



Title	光重合法による曲げおよびねじり剛性を有する審美性矯正ワイヤーの試作
Author(s)	豊泉, 裕
Citation	北海道大学. 博士(歯学) 甲第5084号
Issue Date	2000-03-24
DOI	10.11501/3168648
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/30169
Type	theses (doctoral)
Note	共著者あり。共著者名: 巨理文夫, 今井徹, 山方秀一, 小林雅博. 日本歯科理工学会, 豊泉裕, 巨理文夫, 今井徹, 山方秀一, 小林雅博 = TOYOIZUMI, Hiroshi; WATARI, Fumio; IMAI, Tohru; YAMAGATA, Shuichi; KOBAYASHI, Masahiro, 光重合法による曲げおよびねじり剛性を有する審美性矯正ワイヤーの試作 = Fabrication of Aesthetic Wires with Flexural and Torsional Stiffness by Photo Curing Method, 歯科材料・器械 = The Journal of the Japanese Society for Dental Materials and Devices, 18(6), 1999 NOV, pp.429-440
File Information	toyoizumi.pdf



[Instructions for use](#)

光重合法による曲げおよびねじり剛性を有する 審美性矯正ワイヤーの試作

豊 泉 裕 亘 理 文 夫¹ 今 井 徹
山 方 秀 一 小 林 雅 博²

Fabrication of Aesthetic Wires with Flexural and Torsional Stiffness by Photo Curing Method

Hiroshi TOYOIZUMI, Fumio WATARI¹, Tohru IMAI,
Shuichi YAMAGATA and Masahiro KOBAYASHI²

Keyword : Othodontic wire, Aesthetic, FRP, Photo curing, Flexural strength, Torque, Composite material

To realize aesthetic othodontic wires, we have been developing the FRP wires in combination with biocompatible $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (CPSA) glass fibers and PMMA matrix by a hot drawing method. These wires are mainly intended to be used for the movement of teeth during the initial stage of treatment.

In this study, a photo cure polymerization method was applied to form the rectangular timber with a sufficient torque force for rotation of the teeth. The FRP wire composed of CPSA glass fibers and UDMA matrix showed a sufficient flexural strength. For torsional properties, however, the wire had a much smaller torque compared with that of Co-Cr and Ni-Ti wires. The FRP using dental composite resin for matrix showed a load 4 times of UDMA based FRP wires. The torsional load was increased to 1/2 of Ni-Ti wire. It was found that the fiber content mainly contributes to flexural load while the use of stiff materials such as composite resin for the matrix is much more effective for improving torsional properties.

キーワード：矯正用ワイヤー，審美性，FRP，光重合，曲げ強さ，トルク，複合材料

生体親和性に富む $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (CPSA) ガラス繊維と PMMA の複合による透明性の高い審美性 FRP 矯正ワイヤーの開発を行ってきた。このワイヤーは熱間引抜成形法により作製され、その断面形状は円形で矯正治療の初期において使用されるものに相当する。本研究ではワイヤーの成形法に光重合法を適用し、歯にトルク力を与えるために断面を角形とし、かつねじり剛性を有する新たな審美性 FRP ワイヤーの開発検討を行った。

原稿受付 1999年8月19日，受理 1999年9月10日

北海道大学歯学部歯科矯正学講座（〒060-8586 札幌市北区北13条西7丁目）

¹北海道大学歯学部歯科理工学講座（〒060-8586 札幌市北区北13条西7丁目）

²千葉工業大学工業化学科（〒275-0016 習志野市津田沼2-17-1）

Department of Orthodontics, School of Dentistry, Hokaido University (Kita 13, Nishi 7, Kita-ku, Sapporo 060-8586)

¹Department of Dental Materials and Engineering, School of Dentistry, Hokkaido University (Kita 13, Nishi 7, Kita-ku, Sapporo 060-8586)

²Department of Industrial Chemistry, Chiba Institute of Technology (2-17-1, Tsudanuma, Narashino 275-0016)

強化繊維に CPSA ガラス繊維を用い、マトリックス材に光重合型の UDMA を用いた FRP ワイヤーは 3 点曲げ試験において十分な曲げ強さを示したが、ねじり試験では金属 (Ni-Ti) ワイヤーの約 1/10 と小さなねじり荷重であった。マトリックス材を UDMA からコンポジットレジンに変えた FRP ワイヤーでは、ねじり荷重は UDMA の場合と比べ 4 倍に増加し、金属 (Ni-Ti) ワイヤーの約 1/2 までねじり剛性が改善した。FRP ワイヤーの強化繊維は主として曲げ荷重に寄与するが、ねじり特性の向上には剛性の高いマトリックス材の適用が有効であることがわかった。

緒 言

マルチブラケット装置による矯正治療は、ワイヤーの弾性回復力である矯正力を歯に与え移動させることで不正咬合の改善を図るものである。ワイヤーは各治療段階に適合する機械的特性および形状を有するものを選択して用いている。初期段階に用いるワイヤーは弾性率が低く弾性変形量の大きいもので、かつ断面形状が 0.3~0.5 mmφ の丸形ワイヤーであり、中期から後期にかけて用いるワイヤーは剛性が高く、断面が (0.4~0.5) × (0.5~0.7) mm の角形ワイヤーの場合が多い¹⁾。中期以降の治療で角形ワイヤーが選択される主な理由は、エッジワイズブラケット²⁾との併用によって Fig. 1 に示すようなトルク力を歯に与えることが可能になるからである。

近年、ブラケットに関してはプラスチック製³⁾やセラミック製⁴⁾の透明性が高い製品が市販されており、患者の要望からは可及的に目立たず自然な印象を与えるものが望ましい。しかし、ワイヤーについては依然として金属製のものがほとんどであり、それらのもつ金属色のため審美性が著しく損なわれており、さらにワイヤーの審美性についての改善の報告は現在のところ極めて少ない^{5~9)}。

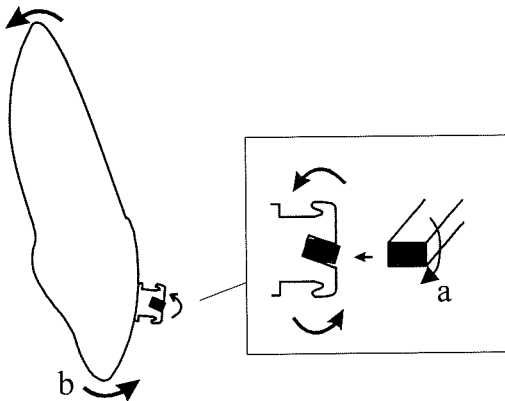


Fig. 1 Tooth movement by torque force applied with a rectangular wire
a: Torsional direction for activation of wire
b: Rotative (torsional) movement by torque force of wire

これまで筆者らはカルシウムとリン酸イオンを含み生体親和性に富む $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ガラス繊維^{10~13)} (以下, CPSA) と PMMA の複合による透明性の高い繊維強化プラスチック型審美性矯正ワイヤー (以下, FRP ワイヤー) の開発を進めてきた。このワイヤーは熱間引抜成形法により成形され、曲げ特性については 3 点曲げ試験から臨床応用に適する曲げ強さおよび弾性回復力を有することがわかっている^{14~20)}。しかしながら、ねじり特性についてはいまだ研究されておらず不明点が多い。また、これまでの FRP ワイヤーの断面形状は円形であるため、歯にトルク力を与えることは不可能である。

本研究では矯正治療中期以降に使用できるトルク力を主とした審美性ワイヤーの実現の可能性を求め、熱間引抜成形法に比べ成形の形状の自由度がより高い光重合法を用いて断面が丸形と角形の FRP ワイヤーを試作し、曲げ特性およびねじり特性の評価とマトリックス材の改良による機械的特性の向上についての検討を行った。以下、試作した各種 FRP ワイヤーの表記には、その構成材料を付記し FRP (ファイバー/マトリックス) と記述する。

材料および方法

1. ワイヤー試料

FRP ワイヤーの強化繊維に用いた CPSA ガラス繊維 (ユニチカグラスファイバー) は繊維径約 20 μm で、ワイヤー成形に先立ちガラス繊維とマトリックス材との間の接着強さの向上を目的として、γ-メタクリロキシプロピルトリメトキシシラン (LS-3380, 802260, 信越化学) により表面処理を施した。FRP ワイヤー内部のガラス長繊維はワイヤーの長軸方向への一方向配向型とした。

本研究では、異なるマトリックス材を用いてポリマーベース FRP ワイヤーとコンポジットレジン (CR) ベース FRP ワイヤーの 2 種類を試作した。ポリマーベース FRP ワイヤーのマトリックス材には、カンファーキノンを 0.3 wt% 配合した可視光線重合型の UDMA 系レジン (050177, サンメディカル) を用い、CR ベース FRP ワイヤーのマトリックス材には 3 種類の歯科用光重合型コンポジットレジン²¹⁾、ライトフィル IIP (以下, CR-L, 119712, 松風), クリアフィルフォト SC (以下, CR-P, 0017, クラレ),

Table 1 Composition of the composite resins used in this study

Product	Specimen code	Base resin	Type	Filler content (wt%)
Lite-fil II P	CR-L	UDMA	Hybrid	85
Clearfil Photo SC	CR-P	Bis-GMA TEGDMA	Hybrid	81.5
Epic-flo	CR-E	UDMA	MFR	67

UDMA : urethanedimethacrylate, Bis-GMA : bisphenolA glycidyl methacrylate, TEGDMA : triethyleneglycoldimethacrylate

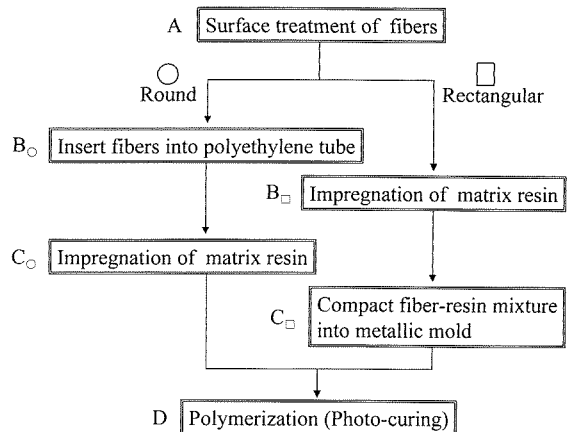
Table 2 Aesthetic wires fabricated by photo curing method

Specimen	Glass fiber	Matrix material	Cross-sectional form
FRP wire	CPSA	UDMA	Round and rectangular
		Composite resin (CR-P, CR-E)	Rectangular
CR wire	None	Composite resin (Filler content regulated CR-L, CR-P, CR-E)	Rectangular

エピックフロ (以下, CR-E, HF-18, サンメディカル), を使用した。それぞれのフィラー含有量は Table 1 に示すように公称値で CR-L が 85 wt%, CR-P が 81.5 wt%, CR-E が 67 wt% であった。

まず, 機械的特性に対するフィラー含有量の影響を調べるため, CR-L および CR-E にはコンポジットレジンのベースレジ²²⁾である前述の UDMA を, CR-P には Bis-GMA 系レジ^ン (980702, サンメディカル, カンファーキノン; 0.3 wt%) を添加し, フィラー含有量を 30 wt% まで段階的に下げ, これを用いてコンポジットレジ^ンのみからなるワイヤー (以下, CR ワイヤー) として成形した。Table 2 に試作したワイヤー試料の内訳を示す。

Fig. 2 に光重合法による FRP ワイヤーの成形工程のフローチャートを示す。まず, 長径 25.0 mm に切りそろえたガラス繊維束をマイクロ電子天秤 (AEM-5200, 島津) により所定重量に計量し, 表面処理を施した後, 繊維間に MMA を浸潤させ微細な気泡の除去を行った (A)。その後直ちに, 断面が丸形の FRP ワイヤー (以下, 丸形 FRP ワイヤーとする) の成形条件では, ポリエチレンチューブ (ポリエチレン細管 #3, ヒビキ) 内に繊維を挿入し (B_○), シリンジ (テルモ) によりチューブ内にマトリックス材を注入した後 (C_○), チューブが直線的になるように固定し光照射を行った (D)。断面が角形の FRP ワイヤー (以下, 角形 FRP ワイヤーとする) の成形条件では, レジンバス内において繊維にマトリックス材を慎重に含浸させ (B_□), 高さ 0.43 mm, 幅 0.64 mm, 長さ 25.0 mm の寸法に設定した金属枠型を用いて, 上下

**Fig. 2** Process of fabrication of FRP wire by photo curing method

面をガラス板で圧接したまま (C_□) 光照射を行った (D)。光照射はペンシルタイプの可視光線照射器 (LUXOR, ICI) により照射口を試料の長軸方向に一定速度で移動させながら 60 秒間の照射を上下方向からそれぞれ 2 回行った後に, 照射のむらをなくすために多目的照射器 (α -ライト II, モリタ) により 5 分間の光照射を加えた。さらに, 未重合モノマーを減少させ重合率を高める目的で 100°C 恒温中に 20 分間保持した。Fig. 3 a はガラス繊維を挿入したポリエチレンチューブに右よりシリンジにてレジ^ンを注入し, 丸形 FRP ワイヤーを成形しているところであり, Fig. 3 b はガラス繊維-レジ^ン複合体を金属枠型に填

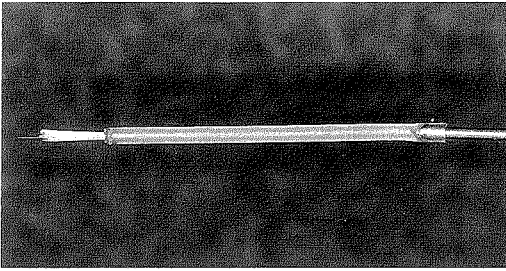


Fig. 3 a Fabrication of FRP wire with round cross-section using a polyethylene tube

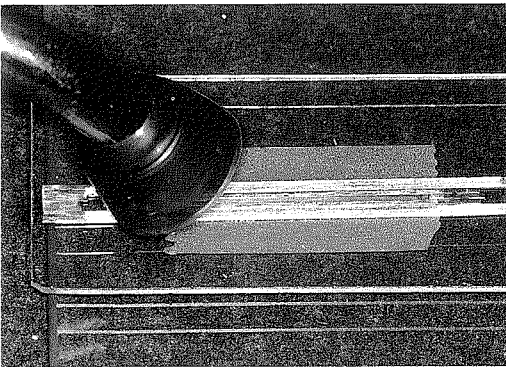


Fig. 3 b Fabrication of FRP wire with rectangular cross-section using a metallic mold and glass slabs

入後、上下面をガラス板で圧接したまま光照射を行い角形 FRP ワイヤを成形している様子である。FRP ワイヤのガラス繊維体積分率（以下、 V_f ）は成形に用いた繊維重量から算出した。なお、試料数は各条件につきそれぞれ 5 本ずつとし、デジタルマイクロメーター（ミットヨ）により各試料の任意点 3 点の寸法計測を行い、その平均値および標準偏差を算出した。

機械的特性の比較のため、コントロールとして丸形（ $0.36\text{ mm}\phi$ ）および角形（ $0.43 \times 0.64\text{ mm}$ ）の Co-Cr 系（エルジロイ、RMO）と Ni-Ti 系（ナイチノール、ユニテック）のワイヤを用いた。

2. 機械的特性試験

1) 曲げ試験

試作したワイヤ試料の曲げ特性を評価するために、曲げ試験を行った。試験はインストロン万能試験機（Model 4204）により支点間距離 14 mm、クロスヘッドスピード 1 mm/min、たわみ量 0 から 2 mm の間での一往復の条件で行った。データ処理用コンピュータ（ProLinea 4/33、コンパック）に負荷時および除荷時の荷重をデータサンプリングレート 20 points/sec でリアルタイムに読み込み、得られた荷重—たわみ曲線からたわみ量 0.5 mm における曲げ荷重を求め

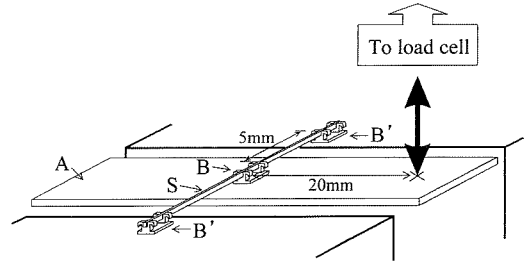


Fig. 4 Illustration of testing unit of torsional test

A : Auxiliary plate, B and B' : Bracket, S : Specimen wire (Inter-bracket distance ; 5.0 mm)

た。なお、ガラス単一組成の場合の曲げ荷重については、

$$P_b = 4 \cdot E \cdot \delta \cdot b \cdot t^3 / l^3 \dots\dots\dots ①$$

(P_b : 曲げ荷重, δ : たわみ量, b : 試料の幅径, t : 試料の高径, l : 支点間距離, E : ヤング率²³⁾) より理論値を算出した。

2) ねじり試験

ねじり試験は自作のねじり試験用治具²⁴⁾を用いて行った (Fig. 4)。ワイヤにねじり荷重を伝達するステンレススチール製の補助板 A の中央に固着した金属製スタンダードブラケット (図中 B, ミニダイヤモンド, オームコ) および治具に固定した両端のブラケット (B') でワイヤ試料を把持し、試料をシアノアクリレート系接着剤により固定した。ブラケット間 (B-B') 距離は 5 mm に設定した。

インストロン万能試験機にて、補助板上でワイヤの中央から 20 mm の位置をクロスヘッドスピード 2.5 mm/min で垂直に 5 mm ($\tan 5/20$ から求められる角度は約 14°) まで押し下げ、ねじりをワイヤに与えた後再び 0 mm まで戻した。この間に検出された荷重を前述のコンピュータで記録した。また、得られた曲線から本試験での最大設定ねじり角約 14° におけるねじり荷重を計測した。なお、治具の構造上、計測される荷重は長径 5 mm の試料のねじり荷重の 2 倍となる。

ねじりモーメント (M_t) は計測されたねじり荷重を P_t 、ねじり角を θ 、補助板水平時の回転中心から荷重測定位置までの距離を L とすると、ねじり角 θ 時の補助板に垂直な方向の分力は $P_t / \cos \theta$ 、また、回転中心から荷重計測位置までの距離は $L / \cos \theta$ と表されることから、

$$M_t = P_t \cdot L / (\cos \theta)^2 \dots\dots\dots ②$$

の計算式によって算出される。本研究では試験機によって検出されたねじり荷重をそのままねじり特性の評価値とした。

ガラス単一組成の場合のねじり荷重については、

$$M_t = G \cdot \bar{\theta} \cdot k \cdot b \cdot t^3 \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

(G :せん断弾性係数²³⁾, $\bar{\theta}$:比ねじり角, k :試料寸法によって決まる定数) および前述 $\textcircled{2}$ 式から理論値を算出した。

3. 試料の外観および断面観察

FRP ワイヤー試料内部の断面像の走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察を行った。SEM 観察には S-4000 および S-2380 N (日立) を使用した。

ポリエステル樹脂に包埋した試料をワイヤーの長軸に対し垂直に低速ダイヤモンドカッターで切断し、切断面を #400 から #2000 までの耐水ペーパーで順次研磨した後に、2, 1, 0.05 μm のアルミナ粒子で鏡面研磨し、横断面観察用とした。

結 果

1. ポリマーベース FRP ワイヤー

1) SEM 観察

成形したワイヤー試料の断面寸法は丸形 FRP ワイヤーで 0.478 (SD: 0.011) mm ϕ , 角形 FRP ワイヤーでは 0.432 (SD: 0.011) \times 0.645 (SD: 0.011) mm であった。

FRP (CPSA/UDMA) ワイヤーの横断面 SEM 像を Fig. 5 (a, b) に示す。(a) は V_F 53% の丸形 FRP ワイヤーで、外形はほぼ円形に近く、大きな凹凸は見受けられなかった。ワイヤー内部にはやや灰色の円形像として認められるガラス繊維がほぼ偏在なく分布し、その周囲をマトリックスレジン (UDMA) が取り囲む構造であることが確認された。(b) は V_F 37% の角形 FRP ワイヤーで、コーナー部分はやや直角性に欠けるものの外形はほぼ長方形に近く、内部構造は丸形 FRP ワイヤーの場合と同様の所見であった。なお、一部ガラス繊維の破壊や脱落がみられたが、これは顕微鏡観察用標本作製の過程での切断、研磨の際に生じたものであった。

2) 曲げ特性

丸形 FRP ワイヤー試料における曲げ-たわみ曲線の典型例を Fig. 6 に示す。図中のワイヤー試料の V_F は 26, 38, 56% で、いずれの試料も負荷時、除荷時ともに荷重はたわみ量にほぼ比例していた。また、曲げ試験後の永久変形量 (除荷時における荷重が 0 の時のたわみ量) は極めて小さく、ほぼ完全な弾性回復をしていることがわかった。

Fig. 7 に丸形 FRP ワイヤー試料の曲げ荷重の V_F 依存性を示す。グラフの縦軸は負荷時たわみ量 0.5

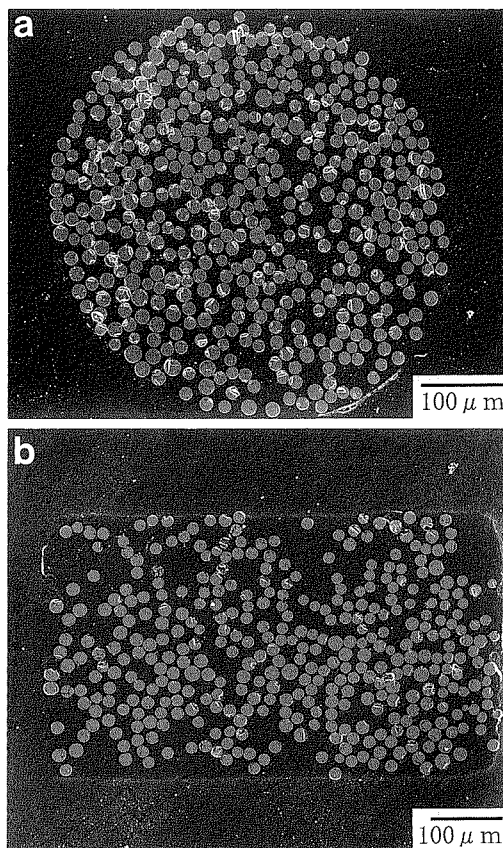


Fig. 5 a, b Cross-section of FRP (CPSA/UDMA) wires observed by SEM
a: Round wire (V_F : 53%), b: Rectangular wire (V_F : 37%)

mm での荷重を表している。これより、 V_F が上がるにつれ荷重もほぼ直線的に増加していた (相関係数 $r=0.997$)。図中の直線は最小 2 乗法により算出した近似直線で、曲げ荷重を P_b (N) とすると、 $P_b = 0.0154 \cdot V_F + 0.0091$ と表された。この近似直線と破線で示した引抜成形法による FRP (CPSA/PMMA) ワイヤーの近似直線¹⁴⁾とを比較すると、今回試作した FRP (CPSA/UDMA) ワイヤーは同一 V_F に対する荷重はやや低いものの、直線の傾きはほぼ同等であった。また、UDMA 単一組成の場合の測定値 (■) とガラス繊維のみの場合の計算値¹⁴⁾ (◆) を結ぶ直線と得られた近似直線は近接していることから、ほぼ簡単な複合則を満足していることがわかった。

3) ねじり試験

角形 FRP (CPSA/UDMA) ワイヤーと角形金属ワイヤーのねじり試験の結果を Fig. 8 に示す。 V_F 37% の角形 FRP ワイヤーの最大設定ねじり角約 14°

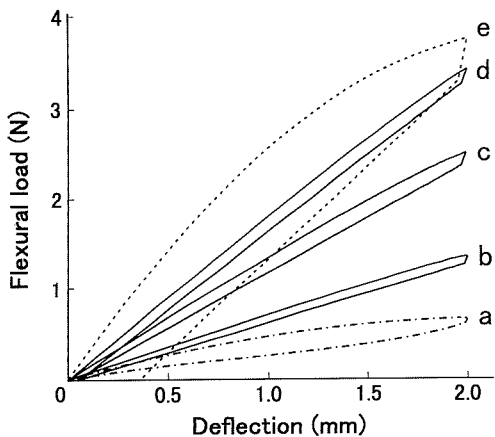


Fig. 6 Flexural load-deflection curves of metallic wires and FRP (CPSA/UDMA) wires with different fiber fraction
 a : Ni-Ti, b : FRP (V_F : 26%), c : FRP (V_F : 38%), d : FRP (V_F : 56%), e : Co-Cr

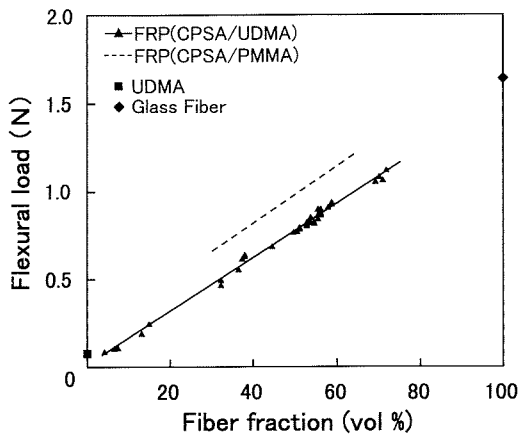


Fig. 7 Dependence of flexural load at deflection 0.5 mm on fiber fraction

における荷重は 0.06 N であり、これは Ni-Ti ワイヤの約 1/10、Co-Cr ワイヤの約 1/20 の値であった。このことより、金属ワイヤに比べ FRP (CPSA/UDMA) ワイヤのねじり特性は劣っていることがわかった。

2. コンポジットレジン (CR) ワイヤの機械的試験

角形 FRP ワイヤのねじり特性を改善する目的で、マトリックス材にコンポジットレジンを適用し、ねじり剛性を高める実験を行った。まず、3種類のコンポジットレジン単体で作製した CR ワイヤのねじ

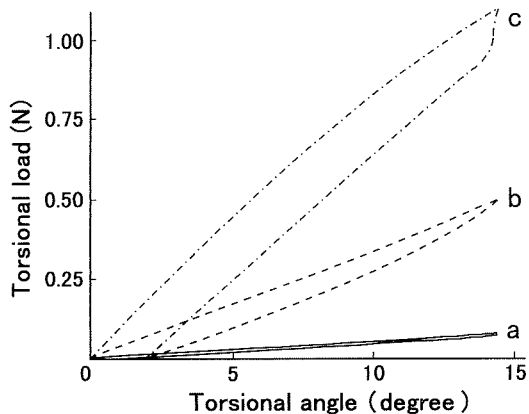


Fig. 8 Comparison of torsional properties between FRP (CPSA/UDMA) wire and metallic wires
 a : FRP (CPSA/UDMA), b : Ni-Ti, c : Co-Cr

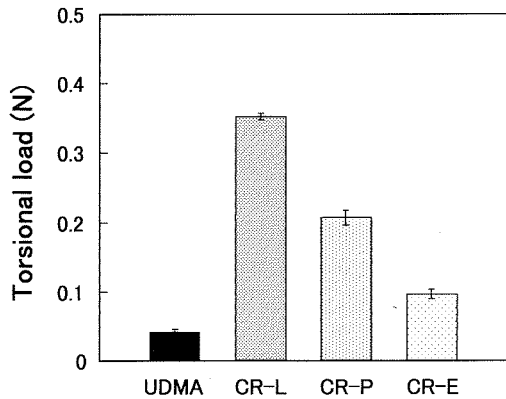


Fig. 9 Torsional load of wires with various matrix materials at torsional angle 14 degree

り試験を行った (Fig. 9)。その結果、最大設定ねじり角での荷重は CR-L ワイヤ (85 wt%) が 0.35 N、CR-P ワイヤ (81.5 wt%) が 0.20 N、CR-E ワイヤ (67 wt%) が 0.10 N であり、UDMA と比べ約 2~7 倍の高い値を示した。また、フィラー含有量が多いものほど荷重も高かったことから、フィラー含有量がねじり特性に関与していることが示唆された。

そこで、曲げおよびねじり特性のフィラー含有量依存性を調べるためにベースレジンを加えフィラー含有量を調節して CR ワイヤを成形した。それらの機械的特性の結果を Fig. 10 および 11 に示す。

Fig. 10 は曲げ荷重のフィラー含有量依存性で、いずれのコンポジットレジンでもフィラー含有量が増加

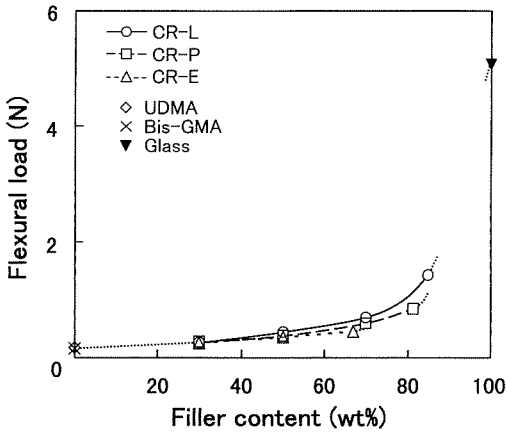


Fig. 10 Dependence of flexural load at deflection 0.5 mm on filler content in CR wires

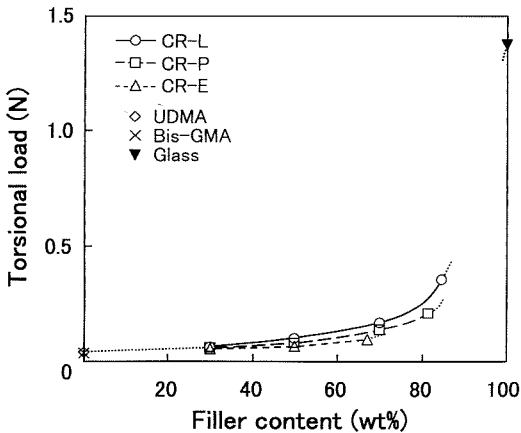


Fig. 11 Dependence of torsional load at torsional angle 14 degree on filler content in CR wires

すると曲げ荷重も増大する傾向がみられた。しかし、フィラー含有量に対する荷重の変化は直線的ではなく、70 wt%までの荷重変化は小さかったが、70 wt%以上では急激に増加していた。50 wt%での荷重はCR-L/CR-P, CR-L/CR-E間で有意差 ($P < 0.01$) がみられた。

Fig. 11 はねじり荷重のフィラー含有量依存性で、ねじり荷重のフィラー含有量依存性は曲げ荷重の場合と同様な傾向がみられ、70 から 85 wt% の領域で急激な荷重変化がみられた。また、50 wt%での荷重においてCR-L/CR-P, CR-P/CR-E, およびCR-L/CR-E間で有意差 ($P < 0.01$) がみられた。

Fig. 12 は同一試料で得られた曲げ荷重 (P_b) とねじり荷重 (P_t) の関係を調べたグラフである。図中の直線は最小2乗法による近似直線で、CR-L, CR-P,

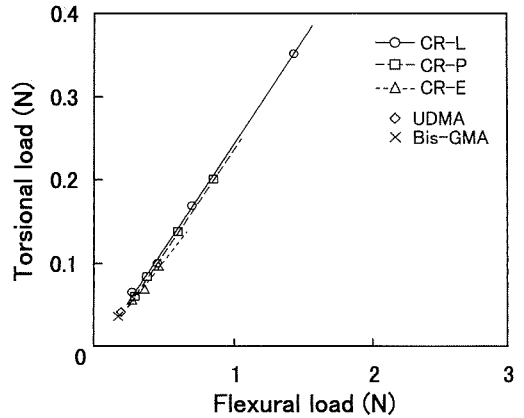


Fig. 12 Relation of flexural load and torsional load of CR wires

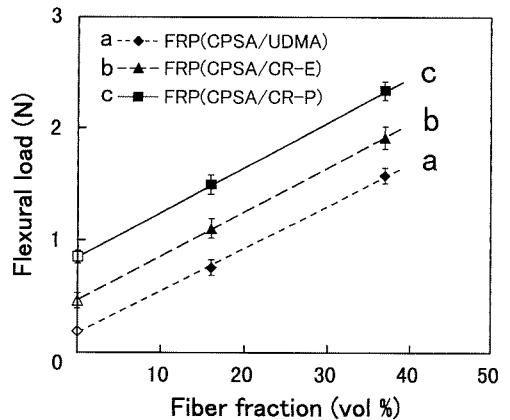


Fig. 13 Dependence of flexural load of various FRP wires on fiber fraction

CR-Eの順に $P_t = 0.2498 \cdot P_b - 0.007$, $P_t = 0.2494 \cdot P_b - 0.0122$, $P_t = 0.2168 \cdot P_b - 0.0054$ の関係式が得られた。これより、いずれのコンポジットレジンでも曲げ荷重とねじり荷重はほぼ原点を通る直線関係を示していた。

3. CR ベース FRP ワイヤー

1) 機械的特性

マトリックス材に2種類のコンポジットレジン、CR-PとCR-Eを用い、 V_f を16%および37%にした角形CRベースFRPワイヤーを試料として機械的特性を調べた。Fig. 13は曲げ荷重の V_f 依存性の結果で、 V_f 0%の点 (\diamond , \triangle , \square) はガラス繊維を含まないマトリックス材単体のCRワイヤーの値である。また、比較のためマトリックス材にフィラーを含まない角形FRP (CPSA/UDMA) ワイヤー (図中 a) の値を加えた。曲げ荷重は V_f の増加にともないほぼ直線的に上昇し、曲げ荷重の V_f 依存性が認めら

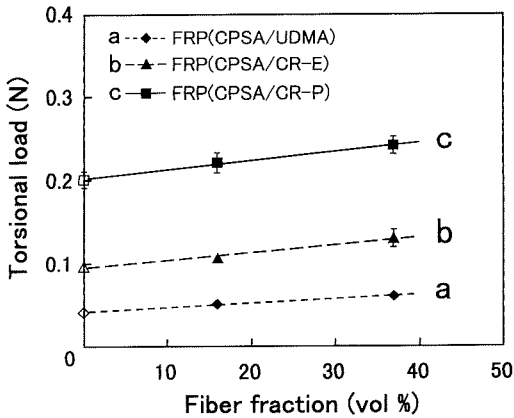


Fig. 14 Dependence of torsional load of various FRP wires on fiber fraction

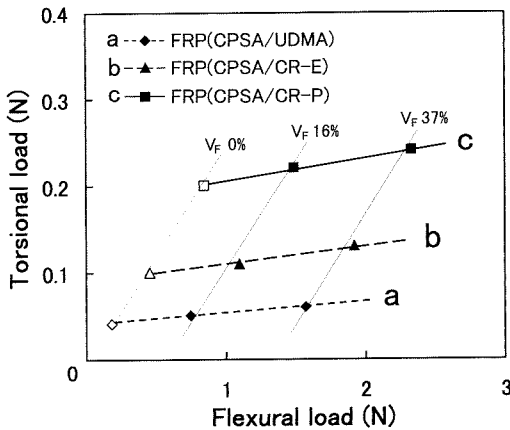


Fig. 15 Relation between flexural load and torsional load in various FRP wires

れた。さらに、近似直線の関係式は CR-P マトリックス (c), CR-E マトリックス (b), UDMA マトリックス (a) の順に、 $P_b = 0.0400 \cdot V_F + 0.8500$, $P_b = 0.0392 \cdot V_F + 0.4649$, $P_b = 0.0374 \cdot V_F + 0.1762$ であり、フィラーの有無に関わらず直線の傾きは近似していた。また、荷重はいずれの V_F においても最も大きいのが CR-P、2 番目が CR-E、最も小さいのが UDMA をマトリックス材として用いたもので、この順位は Fig. 10 の結果と等しかった。

Fig. 14 にねじり特性の V_F 依存性の結果を示す。曲げ荷重とは異なり、ねじり荷重は V_F が変化してもわずかにしか増加せず、近似直線の傾きも小さく V_F 依存性は低いことがわかった。

角形 FRP ワイヤの曲げ荷重とねじり荷重の関係を Fig. 15 に示す。いずれのワイヤにおいても曲げ荷重の増加に対するねじり荷重の増加の程度は小さかった。また、曲げ荷重は主として V_F に依存している

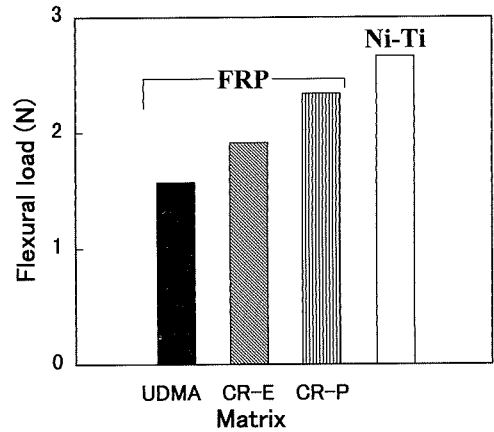


Fig. 16 Comparison of flexural load between FRP wires (V_F ; 37%) and metallic wire

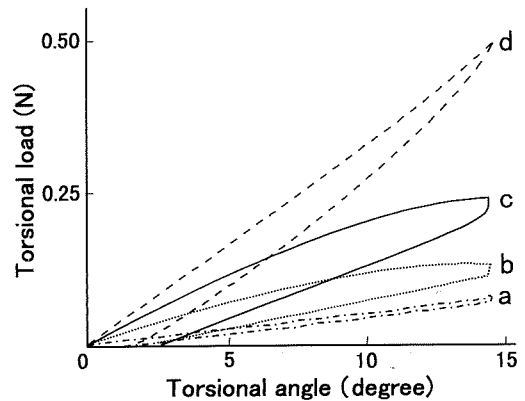


Fig. 17 Torsional load-torsional angle curves for polymer-based and CR-based FRP (V_F ; 37%) and metallic wires
a : FRP (CPSA/UDMA), b : FRP (CPSA/CR-E), c : FRP (CPSA/CR-P), d : Ni-Ti

のに対し、ねじり荷重は主として用いたマトリックス材の種類に依存していることがわかった。

Fig. 13 で示した V_F 37% の各種 FRP ワイヤの曲げ荷重と金属ワイヤ (Ni-Ti) の値との比較を Fig. 16 に示す。曲げ荷重は UDMA マトリックスの場合に比べ、CR-E マトリックスでは 1.2 倍、CR-P マトリックスでは 1.5 倍であり、CR-P マトリックスでは角形 Ni-Ti ワイヤの約 9 割の荷重であった。また、Fig. 17 に示すように最大設定ねじり角におけるねじり荷重は UDMA マトリックスの場合に比べ、CR-E マトリックス (b) および CR-P マトリックス (c) ではそれぞれ、2.2 倍と 4.0 倍に増加したが、角形 Ni-Ti ワイヤ (a) の約 1/2 であった。

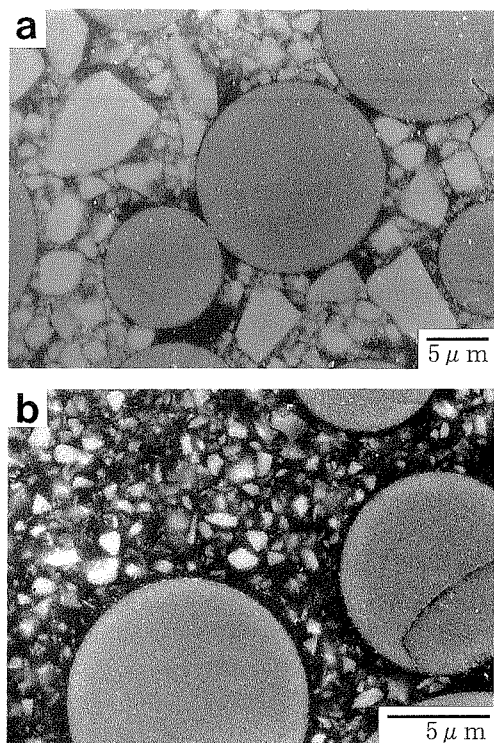


Fig. 18 a, b Structure of CR-based FRP wires observed by SEM
a: FRP (CPSA/CR-P), b: FRP (CPSA/CR-E)

2) SEM 観察

Fig. 18 (a, b) に FRP (CPSA/CR) ワイヤーにおけるガラス繊維とマトリックスとの関係を示す。(a) はマトリックス材に CR-P (フィラー含有量; 81.5 wt%) を、(b) は CR-E (フィラー含有量; 67 wt%) を用いたもので、(a) ではコンポジットレジンに含まれた不定形のマクロフィラー (10~20 μm 程度) とマイクロフィラー²⁵⁾ (0.05~1 μm 程度) およびこれらの中間的な大きさのフィラーがガラス繊維 (約 20 $\mu\text{m}\phi$) の周囲に高密度に配置しているのが観察された。(b) では粒子径からはマイクロフィラーに分類されるフィラーがガラス繊維間に配置している構造が確認された。また、いずれのワイヤーにおいてもフィラー粒子間距離は概ね 1 μm 以下であった。

4. FRP ワイヤーの審美性

試作した FRP ワイヤーの外観を Fig. 19 に示す。引抜成形法で作られた FRP (CPSA/PMMA) ワイヤー (上段) と同様に、FRP (CPSA/UDMA) ワイヤー (上から 2 段目) もほぼ無色透明であり、FRP (CPSA/CR) ワイヤー (上から 3 段目) は白色半透明の外観であった。なお、CR-L と CR-E はシェード

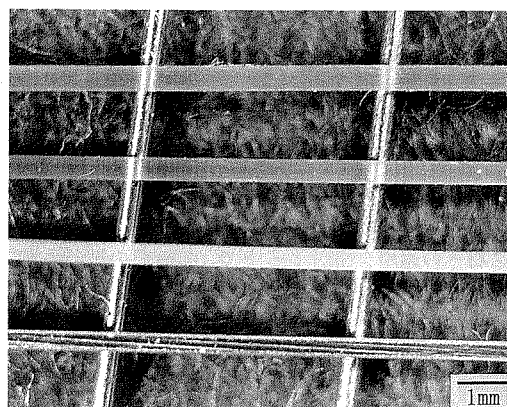


Fig. 19 Esthetic appearance of various orthodontic wires, from top FRP (CPSA/PMMA), FRP (CPSA/UDMA), FRP (CPSA/Composite resin), Co-Cr

A₃ のものを、CR-P は永久歯色として提供されているものを使用した。試作した FRP ワイヤーはいずれも金属ワイヤー (Co-Cr, 下段) と比較すると歯冠色からの隔たりが少なく、より審美性にすぐれていた。

考 察

1. 製造方法

FRP ワイヤーの試作にはポリエチレンもしくは金属製の枠型を用い、溶浸法²⁶⁾に類する成型方法を応用して行った。母材の硬化には可視光線による光重合法を利用した。成形した丸形 FRP ワイヤーの V_f は 4% から 72% までの範囲で、 V_f の非常に低いワイヤーの成形も可能であることがわかった。これは、ワイヤー成形時にマトリックス材に外力を付加することなく、形状付与の可能な成形方法を選択したためである。設定可能な V_f の範囲が拡大することは、利用可能な矯正力の範囲が広がることにつながり、臨床応用の上で意義をもつものと考えられる。しかしながら、 V_f が低くなるにしたがって繊維が中心部に凝集、もしくは偏在する傾向があり、均等分散が難しくなることからワイヤーに変形を加えた際の応力の分布に偏りが生じることが予測される。

マトリックス材の硬化に光重合法を用いることにより、引抜成形法や常温重合法に比べ操作がより容易になり、気泡除去などの成形に必要な時間を十分取ることができ、結果として欠陥の生じる確率は減少したと考えられる。また、成形可能な硬化体の形状の自由度が拡大したことで、従来から引抜成形法で試作してきた丸形ワイヤーに加え角形ワイヤーも簡便に成形が可能となった。また、本方法を応用することにより引抜成形法では困難であったアーチフォーム状のワイヤー

の成形も可能になると期待される。

内部欠陥に関しては、繊維間への含浸性がコンポジットレジンマトリックス材として使用したときに殊に悪く、発生する気泡の完全除去は現時点では困難であった。気泡の混入はワイヤーの機械的性質の劣化因子¹⁹⁾にもなることから、今後さらなる気泡の除去方法の改善が必要である。コンポジットレジンマトリックス材への適用を検討する上で、3種類の製品を使用した。このうちCR-Lは流動性の点でワイヤー成形時の操作性が悪く、機械的特性の悪化が予想されることからFRPワイヤー作製時のマトリックス材としては使用しなかった。

2. ポリマーベース FRP ワイヤー

1) 曲げ特性

FRPワイヤーの曲げ荷重におよぼす V_F の影響を定量的に評価するため、従来我々はたわみ量1mmにおける負荷時荷重を用いてきた¹⁴⁻²⁰⁾。本研究ではファイラー含有量依存性を評価するために強化繊維を複合せず、コンポジットレジン単体の試料(CRワイヤー)を試作したが、この試料の場合たわみ量0.5mm以上になると、破断を起こすものの頻度が高くなった。そこで、すべてのワイヤー試料における荷重の計測条件を統一するため、たわみ量0.5mmにおける負荷時荷重を曲げ特性の評価のために用いた。

試作した丸形FRP(CPSA/UDMA)ワイヤーの曲げ荷重はFig. 7に示したように、引抜成形法で作製された丸形FRP(CPSA/PMMA)ワイヤーとほぼ同様な V_F 依存性を示していたが、荷重はやや低かった。その理由の一つとして、引抜成形した場合のマトリックス材ポリマーの強化効果が考えられる。

Co-Crワイヤーの曲げ-たわみ曲線から得られた完全除荷後の永久変形量とFRPワイヤーの変形量とを比較すると、FRPワイヤーの変形量は0.06mm以下でありCo-Crワイヤーに比べはるかに弾性回復能に優れ、矯正用ワイヤーとしてほぼ理想的な機械的特性を有することがわかった(Fig. 6)。

2) ねじり特性

本研究では自作のねじり試験用治具を使用した。本治具の妥当性を検討するために、他の研究で行われたNi-Tiワイヤーを用いたねじり試験における物性値との比較をした。本研究での試料長5mmのNi-Tiワイヤー(ナイチノール, 0.017×0.025インチ)の最大設定ねじり角(約14°)におけるねじり荷重は0.48N(Fig. 17)で、ねじりモーメントに換算すると約5N・mm(治具の構造上、計測値の1/2)であった。Melingら²⁷⁾の研究ではNi-Tiワイヤー(0.017×0.025インチ)のねじりモーメントは5.1N・mm(ブラケット間距離4mm, ねじり角25°)であり、この数値はブラケットとワイヤー間に生じるあそび

(11.45°)を含んでいるものである。この結果と今回の値を比較するとほぼ近似していると考えられ、本研究のねじり試験結果の妥当性は高いと考えられる。

ポリマーベースFRPワイヤーは極めて小さなねじり荷重を有していた。この理由として、ガラス繊維自体のねじり強さは高い(約1.4N)にも関わらず、本FRPワイヤーはガラス繊維間の結合がない一方向配向の複芯線構造であるため、ねじり変形に対して内部のガラス繊維には回転をとまらぬねじりが生じない。そのため、繊維の変形はマトリックス内の円周方向への曲げのみにとどまり、強化繊維がせん断応力を分担しないことによると考えられる。そのため、ねじり荷重は強化繊維にほとんど依存せず、主としてマトリックス材のねじり抵抗に依存しているものと考えられる。

これらのことから、十分なトルクを発揮するFRPワイヤーを作製するためにはマトリックス自体のねじり抵抗力を増大させるか、あるいは径の大きい強化繊維を挿入する必要があると考えらる。本研究の結果では述べなかったが、後者の目的でけい酸ナトリウムをバインダーとしてガラス繊維間に結合をもたせFRPワイヤーを作製したが、ねじり荷重は依然として小さく、十分な改善には至らなかった。そのため、本研究では前者の方策によりマトリックス材にコンポジットレジン適用することとした。

3. CRベース FRP ワイヤー

1) コンポジットレジンマトリックス材への適用

マトリックス材の強化のために内部にファイラーが分散配合されたコンポジットレジン適用したFRPワイヤーでは、Fig. 10, 11に示したようにファイラー含有量の小さい間は曲げ・ねじり荷重が低かったが、含有量70wt%を越える付近から急速に上昇していた。ファイラー充填による強化率が急激に大きくなった理由として、第一にファイラーとマトリックス間の界面接着面積がファイラー含有量の増加とともに増えることにより機械的強度が上昇したこと、第二にファイラー粒子間距離が粒子径程度に短縮した付近から粒子間摩擦によるマトリックスの変形抵抗が増大したことが考えられる。

曲げ荷重とねじり荷重の関係は、ファイラー含有量によって直線的に変化することがわかった(Fig. 12)。前述の①式および③式より導かれる式において試料寸法および試験条件により定まる値をKとおくと、 $P_0 = K \cdot (E/G) \cdot P_1$ (E:ヤング率, G:せん断弾性係数)なる関係式が得られ、両荷重には理論的にヤング率とせん断弾性係数の比に比例する関係があることがわかる。本実験で理論値に近い高い直線性が得られたのは作製されたFRPワイヤー試料の欠陥等の影響による差が少なく、ほぼ均等な機械的特性を有している

この確証と考えられる。

ガラス繊維を含まないCRワイヤーでは脆性破壊しやすい傾向がみられ、設定した荷重計測点まで至らないものもあった。このため、ねじり荷重の増加にはほとんど寄与しないがクラック破壊の進行を抑制し、信頼性の高い機械的特性を付与するためには強化繊維の配合が必須であると考えられる。

2) 機械的特性

Fig. 13 に示した近似直線の関係式はCR-Pマトリックス (c), CR-Eマトリックス (b), UDMAマトリックス (a) の順に、 $P_b = 0.0400 \cdot V_F + 0.8500$, $P_b = 0.0392 \cdot V_F + 0.4649$, $P_b = 0.0374 \cdot V_F + 0.1762$ であり、フィラーの有無に関わらず直線の傾きは近似していたことから、CRベースFRPワイヤーの曲げ荷重への強化繊維の効果はUDMAベースFRPワイヤーのものにほぼ等しいと考えられる。また、Fig. 10の結果からフィラーの効果は含有量70wt%程度までは極めて小であったが、それ以上の含有量でコンポジット化の効果がFRPワイヤーの曲げ荷重に現れると考えられる。

マトリックス材としてコンポジットレジンを用いることでFig. 14に示したように、ねじり荷重はFRP (CPSA/UDMA) ワイヤーに比べ4倍に増加 (CR-Pマトリックス) し、結果として金属ワイヤーと比較するとその約1/2にまで向上がみられた。このことから、マトリックス材改良のための剛性が高いコンポジットレジンの適用はねじり特性の向上に対して、有効な方法であると考えられる。

曲げ特性とねじり特性の関係を総括すると (Fig. 15)、荷重の調節因子は曲げ荷重の場合ではガラス繊維量が主であり、フィラー含有量は70wt%以上で追加的に寄与するのに対し、ねじり荷重の場合ではフィラー含有量が主たる調節因子であった。そのため、ねじり特性の向上にはフィラー含有量が多く、剛性の高いマトリックス材を選択することが有効であると考えられる。

3) 審美性について

Fig. 19に示したように、UDMAマトリックスのFRPワイヤーはほぼ透明・無色であり、従来の金属ワイヤーに比べて審美性が著しく改善されたものであった。コンポジットレジンマトリックスのFRPワイヤーは白色半透明であったが、これは市販コンポジットレジン製品には歯冠色を再現するための着色が加えられており、これがワイヤーの外観に反映されたためである。透明感のあるワイヤーが好まれる場合には、無着色のレジンからなるコンポジットレジンを用いることで容易に実現されることが考えられる。

4) 今後の展望

コンポジットレジンの適用でねじり特性の向上がみ

られたが、金属ワイヤーと比較すると未だその値には差がみられた。ねじり特性の改善に関して、マトリックス材であるコンポジットレジンの適用の点のみからの方策としてはさらにフィラー含有量を増大させねばならない。しかし、これはマトリックス材の粘度および流動性の悪化による成形操作上の問題が生じてしまうため、限界があると考えられる。そこで、前述のFRPワイヤーに径の大きい強化繊維を用いることと同様の効果の一つとして、ワイヤー内部に金属の芯線を付加することを検討している。金属そのものの剛性は高いことから、芯線自体がねじり変形を起こせばねじり荷重は増加すると考えられ、この方策はFRPワイヤーのねじり特性の向上に対する一つの可能性であると考えられる。

また、臨床応用を考慮するとフィラーの含有によるブラケットとワイヤー間の摩擦抵抗への影響や、浸潤環境下におけるコンポジットレジンの吸水による劣化現象の矯正力におよぼす影響も今後の検討すべき研究課題である。

結 論

成形方法に光重合法を取り入れたFRPワイヤーを試作し、マトリックスにUDMAおよびコンポジットレジンを使用した場合の機械的特性 (曲げおよびねじり特性) の評価・検討を行った結果、以下のような結論を得た。

1. 光重合法をFRPワイヤーの成形に用いることで、種々の断面形状のワイヤーを簡便に試作することが可能になった。
2. 新たに光重合法で試作したFRP (CPSA/UDMA) ワイヤーと従来の引抜成形法によるFRP (CPSA/PMMA) ワイヤーの曲げ特性はほぼ同等であり、金属ワイヤーに匹敵する曲げ荷重を示した。
3. 強化繊維なしのCRワイヤーの曲げ特性とねじり特性は、マトリックス材に含まれるフィラー含有量に依存し、荷重はフィラー含有量が70wt%を越える付近から急激に増加した。
4. ねじり荷重への強化繊維の効果はほとんどみられず、フィラーの配合 (70wt%以上) によるマトリックスの強化が有効であることがわかった。
5. コンポジットレジンマトリックス材に應用することで、ねじり荷重は4倍に増加し、従来の金属 (Ni-Ti) ワイヤーの約1/2にまでねじり特性が向上した。
6. 試作したFRP (CPSA/UDMA) ワイヤーとFRP (CPSA/CR) ワイヤーはいずれも従来の金属ワイヤーでは不可能なすぐれた審美性を有していた。

謝 辞

本稿を終えるにあたり、終始ご指導、ご校閲を賜りました北海道大学歯学部歯科矯正学講座中村進治名誉教授に甚大な謝意を表します。本研究の遂行にあたり、快くご協力下さいました同歯科矯正学講座永山和典医員、同講座大学院生宇賀 大氏、諏訪伸輔氏、八百坂綾子女史に深謝いたします。また、本研究にひとかたならぬご理解、ご協力下さいました同歯科理工学講座近藤清一郎助教授をはじめ、大川昭治助手、宇尾基弘助手、菅原 敏技官に心より感謝いたします。さらに、本研究に種々ご協力いただきました同歯科矯正学講座および千葉工業大学工業化学科の教室員各位に厚く御礼申し上げます。

本論文の一部は第31回日本歯科理工学会学術講演会(平成10年4月, 横浜), 第57回日本矯正歯科学会大会(平成10年10月, 仙台), '99 エネルギー先端工学シンポジウム(平成11年3月, 札幌), 第33回日本歯科理工学会学術講演会(平成11年4月, 川崎)において発表した。

また、本研究は平成8年度科学研究費補助金基盤研究C(08672352号)および平成10年度科学研究費補助金基盤研究A(10357019号)の補助により行った。

文 献

- 1) Proffit WR : Contemporary orthodontics, C.V. Mosby, 1986, 402-421
- 2) Thurow RC : Edgewize Orthodontics, 4th ed., C.V. Mosby, 1966, 138-152
- 3) Newman GV : Epoxy adhesives for orthodontic attachments, *Progress Rep Am J Orthod*, **51**, 901-912, 1965
- 4) Swartz ML : Ceramic brackets, *J Clin Orthod*, **22**, 82-89, 1988
- 5) Talass MF : Optiflex arch treatment of a skeletal class III openbite, *J Clin Orthod*, **26**, 245-252, 1992
- 6) 森下 格, 名方俊介, 渡辺美恵子, 中島昭彦 : Q.C.M. の概念と材料, *矯正臨床ジャーナル*, **10**(9), 51-59, 1994
- 7) Goldberg AJ, Burstone CJ, Madjiniolaon I, Jancar J : Screening of matrices and fibers for reinforced thermoplastic intended for dental application, *J Biomed Mater Res*, **28**, 167-173, 1994
- 8) Kennedy II KC, Kusy RP, UV-cured pultrusion processing of glass-reinforced polymer composite, *J Vinyl & Additive Tech*, **1**(3), 182-186, 1995
- 9) Kusy RP : Review of contemporary arch wires, *Angle Orthod*, **67**, 197-208, 1997
- 10) 小林雅博, 田賀井秀夫, 黒木良克, 丹羽滋郎, 尾野幹也 : 人工骨用ガラス繊維複合材の試作と性質, *Orthopaedic Ceramic Implants*, **4**, 79-82, 1984
- 11) 瀬山雅博, 黒木良克, 新井治男, 森下益太郎, 川内邦雄ほか : 人工骨用ガラス (C.P.S.A系ガラス) の細胞毒性試験, *中部整災誌*, **9**, 160-162, 1986
- 12) 近藤宰司, 黒川胤臣, 黒木良克, 齊藤 進, 新井治男ほか : 人工骨用ガラスの骨界面の超微形態学的検討, *Orthopaedic Ceramic Implants*, **6**, 11-16, 1986
- 13) 瀬山雅博, 黒木良克, 森下益太郎, 小林雅博, 田賀井秀夫 : 人工骨用ガラス (C.P.S.A系ガラス) の細胞毒性試験—第二報 骨組織由来細胞を用いて—, *中部整災誌*, **30**, 474-476, 1987
- 14) 山方秀一, 今井 徹, 亘理文夫 : 繊維強化プラスチック型審美性矯正ワイヤーの開発に関する基礎研究, *北歯誌*, **16**(2), 225-243, 1995
- 15) Watari F, Kobayashi M, Yamagata S, Nagayama K, Imai T et al : Properties of the unidimensionally glass fiber reinforced composite wire for an esthetic orthodontic wire, *Bioceramics 9 (Proc. 9th Int. Symp. on Ceramics in Medicine)*, 469-472, 1996
- 16) Watari F, Kobayashi M, Yamagata S, Nagayama K, Imai T et al : Structure and properties of the FRP esthetic orthodontic wire, *Proc. Int. Conf. on Microstructures and Functions of Materials (ICMFM96)*, 141-144, 1996
- 17) 相馬邦道, 黒田勝也, 堀部邦高孝, 飯田順一郎, 野田隆夫ほか : 歯科用異種特性複合材料の開発, *歯医学誌*, **16**, 46-60, 1997
- 18) Watari F, Yamagata S, Imai T, Kobayashi M, Nakamura S : The fabrication and properties of aesthetic FRP wires for use in orthodontics, *J Mater Sci*, **33**, 5661-5664, 1998
- 19) 永山和典, 亘理文夫, 今井 徹, 山方秀一, 小林雅博 : 審美性矯正ワイヤーの水中浸漬による影響とコーティング処理に関する研究, *北歯誌*, **19**(2), 197-213, 1998
- 20) Imai T, Watari F, Yamagata S, Kobayashi M, Nagayama K et al : Mechanical properties and aesthetics of FRP orthodontic wire fabricated by hot drawing, *Biomaterials*, **19**, 2195-2200, 1998
- 21) Anusavice KJ : Phillip's science of dental materials, 10th ed., W.B. Saunders, 1996, 274
- 22) O'Brien : Dental materials and their selection, 2nd ed., *Quintessence Publishing*, 1997, 97-99
- 23) 成瀬 省 : ガラス工学, 初版, 共立出版, 1968, 250-259
- 24) 戸苺惇毅 : エッジワイズ装置に用いる矯正線の矯正力に関する力学的研究, *愛知大院歯誌*, **27**, 1007-1015, 1989
- 25) Lutz FL, Phillips RW : A classification and evaluation of composite resin systems, *J Prosthet Dent*, **50**, 480-488, 1983
- 26) Vinson JR, Sierakowski RL (福田 博, 野村靖一, 武田展雄) : The behavior of structures composed of composite materials (複合材料の構造力学, 日刊工業新聞社, 1987, 5-13), 1986
- 27) Meling TR, Ødegaard J : On the variability of cross-sectional dimensions and torsional properties of rectangular nickel-titanium arch wires, *Am J Orthod Dentofac Orthop*, **113**(5), 546-557, 1998