三次元重心検知理論による鉄道車両の軸ばねの劣化検知に関する研究*

川島 進^{*1}, 渡邊 豊^{*1}Detecting Deterioration of Coil Spring for Railway Vehicle by the
Three Dimensional Detection of the Center of GravitySusumu KAWASHIMA and Yutaka WATANABE^{*1}^{*1}Tokyo University of Marine Science and Technology, The Graduate School of Maritime Science and Technology,
2-1-6 Etchujima, koto-ku, Tokyo, 135-8533 Japan

A spring constant of railway vehicle is deteriorated as operated either since newly built or lately inspected. The existing system to detect the deterioration of coil springs for railway vehicles depends on periodical inspections at factories away from operational rail tracks. It is costly and time consuming work. In this respect, this paper applies the theory of detecting 3-D locations of the center of gravity for detecting the deterioration of coil springs for railway vehicles, which was invented by the second author of this paper and abbreviated as D3DCG. D3DCG can detect not only the center of gravity of railway vehicles but also the lower limit of unstable zone for the center of gravity by which the deterioration of cars underneath the vehicle can be measured on the moving vehicle. In order to apply D3DCG, the authors measured the vertical acceleration and the roll rate of moving railway vehicles commercially operated and was successfully able to find that the lower limit of unstable zone decreased according to operational years of the car since newly built or lately inspected.

Key Words : Center of Gravity, Detection of Three Dimensional Center of Gravity, Railway, Vibration of Moving Body, Natural Frequency, Rollover, Monitoring, Fault Detection

1. はじめに

鉄道車両の上下のばね系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⁽¹⁾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⁽²⁾⁽³⁾に基づけば、上下のばね系上に設置された物体の重心静止限界高さが導ける。すなわち、上下のばね系を有する台車の上に車体が載る構造である鉄道車両に、この考え方をを用いて重心静止限界高さを算出することで、車体の空間的重心位置⁽⁴⁾⁽⁵⁾とともに、上下のばね系などの劣化を、簡単な方法で検知できる可能性がある。つまり、車体の空間的重心位置が同じでも、上下のばね系などの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、車体の重心静止限界高さを常時監視することによって、上下のばね系など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。

そこで本研究は、鉄道車両の上下のばね系の中で特に一次ばねである軸ばねの経年劣化について、三次元重心検知理論に基づく方法によって検知する検証実験を、以下に示す過程により行った。軸ばねに着目した理由は、このばね系が、車軸と台車枠を直立した金属コイルばねで連結し台車の左右に対をなしているため、三次元重心検知理論の適用が妥当なことである。これに対して二次ばねであるまくらばねは、空気ばねを用いることが多く、その場合は空気圧で自動的にばね定数を一定に保つことができるので、本研究の対象外と判断した。実際に、本研究で実験を行った鉄道車両のまくらばねは、台車の形式から空気ばねであった。

まず、2章では、同一の車体において乗客が増加していった場合の空間的重心位置の変化を三次元重心検知理

* 原稿受付 2012 年 10 月 15 日

^{*1} 正員, 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)
E-mail: ywatana@kaiyodai.ac.jp

論によって求めた。次に、空間的重心位置の変化に伴い、車体の垂直方向の単振動と左右方向のローリングの固有周波数が連動していることを明らかにした。このことから、車体の空間的重心位置を一定に保った状態で軸ばねが経年劣化していった場合には、車体の各固有周波数も変化してゆくと考えられる。

そこで3章では、上下のばね系上に設置された物体の重心静止限界高さの存在を、卓上型三次元重心検知装置を用いて実証した。この結果から、同じ形式の鉄道車両で、かつその車体の空間的重心位置が同じであっても、経年使用により車体の重心静止限界高さはより低いものとなるという仮説を立てた。

この仮説を検証するために、実際の車体を三次元重心検知理論が適用可能な簡素なモデルで表現できると仮定し、3章で示した重心静止限界高さを用いて軸ばねの経年劣化を推定する方法について検討を行った。

まず、4章では、形式が同一で乗車状況と乗客数が同程度の、新造時からの経年数が異なる営業運転中の鉄道車両において、軸ばねの経年劣化を重心静止限界高さによって検知する妥当性を検証する実験を行った。そして、5章では、鉄道車両が経年数によって検査を受けている現状に注目して、工場において台車をオーバーホールして上下のばね系の経年劣化部品の交換を伴う、全般検査と呼ばれる大規模な検査の対象となった特定の鉄道車両に対して、当該検査の前後において、営業運転中に軸ばねの経年劣化を重心静止限界高さによって検知する妥当性を検証する実験を行った。

ここで、本研究に関連する主要な既往研究を調べてみると、次のとおりである。まず、鉄道車両の故障や劣化を調べるために、鉄道車両のある特定部位の振動を解析している研究がある。城取らは、台車枠状の上下振動加速度の周波数をもとに、軸ダンパや空気ばねの減衰特性異常や、空気ばねのパンク、脱線について、研究所内の試験装置上の試験車両で実験を行っている。異常時と平常時の比較実験で得られた結果をもとに、しきい値を設定し上下振動加速度の周波数を比較することで異常を検知する方法を提案している⁽⁶⁾。大庭らは、新幹線車両の同一部位の振動加速度の比較をもとにした異常検知アルゴリズムを提案している。具体的には、研究所内の試験装置と試験車両を用いて、同一車両内での二個の台車の振動加速度の比較、振動の最大値と振動の継続性を比較する手法で比較を行っている⁽⁷⁾。

また、劣化や故障などについて、主に鉄道車両の台車や軸ばねなどの仮想モデルを用いて検討を行っている研究もある。Bruniらは、電子制御されたアクティブ軸ばねの動力学に対する制御と監視系の動向を概察している。特に監視系の動向では、仮想モデルを作成し、そのモデルをもとにした故障検出と識別用の状態監視手法について述べている⁽⁸⁾。林らは、多重モデル法の一つであるIMM (Interacting Multiple Model) を活用し走行シミュレーションを行い有効性の検討を行っている。走行シミュレーションでは、台車上の特定部位の軸ばねが故障しているモデルを作成し、生起確率を観測する手法で発生した故障の内容と発生時刻の判断を行っている⁽⁹⁾。森らは、多重モデル法 (Interacting Multiple Model) の推定精度を向上させるために、推定用モデルを更新する手法を提案している。その上で輪軸、台車、車体の自由度を考慮した34自由度モデルを使い、マルチボディシミュレーションにより提案する故障検出方法の妥当性を検証し、車体台車間左右ダンパの故障検出精度を向上させた⁽¹⁰⁾。

綱島らは、鉄道車両の状態監視のための技術について、信号処理に基づく方法と運動モデルを用いるモデルベースの方法があることを指摘している。特にモデルベースの推定方法では、振動加速度から特定部位の状態を診断する方法があることをレビューしている⁽¹¹⁾。

以上の卓越した既往研究群から判断すると、本研究の特色は、細部にわたる専門の定期検査による精密さには及ばないが、日々の営業運転中に市販のパソコンとセンサのみにより、乗客と同乗状態でも検査が可能であるという、利便性にあると判断できる。センサの設置も両面テープで張り付ける程度であり、車体側には何の施しも必要なく実施できる簡便さは、コストがかかる次の定期検査までの間の必要最低限の予防保全や、赤字経営に悩むローカル鉄道の安全性維持に貢献できると考えられる。

2 車体の空間的重心位置変化に伴う鉄道車両の固有周波数計測実験

2・1 三次元重心検知理論の定式化

営業運転中の鉄道車両は、同一車両であっても、駅ごとの乗降により乗客数が常に変動するので、台車上に

ある車体の空間的重心位置も変化する．ここで言う空間的重心位置とは、水平面上の重心位置の上方にある高さ方向の重心位置のことである．例えば地面に置かれた物体であれば、その四隅の重量を計測すれば、重量分布によって平面的な重心の位置を調べることができる．しかし、高さ方向の重心位置は平面的な重量分布だけでは求められない．本研究では、特に、この高さ方向の空間的重心位置のことを、三次元空間上の重心位置として次の理由から重要視する．なお、これ以後は、三次元空間上の重心位置のことを、重心位置と略記する．前章に述べた既往研究においては、台車の劣化を調べるために振動の周波数を分析している例が多くある．乗客の乗降によって車体の重心位置が変化すると、重心が車体に生ずるモーメントも変化するので、車体上で発生する重心由来の固有周波数も連動して変化すると考えられる．つまり、車体にセンサを設置して軸ばねの劣化を検知しようとした場合には、センサから計測される車体の揺動は、軸ばねの劣化のみならず車体のその時々重心位置の影響も受けていると考えられる．この問題の解決には、まず同一の鉄道車両において、乗客数の変化に対応した重心位置を検知することが必要である．本研究は、この目的のために三次元重心検知理論⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾を適用する．この理論の考え方は、図1に示すように、直線走行中の鉄道車両が、重心由来の固有な縦揺れと横揺れ（図1における点線矢印）のみを生じていると仮定している．

Fig.1 3D-location of the center of gravity on a moving railway vehicle

具体的には、鉄道車両が直線を等速走行中にランダムな外乱を軌道から受けると、軸ばね上にある車体は、その重心位置に応じた固有の上下振動とローリングを生ずる．そのような重心由来の自由な車体の挙動を計測できれば、車体各部の個々の質量や軸ばねのばね定数が不明でも、車体の重心位置を特定することができる．逆に、鉄道車両がコーナリング中のときや分岐器を通過しているときなどは、特定の方向からの強制力が車体に働くので、その間の車体の上下振動とローリングは重心由来のものとはならず、三次元重心検知理論を適用することはできない．この点に注意が必要である．

ところで、図1は、ローリング方向への垂直断面をモデル化したものであるが、ピッチング方向にも同様のモデル化を考えることができる．しかし、ピッチング方向では、動揺中心軸から乗客を含めた車体の質量を支えている部分の幅（図1における b ）がローリングと比較して著しく長くなる．よって、重心由来の車体固有の揺れは減衰しやすく継続しにくいと考えられる．この現象は、船舶において典型的に生じるが、鉄道車両では、さらに前後に別の車両が連結されているので、ピッチング方向に重心由来の車体固有の揺れが顕著に表れるとは考えにくい．このことから本研究では、ローリングを採用するのが妥当と判断する．

2・1・1 車体の垂直方向単振動の定式化

まず、直線を等速で走行中の鉄道車両における車体の重心由来の上下振動を単振動として定式化すると、(1)となる．

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{m}{2k}} \quad (1)$$

ここで、

t : 車体の垂直方向の単振動周期

π : 円周率

k : 車体の左右個々の軸ばねのばね定数

m : 1 両分の車体の質量

とする.

ここで, 軸ばねのばね定数 (k) に関しては, 同じ軸ばねが左右対称に二対あるので, 式 (1) においては $2k$ となる (図 1).

2・1・2 車体のローリングの定式化

次に, 車体の重心由来のローリングが下心によって生じる場合を想定すると, その支点は軸ばねの上部付近にあると仮定できる. 本論文では, これを鉄道車両の動揺中心軸と呼ぶことにする (図 1). これより, 車体がローリング中のモーメントと力のバランスの関係は, 式 (2) に記述できる.

$$Lf = -kxb + mgL\sin\theta \quad (2)$$

ここで,

L : 動揺中心軸から乗客を含めた車体の重心位置までの高さ

f : 重心の回転円の接線方向に加わる力

x : 車体を支える左右の軸ばねの変位

b : 動揺中心軸から乗客を含めた車体の質量を支えている部分の幅

g : 重力加速度

θ : ある瞬間における車体のローリング角度

とする.

図 1 より $x = b/2 \sin\theta$ であるから, 式 (2) より式 (3) を導ける.

$$Lf = -k \frac{b^2}{2} \sin\theta + mgL\sin\theta \quad (3)$$

ここで, 式 (3) を f の式に整理すれば, 式 (4) を得る.

$$f = -\frac{m}{L} \left(\frac{kb^2}{2m} - gL \right) \sin\theta \quad (4)$$

直線を等速で走行中の鉄道車両においては, ローリングの角度は微細なものである. 従って三角関数の特性より θ が十分に小さいとすると, 式 (5) が成り立つ.

$$f = -\frac{m}{L} \left(\frac{kb^2}{2m} - gL \right) \theta \quad (5)$$

この式形は, L を半径とした円運動の方程式と同値になるから, 式 (6) が成立する.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{1}{L^2} \left(\frac{kb^2}{2m} - gL \right) \theta \quad (6)$$

ここで, ω を固有振動数と置けば式 (7) が成立し, それより式 (8) が導ける.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\omega^2\theta \quad (7)$$

$$\omega = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{kb^2}{2m} - gL} \quad (8)$$

さらに, ここで車体のローリング周期を T とすると, $T = 2\pi/\omega$ であるから式 (9) が成り立つ.

$$T = \frac{2\pi L}{\sqrt{\frac{kb^2}{2m} - gL}} \quad (9)$$

2・1・3 車体の重心位置 L の算出

周波数は周期の逆数として記述されるので、 t と T に対応する周波数をそれぞれ F' および F とおくと、式 (1) と式 (9) により、式 (10) と式 (11) が成立する。

$$F' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2k}{m}} \quad (10)$$

$$F = \frac{\sqrt{\frac{kb^2}{2m} - gL}}{2\pi L} \quad (11)$$

ここで、式 (10) と式 (11) において F' と F は、走行中の鉄道車両から計測すれば既知となる。さらに両式において、ばね定数と質量が k/m となって一体化しているので消去できる。よって、未知数を L として両式の連立方程式を整理すると、式 (12) を得る。

$$L^2 + \frac{g}{4\pi^2 F^2} L - \frac{b^2 F'^2}{4F^2} = 0 \quad (12)$$

したがって、車体の重心由来の垂直方向の単振動とローリングの固有周波数が、二つ同時に観測できる場合に限り、式 (12) により動揺中心軸から乗客を含めた車体部分の重心位置を求めることができる。

2・2 重心位置変化に伴う車体の固有周波数の変動

2・2・1 重心位置変化に伴う車体の固有周波数の計測実験方法

同一列車の同一車両に対して駅毎に乗客の乗降が生ずれば、車両動揺中心軸から車体の重心位置までの高さ (L) もそれに応じて変化する。この状況を式 (12) に当てはめた場合、 L の変化に伴い、重心に由来する車体の固有周波数 (F', F) も変動することになる。

そこで本項では、同一列車の同一車両において、駅毎に乗客数が変化することに連動して L も変化し、さらに車体の固有周波数 (F', F) も変動することを、上述した三次元重心検知理論を用いて検証する。実験では営業運転中の実物の鉄道車両に乗客として乗り込んで、図 2 右に示すように加速度・角速度センサを、水平を保てる場所に適宜設置し、車体の垂直方向の単振動とローリングを計測した。これらの計測に、マイクロストレイン社製の半導体振動型小型ジャイロセンサー（電圧出力アナログ型）を使用した。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リング角速度を同時に計測でき、かつ A/D コンバーターが内蔵されているため、計測と同時にデータをパソコンに取り込み分析できるからである。なお、このジャイロセンサーのサンプリング間隔は 0.010 秒である。分析に使用したパソコンも市販の汎用品を用い、装置全体としても膝の上に乗る程度の簡素なものである。

Fig. 2 The procedure of measuring vertical acceleration and roll rate on JR Kansai line

実験は、2010 年 4 月 1 日に JR 関西本線で実施した。実験に用いた鉄道車両を図 2 左に示す。計測区間と計測時間は、加佐登駅から蟹江駅までの各駅間の直線区間で、鉄道車両が等速運動するのに十分な長さである 25.0 秒間とした。この電車は名古屋駅に向かう電車であるので、乗客数は停車駅を経る度に増加し、最終的には満員電車となった。表 1 は、実験の順番と共に目測により得られた乗客数を示したものである。

Table1 Conditions of experiments on measuring the acceleration and the roll rate on JR-Kansai line

Order of Experiments	Locations of Experiments	Number of Passengers
1 st	Kasado ~ Kawano	20
2 nd	Minamiyokkaichi ~ Yokkaichi	40
3 rd	Yokkaichi ~ Tomidahama	70
4 th	Kuwana ~ Nagashima	140
5 th	Eiwa ~ Kanie	140

実験に用いた車体の固有周波数を特定するにあたって、適用した高速フーリエ変換（FFT:First Fourier Transformation）の分析サイズは、使用した加速度・角速度センサのサンプリング間隔が 0.010 秒であったことから、20.48 秒（サンプリング数 2048 個）とした。この設定で計測開始後に最初に FFT が可能となる 20.48 秒から、計測を終了する 25 秒まで、サンプリング間隔ごとに連続して FFT にかけ、平均化を行って測定誤差を取り除いた。このプロセスを経て得られたスペクトルが最大になる周波数を、車体の固有周波数（ F' 、 F ）とした。

2・2・2 重心位置変化に伴う車体の固有周波数の計測実験結果

表 2 に、関西本線での実験から得られた F' と F および L の結果を示す。なお、例として表 2 における第 2 実験の F' を図 3 に、 F を図 4 に示す。表 2 を見ると F' と F は、同一列車でも乗客数の状況によって随時変化

Table2 Results of detecting 3D-location of the center of gravity (L) on JR-Kansai line

Order of Experiments	Width Between Springs on Either Side	Frequency of Vertical Acceleration at the Peak Spectrum	Frequency of Roll Rate at the Peak Spectrum	3D- Locations of the Center of Gravity
	b [m]	F' [Hz]	F [Hz]	L [m]
1 st	1.600	1.220	0.439	1.670
2 nd	1.600	1.318	0.439	1.842
3 rd	1.600	1.416	0.537	1.722
4 th	1.600	1.464	0.488	1.934
5 th	1.600	1.660	0.585	1.936

Fig.3 A result of FFT for the vertical acceleration measured on the JR Kansai Line (2nd in Table 2) Fig.4 A result of FFT for the roll rate measured on the JR Kansai Line (2nd in Table 2)

している。そこで、 L と乗客数の推移を比較したものが図 5 である。これを見ると、特に四日市駅 (3rd) を通過後に乗客数が大幅に増加するとともに、 L が呼応して上昇していることがわかる。この理由は、四日市駅を境に座席が乗客でほぼ埋まり、桑名駅 (4th) では立ち位置の乗客で一気に満席になったからと考えられる。実際に加佐登駅 (1st) から四日市駅 (3rd) の車体の重心位置は 1.7m 前後であり、この位置は、実験で使用した鉄道車両の図面⁽¹²⁾ と福知山線事故の被害者の手記⁽¹³⁾ を参考にすると、動揺中心軸が軸ばねの上部周辺にあると仮定した場合には、ほぼ車体の座席周辺となる。つまり、加佐登駅 (1st) から四日市駅 (3rd) までの間では、乗客が乗車しても皆座位となり車体の重心付近に乗客の質量が増加していったため、 L に顕著な変化が現れなかったと考えられる。これに対して、立ち位置乗客で満席となった桑名駅 (4th) 以後では、乗客の質量分布が車体単体の重心位置より上方に集中したため、 L も上昇したと考えられる。

このような観点から、 L と F' ならびに F は相互に関連していると判断でき、これは、軸ばねの経年劣化検知に三次元重心検知理論を用いることが、有効であることを示していると考えられる。

Fig. 5 A comparison of the center of gravity (L) under different number of passengers

2・2・3 実験結果が下心ローリングであることの検証

鉄道車両の横揺れは、上心ローリングである可能性もある。もし本研究の実験結果が上心ローリングから生じていると仮定するならば、次のような現象を生じているはずである。まず、上心ローリングであるならば、動揺中心軸の位置は車体の重心位置より上方に無ければならない。本研究で車体内に設置したセンサの位置は、車体内の床かあるいは座位で乗車したときの車窓下部である。したがって、センサの位置と上心との距離は、下心ローリングを仮定した場合より長くなると考えられる。したがって、そのような場合のセンサは、上心ローリングによる左右への変位の大きさが下心ローリングを仮定した場合より大きくなり、かつその往復運動の左右直線方向への加速度成分は、上心ローリングと同じ周波数を持って顕著に表れるはずである。

そこで本研究では、この点を検証するために、図 3 と図 4 に示した実験時に左右方向の直線加速度も同時に計測し、FFT をかけてみることにした。その結果を示したのが図 6 である。この図から明らかなように、左右

Fig. 6 A result of FFT for the horizontal (left-right) acceleration measured on the JR Kansai Line (2nd in Table 2)

方向の加速度成分の振幅の大きさは図 3 の上下方向の加速度成分の大きさと比較すると著しく小さく、また、図 6 には、図 4 に現れているローリングの固有周波数に該当する位置に、顕著な振幅も見られない。以上の分析結果から、本研究の分析対象範囲内においては、下心ローリングを仮定するのが妥当であると判断できる。

3 卓上型三次元重心検知装置による重心静止限界高さの存在に関する実証実験

3・1 三次元重心検知理論による重心静止限界高さの導出

本章では、重心位置に基づく軸ばねの経年劣化を検知するための、新たな方法を提案する。

三次元重心検知理論の基礎となっているローリングに着目すると、ばね台座等の上下のばね系上に置かれた物体は、その重心位置がある一定の高さを超えると、外乱が皆無でも上下のばね系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⁽¹⁴⁾。これを鉄道車両の軸ばねを例として図説すると図 7 となる。

Fig. 7 A model of lower limit of unstable zone of the center of gravity on a moving railway vehicle

ここで、車体の重心由来のローリングを示す式 (4) より、次式が成り立つ⁽²⁾。

$$f = -\frac{mg}{L} \left(\frac{kb^2}{2mg} - L \right) \sin\theta \quad (13)$$

ここで、車体の重心が軸ばね上で横転しない状態であれば、 f は θ 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。この条件を満たすためには、

$$\frac{kb^2}{2mg} - L > 0 \quad (14)$$

でなければならない。したがって、次式が成り立つ。

$$L_{\max} = \frac{kb^2}{2mg} \quad (15)$$

ここで、

$L_{\max}$: 軸ばね上に置かれた車体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。式 (10) より、

$$\frac{k}{m} = 2\pi^2 F'^2 \quad (16)$$

であるから、

$$L_{\max} = \frac{\pi^2 F'^2 b^2}{g} \quad (17)$$

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

しかしながら、式 (17) に必要とされる F' は、式 (12) も同時に満たすものでなければならない。つまり、 $L_{\max}$ を得ることができる前提は、 F' と同時に F も計測できている状態であり、それは、 $L_{\max}$ より先に L が得られていることを意味する。例えば 2.1 節にも述べたが、車体に強制力が働くような走行状態では、重心由来の垂直方向の単振動とローリングが妨げられてしまう。このような状態では適切な F' を得ることはできない。この理由から、 $L_{\max}$ は L と共に示してゆく必要がある。

3・2 卓上型三次元重心検知装置による重心静止限界高さの導出

$L_{\max}$ を用いることで、重心位置を考慮した軸ばねの経年劣化を検知できると考えられる。まず、式 (12) から、軸ばね上に置かれた車体の F' と F を計測すれば、 L を求めることができると考えられる。ここで L は、車体の動揺中心軸から重心位置までの高さであるから、軸ばねが経年劣化していったとしても L は変化しないはずである。実際に式 (12) には、ばね定数 (k) は含まれていない。これに対して式 (15) には、 k が含まれている。したがって、 k を変化させずに一定にし、 L を変化させた場合には、式 (15) と同値である式 (17) から $L_{\max}$ は変化しないはずである。あるいは逆に、 L を一定にした状態で k を変化させた場合には、 $L_{\max}$ も変化してゆくはずである。この特性を応用すれば、軸ばねの経年劣化を検知できると考えられる。

そこで、簡易な実験装置である卓上型三次元重心検知装置を自作して $L_{\max}$ の妥当性を検証した。卓上型三次元重心検知装置は、図 8 に示すような、重心検知対象物、ばね台座、加速度・角速度センサとパソコンで構成され、市販の汎用品のみを用いた簡素なものである。

Fig. 8 A structure of a tabletop detector for the center of gravity

重心検知対象物（押しばね上部にある物体）は、ばね台座、プラスチック製の箱、そして、重心位置を変化させる錘で構成した。ばね台座は、質量 0.150kg で厚さ 0.005m の板を用いた。ばね台座の下には、鉄道車両の軸ばねを想定し、押しばねを 4 本設置してばね台座と上部の箱と錘を支えた。この押しばねは、図 7 で示したモデルと同等の動きをするように、左右対称に配置し、式 (12) と式 (17) に代入する b の値は、左右の押しばねの配置幅に合わせて 0.080m とした。これらの押しばねにはホームセンターで入手できる汎用品を用い、ばね定数が異なる 3 種類を用意した。本章では、これらの押しばねを、ばね定数が弱い順に Spring a, Spring b, Spring c と呼ぶ。ばね定数はフックの法則によって算出したもので、Spring a が 662.537N/m, Spring b が 1532.289N/m, Spring c が 3502.347N/m である。

ばね台座上には、上述した箱を二段に重ねて設置し、その中に 7 個の錘を以下のように配置した。箱一つの質量は 0.150kg である。箱の内部は、鉄道車両の車体と同様に空洞となっている。箱一つの高さは 0.180m, 横幅は 0.090m, 奥行きは 0.080m である。この箱を二つ上下二段に組合せ、その上段と下段に錘を任意に重ねることで重心位置を調整できるように構成した。これは、実際の鉄道車両に乗り込んで実施する実験との対比が行えるようにするためであり、つまり、車体に乗客が乗降するのと同じように、二段箱の上段と下段に配置する錘

の数を変えることで、重心位置を変化させるのである。錘は、均一な厚さ 0.010m のステンレス製金属片で、一個あたり 0.483kg のものを 7 個用いた。ばね台座の裏面には、加速度・角速度センサを取り付けた。

実験は、ばね台座上にある箱を一度だけ加振することで、その後一定時間自由に継続される垂直方向の単振動とローリングを計測して、固有周波数の F' と F を得る。加速度・角速度センサのサンプリング間隔は 0.010 秒で、得られた F' と F を用いて式 (12) から L を算出し、式 (17) から $L_{\max}$ を算出した。

まず、ばね定数を変化させずに一定にし、重心検知対象物の L のみを変化させた場合の、 $L_{\max}$ の変化を調べた。実験にあたっては Spring a を使い、図 8 に示したように、錘を下段箱に 7 個積んだ状態から一個ずつ上段箱へ載せ替えて、 L を上方へと変化させた。この要領で、図 9 に示すパターン A（重心が最も低い状態）からパターン H（重心が最も高い状態）へと順に錘の積み上げ方を変化させて、各パターンの重心位置の状態での F' と F を測定し、 L と $L_{\max}$ を算出した。

この実験においては、ばね台座、箱、錘のそれぞれの質量と空間的な位置の関係が既知であるので、図 9 に示したパターン A～パターン H による重心位置は、三者相互の質量分布と距離の関係から静的な比例計算によっても求めることができる。この値を L' とし、三次元重心検知理論によって求めた L の妥当性の評価に用いることにする。表 3 に、実験により得られた F' と F 、ならびに両者より算出された L と $L_{\max}$ 、そして、上述の比例計算によって別途求めた L' を示す。

Pattern	A	B	C	D	E	F	G	H
Weight Combinations
Number of Weights in Upper box	0	1	2	3	4	5	6	7
Number of Weights in Lower box	7	6	5	4	3	2	1	0

Fig.9 Patterns of weight combinations for changing the center of gravity on the tabletop detector

Table 3 Results of detecting the center of gravity (L) and the lower limit of unstable zone ($L_{\max}$) by the tabletop detector

The Three Dimensional Detection of the Center of Gravity					Static Proportional Calculation
Patterns of Weight Combinations	F' [Hz]	F [Hz]	L [m]	$L_{\max}$ [m]	L' [m]
A	4.150	2.441	0.043	0.111	0.042
B	4.150	2.075	0.050	0.111	0.046
C	4.150	1.831	0.054	0.111	0.053
D	4.150	1.465	0.063	0.111	0.062
E	4.150	1.220	0.070	0.111	0.074
F	4.150	0.854	0.082	0.111	0.089
G	4.150	0.610	0.090	0.111	0.106
H	Unmeasured because of $L > L_{\max}$				0.126

Table 4 The comparison of the center of gravity (L) and the lower limit of unstable zone ($L_{\max}$) under different spring constant by the tabletop detector

The Three Dimensional Detection of the Center of Gravity						Static Proportional Calculation
Spring	Spring Constant [N/m]	F' [Hz]	F [Hz]	L [m]	$L_{\max}$ [m]	L' [m]
a	662.537	4.150	0.610	0.090	0.111	0.106
b	1532.289	6.226	2.075	0.088	0.245	
c	3502.347	7.691	2.563	0.102	0.418	

ここで、 L と L' を比較すると、後述するFFT（高速フーリエ変換）の特性に基づく誤差を考慮すれば、両者の結果は概ね一致していることが分かる。以上により、卓上型三次元重心検知装置によって求められた L は妥当であると判断できる。さらに、パターンAからHまでのすべての重心位置において、等しく0.111mという一定の数値の $L_{\max}$ が存在することが示された。加えて、 L' が $L_{\max}$ を超えるパターンH（ $L'=0.126\text{m}$ ）の場合では、ばね台座が復原できなくなり上部の箱が横転し、 L が測定できなくなった。このことから、本研究で提案した $L_{\max}$ の考え方も、妥当であると判断できる。

次に、鉄道車両が経年使用された時の軸ばねの経年劣化による、 k の変化を想定した実験を行った。実験では、重心検知対象物の条件を、表3における L が最も $L_{\max}$ に近い状態であるパターンGに揃えた状態で、三種類のばね（Spring a, Spring b, Spring c）を用いて各ばねの $L_{\max}$ を計測した。この計測によって得られた F' と F および L と $L_{\max}$ を表4に示す。これを見ると、ばね定数が数倍異なっていることとFFTの特性に基づく誤差を考慮に入れば、 L は概ね L' の近傍の値に検知されていると言える。FFTは離散フーリエ変換の一種であるので、計算結果の周波数は連続的に得られず、最小周波数単位での分解能に精度が制限される。本研究で用いているFFTへの一回の計測時間は20.48秒であるので、その逆数が本研究の最小周波数単位となり、その値は0.049Hzとなる。この値が本研究におけるFFTの特性に基づく誤差となる。例えば、表4の F' と F に対して、この値だけずらしてから L を求め表4に示された L との差を求めると、その値は L' に対して約10%程度になる。一方で、表4に示された L の L' に対する差異は、たかだか17%留まりである。したがって、その差異の大半はFFTの特性に基づく誤差であると判断でき、この実験結果は妥当なものであると判断できる。

以上により表4の結果から、重心検知対象物の L を一定にした状態で、ばね定数を大きなものに変化させて F' を計測すれば、 $L_{\max}$ の数値も呼応して大きくなることが分かる。よって k が経年劣化により小さくなれば、 $L_{\max}$ も小さくなると考えられ、この考え方を鉄道車両に適用すれば、車体の重心位置を考慮した軸ばねの経年劣化検知が可能であると考えられる。

4 重心静止限界高さをを用いた新造時からの軸ばねの経年劣化検知実験

4・1 新造時からの軸ばねの経年劣化検知実験の方法

鉄道車両は、新造されてからの経年によって軸ばねが経年劣化をすると考えられる。そこで、3章で示した卓上型三次元重心検知装置の実験を走行中の鉄道車両に应用することで、軸ばねの経年劣化検知が可能かを調べるための実験を行った。実験は、新造時から実験日までの経年数の異なる、同一形状かつ乗客数と、その乗車状況が同程度である鉄道車両で行った。具体的には、乗客の大半が座位の状況と空車に近い状況で実験を行った。この実験により、新造時から実験日までの経年数による軸ばねの経年劣化状況の違いを、三次元重心検知理論から導かれる重心静止限界高さ（ $L_{\max}$ ）によって把握できるかを確かめた。つまり、乗客数が同程度の条件では、各実験で算出される動揺中心軸から乗客を含めた車体部分の重心位置までの高さ（ L ）は近いものになるが、新造時からの経年数が長い車両では、軸ばねが経年劣化することで $L_{\max}$ の数値も低くなるはずである。従って、本章の実験対象の鉄道車両を選定する際には、同一形状で経年数の異なる鉄道車両を選ぶ必要がある。そこで、成田線、常磐線、総武線（各駅停車）で使用されている、床下に機器などの重量物が搭載されていない形式の鉄道車両で実験を行った。この三つの路線を選んだのは、同一形状で経年数が異なる車両が各路線相互に使われているからである。ここで、総武線（各駅停車）の実験で用いた鉄道車両を鉄道車両Ⅰとする、常磐線、成田線の実験で用いた鉄道車両を鉄道車両Ⅱと鉄道車両Ⅲとする。これらの車両の形式はTE231であり、台車形式はTR-246であり同一である。この実験で使用した加速度・角速度センサは2章と同様のもので、営業運転中の鉄道車両の車体内の床面上などの水平面上に適宜設置した。車体の固有周波数の特定は、2章で示した方法で行い、車体個々の L と $L_{\max}$ を算出した。表5は、実験の順番、実験日、計測時の実験区間、使用車両、乗客数、計測秒数、ならびに実験で用いた車両の新造時から実験日までの経年数を示したものである。

Table 5 Conditions of experiments on measuring the acceleration and the roll rate on moving railway vehicles under different operational years since newly built.

Order of Experiments	Dates of Experiments	Locations of Experiments	Distinction of Cars	Number of Passengers	Duration of Measurement [second]	Operational Years since Newly Built [year]
6 th	May 13,2011	JR Sobu line Sendagaya ~ Shinanomachi	Car I	64	25.0	5.5
7 th	May 16,2011	JR Jyoban line	Car II	64	25.0	8.0
8 th	November 18,2009	Kashiwa ~ Matsudo	Car III	54	25.0	5.9
9 th	May 16,2011	JR Narita line	Car II	5	43.0	8.0
10 th	November 18, 2009	Ajikiki ~ Kobayashi	Car III	6	43.0	5.9

具体的には、計測秒数は、各実験において鉄道車両が直線区間を等速で走行できる時間に合わせた。乗客数については目視で確認した。乗客数が 60 人前後で、その乗車状況は座位の条件下で実験を行ったものが、第 6 実験、第 7 実験、第 8 実験である。また、乗客数が 5 人前後のほぼ空車の状態で、同一形状の車両で行ったものが第 9 実験と第 10 実験である。新造時からの実験日までの経年数は、実験対象の鉄道車内外にある表記などを参考に算出した。

4・2 新造時からの軸ばねの経年劣化検知実験の結果

4・1 節で示した方法と条件で実験を行い、乗客数とその乗車状況が同程度の条件下で、実験対象の車体の各々の $L_{\max}$ の差異を調べることで、新造時から実験日までの経年数に応じた軸ばねの経年劣化検知に $L_{\max}$ を活用することが可能か確かめた。

表 6 は、実験の順番と実験時の乗客数、新造時から実験日までの経年数、実測によって得られた台車の車体部分を支える部分の幅 (b)、各実験における車体の固有周波数 (F ; F) と、それによって導かれた L と $L_{\max}$ を示したものである。まず、乗客数が 60 人前後の第 6 実験、第 7 実験、第 8 実験の 3 つの実験で比較すると、 L は 1.7~1.8m 程度のほぼ同一の数値が検知されていることが分かる。同様に、乗車状況が 5 人前後の第 9 実験、第 10 実験の 2 つの実験で比較をすると、 L は 2.2m 程度のほぼ同一の数値が検知されていることが分かる。この結果は、乗客数とその乗車状況が同程度である同一形状の鉄道車両で実験を行ったことから、妥当であると考えられる。

ところで、本章の実験では、2 章の実験と異なり乗客数が多い実験の方が、 L が小さく検知されていた。具体的には、乗客数が 60 人前後の実験より乗客数が 5 人前後の実験の方が、 L の数値が大きい。この理由は、前者の実験時における乗車状況が、乗客の大半が座位の状態であったことと、床下に重量物が搭載されていない形状の鉄道車両で実験を行ったことから、鉄道車両自身の空間的重心位置より相対的に乗客全体の重心位置が低かったからと考えられる。このことは、三次元重心検知理論を用いれば、乗客数と乗車状況、鉄道車両の形状が様々であっても、的確に車体の重心位置の検知ができることを示すものである⁽²⁾。

次に、同程度の L が検知される条件で $L_{\max}$ 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ことが分かる。具体的には、乗客数が 60 人前後の 3 つの実験結果を比較すると、 L はほぼ同一であるが、新造時から実験日までの経年数が最も長い第 7 実験において、 $L_{\max}$ は明らかに低くなっていることが分かる。それに対して、新造時から実験日までの経年数がほぼ同じである第 6 実験と第 8 実験では、 $L_{\max}$ も 5.9m 程度の同程度の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 2 つの実験結果を比較すると、両者の L は、ほぼ同じ値であるが、第 10 実験より新造時から実験日までの経年数が約 2 年長い第 9 実験の方が $L_{\max}$ は明らかに低くなることが分かる。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、軸ばねの経年劣化検知の妥当性を示すものである。

Table 6 Results of detecting the center of gravity (L) and the lower limit of unstable zone ($L_{\max}$) on moving railway vehicles under different operational years since newly built

Order of Experiments	Load Conditions		Operational Years since Newly Built [year]	b [m]	F' [Hz]	F [Hz]	L [m]	$L_{\max}$ [m]
		Number of Passengers						
6 th	Heavier	64	5.5	1.6	1.513	0.537	1.864	5.901
7 th		64	8.0	1.6	1.269	0.439	1.756	4.151
8 th		54	5.9	1.6	1.516	0.585	1.741	5.925
9 th	Lighter	5	8.0	1.6	1.757	0.537	2.222	7.958
10 th		6	5.9	1.6	1.953	0.585	2.332	9.833

4・3 重心静止限界高さに基づく新造時からの軸ばねの経年劣化率

図 10 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。この図に示された結果を考察すると、有益な事実を見出すことができる。具体的には、 $L_{\max}$ による経年劣化率(m/年)を、乗客数が同程度で L の値が至近な実験結果ごとに割り出すと、経年劣化率の値はほぼ同率となることがわかる。つまり、第 6 実験、第 7 実験、そして、第 8 実験の傾向線の傾きは-0.75 (m/年)であり、第 9 実験と第 10 実験の傾向線の傾きも-0.9 (m/年)であり、両者は概ね近い比率である。前者と後者では乗客数が著しく異なっているため L も相違するが、 $L_{\max}$ による経年劣化率(m/年)を求めると大差がないことが分かった。このことから、特定の L の水準における $L_{\max}$ による経年劣化率(m/年)を調べれば、どの水準の L の値で調べたかには依らずに、経年劣化率(m/年)は一定であると考えられる。

したがって、営業運転中に常時 L と $L_{\max}$ を検知し続けることによって、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、軸ばねのリアルタイムな劣化検知が、簡易かつ廉価な方法で実現できると考えられる。

Fig. 10 The lower limit of unstable zone ($L_{\max}$) by operational years since newly built

5 重心静止限界高さを用いた全般検査前後の軸ばねの経年劣化検知実験

5・1 鉄道車両の全般検査前後の軸ばねの経年劣化検知実験の方法

三次元重心検知理論から導かれる重心静止限界高さ ($L_{\max}$) を用いることで、鉄道車両の新造時から実験日までの経年数に応じた、軸ばねの経年劣化の検知が可能であることは、4 章の実験によって示された。しかしながら、鉄道車両には経年数や走行距離などによって、様々な検査が義務付けられている。そこで、本研究はまず、本研究の一連の実験対象路線を有している東日本旅客鉄道株式会社に対して、鉄道車両の特に軸ばねに対する検査の実施や交換のタイミングについて、ヒアリング調査を実施した。このヒアリング調査は、平成 24 年 8 月 25 日に東京総合車両センターで開催された一般公開に赴いて、当該社の技術説明員に対して行った。その結果、

一次ばねである軸ばねは、台車内に組み込まれた大型の重量部品であり、精密な検査或不具合等の問題に対する補修は、台車をオーバーホールして軸ばねを取り外して行っているとのことである。そのような検査は、鉄道車両を営業運行から離脱させて、メーカー等の専門工場等へ搬入して行うとのことであった。このような検査のことを、当該社では、全般検査と呼び、新造時から概ね 8 年～10 年程度の周期で行っているとのことである。したがって、突発的な事故で破損したりしない限り、軸ばねは、少なくともこの間隔の期間内では、補修や交換されることはなく使い続けられると考えてよいとのことであった。

このヒアリング結果に基づいて、本研究は、全般検査前の軸ばねの経年劣化状態と、当該検査後の劣化からの回復状況が、 $L_{\max}$ を用いて検知可能かを調べるための実験を行った。つまり、軸ばねに上述の精密検査が実施されて補修が施された後には、軸ばねの性能は新造時に近い状態に回復されと考えられる。よって、 $L_{\max}$ の数値も当該検査後の方が高くなるはずである。そこで、本章の実験対象の鉄道車両を選定する際には、同一形状で乗客数が同程度の当該検査前後の車両を選ぶ必要がある。

この目的のために本章の実験は、総武線（快速）で使用されている鉄道車両で行った。その理由は、総武線（快速）で用いられている鉄道車両は、実験時に全般検査が順次行われつつあったからである⁽¹⁵⁾。実験では、当該検査前と後の両者の状態が存在し、同一形状で、かつ乗車状況の同程度の鉄道車両を選定した。ここで、当該検査前の鉄道車両を鉄道車両Ⅳとし、当該検査後の鉄道車両を鉄道車両Ⅴとする。これらの車両の形式は TcE217 であり、台車形式は TR-246 であり同一である。実験の方法は 4・1 節と同様であり、当該検査前後の鉄道車両個々の動揺中心軸から乗客を含めた車体の重心位置までの高さ (L) と $L_{\max}$ を得た。

表 7 は、実験の順番、実験日、計測時の実験区間、使用車両、乗客数、計測秒数、ならびに実験で用いた鉄道車両の新造時から実験日までの経年数、または全般検査を受けた日から実験日までの経年数を示したものである。具体的には、表 7 における第 11 実験で用いた鉄道車両は、実験時において新造から 10 年経過し⁽¹⁶⁾、当該検査を受ける 3 か月前の状態であった。これに対して、第 12 実験で用いた鉄道車両は、新造時から実験日までの経年数は 13 年であったが、当該検査を受けて 4 か月経過した後の状態であった。これらの当該検査を受けた日は、車体内外にある表記などを目視確認することにより得たものである。第 11 実験と第 12 実験で用いた鉄道車両の乗客数は同程度であり、その乗車状況は乗客の大半が座位にあった。

Table7 Conditions of experiments on measuring the acceleration and the roll rate on moving railway vehicles under different operational years since newly built or latest car inspection.

Order of Experiments	Dates of Experiments	Locations of Experiments	Distraction of Cars	Number of Passengers	Duration of Measurement [second]	Operational Years since Newly Built or Latest Car Inspection [year]
11 st	November 20, 2009	JR Soubu Line Tsuga ~ Chiba	Car IV	39	39.7	10.0 (Since newly built)
12 th	November 24, 2009	JRSoubu Line Yotsukado ~ Tsuga	Car V	30	41.2	0.3 (Since latest car inspection)

5・2 鉄道車両の全般検査前後の軸ばねの経年劣化検知実験結果

5・1 節で示した方法と条件で実験を行い、全般検査前の軸ばねの経年劣化状態と、当該検査後の軸ばねの劣化回復状況を、 $L_{\max}$ を用いて検知可能か検討した。表 8 は、実験の順番と実験時の乗客数、新造時または当該検査を受けた時からの実験日までの経年数、上述した東京総合車両センターの一般公開で、実物の台車に対する実測によって得られた軸ばねが車体を支える部分の幅 (b)、各実験における車体の固有周波数 (F' , F) と、それによって導かれた L と $L_{\max}$ を示したものである。また図 11 は、横軸を新造時または当該検査を受けた時からの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。

Table8 Results of detecting the center of gravity (L) and the lower limit of unstable zone ($L_{\max}$) on moving railway vehicles under different operational years since newly built or latest car inspection

Order of Experiments	Number of Passengers	Operational Years since Newly Built or Latest Car Inspection[year]	b [m]	F' [Hz]	F [Hz]	L [m]	$L_{\max}$ [m]
11 st	39	10.0 (Since newly built)	1.6	1.513	0.439	2.187	5.901
12 th	30	0.3 (Since latest car inspection)	1.6	1.660	0.488	2.249	7.104

Fig. 11 The lower limit of unstable zone ($L_{\max}$) by operational years since newly built or latest car inspection

まず、第 11 実験と第 12 実験で L の数値を比較した。表 8 によれば、両者の L の値は、2.2m 前後とほぼ同一の値が検知されていることがわかる。この結果は、乗客数が同程度で同一形状の鉄道車両で実験を行ったことから妥当であると考えられる。

次に、第 11 実験と第 12 実験で $L_{\max}$ の数値を比較した。図 11 と表 8 によれば、全般検査前（第 11 実験）より当該検査後（第 12 実験）の方が、 $L_{\max}$ の数値は 1.2m 程度大きくなることがわかる。この理由は、当該検査の実施によって軸ばねの劣化が回復されたからであると考えられる。

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、全般検査前の軸ばねの経年劣化状態と当該検査後の軸ばねの劣化回復状況の検知結果を、妥当に示していると判断できる。

5・3 重心静止限界高さに基づく全般検査後の劣化回復率

4・3 節に述べた $L_{\max}$ による経年劣化率(m/年)を、図 11 における第 11 実験と第 12 実験に適用すると、さらに興味深い事実を確認できる。具体的には、第 11 実験と第 12 実験の傾向線の傾きは、-0.12 (m/年)程度であり、この値の絶対値は、4・3 節に示された経年劣化率の絶対値より小さい。つまり、全般検査を行ったとしても、軸ばねの性能は新造時の状態までには回復できないことを意味する。これは、自動車の車検等においても経験的に認識される現象に、類似すると考えられる。

したがって、営業運転中に常時 L と $L_{\max}$ を検知し続けることによって、特定の L に対する $L_{\max}$ を監視することで、全般検査前後の劣化回復率がどの程度のものなのかを見い出すことも、安価で簡易な方法で実現できると考えられる。

6 おわりに

本研究の結果により、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、鉄道車両の形状と乗客数に応じた、動揺中心軸から乗客を含めた車体の重心位置までの高さ (L) を、簡易な方法で検知できる可能性が示された。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軸ばねの経年劣化も検知で

きる可能性が示された。さらに、全般検査において、軸ばねが精密検査と補修を受ける場合には、当該検査前の軸ばねの経年劣化状態と、当該検査後の軸ばねの劣化回復状況の検知もできる可能性が示された。

したがって、 L と $L_{\max}$ を合わせて用いれば、鉄道車両の営業運転中において、軸ばねの経年劣化をリアルタイムに簡単な方法で検知でき、営業運転中の偶発的な故障の発見や検査のタイミングを判断する目安として、貢献することが可能であると考えられる。具体的には、営業運転中に常時 L と $L_{\max}$ を検知し続けることによって、特定の L に対する $L_{\max}$ を、

- ① 経年劣化率 (m/年) として監視することで軸ばねの新造時からの経年劣化の検知
- ② 劣化回復率 (m/年) として監視することで全般検査後の軸ばねの劣化回復状態の確認

の両者が可能であると考えられる。

このように三次元重心検知理論を用いれば、安価で簡易な装置によって軸ばねの劣化検知を実現できる可能性がある。このことは、赤字に苦しむローカル鉄道などの安全性向上にも役立てられると考えられる。

しかしながら、本研究で行った実験と検証は、台車の形式が TR-246 である鉄道車両に対してだけであり、その他の形式の台車の軸ばねに対しても本研究のアプローチが同様に適用できるかどうかは、今後さらに実験を積み重ねて検証してゆく必要がある。これが本研究の今後の課題である。

文 献

- (1) 運輸安全委員会, “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”, 鉄道事故調査報告書, RA2012-5(2012), P9.
- (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) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 城取岳夫, 安永年広, “台車振動加速度による状態監視手法”, 車両技術, Vol. 25, No. 8 (2011), pp. 17-22.
- (7) 大庭拓也, 山田幸一, 岡田信之, 谷藤克也, “振動解析に基づく新幹線台車の状態監視 (第 2 報, 前後台車比較及び振動ピーク持続性の検証)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 769 (2010), pp. 27-35.
- (8) Bruni, S., Goodall, R.M., Mei, T.X. and Tsunashima, H., “Control and monitoring for railway vehicle dynamics”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 45, No. 7-8 (2007), pp. 765-771.
- (9) 林祐介, 丸茂喜高, 綱島均, “鉄道車両の状態監視と故障検知に関する研究”, 日本機械学会第 16 回交通物流部門大会講演論文集, No. 07-51 (2007), pp. 331-334.
- (10) 森裕貴, 綱島均, “多重モデル法を用いた鉄道車両の状態診断”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 770 (2010), pp. 12-19.
- (11) 綱島均, “鉄道における状態監視の現状と課題”, 日本鉄道技術協会誌, Vol. 55, No. 1 (2012), pp. 36526-36528.
- (12) 交友社, “短絡線ミステリー”, 鉄道ファン, Vol.39, No.458, (1999), 付図クモハ 313.
- (13) 吉田恭一, “2005 年 4 月 25 日 福知山線 5418M、一両目の「真実」”, The Ruins of Rail 廃線跡を旅する, <http://www.kysd.net/fuku42501a.html> (参照日 2013 年 4 月 2 日) .
- (14) 渡邊豊, “横転限界監視システム”, 特願 2011-266708(2011).
- (15) 三浦一仁, “E217 系電車の機器更新工事”, Roll Stock Mach, Vol.16, No.5(2008), pp.15-17 .
- (16) 交友社, “JR 車両ファイル 2000”, 鉄道ファン, Vol.40, No.471(2000), pp.5-40.