

《特別企画》

歯科理工学からみた歯科材料の変遷と今後の展望



昭和大学 国際交流センター 特任教授

宮 崎 隆

●抄 録●

従来から補綴装置の作製には材料と技術の進歩が貢献してきた。長らく高品質の補綴装置作製には、ロストワックス精密鋳造法による高カラット金合金がスタンダードになっていたが、近年チタン合金がインプラントのみならず補綴装置作製用材料として使用されている。CAD/CAM技術とともにジルコニアの歯科利用が進められ、多様なオールセラミック修復が可能になった。さらに透光性ジルコニアが開発されてモノリシック用途が主流になっている。一方、我が国では金銀パラジウム合金に代わる保険材料としてCAD/CAM成形によるコンポジットレジンクラウンが使用され、臼歯部から前歯部まで適用が拡大しつつある。今後、さらにデジタル歯科に対応した新素材の開発が期待される。

キーワード：補綴装置、CAD/CAM、チタン合金、ジルコニア、コンポジットレジン

I. はじめに

歯科医療では治療やリハビリテーションのために、材料を活用してきた歴史がある。20年前に21世紀に移行する際に、前世紀における歯科材料の到達点と今後の展望を議論するシンポジウムが多数開催された。筆者はライフワークとして新素材とデジタル歯科技術の開発を行ってきたが、20年前にはCAD/CAMをはじめとするデジタル技術が実用化のレベルに到達していたものの、素材の対応が追い付かず実用化には時間が必要であった。しかし、その後ジルコニアの登場により世界は一気にデジタル歯科にシフトしつつある。我が国においても、表1に示すように、歯科材料・機器を取り巻く環境には種々の要因が影響して、自費診療の分野のみならず、保険診療においても新しい時代が始まったといえる。

医療で使用される化学物質には医薬品と医用材料があり、従来は圧倒的に医薬品の比重が高かった。医薬品の安全性を規制する薬事法のなかで、材料は診療機

器とともに医療機器の範疇で括られていた。近年、医療の中で医療機器の比重が高まってきたので、法律の名称が薬事法から薬機法（医薬品ならびに医療機器の安全性に係る法律）に代わった。歯科材料も当然この範疇に入り、リスクに応じて一般医療機器、管理医療機器、高度管理医療機器に分類され、それぞれ、届出、第三者認証、大臣承認とハードルが高くなる。使用頻度が高まっている歯周組織や骨の造成に利用する材料やインプラントなどは、高度管理医療機器として非常にリスクが高いことに注意が必要である。

表1 歯科材料・機器を取り巻く環境変化

Table 1 Environmental changes of dental materials and equipment

①薬機法の承認とリスク分類
②国際規格（ISO）の導入
③デジタル技術の導入
④貴金属の高騰
⑤新素材の適用
⑥金銀パラジウム合金に代わる保険収載材料

従来、歯科材料や診療機器等はJIS(日本工業規格)で縛られていたが、国際化に伴い、ISO(国際規格)に連動するようになった。歯科材料の規格もISOが基準になり、金属材料とセラミック材料については新しい時代に突入したと言える。

補綴装置の作製には、従来から印象採得、模型作製、技工作業のワークフローがあった。個別の患者の個別の症例に品質、とりわけ適合の良い補綴装置を作製するために、技工技術として金合金に対するロストワックス精密鑄造法が確立し、これがスタンダードになっていた。近年、製造業だけでなく医療にもデジタル技術が活用され、補綴装置作製の新しいワークフローが登場してきた。デジタル印象採得からCAD/CAMによる補綴装置製作の流れである。特に、今後口腔内スキャナーを利用した光学印象採得が普及すると期待されている。

世界的な貴金属の高騰により、医療に金合金をはじめとする貴金属合金の使用が制限されるようになった。我が国では世界に冠たる保険制度が確立し、歯科医療では補綴装置作製の万能合金として金銀パラジウム合金が多用されてきた。しかし、パラジウムの高騰により保険適用合金の見直しが求められている。

世界的には貴金属の高騰から脱金属化が進められ、CAD/CAM技術の普及とともにセラミックスが伸びている。とりわけジルコニアが透光性の改良とともに急速に普及している。我が国では、保険収載材料として金銀パラジウム合金に替わり、コンポジットレジンを利用したCAD/CAM冠、さらにチタン鑄造冠が注目されている。

本稿では、以上のような背景をもとに、金属、セラミックス、レジン系複合材料について、デジタル歯科に対応した現状と将来展望をまとめた。

## II. 金属材料

金属は合金化することにより、弾性変形能と塑性変形能に優れ、高靱性が得られるので構造材料として幅広く使用されてきた。歯科治療では、クラウン・ブリッジ等の固定性修復装置、可撤性装置である義歯床、および義歯の維持装置、さらに歯科インプラントとインプラント上部構造等の補綴装置が臨床に幅広く

利用されている。矯正装置にも金属線が多用される。

従来は、鑄造用高カーラット金合金の物性(主として力学的特性)と補綴装置の種類との関係が、米国歯科医師会(ADA)規格で整備され、ロストワックス精密鑄造法が頻用されてきた。当時のグローバルスタンダードはADA規格であった。しかし、現在では歯科材料においても、国際規格(ISO)がグローバルスタンダードになっている。現在の歯科用金属材料に国際規格(ISO)では、引張試験から得られる特性値、すなわち耐力、伸び、および弾性係数で6つのタイプに分類している。すなわち、金合金に限らず安全性が担保されれば他の合金も使用できるので、我が国独自の金銀パラジウム合金はもとより、コバルトクロム合金に加えて、チタンが利用できる環境が整備された。また、成形加工技術として鑄造に縛られないので、CAD/CAMの利用も可能である。

金、白金に代表される貴金属は投機の対象にもなり、社会情勢で価格が変動する。1980年代にオイルショックとともに金が高騰し、歯科材料としてニッケルクロム合金が使用され、世界中で金属アレルギーが問題になった。我が国では金銀パラジウム合金を頻用していたので、影響は小さかったが、その後ロシアの政情不安により、パラジウム価格が急高騰し、金銀パラジウム合金の経済的優位性が失われた。さらに、近年の世界情勢により金、白金、パラジウムなどの貴金属の価格はかつてないほどに急騰し、歯科材料としての貴金属系合金の使用が困難になりつつある。そのような中で、世界的には脱貴金属の動きが高まっている。

歯科領域で使用されるチタン合金には、商用純チタン(第1種から4種)とチタンアルミニウムバナジウム合金がある。商用純チタンは酸素ほかの不純物元素を少量固溶した合金であり、その力学的性質(硬さと引張強さ)は従来のタイプ別金合金と同等である。また、チタンアルミニウムバナジウム合金はコバルトクロム合金同等以上である。

チタンは比重が貴金属の4分の1程度と小さく、表面に生成した酸化チタン被膜が食塩水中でも安定であるため、生体内環境下で腐食に抵抗する。現在、チタンはインプラント材料として標準的に使用されているが、今後はクラウン・ブリッジ、可撤性義歯までを含

めて、患者の口腔内を一つの金属で処置できる材料として期待される。

一方で、チタン合金は融点が高く周囲の酸素との反応性が高いので従来の歯科用合金と比較して、融解が難しいことや、鋳型との反応性が高いので、歯科精密鋳造の適用が難しく、鋳造体の適合性や品質保証が貴金属系合金よりも劣っていることが臨床応用のネックになっていた。2020年に脱貴金属の流れからチタン鋳造冠が保険収載された<sup>1)</sup>。しかし、本来金属は切削加工に向いているので、今後はCAD/CAMを利用したチタン補綴装置への期待が高い。

### Ⅲ. セラミック材料

セラミックスはギリシャ語のケラモス（焼き物）が語源で、従来は陶磁器やガラスが代表であったが、ファインセラミックスが登場し、現在では金属以外の無機質固体材料の総称になっている。固体には原子や単位構造が規則正しい配列をしているものと不規則な配列をしているものがある。前者を結晶、後者をガラスと呼ぶ。歯科用セラミックスの代表はポーセレン（陶材）で、これは本来ガラス（磁器）である。

ポーセレンは審美修復には最高の材料であったが、脆性で破壊しやすいため、金属フレームへポーセレンを焼付ける金属焼付鋳造冠が審美と強度を兼ね備えた装置として多用されてきた。しかし、オールセラミックスへの期待が高まり、強度に優れた歯科用セラミックスの開発が進められてきた。その流れは、ガラスから結晶質材料への流れである。とりわけ1900年代末からジルコニアが登場し、透光性の改良とともにフレーム材料からモノリシック材料まで幅広く利用されるようになってきた。

従来の歯科技工技術では、ポーセレンに対しては粉末築成・焼結、ガラスセラミックスに対しては鋳造や加熱加圧成形、ガラス浸潤多孔質多結晶焼結体に対してはスリップキャスト・焼結が用いられていたが、高密度多結晶焼結体の取り扱いが難しかった。近年、CAD/CAMとネットワークの導入により、アルミナやジルコニアの高密度多結晶焼結体を始め、セラミック材料に対してCAD/CAMの適用が可能になっている。とりわけ1990年代末にジルコニアが登場し、オー

ルセラミック修復がブリッジやインプラント上部構造まで適用できるようになり、新しい時代が始まった。

脆性なセラミックスに対しては、金属に利用する直接引張試験の適用が難しいため、曲げ試験と破壊靱性試験を行い、曲げ強さと破壊靱性値で歯科用セラミックスを評価する。そして、固定式補綴装置全般を歯科用セラミックスだけを用いて提供できるように国際規格が整備された。この規格値を満足する材料を使用すれば金属を利用しないで広範なオールセラミック修復が可能になる。いわば新素材としてのジルコニアの登場で、固定式補綴装置作製の世界が一変したと言ってもよい。

ジルコニアは室温では単斜晶の結晶構造で、1,000℃以上の高温で正方晶に、さらに2,000℃以上の高温で立方晶に結晶構造が転移する。当初利用されたジルコニアは、正確にはイットリアを3モル固溶させて、本来高温で安定な正方晶を室温の状態でも安定相として析出させた材料で、正方晶ジルコニア（英語でTZP）と呼ばれる。その後新しいタイプのジルコニアが登場したので、これを従来型ジルコニアと呼んでいる。従来型ジルコニアでは傷の先端（正方晶）に応力が集中すると本来室温で安定な単斜晶に戻りつつ膨張することにより傷を閉じ込め亀裂の進展を防止する。これにより、従来のセラミックの常識では考えられない非常に高い曲げ強さと破壊靱性を有している。この材料は透光性が低いので咬合面への適用は難しく、当初オールセラミックブリッジのフレームワークに適用された。しかし、前装のポーセレン焼成作業が煩雑であることや、ポーセレンのチッピングが生じたため、臨床現場からは透光性を改善してモノリシック用途に堪えられる材料の出現が待たれた。

従来型ジルコニアは強度を高めるために、イットリアに加えて極微量のアルミナを含んでいた。これが結晶粒界で光を散乱して透光性を低下させるので、第二世代として、不純物量を極力少なくして透光性を改善した正方晶ジルコニアが利用された。これを透光性ジルコニアと呼び、審美の要求があまり強くない臼歯部クラウンへのモノリシック用途で使用された。

しかし、ポーセレンやガラスセラミックに比べると透光性が劣り、審美領域への適用は難しかったので、

表2 ジルコニアの種類と特徴  
Table 2 Types and characteristics of zirconia

名称	結晶構造	添加イットリア量	強度	用途
従来型ジルコニア	正方晶	3モル (他に不純物)	高強度	ブリッジフレーム
透光性ジルコニア	正方晶	3モル	高強度	ブリッジフレーム、 モノリシック臼歯部クラウン (審美症例は適応外)
高透光性ジルコニア	正方晶+立方晶	4モル	中強度	モノリシック臼歯部クラウン・ブリッジ (高度な審美症例は適応外)
超高透光性ジルコニア	正方晶+立方晶	5モル	低強度	モノリシック前歯部クラウン・ブリッジ (高度な審美症例は適応外)

第三世代として、イットリア配合量を増やし、正方晶に加えて透光性の高い立方晶を混在させたジルコニアが開発された<sup>2)</sup>。イットリア配合量を増やすと立方晶が増えて透光性が向上する。イットリア4モルの材料を高透光性ジルコニア、イットリア5から6モルの材料は透光性がポーセレンに近づいたので超高透光性ジルコニアと呼ばれる。しかし、立方晶の析出は正方晶と異なり強度向上にはつながらないので、立方晶が増える分曲げ強さと破壊靱性値は低下し、超高透光性ジルコニアでは従来型ジルコニアの半分程度まで低下した。従って、高透光性ジルコニアは臼歯部のモノリシック、超高透光性ジルコニアは前歯部のモノリシックに適用が可能である (表2)。

一方、従来型から超高透光性ジルコニアまで曲げ強さと破壊靱性値は変動するが、硬さはいずれもエナメル質の3-4倍と大きいので対合歯の磨耗が懸念される。これについては、ジルコニアの表面を高度に研磨すれば、対合歯に対しても影響しないことが基礎研究のデータで明らかにされている。しかし、口腔内で硬さが大きいジルコニア修復の咬合面を鏡面研磨することは容易ではなく、今後臨床経過を注意深く検討する必要がある。

#### IV. レジン系複合材料

レジンとは高分子の鎖が絡まった構造の材料である。一般にレジン単独では強度が小さいので、レジンにセラミックス粒子を分散させて強化した材料、ならびにファイバーでレジン強化した複合材料が登場した。

前者を歯科ではコンポジットレジン、後者をファイバー強化レジンと呼んでいる。

コンポジットレジンには配合するフィラーの形状や粒径を工夫して容積で7割強のフィラーを配合することが可能になり、強度が向上した。歯科ではこれまで、液状モノマーにポリマー粒子やフィラーを混合して可塑性のあるペースト状態で成形してから、化学重合、加熱重合、光重合等によりモノマーをポリマー化して鎖の絡み合いで固化させていた。現在では、あらかじめ工場で重合してポリマー構造になっているブロックから、CAD/CAMの工程をへて歯冠修復装置の作製が可能になっている。CAD/CAM用ブロックは、重合率が高く (残留モノマーが少ない)、フィラー含有量を増やすことも可能であるので、強度は向上している。

我が国では貴金属高騰による金銀パラジウム合金に代わる保険材料としてこの材料が期待され、2014年4月にCAD/CAM冠との名称で小白歯対象として保険収載された。その後大白歯、さらに前歯部にも適用されるようになった<sup>3)</sup>。

これらの材料は単独のクラウンで使用され、接着性レジンセメントでの合着が必要になる。現状のコンポジットレジンの靱性では、負荷のかかる部位やブリッジへの適応は無理であるが、CAD/CAM技術が保険診療に適用されたということで、時代が大きく動いたことは間違いない。

ファイバー強化レジンとは先進医療としてシートを利用したブリッジフレームへの応用が収載されている

が、テクニクセンシティブである。近年、強度を向上させたCAD/CAM用ファイバー強化レジンプロックが開発された。将来はフレーム材料への応用が期待され、複合材料だけで金属を使用しない補綴処置の適応が拡大できる。

## V. おわりに

本稿では、金属、セラミックス、レジン（複合材料）のそれぞれの領域で、CAD/CAM技術に対応して利用可能な新しい材料について解説した。CAD/CAMを利用することにより、品質保証やトレーサビリティの管理が可能になる。そしてISOで規定された物性の材料を選択すればCAD/CAMによるワークフローでは成形加工後の物性が保証されるので、検査、診断、治療計画に基づいた補綴装置の作製が可能になる。

歯や歯列には機能時に大きな負荷が加わるので、これまで補綴装置の作製には、強度が保証される人工材

料が必須であった。さらに安全性や審美性の観点から脱金属の流れが加速している。しかし、これらは人工材料の構造は、CAD/CAM成形をしたとしても、現状では生体組織とは異なっている。最近、生体硬組織（エナメル質、象牙質、骨質）の微小力学的特性の解明が進み、ひずみ速度に依存した特殊な弾性挙動を示すことが明らかになっている<sup>4)</sup>。今後の材料には今まで以上に生体組織への適合性が要求されるので、今後生体組織に適合するスマート材料の開発が急務であると考ええる。

## 参考文献

- 1) 竹内義真, ほか: チタン鑄造冠の臨床的必要性と保険収載. 歯材器. 40, 41-45, 2021.
- 2) 伴清治: ジルコニアの材料選択. 日歯技工誌. 41, 150-151, 2020.
- 3) 末瀬一彦: 前歯部CAD/CAM冠の臨床応用の留意点. 日歯医師会誌. 73, 4-20, 2021.
- 4) Maruyama N, et al: Strain-rate stiffening of cortical bone: observations and implications from nanoindentation experiments. *Nanoscale*. 6, 14863-14871, 2014.

---

## Transition and Future Prospects of Dental Materials from the Viewpoint of Dental Engineering

Professor, International Exchange Center, Showa University

Takashi MIYAZAKI, D.D.S., Ph.D., F.I.C.D., Master Fellow

Fabrication of dental prostheses has been supported by the development of materials and technologies. Casting high-carat gold alloys with lost-wax precision casting technologies has been a gold standard for many years. Recently, titanium is available for not only the implant material but also that of normal prostheses. In addition, since zirconia has been developed for a dental use and is available for the CAD/CAM process, all ceramic restorations have been available for a wide range. Especially, with the development of translucent zirconia, monolithic zirconia restoration has been popular. On the other hand, as an alternative material of casting silver-palladium alloys for the insurance system in Japan, composites resin crowns fabricated by a CAD/CAM process have been available for both molar and anterior restorations. Development of further smart dental materials is anticipated in the future.

**Key words :** Dental Prostheses, CAD/CAM, Titanium, Zirconia, Composite Resin