

論文内容要旨

論文題名

Nanoscale toughening mechanism of human tooth enamel: exceptional contact elasticity in nanoindentation stress-strain tests

(エナメル物の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)

掲載雑誌名

Biomaterials (投稿中)

小児成育歯科学 下村直史

内容要旨

エナメル質は生体で最も硬く剛性が高い。同等の力学的特性を有する歯科材料は脆性である一方、エナメル質は一生涯を通じて機能できる靱性機構を有している。したがって、エナメル質材料レベルの力学的特性を理解することは、代替材料の開発に重要である。応力ひずみ曲線は力学的性質の本質的理解に重要であり、ナノインデンテーションでは生体材料の構造に左右されない材料レベルの力学的特性を議論できる。本研究では押し込み深さに比例し、発生するひずみが上昇する球状圧子を用い、エナメル小柱の応力ひずみ曲線測定方法を検討した。

標準試料である熔融石英と、ヒト永久歯を試料とした。永久歯をレジン包埋し、エナメル小柱に対して垂直方向に切断・研磨した。走査型プローブ顕微鏡で試料表面を観察し、エナメル小柱方向から2種の圧子を用いてナノインデンテーション法による測定を行った。動的試験では荷重条件によりひずみ速度を変化させた。ひずみ速度の変化に対応する弾性係数はHertzの準静的接触理論、動的シグナルによる接触接触剛性から求めた。熔融石英では、準静的および動的試験において圧子直径や荷重条件による応力ひずみ曲線の変化は見られなかった。1.0 μm の圧子による動的試験では、ひずみ速度の上昇に伴い降伏点強度が上昇した。エナメル小柱の応力ひずみ曲線、直線部分の傾きから得られた、準静的理論による弾性係数は

90 GPa 程度であり，動的接触剛性から得られた貯蔵弾性係数の 130 GPa に比べて低い．Modulus mapping では最小限度の一定接触荷重（4 μN ）によりエナメル質表面の接触剛性を連続的に画像化することができる．したがって，理論上のひずみ速度は 0 に限りなく近づく．Modulus mapping から算出されたエナメル質の貯蔵弾性係数は 60 GPa 程度であり，応力ひずみ曲線から得られた弾性係数に比べ著しく低い．

これら，ひずみ速度に依存した弾性係数の変化は，エナメル質ナノスケール構造の例外的な弾性変形能に依存すると考えられる．弾性領域内におけるエナメル質特有の変形は，局所の剛性を瞬間的に上昇させ，マイクロクラックの発生や伸展を抑制することが可能である．エナメル質の発生過程で吸収しきれないエナメルタンパクの時間依存特性（クリープ）は材料レベルでの靱性に貢献していると考えられてきた．しかし，クリープなどの粘弾性は高いひずみ速度に対応することが不可能である．これまで，密度の高い皮質骨ではアパタイト結晶と非コラーゲン性タンパクの最小構造が高いひずみ速度に対して瞬間的に拡張し，骨の靱性に関与するナノ生体力学機構が報告されている．人体で最も石灰化密度の高いエナメル質においても同様のメカニズムが存在すると考えられる．最新の歯科材料開発においては剛性や塑性変形能だけでなく，高度な複合化材料による弾性領域内の優れた変形能が重要である．