## 戦略的基盤技術高度化支援事業

「高精度マイクロ単分散粒子を用いた高機能マイクロ部品の開発」

成果報告書

平成22年3月

# 委託者:東北経済産業局

委託先:株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

第1章 研究開発の概要	1
1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1.1.1 研究の概要	1
1.2 研究体制	9
1.2.1 研究体制	2
1.2.2 所在地	2
1.2.2 管理法人	2
1.2.2 再委託先	2
1.2.3 管理体制	3
1.2.4 研究員	4
1.2.5 協力者	4
1.3 成果概要	5
1.3.1 成果概要	5
1.3.1 マイクロパウダーデジタルプロセッシング技術の確立	5
1.3.1. マイクロ部品(マイクロギア・MEMSリレー部品)の試作	6
1.3.1 試作品の評価	7
1.4 知的財産権等の取組状況	7
1.5 対外発表等の状況	8
1.6 当該研究開発の連絡窓口	9
1.6.1 管理法人	9
1.6.2 再委託先	9
第2章本論	11
9.4 マノクロパウダーゴンタルプロセッシングは作の強さ	11
	11
	11
	12
2.1.1(3) 高精度原料粒子作製実験(担当:デジタルパウダー(株)・東北大学)	13
2.1.2 制御粒子充填	15
2.1.2(1) 高精度マイクロ金型(実験用)の設計・試作(担当:デジタルパウダー㈱・	·東

目 次

16八十一山四177本教理学を	15
2.1.3 マイクロホットプレス	18
2.1.3(1) マイクロホットプレス機構の試作	18
2.1.3(2) マイクロホットプレス機構による焼結・成形条件の把握(担当:デジ	タルパウ
ダー(株)・東北大学・山陽特殊製鋼(株) )	19
2.2 マイクロ部品 (マイクロギア・MEMS リレー部品)の試作	22
2.2.1 高精度マイクロ金型の設計・試作 ( 担当:デジタルパウダー㈱、東北大学、၊	山陽特殊
製鋼㈱)	22
2.2.1(1) 高精度マイクロ金型の設計	22
2.2.1(2) 高精度マイクロ金型の試作	22
2.2.2 マイクロパウダーデジタルプロセッシングによるマイクロギア・MEMS リレー	部品の試
作(担当:デジタルパウダー㈱、東北大学、山陽特殊製鋼㈱)	23
2.2.2(1) マイクロギアの試作	23
2.2.2(2) MEMS リレー部品試作	25
2.3 試作品の評価	26
2.3 試作品の評価 2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山	<b>26</b> 陽特殊製
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山)</li> <li>鋼㈱)</li> </ul>	<b>26</b> 陽特殊製 26
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山)</li> <li>鋼㈱)</li> <li>2.3.1. ビッカース硬さ試験結果</li> </ul>	<b>26</b> 陽特殊製 26 26
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山尾鋼㈱)</li> <li>2.3.1. ビッカース硬さ試験結果</li> <li>2.3.2 焼結・成形性及びネットシェイプの評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北;</li> </ul>	<b>26</b> 陽特殊製 26 26 大学・山
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山尾鋼㈱)</li> <li>2.3.1. ビッカース硬さ試験結果</li> <li>2.3.2 焼結・成形性及びネットシェイプの評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北: 陽特殊製鋼㈱)</li> </ul>	<b>26</b> 陽特殊製 26 26 大学・山 27
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山) 鋼㈱)</li> <li>2.3.1. ビッカース硬さ試験結果</li> <li>2.3.2 焼結・成形性及びネットシェイプの評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北: 陽特殊製鋼㈱)</li> <li>2.3.2(1) 加工が及ぼす結晶化への影響の調査</li> </ul>	26 陽特殊製 26 26 大学・山 27 27
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山(鋼㈱)</li> <li>2.3.1. ビッカース硬さ試験結果</li> <li>2.3.2 焼結・成形性及びネットシェイプの評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北:陽特殊製鋼㈱)</li> <li>2.3.2(1) 加工が及ぼす結晶化への影響の調査</li> <li>2.3.2(2) ネットシェイプの評価</li> </ul>	26 陽特殊製 26 26 大学・山 27 27 28
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山(鋼㈱)</li> <li>2.3.1. ビッカース硬さ試験結果</li> <li>2.3.2 焼結・成形性及びネットシェイプの評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北)</li> <li>陽特殊製鋼㈱)</li> <li>2.3.2(1) 加工が及ぼす結晶化への影響の調査</li> <li>2.3.2(2) ネットシェイプの評価</li> <li>2.3.3 ギア動作確認</li> </ul>	26 陽特殊製 26 26 大学・山 27 27 28 29
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山(鋼㈱)</li> <li>2.3.1. ビッカース硬さ試験結果</li> <li>2.3.2 焼結・成形性及びネットシェイプの評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北)</li> <li>陽特殊製鋼㈱)</li> <li>2.3.2(1) 加工が及ぼす結晶化への影響の調査</li> <li>2.3.2(2) ネットシェイプの評価</li> <li>2.3.3 ギア動作確認</li> </ul>	26 陽特殊製 26 26 大学・山 27 27 28 29
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山(鋼㈱)</li> <li>2.3.1. ビッカース硬さ試験結果</li> <li>2.3.2 焼結・成形性及びネットシェイプの評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北:陽特殊製鋼㈱)</li> <li>2.3.2(1) 加工が及ぼす結晶化への影響の調査</li> <li>2.3.2(2) ネットシェイプの評価</li> <li>2.3.3 ギア動作確認</li> </ul> 第3章 全体総括	26 陽特殊製 26 26 大学・山 27 28 29 31
<ul> <li>2.3 試作品の評価</li> <li>2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山(鋼㈱)</li> <li>2.3.1. ビッカース硬さ試験結果</li> <li>2.3.2 焼結・成形性及びネットシェイプの評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北:陽特殊製鋼㈱)</li> <li>2.3.2(1) 加工が及ぼす結晶化への影響の調査</li> <li>2.3.2(2) ネットシェイプの評価</li> <li>2.3.3 ギア動作確認</li> <li>第3章 全体総括</li> <li>3-1 研究開発の成果</li> </ul>	26 陽特殊製 26 26 大学・山 27 28 29 31 31

1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

情報機器においては3G/4G携帯電話・計測器、医療分野においては腹腔 手術用機器・内視鏡及びその他高度な施術機器に対する需要の拡大から、小 型複雑形状に対応し、高強度・高摩耗性・軟磁性材料による高機能マイクロ部 品のニーズが高まっている。

しかしながら、従来技術であるエレクトロフォーミングは合成組成に制約 があり、金属粉末射出成形は小型化に限度があるなどニーズにマッチしてい るとは言えない。

そこで、本研究開発では、試作ターゲットとして「マイクロギア」「ME MSリレー」を選定し、小型高機能化に対応し省資源に資する

製造技術として「マイクロパウダーデジタルプロセッシング(MPDP)」 の研究開発を実施する。

1.1.1 研究の概要

小型高機能マイクロ部品製造技術として、当社独自技術である「マイクロ パウダーデジタルプロセッシング(MPDP)」の研究開発を行う。「マイクロパ ウダーデジタルプロセッシング(MPDP)」は、「高精度原料粒子」「制御粒子 充填」「マイクロホットプレス」の3要素によって構成されている。本研究 開発は、「高精度原料粒子」の研究開発として、Fe基・Ni基を含む6種 以上の合金を材料として真球度が3%未満で直径50~500マイクロメ ートル(以下「 500µm」と記す)の範囲で、任意粒径の直径10%未満 の高精度原料粒子を高歩留まり(粒径領域内原料回収率90%以上)で作成 し、「制御粒子充填」の研究開発として高精度マイクロ金型への搬送・充填 を制御することによる最適化を実施し、独自に開発する「マイクロホットプ レス技術」により、引張強度1000MPa以上で、サイズが1mm<sup>3</sup>未満のマ イクロ部品をネットシェイプで2種(ターゲットはマイクロギア・MEMS リ レー)の試作を行うものである。

### 1.2 研究体制

### 1.2.1 研究体制



- 1.2.2 所在地
- 1.2.2 管理法人

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

(最寄り駅:東北新幹線仙台駅)

〒989-3204 宮城県仙台市青葉区南吉成六丁目6番地の3

1.2.2 再委託先

デジタルパウダー株式会社(最寄り駅:東北新幹線仙台駅) 〒989-3204 宮城県仙台市青葉区南吉成六丁目6番地の3

山陽特殊製鋼株式会社 (最寄り駅:山陽新幹線姫路駅) 〒672-8677 兵庫県姫路市飾磨区中島字一文字3007番地 国立大学法人東北大学大学院工学研究科川崎研究室

(最寄り駅:東北新幹線仙台駅)

〒980-8597 宮城県仙台市青葉区新巻字青葉六丁目6番地の02

1.2.3 管理体制



1.2.4 研究員

[デジタルパウダー株式会社](4名)

	氏名	所属・役職
加藤	洋史	代表取締役
三浦	俊英	製造管理部長
菊地	康仙	技術開発部
紀伊	正	技術開発部

## [山陽特殊製鋼株式会社](2名)

氏名	役     職
柳本勝	研究・開発センター機能開発グループ
	グループ長 主席研究員
松原 慶明	研究・開発センター機能開発グループ

## [国立大学法人東北大学大学院工学研究科](2名)

氏名	役	職	
川崎亮	東北大学大学院工学研究科	教授	

## 1.2.5 協力者

アドバイザー:株式会社 メムス・コア

所在地: 宫城県仙台市太白区秋保町長袋字門前22

1.3 成果概要

1.3.1 成果概要

1.3.1 マイクロパウダーデジタルプロセッシング技術の確立

- 1.3.1. . 高精度原料粒子の研究開発
- 1.3.1. . .a 部材の選定

濡れ性測定を6種類以上の材料に対して行い、坩堝・オリフィス等の最
 適部材の選定を行った。(デジタルパウダー・東北大学・山陽特殊製鋼の共
 同)

1.3.1. . .b 原料粒子作製予備実験

2 種類以上の材料に対し、 50~500µmの範囲の径の原料粒子作 製予備実験を行った。(デジタルパウダー・東北大学)

1.3.1. . . c 高精度原料粒子作製実験

Fe 基・Ni 基を含む6種類以上の原料に対して、高精度原料粒子の最適製 造条件を把握し、粒径±10%未満、真球度±3%未満の高精度原料粒子 の作製を、 50~500μmの粒径範囲で行うものである。

高温粒子製作に対応できるよう改造を行うことで高精度原料粒子の最適 製造条件の把握と 50~500µmの粒径範囲の高精度原料粒子の作製 を行った。(デジタルパウダー・東北大学)

- 1.3.1. 制御粒子充填
- 1.3.1. . .a 実験用マイクロ金型の設計・試作

高精度原料粒子の搬送・充填条件を把握する為の実験用マイクロ金型の 試作を行うものである。

実験用マイクロ金型の設計・試作を実施し、試作品を使用して充填条件 の把握を行った。(デジタルパウダー・山陽特殊製鋼・東北大学の共同)

1.3.1. . . b 高精度原料粒子の搬送・充填条件の把握

制御粒子充填装置を使用して高精度原料粒子の搬送・充填条件の把握を 行うものである。高精度原料粒子の搬送・充填条件の抽出を行い、制御粒 子充填装置の改造を完了し試作機を完成させた。(担当:デジタルパウダー (株)、東北大学)

1.3.1. . . c 高精度原料粒子の制御条件の把握

制御粒子充填装置を使用して高精度原料粒子の制御条件の把握を行うものである。

高精度原料粒子の粒径・個数計測条件の把握を完了し試作機を完成させた。(デジタルパウダー・東北大学)

1.3.1. . .d 制御粒子充填装置の設計・試作

-1-2 高精度原料粒子の搬送・充填条件の把握及び -1-3 高精度原料粒 子の制御条件の把握の結果に基づいて平成19年度に搬入・据付を行った 制御粒子充填装置(デジタルパウダーに設置)の改造(購入:制御粒子充 填装置の改造)を完了させた。(デジタルパウダー・東北大学の共同)

- 1.3.1. . マイクロホットプレス
- 1.3.1. .a 高精度焼結および成形条件の検討・把握 基本的な硬さ・耐食性等の検討を含めて高精度焼結及び成形条件の検討 と把握に関しては平成20年度で完了した。(デジタルパウダー・山陽特 殊製鋼・東北大学の共同)
- 1.3.1. . .b マイクロホットプレス機構による焼結・成型条件の把握 マイクロホットプレス機構による焼結及び成形条件の検討と把握を行 うものである。

粉末プレス成形装置(東北大学所有)及びナノインプリント装置(山陽 特殊製鋼所有)を用い、平成20年度までの結果を踏まえ焼結・成形条件 の最適化を実施した。(デジタルパウダー・山陽特殊製鋼・東北大学の共 同)

- 1.3.1. マイクロ部品(マイクロギア・MEMSリレー部品)の試作
- 1.3.1. . 高精度マイクロ金型の設計・試作
  - 20年度及び21年度においてマイクロ部品を試作するための高精度 マイクロ金型の設計と試作を行うものである。

技術目標である体積 1 mm<sup>3</sup>未満の高精度マイクロ金型の設計・試作を実施した。(デジタルパウダー・山陽特殊製鋼・東北大学の共同)

1.3.1. マイクロパウダーデジタルプロセッシングによるマイクロギア・MEMS用リレー試作

1.3.1. . .a マイクロギア試作

20年度及び21年度においてマイクロギアの試作を実施した。 技術目標である体積1mm<sup>3</sup>未満のマイクロギアの試作を実施した。 (デジタルパウダー・山陽特殊製鋼・東北大学の共同)

1.3.1. . . b MEMSリレー試作

20年度及び21年度においてマイクロギアの試作を行うものである。 技術目標である体積1mm<sup>3</sup>未満のMEMSリレーの試作を実施した。 (デジタルパウダー・山陽特殊製鋼・東北大学の共同)

#### 1.3.1 試作品の評価

- 1.3.1. 試作品の機械特性等の分析・評価 試作品であるマイクロギア・MEMS リレーの機械特性等の分析・評価を実 施するものである。 試作したマイクロギア・MEMS リレーの機械特性等の分析・評価を行った。 (デジタルパウダー・山陽特殊製鋼・東北大学の共同)
- 1.3.1. 焼結・成形性及びネットシェイプの評価 焼結・成形性の評価を実施し、ネットシェイプの確認を実施するもので ある。

焼結・成形性の評価を実施し、ネットシェイプの確認を実施した。 (デジタルパウダー・山陽特殊製鋼・東北大学の共同)

1.4 知的財産権等の取組状況

本プロジェクトにおける研究成果として次の特許を出願した。

特願 2010 - 010774 精密ホットプレス用金型とその製造方法 (出願日:平成22年1月21日)

【発明者】

【住所又は居所】兵庫県姫路市須磨区中島字一文字3007番地 山陽特殊製鋼株式会社内

【氏名】 柳本 勝

【発明者】

【住所又は居所】兵庫県姫路市須磨区中島字一文字3007番地 山陽特殊製鋼株式会社内

【氏名】 松原 慶明

【発明者】

【住所又は居所】宮城県仙台市青葉区南吉成6-6-3 ICRビル 3階、デジタルパウダー株式会社内

【氏名】 加藤 洋史

【発明者】

【住所又は居所】宮城県仙台市青葉区昭和町5丁目51番701号 【氏名】 川崎 亮 【特許出願人】

【識別番号】 000180070

【氏名】 山陽特殊製鋼株式会社

【特許出願人】

【住所又は居所】宮城県仙台市青葉区南吉成6-6-3 ICRビル

3 階、デジタルパウダー株式会社内

【氏名】 デジタルパウダー株式会社

1.5 対外発表等の状況

論文・学会発表等

パルス圧力付加オリフィス噴射法による球形単分散 F e 系金属ガラス粒子の作製(平成19年度 粉体粉末冶金協会秋季大会)

- (東北大院) 三浦 彩子、吉年 規治
- (東北大院工) 董 偉、川崎 亮
- (山陽特殊製鋼) 柳本 勝

パルス圧力付加オリフィス噴射法により作製した F e 系金属ガラス単分散 粒子の元素分布の調査(平成20年度 粉体粉末冶金協会秋季大会)

- (東北大院) 三浦 彩子、吉年 規治
- (東北大工) 董 偉、川崎 亮

パルス圧力付加オリフィス噴射法による球形単分散 F e 系金属ガラス粒子 の作製に及ぼす冷却速度の影響(平成20年度 粉体粉末冶金協会秋季大会) (東北大院工) 董 偉、三浦 彩子、吉年 規治、川崎 亮

(山陽特殊製鋼) 柳本 勝

マイクロホットプレス単粒子圧縮試験による金属ガラスの粘性率の推定 (平成21年度 粉体粉末冶金協会秋季大会) (東北大院工) 山田 類、吉年 規治、川崎 亮

(青森職業能力開発短期大学) 渡辺 龍三

パルス圧力付加オリフィス噴射法による単分散 F e 系金属ガラス粒子の 作製と評価(平成21年度 粉体粉末冶金協会秋季大会) (東北大院工) 福江 正浩、董 偉、吉年 規治、川崎 亮

(東北大院工;現JFEスチール) 三浦 彩子

1.6 当該研究開発の連絡窓口

- 1.6.1 管理法人
  - [株式会社インテリジェント・コスモス研究機構]

所属:産学官連携・インキュベーション事業部

- 氏名: 澁谷 俊昌
- 電話:022-279-8811
- FAX: 022-279-8880

E-mail: <u>shibuya@icr-eq.co.jp</u>

- 1.6.2 再委託先
  - [デジタルパウダー株式会社]
    - 所属:製造管理部
    - 氏名:三浦 俊英
    - 電話:022-277-8526
    - FAX: 022-277-8526
    - E-mail: t.miura@digitalpowder.com

## [山陽特殊製鋼株式会社]

- 所属:研究・開発センター 機能材料グループ
- 氏名:柳本 勝
- 電話:079-235-6143
- FAX: 079-235-6157
- E-mail: kyanagimoto@himeji.sanyo-steel.co.jp

[国立大学法人東北大学大学院工学研究科 川崎研究室]

所属:大学院工学研究科

氏名:川崎 亮

電話:022-795-7314

FAX: 022-795-4297

E-mail:川崎先生

電子メール アドレス : <u>kawasaki@material.tohoku.ac.jp</u>

第2章 本論

2.1 マイクロパウダーデジタルプロセッシング技術の確立

- 2.1.1 高精度原料粒子の研究開発
- 2.1.1(1) 部材の選定(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山陽特殊製鋼(㈱)
- 2.1.1(1) 単分散粒子作製装置

単分散粒子作製装置は、主として高温高真空炉・粒子形成部(飛行管)・圧電 アクチュエータ駆動電源装置、粒子回収機構で構成される炉内で高周波発振器 により溶解された試料を圧電アクチュエータの動作により液滴として下方に射 出し、落下中に球形に固化させることにより単分散な球形粒子を作製すること ができるものである。

2.1.1(1) 部材の選定

第2.1.1(1)-1 図に示す装置内には溶融した原材料と直接接触する部材が あり、高精度原料粒子を作製するためには、これらの部材が溶融原材料と反 応しないことが必要である。

また、これらの部材がもつ溶融原材料との濡れ性は、高精度原料粒子作製 上の重要な因子であり、粒子噴射プロセス大いに関係している。

したがって、高精度原料粒子作製実験を進めるにあたり、これらの部材と 溶融原材料との反応性や濡れ性を調べ、部材の選定を行うことが必要である。

2.1.1(1) - 濡れ性測定結果

本研究開発が目標とする最終生産品の部品(マイクロギア、MEMS リレー) に求められる特性に従って原料粒子の候補4種類と候補基板材料3種類を 選定した。測定結果は第2.1.1(1)-1表に示す。

	Fe-B-P-Si		Ni-Nb-Ti-Zr-		Fe-Co-Si-B-Nb		Fe-Co-Si-B-Nb	
			0-0	Ju	(36-36-4	.8-19.2-4)	(57.6-14.4	-4.8-19.2-4)
	濡れ性	反応性	濡れ性	反応性	濡れ性	反応性	濡れ性	反応性
$Al_2O_3$	140°	あり	溶融せず 測定不可	あり	113°	なし	122°	なし
SiO <sub>2</sub>	溶融せず 測定不可	あり	溶融せず 測定不可	あり	137°	なし	٥	なし
BN	154°	なし	溶融せず 測定不可	あり	139"	なし	143"	なし

第2.1.1(1)-1表 濡れ性及び反応性測定結果

2.1.1(1) - 部材選定結果

濡れ性試験および、反応性試験の結果に基づいて高精度原料粒子作製実験

の候補材に対して次の第2.1.1(1)-2表に示すような部材を選定した。 第2.1.1(1)-2表 部材選定結果

候補材	部材
Fe 系母合金	BN , A $_2O_3$
Fe-B-P-Si 系	BN
Fe-Co-Si-B-Nb	BN , A $_2O_3$ , SiO $_2$

<sup>2.1.1(2)</sup> 原料粒子作製の予備実験(担当:デジタルパウダー(株)・東北大学)

2.1.1.(2) 原料粒子作製の予備実験

この予備実験は、今後本研究開発の中で用いることが予測される材料と似た 特性(高強度材料・高活性材料)を持つ材料を単分散粒子作製装置を用いて 粒子化することを通して事前に作製上の問題点を抽出することを目的として いる。作製した粒子のデータを巻末の第2.1.1(2)-1表に示す。

既存の装置で実施した SUS304・SUS316・りん青銅については良好な噴射 が確認され粒径制御も可能であった。 既存の装置の高温対応化(後述 「2.1.1(2) . 高精度原料粒子作製装置の高温対応化」参照」実施後の Ni 系 金属ガラス合金については部材との反応のため安定した粒子噴射に至らなか った。



第 2.1.1(2)-1 表 予備実験作製粒子データ

2.1.1(2) . 高精度原料粒子作製装置の高温対応化(担当:デジタルパウダ

-(株))

2.1.1(2) · -a. 高精度原料粒子作製装置の高温対応化の意義

既存装置の加熱能力を強化し、炉内の雰囲気ガスの酸素含有量を減少さ せることにより高融点で活性であるFe基・Ni基材料による高精度粒子作製 が可能となる。

- 2.1.1(2) . -b.高精度原料粒子作製装置の高温対応化の箇所とその手法 【高精度原料粒子作製装置の高温対応化の実施内容】
  - ・高温用加熱ユニット・・・高周波炉の溶解温度を1600 (最高到達温度)に 上げる。
  - ・高温用噴射ユニット・・・高融点材料に対応するためのユニット内の断熱・
     冷却能力の強化
  - ・高温用冷却機構・・・高温用加熱ユニット・噴射ユニットの導入に伴う冷却 能力の強化
  - ・炉内脱酸機構・・・活性材料に対応するために、炉内の雰囲気ガスに酸素含 有量を0.02ppm未満に抑える。
- 2.1.1(3) 高精度原料粒子作製実験(担当:デジタルパウダー(株)・東北大学)
- 2.1.1(3) 実験の概要

Fe, Co, Si, B, Nb の高純度元素を誘導加熱炉によって攪拌・融解し、組 成が[(Fe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5)0.75</sub>B<sub>0.2</sub>Si<sub>0.05</sub>]<sub>96</sub>Nb<sub>4</sub>、+(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>0.75</sub>B<sub>0.2</sub>Si<sub>0.05</sub>]<sub>96</sub>Nb<sub>4</sub>の母合 金インゴットを作製した。単分散粒子作製装置による粒子作製には Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ロッド、BN 坩堝、BN オリフィス板を用いた。本研究には直径 400 µm のオリフィス(粒子噴出口)を用いた。粒子噴出中は、ロッド位置、ロ ッド変位量、差圧、圧電素子に印加するパルス波形電圧といったプロセ スパラメーターを変化させて粒子作製状況の調節を行った。パルス波形 電圧を周波数 10 Hz で圧電素子に印加した。

作製した粒子の粒度分布測定、真球度測定には光学顕微鏡及び画像解 析ソフトを用い、粒子の形状及び表面観察は走査型電子顕微鏡(SEM) により行った。また粒子の内部構造は、X線回折法(XRD)を用いて調 査し、線源には CuKαを用いた。更に、ガラス転移温度、結晶化温度、 過冷却液体域、変態エンタルピーは示差走査熱量計(DSC)を用い、Pt パンを使用して昇温速度 0.67 K・sec-1 の条件下で測定した。粒子内部の 微細組織の確認及び組成分布調査にはエネルギー分散型蛍光 X線分光分 析装置付き電界放出形透過電子顕微鏡(TEM-EDX)を用いた。TEM 試 料は作製粒子の上部及び下部に研磨を施し、粒子中心近傍を含む厚さ 30 µm 程度の円盤状の試料を準備し、モリブデンメッシュに装着した後、イ オンミリングで前処理を行った。TEM-EDX の組成分析では約 200~300 nm のビーム径を用いた。

- 2.1.1(3) 実験結果と考察
- 2.1.1(3) 単分散粒子作製装置による単分散粒子作製
- 2.1.1(3) -a 単分散[(Fe0.5Co0.50.75B0.2Si0.05]96Nb4合金粒子作製

第 2.1.1(3)-1 図に初期温度 1473 K における粒子作製状況を差圧対ロッド変 位量のマッピングで示す。



第21.1(3)-1図 初期温度1473Kにおける粒子作製状況を差圧対ロッド変位置

本研究においては粒子噴出状況を以下のように分類した。まず単分散粒子をパルス波形電圧の印加に応じて連続的に作製できる範囲を単分散領域、バイモーダルや不連続な噴出状況を示す範囲を不安定領域、そして粒子が噴出されない範囲を非噴出領域と定義した。第2.1.1(3)-2 図には第2.1.1(3)-1 図中の不安定領域、単分散それぞれにおいて得られた粒子のSEM画像及び粒度分布測定結果を示す。いずれにおいても粒子は2.0%以下の高い真球度で、表面状態も滑らかであることが分かる。 第2.1.1(3)-1 図の不安定領域において作製した粒子はピークが多数存在する粒度分布を示したが、一方で、第2.1.1(3)-1 図の安定領域で作製した粒子は1.0µm以下の標準偏差を示し安定領域で作製した粒子は単分散であることが確認できた。



単分散領域

不安定領域

第2.1.1(3)-2図 単分散領域、不安定領域における作製した粒子SEM画像及び粒度分布

2.1.1(3) - - b 高精度原料粒子作製実験のまとめ

単分散粒子作製装置で作製した単分散[(Fe0.5C00.5)0.75B0.2Si0.05]96Nb4 金属ガラ ス合金粒子の組成分析、構造評価、臨界冷却速度の調査により以下の結論を得 た。

- (a) 単分散粒子作製装置では所望の粒径を持ち、同一組成を持つ均質な単分散 [(Fe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5)0.75</sub>B<sub>0.2</sub>Si<sub>0.05</sub>]<sub>96</sub>Nb<sub>4</sub> 合金粒子を連続かつ安定して作製可能であ ることが分かった。
- (b) 単分散粒子作製装置においては、作製時のプロセスパラメーターを調節す ることによってある程度の粒径制御が可能であった。
- (c) 初期溶湯温度 1523 K、Ar ガス雰囲気下で作製した [(Fe0.5Co0.5)0.75B0.2Si0.05]96Nb4合金単分散粒子の X 線構造解析、TEM 観察 及び DSC 熱分析結果から、作製した粒子の粒径がおよそ 380um 以下の 場合はすべて金属ガラスであることを確認した。また同様に、初期溶湯 温度 1523 K、He ガス雰囲気下で作製した[(Fe0.5Co0.5)0.75B0.2Si0.05]96Nb4 合金単分散粒子の臨界粒径は 700~800µm であることが明らかとなった。 さらに、初期溶湯温度 1523 K、He ガス雰囲気下で作製した [(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.8</sub>)<sub>0.75</sub>B<sub>0.2</sub>Si<sub>0.05</sub>]<sub>96</sub>Nb<sub>4</sub> 合金単分散粒子では臨界粒径がおよそ 310um であり、Ar ガス雰囲気で作製した場合にはさらに小さい値を示す ことが明らかとなった。

2.1.2 制御粒子充填

2.1.2(1) 高精度マイクロ金型(実験用)の設計・試作(担当:デジタルパウ ダー(株)・東北大学・山陽特殊製鋼(株))

実験用マイクロ金型の設計にあたり、特に金属素材の中でも原料粒子の 加工温度である 600 前後での高温強度に優れたステライト (Co 基耐食耐 磨耗合金)をマイクロ金型素材として選定した。

精密加工方法については加工コストや精密加工性の観点からワイヤーカットが最も量産化に適しており、「ステライト素材のワイヤーカット」によるマイクロ金型について設計した。作製した実験用マイクロ金型の断面図とパンチ部外観を第2.1.2(1)-1図に示す。



第2.1.2(1)-1図 実験用マイクロ金型の断面図とパンチ部外観

2.1.2(2) 制御粒子充填装置の設計・試作

「高精度原料粒子の搬送・充填条件の抽出」「)高精度原料粒子の粒径・ 個数計測(粒子制御)条件の抽出」における検討結果に基づいて仕様を決 定し、試作を行った。制御粒子充填装置の主な仕様を第2.1.2.(4)-1表に示 す。

西日	4 世		
	1上 你		
搬送方式	スライドプレート方式		
粒子フィード回数	0~9回		
排出時間	1 0 秒以内/個		
対象粒径	50 μ m - 500 μ m		
	(スライドプレートの交換で対応)		
撹拌方式(ホッパー内)	シリンダによる極細線移動		
粒子有無の検知	透過型ファイバ式光電SW		
ダイセットへの排出	内径 0.6mmSUS チュープ内の粒子を超弾性ワイヤにより排出		
送出しワイヤストローク	8 0 mm		
設定方式	テンキー付タッチパネル		
設定・表示内容	フィード回数・粒径・投入粒子総体積		
機器構成	装置本体 + 制御盤(エアー機器内臓)		

第2.1.2.(4)-1 表 制御粒子充填装置の主な仕様

2.1.2(2) .a 制御粒子充填装置の改造

稼働テストの結果、粒子搬送の精度向上を図るために第2.1.2(4)-1表に示 す問題点を抽出した。

•		
問題点	原因	対策
粒子の空搬送	粒子の詰り・センシング不良	搬送プロセス・センシング見直し
複数粒子の同時搬送	ホッパー・突出しプレート精度	ホッパー・突出しプレート精度 向上
粒子の変形・破損	複数粒子の突出しプレートの穴に流 入	プレートの穴の精度向上
突出しプレートの破損	突出しプレートの強度不足	突出しプレートの強度向上

第2.1.2(4)-2表 制御粒子充填装置の問題点

上記の問題点を解決するため、第2.1.2(4)-3表に示す改造を実施した。

改造内容	効果
ホッパー内の撹拌方式の変更	
(駆動用エアシリンダーの追加)	粒子の詰り防止
排出ロッドをエアープ方式に変更	
突出しプレートの改良	複数粒子の同時搬送の解消
センサー改造	センシング精度向上
ホッパー改良・アジャスター機構追加	粒子の変形・破損の防止

第2.1.2(4)-3表 制御粒子充填装置の改造内容(1)

2.1.2(4) .b 制御粒子充填装置の改造

複雑形状の高精度マイクロ金型(マイクロギア・MEMSリレー用部品)への 複数の粒子の充填テストにおいてはダイセット内での粒子の重なりや粒子の 飛び出しが発生した。

上記の問題点を解決するために、任意の位置に粒子充填が可能で、ダイセット内での粒子の重なりを解消出来る機構を付加した。 第2.1.2(4)-4表に実施した改造内容を示す。

第2.1.2.(4)-4表 制御粒子充填装置の改造内容(2)

改造項目	効果
X Y ステージの追加	粒子落下位置の高精度化
振動機構の追加	ダイセット内での粒子の重なり防止
「「「「」」」」」で、タリル	X Y ステージ追加に伴い粒子の落下位置の固定化
	(フレキシブルチューブ メタルチューブ)

- 2.1.3 マイクロホットプレス
- 2.1.3(1) マイクロホットプレス機構の試作

〔加熱装置の試作(担当:東北大学)〕

以下に試作したマイクロホットプレスの機構を表す模式図(第 2.1.3-1 図)を示す。(赤枠で示される部分の内側が本プロジェクトで 購入した物品である。)



第2.1.3-1 図 マイクロホットプレスの機構

〔試作したマイクロホットプレスのスペック〕

・荷重測定

試作した装置に用いたロードセルは±1kN(静的荷重)の測定が可能で ありその精度は±1gf である。

・変位制御

制御可能な最低変位量は 0.125 µm であり、その測定精度は±0.10 µm である。また歪速度を制御する際に重要なクロスヘッドの最低速度は 0.000024mm/min と極めて遅い速度までの制御が可能である。

・真空排気システム

試作した装置には、比較的早く高真空度が達成できるターボ分子ポンプを用いた。最大到達圧力は10<sup>-7</sup>Paである。

## ・冷却ユニット

試作した装置は高周波すばやく試料を昇温する仕組みになっておりチャンバー及び高周波電源の冷却が必要である。想定の装置作動状態での冷却能力は 1200W 以上であり十分の冷却が可能である。

2.1.3(2) マイクロホットプレス機構による焼結・成形条件の把握(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・山陽特殊製鋼㈱)

2.1.3(2) - 高精度焼結・成形条件の実験における確認

パルス圧力付加オリフィス噴射法を用いて作製した粒子の熱的安定性および 粘性率を検討から精密な温度・時間・荷重・歪速度を制御することにより粘性 流動を利用したマイクロ2次加工を行うことが十分可能であることが判明した。 しかしながら、複雑な形状に2次加工を施す際には摩擦抵抗などの要因が加算 され、詳細な検討は困難であると考えられる。そこで、これまでに収集した諸 情報に基づき試作したマイクロホットプレスを用いて実際に粒子の粘性流動加 工を行い、様々な形状に変形をさせた。

2.1.3(2) - -a 円盤状試料への加工

第 2.1.3(2)-2 図は 0.5 mmの円形状の型により変形させた試料の上部および 側面 SEM 観察画像である。この観察像からきれいに円形状に変形が行われ流動 不足による欠陥等は見受けられない。また上部・側面の表面にはモールド・ダ イスの加工傷まで鮮明に転写されていることもわかる。さらに表面を滑らかに するためにはモールド・パンチの詳細な表面加工を施す必要性があると思われ る。この形状に転写する際の荷重 - 変位曲線を第 2.1.3(2)-3 図に示す。この曲線 より荷重の増加は滑らかに上昇していき中心部より均一に流動がおこり型側面 に到達することによりその荷重は上昇していったと考えられる。さらに最大荷 重は約 500 N で最大変位は約 230 μm であり、最終段階で必要な応力は 2550 MPa 程度であったと見積もられる。一方で、単純な体積計算から見積もられる 必要な変位は約 170 μm であり、実際の装置の変位と一致しない。これは加工 変形中に装置の下部支持棒が熱膨張により試料を上部へ移動させたことに起因 しているものと結論付けられた。今後さらに複雑形状へ 2 次加工を行うことを 想定すると、熱膨張の制御を行うことが必要と考えられる。



第2.1.3.(2)-2図 円柱形状に粘性流動により加工したサンプルSEM観察像





2.1.3(2) - - b 正方形状試料への加工

第2.1.3(2)-4 図は0.5 mm×0.5 mmの正方形状の型により変形させた試料 の上部および側面SEM観察画像である。円形試料と同様に流動不足による割 れなどの欠陥は見られない。またこの形状に転写する際の荷重 - 変位曲線を 第2.1.3(2)-5 図に示す。変形初期段階では滑らかに荷重が上昇していくが、あ る変位で傾きが変化し連続ではあるが傾きが急に変化する点が見受けられる。 この変曲点で粘性流動によりつぶれた粒子が側面に到達し拘束を受けている ことが考えられる。この拘束により拘束面と反対に流動が集中的に起こり他 の側面でさらに拘束が開始される。こうした面との接触を変曲点の数だけ繰 り返しながら荷重を増していき、最終的に正方形の形状に変化したものと考 えられる。一方で、SEM観察像から四角形の頂点に一部充填が不十分な様子 がうかがえる。こうした箇所への流動変形はかなり大きな荷重を伴うと考え られる。



第2.1.3.(2)-4図 四角柱の形状に粘性流動により加工したサンプルSEM観察像



第2.1.3.(2)-5図 四角柱形状への粘性流動加工時の変位と荷重の変化

2.1.3(2) - 金属ガラスの粘弾性挙動の検討

前に述べたように、微小球形金属ガラス粒子 1 つの圧縮変形から円盤状試 料、正方形状試料への加工が可能であることを明らかにした。しかしより複 雑な形状への応用を考慮した場合には、離型性やサイジング等の問題を十分 に検討する必要があると考えられる。一方で金属ガラスは過冷却液体温度域 にて粘弾性現象を発現することが報告されており、この現象を積極的に利用 することにより離型性やサイジング等までを直接的に制御できるものと考え られる。 2.2 マイクロ部品 (マイクロギア・MEMS リレー部品)の試作

2.2.1 高精度マイクロ金型の設計・試作(担当:デジタルパウダー(株)、東北大 学、山陽特殊製鋼(株))

2.2.1(1) 高精度マイクロ金型の設計

2.2.1(1) ダイセットの材質・選択理由

高精度マイクロ金型の試作にあたり、前述した実験用マイクロ金型の素材として用いたステライト(Co基耐食耐磨耗合金)について更に検討を行った。ステライトの製造方法は大きく分けて、溶湯を鋳型で凝固させて所定の形状に切出す鋳造法と、ステライト成分の金属粉末を製造し、その粉末を100%密度に焼結させる粉末冶金法との2つの製造方法がある。

両者の組織を比較すると、鋳造で作製したものは金属組織中に析出する 炭化物が不均一で粗い組織になっているのに対し、粉末冶金法によるものは その炭化物が非常に微細に析出した均一な組織となっている(第2.2.1(1)-1 図)。本プロジェクトで用いる高精度マイクロ金型を製造する際には 50µ m程度の非常に細いワイヤーで精密加工する必要があり、粗い組織ではワイ ヤー切れや寸法精度不良、ワイヤーカット面の平滑度不良などが生じやすい。 また組織を微細にすることによって耐熱衝撃性の向上もはかれるため、高精 度マイクロ金型の材質として第ガスアトマイズと熱間押出しを組み合わせ た粉末冶金法によって製造したステライト材を用いて金型を試作した。



第2.2.1(1)-1図 粉末冶金法(左)と鋳造法(右)によって製造したステライト合金組織

2.2.1(2) 高精度マイクロ金型の試作

高精度マイクロ金型として、歯先外径 0.7mm 歯車状金型をワイヤーカットで加工を行い作製した。作製した高精度マイクロ金型の一例を第 2.2.1(2)-1 図に示す。金型のパンチ部が非常に細く強度が低いため、本作製 事例では成型中や成型後の抜き取り時に折損することを防止する目的で、ガ イドピンを用いて正確に上下動する仕組みとした。



第 2.2.1(2)-1 図 歯車状高精度マイクロ金型の事例

今回作製した高精度マイクロ金型の寸法精度をレーザー顕微鏡で実測した結果 を第 2.2.1(2)-2 図、第 2.2.1(2)-3 図に示す。パンチとダイとの隙間は 15~20 μ m であり、今後の量産を視野に入れた際には、寸法精度やダイセットからの取 出し性を向上させるべく、この隙間を最小限に抑える超精密加工技術の開発が 必要である。



歯先平均外径	704 µ m
歯元平均内径	486 µ m

第 2.2.1(1)-2 図,3 図金型上パンチ部の寸法測定結果



歯先平均外径	732 µ m
歯元平均内径	521 µ m

また、パンチ表面仕上がり観察した結果を第2.2.1.(2)-6図に示すが、ワイヤ ーカット面においては表面粗さを取り除く「鏡面加工技術」の取り組みも必要 になる。

2.2.2 マイクロパウダーデジタルプロセッシングによるマイクロギア・MEMS リレー部品の試作(担当:デジタルパウダー㈱、東北大学、山陽特殊製鋼㈱)

2.2.2(1) マイクロギアの試作

本項目は、マイクロパウダーデジタルプロセッシングによりマイクロギアお よび MEMS リレー部品の試作を行なうものだが、マイクロギアにおいては 6 枚歯簡易ギア・9 枚歯複雑形状ギア・9 枚歯で最も実用の歯車に近い形状を有 したギアの 3 種類の形状での試作、MEMS リレー部品においては 1 種類の試 作に行った。

以下、9枚歯で最も実用の歯車に近い形状を有したギア及び MEMS リレー部

品の試作について報告する。

2.2.2(1) 9 枚歯で最も実用の歯車に近い形状を有したギアの試作

6枚歯のギアの作製に成功し、さらには9枚歯の中でも実用のギアの形状 よりも歯の溝が深く設計されている複雑な形状を有するギアの作製に関して もほぼ成功した。そこで、より実用の歯車に近い形状を有したギアの試作を 行った。加工温度は838 K で、圧縮速度は180 µ m/min の条件下でマイクロ 部品作製を試みた。

第2.2.2(1)-6 図にマイクロギアを作製する際に用いた金型のパンチの SEM 観察像を示す。この図から数百ミクロンオーダの歯の溝を有した精密な金型であることを確認した。

また同図にマイクロギア作製後の試料の SEM 観察像を示す。この図から歯車の形をきれいにかつ精密に写し取った Fe 系金属ガラスマイクロギアの様子がうかがえる。また、先に示した複雑な形状を有した 9 枚歯の SEM 観察像とは異なり、試料の割れ等は見られなかった。さらにパンチの加工傷も正確に写し取っていることから、粘性流動を利用した Fe 系金属ガラスマイクロ部品作製に成功した。

第 2.2.2(1)-7 図に加工時の荷重-変位曲線を示す。このグラフから最終到達 荷重は 700 N 程度であることが確認できる。この値は 9 枚歯の複雑な形状を 有するギアを作製した際に最終到達荷重がおよそ 700 N 程度で、試料は十分 に金型を充満していたため、その荷重の値を参考にしてほぼ同程度の荷重で 加工を終えた。その結果、第 2.2.2(1)-6 図の SEM 画像からも明らかなように [(Fe0.5Co0.5)0.75Si0.05B0.2]96Nb4 金属ガラスのマイクロ部品の作製に成功した。





第2.2.2(1)-6図 9枚歯の実用に近い形状を有したマイクロギアの外観とギア作製時に 用いた金型パンチの外観



第2.2.2(1)-7図 9枚歯の実用に近いマイクロギア形状への粘性流動加工時の変位と荷重の変化

2.2.2(2) MEMS リレー部品試作

MEMS リレー部品の試作に着手するに当たり、ユーザーであり本研究開発 のアドバイザーである㈱メムス・コアおよび金型メーカーを含めて、当社技 術・ユーザー要望・金型技術の摺り合わせを実施し、第 2.2.2(2)-1 図に示すよ うな MEMS リレー部品の試作を検討した。

第 2.2.2(2)-2 図に MEMS リレーの形状を有したマイクロ金型のパンチの SEM 観察像を示す。また同図に実際に作製した MEMS リレーの SEM 観察 像を示す。第 2.2.2(2)-2 図に示す実際に作製した MEMS リレーは、第 2.2.2(2)-1 図に示す MEMS リレーのイメージ図に近い形状にまで到達してい ることが見て取れる。またリレーの上面には金型に存在する加工キズまで正 確に転写されており、粘性流動が発現していることも見て取れた。さらに上 面から 4 つの角に至る 4 本の線も、SEM 観察像のコントラストからはっきり と確認でき、側面もきれいにでていることから、MEMS リレー部品に求めら れる条件を十分に満した試作品の作製に成功した。一方で、リレーの角の部 分においては依然として十分には埋まりきっていなかったが、金型の微細加 工の限界にまで達しており、今後さらに正確かつ厳密な加工条件を検討する ことにより、さらなる高い寸法精度を有した MEMS リレー部品の作製が可能 になるものと考えられる。

第 2.2.2(2)-3 図に MEMS リレー作製時の荷重-変位曲線を示す。9 枚歯のギ アに比べて単純形状なだけにその最終到達荷重は 550 N 程度であることが確 認できた。



第2.2.2(2)-1図 🕬 (1007 メージ図







2.3 試作品の評価

2.3.1 試作品機械特性等の分析・評価(担当:デジタルパウダー㈱・東北大学・ 山陽特殊製鋼㈱)

作製したギア形状を有する Fe 系金属ガラスマイクロ部品の機械的特性の分析・評価を行った。成型加工前の微小球形金属ガラス粒子及び成型加工後の ギア形状を有したマイクロ部品のマイクロビッカース硬さ試験を行い、Fe 系 金属ガラスが有する高強度特性を成型加工後のマイクロ部品が維持し続けて いるかを検討した。なお、ここでは代表的に 6 枚歯を有するギアのビッカー ス硬さ試験を行った。

### 2.3.1. ビッカース硬さ試験結果

第2.3.1-1 図に成型前の金属ガラス粒子及び成型後の6枚歯ギアのマイクロビッカース硬さ試験結果を示す。



Fig. 3-11 (a)成型前の粒子, (b)成型加工後のマイクロギアにおけるビッカー ス硬さ試験結果

この図は荷重 1.96 N におけるビッカース硬さ試験結果を示している、この図からも見て取れるように、成型前の金属ガラス粒子及び成型後の 6 枚歯ギアの ビッカース圧痕の形状に大きな差異は見られなかった。この図から圧痕のくぼ

第2.3.1-1図 (a)成型前の粒子,(b)成型加工後のマイクロギアにおけるビッカース硬さ試験結果

みの対角線長さを計測し、そのときの荷重を用いて 式からビッカース硬 さを算出した。その結果、成型前の金属ガラス粒子のビッカース硬さは HV =1116、成型後の 6 枚歯ギアのビッカース硬さは HV =1125 であることが明らか となった。この結果からも成型前後においてビッカース硬さに差異がほとんど 見られなかった。また一般に、金属ガラスのビッカース硬度は引っ張り降伏強 度の 3 倍の値を示すことが知られており、成型前後においてビッカース硬度に 変化が見られなかったことからも、成型後の 6 枚歯ギアは高い降伏強度を有し ているものと考えられる。実際に成型前の粒子の降伏強度を推定すると f=3348 MPa となり文献値で報告されている同組成金属ガラスの降伏強度 f =4070 MPa に比べて小さな値を示した。これは文献で報告されているビッカー ス硬さ試験は銅鋳型鋳造法により作製した試料を用いている一方で、本研究で はパルス圧力付加オリフィス噴射法により作製した試料に対してビッカース硬 さ試験を行っているため、その冷却速度の違い等によりこの差が生じたものと 考えられる。また成型前後でビッカース硬さに多少の値の差が見られたが、本 来、熱処理によりビッカース硬さは高い値を示すことが知られている。これは 内部に残留する自由体積が熱処理行うことにより外部に排除され、硬度が増加 するためである。本研究においても成型後の試料のビッカース硬さの値が成型 前のそれに比べてわずかに上昇したが、これが熱処理による効果であるのか実 験誤差により生じたものであるかは定かではない。しかしいずれにせよ、ビッ カース硬さ試験により、Fe系金属ガラスが本来有する高強度特性を維持したま まの Fe 系金属ガラスマイクロ部品の作製に成功したことが確認できた。

2.3.2 焼結・成形性及びネットシェイプの評価(担当:デジタルパウダー(株)・ 東北大学・山陽特殊製鋼(株))

### 2.3.2(1) 加工が及ぼす結晶化への影響の調査

### 2.3.2(1) 実験結果

第2.3.2(1)-1 図に 50µm/min、400µm/min、500µm/minの圧縮速度下で 圧縮試験を行った後の試料内部の組織観察結果を示す。この TEM 観察像及び 電子線回折パターンから圧縮速度が 50µm/min、400µm/min の条件下で加 工を施した試料内部には結晶相と思われる組織は観察されず、回折パターン はハローパターンを示した。一方で圧縮速度が 500µm/min もの速い圧縮速 度条件下で加工を施した試料内部にはデントライト相のような結晶相が確認 され、また回折パターンには斑点が見られた。この結果から、結晶化の潜伏 時間内に加工を施したにも関わらず、その時の加工条件によっては結晶化が 促進されることが明らかとなった。



第2.3.2(1)-1図 圧縮速度(a)50 µ m/min,(b)400 µ m/min,(c)500 µ m/minで圧縮試験を行った後の試料内部TEM観察結果 圧縮試験を行った後の試料内部TEM観察結果

## 2.3.2(2) ネットシェイプの評価

本研究開発で試作したマイクロ部品は、寸法が 1mm 以下と小さく、材料とし て Fe 基の金属ガラスを採用したことから、マイクロホットプレスで成形後の加 工は極めて難しい。

このため、成形マイクロ部品は後加工無しで使用できるネットシェイプでの 成形が求められており、この観点から試作したマイクロ部品のうち複雑平面形 状を持つマイクロギアについての寸法精度を確認した。

レーザー顕微鏡による第 2.3.2(2)-1 図にギア外歯部の寸法精度、第 2.3.2(2)-2 図にギア内歯部の寸法精度の測定結果を示す。 これらの精度はマ イクロ金型の精度の範囲内で、いずれも±9µm に収まっている。 また、ギア 歯部の寸法精度として歯の高さの精度を第 2.3.2(2)-3 図に示すが、これも±8 µm に収まっていることから、2.2.1.(2)の項で述べたように、マイクロ金型の 超精密加工技術の開発が進めば十分にネットシェイプ成形が可能になると考え られる。



第 2.3.2(2)-1 図 ギア外歯部の寸法精度



479 467 平均 471

測定位置

直径

( u m 465 473

第2.3.2(2)-2図 ギア内歯部の寸法精度



第2.3.2(2)-3図 ギア歯部の寸法精度

2.3.3 ギア動作確認

本研究開発においては、計画には含まれていないものの、ギアの評価の第1歩 である動作確認を行った。

動作確認は、まず第2.3.3-1図に示すナノ放電加工機を用い 1.8µmのタング ステン電極を回転させながら放電加工を行うことでマイクロギアの中心部にギ ア軸穴を加工し、その軸穴に軸を通して固定し、試作したマイクロギアの歯車 に対応した歯車を持つ棒を直線方向に動かすことによって行った。

ナノ放電加工機



第2.3.3-1図 ナノ放電設備によるギア軸穴加工

また、この動作確認を行うための予備実験として、Fe基金属ガラスへの軸穴加 工を行い、第2.3.3-2図、第2.3.3-3図のように極めて良好な寸法精度で軸穴加工 が行えることが判明した。



測定位置	直径(µm)
	190
	190
	195
	201
平均	194

第2.3.3-2図 ギア軸穴直径の寸法精度



測定位置	直径差(µm)	
	175	
	181	
	184	
	178	
	183	
	166	
	153	
	151	
平均	171	

第2.3.3-3図 内歯に対する軸穴相対位置の精度

このように試作したマイクロギアに軸穴加工を、続いて第2.3.3-4図に写真で示 すような模型を作製して、棒に形成した歯車をマイクロギア金型に噛み合わせ たところで棒を直線上に動かしたところ、マイクロギアが回転することが確認 できた。



第2.3.3-4図 ギア回転確認用模型模式図と軸部写真

第3章 全体総括

3-1 研究開発の成果

情報機器においては、小型携帯無線通信機器、医療分野においては、高度な 施術機器の需要増大から、小型複雑形状に対応し、高強度・高摩耗性・軟磁性 材料による高機能マイクロ部品のニーズが高まっている。(第 4-1-1 表参照)

第3-1-1表 マイクロ部品のニーズの高まり



それに対応するため、)高精度原料粒子製造、)制御粒子充填、)マ イクロホットプレスの各工程を高度化させることにより、高精度原料粒子の機 能性を保持させつつ、サイズ・粒度を最適化できる加工法であるマイクロパウ ダーデジタルプロセッシング(=MPDP)を提案し、研究開発を実施した。 技術的目標値(最終)と最終達成値を第4-1-2表に示す。

第3-1-2表	最終達成値
70-1-21	取於此心

研究項目		技術的目標値(最終)	最終達成値			
M P D P 技術の確立						
	高精度原料粒子	軟磁性 / 高強度・耐摩耗性金属・合金6種類以上 (Fe基・N:基含む)	・Fe基・Ni基含む金属・合金6種達成 ・Fe基金属ガラスを高精度原料粒子として選定			
		真球度3%未満	真球度1.79(Fe基金属ガラス)達成			
		50~500マイクロメートル	粒径100~550µm範囲達成			
		任意粒径の直径±10%未満	粒径精度±5%達成			
	制御粒子充填	高精度マイクロ金型の試作	高精度マイクロ金型の試作を実施			
		搬送・充填条件の最適化	搬送・充填条件の把握による最適化を達成			
		制御粒子充填装置の試作	制御粒子充填装置の試作を実施			
	マイクロホットプレス	高精度焼結・成形条件の把握	高精度焼結・成形条件の検討・把握を実施			
		マイクロホットプレス機構による焼結・成形	マイクロホットプレス機構による焼結・成形を行 い検討を実施			
٦1	クロ部品					
	高精度マイクロ金型	高精度マイクロ金型の設計・試作	・6式の高精度マイクロ金型の試作を実施 ・高精度マイクロ金型材として粉末焼結ステライ トを採用			
	マイクロギア・MEMSリレー部品	硬さ特性・耐摩耗性の把握 引張強度 1000MPa,2000MPa (バルク材として)	硬度(マイクロビッカース硬度):Hv = 1125(マイ クロギア表面) (引張強度換算:)~4000MPa			
		製品サイズ:1mm <sup>3</sup> 以下 1辺のサイズ:0.2mm以下	・製品サイズとして1mm <sup>3</sup> 以下達成 ・1辺のサイズ:最小サイズとして0.2mm以下達 成			
		ネットシェイプの確認	·ネットシェイプ成形を確認 ·組み合せ動作の確認(マイクロギア)			

#### 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

「3-1 研究開発の成果」のとおり本研究開発の技術目的は達成し、マイクロ パウダーデジタルプロセッシング技術での高機能マイクロ部品の実用化の可能 性は大きく高まったと考えられる。

しかしながら、事業化に対しては第3-2-1表に示すように、主としてネットシェイプに資する寸法精度の確保や量産を視野に入れた際の型抜き性を改善する 必要があり、更なるマイクロ金型の超精密加工技術の確立が必要となる。

本研究開発が確立されると、次の効果が期待できる。

第 3-2-1 表 研究開発後の課題

項目	高精度原料粒子	制御粒子充填	マイクロホットプレス
主たる達成事項	Fe基金属ガラスを選定し	制御粒子充填装置の試作	・高精度マイクロ金型の試作
	要求粒径・精度での作製		・マイクロ部品の試作
研究開発後の課題	量産製造	量産用マイクロホットプレ ス機構との取合い	・粉末焼結ステライト金型で の超微細加工と寸法精度向上
			・量産に適応する金型の型抜 き性の改善

- 川下ニーズである小型・高機能マイクロ部品の製造が可能となり、情報機器・医療機器の小型化・高機能化に貢献できる。
- 2. 原料粉末の製造段階から製品まで材料歩留りが高く、ネットシェイプ化出 来るので、環境に配慮された製造が出来る。
- 3. 材料の拡がりが期待でき、将来的には異材料による複合化も図れることか ら、技術の波及性が大きい。

本研究開発を基盤として、第 3-2-1 図に示す体制での事業体制で、増大する MEMS市場(第3-2-2・3-2-3 図参照)に参入すべく継続して研究開発を実施す



第 3-2-1 図 事業化体制



第3-2-3 図 市場の動向

第 3-2-2 図 MEMS Market Report

出展:第18回マイクロマシン/MEMS展 プレビューブック