



充填・支台築造用ファイバー強化型 フロアブルコンポジットレジンが 歯を補強し、亀裂を抑制する！ バイオメティックマテリアルの真価

人工象牙質とは？

日本歯科大学生命歯学部 歯科理工学講座
教授

新谷明一

はじめに

バイオメティクスとは、進化の過程の中で最適化された生物の微細な形態や構造を模倣することで、その機能を獲得する技術的アプローチ法である。歯科におけるバイオメティックコンセプトとは、失われた歯の構造を、その物性に近い人工材料で歯冠形態を回復し、天然歯と同じ機能を獲得しようとする試みのことである(図1、2)。エナメル質は耐酸性に優れ、硬く脆い性質を有する。そのため、エナメル質を模倣できる材料としてはセラミックスが該当している。一方、象牙質は無機質

に加えてコラーゲン線維などの有機質が約20%含まれており、エナメル質より柔軟で粘弾性を有した物性を示すため、硬い脆性材料であるコンポジットレジンでは対応できない。このことから今までの日本では、象牙質を人工材料に置き換えられる材料が存在しなかった。約20年の時を経て、ようやく日本でも紹介できるようになった充填・支台築造用ファイバー強化型フロアブルコンポジットレジン“ジーシー エバーエクスフロー”(図3)は、2003年からフィンランド・トゥルク大学で研究開発が

行われてきたデンチンリプレースマテリアルで、象牙質を模倣することができる唯一のコンポジットレジンである。細かく裁断されたガラス繊維をあらゆる方向に配合することで、高い破壊靱性¹⁾と柔軟な曲げ弾性率²⁾が両立されており、象牙質の物性を模倣することに成功した。硬く脆い外部構造をガラス繊維の持つ“しなやかさ”が強固に支え、クラックの進展を抑制する^{3、4)}(図5)。本稿では、エバーエクスフローの特長と臨床応用について紹介する。

Mechanical properties of the various dental materials

	Enamel	Dentin	Hybrid Composite	Shortrandom Fiber
Density (g/cm ³)	2.96	2.2	1.5~2.5	2.01
Elastic Modulus (GPa)	40~80	15~18	12~50	9.6~12
Fracture Toughness K _{IC} (MPa m ^{1/2})	1~1.5	4	0.55~1.36	5.1
Vickers Hardness (HV)	321	69	104~180	56.4~74.6

図1 歯および各種レジンの基礎物性¹⁶⁻¹⁸⁾。

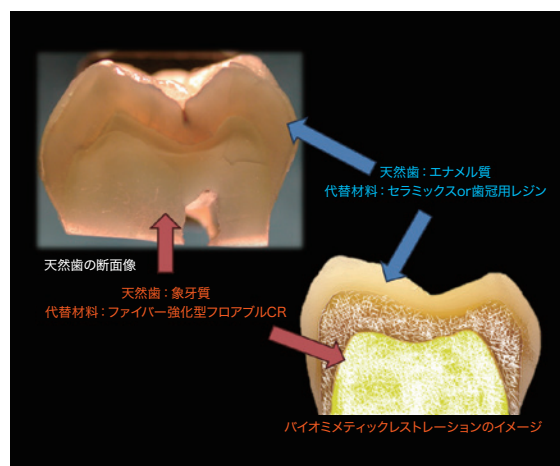


図2 バイオメティックレストレーションに求められる材料。



図3 エバーエックス フロー。

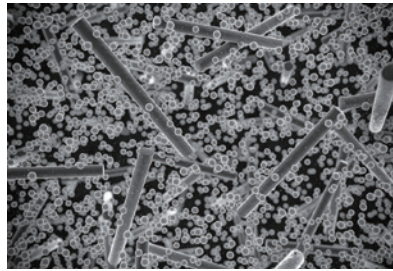


図4 エバーエックス フロー細部の構成 (イメージ図)。

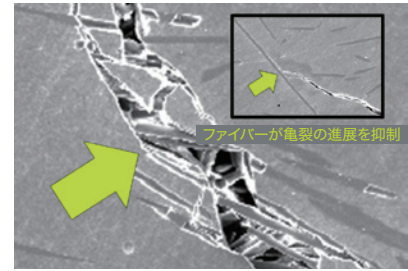
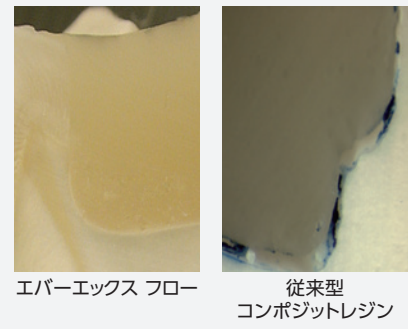


図5 クラックとファイバーの関係。

エバーエックス フローの用途

エバーエックス フローは、エクスベリア (高強度硬質レジnbrリッジ) のファイバーフレームに応用された基礎技術に基づいた設計と組成を持ち、光で重合・硬化し、X線不透過性を有するコンポジットレジジンである。主な使用目的は象牙質の再建で、ベース材やコア材として、生活歯・失活歯を問わず使用できる。最大の特長として高い破壊靱性を有することが挙げ

られる。このことから脆性破壊に抵抗する効果が望める。また、特徴的なファイバーが含まれているため、エバーエックス フローは破折のリスクを減らしながら、深部への亀裂の進展を防ぐ (図5)。さらに、ファイバーはレジンの重合収縮を抑制する^{5,6)}ため、窩洞に適しやすく (図6)、重合時に生じる辺縁漏洩を減少させ、二次う蝕や脱離のリスクを軽減する⁷⁾。



エバーエックス フロー

従来型
コンポジットレジジン

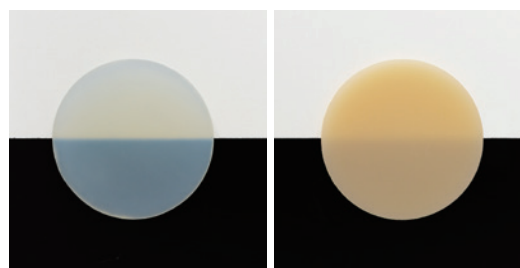
図6 各コンポジットレジンの窩洞への適合性。

ベース材としての有用性

エバーエックス フローは深くて大きな臼歯部の窩洞に有効な人工象牙質として使用できる。直接法で使用する場合、直接法コンポジットレジジン修復の接着システムを利用することで、高い象牙質接着性が得られる。う蝕除去後に生じた歯質の実質欠損をエバーエックス フローで修復することにより、細かなガラス繊維が象牙質を補強し、人工象牙質となる。また、除去できなかったマイクロクラックの進展も抑制できる⁸⁾。窩洞が小さい場合は、エバーエックス フローで人工象牙質を構築した

後に、従来型コンポジットレジジンにて歯冠形態を再現することで歯冠修復を完了できる。また、隣接面を含んだ大きな窩洞の場合には支台歯形成を行った後に、オールセラミッククラウンやオクルーザルベニアにてメタルフリー修復が可能とな

る。エバーエックス フローの色調は重合深度⁹⁾を深くすることができるバルクシェード (重合深度5.5mm) と審美性を考慮したデンチンシェード (重合深度2.0mm) の2種類が用意され (図7)、症例に合わせて選択できる。



バルクシェード

デンチンシェード

図7 エバーエックス フローの色調。

支台築造材料としての有用性

近年では、大臼歯部の支台築造を行うときの注意点として、必要以上に健全歯質を削除しないことが挙げられる。大臼歯は歯髓腔が広いので、抜髄後には十分な維持力を期待できる空間が生じる。その空間がおおよそ2mm以上の深さであった場合、残存した窩壁と合わせて十分な維持力が期待できるため、ポスト形成は不要となる。ポストが必要なければ歯質削除量の減少とともに、光が届かないという問題から解放されるので、通常の光重合型のボンディングシステムを採用することができ、信頼性の高い接着強さを得ることができる。もち

ろん、良好な接着強さを獲得するためには、う蝕象牙質の完全除去が前提となるが、たとえ残存歯質が薄くなったとしても、その失った象牙質をエバーエックス フローにて再構築できる。良好な接着を獲得することができれば、エバーエックス フローに含まれるガラス繊維が歯質を補強する。

エバーエックス フローを大臼歯の直接法支台築造に用いる場合、ポスト形成はいったん忘れて、窩洞の深さと窩壁の有無、そしてう蝕象牙質の除去に集中し、そのあとにポスト形成の必要性を検討していただきたい(図8-11)。大臼歯では歯軸方

向の力が支配的な状態となっており、支台歯高さ／歯冠幅径の比率が等倍に近い構造であることから、ポストの必要性が低くなる。ポストを必要としない支台築造は、再根管治療時の築造体の除去を容易にするのみならず、歯根破折の危険性を低下させることにもつながる。また、エバーエックス フローを間接法支台築造材料として使用することも可能である(図12、13)。エバーエックス フローで製作されたレジンコアは接着性レジンセメントで装着することで、バイオメテックに即した機能的な支台歯を作ることができる。



図8 初診時の口腔内。



図9 直接法による支台築造。



図10 オクルーザルベニアによる歯冠修復。



図11 オクルーザルベニア頬側面観。



図12 作業用模型。

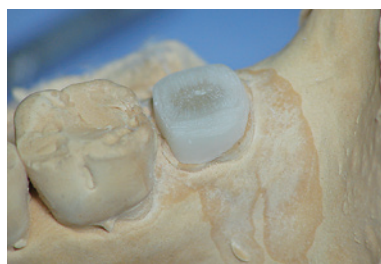


図13 間接法による支台築造。

レジンコーティング材としての有用性

生活歯象牙質は有機質を多く含んだ組織である。象牙細管内には常に水分が存在し、絶えず供給されている。また、経時的に変化しやすく、エナメル質に比べて不安定な組織であるともいえる。このような組織に対してレジンコーティング（イミディエートデンチンシーリング、以下IDS）法の有用性が認められている。IDSを行うことで、生活歯象牙質への

外的な刺激を遮断することが可能となり、歯髄を保護することができる。また、象牙質表面のレジン化によって、間接法修復で用いる接着性レジンセメントとの接着耐久性を飛躍的に向上できることが明らかとなっている。このIDSには2つの方法が考案されている。ボンディング材のみを使う方法と、ボンディング材とフロアブルレジンを用いる方法である。

両者を比較したとき、その効果はフロアブルレジンを用いた場合の方が高いことが分かっている。エバーエックス フローはIDSを行うときのフロアブルレジンとして使用でき、硬く脆いフロアブルレジンよりも、その柔軟性を生かしたレジンコーティング材として象牙質を保護する¹⁰⁾。

人工象牙質であるがための注意点

エバーエックス フローは咬合面外側には適さず、常に硬い外部構造を支える設計としなければいけな

い。エバーエックス フローで人工象牙質を作った後は、従来型コンポジットレジンやセラミックスで覆って十

分な耐摩耗性と表面光沢を得る必要がある。

組成と構成

エバーエックス フローは、歯科製品で広く使用されている原材料で構成されている¹¹⁾。その配合には、レジンマトリックス、多方向に配合されたガラス繊維、そして粒子フィラーが組み合わされている（表1）。レジンマトリックスには、数種類のモノマーが含まれ、相互浸透ポリマーネットワーク（IPN）と呼ばれるマトリックスを形成する。エバーエックス フローのみが、この独自のIPN構造を持ち、樹脂マトリックスが分子レベル

で強固に絡み合っている¹²⁾。ファイバーおよびフィラーの総含有量は重量で約45～65%である。個々のガラスファイバーの平均長さは140μ

m、直径が6μmで、ランダムに配合されており、それぞれの繊維があらゆる方向の力に対して抵抗力を発揮する。

ガラス繊維 平均繊維長	140μm
ガラス繊維 平均繊維径	6μm
成分	バリウムガラス 30-40% ジメタクリレート 25-35% ガラス繊維 15-25% その他 非公表

表1 エバーエックス フローの組成。

機械的性質

エバーエックス フローは、コンポジットレジンにファイバーを強化し、材料表面から始まる亀裂(図14)の進展を抑制する。さらに重合収縮が減少できることで微小漏洩も最小限に抑えられるように設計されている。亀裂は繰り返し加わる咬合力によって歯の外表面から始まり、徐々に進展する。潜在的に存在する隠れたマイクロクラックが臨界深度まで到達

すると、破折となってしまいます。材料の壊れやすさに対する耐性を測定する方法の1つとして破壊靱性が挙げられる。ジルコニアが脆性材料にも関わらず破折に対して高い抵抗性を示すのは、この破壊靱性が高いことに起因している。エバーエックス フローの破壊靱性は従来型のコンポジットレジンと比較して非常に高く、その破壊様式は脆性材料と異なるパター

ン¹³⁾を示す(図15)。これは、含有されているファイバーがマイクロクラックの進展を食い止めることで、壊滅的な破壊様式を回避¹⁴⁾できるからである(図16)。また、静的な基礎物性として曲げ強さは約171MPa、曲げ弾性率は約11.4GPaとなっている。この値は従来型コンポジットレジンと同等以上となる(表2)。

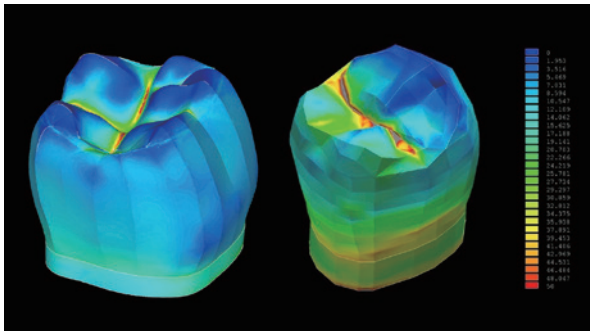


図14 咀嚼時咬合面の生じる引張応力の分布。



図15 各コンポジットレジンの破壊様式。

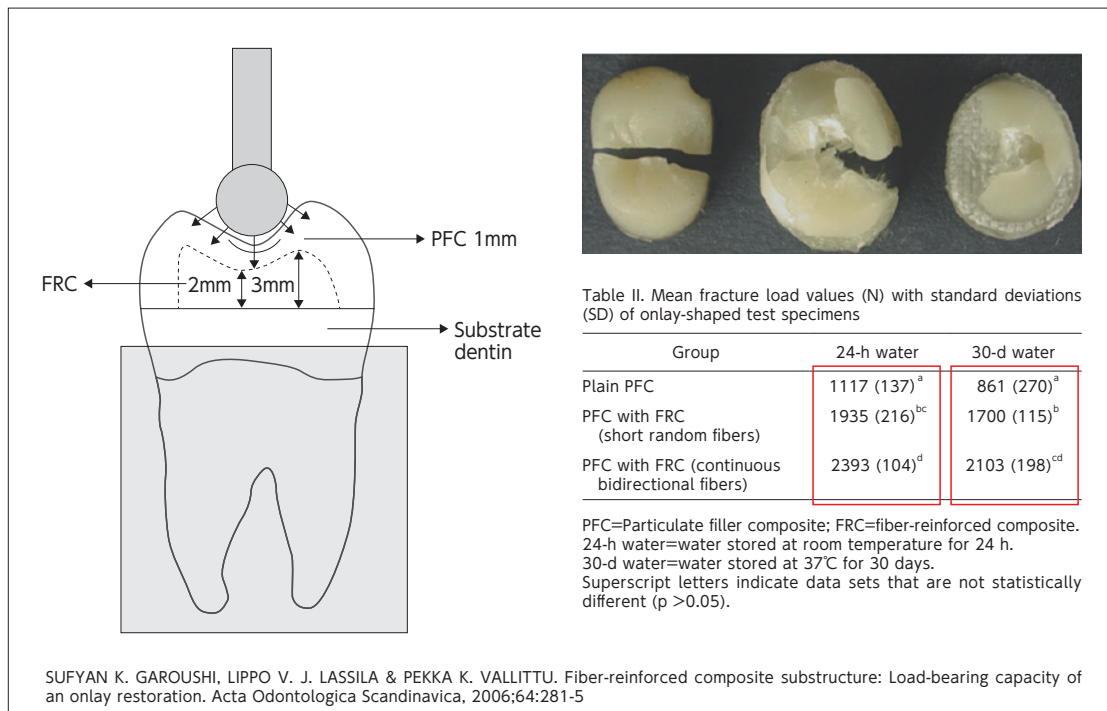


図16 ガラスファイバーがレジナンレーの破断に及ぼす影響¹⁴⁾。24時間浸漬、30日間浸漬ともに、PFC(従来型コンポジット)と比べFRC(ファイバー強化型コンポジット)は約2倍の抵抗性を示した。

基礎物性	測定値
圧縮強度	289MPa
曲げ強度	171MPa
弾性率	11.4GPa
硬化深度 (光硬化樹脂用)	700mW/cm ² 以上 10秒照射: パルクシェード5.5mm 20秒照射: デンチンシェード2.0mm
X線造影性	対アルミニウム223%
吸水性	11.2 μg/mm ³
溶出性	0.1 μg/mm ³

表2 エバーエックス フローの基礎物性。

おわりに

ファイバーの臨床応用への歴史は古く、義歯の補強材から始まった。工業界ではプラスチックの補強材として広く使われているが、歯科界ではファイバーポストや高強度硬質レジンブリッジにとどまっておらず、その恩恵を広く国民に行きわたらせるに至っていない¹⁵⁾。エバーエックス フ

ローは自費診療にとどまらず、保険診療でも使用可能な象牙質代替材料として、日本導入を果たした。ヨーロッパでは以前から発売されており、高名なスタディグループがこぞって使っている材料を、いよいよ日本でも日常臨床で使用できることは、開発にかかわっていた筆者にと

っても感慨深い。留学したばかりの若い研究者であった私がプロトタイプエバーエックス フロー“コードネーム：キャメル”の攪拌をしていた時から20年の月日が経過したが、大幅に改良が加えられた最新のエバーエックス フローを紹介できるのは嬉しい限りである。

●参考文献

- Garoushi S, Lassila LV, Vallittu PK. Fracture toughness, compressive strength and load bearing capacity of short glass fiber-reinforced composite resin. *Chi J Dent Res* 2011;14(1):15-9.
- Garoushi S, Lassila LV, Vallittu PK. The effect of span length of flexural testing on properties of short fiber reinforced composite. *J Mater Sci: Mater Med* 2011;23(2):325-8.
- Garoushi S, Lassila LV, Vallittu PK. Short glass fiber reinforced composite resin with semi-interpenetrating polymer network matrix. *Dent Mater* 2007; 23(11):1356-62.
- Bijelic et al. Fracture load of tooth restored with fiber post and experimental short fiber composite. *Open Dent J* 2011;5:58-65.
- Miura D, Ishida Y, Shinya A. Polymerization Shrinkage of Short Fiber Reinforced Dental Composite Using a Confocal Laser Analysis. *Polymers*. 2021 13;13(18):3088.
- Garoushi S, Vallittu PK, Watts DC, Lassila LV. Polymerization shrinkage of experimental short glass fiber-reinforced composite with semi-interpenetrating polymer network matrix. *Dent Mater* 2008;24(2):211-5.
- El-Mowafy O, El-Badrawy W, Eltanty A, Abbasi K, Habib. Gingival microleakage of Class II resin composite restorations with fiber inserts. *Operat Dent* 2007;32:298-305.
- Garoushi S, Lassila LV, Vallittu PK. Fiber-reinforced composite substructure: Load-bearing capacity of an onlay restoration. *Acta Odontol Scand* 2006b;64:281-285.
- Garoushi S, Vallittu P, Shinya A, Lassila L. Influence of increment thickness on light transmission, degree of conversion and micro hardness of bulk fill composites. *Odontology*. 2016;104(3):291-7.
- Omran TA, Garoushi S, Lassila L, Shinya A, Vallittu PK. Bonding interface affects the load-bearing capacity of bilayered composites. *Dent Mater J*. 2019;38:1002-1011.
- Ferracane JL. 2011. Resin Composite — State of the art. *Dent Mater* 27:29-38.
- Vallittu PK. Interpenetrating Polymer Networks (IPNs) in Dental Polymers and Composites. *Matinlinna JP, Mittal KL. Adhesion Aspects in Dentistry. The Netherlands. IDC Publishers, Martinus Nijhoff Publishers and VSP.* . 2009; 63-74. ISBN 978-90-04-17271.
- Garoushi S, Lassila LV, Tezvergil A, Vallittu PK. Load bearing capacity of fiber-reinforced and particulate filler composite resin combination. *Dent Mater* 2006;34:179-84.
- Garoushi S, Lassila LV, Vallittu PK. Fiber-reinforced composite substructure: Load-bearing capacity of an onlay restoration. *Acta Odontol Scand* 2006;64:281-285.
- Vallittu PK, Shinya A, Baraba A, Kerr I, Keulemans F, Kreulen C, Lassila L, Malmstrom H, Novotny R, Peumans M, Van Rensburg J, Wolff D, Özcan M. Fiber-reinforced composites in fixed prosthodontics-Quo vadis? *Dent Mater*. 2017;33:877-879.
- Lassila LVJ, Tezvergil A, Lahdenpera M, Alander P, Shinya A, Shinya A, Vallittu PK. Evaluation of some properties of two fiber-reinforced composite materials. *Acta Odontol Scand* 2005; 63: 196-204.
- Watanabe H, Khera SC, Vargas MA, Qian F. Fracture toughness comparison of six resin composites. *Dent Mater* 2008; 24: 418-425.
- Imbeni V, Kruzic JJ, Marshall GW, Marshall SJ, Ritchie RO. The dentin-enamel junction and fracture of human teeth. *Nat Mater* 2005;4:229-232.



新谷明一 (しんや あきかず)

日本歯科大学生命歯学部 歯科理工学講座 教授 歯科医師・博士 (歯学)

略歴・所属団体©1999年 日本歯科大学歯学部 卒業。2003年 日本歯科大学大学院歯学研究科 臨床系 修了。2006年 日本歯科大学歯学部 歯科補綴学第2講座 助手。2006年～2008年 トゥルク大学 (フィンランド) 歯学部。2010年 日本歯科大学生命歯学部 歯科補綴学第2講座 講師。2015年 同 准教授。2019年 日本歯科大学生命歯学部 歯科理工学講座 教授。現在に至る

日本補綴歯科学会 専門医・指導医 / 歯科理工学会 シニアアドバイザー / 日本接着歯学会 接着歯科治療専門医・指導医 / 日本歯科審美学会 認定医 / 日本補綴歯科学会 (理事・評議員、社会連携委員会委員長) / 日本歯科理工学会 (常任理事・代議員) / 日本接着歯学会 (理事・評議員、接着歯学編集委員会委員長) / 日本デジタル歯科学会 (理事・評議員、用語検討委員会委員長) / 日本歯科審美学会 (理事・評議員) / 日本臨床歯科学会 (顧問)