

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「金属光造形複合加工法の高度化による
電機機器部品への適応製造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 近畿経済産業局
委託先 財団法人ふくい産業支援センター

第1章 研究開発の概要

I 研究開発概要

1 研究開発の背景・研究目的

簡単に真似の出来る電機機器及びそれを構成する部品は、中国をはじめとする新興国の台頭により、競争力を持たず淘汰されているのが現状である。そこで、電機機器およびそれを構成する部品それぞれにおいて、競争力、独創性をもたすために、製品開発から商品化までの納期短縮要求とコストダウン、同時に、小型化、軽量化、高機能化、多機能化等の実現も含め川下製造業者にて競われている。しかしながら、こうした電機機器部品の製造工程は成熟しており、高機能化、小型化、軽量化は形状の工夫、新材料の採用といった方向での取り組みだけでは、大きな成果が出ない現状となっている。

そこで、電機機器の納期短縮、機能の確保・高度化、小型化のニーズに対し金属光造形複合加工法を用いた製造方法を提案する。従来方法に対して、素材不要（金属粉末必要）、部品点数・重量・体積の削減可能、後加工時間の短縮可能、組立時間の削減可能などの多くのメリットが挙げられる。しかしながら、現在の技術では金属光造形複合加工法による総時間が長いという問題と金属材料粉末の価格が高いという問題とがありコスト面でのデメリットとなっている。よって、機能確保・高度化、小型化といった金属光造形複合加工法のメリットを生かすための技術の確立とコストメリットを出すための時間短縮に取り組む。

2 高度化目標

1で示した目的及び目標から高度化すべき目標は以下の通りである。

(1) 金属光造形複合加工法における加工時間短縮に対する高度化技術開発

金属光造形複合加工法における加工時間短縮に対し造形、切削技術開発及び装置開発を行う。造形、切削技術開発においては、各評価の特性データ取得を行い、装置開発においては高速・高剛性主軸の開発を行う。

(2) CAMシステムにおける加工時間短縮に対する高度化技術開発

CAMシステムにおいて、加工条件の設定、造形・切削加工パスの改善、加工中の造形・切削パス作成時間の改善を行い、3次元データの入力から部品のアウトプットまでの時間を1/3に短縮する。

(3) 評価

物性、機能特性による評価を行い、現状部品と同等以上であること。

3 研究概要・実施内容

金属光造形複合加工法において、3次元データを受けてから、製品とするまでに要する時間は、CAMの設定に要する時間、機械での段取り時間、加工時間（造形・切削）、後段取り時間があげられる。

CAMに要する時間短縮としては、造形・切削パス作成処理の時間短縮を行う。現状のCAMの造形・切削パス処理時間を計測し問題点、課題を抽出、明確化する。問題点に対し、開発を行うCAMの仕様を決定後に、製作・開発を行う。開発されたCAMを用いて実機による造形・切削評価を行い、時間短縮効果を確認する。

加工時間に要する時間短縮としては、造形時間短縮と加工時間短縮を行う。造形時間においてはレーザーパワーアップ、加工条件の見直しを行い、時間短縮を実現する。切削時間においては、工具材料、形状、コーティング選定などを行い、時間短縮を実現する。また、切削時間においては、高速・高剛性主軸の開発により機械剛性をアップさせ切込量アップ及び切削パスの簡素化を行い、時間短縮を実現する。

(1) 実施内容

1) 金属光造形複合加工方法における加工時間に対する高度化技術の開発

①レーザー発振器に係る技術評価・開発

【株式会社松浦機械製作所】

装置に搭載した高出力レーザー発振器を利用して造形時間短縮を図る。平成21年度は、高出力レーザー発振器での、各種材料の焼結条件の最適化を行う。目標としては、各種材料における焼結条件と加工特性の関係を明確にし、低出力レーザー発振器での加工時間と比較を行い時間の短縮目標値を決める。この目標値は、研究目的にあげた“現状の総合時間の1/3”に寄与するものとする。

②切削加工に係る技術評価・開発

【学校法人金沢工業大学，株式会社エムエーツール，株式会社松浦機械製作所】

切削工具の材料・形状開発を行い、切削時間短縮を図る。平成21年度は、切削における課題抽出を行い工具の製作を行う。目標としては、切削条件と加工特性の関係を明確にし、現状での造形物に加工に対する問題点の明確化と開発工具の仕様を明確にする。また、この関係と数値をベースに次年度の時間短縮目標値を決める。

③加工装置の高度化に係る評価・開発

【株式会社松浦機械製作所】

加工装置の高度化（主軸剛性向上）を図り、切削時間短縮を図る。平成21年度は、高度化した新主軸の設計、試運転、装置へ搭載と、新主軸評価と切削評価を行う。目標としては、主軸の機械的特性評価及び主軸剛性と切込量の関係を明確にする。また、この関係と数値をベースに次年度の時間短縮目標値を決める。

2) CAMシステムにおける加工時間短縮に対する高度化技術の開発

①CAMシステム仕様調査・構想

【株式会社松浦機械製作所】

現状のCAMシステムにおいて、造形・切削時間短縮に向けた仕様を検討する。造形・切削パスの作成処理時間を計測し高速化に向け改善必要な問題点、課題を抽出、明確化する。抽出された問題点から高度化を行うCAMシステムの仕様を決定する。

②CAMシステム製作・開発

【株式会社松浦機械製作所】

①で決定した仕様を元に高度化するCAMシステムの製作・開発を行う。目標として、全体としては処理高速化によるシステム処理時間の短縮と安定化、造形・切削パス出力機能に対してはパスの効率化を行うことによる造形・切削時間自体の短縮を目標とする。目標としては、現状CAMにおける加工時間の50%減を目標とする。

③CAMシステム仕様検証評価

【株式会社松浦機械製作所】

製作されたCAMシステムを用いて改善前に対する切削パス作成処理時間および切削加工時間短縮効果の検証・評価を行う。評価方法としては、入力された3次元データを用い、加工条件の設定、造形・切削加工開始から加工終了までの全工程に対する時間を計測、検証・評価する。目標としては、現状の50%減を目標とする。

3) 評価（物性データ、機能評価等）

①試作品の物性値評価

【学校法人金沢工業大学、福井県工業技術センター、株式会社松浦機械製作所】

①で求めた焼結、加工条件で製作したテストピースの機械的特性を評価する（引張強度、曲げ強度、硬度測定、組織観察、面粗度など）。また、市販金属及び焼結条件の違いによるテストピースとの特性比較を行う。

4) プロジェクトの運営・管理

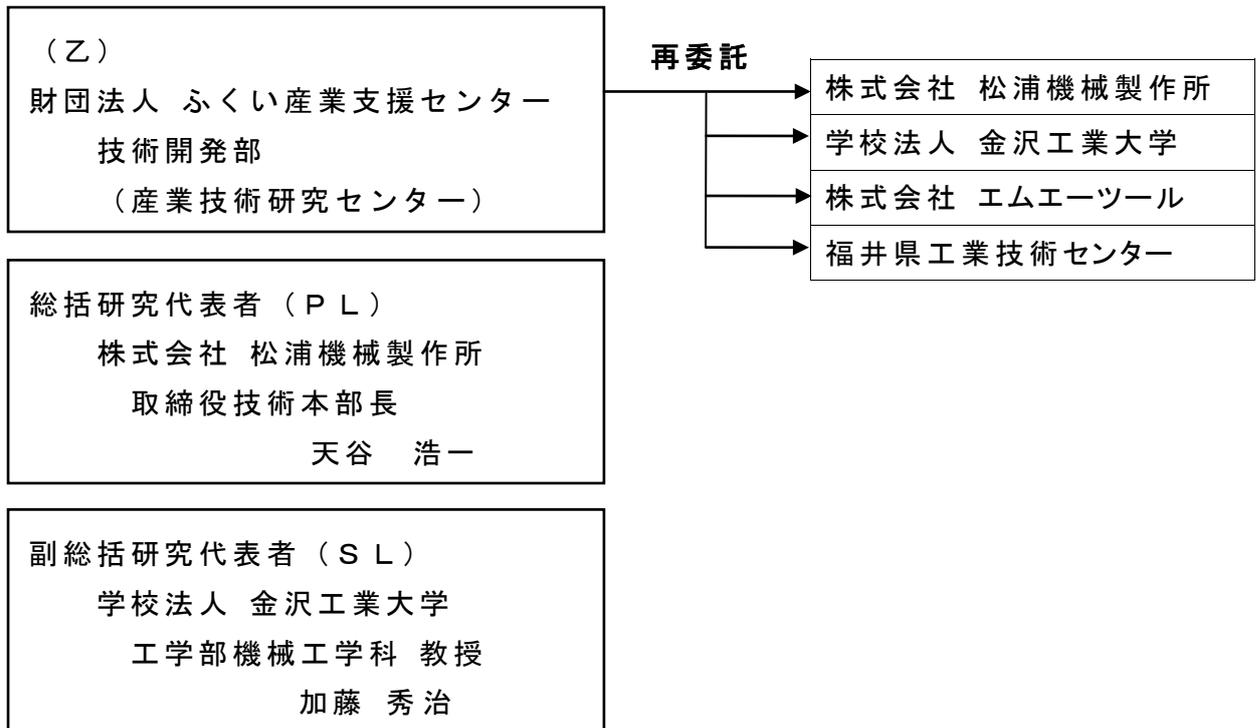
【財団法人ふくい産業支援センター】

本プロジェクトを円滑に進めるため、構成員相互の連絡調整、個別研究テーマの進捗状況の把握及び財産管理等のプロジェクトの管理及び運営を行う。

II 研究体制

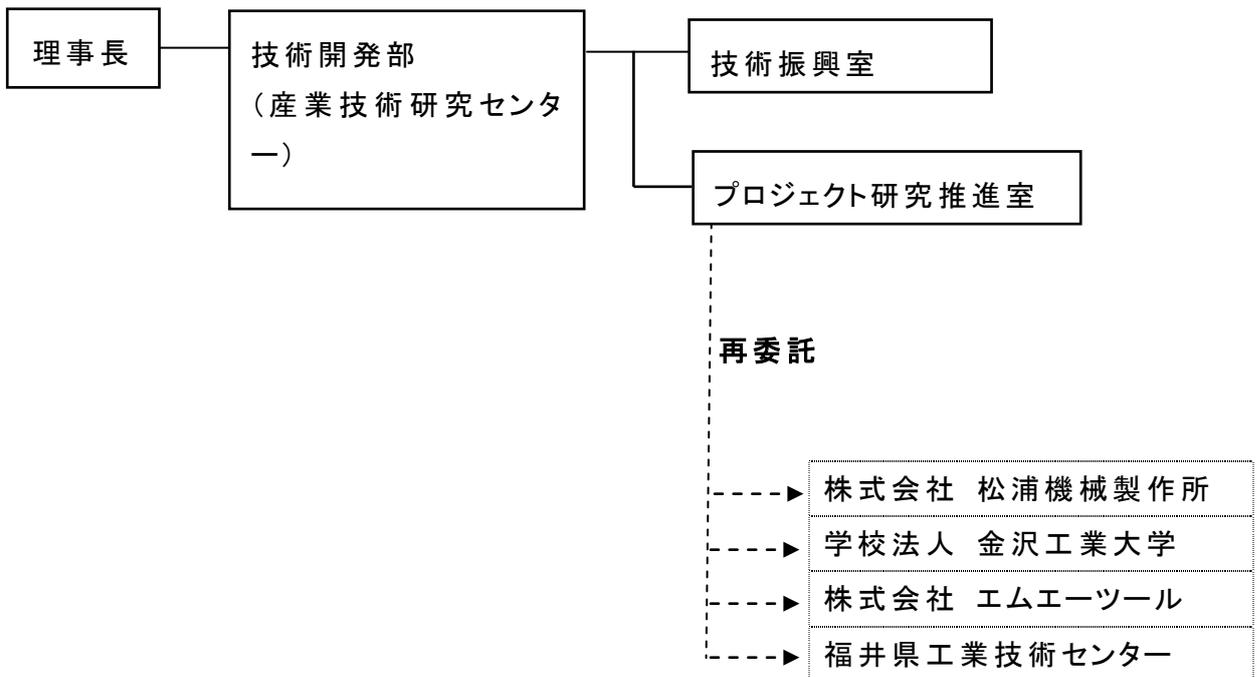
1 研究組織及び管理体制

(1) 研究組織 (全体)



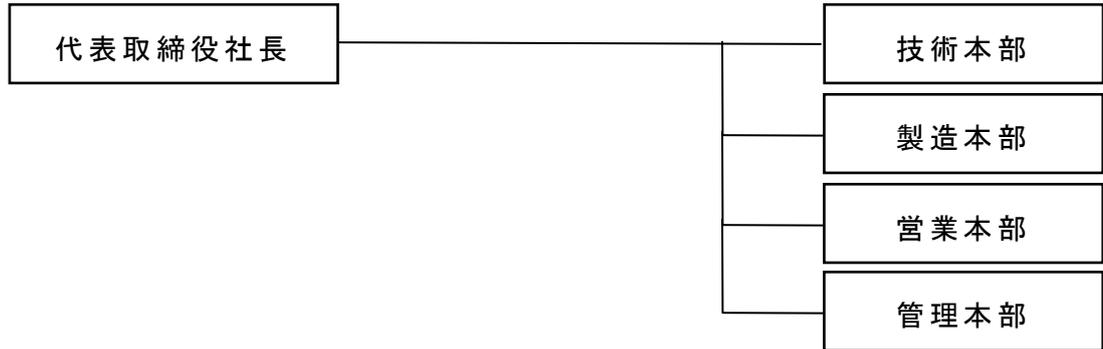
(2) 管理体制

1) 事業管理者 [財団法人ふくい産業支援センター]

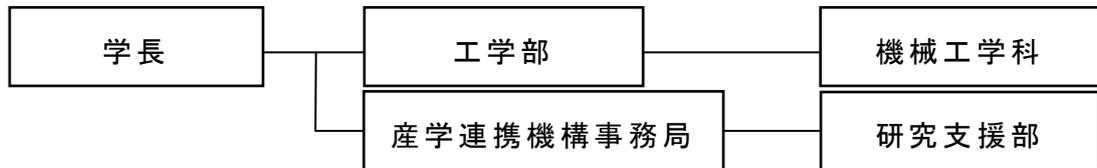


2) 再委託先

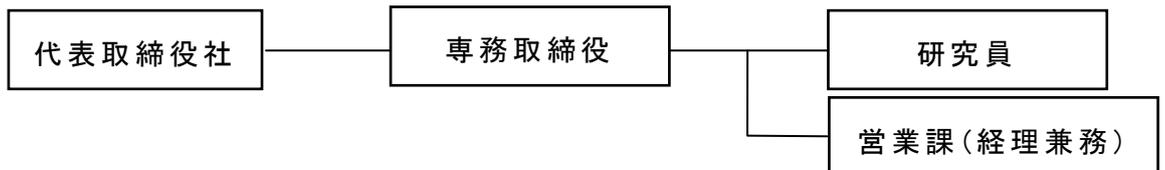
株式会社 松浦機械製作



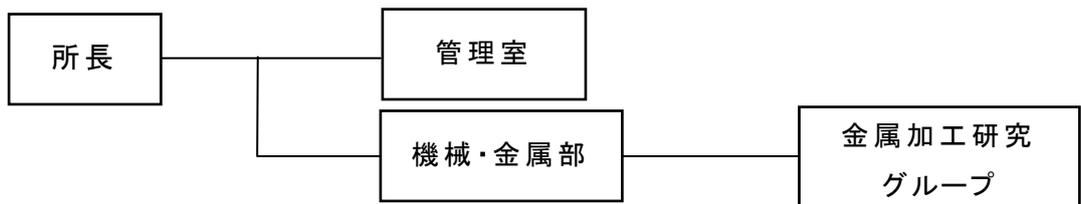
学校法人 金沢工業大学



株式会社 エムエーツール



福井県工業技術センター



3) 管理員及び研究員（役職、実施内容別担当）

【事業管理者】 財団法人ふくい産業支援センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
岩佐 進一	プロジェクト研究推進室 室長	事業管理者 ④
上山 明彦	技術開発部 総括研究員	④
吉江 和美	技術開発部 主事	④

【再委託先】

株式会社 松浦機械製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
天谷 浩一	取締役技術本部長	総括研究代表者 ①～③
漆崎 幸憲	技術本部 マネージャー	①～③
冨田 誠一	技術本部 シニアチーフ	①－3
前田 敏男	技術本部 シニアチーフ	②
松原 英人	技術本部 シニアチーフ	①、③
木村 文武	技術本部 チーフ	①－3
石本 孝介	技術本部 部員	②
土田 智之	技術本部 部員	①、③
市村 誠	技術本部 部員	①、③
吉田 周平	技術本部 部員	①、③
西岡 祐衣	技術本部 部員	②
白崎 了	営業本部 主任	①－2
清水 紀久雄	営業本部 部員	①－2, 3、②－2
田中 智一	製造本部 主任	①－3
山本 裕人	製造本部 部員	①－3
吉田 博信	製造本部 部員	①－3
寺越 典夫	製造本部 部員	①－3

学校法人 金沢工業大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
加藤 秀治	工学部 機械工学科 教授	副総括研究代表者③－1

株式会社 エムエーツール

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
松本 博一	代表取締役専務	① - 2
松本 勝也	取締役	① - 2
渡辺 克彦	製造課長	① - 2

福井県工業技術センター

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
富田 孝一	機械・金属部 金属加工研究 グループ 主任研究員	③ - 1

4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】

財団法人 ふくい産業支援センター

(経理担当者)	技術開発部	主 事	吉江	和美
(業務管理者)	プロジェクト研究推進室	室 長	岩佐	進一

【再委託先】

株式会社 松浦機械製作所

(経理担当者)	管理本部	マネージャー	矢尾	信義
(業務管理者)	技術本部	本 部 長	天谷	浩一

学校法人 金沢工業大学

(経理担当者)	産学連携機構事務局	次 長	西村	五宏
(業務管理者)	工学部機械工学科	教 授	加藤	秀治

株式会社 エムエーツール

(経理担当者)		経 理	朝日	由美
(業務管理者)		専 務 取 締 役	松本	博一

福井県工業技術センター

(経理担当者)	管理室	企画主査	荒川	祥一
(業務管理者)		所 長	笠嶋	文夫

5) その他（他からの指導・協力者名及び指導・協力事項）

① 研究事業推進委員会

氏名	所属・役職	備考
天谷 浩一	株式会社 松浦機械製作所 取締役技術本部長	総括研究代表者（P L）
加藤 秀治	学校法人 金沢工業大学 工学部 機械工学科 教授	副総括研究代表者（S L）
漆崎 幸憲	株式会社 松浦機械製作所 技術本部 マネージャー	☒
松原 英人	株式会社 松浦機械製作所 技術本部 シニアチーフ	☒
前田 敏男	株式会社 松浦機械製作所 技術本部 シニアチーフ	☒
松本 博一	株式会社 エムエーツール 専務	☒
富田 孝一	福井県工業技術センター 機械・金属部 金属加工研究グループ 主任研究員	☒
吉田 徳雄	パナソニック電工株式会社 生産技術研究所 グループ長	アドバイザー
若林 俊嘉	住友電気工業株式会社 ハードメタル事業部 主席	アドバイザー
奥田 博之	株式会社奥田精工 代表取締役社長	アドバイザー
山本 利也	株式会社サンエー精機 代表取締役社長	アドバイザー

② 指導・協力事項

氏名	指導・協力事項
吉田 徳雄	電機機器部品の生産技術に精通しており、市場ニーズについてアドバイスを頂く。
若林 俊嘉	工具に精通しており、市場ニーズ、技術開発についてアドバイスを頂く。
奥田 博之	電機機器部品の生産、加工に精通しており、市場ニーズについてアドバイスを頂く。
山本 利也	電機機器部品の生産、加工に精通しており、市場ニーズについてアドバイスを頂く。

Ⅲ 成果概要

本事業の成果概要を以下に示す。

1 金属光造形複合加工方法における加工時間に対する高度化技術の開発について

①レーザー発振器に係る技術評価・開発

造形時間の短縮と粉末材料の低コスト化を目的として、従来から使用している鉄系粉末材料：03C材と、安価な鉄系粉末材料：Fe-C材の高出力レーザーを使用による焼結評価を行った。

得られた03C材の最適焼結条件における単位体積の造形時間を従来の焼結条件の造形時間と比較し、48%の短縮が可能であることが分かった。この結果と照射エネルギー密度の関係から造形時間短縮目標を60%と設定し、さらに効率を上げ、良好な造形のできる焼結条件を求め、造形物の安定性、機械的特性の評価を今後の課題とした。

Fe-C材の焼結評価については現在も継続中である。

②切削加工に係る技術評価・開発

切削時間の短縮を目的として、従来使用してきた超硬工具より高速加工が可能なcBN焼結工具での加工特性評価を行った。しかしながらcBN焼結工具は超硬工具に対し、3~5倍の価格となり、コストアップとなる。よって、超硬工具においても今回の研究でコーティングの選定及び工具形状の設計を行い切削加工の高速化に向けた開発を行った。

cBN焼結工具での加工特性においても、新規設計した超硬工具においても従来切削加工条件に対し、約3倍の送り速度での切削加工が可能であることがわかった。

③加工装置の高度化に係る評価・開発

切削時間短縮を目的として、高速・高剛性主軸の開発を行い金属光造形複合加工装置への搭載を行った。

開発した主軸を用いて切削特性評価を行い従来主軸に対してZ方向切込量、送り速度を2倍まで大きく設定出来ることを確認した。

本年度は従来の金属粉末造形物での評価のみであったが、単純計算で切削加工時間が従来の1/4となる。今後、開発した主軸での切削条件最適化、切削距離による工具磨耗特性評価、その他金属粉末材料造形物に対する評価を行い金属光造形複合加工法における全工程での時間短縮1/3(67%減)を実現する。

2 CAMシステムにおける加工時間短縮に対する高度化技術の開発について

①CAMシステム仕様調査・構想

現状のCAMの問題点の抽出、明確化を行った。今年度は加工中のCAMによる処理時間の短縮を目的とし、評価用モデルの決定後、各処理部、機能、加工工程別にパス処理時間を計測、分析し現状の問題点、課題を得た。得られた問題点から、今年度開発を行うCAMの仕様を決定した。

②CAM システム製作・開発

時間短縮を目的としたCAMシステムの詳細仕様の決定、効果の確認の後、システムの製作・開発を行った。時間短縮効果に関しては、工程別で時間短縮効果を確認したところ、目標50%に対し最大で91%減、最小で20%減の効果を確認した。

③CAM システム仕様検証評価

製作されたシステムを用い、改善前に対する加工時間短縮効果の検証・評価を行った。作成時間短縮効果は評価モデルにより改善前と比較し最大56%減から20%減の実績が確認された。次に、段取りから加工終了までの全工程に対する時間短縮効果の検証を行った。具体的には機械部品のパス作成処理の実機での動作確認を行い、改善前の作成時間に対し56%減と短縮され、かつ加工中の造形、切削パス作成処理が機械内の加工時間内に十分収まることを確認した。また、段取り時間の短縮とパス効率化を含めた総加工時間の時間短縮効果が改善前の18%減となることを確認した。

今後、主軸高剛性化に伴う切削工具の切込み量、送り速度の増加、レーザ出力の増加によりスポット径、パワー、走査速度の増加により造形・切削パスの削減、高速化による加工時間の短縮により、全体目標である1/3(67%減)を実現する。

3 評価（物性データ、機能評価等）について

①試作品の物性値評価

試作品の物性値評価においては、1) -①で求めた造形条件でのサンプルに対し特性評価をする事を目的とし、1) -①において、Fe-C材の造形条件最適化は未完了の為、Fe-C材について、6種類のエネルギー密度違いのワークについて組織評価と硬さ評価を実施した。

Fe-C材の組織評価では、内部に酸化鉄の組織が見られること、エネルギー密度の高い条件では造形時の水平方向に縞模様が見られ、上下、左右方向で特性の異なる直交異方性材料となっていることがわかった。今後も焼結条件最適化を進め、物性評価を実施する予定である。

ショットブラスト加工特性評価では、後工程での切削レス実現の可能性を探る為に、03C材造形物の造形面に対しショットブラスト加工を行い特性評価を実施した。結果、ショットブラスト加工で造形面の面粗が上げられえることがわかった。また、距離、圧力によって特性が変化することから、もっとも効率的なショットブラスト加工条件を導くことで後処理工程での時間短縮の可能性があることがわかった。

IV 当該プロジェクト連絡窓口

1 事業管理者

財団法人 ふくい産業支援センター 技術開発部

(最寄り駅：JR 北陸本線 春江駅)

〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町 61 字北稲田 10

2 研究実施場所

株式会社 松浦機械製作所

(最寄り駅：JR 北陸本線 春江駅)

〒910-8530 福井県福井市漆原町 1-1

学校法人 金沢工業大学

(最寄り駅：JR 北陸本線 金沢駅)

〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1 石川ソフトリサーチパーク内

株式会社 エムエーツール

(最寄り駅：JR 北陸本線 福井駅)

〒918-8237 福井県福井市三尾野町 1-1-18

福井県工業技術センター

(最寄り駅：JR 北陸本線 春江駅)

〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町 61 字北稲田 10

第2章 本論-(1) 金属光造形複合加工方法における加工時間に対する高度化技術開発

I レーザ発振器に係る技術評価・開発

1 研究目的および目標

装置に搭載した高出力レーザー発振器を利用して造形時間の短縮を図る。平成21年度は、高出力レーザー発振器での、各種材料の焼結条件の最適化を行う。目標としては、各種材料における焼結条件と加工特性の関係を明確にし、低出力レーザー発振器での造形時間と比較を行い時間の短縮目標値を決める。この目標値は、研究目的にあげた“現状の総合時間の1/3”に寄与するものとする。評価を行う粉末材料としては従来使用している鉄系粉末材料（O3C材）と、材料粉末の低コスト化を目的とした安価な鉄系粉末材料（Fe-C材）を用いる。

目標

- (1) 鉄系粉末材料（O3C材）の焼結評価及び造形時間評価
- (2) 安価な鉄系粉末材料（Fe-C材）の焼結評価
- (3) 造形時間短縮目標値の設定

2 研究内容

(1) 鉄系粉末材料（O3C材）の焼結評価及び造形時間評価

1) 目的

高出力レーザー発振器での焼結条件の最適化を行い、従来の焼結条件に対し、造形時間をどれだけ短縮できるか調査を行う。

2) 実験方法

高出力レーザー発振器を用いて□15×6mmのブロック状ワークを造形し、ワーク上面を研磨して顕微鏡観察を行い、内部の空孔の状態を評価する。良好に造形できる焼結条件における単位体積の造形時間を従来の焼結条件と比較する。

3) 実験結果

内部の空孔の状態を評価した結果、空孔の少ない良好な組織となっているワークの焼結条件から、最も造形時間の短い条件を最適条件として選択した。今回得られた最適条件において、造形時間は従来の焼結条件と比較して48%短縮している。

4) まとめ

高出力レーザー発振器を用いて鉄系粉末材料（O3C材）の焼結条件の最適化を行った。得られた最適条件における単位体積の造形時間を、従来の造形条件の造形時間と比較した結果、48%の短縮が可能であることが分かった。今後、さらに造形時間を短縮するための焼結条件の検討ならびに造形ワークの安定性、機械的特性の評価を行う予定である。

(2) 鉄系粉末材料 (Fe-C材) の焼結評価

1) 目的

粉末材料の低コスト化を目的として、従来使用している鉄系粉末材料よりも安価な材料：Fe-C材について高出力レーザー発振器での焼結条件の最適化を行う。

2) 実験方法

① 1ライン造形実験

高出力レーザー発振器を使用してレーザーを1ライン走査して造形を行い、造形可能なエネルギー密度の範囲を求める。

② 品質工学を用いた焼結条件最適化

①で求めたエネルギー密度をもとにブロック状ワークの造形を行い、焼結条件の評価を行う。評価は造形ワークを切削した際の切削電力と切削重量を基本機能とした品質工学の動特性評価の手法を用いた。

3) 実験結果

① 1ライン造形実験

各焼結条件のワークの状態を造形可能/造形可能だがもろい/盛り上がりによる造形不良/造形不可の4種に区別し、照射パワー密度-1ラインの塗潰し時間のグラフにプロットした。この結果から、単位体積のエネルギー密度の範囲で造形可能であることが分かった。

② 品質工学を用いた焼結条件最適化

現在測定した切削電力波形の解析を実施中であり、焼結条件の最適化には至っていない。また、本評価で作製したワークの機械的特性評価、組織観察を福井県工業技術センターにて実施している。

4) まとめ

粉末材料の低コスト化を目的とした安価な鉄系粉末材料 (Fe-C材) について高出力レーザー発振器での焼結条件の最適化実験を実施した。現在、造形ワークの切削電力と切削重量の関係から、品質工学を用いた最適焼結条件の評価を行っている。

(3) 造形時間短縮目標値の設定

(1)の実験で得られた最適条件において、造形時間は従来の焼結条件と比較して48%短縮できたが、単位体積のエネルギー密度を比較すると従来の焼結条件に対し30%増加している。単位体積のエネルギー密度と造形時間は比例関係であるため、高出力レーザーを用い従来条件と同じエネルギー密度で造形すると、造形時間は60%短縮できる計算となる。このことから、造形時間の目標値を60%短縮とし、従来の条件と同じエネルギー密度にて良好な造形のできる焼結条件を求めることを今後の課題とする。

II 切削加工に係る技術評価・開発

1 研究目的および目標

切削工具の材料・形状開発を行い、切削時間短縮を図る。本年度は、切削加工における課題抽出を行い工具の製作を行う。目標としては、切削条件と加工特性の関係を明確にし、現状での造形物に加工に対する問題点の明確化と開発工具の仕様を明確にする。また、この関係と数値をベースに次年度の時間短縮目標値を決める。

目標

- (1) 造形物の cBN 焼結体工具での特性評価
- (2) 造形物加工用工具の開発
- (3) 切削加工時間短縮目標値の設定

2 研究内容

(1) 造形物の cBN 焼結体工具での加工特性評価

切削における時間短縮を図るため、問題点の抽出と時間短縮を可能とする目標値の設定を試みた。O3C造形物を対象材料とし、材料の詳細観察と切削実験による加工特性の把握を行った。また、高能率化の実現性の検証を実施した。

1) 現状の光造形材料の詳細観察

対象材料は金属光造形法を用いてレーザ照射を行うことにより成形されたものであり、材料の表面および内部組織の状態が切削工具の損傷状態に大きな影響を与えることが予測される。このため、O3C 材造形物造形条件において成形した材料の表面および内部組織について観察を行った。

2) 切削実験による加工特性の把握

II-(2)-1)の結果を踏まえ、ボールエンドミルを用いた切削加工実験を行い、工具材料の違いが加工特性に及ぼす影響について検討した。切削評価は現状の加工条件を用いて行った。使用工具材種は現在使用しているコーティング工具をベースに TiSi 系被膜を施したコーティング工具と cBN 焼結体工具を用いた。cBN 焼結体工具は結合剤と cBN 粒子含有率の異なる 4 種類の工具を用意した。

3) 高能率化の実現性の検証

切削時間の短縮が本研究の大きな目的であることから、高能率加工を実現するため送り速度を増加させた実験を試みた。前述の評価で使用した送り速度を3倍の条件で評価を行った。使用工具は現状の切削条件の評価において有効であったcBN焼結対工具4種類の中から1種類の工具を選定し、比較として現状品のコーティング工具を用いた。

4) まとめ

cBN焼結体工具がO3C材造形物の加工に適した工具材料であり、刃先処理（ネガランド）を若干プラス側に変更することにより、切削加工の高能率化（時間短縮）が十分期待できる。

(2) 造形物加工用工具の開発

金属光造形複合加工方法の切削加工時間の短縮を目標とした切削工具を開発し、切削条件の最適化と加工特性の評価を行う。cBN 焼結工具での切削加工時間短縮の開発は(2)で進めるが価格的に高価となる為、超硬工具にてコーティング選定、刃先形状など開発を行うことで切削加工時間の短縮を図る。

項目として従来使用している市販工具の磨耗状態の評価を行い、専用カッターを開発。また、開発した工具を用いて O3C 材造形物の切削実験を実施、刃先磨耗状態を観察し、最適な切削条件と工具寿命の検討を行う。

1) 市販工具の磨耗状態の評価

①目的

切削加工時間を短縮する切削工具を開発するにあたり、O3C 材造形物を切削した現状の市販超硬エンドミルの磨耗状態を評価し開発工具形状を決定する。

②評価方法

デジタルマイクロスコープにて拡大観察し、磨耗状態を調査する。

2) 工具材質(超硬合金)の評価

①目的

切削工具の材質である超硬合金には様々なスペックの材種が多種にある。一般的には小径の難削材用切削工具は折損防止の理由もあり超微粒子合金を材質として使用していることが多い。ただし粉末の焼結合金にも良い加工特性を発揮しているかのデータはなく、その為にどの材種の超硬合金が焼結合金の切削に良いかを調べる必要があった。本結果から開発工具の材料を選定する。

②試験方法および評価方法

3種類の超硬合金を用い同形状のカッターを製作し、ある切削条件にて焼結合金の切削を行い、工具磨耗量を比較した。

3) PVD コーティングの評価

①目的

難削材を超硬合金製切削工具でドライ加工するにあたり、工具寿命の向上の為に PVD コーティングは必須である。しかし、PVD コーティングは特性の違いなどで各メーカーが多種の膜種を出しており、焼結合金の切削にはどの PVD コーティングが良い加工特性を示すかを調査する。本結果から開発工具のコーティングを決定する。

②試験方法および評価方法

同形状、同材質のカッターに4種類の PVD コーティングを処理し、ある切削条件にて焼結合金を切削加工。磨耗状態の比較評価を行った。

4) 工具形状の設計・開発と評価

①目的

焼結合金の加工時間短縮の為、工具形状を設計・開発した。開発工具での焼結金属の切削加工実験を実施し、工具磨耗量を測定して開発形状の有効性を評価する。

②工具形状の設計・開発

市販エンドミルの外周逃げ角部は通常エキセントリック刃型である。これは切込みの多い重切削を行う際には刃先エッジの剛性が高く有効であるが、切削時に被削材との接触面積が大きく、被削材材質の凝着は発生しやすい。また切削抵抗の軽減の為、約 30 度の右ネジレ角が設けられており、コーンケープ刃型と組み合わせると先端エッジ部が強度不足になる。以上を考慮し、3種類の形状違いの工具を設計・開発した。

③試験方法および評価方法

開発カッターと市販超硬エンドミルを用いて切削評価を行い磨耗状態を観察し評価を行った。

5) まとめ

開発カッターは現状の市販工具での切削条件に対し、周速が 1.5 倍、送りスピードが 3.0 倍での切削が可能であった。こまた今回はスクエア形状の工具で評価したが、実際の製品加工には R 形状の工具は必須でありこのデータを元に R 形状の工具を開発する必要がある。

(3) 切削加工時間短縮目標値の設定

cBN 焼結工具評価及び造形物用加工工具の評価において、従来の加工条件に対して 3 倍の条件での評価において切削可能な結果を得ている。本年度の結果としては可能性を得たに留まっているが、次年度開発を進め本年度の結果を実現することを目標とする。よって、次年度の加工時間短縮は、本年度の開発可能性が見えた従来加工時間比 1/3 の実現を目標とする。

Ⅲ 加工装置の高度化に係る評価・開発

1 研究目的および目標

加工装置の高度化（主軸剛性向上）を行い、切削加工時間短縮を図る。本年度としては、高度化した主軸の開発、製作、装置へ搭載、及び機械特性評価を行う。また、装置に搭載した主軸での切削評価と時間短縮目標値の決定を行う。

目標

- (1) 高速・高剛性主軸および自動工具交換装置の開発
- (2) 高速・高剛性主軸の機械特性評価
- (3) 切込量、送り速度と切削特性評価
- (4) 造形物（Ti-6Al-7Nb）に対する部品加工用特殊工具での切削加工特性
- (5) 切削加工時間短縮目標値の設定

2 研究内容

(1) 高速・高剛性主軸及び自動工具交換装置の開発

1) 実施内容

高速・高剛性主軸及び自動工具交換装置（以下、ATCと示す）の開発を行った。研究対象となる金属光造形複合加工装置への搭載を行い、切削加工時間短縮を実現する。

2) まとめ

開発仕様を満足する主軸及びATCの設計を行った。また、金属光造形複合加工装置への搭載も実現した。開発した主軸及びATCは製作、金属光造形複合加工装置へ搭載しサーボ調整を始め機械での調整作業を行った。今後、主軸及びATCの機械的仕様の評価及び切削特性評価を実施する。

(2) 高速・高剛性主軸の機械特性評価

1) 実施内容

Ⅲ-(1)で開発した高剛性・小型主軸を金属光造形複合加工装置に搭載し機械的特性評価を実施した。

①主軸最高回転数評価

②主軸剛性評価

2) 試験方法及び評価方法

①主軸最高回転数評価

主軸を 5000min^{-1} から徐々に回転数を上げていき、ベアリングの温度上昇を測定する。各回転数での温度上昇を測定し使用可能回転数を求めた。

②主軸剛性評価

ロードセルを用いて主軸に荷重をかけ、各荷重時の変位量をダイヤルゲージで測定し主軸剛性を求めた。荷重方向は装置のX、Y、Zの3方向で行った。

3) 結果と考察

①主軸最高回転数評価

試験結果から、開発した主軸は $40,000\text{min}^{-1}$ まで使用可能である。

②主軸剛性評価

従来主軸剛性に対し最大2.2倍の主軸剛性を実現した。

4) まとめ

開発した主軸を金属光造形複合加工装置に搭載し機械特性評価を行った。開発仕様に合致しており、今後、高度化主軸での切削特性評価を行い切削加工時間短縮の研究を進める。

(3) 切込量、送り速度と切削特性評価

1) 実施内容

Ⅲ-(1)で開発した主軸を用い、従来主軸での切削条件に対し切込量、送り速度を変えた場合の特性評価を行った。今年度は従来の金属粉末の造形物に対する切削特性評価を行った。

2) 試験方法及び評価方法

ワークの側面加工を行いでの特性評価を行った。また、開発した主軸では、従来の切削条件に対し切込量、送り速度を大きくした切削条件での評価も行い、切削特性を求め従来主軸と比較を行った。評価は、Z方向の加工面の傾きを測定した。また表面形状粗さ測定機により面粗度を測定し比較した。

3) 結果と考察

Z方向加工面の傾き及び面粗度の結果から、開発主軸と従来主軸ではZ方向加工面の傾きで大きく改善していることがわかった。これは、主軸剛性差による切削時の逃げ量が大幅に少なくなったことを示しており、開発主軸では主軸剛性アップにより従来主軸に対し切込量、送り速度ともにアップ可能であり大幅な切削時間短縮が可能であることがわかった。面粗度に関しては大幅な改善は見られなかったが今後切削条件の最適化を含めて面粗度の改善についても取り組む。

4) まとめ

Ⅲ-(1)で開発した主軸において従来の金属粉末での切削特性を得た。開発した主軸では従来加工条件に対し切込量2倍、送り速度2倍での切削条件での加工が可能であり大幅な切削時間短縮が可能であることがわかった。

(4) 造形物 (Ti-6Al-7Nb) に対する部品加工用特殊工具での切削加工特性

部品加工用特殊工具を用い、チタン合金造形物での切削特性評価を従来主軸及び開発した主軸で行い、切削特性評価及び主軸の比較を行う。

1) 実施内容

被削材として造形物 (Ti-6Al-7Nb) を用い、部品加工用特殊工具の最適切削加工条件で切削を行い、切削距離に対する工具磨耗量特性および面粗度特性を求めた。

2) 試験方法および評価方法

壁面に 10° のテーパがついたワークの側面切削を行い、切削距離に対する工具磨耗量を測定する。面粗度測定用ワークを指定の切削距離毎に切削し切削距離に対する面粗度を測定する。

3) 結果と考察

工具磨耗量及び面粗度の特性を得た。

4) まとめ

切削条件による切削工具の磨耗量と面粗度を定量化測定し、切削距離に対する工具磨耗量特性および面粗度特性を得た。尚、本年度は、当初開発した主軸でも同様の評価を行い、従来主軸と開発した主軸の比較を行うことを目的としていたが開発した主軸での特性評価が完了しておらず次年度の課題とした。

(5) 切削加工時間短縮目標値

(3) の結果から従来切削条件に対し、開発主軸ではZ方向切込量を2倍、送り速度を2倍に大きくすることが可能であることはわかった。そのことから、従来の切削加工時間に対し、単純計算で1/4の時間と出来る。但し、斜面（特に緩斜面）についてはZ方向切込量を大きく取ると面粗度低下につながる為、切削部位によってZ方向切込量は変化（小さく）させていく必要があるが、今回の結果がそのまま実際の時間短縮につながらない。実際の加工条件における時間短縮についてはモデルでの検証を進める必要があるが、今後切削条件の最適化を含め加工技術開発を進めることで更なる時間短縮が可能であると判断し加工時間短縮は従来加工時間比1/4の実現を目標とする。

第3章 本論-(3)CAMシステムにおける加工時間短縮に対する高度化技術の開発

I CAMシステム仕様調査・構想

1 研究目的および目標

現状のCAMシステムにおいて、造形・切削時間短縮に向けた仕様を検討する。造形・切削パスの作成処理時間を計測し、高速化に向け改善必要な問題点、課題を抽出、明確化する。抽出された問題点から高度化を行うCAMシステムの仕様を決定する。

目標

- (1) 現状CAMシステムの問題点抽出と明確化
- (2) 高度化するCAM仕様の決定

2 実施内容

(1) 現状CAMシステムの問題点抽出と明確化

1) 現状CAMシステム概要説明

現状CAMにおける金属光造形複合加工装置用制御装置は、入力された3次元形状モデルを用い制御装置内で造形・切削パスを作成し出力されたそれぞれのパスを用い造形、切削加工を行う。また加工中に次工程の造形、切削パスを作成する。

時間調査の対象範囲としては、加工中に作成される造形・切削パス作成処理時間を対象とした。

金属光造形複合加工では、粉末を積層造形し、設定された回数の積層造形を行った後、周囲形状に対し切削加工を行う。造形と切削を繰り返し積層造形を行うことで目的の形状が生成される。以降、積層造形から切削までの1つの作業単位を「工程」とする。評価用モデルとして形状の異なる4種類もモデルを準備した。

2) 造形、切削等加工時間の分析

現行のCAMの問題点の抽出・明確化を行うために、評価モデルに対し、今回はCAMにおける造形と切削パス生成時間の調査を行った。

形状の違いにより各処理部の占める割合は異なり、処理時間全体に対し影響が大きいと判断できる処理部を特定することはできなかった。

各評価モデルにおいて、処理時間で大きな影響を持つ機能を抜き出した。結果として、緩斜面検出が部品1で全体の処理時間の68%、部品2で31%占め、また等高線パス作成は、部品1以外の3モデルで42%から79%の範囲で処理時間を占有していることが確認された。影響が大きいと判断された機能を更に分解し機能の中で使用される頻度が高い詳細機能毎に処理時間の集計と解析を行った。

次に、造形・切削加工の単位である加工工程毎に造形・切削パス作成処理時間を比較した。加工中形状をスライスし造形・切削パスを作成するが、計算処理が困難である場合は、特定の工程で処理時間がかかることになる。造形・切削パス処理時間が多くなる形状に着目し、問題となる形状の抽出を行った。

部品の場合には、処理時間は断面積の増加によらず断面形状のパターンに大きく依存する。断面のパターンが複雑になるに従って造形・切削パス作成処理が増加することが確認された。

3) 結 果

(1) 現状 CAM システムの問題点抽出と明確化

切削加工の処理時間短縮に向け、切削パスの作成処理において処理時間が必要とされる部分の開発および改善により高速化を行うために、現状 CAM システムにおける切削パス作成処理時間を計測し、以下の問題点を抽出、明確化した。

- ・ 各処理部の作成処理時間
 - 評価モデル毎に作成時間の比率が異なり改善項目は特定できなかった
- ・ 詳細機能毎に集計した作成処理時間
 - 緩斜面の検出、補間パスの作成、工具中心線の算出が処理時間大
- ・ 造形・切削工程毎の処理時間の結果
 - 内部構造に対するパス作成時間が中実構造に比べ著しく増大

(2) 高度化する CAM 仕様の決定

(1) で得られた問題点に対し、加工時間短縮を目的とした高度化を行う CAM 仕様を以下に示す。

1) 切削領域の判定処理の高速化

等高線、緩斜面の検出時の切削領域の判定処理の改善

2) 工具中心曲線の算出処理の高速化

工具接触点と工具半径分のオフセット処理の改善

3) 工具干渉処理の高速化

工具中心曲線における工具干渉部分の判定、削除処理の改善

4) 内部構造に対する切削パス作成の高速化

中空構造など内部構造の場合の切削パス作成処理の改善

5) 緩斜面補間パスの作成処理の高速化

緩斜面用切削パス作成の処理改善

また、処理時間の短縮以外に造形・切削パスの効率化を目的とし、以下の CAM 仕様を追加した。

6) 孔など複雑面形状の簡素化による切削パスの改善

簡略化した面を用いた切削パス作成処理に対する設定方法の改善

7) 切削面指定方法の簡素化による時間短縮

複雑化、内部構造への対応を考慮した面指定方法の改善

本年度の開発すべき CAM 仕様を以上の通り決定した。

II CAM システム製作・開発

1 研究目的および目標

I で決定した仕様を元に高度化する CAM システムの製作・開発を行う。目標として、全体としては処理高速化によるシステム処理時間の短縮と安定化、造形・切削パス出力機能に対してはパスの効率化を行うことによる造形・切削時間自体の短縮を目標とする。目標としては、現状 CAM における加工時間の 50%減を目標とする。

目標

(1) 現状 CAM における加工時間の短縮 50%を実現できる CAM システムの製作

2 実施内容

(1) CAM システム製作

I の仕様から高度化される CAM を製作する。各処理概要を説明する。

1) 切削領域の判定処理の高速化

等高線パスおよび緩斜面用パスを作成する中で、切削を行うかどうかの判定処理が必要となる。本処理は CAM において高速切削を行う上で重要であるが、切削領域の判定処理時間は全造形・切削パス作成時間の 85%以上を占めることが確認された。よって本年度は切削形状の切削領域の判定処理の計算方法を見直し処理の高速化を行った。

2) 工具中心曲線の算出処理の高速化

工具中心曲線は工具接触位置から法線方向に工具半径分を移動した点群を結ぶことで生成される曲線である。CAM の基本的な処理であるが、工具中心線の算出処理が全造形・切削パス作成時間の 42%以上を占めることが確認された。よって本年度は法線方向へのオフセットを行う計算方法を見直し高速化を行った。

3) 工具干渉処理の高速化

切削パス作成時、工具干渉処理は切削パスの中で工具干渉が起こった部分を削除する処理である。本 CAM においては、工具中心曲線をワーク表面から工具半径分オフセットした曲面を用いトリムし切削パスを算出するが、本処理時間は全造形・切削時間の最大 42%を占めることが確認された。よって本年度は切削パス算出のトリム処理の計算方法を見直し高速化を行った。

4) 内部構造形状に対する切削パスの高速化

中空構造を持つ形状の切削パス作成の場合、全ての外周面に対し切削パスを作成後、不要な切削パスの削除を行っているが、処理時間の大幅な増加につながっている。本年度は、切削不要な面に関し切削パス作成を行わない処理を追加することで高速化を行った。

5) 緩斜面補間パスの作成処理の高速化

平面および緩斜面の切削パスを作成する場合、等高線パス作成とは異なり緩斜面用の切削パスを作成するが、緩斜面用パス作成時間が大幅にかかることが確認された。本年度は緩斜面補間パス作成処理において切削領域の判定処理を改善することで、高

速化を行った。

6) 孔など複雑面形状の簡素化による切削パスの改善

ボルト穴、座ぐりなどの穴形状やメッシュなどの機能性形状などの表面孔構造を持つ平面の場合、孔により切削パスは分断され結果として工具退避と接近用のパスが非常に多く追加・生成される。その結果、工具退避と接近を頻繁に繰り返すために切削パス長は長くなり切削時間が増加する。表面上に孔などの構造があった場合にも平面に沿った切削パスを作成することが必要となる。簡略化された面形状を切削用に設定する機能を追加し、切削パスの効率化を行った。

7) 切削面指定方法の簡素化による時間短縮

入力された 3 次元形状に対し切削を行うための面の指定が必要となる。現状設定方法では水管などの内部構造に対し切削面の指定を行う場合には、任意の断面表示を行い内部形状を表示した後に指定する必要があるなど設定方法が困難であった。そのため内部構造の指定を含めた切削面指定方法の開発を行い簡素化、効率化を行った。

(2) 結果

仕様に従い CAM の開発を行った。以下に各機能での効果を確認した結果を記述する。

切削パス作成処理に対する開発項目の時間短縮効果を確認した。各評価モデル中で問題となる部分、たとえば、部品全体に内部構造を持つ部品や断面形状が一様な場合には改善効果が大きく現れるが、多数の曲面から構成されるようなものについては、効果全体では大きく現れない結果であるが、作成処理における時間短縮効果は確認された。

また、複雑面形状を簡素化することによる切削パスの簡素化、内部構造を持つ構造や面指定方法の改善等を含む切削面指定方法の簡素化、について機能の開発を行った。これらの効果については、切削パス作成後の実機による加工時間の比較および段取時間を含め次項での総加工時間の比較にて確認を行うものとした。

(3) まとめ

時間短縮を目的とした CAM システムの詳細仕様の決定、効果の確認の後、システムの製作・開発を行った。時間短縮効果に関しては、評価モデルの形状特徴により効果の大小はあるが、問題となる工程に対し短縮効果があると判断、工程別では時間短縮効果を確認したところ、目標 50%減に対し最大で 91%減、最小で 20%減の効果を確認した。

Ⅲ CAM システム仕様検証評価

1 研究目的および目標

製作された CAM システムを用いて改善前に対する切削パス作成処理時間および切削加工時間短縮効果の検証・評価を行う。評価方法としては、入力された 3 次元データを用い、加工条件の設定、造形・切削加工開始から加工終了までの全工程に対する時間を計測、検証・評価する。目標としては、現状の 50% 減を目標とする。

目標

- 1) 総加工時間の短縮効果 50%

2 実施内容

(1) 検証・評価

1) 造形、切削パス作成処理時間の検証、評価

①各処理部、工程毎の時間短縮効果の検証

現行 CAM と高速化対応後の全造形・切削加工パス作成時間の比較を行う。得られた作成時間について工程毎、処理毎による比較、検証を行った。造形・切削パス作成における造形・切削条件、および各パラメータは、全て同一の条件のもとで計測を行った。

②パス作成処理の全体時間短縮効果の検証

全ての評価モデルに対し、現行仕様と高速化対策後のシステムを用い、全工程における造形・切削パス作成処理の時間短縮効果を確認した。

2) 加工全体の検証、評価

実機による加工を行い、造形、切削加工時間の比較、モデルデータの設定から段取り時間を含めた総加工時間での時間短縮効果を確認した。

(2) 結果

1) 造形、切削パス作成処理時間の検証、評価

①各処理部、工程毎の時間短縮効果の検証

全評価モデルに対し造形パス作成には変化が無いが、切削パス作成では、荒、仕上げ加工で全工程に対し時間短縮効果が確認された。

②パス作成処理の全体時間短縮効果の検証

全ての評価モデルにおいて時間短縮効果が確認されたが、小さな自由曲面が多く存在する部品において効果が少ない結果となった。

2) 加工全体の検証、評価

実機にて造形、切削加工検証を行い、段取りから加工終了までの総加工時間による時間短縮効果の検証を行った。

切削パスの効率化の手段として、加工条件の設定時に、切削面指定の簡素化による時間短縮を実施した。

結果は、改善前に比べ 18% 短縮され加工時の短縮効果を確認した。

(3) まとめ

製作されたシステムを用いて改善前に対する加工時間短縮効果の検証・評価を行った。作成時間短縮効果は評価モデルにより改善前と比較し最大 56%減から 20%減の実績が確認された。次に、段取りから加工終了までの全工程に対する時間短縮効果の検証を行った。具体的には電機機器部品のパス作成処理の実機での動作確認を行い、改善前の作成時間に対し 56%短縮効果を確認、目標 50%減を達成した。また、段取り時間の短縮とパス効率化を含めた総加工時間の時間短縮効果は改善前の 18%減となることを確認した。高速化対応後の加工中の造形・切削パス作成処理時間は、総加工時間に対し 17%となり、加工時間内に十分収まることを確認した。

第4章 本論-(3) 評価（物性データ、機能評価等）

I 試作品の物性値評価

1 研究目的および目標

第2章 I で求めた焼結、加工条件で製作したテストピースの機械的特性を評価する（引張強度、曲げ強度、硬度測定、組織観察、面粗度など）。また、市販金属及び焼結条件の違いによるテストピースとの特性比較を行う。

目標

- (1) O3C材の造形物の硬度特性評価
- (2) Fe-C材の造形物の特性評価
- (3) O3C材の造形物のショットブラスト加工特性評価

2 研究内容

(1) 造形物の硬度特性評価

1) 実施内容

現状の金属光造形法により製作した積層材料（O3C 材造形物）について、表面と内部における硬度特性について調査した。

2) まとめ

O3C材造形物の加工は材料成形形状にフレキシブルに対応するため、ボールエンドミル工具を使用する。このため、切り取り厚みは極めて薄くなり、この硬質部分の偏在が工具損傷に寄与する可能性が高い。また、次年度光造形条件を変更する場合には塊状の偏在組織の状態について再度調査の必要がある。

(2) Fe-C材の造形物の特性評価

1) 目的

Fe-C材の造形時のエネルギー密度と造形物の特性の関係を評価する。

- ①組織評価
- ②硬さの評価
- ③引張試験による評価

2) 実験方法

造形時のレーザー焼結条件を変化させ、単位体積あたりに照射するエネルギー密度を変更して、①組織観察および②硬さ測定用試験片、③引張試験片を作製して評価する。

3) 実験結果

①組織観察

単位体積あたりのエネルギー密度に対する、組織の明確な傾向は見られない。エネルギー密度の高い条件では造形時の水平方向に縞模様が見られ、上下、左右方向で特性の異なる直交異方性材料であると考えられる。

②硬さの評価

造形ワークの空孔の部分を避け、十分に溶融していると考えられる部分に対し、ビッカース硬さ試験を実施した。エネルギー密度が高い条件の方が、測定箇所によるばらつきが小さくなっている。

③引張試験による評価

引張試験片形状を造形し、ワイヤ放電加工にて試験片を切り出して引張試験を実施する予定であったが、一部にクラックが見られること、また試験片の全域にわたり空孔が存在していることから、今回の試験片での評価は実施しなかった。今後、Fe-C材の焼結条件最適化を進め、再度試験片を作製して評価を行う予定である。

4) まとめ

Fe-C材の造形時の単位体積あたりのエネルギー密度と造形物の特性の関係を評価するという目的で、造形時のエネルギー密度を変えた試験片にて評価を行ったが、現時点では明確な関係が得られていない。

(3) 03C材の造形物のショットブラスト加工特性評価

1) 目的

ショットブラスト条件に対する面粗さ、加工範囲を評価する。

2) 実験方法

ブラスターユニットを用い、各ショットブラスト条件において鉄系粉末材料で製作した造形物にショットブラスト加工を施し、加工後に面粗度と加工範囲を評価した。

3) 実験結果

各ブラスト圧力における投射距離と面粗度の関係を得た。最も小さい面粗度が得られる条件はブラスト圧力低／投射距離近であった。

4) まとめ

ショットブラスト加工により、造形肌の面粗度を向上させることが可能である。電機部品における切削面ほど平滑な面が要求されない部位にショットブラスト加工面が使用可能であると考えられる。

第5章 全体総括

本研究では、金属光造形複合加工法を用いた部品製作にかかる総時間の短縮を目的とし、造形、切削、CAM 処理の各工程での時間短縮に関する技術開発を行った。本年度の実績として、造形技術で 60%減、切削技術で 75%減、CAM 処理技術で 18%減（CAM 単独では 56%減）が実現可能な結果を得た。

あるサンプルモデルでの工程分析の結果から、造形工程中の造形の占める割合は約 70%、切削工程中の切削の占める割合は約 95%との結果がある。本年度の造形、切削、CAM 処理での時間短縮効果は、各工程の造形及び切削時間（造形工程の 70%及び切削工程の 95%）の短縮となることからあるサンプルモデルでの金属光造形複合加工時間を算出すると従来加工時間の約 60%減となる。

次年度以降、造形、切削、CAM 処理の各工程での時間短縮の実現、その他工程である 3D データ処理、段取、後処理での時間短縮も検討し、本研究の目標である部品製作に要する時間の 1/3 (67%減) 達成に向けて開発を進める。