品質管理のための検査の自動化の現状

IV. 電磁気量による検査

解説

キーワード：

磁気深傷法，電磁超音波法，スペクトル分析，SQUID

正員 鈴木 正 典

(株)日立製作所機電事業部

1. ま え が き

電磁気量のかかり合いによる検査は前章に述べられている画像，AEなどに比べると目視検査・官能検査を除き歴史も古く，もっとも基本的な工業量を利用したものである。そのセンシングは各種のセンサを用い他の物理量から取り扱いやすい電気量に変換している。被測定量として電気量，磁気量，マイクロ波までの電磁波の範囲としているのが一般的である。

一方，自動化の考え方も各製造業，設備によって品質管理の項目とそれをはかる手段および評価の手法が大きく異なる。ここでは電磁気量による検査の応用例として，磁気探傷法によるエレベータ用ワイヤロープの検査，電磁結合を巧みに用いた電磁超音波法による継目なし鋼管の肉厚計，電磁波のスペクトル分析によるガス絶縁開閉装置のガス絶縁異常検出，SQUID センサによる材料損傷検出装置について述べる。

2. エレベータ用ワイヤロープの検査⁽¹⁾

ビル内の縦の交通機関であるエレベータは直径 12 mm 前後の細いワイヤロープ数本の並列に使用し，乗りカゴと釣り合いおもりを上部にある駆動装置を経由して釣瓶方式につながれているのが一般的である。エレベータにとってワイヤロープは命綱であり，この探傷検査は乗客の安全を確保する保安上重要な作業である。

このようなワイヤロープは一般に長尺でロープ間隔が狭いため，従来，この検査は目視で実施されていた。その検査は時間がかかるのみでなく，使用に伴う油污れなどで検査環境はよくなく，高層ビルなどでは検査に 1 台あたり数時間を要していた。その問題を解決したエレベータ用ロープ探傷装置が開発されている。

その原理は漏洩磁束探傷法に基づくものである。ワイヤロープは強磁性体であるため，磁気飽和状態にするとロープの表面または内部の素線に断線などがあれば，その部分における磁気抵抗の不連続性は通過磁束に影響を与え磁束は曲げられ，その一部は空中に漏洩する。この漏洩磁束をロー

図 1 探傷装置の構造と原理

プ外周から検出すれば非破壊的に検査をすることができる。

図 1 にその探傷装置の構造と原理を示す。探傷装置は E 字形をし，ロープ励磁用の磁極を備え，中央部に検出部を備えている。検出部は図に示すようにワイヤロープのストランドピッチに合わせた二股構造（ H_1 ， H_2 ）にし，それぞれに検知コイル（ C_1 ， C_2 ）をもつ。これらの検知コイルは逆並列に接続されている。

ワイヤロープを図の矢印方向に移動すると，ロープに損傷のない部分では分極磁束 ϕ_1 と ϕ_2 は相等しく方向が逆であるので検出部の磁束はゼロである。その結果，検出コイルには電圧が発生しない。ロープの損傷部が検知部を通過すると e_1 ， e_2 のように各検知コイルに電圧が発生する。合成出力波形は C_1 と C_2 を逆並列に接続して得られる。ストランド部の凹凸による脈動ノイズは検知コイルの逆並列接続により相殺される。

探傷能力は，ワイヤロープの表面または内部の素線 1 本切断以上あり，ロープの走行速度は毎分 15～45 m で探傷が行える。

3. 電磁超音波法による継目なし鋼管の肉厚計⁽²⁾

継目なし鋼管は石油やガスなどのエネルギー資源開発，

Present Status of Automatic Inspection for Quality Control
IV. Inspection by Measurements of Electromagnetic Quantity
By Masanori Suzuki, Member (Hitachi, Ltd.)

図2 電磁超音波の送受信原理

図3 肉厚測定原理

電力、機械加工、各種プラントなど幅広い分野において数多く使用されている。

自動化ラインにおいて、圧延された最長45mの長尺鋼管は冷却後管端の切り捨て部分であるクランプ付きのまま矯正機で矯正され、最高3.2m/sの搬送速度で高速検査される。ラインを実現するためには水を一切使用しない肉厚測定計が必要であり、電磁結合を利用した電磁超音波法による肉厚計が開発され実用に供されている。

図2に電磁超音波の送受信原理の模式図を示す。被検材(導電性材料)表面に磁界 B が与えられている状態で送受信兼用コイルにパルス電流 I_r が与えられる。その結果、被検材表面にうず電流が発生し、ローレンツ力 F が働き超音波が発生する。この超音波は被検材の欠陥あるいは裏面で反射し、再び表面に戻ってくる。表面では磁界中の振動で再びうず電流が流れ、その磁界変化を送受信兼用コイルで電圧信号 V_r として検出できる。図3に肉厚測定原理を示す。

肉厚は管表面に発生した表面エコーと肉厚底面にて反射した底面エコーから算出される。表面エコーと第1底面エコーまたは第1底面エコーと第2底面エコーとの間の時間を T_B とし、鋼中音速を S_V とすると肉厚 W_T は、

$$W_T = T_B \cdot S_V / 2$$

で表わされる。

本計測装置は管直進・測定ヘッド回転式であり、走行中の鋼管の全長をスパイラル状に全面測定する。回転ヘッド

図4 スペクトル分析による部分放電検出例

図5 ガス絶縁異常検出システム

は20mmピッチで配置された4個のプロブからなる一対の測定ヘッドが装備され、1回転当たり96点の測定を行う。最長45mの長尺鋼管の場合、測定データは約21万点となり、データ処理とイベント判定処理を分けたシステムに構成されている。

4. ガス絶縁開閉装置のガス絶縁異常検出^{(3)~(5)}

送変電設備の主器の一つであるガス絶縁開閉装置(GIS)は機器の小型化、高性能化が進むなかで、なんらかな原因で混入・発生した金属異物はガス絶縁特性に大きく影響する。GISは、通常、数気圧以上の SF_6 ガスで絶縁されているが、 SF_6 ガス自身が電界強度に大変敏感なため、電界集中を引き起こす金属異物により絶縁耐力が低下しやすいという性質がある。

絶縁性能に異常を生じると、一般的に部分放電が発生する。この部分放電は数百kHz~数GHzの広い範囲にわたって電磁波を放射していることが知られている。この部分放電を微小放電レベルの内に検出できれば、絶縁事故を未然に防止することが可能となる。

図5にGISの線路の一部を示す。線路はマイクロ波用導波管の構造に似ていることから、同軸管路として作用する所では広範囲な周波数の電磁波が伝搬している。内部導体のない円筒部は円形導波管として作用するので遮断周波数以下の電磁波は伝搬できない一種のハイパスフィルタとなる。その特性により外部ノイズから分離し放電に起因する数百MHz以上の電磁波を抽出し高感度に検出できる。

図4にスペクトル分析による部分放電検出例、図5にガス絶縁異常検出システムを示す。フィルム状コンデンサ形状検出部とスペクトルアナライザおよび処理装置から構成さ

図 6 試作した SQUID センサシステムの構成

れている。現地においても条件が良い場合、この検査方式は電荷量が数ピコクーロンの部分放電を検出できるとされている。

5. SQUID による材料損傷検出装置

SQUID(超電導量子干渉素子) センサは超電導の性質を利用した超高感度の磁気センサである。その応用として医療分野で脳磁計や心磁計として生体磁気計測に用いられている。その他、物性特性測定、電気精密測定、地磁気の測定に使用されている。

最近では、工業分野適用の応用研究も進められている⁽⁶⁾。その一つにプラントの機器の予防保全・予知保全のために、機器材料の余寿命評価に必要な主要構造材料についての材料特性変化の把握、経年による機械的特性変化の早期検出に SQUID を適用した材料損傷検出装置の開発が進められ、オーステナイト系のステンレス鋼における疲労損傷の検出および 2 相ステンレス鋼における低温時効脆化の検出が可能な小形で高分解能な実用形プロトタイプが試作されている⁽⁷⁾。

図 6 にシステム構成を示す。SQUID センサには、3 チャンネルの直流動作形の DC-SQUID 素子を使用し、検出周波数帯域は DC から 20 kHz の範囲である。

センサ部の大きさは、直径 150 mm × 高さ 450 mm、重さ 4 kg である。センサ部は 5 軸多関節ロボットで走査駆動され、位置精度は 0.2 mm である。センサ部のクライオスタットテール部の壁厚を 4 mm と薄くし、検出分解能を、AC ノイズキャンセラー回路を付加して検出感度を向上させている。

このシステムでオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 材からなる試験片を特定の繰り返し数ごとに疲労試験機から取り出し、直流マグネットにより、疲労試験片に 0.15 T の磁界を印加した状態で、SQUID センサを 2 次元に走査し、磁界分布を計測した。疲労損傷の検出結果を図 7 に示す。

累積疲労損傷率 (N/N_f) で SQUID の出力の変化を未損傷域での出力値 B_{pv} で正規化している。

図 7 累積疲労損傷率に伴う SQUID 出力 (B_p/B_{pv}) の変化 (直流磁界 0.15 T)

N/N_f = 数%以上では繰り返し数に伴い SQUID の出力が顕著に増加している。X 線回析によってオーステナイト相が加工誘起マルテンサイトに変態したことによる結果を観測していることからき裂発生前の疲労損傷の推定に有効であった (加工誘起マルテンサイトは磁性相であることが一般に知られている)。また、2 相ステンレス鋼およびステンレス鋼溶接金属の 723 K 以下の低温時効において時効劣化の検出に有効であったと報告されている。

6. あとがき

電磁気量の利用による応用を数例紹介したが、あらゆる産業分野で多くの事例が報告され、実用化段階にある⁽⁸⁾。また、ますます品質管理の要求水準があがるなかでセンサデバイスの改良・開発・センサヒュージョンやシステム化とともに多くの分野で貢献されることが期待されている。

(平成 7 年 11 月 20 日受付)

文 献

- (1) 平間・大平：「長尺磁性体の磁気探傷装置」，マグネテックス研究会資料，(MAG-89-148 (平 1))
- (2) 品質管理のための検査の自動化調査専門委員会，電気学会技報，546 (平 7)
- (3) GIS 絶縁に及ぼす金属異物の影響調査専門委員会，電気学会技報，561 (平 7)
- (4) 川田・山極・遠藤・森・山田：「送変電設備の予防保全システム」，日立評論，72-8 (平 2)
- (5) 山極，遠藤，大下，山田：「GIS の絶縁異常検出技術」，開閉保護装置研究会資料，SPD-89-32 (平 1)
- (6) 葛西：「SQUID の非破壊検査への応用」，電学論 A，115-8
- (7) 大高・榎本・林・坂田・清水：経年模擬ステンレス鋼の機械的特性評価(第 3 報)，機論 A，59, 2041 (平 5)
- (8) 例えば日本非破壊検査協会，新非破壊検査便覧

鈴木 正 典 (正員) 1973 年明治大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、(株)日立製作所入社。現在、機電事業部産業情報制御システム部で計測・制御システムのマーケティングに従事、電気学会、生産設備管理技術委員会の幹事。