

## 貨物が積載された走行中の自動車の三次元重心検知

川島 進\*, 渡邊 豊\*

### Detection of the Three Dimensional Center of Gravity on A Moving Automobile

Susumu KAWASHIMA\* and Yutaka WATANABE\*

自動車の高重心は横転事故の原因になる。よって、乗車積載状況に応じた重心位置を検知できれば、横転事故防止に活用できる。ところが、従来の方法では、走行中に乗車積載状況に応じた重心位置を検知できなかった。そこで本研究では、三次元重心検知理論が走行中の自動車に適用可能かを検証する。初めに、自作の卓上型三次元重心検知装置を用いて、三次元重心検知理論の妥当性を実証した。次に、自動車が走行中に生じるローリング角速度と、上下方向の単振動加速度の固有周波数を計測し三次元重心検知理論を適用することで、自動車の質量を測ることなく、乗車積載状況に応じた重心位置を検知できることを実証した。さらに、自動車を支える部位のばね定数によらずに、当該の理論が適用できるかを確かめるためにタイヤの空気圧を変えて実験を行い、ばね定数によらずに重心検知が可能であるということも実証した。

The center of gravity of an automobile depends on loading conditions of the automobile. It is, however, time consuming work to detect the center of gravity by the static proportional calculation and more over no way to detect instantly on the moving automobile by the static one. In this respect, this paper applies the theory of Detecting three dimensional (3D) locations of the Center of Gravity for detecting the center of gravity on the moving automobile, which was invented by the second author of this paper and abbreviated as D3DCG. D3DCG was created by the concept of motion dynamics of ships floating on water. Since the moving automobile has the natural frequency which dependent on the center of gravity of the automobile, this paper assumes that similar condition of ships can occur while the automobile is moving straight at constant speed. Based on the assumption, the authors measured the vertical acceleration and the roll rate of the moving automobile by which D3DCG can be applied for detecting the center of gravity. As the result, D3DCG was able to detect the center of gravity under variety of lording conditions and air pressures of tires of the automobile without measuring either weights or spring rates of the automobile.

キーワード: 自動車、重心、三次元重心検知理論

Keywords : automobile, center of gravity, D3DCG

\* 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,  
TEL: 03-5245-7370, FAX: 03-5245-7370, Email:ywatana@kaiyodai.ac.jp

\* Tokyo University of Marine Science and Technology, Graduate School of Marine Science and Technology,  
2-1-6, Etchujima Koto-ku, 135-8533, Japan

## 1. はじめに

自動車の横転事故防止のためには、当該の車両の重心位置を把握することが有効である。しかし、自動車は物流業務において、乗車積載状況が不明である場合や、質量が不明である場合があり、重心位置は千差万別である。

さらに、自動車単体の重心位置の具体的な数値は、自動車メーカーの企業秘密のため非公表である。従って、ユーザーは自動車の重心位置を知らないまま、自動車を使用することになる。この状況は、横転防止などの安全面から問題であると考えられる。以上の背景を踏まえて、自動車の横転防止に関連する既往研究を調べる。

はじめに、本研究と同様に実験を行った研究として挙げられる研究としては、ローリングやヨーイングなどの特定の揺れに対して、制御を行うことで横転事故を防ごうとする研究である。例えば北沢らは、車両運動の伝達特性から、制御によって横転を防止するシステムを構築している。具体的には、操舵に関するロールの伝達関数を ARX モデルにより推定し、車両モデルの伝達関数と一致することを前提に、比較係数から実車の重心高さを推定する。その上で、ブレーキによる制御を行うことで、横転防止に活用している<sup>1)</sup>。高野らは、自動車のローリングを制御することで横転事故を防止する研究を行っている。具体的には、スタビライザーバーにアクチュエータを付加した、アクティブロールスタビライザーと呼ばれる機器のプログラムの開発を行い、横転防止へ活用しようとしている。<sup>2)</sup>

次に挙げられる研究は、シミュレーションモデルを使用したものである。例えば、須田らは、マルチボディダイナミクスソフトを使い、大型車のシミュレーションモデルを構築した。その上で、フライホイール式エネルギー貯蔵装置と呼ばれる装置を用いて、シミュレーションを行うことで、横転防止へ活用しようとしている<sup>3)</sup>。

以上のように、既定の重心位置をもとに、シミュレーションモデルを組み、横転事故を防ごうとする研究や、特定の揺れに対して、制御を行うことで横転事故を防ごうとする研究は多く見受けられる。しかしながら、自動車個々に異なる重心位置の検知を目的とした研究は見受けられない。そこで、上記の目的を達成する方法として、本研究では自動車に三次元重心検知理論<sup>4)</sup>を適用することで、乗車積載状況に応じた重心検知が可能かを検証する。

## 2. 三次元重心検知理論の自動車への適用

### 2.1 走行中の自動車のモデル化

本研究で用いる三次元重心検知理論は、当初は積載状態が不明なコンテナトレーラーの横転防止に発明されたものである。そして自動車と同じ移動体である鉄道車両への適用も可能である<sup>5)6)</sup>。しかし、物流現場で使用される自動車は、コンテナトレーラー以外にも多くの種類がある。特に、末端物流に多く使われる小型自動車に三次元重心検知理論が適用可能かは実証されていない。そこで、本研究では軽自動車による輸送を想定した実験を行

い、三次元重心検知理論が適用できるかを実証する。三次元重心検知理論の適用にあたっては、実際の走行中の自動車を、自動車の車体部分と、車体部分を支えるばねで構成される、共通なモデルで再現できると仮定する。当該のモデルを図1に示す。

具体的には自動車の車体部分とは、貨物を積載し、運転者などの人間が乗車する部分を示す。さらに、車体部分を支えるばねとは、タイヤやサスペンションなどの自動車の車体部分の質量を支えるために総合的に弾力機能する全体を示す。

以上の仮定のもと、自動車が直線を定速で走行すると、路面の凹凸によって、自動車はランダムな外乱を受ける。ランダムな外乱を受けることで、ばねの上にある車体部分は、図1の点線矢印に示すような重心位置固有の垂直方向の単振動と、左右方向のローリングを生ずる。

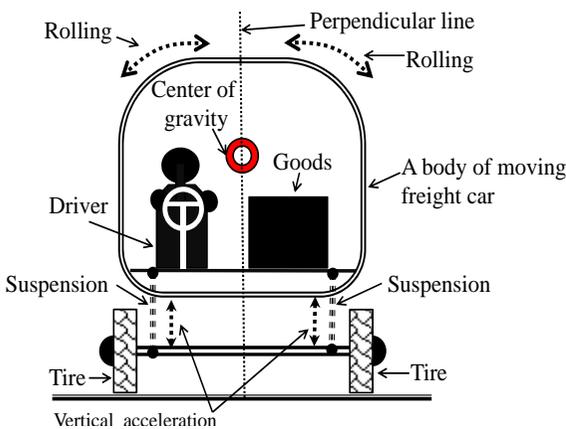


Fig.1 A model of a moving automobile

## 2.2 走行中の自動車の車体部分の垂直方向単振動の定式化

直線を定速で走行中の自動車の車体部分における垂直方向の単振動を定式化すると、式(1)となる。

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

ここで、

$t$  : 自動車の車体部分の垂直方向の単振動周期

$\pi$  : 円周率

$k$  : 自動車の車体部分を支える左右個々のばね定数

$m$  : 自動車の車体部分の質量とする。

なお、ここでばね定数の  $k$  に関しては、図1に示すように、自動車の車体部分を支えるばねは左右対称に二対あるので、式(1)においては  $2k$  となる。

## 2.3 走行中の自動車の車体部分の左右方向のローリングの定式化

走行中の自動車の車体部分の左右方向のローリング中心は、車軸上にあると仮定できる。本研究では、これを車両動揺中心軸と定義する。これにより、ローリング中のある瞬間の自動車の車体部分の、回転モーメントと力のバランスの関係は図2によりモデル化できる。なお、図2の点線は、自動車の移動により、車体部分に生じる、重心位置固有の左右方向のローリングを示す。

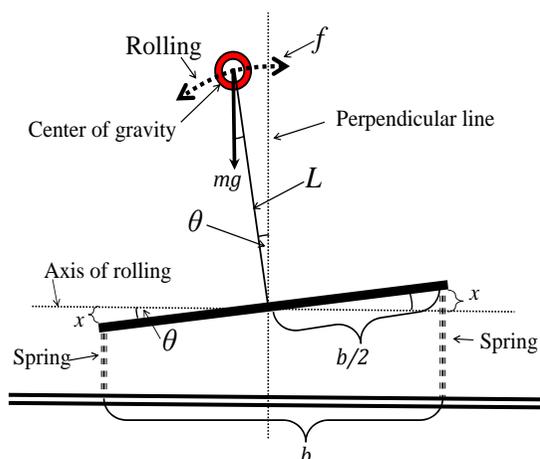


Fig.2 A model of rolling motion of the center of gravity on a moving automobile

図 2 より、回転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、

$f$ : 自動車の車体部分の重心位置に対し、回転角の接線方向に加わる力

$g$ : 重力加速度

$\theta$ : 走行中の自動車の車体部分のローリング中のある瞬間の角度

$L$ : 車両動揺中心軸から自動車の車体部分の重心位置までの高さ

$x$ : 自動車の車体部分を支える左右のばねのある瞬間の変位

$b$ : 車両動揺中心軸から自動車の車体部分の質量を支えている部分の幅とする。

さらに、図 2 より  $x = (b/2) \sin \theta$  である。

このことから式 (3) が成り立つ。

$$f = -\frac{m}{L} \left( \frac{kb^2}{2m} - gL \right) \sin \theta \quad (3)$$

直線を定速で走行中の自動車の車体部分のローリング角度は微細なものであると考えられる。従って、三角関数の特性より  $\theta$  が十分に小さいとすると、式 (4) が成立する。

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

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 (5) が成立する。

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\frac{1}{L^2} \left( \frac{kb^2}{2m} - gL \right) \theta \quad (5)$$

ここで、 $\omega$  を固有振動数と置けば、式 (6) が導ける。

$$\omega = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{kb^2}{2m} - gL} \quad (6)$$

さらに、直線を定速で走行中の自動車の車体部分における、ローリング周期を  $T$  とすると、 $T = 2\pi/\omega$  であるから式 (7) が成り立つ。

$$T = \frac{2\pi L}{\sqrt{\frac{kb^2}{2m} - gL}} \quad (7)$$

## 2.4 走行中の自動車の車体部分の重心位置 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  $V'$  および  $V$  とおくと、式 (1) と式 (7) により、式 (8) と式 (9) が成立する。

$$V' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2k}{m}} \quad (8)$$

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

ここで、式 (8) と式 (9) において  $V'$  と  $V$  は、

直線を定速で走行中の自動車の車体部分の垂直方向の単振動の固有周波数と、左右方向のローリングの固有周波数を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。従って、未知数を  $L$  として両式の連立方程式を整理すると、式 (10) を得る。

$$L^2 + \frac{g}{4\pi^2V^2}L - \frac{b^2V^2}{4V^2} = 0 \quad (10)$$

### 3. 卓上型三次元重心検知装置による実証実験

#### 3.1 卓上型三次元重心検知装置の構成

2章で示した三次元重心検知理論の妥当性を確かめるために、卓上型三次元重心検知装置を自作する。卓上型三次元重心検知装置の構成は図3に示すように、自動車の車体部分を想定した重心検知対象物と重心検知対象物を支えるばね、加速度・角速度センサ、パソコンで構成されるものである。

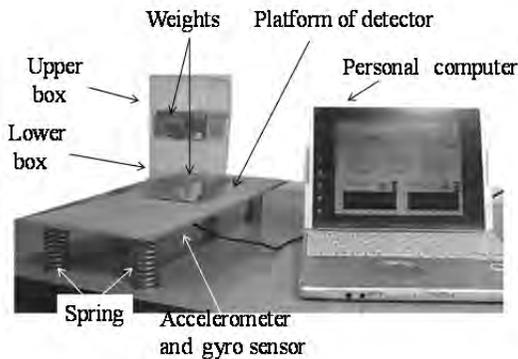


Fig.3 An image of a tabletop detector for the center of gravity

なお、計測に使用するパソコンは当該のセンサのドライバをインストールしたものを使用する。

重心検知対象物は、ばね台座、プラスチック製の箱、数個の錘で構成されている。ばね台座は、質量が 0.150kg で厚さ 0.005m の木板を用いる。ばね台座の上にはプラスチック製の箱を設置する。このプラスチック製の箱の質量は 1 個あたり 0.075kg である。箱の内部は自動車の車体部分と同様に空洞となっており、錘を積載できるようになっている。この箱の高さは 0.092m、横幅は 0.092m、奥行きは 0.077m である。この箱を 2 個使用し、棚状になるように上下の 2 段に組み合わせた。これ以後、上の段の箱を上段箱とし、下の段の箱を下段箱と称する。錘は、一つあたりの質量が 0.483kg の、厚さ 0.010m の均一なステンレス製金属片である。錘を自動車の貨物と想定して上段箱と下段箱に積載する。積載方法は、実際の自動車の車体部分の重心位置の変化を想定し、表 1 に示すように、低重心の状態で

Table.1 Assinments of weights on the tabletop detector

Pattern	Low←Center of Gravity→High			
	A	B	C	D
Assignments of Weights				
Weight in the Upper Box(kg)	0.000	0.483	0.966	1.449
Weight in the Lower Box(kg)	3.381	2.898	2.415	1.932

ある積載パターン A から高重心の状態である積載パターン D への 4 通りとした。ばね台座の下には、ばねを 4 本設置して自動車の車体部分を支えるタイヤやサスペンションと同様に、重心検知対象物を支える。このばねは、**図 2** で示したモデルと同等の動きをするように、左右対称に配置する。また、式 (10) に代入する  $b$  の値は、左右のばねの配置幅に合わせて  $0.082\text{m}$  とする。ばね台座には、重心検知対象物の重心位置固有の垂直方向の単振動加速度と左右方向のローリング角速度を計測できるように、村田製作所製の加速度・角速度センサを取り付ける。この加速度・角速度センサのサンプリング間隔は  $0.010$  秒である。このセンサを利用した理由は、センサ単体の質量が  $0.007\text{kg}$  と非常に軽量であり、重心検知対象物の固有振動を妨げないからである。さらに、バネ台座の下には、ナショナルインスツルメント社製の A/D コンバータを重心検知対象物の動きを妨げないように設置する。**図 4** は、卓上型三次元重心検知装置の作動構造を示したものである。

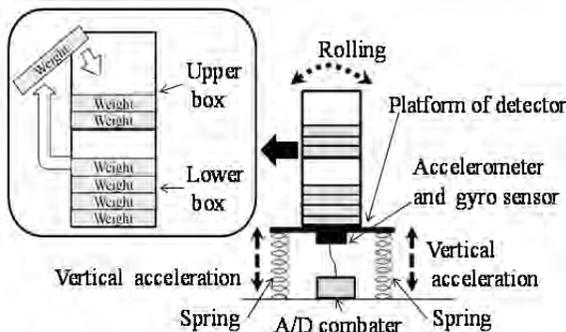


Fig.4 A structure of a tabletop detector for the center of gravity

### 3.2 卓上型三次元重心検知装置による重心検知実験の方法

実験は以下の手順で行う。はじめに、重心検知対象物を軽く手で加振をする。加振をすることによって、重心検知対象物には、重心位置固有の垂直方向の単振動加速度と、左右方向のローリング角速度が一定時間自由に継続される。次に、ばね台座にある加速度・角速度センサによって得られたこれらの値に、高速フーリエ変換 (FFT:First Fourier Transformation) を一度かけて、重心検知対象物の垂直方向の単振動の固有周波数 ( $V'$ ) と左右方向のローリング角速度の固有周波数 ( $V$ ) を得る。その上で、式 (10) によって、低重心の状態である積載パターン A から高重心の状態である積載パターン D への、動揺中心軸から重心位置までの高さ ( $L$ ) の検知を行う。

### 3.3 卓上型三次元重心検知装置による重心検知結果と検証

本節では、卓上型三次元重心検知装置と三次元重心検知理論によって得られた  $L$  を示し、静的な比例計算によって算出した重心位置と比較することで、当該実験結果の妥当性を検証する。静的な比例計算は、重心検知対象物を構成する物体 (①各パターンの錘、②上段箱と下段箱、③ばね台座の重心位置) の三者相互の質量分布と距離の関係から算出する。本研究では、静的な比例計算によって算出された重心位置を  $L$  とする。**表 2** に、3.2 節で示した実験方法と FFT による解析によって得られた各パターンにおける  $V'$  と  $V$  ならびに、こ

Table.2 Results of detecting the center of gravity by the tabeletop detector

Three Dimensional Detection of the Center of Gravity				Static Proportional Calculation
Pattern	$V$ [Hz]	$V$ [Hz]	$L$ [m]	$L'$ [m]
A	4.150	2.441	0.052	0.052
B	4.150	2.075	0.058	0.057
C	4.150	1.831	0.063	0.064
D	4.150	1.465	0.072	0.073

の両者より、式 (10) によって算出された  $L$  と、上述の比例計算によって求めた  $L'$  を示す。さらに、 $L$  と  $L'$  の変化の推移をグラフ化したものを、図 5 に示す。

これらの結果をみると、パターン A からパターン D への錘の積載状況の変化に呼応して、 $L$  も変化していることがわかる。さらに、各パターンにおける  $L$  と  $L'$  を比較すると、両者の差はわずかであり、ほぼ同程度の数値が示されていることが分かる。以上より、三次元重心検知理論で得られた結果は、妥当と判断できる。

#### 4. 三次元重心検知理論の自動車への適用実験

##### 4.1 三次元重心検知理論の自動車への適用実験の方法

3 章における卓上型三次元重心検知装置による実験によって、三次元重心検知理論の妥当性が確認された。本章では、移動体である自動車に三次元重心検知理論を適用することで、車両動揺中心軸から自動車の車体部分の重心位置までの高さ ( $L$ ) の検知ができるかを実証する。図 6 は三次元重心検知理論を自動車に適用するイメージである。

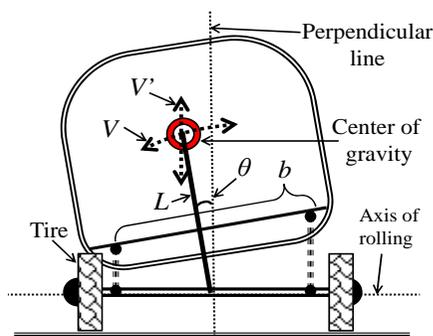


Fig.6 An image of motion of the center of gravity on a moving automobile

実験に使用した自動車は、東京海洋大学が保有する軽自動車である。実験は、自動車が物流現場で使用される時に起きる乗車人数や積載状況の変化を想定して行う。具体的には、乗車人数や積載状況をパターン I ~ パターン IV の 4 通りに変化させる。

図 7 は実験で使用した自動車、貨物の一組の大きさや質量、後部座席におけるパターン III とパターン IV の貨物の積載状態を示したものである。 $L$  は、乗車人数や積載状況が同じ

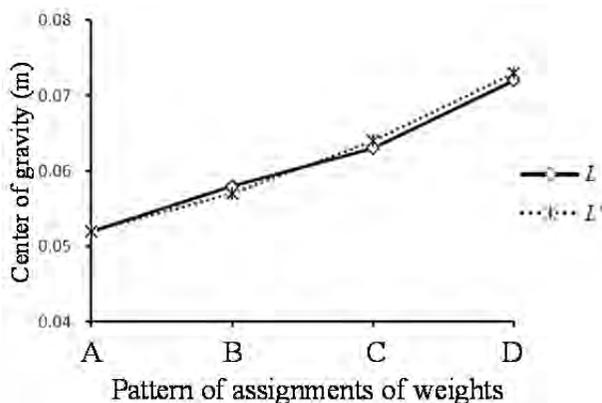


Fig.5 Comparisons of the center of gravity between the three dimensional detection and the static proportional calculation.

Table.3 Patterns of number of passengers and number of cargoes

	Pattern of Loading	Number of Passengers		Number of Cargoes	
			kg		kg
↑ Center of Gravity ↓	I	1	70kg	0	0kg
	II	2	140kg	0	0kg
	III	2	140kg	1	45kg
	IV	2	140kg	2	90kg



Fig.7 Conditions of cargoes on a moving automobile

であれば、タイヤやサスペンションなどの自動車の車体部分を支える部位の、ばね定数が異なっても、不変であると考えられる。また、式 (10) には、ばね定数が含まれていない。そこで、ばね定数に依存せず、 $L$  が正確に三次元重心検知理論によって検知できるかを確かめるために、ばね定数を変えて実験を行う必要があると考えられる。上記の目的を達成するために本研究では、自動車の車体部分を支え弾力機能するばねのひとつである、タイヤの空気圧を 250kPa、200kPa、150kPa の 3 通

りに変化させる。なお、これらの空気圧は、自動車に装備されているタイヤの適正空気圧の 100%、80%、60% に該当する。

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）である。このセンサを利用した理由は、自動車の車体内に設置しやすい形状であることと、A/D コンバータが内蔵されており計測と同時にパソコンにデータを取り込むことができるからである。このセンサのサンプリング間隔は、0.010 秒である。このセンサを図 8 のように、自動車の車体内の水平面に設置する。

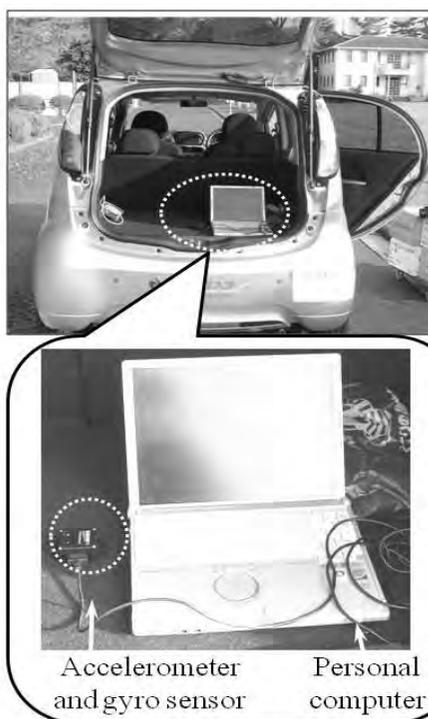


Fig.8 The procedure of measuring the vertical acceleration and the roll rate of a moving automobile during the experiment

実験に使用した道路は、東京海洋大学越中島キャンパス構内の全長 170m の直線道路である。当該の道路を走行する速度は大学内の規制速度に合わせて 20km/h である。また、計測時間は、上記の規制速度と当該の道路の長さの関係から、25.00 秒である。

#### 4.2 三次元重心検知理論適用のための自動車の固有周波数の特定

4.1 節で示した方法で、自動車の垂直方向の単振動加速度と左右方向のローリング角速度の計測を行った。例として、積載パターンⅢ、空気圧 250kPa の条件下で得られた垂直方向の単振動加速度を図 9 に、ローリング角速度を図 10 に示す。

ところで、自動車には、タイヤのほかにサスペンションなどの、車体部分を支え、弾力機能することで、振動や動揺を軽減する装置が装備されている。しかしながら、これらの装置が装備されていても、図 9 と図 10 によると、路面からのランダムな外乱を受けることによって、自動車の車体部分には垂直方向の単振動加速度と左右方向のローリング角速度が生じていることがわかる。従って、3 章の実験と同様に、これらの計測で得られた結果に対して FFT をかけて、自動車の車体部分の垂直方向の単振動加速度 ( $V'$ ) と左右方向のローリング角速度の固有周波数 ( $V$ ) を特定する。なお、FFT 分析に必要なサンプリング数は 2 の乗数個である。本研究で使用した加速度・角速度センサのサンプリング間隔は 0.010 秒であった。4・1 節で述べた移動時間が 25.00

秒という実験条件下では、サンプリング数が 2048 個となる 20.48 秒が適切であったので、当該の秒数で FFT を行った。さらに、誤差の低減を目的として FFT を連続してデータにかけて、平均化を行った。具体的には、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 25.00 秒まで、サンプリング間隔(0.010 秒)ごとに連続して FFT にかけて、平均化を行った。この過程を経て得られた振幅が最大になる周波数を、 $V'$  と  $V$  とした。例として図 9 の積載パターンⅢの垂直方向の単振

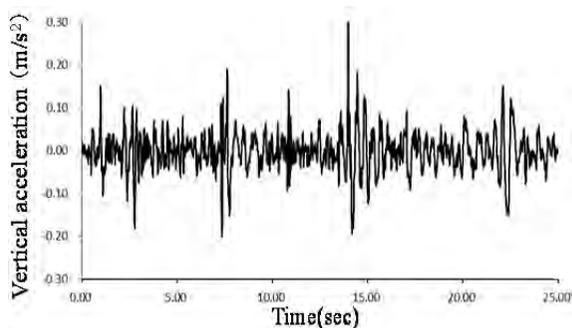


Fig.9 Vertical acceleration of a moving automobile measured by the experiment of pattern Ⅲ at 150kPa of air pressure of tiers

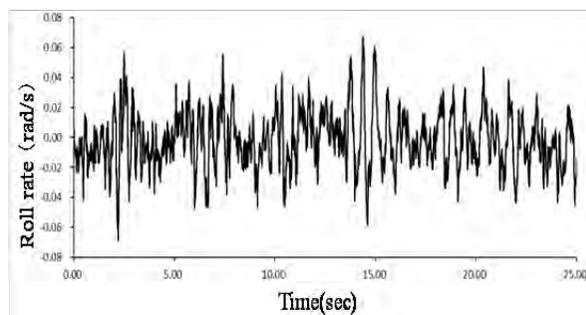


Fig.10 Roll rate of a moving automobile measured by the experiment of pattern Ⅲ at 150kPa of air pressure of tiers

動加速度に対し FFT を行った結果を図 11 に示す。この場合の  $V'$  は 2.343Hz である。さらに図 10 の積載パターンⅢの左右方向のローリング角速度に対し、FFT を行った結果を図 12 に示す。この場合の  $V$  は 1.611Hz である。

### 4.3 自動車への三次元重心検知理論の適用結果

4.1 節で示した方法に基づき、4 通りの乗車積載パターンと 3 通りのタイヤ空気圧の計 12 通りの組み合わせで、実験を行なった。その上で、4.2 節で示した方法で  $V'$  と  $V$  の特定を行った。なお、車両動揺中心軸から自動車の

車体部分の質量を支えている部分の幅 ( $b$ ) は、実車の計測によって 0.950m として、式 (10) より各々の  $L$  を検知した。表 4 は、乗車積載パターンとタイヤの空気圧、各々の  $V'$  と  $V$  ならびに検知された  $L$  を示したものである。表 4 によると、乗車積載パターンを変化させると、検知される  $L$  の数値も乗車積載状況の変化に追従して変化していることが分かる。

その様子を、縦軸を  $L$ 、横軸を乗車積載状況として空気圧別に乗車積載状況と  $L$  の関係を示したものが図 13 である。

ところで、自動車のタイヤの空気圧が異なっても、同じ乗車積載パターンでは  $L$  は、車両動揺中心軸から自動車の車体部分の重心位置までの高さであるから、理論的には変化しない。図 13 によれば、空気圧が異なっても、同じ乗車積載パターンでは、ほぼ同一の  $L$  が検知されている。従って、三次元重心検知理

Table.4 Results of detecting the center of gravity( $L$ ) on a moving automobile under different loading conditions and air pressure of tires.

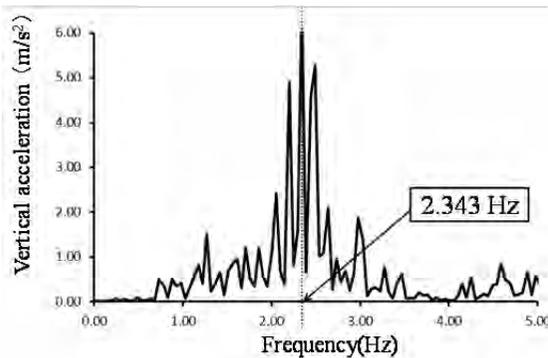


Fig.11 Averaged FFT of fig.9

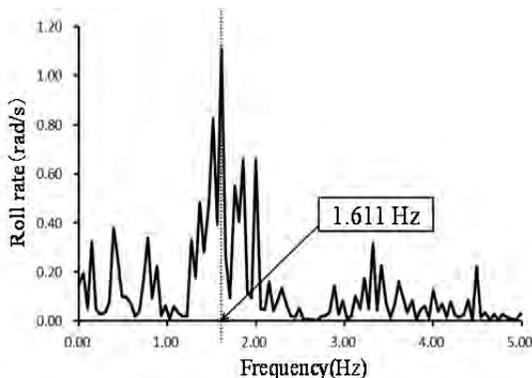


Fig.12 Averaged FFT of fig.10

Pattern of Loading	Air Pressure of Tires	$V'$ (Hz)	$V$ (Hz)	$L$ (m)
Pattern I	250(kPa)	2.343	1.806	0.579
Pattern II		2.441	1.708	0.637
Pattern III		2.636	1.757	0.673
Pattern IV		2.490	1.513	0.729
Pattern I	200(kPa)	2.395	2.050	0.526
Pattern II		2.587	1.904	0.612
Pattern III		2.490	1.611	0.687
Pattern IV		2.685	1.660	0.724
Pattern I	150(kPa)	2.490	1.904	0.587
Pattern II		1.953	1.318	0.636
Pattern III		2.343	1.611	0.644
Pattern IV		2.539	1.611	0.702

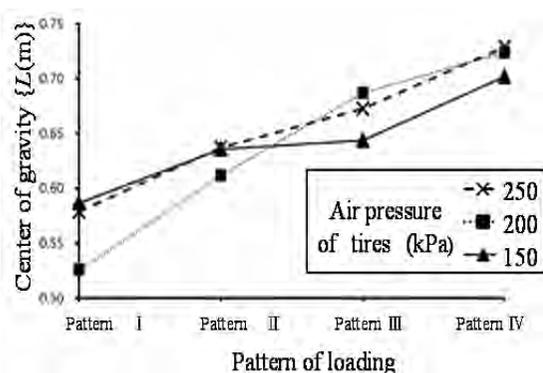


Fig.13 Comparisons of the three dimensional center of gravity under different loadig patterns and air presures of tire on a moving automobile.

論によって検知された  $L$  は、現実的な結果であると考えられる

これらの実験より、三次元重心検知理論は

①自動車の質量が不明の状態であっても、乗車積載状況に応じた  $L$  を正確に検知可能である

②自動車の車体部分を支え弾力機能するばねの、ばね定数に依存せずに、乗車積載状況に応じた  $L$  を正確に検知可能である

ということが明らかになった。

## 5. おわりに

自動車の重心位置は、企業秘密であり公には明らかにされていない上、乗車積載状況は逐一変化するので、ユーザーは知るべきがない。しかしながら三次元重心検知理論を自動車に適用することで、自動車の質量やばね定数が不明な状況でも、乗車積載状況に応じた重心検知が可能であることが明らかになった。

今後は、静的重心計算結果との照合による精度の向上、そして横転限界速度の算出など、

得られた重心位置の活用方法を検討し、物流の安全性向上に貢献できるように応用研究を継続することが必要である。

## <参考文献>

- 1) 北沢啓一、電子情報通信学会技術研究報告、101(102), pp. 17-22、(2001)
- 2) 高野修一、永井正雄、社団法人日本機械学会 交通・物流部門大会講演論文集 2000(9), pp. 193-198、(2000)
- 3) 須田義大、小谷学、王文軍、社団法人日本機械学会年次大会講演論文集 2007(7), pp. 365-366、(2007)
- 4) 渡邊豊(東京都)、特許番号 4517107 号、公告番号 W02011145332 A1
- 5) 川島進、渡邊豊、社団法人日本機械学会論文集 C 編 77(778)、pp. 2376 - 2388、(2011)
- 6) 川島進、渡邊豊、社団法人日本機械学会論文集 C 編 79(803)、pp. 2470 - 2485、(2013)

(原稿受付 2013年10月2日)

(審査受理 2014年4月1日)