

Hilbert-Huang 変換を用いた鉄道車両台車の 異常検出に関する研究

日大生産工(院) 佐藤 建太郎 日大生産工 綱島 均

1. まえがき

鉄道車両においては検査・保守は、事故を未然に防ぎ安全を確保する重要な作業である。これからの保守においては、車両の状態を常時監視して、車両の状態に応じて保守を行う状態基準保全（CBM: Condition Based Maintenance）が主流になるものと考えられる。近年、台車故障が原因となっている事故が発生しているため、車両の状態を監視することは特に重要になっている。

そのためには、車両の状態を常時監視し、早期に故障を検出し事故を未然に防ぐシステムが必要となる^{1),2)}。鉄道車両のサスペンションの故障検出については、台車のヨーダンパが故障した際に、台車の振動加速度に対してカルマンフィルタに基づく IMM(Interacting Multiple Model)法を用いることで、故障検知を行う研究が行われている³⁾。

本研究では、走行中の車両の振動加速度から、サスペンションの異常を検出するシステムの構築を目的としている。ここでは、数値シミュレーションによって生成した軸箱の上下振動加速度に対して、Hilbert-Huang 変換による時間周波数解析を行うことで、故障検知・故障箇所の推定が可能か検討した。

2. Hilbert-Huang変換による異常検出

2.1 時間周波数解析

時間周波数解析は、どの時間帯にどのような周波数帯域が多く含まれているかを検出することができ、刻々と変化する信号の特徴を捉えることができる。一般的な時間周波数解析の手法として、短時間フーリエ変換（STFT）やウェーブレット変換（WT）などがある。これらの手法は、時間周波数領域における不確実性を有している。すなわち、時間領域における分解能を上げると周波数領域における分解能が下がる。逆に、周波数領域における分解能を上げ

ると、時間領域における分解能が下がる。このような不確実性の影響を受けない手法として、Hilbert-Huang変換⁴⁾を用いる手法が提案されている⁵⁾。

2.2 Hilbert-Huang変換（HHT）

Hilbert-Huang変換（HHT）は、経験的モード分解（EMD: Empirical Mode Decomposition）を用いて固有モード関数（IMF: Intrinsic Mode Function）へと分解後、ヒルベルト変換を行うことで、瞬時振幅と瞬時周波数を同時に計算する手法である。

EMDは、信号をIMFと呼ばれる狭帯域かつトレンド成分を持たない信号の和に分解する手法であり、非線形・非定常信号の解析に適している。IMFを I_i 、残差を R とすると原信号 $x(t)$ はEMDによって、(1)式で求められる。

$$x(t) = \sum_{i=1}^m I_i + R \quad (1)$$

ここで、 m はIMFの個数を示す。

IMFは、1) 極値の数と x 軸を交差する数がほとんど等しい、2) 極大値の包絡線と極小値の包絡線の平均値が0、という二つの条件を満たす必要がある。

原信号 $x(t)$ のヒルベルト変換は次式で表される。

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

ここで P はコーシーの主値を示す。この時、解析信号 $z(t)$ は次式で表される。

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (3)$$

(3)式より、瞬時振幅 $a(t)$ と瞬時周波数 $\omega(t)$ は以下の式で求められる。

$$a(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \quad (4)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5)$$

ここで、 $\theta(t) = \tan^{-1}(y(t)/x(t))$ である。
また、瞬時エネルギーは、瞬時振幅 $a(t)$ の絶対値の二乗で求められる。

2.3 HHTを用いた異常検出

複数箇所が同時に故障することは考えにくいことから、異なる二つの箇所の上下振動加速度に対してEMDを行い、差異が明確であるIMFを再構成したものについてヒルベルト変換を行い、瞬時エネルギーを算出する。さらに、これらの相対差を求めて、異常検出可能性を評価した。これらの解析の手順をFig.1に示す。

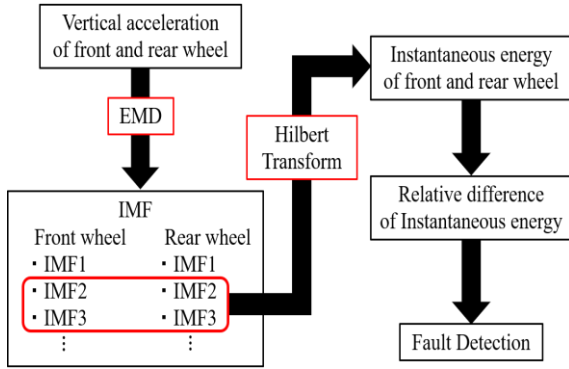


Fig.1 Fault detection using HHT

3 台車異常シミュレーション

3.1 シミュレーション条件

今回の検討では、故障を発生した際の車両モデルの応答について HHT を用いて、二箇所の異なるダンパを故障させた場合、故障検知、故障箇所の推定ができるかを検討する。

シミュレーション条件は、走行速度108km/h、シミュレーション時間60sで行った。そして、後台車の前、後輪軸間のダンパを故障させた場合の軸箱の上下振動加速度を算出した。ここで全車両モデルの後台車の前、後輪軸のダンパの減衰係数をシミュレーション時間20sから2割低下させることで故障を模擬した。

また、今回使用した車両モデルは一般在来線特急車両の緒元をもとに各パラメータを設定し、サンプリング周波数は1kHzとした。

3.2 車両・軌道モデル

作成した車両モデルを図2に示す。車両モデルは、車体1、台車2、輪軸4の計7剛体で構成されており、それぞればねとダンパによって連結・支持されている。車体・台車につい

ては上下方向運動・ピッチングの2自由度、輪軸については上下方向運動のみの1自由度を考慮する。これらに加えて台車枠剛性を考慮するため、台車前後についての上方向運動の2自由度を追加した合計14自由度の車両モデルを用いた。また、赤丸は今回のシミュレーションにおいて、故障させた箇所を示している。

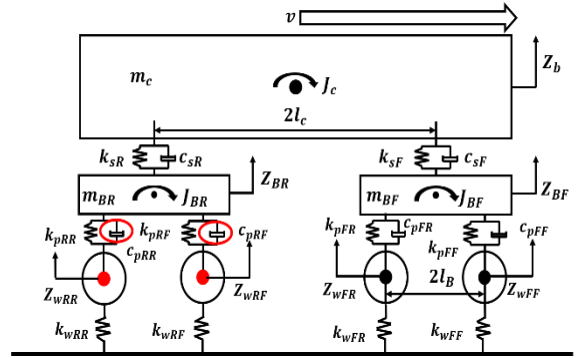


Fig.2 14-DOF vehicle model

軌道モデルは、白色雑音を以下の伝達関数

$$G(s) = \frac{2\pi\sqrt{AV}}{s + \omega} \quad (6)$$

に通したものを上下方向の軌道形状として用いた⁶⁾。ここで、 A は重み係数、 V は走行速度、 ω はカットオフ周波数である。

生成した軌道形状を、図3に示す。

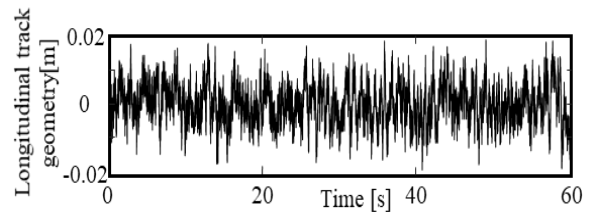


Fig.3 Track model

3.3 シミュレーション結果

シミュレーションによって求めた後台車の後輪軸の重心位置の上下振動加速度を図4に示す。図4(a)では後台車の前軸ダンパを故障させた場合、図4(b)では後台車の前軸ダンパを故障させた場合での結果を示す。

青い波形は正常な場合の上下振動加速度で

あり、赤い波形は故障した場合の上下振動加速度である。

また、図4では波形の特徴が見やすいように、シミュレーション時間60sに対して、故障を模擬した直後の5s間の上下振動加速度を示している。

図4(a), (b)のどちらにおいても正常時と故障時の波形を比較すると、大きな差異が現れていないことが確認できる。

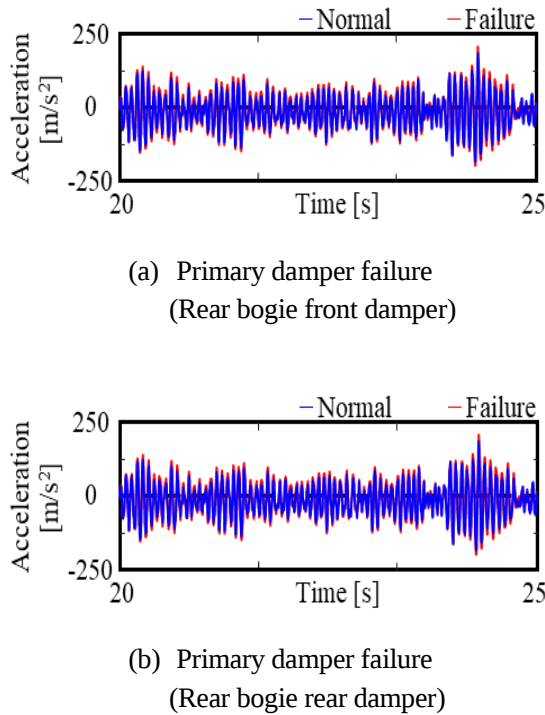


Fig.4 Comparison between normal model and failure model on wheelsets vertical acceleration

4 HHTによるダンパ異常の検出

4.1 EMDによる特徴抽出

シミュレーションにより生成した後台車・後輪軸の後軸ダンパが故障した場合の上下振動加速度のIMFとそれに伴うPSDを図5に示す。ここでは、故障の影響が現れているIMF2, IMF3を加算して信号を再構成した。また、同様な手法で、後台車・後輪軸の前軸ダンパが故障した場合の上下振動加速度のIMFを算出した。

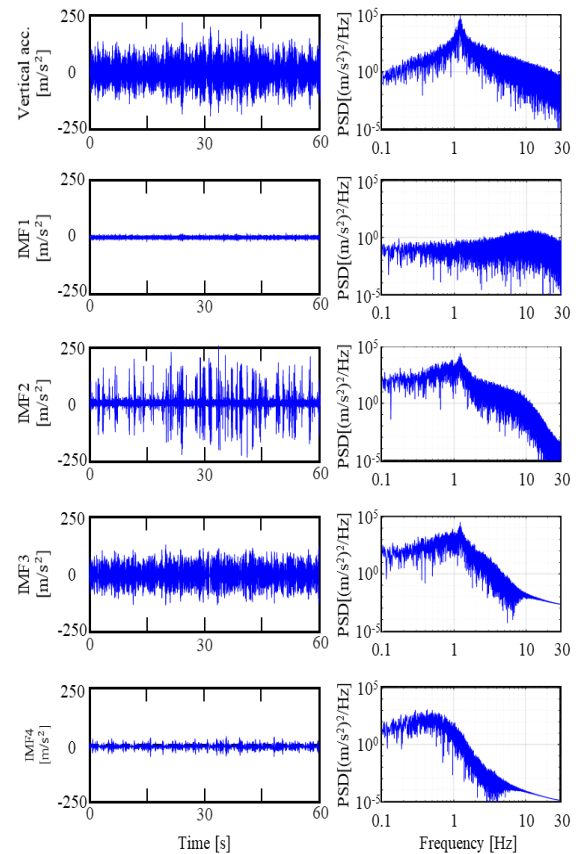


Fig.5 EMD and PSD of vertical acceleration of rear bogie rear wheelset with primary damper failure

4.2 異常検出結果

故障の影響が現れているIMF2, 3を加算して、再構成した信号についてヒルベルト変換を行った結果を図6に示す。図6(a)は、前軸ダンパが故障した際の瞬時エネルギーを示し、図6(b)は後軸ダンパが故障した際の瞬時エネルギーを示している。青い波形は前輪軸の瞬時エネルギー、赤い波形は後輪軸の瞬時エネルギーを示している。

故障開始時刻の20s付近から、故障を模擬している輪軸側の方が、正常の輪軸側に比べて瞬時エネルギーが大きくなっていることが確認できる。なお、故障していない20s以前で、瞬時エネルギーに差が生じている理由は、EMDを求める際の包絡線の影響であることがわかっている。

また、図6(a), (b)それぞれについて、前輪軸と後輪軸の瞬時エネルギーおける相対差を求めた。ここでは、前輪軸を基準とした相対差を算出した結果を図7に示した。青い波形は、前軸ダンパが故障した際の相対差、赤い波形は後軸ダンパが故障した際の相対差を示している。

図6と同様に、20s付近から相対差に変化が生じているのが確認できる。また、前輪軸の瞬時エネルギーを基準に相対差を算出しているのので、前軸ダンパ故障と後軸ダンパ故障とで相対差の取りうる値の符号が異なっていることが確認できる。

したがって、輪軸上下振動加速度に対してHHTを行い、瞬時エネルギーを求め、前後輪軸においての相対差を求めることで、軸ダンパの故障検知と故障箇所の推定が可能であることがわかった。

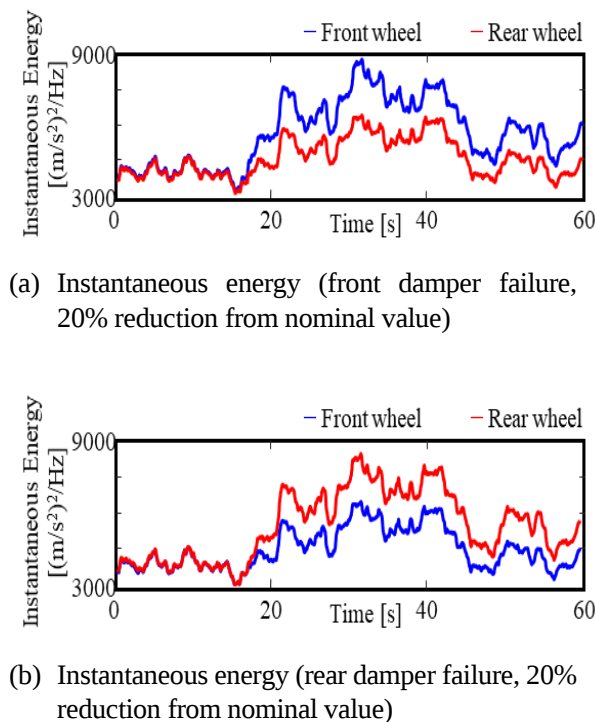


Fig.6 Instantaneous energy

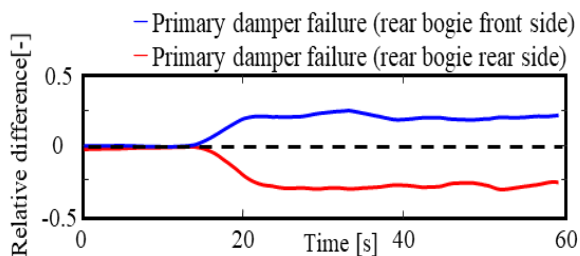


Fig.7 Relative difference of instantaneous energy

5 まとめ

本研究では、Hilbert-Huang変換を用いた走鉄道車両のサスペンション異常検出の可能性について検討した。

その結果、経験的モード分解により、故障の影響が現れているモードを抽出し、再構成した信号に対して、ヒルベルト変換を行ったところ、異なる二箇所の瞬時エネルギーの相対差を算出することで、故障検知・故障箇所の推定を行うことができた。

今後は、サスペンション異常程度の診断可能性を検討する予定である。

参考文献

- 1) Bruni, S, Goodall, R. M., Mei, T. X. and Tsunashima, H., "Control and monitoring for railway vehicle dynamics", Vehicle System Dynamics, 45(7-8), 765-771, (2007)
- 2) T. X. Mei & X. J. Ding (2009) Condition monitoring of rail vehicle suspensions based on changes in system dynamic interactions, Vehicle System Dynamics, 47:9, 1167-1181, DOI: 10.1080/00423110802553087 (2009)
- 3) Hirota MORI, Hitoshi TSUNASHIMA, Condition Monitoring of Railway Vehicle Suspension Using Multiple Model Approach, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 2010, Volume 3, Issue 1, Pages 243-258, (2010)
- 4) Huang NE, Attoh-Okine NO, editors. Hilbert-Huang transforms in engineering. Boca Raton: CRC Press; 2005
- 5) Tsunashima, H. and Hirose, R. Condition monitoring of railway track from car-body vibration using time frequency analysis, Vehicle System Dynamics, DOI:10.1080/00423114.2020.1050808 (2020)
- 6) 日本機械学会, 車両システムのダイナミクスと制御, 養賢堂, 1999/02/27