

《特別企画》

メタルフリー材料の理工学的特徴

昭和大学 副学長
ICDマスターフェロー



宮 崎 隆

●抄 録●

補綴装置の製作には従来から金属、セラミックス、レジン及びその複合材料が利用されてきた。近年歯科用CAD/CAM装置の普及により、歯冠修復にメタルフリーの流れが進められている。世界的に利用されているセラミック材料に加えて、我が国ではレジン系材料をCAD/CAM冠として保険収載してきた。これらの材料は強さ、弾性係数、硬さなどの特性が異なっているので、グローバルスタンダードになっているISO規格をもとに、各材料の材料特性を理解したうえで臨床使用しなくてはならない。

キーワード：ポーセレン、ガラスセラミックス、ジルコニア、
コンポジットレジン、ピーク

I. はじめに

貴金属の高騰や金属アレルギーの懸念、高まる審美的要求により、世界中でメタルフリー修復が進められている。この背景には新しい材料の開発と成形加工法としてのCAD/CAMの利用がある。

新素材を臨床応用するためには、グローバルスタンダードになっているISO規格と対比して、素材の特性を理解したうえで適正な臨床術式を遵守することが重要である。本稿では歯科用金属材料のISO規格をもとに、新しいセラミックス材料とレジン系材料の特性を評価したい。

II. 補綴装置の用途と望ましい物性

20世紀を通じて歯科医療の進歩に大きく貢献したのが、金合金の精密鋳造による歯冠補綴処置である。歯冠補綴装置には、インレーからクラウン、ブリッジ、薄いフレームワークまでいろいろな種類がある。用途に応じて望ましい物性を整備したのが、以前のア

メリカ歯科医師会のタイプ別鋳造用金合金の規格であった。現在では国際規格 (ISO) でグローバルスタンダード化されており (表1)、我が国の保険診療を支えてきた金銀パラジウム合金や、2022年に保険収載されたチタン鋳造冠もこれに合致する。

金属の力学的特性は、引張試験で評価する。応力が加わると最初は弾性変形 (力を取り除くと元に戻る変形) が生じ、耐力以上の応力下では塑性変形 (力を取り除いたあとに形が変わる変形) に移行し、さらに力が加わると破壊する。

従来のメタルインレーでは辺縁部のすり合わせのためには、耐力が比較的小さく塑性変形が可能で破断までの伸びが大きい材料が扱いやすい。一方、クラウン、ブリッジでは、鋳造体で再現された望ましい歯冠形態が機能下でも保持されるためには、耐力が大きく機能下の咬合圧で塑性変形しないことが望まれた。ISO規格は、先人の研究成果と臨床的経験から導かれたものである。補綴装置の厚さに影響するのが弾性係数で、弾性係数の大きい材料のほうが装置を薄くでき

表1 補綴装置用金属材料の分類 (ISO22674、2006年)

タイプ	臨床用途	耐力 (MPa)	伸び (%)	弾性係数 (GPa)
1	低負荷のかかる単一歯固定性修復物 例) 単純窩洞のインレー、ラミネートベニア、クラウン	80	18	
2	単一歯固定性修復物 例) インレー、クラウン	180	10	
3	複数歯固定性修復物 例) ブリッジ	270	5	
4	高負荷のかかる薄断面装置 例) 可撤性義歯、クラスプ、薄い被覆冠、ロングスパンブリッジ、連結部が小断面のブリッジ、バー、アタッチメント、インプラント上部構造	360	2	
5	高い剛性と強さが必要な装置	500	2	150

る。コバルトクロム合金の弾性係数は金合金の2倍ほどあるので薄い装置を作製できる。

咬合面の硬さは自身の摩耗や対合歯の摩耗に関係する。金合金や金銀パラジウム合金の硬さはエナメル質よりも小さいが、機能下で問題ない。

Ⅲ. セラミックス

セラミックスの代表はポーセレン (陶材) である。これはガラスの焼き物で、歯冠色の再現が非常に優れている。金属修復では表面に傷があっても耐久性に問題が無いが、ポーセレンは非常に傷に弱い。金属のように引張試験をすることができないので、代わりに曲げ試験で評価する。また、傷があることを前提として、どのくらい破壊に耐えられるかどうかを評価する破壊靱性試験も行われる。

ポーセレンの曲げ強さや破壊靱性値は臼歯部のモノリシック用途には不十分であり、金属フレームへの前装として利用されてきた。ポーセレンの硬さはエナメル質よりも大きく、研磨が不十分であると表面がやすりようになって対合エナメルを摩耗させる。

ニケイ酸リチウムを代表とするガラスセラミックスは、ガラス中に結晶粒子を分散させて強度を向上させている。さらに、ガラスを含まない結晶粒子の焼結体であるジルコニアなどの新しいセラミックスが登場して、ブロックからCAD/CAMで削りだして歯冠補綴装置の作製ができるようになった。これら新しい材料はポーセレンよりも曲げ強さや破壊靱性が大きいので、ISO規格では、金属を必要としなくてもセラミックスだけで固定性歯冠補綴装置が作製できるというお墨付きを与えた (表2)。我が国でもオールセラミッ

表2 セラミックスの用途によるクラス分類および特性 (ISO6872、2015) *推奨値

クラス	用途例	曲げ強さ (MPa)	溶解量 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	破壊靱性* ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
1	a) 接着用セメントで装着される前歯用クラウン、ベニア、インレーまたはアンレー用のモノリシックセラミックス b) 下部構造セラミックスの被覆用セラミックス	50以上	100未満	0.7以上
2	a) 接着用セメントで装着されるクラウン用のモノリシックセラミックス b) 接着用セメントで装着されるクラウン用の下部構造セラミックス	100以上	100未満 2,000未満	1.0以上
3	a) 接着用または合着用セメントで装着されるクラウン用および大白歯を含まない3歯連結補綴用のモノリシックセラミックス b) 接着用または合着用セメントで装着されるクラウン用および大白歯を含まない3歯連結補綴用の下部構造セラミックス	300以上	100未満 2,000未満	2.0以上 3.0以上
4	a) 大白歯を含む3歯連結補綴装置用のモノリシックセラミックス b) 大白歯を含む3歯連結補綴装置用の下部構造セラミックス	500以上	100未満 2,000未満	3.5以上
5	4歯以上連結補綴装置用のモノリシックセラミックスまたは下部構造セラミックス	800以上	100未満	5.0以上

クスが自費診療で普及している。

ジルコニアは温度で結晶構造が変わり、室温では単斜晶、1000℃以上で正方晶、2000℃以上で立方晶に変態する。ジルコニアにイットリアを3 mol%配合すると室温でも正方晶で存在する。この正方晶ジルコニアは傷の先端で傷が拡がるのを防ぐので従来のポーセレンに比べると、破壊靱性や曲げ強さが5から10倍も大きい。しかし、透光性がなく白色なので金属焼付ポーセレンの金属フレームの代わりに利用され、表面にポーセレンを前装した。

その後、立方晶を混在させて透光性を改善させた部分安定化ジルコニアが、フルジルコニア冠として利用できるようになった。立方晶は正方晶と異なり傷の進展を防止できないので、フルジルコニア材料は正方晶ジルコニアに比べて破壊靱性と曲げ強さが半分程度に落ちている。それでもガラスセラミックスよりも強いので、臼歯部のクラウンブリッジに適用可能であるが、過信してはいけな。試適時に破折することもある。また、ジルコニアの硬さがエナメル質の3～4倍と大きいので、当初、対合歯を摩耗させるのではと懸念された。しかし、ガラス質ではなく細かい結晶が詰まっているので、滑沢に研磨すれば対合歯を摩耗させないことが認められている。

IV. レジン系材料

歯科用レジンの代表はアクリルレジンである。これは高分子の鎖が絡まった材料であり、産業界では高分子の塊を加熱して柔らかくして（熱可塑性を利用して）金型に射出して製品を作っている。歯科では、高分子状態の粉末と高分子の構成単位であるモノマー（液）を混ぜて成形し、そのあとで加熱や薬品で重合

させて固めて成形する方法が利用されてきた。便利な方法であるが、成形後にモノマーが残り為害作用があることや、硬化体の硬さや強さが低いので、パーマネントの歯冠補綴には利用されない。

一方、2014年から保険収載されたCAD/CAM冠のこれまでの素材はコンポジットレジンである。これはレジンの鎖の中にガラスのフィラーが入っており、ガラス表面にシランカップリング処理をすることにより、レジンと化学的に結合して非常に強固な構造となる。予め工場ブロックにすることで残留モノマーもなく、品質が向上する。コンポジットレジンの曲げ強さと破壊靱性はポーセレンの2倍ほどあるので、CAD/CAM冠の臨床経過では破壊はそれほど認められなかった。しかし、装置の厚さに関連する弾性係数をみると、コンポジットレジンの弾性係数は金銀パラジウム合金の1/5から1/10程度と小さいので、厚さを確保することが必要になる。

2023年暮れにはピークがCAD/CM冠用として大白歯に導入された（表3）。ピークはスーパーエンジニアリングプラスチックとして産業界で幅広く利用が進められている材料である。この度の保険収載では、壊れない材料ということが強調され、従来のCAD/CAM冠の素材であるコンポジットレジンよりも強い材料、さらに金属の替わりになると期待させられているようであるが、特性を精査したい。

ピークは線状高分子の鎖である。歯科でなじみのあるアクリルレジンが脆性であるのに比べて、十分に塑性変形できるので、いわゆる壊れにくい（感じがする）。しかし、破断時の曲げ強さを比較すると、コンポジットレジンの240MPaと比較してピークは180MPaであるから決して強くない。耐力に相当す

表3 CAD/CAMレジン冠の機能区分と要求事項（一部、2023年12月改定）

機能区分	I	II	III	IV	V
材 質	コンポジットレジン				ピーク
適応範囲	小1臼歯		大白歯	前歯	大白歯
無機フィラー (%)	60以上	60以上	70以上	60以上	17～25
硬さ (HV0.2)		55以上	75以上	55以上	25以上
曲げ強さ (MPa)		160以上	240以上	160以上	180以上
吸水量 ($\mu\text{g}/\text{mm}^3$)		32以下	20以下	32以下	10以下

る弾性変形から塑性整形に移行するところの応力は100MPa程度と小さいので、歯冠形態が機能下で変形する可能性がある。さらに、弾性係数がコンポジットレジン約1/2から1/4、金銀パラジウム合金の約1/20と非常に小さい。従って、金銀パラジウム合金と同じ厚さは不可能であり、厚さを確保しなければならないのは当然である。ピークの硬さはアクリルレジン歯と同程度で非常に小さい。添付書類の情報提供が十分でないが、おそらく混入されているフィラーは色調を改善するために配合されている酸化チタンフィラーであり、強度の改善には貢献していない。

ピークはすべての大白歯部位に適用可能になっているので、一般臨床家には金銀パラジウム合金と同じような適用が可能かと思われるかもしれないが、全く異なった材料であることを理解されたい。

V. おわりに

メタルフリー修復のグローバルスタンダードはセラミックスである。ポーセレン、ガラスセラミックス、ジルコニア（フルジルコニア用、フレーム用）が利用されており、すでにISOで用途と物性が規程されてい

る。それに対して、我が国のCAD/CAM冠はレジン系であり、これまでの機能区分IからIVがコンポジットレジン、Vがピークである。これらは海外先進国ではテンポラリー修復の対象であり、ISOでも規格化されていない。我が国では、企業の努力によりコンポジットレジンの品質が向上しているため、今後臨床実績を蓄積して世界に発信できるチャンスがある。一方、ピークに関しては産業界では用途に応じて複合化により強度改良をしているが、今回の材料はこれまでの歯冠補綴用材料と比較して必ずしも十分な強度を有していない。材料は正直であるので、材料の物性を正しく理解して、症例にあった材料を選択し、適正な臨床操作を行うことが重要である。

参考文献

- 1) 伴 清治：デジタルデンティストリーにおけるマテリアル選択. 日補綴会誌, 10: 209-215, 2018.
- 2) 峯 篤史, 松本真理子, 伴 晋太郎, 矢谷博文: CAD/CAMレジン冠: 日本から発信するメタルフリー治療. 日補綴会誌, 14: 115-123, 2022.
- 3) 末瀬一彦: PEEK材を用いたCAD/CAM冠の臨床応用への注意点. 日本歯科医師会雑誌, 76: 52-57, 2024.

Material Science Properties of Dental Materials Used for Metal-Free Restorations

Vice President, Showa University

Takashi MIYAZAKI, D.D.S., Ph.D., M.I.C.D.

Traditionally, metal, ceramics, resin, and composite materials have been used to fabricate prosthetic devices. In recent years, with the spread of dental CAD/CAM devices, the trend toward metal-free crown restorations has been promoted. In addition to ceramic materials used worldwide, resin-based materials have been covered by insurance as CAD/CAM crowns in Japan. Since these materials have different properties such as strength, modulus of elasticity, and hardness, it is necessary to understand the material properties of each material in comparison with the ISO standard, which has become a global standard, before clinical use.

Key words : Porcelain, Glass Ceramics, Zirconia, Composite Resin, Peak