レーザーによる非破壊検査と診断

豊岡 了

埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255)

Nondestructive Inspection and Diagnosis by Lasers

Satoru TOYOOKA

School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Urawa, Saitama, 338-8570

(Received July 21, 1998)

レーザー光の持つ直進性, 単色性, 超短パルス発生などの特徴は, 実に多様なセンシング技術を様々な分野に提供してきた。レーザー光利用センサーは, 干渉センサー, レーザー分光, レーザーレーダなど, 原子分子レベルから人間の生活圏のスケール, さらに地球規模のスケールに及ぶセンシングを可能にしている。対象分野の違いにより, 物理的な非接触センシング, 化学的な遠隔成分分析, 生物内部の無侵襲センシングなどを挙げることができる。いずれにしても非接触, 遠隔, 無侵襲といったキーワードがレーザー利用センシングの特徴を表わしているように見える。これらの特徴は, 「非破壊検査と診断」という応用を考えたときにも非常に重要なものとなる。非破壊検査や診断は, 高度技術社会を安全に維持するために欠くことのできない技術であるが, もの造りのための生産技術とは本質的な相違点を指摘することができる。もの造りにあつては設計においてあらかじめ策定されたプログラムに則つてプロセスを進めていく。生産技術におけるセンシングは, 工程がプログラム通りに進んでいるか否かをモニターし, 生産工程を制御することが主であり, 目的に応じて対象をある程度理想化することができ, 一般に非常に高い精度が要求される。それに対して, 非破壊検査は, 例えば機械構造物の運転にともなう応力や熱の繰返し負荷による疲労や経年劣化がどの程度進んでいるかの診断であったり, 欠陥の早期発見であったりする。構造物の疲労や経年変化のプロセスは一般に複雑で, 危険な箇所があつても何時どこで欠陥が発生し, 最悪の場合破壊に至るかをあらかじめ予知することは簡単ではない。これは, たとえ対象が人工構造物であっても, 複雑な劣化の物理的, 化学的変換過程を制御することはできないからである。医師が人間を診断する状況, あるいは天気予報官の立場に似ていて, 現象が非線形的であることから, 要素的にいかに精密な定量化がなされたとしても, いくつかの検査結果の融合として定性的な評価しか得られないこともある。

本小特集では, レーザー光による非破壊検査と診断に関連する4つのテーマを取り挙げた。はじめに取り挙げる

テーマは「スベックル干渉法による固体材料の変形解析および破断予測法」である。これは, 近年V. E. Paninらによって体系化された塑性変形理論を基礎に, 波動現象としての塑性変形の動的過程をレーザースベックル干渉法によって時空間で追跡することによって, 早期に破壊の位置と時期を予測することができる, とする新しい非破壊検査法の提案である。塑性変形が並進と回転の相互作用(TRI)として固体内を伝播するとし, 電磁気学におけるマックスウェル方程式に類似の場の方程式が得られる, とする理論はその詳細な導出過程まで立ち入ることは本解説では難しいものの, 物理的な解釈は自然である。塑性変形過程に特徴的なスベックル相関縞パターンの変化から破壊を予知する方法を示しているが, 今後種々の材料についての実施例が待たれる。固体の内部の応力状態を把握することは材料の診断に当たって重要な情報を提供する。

ガラスやプラスチックなどの透明物体においては, 内部に発生した応力場によって一時的な複屈折状態を生じることから, プラスチックモデルによる応力場のシミュレーション実験が行われる。これは, 光弾性応力解析法として古くから知られている。ここではより一般的に透明物体の屈折率と厚さを同時に計測する方法として最近注目を集めている「低コヒーレンス共焦点干渉顕微鏡による多層構造試料の解析」を取り挙げた。光学的な方法で透明物体を計測したときに得られる情報は, 光路長, すなわち幾何学的な厚さに屈折率を掛け合わせたものである。本解説では, 低コヒーレンス干渉法と共焦点顕微鏡法をシステムとして一体化することにより, 両者の分離計測を行っている。具体的な測定例として, 多層構造試料の屈折率と厚さの分離計測, 光弾性試験片における主屈折率の分離計測, 断面の構築をとりあげている。

次に取り挙げる題は, 「レーザー光を応用した半導体素子内残留応力の非破壊測定」である。半導体素子は薄膜形成過程における熱サイクルによって薄膜および素子内部に機械的応力が残留する。これらが素子の破壊や性能劣化の原因となり, 結果として歩留りを下げることになる。薄

膜の残留応力測定法として、レーザー光の反射位置を検出することによる基板の反り変形測定、偏光解析による方法、素子内部の残留応力測定法として最近活発に研究がすすめられているラマン分光法が紹介されている。半導体産業は今日の情報化社会を支える基盤技術であり、今後さらに進むであろう高集積化、高機能化に対して、製品の信頼性向上をはかる上で、顕微鏡的な視野における応力状態の評価技術はますます重要になってくるであろう。

最後に挙げた話題は「光ファイバによる診断技術」である。一般に自由空間伝播光を利用したセンサーは、システムの配置の自由度が乏しいが、光ファイバにおいては光を自由自在に曲げることができることから、目標とするモニター点を経由するように自由にファイバを張り巡らせることができ、OTDRをはじめとする独特なセンサー群を形成している。特に最近注目されているファイバ・ブラッグ・グレーティングおよびファイバ・ファブリペロー・インターフェロメータにおいては、多点のひずみを高精度に測定することができる。低損失性を生かして、構造物の強度劣化診断や種々のライフラインの異常診断を広域にわたって可能にする分布型センサーが実現する。具体例として、光ファイバネットワークの監視診断、送電線の監

視、漏油およびガス漏れ監視など、我々の生活において欠くことのできないインフラストラクチャーの診断技術が実用化の状況を含めて展望されている。

本小特集では、レーザー応用技術の一つとして「非破壊検査と診断」と題して、比較的最近の話題を取り上げた。一方、従来技術としての非破壊検査法としては、超音波探傷、放射線探傷、磁気探傷、渦電流探傷などが確立している。これらはいずれも物体内部の欠陥検出法である。それに対して本小特集で取り上げたレーザーを利用した方法は、欠陥検出に限るものではなく、さまざまな状況における物理的状态の計測である。欠陥の生成は、劣化過程の最終段階であり、そこに至る以前の劣化に関する何らかの情報が得られる検査法が望ましい。レーザーを利用した方法は研究段階のものからすでに実用の段階に入っているものまで実に多様であり、このような要求に対してはある程度の回答は用意できそうである。しかし、非破壊検査と診断には決定打は望めない以上、先輩格の従来技術に敬意を表することも大切である。すなわち、物理的原理を異にする複数の検査法を融合した相互評価(cross evaluation)法の確立が今後重要になってくるものと思われる。