旅客船内における車いすの走行シミュレーション —駆動力推定用基本モデルの開発—

今里元信*・太田 進*・平田宏一**・宮崎恵子*

Numerical Simulation of Wheelchair Running on Passenger Ships —Development of Basic Model for Estimating Driving Force—

Motonobu IMASATO, Susumu OTA,
Koichi HIRATA and Keiko MIYAZAKI

Abstract

Passenger ships should accept disabled persons and appropriate safety measures should be taken to accept disabled persons. On passenger ships, there are some hazards due to ship motion for persons using a wheelchair such as uncontrollable running of wheelchair. It is necessary to evaluate various acceleration conditions in view of running of wheelchair to prevent uncontrollable running. In other words, a numerical simulation program on running of wheelchair under given acceleration conditions is necessary. The purpose of this paper is to provide basic numerical model for the simulation.

We made a numerical model, by which torque for driving wheelchair can be calculated with a track of running and an acceleration condition as input data, under the assumption that the position of the center of gravity of the person driving a wheelchair was fixed to the wheelchair. Experiments on a slope using the special wheelchair, with which rotation and torque of rear wheels can be measured, were carried out to check the effectiveness of the numerical model. By comparing the calculated and measured data on torque, it is concluded that the numerical model can be used as a basis for the development of detailed numerical model for the simulation.

1. 緒 言

公共交通機関のバリアフリー化が進むなか、身体障害者等が日常生活や旅行のために船に乗ることは必然であり、旅客船もバリアフリー化する必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。昨年秋、「高齢者・身体障害者等の公共交通機関を利用した移動の円滑化の促進に関する法律」（通称：交通バリアフリー法）が施行され、その中で旅客船のバリアフリー化について、技術基準が示されている⁽³⁾。しかし、安全対策については、検討の余地を多く残している。車いす利用者について言えば、船舶は波浪による動揺を伴うため、船内では車

いすが暴走・転倒する恐れがあり、有馬らも研究を実施している⁽⁴⁾。こうした危険を防止するためには、まず動揺している船内で走行する車いすの挙動を明らかにし、安全走行の限界を把握する必要がある。安全走行の限界を把握するには、各航海において、車いすの利用が想定される船内の場所でどのような加速度が作用するかを推定する技術と、所与の加速度条件下で車いすが安全に走行できるか否かを判定する技術が必要である。前者について言えば、波浪予測と船体運動の応答関数から加速度を推定することは、現在の技術で可能である⁽⁵⁾。一方、後者について言えば、陸上では、歩道や坂道での車いす走行に

* 正会員 海上技術安全研究所（旧船舶技術研究所）（〒181-0004 東京都三鷹市新川6-38-1）

** 非会員 海上技術安全研究所（旧船舶技術研究所）（〒181-0004 東京都三鷹市新川6-38-1）

関する研究などが行われている⁽⁶⁾が、船舶のような動揺下における研究が十分になされているとは言い難い。そこで著者らは、所与の加速度条件下において車いすが安全に走行できるか否かを判定する技術の研究を実施している。

実際の船舶において、車いすが安全に走行できるか否かを判定するためには、多くの加速度条件を設定する必要があり、実験だけでは困難であることから、任意の加速度条件下において車いすの走行を模擬できるプログラムを開発中である。本研究の目的は、そのための基礎的なモデル（以下、走行モデルと呼ぶ。）を構築することである。

動揺する船舶において車いすを安全に走行させられるか否かの評価指標の一つは、車いすの操作に要する駆動力であると考えられる⁽⁷⁾。そのため、走行モデルには、所与の加速度条件下で車いすを所定の方法で走行させる際に必要な駆動力を推定する機能が要求される。車いすの各利用者が、どの程度の駆動力を与えることができるか、かつ操作できるかも重要な課題であるが、この点については別途研究を実施しており、ここでは論じない。

2. 車いすの走行モデル

2.1 走行モデルの概要

本研究で開発している走行モデルは、搭乗者が後輪にトルクを与えるもの、いわゆる手漕ぎ式車いすを想定し、搭乗者を含む車いす（以下、単に「車いす」と呼ぶ。）の走行の軌跡および車いすに作用する加速度の条件から、駆動に要したと考えられるトルク（以下、単に「トルク」と呼ぶ。）を求めるためのものである。走行モデルは、各時刻における車いすの運動と各種の力の関係式に基づき作成する。

2.2 走行モデルにおける仮定

走行モデル作成の際の仮定は以下のとおりである。

- (1)床面は凹凸がない平面とする。
- (2)後輪の横滑りは無視し、前後方向のスリップも無視する。
- (3)搭乗者を含む車いすは剛体とみなす。重心位置は車いすに固定されているものとし、慣性モーメントは時間によらず一定とする。
- (4)各車輪の浮き上がりは無視する。ただし、計算の結果、走行面と車輪の間に張力が作用した場合は、モデルの適用対象外とみなす。
- (5)各車輪に作用する走行面の法線方向の力の計算（不静定問題）における各車輪の変位は弾性変形とし、比例定数（ばね定数）は車輪によらず

同じとする。（2.4.2項参照）

- (6)前輪の接地点には走行面の法線方向の力およびこの力に比例する転がり摩擦抵抗のみが作用するものとする。ただし、実際の車いすの前輪の中心は、取り付け軸を中心として一定距離で動くものに対して、このモデルでは、前輪は取り付け軸の位置とし、車いすに対して固定されているとする。
- (7)後輪の接地点には走行面の法線方向の力およびこの力に比例する転がり摩擦抵抗、横滑りを起こさないための横力、トルクに応じた推力が作用するものとする。
- (8)転がり摩擦抵抗は、車いすの重心の進行方向の逆向きに作用するものとする。

図1 車いすと走行面の座標系

2.3 座標系

座標系としては、図1に示すとおり、走行面固定のもの（ X, Y, Z 座標）と車いす固定のもの（ x, y, z 座標）の二つを考える。車いすに固定した x, y, z の各軸は、それぞれ前向き、左向き、上向きを正とし、原点は車いすの重心下の走行面上とする。走行面としては船内の床面を想定し、これに固定した X, Y, Z の各軸はそれぞれ船首方向、左舷方向、上方向を正とし、原点は任意の位置とする。

車いすの重心位置は G で表し、走行面に対する車いすの重心位置は (X_G, Y_G) で表す。走行面固定の X 軸に対する車いす固定の x 軸の向き、すなわち車いすの向きは、反時計回りを正として ϕ で表す。

2.4 走行モデルの式

2.4.1 車いすに作用する力

車いすに作用する力としては、以下のものを考える。

F_{xG}, F_{yG}, F_{zG} ：外力加速度（重力を含む）により車いすの重心に作用する力の x, y, z 成分

F_{xi}, F_{yi}, F_{zi} ：走行面より車輪 i に作用する力の x, y, z 成分

ここで下付きの記号 i は車輪の接地点を意味し、 $i=1, 2, 3, 4$ はそれぞれ左前輪、左後輪、右後輪、右前輪を表す。図2は車いすの右側の車輪に作用する x および z 方向の力を、図3は各車輪に作用す

図2 車いすに作用する力 (xz平面)

図3 車いすに作用する力 (xy平面)

る x および y 方向の力を表す。

2.4.2 z 方向の力

このモデルでは、車いすに作用する z 方向の加速度は既知として、走行面により各車輪に作用する z 方向の力を求める。車いすの z 方向の剛体の運動は無視できる。そのため、基礎となる式は、 z 方向の力のつり合いの式、 x 軸周りおよび y 軸周りのモーメントのつり合いの式の三つである。これに対し、求めるべき力は四つである。そこで(5)の仮定を用い、ばね定数は十分に大きいとすれば、 z 方向の各車輪の力は、車いすの z 方向の微小変位および x 軸ならびに y 軸周りの車いすの微小回転角度の三つの変数で表せる。これらの変数を三つのつり合いの式に基づいて解き、 z 方向の各車輪の力を求めればよい。なお、各車輪に作用する z 方向の力は、各車輪のばね定数の比のみに依存し、絶対値にはよらないこと、すなわち仮定したばね定数の値によらないことに留意されたい。

2.4.3 x 方向および z 軸回りの運動方程式

車いすに関する x 方向の運動方程式は以下のとお

りである。

$$M \cdot \dot{V}_{xG} = F_{xG} + T_{x2} + T_{x3} - \mu \cdot \sum_{i=1}^4 F_{zi} \quad (1)$$

ここで、 M は車いすの全質量を、 V_{xG} は車いすの重心の x 方向の速さを示す。 T_{x2} 、 T_{x3} はそれぞれ左右の後輪に与えられる推力を示し、 μ は転がり摩擦抵抗係数を示す。

図3で示した A 点を通る z 方向の軸周りの運動方程式は、後輪の横滑りはないと仮定しているため、次式のとおりとなる。

$$I_A \cdot \ddot{\phi} = -F_{yG} \cdot x_A - (T_{x3} - \mu \cdot (F_{z3} + F_{z4})) \cdot y_3 - (T_{x2} - \mu \cdot (F_{z1} + F_{z2})) \cdot y_2 \quad (2)$$

ここで、 y_2 および y_3 は後輪接地点の y 座標であり、 x_A は、 A 点の x 座標であり、 $\ddot{\phi}$ は旋回角加速度を表す。また、 I_A は A 点を通る z 方向の軸周りの慣性モーメントであり、 z 軸周りの慣性モーメント I_z を用いて次式で表される。

$$I_A = I_z + M \cdot x_A^2 \quad (3)$$

2.4.4 トルクの計算手順

各時刻における、車いすの重心に作用する加速度、車いすの重心の x 方向の加速度および旋回角加速度が与えられれば、(1)、(2)式の未知数は T_{x2} 、 T_{x3} のみなので、この二式を連立させることにより、各時刻におけるトルクが以下の手順で求めることができる。

- (1)2.4.2項で述べた計算に基づく各車輪に作用する z 方向の力の算出
- (2) z 方向の力より転がり摩擦抵抗の計算
- (3)(1)(2)式の連立方程式に基づく左右の後輪の推力の算出
- (4)推力にハンドリムの半径を掛けることによるトルクの計算

3. 実験装置ならびに解析方法

3.1 実験装置

3.1.1 傾斜台

単純化された条件下で車いすの走行実験を行うため、傾斜台を製作した。走行面の寸法は5.5m×5.5mで、傾斜角は0～10度まで1度刻みで設定でき、約250kgの荷重まで耐えられる構造にした。

3.1.2 計測用車いす

実験は、(財)東京都地域福祉財団東京都福祉機器総合センターが所有している計測用車いす⁽⁸⁾⁽⁹⁾を用いて、左右のトルクおよび回転角 θ を計測した。また実験には、著者らが開発した計測用車いすも用いて、

同様に左右のトルクおよび回転角 θ を計測した。

車いすの別による計測内容の差異は有意ではないので、ここでは車いすの区別はしないことにする。

3.2 x方向加速度および旋回加速度の解析方法

各時刻 t における後輪の前身速度 $V_{x2}(t)$ 、 $V_{x3}(t)$ は、後輪の回転角 $\theta_2(t)$ 、 $\theta_3(t)$ より、中央差分、すなわち次の式を用いて求めた。

$$V_{xi}(t) = \frac{R \cdot (\theta_i(t + \Delta t) - \theta_i(t - \Delta t))}{2 \Delta t}, \quad i=2, 3 \quad (4)$$

ここで、 Δt はサンプリング周期を、 R は後輪の半径を表す。車いすの重心の x 方向の速さは、左右後輪の前進速度の平均値とした。車いすの重心の x 方向の加速度は、速さの中央差分により求めた。

走行開始前に、車いすは所定の向きに合わせた。サンプリング周期あたりの旋回角度 $\Delta\phi(t)$ および各時刻 t における向き $\phi(t)$ は、以下の式により求めた。

$$\Delta\phi(t) = \frac{2R}{B} \cdot \begin{Bmatrix} (\theta_2(t) - \theta_2(t - \Delta t)) \\ -(\theta_3(t) - \theta_3(t - \Delta t)) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\phi(t) = \phi(t - \Delta t) + \Delta\phi(t) \quad (6)$$

ここで、 B は後輪の接地点間の距離を表す。車いすの旋回角加速度 $\ddot{\phi}(t)$ は、各時刻 t における向き $\phi(t)$ の二階の中央差分、すなわち次の式により求めた。

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{\phi(t + 2\Delta t) - 2 \cdot \phi(t) + \phi(t - 2\Delta t)}{4 \Delta t^2} \quad (7)$$

各時刻において車いすの重心に作用する外力加速度は、走行面の傾斜角度と車いすの向き $\phi(t)$ に基づき、重力加速度を座標変換することにより求めた。

4. 計算に用いる定数の決定

4.1 計算に用いる定数およびその決定法の概要

2章で構築した走行モデルを解くには、車いすの質量、重心位置、重心周りの慣性モーメントおよび転がり摩擦抵抗係数を求める必要がある。そのため、走行モデルの検証のための実験とは別に、各定数を求めるための実験を実施した。なお、走行モデルの検証のための実験を含めて、実験は全て、比較的車いすの操作に慣れている一人の著者が搭乗した状態で実施した。また実験は車輪の浮き上がりが無い範囲で実施した。(2.2節(4)参照)

4.2 重心位置

車いすの重心の x 方向の位置は、傾斜0度における前後の車輪にかかる荷重計測の結果から求めた。 y 方向の位置は左右後輪の接地点中央と仮定した。 z

方向の位置(高さ)は、水平時および傾斜時の前後方向の重量バランスから計算した。

4.3 慣性モーメント

慣性モーメントを求めるため、車いすを可能な限りその場で旋回させる実験を行った。この実験により得られたトルクと車いすの旋回角加速度から慣性モーメントを計算した。実験は繰り返し実施し、最も並進運動が小さかった実験結果を採用した。図4にトルクおよび旋回角加速度の時系列を示す。実験結果から求めた慣性モーメントは、質量に 0.09m^2 を乗じた値であった。このことから、以下の計算では、各車いすの質量に応じて、慣性モーメントは質量 $\times 0.09\text{m}^2$ とする。なお、実験結果にはばらつきがあったことを付記する。

図4 車いす旋回実験結果の一例

4.4 転がり摩擦抵抗係数

車いすの転がり摩擦抵抗係数を算出するため、傾斜台を水平に設置し、計測用車いすに初速を与え、トルクを与えずに静止するまでの運動の様子を記録した。図5に車いすの速さの変化を示す。この実験結果から求めた加速度の絶対値と重力加速度の比、すなわち転がり摩擦抵抗係数 μ は0.015であった。

図5 駆動力がない場合の車いすの速さの低下

5. 走行モデル検証用実験

5.1 実験の概要

走行モデルを検証するために、傾斜台上で車いすの走行実験を行った。ここでは、船体の左舷側が沈んでいる状態で横傾斜しているものと想定し、船内を船首方向、船尾方向、右舷方向に走行する場合を、車いすから見た状態を考慮し、それぞれ左下がり走行、右下がり走行、登坂走行と呼ぶ。実験は、0度、3度、5度、7度の角度の傾斜に対して車いすを走行させ、各走行時のトルクと後輪の回転角を計測した。また左下がり走行、右下がり走行の開始時には、車いすの向き（ x 軸）を X 軸に合わせ、登坂走行開始時には、車いすの向きを Y 軸に合わせた。なお、実験に際しては予め重心位置を調整するとともに、車いすを操作する際には極力体重移動がないようにした。

5.2 実験結果および計算結果

各実験について、左右後輪の回転角より得られた車いすの重心の x 方向の加速度、旋回角加速度、外力加速度から、2章で示した走行モデルを用いて、トルクを算出した。実験結果とそれに対応するトルクの計算結果の例を図6から図10に示す。図中のグラフは上から順に、車いすの X 方向および Y 方向の移動距離、重心の x 方向の速さ、右後輪のトルクおよび左後輪のトルクを示している。

左後輪のトルクの時系列を表している。また、実線は計測結果、破線は計算結果を表している。計算は、車いすの走行開始から、ブレーキ操作など急激な制動が起こらない範囲について行った。

図6は、水平面上を概ね X 軸方向に走行させた場合の結果である。この実験では、搭乗者が左右のトルクをほぼ同時に与えている。最初に加速する際のトルクはよく合っているが、その後計算で求めたトルクには、計測結果には無い変動が見受けられる。その原因の一つは、今回の計算では重心位置を固定したが、実際には車いす操作時に前後方向に体重移動が生じたためではないかと推定される。

図7は、傾斜角7度の登坂走行の結果である。この図ではトルクの計測結果と計算結果がよく合っている。

図8、9、10は、傾斜角3、5、7度の左下がり走行の結果である。走行面の傾斜が大きい場合、左下がり走行においては、車いすをまっすぐに走行させようとすると、左側を前向きに漕ぎながら、右側をブレーキ操作しなければならなかった。なお、傾斜角を9度とした場合は、体重移動なしに車いすを操作することは困難であった。これらの図より、左のトルク、すなわち前向きに漕いでいる方のトルクについて言えば、計算結果の時系列には、計測結果のそれと比較して多少の振動が見られるものの、計

図6 計測結果とトルクの計算結果 (0度)

図7 計測結果とトルクの計算結果
(7度登坂走行)

図8 計測結果とトルクの計算結果
(3度左下がり走行)

図10 計測結果とトルクの計算結果
(7度左下がり走行)

図9 計測結果とトルクの計算結果
(5度左下がり走行)

算結果の最大値は、計測結果のそれと概ね一致している。右のトルクについて言えば、計算結果と計測結果は一致しているとは言い難い。なお、走行限界

の評価においては、左のトルクが問題になるであろうことに留意されたい。

右下がり走行の結果も、左下がり走行の場合と同様の傾向を示した。

5.3 考察

登坂走行では、左右のトルクともに計算結果と計測結果が概ね一致している。左下がり走行において、トルクの計算結果と計測結果が一致しない理由としては、走行モデルでは体重移動を考慮していないのに対して、著者が注意して実験したにもかかわらず、実際には、一定程度の体重移動があったことが考えられる。左下がり走行でも、走行限界の観点で問題になると考えられる左のトルクの最大値については、計算結果と計測結果が概ね一致している。左下がり走行では、一般的には、左のトルクが小さくなる方向に搭乗者による体重移動がなされるであろうことから、体重移動を考慮しない走行モデルは、左下がり走行における左のトルクに関して、大きめの数値を与えるものと考えられる。

この走行モデルの式を用いて、トルクおよび外力加速度を入力として、車いすの運動を推定することも原理的には可能である。但し、車いすは旋回に対する慣性が小さく、左右の僅かなトルクの違いが大きな回転角加速度となるため、これらの式を用いてトルクおよび外力加速度から運動を推定した場合、

車いすの運動、特に車いすの向きの推定精度が悪いことは、別の計算により確認している。しかし、車いすの運動および外力加速度を入力としてトルクを求めた場合については、前述のと通りの精度が得られ、走行限界の定性的評価には資すると考えられる。

以上のことを考慮すれば、体重移動を考慮しない走行モデルは、このままでは走行限界の評価に用いるには十分な精度を有するとは言いが、今後より詳細なモデルを開発する際の基礎として用いることができると考えられる。

6. 結 言

本報では、車いすの走行シミュレーションの基礎として、重心の移動を考慮しない車いすの走行モデルを開発し、静止している傾斜面上での検証実験を実施した。その結果、トルクの推定精度に問題はあるものの、このモデルは、今後より詳細なモデルを開発する際の基礎として用いることができるであろうことを示した。搭乗者の体重移動を考慮したモデルの開発は今後の重要な課題である。また、車いすの操作モデル（トルクの与え方のモデル）の開発も今後の課題である。

最後に本研究を行うにあたり、貴重な助言を頂き、また計測用車いすを貸して下さった、橋詰努氏をはじめとする(財)東京都地域福祉財団東京都福祉機器総合センターの皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 有馬正和：フェリー・客船におけるバリアフリーの現状と課題，らん，関西造船協会，第41号，pp.54-61 (1998.10).
- (2) 宮崎恵子，今里元信：旅客船におけるバリアフリーの現状と技術的課題，らん，関西造船協会，第50号，pp.11-16 (2001.1).
- (3) 大橋将太：旅客船のバリアフリー化について，TECHNO MARINE，日本造船学会，第856号，pp.51-53 (2000.10).
- (4) 有馬正和・細田龍介：動揺環境における車いすのユーザビリティ評価に関する研究（第1報）—後輪ブレーキ状態の車いすのモデリング—，日本造船学会論文集，No.188，pp.419-427 (2000.11).
- (5) 福田淳一：船体応答の統計的予測，耐航性に関するシンポジウム論文集，日本造船学会，pp.99-119 (1969.7).
- (6) 例えば中川伸一ほか：「人にやさしい道路」を目指して一歩道横断勾配が車椅子の挙動に及ぼす影響—，土木計画学研究・論文集，No.12，pp.775-786 (1995.8).
- (7) 今里元信ほか：旅客船内での車いす利用に関する研究，(社)日本設計工学会東北支部研究発表講演会論文集，pp.48-49 (2000.10).
- (8) 橋詰努・米田郁夫ほか：手動車いすの走行性能の研究，第11回リハビリ工学カンファレンス講演論文集，日本リハビリテーション工学協会，pp.481-482 (1996.7).
- (9) 鎌田実ほか：手動車いすの駆動に関する研究，日本機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集（部門大会編），No.97-12，pp.253-256 (1997.7).

質 疑 応 答

櫻井美奈(慶應義塾大学)：水平な平面に傾斜台を置いた場合と、船舶航行時のように船全体が傾斜している場合とでは、傾きに関する視覚的な手がかりに相違があると考えますが、それについて考慮する必要はないのでしょうか？

今里元信：傾斜台上と船内では、確かに視覚的に相違があると、著者の体験上感じています。そのため、傾斜台上だけでなく、実船実験も行い、動揺下での車いすの挙動やそれに対する人間の操作について、検討しています。

黒川久幸(東京商船大学)：車いすの個体差による影響は今回の実験では見られなかったのでしょうか？

また、重心位置の違いによって、前輪と後輪にかかる荷重が異なると考えられます。この影響について、何か判ったことはあるのでしょうか？

今里元信：今回の実験では、車いすの違いによる影響は見えておりません。

重心位置の違いについては、例えば重心位置を後輪間軸上近くに移しますと、駆動時に前輪が浮き上がってしまうという現象が起こります。特に登坂時にその現象が起きると、後方に転倒する恐れがあります。そのため、前方に重心を移す必要があることなどから、体重移動を考慮したモデルの開発を考えています。