

令和2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

CAM 機能を搭載した小型で低価格な  
歯科用 CAD/CAM 冠切削加工機の研究開発

研究開発成果等報告書

令和3年5月

担当局 近畿経済産業局  
補助事業者 一般財団法人大阪科学技術センター

## 目次

第1章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	5
1-3	成果概要	6
1-4	当該研究開発の連絡窓口	8
第2章	本論	9
2-1	数値制御装置に実装するCAMの開発	9
2-2	補綴物の切削加工に特化した小型で軽量の切削加工機の開発	12
2-3	補綴物の切削加工に特化した低コストの数値制御装置の開発	16
2-4	試作機による補綴物の切削加工の実証と検証評価	17
2-5	IoT、AIを活用した製品・サービスの向上のための技術開発	18
最終章	全体総括	20
3-1	研究成果のまとめ	20
3-2	補助事業の成果に係る事業化展開について	20
	(1) 想定している具体的ユーザー、マーケット及び市場規模等に対する効果	20
	(2) 事業化見込み	20

## 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

#### <研究開発の背景>

歯科の治療を行う際、患者にとって負担となるのは「治療期間が長すぎる」ことである。この原因のひとつは補綴物の製作日数の期間の長さにある。高齢者の増加や、審美性への認識の変化など、歯科治療に於いて欠損部を補うための歯科補綴物のニーズは高まっているが、これを製造する歯科技工士の総数は、1996年の約36,000名をピークに年々減少し、2018年は約34,400名となっている。また歯科技工士を育成する技工学校も、志望者の減少で72校から50校を下回るまでに減少、入学者数は950人程度となっている。今後、60～70歳の歯科技工士の引退後は深刻な人材不足に陥ると考えられている。(参考資料1)

年度	受験者数 (人)	合格者数 (人)	合格率 (%)
15年度	2,268	2,238	98.7
16年度	2,278	2,249	98.7
17年度	2,284	2,266	99.2
18年度	2,010	1,991	99.1
19年度	調査せず	調査せず	
20年度	1,444	1,431	99.1
21年度	1,317	1,298	98.6
22年度	1,265	1,244	98.3
23年度	1,319	1,302	98.7
24年度	1,250	1,239	99.1
25年度	1,142	1,134	99.3
26年度	調査せず	調査せず	
27年度	1,114	1,104	99.1
28年度	1,012	987	97.5
29年度	952	902	94.7
30年度	839	798	95.1

参考資料 1 日本歯科新聞 2019.4.2

日本の人口動態統計を見ると、1980年頃の第2次ベビーブーム以降、14歳以下の年少人口は減少し、65歳以上の老年人口の割合が増えていて2016年には年少人口が12.4%、老年人口が27.3%を占めている。こうした高齢化社会において高齢者が健康な生活をするうえで歯の健康が全身の健康を左右することから歯科治療の重要性が指摘されている。特に虫歯や歯周病の治療に限らず、インプラントや矯正治療のニーズも高まり、新しい治療法が確立されるとともに新しい治療用の補綴物材料も登場している。

十数年前に商品化された歯科用CAD/CAMの登場は歯科技工における革命とも言われ、過去数世紀にわたって行われてきた金属鋳造法による補綴物の製造から切削加工による補綴物の製造へと製造法が大きく変化した。また、歯科用CAD/CAMを用いて製造されるハイブリッドレジン補綴物(通

称 CAD/CAM 冠) が 2014 年に保険適用されて以来、金属鑄造法で用いられるパラジウム、金などの金属材料の高騰と金属アレルギーを避けたい歯科医師や患者の要望で CAD/CAM 冠の需要が伸びている。さらに、2017 年には小臼歯用に加えて大臼歯用も保険適用となり、ますます需要が伸びると予測されている。(図 1)

歯科治療のニーズが高まり、特に CAD/CAM 冠の需要が拡大しているにも関わらず、歯科用 CAD/CAM の場合は CAD によるデザインはこれまでの手作業による補綴物製作の技術を応用できるが CAM での切削加工は全く新しいコンピュータ操作技術の習得が必要であり、このため、歯科治療における補綴物、特に保険適用の CAD/CAM 冠の製作における期間の短縮と加工した補綴物の品質の安定化は早急の課題となっている。(図 2)

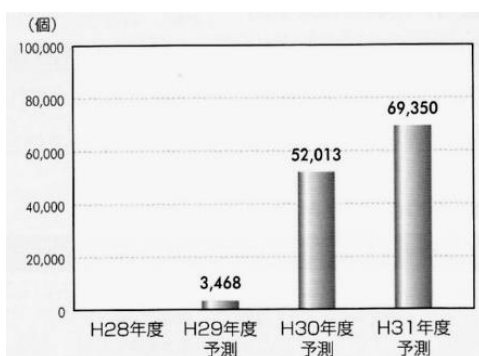


図 1 大臼歯用ハイブリッドレジン補綴物の販売予測 (ヤマキン、歯科用 CAD/CAM ハンドブックより)

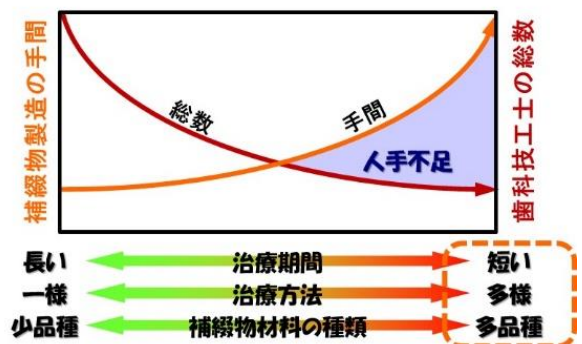


図 2 歯科技工士の不足による補綴物製造の危機

本研究開発事業は歯科用 CAD/CAM システムの運用において、CAM の操作技術を必要としない小型で安価な CAD/CAM 冠切削加工機を開発/上市することにより、一人当たりの歯科技工士の生産性を向上させ、増大する需要に対応するものである。

<研究開発目的及び目標>

図 3 に示すように歯科用 CAD/CAM による補綴物製造法は、患者さんの歯牙の欠損部を型にとり、その石膏モデルを精密計測してモデルの形状をデータ化する工程から始まる。次に、そのデータをもとに欠損部を補綴する形状をコンピュータ上でデザインし、補綴物の 3 次元モデルを作成する (CAD 操作)。補綴物は数値制御切削加工機で加工されるが、加工を指令する加工用プログラムは、CAD で作成された 3 次元モデルからコンピュータを用いて作成する (CAM 操作)。従来の歯科用 CAD/CAM に於いてはこの CAM 部分での作業工程が多かった。

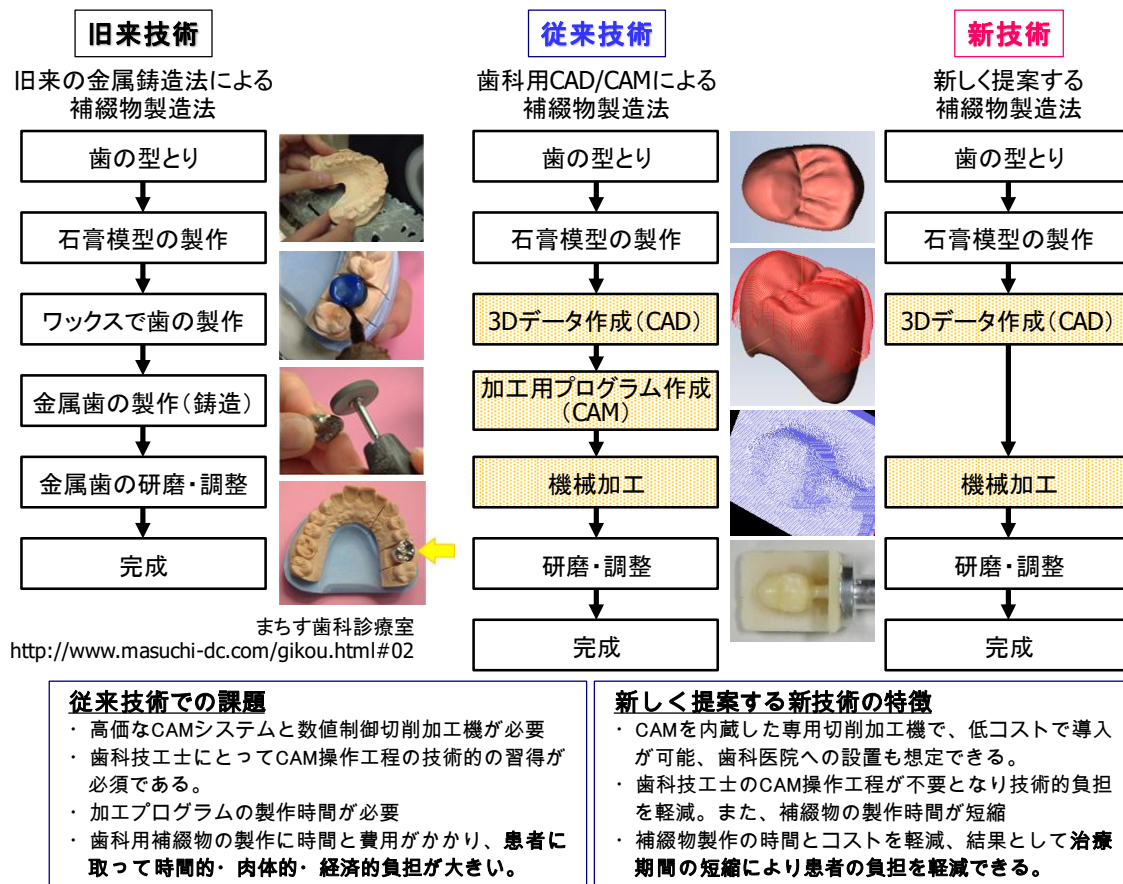


図 3 補綴物製造法の比較

歯科用 CAD/CAM システムによる補綴物製造法では、補綴物の生産効率が大幅に改善され補綴物の形状や精度のばらつきがなくなり加工品質が向上した。しかし、従来のシステムでは CAM を操作して加工用プログラム作成する工程が必要で、これは歯科技工士の経験と技術が特に必要なく、むしろこの工程に時間と労力を要するというデメリットがあった。本研究では CAM 操作を不要とするために加工用プログラムを自動で生成することができるソフトウェアを数値制御切削加工機本体に内蔵することとし、これにより歯科用 CAD/CAM による補綴物製造法のデメリットを排除することができる。その比較を表 1 に示す。

表 1 補綴物製造法のメリット、デメリットの比較

	メリット	デメリット
金属鑄造法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 取得した技術を活かしたカスタマイズ品とすることで高付加価値製品が作成可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工程の全てが手作業で生産効率が低い</li> <li>・ 補綴物の形状や精度のばらつきが大きい</li> </ul>
従来の歯科用 CAM/CAM	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 機械加工により生産効率が高い</li> <li>・ 補綴物の形状や精度のばらつきが小さい</li> <li>・ 技工士の作業が簡素化でき、単純操作で高品質な補綴物が製作可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ CAM による加工用プログラムの作成のための時間と労力が必要</li> <li>・ 機器本体価格が高コストである</li> <li>・ 機器が大きく重いので設置場所が限定的</li> </ul>
新技術提案手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 機械加工により生産効率が高い</li> <li>・ 補綴物の形状や精度のばらつきが小さい</li> <li>・ CAM による加工用プログラムの作成のための熟練度や時間／労力が不要</li> <li>・ 機器本体価格が低コスト</li> <li>・ 機器本体がコンパクトで軽量であり設置場所の選択肢が多い</li> </ul>	

コストの面では、従来の歯科用 CAD/CAM と数値制御切削加工機の導入費用が総額 1000 万円程度と高額で、事業所数で全体の 80%を超える 3 人以下の小規模な歯科技工所では導入することができず、旧来の金属鑄造法による補綴物製造法に頼らざるを得ない。導入費用の内訳は石膏模型の計測装置と CAD に要する費用が約 400 万円、CAM と数値制御切削加工機に要する費用が約 600 万円である。また、数値制御切削加工機には工業製品の部品加工にも使用される高精度な数値制御装置を備えた大型加工機をそのまま使用することも多いため、歯科医院や小規模な歯科技工所に設置することが難しい。

歯科における医療サービスとは医師の治療技術以外のファクターとして患者の時間的／経済的負担の軽減がある。歯科治療の基本である補綴物の品質を維持しながら低コストで迅速に提供することは治療期間の短縮を実現し、サービスの向上につながる。現在市販されている歯科用 CAD/CAM システムはその実現のためのひとつの手段であるが、さらにシステムの一体化を図った“CAM 機能を搭載した小型低価格な歯科用 CAD/CAM 冠切削加工機”は補綴物の製作コストと期間のさらなる削減を実現するものである。具体的な研究内容として次の目標を挙げた。

#### ① 数値制御装置に実装する CAM（加工用プログラムの自動生成ソフトウェア）

神戸大学白瀬研究室で研究されている工具の位置と姿勢を自動で計算する機能と切削加工シミュレーションの技術を活用して切削加工データを自動生成でき、CAM の操作スキルを持たない歯科技工士でも装置の導入直後から利用することが可能なソフトウェアを開発する。

② 補綴物の切削加工に特化した小型で軽量の切削加工機

(株)プロトが有する3Dプリンタ応用技術、精密鋳造技術、5軸加工技術を活用して、小型で軽量の躯体の鋳造方法、ならびに低コストで高精度な機械加工法を確立する。

③ 補綴物の切削加工に特化した低コストの数値制御装置

モディアシステムズ(株)が有する数値制御装置の設計・製造技術を用い、廉価な同時5軸制御ステッピングモータ駆動の数値制御装置を開発/試作する。

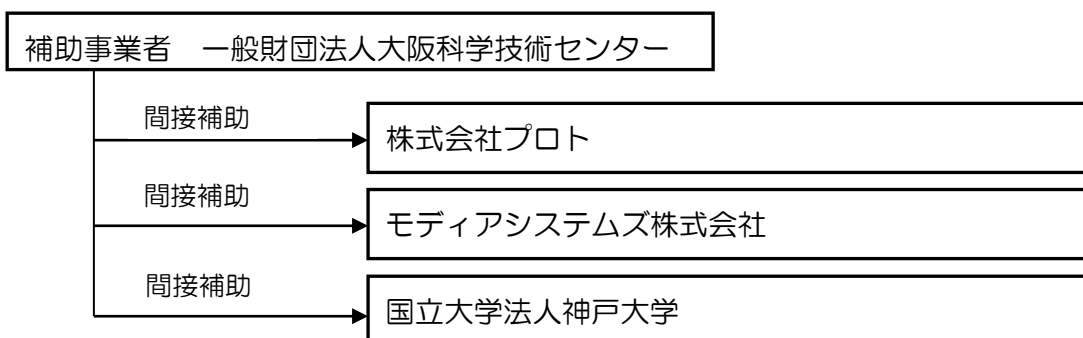
本プロジェクトで試作開発する装置の具体的な仕様目標を、既存の歯科用切削機の仕様と比較して表2に表す。

表2 既存の歯科用切削加工機と試作開発するCAM機能付き切削加工機の仕様

	既存の歯科用切削加工機	試作開発する歯科用切削加工機の高度化目標値
CAM	本体以外に加工用プログラムを作成するCAMが外部に必要となる	CAM機能を持ち、外部のCAMシステムは不要
切削加工機	外形寸法 1×1×2 m 程度 加工領域 0.4×0.4×0.4 m 程度 消費電力 1.0~1.5 kW 工具本数 10 本程度	外形寸法 0.4×0.4×0.6 m 程度 加工領域 0.1×0.1×0.1 m 程度 消費電力 300~400 W 工具本数 4 本
数値制御装置	4軸あるいは5軸制御 サーボモータ駆動 セミクローズドループ制御 IoT機能は持たない	4軸あるいは5軸制御 ステッピングモータ駆動 オープンループ制御 IoT機能を搭載して、遠隔地からのリモート操作が可能
導入コスト	400~600万円 (CAM機能を含まない)	180万円 (CAM機能を含む)

1-2 研究体制

<履行体制図>



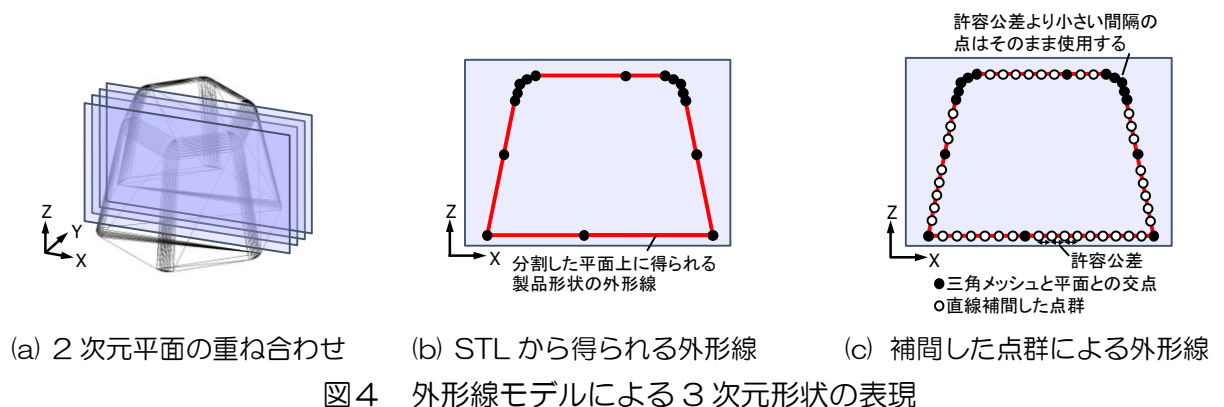
<研究者>

株式会社プロト	長谷川、中村、坂下、中尾、井上
モディアシステムズ株式会社	馬杉、小川、星野
国立大学法人神戸大学	白瀬、西田

## 1-3 成果概要

(1) 数値制御装置に実装するCAM（加工用プログラムを自動生成するソフトウェア）の開発

CAD で作成された歯科用補綴物の STL 形式のモデルから工具の位置と姿勢（工具経路情報）を自動計算して切削加工用プログラムを生成するため、図4に示すような STL 形式のモデルから取得した断面形状（外形線）を構成する点群を高密度な点群で補間する外形線モデルを新たに提案し、外形線モデルによる3次元形状の表現法の開発を重点的に実施した。STL 形式の歯科用補綴物のモデルは外形線モデルに変換され、図5に示すように外形線モデルで表現された補綴物と指定された工具との関係から工具の位置と姿勢（工具経路情報）が自動で計算できるようになった。また、工具の位置と姿勢（工具経路情報）に基づいて切削加工用プログラムが自動で作成できるようになった。



(2) 補綴物の切削加工に特化した小型で軽量の切削加工機の開発

(株)プロトが有する3Dプリンタ技術で製作される鋳造木型と、精密アルミ鋳造技術を応用して“小型で安価な歯科CAD/CAM 冠NC切削加工機”を開発試作した。令和元年度は評価試作機2台を製作し、耐久性テストと電氣的ノイズによる誤動作のテスト、実際の補綴物データを使った切削加工および加工精度測定など、商品化に向けた各種テスト、組立手順や保守方法等の検証を行った。

令和2年度は令和元年度製作の評価試作機の各種テスト結果を分析、及び実際に装置を運用した際の使用感等の評価を行い、問題点を改良して量産試作機3台を製作した。(図6)



図6 令和3年量産試作機3台（評価デザイン3種）

### （3）補綴物の切削加工に特化した低コストの数値制御装置の開発

本事業で計画したCAD/CAM 冠切削加工機はX、Y、Z、A軸の4軸の仕様であるが、開発する数値制御装置は将来のバージョンアップに備え5軸制御の機能とし、軸制御以外にネットワークによる外部からのモニタリング機能、稼働ログ／使用工具の積算時間のデータ蓄積機能を有している。

（図7）

また、低価格タイプの販売形態も考慮してタッチパネルを搭載しなくても外部PCとのネットワーク通信機能でデータ転送およびリモート運転が可能な機能を装備した。この機能により他社のCAMで生成されるNCデータでの切削加工が可能となる。さらに、令和2年度では、小型表示器とスイッチ類および軸動作の為にパルスハンドルを持った操作パネルを接続できる拡張インターフェイスとそれに伴うファームウェアソフトの開発を行った。この操作パネルは装置の製作過程や目利きの保守時に必要な各軸のポジション設定やパラメータ変更などのための機能を持つ。（図8）



図7 5軸数値制御基板



図8 保守用操作パネル

## (4) 開発した試作機の仕様

歯科用 CAD/CAM 冠 NC 切削加工機の量産試作機仕様を以下に示す。

軸仕様：	X、Y、Z軸ボールスクリー/リニアガイド A軸 ハーニックドライブ
軸動作距離：	X軸 80mm Y軸 80mm Z軸 65mm A軸 ±360度
制御方式：	オープンループ方式ステッピングモータ駆動 同時4軸（最大同時5軸）制御
主軸：	出力350W 最高回転数30000RPM 最大シャンク径6φ
装着ワーク数：	CAD/CAM冠（S/M/Lサイズ）3個
工具数：	最大4本
インターフェイス：	イーサネットLAN USB SDカード 汎用I/O
寸法：	W380mm D440mm H490mm
重量：	約28kg
電源：	AC100V 定格電流4A以内
必要エア源：	0.55~0.6MPa 30L/min以上
組み込みPC：	9インチ タッチパネル仕様

## 1-4 当該研究開発の連絡窓口

〒613-0023 京都府久世郡久御山町野村村東123番1号

株式会社プロト

Tel: 0774-41-2833

長谷川 美成 Email: [y.hasegawa@proto-tec.co.jp](mailto:y.hasegawa@proto-tec.co.jp)

## 第2章 本論

### 2-1 数値制御装置に実装するCAMの開発

#### 2-1-1 工具の位置と姿勢を自動計算するプログラムの開発

切削加工する補綴物の3次元モデル、切削加工に使用する工具形状、加工条件から工具の位置と姿勢の計算を行い、切削加工プログラムを自動計算するソフトウェアを開発した。3次元CADモデルを三角メッシュで表現した形式であるSTL (Standard Triangular Language) 形式のファイルから加工用プログラムを生成する独自のCAMソフトウェアである。

一般的に、STL形式のファイルでは構成する三角メッシュのサイズが不均一であるため、その扱いは難しい。本研究では、製品形状をSTLデータで表現した三角メッシュに対して、図9に示すようにZX平面で分割することで製品形状の外形線を取得する。STLデータでは三角メッシュが不均一であるため、分割した平面上に得られる三角メッシュとの交点の間隔は不規則である。そこで、図9に示すように得られた交点を等間隔の点群となるように直線補間することで、製品形状表面を等間隔の点群で表現することが可能となる。本研究では、外形線モデルで表現した製品形状の表面と工具との干渉量から工具経路を算出する。ここでは、Y軸方向の工具経路の間隔は加工条件である半径方向切込み量によって一意に決まる。そのため、工具進行方向に対する微小間隔ごとに製品形状と工具とのZ軸方向の干渉量を算出して、干渉量の最大値をZ軸正方向にオフセットすることで工具位置を算出することができる。

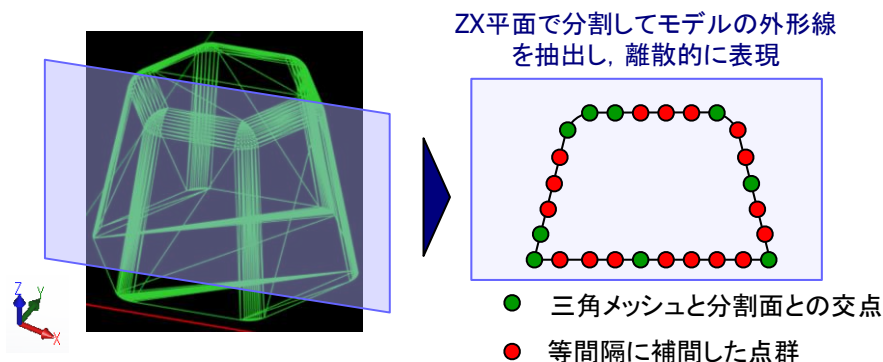


図9 メッシュデータを等間隔の点群で表現する外形線モデルによる形状表現方法

まず、図10に示すように工具を製品形状と同じ間隔のZX平面で分割して表現する。スクエアエンドミルの場合、ZX平面で分割した平面上には工具領域を長方形で描画することができる。

次に、工具を表現した長方形と外形線モデルで表現した製品形状の点群との干渉を判定する。工具を表現した長方形の内部に存在する点群に対して、Z軸方向に対して干渉量が最も大きい値を算出する。工具の内部に存在する製品形状の外形線すべてに対して、工具を表現した長方形と製品形状の点

群との干渉量を判定して、干渉量の最大値を算出する。得られた干渉量の最大値だけ工具を Z 軸正方向に退避することで工具位置を算出することができる。工具進行方向に対する微小間隔ごとに工具位置を求めることで、図 1 1 に示すような工具経路を算出することができる。

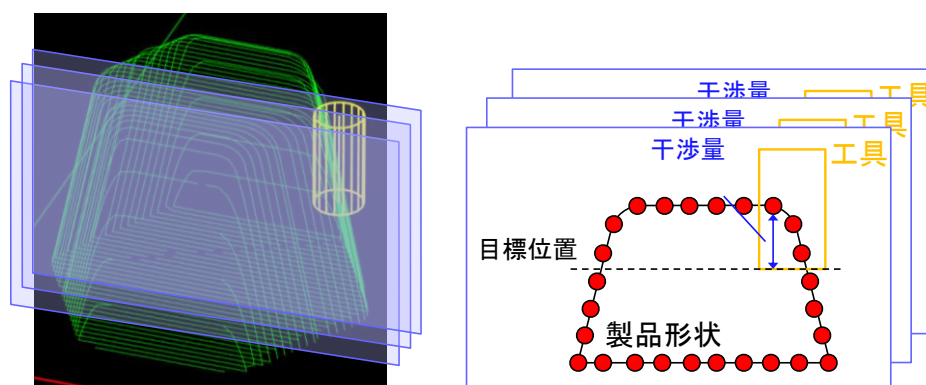


図 1 0 外形線モデルで表現した製品形状および工具による干渉量の判定

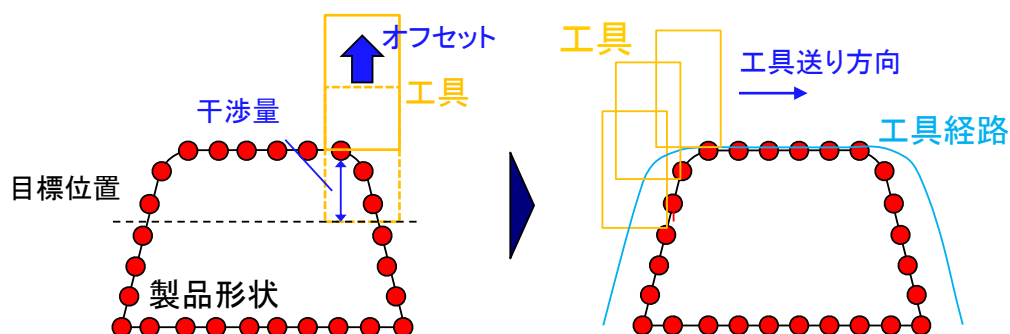


図 1 1 工具と製品形状との干渉量によって算出される工具経路

また、後述する被削材の材質に合わせた加工条件を自動で決定する処理を組み込み、STL 形式の CAD モデルをインプットするだけで、加工用プログラムを自動生成するソフトウェアを開発した。

## 2-1-2 加工条件データベースの構築

CAD/CAM 冠の材料はメーカーごとに組成／特性が異なり、それを加工する工具の種類也多岐にわたり加工条件は多種多様である。このため令和 2 年 4 月の調査では市場で有力な複数メーカーの材料／工具を入手し、最適な切削加工条件を検証するためのデータベースを構築した。

本研究では事例ベース推論 (Case-Based Reasoning: CBR) の考え方に基づいてデータベースに蓄積された加工事例を再利用して加工条件を決定する方法を提案した。CBR は、過去の類似問題の解法を参照して新たな問題を解く手法で、導かれた解には過去の事例に含まれる経験やノウハウが反映できると考えられている。データベースに蓄積する一つの方法として、図 1 2 に示すように従来の CAM ソフトウェアのようにオペレータの作業支援を行う中で、使用者の入力情報である加工領域の幾

何学的特徴と加工条件とを紐づけて蓄積していき、ある程度データの蓄積ができたところで自動の運用に切り替えるソフトウェアを開発した。

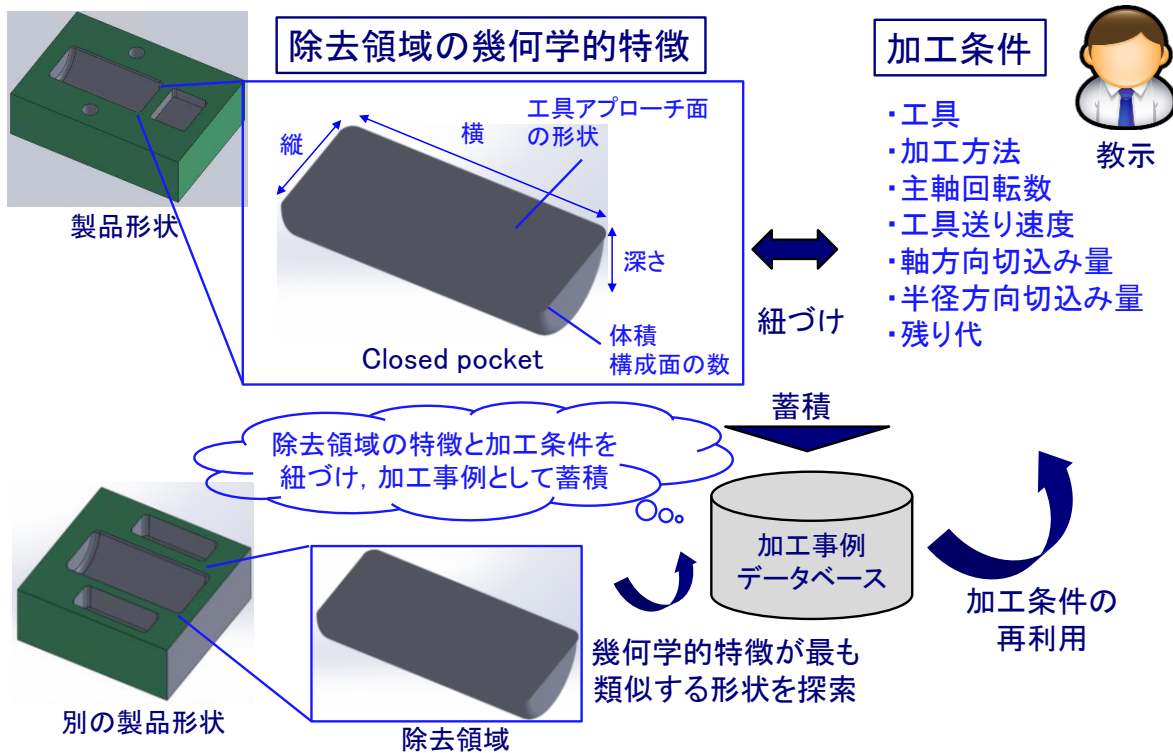


図12 加工事例データベースを再利用した加工条件の決定

### 2-1-3 切削加工シミュレーションの技術を活用した工具破損防止技術の開発

工具が破損に至る切削力の大きさ（工具破損限界切削力）を工具の直径や長さから分析し、加工中の切削力が工具破損限界切削力を超えると予測される箇所では、切削力が工具破損限界切削力を下回るように工具送り速度を最適化することで工具破損を回避する仕組みを開発した。

工具が破損に至る切削力の大きさ（工具破損限界切削力）を工具の直径や長さから分析し、加工中の切削力が工具破損限界切削力を超えると予測される箇所では、切削力が工具破損限界切削力を下回るように工具送り速度を最適化することで工具破損を回避する仕組みを開発した。

本研究では、被削材をボクセルモデルで表現した切削加工シミュレーション技術を構築した。ボクセルモデルとは、二次元要素ピクセル(Pixel)を三次元に拡張した立方体状のものであり、これを用いて表現された図13のようなモデルがボクセルモデルと呼ばれる。ボクセルモデルでは、3次元形状をボクセルで埋め尽くし、形状全体を離散的に表現する。

これにより、モデルに対してある形状の差演算処理を行う場合でも、ボクセルの有無だけを考慮すればよく、演算処理が簡易であるという利点がある。本研究では、工具切れ刃が通過するボクセルは除去対象のボクセルを決定することで、切削加工中の実切り込み厚さを精度よく算出することが可能となる。実切り込み厚さと切削力は相関があることが明らかであり、算出した実切り込み厚さの大小

に応じて、工具送り速度を最適化することで加工効率を低下させずに工具破損を回避する仕組みを開発した。

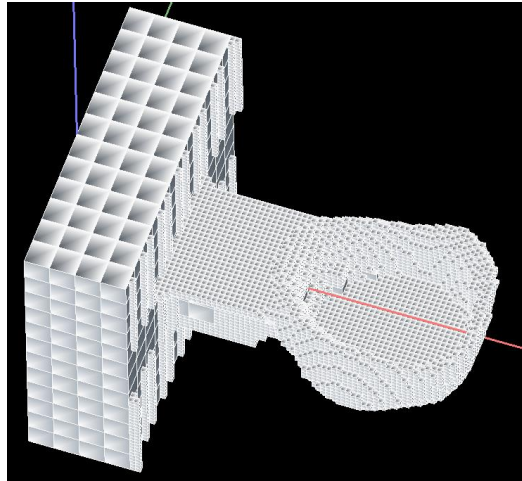


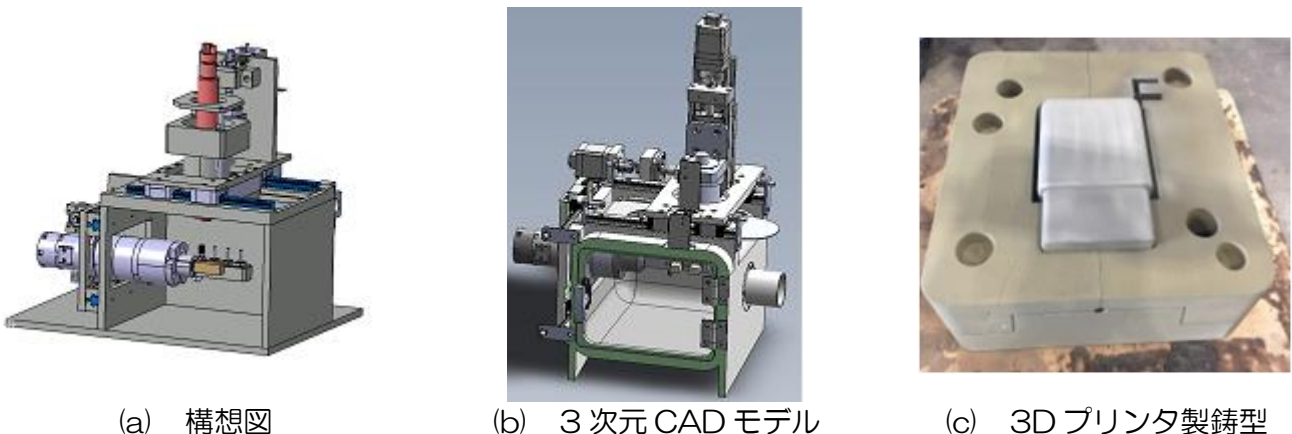
図 1 3 ボクセルモデルで表現した被削材形状

## 2-2 補綴物の切削加工に特化した小型で軽量の切削加工機の開発

### 2-2-1 3Dプリンタによる精密鋳造型の試作および切削加工機の躯体の設計試作

#### ① 鋳造型の試作

造形できる形状の自由度が高い 3D プリンタの特徴を活かして鋳造型を作成し、切削加工機の躯体を精密鋳造による一体構造とすることで、既存の切削加工機に比べて部品点数や組立工数を大幅に削減して製造コストを抑えた軽量で高剛性の躯体を設計した。(図 14) 試作機に使用する鋳造部品は、加工室本体、Y軸ユニット、Z軸ユニットなど機械剛性/精度の確保が必要な構造体で、精度の確保と品質をコントロールし鋳造から仕上げ加工まで行った。(図 15) これにより令和元年度の評価試作機の製作過程で発生した様々な問題点：組立工程の複雑さ、組立後の精度計測値のばらつき、共振音の発生の他、部品点数の削減等々について開発グループ内で検討/改善を行い、令和2年度の量産試作機に反映させるとともに、その成果を将来の量産時におけるノウハウとして蓄積する事ができた。



(a) 構想図

(b) 3次元CADモデル

(c) 3Dプリンタ製鋳型

図 14 鋳造型の試作



図 15 切削加工後のアルミ躯体

## ② 機構部品の製造、部材の選択と組み込み

令和元年度は評価試作機として2台を製作し、実際の歯科補綴物のデータを使って切削テストと加工精度の計測、機構部の長時間運転による耐久性テストと電氣的ノイズによる誤動作のテストなど商品化に向けた各種のテストを行った。また、組立・分解を繰り返し、都度の作業時間や精度変化等を計測する事で組立手順や保守方法等の検証を行った。令和2年度は令和元年製作の評価試作機の各種テストの結果を分析、及び実際に装置を運用した際の使用感等の評価を行い、問題点の改良を行った。

(1) 加工室本体の幅、高さ方向の寸法を20mm拡張、底面の形状変更、(2) 回転A軸の全面改良：エアシリンダー方式からステッピングモータ+ハーモニックドライブ方式に変更、(3) X、Yモーター取付けフランジの変更、(4) XZ軸ベースの剛性アップ、である。これらの改良により、当初目標としていた仕様/操作性を持つ機構部を完成させた。(図16)

<改訂版・改善点>

モーター取り付け部 別体化加工用 治具作製



5軸機械加工実施

加工室本体側加工



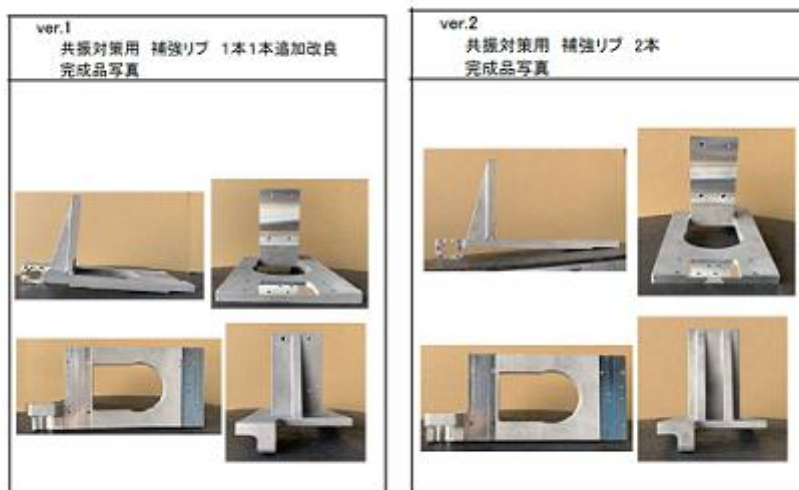
モーター取り付け用の部品 新規作製～組付け



**改訂結果：  
加工効率向上・組付け作業性向上**

<改訂内容>

②補強リブ追加



**組付け動作確認結果：振動の減少 達成**

図16 評価試作機から量産試作機への改良

量産試作機は3台製作し、そのうち2台はCAM機能を搭載したタッチパネルPCを組込んだ。今後の商品化の過程ではいくつかのシステムパターンが想定されることから、残りの1台は外部のPCと連動して運用するタイプのシステムとした。

X, Y, Z軸で使われるボールスクリュー、リニアガイド等の購入部品は、精度/耐久性などの仕様を満足し、かつ価格的に競争力のある製品とするため、量産時の仕入れコストや供給能力等について安定性を確保できるメーカーの製品を調査、検討して決定した。(図17)

次に量産試作機の外装の検討を行った。外装デザインは商品の市場競争力、製品のグレードを決める大きな要素であり、グループメンバー間の意思疎通が必須であるが、コロナ禍で対面形式のミーティングが開催できない中、オンライン会議での打合せを重ね、メンバーの考えを共有していくことで最終的に上市可能な製品レベルに近い製品を開発する事ができた。(図18)



(a) 選択した機構パーツ



(b) 組立途中



(c) 組立完了

図17 量産試作機



(a) 外装3次元CADモデル



(b) 正面



(c) 側面

図18 量産試作機外観

### 2-2-2 鋳造品の5軸加工による高効率・高精度加工法の検討

精密鋳造で造形された切削加工機の躯体を高効率・高精度で加工するために、一般的な3軸NC加工ではなく5軸NC加工に挑戦した。5軸NC加工では一度の取り付けで加工を完了させることができるので、取り付け/取り外しの工程に要する作業時間が不要となり、取り付け/取り外しの際に生じる位置決め誤差が軽減できた。このため5軸加工に適した治具の設計、使用工具や加工条件の選択、加工用プログラムの作成を行って高精度加工を達成するとともに、製造コストの低減につながる加工時間と作業時間の短縮を実現する為の開発を行なった。

## 2-3 補綴物の切削加工に特化した低コストの数値制御装置の開発

### 2-3-1 ステッピングモータ駆動用の低コスト5軸数値制御装置の開発

高精度な数値制御装置では切削加工機をサーボモータで駆動し、セミクロード制御で工具の位置や移動速度を高精度に制御しているためコストが高いが、サーボモータに比較してコストの低いステッピングモータを採用しながら、CAD/CAM 冠材料の加工に十分な精度を確保できる同時5軸のNC 制御装置の開発を行った。制御装置の電子回路基板の製作にあたっては（1）：製造コスト、（2）：安定供給される部品の採用、（3）：保守性等を考慮し、かつ小型であること、電氣的ノイズ/温度/振動等に高い耐環境性を持たせること、を主体に設計を行なった。制御基板の設計/製作/実装はアプリケーションソフトウェアの開発能力を持つメーカーに委託し、さらにモディアシステム(株)の担当研究者が共同してデバッグ作業を行う事でハードウェア、ソフトウェアの一貫した開発体制を構築する事ができた。（図 19）

令和2年度は、装置の組立時の手動操作用、及び保守用ツールとしてマニュアル操作パネルを接続する拡張機能ボードを開発した。パルスハンドルによる各軸の手動操作、入出力のモニタ、工具データの確認などが可能で、また将来の多用途化へのバージョンアップ（操作パネルを標準装備したシステム）にも対応が可能となる。



(a) 開発した制御基板



(b) 実装した制御基板



(c) 3台の量産試作機

図 19 量産試作機への制御基板の実装

### 2-3-2 直観的な簡単操作のユーザーインターフェースの検討

数値制御装置に、加工用プログラムを自動生成する CAM システムを搭載した9インチの液晶表示部とタッチパネルを持つPCを組み込み、直感的で非常に簡単に操作できるユーザーインターフェースを検討/開発した。操作画面を図20に示す。切削加工に不慣れなユーザーでも簡単に使用することを考慮した画面設計になっている。操作は解析対象のモデルを格納したフォルダを選択して、解析ボタンを押すのみである。解析完了後は、図 21 に示すようにモデルごとに算出された工具経路を画面に描画して確認することができる。

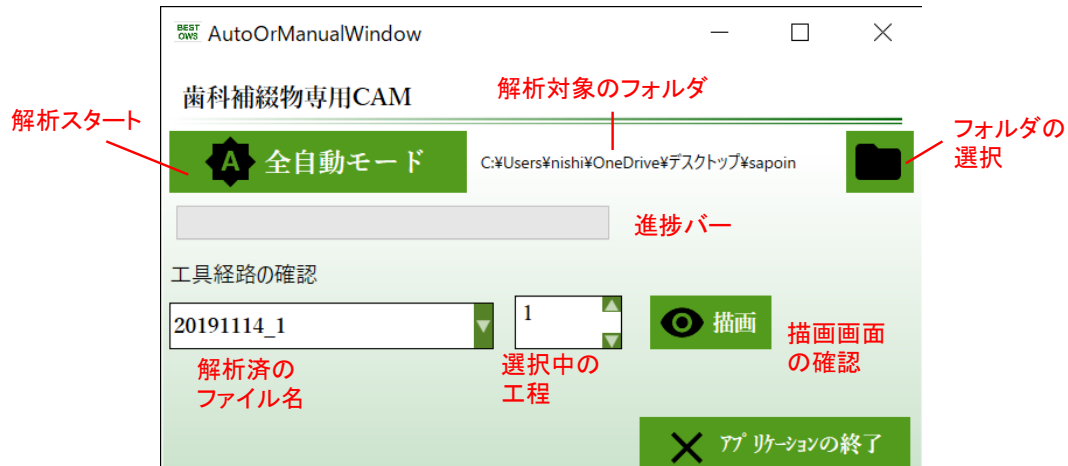


図20 操作画面

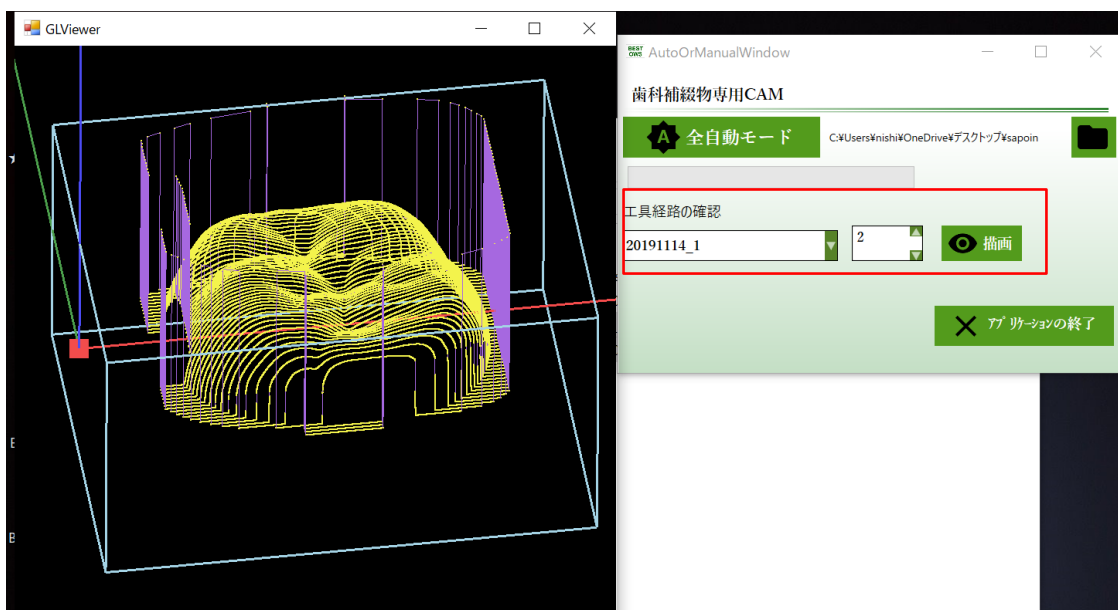


図21 自動計算された工具経路の描画

#### 2-4 試作機による補綴物の切削加工の実証と検証評価

切削加工の検証評価は（1）本補助事業で開発する歯科CAD/CAM 冠材料専用CAM（以下N-CAM）で生成したデータを使い、市販の歯科専用切削加工機で加工してCAM機能を検証。（2）通常の歯科用CAD/CAM で生成したNCデータを使い、本事業で試作した切削加工機でCAD/CAM冠を加工して検証。（3）N-CAMで生成したNCデータを使い、開発した量産試作機で加工して検証。以上の3パターンを行った。（1）ではN-CAMのデータでの加工が通常の歯科専用CAM（WORK-NC DENTAL）の約1.5倍程度の加工時間がかかること、製作品の表面が粗いことなどが判明しN-CAMの加工データ生成アルゴリズム等を変更しながらチューニングを継続して行った。（2）では通常の歯科専用切削加工機と比較して加工速度はほぼ同等であるが、主軸の切削動作時の共振音が耳障りで、加工速度を下げたため結果として1.2倍程度の加工時

間増加となった。この共振音の問題は量産試作機の開発での改良によって解消された。(3)では、令和2～3年にかけて対面形式のミーティング、共同作業など本来計画していた研究開発作業が困難になったことで、外装を含めた量産試作機の完成が令和3年明け早々となり実際の検証作業に遅れが生じた。本事業の最終段階の令和3年2月から量産試作機1号機を使い検証を開始し、3月には(有)かんとうセラミックス(歯科技工所)でのフィールドワークを行った。また2号機を(株)プロトに移送して検証を行い、いずれも事業期間後も継続して検証作業を続けることとした。この間の検証作業での結果としては加工時間、仕上がり形状とも更なるチューニングが必要であるとの認識で、今後は切削加工機としてのグレードの中でどこまでの数値が市場で期待されるかを検討しながらチューニングを継続する。(図22, 図23)



図22 加工サンプル例



(a) 切削加工



(b) (有)かんとうセラミックス(歯科技工所)でのテスト



(c) (株)プロトでのテスト

図23 加工テスト

## 2-5 IoT、AIを活用した製品・サービスの向上のための技術開発

### 2-5-1 CAM機能と加工条件データベースの更新

新たに発売される工具や補綴物材料が市場に登場した場合、それらに対応する加工条件データをすでに導入している装置に反映させるためのデータベースの更新機能を開発した。

切削加工機に搭載されるCAM機能は、ネットワークもしくは外部ストレージ(USBやSDカード)を通じて外部からのCADデータ(STL)を受けると同時に必要な加工条件パラメータを更新する機能を持っている。現在のところこれらの加工条件データはまだ形式が標準化されていないため

内蔵CAMのみでの使用にとどまっているが、データ形式が標準化された場合には適合させていく予定である。

### 2-5-2 ランニングコストの低減と稼働率の向上

稼働状況のモニタリング機能を数値制御装置自体に搭載し、外部からの要求によって現在の稼働状況を通知する機能、及びプログラム運転中の制御装置内部に蓄積されるログデータは随時ダウンロードが可能である。今後、上市を経て具体的にシステムが稼働するケーススタディーを重ねていかに“稼働の見える化”を実現し、トータルなランニングコストの低減、稼働率の向上を図るシステムの開発を継続する。

### 2-5-3 工具寿命管理

5軸数値制御に切削加工中の工具使用時間を積算して記録し、ネットワークを介して随時CAMシステムに工具使用積算データを転送可能な機能を開発した。

数値制御システムはプログラム運転中に“M06T#”で選択された工具が“M03”で指令された“主軸回転中”に使用された時間（秒単位）を計算する機能を持っている。この数値はM05による主軸停止指令によって、内部の工具管理ファイルに工具番号毎に積算される。つまり、M03とM05の間の時間軸の積算値となる。次の“M06T#”機能で工具が交換された時は、新たに指定された工具の積算が開始される。このファイルのデータはネットワークを通じて上位PCからのコマンドにより随時アップロード及び各積算値のクリアリセット等のメンテナンスを行う事が可能である。

## 最終章 全体総括

### 3-1 研究成果のまとめ

本補助事業で研究／開発した“小型で低価格な歯科用 CAD/CAM 冠切削加工機”は、小型ながら機構としての耐久性、精度の維持に優れていることに加え、専用で開発した数値制御装置は電氣的ノイズに強い、動作温度の幅が広いなど、大きな利点を持っている。これは3D プリンタによる自由なデザインによる鋳造木型と精密アルミ鋳造技術、さらに5軸 NC 加工機による高精度な機械加工などが寄与してシンプルかつ剛性の高い機構を実現していることによる。またこれらの利点は製造／検査工程においても、想定した作業時間の50%以下というメリットを実現した。これらの点は製品の上市にあたり非常に大切な要素で、上市時における販売価格やユーザーサイドの保守等のコストの低減に大きく影響するものであり、本研究開発における最も重要な成果と考えている。

装置のアプリケーションの基本的な機能は開発を完了したが、外装を含む最終的な量産試作機の完成が事業期間終盤となったこと、グループメンバー間の対面形式での研究開発の実施が困難であったことなどで、“CAM 機能”の操作性や“IoT、AI の活用”方法の検討、また加工後の補綴物の仕上がり評価などにまだまだ検討の余地が残った。しかしこれらは上市に向け今後も継続する製品開発によって補完していく所存である。

### 3-2 補助事業の成果に係る事業化展開について

#### (1) 想定している具体的ユーザー、マーケット及び市場規模等に対する効果

歯科用 CAD/CAM システムが歯科医療の市場に登場して約15年、CAD/CA 冠材料による歯科補綴物の保険適用が開始されて7年が経過し、初期は小臼歯のみであったものが現在では大臼歯、前歯にも適用が拡大された。当初に導入したユーザーではすでにシステムの更新が始まり、市場には海外から輸入された製品を含め新規参入メーカーのシステムが登場している。本事業で開発した歯冠加工機はユーザーにおけるシステムの新規導入時はもとよりであるが、システムの更新を進めるユーザーに向け、小型で安価である特長を活かしてパーソナルユース（歯科医師／歯科技工士が1名：1台）の利用が可能な切削加工機とした販売を目指している。市場規模としては令和2年3月時点で歯科用 CAD/CAM システムを導入している歯科技工所、歯科クリニックは1800軒を超えていると想定されており、本装置が180～200万円の販売価格を実現したときの年間販売台数はその10%として180～200台と予想している。

#### (2) 事業化見込み

当初は令和3年9月を目標に上市を計画していたが、本報告書作成時点では“コロナ禍”による緊急事態が今後の市場動向にどのような影響を及ぼすかの見込みが不明であり、当面は上市＝事業化期日の設定は行わず、今後も研究開発を継続してより競争力のある製品作りをしていく所存である。