



Title	電磁超音波センサによる非接触・高感度な超音波計測技術の開発と金属材料損傷評価への応用
Author(s)	滝下, 峰史
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105427
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (滝 下 峰 史)

論文題名

電磁超音波センサによる非接触・高感度な超音波計測技術の開発と金属材料損傷評価への応用

論文内容の要旨

社会インフラや産業設備の安全性・信頼性の確保は極めて重要であり、特に、金属疲労と応力腐食割れの早期検出および残存寿命評価技術の確立は最重要課題である。本研究は、電磁超音波センサ (Electromagnetic acoustic transducer, EMAT) を用いた非接触かつ高感度な超音波計測技術を開発し、金属材料における疲労損傷やSCCなどの重要な損傷の早期検出および残存寿命評価に資する基盤技術を確立することを目的とした。具体的には、炭素鋼のねじり疲労に伴う超音波減衰および音速の変化挙動とそのメカニズムを解明した。また、局所的な欠陥検出の非接触・高感度検出を目的として、SV 波点集束型EMAT (SV-wave point-focusing EMAT, PF-EMAT) を独自に開発し、従来のEMATと比較して、信号強度、欠陥検出感度を飛躍的に改善することに成功した。さらに、PF-EMATを非線形超音波法に応用し、非線形3波相互作用の非接触測定手法を開発した。接触界面、塑性変形、金属疲労の各評価に本手法を適用し、その有効性を実証した。以下に本論文の構成と要点を示す。

(第1章) 本研究の背景を述べ、本論文の研究目的と構成を示した。

(第2章) 電磁超音波共鳴法を用いた金属疲労評価手法の原理を示した。

(第3章) 軸対称SH波を用いた電磁超音波共鳴法により、炭素鋼のねじり疲労に伴う超音波減衰および音速の変化挙動とそのメカニズムを解明した。ねじり疲労評価は産業上極めて重要な課題であるが、ねじり疲労による超音波特性変化を体系的に解明した研究は存在せず、本研究はその初めての試みである。減衰係数については、一般的な疲労に対する超音波挙動と同様に、寿命終盤に急激な増加を示した。一方で、音速については、疲労初期に増加し、その後低下へ転じるという、従来の疲労研究では報告例のない異常な現象を発見した。この音速の増加は、回転曲げ疲労や引張圧縮疲労、片振り引張疲労では見られず、ねじり疲労に特有である。この結果は、疲労損傷の進展に伴う欠陥の増加が巨視的な弾性定数を低下させ、その結果として音速が単調に減少するという従来の理解と相反するため、重要な知見である。そのメカニズムを解明するために、組織観察、X線残留応力測定、理論的考察により要因を網羅的に分析した結果、残留応力の蓄積 (音弾性効果) と微量固溶元素の析出による剛性率増加が主な要因であると結論づけた。

(第4章) 局所的な欠陥検出の非接触・高感度検出を目的として、PF-EMATを独自に開発した。PF-EMATは、SV 波を焦点に同位相で集束させることにより、従来のEMATと比較して、信号強度、欠陥検出感度を飛躍的に改善することに成功した。具体的には、従来の斜角入射型EMATの約3.8倍、線集束型EMATの約2.4倍の変位振幅を達成した。エネルギー比にすると、それぞれ14.4倍および5.8倍である。さらに、探傷性能評価の結果、従来のEMATでは検出困難であったステンレス鋼管のSCC の検出にも適用できることを実証した。

(第5章) PF-EMATを非線形超音波法に応用し、非線形3波相互作用の非接触測定手法を開発した。非線形超音波法は、転位やマイクロクラックなど微細損傷に感度を有し、非破壊検査への応用が期待されている。しかしながら、従来の圧電トランスデューサによる測定では音響結合剤の影響を受けやすく、測定信頼性や実用性に課題があった。非線形3波相互作用とは、材料中で2つの入射波が交差する時、交差領域における材料非線形性によって入射波の周波数の和および差の周波数成分を持つ第3波が生成される現象である。非線形3波相互作用は2波の交差領域のみで発生し、なおかつ、入射波の周波数を適切に選ぶことにより、他の要因からも発生する高調波成分と分離することができるため、材料非線形性の選択的評価を実現する。本研究では、駆動周波数の異なる2つのPF-EMAT を用いてSV波を共通の焦点に集束させることで、非線形3波相互作用を非接触で励起し、集束領域における局所的な材料非線形性の評価を可能とした。接触界面、塑性変形、金属疲労の各評価に本手法を適用し、有効性を実証した。

(第6章) 本研究のまとめ、および、今後の展望を示した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (滝 下 峰 史)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	荻 博次
	副 査	教授	佐野 泰久
	副 査	教授	森川 良忠
	副 査	教授	桑原 裕司
	副 査	教授	渡部 平司
	副 査	教授	有馬 健太
	副 査	教授	大参 宏昌
	副 査	教授	山村 和也
副 査	教授	林 高弘	

論文審査の結果の要旨

昨今の社会インフラや産業設備の老朽化は極めて重大な社会問題となっており、安全性・信頼性の確保のための精度の高い非破壊検査技術の開発は重要な課題である。特に、金属疲労や応力腐食割れは、多くのインフラ設備において問題となっている損傷要因であるため、これらの早期検出および残存寿命評価技術の確立は最重要課題である。

本研究では、申請者は、電磁超音波センサ (Electromagnetic acoustic transducer, EMAT) を用いた非接触かつ高感度な超音波計測技術を開発し、金属材料における疲労損傷や応力腐食割れなどの重要な損傷の早期検出および残存寿命評価に資する基盤技術を確立している。疲労研究においては、炭素鋼のねじり疲労に伴う超音波減衰および音速の変化挙動とそのメカニズムを解明しており。また、局所的な欠陥検出の非接触・高感度検出を目的として、横波超音波を金属材料内の 1 点で集束させる SV 波点集束型 EMAT (SV-wave point-focusing EMAT, PF-EMAT) を独自に開発し、従来の EMAT よりも、信号強度、欠陥検出感度を飛躍的に改善することに成功している。さらに、PF-EMAT を非線形超音波法に応用し、非線形 3 波相互作用の非接触測定手法を開発した。接触界面、塑性変形、金属疲労の各評価に本手法を適用し、その有効性を実証している。特に、PF-EMAT を用いた非線形 3 波相互作用の非接触測定手法の提案においては、周波数の異なる 2 つの PF-EMAT の焦点を金属材料内で一致させ、その部位に限定した局所的非線形量の非接触検出に世界で初めて成功しており、接触界面、塑性変形、金属疲労への有効性を実証した。

以上のように、申請者の開発した非接触電磁超音波技術は、新規性・独創性が極めて高く、また、非接触計測可能なため実用性も高いため、社会インフラの安全性確保に大きく貢献することが期待される。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。