Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-17

# 医療用インプラントのカスタムメイド加工技術 : 歯科治療用の補綴物加工（特集「 医工学連携がひらく新しい医療技術 」）

白瀬, 敬一
西田, 勇

(Citation)
神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要,11:5-8

(Issue Date)
2019

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(JaLCDOI)
https://doi.org/10.24546/81012412

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81012412

# 医療用インプラントのカスタムメイド加工技術
## －歯科治療用の補綴物加工－

白瀬　敬一 [1*]，西田　勇 [1*]

[1] 工学研究科機械工学専攻

キーワード：　インプラント，カスタムメイド，歯科補綴物，歯科用 CAD/CAM，機械加工

## １．はじめに

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新しい治療用の補綴物材料も登場している。

特に，10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ていて，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。しかし，歯科治療用の補綴物は，患者ごとに形状が異なる一品生産（カスタムメイド）が求められる。もともとCAD/CAMは，工業製品の部品の機械加工のような大量生産を前提に進化した技術であり，加工用プログラムの作成に多大な労力とコストを必要とする。

歯科技工士の人手不足と歯科治療用の補綴物の需要増大に対応するためには，加工用プログラムの作成に要する多大な労力とコストの削減，すなわち加工用プログラム作成の完全自動化が求められる。

## ２．歯科用 CAD/CAM による歯科補綴物加工

図1に示すように歯科用CAD/CAMによる補綴物製造法は，患者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で作成された補綴物の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）。

旧来の金属鋳造法と比較すると，歯科技工士が石膏模型を使ってデザインを行い，手作業でワックスを加工して鋳造用の原型を製作する工程を，石膏模型の計測とコンピュータ上でのデザインの工程に置き換えたのがCADである。また，金属鋳造法で造形した補綴物を手作業で加工する工程を，数値制御切削加工機で加工する工程に置き換えるために，加工用プログラムを作成する工程がCAMである。

補綴物を手作業で加工する工程を数値制御切削加工機で加工する工程に置き換えたことで，歯科用CAD/CAMによる補綴物製造法では，補綴物の加工効率が改善され補綴物の形状

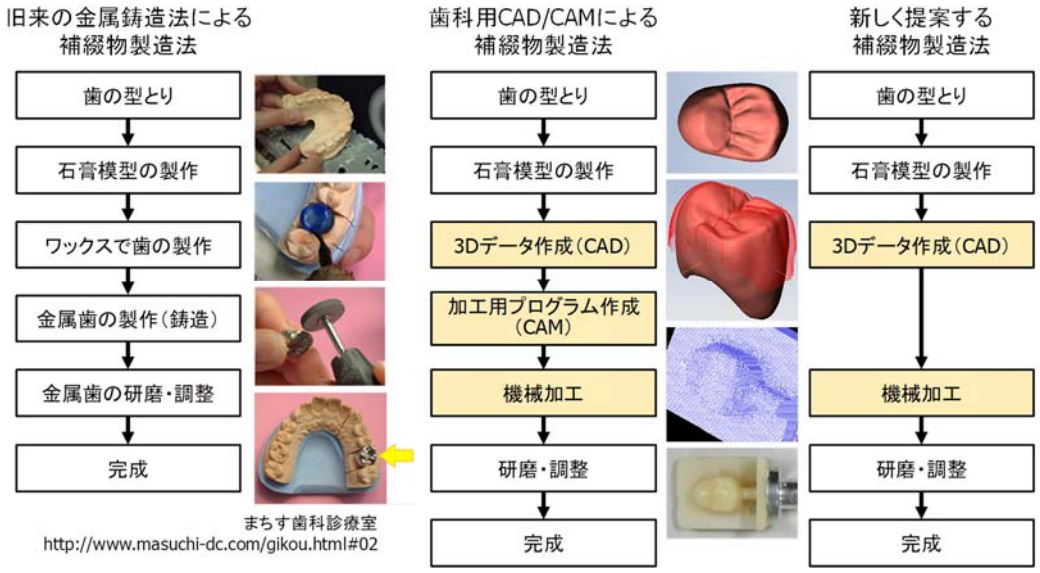
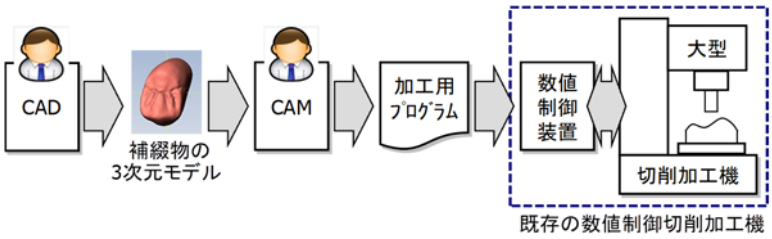
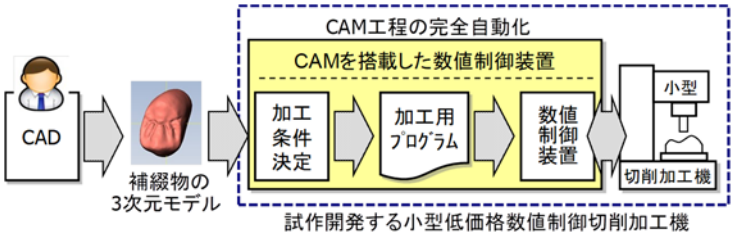



図 1　歯科補綴物の製造法の比較




(a)　既存の数値制御切削加工機




(b)　CAM を搭載した数値制御切削加工機

図 2　既存の数値制御切削加工機と試作開発する数値制御切削加工機との比較

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，CAMを操作して加工用プログラムを作成する工程が新たに加わった。この工程は歯科技工士の経験と技術が活かされず，その作業に多大な労力とコストを要するという欠点がある。そこで，このCAM操作を不要とするために加工用プログラムを完全に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に実装し，歯科用CAD/CAMによる補綴物製造法の欠点を排除することを考えた。

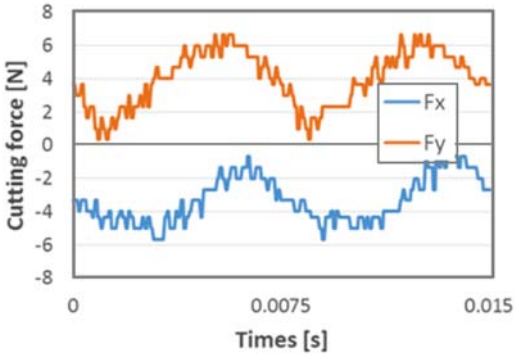
## 3．CAM を搭載した数値制御切削加工機

歯科診療所や小規模な歯科技工所に歯科用CAD/CAMによる補綴物製造法を広く普及さるためには，小型で低価格さらに切削加工の専門家ではない歯科医師や歯科技工士が簡単に操作できる数値制御切削加工機が求められている。既存の数値制御切削加工機と試作開発する数値制御切削加工機による補綴物製造を比較すると，既存の数値制御切削加工機の場合は，切削加工の専門家ではない歯科医師や歯科技工士がCAMを操作して加工用プログラムを作成しなければならないのに対して（図2(a)），試作開発する数値制御切削加工機の場合は，数値制御装置にCAMを搭載していて，CADでデザインされた補綴物の3次元モデルに基づいて適切な加工条件を導き出し，加工用プログラムを自動的に作成して補綴物の切削加工を行うことができる（図2(b)）。数値制御装置にCAMに相当するソフトウェアを実装することにより非常に簡単に操作できるユーザインタフェースを提供することができ，歯科医師や歯科技工士は加工したい補綴物の3次元モデルを選択するだけになる。

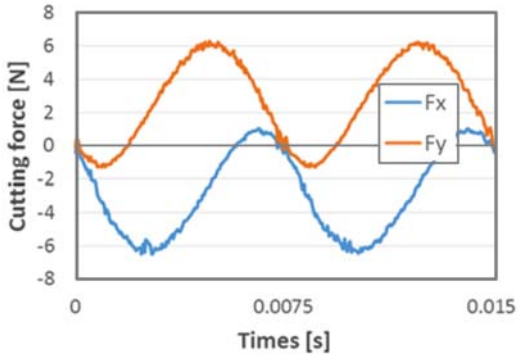
## 4．切削力予測による工具の破損回避

補綴物の製造コスト低減のためには夜間の無人運転が求められるが，加工中に工具が破損すると不良品を製造することになる。そこで，切削加工シミュレーションの技術[1]を活用して加工中の切削力を事前に予測して加工中の工具破損を回避する。具体的には，工具が破損するような大きい切削力が作用する箇所では，工具の送り速度を抑制して発生する切削力を小さくすれば良い。

切削力の実測値と切削加工シミュレーションによる切削力の予測値を図 3 に比較して示す。仕上げ加工用の工具は直径が 1 mm と細く切削力が微小であるにもかかわらず，概ね正しく予測できることが分かる。

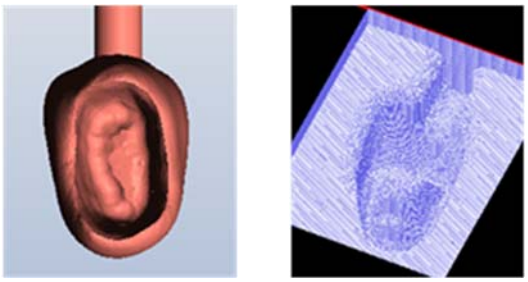



(a)　切削力の実測値




(b)　切削力の予測値

図 4　切削力の実測値と予測値との比較



(a)　CADモデル　　(b)　ボクセルモデル

図4　切削加工シミュレーション

図4(a)に示すCADモデルから補綴物を加工する場合を例に切削加工シミュレーションを行い，図4(b)に示すボクセルモデルで表現した荒加工後の被削材形状を用いて，仕上げ加工中の切削力を予測した。このときの切削条件を表1に示す。被削材は補綴物の材料として実際に使用されているハイブリッドレジンである。一般的な加工条件では，工具送り速度は1320 mm/min，ピックフィード量は0.08 mmであるが，本研究では工具が破損しないように工具送り速度を局所的に抑制することができるため，加工効率を重視してかなり大きい値に設定している。

表1　シミュレーションの切削条件

| 工　　具 | ボールエンドミル |
|---|---|
| 工具刃数 | 2 |
| 工具径　mm | 1.0 |
| 被削材 | ハイブリッドレジン |
| 主軸回転数　rpm | 27,000 |
| 工具送り速度　mm/min | 10,000 |
| ピックフィード量　mm | 0.2 |

切削力の予測結果の一例を図5に示す。横軸は加工を指令する加工用プログラムのステップ番号で，工具送り速度の調整前に切削力が局所的に大きくなっている箇所は，荒加工による削り残しを仕上げ加工で除去している箇所に相当する。実加工で切削力が急激に大きくなれば工具が破損するので，この箇所の切削力が小さくなるように工具送り速度を調整する。工具送り速度の調整後は切削力の最大値が小さく抑えられ，工具の破損を回避することができる。

以上のような工具送り速度の調整を行った加工用プログラムで加工実験を行い，工具破損発生の有無を調査するとともに従来法と加工時間を比較した。図6(a)に補綴物の素材である直方体のハイブリッドレジン，図6(b)に加工後の補綴物を示す。図6(b)は図4(a)のCADモデルを参照して，補綴物の裏面だけを加工した状態の写真である。

加工実験では加工中に工具が破損することはなかった。また，補綴物の表面および裏面の加工時間の合計は，従来法では 6 分 34 秒，本手法では 1 分 19 秒となり，従来法と比較して約 80%の加工時間短縮を達成した。これにより，安全かつ高効率な歯科補綴物の加工を実現できることが分かった。

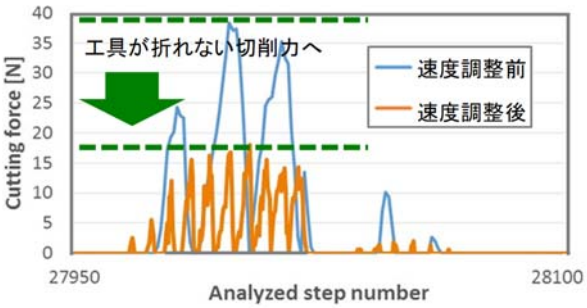
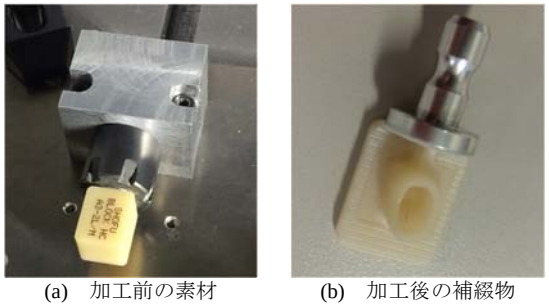



図 5　工具送り速度調整前後の切削力予測結果の比較



(a)　加工前の素材　　(b)　加工後の補綴物

図 6　歯科用補綴物の加工結果

## 5．外形線モデルによる工具経路計算

切削加工シミュレーションに必要な機能は，被削材と工具との干渉量を計算して被削材の形状変化を表現すること，および工具 1 刃当たりの送り量ごとの切削除去量を算出することである。これまで，被削材形状をボクセルモデルで表現するシミュレータを開発してきたが [2]，① 3 次元形状全体を離散的に表現することができる，② 複雑形状の加工においても工具と被削材の干渉量を容易に計算できる，という利点の一方で，① 高精度のシミュレーションではコンピュータのメモリを大量に消費する，② 形状表現に使用するボクセルが膨大になると干渉計算に時間を要する，という欠点があった。そこで上記の欠点を解消する目的で，形状表現に必要なメモリが少なく干渉計算を高速で処理できるように，被削材の形状を外形線モデルで表現する方法を新たに開発した [3]。歯科補綴物の CAD モデルを外形線モデルで表現すると，図 7 に示すように CAD モデルを ZX 平面で微小に分割して，分割した平面上の断面の外形線を重ね合わせるようになる。

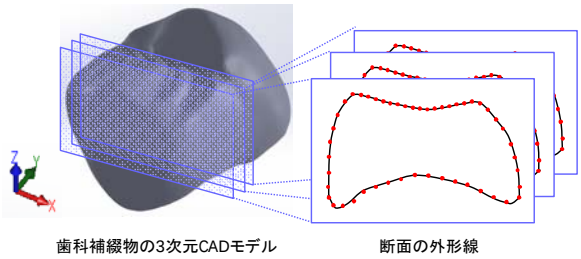
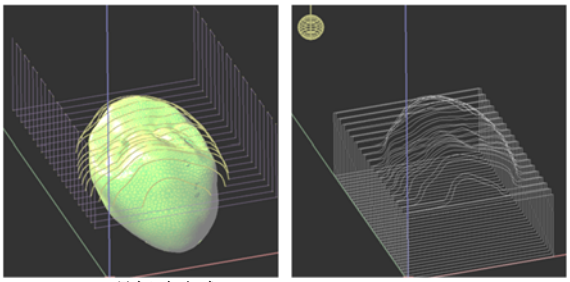



図 7　外形線モデルによる歯科補綴物の形状表現



(a)　工具経路生成　　(b)　シミュレーション

図 8　数値制御装置に搭載する CAM

図 8 に新しく開発している CAM の実行画面を示す。この CAM が CAD から受け取った STL 形式の CAD モデルを前述した外形線モデルに変換して工具経路を生成する（図 8(a)）。また加工に必要な切削条件は，工具と被削材の材質ごとに準備されたデータベースを参照して自動で決定される。同時に切削加工シミュレーションを行って加工される被削材の形状変化を可視化するとともに，加工で除去される除去量の時間変化を計算する。除去量の大小は切削力の大小と相関があり，切削力よりも短時間で計算することができる。このため，CAM を数値制御装置に搭載する場合には，除去量の大小に応じて工具送り速度を調整することを考えている。

## ６．歯科用の小型数値制御切削加工機の開発

歯科用 CAD/CAM による補綴物製造法では，① 機械加工により生産効率が高い，② 補綴物の形状や精度のばらつきが小さい，という利点がある反面，① 加工用プログラム作成のために多大な労力とコストが必要，② 使用する数値制御切削加工機が大型で高コスト，という欠点がある。この欠点を排除するために，歯科医師や歯科技工士の作業負担の削減，安全で高効率な加工の実現，歯科診療所や小規模な歯科技工所に簡単に設置できる数値制御工作機械の小型化を目標として CAM を搭載した歯科用の小型数値制御切削加工機の試作開発を行っている。この試作開発プロジェクトは，平成 31 年度の戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン事業）に採択された。試作開発中の数値制御工作機械の仕様は表 2 に示すとおりで，歯科用 CAD/CAM による補綴物製造法の普及と，補綴物製造における生産性向上，形状や精度といった品質の向上や製造コストの低減に貢献できる。

表 2　試作開発する歯科用の小型数値制御切削加工機の仕様

| | |
|---|---|
| CAM | ・CAM に相当するソフトウェアを数値制御装置に搭載（CAM 操作が不要） |
| 切削加工機 | ・外形寸法 0.5×0.5×0.8 m 程度<br>・加工領域 0.1×0.1×0.1 m 程度<br>・使用電源 100 V，300～500 W<br>・工具本数 4 本 |
| 数値制御装置 | ・5 軸制御<br>・ステッピングモータ駆動<br>・オープンループ制御<br>・簡単な操作 |
| 導入コスト | ・180 万円程度 |

## ７．おわりに

歯科用 CAD/CAM による補綴物製造法の欠点を排除するために，CAM を搭載した歯科用の小型数値制御切削加工機の試作開発を行っている。

1) 補綴物の CAD モデルから加工用プログラムを自動的に作成する CAM を搭載することで，加工用プログラム作成に要する労力とコストが削減できる。

2) 切削力あるいは除去量の予測結果に応じて工具送り速度を制御することで工具折損が発生しない安全な加工が実現でき，加工時間も飛躍的に削減できる。

この切削加工機の開発で，歯科用 CAD/CAM による補綴物製造法の普及と，補綴物製造における生産性向上，形状や精度といった品質の向上や製造コストの低減に貢献できる。

**References**


1) 長谷川輝人，佐藤隆太，白瀬敬一，被削材のボクセルモデルを用いたエンドミルの切削力シミュレーションと切削力の予測結果に基づく適応制御，精密工学会誌，Vol.82, No.5, 467-472　(2016)

2) Isamu Nishida, Ryo Tsuyama, Ryuta Sato, Keiichi Shirase, Customized End Milling Operation of Dental Artificial Crown without CAM Operation, International Journal of Automation Technology, Vol.12, No.6, 947-954　(2018)

3) 西田 勇，白瀬敬一，切削シミュレータを統合したエンドミル加工用 CAM の開発，第 33 回型技術者会議講演論文集，102-103　(2019)