

氏名	千葉裕介		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第8529号		
学位授与年月日	平成30年3月23日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	ラブ波をプローブとして用いる基板上膜面の物性計測に関する研究		
主査	筑波大学	准教授	博士(工学) 海老原 格
副査	筑波大学	教授	工学博士 水谷 孝一
副査	筑波大学	教授	工学博士 藪野 浩司
副査	筑波大学	教授	工学博士 京藤 敏達
副査	筑波大学	准教授	博士(工学) 若槻 尚斗
副査	筑波大学	助教	博士(工学) 前田 祐佳
副査	防衛大学校	講師	博士(工学) 小笠原 英子

論文の要旨

本論文は、ラブ波をプローブとして用いることで、厚い材料(基板)表面に形成された薄膜である「基板上膜面」の物性を計測する手法の確立を目的としている。まず、基板上膜面の厚さ及び材料物性とラブ波の波動的性質の理論的關係を整理し、ラブ波の分散曲線が、特に基板上膜面の弾性、および、厚さによって大きく変化することを見いだしている。次に、ラブ波の伝搬を観測して得られた分散曲線と、基板上膜面の厚さと物性をパラメータとする理論曲線の差を最小化する最適化問題を解くことで、膜面の物性を計測する手法を確立している。さらに、金属表面の樹脂コーティングや塗膜など、既存、ないし、既設された基板上膜面におけるラブ波の伝搬を観測するため、レーザドップラ振動計を走査することによる振動分布の計測法を適用することを提案している。そして、金属製の基板上に形成した膜の厚さと物性を、一連の提案手法を用いて精度良く測定できることを実証している。

本論文は全5章で構成されており、概要は次に示す通りである。

第1章は、序論であり、本研究の背景、および、目的を説明している。具体的には、物性計測に用いられるバルク波やガイド波の分類や特徴を整理するとともに、金属表面の樹脂コーティングや塗膜など、既に存在している基板上膜面における物性計測の必要性を指摘している。そして、ラブ波をプローブとして用いることで、基板上膜面の物性を計測する手法を確立することを目的に定めている。

第2章では、本研究に関連する先行研究についてまとめている。まず、先行研究として、バルク波やガイド波を利用した物性計測手法について述べ、本研究の対象である基板上膜面の物性を計測する場合には、ガイド波の一種であるラブ波の利用が適していることを示している。そして、既に存在し

ている基板上膜面の物性計測に適した手法を確立するために実施すべき三項目として、1：基板上膜面の物性変化に対する分散曲線変化の定性的な把握、2：既存、ないし、既設された基板上膜面におけるラブ波の伝搬を観測する手法、3：観測されたラブ波の伝搬から基板上膜面の物性値を求める手法、を挙げている。

第3章では、基板上膜面の物性変化に対する分散曲線変化を定性的に把握するとともに、観測されたラブ波の伝搬から、基板上膜面の物性値を求める手法を提案している。まず、第3.1節において、計測対象である基板表面近傍を伝搬するラブ波の波動的性質について、基板および膜面を構成する材料が弾性体の場合について無次元特性方程式を導出し、ラブ波の分散曲線を数値計算により算出している。次に、材料が粘弾性体の場合に拡張し、同様に特性方程式の導出と、分散曲線の算出を行っている。そして、粘性のない弾性の膜面および弾性基板からなる基板上膜面の場合、および、粘弾性の膜面および弾性基板からなる基板上膜面の場合、いずれの場合においても、膜面の横波速度、あるいは、膜面の剛性率を変化させた場合を比較すると、ラブ波の分散曲線の変化は前者の方が大きいことを明らかにしている。加えて、粘弾性膜面の損失正接が増大するに従って、ラブ波の減衰係数の分散曲線は大きく変化することを明らかにしている。このことから、ラブ波の波数、および、減衰係数の分散曲線を測定することで、基板上膜面の粘弾性が計測できると結論づけている。さらに、基板上膜面を構成する材料が弾性体の場合、基板上膜面の物性のうち、特に弾性、および、厚さの変化に対して、ラブ波の分散曲線変化の感度が大きいことから、膜の弾性率と厚さについては精度良い計測が可能であると予想している。次に、第3.2節では、観測されたラブ波の伝搬から基板上膜面の物性値を求める手法を説明している。ラブ波の伝搬を観測して得られた分散曲線と、基板上膜面の物性を変数として、理論的に得られるラブ波の分散曲線の差を最小化する最適化問題を解くことで、ラブ波の伝搬観測結果から、基板上膜面の物性が計測できることが示されている。

第4章では、既存、ないし、既設された基板上膜面の物性を計測するため、第3章で確立した手法に対してレーザドップラ振動計を用いるラブ波計測を適用することにより、基板上膜面の物性を実際に計測できることを検証している。まず、膜面に対して平行な粒子変位を持つラブ波の伝搬特性をレーザドップラ振動計により直接観測する手法を提案している。そして、膜面に高分子材料（アクリル樹脂およびポリスチレン）、基板にアルミニウム合金を用いた基板上膜面の供試体を作成し、実際に観測された変位に対する時間応答の分布をフーリエ変換することで得られる波数スペクトルから、観測された波動がガイド波特有の速度分散性を有するラブ波であることを確認している。さらに、実験により観測されたラブ波の分散曲線は、ラブ波の特性方程式から計算される理論曲線とほぼ一致することを確認している。さらに、実験により得られた分散曲線のデータと、第3章で確立した手法を用いて、基板上膜面の物性を実際に計測した結果、基板上膜面の横波速度と厚さについては、約6%程度の精度で計測することができたと結論づけている。

第5章では、第2章から第4章で得られた成果をまとめている。すなわち、レーザドップラ振動計を用いてラブ波を基板上膜面において観測することで、既存、ないし、既設された基板上膜面の物性計測を実現する手法が確立された。それを踏まえ、今後の展望も述べられている。

審査の要旨

【批評】

本論文は、ガイド波の一種であるラブ波を対象である基板上膜面へ伝搬させ、その伝搬特性をレーザドップラ振動計で測定することで、基板上膜面の材料物性を計測する手法の確立を目的としている。これまでも、ラブ波を用いる基板上膜面の物性計測に関する研究は存在したが、実環境での利用を想定した計測手法は提案されていないことなどから、レイリー波やラム波など、他のガイド波を用いる材料物性計測手法に比べ、あまり活用されてきたとは言いがたい。そのような現状にあって、本論文では、レーザドップラ振動計を用いて、基板上膜面において観測される振動分布よりラブ波の進行波だけを計測するシステムを考案し、実利用環境においてラブ波の波動的特性から、基板上膜面の供試体の弾性特性を計測する手法を提案しているという点で独創的であり新規性が認められる。

また、本論文は、測定対象である基板上膜面それ自体が、ある条件を満たせば、表面近傍に波動のエネルギーを局在させる作用を持つことに着想を得たものであり、それによって既に存在している層状構造体の、表面層の剛性率や厚みを直接測定するプローブとしてラブ波が利用できることを見出し、その有効性を実験により確認した点は特に高く評価できる。本論文の成果を発展させることで、実環境における基板上膜面の材料物性計測の技術が確立され、非破壊検査等の工学分野への寄与が期待される。

【最終試験の結果】

平成30年1月25日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。