

旅客船の乗り心地評価のためのアンケート調査 (第1報)

— 船体運動と乗り心地・乗り物酔いの関連 —

学生員 田村裕貴* 正員 有馬正和*

A Questionnaire Survey for Evaluating Ride Comfort of a Passenger Ship (1st report)
- Relationship between ship motion and motion sickness -

by Yuuki Tamura, *Student Member* Masakazu Arima, *Member*

Summary

The authors carried out the experiment on ride comfort of a high-speed catamaran plying the Bay of Osaka, and proposed a new evaluating method with a 'ride comfort index' RCI, introducing the concept of Weber-Fechner's law. It was demonstrated that the resultant RCI combining effects of vertical and lateral acceleration could estimate well ride comfort of a high-speed craft. Another experiment has also conducted on board a car ferry running across the Tsugaru-Straits in North Japan. The purpose of this study is to verify the index by applying it to a conventional displacement-type car ferry, and to establish a method for evaluating ride quality of passenger ships. Ship motion was measured at the navigation bridge, and a questionnaire survey was carried out so as to obtain passengers' physiological and psychological responses. The first report deals with a questionnaire survey for revealing the relationship between ship motion and passengers' subjective evaluation of ride quality. Motion sickness was quantified by indices of 'illness rating' and 'symptom score'. Various kinds of consideration leads to the conclusion that the resultant RCI combining lateral and vertical motions can be a useful index for estimating ride quality of a displacement-type passenger ship as well.

1. 緒言

船舶の乗り心地を正しく推定・評価することは、旅客船の設計や運航計画において非常に重要な課題である。このため船舶工学分野では、長年に亘って、船舶の乗り心地評価手法の確立に向けたさまざまな取り組みがなされてきた¹⁾。そして、実験室における人体振動暴露実験や実海域での実船実験の結果、乗り物酔いを発症しやすい周波数領域が明らかとなり²⁾、現行の国際規格³⁾や日本工業規格⁴⁾では周波数荷重曲線を考慮した乗り心地の評価手法が提案されて、現在では実用化に至っている。この手法は、排水量型船舶をはじめホバークラフトや水中翼船などの膨大な実験データに基づいているが、支配的な船体運動が上下揺れであることから上下揺れ加速度のみに着目している。

近年、船舶の高速化が図られ、欧州を中心に数多くの高速船が運航されているが、高速船では流体力特性が従来の排水量型船舶とは異なるため、予想もしなかった運動特性が現れ、

波浪中で針路が不安定になりやすいとされている。このため、乗り心地の悪化や船上活動能力の低下が指摘されている。現在、国内では比較的小型の水中翼付高速双胴船が数多く就航しているが、その乗り心地の評価手法についてはこれまで十分な検討がなされてこなかった。そこで、著者らは、高速双胴旅客船における船体運動の計測および乗り心地の調査を行い、乗り心地の評価において左右揺れの影響が無視できないことを指摘するとともに、新しい乗り心地評価手法を提案した⁵⁾。しかしながら、本手法の構築に用いた実験データが、単一航路を就航する同一船舶によるものであることから、本手法の妥当性・有効性を明らかにするためには、さまざまな海域における複数船舶の実験データによる検証を必要としていた。

この度、東日本シッピング株式会社のご理解とご協力を得て、函館—青森航路を就航するカーフェリー『びいな』において乗り心地の調査をする機会に恵まれた。

本論文では、第1報として、排水量型カーフェリーの船体運動を解析し、アンケート調査から得られた乗客の乗り心地・乗り物酔いの発症程度との関連を調べた結果について述べる。そして、著者らが提案するRCI (Ride Comfort Index) による評価手法が、排水量型船舶の乗り心地評価においても有効であることを明らかにする。

* 大阪府立大学大学院工学研究科

2. カーフェリーにおける実船実験

2.1 カーフェリー『びいな』

『びいな』は、1987年に就航した2軸2舵の小型カーフェリーで、航行中に発見した浮遊物を容易に避けることができるほど操縦性に優れている。フェリー『びいな』の主要目と一般配置図をそれぞれ Table 1 と Fig.1 に示す。

Table 1 Principal particulars of the 'Vena'.

Ship's name	Vena
Gross Tonnage	2,290 ton
Length × Breadth × Depth	98.63 m × 17.20 m × 11.80 m
Draught loaded	4.66 m
Maximum number allowed on board	
Passenger :	456 passengers
Car :	35 lorries or 100 cars
Service speed	18.65 knot (34.5 km/h)

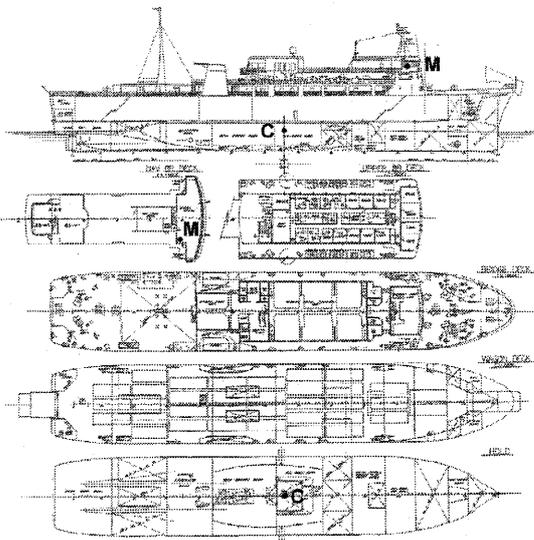


Fig.1 General arrangement of the 'Vena'. Ship motion was measured at the point M in the navigation bridge, and 6-degrees-of-freedom of motion at the point C was calculated for evaluating ride comfort.

2.2. 実船実験の概要

『びいな』は、函館港（北海道函館市）と青森港（青森県青森市）との間 113 km を 3 時間 50 分で結んでおり、毎日 2 往復 4 便が運航している。利用者は、地元住民や旅行者の外、道内の貨物を首都圏にまで運ぶトラック運転手が多い。

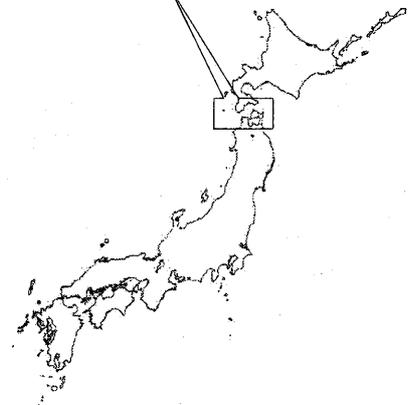
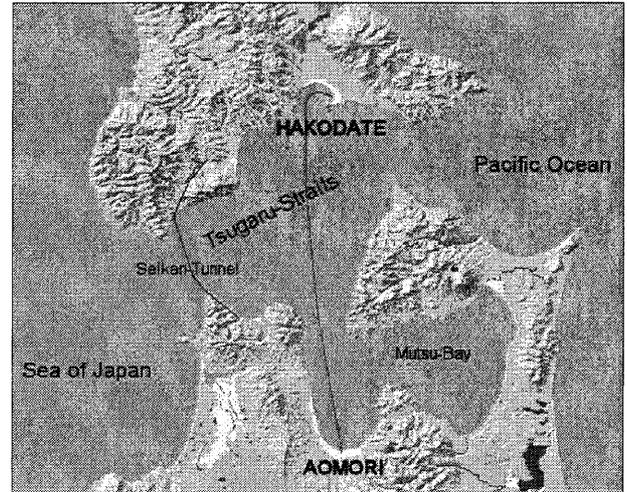


Fig.2 Seikan-line crossing the Tsugaru-Straits in North Japan.

乗り心地に関する実船実験は、平成 18 年 1 月 9 日から同年 2 月 26 日までの 195 航海において実施した。Fig.2 は、『びいな』の航路図であるが、津軽海峡を抜ける冬場の強い西風や波浪の影響をできるだけ抑えるよう状況に応じて最適な航路がとられている。

3. 船体運動の計測と解析

3.1 船体運動の計測

船体運動の計測は、Fig.1 中の点 M に示される航海船橋の右舷後方に設置された海図台の隅に 3 つのひずみゲージ式 3 軸/1 軸加速度計（共和電業 AS-2TG および AS-2GB）を Fig.3 のように固定して行った。アンチエイリアシング用ローパスフィルター（2 次の Butterworth 特性；振幅平坦特性）の遮断周波数を $f_c = 2.0$ [Hz]，サンプリング周波数を $f_s = 10.0$ [Hz] として、コンパクトレコーダー（共和電業 EDS-400A）のコンパクトフラッシュに記録した。

船体を剛体であると仮定すると、任意の位置における直線/角加速度は、次式によって近似的に求めることができる。

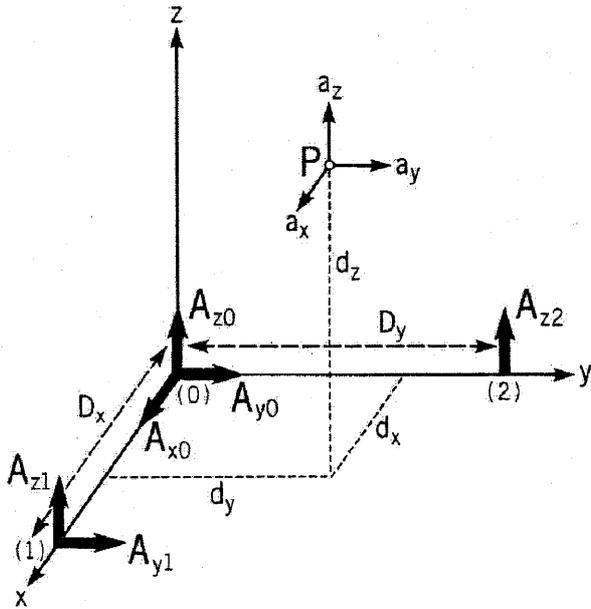


Fig.3 Accelerometer locations and orientations for calculating the six axes of motion at arbitrary point P⁶⁾.

角加速度は、船体上のすべての場所で同じになり、(1)~(3)式ようになる。

$$\text{roll} = a_{rx} \equiv \frac{A_{z2} - A_{z0}}{D_y} \quad (1)$$

$$\text{pitch} = a_{ry} \equiv \frac{A_{z0} - A_{z1}}{D_x} \quad (2)$$

$$\text{yaw} = a_{rz} \equiv \frac{A_{y1} - A_{y0}}{D_x} \quad (3)$$

また、任意の点 P(d_x, d_y, d_z)における直線加速度は、(4)~(6)式によって求められる。

$$a_x \equiv A_{x0} - \frac{d_z}{D_x}(A_{z1} - A_{z0}) - \frac{d_y}{D_x}(A_{y1} - A_{y0}) \quad (4)$$

$$a_y \equiv A_{y0} + \frac{d_x}{D_x}(A_{y1} - A_{y0}) - \frac{d_z}{D_y}(A_{z2} - A_{z0}) \quad (5)$$

$$a_z \equiv A_{z0} + \frac{d_x}{D_x}(A_{z1} - A_{z0}) + \frac{d_y}{D_y}(A_{z2} - A_{z0}) \quad (6)$$

(1)~(6)式は近似式であり、厳密に求めるためには9つの加速度計が必要となる⁷⁾。Lawther と Griffin は、荒れた海を想定し、位相を考慮しない複合正弦波による誤差の検討を行い、船首揺れの角加速度で5%未満、縦揺れと横揺れで2%未満、左右揺れと上下揺れの加速度で2%未満となるが、前後揺れでは20%になり得ると述べている⁸⁾。本論文の附録では、ストリップ法で求められた船体運動を用いて近似式による誤差についての検証を試みた。

3.2 船体運動の解析

航海ごとの船体運動の良し悪しを評価するために、前述の(1)~(6)式を用いて Fig.1 中の船体中央部の点 C における船体運動を求めた。得られた船体運動データの一例を Fig.4 に示す。左図は、平成 18 年 2 月 9 日 (木) の第 13 便における 10:50 から 120 秒間の前後揺れ・左右揺れ・上下揺れの加速度 [ms^{-2}] と横揺れ・縦揺れ・船首揺れの角加速度 [rad s^{-2}] である。図より、本船では、上下揺れ加速度だけでなく、大きな左右揺れ加速度がはたらいていることがわかる。ただし、船体に固定されたひずみゲージ式加速度計によって船体運動を計測しているため、横揺れ等の傾斜による重力加速度成分も含まれていることに注意を要する。また、右図は、同時刻から 1500 秒間のパワースペクトル密度関数 (PSD) を示している。上下揺れ加速度の周波数は、乗り物酔いの発症に大きく関与する 0.2 [Hz] 付近にピークがあり、これが排水量型船舶の典型的な特徴であると言われている。一方、左右揺れ加速度の周波数は、0.12 [Hz] 付近にピークを持ち、少なからず乗り心地に影響を与えたと考えられる。

次に、ISO 2631-1 等で定義される周波数荷重曲線 W_f を Fig.5 に示す。この周波数荷重曲線は、上下揺れ加速度に対して定義されたもので、現在、乗り心地や乗り物酔いの評価に広く用いられている。最近では、鉄道や自動車への適用を目指して、左右揺れや前後揺れに対する周波数荷重曲線を明らかにしようとする研究も進められている^{9,10)}が、まだ十分な数のデータがないために、一般に認められているとは言えないのが現状である。そこで、本研究では、現行の周波数荷重曲線 W_f を左右揺れにも適用して、船体運動の評価を行うこととした。この周波数荷重曲線は 0.2 [Hz] 付近にピークを持つため、同じく 0.2 [Hz] 付近にピークを持つ本船の上下揺れ加速度は減衰されずに評価される。一方、0.12 [Hz] 付近にピークを持つ左右揺れ加速度は、0.895 倍 (-0.96 dB) に減衰して評価されることになる。以下、周波数荷重後の加速度 a_w [m/s^2] を船体運動の解析・評価に用いることにした。

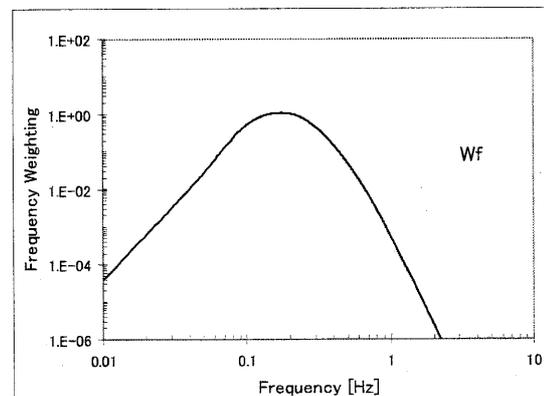
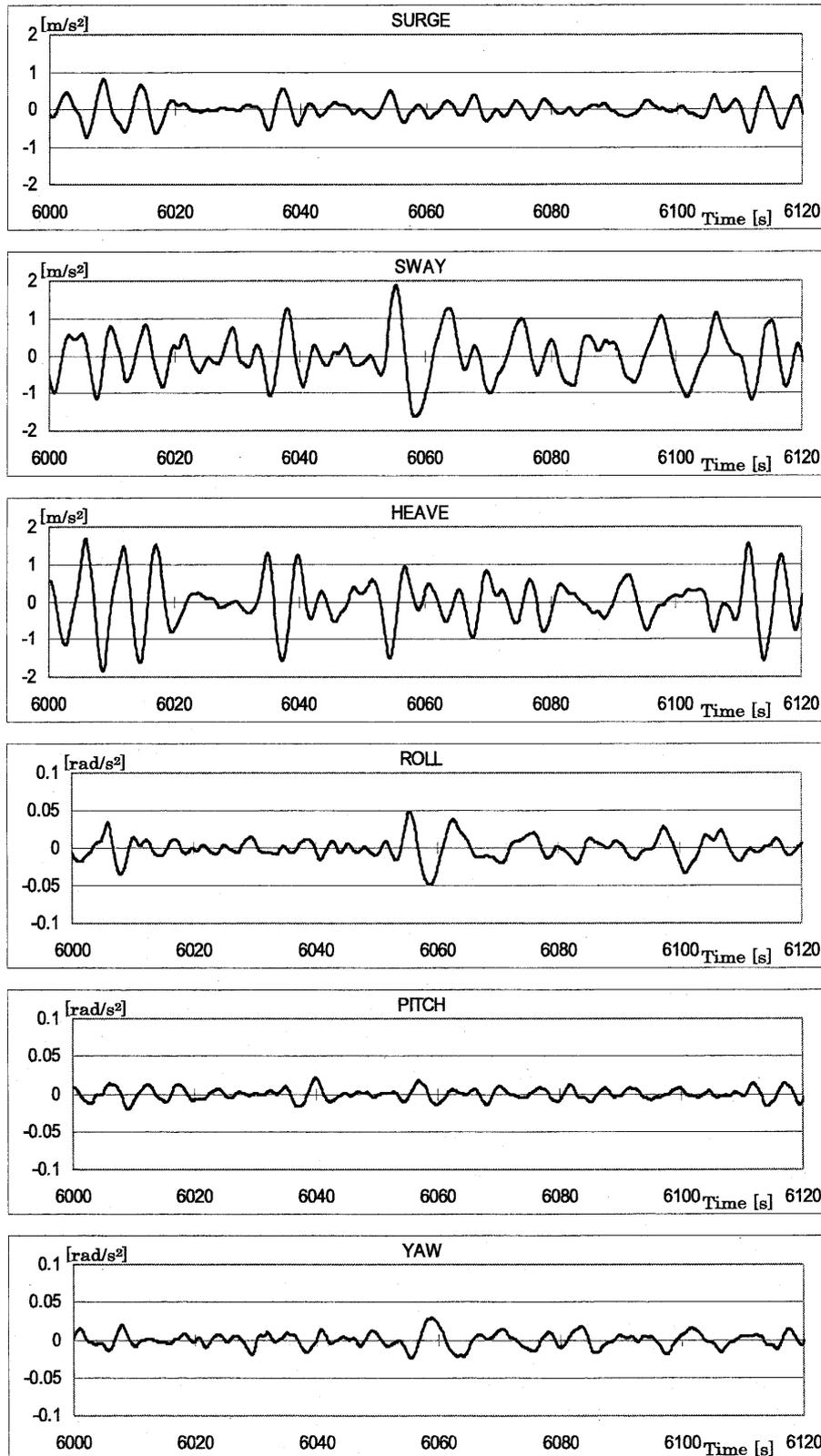


Fig.5 Frequency-weighting curve W_f defined in ISO 2631-1.

(a) acceleration time histories



(b) power spectral densities

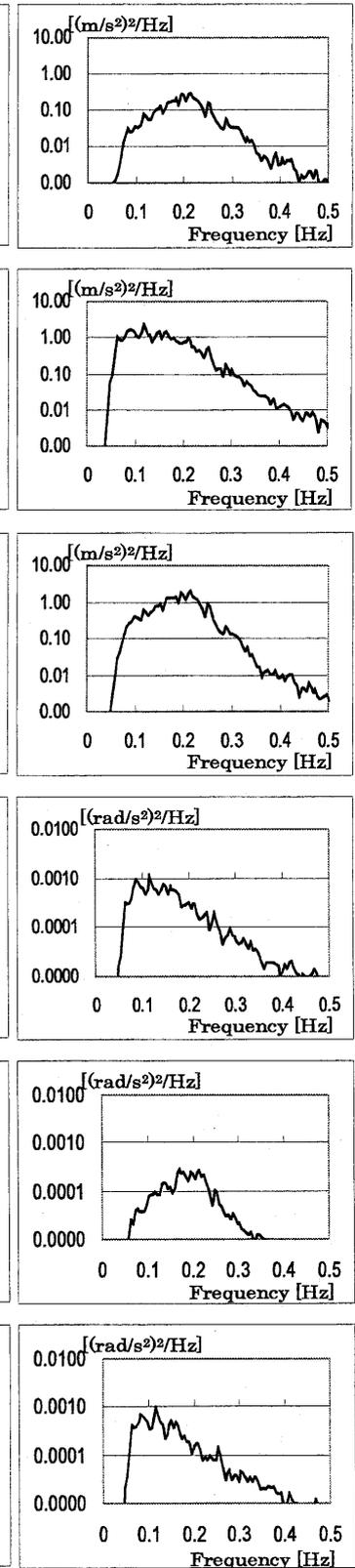


Fig.4 Acceleration time histories (a) and power spectral densities (b) for the six axes of motion of the 'Vena': frequency resolution 0.0049 Hz; duration 1500 seconds.

4. 乗り心地・乗り物酔いの解析と評価

4.1 アンケート調査の概要

フェリー『びいな』の乗り心地を評価するために、アンケート調査を実施した。アンケートの項目は、航海中の乗り心地/乗り物酔い発症の程度および自覚症状、発症時刻、薬物服用の有無、乗り物酔いの易罹患性、船の利用頻度等である。また、詳細な解析のために、船室内の居場所とそのときの姿勢についても記入してもらうことにした。

アンケート調査票の配付・回収は、『びいな』の乗組員の協力を得て実施することができた。アンケートの詳細な解析結果は第2報で述べるが、本報では、船体運動と乗客の乗り心地/乗り物酔いの発症との関連を明らかにするために、乗り物酔いの発症程度と自覚症状に係る項目を用いることにした。アンケート調査票の一部を Fig.6 に示す。

アンケートの回答者数は延べ 984 名で、便によって 0 名から 29 名であった。船体運動が正しく計測できなかった 16 航海とアンケートの回答が得られなかった便を除いて、162 航海の実験データを用いて解析・評価を行った。

■ この航海で体調の最も悪い状況は以下のどれですか？

全く何ともない

少し気分が悪い

気分が悪い

とても気分が悪い

■ この航海中に以下の身体的な変化がありましたか？ (いくつでも可)

体が暖かく感じた/発汗

頭痛

顔面蒼白などの顔色の変化

生つば

眠気

めまい

吐き気・乗り物酔い

嘔吐

ご協力をありがとうございました。

Fig.6 A part of questionnaire sheet, 'illness rating' and symptoms.

illness rating (I.R.)は、「全く何ともない」を0、「とても気分が悪い」を3として、0~3の数値で乗り心地を表すもので、乗り心地や乗り物酔いの発症程度を表す指標として国内外で広く用いられている。有効なアンケートの回答者数は、航海によってバラツキが見られたが、航海ごとに I.R.の平均値をとることによって、その航海の乗り心地を表すこととした。

また、乗客が自覚した乗り物酔いの症状に重み付けをして乗り物酔いの発症程度を定量的に表現するために、(7)式で表される Symptom Score (S.S.)¹⁾を導入した。乗客の S.S.を算出し、航海ごとの平均値を求めることによってその航海の良し悪しを評価することとした。

$$S.S. = \sum (hot \times 1) + (headache \times 1) + (pallor \times 2) + (salivation \times 2) + (drowsiness \times 2) + (dizziness \times 2) + (nausea \times 3) + (vomiting \times 4) \quad (7)$$

4.2 船体運動の評価

4.2.1 Motion Sickness Dose Value

ISO 2631-1の附録Dで提案されている Motion Sickness Dose Value (MSDV) [ms^{-1.5}]は、次式で定義されている。

$$MSDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} = a_w T^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

ここに、 a_w は周波数加重後の加速度[ms⁻²]で、 T は動揺暴露時間[s]である。そして、嘔吐率は、 $1/3 MSDV_z$ で予測できると言われている²⁾。ここに、添え字 Z は、上下揺れであることを表している。

航海ごとの $MSDV_z$ と illness rating との関係を図.7 に示す。図中の黒丸は、アンケートの回収率が 33.3%以上の航海で、白丸は 33.3%未満の航海を表している。長時間の航海では、何ら制約を受けない乗客が船内の同じ場所で同一姿勢を保ち同じ行動をし続けることは極めて少ないと考えられるので、乗り心地の良し悪しを評価する指標として航海ごとの I.R. や S.S.の平均値を用いることが妥当であると判断した。その際に、アンケート調査票の回収率が重要な意味を持つことになるので、本研究では、回収率が 33.3%以上のデータを有効なものとして線形近似式と相関係数 R を求めた。黒丸で表される有効データ数は 40 で、3~29 名の乗客の I.R.の平均値である。

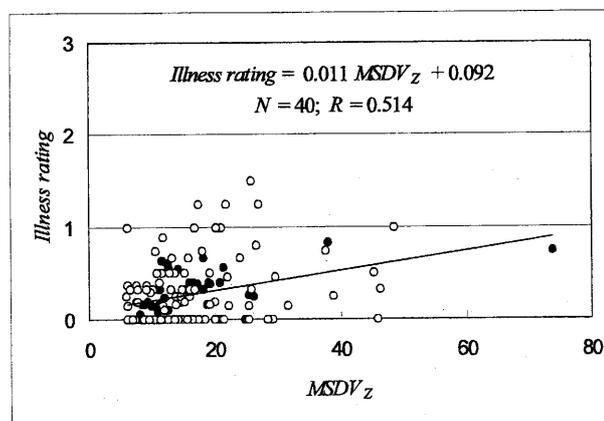


Fig.7 Relationship between $MSDV_z$ and illness rating.

次に、上下揺れと左右揺れの影響を複合的に考慮するために、次式のように左右揺れの $MSDV_Y$ と上下揺れの $MSDV_Z$ の root-sums-of-squares をとる $MSDV_{r.s.s.}$ ¹²⁾ を導入する。

$$MSDV_{r.s.s.} = \sqrt{MSDV_Y^2 + MSDV_Z^2} = \left\{ \int_0^T \left[[a_{y_w}(t)]^2 + [a_{z_w}(t)]^2 \right] dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

ここに、 $a_{y_w}(t)$ と $a_{z_w}(t)$ は、それぞれ周波数荷重をした左右揺れと上下揺れの加速度である。

$MSDV_{r.s.s.}$ と illness rating の関係を Fig.8 にプロットする。相関係数 R は、 $MSDV_Z$ のみの場合よりも若干高くなっていることがわかる。

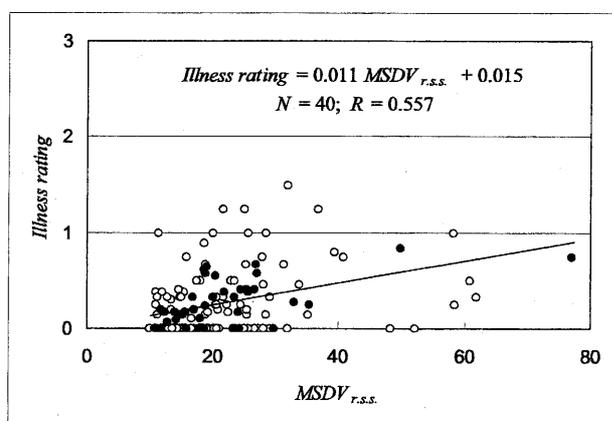


Fig.8 Relationship between $MSDV_{r.s.s.}$ and illness rating.

4.2.2 Ride Comfort Index

$MSDV$ は、刺激に対する人間の感覚強度が物理的な刺激強度の指数関数で表されるという「Stevens のべき法則」に基づいてモデル化されている。しかし、高速双胴船における実船実験の結果から、被験者の心理的反応がべき法則に当てはまらないということがわかったので、著者らは、刺激に対する心理的な感覚強度が物理的な刺激強度の対数に比例するという「Weber-Fechner の法則」を適用することにした。そして、次式で表される ride comfort index, RCI を提案して、高速双胴船の乗り心地評価に有効であることを示した⁵⁾。

$$RCI = \log_e \left[\int_0^T [a_w(t)]^2 dt + 1 \right] = \log_e [MSDV^2 + 1] \quad (10)$$

また、左右揺れと上下揺れの影響を複合的に考慮する指標として、次式の $RCI_{resultant}$ を提案している¹³⁾。

$$\begin{aligned} RCI_{resultant} &= \log_e \left[\int_0^T \left\{ [a_{y_w}(t)]^2 + [a_{z_w}(t)]^2 \right\} dt + 1 \right] \\ &= \log_e [MSDV_{r.s.s.}^2 + 1] \end{aligned} \quad (11)$$

Fig.9 は、 $RCI_{resultant}$ と illness rating との関係である。 $MSDV$ による評価と比べると、相関係数 R の値も高く、 $RCI_{resultant}$ が高速船だけでなく排水量型船舶の乗り心地評価にも有効であると判断することができる。

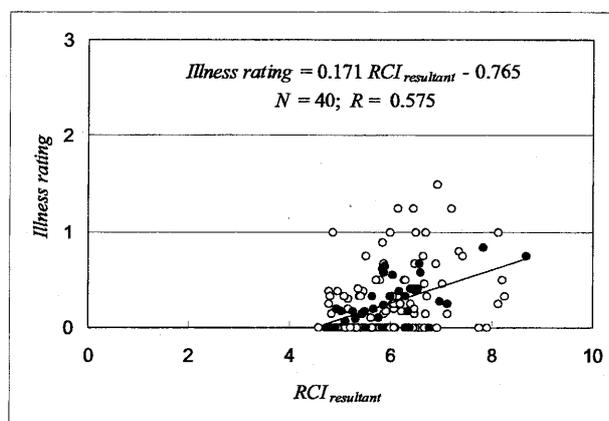


Fig.9 Relationship between $RCI_{resultant}$ and illness rating.

次に、 $RCI_{resultant}$ と Symptom Score との関係を Fig.10 に示す。相関係数は、 $MSDV_Z$ ($R = 0.239$) や $MSDV_{r.s.s.}$ ($R = 0.267$) の場合よりも高く、乗り物酔いの自覚症状から見た乗り物酔いの発症程度も $MSDV$ よりも $RCI_{resultant}$ による評価の方が良いという結果が得られた。

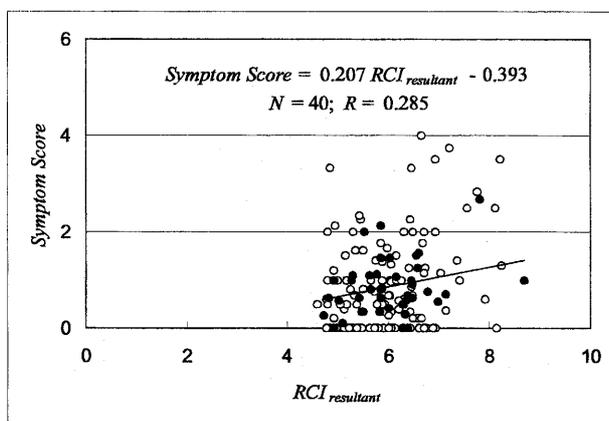


Fig.10 Relationship between $RCI_{resultant}$ and symptom score.

5. 結 言

旅客船の乗り心地評価手法を確立するために、青函航路を就航する小型カーフェリーにおいて船体運動の計測と乗客へのアンケートを通して乗り心地の調査を実施した。

排水量型船舶では上下揺れが支配的な動揺となるため、現行の国際規格 ISO 2631-1 では、船体の上下揺れ加速度に基づく評価手法が提案されている。本研究が対象とする

カーフェリーは排水量型船舶であるため、この国際規格による評価手法が適用可能であるが、実験で計測された船体運動を解析した結果、左右揺れ加速度も大きく、乗り心地の評価に少なからず影響を及ぼす可能性があることを明らかにした。冬場の津軽海峡では、強い西風や波浪による横揺れがあり、本船は浮遊物を避けるために頻繁な操舵が行われることから特に左右揺れの影響が大きいと考えられる。

そして、船体運動と乗り心地の関連を調べた結果、著者が提案する $RCI_{resultant}$ による評価手法は、従来の排水量型船舶に対しても有効であり、ISO 2631-1 で提案されている $MSDV_z$ や上下揺れと左右揺れとの複合的な影響を考慮するための $MSDV_{r.s.s.}$ による評価に比べてより正確な乗り心地の評価ができることを明らかにした。

今回の実験実験では、乗り物酔いを発症して嘔吐に至った乗客のうち、アンケート調査に協力を得られたのは数名にとどまり、嘔吐率の評価を試みる事ができなかった。また、有効なデータ数が統計的に十分であるとは言えないので、他の海域を就航する複数の船舶においてさらに実験を行い、より多くのデータを蓄積することによって、提案する乗り心地評価手法の妥当性、有効性を明らかにしたいと考えている。

謝 辞

本研究にご理解とご協力をいただいた東日本シップマネージメント株式会社 古閑信二 代表取締役をはじめ、関係各位に厚く御礼申し上げます。また、船体運動の計測およびアンケート調査の配付・回収・集計をしていただいた『びいな』の乗組員の皆様、および実務的な対応をしていただいた船舶管理部運航管理課 茂木治人 係長に深く感謝の意を表す。

また、本研究の機会を与えていただき、船舶の耐航性能評価に関する有益なご助言をいただいた大阪府立大学大学院工学研究科 池田良穂 教授、片山 徹 講師に心より感謝申し上げます。

最後に、本研究は、東日本シップマネージメント株式会社の教育・研究奨励寄附金 (No.0527100342) を受けて実施したことを付記し、関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 有馬正和：船舶の乗り心地評価の動向，フェリー・客船情報 '99，船と港編集室，pp.137-144，1999。
- 2) Lawther, A, Griffin, MJ : Prediction of the incidence of motion sickness from the magnitude, frequency and duration of vertical oscillation, J. of Acoustical Society of America, Vol.82, No.3, pp.975-966, 1987.

- 3) International Organization for Standardization, "Mechanical vibration and shock -Evaluation of human exposure to whole-body vibration- Part 1: General requirements, ISO2631-1 Second edition", International Organization for Standardization, 1997.
- 4) 日本規格協会：JIS B 7760-2 全身振動-第2部：測定方法及び評価に関する基本的要求，日本規格協会，2004。
- 5) 有馬正和，田村裕貴：高速旅客船の乗り心地評価に関する研究 (第1報) -船体運動の計測と解析-，日本船舶海洋工学会論文集，No.2, pp.211-215, 2005。
- 6) Griffin, MJ: Handbook of human vibration, Academic Press, p.461, 1990.
- 7) Padgaonkar, AJ, Krieger, KW, King, AI: Measurement of angular acceleration of a rigid body using linear accelerometers, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Applied Mechanics, Paper No75-APMB-3, 1975.
- 8) Lawther, A, Griffin, MJ : Measurement of ship motion, In : Human Factors in Transport Research, Vol. 2, pp.131-139, 1980.
- 9) Donohew, BE, Griffin, MJ: Motion sickness: Effect of the frequency of lateral oscillation, Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol.75, No.8, pp.649-656, 2004.
- 10) Griffin, MJ, Mills, KL: Effect of frequency and direction of horizontal oscillation on motion sickness, Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol.73, No.6, pp.537-543, 2002.
- 11) Turner, M: A Survey of Motion Sickness in Road Coach, Procs. of the United Kingdom Informal Group Meeting on Human Response to Vibration, 1993.
- 12) Turner, M: Driven to sickness? The effect of individual driving style on motion sickness occurrence, Procs. of the United Kingdom Informal Group Meeting on Human Response to Vibration, 1994.
- 13) Tamura, Y, Arima, M: Measurement and analysis of ship motion of a high-speed passenger craft, Procs. of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2006), Paper No. 2006-JSC-253, pp.514-519, 2006.
- 14) 池田良穂・片山徹監修：船舶用CADシステムWindows版，船と港編集室，2001。

附 録

船体運動解析における近似式の精度について

3.1 では、船体を剛体と仮定したとき、船上の任意の場所における直線加速度と角加速度は、(1)~(6)の近似式で推定できると述べた。ここでは、近似式による推定精度について、船体運動理論による計算例を用いて検証を試みた。

船体上の任意の場所における直線加速度と角加速度は、理論的には次式のように求められる⁸⁾。

角加速度は、船体上のすべての場所で同じになり、(12)~(14)式のようになる。

$$\text{roll} = a_{rx} = \frac{A_{z2} - A_{z0}}{D_y} - \omega_y \omega_z \quad (12)$$

$$\text{pitch} = a_{ry} = \frac{A_{z0} - A_{z1}}{D_x} + \omega_x \omega_z \quad (13)$$

$$\text{yaw} = a_{rz} = \frac{A_{y1} - A_{y0}}{D_x} - \omega_x \omega_y \quad (14)$$

また、任意の点 $P(d_x, d_y, d_z)$ における直線加速度は、(15)~(17)式のようになる。

$$a_x = A_{x0} - \frac{d_x}{D_x}(A_{z1} - A_{z0}) - \frac{d_y}{D_x}(A_{y1} - A_{y0}) + 2\omega_x \omega_y d_z + 2\omega_x \omega_y d_y - d_x(\omega_y^2 + \omega_z^2) \quad (15)$$

$$a_y = A_{y0} + \frac{d_x}{D_x}(A_{y1} - A_{y0}) - \frac{d_z}{D_y}(A_{z2} - A_{z0}) + 2\omega_x \omega_y d_z - d_y(\omega_x^2 + \omega_z^2) \quad (16)$$

$$a_z = A_{z0} + \frac{d_x}{D_x}(A_{z1} - A_{z0}) + \frac{d_y}{D_y}(A_{z2} - A_{z0}) - d_z(\omega_x^2 + \omega_y^2) \quad (17)$$

次に、例として、ストリップ法 (OSM)¹⁴⁾ によって求めた 2000 総トン型カーフェリーの船体運動について近似式による誤差の検討を行った。計算条件は以下の通りである。

冬場の津軽海峡を想定し、波高 3 [m]、波長 $\lambda = 54$ [m]、波周期 $T_W = 5.88$ [s] の規則波中を斜め向かい波 (入射波との出会い角 $\chi = 120$ [deg]) 状態でフルード数 $F_n = 0.28$ 、出会い円周波数 $\omega_e = 1.552$ (出会い波周期: 約 4 秒) で航走したときの船体運動を計算した。

得られた上下揺れ、縦揺れ、左右揺れ、船首揺れ、横揺れの変位振幅と位相から船体重心位置における速度/角速度および加速度/角加速度を算出した。また、オイラー角を考慮して直線加速度に重力加速度成分を加え、前後揺れ、左右揺れ、上下揺れの直線加速度と横揺れ、縦揺れ、船首揺れの角加速度を求めた。

次に、(12)~(17)式で表される理論式と(1)~(6)で表される近似式との誤差を算出した。近似による角加速度の誤差 (r.m.s.) は、横揺れで 2.95 %、縦揺れで 0.66 %、船首揺れで 1.32 %であった。一方、(15)~(17)式の cross-coupled acceleration と centripetal acceleration の成分を含む直線加速度は、任意の点 $P(d_x, d_y, d_z)$ の取り方によって大きく影響される。いま、 $d_x = 30$ [m]、 $d_y = 5$ [m]、 $d_z = 10$ [m] とし

たとき、近似による誤差 (r.m.s.) は、前後揺れで 31.28 %、左右揺れで 3.57 %、上下揺れで 2.40 %である。左右揺れ加速度の時系列を Fig.A1 に示す。

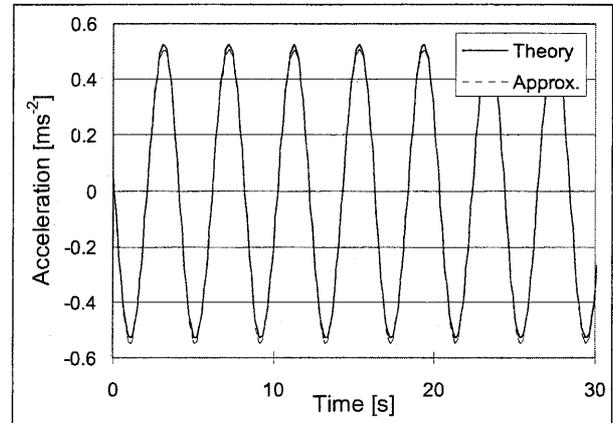


Fig.A1 Time histories of lateral acceleration obtained from theoretical and approximate equations.

船長方向に長い船舶の場合、 d_x が大きくなれば、 d_x が近似式の誤差項に含まれる前後揺れ加速度 a_x の推定誤差も大きくなることに注意を要する。しかし、本研究で船体運動の評価に用いた左右揺れと上下揺れの加速度は、近似による誤差が数%以内に抑えられているということが確かめられた。