

乗り物酔いの実用的評価法

松本 互平¹, 藤井 智弘²

要旨

乗り物の計画や設計において、乗り物酔いは乗り心地や居住性の観点から、その推定と評価の方法が必要になる。動揺病の国際基準は、1985年その試案が提案され、1997年には振動基準 ISO2631-1の一部として発行された。

本研究では、ISO基準の方法とその特徴について述べるとともに、実製品設計に適用可能な形の実用的評価法について検討した。本基準に基づいた嘔吐率などの計算式を導き、簡単な影響因子の入力による動揺病の発症を推定できる計算ソフトを作成した。これを用いて動揺病におよぼす動揺周期、動揺加速度、暴露時間などの要因の影響について考察した。O'Hanlonの実験結果や船酔い率に関する池田の実船計測との比較を行ない、本方法による妥当性を検証した。

1. 緒言

人類は古くから交通手段として船や動物を利用してきたので、乗り物酔いには長い歴史がある。乗り物酔いの症状が動揺病 (Motion Sickness) と名づけられ医学や工学の分野で本格的に研究が始められたのは19世紀末のことである。科学技術が進歩し、船舶はもとより自動車や鉄道車両、航空機などの運動性能の高い機械製品が出現するに至り、その乗り心地や作業環境をよくするための研究が盛んに行なわれるようになった。

乗り物酔いは人体の平衡感覚をつかさどる三半規管や耳石などの内耳前庭器官の加速度刺激が強すぎたとき、その働きに破綻をきたして発症するものと考えられてきた。しかし視覚による映像だけで発症する「シネマ酔い」や宇宙飛行士の大半がかかるとされる「宇宙酔い」など単に加速度刺激だけでは説明できない乗り物酔いの現象が現れ、脳の知覚や記憶に深く関係する複雑なメカニズムであることがわかってきた。一方、遊園地のスリルライドから受ける衝撃加速度やスピードは短時間であれば、快適感や達成感につながる。人体が過大な振動環境に暴露されたときの心理的応答は時代とともに変化し、また現象の理解をむずかしくしている。動揺 (0.1~0.5 Hz) と振動 (0.5~80 Hz) に対する心理的反応は受容器の違いはあれ、快適感や不快感の表れ方において同様な性質をもつ。

乗り物を始めとする新しい機械や構造物の出現にともない、その計画や設計において、人間の作業環境や居住性におよぼす振動の影響を評価する方法が必要になってきた。全身振動

1. Department of Mechanical Engineering and Biomimetics, Kinki University, Wakayama 649-6493, Japan

2. Graduate student of Department of Mechanical Engineering, Kinki University, Wakayama 649-6493, Japan

に対する国際基準 ISO2631 は 1974 年に発行されたが、動揺病に対する試案 ISO2631-3⁽¹⁾はその一部として 1985 年に始めて表れている。評価方法は基本的には振動に対するものと同一であった。その後、その現象を支配する物理量や人体の許容量に関する研究成果をもとに 1997 年に ISO2631 の全体が改訂されたのに伴い、動揺病に対する基準も新しくなった。

本論文では、振動に関する国際基準 ISO2631-1 の中から動揺病に関する項目を対象に、乗り物酔いの実用的な評価法について考察する。乗り物酔いの代表的な症状である「嘔吐率」に関して新基準対応の計算法を導き、動揺周期や動揺加速度などの嘔吐率におよぼす影響について考察する。また O'Hanlon の実験や船酔い率に関する池田の実船実験に本方法を適用し、本推定法の妥当性を検討する。

2. 乗り物酔いの評価量

乗り物酔いは人体に同じ物理量を与えても同じ生理的反応が得られるとは限らない不確定要素の高い生理現象である。身体、頭部や眼球などの運動による直接的な刺激量のほか、動揺以外の環境や体調、姿勢、性別、年齢などにより変わり、これに経験や記憶、精神活動の状態など個人差や状況差による影響も大きく受ける。また、実際の動揺環境下で起こる生理的、心理的反応は他の環境因子によって起こる反応との複合された非特異的反応であるため、乗り物酔いの評価量を特定し、実験によりその量を数式モデル化することを難しくしている。

乗り物酔いによりあらわれる症状は、船酔いに関する統計的観察によれば、頭重（ずじゅう）、欠伸、頭痛、生唾、冷汗、便意、胃部膨満感、顔面蒼白、悪心（おしん）、ふらつき、嘔吐の発症順序になる。このほか、めまい、胸苦しさ、無力感などの症状を分類に含めることもある。これらの症状は、すべてこの順序で起こるとは限らないし、起こらないものもある。また発症頻度では、悪心、嘔吐、生唾、頭重、冷汗などが多いことが報告されている⁽²⁾。

乗り物酔いの評価量として、何を選定するかは乗り物あるいは構造物の受ける振動環境によって異なる。これまでの研究は、主として船酔いが対象であったため、評価量は「嘔吐率」(Percentage of Vomiting) が用いられてきた。これは、船の動揺加速度が比較的大きいため発症頻度が多く、また現象が他の症状に比べてはっきりしており、人々を最も悩ます症状であったからである。ISO2631-3 (1985) や BS6841 (1987) は主に船酔いによる研究成果が基になっている⁽³⁾。

新基準⁽⁴⁾ (ISO2631-1997) においては、動揺病評価値 (Motion Sickness Dose Value、MSDV と略記する) が新しく提案された。この物理量は weighting した加速度を暴露時間で積分し、自乗平均をして求めるものである。嘔吐率はこの値に定数をかけることにより求めることができる。例としてその定数は動揺運動の暴露経験の少ない成人男女に対して、 $K_m = 1/3$ であることを述べている。

この乗り物酔いに対する基準は、船舶や海洋構造物のように、主に海洋波による動揺を対象としたものであるが、この動揺病評価値 MSDV が他の乗り物や構造物の動揺病の発症頻度にも使えるものとする、嘔吐に至らない動揺病の発症予測にも適切な実験定数を与えることにより評価式を導くことができる。比較的発生頻度の低い暴露に対する軽度の発症評価にも応用でき、実用的な動揺病評価が可能になる。

3. 動揺病に対する ISO 基準の特徴

ISO2631-1 (Mechanical vibration and shock —Evaluation of human exposure to whole-body vibration—) は人体の全身振動に対する基準であるので、振動 (0.5Hz~80Hz) に対する健康、快適性および知覚についての基準が主体である。0.5Hz 以下の振動に対しては動揺病を発症する可能性があり、その基準の考え方を第 9 章に述べ、付録 D にその算定法を概説している。この振動の評価の方法と特徴は次に示すとおりである。

- (1) 動揺病による不快感は振動数 0.1Hz~0.5Hz 以下の立位および座位の姿勢で起こる可能性がある。
- (2) 単一の振動数荷重関数、 W_f を動揺病の発症率に対する振動の影響の評価に使う。

ここに、 W_f は周波数の関数として、High pass、Low pass、Acceleration-velocity transition、Upward step の 4 つの伝達関数の積として表わされる。すなわち、

$$W_f = H_h \times H_l \times H_t \times H_u \quad (1)$$

Band-limiting

High pass

$$H_h = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}}$$

Low pass

$$H_l = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}}$$

Acceleration-velocity transition

$$H_t = \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \cdot \sqrt{\frac{f_4^4 \cdot Q_4^2}{f^4 \cdot Q_4^2 + f^2 \cdot f_4^2 (1 - 2Q_4^2) + f_4^4 \cdot Q_4^2}}$$

Upward step

$$H_s = \frac{Q_6}{Q_5} \cdot \sqrt{\frac{f^4 \cdot Q_5^2 + f^2 \cdot f_5^2 (1 - 2Q_5^2) + f_5^4 \cdot Q_5^2}{f^4 \cdot Q_6^2 + f^2 \cdot f_6^2 (1 - 2Q_6^2) + f_6^4 \cdot Q_6^2}}$$

ここに、 f は振動数、 f_i, Q_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) は振動数荷重関数 W_f の曲線形状に関する定数ある。また、これらの Frequency-weighting function の定数は表 1 のように与えられている。

表 1 ISO2631-1 の Weighting function の定数

Band-limiting	f_1	0.08
	f_2	0.63
Acceleration- velocity transition	f_3	∞
	f_4	0.25
	Q_4	0.86
Upward step	f_5	0.0625
	Q_5	0.80
	f_6	0.1
	Q_6	0.8

- (3) 人体の体軸方向 (z 軸と決める) の frequency-weighted r.m.s. acceleration の振動波形を評価対象因子とする。
- (4) 動揺病の発症率を表わす物理量として、動揺病評価値、MSDV を定義する。これには 2 つの方法がある。
- A. 複雑な振動波形や長時間計測する場合には、

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

ここに、 a_w : frequency weighted acceleration

T : total period (seconds)

B. 動揺の大きさが一定である場合や短期間計測する場合には、

$$MSDV_z = (a_w)_{rms} T_0^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここに、 $(a_w)_{rms}$: frequency weighted root mean square acceleration

T_0 : exposure duration (seconds)

- (5) 暴露時間を評価対象因子に取り上げている。動揺病の発症は数時間までは暴露された期間とともに増加する傾向にある。しかし、ある一定期間 (2 日程度) 以上続くと、振動に対する適応、つまり「慣れ」が起こる。この慣れはその後の発症を軽減させる。
- (6) 嘔吐率は MSDV に比例する量として次式で求める。

$$V = K_m \times MSDV_z \quad (\%) \quad (4)$$

ここに、暴露対象群によって異なる定数であるが、暴露経験の少ない成人男女の場合、 $K_m = 1/3$ をとる。 $a_w \geq 0.5 (m/s^2)$ の場合には、本式は過少評価となる。

4. ISO 基準に基づいた実用的動揺病推定式

実際の乗り物や構造物において、乗り物酔いが問題となる振動の固有周期は長く、ゆっくりしたものであるため、ほぼ単振動波形と仮定できる場合が多い。その時、振幅 A 、周期 T_A の応答加速度 $a(t)$ は次式で表わされる。

$$a(t) = A \cos\left(\frac{2\pi}{T_A} t\right) \quad (5)$$

いま、振動数 f_A に対する動揺病の荷重曲線を $W(f_A)$ とすると、

$$a_w = W(f_A) a(t) \quad (6)$$

(5)および(6)式を(2)式に代入して積分すると、次式が求まる。

$$MSDV_z = \frac{W(f_A) A}{\sqrt{2}} \left[T + \frac{T_A}{4\pi} \sin\left(\frac{4\pi T}{T_A}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

(7)式の括弧の中の第2項は T が T_A より十分に大きい時、無視することができる。

単振動波形の場合、 $A_{rms} = \frac{A}{\sqrt{2}}$ また $(a_w)_{rms} = W(f_A) A_{rms}$ であるので、これを(7)式に代入すると、(3)式と一致する。

つまり動揺運動の波形が単振動状の場合には、長い暴露時間にわたって振動が持続するとき、MSDV は近似的に(3)式で推定することができる。

以上の検討結果より、動揺病の発症は MSDV を代表的なパラメータとし、その関数で表されるものと仮定する。また、最も簡単な関数形を採用すれば、動揺病発症推定算式は次の形となる。

$$IMS = K_m K_n W(f) A_{rms} \sqrt{T} \quad (8)$$

ここに、*IMS: Incidence of Motion Sickness* (%)

K_m : 嘔吐率に関する定数

K_n : 頭重、悪心などの発症に関する嘔吐率に対する割増し定数

(7)式において、船酔いなどに適用する場合の嘔吐率の実験定数を ISO 基準では $K_n = 1/3$ を例示している。

乗り物酔いには乗り物の振動特性が大きく影響する。嘔吐率が低いときには、嘔吐には至らないが、悪心や頭痛感を評価量の対象に選んだ方がよいかもしれない。そのようなときには、 K_n を利用する。これは、嘔吐には至らなかったが、その前段階まで達した人の割り増し係数である。たとえば、嘔吐 48% に対して、悪心 60% なら $K_n = 1.25$ のようにとる。今後本推定式を実用算式として用いるには、これらの実験定数を定めるデータが必要である。

5. 乗り物酔いに影響をおよぼす諸要因

前節で示した動揺病の発症推定算式を用いて、嘔吐率に及ぼす加速度、振動数、暴露時間の影響を検討する。本研究では、これらの計算が簡単にできる専用ソフトを作成した。この解析ソフトを使用することにより、入力に加速度や振動数などを与えた場合の動揺病発症率が計算できるだけでなく、嘔吐率を与えた場合の加速度などの許容限界値も求めることができる。シリーズ計算やグラフィックス表示⁽⁶⁾も便利にできるようになっている。また、(1)式で示した伝達関数の形状係数や式の変更も容易に行なえるので、乗り物などの設計検討にも有用に利用可能である。

5.1 O'Hanlon の実験値との比較

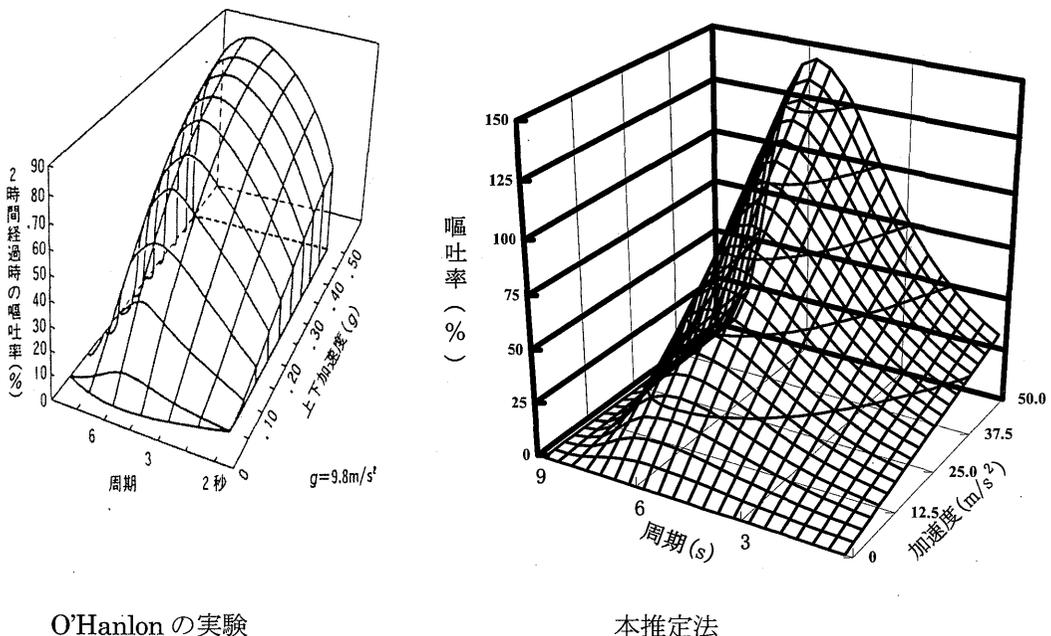


図 1 O'Hanlon の実験と本推定法による嘔吐率の比較

O'Hanlon⁶⁾は上下振動する部屋に被験者をいれた実験をおこない嘔吐率を測定した。暴露時間 2 時間において、動揺周波数と上下加速度を 25 通りの組み合わせでかえ、全被験者に対する嘔吐者の比率を求めた。O'Hanlon の実験結果をもとに曲線近似した上下加速度と周期の影響と嘔吐率の関係を示した図および本推定法による $K_m = 1/3, K_n = 1$ とした場合の計算結果を図 1 に示す。嘔吐率を表すどちらの曲面も傾向的にはよく一致した形状を示すことがわかる。

5.2 動揺周期と嘔吐率との関係

前の曲面を横方向に切った断面が動揺周期と嘔吐率の関係である。図 2 には、暴露時間 2 時間で上下加速度が $0.5, 1.0, 2.0 \text{ m/s}^2$ の場合の動揺周期と嘔吐率の関係を示した。周波数は 0.16 Hz (周期 6 秒) 付近で大きな嘔吐率になり、人体の動揺に対する感受性が最も鋭敏であることを意味している。(8)式より、(9)式が成立するので、図 2 の曲線の形状が荷重曲線、すなわち人体の動揺周期に対する感受性そのものを表わしていることがわかる。

$$\frac{3 \text{ IMS}}{A_{\text{rms}} \sqrt{T}} = W(f) \quad (9)$$

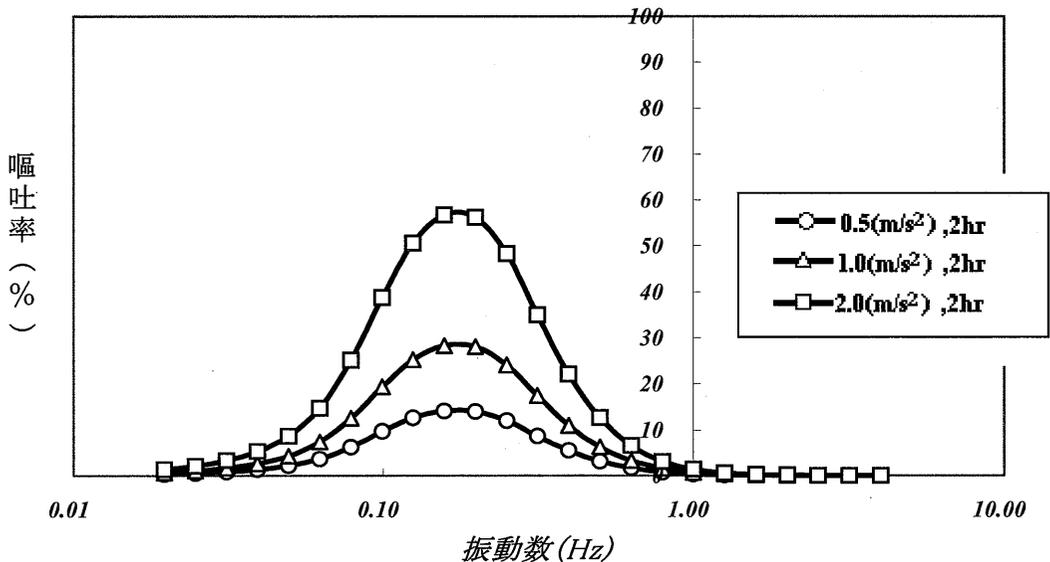


図 2 動揺周期と嘔吐率との関係

5.3 暴露時間の影響

O'Hanlon は暴露時間が 2 時間経過時が最も不快感を与えるものとして、特に暴露時間の影響を考慮していない。ISO 基準では個人差や慣れの影響が大きいため暴露時間の嘔吐率に及ぼす影響は不確定であることを述べている。しかし数式的には図 3 に示したような右上がりの傾向をしめす。

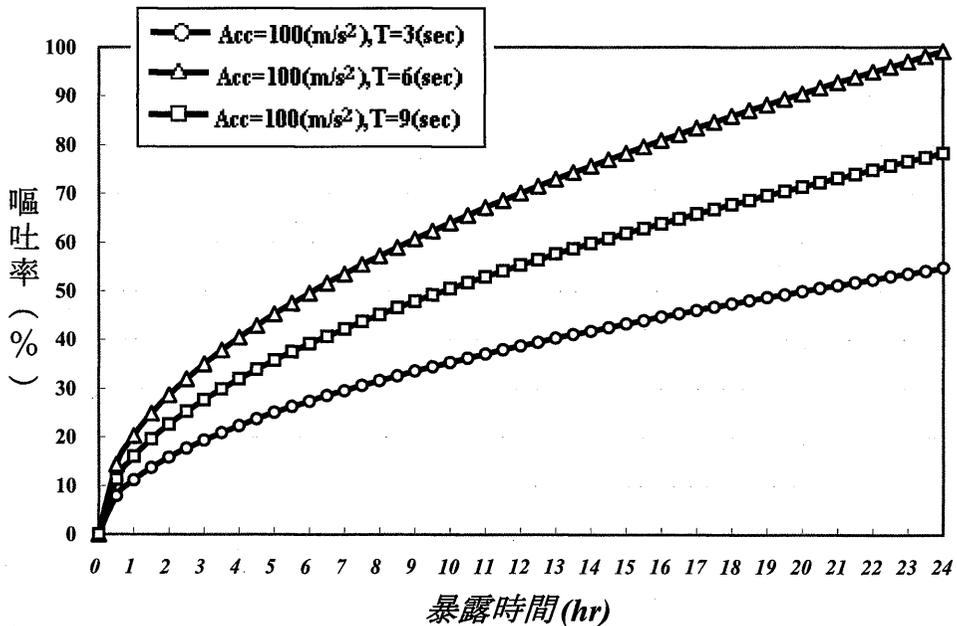


図 3 嘔吐率におよぼす暴露時間の影響

6. 船酔い率の実験結果と推定値との比較

池田のらは 2 隻のカーフェリーと 1 隻の双胴型高速旅客船について、船の動揺を計測するとともに乗客のアンケート調査により船酔い率の実験をおこなった。実航海中の計測は動揺状態も一様でなく、またさまざまな環境因子それに不特定多数の人々によるので不確定要素は高い。本方法による計算では暴露時間を 2 時間に想定した。

実測値と計算値の比較を図 4 に示す。●▲■ は実験値、○△□ は計算値を示しており、縦線上の白黒の印が同一船、同一状態の結果に対応している。その近くに示した数字は動揺周期に相当している。計算値は 2 状態を除き、実測値の 1~2 倍の範囲にある。また、1 例を

除き計算値は実測値より大きく過大評価となっている。この傾向は 0.5m/s^2 以上では過小評価になると述べた ISO 基準のコメントとは逆の傾向を示している。

本推定式によるこの程度の差異は多くの不確定因子が関連する生理現象の評価方法として、現在のところ許容でき、実用上適用可能であろうと判断できる。

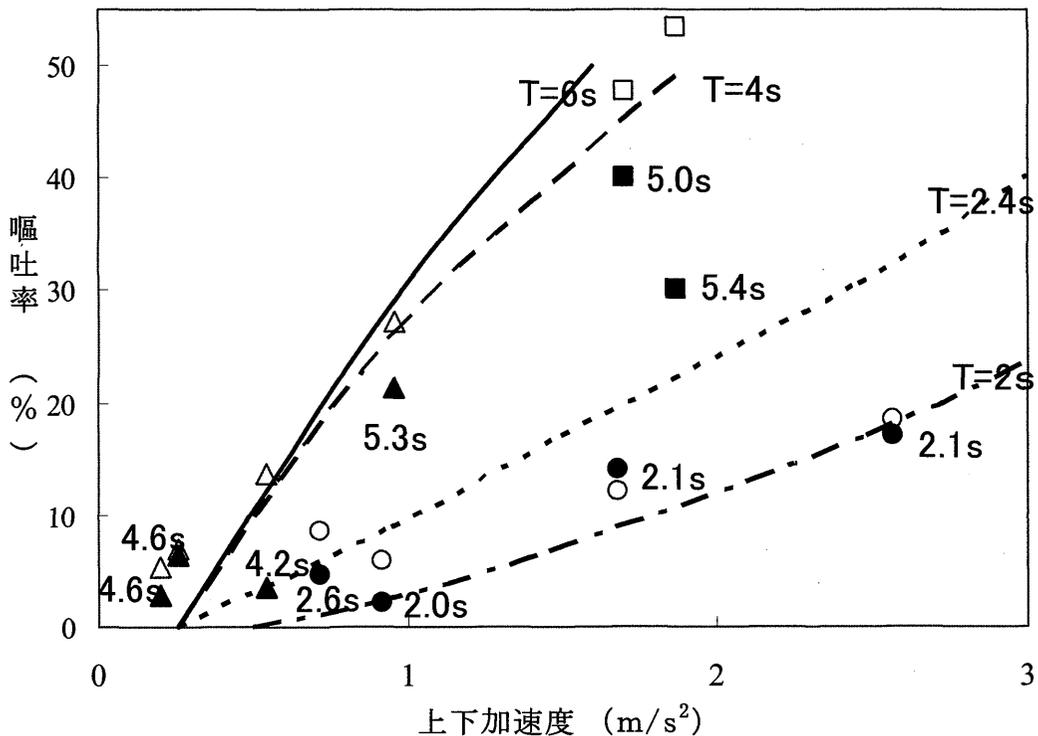


図 4 船酔い率の計測値と計算値の比較

7. 結言

本研究では、国際振動基準 ISO2631-1(1997)の一部に記載されている動揺病に関する評価の考え方と特徴について述べ、それにもとづいた乗り物酔いの推定法と評価法について検討を行なった。得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) ISO 基準に基づいた実用的動揺病推定算式[(8)式]を導き、容易に適用できるような解析ソフトを作成した。また、将来的に嘔吐以前に現れる悪心、冷汗、頭重などの動揺病発症率の推定にも適用可能であるよう配慮した。
- (2) 本推定法により、嘔吐率におよぼす動揺加速度、動揺周期、暴露時間などの影響についての一般的傾向を調べた。また、O'Hanlon の室内動揺実験結果と比較し、ほぼ同一の傾向を示すことを確認した。

- (3) 船酔い率に関する池田の実船実験結果と本方法による推定計算結果を比較し、嘔吐率実験係数 $K_n = 1/3$ を使った場合、嘔吐率に関して、1~2 倍の範囲で過大評価となるが、実用推定式としては許容できるであろう。

終りに当たって、生活環境の利便性により三半規管が機能低下し、めまいや平衡失調を訴える現代人が急増しているという。それと相まって乗り物酔いも多様化し、報告件数も増えている。乗り物酔いの研究は変わり行く母集団を対象とした生体の複雑な生理現象の解明が必要である。乗り物酔いを定量的に把握するためには、実験データの蓄積が不可欠であり、そのための実験方法や実験装置の研究などが、まず望まれるところである。

本研究の実施にあたり、動揺病に関する文献調査、データ収集・整理に協力いただいた卒業生の今泉佐知子、松本健介（平成 14 年）、馬場重之（平成 15 年）の諸君に感謝の意を捧げます。

参考文献

- (1) ISO2631 Part3 ; Evaluation of Exposure to Whole-body Z-axis Vertical Vibration in the Frequency Range 0.1 to 0.63Hz, 1985
- (2) 東 司(1993), 船酔いのメカニズムとその対策, 関西造船協会誌, 第 20 号, pp.1-6.
- (3) Griffin,M.J. (1990), Handbook of Human Vibration , Academic Press LTD
- (4) ISO2631-1 ; Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration . Part1 ; General Requirement , 1997.
- (5) 松本 互平 (2001), 振動許容限界曲線の数式および図式表示法, 関西造船協会平成 13 年春季講演会梗概, pp.169-170.
- (6) O'Hanlon,J.F.&McCauley,M.E (1974), Motion Sickness Incidence as a Function of the Vertical Sinusoidal Motion , Aerospace Medicine
- (7) 池田 良穂ほか (1990), 旅客船設計における耐航性性能評価に関する研究, 関西造船協会誌, 第 214 号, pp.107-108.

英文抄録

Practical Method of Motion Sickness Evaluation

Kohei Matsumoto, Norihiro Fujii

Abstract

In planning and designing vehicles or structures, practical methods of estimating and evaluating motion sickness are desirable characteristics with respect to riding quality or habitability. In 1997, the International Standard for Motion Sickness was published as part of the vibration standard of ISO2631-1.

In the present study, an evaluation method based on the ISO standard was investigated. An estimation formula was derived for physiological incidences of motion sickness including vomiting. A computer program applicable for practical use was developed. The effects of physical factors such as oscillating frequency, acceleration and exposure time on incidence of motion sickness were discussed. Comparison of the present results with O'Hanlon's experimental results and Ikeda's research on seasickness revealed that the proposed method was verified to yield a reasonable estimation.

