

S2-3-5

新しい台車枠非破壊検査技術の開発

[機] 大津山 澄明 ○武藤 行伸 (西日本旅客鉄道株式会社)

笹原 利彦 藤原 貢 大黒 光喜 (石川島検査計測株式会社)

養祖 次郎 坂本 博 [機] 牧野 一成 (財団法人鉄道総合技術研究所)

Development of the new non-destructive inspection technology for bogie-frame

Sumiaki Ohtsuyama [Member], Yukinobu Muto (West Japan Railway Company)

Toshihiko Sasahara, Mitsugu Fujiwara, Kouki Daikoku (Ishikawajima Inspection & Instrumentation CO.,LTD.)

Jiro Yohso, Hiroshi Sakamoto, Kazunari Makino [Member] (Railway Technical Research Institute)

At present, railroad enterprise detects surface crack of bogie-frame by magnetic particle testing mainly, and they are repairing it. We develop the new non-destructive inspection technology which can detect the crack without tearing off the paint by ACFM (Alternating Current-Field Measurement) method. This technology is crack decision calculation which based on signal data which inspected surface of bogie-frame with inspector's probe, and the inspection procedure reflected this technology. The calculation used theory of vector-product. We manufacture a device as an experiment, and confirm the crack detection performance, the removal effect of false signal-data, and so on. If this is put to practical use, there is an advantage such as 1: Inspector's burden in health is reduced, 2: Inspector's skill shouldn't be necessary for judgment of crack or false, 3: Result of the inspection can be managed by electronic data, in non-destructive inspection of bogie-frame.

キーワード: 台車枠、表面のき裂、交流電磁場測定法、ベクトル積

Keyword: bogie-frame, surface crack, Alternating Current-Field Measurement method, vector-product

1. はじめに

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見出し、加修しているが、この作業は、塗膜をはがさずによる作業への負担、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判りやすく検出し、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。

2. 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、近年英国で発明された非破壊検査の理論で、原理を図1に示す。

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 Bx 成分と、き裂両端部で回転する誘導電流で生じる Bz 成分である。誘導電流を流すコイルのほか、Bx 成分を検出するコイルと Bz 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。

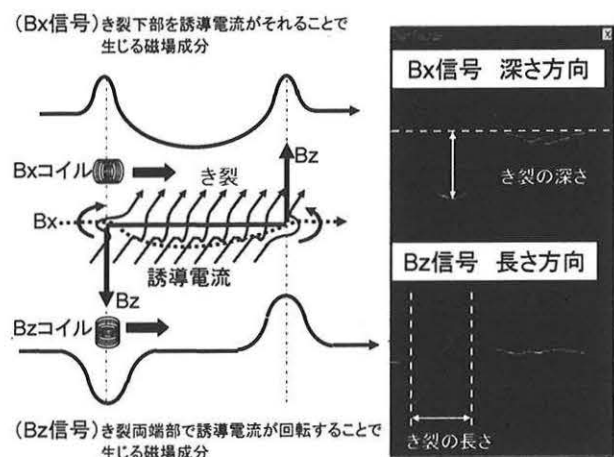


図1 ACFM法のき裂検出原理と実際のき裂信号例



図2 プローブと台車枠探傷部位を探索する様子

3. 目標

き裂検出能力の目標について、国土交通省 H13 告示の解釈基準 6「台車枠検査マニュアル」では、「検査時に 40mm 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}とあるが、台車枠側ハリ部のき裂進展長さと走行距離の関係を示す計算結果（図 3）を参考に、一定検 60 万 km 走行しても、40mm に至らない初期き裂長さ 10mm を検出することを目標とした。

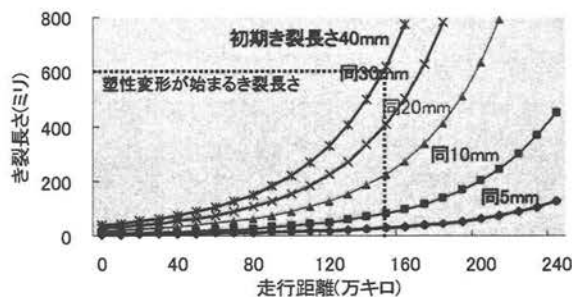


図 3 側ハリ部き裂進展長さと走行距離の関係^{※2}

4. 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=12mm）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）。

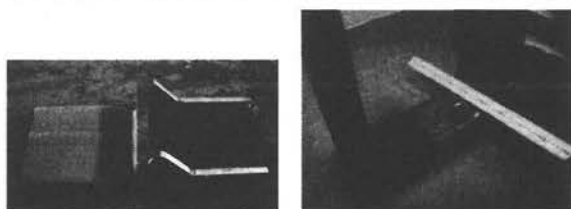


図 4-1 溶接構造試験片(疲労き裂 L=約 10mm)



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、その時のき裂信号の変化量(振幅値)とき裂の大きさとの関係について、き裂の長さや深さそれぞれを確認した結果を図 5-1、図 5-2 に示す。

これらの結果から、長さ 10mm、深さ 1mm 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。台車枠の探傷部位の塗膜厚は 1mm 程度なので、検出能力としては充分であると言える。

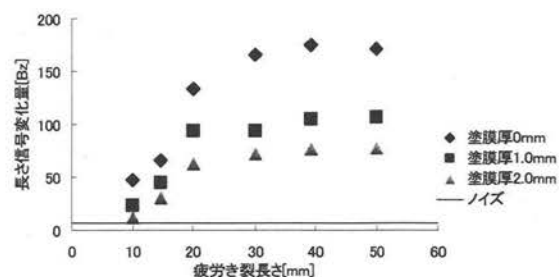


図 5-1 Bz(長さ方向)信号変化量と疲労き裂長さの関係

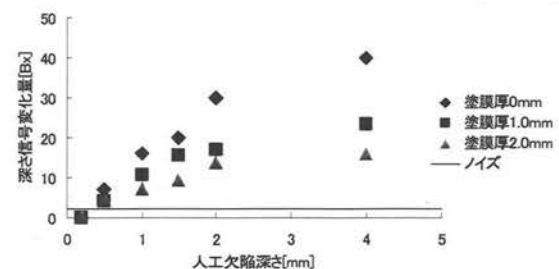


図 5-2 Bx(深さ方向)信号変化量と人工欠陥深さの関係

き裂の長さや深さの関係調べるため、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。

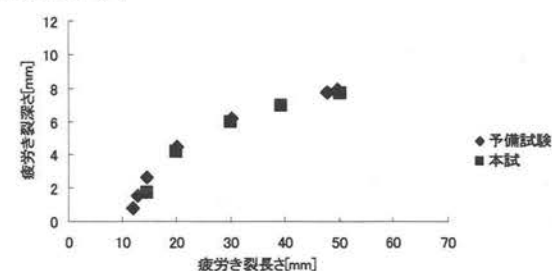


図 5-3 平鋼板(SM400B、d=12mm)の疲労試験結果

長さ 10mm 未満の疲労き裂を再現できなかったため、図 5-1 も長さ 10mm 未満の Bz 信号をプロットしていない。そこで、図 5-3 を近似すると長さ 10mm では深さ 1～2mm なので、図 5-2 の人工欠陥深さ 1mm での Bz 信号を図 5-1 に反映した。その傾向から言うと、深さ 0.5mm の時の長さの辺りに検出限界があると思われる。

そのほか開発に伴って確認したことを以下に挙げる。

- 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 1mm 程度短めに評価するが、おおむね良好だった。
- 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。

5. 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、例として、当社の通勤近郊列車や特急列車などに採用されている台車形式の一つについて、その探傷部位を図6に示す。

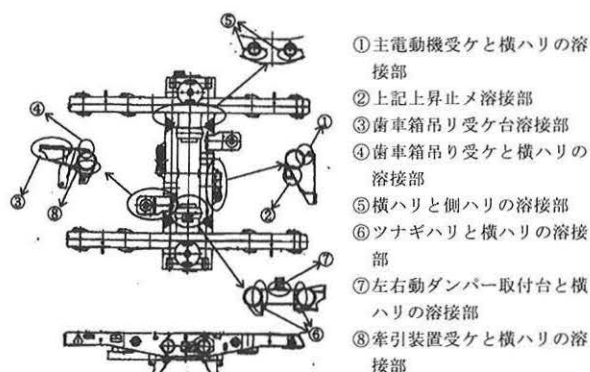


図6 M台車枠の探傷部位の例

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。

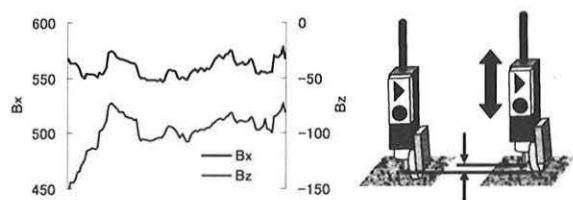


図7 ノイズを含む信号データ（主電動機受けと横ハリの溶接部）とリフトオフ

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Bx信号とBz信号をBz-Bx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。

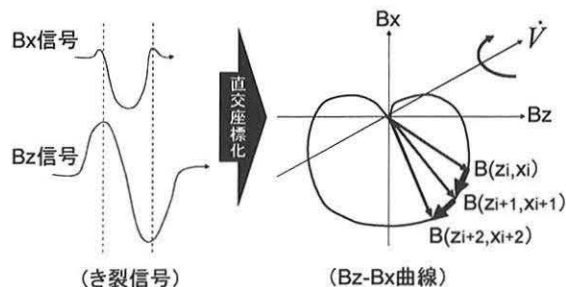


図8 バタフライプロットとベクトル積計算法

き裂信号をBz-Bx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Bx信号とBz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。

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。

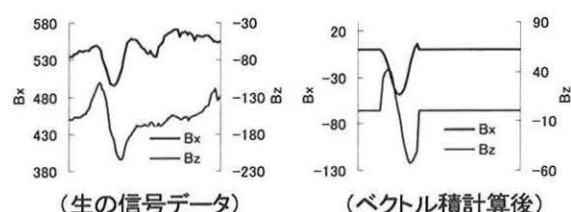


図9 ベクトル積計算法によるフィルター効果例

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Bz-Bx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。

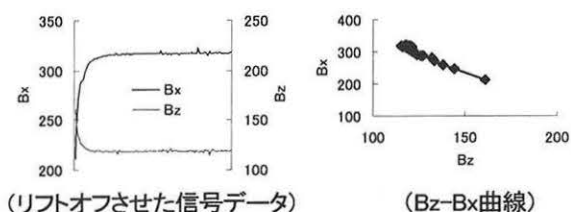


図10 リフトオフによる信号データとBz-Bx曲線

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、き裂の有無の判断の容易化に寄与している。例として、前記の台車形式の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。

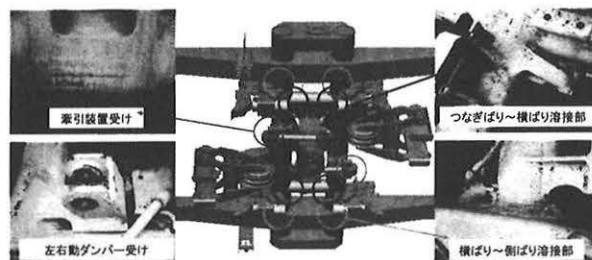


図11 T台車枠の探傷部位の例

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、Bx 信号と Bz 信号の位相差、平滑さ、信号レベルの違いなどに着目し、Bz・Bx 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 Bz・Bx 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。

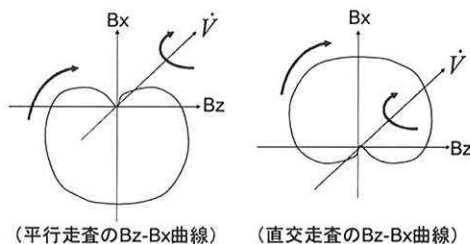


図 12 平行走査と直交走査の Bz・Bx 曲線の比較

6. 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。

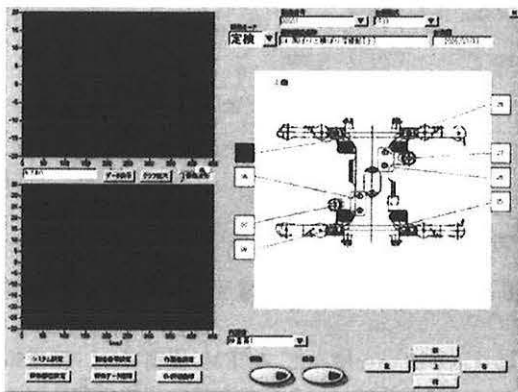


図 13 ACFM 検査装置のインターフェイス

- 検査結果
- 台車枠と探傷部位の図示、施工済と未施工の表示
- 作業者、台車形式など記録事項
- 機械的調整事項

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いちいち信号データまで必要かどうかは検討の余地がある。

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。

7. まとめと課題

7.1 まとめ

- 長さ 10mm、深さ 1mm 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。
- 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。
- 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。

7.2 課題

7.2.1. 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け合わせ、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。

7.2.2. 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。

7.2.3. 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 10mm 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。

7.2.4. 検査にかかる時間

現在、ACFM 検査は磁粉探傷検査と比べて一つの台車枠の探傷作業にかかる時間が長い。そこで、試作装置をバッテリー駆動、小型化し、ノイズフィルターの精度を高めるとともに、手順や要領を教育訓練し、現状と同等程度となるように努めていく。

8. 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「溶接台車枠の強度と保守」（長瀬隆夫著 研友社版 1999）