

半径方向に傾斜組成した円筒型傾斜機能材料の製造方法の開発

立石 健太郎（技術本部 技術部） 炭矢 芳男（営業本部 営業企画部）

中野 光一（九州工業大学 大学院 生命体工学研究科）*

大崎 徹郎（福岡県工業技術センター） 蓮尾 東海（福岡県工業技術センター）

石橋 完（オタライト株式会社）

宮崎 良忠（計測検査株式会社）

渡邊 健太郎（計測検査株式会社）

射出成形法にて金属と樹脂を一体成形した部品は、それぞれの線膨張係数の違いにより、温度が大きく変化した際に熱応力が発生し、両者の界面にき裂が発生することがある。そこで、金属と樹脂の間に作用する熱応力を緩和するために、半径方向に線膨張係数を段階的に変化させた傾斜層を有する円筒型傾斜機能材料を使った整流子の開発に着手した。開発は産学官の連携体制で役割を分担して進められ、本稿では当社が担当した円筒型傾斜機能材料の製造方法の開発について報告する。

1. はじめに

当社が所属している福岡県工業技術センタークラブ 材料技術部において、射出成形法により金属と樹脂を一体成形（図1）したモータ部品の使用中に、金属と樹脂の間に数 μm の隙間が生じ、き裂が発生する等の課題が紹介され、この課題に取り組むために、「傾斜機能材料研究会」が立ち上げられた。き裂発生メカニズムは、整流子の温度が上昇した際に、銅と樹脂の線膨張係数の違いにより両者の間に熱応力が発生し、界面からき裂が進展するということが推定された。そこで、熱応力を緩和させるために、銅と樹脂の間に線膨張係数を半径方向に段階的に変化させた傾斜層を有する円筒型材料からなるモータ用整流子の開発に着手した。

本研究は、2008年度から2009年度にかけて（財）福岡県産業・科学技術振興財団（ふくおかIST）の産学官共同研究開発事業の支援を受け、研究テーマ名「放電プラズマ焼結法による自動車用傾斜機能性金属/樹脂複合材の開発¹⁾」として、研究総括責任者九州工業大学大学院 中野准教授のもと、民間企業のオタライト(株)殿、計測検査(株)殿、当社、さらに福岡県工業技術センター殿を加えた産学官の連携体制で取り組んだ。その中で当社は、粉末を圧縮成形する「積層方法の確立と粉末充填装置の開発」および「プラズマ焼結用グラファイト型の開発」を担当した。開発に

あたっては、プラズマ焼結による収縮率を考慮した粉末充填装置（以下、圧粉体用金型）を開発するとともに、金属/樹脂の混合比に応じた焼結条件（焼結温度、圧力、時間、雰囲気ガス）の検討、焼結後の冷却方法およびグラファイト型からの取出し方法の検討を行った。本稿ではその内容について報告する。

2. 実験方法および実験条件

開発にあたって、半径方向に傾斜層を形成させるための製造プロセスを検討し、それに適した圧粉体用金型、焼結用グラファイト型の設計・製作を行った。以下に、製造プロセスの検討内容を示す。

2.1 積層方法の検討

半径方向に傾斜組成した円筒型傾斜機能材料の製造方法として、二つの方法が特許公開されている。

一つは、2種類以上の粉末材料に分散剤および溶媒を加え、スラリー化したものを円筒型の回転容器に充填し、回転させて遠心力を付加することにより密度の大きい粉末を外側に、密度の小さい粉末を内側に傾斜組成させ、それを焼結させるという方法である²⁾。この方法では傾斜層の厚みの制御が難しく、密度の大きい粉末を内側に配置することができないという問題がある。

もう一つの方法は、外径の異なる複数の円筒状の仕切体を同心円状に配置し、それらの隙間に粉末を充填した後に仕切体を抜いて焼結させるという方法である³⁾。この方法では、仕切体の隙間を狭くすると粉末を充填する際に粉末がブリッジを形成して充填が困難になるため、仕切体の隙間を広くしなければならず、その結果、傾斜層の厚みを薄くできないという問題がある。

今回は自動車のセルモータに使われている整流子をモデルとして、これらの課題を解決するため、図2に示す構

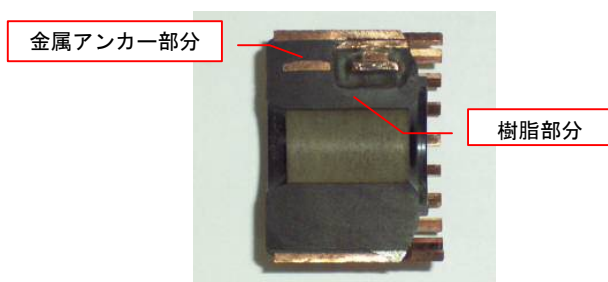


図1 射出成形法により一体成形した整流子断面

造を採用した。外側は円筒型の銅材，中心部は樹脂粉末の焼結品とし，その間の傾斜層は，銅粉末と樹脂粉末の混合粉末の焼結品とした。傾斜層が少ないほど製造コストを下げる事ができるため2層とし，銅側の傾斜層は銅75%と樹脂25%，樹脂側は銅50%と樹脂50%とした。また，傾斜層の厚みを薄くすることで従来の整流子より銅の使用量を減らす事ができるため，一層ごとに粉末を圧縮成形し傾斜層の厚みを薄くする方法を用いた。

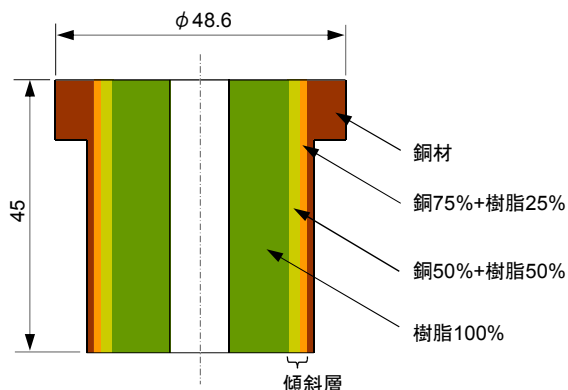


図2 整流子形状の傾斜機能材料断面図

2.2 焼結方法および製造プロセス

融点が大きく異なる銅と樹脂およびそれらの混合粉末から成る傾斜層を結合するため，銅側は焼結温度を高く，樹脂側は焼結温度を低く設定する必要がある。この特性を考慮して，低温かつ短時間で焼結可能な放電プラズマ焼結法を採用し，焼結を2回に分けて行った。

製造プロセスは図3に示すように，まず銅材の内側に銅側傾斜層を成形し，一次焼結させる。次に樹脂の圧粉体を成形し，一次焼結品との間に樹脂側圧粉体を成形後，二次焼結を行う。なお，これらの製造方法に関しては特許出願中である^{4,5)}。

3. 実験結果および考察

3.1 圧粉体用金型の設計・製作

圧粉体用金型の設計については，材料の選定，金型設計に必要な粉末および圧粉体の密度，金型の強度の3項目について検討を行い，設計・製作を行った。

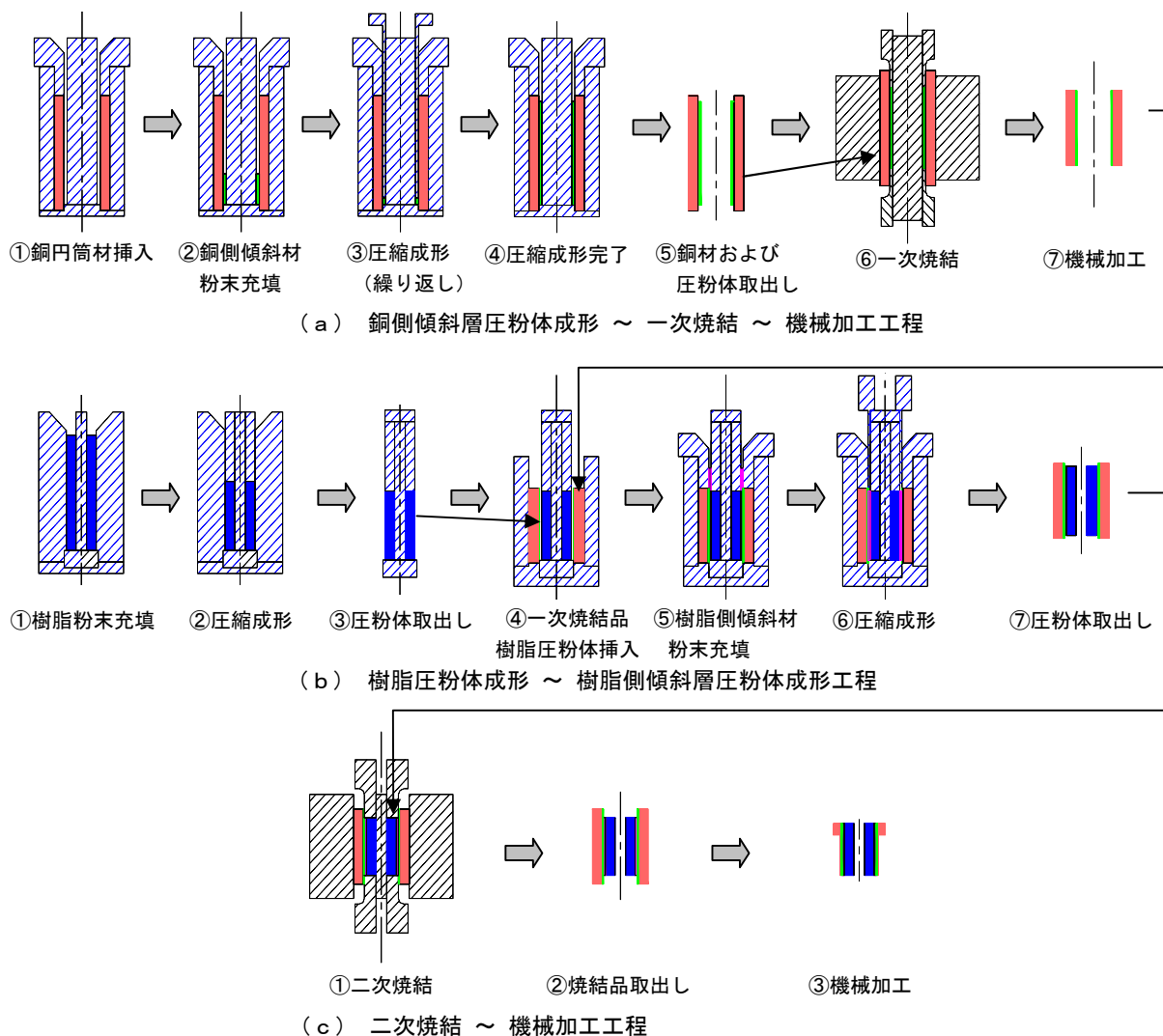


図3 製造プロセス

3.1.1 材料の選定

材料選定にあたり求められる要件は、金型の寸法を安定させるため熱膨張率が低いこと、圧粉体の圧縮成形に耐え得る強度を有すること、長期間の使用において耐食性を有すること等であり、これらの要件に見合い、かつ汎用性を考慮してオーステナイト系ステンレス鋼 JIS G4303 SUS303 を選定した。SUS303 は機械構造用炭素鋼 JIS G4051 S45C に比べると熱膨張率は高いが、圧粉体の成形を恒温環境で行うことで熱膨張の影響を緩和できるようにした。

3.1.2 圧粉体および焼結品の密度

圧粉体は成形圧力により充填度合いが変化するため、成形圧力 60MPa にて外径 130mm、厚み 30mm の円盤状の圧粉体を成形し、その質量および体積から圧粉体の密度を求めた。

焼結品密度は、次に示す計算により算出した。まず混合粉末中の銅と樹脂の質量比を求めるため、銅の質量比を RWC 、銅の密度を ρ_c 、体積比を RV_C 、樹脂の質量比を RWR 、密度を ρ_r 、体積比を RV_r とすると、次式が成り立つ。

$$RWC : RWR = \rho_c \times RV_C : \rho_r \times RV_r \quad (1)$$

式(1)から樹脂の質量比 RWR を求めると、次式となる。

$$RWR = (\rho_r \times RV_r) \times RWC / (\rho_c \times RV_C) \times \quad (2)$$

次に焼結品の密度を ρ_s とすると、

$$RWC / \rho_c + RWR / \rho_r = (RWC + RWR) / \rho_s \quad (3)$$

となり、この式から焼結品の密度 ρ_s は、

$$\rho_s = (RWC + RWR) / (RWC / \rho_c + RWR / \rho_r) \quad (4)$$

となる。式(2)および式(4)より、

$$\rho_s = \frac{\rho_c RV_C + \rho_r RV_r}{RV_C + RV_r} \quad (5)$$

となる。式(5)より混合粉末（銅 75%+樹脂 25%）、混合粉末（銅 50%+樹脂 50%）の焼結品密度を求めた。また、銅および樹脂の焼結品密度はそれぞれ銅材、樹脂材の密度とした。表 1 に測定および計算により求めた密度を示す。当然のことであるが、圧粉体および焼結品の密度は銅の混合比が多くなるにつれて大きくなる。

表 1 圧粉体および焼結品の密度

材料の混合比	圧粉体 (gf/cm ³)	焼結品 (gf/cm ³)
銅 100%	—	8.92
銅 75%+樹脂 25%	5.55	7.14
銅 50%+樹脂 50%	4.00	5.35
樹脂 100%	1.48	1.78

3.1.3 圧粉体用金型の強度

金型の強度について、成形圧力によってダイの内面に圧力がかかると想定して、内圧を受ける厚肉円筒にかかる応力を求める式⁹⁾より求めた。成形時の模式図（図 4）に示すとおり、ダイの外径を D_o 、内径を D_i 、圧粉体の成形圧力を P とする。このとき、成形圧力がどれくらいの割合でダイの内面にかかるかを示す係数を側圧比 K とすると、ダイの内面にかかる圧力 p は、

$$p = P \times K \quad (6)$$

で表され、このとき、ダイにかかる最大応力 σ_{max} は式(7)より求められる。ただし、側圧比 K は成形物の種類、粒度および予備成形の有無などにより変わるが、成形圧力がそのまま内圧に変換されると想定し、 $K=1$ とした。

$$\sigma_{max} = \frac{[(D_o / D_i)^2 + 1]}{(D_o / D_i)^2 - 1} \times P \times K \quad (7)$$

銅側傾斜層の圧粉体用金型の場合、外径 $D_o = 80.0\text{mm}$ 、内径 $D_i = 52.3\text{mm}$ 、圧粉体の成形圧力 $P = 60\text{MPa}$ 、圧粉体長さ $\ell_g = 88\text{mm}$ 、ダイ長さ $L = 125\text{mm}$ とすると、式(7)より、

$$\sigma_{max} = \frac{[(80.0/52.3)^2 + 1] \times 60}{(80.0/52.3)^2 - 1} = 149.6 [\text{MPa}] \quad (8)$$

となる。SUS303 の降伏応力 $\sigma_y = 206\text{MPa}$ より安全率 S は、

$$S = \sigma_y / \sigma_{max} = 206 / 149.6 = 1.37 \quad (9)$$

となった。同様に、樹脂側傾斜層および樹脂の圧粉体用金型についても、その寸法から安全率はそれぞれ 1.37、2.68 となった。

3.1.4 圧粉体用金型の設計・製作

金型設計について、銅側傾斜層圧粉体（銅 75%+樹脂 25%）の例を以下に示す。

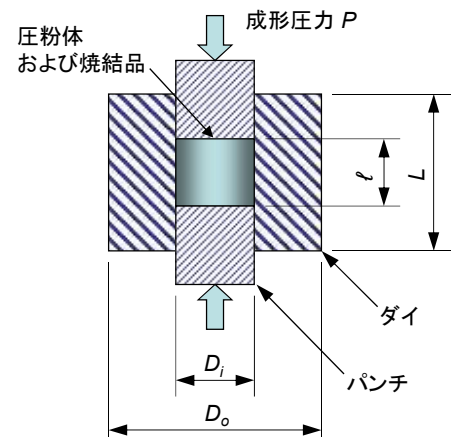


図 4 成形時の模式図

一次焼結品の銅側傾斜層の長さは、機械加工代を考慮して 68.4 mm とし、内径 30 mm、外径 34 mm とした（内径は機械加工後で 32mm とする）。一次焼結前後で銅側傾斜層の内径、外径、および質量の変化はなく、軸方向のみ収縮すると仮定した場合、必要とされる圧粉体の長さは、焼結品の密度と焼結品の長さの積を圧粉体の密度で除することで求められる。そこで焼結品の密度 ρ_s 、焼結品の長さを ℓ_s 、圧粉体の密度を ρ_g とすると、圧粉体の長さ ℓ_g は、以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} \ell_g &= (\rho_s \times \ell_s) / \rho_g & (10) \\ &= (7.14 \times 68.4) / 5.55 \\ &= 88.0\text{mm} \end{aligned}$$

銅側傾斜層圧粉体用金型を図 5 に示す。樹脂圧粉体用と樹脂側傾斜層用（銅 50%+樹脂 50%）についても、同様な設計・製作を行った。

3.2 焼結用グラファイト型の設計・製作

焼結用グラファイト型についても、材料の選定および強度検討を行い、設計・製作を行った。

3.2.1 材料の選定

材料に求められる要件は、焼結品の寸法を安定させるため熱膨張率が低いこと、焼結中の加圧力に耐えられる強度を有すること、焼結中のグラファイト型の局部加熱を防止するために熱伝導率が高いこと等であり、東洋炭素㈱製の ISO-68（引張り強度 54MPa）および ISO-88（引張り強度 69MPa）を検討し、引張り強度の高い ISO-88 を選定した。

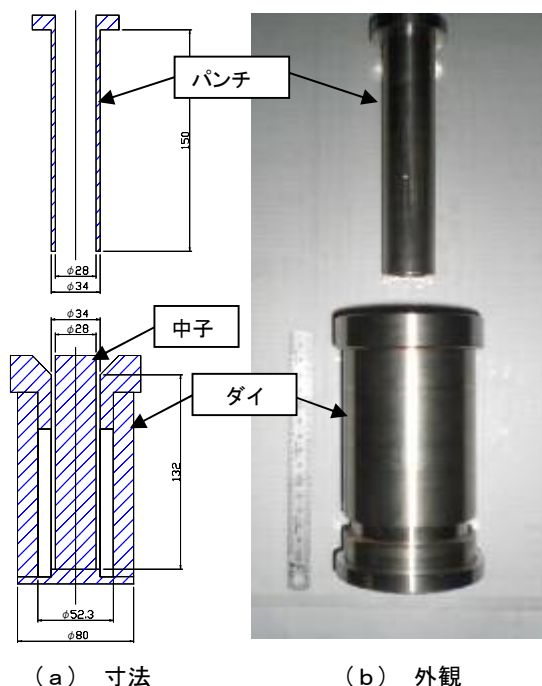


図 5 銅側傾斜層圧粉体用金型

3.2.2 グラファイト型の強度

グラファイト型の強度は、図 4 で成形圧力をかけた場合、ダイと焼結品の長さがダイにかかる応力に影響することを考慮した。焼結品の長さ ℓ_s 、ダイの長さ L とするとダイにかかる応力 σ は、式 (11) により求められる。

$$\sigma = \sigma_{\max} \times (\ell_s \times L) \quad (11)$$

一次焼結用の場合、外径 $D_o = 135.0\text{mm}$ 、内径 $D_i = 52.8\text{mm}$ 、焼結時の加圧力 $P = 60\text{MPa}$ 、焼結品長さ $\ell_s = 68.4\text{mm}$ 、ダイ長さ $L = 90\text{mm}$ とすると、 $\sigma_{\max} = 81.7\text{MPa}$ で、ダイにかかる応力 σ は $\sigma = 62.1\text{MPa}$ となり、ISO-88 の引張り強度 $T_s = 69\text{MPa}$ であるため、安全率は 1.11 となった。

二次焼結用のダイについては一次焼結用と共通とした。安全率を同様に求めた結果、1.52 となった。

3.2.3 焼結用グラファイト型の設計・製作

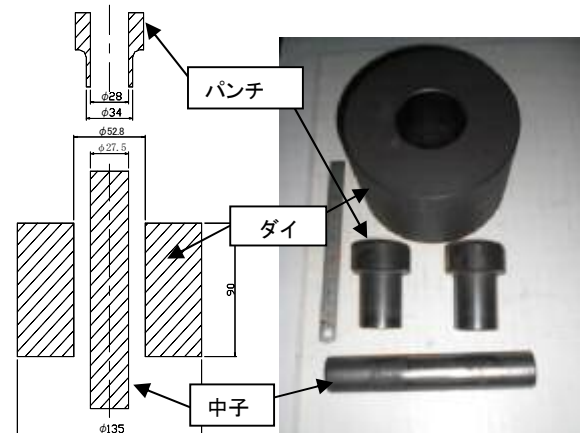
一次焼結用グラファイト型を図 6 に示す。ダイの寸法は外径 135mm、内径 52.8mm、長さ 90mm、パンチの寸法は外径 34mm、内径 30mm とした。二次焼結用のダイは一次焼結用と共通とし、パンチの寸法は外径 32mm、内径 10mm とした。

3.3 積層方法・製造プロセスの検証

設計・製作した圧粉体用金型と焼結用グラファイト型を用いて、2.2 項の製造プロセスに基づいて円筒型傾斜機能材料を製作し、実際にその製造プロセス、圧粉体の成形や焼結に適応可能か検証を行った。その結果を以下に示す。

3.3.1 銅側傾斜層圧粉体の成形

外側の銅材は銅丸棒を機械加工し、パイプ状の銅材を製作し、実験に供した。図 5 に示す金型を用いて銅材の内側



(a) 一次焼結用グラファイト型の寸法 (b) 一次焼結用グラファイト型の外観

図 6 一次焼結用グラファイト型

に混合粉末（銅 75%+樹脂 25%）を充填後、圧縮成形によって銅側傾斜層の圧粉体を成形した。銅と圧粉体の写真を図 7 に示す。

3.3.2 一次焼結

図 7 の状態で銅と圧粉体（銅 75%+樹脂 25%）を結合させるため一次焼結させた。一次焼結させたものを図 8 に、焼結時間や温度を記録した一次焼結昇温プロファイルの一例を図 9 に示す。一次焼結後、機械加工したものを図 10 に示す。機械加工後の焼結層（銅 75%+樹脂 25%）の表面には、き裂などは特に見られなかった。

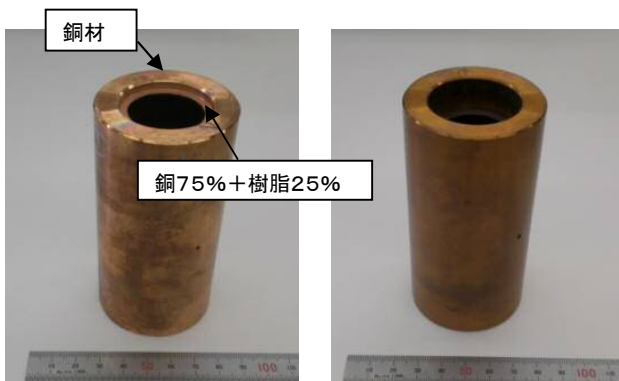


図 7 銅+圧粉体（銅 75%+樹脂 25%）

図 8 一次焼結品

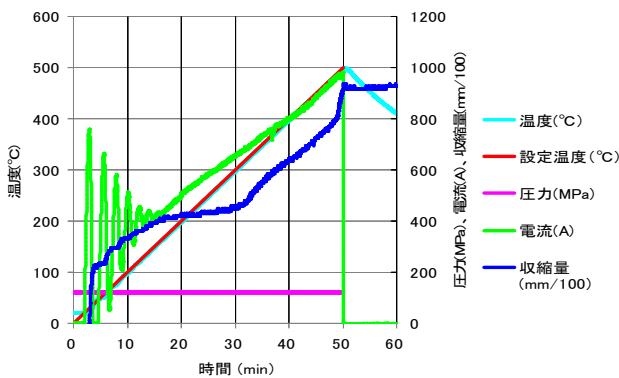


図 9 一次焼結昇温プロファイルの一例



図 10 機械加工後の一次焼結品

3.3.3 樹脂圧粉体の成形

樹脂圧粉体を図 11 に示す。樹脂圧粉体はダイから取出した後、半径方向および軸方向に膨張したため、半径方向のみ所定の寸法に研磨した。この膨張寸法を考慮した金型を検討し、圧粉体の寸法精度の向上を図ることが課題として残っている。

3.3.4 樹脂側傾斜層圧粉体の成形

図 10 の機械加工後の一次焼結品の中に図 11 の樹脂圧粉体をセットし、その間に混合粉末（銅 50%+樹脂 50%）を充填後、圧縮成形によって樹脂側傾斜層を成形した。その成形品を図 12 に示す。

混合粉末（銅 75%+樹脂 25%）、樹脂粉末および混合粉末（銅 50%+樹脂 50%）の圧粉体成形については、焼結品の密度および圧粉体の密度などから圧粉体成形用金型の深さ方向の寸法を決め、各層ごとの圧粉体を成形した。

しかし、今回の方法では圧粉体を成形する際に銅材あるいは一次焼結品の内側に圧粉体を成形しており、ダイやパンチが長くなり、金型が大きくなるのが課題としてあげられる。このことは作業性に影響するため、例えば厚みが 5mm 程度のリング状あるいは円盤状の圧粉体を単独で成形し、それを銅材あるいは一次焼結品の内側に複数個積み上げる方法であれば金型がシンプルでコンパクトになり、作業性の改善が図れると考える。さらに、銅材あるいは一次焼結品が無くても圧粉体だけの成形が可能となるため、圧粉体の成形工程と一次焼結の成形工程を並行して作業できるようになり、生産性の向上も図れる。

3.3.5 二次焼結

図 12 の一次焼結品と樹脂側傾斜材を二次焼結したものを図 13 に、焼結時間や温度を記録した二次焼結昇温プロファイルの一例を図 14 に示す。一次焼結、二次焼結とも



図 11 樹脂圧粉体

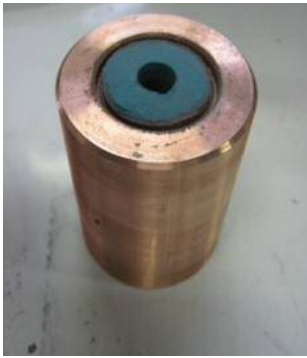


図 12 一次焼結品+圧粉体



図 13 二次焼結品



図 15 整流子形状に機械加工した試作品

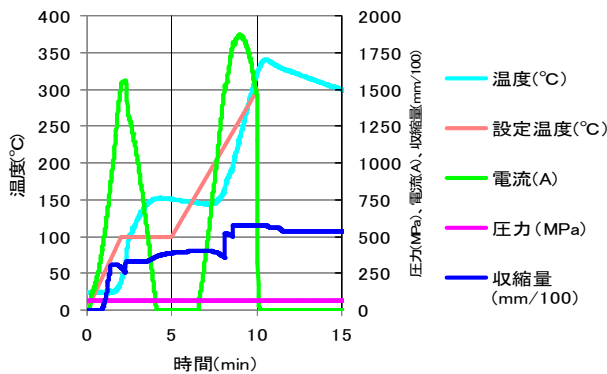


図 14 二次焼結昇温プロフィールの一例

に焼結実験を繰り返し行うことで、最適な焼結条件を見つけた。

二次焼結品を整流子形状に機械加工した試作品を図 15 に示す。機械加工後の傾斜層（銅 75%+樹脂 25%）、傾斜層（銅 50%+樹脂 50%）および樹脂層の表面には、き裂などは特に見られなかった。

グラファイト型からの焼結品の取出しは、グラファイト型にカーボンシートを貼ることによりグラファイト型と焼結品の離型性が良くなり、容易に取出し作業ができるようになった。また、焼結後の冷却方法については、焼結後のグラファイト型に冷却フィンを取り付け強制空冷することにより、冷却時間を短縮することができた。現在の熱硬化性樹脂成形品の冷却時間は、金型から取出して約 1 時間とされているが、今回、冷却フィンを取り付け強制空冷することで約 30 分間で手を触れることができる温度になった。

4. おわりに

圧粉体用金型および焼結用グラファイト型の設計・製作を行い、整流子形状の円筒型傾斜機能材料を製作することができた。今回の研究開発で得られた技術・データをもとに今後残された課題の解決を行い、より生産性の高い円筒型傾斜機能材料の製品開発を行っていきたい。

本開発の実施にあたり、ご協力頂きました（財）福岡県

産業・科学技術振興財団（ふくおか IST）様、九州工業大学大学院生命体工学研究科 中野光一准教授、福岡県工業技術センター大崎徹郎様、蓮尾東海様、オタライト（株）石橋 完様、計測検査（株）宮崎良忠様、渡邊健太郎様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中野光一：放電プラズマ焼結法による自動車用傾斜機能性金属/樹脂複合材の開発, 福岡 IST 研究成果報告書, (2010)
- 2) 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構, 長崎菱電テクニカ株式会社：傾斜機能材料の製造方法及びその成形装置, 特開 2006-103135, 日本, (2004)
- 3) 深瀬康公：生体用同心円状傾斜機能材料, 特開 2008-307071, 日本, (2007)
- 4) 中野光一, 石橋完, 炭矢芳男, 立石健太郎：傾斜機能性複合材料及びその製造方法, 特願 2010-237669, 日本, (2010)
- 5) 中野光一, 石橋完, 炭矢芳男, 立石健太郎：傾斜機能性複合材料の製造方法, 特願 2010-239837, 日本, (2010)
- 6) 邊吾一：標準 材料の力学, 日刊工業新聞社, p.216, (2001)



立石 健太郎 Kentarou Tateishi
 (株)高田工業所 技術本部 技術部
 技術開発グループ 係長