表面筋電図を用いた小型船舶動揺に対する乗船者の姿勢制御動作の解析

土井根礼音¹・坂牧孝規²・瀬田広明²・本間章彦³

The Behavior of Passengers' Postural Control against Ship Motion on a Small Marine Craft using Surface Electromyogram

Renon DOINE, Takanori SAKAMAKI, Hiroaki SETA and Akihiko HOMMA

Abstract

The causes of crew members' fatigue have been still unclear, though their fatigue was reported as the one of the causes of marine accident. In our previous study, we found that passengers had an exercise load attributable to their postural motion caused by their postural control. However, the muscles that caused postural motion were not clarified. This study investigates the behavior of passengers' postural control against ship motion using surface electromyogram (EMG).

Behavior of postural control was evaluated by linear and angular accelerations, exercise load, and muscle activity. Muscle activity was calculated by integrating the surface EMG of the soleus, the vastus lateralis, the lumbar paraspinals and the cervical paraspinals. In addition, regularized muscle activities were calculated by dividing muscle activities at sitting or standing posture by minimum value of these activities in each posture.

When passengers were standing, muscle activities of the soleus and the vastus lateralis were larger than the activities that they are sitting posture. We thus found possibility that passengers controlled their postures by using lower limbs.

Keywords : *human engineering, ship motion on a small marine craft, standing postural motion, exercise load, muscle activity*

キーワード: 労働・人間工学、小型船舶動揺、立位姿勢動揺、運動負荷、筋活動量

1. はじめに

乗船者の中でも船舶職員の疲労は、船舶事故を引き起こすヒューマンエラーの原因の一つとして報告されている⁽¹⁾。疲労には、肉体的負荷により生じる肉体的疲労と精神的負荷により生じる精神的疲労がある⁽²⁾。乗船者の疲労原因を解明するためには、船舶動揺に対する生体反応の仕組みを解明する必要がある。これまでに、筆者らは、小型船舶動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺に着目し、立位姿勢動揺に

より生じる生体の運動負荷を算出し、小型船舶動揺が乗船者に与える生理的影響を解析してきた。これにより、立位姿勢時の乗船者は、小型船舶動揺に対して腰部、頭部を動揺させ、自らの姿勢制御を行い、その運動量は、陸上での踏み台昇降運動相当である場合があることが示された⁽³⁾⁽⁴⁾。一方、乗船者の腰部や頭部における立位姿勢動揺の発生原因となる筋肉の働きについては、明らかとなっていない。本研究は、表面筋電図を用いた小型船舶動揺に対する乗

¹ 正会員 東京電機大学 東京千住キャンパス (〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番) doine@mail.dendai.ac.jp

² 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)

³ 非会員 東京電機大学 埼玉鳩山キャンパス (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

船者の姿勢制御動作の解析を目的とする。

2. 方法

2.1 計測システム

計測システムの構成を図1に示す。同システムは、小型船舶の床、被験者の腰部、頭部に設置した3台の3軸方位角センサ、呼吸量と O_2 濃度計測により生体のエネルギー消費量を計測するエネルギー代謝計、被験者の表面筋電図を計測するための表面筋電位計測装置、データ計測を行うコンピュータから構成される。3軸方位角センサの計測インターバルは、小型船舶における実測値と陸上における被験者の腰部、頭部の動揺の周波数に基づき、0Hz~25Hzの動揺計測が十分に可能な0.01s(100Hz)とした。エネルギー消費量のサンプリングインターバルは、加速度・角加速度および表面筋電図と同期して解析するため、代謝計で設定可能な最も短い計測インターバルである10sとした。表面筋電図の計測は、高周波の雑音や低周波の基線の動きを避けるため、一般に20Hz~5000Hzの範囲で記録されることが多い⁽⁵⁾。表面筋電図の計測インターバルは、表面筋電位計測装置で設定可能な0.001s(1000Hz)とした。表面筋電図の計測部位を図2に示す。表面筋電図は、生体が主に姿勢制御を行うために使用する頸部傍脊柱筋、腰部傍脊柱筋、外側広筋、ヒラメ筋について計測した。

2.2 実験方法

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。本研究では、乗船者の腰部や頭部における立位姿勢動揺の発生原因となる筋肉の働きを検討するために、小型船舶内で立位姿勢時の被験者と動揺のない陸上で立位姿勢時の被験者について、立位姿勢動揺と運動負荷、筋活動量の比較を行った。

小型船舶における実験は、鳥羽商船高等専門学校が所有する実習船あさま(総トン数14t、定員23名)を用いて実施した。小型船舶の仕様は、全長12.5m、船幅4.2m、全深さ2.3m、喫水0.8mであり、重心は、トランサム面から4.5m、船底から1.4mにある。表面筋電図の計測風景を図3に示す。実験海域は、池の浦湾とした。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。被験者の一覧を表1に示す。実験は、2012年8月30日~2012年9月12日の期間に実施した。実験時の気象および海

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。本研究では一般の人間に主眼をおいているため、被験者は鳥羽商船高等専門学校の学生7名と職員1名の計8名(性別：女性3名、男性5名、年齢：18~51歳)とした。被験者には、靴を履いた状態で、船舶航行中に①座位25分間(15分間のデータ計測と10分間の唾液計測)、②立位25分間(15分間のデータ計測と10分間の唾液計測)、③座位15分間の姿勢をとり、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。立位姿勢の実験を行った船内の位置は、トランサム面から約8.0m、船底から0.7m、右舷から約2.0mである。座位姿勢の実験を行った船内の位置は、トランサム面から約7.4m、船底から0.9m、右舷から約1.4の位置にある椅子で行った。椅子は、クッション性のある固定式もので、座面は床面から0.5mである。座位姿勢の実験時は、実験協力者に、椅子の背板にもたれない姿勢を維持するように指示した。陸上における実験プロセスは、①座位15分間、②立位15分間、又は①座位10分間、②立位10分間とした。

2.3 評価指標

2.3.1 立位姿勢動揺

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⁽³⁾。また3軸方位角センサのx軸方向の加速度を前後揺(Surge)、y軸方向の加速度を左右揺(Sway)、z軸方向の加速度を上下揺(Heave)、x軸まわりの角加速度を横揺(Roll)、y軸まわりの角加速度を縦揺(Pitch)、z軸まわりの角加速度を船首揺(Yaw)と定義する。なお、上下揺

図1 計測システムの概念図

図2 表面筋電図の計測部位⁽⁶⁾

図3 表面筋電図の計測風景

表1 被験者一覧

実験協力者	実験日	実験時刻	性別	年齢 [歳]	身長 [cm]	体重 [kg]
A	2012.08.30	13:55:00-15:00:00	女性	19	156	54
B	2012.08.31	13:45:00-14:50:00	男性	23	173	69
C	2012.08.31	15:35:00-16:36:00	男性	23	169	75
D	2012.09.03	13:25:00-14:30:00	男性	20	175	95
E	2012.09.05	10:44:00-11:45:00	女性	18	156	56
F	2012.09.05	13:55:00-15:00:00	男性	18	169	53
G	2012.09.12	10:55:00-12:00:00	女性	24	150	48
H	2012.09.12	14:05:00-15:10:00	男性	49	175	75

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。

立位姿勢動揺は、式(1)で定義される船舶の床、被験者の腰部、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⁽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。実効値は、立位開始 5 分後から 15 分後までの範囲について算出した。本研究では、被験者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。立位姿勢動揺は、被験者ごとに算出し、被

験者 8 名の平均値と標準偏差を算出した。小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部間の有意差の検定には、多重比較検定の一つである分散分析および、チューキーの母集団平均の対比較検定により行った。陸上における被験者の腰部、頭部間の有意差の検定は、対応のある t 検定により行った。有意水準は 5% とした。

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

2.3.2 運動負荷

本研究では、運動負荷を、METS (Metabolic Equivalent)⁽⁸⁾を参考に、立位姿勢時のエネルギー消費量を、座位姿勢時のエネルギー消費量で除した値と定義した (式(2))。また式(2)のエネルギー消費量は、立位開始 5 分後から 15 分後までのエネルギー消費量の平均値とした。運動負荷は、被験者ごとに算出し、被験者 8 名の平均値と標準偏差を算出した。有意差の検定は、対応のない t 検定により行った。有意水準は 5% とした。

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

図4 筋活動量の算出方法

2.3.3 筋活動量

本研究では、筋活動の評価を、立位と座位における頸部傍脊柱筋、腰部傍脊柱筋、外側広筋、ヒラメ筋の表面筋電図の計測により行った。外側広筋とヒラメ筋は、立位姿勢となることにより活動が活発になる。また、実験環境、電極の取り付け位置などによる個体差の除去が必要である。このため、本研究では、立位、座位における積分筋電図の最小値を基準とした筋活動量を定義し、船舶動揺に対する筋活動の評価を行った。また、筋活動量の算出の流れを

図4に示す。筋活動量は、表面筋電図を10秒ごとに積分した積分筋電図を用いて算出した⁽⁹⁾。表面筋電図には、ノイズ除去のため、カットオフ周波数10Hzのハイパスフィルタを適用した。本研究では、座位姿勢時における筋活動量を座位筋活動量（式（3））、立位姿勢時における筋活動量を立位筋活動量（式（4））と定義し、比較を行った。

座位筋活動量は、座位姿勢時の積分筋電図を座位姿勢時の積分筋電図の最小値で除することで算出される。立位筋活動量は、立位姿勢時の積分筋電図を立位姿勢時の積分筋電図の最小値で除することで算出される。積分筋電図の最小値は、座位姿勢開始、又は立位姿勢開始から15分後までの範囲で算出した。座位筋活動量と立位筋活動量は、被験者ごとに、立位開始5分後から10分後までの5分間（30データ）の平均値を算出し、被験者8名の平均値と標準偏差を算出した。但し、小型船舶動揺に対して倒れそうになる等の被験者が立位姿勢の維持ができない状況における表面筋電図のデータは排除した。有意差の検定は、対応のあるt検定により実施した。有意水準は5%および10%とした。

$$\text{座位筋活動量} = \frac{\text{座位姿勢時の積分筋電図}}{\text{座位姿勢時の積分筋電図の最小値}} \quad (3)$$

$$\text{立位筋活動量} = \frac{\text{立位姿勢時の積分筋電図}}{\text{立位姿勢時の積分筋電図の最小値}} \quad (4)$$

3. 結果

3.1 時系列解析

実験データの一例（被験者D）を、図5に示す。これは、船舶の床、被験者の腰部および頭部の加速度・角加速度の実効値、エネルギー消費量、左右の頸部傍脊柱筋、腰部傍脊柱筋、外側広筋およびヒラメ筋の積分筋電図の時系列データを示している。エネルギー消費量のサンプリング周期が10秒であるため、加速度・角加速度の実効値、および積分筋電図の値は、10秒間の値をプロットした。

他の被験者のデータを含め、外側広筋およびヒラメ筋の積分筋電図は、座位姿勢時に比べて立位姿勢時の方が増加している。

3.2 乗船者の立位姿勢動揺と運動負荷

表1の被験者8例について、小型船舶における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図6に、同被験者のうち陸上で立位姿勢時

図5 時系列データの一例（男性、20歳）

の加速度・角加速度の計測を行った6例（被験者A、D～H）の加速度・角加速度の実効値の平均値と標準偏差を図7に示す。乗船者の腰部、頭部の実効値（図6）は、小型船舶の床の実効値および陸上における立位姿勢時の被験者の腰部と頭部の実効値（図7）に

(a) 加速度

(b) 角加速度

図6 乗船者の加速度・角加速度の実効値

(a) 加速度

(b) 角加速度

図7 陸上の被験者の加速度・角加速度の実効値

比べて大きくなる傾向にあった。また乗船者の腰部の縦揺 (Pitch) が特に大きくなる傾向にあった。

表1の被験者8例の小型船舶における立位姿勢時の運動負荷と、同被験者のうち陸上でエネルギー消費量の計測を行った5例 (被験者A~D, F) の立位姿勢時の運動負荷について平均値と標準偏差を算出した結果を図8に示す。小型船舶における立位姿勢時の運動負荷は、陸上における立位姿勢時の運動負荷よりも有意に大きくなった。

3.3 乗船者の筋活動量

表1の被験者8例について、左右のそれぞれの頸部傍脊柱筋、腰部傍脊柱筋、外側広筋、ヒラメ筋の座位および立位時の筋活動量の平均値と標準偏差を算出した結果を図9に示す。頸部傍脊柱筋、腰部傍脊柱筋は、身体の上肢を支える筋肉であり、外側広筋、ヒラメ筋は、生体の下肢を支える筋肉である。また、同被験者について、陸上で左右のそれぞれの頸部傍脊柱筋、腰部傍脊柱筋、外側広筋、ヒラメ筋の座位および立位時の筋活動量の平均値と標準偏差を算出した結果を図10に示す。乗船者の外側広筋およびヒラメ筋の立位筋活動量は、座位筋活動量に比べて有意に大きくなった。一方、陸上における被験者の外側広筋およびヒラメ筋の立位筋活動量は、座位筋活動量と有意な差は確認されなかった。乗船者の筋活動量と陸上における被験者の筋活動量の平均値は、ほぼ変わらない値を示し、有意差はなかった。

4. 考察

筆者らは先行研究において、乗船者が小型船舶の床の動揺に対して、腰部や頭部の回転方向の姿勢動

図8 運動負荷

図9 乗船者の筋活動量

図10 陸上における被験者の筋活動量

揺により、姿勢を維持していることを解明した⁽³⁾。さらに、小型船舶の床の動揺に対する乗船者の姿勢動揺によって運動負荷が発生することから、乗船者の姿勢動揺が、乗船者の筋肉運動による姿勢制御運動によって発生している可能性があることを解明した⁽⁴⁾。これは、図6および図8に示すように、本論文の被験者においても再現された。一方、先行研究だけでは、乗船者の姿勢制御運動に使用される筋肉が特定されておらず、肉体的疲労を発生させる肉体的負荷の発生部位の特定には至っていなかった。

そこで本研究では、姿勢維持の必要とされる左右それぞれの頸部傍脊柱筋、腰部傍脊柱筋、外側広筋、ヒラメ筋の表面筋電図を計測し、筋活動量を算出することで、肉体的負荷が発生する部位の特定を行った。頸部傍脊柱筋、腰部傍脊柱筋は、身体の上肢を支える筋肉であり、外側広筋、ヒラメ筋は、生体の

下肢を支える筋肉である。

エネルギー代謝量に基づいて算出する生体の運動負荷については、海上における運動負荷に比べて、陸上における運動負荷は有意に小さかった(図8)。筋活動量については、小型船舶における被験者の筋肉活動量は、立位と座位では有意差が現れた(図9)。しかし、小型船舶における被験者の筋肉活動と陸上における筋肉活動量とでは、有意な差が現れなかった(図9、図10)。これは、運動負荷が、生体の全身の運動量を表すのに対して、筋活動量は、生体の一部の筋肉の活動量を示しているため、有意差が出なかった可能性がある。ただし、立位姿勢維持は、左右の筋肉を均等に使用しているとは限らないため、筋活動量の分析には、実際に使用している筋肉を考慮した分析が必要となると考えられる。

5. まとめ

本研究では、船舶動揺に対する乗船者の腰部・頭部の動揺、乗船者の運動負荷、乗船者の筋活動量の計測を行い、陸上で計測した同データとの比較を行った。

実験結果より、立位姿勢の乗船者は、船舶動揺に対して、主にヒラメ筋や外側広筋などの下肢の筋肉を用いて、姿勢制御を行っている可能性が高いことがわかった。今後、筋活動量については、使用している筋肉の左右差を考慮した分析を行い、肉体的疲労を発生させる肉体的負荷の発生部位の特定を行っていく予定である。

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 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）の援助を受けて実施しています。

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，456，pp. 1-10，1997.
- (2) 片岡洋祐：中枢性疲労の動物モデルと睡眠誘導メカニズム．別冊・医学のあゆみ 最新・疲労の科学－日本発：抗疲労・抗過労への提言－．医歯薬出版株式会社．東京，pp. 17-21，2010.
- (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 (2)，pp. 45-53，2015.
- (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.
- (5) 木村淳，幸原伸夫，神経伝導検査と筋電図を学ぶ人のために（第2版），p. 57，株式会社医学書院，2012.
- (6) 下野俊哉，表面筋電図マニュアル基礎・臨床応用，pp. 125-126，酒井医療，2010.
- (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，pp. 53-54，森北出版株式会社，2011.
- (8) 朝山正己，今村裕行，大西範和，彼末一之，藤原素子，三木健寿，宮側敏明，村上太郎，寄本明：イラスト運動生理学，pp. 41-57，pp. 134-138，東京数学社，2013.
- (9) 木塚朝博，木竜徹，増田正，佐渡山亜兵：積分筋電図，pp. 43-46，東京電機大学出版局，2009.