

氏名	Yi(Lee) Jin Yi 李 鎮 伊
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4章第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)航空宇宙工学専攻
学位論文題目	磁気光学探傷システムの開発に関する研究
指導教官	東北大学教授 庄子 哲雄
論文審査委員	主査 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 関根 英樹 東北大学教授 坂 真澄 東北大学教授 羽根 一博

論文内容要旨

本論文は、稼働中の原子力発電設備などの接近困難な場所における遠隔探傷、探傷精度の向上及び検査者の疲労軽減のための自動探傷、探傷感度の影響因子であるきずと励磁方向との交差角度の影響を除去することにより多重き裂に適用、き裂の画像データ及び漏洩磁束分布を同時に得ることによる欠陥情報の多様化、強磁性材料及び常磁性材料の構造物での探傷が可能である新しい磁気光学探傷システムの開発に関するものである。

第1章では本研究の背景となる非破壊探傷法の必要性及び役割について概説し、非接触的な非破壊探傷法の一つである従来の磁気光学探傷法の解決すべき課題と本研究の目的を示した。

第2章では磁気光学効果と磁気光学センサーによる非接触型非破壊探傷として提案されている、磁気光学渦流探傷法、磁気光学漏洩磁束探傷法および偏光顕微鏡を用いた探傷法を励磁方法、センサーにより検出する対象、探傷方法及び装置の構成から検討し、これらの探傷法が有する

- 1) 複雑な配管構造あるいは危険であり人が接近困難な場所での遠隔探傷が困難である
- 2) き裂の長さ方向と励磁方向との成す角度が探傷能力に大きな影響を及ぼすことから、多重き裂などの複雑な欠陥への適用性が明らかでない
- 3) 探傷した欠陥を解析する際に用いるデータは磁区の模様或いは漏洩磁束による光量の分布のみであることから生じるエラーは避けられない
- 4) 人により探傷するので検査者の知識及び熟練度が必要になるなどの解決すべき課題を指摘し、本論文の目的を明確にした。

第3章ではセンサー平面に垂直方向に磁化容易軸を有するMOセンサーのヒステリシス現象を実験的に検討し、磁区のファラデー効果を理論的に考察、その上ファラデー効果と光透過性による磁壁の観察と磁壁による回折などの新たな特性を調べた結果、次の知見が得られた。

- 1) MOセンサーはその膜厚と飽和に至る磁界の強さによって、ヒステリシス特性の大きさが決まる。
- 2) 磁区のファラデー効果を用いることにより、MOセンサーに転写するき裂の情報をイメージとして観察するのは勿論、反射光量から漏洩磁束の分布を調べることが可能である。
- 3) ファラデー効果のみではなく、その光透過性を用いることにより磁壁の観察が可能である。磁壁の存在有無及びその密度を用いることにより遠隔探傷が可能である。
- 4) 磁壁は半透明な細線として見なすことが可能であり、そのため遠隔探傷の時、レーザーと磁壁による回折現象が起こる。この回折現象により遠隔探傷の時に探傷結果の分解能を高める。

また、垂直磁化方法を理論的、実験的に考察することにより、従来 of 解決すべき課題であったきずと励磁方向との交差角度による影響を除去することが可能であり、多重き裂の探傷へ有効であることを検証した。その上、相直交する2方向からの極間式水平励磁は勿論、垂直励磁を一つの励磁器と多数のリレースイッチを有するスキヤナ、そしてコンピュータにより連続的に繰り返すことが可能な総合的励磁システムを実現した。

以上述べた原理に基づいて、光源及び光学系、セパレータ及び探傷部、そしてデータ処理・電源部からなる新しい磁気光学探傷システムを開発した。本システムは光源・光学系の配置によりMOセンサーに転写するき裂の画像データは勿論、漏洩磁

束を示す光量データを同時に取り出すことが可能であり、き裂情報の多様化を実現した。

第 4 章では新しい磁気光学探傷システムによる遠隔および自動探傷法について述べた。ここで、遠隔探傷が可能になるのは

- 1) 遠距離でも光の広がりほとんどなく直進性を保つレーザとビームエキスパンダを光源として導入し、
- 2) MO センサーの新たな特性である磁壁の光透過性を用いて
- 3) 磁壁によるレーザ光の回折を用いることより、画像データの分解能を高めることが可能であるからである。

また、新しく開発した磁気光学探傷システムは

- 1) き裂の情報が光学的な経路により伝送するので、電気ノイズの減衰における検査者の熟練度を必要としない
 - 2) 探傷に用いる物理的なエネルギーが、超音波のように試験片表面から反射するのではなく、MO センサーから反射する光などで、試験片との接触条件が探傷性能に影響を受け難い
 - 3) MO センサーを試験片表面と均一でありながら、小さいリフトオフにする以外は、探傷姿勢における検査者の熟練度を必要としない
 - 4) 体積と重量を占める光源・光学系(Main system)とデータ処理・電源部(Processor)がセパレータ・検出部(Separator & Detector)と分離されている
 - 5) 光の伝送をフレキシブルな光ファイバとイメージコンジットにより行っている
 - 6) セパレータ・検出部をコンパクトに設計している
- 等の特徴を有し、従って自動探傷が可能である。

第 4 章の後半は MO センサーより曲面を有する構造物の高感度探傷方法について述べた。MO センサーが脆性材料の希土類ガーネットをベースにし、曲げることが困難であることから、従来の磁気光学探傷法では配管内壁などの曲面を有する構造物の探傷に関する研究は見当たらない。そこで、本論文では

- 1) 狭い幅の MO センサーと漏洩磁束の垂直成分を用いる方法
- 2) 曲面に沿って加工した MO センサーと漏洩磁束の水平成分を用いる新しい方法の配管内壁に存在する微小き裂の探傷のための二つの方法を提案した。

第 5 章では欠陥の情報として画像データのみではなく、漏洩磁束の分布も取り出

すことが可能である新しい磁気光学探傷システムと磁気光学渦流探傷法で用いた渦電流による励磁方法を導入することにより

- 1) 常磁性材料に存在する欠陥を対象に
- 2) 画像データ及び光量データを同時に取り出すことが可能な

非破壊探傷法を提示した。

さらに、常磁性材料(SUS304)の板材試験片に導入した切欠き欠陥を対象に実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 高周波数の励磁電流より低周波数の場合が、より大きな欠陥先端情報を示す。
- 2) 常磁性材料を対象にする磁気光学探傷システムの検出能力は検出可能な最小深さが2mmであり、最小長さは5mmであった。
- 3) 欠陥が深くなるとその両端で漏洩磁束が大きくなり、磁壁密度が増えることを光量により定量的に表すことが可能である。即ち、欠陥の深さが画像及び光量データと密接な相関関係を有している。
- 4) 欠陥からの漏洩磁束の大きさは欠陥の幅の変化に殆ど影響を受けない。
- 5) 欠陥長さの変化は、欠陥の深さと同じく画像及び光量データと密接な相関関係を有する。

第6章は本論文の結論である。新しく開発した磁気光学探傷システムにより、稼働中の原子力発電設備などの接近困難な場所における遠隔探傷、探傷精度の向上及び検査者の疲労軽減のための自動探傷、探傷感度の影響因子であるきずと励磁方向との交差角度の影響を除去することにより多重き裂に適用、き裂の画像データ及び漏洩磁束分布を同時に得ることによる欠陥情報の多様化、強磁性材料及び常磁性材料の構造物での探傷が可能になった。

審査結果の要旨

多くの機器構造物において、高経年化が進みその健全性、安全性に重大な関心が払われている。原子力機器構造物の寿命予測においては欠陥の高精度計測と合わせて、遠隔探傷、自動探傷、高速探傷への期待が大きく、例えば画像情報による探傷等を含む欠陥情報の多様化が要求されている。

本論文は、光探傷法の一つである磁気光学素子を用いた新しい探傷システムの開発に関する研究を取りまとめたものであり、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、これまで磁気光学効果を用いて提案されている磁気光学渦流探傷法、磁気光学漏洩磁束探傷法および偏光顕微鏡を用いた探傷法について現状を概括し、各々の特徴を比較検討するとともに遠隔探傷、自動探傷、高速探傷における各々の問題点を明らかにしている。

第3章では、磁気光学素子のヒステリシス現象を実験的に検討し、ファラデー効果による磁区観察に加えて、新たに見出した磁壁密度による光透過性の変化、さらには磁壁による光の回折等に着目し強磁性体におけるき裂情報の多様化を実現し遠隔探傷および探傷の高精度化への道を開いた。さらに多重き裂探傷を可能とする垂直磁化方法を新たに提案し、その有用性を数値計算および実験により確認している。これらの新たな知見を集約し、従来にない新しい磁気光学探傷システムを開発した。これは光探傷法において独創的な成果である。

第4章では、さらに光源および情報伝送系に工夫を加えた新しい磁気光学探傷システムを用いて遠隔探傷および自動探傷を実現している。具体的には、レーザおよびビームエキスパンダーを光源として導入し、光ファイバーとイメージコンジットにより情報を伝送し、磁壁の光透過性を用いることによりこれらを可能としたものであり、本システムの有効性を配管の内壁に存在する微小腐食疲労き裂の検出により検証している。今後の発展につながる有用な知見である。

第5章では、常磁性体の欠陥検出に適用するため渦電流による電流印加を行い、さらに画像データおよび光量データを同時に取り込み可能なシステムを開発し、304ステンレス鋼板において深さ2 mm, 表面長さ5 mm程度の切欠き欠陥の検出に成功している。また欠陥の長さおよび深さが、画像データおよび光量データの双方と良い相関を持つことを明らかにしており定量評価の可能性を示している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、磁気光学素子を用いた新しい原理に基づく磁気光学探傷システムの開発を行い、遠隔探傷、自動探傷を実現し、その有用性を検証したものであり、非破壊検査工学および機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。