



# 唾液硝酸イオンを用いた操船者の心的負荷評価

北村, 健一

---

(Degree)

博士 (海事科学)

(Date of Degree)

2018-03-25

(Date of Publication)

2019-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7217号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007217>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



# 博士論文

唾液硝酸イオンを用いた操船者の心的負荷評価

Evaluation of ship navigator's mental workload  
using salivary nitrate

平成 30 年 1 月

神戸大学大学院海事科学研究科

北村 健一

# 内容梗概

本研究は、唾液に含まれる硝酸イオン濃度を生理指標として使用する、操船者の心的負荷定量評価をテーマとする。本研究に関する心的負荷は、船長経験のある熟練操船者が感じるもの、即ち操船時における安全な航行を脅かす、他船との衝突等を含む操船イベントを取り挙げる。熟練操船者の心的負荷特定が可能ならば、熟練操船者の操船を誰もが採用できると考える。心的負荷熟練操船者の操船術を模倣可能となり、危険な操船イベント時に若手航海士が執る必要のある操船方法を、最適化することが可能であるとする。最終的には航海士養成機関における教育者が、操船シミュレータ訓練時に唾液硝酸イオン指標を基に操船要領の詳細な示唆を熟練に至るまでの若手航海士（学生）に示されることを目指す。

本論は唾液硝酸イオンが、生理指標として有効性を示すかを確認及び検証したものであり、次の9章から構成される。

第1章は諸言であり、本研究の契機を研究背景で説明し、本論の目的及び本研究の内容を概括的に述べる。

第2章は心的負荷、生理指標といった本研究に関連するキーワードに関して述べる。

第3章は、第2章で説明した生理指標の中でも、本研究が採用する唾液硝酸イオンが他の指標と比較して優位性を持つことを述べる。

第4章は、アスリートを対象とする唾液硝酸イオン濃度の日内変動を認識した実験を行ったが、本実験に関する結果及び考察を述べる。また本実験を契機に行った、唾液硝酸イオン濃度へ及ぼす高負荷運動の影響を確認した実験に関して述べる。

第5章は、海事社会で働く人々の代表としてポートコーディネーターを選定し、実際の現場で唾液硝酸イオンにより心的負荷評価が可能か否かを検証する実験を行った。本実験に関する結果及び考察を述べる。

第6章は、本研究の主目的である、唾液硝酸イオン生理指標が操船時に発生するイベントに対して、操船者の心的負荷に応答するかを検証した。生理指標には唾液硝酸イオン指

標及び心拍変動 (LF/HF 値) を採用する。操船者に水先人を選定した本検証実験に係る結果及び考察を述べる。

第7章は、ポートコーディネーターを対象とする心的負荷評価、同日に行った水先人を対象とする心的負荷評価を比較した結果、および本結果に対する考察を述べる。本比較結果から、水先人が業務時に心的負荷だと感じる操船イベントを断定することを目的とする。捉える操船イベントは、ポートコーディネーターにとっても業務イベントである、といった考えが、本章における実験の契機となっている。

第8章は、実際の当直現場を想定し、異文化の者で構成したブリッジチームの心的負荷評価を行った実験に関する結果および考察を述べる。本章は、今後の発展的研究において唾液硝酸イオン指標との比較対象生理指標として有効な心拍変動 (LF/HF 値) のみを使用する。

第9章は結言である。本論で得られた成果を総括するとともに、その意義および今後の課題について述べる。

# 研究業績

## － 学術論文 －

1. 北村健一, 村井康二, 脇田慎一, 林祐司 (2015) “唾液硝酸イオンを用いたポートコーディネーターの心的負荷定量評価” 日本航海学会論文集, 132 : 58-62
2. Kitamura, K., Murai, K., Wakida, S., Mitomo, N. and Fukushi, K. (2016) “A Ship Navigator’s Mental Workload Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Concentration for Simulator-based Experiment.” *Intelligent Automation & Soft Computing*, Taylor & Francis, 23 (1) : 161-166
3. Kitamura, K., Murai, K., Wakida, S. and Rooks, M. (2017) “Evaluation of Mental Workload for Porto-coordinator on an Individual Scale Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.” *Transactions of Navigation*, Japan Institute of Navigation, 2 (1) : 15-23

## － その他 －

1. Kitamura, K., Murai, K., Hayashi, Y., Fujita, T. and Maenaka, M. (2014) “Measurement and Analysis of Marine Pilot’s Performance Using a Large Model Sensor.” *Proceedings of IEEE 3<sup>rd</sup> Global Conference on Consumer Electronics*: 37-41
2. 北村健一, 村井康二, 脇田慎一, 林祐司 (2014) “唾液硝酸イオンを用いたポートコーディネーターの心的負荷定量評価” 日本航海学会第 131 回講演予稿集, 2 (2) : 214-216
3. Kitamura, K., Murai, K., Fukushi, K., Mitomo, N. and Wakida, S. (2015) “Development of Mental workload Measurement Device Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup> for Handling-a-ship Navigators.” *International Journal of Emerging Trends in Engineering & Technology*, 3 (1) : 1-10
4. 脇田慎一, 宮道隆, 北村健一, 村井康二, 林祐司 (2015) “生体成分計測用バイオ FET の研究開発 (XI) 唾液硝酸イオン計測による緊張ストレス評価の検討” 第 58 回分析化学化予稿集, 31 (Supplement A) : 88-90
5. Kitamura, K., Murai, K. and Wakida, S. (2015) “Evaluation of Mental Workload in Maritime Society Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.” Poster presentation of 4<sup>th</sup> International Conference on Informatics, Electronics & Vision
6. 脇田慎一, 澁脇雄介, 宮道隆, 北村健一, 村井康二, 林祐司 (2015) “ストレス計測評価用バイオセンシングデバイスの研究開発(II)唾液硝酸イオン分泌機序の基礎検討” 第 59 回分析化学会予稿集, 31(Supplement B) : 40-42

7. Murai, K., Kitamura, K. and Hayashi, Y. (2015) "Study of A Port Coordinator's Mental Workload Based on Facial Temperature." *Proceedings of 19<sup>th</sup> Annual Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems*, 60 (1) : 1668-1675
8. Kitamura, K., Murai, K., Fukushi, K., Hayashi, Y. and Wakida, S. (2015) "Evaluation of Mental Workload for Athletes' Training Based on Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Concentration." *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* : 1250-1254
9. Murai, K., Kitamura, K., Fujita, T. and Maenaka, K. (2015) "Evaluation of Mental Workload by Large Model Sensor toward Development of Healthcare Monitoring System." *Proceedings of the 2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress* : 1-5
10. Murai, K., Kitamura, K. and Ikawa, A. (2015) "Proficiency Characteristics of Maritime Student's Radar Plotting." Presentation of 7<sup>th</sup> International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology
11. Kitamura, K., Murai, K. and Wakida, S. (2016) "Evaluation of Mental Workload of Sea Pilot and Captain Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup>." *Proceedings of World Automation Congress 2016, International Forum on Multimedia and Image Processing*
12. Murai, K., Kitamura, K., Fujita, T., Maenaka, K. and Higuchi, K. (2016) "Toward Development of Monitoring System of Port Coordinator's Mental Workload Using Adhesive Plaster-type Sensor." *Proceedings of Satellite session of World Automation Congress 2016, International Forum on Multimedia and Image Processing*
13. Kitamura, K., Murai, K., Furusho, M., Wang, Y., Wang, J. and Kunieda, Y. (2016) "Evaluation of Mixed Culture Bridge Teammates' Mental Workload Using Heart Rate Variability: Simulator-based Ship Handling." *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* : 875-879
14. Sugimoto, I. Kitamura, K., Murai, K., Wang, Y. and Wang, J. (2016) "Study on Relation between Operator and Trainee's Mental Workload for Ship Maneuvering Simulator Exercise Using Heart Rate Variability." *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* : 768-772
15. Kitamura, K., Murai, K. and Wakida, S. (2017) "Evaluation of Mental Workload for a Newly-Appointed Pilot Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Concentration and LF/HF Values, Compared with Port-Coordinators." *Proceedings of the IFSA-SCIS 2017*
16. Kamioka, D., Murai, K., Kitamura, K. and Wakida, S. (2017) "Construction of Port-Coordinator Duties List for Mental Workload Assessment." *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* : 3409-3414

# 目次

第1章 緒言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 心的負荷評価概説.....	2
第2章 心的負荷.....	3
2.1 定義.....	3
2.1.1 心的負荷.....	3
2.2 諸学説と心的負荷.....	4
2.3 心的負荷応答機序.....	6
2.4 心的負荷評価.....	8
2.4.1 生理指標.....	9
2.4.2 評価方法.....	9
2.4.3 唾液による指標.....	9
2.4.4 心拍変動.....	10
第3章 唾液硝酸イオンによる評価.....	13
3.1 NO代謝物.....	13
3.2 硝酸イオン測定器.....	14
3.2.1 概要.....	14
3.2.2 測定器の構成.....	15
3.2.3 液膜.....	16
3.2.4 測定用具.....	17
3.2.5 心的負荷の定量評価方法.....	18
3.2.6 測定方法.....	20
第4章 日常生活における唾液硝酸イオン変動.....	21
4.1 日内変動実験.....	21
4.1.1 概要および目的.....	21
4.1.2 結果.....	23
4.1.3 考察.....	24
4.2 高負荷実験.....	25
4.2.1 概要および目的.....	25
4.2.2 結果.....	26
4.2.3 考察.....	27
4.3 まとめ.....	27
第5章 ポートコーディネーターの心的負荷評価.....	28

5.1	ポートコーディネーター対象実験	28
5.1.1	概要および目的	28
5.1.2	ポートコーディネーター	28
5.2	実験 (part.1)	29
5.2.1	実験概要	29
5.2.2	結果	30
5.2.3	考察	33
5.3	実験 (part.2)	34
5.3.1	実験概要	34
5.3.2	ポートコーディネーターの業務分類表	35
5.3.3	結果	36
5.3.4	考察	41
5.4	まとめ	42
第6章	操船者の心的負荷評価	43
6.1	水先人対象実験	43
6.1.1	水先人	43
6.1.2	概要および目的	43
6.2	実験	43
6.2.1	概要	43
6.2.2	結果および考察	46
6.3	まとめ	48
第7章	ポートコーディネーターおよび操船者の心的負荷変動結果に対する比較評価	49
7.1	概要および目的	49
7.2	結果および考察	51
7.3	まとめ	58
第8章	シミュレータにおける心的負荷評価	59
8.1	異文化ブリッジチーム員対象実験	59
8.1.1	概要および目的	59
8.2	結果	63
8.2.1	心拍変動	63
8.2.2	LF/HF 値	65
8.3	まとめ	67
第9章	結 言	68
	- 参考文献 -	
	謝 辞	
	附 録	

## 図目次

図 2.1	全身適応症候群 .....	4
図 2.2	HPA 系, SAM 系, および ANS 系 .....	6
図 2.3	R-R Interval (ECG) .....	10
図 2.4	心拍測定装置 .....	11
図 2.5	スプライン補間図 .....	12
図 2.6	MEM 法による LF/HF 評価 .....	12
図 3.1	NO 産生と最終代謝物生成 .....	13
図 3.2	硝酸イオン測定器 .....	14
図 3.3	測定器の構成 .....	15
図 3.4	液膜 .....	16
図 3.5	測定用具 .....	17
図 3.6	測定値と硝酸イオン濃度の関係 .....	18
図 3.7	実際の硝酸イオン濃度の変動 .....	18
図 3.8	サリベット .....	20
図 4.1	唾液硝酸イオン濃度結果 (平均) .....	23
図 4.2	コルチゾール日内変動結果 .....	23
図 4.3	行程と標高の関係 .....	26
図 4.4	唾液硝酸イオン結果 (平均) .....	26
図 5.1	2014 年 8 月 11 日 5:20 – 9:00 .....	30
図 5.2	2014 年 8 月 11 日 13:00 – 17:00 .....	30
図 5.3	2014 年 8 月 12 日 6:30 – 9:00 .....	31
図 5.4	2014 年 8 月 12 日 9:00 – 13:00 .....	31
図 5.5	2014 年 8 月 12 日 17:00 – 20:00 .....	31
図 5.6	唾液硝酸イオン測定値の結果 (2015 年 8 月 25 日) .....	36
図 5.7	唾液硝酸イオン濃度の結果 (2015 年 8 月 25 日) .....	36
図 5.8	唾液硝酸イオン測定値の結果 (2015 年 8 月 26 日) .....	37
図 5.9	唾液硝酸イオン濃度の結果 (2015 年 8 月 26 日) .....	37
図 5.10	唾液硝酸イオン測定値の結果 (2015 年 10 月 15 日) .....	38
図 5.11	唾液硝酸イオン濃度の結果 (2015 年 10 月 15 日) .....	38
図 6.1	唾液硝酸イオン測定値結果 (一隻目) .....	47
図 6.2	LF/HF 値結果 (一隻目) .....	47
図 7.2	唾液硝酸イオン測定値の結果 .....	52
図 7.3	唾液硝酸イオン測定値の結果 .....	54
図 7.4	唾液硝酸イオン測定値の結果 .....	55

図 7.5	唾液硝酸イオン測定値の結果.....	57
図 8.1	操船シミュレータ .....	59
図 8.2	実験対象海域における航行ルート.....	61

## 表目次

表 2.1	唾液ストレス研究対象物質 .....	10
表 4.1	実験協力者 .....	21
表 4.2	実験イベント .....	22
表 4.3	実験協力者 .....	25
表 5.1	実験協力者 .....	29
表 5.2	唾液硝酸イオン値の平均.....	33
表 5.3	実験協力者 .....	34
表 6.1	実験対象船舶 .....	43
表 6.2	実験協力者 .....	44
表 7.1	実験協力者 .....	50
表 8.1	操船シミュレータ実験協力者データ .....	60
表 8.2	ブリッジチームの構成.....	61

# 第1章 緒言

## 1.1 研究背景

操船者は日々変動する運航計画の下、安全かつ効率的な船舶の運航を実現するために時々刻々と変化する操船環境に応じて適切な操船を行う。適切な操船を支える操船者の操船術の高度化を図るために、本研究は生理指標を用いた心的負荷の定量評価に着目した [Kitamura 2011] .

様々な操船判断により生じる心的負荷は多大であると考え、本評価方法はアンケートによるものが多く主観的評価に陥る可能性がある。しかし主観的評価では、個人の航法・操縦性に関する認知や安全意識のあり方に影響されやすく、正確とは言い難い。操船環境による心的負荷を判断するには、可能な限りこのような影響が少なく定量的に取扱い可能な指標が求められる。その一つの代表として生理応答が挙げられるが、これを用いた操船者の心的負荷の定量的な評価研究を行う。

操船者の心的負荷を測定し、操船時に操船者に心的負荷が掛る状況を特定することで、本状況下での操船者の行動および操船術が把握されて、今後起こりうる事態に対策を容易に講じることが可能となる。また心的負荷による操船者の行動および操船術の把握という観点においては、実務経験年数の浅い操船者に対する経験豊富な操船者の操船術の容易な伝承が実現する。即ち当該手法による心的負荷の定量評価が経験の浅い操船者への指導指針となると考える。そして最終的には講じた対策により本研究の目指す「安全かつ効率的な」船舶の運航が実現すると考える。

先行研究において、操船者の心的負荷の測定・評価のために様々な生理指標が用いられた。取り扱った主な生理指標としては心拍 (HRV (Heart Rate Variability) ・ R-R Interval ・ LF/HF 値) [Murai 2004] ・ 顔面皮膚温差 [Murai 2007] ・ 唾液アミラーゼ [Murai 2009] 等が挙げられる。本研究においては、実船および操船シミュレータといった本研究環境での生理対象物質の採取が容易であり、測定器の生理対象物質に対する応答が早く、その場での心的負荷評価が可能である、唾液中に含まれる硝酸イオンを生理指標として使用した [Kitamura 2011] . 硝酸イオンはヒトの一酸化窒素 (NO) ガスの代謝産物であり、血圧上昇時に血管内に NO ガスが産生され、代謝産物の硝酸イオン上昇が認められると同様に唾液でも濃度が上昇する報告が散見される [Atami 1979] . この指標は未確立であるが、本心的負荷評価の有効性を示すために、本研究では唾液硝酸イオン指標と同様に実験協力者に対して心拍変動 (HRV ・ R-R Interval) を測定し、これらを解析して得られる LF/HF 値を比較指標として使用した。

## 1.2 研究目的

操船者を対象とした生理指標による心的負荷評価は、心拍変動、顔面皮膚温、唾液アミラーゼにより実施し続けられる。それら生理指標は操船イベントに対する時間的応答には鋭敏であるが、即時の心的負荷評価は不得手である。そこで、本研究では時間的応答には遅延が考えられるものの、心的負荷の全体的な傾向を主に評価するための新たな指標として、唾液中の成分である硝酸イオンに着目し、使用することに因り、操船者の心的負荷評価を行うことを主目的とする。唾液硝酸イオンを用いたヒトの心的負荷評価研究は他に類を見ない世界初だと考えるが、本指標を用いた評価手法を確立するとともに、他の指標と同様に有効性について検討、考察する。

## 1.3 心的負荷評価概説

唾液硝酸イオン指標は、ヒトが心的負荷を受けると血管内皮細胞が硝酸イオンを血中へ放出するシステムを利用する[Palmer 1987] が、血液由来の唾液において放出された硝酸イオンは検出可能[Atami 1979] と考える。システムから、唾液硝酸イオン濃度が高いほど心的負荷は大きいと考える。

唾液硝酸イオンによる心的負荷評価は以下の手順で行う。

- 1) 唾液中に含まれる硝酸イオンの濃度による心的負荷の定量評価実現に向けて、唾液硝酸イオン指標となる硝酸イオン測定器を構築する。具体的には、市販の pH 測定器のセンサ部分に別途作成した膜を張る液体（液膜カクテル）を塗布することで硝酸イオン測定器が完成する。唾液をセンサ部分に少量付着させると変化する膜電位を通して、測定器本体の pH 値表示部に唾液硝酸イオン濃度が数値として出力される。
- 2) 1) の唾液硝酸イオン指標による心的負荷評価実験は、主に船舶との通信業務を担う博多ポートラジオ、および操船環境である実船舶の船橋並びに操船シミュレータにより実施する。本結果を基に硝酸イオン指標の有効性、信頼性について評価する。また、唾液硝酸イオンと心的負荷との相関関係を確認し、検討・考察する。
- 3) 2) の実験の際には、実験協力者の心拍変動（R-R Interval, LF/HF）を読み取り、硝酸イオン指標の心的負荷応答との関係を確認する。

## 第2章 心的負荷

### 2.1 定義

Hans Selye は、ストレスを「外界からのあらゆる刺激に対する生体の非特異的な反応」、ストレッサーを「ストレスを引き起こす外界からの刺激」と定義しているが[Selye 1936, 1946, 1950] , 一般的にこれらは厳密に区別されないことが多い[Niki 2008] . 我々は生命工学的認知から、ストレッサーを実験協力者に被るものとした「心的負荷」、それにより実験協力者に生ずるストレス反応を「心的負担」とする.

本研究においては操船イベントといった操船者が受ける心的負荷を定量評価により確認する.

#### 2.1.1 心的負荷

心的負荷は大きく以下の三つに分類される[Niki 2008] . 尚 Selye は身体的心的負荷をさらに細分化して分類している（物理的, 化学的, 生物的心的負荷）[Selye 1946: 119] .

##### 1) 心理的心的負荷

不安や恐怖等が当てはまる. 本研究は操船者が不安を覚えるイベント海域, すなわちこの心理的心的負荷を定量評価することが目的である.

##### 2) 身体的心的負荷

過度な運動やけが等が当てはまる. 本研究に係る実験において, 実験協力者は操船のために船橋内を動くことになるが, この身体的心的負荷が心理的心的負荷を測定する際にどれ程の測定ノイズが影響を及ぼすかを予め評価する必要がある. そのため, これまでに運動前後における唾液硝酸イオン定量評価実験を行っている [Kitamura 2015c] . 研究の現段階では高負荷運動が及ぼす測定ノイズ効果は不明である.

##### 3) 社会的心的負荷

肉親との死別, 結婚・離婚, リストラが当てはまる. 我々の研究は瞬間の心的負荷評価なので, この恒常的に持続する心的負荷は本研究に影響なくまた測定ノイズとなると考えない.

## 2.2 諸学説と心的負荷

今日使用される「ストレス」「ホメオスタシス」という言葉は、Walter Bradford Cannon による使用が起源とされる[Cannon 1932]。彼は Claude Bernard により提唱された生体内部環境の固定性の考え[Gross 1998]を「ホメオスタシス」と名付けたが、本研究はホメオスタシスおよび心的負荷（ストレッサー）とする生体反応を利用する。

心的負荷に対する生体防御反応によりヒトは変調をきたすが、本変調変動は時期により特徴づいた変化を示す。図 2.1 に示すようにその時期は「警告反応期」、「抵抗期」「疲憊期」に分けられる [Niki 2008; Shimizu 2012].

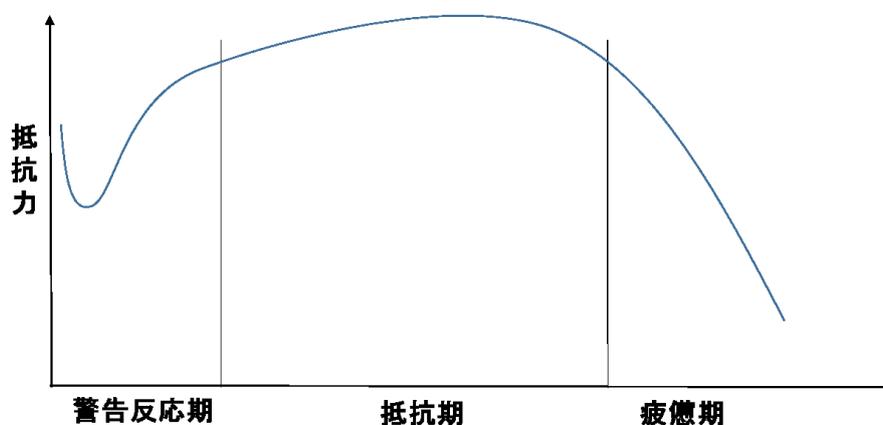


図 2.1 全身適応症候群

「警告反応期」はショック相と反ショック相の二つに分けられる[Shimizu 2012; Selye 1946: 119-121].

### 1) ショック相

- ・いきなり心的負荷を受けてショックを受けている状態.
- ・心的負荷の強度に応じて数分～1日ほどの期間.
- ・心的負荷に対する適応が形成される以前のまったく受動的な状態であり，生体が心的負荷に振り回されている時期である.
- ・アドレナリンや副腎皮質ホルモンの分泌はまだ開始されず，生存上にとって具合の悪い様々な症状を伴う．血圧低下，体温低下，血糖低下，神経系の活動抑制，筋弛緩など.

### 2) 反ショック期

- ・生命を守るため，ショックに対して積極的に防御反応をしている時期.
- ・生理的变化はショック相とは逆方向へ向かい，交感神経系の活動，および副腎髄質か

らのアドレナリンの分泌による生理的反応，すなわち，心拍数・心拍出量の増加，血圧上昇，血糖値上昇，呼吸数増加などが起こる．

- ・引き続き，副腎皮質ホルモンの分泌増加，副腎皮質重量増加が起こり，血糖上昇，顆粒球増多などが続く．

「抵抗期」における生体反応を以下に記す．

- ・反ショック相の防衛反応を維持し，安定して心的負荷に対応する状態であり，体は常に緊張状態にある．
- ・成長ホルモンの分泌亢進によって組織の同化作用も上向き，いったん減少した体重は回復する．
- ・対象となる心的負荷に対する抵抗力は増すが，別の心的負荷に対する抵抗力は却って弱くなる．すなわち，複数の心的負荷にさらされると容易に病気に陥る．

「疲憊期」における生体反応を以下に記す．

- ・強い心的負荷に長期間さらされたために，適応に必要なエネルギーを消耗し尽くし，適応反応の維持が困難な状態である．
- ・いったん獲得された心的負荷に対する適応力は減退し，全身症状が悪化しはじめる．
- ・体温低下，血圧低下，血糖低下，副腎皮質の脂質量の減少などが続発する．
- ・疲憊期の最終段階では生体はまったく抵抗力を喪失して，遂には死に至る．

本研究においては，操船イベントという心的負荷により起こる，瞬間的なショック相を経た後の反ショック相および抵抗期における生理的反応を，唾液硝酸イオンを指標として使用し操船者が受ける心的負荷を定量評価することを目的とする．図 2.1 が示すように時間的応答には遅延が考えられるものの，緊張の全体的な傾向を掴むのに唾液硝酸イオン指標は有効であると考えられる．

### 2.3 心的負荷応答機序

心的負荷が加わることにより、自律神経系、内分泌系、免疫系などの生体システムが影響を受け、さらにシステム間の相互作用により様々な現象が発生する。心理的あるいは身体的ストレスに対する生理応答として重要な視床下部－下垂体前葉－副腎皮質系（HPA系：hypothalamic pituitary adrenal）、視床下部－交感神経－副腎髄質系部（SAM系：sympathetic adrenal medullary）と自律神経系（ANS系：autonomic nervous system）を中心に扱う [Sakabe 1993; Niki 2008; Tanaka 2011] .

一般的に脳内の大脳辺縁系の扁桃体と呼ばれる部位において心的負荷は感知されるが、扁桃体から快・不快のシグナルが視床下部へ送られる（図 2.2）。視床下部では不快のシグナルに応じて、副腎皮質刺激ホルモン放出ホルモン（コルチコトロピン放出ホルモン）（CRH： corticotropin releasing hormone）を放出して下垂体に働きかけ、その前葉から副腎皮質刺激ホルモン（ACTH： adrenocorticotropic hormone）を分泌させる（HPA系）。ACTHは副腎皮質に働きかけてグルココルチコイド（ヒトではコルチゾール）を血中に分泌する。グルココルチコイドは、体内で脂肪や蛋白質をブドウ糖へと転換

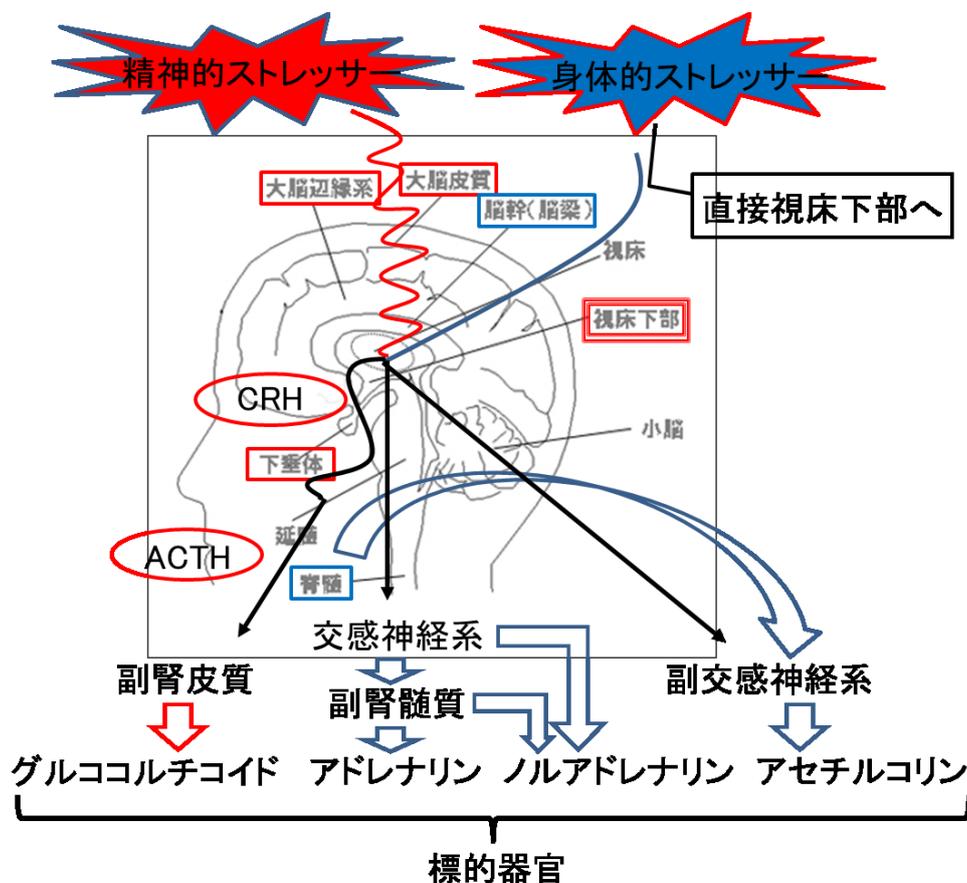


図 2.2 HPA系, SAM系, およびANS系

させる働きを持つホルモンで、心的負荷曝露時のみならず、通常時の生物の生存のためにも極めて重要であるとされる[Niki 2008] .

他方、視床下部は自律神経に作用してその働きを活発化させ、自律神経である交感神経の緊張を促し、副腎髄質からアドレナリンを分泌させる。アドレナリンは、血液中のブドウ糖を増加させて血糖や血圧の低下を防ぐように働く。これらは生体が緊急事態に遭遇した際に、その状態から逃れるために用意されたメカニズムである[Niki 2008]。ストレスなどにより交感神経が緊張すると、ノルアドレナリンが交感神経節後線維の神経伝達物質として放出され、神経終末部近傍の器官に作用する。また、SAM系を介して主にアドレナリンがホルモンとして血管内に分泌され、体液（主に血液）によって標的器官に運ばれ作用する。

標的器官の受容体に結合に至らないノルアドレナリンの一部はシナプス前終末に再び取り込まれ、残りは血液中に流れる。このため、ノルアドレナリンやアドレナリンなどのカテコールアミン（多くの神経伝達物質系の基本骨格となっている）類の血中濃度を測定することにより、交感神経系の活動度を評価することが可能である[Niki 2008]。しかし、交感神経活動度は器官により異なる。このため、カテコールアミン類の血中濃度から特定の器官を支配する交感神経活動度を評価することは不可能である。

図 2.2 に示すように、脳は心的負荷を受けると、「大脳皮質」⇒「大脳辺縁系」⇒「視床下部」と伝わり、視床下部から「自律神経系」、「内分泌系」、「免疫系」と伝わる。各系の心的負荷評価としては、自律神経系は交感神経と副交感神経、内分泌系は副腎皮質ホルモンおよび分泌亢進、免疫系は抵抗力低下が有用される。一方身体的負荷を脳が受けると、それは「視床下部」へと直接伝わる。よって脳が心的負荷を受けると最終的には「視床下部」へ伝わるため、本研究において心的負荷を定量評価する際に測定ノイズとなる身体的負荷、即ち船橋での操船者の運動を考慮する必要がある[Shimizu 2012] .

図 2.2 における標的器官へと向かう血中に分泌されたホルモンの内、伝達経路で視床下部から末端にある、副腎髄質により生成され、かつ交感神経末端から放出されるノルアドレナリンは、心的負荷指標の応答速度の遅さが懸念される。一方、NO は血管内皮細胞から産生される血管弛緩因子であり、血圧上昇などの血管ずり応力に速やかに応答し、ノルアドレナリンよりも応答が早いことが報告されている。そこで NO 代謝産物である硝酸イオンをストレス定量評価指標に選定した [Iso 2014] . ところが採血は心的負荷を伴う。唾液アドレナリンやノルアドレナリンは検出不可なため、血液同様硝酸イオンを含む唾液を用いて硝

酸イオンを定量評価する。

## 2.4 心的負荷評価

世の中には様々な心的負荷測定評価法が存在する。それらを以下に紹介する[Niki 2008; Wakida 2010]。

### 1) 主観評価

問診・心理テスト、クレペリン検査などが挙げられる。この評価は評価対象者が虚偽の返答を行う可能性があり、評価方法としては正確性に欠ける。

### 2) 免疫学的評価

NK細胞（リンパ球）活性が挙げられる。これはNK細胞が悪性の癌細胞をどれほど殺すかを定量評価することで心的負荷を評価する。データ採取に一日費やすので評価方法としては最適でない。

### 3) 行動評価

行動パターンを蓄積し、そのデータを解析する。行動パターンの一つの例としては、うつ病患者の抑制行動である。その行動パターンから規則性を見出し、患者がうつ病であるか否かを評価する。

### 4) 生化学評価

血液など生体中のストレスホルモンや関連物質（神経伝達物質）によりストレスを定量評価する。本研究はストレス測定評価法に有効であるとしてこの評価方法を採用する。というのも唾液が血液由来であり、また血中のホルモン濃度が均一であり定量評価に最適であると考えためである。

この評価法でしばしば採用するのは生命工学研究分野において代表的なストレスホルモンとされるコルチゾール（ケルココルチコイド）、アドレナリン、ノルアドレナリンである。

### 5) 生理指標評価

脳波、血圧・心拍、皮膚抵抗などの電気信号が挙げられる。血圧・心拍は完全に自律神経系に応答する。皮膚抵抗は発汗作用を見るが、嘘発見器にも応用されておりストレス評価法として有効である。

本研究は、4) 生化学評価として有効な心拍変動を採用し、これと比較することで5) 生理指標評価とする、唾液硝酸イオン生理指標による心的負荷評価の手法を確立することを目的とする。

#### 2.4.1 生理指標

生理指標は、実験協力者が試料採取の際に測定ノイズとなる心的負荷を与えないような非侵襲的で試料採取可能なものがよい[Yamaguchi 2007]。とりわけ、血液由来である尿、唾液、涙や汗を試料とするものがよい。それら試料を生理指標として採用する際には、事前に血中成分の濃度相関関係を検証するといった学術的な研究の必要性を考慮する必要がある。

また生理指標は非接触のものがよい。心的負荷測定時において接触を要する生理指標ならば、その指標自体が測定ノイズとなるおそれがあるためである。

現在生理指標として有効とされるコルチゾール（グルココルチコイド）は、生命工学研究分野において内分泌系心的負荷応答に関与する典型的なストレスホルモンとされ、心的負荷を定量化する一般的な物質である。しかしながら、本研究の心的負荷評価に採用する生理指標はコルチゾールによる内分泌系応答よりストレス応答の早い自律神経系から評価できる唾液硝酸イオン生理指標である。コルチゾールが血中のものを分析するため侵襲的であるが、唾液硝酸イオン生理指標は唾液を採用するため非侵襲であり、心的負荷評価に有効であると考えられる。

#### 2.4.2 評価方法

あらゆる面での心的負荷を評価して測定の確実性を実証するために、生理指標を使用する際には複数マーカーによる同時評価が肝要である。本研究は唾液硝酸イオンを生理指標として使用するが、この指標の心的負荷定量評価に対する有効性の確認が報告されておらず、特にその必要性がある。

生理指標を用いた心的負荷評価は、測定ノイズを無くすために無ストレス刺激で、血中の成分を分析するのが好ましいが、即時の心的負荷評価に対する血液中の生理指標の使用は現状困難である。

#### 2.4.3 唾液による指標

表 2.1 において研究対象物質クロモグラニン A、アミラーゼ活性および NO 代謝物は自律神経系である[Wakida 2004]。我々が取り上げる唾液による測定に関して、自律神経系の生理指標で有効とされるアドレナリンは採用しない。血中成分であるアドレナリンは唾液へ分泌されるが、口腔疾患といったストレスとは無関係な血液コンタミの影響を考慮する必要があるためである。一方で、唾液硝酸イオンは血中における濃度に比べて桁違いに高く、血中 NO 代謝物が唾液内に分泌される際には濃度影響が少なく、ストレス研究対象物質として有効であると考えられる。

表 2.1 唾液ストレス研究対象物質

物質	コルチゾール	分泌型免疫グロブリンA	クロモグラニンA	アミラーゼ活性	NO代謝物
計測法	ELISA ラボチップ	ELISA ラボチップ	ELISA 免疫センサ	ドライケミストリー ELISA	比色キット ラボチップ
試料	唾液・血液	唾液	唾液	唾液	唾液・血液
特徴	遅い ストレス応答	免疫指標	精神的ストレス応答	速やかな応答	血管ずり応答に 応答
R&D拠点	HQL 産総研	産総研	豊田中研 MBE アイシン精機	富山大工 ヤマハ発動機 ニプロ	産総研

#### 2.4.4 心拍変動

心臓の動きは一回拍出量や心拍数から捉えることが可能だが、拍出量の測定は容易ではないため、心拍数や血圧を測定するのが一般的である。そのため心臓の動きをとらえるために利用するのが心電図 (Electrocardiogram : ECG) である。心電図 (図 2.3) には心筋が収縮する時の一連の電気的活動が現れる。心電図の最初に見られるピークは P 波と呼ばれ、心房の興奮によって生じる。その後の鋭く高い波は R 波と呼ばれ、これらとは反対極性の小さなピークが Q 波と S 波である。心臓の拍動に対する時間間隔は正確には興奮の起始点である P 波間隔だが、図 2.3 に示すように P 波のピーク高は低くて検出が困難である。このため鋭い R 波を検出して、その間隔 (R-R 間隔) を心拍の時間間隔として代用する。

心拍数や血圧を変動させる要因は、年齢、性差、姿勢、運動、日内変動、薬物や化学物質、気温および心的活動等である。心拍変動はストレスが交感神経を刺激することにより生じるため、心拍はストレスの評価指標として採用される [Tani, et al. 1992] .

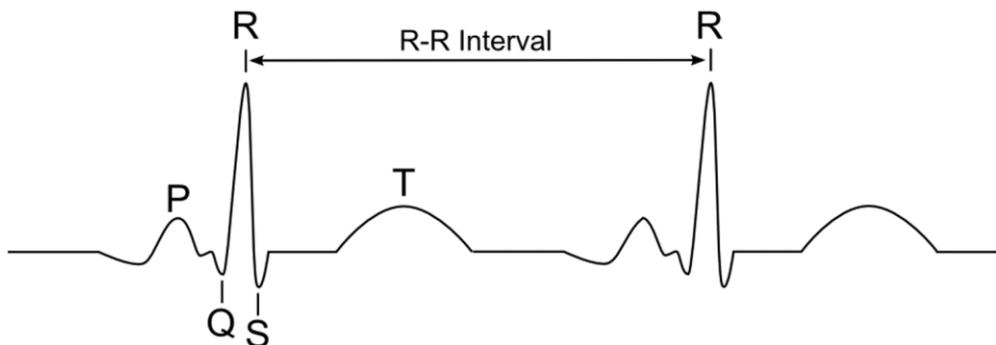


図 2.3 R-R Interval (ECG)

図 2.4 に示す心拍測定装置を用いて測定する。



図 2.4 心拍測定装置

心拍測定装置は Polar Electro の RS800CX を採用した。この装置はセンサ付ストラップ (図 2.4 左) とデータ受信器 (図 2.4 右) から構成されており、ストラップから取り外し可能なセンサ部が心拍を検知して、データ受信器に無線で伝達する仕組みである。

R-R 間隔による心的負荷評価は最終的に LF/HF 値から行う [Takada 2005] .

LF/HF 成分は自律神経の活発度を評価する。HF 成分は呼吸変動を反映し、副交感神経が緊張 (活性) する場合にのみ心拍変動に現れる。また LF 成分は血圧変動を反映し、特徴としては交感神経が緊張する時、副交感神経が緊張する時共に心拍変動に現れる。

副交感神経を含む脳神経の一つである迷走神経のムスカリン様受容体はアトロピンによって遮断され心拍数が上昇する。最終的に副交感神経系の作用を抑制するため、心拍変動の高周波 HF 帯域 (ヒトの高周波数成分, 呼吸周期: 0.15 - 0.40 Hz) のパワーが低下・消失する。交感神経系の  $\beta_1$  アドレナリン受容体はプロプラノロールで遮断され心拍数が低下する。つまりは交感神経系の作用を抑制するため、心拍変動の低周波数 LF 帯域 (ヒトの低周波数成分, 血圧調節機構: 0.04 - 0.15 Hz) のパワーが低下・消失する。この際に HF 帯域のパワーもまた同様に低下・消失する。以上より LF 帯域のパワーと HF 帯域のパワーの比, LF/HF 値を用いて、交感神経系と副交感神経系の活動度のバランスを評価する [Niki 2008; Iso 2014] .

心拍測定装置からの R-R 間隔データは、心拍 R 波のピーク毎にその間隔を記録したものである。そのデータを LF/HF 解析のためには時間が等間隔のデータに変換する必要があり、その場合は何らかの補間法を用いる必要がある。本研究では補間する方法としてスプライン補間を行う。図 2.5 におけるようにスプライン補間の特徴は、測定値間のデータが連続的に滑らかである。図 2.5 の丸は生データ例、四角を経由する曲線はスプライン補間されたデ

一タ例を示す。

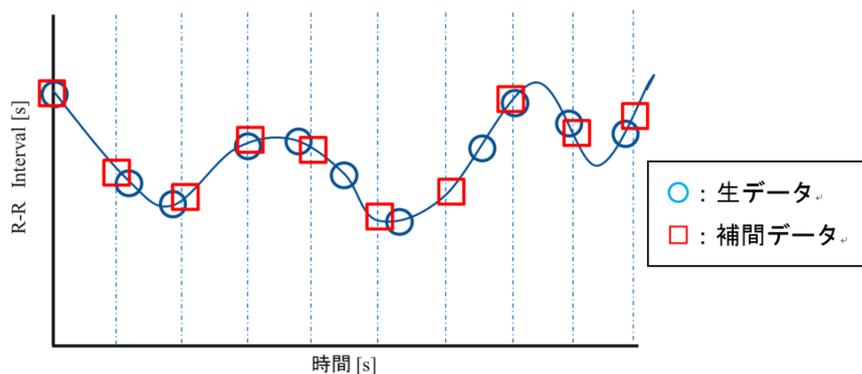


図 2.5 スプライン補間図

スプライン補間により得た心拍変動時系列データに対して最大エントロピー法 (MEM : maximum entropy method) という信号処理法を適応することにより, その周波数スペクトルを推定した. この方法によりデータを細部まで綺麗に整えることが可能となる. HF 帯である呼吸周期 : 0.15 - 0.40 Hz および LF 帯である血圧調節機構 : 0.04 - 0.15 Hz におけるパワースペクトルの結果例を図 2.6 に示す.

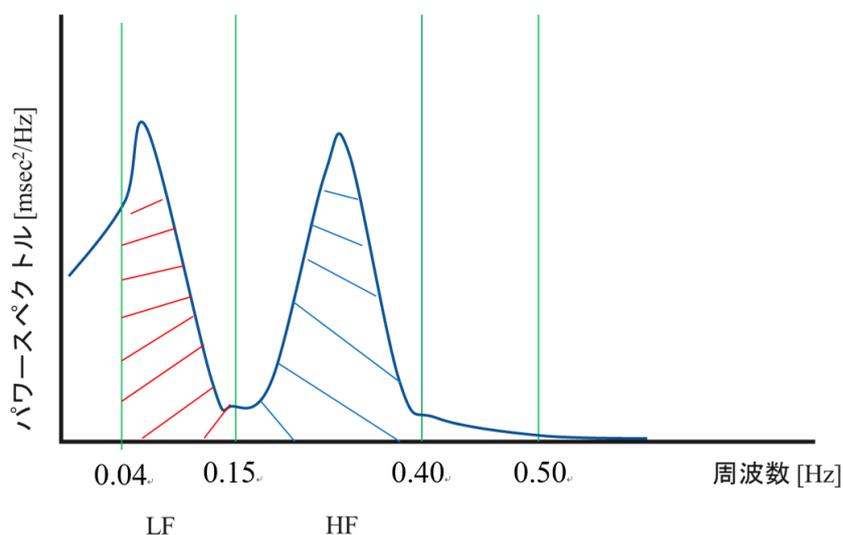


図 2.6 MEM 法による LF/HF 評価

最大エントロピー法により得られた LF/HF 値により, 本研究の心的負荷定量評価を行う. 操船者がストレスを感じると HF 成分に対して LF 成分が大きくなるため LF/HF 値が高くなる, といった評価方法である.

## 第3章 唾液硝酸イオンによる評価

### 3.1 NO代謝物

我々の採用するストレス評価指標の唾液硝酸イオンは唾液腺から分泌する。そして、その唾液腺は自律神経系が制御しており、血液に吸収された硝酸イオンは最大25%が唾液腺に取り込まれると考える。さらに硝酸イオンは唾液に10 mM程度、つまり血液濃度の10倍まで濃縮すると考える。その硝酸イオンは $\text{NO}_3^-$ のみ分泌することが明らかにされている[Sato 2008].

生体内において、L-アルギニンにより生成される一酸化窒素(NO)はガス状物質であり、血管の弛緩・拡張作用[Arnold 1977; Furchgott 1980]や神経伝達・学習・記憶[Ignarro 1987]および発癌機構[Tazawa 2013]などにも関与することが認められる。生体内におけるNOは10数秒でNO代謝物( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ )に分解されると考える(図3.1).

NO産出量の生化学測定としてはNO代謝物の含量を測り採る。一般的な測定方法として蛍光法[Kojima 1998], 電子スピン共鳴(ESR)法[Ikeya 1975], やGriess法[Green 1982]が挙がる[K. Schulz 1999]。このうちGriess法は、NOの代謝物である $\text{NO}_2^-$ がGriess試薬と反応して生成されるアゾ化合物の吸光度を測定する方法で、NOの生成量を推測する最も簡便な方法である。従来はGriess法のように試料中の $\text{NO}_2^-$ 量によってのみNO産生量を推測していたが、生体試料中で代謝された $\text{NO}_2^-$ のほとんどはさらに酸化されて $\text{NO}_3^-$ となることが分かり、最近では $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ のトータル量によってNOの産生量を推測することが有力視されている。

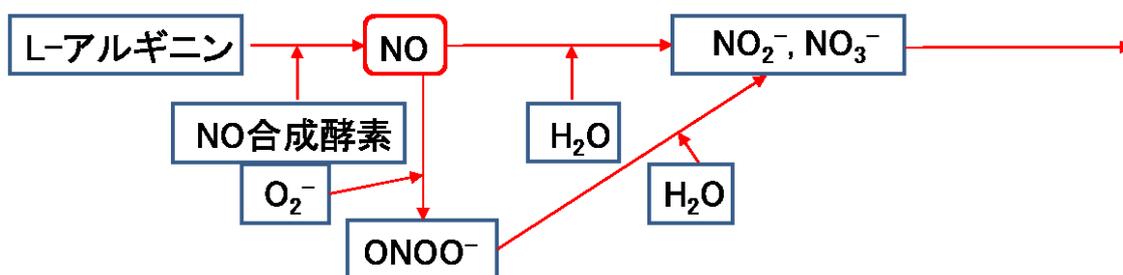


図 3.1 NO 産生と最終代謝物生成

## 3.2 硝酸イオン測定器

### 3.2.1 概要

図 3.2 に測定器を示す。大きさは、L : 143 mm × W : 29 mm × H : 15 mm で 48 g と小型かつ作成が簡便であり、実用性は高い。即ち小型であるため持ち運びが容易であり、即時の唾液硝酸イオンの応答に対する心的負荷評価が可能のため、操船環境となる船橋内での準備が容易に実現する。そして生理指標となる測定器はその特殊性から高価なものが多数見受けられるが、本研究で採用する硝酸イオン測定器は比較的安価で入手が可能である。



図 3.2 硝酸イオン測定器

先に述べたようにこの研究は他に類を見ない研究であり硝酸イオンを定量する測定器が存在せず、硝酸イオン測定器を創造開発することが不可欠である。

硝酸イオン測定器は、共同研究者である産業技術総合研究所 (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology : AIST) 所属の脇田慎一氏から提供されたものであるが、脇田氏が独自で開発された特殊な液膜を、市販の pH 測定器[ISFETCOM 2017] のセンサ部に塗布して膜を張ることにより、作成される。筆者は本測定器が硝酸イオンのモル数を測る指標として使用可能かを、検量線データを取るにより事前に確認する。検量線データに関しては「3.2.5 心的負荷の定量評価方法」で詳細を記載する。

### 3.2.2 測定器の構成

測定器は，測定値を表示する本体部（センサ）と液絡付比較電極部から構成される．

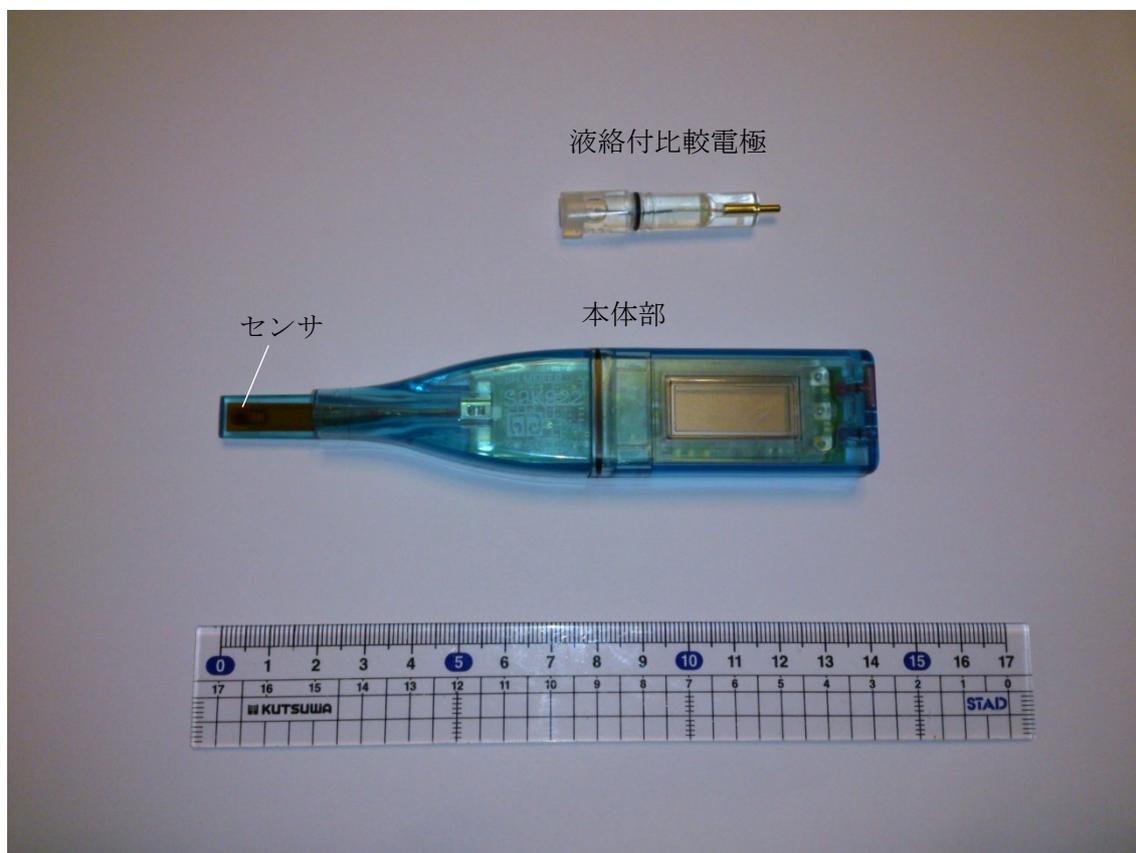


図 3.3 測定器の構成

比較電極は消耗品であり，内部の塩化カリウム水溶液の残量が少ないと本体部が値を示さなくなるため新品と交換する必要がある．本体部の値は，ネルンストの式を pH 値に換算することで 2.00 - 12.00 を示し，温度による校正を即時に自動で行う．本測定器は一点校正のみで値が得られる．

### 3.2.3 液膜

液膜は硝酸イオン測定器を完成させる要となる。本液膜には、先行研究において膜を生成するポリマーとして最適とする KP-13 を採用している[Kira 1983]。

膜の成分および含有量は以下の通りである（AIST 呼称含）（図 3.4）。

- バソクプロイン銅（I）硝酸塩錯体  $[\text{Cu}(\text{bcp})_2]\text{NO}_3^-$  : 5 %  
金属錯体硝酸塩を形成し、ポリ塩化ビニルなどポリマーと混ざりやすい。硝酸イオン検知材料（リガンド）の役割を担う。
- NPDDE (2-nitrophenyldodecylether) : 65 %  
常温で粘性の高い液体の可塑剤で、液膜の溶媒となる。
- KP-13 (AIST 呼称) : 30 %  
プラスチック膜を作るポリマーの一種であり、生体適合性材料として人工心臓に用いられている。タンパク質など生体高分子がセンサ部に付着し難くなり唾液成分の吸着抑制の高い性質があり、本研究のプラスチック膜化剤として適する。
- THF (tetrahydrofuran) :  $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$  : 適量  
揮発性がある。キャスト法による成膜溶剤の役割を担う。

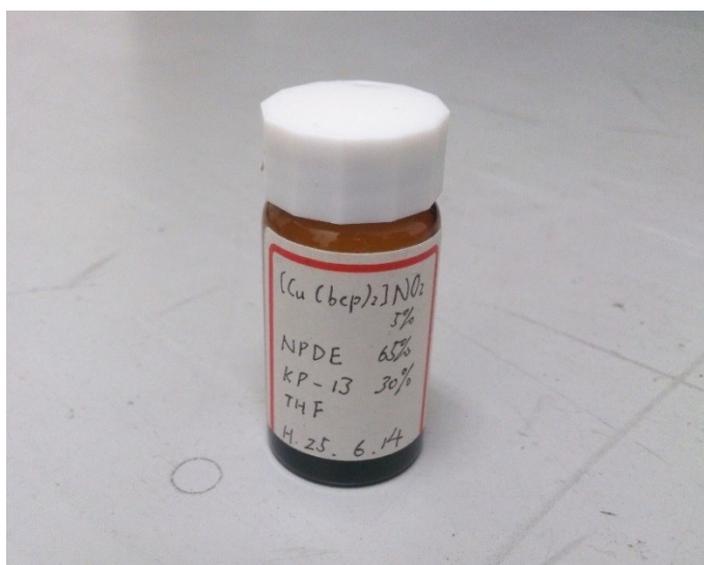


図 3.4 液膜

尚，センサ部に塗布する際には膜液への気泡の侵入に注意する必要がある．気泡を放置すると，THF が揮発して膜を形成する際にその気泡部分に空洞が生じ，イオン応答が損なわれるためである．

### 3.2.4 測定用具

測定に必要な用具を図 3.5 に示す．



(a) 蒸留水

(b) 紙製ウエス

図 3.5 測定用具

蒸留水は唾液を採取する金属スプーン，および唾液が付着した測定器を洗浄するために使用する（図 3.5 (a)）．本研究は唾液硝酸イオン濃度を測定するが，洗浄の際に水道水を使用すると，水道水に含まれる塩素をはじめとするイオンが測定ノイズになることを恐れたために，洗浄水として蒸留水を採用している．

また本研究では水分拭取りのために，使い捨ての紙製ウエスを使用する（図 3.5 (b)）．本研究の初期に同目的のためにティッシュを採用したが，実際に使用すると測定器のセンサ部に細かなティッシュが付着してしまい，測定ノイズとなる要因を作ってしまった．一方で紙製ウエスを使用すると，センサ部に紙製ウエスが破けて付着することがなかった．吸水力が優れており，センサ部に塗布した液膜上の水分を，液膜に微かに触れるのみで拭取ることが可能である，また膜を傷つけずに済むといった利便性があることから，紙製ウエスを採用している．

### 3.2.5 心的負荷の定量評価方法

硝酸イオンは、pH 測定器の pH センサ部に独自の膜を張ることで、モル濃度 (M : mol/l) の対数と pH 表示値が一次相関することを利用して評価する。具体的には、 $10^{-3}$  M の  $\text{KNO}_3$  で pH 測定器の数値 6.86 を較正し、pH 測定器の数値が 7.86 を示すと、硝酸イオン濃度は  $10^{-2}$  M と高くなり、数値 5.86 を示すと硝酸イオン濃度は  $10^{-4}$  M と低くなると相当する。図 3.6 に較正溶液硝酸カリウム溶液を用いた硝酸イオン指標検量線データ結果を示す。また測定値を、実際の硝酸イオン濃度とした変動を図 3.7 に示す。

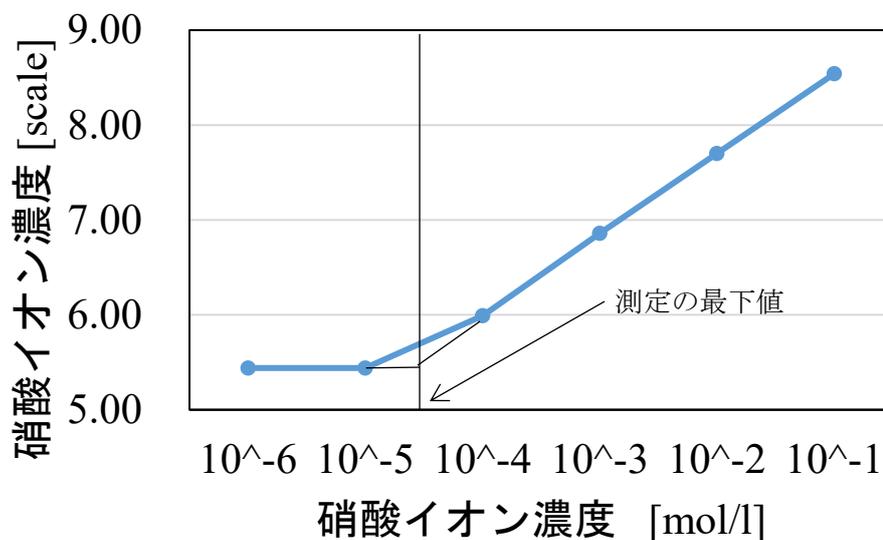


図 3.6 測定値と硝酸イオン濃度の関係

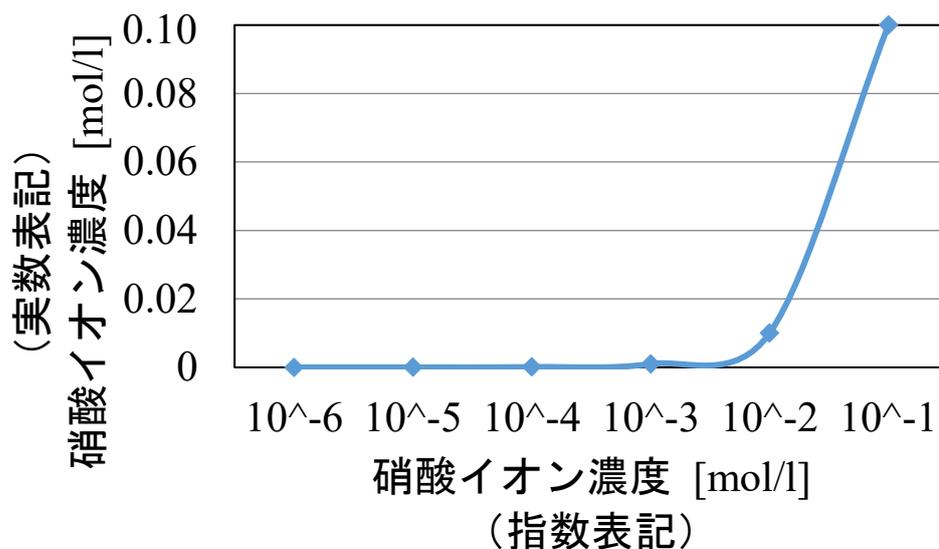


図 3.7 実際の硝酸イオン濃度の変動

図 3.6 の検量線データより，測定器の測定可能な硝酸イオン濃度は  $10^{-5}$  -  $10^{-4}$  [M (mol/l)] の間からと考えるが，先行研究[Kitamura 2011] により，範囲を大きく見積もっても  $10^{-4}$  -  $10^{-1}$  M において唾液硝酸イオン濃度が測定値に応答するため，本硝酸イオン測定器は，唾液硝酸イオン濃度を測定するには十分な応答範囲をことから，本研究でその場において唾液から心的負荷を定量評価可能な測定器として有効であると考えられる。また唾液が  $10^{-4}$  -  $10^{-1}$  M の範囲で硝酸イオンを含むことが分かっているため，その中間値である  $10^{-3}$  M をデバイスの中央値 6.86 で校正することを記す。

本研究は図 3.6 が表すように，測定器の示す，唾液硝酸イオン濃度に常用対数をかけた値で評価を行う。そのため本測定器による心的負荷評価は，個人の唾液硝酸イオン測定値の相対評価により行うものとする。すなわち，ヒトは体温や血圧の高低を評価する際に，それらを定量評価する測定器の示す値は，そのヒト自身の持つ固有の値の範囲により評価されるが，唾液硝酸イオン測定値も同様に評価されることを想定する。従って，硝酸イオン測定器を使用した唾液硝酸イオンによる，他者との心的負荷を比較する定量評価は，測定値の高低ではなく，各ヒトの測定値の変動傾向から行う。

しかしながら図 3.7 から，唾液硝酸イオン濃度から得られる測定値 2.00 差が開くと，実際の唾液硝酸イオン濃度は 100 倍もの差になることが分かる。ヒトの持つ固有の唾液硝酸イオン濃度を見積もるために，我々は唾液から得られた測定値を逆算して，実際の硝酸イオン濃度を評価する[Kitamura 2017]。

硝酸イオン測定器により得られた値から実際の硝酸イオン濃度への換算方法は附録に式を用いたものを記す。また固有値を用いた実験は「4.1 日内変動実験」および「5.3 ポートコーディネーター対象実験」において詳細を記す。

### 3.2.6 測定方法

基本的に実験時における唾液硝酸イオン濃度の測定は 1 分間隔で行う。唾液採取方法としては、先行研究でスプーン（小型プラスチック製，小型金属製），唾液採取サリベット用綿花（サリベット）[SARSTEDT 2017] 及び遠心機[AXEL 2018]（図 3.8）を試行し，最終的には金属性スプーンを使用している[Kitamura 2015c]。サリベットは綿花を口に含み唾液採取した後に，遠心機により綿花から唾液を得る方法をとるが，実際にサリベットを使用する際に，遠心機により綿花から唾液を採取することが不可能であった。綿花の吸水性が高いことから，遠心機の回転数では唾液を綿花から得られないと結論づけた。

具体的な評価方法は，操船者がスプーンで唾液腺のある舌下から唾液を採り，それをセンサ部に塗布することで測定を行う。測定値は数秒で得られる。測定後にセンサ部およびスプーンを蒸留水（図 3.5 (a)）により十分に洗い流し，キムワイプ（図 3.5 (b)）で拭き取りを行うことで洗浄した。

硝酸イオン測定器は測定前毎に標準校正溶液  $\text{KNO}_3$  にセンサ部を 30 分ほど浸しておく必要がある。コンディショニングを行うことにより，センサ部に張った膜の硝酸イオン応答再現性が向上すると共に膜の状態も破れにくくなる。



図 3.8 遠心機とサリベット

## 第4章 日常生活における唾液硝酸イオン変動

### 4.1 日内変動実験

#### 4.1.1 概要および目的

運動負荷を行った場合、心拍の上昇によって血管内壁ずり応力が増大し、それに伴いNOが血管弛緩のために産生され、結果血液中の硝酸イオン濃度が増加することが認められる[Masuda 2000]。操船者は当直中に見張り、船橋内にある計器を使用するために身体を動かしている。本実験は、運動負荷実験を行うことにより運動が唾液硝酸イオン濃度へ及ぼす影響を把握するためである[Kitamura 2015a]。

本実験は硝酸イオン測定器から得られる値を、実際の唾液硝酸イオン濃度に換算する。本実験の性質から、ヒト固有の唾液硝酸イオン濃度を把握するためである。

本実験は、運動が測定誤差として心的負荷評価に影響を与えるかを心的負荷変動より確認することを目的とする。また、心的負荷および唾液硝酸イオン濃度の日内変動を確認することも目的である。

表 4.1 に実験協力者の詳細を示す。

表 4.1 実験協力者

実験協力者	性別	年齢[歳]
A	男	22
B	男	22
C	男	22
D	男	21

本実験における実験協力者は、本学のアメリカンフットボール部に所属する学生 4 人である。また性別による実験結果の差異を無にするために、男性のみとした。年齢は 21 – 22 歳で、ほぼ毎日相当心身共に厳しい練習を行っている。実験協力者は、神戸大学の学術研究に係る行動規範：環境・安全への配慮、生命倫理の尊重のもとに規定された倫理基準に則り実験の説明を行い、同意（署名）を得た上で参加した。

実験協力者の日常生活における唾液採取のタイミング（イベント）と、それに他対応する時刻を表 4.2 に示す。実験協力者であるアメリカンフットボール部の学生は日々規則正しい生活を送っている。そのため本実験において正確な時刻の下、唾液を採取することに成功した。

表 4.2 実験イベント

イベント	時刻
朝食前	8:00
朝食後	9:00
昼食前	12:00
昼食後	14:00
運動前	16:30
運動後	20:30
(夕食前)	
(夕食後)	21:30
就寝前	23:59

本実験は 2014 年 9 月 18 日から 11 月 6 日の間の任意の 20 日を対象に行った。実験協力者 A のみ 15 日を対象とした。実験環境は気象、気温、湿度、気圧等環境が統一ではない状況の下行った。

表 2 が示すように唾液採取のタイミングは、朝食前後、昼食前後、運動前、夕食前の運動後、夕食後、そして就寝前の 8 回/日とした。運動内容は日毎に内容が変わるが、負荷としては一般のアメリカンフットボール部と変わらないハードな内容であると実験協力者から聞いている。

#### 4.1.2 結果

各実験協力者 A - D の結果の平均を一つのグラフにまとめたものを図 4.1 に、また参考資料として図 4.2 にコルチゾールの日内変動結果を示す[Izawa, et al. 2010] . そして各実験協力者 A - D の実験結果を附録図 A.1 - 4 に示す.

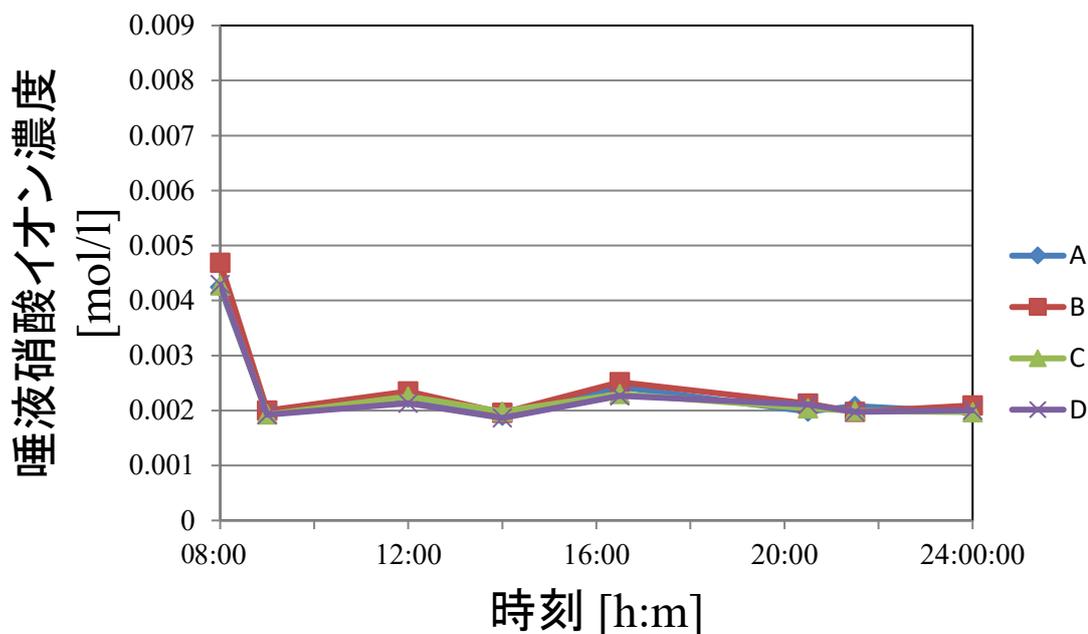


図 4.1 唾液硝酸イオン濃度結果 (平均)

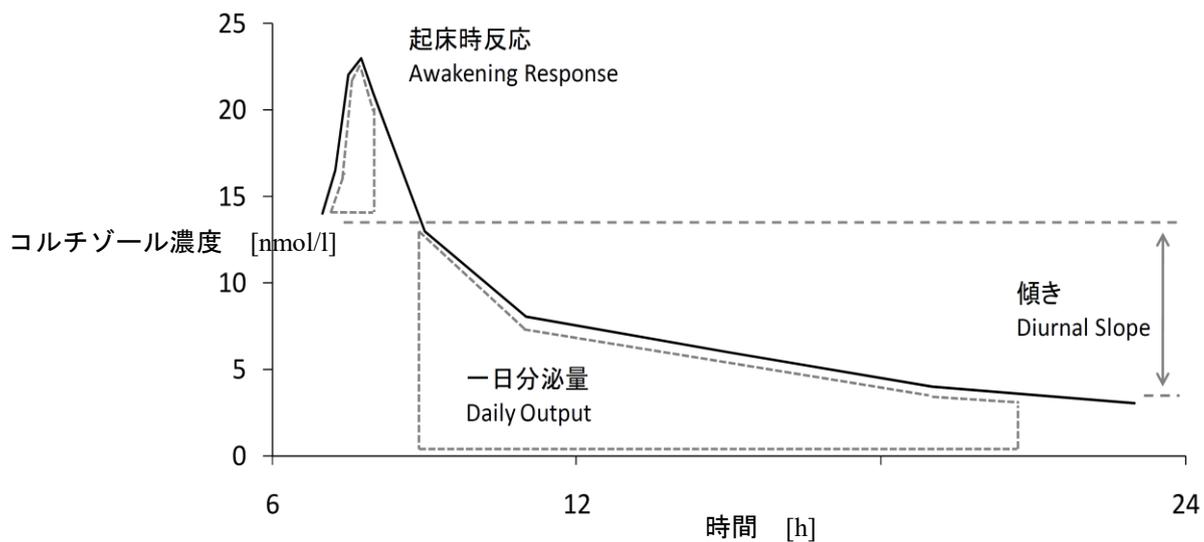


図 4.2 コルチゾール日内変動結果

図 4.1 および附録図 A.1 - 4 におけるグラフは、縦軸は測定値から換算した実際の唾液硝酸イオン濃度、横軸に時刻を取る。附録図 A.1 - 4 は 1 つのグラフにつき 20 回 (A.1 のみ 15 回) の結果を示しているが、各図同様の変動傾向を示していることが分かったため、各図の平均値により唾液硝酸イオン濃度の変動を評価しても問題はないと考える。そのため、図 4.1 において、実験協力者 A - D の各平均の唾液硝酸イオン濃度の結果から心的負荷評価を行った。各実験協力者から得られた値を平均すると、より鮮明に各実験協力者の結果が理解可能だと考えるが、図 4.1 より各実験協力者何れの結果もきれいに重なることがわかる。従って、本結果は再現性の高いものとなったと考える。

また図 4.2 のコルチゾール日内変動結果[Izawa 2010] と比較すると、図 4.1 の実験結果から唾液硝酸イオン濃度は心的負荷評価に有効であるとされるコルチゾールと相関関係があると考える。すなわち、起床時に最も濃度が高く、そこから濃度が低くなるといった日内変動結果が同様であると考えられる。

#### 4.1.3 考察

図 4.1 において、唾液硝酸イオン濃度は 8:00 の起床時に最も高く、12:00 の昼食前および 16:30 の運動前に 2 番目に高かった。結果がこのように至った原因は不明だが、運動後の 20:30 唾液に硝酸イオン濃度の上昇が見られなかったことから、運動は唾液硝酸イオン濃度に影響を与えないと結論付けた。本結果は先行研究[Jin 2013] とは異なるが、これは本研究の指定するイベントが運動および食事の前後と混同してしまっているために、高負荷な運動に対する唾液硝酸イオン濃度結果が埋もれてしまった可能性が考えられる。若しくは日常的に運動を行っていることから、実験協力者 A - D が運動を心的負荷と認知していない可能性も考えられる。

また図 4.1 において、各実験協力者 A - D の結果が重なることから、同年代、同性別のものが同様の日常生活を送ると一様な唾液硝酸イオン濃度となることが分かった。

本実験から唾液硝酸イオン濃度の日内変動結果は再現性が高く、確かであると考えられる。またコルチゾールと同様の変動傾向を示すことから、唾液硝酸イオン指標は心的負荷評価に有効であると考えられる。

## 4.2 高負荷実験

### 4.2.1 概要および目的

「4.1 日内変動実験」から、運動による高負荷の測定のみが及ぼす影響の検証が必要であると考えたため、それを把握することを目的に、自転車によるサイクリング時の心的負荷評価の変動把握実験を行った[Kitamura 2015b]。操船者は操船時に高負荷と考えられる運動等を行わないが、水先人等海事社会に属する人々の中には高負荷な身体運動を業務で必要とする場合が考えられたために、必要な実験であるとする。唾液は特定の交差点や店に着いた時点で採取し、即時に心的負荷評価を行った。表 4.3 に実験協力者の詳細を示す。

表 4.3 実験協力者

実験協力者	性別	年齢 [歳]
A	男	24
B	男	49
C	男	52

実験協力者 A - C の 3 人は一般成人男性である。実験協力者 A のみ学生で、B および C は社会人である。実験協力者の 3 人は日頃から自転車に乗っている。実験データとして、実験協力者 A および B は 5 回、C は 2 回実験を行ったが、何れも同じ行程とした。2015 年 5 月の任意の日に実験を行ったが、天候を晴に統一して実験を行った。実験協力者 A および B の結果は全て同一日に実験を行い、実験協力者 C に関しては、実験協力者 A および B の 1 回目および 2 回目の実験と同日に実験を行った。

実験協力者は、神戸大学の学術研究に係る行動規範：環境・安全への配慮，生命倫理の尊重のもとに規定された倫理基準に則り実験の説明を行い，同意（署名）を得た上で参加した。

#### 4.2.2 結果

図 4.3 に実験開始から終了までの行程および標高の概要を示す。また附録図 A.5 - 7 に各実験協力者の唾液硝酸イオン測定器による測定値、および図 4.4 に各実験協力者の平均の測定値の結果を示す。

図 4.3 の横軸は、実験開始から終了までの行程を、縦軸は同行程における標高を示すが、横軸は図 4.4 および附録図 A.5 - 7 の横軸と一致する。また図 4.3 における 4.1, 7.9, 11.9, 14.2, 16.9, 23.0, 26.4 km は測定地点を表す。そして図 4.4 および附録図 A.5 - 7 における 30 km 地点の結果は実験終了 30 分後の測定したものを示す。



図 4.3 行程と標高の関係

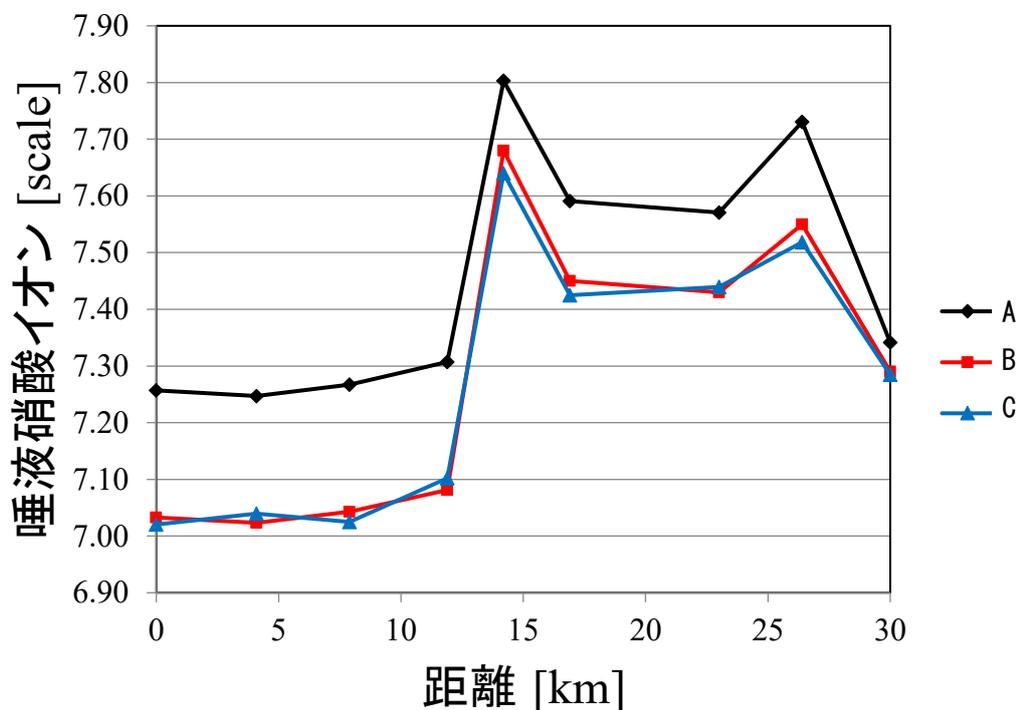


図 4.4 唾液硝酸イオン結果 (平均)

図 4.4 および附録図 A.5 - 7 の縦軸に硝酸イオン測定器から得られた唾液硝酸イオン値，横軸に実験時の行程距離 [km] を示す．図 4.11 において，菱形，四角，三角のマーカ―はそれぞれ実験協力者 A - C の結果を示す．

「4.1 日内変動実験」と同様に，附録図 A.5 - 7 の結果は同様の硝酸イオン値の変動を示したため，図 4.4 における各実験協力者の平均値結果で考察をして問題はないと考える．

#### 4.2.3 考察

共同研究者の宮道氏によると，マイクロチップ電気泳動を用いた運動負荷実験の結果は，血圧・脈拍が共に上昇するにつれ，唾液 NO 代謝物濃度も上昇していることを認めた [Miyadou 2013] ．本研究も同様に，標高の高い方へ移動する際にとりわけ硝酸イオン値が 14.2 および 26.4 km 地点で最も高いものを得られた．そして運動後 30 分時における唾液硝酸イオン値は実験開始時の値と同様になる．これは短期間の高負荷な運動は唾液硝酸イオン濃度に影響を及ぼすと考える．また図 4.4 より，唾液硝酸イオンの変動傾向が各実験協力者に対して一様であったことから，本実験結果は再現性が高く，確かであると言える．

#### 4.3 まとめ

高負荷な運動を日常的に行う部活動に属する者ではなく，運動を非日常とする者を対象に高負荷運動実験（4.2 高負荷実験）を行った．アメリカンフットボール部員を対象とする実験（4.3 日内変動実験）結果とは異なり，高負荷運動は唾液硝酸イオンに影響を及ぼす，測定ノイズとなる心的負荷だと断定した．操船者の心的負荷評価に関して，本実験結果がアメリカンフットボール部員対象の実験結果よりも優位にあると考える．アメリカンフットボール部員は常日頃から高負荷な運動に慣れており，本実験において運動を心的負荷と認識しなかったと考える．本章で示した実験結果は，海事社会において能動的に身体運動を伴う業務に従事する現場でも，活用の可能な生理指標を構築する，という観点において，本硝酸イオン測定器の持ち運びの簡便性およびその場計測の有効性を示したと考える．

## 第5章 ポートコーディネーターの心的負荷評価

### 5.1 ポートコーディネーター対象実験

#### 5.1.1 概要および目的

本研究背景は操船者を対象とするが、本実験は海事社会に属する人々を代表してポートコーディネーターを対象とする。海事社会に属する人々は24時間交代により当直業務を行うことが一般的であり彼/彼女等（彼等）にかかる心的負荷は相当なものだと考えられる。操船者と同様に、海事社会に従事する者の心的負荷評価はその必要性が高い。

本実験の目的は、唾液硝酸イオン生理指標を使用した業務時におけるポートコーディネーターの心的負荷定量評価、および本評価を基にした業務イベントの特定とする。また「5.3.2 業務表」で後述するが、業務表の完成も目的とする。ポートコーディネーターは多ポートラジオの業務従事者を対象とした[Touyoushingoutsuushinsya 2008]。

#### 5.1.2 ポートコーディネーター

ポートラジオとは電波法施行規則および電波法関係審査基準により定められた海岸局の名称で、『港湾管理事務および入出港船舶の航行の能率化を図るため港湾通信業務を行う』ことを目的として船舶の航行安全に寄与し港湾管理運営を支援する。ポートラジオに所属するポートコーディネーターは各港湾管理者からの委託を受け、港へ入出港する船舶と国際 VHF 無線電話にて通信を行う。一般的な海事社会に属する人々と同様に、ポートコーディネーターもまた24時間2人体制により業務を行う。彼等は特定の輻輳する港湾において、対象港湾を航行する船舶に有益な情報を伝えることにより、本港湾における交通安全を維持する役割を担う。彼等が伝える情報には航行制限、他船の動静、他船との見合い関係、船舶入出港予定、気象・海象等が含まれる。

ポートコーディネーターはメイン・サブの業務を二人体制により行う。メイン業務（メイン）は主に情報収集、船舶との通信を担当する。サブ業務（サブ）は主に双眼鏡を用いた肉眼による港湾の見張り、電話応対、船舶入出港予定のとりまとめを担当するが、メインの繁忙時にはメインを行う場合もある。

## 5.2 実験 (part.1)

### 5.2.1 実験概要

2014年8月10日 - 13日の4日間、ポートコーディネーターを対象とする実験を行った[Kitamura 2014b]。実験は本学博士課程前期課程在籍時に行ったが、データ処理および結果に対する考察は現在の博士課程後期課程に行った。

データ測定は業務に支障が生じて、それが心的負荷となるのを防ぐために10分間隔とした。実験環境において、分析の際に必要なとなる操船中の発生イベントを、ビデオカメラおよびボイスレコーダーにより記録した。

表 5.1 に実験協力者の詳細を示す。

表 5.1 実験協力者

実験協力者	性別	年齢 [歳]	経験年数 [年]
A	男	45	18
B	男	32	7.5
C	女	25	5
D	女	-	3
E	男	28	2
F	男	-	2
G	男	-	0.75
H	女	21	0.5

本実験では実験協力者全員に詳細な年齢を聞けなかったが、20 - 40代と年齢層に幅が見られた。実験協力者は男5人、女3人で、経験年数が半年未満のものから18年と性別、業務経験年数ともに分散されていた。

実験協力者は、神戸大学の学術研究に係る行動規範：環境・安全への配慮、生命倫理の尊重のもとに規定された倫理基準に則り実験の説明を行い、同意（署名）を得た上で参加した。

## 5.2.2 結果

図 5.1 - 5 に時間毎のメインおよびサブの唾液硝酸イオン濃度の変動結果を示す (Kitamura, et al. 2014b).

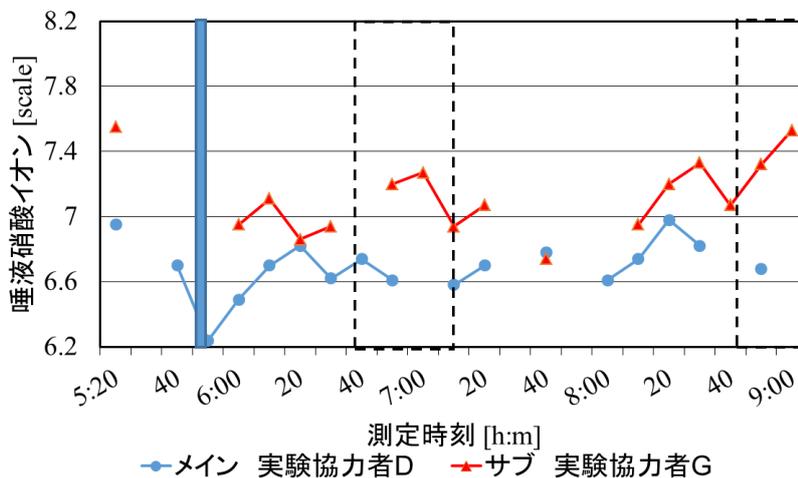


図 5.1 2014年8月11日 5:20 - 9:00

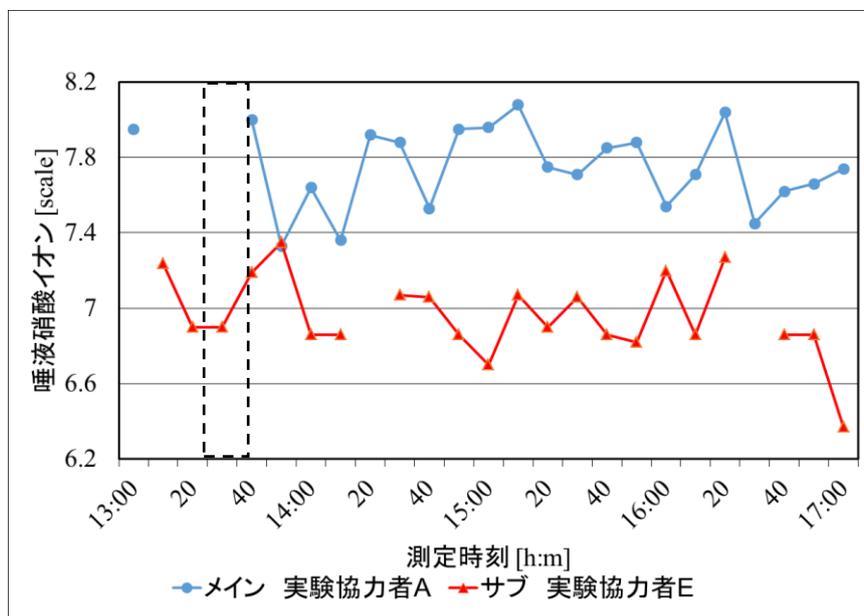


図 5.2 2014年8月11日 13:00 - 17:00

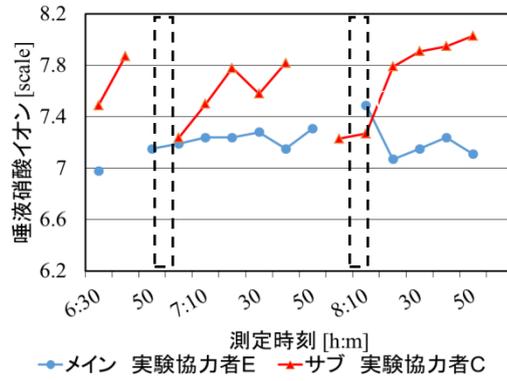


図 5.3 2014年8月12日 6:30 - 9:00

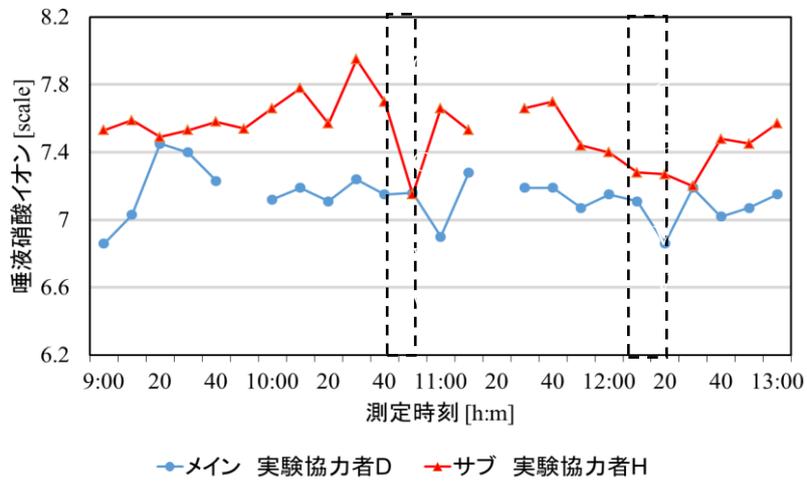


図 5.4 2014年8月12日 9:00 - 13:00

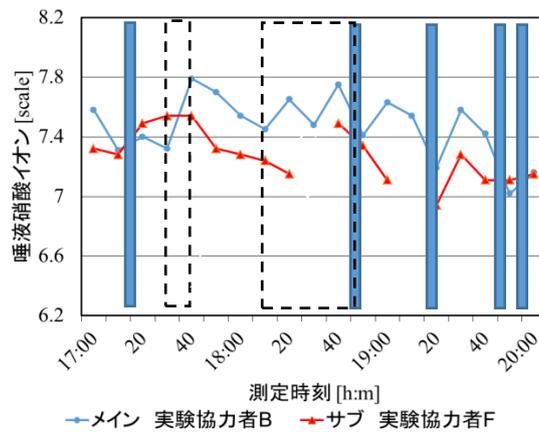


図 5.5 2014年8月12日 17:00 - 20:00

図の 5.1 - 5 の縦軸は硝酸イオン値，横軸は測定時刻を表す．またメインおよびサブの実験協力者に対する実験結果はそれぞれ丸，三角のマーカで示す．図中の垂直太線は水分摂取，破線による角柱は実験イベントを示す．各グラフ実験時間で示しているため，各図の幅は異なる．ここで，実験イベントとは業務に対する実験協力者への顕著な心的負荷とし，具体的には実験協力者の通信業務を示す．水分摂取は測定ノイズになると考えられることから，これも実験イベントと見做す．

図 5.1 において，5:50 の測定直前にメインである実験協力者 D は多量の水分を摂取した．水分摂取の理由としては唾液の量の不足により測定ミスが連続したため，唾液の分泌を促すことを考慮して実験協力者 D が水分を摂取した．その結果，唾液はより水分を含んだ状態となり，数値も急激に減少した．図 5.5 における水分摂取はいずれもメインである実験協力者 B のものを示すが，17:17 を除き数値が急激な減少を示した．実験協力者 A，C，F は業務中に飲食を行わなかった．図 5.1 において 6:40 -7:10 にかけて出入港船舶が多く，メインである実験協力者 D の通信回数も 12 回と増加した．また 6:40 よりメイン・サブ共に引継ぎを開始した．これら二つの実験イベントが唾液硝酸イオン値の増加として，心的負荷の応答を示したと考える．

図 5.2 に関して，13:30 - 40 にメインである実験協力者 A が船舶とタグボート代理店を中継するコミュニケーションを行ったが，タグボートの手配がスムーズにいかず，その対応としての通信に携わり，唾液硝酸イオン値は増加した．実験協力者 A に心的負荷がかかったと考える．

図 5.3 において，実験イベントは何れも大型客船の入港開始時期を示すが，ここでは明らかにサブである実験協力者 C の心的負荷が増加した．これはサブが対象とする入港客船を絶えず双眼鏡で観察していたことによるものと考えられる．また，8:10 の実験イベントの後にサブである実験協力者 E の唾液硝酸イオン値は急激に減少する．実験協力者 C と同様に心的負荷と関連して減少したと考える．

図 5.4 に関して，各実験イベントは他とは異なりメイン・サブである実験協力者 D，H が談笑するといったリラックス状態であった．10:40 - 50，12:10 - 20 の時間で共に心的負荷の減少が確認できた．

図 5.5 において，17:40 前後にメイン・サブ業務に従事する二人の実験協力者 B，F が議論をした後に通信業務に携わるといった実験イベントが生じた．また，18:10-50 の時間に二人の実験協力者が出入港情報を船舶に伝える等，多数の通信業務を行うといった実験イベ

ントが生じた。これら二つの実験イベントと唾液硝酸イオン値のピークとの相関性が定かではないものの、それら実験イベントの後に唾液硝酸イオン値が減少していることから、実験イベントに対応した後、実験協力者 B, F はリラックス状態となったものとする。

### 5.2.3 考察

表 5.2 に各実験協力者から得られた唾液硝酸イオン値の平均を示すが、午前中を担当するメインの方がサブに比べて唾液硝酸イオン値が全体的に小さいことが分かる。この結果の確かさは今後検証する必要があると考える。

「5.2.4 結果」より、唾液硝酸イオンは顕著な実験イベントに反応し、心的負荷を定量評価する生理指標として有効であるとする。しかしながら、実験イベント以外における心的負荷の変動に関してはさらなる考察が必要となった。今後の研究課題として、実験協力者に対するより詳細な行動分析が必要とする。

表 5.2 唾液硝酸イオン値の平均

2014/8/11 5:20-9:00	メイン 実験協力者 D	サブ 実験協力者 G
	6.69	7.13
2014/8/11 13:00-17:00	メイン 実験協力者 A	サブ 実験協力者 E
	7.75	6.96
2014/8/12 6:30-9:00	メイン 実験協力者 E	サブ 実験協力者 C
	7.2	7.65
2014/8/12 9:00-13:00	メイン 実験協力者 D	サブ 実験協力者 H
	7.14	7.53
2014/8/12 17:00-20:00	メイン 実験協力者 B	サブ 実験協力者 F
	7.47	7.28

### 5.3 実験 (part.2)

#### 5.3.1 実験概要

2015年の8月25, 26日および10月15日に実験を行った[Kitamura 2017]。10月15日は2014年に実施した「5.2 実験 part.1」の実験から、5分間隔で唾液採取を行ってもポートコーディネーターの業務に差し支えないだろうといった考えから、5分間隔により唾液採取を行った。しかしながら、8月25日は10分間隔で、26日は15分間隔で行った。その理由としては実験環境とする博多港湾に台風が直撃したために博多港が閉鎖し、博多港湾における交通が滞ってしまったために、ポートコーディネーターの業務時に受ける心的負荷が見受けられないだろうと我々で判断したためである。

本実験では硝酸イオン測定器から得られる値と、その値から換算して得られる実際の濃度を基に、唾液硝酸イオンによりポートコーディネーターの心的負荷を評価した。

本実験の実験協力者の詳細を表 5.3 に示す。

表 5.3 実験協力者

実験協力者	性別	年齢[歳]	経験年数 [年]
A	男	46	19
B	男	33	8.5
C	女	26	6
E	男	29	3
G	男	-	1.75
H	女	22	1.5
I	男	37	0.5

表 5.3 において実験協力者を表すアルファベットは、表 5.1 と同一人物の者には同様のものを振った。「5.2 実験 (part.1)」で実験に協力した D は今回おらず、代わりに新たに実験協力者 I が本実験に加わった。

本実験では「5.2 実験 (part.1)」と同様に分析の際に必要な操船中の発生イベントを、ビデオカメラおよびボイスレコーダーにより記録したが、ビデオカメラは台数を増やして2台とした。また目視および手書きのメモにより業務イベントを記録した。

### 5.3.2 ポートコーディネーターの業務分類表

改めて本研究の目的は、唾液中に含まれる硝酸イオンを用いて港湾通信業務を行うポートコーディネーターの心的負荷を定量的に評価することである。生理指標の一つである唾液硝酸イオンは心的負荷に対して応答することが確認されているが、各種イベントに対する応答特性は明らかではない。この応答特性を明確にするために、唾液硝酸イオンの応答と各種イベントとの関係性を精査する必要がある。そこで、業務中におけるポートコーディネーターの心的負荷の高いイベントを業務内容ごとに分類・整理できる業務表を作成し活用する。

本研究においては、ポートコーディネーターの業務表を確立することもまた目的とする。この業務表は最終的にはポートコーディネーターの新人育成の場での業務チェックリストとして活用されるものを作成することを念頭に作成される。

附録表 A.I および A.II に本実験で使用した業務表を示す。実際には表 A.I が上部、表 A.II が下部の一つの業務表となる。業務表の左部に業務の大分類として通信、見張り、情報収集を並べており、業務表の上部に記載する横軸は左から、業務、デバイス、情報源、詳細、カテゴリー分け、本船の位置、内容、情報①、情報②、調整の種類、調整の内容となり、右へ行くほど大分類された 3 業務が詳細に分けられるといった表となっている。

本実験での業務表の活用として、業務表左部に記載されたポートコーディネーター業務の大分類 3 項目、通信、見張り、情報収集に対して、唾液硝酸イオンにより確認された、心的負荷のかかる業務イベントが適合するかを検証するために使用した。

### 5.3.3 結果

実験結果を図 5.6-11 に示す。

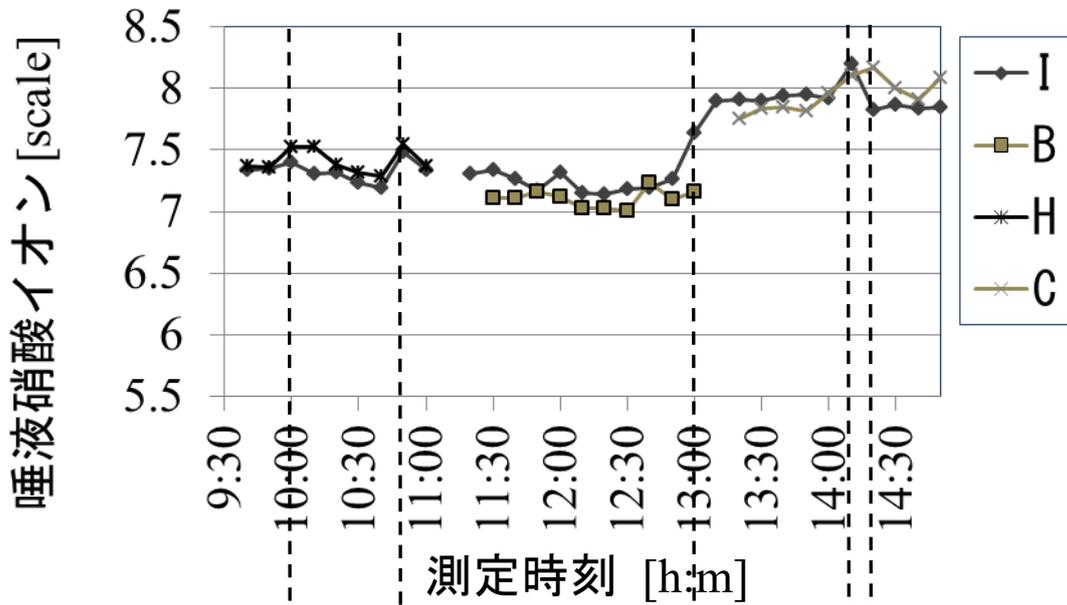


図 5.6 唾液硝酸イオン測定値の結果 (2015年8月25日)

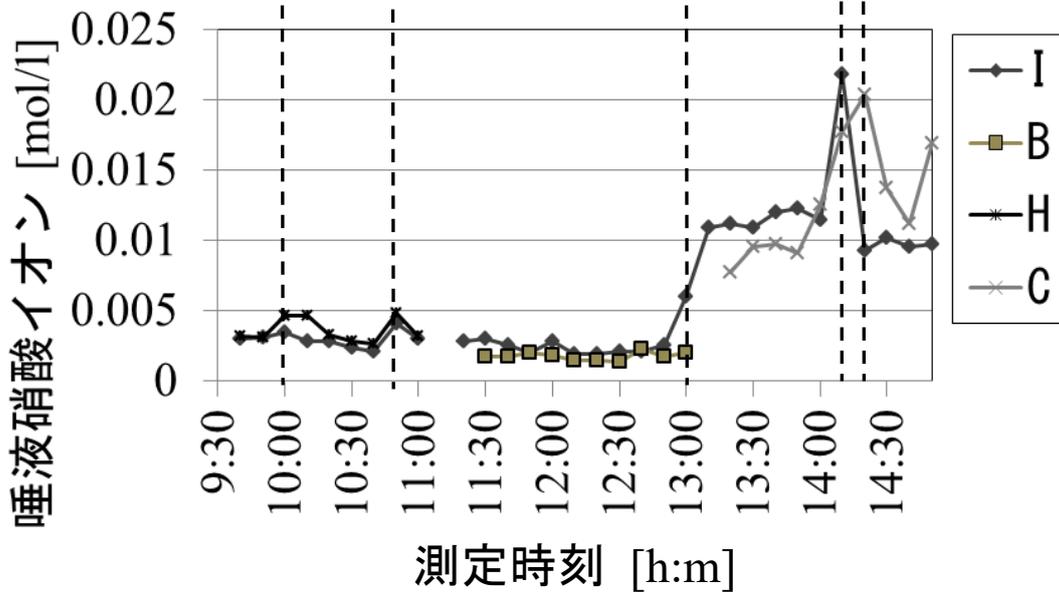


図 5.7 唾液硝酸イオン濃度の結果 (2015年8月25日)

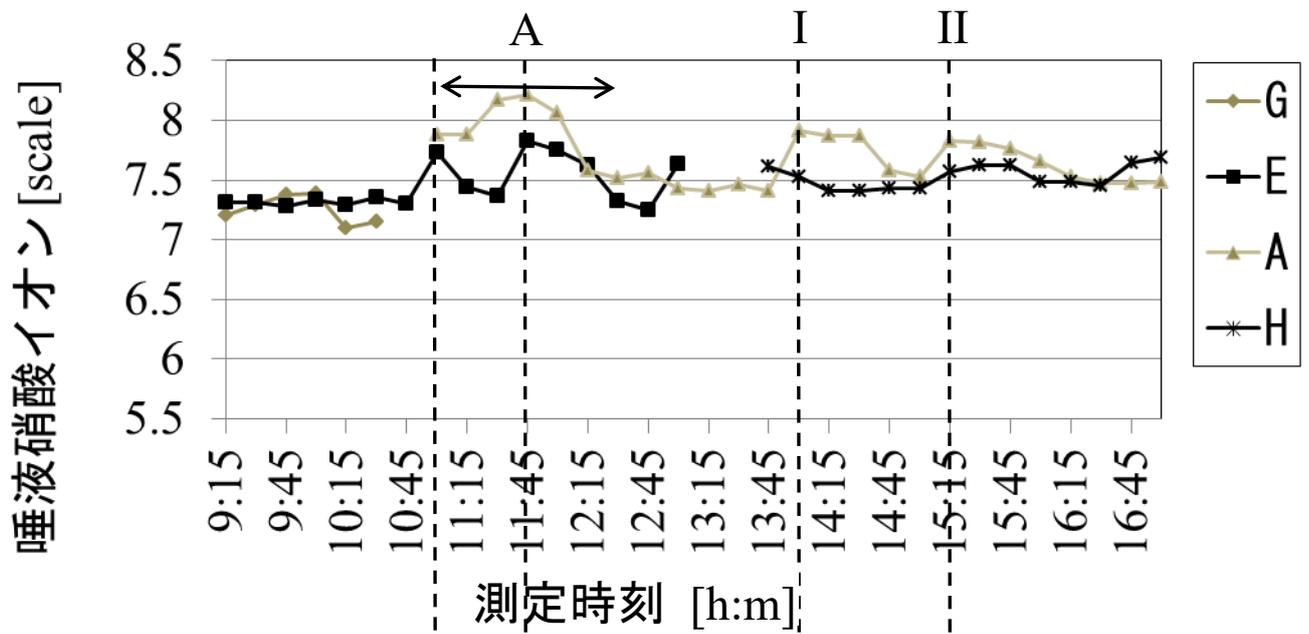


図 5.8 唾液硝酸イオン測定値の結果 (2015年8月26日)

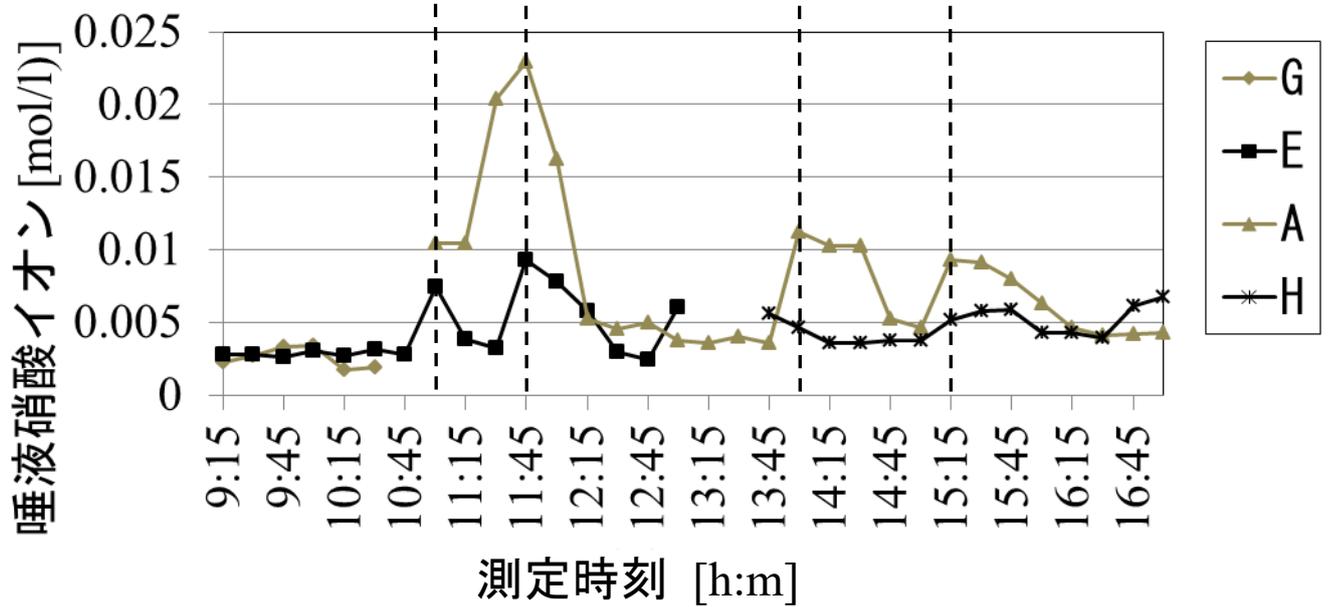


図 5.9 唾液硝酸イオン濃度の結果 (2015年8月26日)

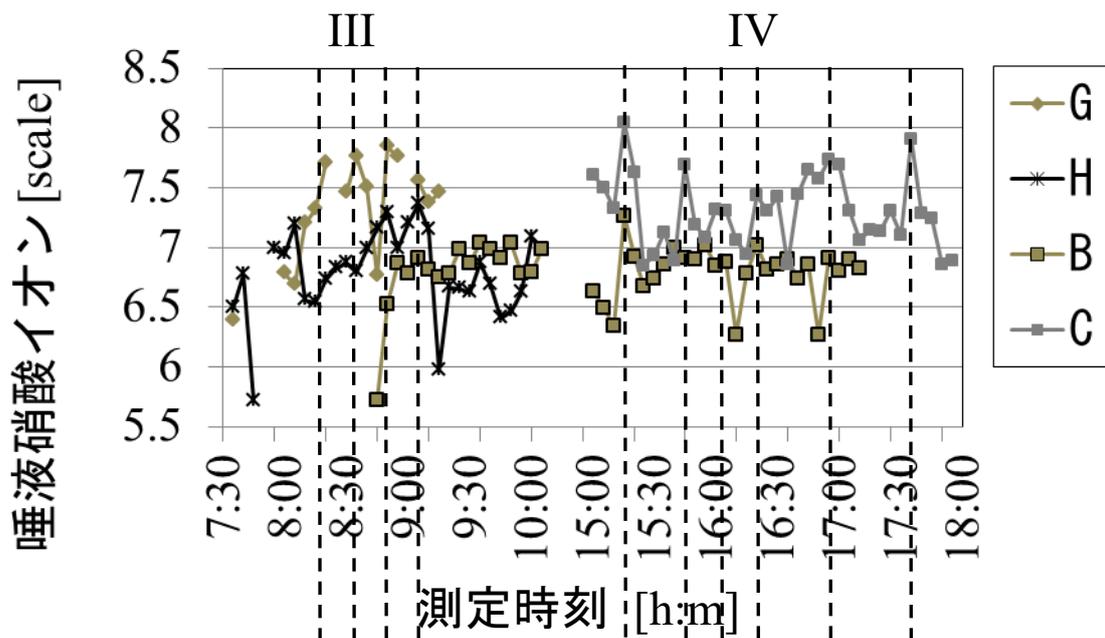


図 5.10 唾液硝酸イオン測定値の結果 (2015年10月15日)

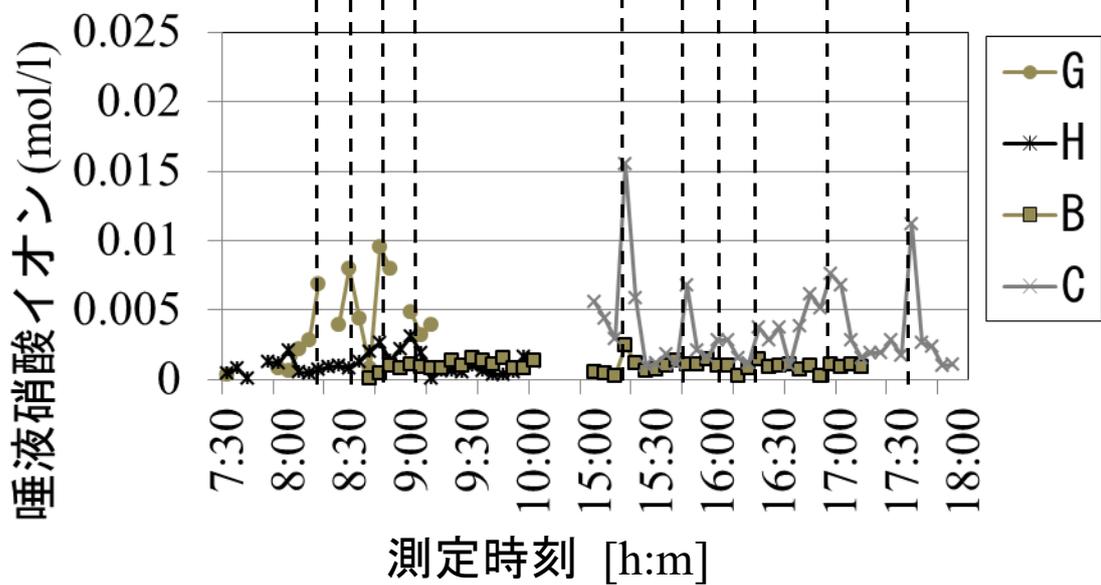


図 5.11 唾液硝酸イオン濃度の結果 (2015年10月15日)

図 5.6, 5.8, 5.10 は硝酸イオン測定器から得られた値を結果として示す。縦軸に硝酸イオン測定値, 横軸に時刻を表す。図 5.7, 5.9, 5.11 は測定値を換算して得られた実際の硝酸イオン濃度の結果である。縦軸に硝酸イオン濃度, 横軸に時刻をとる。図 5.6–11 の評価方法としては, 値が高ければ実験協力者の心的負荷が高いとする。

図 5.6–11 の垂直点線は, 業務イベントとポートコーディネーターの業務が一致する場合に硝酸イオン値は相対的に高いところを示す, ことを確認するために各グラフの高い値を主観的に拾ったものである。これは, より唾液硝酸イオン値が高ければ心的負荷が高いとすることを根拠に拾っている。

図 5.6, 図 5.7 より, 実験協力者 H および I 並びに B および I の心的負荷は, 同様な安定した変動傾向を示す。13:00 において, 実験協力者 B は実験協力者 C へ当直交代したが, 実験協力者 B が当直から解放されてすぐに実験協力者 I の唾液硝酸イオンが上昇した。これは実験協力者 I にとって, 実験協力者 B より業務経験のあり, 上司である C の方が一緒に仕事し辛いためだと考える。実際に図 5.7 より実験協力者 C の唾液硝酸イオン濃度は B と業務に従事していた時に比べて 4 倍以上の高さを示す。一方で図 5.8 実験協力者 C と I の硝酸イオンの変動傾向は同様であるため, 原因は不明であるが, 二人の心的負荷がある特定のイベントに反応したと考えられる。図 5.6 および図 5.7 においてピックアップしたどの垂直点線箇所においても, イベントを特定することは不可能であった。

図 5.8 の左右矢印 A はポートコーディネーターの見張り対象の船舶との継続的な通信とする業務イベントを示す。そのイベントにおいて垂直点線を 2 つ含むが, その時刻に実験協力者 A と E の値はより高い硝酸イオン値を示す。従って彼等の心的負荷は業務イベントに反応していると考えられる。しかしながら, イベントを特定することは不可能であった。

図 5.8 および 5.9 の垂直点線 I は, フェリーがその後方のフェリーに接近する際に, 実験協力者 A がそのフェリーに状況を伝えるために電話により通信を行ったイベントであり, 垂直点線 II は I と同様に実験協力者が通信を行ったイベントである。従って垂直点線 I および II は実験協力者の心的負荷を再現したと考える。

図 5.8 における各実験協力者の心的負荷傾向は同様であるとわかるが, 図 5.9 において実際の唾液硝酸イオン濃度による評価とは大きく異なることが分かる。

また, 正午前におけるメインである実験協力者 A の心的負荷は, サブである E よりも高かった。本結果および図 5.6 および 5.7 の結果は先行研究「5.2 実験 (part.1)」と異なる。

図 5.10 および図 5.11 において、10 本の垂直点線を作成したが、2 本の垂直点線 III および IV のみ実際の業務と一致した。垂直点線 III の 30 分前からメインである実験協力者 G およびサブ H は複数の船舶と通信を行うといった困難な業務に直面していた。垂直点線 III 以降に実験協力者 G の唾液硝酸イオンは急速に減少する。これは G が困難な作業を終えて安堵したためだと考える。実験協力者 G と H の結果を比較して、正午前後のメイン・サブの唾液硝酸イオン傾向は先行研究「5.2 実験 (part.1)」と異なる。

図 5.10、図 5.11 における垂直点線 IV は、実験協力者 B および C が担当する業務を交代したイベントである。実験協力者 B はメインからサブへ、C はサブからメインに変更した。ここでもやはりメイン・サブの唾液硝酸イオンの傾向は先の先行研究と異なる。

図 5.10 において実験協力者 B、C の唾液硝酸イオン値の傾向は同様であることが分かるが、実際の 2 者の唾液硝酸イオン濃度は図 5.11 より大きく乖離する。実験協力者 C の唾液硝酸イオン濃度の変動傾向は、実験協力者 B のものよりも鋭敏である。

本実験では、心的負荷と一致すると考える業務内容を取り挙げて業務表に落とし込むことを一目的とするが、図 5.8 - 11 のおける左右矢印 A、垂直点線 I - IV の業務を、表 5.4 および 5.5 において業務の大分類に指定した通信、見張り、情報収集に落とし込めた。結果を次に記載する。

- ・ 通信 -A, I - III
- ・ 見張り -A, IV
- ・ 情報収集 -A, I - III

左右矢印 A は一期間を取り挙げているため、業務内容が 3 つの大分類全てに落とし込むこととなった。詳細に業務を分類できなかったため、業務表の改善の必要がある。

### 5.3.4 考察

本実験は業務時のポートコーディネーターの心的負荷評価を、硝酸イオン値および硝酸イオン濃度により行った。また、業務表の有用性を確認した。本実験に関する考察を以下項目にして記載する。

- ・ 図 5.6 – 11 の示す本結果は、先行研究「5.2 実験 (part.1)」で示した「午前中を担当するメインの方がサブに比べて唾液硝酸イオン値が全体的に小さい」と異なったメイン・サブの業務担当そのものは硝酸イオン濃度に影響を与えないと考えられる。
- ・ 本結果から、メインおよびサブの硝酸イオン値の変動傾向は同様であると掴んだ。これは当直時のポートコーディネーターが業務イベントに対して同様の心的負荷を受けていると考える。そして唾液硝酸イオンはポートコーディネーターの心的負荷評価を行うにあたり有効な生理指標であると示すと考える。
- ・ 各ポートコーディネーターの唾液硝酸イオン濃度の固有値は異なった。具体的には 10 倍以上の濃度の幅が見られた。各ヒトが持つ唾液硝酸イオン濃度の固有値は一樣ではないことを本実験から掴んだ。本実験より、硝酸イオン濃度によるヒト間の相対的な心的負荷評価は難しいのが現状であるが、濃度からも心的負荷評価のヒントを掴みたい。
- ・ 業務と一致しない、唾液硝酸イオン値の高い箇所が半数以上見受けられた。5 分間隔の唾液採取では唾液硝酸イオン値が高まった傾向を掴むのが難しいと考える。今後は、ポートコーディネーターの業務に支障が生じない限りにおいて、唾液採取間隔を短くし、採取数を増やす必要があると考える。
- ・ 本実験で掴んだ業務イベントを業務表の大分類項目に落とし込むことに成功した。大分類項目とする通信、見張り、情報収集は選定としては正解であったと考える。しかしながら、実際に得られた業務イベントを大分類項目から派生する詳細項目へ分類することは難しいと考える。業務表の内容改善が必要であると考ええる。

## 5.4 まとめ

「5.2 実験 (part.1)」において得られた、メイン・サブの唾液硝酸イオンの変動傾向は「5.3 実験 (part.2)」において見られなかった。従ってメイン・サブの関係のみならず、今後は実験協力者の年齢、性別、業務経験年数から何かしらの唾液硝酸イオンに関する傾向を掴めたらと望む。

本研究では、唾液硝酸イオンを指標とした実地実験を博多ポートラジオにおいて実施し、以下の知見を得た。

- ・ 唾液硝酸イオンは、ポートコーディネーターの心的負荷の変化を示す指標として有効である。
- ・ また唾液硝酸イオンは実地での評価指標としての再現性を有する。
- ・ 当直に当たるポートコーディネーターの心的負荷は同様であった。これは業務イベントに反応しているためだと考えるが、
- ・ 水の摂取は測定値に大きく影響を与える。

唾液硝酸イオンを基に、ポートコーディネーターの実際の業務を全て確認し、その業務から推察される心的負荷と唾液硝酸イオンの反応が一致するかを検証した後に、心的負荷の高いとされた業務を、完成した業務表に落とし込み蓄積することにより、その業務表を基にポートコーディネーターの新人教育現場において注視する必要がある業務を選別する、或いは業務評価を行うことの可能な、業務表を完成するを最終的に目指す。

## 第6章 操船者の心的負荷評価

### 6.1 水先人対象実験

#### 6.1.1 水先人

水先人[Kokudokoutsuushou 2008]とは、船舶の交通が輻輳する水域や港湾において、航行する船舶や入出港する船舶に乗り込み、安全かつ効率的に船舶を導くことを業務とするものである。また水先人は、その水域や港湾特有の事情に精通する専門家、そして高度な操船技術を有するため、操船に関する船長のアドバイザーでもある。水先人は船長から要請を受けるとその船舶に乗り込み、その船長から船舶の停止距離や旋回性能その他の操縦性能等の操船に必要な船舶に関する情報を入手する。その後船長に対してその水域や港湾の状況および航行計画を説明する。業務内容としては、風や潮流等の自然条件や他の船舶等周囲の状況を把握し、海上交通センターやポータルラジオとの通信による情報を基に船長に操船に関するアドバイスをする。

#### 6.1.2 概要および目的

水先業務経験や立場の違いが危険の認識にどのような相違をもたらすのかを考察し、より安全な水先業務の実現を可能とするために、水先人、水先修業生の心的負荷を同時に比較し、唾液硝酸イオン生理指標の評価の正確さ、および実地におけるその場測定が可能かを確認した。唾液硝酸イオン生理指標の有効性を確認するために、生理指標として有効とされる心拍変動（LF/HF 値）を採用する。

### 6.2 実験

#### 6.2.1 概要

本実験[Kitamura 2016b]は、博多湾にて実験協力者の一級水先人（67歳，男）および同修業生（56歳，男）の2名を対象に行った。一方が操船しない場合もあるが、実験協力者の2人とも船舶に乗り込む。10月15日に入港船1隻，出港船3隻の計4回の実験を行った（表6.1）。表6.1における三隻目の船舶に関して、乗り込んだ船舶の船長に実験協力の同意が得られたため、心拍変動のみではあるが、それを基に船長の心的負荷評価を行い、水先人との結果比較を行った。実験当日の天候は晴れで、視界良好であった。波、風ともに非常に穏やかで実験に影響を与えない気象状況であった。

表 6.1 実験対象船舶

対象船舶	総トン数 [GT]	全長 [m]	航行状況	操船者
一隻目	5070	119.32	離岸	a
二 / 四隻目	27437	221.62	着岸・離岸	a→A / a
三隻目	9568	141.00	離岸	a

一隻目の船舶は、総トン数：5,070.00 GT、全長：119.32 m の出港船のコンテナ船（船名：COLOMBO）である。船舶の航行状況は、入船左舷付け・右錨使用の着岸状態から IC 岸壁を離岸し、左回頭しながら東航路に向首、航行するものである。操船は修業生 a が行った。

二隻目および四隻目の船舶は、総トン数：27,437.00 GT、全長：221.62 m のコンテナ船（NORTHERN VIGOUR）である。二隻目の実験は唯一の入港船である。船舶の航行状況は、中央航路から東航路を経由して IC 岸壁へ着岸するものである。着岸方法は入船左舷付けである。操船は、中央航路から東航路までを修業生 a が行い、東航路から着岸までを水先人 A が行う。これは大型船舶の着岸操船は難しいと判断する水先人 A の意向を反映した操船担当決めの結果である。四隻目としての航行状況は、入船左舷付けの着岸状態から IC 岸壁を離岸し、左回頭しながら航路に向首、航行するものである。操船は修業生 a が行った。

三隻目の船舶は、総トン数：9,568.00 GT、全長：141.00 m の出港船のコンテナ船（ULTIMA）である。船舶の航行状況は、入船右舷付けの着岸状態から香椎岸壁を離岸し、右回頭しながら東航路に向首、航行するものである。操船は修業生 a が行った。

また本船の実験に関してのみ船長が実験に協力した。船長の心的負荷に対する生理応答として心拍変動（LF/HF 値）を採用した。

附録図 A.8 - 11 は AIS 情報により取得した、本船の航跡図を示す。各附録図において、矢印は本船の進行方向を表す。本船への移乗の際にはタラップを使用し乗船した。

本章で紹介する本実験結果および考察は、代表例として一隻目のものとする。二 - 四隻目の結果および考察は第 7 章で使用するために附録に記載する。

表 6.2 に実験協力者の詳細を示す。

表 6.2 実験協力者

実験協力者	年齢 [歳]	性別	現職勤続年数
水先人 A	67	男	7 年 7 ヶ月
修業生 a	56	男	-
船長 α	63	男	36 年

水先人 A および修業生 a は日本水先人連合会の博多水先区に所属し、業務に従事する。水先人 A は一級水先人として7年7か月現職に就いているが、船長歴が18年と優れた操船術を持つと考える。

修業生 a の現職勤続年数は不明だが、船会社で船長経験後、一級水先人養成課程において一級水先人になるべく修行中である。

三隻目の船長  $\alpha$  は年齢が63歳のフィリピン人である。船長歴は不明だが、船員として36年の業務経歴を持つ。

唾液硝酸イオンに関して、入港船においてはパイロットボートから乗船し測定を開始、着岸後測定終了とした。出港船においては岸壁から乗船し測定を開始、東航路航行中に測定終了とした。唾液硝酸イオンの結果と比較する心拍変動を得るために、予め実験開始前に実験協力者には図 2.4 で表す心拍測定装置を装着してもらい心拍変動データを得た。船長  $\alpha$  に関してのみ、対象船舶に乗り込み実験に関する説明を与えた後に心拍装置を装着してもらった。水先業務中の発生イベントはビデオカメラおよび音声レコーダにより記録した。

本実験における唾液採取方法としては、十分な量のスプーンを実験協力者に持っていてもらい、業務に支障のないタイミングを見計らって、実験協力者自身が唾液を採取する、とする。そのため、唾液採取間隔は一樣ではない。

実験協力者は、神戸大学の学術研究に係る行動規範：環境・安全への配慮、生命倫理の尊重のもとに規定された倫理基準に則り実験の説明を行い、同意（署名）を得た上で参加した。

## 6.2.2 結果および考察

本実験結果を図 6.1 および図 6.2 に示す。図 6.1 の縦軸は唾液硝酸イオン測定値、横軸に時刻を取る。マーカーの円形、四角はそれぞれ水先人 A、修業生 B の結果を指す。図 6.2 の縦軸は得られた LF/HF 値、横軸に時刻を取る。実線、点線、太線は各々水先人 A、修業生 B、船長 α の結果を示す。図 6.1 および 6.2 の垂直線① - ⑤（附録図 A.12 - 17 における⑥ - ⑬）は注視すべき操船イベントである。これら操船イベントは第 7 章でも活用される。

生指標として有効とされる LF/HF 値による心的負荷評価結果（図 6.1）に関して考察を行い、同時に唾液硝酸イオン測定値による心的負荷評価結果（図 6.2）を比較する。

本出港時の測定が、本実験における最初であったため、水先業務中に実験者が実験協力者に対して測定に関する依頼のために話しかける場面があった。このことが 7:25 (①) と 7:47 (③) の水先人 A および修業生 a の LF/HF 値の上昇の原因であると考えられる。よって今後の実験においては、水先業務内での心的負荷の変動を明確にするために、可能である限り実験者は実験協力者の業務の妨げにならないようにしなければならない注意が必要である。ここでは両実験協力者の唾液は採取が行われず、結果を比較することは不可能である。

7:32 (②) に修業生 a は本船の出向の妨げになる入港船の確認のため、ポートコーディネーターと通信を行った。この時水先人 A および修業生 a の LF/HF 値の上昇が見られる。LF/HF 値が心的負荷に応答したものであると考えられる。水先人 A の唾液硝酸イオン測定値に変動は見られなかった一方で、修業生 a においては変動が見られた。ここでのイベントの主体は修業生 a であり、唾液硝酸イオンは比較的顕著な心的負荷に応答するものであると考えられる。

本船の出港は、入船左舷付けの状態から、タグとスラストを用いて岸壁と平行に離岸し、左回頭をした後に東航路に入航するという流れであったが、操船権をもつ修業生 a の LF/HF 値のみが、岸壁と船体とが垂直になった 8:01 (④) で上昇する。これは下船後の水先人 A および修業生 a に対する聞き取り調査における、出港作業における船体の回頭の際には、岸壁との距離に特に気を遣うとの意見と合致する。ここでの修業生 a の唾液硝酸イオンは得られず心的負荷評価が不可能であるが、水先人 A の唾液硝酸イオンの上昇が見られた。本イベントが心的負荷に応答したものであると考えられる。

LF/HF 値に関して、離岸時の、とりわけ回頭中に水先人 A および修業生 a に顕著な心的負荷が現れるが、8:05 (⑤) 回頭終了後は航路に向首し、心的負荷は落ち着いたと考える。ここでの実験協力者の唾液硝酸イオンは得られなかったため、心的負荷評価は不可能とする。

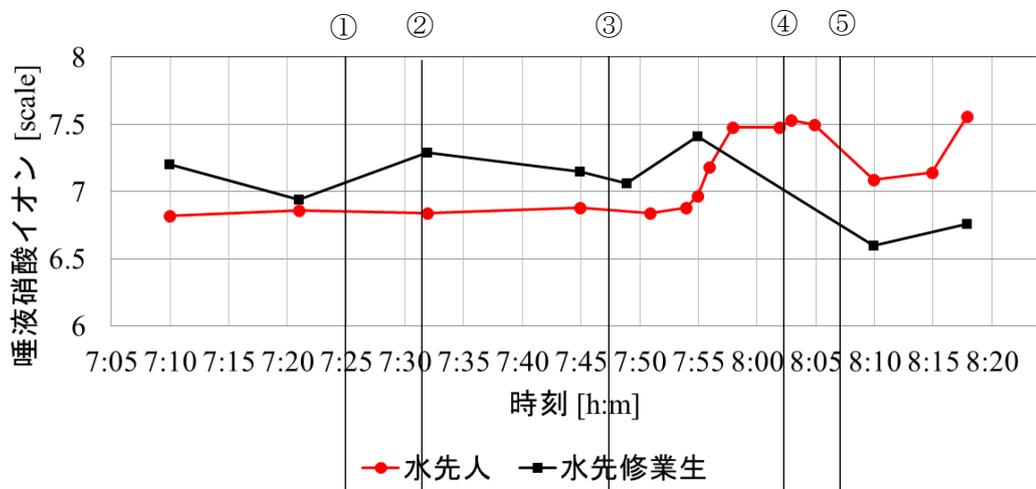


図 6.1 唾液硝酸イオン測定値結果（一隻目）

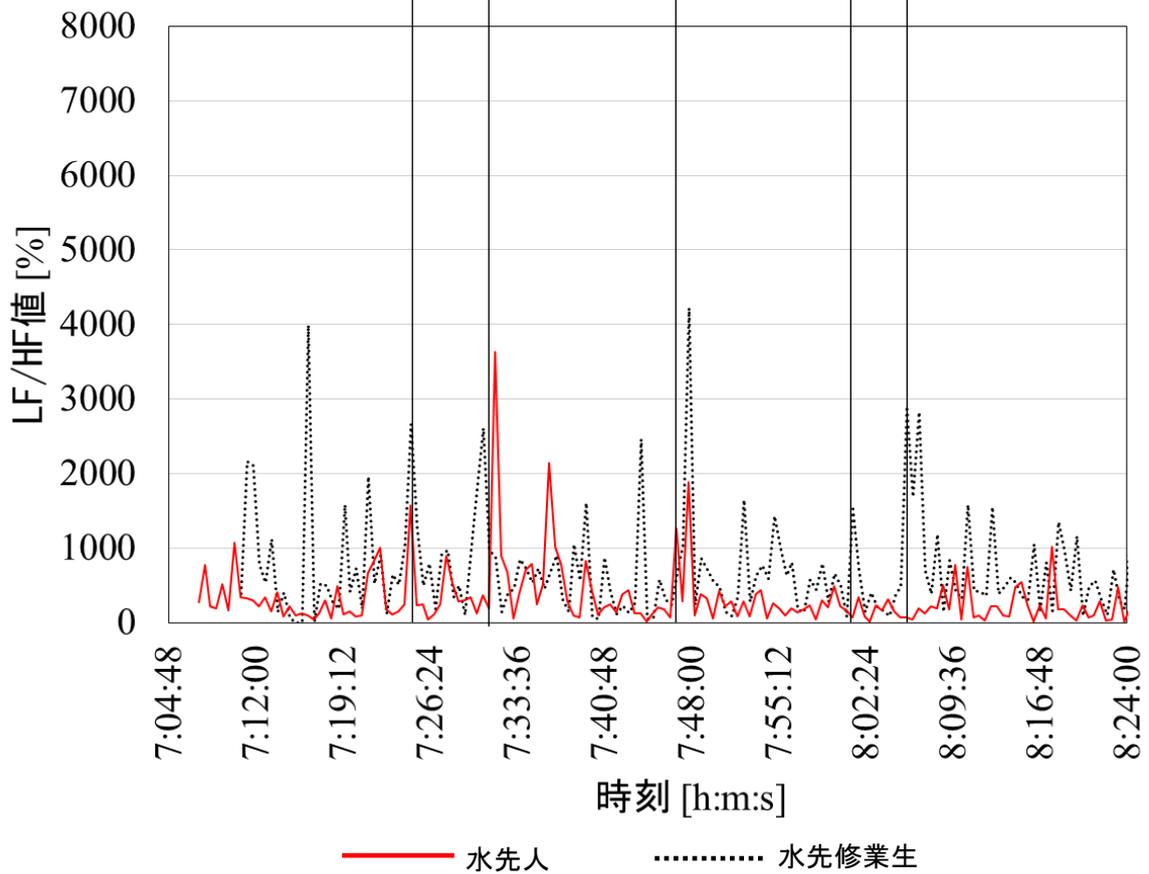


図 6.2 LF/HF 値結果（一隻目）

### 6.3 まとめ

本研究により硝酸イオン測定器が、業務現場における水先人、水先修業生の唾液硝酸イオンから即時のその場評価が可能なものだと確認した。また唾液硝酸イオンは、心拍 LF/HF 値と比較して、操船者の即時の心的負荷評価が可能である有効な生理指標であると結論付けた。

本実験においては唾液採取を実験協力者に委ねるかたちを採ったことにより、唾液採取回数が先行研究に比較して少なかったため、唾液硝酸イオンによる心的負荷評価の結果を LF/HF 値による結果と比較不可能な個所が幾何か見受けられた。この事象は今後の操船者対象実験において考慮する必要があるが、実験においてのみ今後の課題であると考える。

実験においては唾液硝酸イオンの生指標としての有効性を示すために複数回の唾液採取を行うが、実際の硝酸イオン測定器の使用環境としては、操船時における特定の操船イベント時に即時の心的負荷評価を行う状況と考える。従って、本実験結果の唾液採取回数は少なかったものの、唾液硝酸イオンによる心的負荷評価が失敗・遅滞なく行われたことを評価し、本硝酸イオン測定器の有効性を示されたと考える。

本研究の一隻目の実験結果より、『7:32 (②) に修業生 a は本船の出向の妨げになる入港船の確認のため、ポートコーディネーターと通信を行った。』とあるが、本実験を契機に操船者とポートコーディネーターの心的負荷評価の比較の必要性を見出した。海上において操船者が心的負荷となる操船イベントを認知する時期を、生理指標を用いた操船者の心的負荷評価により見出すことが可能となれば、同様の評価方法により、地上でその海域を管制するポートコーディネーターの、同一の操船イベントに対する認知の時期が認められた後に操船者のものと比較することにより、その操船イベントが 2 者の認知時期が合致した際には、改めてその操船イベントが心的負荷となる因子を含んでいると断定可能となる。

第 7 章において、操船者およびポートコーディネーターの心的負荷評価結果に対する比較の必要性を念頭に行った研究結果を紹介する。

## 第7章

# ポートコーディネーターおよび操船者の心的負荷変動結果 に対する比較評価

### 7.1 概要および目的

本研究は「第5章 ポートコーディネーターの心的負荷評価」の「5.3 実験 (part.2)」における2015年10月15日に実施した実験結果と、同日に実施した「第6章 操船者の心的負荷評価」実験の結果を比較する。これは「第6章 操船者の心的負荷評価」の「6.7 まとめ」に記述する『海上において操船者が心的負荷となる操船イベントを認知する時期を、生理指標を用いた操船者の心的負荷評価により見出すことが可能となれば、同様の評価方法により、地上でその海域を管制するポートコーディネーターの、同一の操船イベントに対する認知の時期が認められた後に操船者のものと比較することにより、その操船イベントが2者の認知時期が合致した際には、改めてその操船イベントが心的負荷となる因子を含んでいると断定可能となる。』とする考えを前提に行う。

先行研究は、唾液硝酸イオンおよび心拍変動(LF/HF値)に対する生理指標としての有効性を示す。これら生理指標を基に行う操船者およびポートコーディネーターの心的負荷評価の比較による、心的負荷となる操船イベントの断定を本研究の目的とする。

本実験は2015年10月15日におけるポートコーディネーターおよび水先人の心的負荷評価を比較したものである。第5章では唾液硝酸イオン測定値および濃度によりポートコーディネーターの心的負荷評価の比較検証を行うが、本章では「3.2.5 心的負荷の定量評価方法」における『本研究は図3.6が表すように、唾液硝酸イオン濃度に常用対数をかけた値で評価を行う。そのため本測定器による心的負荷評価は個人の唾液硝酸イオン測定値の相対評価により行うものとする。』とする考えにより唾液硝酸イオンは硝酸イオン測定器の示す値をデータとして採用する。これは、他者との比較の際には濃度より測定値の方が唾液硝酸イオンの変動傾向が明確であり、高低の幅は異なるものの、測定値が唾液硝酸イオン濃度と同傾向を示すこともまた採用の要因とする。

本実験により、ポートコーディネーターの心的負荷評価は第 5 章の結果と比較して、より精密なイベント評価が可能であると考えられる。本研究はポートコーディネーターの心的負荷を操船者のものと比較評価するが、操船者を実験協力者とする実験時間はポートコーディネーターを実験協力者とする時間よりも短い。本研究におけるポートコーディネーターの心的負荷データの対象時間は、半日というマクロスケールから 1 時間前後のミクロスケールに変わり、唾液硝酸イオンの変動がより明確に把握可能となる。

第 6 章において、採用する生理指標、唾液硝酸イオンおよび LF/HF 値は心的負荷評価に有効であると示されるが、毎 5 分の測定とする唾液硝酸イオンと比較して、継続的に測定する心拍変動 (LF/HF 値) の方が心的負荷評価に際してデータが多いため、本章において使用する生理指標のデータは LF/HF 値のものとした。

本章における対象の実験協力者の詳細を表 7.1 にまとめる。

表 7.1 において、実験協力者を表す記号は、表 5.3 および 6.1 に割り当てたものと同一である。

表 7.1 実験協力者

実験協力者	年齢 [歳]	性別	現職勤続年数
水先人 A	67	男	7 年 7 ヶ月
修業生 a	56	男	-
船長 $\alpha$	63	男	36 年
B	33	男	7 年
C	26	女	5 年 10 ヶ月
G	-	男	1 年 9 ヶ月
H	22	女	1 年 4 ヶ月

本章において、硝酸イオン測定値によるポートコーディネーターの心的負荷評価結果、および LF/HF 値による操船者の心的負荷評価結果の比較検証を行うが、第 6 章で対象とする船舶四隻の内、一隻目および三隻目の操船者の心的負荷測定開始時刻に対して、ポートコーディネーターの測定開始時刻は遅れている。しかしながら、本比較評価の対象とする操船イベントは主に測定時間の中頃と考えており、本研究に関して影響はないと考える。

## 7.2 結果および考察

図 5.10 におけるポートコーディネーターの唾液硝酸イオン測定値を抜粋したもの（図 7.1 - 4）に対して図 6.2 および附録図 A.13,15,17 を比較する。図 6.2 および附録図 A.13,15,17 は縦軸に操船者から得た LF/HF 値，横軸に時刻をとる。図 7.1 - 4 は縦軸に硝酸イオン測定器の示す唾液硝酸イオン測定値，横軸に時刻をとる。図にかかる垂直線は実験イベントを示すが，数字を○で囲ったものは「6.3.2 結果および考察」に係るものと同様である。また垂直線（E.1 - 4）は本研究で注視するイベントである。

### A. 一隻目

本実験において，実験協力者 G はメイン，H がサブとして業務に従事する。

「6.3.2 結果および考察」において、『7:32 (②) に修業生 a は本船の出向の妨げになる入港船の確認のため，ポートコーディネーターと通信を行った。この時水先人 A および修業生 a の LF/HF 値の上昇が見られ』，②における本章の目的であるポートコーディネーターと操船者の心的負荷結果の比較を行い，その LF/HF 値の上昇の原因を確認したいが，ポートコーディネーターのデータが欠落しており比較は不可能である。

8:15 (E.1) において，本船の出港準備の状況を把握したいメイン G が，通信の呼びかけに応答しない水先人 A に対して苛立ちを覚えており，その感情に対するメイン G の心的負荷応答が図 7.1 に明確に確認する。メイン G の苛立った様子はビデオカメラにて確認した。一方で同時刻における水先人 A の LF/HF 値も，ポートコーディネーター G の唾液硝酸イオン測定値の傾向と同様に上昇を示す。船内に持ち込んだビデオカメラにて確認したところ，原因は不明だが水先人 A も苛立っており，この感情が心的負荷となり水先人 A の LF/HF 値に応答したと考える。

### B. 二隻目

本実験において，実験協力者 B はメイン，H がサブとして業務に従事する。

附録<6.3.2>の結果および考察において『9:06 (⑥) に船内電話が急に鳴った。この時に水先人 A の LF/HF 値および唾液硝酸イオン測定値の上昇が見られた。ここでの即時の修業生 a の唾液硝酸イオンは得られなかったが，実験協力者 A および a にとって突発的な本イベントは心的負荷となったと考える』とする結論があるが，9:06 (⑥) にポートコーディネーターの LF/HF 値は比較的高い値を示す（図 7.2）。本イベント⑥は船内にいる者のみ認識可能であるため，この LF/HF 値の上昇は別の要因が心的負荷となったと考える。要因となる心的負荷は掴めてない。

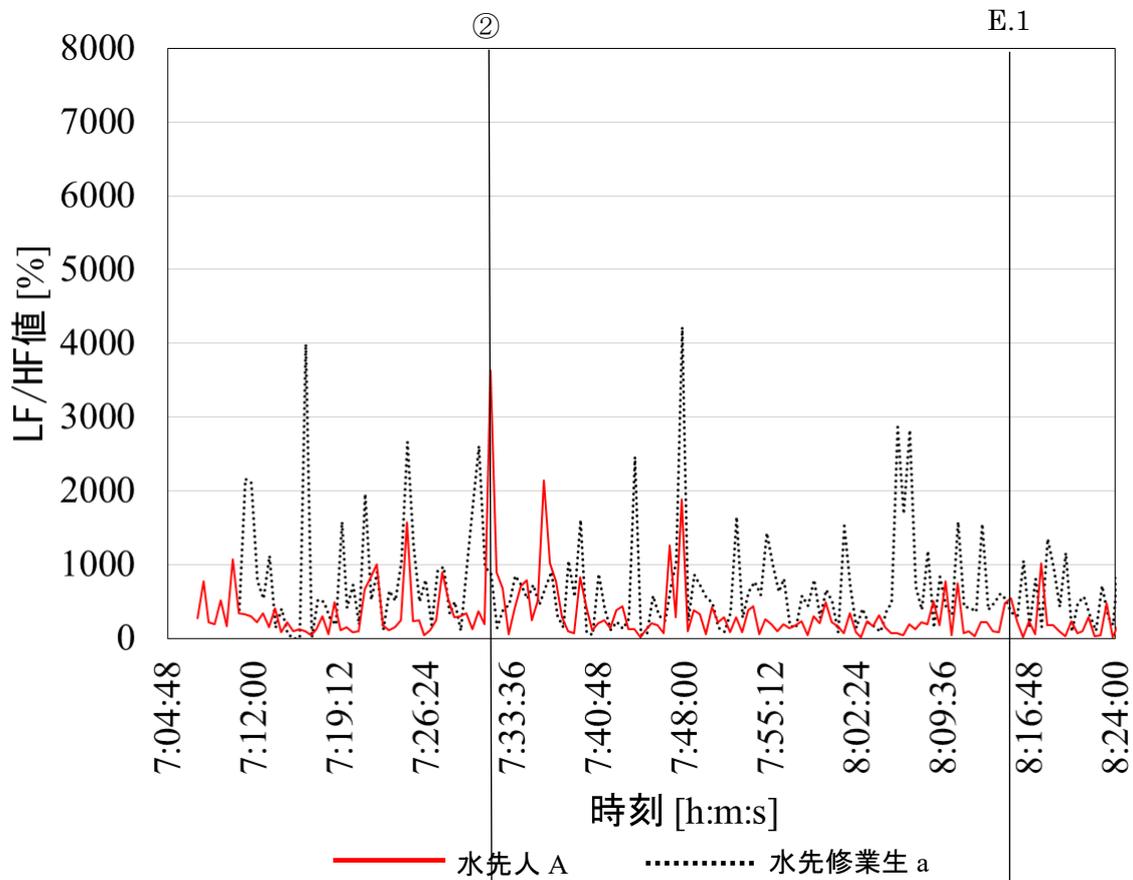


図 6.2 LF/HF 値結果 (一隻目)

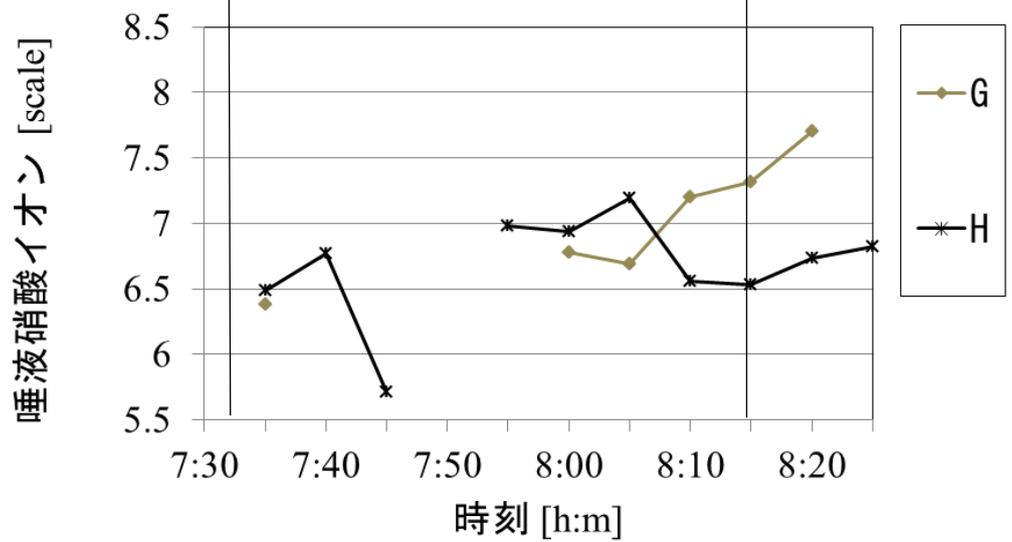


図 7.1 唾液硝酸イオン測定値の結果

また、6.4.2において『9:30 (⑧) より本船は着岸体制に入り、本船前方の停泊船に接近した。そして9:32~9:33に停泊船に本船が向首し始めると、水先人 A および修業生 a の LF/HF 値は上昇を示した。ここでは実験協力者 2 人の唾液硝酸イオンは得られなかったため LF/HF 値の結果との比較は不可能だが、操船イベント⑧が他船との衝突の恐れのある危険な状況を表すことから、LF/HF 値は 2 者の心的負荷に応答したと考える』と結論付けたが、9:30 (⑧) 前後でポートコーディネーターの唾液硝酸イオン測定値は上昇傾向にある。本船の着岸体制の危険な状況が、操船者 A および a と同様にポートコーディネーター B および H の心的負荷となったと推察する。

### C. 三隻目

本実験において、実験協力者 B はメイン、C がサブとして業務に従事する。

附録<6.3.2>の結果および考察において、『修業生 a による出港のオーダーが発せられたとき、船長の LF/HF 値は上昇するが、15:29 (⑩) の let go line から水先業務終了の直前まで再び LF/HF が上昇することはなかった。よって船長  $\alpha$  が完全に着岸作業を水先人に任せていると推察する。15:29 (⑩) の離岸時に修業生 a の測定値は上昇する。これは、タグと連携して注意深く離岸作業を行ったために心的負荷を受けたと考えられる。修業生 a の操船中は特にイベントもなく、水先人 A の心的状態は穏やかであることが見て取れる。しかし岸壁が近い状況における後進での回頭の際に水先人 A の測定値は上昇した。本状況は心的負荷に値すると考える』と結論付けたが、この時刻 (⑩) の前後で実験協力者 B および C の唾液硝酸イオン濃度は上昇する。水先人 A と同様に実験協力者 B および C は、本船の岸壁付近における回頭は危険な状況であると捉えたと推察する。その結果、本状況が心的負荷となって唾液硝酸イオン測定値に現れたと考える。

15:20 (E.2) において、内容は不明だが、修業生 a は実験協力者 B と交信した。この際にポートコーディネーターの唾液硝酸イオン測定値は減少傾向を示す。本実験に関して、実験協力者 B および C とともに同様の値の傾向を示すことから結果の再現性が高く、本減少傾向は確かであると考えられる。しかしながら、その原因は不明である。一方で、15:20 (E.2) において修業生 a の LF/HF 値は上昇する。これは一隻目の結果と同様に、操船者に対して通信業務は心的負荷となると考える。

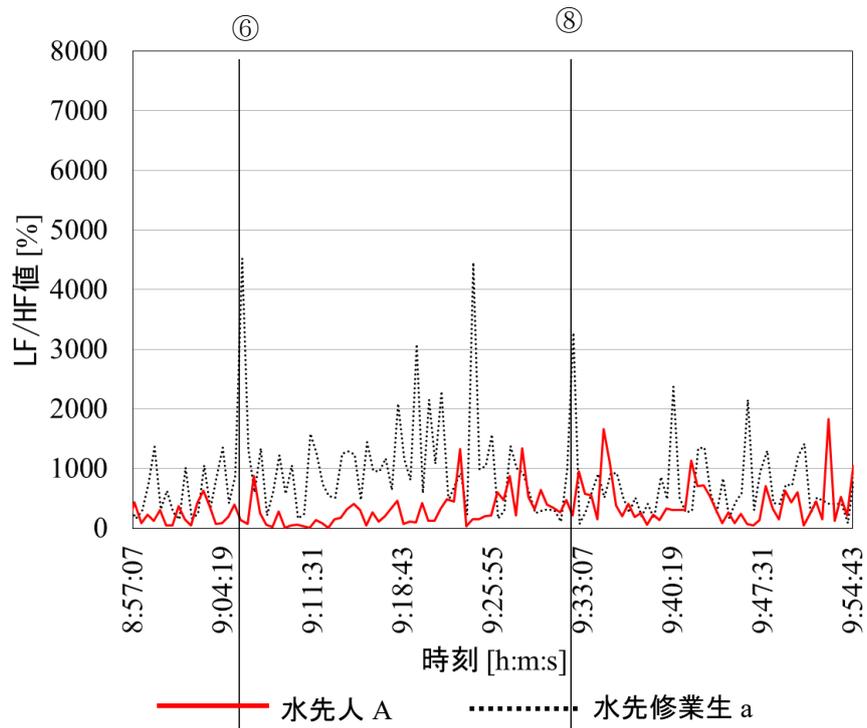


図 A. 13 LF/HF 値結果(二隻目)

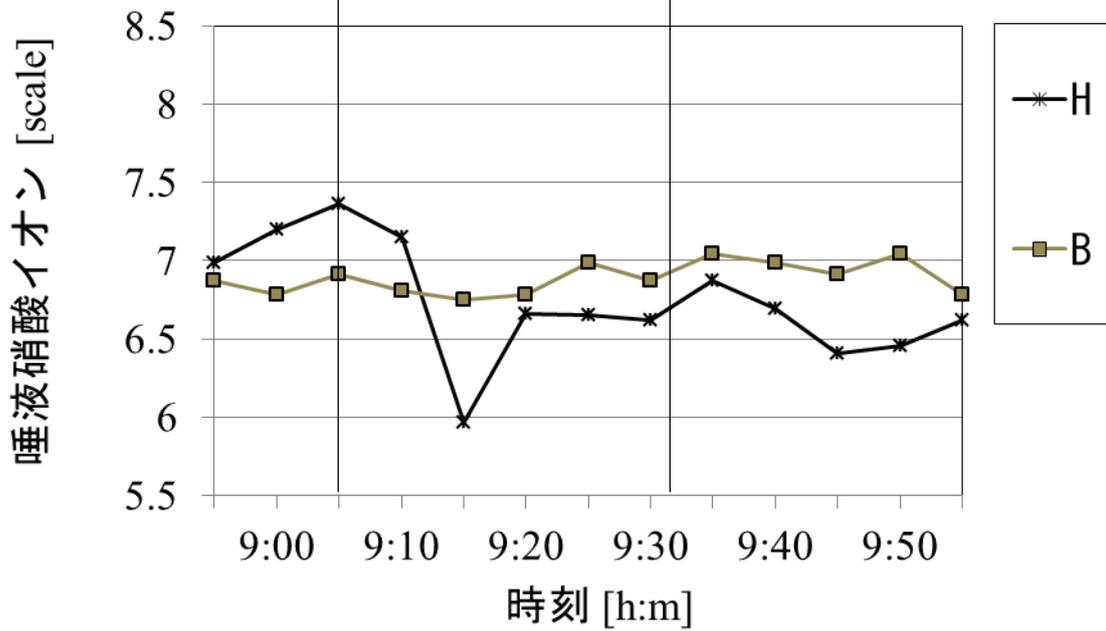


図 7.2 唾液硝酸イオン測定値の結果

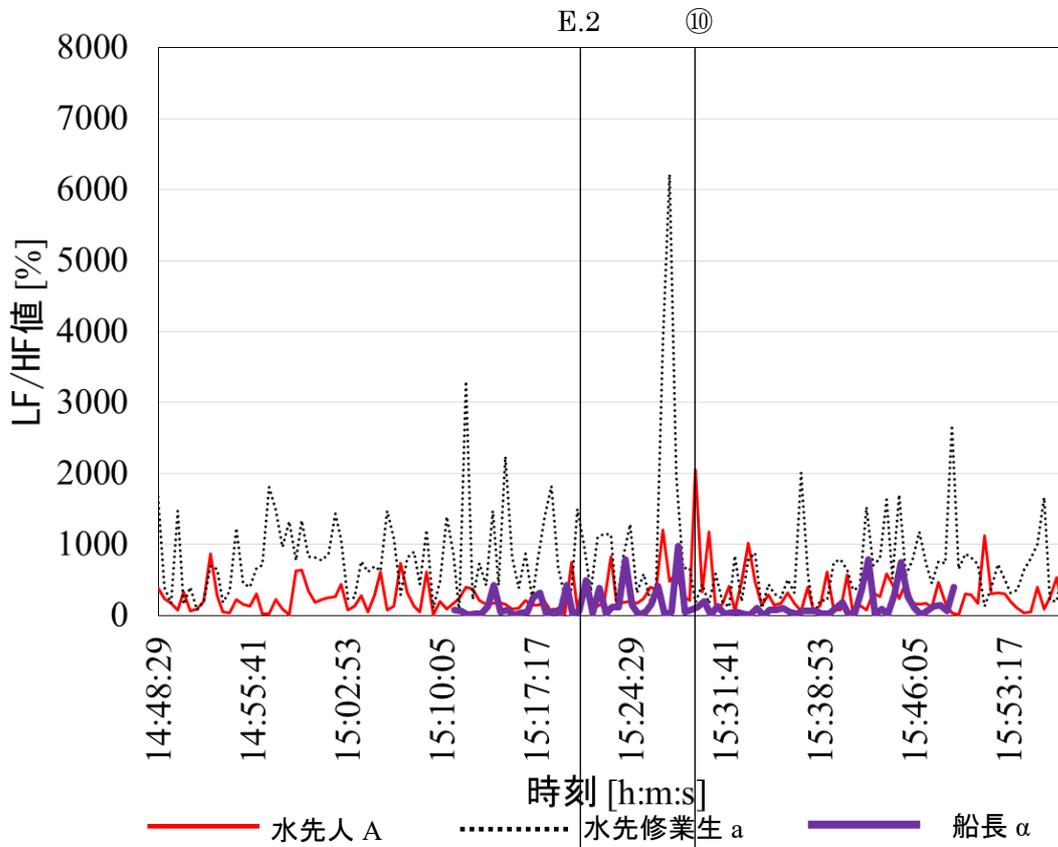


図 A.15 LF/HF 値 (三隻目)

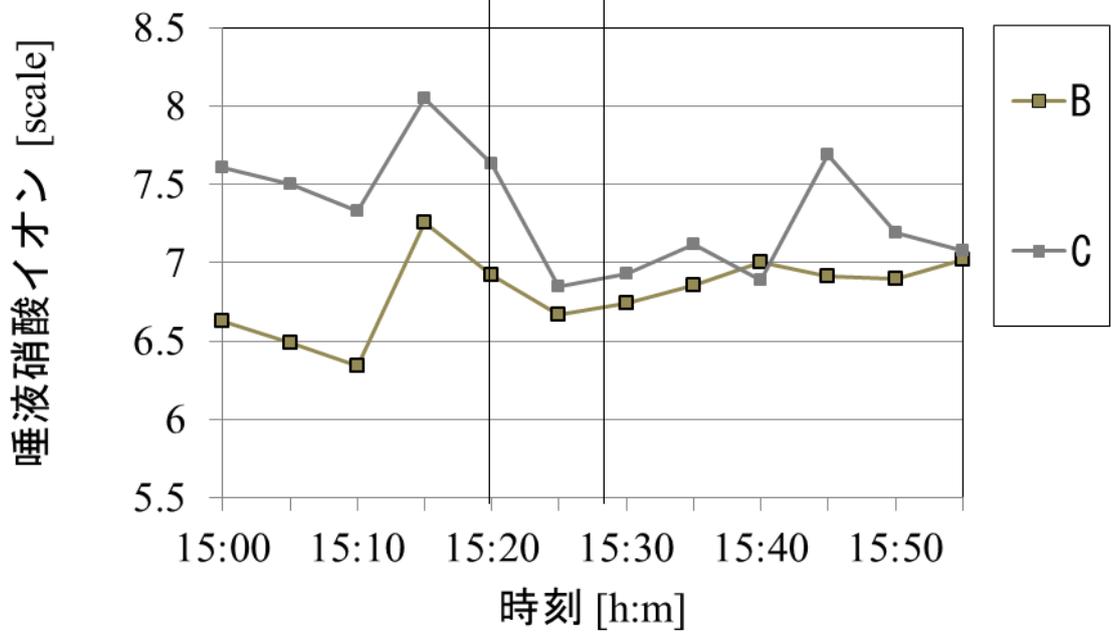


図 7.3 唾液硝酸イオン測定値の結果

#### D. 四隻目

本実験においては三隻目と同様に、実験協力者 B はメイン、C がサブとして業務に従事する。また実験協力者 B の測定値は 17:10 で終了だが、これは B が業務を終えた結果である。

16:53 (E.3) および 17:24 (E.4) において、修業生 a はポートコーディネーターと通信を行った。E.3 では修業生 a の LF/HF 値は上昇したが、E.4 では減少傾向を示した。通信の内容が不明であり、本結果が心的負荷に応答したのか評価不可能であった。一方で、E.4 においては通信業務を主に担うメインである B の実験結果が欠落するため、E.4 に関しては心的負荷評価不可能であるが、E.3 に関して実験協力者 B および C ともに唾液硝酸イオン測定値の上昇傾向が見られたため、通信が心的負荷となったと推察する。しかしながら、通信の内容が不明であるため、安易に本推察結果を断定することは難しいと考える。

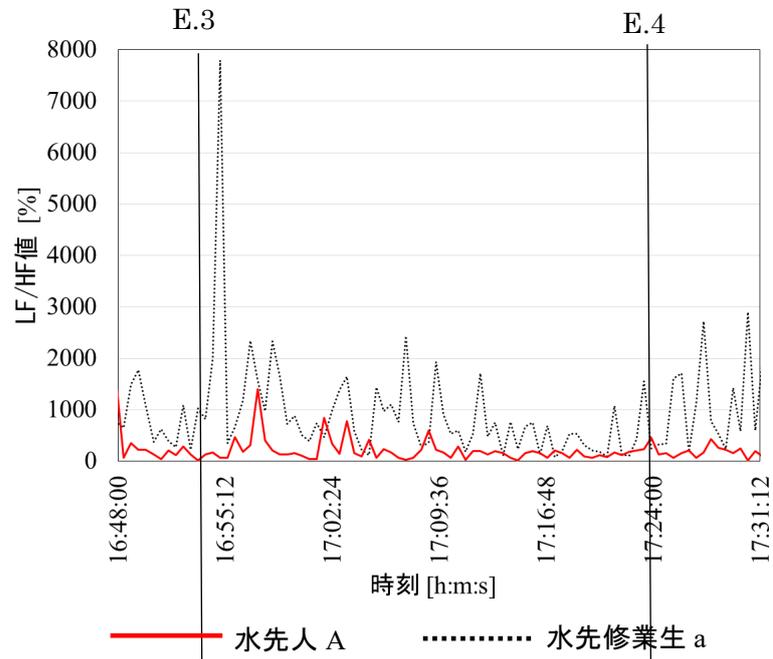


図 A.17 LF/HF 値結果 (四隻目)

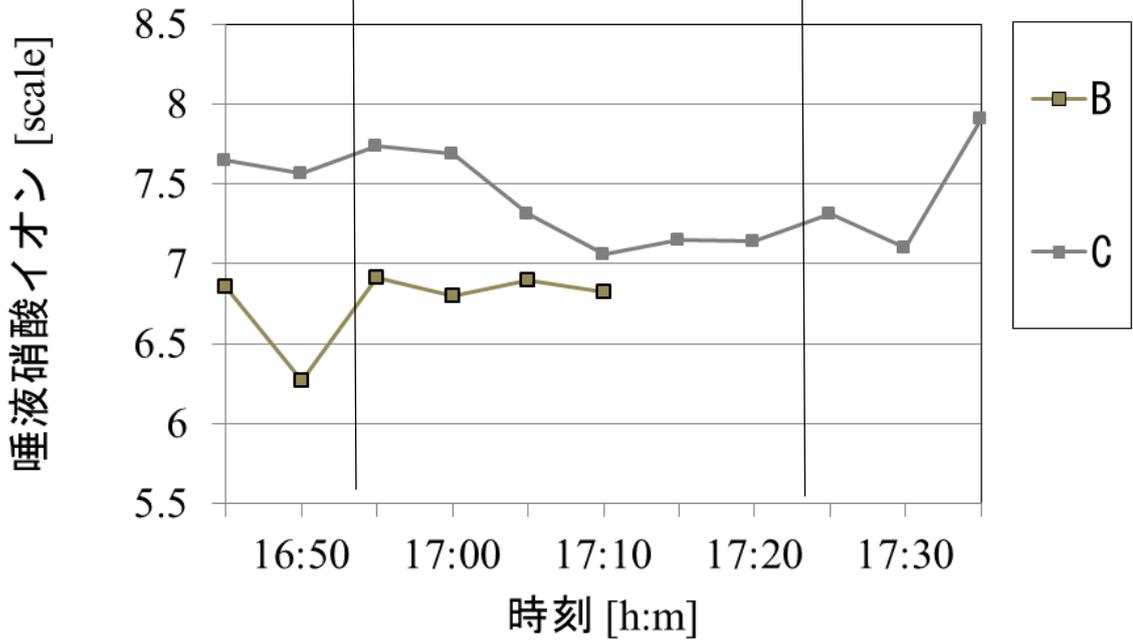


図 7.4 唾液硝酸イオン測定値の結果

### 7.3 まとめ

本章は、唾液硝酸イオンによるポートコーディネーターの心的負荷評価および心拍(LF/HF 値)により操船者の心的負荷評価の結果比較を行った。

一、三、および四隻目の結果に関して、海上における操船者がポータルラジオにおいて出入港に関する情報を提供するポートコーディネーターと交信する操船イベントが見られた。測定結果の欠落のためにポートコーディネーターおよび操船者の心的負荷結果の比較が不可能なものもあるが、比較可能な通信イベントもあった。本イベントを、7.1において目的とする、断定したい操船イベントの一つと考える。

しかしながら実際に比較評価の際に、実験協力者であるポートコーディネーターおよび操船者が通信業務を行っていたという事実は認めるが、彼等の間で行われた通信内容は不明であるため、本通信イベントが彼等の心的負荷傾向に影響を及ぼす可能性を確認することは不可能であった。今後の研究においては、通信イベントに関しては、イベントが発生した事実を確認するのみならず、通信の内容の確保を考慮する必要がある。

二隻目および三隻目の結果に関して、実験対象船が他船および岸壁に近づく操船イベントの際には、ポートコーディネーターおよび水先人の各指標値は比較的高い傾向を示した。従って、海難事故を引き起こす可能性のある操船イベントは、本研究目的の断定すべき対象だと考える。

第5章および第6章における実験は、結果の比較を前提に実施しておらず、操船者(水先人)の操船時間を考慮すると、ポートコーディネーターの実験結果は5分間隔と比較的広いこととなった。

しかしながら、本研究は操船者の心的負荷の把握に関して有意義であると考えため、今後はポートコーディネーターの間隔を狭めて、本章と同様の心的負荷結果の比較を行う。

## 第8章 シミュレータにおける心的負荷評価

### 8.1 異文化ブリッジチーム員対象実験

#### 8.1.1 概要および目的

本実験においては、操船者（船長）・操船者補助の航海士・操舵手で構成されるブリッジチーム員の心的負荷評価を行う。先行研究で同様のチーム構成により実験は実施されたが、本実験では国籍の異なるブリッジチーム員を実験協力者とする。実際のブリッジの現場においては、本実験の様に国籍が一樣でないブリッジチームにより船舶の運航が成されるため、本研究の有意性は高いと考える。

本研究は生理指標による異文化ブリッジチーム員の心的負荷評価を基に、彼等の操船時に直面する操船イベント、および異文化間コミュニケーションがブリッジチームに及ぼす影響の把握を目的とする。当初本実験に採用する唾液硝酸イオン指標の心的負荷評価に係る有効性を比較検証するために、心拍変動（LF/HF 値）を使用することを考えた。しかしながら実験環境が中国と国外である、また硝酸イオン測定器の中国への持ち込み方法が難しいといった観点から、本実験では心拍変動（LF/HF 値）のみを心的負荷測定に使用した。従って、本実験はシミュレータにおける異文化ブリッジチーム員の心的負荷評価の基礎実験とする。本実験の目的を、心的負荷評価に対する LF/HF 値の有効性の再認識とする。

本実験は、Zhejiang International Maritime College にて海事分野で国際的にも一般的な仕様であるフルミッション型操船シミュレータを用いた（図 8.1）。操船シミュレータの特徴としては、実験環境と条件（実験実施時間、温度、湿度、シナリオ等）の制御が容易である点が挙がる。



図 8.1 操船シミュレータ

2015年12月22-24日に行った実験について説明する。

本実験における本船はコンテナ船：32,025 GT, Length 203.6 m, Breadth 25.4 m, 最高速度 19.4 kts, のものを採用する。

表 8.1 に示すように、実験協力者は合計 9 人（男 8, 女 1）で年齢 21～56 歳であった。実験協力者 A, B は Zhejiang International Maritime College に所属する、乗船経験のない学生である。実験協力者 C, D は現職が水先人であり、表 8.1 における業務経験は水先人業務のものを示す。実験協力者 E は実験当時船長であったが、1.5 年の船長経験歴がある。実験協力者 F は現職が二等航海士であり、9 年間の乗船経験がある。実験協力者 G は乗船経験を有さないが、現職が GMDSS（Global Maritime Distress and Safety System）に関して大学の士官候補生を指導する教員であり、操船は容易に行う。実験協力者 H および I は本学大学院の学生だが、H は 3 級海技士（航海）を有する。

実験協力者は、操船者（船長）役、操船者を補佐する当直航海士役、操舵士の 3 役を交代で担った。実験協力者は、神戸大学の学術研究に係る行動規範：環境・安全への配慮、生命倫理の尊重のもとに規定された倫理基準に則り実験の説明を行い、同意（署名）を得た上で参加した。

表 8.1 操船シミュレータ実験協力者データ

実験協力者.	性別	年齢 [歳]	乗船経験 [年]	国籍
A	男	21	-	中国
B	男	21	-	中国
C	男	39	17	中国
D	男	40	18	中国
E	男	56	18.5	日本
F	男	30	9	中国
G	男	31	-	中国
H	女	25	1	日本
I	男	24	0.5	日本

表 8.2 に実験協力がブリッジチームで担当した役割の詳細を示す。

実験協力者 A, B は操船者および当直航海士の役割を交代して担う。彼等は操船シミュレータ環境を含む操船経験が全くなかったため、操船に慣れるために予め半日ほどシミュレータを試している。実験協力者 C, D および E は、船長としての豊富な操船経験を活かすため、操船者役のみとする。実験協力者 F は現役の二等航海士だが、実際の業務と同様に本実験においては当直航海士の役割を担う。実船での操船経験が乏しいため、実験協力者 G, H, I には操舵手役のみの担当とする。

表 8.2 ブリッジチームの構成

実施日	船長役	航海士役	操舵手役	チームの国籍
12/22①	C	F	G	中国のみ
12/22②	C	F	G	中国のみ
12/23③	A	B	H	中国および日本
12/23④	B	A	I	中国および日本
12/23⑤	D	F	G	中国のみ
12/23⑥	D	F	G	中国のみ
12/24⑦	A	B	I	中国および日本
12/24⑧	B	A	H	中国および日本
12/24⑨	E	F	G	中国および日本
12/24⑩	A	B	G	中国のみ

航行シナリオは、他船との関係を常時判断して狭水道を通狭するものとする（図 8.2）[Kitamura 2016a]。航行時に自船の進路、速力制御を行う操船判断に対する心拍変動および LF/HF 値の心的負荷応答を確認する、図 8.2 における矢印は航行ルート of の概要を表す。

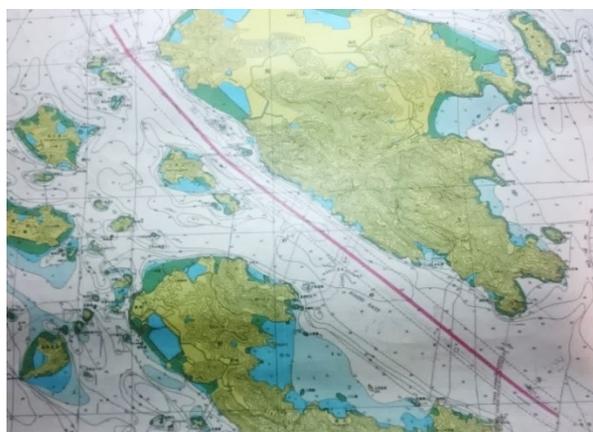


図 8.2 実験対象海域における航行ルート

先行研究から、短時間に自船の進路、速力制御を多く必要とする操船に対して、顕著な生理応答を得ること確認している[Kitamura 2014a]。今回の実験では風、潮流等の外力の影響はなしとする。両シナリオとも1回の実験時間は平均30分程度である。航行シナリオでは、他船との見合い関係に注意し狭水道を通狭する際の、自船の進路、速力制限等に対する操船判断に対する生理応答を確認する。シナリオでの他船における通信相手は、操船シミュレータを運用するオペレーターが担当する。オペレーターは英語により本船と交信する。

本実験においては、操船シミュレータ内に実験協力者となる操船者、操船者を補助する航海士、操舵士、唾液採取者、および状況メモ係の5名が存在する。唾液採取により操船者に心的負荷を与えないように、採取時以外では彼らは操船者の行動範囲外に位置した。状況メモ係は操船者の号令、および操舵士の応答、並びに時系列ごとに目視で読み取れる操船シミュレータイベントをメモした。

また本実験においては心的負荷評価に LF/HF 値を採用するが、心拍 HRV (Heart Rate Variability) [bpm] による評価も行った。本実験で採用される主な心的負荷評価の対象は LF/HF 値だが、本研究で採用する心拍測定装置(図 2.4)は LF/HF 値と同様に、ヒトから取得する R-R Interval から HRV を算出する。本章では 10 回行った内の 1 回の実験結果(表 8.2 における 9 回目)を紹介する。本来ならば HRV は変動が激しく、心的負荷評価が難しいため生理指標として採用されない。しかしながら本研究で取り上げる実験結果は HRV の変動傾向が非常に明確であり、また研究を進めるうえで興味深い結果となったため、紹介する。LF/HF 値を使用した残りの 9 回に関する結果の内容が、紹介する 9 回目に実施した実験結果と同様であったため、実験結果の考察に使用した結果図は附録図 A.18 - 26 に示す。4 回目の実験において、I の結果は欠落している(附録図 A.21)。原因は不明だが、心拍測定装置により生理データを測定されなかったためである。

## 8.2 結果

### 8.2.1 心拍変動

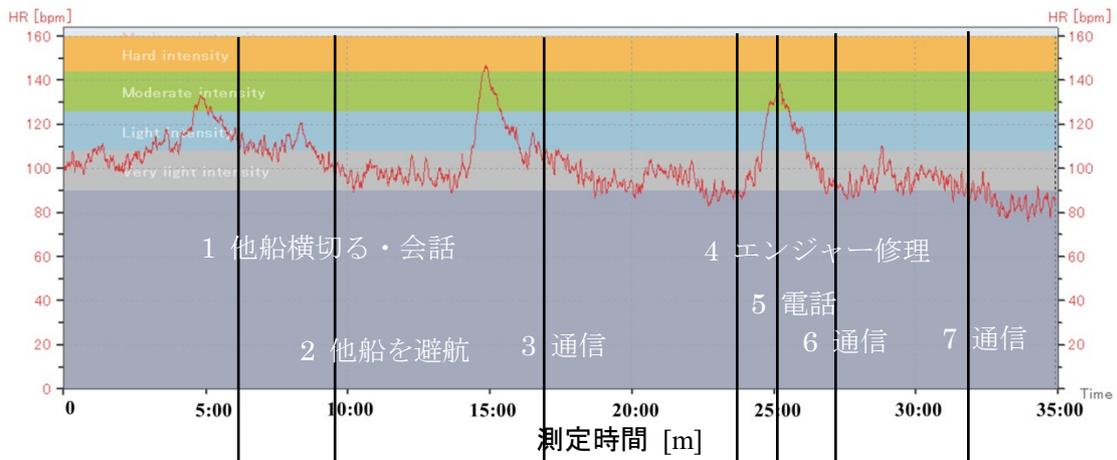
本実験結果は 2015 年 12 月 24 日，実験協力者 E，F，および G により行われたものである（図 8.3）．シナリオでの航行時間は 30 分 20 秒であった．LF/HF 値はシナリオ前後数分も測定する．図 8.3 の結果は，図 4 における心拍測定装置のデータ受信器から転送された，PC 画面上における解析ソフトのキャプチャを表す．解析ソフトは心拍測定装置に付属する Polar Protrainer 5™ を使用した．図 8.3 における縦軸および横軸はそれぞれ HRV [bpm] ，測定時間 [m] を示す．垂直実線 1 - 7 は操船イベントを指す．HRV の心的負荷評価方法は，値が高いとヒトの心的負荷は高いと評価する．

図 8.3 において，イベント 3 および 6 は船長役の E が，他の行き合い船および追い越し船と VHF により通信を行う，といった内容である．ここでは実験協力者 E の値が最も高い．これは実験協力者 E が日本人であり，一般の日本人と同様に英語によるコミュニケーションに難が見られたと推察する．イベント 1 は本船正面を他船が横切ると同時に実験協力者 E が当直航海士担当の F に話しかけられる場面だが，ここでも値の上昇が見られる．従って各イベントに対して，HRV が実験協力者 E の心的負荷に応答したと考える．

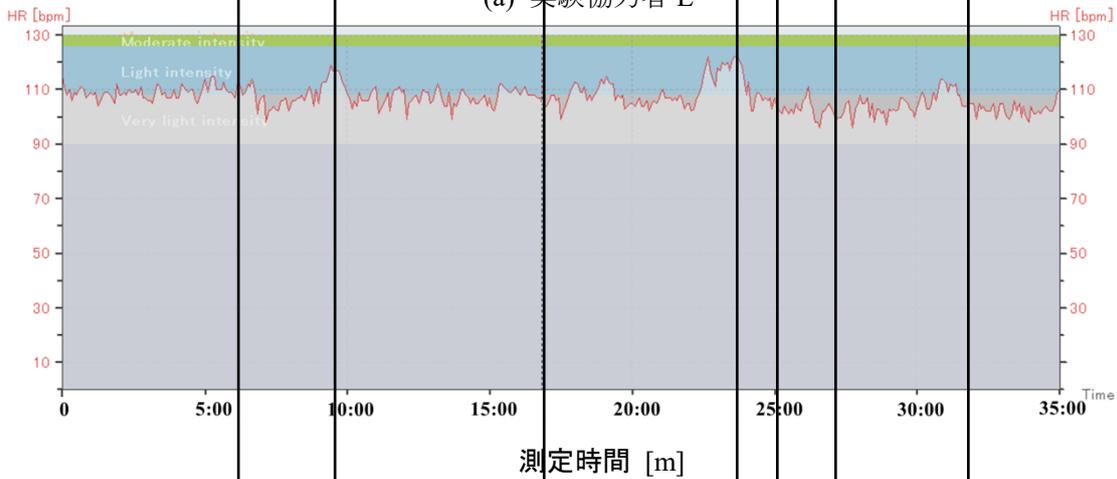
イベント 2 は他船を避航する場面だが，イベント 2 の直後に実験協力者 F および G の HRV の上昇が見られる（図 8.3 (b) (c)）．この時，実験協力者 F は衝突の恐れのある他船の動向に不安を覚えて，汽笛を鳴らした．そして操舵手担当の G もまた操船の困難な状況な状況下，操舵に集中していた．従ってここでも実験協力者の HRV が心的負荷に応答したと考える．

イベント 4, 5 の間において，実験協力者 E の HRV は低く，実験協力者 F の HRV は高い．イベント 4 の数分前に実験協力者 E はエンジンテレグラフの故障を認識した．そしてイベント 4 でエンジニアがそれを修理した．修理が終わったことで，実験協力者 E はエンジンテレグラフが完全に直ったと思い安心していった．しかしながら，修理後も実験協力者 F が使用するエンジンテレグラフの調子は依然として悪かった．最終的に再修理のために，実験協力者 F は再び電話で先のエンジニアを呼んだ（イベント 5）．これらイベントは実験協力者 E および F の心的負荷に応答したと考える．

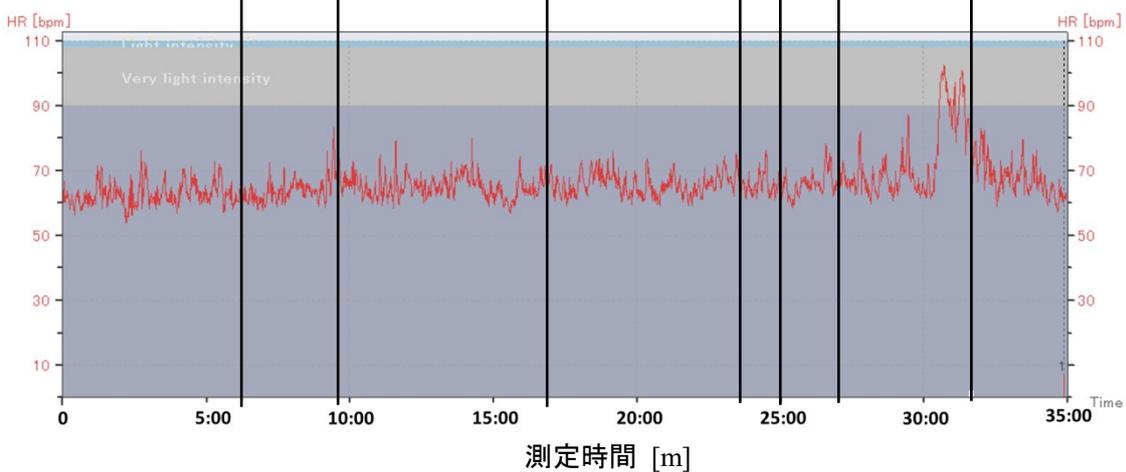
総じて，HRV により捉えた操船イベント 1 - 5 は実験協力者 E，F，および G の心的負荷に  
応答したと考える．



(a) 実験協力者 E



(b) 実験協力者 F



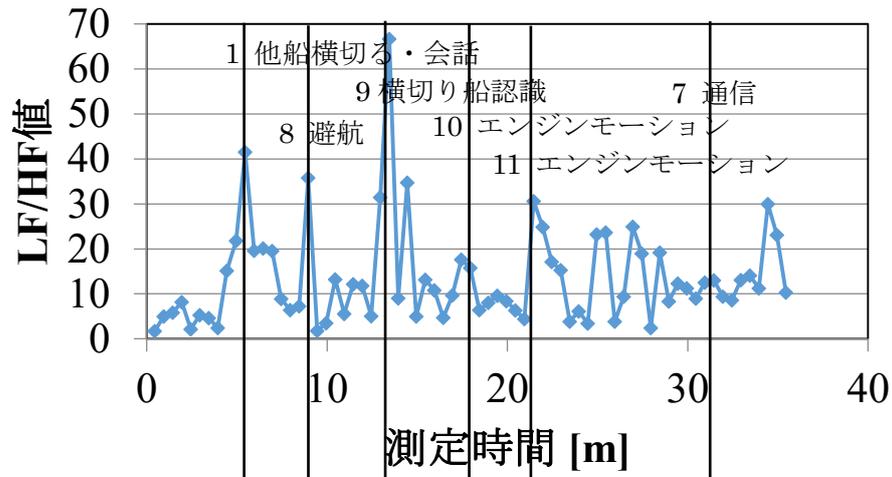
(c) 実験協力者 G

HRVの結果 (9回目)

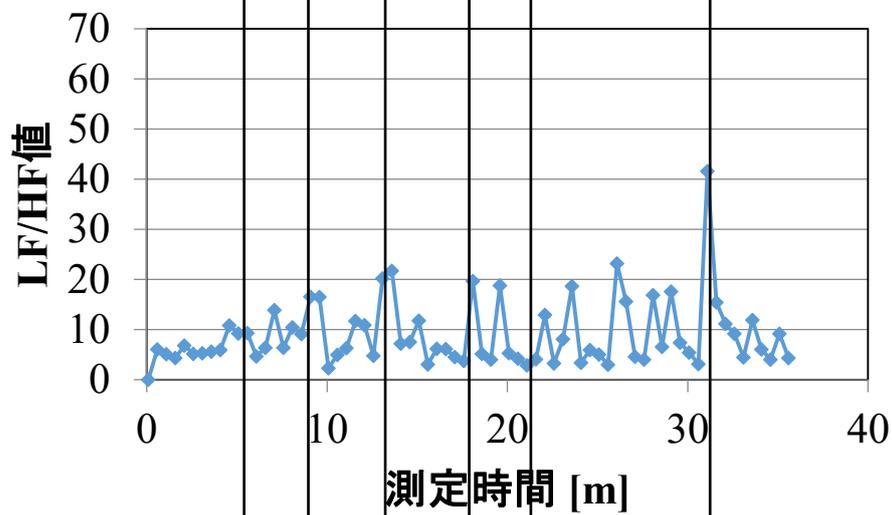
## 8.2.2 LF/HF 値

8.2.1 と同様の実験に対する、LF/HF 値の結果を図 8.4 に示す。図 8.4 における縦軸および横軸はそれぞれ LF/HF 値，測定開始から終了に至る時間 [m] を示す。垂直実線 1 および 7 - 11 は操船イベントを指す。図 8.4 におけるイベント 1 および 7 は、図 8.5 におけるものと同一である。

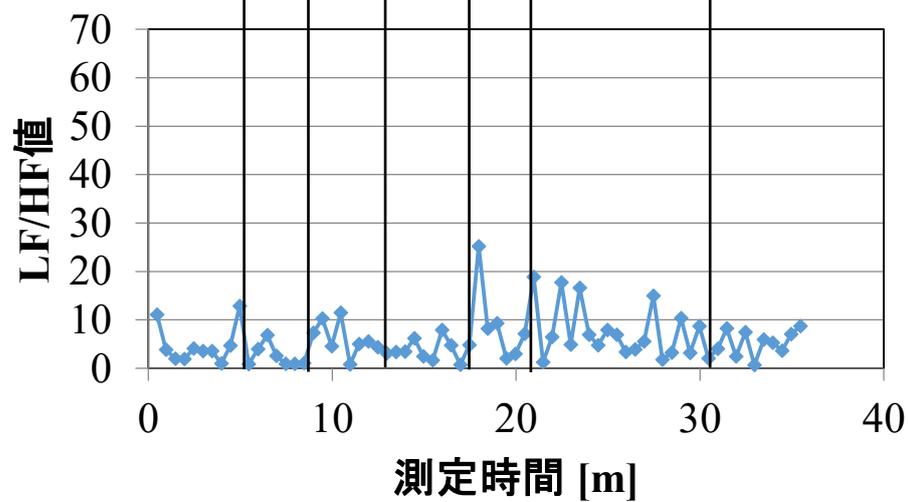
イベント 1 は各実験協力者の心的負荷に応答すると考えるが、イベント 7 に対する当直航海士担当 F の LF/HF 値の高い値を示すことに関して、原因は不明である (図 8.4 (b))。イベント 8 は船長役 E と実験協力者 F が漁船群を避航する場面である。また、イベント 9 は実権協力者 E および F が見合い関係の悪い横切り船を認識した場面である。これらイベント時の LF/HF 値の上昇から、2 者の値は心的負荷に応答したと考える (図 8.4 (a) (b))。イベント 10 はエンジンモーションを slow から half に、イベント 11 は half から full ahead に切り替えた場面である。ここでは操舵手担当の G の LF/HF 値が図 8.4 (c) における最も高い値を示す。これは、実験協力者 G がエンジンテレグラフの故障を認識したためだと推察する。以上により、イベント 8 - 10 は各実験協力者の LF/HF 値と心的負荷の一致する場面であり、心的負荷となる場面だと捉える。



(a) 実験協力者 E



(b) 実験協力者 F



(c) 実験協力者 G

LF/HF の結果 (9回目)

### 8.3 まとめ

本研究では操船シミュレータ環境において生理指標を用いた，異文化間で構成されるブリッジチームの心的負荷評価を行った．生理指標は，通常本研究において唾液硝酸イオンの有効性を検証するための比較対象指標として採用される LF/HF 値を使用した．本研究により行った結果から明確になったことを次に記す．

- ・ LF/HF 値および顕著な傾向を示す HRV は，操船シミュレータのシナリオにおける操船イベントに心的負荷が応答するかを確認するために有効な生理指標である．
- ・ 本研究により，LF/HF 値が唾液硝酸イオン指標との比較対象生理指標としての有効性を示した．しかしながら，本実験の 4 回目に 1 人の実験協力者 I のデータを測定不可能であった．今後の研究で原因を把握したい．
- ・ イベント 7 の様な，心的負荷と一致しなかった場面の検証が必要である．本実験では操船シミュレータ内に備えられたビデオカメラ，および目視による実験協力者の行動の詳細を記したメモによって実験協力者の行動を把握したが，それだけでは今後の実験に臨むには不十分だと考える．
- ・ 異文化間のコミュニケーションは心的負荷となることが示された．日本人である実験協力者 A が中国人の実験協力者と会話を行う際に LF/HF 値の上昇が見られる．これは実験協力者 A の心的負荷に応答したと考えるが，英語を含めた外国語が生理指標測定に及ぼす影響を今後考察したい．海事社会では英語が常用言語となっているため，本考察は必須であると考えられる．

## 第9章 結 言

本論は、新規に心的負荷評価対して有効とする唾液硝酸イオンに着目し、多様な実験を経てその有効性の確認を行ったが、それと同時に実際の海事社会で業務に従事する者の、業務時における心的負荷評価の検証を行った。

第4章において、運動が心的負荷に及ぼす影響を、唾液硝酸イオンを用いて評価した。大学のアメリカンフットボール部に所属する学生を対象に彼等の唾液硝酸イオンの日内変動を調べるとともに、実際に部活動の激しい運動が心的負荷となるかを検証した。実際には運動前後で唾液硝酸イオンに大きな変動は見られなかったため、運動は心的負荷足りないと結論付けた。加えて、唾液硝酸イオン濃度の日内変動が生理指標として有効とされるコルチゾールのものと類似することを把握し、唾液硝酸イオン指標の生理指標としての有効性を示した。

また同章は、高負荷な運動を常時行う部活動に属する者ではなく、スポーツに関して素人である者を対象に高負荷運動実験を行った。アメリカンフットボール部員を対象とする実験結果とは異なり、高負荷運動は唾液硝酸イオンに及ぼし、測定ノイズとなる心的負荷だと断定した。最終的な結論は、本実験結果がアメリカンフットボール部員対象の実験結果よりも優位にあると考える。アメリカンフットボール部員は常日頃から高負荷な運動に慣れており、運動を心的負荷と認識しなかったと考える。本章で示した実験結果は、海事社会において能動的に身体運動を伴う業務に従事する現場で活用できる、生理指標を構築したことを示す。

第5章は、博多湾における港湾の管制塔の役割を担い通信業務を行う博多ポートコーディネーター実験（博多実験）結果に述べた。実際には数秒で唾液から値を得ることが可能であるが、実験協力者が業務中での実験協力ということを考慮し、測定間隔に余裕を持った。本実験では、これまでポートコーディネーターに対する唾液採取間隔が10分と長かったため5分とした。そして心拍データから算出するLF/HF値と比較して、唾液硝酸イオン指標の結果を精査した。ポートコーディネーターは24時間二人体制で、通信業務を主に行うメインと、メインの支援を行うサブと役割を決めて当直を行う。メインの心的負荷がサブより低い場合が朝方に限るとする結果を先行研究から得ていたが、本実験からそれに反する結果が出た。従ってメイン・サブの関係以外の硝酸イオン濃度変動要因があるかを検証する必要がある。

また5章は、ポートコーディネーターの業務内容を精査する業務表を作成し、活用した。本業務表は実験環境においては心的負荷となる業務の追究のために、また業務に係る現場では新人教育における業務チェックリストとして活用されるために、作成する。大きく業

務を区分した大分類項目に業務内容の区別が可能であったが、大分類項目に対する詳細な業務項目に業務を落とし込むことが不可能であった。従って、業務の細かな精査のために、作成した業務表の改善が必要だと認識した。

第 6 章は、船舶に乗り込み船長の代わりに操船を行う水先人、および水先人が乗り込む船舶の船長を実験協力者とする博多港で行った実験に関して述べた。主に通信業務が操船者の心的負荷となると推察した。本考えの下、第 7 章では生理指標を使用して、操船者とポートコーディネーターの心的負荷評価の比較を行った実験に関して述べた。結果として、実際に水先人はポートコーディネーターと行う通信を心的負荷とみなすと推察する。そして本実験の目的である、操船者が心的負荷と見做す操船イベントを唾液硝酸イオンにより心的負荷の評価を行い、把握することに成功した。

第 8 章は、実際の当直中の船橋環境を想定し、異文化間の当直者で構成されるブリッジチーム員の心的負荷評価を LF/HF 値を用いて行った。実際には航行中の船舶に乗り込み本内容の実験を行いたいが、現実的に不可能であることから、操船シミュレータを使用して実験を行った。結果は、第二外国語とする英語によるコミュニケーションはチーム員の心的負荷となることが明確となった。本指標は LF/HF 値であり、心的負荷評価に対する本有効性を認めたが、今後は LF/HF 値と比較しながら、唾液硝酸イオン生理指標により心的負荷評価を行い、こちらの有効性も確認する必要がある。

心的負荷評価のための生理指標は高価なものが多い中、本硝酸イオン測定器は安価で、かつ持ち運びが容易で即時にその場での指標測定が可能である。

## - 参考文献 -

- [Arnold 1977] Arnold, W. P., Mittal, C. K., Katsuki, S. and Murad, F. (1977) "Nitric oxide activates guanylate cyclase and increases guanosine 3': 5'- cyclic monophosphate levels in various tissue preparations." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74 (8) : 3203-3207
- [AXEL 2018] "2-5049-11-31 遠心機 (回転固定型) CN-810 出荷前点検検査書付き" AXEL HP. (2018) Available online: [www.isfet.com/new/](http://www.isfet.com/new/) (accessed on 15 January 2018)
- [Atami 1979] 熱海智子 (1979) "ヒト唾液中の亜硝酸イオンの生成機構に関する研究" 口腔衛生学会雑誌, 29 (2) :43-53
- [Cannon 1932] Cannon, W.B. (1932) "The Wisdom of the Body."
- [Chrousos 1998] Chrousos, G.P. (1998) "Stressors, Stress, and Neuroendocrine Integration of the Adaptive Response. The 1997 Hans Selye Memorial Lecture." *Annals of the New York Academy of Sciences*, 851 (1) : 311-335
- [Furchgott 1980] Furchgott, R. F. and Zawadzki, J. V. (1980) "The obligatory role of endothelial cells in the relaxation of arterial smooth muscle by acetylcholine." *Nature*, 288 (5789) : 373-376
- [Green 1982] Green, L. C., Wagner, D. A., Glogowski, J., Skipper, P. L., Wishnok, J. S. and Tannenbaum, S. R. (1982) "Analysis of nitrate, nitrite, and [15N] nitrate in biological fluids." *Analytical biochemistry*, 126 (1) : 131-138
- [Gress 1998] Gross, C.G. (1998) "Claude Bernard and the Constancy of the Internal Environment." *The neuroscientist*, 4 (5) : 380 - 385
- [Ignarro 1987] Ignarro, L. J., Buga, G. M., Wood, K. S., Byrns, R. E. and Chaudhuri, G. (1987) "Endothelium-derived relaxing factor produced and released from artery and vein is nitric oxide." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 84 (24) : 9265-9269
- [Ikeya 1975] Ikeya, M. (1975) "Dating a stalactite by electron paramagnetic resonance." *Nature*, 255 (5503) : 48-50
- [ISFETCOM 2017] ISFETCOM Co., LTD HP. (2017) Available online: [www.isfet.com/new/](http://www.isfet.com/new/) (accessed on 31 October 2017)
- [Iso 2014] 磯達也, 倉林正彦 (2014) "毛細血管内皮細胞を介する心筋脂肪酸代謝の制御機構 : 脂肪酸タンパク質 4/5 は経内皮的脂肪酸輸送を促進する (特集 心不全と代謝)" 細胞, 46 (7) : 303-306
- [Izawa 2010] 井澤修平, 小川奈美子, 原谷隆史 (2010) "唾液中コルチゾールによるストレス評価と唾液採取手順" 労働安全衛生研究, 3 (2) : 119-124
- [Jin 2013] Jin, L., Qin, L., Xia, D., Liu, X., Fan, Z., Zhang, C., Gu, L., He, J., Ambudkar, I.S., Deng, D. and Wang, S. (2013) "Active secretion and protective effect of salivary nitrate against stress in human volunteers and rats." *Free Radical Biology and Medicine*, 57: 61-67

- [Kira 1983] Kira, K., Minokami, T., Yamamoto, N., Hayashi, K. and Yamashita, I. (1983) "Synthesis and evaluation for antithrombogenic materials of polyurethane containing polydimethylsiloxane in the main chain." *J Jpn Soc Biomater*, 1 : 29-34.
- [Kitamura 2011] 北村健一, 村井康二, 福士恵一, 林祐司, 脇田慎一, 宮道隆 (2011) "唾液 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> による操船者の心的負荷評価に向けて - 学生シミュレータ訓練の場合 -" 第 54 回自動制御連合講演会論文集 : 1203-1204
- [Kitamura 2014a] Kitamura, K., Murai, K., Fukushi, K., Hayashi, Y., Mitomo, N., Yoshimura, K., Hikida, K. Wakida, S. & Miyado, T. (2014) "A ship Navigator's mental workload using salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup> compared with RR interval: Simulator-based experiment." *Proceedings of World Automation Congress 2016, International Forum on Multimedia and Image Processing*, IEEE: 98-102
- [Kitamura 2014b] 北村健一, 村井康二, 脇田慎一, 林祐司 (2014) "唾液硝酸イオンを用いたポートコーディネーターの心的負荷定量評価" 日本航海学会第 131 回講演予稿集, 2 (2) : 214-216
- [Kitamura 2015a] Kitamura, K., Murai, K., Wakida, S., Mitomo, N., Fukushi, K. and Hayashi, Y. (2015a) "Development of Mental workload Measurement Device Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup> for Handling-a-ship Navigators." *International Journal of Emerging Trends in Engineering & Technology (IJETET)*, 3 (01) : 1-10
- [Kitamura 2015b] Kitamura, K., Murai, K. and Wakida, S. (2015b) "Evaluation of Mental Workload in Maritime Society Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup>." Poster presentation of 4th International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV-15)
- [Kitamura 2015c] Kitamura, K., Murai, K., Fukushi, K., Hayashi, Y. and Wakida, S. (2015c) "Evaluation of Mental Workload for Athletes' Training Based on Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Concentration." *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE : 1250-1254
- [Kitamura 2016a] Kitamura, K., Murai, K., Wakida, S., Mitomo, N. and Fukushi, K. (2016a) "A ship navigator's mental workload using salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration for simulator-based experiment." *Intelligent Automation & Soft Computing*, 23 (1) : 161-166
- [Kitamura 2016b] Kitamura, K., Murai, K. and Wakida, S. (2016b) "Evaluation of Mental Workload of Sea Pilot and Captain Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup>." *Proceedings of World Automation Congress 2016, International Forum on Multimedia and Image Processing*
- [Kitamura 2017] Kitamura, K., Murai, K., Wakida, S. and Rooks, M. (2017) "Evaluation of Mental Workload for Porto-coordinator on an Individual Scale Using Salivary NO<sub>3</sub><sup>-</sup>." *Transactions of Navigation*, Japan Institute of Navigation, 2 (1) : 15-23
- [Kokudokoutsushou 2008] 国土交通省 (2008) "水先人とは?" < [http://www.mlit.go.jp/maritime/s\\_hikaku/mizusaki2/about/index.html](http://www.mlit.go.jp/maritime/s_hikaku/mizusaki2/about/index.html) > (2017/11/05 アクセス)
- [Kojima 1998] Kojima, H., Nakatsubo, N., Kikuchi, K., Kawahara, S., Kirino, Y., Nagoshi, H. and Nagano, T. (1998) "Detection and imaging of nitric oxide with novel fluorescent indicators: diamino fluoresceins." *Analytical chemistry*, 70 (13) : 2446-2453

- [Masuda 2000] 増田大輔, 野原隆司 (2000) “運動と血管内皮機能” 体力化学, 49 (2) : 225-236
- [Miyadou 2013] 宮道隆, 岡根拓也, 下野勝也, 高橋誠, 中村亮彦, 西野正悟, 林祐真 (2013) “唾液を用いた健康管理システムの開発に向けた基礎検討” 近畿能開大ジャーナル, 21 : 45-51
- [Murai 2004] Murai, K., Hayashi, Y., Nagata, N. and Inokuchi, S. (2004) “The Mental Workload of a Ship’s Navigator Using Heart Rate Variability.” *Interactive Technology & Smart Education*, 2: 127-133
- [Murai 2007] Murai, K., Okazaki, T., Stone, L.C. and Hayashi, Y. (2007) “A Characteristics of a Navigator’s Mental Workload Based on Nasal Temperature.” *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* : 3639-3643
- [Murai 2009] Murai, K., Wakida, S., Miyado, M., Fukushi, K. and Hayashi, Y. (2009) “Basic study of a Ship Navigator’s Stress Using Salivary Amylase Activity.” *INSTITUTE ELECTRICAL ENGINEERS OF JAPAN*, 4 (5) : 680-682
- [Niki 2008] 二木鋭雄編著 (2008) ストレスの科学と健康 共立出版
- [Palmer 1987] Palmer, R.M.J., Ferrige, A.G. and Moncada, S. (1987) “Nitric Oxide Release Accounts for the Biological Activity of Endothelium-derived Relaxing Factor.” *Nature*, 327 (6122) : 524-526
- [Sakabe 1993] 坂部弘之 (1993) ストレス小論 *Bull. Inst. Public Health*, 42(3) : 366-374
- [SARSTEDT 2017] SARSTEDT HP. (2017) Available online: <https://www.sarstedt.com/jp/products/diagnostic/salivasputum/product/51.1534/> (accessed on 31 October 2017)
- [Sato 2008] Sato, E.F., Choudhury, T., Nishikawa, T. and Inoue M. (2008) “Dynamic Aspect of Reactive Oxygen and Nitric Oxide in Oral Cavity.” *Journal of clinical biochemistry and nutrition* , 42 (1) : 8-13
- [Schulz 1879] Schulz, K., Kerber, S. and Kelm, M. (1879) *Nitric Oxide*, 12: 426
- [Selye 1936] Selye, H. (1936) “A Syndrome produced by Diverse Nocuous Agents.” *Nature*, 138 (3479) : 32
- [Selye 1946] Selye, H. (1946) “The General Adaptation Ayndrome and the Diseases of Adaptation.” *The Journal of Clinical Cndocrinology*, 6 (2) :117-230
- [Selye 1950] Selye, H. (1950) “The Physiology and Pathology of Exposure to Stress.” *Acta Endoerinologica*
- [Shimizu 2012] 清水隆文 (2012) ストレス < <http://www.stnv.net/med/stress.htm> > (2017/11/06 アクセス)
- [Takada 2005] 高田晴子, 高田幹夫, 金山愛 (2005) “心拍変動周波数解析の LF 成分・HF 成分と心拍変動係数の意義 —加速度脈波測定システムによる自律神経機能評価—” *総合健診* 32 (6): 504-512
- [Tanaka 2011] 田中秀喜, 脇田慎一 (2011) “ストレスと疲労のバイオマーカー” *日薬理誌*, 137: 185-188
- [Tani 1992] 谷明博, 鍵谷俊文, 堀正二 (1992) “心拍変動のスペクトル解析による自律神経機能評価” *CLINICIAN*: 59-63

- [Tazawa 2013] Tazawa, H., Kawaguchi, T., Kobayashi, T., Kuramitsu, Y., Wada, S., Satomi, Y. and Kitagawa, T. (2013) “Chronic inflammation-derived nitric oxide causes conversion of human colonic adenoma cells into adenocarcinoma cells.” *Experimental cell research*, 319 (18) :2835-2844
- [Touyoushinguotsuushinsya 2008] 東洋信号通信社 (2008) “会社情報”  
<<http://www.toyoshingo.co.jp/site/portal/corporate/>> (2017/11/06 アクセス)
- [Wakida 2004] 脇田慎一, 田中喜秀, 永井秀典 (2004) “ストレスマーカーの迅速アッセイ” *ぶんせき*, 6 : 309-316
- [Wakida 2010] 脇田慎一, 田中喜秀, 永井秀典 (2010) “ストレス計測評価用バイオチップのプロトタイプ開発” 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文集: 4-7
- [Yamaguchi 2007] 山口昌樹 (2007) “唾液マーカーでストレスを測る” *日本薬理学雑誌*, 129 (2) :80-84

## 謝 辞

本論文は、著者が国立大学法人神戸大学大学院海事科学研究科博士課程後期課程（海事科学専攻）在学中に、国立大学法人神戸大学大学院海事科学研究科グローバル輸送科学講座 村井康二准教授の御指導の下に行った研究成果をまとめたものである。本研究を遂行するにあたり、村井康二准教授から賜った御教示、御鞭撻および御助言に対し深甚なる感謝の意を表します。

共同研究者である国立研究開発法人産業技術総合研究所 産総研・阪大 先端フォトニクスバイオセンシング オープンイノベーションラボラトリ 脇田慎一副ラボ長には、測定器に関する貴重な御教示、御鞭撻を賜りましたこと厚く御礼申し上げます。また同ラボリサーチアシスタント 大崎脩仁くんに謝意を表します。

国立大学法人神戸大学大学院海事科学研究科 今井昭夫教授、古莊雅生教授、齋藤勝彦教授、藤本昌志准教授には、本論文を作成するにあたり貴重な御助言および御指導を頂きましたことを深く感謝致します。また公聴会に御出席下さった、国立大学法人神戸大学大学院海事科学研究科 内田誠研究科長をはじめ皆様には謝意を表します。

本研究に興味を持って頂き、実験環境の提供および実験協力者となって頂いた、博多水先区水先人会会長 藤瀬一則氏、そして株式会社東洋信号通信社 早川友晴氏、岡部和美氏には心惜しみのない御援助を頂き心より感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、国立大学法人神戸大学大学院海事科学研究科航海学研究室 院生上岡大城くん、杉本一平くんをはじめ同室の学生諸氏には一方ならぬ御世話になりましたことを申し上げ、感謝の気持ちと致します。

また私事ながら、本研究を遂行するにあたり、本学学部在籍時より、研究の日々に心の癒しの場を与えて下さった株式会社レストランアラスカ水野伸彦店長に心より御礼申し上げます。また、最後になりますが、生活面・健康面で常に献身的な協力を頂いた母に感謝致します。

## 附 録

### 第 3 章 (3.2.5) 関連式

硝酸イオン測定器の示す測定値を  $X$ ,  $H^+$  濃度を  $[H^+]$ , 求める硝酸イオン濃度を  $[NO_3^-]$  とすると,

一般的に次式が成り立つ.

$$X = -\log[H^+] \quad (1)$$

$$[NO_3^-] = 1.0 \times 10^{-14} / [H^+] \quad (2)$$

式 (1) は式 (3) となる.

$$[H^+] = 10^{-X} \quad (3)$$

式 (2) へ式 (3) を代入する.

$$[NO_3^-] = 10^{X-14+\alpha} \quad (4)$$

式 (4) において,  $\alpha$  は校正値によって変わる.

本研究において, 測定値 6.86 を硝酸イオン濃度  $10^{-3}$  M に校正するため, 式 (5) が成り立つ.

$$\begin{aligned} [NO_3^-] &= 10^{-3} \\ X &= 6.86 \end{aligned} \quad (5)$$

従って, 式 (4) および (5) より,  $\alpha = 4.14$  となることが分かる. これを式 (2) へ代入する.

$$[NO_3^-] = 10^{X-9.86} \quad (6)$$

最終的に, 式 (6) より測定値  $X$  から硝酸イオン濃度が求まる.

第4章関連図

<4.1>

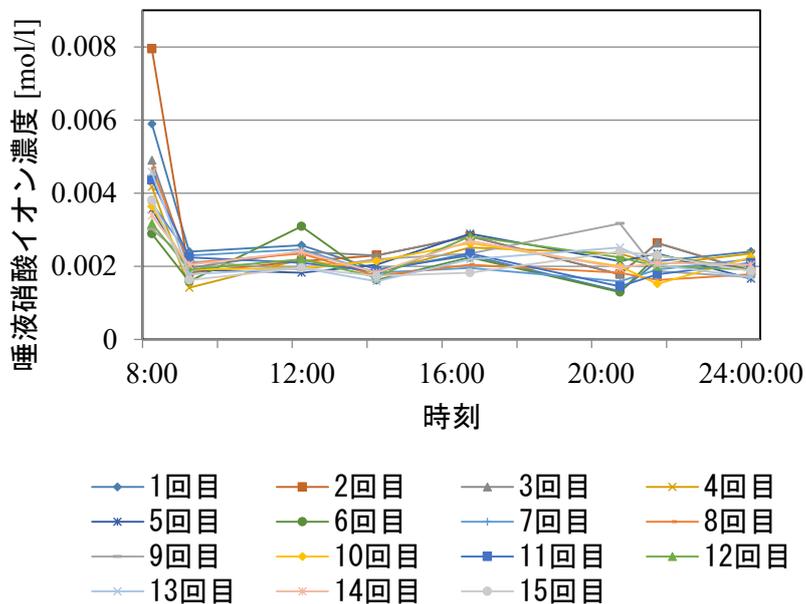


図 A.1 唾液硝酸イオン濃度結果 (実験協力者 A)

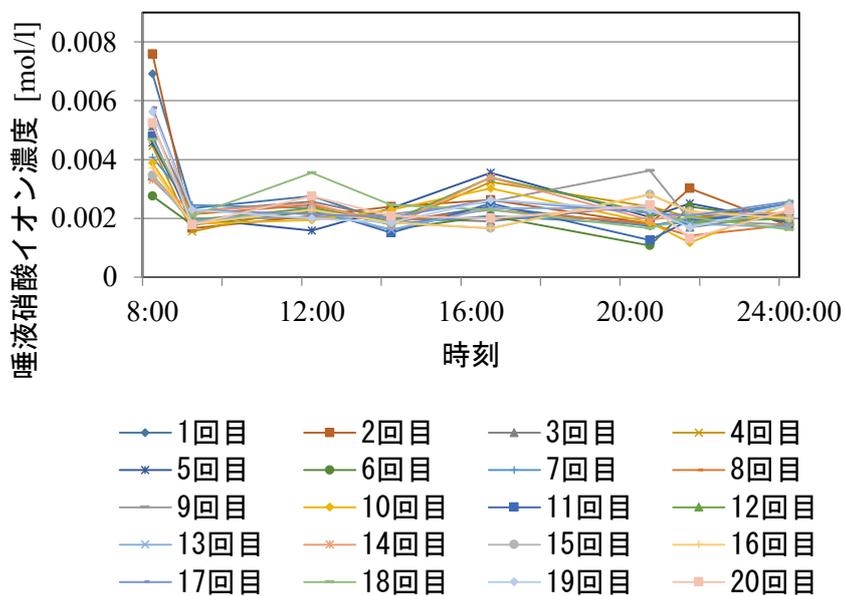


図 A.2 唾液硝酸イオン濃度結果 (実験協力者 B)

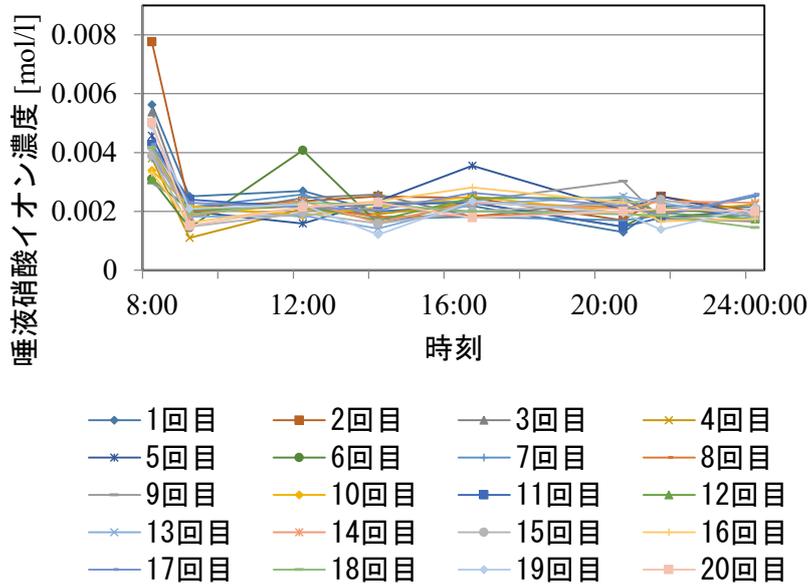


図 A.3 唾液硝酸イオン濃度結果 (実験協力者 C)

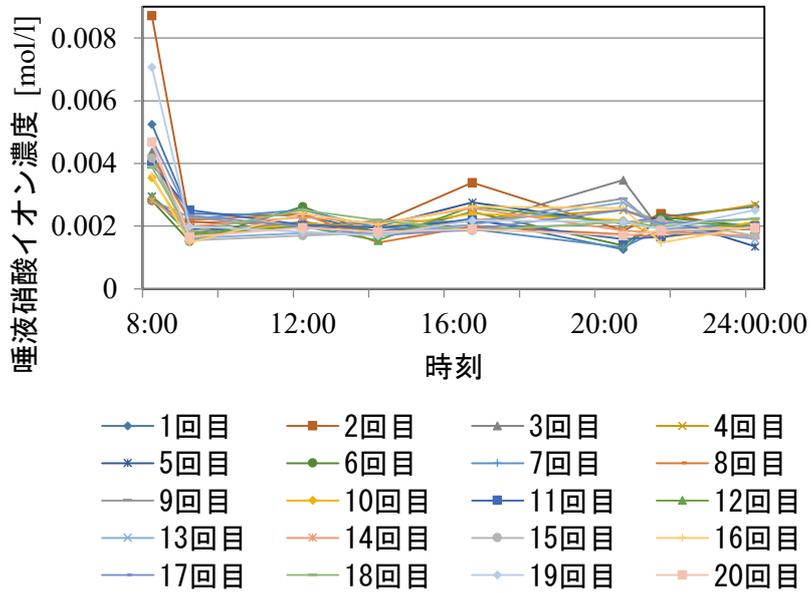


図 A.4 唾液硝酸イオン濃度結果 (実験協力者 D)

<4.2>

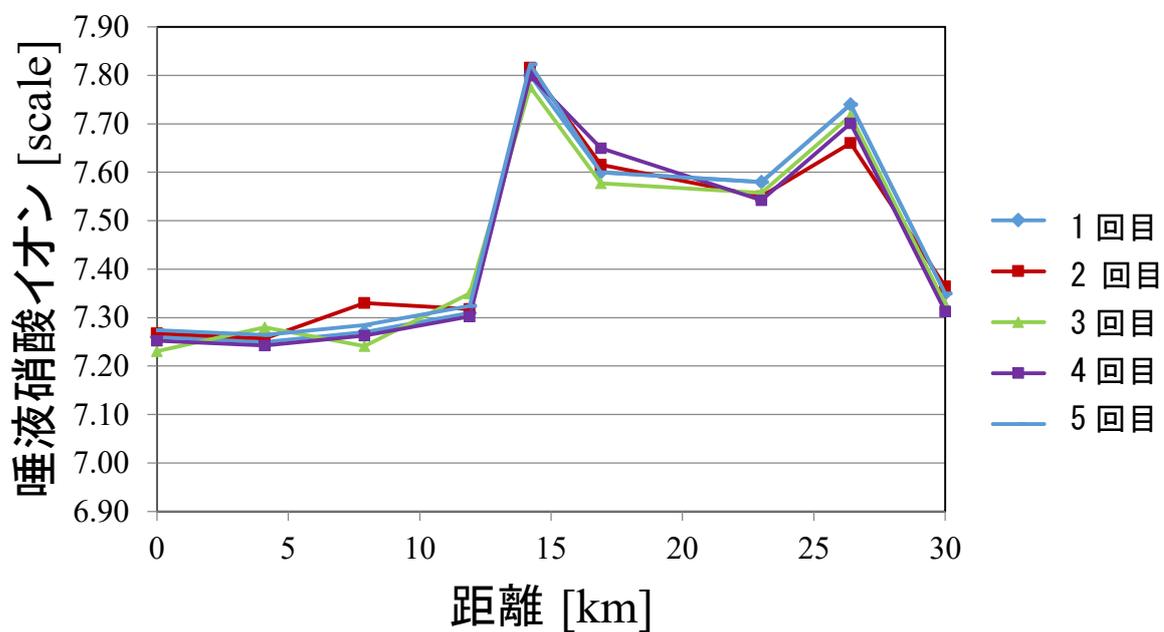


図 A.5 唾液硝酸イオン結果 (実験協力者 A)

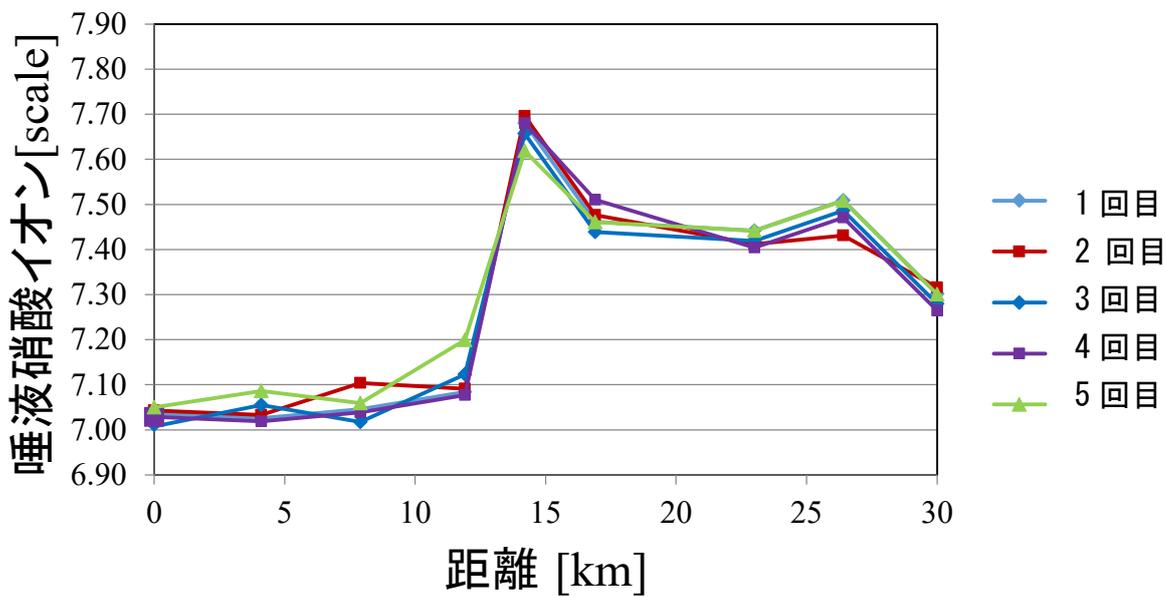


図 A.6 唾液硝酸イオン結果 (実験協力者 B)

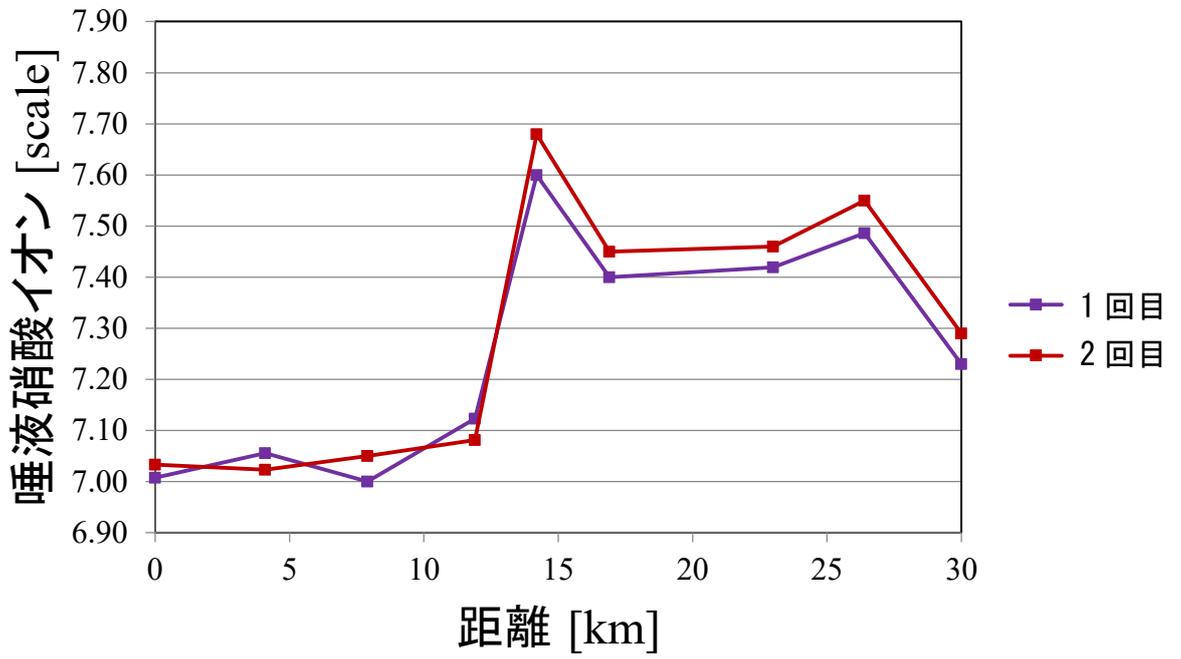


図 A.7 唾液硝酸イオン結果 (実験協力者 C)

第5章 関連図

表 A.I 業務表 (上部)

業務	デバイス	情報源	詳細	カテゴリー分け	本船の位置	内容	情報①	情報②	調整の種類	調整の内容						
通信	VHF			入港	博多港から 約30ML沖～ ハーバーリミット 外	ETA連絡	着岸スケジュール 水先人 タグボート 岸壁 喫水 前港 保安レベル 風向風速情報									
						ハーバーリミット	入港連絡	他船情報	交通流							
									整流	博多港利用基準による調整	①中央航路5.6パイ以東の航路内で、全長200～350m未満の船は 下配の船舶と行会い防止 全長200m以上220m未満⇔全長180m以上 全長220m以上240m未満⇔全長160m以上 全長240m以上280m未満⇔全長120m以上 全長280m以上300m未満⇔全長100m以上 全長300m以上350m未満⇔全船舶 ②東航路全域及び中央航路5.6パイ以西の航路内で、全長240～370m未満の船は 下配の船舶と行会い防止 全長240m以上320m未満⇔160m以上 全長320m以上370m未満⇔全船舶 ※以下、調整①②と表記					
										上記以外の自主的な調整	航路確認					
									避航	行会い船 追越し船 航路外航行 雑種船 船員の常務						
									投錨位置 着岸スケジュール							
						船舶電話			移動	錨地	投錨連絡	岸壁 タグボート				
												他船情報	交通流			
													整流	博多港利用基準による調整	調整①②	
													上記以外の自主的な調整	入航順序の確認		
		避航	行会い船 横切り船 航路外航行 雑種船 船員の常務													
		岸壁	移動前連絡	岸壁 タグボート												
				他船情報	交通流											
					自主的な調整						入出港順序の確認					
					避航						行会い船 横切り船 雑種船 船員の常務					
			出港	岸壁	着岸連絡											
		ETD連絡			ドラフト 次港											
					他船情報	交通流										
						整流	博多港利用基準による調整	調整①②								
						上記以外の自主的な調整	入出港順序の確認									
					シングルアップ連絡	他船情報	交通流									
							整流	博多港利用基準による調整	調整①②							
							上記以外の自主的な調整	入出港順序の確認								
					離岸連絡	他船情報	交通流									
							整流	博多港利用基準による調整	調整①②							
					港用法による特定航法	東航路航行船は、中央航路航行船の進路を避けなければならない										
			緊急時		避難				行会い船 追越し船 横切り船 航路外航行 雑種船 船員の常務							
		故障														
		事故														
		医療														

表 A.II 業務表 (下部)

業務	デバイス	情報源	詳細	カテゴリー分け	本船の位置	内容	情報①	情報②	調整の種類	調整の内容	
見張り	目視	肉眼			ハーバーリミット	船舶の把握・特定 行会いの予測 入航順序の予測		交通流 整流	博多港利用基準による調整 上記以外の自主的な調整	調整①② 入航順序 行会い船 追越し船 雑種船 船員の常務	
					航行内	防波堤付近の行会い予測 錨地からの入航船予測 防波堤通過順	交通流 整流	博多港利用基準による調整 上記以外の自主的な調整	調整①② 入航順序 防波堤通過順の確認 航路外航行 雑種船 船員の常務		
					防波堤内	実計時の行会い 隣接船との入出港順 防波堤通過順	交通流 整流	博多港利用基準による調整 自主的な調整	調整①② 入航順序 防波堤通過順の確認 航路外航行 雑種船 船員の常務		
					航行内	防波堤付近の行会い予測 錨地からの入航船予測 防波堤通過順	交通流 整流	博多港利用基準による調整 上記以外の自主的な調整	調整①② 入航順序 防波堤通過順の確認 航路外航行 雑種船 船員の常務		
					防波堤内	実計時の行会い 隣接船との入出港順 防波堤通過順	交通流 整流	博多港利用基準による調整 自主的な調整	調整①② 入航順序 防波堤通過順の確認 航路外航行 雑種船 船員の常務		
					レーダー	レーダー	レーダー	ハーバーリミット	船舶の把握 行会いの予測 入航順序の予測		交通流 整流
	AIS		動的情報	特的情報 動的情報	現在位置 動静予測	ハーバーリミット	船舶の把握 行会いの予測 入航順序の予測		交通流 整流	博多港利用基準による調整 上記以外の自主的な調整	調整①② 入航順序 行会い船 追越し船 雑種船 船員の常務
						航行内	防波堤付近の行会い予測 錨地からの入航船予測 防波堤通過順	交通流 整流	博多港利用基準による調整 上記以外の自主的な調整	調整①② 入航順序 防波堤通過順の確認 航路外航行 雑種船 船員の常務	
						防波堤内	実計時の行会い 隣接船との入出港順 防波堤通過順	交通流 整流	博多港利用基準による調整 自主的な調整	調整①② 入航順序 防波堤通過順の確認 航路外航行 雑種船 船員の常務	
						航行内	防波堤付近の行会い予測 錨地からの入航船予測 防波堤通過順	交通流 整流	博多港利用基準による調整 上記以外の自主的な調整	調整①② 入航順序 防波堤通過順の確認 航路外航行 雑種船 船員の常務	
						防波堤内	実計時の行会い 隣接船との入出港順 防波堤通過順	交通流 整流	博多港利用基準による調整 自主的な調整	調整①② 入航順序 防波堤通過順の確認 航路外航行 雑種船 船員の常務	
						電話	電話	通報	代理店	ETA ハーバーリミット通過 調整依頼 緊急事案内容	
情報収集	港湾管理者端末				保安部					新規予定 時間変更	
					博多港ふ頭					新規予定	
					博多港ふ頭					時間変更	
					代理店					水先人乗船予定	
					代理店					タグ配船予定	
					博多港ふ頭					タグ配船変更	
	FAX・メール					保安部					新規予定
						博多港ふ頭					時間変更
						博多港ふ頭					時間変更
						代理店					水先人乗船予定
						代理店					タグ配船予定
						博多港ふ頭					タグ配船変更
電話					保安部					新規予定	
					博多港ふ頭					時間変更	
					博多港ふ頭					時間変更	
					代理店					水先人乗船予定	
					代理店					タグ配船予定	
					博多港ふ頭					タグ配船変更	

第 6 章 関連図

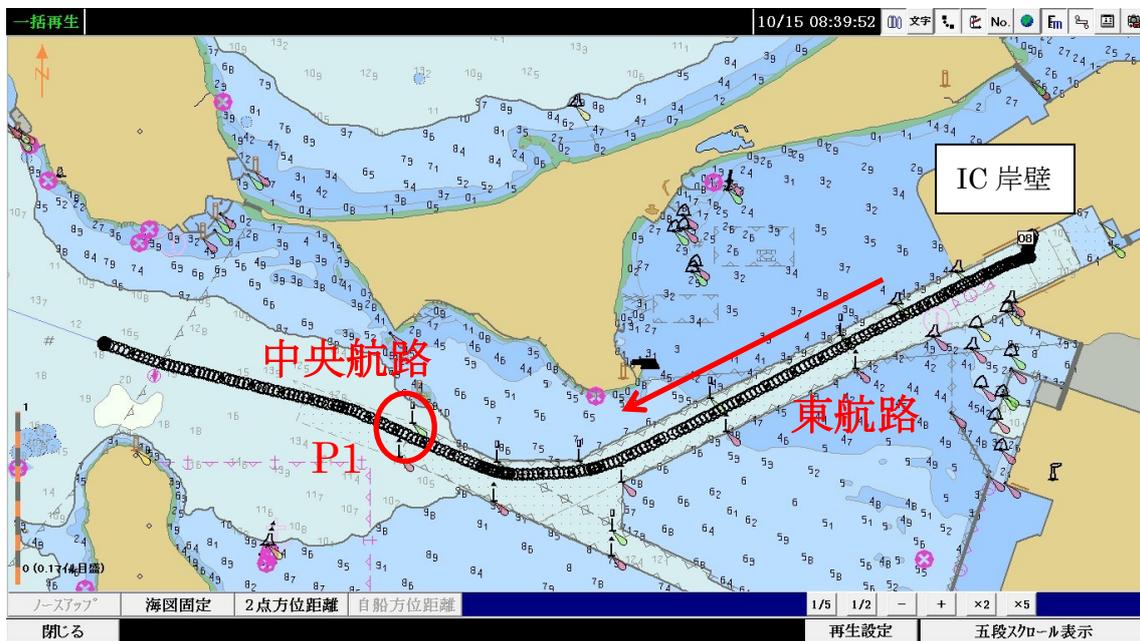


図 A.8 一隻目航跡図

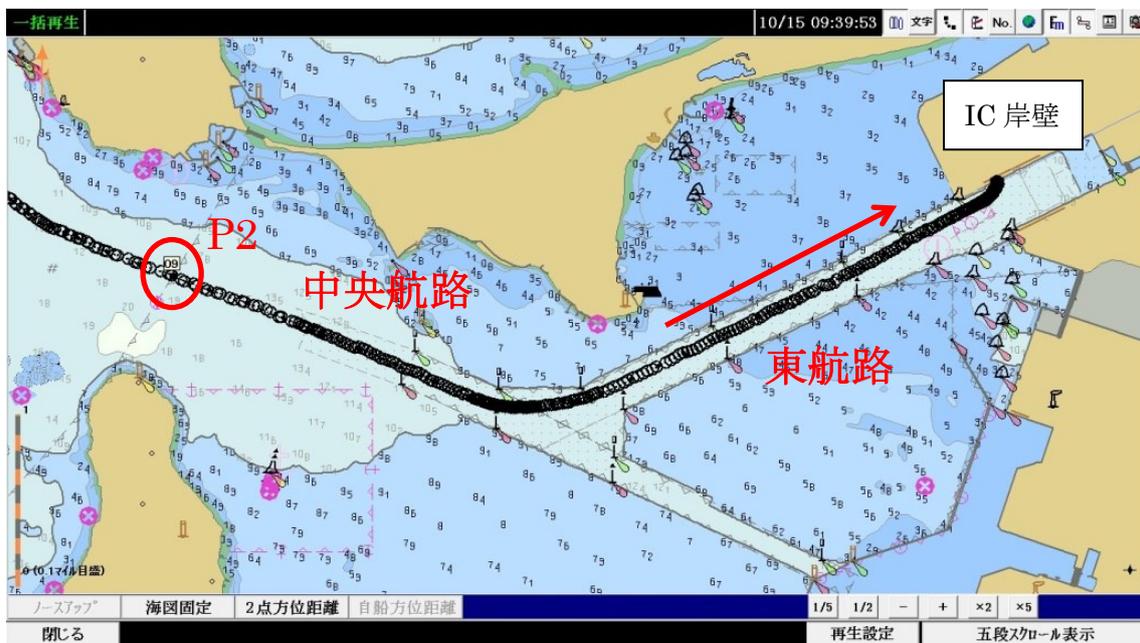


図 A.9 二隻目航跡図

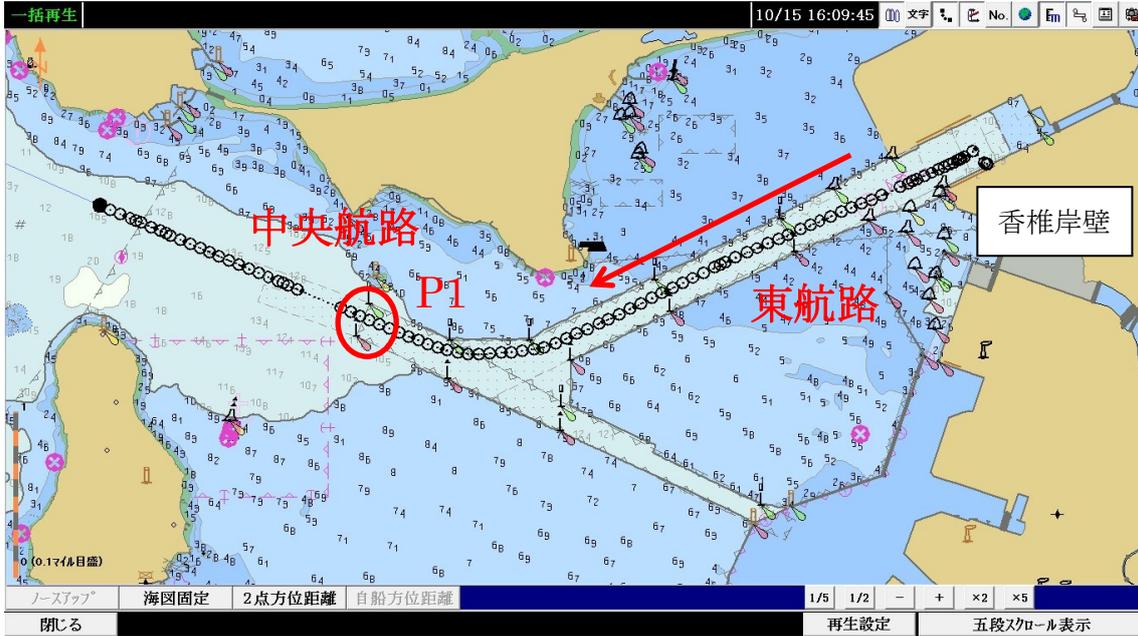


図 A.10 三隻目航跡図

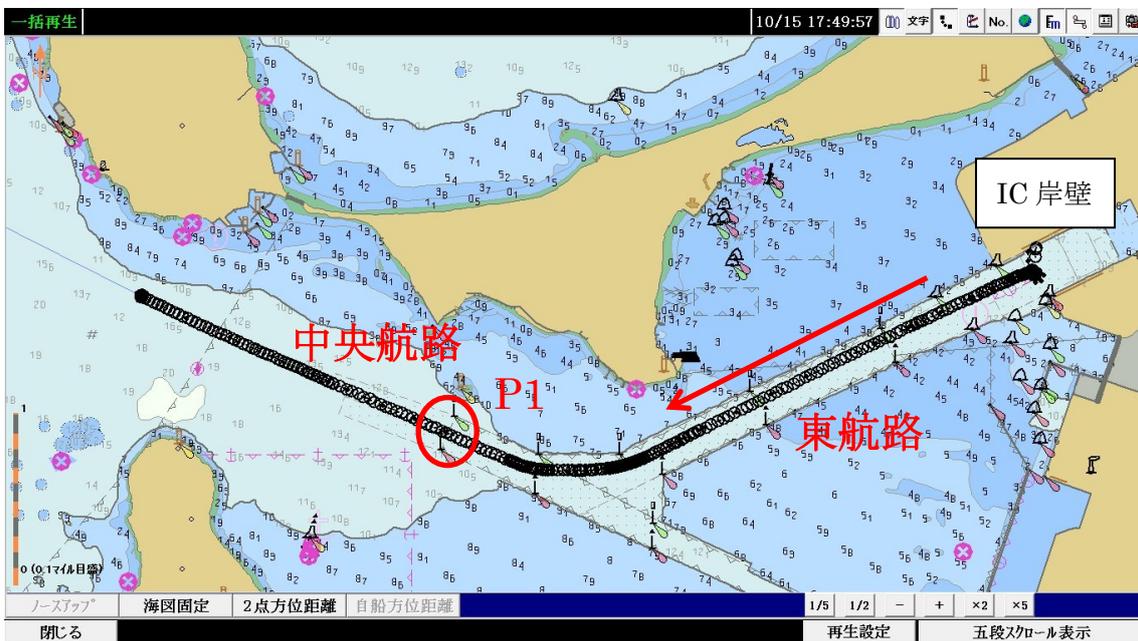


図 A.11 四隻目航跡図

### <6.3.2>

LF/HF 値による心的負荷評価結果（図 A.12）に関して考察を行い，同時に唾液硝酸イオン測定値による心的負荷評価結果（図 A.13）を比較する．

9:06（⑥）に船内電話が急に鳴った．この時に水先人 A の LF/HF 値および唾液硝酸イオン測定値の上昇が見られた．ここでの即時の修業生 a の唾液硝酸イオンは得られなかったが，実験協力者 A，および a にとって突発的な本イベントは心的負荷となったと考える．

9:21（⑦）の操船権移行直前で，修業生 a は本船前方の停泊船との距離の確認など，水先人 A へ引き継ぐべき事項を確認し始めた．この時期から，修業生 a の LF/HF 値は大きな変動を示し始めた．そして操船権が水先人 A に移って以降は，水先人 A の LF/HF 値がそれ以前とは比較的高い値を維持し続けた．ここでの唾液硝酸イオン測定値の変動傾向に関して，9:21（⑦）前後で変化する．水先人 A の唾液硝酸イオン測定値は 9:21 の操船交代前に上昇を続け，交代後に落ち着く．これは水先人 A の操船に対する心的準備のために至った結果だと考える．一方で修業生 a の値は 9:21 を境に下降した（9:23）．これは操船から解放されたことを契機に心的負荷が減少したものと考える．

9:30（⑧）より本船は着岸体制に入り，本船前方の停泊船に接近した．そして 9:32~9:33 に停泊船に本船が向首し始めると，水先人 A および修業生 a の LF/HF 値は上昇を示した．ここでは実験協力者 2 人の唾液硝酸イオンは得られなかったため LF/HF 値の結果との比較は不可能だが，操船イベント⑧が他船との衝突の恐れのある危険な状況を表すことから，LF/HF 値は 2 者の心的負荷に応答したと考える．

9:41（⑨）に本船は着岸したが，着岸前後に水先人 A の LF/HF 値は比較的高い値を示した．修業生 a は着岸時に操船権はなかったが，同様に比較的高い値を示した．これは着岸への接近が警戒すべきイベントだと認識する実験協力者の心的負荷に応答したと考える．ここでの実験協力者の唾液硝酸イオン測定値はともに比較的高い値を示した．LF/HF 値と同様に心的負荷に応答したと考える．

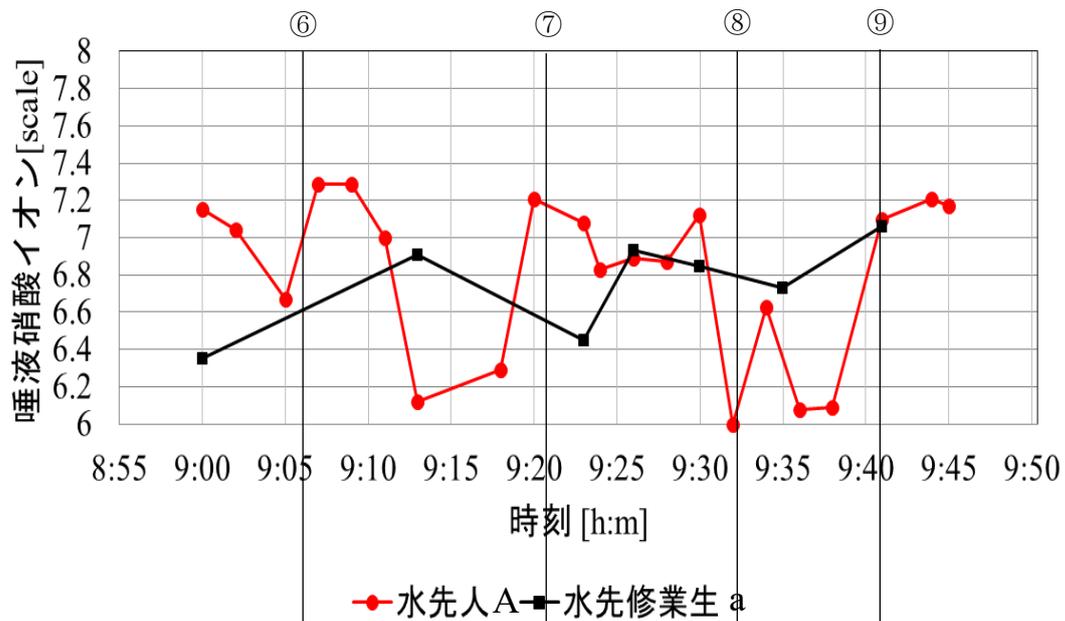


図 A.12 唾液硝酸イオン測定値結果 (二隻目)

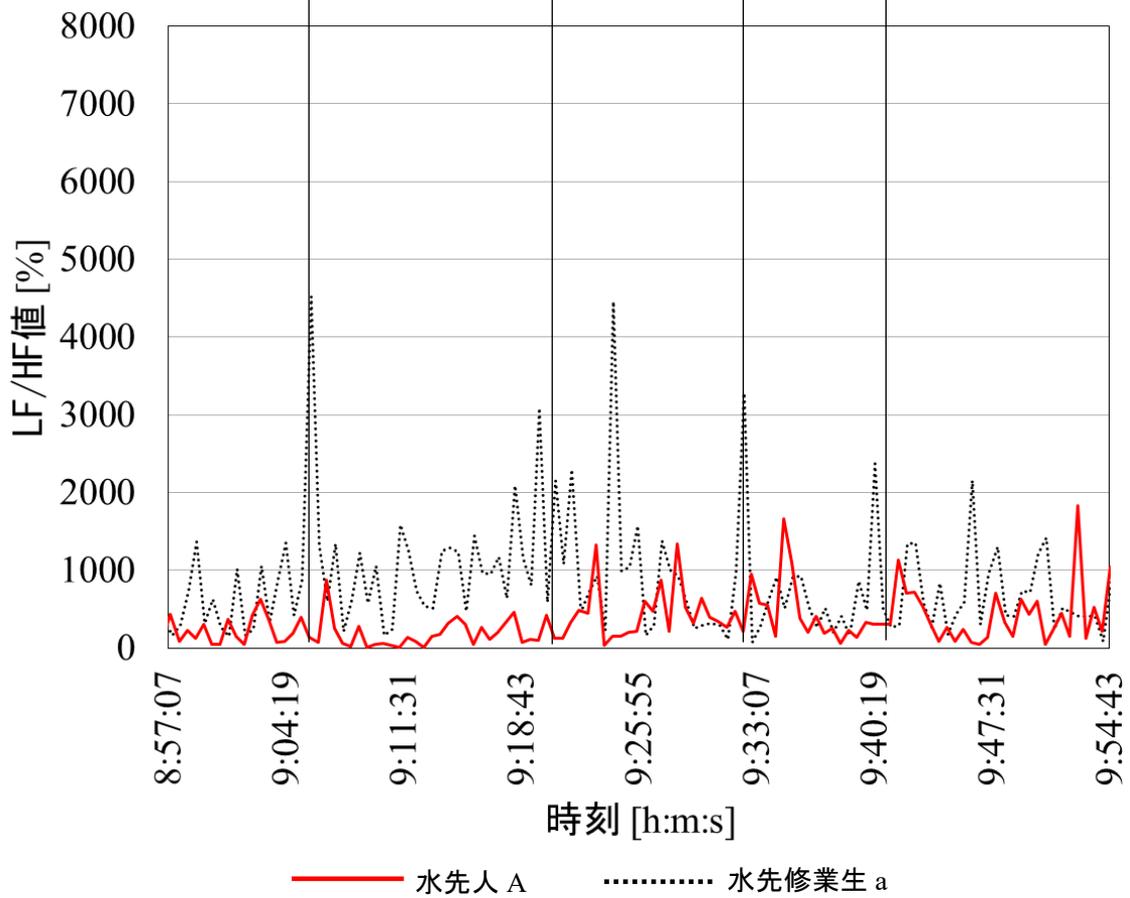


図 A.13 LF/HF 値結果 (二隻目)

LF/HF 値による心的負荷評価結果（図 A.14）に関して考察を行い，同時に唾液硝酸イオン測定値による心的負荷評価結果（図 A.15）を比較する

修業生 a による出港のオーダーが発せられたとき，船長の LF/HF 値は上昇するが，15:29 (⑩) の let go line から水先業務終了の直前まで再び LF/HF が上昇することはなかった．よって船長  $\alpha$  が完全に出港作業を水先人に任せていると推察する．一方で 15:29 (⑩) の離岸時に修業生 a の測定値は上昇する．これは，タグと連携して注意深く離岸作業を行ったために心的負荷を受けたと考えられる．修業生 a の操船中は特にイベントもなく，水先人 A の心的状態は穏やかであることが見て取れる．しかし岸壁が近い状況における後進での回頭の際に水先人 A の測定値は上昇した．本状況は心的負荷に値すると考える．

15:45 (⑪)，東航路航行中に船長  $\alpha$  は修業生 a に博多湾の漁船に関する質問を開始したが，この際に船長  $\alpha$  の LF/HF 値は上昇した．したがって，自身の知識外である漁船に関する質問に対して，船長に心的負荷がかかったと考える．

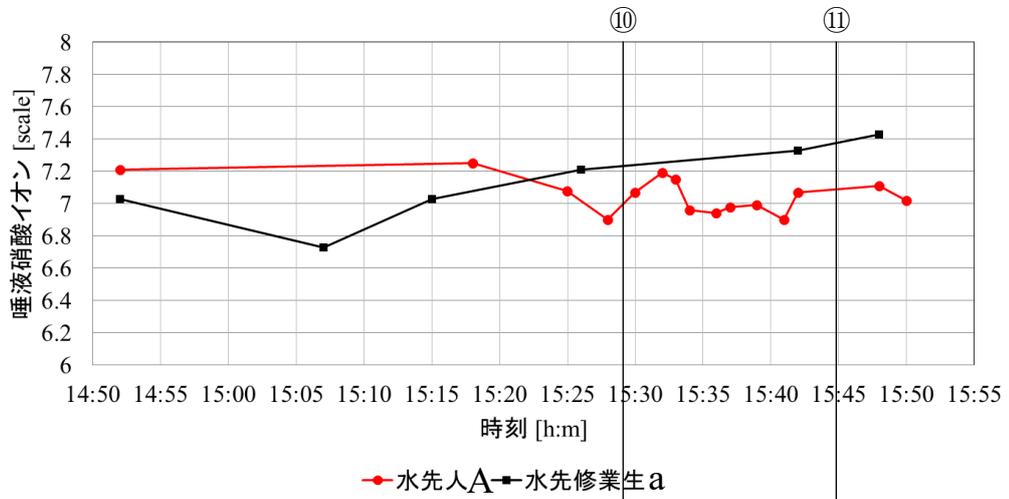


図 A.14 硝酸イオン測定値結果 (三隻目)

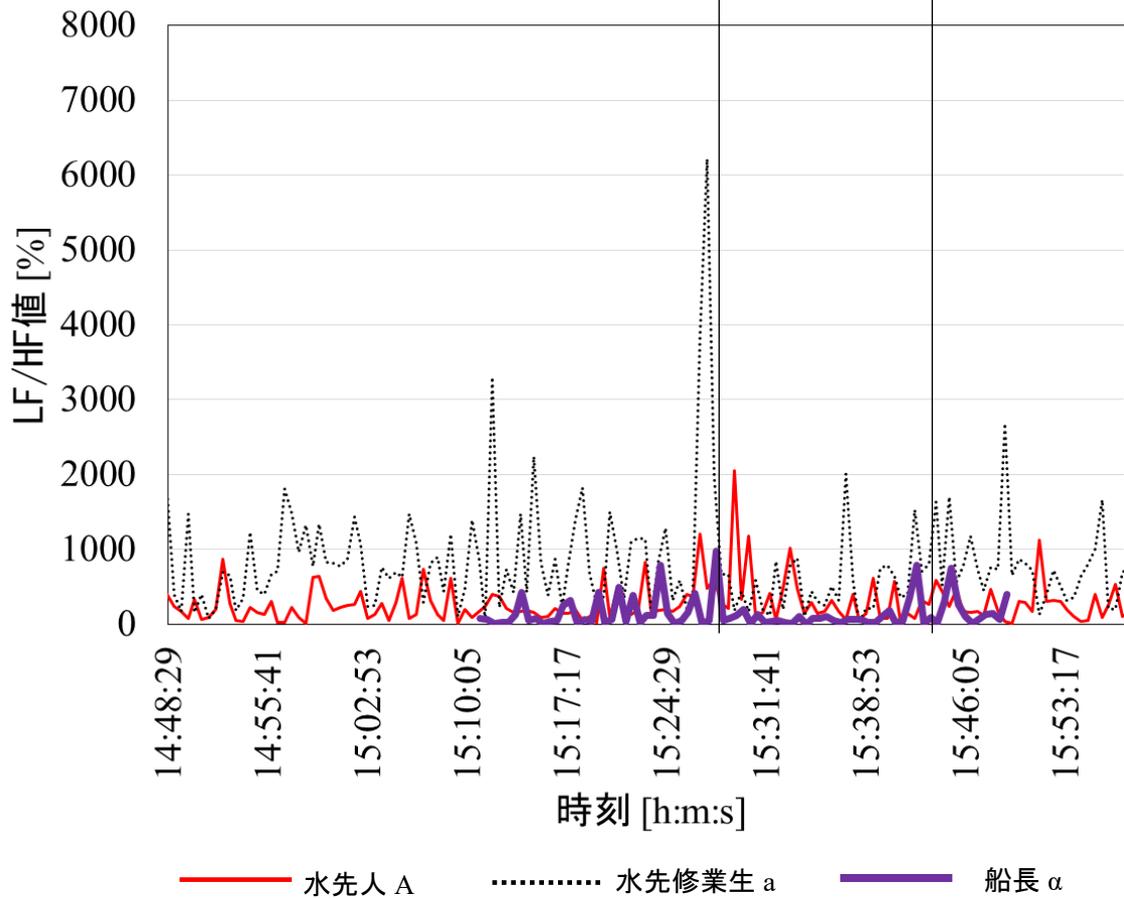


図 A.15 LF/HF 値 (三隻目)

LF/HF 値による心的負荷評価結果（図 A.16）に関して考察を行い，同時に唾液硝酸イオン測定値による心的負荷評価結果（図 A.17）を比較する．

唾液採取開始時刻の 16:55 (⑫) において，修業生 a の LF/HF 値は最も高い値を示した．図 6.1, A.12, A.14, A.16 のグラフを見ても分かるように，実験に積極的であった水先人 A と比較して唾液採取回数が少ないが，修業生 a が本実験に消極的な参加であったことから，心的負荷に応答して高まったと考える．本結果は他の三隻に関しても同様に見られる．

水先人 A の LF/HF 値は図 6.2, A.13 および A.15 と比較してほとんど変動がない一方で，修業生の値は上昇・下降を繰り返している．東航路入航後，本船は西進したが，西日が非常に眩しく，修業生 a はサングラスをした．船橋の窓ガラスには遮光シートが設置されていたが，ウイングとブリッジ内を行き来する修業生 a は光量を気にした．最終的に，ブリッジ内の遮光シートを撤去するように修業生 a は要請船船長に求めた．このことが心的負荷に影響を及ぼしたと考える．

修業生 a の LF/HF 値は水先人 A と比較して変動が激しいが，特に水先人 A との変動の違いが確認可能な個所としては，17:22 (⑬) の左回頭が終了して東航路に入航し，その後右転して中央航路に入航する時である．本実験における修業生 a の唾液採取間隔が最大で 17 分と長いため，LF/HF 値と比較した唾液硝酸イオン測定値の変動傾向を把握することは不可能である．

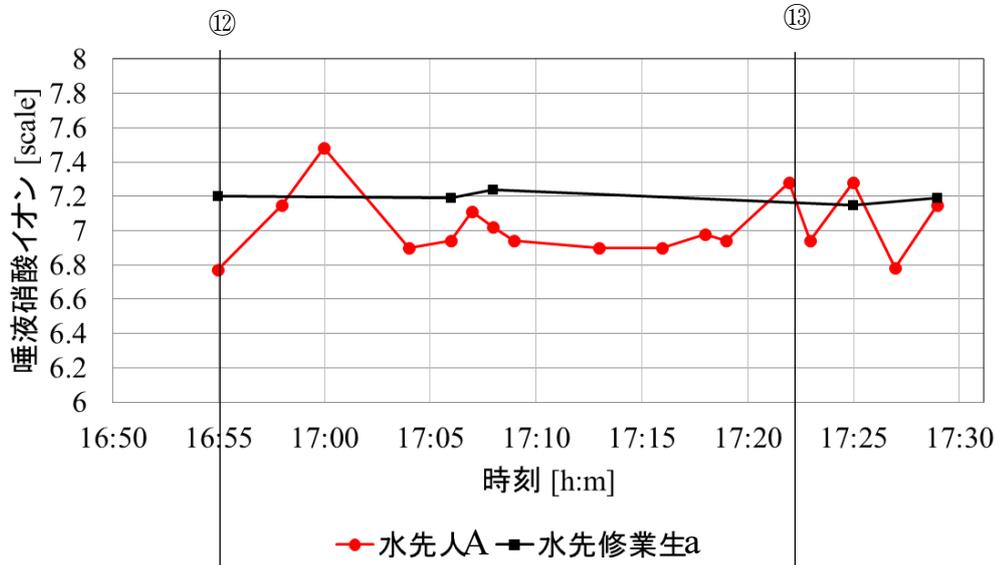


図 A.16 唾液硝酸イオン測定値結果 (四隻目)

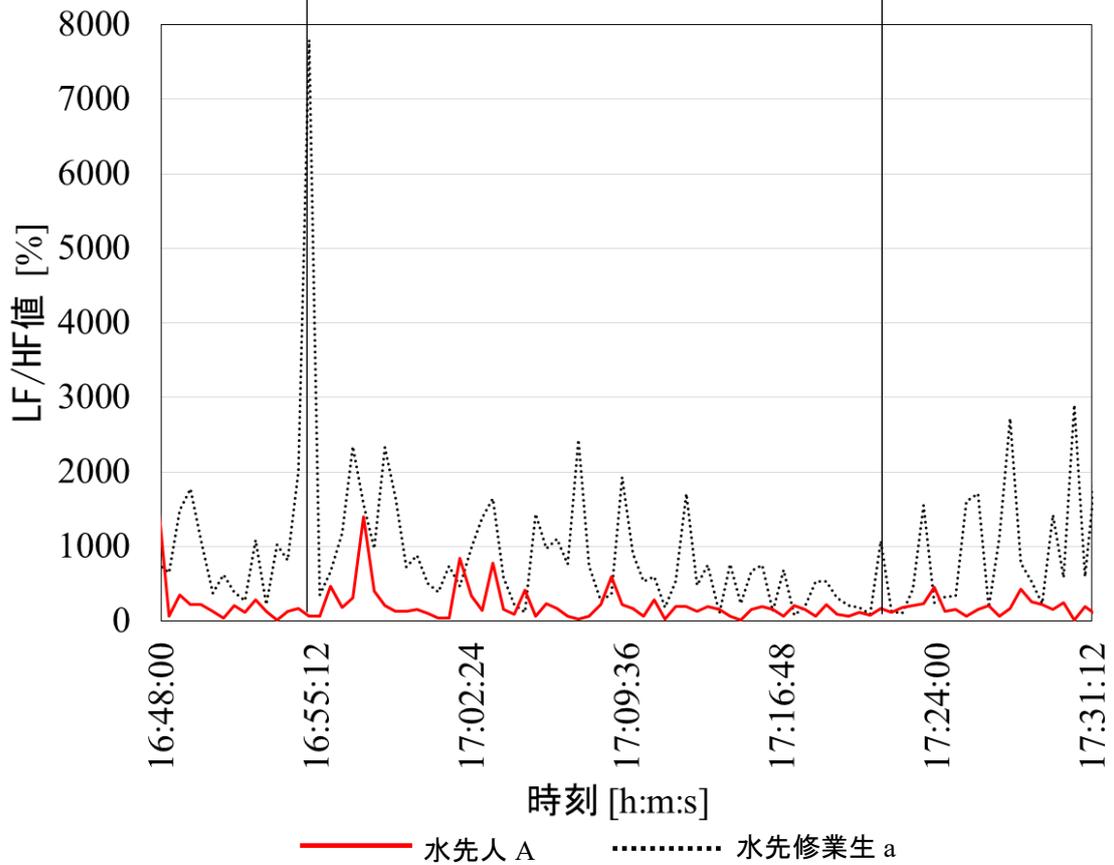
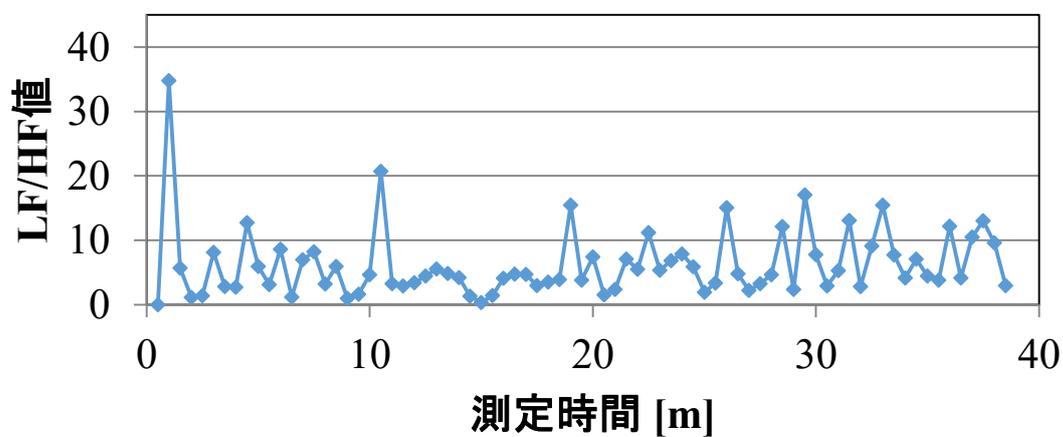
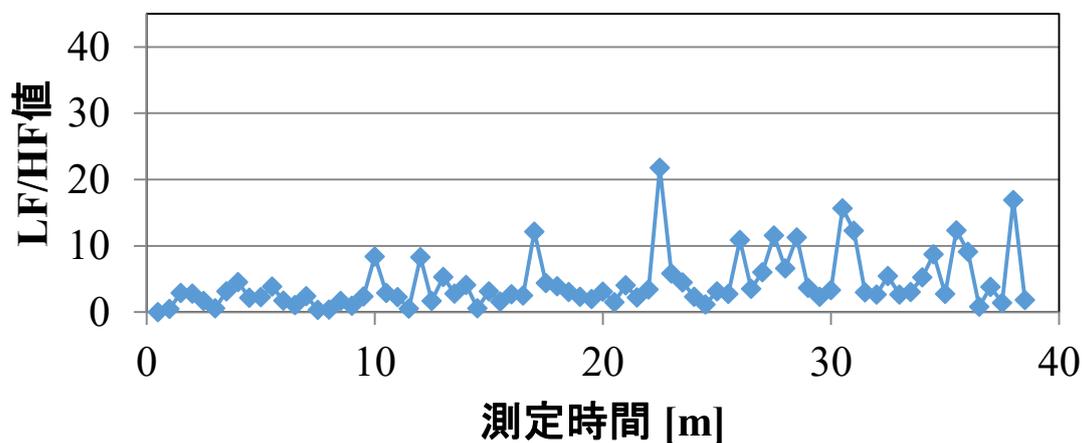


図 A.17 LF/HF 値結果 (四隻目)

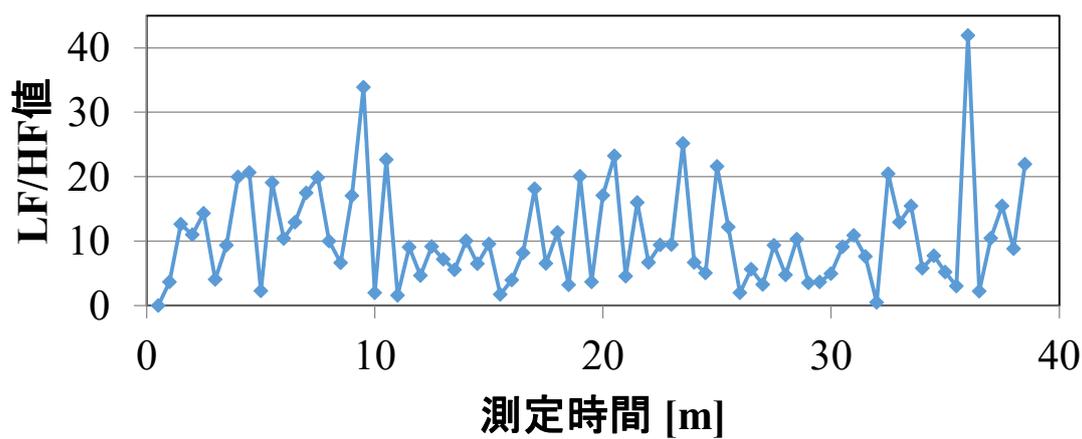
第 8 章関連図



(a) 実験協力者 C

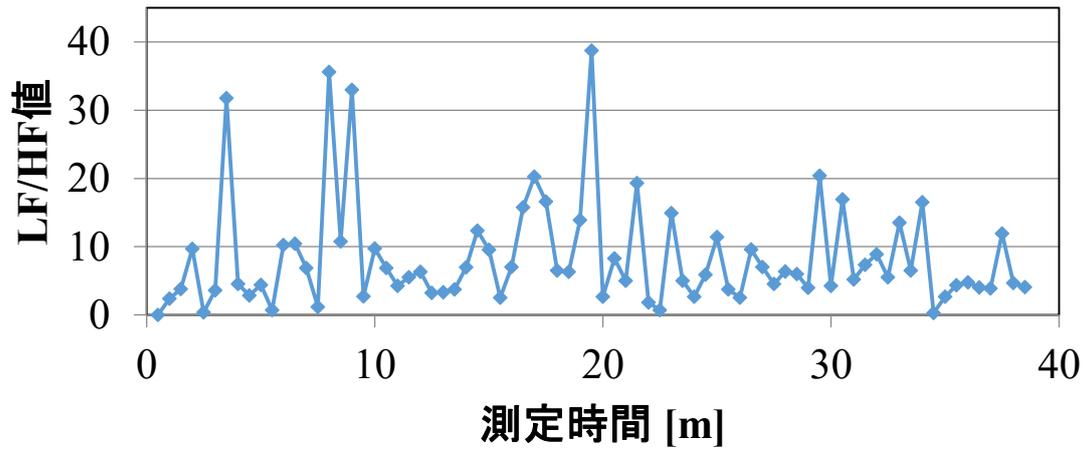


(b) 実験協力者 F

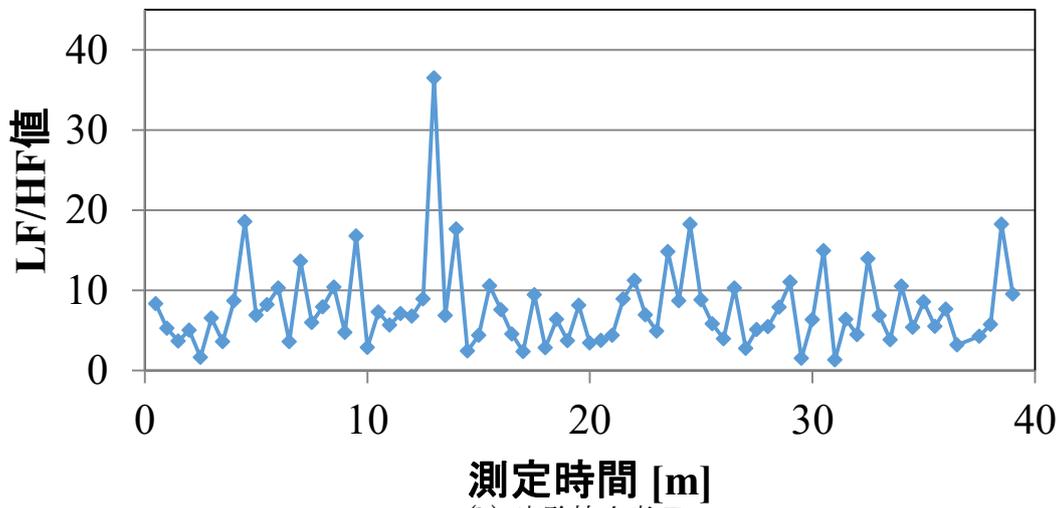


(c) 実験協力者 G

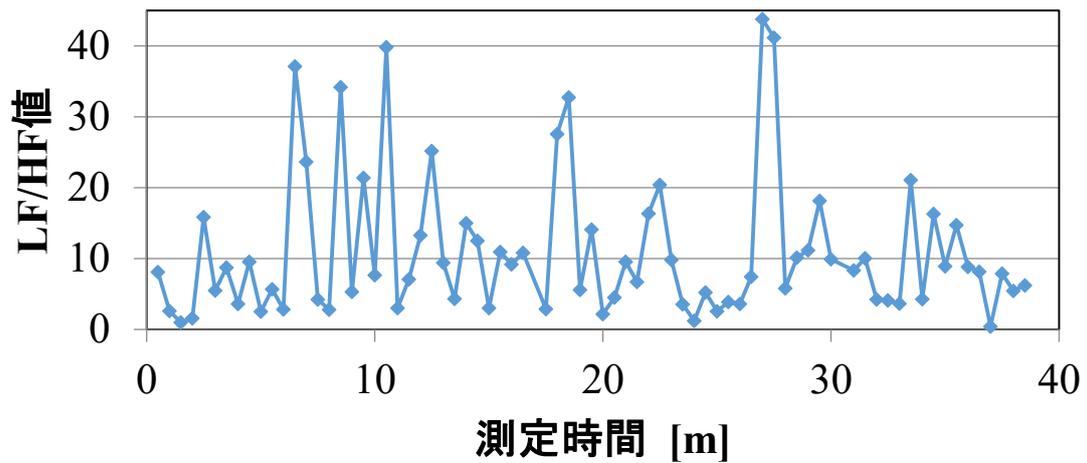
図 A.18 LF/HF 値の結果 (1回目)



(a) 実験協力者 C

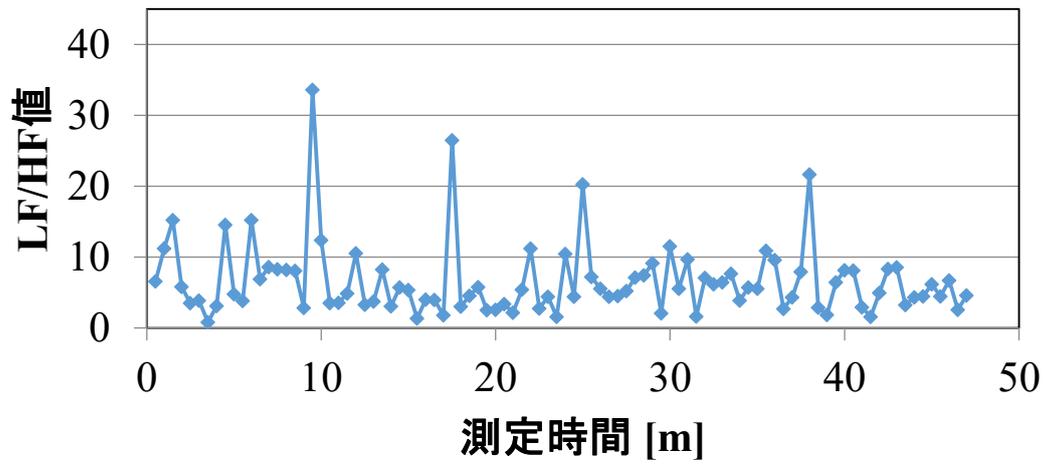


(b) 実験協力者 F

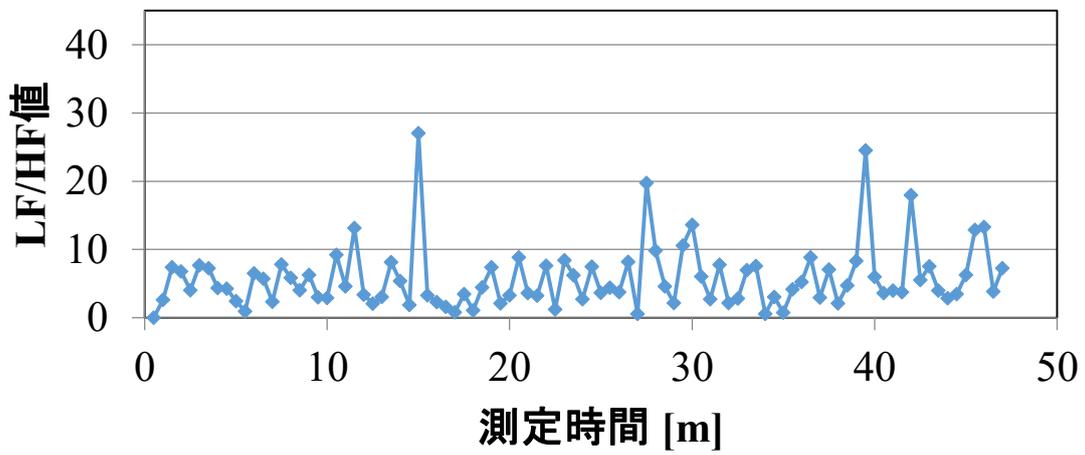


(c) 実験協力者 G

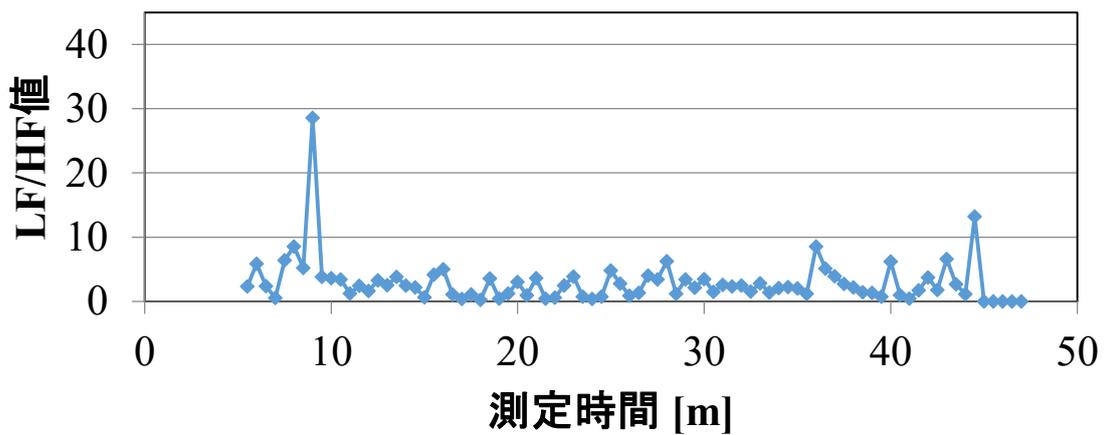
図 A.19 LF/HF 値の結果 (2回目)



(a) 実験協力者 A

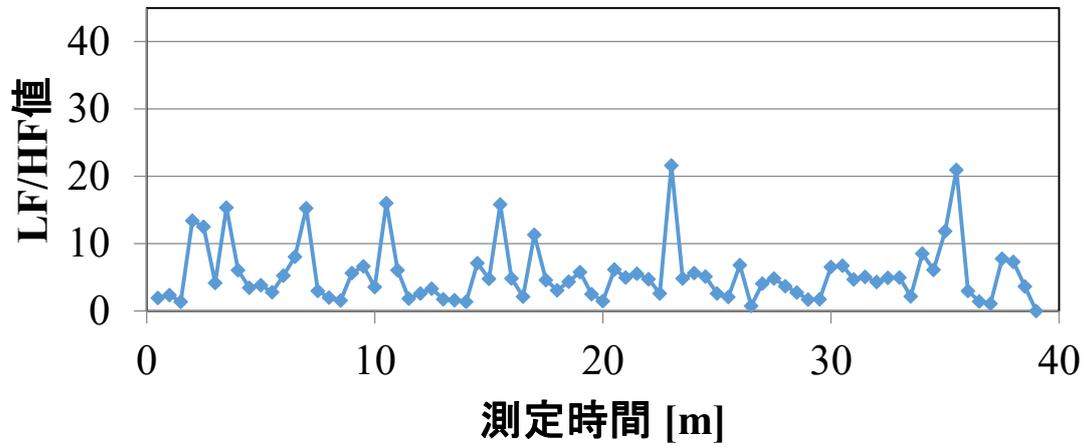


(b) 実験協力者 B

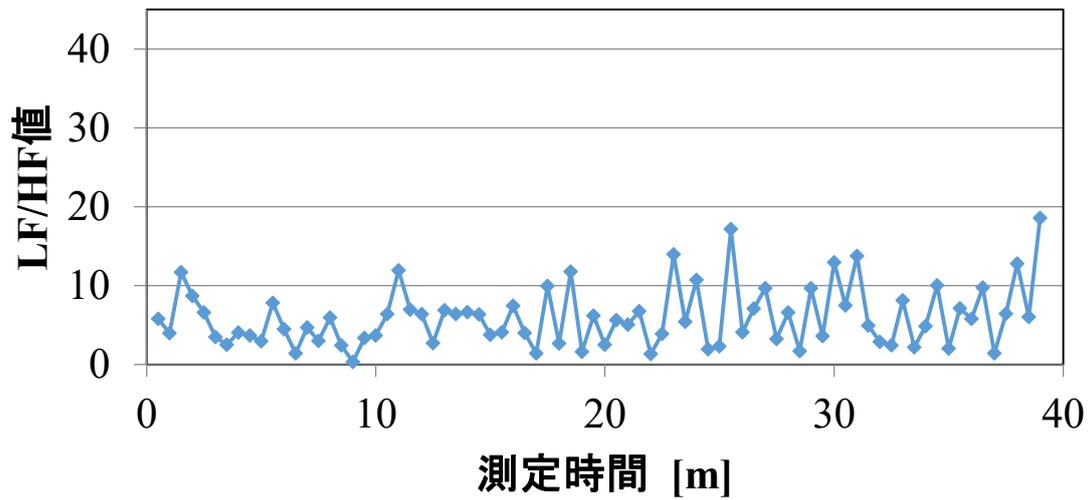


(c) 実験協力者 H

図 A.20 LF/HF 値の結果 (3 回目)

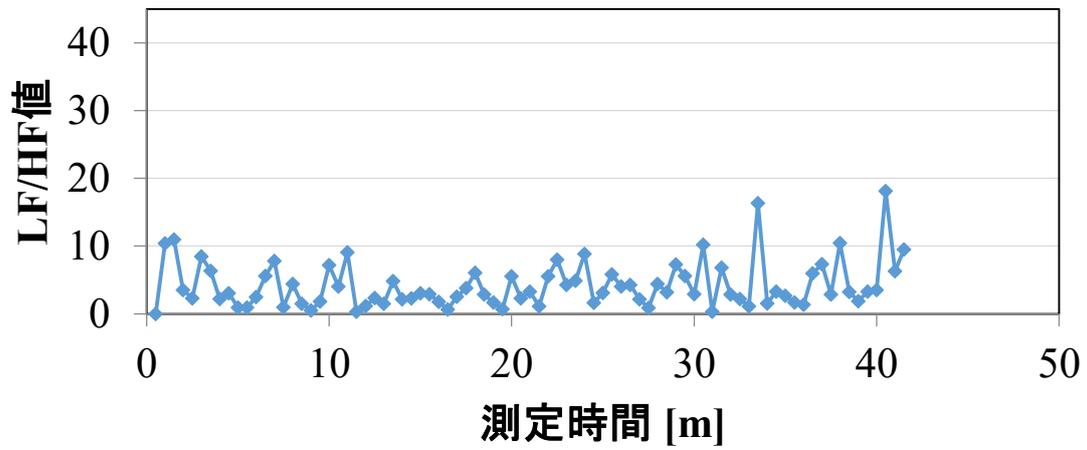


(a) 実験協力者 B

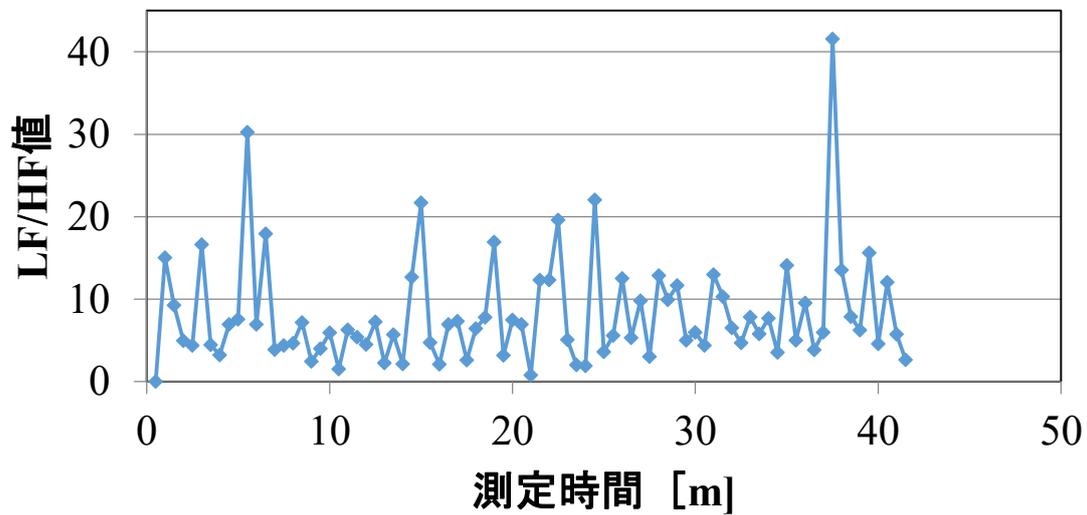


(b) 実験協力者 A

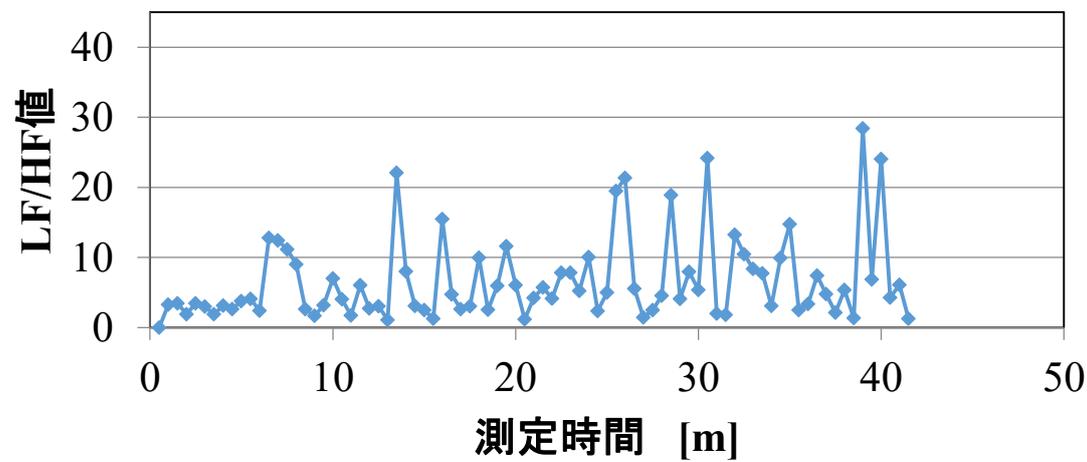
図 A.21 LF/HF 値の結果 (4回目)



(a) 実験協力者 D

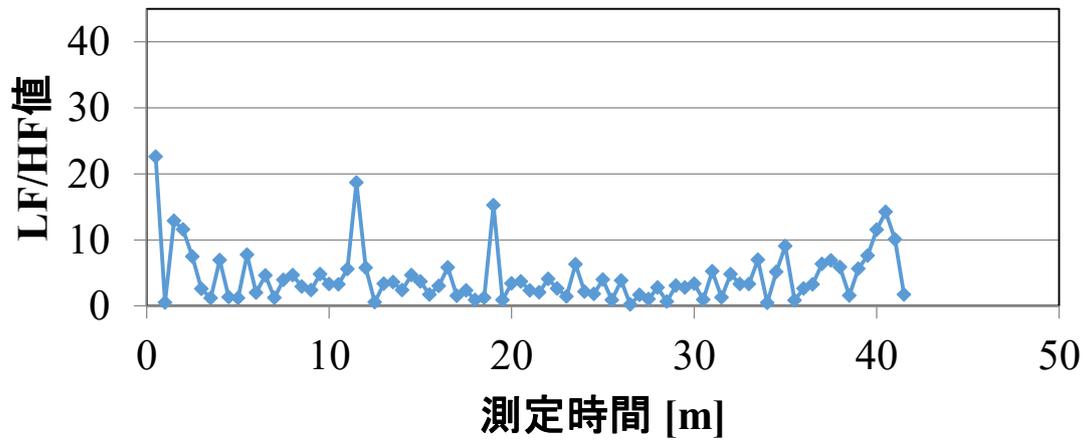


(a) 実験協力者 F

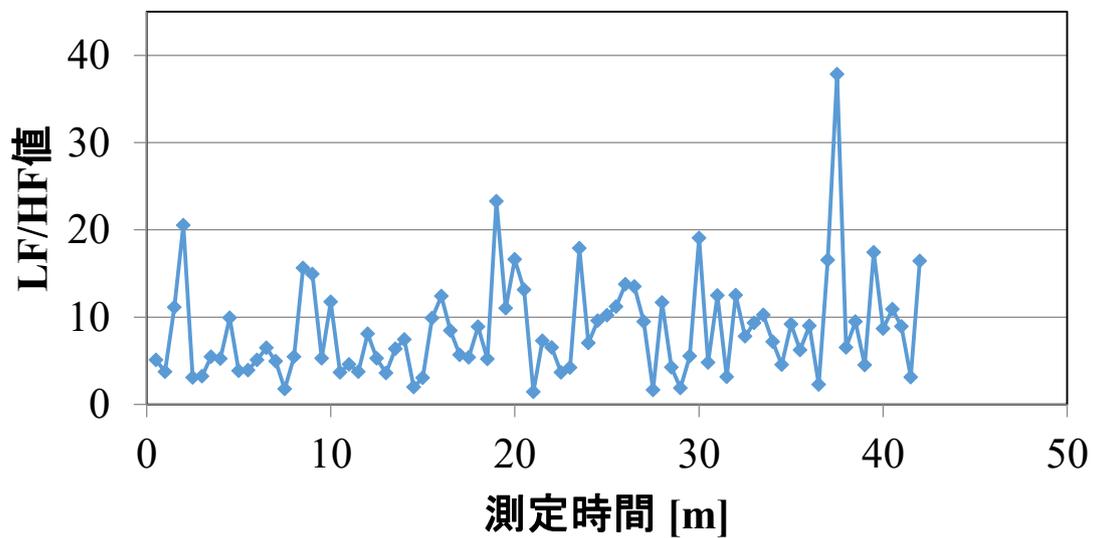


(a) 実験協力者 G

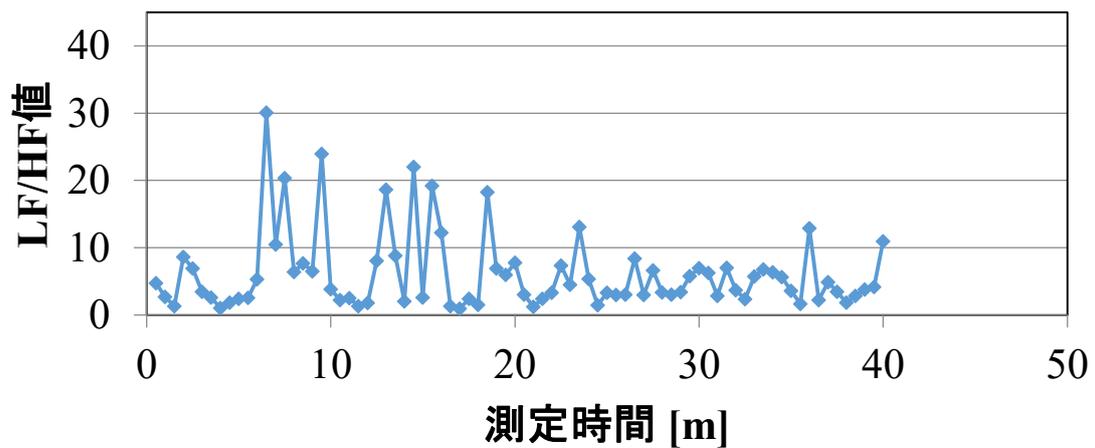
図 A.22 LF/HF 値の結果 (5 回目)



(a) 実験協力者 D

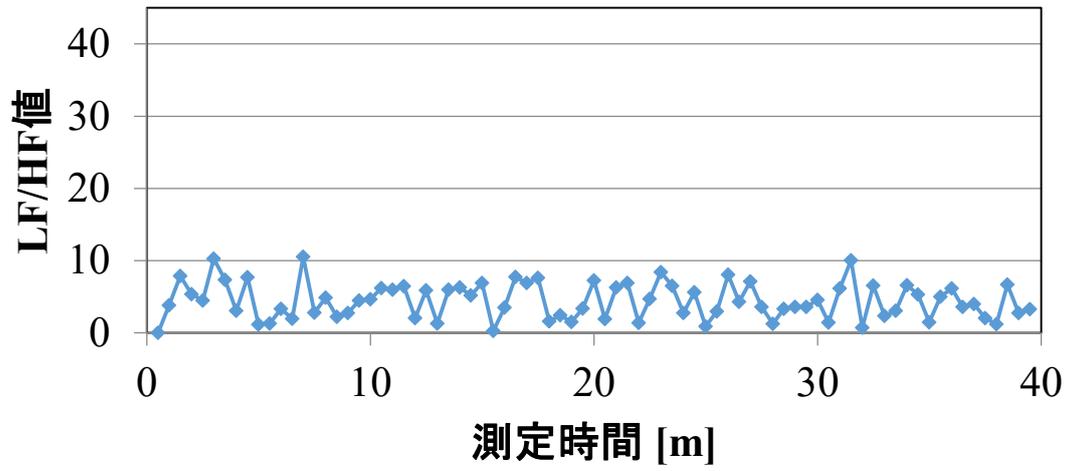


(b) 実験協力者 F

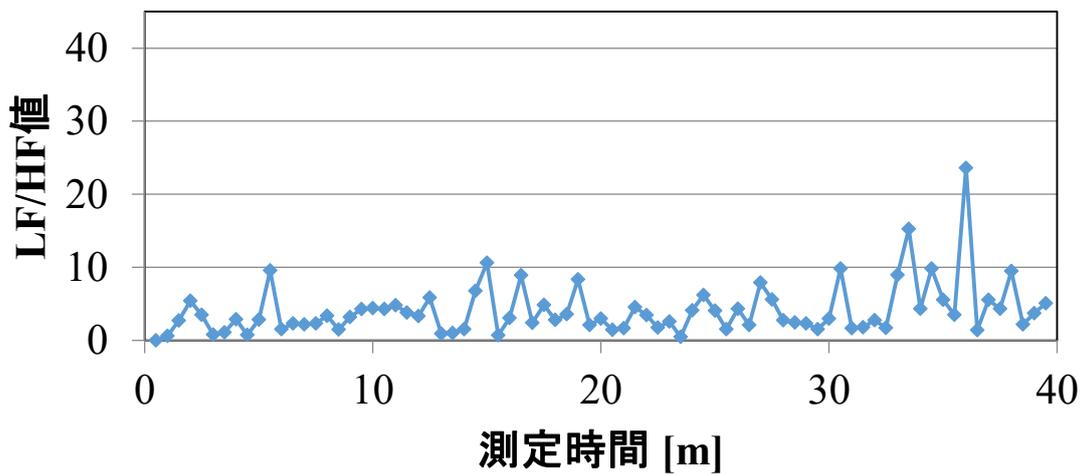


(c) 実験協力者 G

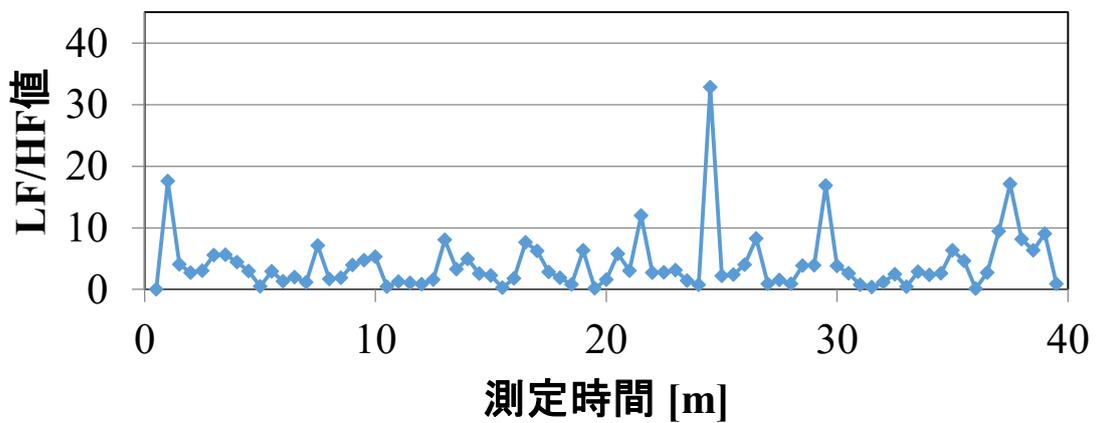
図 A.23 LF/HF 値の結果 (6回目)



(a) 実験協力者 A

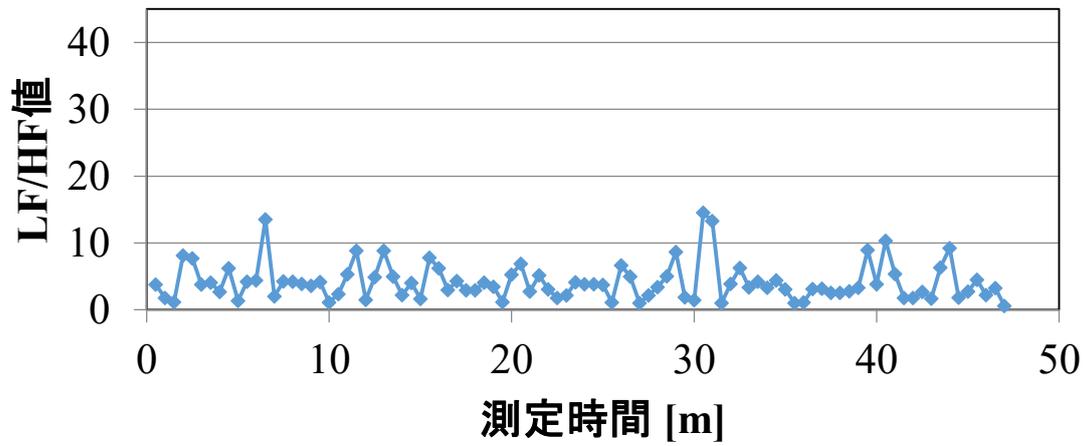


(b) 実験協力者 B

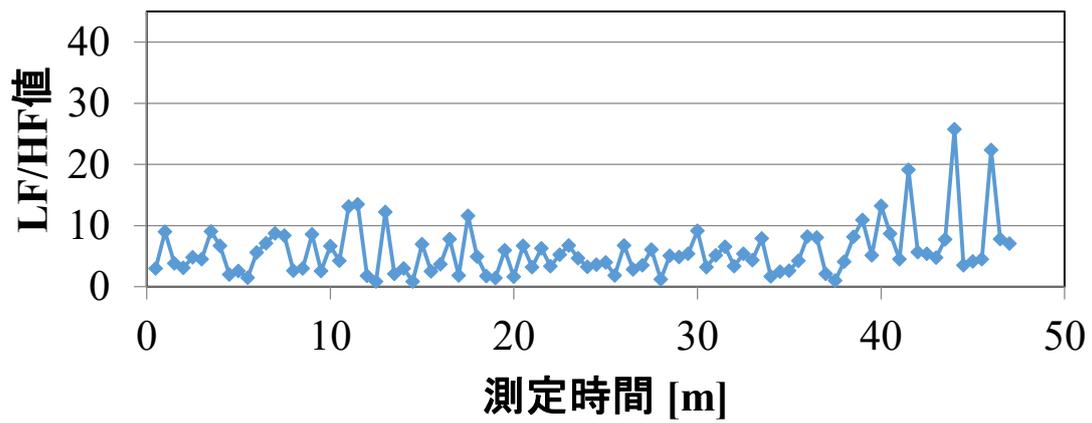


(c) 実験協力者 I

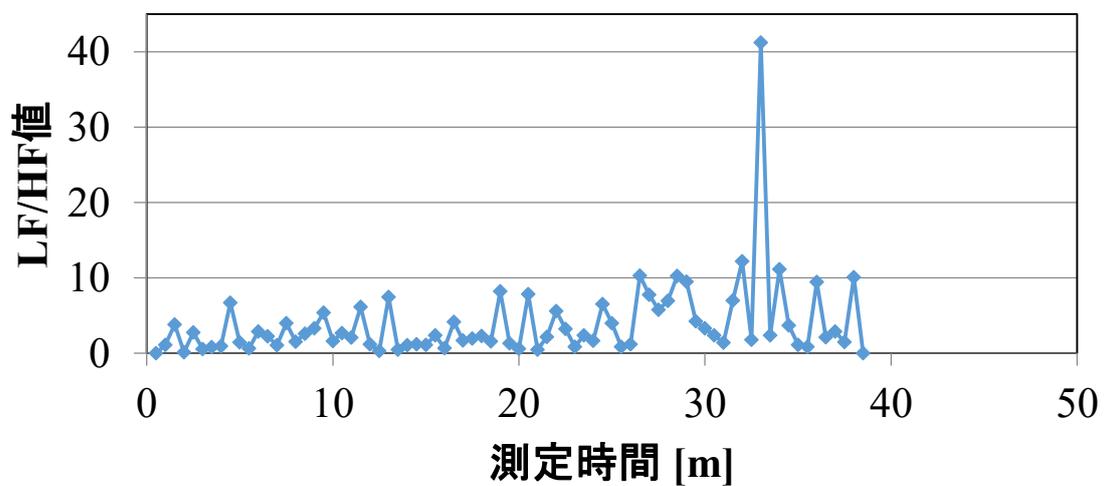
図 A.24 LF/HF 値の結果 (7回目)



(a) 実験協力者 B

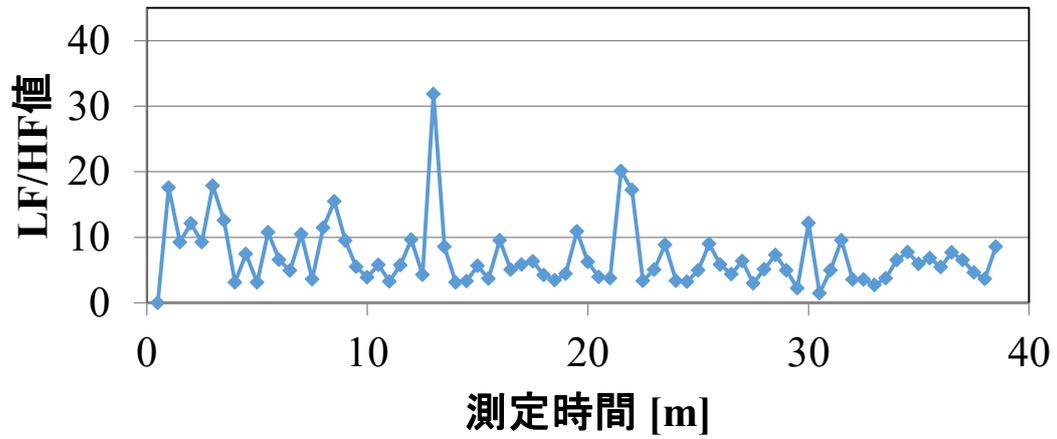


(b) 実験協力者 A

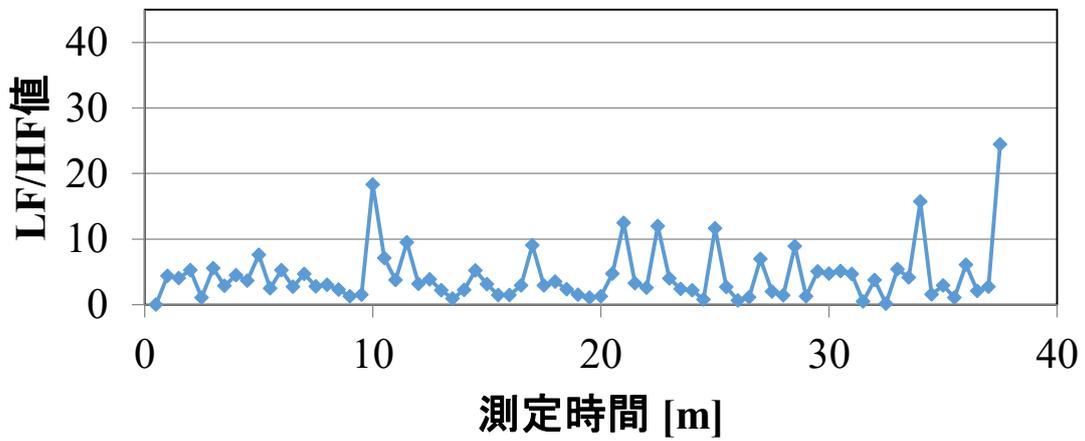


(c) 実験協力者 H

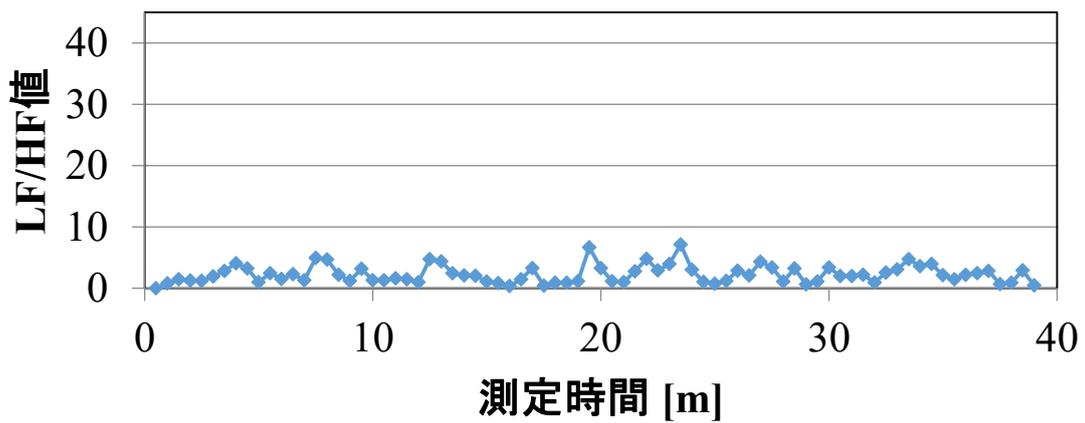
図 A.25 LF/HF 値の結果 (8回目)



(a) 実験協力者 A



(b) 実験協力者 B



(c) 実験協力者 G

図 A.26 LF/HF 値の結果 (10 回目)