

船舶の乗り心地に関する研究*

池 田 良 穂^{*1}

1. はじめに

今はやりのクルーズに関するアンケートで、「クルーズに乗りたいか」との問いに、約半分の人が「船酔いが嫌なので乗りたくない」と答えたという。このように船に乗って気持ちが悪くなり、嘔吐にまで至って、船の旅を敬遠する人は少なくない。

この船酔いの原因は、上下する波によって生ずる船の運動にあり、動揺病の一種に分類されている。動揺病は、車、エレベーター、飛行機などでも発症する病気だが、運動が収まると直り、運動に長時間晒されると次第に慣れてしまうという特性もあるため、あまり重篤な病気とは考えられてこなかった。

船の場合には、船を支えている浮力と密接に関連する水面自体が波として大きく上下する。その上下量は、台風などの嵐では10m以上になることもある。こうした波の中で揺れる船体の中での人間は、陸上の建物にすると3階以上もの高さを上下、左右に揺すられ、さらに回転運動も加わるから尋常な状況ではない。船酔いが、動揺病の中でも特に嫌われる所以である。

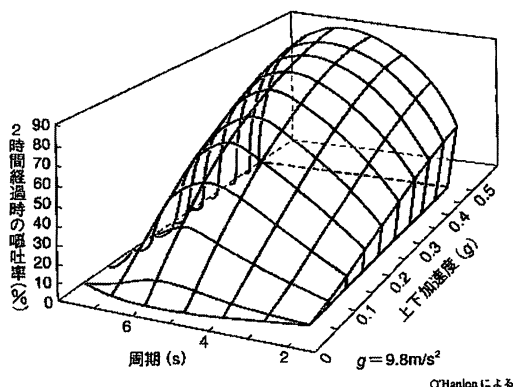
2. 船酔いのメカニズム

動揺病に関する画期的な成果を得たのは米国のO'Hanlon教授で、1974年に発表した論文で、嘔吐にまで至る上下加速度と周期の関係を1つの図にまとめた¹⁾。この研究は、宇宙酔いに関する研究の一環として行われ、上下に運動する部屋に入った人間が嘔吐に至るかどうかを上下加速度と周期を系統的に変化させて調査したもので、その結果を図-1に示す。上下加速度は重力加速度 g との比で表し、2時間の暴露で嘔吐した人の割合をパーセントで表している。この図から分かる船酔いの持つ最も特徴的な傾向は、周期が5~6秒で嘔吐率がピークをもつ

ていることであろう。すなわち、人間には酔いやすい周期があるということを示している。この5~6秒という周期は、人間が歩いたり走ったりした時の日常的な周期に比べるとずいぶん長い。すなわち、人間の日常の動きで酔うことはないように人間の体ができていることを示している。

船酔いの先駆的な研究の1つである富の研究^{2),3)}では、船酔いのメカニズムについて、体内の加速度知覚センサーである内耳の耳石器や半規管の固有周期が6~9秒にあるために、神経細胞に載っている耳石もしくは三半規管内のリンパ液が同調振動を起こすのではないかと仮説を立てている。すなわち同調の結果、この周期では加速度を過大に知覚することとなり、船酔いを起こしやすくしているのではとの仮説である。

他の動揺病に比べて船酔いが問題視される場合が圧倒的に多い理由は、この周期にもあることが分かっている。海上の波には5~9秒の波が非常に多く、船の上では、人間が最も酔いやすい周期に晒される可能性が大きいのである。また、10秒以上の長いうねりと呼ばれる長波長の波でも、前方から受けながら船が走るとドップラー効果で、実際に会える波の周期は短くなり5~9秒の周期で船体が揺れ



O'Hanlonによる

図-1 O'Hanlon が計測した嘔吐率と上下加速度の振幅・周期の関係

* Riding Comfort of a Ship

^{*1} Yoshiho Ikeda : Osaka Metropolitan University (大阪公立大学)

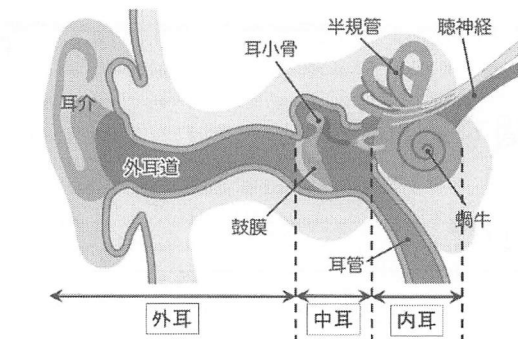


図-2 人間が体の運動を感知するセンサー「内耳」
（受験のみかた「図解 耳の構造と聴覚・平衡覚が生ずる仕組み」より）

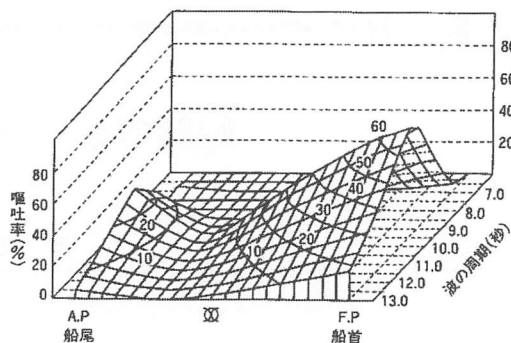


図-3 船内各位置でのMSI（嘔吐率）の推定結果：
5000総トン級客船が、波高2mの向波中を18
ノットで航行中の推定例。市販プログラム¹⁰⁾
を使用。

ることは珍しくない。

3. 脳の情報混乱説

前述したように、人間が受ける加速度と船酔いの発症の関係はかなり分かっている、実用的に設計や運航に使えるものにはなっているものの、なぜ動揺の加速度が動揺病を発症させるかについて生理学的には答えられていない。現在のところ、最もよく説明できるモデルとして「脳への情報混乱説」がある^{4),5)}。

これは人間が運動を知覚するセンサーである内耳器官（耳石および半規管；図-2）からの情報と、視覚すなわち目からの情報が一致せずに、脳内で情報混乱が起こり、自律神経に不調を来すというもの。揺れる船内で本を読んだりすると2つのセンサーからの情報が違って酔いやすくなり、また揺れていない劇場で揺れる画面を見ても酔いの症状がでることが同説の妥当性をもの語っている。

また、しばらく乗船して船酔いが緩和した人が、船から降りるとしばらく酔ったような感覚が続く「陸酔い（おかよい）」は、船上での矛盾した情報を処理することに慣れた脳が、陸に上がって内耳器官からの加速度情報と視覚からの運動情報が一致したことに再対応する過程とみられている。

4. MSIによる動揺病発症の判定と船舶設計・運航への応用

前述のO'Hanlonの実験結果の図に基づく動揺病発症の判定は、MSI（Motion Sickness Incidence）と呼ばれる指標として、広く船舶の船酔い判定に用いられている。この実験室で得られたデータは、運航する実船上での加速度の計測と乗客の嘔吐率調査とを比較した研究ではほぼ一致することが確かめられ

ている。まずLawtherらによるドーバー海峡横断フェリーでの実船実験⁶⁾があり、さらに日本人乗客を対象とした著者らの各種船舶での実船実験の結果^{7) 9)}が公表されている。いずれも、同図を使った判定結果と実験結果が比較的良好に符合している。ただし、実際の船酔いの発症は、その時の体調、精神状態、ペンキの匂い等の外的要因にも影響されることから、MSI推定値と実験結果との一致にはばらつきは少なくない。

このように実際の船舶設計や運航時の操船判断には、MSIという判定法が実用的なレベルで使えたとみられている。波浪中の船体運動を理論計算に基づくシミュレーションで求めて、船体各部におけるMSIを推定するPC用プログラム¹⁰⁾も市販され、それに基づいて客船の船内配置を決定することや、客船運航時の減速や変針に用いることも行われている。

船体各部のMSIを同システムで計算した例を図-3に示す。

5. 船酔いを防ぐ方法

船酔いを防ぐ乗客側の対策として、脳での情報混乱を起こさないように、目からも動いている情報を積極的に入れることや、目を閉じて一方の情報を遮断する等の方法が考えられるし、情報に矛盾があっても脳が対応できるように、次に加わる加速度を予測する方法も有効とみられている。また、船酔いを押さえる薬も数多く開発されて市販されている。

船のハード的な対策として最も効果的なのは、船を波の中で揺れないようにすることであろう。横揺れについてはフィンスタビライザー（図-4）が極めて効果的であり、ほぼすべてのクルーズ客船や大

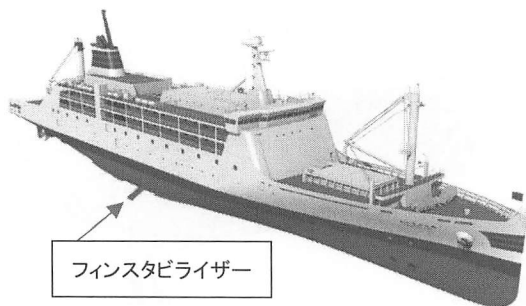


図-4 横揺れを止めるフィンスタビライザー（提供：小笠原海運）



図-5 荒れた海上を進む船は大きな縦揺れをしながら進む。特に船首部では大きな上下加速度が発生して船酔いにつながる。



図-6 大型化して300m以上の船長になると船体運動は小さくなり船酔いの心配はなくなる。奥の船は長さ331mの大型クルーズ客船、手前の小型船は長さ70mのカーフェリー。

型カーフェリーには標準装備されている。水面下に設置した翼状のフィンを、横揺れ運動の角速度に比例制御させて減衰力を発生させて、同調時の横揺れを80～90%も減らすことができる。

ただし、船体運動の中で最も船酔いに深く関係するのは、縦揺れと上下揺れだとみられている。縦揺れ（図-5）は船首船尾を上下させるような回転運動であり、上下揺れは船体自体が上下に運動する。この2つの運動については制御が難しく、高速船の場合を除くと有効な減揺手段はまだない。さらに、これらの揺れを無理に止めると、波からの大きな力が船体に働いて、船体自体が折れ曲がったり、船体構造を損傷したりするという安全性の恐れすらある。

また、船酔いに最も影響がある上下加速度は、図-3からもわかるように船上の位置によって大きく変わる。縦波の場合には船首や船尾では大きく、船体中央より少し後ろの位置で最も小さくなる。このように船上で上下加速度の小さい場所を選ぶことも船酔い防止には効果的である。

向波（船の前方からの波）の場合の船体運動を小さくするには、船の大型化が最も効果的で、10万総トン以上の、船の長さが300mを超える大型の客船（図-6）では、乗客の船酔いがほとんどなくなるとの報告も多い。海上の波の波長は150m程度までが多く、300m以上の船長の船になると複数の波が一船長内に入るようになり、力が分散されて大きな強制力を生まないためである。ただし、こうした大型船は大きな運動はしないものの、波が船体に当たった衝撃力（パンチング）で船体が細かく振動するホイッピングを発生することはあるが、その振動周期が短いこともあって船酔いにはつながらない。

6. 高速船の乗り心地

小型高速船の乗り心地は、前述の船酔いだけでは

評価ができない。

それは船が高速で波の中を走ると、波との出会い周期は短くなり、船体運動は激しくなるためである。この時に船上にいる者に働く加速度は、周波数の二乗に比例して急増し、やがて上下加速度が重力加速度 g と同じオーダーになると体が浮き上がる。小型高速旅客船における乗客のケガでは、座席から浮き上がってから尻から落ちて腰椎圧迫骨折となるなどの事例が多く発生している。このため小型高速旅客船では、座席のシートベルトの着用が推奨されている。また、小型高速艇には多い半滑走型船型（モーターボートのように船底に働く揚力で船体を浮上させて高速航行する）では、向波中での上下加速度の分布が、船尾付近が最も小さく、船首にいくほど大きくなる。したがって、海が荒れ始めると乗客の座る席を前方から後方に移動させる処置等がとられている。

こうした高速船の乗り心地を改善するための方策として、揺れにくい船型の開発、付加物による運動制御が行われている。揺れにくい船型としては、水面貫通型船型（ウェーブピアシング型；図-7）がある。船首を鋭く尖らせて、波を切り裂くように航



図-7 船首を尖らせて、波を貫通して進むコンセプトの波浪貫通型船型が1990年代にオーストラリアで開発された（提供：INCAT Tasmania）



図-8 完全に水中に没水させた水中翼で船体を支えるジェットフォイルは、波浪中でもほとんど揺れない究極の運動性能をもつ

行することで縦揺れを抑えている。また半没水型船型は水線面付近の体積を削って、水面下の体積を増やしたもので、波による復原力変動を減らすことで波からの外力を減らして揺れを防いでいる。

究極の揺れない船としては、米ボーイング社が開発したジェットフォイル（図-8）をはじめとした全没翼型水中翼船がある。水面下に完全に沈めた水中翼（図-9）で主船体を浮き上がらせて、波からの外力をなくするというコンセプトで開発されたが、傾いた時に元に戻るための復原力がないため、常に水中翼の揚力を自動制御して船体を水平に保つ必要がある。また高速航行時のみに船体を海面上に保つことができると、揚力で自重を支えていることから「2乗3乗の法則」で大型化が難しいという欠点がある。

小型高速船では、各種のフィンによって縦揺れ、横揺れを軽減することも行われている。これは高速

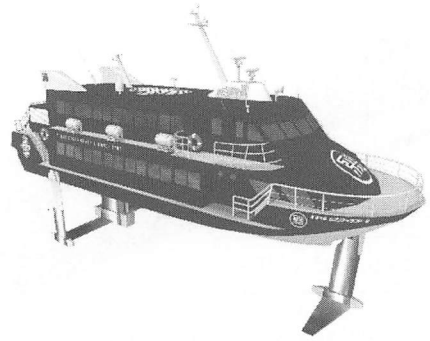


図-9 東海汽船のジェットフォイル「結」の翼システム（提供：東海汽船）

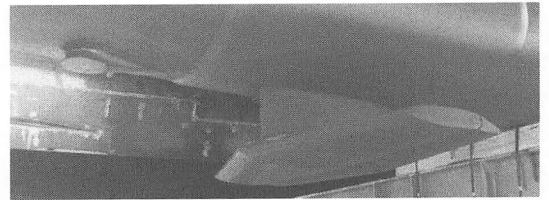


図-10 高速カーフェリーの船底のTフォイル

になると速度の二乗で大きくなる揚力の特性を活用したもので、比較的小さなフィンでも船体運動をかなり軽減させることができるためだ。また船尾船底にヒンジ状に取り付けたトリムタブ、垂直に平板を突き出すインターセプターが縦揺れを軽減して乗り心地を改善する装置として広く実用化されている。いずれの装置も、縦揺れ運動を計測して、それに基づく制御を行っている。また、船首水面下にフィンを取り付けたり、船首船底から突き出したT字型のフィン（図-10、図-11）を取り付けたりする試みもされている。

2つの胴をもつ双胴船で、水面下に双胴船底をつなぐ形で水中翼を設けて、その水中翼を制御して船体運動を低減する翼付水中翼船（図-12）は、特に、日本近海の多くの航路で活躍している。中には、縦揺れだけでなく、横揺れの制御を行う船もあり、高速船の乗り心地改善に寄与している。

双胴の高速船の欠点である過度の横復原性を抑制するために開発されたのが3つの胴をもつトリマランである。イギリス海軍やオーストラリアの造船所で開発が進み、軍艦、フェリー等で実用化が進んでいる。高速船特有の短周期のガタガタとした船体運動が緩和されて、乗り心地がよくなったという。

また特異な例として、乗客のいる客室だけを常に水平に制御して揺れなくして船酔いを回避するシス

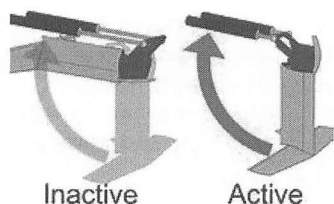


図-11 収納式 T フォイルの概念図



図-12 水中翼付き双胴高速旅客船。水中船底の水中翼で浮上し、かつ運動制御を行って乗り心地の改善を行っている。

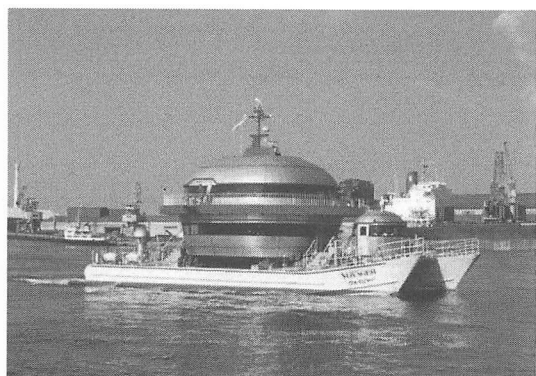


図-13 丸い船室部分を水平に制御して、旅客を船酔いから解放した

テムも三菱重工によって開発されてハイ・ステイブル・キャビン艇(図-13)として実用化¹³⁾されたが、あまり普及はしていないようだ。

7. おわりに

船舶の乗り心地、中でも最も嫌われる船酔いについて解説した。船酔いが動揺病の中で最も嫌われるのは、その動揺周期が、人間がめったに晒されることのない、5~6秒という比較的長い周期にあることがわかっている。また、上下加速度が最も重要な

物理パラメータとなる。

嘔吐に至る生理的なメカニズムとしては、内耳器官からの加速度情報と、目からの運動情報が異なることによる脳の混乱説が最有力視されており、この2つの知覚センサーからの情報の矛盾をなくすること、また矛盾した情報を処理できるように脳を教育することでも船酔いは軽減する。

ハードとしての対策としては、揺れない船を造ることが最も重要で、各種の減揺装置が開発され実用化されていることを解説した。今後も、各種の減揺装置が開発されることに期待をしたい。

船本体についても、揺れない船の開発が綿々と行われており、短周期の運動で乗り心地の悪い高速旅客船の場合の開発状況に触れた。一方、大型化したクルーズ客船では、10万総トンを超えて、長さが300mを超えてきて、船酔いの問題がほとんどなくなった事例も紹介した。

なお、国際規則 ISO では 2631-3^{11),12)} として暴露される動揺の周波数と加速度に対する暴露時間の許容限界が示されており、これらは本記事で紹介した O'Hanlon の研究成果¹⁾ や Lawther らの実験結果⁶⁾ をベースとして作られている。

参考文献

- 1) J.F. O'Hanlon, M.E. McCauley : Motion sickness incidence as a function of frequency and acceleration of vertical sinusoidal motion, *Aerospace Medicine*, pp. 366-369 (1974).
- 2) 富武満 : 船舶における振動および同様許容限界に関する研究 (第1報), *関西造船協会誌*, no. 104, pp. 18-30 (1961).
- 3) 富武満 : 船舶における振動および同様許容限界に関する研究 (第2報), *関西造船協会誌*, no. 105, pp. 29-40 (1962).
- 4) 池田良穂 : 船酔いの科学, フェリー・客船情報 '97, 船と港編集室.
- 5) 有馬正和 : 船舶の乗り心地評価の動向, フェリー・客船情報 '98, 船と港編集室.
- 6) A. Lawther, M.J. Griffin : Prediction of the incidence of motion sickness from the magnitude, frequency and duration of vertical oscillation, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 82, pp. 957-966 (1987).
- 7) 池田良穂, 高田浩, 石原慎一, 副島信 : 旅客船設計における耐航性評価に関する研究, *関西造船協会誌*, no. 214, pp. 105-112 (1991).
- 8) 池田良穂, 白澤秀夫 : 旅客船設計における耐航性評価に関する研究 (第2報), *関西造船協会誌*, no. 222, pp. 141-147 (1994).
- 9) 池田良穂, 白澤秀夫 : 旅客船設計における耐航性評価に関する研究 (第3報), *関西造船協会誌*, no. 224,

- pp. 87-93 (1995).
- 10) 池田良穂, 片山徹: 船舶用 CAD システム, 船と港編集室 (2001).
 - 11) ISO: ISO2631-1 Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration (1997).
 - 12) ISO: ISO2631-3 Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration z-axis vertical vibration in frequency range 0.1 to 0.63 Hz (1985).
 - 13) 木原和幸, 濱田知聰, 大仲茂樹, 北村徹: 200 人乗りハイ・ステイブル・キャビン艇の開発, 西部造船会会報, vol. 81 (1991).