

## 【論文】

## 船体動揺による人の転倒に関する基礎的研究

水口 文洋\*<sup>1</sup> 東 明彦\*<sup>2</sup> 木幡 章弘\*<sup>3</sup> 田邊 優子\*<sup>3</sup>

## A Basic Study on a Person's Fall Caused by Ship Motion

Fumihiko Mizuguchi, Akihiko Higashi, Akihiro Kowata, Yuko Tanabe

## Abstract

Recently, the problem for falls among elderly persons living in the community is being watched with keenest interest. The study of fall on the land has been examined by various authors from different points of view. But only a few research of fall on the sea have been published to date. So the study to prevent falls of these persons on board ship should be investigated immediately. In this study, we assume that the human body standing on the floor is expressed by inverted 3-link pendulum model in order to clear the mechanism of fall. In addition, the floor is moved to vertical direction by the inputted step force. The reaction of the body attached optical markers is recorded by the Digital Video Camera. We investigated some joint torques to maintain posture with the equation of motion which is induced from pendulum model by Lagrange's equation. It is found that the acceleration of the floor influenced joint torques.

Key Words : Ship Motion, Fall Prevention, Joint Torque

## 1 はじめに

近年高齢化社会の急速な進行により、加齢に伴う筋力や体力の低下の著しい高齢者の転倒の問題がクローズアップされている。転倒の原因には上述の身体機能の低下によるもののほか、人体そのものに原因がある場合と、環境に原因がある場合がある。人体そのものの原因としては、何らかの疾患（循環器、運動器等）によるものと薬剤（抗不安、向精神等）によるものがある。また生活環境の原因としては、屋内にある段差、浴室・トイレの構造、階段等の構造や敷物によるものがある。その他、屋外の傾斜面、歩道の縁石や視覚障害者のためのブラインドパネル、礫や砂地の路面、さらに気象状況（雨、雪等）等があり、これ以外にも様々な要因がある。転倒はこれらの原因が引き金となり、歩行中のスリップ、つまずき及びよろめき、更に他人との衝突や押されることによって起こる。

転倒に関する研究としては、転倒に大きく影響を及ぼす運動能力や感覚器の衰えを、医師や理学療法

士が経験的に評価しているが、定量的に評価を行うための研究<sup>1)</sup>、転倒のメカニズムと防止についての研究<sup>2) 3)</sup>、転倒予防のための研究<sup>4)</sup>、さらに未然に転倒を判別してエアバック等で骨折等を回避する研究<sup>5)</sup>等が行われている。また近年の釣りブームから、「親水性防波堤」での釣りも盛んに行われていることから、越波による転倒事故防止のための研究<sup>6)</sup>も行われている。

わが国では新バリアフリー法が2008年12月に施行され、高齢者や障害者に対しても公共建物や宿泊施設では、バリアフリー設計が進められることになった。またバス・列車等の陸上の輸送機関でも段差をなくし、車いすでの移動も可能とする高齢者・障害者にも利用可能なものに徐々に becoming。海上交通における旅客船は、短距離航路の場合を除き単なる移動手段としてだけでなく、余暇として船旅そのものを楽しむことも主目的の1つであり、船内の移動もバリアフリー化が図られている。船は気象海象の影響で動揺する。このような床面が動揺する

## Received

\*<sup>1</sup> 海上保安大学校 [mizuguchi@jcga.ac.jp](mailto:mizuguchi@jcga.ac.jp)\*<sup>2</sup> 海上保安大学校 [higashi@jcga.ac.jp](mailto:higashi@jcga.ac.jp)\*<sup>3</sup> 海上保安大学校

場合には、陸上に比べ転倒の可能性も大きくなることが予測される。しかしながらこれについての研究はほとんど行われていない。

本研究では、転倒による船内事故防止のための一助とするため、床面が動揺することで人が転倒するメカニズムを解析することを目的とする。そこで、ここでは第1段階として、3リンクの倒立リンクモデル<sup>7)</sup>を仮定し、水平一方向に加速度入力を加えた場合の人体の応答から各関節トルクに及ぼす影響を求め、加速度と関節トルクとの関係を明らかにした。

## 2 解析モデル

人体の動作を解析する場合、幾つかのセグメントにわけて解析することは一般的に行われている。ここでは、図1に示すように、人体が、脚部、胴部及び頭部の3つのセグメントから構成されていると仮定し、3リンクの倒立モデルを解析モデルとした。

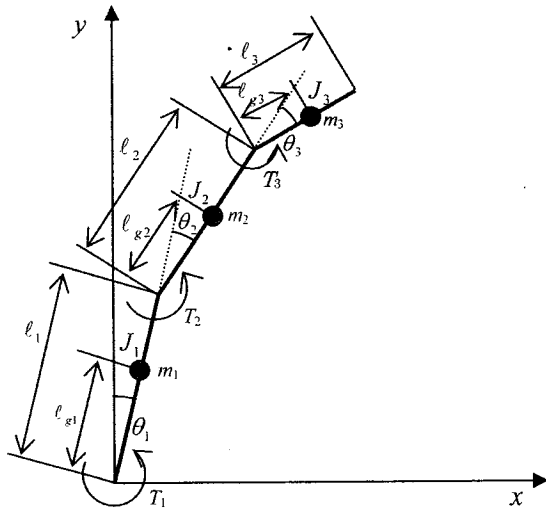


図1 倒立3リンクモデル

図中の $m$ は質量、 $J$ は慣性モーメント、 $\ell$ はセグメントの長さ、 $\ell_g$ は重心までの長さ、 $\theta$ は傾斜角度、

$T$ は関節トルクを表し、添え字1, 2, 3は、それぞれ脚部、胴部、頭部を表わしている。また、 $xy$ 平面は矢状面を表し、ここでは床面に $x$ 方向の加速度入

表1 被験者の身体特性

	脚 部	胴 部	頭 部	腕 部
全長 $\ell$ (cm)	85.0	58.0	26.0	76.0
重心距離 $\ell_g$ (cm)	53.1	26.6	10.8	44.6
質量 $m$ (kg)	13.8	34.1	4.9	4.2
慣性モーメント $J$ (kgcm <sup>2</sup> )	8729.4	14475.1	297.1	1568.4

力を与えた場合について解析を行った。

被験者は22歳の健康者の男性で、身長169cm、体重72kgであった。阿江等<sup>8)</sup>の方法によって求めた身体部分慣性特性は表1に示す通りである。

このモデルの運動方程式を用いて、床面に水平方向の加速度を与えたときの各関節に働く関節トルクを求める。なお、3リンク倒立モデルは以下のことを仮定している。

- ① 運動は矢状面のみで起こる
- ② 頭部、胴部の重心はそれぞれの剛体の中心に位置し、脚部は二脚を合算する
- ③ 腕は簡単のため省略する
- ④ 関節では矢上面に垂直な1つの回転トルクしか発生しない
- ⑤ 関節は摩擦のない一軸で連結されている
- ⑥ 床面と脚接触部は一体となって移動する

この①～⑥の仮定のもとに、3リンク倒立モデルのLagrangeの運動方程式を求めると、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \alpha = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $g$ は重力加速度、 $\alpha$ は $x$ 方向に加えた加速度入力である。また、各項の係数は次の通りである。

$$\begin{aligned} A_{11} &= m_1 \ell_{g1}^2 + J_1 + m_2 \{ \ell_1^2 + \ell_{g2}^2 + 2\ell_1 \ell_{g2} \cos \theta_2 \} + J_2 + J_3 + m_3 \{ \ell_1^2 + \ell_2^2 + \ell_{g3}^2 + 2\ell_1 \ell_2 \cos \theta_2 + 2\ell_1 \ell_{g3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2\ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} \\ A_{12} &= m_2 \{ \ell_{g2}^2 + \ell_1 \ell_{g2} \cos \theta_2 \} + J_2 + J_3 + m_3 \{ \ell_2^2 + \ell_{g3}^2 + \ell_1 \ell_2 \cos \theta_2 + \ell_1 \ell_{g3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2\ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} \\ A_{13} &= m_3 \{ \ell_{g3}^2 + \ell_1 \ell_{g3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + \ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} + J_3 \\ A_{21} &= m_2 \{ \ell_{g2}^2 + \ell_1 \ell_{g2} \cos \theta_2 \} + J_2 + J_3 + m_3 \{ \ell_2^2 + \ell_{g3}^2 + \ell_1 \ell_2 \cos \theta_2 + \ell_1 \ell_{g3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2\ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} \\ A_{22} &= m_2 \ell_{g2}^2 + J_2 + m_3 \{ \ell_2^2 + \ell_{g3}^2 + 2\ell_2 \ell_{g3} \cos \theta_3 \} + J_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{23} &= m_3 \{ l_{g3}^2 + l_2 l_{g3} \cos \theta_3 \} + J_3 \\
A_{31} &= m_3 \{ l_{g3}^2 + l_1 l_{g3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 l_{g3} \cos \theta_3 \} + J_3 \\
A_{32} &= m_3 \{ l_{g3}^2 + l_2 l_{g3} \cos \theta_3 \} + J_3 \\
A_{33} &= m_3 l_{g3}^2 + J_3 \\
B_1 &= -\{ m_2 l_1 l_{g2} (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) + m_3 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \} \sin \theta_2 - m_3 l_1 l_{g3} (\dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) + \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
&\quad - m_3 l_2 l_{g3} (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \sin \theta_3 \\
B_2 &= -\{ m_2 l_1 l_{g2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_3 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \} \sin \theta_2 - m_3 l_1 l_{g3} (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - m_3 l_2 l_{g3} (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \sin \theta_3 \\
&\quad + m_2 l_1 l_{g2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_{g3} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
B_3 &= -m_3 l_1 l_{g3} (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - m_3 l_2 l_{g3} (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \sin \theta_3 + m_3 l_1 l_{g3} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
&\quad + m_3 l_2 l_{g3} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \sin \theta_3 \\
C_1 &= -m_1 l_{g1} \sin \theta_1 - m_2 \{ l_1 \sin \theta_1 + l_{g2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \} - m_3 \{ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_{g3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
C_2 &= -m_2 l_{g2} \sin(\theta_1 + \theta_2) - m_3 \{ l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_{g3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
C_3 &= -m_3 l_{g3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
D_1 &= m_1 l_{g1} \cos \theta_1 + m_2 \{ l_1 \cos \theta_1 + l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \} + m_3 \{ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_{g3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
D_2 &= m_2 l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_3 \{ l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_{g3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
D_3 &= m_3 l_{g3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)
\end{aligned}$$

以上のことから、立位静止状態から床面に加速度  $\alpha$  を与え、身体の応答を計測し、身体各部の運動の時間的変化を求めることによって、式(1)から姿勢を維持するに必要な関節トルクを求めることができることがわかる。

### 3 実験

身体の動きを読み取るため、マーカーを取り付けた。取り付け位置は図2に示すとおり、①足関節中心、②膝関節中心、③大転子点、④肩峰、⑤頭頂、及び、⑥手関節中心の6か所とした。

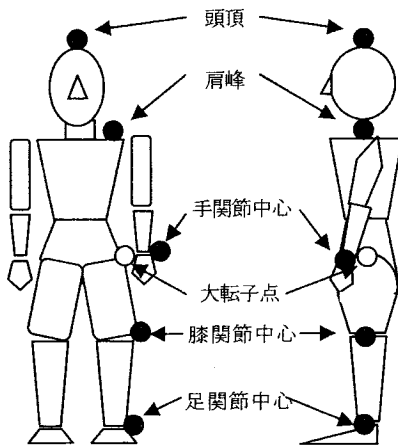


図2 マーカー貼付ポイント

実験は、四隅と荷重の掛かる中央にゴム製のタイヤを取り付けた台車 (900×900mm) の中央部の定位位置に被験者を立位静止状態とし、台車に滑車を介して錘 (3~15kg の 9 種類) を加えることで水平方向の加速度を与えた。被験者の立位静止姿勢は、常に同じ姿勢になるように基準となる鉛直線で補正して計測を行った。動画撮影は 46m 離れた位置からデジタルビデオカメラにて、被験者の矢状面での動きが分かるように撮影した。

また実験は、加速度の加わる方向を変化させた。図1において、被験者が  $x$  方向を向いた状態で  $-x$  方向の加速度を受ける場合を背対、 $x$  方向の加速度を受ける場合を正対と定義した。この2つのパターンについて、9 種類すべての錘を変えて加速度を与えて実験を実施した。

デジタルビデオカメラで撮影した映像は、静止状態から加速度による影響がある数秒間を毎秒 60 コマで読み込み、読み込んだ画像からデジタイジングソフト<sup>9)</sup>を用いて各点の時刻毎の座標の抽出を行った。そして、得られた座標の時刻歴データは、数値解析ソフト MATLAB を使って解析を行った。

### 4 解析結果

図3及び図4は結果の一例である。被験者を加速度の方向に正対して立たせ、15kg の錘で加速度を与

えた場合の結果である。図3は各部関節の角度・角速度・角加速度の時間的な変化を表しており、角度から被験者の姿勢がわかる。関節角度の図から、計測初期の加速度が加わる前から大転子関節( $\theta_2$ )と首関節の角度( $\theta_3$ )が負で、足首関節の角度( $\theta_1$ )が正となっていることがわかる。このことは、この姿勢は腹を突き出し、上体を後傾したことを示しており、加速度が加わることにに対する準備姿勢を取っていることを表していることが考えられる。また、関節角加速度の図から加速度の印加は0.05秒前後で行われており、加速度が加わった後、時間の経過とともに大転子関節及び首節角度が負から正に変化している。この結果より、加速度が加わると、脚接触部の前方移動に伴い頭部・胴部は慣性によって大転子関節・首関節の順に後傾角度は小さくなり、最終的に大転子関節は正の値となって前傾していることがわかる。

関節角速度については、ほぼ加速度の印加と同時に変化を始め、徐々に変化が大きくなり、その振幅は足首、大転子、首の順に大きくなっている。またそれらは角変位には見られない周期性を持ち、首と足首とは同相であり、大転子は逆相になっている。この関係は角加速度についても同様である。

一方、図4の台車速度は一定の割合で増加するのではなく変動を繰り返しながら徐々に上昇しており、このことは加速度のピーク値が多数あることからわかる。また、関節トルクについては、計測期間中、足首関節トルク( $T_1$ )が最も大きく、次に大転子トルク( $T_2$ )最も小さいのが首関節トルク( $T_3$ )となっている。

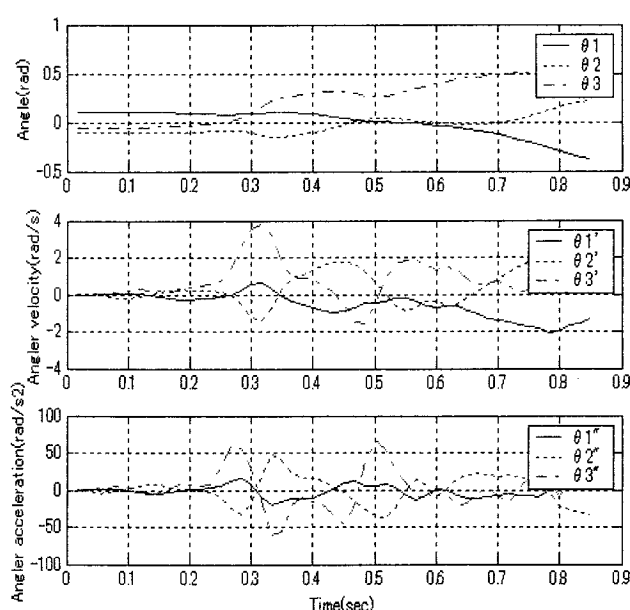


図3 関節部の角度、角速度、角加速度

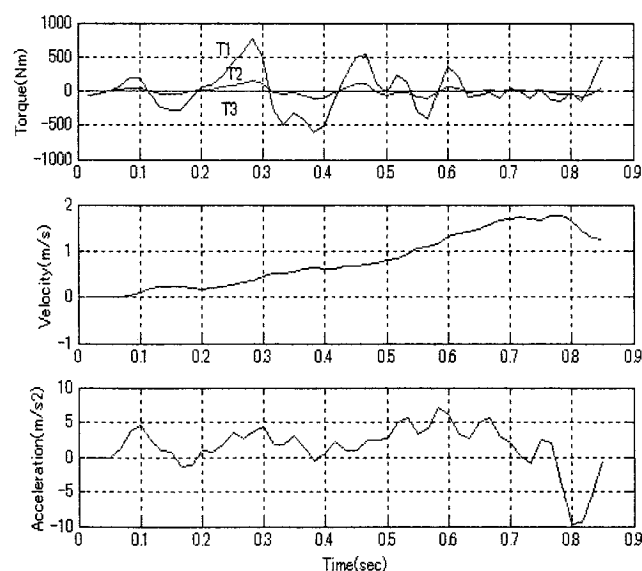


図4 関節トルクと台車の速度、加速度

各関節トルクは、台車が動く前から姿勢保持のためわずかに変動しているが、この変動は台車に加速度を加えたときの応答トルクではない。入力加速度に対する応答トルクは、加速度が加えられた直後のトルクのピーク値と考えられる。また、以降の関節トルクの変動は、移動する台車上で被験者が転倒防止動作を行うことによって発生したものと考えられ、入力加速度に対する応答とは言えない。しかしながら本解析では広く加速度に対する各関節トルクの関係を求めるため、加速度が入力された直後の関節トルクのみならず、比較的速度変化が長時間一定と思われる間の関節トルクにも着目して解析を行った。

図5は正対・背対時に加速を受ける場合の姿勢の0.1秒毎の時間的な3リンクの姿勢の変化を折れ線で変化を表している。台車はxの正方向の加速度を受けている。この図では、初期状態は正・背対の何れも最も右の折れ線がそれを表し、時間の経過とともに矢印で示す左側の折れ線の方へ移っていくことを示している。

正対時には脚部を進行方向に前傾させて上体をほぼ鉛直に維持した初期状態から、加速を受けると脚接触部は台車とともに前方に移動する。慣性の大きい胴部は徐々に取り残され、足首角度が正から負に変わるとともに大転子角度も負から正に変わっている。さらに首の関節角度も負から正に大きく変化する。これは動き始めの初期の段階で起こっており、他の関節のこわさに比べて弱いと考えられる。その後脚接触部に引かれる形で胴部は大転子を中心に回転することになる。

背対時にも初期の姿勢は基本的に正対時と同様に、脚部を進行方向とは反対方向に前傾させ、上体をほ

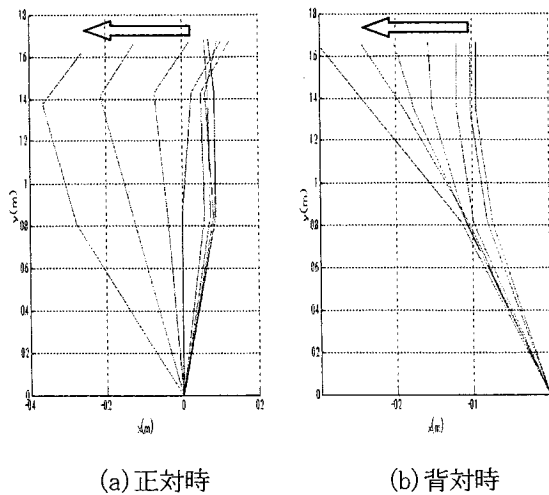
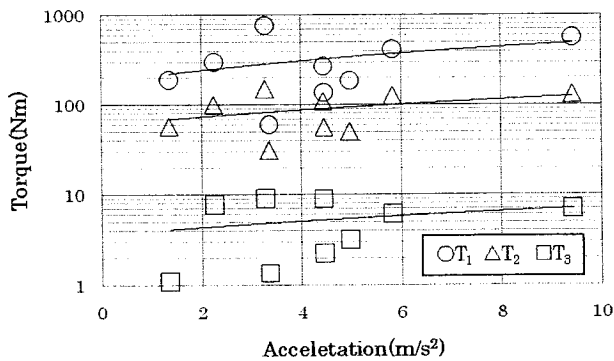
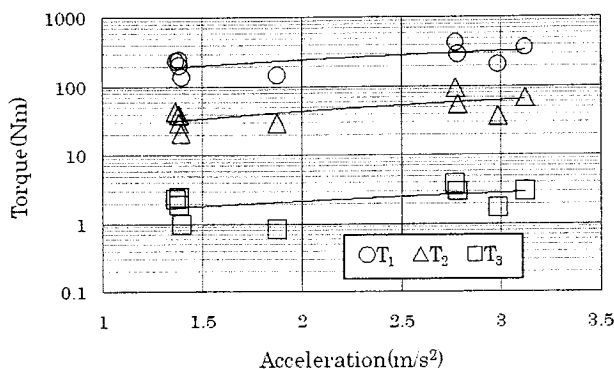


図5 立位姿勢の加速による時間的变化

ば鉛直に維持した状態である。加速入力を与えられると、足首関節を中心とする脚部の回転変化は小さく、主として大転子関節の前方への回転により、上半身を鞭のようにしならせることによって転倒防止の動作を行っている。この理由は、足関節（くるぶし）位置と踵までの距離の比べ爪先までの距離が大きく、いわゆる支持基底面の関係から姿勢が前方へ傾いた場合の安定性が、後方の場合（正対時）のそれに比べて良いためと考えられる。



(a) 正対時



(b) 背対時

図6 台車の加速度と関節トルク

図6は、加速度の値に対する関節トルクの関係を正対時と背対時の場合にわけて示したものである。ばらつきが大きいのが、直線近似すると図のように右上がりの傾向を示し、いずれの場合も加速度の増加に従い、関節トルクの値が大きくなる傾向が見られる。また各関節トルクの値は首関節トルク( $T_3$ )が最も小さく、最も大きいのが足関節トルク( $T_1$ )となっていることがわかる。各関節トルクは、最も大きい足関節トルクが大転子トルクの約10倍であり、最小の首関節トルクの100倍程度のオーダーであることから、片対数表示としている。この加速度範囲での正・背対時の関節トルクを比較すると正対時の値が大きい。これは、水平加速度を受けた際に、正対と背対の場合とでは、転倒を防ぐため身体のバランスを維持しようとする動きが異なっていることが考えられる。すなわち、人体では足関節軸を通る鉛直線軸と爪先までの距離に比べ、踵までの距離が短いので、床面に正対方向に水平加速度を加えた場合、重心が背面側に移動し支持基底面に余裕がないことが一因であることが推定される。

## 5 結論

立位状態で水平方向加速度を受けた場合の身体各部の関節に働く関節トルクについて解析を行った結果、次の結論を得た。

- (1) 床の加速度と身体に働く関節トルクに関連性があり、加速度の増加にともなって関節トルクも増加する。
- (2) 床に近い関節部ほど大きい関節トルクが発生する。
- (3) 背対時より正対時の方が働く関節トルクが大きい。

今後の課題として、実験の精度をあげるための実験装置の改良と、今回の実験では水平方向のみであったが垂直方向の加速度が組み合わさって作用した場合の関節トルクや、性別や年齢別での姿勢保持に必要な関節トルクについて調べる必要があると思われる。

## 参考文献

- 1) 川口 勉ほか、モデルベースアプローチによる立位姿勢の安定性評価、バイオメカニズム学会誌, Vol. 31, No2(2007), 101-109.
- 2) 浜 克己ほか、歩行支援機を用いた転倒に関するメカニズムの解析とその防止、函館工業高等専門学校紀要, Vol. 41, 7-12, 2007.

- 3) 鈴木立人ほか、踏み出しによる前方転倒防止挙動の動作解析、舞鶴工業高等専門学校紀要 Vol. 44, 5-10, 2009-03.
- 4) 長谷和徳ほか、高齢者転倒予防を目指した歩行訓練システムの開発(設計指針の立案と基礎的評価実験)、日本機械学会論文集(C 編), Vol. 68, No. 665(2002-4), 219-224.
- 5) 青柳俊一ほか、機械学習による人の転倒動作のオンライン判別方法、日本機械学会論文集(C 編), Vol. 73, No. 772(2010-12), 522-531.
- 6) 高橋重雄ほか、越波時における防波堤上の人々の転倒に関する研究—親水性港湾構造物に関する水工的研究(第2報)一、Vol. 31, No. 4, (1992-12)
- 7) 石田水里ほか、倒立振り子モデルを利用した身体前後傾斜運動時の立位安定性の定量評価に関する検討、日本機械学会論文集(C 編), Vol. 75, No. 752(2009-4), 283-291.
- 8) 阿江通良ほか、日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定、バイオメカニズム, 11, (1992)23-33.
- 9) 馬場 仁, Excel & PS デジタイザで簡単動作解析実習, 有限会社 フィジカルソフト  
<http://www.physicalsoft.jp>