

耐火模型上に鋳造原型を三次元造形する方法

— 型ごと埋没法に利用可能な分割復位式ワークの開発と追加工法 —

中野田 紳一, 宮田 幸一郎^{*1}, 谷口 巧^{*2}, 热田 俊文^{*3}, 高原 茂幸^{*3}

香川県歯科技工士会所属

株式会社インサイドフィールド

^{*1}株式会社デンタルデジタルオペレーション

^{*2}有限会社セントラルラボ

^{*3}香川県産業技術センター

【はじめに】

歯科技工における機械切削加工では「ワーク」と呼ばれる被削材を医療機器である4軸もしくは5軸工作機械に固定し、工具を用いて連続一回加工することで切削を完了することが一般的になってきた。この際、加工中の外力よって、目的の製品が脱落、変形することを防止する目的で、ワーク本体と製品を連結する支柱部を「サポート」と呼ぶことがある。また、市販部品形状の穴径のみ拡大する場合や、溝を追加する必要がある場合に、既に加工が完了している市販部品をワークとして利用し、その必要な個所だけ二次加工する際に、この二次加工は「追加工」と呼ばれている。

歯科における追加工の例としては、有床義歯領域における人工歯咬合面の加工が知られている^①。一般的には、全部床義歯研磨面などの切削加工を中断し、義歯床に人工歯を接着固定した後、必要な個所だけ加工を再開する。この際、もしも接着などの歯科技工操作のために一時的に機械からワークを取り外す必要があれば、先行加工された義歯床研磨面と、これから追加工する人工歯部の咬合小面との位置関係がずれることがないよう、ワークを元あった位置に正確に復位しなければならない。追加工法の実際において、ワークを工作機械から脱着する場合には、CAMソフトウェアや固定用治具の機能拡張によって実現される場合が多い。したがって、接着のような歯科技工操作を伴う追加工は、目的形状を得るためのより付加価値の高い加工法として知られているが、何らかの機能拡張が必要な場合が多いという点

において、通法の連続一回加工法と比較して、より高度で難易度の高いオペレーションであるといえる。

そこで、本研究では、特に鋳造原型を切削加工する際ににおいて、「ワーク」の一次加工面に耐火模型材を注入することによって、医療機器を機能拡張することなく、「追加工」を行うことで、「サポート」が付着しない鋳造原型の加工を完了するための「分割復位式ワーク」を利用したワークフローによって、耐火模型上に鋳造原型を三次元造形する方法について検討した。

【材料と方法】

1. 基礎的検討のための試料とその作成方法について

切削試験では、汎用3軸工作機械（図2：3軸工作機械（ヤマザキマザック社製 VERTICAL CENTER NEXUS 430B-II HS）上に設置された固定金具（バイス）に固定することを目的に図1-A、図3に示すような形状を金属切削加工によって製作し、分割復位式ワーク固定部（図1-A、図3左部）、並びにワーク固定金具（図3右部）とした。ワーク固定部には回転防止溝（図1-X、図1-Y）を付与した。それら回転防止溝によって、ワーク基底面（図1-B）に依存することなくワークの上下的位置を規定できるようにした。

次に、ワーク固定部（図1-A）を埋没するように、アクリル板（図1-P）にてボクシングしたのち、ワックス材を注入してワーク可撤部（図1-B）を用意した。ワックス材は、歯科用パラフィンワックスに、樹脂

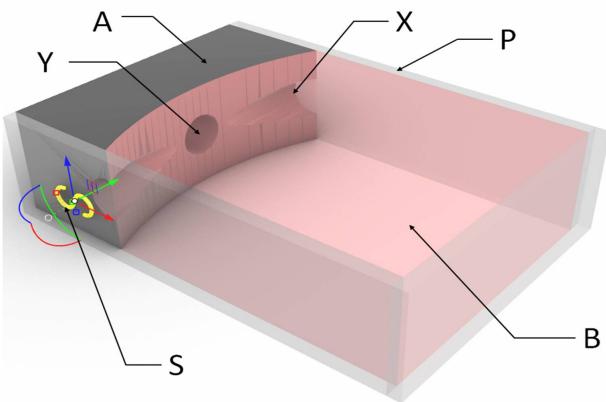


図 1：分割復位式ワークの構造



図 2：ヤマザキマザック社製 3 軸工作機械

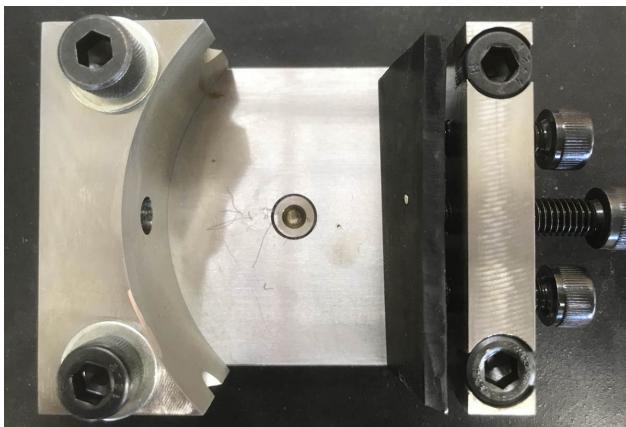


図 3：分割復位式ワークのワーク固定部

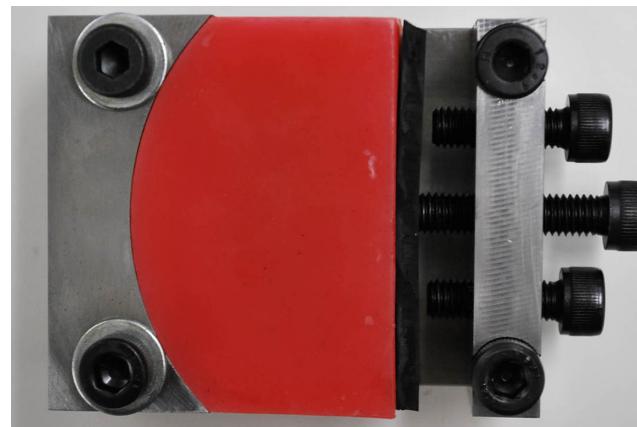


図 4：ワーク固定部とワーク可撤部

A	B	C	D
内面加工	埋没材注入	反転180°	咬合面加工

図 5：複合素材ワークの加工手順

混合パラフィンワックス（日本精蠅社製 PALVAX - 1230）を 10wt%混入したワックスを使用した。

2. ワークの加工機への固定と可撤部の着脱について

作製したワークは、図 3 右部に示す固定金具を緩めて図 4 に示すように固定した。最後に、工作機械に図 4 に示す分割復位式ワークのワーク固定部(図 1-A)のみをまずバイスに固定した後は、バイスを緩

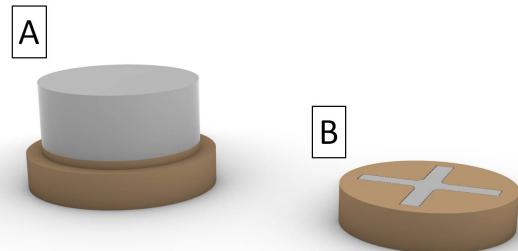


図 6：サポートの付着がない鋳造原型イメージ

めることなくワーク可撤部(図 4 中央ワックス部材)が自由に着脱できることを確認した。

3. 鋳造原型の形状データ作成について

切削加工用データは、汎用 CAD ソフトウェア (McNeel & Associates) 社製 Rhinoceros 3D) を使って作製した。試料形状は、機械加工しやすい形状になるよう形態的特徴を簡素化し、内側性インレー (図 5 上段) とクラウン (図 5 下段) の STL

データを作成した。

データ作成手順として、外側性修復物に該当するクラウン（図 6-A）では、クラウンマージンから歯根側 1mm の位置で支台歯断面外形線を外側に 5 mm オフセットし、頬舌側、近遠心面切削時に工具が侵入できるスペースを確保した。その後、モデル陽型（図 6-A, B）の他、そのメッシュ表面の陰型である、閉じたメッシュソリッドもあわせて作成して STL ファイルフォーマットにて出力した。

4. 鋳造原型の加工手順と鋳造体の製作について

加工手順を図 5 に示した。まずははじめに、内面加工（図 5-A）を行い、歯科用クリストバライト埋没材（耐火模型材）を注入（図 5-B）した。次に、ワークを 180° 反転（図 5-C）し、咬合面観の切削加工を行った。作製した耐火模型上の鋳造原型のモデルは、ワークから分離すると図 6 のようになる。これを通法に従って型ごと埋没し、金銀パラジウム合金を鋳造することによって、鋳造体を得た。

5. 鋳造体の形状について

加工の確認には、外側性修復物は内側に、内側性修復物は外側にそれぞれ 0.1mm オフセットしたメッシュオブジェクトを使って、レジンを積層造形した支台歯モデルに各歯科技工物を適合し、目視にて本術式の有用性について確認した。あわせて各歯科技工物のいくつかの各計測点の厚みについて歯科技工用厚み計測ノギスにて計測した。

【結果】

1. ワークの一次加工について

以上のように作成したモデル陰型（図 5-A, 図 6-A）を使って、まずはオブジェクト内面を一次加工した。図 7 にはそのウェットミリングの状態を示し、一次加工完了結果を図 8 に示した。

2. 耐火模型材注入によるワークの複合素材化と追加工の準備について

次に、ワーク固定金具を外し、ワークの固定部と一次加工済み可撤部とを分離（図 9）したのち、埋

没铸造室においてワークの一次加工面に歯科用クリストバライト系埋没材を注入し、図 10 に示した。

今回はワーク形状を立方体にすることによって、各面を工作機械の各軸に対応させた。そして図 1-Y の中央を通る Y-Z 平面が原点を通過するよう座標を決定した。その上で、図 1-Y を中心に工作機械水平面に対して 180° 反転したワーク可撤部をワーク固定部に復位した。工作機械内ではバイスに固定された状態で図 4 の状態になるよう、再度固定用治具にてワーク可撤部を固定し、二次加工を再開した。図 11 には二次加工中の咬合面側を示している。なお、ワーク可撤部の着脱方向の脱着と仮固定は容易であった。

3. 複合素材化されたワークの二次加工について

図 11 に示す陽型 STL データを使った二次加工では、分割復位式ワーク可撤部の複合素材（図 5-C, 図 10）を、埋没材とワックスを同時にドライミリング法（図 11）にて追加工した（図 5-D）。追加工の結果を図 12 に示した。最終的には、図 5-D に示すよう、埋没材全周をリング状に加工して、そこにサポートの付着を計画することによって鋳造原型にサポートが直接付着しないで加工を完了することができた。

4. 二次加工後のサポートの状態と型ごと埋没について

以上のように製作したクラウン鋳造原型（図 6-A）とインレー鋳造原型（図 6-B）を型ごと埋没し、鋳造体を製作した結果を図 13, 図 14 に示した。

5. 鋳造結果について

図 15, 図 16 に鋳造体の適合結果を示し、図 17 に咬合面観における各計測結果を示した。厚みにおいては、顕著に偏った傾向を示した。インレー試験体咬合面部には、ワーク切削時に不均一に偏った厚みのバリ形状の取り残しが認められた。同様に、クラウン試験体歯頸部にはワーク切削時にマージンを覆うバリ形状の部分的な取り残しが認められた。適合においては、通法の鋳造技工物と同等程度の適合が得られていることを目視にて確認することができた。特に鋳造後に発生しているバリ形状の鋳造欠陥の厚みを計測すると、約 0.15 mm であり、マ

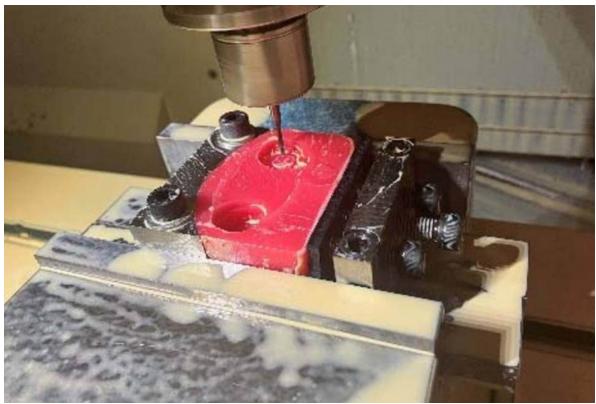


図 7：ウェットミリングによる一次加工



図 8：一次加工が完了したワーク

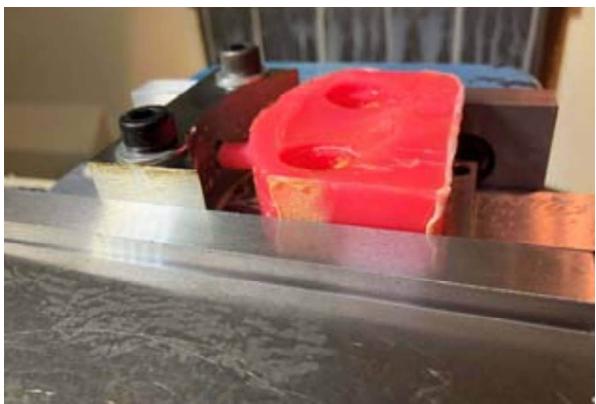


図 9：埋没材注入時に一時的にワークを取り外す

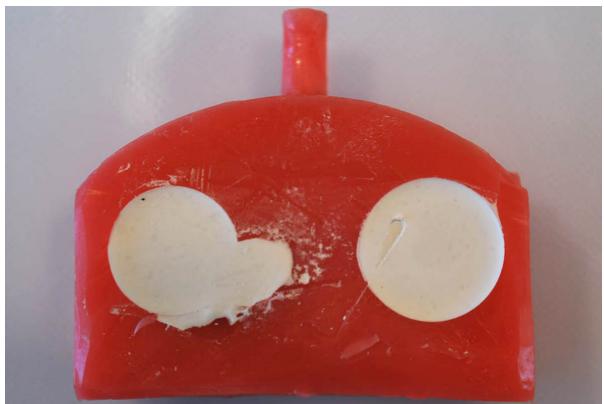


図 10：埋没材が注入されたワークの一次加工面

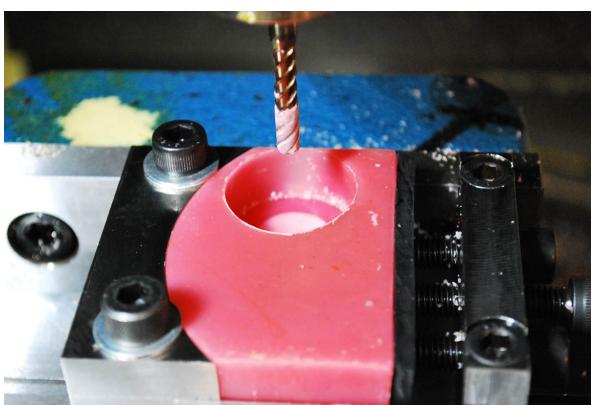


図 11：2 次加工中のワーク咬合面観



図 12：加工が完了したワーク咬合面観



図 13：鋳造が完了した試料



図 14：クラウン辺縁のバリ



図 15：内側性修復物の適合性



図 16：外側性修復物の適合性

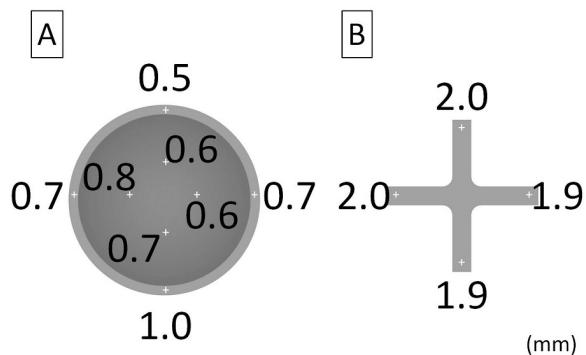


図 17：鋳造体の咬合面観における各部の厚み

イクロスコープ下にて調整することで適合の程度を確認した。

【考察】

1. 本研究の目的と課題について

本研究の目的は、クラウンやインレーのみならず、有床義歯の構成要素なども含めて、各種鋳造原型を耐火模型上に 3D 造形する方法を確立することである。

まず第一の基礎的な共通課題は、ワックス材と耐火模型材からなる複合素材ワークを同時に切削する

追加工法を確立することである。そして第二の共通課題は、ワークを複合化するためには、加工を中断もしくは終了する加工パスを歯科用 CAM で作成し、いわゆる歯科用 CAD/CAM ディスクと呼ばれるワークの片面をそれぞれ選択的に 2 回に分けて加工することである。そのうえで第三の共通課題は、耐火模型注入に必要な作業を埋没铸造室で行うために、ワークが工作機械から着脱可能でなければならないことである。ただし、医療機器本体の改良や、ソフトウェアの新たな機能拡張を行うことなくこれらの課題を解決する必要がある。

2. 複合素材ワーク追加工法の確立について

1) 追加工法の課題

まず、一般的な追加工の実施においては、2 種類の機能拡張が必要である。すなわち、ワークの着脱を CAM ソフトウェアで制御する方法と実際に工作機械に着脱可能な金属アタッチメントを準備することの片方もしくはこれら両方である。このような追加工の実行可能環境が装備された工作機械は既に市販されている^①。たとえば、歯科用ディスクから義歯床研磨面を大まかに一次加工した後、人工歯を接着固定すると、人工歯の接着界面部に介在する接着剤層の厚み量依存的に CAD 計算値よりも厚み方向に浮き上がることがある。そこで、ワークを一次的に機械から取り外した後、接着作業を行い、最後にこの差分を追加工するフローを実現できる。しかし、このような術式以外で特に、インプラントや歯冠修復物あるいは有床義歯の構成要素製作時の様々な場面で追加工が必要な場合は、個別に対応が可能かどうかの検討が必要な場合が多い。

図 10 には、工作機械の切削場面における追加工課題の説明図をあらためて示した。追加工では、工具 A があらかじめ出力された加工経路に基づいて移動することによって、ワーク F に先行加工される穴形状 C を切削する。このような切削実行中に、目的形状 D がワーク F から脱落しないように支持するために、サポート E をあえて削り残しながら切削作業を進めていく。図 10 矢印 H に示すように、一時的に機械からワーク F を取り外す場合、先行加工された穴形状 C と、これから追加で加工する穴形状 G との位置関係がずれることがないように、元あった位置に正確にワークをもどさなければならない。

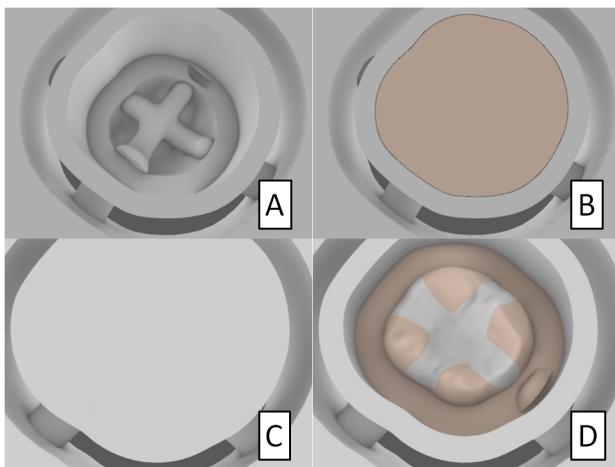


図 18 : 大臼歯咬合面インレーの切削イメージ

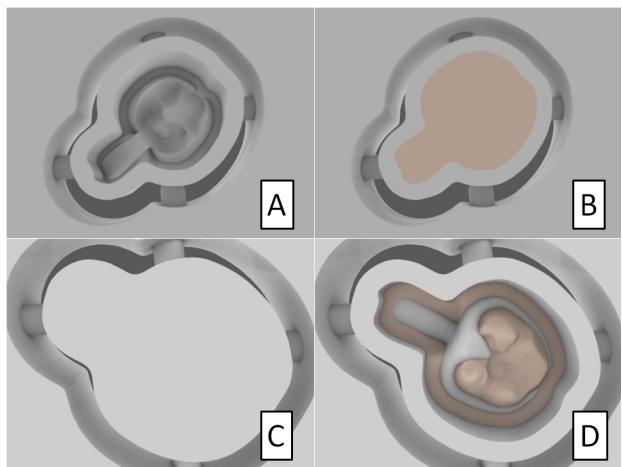


図 19 : 大臼歯エーカスクラップの切削イメージ

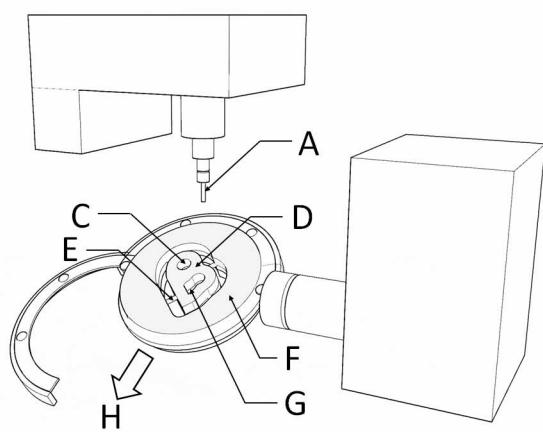


図 20:加工中にワークを着脱する際の課題説明図

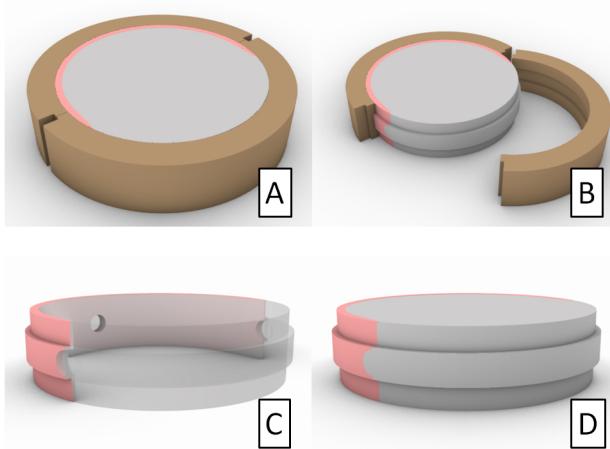


図 22 : ディスク廃材のワーク固定部と可撤部

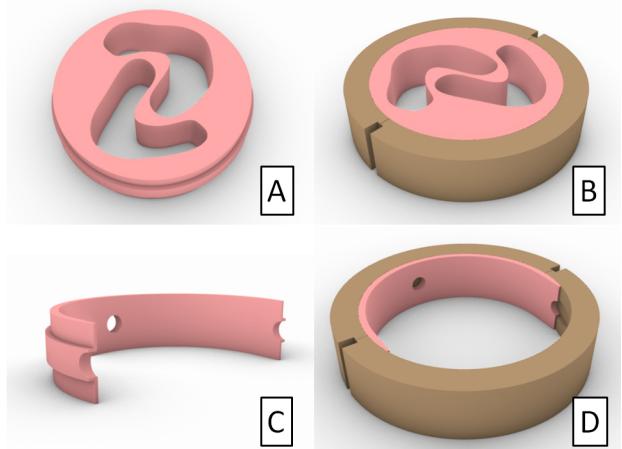


図 21:ディスク廃材を利用したワーク固定部と外枠

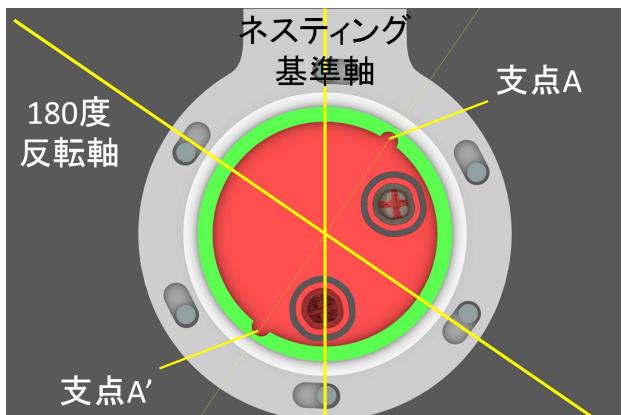


図 23 : 分割復位式ワークの支点Aと支点A'を入れ替えることでワークを180度反転する際の課題

2) 複合素材ワークの製作

本研究における分割復位式ワークは、図 1 に示すように、ワーク固定部と、上下左右前後方向のうち一方向のみに着脱できるよう計画されたワーク可撤部とからなる。本研究では工作機械の構造的特性から、手前（前）方向に着脱できるよう計画した。そ

こで、ワーク固定部には、ワーク可撤部との位置固定機能として、上下的方向と水平方向に抵抗する溝部（図 1-X）と可撤部の回転に抵抗する突起嵌入部（図 1-Y）とを備えることにした。このように分割復位式ワークは、本来のワークとして機能するだけでなく、必要に応じてワークを正確に脱着できるこ

とである。

3) 歯科用ディスク廃材の再利用による分割復位式ワーク製作の提案

歯科用工作機械に利用可能な分割復位式ワークを仮想空間で計画し、図21と図22に示した。歯科用ミルブロック廃材や本例のような歯科用ディスク廃材（図21-A）を再利用したワーク形状（図22-D）は、図4に示すワークと同じ構造である。つまり、歯科用分割復位式ワークは、図21-Dに示すようにボクシングされた歯科用ディスク素材からなる外枠を使って、歯科用ワックス等を注入（図22-A）すること等によって作製できる。ワークを工作機械に固定するためのワーク固定部（図21-C）は、ワーク可撤部（図22中央部材）の着脱方向や、固定方法に応じて様々な形状に加工し、再利用できると考えている。

4) 複合素材ワークのサポートについて

部品形状をワークにネスティングするような切削加工では、サポートと呼ばれる固定源をあえて削り残して切削を終える方法が一般的である。その後このサポート部において、目的形状をワークから切断し、その切断面を整えるための後加工と呼ばれる手作業が必要である。このようにそもそも図20-Eに示すサポートは最終的な目的形状図20-Dを得るためにには不要になるにもかかわらず、加工時にサポートを採用しないという選択肢はないといえる。

以上のように、サポートは、重要な役割をはたしているとはいえ、たとえばインレーのように形状が比較的小さい場合、あるいは、切削体が比較的軟質の樹脂や、ワックス素材である鋳造原型の場合、そこに無数のサポートが付着していると、その後の手作業が高度に複雑になるだけでなく、ワークからサポート切断直後の内部応力緩和による鋳造原型の寸法精度などに対する悪影響が懸念される場合も少なくなかった。

今回、ワークに歯科用埋没材を注入して複合化し、耐火模型が介在するよう切削加工すれば、サポートが鋳造原型に付着しない造形方法を実現できることがわかった。この方法によれば、鋳造後の作業効率を向上することが可能であり、特にラミネートやインレー等の薄肉形状のみならず、内冠やアバットメント

等のできればサポートを付着させたくない場合に有用である。ただし、リン酸塩系埋没材のようにコロイダルシリカ溶液との混和によって高い硬化熱が発生する場合には発熱のコントロールに関して注意が必要になる場合がある。

3. 歯科用CAMによる片面の選択加工パスについて

そもそも5軸加工機であれば、適切な加工パスによって、追加工を実行することは困難ではないが、歯科用CAMソフトウェアは通常のCAMと比較して、その仕様が制限されていることが多い。具体的な方法としては、歯科用CAMソフトウェアにおいても、切削シミュレーションを行い、裏面に該当するパスコード文字列を削除すれば、表面のみを切削するパスを作成することが可能な場合がある。あるいは、あまり効率的ではないが、平面形状である裏面を工具が通過するだけのパスを作成することによって、ワークの裏面にはまったく工具が接触することなく一次加工を終えることが可能である。

今回、一時的にワークが工作機械から離れることができた。一次加工の後にワーク可撤部の一次加工面に界面活性剤を塗布し、通法に従って混和した埋没材を注入し埋没材注入後に加圧する歯科技工作業を実施することができた。したがって、このようなパスを作成できることを前提に、分割復位式ワークを活用すれば、一次加工を終了したのち切削を一次終了し、ワークを一時的に加工機から取り外したのち、中間処理を行い、ワークを反転することなく正方向で復位し、最後に5軸加工によって、裏面を追加工することができるようになると考えている。

4. 可撤性分割復位式ワークについて

本研究における分割復位式ワークの有用性は、医療機器を改造することなく、工作機械本体の元あった位置へ容易にワークを脱着可能であり、一次加工後にワークをいったん分割分離し、別途、歯科技工室において中間処理を行った後、ワークを元あった位置に復位して二次加工することへの経済的、技術的負担が軽減されることによって、より付加価値の高い歯科技工物製作のしやすさに寄与することである。特に、ソフトウェアプログラムあるいは、追加

工用治具の別途開発やそれらの採用ができない場合においても、追加工ができる方法を提供する。

図 23 は、分割復位式ワークを復位する際、仮に、支点 A と支点 A' を入れ替えることでワークを 180 度反転する場合の課題の説明図である。もしもこの図ように計画した場合、術者は実際に、支点 A の位置を工作機械本体のこの位置にきわめて正確に固定しなければ、手動で 180 度反転は実現できない困難さがある。その上、歯科用 CAD/CAM を使って、ネスティングする場合、その多くは、各種ソフトウェアによってあらかじめ決定されている原点や基準線によって決定されることになることから、ネスティング基準軸が必ずしも図 23 のようになっていないことが、さらに課題解決を複雑にしている。今回立方体ではワークを手動で 180 度反転したが、今後、このような手動にて 180 度反転する方法を歯科用ディスクの円形ワークに転用するためにはさらなる検討が必要であった。

【参考文献】

1. SILVA, Nelson RFA; KUKUCKA, Eric D. Innovative subtractive production of a digital removable complete denture from start to finish. J Prosthet Dent, 2022, 127.1: 1-5.

【おわりに】

1. ワックス材と耐火模型材からなる複合素材ワークを同時に切削する追加工が可能である。
2. 加工を中断もしくは終了する加工パスを歯科用 CAM で作成し、歯科用 CAD/CAM ディスクの片面を選択的加工することができる可能性が示された。
3. 分割復位式ワークを採用すれば、ワークを工作機械から着脱可能である。
4. 目的形状に直接サポートを設置することなく切削を完了する新しい方法が示された。

以上の結果によって、機械切削加工で歯科技工物を製作する際に、医療機器本体の機能拡張のように、特別なソフトウェアプログラムの開発や、特殊な追加工用治具を開発できない場合であっても、追加工するための手段が提供され、有床義歯のメタルフレームワークにおいてもクラウンやインレーと同様に、耐火模型上に鋳造原型を 3D 造形することができる可能性が示された。