

平成 29 年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「軽量高剛性高減衰性 CFRP 構造ユニットを搭載した
ジルコニア歯科補綴物切削用マシニングセンタの開発」

研究開発成果等報告書

平成 30 年 3 月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 一般財団法人 総合研究奨励会

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

1－1－1 研究開発の背景

1－1－2 研究目的及び目標

1－1－3 研究開発の実施結果及び成果

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 本論一（1）

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

1-1-1 研究開発の背景

再生能力が乏しい歯の修復に使用される歯科用機器は、個々人の「食べる」ことを通じて「生きる力」を支援し、健康長寿と健康増進と審美性要求等の QOL の向上ニーズへの貢献に寄与できるものである。しかし、現時点での歯科用 CAD/CAM 装置は独国等からの輸入比率が 91% 強（平成 22 年度）と極めて高い状況にある。このため、“厚労省 20 年ビジョン（先進歯科医療）”と“日本再興戦略 改訂 2014：先駆けパッケージ戦略”で“先進医療機器開発による国際競争力強化”が掲げられている。

関連市場の調査結果では、歯科用 CAD/CAM 装置の普及と審美性の面から、ジルコニア材料やオールセラミックス、ハイブリッドレジン等の歯科材料への需要シフトの報告があり、また、平成 26 年 4 月の小臼歯の歯冠補綴に対する保険適用の診療報酬改定により、CAD/CAM 装置の導入拡大が期待できる状態との報告がある。なお、小臼歯より奥歯の部分ではハイブリッドレジンでは強度面に懸念があるため、靱性が高いジルコニア材が更に普及するものと期待できる。

1-1-2 研究目的及び目標

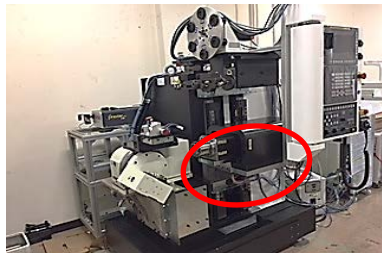
歯科補綴物の切削装置を事例とした場合、微小送り機構の局所摩耗を回避した上で高精度化・高速度化のニーズに対応するには、非接触式のリニアモータ駆動が有効だが、新たな課題として可動体の振動対策とモータ支持部の高剛性構造化と熱変位対策が必要となる。その上で、技工所に設置する必要条件の小型化と高速度化のための軽量・高減衰性・高剛性の構造を実現しなければならぬ。この課題解決のための高度化目標として、CFRP を基本構造材とし、他の構造部材を複合構造化した CFRP ハイブリッド構造体により、小型・軽量、高剛性と高減衰性に優れる駆動機構と支持構造体を実現し高精度化・高速化へのニーズ対応を実現する。

また、歯科補綴物用セラミックスのジルコニアは高硬度材のため難加工材の典型である。このため本焼成されたジルコニアは、ダイヤモンド工具による切削・研削・研磨加工を行うが、加工効率が非常に低いため高コスト、低生産性が課題となっている。その上で、成形精度は、支台歯に装着した場合の接着隙間から侵入する虫歯菌の防御に効果が高いため、歯科医院では極限まではめ合い公差（フィッティング）を求める傾向にある。したがって、難削材ジルコニアの微細精密切削成形を高い生産性で加工できる熱援用切削工法を本提案の開発装置に搭載し実用化技術を開発する。下記内容が開発目標である。

- i) 構造特性の目標 : アルミ合金構造体と同等以下の重量で鉄系構造体より高剛性
- ii) 駆動特性の目標 : 現状の送り方向の加速度 0.3G を 3 倍以上の 1.0G に向上
- iii) 送り機構の長寿命化 : ボールねじ機構の平均寿命（2000 時間）に対し 2 倍（4000 時間）の長寿命化
- iv) 省エネ特性 : コンパクト（1000x1200 相当）、軽量・高精度・高減衰新材料の適用による 15%省エネの実現
- v) 技術的目標 : ジルコニアの 3 次元熱援用切削システムの開発
- vi) 技術的目標 : 従来技術では切削加工ができない本焼成ジルコニアの成形切削の実現

1－1－3 研究開発の実施結果及び成果

研究開発の実施結果及び成果を下の表にまとめた。

研究開発実施内容	開発目標	進捗状況
[1-1] CFRP ハイブリット構造体の設計/製作課題への対応	1. アルミ合金構造体と同等以下の重量で鉄系構造体より高剛性	1, 2, 3, 4, : 達成度 : 100% ・クイルユニットと Y 軸 Box ユニットの 2 か所の駆動機構(写真赤枠)に軽量高剛性高減衰性 CFRP 複合材を用いた革新的な軽量可動体を開発し、リニアモータ駆動方式を採用したことで、年度目標の項目-1, -2, -3, -4 の全てを実現。 
[1-2] CFRP ハイブリット構造体の可動機構の実用化	2. 長寿命 : 従来比 2 倍 (4000 時間) 3. 駆動加速度 : 従来比 3 倍 (1.0G)	
[1-3] 同時 5 軸 MC への各ユニット技術の統合化	4. 省エネ特性 : 従来比 15%削減、コンパクト化	
[2-1] ジルコニアの熱援用切削技術の応用開発	5. ジルコニアの 3 次元熱援用切削システムの開発	5. 達成度 : 100% ・5 軸 MC で本焼成ジルコニアの切削、研削、熱援用切削の各種加工法の実装加工を行い、最適な工程設計のための応用研究を実施した。
[2-2] 同時 5 軸制御 MC への熱援用システム搭載による歯科補綴物専用 MC の開発	6. 本焼成ジルコニアの成形切削実現	6. 達成度 : 100% ・上記[2-1]の成果を受けて本焼成ジルコニアの歯科補綴物の成形加工を実現した。

1－2 研究体制

1－2－1 研究組織・管理体制

本研究開発の実施体制は、東京大学杉田研究室の先進医療技術の研究成果と(株)岩間工業所がモデル加工で蓄積した CAD/CAM ソフトウェア技術と同時 5 軸制御 MC の設備技術を核とし、周辺技術の研究開発に必要となる各要素技術分野に長けた(株)テックラボ、(株)東鋼と共同研究体制を組み、更に、アドバイザーからは、テイジン傘下の CFRP 素材の研究・生産・販売担当の東邦テナックス(株)からは CFRP 素材面で、マイクロ・ダイヤモンド(株)からは工具面で、また、歯科医療機器の販売実績でグローバル 9 位、国内 1 位の(株)ジーシーからは事業化時の販売体制等の支援が得られる。以上の共同体を事業管理者（一般）総合研究奨励会が管理運営する体制である。（図 1）。

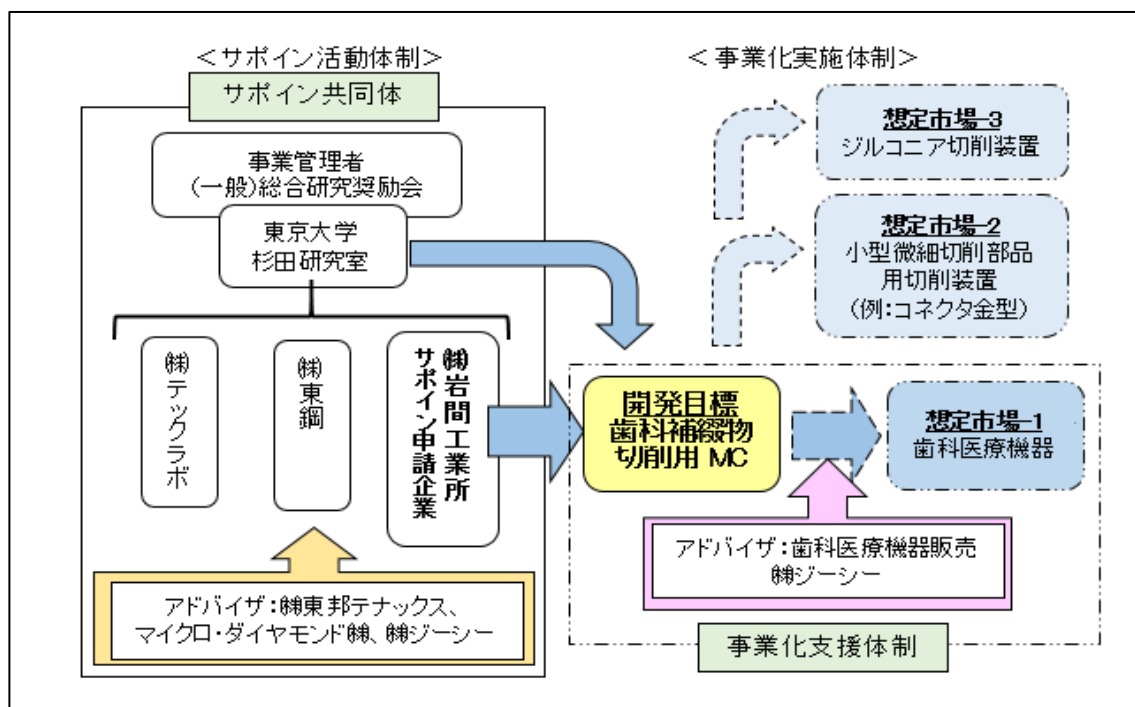


図1 実施体制

1-2-2 研究者氏名、協力者

研究者氏名

研究機関	研究者	研究担当
東京大学	杉田直彦(大学院工学研究科 教授)	・CFRP 複合材及び MC 構造の解析
	木崎 通 (同上 助教)	・ジルコニアの熱援用切削加工の研究
(株)岩間工業所	岩間 正俊 (代表取締役)	・CFRP 複合材搭載 5 軸 MC の開発/設計/製造
	濱田 弘顕	・CFRP 複合構造材の組立の生産技術の研究
(株)東鋼	寺島 誠人(代表取締役社長)	・CFRP 複合材の機械加工の研究
	葉波 孝義	
(株)テックラボ	日比野 俊雄(代表取締役)	・CFRP 複合材の成形プロセスの研究
	白石 勝	

協力者

機関名	代表者	協力分野担当
東邦テナックス株式会社	代表取締役社長 吉野 隆	CFRP 素材関連の総合支援
株式会社ジーシー	代表取締役社長 中尾 潔貴	歯科用機械助言、事業化支援
マイクロ・ダイヤモンド株式会社	代表取締役 中島 博邦	CFRP 材切削工具の技術支援

1－3 成果概要

次の項目が補助事業の成果概要である。下記の研究成果により、当初設定した開発目標の全てを達成できている。

- ① 工作機械に適用できるCFRP複合構造体の最適構造の提案
- ② 上記に関するCFRP複合構造体の製作プロセスの開発
- ③ 上記に関する3件の特許出願による技術の知財保護と普及への寄与
- ④ 本焼成ジルコニアに対する3次元成形加工工法の提案
- ⑤ 上記の研究成果を統合化し、開発目標のCFRP複合構造体を搭載したジルコニアの熱援用同時5軸MCを実現

1－4 当該研究開発の連絡窓口

対外的な問い合わせの担当者（所属・氏名・電話・FAX・E-mail）は以下である。

所属：一般財団法人 総合研究奨励会

氏名：堀 雅文

電話： 03-5841-7661

FAX： 同上

E-mail： erf@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

第2章 本論一（1）

[1] 歯科補綴物切削に最適な CFRP ハイブリット構造体を搭載した同時 5 軸 MC の開発

[1-1] CFRP ハイブリット構造体の設計/製作課題への対応

CFRP ハイブリット構造体の実現に対し、ア) CFRP 繊維の異方性構造体の機械的特性（例：繊維方向と特性）等の把握、イ) CFRP とコンクリート材の複合材の設計/構造化手法の修得、ウ) CFRP 材の精密成形の技術を修得、の対応により、静的 CFRP ハイブリット構造体の技術を修得する。

i) 構造特性の目標：アルミ合金構造体と同等以下の重量で鉄系構造体より高剛性

研究成果

CFRP ハイブリット構造体の研究対象は、スピンドル主軸の保持部となるクイル構造体（z 軸）とそのクイル構造体の直動駆動機構用構造体（z 軸ボックス）、及び y 軸構造体の 3 種類である。クイルの CFRP ハイブリット構造体の開発に係る共同研究者間の関係を図 2 に示した。まず、5 軸 MC の基本構造の設計を岩間工業所が行い MC 全体構成と主要ユニットの仕様案を設定し、この情報を基に、東大杉田研究室

にてクイルの CFRP ハイブリット構造体部の詳細な開発設計を進める。

ここでは、同研究室が長年にわたる骨材の切削研究等で蓄積した異方性材料の構造シミュレーションを最大限に活用し、CFRP 繊維の異方性特性を構造強度、熱膨張特性、振動減衰性に関して工作機械に求められる CFRP ハイブリット構造体とすべく、①トポロジ最適化による基本構造の決定、②製造方法を考慮した CFRP ハイブリット構造体モデルの作成、③CFRP ハイブリット構造体モデルの構造解析（強度/変形量、共振周波数、接着部と締結部の応力解析）による形状、寸法の最適化、④構造決定、の手順で開発を進め、この構造を対象にテックラボにて CFRP ハイブリット構造体モデル用の成形金型の設計製作に作業が繋がる。

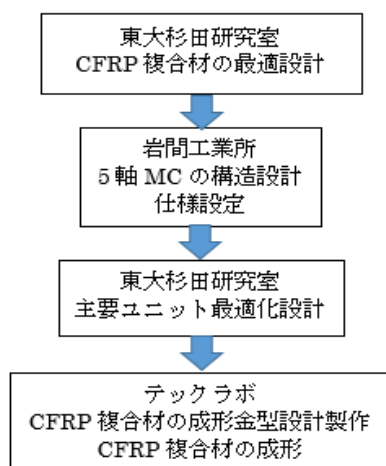


図 2 CFRP ハイブリット構造体開発の流れ

クイル構造体は、ジルコニアの成形切削時に生じる切削抵抗に対する支持強度と切削時の振動に対する振動減衰性が、また、主軸回転等で生じる発熱による熱変位の影響を最小化させる構造と成形法が求められてくる。また、z 軸ボックス構造体は、その 2 面にリニアモータの駆動用磁石を取り付けるため、磁石の吸引力に対する変形強度が求められてくる。また、MC のコラムとなる箱型ベッドとの絶対精度を造り込む主要構造体となるため、形状精度、組立再現性が必要となることから箱型構造体の部品の分割形状を考慮した CFRP 複合構造体としている。図 3 は成形金型の例で、発泡材製型、アルミ合金製型とそれらの型の成形加工状態を示した。成形プロセスの作業を図 4 に示した。



図 3 CFRP 成形金型（左：パールボード製）

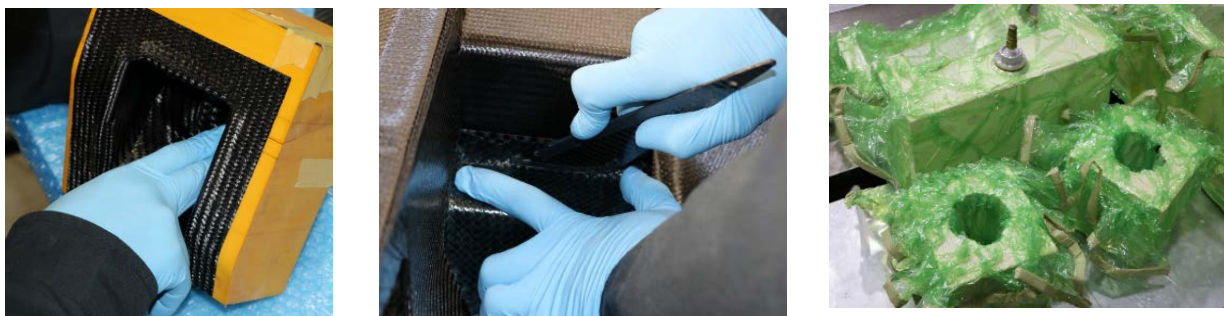


図4 CFRP 成形プロセス
(左：積層、中央：コーナー部成形、右：加圧加熱硬化処理)

この補助事業の2年間の研究成果を踏まえて最適なCFRP複合構造体の設計とその成形プロセスの高度化を実行した。図5の最上段の写真が昨年のCFRP/アルミハニカムのサンドウィッチ構造体である。この構造体の熱変位の抑制と剛性向上のため積層内部にI型の支柱を持たせた新たなCFRP/アルミハニカムのサンドウィッチ構造体に対するCFRP成形プロセスの確立を実施した。クイルのオートクレープ成形プロセスの概要を図6に示した。



図5 3種のCFRP-アルミハニカム構造体

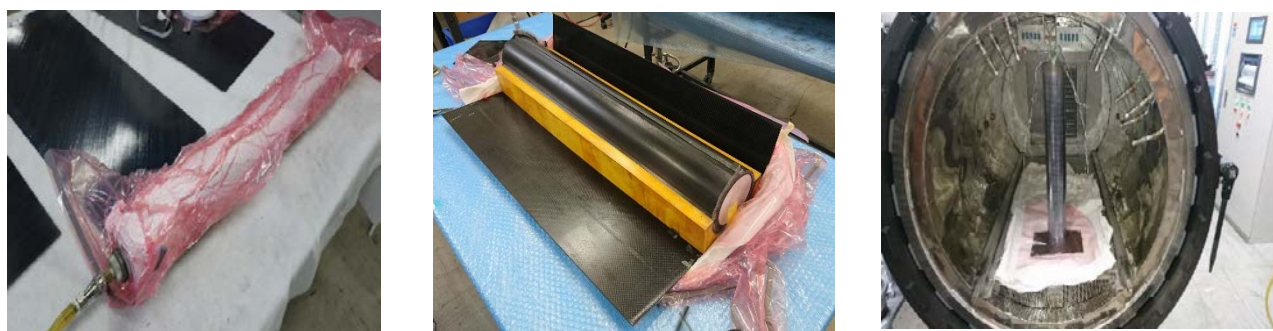


図6 CFRP 複合材成形プロセスの作業状況

CFRP 成形品の加工では、端面切断加工とボルト締結用の穿孔加工が主なテーマである。加工面の断面写真を図7に示した。外周面のキズやチャッキングの影響は無いと判断できた。また、切断方向による切断面の影響もなく両者共に切断面は非常に綺麗で、その後の接着基準面と成り得ると判断した。但し、バンドソーの抜け側のCFRP多層構造材の表面の1～2層に僅かな繊維の剥離が確認された。穿孔加工用に製作した超硬製ドリルは、25個の穿孔加工部のエッジ周辺部（CFRP多層積層材の表裏面：ドリルの入り側、抜け側）および加工壁面にCFRP繊維のケバ立ちやむしれ、層の剥離に関して良好な切削品質が得られたことから、PITCH系CFRP多層積層材の穿孔加工（径12mm）に対して良好な切削性能を有していることが確認された。

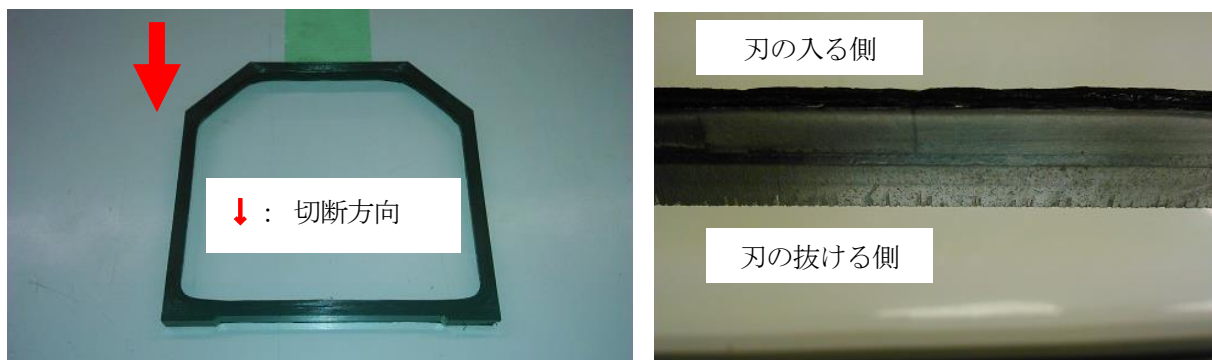


図7 切断部の観察写真（左：全体、右：拡大）

CFRP 複合材の機械加工（切断、穴加工）は、PAN 系と PITCH 系の異なる CFRP 素材特性を用いた CFRP 複合構造体や同構造体のねじ締結部での剛性を確保するために挿入した鋼板などから成る異種材の多層ハイブリット複合材への加工である。この被加工材に対して、ねじ締結用穴加工では 68 個や 54 個など多数の穴加工を曲面部位などにバリや積層剥離を生じさせずに安定して加工する必要がある（図 8）。共同研究者の(株)東鋼の研究成果による特殊切削工具の採用で、上記の対応が可能となった。また、複雑成形品の切断加工においても同様に積層剥離などの CFRP 積層材の構造強度の低下や信頼性への影響を抑えた加工品質が実現できた。



図8 CFRP 曲面成形部へのねじ締結用穴加工の例



図9 CFRP 成形品の端面切断の例

図 10 は CFRP 材の納品状態の事例、図 11 は試作した 3 種類の CFRP サンドイッチ複合構造材の事例、図 12 は軽量高剛性の機械特性を持つジルコニア材の歯科補綴物の成形切削に最適な MC 用部材の研究に試作した PAN 系 CFRP とアルミハニカムをサンドイッチ構造で積層した CFRP 複合構造材の事例である。この

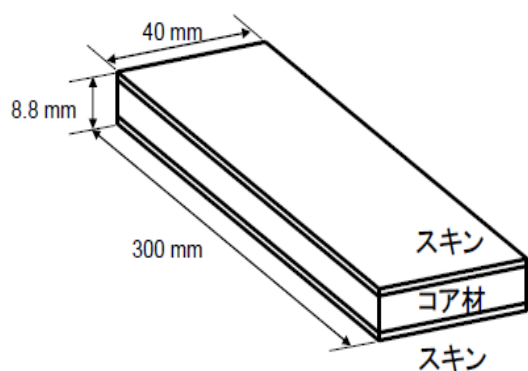
構造材の機械的強度の評価法は、従来の構造材の強度評価法と同様の万能試験機による3点曲げ試験法を採用し、試作資料の強度評価を実施した。図13はその評価状況である。図14に3点曲げ試験による強度の測定結果と材料力学の2種類（有限要素法、材料力学を用いた手計算）の計算解析結果との比較を示した。グラフより手計算と有限要素法の結果が完全に一致しており（2種類の線が重なっている）、また、試験結果ともほぼ一致していることがわかる。したがって、有限要素法の手法が高い信頼性を有することと、その絶対値が把握できた。この評価試験の値と強度解析より、アルミ合金構造体より軽く、従来の工作機械用構造材である鋼板の比剛性に比べて約2.4倍の増大が期待できる結果を得た（表1参照）。



図10 納品時のCFRP材（プリプレグ）



図11 3種類のCFRP複合構造材

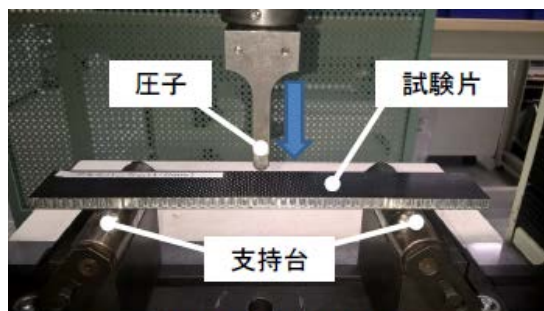


- スキン は各面2層
- コア材は厚さ8 mm
- 側面はコア材がむき出し



CFRP + アルミハニカム

図12 CFRP複合構造材の例（CFRP積層材+アルミハニカム）



押し込み前の様子



試験片破壊直後の様子

図 13 CFRP 複合構造材の機械的強度の評価状況

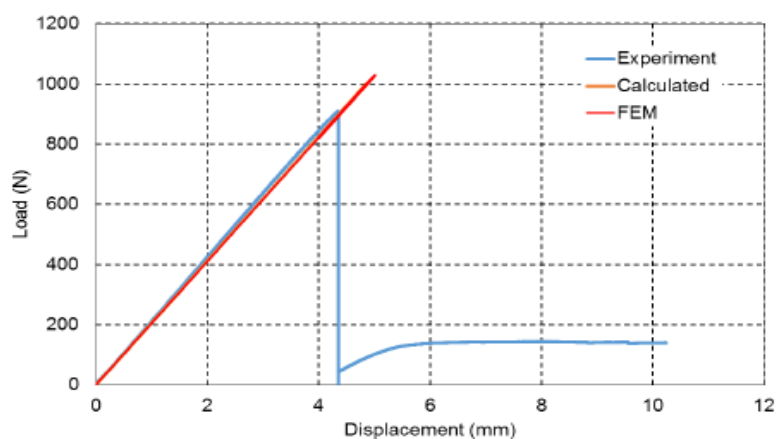


図 14 CFRP 複合構造材の強度評価の実験結果と材力計算との比較

表 1 鋼材と CFRP アルミハニカム複合材の比剛性比較

比較資料	試料サイズ T, W, L : mm	重量 Kg	曲げ剛性 Nmm ²	比剛性	比率
鋼材	8.8, 40, 200	0.549	3.67×10^7	2.05×10^9	1
CFRP アルミハニカム複合材	8.8, 40, 200 (T : 0.4+8.0+0.4)	0.018	4.77×10^8	8.68×10^8	2.36

MC 組立に採用する CFRP 製の構造部品を用いて評価（①機械強度：図 15、②振動特性：図 16）を行った。振動特性では、シミュレーション解析結果と非常に近似した計測結果が得られた。この振動特性の評価では計測状態で誤差が生じることが考えづらいことから、機械強度の特性はシミュレーション解析値が妥当と考えるのが好ましいと思われる。熱変位の計測評価は、熱変位の少ない新たな CFRP/アルミハニカム構造体を考案し、昨年の旧モデルとの比較評価を行い、シミュレーション解析通りの特性が得られることを確認した。



図 15 機械的強度の評価（Y 軸 Box 構造体）

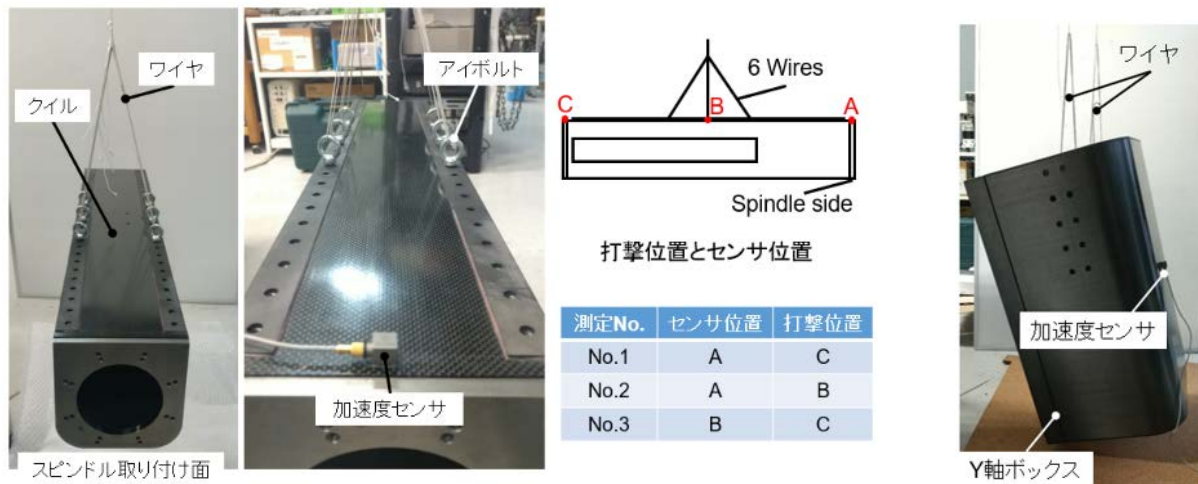


図 16 振動特性の評価（左：クイル、右：Y 軸 Box 構造体）

構造特性の目標 i) のアルミ合金構造体と同等以下の重量で鉄系構造体より高剛性、に関して、鋼材と CFRP アルミハニカム複合材の比剛性比較実験の結果より、 $8.8 \times 40 \times 200 \text{ (t, w, l) mm}^3$ の CFRP アルミハニカム複合材の重量は 0.018kg。本年度に開発したリブ付き CFRP アルミハニカム複合材の重量は、前述の標準 CFRP アルミハニカム複合材の重量比で 105%の重量との解析結果より 0.019kg ($0.018 \times 1.05\text{kg}$) となる。比較対象のアルミ合金の試験片重量は約 0.19kg ($= 8.8 \times 40 \times 200 \text{ (mm}^3) \times 2.7 \text{ (比重; g/cm}^3)$) であることから、試験片サイズでリブ付き CFRP アルミハニカム複合材とアルミ合金の重量を比較すると約 1/10 の軽量化が実現できることとなる。更に、鉄系構造体との比剛性特性の比較では、図 11 の Y 軸 Box 構造での比較とした場合、鋳鉄製 Y 軸 Box 構造体の重量は 59.3kg、他方でリブ付き CFRP アルミハニカム複合材の重量は 27.8kg となる。この両者のリニアモータの吸引力による変形量は、前者が $18.1 \mu\text{m}$ に対し後者では $17.5 \mu\text{m}$ である。したがって、単位重量当たりの剛性では、前者が $2.80\text{N}/(\mu\text{m} \cdot \text{kg})$ に対し後者では $6.17\text{N}/(\mu\text{m} \cdot \text{kg})$ となり、開発したリブ付き CFRP アルミハニカム複合材の比剛性は鋳鉄材の比剛性の約 2.2 倍の強度を持つことが期待できる（図 17 参照）。以上の結果より、目標 i) が実現できているといえる。

目標の達成状況
- 単位重量あたりの剛性が鉄より高い -

■ Y軸ボックスの比剛性

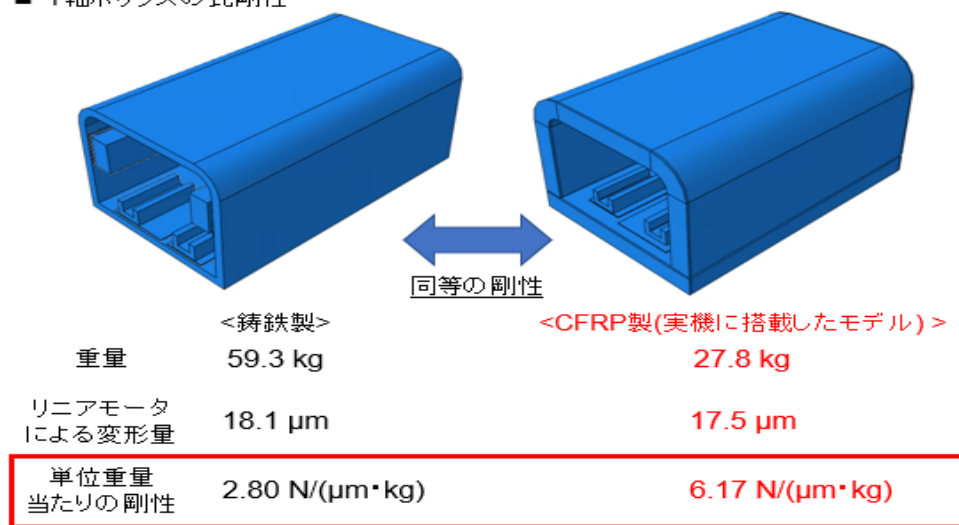


図 17 鋼製と CFRP 複合材製 Y 軸 Box の比剛性比較結果

[1-2] CFRP ハイブリット構造体の可動機構の実用化

1-1 の工法で成形した CFRP ハイブリット材の成形部品を組立て可動ユニットに構成し、リニアモータで駆動する可動機構の実用化がテーマとなる。

ii) 駆動特性の目標 : 現状の送り方向の加速度 0.3G を 3 倍以上の 1.0G に向上

研究成果

各種の機構部品（リニアモータ磁石、直動案内など）とのボルト締結法と直動案内を締結する基準面の平面形成のための積層接着法を考案しクイルユニットの試作品で応用確認を行った。また、前述締結部の信頼性評価のため、応力解析のシミュレーションを行い、それぞれ剥離破壊のリスクがないことを確認した。

Y 軸 Box 構造体と Z 軸支持フレームを合体させた可動機構（図 18）について、静剛性と振動特性のシミュレーション解析を実施した。この解析結果より、1 次から 4 次までの共振周波数と重力によるスピンドル先端の変位量の解析結果を確認した。詳細の解析情報は省略した。

YZ軸構造体の解析モデル

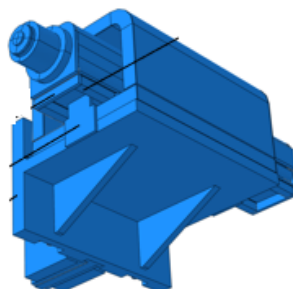


図 18 YZ 軸構造体の解析モデル

CFRP 構造材の接着の信頼性向上のために、接着剤の塗布厚さを得るための手加工、長尺補強リブへの接着剤塗布法の工夫、接着組付け後に 3 部品を確実に接着固定するための固定治具の採用などの接着プロセスによりユニットを製作している（図 19、20）。クイルユニットには直動スライドガイドが組み込まれて Z 軸の基準座標が形成される。主軸スピンドルとクイルユニットの組付けでは、主軸スピンドルがこの 2 軸に合致した組付け精度を実現しなければならない。詳細の解説は省略した。



図 19 クイルの精密接着の例



図 20 主軸スピンドルとクイルの接着/ねじ締結の状態

機構要素のリニアモータ用磁石と CFRP 複合構造体であるクイルユニットとの組立工法を研究し、実現可能なことを確認した。MC のコラムは振動減衰性の寄与を狙い人工石を母材とした一体成型コラムを採用した。MC の機構ユニットの組立は静岡の岩間工業所で行い、その後、東大のプロジェクト室に移送し電装系の組込みと並行して最終組立を実施した（図 21、22）。従来の鋼製ユニットでは、組立作業に簡易クレーンなどが必要となるが、CFRP 複合材を用いた Y 軸 Box ユニットの組立では手作業で積載や組立調整ができるなど軽量の CFRP 素材採用の利点を確認できた。



図 21 電装系の組付け作業



図 22 組立後の開発 MC

クイルユニットを対象にモデル解析を用いて動的挙動の研究を実施した。この結果で振動 1 次モードでの周波数条件と変位に関し、設計構造案で仕様条件を満足できることを確認した。

駆動機構は従来の送り機構のボールネジ方式ではなくリニアモータを採用することで、ボールネジ等の機械要素部品（ボールねじ、ボールナット、カップリング、歯車など）が無くせるため、駆動系の剛性が高く、慣性も小さい。したがって、ロストモーションが小さく、高精度位置決めと高速・高加減速駆動が可能となる。更には、ベアリングの局所摩耗が無くせることから与圧抜けによる精度劣化（駆動機構の寿命）が格段に少なくできている。

3 軸リニアモータのサーボゲイン調整においては、前述の Z 軸を除いた 2 軸に関して目標の加速度特性 1G をはるかに超え得る駆動性能に調整できている。この理由は、CFRP 構造体を採用したことによる軽量高剛性ユニットの採用や本体コラムを一体構造の人工石を採用したことなどによるものと推定している。技術データは省略した。

[1-3] 同時 5 軸 MC への各ユニット技術の統合化

1-1、1-2 の成果を統合し、軽量・高剛性・高減衰性を有す CFRP ハイブリット構造体の駆動機構からなる 5 軸 MC の機構部を構成するとともに、駆動制御の最適化を機構部とのマッチングで行い、実用機として統合化する。技術的目標値は次の数値とする。

iii) 送り機構の長寿命化 : ボールねじ機構の平均寿命 (2000 時間) に対し 2 倍 (4000 時間) の長寿命化

iv) 省エネ特性 : コンパクト (1000x1200 相当)、軽量・高精度・高減衰新材料の適用による 15% 省エネの実現

研究成果

分解/組立性/メンテナンス性を考慮した CFRP 複合構造体の構造設計として、Y 軸 Box ユニットにおいて組立性を考慮した設計が成されている。また、本体コラムを一体型の人造石ベースとしたことで組立とメンテナンスの場面で作業の容易さが期待できる。

自動工具交換システム (ATC) は工具の保管数を 6 本程度とし ATC がコンパクトにできるアーム旋回振り込み式の ATC アームと工具収納ポットを円盤状に配置したディスクタイプのツールマガジンを採用した。駆動機構をカム式とすることで油圧駆動システムなどの周辺機器を不要としている (図 23)。

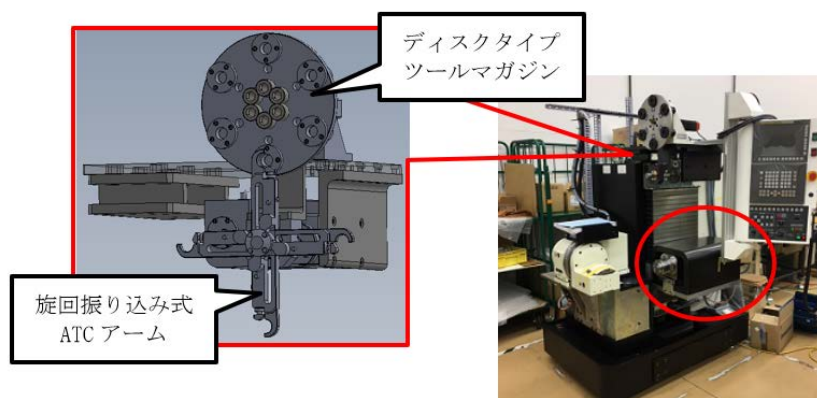


図 23 採用した自動工具交換ユニットと製作した同時 5 軸 MC

送り機構の長寿命化の目標iii)のボールねじ機構の平均寿命（2000 時間）に対し 2 倍（4000 時間）の長寿命化では、従来構成の与圧ベアリングによるトライボロジータの寿命の制約を根本的に解決する駆動機構を採用することで、従来の 2 倍以上の寿命を目標とした。即ち、ボールねじ駆動機構を無くし 3 軸の全てに非接触駆動方式のリニアモータを採用したことでトライボロジータの寿命の回避を実施している。採用した駆動機構における寿命では、直動案内のリニアガイドが挙げられるが、可動体重量が鋼製に比べて格段に軽量のため慣性力等による寿命への影響は無視できると考えてよい。したがって、送り機構の長寿命化目標は、駆動機構の非接触式の採用で実現できていると判断した。

省エネ特性の評価ではリブ付き CFRP アルミハニカム構造体を採用した可動部となる YZ 軸 Box 構造体ユニットと鉄系材料（鋳鉄製）で製作した同構造体ユニットの両者の駆動時の総エネルギー消費量のシミュレーション比較を行った。2 種類の異なる構造材で製作された YZ 軸 Box 構造体ユニットの合計重量は、鋳鉄製で 208.0kg に対し CFRP 複合材製では 141.1kg となり、鋳鉄製可動体の重量に対して約 32%の軽量化が期待できる結果である。省エネ特性を評価する可動部の駆動条件は昨年と同じで、①加速度 1.5G で到達速度 100,000mm/min での早送りによる位置決め、②加速度 1.5G で到達速度（送り速度）1,000mm/min で切削時間 1s の動作を 100 回繰り返す、とした場合のエネルギー消費率を最大エネルギー消費率（W）としている（図 24）。加工力 50N（設置値）としたときの鋳鉄製可動体と CFRP 複合体製可動体のそれぞれの動作時に働く慣性力は、前者で 3,058N、後方で 2,074N となり、両者比較で CFRP 複合体製可動体では約 32%の慣性力の低減効果が期待できることとなる。この時、最大エネルギー消費率は鋳鉄製可動体で 5,097N、CFRP 複合体製可動体では 3,457N（約 32%低減）となる。したがって、1 サイクル当たりの総エネルギー消費率は、鋳鉄製可動体で 568.7N、CFRP 複合体製可動体では 399.1N となり約 29.8%の低減が期待できる結果となる。したがって、本研究が目標とする総エネルギー消費量 15%以上の削減は到達の見込みがあると考えられる。なお、正確には、開発 MC を稼働させた状態での省エネ特性の評価を実施する事が望ましいが、切削液ユニットなどの周辺機器類が整備されていない事や、比較に適する同等仕様の MC が無い事などから実機の駆動状態における省エネ性の比較は現時点では実現できないことから、前述の解析による比較評価を行った。

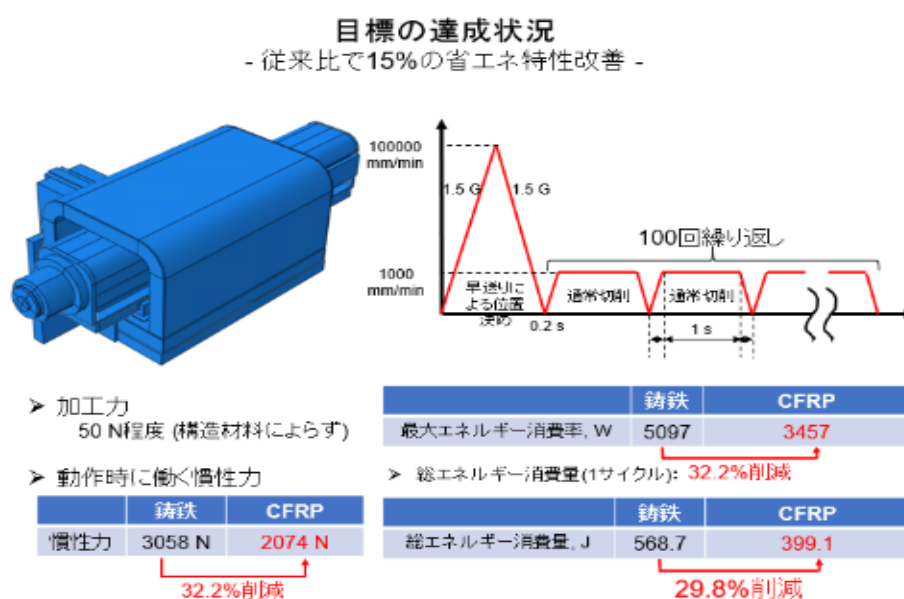


図 24 最大エネルギー消費率（W）の解析結果

リニアモータが装着される Y 軸 Box 構造体に対し、比較的短い時間での熱による経時変化の抑制策を研究した。加熱実験では、恒温装置の槽内にレーザ変位計を装着した試験片を設置し、槽内温度を 20℃から 40℃まで加温し試験片の変形量を測定している（図 25）。以上の結果を経て、実際の Y 軸 Box 構造体にリブ付きサンドウィッチ構造を適用した場合のシミュレーション解析を行い、熱解析においてリブ付きサンドウィッチ構造では 17%の熱剛性の向上が、更に、リブ配置の最適化を行う事で 26%の熱剛性の向上がそれぞれ期待できる結果が得られた（図 26）。



図 25 熱変位の評価実験状況

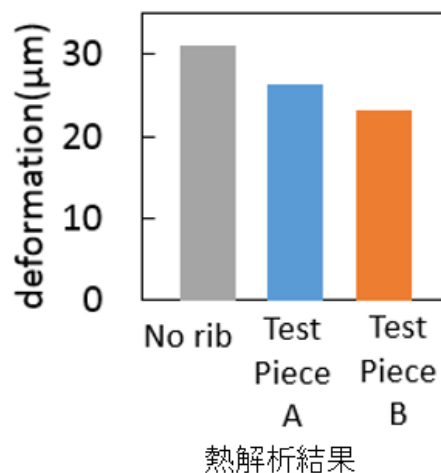


図 26 熱変位の実験比較結果

装置のコンパクト性では、当初の目標投影面積：1.2m²（1,000 x 1,200）に対し、ベース設置部の投影面積では目標の 1.2m²を実現できているが、加工機の外装カバー外形では 1.77m²（1,090x1,626）となり 47.5%の増大となった。電装 Box 系の操作性を重視したことから外装カバーを含めた投影面積の増大と熱援用レーザシステムを本体側面に配置したため目標未達となった。

レーザ熱援用システムは、CO₂ レーザユニットを搭載した保持機構とレーザ照射光を加工点に供給制御するガルバノミラー制御ユニットの 2 ユニットで構成される。このレーザ熱援用システムと開発 MC をレーザ光の光路調整の作業性、同システムのメンテナンス性、更には、CO₂ レーザ光に対する作業時の安全性確保の対策（保護カバー、完全安全のシステム設計など）などを考慮したレーザ熱援用システムと開発 MC との統合化が必要となる。

以上の研究成果として、a)CFRP 複合構造材に振動減衰性を持たせるための設計解析法に関する特許 1 件、b)同構造体の熱変位を抑制する構造に関する特許 1 件、c)PITCH 系 CFRP 素材を用いた精密成形法に関する特許 1 件の 3 件の出願を終えた（図 27 参照）。

- a) 複合構造体の設計方法及び複合構造体：特願 2017-111159
- b) 複合構造体：特願 2017-111160
- c) 炭素繊維強化部材の製造方法：特願 2017-111171

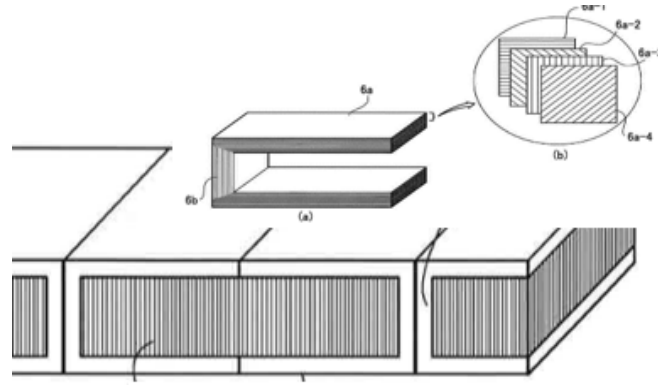


図 27 熱変位抑制の発明解説図の例

[2] 熱援用ジルコニア切削技術の応用開発

[2-1] ジルコニアの熱援用切削技術の応用開発

岩間工業所と東京大学杉田研究室は、ジルコニア材に対する熱援用切削の原理開発を 2 次元平面加工をテーマに共同研究を実施している。このため本研究開発では、前述の 2 次元加工の成果を活用し 3 次元形状の成形切削を目標とする応用開発を実施する。

v) 技術的目標：ジルコニアの 3 次元熱援用切削システムの開発

研究成果

小径の電着ダイヤモンド砥石を用いた基礎実験を行い、電着ダイヤモンドの著しい損耗を生じない状況で、良好な熱援用研削加工が可能であることを確認した。また、工作機械搭載の前に動作試験を行うための CO₂ レーザとその光路制御用のガルバノスキャナの実験装置を構築した。これまでの研究で、研削法、切削法とこれらの工法に熱援用工法を併用した工法を用いて本焼成ジルコニアの成形加工の研究を進めてきた。この中で熱援用工法のレーザ熱が加工工具に与える影響を低減させる必要性を確認したことから、3 年次の研究の中で液体窒素を用いた極低温加工（クライオジェニック加工）による工具冷却の効果検証の研究を進めた。以上の研究開発の工法の最適化の検討により、本焼成ジルコニアの機械加工工法（粗加工；熱援用加工（切削 or 研削）＋仕上げ加工；精密研削加工）で実現できた。

なお、ジルコニア歯科補綴物の信頼性に関する評価については、切削表面の加工変質状況を評価する手法（比較試験片の表面に FIB（Focused ion beam:集束イオンビーム）装置で断面を形成し SEM でマイクロクラックなどの欠陥を拡大観察する）を適用した。本焼成ジルコニアを精密研削と熱援用精密研削で加工した表面の 2 種の加工面に対し FIB 断面の SEM 観察を行った結果、微小径ダイヤモンド研削砥石を用いた精密研削加工表面にはマイクロクラックは観察されなかったが、熱援用加工表面ではサブミクロンオーダーのマイクロクラックが観察できた。この結果より、本研究が開発した本焼成ジルコニアの機械加工工法（粗加工；熱援用加工（切削 or 研削）＋仕上げ加工；精密研削加工）が適切であることを間接的に示すものと判断した。

[2-2] 同時5軸MCへの熱援用システム搭載による歯科補綴物専用MCの開発

熱援用システムを開発した同時5軸MCに搭載し、加工点近傍の熱援用処理アルゴリズムを開発するとともに、加工性能や長時間安定性（レーザーによるノイズの影響、加工環境の影響、他）を評価確認し、歯科補綴物専用MCを実現する。技術的目標は以下の内容とする。

vi) 技術的目標：従来技術では切削加工ができない本焼成ジルコニアの成形切削の実現

研究成果

技術目標v)の成果を活用し、本焼成ジルコニアの機械加工工法（粗加工；熱援用加工（切削 or 研削）＋仕上げ加工；精密研削加工）の適用により本焼成ジルコニア製歯科補綴物を加工したことから目標vi)を達成したといえる（図28、29）。

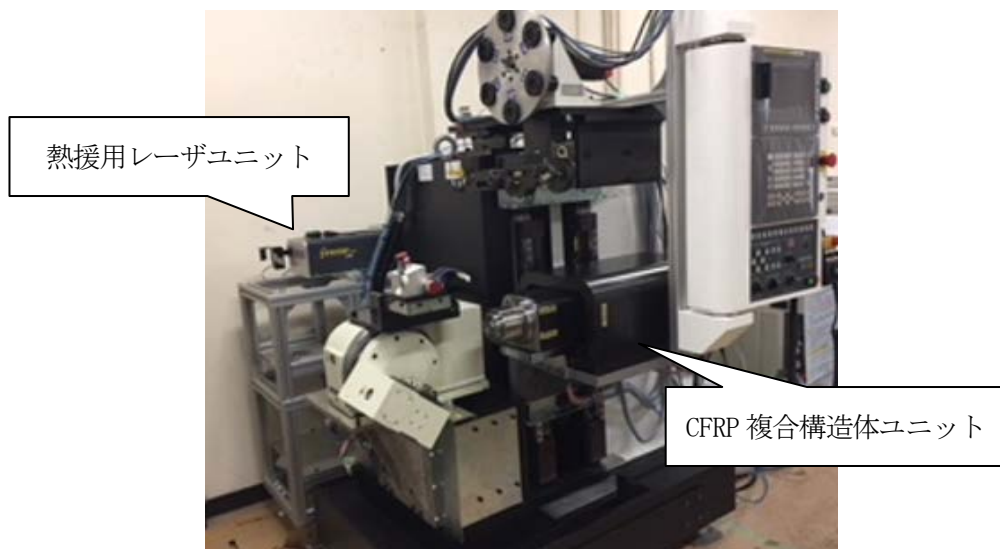


図28 熱援用システムと統合化した CFRP 複合構造体搭載の同時5軸MC



図29 開発工法で製作した本焼成ジルコニア製歯冠補綴物

最終章 全体総括

(1) 複数年の研究開発成果

次の項目が補助事業の成果概要である。

- ① 工作機械に適用できるCFRP複合構造体の最適構造の提案
- ② 上記に関するCFRP複合構造体の製作プロセスの開発
- ③ 上記に関する3件の特許出願による技術の知財保護と普及への寄与
- ④ 本焼成ジルコニアに対する3次元成形加工工法の提案
- ⑤ 上記の研究成果を統合化し、開発目標のCFRP複合構造体を搭載したジルコニアの熱援用同時5軸MCを実現

特に、CFRP素材を用いた工作機械はテーブルなどの成形形状が単純な箇所で軽量性を活かした実用化が実施されているが、本提案では駆動機構ユニットに適用する狙いのため、CFRP複合材を用いた構造設計とその製作に関する知見等が乏しかったことから、シミュレーション解析を先行させた開発アプローチ（モデルベース開発）アプローチを初期から採用して研究開発を進めた。このアプローチの成果や共同研究者の個々の保有技術の信頼性の高さなどにより、後戻りの少ない研究開発活動が展開できた。

(2) 研究開発後の課題・事業化展開

研究開発後の課題

この研究期間ではスピンドルを研究テーマとしなかったため市販のスピンドルを用いてMCを開発した。このため、スピンドル重量に対応できる構造を採用する必要性からMC全体の小型軽量化と高速駆動性能の実現に限界が生じた。したがって、研究開発後の課題は、スピンドルを含めた軽量化を前提とした小型軽量で高速駆動性能を有するMCの実現である。

事業化展開

本研究開発成果は小型精密ワークに対する高速高精度切削装置の開発である。研究開発後、短期での具体的な対象商品は、1) ジルコニア製歯科補綴物、2) コネクタ用超精密金型の2種である。また、開発成果の特徴（コンパクト、高速・高精度、難削材対応性）を考慮した場合、将来の可能性として、3) 人工関節などの1品切削加工用途、4) 3Dプリンター成形品の仕上げ切削装置などが候補として挙げられる。