

学 位 論 文 題 名

ヒト歯根象牙質における
力学的特性の荷重速度依存性の解析

学位論文内容の要旨

【目的】

象牙質欠損の修復は歯冠補綴治療の基礎をなしているが、象牙質の力学的性質に関しては不明な点が多い。現在、歯質の欠損を修復するための人工材料には無機質材料（金属やセラミック）と有機・無機質複合材料（コンポジットレジン）が主として用いられている。支台築造のように象牙質の欠損を対象にした場合は、修復材料に求められる力学的特性は異なってくる。これまでは高い虚どの金属などで歯根を補強しようと考えられてきたが、歯根破折防止という観点から支台築造材料の要件は高い力学的強度から象牙質に近似した力学的特性へと大きく転換した。しかし、象牙質およびコンポジットレジンとは純粋な弾性体ではなく、粘弾性的性質を示すことが知られている。弾性体と異なり粘弾性体の挙動は、荷重速度依存性を持つため加わる荷重の条件によって変化する。これまで静的荷重を用いた研究は多く行われてきたが、動的・衝撃的荷重に対する象牙質の挙動は不明な点が多い。また、象牙質は有機質と無機質から構成され、両者の相互作用によって象牙質の粘弾性的性質が決定される。外来刺激が象牙質に加わると反応性に象牙細管の石灰化・閉塞を行う。したがって、象牙質の組成（無機質量）は生涯不変では無く、歯が置かれている環境によって変化する。それらの変化によって力学的特性が影響を受けることが報告されているため、計測された力学的特性と象牙質試料の組成との関係を理解することも重要である。

そこで、本研究では象牙質が有する粘弾性的性質に着目し、準静的荷重試験と衝撃荷重試験であるスプリットホプキンソン棒法（SHPB 法）試験を組み合わせることで、象牙質の弾性係数の荷重速度依存性を明らかにすることを目的とした。また、象牙質は無機質と有機質の複合体であることから、Ash Content 法を用いて試料の無機質量を定量し、象牙質の組成と粘弾性的性質の関係を調べる事も目的とした。

【材料と方法】

＜試料の作製＞

抜去後クロロミンT溶液中に保存されたヒト永久歯（上顎中・側切歯、犬歯、小臼歯および下顎犬歯・小臼歯）の中から、齲蝕や修復物が無い12本を選択し試料として用い、歯根長軸方向に平行な高さ3mm、直径4mmの円柱状の象牙質試料を合計20作製した。

＜荷重試験＞

1. 準静的荷重試験

準静的荷重試験として油圧制御型材料試験機（MTS 社製 858 Mini Bionix® II）を用いて、0.005 mm/sec の荷重速度で試験を行った。測定結果から応力-歪み線図を描き、直線部の傾きから準静的弾性係数を算出した。この荷重試験はその後の SHPB 法試験に影響がないように荷重-変位曲線をリアルタイムにモニターし、塑性変形の起きない弾性変形の範囲内で荷重試験を行った。

2. SHPB 法試験

荷重速度の速い動的試験として、SHPB 法試験を行った。この装置では打撃棒、入力棒、出力棒を同軸上に配置し、試料を入力棒と出力棒の間に密着させて設置する。圧縮空気によって打撃棒を打ち出し入力棒に衝突させ、入力棒に衝撃波を発生させる。入力棒、出力棒に貼付けられた歪みゲージによって入射応力波および透過応力波を検出する。入射応力波と透過応力波を比較することで、試料の力学的特性を知ることができる。求められた測定値から応力—ひずみ線図を作製し、直線部の傾きから衝撃弾性係数を求めた。

<組成分析-Ash content 法（無機成分含有量）>

荷重試験終了後の試料を 800℃で 2 時間加熱・焼成し、残った Ash の重量を予め測定しておいた試料重量で割って無機成分含有量を定量した。

一つの試料について、準静的荷重試験→SHPB 法試験→Ash content 法の順序で実験を行った。

<象牙細管の走行方向>

象牙細管の走行と荷重方向との関係を確認するために、荷重・組成試験で用いたものとは別途に試料を作製し、光学顕微鏡にて象牙細管の走行方向と荷重方向との関係を検討した。

<統計学的評価>

準静的荷重試験と SHPB 法試験で得られた弾性係数について、Wilcoxon 符号付順位検定を用いて統計学的に比較を行った ($p < 0.01$)。準静的および衝撃弾性係数と Ash content の間の相関関係を回帰分析によって評価した ($p < 0.01$)。

【結果】

準静的弾性係数は $6.0 \pm 0.8 \text{ GPa}$ で、SHPB 法試験より求められた衝撃弾性係数は $13.4 \pm 2.7 \text{ GPa}$ であった。両者間には統計学的に有意な差が認められた。

Ash Content の平均は、 $63.2 \pm 1.1\%$ であった。準静的弾性係数と Ash Content の間に比較的強い相関がみられたが、衝撃弾性係数と Ash content には相関関係は認められなかった。

象牙細管の走行方向は荷重方向とほぼ直行する傾向を示し、被験歯および試料の採取位置（歯頸部寄りか、根尖寄りか）による差は無かった。

【考察】

準静的荷重試験および SHPB 法試験の異なる二つの荷重速度によって弾性係数が変化したことから、象牙質の力学的挙動は荷重速度依存性を示し、外力に対して粘弾性体として振る舞うことが確認された。一般的に粘弾性体の挙動はバネ（弾性）とダッシュポット（粘性）の組み合わせで表現される。弾性を司るバネ部分は荷重速度の如何に関わらず同じ挙動を示し、粘性のダッシュポット部分は荷重速度が増加すると変形抵抗が増し弾性係数が高くなる性質を持つ。したがって、SHPB 法試験では象牙質のダッシュポット部分は変形抵抗として働き、バネ部分の弾性ととともに試料の挙動を規定したと考えられる。一方、準静的荷重ではダッシュポット部分である粘性部分の変形抵抗としての作用が弱まり、SHPB 法試験に比べて弾性係数が低く測定されたと考えられる。本研究で観察された象牙質の無機質量の範囲では、準静的弾性係数は無機質成分が多いほど（有機質成分と水分の合計が少ない程）高くなるが、衝撃弾性係数は無機質と有機質・水分の組成比にほとんど影響を受けなかった。これらの結果から、準静的荷重に対しては、粘性部分の変形抵抗が小さくなるため象牙質の弾性部分が試料全体の挙動を支配することになる。準静的弾性係数と無機質量に比較的強い相関関係があったことを考慮すると、無機質成分が弾性的性質を担っていると考えられることができる。一方、速い荷重に対しては粘性部分の変形抵抗の増加による弾性係数のかさ上げが起きるため、無機質部分の影響が相対的に小さくなり、結果として衝撃弾性係数と無機質量が相関しなかったと解釈される。以上より、象牙質の粘性的性質は、有機質部分および水分が担っている可能性が示唆された。今回の研究では衝撃弾性係数を求めるために用いたが、本来 SHPB 法試験は応力やひずみの伝播を測定することが目的であることから、粘弾特性評価に留まらず歯質とコンポジット

レジンの接着界面での咬合荷重伝達の解明のような新たな展開が期待できる実験手法である。更に象牙質の測定値をもとにして、理想的な象牙質代替材料を目指したコンポジットレジン等の修復材料の評価・開発への応用も可能と考えられる。

【結論】

- ・ 弾性係数が荷重速度依存性を示したことから、象牙質が粘弾性を持つことが確認できた。
- ・ 象牙質の弾性的性質を無機質成分が担っており、粘性的性質は有機質成分と水分によるものであることが示唆された。
- ・ SHPB 法試験は、象牙質の粘弾性的性質の解明に有効であることが示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 畑 昇

副 査 教 授 佐 野 英 彦

副 査 教 授 亘 理 文 夫

学 位 論 文 題 名

ヒト歯根象牙質における

力学的特性の荷重速度依存性の解析

審査は、最初に論文提出者に対して論文の要旨を説明させ、ついで論文の内容について審査委員による口頭試問を行った。以下に提出論文の要旨と審査の内容を記す。

【目的】象牙質欠損の修復は歯冠補綴治療の基本をなしているが、象牙質の力学的性質に関しては不明な点が多い。本研究では象牙質が有する粘弾性的性質に着目し、準静的荷重試験と衝撃荷重試験であるスプリットホプキンソン棒法（SHPB 法）試験を組み合わせることで、象牙質の弾性係数の荷重速度依存性を明らかにすることを目的とした基礎的研究である。また、象牙質は無機質と有機質の複合体であることから、Ash Content 法を用いて試料の無機質量を定量し、象牙質の組成と粘弾性的性質の関係を調べる事も目的とした。

【材料と方法】抜去されたヒト永久歯（前歯・小臼歯）の歯根から、歯根長軸方向に平行な高さ 3 mm、直径 4 mm の円柱状の象牙質試料を作製した。一つの試料について、準静的荷重試験→SHPB 法試験→Ash content 法の順序で実験を行った。荷重は試料の長軸方向と平行に加え、準静的荷重試験および SHPB 法試験からそれぞれ応力-ひずみ線図を作成し弾性係数を求めた。荷重試験終了後の試料を 800℃で 2 時間加熱・焼成し、残った Ash の重量を予め測定しておいた試料重量で割って無機成分含有量（Ash content）を定量した。Ash Content と準静的および衝撃弾性係数の相関関係を統計学的に検討した。また、象牙細管の走行と荷重方向との関係を確認するために、荷重・組成試験で用いたものとは別途に試料を作製し、光学顕微鏡にて象牙細管の走行方向と荷重方向との関係を検討した。

【結果と考察】準静的弾性係数は $6.0 \pm 0.8 \text{ GPa}$ で、SHPB 法試験より求められた衝撃弾性係数は $13.4 \pm 2.7 \text{ GPa}$ であり、両者間には統計学的に有意な差が認められた。

Ash Content の平均は、 $63.2 \pm 1.1\%$ であった。準静的弾性係数と Ash Content の間に比較的強い相関がみられたが、衝撃弾性係数と Ash content には相関関係は認められなかった。象牙細管の走行方向は荷重方向とほぼ直行する傾向を示し、被験歯および試料の採取位置（歯頸部寄りか、根尖寄りか）による差は無かった。荷重速度によって弾性係数が変化したことから、象牙質の力学的挙動は荷重速度依存性を示し、外力に対して粘弾性体として振る舞うことが確認された。準静的弾性係数と無機質量に比較的強い相関関係があったことから、象牙質の弾性的性質には無機質部分が支配的に働いていることが示された。一方、象牙質の粘性的性質は、有機質部分及び水分が担っていることが示唆された。

以上の提出論文の要旨説明に引き続き質疑応答を行った。主な質疑応答を以下に示す。

1. スプリットホプキンソン棒法（SHPB 法）試験に関して
 - a. 入射応力波と透過応力波のグラフに現れるその他の波形について
 - b. ホプキンソン棒法試験機の形状について
2. 試験片に関して
 - a. 象牙質への荷重方向が縦と横では違いが現れるかどうかについて
 - b. 歯根側、歯冠側の弾性率の違いについて
3. 実験結果と表に関して
 - a. 弾性率が過去の文献に比べ低い事について
 - b. 無機成分含有量の約 4 % の変化に対して準静的弾性係数が約 1.5 倍変化した事について
4. 今後の臨床的研究に関して
 - a. 象牙細管の方向の違いによる粘弾性的性質について
 - b. 修復により象牙質と一体化した象牙質・修復材料の粘弾性的性質について
 - c. 健全歯のようにエナメル質、象牙質が一体となった粘弾性的性質について

以上の質疑応答において論文提出者は、上記のような質問に対して明確に回答し、本論文の内容に関する事項についても十分な知識を有していた。さらに今後の研究の明確な展望も有しており、将来性の点においても高く評価できる。よって、学位申請者は博士（歯学）の学位授与にふさわしいものと認めた。