小型船舶における生体の立位姿勢動揺が エネルギー消費量に及ぼす影響

土井根 礼音¹・宮脇 富士夫²・瀬田 広明³・坂牧 孝規⁴

Effects of Standing Postural Motions on Human Energy Expenditures in a Small Marine Craft

Renon DOINE, Fujio MIYAWAKI, Hiroaki SETA and Takanori SAKAMAKI

Abstract

Crew member fatigue has been reported as one of the causes of marine accidents. In our previous study, it was found that human energy expenditure increased in a small marine craft because of the standing postural motions, such as motions of the head and the hip. The purpose of this study is to analyze the relationship between standing postural motions and energy expenditure, assuming that these motions are one of the causes of physical fatigue. Three orientation sensors capable of measuring linear accelerations and angular velocities were placed on the head and hip of each participant, and on the floor of the marine craft, to analyze the postural motions. Energy expenditure was measured using a calorimeter. The relationship between the standing postural motions and their energy expenditures was analyzed by multiple regression analysis of the following variables: energy expenditure, height, weight, and root mean square values of surge, sway, heave, roll, pitch and yaw motions at the head and hip of each participant, and on the floor of the marine craft. It was determined that weight and the pitch motions at the hip were especially affecting energy expenditure. The coefficient of determination was 0.71. Thus, it was suggested that the pitch motions at the hip affect the energy expenditure in the small marine craft.

Keywords : labor and ergonomics, standing postural motions, energy expenditure, multiple regression analysis

キーワード: 労働・人間工学、立位姿勢動揺、エネルギー消費量、重回帰分析

1. はじめに

船員の疲労は、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⁾。疲労は、肉体的負荷あるいは精神的負荷を連続して与えられたときにみられる肉体的および精神的パフォーマンスの低下現象と説明される⁽²⁾。船員の疲労を低減するためには、船舶動揺が生体に与える影響を解析し、船員の疲労原因を解明する必要がある。一

般に、生体の肉体的な負荷の大きさは、エネルギー消費量や心拍数を指標として評価される。本研究では、肉体的負荷を与えられることにより生じる疲労（以下肉体的疲労）に焦点をあて、肉体的疲労の度合いを評価する一つの指標として生体のエネルギー消費量を分析し、基礎研究として、船舶動揺により生じる生体の立位姿勢動揺とエネルギー消費量の関係を導いた。

¹ 正会員 東京電機大学総合研究所（〒120-8551 東京都足立区千住旭町5番）doine@mail.dendai.ac.jp

² 非会員 東京電機大学理工学部理工学科電子工学系（〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂）

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

⁴ 正会員 鳥羽商船高等専門学校制御情報工学科（〒517-8501 三重県鳥羽市池上町1-1）

図1 計測システム概念図⁽⁷⁾

表1 3軸方位角センサの仕様

項目		仕様
センサの出力		加速度
		角速度
		角度
		方位
加速度	測定範囲	±5 [G]
	バイアス安定性	±0.005 [G]
角速度	測定範囲	±300 [deg/s]
	バイアス安定性	±0.2 [deg/s]
角度	静的精度	±0.5 [deg]
	動的精度	±2.0 [deg]
サンプリング周期		0.01 [s]
外寸		44×25×11 [mm]
重量		11.5 [g]
インターフェース		RS232C

船員の疲労に関する先行研究では、木村らが3隻の船舶（(a) 全長 27.5m、幅 6.5m、(b) 全長 56.0m、幅 11.1m、(c) 全長 66.0m、幅 12.6m）を使用し、アンケートにより評価した船員の疲労や船酔いの自覚症状と船舶動揺、海況等の重回帰分析を行うことにより、船酔いや疲労に影響を及ぼす因子は船舶の床の加速度と船舶の動揺周期であることを報告している⁽³⁾。また、船員のエネルギー消費量に関する先行研究では、Breidahl らが、2隻の漁船（(a) 全長 28.44m、幅 8.20m、(b) 全長 23.50m、幅 7.00m）を使用し、船舶の床の回転角度とエネルギー消費量との直線回帰分析を行うことにより、船舶動揺が船員のエネルギー消費量を増加させる可能性があることを報告している⁽⁴⁾。しかしながら、船員の疲労の評価は、主観的なアンケート調査にとどまっており、定量的な評価がなされていない。また、船舶動揺が船員のエネルギー消費量を増加させる可能性があることが報告されているが、船員のエネルギー消費量に影響を及ぼす動揺の解明には至っていない。

筆者らはこれまでに、船員の肉体的疲労の原因を解明するために、生体が単一の剛体ではなく、関節を有することから、船舶動揺により生じる生体の姿勢維持動作⁽⁵⁾に着目し、生体の姿勢維持動作に伴う立位姿勢動揺の計測、およびエネルギー消費量に基づく運動負荷の解析を行った。これにより、船舶の上下揺れ（heave）の実効値が 1.00m/s^2 – 1.39m/s^2 の範囲における生体の立位姿勢動揺に伴う運動負荷は、陸上での 30 回/min の踏み台昇降運動の運動負荷に相当することがわかった⁽⁶⁾。以上より、船員の肉体的疲労の原因を解明するためには、基礎研究として、船舶動揺により生じる生体の立位姿勢動揺とエネルギー消費量の関係を導くことが、解明に役立つと考えた。

本研究は、小型船舶動揺により生じる立位姿勢動揺が生体のエネルギー消費量に及ぼす影響の解明を目的とし、重回帰分析を用いて生体のエネルギー消費量に影響を及ぼす因子を解析した。重回帰分析には、生体のエネルギー消費量、加速度・角速度の実効値、生体の個体差を表す身長、体重を変数として使用した。

2. 方法

2.1 実験

2.1.1 計測システム

本研究の計測システムは、加速度・角速度を計測する3軸方位角センサ、およびエネルギー消費量を計測するエネルギー代謝計、コンピュータで構成される（図1）。3軸方位角センサには、加速度センサ、ジャイロセンサ、磁気センサが内蔵されている（表1）。3軸方位角センサを、小型船舶の床、生体の腰部、頭部に設置し、計測インターバルを 0.01s とした。エネルギー消費量は、生体の呼吸量と O_2 濃度、呼吸の頻度により算出され、10s 間のエネルギー消費量を 10s ごとに記録した。加速度・角速度計測のための座標系を図2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 軸まわりの角速度を横揺れ（roll）、y 軸まわりの角速度を縦揺れ（pitch）、z 軸まわりの角速度を船首揺れ（yaw）と定義した。本研究では、各計測部位の加速度・角速度を 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・角速度へと座標変換し、各計測部位の動揺の比較を行った⁽⁸⁾。

図2 加速度・角速度の座標系¹⁾(7)

2.1.2 実験方法

本実験は、鳥羽商船高等専門学校の生命倫理委員会の承認のもとに行った。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。また、食事や運動、睡眠によるエネルギー消費量への影響を防ぐため、実験協力者には、実験前日の夜は十分な睡眠をとり、実験開始前4時間は水以外の飲食および激しい運動は控えるよう指示した。データの計測は鳥羽商船高等専門学校が所有する実習船「あさま」の船舶内で行った。小型船舶の仕様は、総トン数14t、全長12.5m、船幅4.2m、全深さ2.3m、喫水0.8m、最大速度28knot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。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。視覚情報による影響を最小限に抑えるために、船舶動揺の予測を可能とする船外の風景が見えない船首側で実験を行った。

実験環境を図3に示す。実験は、実験協力者15名に対し座位姿勢15分の後、立位姿勢15分をとらせ、31例のデータを収集した。座位姿勢での計測は、基準となる生体のエネルギー消費量を計測するために行った。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、両足を肩幅の位置で自然に立つよう指示した(図3)。立位姿勢の実験を行った船内の位置は、

図3 実験環境

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。安全を確保するため、実験協力者の立ち位置は、とっさの揺れが発生したときにつかまることができる船内の壁の近くとした。

2.2 エネルギー消費量に影響を与える要因分析

2.2.1 重回帰モデル

本研究では、重回帰モデルの従属変数をエネルギー消費量、独立変数を小型船舶の床、生体の腰部、頭部の前後揺れ(surge)、左右揺れ(sway)、上下揺れ(heave)、横揺れ(roll)、縦揺れ(pitch)、船首揺れ(yaw)、個体差を考慮するための身長、体重の20変数とした。本研究で扱う重回帰モデル及び重回帰分析により推定された重回帰モデルは式(1)、式(2)で表される⁽⁹⁾。式(1)は従属変数 Y を独立変数 X_i ($i=1, \dots, 20$)に対して回帰するモデルである。式中の β_0 は、回帰面の Y 切片を、 β_i ($i=1, \dots, 20$)は独立変数 X_i に関する回帰面を、 ε は誤差項を表す。式(2)は従属変数 Y と独立変数 X_i の関係を推定した結果のモデルであり、 $\hat{Y}$ は従属変数 Y の予測値を、 b_0 は回帰面の $\hat{Y}$ 切片を、 b_i ($i=1, \dots, 20$)は偏回帰係数を表す。本研究では共線性を防ぐために、互いに相関が高い2つの変数のうち、一方の変数を除くことで、重回帰モデルを構成する適切な独立変数の選択を行った。共線性とは、互いに相関のない独立変数を使用することが前提である重回帰分析において、互いに相関が高い変数を使用することで、偏回帰係数の符号が本来の現象とは逆になる等、正しい重回帰モデルを得られない現象である。従属変数に影響する独立変数の

¹⁾ O は各座標系の中心を表している。各座標系の中心 O と船体中心は、同じではない。

抽出は、ステップワイズ法の一つである変数増減法により行った。

本研究では、各独立変数間の測定単位の違いを考慮するために、偏回帰係数を標準化した標準偏回帰係数 b_i' ($i=1, \dots, 20$) を式 (3) により算出した⁽¹⁰⁾。式 (3) 中の S_{X_i} は式 (4) に示す独立変数 X_i の標準偏差を、 S_Y は式 (5) に示す従属変数 Y の標準偏差を表す。 N は従属変数 Y および独立変数 X_i のサンプル数を表す。標準偏回帰係数が大きい独立変数ほど、従属変数への影響力が大きいことを示している。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_{20} X_{20} + \varepsilon \quad (1)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_{20} X_{20} \quad (2)$$

$$b_i' = b_i \times \frac{S_{X_i}}{S_Y} \quad (3)$$

$$S_{X_i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^N (X_{i_m} - \bar{X}_i)^2} \quad (4)$$

$$S_Y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^N (Y_m - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

2. 2. 2 従属変数と独立変数

従属変数であるエネルギー消費量には、生体が運動を始めてから応答するまでに時間遅れが生じる。真家らは、生体にステップ入力（一定速度の歩行）を与えた際のエネルギー消費量の応答の時定数が、男性が 1.38 ± 0.28 min、女性が 2.29 ± 0.99 min であったことを報告している⁽¹¹⁾。本研究では、実験協力者ごとに、エネルギー消費量が定常状態に達したと考えられる立位姿勢に移行してから5分後～15分後までの範囲でエネルギー消費量の平均値を算出し、重回帰分析の従属変数とした。但し、立位姿勢に移行してから15分経過前に、実験協力者が早めに座位姿勢に移行していたときのデータについては除外した。

独立変数である各動揺の大きさは、式 (6) に示す実効値 (RMS: Root Mean Square) により評価した⁽¹²⁾。式 (6) 中の f_i は、加速度又は角速度データを、 N はデータ数を表す。加速度・角速度の実効値は、エネルギー消費量と同じ範囲で算出した。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (f_i)^2} \quad (6)$$

2. 2. 3 重回帰モデルの評価

本研究では、重回帰モデルの予測精度を評価するために、従属変数と説明変数の相関係数を表す重相関係数 R と、重回帰モデルのあてはまりを表す自由度調整済み決定係数 R^2 を算出した。自由度調整済み決定係数 R^2 は、式 (7) により算出される。式 (7) 中の SSE は式 (8)、 SST は式 (9) により算出される。 N は従属変数 Y のサンプル数を、 k は独立変数の数を、 $\hat{Y}$ は従属変数 Y の予測値を、 $\bar{Y}$ は従属変数 Y の平均値を表す。

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{SSE}{N - (k + 1)}}{\frac{SST}{N - 1}} \quad (7)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (8)$$

$$SST = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (9)$$

3. 結果

3. 1 重回帰モデルの決定

本研究では、重回帰モデルを正しく推定するために、収集した31例のデータに対し、外れ値の検定方法の一つであるスミルノフの棄却検定を行い、3例の外れ値を除外した。従って本研究では、表2に示す15名の実験協力者A～Oの28例を対象に、重回帰分析を行った。

表2の28例のデータについて、加速度・角速度の実効値とエネルギー消費量の平均値の相関関係を示したグラフを図4～図6に示す。図6(d)～(f)に示した小型船舶の床の角速度は、生体の腰部と頭部の角速度に比べて小さいため、図4、5(d)～(f)よりも横軸の縮尺を拡大している。また身長、体重とエネルギー消費量の平均値の相関関係を示したグラフを図7、図8に示す。図4は実験協力者の頭部で計測された加速度・角速度の実効値とエネルギー消費量の平均値の相関関係を、図5は実験協力者の腰部で計測された加速度・角速度の実効値とエネルギー消費量の平均値の相関関係を、図6は小型船舶の床で計測された加速度・角速度の実効値とエネル

表2 重回帰分析の対象とした実験協力者

No.	実験協力者	性別	年齢	身長 [cm]	体重 [kg]
1	A	女性	19	149	39
2	A	女性	19	149	39
3	B	男性	19	170	75
4	B	男性	19	170	75
5	C	女性	18	149	53
6	C	女性	18	149	53
7	D	女性	23	150	48
8	D	女性	23	150	48
9	D	女性	23	150	48
10	D	女性	24	150	48
11	E	女性	18	162	57
12	E	女性	18	162	57
13	F	男性	49	175	75
14	F	男性	49	175	75
15	F	男性	49	175	75
16	F	男性	49	175	75
17	F	男性	50	175	75
18	G	女性	18	153	41
19	G	女性	18	153	41
20	H	男性	19	168	53
21	I	女性	18	151	45
22	J	女性	18	153	48
23	J	女性	18	153	48
24	K	女性	19	156	54
25	L	男性	23	173	69
26	M	男性	23	169	75
27	N	女性	18	156	56
28	O	男性	18	169	53

ギー消費量の平均値の相関関係を表す。船舶動揺の範囲は、前後揺れ (surge) が $0.06\text{m/s}^2 \sim 0.18\text{m/s}^2$ 、左右揺れ (sway) が $0.11\text{m/s}^2 \sim 0.33\text{m/s}^2$ 、上下揺れ (heave) が $0.39\text{m/s}^2 \sim 1.38\text{m/s}^2$ 、横揺れ (roll) が $0.01\text{rad/s} \sim 0.04\text{rad/s}$ 、縦揺れ (pitch) が $0.01\text{rad/s} \sim 0.04\text{rad/s}$ 、船首揺れ (yaw) が $0.01\text{rad/s} \sim 0.04\text{rad/s}$ であった。図中の r は相関係数を表す。

本研究では、相関係数による共線性の評価を行ったところ、相関係数 0.80 以上を相関が高いと判断することで、重回帰分析の結果に共線性が現れなくなった。これより、本研究では図4～図8を考慮し、共線性を示す現象が現れなかった相関係数 0.80 を指標として、2つの独立変数間に 0.80 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が高い変数を残し、もう一方の変数は除外することで、独立変数の選択を行った。相関係数 0.80 以上を示した2変数を表3に示す。変数の選択の結果、独立

表3 相関係数 0.80 以上を示した2変数

変数1	変数2	相関係数
上下揺れ(頭部)	上下揺れ(床)	0.99
上下揺れ(腰部)	上下揺れ(床)	0.97
上下揺れ(頭部)	上下揺れ(腰部)	0.96
上下揺れ(腰部)	縦揺れ (床)	0.91
縦揺れ (床)	上下揺れ(床)	0.90
体重	身長	0.90
上下揺れ(頭部)	縦揺れ (床)	0.89
縦揺れ (頭部)	前後揺れ(頭部)	0.89
左右揺れ(頭部)	左右揺れ(床)	0.87
縦揺れ (床)	前後揺れ(床)	0.86
縦揺れ (腰部)	前後揺れ(腰部)	0.86
左右揺れ(腰部)	前後揺れ(腰部)	0.84
左右揺れ(頭部)	左右揺れ(腰部)	0.83
船首揺れ(腰部)	左右揺れ(腰部)	0.82
左右揺れ(腰部)	横揺れ (床)	0.81
前後揺れ(腰部)	縦揺れ (床)	0.80
横揺れ (床)	左右揺れ(床)	0.80

() 内は計測箇所

表4 重回帰分析に用いた変数

変数		値
従属変数	Y	エネルギー消費量
独立変数	X_1	前後揺れ (surge、x軸方向の加速度)
	X_2	頭部 横揺れ (roll、 x軸まわりの角速度)
	X_3	船首揺れ (yaw、 z軸まわりの角速度)
	X_4	左右揺れ (sway、 y軸方向の加速度)
	X_5	上下揺れ (heave、 z軸方向の加速度)
	X_6	腰部 横揺れ (roll、 x軸まわりの角速度)
	X_7	縦揺れ (pitch、 y軸まわりの角速度)
	X_8	船舶 前後揺れ (surge、 x軸方向の加速度)
	X_9	の床 船首揺れ (yaw、 z軸まわりの角速度)
	X_{10}	体重

変数として、表4に示す頭部の前後揺れ (surge)、横揺れ (roll)、船首揺れ (yaw)、腰部の左右揺れ (sway)、上下揺れ (heave)、横揺れ (roll)、縦揺れ (pitch)、小型船舶の床の前後揺れ (surge)、船首揺れ (yaw)、体重の10変数が選択された。個体差を表す体重と身長の相関係数は0.90であったため、体重に比べてエネルギー消費量との相関が低い身長を重回帰分析から除外している。決定された重回帰モデルを式(10)に、重回帰分析により推定される重回帰モデルを式(11)に示す。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_{10} X_{10} + \varepsilon \quad (10)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_{10} X_{10} \quad (11)$$

図4 実験協力者の頭部で計測された加速度・角速度の実効値とエネルギー消費量の平均値の相関関係

図5 実験協力者の腰部で計測された加速度・角速度の実効値とエネルギー消費量の平均値の相関関係

図6 小型船舶の床で計測された加速度・角速度の実効値とエネルギー消費量の平均値の相関関係

図7 身長とエネルギー消費量の平均値の相関関係

図8 体重とエネルギー消費量の平均値の相関関係

3.2 エネルギー消費量に影響を及ぼす因子

重回帰分析の結果を表5に示す。生体のエネルギー消費量に影響を及ぼす因子には、腰部の縦揺れ (pitch) と体重が抽出された。標準偏回帰係数は、

表5 重回帰分析の結果

変数		標準偏回帰係数	p値
切片		b_0	-0.11
頭部	前後揺れ (surge)	b_1'	0.10
	横揺れ (roll)	b_2'	0.12
	船首揺れ (yaw)	b_3'	0.14
腰部	左右揺れ (sway)	b_4'	0.77
	上下揺れ (heave)	b_5'	0.59
	横揺れ (roll)	b_6'	1.00
	縦揺れ (pitch)	b_7'	0.48 ^{a)}
船舶の床	前後揺れ (surge)	b_8'	0.37
	船首揺れ (yaw)	b_9'	0.99
体重		b_{10}'	0.53 ^{b)}
重相関係数 (R)		0.84 ^{c)}	
自由度調整済み決定係数 (R^2)		0.71 ^{d)}	

—: 因子として選択されなかった変数

腰部の縦揺れ (pitch) が 0.48 (表 4a)、体重が 0.53 (表 3b) となった。従属変数の予測値と実測値の相関係数を表す重回帰係数は 0.84 (表 4c)、重回帰モデルのあてはまりの良さを意味する自由度調整済決定係数は 0.71 (表 4d) となった。

4. 考察

Breidahl らの研究では、2 隻の漁船を用いて、船舶の床の回転運動と船員のエネルギー消費量の関係について直線回帰分析を行っているが、有意な相関がなかったことが報告されている⁽⁴⁾。一方、筆者らの研究ではこれまでに、生体の立位姿勢動揺に着目し、小型船舶の床、生体の腰部、頭部の動揺の大きさを加速度・角加速度を指標として評価し、関節のない棒と比較を行っている⁽⁸⁾。筆者らの先行研究では、関節をもつ生体が腰部や頭部の回転方向の動きで姿勢制御を行う傾向にあることが観察され、船舶動揺と生体の立位姿勢動揺は異なることが示された。生体が腰部や頭部の回転方向の動きで姿勢制御を行う傾向にあることは、本論文の図 4～図 6 の (d)～(f) に示した角速度の分布からも確認できる。本研究では、小型船舶の床、生体の腰部、頭部の加速度・角速度とエネルギー消費量の相関関係を分析することにより、生体の腰部の縦揺れ (pitch) とエネルギー消費量に相関 $r=0.71$ (図 5(e)) があること、また表 6 に示すように、腰部の縦揺れ (pitch) と船舶動揺の個々の成分との相関は低いことがわかった。さらに重回帰分析の結果においても、エネルギー消費量に影響を及ぼすパラメータとして、腰部の縦揺れ (pitch) が抽出された。立位姿勢動揺に起因すると考えられる生体のエネルギー消費量は、主に腰部の縦揺れ (pitch) の動きにより生じたものと考えられる。本研究の実験環境においては、生体の立位姿勢時の肉体的疲労の原因を解明するためには、生体の腰部の縦揺れ (pitch) が重要なパラメータであることがわかった。

本研究で構築した体重と腰部の縦揺れ (pitch) からなるエネルギー消費量の推定モデルは、自由度調整済決定係数が 0.71 を示したことから、71%の一致が見込まれた。エネルギー消費量の推定モデルの精度を上げるためには、気温、体温、性差やホルモンなどを考慮する必要があるものと考えられる^{(13), (14)}。また、本研究では実験系を単純化するために、変針や旋回などを行わず一定の速度で前進する半滑走型の小型船舶内で実験を実施した。より実船に近い

表 6 腰部の縦揺れ (pitch) と船舶動揺の相関係数

船舶動揺	腰部の縦揺れ(pitch)との相関係数
前後揺れ (surge)	0.38
左右揺れ (sway)	0.37
上下揺れ (heave)	0.48
横揺れ (roll)	0.39
縦揺れ (pitch)	0.50
船首揺れ (yaw)	-0.01

動揺環境での生体の立位姿勢動揺とエネルギー消費量の関係を導くことで、エネルギー消費量の予測モデルの正確性が増すと考えられる。今後、室内において動揺装置⁽¹⁵⁾を用いることで、気温などの影響が少なく再現性のある実験を行い、より精度の高いエネルギー消費量の推定モデルについて検討を行う。

実験協力者 15 名から得た 31 例のうち外れ値と判断された 3 例は、他の実験協力者と比べて船舶動揺が大きく実験環境が異なる 1 例と、腰部又は頭部の立位姿勢動揺が極端に大きく、他の実験協力者とは姿勢維持動作の方法が異なる 2 例であった。本研究では、生体の立位姿勢動揺とエネルギー消費量の関係を最も単純なモデルとして推定するために、外れ値と判断されるデータを除いたが、生体の肉体的疲労と立位姿勢動揺の関係を導くためには、今後は外れ値と判断された 3 例も含め、実験協力者ごとの姿勢維持動作の違いも考慮し、立位姿勢動揺とエネルギー消費量の関係についてさらなる分析が必要と考えられる。

5. まとめ

本研究では、船員の肉体的疲労の原因を解明するために、肉体的疲労を生体の運動の負荷の大きさを表すエネルギー消費量として捉え、船舶動揺により生じる生体の立位姿勢動揺がエネルギー消費量に及ぼす影響の解明を目的とし、エネルギー消費量および、小型船舶の床、生体の腰部、頭部で計測された加速度・角速度の実効値、生体の身長、体重を変数とした重回帰分析を行った。計測実験は、小型船舶の重心より前方の位置において実験協力者 15 名に対して行った。本研究は、一定の速度で前進する半滑走型の小型船舶内で実験を実施した。

加速度・角速度とエネルギー消費量の相関関係及び重回帰分析の結果、主に生体の腰部の縦揺れ

(pitch) がエネルギー消費量に影響を及ぼすことがわかった。本研究の実験環境において、生体の立位姿勢時の肉体的疲労の原因を解明するためには、生体の腰部の縦揺れ (pitch) が重要なパラメータであることがわかった。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 19651075 (2007 年-2009 年)、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)、JSPS 科研費 17H02056 (2017 年-2019 年)、JSPS 科研費 18K13951 (2018 年-2020 年) による援助を受け行っています。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実習船および練習船関係者の皆様、商船学科の皆様、学生の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 天下井清：疲労と海難，公益社団法人 日本海難防止協会 海と安全，Vol. 456，pp. 3-10，1997. 1.
- (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—，pp. 17-21，医歯薬出版株式会社，2010.
- (3) 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，(doi:10.9749/jin.90.377).
- (4) Breidahl T, Christensen M, Jepsen JR, Johansen JP, Omeland Ø: The influence of ship movements on the energy expenditure of fishermen: a study during a North Sea voyage in calm weather, *International Maritime Health*, Vol. 64, No. 3, pp. 114-120, 2013.
- (5) F. B. Horak and L. M. Nashner. Central Programming of Postural Movements: Adaptation to Altered Support-Surface Configurations. *Journal of Neurophysiology* 1986; 55(6): 1369-1381.
- (6) 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. 9, (doi:10.14326/abe.4.164).
- (7) 土井根礼音，宮脇富士夫，坂牧孝規，瀬田広明：小型船舶乗船者の立位姿勢動揺が生体のエネルギー消費量に及ぼす影響，日本航海学会第139回講演会講演予稿集，Vol. 6, No. 2, pp. 151-154，2018.
- (8) 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. 6，(doi:10.5136/lifesupport.27.45).
- (9) アミール・D. アクゼル，ジャヤベル・ソウンデルパンディアン：ビジネス統計学 下，pp. 167-173，ダイヤモンド社，2012.
- (10) 石村貞夫：すぐわかる多変量解析，pp. 1-31，東京図書株式会社，2007.
- (11) Kazuo Male: Dynamic Characteristic of Human Energy Metabolism Observed from Transition of Walking, *Journal of the Anthropological Society of Nippon*, Vol. 84, No. 3, pp. 221-229, 1976, (doi:10.1537/ase1911.84.221).
- (12) 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.
- (13) 細谷憲政：今なぜエネルギー代謝か，pp. 8-10，第一出版株式会社，2000.
- (14) 厚生労働省：食生活改善指導担当者研修「食生活改善指導担当者テキスト」(5)運動の基礎科学，<http://www.mhlw.go.jp/bunya/shakaihoshou/iryouseido01/pdf/info03k-06.pdf>，2018. 3.
- (15) 坂牧孝規，土井根礼音，瀬田広明，小川伸夫：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，日本航海学会論文集，Vol. 134，pp. 98-102，2016. 7，(doi:10.9749/jin.134.98).