

3405 振動解析に基づく新幹線台車の状態監視

正 [機] ○大庭 拓也 (東海旅客鉄道)

山田 幸一 (東海旅客鉄道)

岡田 信之 (日本車輛製造)

正 [機] 谷藤 克也 (新潟大)

Condition Monitoring for Shinkansen Bogies Based on Vibration Analysis

Takuya OBA, Central Japan Railway Company (KOMAKI), 1545-33 Ohyama, Komaki-shi, Aichi

Koichi YAMADA, Central Japan Railway Company (KOMAKI)

Nobuyuki OKADA, Nippon Sharyo, LTD.

Katsuya TANIFUJI, Niigata University

Rolling stock has been generally inspected and maintained on the basis of the preventive maintenance. However, the reliability of the sensors and information technology has drastically improved, and with this background the objective of this research is to develop the condition monitoring system for the bogies of the Shinkansen cars. This paper describes an algorithm for detecting fault in some parts of bogies. This scheme is based on the statistic analysis of vibration acceleration. This algorithm detects the signs of faults by examining the amplitude and duration of measured vibration acceleration. For examining the possibility to detect fault in the bogie, experiments simulating some fault modes in bogie parts are conducted in the rolling stock field simulator at Komaki Research Center of JR Central. From the results of these experiments, we can show the reliability and the validation of this scheme for monitoring conditions of Shinkansen bogies developed in this study.

Keywords : Railway, Diagnostics, High-speed Train, Monitoring, Fault Detection, Vibration of Moving Body, Vibration of Rotating Body

1. はじめに

鉄道車両は一般的に予防保全を基本に保守管理されており、安全は確保されている。しかし、台車については一重系であり、異常が発生した場合には重大事故に繋がる恐れがある。近年のセンサ技術、IT 技術のめざましい発展を背景に、鉄道車両分野でも主に、電気機器分野では状態監視システムが開発され、実際に運用が開始されており、一定の成果を上げつつある⁽¹⁾。一方、機械部品の状態監視の取り組みとしては、故障検知や同定 (Fault Detection and Identification : FDI) に基づく車両の状態監視と故障検知に関する研究報告^{(2)~(3)}がなされているが、それらは主にバネ特性の経年変化などをテーマにしたもので、必ずしも重大事故に繋がりうる台車不具合とは関連付けられていない。重大事故を防止する上で重要な回転駆動系機械部品の状態監視の分野では、床下温度検知システムなど一部で既に運用を開始した温度検知事例⁽⁴⁾もあるが、総じて、台車に関する状態監視の取り組みは進んでいないのが現状である。

本研究では重大事故に繋がりうる新幹線台車回転駆動系部品の異常の予兆を早期に検出し、警告を発する状態監視システムの開発を目的としている。著者らは、走行速度、線路状態の影響を排除するため、編成内の同一部位の振動を比較することによる異常検知方法⁽⁵⁾及び同一車両内の前位台車と後位台車の振動状態の比較に基づく異常検知手法を提案した。本報では、より短時間で異常判定を実施するため、振動ピーク値とその継続性の比較に基づく新幹線台車の異常検知アルゴリズムを提案する。次いで、現車走行状態を模擬できる車両走行試験装置で台車回転部品の異常模擬試験を実施し、開発した解析手法の特性と有効性を検証する。

2. 異常検知手法

鉄道車両において計測した振動加速度を基に走り装置の異常検知を行う場合、測定される振動加速度に対して一律の閾値を設け、その閾値によって正常、異常の判定を行なうのが最も簡潔なシステムとなる。しかし、実際の車両走行時に測定される振動加速度は、線路状態などの地上側条件や走行速度帯により正常時においてもばらつきが大きい。本研究において開発した異常検知アルゴリズムはそのような擾乱を除くことが可能である。これらのアルゴリズムは下記のように台車部品の回転に関する振動ピーク値とその継続性を走行速度帯毎に、正常時データと比較照合することによって異常検知を行う。

2.1 前処理

(a) 等距離サンプリング 振動加速度計により式 (1) のように等間隔 Δt で取得した時系列の振動加速度離散データを $f(t_i)$ とする。 Δt は検知対象の周波数域から余裕をみて 1/2000 秒とする。 N は時間領域のデータ数を表す。

$$t_i = i \times \Delta t \quad i=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

振動加速度と同時に取得した速度データ v_i を用いて時間に関して式 (2) で表される数値積分を実行する。

$$\begin{aligned} x_i &= \int_{t_0}^{t_{i-1}} v dt \\ &= \Delta t \left(\frac{1}{2} v_0 + \frac{1}{2} v_{i-1} + \sum_{j=1}^{i-2} v_j \right) \end{aligned} \quad (2)$$

こうすることにより式 (3) のように時系列の振動加速度離散データ $f(t_i)$ を、走行距離に応じた離散データ $f(x_i)$ に変換する。

$$f(x_i) = f(t_i) \quad (3)$$

更に、この離散データを式 (4) で表される等間隔 Δx で再サンプリングする。

$$\Delta x = \frac{x_{N-1}}{M-1} \quad (4)$$

M は空間領域のデータ数を表す。 Δx は後述するバンドパスフィルタの最小通過域から余裕をみて 0.1m とする。 Δx を加算することにより、 j 番目の離散データの走行距離は式 (5) のように表され、その走行距離が式 (6) を満たす区間に存在する場合、式 (7) に示す線形補間により、 x_j' における等距離サンプリングされた振動加速度離散データ $f(x_j')$ を得る。

$$x_j' = j \times \Delta x \quad j=0,1,2,\dots,M-1 \quad (5)$$

$$x_k < x_j' < x_{k+1} \quad (6)$$

$$f(x_j') = \frac{f(x_{k+1}) - f(x_k)}{x_{k+1} - x_k} (x_j' - x_k) + f(x_k) \quad (7)$$

(b) 空間バンドパスフィルタ (BPF) 処理

台車回転部品の不具合は構成部品の回転周波数に関連していると考えられ、表 1 に示す各空間フィルタを手順 (a) の出力である等距離サンプリングされた振動加速度離散データ $f(x_j')$ に適用する。各フィルタは各々車輪とピニオン軸の回転周波数に対応しており、ピニオン軸に関するフィルタの通過域は新幹線車両の駆動装置のギア比に基づき算出している。各フィルタ通過域については新幹線車両の車輪直径の変化に対応した幅を有している。よって波数は表 1 に示す範囲となる。各フィルタについては 4 次のバターワース型のデジタルバンドパスフィルタを使用する。フィルタ適用前後の信号波形例を図 1 に示す。

2.2 振動ピーク値と継続性の比較

(1) 振動ピーク値の算出 上記の各フィルタ通過域の振動ピークを抽出し、区間毎のピーク値とする。各通過域でのピーク値は図 1 中に示すように、各フィルタ通過域の中で正負のピーク値を抽出し、絶対値をとる。この際、1 番目のフィルタ通過域のピーク値を P_1 とする。

(2) 振動ピーク平均の算出 予め測定した正常状態における走行速度帯毎、空間フィルタ通過域毎の振動ピーク値の絶対値の平均値を P_r とする。実運用時では正常状態については、車両完成時の試験走行データを基に算出する。本手法では同部位での検知であり、部位毎にピーク平均値を設定するため、部品固体差等の変動要素は排除される。

Table 1 Properties of filters

Rotation mode	Band pass filters' pass band [1/m]	Frequency at maximum speed [Hz]
Wheel 1st	0.32~0.46	31~34
Pinion 1st	0.92~1.38	91~99
Pinion 2nd	1.88~2.66	183~199

(3) 異常検知指数の算出 振動ピーク値の大きさと継続性を異常検知の指標とするため、手順 (1) で算出した振動ピーク値 P_i が手順 (2) で算出した振動ピーク平均値 P_r の一定の倍率を連続して超過する回数を異常検知指数とし、走行速度帯とフィルタ通過域毎に求める。異常検知指数の具体的な算出手順は図 2 に示すように、振動ピーク値 P_i が、当該の走行速度帯と空間周波数域での振動ピーク平均値の一定の倍率を超えたら加算し、1 回でも下回った場合には初期化する。例えば、ある走行速度帯での P_r の倍率を表 2 の 1 行目の値とした場合、

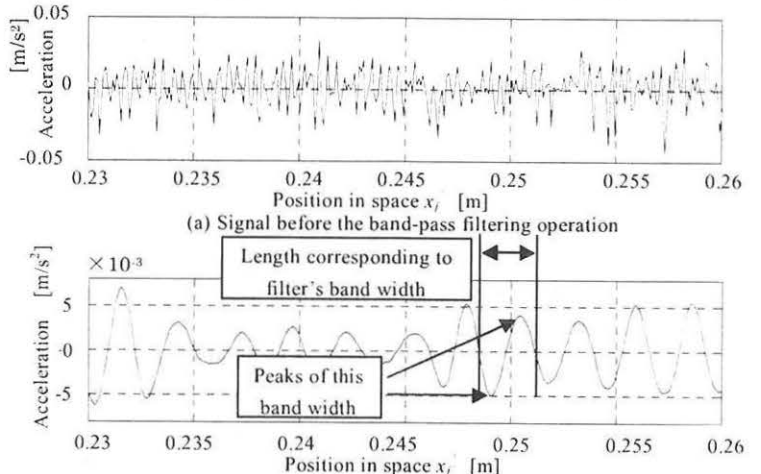


Fig.1 Bandpass filtering in space

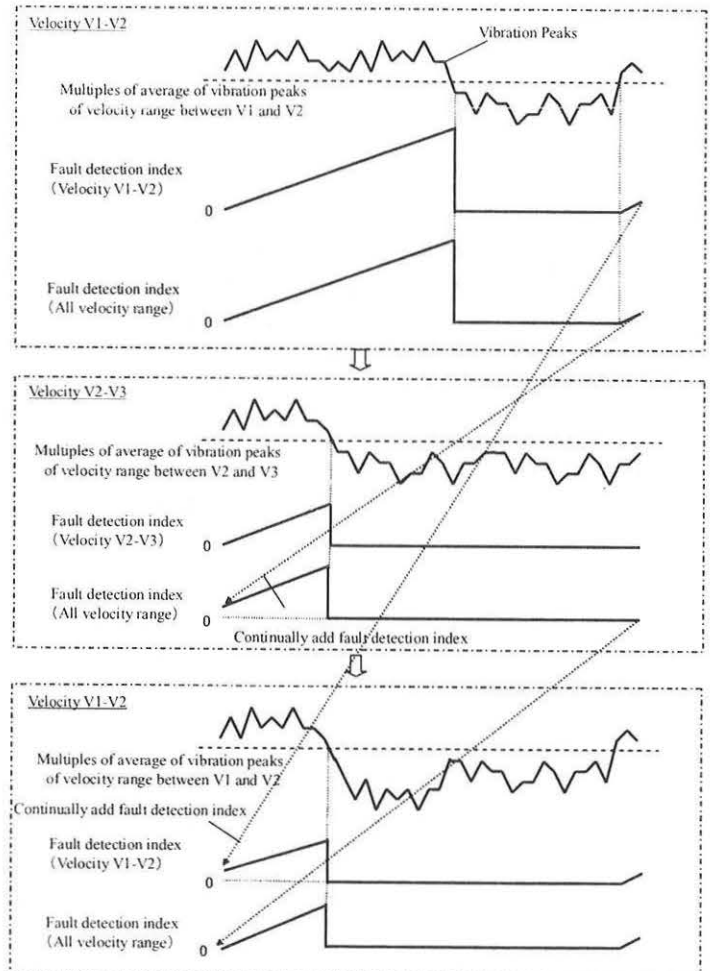


Fig.2 Procedure of fault detection algorithm

Table 2 Fault detection index matrix (Normal condition)

	×1.5	×2	×2.5	×3	×4	×5	×7	×9	×11	×13
100km/h	12	8	5	4	0	0	0	0	0	0
105km/h	9	3	0	0	0	0	0	0	0	0
110km/h	12	9	3	2	0	0	0	0	0	0
115km/h	12	9	6	3	1	0	0	0	0	0
120km/h	13	9	6	5	2	2	0	0	0	0
125km/h	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0
130km/h	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0
135km/h	7	1	3	3	0	0	0	0	0	0
140km/h	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
145km/h	12	5	1	0	0	0	0	0	0	0
150km/h	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0
155km/h	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0
160km/h	8	2	1	0	0	0	0	0	0	0
165km/h	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0
170km/h	8	2	1	0	0	0	0	0	0	0
175km/h	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0
180km/h	7	2	1	0	0	0	0	0	0	0
185km/h	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0
190km/h	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
195km/h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200km/h	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
205km/h	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
210km/h	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
215km/h	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0
220km/h	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0
225km/h	10	5	1	0	0	0	0	0	0	0
230km/h	9	7	2	0	0	0	0	0	0	0
235km/h	13	8	4	1	0	0	0	0	0	0
240km/h	10	8	2	0	0	0	0	0	0	0
245km/h	16	9	6	2	0	0	0	0	0	0
250km/h	14	13	9	6	0	0	0	0	0	0
255km/h	16	13	10	6	0	0	0	0	0	0
260km/h	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
265km/h	16	13	12	9	2	0	0	0	0	0
270km/h	17	16	13	12	8	2	0	0	0	0
0km/h	17	16	13	12	8	2	0	0	0	0

$P_r \times 2.5 < P_l < P_r \times 3$ であれば、倍率が1.5、2、2.5の異常検知指数を各々加算する。併せて、走行速度変化時の異常検知性能を向上させるために、走行速度が変化した場合でも連続して超過している場合には直前の走行速度帯での異常検知指数を保持したまま加算を継続する。この手順によって異常検知指数は表2のような異常検知指数表として表すことができる。この表は東海道新幹線の東京-新大阪間で予め測定した正常走行時の最大値を示している。実際に、本手法により異常検知を行う際には、処理後の異常検知指数表の中の各値が、表2の正常時の異常検知指数表の中の各値より大きな値となった場合に異常判定する。

3. 台車部品の異常模擬試験

前章で詳述した異常検知アルゴリズムを検証するため、新幹線台車部品の異常模擬試験を実施する。

3.1 試験装置

東海旅客鉄道株式会社技術開発部（小牧）の車両走行試験装置を図3に示す。この試験装置は現車走行条件を忠実に再現することが可能である。また、本線上での試験が難しい装置部品の不具合設定試験の実施が可能であり、不具合の予兆を検証することが出来る。図3中で新幹線の車体と台車はレールの役割を担う軌条輪上に設置されている。この試験装置は本線走行状態と同様に、車上の電気機器により力行、ブレーキを制御することが出来る。

3.2 異常設定項目

検証する異常種別については表3に示す。今回の試験検証する異常種別は、東海道新幹線開業以来の新幹線台車部品に発生した事例の検証に基づき選定している。

3.3 試験条件

駆動条件については、本線走行時の条件を模擬するため、車両側からの駆動とし、軸重は定員乗車時相当の荷重とする。また、試験には実運用で使用された運転曲線を用いる。また、振動加速度の測定については車体下面に設置した加速度センサにより行う。測定点の詳細は図4に表す。異常模擬の設定手順としては、車両検修上の

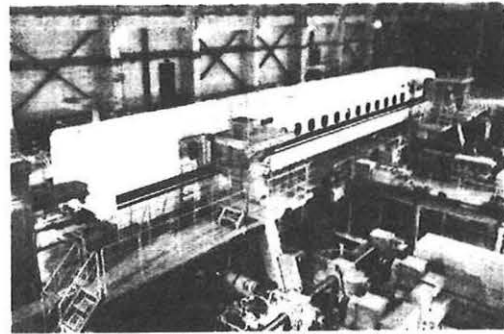


Fig.3 Rolling stock field simulator (Komaki Research Center)

Table 3 Examined fault modes

Test number	Test contents
1	One bolt missing from sleeves of WN coupling
2	Two bolts missing from sleeves of WN coupling
3	Poor lubrication in WN coupling
4	Poor lubrication in axle box

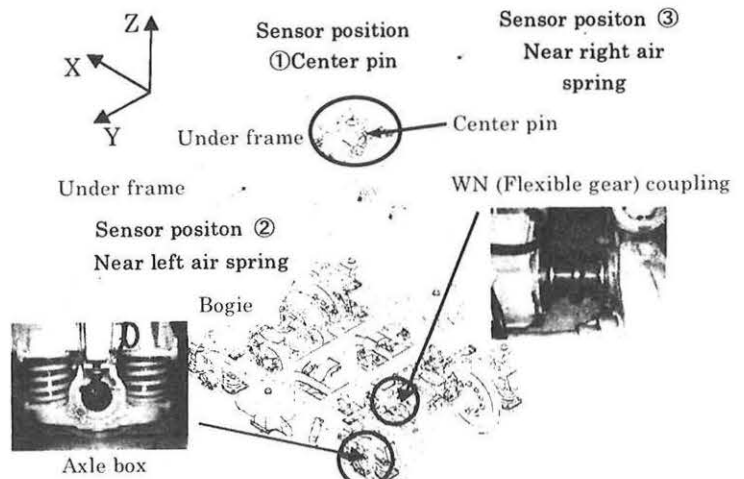


Fig.4 Parts of Shinkansen bogie related to this test

ヒューマンエラー発生の可能性等を考慮しながら決定する。WN（歯車形撓み軸）継手潤滑不良については、新品に塗布されている防錆のための機械油を拭き取って台車に組み込む。車軸軸箱潤滑不良については、軸箱下部に設けられている排油栓から潤滑油を抜き取る。

4. 異常検知手法の性能検証

2章において詳述した異常検知手法について、今回実施した異常模擬試験の各異常モードに対する異常検知性能を検証する。

振動加速度の測定位置は図4①の台車中心ピン直上で、測定方向は前後方向である。走行パターンについては比較のため、表2と同じ実際の本線走行時のものを用いる。表4、5に表3に示した異常モード中の試験結果例を示す。この表は各異常模擬試験結果を異常検知指数表としてまとめたものである。表は例としてビニオン1次の空間バンドパスフィルタ処理による解析結果を示している。表中の灰色箇所は表2に示した正常時の異常検知指数表と比較した際に、正常時を上回る異常検知指数となっている。WN継手取付ボルト1本脱落（表4）、WN継手潤滑不良（表5）ともに、多くの走行速度帯で正常時を上回る異常検知指数を示しており、安定した異常検知が可能であることが分かる。また、異常時には継続時間は短いものの正常時に見られないような大きな振動ビ

Table 4 Fault detection index matrix
(1 bolt missing from WN coupling)

	x1.5	x2	x2.5	x3	x4	x5	x7	x9	x11	x13
-100km/h	13	8	8	3	2	0	0	0	0	0
-105km/h	7	4	2	0	0	0	0	0	0	0
-110km/h	21	12	7	6	2	0	0	0	0	0
-115km/h	13	9	8	3	2	0	0	0	0	0
-120km/h	13	11	6	3	1	0	0	0	0	0
-125km/h	13	9	8	8	1	0	0	0	0	0
-130km/h	9	5	2	1	0	0	0	0	0	0
-135km/h	12	6	2	0	0	0	0	0	0	0
-140km/h	9	5	0	0	0	0	0	0	0	0
-145km/h	12	9	6	2	0	0	0	0	0	0
-150km/h	10	4	2	0	0	0	0	0	0	0
-155km/h	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
-160km/h	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0
-165km/h	12	6	2	0	0	0	0	0	0	0
-170km/h	12	8	5	1	0	0	0	0	0	0
-175km/h	13	7	2	0	0	0	0	0	0	0
-180km/h	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-185km/h	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-190km/h	3	2	2	1	0	0	0	0	0	0
-195km/h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-200km/h	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-205km/h	7	3	1	0	0	0	0	0	0	0
-210km/h	16	8	5	1	0	0	0	0	0	0
-215km/h	9	7	2	0	0	0	0	0	0	0
-220km/h	14	10	8	5	0	0	0	0	0	0
-225km/h	16	12	9	8	1	0	0	0	0	0
-230km/h	17	13	9	9	2	0	0	0	0	0
-235km/h	21	18	16	13	8	3	0	0	0	0
-240km/h	17	14	12	9	2	1	0	0	0	0
-245km/h	16	13	9	5	0	0	0	0	0	0
-250km/h	17	16	14	10	5	2	0	0	0	0
-255km/h	16	13	13	12	8	1	0	0	0	0
-260km/h	17	16	13	13	9	5	0	0	0	0
-265km/h	17	16	16	15	12	10	0	0	0	0
-270km/h	17	17	16	14	12	9	0	0	0	0
0km/h	21	18	16	13	12	9	0	0	0	0

Table 5 Fault detection index matrix
(Poor lubrication in WN coupling)

	x1.5	x2	x2.5	x3	x4	x5	x7	x9	x11	x13
-100km/h	18	16	16	10	8	6	1	0	0	0
-105km/h	16	13	12	12	9	5	0	0	0	0
-110km/h	18	13	12	12	12	9	6	2	0	0
-115km/h	15	13	13	12	8	7	2	0	0	0
-120km/h	20	20	13	13	10	9	3	2	0	0
-125km/h	22	17	17	14	7	6	4	1	0	0
-130km/h	24	16	16	13	9	6	2	0	0	0
-135km/h	21	16	14	13	13	12	2	2	0	0
-140km/h	23	17	16	13	12	9	6	1	0	0
-145km/h	18	18	17	17	12	9	2	1	0	0
-150km/h	16	13	9	5	2	0	0	0	0	0
-155km/h	18	13	12	9	6	2	0	0	0	0
-160km/h	16	14	13	10	6	2	0	0	0	0
-165km/h	21	13	12	12	5	2	0	0	0	0
-170km/h	27	13	13	13	13	10	2	0	0	0
-175km/h	16	14	14	13	12	9	2	0	0	0
-180km/h	18	13	13	9	6	5	1	0	0	0
-185km/h	13	13	12	7	6	2	0	0	0	0
-190km/h	11	10	7	5	4	3	1	0	0	0
-195km/h	14	6	4	4	2	2	0	0	0	0
-200km/h	14	8	6	5	3	3	0	0	0	0
-205km/h	17	10	10	7	2	1	0	0	0	0
-210km/h	17	14	11	9	7	4	0	0	0	0
-215km/h	13	11	9	7	3	1	0	0	0	0
-220km/h	13	13	12	12	7	4	0	0	0	0
-225km/h	18	17	13	12	5	3	0	0	0	0
-230km/h	18	13	12	9	5	2	0	0	0	0
-235km/h	17	17	16	12	8	4	0	0	0	0
-240km/h	16	14	12	12	6	2	0	0	0	0
-245km/h	17	15	13	10	10	7	0	0	0	0
-250km/h	17	16	13	11	9	5	0	0	0	0
-255km/h	17	13	12	9	3	2	0	0	0	0
-260km/h	16	13	12	9	5	1	0	0	0	0
-265km/h	17	16	12	11	4	0	0	0	0	0
-270km/h	17	16	16	13	9	5	0	0	0	0
0km/h	27	20	17	17	13	12	6	2	0	0

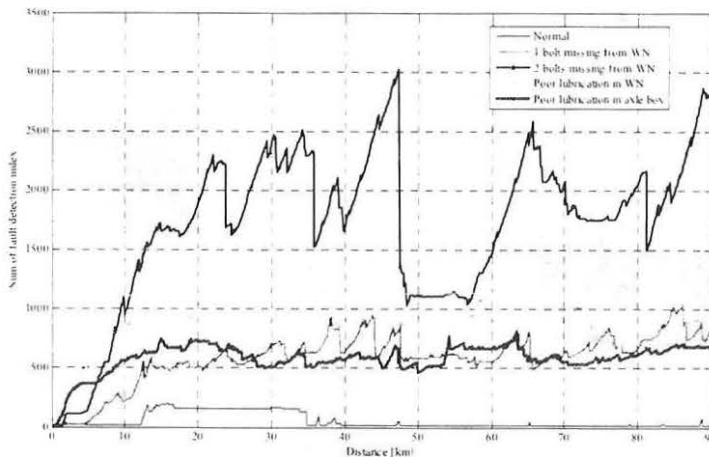


Fig.5 Variation of the sum of fault detection index with running distance

ーク値が発生することも同表より確認できる。次に、表3に示した4つの異常モードについて、ピニオン1次の空間フィルタ処理後の走行距離と異常検知指数表中の異常検知回数の総和の推移を図5に示す。この図より異常時の異常検知指数は、取付ボルト脱落のような質量アンバランス及び潤滑不良といった異常種別に関係なく試験開始直後の数kmの初期段階から正常時と比較すると、著しく大きな値となっており、初期段階での異常検知が可能と考えられる。

このように、適切な空間フィルタを用いることによって、正常試験と異常模擬試験の間には振動ピーク値のその継続性に著しい差異が生じ、異常発生初期段階で十分異常を検知することが可能と言える。

5. まとめ

異常発生初期段階での検知を可能にする新幹線台車の状態監視システムの実現に向けて、振動加速度のピーク値とその継続性の比較に基づく異常検知手法について検討を行った。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 空間バンドパスフィルタ処理を実施した振動加速度ピーク値とその継続性を走行速度帯毎で正常時と比較

することによって新幹線台車の回転系部品の不具合に起因する異常を検知する手法を開発した。

(2) (1)に記した異常検知手法の検知性能を検証し、検証した過去事例の異常種別について、早期の異常検知が可能であることを確認した。異常時においては、振動ピーク値、継続時間ともに正常時との間に著しい差異が見られ、ピーク値と継続回数に基づく異常検知指数表によって早期の異常検知が可能である。

以上のことから、開発した振動加速度のピーク値処理に基づく異常検知手法が新幹線台車の状態監視に有効であることを確認できた。本論文では、新幹線車両の台車を異常検知対象としたが、開発した異常検知手法では、適切な空間フィルタを用いて回転成分を抽出することにより異常検知が可能であることから、新幹線以外の鉄道車両、さらには回転機械等の異常検知への応用が期待できる。

参考文献

- 1) Morimura, T., A Note on Research and Development to the condition monitoring system, Japan Railway Engineers' Association, Vol. 51, No. 7 (2008), pp. 8-11.
- 2) Hayashi, Y., Tsunashima, H. and Marumo, Y., Systems Using Multiple-Model Approach, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 1, No. 4 (2008), pp. 88-99.
- 3) Goodall, R. M. and Mei, T. X., Advanced Control and Monitoring for Railway Vehicle Suspensions, Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev System 2006 (STECH 2006), (2006), pp. 10-16.
- 4) Yamada, K., Development of Temperature Measurement System of Underfloor Equipment, Rolling stock & machinery, Vol. 15, No.4 (2007), pp. 23- 26.
- 5) Oba, T., Yamada, K., Okada, N., Soma, H. and Tanifuji, K., Condition Monitoring for Shinkansen Bogies Based on Vibration Analysis, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 75, No. 757 (2009), pp. 2459- 2467.