

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

車両の油圧ダンパーの異常を走行しながら見つける

車両の油圧ダンパーに異常が発生した場合、車両の定期検査の際にダンパーを車両から取り外すことでその異常を発見することができますが、走行中に発見することは困難です。特に、ダンパーを制御する振動制御システムでは、ダンパーの状態監視が必要になります。ここでは、走行する車両の振動を監視することでまくらばねダンパーの異常を検知する異常検知システムについて紹介します。



小島 崇
Takashi Kojima
車両構造技術研究部
走り装置研究室
副主任研究員
[専門分野] 車両のダイナミクス、異常検出



菅原 能生
Yoshiki Sugahara
車両構造技術研究部
車両振動研究室
主任研究員
[専門分野] 制御技術とその応用

車両の油圧ダンパー

走行する車両にはさまざまな振動（揺れ）が生じます。振動が大きくなれば、乗り心地が悪くなるのはもちろん、振動の種類によっては走行安全性にも影響します。そのため車両には振動を減衰させる機構が各所に設けられています。減衰機構には摩擦力を利用したものもありますが、減衰に大きな力が必要なところには油圧ダンパーがよく用いられます（図1）。油圧ダンパーは、油の粘性を利用して、伸縮する動きと逆向きの力を発生します。これを「減衰力」といいます。もしダンパーに劣化や故障が生じると、所定の減衰力が出なくなることがあります。

車両の定期検査

鉄道車両には、一定の期間や走行距離ごとに各種の定期検査が定められています。規模の大きな定期検査では、車両の各部を解体して検査します。その際ダンパーも車両から取り外し、分解検査や性能試験を行います。ダンパーに異常があれば、この検査で発見して直すことができます。定期検査は、状態が徐々に変化するような劣化を把握するには有効ですが、突発的な異常は定期検査よりも早く発見することが望めます。もし走行中にダンパーの異常を知ることができれば、例えばその日の運転を終えた後に正常なダンパーと交換することができます。

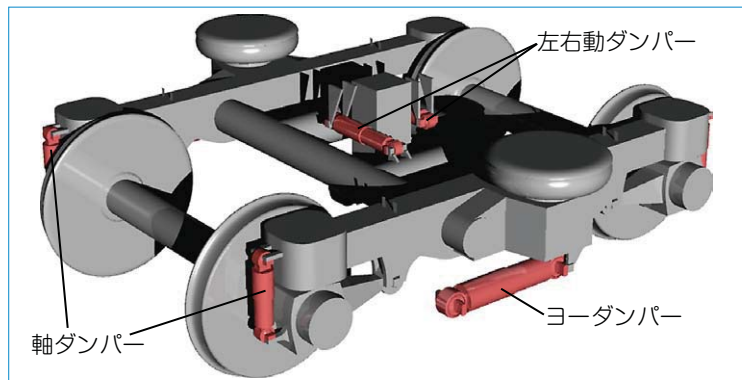


図1 車両に用いられている油圧ダンパーの例

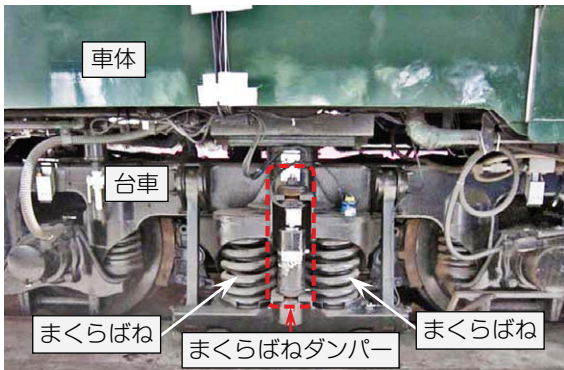


図2 まくらばねダンパー

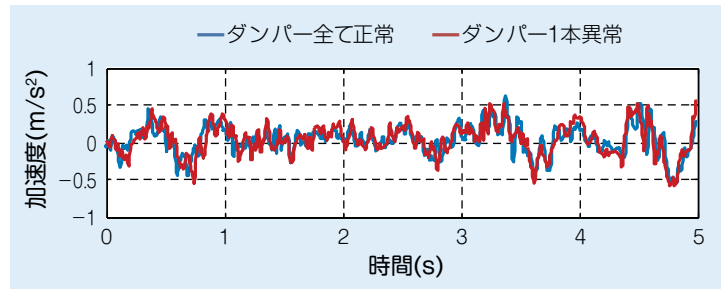


図3 車体の上下振動加速度

走行中の状態診断の必要性 (振動制御システムの異常検知)

ダンパーの異常を走行中に発見することは、特に振動制御システムにおいて重要になります。「セミアクティブサスペンション」と呼ばれる振動制御システムは、減衰力を電磁弁で制御可能にしたダンパーを用いて、その減衰力を車両の振動に応じて適切に制御することで、通常のダンパーより効果的に車両の振動を低減するシステムです。このような制御システムには、システムの一部に異常が生じた際に制御を停止する機能が求められます。

鉄道総研では、まくらばねダンパー(図2、参照)の減衰力制御による振動制御システム¹⁾を開発し、そのシステムの異常検知機能の一つとして、まくらばねダンパーの異常を検知する方法を開発しました²⁾。ここでは、その検知方法と、実際に車両に搭載した異常検知システムについて紹介します。

まくらばねダンパー

車体はまくらばねを介して台車に支えられています。このまくらばねと並列に設ける減衰装置がまくらばねダンパーです。近年の車両は、まくらばねに空気ばねを用い、その空気ばねに減衰機能を持たせることで、まくらばねダンパーを用いないことが多くなっています。

ダンパーの状態を監視するには

ダンパーが正常に機能しているかどうかを走行中に判別する方法としてまず考えられるものは、ダンパーが実際に出している力を監視しながら走行することです。例えば試験車両などでは、ダンパーのピストンロッドにひずみゲージなどの力センサーを取り付け、減衰力を計測することがあります。しかしこのようなセンサーは、実用レベルの耐久性を確保することが難しく、さらにこれをすべてのダンパーに組み込むには高いコストがかかります。

ダンパーが故障すると、振動を適切に減衰できなくなるために、通常とは異なる振動が発生する場合があります。振動は加速度センサーで測ることができ、加速度センサーは比較的耐久性が高く、車両への取り付けも容易です。そこで、車両の振動を監視することでダンパーの状態を間接的に診断できる可能性があります。

ダンパー異常時の車両の振動

まくらばねダンパーが故障した場合、車両の振動がどのように変化するか確かめる実験を行いました。1両に4本あるまくらばねダンパーのうち1本を車両から取り外して異常状態をつくり、実際に走行しました。

図3は、その際の車体の上下振動加速度です。1本のまくらばねダンパーが故障しても、車体の振動はあまり変わらないことがわかります。この状態では大きな事故にはつながりませんが、故障を知らずに走行を続け、複数の異常が発生する場合を考えると、そのすべての組み合わせを想定するのは困難です。そのため、ダンパー1本が故障した時点で確実にそれを発見することが必要です。

しかし、図3の波形からダンパーの異常を検知するのは難しいことがわかります。さらに、車両の振動は軌道変位(レールの凹凸)によって変わってしまうため、振動の「大きさ」をもとに、まくらばねダンパーが正常かどうか判断することはできません。

並進運動と回転運動

車体の上下振動を図4のように平面的に捉えると、上下方向の並進運動と左右方向軸まわりの回転運動(ピッチング)の2つの成分に分けることができます。さらに、凹凸のあるレール上を走る台車の動きは、2つの台車をつなぐ基線が並進運動と回転運動をしていると考えることができます(台車単体の回転運動はここでは無視します)。

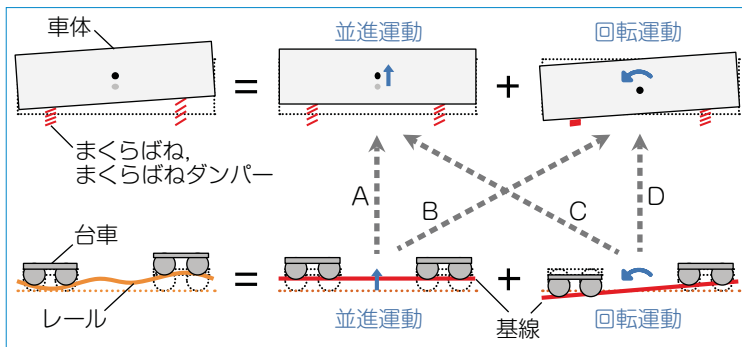


図4 並進運動と回転運動

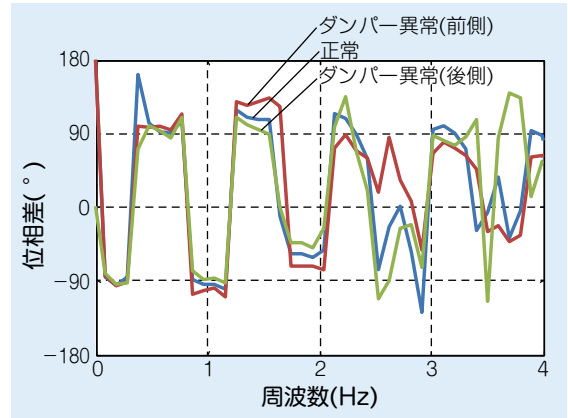


図6 並進運動と回転運動の位相差

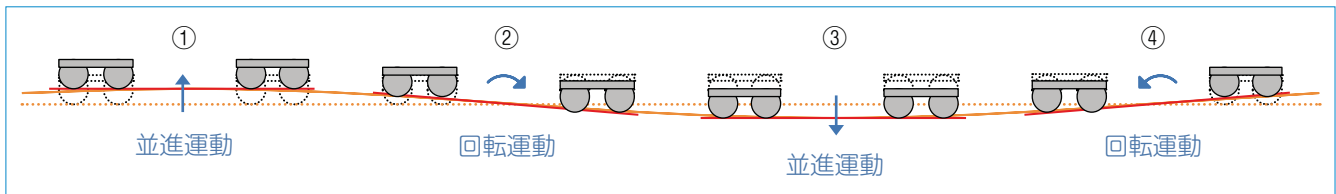


図5 正弦波状のレールの上を走る台車

台車の動きに注目する

どんな複雑な波形も、色々な周期の正弦波を足し合わせてつくることができます。車両の振動も同じように、「正弦波状のレールの上を一定の速度で走った時の振動」が多数組み合わせさせたものと考えることができます。そこで図5のように、正弦波状の変位を持つレールの上を走る台車について考えます。そしてここに図4の基線を取り入れます。基線の並進変位が最も大きい時に回転変位が0になり(①と③)、逆に回転変位が最大の時に並進変位が0になります(②と④)。この並進運動と回転運動の関係を位相差(参照)で表すと90°になります。正弦波の波長を変えて同じように考えると、回転運動の向きが逆になる(②と④が入れ替わる)ことはあっても、やはり位相差は90°になります。正弦波の振幅が変わっても位相差はもちろん変わりま

振動の位相差

同じ周期の2つの振動の過程がどれだけずれているかを表します。一般に1周期を360°とした角度で表し、例えば位相差90°は4分の1周期のずれを意味します。

せん。つまりこの位相差は、軌道変位に関係なく一定になります。

2つの台車の動きをこのように捉えることで、その動きに一定の特徴があることがわかります。

車体の動きに注目する

基線が並進運動すると、車体はまくらばねとまくらばねダンパーを介して並進運動します(図4のA)。基線が回転運動すれば、車両も回転運動します(D)。このとき車両が前後対称ならば、基線の並進運動で車体の回転運動(B)は起きず、その逆(C)も起きません。しかし1本のダンパーに異常があると、車両の前側と後ろ側のダンパーの力は同じではなくなるので、BとCが起ります。この相互作用によって位相差に変化が生じます。

図6は、先ほどの実験で測定した車体の振動加速度から、並進運動と回転運動の位相差を計算したものです。特定の周波数の位相差が、ダンパーの異常で変化しています。さらに、故障したダンパーの位置が車両の前側か後ろ側かによっても位相差が異なることがわかります。

ところでこの位相差が、軌道変位に

よっても変わってしまったら、ダンパーの異常によるものかどうか区別できません。ここで図5の基線の動きが重要になります。基線は、軌道変位に関わらず一定の位相差で並進運動と回転運動をするので、それによって揺られる車体の並進運動と回転運動の位相差も軌道変位とは無関係になります。そのため図6の位相差から、ダンパーの異常が判断可能になります。

開発した異常検知システム (振動制御システムへの組み込み)

考案した異常検知方法は、振動制御システム¹⁾の異常検知機能として組み込まれ、現在、JR九州の観光特急車両で実際に使われています(図7)。この振動制御システムは、車体に取り付けた4つの加速度センサーで車体の動きを把握し、それに応じてまくらばねダンパーの減衰力を制御することで、主に車体の上下振動を低減するシステムです。ダンパー異常検知機能は、振動制御に使う加速度センサーをそのまま利用するので、この振動制御システムの構成を変えることなくダンパーの異常が検知できます。

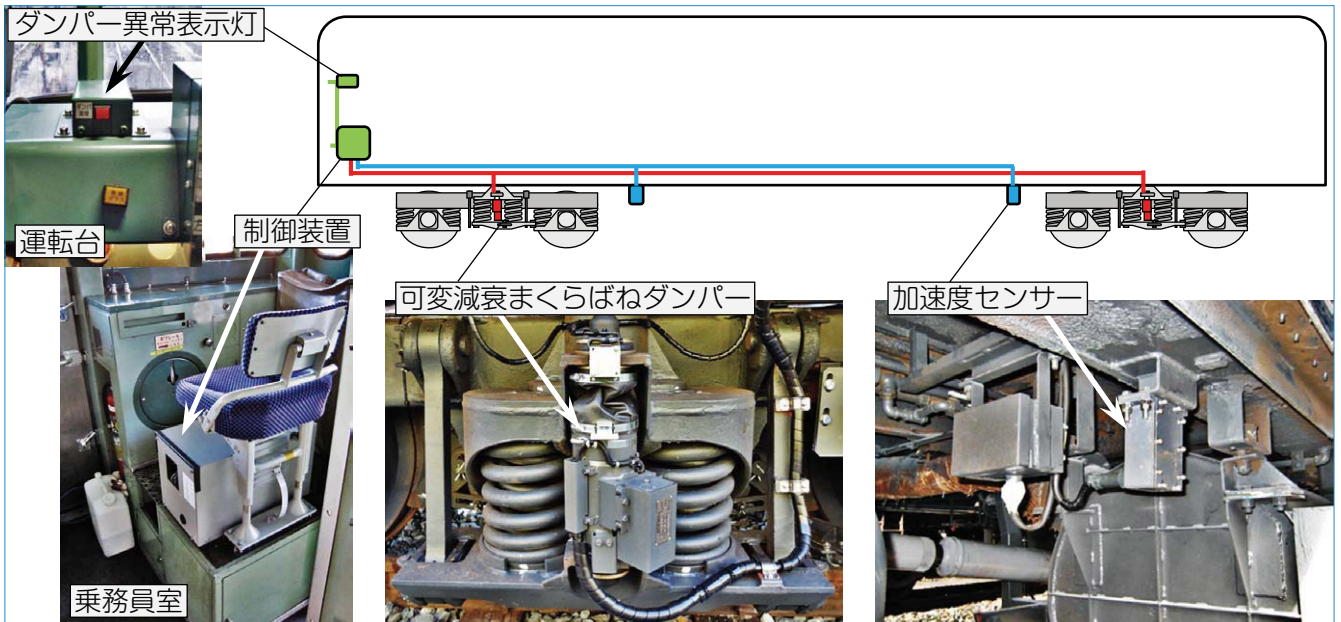


図7 まくらばねダンパー異常検知機能を搭載した上下振動制御システム

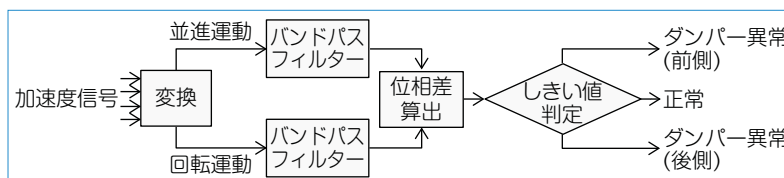


図8 ダンパー異常検知アルゴリズム

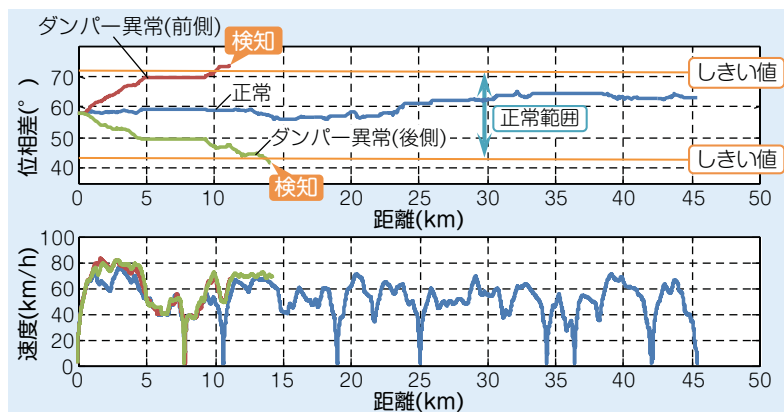


図9 ダンパー異常検知の試験結果

図8は、ダンパーの異常検知アルゴリズムです。4つの加速度センサーの信号から、車体の上下方向の並進運動と、ピッチングを計算します。そして両者の位相差を算出する前に、それぞれバンドパスフィルターに通します。これは、図6のように特定の周波数の位相差に特徴が現れるため、その周波数成分をここで抽出します。算出した位相差が、あらかじめ設定したしきい値を超えた場合にダンパーの異常と判断します。

図9は、実際に1本のダンパーの減

衰力を出ないようにして異常状態をつくり、営業路線を走行した結果です。位相差がしきい値を超えた際にダンパーの異常を検知しています。また、正常範囲をどちら側に外れたかによって、故障ダンパーの位置が車両の前側か後側かを特定しています。

ダンパーの異常や、その他制御システムの異常が検知された場合には、制御装置は直ちに振動制御を停止すると同時に、運転台の異常表示灯(図7)を点灯し、制御装置本体のランプに異常

種別(故障ダンパー位置など)を表示するようになっています。また、異常検知などのイベントを制御装置に保存する機能を持っています。

おわりに

ここで紹介した異常検知方法は、振動制御システムを搭載しない車両にももちろん使うことができます。しかしこのような異常検知システムを低コストに実現するには、センサーなどの機器をできるだけ共有化することが重要と考えています。1つのセンサーでより多くの状態を監視できるシステムが今後求められると考えています。[RRR]

文献

- 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
- 小島崇, 菅原能生: 車両の振動位相差に着目した上下動ダンパの異常検出, 鉄道総研報告, Vol.26, No.10, pp.17-22, 2012