唾液アミラーゼ活性による操船者の心的負荷評価

村井 康二*・脇田 慎一**・宮道 隆**・林 祐司*

Evaluation of A Navigator's Mental Workload Based on Salivary Amylase Activity

Koji MURAI, Shin-ichi WAKIDA, Takashi MIYADO

and Yuji HAYASHI

Abstract

This paper describes an evaluation of mental workload of a professional who has a lot of on-board experience (Captain, unlimited licensed mariner). We evaluate their performance using a ship handling simulator, and ascertain their mental workload based on salivary amylase activity. We show the effect of physiological indices named "Salivary Amylase Activity: SAA index" for their performance and characteristics of mental workload.

In this paper, we confirm whether the response to their performance for the ship handling is clear or not. The research of mariner using SAA index is the first challenge through worldwide.

Keywords : Education and Training, Salivary amylase activity, Simulator, Mental workload, Stress

キーワード: 教育・訓練, 唾液アミラーゼ活性, シミュレータ, メンタルワークロード, ストレス

1. はじめに

操船者の心的負荷や操船技能の評価を行うための手法として、心拍やその揺らぎである心拍変動、鼻部皮膚温等の生理指標が有効であることが明らかにされている^{(1)~(4)}。そして、それらの手法はあくまで相対的な評価指標ではあるが、定量的評価かつ評価対象者自身の生理的応答であることから、評価対象者に対して説得力があると考えられる。

近年の研究により、唾液アミラーゼは交感神経系の直接神経作用とノルエピネフリン作用の両作用で分泌され、心的負荷の定量的評価のバイオマーカーとされている。そして、他の交通システムである自動車の操縦者に対するストレスを表わす有効な指標として報告されている⁽⁵⁾。また、評価結果を即刻、評価対象者に提示できる唾液アミラーゼは、特に現場での教育訓練評価を行う際に、指標に求められる重要な要素となる“即時性”と“簡便性”を兼ね備えていると考える。

本研究では、評価対象者にセンサー等の常時装着が不要であり、簡便な測定装置と測定方法により安定した結果を「短時間」かつ「測定現場」で得ることが可能な評価指標として、唾液アミラーゼ活性を用いる。具体的には、唾液アミラーゼ活性が、乗船経験豊富な操船者の心的負荷に対して、その応答が確認できるか否かについて操船シミュレータを用いた実験を行い、その測定結果について報告する。操船者に対するこのような取り組みは著者等の研究が日本で初めてとなるが、本指標の有効性を確認することは、他の指標との複数指標による同時評価や学生に対する船舶実習等の教育訓練評価のための指標としても活用できる可能性が期待できる。

2. 心的負荷の評価手法について

心的負荷を評価するための手法としては、1) 主観評価（認知系）、2) 生理評価（脳活動、神経系）、3) 生化学評価（神経・分泌系）、4) 免疫学的評価（免

* 正会員 神戸大学海事科学研究科（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1） murai@maritime.kobe-u.ac.jp

** 非会員 (独)産業総合技術研究所 ヒューマンストレスシグナル研究センター

疫系) および 5) 行動評価 (行動系) に大きく分類できると考えられる。

操船者を対象とした評価手法を考えた場合には、上記、項目 1: “乗船経験豊富な専門家による主観評価” および項目 5: “舵角量や操船時間等の操船行動結果である行動解析” が従来からの主とした評価方法である。そして、それらを支援するために、項目 2: “生理指標を用いた生理評価” が提案されていると考える。

使用する生理指標については、データ測定のためのセンサーを被験者へ装着する等、被験者の負担を可能な限り軽減することが、評価に対する確かな測定データを獲得するための必要条件であると考ええる。つまり、信号対雑音比が良好であり、測定が比較的簡単な心拍 (心拍変動) や非接触で測定可能な鼻部皮膚温が有効な指標として提案されている^{(1),(6)}。著者等もその有効性については、すでに確認を行っている^{(2),(3)}。

唾液アミラーゼ活性は、項目 3: “交感神経-副腎髄質系の神経活動を評価するための指標” として考えられ、その測定装置が開発されている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。唾液は、非侵襲により 30 秒で採取可能であり、さらに 30 秒程度で唾液アミラーゼ活性を測定できる。つまり、評価者は測定結果を約 1 分間でかつその場で得ることが可能である。著者等は、交感神経活動の測定指標として唾液アミラーゼ活性が有効であれば、これらの即時性および簡便性という利点を活用することが可能となり、新しい教育訓練評価指標として期待できる。

3. 唾液アミラーゼ活性の測定実験

3.1 実験概要

実験は、被験者への様々な外的影響 (音、気温、湿度等) を制御しやすい環境とするために、操船シミュレータを用いて行う。そして、操船者の唾液アミラーゼ活性が心的負荷に対する応答を示す指標として有効であるかについて検討する。

実験シナリオは、各種操船環境条件⁽¹⁰⁾の中から、短時間内に自船の針路、速力を頻繁に制御する必要があると考えられる「出港操船」、「入港操船」および「狭水道操船」を選択する。著者等の心拍変動および鼻部皮膚温を評価指標とした操船シミュレータおよび実船を用いた先行研究では「入港操船」に対する応答が非常に顕著であったことが、これらの実験シナリオの選択を支持する^{(11),(12)}。

被験者は、外航船舶長 2 年以上の経験者 10 名 (被験者 A~J) である。性別、年齢、乗船経験年数を表

1 に示す。

Table 1 Subjects (Ten captains)

Subject	Agenda	Age	On-board experience [year]
A	Male	55	17
B	Male	59	20
C	Male	49	25
D	Male	46	18
E	Male	58	28
F	Male	57	15
G	Male	55	18
H	Male	59	17
I	Male	47	16
J	Male	55	10

本実験に使用した操船シミュレータ ((株) 日本海洋科学製) は、円筒形スクリーン型 (スクリーン半径: 6 メートル) で水平視野角 240 度 (プロジェクター 7 台により投影映像を構成)、垂直視野角 40 度のフルミッション型の装置で、国際的にも十分な仕様であり、本実験を実施するための性能 (現実性) を有していると考ええる。また、各実験におけるブリッジチームは 4 名体制で行い、全ての被験者がお互いに水先人、船長、航海士および操舵手の役割を担当する。本研究では、「水先人」役が被験者となり操船を行い、その唾液アミラーゼ活性を測定する。また、ビデオカメラ、ワークサンプリングによる被験者の行動観察および記録を同時に行う⁽¹³⁾。

3.2 唾液アミラーゼモニター

唾液アミラーゼ活性の測定には、酵素分析装置「唾液アミラーゼモニター」(ニプロ (株) 製) を使用した。装置本体の大きさは、幅 130 [mm]、高さ 40 [mm]、奥行 87 [mm] であり、実船船橋や操船シミュレータ室においての取扱いが容易であり、評価装置として実用的である。また、30 秒程度で唾液アミラーゼ活性値 (The value of Salivary Amylase Activity: SAA 値、単位 [kIU/L]) が測定可能である。図 1(a)、1(b) に測定装置の本体および唾液採取マーカーを示す。

被験者は、唾液採取に際し、専用試薬 (図 1(b)) を舌下に 30 秒置く。舌下は、唾液の分泌線があり、測定に十分な唾液量と不純物の少ない唾液を採取するための良好な場所である。唾液アミラーゼ活性の測定は 30 秒程度の時間が必要なため、SAA 値測定には合計 1 分間 (測定最短時間) を必要とする。

Fig. 1 Salivary Amylase Monitor

3.3 データ測定

本研究では、操船者の心的負荷や操船訓練効果の評価指標として、SAA 値の有効性を検討するための初めての試みであるために、まずは唾液アミラーゼモニターにより、できる限り短いサンプリング間隔によりデータ測定を行う。そして、操船者の各種操船状況に対する応答を検討することを主目的とする。本研究でのデータサンプリング間隔は 1 分間から 5 分間である。

4. 評価方法

心的負荷の評価は、被験者の安静時に 3 回または 4 回の測定を行い、その平均値を参考基準値として用いることで行う。そして、実験時の SAA 値の各レベルおよび増減傾向により心的負荷の変動を検討する。表 2 に、各被験者に対する安静時のアミラーゼ活性値を示す。被験者 A～E については、実験日とは別日に複数回 (3 または 4 回) の測定を行い、その平均値を求める。また、被験者 F～J については、実験日の実験後に複数回 (3 回) の測定を行い、その平均値を求める。ただし、被験者 H、I の 2 名については被験者の都合から実験後にも別途測定する機会を得ることができなかったため、ブランク (－) としている。被験者 H、I の参考基準値については、実験直後の値を安静時として取り扱うこととする。

自動車を対象とした研究⁽⁵⁾では、実験前の 3 回の測定値の平均値を基準値として使用する方法が提案されているが、操船者を対象とする実験では、操船者は実験前 (操船前) の段階から操船計画を建て、自身の操船をイメージしており、既に適度な緊張状態にあると考える。したがって、本研究では実験後または実験後別日の安静時に参考基準値を測定することとした。

著者等は、事前実験により実験直前より実験直後の方が SAA 値の値が大きい傾向にあることを確認している。

Table 2 Reference basis value of salivary amylase activity (SAA* value)

Subject	SAA* value [kIU/l]	Subject	SAA* value [kIU/l]
A	9	F	45
B	24	G	8
C	23	H	-
D	31	I	-
E	22	J	12

*Salivary Amylase Activity: SAA

5. 結果および考察

実験の種類を始め、入港操船、出港操船および狭水道操船時における典型的な SAA 値の測定結果を順に示し、SAA 値の評価指標としての有効性について検討した。

5.1 実験の種類

表 3 に、実施した実験番号、操船状況、データサンプリング時間、実験対象被験者を示す。表 3 中、実験番号 4～6 および 9、実験番号 7 および 8、実験番号 3 および 10 は、各操船状況は同じであるが、入港岸壁または自船の船種が異なる。

Table 3 Simulation experiment

No.	Navigational situation	Data Sampling time [min]	Subject
1	NP	5	A,B,C
2	LP(Osaka)	5	D,E,F,G
3	EP(Osaka)	3	E
4	EP(Kobe)	3	H
5	EP(Kobe)	3	A
6	EP(Kobe)	3	F
7	EP(Wakayama)	3	I
8	EP(Wakayama)	3	I
9	EP(Kobe)	1 or 2	J
10	EP(Osaka)	2	J

NP: Narrow Passage (Tomogashima-suido)

EP: Entering a Port (Osaka, Kobe, Wakayama)

LP: Leaving a Port (Osaka)

5.2 入港操船

図 2 に入港操船結果 (表 3: 実験番号 3、被験者 E) の一例を示す。被験者 E の参考基準値は、表 2 より 22 [kIU/l] である。また、図 2 中の数値は各測定値、

A から C は顕著なイベント発生を示している。イベントを以下に示す。

[イベント]

- A: 着岸予定岸壁の奥域から他船の出港船が現れる。(SAA 値: 92 [kIU/l]、時間: 27 [min])
 B: 自船が接岸速力が大きい状態で接近する。(SAA 値: 164 [kIU/l]、時間 51 [min])
 C: 岸壁に係留索 (ファーストライン) を取る。(SAA 値: 43 [kIU/l]、時間: 54 [min])

Fig. 2 The SAA value for entering a port
(Subject E)

図 2 から、操船者は入港操船を行うための見張り (イベント A) や自船の針路、速力の制御 (イベント B) に対する意志決定と強く関係する状況下で大きな SAA 値を獲得していることがわかる。そして、岸壁に係留索をとり、自船が安定した状態となった場合 (イベント C) に SAA 値が減少している。特に、イベント B では被験者自身に対して不測の事態が生じた場合であり、最大値を得ており、他の SAA 値と比べて顕著な値となっていることがわかる。

これらの結果から、SAA 値は操船行動に対する重要な意志決定に対して応答し、操船者の大きな心的負荷を示す有効な指標であると考えることができる。他の被験者 (実験番号 4~10) の入港操船に対して同傾向を示した。

5.3 出港操船

図 3 に出港操船結果 (表 3: 実験番号 2、被験者 D~G) を示す。各被験者の参考基準値は、表 2 より順に D: 31、E: 22、F: 45、G: 8 [kIU/l] である。出港操船について、自船は出船状態による出港シナリオであったこともあり、図 2 の入港操船時と比べて操船困難な状況は発生しなかった。SAA 値からも、参考基準値以下もしくは、それに近い値を示しており、顕著な心的負荷がかかる操船状況は発生しなかったと考えることができる。被験者 G については、

総じて SAA 値が 4 または 5 [kIU/l] であり、誤測定の可能性が考えられる。

これらの結果から、大きな心的負荷がかからない場合では、個人差が大きく見られ、各被験者に対する共通の特徴は見られない。さらに、多くのデータを収集し、検討する必要があると考えられる。ただし、先行研究である心拍変動や鼻部皮膚温を評価指標に用いた実験結果からも、既述したとおり、短時間に多くの針路および速力の制御を必要とする入港操船の場合において、顕著な応答を示しており、この点において同傾向を示していると考えられる。5.2 節の入港操船時の被験者 E の SAA 値が 60 前後の値を多く得ていることに比べて、入港操船では、20~30 の値となっており、本傾向を支持していると考えられる。

Fig. 3 The SAA value for leaving a port
(Subjects D to G)

5.4 狭水道操船

図 4 に狭水道操船結果 (表 3: 実験番号 1、被験者 B・C) を示す。各被験者の参考基準値は、表 2 より順に A: 9、B: 24、C: 23 [kIU/l] である。ただし、被験者 A については測定エラーのため、測定結果を得ることができなかった。狭水道操船では、実験シナリオが狭水道入口前から開始されることから、開始直後に他船等の操船環境判断を集中して行い、同時に操船判断も行っていることから、操船直後の SAA 値が両被験者ともに最大値 (被験者 B: 52 [kIU/l]、被験者 C: 29 [kIU/l]) を得ており、その後、全体的な傾向としては減少傾向となることがわかる。

これらの結果から、SAA 値は入港操船時と同様に操船行動に対する意志決定に対して応答し、その心的負荷を示すと考えることができる。

Fig. 4 The SAA value for narrow passage
(Subjects B and C)

6. まとめ

本研究では、唾液アミラーゼ活性を用いた操船者の心的負荷評価を操船シミュレータ実験により行い、その評価指標の有効性について検討した。以下に得られた知見のまとめを示す。

- ・唾液アミラーゼ活性値は、安全な航海を維持するための操船者の重要な操船判断時に対して、大きな値を示し、操船者を対象とした心的負荷の評価指標として有効である。

- ・入港操船時と比べて、出港操船や狭水道操船時には、あまり顕著な応答は見られず、個人差が存在する。

今後の課題としては、心拍変動、鼻部皮膚温との同時複数評価を行うことにより、心的負荷評価指標としての有効性をさらに検討する必要がある。また、被験者数を増やし、データを蓄積する必要があると考える。

謝辞

本研究にご協力いただいた福士恵一教授（神戸大学大学院海事科学研究科）、松尾唯氏（神戸大学海事科学部）をはじめ、小玉誠 船長（旧阪神水先区水先人会元会長）、吉川誠司 船長（旧大阪湾水先区水先人会元水先人）、大塚滋夫 船長（和歌山下津水先区水先人会水先人）および諸船長の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 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，

No.98, pp.247-255, 1998.10

- (2) Koji MURAI, Yuji HAYASHI, Noriko NAGATA and Seiji INOKUCHI: The Mental Workload of a Ship's Navigator using Heart Rate Variability, International Journal of Interactive Technology and Smart Education, Vol.1, No.2, pp.127-133 Troubador Pub. Ltd, 2004.5
- (3) 林 祐司・竹原 隆・村井康二・矢野吉治：顔面皮膚温による操船者の心的負荷の定量的評価，日本航海学会論文集，No.116, pp.213-218, 2007.3
- (4) Koji MURAI, Laurie C.STONE and Yuji HAYASHI: Towards Evaluation of Skill and Kansei for Ship Handling Based on Physiological Index, Proceedings of 11th International Conference on Engineering Education, The International Network for Engineering Education and Research, CD-ROM, 2008.7
- (5) 出口満生・若杉純一・池上達也・難波晋治・山口昌樹：ドライビングシミュレータを用いた運転ストレスの試験方法，電気学会論文誌 E, Vol.126, No.8, pp.438-444, 2006.8
- (6) 坂本涼・野澤昭雄・田中久弥・水野統太・井出英人：顔面熱画像によるドライバーの覚醒評価 - 周辺温度と風量の影響 -，電気学会論文誌 C, Vol.126, No.7, pp.804-809, 2006.7
- (7) 山口昌樹・花輪尚子・吉田博：唾液アミラーゼ式交感神経モニタの基礎的性能，生体医工学，Vol.45, No.2, pp.161-168, 2007.2
- (8) T.R. CHATTERTON, M.K. VOGELSONG, Y. LU, B.A. ELLMAN and A.G. HUDGENS: Salivary a-amylase as a measure of endogenous adrenergic activity, Clinical physiology, Vol.16, pp.433-448, 1996
- (9) M. YAMAGUCHI, T. KANEMARU, N. TAKAI, Y. MIZUNO and H. YOSHIDA: Performance evaluation of salivary amylase activity monitor, Biosensors & Bioelectronics, Vol.20, pp.491-497, 2004
- (10) Bowditch: The American Practical Navigator, National Geospatial-Intelligence Agency, Chapt.25, pp.363-371, 1995
- (11) Koji MURAI, Yuji HAYASHI, Noriko NAGATA and Seiji INOKUCHI: Mental Workload of Ship's Navigator - A Few Comments on Heart Rate Variability during Navigational Watch Keeping -, Palade, Howlett, Jain (Eds.)

Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, part II, pp.897-903, Springer, 2003.9

- (12) Koji MURAI, Tadatsugi OKAZAKI, Laurie C.STONE and Yuji HAHASHI: A Characteristic of A Navigator's Mental Workload Based on Nasal Temperature, Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.3639-3643, 2007.10
- (13) Koji MURAI, Yuji HAYASHI, Laurie C.STONE and Seiji INOKUCHI: Basic Evaluation of Performance of Bridge Resource Teams Involved in On-Board Smart Education: Lookout Pattern, 神戸大学海事科学部紀要, No.3, pp.77-83, 2006.7