

学位論文題名

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

学位論文内容の要旨

近年、マルチブラケット装置への審美的要望が高まっている。審美性ブラケットはすでに臨床に普及しているが、アーチワイヤーの審美的改良に関しては報告も稀である。

本研究の目的は、引抜き成形法にて試作した繊維強化プラスチック型審美性矯正ワイヤー（以下FRPワイヤーとする。）の諸特性試験を行い、その応用性を検討することである。

【実験方法】

I. FRPワイヤーの作製：ガラス繊維の原材料には生体親和性を有するCaO-P₂O₅-SiO₂-Al₂O₃系ガラス（以下CPSAガラスとする）を用いた。本研究では直径8、15、20μmφの繊維を選択した。また、マトリックス材には2種類のポリメタクリル酸メチル（以下PMMAとする。三菱レイヨン製VH種およびIR種）を用いた。

まずガラス繊維束をシランカップリング剤（日本ユニカー製A-174）で表面処理し、アセトンに溶解したPMMAに浸漬含浸した後乾燥させた。これらを220～250°Cに加熱した成形器に通し、マトリックス材、ガラス繊維径、繊維含有量を様々に組み合わせた外径0.5mmの棒状一方向複合材料に引抜き成形した。全ての複合材料を、長さ30.0mmの試験用試料にそろえ、あわせて各々の一部で繊維体積分率を測定した。試験用試料の断面は全て円形形状であり、繊維体積分率は27.8～60.4%の範囲であった。

II. 顕微鏡観察と装着状態観察：ガラス繊維の分布および界面の接着状態を調べるために、横断面と縦断面の光学顕微鏡ならびにSEM観察を

行った。さらに、FRP ワイヤーと Co-Cr 系ワイヤーの歯列模型装着状態を肉眼的に観察し、審美性を比較した。

III. 機械的特性の測定：3点曲げ試験にはインストロン万能試験機 4201 型（23°C、湿度 50%、標点間距離 14.0mm、クロスヘッドスピード 1.0mm/min で 2.0mm までの一往復）を用いた。結果の表示は、矯正力として認識しやすい荷重-たわみ曲線に統一した。

次に、FRP、0.018"φ Ni-Ti 系および Co-Cr 系ワイヤーを用いてブラケット（Unitek 製 TRANCEND™ 2000; 0.022" slot）-ワイヤー間の摩擦抵抗試験（23°C、湿度 50%）を行い、摩擦力の最大値を求めた。

【結果】

I. FRP 構造の顕微鏡観察

光学顕微鏡像から、ガラス繊維の均一な分散が認められた。また、異なる径のガラス繊維を均一に混在させる FRP 化が可能なことも確認された。SEM 像からは、界面の緊密な接着が認められた。

II. FRP ワイヤーの機械的特性

1. マトリックス種依存性：VH 種の試料ではたわみ 1.5mm 以上の範囲に鋸歯状の荷重低下が生じたが、除荷によってほぼ完全に弾性回復した。一方、IR 種では全てたわみ 2.0mm 付近で急激な荷重低下が生じ、除荷時の弾性回復が著しく低下した。このことから、以下ではより優れた機械的特性を示した VH 種のみを用いた。

2. 繊維体積分率依存性およびガラス繊維径依存性：同一ガラス繊維径の場合、繊維体積分率が高い試料ほど曲げ強さが大きかった。また、同一繊維体積分率の試料の荷重-たわみ曲線は、ガラス繊維径に依存せず一致した。また、たわみ 1.0mm での負荷時荷重値（およびヤング率）-繊維体積分率線図には、曲げ強さ-繊維体積分率間のガラス繊維径に依存しない比例関係が認められた。

3. FRP ワイヤーと金属ワイヤーとの比較：繊維体積分率 30~60% の範囲の FRP ワイヤー荷重領域は、0.016"φ Ni-Ti 系から Co-Cr 系ワイヤーまでのそれに匹敵した。また、Co-Cr 系ワイヤーに比べ、FRP ワイヤーでは繊維体積分率によらず弾性回復に優れていた。

III. 摩擦抵抗試験

摩擦力は静止的に最大値（最大静止摩擦係数）に達した後減衰した。

いずれのワイヤーの最大静止摩擦係数－垂直抗力線図にも正の比例関係が認められた。直線の傾きで表される静摩擦係数はFRP、Ni-Ti系、Co-Cr系ワイヤーでそれぞれ0.46、0.49および0.29であった。

IV. 審美性に関して

FRP ワイヤーと金属ワイヤーの歯列模型装着状態の比較から、FRP ワイヤーとセラミックス製ブラケットの組み合わせでは、矯正治療を行っているのがわからない程度まで審美性が向上することがわかった。

【考察】

・機械的特性：ポリマーまたはセラミックス単一素材の機械的特性を金属に近付けることは困難なため、FRP に着目した。FRP の作製には、モノマーから重合する方法とポリマーを成形する方法とがある。前者は作製時の重合度管理が難しく、再現性に乏しい。本研究では後者のうち引抜き成形法を選択した。これにより、重合法では40%が上限であった繊維体積分率を60%まで上げることが可能となった。

歯の移動には「弱い持続的な力」が適し、各治療段階に適切な剛性のワイヤーが必要となる。FRP ワイヤーは、同一ワイヤー径で様々な特性に調節できる利点がある。そこで調節因子についての検討を行った。

IR種の機械的特性試験の結果は、試験後のマトリックス材の破壊がなかったことから、これが著しい荷重低下の原因とは考え難い。考え得る原因には① FRP表層に露出したガラス繊維の破断、② FRP内部のガラス繊維の破断、③界面の層間剪断、④マトリックス材の違いによる応力分担の差、⑤マトリックス材の成形性の良否による影響があり、中でも可能性が高いのは③～⑤である。

曲げ強さの繊維体積分率依存性を評価するために、たわみ 1.0mmにおける負荷時荷重値を用いた理由は以下の通りである。①たわみ1.0mm以上で生じる荷重低下の影響の排除できる。②比例限の範囲内であり、解析が容易である。③臨床的に、初期から中期までの治療段階を想定したたわみ量である。

たわみ1.0mmでの負荷時荷重値（およびヤング率）－繊維体積分率線図における線型複合則の成立から、曲げ強さは主として繊維体積分率に

依存し、ガラス繊維径依存性は極めて低いと考えられた。ただし、これは界面剥離の影響が少ない範囲での結果である。いずれにせよ界面の問題はFRPワイヤーの特性向上のために今後とも重要な課題である。

・摩擦特性：現時点では、FRPワイヤーにループ等の屈曲を付与することは困難なため、ストレートワイヤー法への適用が考えられる。FRPワイヤーの比較的低い静摩擦係数から、ストレートワイヤー法でエラストマー材料を利用するスライディングメカニクスへの応用の可能性が示唆された。

・問題点と今後の展望：弾性率領域の拡大および角形ワイヤーの作製を試み、広い治療段階に適用し得る審美性矯正用ワイヤーとしての確立を目指す。このために、様々な温度や湿潤条件下での試験、標点間距離を変えた試験、両持ち梁での試験、さらには衝撃や疲労試験等を行いながら特性の向上を画る必要がある。

アーチフォームの賦形は、マトリックス材の熱可塑性の利用で可能と考えられる。また、ワイヤー表層にコーティングを施すことで摩擦抵抗を低下させ、スライディングメカニクスの効率を向上することも期待できる。

ところで、生体応用には安全性が必須となる。CPSAガラスは整形外科分野に用いるために開発されたものである。CPSA-FRPに関して、森下らが組織親和性に優れることを、瀬山らが細胞毒性が認められなかったことを報告している。

一方、矯正臨床における問題点に破折がある。これに対する対応策として、水分や衝撃などからの保護層を施すこと、また万一組織内に埋入した場合にX線等で検知できる性質を持たせることも考えている。

【結論】

本ワイヤーの審美性と物性特性は、今後開発を進めるにあたり十分な基礎的性質であったと考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 村 進 治
副 査 教 授 内 山 洋 一
副 査 教 授 亘 理 文 夫

学位論文題名

繊維強化プラスチック型審美的矯正ワイヤーの 開発に関する基礎研究

審査はいずれの担当者も口頭試問により提出論文の内容とそれに関連した学問分野につき行った。

矯正治療の最終段階において、ほとんどの症例でマルチブラケット装置が使用される。近年成人の矯正治療が普及したのに伴い、マルチブラケット装置への審美的要望も増大してきている。従来、本装置の維持部であるブラケットに関しては、ダイレクトボンディング法やセラミックブラケットなど様々な研究開発が行われている。しかし、矯正力を発揮するアーチワイヤーの審美的改良に関する報告は極めて少ない。

そこで本論文は、ガラス繊維を長さ方向に配向させた繊維強化プラスチック型審美的矯正ワイヤー（FRPワイヤー）を引抜き成形法にて試作し、その機械的特性試験を行い、基本物性を明らかにするとともにその臨床応用の可能性についても検討を加えている。

【実験方法】

強化繊維として生体親和性に富むCaO-P₂O₅-SiO₂-Al₂O₃系（CPSA）ガラス繊維（8、15、20μmφ）を選択し、シランカップリング剤による表面処理を施した。マトリックス材には2種類のポリメタクリル酸メチル（PMMA、VH種およびIR種）を用いた。これらを様々に組み合わせて外径0.5mmの棒状一方向複合材料に引抜き成形し、長さ30.0mmの試験片にそろえた後、各々の繊維体積分率を測定した。

まず、試験片中のガラス繊維の分布および繊維とマトリックス材との界面の接着状態を調べるために、試験片断面の光学顕微鏡ならびにSEM観察を行った。さらに、機械的特性の測定としてインストロン万能試験機による3点曲げ試験（2.0mmまでの一往復）およびブラケット-ワイヤー間の摩擦抵抗試験を行った。

【結果】

肉眼的観察では、FRPワイヤーとセラミックス製ブラケットとを組み合わせることによって、矯正装置を装着しているのがほとんどわからない程度にまで審美性が

向上することがわかった。また顕微鏡による観察から、FRPワイヤー内部におけるガラス繊維の均一な分布と界面の緊密な接着が認められた。さらに、FRPワイヤーの機械的特性に関しては、以下のことが明らかになった。

1) マトリックス種依存性：VH種の試料では除荷後ほぼ完全に弾性回復したが、IR種の試料ではたわみ 2.0mm付近で急激な荷重低下が生じ、弾性回復が著しく低下した。このことから、より優れた弾性回復能を有するVH種についてのみさらに検討を進めた。

2) 繊維体積分率依存性およびガラス繊維径依存性：たわみ 1.0mmでの負荷時荷重値（およびヤング率）－繊維体積分率線図に認められた比例関係から、曲げ強さは主として繊維体積分率に依存し、ガラス繊維径依存性は極めて低いことが明らかとなった。また、同図は線形複合則の成立も示していた。

さらに、FRPワイヤーは繊維体積分率を変化させることで、0.016"φのNi-Ti系からCo-Cr系ワイヤーまでの範囲に曲げ強さを調節することが可能であった。

3) 摩擦抵抗試験：最大静止摩擦力－垂直抗力線図から得た静摩擦係数はFRP、Ni-Ti系、Co-Cr系ワイヤーでそれぞれ0.46、0.49および0.29であった。

【考察】

矯正治療では、各治療段階に適切な剛性のワイヤーが必要となる。FRPワイヤーは、同一ワイヤー径で様々な機械的特性を調節できる利点がある。そこで調節因子についての検討を行った。

IR種を用いた試料で認められた著しい荷重低下の原因には① FRP表層に露出したガラス繊維の破断、② FRP内部のガラス繊維の破断、③界面での層間剪断、④マトリックス材の違いによる応力分担の差、⑤マトリックス材の成形性の良否による影響、などが考えられる。中でも可能性が高いのは③～⑤であり、マトリックス材を選択する上で留意すべき点と考えられる。

FRPワイヤーの曲げ強さは繊維体積分率に依存し、ガラス繊維径依存性は極めて低かったが、これは界面剥離の影響が少ない範囲での結果であり、界面の問題は今後のFRPワイヤーの特性向上にとって重要な問題である。また、FRPワイヤーの摩擦特性に関しては、臨床応用に向けて十分な性質を有するものと考えられる。

今後は広い治療段階に適用し得る審美的矯正ワイヤーとしての確立を目指す。そのために、荷重領域の拡大、角型ワイヤーの作製、アーチフォームの賦形、摩擦特性の向上および破折への対応策について検討し、さらに口腔内環境にあわせた温度や湿潤の機械的特性に与える影響や組織親和性、細胞毒性につき試験を行い、生体応用に向けた安全性の向上に関する検討を行う予定である。

以上のように本論文は組織親和性に優れたカルシウムとリン酸イオンを含むCPSAガラスを用い、臨床応用にも十分耐え得る繊維強化プラスチック型審美的矯正ワイヤーを開発した点、今後の矯正治療に資すること大である。よって申請者は博士（歯学）の学位を授与される資格を持つものと認めた。