小型船舶および動揺装置による動揺に対する 生体の立位姿勢動揺と運動負荷

坂牧 孝規¹・土井根 礼音²・瀬田 広明³・小川 伸夫⁴

Exercise Load and Physical Motion on Standing Posture in a Small Marine Craft and Motion System

Takanori SAKAMAKI, Renon DOINE, Hiroaki SETA and Nobuo OGAWA

Abstract

The purpose of this study was to develop method of evaluating a motion system using motion on standing posture and exercise load. In this paper, we report participants' motion on standing posture, participants' exercise load during standing on the motion system and compared with those on a 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 waist of each participant, and on the floor of a small marine craft. Energy expenditure was measured using the calorimeter. In the small marine craft, participants were either sitting or standing. In the laboratory, participants were sitting, or standing on the motion system. Motion on standing posture was analyzed by calculating the root mean square (RMS). Exercise load was calculated by dividing the mean energy expenditure in each condition by that in the sitting condition.

Passengers' motion on standing posture on the craft was mainly rotational motion. The exercise load during performing motion system was similar to that during standing on the craft. We thus suggested that motion on standing posture and exercise load are proved effective in evaluating a motion system.

Keywords : *human engineering, motion on standing posture, exercise load, small marine craft, motion system*

キーワード: 労働・人間工学、立位姿勢動揺、運動負荷、小型船舶、動揺装置

1. はじめに

船舶に乗船すると、ほとんどの人たちは疲労を感じ、船舶が小さくなるほどその傾向は強い。しかし、船舶乗船時の疲労の原因の特定や、その定量化に関する研究はほとんど行われていない。

船舶事故の原因の 90% は人的要因によるものとされている⁽¹⁾。疲労は、ヒューマンエラー（見張り不十分）の原因の 1 つとして考えられており⁽²⁾、船舶職員の疲労の適切な対応策が求められている。

これまでに、筆者らは、小型船舶の動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺を計測するとともに、立位姿勢動揺によって生じる生体の運動負荷を算出することで、船舶動揺が乗船者に与える生理的影響を解析してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。一方、小型船舶で同一の動揺を再現することは困難であり、生体の状態も個体差や時系列変化が生じる。このため、船舶動揺と同等な動揺を再現することが可能な研究環境の構築が必要となる。

¹ 正会員 鳥羽商船高等専門学校 (〒517-8501 三重県鳥羽市池上町 1 番 1 号) takanori@sakamaki-lab.jp

² 正会員 東京電機大学 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番)

³ 正会員 鳥羽商船高等専門学校 (〒517-8501 三重県鳥羽市池上町 1 番 1 号)

⁴ 非会員 鳥羽商船高等専門学校 (〒517-8501 三重県鳥羽市池上町 1 番 1 号)

本研究は、船舶動揺に対する乗船者の疲労などの研究環境を構築するための基礎研究として、生体の立位姿勢動揺と運動負荷を指標とした動揺装置の評価手法の構築を目的とする。一般に、並進運動として前後揺れ (Surge)、左右揺れ (Sway)、上下揺れ (Heave)、回転運動として横揺れ (Roll)、縦揺れ (Pitch)、船首揺れ (Yaw) の動揺を再現する動揺装置は高価である。このため、本研究は、上下揺れ (Heave)、横揺れ (Roll)、縦揺れ (Pitch) の動揺を再現する簡易型動揺装置を用いた研究環境の構築の可能性について検討を行ったので報告する。

2. 方法

2.1 計測システム

船舶または簡易型動揺装置の床の動揺に対する生体の立位姿勢動揺の計測は、船舶または簡易型動揺装置の床、乗船者の腰部、頭部に設置した3台の3軸方位角センサを用いて、各部位の加速度・角加速度を計測することにより行った。加速度・角加速度の計測インターバルは、0.01sとした。

立位姿勢動揺によって生じる生体のエネルギー消費量を、呼吸量と O_2 濃度の計測により算出するエネルギー代謝計⁽⁵⁾を用いて計測した。エネルギー消費量の計測インターバルは、10sとした。

2.2 評価指標

2.2.1 立位姿勢動揺

船舶の床、生体の腰部、頭部に設置した3軸方位角センサは、各々独立した座標系をもち、その傾きに応じた重力加速度の影響を受ける。本研究では、船体近傍の地球表面の接平面に、船舶の前方をx軸のプラス方向、船舶の右側をy軸のプラス方向、地球の中心に向かう軸をz軸のプラス方向とし、x-y平面を水平面とした固定座標系を定義し、各3軸方位角センサの加速度、角速度を固定座標系に変換し解析を行った⁽⁶⁾。

並進運動は、前後揺れ (Surge)、左右揺れ (Sway)、上下揺れ (Heave) とした。回転運動は、座標変換を適用した角速度を微分した角加速度を算出し横揺れ (Roll)、縦揺れ (Pitch)、船首揺れ (Yaw) とした。なお、上下揺れに含まれる重力加速度は、 9.80665m/s^2 を減じることで除去した。

動揺の大きさは、船舶の床、生体の腰部、頭部の加速度・角加速度の実効値(Root Mean Square : RMS)として算出した。実効値とは、時系列波形がもつ任

意の時間内における平均的な強さを意味する。実効値は式(1)により定義される⁽⁷⁾。式中の f_i は加速度または角加速度であり、 N はデータ数である。本研究では、生体の立位姿勢動揺を抽出するために、カットオフ周波数15Hzのローパスフィルタを加速度、角加速度データに適用した。

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

2.2.2 運動負荷

運動に要するエネルギー量や運動の強さを表す指標として、METS (Metabolic Equivalent) が定義されている。これは、運動時のエネルギー代謝量を安静時のエネルギー代謝量で除した値であり、運動による全代謝量が安静時の何倍であるかを示す⁽⁸⁾。

本研究では、運動負荷を、METSを参考に、気温等の環境要因による誤差を少なくするために、立位姿勢時のエネルギー消費量を、安静時のエネルギー消費量を除した値と定義した (式(2))⁽⁴⁾。なお、安静時のエネルギー消費量は、座位姿勢時のエネルギー消費量とし、エネルギー消費量は10分間(60データ)の平均値とした。

$$\text{運動負荷} = \frac{\text{立位姿勢時のエネルギー消費量}}{\text{安静時のエネルギー消費量}} \quad (2)$$

2.3 実験概要

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。被験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。

2.3.1 小型船舶を用いた実験

小型船舶を用いた実験は、図1に示す鳥羽商船高等専門学校が所有する実習船「あさま」(半滑走型、総トン数14t、定員23名)の船舶内で実施した。小型船舶内の実験風景を図2に示す。小型船舶の速度は可能な限り一定(16.0~19.9 knot)とし、急な変針は行わないようにした。なお、実験は複数日実施し、その際の気象海象は風速が1.9~4.2m/s、波高は全日とも0.30m以下であった。視覚情報を排除するために、被験者の立位姿勢動揺は、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で計測した。被験者には、①座位 15min、立位 15min、座位 15min、立位 15min、座位 15min、または②座位 25min、立位 25min、座位 15min の姿勢をとり、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。座位姿勢の際は、被験者を船舶内に固定されたクッション性のある椅子に座らせた。

2.3.2 動揺装置を用いた実験

簡易型動揺装置の動揺面を図3に示す。これは、並進運動の上下揺れ (Heave)、回転運動の横揺れ (Roll)、縦揺れ (Pitch) の動きを、一辺 1.0m の正三角形の板に発生させる。動揺は、板の各頂点が台車の上に垂直に立てられたボールねじに接続され、AC サーボモータを用いて、ボールねじの回転を制御することで調整される。

動揺装置によって発生させる動揺は、板の中心点に於いて、表1に示す基本揺れに、加算揺れ1～5を加えた波形を発生させた。基本揺れおよび加算揺

れの波形は、sin 波 (正弦波) とした。これは、前述の小型船舶を用いた実験で計測した船舶の床の動揺について、周波数解析を行い、周波数成分として含まれる揺れを組み合わせたものである。

動揺装置を用いた実験風景を図4に示す。これは、図3で示した簡易型動揺装置の動揺面上で、被験者が立っている状態を示している。被験者には、椅子で座位 15min、動揺装置上で立位 15min の姿勢をとり、開眼状態で正面を見るように指示した。

表1 動揺装置で発生させた動揺

	上下揺れ(Heave)	横揺れ(Roll)	縦揺れ(Pitch)
基本揺れ	$\pm 0.06\text{m}$, 0.80Hz	$\pm 0.58^\circ$, 0.20Hz	$\pm 1.73^\circ$, 0.50Hz
加算揺れ1	-	-	$\pm 1.27^\circ$, 0.04Hz
加算揺れ2	$\pm 0.03\text{m}$, 0.04Hz	$\pm 3.42^\circ$, 0.04Hz	$\pm 1.27^\circ$, 0.04Hz
加算揺れ3	$\pm 0.03\text{m}$, 0.04Hz	$\pm 8.42^\circ$, 0.04Hz	$\pm 1.27^\circ$, 0.04Hz
加算揺れ4	$\pm 0.03\text{m}$, 0.04Hz	$\pm 8.42^\circ$, 0.04Hz	$\pm 7.27^\circ$, 0.04Hz
加算揺れ5	$\pm 0.04\text{m}$, 0.04Hz	$\pm 0.42^\circ$, 0.04Hz	$\pm 8.27^\circ$, 0.04Hz

図1 実習船「あさま」

図3 簡易型動揺装置の動揺面

図2 小型船舶を用いた実験風景

図4 動揺装置を用いた実験風景

3. 結果

3.1 立位姿勢動揺

小型船舶の動揺に対する被験者の動揺を図5に示す。これは、14名の被験者(19～48歳、男6名、女8名)の22例の実験データを対象に、座位姿勢から立位姿勢になって5分経過後の10分間の有効なデータについて、船舶の床、被験者の腰部、頭部の加速度・角加速度の実効値を求め平均値と標準偏差をプロットしたものである。ただし、図5で示したデータは、簡易型動揺装置で発生させた動揺とは異なる船舶の床の上下揺れ(Heave)の実効値が $0.45 \sim 1.27 \text{ m/s}^2$ の範囲から外れるデータを除外した。なお、図5データは、スミルノフの棄却検定を行った結果、有意水準5%で外れ値でないデータである。

動揺装置の動揺に対する被験者の動揺を図6に示す。これは、5名の被験者(20～24歳、男3名、女2名)の10例の実験データを対象に、座位姿勢から立位姿勢になって5分経過後の10分間のデータについて、被験者の腰部、頭部の加速度・角加速度の実効値を求め、平均値と標準偏差をプロットしたものである。これらデータは、スミルノフの棄却検定を行った結果、有意水準5%で外れ値でないデータである。

3.2 運動負荷

図5、図6で用いた実験データに対応する小型船舶における被験者の運動負荷、動揺装置における被験者の運動負荷の平均値と標準偏差を図7に示す。

小型船舶における被験者の運動負荷、動揺装置における被験者の運動負荷における運動負荷を対象に差があるかを、対応のないt検定を用いて、有意水準5%で検定を行った結果、有意差なしとなった。

4. 考察

我々の先行研究により、小型船舶の乗船者の立位姿勢動揺は、船舶の床の上下揺れ(Heave)発生時に、他の方向の揺れが加わることで、関節を使った姿勢制御が生じ、乗船者の腰部、頭部の回転方向に発生することがわかっている⁽³⁾。本研究では、上下揺れ(Heave)、横揺れ(Roll)、縦揺れ(Pitch)を発生させる簡易型動揺装置を用いて、小型船舶の乗船者と同様な立位姿勢動揺と、運動負荷を発生させる環境の構築を目指した。

本稿では、簡易型動揺装置を用いて、表1に示したsin波(正弦波)の動揺を発生させた。これは、表1中の基本揺れに、基本揺れの周波数に対して相

対的に低い周波数の加算揺れを合成したものである。

図6より、動揺装置の動揺に対して、被験者が、腰部、頭部の縦揺れ(Pitch)、船首揺れ(Yaw)方向の動きによって、姿勢制御を行う様子が示されている。しかし、動揺装置の床の横揺れ(Roll)を基準とした被験者の腰部、頭部の横揺れ(Roll)の相対的な値は、図5に比べて小さくなっている。これは、動揺装置で発生させた動揺が、船舶動揺とは異なることを示唆する可能性がある。ただし、動揺装置の

図5 小型船舶における加速度・角加速度の実効値

図6 動揺装置における加速度・角加速度の実効値

図7 運動負荷

動揺によって発生する運動負荷については、有意差がないことから、船舶動揺によって発生する運動負荷と同等な強度である可能性がある。

今回、簡易型動揺装置で発生させた動揺は、同一パターンの上下揺れ (Heave)、横揺れ (Roll)、縦揺れ (Pitch) を発生させていた。このため、被験者が動揺装置の動揺に慣れ、船舶と異なった姿勢制御を行った可能性もある。さらに、加速度・角加速度の実効値は、高い周波数の加速度・角加速度で大きな値を示す傾向があるため、今後、小型船舶の床の動揺解析を進め、動揺装置で再現する動揺パターンの検討を行っていく必要がある。

5. まとめ

筆者らの先行研究における加速度・角加速度の実効値の計測により、乗船者が船舶動揺に対して、頭部、腰部の回転方向の動きによって立位姿勢を維持していることを明らかにした⁽³⁾。さらに、その運動負荷が、踏み台昇降運動に相当していることを明らかにした⁽⁴⁾。

本研究では、並進運動としての上下揺れ (Heave)、回転運動としての横揺れ (Roll)、縦揺れ (Pitch) の動揺を再現する簡易型動揺装置を用いて、加速度・角加速度の実効値と運動負荷の視点で、動揺装置の動揺と船舶動揺を評価する手法を提案し検証実験を行った。検証実験により、動揺装置の動揺に対して、被験者が、腰部、頭部の縦揺れ (Pitch)、船首揺れ (Yaw) 方向の動きによって、姿勢制御を行う様子が示された。また、動揺装置の動揺によって、船舶動揺と同等な強度の運動負荷が再現できた。

以上より、船舶動揺が乗船者に与える生理的影響を解析するための研究環境構築において、加速度・角加速度の実効値と運動負荷を指標とする評価手法が有効である可能性が示唆された。簡易型動揺装置で発生させる動揺については、小型船舶で計測したデータを基に、加速度・角加速度と、その実効値との関係を精査し、発生させる動揺パターンを改善することで、実際の船舶と同等な動揺を再現できる可能性がある。今後、簡易型動揺装置で発生させる動揺パターンについて検討を行う必要が有る。また、被験者の個体差について検討を行うため、同一の被験者による評価を行う必要が有る。

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の笹川科学研究助成 (24-724、2012 年)、および鳥羽商船高等専門学校校長裁量経費 (教育研究活動支援) により実施したものです。本研究のデータ収集におきましてご協力頂きました鳥羽商船高等専門学校の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 公益社団法人 日本海難防止協会:海と安全 平成八年版「海難審判の現況」概要, 454, pp. 1-28, 1996.
- (2) 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, 456, pp. 1-10, 1997.
- (3) 土井根礼音, 坂牧孝規, 瀬田広明, 伊藤政光, 本間章彦, 福井康裕: 船舶動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺の解析, ライフサポート, Vol. 27, No. 2, pp. 45-53, 2015.8.
- (4) Renon Doine, Takanori Sakamaki, Hiroaki Seta, Masamitsu Ito, Akihiko Homma, Yasuhiro Fukui: The Exercise Load of Passengers' Postural Control Against Ship Motion Using Human Energy Expenditure, Advanced Biomedical Engineering, 4, pp. 164-165, 2015.
- (5) 細谷憲政, 雨海照祥, 金子道夫, 田村俊世, 鳥井嘉彦, 鈴木正成, 松末智, 太田壽城, 石川和子, 福永哲夫, 三橋扶佐子, 杉山みち子, 森脇久隆, 加藤昌彦: 今なぜエネルギー代謝かー生活習慣病予防のために, pp. 83-95, 第一出版株式会社, 2005.
- (6) Thor I. Fossen. : Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, pp. 15-25, John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- (7) 伊佐弘, 谷口勝則, 岩井嘉男, 吉村勉, 見市知昭: 基礎電気回路 第2版, pp. 53-54, 森北出版株式会社, 2011.
- (8) 朝山正己, 彼末一之, 三木健寿, 今村裕行, 大西範和, 藤原素子, 宮側敏明, 村上太郎, 森悟, 寄本明: 運動生理学, p. 54, 東京数学社, 2013.