

車両の振動位相差に着目した上下動ダンパの異常検出

小島 崇* 菅原 能生**

Fault Detection of Vertical Dampers of Railway Vehicles Based on Phase Difference of Vibrations

Takashi KOJIMA Yoshiki SUGAHARA

This paper presents a technique for damper fault detection based on the phase difference between the bounce and the pitch vibration of bogie frames or a car body obtained with inertial sensors, as a method without mounting sensors in oil dampers. The result of vibration excitation test with one vehicle on a testing plant demonstrates that the fault of a primary vertical damper was detectable by evaluating the phase difference between the bounce and the pitch vibration of the bogie frames. The result of running test on a meter-gauge line demonstrated that the fault of a secondary vertical damper was detectable based on the phase difference between the bounce and the pitch vibration of the car body.

キーワード：異常検出，診断，モニタリング，車両振動，可変減衰ダンパ，位相差

1. はじめに

鉄道車両の上下系の振動乗り心地を向上する方法の一つとして、筆者らは、減衰力の制御機能を持つ油圧ダンパを用いて1次ばね系や2次ばね系の上下方向の減衰力を制御することにより、車体の振動を低減する制振制御システムを開発している^{1) 2)}。このようなシステムの実用にあたっては、システムに何らかの異常が発生した場合に、それを検出して制御を停止する機能が必要になる。異常検出機能には、異常な制御出力や断線などといった制御システム特有の故障に加え、油圧ダンパ本体の機械的故障の検出も求められる。ダンパ本体が正常に機能しているかどうかのモニタリングは、例えばひずみゲージなどをダンパに組み込み減衰力を直接計測すれば比較的容易に行えると考えられるが、ダンパにそのようなセンサを設けることは、センサの信頼性やコストの観点から実用には望ましくない。そこで、制振制御に使用する加速度センサで取得できるばね上の振動からダンパの減衰力異常を検出する手法について検討する。

振動による異常検出の簡単な方法として、振動加速度の著大値やパワーを評価する手法が挙げられるが、それらの指標は軌道変位や走行速度によっても変化するため、このような方法によりダンパの異常を判別することは難しい。

本論文では、台車枠や車体の並進運動と回転運動との位相差を評価することによって、軸ダンパ（1次ばね系）やまくらばねダンパ（2次ばね系）の減衰力異常を検出する手法を提案する。そして、軸ダンパについては車両

試験台を用いた1車両の加振試験、まくらばねダンパについては走行試験を実施した結果について述べ、提案する手法の有効性を示す。

2. 異常検出の原理

一般に2次ばね系の上下剛性は1次ばね系に比べて十分小さいため2次ばね系を無視することにより、台車枠の上下系の運動は、図1に示すように、2つの車軸の上下変位 z_{R1} 、 z_{R2} を入力とする、1次ばね系と台車枠から構成される単純なモデルで近似表現することができる。軸間距離 $2l$ および走行速度 v が一定で、ある周波数 ω に注目すると、各車軸の上下変位 z_{R1} 、 z_{R2} は、次式で表すことができる。

$$z_{R1}(t) = A \sin \omega \left(t + \frac{l}{v} \right) \quad (1)$$

$$z_{R2}(t) = A \sin \omega \left(t - \frac{l}{v} \right) \quad (2)$$

これを、台車枠に対する上下並進入力 z_R とピッチ入力 θ_R に変換すると次式が得られる。

$$z_R(t) = \frac{z_{R1} + z_{R2}}{2} = A \cdot \cos \omega \frac{l}{v} \cdot \sin \omega t \quad (3)$$

$$\theta_R(t) = \frac{z_{R2} - z_{R1}}{2l} = -\frac{A}{l} \cdot \sin \omega \frac{l}{v} \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

この式から、 z_R と θ_R の位相差は、振幅 A によらず ± 90 degとなり、周波数 ω 、走行速度 v 、軸間距離 $2l$ の関係によって符号のみが変わることがわかる。

これらを入力とする台車枠の上下並進運動 z 、ピッチング θ は、図2に示すブロック線図で表される。ここで、

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室

** 車両構造技術研究部 車両振動研究室

特集：車両技術

図中の各伝達関数は次式で定義され、車両の特性によって決まるものである。

$$G_z(s) = \frac{(c_1 + c_2)s + (k_1 + k_2)}{ms^2 + (c_1 + c_2)s + (k_1 + k_2)} \quad (5)$$

$$G_{\theta z}(s) = \frac{l(c_2 - c_1)s + l(k_2 - k_1)}{ms^2 + (c_1 + c_2)s + (k_1 + k_2)} \quad (6)$$

$$G_{z\theta}(s) = \frac{l(c_2 - c_1)s + l(k_2 - k_1)}{Js^2 + l^2(c_1 + c_2)s + l^2(k_1 + k_2)} \quad (7)$$

$$G_\theta(s) = \frac{l^2(c_1 + c_2)s + l^2(k_1 + k_2)}{Js^2 + l^2(c_1 + c_2)s + l^2(k_1 + k_2)} \quad (8)$$

ここで、 m ：台車枠質量、 J ：台車枠ピッチング慣性モーメント、 k_1 ：前側軸ばね剛性（左右の合計）、 k_2 ：後側軸ばね剛性（左右の合計）、 c_1 ：前側軸ダンパ減衰係数（左右の合計）、 c_2 ：後側軸ダンパ減衰係数（左右の合計）である。ばね系が正常である状態を $k_1 = k_2$, $c_1 = c_2$ とすると、 $G_{\theta z} = G_{z\theta} = 0$ となるので、上下並進運動とピッチングは独立する。したがって、台車枠の上下並進運動 z とピッチング θ の正常時の位相差は、 z_R と θ_R の位相差 (± 90 deg) と、車両の特性である G_z , G_θ の位相遅れによって決まる。もし、ばね系に異常が発生し、 $k_1 \neq k_2$ または $c_1 \neq c_2$ となった場合、 G_z , G_θ の変化に加え、特に $G_{\theta z} \neq 0$, $G_{z\theta} \neq 0$ となることにより、 z と θ の位相差が正常時から変化する。そこで、この位相差を評価することによって、ばね系の異常を走行中に検出できると考えられる。

一方、ダンパの減衰力を制御した場合、 c_1 , c_2 はそれぞれ時間とともに変化するが、正常時の c_1 と c_2 の統計的性質が近いと仮定し、正常時を $G_{\theta z} = G_{z\theta} = 0$ と近似することができれば、制御中のダンパに対しても本手法は有効である可能性がある。

以上の説明は台車枠と1次ばね系に注目したものであるが、車体と2次ばね系に注目し、台車の運動を無視す

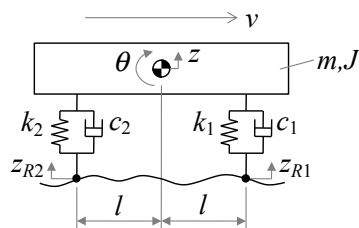


図1 台車枠の上下系振動の単純モデル

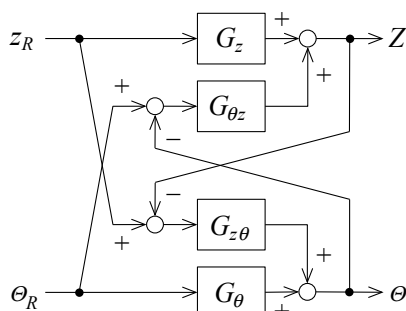


図2 ブロック線図

ると、車体の上下系の運動も同様に図1のモデルで表現できる。したがって本手法は、注目する対象物を換えることによって、1次ばね系（軸ダンパ）と2次ばね系（まくらばねダンパ）の両者の異常検出に適用できると考えられる。

3. 軸ダンパの異常検出

3.1 異常検出システムの構成

提案した異常検出手法を、1次ばね系の減衰制御による上下制振制御システム¹⁾に適用することを考慮し、図3に示すようなシステム構成とする。各台車枠に、制振制御と異常検出共用の2つの加速度センサを、上下方向を感度軸とし、台車中心の前後に配置して取り付ける。各センサからの上下加速度の加減算により、異常検出に必要な台車枠の上下並進運動およびピッチングを求める。なお、本検討においては、加速度センサの信号をデータとして収録し、そのデータに対してオフラインで異常検出処理を実行した。

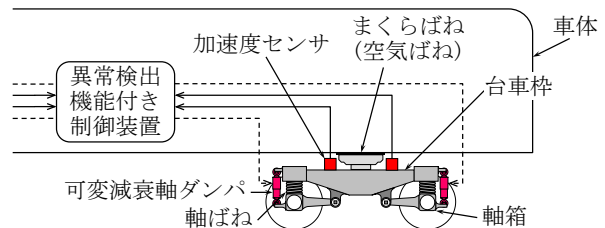


図3 上下制振制御システム¹⁾に適用した軸ダンパの異常検出システムの構成

3.2 試験方法

鉄道総研の車両試験台において、新幹線電車相当の試験車両1両を用いて試験を行った（図4）。本線走行時に測定した軸箱の振動加速度にもとづいて生成した車軸変位（上下およびロール成分）を、全車軸に対して走行速度に対応する時間差を持たせて与えることによって、本線走行時の車両の振動を模擬した。加振時間は115 sで、走行速度は320 km/h一定である。試験車両の軸距 $2l$ は2.5 mである。

試験車両には、1次ばね系の減衰制御による上下制振制御システム¹⁾を適用した。このシステムは、各台車枠に取り付けた加速度センサからの信号にもとづいて可変減衰軸ダンパ（図5）の減衰力を制御することにより、車体の振動を低減する。本試験では、LQG 制御則を用いて車体の曲げ振動を選択的に低減するよう台車枠の上下並進運動を制御し、さらにスカイフック制御則を用いて台車枠のピッチングを制御した。この可変減衰ダンパは、非制御時には通常のパッシブ軸ダンパと同等の特性となる。

ダンパの異常については、可変減衰ダンパの故障モード影響解析（FMEA）等の結果にもとづき、ダンパの減衰力が発生しなくなる異常を想定し、すべての可変減衰ダンパが非制御（パッシブ）および制御の各状態から、



図4 車両試験台による加振試験

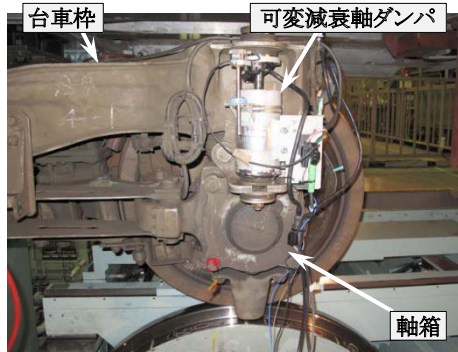


図5 可変減衰軸ダンパ（異常検出対象）

1本のダンパのみを減衰最小にして加振を行い、この異常を検出する検討を行った。異常ダンパの部位は、進行方向右側の第1～3軸のうち1箇所とした。

3.3 パッシブ状態の軸ダンパの異常検出

ダンパ正常時、第1軸右側ダンパ異常時、第2軸右側ダンパ異常時の前位台車の台車枠上下並進加速度およびピッチ角加速度の時刻歴波形を図6に示す。各条件で振幅に若干の違いが見られるが、正常と異常を区別できるような明確な違いは見られない。

前位台車の台車枠上下並進加速度とピッチ角加速度のパワースペクトル密度 (PSD) を図7に示す。上下並進運動 (図7 (a)) では10～15 Hz付近、ピッチング (図7 (b)) では6～9 Hz付近に正常時と異常時の違いが見られる。しかし、加速度 PSD は軌道からの入力に依存して変化するので、このような PSD の差異からダンパの異常を判別することは難しい。

前位台車の台車枠上下並進加速度とピッチ角加速度のクロススペクトルより求めた位相差を図8に示す。5～7 Hz付近、および10 Hz以上に正常時と異常時の違いが見られる。10 Hz以上の位相差は、理論計算を行った結果、走行速度によって大きく変化することがわかった³⁾。これに対し、5～7 Hzの位相差は、走行速度によらず第1軸右側ダンパ異常時、正常時、第2軸右側ダンパ異常時の順に大きい傾向があり、さらにこの傾向が現れる周波数は、台車枠の上下並進運動の固有振動数付近であることが理論計算によりわかった³⁾。そこで、この周波数帯域における台車枠の上下並進運動とピッチングの位相差を評価することにより、軸ダンパの異常を検出できると考えられる。

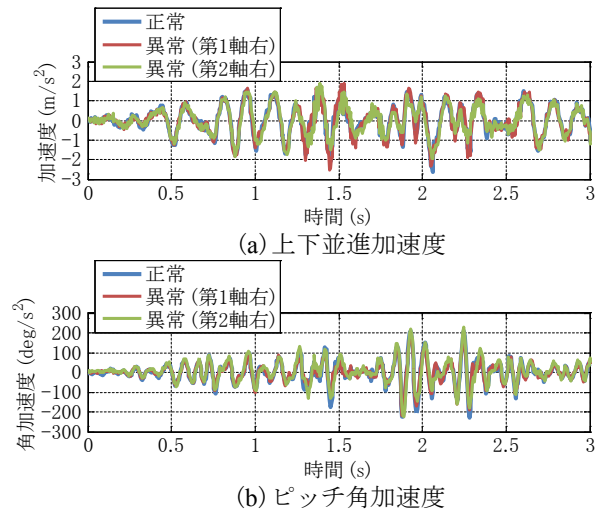
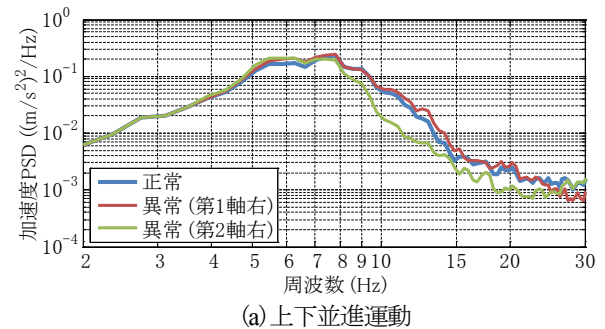
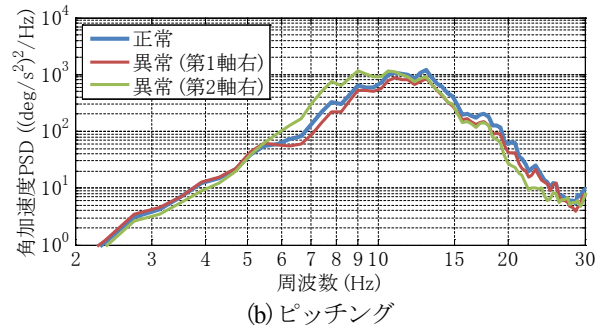


図6 台車枠振動加速度



(a) 上下並進運動



(b) ピッチング

図7 台車枠振動加速度 PSD

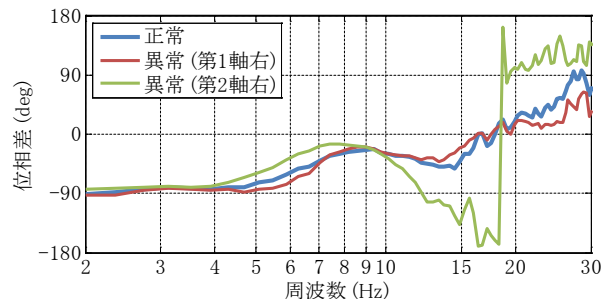


図8 台車枠上下並進運動とピッチングの位相差 (パッシブ状態)

3.4 制御中の軸ダンパの異常検出

前位台車の台車枠上下並進運動とピッチングのクロススペクトルより求めた位相差を図9 (a) に示す。4～9 Hzにおいて、正常時と異常時に違いが見られ、パッシブ状

特集：車両技術

態の場合（図8）よりも顕著に傾向が現れた。また、後位台車に位置する第3軸右側のダンパ異常時は、前位台車は正常であるため、その位相差は正常時とほぼ同じになっている。

後位台車枠の上下並進運動とピッチングの位相差を図9（b）に示す。4～9 Hz付近において、第3軸右側ダンパ異常時の位相差は正常時より小さく、前位台車に位置する第1、2軸右側のダンパ異常時の位相差は、正常時とほぼ同じになっている。

以上の結果は、提案した異常検出手法が制御中のダンパに対しても有効であることを示す。また、台車枠の上下並進運動の固有振動数付近における位相差が、正常時より小さければ台車の前軸、大きければ後軸のダンパ異常とする判定を各台車で行えば、異常が発生した軸ダンパの部位が車軸単位で特定できると考えられる。

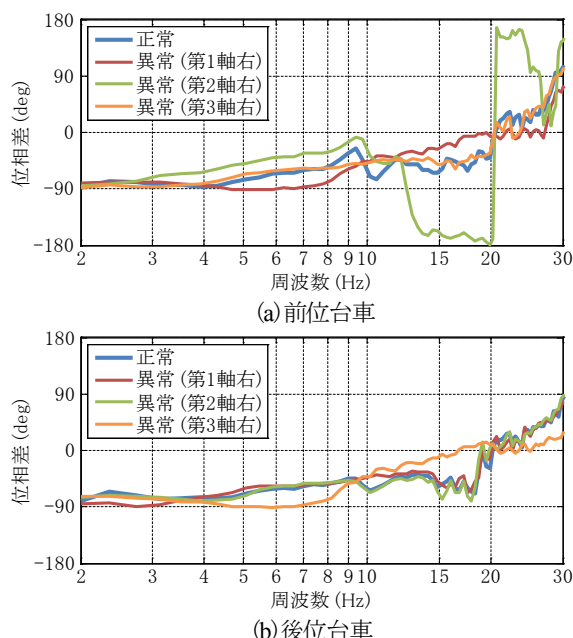


図9 台車枠上下並進運動とピッチングの位相差（制御中）

4. まくらばねダンパの異常検出

4.1 異常検出システムの構成

提案した異常検出手法を、2次ばね系の減衰制御による上下制振制御システム²⁾に適用することを考慮し、図10に示すようなシステム構成とする。制振制御および異常検出共用の複数の加速度センサを、上下方向を感度軸として車体に取り付け、各センサからの上下加速度の加減算により、異常検出に必要な車体の上下並進運動およびピッチングを求める。なお、本検討においても、加速度センサの信号をデータとして収録し、オフラインで異常検出処理を実行した。

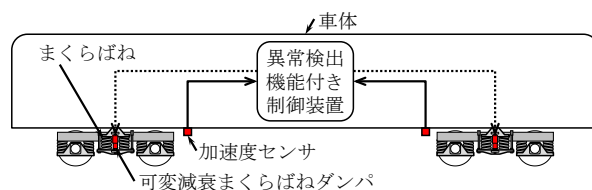


図10 上下制振制御システム²⁾に適用したまくらばねダンパの異常検出システムの構成

4.2 試験方法

2次ばね系の減衰制御による上下制振制御システム²⁾を適用した在来線車両を用いて本線走行試験を行った。試験車両の台車は、まくらばねにコイルばねを用いた揺れまくら吊り方式の台車である（図11）。制振制御システムは、車体に取り付けた4つの加速度センサ（図12）からの信号にもとづいて可変減衰まくらばねダンパ（図11）の減衰力を制御する。4本すべてのダンパが制御された状態を正常とし、このうち1本のダンパの減衰力を最小にすることによりダンパの減衰力異常を模擬した。正常、前台車左側ダンパ異常、後台車左側ダンパ異常の3条件で走行し、それぞれ加速度センサの信号を取得した。

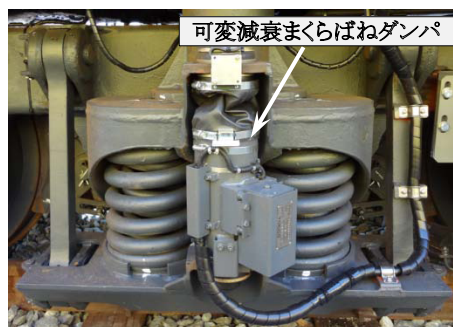


図11 可変減衰まくらばねダンパ（異常検出対象）



図12 加速度センサ

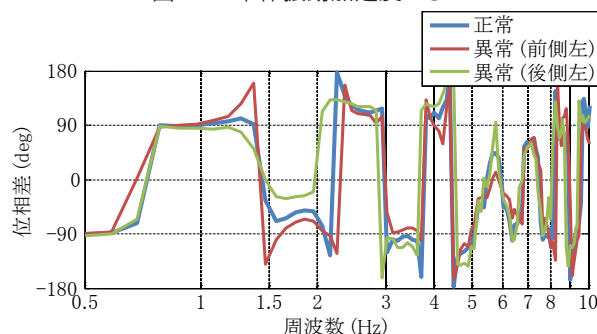
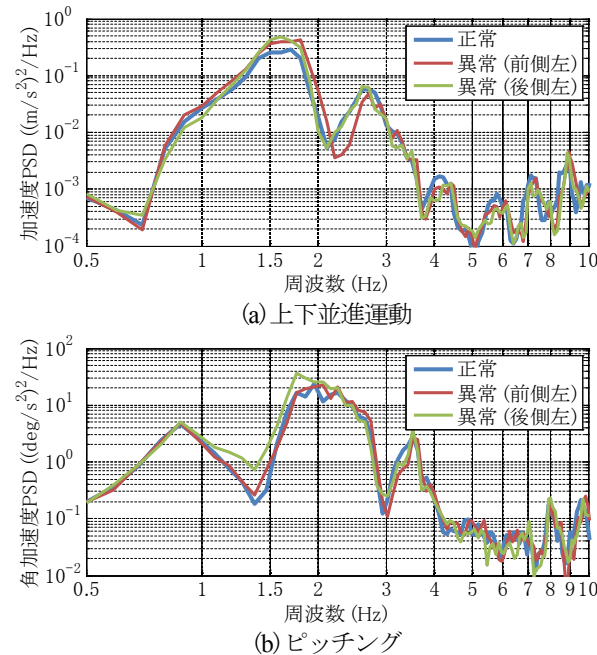
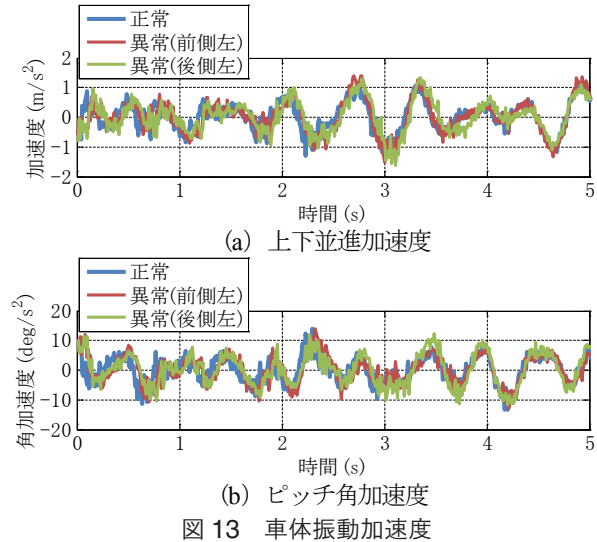
4.3 試験結果

一定速度 75 km/h で走行した際の車体の上下並進加速度とピッチ角加速度の時刻歴波形を図13に示す。まくらばねダンパ減衰力異常時と正常時とで明確な違いは見られない。

図13の区間を含む1.4 kmを一定速度 75 km/hで（60 s間）走行した際の車体の上下並進加速度とピッチ角加速度のPSDを図14に示す。上下並進加速度PSD（図14(a））は、その固有振動数付近と思われる1.5～2 Hzにおいて、異常時の方が正常時より若干大きい傾向にあるが、正常

時と異常時の顕著な差は現れていない。

同じ区間の車体の上下並進運動とピッチングのクロススペクトルにより求めた位相差を図 15 に示す。位相差が +90 deg 付近となる周波数帯域と、-90 deg 付近となる帯域が交互に存在している。これは、式 (3), (4) より、上下並進入力 z_R とピッチ入力 θ_R の位相差の符号が、周



波数 ω 、走行速度 v 、軸間距離 $2l$ の関係によって反転するためである。正常時と異常時の違いは、車体の上下系の固有振動数付近の周波数帯域 (1.3 ~ 2 Hz) に見られ、この傾向は軸ダンパ (1 次ばね系) の異常検出と同様の傾向である。以上の結果は、提案した異常検出の原理がまくらばねダンパ (2 次ばね系) の減衰力異常に対しても成り立つことを示す。

5. 実用向けのダンパ異常検出システム

5.1 アルゴリズム

2つの信号の位相差は、クロススペクトルの計算により得ることができるが、その計算を走行中にオンラインで実行するためには高い計算能力が必要となり、実用には望ましくない。本異常検出手法では、特定の周波数成分の位相差を評価し、それ以外の周波数成分の位相差は必要ない。そこで、上下並進加速度 z とピッチ角加速度 θ に対し、評価周波数近傍を通すバンドパスフィルタをそれぞれ適用し、得られた z^* と θ^* の近似位相差 α (deg) を次式により算出する。

$$\alpha(t) = \frac{180}{T} \int_{t-T}^t \delta_z(\tau) \oplus \delta_\theta(\tau) d\tau \quad (9)$$

ここで、 \oplus は排他的論理和 (XOR) を表し、

$$\delta_z(t) = \begin{cases} 0, & \dot{z}^*(t) < 0 \\ 1, & \dot{z}^*(t) \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\delta_\theta(t) = \begin{cases} 0, & \dot{\theta}^*(t) < 0 \\ 1, & \dot{\theta}^*(t) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

T : 平均化時間である。

以上の計算を、走行速度が 60 km/h 以上の場合に実行するようにした。平均化時間 T は 300 s とし、近似位相差の初期値は正常時の全試験区間の平均値とした。

5.2 本線走行試験による検証

前章の本線走行試験で取得したまくらばねダンパの正常時および異常時のデータに対して、本章で提案する異常検出アルゴリズムを適用した。

算出した近似位相差と、走行速度を図 16 に示す。正常時の近似位相差は、60 ~ 65 deg の間でおおむね一定であるのに対し、前側ダンパ異常時では、走行速度が 60 km/h を超えた 2 km 付近から 300 s (平均化時間 T) 後の 8 km 付近にかけて上昇し、後側ダンパ異常時では下降している。この近似位相差と、図 15 に示したクロススペクトルの位相差を比較すると、評価周波数 (1.7 Hz) 付近における正常時のクロススペクトルの位相差 (絶対値) は 60 deg 程度であり、正常時の近似位相差はこれに近い値になっており、提案した近似計算が、評価周波数における位相差を求めるのに有効であることを示す。

このように算出した近似位相差に対して、正常範囲 (こ

特集：車両技術

の場合、例えば 55 ～ 70 deg)を設定し、正常範囲を上回ったときに前側ダンパ異常、下回ったときに後側ダンパ異常と判定すれば、まくらばねダンパの異常検出と、その異常ダンパの部位（前側または後側）の特定が通常の運転走行において可能になると考えられる。

5.3 システムの実用化

本異常検出手法は、2 次ばね系の減衰制御による上下制振制御システムに組み込み実用化した⁴⁾。制御装置(図 17 (a))は、制振制御と並列して、車体振動加速度、走行速度、進行方向の情報にもとづき位相差計算としきい値判定処理を行う。位相差がしきい値を一定時間以上超過した場合にダンパ異常と判定する。ダンパ異常を含むシステムの異常が検知された場合には、制御装置は制振制御を停止するとともに、運転台の異常表示灯(図 17 (b))を点灯し、異常種別(異常ダンパ部位など)を制御装置に取り付けられた LED に表示する。また、発生したイベントを制御装置内に保存する機能を持つ。

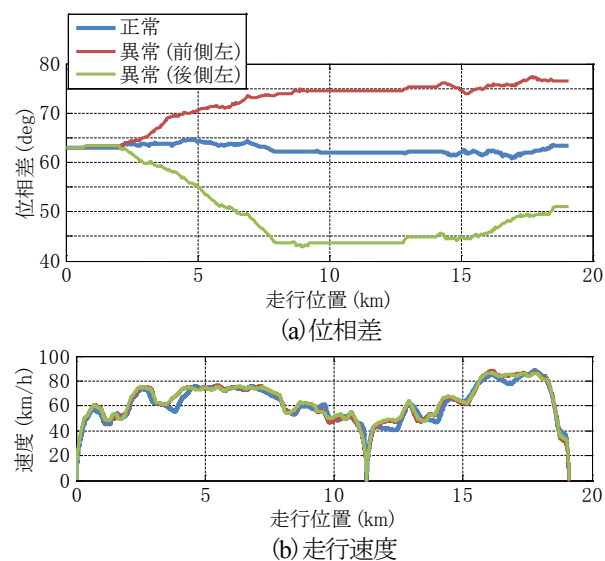


図 16 車体上下並進運動とピッチングの近似位相差



図 17 異常検知手法を搭載した制振制御システム

6. まとめ

鉄道車両の軸ダンパ（1 次ばね系）およびまくらばねダンパ（2 次ばね系）の減衰力異常を検出する方法として、本論文では、異常検出対象とするばね系のばね上の並進運動と回転運動の両者の位相差に着目した手法を提案し、検証を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) パッシブ軸ダンパの減衰力異常時と正常時の加振試験を行い、特定の周波数帯域における台車枠の上下並進運動とピッチングの位相差が、前側ダンパ異常時では正常時より小さく、後側では大きくなり、この位相差が軸ダンパの異常検出と異常部位の特定に有効な指標となることを示した。
- (2) 制振制御システムにより軸ダンパを制御して加振試験を行い、パッシブ軸ダンパと同様の結果が得られ、提案手法が制御中の軸ダンパに対しても有効であることを示した。
- (3) まくらばねダンパの減衰力異常時と正常時の走行試験を行い、車体の上下並進運動とピッチングの位相差を求め、軸ダンパの異常検出と同様の傾向が得られ、注目する対象物を車体に換えることによって提案手法がまくらばねダンパの異常検出に有効であることを示した。
- (4) 位相差をオンラインで近似計算可能な実用向けの異常検出アルゴリズムを提案し、営業運転同様に加減速や駅停車を含む走行に適用した。走行速度が変化しても、正常時と異常時で近似位相差に明確な違いが生じ、通常の運転走行においてダンパの異常検出が可能になることを示した。

謝 辞

本システムの開発にあたりご協力を賜りました九州旅客鉄道(株)、日立オートモティブシステムズ(株)の関係各位に心より感謝申し上げます。

文 献

- 1) 菅原能生, 風戸昭人, 富岡隆弘, 三平満司: 鉄道車両の 1 次ばね系の減衰制御による上下振動低減 (新幹線電車による高速走行試験結果), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 741, pp. 1222-1230, 2008
- 2) 菅原能生, 小島崇, 風戸昭人, 森下隼人: 空気ばね並列油圧ダンパの減衰力制御による車体上下振動低減, 鉄道総研報告, Vol. 24, No. 6, pp. 17-22, 2010
- 3) 小島崇, 菅原能生: 並進運動と回転運動の位相差に着目した鉄道車両のダンパの異常検出, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 786, pp. 396-410, 2012
- 4) 菅原能生, 小島崇, 榎田正春, 松永智: 上下制振制御システムの開発と実用化, R&m, Vol. 20, No. 7, pp. 27-31, 2012