くなるほどその変化が大きくなることがわかった。この理由は以下のように推定できる。樹脂固化体の電気抵抗は曲げひずみが起こると引張りの影響を大きく受けることになる。突発的に荷重がかかったと考えると、ヤング率の低いエポキシ樹脂だけが引張りを受け研磨粉同士の距離が広がるために電気抵抗が高くなるが、時間的経過を見たとき電気抵抗が低くなり始めるのは、突発的な荷重により伸びたエポキシ樹脂がクリープ現象を起こすため徐々に縮みだし、その結果研磨粉同士の距離も縮まったためであるものと考えられる。

6. 結論

以上の研究から以下のようなことが結論付け出来る。

- 1) いままでの研究によって得られた磁場を付与することによる従来に無い電気抵抗特性を持つ新物質の詳細なデータを得ることが出来た
- 2) 対象とする研磨粉は研磨油が残ったままのほうが電気抵抗特性は実用領域に近く洗浄という手間なしで利用で来ることがわかった
- 3) 磁場を与えることにより電気抵抗に方向性が現れており利用に当たって特異な特徴を見出すことが出来た
- 4) 可撓性を要求する利用方法がありこのために可撓剤の検討、可撓性を与えた場合の強度や電気特性を明らかにした
- 5) 可撓性を与えた場合、変形直後には電気抵抗が増すが時間とともに徐々に抵抗が減少し安定する傾向が新しくわかった

今後引き続き新しい特性を研究して付加価値の高い利用方法につなげて行きたいと考えている

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. 中原崇文、吉川俊夫、戸伏壽昭、松岡慎也、山田英介、宮崎誠道 “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”、愛知工業大学総合研究所 “研究報告” 第 4 号(2002)頁 19～30
3. 吉川俊夫、岩田博之、中原崇文 “エポキシ樹脂充填剤としての研磨粉に関する研究 第 1 報 硬化による導電性の発達と磁場印加の効果” ネットワークポリマー Vol.23, No.2 2002 pp.92-100 (2002)
4. 中原崇文、吉川俊夫、岡田教嗣、松岡慎也 “高速研磨工程から排出される研磨粉の洗浄と固化体の特性” エネルギー資源学会 第 20 回研究発表会講演論文集 2001.6.13-14 頁 341～346 (2001)
5. 中原崇文、吉川俊夫、松岡慎也 “高速研磨工程から排出される研磨粉の再利用に関する研究” 日本機械学会東海支部第 51 期総会講演会講演論文集(’02.3.8-9) No.023-1 頁 343～344 (2002)

(受理 平成 15 年 4 月 30 日)