

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 中野英俊

本論文は、遠隔性に優れたレーザと、内部透過性をもつ超音波の技術融合により、材料化学を始めとする広範な材料分野について、高温材料の開発、材料特性の評価、プロセス中での材料検査に資する新たな計測手法を提案したものである。特に、本論文では遠隔計測の十分な活用を検討の中心課題として位置づけ、高温等の極限環境での応用を想定した技術開発についてとりまとめた。

益々高度化、精密化する最近の材料の開発・製造プロセスにおいて、計測技術は従来以上に重要な位置を占めつつあり、同時に極限環境への対応、in-situ 性の付与、材料内部のモニタリング等の高度な機能が求められている。従来の超音波技術が、高温、移動物体、in-situ 等の最新の計測要求に十分に 대응することができないため、レーザ光を用いた非接触の超音波技術（レーザ超音波）が近年活発に研究され、優れた研究成果が生まれている。しかし、現状のレーザ超音波は、測定対象の表面性状や遠隔距離により著しく測定感度が悪化し、これにより応用範囲が制限されていることが多い。このような背景の下で、本論文では現状の欠点を克服し、遠隔計測を十分に活用するための要素技術の開発を積み重ね、実証実験により本技術の可能性を明らかにした。

第1章では、本研究の主テーマであるレーザ超音波技術の特長、有用性に関する考え方を整理し、次に遠隔計測により可能となる物性評価技術、超音波計測技術についての意義を明確にして、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、従来の接触超音波技術と比較して劣っていた測定精度の向上を図り、材料化学における高温材料の開発や評価への応用を意図した高温固体の精密音速測定手法を提案した。ここでは、超音波の位相情報を積極的に利用することを提案し、位相情報を付与するため複数台のパルスレーザによる励起用光学系を構成し、特定周波数の超音波を励起する装置を試作した。これにより、従来法と比較して測定分解能が1桁改善されることを実証した。また、無機材料等について1000°C程度までの高温音速測定を行い、耐熱高温材料の物性評価手法として非常に有効であることを示した。さらに、測定対象を薄板や薄膜に拡張し、位相情報の利用により特定周波数の板波から音速を測定する手法を提案した。これにより、従来測定が困難であった薄板脆性材料であるセラミックスやアモルファス薄板の高温力学特性を評価した。

第3章では、前章で示した材料評価手法をより多様な材料に適用するため、光学的に粗い表面をもつ試料を遠隔から光計測する技術を課題として設定した。ここでは、フォトリフラクティブ結晶を利用した非線形光学手法を用いて、光波面を任意に変換する技術に着目した。超音波検出に必要な波面変換の要件として、1) 検出帯域が広いこと、2) 外乱振動に強いこと等の条件を示し、従来の波面変換手法では、これらの条件を十分に満足できないことを示した。そこで、新たな検出法としてMPPC(mutually pumped phased conjugation)による波面変換が適切であることを初めて指摘し、これらの考察および性能実験の結果をもとに、波面変換効率の高いBaTiO₃結晶を組み込んだ独自の光干渉計を考案した。

試作した干渉計を溶射膜や熔融金属の音速測定に適用して、装置の有効性を実証した。溶射膜の測定では、微弱光でも位相共役光が形成され計測が可能であった。また、極限計測への適用例として、半導体の固体から融液に至る連続的な音速測定を示した。レーザ超音波の適用により初めて可能となる計測法であり、融点近傍の固体や融液の力学的挙動を精密に測定できる可能性を示した。

第4章では、十分な遠隔距離を保って必要な測定感度を得るための計測条件を検討した。始めに、遠隔距離の確保には高出力レーザ光源の使用が不可欠であることを量子雑音との関係から示し、この実現のためパルスモードレーザ光源を開発した。開発した光源は等価的に1kWの出力を持ち、また干渉性も高いことを実験により確認した。しかし、パルス光源自身の強度変動が測定感度に影響することも判明した。そこで、実環境での計測性に優れた共焦点ファブリペロー干渉計を改良し、偏光を利用して新たに差動機能を付与した干渉計を考案した。これにより、パルス光源の強度変動を差動により相殺して超音波信号だけを検出することを可能とした。

これらの試作装置を、いくつかの材料検査に適用し、装置の有効性を実証した。遠隔からの模擬欠陥検査では、1m程度離れた距離において厚さ10mmの試験片にあけた直径1mmのドリル穴の超音波イメージが明瞭に得られた。次に、疲労き裂を欠陥と見なして、き裂内を伝播する表面波により疲労き裂が検出でき、さらに高温環境でも測定できることを見いだした。これらの結果から、材料の製造・加工で発生しやすい細い欠陥の計測手段としても有効であることを示した。

第5章では、第3章、第4章で検討した光干渉計の絶対感度の向上を図るため、高強度のレーザ光と干渉の暗フリンジを利用する干渉計について検討した。感度の向上には高出力レーザの使用が不可欠であるが、現実的には光検出器の飽和が検出感度を制限することを指摘した。そこで、光干渉縞の暗フリンジを作動点とする干渉計を、超音波の検出に用いることを初めて提案し、この結果を基にマイケルソン干渉計を構成した。試作装置を用いて振動子とレーザにより励起された超音波の測定を行い、信号平均なしに10pm程度の超音波信号の検出が可能となることを示した。これは、暗フリンジ干渉計の効果を顕著に示すものであった。さらに、より高い汎用性を得るため、共焦点ファブリペロー干渉計による暗フリンジでの検出を検討し、原理的には共焦点ファブリペロー干渉計を用いた暗フリンジ干渉が可能であることを示した。

以上要約したように、本研究ではレーザ超音波技術を主に高温等の極限環境で利用するための技術課題について検討し、課題解決を目的とした新規の計測手法を提示した。本論文において示した、位相情報を利用した音速測定、位相共役技術による光波面の変換、高強度レーザと差動干渉計の併用は、遠隔計測において共通的に有効な手法であり、歴史の浅い本技術の技術基盤に資するものである。また、論文の最後に提案した検出感度の向上手法は、本技術のさらなる高度化への指針を示したものと考えられる。

以上のことから、本論文は工学博士の学位にふさわしい内容を持つものと判断した。