

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「電気自動車用薄肉形状部品の
研磨レス超精密切削加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成27年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構

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
(1)研究背景、目的	
(2)研究概要	
(3)実施内容	
1－2 研究体制	4
(1)研究組織・管理体制	
1)研究組織(全体)	
2)管理体制	
(2)研究者氏名	
1)業務管理者及び研究員	
2)経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	
3)推進委員会	
1－3 成果概要	8
1－4 当該研究開発の連絡窓口	10
 第2章 本論	11
2－1 貼り付け法による加工品の接着の 検討	12
2－2 エアーバキューム法の高度化の検討	15
2－3 平面度及び面粗さの計測技術の確立	19
2－4 切削加工熱の影響を低減する方法の確立	23
2－5 超高精度切削加工技術の確立	25
第3章 総括と展望 事業化への取り組み	
3－1 総括と展望	34
3－2 事業化への取り組み	35

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) 研究背景、目的

電気自動車用モータにおいては、高出力、小型・軽量化、高速回転に耐える堅牢性を兼ね備えた特性を得るため、0.5～3.0mmといった薄肉で直径200mm以上のディスク形状の部品が多く要求されるようになっている。

本事業では、高度な切削加工技術を用い、薄肉形状部品を高効率で加工する、研磨レス超精密切削加工技術の開発を目的に研究を行う。

これにより、貼り付け法とエアーバキューム法による薄肉ディスク形状部品の保持方法を確立し、『外径 $\phi 224 \times$ 内径 $\phi 16 \times 1.2\text{mm}$ で、平面度 $\leq 0.02\text{mm}$ 、面粗さ $\leq \text{Ra}0.2$ の精度』の薄肉ディスク形状部品の切削加工を実現し、加工時間を従来の1/15に短縮する合理化を実現させる。

2) 研究の概要

本研究開発では、従来の旋盤加工機のチャック機構により部品を保持する際のワークの変形または保持そのものができないといった問題を解消するため、以前から検討してきた貼り付け法とエアーバキューム法による薄肉ディスク形状部品の固定技術の見直しを行い、平成24年度目標 外径 $\phi 120$ 平面度0.1 材料板厚3.0mm 面粗さ1.6aを達成した。

平成25年度は、加工条件の最適化と信頼性の向上を図るとともに、薄肉切削専用加工装置の製作を行い、本加工装置を使用することで $\phi 224$ の薄肉ディスクを保持し、平成25年度目標 外径 $\phi 224$ 平面度0.05 材料板厚2.0mm 面粗さ1.0aの切削加工を実現した。しかし、平面度が未達成のため、課題を残す形となった。

また、加工体の変形等のため、接触端子による平面度評価が正確に行えない問題に対し、平面度及び面粗さの計測ができる非接触レーザー測定装置を完成させ、切削加工時の熱応力変形量の評価をシミュレーションと対比させて評価できる検査体制を構築した。

平成26年度は、高精度オンマシン測定装置の導入による機上での測定の高精度化を図る。従来の測定手順を見直し、実用化に向け測定の時間短縮及び加工手順を確立する。非接触レーザー測定装置で得たデータと照らし合わせ、平成26年度目標値である $\phi 224$ 薄肉ディスクの切削加工を実現させる。

表1 各年度 目標値

年度	平面度 (mm)	材料板厚 (mm)	外径 (mm)	面粗さ (Ra)	
平成24年度	0.1以下	3.0以下	120	1.6	達成
平成25年度	0.05以下	2.0以下	224	1.0	達成
平成26年度	0.02以下	1.2以下	224	0.2	達成

3)実施内容

①貼り付け法による加工品の接着の検討

(実施:株式会社山岸製作所、群馬県立群馬産業技術センター)

φ224 薄型ディスク形状部品の試作型を作製し、接着剤貼り付け装置及び接着剤剥離装置の開発を行い、加工中剥離ゼロの接着及び完全剥離状況を作る。また、接着強度測定治具を作製し、接着強度を数値化する。通常把持力と相関させるため、軸方向及び径方向の剥離力を加味した測定方法を確立する。

②エアバキューム法の高度化の検討

(実施:株式会社山岸製作所、群馬県立群馬産業技術センター)

平成 25 年度導入の薄肉切削専用加工装置は、平成 24 年度より実施している基本設計データを利用して、最適機械を購入・改造を施し、エアバキューム構造を完成させる。真空ポンプの真空圧及びチャック圧力の繰り返し保持実験を行って、最適条件決定し本研究開発の目標値である φ224 を保持可能な、薄肉切削専用加工装置の改造を行う。この薄肉切削専用加工装置を使用し、従来の加工機では切削することが出来ない φ224 薄型ディスク形状部品の試作品を作製し、①と同様の接着強度測定治具により、薄肉ディスクの剥離実験を行い、切削中の部品のズレや刃物破損をしない保持構造の最適化を図る。

③平面度及び面粗さの計測技術の確立

(実施:株式会社山岸製作所、国立大学法人群馬大学)

平成 24 年度導入した薄肉専用解析ソフト及び薄肉専用レーザー測定子を内蔵した三次元測定器を使用し、薄型ディスク形状部品の試作型及び測定器保持治具を作製して、板厚 1.2mm 以下の薄肉ディスクを測定できる非接触レーザー測定装置を開発する。平成 26 年度の目標値として、外径 φ224mm・板厚 1.2mm のディスクを、平面度 0.02mm 以下、面粗さ 0.2a の測定を可能とする。また本装置などを使用し、薄型ディスク形状部品の試作型内部の熱変形解析等のシミュレーションを行い、その結果を薄型ディスク形状部品の試作型製作へ反映させる。加工面形状は工業用光学顕微鏡を使用し、加工面の微細形状を拡大して状態を把握する。

平成 26 年度導入した高精度オンマシン測定装置を使用し、機上での平面度測定の高精度化を図る。また、従来の測定方法だと時間が掛かるため、実用化に向け、測定の時間短縮及び測定手順を確立する。

④切削加工熱の影響を低減する方法の確立

(実施:株式会社山岸製作所、国立大学法人九州工業大学)

吸熱評価用治具(旋盤用試作チャック)及び熱的影響測定実験用治具を作製し、加工熱の発生データの収集及び解析を行う。③のデータを利用し、熱応力解析シミュレーションによる熱応力変形量の推定を行う。工具の切削方向、切削方法による製品への熱

応力を解析する。熱の除去には 1.5Mpa の高圧クーラントを用いて切削熱の除去実験を行う。熱の影響による平面度を検証するために、切削抵抗の少ない熱切断実験用器具を使用し、切削以外の熱の影響を分析する。

⑤超高精度切削加工技術の確立

(実施:株式会社山岸製作所、国立大学法人九州工業大学、国立大学法人群馬大学)

各種切削ホルダー・切削チップを使用し、既存簡易バキューム装置を利用し、外径 ϕ 224mm・板厚 1.2mm のディスクを平面度 0.02mm 以下、面粗さ 0.2 μ m 以下とする切削加工条件の最適化を実現する。また、鏡面仕上げ用工具の摩耗解析と最適設計を行うため、④によって得た熱的影響を元に切削実証実験を行う。加工による平面度の悪化に対しては、X 線応力測定装置を用いて圧縮及び引張り応力の関係を数値化、また実際に加工した ϕ 224 薄肉ディスクをワイヤーカットし、変形から応力分布を推察し、目標を達成する。

⑥プロジェクトの管理・運営

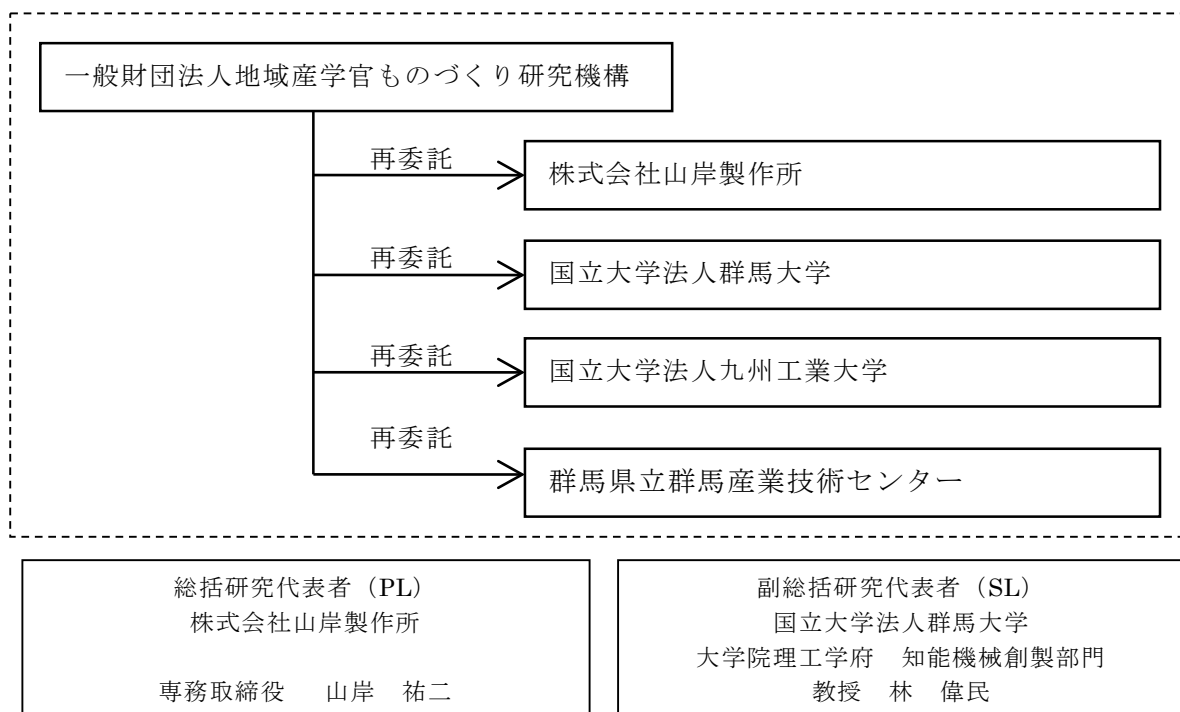
(実施:一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構)

- ・ 事業管理機関:一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構において、本プロジェクトの管理を行う。プロジェクトの研究過程と成果について取りまとめ、成果報告書 2 部及び電子媒体(CD-ROM)1 式を作成する。
- ・ 研究の進捗状況を検証するとともに、研究実施で発生する課題等について、随時研究実施者と調整を行う。
- ・ 再委託先事業者が作成する証憑書類について、指導及び確認を行う。
- ・ 研究開発推進委員会を委託契約期間内に 3 回程開催する。

1-2 研究体制

(1) 研究組織・管理体制

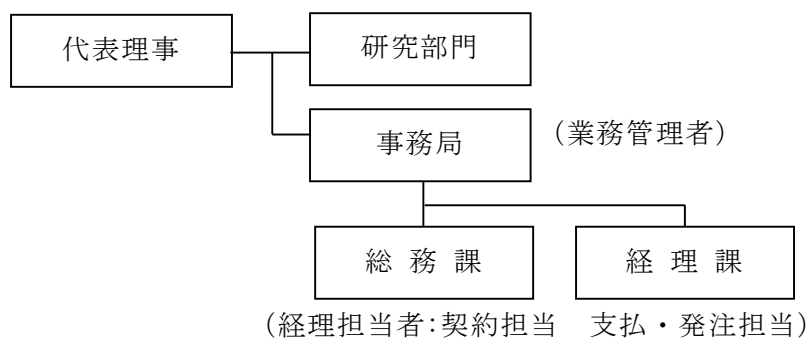
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

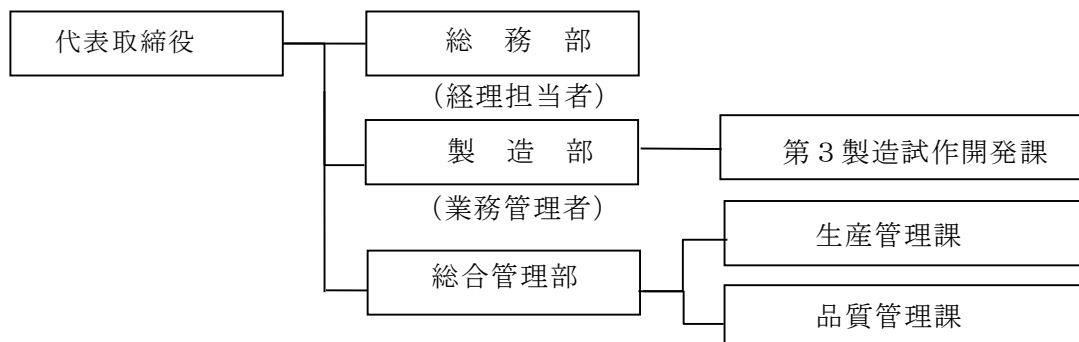
① 事業管理機関

[一般財団法人地域産学官ものづくり研究機構]

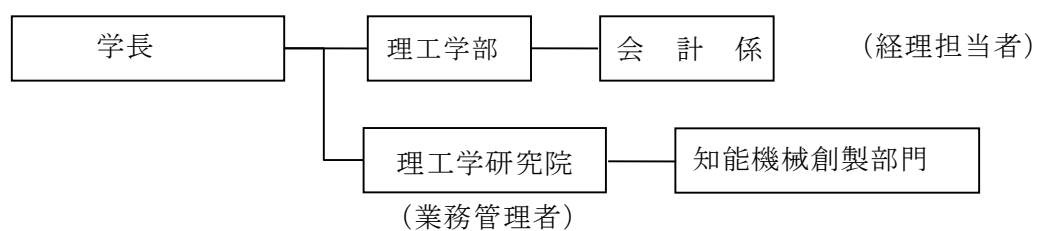


②再委託先

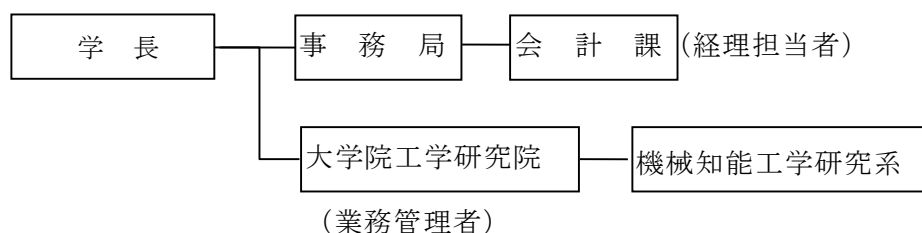
[株式会社山岸製作所]



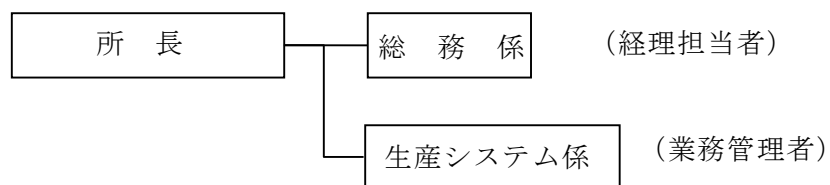
[国立大学法人群馬大学]



[国立大学法人九州工業大学]



[群馬県立群馬産業技術センター]



(2)研究者氏名

1)管理員及び研究員

【事業管理機関】

一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構

(管理員)

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
石坂 之敏	事務局 事務次長	⑥
佐藤 純一	総務課長	⑥
天野奈緒美	経理課長	⑥

【再委託先】

(研究員)

株式会社山岸製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
山岸 祐二	専務取締役	① ③④⑤
高井 豊	製造部 課長	① ③④⑤
郷 智英	総合管理部 生産管理課	① ③④⑤
平尾 剛史	総合管理部 品質管理課 課長代理	①③⑤

国立大学法人群馬大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
林 偉民	大学院理工学府 知能機械創製部門 教授	③⑤

国立大学法人九州工業大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
水垣 善夫	大学院工学研究院 機械知能工学研 究系 教授	④⑤
宝亀 真澄	工学部技術部 技術職員	④⑤

群馬県立群馬産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
福島 祥夫	生産システム係 係長	

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構

(経理担当者) 経理課長 天野奈緒美

(業務管理者) 事務局 事務局長 石坂 之敏

(再委託先)

株式会社山岸製作所

(経理担当者) 総務部長 岡田 徹

(業務管理者) 専務取締役 山岸 祐二

国立大学法人群馬大学

(経理担当者) 理工学部 会計係長 宮路 昌浩
(業務管理者) 理工学研究院長 篠塚 和夫

国立大学法人九州工業大学

(経理担当者) 会計課 課長補佐 白木 智行
(業務管理者) 大学院工学研究院長 前田 博

群馬県立群馬産業技術センター

(経理担当者) 総務係 森本 寛枝
(業務管理者) 生産システム係長 福島 祥夫

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
山岸 祐二	株式会社山岸製作所 専務取締役	PL
林 偉民	国立大学法人群馬大学 大学院理工学府 知能機械創製部門 教授	SL
水垣 善夫	国立大学法人九州工業大学 大学院工学研究院 機械知能工学研究系 教授	
福島 祥夫	群馬県立群馬産業技術センター 生産システム係 係長	
高井 豊	株式会社山岸製作所 製造部 課長	図
西川 真一	日産自動車株式会社 パワートレイン生産技術本部・主担	アドバイザー
市毛 誠	日立オートモティブシステムズ株式会社 PT&電子調達部	アドバイザー
三浦 勝弘	三鷹光器株式会社 第一製造部 部長	アドバイザー
酒井 英司	株式会社 NC ネットワーク 加工事業部・新規プロジェクトリーダー、	アドバイザー (旅費のみ)
樋口 俊郎	東京大学工学系研究科 精密工学専攻 教授	アドバイザー (謝金、旅費)
甲本 忠史	一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構 専務理事(群馬大学名誉教授)	委員会事務局
久米原宏之	一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構 常務理事(群馬大学名誉教授)	委員会事務局

(5) 知的財産権の帰属

知的財産権は全て当方に帰属することを希望する。

(6) その他

なし

1-3 成果概要

① 貼り付け法による加工品の接着の検討 平成 24 年度からの継続内容

(実施:株式会社山岸製作所、群馬県立群馬産業技術センター)

従来手動にて接着を行っていたが、接着剤張り付け装置を作成し定量塗出を行った。この定量塗出装置により手塗りから、定量塗布装置を作成。接着剤・塗り方による接着状態のばらつきの定量化を実施この結果、加工中の剥離を防ぐ事が出来るようになった。

接着強度測定治具を作成し、接着強度を数値化する実験を群馬産業技術センターにて実施。保持力の数値化により、切削抵抗を受けても剥離をしない最適接着材の選定が可能となった。今後の課題は通常把持力と相関させるため、軸方向及び径方向の剥離力を加味した測定方法を確立する。更なる最適接着剤を探索し続けている。

平成 26 年度はφ224 薄型ディスク形状部品の試作型を作製し、接着剤貼り付け装置及び接着剤剥離装置の開発を行った。結果加工中剥離ゼロの接着及び完全剥離状況を作ることになった。

② エアーバキューム法の高度化の検討 平成 24 年度からの継続内容

(実施:株式会社山岸製作所)

①と同様の接着強度測定治具を作成し、500kN油圧型万能試験機を使用し吸着力の数値化に成功した。

吸着面の違いによる剥離状態を検証し、現状での最適接着面を決定した。吸着力による剥離状態を検証し、真空吸着力による切削抵抗に耐えて切削が可能な吸着力を決定した。これにより安定的な保持が可能となり、剥離実験データを基に、外れない吸着面の構造設計・試作を行い導入予定の薄肉切削専用加工装置の基本設計を行った。

平成 25 年度は薄肉切削専用加工装置を導入し、平成 24 年度より実施している基本設計データを利用して、最適機械を購入・改造を施し、φ224 の吸着できるエアーバキューム構造を完成させることに成功した。真空ポンプの真空圧及びチャック圧力の繰り返し保持実験を行って、最適条件決定し本研究開発の目標値であるφ224 を保持可能な、薄肉切削専用加工装置の改造を行い、平成 25 年度はφ224 板厚 2mm を保持することに成功した。平成 26 年度はエアーバキューム構造を更に改良し、世界初の板厚 1.2mm の保持を可能とした。この薄肉切削専用加工装置を使用し、従来の加工機では切削することが出来ないφ224 薄型ディスク形状部品の試作品を作製し、保持構造の最適化を図った。

③ 平面度及び面粗さの計測技術の確立 平成 25 年度からの継続内容

(実施:株式会社山岸製作所、国立大学法人群馬大学)

薄肉専用解析ソフト及び薄肉専用レーザー測定子を内蔵した三次元測定器を導入し、薄型ディスク形状部品の試作型及び測定器保持治具を作成して、板厚 1.2mm 以下の薄肉ディスクを測定できる非接触レーザー測定装置を開発した。この技術の成功により全体の平面度を把握し、CAD情報のプログラム作成を行うCAMにフィードバックする事が出来るようになった。平成 26 年度の目標値として、外径φ224mm・板厚 1.2mm のディスクを、平面度 0.02mm 以下、面粗さ 0.2a の測定を可能とした。また本装置などを使用し、薄型ディスク形状部品の試作型内部の構造解析・熱解析・流動解析等のシミュレー

ションを行い、その結果を次の薄型ディスク形状部品の試作型製作へ反映させることに成功した。

高精度オンマシン測定装置を導入により、機上での平面度測定を可能にした。機上から着脱しなくて良いので、測定の精度向上と着脱時間の削減が可能となった。これにより、実用化への時間短縮に成功した。

④切削加工熱の影響を低減する方法の確立

(実施:株式会社山岸製作所、国立大学法人九州工業大学)

加工後に平面度を悪化させる原因が加工熱にあるという予測をもとに切削加工熱を低減させる工具の選定、切削条件、刃先の形状を変え平面度を測定する実験を繰り返し行った。この実験により、現段階での工具、切削条件、刃先形状の現状での最適条件を把握した。吸熱評価用治具(旋盤用試作チャック)及び熱的影響測定実験用治具を作成し、加工熱の発生データの収集及び解析を行った。吸熱評価用治具(旋盤用試作チャック)及び熱的影響測定実験用治具を作製し、加工熱の発生データの収集及び解析を行い、切削条件、工具を選定し、工具の切削方向、切削方法による製品への熱応力を解析した。熱の除去には1.5Mpaの高圧クーラントを用いて切削熱の除去実験を行った結果、熱処理前の製品に対しては大きな効果を得られることが判った。

熱の影響による平面度を検証するために、切削抵抗の少ない熱切断実験用器具を使用し、切削以外の熱の影響を分析したが、工法が異なるため良い実験データを得ることは出来なかった。

⑤超高精度切削加工技術の確立

(実施:株式会社山岸製作所、国立大学法人九州工業大学、国立大学法人群馬大学)

上記の①～④の実験結果を元に、第一工程を貼り付けで接着し、第2工程をエアーバキュームチャックで吸着し安定保持を行いながら、HRC62 という非常に硬いマトリクスダイス鋼の切削に挑戦した。

各種切削ホルダー・切削チップを使用し、既存簡易バキューム装置を利用し、外径φ224mm・板厚1.2mmのディスクを平面度0.02mm以下、面粗さ0.2μ以下とする切削加工条件の最適化を実現するために、様々な工具を使用し、切削条件を選定し目標の達成に平面度は課題を残す形となったが、成功した。鏡面仕上げ用工具の摩耗解析と最適設計を行うため、切り粉、チップの先端を拡大し確認を行い、他に類を見ない超高精度切削加工の基礎を構築した。

既存のデータが存在していないマトリクスダイス鋼に関しては試験片を作成し、曲げ試験、引っ張り試験を実施し、シミュレーションに必要なデータを入手した。切削工具の選定にも役立つデータの入手に成功した。

平面度の悪化に対しては、X線応力測定装置を用いて圧縮及び引張り応力の関係を数値化、更に半径方向からの測定に加え、円周方向からの測定も実施した。その後、実際に切削加工したφ224薄肉ディスクをワイヤーカットし、変形から各領域の応力分布を推察した。現在もそのデータを元に切削加工を行い、目標達成に向け実験中である。

〒373-0057 群馬県太田市本町 29 番 1 号

連絡担当者 一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構 事務局長 北爪 宏

Tel: 0276-50-2100 Fax: 0276-50-2110 E-mail: kitazume@mro.or.jp

はじめに

本プロジェクトの内容は以下の通りである。

本研究開発では、従来の旋盤加工機のチャック機構により部品を保持する際のワークの変形または保持そのものができないといった問題を解消するため、以前から検討してきた貼り付け法とエアバキューム法による薄肉ディスク形状部品の固定技術の見直しを行い、加工条件の最適化と信頼性の向上を図るとともに、次年度導入予定の薄肉切削専用加工装置の基本設計を行う。

また、加工体の変形等のため、接触端子による平面度評価が正確に行えない問題に対し、平面度及び面粗さの計測ができる非接触レーザー測定装置を完成させ、切削加工時の熱応力変形量の評価をシミュレーションと対比させて評価できる検査体制を構築する。

本研究におけるエアバキュームチャックの機構は
株式会社 [山岸製作所](mailto:info@yamagishi-ss.com) info@yamagishi-ss.com
専務取締役 山岸祐二が特開中である。 出願番号:201145756

2-1 貼り付け法による加工品の接着の検討

(実施:株式会社山岸製作所、群馬県立群馬産業技術センター)

2-1-1 接着剤張り付け装置の開発

貼り付け接着は従来このような切削加工では類似の使用方法が無く、手作業にて接着を行っていた。

このような状況下では接着力、接着剤の量が安定せず加工中の剥離が発生していた。

手塗りから、定量塗布装置を作成。接着剤・塗り方による接着状態のばらつきの定量化を実施。

薄型ディスク形状部品の試作型を作成し、接着剤貼り付け装置及び接着剤剥離装置の開発を行った。従来手動にて接着を行っていたが、接着剤張り付け装置を作成し定量塗出を行った。この定量塗出装置により手塗りから、定量塗布装置を作成。接着剤・塗り方による接着状態のばらつきの定量化を実施この結果、加工中の剥離を防ぐ事が出来るようになった。

	手塗り	自動塗り
塗布時間	10～13秒	3秒
塗布量	0.7gから1.6g	1.2g (一定)

図1 定量塗布装置による結果

・まとめ

本研究の旋盤切削を貼り付けで行うという開発は、定量塗出装置の開発により剥離を防ぎ、作業者によるバラツキを無くす事ができた。

2-1-2 貼り付けの接着力の定量化 (平成24年度からの継続まとめ)

張り付け強度の定量評価を行うため、引張り試験機による接着力の測定により、貼り付け実証実験を行った。定量的に測定できる方法が無く、接着強度測定治具を社内で設計、開発を行った。接着強度測定治具を使用し、接着強度を数値化する実験を群馬産業技術センターにて実施した。

サンプルはA、B、C、3種類を用意し、接着強度測定治具に張り付け、実験を行った。

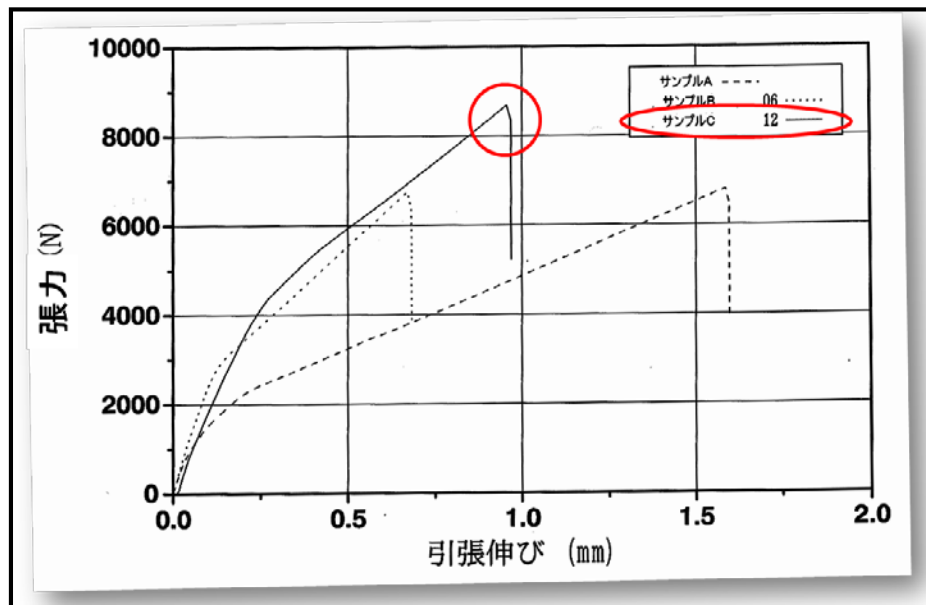


図 2 貼り付け法実験結果

・まとめ

定量評価によりサンプルCの接着力が1番高い事が確認出来た。現状の加工中に剥離が起きる可能性と合わせ、現時点で最適と判断した。

保持力の数値化により、切削抵抗を受けても剥離をしない最適接着材の選定が可能となった。

今年度、メーカーの物性値の再検証をおこなった。開発中の貼り付けについてメーカーより物性値を取りよせ、現状の貼り付け接着に重要な3項目について再度比較を行った。

粘度は溶解後の作業性に大きな影響を与える。また冷却後のじん性にも影響が出る。

軟化点は溶融点を表し、軟化点が低い程液状になりやすく貼り付けの膜圧に影響を与える。季節も接着力の変化を起こす事がある。

接着強度は貼り付けの接着力の定量化を裏付けるデータであった。

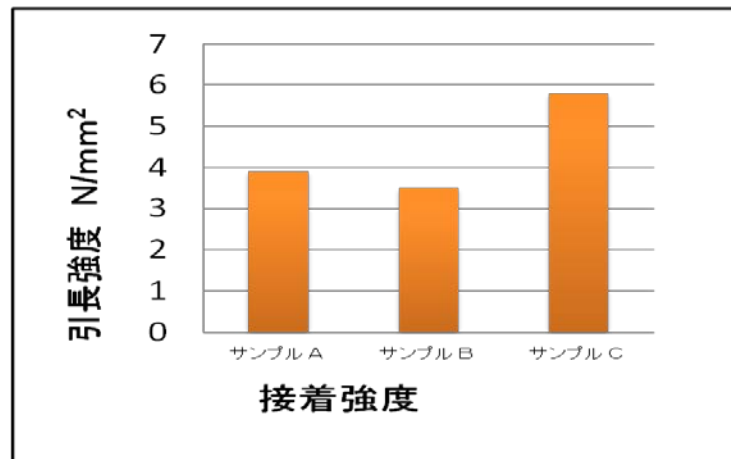


図 3 接着力

まとめ

結果は上記のようにサンプル C を 3 つの評価より、現時点で最適とした。
(サンプル C は、粘度が高いため伸びが無くなる事が、剥離における課題である。)

貼り付け接着の確立まとめ

貼り付け接着による安定的な切削は継続的に成功している。
今期の φ224 ディスクに対しても剥離状態は発生しておらず、選定が正しいことを証明できた。

2-2-1 構造の検討

(実施:株式会社山岸製作所)

バキューム吸着面の吸着性能評価を行い切削加工時の剥離回数を検証した。既存設備である簡易バキューム装置を利用して薄型ディスク形状部品の試作型を作成し、薄肉ディスクの剥離実験を行い、切削中の部品のズレや刃物破損をしない保持構造の最適化を図った。

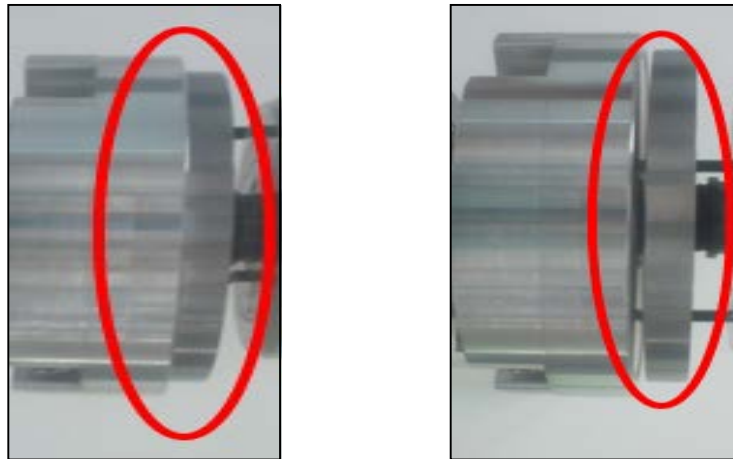


図4 吸着実験 吸着と剥離

最初に設計を行った物を吸着面Aとして、剥離実験を行った。

タイプA・・・吸着面パッキン標準では剥離回数 1/2 枚であった。

続いて摩擦係数を増やす吸着面Bの実験を行った。

タイプB・・・吸着面パッキン改良型では剥離回数 1/3 枚であった。

摩擦係数の関係性がないことから吸着面を増やす実験を行い、吸着面Cの設計を行い、実験を行った。

タイプC・・・吸着面全面改良で剥離回数が無くなった。

まとめ

最初に設計を行ったタイプAでは剥離回数 1/2 枚であった。

摩擦係数を増やしたタイプBでは剥離回数 1/3 枚であった。

吸着面を増やしたタイプCでは剥離が無くなった。

この実験により現段階での最適接着面の選定が出来た。

2-2-2 エアーバキューム用真空圧の検討

簡易エアバキューム装置を用いて、真空圧を調整し、真空圧と剥離の関係性を確認するため真空圧と切削における剥離検証を行い、切削方法と真空圧の関係を実験にて検証した。



図 5 簡易エアバキューム調整装置

まとめ

この実験結果で評価を行った結果、定量的ではないが、剥離を防止するには -90kPa 以上必要である。

(実施:株式会社山岸製作所、群馬産業技術センター)

平成 24 年度のデータから構造、真空圧を基準に吸着力を数値化するための接着強度測定治具の作成を行い、切削抵抗による剥離の原因となる回転方向のトルク測定を、500kN 油圧型万能試験機を使用し実施した。より切削抵抗に近いねじれを、回転角度毎に測定し、数値化に成功した。



図 6 油圧型万能試験機 装着状態及び剥離状態

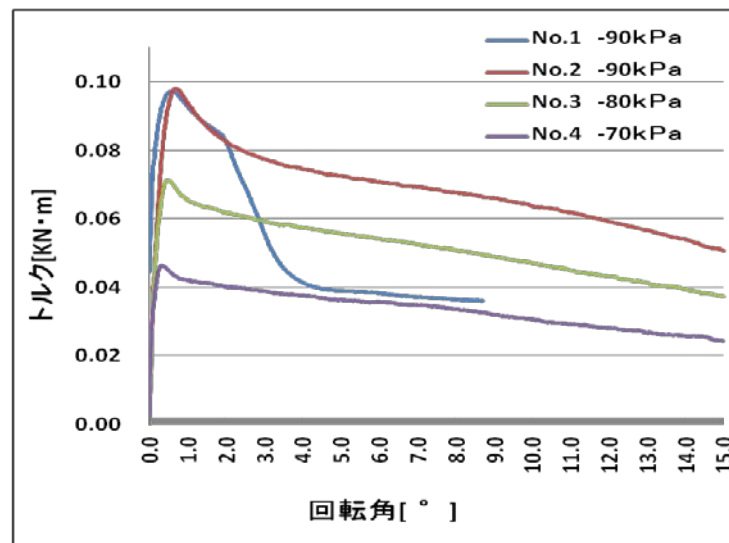


図 7 エアバキュームトルク

まとめ

この実証実験でも -90kPa の接着力が1番高く、現時点で最適と判断した。また、切削力に対しての接着力の数値化に成功した。

今回の実験結果より、現状での最適吸着面による剥離状態を検証し、吸着力による剥離条件を検証する事が出来た。現段階での真空吸着力による切削抵抗に耐えて切削が可能な吸着力を決定する事ができた。これにより安定的な保持が可能となり、剥離実験データを基に、外れない吸着面の構造設計・試作を行い、平成 25 年度導入した薄肉切削専用加工装置の基本設計を行った。

2-2-4 研究開発に必要な機械装置について(平成 25 年度からに継続まとめ)

(実施:株式会社山岸製作所)

平成 25 年度、薄肉切削専用加工装置が導入された。この装置は真空装置とチャックが一体化していて、従来の加工機では切削することが出来ない $\phi 224$ 薄型ディスク形状部品の切削には欠かせない装置である。

この装置に2-2-1で検証した治具構造、エアーバキュームに最適な真空圧を設計、製作し、実際に切削を実施した。



図 8 薄肉ディスク切削専用加工装置

まとめ

平成 24 年度からのデータに基づき切削に最適な保持構造を構築した。

薄肉ディスク切削専用加工装置の開発により、従来保持することが不可能であった薄肉ディスクを保持することに成功した。

このエアーバキューム法を使用し切削を行った結果は(2-5 超高精度切削加工技術の確立)で報告する。

2-3 平面度及び面粗さの計測技術の確立

(実施:株式会社山岸製作所)

2-3-1 薄肉測定用非接触レーザー測定装置の導入

薄肉測定用非接触レーザー測定装置の導入により、全体の形状測定を行う事が可能となった。

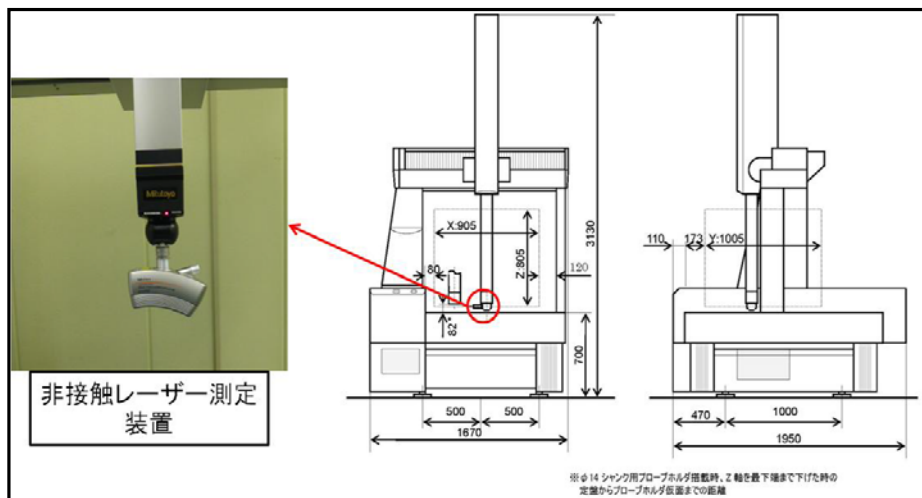


図 9 薄肉測定用非接触レーザー測定装置

薄肉測定用非接触レーザー測定装置の導入に伴い測定保持治具の設計、開発を実施した。

図 10 のような測定方法を用いて測定した結果、薄肉測定を両面から加工する事が可能となった。また、繰り返しの位置決めの精度出しが可能となった。

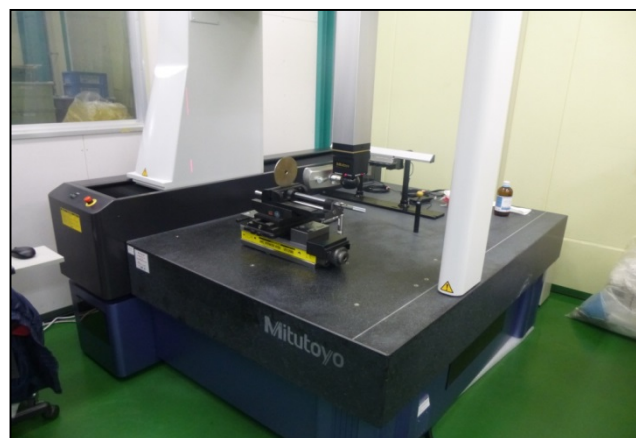


図 10 測定保持治具での測定

2-3-2 加工後の変形測定

平成 25 年度導入した、薄肉測定用非接触レーザー測定装置により、各工程で出た変形量を測定可能となった。この測定データから加工誤差を補正するデータを切削加工プログラムに反映し、切削を行った。

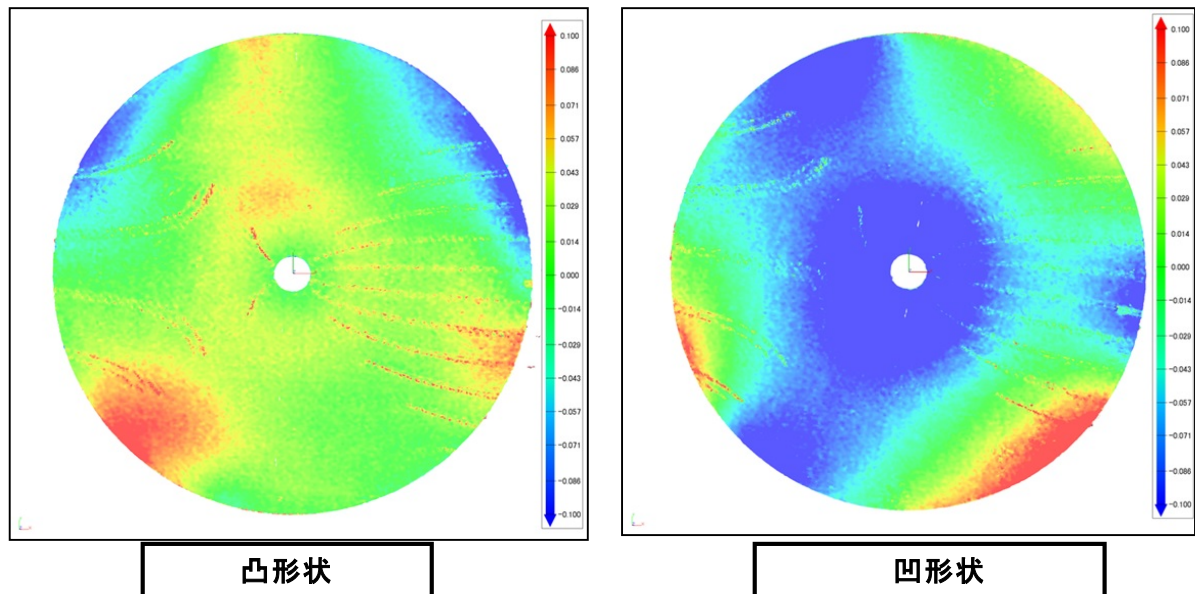


図 11 薄肉測定用非接触レーザー測定装置による変形量の測定

レーザー測定を行ったところ、変形量に対して、どの程度補正を入れるのかを検討、解析をし、切削加工プログラムに反映した。

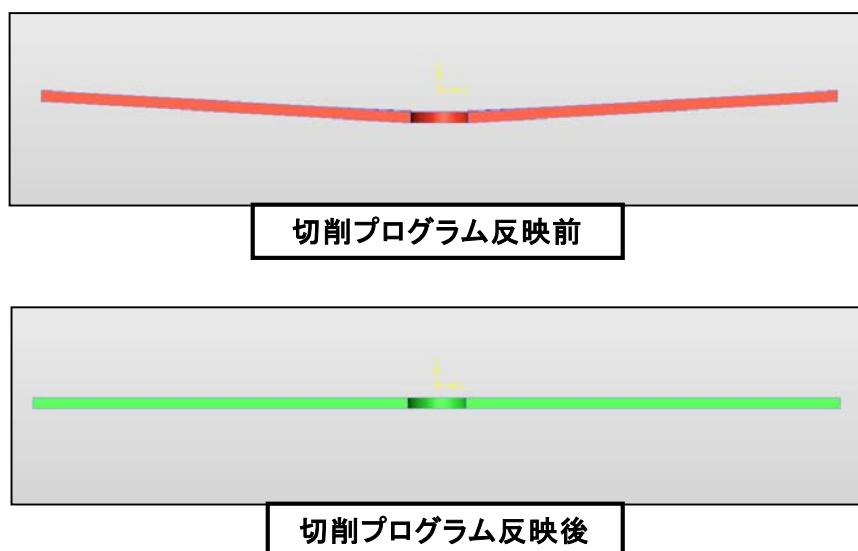


図 12 CAD による変形量のシミュレーション

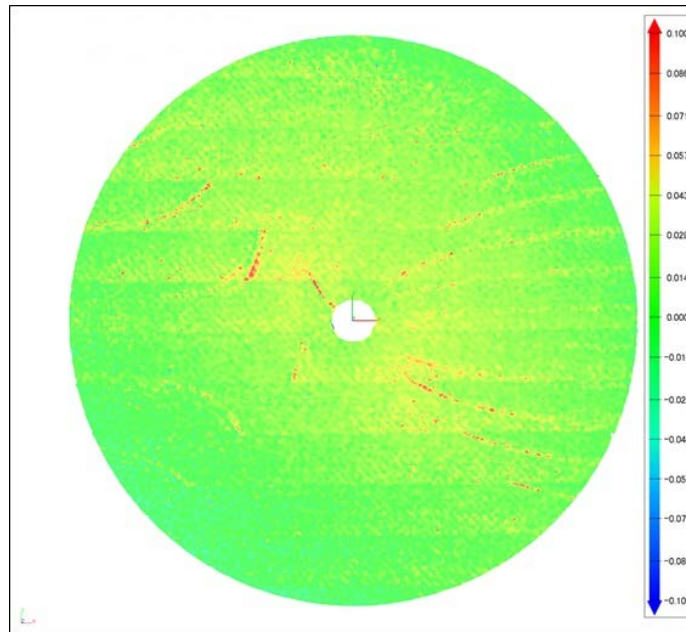


図 13 変形量の測定 切削プログラム反映後

まとめ

このレーザー測定により、プログラム反映前と後で変形量がより解りやすくなった。それを立体的に捉える CAD によるシミュレーションもまた、変形量に対する意識、対策などを検討することに大いに役立ったと言える。

平成 26 年度導入した、高精度オンマシン測定装置により機上での平面度の測定が可能となった。機上での測定値から加エプログラムに反映し、切削加工を行った。

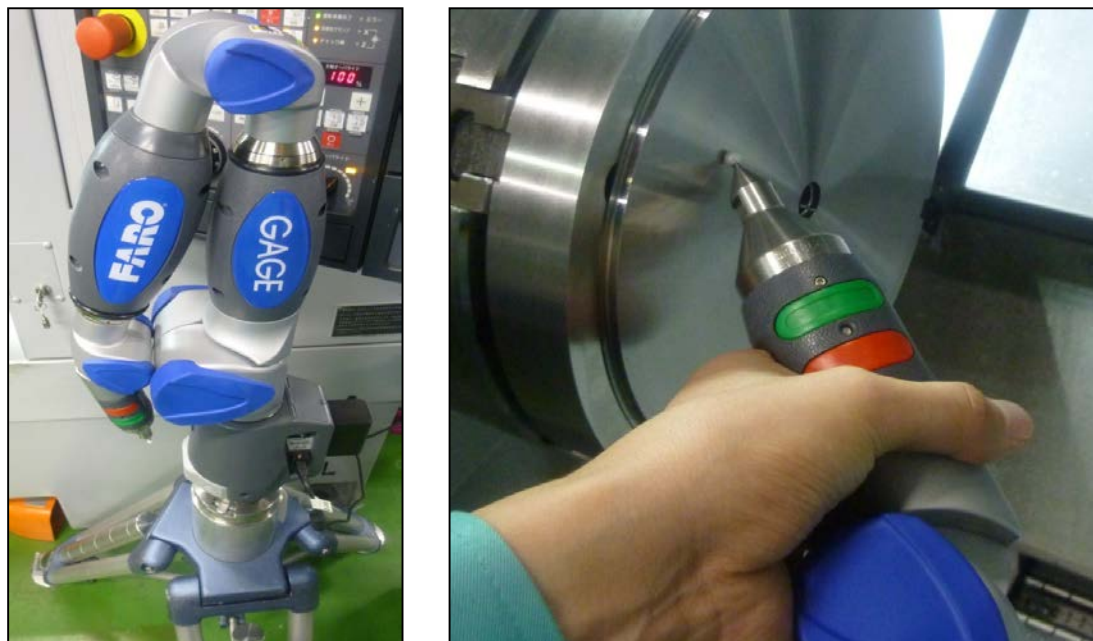


図 14 高精度オンマシン測定装置

まとめ

従来の測定方法だと、ピックテスターでの測定の時間、着脱の時間が発生し、加工に至るまで多くの時間、工程が掛かってしまったが、この装置により、着脱の時間が除かれ、加工後いち早く平面度測定に移ることを可能とした。このことにより着脱による測定誤差が無くなり、測定精度の向上に繋がった。

2-4 切削加工熱の影響を低減する方法の確立

2-4-1 切削条件による平面度への影響分析

切削方向における平面度の違い

加工後に平面度を悪化させる原因が加工熱にあるという予測をもとに切削加工熱を低減させる加工方法を検討し工具の選定、切削条件、刃先の形状を変え平面度を測定する実験を繰り返して行った。

最初に切削方向が変わる事でどのように平面度に影響を与えるかを確認する事にした。

外径から内径へ切削する加工法(スパイラルイン)、内径から外径へ切削する加工法(スパイラルアウト)による平面度への影響を検証した。一般的にはスパイラルアウトが変形を抑える傾向がある。加工工具の先端チップノーズ R における変形量の違いによる平面度への影響を検証した。R が小さいほうが、抵抗が低くなる傾向が有る。

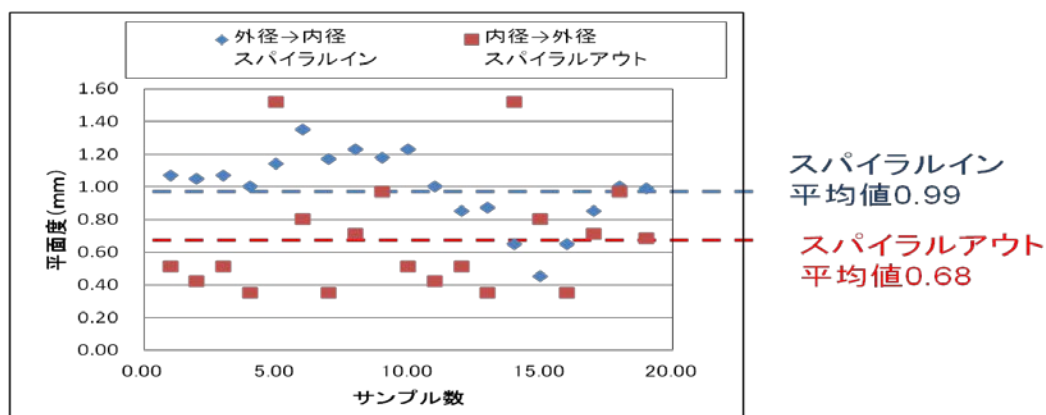


図 15 切削方向が平面度に及ぼす影響

次に加工工具の先端チップノーズ R における変形量の違いによる平面度への影響を検証した。R が小さいほうが、抵抗が低くなる傾向が有る。

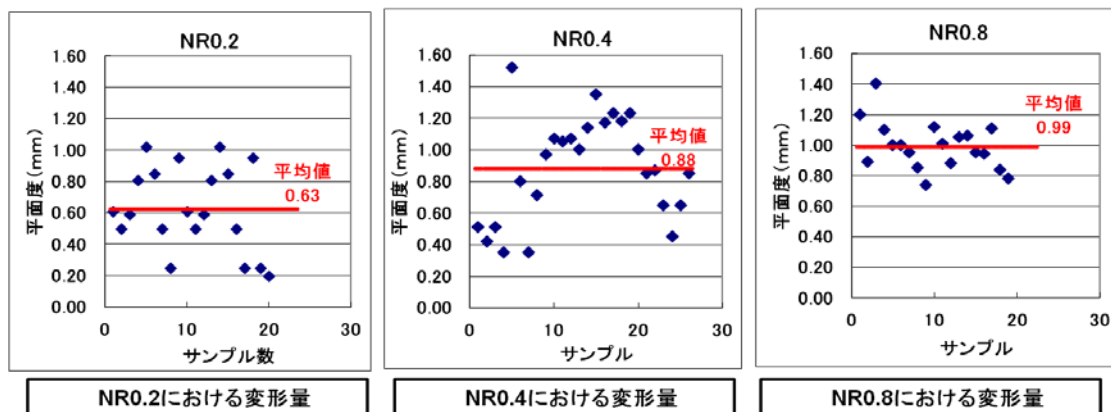
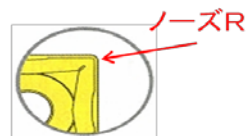


図 16 チップノーズ R が平面度に及ぼす影響

まとめ

図 15 における今回の実験結果から、推測していた通り内径から外径へ加工するスパイラルアウトの方が若干平面度を抑えられる傾向がみられる。

図 16 からチップノーズ R は小さいチップが若干平面度を抑える傾向がみられる。

この 2 つの実験から熱が平面度に影響を与えている可能性が高い事が分かった。

2-4-2 高圧クーラントを適応した切削加工(平成 25 年度からの継続まとめ)

平成 24 年度の分析結果から、熱が平面度に与える影響を除去するため、高圧クーラントを用いて切削熱の除去実験を実施した。

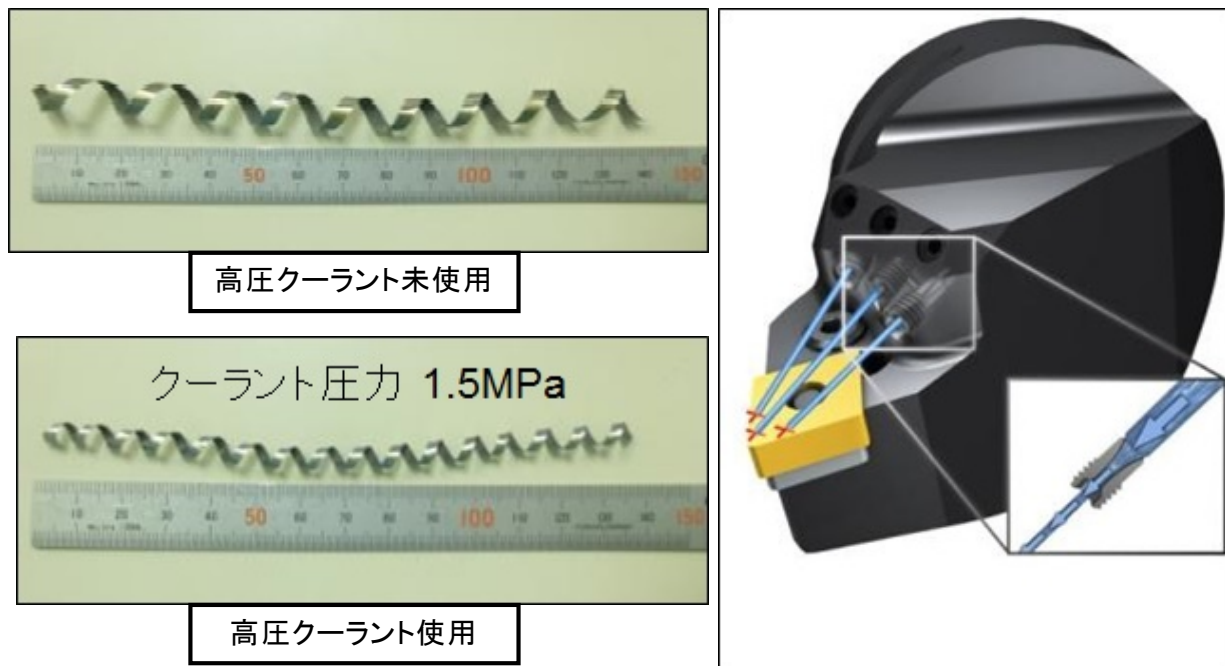


図 17 切粉の色と形状及び高圧クーラント解説図

まとめ

高圧クーラント及び専用切削工具を用いることにより、解説図にもある通りクーラントが刃先に局所的に接触するため図 17 のように切粉の色及び形状の変化が見られた。これは、切粉の温度の変化、切削している際に素材が軟化するのを防いでいることが分かる。

平成 25 年度同様、今期目標の $\phi 224$ 薄肉ディスクの荒切削では製品幅 1.8mm にする工程で、平面度 0.1 以内を達成。使用と未使用では平面度に大きな差がでる事が分かった。

2-5-1 熱処理の実施 高硬度HRC62 の切削加工の工具準備
 硬度HRC62 を切削出来る工具の選定を実施。

表 1 切削工具の選定

工具材種	高硬度への摩耗	切削速度	コスト	表面粗さ
CBN	○	○	×	○
コートサーメット	×	×	○	×
サーメット	×	×	○	×
コート超硬	×	×	○	×
超硬	△	×	○	△

まとめ

HRC62 という高硬度材に対し表面粗さ、切削抵抗、高硬度材を切削できる刃物は現在では CBN 工具のみとなった。超硬のノンコートチップでも切削は何とか出来たが、製品加工の途中で欠損してしまった。その他の工具では摩耗が激しく削る事さえできない状態であった。この事からも非常に難易度の高い切削で有る事が分かった。

CBN 工具は寿命がまだ完全な把握が出来ていないが、コスト面では問題が残る。

2-5-2 切削による平面度悪化の要因解析

平成 25 年度の結果から、各工程で平面度が大きく増加している傾向が見られた。切削による平面度悪化に対し、X 線応力測定器を使用し、その素材の表面残留応力の解析を実施した。

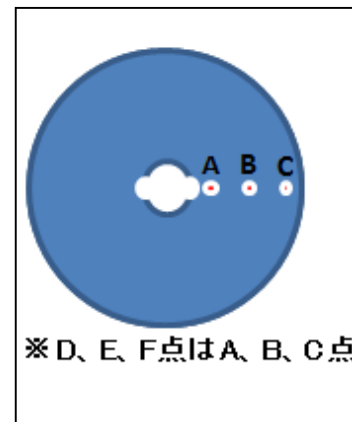


図 18 表面残留応力使用設備及び測定箇所

まとめ

各工程の表面残留応力を、図 9 の設備で測定した。

実験工程

～切削前～

i、単品→ii、治具貼り付け後

～切削後～

iii、切削後(第一工程)→iv、治具取り外し後→v、バキューム切削後(第二工程)

・表面残留応力結果 ～切削前～

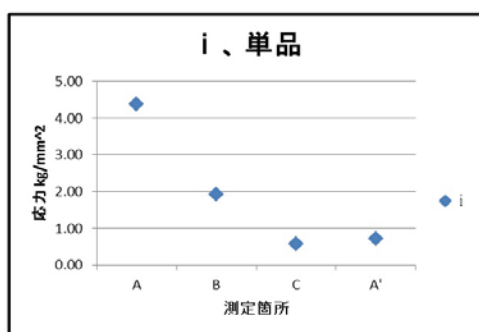


図 19 単品の残留応

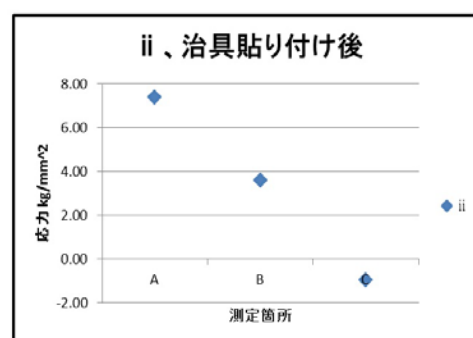


図 20 治具貼り付け後の残留

切削前の素材には大きな傾向は見られなかった。残留応力の差もわずかなので、変形には影響がないと考えられる。

・表面残留応力結果 ～切削後～

貼り付け切削後も同様に表面の残留応力の測定を行った。
結果は以下のような結果となることがわかった。

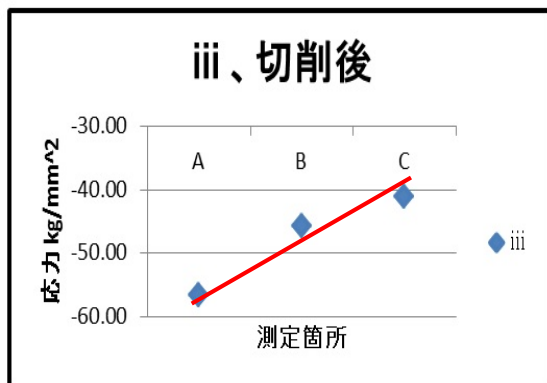


図 21 切削後の残留応力

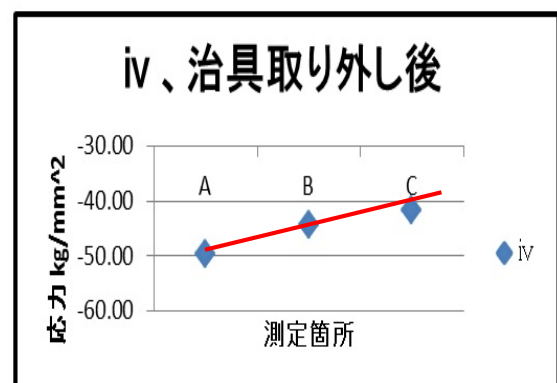


図 22 治具取り外し後の残留応力

上記より、切削により圧縮応力が生じこのことが平面度に大きく影響していることが確認できた。治具取り外し後に関しては、この影響から平面度が0.15と大きくなっていた。

エアーバキューム切削後も同様に測定を行った。最終工程のため貼り付け側の残留応力も測定した。この結果は以下の通りとなった。

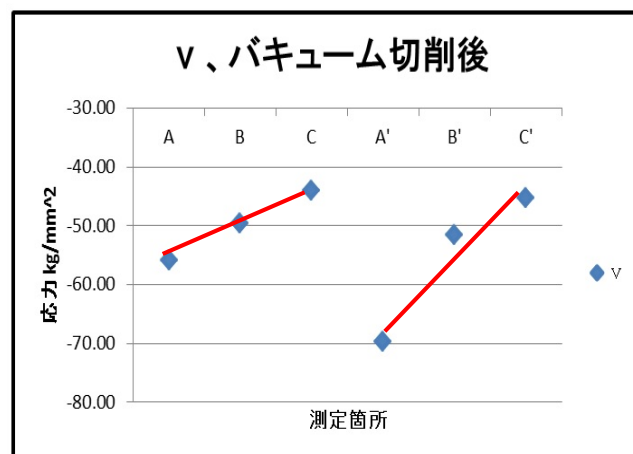


図 23 バキューム切削後の残留応力

数値から切削後は圧縮応力が生じる事が分かった。切削前と後での残留応力の程度が把握できた。切削方向の関係もあるが、分布図から外に進むに従い、応力差が減少していくのが分かった。

薄型ディスクの解析等のシミュレーションのために機械的性質の調査を実施した。
試験片には熱処理を加え、焼鈍材、調質材の 2 種類、試験片寸法は板厚 12mm×幅 50mm×長さ 200mm を使用し、曲げ試験を実施した。



曲げ試験用試験片



曲げ試験機

図 24 曲げ試験機及び試験片

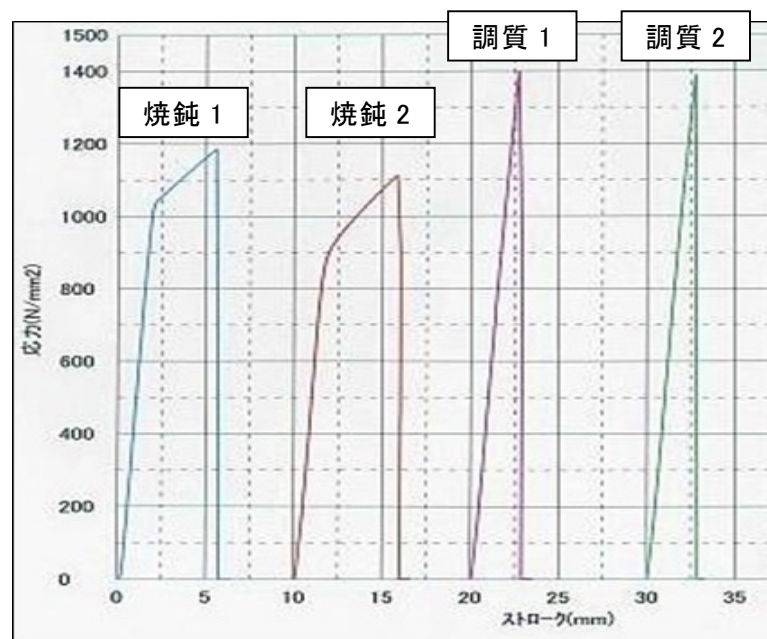


図 25 曲げ試験 測定結果

まとめ

試験結果から、調質材は焼鈍材の 2 分の 1 程度のストロークで破断した。焼鈍材と比べて、破断応力は 1.2 倍の値を示した。どちらの破断した応力もハイテン鋼と同様の応力値であった。

2-5-4 DCMX 機械的性質の測定 引張試験

薄型ディスクの解析等のシミュレーションのために機械的性質の調査を実施した。
試験片には熱処理を加え、焼鈍材、調質材の2種類、試験片寸法は JIS14A 号を採用し試験を実施した。

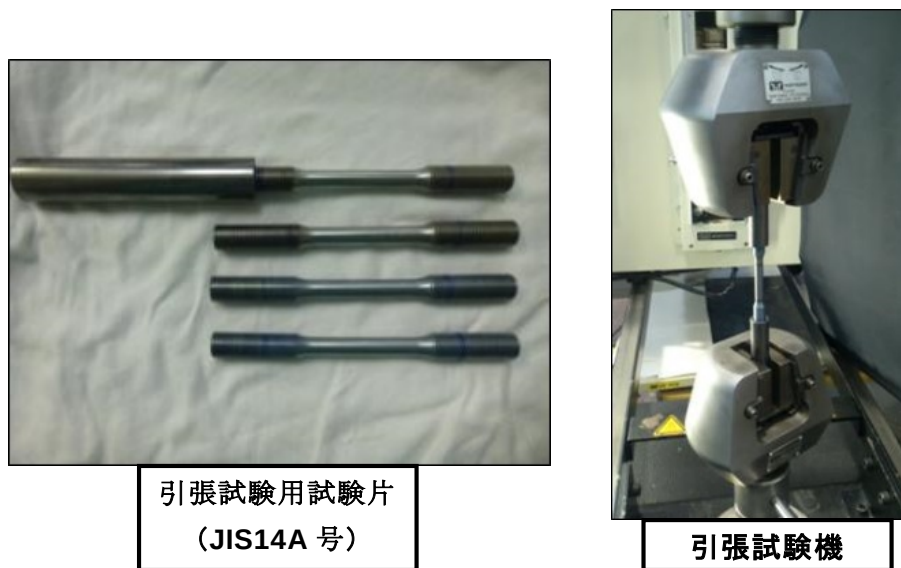


図 26 引張試験及び試験片

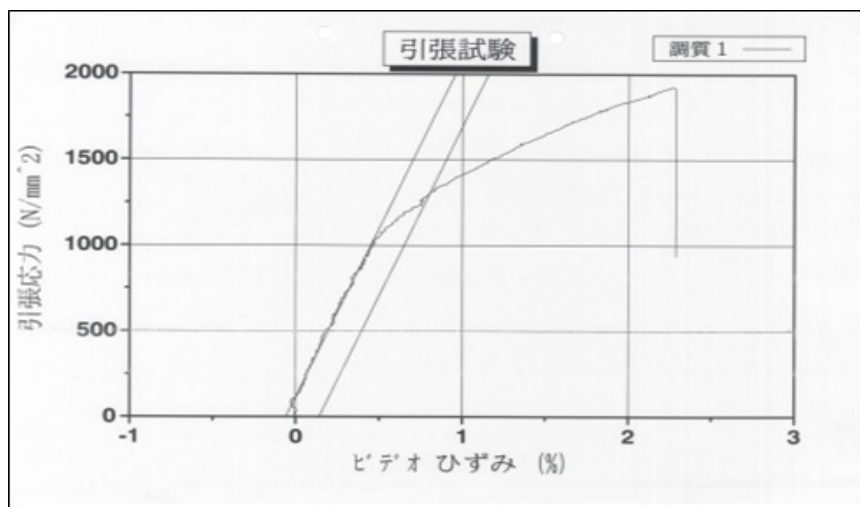


図 27 引張試験 測定結果

まとめ

試験結果から、調質材は焼鈍材の応力と比べ約 2.5 倍の高い強度が認められた。それと、調質材は降伏点が認められず、弾性域から変曲して塑性域に移り、破断した。
以上の事から、2-5-3及び2-5-4の結果から、焼鈍後は高張力鋼と同等であり、調質後の引張応力は超高張力鋼(1000MPa)以上の強度があることが確認出来た。

2-5-5 各工程別の表面の加工硬化

平成 25 年度の課題から、平面度の悪化に対する要因解析として、各工程別の表面の加工硬化について調査を実施した。試験方法はマイクロビッカース硬さ試験を採用し試験を実施した。



図 28 硬さ試験機及び測定箇所

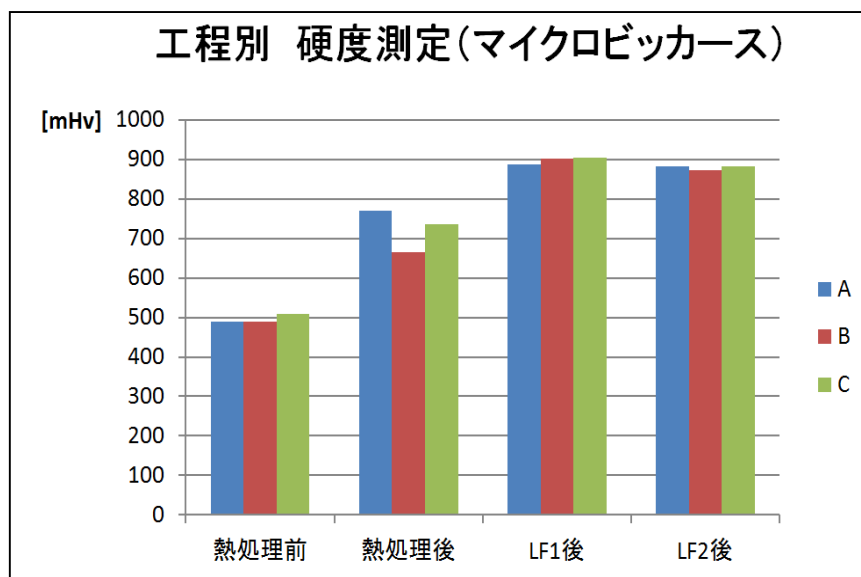


図 29 各工程の表面硬度の変化

まとめ

試験結果から、熱処理後と LF1, LF2 仕上げ加工後を比較してみると、硬度が増していることが分かる。これは切削による熱で材料に影響が出ている可能性が認められ、この事から切削熱が変形の要因の一つとして考えられる。

2-5-6 半径方向ならびに円周方向の応力測定

平成 25 年度実施した $\phi 224$ 薄肉ディスクの表面残留応力の解析から、以前は半径方向のみの測定だった。円周方向からの計測が未計測だったので、今回は円周方向からの計測を実施した。

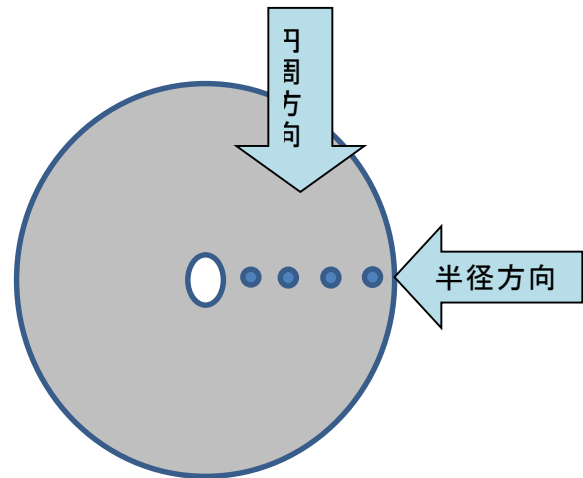


図 30 表面残留応力使用設備及び測定箇所

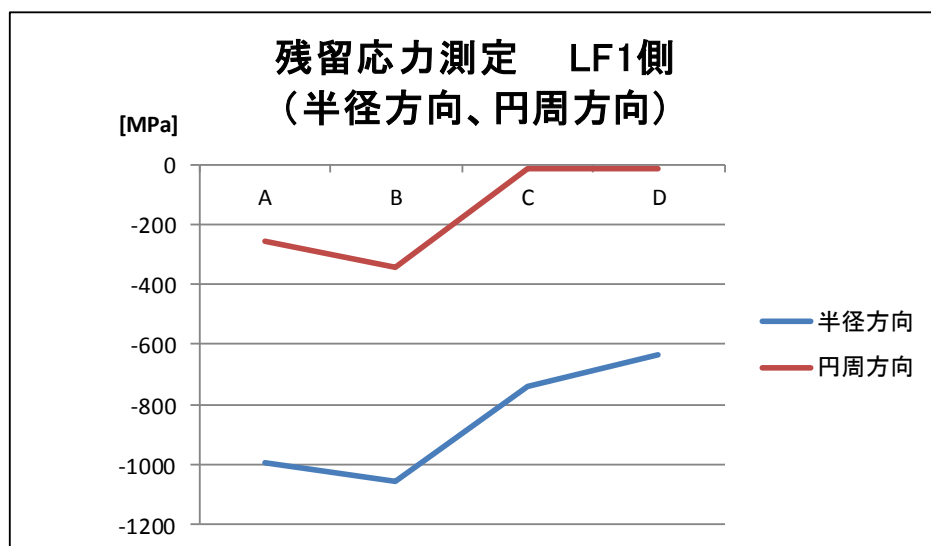


図 31 残留応力 測定結果

まとめ

半径方向の応力測定から圧縮成分の傾向が強く見られた。円周方向の内側(A,B)では圧縮応力、外側(C,D)では応力の残留が少ないことが認められた。結果からみると、測定誤差の範囲内で、円周方向では応力がないとも捉えることができる。このことから、半径方向の残留応力分布の把握が超高精度切削では重要であることが確認できた。

2-5-7 ワイヤークット後の各領域における変形測定

φ224 薄肉ディスクをリング状に切断し、さらにそれぞれ半径方向にワイヤーカットし、各領域における変形から応力分布を推察する。

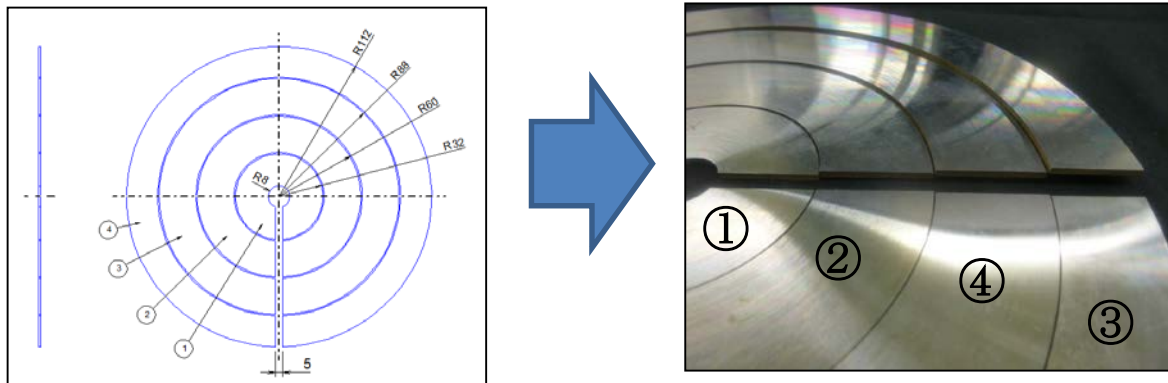


図 32 φ224 薄肉ディスク ワイヤーカット図面及び加工後

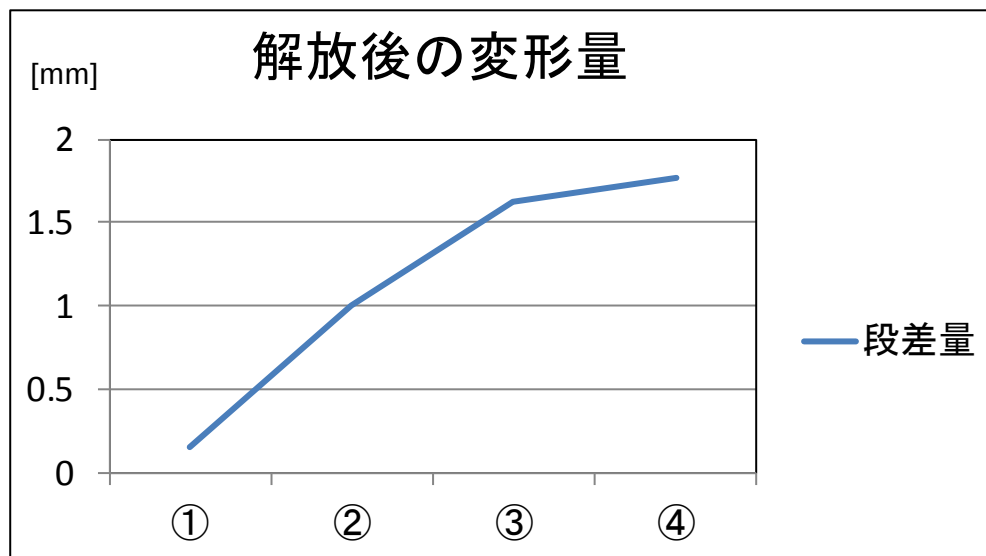


図 33 解放後の変形量

まとめ

φ224 薄型ディスクの半径が増大するにつれて、端面の段差量が増し、切削面の平面度を悪化させる。このことから残留応力の影響が認められた。

今期目標値に対する結果

材質DCMX 硬さHRC62 φ224 薄肉ディスク

目 標	外径 [mm]	内径 [mm]	板厚 [mm]	表面粗さ [Ra]	平面度 [mm]	加工時間 [分]
	224.0±0.02	16.0±0.015	1.20±0.02	0.2 以下	0.02 以下	15 分
結 果	244.00	16.005	1.22	0.16	0.012	20 分
達成率	◎	◎	◎	◎	○	○

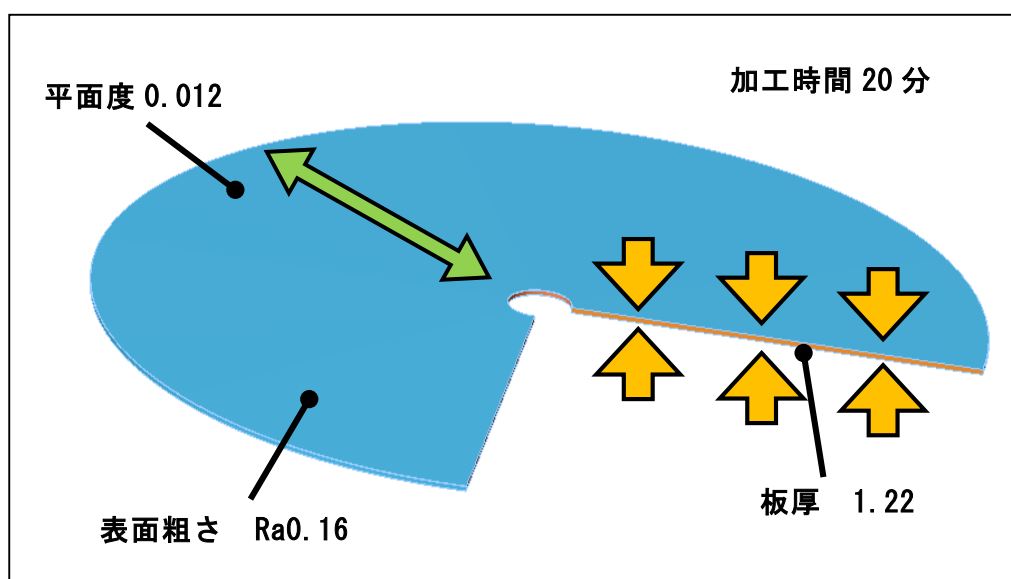


図 34 φ224 薄肉ディスク 3D カットモデル

まとめ

薄肉ディスクの保持方法の確立により平成 26 年度は更に薄い 1.2mm の保持に成功した。切削でも最適切削条件、加工工程を見つけることに成功した。上記結果から、研磨レス超精密切削加工技術を確立させた。

目標値の視点から外径、内径、板厚、表面粗さに関しては目標を達成した。しかし、平面度はオンマシン測定上での数値、加工時間は目標に届かなかった。

平成 25 年度同様に平面度の数値が一枚一枚変化する、コントロールすることが出来ず、今後の課題として残す形となった。そこを上手にコントロールすることが実用化への大きな一歩だと認識できた。本研究は切削加工が材料に与える影響、その影響が発生する要因などを可視化することが出来た。

第3章 総括と展望

3-1 全体総括

平成 26 年度は高精度オンマシン測定装置を導入し、平面度測定の高精度化、実用化への時間短縮を図ると共に、平成 25 年度導入した薄肉切削専用加工装置を用いて平成 26 年度目標である、外径 $\phi 224\text{mm}$ ・板厚 1.2mm ・平面度 0.02mm 以下・面粗さ $Ra0.2$ 以下を満たす薄肉ディスク形状部品の切削加工に臨んだ。

貼り付け法の研究では平成 24 年度からの継続とし、 $\phi 224$ 薄型ディスク形状部品に最適な接着保持治具の作製を行い、加工中の剥離無く切削を成功させた。

エアバキューム法の研究では吸着力の剥離実験を行い、切削加工における最適な吸着力を決定、これを基に、治具の構造、吸着面の形状などを検討した。平成 24 年度からのデータを利用し薄肉切削専用加工装置の改造を実施し、 $\phi 224$ ・板厚 1.2mm の保持を可能としたエアバキューム構造を完成させた。

平面度及び面粗さの計測技術の確立させる研究では非接触レーザー測定装置を使用し、切削後の形状をデータとして次工程の加工プログラムに反映し、切削加工を行うことに成功した。平成 26 年度導入した高精度オンマシン測定装置では着脱の時間短縮、測定精度の向上を可能とした。

切削加工熱の影響を低減する方法の研究については、平成 25 年度の切削実験の分析結果から平成 26 年度目標値を達成する上で高圧クーラントでの切削加工が最適と判断した。しかし切削熱を完全に除去する点から見ると、今後の大きな課題となるであろう。

超高精度切削加工技術の研究では、平成 24 年度から平面度の悪化に対する要因解析として、平成 25 年度は X 線応力測定器を使用し、表面残留応力の測定を実施、またマトリクスダイス鋼の機械的性質データが存在していないため、試験片を作製し、曲げ試験及び引張り試験を実施し解析を行った。平成 26 年度は各工程別の表面の加工硬化について解析した。熱処理後と表裏加工後では硬度が増していることが確認できた。このことから切削による熱が材料に影響を与えている可能性があることと認められ、切削熱が変形の要因の一つとして考えられる。

また、表面残留応力の円周方向からの測定も実施した。半径方向のみならず、円周方向の数値化にも成功した。その後に $\phi 224$ 薄肉ディスクをワイヤーカットし、応力解放後の各領域別の変形量も確認することができ、平面度に与える影響などの理解がより深まった。

平成 24 年度から問題視されている様々な要因解析、試験を行い、今期目標値の高硬度の材料 $HRC62$ ・外径 $\phi 224$ ・内径 $\phi 16$ ・板厚 1.2 ・平面度 0.02 ・表面粗さ $Ra0.2$ ・加工時間 15 分という世界初の切削加工に挑んだ。この未知の領域とも言える規格を平面度、加工時間以外達成できたのは、これまでに培ってきた研究の成果である。この規格を切削加工で達成すれば、切削加工の道が更に広がり、また新たな領域への道が開くと思う。この研磨レス超精密加工技術の確立により、切削加工業界の発展と貢献に大きく繋がるであろう。

3-2 事業化への取り組み

一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構の事業管理機関の元、群馬大学・産業技術センター・九州工業大学、さらに山岸製作所と複数の共同研究体によって構成されていたが、各事業年度における委員会を実施、さらに月１回のものづくり研究機構・山岸製作所とのすり合わせによって、ほぼ 100%の研究開発が実施できた。今後は、この成果を元に、2015 年に向けて本研究の事業化に向けて、自動車メーカーからの受注を実現する予定である。さらにこの技術を応用して、2016 年までに航空機産業に進出し、受注拡大を実現する予定である。