

小型船舶における乗船者のエネルギー消費量を支配する

身体的特徴および動揺の解明に関する研究

Elucidate the Motions and Body Characteristics That Most Affect the Energy Expenditure of

Passengers in a Small Marine Craft

○土井根礼音（電機大），坂牧孝規（鳥羽商船高専），瀬田広明（鳥羽商船高専），宮脇富士夫（電機大），
本間章彦（電機大），土肥健純（電機大），福井康裕（電機大）

Renon DOINE, Tokyo Denki University

Takanori SAKAMAKI, National Institute of Technology, Toba College

Hiroaki SETA, National Institute of Technology, Toba College

Fujio MIYAWAKI, Tokyo Denki University

Akihiko HOMMA, Tokyo Denki University

Takeyoshi DOHI, Tokyo Denki University

Yasuhiro FUKUI, Tokyo Denki University

Abstract: The purpose of this study was to elucidate the motions and body characteristics that most affect the energy expenditure of passengers in a small marine craft. The measurement system consisted of three orientation sensors and a calorimeter. Orientation sensors capable of measuring linear and angular accelerations were placed on the head and hip of each participant, and on the floor of the marine craft. These accelerations were transformed to the reference frame and were evaluated by the root mean square (RMS). Energy expenditure was measured using the calorimeter. Motions and body characteristics that most strongly influenced energy expenditure were identified by multiple regression analysis. The dependent variables were the mean values of energy expenditure. The independent variables were the mean values of RMS and body surface area (BSA). Therefore, the motions and body characteristics that most influenced energy expenditure of passengers were pitch motion at the hip and BSA.

Key Words: Small Marine Craft, Energy Expenditure, Linear and Angular Accelerations, Body Surface Area, Multiple Regression Analysis

1. はじめに

船舶動揺が乗船者に及ぼす影響の代表的なものには船酔いや疲労があり，この症状は，海上の波の影響を受けやすい小型船舶ほど大きい．船酔いは乗船者にとって不快な症状である．また疲労は，船舶事故につながるヒューマンエラーの原因の一つとしても報告されている⁽¹⁾．

先行研究の多くは，船酔いや疲労に対する主観的なアンケート結果と船舶動揺の関係について調査したものであり⁽²⁾、立位姿勢で作業することの多い小型船舶の乗船者の姿勢維持の動作という視点から調査した研究は，行われていない．また，船舶上で乗船者の姿勢維持に重要な頭部と股関節位置である腰部の動揺を比較検討するための計測解析手法は確立されておらず，乗船者の立位姿勢時における身体動作解析は十分に行われているとは言えない．さらに，船舶動揺に対する乗船者の運動をエネルギー消費量として捉え，計測を試みた研究⁽³⁾はあるが，どのような動揺が乗船者のエネルギー消費量に影響を及ぼすのか特定されていない．本研究は，小型船舶における乗船者のエネルギー消費量を支配する身体的特徴および動揺の解明を目的とする．

2. 方法

2.1 計測システム

本研究の計測システムは，乗船者の立位姿勢時の姿勢動揺（以下，立位姿勢動揺）を計測するための3軸方位角センサと生体の呼気からエネルギー消費量を計測するエネルギー

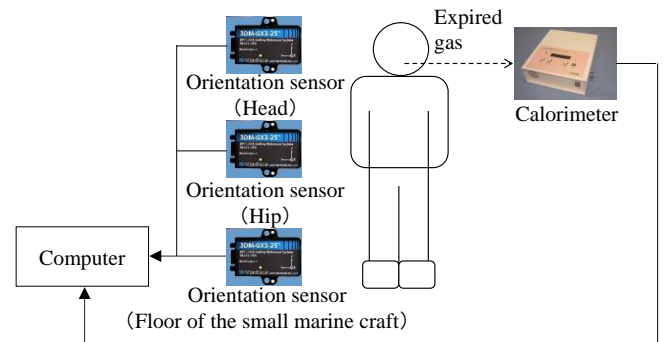


Fig. 1 Measurement system

ギー代謝計から構成される (Fig. 1). 3 軸方位角センサは，小型船舶の床，乗船者の腰部，頭部に設置した．同センサの計測インターバルは 0.01s である．エネルギー代謝計の計測インターバルは 10s である．

2.2 実験方法

実験は，鳥羽商船高等専門学校が所有する実習船「あさま」(Fig. 2, 総トン数 14t, 定員 23 名) の船舶内で実施した．小型船舶の速度は可能な限り一定とし，急な変針は行わないようにした．視覚情報を排除するために，船舶動揺の予測を可能とする船外の風景が見えない場所（船首側のギャレー）で実験を実施した．



Fig. 2 The small marine craft⁽⁴⁾

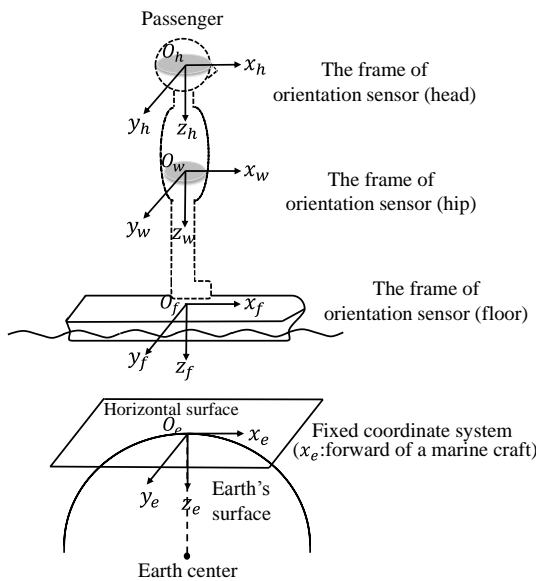


Fig. 3 Coordinate system for analysis of linear and angular acceleration⁽⁴⁾

実験協力者 16 名に対し，①座位 15min，立位 15min，座位 15min，立位 15min，座位 15min（女性 6 名，男性 4 名），又は②座位 25min，立位 25min，座位 15min（女性 3 名，男性 5 名）の姿勢をとるように指示した．また，実験協力者の向きは，開眼状態で，船首方向である船内の壁を正面とするように指示した．さらに実験協力者には，座位姿勢時には，船舶内に固定されたクッション性のある椅子に座り，立位姿勢時には，両足を平行にして立つよう指示した．

本実験は，鳥羽商船高等専門学校生命倫理委員会規則に則り実施された．実験協力者には実験開始前に実験内容の説明を行い，実験への参加について同意を得た．

2.3 エネルギー消費量を支配する身体的特徴と動揺の解明

2.3.1 立位姿勢動揺

本研究では，動揺を 3 軸方位角センサで計測される加速度・角加速度として評価した．本研究で扱う座標系を Fig. 3 に示す．本研究では，3 軸方位角センサの x 軸方向の加速度を前後揺れ (Surge)，y 軸方向の加速度を左右揺れ (Sway)，z 軸方向の加速度を上下揺れ (Heave)，x 軸まわりの角加速度を横揺れ (Roll)，y 軸まわりの角加速度を縦揺れ (Pitch)，z 軸まわりの角加速度を船首揺れ (Yaw) と定義する．小型船舶動揺の床，乗船者の腰部，頭部で計測される加速度・角加速度は，それぞれ異なる座標系で計測されるため，比

較検討ができない．本研究では，各計測部位における加速度・角加速度を x 軸を船首方向，y 軸を船舶の右側 (右舷)，z 軸を地球の中心の方向とする固定座標系上の加速度・角加速度へと座標変換することにより，動揺の比較検討を可能とした．

動揺の大きさは，式 (1) に示す実効値 (RMS) により評価した．式中の f_i は，加速度又は角加速度データを， N はデータ数を表す．立位姿勢動揺の解析範囲は，立位開始 5 分後から立位開始 15 分後までとした．有意差の検定は，分散分析とテューキーの母集団平均の対比較検定を使用し，有意水準は 1% とした．

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (f_i)^2} \quad (1)$$

2.3.2 エネルギー消費量

本研究では，乗船者の運動をエネルギー消費量として評価した．エネルギー消費量は，呼気から求められる酸素摂取量を基に算出される．エネルギー消費量の解析範囲は，立位開始 5 分後から立位開始 15 分後までとした．

2.3.3 重回帰分析

エネルギー消費量を支配する動揺および身体的特徴の解明は，重回帰分析により行った．重回帰分析に用いた変数を Table 1 に示す．目的変数は，解析範囲におけるエネルギー消費量の平均値とした．説明変数は，解析範囲における加速度・角加速度の実効値の平均値，および実験協力者の体表面積とした．体表面積 (BSA) は，日本人の体格に近いとされる藤本式を用いて算出した (式 (2))．式中の H は身長 [cm] を， W は体重 [kg] を表す．

$$BSA = H^{0.663} \times W^{0.444} \times 0.008883 \quad (2)$$

重回帰分析は，実験協力者が立位姿勢時の 31 データから，スマイルノフの棄却検定により判定した外れ値 3 データを除く 28 データを対象に，ステップワイズ法により行った．説明変数間の共線性を防ぐため，変数となる動揺と動揺の間に 0.8 以上の相関が確認された場合は，エネルギー消費量との相関係数が低い方の動揺を排除した．

Table 1 Variables in the multiple regression analysis

Variable		Value
Dependent variable		Average of energy expenditure within the analysis range
Independent variables	Body characteristics	Body surface area by Fujimoto formula
	Motion	Mean RMS values of linear and angular accelerations at the head and hip of each passenger, and on the floor of the marine craft

3. 結果

3.1 小型船舶動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺

実験協力者 16 名の立位姿勢時の加速度・角加速度の実効値の平均値と標準偏差を Fig. 4 に示す．実験協力者の腰部，頭部の実効値は，小型船舶の床に比べて，有意に大きくなった ($p < 0.01$)．また，回転運動 (Fig. 4(b)) には，実験協力者の頭部の実効値に比べて腰部の実効値が大きくなる傾

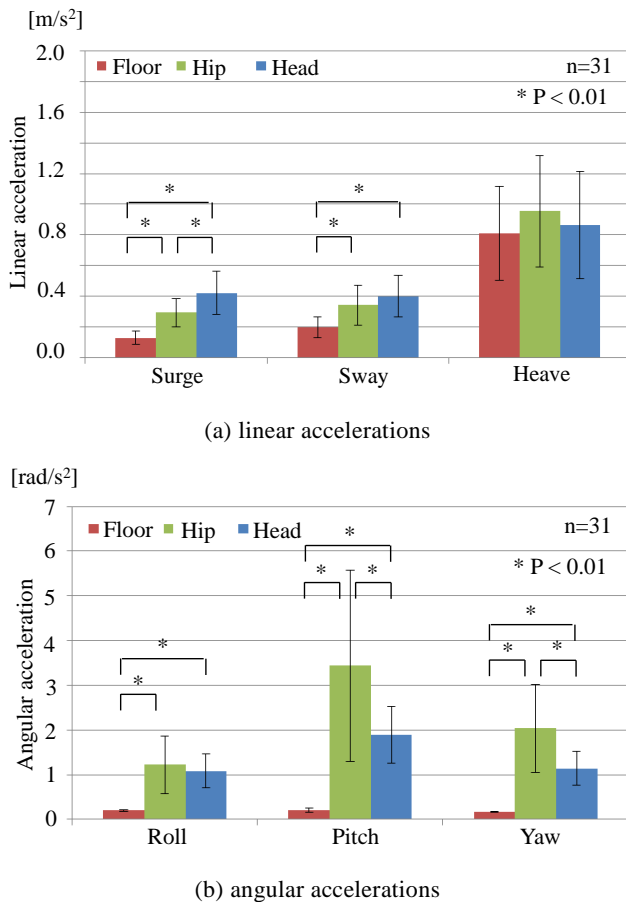


Fig. 4 RMS values of linear and angular accelerations

Table 2 Result of the multiple regression analysis

Variable	Standard partial regression coefficient	P value	
Intercept	-0.135	1.000	
Body surface area	0.445	0.002	
Head	Surge	—	0.984
	Sway	—	0.237
Hip	Surge	—	0.713
	Heave	—	0.392
	Pitch	0.511	0.001
Floor	Surge	—	0.933
	Roll	—	0.540
	Yaw	—	0.728
Multiple correlation coefficient (R)	0.835		
Squared multiple correlation coefficient adjusted for the degrees of freedom (R ²)	0.697		

Note: “—” indicates that the variable is unrelated to energy expenditure.

向が観察され，この傾向は特に縦揺れ (Pitch) で顕著であった。

3.2 エネルギー消費量を目的変数とした重回帰分析

重回帰分析の結果を Table2 に示す。エネルギー消費量を支配する身体的特徴および動揺は，体表面積と腰部の縦揺れ (Pitch) であることがわかった。それぞれの標準偏回帰係数は，0.445 と 0.511 となった。また，目的変数の予測値と実測値の相関係数を表す重相関係数 (R) と重回帰式のあてはまりの良さを意味する自由度調整済決定係数 (R²) は，それぞれ 0.835, 0.697 と高い数値を示した。

4. 考察

4.1 乗船者の立位姿勢動揺

小型船舶動揺よりも実験協力者の腰部，頭部の立位姿勢動揺が大きくなったのは，実験協力者が小型船舶動揺に対して姿勢維持の動作を行ったことが原因と考えられる。また，実験協力者の腰部の縦揺れ (Pitch) が，他の回転運動 (横揺れ (Roll), 船首揺れ (Yaw)) に比べて大きくなる傾向が観察されたことから，小型船舶動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺は，主に回転運動である縦揺れ (Pitch) として生じるものと推察される。

4.2 エネルギー消費量を支配する身体的特徴と動揺

重相関係数 (R) が，0.835 と高い相関を示したことから，乗船者のエネルギー消費量は，体表面積と腰部の縦揺れ (Pitch) により説明できるものと推察される。また自由度調整済決定係数 (R²) が 0.697 を示したことから，乗船者のエネルギー消費量のおよそ 7 割は，乗船者の体表面積と腰部の縦揺れ (Pitch) で説明可能であることがわかった。重回帰式で説明することのできなかつた乗船者のエネルギー消費量に影響を及ぼす原因の 3 割は，実験協力者の姿勢維持の方法の違いや実験時の体調，性別，小型船舶内の気温などが考えられる。

本実験より，小型船舶動揺が乗船者に及ぼす影響を解明するためには，乗船者の姿勢維持の動作に着目し，小型船舶動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺およびエネルギー消費量を計測することが重要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では，小型船舶における乗船者のエネルギー消費量を支配する身体的特徴および動揺の解明を目的とし，小型船舶動揺と立位姿勢動揺の計測解析手法を考案し，エネルギー消費量を目的変数とした重回帰分析を行った。

計測実験は小型船舶において実験協力者 16 名に対して実施した。本研究により，エネルギー消費量を支配する身体的特徴および動揺は，体表面積と腰部の縦揺れ (Pitch) であることが示唆された。

6. 謝辞

本研究は，JSPS 科研費 19651075，公益財団法人長岡技術科学大学技術開発教育研究振興会による研究助成 (2008 年)，公益財団法人日本科学協会 笹川科学研究助成 (24-724, 2012 年)，鳥羽商船高等専門学校校長裁量経費 (教育研究活動支援) による援助を受け実施しています。

参考文献

- (1) 公益社団法人 日本海難防止協会，海と安全 疲労と海難 また幽水，Vol.456，pp.1-10，1997.
- (2) 木村暢夫，甫喜本司，天下井清。船体運動が身体機能に与える影響について—船酔い，疲労と船体運動との関係—。日本航海学会論文集，Vol.50，pp.377-385，1994.
- (3) Breidahl T, Christensen M, Jepsen JR, Johansen JP, Omland Ø: The influence of ship movements on the energy expenditure of fishermen: a study during a North Sea voyage in calm weather. Int Marit Health. Vol.3, pp.114-120, 2013.
- (4) Renon Doine, Takanori Sakamaki, Hiroaki Seta, Masamitsu Ito, Akihiko Homma and Yasuhiro Fukui, The Exercise Load of Passengers' Postural Control Against Ship Motion Using Human Energy Expenditure, Advanced Biomedical Engineering, Vol.4, pp.164-169, 2015.