船員のワークロードに関する研究－I. －海難と生体リズムの関係－

村山義夫 * ・ 加藤和彦** ・ 遠藤 真***
小林弘明**** ・ 重田茂夫*****

A Study on Seafarers' Work-load - I. －The Corelation between Casualties and Biorythms－

Yoshio MURAYAMA, Kazuhiko KATO, Makoto ENDO,
Hiroaki KOBAYASHI and Shigeo SHIGETA

Abstract

A workload is the concept for synthesizing a stress and a strain, which contains watch-keepers' performance connected with casualties caused by human errors. This report explains analyses on the relationship between casualties and stress in an aspect of biological characteristics.

One of data for these analyses is the time-related frequencies of domestic vessels' casualties (n=1,005 vessels). The second data is the number of watch-keepers engaged in the job for every hour (n=4,725 days). The third data is an oral temperature, a critical flickering frequency (CFF), and subjective feelings for a fatigue and a sleepiness from the field research on board (n=59 days).

Analyses based on maximizing entropy method make clear that powerspectrums have peaks of power in around a half day and about a leastsquares methods make clear approximate cyclical functions that temperature at 0:30 p.m., CFF at 1:40 p.m., fatigue at 1:00 a.m., and sleepiness at 0:30 a.m.

These analyses suggest that the increasing casualty in midnight and early morning is related to a circadian rhythm in biological function rather than traffic conditions. It is important to prevent casualties that we investigate a workload under influence of environmental stress, task demand, physiological and psychological response, and performance for task, and so on.

1. はじめに

交通システムで運転者の占める役割は大きい。事故直前の場面では、運転者の操作が必須であるために、責任が問われる。そしてヒューマンエラーが原因とされることが多い。特に船や自動車は、操船者や運転手の判断と操作の自由度が大きいためミスが強調される。海難審判庁が1年間におこなった採決件数は837件(1,166隻)であり、そのうち自身の原因による海難1,065隻の延べ1,554原因のうち、1,516原因が操船者のヒューマンエラー、その473原因は見張り不十分等とされている⁽¹⁾。

業務上の違反に重点を置いて事故分析すると、注意喚起に終始する「精神主義」に陥り、原因の本質の追求が希薄になりがちである⁽²⁾。安全性を高めるには、ヒューマンエラーがおこる原因と背景についての分析を深める必要がある。この報告は、海難と心身機能の状態との関わりを、特にその生物的特性について

* 正会員 海上労働科学研究所 (〒102 東京都千代田区麴町4-5海事センタービル4F)
 ** 非会員 海上労働科学研究所 (〒102 東京都千代田区麴町4-5海事センタービル4F)
 *** 正会員 富山商船高等専門学校 (〒933-02 富山県新湊市海老江練合1-2)
 **** 正会員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島2-1-6)
 ***** 正会員 株式会社 郵船海洋科学 (〒140 東京都品川区南品川2-3-6)

分析し、ヒューマンエラーを減らす上での基本的な問題を提起する。

2. ワークロード研究について

2.1 船舶システムと人

船舶は、複数の機器を含む装置全体が、運航の目的にそって自律的に制御しつづけるフィードバック回路をもつ自動制御システムである。海上には多様な利用者がいることから、鉄道や航空機などのような航行管理システムをとることは難しく、船内の人によって管理される自己完結的なマン・マシンシステムである。

海難の面から船舶システムを考えると、その運動の制御に注目される。運動の制御は舵と推進機によっておこなわれるため、2系統のシステムを有する。各システムは自動制御機構をもち、その制御範囲外の状態になったり、制御範囲内に障害があれば警報を発し、人の制御に委ねる。人は、生体内では筋・骨格系、循環系、神経系、内分泌系、代謝系が連動して、機能の促進と抑制が制御され、集団では職務分担や勤務時間の分担などによって機能が調整される。勤務中は船舶のシステムを統御する役割を担い、勤務外には労働力を再生産する。このように人は、船舶システムの一部であると同時に、外部と物質・エネルギー、精神的刺激を交流することによって、人としてのシステムを維持する解放されたシステムである。

したがって、一般にマン・マシンシステムは、人をマシンの外部に直列に連ねるか、内部に含まれた形で理解されることが多いが、船舶システムでは、人を図1のように、システムの機構に含まれないが部分があるシステムと理解する方がよい。

2.2 ワークロードについて

人の作業の結果（パフォーマンス）に影響する因子は、状態特性、作業の指示、作業と設備の特性、および心理的ストレス・生理的ストレスといった外的因子と、内的因子としての人間の個人的特性である⁽³⁾。この外的因子は作業（タスク）にともなうものと、作業の環境による負荷（環境負荷）に分類できる。人はこれらストレスに適応しながら要求に応じた結果をもたらすが、このとき負担反応をとともなう。パフォーマンスの程度は、適応のレベルと関連しており、適応のレベルはストレスのレベルと関連している。ストレスが強すぎても少なすぎても、適応レベルは下がるという特性がある⁽⁴⁾。

これらの関係を総合的に示す概念がワークロードである。「ワークロードは、作業負荷（Work stress）と作業負担（Work strain）であり、前者は、作業システムにおいて人間の生理的・心理的状态を乱すように作用する外的条件や要求の総量であり、後者は、作業負荷が個人の特性や能力と関連して与える影響である」と定義されている⁽⁵⁾。したがって、ワークロードの要素の関係は図2のようになる。

船員には、船舶システムが要求する課題があり、常に移動する船舶内で生活と作業をするということから派生する各種の負担がある⁽⁶⁾。特に、仕事の間であると同時に生活の間であり、本来の生体リズムと異なる夜間勤務を連続することが、生体本来の活動と回復の日内リズムから逸脱することが予想される。したがって、このような負荷と海難との関係を明らかにすることは、ワークロードについての研究を進める上での基本的課題である。

3. 海難、当直、心身機能の周期性分析

3.1 分析資料

分析対象資料は、海難審判庁が発表した1993年

図1 船舶システムと人の関係

S：船舶内のサブシステム、H：人の機能の構成要素
添え字i, j, k, lは個別要素の識別番号

図2 ワークロード要素の関係

までの5年間に裁決した内航船の海難1,005隻の時刻帯別発生隻数⁽⁷⁾である。図3のとおり深夜に多く日中に少ないリズムがある。内航船員の時刻帯別当直者割合は、内航船160隻、675人の延べ4,725日の生活行動記録の自調査結果である⁽⁸⁾。時刻帯別の当直者比率は、変動が少なく、深夜から日中は約15%で夕方に20%に増加する程度である。

船内生活における生体リズムの状態を確認するために、日本とオーストラリア間の往航と復航に各2回、4時間交代の8名の当直者を含む16名の乗組員、延べ59日に、数時間間隔に舌下温、ちらつき融合閾値(フリッカー値)、疲労の自覚(表1右欄、産衛学会、「疲労しらべ」の一部)⁽⁹⁾、眠気の自覚(表1左欄、石原、「KSS調査票」の一部)⁽¹⁰⁾を測定した⁽¹¹⁾。ただし、日中勤務者は夜間の就寝から起床まで測定せず、この間の測定は当直者のみであり、日中の勤務、夕食から就寝までの休息、および夜間の当直勤務とその前後である。

3.2 分析方法

海難と当直者比率のデータは、時刻帯1時間毎の海難隻数または当直

者比率と時刻である。心身機能のデータは、各人の昼の測定値(昼に測定していない延べ4日分はその前後の中央値)との差を求め、3分間毎に3名までの平均値を一組のデータとした。疲労と眠気の値は、「ある」または「ややある」の回答を訴えありとし、疲労ではその合計数、眠気では重みづけした得点平均である。ただし、眠気自覚では、得点がない場合は分析対象から除いた。解析ソフト、Mem Calcを用いて、この時系列データから、移動平均により修正時系列データを作成し、(1-1)式による最大エントロピー法でエネルギーが大きい周波数を求め、その周期と位相で近似されるフーリエ級数を(1-2)式による最少2乗法で近似曲線を得た⁽¹²⁾。さらに、1日周期のリズムを仮定した1関数を与えた日内リズムを求めた。

$$P(f) = \frac{\Delta t \cdot P_m}{\left| 1 + \sum_{k=1}^m \gamma_k \exp(i2\pi f \Delta t) \right|} \quad \text{.....(1-1)}$$

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i \cos \{ (1/2\pi T_i) (t - \phi_i) \} + a_{i+1} t + \epsilon(t) \quad \text{.....(1-2)}$$

ここに、

$P(f)$: パワースペクトル

Δt : 測定時間間隔

f : 周波数

P_m : 予測誤差の分散

図3 時刻別海難隻数(内航船裁決隻数)分布⁽⁷⁾

表1 疲労・眠気調査表

()内の数は重み

記入予定時刻 [] 実際の記入時刻 [] 時 [] 分
 体温 [] °C フリッカー値: 1回目 [], 2回目 [], 3回目 []

今の状態についておたずねいたします。あまり深く考えずにお答えください。
 次のようなことについての尺度のうち、あてはまる番号に○をつけてください。

(1:まったくそう感じる、2:ややそう感じる、3:あまりそう感じない、4:まったくそう感じない)

1. まぶたが重い (5.54)	1 - 2 - 3 - 4	1. 頭が重い	1 - 2 - 3 - 4
2. 機敏である (2.38)	1 - 2 - 3 - 4	2. 全身がだるい	1 - 2 - 3 - 4
3. ゆったりくつろいでいる (3.46)	1 - 2 - 3 - 4	3. 足がだるい	1 - 2 - 3 - 4
4. 目がしょぼしょぼしている (5.37)	1 - 2 - 3 - 4	4. あくびがでる	1 - 2 - 3 - 4
5. 身体がだるくない (3.03)	1 - 2 - 3 - 4	5. 頭がぼんやりする	1 - 2 - 3 - 4
6. 頭がさえていない (4.68)	1 - 2 - 3 - 4	6. ねむい	1 - 2 - 3 - 4
7. 能率がよい (1.22)	1 - 2 - 3 - 4	7. 目が疲れている	1 - 2 - 3 - 4
8. 活力がみなぎっている (0.58)	1 - 2 - 3 - 4	8. 動作がぎこちない	1 - 2 - 3 - 4
9. だるくもないし、 すっきりもしていない (3.63)	1 - 2 - 3 - 4	9. 足もとがたよりない	1 - 2 - 3 - 4
10. 何となく眠気を感じるが、 活動していると忘れる (4.39)	1 - 2 - 3 - 4	10. 横になりたい	1 - 2 - 3 - 4
11. 気力が充実している (0.82)	1 - 2 - 3 - 4	11. 考えがまとまらない	1 - 2 - 3 - 4
12. 気がゆるんでいるわけではない (3.95)	1 - 2 - 3 - 4	12. 物事に熱心になれない	1 - 2 - 3 - 4
13. 考えることが苦にならない (2.11)	1 - 2 - 3 - 4		

γ_k : 予測誤差フィルター

m : 項数

$y(t)$: 近似関数

a_0 : 水準値 (y 切片)

a_i : i 番目モードの振幅

T_i : i 番目モードの周期

ϕ_i : i 番目モードの頂位位相

a_{i+1} : 傾向線の傾き

$\epsilon(t)$: 傾向線と周期成分で説明できない成分

3.3 分析結果

海難のデータを分析した結果は図4のとおりである。図4-1は2.5時間間隔の移動平均データのパワー分析結果である。約半日にピークがあり、周期は約1日である。図4-2はパワー分析結果の主な4関数の周期を与えた最小2乗近似の結果である。実測値(破線)との差は、平均値が約-1、標準偏差が約6(振幅の約40%)である。図4-3は24時間周期の1関数で近似した結果である。頂位位相は3.6時、すなわち海難のピークは午前3時40分頃である。この関数の実測値との差の標準偏差は約9(振幅の約60%)であり、先の4関数近似より1.5倍になる。内航船の当直の割合は図5のように夕方の6時50分頃がピークである。体温は図6のように午後の3時40分頃がピークで、逆にその12時間前の午前3時40分頃にもっとも低くなって、心身活動が不活発になる。フリッカー値は図7のように午後の1時40分頃に、もっとも視覚刺激の弁別がよく、午前1時40分頃に悪くなる。疲労の自覚は図8のように午前1時頃に最低になり、午後1時40分頃に良い状態になる。眠気の自覚は図9のように午前0時半頃にピークになり、午後0時半頃に眠気をもっともなくなる。

4. 考察

海難と当直者比率の分析結果は、海難は深夜から早朝に多いが、そのとき当直者の割合から推定される航海隻数が多いわけではないことを示す。また、夜航海の前半は、航海隻数がやや多いにもかかわらず、海難はその後ほど多くはない。したがって、海難は航海隻数、夜航海という環境条件とあまり関係ないことがわかる。

一般に、活動力、気分、記憶力などの心身機能のピークは午後2時頃であり、体温は午後4時頃であるが⁵⁽¹²⁾、夜間または早朝勤務する当直が半数含まれる乗組員の集団においてもこの傾向は同じであり、しかも、深夜から朝にかけての測定値は当直者の覚醒中の測定値であることから、心身機能の日内リズムは交代制によっても維持される強固なリズムを保っている。

図4-1 時刻別海難隻数変動の最大エントロピー法によるパワースペクトル

図4-2 時刻別海難隻数変動のパワー分析結果を与えた最小2乗近似曲線

図4-3 時刻別海難隻数変動の24時間周期関数の最小2乗近似曲線

体温の変動は海難の変動と完全に逆相であり、フリッカー値は海難よりやや位相が早く逆相である。体温もフリッカー値も心身機能が活発なときに高くなるので、海難は心身機能が低下している時刻帯に多い。疲労と眠気の自覚は海難と同相で、やや位相が早いことから、疲労や眠気がしばらく続いたような時期に海難が多い。

以上の3点から、海難隻数の変動は、交通量や夜航海の条件との関係より、心身機能の変動との関係が強いと考えられる。ただしこれは、ある船の人の心身機能と、それとは無関係の船の海難の頻度から得られた時刻別変化の類似性からの予想である。海難のヒューマンエラーの原因を明らかにするには、パフォーマンスに影響する図2に示した各要素の関わり、すなわちワークロードを明らかにすることが必要である。ワークロードは、タスクと環境負荷が人に与えられ、パフォーマンスと負担反応として出力される全体の収支として関数(2-1)式であらわされる。この関数は、各要素を F_i とすると、ワークロードに一定の重みで影響する各要素の一次結合項 $\lambda_i F_i$ 、個人特性が左右する変動項 $e_i F_i$ 、および要素が交互作用する関数 $f(F_i)$ の項からなる(2-2)式のように表わされる。

$$WL = F(T, L, P, R) \dots\dots\dots (2-1)$$

$$= \sum \lambda_i F_i + \sum e_i F_i + f(F_1, F_2, F_3, F_4) \quad (2-2)$$

これらの各項の関係をj得ることによって、ワークロードを適度にするためのバランスを明らかにすることができる。今回の分析は、内航船の操船の全般的タスクにおいて、夜間勤務の環境負荷が加わった場合の、海難隻数によって測られるパフォーマンスと、船内集団の心身機能の波動性について調べたことになる。このように、ワークロードの要素を抽出して、相互の関係式(2-2)を明らかにすることによって、タスクと環境負荷を調整してパフォーマンスと負担反応を制御することや、パフォーマンスと負担反応を調整するための支援の目安を得ることができる。

5. おわりに

海難と負担反応としての心身機能の1日の周期性の分析をした。海難は明らかに深夜と早朝に多い周期がある。船内集団の心身機能は、海難と体温は全く逆相の、その他は海難より早い位相の同相もしくは逆相の関係にあり、海難の波動性は心身機能の日内リズムの波動性と対応している。心身機能は日内リズムの他にタスクや環境負荷によっても変化し、パフォーマンスに影響する。ワークロードはこれらの関係を総合的に示す指標である。心身機能とパフォーマンス、あるいは心身機能に影響する負荷などワー

図5 時刻別当直者率の24時間周期関数の最小2乗近似曲線

図6 時刻別体温の24時間周期関数の最小2乗近似曲線

図7 時刻別フリッカー値の24時間周期関数の最小2乗近似曲線

クロードの要素の関係を知り、それらを調整することが海難防止に有効である。

参考文献

- (1) 海難審判庁：海難審判の現況，海難審判庁，1994.
- (2) 野沢 浩，他：自動車運転労働，労働科学研究所，1980.
- (3) 林 喜男：人間信頼性工学，海文堂，1984.
- (4) P.A. Hancock：A Dynamic Model of Stress and Sustained Attention, Human Factors, 31(5), 1989.
- (5) 長沢有恒：パイロット・ワークロードの測定評価法(展望)，航空医学実験隊報告，1984.
- (6) 大橋信夫，他：海上労働の特殊性にもとづく労働の評価法に関する予備的研究，海上労働科学研究所，1981.
- (7) 海難審判庁：内航貨物船海難の実態，海難審判庁，1994.
- (8) 篠原陽一，他：内航船員の労働と生活に関する労働科学的調査，1984.
- (9) 石原金由，他：K S S 調査表，関西大学.
- (10) 齊藤 一，他：現代労働衛生ハンドブック，労働科学研究所，1988.
- (11) 村山義夫，他：技術革新に伴う海上生活の変化に対する船員の適応に関する研究，海上労働科学研究所，1990.
- (12) 三宅浩次，他：生物リズムの構造，富士書院，1992.
- (13) 千葉喜彦，他：時間生物学ハンドブック，朝倉書店，時間生物学ハンドブック，1991.
- (14) R. Condon et al.：Work at Sea：a study of sleep, and of circadian rhythms in physiological and psychological functions, in watchkeepers on merchant vessels, Int Arch Occup Environ Health, 60, 1988.

質疑応答

天下井 清(北海道大学)：生体リズムと海難発生との間に相関が強いということですが、生体リズムは生活パターンを変えることによって変えられるものなのでしょうか。

村山義夫：生体リズムは体温をはじめ各種の機能にあります。生体リズムは内因性発現機構で強固なリズムであることが、洞窟内で長期間外部と接触を絶って自由に生活させた実験で約25時間周期のリズムが維持されたことから明らかになっています。これに明暗や社会的、心理的同調因子が作用して24時間リズムが維持されます。光など同調因子を操作することで、飛行による時差ボケの解消を早める効果があるとされています。一端解消した時差ボケが元の地で再同調するには同じ7日間ほどかかりますが、交代制勤務から普通の生活への再適応は1、2日と短いことから、交代制勤務への同調は部分的でしかないとされています⁽¹³⁾。当直船員でも1日周期のリズムが基本で、当直によって部分的に変形するリズムであったという報告があります。この報告をしたヨーロッパのグループは現行の船員の当直体制が最適かどうか問題提起しています⁽¹⁴⁾。今回の分析でも、夜間の測定値は当直者のデータであることから、当直者も1日のリズムにしたがっているとみられます。

図8 時刻別疲労自覚の24時間周期関数の最小2乗近似曲線

図9 時刻別眠気自覚の24時間周期関数の最小2乗近似曲線