操船シミュレータを用いた視覚的船体横揺れに対する身体・生理応答に関する基礎研究

正員 村井 康二* 正員 林 祐司*
非会員 井口 征士**

A Basic Study on the Body and Physiological Response to Visual Simulation of Ship Rolling

Koji Murai*, Member, Yuji Hayashi*, Member, Seiji Inokuchi**, Non-member

The purpose of this paper is to find relations between the body and physiological response to visual simulation of ship rolling and the horizontal visual field. We carry out the experiment that is simulated ship rolling only visually and not mechanically from zero to eight meters wave height at one meters interval for four kinds of horizontal visual field (210° , 150° , 90° and 30°) using the ship handling simulator at Kobe University of Mercantile Marine. We measure subjects gravity center and R-R interval for body and physiological response to the artificially created visual environment. The subjects look visual environment for three minutes in each wave condition. Here, subjects are three experienced persons (navigators) and three inexperienced persons.

The results showed that the displacement of navigators gravity center were led toward an inclination of the picture created by the simulator with wide horizontal visual field. And the relations between rolling angle and locus length of gravity center took the peak point for all horizontal visual fields. Also, the index with R-R interval and locus length of gravity center were correlated for 210° horizontal visual field.

From the results, we knew the realistic image with wide horizontal visual field was influenced on the subject's body and physiology, and its characteristics was difference between experienced persons and inexperienced persons.

キーワード：操船シミュレータ，船体横揺れ，重心動揺，心拍変動

Keywords: Ship handling simulator, Ship rolling, Displacement of gravity center, Heart rate variability

1. はじめに

一般的な操船シミュレータ（以下、シミュレータと呼ぶ。）のハードウェアは、各種航海機器を含む操舵室システムおよび自船舶周辺の操船環境を模擬するスクリーン式のビジュアルシステムから構成される。最近では、当該シミュレータを用いた教育・訓練が盛んに行われており、その教育・訓練効果を定量的に評価するための研究が数多く行われている⁽¹⁾。そして、それらの研究はシミュレータ訓練に対する操船者の操船技能の習熟度や操船行動選択の的確度を評価

対象としているが、その評価の根本に存在するシミュレータの現実再現度合いを定量的に評価する方法に関する研究は、シミュレータのハードウェア開発の陰に隠れて大きく後れている。

著者らは操船環境に対する操船者の身体・生理応答に着目して、これらを指標に用いることによりシミュレータの現実再現度合いを定量的に評価する方法の開発を行っている。その研究過程において、シミュレータ内の操船者が獲得する航海情報の質と量は、操船環境の模擬映像に大きく依存するために、模擬映像はシミュレータ操船における操船者の緊張感を高めるための最重要要素であると位置付けている。著者らの最近の研究⁽²⁾では、模擬映像が無意識レベルの身体、生理応答にどのように影響を及ぼしているかを解明するために、広視野といわれる水平視野角 210° の映像画面を有するシミュレータを用いた船体横揺れ模擬実験を乗船経験者（乗船実歴3ヶ月）を対象に行った。そして、この実験により、模擬映像を用いて操船者に船体動揺の現実感を与えることが可能であることを明らかにした。その

*神戸商船大学商船学部

〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町 5-1-1
Kobe University of Mercantile Marine.
5-1-1 Fukaeminami, Higashinada-ku, Kobe, Hyogo
658-0022

**大阪大学大学院基礎工学研究科

〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
Osaka University.
1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 560-8531

ことは操船者の重心動揺および心拍変動等の身体・生理指標を用いることにより、シミュレータの現実感を定量的に評価する手法を構築することが可能であることを示唆している。

操船者は、自動車、鉄道車両および航空機の操縦者とは異なり、操縦席に固定されることなく船橋内を移動可能であったり、操縦対象が低速度移動であるために、操船者の目視領域はそれらに対して広範囲となる。しかし、効率的な教育・訓練に不可欠な高い現実再現度合いに最も影響を及ぼすであろうシミュレータ映像の水平視野角についての研究は今までに行われていない。本研究では、シミュレータ映像の水平視野角が操船者にどの程度現実感を喚起しているかを前述の重心動揺および心拍変動の身体・生理指標を用いることにより定量的に評価することを主目的とする。また、被験者を乗船経験者（以下、経験者と呼ぶ。）群と乗船未経験者（以下、未経験者と呼ぶ。）群に二分割し、彼らの身体・生理指標値により乗船経験量を定量的に推測できる可能性について提案することを目的とする。

2. 映像による船体横揺れ実験

洋上で発生する船体動揺に対して身体・生理応答を引き起こす主要素は、縦揺れと横揺れであることが明らかにされているが⁽³⁾、本実験では横揺れのみを実験対象として選択する。ここでは、シミュレータの操舵室を動揺装置により動揺させ加速度を発生させる方法ではなく、シミュレータ映像画面に投影した映像により船体横揺れを模擬し、身体・生理応答を喚起する方法を採用する。本論ではこれを「映像による船体横揺れ実験」と呼び、広視野と狭視野それぞれ2種類の水平視野角、広視野；210°、150°および狭視野；90°、30°別に実験を繰り返し、操船者にどの程度の身体的、生理的影響を及ぼすかについて重心動揺および心拍変動に焦点を定めて測定をする。また、経験者群と未経験者群の無意識レベルでの身体・生理応答特徴を比較するために、操船判断等による意識的な操船経験差の影響が含まれないような映像を提供する。即ち、映像としては、陸地および他船舶等の目標物が存在しない空領域、海領域、自船舶船首領域のみで構成された映像を被験者に提示する。

〈2・1〉 実験装置 本実験に使用する装置を以下に説明する。

〈2・1・1〉 シミュレータ 映像画面は、垂直視野角は30°の固定とし、RGB3管式プロジェクタ（1台の水平視野角は30°）7台の合成映像により最大水平視野角210°の全体映像を構成する。操舵室システムの中心から映像画面までの半径は7メートルで、図1に操舵室システムの機器の配置と被験者の視点位置を示す。

〈2・1・2〉 平衡機能測定装置 平衡機能測定装置では、検査架台上の被験者の重心を4ゲージ法の抵抗線歪み測定法により構成された片持ち方式のロードセルにより測定し、0.1秒毎にX-Y座標値として記録する。図2に平衡機能測定装置を用いた重心位置測定概念を示す。

図1 シミュレータ（操舵室システム）

Fig. 1. Ship handling simulator (Own ship wheel house system).

図2 重心の測定概念

Fig. 2. Measurement method of gravity center.

図3 R-R 間隔

Fig. 3. R-R interval.

〈2・1・3〉 心拍数測定装置 心拍数測定装置を用いて、胸部に3つの電極を貼り付け、心拍変動として心拍R波の時間間隔データ（以下、R-R間隔と呼ぶ。）を測定する⁽⁴⁾。心拍数測定装置の測定レンジは200-4,096[msec]で、測定分解能は1[msec]である。ここで測定するR-R間隔とは、図3に示すようなP、Q、R、SおよびT波から構成される心電図のR波ピークと続くR波ピークとの時間間隔である。

〈2・2〉 実験概要 映像による船体横揺れ実験は、神戸商船大学レーダ航法実験研究装置棟内のシミュレータを用いて行う。実験に使用した自船舶モデルは、全長130メートル、総トン数1万トンの貨物船であり、操船者の眼高は一定である。また、人間の正常な水平視野は、右眼の場合、身体左内側60°から身体右外側に100-110°、左眼の場合はその逆方向に同値である⁽⁵⁾。本実験装置の最大水平視野角は210°であるので、前述の被験者の水平視野を包含す

表1 船体横揺れを発生させる波
Table 1. Wave conditions to generate ship rolling.

波高 [m]	0	1	2	3	4	5	6	7	8
周期 [sec]	0.0	3.4	4.9	6.0	6.9	7.7	8.4	9.1	9.7
波長 [m]	0.0	18.5	37.0	55.5	74.0	92.5	111.0	129.5	148.0

ることになる。

映像画面上での船首部分の横揺れは波高により制御できるので、波高を0メートルから8メートルまで1メートル間隔で発生させることにより、9段階の映像による船体横揺れ実験を設定する。また、0メートルと8メートル以外の各波高実験の後には、被験者の映像に対する影響蓄積を解消させるために、波高0メートルの映像を挿入する。つまり、被験者は合計16回の映像を各水平視野角に対して見ることになる。各波高に対する最大船体横傾斜角は0メートルから順に0.0°、0.1°、0.8°、3.2°、6.1°、7.8°、11.0°、16.9°、20.1°である。表1に模擬した波の周期、波長を示す。

〈2・2・1〉被験者 被験者Aは、大型船の航海士として10年の乗船経験を有する一級海技士(航海)の男性(48歳)、被験者Bは、大型船の実習生として1年の乗船経験を有する三級海技士(航海)の男性(23歳)、被験者Cは、大型船の実習生として3ヶ月の乗船経験を有する男性(22歳)および被験者d, e, fは乗船経験の無い男性(18-19歳)の合計6人である。なお被験者C, fは、船酔いし易いと事前に申告があった。被験者6人のうち、経験者群の被験者A, B, Cを経験者、未経験者群の被験者d, e, fを未経験者と分類する。また、大洋航海の経験を有し慣海性豊かな経験者A, Bの2名は分析型官能検査⁽⁶⁾⁽⁷⁾のパネリストとして、シミュレータ映像による各波高の船体横揺れに対する現実感の差異を検査可能な専門家である。

〈2・2・2〉実験手順 実験の手順を以下に記述し、図4にそのフローチャートを示す。

- (1) 実験者は、被験者に心拍数測定装置の電極を3箇所貼り付ける。
- (2) 被験者は、シミュレータのスクリーン中心位置(幾何学的映像中心位置)に置いた平衡機能測定装置の検査架台の上にはほぼ肩幅に両脚を開き自然体で直立する。
- (3) 実験者は、水平視野角および波高を設定し、横波を受ける状態で自船舶を一定の針路、一定の速力で航走させる。
- (4) 被験者は、3分間映像を見て、続く1分間を着席・閉眼して休息する。その間に動揺感に対する主観値および主観コメントを口頭で報告する。
- (5) 実験者は、波高を0メートルから8メートルまで、1メートル間隔毎に0メートルを挟みながら順に変化させる。
- (6) 被験者は、各水平視野角に対して16回の測定を連続して受ける。

図4 実験手順

Fig. 4. Flow chart of the experiment.

- (7) 被験者は、16回の測定後、アンケートによる各波高毎に対する動揺感を評価し、船酔い感の自覚症状等についての詳細な主観コメントを行う。
- (8) 実験者は、(1)から(7)を水平視野角210°、150°、90°および30°の順に充分な休息時間を挟み実験を実施する。

3. 測定データの解析方法

測定した重心動揺^{(8)~(10)}、R-R間隔^{(11)~(15)}および主観データの解析方法について説明する。

〈3・1〉重心動揺 重心動揺の大きさを評価する指標として総軌跡長、各被験者の重心動揺の大きさを無次元化した指標としての総軌跡長比および重心動揺の偏りを評価する指標としての動揺方向係数を以下のように定義する。

〈3・1・1〉総軌跡長(L) 0.1秒毎にサンプリングした被験者のx方向(身体左右方向)およびy方向(身体前後方向)の重心位置データ(x-y座標値)を用いて、重心移動距離の総和を下式により算出し、総軌跡長と定義する。

$$L = \sum_{n=0}^{1800} \sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2} \cdots \cdots (1)$$

ここで、 n はデータ数を示す。

〈3・1・2〉総軌跡長比(L') 各波高の総軌跡長を波高0メートルの総軌跡長で除した比率を総軌跡長比と定義する。波高0メートル時の総軌跡長を各被験者の基本身体保持能力として、各波高の総軌跡長をそれで除することにより無次元化したものである。

〈3・1・3〉動揺方向係数(r) 被験者の重心動揺のx方向およびy方向への偏りを、各方向の標準偏差の正接角[deg]として算出し、動揺方向係数と定義する。 r と重心動揺の偏りの関係は、 $r < 45$ でx軸方向(身体左右方向)に

長軸をもつ楕円形, $r = 45$ で円形, $r > 45$ で y 軸方向 (身体前後方向) に長軸をもつ楕円形となる。

$$r = \tan \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで, σ_x は x 方向の標準偏差, σ_y は y 方向の標準偏差を示す。

〈3・2〉 R-R 間隔 各波高実験に対する R-R 間隔の長さとその変動を評価する指標としての平均値および変動係数を以下のように定義する。

〈3・2・1〉 平均 (μ_{RR}) 被験者が各波高実験において映像を見ている 3 分間の R-R 間隔の平均値を下式により算出する。

$$\mu_{RR} = \frac{\sum_{i=1}^n RR_i}{n} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, n はサンプリング数, i は測定番号, RR_i は測定番号 i のときの R-R 間隔値を示す。

〈3・2・2〉 変動係数 (γ) 被験者が各波高実験において映像を見ている 3 分間の R-R 間隔の標準偏差 (σ_{RR}) を算出し, 変動係数 γ を以下のように定義する。

$$\gamma = \left(\frac{\sigma_{RR}}{\mu_{RR}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

〈3・3〉 主 観 被験者は, 真針路 000° で航走する自船舶に対して真方位 090° からの横波を受ける船体横揺れ映像を 3 分間見て, 続く 1 分間を着席・閉眼して休息する。そして, 各実験間には動揺感に対する主観値を評価する。さらに, 一定の水平視野角における 16 回の全実験終了後に主観コメントを報告する。

ここでいう「動揺感」とは, 被験者が周囲の環境は動揺しているとの主観的認識を持つ状態として定義する。

〈3・3・1〉 主 観 値 主観による動揺感に対する評価を「動揺を全く感じない」の第 0 段階から「動揺を著しく感じる」の第 5 段階の範囲で 0.5 単位のクラス値 (主観値) により評価を行う。

〈3・3・2〉 主観コメント 各波高毎に対する汗ばみや船酔い感の自覚症状および映像の印象等について詳細な主観評価を口頭で行う。

4. 解析結果

各水平視野角の映像による船体横揺れ実験に関して得られたデータの解析結果を順に示す。ここで取り扱う総軌跡長比および動揺方向係数に関しては, 水平視野角 210° という限定された視野角において, 船体傾斜角と総軌跡長および動揺方向係数に対して回帰近似可能な傾向がある⁽²⁾⁽¹⁶⁾ことから, 各水平視野角について各指標値の変動傾向を調べるために回帰直線の傾きを求める手法を用いる。

図 5 重心動揺の測定結果の一例 (被験者 A)

Fig. 5. Examples of displaced gravity center (Subject A).

〈4・1〉 重心動揺 重心動揺の測定結果のうち, 乗船経験年数が卓越している経験者 A を対象とした重心動揺測定結果を一例として図 5 に示す。図 5 の左縦列に示す 4 種類のグラフは, 波高 0 メートル時の各水平視野角における重心動揺結果である。同様に中央縦列には波高 4 メートル時, 右縦列には波高 8 メートル時の各水平視野角における重心動揺の結果である。

図 5 に示す各グラフより明らかなことは, 波高が高くなるにつれ重心動揺量が増加することである。また, 重心動揺方向は水平視野角が 150° , 210° の広視野では船体傾斜方向である身体左右方向に偏り, 水平視野角 30° , 90° の狭視野では身体前後方向に偏る。これと同様の各水平視野角における重心動揺方向の偏り傾向は, 全被験者 6 人中 4 人 (経験者 B, C および未経験者 f) に生じた。

〈4・1・1〉 総軌跡長比 各水平視野角に対する船体傾斜角と総軌跡長比の関係を, 経験者 A および未経験者 d の処理結果を群の代表として図 6 に示す。

図 6 の左グラフより, 経験者 A は各水平視野角の波高 4 メートルにおいて総軌跡長比の最大値をもつことがわかる。同図右グラフに示す未経験者 d の結果からは, 特定の波高に対して総軌跡長比の最大値をもつ傾向はない。この傾向は, 経験者群および未経験者群に対してそれぞれ同傾向であった。また, 経験者 A はすべての船体傾斜角において,

図6 船体傾斜角と総軌跡長比の関係

Fig. 6. Relationship between rolling angle and ratio of locus length (Subject A and Subject d).

表2 船体傾斜角と総軌跡長比の回帰直線の傾き (a_l)

Table 2. a_l values of regression line between rolling angle and ratio of locus length.

	210°	150°	90°	30°
A	0.020	0.010	0.006	0.001
B	0.040	0.030	0.027	0.009
C	0.026	-0.010	0.007	0.016
d	0.013	-0.014	0.031	-0.002
e	0.029	0.017	0.007	0.007
f	0.230	0.170	0.180	0.160

水平視野角 210° の総軌跡長比の値が水平視野角 30° の総軌跡長比の値より大きいことがわかる。

次に、各被験者の各水平視野角における総軌跡長比の船体傾斜角に対する変動傾向を調べるために、回帰直線 ($y = a_l \times x + b_l$) を求めた。求めた回帰直線の傾き (a_l) を表 2 に示す。

表 2 から、経験者 A, B には、

$$a_{l210^\circ} > a_{l150^\circ} > a_{l90^\circ} > a_{l30^\circ}$$

の関係があるが、未経験者群ではその関係は成立しない。

〈4・1・2〉 動揺方向係数 各水平視野角に対する船体傾斜角と動揺方向係数の関係について、経験者 A および未経験者 d の結果を図 7 に示す。

図 7 左グラフから、経験者 A は水平視野角が 210° および 150° の広視野の場合、船体傾斜角が増加するに従い、重心動揺は船体傾斜の方向に誘導され、結果として身体左右方向に長軸をとる楕円形状に重心が動揺する。一方、同図右グラフに示す未経験者 d の重心動揺方向は水平視野角の大きさや船体傾斜角の増減に関係せず、ほぼ身体前後方向に長軸をとる楕円形状に動揺する。これらの傾向は、経験者群では同傾向であり、船酔いし易い未経験者 f を除く未経験者群でも同傾向であった。

次に、各被験者の各水平視野角における動揺方向係数の船体傾斜角に対する変動傾向を調べるために、回帰直線 ($y = a_r \times x + b_r$) を求めた。表 3 にその傾き (a_r) を示す。

表 3 から、経験者 A は水平視野角 210°, 150° で負の傾き、90°, 30° で正の傾きを示す。

図7 船体傾斜角と動揺方向係数 (r) の関係

Fig. 7. Relationship between rolling angle and coefficients of displaced direction (Subject A and Subject d).

表3 船体傾斜角と動揺方向係数の回帰直線の傾き (a_r)

Table 3. a_r values of regression line between rolling angle and coefficients of displaced direction.

	210°	150°	90°	30°
A	-1.34	-1.13	0.66	1.28
B	-1.69	-2.02	-0.88	0.11
C	-0.32	-0.12	-0.14	-0.47
d	-0.35	-0.17	-0.28	0.74
e	-0.80	-0.08	0.47	0.68
f	-1.82	-1.43	-1.18	-0.81

図8 船体傾斜角と R-R 間隔の平均 (μ_{RR}) の関係

Fig. 8. Relationship between rolling angle and average of R-R interval (Subject A and Subject d).

〈4・2〉 R-R 間隔

〈4・2・1〉 平均 図 8 に各水平視野角に対する船体傾斜角と R-R 間隔の平均値の関係について、経験者 A および未経験者 d の結果を示す。

図 8 左グラフから、経験者 A は水平視野角 210°, 150° の値が 90°, 30° の値より小さくなっているが、同図右グラフの未経験者 d は水平視野角 210°, 150° の値は 90°, 30° の値より大きくなっている。経験者 B, C および未経験者 e, f の R-R 間隔の大小関係は水平視野角 210° および 30° に対してそれぞれ同傾向であった。

〈4・2・2〉 変動係数 身体応答と生理応答の相関を調べるために、総軌跡長 (L) と変動係数 (γ) の相関係数を求めた。表 4 にその結果を示す。

表 4 総軌跡長 (L) と変動係数 (γ) の相関

Table 4. Correlation coefficient between L and γ.

	210°	150°	90°	30°
A	0.78	-0.19	-0.45	0.45
B	0.62	0.67	0.50	0.60
C	0.76	0.87	0.88	0.75
d	0.65	-0.20	-0.54	0.12
e	0.47	0.56	-0.01	0.45
f	-0.23	0.37	0.62	-0.12

図 9 船体傾斜角と主観値の関係

Fig.9. Relationship between rolling angle and subjective value for ship rolling (Subject A and Subject d).

表 4 から、水平視野角が 210° の場合、経験者群では正の相関がある。

〈4・3〉 主 観

〈4・3・1〉 主 観 値 図 9 に各水平視野角に対する船体傾斜角と主観値の関係について、経験者 A および未経験者 d の結果を示す。

図 9 左グラフから、経験者 A は水平視野角別に動揺感に対する主観値は広く分布するが、同図右グラフの未経験者 d は各船体傾斜角における主観値が密集する傾向がある。この傾向は、経験者群と未経験者群に対してそれぞれ同傾向であった。

〈4・3・2〉 主観コメント 経験者 A は、図 9 左グラフ中 * 印 (波高 5 メートル) において、「船体横揺れ映像が実船経験から培われた実際の船体動揺のイメージに対して違和感がある。」「映像の揺れによる船体傾斜は感じる。」と主観コメントとして報告した。また、経験者 B、C も報告時機は異なるが、映像による船体横揺れに対する違和感を報告した。一方、被験者 d は船体横揺れ映像の現実感に違和感を感じたという評価はなく未経験者 e、f も同様であった。

5. 考 察

〈5・1〉 重心動揺

〈5・1・1〉 総軌跡長 経験者 A に代表される経験者群は、各水平視野角の重心動揺測定結果より総軌跡長に最大値をもつ波高が存在する。一方、図 9 の主観コメントから、最大値をもつ波高時の観測後、より高い波高時の映像による船体横揺れに違和感があると報告している。この映像に対する違和感は、映像による船体横傾斜角と重心動揺の総

軌跡長とのそれまでの比例関係が崩れる原因として揚げることができる。この現象は、映像が提供する模擬現実に対する違和感が身体応答を抑制したことを示している。換言すれば、この結果は被験者に何らかの刺激が与えられ意識的な認識が生じた場合、その影響が映像による操船環境から受ける身体・生理応答に作用することを示唆しているともいえる。

この結果は、シミュレータの提供する空領域・船首領域・海領域映像の現実再現度合いを、経験者群の重心動揺の総軌跡長を測定することにより評価することが可能であることを支持している。

〈5・1・2〉 動揺方向係数 経験者 A の総軌跡長比の解析結果から、経験者 A は映像に違和感を持った後、総軌跡長比の値は船体傾斜角に比例して増加しなくなる。一方、水平視野角が 210°、150° と広視野の場合、動揺方向係数は船体傾斜角が大きくなると ($r_{210^\circ}, r_{150^\circ}$) < 45 の値をとり、船体傾斜方向に誘導され、映像に違和感をもちながらも映像の影響を身体的に大きく受けている。これは、波高と船体傾斜角の関係に違和感を持った後も、広視野の映像の提供があれば現実再現度合いが大きいことを意味している。この現象は、外界からのより強い刺激に対して身体応答をするという一般的な人間の特性に合致したものであり、現実再現度合いの高いシミュレータを設計する上で、より強い刺激を提供する広視野の水平視野角画面が有効であることを意味している。

また、広視野の水平視野角画面をもつシミュレータを用いることにより、船体傾斜角に対する r 値の変動傾向を測定することにより被験者を経験者と未経験者に分類できる可能性がある。

〈5・2〉 R-R 間隔

〈5・2・1〉 平 均 R-R 間隔 平均値について、経験者 A と未経験者 d には、それぞれ、

経験者 A : ($\mu_{RR210^\circ}, \mu_{RR150^\circ}$) < ($\mu_{RR90^\circ}, \mu_{RR30^\circ}$)

未経験者 d : ($\mu_{RR210^\circ}, \mu_{RR150^\circ}$) > ($\mu_{RR90^\circ}, \mu_{RR30^\circ}$)

の関係がある。経験者群と未経験者群においても経験者 A と未経験者 d の R-R 間隔平均値の各視野角における大小関係とはほぼ同様の傾向を生じたことは、広視野と狭視野における船体横揺れ実験の R-R 間隔の測定が、経験者と未経験者を定量的に分類できる一手法であることを示している。

〈5・2・2〉 変動係数 総軌跡長 (L) と変動係数 (γ) の相関関係について、水平視野角が 210° の場合、経験者群は正の相関をもつことから、広視野のシミュレータ映像の現実感、身体・生理の両面に顕著な応答を与え、現実再現度合いが大きいと考えられる。

〈5・3〉 主 観 主観評価について、主観値および主観コメント単独では、評価基準として充分ではないが、総軌跡長、動揺方向係数および R-R 間隔等の身体・生理指標と合わせて評価することにより重要な評価基準となりうる。

〈5・3・1〉 主 観 値 経験者 A について、主観値と総軌跡長比の特徴を比較すると、主観値は船体傾斜角に比例

して増加する。しかし、総軌跡長比は主観コメントが示す映像の違和感の生起により、その比例関係が崩れて最大値をもつ。つまり、主観値単独では図6の総軌跡長比の結果が示す特徴を定量的に説明することはできない。つまり、シミュレータの映像およびシナリオの現実再現度合いを主観値により評価する手法はその妥当性を保証することはできないといえる。

〈5・3・2〉主観コメント 主観値のように主観を数値化して評価することに加え、詳細な主観コメントを収集することは客観的な定量的評価を実現することは不可能であるが、他の評価指標を用いて行う定量的評価をより確かなものにするための一つの有効な手段にはなりうる。即ち、身体・生理応答に対する生理指標の値をバックグラウンドで支持することができる有用なデータとなる。主観評価は、重心動揺やR-R間隔等のより客観的な身体・生理指標評価と同時にを行うことにより、その効力を発揮する可能性がある。

6. おわりに

本研究では、4種類の水平視野角（210°, 150°, 90°および30°）に対して、映像により模擬した船体横傾斜が被験者に与える身体的、生理的影響を重心動揺およびR-R間隔を用いて定量的に評価し、水平視野角別、乗船経験の有無による特徴について検討した。そして、シミュレータの水平視野角の大きさは現実再現度合いに大きく影響しており、それに対する教育・訓練対象者の身体的、生理的影響はシミュレータによる教育・訓練効果を高めるためにも欠かせない。

さらに、経験者群と未経験者群の間で身体・生理応答の特徴が異なることが明らかとなり、身体的、生理的応答を測定することにより、乗船経験量を定量的に評価することが可能であることを解明した。本論で検討した評価指標を用いることにより教育・訓練効果を評価するための一手法ともなりえる可能性も見出されたと考える。

今後、さらに経験年数別のデータを系統的に収集したり、今回得られたデータを詳細に検討していく必要がある。それにより、シミュレータの現実再現度合いをより精度良く評価できたり、教育・訓練効果をよりの確に評価できるものとする。また一歩進んで、操船判断が生じた場合に本論で提案した評価指標がどのような振る舞いをするかについて観測することにより、操船者の作業に対する精神的負荷を定量的に評価することが実現する可能性がある。このようなアプローチにより、より現実再現度合いの高いシミュレータの開発とより適切なシミュレータ教育・訓練の実現に向けて研究を進めていきたい。

最後に、本論文に協力していただいた神戸商船大学商船学部桑原和洋氏、大阪大学基礎工学部瀬井裕子氏、神戸商船大学航海学研究室および大阪大学大学院基礎工学研究科井口研究室の諸氏に厚くお礼申し上げます。また、大洋電機株式会社小石吉人氏、大谷哲也氏、ノルコントロール社Mr. Terje Heierstad, Ms. Berit Fredheim, エイコーサ

イエンス社古藤田誠一氏に謝意を表します。

(平成13年12月25日受付, 同14年8月19日再受付)

文 献

- (1) 操船シミュレータ研究会:「航行安全とシミュレーター 21世紀へのシミュレータの活用」, 第2回操船シミュレータ・シンポジウムテキスト, 日本航海学会操船シミュレータ研究会(2000-12)
- (2) K.Murai and Y.Miyoshi: "Basic Study on the Relationship between Visual Perception and the Response of the Body using Simulator", *Journal of Japan Institute of Navigation (JIN)*, Vol.103, pp.167-173 (2000-9) (in Japanese)
村井康二・三好雄一:「シミュレーターによる視覚と身体応答の関係に関する基礎研究—Rollingの模擬と身体応答—」, 日本航海学会論文集, **103**, pp.167-173 (2000-9)
- (3) N.Kimura and R.Kawashima: "Fundamental Study for Human Dynamic Responses to the Motion of Fishing Vessels in Ocean Waves -I", *Journal of JIN*, Vol.69, pp.67-75 (1983-9) (in Japanese)
木村暢夫・川島利兵衛:「船体運動と人体の応答に関する基礎研究-I」, 日本航海学会論文集, **69**, pp.67-75 (1983-9)
- (4) 加藤象二郎・大久保亮夫:「初学者のための生体機能の測り方」, pp.87-93, 日本出版サービス(1999)
- (5) H.Tanihara: "Strategy for the Treatment of Glaucoma", pp.40-43, Igaku-Shoin (1997) (in Japanese)
谷原秀信:「緑内障の治療戦略」, pp.40-43, 医学書院(1997)
- (6) 日科技連官能検査委員会編:「新版官能検査ハンドブック」, pp.578-596, 日科技連(1973)
- (7) 佐藤 信:「官能検査入門」, pp.153-166, 日科技連(1979)
- (8) 畑田豊彦・坂田晴夫・日下秀夫:「画面サイズによる方向感覚誘導効果—大画面による臨場感の基礎実験—」, *テレビジョン学会誌*, **33**, 5, pp.407-413 (1979-5)
- (9) T.shimizu and S.Yano: "Induced Effects to the Body Sway by the Synchronous Presentation of a Visual Wide-Field Stimulus with an Auditory Stimulus", *Trans. IEICE*, Vol.J83-A, No.7, pp.912-919 (2000-7) (in Japanese)
清水俊宏・矢野澄男:「広視野視覚刺激と聴覚刺激の同期提示による重心動揺への誘導効果」, 電子情報通信学会論文誌A, **J83-A**, 7, pp.912-919 (2000-7)
- (10) T.Takeda and T.Kaneko: "Effect of Body Sway by Using Visual Wide-Field Images", *J. Institute of Television Engineers*, Vol.50, No.12, pp.1935-1940 (1996-12) (in Japanese)
竹田 仰・金子照之:「広視野映像が重心動揺に及ぼす影響」, *テレビジョン学会誌*, **50**, 12, pp.1935-1940 (1996-12)
- (11) K.Takano, K.Yoshino, and A.Nagasaka: "Basic Research on Measurement of Mental Work Load Utilizing Physiological Information", *J. Ind. Health*, Vol.32, pp.105-117 (1990) (in Japanese)
高野研一・吉野賢治・長坂彰彦:「生体情報を利用した精神作業負荷の評価に関する基礎的研究」, 産業医学, **32**, pp.105-117 (1990)
- (12) K.Takahashi, M.Miyamoto, Y.Mizutani, H.Kikuchi, R.Hayashi, K.Hayashi, Y.Fujiki, and T.Takahashi: "An evaluation of physiologic stress in driving under carnavigation system", *Proc. of the 11th Symposium on Human Interface*, pp.241-247 (1995) (in Japanese)
高橋克明・宮本昌昭・水谷泰陽・菊地 浩・林 ルミ子・林 孝平・藤本幸雄・高橋示人:「カーナビゲーションを使用した自動車運転時のストレス評価」, 第11回ヒューマンインターフェースシンポジウム, pp.241-247 (1995)
- (13) M.Ohsuga, H.Terashita, and F.Shimono: "Towards the assessment of Mental Workload Using Automatic Indices", *Trans. SICE*, Vol.29, No.8, pp.979-986 (1993-8) (in Japanese)
大須賀美恵子・寺下裕美・下野大海:「自律系生理指標を用いたメンタルワークロードの評価に向けて」, 計測自動制御学会論文集, **29**, 8, pp.979-986 (1993-8)
- (14) F.Shimono, M.Ohsuga, K.Ishikawa, H.Genno, Y.Oda, Y.Nishio, and T.Ohya: "Assessment of Mental Work Stress under the Variety of Environment using Heart Rate, Respiration and Blood Pressure", *Proc. of the 13th symposium on Biological and Physiological Engineering*, pp.381-384 (1998) (in Japanese)
下野大海・大須賀美恵子・石川恵子・源野広和・織田弥生・西尾恭幸・大矢高司:「心拍呼吸・血圧を用いた種々の環境下における作

- 業ストレスの評価」, 第 13 回生体生理工学シンポジウム論文集, pp.381-384 (1998)
- (15) M.Moyoshi, K.Yokoyama, T.Yoshioka, Y.Watanabe, and K.Takata: "Analysis of R-R Interval Time Series of Automobile Long-Distance Drivers", *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE)*, Vol.27, No.3, pp.107-112 (1996-3) (in Japanese)
茂吉雅典・横山清子・吉岡貴芳・渡辺興作・高田和之:「高速道路の長時間運転における心電図 R-R 間隔時系列の経時変化」, 自動車技術会論文集, 27, 3, pp.107-112 (1996-3)
- (16) K.Murai, Y.Hayashi, Y.Sei, and S.Inokuchi: "On the Relationship between Horizontal Angle of Visual Field and it's Reality by Ship Handling Simulator", *Journal of JIN*, Vol.106, pp.131-138 (2002-3) (in Japanese)
村井康二・林 祐司・瀬井裕子・井口征士:「操船シミュレータの水平視野角と現実感の関係ー重心動揺と鼻部皮膚温の計測ー」, 日本航海学会論文集, 106, pp.131-138 (2002-3)

村 井 康 二 (正員) 1969 年生。1992 年神戸商船大学商船学部航海学科卒業。1993 年神戸商船大学乗船実習科航海課程修了。1995 年神戸商船大学大学院商船学研究科修士課程航海学専攻修了。1995 年同大学商船学部助手。主として舶用レーダ信号処理, 操船者の生体情報処理, シミュレータに関する研究に従事。日本航海学会, 米国航海学会, 英国航海学会, 電気学会, IEEE 各会員。

林 祐 司 (正員) 1953 年生。1989 年神戸商船大学大学院修士課程修了。1989 年同大学商船学部助手。1992 年同助教授。現在に至る。主として航海情報のデータベース化と検索に関する研究に従事。日本航海学会, 英国航海学会, 電気学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。博士 (工学)

井 口 征 士 (非会員) 1962 年大阪大学工学部電気工学科卒業。64 年同大学院修士課程修了。65 年同大学基礎工学部助手, 69 年助教授, 1984 年教授 (現大学院基礎工学研究科システム人間系)。パターン計測, 画像処理, 感性情報処理の研究に従事。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE Computer Society 各会員。工学博士