シミュレータ映像による身体動揺

村井康二*・林 祐司*・内藤晴嗣**・井口征士***

A Study on Operator's Body Sway in Visual Simulation of Ship Handling Simulator

Koji MURAI, Yuji HAYASHI, Harutsugu NAITOH
and Seiji INOKUCHI

Abstract

Ship's Navigator gets diverse information from the ship and her environment for safe and efficient navigation, and visual information is the most important information source. Simulator is used to do some education and training of ship handling, and navigational environment simulate using visual simulator.

We have advanced an analysis of unconscious subjects' body response to visual simulation of the simulator, in case of 210 and 150 degrees' horizontal angles, gravity of body center was led toward a picture by the recognition of visual rolling. However, the subjects were only experienced persons (or navigators), and it is not carried out to do about inexperienced persons.

In this study, we use the moving of gravity that body response was obvious in our index. And, we carried out the experiment to seven subjects (four experienced persons and three inexperienced persons), four kinds of horizontal visual field (210, 150, 90, 30 degrees) and nine kinds of inclination of rolling (from 0.0 to 20.1 degrees). We show characteristics of the subjects who are the persons easy to get seasick, experienced persons and inexperienced persons.

1. はじめに

操船者は、安全な航海を実現するために視覚からの情報を主に用いて、船舶周辺の航海環境から多くの航海情報を獲得していると考えられる。そして著者らは、今日頻繁に活用されている操船シミュレータ（以下、シミュレータと呼ぶ。）の模擬する航海環境である映像が無意識レベルで操船者に与える身体的、生理的影響に注目し、水平視野角（210度、150度、90度）の大きさ別に、映像により模擬したRollingに対する身体応答についての解析を、重心動揺、鼻部皮膚温、R-R間隔等の生理指標を用いることで進めてきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

その結果、水平視野角が広視野の場合、視覚的な

船体横傾斜の認識により、身体重心は映像の傾斜方向に誘導され、その特徴量は重心動揺の変化に対して顕著であることが明らかになった。しかし、前回の実験では、被験者が乗船経験者（以下、経験者と呼ぶ。）のみであり、乗船未経験者（以下、未経験者と呼ぶ。）についての検討、比較は行われていない。経験者、未経験者別にそれぞれ身体応答の差異が定量的に評価できる可能性が見出せれば、経験により培われる感性⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾を無意識レベルの身体応答から定量的、客観的に評価できる可能性があると考えられる。また、船舶に対する身体動揺の解析は船酔い、乗り心地および船体運動に対する人体応答を対象とした研究⁽⁸⁾⁻⁽¹²⁾が行われているが、シミュレータ映像に対する身体動揺に関する研究は見られない。

* 正 会 員 神戸商船大学商船学部（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1）

** 学生会員 神戸商船大学大学院（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1）

***非 会 員 大阪大学大学院基礎工学研究科（〒560-8531 豊中市待兼山町1-3）

本研究では、著者らが用いてきた指標の中で、身体応答の特徴量が顕著であった重心動揺に注目する。そして、4種類の水平視野角(210度、150度、90度、30度)、9段階の船体横傾斜に対する船体横揺れ模擬実験を7名の被験者に対して前報⁽³⁾の実験装置および手順で行い、重心動揺の解析を行う。そして、経験者、未経験者および船酔いしやすい被験者に対して得られた特徴について報告する。

2. シミュレータ映像による船体横揺れ実験⁽³⁾

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った。被験者は経験者4名、未経験者3名の合計7名である。被験者の乗船経験年数、性別等を表1に示す。なお、被験者C、Eは「船酔いしやすい」と自己申告している。

船体横揺れの模擬はシミュレータ映像により行い、波高(0から8メートルの1メートル間隔)により9段階の横揺れ(Rolling)を発生させる。被験者は、シミュレータのスクリーン曲面の中心位置(映像計算基準位置)に置いた平衡機能測定装置の検査架台の上に船首方向に正対して立つ。そして、各波高に対して本船を真針路000度で航走させ、真方位090度から横波を受けるように状況設定されたシミュレータ映像を3分間注視し、続く1分間閉眼して休息する。そして、休息中に船体動揺の程度を「動揺を感じない:0」、「動揺を感じる:0.5~5」の11段階の主観値を用いて評価し、報告する。また、各水平視野角に対する一連の実験終了後には、さらに各波高の実験に対するシミュレータ映像への印象や、吐き気、汗ばみ等の詳細な主観評価をアンケート用紙により回答する。シミュレータ映像は、海域および雲量0の空域のみとし、陸域や物標等は表示しない。

表1 実験対象者

	A	B	C	D	E	F	G
性別	男	男	男	男	男	男	男
年齢	48	23	21	21	19	19	19
経験年数(年)	10	1	0.25	0.25	0	0	0

表2 設定波高と周波数、波長、最大船体横傾斜角の関係

波高[m]	1	2	3	4	5	6	7	8
周波数[Hz]	0.294	0.204	0.167	0.145	0.130	0.119	0.110	0.103
波長[m]	18.5	37.0	55.5	74.0	92.5	111.0	129.5	148.0
最大船体横傾斜角[deg]	0.1	0.8	3.2	6.1	7.8	11.0	16.9	20.1

い。また、眼高は8メートルで一定とする。各設定波高に対する周波数、波長、最大船体横傾斜角を表2に示す。

3. 身体動揺の解析

シミュレータの分野ではVR(Virtual Reality)やVE(Virtual Environment)に関係して映像が身体動揺に与える影響に関する研究^{(13)~(16)}が行われており、身体動揺に関する研究は広い分野で解析、評価が行われている。そして、これら諸研究の重心動揺に対する従来の解析手法は軌跡長、標準偏差や誘導角等を指標とし、被験者の全体的な傾向に注目した研究が多いと考えられる。しかしながら、著者らは経験者、未経験者の個人の特性を評価することを目的としていることから、個人が各指標値に対してもつ幅を規準化することにより、各被験者の特徴量を比較する必要がある。そこで、本研究では動揺幅比、横傾斜感度、正接角による偏りを指標として提案し解析を行う。さらに、重心動揺の周波数特性および主観値と総軌跡長の相関を求める。

重心動揺の計測は、平衡機能測定装置により被験者の身体前後方向(以下、身体y方向と呼ぶ。)および左右方向(以下、身体x方向と呼ぶ。)の重心位置データを0.1秒間隔でサンプリングし、計算機に収録する。以下に本研究で用いた解析方法を示す。なお、本研究でのサンプリング周期は、通常、身体の重心動揺が周波数によって、2Hz程度の比較的高周波な動きと、0.2~0.3Hz程度の低周波の動きに分けられると言われている⁽¹⁷⁾ことから、高周波成分である2Hz辺りまでの範囲を十分に識別できる0.1秒間隔とした。

(1) 重心動揺幅比

各波高別実験中の被験者の重心位置変動幅を身体動揺幅と定義し、身体x方向および身体y方向について、最大・最小値の差として算出する。そして、波高0メートルの身体動揺幅に対する比により重心動揺幅比として求める。この値を用いて、重心動揺の大きさを評価する。

(2) 横傾斜感度⁽¹⁾

(1)式で示すとおり、各波高別実験中に重心位置が移動した総軌跡長を最大船体横傾斜角で除し、その値を横傾斜感度と定義する。船体横傾斜が生じた場合に対する横傾斜角1度あたりの重心動揺の応答性を評価する。この横傾斜感度値が大きいほど横傾斜に対する身体応答の感度が高いとする。

$$\text{横傾斜感度} = \frac{\text{総軌跡長}}{\text{最大船体横傾斜角}} \quad (1)$$

総軌跡長 (L) は、0.1秒毎に重心位置が移動した距離を3分間積分した値で、(2)式により求める。

$$L = \sum_{i=0}^{1800} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (2)$$

ここで、 x_i は身体x方向の重心位置データ、 y_i は身体y方向の重心位置データを示す。

(3) 偏り (r)

被験者の重心動揺の身体x方向および身体y方向の標準偏差を計算し、その比(σ_y/σ_x)の正接角[deg]を求める ((3)式)。この値から、重心動揺方向の偏りの程度を評価する。

$$r = \tan^{-1} \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right) \quad (3)$$

偏りrの値と重心動揺方向の関係は次のようになる。

- ・ $r < 45$: 身体x方向に長軸をもつ楕円形。
- ・ $r = 45$: 円形。
- ・ $r > 45$: 身体y方向に長軸をもつ楕円形。

(4) 周波数解析

身体x方向および身体y方向の周波数成分をFFTにより計算する。そして、シミュレータ映像の船体横傾斜により誘導された被験者の重心動揺のピーク周波数を求める。この値から、船体横傾斜と重心動揺の周期性の関係を検討する。

(5) 主観値

主観値は、シミュレータ映像の船体横傾斜に対する動揺感⁽¹⁾⁽³⁾について、動揺を感じないが「0」、動揺を感じるが「0.5」から「5」までの数値として、0.5単位のレベルを設定し、全11段階の評価を被験者自らが行う。本研究では波高を0～8メートルの9段階変化させており、各波高に対して映像から受ける主観評価を9段階以上のレベルで判別可能とするために、5段階評価にさらに0.5単位のレベル設定を行っている。

4. 結果と考察

4種類の水平視野角、9段階の船体横傾斜に対する重心動揺について、前節の指標を用いた解析結果を示す。

4.1 重心動揺の測定結果

重心動揺の測定結果の一例として、乗船経験年数が最も長い被験者Aの場合を図1に示す。図1は、シミュレータ映像を視覚刺激として受ける3分間の身体x方向および身体y方向の重心動揺時系列データ

を各身体方向の平均値を0として水平視野角別、波高0、4、8メートルの場合についてそれぞれ示している。

図1より、水平視野角が広視野(210度、150度)で波高が4メートル、8メートルと高く船体横傾斜が大きくなると身体x方向へ周期的な重心動揺が生起していることがわかる。しかし、この周期的な重心動揺は水平視野角が90度の場合、視覚刺激を受けはじめた30秒程度にしか見られず、水平視野角が30度の場合では見られない。各実験条件に対する重心動揺は、動揺の「大きさ」とシミュレータ映像による船体横傾斜に誘導される重心動揺の「周期性」に特徴が見られると考えることができる。

4.2 重心動揺幅比

重心動揺の大きさについて、重心動揺がもっとも顕著な水平視野角210度の重心動揺幅比の結果を図2に示す。重心動揺の幅は、個人によりばらつきがあるため波高0メートルの動揺幅を、個人の開眼時における身体基本保持能力の大きさとして規格化している。ここで、本論文での身体基本保持能力とは、開眼時、視覚刺激として傾斜が無くかつ自然体の状態における重心動揺の大きさとする。

図2より、身体x方向の重心動揺幅比について、経験者は未経験者と比べ大きく、波高0メートルのときと比べ4～7倍の重心動揺が見られる。また、経験者は船体横傾斜角約6～11度で最大値をもつ特徴が見られる。この原因について、経験者は身体動揺幅比の最大値をもつ船体横傾斜角以降では、Rollingのみ

図1 重心動揺の測定結果

(被験者A、波高0、4、8メートル)

図2 船体傾斜角と重心動揺幅比の関係
(水平視野角210度)

の船体運動に対して「違和感がある」と主観評価しており、視覚刺激の影響を受けて重心動揺は生起するが、その動揺幅は船体横傾斜角の大きさに比例して増加することは無く、結果として身体応答である重心動揺は抑制されたと考える。一方、未経験者にはこのような特徴は見られない。また、身体y方向の重心動揺について、全被験者とも重心動揺幅比は3倍以内に収まっている。これらの結果より、重心動揺の特徴には経験者と未経験者の間に差異が見られ、その差異を定量的に評価できる可能性がある。

4.3 横傾斜感度

個人により重心動揺のばらつきに幅があることは、個人の身体基本保持能力が異なるために起こると考えられる。次に、横傾斜に対する感度能力の特性を見るために、前報⁽¹⁾で提案した指標である横傾斜感度により経験者、未経験者、船酔いしやすい者の横傾斜角1度あたりに対する重心動揺の応答特性について得られた結果を図3に示す。

図3より、船酔いしやすいと自己申告していた被験者Eを除いて、横傾斜感度の全体的な特性は類似しており、4種類の水平視野角に対して $y = a \times x^b$ で近似される。各水平視野角毎に、被験者6名の平均値を用いた近似式の各係数値と R^2 誤差を表3に示す。ここで、 R^2 誤差とは全体の分散に対する近似値の分散の割合を誤差率として1から引いた値であり、近似曲線のデータに対する当てはまりの度合いを表した決定係数(R^2 値)である。この値が1に近づくほど近似曲線の適合はよい。また、各船体傾斜角に対する横傾斜感度の値は、被験者Eを除く被験者6名の平均値に注目すると、水平視野角が大きくなるほど横傾斜感度の値は大きくなる。被験者Eについては、全ての横傾斜角に対して横傾斜感度が他の被験者のそれより卓越しており、水平視野角210度、150度では波高5メートルでピークをもち、他の被験者とは全く異なる特性を示す。主観評価からピークをもつ波高で、吐き気等の気分の悪化を申告しており

図3 船体傾斜角と横傾斜感度の関係

表3 近似式の各係数値と R^2 誤差

水平視野角	a	b	R^2 誤差
210°	9.59	- 0.91	0.99
150°	9.68	- 0.99	0.99
90°	8.46	- 0.95	0.99
30°	7.68	- 0.98	0.99

図4 船体傾斜角と重心動揺の偏りの関係
(被験者A、B、F、G)

顔色も悪く嘔吐をこらえる状態であった。

4.4 偏り

重心動揺の偏りについて、経験者(A、B)および未経験者(F、G)の結果を図4に示す。

図 5 a 重心動揺の周波数解析 (被験者A、水平視野角210度)

図 4 より、経験者は水平視野角210度および150度において船体傾斜が大きくなると身体x方向に偏った重心動揺を行う。この傾向は前報⁽³⁾の評価からも得られており、さらにそれらの結果に対する裏付けができたと考える。しかし、未経験者は、円形（偏り値：45）程度にまでしか船体傾斜方向への誘導を受けていない。換言すれば、未経験者は経験者ほどシミュレータ映像による船体横傾斜に対して、身体y方向の動揺の大きさに比べ身体x方向に誘導されないと言える。

4.2節と同様に経験による意識的な違和感が重心動揺に影響を与えたように、船橋から見る船体運動の経験の有無が、船体傾斜方向に生じる自己運動感覚の生起度合いに何らかの影響を与えている可能性があると考えられる。

4.5 周波数解析

4.1節の測定結果から、水平視野角210度および150度において船体傾斜角が大きくなると身体x方向の重心動揺に周期性が見られる。この周期性について、FFTにより周波数解析をおこなった結果を経験者(A)、未経験者(F) および船酔いしやすい被験者Eの水平視野角210度の場合について図 5 aから図 5 cにそれぞれ示す。図 5 a-5 cのスペクトルは全周波

数成分に対する各周波数成分の割合(%)で示している。

図 5 aより、波高が2メートルから船体横傾斜を制御するための各波高がもつ周波数周辺に重心動揺の周波数成分が現われることがわかる。図中に矢印および周波数を示す。この結果から、シミュレータ映像による船体横傾斜により誘導される重心動揺は、船体横傾斜に同調する傾向があることがわかる。また、波高0メートルの場合には身体x方向および身体y方向の周波数成分は類似しており、一定の動揺で身体の直立を維持していることがわかる。そして傾斜が起るとこの特徴は見られなくなる。これらの傾向は、図 5 b、図 5 cにも見られ経験者、未経験者、船酔いしやすい等に関係なく全被験者について見られる。

4.6 主観値

各波高に対する船体横傾斜のシミュレータ映像から得た視覚的な動揺感に対する主観値の結果を被験者A、Fについて図 6 に示す。

図 6 より、被験者Aは被験者Fと比べ水平視野角の大きさに対して、主観値の差が明確であることがわかる。そして、この傾向は経験者と未経験者の特徴として見られる。

図5b 重心動揺の周波数解析 (被験者F、水平視野角210度)

図5c 重心動揺の周波数解析 (被験者E、水平視野角210度)

図6 船体傾斜角と主観値の関係（被験者A, F）

表4 主観値と総軌跡長の相関係数

水平視野角	A	B	C	D	E	F	G
210°	0.76	0.82	0.77	0.80	0.97	0.86	0.73
150°	0.72	0.67	-0.01	0.23	0.95	0.85	-0.58
90°	0.40	0.82	0.39	0.94	0.92	0.24	-0.48
30°	-0.17	0.78	0.69	0.76	0.96	0.59	0.08

次に、主観と身体応答の相関を見るために、主観値と総軌跡長の相関係数を求めた結果を表4に示す。

表4より、水平視野角210度に対して、全被験者に正の相関がある。また、船酔いしやすい被験者Eについては全ての水平視野角に対して強い正の相関が見られる。この結果から、顕著な身体応答に対する主観評価は、客観的評価としての妥当性を得ることができる可能性があると考えられる。

5. まとめ

本論文は、シミュレータ映像による9段階の船体横傾斜が、視覚から取り込まれた時の無意識レベルの身体応答として、重心動揺がどのように起こるかについての解析・検討を、4種類（210度、150度、90度、30度）の水平視野角に対して行った。そして以下のことが明らかになった。

- ・重心動揺は、水平視野角が個人の視野角を覆うような広視野の場合、映像の傾斜方向に誘導される。そして、その誘導による傾斜方向への偏りは経験者の方が未経験者より顕著である。
- ・誘導された重心動揺は、船体動揺周波数と同調した周波数成分をもつ。
- ・経験者は、重心動揺幅に顕著な最大値をもつが未経験者はもたない。
- ・横傾斜感度の特徴は、船酔いしやすい被験者を除いて同傾向を示す。
- ・水平視野角210度の場合、全被験者に対して主観値と重心動揺の総軌跡長に正の相関がある。

本研究によって、シミュレータ映像による船体横

傾斜が、経験者および未経験者の重心動揺に与える影響を定量的、客観的に評価できたと考える。また、シミュレータ映像によっても無意識レベルで重心動揺が生起し、その個人への影響は、船酔いしやすい者にとっては3分間で嘔吐症状の前兆が得られるほどであり、教育訓練に用いられる各種シミュレータのビジュアル効果を軽視できない。今後は、この身体応答、主観評価を十分に支持できる生理指標とその評価方法の確立を進めて行きたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり実験に協力していただいた神戸商船大学河口信義助教授、若林伸和助教授、井川晶裕技官、桑原和洋氏および神戸商船大学航海学研究室、大阪大学基礎工学部瀬井裕子氏に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 村井康二・三好雄一：シミュレータによる視覚と身体応答の関係に関する基礎研究，日本航海学会論文集，103号，pp.167-173（2000）。
- (2) Koji Murai and Yuji Hayashi：Occurred Seasick Impression and Analysis of the Observer's Heart Rate Variability by using Ship's Bridge Simulator, Proceedings of 2001 ICASE International Conference on Control, Automation and Systems, pp.1291-1295（2001）。
- (3) 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-重心動揺と鼻部皮膚温の計測-，日本航海学会論文集，106号，pp.131-138（2002）。
- (4) 井口征士 他5名：感性情報処理，pp.1-12，103-130，オーム社。
- (5) 行場次朗・箱田裕司：知性と感性の心理，pp.60-75，福村出版。
- (6) 八木昭宏：感性の物理計測，日本ファジィ学会誌，Vol.9，No.3，pp.318-326（1997）。
- (7) 元木紀雄・矢野澄男：3次元画像と人間の科学，8章，オーム社。
- (8) 花田力：動揺病の実態に関する研究，目耳鼻，Vol.69，No.5，pp.46-74（1966）。
- (9) 後藤大三：人体応答よりみた振動限界，日本造船学会誌，No.583，pp.10-21（1978）。
- (10) 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

号, pp. 67-75 (1983).

- (11) 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-III, 日本航海学会論文集, 71号, pp. 63-70 (1984).
- (12) 川崎潤二・天下井清・木村暢夫・甫喜本司：船体運動に対する人間の応答特性, 日本航海学会論文集, 87号, pp. 79-88 (1992).
- (13) 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, テレビジョン学会誌, Vol. 33, No. 5, pp. 407-413 (1979).
- (14) 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, Vol. J83-A, No. 7, pp. 912-919 (2000).
- (15) 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, Vol. 50, No. 12, pp. 1935-1940 (1996).
- (16) 元本紀雄・矢野澄男：3次元画像と人間の科学, 6章, オーム社.
- (17) De Wit, G.: The stabilometry as an auxiliary in investigations of patients with vestibular

disturbances, Agressologie, 14, pp. 27-31 (1973).

質 疑 応 答

世良 亘(神戸商船大学)：実験条件を波高により整理していますが、波周期、波と船との出会い周期が変化すれば、揺れの状態は、変化すると考えられます。他の条件とその影響について教えてください。

内藤晴嗣：ご質問ありがとうございます。シミュレータの船体横揺れ映像は、自船針路000度で航走中、右舷正横090度から波高により波周期を制御した横波を受ける状況で模擬しております。そして、本実験は自船のRolling周期を一定とするようにした状態で行いました。

久保雅義(神戸商船大学)：波高0メートルの時の動揺の意味は何でしょうか。

内藤晴嗣：ご質問ありがとうございます。波高0メートル時の動揺については、被験者が、横傾斜の無い状態における映像を見たときの重心動揺と考えています。そして、その値を各被験者がもつ重心動揺の基準値として取扱っています。