

# 3511 三次元重心検知理論に基づく 鉄道車両劣化検知の汎用性実証実験

学 [機] ○川島 進 (東京海洋大) 正 [機] 渡邊 豊 (東京海洋大)

Availability of The Three Dimensional Detection of  
Center of Gravity for Detecting Deterioration of Railroad Car

Susumu Kawashima, Yutaka Watanabe,  
Tokyo University of Marine Science and Technology The Graduate School of Marine Science and Technology  
Etchujima2-1-6, koto-ku, Tokyo, 135-8533 Japan

D3DCG can detect not only the center of gravity of rail road cars but also the lower limit of unstable zone for the center of gravity by which the deterioration can be measured on moving rail road cars. In order to apply D3DCG, the author measured the vertical acceleration and the roll rate of moving rail road cars commercially operated, and were successfully able to find that the lower limit of unstable zone decreased according to operational years of the railroad cars since newly built.

**Keywords :** Center of Gravity, D3DCG , Railway, Vibration of Moving Body , Natural Frequency, Rollover, Monitoring, Fault Detection

## 1. はじめに

鉄道車両の弾性構造体部分の経年劣化が要因の一つである事故は、成田線貨物列車脱線事故<sup>(1)</sup>のように、大きな被害を生ずることがある。三次元重心検知理論<sup>(2)</sup>に基づけば、弾性構造体上の物体の重心静止限界高さが導ける<sup>(3)</sup>。そこで弾性構造体である鉄道車両の重心静止限界高さを検知できれば、鉄道車両の空間的重心位置とともに、経年劣化を安価で簡易な方法で検知することが可能になる。つまり、鉄道車両の空間的重心位置が同じでも、経年劣化が進めば重心静止限界高さは下がってくる。よって、鉄道車両の重心静止限界高さを常時監視することによって、鉄道車両の検査の必要性の判断や、故障などを診断できる可能性がある。

## 2. 三次元重心検知理論による重心静止限界高さの算出

川島らの研究によれば、三次元重心検知理論を鉄道車両に用いることで、質量やばね定数が未知の状態でも、空間的重心位置を走行中に検知することが可能であることが分かっている<sup>(2)(4)(5)(6)</sup>。式(1)は三次元重心検知理論を定式化したものである。

$$L^2 + \frac{g}{4\pi^2 V^2} L - \frac{b^2 V'^2}{4V^2} = 0 \quad (1)$$

ここで、

$g$  : 重力加速度

$\pi$  : 円周率

$L$  : 鉄道車両の動揺中心軸から乗客を含めた車体部分の空間的重心位置までの高さ

$b$  : 鉄道車両の動揺中心軸から乗客を含めた車体部分の質量を支えている部分の幅

$V'$  : 鉄道車両の垂直方向の単振動加速度の固有振動周波数

$V$  : 鉄道車両の左右方向のロール角速度の固有動揺周波数

$\theta$  : 鉄道車両の車体部分の左右方向のロール角度

とする。

本論文では、空間的重心位置に基づく鉄道車両の新造時からの経年劣化検知をするために、三次元重心検知理論<sup>(2)</sup>から導かれる、重心静止限界高さ検知式<sup>(3)</sup>を活用する。渡邊によれば、ばね台座等の弾性構造体上に置かれた物体は、その空間的重心位置がある一定の高さを超えると、外乱が皆無でも弾性構造体上で静止できなくなり、左右どちらかに必ず横転する重心静止限界高さがあると指摘されている。これを同じ弾性構造体的一种である鉄道車両にあてはめて、図説すると図1となる。

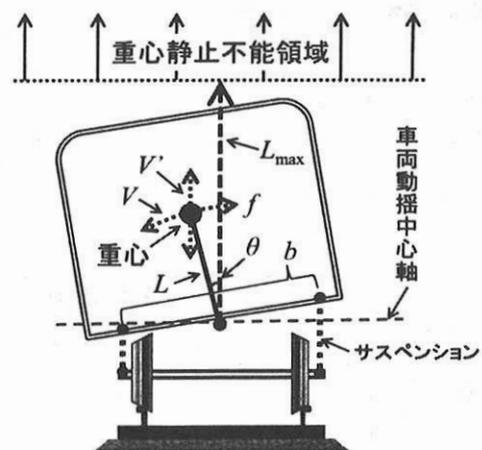


図1 走行中の鉄道車両における重心位置と重心静止限界高さの概念

ここで、重心の生ずるロールの動揺は円運動であるから、式(2)が成り立つ<sup>(3)</sup>。

$$f = -\frac{mg}{L} \left( \frac{kb^2}{2mg} - L \right) \sin \theta \quad (2)$$

ここで、

$f$ : 鉄道車両の重心の生ずるロール円の接線方向に加わる力  
 $k$ : 鉄道車両の左右個々のばね定数  
 $m$ : 乗客を含めた鉄道車両全体の質量とする。

この条件を満たすためには、重心が弾性構造体上で横転しない状態であれば、 $f$ は $\theta$ を減じる復原力として働くので、その符号はマイナスである。

よって、

$$\frac{kb^2}{2mg} - L > 0 \quad (3)$$

でなければならない。

一方、図1の如く、ばね等の弾性力が左右に対をなす場合は、

$$\frac{k}{m} = 2\pi^2 V'^2 \quad (4)$$

となる<sup>(2)</sup>。ここで、

$L_{\max}$ を鉄道車両の静止不能に至る重心高さの限界（重心静止限界高さ）とすると

$$L_{\max} = \frac{\pi^2 V'^2 b^2}{g} \quad (5)$$

となる。

ここで、

$\pi$ : 円周率

である。したがって、 $L_{\max}$ は、 $V'$ と $b$ によって一意的に定まることになる。

### 3. 鉄道車両の劣化検知実験

**3-1 実験の概要** 三次元重心検知理論を走行中の鉄道車両に適用するには、鉄道車両が直線を等速で走行する条件である必要がある。そこで、計測時間は直線を走行する計測の中で一番短い、JR成田線の湖北駅～布佐駅間の走行時間に合わせて25秒とし、この時間内で直線を等速走行する条件を満たす区間を適宜選択して行った。実験に用いた鉄道車両は、都市近郊で使用されている経年が異なる同一形状の鉄道車両と

した。本論文では車両aから車両eまでの5種類の鉄道車両を用いて、時期を変えて実験を行い、経年数の違いによる重心静止限界高さ（ $L_{\max}$ ）の違いを確認した。ところで、鉄道車両の乗車状況は駅での乗客の乗り降りによって変動する。よって、乗客数が違っていても、劣化検知が可能な確認する必要がある。本研究では、60人前後の乗客を乗せた状態（ケースA）と、5人前後のほぼ空車の状態（ケースB）の2ケースで、乗車状況に応じた重心静止限界高さを用いた経年劣化検知が可能かについても確認した。表1は実験のコンディションをケース別に日付順にならべたものである。実験番号、実験日、乗客数、実験時における新造からの経年数<sup>(7)(8)</sup>、実験車両、実験区間を示す。

実験で用いた加速度・角速度センサは、マイクロストレイン社製の半導体振動型小型加速度・角速度センサ（電圧出力アナログ型）で、計測レートは0.01秒である。実験では乗客として営業運転中の鉄道車両に乗り込み、センサを図2のように、水平面が保てる床部分などに、適宜固定した。このセンサを使用した理由は、垂直方向の加速度と左右方向のロール角速度を同時に計測でき、かつA/Dコンバータが内蔵されているので、計測と同時にパソコンへデータを取り込み分析が可能だからである。これを加速度・角速度センサの計測レートに合わせて0.01秒ずつずらしてデータを連続して高速フーリエ変換（FFT: First Fourier Transformation）にかけてアベレージングを行った。FFTサイズは20.48秒とした。

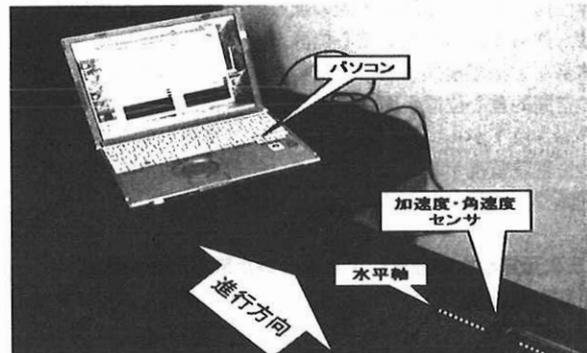


図2 鉄道車両内での加速度・角速度センサの設置状況

表1 各乗車状況における実験時のコンディション

乗車人数 60人前後における実験時のコンディション					
実験番号	実験日	乗客数	新造からの経年数[年]	実験車両	実験区間
A1	2009年11月18日	54	5.9	車両a	JR常磐線 柏～松戸
A2	2011年5月13日	64	5.5	車両b	JR総武線 千駄ヶ谷～信濃町
A3	2011年5月16日	64	8.0	車両c	JR常磐線 柏～松戸
A4	2012年4月28日	52	8.1	車両a	JR成田線 湖北～布佐
A5	2012年8月10日	54	8.5	車両d	JR常磐線 松戸～柏
乗車人数 5人前後における実験時のコンディション					
実験番号	実験日	乗客数	新造からの経年数[年]	実験車両	実験区間
B1	2009年11月18日	6	5.9	車両a	JR成田線 安食～小林
B2	2011年5月16日	5	8.0	車両c	JR成田線 安食～小林
B3	2012年4月28日	9	8.1	車両a	JR成田線 小林～木下
B4	2012年8月21日	3	8.3	車両e	JR成田線 小林～木下

**3-2 重心位置固有の振動動揺周波数の特定** 実験において計測された、垂直方向の加速度と左右方向のロール角速度の例を、図3と図4に示す。これは実験番号B1の実験で得られた計測結果である。ところで、鉄道車両には、サスペンションなど様々な動揺軽減装置が装備されている。しかしながら車体自身の固有の振動や揺れは、動揺を軽減する装置の上で生じる現象である。従って、それらの装置の種類を問わず走行中の鉄道車両には、空間的な重心の位置に由来する固有の振動と動揺が発生すると考えるのが自然である。図3と図4にはその事実が的確に表れている。

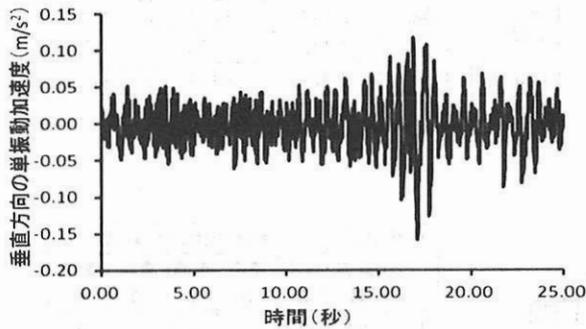


図3 走行中の鉄道車両の垂直方向の単振動加速度

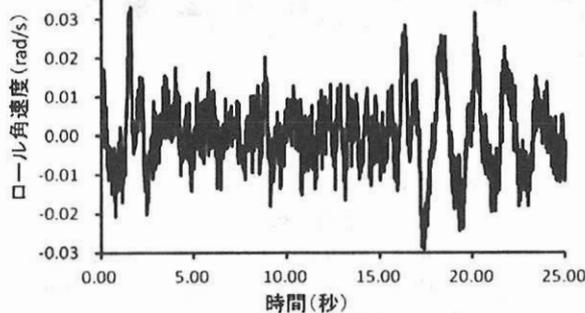


図4 走行中の鉄道車両のロール角速度

3-1節で示した方法により実験を行い、鉄道車両の空間的な重心位置固有の振動動揺周波数を特定するため、計測データに高速フーリエ変換をかけた。まず、加速度・角速度センサ自身が持つ誤差は、周波数方向に正規分布的に分散すると仮定し、計測データに対して0.01秒ごとに計測時の時間枠(20.48秒)をずらして連続し高速フーリエ変換を行い、その平均を求めた。その例を図5と図6に示す。両図に示されるように、本研究の実験で計測した鉄道車両の垂直方向の加速度と左右方向のロール角速度には、明からに特定の周波数帯の振幅に突出したピークが存在する。

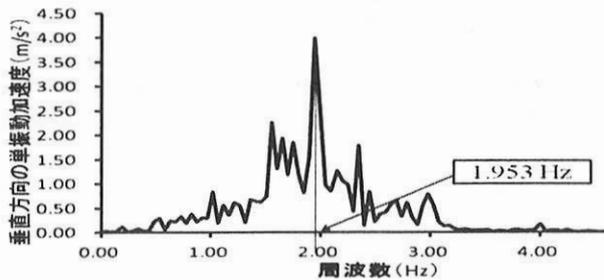


図5 走行中の鉄道車両の垂直方向の単振動加速度固有の周波数 (図3にFFTを行った結果)

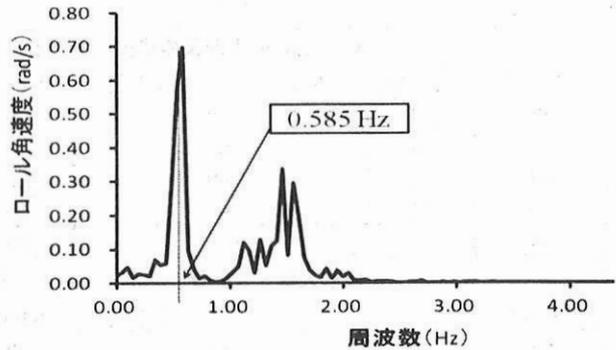


図6 走行中の鉄道車両のロール角速度固有の動揺周波数 (図4にFFTを行った結果)

これらは、鉄道車両自身の空間的な重心の固有振動・動揺周波数を表すものと考えられることができる。そこで、平均化した高速フーリエ変換の結果において、左右対称性を損なわずにより大きい振幅を持つようなピーク周波数を、鉄道車両の空間的な重心の固有振動・動揺周波数として特定した。なお、左右方向のロールのピーク周波数と上下方向の垂直方向単振動のピーク周波数が同値となり、干渉していると考えられるケースがあった。その場合は、周波数帯をずらして上記の方法で特定した。

#### 4. 空間的の重心位置と重心静止限界高さの検知

上述した方法で特定を行った鉄道車両の空間的な重心の固有周波数に加え、鉄道車両全体の質量を支えている部分の幅( $b$ )は、1.6mとした<sup>(9)</sup>。計測と実験で得られた数値を式(1)の $V$ と $V_c$ ならびに式(5)に適用して空間的な重心位置( $L$ )と重心静止限界高さ( $L_{max}$ )を算出した。その結果を表2に示す。三次元重心検知理論によって導き出された $L$ は、乗客数に呼応して変動していることが分かる。具体的には、乗客数が60人前後の実験(実験A1~A5)では、空間的の重心高さの値は1.7m前後に検知されているのに対して、乗客数が5人前後の実験(実験B1~B4)では、空間的の重心高さが2.1m前後に検知されている。このことは、三次元重心検知理論から導かれる $L$ の妥当性を示すものである。

次に、同程度の $L$ が検知される条件で重心静止限界高さ( $L_{max}$ )の数値を比較する。新造時から実験日までの経年数が長い鉄道車両では、 $L_{max}$ の数値が小さくなる事が分かる。具体的には、乗客数が60人前後の実験(実験A1~A5)の5つの実験結果を比較すると、経年数が5.5年以上の実験A1と実験A2では $L_{max}$ は5.9m前後、経年数が8.1年前後の実験A3、実験A4と実験A5では、 $L_{max}$ は4.5m前後の、新造年ごとにそれぞれ同程度の数値が検知されていることが分かる。

同様に、乗客数が5人前後の4つの実験結果を比較すると、得られた $L$ は、ほぼ同程度の値であるが、実験B1より新造時から実験日までの経年数が約2年長い、実験B2~B4までの実験の方が $L_{max}$ は明らかに低くなる事が分かる。

ところで、実験A1と実験A4、実験B1と実験B3は時期を変えて、同じ車両aで実験を行ったものである。比較的似たような乗車状況に関わらず、同程度の $L$ が検知される条件で、 $L_{max}$ を比較すると、年数の経過によって重心静止限界高さが低くなる傾向が見られることが明らかになった。以上の結果は、三次元重心検知理論から導き出される $L_{max}$ による、鉄道車両の経年劣化検知結果の妥当性を示すものである。

表2 三次元重心検知理論による乗客人数別の各種鉄道車両での劣化検知結果

乗車人数 50 人前後の状況における三次元重心検知理論による劣化検知結果								
実験番号	乗客数	新造からの経年数 [年]	b [m]	$V^2$ [Hz]	$V$ [Hz]	$L$ [m]	$L_{max}$ [m]	使用車両
A1	54	5.9	1.6	1.516	0.585	1.741	5.925	車両 a
A2	64	5.5	1.6	1.513	0.537	1.864	5.901	車両 b
A3	64	8.0	1.6	1.269	0.439	1.756	4.151	車両 c
A4	52	8.1	1.6	1.367	0.537	1.651	4.817	車両 a
A5	54	8.5	1.6	1.367	0.488	1.779	4.817	車両 d
乗車人数 5 人前後の状況における三次元重心検知理論による劣化検知結果								
実験番号	乗客数	新造からの経年数 [年]	b [m]	$V^2$ [Hz]	$V$ [Hz]	$L$ [m]	$L_{max}$ [m]	使用車両
B1	6	5.9	1.6	1.953	0.585	2.332	9.833	車両 a
B2	5	8.0	1.6	1.757	0.537	2.222	7.958	車両 c
B3	9	8.1	1.6	1.660	0.537	2.079	7.104	車両 a
B4	3	8.3	1.6	1.660	0.537	2.079	7.104	車両 e

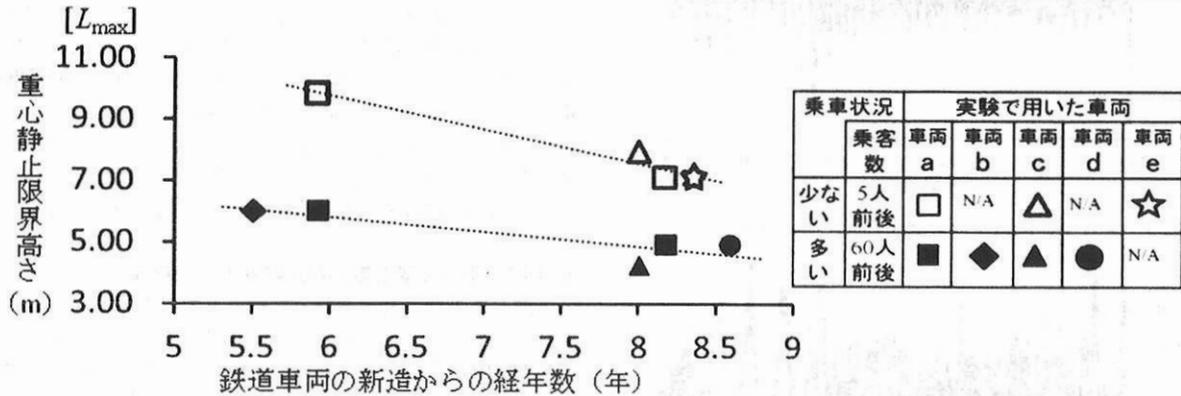


図7 鉄道車両の新造時から実験日までの経年数と重心静止限界高さの関連性

### 5. 重心静止限界高さに基づく新造時からの経年劣化率

図7は横軸を鉄道車両の新造時から実験日までの経年数、縦軸を $L_{max}$ として関連性を示したものである。図7によれば、 $L_{max}$ による経年劣化率(m/年)を、乗客数が同程度の実験結果ごとに割り出すと、それらの値は、ほぼ同率となることがわかる。つまり、乗客数が60人前後の実験(実験A1~A5)の傾向線の傾きは $-0.4$  (m/年)であり、乗客数が5人前後の実験(実験B1~B4)の傾向線の傾きは $-1.1$  (m/年)であり、経年劣化は、軽荷で顕著に表れることが分かった。したがって、営業運転中の特にラッシュアワー外の時間帯に、常時 $L$ と $L_{max}$ を検知し続け、特定の $L$ に対する $L_{max}$ の経年劣化率(m/年)を監視することで、鉄道車両のリアルタイムな劣化検知が、安価かつ簡易な方法で実現できると考えられる。

### 6. おわりに

三次元重心検知理論を走行中の鉄道車両に適用することで、空間的重心位置( $L$ )と同時に、重心静止限界高さ( $L_{max}$ )を用いれば、新造時から実験日までの経年劣化を検知可能であることが明らかになった。従って、 $L_{max}$ を用いれば、鉄道車両を工場で分解せずとも、台車などの弾性構造体部分の経年劣化がリアルタイムに検知でき、営業運転中の故障発見や検査のタイミングの判断に有用であると考えられる。今後はさらに精度の向上に努めると同時に、将来的には、営業運転中の鉄道車両の状態をリアルタイムに監視可能な、アプリケーションの開発も必要である。

### 参考文献

- (1) 運輸安全委員会, 鉄道事故調査報告書, 日本貨物鉄道株式会社 成田線 久住駅~滑河駅間 列車脱線事故, RA2012-5, P9 (2012)
- (2) 渡邊豊, 重心検知装置および横転限界速度予測装置並びに貨物重量予測装置並びに演算プログラム, 日本国特許第4517107号 (2010)
- (3) 渡邊豊, “横転限界監視システム”, 特願 2011-266708 (2011)
- (4) 川島進, 渡邊豊“走行中の鉄道車両における空間的重心位置の検知に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.778, (2011), PP.208-210.
- (5) 川島進, 勝村元亮, 渡邊豊“ローカル鉄道における三次元重心検知実験”, 日本機械学会第20回交通物流部門大会講演論文集, No. 11-59 (2011), pp. 221-224
- (6) 勝村元亮, 川島進, 渡邊豊“鉄道車両の自律的横転防止のための三次元重心検知実験”, 第18回 鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2011) 講演論文集. (2011). pp. 377-380
- (7) 交友社“JR車両ファイル2004”, 鉄道ファン, Vol. 44 No. 519 (2004).
- (8) 交友社“JR車両ファイル2005”, 鉄道ファン, Vol. 45 No. 531 (2003).
- (9) 奥井淳司, “鉄道CAD 製作所”台車のページ [http://www.geocities.jp/rail\\_cad/truck/truck.html](http://www.geocities.jp/rail_cad/truck/truck.html)