

ACFMによる台車枠検査技術の開発

大黒 光喜 *

Kouki Daikoku

藤原 貢 *

Mitsugu Fujiwara

笹原 利彦 **

Toshihiko Sasahara

大津山 澄明 ***

Sumiaki Ohtsuyama

武藤 行伸 ***

Yukinobu muto

養祖 次郎 ****

Jiro Yohso

坂本 博 ****

Hiroshi Sakamoto

牧野 一成 ****

Kazunari Makino

現在、鉄道車両用台車枠の溶接継手部検査は定期的に磁粉探傷検査（MT）が適用されている。しかしMTでは、塗膜剥離作業による作業員への負担が大きい、欠陥判定の個人差によるバラツキ、紙による検査記録管理の煩雑さが伴う。これらを解決するために塗膜上から表面開口き裂の検出が可能であるACFM法を適用し、ベクトル積フィルタによる自動欠陥判定および、検査結果の電子管理を可能とした台車枠検査技術を開発した。

キーワード：台車枠、表面き裂、交流磁場測定法、ベクトル積

1. はじめに

現在、西日本旅客鉄道株式会社殿、ならびに財団法人鉄道総合技術研究所殿と当社の3者でACFMを利用した台車枠検査技術を共同開発中である。本書では平成16年度の開発の成果について紹介する。

2. 背景

鉄道事業者は定期検査で台車枠の表面開口欠陥を磁粉探傷検査や浸透探傷検査で検出し、加修¹⁾しているが、この作業は、塗膜のはく離による作業

員への負担、き裂判定時の個人差、紙による検査記録による管理の煩雑さを伴う。そこで、我々は塗膜をはがさずに表面開口欠陥を容易に検出し、検査結果を電子管理できる新しい非破壊検査技術を開発し、これらを解決することにした。1) 修理・補修の意味

3. 原理

開発では交流電磁場測定（ACFM=Alternating Current Field Measurement）法を用いた。これは、近年英国で開発された非破壊検査の理論で、原理を図1に示す。

* 検査事業部 技術部 NDE技術グループ
 ** 財団法人 電力中央研究所（元検査事業部）
 *** 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 技術部
 **** 財団法人鉄道総合技術研究所 車両構造技術研究部（車両強度）

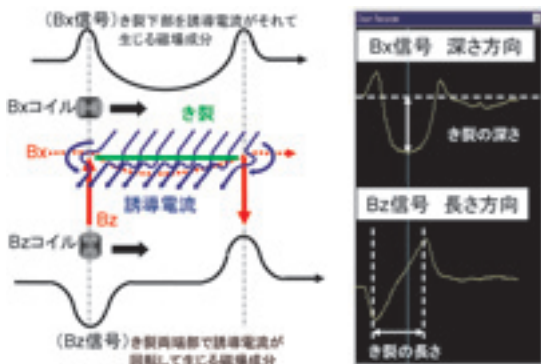


図1 ACFM法のき裂検出原理と実際のき裂信号例

分布が均一で平行な誘導電流を試験体の表面に流すと、き裂の周辺では磁場の変化について2つの有効成分を生じる。それは、き裂の底部を迂回した誘導電流で生じる B_x 成分と、き裂両端部で回転する誘導電流で生じる B_z 成分である。誘導電流を流すコイルのほか、 B_x 成分を検出するコイルと B_z 成分を検出するコイルがあり、図2に示すプローブがき裂を通過すると、2つの成分の信号データが取り込まれ、リアルタイムに表示される。これがき裂信号のパターンで、この波形の有無でき裂の有無を判断する。



図2 プローブと台車枠探傷部位を探傷する様子

4. 目標

き裂検出能力の目標について、国土交通省H13年告示の解釈基準6「台車枠検査マニュアル」では、「検査時に40 mm程度のきずを発見すれば、脱線に至るような亀裂への進展を防ぐ」*1とある。

台車枠側ハリ部のき裂進展長さとして走行距離の関係を示す計算結果(図3)を参考に、定期検査の間隔である60万kmを走行しても40 mmに至らない初期き裂長さ10 mmを検出することを目標とした。

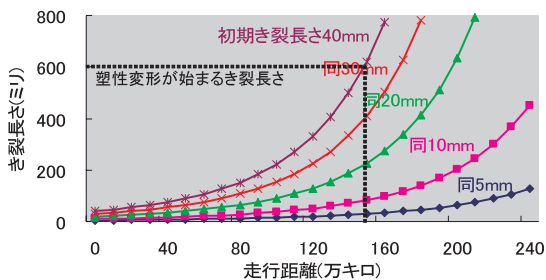


図3 側ハリ部き裂進展長さとして走行距離の関係*2

5. き裂検出能力

き裂検出能力は、台車枠の溶接部を模擬し、疲労き裂や放電加工欠陥を付けて塗装した試験体、台車枠の材質や板厚と同じ平鋼板(SM400B、 $d = 12$ mm)を3点曲げ疲労試験にかけた疲労き裂試験片、放電加工欠陥試験片、アクリル板の擬似塗膜(1.0 mm、2.0 mm)を用いて検証した(図4-1、図4-2)。

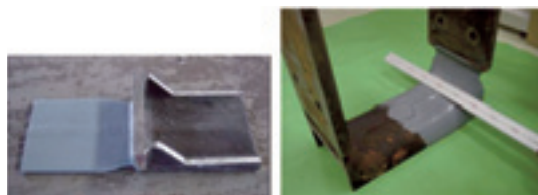


図4-1 溶接構造試験片(疲労き裂L=約10 mm)



図4-2 試験片と3点曲げ疲労試験

これらの試験片をプローブで走査し、き裂信号の変化量（振幅値）とき裂の大きさとの関係について、き裂の長さとき裂の深さそれぞれを確認した結果を図5-1、図5-2に示す。

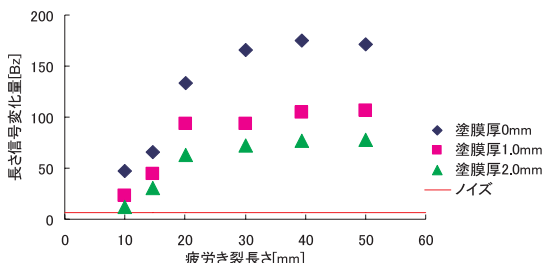


図5-1 Bz (長さ方向) 信号変化量と疲労き裂長さの関係

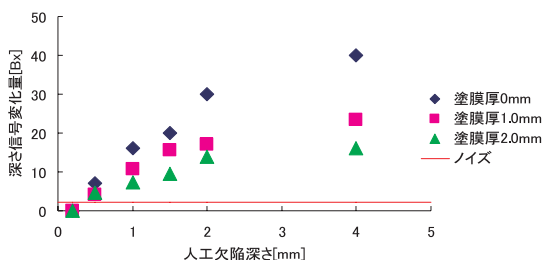


図5-2 Bx (深さ方向) 信号変化量と人工欠陥深さの関係

これらの結果から、長さ10 mm、深さ1 mm以上のき裂を塗膜上から検出する能力があることを確認できる。実台車枠の探傷部位の塗膜厚は1 mm程度なので、検出能力としては充分であると言える。

き裂の長さとき裂の深さの関係を調べるため、先に述べた平鋼板の試験片について3点曲げ疲労試験をした。その結果を図5-3に示す。

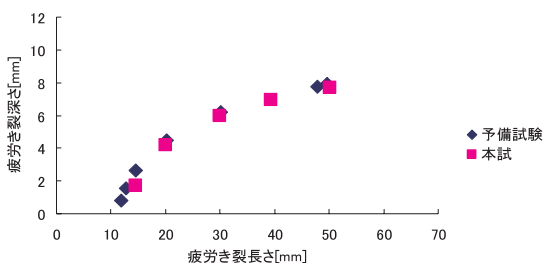


図5-3 平鋼板 (SM400B、d = 12 mm) の疲労試験結果

今回の疲労試験では長さ10 mm以下の疲労き裂を再現できなかったが、図5-3で、長さ10 mmまで近似すると、深さは1～2 mmと仮定できる。このことから、図5-1には、疲労き裂長さ10 mmの代わりに、別途得られた人工欠陥長さ10 mm深さ1 mmのBz信号値を反映した。その傾向から言うと、深さ0.5 mmとなるき裂長さが検出限界であると思われる。

そのほか開発に伴って確認したことを以下に挙げる。

- (1) プローブにエンコーダを付けて距離情報を読み取り、Bz信号からき裂長さを計算する試験を行なった。その結果、実際のき裂長さより 2σ (95%) で1 mm程度短めに評価するが、おおむね良好だった。
- (2) 図5-3の疲労試験では、き裂の深さが平鋼板を貫通するまで裏面でも信号データを取ったが、き裂の底部が貫通し裏面に開口するまで、き裂信号を確認できなかった。これは、ACFM法が開口き裂にのみ有効であることを示す結果である。

6. ノイズ対策

台車枠の探傷部位にプローブをそって探傷した。台車枠の探傷部位は台車形式によって異なるが、代表的な探傷部位として、WDT55台車枠の探傷部位を図6に示す。

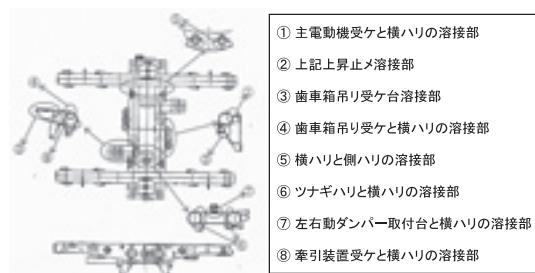


図6 WDT55台車枠の探傷部位※3

探傷部位のほとんどは溶接止端部で、信号データは図7に示すようにノイズが多く、仮にき裂があつてき裂信号を生じると、信号データにき裂信号が含まれているかどうかを容易に判断することが難しくなる。主な原因として、台車枠の表面にある凹凸でプローブが上下し、試験体との離れ(=リフトオフ)が変化するためであると推定した。

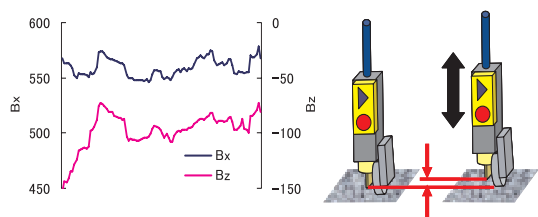


図7 ノイズを含む信号データ (WDT55主電動機受ケと横ハリの溶接部) とリフトオフ

そこで、我々はノイズ信号を低減するフィルターを開発した。それは、信号データである B_x 信号と B_z 信号を B_z - B_x 曲線として直交座標に表すことで、隣り合うデータのベクトル積を順次計算していき、その値の大小によって、信号データにおけるき裂信号の有無を評価するものである。

図8にベクトル積計算法の概念を示す。

き裂信号を B_z - B_x 曲線で表すと、蝶が開いたような円形になる。これを「バタフライプロット」と呼ぶ。き裂信号は B_x 信号と B_z 信号の電磁気学的な挙動から相互にこのような関係がある。

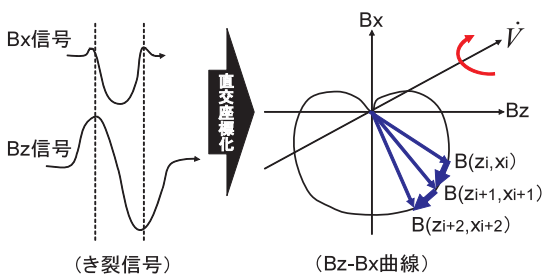


図8 バタフライプロットとベクトル積計算法

具体的には、原点からある点まで、またはデータの点間にベクトルを引く。前者は原点ベクトル、後者は差分ベクトルといい、どちらの場合も隣り合うベクトルの積を計算する。また、ベクトルの積には外積と内積がある。よって、ベクトルの種類と積の種類を組み合わせることで計算する。

計算の結果、ベクトル積がしきい値を超えた部分の信号データを残し、それ以外は $null = 0$ とすると、典型的なき裂信号だけが残る。ベクトル積計算法によるフィルター効果の例を図9に示す。

リフトオフを想定してプローブを上下させた信号データを B_z - B_x 曲線で表すと、図10のように線形になり、ベクトル積は小さな値になる。したがって、ベクトル積を計算することでノイズが低減され、き裂信号の有無の判断が容易になる。

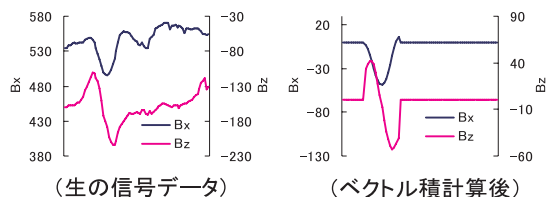


図9 ベクトル積計算法によるフィルター効果例

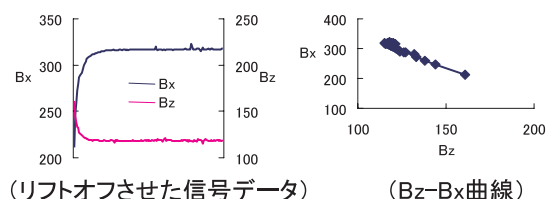


図10 リフトオフによる信号データと B_z - B_x 曲線

このフィルターを使ったACFM検査では、探傷部位の多くでノイズを低減し、き裂の有無の判断を容易にしている。例として、WTR239 (WDT55のT台車) を探傷した部位を図11に示す。いずれの部位でもACFM検査で無欠陥であると容易に判断できた。

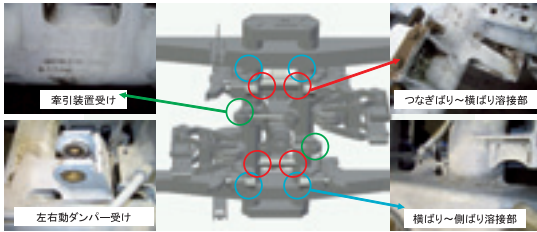


図11 WTR239 台車枠の探傷部位

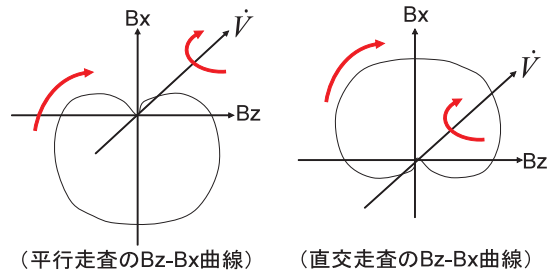


図12 平行走査と直交走査のBz-Bx曲線の比較

なお、実際にはベクトル積を計算する前に、取り込んだ信号データに前処理的な計算を加えている。それは、 B_x 信号と B_z 信号の位相差、平滑さ、信号レベルの違いなどに着目し、 B_z - B_x 曲線を理想的な円形にしたり、円形の中心を原点に移したりすることが理由であるが、いずれもベクトル積の計算効果を得るために行なっている。

ところで、ACFM 検査ではプローブがどの向きでもき裂を検出する。き裂を検出する方向としてき裂上を走査する場合と、き裂を直交する場合がある。図12に示すように、平行走査と直交走査では、信号データは B_z - B_x 曲線で点対称となるが、ベクトルの回転方向が同じであるからベクトル積を計算すればノイズと区別してき裂を検出できる。

7. 電子管理化

電子管理化については、現時点では以下の点について実現しており、インターフェイスを図13に示す。

- (1) 検査結果
- (2) 台車枠と探傷部位の図示、施工済と未施工の表示
- (3) 作業者、台車形式など記録事項
- (4) 装置のパラメータ設定

この中で、検査結果については現時点で信号データが残せるようになっているが、主にき裂の有無の判断と履歴の検索に使うのに信号データまで必要かどうかは検討の余地がある。

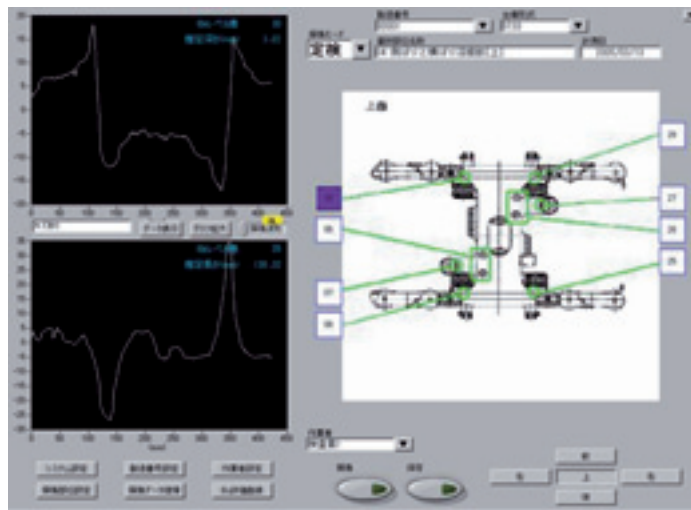


図13 ACFM 検査装置のインターフェイス

また、電子化は帳票作成にも有利な手段であるが、現時点では実現していないので、今後の課題の一つである。

8. まとめと課題

8.1 まとめ

- (1) 長さ10 mm、深さ1 mm以上のき裂を塗膜上から検出できることを各種試験片で確認した。
- (2) プローブのリフトオフによるノイズを低減してき裂信号の有無の判断を容易化するため、Bz-Bx曲線によるベクトル積計算法を開発し、実際の台車枠でその効果を確認した。
- (3) 探傷作業の電子管理化を可能にするインターフェースプログラムを開発した。

8.2 課題

8.2.1 き裂検出能力の磁粉探傷検査との比較検証

現時点で確認しているき裂検出能力は、多くはベンチレベルに過ぎない。今後、実際の台車枠でACFM検査の信号データと磁粉探傷検査の結果を付き合わせ、き裂発見時は大きさを記録し、ACFM検査が磁粉探傷検査と同等であることを検証していく。

8.2.2 リフトオフ以外のノイズの発生条件と対策

ベクトル積計算法でも、き裂がないのにき裂信号に似た擬似信号が残ることがまだある。そこで、ノイズの発生条件を調べる模擬試験片で信号データを分析し、より精度の高い検査方法にする。

8.2.3 ベクトル積のしきい値の検証

現在、ベクトル積計算によるノイズフィルターで信号データを残すしきい値は、開発目標である長さ10 mmのき裂での値であるが、今後もしきい値の最適化に努めていく。

8.2.4 検査にかかる時間

現在、ACFM検査は磁粉探傷検査と比べて、探傷装置の大きさ、および作業の慣れなどから、探傷時間がかかる。そこで、試作探傷装置をバッテリー駆動、小型化など取り扱い易くし、ノイズフィルターの精度を高め、判定時間の短縮を図ると共に、探傷手順や要領を教育訓練し、現状実施している磁粉探傷検査と同等の検査時間とする。

9. おわりに

今後も改良や試験に努め、ACFM検査を台車枠の非破壊検査に導入することで、初期の開発目的の達成に努める。 (H17.3特許出願中)

参考文献

- ※1 「解説 鉄道に関する技術基準(車両編)」(国土交通省鉄道局監・車両関係技術基準調査研究会編 2002) p341 H13検査告示5条の解釈基準6「台車枠の検査方法について」の別紙第3「台車枠検査マニュアル」の解説
- ※2 同p346 「台車枠検査マニュアル」別添2
ほか 西日本旅客鉄道株式会社 大津山澄明 武藤行伸
財団法人鉄道総合技術研究所 養祖次郎 坂本博 牧野一成他
「新しい台車枠非破壊検査技術の開発」(J-Rail2005 発表論文)
「溶接台車枠の強度と保守」(長瀬隆夫著 研友社版 1999)