

平成 2 4 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「シンターハードニング処理後の二次切削加工を容易にするための 3 D
複合化成形技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 5 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 三木プーリ株式会社

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 当該研究開発の連絡窓口

第 2 章 本論

研究開発目標

- 2－1 複合化材料の特性把握
- 2－2 3D 複合化成形用鉄粉の金型への充填方法の開発
- 2－3 CNC 成型プレスと連携した鉄粉供給したシステムの開発
- 2－4 低慣性軸継手ハブの開発

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

○当該特定ものづくり基盤技術において達成しようとする高度化目標
特定ものづくり基盤技術高度化指針のうち、以下の項目に対応。

(五) 粉末冶金に係わる技術に関する事項

1. 粉末冶金に係わる技術において達成すべき高度化目標

(4) その他伸長が期待される産業に関する事項

<川下業者の抱える課題及び要請（ニーズ）>

ア. 高機能化、イ. コスト低減

【背景】

様々な機械部品を加工するためのマシニングセンターやCNC旋盤などにおいて、切削工具や加工物へ位置出しはサーボモータとボールねじを組合せて行っている。そして、それら二要素をつなぐ動力伝達部品が弊社で製造している金属板ばね式軸継手である。

	工作機械 生産総合計	軸継手（カップリング）	
			内 金属ばね式
数量	106,202	1,886,008	818,789
金額 (百万円)	1,303,164	5,861	2,729



サーボモータとボールネジを
つないでいる
軸継手の例

(参考) 2007年の工作機械及び弊社軸継手の市場規模

金属板ばね式軸継手に求められる特性としては、各種取り付け誤差を吸収することは当然であるが更に①回転方向のねじりばね剛性が高いこと（高い位置精度）②低慣性であること（高速対応）の2点がある。この特性を決めるのは、板ばねとハブ（軸に接する部分）である。最近の加工時間短縮傾向に伴い主軸（3万回転）および送り軸の高速化が必須となり、軸継手の低慣性化は弊社と取引がある川下製造業者（工作機械製造業 約30社）より要望されている。

工作機械での送り軸での慣性負荷は、軸継手の分で50%にも及んでいると弊社では試算している。また、軸継手の慣性負荷を半分にできれば、工作機械の切削時以外の切削工具および加工物の移動時間を20%程度は短縮できると見積もっており、川下製造業者の課題解決に資することができる。

【これまでの取り組み】

板ばね自体の開発は限界に近付いており、最近の開発はハブに視点が移っている。慣性モーメントはハブの材料と形状に依存しており、いかに剛性の高い材料で慣性モーメントと剛性に有利な形状にするかに係っている。

金属板バネ式軸継手ハブの材料としては、剛性・慣性モーメントとコストの関係から大半は中炭素鋼を使用している。高剛性で低慣性化するためには、軽量化とともに剛性に有利な形状が必要であり、複雑な形状でハブを製造することが必要になる。そのため慣性モーメントを下げるために剛性に影響の少ない部分を切削加工で削っていたが、複雑な切削加工はコストが高くなるため妥協した形状にせざるを得なかった。

【最新の技術水準】

複雑形状を求めるのであれば、コスト面で切削加工より粉末冶金で成形することが望ましいものの、焼結のみの焼結部品では材料強度が低いため必要強度を得るために二次的な熱処理が必要になりコストが高くなってしまった。さらに低慣性を求める場合、肉厚を薄くする必要もあり切削加工が困難な領域まで強度（硬度）を高める必要があった（一般的に鋼材は“強度＝硬度”の関係がある）。最近開発されたシンターハードニング技術（焼結後の熱処理を行うことなく、焼結冷却過程で変態させ、焼結体を硬化させるプロセス）を使用すると低コストで高強度を得られることがわかっていて、全体が高硬度な材料特性になってしまうため成形では付与できない形状や高い精度を得るための二次的な切削加工が困難になる欠点があった。

【現状との違い】

粉末冶金で高剛性・高精度・低慣性・低コストのハブを製作するには、シンターハードニング処理後に二次的な切削加工を可能にする必要がある。そのためには加工が必要な部分には硬度が高くない中強度材料、高い強度が必要な部分には高強度材料を使用できる「3D（三次元）複合化成形」技術が求められている。

また現在この技術は「3D複合化成形」方法として特許出願中である。

（参考）粉末冶金製造プロセス

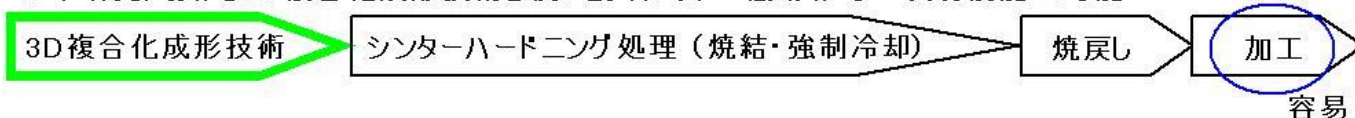
● 従来プロセス = コスト 高



● 従来のシンターハードニング処理を使ったプロセス = 低コストだが、加工困難



● 本研究における3D複合化成形技術を使ったプロセス = 低コストで二次切削加工可能



【研究目的及び目標】

本開発では、素形材産業の焼結部品におけるシンターハードニング技術の問題点である部品全てに焼入れが入ってしまうことを解決するために、特性の違う二種類以上の材料鉄粉を任意の位置に充填し成形する３Ｄ（三次元）複合化成形技術を開発することである。

当社「ＭＬＳＴ技術」の主設備となるＣＮＣ油圧成型プレスと連動させた粉体供給装置を開発することで、任意の位置に必要とされる特性を持った材料を充填・成形することが可能になり、たとえば二次切削加工が必要な部分には中強度用鉄粉を、強度を持たせるべき部分には高強度用鉄粉を三次元的に配置することでシンターハードニング技術の可能性が大きく広がる。

まず、特性の違う二種類以上の材料鉄粉をシンターハードニング処理した場合の境界部の状態を把握し、金属組織および機械強度特性により最適な材料と最適な組合せを求める必要がある。

次に、鉄粉の金型への充填方法の開発がある。積層（二次元）ではなく立体的（三次元）に充填する方法を開発するため実験装置を製作し、鉄粉の流れや充填密度を把握し最適な方法を見つける。

実験装置で開発した方法を基に、ＣＮＣ成型プレス用と連動した量産用鉄粉供給システムを開発する。鉄粉供給システムには、鉄粉メーカーより供給されるフレキシブルコンテナから供給し、金型に充填・成形・取出しまで全ての機器と、プレスと供給システムの連携ソフトを開発し、自動連続生産が可能となる生産システムを構築する。

開発した３Ｄ複合化成形技術により、５０％の慣性、５０％のコストの軸継手ハブを開発・設計・製品化し達成する。

【実施内容】

① 複合化材料の特性把握（実施：三木プーリ株式会社）

シンターハードニング処理により高強度を得られる材料と、二次切削加工が可能な中強度材料を選定する。部品に要求される強度および切削加工性により３種類以上の組合せを選定する。選定した高強度・中強度材料を組合せた場合の金属組織・強度を把握し最適な成形・焼結条件を見つける。

特性の異なる２種類以上の材料が粉の状態で作成境界を作り成形されるため、成形・焼結＋シンターハードニング処理により金属組織および強度がどのように変化するのか試験により把握する。試験には、弊社５００ｔ成型プレスにて２種類の鉄粉を分けて手動充填できる、分割された専用の引張試験用と衝撃試験用の金型を２型製作し成形を行う。

なお、複合化材料の特性把握は、平成２２年度に基本となる約３種類の組合せで行うが、サブテーマ②３Ｄ複合化成形用鉄粉の金型への充填方法の開発、③ＣＮＣ成型プレスと連携した鉄粉供給システムの開発および④低慣性軸継手ハブの開発に合わせ、平成２４年度まで継続して最適な複合化材料の開発・検証を進める。

試験片はシンターハードニング可能な量産用連続炉で焼結した試験片により行う。試験片・分析試料の製作や硬度・引張試験は三木プーリ株式会社で実施する。また、九州大学にて金属組織の評価・アドバイスおよび衝撃・疲労試験を実施する。

② ３Ｄ複合化成形用鉄粉の金型への充填方法の開発（実施：三木プーリ株式会社、東京メータ株式会社）

充填方法の違いにより２種類以上の鉄粉がどのように混ざり合い境界を作るのかを検証する。さらに、３Ｄ複合化にはどのような充填方法が良いか研究をする。ＣＮＣ成型プレスの実機充填装置を製作する前段階として、東京メータ(株)において小型の試験用充填装置（金型部およびフィーダー部）の製作を行い、充填方法の研究で把握された通りに充填されるか検証する。また、金型の動きとフィーダーの動きをどのように連携させるか基本的な機構および制御ソフトウェアも開発する。ＣＮＣ成型プレス本体とリンクに必要な条件もこの時点で把握する。

③ ＣＮＣ成型プレスと連携した鉄粉供給システムの開発（実施：三木プーリ株式会社、東京メータ株式会社）

平成２３年度より②で開発した試験用充填装置と同じ構想のもとに、ＣＮＣ成型プレスと連動した量産用鉄粉供給システムを開発する。鉄粉供給システムには、鉄粉メーカーより供給されるフレキシブルコンテナから供給し、金型に充填・成形・取出しまでの全てが含まれる。量産用装置のため、耐久性や生産スピード、段取り時間・メンテナンス性等経済的な部分も考慮する。ＣＮＣ成形プレスと鉄粉供給システムの連携による連続自動生産システムを機能させるためのソフトウェアを開発する。ＣＮＣ成型プレスのソフトウェアは米国製のため本開発の鉄粉供給システムソフトウェアとのインターフェイス開発のため、米国技術者の要請あるいは本開発技術者が渡米し開発を進める。

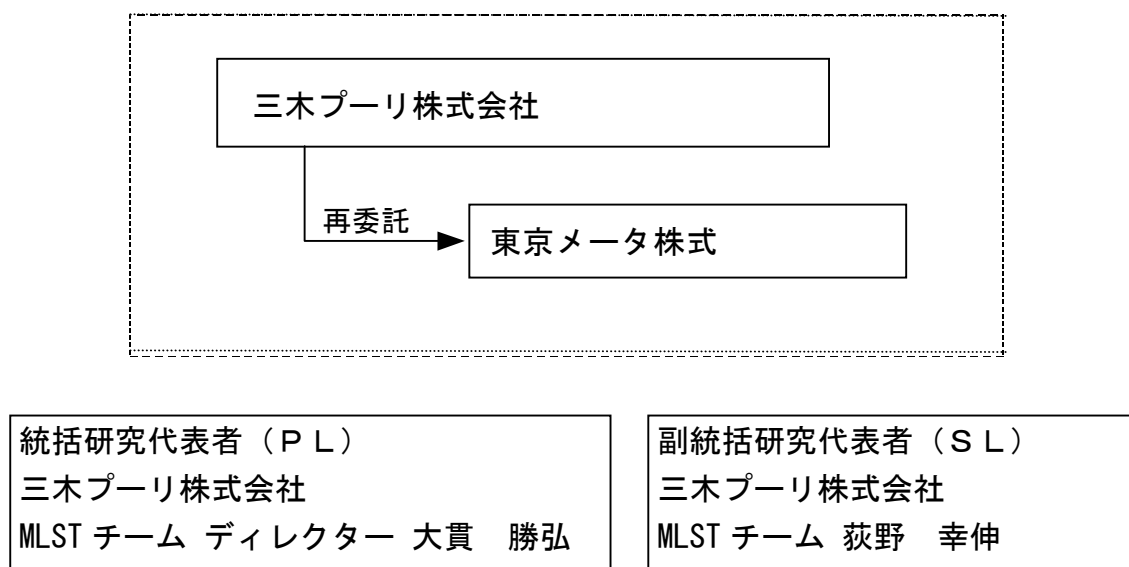
④ 低慣性軸継手ハブの開発（実施：三木プーリ株式会社）

平成２４年度より③で開発した量産システムをベースに実際の低慣性軸継手ハブの３Ｄ複合化成形用金型を製作し、最適な材料選定と成形方法および焼結条件による設計・試作を行う。３Ｄ複合化による２種類以上の強度材料を使用するため強度計算等は非常に難しくＦＥＭ等の解析手法も開発する。並行して①で選定した材料が軸継手ハブとして最適材料なのか検証し、必要がある場合は再度選定をやり直し追加試験を行う。軸継手ハブとしての機械的特性および切削加工性を検証すると共に、軸継手としての性能も検証する。また、軸継手として市場要望の性能を満たしているかの実機試験等をおこなう。

1－2 研究体制

【研究組織・管理体制】

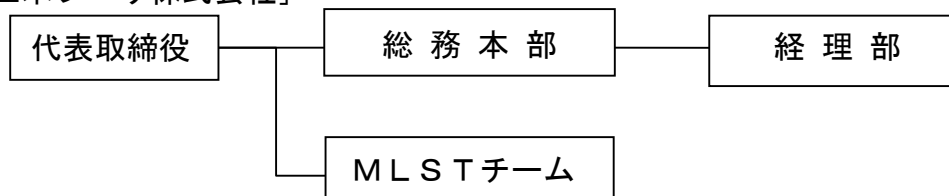
(1) 研究組織（全体）



(2) 管理体制

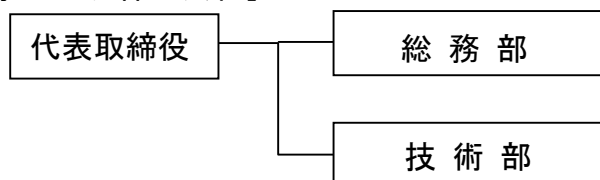
①事業管理機関

[三木プーリ株式会社]



② 再委託先

[東京メータ株式会社]



【管理員及び研究員】

【事業管理機関】 三木プーリ株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
大貫 勝弘	MLSTチーム ディレクター	①②③④

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
大貫 勝弘（再）	MLSTチーム ディレクター	①
荻野 幸伸	MLSTチーム	②③④
飯塚 富久	MLSTチーム	①②③④
佐々木 太一	開発部 開発グループ	④

【再委託先】 東京メータ株式会社

① 研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
小林 敏也	技術部	②③

【協力者】

氏名	所属・役職	備考
三浦 秀士	九州大学 大学院工学研究院知能機械システム部門 教授	アドバイザー
山野 真	高松機械工業株式会社 技術部 開発課 課長	アドバイザー

1-3 成果概要

① 複合化材料の特性把握

異なる特性を持つ5種類の鉄粉において、左右分割された引張・衝撃試験片を作成し、様々な評価試験を行った。引張試験結果より2種類の鉄粉の境界は金属組織的に結合しており、中強度側から破壊が起こっていた。これにより実際の部品に適用した際には鉄粉の境界から破損することは無いと判断できた。しかし、衝撃試験の結果より衝撃値は試験片中央（境界部）に衝撃を与えた時が最も低くなり、2種類の境界が衝撃に対して弱いことが明らかとなった。

様々な試験結果より2種類の鉄粉を選定し今後の研究の基本材料とした。

② 3D複合化成形用鉄粉の金型への充填方法の開発

3D充填試験装置及び③にて開発を行った鉄粉供給システムを用いて様々なパターンの充填・成形を行い、最適な3D複合化成形方法の開発を行った。2重リング形状の部品において厚みが増すにつれて2種類の境界に崩れが発生していた。

そこで、1種類の鉄粉を充填した後に、予備圧縮を行い、もう1種類の鉄粉を最後に充填すると明確な境界を得られることが明らかとなった。これにより1部品の中で任意の場所に的確に材料を充填・成形することが可能となった。

③ CNC成型プレスと連携した鉄粉供給システムの開発

弊社MLSTチーム所有のCNC成型プレスと連携した複数鉄粉供給システムの開発を行った。複数の粉箱を有し、それぞれが独立で可動し粉箱が切り換わることにより複数の異なる鉄粉を金型へ充填可能となった。しかし、粉箱移動時や切り換わる際の粉漏れが多く、量産へ向けては更なる改良も必要である事が明らかとなった。

④ 低慣性軸継手ハブの開発

FEM解析を用い慣性と剛性のバランスを取りながらハブ形状を決定した。また、②で明らかとなった予備圧縮や③で開発を行った鉄粉供給システムを用いて強度が必要な箇所には高強度材料を、焼結後に切削加工が必要な箇所には中強度材料を、三次元的に充填し複雑形状の軸継手ハブの開発を行った。結果、従来の軸継手よりも慣性・コスト共に50%以下の軸継手が開発でき、川下ユーザーにて実機試験を行い、従来の軸継手と遜色ない結果を得られた。しかし、組立時や安全面からも形状の変更が必要であり、量産に向けて更なる改良が必要である事が明らかとなった。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

総括研究代表者

所属：三木プーリ株式会社 MLSTチーム

氏名：大貫 勝弘

TEL：046－257－5844

FAX：046－257－5846

E-mail：onuki@mikipulley.co.jp

第2章 本論

研究開発目標

本開発では、素形材産業の焼結部品におけるシンターハードニング技術の問題点である部品全てに焼入れが入ってしまうことを解決するために、特性の違う二種類以上の材料鉄粉を任意の位置に充填し成形する3D複合化成型技術を開発することである。

当社「MLST技術」の主設備となるCNC油圧成型プレスと連動させた紛体供給装置を開発することで、任意の位置に必要とされる特性を持った材料を充填・成形することが可能になり、たとえば二次切削加工が必要な部分には中強度用鉄粉を、強度を持たせるべき部分には高強度用鉄粉を3D（三次元）に配置することでシンターハードニング技術の可能性が大きく広がる。

まず、特性の違う二種類以上の材料鉄粉をシンターハードニング処理した場合の境界部の状態を把握し、金属組織および機械強度特性により最適な材料と最適な組合せを求める必要がある。

次に、鉄粉の金型への充填方法の開発がある。積層（二次元）ではなく立体（三次元）に充填する方法を開発するため実験装置を製作し、鉄粉の流れや充填密度を把握し最適な方法を見つける。

実験装置で開発した方法を基に、CNC成型プレス用と連動した量産用鉄粉供給システムを開発する。鉄粉供給システムには、鉄粉メーカーより供給されるフレキシブルコンテナから供給し、金型に充填・成形・取出しまで全ての機器と、プレスと供給システムの連携ソフトを開発し、自動連続生産が可能となる生産システムを構築する。

開発した3D複合化成型技術により、50%の慣性、50%のコストの軸継手ハブを開発・設計・製品化し達成する。

2-1 複合化材料の特性把握

シンターハードニング処理により高強度を得られる高強度材料と、二次切削加工が可能な中強度材料の中から、軸継手ハブに要求される強度および切削加工性により数種類の鉄粉の中から3種類の組合せを選定する。選定した高強度・中強度材料を一体で成形し金属組織・強度を把握し最適な成形・焼結条件を見つける。

これらの鉄粉材料を左右分割された金型を用いて充填・成形を行った。

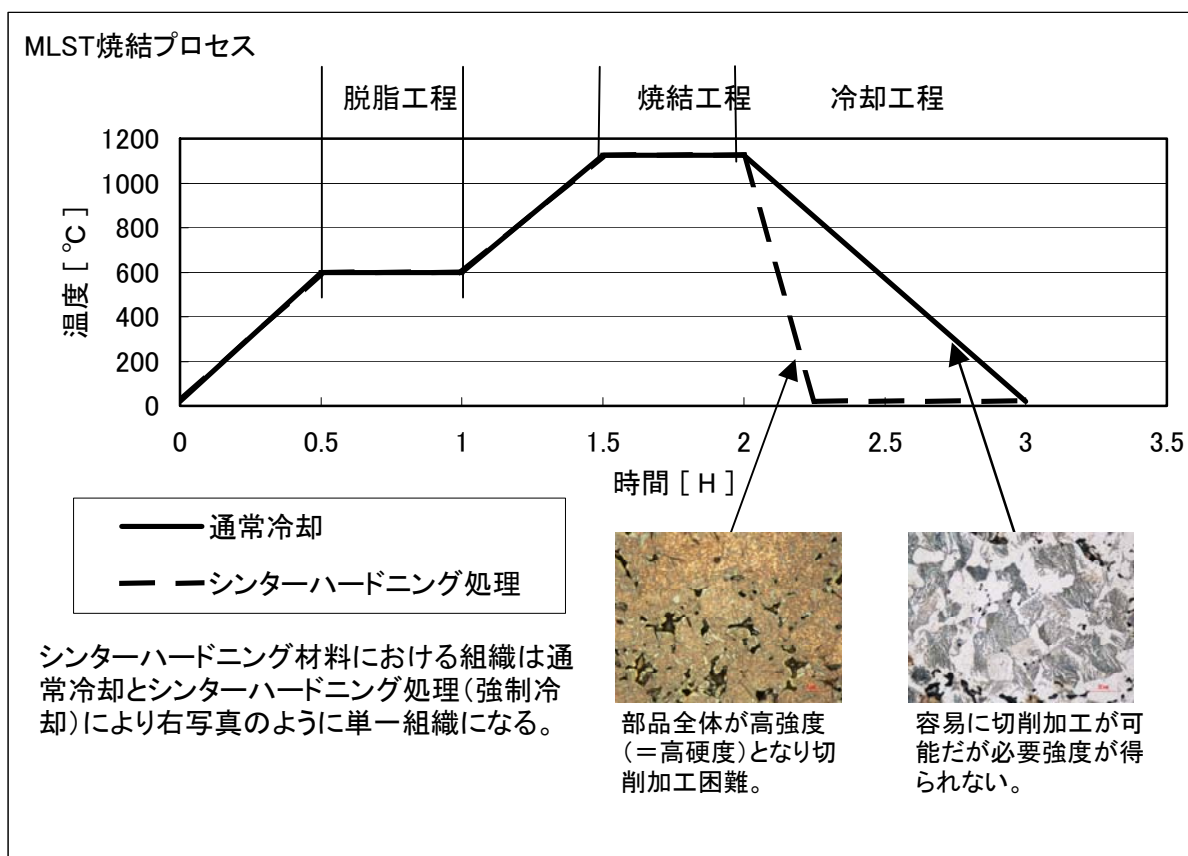


左右分割された引張試験片用金型

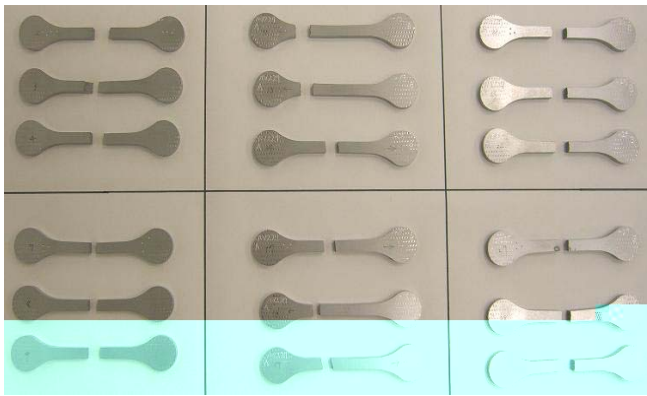


左右で異なる鉄粉を有する試験片（圧粉体）

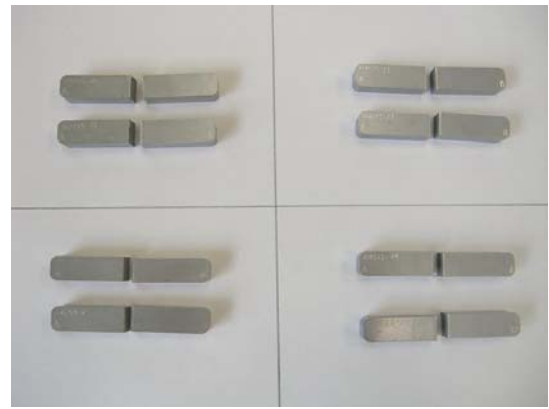
得られた圧粉体に通常冷却とシンターハードニング処理を行った。



MLST焼結プロセスにおいて得られた焼結体の強度試験を行った。



引張試験後の試験片

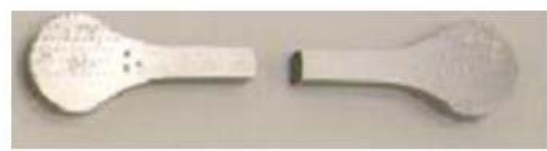


衝撃試験後の試験片

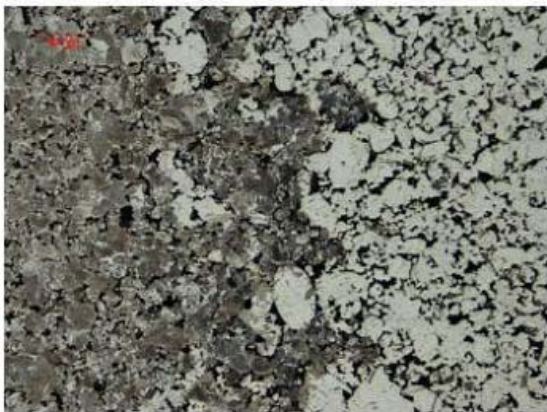
ほぼ全ての試験片が中央（２種類の境界）で破壊しているように見えるが、金属組織写真より常に中強度側から破壊が起こっていた。これにより２種類の鉄粉の境界は金属組織的に結合しており、実際の部品に適用した際には境界から破損することは無いと判断できた。



左右で異なる鉄粉を有する引張試験片

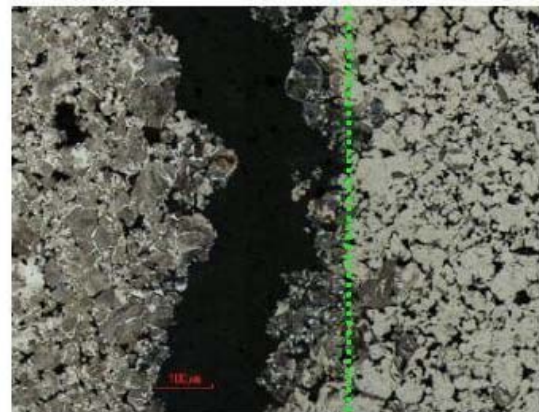


引張試験後



中強度

高強度



中強度

境界

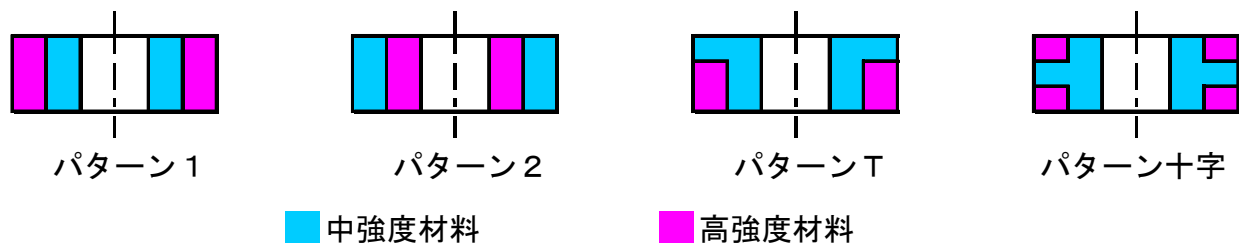
高強度

これらの様々な試験結果より２種類の鉄粉を選定し今後の研究の基本材料とした。

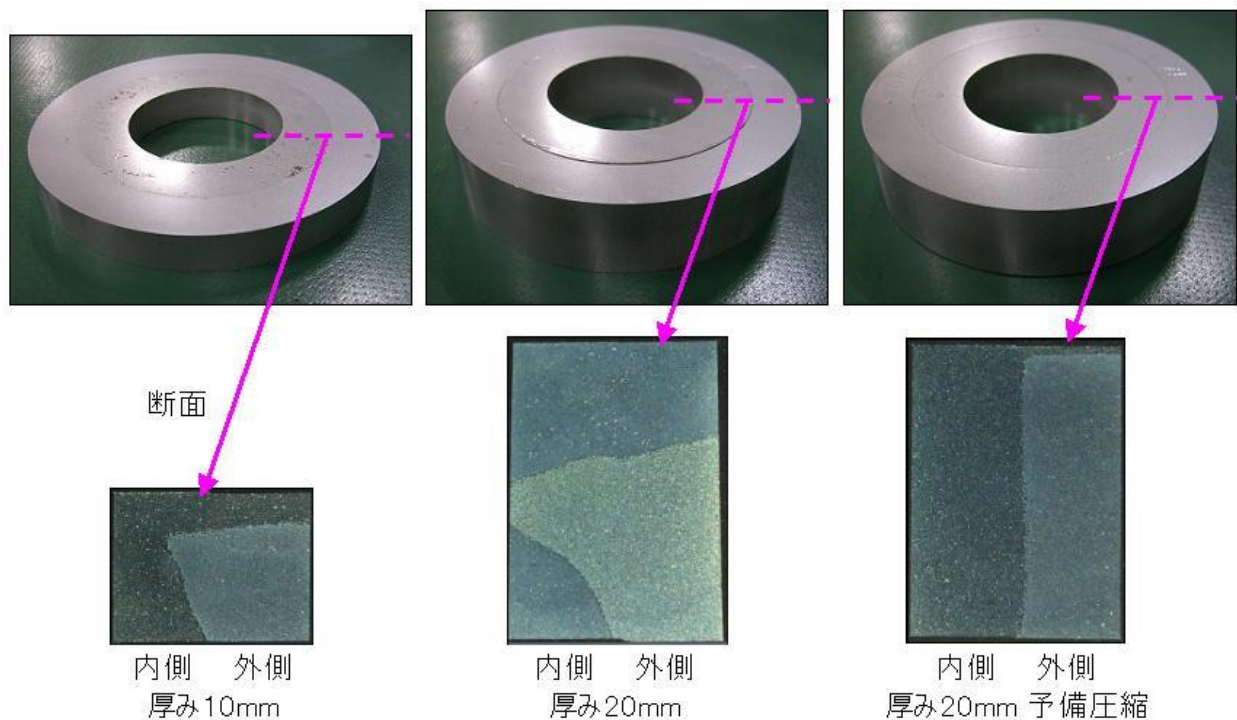
2-2 3D複合化成形用鉄粉の金型への充填方法の開発

充填・成形方法の違いにより2種類の鉄粉がどのように混ざり合い境界を作るのかを検証し、3D複合化成形に必要な条件を把握する。

2個の粉箱が切り替え2種類の鉄粉を充填する機構を持った3D充填試験装置およびこの機構を進化させた鉄粉供給システム（2-3にて開発）を用いて様々なパターンの充填・成形を行い、最適な3D複合化成形方法の開発を行った。



パターン1と2において、先に1種類の鉄粉を充填した後に、もう1種類の鉄粉を充填すると製品の厚みが増すにつれて2種類の鉄粉の境界が崩れていた。そこで最初に1種類の鉄粉を充填した後、予備圧縮を行い、もう1種類の鉄粉を最後に充填すると明確な境界を得られることが明らかとなった。これにより1部品の中で任意の場所に的確に材料を充填・成形することが可能となった。



2-3 CNC成型プレスと連携した鉄粉供給システムの開発

2-2にて粉箱切換機構を有する簡易的な3D充填試験装置を製作し、この機構を基にCNC成型プレスと連携した鉄粉供給システムの開発を行う。

2個の粉箱は油圧シリンダにて可動する。鉄粉を1種類ずつ金型へ充填し自働で粉箱の切換を行う。また、制御ソフトの開発も同時に行い、切換るタイミングは成形プログラムによってCNC成型プレスと同期し様々な充填パターンに対応可能となった。更に、充填部分だけでなく、ホッパーから各粉箱への鉄粉供給部分も開発し量産に向けた鉄粉供給・充填が可能となった。

しかし、粉箱が切換る際に僅かな粉漏れが発生している。金型と接触する粉箱底面の形状や材質などを変更し、更なる改良が必要である。

2-4 低慣性軸継手ハブの開発

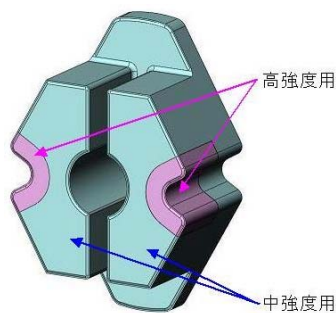
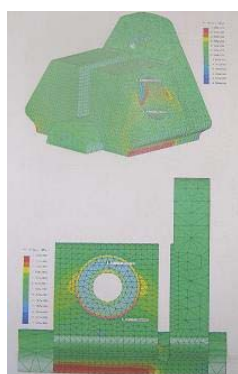
従来の弊社金属板ばね式軸継手06サイズと同サイズで、慣性・コスト共に50%以下の軸継手を実現するために、3D複合化成形技術を用いて、低慣性軸継手ハブの開発を行う。



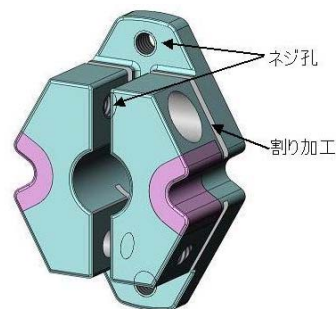
従来の金属板ばね式軸継手06サイズ

FEM解析を用い慣性と剛性のバランスを取りながらハブ形状を決定した。

また、3D複合化成形技術を用い焼結プレスでは成形不可能なネジ孔や、軸をクランプするための割り加工が必要な部分には中強度材料用鉄粉を、強度が必要な部分には高強度材料用鉄粉を三次元に充填・成形した。



3D充填イメージ



切削加工後

2-2にて予備圧縮の有効性が明らかとなっているので、本研究においても高強度材料を充填した後、予備圧縮を行った。

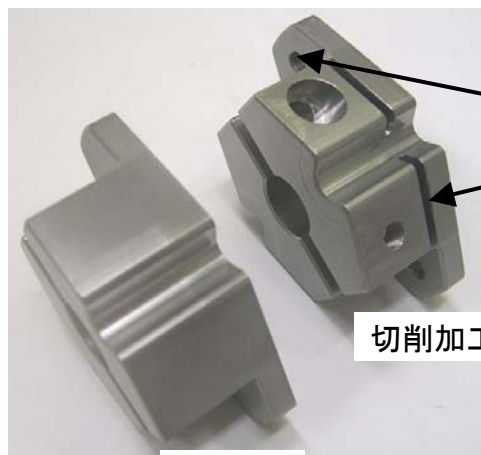


低慣性軸継手ハブ 金型



予備圧縮された高強度材料鉄粉

3D複合化成形技術によって得られた圧粉体をシンターハードニング (SH) 処理し、切削にてネジ孔や割り加工を行った。



切削加工後

中強度材料部分に
ネジ孔や
割り加工
を行った。

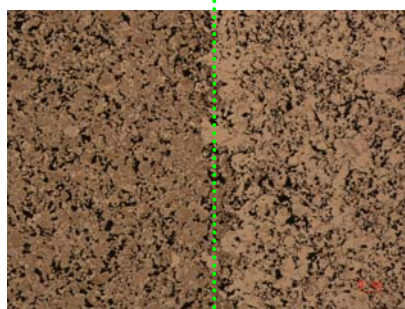
中強度材料：250Hv
高強度材料：700Hv

焼結体

また金属組織より2種類の鉄粉の境界を観察した。
境界にはクラックなどは見られず結合していた。

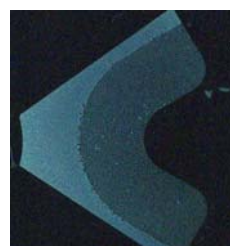
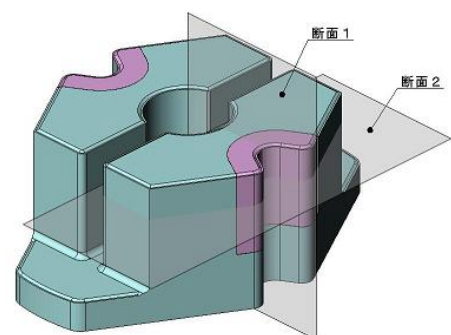


断面 1



中強度材料

高強度材料



断面 2



高強度材料

中強度材料

3D複合化成形技術により得られたハブと金属板ばねを組合せ、低慣性金属板ばね式軸継手を完成させ、従来の弊社同サイズの軸継手と比較し、慣性モーメント・コスト共に50%以下を実現できた。

	従来の軸継手	低慣性軸継手
製作方法	全切削	3D複合化成形＋SH処理 一部切削
全体図		
慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.34×10^{-3}	0.17×10^{-3}
コスト比	1.0	0.5

軸をクランプした際の伝達トルクや繰返し脱着時の変形の有無など、弊社社内規定を全て満たす軸継手が開発でき、協力会社（アドバイザー）において従来品との性能比較評価を行った。

様々な試験の結果、位置決めや繰返し精度など従来品と遜色ないことから、軸継手に要求される性能は満たしている事が確認できた。また、組立時はボールねじとの締結ボルト本数が2本となり作業効率の向上も確認できた。

最終章 全体総括

平成22年度から平成24年度にかけて、シンターハードニング処理後の二次切削加工を容易にするための3D複合化成形技術の開発を行ってきた。

当社「MLST技術」の主設備となるCNC油圧成型プレスと連動させた紛体供給装置を開発することで、任意の位置に必要とされる特性を持った材料を充填・成形することが可能になり、たとえば二次切削加工が必要な部分には中強度用鉄粉を、強度を持たせるべき部分には高強度用鉄粉を三次元に配置することでシンターハードニング技術の可能性が大きく広がる。

そこで平成22年度に、複合化材料の特性把握として、シンターハードニング処理により高強度を得られる高強度材料と、二次切削加工が可能な中強度材料の中から、軸継手ハブに要求される強度および切削加工性により数種類の鉄粉の中から3種類の組合せを選定した。選定した高強度・中強度材料を一体で成形し金属組織・強度を把握し最適な成形・焼結条件を開発できた。

また、複数の粉を充填できる小型の試験用充填装置を開発し、予備実験を行った。

平成23年度にはCNC油圧成型プレスと連動させた鉄粉供給システムを開発し、リング形状の部品において充填・成形実験を行い3D複合化成形技術の開発および量産に向けての準備を行った。リング形状の部品において予備圧縮を行うことで、1部品の中で任意の場所に的確に材料を充填・成形することが可能となった。

最終年度となる平成24年度は開発された3D複合化成形技術を用いて、切削加工が必要な部分には中強度用鉄粉を、強度が必要な部分には高強度用鉄粉を三次元に充填し複雑形状の低慣性軸継手ハブおよび軸継手の開発を行った。

弊社同サイズの軸継手に比べ慣性モーメント・コスト共に50%以下を実現でき、工作機械メーカーにおける実機試験の結果からも軸継手としての性能は従来品と遜色無いことから、低慣性で且つ十分な剛性を有する軸継手が開発できた。

本研究において開発を行った、3D複合化成形技術により1部品内で2種類の異なる材料特性を有する機械部品の製作が可能となった。また、予備圧縮を行うことにより任意の箇所に異なる材料を的確に充填・成形することが可能となった。

しかし、本研究では金型が複雑な動きをしながら複数鉄粉を交互に充填する為、金型同士の干渉に十分注意する必要がある。また、鉄粉供給システムにおいて鉄粉材料の漏れ対策などの改良や生産性向上が量産に向けての課題となる。

本研究において開発した低慣性軸継手の事業化展開としては、弊社が軸継手トップメーカーとして市場要求も把握しているので順調に進むと考えている。しかし、市場の環境変化が大きく、軸継手を使用する業界の海外移転による現地調達も増えており

予断を許さない。

また、3D複合化成形技術は高強度を必要としている焼結部品には応用可能な技術なので他部品への展開も十分考えられる。更に、強度部品に限らず特性の違う材料の一体化をする技術を求めている部品（含油軸受・磁性部品）も多く展開は色々ある。