4 mm/s の線は、それぞれが minimum requirement, design target と考えられていた。

この規格のピーク値は振動強さを表すものと定義されており、別規格の船の振動計測コードに、振動強さは定常振動区間内の maximum repetitive な挙動を表現する振動振幅と定義されている。

ISO6954 を適用する際に、次の問題点がある。

- ① 評価対象とするピーク値の算出方法が明確に示されていない。
- ② 単一振動数成分の評価では不十分な場合もあるが、複数振動数成分が同時に存在する場合の評価法がない。
- ③ 振動評価のガイドラインは示されているが、許容値をどのように決めるべきか。

①、②の問題点を解消できるよう ISO6954 の改訂作業を進めているが、③については、ISO では評価法を与えるが許容値は示さない方針である。現在の改訂作業の方針は以下のとおりである。

- ① 現 ISO6954 が与えているピーク値による評価を r, m, s. 値による評価に変える。
- ② 船体の総合的な振動評価を、居住性 (Habitability) と人体感覚を除くメカニカルな評価 (Mechanical suitability) に分ける。
- ③ 居住性の評価は ISO2631/1 が示す一般原則に従う。

5. お わ り に

振動評価に際しては、計測法は実際に使いやすいもので、評価法はこれを適用する当事者が納得できるものでないといけない。同じ設計でも完成した船の振動が少し異なることもある。それだけに、契約時に振動許容値を決めることは大変難しい。

振動の評価は、感覚的なことを含んでおり、評価に明確な差をつけにくいことに留意して、振動許容値の設定と判定は弾力的に行って頂きたいと考えている。

文 献

- 1) ISO2631/1-1985 Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1 : General requirements
- 2) ISO6954-1984 Mechanical vibration and shock-

Guidelines for the overall evaluation of vibration in merchant ships

- 3) JISF0907-1990 船舶居住区の振動評価のための基準
- 4) 藤井, 船体振動の許容限, 造船学会誌, 692 (昭63-2)
- 5) 金沢, 振動の許容限について, 造船学会誌, 410 (昭38-10)
- 6) 第112研究部会, 機関およびプロペラの起振力と船体の振動の応答に関する研究 (その2 船体振動と振動感覚に関する実船調査), 日本造船研究協会研究資料, 167-2 (昭48-3)
- 7) DIS2631-1.2 Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part1 : General requirements [Revision of first edition (ISO2631/1 : 1985)]

動揺等刺激暴露下の生理的・心理的变化*

細 田 龍 介**

Physiological and psychological change under exposure to motion stimuli

By Ryusuke Hosoda

Measurements of physiological and psychological changes of subjects have been carried out under whole-body exposure to low frequency oscillations by using ship-motion simulator. Electroencephalogram, Electrocardiogram, facial expression, face surface temperature, are measured as the physiological effects, and symptoms of motion sickness or ride-quality are measured as the psychological effects. Methods for analyzing the measured results have been also developed. In this short monogram, results as well as methods of measurements, analyses are described.

*原稿受付 平成8年6月6日

第56回春季学術講演 (平成8年5月16日)

**大阪府立大学工学部 教授 (堺市学園町1-1)

1. は じ め に

船酔いに代表される乗り物酔いは健康者でも経験する一時的な異常状態、即ち、一過性の病的状態、あるいは動揺という特殊な環境下における人体の正常反応であって、その原因である外的刺激を取り去れば治療を必要としないで回復するため、医学的には重要視されなかった嫌いがある。しかし、当事者にとっては深刻であることは言うまでもなく、なんとかして欲しい症状であるところに依存はない。特に、日常生活の中でも交通手段として乗り物を利用する機会が多い現代では、乗り心地の向上が乗り物の設計、運用における重要な課題の一つとして扱われるようになってきた。

乗り物酔いの研究は、医学、生理学、心理学、工学の分野でかなり以前からなされているにも拘らず、その発症メカニズムは完全に解明されていない。特に、乗り物に乗ったときの「外的刺激－生理的、心理的状态の変化－乗り物酔いの発症」の関係を量的な指標を用いて明らかにした報告は皆無であると言わざるを得ない。

振動に対する人体の応答に関しては、人間工学的あるいは工学的見地からの研究が進められているが、そこでは生理学的見地からのアプローチが主で、心理的な要因の影響は殆ど考慮されていない。列車や自動車の場合には比較的周波数範囲の高い振動が乗り物酔い、乗り心地の対象となるため生理的な人体反応を重要と考えれば良いであろうが、船舶のように低周波数領域で動揺する乗り物の場合には、心

理的影響を無視することはできない。

一方、心理的影響に関しては医学の見地からもその重要性は指摘されてはいるものの¹⁾影響の度合いを量的に計測、解析、評価する手法の確立が遅れているため、具体的な指標として報告された例は見あたらない。

本稿では、医学の見地から提唱されている乗り物酔い発症のメカニズム・神経機構において生理的影響・変化および心理的影響・変化がどのように関わりあっているかを概説し、筆者が所属する研究室で行ってきた研究の内容を例として生理的反応、心理的反応の計測、解析、評価について述べる。

2. 乗り物酔いの発症機構

医学分野では、「乗り物酔い（動揺病）は、乗り物に搭乗することによって引き起こされる一過性の自律神経系の失調状態を言い、その中心的症状は悪心、嘔吐である」²⁾と定義されている。乗り物の種類に応じて呼び名も異なり、船酔い、車酔い、空酔い、宇宙酔いなどと呼ばれる。

乗り物酔いの発症のメカニズムは徐々に明らかにされつつあるものの、物理的、感覚的な外部刺激とそれに伴って起こる人体の生理的・生化学的変化、心理的変化、更には感覚的にしか表現されないところが多い酔いの症状との関係は定性的には解釈されているが量的な解明はなされていないのが現状である。現在までになされた乗り物酔いのメカニズムの解釈には「刺激過剰説」、「体液移動説」、「感

Fig. 1 乗り物酔いの発症機構〔4〕

Fig. 2 乗り物酔い発症の神経機構〔4〕

覚混乱説」等がその主な成果であるが、刺激過剰説はあてはまらない例が多く否定されている。また、体液移動説は宇宙酔いに関連ありと言われたがこれも必ずしも正しくないようである。現在では、全ての問題点が解決されてはいないものの、感覚混乱説が最も妥当な解釈を与えるとして受け入れられている^{3)~6)}。Fig. 1は感覚混乱説による乗り物酔いの発症機序を表現したものである。人体の運動は原則的には視覚系と前庭迷路系によって認識され、重力下の人体の空間識は体性感覚によって認識されている。動揺のような外的刺激が人体に加わったとき、中枢神経系では感覚受容器からの情報と平常時に記憶され体内の空間識モデルにより予測された神経機構による情報とが比較されて円滑に反応するべく情報を伝達する。しかし、これらの情報に不適合が起こり、ある閾値を越えると自律神経の失調状態が起こるものと考えられている。

乗り物酔いの発症機序や症状には個人差や場合差が影響することが知られている。乗り物酔いのメカニズムの解明のためには、先ずこの個人差や場合差を正しく理解する必要がある。即ち、平常時の身体的、精神的、遺伝的な健康状態が個人差や場合差を生み出していると考えられる。

更に重要なことは、この発症機序や症状には神経機構が大きく関与していることによることが明らかとなっている。①乗り物酔いにかかった時先ず憂鬱な気分となり、頭痛、悪心等の症状を経て嘔吐に至る場合、②冷や汗、胃のむかつきの後、頭痛や吐き

気を経て嘔吐に至る場合、更には、③上のような経過を経ないでいきなり嘔吐してしまう場合がある。これら発症機序の違いは乗り物酔いに関与する神経回路が単一ではないことを示すものであると同時に平常時の健康状態にも大きく関係していると考えられる。Fig. 2は乗り物酔いの発症に関する神経機構を表したもので⁴⁾で、上の①、②、③の情報伝達機構を表している。

3. 動揺刺激暴露下の生理的・心理的变化の計測・解析

乗り物酔いの発症には生理的、心理的な要因が大きく関与している。従ってそのメカニズムを量的に明らかにするためには、動揺暴露下におけるこれらの要因を正確に把握する必要がある。このためには、数多くの被験者を対象として一定の環境条件の下で再現性のある実験を実施する必要がある。筆者の所属する研究室においては、船体動揺模擬装置を用いて動揺暴露実験を行ってきた^{7)・8)}。

3.1 平常時健康状態の検査 一見して健康に見える人でも、精神的、性格的に不安定であったり、病的な因子を内在していたりする。これらの要因を個人差として扱うことは不適当であるから、動揺暴露実験の被験者を予め分けておく必要がある。このために、日常のライフスタイル、性格・行動尺度、ストレス度および船酔い耐性度に関するアンケート調査、および心電図、血液、尿検査による精

Table 1 動揺暴露実験時の計測項目

計測項目	計測方法 (センサー)	解析・分析
(1) 実験前・後計測 血液検査 尿検査 平衡感覚 心電図 血圧 心拍 体温 心理状態	採血 採尿 重心動揺計 心電計 ポータブル血圧計 ポータブル血圧計 電子式体温計 SD法アンケート調査	生化学的検査* 生化学的検査* ミネタコード* 因子分析, ファジィ積分
(2) 動揺暴露中 動揺加速度(3軸) 動揺角速度 シリンダーの変位 頭部加速度(3軸) 脳波(21channel) 心電図 呼吸 表情 顔面温度分布 乗り心地	歪ゲージ式加速度計 水晶発信式角速度計 ポテンショメータ 歪ゲージ式加速度計 32channel脳波計 32channel脳波計 温度センサー ビデオカメラ 赤外線放射温度計 聴取(5分間隔)	スペクトル解析 スペクトル解析 スペクトル解析 スペクトル解析 スペクトル解析 スペクトル解析 スペクトル解析

* : 専門の医師による。

身的、身体的健康度の調査を行っている。

3.2 動揺暴露実験および実験結果の解析

動揺暴露実験には船体動揺模擬装置⁹⁾を用いる。実験時の計測項目はTable 1に示されるように実験の前後の計測項目を含めて多岐に亘る。

実験の手順は以下に示される通り、通常の工学実験に比べて複雑である。

- ①動揺模擬装置を設置したテント内で、重心動揺計を用いて平衡機能検査を行う。
- ②航空機座席に着席状態で、心電計を用いて心電図計測を行う。
- ③着席状態で血圧、脈拍、体温測定を行う。
- ④保健室（大阪府立大学構内、動揺模擬装置からの距離100m）において、採血、採尿を行う。
- ⑤被験者はキャビンに搭乗、着席し、頭部に脳波計測用、両手首に心電図計測用の電極を装着する。脳波計測の電極は国際式電極配置法（10-20法）に基づいて装着し、基準電極は両耳朶に、アース電極は額に取り付ける。また、鼻の下に、呼吸計測用の温度センサーを取り付ける。
- ⑥キャビンの扉を閉じて被験者を外部と遮断し、心理計測用のアンケートを実施する。（以下の計測はキャビンを密室状態にして行う）
- ⑦回答終了後アンケート票を回収する。この時、室内温度、湿度を記録。

（この時まで、ビデオ装置、赤外線放射温度計の調整を済ませておく）

- ⑧閉眼安静、開眼安静状態の被験者の生理計測として、脳波、心電図、呼吸を1分間計測。

脳波および心電図の計測は閉眼安静から実験終了の安静状態まで連続計測。

- ⑨安静時の生理計測終了後、被験者に動揺暴露中の注意事項を口頭で伝えながらシミュレータを動揺開始位置にセット。

- ⑩動揺開始と同時に表情計測用ビデオカメラ、顔面温度計測用赤外線放射温度計およびビデオデッキを録画状態にセット。さらに視覚刺激用映像を再生にする。

- ⑪動揺開始と同時に動揺開始直後の口頭による聞き取りを実施。以後、この調査を5分毎に実施。

- ⑫動揺開始後30分後の聞き取り調査の後、動揺暴露を終了。

- ⑬キャビンを着底させながら、表情計測、顔面温度計測を終了。

- ⑭開眼安静、閉眼安静の順で、動揺暴露終了後の生理計測を1分間づつ実施。

- ⑮動揺終了後の心理測定アンケート調査を実施。室内温度、湿度を計測。

- ⑯アンケート調査終了後、電極類、センサー類を取り外し、キャビンの外で平衡機能検査、心電図、血圧、体温の測定を行う。

- ⑰保健室において、採血、採尿を行う。

実験結果の分析、解析もかなり複雑であるが、特に被験者の血液、尿の生化学的分析は専門の医療機関に依頼する必要がある。動揺暴露中の被験者の生理的・心理的状态の変化を表す脳波、心電図の解析には種々の解析手法の適用が可能であるが、スペクトル解析を中心に脳波スペクトルの時間的变化、周波数・振幅のゆらぎ、脳活動電位の頭皮上分布、心電図のスペクトルを用いた心拍の揺らぎの時間的变化、位相面解析による心電図の乱れの解析、等が行われつつある。

3.3 動揺暴露下の生理的变化

3.3.1 脳波スペクトルの変化 脳波の計測記録を3-13Hzの帯域通過フィルターによって濾波した後スペクトル解析を行った例をFig. 3に示す。動揺開始から嘔吐に至るまでの脳波の周波数領域の変化を見ることができる。すべての被験者の脳波が同じ変化をする訳ではないが、乗り物酔い発症者に共通の変化としてスペクトルに大きな変化が現れる。このようなスペクトルの時間的变化を更に詳しく調

べる方法としてウェーブレット解析を行った例がFig. 4である。図の横軸は時間を、縦軸は周期を表す。閉眼安静状態では広い周波数範囲で安定した脳波の変化を示すが、酔いを発症した状態では乱れが大きいことが分かる。このような脳波スペクトルの時間的変化の傾向は脳波の振幅変動のスペクトルにも現れる。

一方、頭皮上で計測される脳波の平均パワーの分布およびその時間的変化を表したものがFig. 5である。特に、 α 波、 β 波に関して酔いの発症過程で

Fig. 3 脳波スペクトルの時間的変化

分布に変化が現れることが分かってきた。

3.3.2 心電図の変化 心電図に現れる尖頭間隔周期の揺らぎ（心拍ゆらぎ）のスペクトル解析によれば、スペクトルの低周波成分（0.08–0.15Hz）は交感神経の亢進状態を高周波成分（0.15–0.40Hz）は副交感神経の亢進状態を表すという報告がある¹⁰⁾。Fig. 6はこれらの成分比の時間的変化を表しており、酔いを発症した場合にはその変動が大きいことが表れている。この他にも、酔いを発症した場合には心拍に乱れが生じることを位相面解析、カオスの観点から調べている。

3.4 動揺暴露下の心理的变化 動揺暴露実験の前後に行われるSD法アンケート調査の回答の解析によって被験者の心理的变化を把握する。この方法は被験者が感覚的に感じるイメージを相反する形容語対を評価尺度として用いる方法で、感性を評価する場合に因子分析法とともに多用されている方法である。しかし、因子分析法は確率尺度を用いて対象を評価する統計的手法で因子間の統計的独立性、加法性を前提としなければならない点に、主観的尺度に基づいて感覚的に行われた評価には適していない場合がある。乗り物酔いの評価は正にこの範疇に属するものであるため、筆者らの研究室ではファ

(a) Rest with eyes closed

(b) Just before vomiting

Fig. 4 脳波のウェーブレット解析例

Fig. 5 脳波の平均パワー分布の時間的变化

Fig. 6 心拍ゆらぎの時間的变化

Fig. 7 階層化ファジィ積分による乗り心地評価モデル

Table 2 心理要因に対する形容語対の重要度

PSYCHOLOGICAL FACTOR	Easy- Uneasy	Composed- Busy	Relaxed- Strained	Familiar- Obscure	Refreshing- Gloomy
Easy- Uneasy	0.00	0.29	0.64	0.00	0.37
Composed- Busy	0.44	0.28	0.29	0.29	0.40
Relaxed- Strained	0.45	0.74	0.00	0.00	0.00
Familiar- Obscure	0.43	0.64	0.74	0.00	0.00
Refreshing- Gloomy	0.34	0.33	0.25	0.34	0.00
4 Other Pairs	0.86	1.03	0.86	0.64	1.03
All Pairs	1.03				

 $\sigma = 0.09$

ジメ測度を用いて乗り心地を評価する方法を提案した⁷⁾。

Fig. 7はファジィ測度、階層化ファジィ積分を用いて乗り心地を評価するための数学モデルを表したものである。図では乗り心地に影響を及ぼす要因を「環境要因」、「動揺刺激要因」、「生理的要因」、「心理的要因」の4つに分類してその影響の重要度を表現している。Table 2は心理的要因に対して形容語対が如何なる寄与をするかを表したもので、この表からも乗り心地に対する各形容語対の寄与は確率測度では表現しきれないことが理解できる。Fig. 8はFig. 7の心理測定モデルを用いて推定された乗り心地の例である。図中のEXPはアンケート調査回答による乗り心地、MODEL Aは被験者のイメージによる形容語対の評価結果からファジィ積分によって推定された乗り心地、MODEL Bは4つの要因からファジィ積分して得られた推定値であり、乗り心地評価のためのモデルが概ね正しい結果を与えることを示した例である。

4. おわりに

周波数の高い振動環境下においては、従来生理的な反応が重要であると考えられてきたようであるが、船舶のような低周波数領域の動揺暴露環境下におかれた人間の乗り物酔い発症のメカニズムを解明するためには生理的な変化に加えて心理的な変化に関しても工学的見地のみならず、医学・心理学的見地から正しく行わなければならない。特に、これらを切り離して考えることは誤った結果を導く可能性がある。この点を解決するためには動揺暴露下において

EXP. No.: 6, Male (felt sick)
STIMULUS: ROLLING(0.3 Hz, 10 deg)

Fig. 8 乗り心地評価の例

脳内神経機構と生理学的・心理学的反応の関わりについて明らかにする必要があるが、このためには、工学関係者だけでは不十分で、医学、心理学、人間科学等の広範囲の学際領域からの研究者の協力が不可欠である。また、研究途上であるため本稿では紹介できなかったが、筆者もその委員として参加している、(財)日本財団の補助金を受けて実施されているシップアンドオーシャン財団「乗り心地のよい低動揺型船体形状の調査研究」プロジェクト(1994-1996)においては、産・官・学から広い分野にまたがった研究者が協力して研究が進められている。

参考文献

- 1) 松永亨：動揺病と自律神経，JOHNS, vol. 6, no. 9, 1990, pp. 23-27 (1990)
- 2) 浜田恵亮，早川国男：乗り物酔い，小児科学, vol. 15, no. 1, pp. 50-56, 1982.
- 3) 松永亨，武田憲昭：動揺病と宇宙酔い，耳鼻臨床, 81(8), pp. 1905-1120, 1988.
- 4) Benson, A. J. : Motion Sickness, Vertigo, Chap. 19, John Wiley & Sons, pp. 391-426, 1984.
- 5) 水越鉄理：動揺病の神経耳科学的研究, JOHNS, vol. 6, no. 9, pp. 29-34, 1990.
- 6) 武田憲昭：動揺病と中枢神経，JOHNS, vol. 6, no. 9, pp. 35-39, 1990.

- 7) 細田龍介, 有馬正和: 船舶の乗り心地評価に関する研究(第2報)ー心理測定モデルの構築ー, 日本造船学会論文集, 第173号, pp. 451-460, 1993.
- 8) 細田龍介, 有馬正和, 桜井秀一, 貴田昭臣: 船舶の乗り心地評価に関する研究(第3報)ー乗り物酔い発症時の生理的变化の計測ー, 日本造船学会論文集, 第176号, pp. 517-524, 1995.
- 9) 細田龍介, 岸光男, 山田智貴, 有馬正和, 中島武士, 桜井秀一: 大阪府立大学海洋システム工学科 乗り心地シュミレータについて, 関西造船協会誌, no. 220, pp. 145-151, 1993.
- 10) 佐藤望, 三宅晋司, 松波美穂子: 若年女性における変則鏡映描写課題遂行時の自律神経変動評価, 日本人間工学会誌, 第30巻特別号, pp. 444-445.

~~~~~メッセージ~~~~~

細 田 龍 介

日本舶用機関学会の会員諸兄, 学会の公式行事であったシンポジウム「振動・騒音と人間」に参加させていただき, 多くの方々に初めてお会いでき幸せに思います。

前置きはさておき, 現在行っている研究は(1)乗り物酔い発症のメカニズムの解明, 及び(2)閉鎖性海域の環境創造に関するもので, 通常は, 「何故そんなに大きく異なった分野を2つも選ぶのか?」と聞かれます。しかし, 実は研究の根底に流れる思想は同じで, “人や自然や生物を愛しみ, 優しいソフトな心を持って, これらを支える技術を考えよう”であります。

今こそ, 人や周りに住む生物を中心において技術開発を行う時期だと信じて研究したいと考えております。

どちらの研究も, 答えを得るまでにはかなり時間がかかるようです。戯言容赦

テクノスーパーライナー揚力式複合支持船型船体姿勢制御装置の開発*

井 床 利 之**

1. はじめに

新形式超高速船テクノスーパーライナー(TSL)の研究開発は, 平成元年度のテクノスーパーライナー研究組合の設立に始まり, 6年間にわたる研究開発の後, 平成6年度末に終了した。

本研究開発は, 複合支持型新形式超高速船を対象とし, 速力50ノット, 積載貨物量1,000トン, 航続距離500海里以上の性能を有する波浪階級6の外洋を航行可能な商船の設計のための基礎技術を確認しようとするものである。

揚力式複合支持船型(TSL-F)は開発対象となっている2船型の1つであり, 「水中翼と浮力によって船体を支持する船型」であり, 川崎重工業(株)をはじめ石川島播磨重工業(株), 住友重機械工業(株), 日本鋼管(株), 日立造船(株)からなる5社共同研究グループにより開発した。

本船型は, 耐航性に優れている特長を有するが, 高速航行時に船体を支持する浮力発生部分のほとんどを没水させて造波抵抗を小さくし, 波浪の影響を受けないようにしているため, 浮力による自己復原性がないので, 船体姿勢制御が不可欠である。したがって, この船体姿勢制御システムの設計技術は本研究開発の重要な技術課題の一つであると位置づけ, はじめの4年間で要素技術の開発を行い, 5年度には実海域模型船を建造し, 6年度に要素技術研究成果を検証するための海上試験を実施した。

ここでは, このTSL-F船型船体姿勢制御システムの研究開発概要について紹介する。

2. 揚力式複合支持船型(TSL-F)

2.1 揚力式複合支持船型(TSL-F)の船型概念 外洋航行の高速海上輸送手段としては, 高い就航率と定時性という2つの要件を満たす

*原稿受付 平成8年5月30日

第56回春季学術講演(平成8年5月16日)

**川崎重工(株)(千葉県野田市二ツ塚118)