

超短光パルスを用いた結晶の弾性表面波のイメージング

学位論文内容の要旨

池に石を投げ込んだ時、水面には円形の"波紋"が発生する。これと同じように、波紋は固体表面においても発生する。しかし、固体の波紋を人間の目で直接見ることは、ほぼ不可能である。それは身近に発生している固体の波紋は、一秒間に 1km~10km もの距離を進む速さで伝播し、その振動振幅は原子の大きさと同じオーダーのためである。肉眼では見えない固体の波紋がどのような波面の模様をしているのか、どのように伝播するのかを想像することは容易なことではない。その伝播特性を最もよく理解するための有効な手段の一つは、固体の波紋を直接“見る”ことである。本研究では、その固体の波紋を可視化(イメージング)することに成功した。即ち、固体の波紋の伝播特性を調べるための優れた手法を開発したのである。

一般に、固体の表面に沿って伝播する弾性波のモードの一つを弾性表面波(SAW: surface acoustic waves)と呼び、固体の波紋はその弾性表面波の伝播によってあらわれる。その伝播特性は水面の波紋の伝播とは違った性質を示す。例えば、結晶表面の点波源から発生させた弾性表面波は、結晶の弾性的異方性のため波の位相速度が伝播方向に依存するので、波面はもはや円形とはならない。この結果として、弾性波によって運ばれるエネルギーの大きさは、伝播方向に強い依存性を示し、表面フォノン集束効果と呼ばれる現象を生じる。この表面フォノン集束効果は物理的興味からだけではなく、弾性表面波デバイスへの応用面からも興味が増大している。表面弾性波の伝播する距離が比較的長く、伝播を妨げるものがない場合、その理論的解析は容易である。しかしながら、デバイスなどにこの効果を用いる場合、弾性波の伝播を妨げる構造が絶えず存在し、そのための解析は大変困難なものとなる。この事情を鑑みると、実験的に弾性波の伝播を実時間で追跡することが可能になれば、多種多様な構造への応用が可能になるばかりでなく、表面弾性波の物理的な現象の解明にも著しく貢献すると期待される。しかしながら、固体表面の弾性波の伝播を追跡する技術、即ち実時間2次元イメージングを行う技術はこれまでなかった。

弾性表面波を用いた電子デバイスは、TV用フィルタ、VTRのRFモジュレーター、携帯電話のRFフィルタやIFフィルタなどに幅広く使用されており、“SAWデバイス”としてエレクトロニクスの分野において、今やなくてはならない電子デバイスとなっている。このSAWデバイスに対して現在用いられる弾性表面波の周波数は、数百MHz~数GHzにまで到達している。また弾性表面波は、レーザー超音波技術の発達によって、よりいっそう興味もたれている。それは、光によって弾性表面波を励起・検出することによって、測定対象を破壊せずに物質表面近傍の構造、および物質の弾性的・熱的性質を得ることができるからである。

このように多くの応用の可能性を持つ弾性表面波の本質を理解し、新たな応用への道筋を明らか

にするため、本研究では、弾性的異方性物質、表面に薄膜構造を持つ物質、表面にマイクロ構造を持つ物質の表面を伝播する弾性表面波を、時間・空間領域において直接“見る”ことによってその伝播特性を直感的に理解し、その上で定量的な解析を行うことを目的とする。

本研究では、透明基板に金属薄膜を真空蒸着した試料表面において、周波数領域 100 MHz~1 GHz の弾性表面波の伝搬を、動画として観測を行っている。測定は、フェムト秒光パルスレーザーを用いたポンプ・プローブ分光法によって行う。まず励起光パルスを透明基板側から直径およそ 2 μm に集光して金属薄膜に照射する。これにより金属薄膜に光吸収、および温度上昇を引き起こし、熱弾性的に弾性表面波を励起する。そして、検出光パルスを試料の表面側から照射し、我々のグループで開発した超高速現象用の光干渉計により、弾性表面波の伝搬を観測する。イメージングは、光パルスを集光する対物レンズを 2 次元走査することによって行われる。この方法では、弾性表面波の伝播によって引き起こされた pm オーダーの表面変位の信号を、ps の時間分解能、 μm の空間分解能でイメージングすることができる。

この測定方法によって観測された固体の波紋（弾性表面波）を図 1 に示す。図 1 (a) は弾性的等方的物質であるガラスを基板とした試料表面におけるある時刻の弾性表面波イメージである。図 1 (b)、(c) はそれぞれ弾性的異方性物質である立方晶系単結晶 LiF(100)面、正方晶系単結晶 TeO₂(001)面を基板とした試料表面における弾性表面波イメージである。試料の表面には、それぞれ膜厚が数十 nm の金の薄膜が真空蒸着されている。それぞれの表面波イメージをみると試料の弾性的な対称性を反映した表面波の波面を示している。このように本実験の測定法は、空間的に複雑な波面をもって伝播する弾性表面波の観測に非常に有効である。

本論文は以下のように構成される。第 1 章では、異方性物質を伝播する弾性波に関する研究、レーザー超音波技術に関する研究、弾性表面波を用いた物性評価に関する研究、に関する背景を述べる。第 2 章では、弾性表面波の定式化を行い弾性表面波の基本的な特性や計算方法について述べ、弾性表面波速度の周波数分散と角度分散に対する実際の数値計算結果を記す。第 3 章では、ポンプ・プローブ分光法と変形 Sagnac 光干渉計を基礎とした弾性表面波の時間分解イメージング法について説明する。第 4 章では、等方性試料において観測された弾性表面波の時間分解イメージングについて考察する。第 5 章では、時間分解イメージングデータから弾性表面波の分散関係イメージを取得する二つの定量的解析法について述べる。そして、コンピュータシミュレーションデータと第 4 章で観測された実験データに対しその解析法を適用し、そのフーリエ解析方法に対する評価する。第 6 章では、時間分解イメージング法を様々な単結晶基板材料に適用した結果を示す。そして、単結晶を伝播する表面波の伝播特性を定性的・定量的に考察する。第 7 章では、表面にマイクロ構造を持つ試料に対して測定を行った結果を示す。第 8 章では、本研究の成果を総括し今後の展望を述べる。

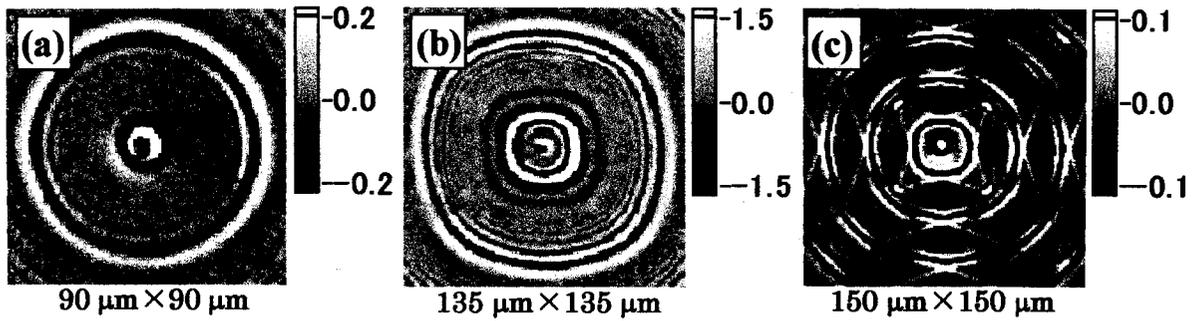


図1: ある瞬間の弾性表面波イメージ; (a) 70nm の金薄膜が真空蒸着されたクラウンガラス(等方性試料)。(b) 50nm の金薄膜が真空蒸着された立方晶系単結晶 LiF (100) 面。(c) 40nm の金薄膜が真空蒸着された正方晶系単結晶 TeO_2 (001) 面。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 オ リ バ ラ イ ト
副 査 教 授 田 村 信 一 朗
副 査 教 授 田 中 啓 司

学 位 論 文 題 名

超短光パルスを用いた結晶の弾性表面波のイメージング

池に石を投げ込んだ時、水面には円形の"波紋"が発生する。これと同じように、波紋は固体表面においても発生する。しかし、固体の波紋を人間の目で直接見ることは、ほぼ不可能である。それは身近に発生している固体の波紋は、一秒間に $1\text{km}\sim 10\text{km}$ もの距離を進む速さで伝播し、その振動振幅は原子の大きさと同じオーダーのためである。肉眼では見えない固体の波紋がどのような波面の模様をしているのか、どのように伝播するのかを想像することは容易なことではない。その伝播特性を最もよく理解するための有効な手段の一つは、固体の波紋を直接“見る”ことである。本研究では、その固体の波紋を可視化（イメージング）することに成功した。

一般に、固体の表面に沿って伝播する弾性波のモードの一つを弾性表面波(SAW : surface acoustic waves)と呼び、固体の波紋はその弾性表面波の伝播によってあらわれる。弾性表面波を用いた電子デバイスは、TV用フィルタ、VTRのRFモジュレータ、携帯電話のRFフィルタやIFフィルタなどに幅広く使用されており、“SAWデバイス”としてエレクトロニクスの分野において、今やなくてはならない電子デバイスとなっている。このSAWデバイスに対して現在用いられる弾性表面波の周波数は、数百MHz～数GHzにまで到達している。このような高周波数の弾性表面波の本質を理解し、新たな応用への道筋を明らかにするため、本研究では、弾性的異方性物質、表面に薄膜構造を持つ物質、表面にマイクロ構造を持つ物質の表面を伝播する弾性表面波を、時間・空間領域において直接“見る”ことによってその伝播特性を直感的に理解し、その上で定量的な解析を行うことを目的とする。

本研究では、透明基板に金属薄膜を真空蒸着した試料表面において、周波数領域 $100\text{MHz}\sim 1\text{GHz}$ の弾性表面波の伝搬を、動画として観測を行っている。測定は、フェムト秒光パルスレーザーを用いたポンプ-プローブ分光法によって行う。まず励起光パルスを透明基板側から直径およそ $2\mu\text{m}$ に集光して金属薄膜に照射する。これにより金属薄膜に光吸収、および温度上昇を引き起こし、熱弾的に弾性表面波を励起する。そして、検出光パルスを試料の表面側から照射し、我々のグループで開発した超高速現象用の光干渉計により、弾性表面波の伝搬を観測する。イメージングは、光パルスを集光する対物レンズを2次元走査することによって行われる。この方法では、弾性表面波の伝播によって引き起こされた pm オーダーの表面変位の信号を、 ps の時間分解能、 μm の空間分解能でイメージングすることができる。本手法のように光によって超音波（弾性表面波）を励起・検出する技術は

“レーザー超音波技術”と呼ばれている。レーザー超音波技術は、測定対象を破壊せずに物質表面近傍の構造、および物質の弾性的・熱的性質を得る非破壊評価法として、近年非常に興味をもたれている。

本論文は以下のように構成される。第1章では、異方性物質を伝播する弾性波に関する研究、レーザー超音波技術に関する研究、弾性表面波を用いた物性評価に関する研究、に関する背景を述べる。第2章では、弾性表面波の定式化を行い弾性表面波の基本的な特性や計算方法について述べ、弾性表面波速度の周波数分散と角度分散に対する実際の数値計算結果を記す。第3章では、ポンプ・プローブ分光法と変形 Sagnac 光干渉計を基礎とした弾性表面波の時間分解イメージング法について説明する。第4章では、等方性試料において観測された弾性表面波の時間分解イメージングについて考察する。第5章では、時間分解イメージデータから弾性表面波の分散関係イメージを取得する二つの定量的解析法について述べる。そして、コンピュータシミュレーションデータと第4章で観測された実験データに対しその解析法を適用し、そのフーリエ解析方法に対する評価を行う。第6章では、時間分解イメージング法を様々な単結晶基板材料に適用した結果を示す。そして、単結晶を伝播する表面波の伝播特性を定性的・定量的に考察する。第7章では、表面にマイクロ構造を持つ試料に対して測定を行った結果を示す。第8章では、本研究の成果を総括し今後の展望を述べる。

これを要するに、筆者は、弾性表面波の観測方法およびその伝播特性に関する新知見を得たものであり、弾性的異方性材料、薄膜構造材料、マイクロメータ構造を持つ材料を伝播する弾性表面波特性の解明に対して貢献するところ、大なるものがある。よって筆者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。