

# トンネル換気設備における電動機の劣化診断技術の応用

阪神高速技術(株) 工事部京橋事業所 司馬 竜也  
 阪神高速技術(株) 工事部四つ橋事業所 花坂 謙一  
 阪神高速技術(株) 工事部工事統括課 堀 省悟

## 要 旨

トンネル換気設備はトンネル内や坑口環境の確保のみならず、火災等有事の際に人命に関わる設備であることから、機械設備の中でも重要設備に位置づけている。しかしながら、トンネル上部に設置されているジェットファンについては、現場での近接点検も容易ではなく、形状としても電動機内部までの詳細な点検ができていないのが現状である。分解整備や機器更新の計画についてもメーカーの推奨年数や外観状態により判断しており、今後、設備が急激に増加する事から、容易に、かつ詳細に機器固有の劣化状況が分かる管理手法が必要である。今回、近接せずに電動機内部の状態把握ができる計器をジェットファン電動機に適用し、診断検討を行った。

**キーワード:** トンネル換気, ジェットファン, 電動機, 劣化診断, 電流劣化診断法

## はじめに

トンネル換気設備は大きく分けてトンネル内環境・坑口環境の確保をする目的(換気用)と、火災等有事の際に煙からお客さまを守る目的(排煙用)がある。何れも常時運転可能でなければならない設備である。ジェットファンはトンネル換気設備の一種で、一般的にトンネルの上部に据え付けられているものである。

昨今、天井板がなくなり換気方式が横流から縦流へと変更されるトンネルが増えたことによってジェットファンは全国的に増加傾向となっている。

### 1. 阪神高速の換気設備の概要

現在、阪神高速内には換気用、排煙用併せて

110 台のジェットファンが設置されている。阪神高速内のトンネル名と設置されているジェットファンの台数を表-1 に示す。今後は、更に大阪地区の大和川線が供用することで、管理対象のジェットファンは表-2 に示すように、188 台まで増加する見通しである。

表-1 阪神高速のジェットファン設置台数

| 地区 | トンネル     | 設置台数[台] |
|----|----------|---------|
| 大阪 | 伊丹トンネル   | 4       |
|    | 正蓮寺川トンネル | 34      |
| 神戸 | 有馬北トンネル  | 6       |
|    | 新唐櫃トンネル  | 4       |
|    | 神戸長田トンネル | 19      |
|    | 新神戸トンネル  | 27      |
| 京都 | 稲荷山トンネル  | 16      |
| 合計 |          | 110     |

表-2 今後のジェットファン設置予定台数

| 地区        | トンネル        | 設置台数[台] |
|-----------|-------------|---------|
| 大阪        | 大和川線(Aトンネル) | 10      |
|           | 大和川線(Bトンネル) | 12      |
|           | 大和川線(Cトンネル) | 56      |
| 合計(既設+新設) |             | 188     |

## 2. 現状の維持管理上の問題点

### 2-1 点検上の問題

現在、ジェットファンを管理する上で、大きく三つの問題点が存在する。第一に、ジェットファンの設置箇所がトンネルの上部であるため、容易に近接点検ができないことである。中には新神戸駅出路などのように、1車線の道路上に設置されているジェットファンもあり、近接するためには通行止めが必要な機器も存在する。

### 2-2 構造上の問題

第二に、ジェットファンの構造上、電動機が内部に格納されているため、近接点検を行っても主構成部品である電動機の状態が把握できないことである。

写真-1にあるように、ジェットファンの電動機はジェットファン内部に設置されている。トンネルに設置されると、外からは電動機が確認できない構造になっているため、正確に電動機の劣化度合いを目視で確認できているわけではなく、異常振動・異音などでしか異常判断ができない。



写真-1 ジェットファン電動機設置箇所

### 2-3 整備計画上の問題

第三に、維持管理費の問題である。従来、外観の腐食と設置年数を目安に機器更新を行って

いたため、電動機の寿命前に更新していた可能性がある。現在は、機器腐食の対策として、ステンレス材質のジェットファンを採用しており、従来よりも機器更新間隔は長くなると見込まれる。つまり、ジェットファンが健全な状態を維持するためには、電動機の分解整備を実施する必要がある。

しかし、設置からの経過年数や運転時間を目安に分解整備を行うと、常用稼働台数の多い神戸長田トンネル・新神戸トンネル・正蓮寺川トンネルのジェットファンは計画年度が集中化してしまい、工程及び費用的に問題となる。その際、各々の劣化状態が把握できていなければ適切な整備時期の調整が出来なくなってしまう。

## 3. 各種問題の対策(電流兆候解析)

先述の問題を解決するために、電流兆候解析MCSA(Motor Current Signature Analysis)(以下MCSAと称する)を用いた劣化診断の検討を行った。

### 3-1 MCSAとは

MCSAとは、電動機内部(図-1)の固定子と回転子間のエアギャップの変化や回転子バーの抵抗値変化、回転の変動、トルクの変動などが空間磁束線に影響を与え、逆起電力を通して固定子に流れる電流に反映しているという理論に基づいたものである。

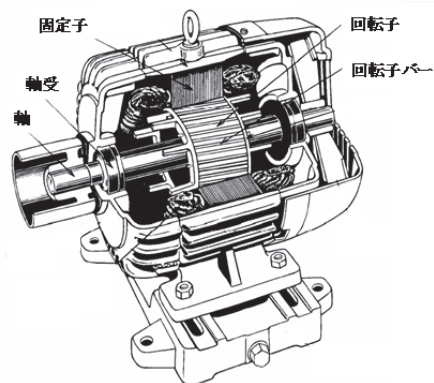


図-1 電動機断面図<sup>1)</sup>

この原理を利用することで、電動機内部を確認せず回転子バーの破損・回転子の偏心、固定子の鉄心の破損、巻き線の緩み・短絡など異常、又は兆候を検出することができる。更には検出信号に信号処理を施すことで電動機に駆動されている従機の不釣り合い、心出し不良、基板緩み、軸受けの欠陥などについても検出することができる。<sup>2)</sup>

### 3-2 MCSA の優位性

本診断技術は、1970年に米国原子力規制委員会で、原子炉に入らず炉内に設置された電動機の状態を診断する方法が必要とされたことから研究が始まった技術である。その後、1985年から欧米で実用化されてきており、現在欧米では盛んに利用されている。容易に近接が出来ないという面ではトンネル内のジェットファンは原子炉と共通しているため、MCSAの技術はジェットファンに対して有効な診断技術であると考えられる。

### 3-3 実用化に向けた計画

MCSA 実用化に向け、下記の通り(a)、(b)の検証を行う。なお、ジェットファンに対してのMCSA 導入については他の道路会社での実施事例もないため、検証の実施方法についてデータ分析などの試行を通じて新たに定義することとした。

#### (a) 電動機差による検証

まず、同じ仕様かつ電動機のみ劣化度合いに差のあるジェットファンにて状態の比較を行う。新神戸トンネル上り線に、電動機を更新したばかりのジェットファン(JF-10)と、設置から27年経過した電動機を搭載したジェットファン(JF-9)にて、比較検証を行う。

#### (b) ジェットファンに対するMCSA 適用性検証

上記(a)による検証が完了次第、MCSA による診断結果の確からしさを検証するため、機器更新直前のジェットファンに対してMCSA を行い、

その結果と内部の劣化状態を比較する。直近では、設置から17年経過した伊丹トンネルのジェットファンが更新されるため、伊丹トンネルのジェットファンを対象とする。

## 4. 対策実施内容と結果考察

### 4-1 使用機器

今回、MCSA による解析を行うにあたり、ツールとしてBentry Nevada 製品のアノムアラート(図-2)を使用する。



図-2 アノムアラート姿図

現場へは図-3のように、電気盤と電動機間の電流値と、電気盤の電圧値が入力できるように設置する。アノムアラートは軸受、回転体、ミスアライメントなどの機械的故障と、電圧アンバランス、固定子異常、巻線異常、回転体異常などの電氣的故障について診断できるようになっている。

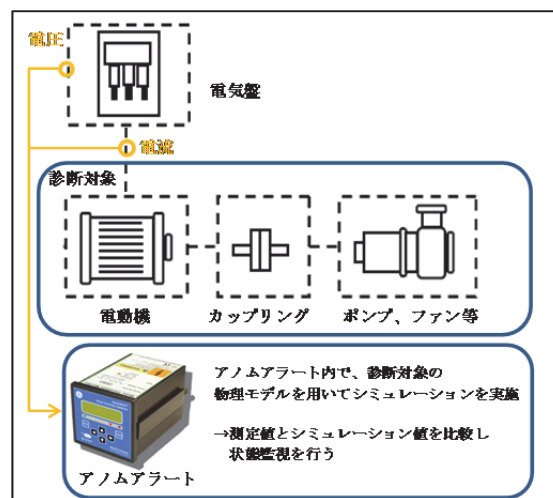


図-3 アノムアラート測定要領

## 4-2 実施結果

### (a) 電動機差の検証結果

新神戸トンネル上り線の JF-9 と JF-10 の PSD (Power Spectrum Density : パワースペクトル密度) を図-4 に示す。横軸は周波数、縦軸は振幅の標準偏差を取ったグラフである。PSD とは単位周波数毎のパワー分布で、機器に異常があればその部位に応じた特定の周波数帯の値が増加する。今回の比較では、多少の差はあるものの、両機器とも機械的な不具合箇所は存在しないという結果が得られた。

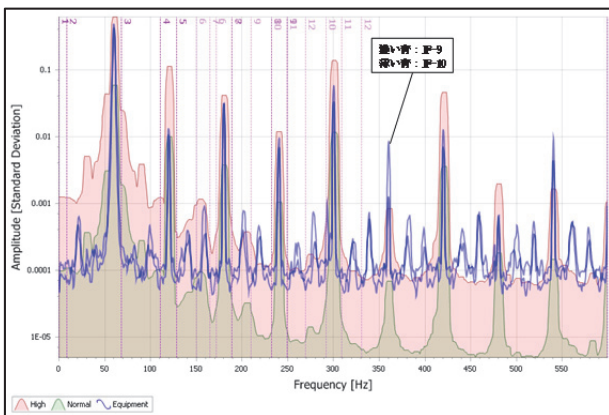


図-4 新神戸トンネル PSD 比較

一方、電気的な要素に着目すると、電動機が古い JF-9 については、JF-10 に対し R・S・T 各相電流値のアンバランスが大きいことが確認できた。

アンバランスの根本的な原因は絶縁抵抗の劣化が考えられ、アンバランスが大きければすぐに不具合が起きるというわけではなく、機器個体差に起因することもあるため、絶対値ではなくアンバランスのトレンドを捉える必要がある。今回測定した期間では悪化トレンドではなかったため、今後も定期的にアンバランスが増加しないかを継続的に監視する必要があるという結果であった。図-5 に電流アンバランス値のトレンドグラフ、図-6 に各相の電流値トレンドグラフを示す。

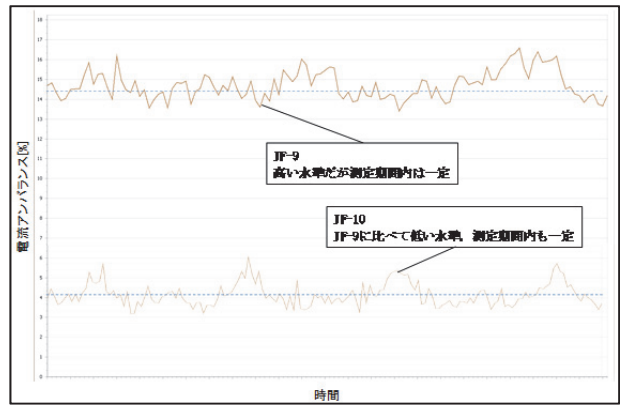


図-5 電流アンバランス トレンドグラフ

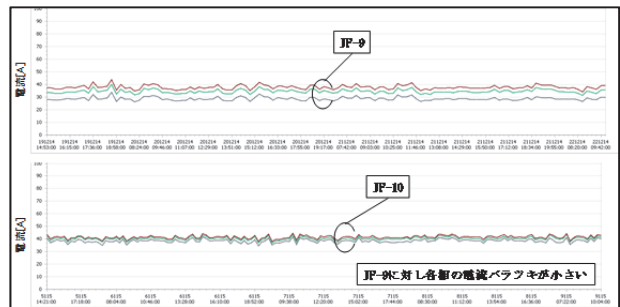


図-6 電流値 トレンドグラフ

### (b) ジェットファンへの MCSA 適用性検証結果

アノムアラートによる劣化診断結果は、異常がないという結果であった。そこで、結果の信頼性を検証するために、回転機器において一般的に劣化が顕著に表れるベアリングに着目し、正常であることの確認を行うためにベアリングの解析を製作メーカーに依頼した。

撤去されたジェットファンのベアリングに対して、すきまや真円度の寸法測定、グリース状況の確認のための IR 分析等を行った結果、継続しての利用は充分可能というものであった。ベアリングの調査結果を表-3 に示す。

表-3 ベアリング調査結果

| 6312ZC3 ENS |                |                             |
|-------------|----------------|-----------------------------|
| 項目          | 軸受 No. 1       | 軸受 No. 2                    |
| 音響 (聴覚)     | レース音小          | レース音小                       |
| 寸法測定        | 全て規格内          | 全て規格内                       |
| グリース状況      | 変色、油分は十分認められる。 | 変色、油分は十分認められる。              |
| 外観・内部状況     | 返却時            | 反刻印側のシールド表面にグリース状の付着が認められる。 |
|             | 外輪軌道面          | 内径面にフレッチングが認められる。           |
|             | 内輪軌道面          | やや変色した軽微な走行跡が認められる。         |
|             | 玉              | やや変色した軽微な走行跡が認められる。         |
|             | 保持器            | 特に異常は認められない。                |
| 真円度形状       | 特に形状変化は認められない。 | 特に形状変化は認められない。              |
| 溝R形状        | 特に形状変化は認められない。 | 特に形状変化は認められない。              |

また、残余寿命調査のため、ベアリングの内輪に対して、疲労進行度の確認も行った。疲労進行度は、これまでに蓄積されたデータを統計的に評価した疲労度インデックスと呼ばれる指標を用いて求められるものである。疲労進行度の調査結果を図-7、図-8、表-4 に示す。最大の疲労度インデックスが 1.2(もう片方のベアリングの疲労度インデックスは 1.0)、寿命までの進行度合いである疲労進行度が 6%であり、ベアリングの劣化状況だけで考えると、残余寿命はこれまでの運転時間の 10 倍以上という結果であった。

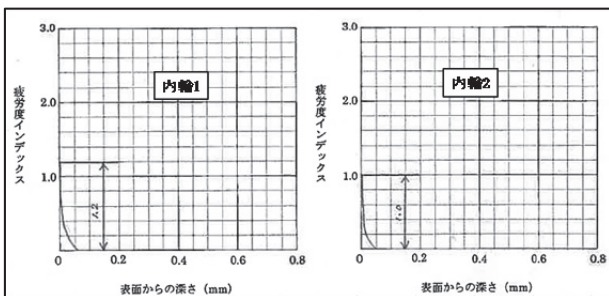


図-7 ベアリング内輪疲労度インデックス

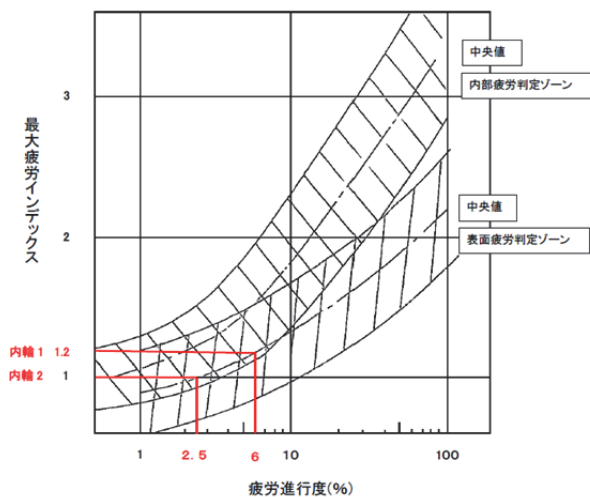


図-8 ベアリング内輪疲労進行度

表-4 残余寿命調査結果

| 試料  | 疲労タイプ | 疲労進行度 | 残余寿命推定 |
|-----|-------|-------|--------|
| 内輪1 | 表面疲労  | 疲労度小  | 10倍以上  |
| 内輪2 | 表面疲労  | 疲労度小  | 10倍以上  |

#### 4-3 結果考察

2-1 で記載した点検上の問題については、トンネル内ではなく、電源供給元のコントロールセンター盤・インバーター盤が設置されている電気室・通信機械室に据え付けることが可能であるため、アノムアラートを利用することで解消されることが確認できた。設置状況の写真を写真-2 に示す。



写真-2 現場設置状況

電動機差の検証結果からは、測定電圧・電流を使用しているため、電流アンバランスの差があることは正確に読み取れる。ジェットファンの故障パターンは過去の事例を確認しても電動機の絶縁不良による故障のみであるため、継続的に診断を行うことで劣化傾向にあるかの判断は可能である。しかし、機器個体差のある電流アンバランスのみで劣化を判定するのは難しいと思われる。機器の個体差に影響されないために、機器それぞれの初期値を把握し、初期値からの変動を指標とすることが望ましいため、設置年数の浅い機器を優先して初期データ取りを行う計画を立てる必要がある。

MCSA の結果と実機分解の比較では、ともに正常な結果というものであり、十分な検証ができたとは言いがたいが、正常状態の判定は可能であると考えている。今回対象とした伊丹トンネルのジェットファンは、設置後 17 年経過していたが、用途が排煙用のジェットファンであるため、総運転時間が約 550 時間と短いこともあ

り、著しい劣化をしなかったことは容易に想定できる。恒常的に換気制御で使用される換気用と、有事の際に使用される排煙用のジェットファンでは劣化状況も当然異なるとも予想できるため、換気用のジェットファンについても検証を行うことは必要であるが、換気用のジェットファンはまだ設置年数が10年にも満たない機器ばかりであり、検証するには長期的な計画が必要となる。

今後、MCSAによるジェットファンの診断を実用化するにあたり、ジェットファン特有の環境も考慮しなければならない。具体的には、大型車両が通過した直後の車両風によりジェットファンが受ける力(揺れ)をアノムアラートがどう判定するのか、他の設備のように強固な基礎に固定されている機器ではないため、揺れているという事象に対して悪影響が出てこないか、吊り金具の緩みの検出まで可能か等、検証すべき項目は多数残っているため、計画的に検証する必要がある。

## 5. 今後の予定

MCSAを用いてのジェットファン電動機の劣化診断を実用化するため、今後も複数の検証が必要になると考えている。中でも異常データを取り、判定することが難しいと考えており、異常状態の作成方法を検討する。異常データ取りと並行して、換気用ジェットファンのデータ蓄積も行い、異常発生時にデータから異常が判断出来るように備えておく。

ジェットファン個々の状態を把握することで、初めて現状の問題が解決出来るため、より安心・安全・快適な阪神高速の維持に貢献するために、今後も継続して劣化診断手法の検討していく。

### 参考文献

- 1) 3DIM 技研, 小村英智, 誘導電動機の電流微候解析, 機械状態監視診断技術(振動)交流会, 2010.
- 2) 日本診断工学研究所, 豊田利夫, 電流微候解析 MCSAによる電動機駆動回転機の診断技術
- 3) IMV 株式会社 HP, [https://www.imv.co.jp/products/bentry\\_nevada/](https://www.imv.co.jp/products/bentry_nevada/).

## APPLICATION OF DEGRADATION DIAGNOSTIC TECHNIQUE TO ELECTRIC MOTORS OF TUNNEL VENTILATING FACILITIES

Tatsuya SHIBA, Kenichi HANASAKA and Syogo HORI

Tunnel ventilation equipment is very important machinery which requires particularly careful maintenance. Although more tunnels are equipped with jet fans, their location or shape makes the close-range inspection on them, as well as detailed inspection on the interior of the motors, very difficult. Times for overhaul or replacement are determined from the appearance or in accordance with the maker recommendations. Since the number of jet fans to be inspected will increase rapidly, it is necessary to develop some simple but precise inspection method which meets specific needs of the equipment. In this study a diagnostic instrument capable of inspecting inside the motor from a distance was applied to the jet fan motors.

司馬 竜也



阪神高速技術株式会社  
工事部 京橋事業所  
Tatsuya Shiba

花坂 謙一



阪神高速技術株式会社  
工事部 四つ橋事業所  
Kenichi Hanasaka

堀 省悟



阪神高速技術株式会社  
工事部 工事統括課  
Syogo Hori