

補綴歯科領域における CAD/CAM 用デンタルマテリアルの現状と展望

谷本安浩, 永田俊介, 加藤由佳子

Current status and future perspectives of dental materials for CAD/CAM system in prosthodontics

Yasuhiro Tanimoto, PhD, Shunsuke Nagata, DDS, PhD and Yukako Kato, DDS

抄 録

近年、デジタルテクノロジーが歯科領域に導入され、CAD/CAM システムなどを応用したデジタルデンティストリーも発展してきた。現在、CAD/CAM システムには、除去製造（切削加工）法と付加製造（積層造形）法がある。これらに使用されるデンタルマテリアルは素材別に有機（高分子）材料、無機（セラミック）材料、金属材料、およびそれらを組み合わせた複合材料に分類され、それぞれに特徴がある。

本稿では、CAD/CAM システムにおける切削加工および積層造形に使用されているデンタルマテリアルの主な種類、特徴を概説し、今後の展望について述べる。

キーワード

デンタルマテリアル, CAD/CAM, 除去製造（切削加工）, 付加製造（積層造形）

ABSTRACT

Recently, digital technology has been introduced in dental fields, following by digital dentistry with CAD/CAM system has been developed. Nowadays, there are subtractive manufacturing method and additive manufacturing method in CAD/CAM system. Dental materials used in CAD/CAM system are generally classified into polymers, ceramics, metals, and its composites, and have certain inherent properties, respectively.

In this paper, we would like to provide an overview of the main types and characteristics of dental materials used for subtractive manufacturing and additive manufacturing in CAD/CAM system, and then discuss the future perspectives of them.

Key words:

Dental materials, CAD/CAM, Subtractive manufacturing, Additive manufacturing

I. 緒 言

歯科治療にはさまざまな材料、すなわちデンタルマテリアルが使用されており、その発展は日進月歩である。特に近年、工業分野におけるデジタルテクノロジーが歯科領域にも導入され、CAD/CAM システムや AI などを用いたデジタルデンティストリーも発展してきた。そのようななかで、歯科修復物・補綴装置の設計や製作においてデジタルワークフローが構築され、それに伴い使用されるデンタルマテリアルも変

化している。たとえば、CAD/CAM システムによる切削加工は、オールセラミックレストレションを発展させ、そのメイン素材であるジルコニアはニーズの高まりとともに進化している¹⁾。また、コンポジットレジン（CR）を素材とする CAD/CAM 冠²⁾については2014年4月から小臼歯に対する保険収載が開始し、2020年9月までに適用部位が大白歯、前歯に拡大されたことが追い風となり、CAD/CAM 冠用 CR ブロックは幅広く臨床応用されている。さらに、ガラス繊維強化レジンやスーパーエンジニアリングプラスチック（スーパーエンプラ）である芳香族ポリエーテルケト

表 1 素材別における切削加工用材料

	材 料	製品名	
高分子	PMMA	M-PM- ディスク, レジンディスク, Ivotion	
	ポリカーボネート	ZR-CAD デンチャー PC	
	芳香族ポリエーテルケトン	PEEK PEKK 松風 PEEK, KZR-CAD PEEK, Ceramill Peek Pekkton	
	コンポジットレジン	CAD/CAM 冠用材料 (I)	カタナ アベンシア, 松風 ブロック HC, セラスマート 270
		CAD/CAM 冠用材料 (II)	カタナ アベンシア ブロック 2, 松風 ブロック HC ハード II, セラスマートプライム
		CAD/CAM 冠用材料 (III)	セラスマート 300, カタナ アベンシア P ブロック, 松風 ブロック HC スーパーハード
		CAD/CAM 冠用材料 (IV)	セラスマート レイヤー, カタナ アベンシア N, 松風 ブロック HC ハード AN
		繊維強化レジン	TRINIA, C-Temp
	ガラス	長石系	CEREC Blocs, VITABLOCS Mark II
		リユースイト系	Everest G-Blank, IPS Empress CAD, initial LFR
ニケイ酸リチウム系		IPS e.max CAD, Initial LiSi Block, CEREC Tessera	
メタケイ酸リチウム系		VITA SUPRINITY, Celtra Duo	
Nano リチウムダイシリケート系		Amber Mill	
セラミックス	単一組成型	3Y-HA	IPS e.max ZirCAD MO, カタナジルコニア LT, Aadv ST, 松風ディスク ZR SS
		3Y	IPS e.max ZirCAD LT, Aadv EL, KZR-CAD Zr HT, 松風ディスク ZR SS カラード
		4Y	IPS e.max ZirCAD MT, カタナジルコニア HT, LUXEN Enamel, Ceramill Zolid HI*
		5Y	カタナジルコニア ST, Aadv NT, KZR-CAD Zr SHT, Ceramill Zolid FX
		6Y	カタナジルコニア UT, 松風ディスク ZR ルーセント ウルトラ
		ジルコニア	M3Y
	単一組成 積層型	M4Y	Ceramill Zolid Gen-X, カタナジルコニア HTML PLUS, LUXEN Enamel Multi Gradation
		M5Y	Ceramill Zolid FX multilyer, カタナジルコニア STML, KZR-CAD Zr GR-SHT
		M6Y	カタナジルコニア UTML
		混合組成 積層型	M3Y-M5Y
	M3Y-M4Y		Sakura Zr. Disk, LUXEN Multi Premium
	M4Y-M5Y		IPS e.max ZirCAD MT Multi, カタナジルコニア YML, TANAKA エナメル Zr マルチプライト
金 属	チタン合金	KZR-CAD Ti Gr.5, Colado CAD Ti5, Ceramill Ti alloy	
	コバルトクロム合金	Colado CAD CoCr4, KM- コバルトクロム CAD, Ceramill Sintron	

ンなども使用されるようになってきた³⁾。また、歯科用 CAD/CAM システムにおいて、除去製造 (切削加工) 法に加えて、付加製造 (積層造形) 法を応用したデジタルデンチャー^{4,5)}、メタルクラスプ⁶⁾ やジルコニア冠⁷⁾ などの歯科補綴装置の研究開発も活発に行われている。

以上のように、CAD/CAM を用いた補綴装置の製作に使用されるデンタルマテリアルは素材別に有機 (高分子) 材料、無機 (セラミック) 材料、金属材料、およびそれらを組み合わせた複合材料に分類され、それぞれに特徴がある。これらのマテリアルは適切に使用されてこそ期待した性能を発揮するため、基本的性質や特徴を十分に理解しておく必要がある。

本稿では、CAD/CAM システムによる切削加工法

および積層造形法を応用した補綴装置の製作に使用されているデンタルマテリアルの主な種類、特徴および今後の展望について述べる。

II. 切削加工用材料

歯科用 CAD/CAM システムにおける除去製造法、すなわち切削加工法ではブロック状あるいはディスク状の種々の素材を切削工具によって所望の形状に削り出す。ここでは、切削加工に使用されるデンタルマテリアルについて素材別 (表 1) に概説する。

1. 高分子材料

切削加工用ポリメチルメタクリレート (PMMA)

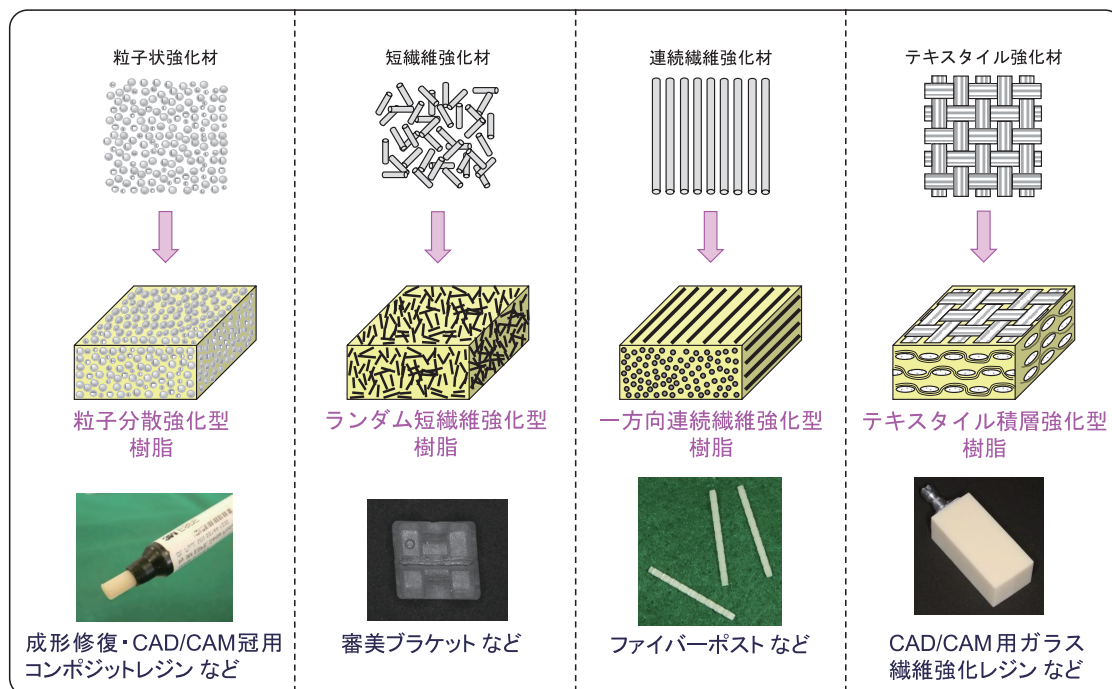


図1 歯科分野における複合材料の強化形態による分類 (文献9) を改変, 引用)

の主な用途はデンチャー, プロビジョナルクラウンやスプリントなどである。切削加工用 PMMA は紛液重合法 (従来型) による加熱重合型 PMMA に比べて, 重合度が高く, ほとんど気泡もないため, 高い機械的性質を有する。そのため, 切削加工で製作されるデンチャーは従来型および積層造形によるデンチャーよりも機械的性質に優れている⁴⁾。一方, 問題点としては, デンチャーの体積よりも大きいレジンディスクが必要であり, 切削加工にて製作することにより余剰部分の切削片が出るため, 材料の有効利用率が低いなどがある。また, デジタルデンチャー用として PMMA のほかに, ポリカーボネート製品 (ZR-CAD デンチャー PC) も販売されている。ポリカーボネートは PMMA に比べて, 耐衝撃性・耐摩耗性に優れており, 吸水性も低い。

現在, ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) やポリエーテルケトンケトン (PEKK) などのスーパーエンプラ製品が販売されている。PEEK や PEKK は高い融点およびガラス転移点を有し, 優れた耐熱性と強度を示す。また, ポリカーボネートやポリアミドなどと異なり, その構造の骨格にエステル結合やアミド結合を含まないため, 加水分解しにくく, 耐水・耐薬品性に大変優れる。一方, 透光性が低いので審美面の観点からその用途は限定され, 主にフレームやインプラントのアバットメントなどに適用されている。

CAD/CAM 冠用 CR は 2014 年の保険取載から 2020 年までに適用範囲が拡大され, 機能区分 (I) ~ (IV) に分類されている。2020 年度における CAD/CAM 冠の総市場は約 61 億円とされ⁸⁾, 急速にその需要が伸びている。CAD/CAM 冠用 CR は成形修復用 CR と同様の組成で, シリカフィラーと熱硬化性ジメタクリレート樹脂から構成される粒子分散強化型複合材料である (図 1)⁹⁾。CAD/CAM 冠用 CR は, フィラー含有量が成形修復用 CR とほぼ変わらないが, 機械的性質に優れている。これは, デンチャー用レジンディスクと同様, CAD/CAM 冠用 CR ブロックは高温・高圧下で成形・重合を完了させたポリマー構造体であり, 重合率が高く, 残留モノマーが非常に少ないためである。

ガラス繊維強化レジンとは, ガラスクロスを強化材とし, 熱硬化性エポキシ樹脂をマトリックスとする, 繊維強化型複合材料である (図 1)。現在, TRINIA と C-Temp の 2 製品がある¹⁰⁾。それぞれの曲げ強さは, TRINIA が約 400 MPa, C-Temp が約 450 MPa であり (ともにメーカー公表値), CAD/CAM 冠用 CR の機能区分 III (大白歯用, 曲げ強さ 240 MPa 以上) に比べても高い。現在, その用途はフレームやプロビジョナルブリッジに限定されている。

そのほかの高分子材料として, 従来のパラフィンワックスを主成分とする歯科用ワックスと比較して融

点の高いマイクロクリスタリンワックスなどが切削加工用ワックスとして使用されている。特徴としてはワックスアップしたワックスパターンに比べて熱による変形が少ないなどの利点がある。

2. セラミック材料

歯科用 CAD/CAM システムが普及する以前、歯科用セラミックスは、陶材焼付金属冠における焼付用陶材やキャストブルセラミックス、加熱加圧用セラミックスなどのガラスセラミックス（結晶化ガラス）が主流であった¹¹⁾。現在、歯科領域に CAD/CAM システムが浸透するなかで、切削加工用ガラスセラミックスとして、リューサイト系 ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$)、二ケイ酸リチウム系 ($Li_2O \cdot 2SiO_2$) やメタケイ酸リチウム系 ($Li_2O \cdot SiO_2$) などがある。これらのガラスセラミックスはジルコニア (ZrO_2) に比べて、透光性があり、審美性に優れているが、機械的性質は低い。そのため、主にインレー、クラウンおよびラミネートベニアに使用され、ブリッジへの適応範囲は限定される。

高密度焼結体であるジルコニアは、単斜晶、正方晶、立方晶の三つの結晶系が成り立ち、温度により変態する。1975年に Garvie によって正方晶と立方晶が混在する部分安定化ジルコニア (Partially stabilized zirconia : PSZ) が見い出され¹²⁾、一般産業界ではジルコニアの開発、応用が急速に進んだ。国内において、2005年に Cercon が薬事承認された後、これまでに PSZ および正方晶ジルコニア多結晶体 (Tetragonal zirconia polycrystal : TZP) の歯科用ジルコニア製品が多く販売されている。イットリア系ジルコニアは、曲げ強さが約 560 ~ 1,400 MPa、破壊靱性値が約 2.4 ~ 4.2 MPa · m^{1/2} を示し¹⁾、これまでのガラスセラミックスに比べて機械的性質に大変優れている。特に、アルミナやイットリアの添加量を調整することで、適度な機械的性質と透光性を有するモノリシックジルコニア冠の使用も可能となった。また、多数歯欠損によるロングスパンにも幅広く適用されるが、連結部の面積は 7.0 mm² 以上必要との報告¹³⁾もあり、その形状も含めて、補綴装置の設計には注意が必要である。さらに現在、プリシェードを数層積層したマルチレイヤー型、組成の異なる TZP や PSZ を積層させた混合組成積層型が市販されている。最近では、透光性に大変優れる超透光性 PSZ などが上市されており、歯科用ジルコニアは強度のみならず、透光性・審美性の改善¹⁾や高速焼成に関する適正化¹⁴⁾なども進んでいる。

3. 金属材料

切削加工の際、熱と切削屑が発生するため、熱伝導性と材料単価が高い貴金属合金は切削加工法における被削材としては不向きと言える。そのため、切削加工用金属材料には純チタン、チタン合金 (Ti-6Al-4V) やコバルトクロム合金などの非貴金属合金が用いられる。切削加工用チタンである KZR-CAD Ti は Grade 4 および Grade 5 が上市されている。また同じく、切削加工用チタンあるいはコバルトクロム合金である Colado CAD は均質なマイクロ構造を有しており、ミリングに負担がかかりにくいように設定されている。主に陶材焼付金属冠のフレームに使用されている。

III. 積層造形用材料

近年、積層造形は CAD/CAM システムによるデジタル歯科技工における手法の一つとして応用されるようになってきた。造形方式は ISO/ASTM 52900 規格において、七つの方式に細分化されている¹⁵⁾ (図 2)。また、表 2 に各造形方式で使用可能な素材を示す。特に歯科領域においては、光硬化性樹脂の造形を主とする液槽光重合法 (Vat photo-polymerization : VPP) と、金属粉末材料からコバルトクロム合金やチタン合金などを造形することができる粉末床熔融結合法 (Powder bed fusion : PBF) などが盛んに用いられている。そこでここでは、主に VPP および PBF で使用されるデンタルマテリアルについて素材別 (表 3) に概説する。

1. 高分子材料

現在、歯科領域における積層造形で最も活用されているのは高分子材料であり、その用途はさまざまである。種類としてはビニル系、スチレン系、アクリル系、ポリエステル系、ポリカーボネート系、ポリアミド系などがある¹⁶⁾。また、切削加工用と同様、機械的性質および生体安全性に優れた PEEK も応用されている。積層造形用高分子材料は技工装置として、石膏模型の代替となる歯牙模型や印象採得用の個人トレー、鑄造用パターンなどに用いられる。また、口腔内で使用する装置としては、義歯、インプラントサージカルガイド、プロビジョナルクラウンなどが挙げられる。

積層造形は、一度に複数の装置を造形することが可能で、加工時間も切削加工と比較して短時間であることに加え、材料ロスが少なく低コストであるため製作効率に優れている。また、レーザー光により材料を選択的に硬化させることができるため、中空構造を有す

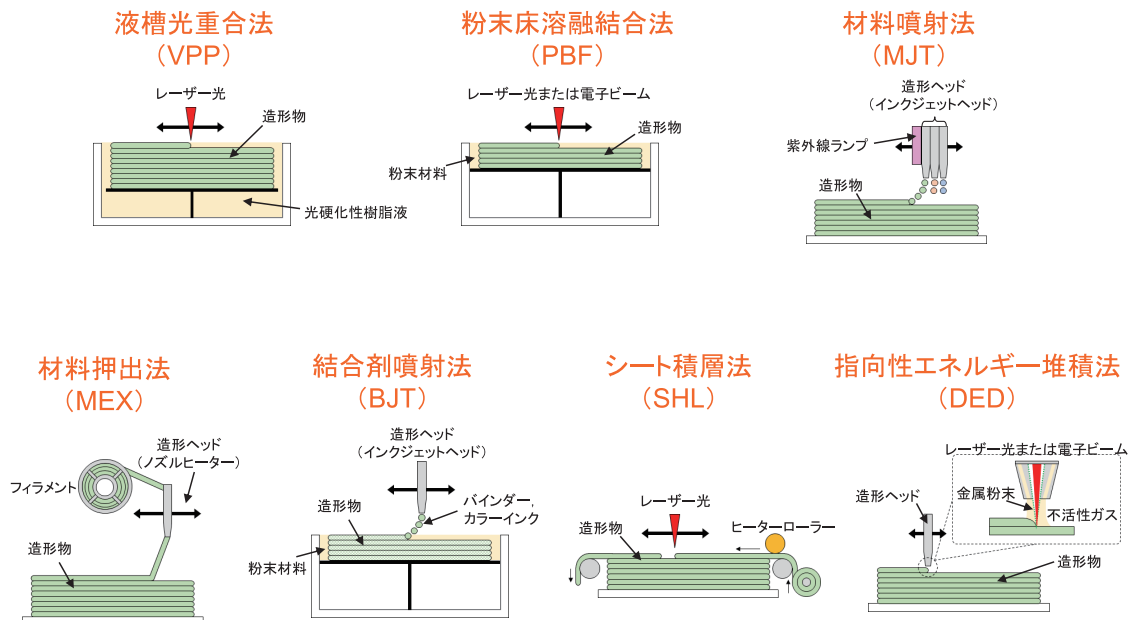


図2 各種積層造形方式の模式図

表2 各種積層造形方式で利用可能な素材

方式	高分子材料	セラミックス	金属
液槽光重合法	○	△	
粉末床熔融結合法	○	○	○
材料噴射法	○		
材料押出法	○		
結合剤噴射法	○	○	○
シート積層法	○	△	○
指向性エネルギー堆積法			○

る装置を精度良く製作することが可能である¹⁷⁾。これにより模型製作時に用いる樹脂材料の使用量を低減でき、中空構造を有する軽量の顎義歯を容易に製作できる。さらに、工具サイズに規制されないため微細な構造を再現可能であり、高い精度で補綴装置を製作することが可能である¹⁸⁾。そのため、積層造形法で製作したデジタルデンチャーは従来法のデンチャーよりも適合性が良く、高い維持力を有する¹⁹⁾。その一方、積層造形法ではさまざまな材料を層ごとに盛り上げ、造形するため、層間にギャップが生じる。その結果、切削加工用樹脂や加熱重合樹脂と比較して不均質で、異方性を示す²⁰⁾。最近では、光硬化性樹脂にシリカガラスやジルコニアなどのナノフィラーを添加することで機械的性質の向上を試みた研究もある²¹⁾。現在、最終補綴装置として利用できる樹脂材料も上市されており、適応範囲は今後拡大していくと考えられる。

2. セラミック材料

近年ではセラミックレストレーションの最新技術として、ジルコニア製補綴装置を積層造形にて製作する試みがなされている⁷⁾。代表的な方法としては、ジルコニア粉末を混合した光硬化性樹脂を用いてVPPによって、積層→光重合・硬化→脱脂→焼成して製作する。VPPで製作したジルコニア冠は、臨床的に応用可能な曲げ強さを有し²²⁾、硬さや破壊靱性に関しても切削加工法と同等の値を示しており²³⁾、機械的性質に関しては十分な特性を有する。また、マージンや内面の適合精度に関しても、臨床的に許容できる範囲での製作が可能である²⁴⁾。現在、直接インク書込み法 (Direct ink writing : DIW) によるジルコニア造形法が開発されており、今後、歯科領域でDIWの積極的な活用が期待される²⁵⁾。近年では、Lithoz社の特許技術であるVPPとデジタル・ライト・プロセッシングを組み合わせたセラミック光造形技術を用いた高透光性の石英ガラスベースの積層造形用材料も開発されている。

その他のセラミック材料として、材料押出法 (熱溶解堆積法) によるハイドロキシアパタイトブロックの製作²⁶⁾ などがあり、骨欠損部の形態を自在に再現することが可能である。加えて、従来の材料よりも高い比表面積を有するため、再生医療におけるスキャホールドとして優れた特性を有することが示唆されている。

表 3 素材別における積層造形用材料

材 料	製品名	主な用途
高分子	ASIGA デンタモデル, SP-Model, DH Print モデル, NextDent モデル 2.0, Formlabs Model Resin, Freeprint モデル	模型材
	ASIGA デンタトレー, DH Print トレー, NextDent トレー, Formlabs Custom Tray Resin, Freeprint トレー	トレー
	ASIGA デンタキャスト, SP-Cast, DH Print キャスト, NextDent キャスト, Formlabs Wax Resin, Freeprint キャスト	パターンレジン
	ASIGA デンタガイド, DH Print スプリント & ガイド, NextDent オルソフレックス, Freeprint スプリント, Freeprint オーン	スプリント
	DH Print プロビジョナル CB, Formlabs Temporary CB Resin, Formlabs Permanent Crown Resin, Detax テンポラリー	歯冠用材料
	Flexcera Base, SP-Partial, DH Print デンチャーベース, Formlabs Digital Dentures Resin, Detax デンチャーベース	義歯用材料
セラミックス	ジルコニア Lithacon 3Y 210, 3DMIX Zirconia, AdmaPrint Z130	歯冠用材料
	ハイドロキシアパタイト LithaBone HA 480, 3DMIX HAP, AdmaPrint B130	骨補填材, インプラント
金 属	チタン合金 純チタン, Ti-6Al-4V 合金	
	コバルトクロム合金 Co-Cr-Mo-W 合金粉末: SP2, CCMS-W Co-Cr-Mo 合金粉末: MP1, CCMS1	歯冠用材料, 義歯用材料

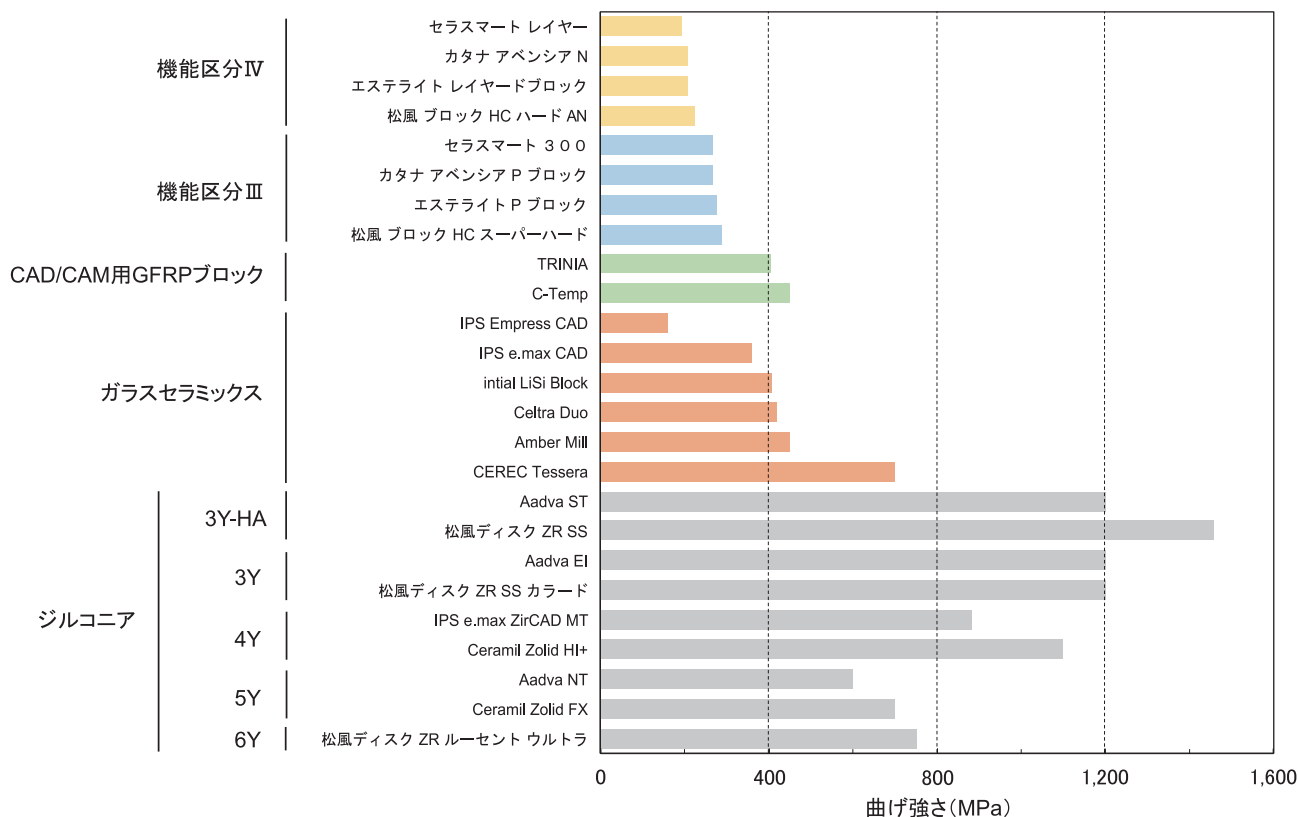


図 3 各種切削加工用材料の曲げ強さ (メーカー公表値)

3. 金属材料

金属粉末を三次元に積層して補綴装置を製作する場合、高出力レーザーの熱エネルギーによって粉末粒子を選択的に熔融する、PBFによって製作を行う。三次元積層造形用の金属粉末材料は、Co-Cr-Mo-W 合金粉末の SP2 (EOS), CCMS-W (山陽特殊製鋼) と、Co-Cr-Mo 合金粉末の MP1 (EOS), CCMS1 (山陽

特殊製鋼) の計 4 種が薬事承認を受けている²⁷⁾。積層造形用のコバルトクロム合金は従来の鋳造用合金よりも高い機械的性質や疲労特性を有しており、生体適合性においても同等の性質を示す²⁸⁾。積層造形法で製作したメタルフレームやクラスプは、鋳造法の場合と同等の適合性を有するが、切削加工法に比べると劣るとの報告がある²⁹⁾。積層造形による造形物の表面

性状は粗いため、積層造形した補綴装置の表面を切削加工により平滑にするハイブリッド製造法も提案されている²⁹⁾。現在、歯科領域における金属積層造形的主流はコバルトクロム合金だが、三次元積層造形用チタン合金の研究開発が推進されており、その応用が期待される³⁰⁾。

IV. 今後の展望

切削加工法におけるジルコニアや二ケイ酸リチウムガラスの発展はオールセラミックレストレーションの浸透に大きく貢献してきた。図3に各種切削加工用材料の曲げ強さを示す。ジルコニアはほかの歯冠修復・補綴装置用材料に比べて、非常に高い機械的性質を有する。また、直近の2023年6月には、イトリア濃度1.5%で結晶粒の小さい1.5Y-TZPの研究開発が発表され、その曲げ強さは1,210 MPa、破壊靱性値は $22.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ と驚異的な高靱性を示し³¹⁾、今後もジルコニアは飛躍的に進化していくものと考えられる。

近年の貴金属価格の高騰などにより、保険診療におけるCAD/CAM冠へのニーズが高まっている。そのようななか、CAD/CAM冠の臨床エビデンスにおいて脱離が最も多いトラブルであり、その支台歯形態が大きく起因していると考えられている²⁾。脱離防止策の一つとして、CAD/CAM冠に比べて曲げ強さが約1.5～2倍大きいガラス繊維強化レジン³²⁾の適用が考えられる(図3)。これにより、CAD/CAM冠に比べて支台歯形成の削除量を減らして装置の厚みを薄くでき、支台歯高径や支台歯表面積を確保することが可能である。今後、前装なしで使用可能な審美性に優れたガラス繊維強化レジン材料の開発と保険収載が望まれる。その他の材料として、PEEKやPEKKは優れた機械的性質および生体安全性に加えて、ガラス転移点が高いため、簡易的で有効に殺菌可能であり³²⁾、歯科における用途が更に拡大するものと推測される。

積層造形法では、チタンやジルコニア製補綴装置の製作システムの確立が期待される。2020年には铸造による純チタン2種の大白歯歯冠修復が保険収載された。現在、積層造形用チタン合金材料の研究開発が推進されており³⁰⁾、今後、コバルトクロム合金粉末に続き、積層造形用チタン粉末の薬事承認が待たれる。一方、PBFによる合金の積層造形の普及には、装置の小型化や低価格化または診療所一技工所との連携構築などが必要である。また、造形工程で発生する金属造形物内における残留応力の緩和や表面性状の向上な

どが今後の課題である。さらに、PBFを含めた各種積層造形法の生体安全性に関する研究は少ないため³³⁾、造形工程や造形物の安全性に関するデータの収集、整備が急務であろう。

以上、さまざまなデンタルマテリアルの開発が進むなか、筆者は今後、生体組織の物性やバイオメカニクスを考慮したコンピュータ支援工学のデジタルデンティストリーへの更なる導入、発展に期待したい。患者個別モデル(Patient-specific modeling)³⁴⁾が実用化されることで、患者それぞれに応じた支台歯形態や補綴装置の形状に関する適正化が進み、より材料の特性を活かした補綴治療が可能になるものと考えられる。

V. おわりに

現在、CAD/CAMシステムによる補綴装置製作においてはアナログとデジタルが共存しているが、ニーズの増加とともにデジタルワークフローに対応したデンタルマテリアルはますます多種多様になっていくものと考えられる。今後も日進月歩のデンタルマテリアルについて、その組成や特性などに関する知識を常にアップデートし、臨床において適切に使用する必要がある。

謝 辞

本総説の一部はJSPS科研費JP20K10018の助成を受けたことを付記し、謝意を表します。

文 献

- 1) Ban S. Development and characterization of ultra-high translucent zirconia using new manufacturing technology. *Dent Mater J* 2023; 42: 1-10.
- 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* 2022; 14: 115-23.
- 3) Jovanović M, Živić M, Milosavljević M. A potential application of materials based on a polymer and CAD/CAM composite resins in prosthetic dentistry. *J Prosthodont Res* 2021; 65: 137-47.
- 4) Abualsaud R, Gad MM. Flexural strength of CAD/CAM denture base materials: Systematic review and meta-analysis of *in-vitro* studies. *J Int Soc Prev Community Dent* 2022; 12: 160-70.
- 5) Kalberer N, Mehl A, Schimmel M, Müller F, Srinivasan M. CAD-CAM milled versus rapidly prototyped (3D-printed) complete dentures: An *in vitro* evaluation of trueness. *J Prosthet Dent* 2019; 121: 637-43.

- 6) Takahashi K, Torii M, Nakata T, Kawamura N, Shimpo H, Ohkubo C. Fitness accuracy and retentive force of additive manufactured titanium clasp. *J Prosthodont Res* 2020; 64: 468-77.
- 7) Khanlar LN, Rios AS, Tahmaseb A, Zandinejad A. Additive manufacturing of zirconia ceramic and its application in clinical dentistry: A review. *Dent J* 2021; 9: 104.
- 8) アールアンドディ. 歯科機器・用品年鑑 2022 年版 (32 版) 2022 : 159-60.
- 9) 谷本安浩, 岩崎太郎. 繊維強化高分子材料の特徴と歯科的応用. *日歯理工会誌* 2019 ; 38 : 73-7.
- 10) 永田俊介, 岩崎太郎, 高橋治好, 北川剛至, 平山紀夫, 谷本安浩. CAD/CAM 用ガラス繊維強化型レジン の表面硬さおよび摩擦摩耗特性. *日大口腔科学* 2022 ; 48 : 8-17.
- 11) 堤 定美, 関野雅人. 歯科用セラミックスの工学的性質. *日補綴会誌* 1999 ; 43 : 194-202.
- 12) Garvie RC. Ceramic steel? *Nature* 1975; 258: 703-4.
- 13) Erdiñç G, Bülbül M, Özcan M. Fracture strength and energy-dispersive spectroscopy analysis of 3-unit fixed partial dentures fabricated from different monolithic zirconia materials. *J Prosthet Dent* 2023; 129: 938e1-938e7.
- 14) 猪越正直, 水口俊介. ジルコニア : マテリアルサイエンスから見た最新のエビデンス. *日補綴会誌* 2022 ; 14 : 124-30.
- 15) 樋口鎮央. 積層造形技術の応用と今後の展開. *歯産学誌* 2022 ; 36 : 3-12.
- 16) Jockusch J, Özcan M. Additive manufacturing of dental polymers: An overview on processes, materials, and applications. *Dent Mater J* 2020; 39: 345-54.
- 17) Sherman SL, Kadioglu O, Currier GF, Kierl JP, Li J. Accuracy of digital light processing printing of 3-dimensional dental models. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2020; 157: 422-8.
- 18) Son K, Lee JH, Lee KB. Comparison of intaglio surface trueness of interim dental crowns fabricated with SLA 3D printing, DLP 3D printing, and milling technologies. *Healthc (Amst)* 2021; 9, 983.
- 19) Tasaka A, Matsunaga S, Odaka K, Ishizaki K, Ueda T, Abe S et al. Accuracy and retention of denture base fabricated by heat curing and additive manufacturing. *J Prosthodont Res* 2019; 63: 85-9.
- 20) 岩崎太郎, 北川剛至, 永田俊介, 谷本安浩. 液槽光重合合法における造形条件が歯科用樹脂造形物の機械的性質および寸法精度に及ぼす影響. *日歯理工誌* 2023 ; 42 : 179-87.
- 21) Alshamrani A, Alhotan A, Kelly E, Ellakwa A. Mechanical and biocompatibility properties of 3D-printed dental resin reinforced with glass silica and zirconia nanoparticles: In vitro study. *Polymers* 2023; 15: 2523.
- 22) Abualsaud R, Abussaud M, Assudmi Y, Aljoaib G, Khaled A, Alalawi H et al. Physiomechanical and surface characteristics of 3D-printed zirconia: An in vitro study. *Materials* 2022; 15: 6988.
- 23) Mei Z, Lu Y, Lou Y, Yu P, Sun M, Tan X et al. Determination of hardness and fracture toughness of Y-TZP manufactured by digital light processing through the indentation technique. *Biomed Res Int* 2021; 2021: 6612840.
- 24) Refaie A, Fouda A, Bourauel C, Singer L. Marginal gap and internal fit of 3D printed versus milled monolithic zirconia crowns. *BMC Oral Health* 2023; 23: 448.
- 25) Teegen IS, Schadte P, Wille S, Adelung R, Siebert L, Kern M. Comparison of properties and cost efficiency of zirconia processed by DIW printing, casting and CAD/CAM-milling. *Dent Mater* 2023; 39: 669-6.
- 26) 廣田 健, 張 仕博, 中村維吹, 美濃和幸, 藤原卓月, 加藤将樹ほか. 熱溶融堆積 (FDM) 3D プリンターを用いたセラミックスの作製 - 高密度アルミナと Ni-Zn-Cu フェライトおよびヒドロキシアパタイト (HAP) のスキャホールドー. *粉体および粉末冶金* 2023 ; 70 : 132-44.
- 27) Takaichi A, Fueki K, Murakami N, Ueno T, Inamochi Y, Wada J et al. A systematic review of digital removable partial dentures. Part II: CAD/CAM framework, artificial teeth, and denture base. *J Prosthodont Res* 2022; 66: 53-67.
- 28) Alageel O, Abdallah MN, Alshegri A, Song J, Caron E, Tamimi F. Removable partial denture alloys processed by laser-sintering technique. *J Biomed Mater Res Part B Appl Biomater* 2018; 106: 1174-85.
- 29) Suzuki Y, Shimizu S, Waki T, Shimpo H, Ohkubo C. Laboratory efficiency of additive manufacturing for removable denture frameworks: A literature-based review. *Dent Mater J* 2021; 40: 265-71.
- 30) Okazaki Y, Ishino A. Microstructures and mechanical properties of laser-sintered commercially pure Ti and Ti-6Al-4V alloy for dental applications. *Materials* 2020; 13: 609.
- 31) Matsui K, Hosoi K, Feng B, Yoshida H, Ikuhara Y. Ultrahigh toughness zirconia ceramics. *Proc Natl Acad Sci* 2023; 120: e2304498120.
- 32) 浅野 隆, 續橋 治, 内堀聡史, 鈴木浩司, 若見昌信, 福本雅彦ほか. PEEK のマイクロ波加熱処理による

- 変形量と真菌に対する殺菌効果. 日補綴会誌 2022 ; 14 : 52-60.
- 33) Vallabani NVS, Alijagic A, Persson A, Odnevall I, Särndahl E, Karlsson HL. Toxicity evaluation of particles formed during 3D-printing: Cytotoxic, genotoxic, and inflammatory response in lung and macrophage models. *Toxicology* 2022; 467: 153100.
- 34) Lahoud P, Jacobs R, Boisse P, EzEldeen M, Ducret M, Richert R. Precision medicine using patient-

specific modelling: state of the art and perspectives in dental practice. *Clin Oral Investig* 2022; 26: 5117-28.

著者連絡先：谷本 安浩

〒 271-8587 千葉県松戸市栄町西 2-870-1

日本大学松戸歯学部歯科生体材料科学講座

Tel: 047-360-9352

Fax: 047-360-9350

E-mail: tanimoto.yasuhiro@nihon-u.ac.jp