緊張ストレス環境における海洋事故の状態遷移 と安全性評価

(その1) 緊張ストレスと心拍変動

正員 福地信義* 正員 篠田岳思*
小野隆弘**

A Stochastic State-transition and Safety Assessment for Marine
Accidents Based on Human Factors

(Part 1; Tensional Stress by Measuring Fractal Nature of Heart Rate Variability)

by Nobuyoshi Fukuchi, *Member*

Takeshi Shinoda, *Member* Takahiro Ono

Summary

The thinking faculty and operating ability of ship operators tend to be affected by their mental work-load under the pressure from navigation environment. The suitable safety measures have to be taken to cope with the relation between stress degrees of operators and human errors based on the state-transition during operating man-machine systems such as a ship maneuvering system.

This paper, on the subject of the state-transition and stress degrees of operators, consists of (1) the estimation of accident incident probability based on the fault tree analysis and (2) the quantitative analysis of the tensional stresses by measuring the fractal nature of heart rate variability under mental work-load during maneuvering several kinds of ships. Then these results are compared with the environmental stress model proposed by K. Inoue et al., and the specific property of tensional stress generated under severe environment may be clarified with a view of to prevent marine accidents.

1. はじめに

人間-機械系システムの設計では、人間に一定レベル以上の判断・操作能力を期待して機械との機能配分を行っているが、人間の思考・行動能力は環境負荷や仕事内容などの外部環境によって大きな影響を受ける。例えば輻輳海域での操船は、タスクロードが大きく、疲労や緊張によって心身機能が低下し、操船能力に影響を与えることが懸念される。従って、このような人間-機械系システムにおいては、環境負荷による心身能力の変化と事故に係わる事象の時間経過に伴う遷移を考慮したシステム信頼性評価に基づくシステム設計が不可欠である。

本研究では、人的過誤による事故では重大でかつ比較的频率が高い衝突事故を対象として、緊張ストレス環境下

における安全性評価を行い、これに基づき事故の状態遷移について解析し、人間-機械系システムに関する安全設計のための基礎とする。

本報では、まず緊張ストレスと人的過誤生起の関係を考慮した船舶の衝突事故に対する信頼性解析を行う。次に環境負荷による緊張ストレスの発生状態を把握するために、操船中における操船者の心拍変動を計測し、心電図から粗視化スペクトル法により緊張ストレス値を算出する。また、操船環境ストレス値として、井上らの提唱する主観的危険度¹⁾²⁾を計算し、緊張ストレス値との比較により操船環境負荷とストレスの関係を調べる。

なお、第2報では、緊張ストレスと人的過誤の関係を考慮して、衝突事故における状態推移をマルコフ過程による確率モデルを用いて推定し、事故防止のための支援システムのあり方について考察する。

2. 緊張ストレスの度合と衝突事故生起の関係

2.1 フォルトツリー解析 (FTA) と生起確率の推定

フォルトツリー解析 (FTA)³⁾をもとに、海洋事故の中

* 九州大学大学院工学研究院

** 三菱重工業 (研究当時; 九州大学大学院工学研究科)

では比較的発生頻度が高く、重大事故になり易い“船舶の衝突、座礁事故”⁴⁾を解析して、事故の生起確率を求める。

「平成10年度海難審判の現況」⁵⁾に示されている事故船舶922隻の衝突事故の原因は、見張り不十分47.5%、航法不遵守19.3%、信号不吹鳴9.8%、服務に関する指揮・監督の不適切7.3%、速力の選定不適切6.5%、報告・引継ぎの不適切3.8%、灯火・形象物の不表示2.3%、となっている。これらの原因項目⁶⁾⁷⁾を知覚、判断、操作・操船の3つに分類して、文献⁴⁾⁵⁾⁶⁾に基づき基本事象の生起確率を算定・類推し、作成した衝突事故のフォルトツリー(FT)と各事象の生起確率をFig.1に示す。

ここで、要救助海難クラスの衝突事故の発生率(海難隻数と保有隻数の比率)はほぼ 2×10^{-2} 隻/隻・年であり、延入港隻数当たり衝突(要救助海難クラス)発生率はほぼ 0.6×10^{-4} 隻/隻(入港)・年であることから、船舶の動きに伴う具体的危険性を対象とした事故発生率は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 隻/隻(運用)・年程度である。従って、このFTより求められた衝突事故の生起確率 1.15×10^{-4} 隻/隻(運用)・年は妥当な値であると考えられる。

2.2 緊張ストレスレベルと事故の生起確率の関係

「衝突事故」のFT(Fig.1)において緊張ストレスの影響を考慮するために、Table1に示すストレスレベルと人的過誤の生起確率(HEP)の関係⁸⁾⁹⁾を用いて、各基本事象の発生確率の値を変えて計算した、ストレスレベルに応じた“衝突事故”の生起確率をFig.2(a)に示す。なお、計算は表のSkilled operatorに関するデータによる。これにより、ストレスレベルは高過ぎても低過ぎても人的過誤は起こり易く、適度なストレスレベルを保つことが事故防止には重要であると考えられる。

また主要中間事象である“知覚失敗”、“判断失敗”、“操船・操作失敗”についても同様にストレスレベル別生起確率を求め、その結果をFig.2(b)に示す。これより、“知覚失敗”の生起確率はストレスレベルに拘わらず比較的低い値を保っているが、“判断失敗”や“操船、操作失敗”の段階ではストレスレベルに応じて大きく変化することが

わかる。

従って、人間-機械系システムにおける安全設計を行うためには、着岸時や輻輳海域などの緊張が高くなる状態でのストレスレベルを把握しておく必要がある。

3. 心拍変動による緊張ストレスの推定

操船時における人間の緊張ストレスのレベルを知るために、操船者の心電図を計測し、スペクトル解析による心拍変動の分析によって自律神経機能の活動を把握し、生理・心理的負担を評価⁹⁾¹⁰⁾する。

3.1 緊張ストレスと心拍変動の関係

(1) 心拍と自律神経の関係

人間における緊張や興奮を示す生理反応には、交感神経と副交感(心臓迷走)神経からなる自律神経が関わる。呼吸循環機能の亢進や消化機能を抑制する交感神経は緊張状態で活発であり、一方、エネルギーの保存、貯蔵に係わる副交感神経はリラックス時に活動することが知られており、自律神経によって心拍数は調整されている。また、副交感神経活動は1 Hz前後の心拍調節まで伝達できるのに対し、交感神経による心拍調節は0.15 Hz以上を伝達できないことから、両神経による心拍数調節活動を分離でき、さらに心拍変動の様相は心電図計により簡単に計測できる。

そこで、心拍と自律神経の関係より人間の緊張や興奮状態を調べるためには、交感神経と副交感神経がどの程度働いているかが重要となるため、心電図計により計測した心拍変動データからスペクトル解析によって調べる方法が用いられる¹¹⁾¹²⁾。

(2) 心拍変動計測とスペクトル解析

心電図の波形はFig.3(a)のようになるが、これを基に発生電流が高いR波の出現する時間間隔を表示したものがFig.3(b)であり、心拍変動と呼ばれる心拍のリズムは大きく揺らいでいる。この心拍変動のパワースペクトルは、1) その高周波成分には副交感神経だけ、低周波成分には交感神経と副交感神経の両方が関与している、2) その対数パワーが対数周波数に反比例するという、いわゆる $1/f^\beta$ ゆらぎ(β はスペクトル指数)のスペクトルをもつ。

この $1/f^\beta$ ゆらぎを有する場合には、1) スペクトル解析を行なってそのパワーを両対数表示で表わしたとき、ピーク(特に低周波数域)が存在しても見つけ出すことが難しい、2) スペクトル指数 β が1より大きい $1/f^\beta$ ゆらぎを有する時系列は確率過程として非定常となり、測定開始時刻や計測時間に依存し、短時間の心拍変動スペクトルの定量的な特長まで不鮮明にする難点がある。これらのことから、心拍変動のスペクトル解析を行なう際には、もとの時系列データから非定常である $1/f^\beta$ ゆらぎ成分だけを取り除いて、周期成分のみのスペクトルを得ることが必要となり、本研究では粗視化スペクトル法(CGSA法; Coarse

Table 1 Relation between stress levels and incident probability of human errors

	Stress level	Probability of human error
Skilled operator	Low stress	HEP×2
	Suitable stress	HEP
	Moderate stress	
	{ Sequential work	HEP×2
	{ Non-sequential work	HEP×5
Unskilled operator	Extreme high stress	HEP×10
	Low stress	HEP×2
	Suitable stress	HEP×2
	Moderate stress	
	{ Sequential work	HEP×4
	{ Non-sequential work	HEP×10
	Extreme high stress	HEP

note) HEP: Probability of human error in the case of non-stress working

Fig.2 Relations between stress levels and incident probability

Graining Spectral Analysis)¹³⁾¹⁴⁾を用いて解析する。

粗視化スペクトル法は、心拍変動のもつ明らかな周期成分や位相の揃った広帯域信号と、フラクタル的な（位相の混った）成分とを分離するための手法である。原理としては、原時系列とそれを粗視化した時系列とのクロススペクトルの位相を計算すると、前者では時間の経過とともに規則的に変化するのに対して、後者では不規則に変化する性質を利用する。そして、クロススペクトルの計算値から規則的に変化する成分を排除するアルゴリズムが用いられる。

CGSA 法によって得られた周期成分のみのパワースペ

クトルのうち、0～0.15 Hz の低周波成分の積分値 (Lo) と、0.15～0.8 Hz の高周波成分の積分値 (Hi)、また、パワーの全周波数にわたる積分値 ($Total$) を求める。ここで、交感神経活動の指標 SNS (Sympathetic Nervous System) は緊張度、および副交感神経活動の指標 PNS (Parasympathetic Nervous System) はリラックス度を表し、 $SNS = Hi/Lo$ 、 $PNS = Lo/Total$ より人間が感じる精神的緊張や興奮を具体的な数値として求めることができる。この CGSA 法によるスペクトル解析過程の例を Fig. 3(b)～(e)に示す。

(3) 計測と分析方法

心拍変動の測定とそのスペクトル解析は以下のように行った。

- 1) 心電計により標準的な2極式の導線を用いて、心拍変動の計測をした。
- 2) 連続的に測定された心電図波形を、I/O ボードを通してノートパソコンにサンプリング周波数 250 Hz で取り込んだ。
- 3) 波形の最大値と各点における増分を考慮した R-R 間隔抽出プログラムを作成し、採取された心拍データより R-R 間隔の時系列データを求めた。
- 4) このデータを時系列データ解析システムによりスペクトル解析する。

(4) 予備的計測

この心拍変動の測定とスペクトル解析による緊張ストレスの推定法の有効性を調べるために、幾つかの予備的実験を行った。

a) 自動車による実験

体感的な緊張・リラックスの度合いと SNS 、 PNS との関係を知るために、乗用車の運転時における心拍変動を予備的に調べてみた。そこで、1) 運転席での平静時、2) 平坦な一般道を 50 km/h で運転、3) 複雑な峠道を運転（平均 50 km/h）、4) 高速道路を 80 km/h で運転、5) 高速道路を 100 km/h で運転、状態における運転者の心拍変動を計測し求めた心拍数、 SNS 、 PNS の 5 分間平均値を Fig. 4 に示す。

この解析結果では、緊張度を示す SNS 値は、平坦一般道 50 km/h、高速 80 km/h が低くて、高速 100 km/h、峠道の順に高くなっているのに対し、リラックス度を示す PNS 値は、信号停止などの外乱が少ない高速 80 km/h 走行時が一番高い値を示している。このことは運転の難易度などに依存する常識的な感性に一致する。なお、心拍数は、緊張度とある程度の相関があるが、明確にはストレスを表し得ない。

b) 小型艇による実験

Deep-V 型船型の実習調査艇（総トン数 13 ton）を用いて、漁港から出港し、外海での半速（約 10 knot）、巡航速度（約 20 knot）での航走、入港着岸に至る間の操船者

Fig. 3 A result of spectrum analysis for fractal nature of heart rate variability

の心拍計測を行い、操船中の心拍数、SNS、PNSの移動平均と5分間平均を算出してFig. 5に示す。

半速 (10 knot) と巡航速度 (20 knot) の場合を比べると、速度の上昇によって緊張度も上がるということがわかる。また、港内走行では、離岸時は緊張しているが出航そのものはSNSの値が低く、一方入港時には着岸までずっと緊張した状態が続いている。

これらの緊張ストレスは、インタビューで得た操船者の実感覚とほぼ一致している。また、この場合にも心拍数は緊張度と強い相関はない。

3.2 実船における心拍変動計測

予備的実験において、船舶の操船時における緊張ストレスを心拍変動により評価できることが明らかになったので、実際の運航船において計測を行った。

(1) 内航 LPG タンカーにおける計測

幅狭海域や狭水路などにおける緊張ストレスを調べるために、音声により指示・応答を行う対話型航海支援システムを備えた内航 LPG タンカー (載荷重量トン数 849 ton, 航海速度 12.0 knot, 昼間は単独操船) において計測を行った。

本船は堺港を午前中に空荷で出航し、坂出港沖で一晩停

泊し、翌朝坂出港石油基地バースに着岸・積荷を行ったが、1) 明石海峡 (約 45 分)、2) 小豆島から坂出港まで (約 2 時間 25 分)、3) 泊地から着岸まで (約 55 分)、において計測を行った。この時間経過に伴うイベントと SNS、PNS の値の関係を Fig. 6 (移動平均) および Fig. 7 (5 分間平均) に示す。これらより以下のことがわかる。

a) 幅狭海域や横切り船が通過する時点で SNS 値が高くなっており、入港時や着岸時などよりも高く、より緊張している。

b) PNS 値は平静時以外の航海中全てにわたり低く、リラックス状態はほとんど無い

c) 航海開始前や作業準備中に SNS 値が高く、操作・操船の方針を決める判断時点、および目視や双眼鏡で前を見ている知覚時点においてかなり緊張し、操作を開始すると落ち着く傾向が見られる。

(2) 渡船における計測

博多湾内渡船の双胴型中速艇 (総トン数 120 ton, 航海速度 21.8 knot, 旅客定員 162 名) において博多港から志賀島港までの 1 往復 (片道 28 分) の間について計測を行った。なお、本船では操舵室には常時 2~3 人いるが、操船操作はすべて船長 1 人で行っている。

Fig. 4 Tensional stresses based on heart rate variability for each condition of driving an automobile (Five minutes average)

この実験におけるイベントと SNS, PNS 値の時間変化との関係を往路について Fig. 8 (移動平均) に示す。なお、復路については Fig. 11 に示す。これらより以下のことがわかる。

- 着岸作業時よりもその少し前、だいたい最大速度から減速を開始するときにおいて SNS 値が高くなり、PNS 値が低くなっており、より緊張していることがわかる。このことは、輻輳海域と同様に着岸時においても直前の知覚と判断が重要となるためと考えられる。
- 着岸時に比べて離岸時においては、SNS と PNS の値を見てもそれほど緊張していない。
- 往路・復路を操船した 2 人の船長についての解析結果では、SNS, PNS の値にはかなりの差がみられる。外部環境から受けるストレスはほぼ等しいと仮定すると、緊張の時点は同じ傾向にあるが緊張ストレスの絶対値には個人差がある。

(3) 旅客フェリーにおける計測

船長は知覚、判断を行い、操舵手が操船を行う体制の船では、単独操船の場合とは別種の緊張ストレスを受けてい

ると考えられるので、博多港から壱岐経由で対馬までの旅客フェリー (総トン数 1926 ton, 航海速力 20.0 knot, 旅客定員 974 名) の往復路において船長の緊張度について計測を行った。なお、本船の船長は、重要な海域のみ指揮をとり、離岸や着岸時においては命令の他にバウ・スラスターの操作を同時に行う。

ここでは、1) 対馬の厳原港出港から外海まで (約 20 分)、2) 壱岐の郷ノ浦港への着岸および離岸から外海まで (約 45 分)、3) 博多湾外から港へ着岸まで (約 60 分)、についての計測に対するイベントと SNS, PNS 値の時間変化の関係を Fig. 9 に示す。なお、3) については Fig. 13 に示す。

各海域・状態別の SNS, PNS 値の値を比較して以下のことがわかった。

- 状態別で見ると、着岸のための旋回、後進、主機停止命令時において SNS 値が最も高く、PNS 値が最も低くなっている。
- SNS と PNS 値の時間変動の様子を見ると、操船命令を下したときに SNS 値が高くなっていて、その後低くなっている。特に、港内旋回時、防波堤を通過前、針路変更の指示前後、他船との行き会い時が顕著である。これらは、操船命令を最も良いタイミングで出そうとするための緊張によるものと考えられる。

4. 操船時における環境ストレス

操船者は自然現象による外乱の他に、航路幅、浅瀬などの航路障害や船舶交通の輻輳などの環境要因により負荷を受けている。操船の安全性を評価して操船システムの設計に反映するためには、操船者自身が環境負荷より感じる安心度や危険感に基づいた評価¹⁵⁾が必要となってくる。ここでは、操船環境を定量的に評価するために、井上らの提唱する主観的衝突危険度 (SJ 値; Subjective Judgment Values) に基づく環境ストレス値¹²⁾を用いて操船者が受ける危険感を推定し、心拍変動より求めた緊張ストレスと比較する。

4.1 操船者の環境ストレス値¹²⁾

操船者の主観的危険度 (SJ 値) とは、操船時に遭遇する各場面における状況やその後の予測を踏まえた操船者自身が感じる危険度であり、[非常に危険: SJ = -3], から [非常に安全: SJ = 3] までの 7 段階で表現されている。

また、この SJ 値には、操船環境、交通環境に対応する次の 2 種類があり、シュミレータ実験やアンケート調査に基づき多くの操船者の意識を反映させ、幾つかのパラメータを組み合わせて回帰分析を行なって、次式により表現されている¹⁾。

- 地形に対する操船者の主観的危険度 (操船環境ストレス); SJ_L

$$SJ_L = a(R/V) + \beta \quad (1)$$

Fig. 5 Tensional stresses based on heart rate variability for each condition of operating a small boat

ここに、 α , β は自船船型による係数、 R は岸までの距離、 V は自船速度である。

$$\alpha = -0.00092 \cdot \log_{10}(GT) + 0.0131 \quad (GT \leq 10,000 GT)$$

$$\alpha = 0.006671 \cdot \exp\{-7 \times 10^{-6}(GT)\} \quad (GT > 10,000 GT)$$

$$\beta = -3.82$$

b) 他船との接近に対する操船者の主観的危险度（交通環境ストレス）； SJ_s

$$SJ_s = \alpha^*(R^*/L_m) + \beta^* \quad (2)$$

ここに、 L_m は自他船平均船長、 α^* , β^* は L_m による係数、 R^* は他船との相対距離である。

$$\alpha^* = 0.0019L_m, \quad \beta^* = -0.65 - \ln(L_m) - \beta_2$$

ただし、 β_2 は 2.07（右舷から横切、船首行会い）、2.35（左舷から横切）、0.85（追越し）である。これらの式は対象物や相手船との衝突までの時間的余裕が大きく関与している。

具体的には、操船および交通環境ストレス値は、1) 現針路を中心に $\pm 110^\circ$ の範囲にわたり刻み 1° 毎に、障害物への衝突までの時間的余裕を計算し、操船者が抱く危険感を(1)または(2)式を用いて計算する、2) 障害物の存在方向による危険感の修正を、正面で 1.0、左右 110 度で 0 になる余弦関数を人間の視野の重み関数として用いて行う、3) 各針路毎に求められた ± 3 の危険感を 180 倍し、 $SJ = +3$ を 0 とする 0~1000 の範囲に尺度変換して、

$\pm 110^\circ$ の針路範囲についての総計から環境ストレス値を算出する。この値は次の 4 区分により評価している²⁾。

- 1) 環境ストレス値 0~500；“Negligible”：「非常に安全」から「どちらでもない」まで
- 2) 環境ストレス値 500~750；“Marginal”：「どちらでもない」から「やや危険」の範囲
- 3) 環境ストレス値 750~900；“Critical”：「やや危険」から「かなり危険」の範囲
- 4) 環境ストレス値 900~1000；“Catastrophic”：「かなり危険」から「非常に危険」まで

この環境ストレス値の計算においては、航路上の各点における視角 $\pm 110^\circ$ の範囲の陸岸までの距離が必要であり、画像処理の技術を用いて航路や地形をパソコン上に再現し、その再現された地図上における距離を求めた。

4.2 実船計測に対応した環境ストレス値と緊張度

心拍変動の計測を行った渡船、旅客フェリーについて、その実験当日の船速や航路をもとに操船環境ストレス値を求め、SNS、PNS 値と比較した。なお、両グラフは縦軸のスケールを調整して同じグラフ上に示している。

(1) 博多湾の渡船

博多湾内の渡船における志賀島から博多港までの航路について、Fig. 10 の航路図と船速より計算した環境ストレス値を、心拍変動より求めた SNS、PNS 値と比較して

Fig. 6 Tensional stresses based on heart rate variability for each condition of operating a coastal tanker

Fig. 11 に示す。

環境ストレス値は、寄港停船による2度の低下を除いて、博多湾という船舶が多い狭い海域において比較的高速で運航しているために、航路全体に渡り高い値を示している。一方、SNS 値は寄港停船前後の着岸・離岸時および防波堤に接近時に高くなっているが、それ以外は低いレベルにある。また、海が開けた志賀島側から幅転する博多港に向かって航行しているために、SNS 値は次第に上昇している。このような内湾では環境ストレス値が常に危険感を

示すのに対し、緊張感は持続せずに、緊張の合間にリラックスしている。従って、環境ストレス値ではこのような微妙な緊張感の変動は表現しきれない。

(2) 博多港入港時の旅客フェリー

旅客フェリーの壱岐から博多港までの帰港路について、その航路図と船速 (Fig. 12 参照) より求めた環境ストレス値および計測による SNS と PNS 値を Fig. 13 に示す。

環境ストレス値は、糸島半島に接近時と停泊中の大型客船と貨物船の間を通過する際に上昇し、能古島から博多港

Fig. 7 Tensional stresses based on heart rate variability for each condition of operating a coastal tanker (Five minutes average)

Fig. 8 Tensional stresses based on heart rate variability during maneuvering a twin body type ferry boat

(a) Leaving Gohnoura harbor in Tsushima

(Events)

(a): Passing a lighthouse (b): Direct "dead slow" (c): Entry in the document
(d): Direct "slow astern" (e): Turning in harbor (f): Instruct a course

(b) Entering and leaving Gohnoura harbor in Iki island

Fig. 9 Tensional stresses based on heart rate variability during operating a car ferry carrying passengers

Fig. 10 The sea route and ship speed during measurement on a ferry boat in Hakata bay

Fig. 11 Variations of environment stress and tensional stress during measurement on a ferry boat

Fig. 12 The sea route and ship speed during measurement on a ferry at arrival in Hakata port

Fig. 13 Variations of environment stress and tensional stress during measurement on a car ferry

Fig. 14 The sea route and ship speed during measurement on a car ferry at leaving Gonoura port

までの間は渡船の場合と同じく常に高い値を示している。

一方、2隻の間を通過後から漁船および防波堤に接近し SNS 値が高くなるまでは、SNS 値は低くて緊張は解けているが、PNS 値も低くリラックス状態ではない。また、海が開けた志賀島側から輻輳する博多港に向かって SNS 値は次第に上昇し、着岸までの操作命令の度に SNS 値が上昇しているが、命令間には緊張を解いて低下している。この図より、環境ストレス値は SNS 値の上昇部の包絡線を辿り、環境からの圧迫感を表現することが分かる。

(3) 郷ノ浦港出航時の旅客フェリー

対馬に向かう旅客フェリーが壱岐の郷ノ浦港を出港の際について、Fig. 14 の航路図と船速により環境ストレス値を求めて、SNS、PNS 値と比較して Fig. 15 に示す。なお、この航路では出港後に浅瀬がある島間の狭水路を航行することになる。

環境ストレス値は、離岸時には高い値を示し、防波堤を抜けると比較的開けた水域に入るために値は下がるが、しばらくして浅瀬がある狭い水域を抜けるため大きく右旋回する地点において値が高くなっている。ここで、環境ストレス値が“Critical”から“Catastrophic”に移らない程度に減速して時間的余裕を確保し、危険水路を抜けると船速を上げている。“Critical”における操船者の許容感とは「限界」²⁾となっており、操船者はその操船環境を許容の限界に保持するように、感覚的または経験的に時間的余裕を制御する行動を取るものと解釈できる。

一方、SNS 値は離岸時に少し高くなっているが、防波堤を抜け水域が開けるに従って値は下がっている。さら

Fig. 15 Variations of environment stress and tensional stress during measurement on a car ferry

に、大きく右旋回して狭水域を抜ける危険水路において値が急激に高くなり、その後漸次低下するが、環境ストレス値程は下がらず緊張感が続いていることを示している。

4.3 緊張ストレス値と環境ストレス値の特徴と有効性

心拍変動による緊張ストレス値および操船者の主観的危険度 (SJ 値) に基づき、操船環境ストレスを求める2つのストレス推定法の特徴を述べて比較を行う。

(a) 緊張ストレス値の特徴

i) 自己の意志による影響を受けにくい自律神経の働きを調べるため、比較的安定した結果が得られる。また、行動に対する瞬間の緊張ストレスおよび離着岸時など比較的長い時間にわたる緊張ストレスも同じ精度で求めることができる。

ii) 操船者が受けるあらゆる要因からの緊張ストレス、さらに緊張の持続と間断など人間の特性を全て含んで現われる。このため、緊張ストレスを引き起こす要因をすべて説明することが困難な場合もあるので、被験者の行動および周辺環境の様子などをビデオカメラなどを用いてこと細かく記録する必要がある。

iii) 同一状況における異なる被験者の結果を見ると、緊張度は同じような傾向を示す。ただ、 SNS や PNS 値そのものには個人差があり、値の絶対値だけで緊張度を論じられない。

(b) 環境ストレス値の特徴

i) 緊張ストレス値と比較すると、環境ストレス値は SNS 値の上昇部の包絡線を追って操船環境からの圧迫感を表現しており、緊張の間断を除けば同じような傾向を示

す。よって、環境ストレス値を求めれば、実際に心拍変動を計測して緊張ストレス値を求めなくても、ある程度の精度で緊張度の推定が可能である。

ii) 操船者の感じる危険感 (SJ 値) をもとにストレスを推定しているため、操船時のストレスのみ推定でき、他の要因は考慮されない。

iii) 障害物までの距離と船速のみでストレスを表しているために簡単で分かり易く、環境負荷の影響を予測できる。

以上のような両者の特徴から、心拍変動計測による緊張ストレス値は瞬時の緊張感を表現できるために、2.で述べた緊張度と事故発生確率の関係を応用して、強い緊張時に対する装備支援による事故防止を考慮した航海支援システムの設計に役立つ。一方、操船者の危険感に基づく環境ストレス値は、船舶の運用計画や航路設計などに極めて有用であり、事故防止のシステム構築にも有効と考えられる。

5. 結 言

本研究では、人的過誤に関与する緊張ストレスの発生予測のために、操船者の心拍変動の計測から緊張ストレスを求め、さらに主観的危険度に基づく環境ストレス値を算出して、操船環境とストレスの関係を調べた。これにより、次のことが明らかになった。

- 1) 船舶のような外部環境より多大な影響を受ける人間—機械系システムにおいては、操作時における緊張ストレスの程度を考慮した事故防止の対策を講じる必要がある。
- 2) 心拍変動計測による緊張ストレス値は、緊張の持続と間断など人間の特性を全て含んだ瞬時の緊張感を表現でき

るために、高緊張時に対する装備支援による事故防止を考慮した人間-機械系システムの設計に役立つ。

3) 操船者の危険感に基づく環境ストレス値は、操船環境からの圧迫感を表現しており、緊張の間断を除けば緊張ストレス値と同じような傾向を示す。また簡単な演算により値が得られるために、事故防止のシステム設計に有効と考えられる。

本研究にあたり、実船計測の実施にご協力いただきました共和産業海運(株)、九州商船(株)、福岡市港湾局の関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 井上欣三 他：危険の切迫に対して操船者が感じる危険感の定量モデル，日本航海学会論文集，第98号，pp. 235-245, (1997)
- 2) 井上欣三，増田健司，世良亘：海上交通安全評価のための技術的ガイドライン策定に関する研究Ⅰ・環境負荷の概念に基づく操船の困難性評価，98，pp. 225-234, (1997)
- 3) 福地，篠田，小野：人的要因を考慮した安全システムのリスク解析手法について，西部造船会会報，第98号，pp. 279-291, (1999)
- 4) 林芳男：人間信頼性工学，海文堂出版，(1984)
- 5) 海難審判庁：平成10年度版 海難審判の現況，(1998)
- 6) 日本造船研究協会：「第42基準研究部会 船舶の確率論的安全評価方法に関する調査研究（平成9年度報告書）」，(1998)
- 7) 福島弘：新海難論，成山堂，(1991)
- 8) A. D. Swain, H. E. Guttman: Handbook of Human-reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, U. S. Nuclear Regulatory Commission, (1983)
- 9) 細田龍介 他：船舶の乗り心地評価に関する研究（第3報）乗り物酔い発症時の生理的变化の計測，日本造船学会論文集，第176号，pp. 517-524, (1994)
- 10) 小林弘明，仙田晶一：心拍変動データによる操船者の知的負担の研究，日本航海学会論文集，第98号，pp. 247-254, (1997)
- 11) 宮田洋（監修）：生理心理学の基礎，新生理心理学，1巻，北大路書房，(1998)
- 12) Akselrod, S. et al.: Power spectrum analysis of heart rate fluctuation; A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control, Science, Vol. 213, pp. 220-222, (1981)
- 13) Yamamoto Y., Hughton R. L.: Coarse-graining spectral analysis; New method for studying heart rate variability, J. App. Physiological, Vol. 71, pp. 1143-1150, (1991)
- 14) Yamamoto Y., Hughton R. L.: Extracting fractal components from time series, Physical-science D, Vol. 68, pp. 250-264, (1993)
- 15) 原 潔：輻輳海域における避航操船基準の有効性，日本航海学会論文集，第85号，pp. 33-40, (1990)