

氏 名	Ha 河	Kanz 康	Lyoo 烈
授 与 学 位	工 学 博 士		
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻		
学 位 論 文 題 目	超音波顕微鏡による歯及び歯科材料の弾性的 性質の計測に関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 中鉢 憲賢		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 山之内和彦 東北大学教授 中村 信良 東北大学助教授 櫛引 淳一		

論 文 内 容 要 旨

物質・材料の微小領域における構造や粘弾性的性質を二次元的な超音波画像、あるいは高精度な定量値として捉えることができる超音波顕微鏡は、様々な分野への応用が期待されており、これまで、電子材料工学、材料物性工学、機械工学、医・生物学などの分野においては次々と新しい研究成果が報告されている。しかしながら、生体の硬組織を対象とした研究には、まだ殆ど適用されていない。本研究は、歯や骨などの生体硬組織を取り扱う歯学及びその関連分野における基礎研究手段として超音波顕微鏡を導入することを目的として、それに伴う諸問題を検討して、高精度な計測法として確立させるとともに、具体的には、その方法を適用して歯の硬組織及び歯科材料の弾性的性質の計測を行ったものである。

本研究を着手するまで、歯学あるいは歯科分野における計測手段としての超音波の利用については、十分な検討がなされておらず、確立されている手法もなく、測定データも十分でなかった。そこで、本研究では、まず、歯の硬組織及び歯科材料の音響特性の測定に有用な縦波平面超音波を用いる一測定法を開発し、その方法によって音速と減衰に関する基礎特性を明らかにした。さらに、点集束ビーム超音波顕微鏡による縦波伝搬特性の組織内での空間分布と、直線集束ビーム超音波顕微鏡による漏洩弾性波伝搬特性の異方性及び空間分布などの重要な基礎音響特性を測定、その結果が試料の組織構造及び従来の静的な方法による硬さの測定結果と深く関係することを明らかにした。また、歯の内部及び初期齶蝕部分における超音波画像計測の結果から、超音波顕微鏡による画像計

測の歯学分野における有用性を示した。

以上の内容を含む本論文は全編6章よりなり、各章の主な内容を要約すると以下の通りである。

第1章 緒 論

本章は、緒論で、本研究の背景と動機、及び目的と本論文の構成全般について述べている。

第2章 歯や歯科材料の組織構造、構成成分及びその機械的性質

本章では、本研究を進めるうえで、基礎知識として必要である歯及び歯科材料の組織構造、構成成分、機械的性質などを文献に基づいて説明した。従来、歯など生体硬組織の弾性的性質についての報告は、組織を形成する物質の基本構造が六方晶であることから、六方晶の単結晶として取り扱い、その性質を記述したものと、診断あるいは歯科材料の評価などへの応用における有用性を考えた基礎データとしての利用における便宜点を考慮して、等方性物質として取り扱い、その性質を記述したものがある。しかしながら、それらの文献値には、適切な測定法が確立されていないことから文献によってかなり大きなばらつきがある。そのようなばらつきの原因を含む測定方法及び測定結果における問題点を把握することは、本研究の遂行方針を設定するうえで非常に重要であり、また、本研究で得られた結果を検討、考察するための基礎資料として必要であるため本章で詳細にまとめた。

第3章 短パルス平面超音波による音響特性の測定

本章では、短いパルスの平面超音波を用いて、歯など生体硬組織の音速と減衰係数を精度よく測定する方法とシステムを開発した。本測定法は、厚さが既知である試料中を伝搬する超音波の伝搬時間をスペクトラムアナライザを用いて周波数領域で求めるので、伝搬時間の高精度な測定が可能となり、音速測定精度を高めることができる。本章では、まず、その測定原理を理論的に明確にした後、図1に示すような測定システムを構成した。さらに、正確な測定に必要なスペクトラムアナライザの分解能帯域幅の設定指針を与えた。本方法とシステムによる測定精度を溶融石英とポリエステル膜を用いて実験的に検討した結果、非常に高い精度が得られていることがわかり、生体硬組織の音響特性の測定に十分なものであることが確認できた。それらの結果を踏まえて、本計測法を歯及び歯科材料に適用した結果、音速及び減衰の周波数依存性が精度よく測定され、その基礎特性を明らかにすることができた。

本章で得られた歯及び歯科材料の縦波音速を表1に示す。この結果から各組織に対する音速の絶対値がわかるとともに、ヒト歯の音速は牛歯に比べて速いことや、歯科用陶材の音速はエナメル質に近い値を持ち、歯科用レジン音速は象牙質に近い値であることなどが明らかになった。これらの結果は、現在まで、歯科分野において機械的性質を測る主な手段であるヌープ硬度計などによる硬さの測定結果とよく対応するものである。しかし、各方法における測定精度を考慮すると、本研究で構築した測定法とシステムは歯科材料の機械的性質の評価における従来の手法に代わる手段として有用であると考えられる。

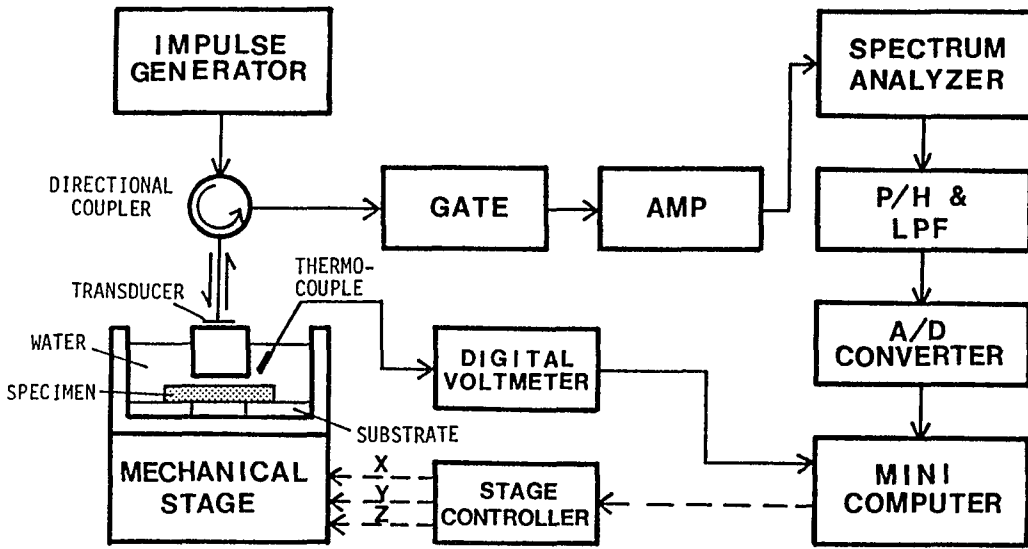


図1 短パルス平面超音波による音響特性測定システムのブロック図

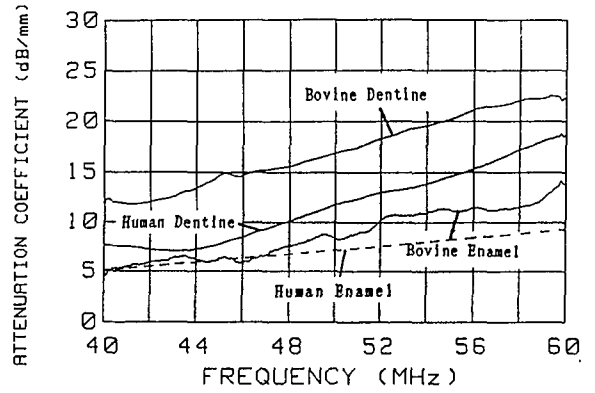
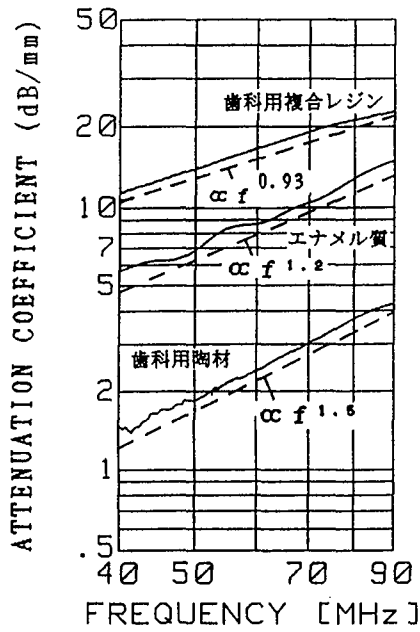
表1 歯及び歯科材料における縦波音速及び伝搬減衰の周波数依存係数

	エナメル質		象牙質		歯科用陶材	歯科用レジン
	ヒト	牛	ヒト	牛		
音速 (m/s)	6532	5935	3650	3591	5713	3071
$\alpha \propto f^x$ の x	1.20	1.27	1.33	0.92	1.5	0.93

また、本章では、歯の硬組織及び歯科材料での伝搬減衰を初めて測定し、その周波数依存性を明らかにした。その結果を表1と図2に示す。この結果から、歯のエナメル質の減衰は歯科用陶材より大きく、歯科用レジンより小さいことやその周波数依存性はほぼ1.2乗特性を持つことがわかった。また、ヒト歯の減衰は、音速とは逆に、牛歯より小さいことが明らかになった。

第4章 インパルス波超音波顕微鏡の適用と弾性的性質の場所による変化の測定

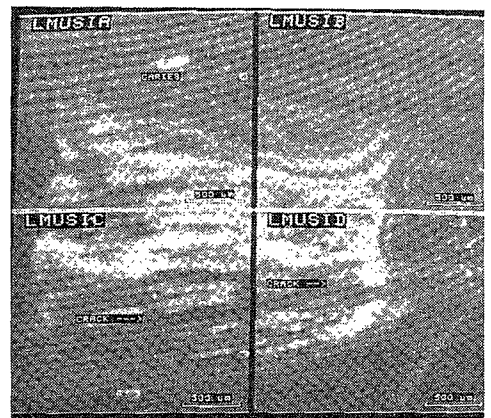
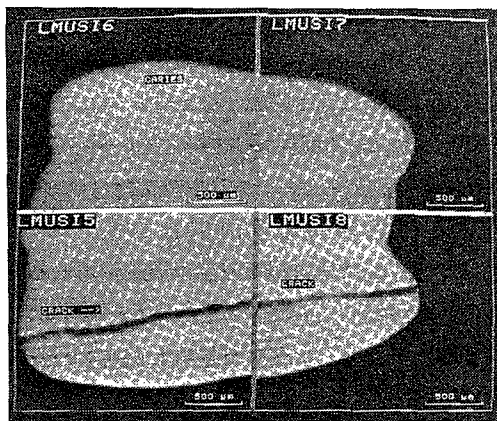
第3章で開発した方法とシステムに開口角の小さい音響レンズ型の超音波集束素子を用いるインパルス波超音波顕微鏡システムを構成して、歯の内部を非破壊的に観察するとともに、縦波伝搬特性を狭い領域で測定し、組織内での場所による変化を明らかにした。ここで構成したインパルス波超音波顕微鏡は、約130nsの非常に短い超音波パルスを発生するため、歯の内部にあるエナメル象牙境からの反射パルスと歯の表面からの反射パルスをAモード上で分離して測定できる。図3は、歯の唇側面を研磨し、その面に垂直に超音波を入射させた場合、その各反射信号によるCモードの超音波画像を示す。図3(a)の表面の画像には一定な明るさしか現れていないが、(b)の内部画像



(a) ヒト歯のエナメル質と歯科材料の比較

(b) ヒト歯と牛歯の比較

図2 歯及び歯科材料における伝搬減衰の周波数特性

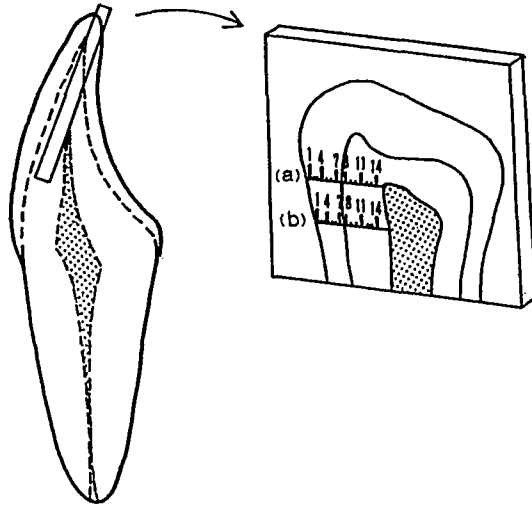


(a) 歯の表面

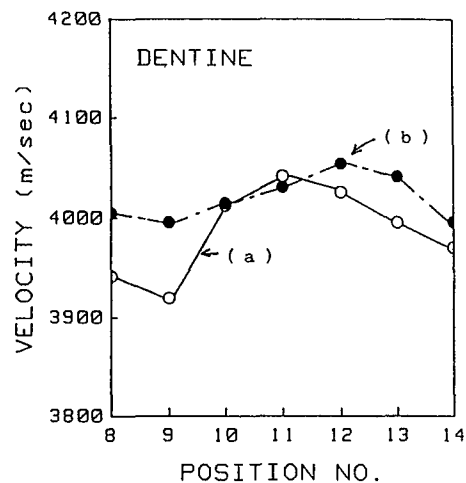
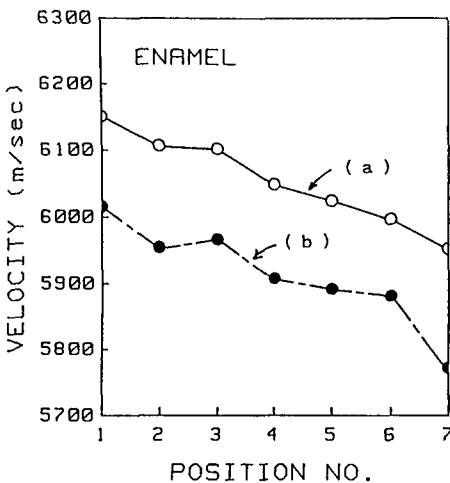
(b) 歯の内部 (エナメル象牙境中心)

図3 インパルス波超音波顕微鏡による歯の表面と内部の超音波画像

には、表面には現れていない齲蝕の部分明らかにコントラストされていることがわかる。これらの超音波画像は、将来、歯の超音波診断への応用につながるものと考えられる。しかしながら、そのような臨床的応用の基礎を作るためには、歯の組織内での弾性的性質が場所によってどの程度変化するかを予め定量的に把握する必要がある。そのため本章では、集束ビームの焦点近傍を平面波近似した測定を行い、その変化の程度を解明した。その結果、一個の歯の組織内でも音速と減衰の場所による変化はかなり大きく、次のような傾向を示すことがわかった。すなわち、歯軸方向における音速分布は、エナメル質では歯の切縁部分の音速が大きく、象牙質では逆に切縁部が小さい。また、深さ方向については、図4に示すように、エナメル質では歯の外側が最も大きく、エナメル



(a) 試料と測定点



(b) 各測定点における音速分布

図4 歯の深さ方向における音速分布

象牙境に近づくに従って徐々に減少し、象牙質では組織の中央部分の音速が最も大きい。これらの傾向も第3章の結果と同様に、従来の静的な方法による結果とほぼ対応するもので、本研究によってより具体的に解明することができた。一方、減衰はエナメル質では音速変化にほぼ逆比例する傾向を示すが、象牙質では明らかな関係は見られなかった。

ところで、本章で得られた測定値には超音波ビームの集束による影響が含まれているため、平面波による結果とは多少の差が生じる。本章では、その差の最大の原因となる試料の表面と底面でのモード変換の振舞いを実験的ならびに理論的に検討し、測定値に及ぼす影響について把握した。

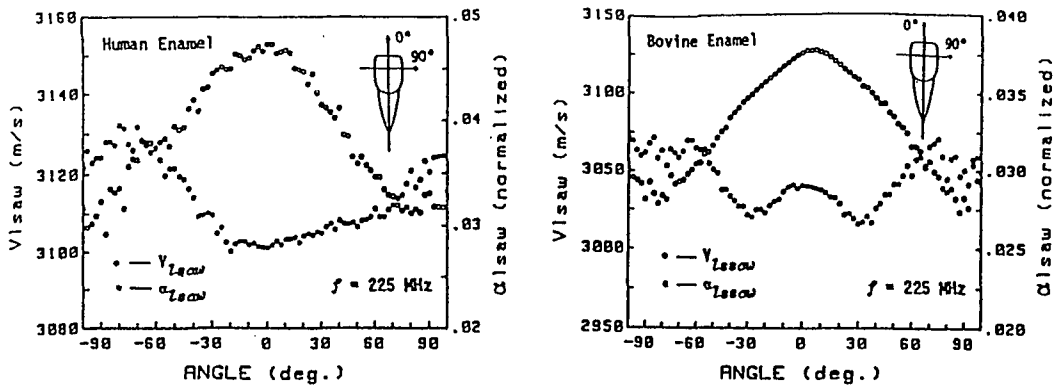
第5章 漏洩弾性波伝搬特性の測定による弾性的性質の評価

開口角の大きい音響レンズを用いることによって漏洩弾性波を試料表面に伝搬させ、その伝搬特性を測定することによって歯の硬組織及び歯科材料の弾性的性質を計測し、その特性を明らかにした。漏洩弾性波伝搬特性の計測には直線集束ビーム超音波顕微鏡による $V(z)$ 曲線解析法を導入した。その方法による歯及び歯科材料における漏洩弾性波の音速と伝搬減衰を表2に示す。音速測定値から、歯の硬組織及び歯科材料の $V(z)$ 曲線に寄与する漏洩弾性波モードは漏洩弾性表面波(LSAW)あるいは漏洩擬似縦波(LSSCW)であることを見出し、その各モードによって、異方性及び場所による変化を含む弾性的性質を明らかにした。その結果の一例として、ヒト歯と牛歯の各組織における異方性の測定結果を図5に示す。さらに本章では、初期齲蝕部分の高分解能超音波画像計測結果から齲蝕による組織構造の変化状態を観察し、歯科分野における高分解能超音波画像計測の有用性を示した。

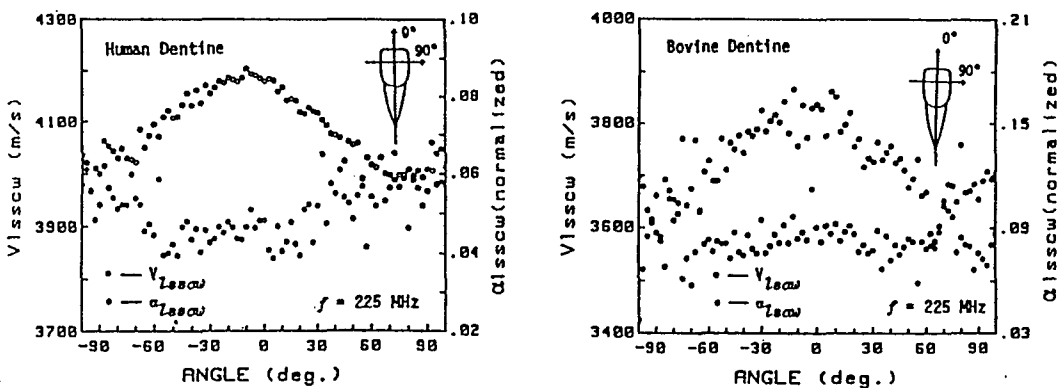
表2 歯及び歯科材料に対する $V(z)$ 曲線の解析結果と漏洩弾性波モード

		音速 (m/s)	伝搬減衰 (/波数)	V_{lsaw}^* (m/s)	θ_{lsaw}^* (°)	縦波音速 (m/s)	伝搬モード
エナメル質	ヒト	3153	0.027	—	—	6532	LSAW
	牛	3125	0.029	2747	32.7	5935	LSAW
象牙質	ヒト	4198	0.048	—	—	3650	LSSCW
	牛	3886	0.087	1682	61.8	3591	LSSCW
HAP		3581	0.028	3350	26.3	—	LSAW
歯科用陶材		3124	0.041	—	—	5713	LSAW
歯科用レジン		2986	0.064	—	—	3071	LSSCW

* J.L. Katz and K. Ukraincik; "On the anisotropic elastic properties of hydroxiapatite," J.Biomechanics, Vol. 4, pp.221~227 (1971) の弾性定数による計算値



(a) エナメル質



(b) 象牙質

図5 直線集束ビーム超音波顕微鏡によるヒト歯と牛歯のエナメル質及び象牙質における漏洩弾性波伝搬特性の異方性

第6章 結 論

本章は、本論文の結論である。

以上、本研究は、超音波顕微鏡と関連した計測技術を総合的に検討することによって、歯及び歯科材料の弾性的性質の計測を主目的とした歯科分野に超音波を応用するにあたっての基礎を築いたものである。

近年、数十メガヘルツ以上の超高周波超音波の計測技術は、超音波エレクトロニクス技術の発展とともに急速に進展しており、物質・材料のキャラクタリゼーション、非破壊評価などの分野における貢献は目ざましいものがある。医学・生体工学などに関連した分野においても、その技術の応用は着実に広がっている。歯科理工学分野においても歯科材料の開発及び評価、あるいは、生体

硬組織に適用できる診断装置の開発を目指した基礎研究などにおける応用価値は極めて大きい。今後、この分野の研究がさらに広がるとともに本研究で得られた成果が歯学分野における超音波技術の発展に寄与できることを期待する。

審 査 結 果 の 要 旨

歯や骨などの生体硬組織のミクロな領域における粘弾性的性質を解明することは、歯・医学分野はもとより、生体構造力学、生体材料学などの分野における重要な課題の一つであり、そのための超音波測定技術の確立が要望されてきた。

著者は、歯学分野の基礎研究手段として超音波顕微鏡を導入することを考え、それに伴う諸問題を系統的に検討して、高精度な計測法として確立させるとともに、その方法を適用して歯の硬組織及び歯科材料の弾性的性質を明らかにすることを目的として研究を行った。本論文はその成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、本研究を進めるにあたっての基礎知識として、歯の組織構造と構成成分及び歯科材料について概要を述べている。また、現在まで知られている機械的性質に関してまとめ、従来の測定法における問題点と本研究の必要性を明らかにしている。

第3章では、短いパルスの平面超音波を用いて、音速と減衰係数を精度よく測定する方法とシステムを開発している。本測定法を用いて歯のエナメル質と象牙質及び代表的な歯科材料である陶材と複合レジン基礎音響特性を測定し、各物質間の差異を定量的に明らかにしている。

第4章では、第3章で確立した測定法とシステムに開口角が狭い音響レンズを導入することによって、インパルス波超音波顕微鏡システムを構成している。そのシステムが歯の内部の齶蝕などの観察や評価に適用可能であることを示している。次に、組織内での縦波伝搬特性の空間的変化を測定して、その特性と歯の内部構造との関係について考察するとともに、前章の平面超音波による測定結果との差異を明らかにしている。これらは新しい知見である。

第5章では、開口角が広い音響レンズを使用した超音波顕微鏡システムを用いて、歯科試料のミクロな弾性的性質の解析法を開拓している。直線集束ビーム超音波顕微鏡を用いた漏洩弾性波の伝搬特性の定量計測、また、高分解能点集束ビーム超音波顕微鏡を用いた初期齶蝕部位の形態的観測などによって、超音波顕微鏡手法が歯学分野における新しい研究手段として有用であることを初めて明らかにしている。これは優れた成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、超音波顕微鏡を歯学研究分野に応用するにあたっての基礎を築いたもので、電気応用計測工学、生体超音波工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。