

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業  
「金属粉末射出成形法（MIM）を用いた高磁性部品の開発」

## 研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 太盛工業株式会社

## 目次

### 第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-2 研究体制

1-3 成果概要

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

### 第2章 本論

2-1 成果概要

2-2 研究手法

2-3 研究手順

2-3-1 混練・造粒過程

2-3-2 成形過程

2-3-3 脱脂・焼結過程

2-3-4 検査過程

### 第3章 パーマロイ材料での磁気特性の改善、向上

### 第4章 パーマロイ材料での寸法精度の向上

### 第5章 Fe-3%Si材料での高密度化と磁気特性の改善

### 最終章 全体総括

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 【背景】

自動車関連メーカー、情報機器・家電関連メーカー、医療機器関連メーカー、ロボット関連メーカー等の共通した省エネルギー・省資源化を図るため、高磁性部品（軟磁性材料）という強いニーズに対応した高付加価値の製品を提供し、各産業分野に大きな経済効果をもたらすことを目的とする。軟磁性材の部品は、上記の産業分野において電磁バルブ、アクチュエーター、各種センサー等に使用されており、従来は切削加工又は粉末冶金法で製作されているが、それぞれ下記のメリットがある。

- ・切削加工：①良好な磁気特性が得られる。
- ・粉末冶金法：①低コストにもものづくりができる。

しかし、逆に課題も多く、ユーザーの強い要望としては以下の内容が挙げられる。

- ・切削加工：①高コスト、②複雑形状部品が困難、③材料歩留まりが低い、④生産性が低い
- ・粉末冶金法：①複雑形状部品、寸法精度に限界がある。

そのため、より革新的なプロセスでのものづくりが要望されている。

#### 【研究目的】

平成19年度は金属粉末射出成形法（MIM）を用いてSUS410L材料での射出成形品についての研究開発を行い、平成20年度はSUS410L材料のさらなる磁気特性における量産的な品質安定性について研究開発を行った。また併せて平成20年度にパーマロイ（Fe-47%Ni）材料の軟磁性粉末について研究開発を行った。本年度はパーマロイ（Fe-47%Ni）材料でさらなる高磁気特性を持ち、複雑形状かつ高精度な部品の量産的な品質安定性の確認を行い、そして従来の切削加工法に対してコストの低減、複雑形状化、コンパクト化を図ることを目標とする。

#### 【目標】

本研究はSUS410L、パーマロイ共に以下の内容を達成することを目標とする。

- |            |                   |
|------------|-------------------|
| ・高寸法精度の実現  | ±0.5%→±0.2%~0.4%  |
| ・コスト低減     | 従来切削加工部品の1/5~1/10 |
| ・磁気特性      | 溶製材相当の特性          |
| ・磁気特性のバラツキ | 保磁力（Hc）として±0.2    |

特に磁気特性に対して影響の大きいと考えられる残留炭素の低減については、MIM工程での脱脂時に水素（通常は窒素）を流すことの改善効果の確認を行ってきたが、さらなる高磁気特性を確保するには、焼結工程での焼結挙動を把握する必要がある。そのため成形体、脱脂体、焼結体の各段階での成分分析を行い、また焼結品では組織や結晶粒の観察と結晶粒内や結晶粒界介在物の分析評価を行い、その結果を脱脂・焼結条件へフィードバックすることで条件の見直しや改善を行なう。

また寸法精度の向上については、これまで一般的に使用する他のステンレス金属粉末の粒径を見直しすることにより改善されることを確認してきたが、今年度は磁性粉末材料（パーマロイ）のさらなる微細粉末を用いて、より焼結品の高密度化を図ることで磁気特性の改善を目指すと共に複雑形状製品での寸法精度の確認を行なう。

したがって、本研究においては下記に挙げる内容に焦点を当てて進めていく。

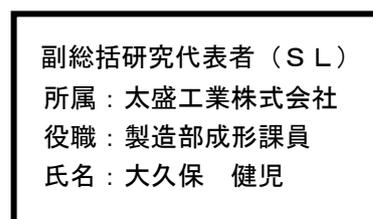
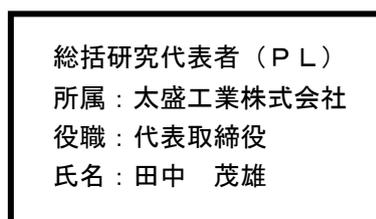
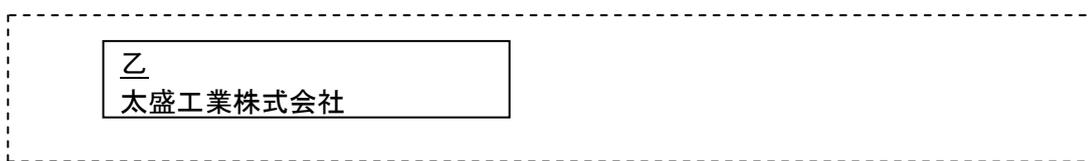
【磁気特性の改善、向上】

- i 成形体/脱脂体/焼結体の各段階における成分分析
- ii 焼結体の焼結挙動観察
- iii 焼結体の組織観察
- iv 焼結体の結晶粒内および結晶粒界介在物の分析

【寸法精度の向上】

本研究においては、磁性粉末材料の粒径を微細化することによる寸法精度の影響を確認する。

1-2 研究体制



2) 管理体制

①事業管理者

[太盛工業株式会社]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 太盛工業株式会社

①管理員

| 氏名     | 所属・役職          |
|--------|----------------|
| 田中 茂雄  | 代表取締役          |
| 大久保 健児 | 太盛工業(株)製造部成形課  |
| 横田 智行  | 太盛工業(株)製造統括責任者 |

②研究員

| 氏名     | 所属・役職         |
|--------|---------------|
| 田中 茂雄  | 代表取締役         |
| 大久保 健児 | 太盛工業(株)製造部成形課 |
| 金谷 陽太  | 太盛工業(株)製造部成形課 |

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

太盛工業株式会社

(経理担当者) 生産管理部 課長 森田 純代  
 (業務管理者) 代表取締役 社長 田中 茂雄

(4) その他

【外部協力者】

| 氏名    | 所属・役職             | 実施内容  |
|-------|-------------------|---|
| 多田 昌弘 | CKD株式会社 生産本部 技術部長 | 本研究で種々のパラメータを変化させて製作された焼結品の磁気特性（B-Hカーブ）を測定し、特性の良否判断及び提言及び技術的知見をいただいた。 |

1-3 成果概要

SUS410L材料での磁気特性の改善、向上

検証の結果、量産品においても95%以上の焼結密度、残留C割合0.001%以下、残留O割合0.01%前後と十分に目標値を達成しており、実用可能な水準に達していることが再確認できた。

パーマロイ材での磁気特性の改善、向上

①高寸法精度の実現

目標値である寸法値±0.2%～0.4%に対して±0.15%の精度の焼結部品が製作できた。

②磁気特性

|      | 昨年度      | 本年度      | (参考値：溶製材の特性値) |
|------|----------|----------|---------------|
| B10  | : 1.40 T | ⇒ 1.46 T | (1.50 T)      |
| B125 | : 1.49 T | ⇒ 1.58 T |               |
| Hc   | : 24 A/m | ⇒ 16 A/m | (6.4 A/m)     |

全ての値で昨年度より良好な特性が得られた。

特に磁束密度に関してはB10=1.46Tと溶製材とほぼ同程度の十分な値が得られた。だが、保磁力に関してはHc=16A/mと、昨年度と比較して向上したが、溶製材にはまだ及ばず改良の余地があると考えられる。

- ③残留低炭素、低酸素焼結品の実現
- 0.005% C以下の目標に対して、
  - 0.001% Cの低炭素焼結品が実現できた。
  - 1.0% O前後の目標に対して、
  - 0.03% O程度の低酸素焼結品が実現できた。

- ④高焼結密度の実現
- 95%～98%の焼結密度の目標に対して、
  - 98.5%以上の密度の焼結品が実現できた。

- ⑤コスト低減
- 従来切削加工部品の1/5～1/10の目標に対して、
  - 形状にもよるが目標値を達成できる目途が立った。

Fe-3%Si材料での焼結品のさらなる密度向上と磁気特性の相関評価

- ①高寸法精度の実現
- 目標値である寸法値±0.2%～0.4%に対して
  - ±0.12%の精度で焼結部品の製作が実現できた。

②磁気特性

|      | 本年度      | (参考値：溶製材の特性値) |
|------|----------|---------------|
| B10  | : 1.46 T |               |
| B125 | : 1.76 T | (1.92～2.12)   |
| Hc   | : 52 A/m | (20～130)      |

保磁力はHc=52と、溶製材とほぼ同程度の十分な値が得られた。だが、磁束密度はB125=1.76と溶製材にはまだ及ばず、改良の余地があると考えられる。

- ③残留低炭素、低酸素焼結品の実現
- 0.005% C以下の目標に対して、
  - 0.002% Cの低炭素焼結品が実現できた。
  - 1.0% O前後の目標に対して、
  - 0.035% O程度の低酸素焼結品が実現できた。

- ④高焼結密度の実現
- 95%～98%の焼結密度の目標に対して、
  - 98.3%以上の焼結密度の焼結品が実現できた。

- ⑤コスト低減
- 従来切削加工部品の1/5～1/10の目標に対して、
  - 形状にもよるが目標値を達成できる目途が立った。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

太盛工業株式会社 代表取締役 田中 茂雄 TEL 072-830-2588

## 第2章 本論

### 2-1 概要

昨年度までに量産化に成功したSUS410Lよりサンプルを無作為に抽出し焼結密度測定と化学成分分析を行った。それぞれの結果を図2-1、図2-2、に示す。これらの結果はこの量産材が焼結密度目標と化学成分目標を十分に達成し、実用可能な水準に有ることを示している。本年度はパーマロイとFe-3%Siを用いて、SUS410Lと同様に安定した特性を持つMI M製品の研究に取り組む。

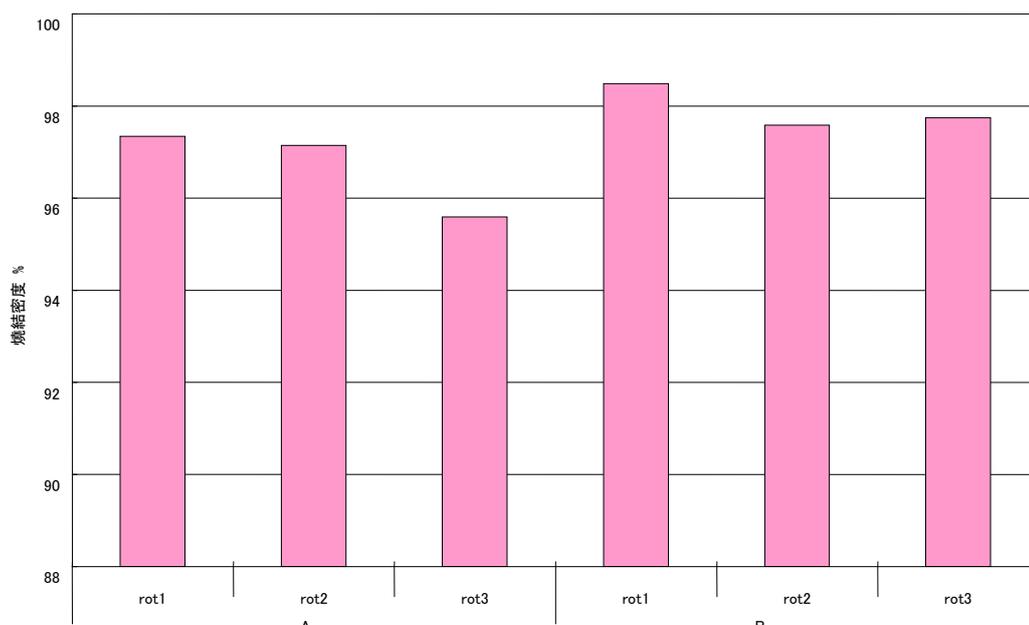


図2-1 SUS410L密度測定結果

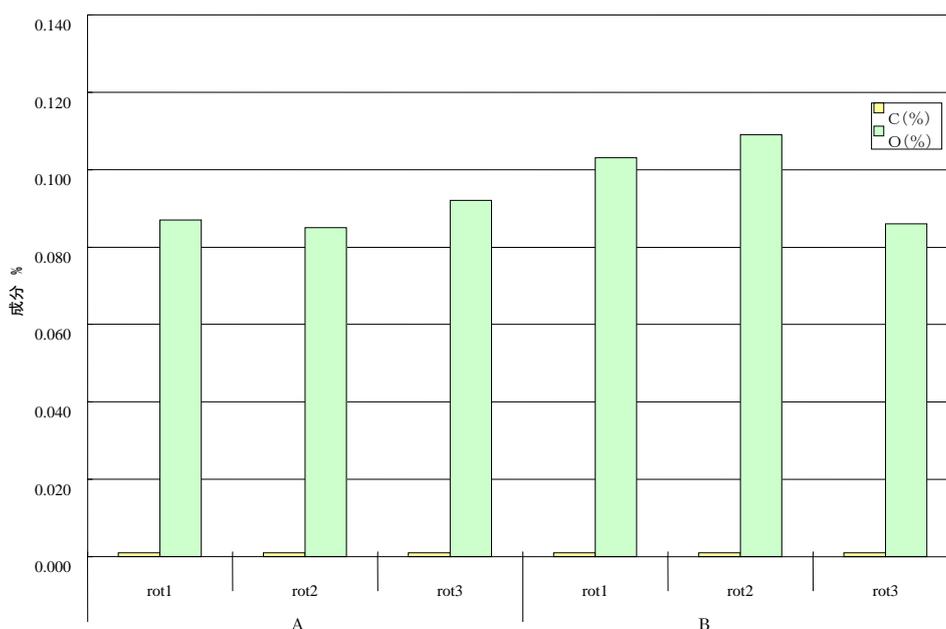


図2-2 SUS410L化学成分分析結果

## 2-2 研究手順

本研究は基本的にMIMの製造工程に則り行った。研究の手順と内容を図2-3に示す。



図2-3 研究内容及び手順

## 2-3 研究手法

### 2-3-1 混練・造粒過程

混練には(株)トーシン TD1-3M型 加圧式ニーダーを用いた。混練機の写真を図2-4に示す。なお、混練条件は180°C×60分とした。また、造粒には(株)トーシン TP80-2型プランジャー押出造粒機を用いた。造粒機の写真を図2-5に示す。なお、造粒条件は180°C×60分とした。



図2-4 混練機



図2-5 造粒機

### 2-3-2 成形過程

本研究ではリングタイプ（2mm、3mm、4mm）とコアタイプの4種類の成形物を作製した。それぞれを図2-6、図2-7、図2-8、図2-9に示す。また、それぞれの使用成形機と成形条件を表2-1に示す。

表2-1 使用成形機、並びに成形条件

| 成形機、成形条件 | 製品名                 |     |     |                  |
|----------|---------------------|-----|-----|------------------|
|          | リング                 |     |     | コア               |
|          | 2mm                 | 3mm | 4mm |                  |
| 成形機名     | 日精樹脂工業(株) PS20E2ASE |     |     | 日精樹脂工業(株)PS20E1A |
| 射出温度 °C  | 170                 | 170 | 170 | 170              |
| 射出圧力 MPa | 60                  | 60  | 60  | 40               |
| 射出速度 m/s | 50                  | 50  | 50  | 20               |
| 射出時間 s   | 3                   | 4   | 4   | 2                |
| 冷却時間 s   | 5                   | 5   | 6   | 4                |



図2-6 リング試験片  
(t = 2mm)



図2-7 リング試験片  
(t = 3mm)



図2-8 リング試験片  
(t = 4mm)



図2-9 コアタイプ

### 2-3-3 脱脂・焼結過程

脱脂・焼結には島津メクテム(株) 真空脱脂焼結炉 VHSgr-40/40/100-Mを用いた。炉の写真を図2-10に示す。また、本研究では1300°C×2hと1350°C×3hの焼結温度と時間が異なる脱脂・焼結条件を用いた。



图 2 - 1 0 真空脱脂烧结炉

### 2-3-4 検査過程

本研究では成形体の磁気特性、並びに磁気特性に影響を与える因子の解明のため表2-2に示す7つの検査を行った。また、寸法測定を行った箇所を図2-13に示す

表2-2 検査内容及び詳細

| 検査内容    | 検査詳細                     |
|---------|--------------------------|
| ビッカース硬さ | マイクロビッカース(200g)          |
| 寸法      | 図2-13に準じた位置をマイクロメータにより測定 |
| 密度      | アルキメデス法による測定             |
| 組織観察    | エッチング後、顕微鏡観察             |
| 成分分析    | CとOに関する化学成分分析            |
| 粒界析出物   | EPMA面分析                  |
| 磁性特性    | 印加磁化力100e,1250eによるB-H測定  |

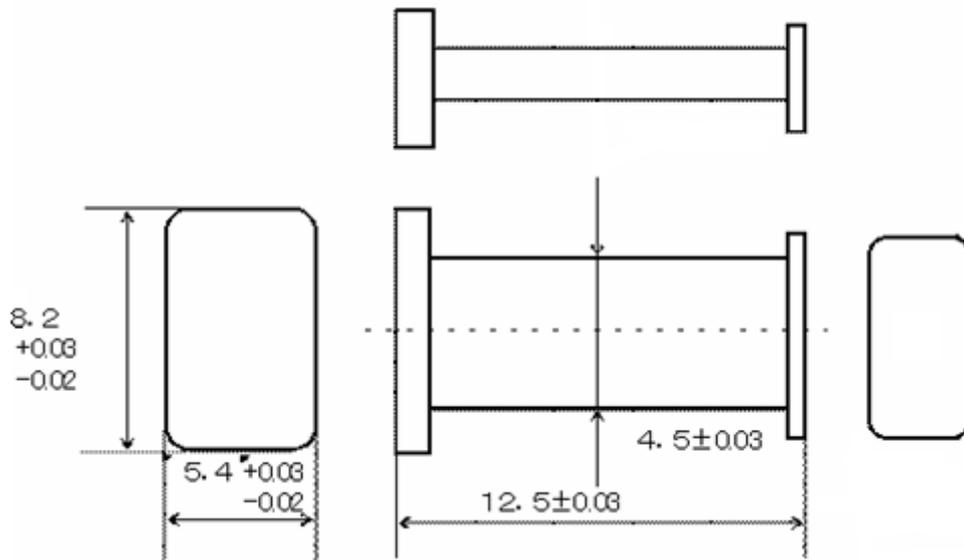


図2-13 寸法測定箇所

### 第3章 パーマロイ材料での磁気特性の改善、向上

本年度の研究では、パーマロイ材料の磁気特性の向上に際して、通常粉末を分級した微細粉末を用い、脱脂・焼結条件などを工夫する事で、以下の結果が得られた。

焼結密度：目標値98%に対して98.5%と非常に優れた値が得られた。

O含有率：目標値0.10%Oに対して0.03%O以下の非常に優れた値が得られた。

C含有率：目標値0.005%Cに対して0.001%Cの非常に優れた値が得られた。

磁束密度： $B_{10} = 1.46\text{T}$ と溶製材相当 ( $B_{10} = 1.50\text{T}$ ) の値が得られた。

保磁力： $H_c = 16\text{A/m}$ と、昨年度 ( $H_c = 24\text{A/m}$ ) に比べて向上したが溶製材相当 ( $H_c = 6.4\text{A/m}$ ) には及ばず課題が残る結果となった。

### 第4章 パーマロイ材料での寸法精度の向上

本年度の研究ではパーマロイ材料の寸法精度の向上に際して、通常粉末を分級した微細粉末 (PF-5R) を用い、脱脂・焼結条件などを工夫する事で、以下の結果が得られた。

寸法精度：目標値 $\pm 0.2\%$ に対して $\pm 0.15\%$ と優れた値が得られた

### 第5章 Fe-3%Si材料での高密度化と磁気特性の改善

Fe-3%Si材料での高密度化と磁気特性の改善に際して、一般粉末と特別粉末を用い、脱脂・焼結条件などを工夫することで、以下の結果が得られた。

寸法精度：目標値 $\pm 0.20\%$ に対して $\pm 0.16\%$ と優れた値が得られた。

焼結密度：目標値98%に対して98.3%と非常に優れた値が得られた。

O含有率：目標値0.10%Oに対して0.035%O以下の非常に優れた値が得られた。

C含有率：目標値0.005%Cに対して0.002%Cの非常に優れた値が得られた。

磁束密度： $B_{125} = 1.76$ と溶製材相当 ( $B_{10} = 1.92 \sim 2.12$ ) には及ばず課題が残る結果となった。

保磁力： $H_c = 52$ と、溶製材相当 ( $H_c = 20 \sim 130$ ) の値が得られた。

## 最終章 全体総括

### SUS410Lの材質において

#### ①高寸法精度の実現

目標値である寸法値 $\pm 0.2\% \sim 0.4\%$ に対して  
 $\pm 0.15\% \sim 0.4\%$ の精度の焼結部品の製作が実現できた。

#### ②磁気特性

溶製材（K-M31 東北特殊鋼(株)製）相当の特性目標、飽和磁束密度 $=1.65$  T、 $B10=1.13$  T、 $H_c=1.880$  e、最大透磁率 $2500 \mu m$ に対して、本研究では、飽和磁束密度 $=1.90$  T、 $B10=1.20$  T、 $H_c=1.50$  e、最大透磁率 $2100 \mu m$ の溶製材相当、或いは $H_c$ に関してはそれ以上の特性が得られた。

#### ③残留低炭素焼結品の実現

$0.01\%C$ 以下の目標に対して、  
 $0.001\%C$ 以下の低炭素焼結品が実現できた。

#### ④高焼結密度の実現

$95\% \sim 98\%$ の焼結密度の目標に対して、  
 $97\% \sim 98\%$ の高密度の焼結品が実現できた。

#### ⑤コスト低減

従来切削加工部品の $1/5 \sim 1/10$ の目標に対して、  
形状にもよるが目標値を達成できた。

#### ⑥量産安定性

量産条件での製造ロット間の磁気特性を評価した。社内および外部協力者（CKD(株)）の相互評価において、共に磁気部品として十分な磁気特性の量産安定性と寸法精度が確認できた。

#### ⑦量産化

顧客メーカーからMIM製の磁気部品として正式採用され、受注を受けた。

## パーマロイ材での磁気特性の改善、向上

### ①高寸法精度の実現

目標値である寸法値 $\pm 0.2\% \sim 0.4\%$ に対して  
 $\pm 0.15\%$ の精度の焼結部品が製作できた。

### ②磁気特性

|      | 成 果      | (参考値：溶製材の特性値) |
|------|----------|---------------|
| B10  | : 1.46 T | (1.50 T)      |
| B125 | : 1.58 T |               |
| Hc   | : 16 A/m | (6.4 A/m)     |

磁束密度に関しては溶製材とほぼ同程度の十分な値が得られた。だが、保磁力に関しては溶製材にはまだ及ばず改良の余地が残った。

### ③残留低炭素、低酸素焼結品の実現

- 0.005% C以下の目標（磁気特性の改善、向上）に対して、
- 0.001% Cの低炭素焼結品が実現できた。
- 0.10% O前後の目標に対して、0.03% O程度の低酸素焼結品が実現できた。

### ④高烧結密度の実現

- 95%~98%の焼結密度の目標に対して、
- 98.5%以上の密度の焼結品が実現できた。

### ⑤コスト低減

従来切削加工部品の1/5~1/10の目標に対して、  
形状にもよるが目標値を達成できる目途が立った。

## Fe-3%Si材料での焼結品のさらなる密度向上と磁気特性の相関評価

### ①高寸法精度の実現

目標値である寸法値 $\pm 0.2\% \sim 0.4\%$ に対して、 $\pm 0.12\%$ の精度の焼結部品の製作は実現できた。

### ②磁気特性

|      | 成 果      | (参考値：溶製材の特性値) |
|------|----------|---------------|
| B10  | : 1.46 T |               |
| B125 | : 1.76 T | (1.92~2.12)   |
| Hc   | : 52 A/m | (20~130)      |

保磁力は $H_c = 52$ と、溶製材とほぼ同程度の十分な値が得られた。だが、磁束密度は $B_{125} = 1.76$ と溶製材にはまだ及ばず、改良の余地があると考えられる。

### ③残留低炭素、低酸素焼結品の実現

$0.005\%C$ 以下の目標（磁気特性の改善、向上）に対して、 $0.002\%C$ の低炭素焼結品が実現できた。

$0.10\%O$ 前後の目標に対して、 $0.035\%O$ 程度の低酸素焼結品が実現できた。

### ④高焼結密度の実現

$95\% \sim 98\%$ の焼結密度の目標に対して、 $98.3\%$ 以上の密度の焼結品が実現できた。

### ⑤コスト低減

従来切削加工部品の $1/5 \sim 1/10$ の目標に対して、形状にもよるが目標値を達成できる目途が立った。

## 研究開発後の課題及び今後の事業展開

本研究により製造に成功した磁性材料のMIM品はSUS410の実績に裏付けられるように既に実用が可能である。よって、今後は開発したMIM品が顧客に周知され採用されるよう営業活動に励むと共に、顧客が材料に必要な特性を得るための研究に励む。なお、その改良の一環としてナノ微粒子粉末を用いたMIM品の研究を行い、本研究で得られた製品に比べさらに優れた特性を持つ製品の開発に取り組む。

1. MIMの製造工程の概略

微細な金属粉末と数種類の熱可塑性樹脂を配合したバイндаを均一に混練した材料を成形材料とし、その材料、目的とする製品の金型、射出成形機によって複雑形状の成形品を製造する。その成形品を脱脂・焼結することにより、高密度の金属製品を製造する。

MIMと従来の加工方法との比較表を下記に示す。

特に切削加工の場合、密度、精度は非常に高いものを製造することはできるが、形状の複雑さ、生産性、コストという面では、他の加工方法の中でも課題を抱えた加工方法である。一方、MIMの場合は精度、密度面等で若干、切削加工より劣るが、形状の複雑さ、生産性、コストという面では非常に優れた加工技術である。本研究は切削加工より劣っている精度、密度面等での技術改善を図り、高磁性部品を開発するものです。

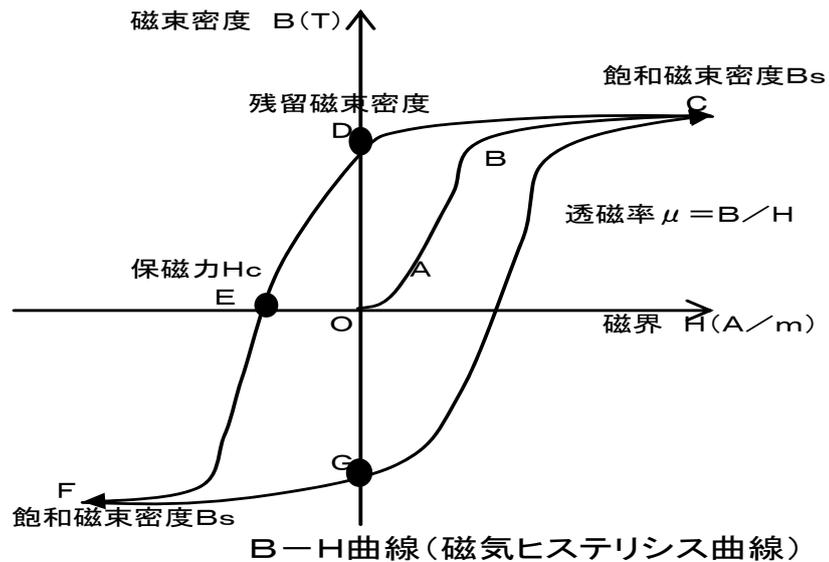
2. 軟磁性材料

磁性材料には強い磁界の中で磁化すると、磁界を取り去っても強い磁性が残るものを硬磁性材料（一般的に磁石と呼ばれるもの）と、小さな磁界で大きな磁束密度が得られる軟磁性材料がある。

軟磁性材料には純鉄や低炭素鋼、ケイ素鉄、フェライト系ステンレス、パーマロイ（Fe-40~50%Ni）、センダスト（Fe-Si-Al）、パメンジュール（Fe-45%Co-2%V）が用途に応じて使用される。

通常の軟磁性材料で作られた部品は、部品の周囲にコイルを巻き、そのコイルに電流（直流、交流）を流して磁界を作り、強い磁性を得て、別の部品を吸着させたり、離したりする機能をもたせるものである。

3. 磁束密度B、保磁力Hc、透磁率μ



軟磁性材料は用途によって要求される特性が異なるが、一般的には磁界Hをかけた時に磁束密度がすばやく立ち上がる（上図のA→B→Cの立ち上がり）ほど、応答性

が良く、その特性の指標がB10、B125等で表現され、大きな値ほど特性が良いことになる。

B10：100e（=796A/m）の磁界をかけたときの磁束密度  
（特に立ち上がり特性の指標となる。）

B125：1250e（=9950A/m）の磁界をかけたときの磁束密度  
また飽和磁束密度 $B_s$ も高いほど、強い磁力が得られることになる。

更に保磁力 $H_c$ は磁界を取り除いた後に残留する磁束を打ち消すために必要な逆方向の磁界の大きさのことで、この値は小さいほど良い特性が得られる。

#### 4. 鉄損失

磁化した後に外部磁場により点Cから点D、F、Gを通り、点Cに戻る時期ヒステリシス曲線内を移動する際に、エネルギーが消費され熱になることを鉄損失（磁心損失）と言い、この損失はヒステリシス曲線の面積に比例するため、面積が少ないほど損失が少ない。

「この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象文書となります。」