

## 論文審査の要旨

報告番号	㊦・乙 第 2970 号	氏名	下村 直史
論文審査担当者	主査 教授 長谷川 篤司 副査 教授 馬場 一美 副査 教授 桑田 啓貴		
<p>(論文審査の要旨)</p> <p>学位論文「Nanoscale toughening mechanism of human tooth enamel: exceptional contact elasticity in nanoindentation stress-strain tests (エナメルナノスケール強化機構：応力-ひずみ試験における動的接触弾性) について上記の主査 1 名、副査 2 名が個別に審査を行った。エナメル質の力学的性質を、動的接触によるナノインデンテーション法から得られた応力-ひずみ曲線と modulus mapping から得られた貯蔵弾性係数などによって評価したところ、エナメル質の優れた靱性機構が弾性領域内の優れた変形能によるものであることが明らかになった。</p> <p>本論文の審査にあたり、副査の馬場委員および桑田委員から多くの質問があった。それら質問と回答の一部を以下に示す。</p> <p>馬場委員の質問とそれらに対する回答：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>今回は埋伏智歯を試料とし小柱体部の小柱走行方向に荷重をかけて測定したとのことだが、エナメル小柱を他方向から測定した場合にどのような変化がみられると思うか？ エナメル小柱の走行に対してある角度をもって外力がかかった場合、縦方向に <math>\sin \theta</math> 横方向に <math>\cos \theta</math> の力がかかっていると考えることが出来る。横方向にかかる力は、HA 結晶と結晶間タンパクをより凝縮させるように働く力となり、pile up がより生じると考えられ、結果としてひずみ速度に応じて上昇する接触剛性はより高くなると考えられる。</li> <li>象牙質を同じシステムで比較した場合、エナメル質と比較して機械的性質にどのような性質が見られると思うか？ 象牙質は無機物 70%有機物 20%水分 10%の割合で構成されており、エナメル質と同様に複合材料であると考えられる。そのため、本計測技術で測定した場合には弾性限での応力上昇や弾性係数上昇がみられると考えられる。その際には測定試料の破断点を考慮した最大荷重の調整は行う必要がある。また、象牙質を構成する無機質の組成の主たるものはリン酸カルシウム結晶であり、エナメル質を構成する HA 結晶に比べて物性面で大きく劣ることが想定される。一方、加齢した象牙質は象牙細管内の石灰化などにより石灰化度が上がり無機成分の比率が向上していると考えられるので、象牙質における有機物との複合材</li> </ol>			

(主査が記載)

料的挙動は、石灰化度の低い象牙質と石灰化度の高い象牙質を比較することでより明確に考察することが出来ると考えている。

桑田委員の質問とそれらに対する回答：

1. 本実験での測定方法に、向いている素材や向いていない素材はあるのか？

本測定技術は複合材料としての構造を持つ生体材料の局所の物性測定に適しており、例えば、骨、歯（エナメル・象牙質）、貝類などが相当すると考えている。特に貝類などが分泌する真珠層は、無機成分の炭酸カルシウムと有機質で構成されており、炭酸カルシウム結晶単体では著しく脆い材料が複合構造になることで得た 70GPa 程の強い弾性係数を計測することができる。逆に石英などの均一な材料は粘弾性的特性を持たないため、荷重時に起きる変位は応力に対し応答遅延なく 1 対 1 対応するため、本実験での連続測定と振動を与えながらの測定は必要としない。

2. 本実験で用いた測定技術を用いて将来的に期待できる応用例にはどんなものがあるか。

本計測技術でフッ化物など強化された歯質の物性変化を計測することで、歯質強化作用が HA 結晶とその間質で起きているのか、小柱間質で起きているのかを考察できることが期待される。

両副査は、上記を含めた質問に対する回答が、いずれも満足のいくものであることを確認した。

主査 長谷川委員の質問とそれらに対する回答：

1. 圧子の形状や大きさは何が最適だと考えるか？また、このような圧子はどのような臨床条件を模していると考ええるか？

今回使用した  $R=0.5(0.234)\mu\text{m}$  と  $R=1.0(1.041)$  の圧子はそれぞれエナメル小柱に対し  $\sim 50\text{nm}$ 、 $\sim 150\text{nm}$  の圧子接触半径(図内 a)であった。エナメル小柱は横幅  $5\text{-}6\mu\text{m}$  で、HA 結晶は  $50\text{-}200\text{nm}$  程の大きさに成長していることが知られている。

ナノインデンテーション試験では圧子接触直径(2a)が測定対象の 1/10 以下であることが求められている。従って、今回の測定法と使用圧子はエナメル小柱測定において適していると考えられる。また、 $0.5\mu\text{m}$  圧子で測定した結果は  $1.0\mu\text{m}$  圧子で測定した結果に対して、エナメル小柱の物性より HA 結晶の物性を測定したと考えることが出来る。これが両圧子での弾性限における応力の差異に表れていると考えられる。

臨床的な物性を測る際には、よりマクロに測定することが可能なビッカース試験やブリネル試験などを使用し比較することが求められると考える。

主査の長谷川委員は、両副査の質問に対する回答の妥当性を確認するとともに、本論文の主張をさらに確認するために上記の質問をしたところ、明確かつ適切な回答が得られた。以上の審査結果から、本論文を博士（歯学）の学位授与に値するものと判断した。

（主査が記載）