

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

医療用難削小物部品加工用高精度超小型ミーリングセンタの開発

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 東北経済産業局

委託先 特定非営利活動法人産学金連携センター

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	2
1-2 研究体制	7
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1-2-1 研究組織及び管理体制	7
1-2-2 研究員及びプロジェクト管理員(役職, 実施内容別担当)	8
1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	9
1-2-4 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項	9
1-3 成果概要	9
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	12

第2章 本論

2-1 超小型工作機械の設計コンセプトの刷新	13
2-1-1 立形から横形への技術展開	14
2-1-2 オーバーハングの抑制及びシンメトリックデザイン的设计	14
2-2 機械精度の向上	15
2-2-1 構成部材の機械加工精度の向上	15
2-2-2 スピンドルの高速化及び高精度化に伴う振動抑制	19
2-2-3 スライドの位置決め精度の向上	21
2-3 小物難削材の切削加工技術の確立(東京大学、産学金連携センター)	27
2-3-1 切削工具の選択(超小型ミーリングセンタ用工具選択)	28
2-3-2 切削実験(コーテッド超硬エンドミルの工具摩耗)	33
2-3-3 切削実験(コーテッド超硬エンドミルによる仕上げ面粗さ)	38
2-3-4 切削実験(PCDエンドミルの工具摩耗)	39
2-4 今後の課題	40
2-5 参考	41

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

1-1-1 研究開発の背景

骨用ねじや接合部材、人工関節、歯科用器具など医療用小物難削部品の高精度加工ニーズに対応するため、小物高精度部品の加工は小型機が適するとの設計思想に基づき、構成部材の加工精度向上、スピンドルの振動抑制、切削加工技術等の開発により、世界最小の機械幅 600mm、奥行き 1700mm、高さ 1750mm 以下の高精度超小型横形ミーリングセンタを実現し、川下企業へ省エネルギー、低コストな加工システムを提供する。

超小型の横形ミーリングセンタは、スピンドル軸が水平で、構成部品が重力の影響を受け、振動が大きくなりやすい。また、小型化により機械構成各部の剛性が小さくなり、案内精度を実現することが困難で、世界中で未だ実用化されていない。横形は立形に比べ構造が複雑で、精度の実現のために工数が掛かるため、一般的に横形の機械製作コストは同等仕様の立形マシニングセンタに対して約 1.5 倍以上になると言われている。株式会社長谷川機械製作所では、これまで培ったものづくり技術の蓄積のもとに振動や精度向上を実現する加工装置や測定装置を導入するとともに、福島工場全体の生産技術を向上させ、このトレードオフの克服により、以下の課題に対応する。

① 高性能な世界最小のマシンスペースの実現

医療用難削部品の加工可能なマシニングセンタは立形マシンで機械幅 2250mm、奥行き 2300mm、高さ 2300mm が市場化されているが、開発機械は、小物部品を視野に 1/4 の機械幅 600 mm、奥行き 1700mm、高さ 1750mm、占有床面積を 1 m²程度に設定し、ユーザー・ニーズに対応する。

機械性能を発揮させるため、設計コンセプトを根本から見直し、主軸を立形から横形に変える。立形の場合、構造上機上部に主軸や駆動制御機器が集中し、保守性や改善を加える際のネックになること及び加工くずがたまりやすく長時間運転が難しいという課題がある。横形ミーリングセンタは切りくず処理が容易なことから MQL 切削など環境対応型切削加工技術が可能で難削材加工の大問題の切粉の対応が進む。

さらに横形機では、a:加工精度向上(穴加工やポケット加工などの際切粉が排出されやすくなり、加工精度が向上)、b:自動化(立形では、加工物上方に主軸があるが、横形の場合加工物上方に障害となるものが存在しないので、機械自身への自動化装置の配置が容易となり、ガントリーローダや天吊り型走行ロボットなどによる自動化が容易)、c:高拡張性(回転テーブルを追加することにより、同時に 1 面以上の加工が可能)などのメリットが得られる。

② 大型機と同様の高精度と高剛性の維持

超小型で大型機と同様の高精度を発揮させるため、超小型化と剛性と案内精度のトレードオフの克服が大きな課題である。このため、a:構成部材の機械加工精度向上、b:スピンドルの高速化に伴う振動の抑制、c:スライドの位置決め精度向上の各項目について技術開発を行う。

構成部材については機械加工部品の直進度・平行度・直角度を確保するため部材の形状、材料選択の最適化、部品の製作・仕上げ精度の向上の基本に立ち返り、高精度の実現を図る。スピンドルは高速化に伴う振動を抑制し、横形であっても立形と同様の 30,000rpm の高速化を実現する。スライドの位置決め精度の向上のため最適なスライド機構、材料選択、組立精度の向上を図る。

③ 医療用小物難削材の切削加工技術の確立

医療用小物部品に多く用いられるチタン合金の高速高精度加工技術を確立するため、切削工具の選択、最適な切削条件、クーラントの供給条件など小物加工に適した切削加工技術を模索する。これらを通じて高精度超小型の横形ミーリングセンタを短期間で開発する。

1-1-2 研究の概要

本研究開発では、高精度な機上、機外計測技術と高精度加工技術を導入と熟練技術者の技能との融合化、さらには最適な難削材切削加工技術の実現、統合によりコンパクト化と同時に高い動剛性と高い案内精度、高速化を満足する超小型横形ミーリングセンタを開発するため以下の4項目の課題を設定し、計画的な研究開発を行う。

- ① 超小型工作機械の設計コンセプトの刷新
- ② 機械精度の向上
- ③ 小物難削材の切削加工技術の確立
- ④ 加工精度評価、フィードバック評価

1-1-3 実施内容

各開発項目の目標及び内容は以下のとおりとする。

① 超小型工作機械の設計コンセプトの刷新(株式会社長谷川機械製作所)

機械サイズ:600×1700×1750mm(幅×奥行き×高さ)、ストローク:X軸 150mm、Y軸 200mm、Z軸 200(+50ATC)mmを満たす超小型横形ミーリングセンタを実現するため、以下の通りの設計コンセプトを確立し、試作機械を組み立てる。

①-1 立形から横形への技術展開(株式会社長谷川機械製作所)

- ・長谷川機械製作所が超小型立形ミーリングセンタの開発時に取得した技術である HSK30 タイプの高速回転仕様主軸を横形に配置することで発生する問題点を考察し、その対応策を講じる。
- ・立形から横形へ構造変化による機構の複雑化や機械コストの上昇を抑えるべく、部品点数の削減や形状の簡素化に努め、横形のメリットであるチップフローと自動化を有効に活用すべく、機械の切粉口を大きくするような考慮や、ローダーの装着が簡単に行える構造に設計する。

①-2 オーバーハングの抑制及びシンメトリックデザインの設計(株式会社長谷川機械製作所)

- ・機械の超小型化と機械剛性を両立させるため、機械設計における原理原則であるオーバーハングの抑制とシンメトリックデザインに忠実な設計をするため、機械中心に主軸を配

置し、コラムやベッド、テーブルなどの主要部品も機械のセンターラインから均等に配置する。

・部品を組立ての際、部品各々の重心が安定するよう突出量を最小限に抑える設計をする。

② 機械精度の向上(株式会社長谷川機械製作所)

横形マシンで必要とされる精度を実現するため、以下の各要素について機械精度の向上を図る。

②-1 構成部材の機械加工精度の向上(株式会社長谷川機械製作所)

従来から長谷川機械製作所が所有する切削加工機に加え、株式会社長谷川機械製作所福島工場内に導入するテーブル型横中ぐりフライス盤を積極的に用いて機械加工部品のL=300mmに対する直進度・平行度・直角度を現状の $4\mu\text{m}$ 以下から $2\mu\text{m}$ 以下、組立て時の調整工数を1/2とするための、高性能な部材加工を行う。

②-2 スピンドルの高速化及び高精度化に伴う振動抑制(株式会社長谷川機械製作所)

・スピンドルを毎分30,000回転させた際の振動量を現状の $1.4\text{m/s}^2\text{r}$ から $0.5\text{m/s}^2\text{r}$ 程度に抑制するため、長谷川機械製作所が所有するFFT測定器にフィールドバランシングソフトウェアを導入する。導入したソフトウェアを用いてスピンドルの振動特性を解析し、スピンドルの重量バランスを調整することで振動を抑制する。

・上記解析結果を踏まえてスピンドルを開発する。

・開発されたスピンドルは試作機に組み込む。

②-3 スライドの位置決め精度の向上(株式会社長谷川機械製作所)

・X, Y, Zの各軸ストローク間で位置決め精度 $1.5\mu\text{m}$ 以下とし、繰り返し精度は $1\mu\text{m}$ 以下とするスライドの位置決め精度実現の方策を検討する。

・株式会社長谷川機械製作所福島工場内に導入する高感度のレーザー干渉測定器を活用し、スライドが上記の構成部材の機械加工精度の向上やオーバーハングを抑制した設計により高精度に組立てられていることを確認する。

③ 小物難削材の切削加工技術の確立

(株式会社長谷川機械製作所、国立大学法人東京大学生産技術研究所)

・高精度、高速の超小型横形ミーリングセンタに適合する切削加工工具の選択、加工条件を確立する。

・長谷川製作所がこれまでに開発した超小型ミーリングセンタを東京大学生産技術研究所へ移設し、この実機を用いて環境対応型のMQL切削を中心に、最適な切削条件を探索の基盤を確立する。

③-1 切削工具の選択(国立大学法人 東京大学生産技術研究所)

・医療用小物部品に多く用いられるチタン合金の高速高精度加工に最適な微細・小径工具(超硬、ダイヤモンド等)を選択するため、小径エンドミルによるチタン合金の高速加工の切削加工切削について実機に想定される加工条件を想定した要素技術開発を行う。

- ③-2 切削条件の最適化(株式会社長谷川機械製作所、東京大学生産技術研究所)
 - ・実機を使用し、環境対応型の MQL 切削を中心に、最適な切削条件を探索する。川下企業に工作機械と加工条件をセットで提供することを目標とする。
 - ・直径1～3mm程度の小径エンドミルによるチタン合金の高速加工、さらには、自動車部品や電機・光学部品へ適用を想定したダイヤモンドコーテッド微小エンドミルによる CFRP の穴加工、アルミ合金のダイヤモンド切削も実施し、切削条件の評価を行う。
- ④ 加工精度評価、フィードバック評価(株式会社長谷川機械製作所、東京大学生産技術研究所)

試作機械に切削工具を搭載し、ユーザースペックを満たす加工ができるかを評価し、設計、機械製作、要素部材の精度向上等にフィードバックする

 - ④-1 加工精度評価(株式会社長谷川機械製作所、東京大学生産技術研究所)
 - ・試作機でテスト加工を行い、長谷川機械製作所が所有する各種測定機を用いて加工精度を評価する。
 - ・長谷川機械製作所福島工場内にデジタルマイクロスコープを導入し、これまで評価することが出来なかった被加工面の状態や、切削刃具の状態を評価する。
 - ④-2 フィードバック評価(株式会社長谷川機械製作所、東京大学生産技術研究所)
 - ・ユーザーの定めるスペック数値内の部品加工が行えるよう、加工条件や刃具の選定に必要なデータ検証し、ユーザースペックへ対応する。
- ⑤ 研究全体の統括、プロジェクトの管理運営(特定非営利活動法人産学金連携センター)

研究を円滑に推進するため、特定非営利活動法人産学金連携センターがPL、SLと協議して必要な調整を行い、計画全体を統括する。また、必要に応じ、知的財産権の保護や事業化に必要な事項について関係者の意向や技術動向等を参考にしつつ調査を行う。

 - ⑤-1 全体計画の企画(特定非営利活動法人産学金連携センター)
 - ・プロジェクト全体の計画を踏まえながら、年度ごとの研究計画をPL、SLと協議し、また適宜アドバイザーの意見を聴取し企画、策定する。
 - ⑤-2 進捗管理(特定非営利活動法人産学金連携センター)
 - ・PL、SL及び再委託先と緊密な連携をとり、プロジェクトの円滑な遂行を図る。
 - ⑤-3 プロジェクト委員会の開催(特定非営利活動法人産学金連携センター)
 - ・研究の効果的推進と関係者間の知識、意見の共有を図るため、プロジェクト委員会を開催する。
 - ⑤-4 報告書とりまとめ(特定非営利活動法人産学金連携センター)
 - ・研究開発成果報告書のとりまとめを行う

1-1-4 所在地

①事業管理機関

特定非営利活動法人産学金連携センター(最寄り駅:東京メトロ 丸の内線新大塚駅)

〒170-0005 東京都豊島区南大塚2丁目14番12号 YSビル101号室

②研究実施場所

株式会社長谷川機械製作所福島工場(最寄り駅:JR東北本線 新白河駅)

〒961-8091 福島県西白河郡西郷村熊倉字折口原415

国立大学法人東京大学 生産技術研究所(最寄り駅:小田急線 東北沢駅)

〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

1-1-5 研究開発期間 平成23年10月1日から平成26年3月31日まで

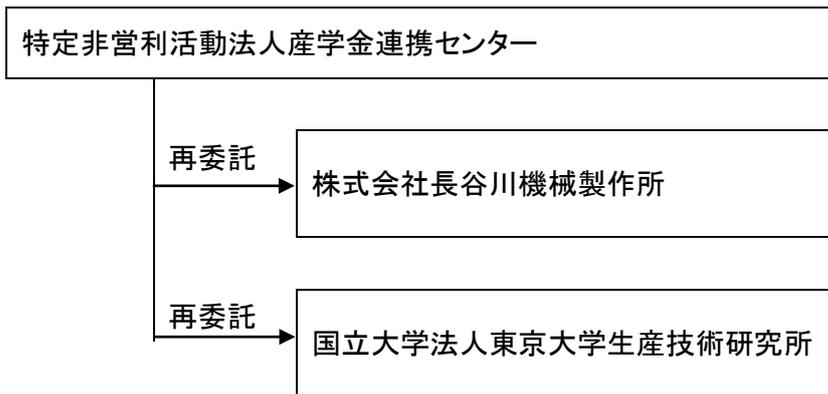
1-1-6 実施計画日程

【番号】実施内容	実施者	実施時期											
		初年度				第二年度				第三年度			
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
【1】超小型工作機械の設計コンセプトの刷新		全体コンセプト、要素課題の開発				開発状況を踏まえ追加設計、調整							
【1-1】立形から横形への技術展開 【1-2】オーバーハングの抑制及びシンメトリックデザイン的设计	長谷川機械製作所												
【2】機械精度の向上		鋼製部材等の製作・測定・調整				製作・測定・調整 機械全体との調整							
【2-1】構成部材の機械加工精度の向上 【2-2】スピンドルの高速化及び高精度化に伴う振動抑制 【2-3】スライドの位置決め制度の向上	長谷川機械製作所												
【3】小物難削材の切削加工技術の確立。		要素研究				実機の切削性研究				改善研究			
【3-1】切削工具の選択 【3-2】切削条件の最適化	東京大学 長谷川機械製作所												
【4】加工精度評価、フィードバック評価										評価結果をフィードバックする			
【4-1】加工精度評価 【4-2】フィードバック評価	長谷川機械製作所 東京大学												

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織及び管理体制

(1)研究組織(全体)



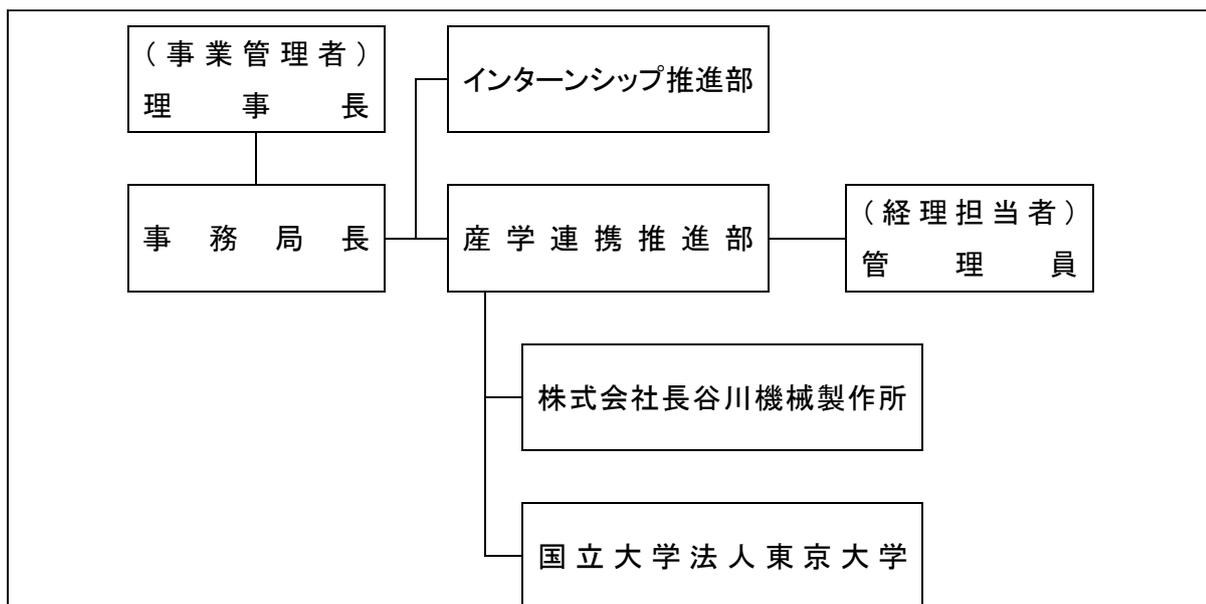
総括研究代表者(PL)
 所属: 株式会社長谷川機械製作所
 役職: 取締役技術部長
 氏名: 真船 繁美

副総括研究代表者(SL)
 所属: 国立大学法人東京大学生産技術研究所
 役職: 教授
 氏名: 帯川 利之

(2) 管理体制

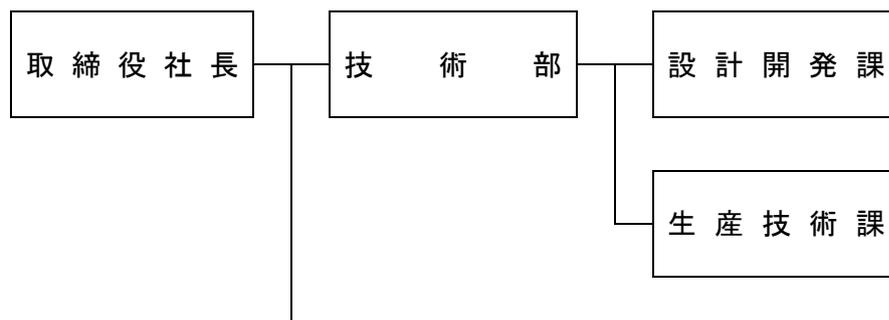
① 事業管理機関

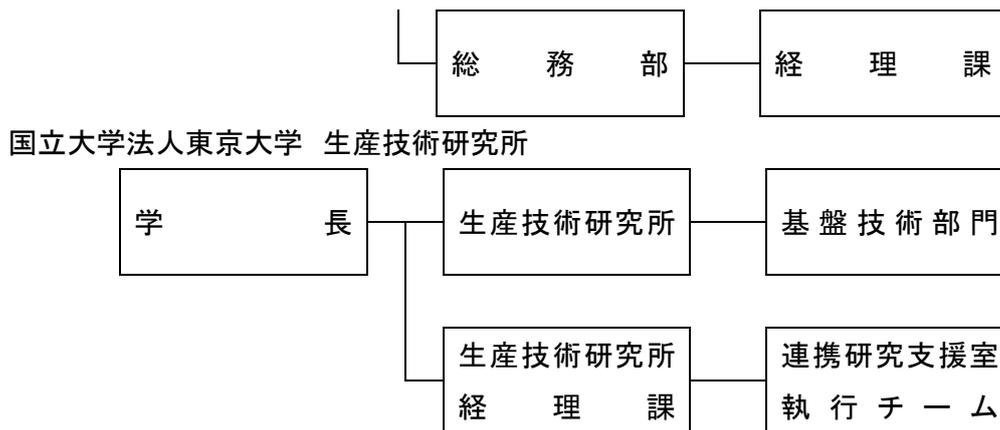
[特定非営利活動法人産学金連携センター]



② (再委託先)

株式会社長谷川機械製作所





1-2-2 管理員及び研究員(役職、実施内容別担当)

【事業管理機関】特定非営利活動法人産学金連携センター

① 研究員

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
大野 龍巳	産学連携推進部研究員	③
中司 龍太	産学連携推進部研究員	③
櫻井 一孝	産学連携推進部研究員	③

② 管理員

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
小島 彰	産学連携推進部主席研究員	⑤
浜田 ちひろ	産学連携推進部管理員	⑤
佐藤 麻子	産学連携推進部管理員	⑤

【再委託先(研究員)】

株式会社長谷川機械製作所

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
真船 繁美	取締役技術部長	①、②、③-2、④ PL
小針 俊則	設計開発課	①、④
日高 邦友	設計開発課	①、④
沼野 大輔	設計開発課	①、④
岡崎 守雄	生産技術課	②、③-2、④
小林 洋平	生産技術課	②、③-2、④

国立大学法人東京大学 生産技術研究所

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
帯川 利之	生産技術研究所教授	③、④ SL

1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理機関】

特定非営利活動法人 産学金連携センター

(経理担当者) 管理員 佐藤 麻子

(業務管理者) 理事長 小島 彰

【再委託先】

株式会社長谷川機械製作所

(経理担当者) 総務部経理課長 松山美恵子

(業務管理者) 代表取締役社長 長谷川 透

国立大学法人東京大学

(経理担当者) 経理課 連携研究支援室 企画チーム 赤池 真

(業務管理者) 生産技術研究所 機械・生体系部門 帯川 利之

1-2-4 他からの指導・協力者名および指導・協力事項

アドバイザー

氏名	所属	指導・協力事項
中西英一	株式会社ナカニシ代表取締役	開発機械のユーザーとしての立場から要求スペック、使い勝手等について専門的意見をもらう
大下秀男	株式会社アライドマテリアル顧問	難削材料加工用工具選定について専門的意見をもらう

1-3 成果概要

1-3-1 超小型工作機械の設計コンセプトの刷新

23年度に試作機構想段階でのモックアップを製作し、試作機の基本構造を検討した。24年度にはモックアップでの検討結果を基に図面を展開し試作機を組み立てた。試作機は平成24年11月に東京ビックサイトで開催された日本国際工作機械見本市(JIMTOF2012)に出展し、平成25年10月には名古屋国際展示場で開催されたメカトロテックジャパン2013に出展した。

① 立形から横型への技術展開

- ・ 目標としていた立形同様の機械サイズ 600×1700×1750(幅×奥行×高さ)に対して、試作機のサイズは600×1700×1800となり、高さが50mm大きくなったが、床面積では目標値内にすることができた。
- ・ ストロークに関しては目標通りのX軸 150mm、Y軸 200mm、Z軸 200mmを達成した。
- ・ 高速回転仕様の主軸に関して、立形と同仕様の主軸を搭載した。
- ・ X軸部は部品を全て立形と共通化し部品の簡素化を達成した。また、切粉口の拡大やローダーの装着性を高めた構造にて試作機を製作した。

② オーバーハングの抑制及びシンメトリックデザインの設計

- ・ 機械中心に主軸を配置し、コラムやベット、テーブルなどの主要部品をシンメトリックに配置する構造とした。また、部品各々の重心が安定するよう、部品組立時のオーバーハン

グ量を最小限にした形状にて試作機を製作した。

1-3-2 機械精度の向上

機械精度の向上は 23 年度に導入した横ぐりフライス装置を活用した高精度の加工及びレーザー測定器を用いた加工精度の計測により、高精度な部材加工が可能となった。これにより目標としていた精度、スピンドルの振動抑制を図ることができた。

① 構成部材の機械加工精度の向上

23 年度に導入した横中ぐり盤(東芝機械製)を用いて、試作機の構成部材を加工した。部品長さ 300mm に対する直進度・平行度・直角度を導入前の $4\mu\text{m}$ から $2\mu\text{m}$ とすることを目標としたが、 $2\mu\text{m}$ 以下を達成した。それに伴い、組立時の擦り合わせ工数を $1/2$ にする目標も達成した。

② スピンドルの高速化及び高精度化に伴う振動抑制

- ・ 高精度なバランス調整を行うため、現状の測定器にフィールドバランスソフトウェアを導入した。
- ・ 振動量の目標値は $0.5\text{m/s}^2\text{r}$ 以下であるが、試作機にてバランス調整を行い $0.47\text{ m/s}^2\text{r}$ を達成した。

③ スライドの位置決め精度の向上

- ・ 23 年度に導入した高感度レーザー干渉測定器を用いて、試作機の位置決め精度、ヨーイング、ピッチング、真直度の測定を行った。
- ・ X, Y, Z の各軸ストローク間で位置決め精度 $1.5\mu\text{m}$ 以下とし、繰り返し精度は $1\mu\text{m}$ 以下とするスライドの位置決め精度を実現した。

1-3-3 小物難削材の切削加工技術の確立

① 切削工具の選択

チタン合金を主体とする小物部品の加工を対象として超小型ミーリングセンタで使用する推奨工具と推奨切削条件について研究を実施した。医療用部品の被削材の中で特にチタン合金は、工作機械、切削工具、切削加工技術の数十年来の発展にもかかわらず、未だに工具寿命が短く、切削トラブルの発生しやすい素材である。

そこで、3 社の工具カタログに基づいてチタン合金用のエンドミル全体を幅広く調査し、特に小径のスクエアエンドミルについて推奨切削条件を抽出した。

② 切削条件の最適化

小径エンドミルの最適な切削条件を選択するためには、工具寿命試験のデータが必要であるが、学術論文を含めても公開されているものが極めて少ないことが明らかとなったため、切削条件の最適化の研究を実施するためには、少なからず工具寿命試験を行うことが不可欠である。このため、工具寿命のデータを取得した。実験用切削装置で研究を実施してきたが、24、25 年度は長谷川機械製作所から東京大学へ実機が搬入し、実機を用いて研究を実施した。

1-3-4 加工精度評価、フィードバック評価

試作機械に切削工具を搭載し、ユーザースペックを満たす加工ができるかを評価した。試

作機による加工についてのユーザー評価は高く、開発終了以前に複数のユーザーから受注を受けることができた。

①加工精度評価

- ・ 試作機にてテスト加工を行い、高精度超小型の横形ミーリングセンタとしての機能を実現できることを評価した。
- ・ 被加工面の微細部分や刃具の状態について、表面粗さ等を鮮明に確認できるデジタルマイクロスコープを株式会社長谷川機械製作所福島工場内に導入し、既設の測定機と併用して加工精度評価を行った。

②フィードバック評価

- ・ 展示会で寄せられた来場者の意見や、長谷川機械製作所のユーザーからの意見を参考に、使い勝手の向上や改善点の検討を行った。
- ・ 試作機にて実機としての基本機能は実現できたので、個別のユーザースペックに対応できるよう、ローダー等のオプション機能の設定や、加工条件のデータの積み重ねを行う。

1-4当該プロジェクト連絡窓口

特定非営利活動法人産学金連携センター

産学連携推進部 小島彰

電話: 03-6902-0526

FAX: 03-6902-0546

E-mail: kojima.@isij.or.jp

【総括研究代表者】

〒961-8091 福島県西白河郡西郷村熊倉字折口原 415

株式会社長谷川機械製作所福島工場

取締役技術部長 真船 繁美

第2章 本論

2-1 超小型工作機械の設計コンセプトの刷新

本開発では、長谷川機械製作所が有する機械の小型化技術や主軸高速化の技術など、既存の立形ミーリングセンタで培った技術を応用し、医療用難削小物部品加工用の超小型ミーリングセンタとして、新たな横形ミーリングセンタを開発する。

23年度にモックアップにて開発機の基本構造を検討した。24年度に各軸の配置やATC部構造、カバーリングなどの図面を展開し試作機を組み立てた。試作機は、平成24年の日本国際工作機械見本市(JIMTOF2012)、平成25年のメカトロテックジャパン2013に出展した。試作機の仕様は下記の通りである。

開発目標としていた機械サイズ600mm×1700mm×1750mm(幅×奥行×高さ)に対して、機械高さが50mmアップの1800mmとなったが、機械の占有床面積としては開発目標を達成している為、機械仕様としては差し支えない。各軸のストロークは開発目標を達成した。

表2-1-1 試作機の主要仕様

項目		仕様	単位
主軸	端形状	HSK-E32	
	回転数	100~30,000	min ⁻¹
	電動機	3.0/4.5	kW
ATC	工具収納本数	14	本
	工具選択方式	近回りランダム	
	工具最大寸法	φ40×L150 主軸端からの長さ	mm
	交換時間	1.9	sec
テーブル	サイズ	300×260	mm
	許容積載重量	80	kg
	主軸端からテーブル中心まで	150~350	mm
軸仕様	X軸ストローク	150	mm
	Y軸ストローク	200	mm
	Z軸ストローク	200	mm
	早送り速度 X,Y,Z共通	30	m/min
外寸(幅×奥行×高さ)		600×1700×1800	mm
機械重量		1650	kg
制御仕様		FANUC 0i-MD	



図2-1-1 試作機械のモックアップ写真

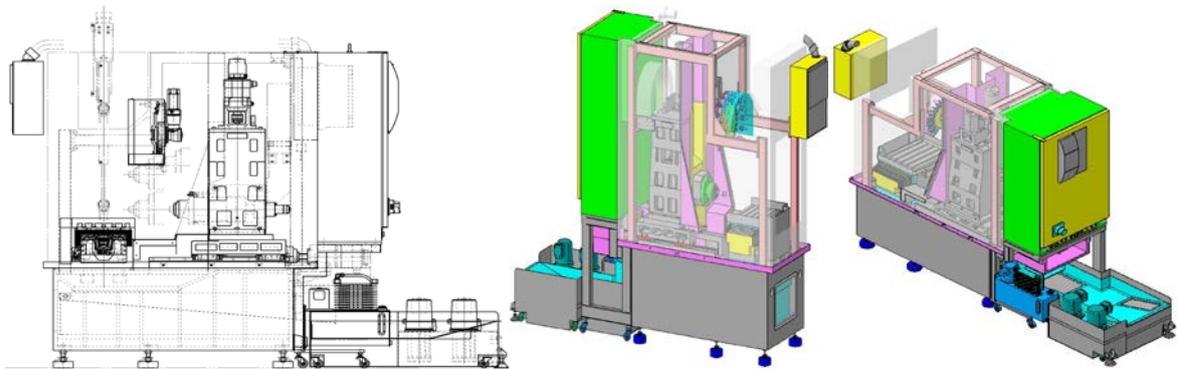


図2-1-2 試作機械の構想図

2-1-1 立形から横形への技術展開(長谷川機械製作所)

開発機の初期構想では、既存の立形ミーリングセンタと同じコラム移動型構造ではなく、テーブル移動型であったが、23年度に製作したモックアップにて検討を行った結果、下記の利点からコラム移動型にて開発を行った。

- 1) Z軸を分離することでテーブル高さが低くなり、剛性と安定性を高めることができる。
- 2) Z軸とY軸は直交動作のみとなるため、精度調整が簡素化できる。
- 3) X軸部(テーブル部)は立形ミーリングセンタと共通化できる。

24年度には下記の内容にて設計及び試作機の製作を行った。

- 1) 既存の立形ミーリングセンタの基本構造であるコラム移動式と同様の構造とした。
- 2) 脚部(機械ベース部)は立形と共通寸法(幅600mm×奥行1200mm×高さ470mm)とし、クーラントタンクの設置構造も立形と共通化とした。
- 3) 主軸部及びX軸部(テーブル部)の仕様は立形と同等とし、構成部材の共通化を図った。
- 4) コラム形状は既存の複合加工機<KM250>と同じ構造とした。
- 5) ATC部は主軸上部に設置し、Y軸・Z軸の移動によりツール着脱を行う構造とした。工具収納スペースが拡大したことで、工具収納本数を立形の10本から14本に変更した。



図 2 - 1 - 4 試作機組み立て時の様子



図 2 - 1 - 5 日本国際工作機械見本市（平成 24 年 11 月）



図 2 - 1 - 6 メカトロテックジャパン（平成 25 年 10 月）

2-2 機械精度の向上

2-2-1 構成部材の機械加工精度の向上（長谷川機械製作所）

機械加工部品のL=300mmに対する平行度、真直度、直角度を現状の $4\mu\text{m}$ 以下から $2\mu\text{m}$ 以下とすることで、組立て時の調整工数を1/2にするという開発目標の達成を確認する為、既存機（東芝中ぐりフライス盤：BTD-11H.R16）と23年度の導入機（東芝中ぐりフライス盤：BTD-110H.R16）にてダミーワークを加工し（写真1、2）、長谷川機械製作所が所有する東京精密製三次元測定機（SVA600A）を用いて精度確認を行った。ダミーワークの形状（図1）、加工条件（表1）は次の通りである。

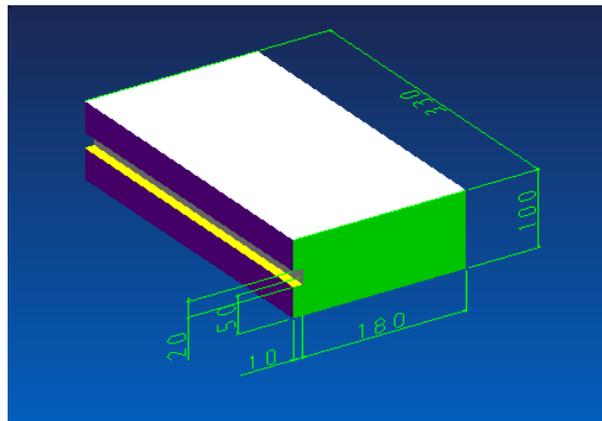


図 2-2-1 ダミーワーク

加工部	刃具	仕上代 (mm)	S	F
緑部	φ125 フェイスミル	0.5	300	300
紫部	φ125 フェイスミル	0.5	300	300
黄部	φ20 エンドミル	0.05	600	100

表 2-2-1 加工条件

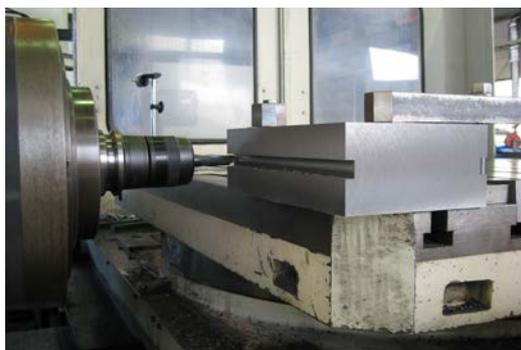


図 2-2-2 既存機加工風景



図 2-2-3 導入機加工風景

また、新規導入した東芝中ぐりフライス盤 (BTD-110H.R16) ではタッチプローブによる機上測定も行った(写真 3)。



図 2-2-4 機上測定風景

三次元測定は下記のように行った。

- ①基準面 A に対する溝下面平行度
- ②溝下面部真直度
- ③B に対する直角度

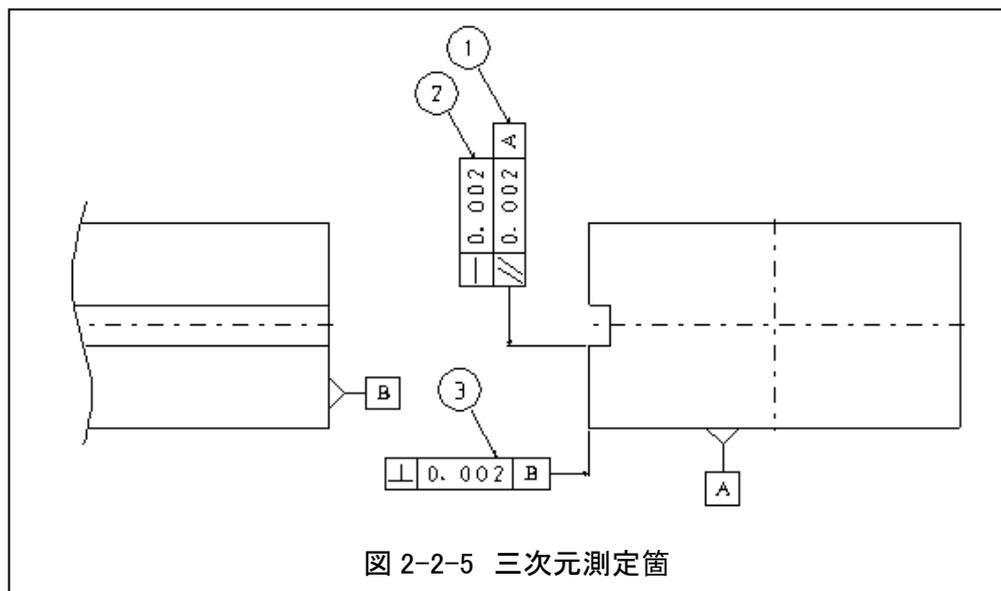


図 2-2-5 三次元測定箇所

①平行度測定結果(基準面(A部)に対する溝下面部の平行度測定)

新規導入した東芝中ぐりフライス盤(BTD-110H.R16)では $1.5\mu\text{m}$ 、既存の東芝中ぐりフライス盤(BTD-11H.R16)では $3.8\mu\text{m}$ という結果が出た(表2)。この値により、1/2 以下に改善されたことを確認できた。

	既存機	導入機
平行度	0.0038mm	0.0015mm

表 2-2-2 平行度測定結果

②真直度測定結果(溝下面部の真直度の測定)

溝下面部(黄色)を約 10mm 間隔でプローブを当て、真直度を測定した。

導入機で $1\mu\text{m}$ 、既存機で $3.2\mu\text{m}$ 、(表3)と $1/3$ 以下に改善されたことを確認できた。

	既存機	導入機
真直度	0.0032mm	0.0010mm

表 2-2-3 真直度測定結果

③直角度測定結果(B 部に対する直角度測定)

導入機で $1.7\mu\text{m}$ 、既存機で $3.4\mu\text{m}$ 、(表4)とこちらも $1/2$ の精度改善が確認できた。

	既存機	導入機
直角度	0.0034mm	0.0017mm

表 2-2-4 直角度測定結果

ダミーワーク加工による加工精度比較データを見ると、平行度、真直度、直角度すべての項目で既存機よりも導入機の方が 2~3 倍程度良い値を示している。また、機械加工部品の $L=300\text{mm}$ に対する平行度、真直度、直角度を現状の $4\mu\text{m}$ 以下から $2\mu\text{m}$ 以下にするという開発目標の達成を確認することができる。尚、今回のデータは面粗度を考慮していない。

以上の結果から、構成部材の機械加工精度が 2 倍になることで、組立時の技術者による擦り合わせ工数は $1/2$ にする開発目標も達成することができた。これは、横形ミーリングセンタの低コスト化に寄与する。

2-2-2 スピンドルの高速化及び高精度化に伴う振動抑制(長谷川機械製作所)

24年度に導入したフィールドバランスソフトウェア(キーエンス:DS-0227)を用いて、試作機スピンドルのバランス修正を行った。また、立形ミーリングセンタのデータとの比較を行い、立形と横形の比較検証を行った。

<測定方法>

試作機のスピンドルを 30000min^{-1} で回転させ、フィールドバランスソフトウェアを用いてバランス修正を行う。その結果を既存の FFT アナライザー(DS-2100)を用い、バランス修正前後のデータ比較を行う。

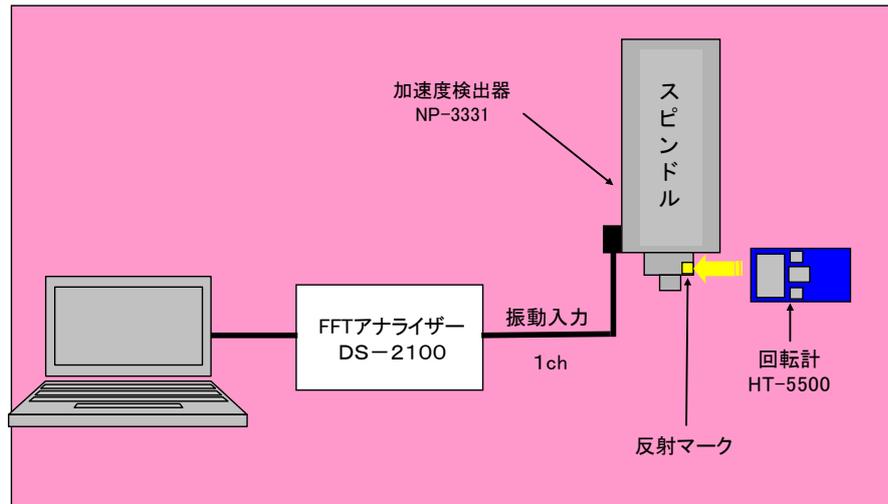


図2-2-6 バランス修正方法(上)と測定時の写真(下)

<測定結果>

立形機と試作機のバランス修正前後の比較データを下記に示す(表 1)。立形機のデータは、立形機が開発されたときに測定した値で、測定器は旧式のバランスモニターを使用している。

	バランス修正前	バランス修正後
立形機	2.519m/s ² r	1.233m/s ² r
試作機	0.885m/s ² r	0.472m/s ² r

表 2-2-5 バランス修正前後の振動量

バランス修正前のデータで大きな差が見られた。これは、立形機の開発当事と比較して、スピンドルの組立精度が向上したことや、構成部材の部品精度が向上したことが要因と考えられる。

バランス修正後のデータを比較すると、立形機では 1.233 m/s²r に対し、試作機では 0.472m/s²r まで調整されている。これは本年度導入したバランスソフトウェアによる効果が高いと考えられる。

当初の想定では、立形よりも横形のほうが構造上の理由から主軸への重力負荷が大きくなるため、振動バランスは悪化するものと思われた。しかし、今回の測定データでは立形機に比べ試作機の方が良い値となり、開発目標であった 30000min⁻¹ 時の振動量を 0.5m/s²r 以下とすること

ができた。これは、上記でも述べたが、組立て精度や構成部材精度の向上により、修正前の時点で振動量を 1/3 程度に抑えることができたことと、フィールドバリシングソフトウェアの導入により、少ない工程でより小さな値まで修正できるようになった事が大きい。

2-2-3 スライドの位置決め精度の向上(長谷川機械製作所)

23 年度に導入した高感度レーザー干渉測定器(東京精密製: DISTAX)を用いて、試作機の位置決め精度、ヨーイング、ピッチング、真直度の測定を行った。測定条件は表 1、表 2 の通りである。

軸	測定長さ(mm)	測定ピッチ(mm)	測定点(点)	測定回数(回)
X 軸	100	20	6	5
Y 軸	100	20	6	5
Z 軸	125	25	6	5

表 2-2-6 位置決め精度・繰り返し精度の測定条件

軸	測定長さ(mm)	測定ピッチ(mm)	測定点(点)
X 軸	130	10	13
Y 軸	130	10	13
Z 軸	180	10	18

表 2-2-7 ヨーイング・ピッチング・真直度の測定条件



図 2-2-7 高感度レーザー干渉測定器による測定の様子

24 年度に測定を行った際、開発目標値である位置決め精度 $1.5 \mu\text{m}$ 以下、繰返し位置決め精度(繰返し精度) $1 \mu\text{m}$ 以下を達成することができなかった。25 年度には、精度向上のために下記対策を実施した。

対策1. 各種パラメータ設定の見直し

下記パラメータの変更により精度の向上を目指した。

(スケール使用関係のパラメータ)

No1815#1(OPTX) :0→1 別置位置検出器を使用

No2085 :10→1 フレキシブルフィードギア分母

No2024 :12500→25000 位置パルス数

No2185 :0→8 位置パルス数変換係数

(オーバーシュート抑制関係のパラメータ)

No1815#1(OVSC) :0→1 オーバーシュート防止機能を使用

No2045 :0→32300 速度ループ不完全積分ゲイン(PK3V)

No2077 :0→50 オーバーシュート防止カウンタ(OSCTP)

対策2. スケールフィードバック機能の追加

XYZ 軸の全てにマグネスケール社製の SR87 シリーズ(分解能 0.05 μm)を取付け、セミクローズドループ制御からクローズドループ制御に変更することで精度の向上を目指した。

対策3. ピッチ誤差補正

送り機構に使用しているボールネジのピッチ誤差を補正することで精度の向上を目指した。

対策前の 24 年度測定結果と、対策後の 25 年度測定結果は下記の通りである。

	位置決め精度 (μm)		繰り返し精度 (μm)	
	24 年度	25 年度	24 年度	25 年度
X 軸	4.00	1.50	2.78	0.41
Y 軸	6.42	1.19	2.23	0.60
Z 軸	4.02	1.29	2.08	0.84

表 2-2-8 測定結果の比較 (24 年度及び 25 年度)

以上の結果から、位置決め精度、繰り返し精度ともに開発目標値を達成できた。

2-3 小物難削材の切削加工技術の確立(東京大学、産学金連携センター)

3年間に亘り、主としてチタン合金に適したエンドミルの選定、チタン合金のエンドミル切削力の測定と切りくず生成状態の可視化、チタン合金のエンドミル切削における切削速度の最適化、新しいエンドミル切削法であるエアジェット援用エンドミル切削について研究を行ったので、これらの概要と主要な結果について、以下に記す。

2-3-1 推奨小径エンドミルの選択

(1) ボールエンドミル

ボールエンドミルについては、ユニオンツールのCFBタイプ(高能率ボールエンドミル)がチタン合金に対して唯一高い評価(カタログ上では二重丸)を与られている。その他の工具メーカーではチタン合金に対し高い評価が得られる小径ボールエンドミルを製作していない。CFBは図2.3.1のように不等ピッチの3枚刃を有するコーテッド超硬工具であり、チタン合金の他に、炭素鋼、合金鋼、プリハードン鋼、焼入れ鋼(但し55HRC以下)、鋳鉄、アルミ合金、銅、耐熱超合金に幅広く適用でき、高送りが可能とされている。比較的硬い材料から軟らかい材料まで、また、比較的脆い材料からねばい材料まで適用可能な理由としては、切れ刃からの切りくず離れがよいこと、コーティングと種々の切りくずとの間の化学的な親和性が低いこと、コーティングの硬度が高すぎず適度な靱性を有すること、不等ピッチを採用することによりびびり限界が高く、切削が不安定になりにくいこと等が挙げられる。



図 2.3.1 CFB ボールエンドミルの先端形状(ユニオンツール(株)の工具カタログより)

(2) スクエアエンドミル

本研究開発では三菱マテリアル(株)、オーエスジー(株)、ユニオンツール(株)の工具カタログから、推奨の小径超硬コーテッドエンドミルを選定したが、オーエスジー以外のメーカーでは、チタン合金と耐熱合金を区別していないので、最適と表示された工具が必ずしもチタン合金に適しているとは限らない。そのためオーエスジーのエンドミルの選定結果だけを最終報告用を選び図2.3.2に示す。

チタン合金切削用のエンドミルの種類は、各メーカーが提供するエンドミルの全種類に比べ非常に少ない。チタン合金では切りくずが長く伸びないので、大きなチップポケットが不要である。そのため、例えば図2.3.2からも分かるように、小径エンドミルでも2枚刃エンドミルはほとんど使用されず、4枚刃エンドミルが多く用いられる。この点が鋼用やアルミ合金用のエンドミルと大きく異なる。とはいえ、小径エンドミルには6枚以上の刃数は適用されない。以下では、チタン合金切削

用の 4 枚刃の小径スクエアエンドミルに注目し、その性能を評価する。

スクエアエンドミル(4枚刃)						◎は最適、○は適
製品番号	仕様	表面処理	被削材質		備考	
			チタン合金	耐熱合金		
WX-PHSS	4刃スタブ形(強力重切削型)	WX	◎	◎	※	
WX-PHS	4刃ショート形(強力重切削型)	WX	◎	◎		
UP-PHS	4刃ショート形(防振型多機能)	FX	◎	○		
NEO-PHS	4刃ショート形(強力重切削型・不等リードタイプ)	FX	◎	◎		
WX-PHN	4刃ミディアム形	WX	◎	◎		
※荒削りで使用						
スクエアエンドミル(多刃)・その他						◎は最適、○は適
製品番号	仕様	表面処理	被削材質		備考	
			チタン合金	耐熱合金		
FX-MG-EHS	ハイヘリックスショート形	FX	◎	◎		
FX-MG-EHL	ハイヘリックスロング形	FX	◎	◎		
NEO-EMS	多刃ショート形(不等リード)	FX	◎	◎		
コーナーR(4枚刃)						◎は最適、○は適
製品番号	仕様	表面処理	被削材質		備考	
			チタン合金	耐熱合金		
NEO-CR-PHS	4刃コーナーRショート形(強力重切削・不等リード)	WX	◎	◎		
FX-CR-MG-EHS	4刃コーナーRハイヘリックスショート形	FX	◎	◎		
コーナーR(多刃・その他)						◎は最適、○は適
製品番号	仕様	表面処理	被削材質		備考	
			チタン合金	耐熱合金		
WX-CR-PHS	強力重切削型コーナーR	WX	◎	◎		
FXS-PKE	強力型多機能	FX	◎	◎		
FXS-HS-PKE	強力型多機能(HSK対応)	FX	◎	◎		
FXS-PKER	強力型多機能レギュラ形	FX	◎	◎		
荒・中仕上げ用						◎は最適、○は適
製品番号	仕様	表面処理	被削材質		備考	
			チタン合金	耐熱合金		
WX-RESF	ラフィング形(強ねじれタイプ)	WX	◎	○		

図 2.3.2 推奨エンドミル(オーエスジー)

図 2.3.2 のスクエアエンドミルの内、直径 5mm 以下のものが揃う 4 枚刃エンドミルの中から 2 種類だけを抜き出し、図 2.3.3 にその切削条件を示す。ただし、直径が 10mm を超える工具については、切削条件の表示を省略し、側面切削については、一刃当たりの送り量を追記した。しかし、切削条件の選定基準となる工具寿命データが示されていないので、推奨切削条件を初期切削条件として使用し、工具寿命を確認しながら最適条件を別途探索する必要がある。また同じ材料でも硬度が違えば工具寿命が大きく異なること、工具カタログが更新される毎に同じ型番でも工具の切削性能が向上し、最適切削条件が高速側に変更されることが多いことに、注意を要する。

2-3-2 チタン合金のエンドミル切削状態の可視化

本実験では、切りくずの生成と工具からの離脱状態を観察するため、乾式で切削を実施し、切削速度およびその他の切削条件を低めに設定した。またボールエンドミルとスクエアエンドミルの2つの異なるタイプのエンドミルにほぼ同一の切削条件を適用することから、比較的ボールエンドミルの切削条件に近い切削条件を表 2.3.1 のように設定した。各切削条件では一刃あたりの送りを一定としているので、エンドミルの刃数に比例して、テーブル速度が速くなる。また一刃あ

たりの切りくず除去量は切削条件2の方が切削条件1より、20%程度大きい。

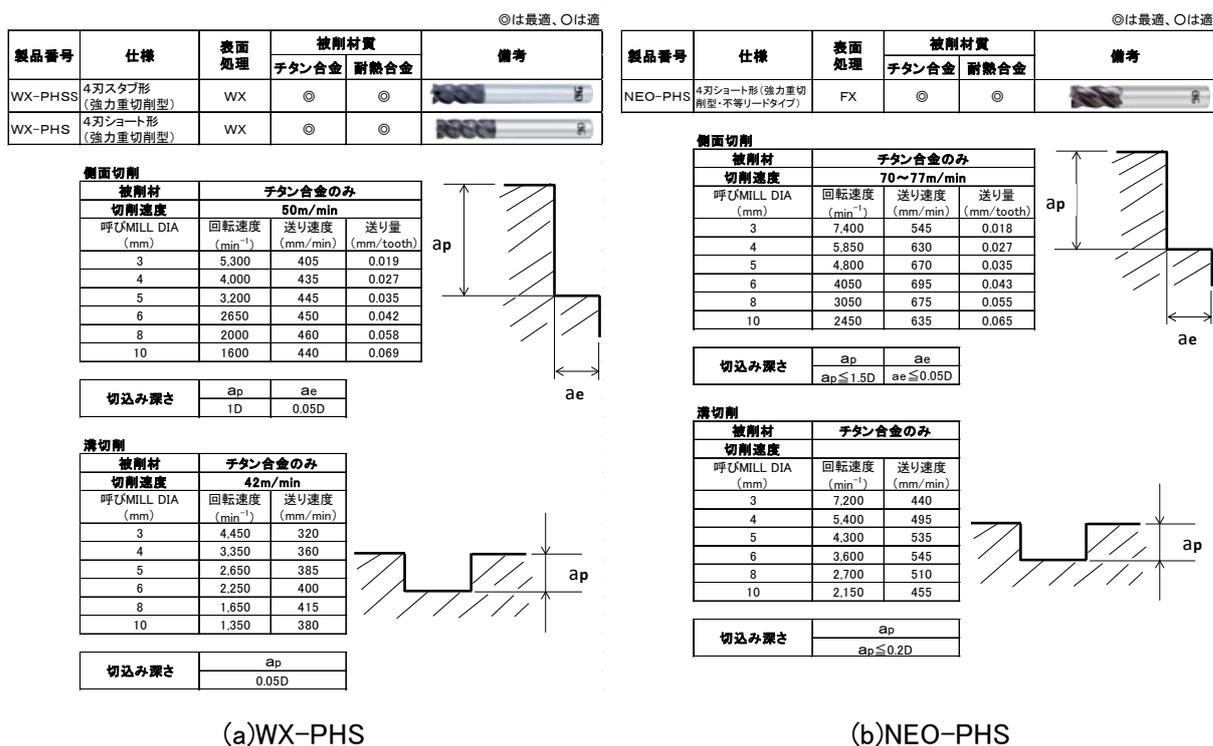


図 2.3.3 推奨エンドミルの切削条件 (2011-2012 年度カタログより)

表 2.3.1 切削条件 (工具径 4 mm)

N (min ⁻¹)	V (m/min)	a_p (mm)	a_e (mm)	f (mm/tooth)	潤滑・冷却
6,000	76	0.5	0.4	0.02	Dry

高速度カメラの設定は、主軸の回転数が毎秒 100 回転になるので、撮影速度は毎秒 6,000 フレーム (1 回転あたり 60 フレーム) とした。シャッタースピードは 1/10,000 s、解像度は 256 × 256 ピクセルである。これにより、切りくずの生成状態を十分な時間分解、空間分解能で観察することが可能である。

高速度カメラで撮影した切りくず生成状態の内、CFB、WX-PHSS (WX-PHS のさらに短い工具) による結果をそれぞれ図 2.3.4 と 2.3.5 に示す。これらの図では、30 フレーム毎、すなわち、エンドミル半回転毎に 1 枚の写真を時系列で並べている。ただし、各図の写真の数は、CFB で 6 回転分 WX-PHSS で 3 回転分に相当する。撮影された各フレームには、工具から飛び出した (離脱した) 切りくずと工作物や切削動力計上に既に落下した切りくずが映っているが、これらの図では、特に、前後のフレームと位置が変わる切りくずに注目されたい。それぞれの図を比較すると、CFB、WX-PHSS とでは、切りくずが工具から飛び出す頻度が明らかに異なることが分る。その頻度は WX-PHSS で高い。

WX-PHSS では、図 2.3.5 に見られるように工具から新しく飛び出た切りくずが全てのフレームにおいて観察される。上述のように、工具の寿命を延ばすためには、硬化した切りくずをエンドミ

ルの切れ刃が噛みこまないように、切りくずを速やかに切削域から排出する必要がある。ビデオではよく分かるが、幾つかの切りくずが溶着し繋がった切りくずが排出されることが少なくない。

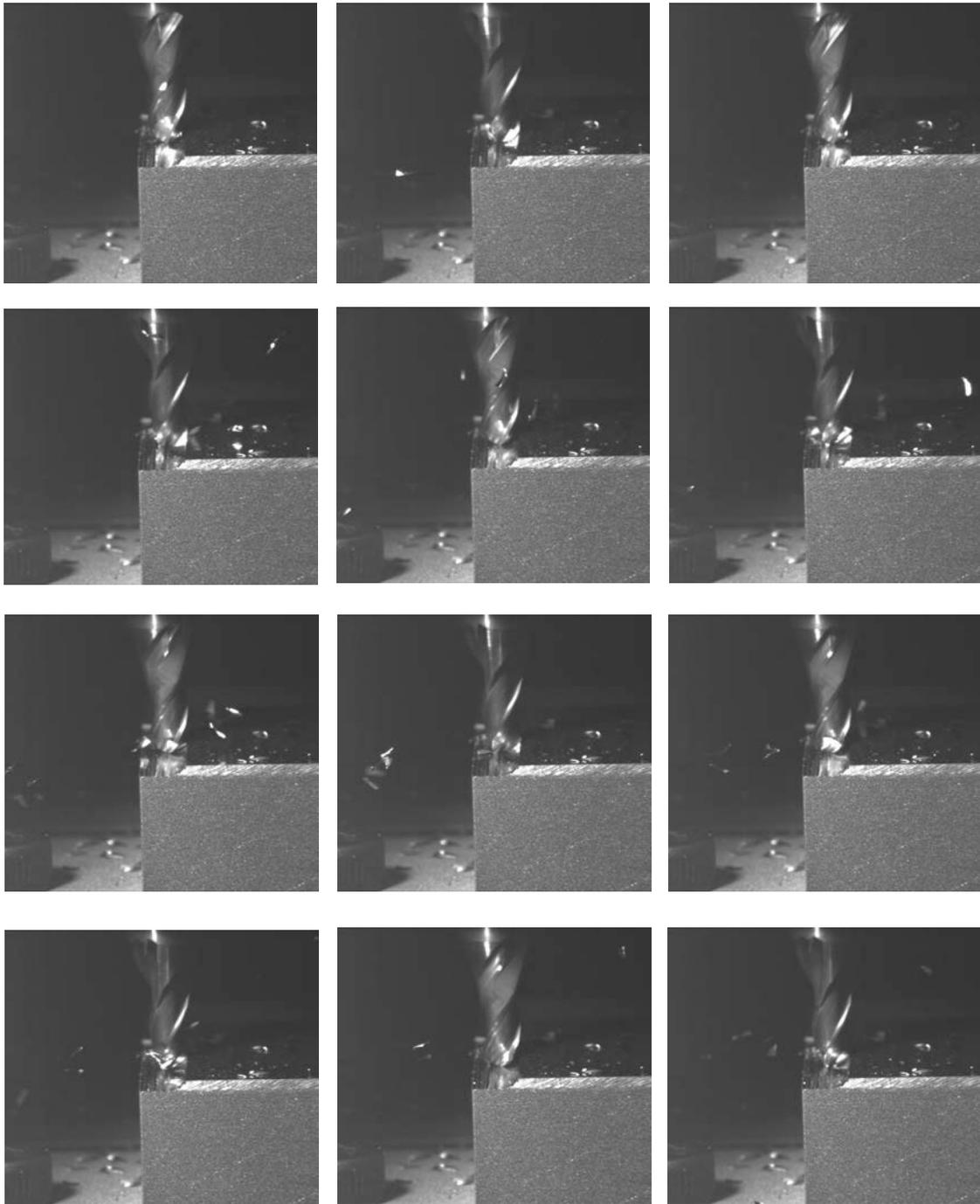


図 2.3.4 CFB ボールエンドミルの切削状態

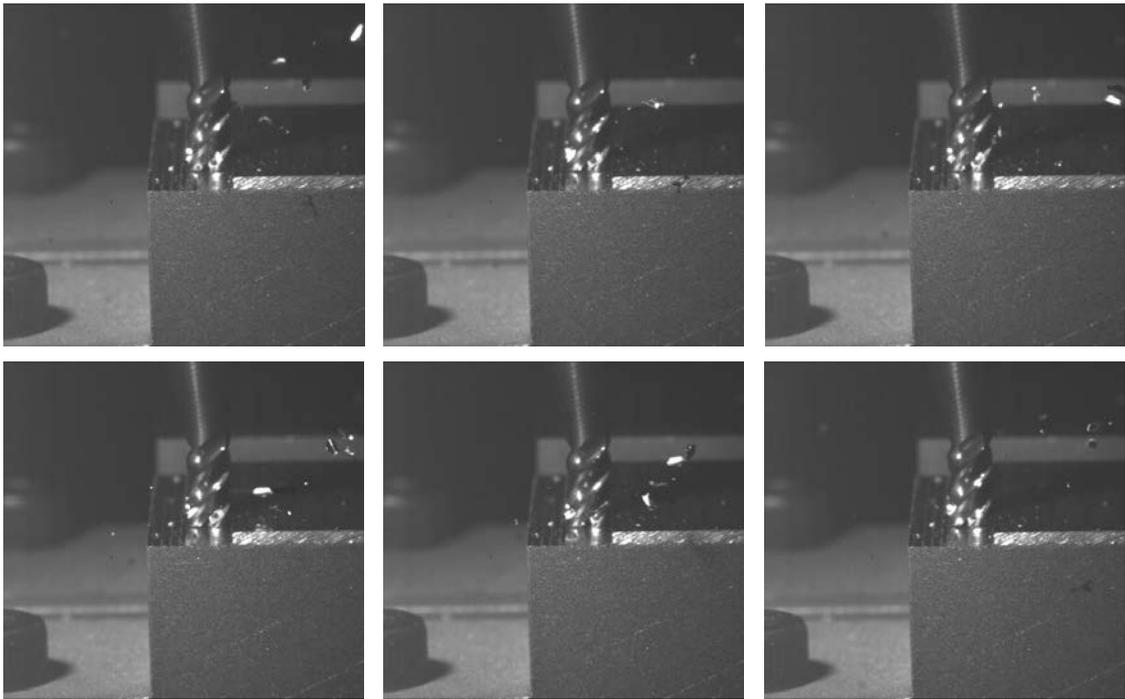


図 2.3.5 WX-PHSS スクエアエンドミルの切削状態

CFB は、図 2.3.4 によれば WX-PHSS ほど切りくず排出性はよくないが、切りくず離れは比較的良い。これが、多くのメーカーの工具カタログの中で CFB が唯一チタン合金の切削に推奨されていることの大きな理由のひとつであると思われる。またエンドミルの切れ刃を不等ピッチにすることにより、連続して同じ切削を繰り返さないことが、工具からの切りくず離れをよくしているように思われる。

2-3-3 チタン合金のエンドミル切削速度の最適化

本研究のために、株式会社長谷川機械製作所より東京大学生産技術研究所に移設した超小型ミーリングセンターを用いて、小径スクエアエンドミルの摩耗試験を実施した。使用工具は図 2.3.2 の WX-PHS、UP-PHS、NEO-PHS の3種類のエンドミルであり、直径は 5mm とした。工作物には、医療用チタン合金 ASTM F136 を使用した。ASTM F136 は、手術用具等に使用されるが、酸素、窒素、水素及び鉄の含有率を特別に低く抑えた 64 チタンであり、Ti-6Al-4V ELI ともエリ一材とも呼ばれる。なお、「ELI」は「Extra Low Interstitial Elements」の略であり、JIS では JIS 60E 種 に分類される。なお、これらの工具では、不等リードエンドミルの NEO-PHS の工具寿命が最も長かったが、以下では WX-PHS に対する切削速度の最適化に関する結果のみを示す。

摩耗試験の基準となる切削条件を、推奨切削条件を参照し、次のように設定した。切削様式はアップカットである。

[基準切削条件]

主軸回転数 4780 min^{-1} (切削速度 75 m/min)

送り速度 575 m/min (一刃当たりの送り量 0.03 mm/tooth)

軸方向切込み $a_p = 1 \text{ mm}$

半径方向切込み $a_e = 1 \text{ mm}$

湿式切削, 難削材用ソリュブルタイプクーラント(マスタークール, 濃度 10%)

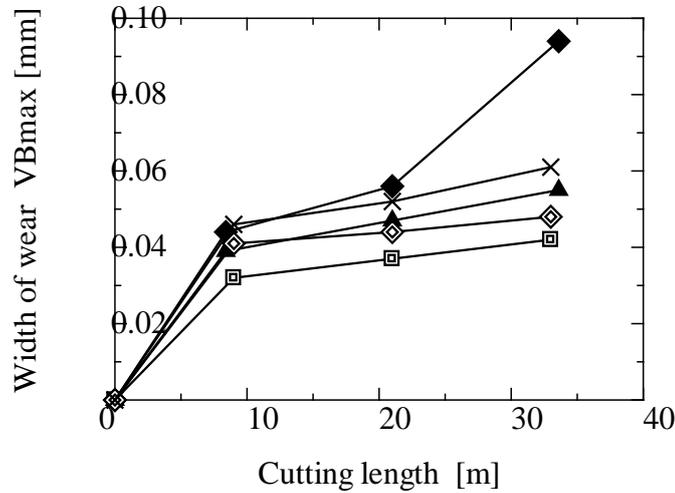
WX-PHS の切削速度の最適化に関する実験では、切削速度を上記の基準切削条件 75 m/min ($N = 4780 \text{ min}^{-1}$) から、 105 m/min ($N = 6700 \text{ min}^{-1}$)、 135 m/min ($N = 8620 \text{ min}^{-1}$)、 165 m/min ($N = 10540 \text{ min}^{-1}$) と、 30 m/min ずつ増加させた。また一方、一刃当たりの送り量が一定であるから、送り速度も切削速度に比例して、 504 mm/min から 1264 mm/min まで増加させ、最終的には、基準切削条件の 2.2 倍の高速(能率)で切削実験を実施した。切削時間は切削速度と送り速度の増加に伴い 58 分から、42 分、32 分、27 分まで短縮される。この他に、さらに速い切削速度 210 m/min での実験も行った。ただし、この場合の一刃当たりの送り量は、基準切削条件の $1/2$ の 0.015 mm/tooth である。

図 2.3.6 に側刃の最大逃げ面摩耗幅 VB_{\max} の発達状況を示す。この結果から、切削速度の増加に伴い逃げ面摩耗幅が単調に増加するのではなく、摩耗の極小値を与える切削速度があることがわかる。これを明示するため、切削距離 33.6 m における摩耗幅と切削速度の関係を図 2.3.7 に示す。この結果から、切削速度以外の切削条件を基準条件とした場合、最も工具寿命の長い切削速度が 100 m/min 付近あることが分かる。おそらく、より経済的な切削速度は、 130 m/min から 150 m/min 付近にあることが予想される。ただし切削速度が経済的な速度より少し速くなると、急激に摩耗は増大するので、種々の条件について限界の切削速度を調査し、徐々にデータが蓄積されれば、非常に役立つものになる。切りくず排出量の少ない小径エンドミルの切削、特に小径ボールエンドミル切削では、このような事例が報告されているが、一般に認知されてはいないので、こうした結果ができるだけ広く知れ渡ることが、チタン合金の高速切削の普及には不可欠である。切削条件の最適化においては、切削速度だけでなく、一刃当たりの送り量や軸方向切込み、半径方向切込みも考慮することにより、よりよい条件を探索できるようになる。仕上げ削りにおいては高速化、荒削りや中仕上げにおいては、高能率化の観点から、総合的な最適化を図ることが望まれる。

2-3-4 エアジェット援用高速エンドミル加工法

エアジェット援用切削法は、本プロジェクトチームのメンバーの一人が開発したものであり、通常の湿式切削において圧縮空気を高速で刃先に向け噴出させる方法である。別の幾つかのプロジェクトでの旋削実験において大変良好な結果が得られているので、本プロジェクトでは、エアジェット援用切削法を高速エンドミル切削加工に適用し、その効果を確認するとともに、エアジェットの噴出位置の最適化を行った。本研究開発の成果は、多くの企業が困難と感じているチタン

合金の高速切削に対し、ソリューションのひとつを提案するものであり、良好な結果が得られれば今後の幅広い適用が期待される。



- ▲ WET WX-PHS(N=4780 F=574 ap=1mm ae=1mm)
- ◆ WET WX-PHS(N=13400 F=804 ap=1mm ae=1mm)
- WET WX-PHS(N=6700 F=804 ap=1mm ae=1mm)
- ◇ WET WX-PHS(N=8620 F=1034 ap=1mm ae=1mm)
- × WET WX-PHS(N=10540 F=1264 ap=1mm ae=1mm)

図 2.3.6 異なる切削速度における摩耗幅の発達状況

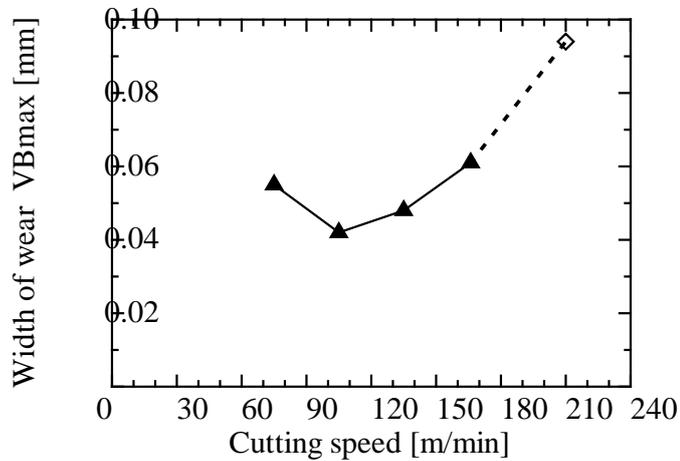


図 2.3.7 切削速度と摩耗幅の関係

図 2.3.8 に長谷川機械製作所製の超小型立形マシニングセンタで実施したエアジェット援用切削の実験状況を示す。奥のクーラント用と手前のエアジェット用のふたつのノズルからそれぞれクーラントと高速の圧縮空気が切削点に向かって噴出している。高速の圧縮空気が刃先先端までクーラントを押し込み、切削状態を改善する。工作物は、上記の実験と同じくチタン合金 Ti-6Al-4V ELI である。本実験では、ふたつのロットを使用したので、Ti-6Al-4V ELI #1 (Work #1) と Ti-6Al-4V ELI #2 (Work #2) と表記し区別する。ただし、引張強度は Ti-6Al-4V ELI #1 の方が

高いので、後述の実験結果のように、工具の逃げ面摩耗は Ti-6Al-4V ELI #1 の方が大きい。



図 2.3.8 チタン合金のエアジェット援用高速エンドミル切削の状況

使用工具は、切削速度の最適化を同様にコーテッド超硬ソリッドエンドミル WX-PHS である。直径は 5 mm、切れ刃は4枚、ねじれ角は強ねじれの 45 度である。ねじれ角が大きいので、側刃(ねじれ刃)がエンドミル先端で底刃と交わる部分の強度を高めて欠けを防止するため、コーナランド(ギャッシュランドとも呼ぶ)が設けられている。切削に係る切れ刃の中では、コーナランドの摩耗が大きく、後述するようにエンドミル先端で摩耗幅が最大となる。

摩耗試験の基準となる切削条件については、昨年度の実験結果と選択したエンドミルの推奨切削条件を参照し、以下のように設定した。

[切削条件]

主軸回転数 15300 min⁻¹(切削速度 240 m/min)

送り速度 1836 mm/min(一刃当たりの送り量 0.03 mm/tooth)

軸方向切込み $a_p = 1\text{mm}$

半径方向切込み $a_e = 1\text{mm}$

湿式切削, 難削材用ソリュブルタイプクーラント(マスタークール, 濃度 10%)

エアジェットノズルの設定状況を図 2.3.9 に示す。同図(a)、(c)によりノズルのオイラー角(圧縮空気の噴出方向)を決め、(b)でエンドミルからエアノズルまでの距離 L を設定する。本実験では、 $L = 10, 15, 30, 40, 60, 80, 100\text{ mm}$ に設定し、距離 L の工具摩耗に及ぼす影響を検討した。クーラントの流量は 30 L/min、クーラントノズルの径は 5.0 mm である。したがってクーラントの流速は 25.5 m/s と非常に速い。一方、空気の流量は、38 L/min(NTP)、空気圧は 0.2 MPa である。

エアジェット援用切削ならびに湿式切削で得られたエンドミルの逃げ面摩耗と切削距離との関係を、図 2.3.10 に示す。湿式切削とエアジェット援用切削の結果をそれぞれ”Wet”と”AJA”と表記する。上述のようにエアジェット援用切削では、エアノズルからエンドミルまでの距離 L を 10 mm から 100 mm まで変えているが、その他の切削条件は同じである。また切削距離は 33 m、その間の切削時間は 18.0 分である。本実験ではエンドミル先端(コーナランドと底刃の交点)での

逃げ面摩耗幅(以下、コーナ逃げ面摩耗幅①)VC、側刃(ねじれ刃)とコーナランドの交点での逃げ面摩耗幅(以下、コーナ逃げ面摩耗幅②)VC*、側刃における最大逃げ面摩耗幅 VBmax ならびに切込み深さの位置(境界部と呼ぶ)での境界摩耗幅 VNを測定しているが、図 2.3.10ではVCの測定結果のみを示している。なお、コーナ逃げ面摩耗幅①と②はエンドミル先端のコーナランドに垂直に、最大逃げ面摩耗幅は側刃に垂直に測定した摩耗幅である。また4枚の切れ刃の摩耗幅は同じでないので、それぞれの切れ刃位置での摩耗幅を測定し、各部位における4枚の刃の測定値を平均した。

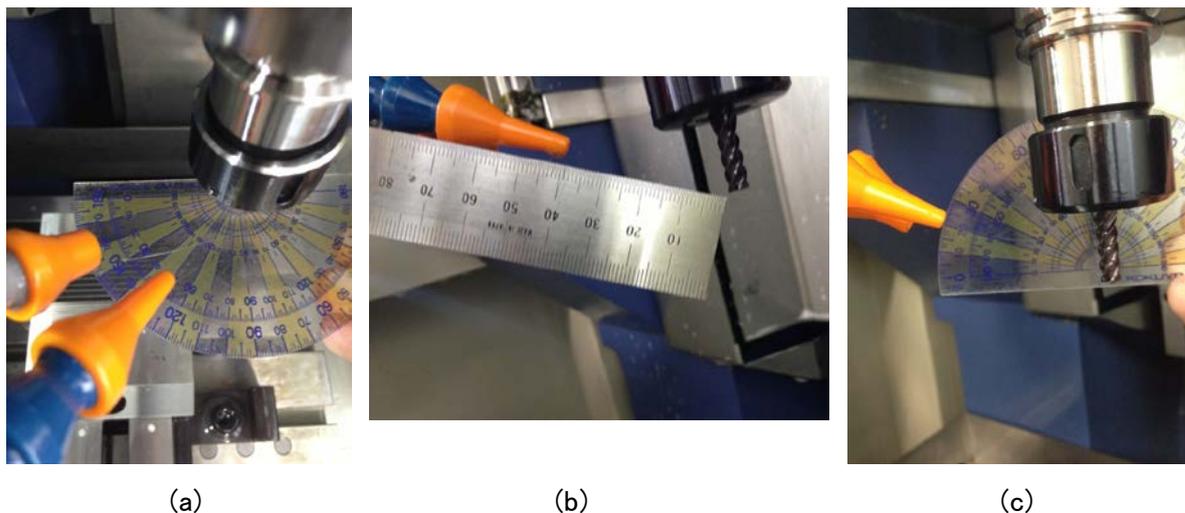


図 2.3.9 エアジェットノズルの設定状況

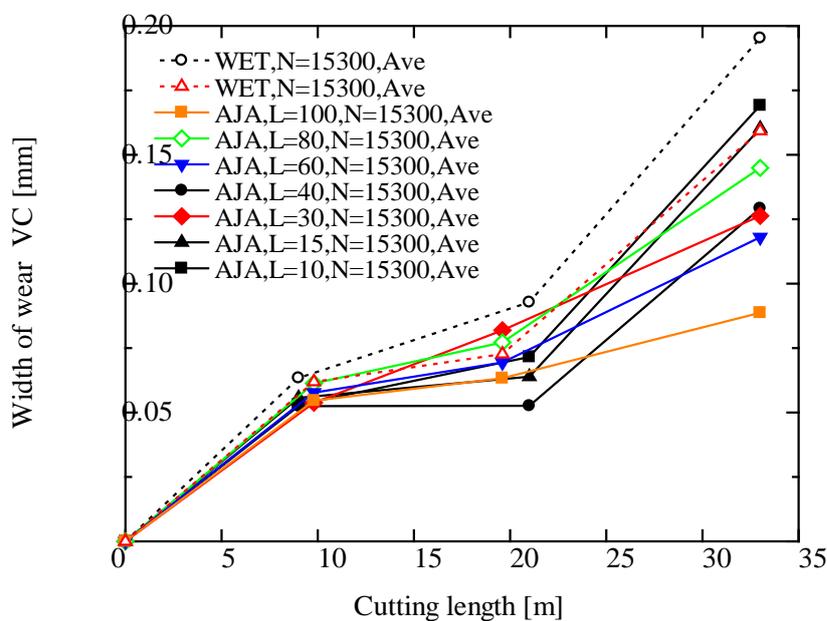


図 2.3.10 エアジェット援用切削ならびに湿式切削におけるエンドミルのコーナ逃げ面摩耗幅①
VC

図 2.3.10 のコーナ逃げ面摩耗幅①は、多くの場合 0.1 mm を超え、特に湿式切削ではコーナ部の損傷が顕著になっている。コーナ部ではコーナの切れ刃先端から工作物に食いついていくこと

になるため、クーラントが最も届きにくい場所である。したがって、工具寿命を改善し切削性能を向上させるためには、コーナ部での潤滑・冷却が最も重要である。図 2.3.10 では、エアジェット援用切削による工具摩耗の低減が明確にみられ、このことからクーラントが届きにくいコーナ部の摩耗に対し、エアジェットによるクーラントの押し込みがより効果的に作用することは明らかである。

以上の結果を切削距離 33 m における摩耗幅で整理する。その中からコーナ逃げ面摩耗幅① VC と側刃の最大逃げ面摩耗幅 VBmax の結果を図 2.3.11 と図 2.3.12 に示す。これらの結果では、エアジェット援用切削の比較対象基準となる湿式切削での摩耗幅の値をそれぞれ Wet work #1、Wet work #2 として、それぞれの図に横線で示した。また、エアジェット援用切削ならびに湿式切削における Work #1 の結果を赤で、Work #2 の結果を青で示すこととした。

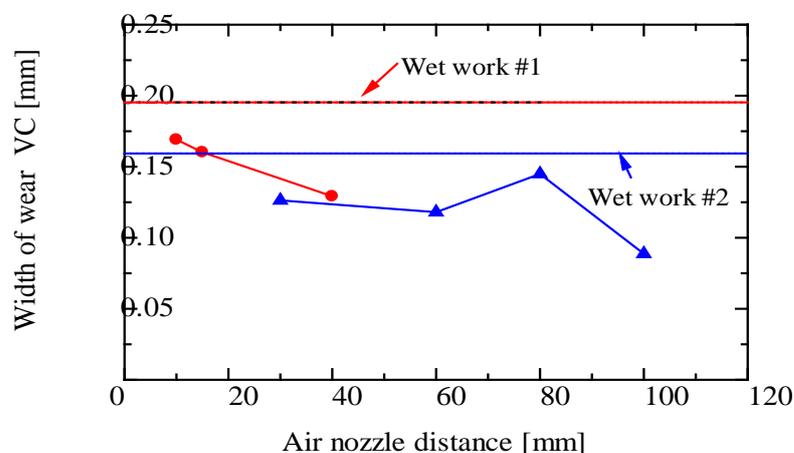


図 2.3.11 エアジェット援用切削ならびに湿式切削におけるエンドミルのコーナ逃げ面摩耗幅① VC の比較(切削距離 33 m)

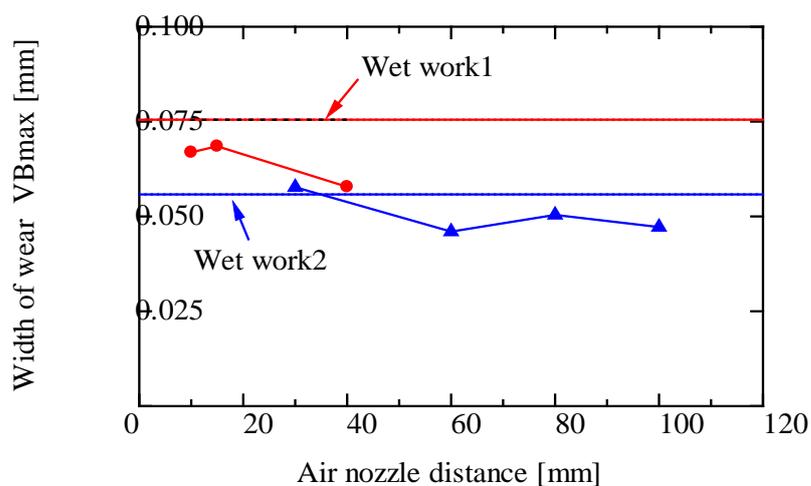
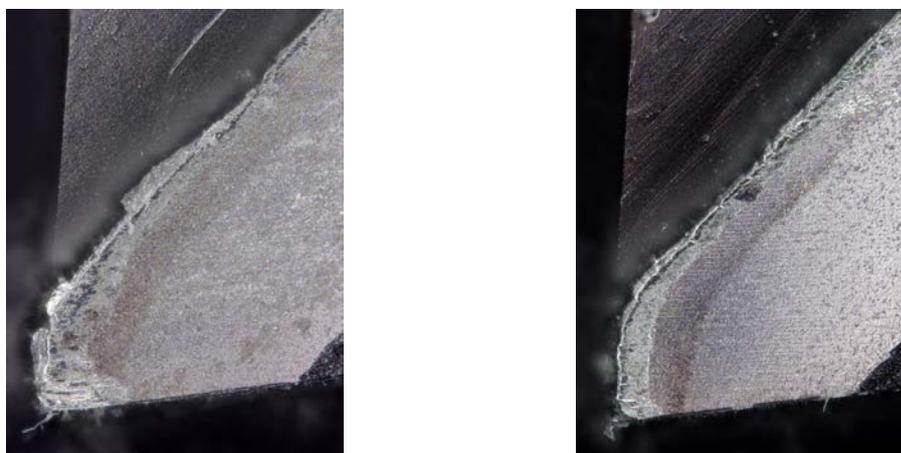


図 2.3.12 エアジェット援用切削ならびに湿式切削におけるエンドミルの側刃の最大逃げ面摩耗幅 VBmax の比較(切削距離 33 m)

図 2.3.11、図 2.3.12 の結果から、エンドミルの切れ刃のいずれの部分に対しても、エアジェットは逃げ面摩耗を抑えることができるが、特に、コーナランドのようにクーラントが届きにくい部分に対し大きな効果をもたらすことが再確認される。ただし、エアノズルが切れ刃に非常に近い場合には、その効果が低減するので、エアノズルの位置はエンドミルより 40 mm 程度離れたほうがよい。

Ti-6Al-4V ELI #2 を切削した後にデジタル(光学)顕微鏡で観察したエンドミル切れ刃の摩耗状態を図 2.3.13 示す。切削距離は 33 m であり、同図(a)が通常の湿式切削、同図(b)がエアジェット援用切削の結果である。また、エアジェット援用切削におけるエアノズルからのエンドミルまでの距離は 100 mm である。なお、これらの顕微鏡写真で観察した切れ刃の位置は、エンドミル先端のノーズランドとその上方の側刃である。ちなみに切削前のノーズランドの幅は 200 μ m である。



(a) 湿式切削

(b) エアジェット援用切削 (L = 100 mm)

図 2.3.13 逃げ面摩耗の観察(工作物 Ti-6Al-4V ELI #2、切削距離 33 m)

難削材のチタン合金を切削速度 240 m/min で高速切削すると、湿式切削であってもコーナ部の逃げ面摩耗幅は全般的に大きく、特にコーナ部逃げ面摩耗幅①は際立って大きくなる。また切りくずの付着も多く、すくい面に切りくずが厚く付着している様子が逃げ面側から観察される。一方、エアジェット援用切削では、湿式切削に比べコーナ部での摩耗が大きく抑えられている。それでもエンドミル先端のコーナ部逃げ面摩耗幅①は小さくないが、コーナ部での許容逃げ面摩耗幅が 200 μ m 程度であることから、切削距離 33 m においても、まだ切削が継続できる状況にある。このように、両者の切削法における摩耗状態には明らかに大きな差が見られ、エアジェットがエンドミル先端の刃先の冷却に大きく寄与していることが分かる。

2-3-5 まとめ

チタン合金の切削法として、近年、高圧クーラントが注目されているが、高圧クーラントによらない新しい切削法としてエアジェット援用エンドミル切削法を提案し、工具摩耗に及ぼす効果を確

認した。切削速度 240 m/min の高速切削において一連の実験を行ったところ、エアジェット援用エンドミル切削法では、エンドミル先端のコーナ部の摩耗を大幅に低減することが明らかとなった。

2-4 加工精度評価、フィードバック評価

試作機械に切削工具を搭載し、ユーザースペックを満たす加工ができるかを評価した。試作機による加工についてのユーザー評価は高く、開発終了以前に複数のユーザーから受注を受けることができた。

2-4-1 加工精度評価

- ・試作機でテスト加工を行い、被加工面の微細部分について精密寸法、表面粗さ等を精密に測定できるデジタル処理可能な非接触形状測定機を株式会社長谷川機械製作所福島工場内に導入し、既設の3次元測定機等も含めて加工精度評価を行った。その結果、高精度超小型の横形ミーリングセンタとしての機能を実現できることを評価した。
- ・加工精度評価事例1として、ユーザー企業で使用しているチタン合金を対象に、長谷川機械の試作機でテスト加工（ヘリカル切削）を行った成果について25年度に導入したデジタルマイクロスコープ及び既設のNC真円度測定器、面粗度計を使用して測定した。（加工は日進工具のφ6の超硬ラジラスエンドミル4枚刃を使用し、加工条件は工具メーカー推奨条件3600の3倍にあたる毎分12000回転で行った。これはユーザー企業からの指定切削条件である）
- ・結果は、切削速度が速いほど、送り目が大きく粗い加工面となった。また、主軸内クーラント吐出も行わなかったため、切削奥部では切削油の供給が十分でなく、加工面の粗さが残った。真円度については立形機で加工したものに比べて若干ではあるが良好な結果が認められた。これら結果はユーザー企業に報告したが、結果については満足している旨の報告があった。
- ・加工精度評価事例2として、開発機械を導入予定のスイス時計メーカーからの支給材（黄銅）を対象にドリル加工、エンドミル加工を実施した。このメーカーからは開発機械の受注を確保できたので、加工精度について高い評価を得られたものと考えられる。
- ・加工精度評価事例3として、国内ユーザー企業に対しても部材加工を開発機械で試作加工した。立形機と遜色のない加工が可能であった。この企業からも横形機の使い勝手を評価されて、受注を受けることができた。

2-4-2 フィードバック評価

- ・24年10月のJIMTOF2012でのユーザー意見のほか、従来の長谷川機械製作所のユーザーの意見も聞いて、使い勝手の向上等、改善が加えられた。
- ・25年10月に名古屋で開催されたメカトロテックジャパンには開発した横形機と立形機を並べて展示した。自動化するには横形機が好都合で、これまで長谷川機械と取引のない市場占有

率の高い大手企業や高い技術を有するユニークな企業に関心をもってもらうことができた。

・基本機能の実現はできたので、今後は個別のユーザースペックについては受注内容に対応してユーザーの定めるスペック数値内の部品加工が行えるようローダーの付加、加工条件、等を設定していく。

最終章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

前述のように、本研究開発計画で設定した以下の各項目については、いずれも目標を達成することができた。

また、24年10月の東京ビックサイトで開催されたJIMTOF2012及び25年10月に名古屋で開催されたメカトロテックジャパに開発機械を出展してユーザー企業から高い評価を得ることができた。

また、研究終了以前の段階ですでに4台の受注を確保できたことは、これらの研究成果がユーザー企業によって評価されたことの証となる。

- (1) 超小型工作機械の設計コンセプトの刷新
 - ①立形から横形への技術展開
 - ②オーバーハングの抑制及びシンメトリックデザインの設計
- (2) 機械精度の向上
 - ①構成部材の機械加工精度の向上
 - ②スピンドルの高速化及び高精度化に伴う振動抑制
 - ③スライドの位置決め制度の向上
- (3) 小物難削材の切削加工技術の確立
 - ①切削工具の選択
 - ②切削条件の最適化
- (4) 加工精度評価、フィードバック評価
 - ①加工精度評価
 - ②フィードバック評価

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

4台の受注を確保できたことは、横形機械として使い勝手の良いミーリングセンタの機能が評価されたことではあるが、このうち、医療用部品加工用途は2台である。

加工評価事例でも触れたように、切削液の主軸内クーラント塗布機能やローダーの付加等ユーザーの求める機能に対してさらに改善する要素も残っている。

また、医療用小物部品に用いられるチタン合金等は難削材であり、使用工具の長寿命化も引き続き対応が迫られる課題である。このため、開発機械のさらなる使い勝手の向上と難削材加工における使用工具の長寿命化、被加工面の精度向上のため、引き続き東京大学の指導を得つつ、補完研究を行い、開発機械の完成度を高めていく必要がある。

事業化については、既に始まったところであるが、工作機械は基本機能に加えてユーザーのニーズに対応した追加機能付加やライン化といった要望にきめ細かく対応していくことが必須である。また、当然のことながら設置後のメンテナンス、アフターサービスも重要な要素である。このため、営業、開発、技術サービスの各部門が密接な連携をとり、事業化を展開していく。すでに米国、スイスの海外企業から受注を得たこともあり、海外営業も積極的に展開していく。

3-3 謝辞

短期間で大きな成果を挙げることができたが、長谷川機械製作所を中心とする開発チームに研究開発の機会を提供していただいた東北経済産業局及び審査・評価の各場面で叱正やアドバイスをいただいた委員の方々に感謝する。