

博士論文

小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的・代謝的影響の
計測に関する研究

Measurement of Physical and Metabolic Influence of Ship Motion
on Standing Passengers in a Small Marine Craft

2016年 3月

土井根 礼音

要約

船舶動揺が乗船者に及ぼす影響の代表的なものには、船酔いや疲労があげられる。海上の波の影響を受けやすい小型船舶ほど、その傾向は強い。また近年、小型船舶の事故が増加している。船舶事故の原因の79%は、人為的要因によるもので、その原因の一つとしては疲労があげられる。船酔いや疲労は、乗船者にとって不快な症状であると共に、判断力や作業効率の低下をもたらす原因の一つである。乗船者の船酔いや疲労の改善が求められる一方で、その発生メカニズムの詳細は明らかとなっていない。船酔いや疲労に関する先行研究の多くは、船酔いや疲労の自覚症状を主観的なアンケートにより調査しているが、立位姿勢で作業することの多い小型船舶の乗船者の姿勢維持の動作という視点からアプローチした研究はほとんどない。乗船者の姿勢維持の動作や運動の計測を行っている先行研究はあるが、姿勢維持の動作に重要な頭部と腰部の動揺の計測および評価手法は確立されておらず、また乗船者のエネルギー消費量を支配する動揺は同定されていない。

本論文では、小型船舶の床、および乗船者の腰部、頭部の加速度・角加速度を物理的影響として捉え、また乗船者の呼気から測られるエネルギー消費量を代謝的影響として捉え、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的・代謝的影響の計測および解析を行うことを目的としている。

本論文の構成を以下に示す。

第1章 本研究の生体医工学的な背景と、目的を記述した。

第2章 小型船舶の定義、航走、および小型船舶の動揺について記述した。

第3章 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響に関する調査結果について記述した。

第4章 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響に関する調査結果について記述した。

第5章 小型船舶動揺が乗船者に与える影響の総合的な解析の結果について記述した。

第6章 本研究に関する総括的結論を記述した。

付録 計測装置および実験データの詳細について記述した。

本論文は、主要な点および実験データを本論に記述し、計測装置の仕様および、実験データの詳細については、付録に記述した。

本研究では、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的・代謝的影響の計測および解析を行うために、以下の3点について検討を行った。従来の乗船者の姿勢維持の動作に関する研究では、小型船舶動揺に対する乗船者の腰部、頭部の動揺の計測および評価手法は確立されていなかった。本研究では、座標変換および実効値を使用した小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の動揺の計測解析手法の提案を行ったことにより、小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の動揺の比較検討、および乗船者のエネルギー消費量を支配する動揺の同定を可能とした。

- (1) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響の計測および解析 (第3章)
- (2) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響の計測および解析 (第4章)
- (3) 小型船舶動揺が乗船者に与える影響の総合的な解析 (第5章)

(1) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響は、小型船舶の床および乗船者の腰部、頭部の動揺を加速度・角加速度として計測することで解析した。動揺の大きさは、加速度・角加速度の実効値により評価した。本章では、任意の基準となる座標系上で加速度・角加速度の評価を行う座標変換および実効値による小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の動揺の計測解析手法の提案を行うことにより、小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の動揺の比較検討を可能とした。座標変換の際に基準とする座標系は、地球表面の接平面に定義される固定座標系、又は小型船舶の床の座標系とした。関節の有無による比較検討を行うために、乗船者の立位姿勢動揺と関節のない棒の立位姿勢動揺を比較した。計測実験の結果、固定座標系および小型船舶の床の座標系のどちらを基準としても、小型船舶に対する姿勢維持の動作により、乗船者の腰部に、並進運動として上下揺 (Heave)、回転運動として縦揺 (Pitch) が、特に生じることがわかった (第3章)。

(2) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響は、乗船者のエネルギー消費量と陸上での踏み台昇降運動時のエネルギー消費量を比較することで解析した。小型船

船内では、乗船者に座位または立位姿勢をとらせた。陸上の研究室内では、30回/分、40回/分、50回/分の踏み台昇降運動を実験協力者に実施した。本論文における踏み台昇降運動は、マスターの2階段負荷試験ではない独自の方法で実施した。計測実験の結果、小型船舶の上下揺（Heave）の実効値が 1.0m/s^2 以上の大きさとなった場合における立位姿勢時の乗船者のエネルギー消費量は、30回/分の踏み台昇降運動に相当することがわかった（第4章）。

（3）小型船舶動揺が乗船者に与える影響の総合的な解析は、エネルギー消費量を目的変数とする重回帰分析を行い、エネルギー消費量を支配する動揺および乗船者の身体的特徴を同定することにより行った。重回帰分析の説明変数には、乗船者の身体的特徴を表す体表面積（デュポア式、藤本式、新谷式）および、固定座標系を基準とした場合の加速度・角加速度の実効値、小型船舶の床の座標系を基準とした場合の加速度・角加速度の実効値を使用した。重回帰分析の結果、乗船者のエネルギー消費量を支配する身体的特徴および動揺は、体表面積と腰部の縦揺（Pitch）であることがわかった（第5章）。

以上（1）～（3）の結果から得られた本研究の結論を以下に示す。

1. 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響

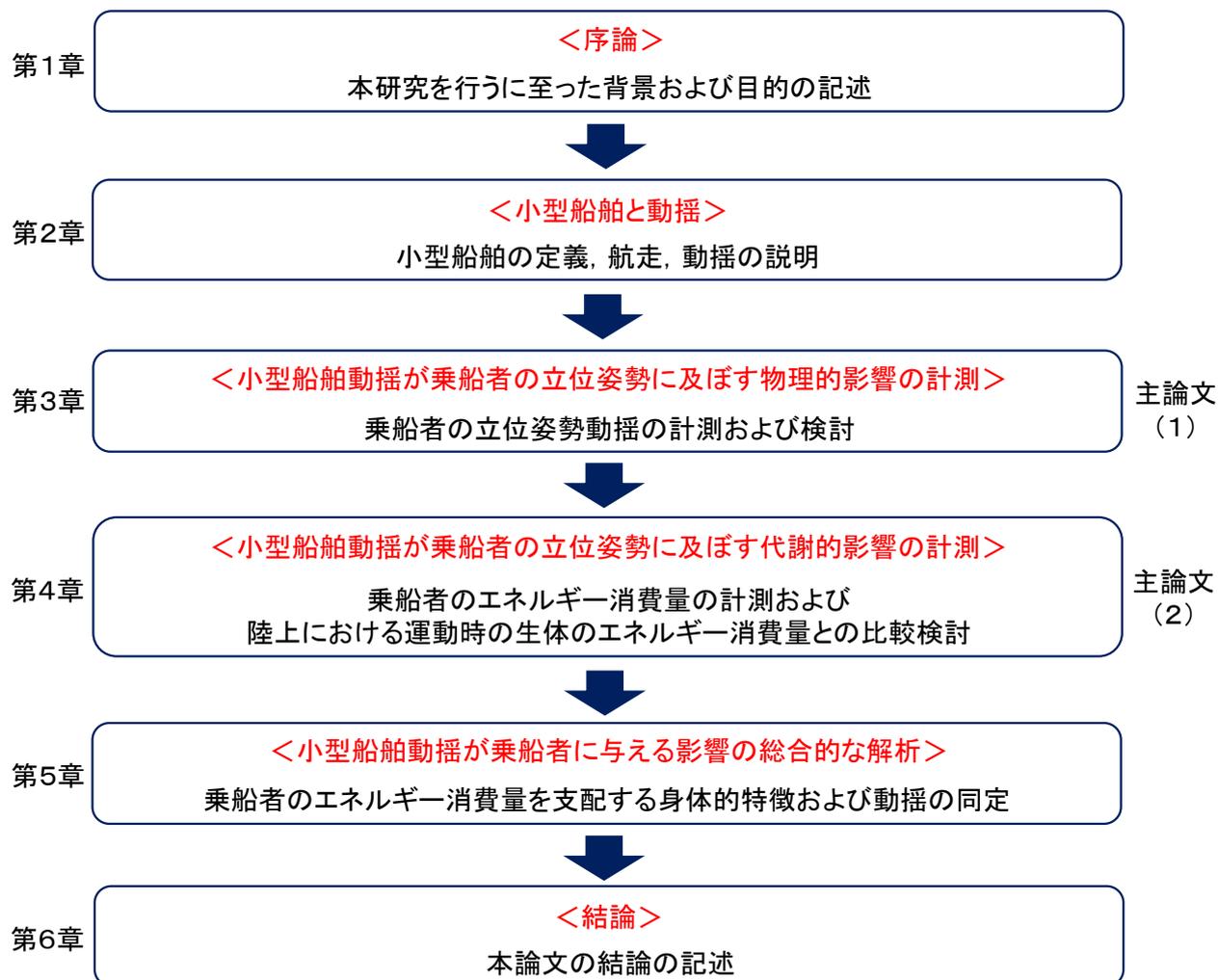
小型船舶動揺に対する姿勢維持の動作により、乗船者の腰部に上下揺（Heave）と縦揺（Pitch）が特に生じることがわかった

2. 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響

（1）小型船舶の上下揺（Heave）の実効値が 1.0m/s^2 以上の場合には、立位姿勢時の乗船者のエネルギー消費量は30回/分の踏み台昇降運動のエネルギー消費量に相当することがわかった

（2）乗船者のエネルギー消費量を支配するパラメータは、体表面積と腰部の縦揺（Pitch）であることがわかった

論文の構成



主論文

- (1) 土井根礼音, 坂牧孝規, 瀬田広明, 伊藤政光, 本間章彦, 福井康裕: 船舶動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺の解析, ライフサポート, Vol.27(2), pp.45-53, 2015.
- (2) Renon Doine, Takanori Sakamaki, Hiroaki Seta, Masamitsu Ito, Akihiko Homma and Yasuhiro Fukui: The Exercise Load of Passengers' Postural Control Against Ship Motion Using Human Energy Expenditure, Advanced Biomedical Engineering, Vol. 4, pp.164-169, 2015.

Abstract

The motion of a ship at sea can cause substantial stress for passengers and crews. In particular, the motion sickness and physical fatigue will be a significant problem in the small marine craft that receives influence of a sea wave. In recent years, the number of ship accidents has increased. Ship accidents of 79% are due to human error, and physical fatigue is known to be a cause of such error. In fact, the motion sickness and physical fatigue can decrease the work efficiency and ability of judgment of the crew. Although possible mechanisms of the motion sickness and physical fatigue aren't obvious. The motion sickness and physical fatigue have been investigated by means of questionnaires on the ship. However, the study that focused on the posture maintenance of the passengers and crews haven't been reported. In addition, the measurement and evaluation methods for the motion of the head and hip required for the posture maintenance haven't been established. Furthermore, the motions that influence the energy expenditure of passengers and crews haven't been identified too.

The purpose of this study is to investigate the physical and metabolic influence of the small marine craft motion on standing passengers and crews. The physical influence was analyzed by means of linear and angular accelerations measured at the head and hip of the passenger, and at the floor of the small marine craft. The metabolic influence was analyzed by means of the energy expenditure calculated from the expired air of the passenger.

This thesis consists of six chapters. The main findings and experimental data are described in the main text, and the details concerning the experimental data and the specifications of the measurement apparatus are described in the appendix.

Chapter 1:

Describes the background and the purpose of the study.

Chapter 2:

Explains small marine crafts and ship motion.

Chapter 3:

Explains the physical influence of ship motion on standing passengers on the small marine craft.

Chapter 4:

Explains the metabolic influence of ship motion on standing passengers on the small marine craft.

Chapter 5:

Explains the overall influence of ship motion on standing passengers on the small marine craft.

Chapter 6:

Summarizes the study and describes conclusions.

Appendix:

Provides details of the measurement apparatus and the experimental data.

In this study, the following three points were performed to investigate the physical and metabolic influence of ship motion on standing passengers in a small marine craft.

- (1) Measurement and analysis of the physical influence of ship motion on standing passengers in the marine craft (chapter 3)
- (2) Measurement and analysis of the metabolic influence of ship motion on standing passengers in the marine craft (chapter 4)
- (3) Overall analysis of the influence of ship motion on standing passengers in the marine craft (chapter 5)

(1) The physical influence of the ship motion on standing passengers was analyzed by linear and angular accelerations measured at the head and hip of passengers, and at the floor of the small marine craft. The value of these acceleration was transformed to the reference frame and the amplitude of these acceleration was evaluated by means of root mean square (RMS). The linear and angular accelerations of passengers were compared with those of a vertical standing rod to characterize the motions involved in posture maintenance. It was found that the heave and pitch motions were mainly generated at the hip of passengers. These motions were involved in posture maintenance against ship motion (chapter 3).

(2) The metabolic influence of ship motion on standing passengers in the small marine craft was analyzed by comparing the energy expenditure of passengers with that of participants during a step test in a laboratory. The original protocol of the step test was used in this study instead of the Master's two-step test. The energy expenditure for the sitting or standing posture of participants on the small marine craft and that for the sitting posture, standing posture or stepping exercise of 30, 40 and 50 steps/min in the laboratory were evaluated. It was found that the energy expenditure while maintaining the standing posture when the RMS of heave motion was 1.0 and more in the small marine craft was equal to that during the stepping exercise of 30 steps/min (chapter 4).

(3) The multiple regression analysis was used to investigate the influence of ship motion on standing passengers in the small marine craft. Specifically, the motions and body characteristics that most strongly influenced the energy expenditure of passengers were identified. Independent variables were body surface area (BSA) calculated by DuBois's formula, Fujimoto's formula, and Shintani's formula, the RMS of the linear and angular accelerations with respect to the fixed coordinate system on the earth's surface, and the RMS with respect to the floor of the marine craft. As a result of multiple regression analysis, the motion and body characteristics that most strongly influenced the energy expenditure of passengers were pitch motion at the hip and BSA, respectively (chapter 5).

As a result of our investigation, the following conclusions were derived.

1. The physical influence of ship motion on standing passengers in the small marine craft

The standing postural motions of passengers mainly comprised heave and pitch motions at the hip. These motions were important for posture maintenance against ship motion.

2. The metabolic influence of ship motion on standing passengers in the small marine craft

(1) The energy expenditure while maintaining the standing posture when the RMS of heave motion was 1.0 and more in the small marine craft was similar to that during the stepping exercise of 30 steps/min.

(2) The type of motion and body characteristic that most greatly influenced the energy expenditure of passengers was pitch motion at the hip and BSA, respectively.

要旨	・・・1
目次	・・・9
用語表記と用語解説	・・・13
第1章 序論	・・・15
1.1 医学的な背景	・・・16
1.1.1 船舶動揺の乗船者への影響	・・・16
1.1.2 運動とエネルギー消費量	・・・18
1.2 工学的な背景	・・・20
1.2.1 船舶動揺計測	・・・20
1.2.2 姿勢動揺計測	・・・22
1.2.3 運動計測	・・・23
1.3 研究の目的	・・・24
第2章 小型船舶と動揺	・・・26
2.1 小型船舶	・・・27
2.2 小型船舶動揺	・・・30
第3章 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響の計測	・・・32
3.1 実験	・・・33
3.1.1 実験方法	・・・33
3.1.2 陸上における計測実験	・・・35
3.1.3 小型船舶における計測実験	・・・38
3.2 解析方法	・・・42
3.2.1 動揺計測システム	・・・42

3. 2. 2	基準とする座標系への座標変換の方法	・・・45
3. 2. 3	立位姿勢動揺の解析方法	・・・52
3. 2. 4	立位姿勢動揺の周波数解析	・・・54
3. 3	陸上における立位姿勢動揺	・・・56
3. 3. 1	結果	・・・56
3. 3. 2	考察	・・・61
3. 4	小型船舶における立位姿勢動揺	・・・62
3. 4. 1	結果	・・・62
3. 4. 2	考察	・・・81
3. 5	まとめ	・・・82
第4章 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響の計測		・・・83
4. 1	実験	・・・84
4. 1. 1	実験方法	・・・84
4. 1. 2	陸上における計測実験	・・・86
4. 1. 3	小型船舶における計測実験	・・・91
4. 2	解析方法	・・・93
4. 2. 1	エネルギー消費量計測システム	・・・93
4. 2. 2	代謝的影響の解析方法	・・・96
4. 3	陸上における立位姿勢動揺のエネルギー消費量	・・・97
4. 3. 1	結果	・・・97
4. 3. 2	考察	・・・100
4. 4	小型船舶における立位姿勢動揺のエネルギー消費量	・・・101
4. 4. 1	結果	・・・101
4. 4. 2	考察	・・・108
4. 5	まとめ	・・・109

第5章 小型船舶動揺が乗船者に与える影響の総合的な解析	・・・110
5.1 実験方法	・・・111
5.2 解析方法	・・・112
5.2.1 実験データの評価指標	・・・112
5.2.2 重回帰分析	・・・113
5.3 結果	・・・117
5.4 考察	・・・125
5.5 まとめ	・・・128
第6章 結論	・・・129
謝辞	・・・132
参考文献	・・・133
付録	
1. 計測装置の仕様	・・・140
1.1 3軸方位角センサ	・・・140
1.2 エネルギー代謝計	・・・141
2. 小型船舶動揺と自動車の動揺の比較	・・・142
2.1 概要	・・・142
2.2 方法	・・・143
2.3 動揺の大きさ	・・・145
2.4 動揺の周波数	・・・147

3. 座標変換	・・・149
3. 1 加速度・角加速度のベクトル表現	・・・149
3. 2 座標変換のための回転行列の導出	・・・150
3. 3 座標変換処理プログラムの検証	・・・152
4. 実験データ	・・・156
4. 1 加速度・角加速度の実効値	・・・156
4. 2 エネルギー消費量	・・・225
4. 3 標準偏回帰係数	・・・236

用語表記と用語解説

小型船舶

小型船舶とは，総トン数が 20t 未満の船舶を表す．船舶とは，水上航行のために使用する工作物である．

乗船者

船舶に搭乗する船舶職員および乗客を表す．

姿勢

立位姿勢とは，まっすぐに立った姿勢を表す．座位姿勢とは，座った姿勢を表す．

動揺

本研究では，船舶の床，乗船者の身体の動きを示す．これらの動きは，並進運動としての前後揺 (Surge)，左右揺 (Sway)，上下揺 (Heave)，回転運動としての横揺 (Roll)，縦揺 (Pitch)，船首揺 (Yaw) によって構成される．本研究では，並進運動および回転運動を定量的に評価するパラメータとして加速度・角加速度を計測した．本研究では，小型船舶の床の動揺を小型船舶動揺，生体の腰部と頭部，棒の中間（生体の腰部相当）と先端（生体の頭部相当）の動揺を立位姿勢動揺と定義した．

物理的・代謝的影響

物理的影響：本研究では，小型船舶の床，乗船者の腰部，頭部において計測された加速度・角加速度を物理的影響として評価する．

代謝的影響：本研究では，乗船者の呼気から計測されるエネルギー消費量を代謝的影響として評価する．

姿勢維持

小型船舶動揺などの外乱に対し、生体が身体のバランスを維持しようとすることを表す。姿勢維持は、頭部の内耳からの平衡感覚、眼からの視覚、筋肉などの体性感覚からの情報を中枢神経系に集め、脳が身体の筋肉を動かすことにより行われる。

固定座標系

x軸を船首方向、y軸を船舶の右側（右舷）、z軸を地球の中心の方向とする座標系を表す。本研究では、異なる座標系上で計測された小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の加速度・角加速度を1つの基準とする座標系で評価を行うために、固定座標系を定義した。

座標変換

ある座標系で記述された物理現象を、別の座標系で記述するための変換を表す。本研究では、①小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の座標系で記述された加速度・角加速度から固定座標系で記述された加速度・角加速度への変換、および②乗船者の腰部、頭部の座標系で記述された加速度・角加速度から小型船舶の床の座標系で記述された加速度・角加速度への変換を座標変換と表現する。

航走

船舶が、水面上を走ることを表す。

第1章 序論

本研究では、乗船者の立位姿勢動揺およびエネルギー消費量の計測解析手法を考案し、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的・代謝的影響の計測および解析を行うことを目的とする。

本章では、「医学的な背景」において、船舶動揺が生体に与える影響、および対象とする立位姿勢の特徴、エネルギー代謝について述べる。「工学的な背景」では、船舶における立位姿勢動揺およびエネルギー消費量の計測方法の現状とその問題点について述べる。次に、「研究の目的」では、研究の目的、研究の流れと投稿論文との関係を述べる。

1. 1 医学的な背景

1. 1. 1 船舶動揺の乗船者への影響

(1) 船酔い

小型船舶は、離島間の交通手段やマリンレジャーの普及などにより、一般的な交通手段となってきた。一方、船舶動揺が生体に及ぼす影響の代表的なものに船酔い（動揺病）があげられ、海上の波の影響を受けやすい小型船舶ほどその傾向は強い。

船酔いの症状の多くは、自律神経系の失調状態により生じると報告されている。船酔いは、乗船者にとって不快な症状であり、船舶内で業務を行う船舶職員にとっては、判断力や作業効率の低下をもたらすため、適切な対応策が求められている。

(2) 乗り物酔い発生メカニズム

乗り物酔い発生のメカニズムには、①内耳異常刺激説と②感覚混乱説がある。以下のそれぞれの諸説を示す¹⁾。

①内耳異常刺激説

内耳異常刺激説とは、乗り物の動揺によって身体に加速度刺激が生じ、内耳を異常に刺激して自律神経系の働きに異常をきたした結果、乗り物酔いが発症すると考える説である。

人間の内耳には、身体の傾きや運動を感じるための前庭と半規管がある。前庭は加速度（並進運動）の検知を行い、半規管は角加速度（回転運動）の検知を行う。前庭器官への加速度刺激が強すぎると、その働きに破綻をきたし、身体の平衡が保てないだけでなく、めまいを引き起こす。しかし、この説では、ワイドスクリーンや船舶、航空機などのシミュレータの映像によっておこるシネラマ酔い（映像酔い）を説明することができないという問題点がある。

②感覚混乱説

内耳異常刺激説では説明できなかったシネラマ酔いを含めて、現在最も乗り物酔いを説明できると報告されているのが感覚混乱説である。人間は、身体の傾きや運動を前庭器官からの平衡感覚だけでなく、眼からの視覚、筋肉に加わった力からの体性感覚から知覚し、その情報をもとに身体各部位の筋肉を動かすことで身体の平衡を保っている。動揺の発生

しない陸上では、人間は、歩く、走るなどの日常生活の中で遭遇する感覚情報のパターンを中枢神経系に記憶している。しかし船舶に乗るなどの日常ではあまり体験しない新しい感覚情報のパターンがもたらされると、新しい感覚情報のパターンと中枢神経系に記憶された感覚情報のパターンが異なるため、中枢神経系は自分の位置や運動が把握できず、感覚の混乱が生じる。その際、中枢神経系が新しい感覚情報に適応することができなかった場合、自律神経系を刺激し、乗り物酔いが発症するという説が感覚混乱説である。

(2) 疲労

船舶事故の原因の90%は人的要因によるものとされている²⁾。疲労は、ヒューマンエラー（見張り不十分）の原因の1つとして考えられており³⁾、船舶職員の疲労への適切な対応策が求められている。平成26年度に海上保安庁が行った船舶事故件数の調査によると、船舶種類別では、プレジャーボート932隻(43%)、漁船596隻(28%)、貨物船276隻(13%)の順に多く、プレジャーボート、漁船及び遊漁船の小型船舶による事故が、船舶事故全体の約7割を占めている⁴⁾。

1. 1. 2 運動とエネルギー消費量

(1) 身体の運動

身体の運動は、骨を介して筋肉が収縮することで行われる。生体は、食物から体内に取り入れた栄養素を呼吸によって得られた酸素で燃やすことにより、筋肉を収縮させるエネルギーを生成する。エネルギー代謝とは、身体のエネルギーの入出力を表す。エネルギー消費量とは、運動や生命活動のための筋肉の収縮により、身体全体で消費された総エネルギー量を表す。エネルギー消費量の内訳は図 1-1 のように表される⁵⁾。基礎代謝量とは、心臓の拍動や呼吸などの生命を維持するための最小限のエネルギー量を表す。安静時代謝量とは、運動や作業をしていない安静にしたときのエネルギー量を表す。エネルギー需要量とは、運動や食事などに必要とされるエネルギー量である。

(2) 筋肉の種類

筋肉内で生成されるエネルギーは、ATP（アデノシン三リン酸）により作り出される。生体の筋肉を大別すると、骨格筋、心筋、平滑筋の 3 種類となる⁶⁾。骨格筋とは、骨と骨の間に張られ、手足などを動かす役割をする。骨格筋には、遅筋と速筋がある。遅筋は、赤筋ともよばれ、脂肪の酸化によってゆっくりと大量のエネルギーを出す。速筋は、白筋ともよばれ、ATP を生成しやすいクレアチンやグリコーゲンの含有量が多く、急激な筋収縮が可能である。

運動に使用する筋肉や遅筋、速筋の割合は乗船者ごとに異なる。小型船舶動揺に対する乗船者の運動を計測する場合は、乗船者の運動を身体全体のエネルギー消費量として計測および解析することが有効である。

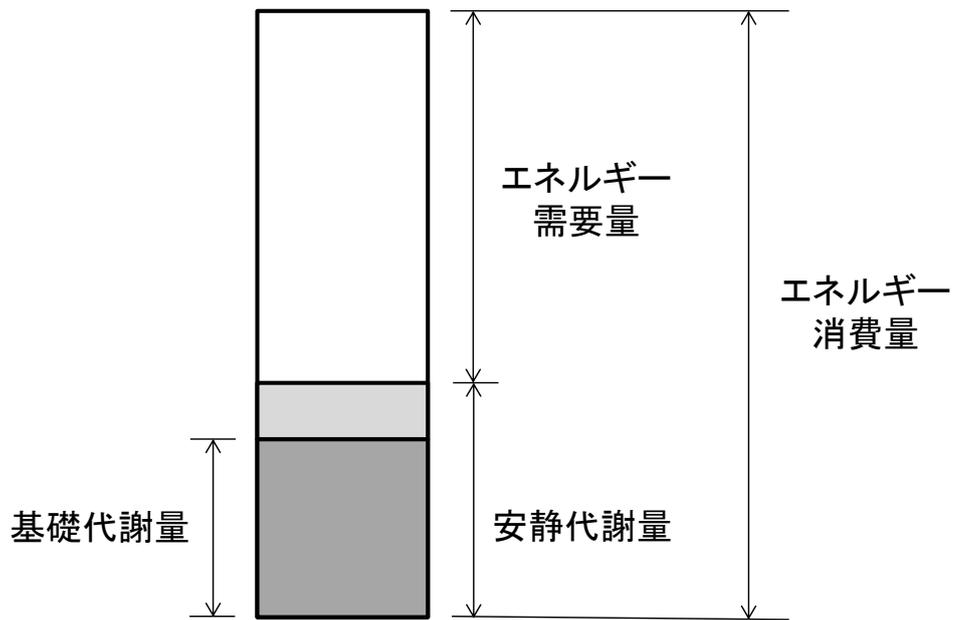


図 1-1 エネルギー消費量の内訳

1. 2 工学的な背景

1. 2. 1 船舶動揺計測

(1) 船酔いと疲労

船酔いの研究の多くは、船舶の上下揺に着目し、船舶動揺の計測、または動揺装置を用いて、動揺と生体の酔いとの関係を導くことを試みている⁷⁻¹⁹⁾。船舶動揺の大きさや周波数、船舶動揺に曝される時間が、生体に与える影響を、嘔吐率として算出することで評価を行う研究も行われている。Bob Cheung らは、0.1~0.5Hz の上下揺、0.025Hz~0.4Hz の横揺 (roll 方向の動揺) が乗船者に船酔いを引き起こしやすい船舶動揺であると報告している²⁰⁾。McCauley らは、500 名以上の実験協力者に対し動揺装置を用いて、周波数が 0.083~ 0.700 Hz、振幅が $0.27 \text{ m/s}^2 \sim 5.5 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$ の上下揺 (Heave) を発生させた際の嘔吐率 (MSI: Motion Sickness Incidence) を調査し、0.167 Hz の上下揺 (Heave) を発生させた際の嘔吐率が最も高くなることを発見した¹⁰⁾。嘔吐率は、平衡覚の受容器である前庭器や半規管、視覚、体性感覚のモデルから推定する手法も研究されている²¹⁻²³⁾。

乗船者の船酔いと疲労に関する先行研究では、木村らが、船舶動揺の計測および船酔いと疲労に関する主観的なアンケート調査により、船舶の前後揺 (Surge)、左右揺 (Sway)、上下揺 (Heave) が船酔いと疲労に影響を及ぼすと報告している²⁴⁾。

乗り物酔い発症のメカニズムについては、船舶のみならず、自動車や電車についても研究が行われている²⁵⁻²⁷⁾。その一方で、乗り物の動揺と、それに伴っておこる身体の生理的・心理的变化、また定性的にしか表現されない酔いの症状との関係は、定量化されていない。また、船酔いや疲労に関する先行研究の多くは、船舶動揺の中でも並進運動、特に上下揺 (Heave) に主眼をおいている研究が多く、船舶の回転運動も含め評価が行われている研究は少ない。また、船舶動揺に主眼をおいているため、船舶動揺に対する乗船者の姿勢維持の動作やその生体反応が考慮されていないという問題がある。

(2) 乗り心地の評価

造船分野では、国際標準規格が、客船における乗船者の居住性に関する評価、報告、計測のためのガイドライン ISO6954 が発表されている²⁸⁾。また船舶の乗り心地については、

船舶動揺の計測を行い、乗船者が不快に感じる限界の検討が行われている²⁹⁻³²⁾。乗船者の居住性に関するガイドラインは、船舶の甲板上の2箇所以上の船舶動揺を計測し、計測された船舶動揺の大きさをもとに、船舶の居住性評価を行っている。一方、これは船舶の長さが100m以上の客船および商船を対象としたガイドラインである旧ISO6954を改良したものであり、小型船舶での評価はなされていない。また乗り心地の評価指標には、船舶の床の並進運動が使用されているが、船舶特有の回転運動は考慮されていない。さらに、立位姿勢で作業することの多い小型船舶の乗船者の船舶動揺に対する姿勢維持の動作および生体反応は考慮されていない。

1. 2. 2 姿勢動揺計測

(1) 陸上における姿勢動揺計測

陸上における姿勢動揺計測に関する研究では、生体の姿勢維持モデルの開発および仮想的な動揺環境における生体の姿勢動揺計測、視覚刺激を与えた際の姿勢動揺計測が行われている³³⁻³⁷⁾。生体の姿勢維持モデルの開発分野では、前後、左右、上下方向の外乱を想定した場合の頭部や下肢のモデルの開発およびシステム同定などが行われている³⁸⁻⁴⁷⁾。またモーションキャプチャにより、前進の生体モデルを作成し、外乱に対する生体の姿勢維持の動作分析なども行われている⁴⁸⁾。Sébastienらは、映像による仮想的な動揺環境における重心位置の動揺、胸部や頭部の変位と速度の計測から、生体は姿勢動揺が大きいほど船酔いを発症する傾向にあることを示した⁴⁹⁾。これらの先行研究は、床の並進運動に対する姿勢動揺を計測した研究であり、船舶特有の床の回転運動に対する姿勢維持の動作の解明には至っていない。

(2) 船舶における姿勢動揺計測

実際の船上における生体の立位姿勢動揺の計測に関する先行研究では、朝長らや今枝らが、生体の前後、左右方向の重心の移動距離、速度、加速度を計測し、生体は左右方向の姿勢維持が容易であり、船舶動揺と生体の重心動揺には相関がみられることを明らかにした⁵⁰⁻⁵²⁾。また、木村らは、漁船において船舶動揺に対しバランスを崩すことにより発生する船員の海中転落事故を重視し、船舶動揺と重心位置の加速度を計測し、船舶動揺を入力、重心位置の加速度を出力とした際の生体の応答特性を求めることにより、生体のバランス維持能力を判定する線形判別関数を求めている^{53,54)}。これらの先行研究の多くは、乗船者の重心動揺により姿勢動揺の計測を試みているが、乗船者の姿勢維持の動作に重要な股関節位置である腰部、また頭部の計測を行う研究は少なく、計測および評価手法も確立されていない。また乗船者の姿勢動揺は、並進運動として計測されることがほとんどであり、船舶特有の回転運動は考慮されていない。

1. 2. 3 運動計測

陸上における運動計測には、生体の身体の加速度、エネルギー消費量、酸素摂取量、心拍数を計測しているものが多い⁵⁵⁾。特に酸素摂取量と心拍数は、運動強度に応じて増加する傾向にあるため運動強度の指標として計測されることが多く、酸素摂取量と心拍数の間には高い相関があることが知られている^{56,57)}。

乗船者の運動計測に関する先行研究では、Wertheim らは、船舶の動揺装置を用いて、動揺装置で縦揺 (Pitch) と横揺 (Roll) を発生させた際に、乗船者のエネルギー消費量と心拍数が増加することを報告した^{58,59)}。加えて、Breidahl らは、簡易型のエネルギー代謝計を用いて生体のエネルギー消費量を 2 隻の船舶で計測し、船舶の縦揺 (Pitch) と横傾斜 (Heeling) が、実験協力者のエネルギー消費量に影響を与えることを発見した⁶⁰⁾。日高らは、大型の母船と小型の漁船で船員のエネルギー消費量を 1 日 1 回計測し、大型の母船よりも小型の漁船における船員のエネルギー消費量が高いことを報告している⁶¹⁾。これらの先行研究では、床の動揺と乗船者のエネルギー消費量の計測を行うことで、生体のエネルギー消費量を支配する床の動揺の解明を試みているが、未だ解明には至っていない。また、立位姿勢で作業することの多い乗船者の姿勢維持の動作とエネルギー消費量の関係は未だ定量的に解明されていない。

1. 3 研究の目的

本研究の目的は、乗船者の立位姿勢動揺およびエネルギー消費量を計測し、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的・代謝的影響を計測および解析することである。本研究では、以下の項目について検討を行った。

- (1) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響
- (2) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響
- (3) 小型船舶動揺が乗船者に与える影響

以下に上記項目の概要を示す。

(1) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響 (第3章)

小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響は、小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部における加速度・角加速度を計測することで検討する。本研究では、小型船舶動揺および立位姿勢動揺の大きさを実効値として定量化する解析手法を考案することにより解析した。小型船舶動揺および乗船者の腰部、頭部における加速度・角加速度は、それぞれ独立した座標系上で計測されるため、本研究では、新たに固定座標系を定義し、座標変換による座標系の統一を行うことで小型船舶動揺と乗船者の立位姿勢動揺の比較を可能とした。座標変換において基準とする座標系は、固定座標系および小型船舶の床の座標系とし、乗船者の立位姿勢動揺の比較を行った。乗船者の立位姿勢動揺の特徴を解明するために、乗船者と関節のない棒の立位姿勢動揺を比較した。

(2) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響 (第4章)

小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響は、呼気から計測されるエネルギー消費量を計測することにより評価することを目的としている。小型船舶動揺および乗船者の立位姿勢動揺と、乗船者のエネルギー消費量を同時に計測するエネルギー消費量計測システムを開発することにより解析された。陸上では、実験協力者に踏み台昇降運動を実施し、立位姿勢時の乗船者のエネルギー消費量と踏み台昇降運動時のエネルギー消費量の比較を行った。エネルギー消費量の比較は、個人差を排除するために、運動時のエネルギ

一消費量の平均値を安静時のエネルギー消費量の平均値の最小値で除したエネルギー消費量の比を算出することにより行った.

(3) 小型船舶動揺が乗船者に与える影響 (第5章)

小型船舶動揺が乗船者に与える影響の解析は, エネルギー消費量を目的変数とする重回帰分析により, 乗船者のエネルギー消費量を支配する動揺および身体的特徴を同定することを目的としている.

第2章 小型船舶と動揺

本章では，小型船舶の定義，小型船舶の航走，および小型船舶の動揺について述べる．

2. 1 小型船舶

小型船舶とは、日本の法律では、総トン数 20t 未満の船舶で、漁船法第 2 条 1 項に定める漁船、櫓船（主として櫓により運転する舟を含む）を除いた船舶を示す。小型船舶の種類を図 2-1 に示す。小型船舶には、モーターボートやヨット、水上オートバイ、小型漁船、遊漁船がある。モーターボートは、エンジンの推進方式により船外機船、船外内機船、船内機船に大別される。船外機船は、エンジンと推進器、プロペラが一体となった船外機を船尾板に取り付けた船舶である⁶²⁾。船外内機船は、エンジンは船内に取り付け、プロペラのついた推進器を船外に取り付けた船舶である⁶²⁾。また船内機船は、エンジンは船内に取り付け、プロペラシャフトによって船底外のプロペラを回転させる船舶である⁶²⁾。

小型船舶の航走状態は、排水型、滑走型、半滑走型に分類される。排水型とは、船体が水を押しつけて航走する船舶である。滑走型とは、巡航から高速走行中に、わずかな節水面を残して水面を滑走する船舶である。半滑走型とは、排水型と滑走型の中間的な航走をし、微速から中速では排水型、中速から高速では、滑走型には至らないが、船体がやや持ち上がった状態で航走する船舶である、

本研究で使用した小型船舶の外観および仕様を図 2-2、表 2-1 に示す。小型船舶は、鳥羽商船高等専門学校が所有する実習船「あさま」を使用した。実習船「あさま」の推進方式は、船内機船であり、走航状態は半滑走型となる。

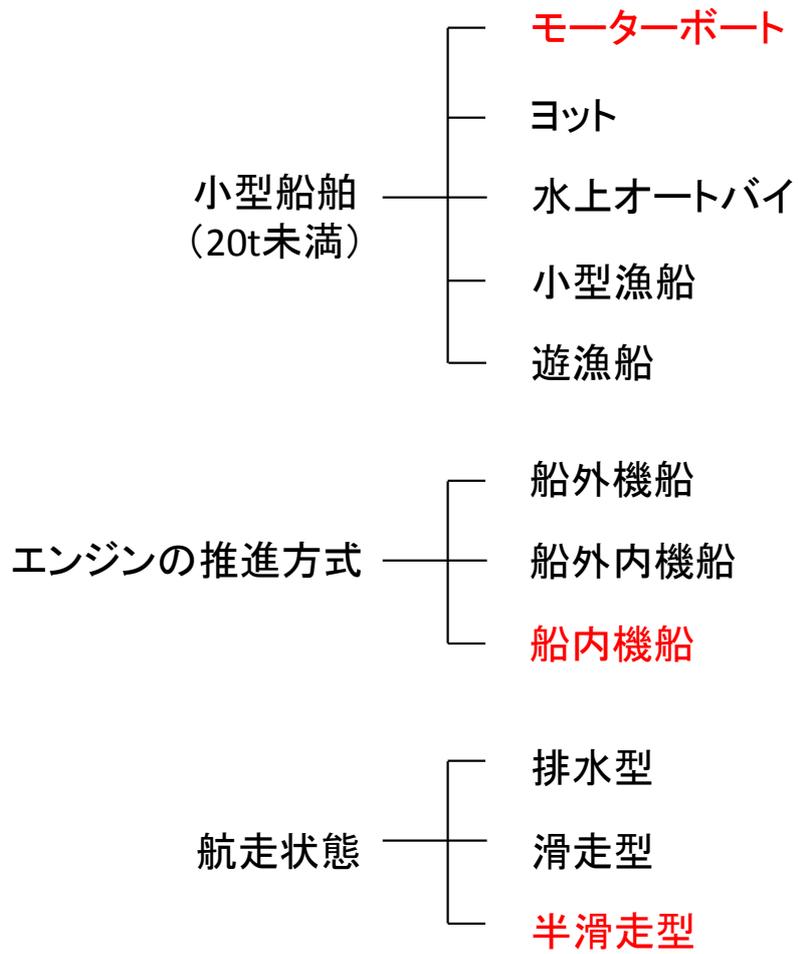


図 2-1 小型船舶の種類



図 2-2 小型船舶の外観

表 2-1 小型船舶の仕様

項目	仕様
船名	あさま
船種	汽船
推進方式	船内機船
航走状態	半滑走型
総トン数	14 [t]
全長	14.50 [m]
幅	4.15 [m]
深さ	2.34 [m]
最大速度	28 [knot] (51.86 [km/h])
定員	23 [名]

2. 2 小型船舶動揺

物体に作用する力は、大きさ、方向、作用点の3つの要素を考える必要がある。剛体に作用する力は、6自由度であり、直交する3次元ベクトルに並行する並進運動と、各ベクトルの回転方向の回転運動から構成される⁶³⁾。

船舶動揺には、図2-3で示す形で、並進運動として前後揺 (Surge)、左右揺 (Sway)、上下揺 (Heave)、回転運動として横揺 (Roll)、縦揺 (Pitch)、船首揺 (Yaw) という名前がある⁶⁴⁾。小型船舶動揺とは、小型船舶の船舶動揺と定義する。本研究では、並進運動である前後揺 (Surge)、左右揺 (Sway)、上下揺 (Heave) を加速度、回転運動である横揺 (Roll)、縦揺 (Pitch)、船首揺 (Yaw) を角加速度として評価した。

前述の通り、対象とした小型船舶の航走は、半滑走型であるため、滑走水面の凹凸上を走行することになる。このため、小型船舶の動揺は、上下揺 (Heave) が、他の動揺に比べて多いことがわかる。小型船舶動揺の詳細は、「第3章 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響の計測」に示す。また、参考実験として行った乗用車の動揺計測の実験結果については、「付録2 小型船舶動揺と自動車の動揺の比較」に示す。

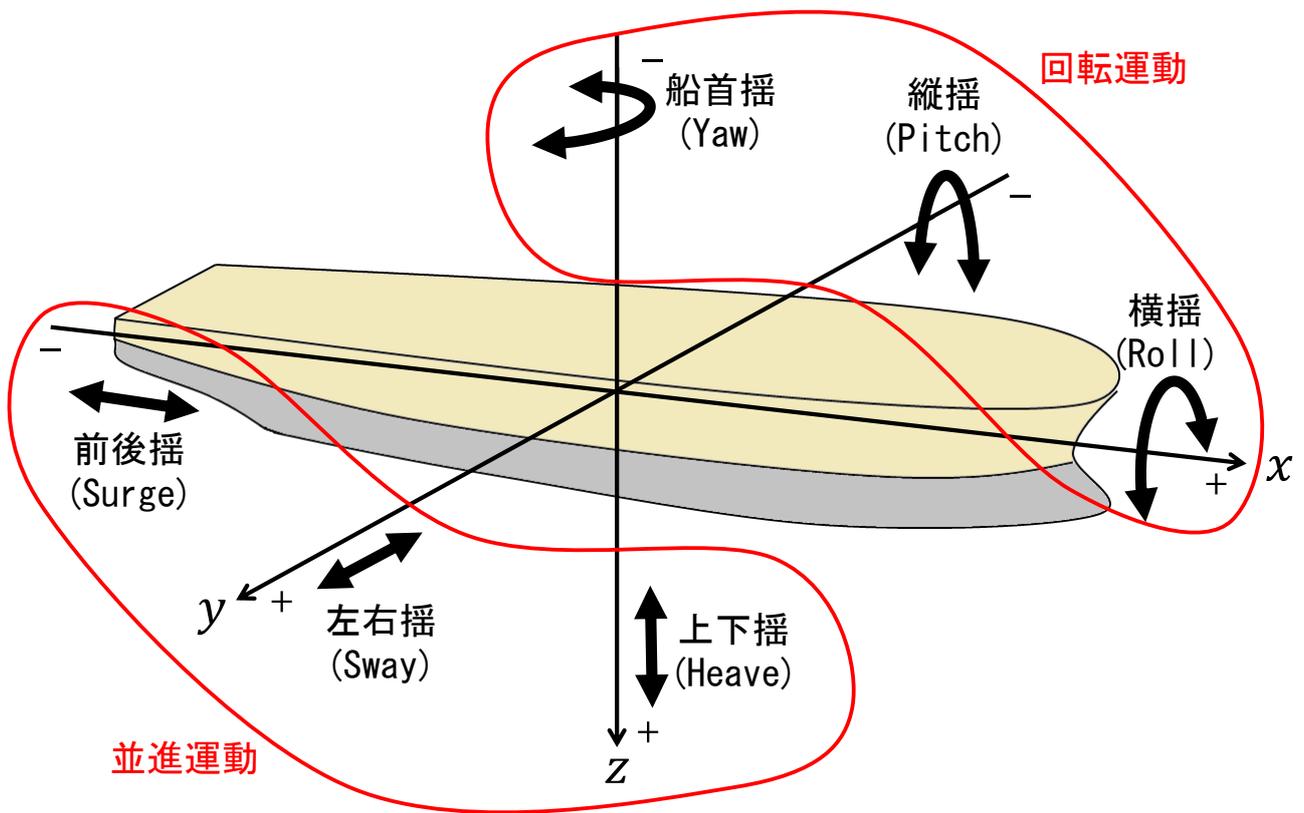


図 2-3 船舶動揺 (A Guide to Ship Handling⁶⁵⁾ より改変)

第3章 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響の計測

本章では、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響の計測・解析手法、および得られた知見について述べる。

本章では、先ず、陸上および小型船舶において実施した計測実験の方法、次に小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響の計測・解析手法である「動揺計測システム」、
「基準とする座標系への座標変換」、「立位姿勢動揺の解析方法」について述べる。最後に実験により得られた知見について述べる。

3. 1 実験

3. 1. 1 実験方法

小型船舶動揺の乗船者の立位姿勢への物理的影響の解明を目的とした実験方法を図 3-1 に示す。本章では、小型船舶動揺の乗船者の立位姿勢への物理的影響の解明を目的とし、小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の動揺を計測した。動揺は、加速度・角加速度の物理量として計測した。小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部に設置した 3 軸方位角センサの設置位置は、小型船舶および乗船者の動作によって変化するため、3 箇所計測された加速度・角加速度データの座標系の統一を行った。座標系の統一は、小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の座標系を、固定座標系および小型船舶の床の座標系へと座標変換することにより行った。

計測実験は、陸上および小型船舶上で実施した。3 軸方位角センサおよび立位姿勢動揺の特性を解析するために、陸上での静止立位時の生体の立位姿勢動揺の計測を行った。小型船舶上では、乗船者の立位姿勢動揺の特性を解明するために、関節のない棒に乗船者と同位置に 3 軸方位角センサを設置し、乗船者の立位姿勢動揺と棒の立位姿勢動揺の比較を行った。加速度・角加速度には、3 軸方位角センサのノイズ除去、および立位姿勢動揺の算出のため、ローパスフィルタを適用した。加速度・角加速度の大きさは、実効値として算出した。

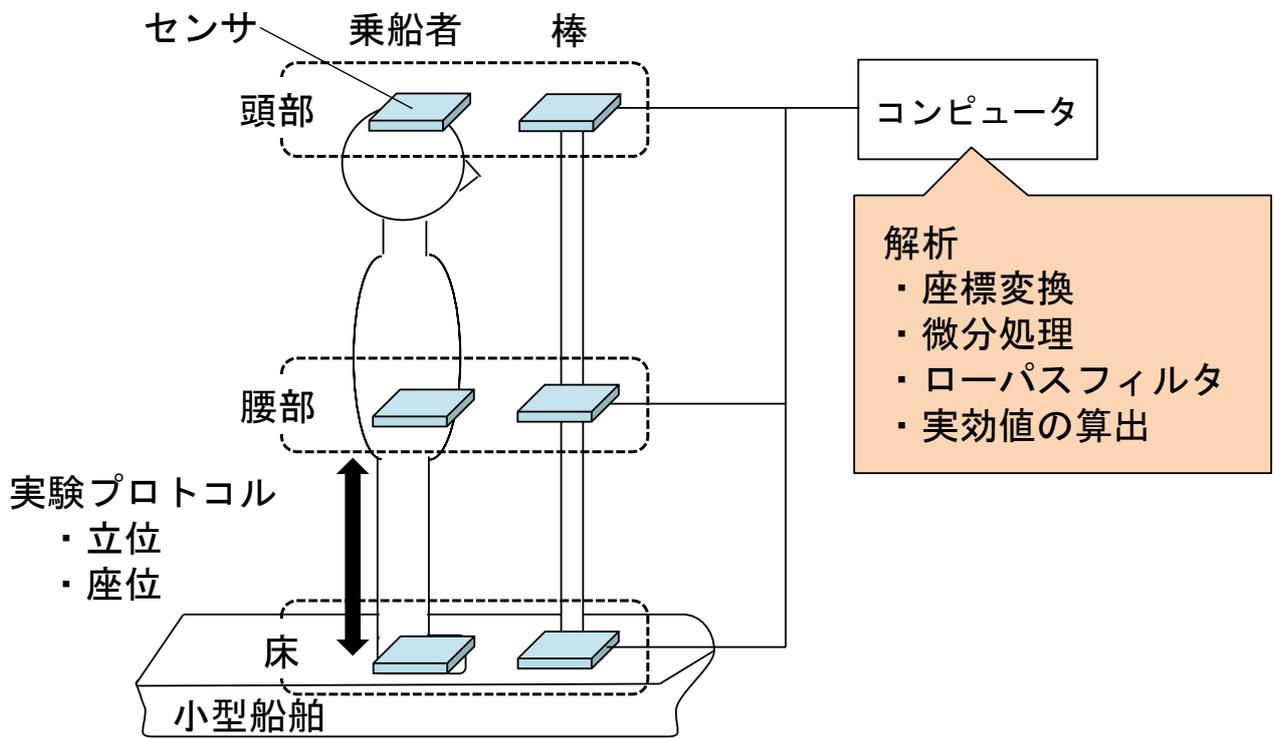


図 3-1 実験方法

3. 1. 2 陸上における計測実験

本研究では、生体の立位姿勢動揺の周波数帯域を調査するために、陸上の建屋内において、延べ7名の実験協力者の腰部、頭部の加速度・角加速度を計測した。陸上における実験プロトコルおよび実験風景を図3-2、図3-3に示す。実験は、座位15分間、立位15分間、座位15分間、立位15分間の流れで実施した。実験データの解析範囲は、立位開始5分後～立位開始15分後までとした。実験協力者には、常に前方を向き、立位姿勢の際には、重心移動を除き、可能な限りその場で静止するように指示した。表3-1に今回の実験に使用したデータの実験協力者を示す。

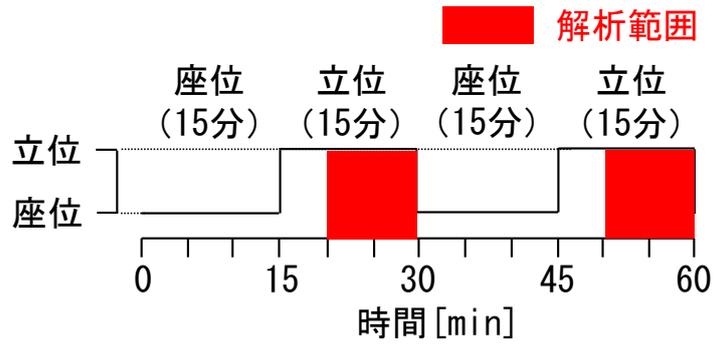


図 3-2 陸上における実験プロトコル

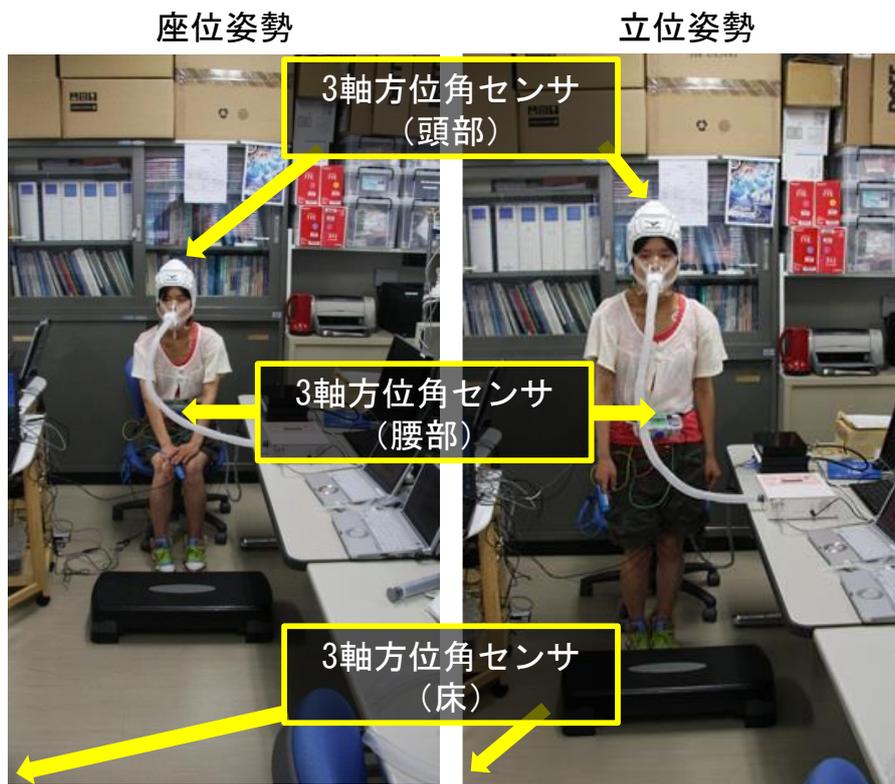


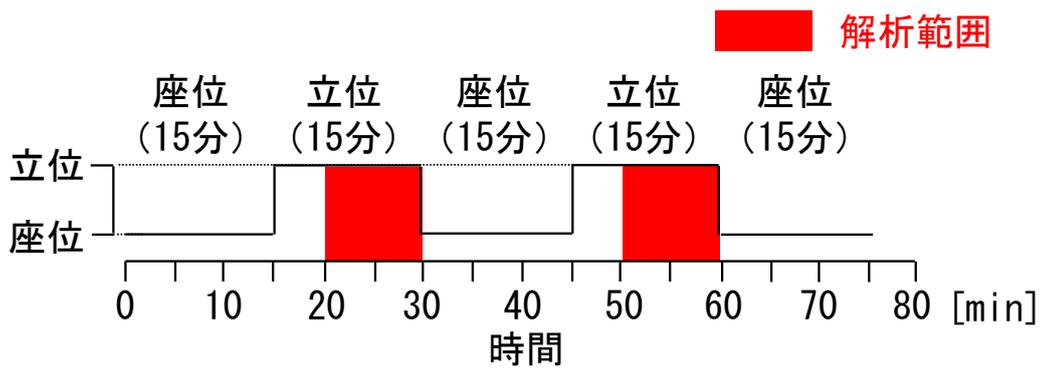
図 3-3 陸上における実験風景

表 3-1 実験協力者一覧

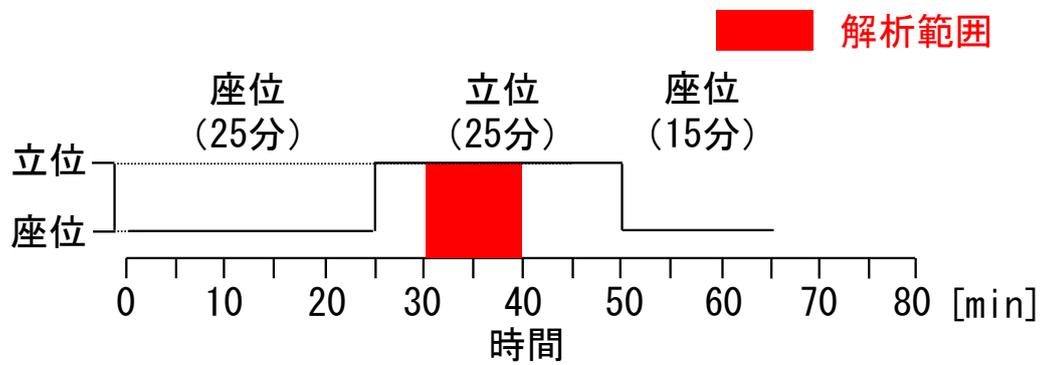
No.	実験日	実験協力者			
		性別	年齢[歳]	身長[cm]	体重[kg]
1	2013/6/26	男性	18	169	53
2	2013/6/27	女性	18	156	56
3	2013/6/29	女性	19	156	54
4	2013/6/29	男性	20	175	95
5	2013/6/30	女性	25	150	48
6	2013/6/30	男性	51	175	75
7	2013/7/1	男性	51	175	75

3. 1. 3 小型船舶における計測実験

計測実験は、第2章の表2-1に示した鳥羽商船高等専門学校が所有する実習船「あさま」(総トン数14t, 定員23名)の船舶内で実施した。小型船舶における実験プロトコルおよび実験風景を図3-4, 図3-5に示す。実験は、プロトコルA(座位15分間, 立位15分間, 座位15分間, 立位15分間, 座位15分間)とプロトコルB(座位25分間, 立位25分間, 座位15分間)の流れで実施した。実験データの解析範囲は、立位開始5分後～立位開始15分後までとした。実験時の小型船舶の速度は、30～37 km/hで可能な限り一定とし、急な変針は行わないようにした。また視覚情報を排除するために、実験協力者の立位姿勢動揺は、小型船舶動揺の予測を可能とする船外の風景が見えない場所で計測した。実験協力者には、開眼状態で、船首方向である船内の壁を正面とするように指示した。座位姿勢の際は、実験協力者を船舶内に固定されたクッション性のある椅子に座らせた。本研究では、関節の有無による比較検討を行うために、小型船舶の床に実験協力者の身長相当である高さ1.6mの棒を垂直に立て、実験協力者の加速度・角加速度と比較を行った。3軸方位角センサは、棒の高さ0.9m(乗船者の腰部に相当)と1.6m(乗船者の頭部に相当)の位置に設置した。表3-2に今回の実験で対象とした実験協力者および実験プロトコル一覧を示す。また表3-3に棒の実験条件を示す。



(a) 実験プロトコル A



(b) 実験プロトコル B

図 3-4 小型船舶における実験プロトコル



図 3-5 小型船舶における実験風景

表 3-2 実験協力者および実験プロトコル一覧

No.	実験日	実験協力者				実験 プロトコル	備考
		性別	年齢 [歳]	身長 [cm]	体重 [kg]		
1	2011/7/27	女性	19	149	39	A	35分後に中止
2	2011/7/27	男性	19	170	75	A	
3	2011/7/28	女性	18	149	53	A	
4	2011/7/28	女性	23	150	48	A	
5	2011/7/29	女性	18	162	57	A	
6	2011/7/29	男性	49	175	75	A	
7	2011/8/22	女性	18	153	41	A	
8	2011/8/22	男性	19	168	53	A	
9	2011/8/23	女性	18	151	45	A	
10	2011/8/23	女性	18	153	48	A	
11	2011/8/24	女性	23	150	48	A	
12	2011/8/24	男性	49	175	75	A	
13	2012/8/30	女性	19	156	54	B	
14	2012/8/31	男性	23	173	69	B	
15	2012/8/31	男性	23	169	75	B	
16	2012/9/3	男性	20	175	95	B	
17	2012/9/5	女性	18	156	56	B	
18	2012/9/5	男性	18	169	53	B	
19	2012/9/12	女性	24	150	48	B	
20	2012/9/12	男性	49	175	75	B	

表 3-3 棒の実験条件

No.	実験日	高さ [cm]	センサの位置 [cm]	
			先端	中間
1	2012/9/12	160	160	90

3. 2 解析方法

3. 2. 1 動揺計測システム

動揺計測システムを図 3-6 に示す。同システムは、船舶の床、乗船者の腰部、頭部に設置した3台の3軸方位角センサから構成される。3軸方位角センサから出力されるデータは、RS232C で接続されたコンピュータで記録した。実験時には、3台のコンピュータ間の時間の同期をとり、各3軸方位角センサの計測開始時刻を基に計測データの同期をとった。3軸方位角センサのサンプリングインターバルは、0.01sとした。図3-7に3軸方位角センサ、表3-4に3軸方位角センサの仕様を示す。3軸方位角センサの座標系は、センサの前方を x 軸、センサの鉛直下方を z 軸、 x 軸と z 軸に直交しセンサの右側を向く軸を y 軸とする座標系である。3軸方位角センサには、加速度センサ、ジャイロセンサ、磁力センサが内蔵され、3軸方向の加速度、および3軸まわりの角速度、3軸まわりの角度を出力する。3軸まわりの角度は、地球表面に定義されたNED (North-East-Down) 座標系を基準とした際の3軸方位角センサの傾きおよび方位を表す。3軸方位角センサの加速度、角速度、角度、方位は、3軸方位角センサの傾きに応じて出力される。3軸方位角センサの内部の詳細な構成については、本論文の付録1.1に示す。

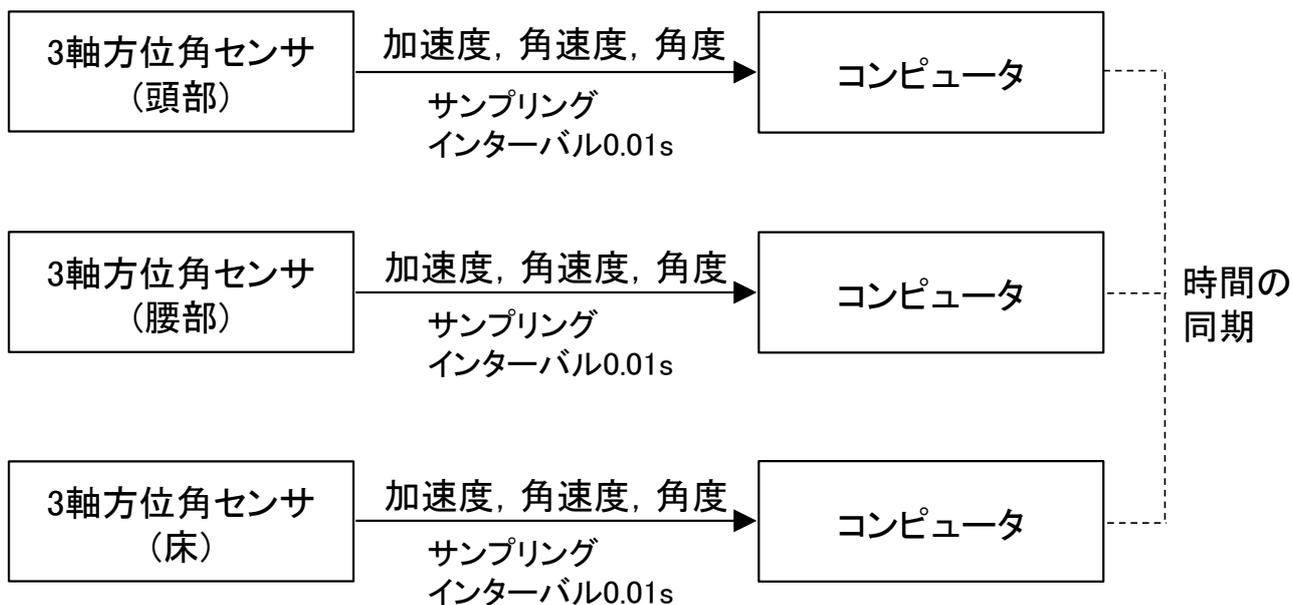


図 3-6 動揺計測システム

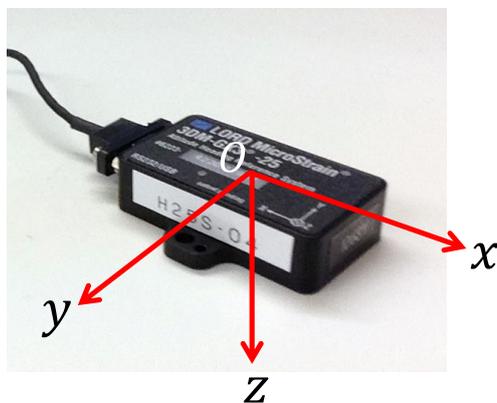


図 3-7 3 軸方位角センサ

表 3-4 3 軸方位角センサの仕様⁶⁶⁾

項目	仕様
製品名	3DM-GX3-25
サンプリング周期	0.01 [s]
センサの出力	加速度(加速度センサ) 角速度(ジャイロセンサ) 角度, 方位(地磁気センサ)
加速度測定範囲	±5 [G]
角速度測定範囲	±300 [deg/s]
角度測定範囲	360 [deg]
角度の精度	±0.5 [deg] (静的精度) ±2.0 [deg] (動的精度)
外寸	44 × 25 × 11 [mm]
重量	11.5 [g]
インターフェース	RS232C

3. 2. 2 基準とする座標系への座標変換の方法

(1) 座標系の定義

図 3-8 に座標系の定義を示す. 3 軸方位角センサの座標系は, センサの取付位置や角度によって決まる. 座標系 $O_h - x_h y_h z_h$, $O_w - x_w y_w z_w$, $O_f - x_f y_f z_f$ は, 乗船者の頭部, 腰部, 小型船舶の床に取り付けた 3 軸方位角センサの座標系を表す. 3 軸方位角センサの座標系は, 座標系の中心を 3 軸方位角センサの重心位置とし, x をセンサの前方, y を x と z に直交する向き, z をセンサに対し鉛直下方とする座標系である. 固定座標系 $O_e - x_e y_e z_e$ は, 地球表面に定義され, 船舶の船首方向を x_e 軸, 船舶の右舷を y_e 軸, 地球の中心に向かう軸を z_e 軸とし, O_e を乗船者のいる位置とする座標系である. 固定座標系は, 乗船者のいる位置と船首方向で一つだけに決まる.

本研究では, x 軸方向の加速度を前後揺 (Surge), y 軸方向の加速度を左右揺 (Sway), z 軸方向の加速度を上下揺 (Heave), x 軸まわりの角加速度を横揺 (Roll), y 軸まわりの角加速度を縦揺 (Pitch), z 軸まわりの角加速度を船首揺 (Yaw), x 軸まわりの角度を Roll 角, y 軸まわりの角度を Pitch 角, 真北を基準とした x 軸の方位を Yaw 角と定義する. 小型船舶の床, 乗船者の腰部, 頭部の加速度・角速度は, それぞれ異なる 3 軸方位角センサの座標系上で計測されたものであり, 比較検討を行うことができない. そこで, 小型船舶の床, 乗船者の腰部, 頭部で計測された加速度・角速度に対して任意の座標系への座標変換を行い, 一つの統一した座標系上で比較検討を行うことを可能にした⁶⁷⁾. 座標変換の際に基準とする座標系は, 固定座標系と小型船舶の床の 3 軸方位角センサの座標系 (以下, 小型船舶の床の座標系と表記) とした.

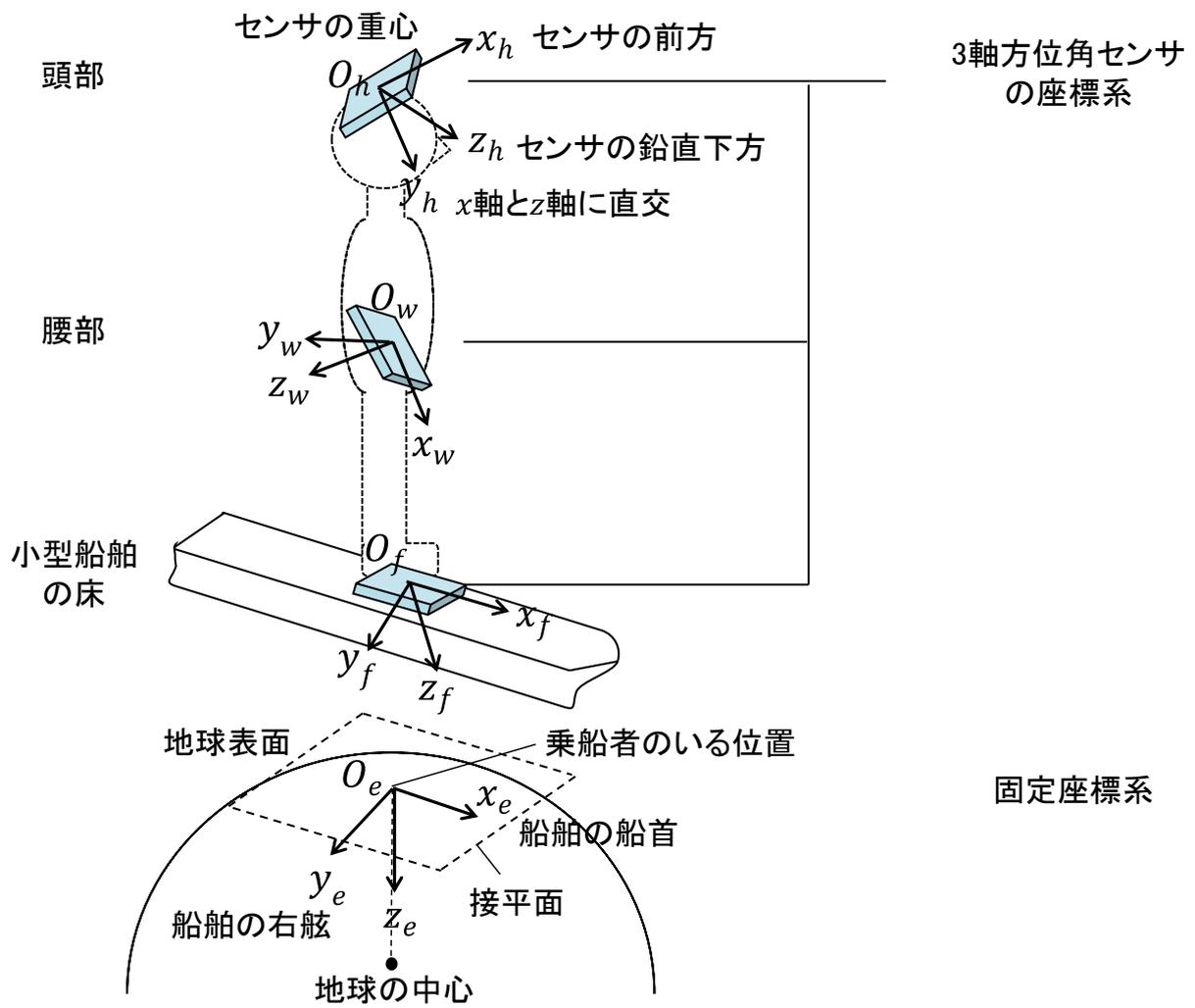


図 3-8 座標系の定義

(2) 固定座標系を基準とした座標変換

加速度・角速度は、3軸方位角センサの重心を原点としたベクトルで表される。加速度・角速度のベクトル表現については、付録 3.1 で述べる。固定座標系を基準とした座標変換の例を図 3-9 に示す。 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ は、3軸方位角センサの座標系における加速度ベクトル α のx,y,z成分であり、 $\alpha_{xe}, \alpha_{ye}, \alpha_{ze}$ は固定座標系における加速度ベクトル α の x_e, y_e, z_e 成分である。固定座標系を基準とした座標変換とは、3軸方位角センサの座標系における加速度ベクトル α を固定座標系へと投影し、固定座標系における加速度ベクトル α の x_e, y_e, z_e 成分を求めることである。固定座標系を基準とした座標変換の概念図を図 3-10 に示す。乗船者の頭部、腰部、小型船舶の床で計測された加速度又は角速度ベクトル $\mathbf{A}(A_{xh}, A_{yh}, A_{zh})$, $\mathbf{B}(B_{xw}, B_{yw}, B_{zw})$, $\mathbf{C}(C_{xf}, C_{yf}, C_{zf})$ をそれぞれ固定座標系へと投影し、固定座標系における加速度又は角速度ベクトル $\mathbf{A}(A_{xe}, A_{ye}, A_{ze})$, $\mathbf{B}(B_{xe}, B_{ye}, B_{ze})$, $\mathbf{C}(C_{xe}, C_{ye}, C_{ze})$ に変換する。

固定座標系への座標変換は、式(3-1)⁶⁸⁾、式(3-2)⁶⁸⁾により行った、回転行列の導出は、付録 A3 に示す。式(3-1)中の $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ は、3軸方位角センサの座標系におけるx,y,z軸方向の加速度であり、 $\alpha_{xe}, \alpha_{ye}, \alpha_{ze}$ は固定座標系における x_e, y_e, z_e 軸方向の加速度である。式(3-2)中の $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ は、3軸方位角センサの座標系におけるx,y,z軸まわりの角速度であり、 $\omega_{xe}, \omega_{ye}, \omega_{ze}$ は固定座標系における x_e, y_e, z_e 軸まわりの角速度である。 ϕ は Roll 角、 θ は Pitch 角、 ψ は Yaw 角である。 ϕ と θ は、3軸方位角センサの座標系の水平面からの傾きを表す角度である。 ψ は固定座標系の x_e 軸と3軸方位角センサの座標系のx軸が示す方位 (Yaw 角) の差の角度である。座標変換処理プログラムの検証結果は、付録 3.3 に示した。

加速度の3軸方位角センサの座標系から固定座標系への変換式

$$\begin{bmatrix} \alpha_{xe} \\ \alpha_{ye} \\ \alpha_{ze} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

角速度の3軸方位角センサの座標系から固定座標系への変換式

$$\begin{bmatrix} \omega_{xe} \\ \omega_{ye} \\ \omega_{ze} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

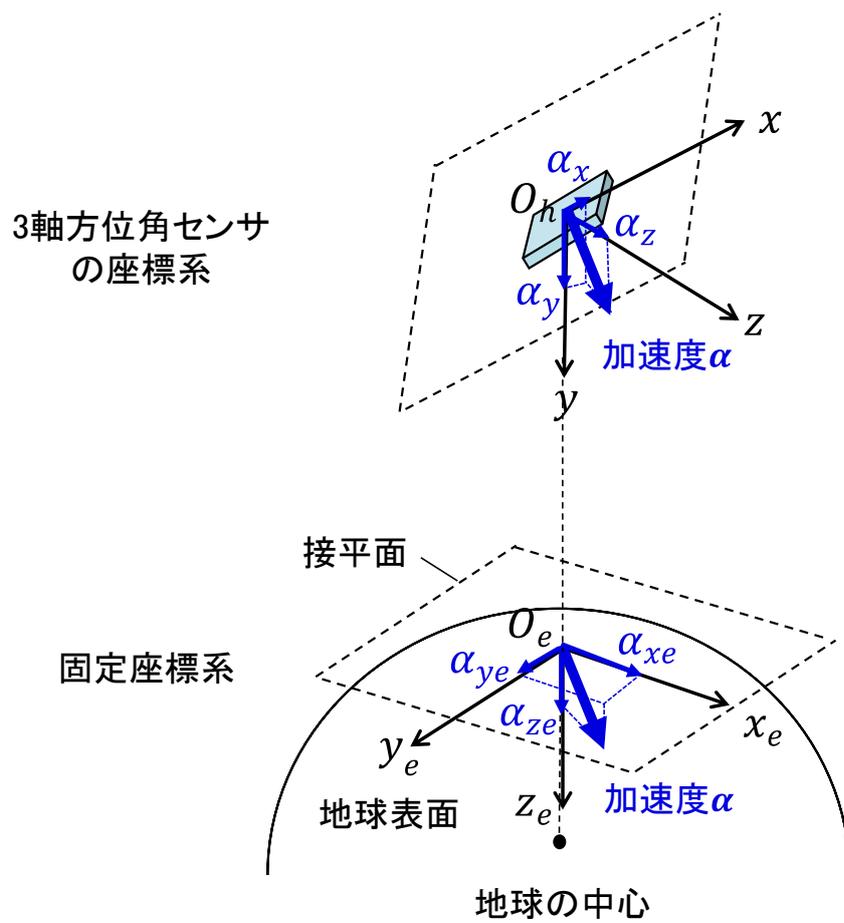


図 3-9 固定座標系を基準とした座標変換の例

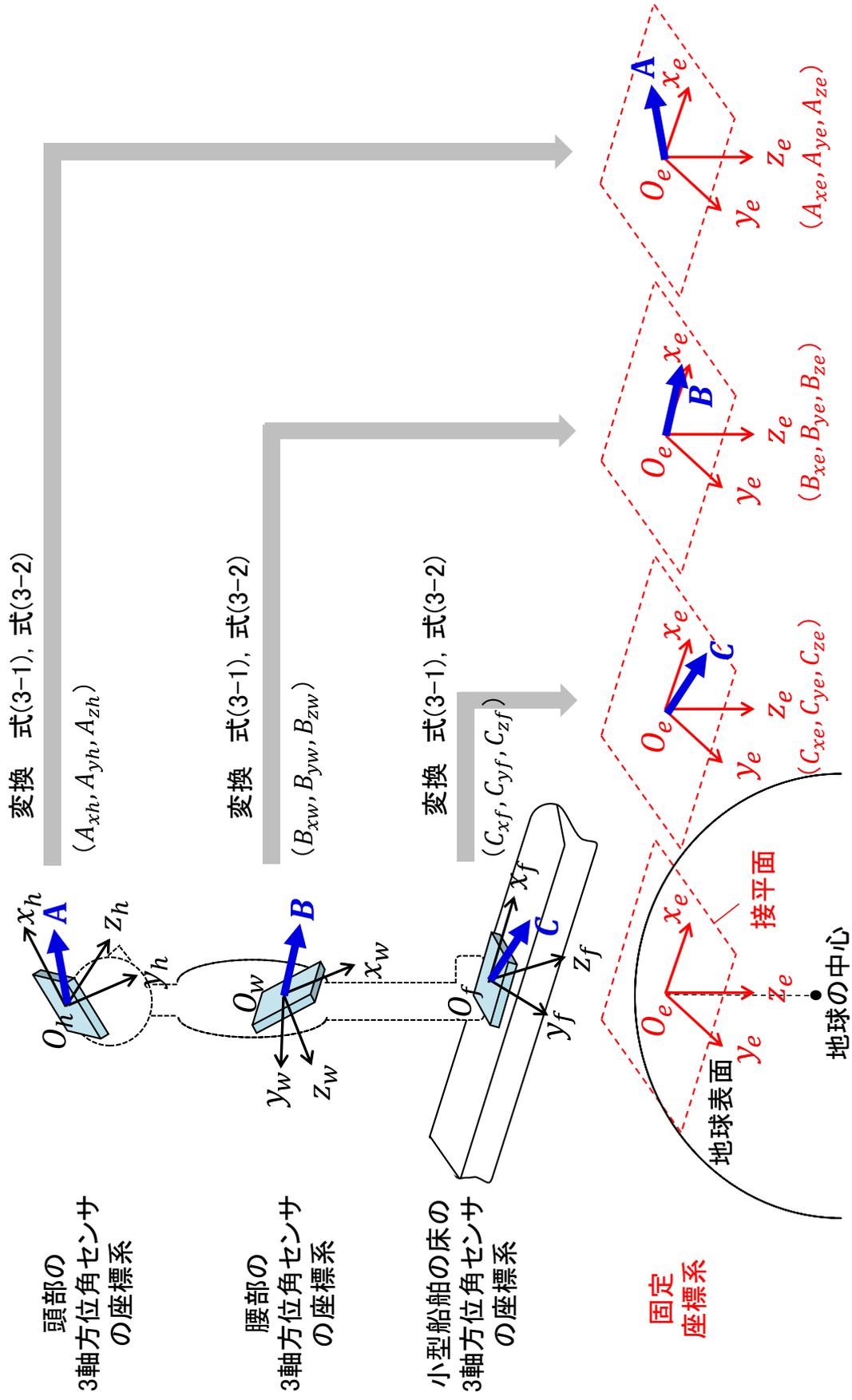


図 3-10 固定座標系を基準とした座標変換の概念図

(3) 小型船舶の床の座標系を基準とした座標変換

小型船舶の床の座標系を基準とした座標変換の概念図を図 3-11 に示す. まず乗船者の頭部, 腰部で計測された加速度又は角速度ベクトル $\mathbf{A}(A_{xh}, A_{yh}, A_{zh})$, $\mathbf{B}(B_{xw}, B_{yw}, B_{zw})$ をそれぞれ固定座標系に投影し, 上下加速度に混入する重力加速度の除去を行う. さらに, 固定座標系における加速度又は角速度ベクトル $\mathbf{A}(A_{xe}, A_{ye}, A_{ze})$, $\mathbf{B}(B_{xe}, B_{ye}, B_{ze})$ を小型船舶の床の座標系へと投影し, 小型船舶の床の座標系における加速度又は角速度ベクトル $\mathbf{A}(A_{xf}, A_{yf}, A_{zf})$, $\mathbf{B}(B_{xf}, B_{yf}, B_{zf})$ に変換する. 固定座標系から小型船舶の床の座標系への座標変換は, 式(3-3)⁶⁸⁾, 式(3-4)⁶⁸⁾により行った. 式(3-3)中の $\alpha_{xf}, \alpha_{yf}, \alpha_{zf}$ は, 小型船舶の床の座標系における x, y, z 軸方向の加速度であり, 式(3-4)中の $\omega_{xf}, \omega_{yf}, \omega_{zf}$ は, 小型船舶の床の座標系における x_f, y_f, z_f 軸まわりの角速度である.

加速度の固定座標系から小型船舶の床の座標系への変換式

$$\begin{bmatrix} \alpha_{xf} \\ \alpha_{yf} \\ \alpha_{zf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{xe} \\ \alpha_{ye} \\ \alpha_{ze} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

角速度の固定座標系から小型船舶の床の座標系への変換式

$$\begin{bmatrix} \omega_{xf} \\ \omega_{yf} \\ \omega_{zf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{xe} \\ \omega_{ye} \\ \omega_{ze} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

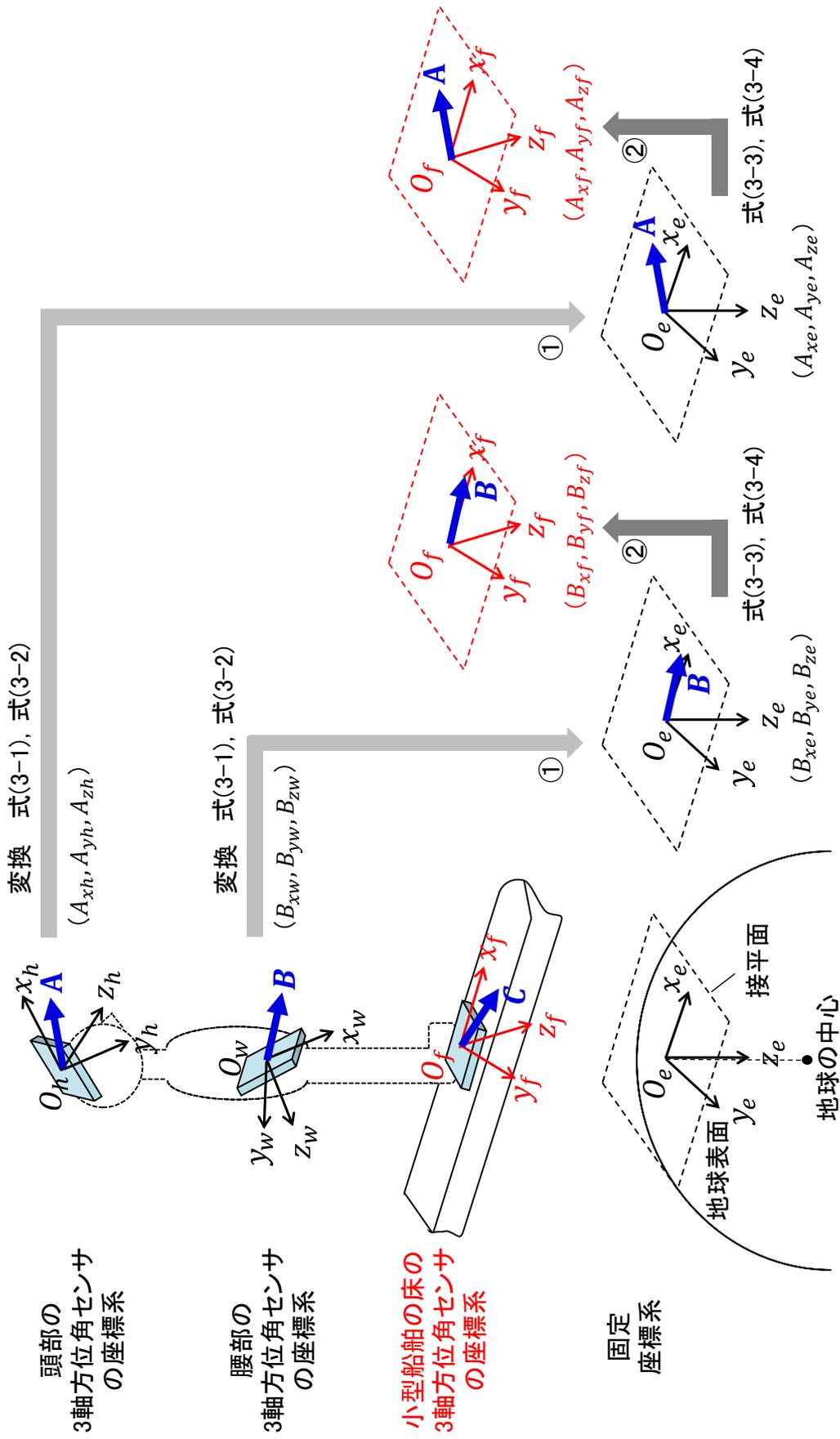


図 3-11 小型船舶の床の座標系を基準とした座標変換の概念図

3. 2. 3 立位姿勢動揺の解析方法

固定座標系を基準とした立位姿勢動揺解析のブロックダイアグラムを図 3-12 に示す. 小型船舶動揺および立位姿勢動揺の大きさは, ①座標変換, ②重力加速度の除去, ③角速度の微分処理, ④ローパスフィルタの適用, ⑤実効値の算出により解析された. 重力加速度は, 上下揺から 9.80665m/s^2 を減じることで除去した. 本研究では, 3 軸方位角センサのノイズを除去し, 立位姿勢動揺を抽出するために, カットオフ周波数 15Hz のローパスフィルタを加速度・角加速度に適用した. 実効値とは, 時系列波形がもつ任意の時間内における平均的な強さを意味する. 実効値は式 (3-5)⁶⁹⁾ により定義される. 式中の f_i は加速度 $(\alpha_{xe}, \alpha_{ye}, \alpha_{ze})$ または角加速度 $(\frac{d}{dt}\omega_{xe}, \frac{d}{dt}\omega_{ye}, \frac{d}{dt}\omega_{ze})$ である.

$$RMS(f_i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (f_i)^2} \quad (3-5)$$

小型船舶動揺および立位姿勢動揺の大きさの比較は, 実験協力者 16 名に対し, 立位開始 5 分後から 15 分後まで解析範囲における実効値を算出することで行った. 図 3-13 に小型船舶の床の座標系を基準とした立位姿勢動揺解析のブロックダイアグラムを示す. 小型船舶の床の座標系を基準とした場合の立位姿勢動揺は, ①小型船舶の床, 実験協力者の腰部, 頭部の座標系を固定座標系に座標変換し, ②加速度に含まれる重力加速度の除去を行い, ③小型船舶の床, 実験協力者の腰部, 頭部の座標系を小型船舶の床の座標系に座標変換することにより算出された. 加速度・角加速度の有意差の検定には, 分散分析およびテューキーの母集団平均の対比較検定を用い, 有意水準は 5% および 1% とした.

立位姿勢動揺の周波数成分は, ①座標変換, ②重力加速度の除去, ③角速度の微分処理を終えた加速度・角加速度に対し, 高速フーリエ変換を行うことにより解析された.

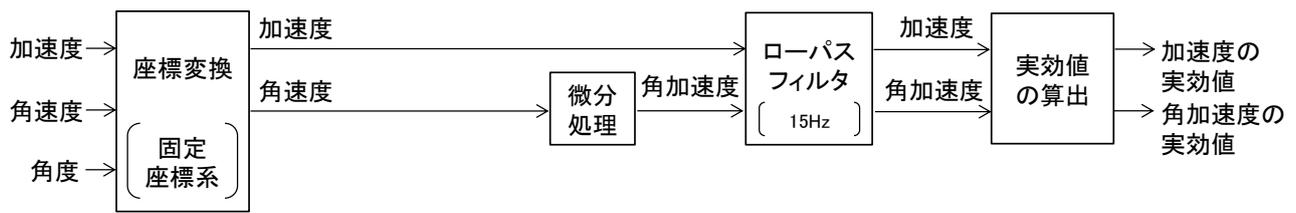


図 3-12 固定座標系を基準とした立位姿勢動揺解析のブロックダイアグラム

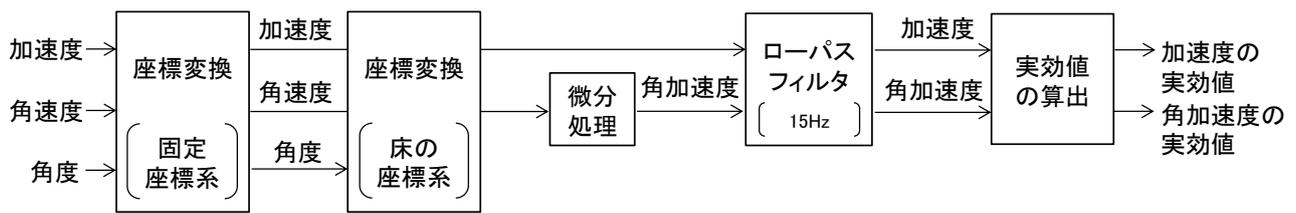


図 3-13 小型船舶の床の座標系を基準とした立位姿勢動揺解析のブロックダイアグラム

3. 2. 4 立位姿勢動揺の周波数解析

小型船舶動揺および立位姿勢動揺の周波数解析は、小型船舶の床、実験協力者の腰部、頭部で計測した加速度・角加速度データの高速度フーリエ変換により行った。図 3-14 に小型船舶動揺および立位姿勢動揺の周波数解析のブロックダイアグラムを示す。周波数解析は、座標変換および微分処理により算出された加速度・角加速度 2048 データ (20.48s) ごとに行った。周波数分解能は、0.05Hz である。

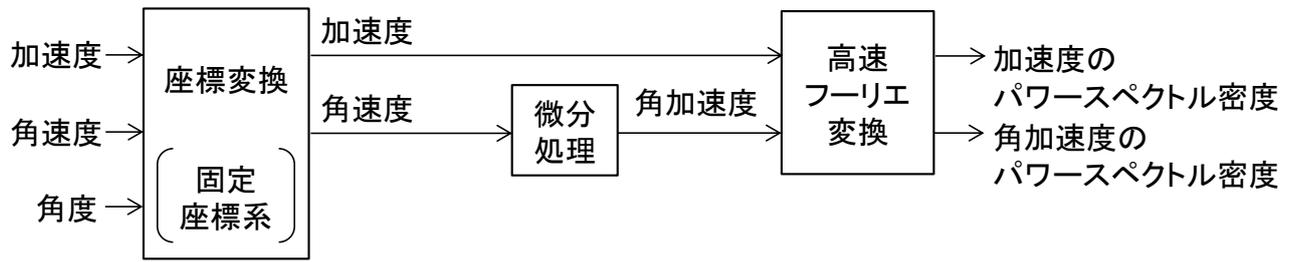


図 3-14 小型船舶動揺および立位姿勢動揺の周波数解析のブロックダイアグラム

3. 3 陸上における立位姿勢動揺

3. 3. 1 結果

陸上における加速度・角加速度の時系列データを図 3-15, 図 3-16 に示す. 実験協力者の腰部と頭部の加速度には, わずかな動揺が計測された (図 3-15(a)). 実験協力者の腰部と頭部の角加速度には, 床の角加速度と共に高周波ノイズが観察された (図 3-16).

陸上における加速度・角加速度のパワースペクトル密度の一例を図 3-17, 図 3-18 に示す. 実験協力者の腰部と頭部の加速度のパワースペクトル密度には, 周波数成分は観察されなかった (図 3-17). 一方, 実験協力者の腰部と頭部の角加速度のパワースペクトル密度には, 0~15Hz の周波数成分が観察された (図 3-18(a)~(c)). また 15Hz~50Hz における角加速度のパワースペクトル密度には, 3 軸方位角センサのノイズが観察された. これは, 他の実験協力者についても同様の結果が得られた.

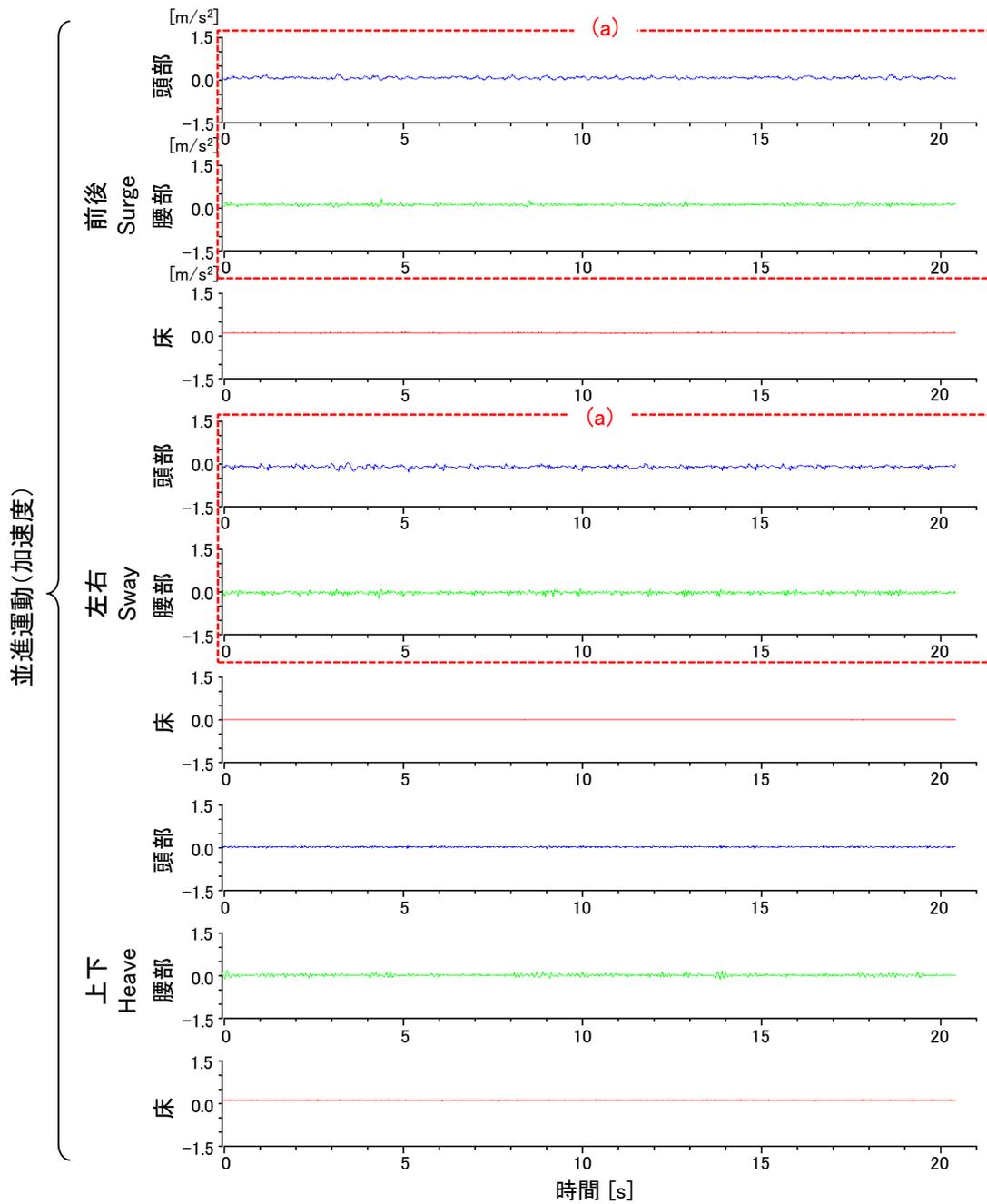


図 3-15 陸上における加速度の時系列データの一例

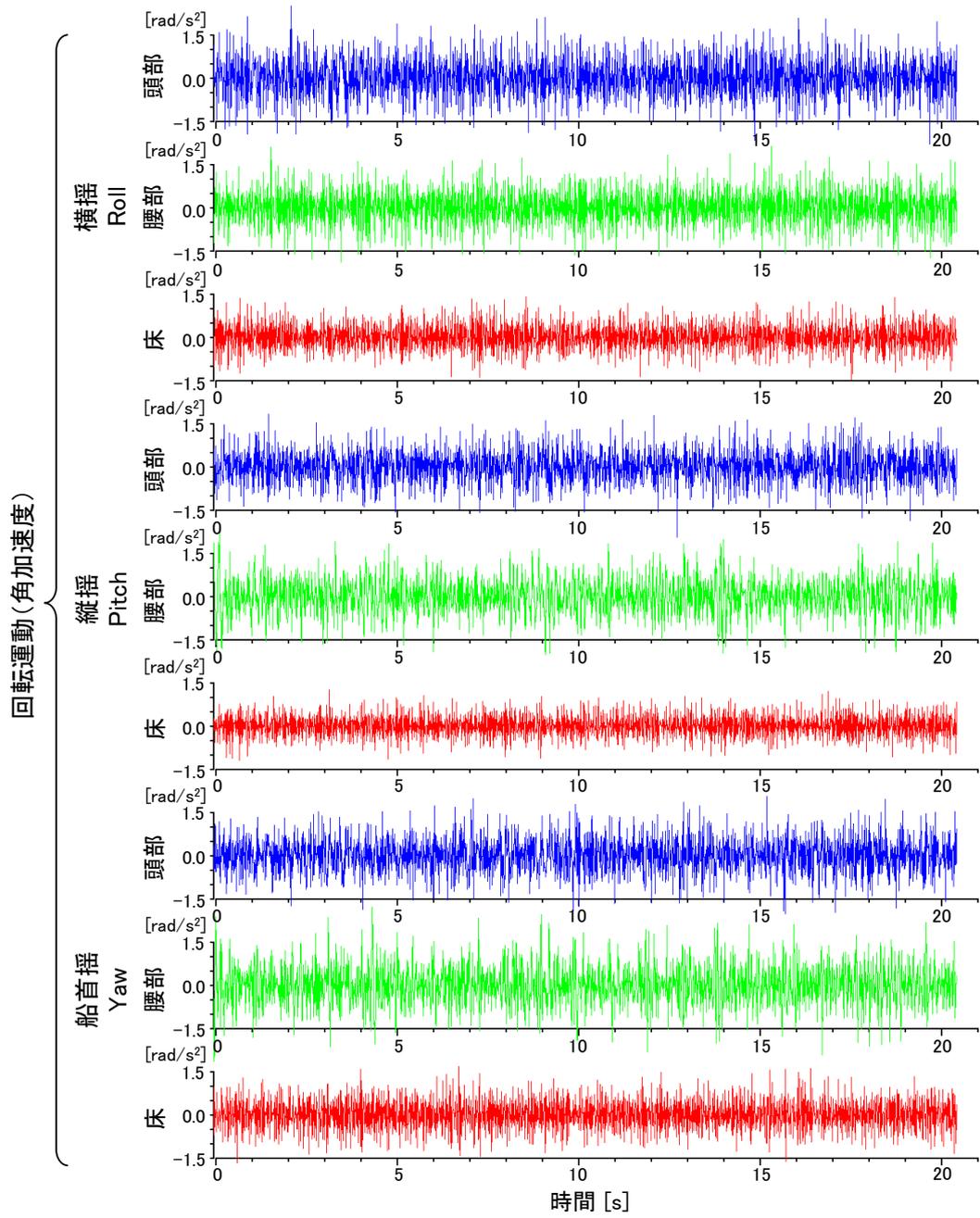


図 3-16 陸上における角加速度の時系列データの一部

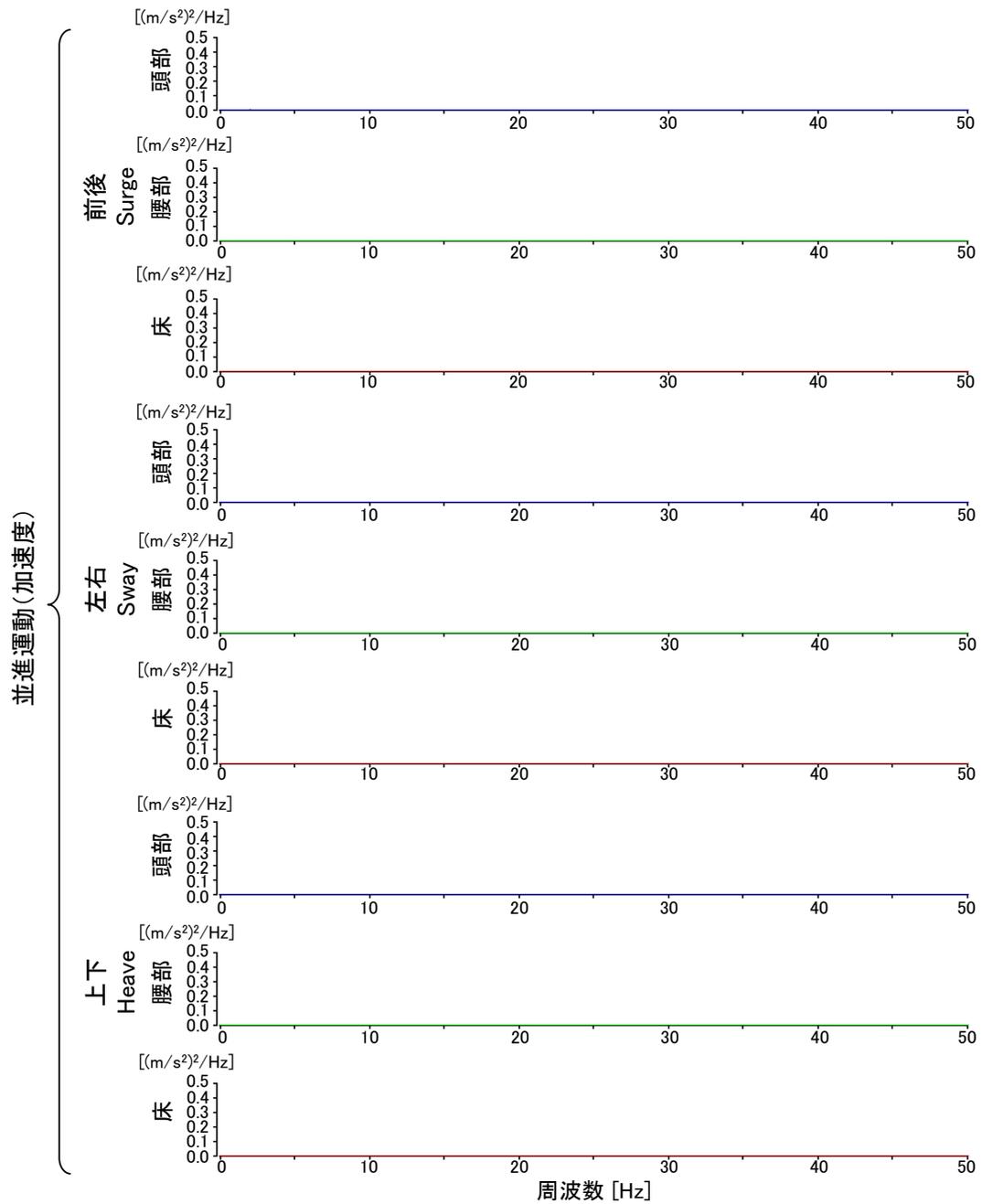


図 3-17 陸上における加速度のパワースペクトル密度の一例

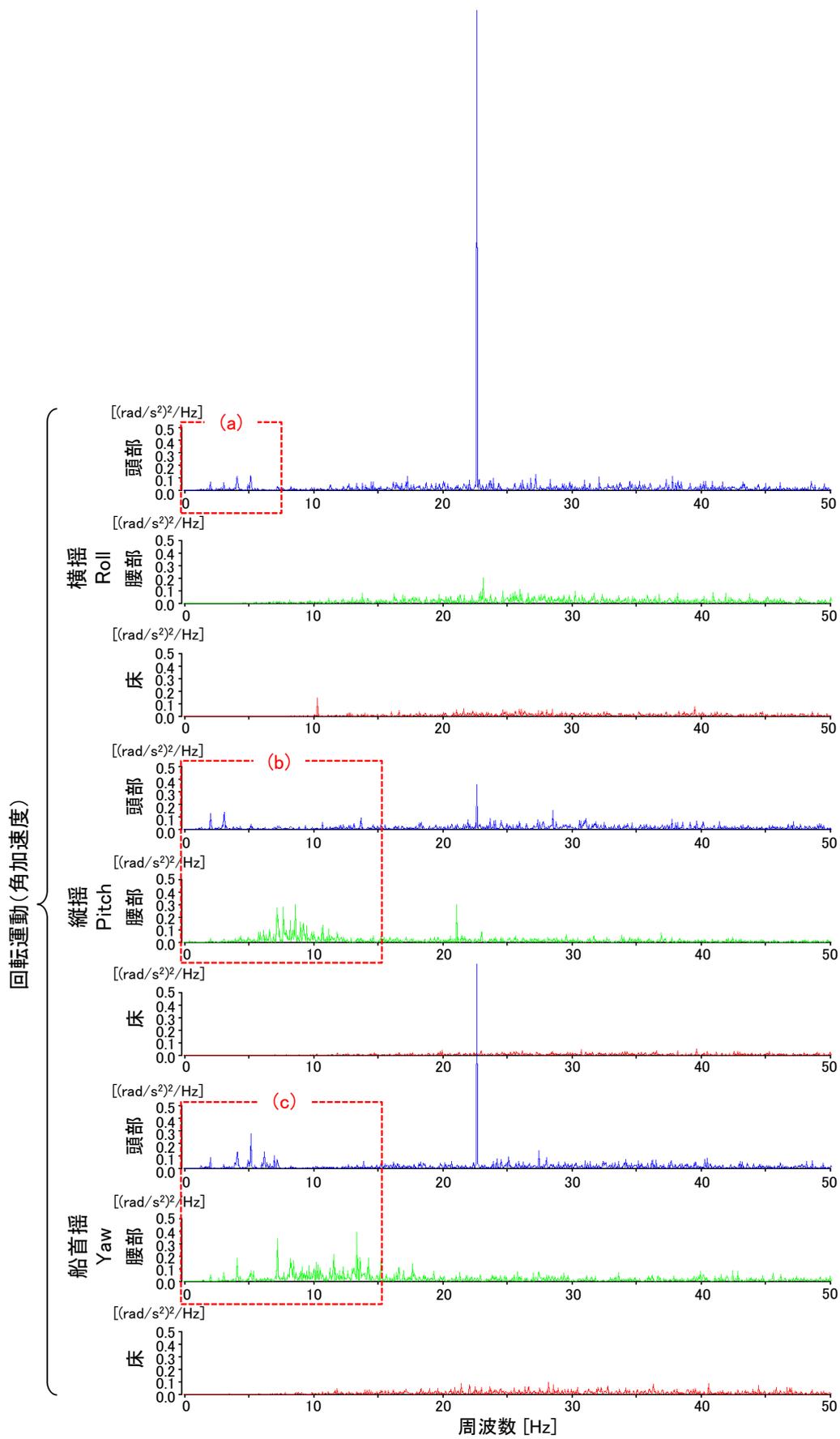


図 3-18 陸上における角加速度のパワースペクトル密度の一例

3. 3. 2 考察

陸上において静止立位姿勢をとった実験協力者の腰部と頭部の加速度・角加速度には、わずかな動揺が計測された。また実験協力者の腰部と頭部の加速度・角加速度には、0～15Hzの周波数成分が観察された。また、小型船舶における実験協力者の腰部、頭部には、上下揺(Heave)、および横揺(Roll)、縦揺(Pitch)、船首揺(Yaw)が発生し、その周波数成分は0～15Hzに分布していた。陸上および小型船舶における実験協力者の立位姿勢動揺の周波数解析により、生体の腰部と頭部の動揺の周波数成分は、0～15Hzに分布していると考えられる。

3. 4 小型船舶における立位姿勢動揺

3. 4. 1 結果

(1) 小型船舶動揺および立位姿勢動揺の周波数

小型船舶が船速 16knot (30km/h) で前進時の立位姿勢の実験協力者 (男性, 20 歳) の加速度・角加速度の時系列データを図 3-19, 図 3-20 に示す. また, 同被験者の加速度・角加速度のパワースペクトル密度の一例を図 3-21, 図 3-22 に示す. 小型船舶における実験協力者の腰部や頭部には, 小型船舶の床と異なる加速度・角加速度が観察された (図 3-19(a) (b), 図 3-20(a) (b) (c)). 小型船舶の床では, 主に上下揺 (Heave) が発生し, これに伴い実験協力者の腰部や頭部に上下揺 (Heave) が発生していた (図 3-19(c)). 実験協力者の腰部, 頭部には, 主に並進運動では上下揺 (Heave), 回転運動では, 横揺 (Roll), 縦揺 (Pitch), 船首揺 (Yaw) が発生していた (図 3-19(c), 図 3-20(a) (b) (c)). 小型船舶における実験協力者の腰部, 頭部の加速度・角加速度のパワースペクトル密度には, 0~15Hz の低周波成分が確認された (図 3-21 (a) (b), 図 3-22 (a) (b) (c)). 図 3-21(c) と図 3-22(d) (e) の周波数成分は, 3 軸方位角センサのノイズである.

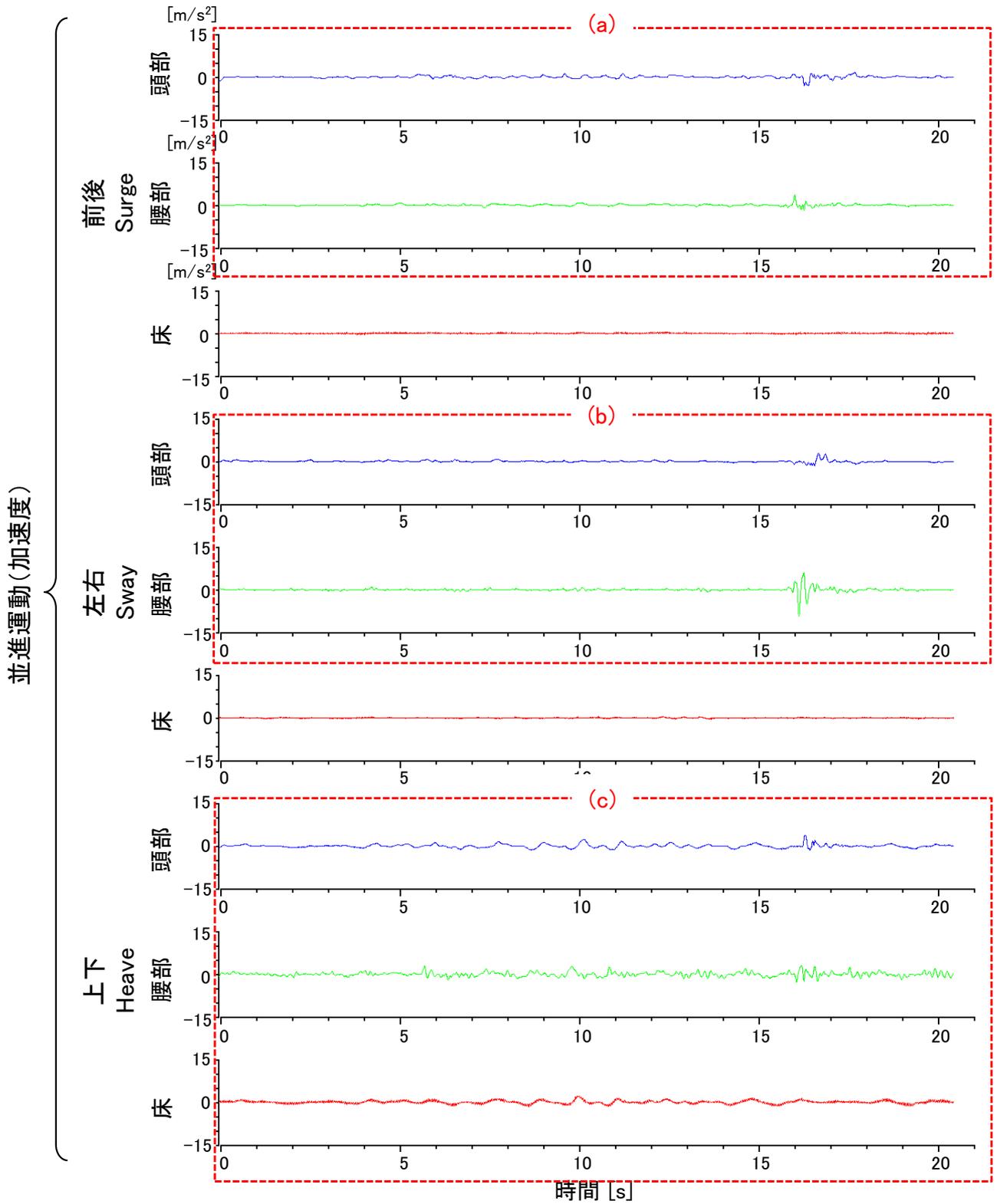


図 3-19 小型船舶における加速度の時系列データの一部

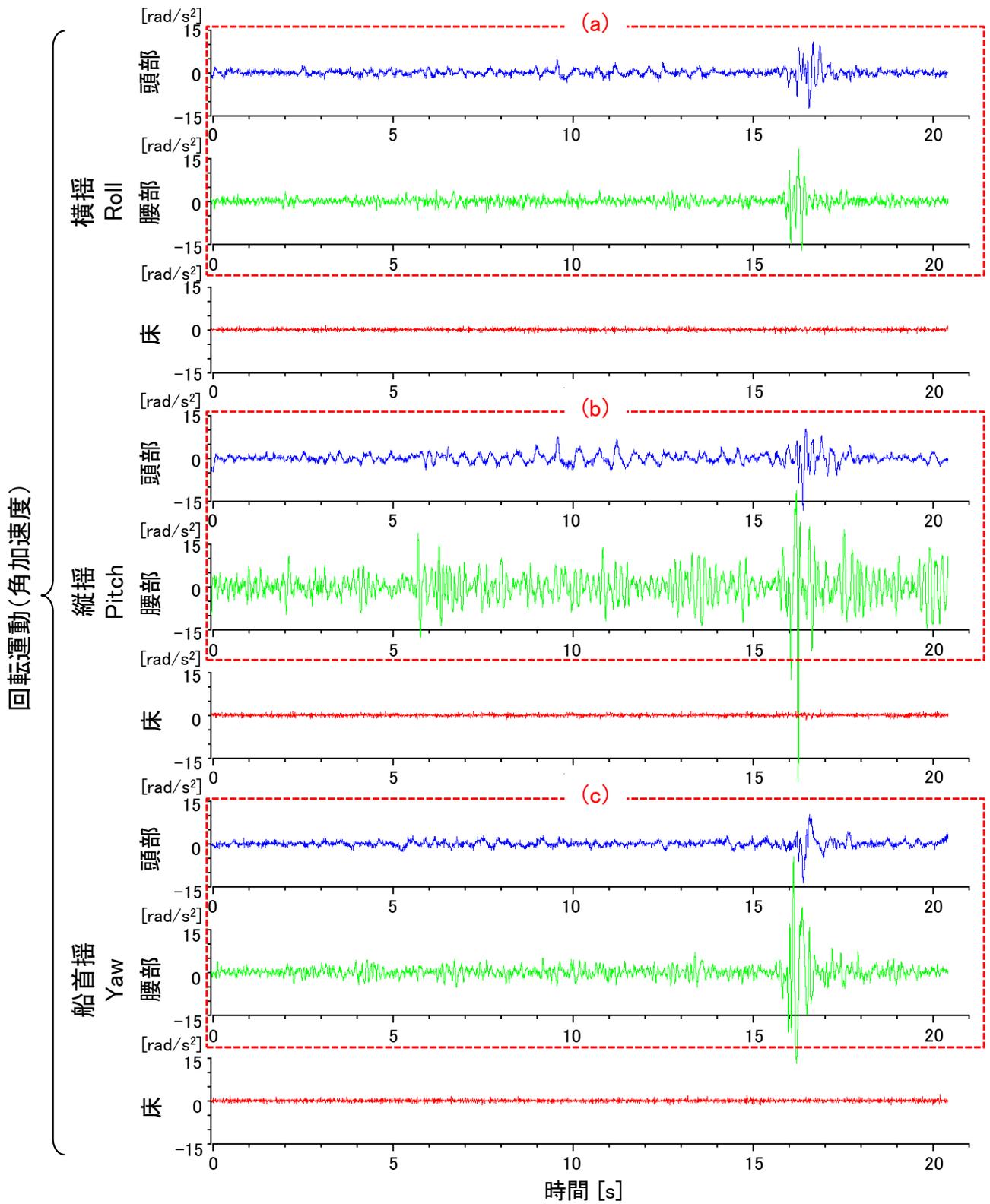


図 3-20 小型船舶における角加速度の時系列データの一例

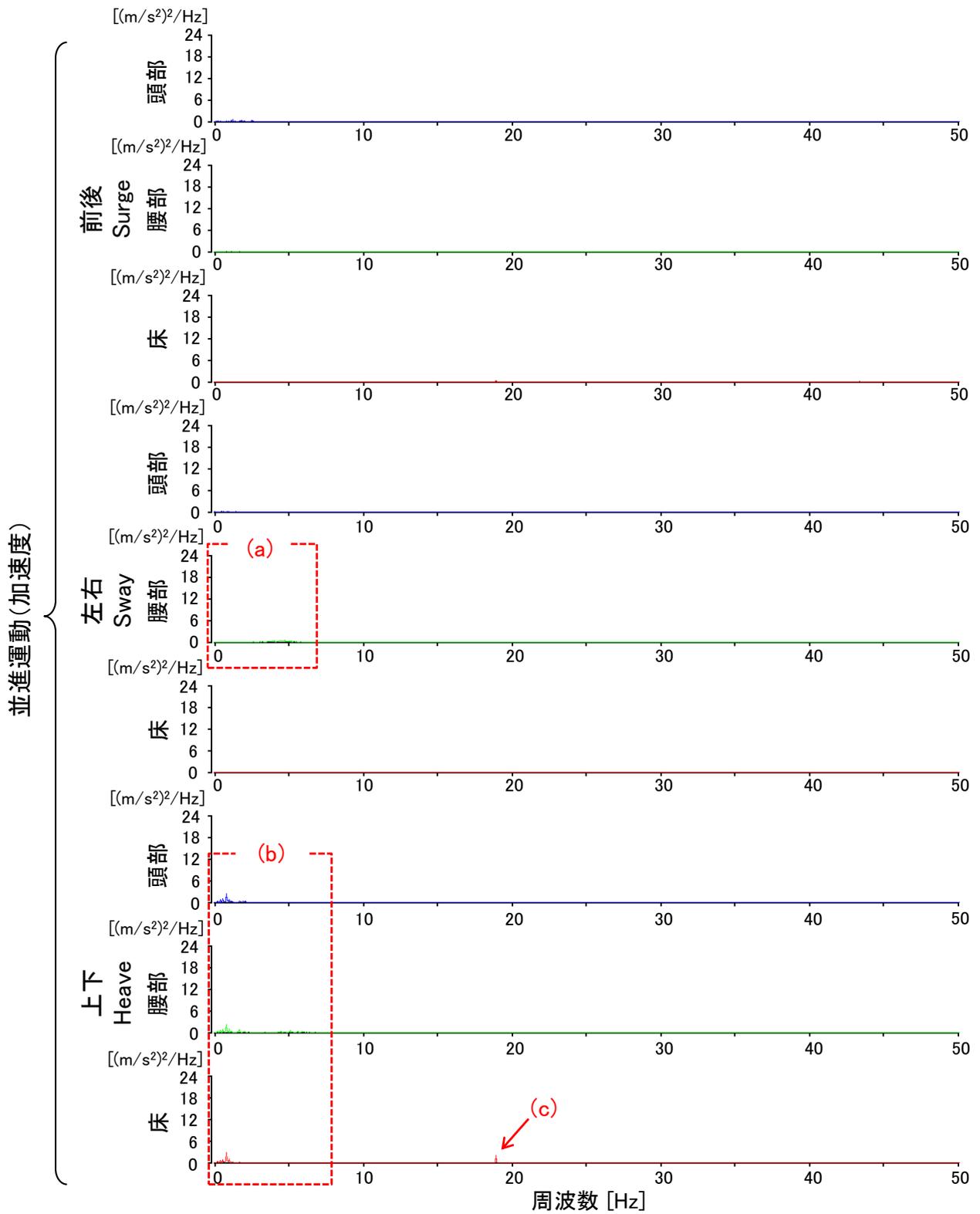


図 3-21 小型船舶における加速度のパワースペクトル密度の一例

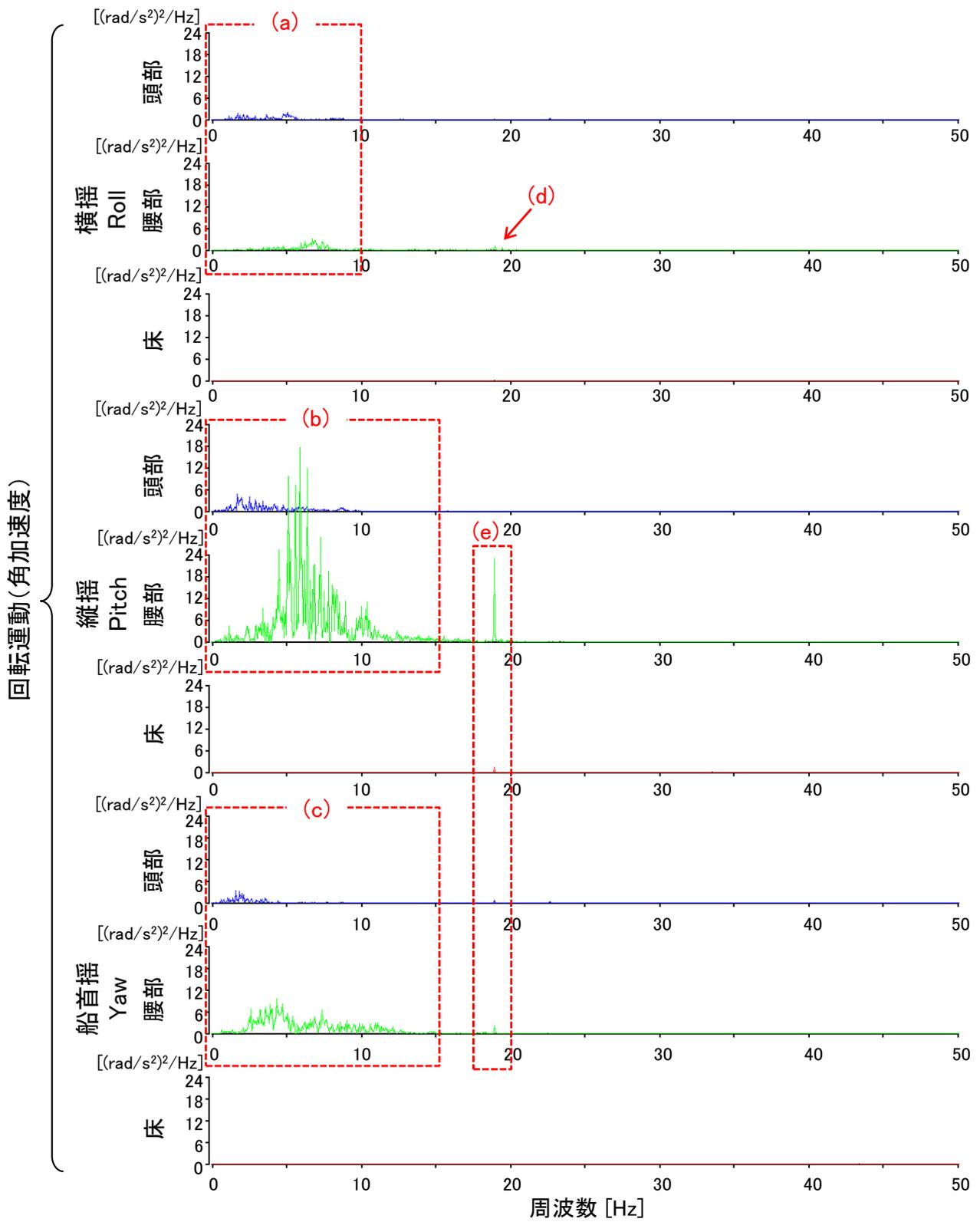


図 3-22 小型船舶における角加速度のパワースペクトル密度の一例

(2) 小型船舶動揺および立位姿勢動揺の時系列データ

固定座標系を基準とした場合の実験協力者（女性，18歳）の立位姿勢動揺の時系列データの一例を図 3-23，図 3-24 に示す。また小型船舶の床の座標系を基準とした場合の同実験協力者の立位姿勢動揺の時系列データの一例を図 3-25，図 3-26 に示す。これより，実験協力者の腰部と頭部の動揺は，小型船舶の床の動揺に比べて大きいことがわかった。この傾向は，特に回転運動で顕著であった。また小型船舶の床の上下揺 (Heave) の出現とともに，実験協力者の腰部，頭部の動揺が大きくなっていることがわかる。実験協力者の立位姿勢動揺の傾向は，固定座標系を基準とした場合と小型船舶の床の座標系を基準とした場合で変わらなかった。小型船舶では，特に上下揺 (Heave) が顕著に発生する傾向にあることが，自動車の動揺との比較結果からも明らかとなっている。小型船舶動揺と自動車の動揺との比較結果の詳細は，付録 2 に示した。

固定座標系を基準とした場合の棒の立位姿勢動揺の時系列データの一例を図 3-27，図 3-28 に示す。また小型船舶の床の座標系を基準とした場合の棒の立位姿勢動揺の時系列データの一例を図 3-29，図 3-30 に示す。棒の中間や先端には，実験協力者の腰部や頭部で観察されたような回転運動は観察されなかった。

本研究では，実験協力者 16 名に対し行った 31 回の実験データに対し，立位開始 5 分後から 15 分後までの範囲における小型船舶の床，腰部，頭部における加速度・角加速度の実効値の平均値を求めた。また棒 1 例に対し行った 3 回の実験データに対し，小型船舶の床，中間，先端における加速度・角加速度の実効値の平均値を求めた。実験協力者ごとの加速度・角加速度の実効値の詳細は，付録 4.1 に示した。

図 3-31 に固定座標系を基準とした小型船舶動揺および立位姿勢動揺（並進運動）を，図 3-32 に固定座標系を基準とした小型船舶動揺および立位姿勢動揺（回転運動）を示す。図 3-33，図 3-34 より，小型船舶動揺に比べて，実験協力者の腰部，頭部の実効値が有意に大きくなっていることがわかった ($p < 0.05$)。また，小型船舶の床，実験協力者の腰部，頭部の上下揺 (Heave) には有意差がなかった。また回転運動（横揺，縦揺，船首揺）については，実験協力者の頭部の実効値に比べて腰部の実効値が大きくなる傾向が観察された。実験協力者の腰部の縦揺 (Pitch) は，他の回転運動に比べて特に大きくなった。一方，棒の

動揺は、小型船舶の床から棒の先端に向かって大きくなっていく様子が観察された。また実験協力者の腰部、頭部のような回転運動（横揺、縦揺、船首揺）は確認されなかった。

図 3-33 に小型船舶の床の座標系を基準とした小型船舶動揺および立位姿勢動揺（並進運動）を、図 3-34 に小型船舶の床の座標系を基準とした小型船舶動揺および立位姿勢動揺（回転運動）を示す。小型船舶の床の座標系を基準とした実験協力者および棒の立位姿勢動揺は、固定座標系を基準とした場合の立位姿勢動揺と同様の傾向を示した。

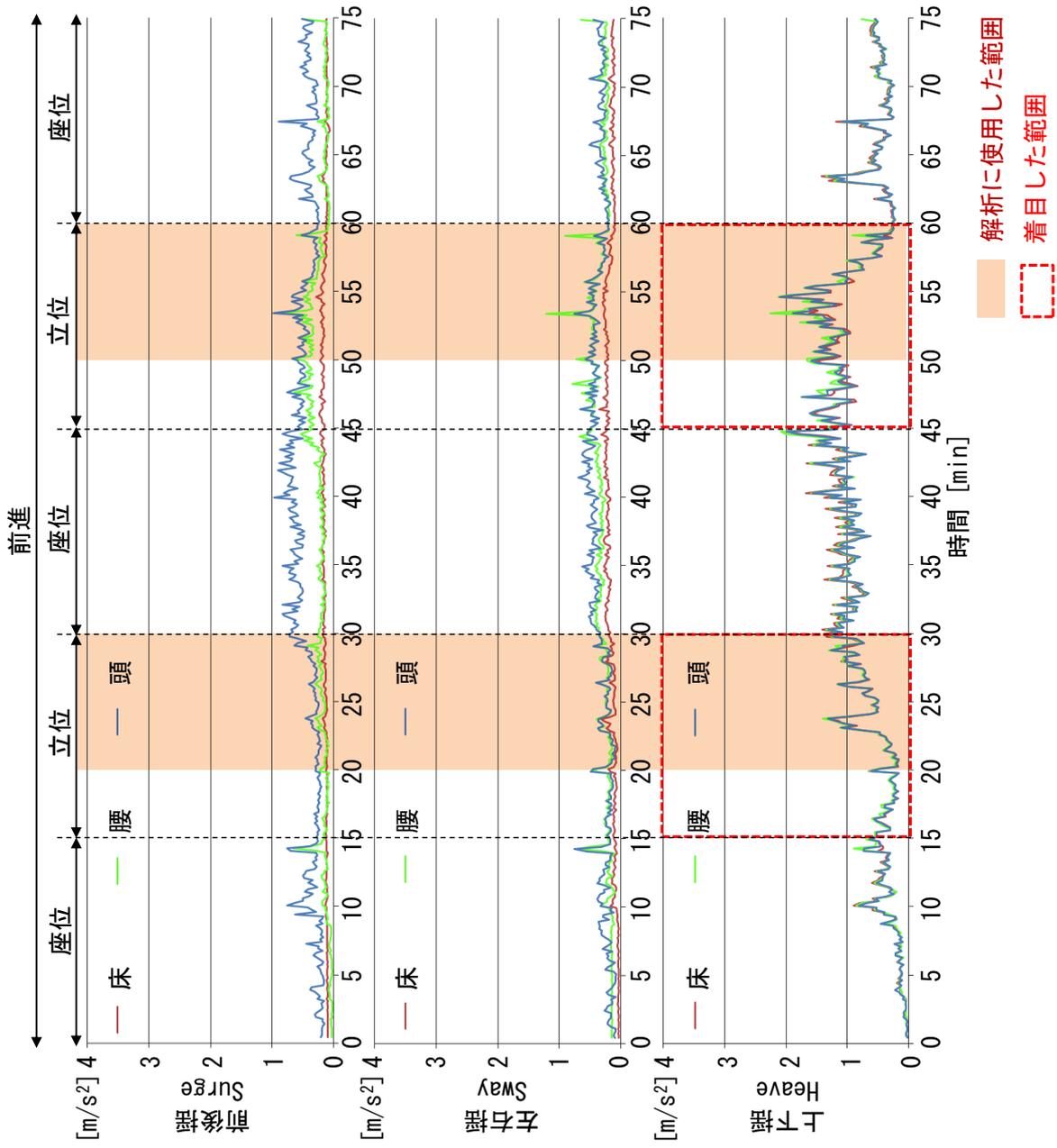


図 3-23 固定座標系を基準とした小型船舶動揺と乗船者の立位姿勢動揺の時系列データ (並進運動)

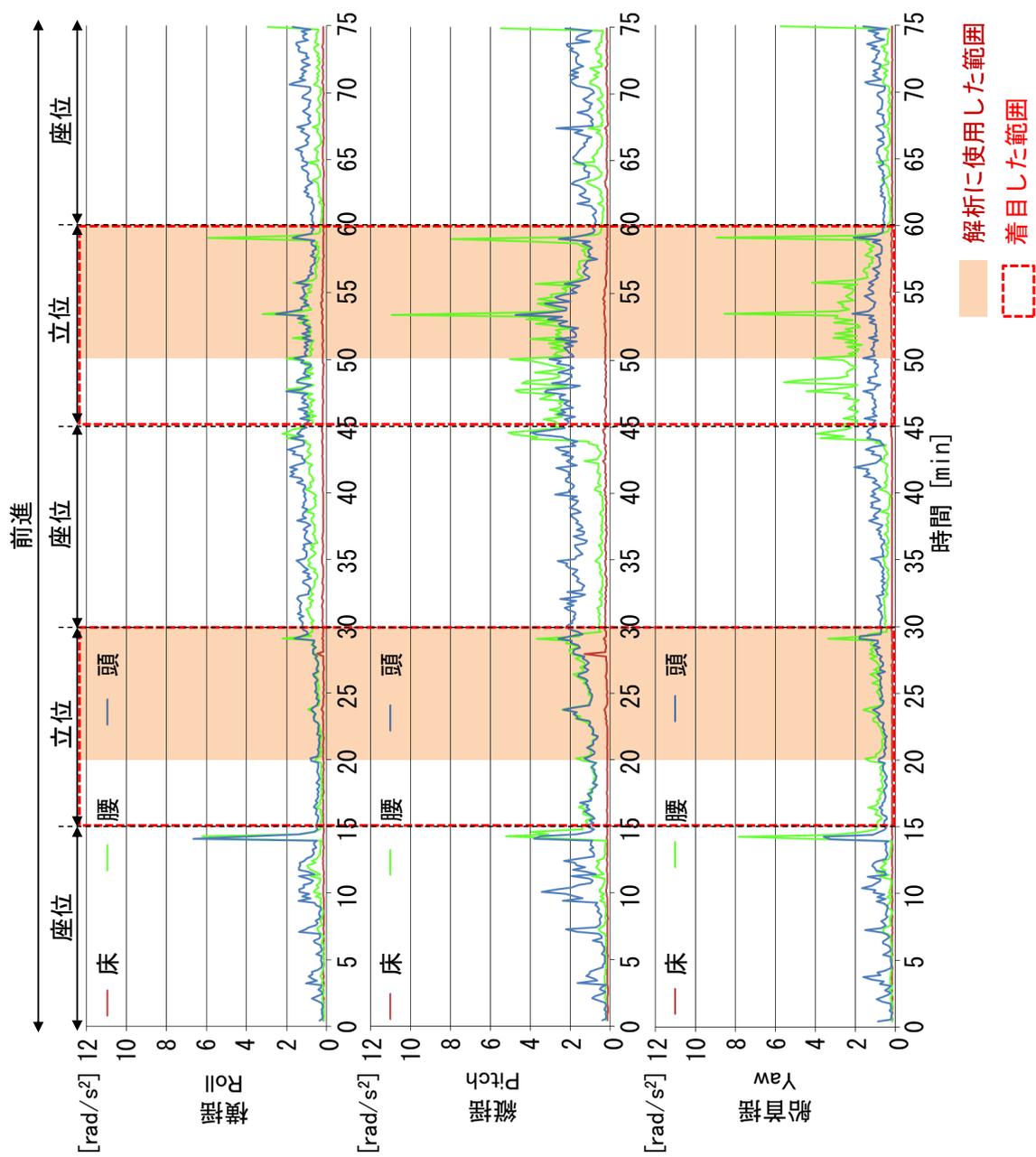


図 3-24 固定座標系を基準とした小型船舶動揺と乗船者の立位姿勢動揺の時系列データ (回転運動)

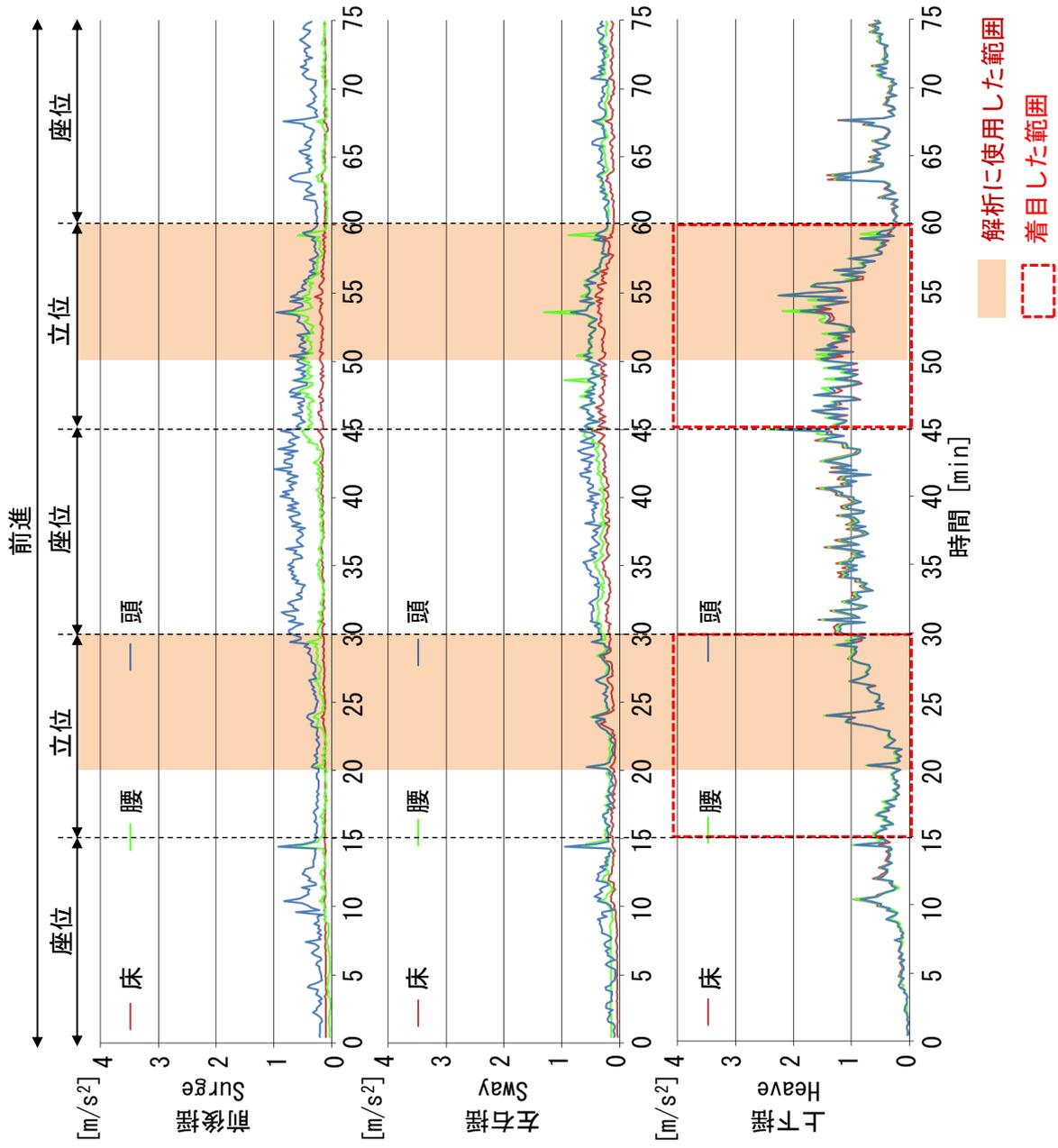


図 3-25 小型船舶の床の座標系を基準とした小型船舶動揺と乗船者の立位姿勢動揺の時系列データ（並進運動）

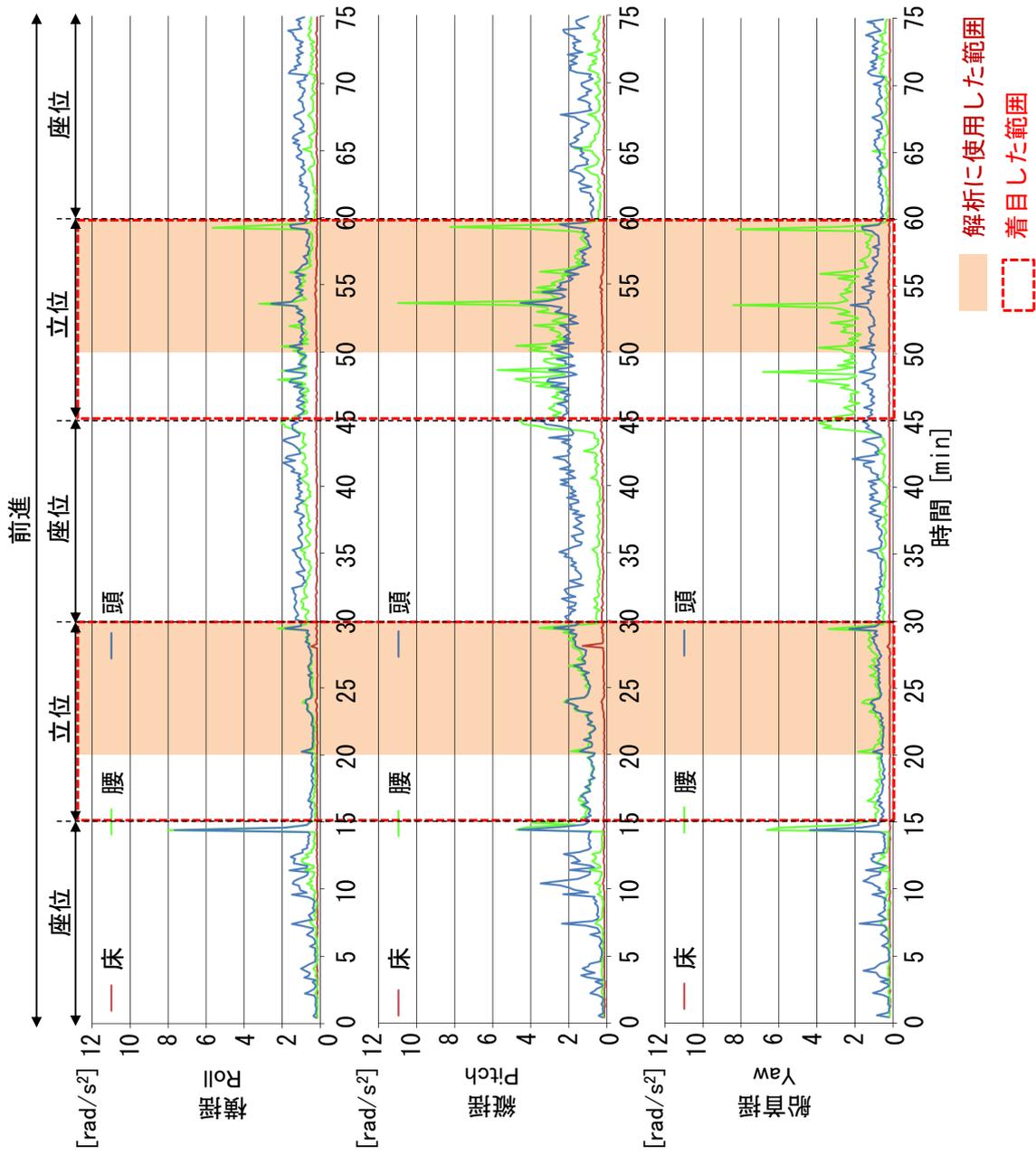


図 3-26 小型船舶の床の座標系を基準とした小型船舶動揺と乗船者の立位姿勢動揺の時系列データ (回転運動)

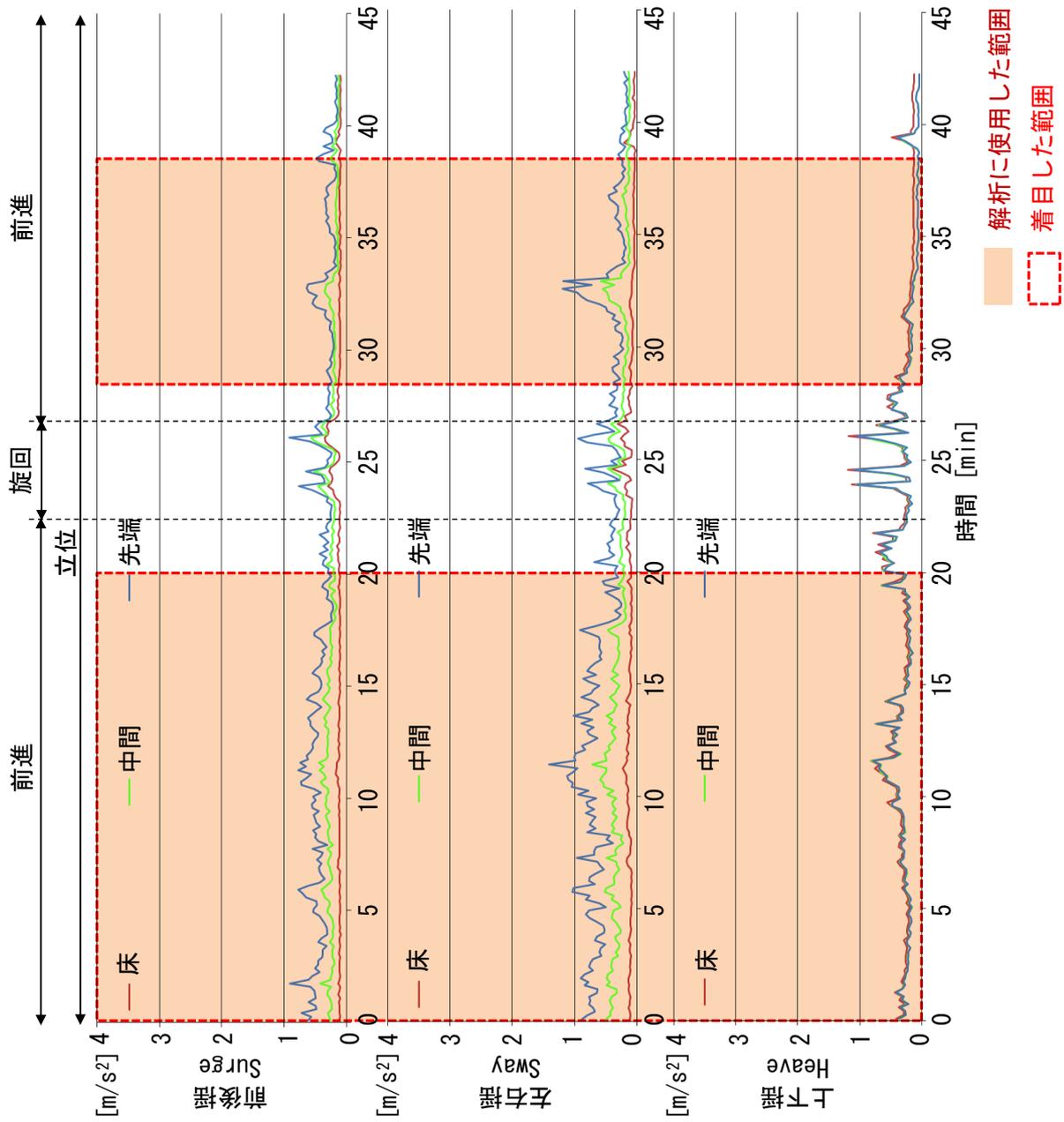


図 3-27 固定座標系を基準とした小型船舶動揺と棒の立位姿勢動揺の時系列データ（並進運動）

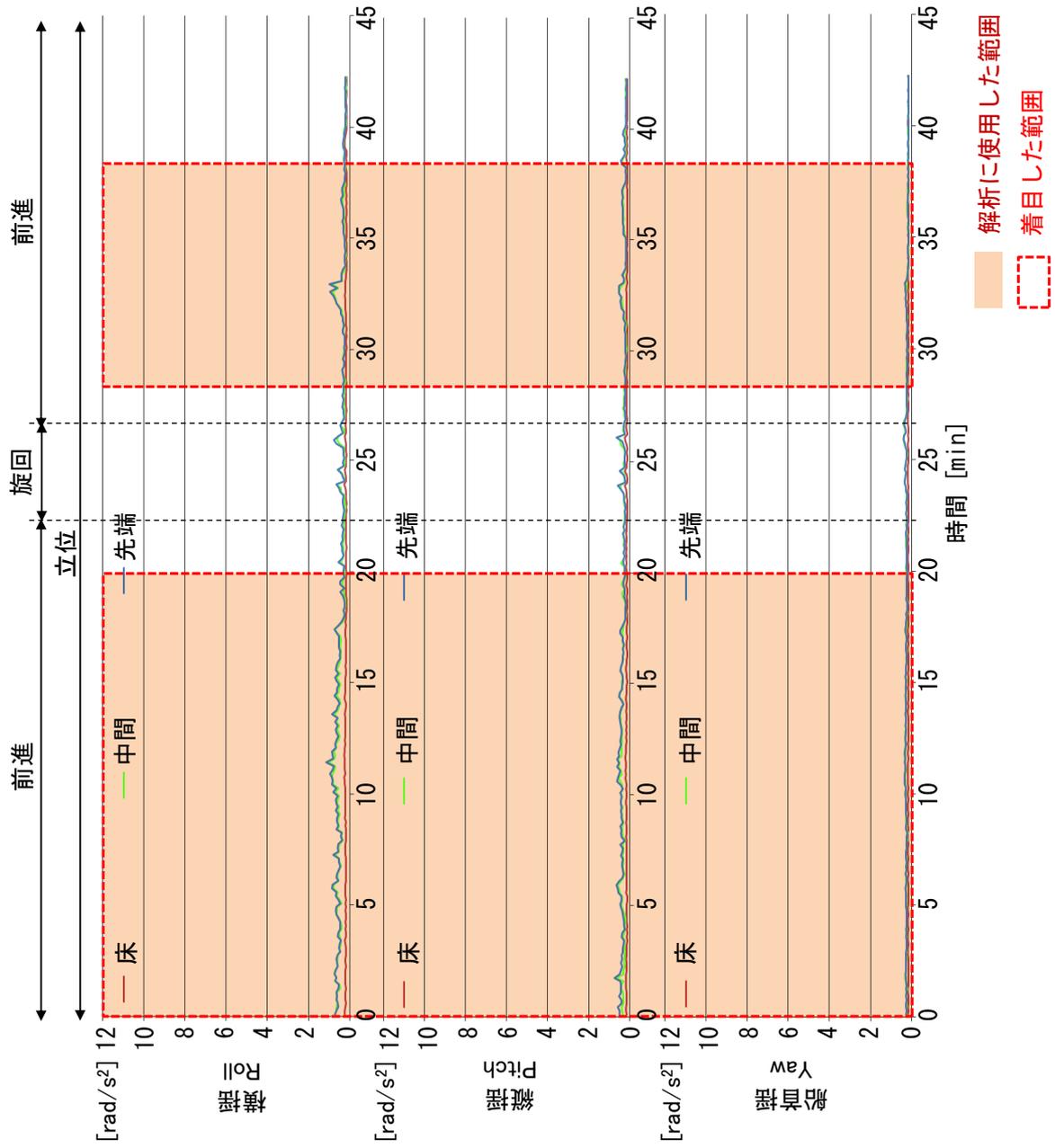


図 3-28 固定座標系を基準とした小型船舶動揺と棒の立位姿勢動揺の時系列データ (回転運動)

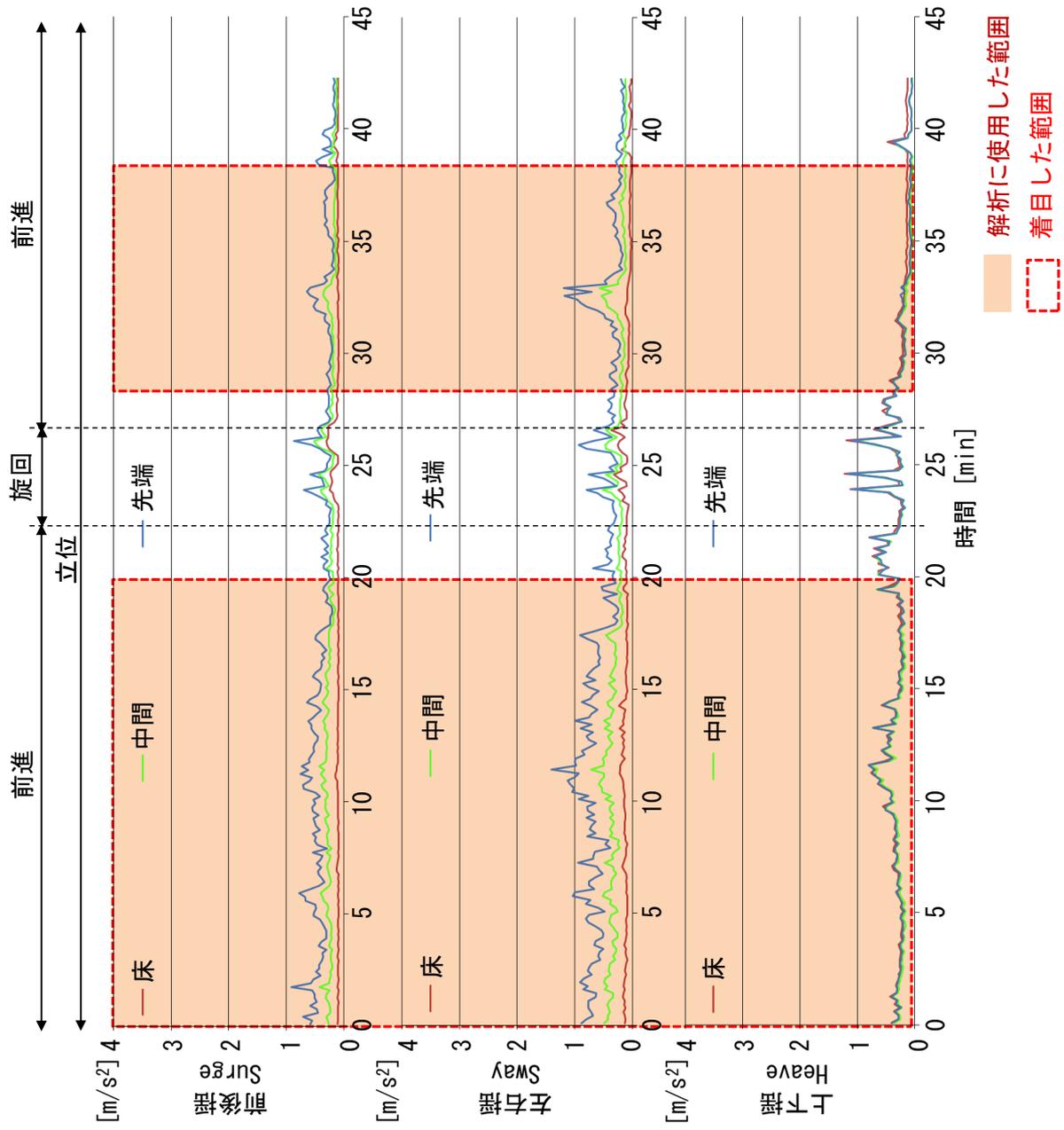


図 3-29 小型船舶の床の座標系を基準とした小型船舶動揺と棒の立位姿勢動揺の時系列データ（並進運動）

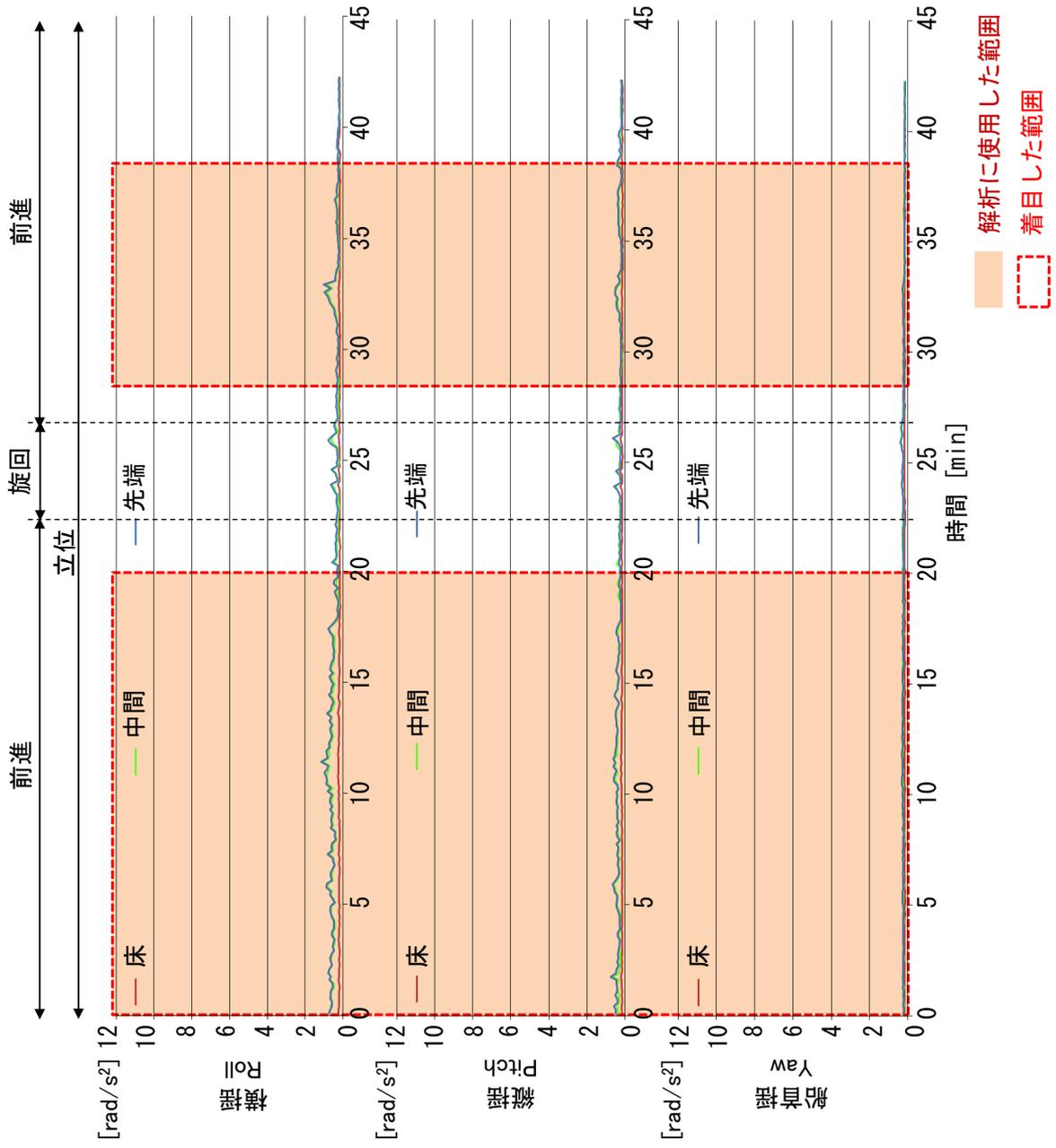
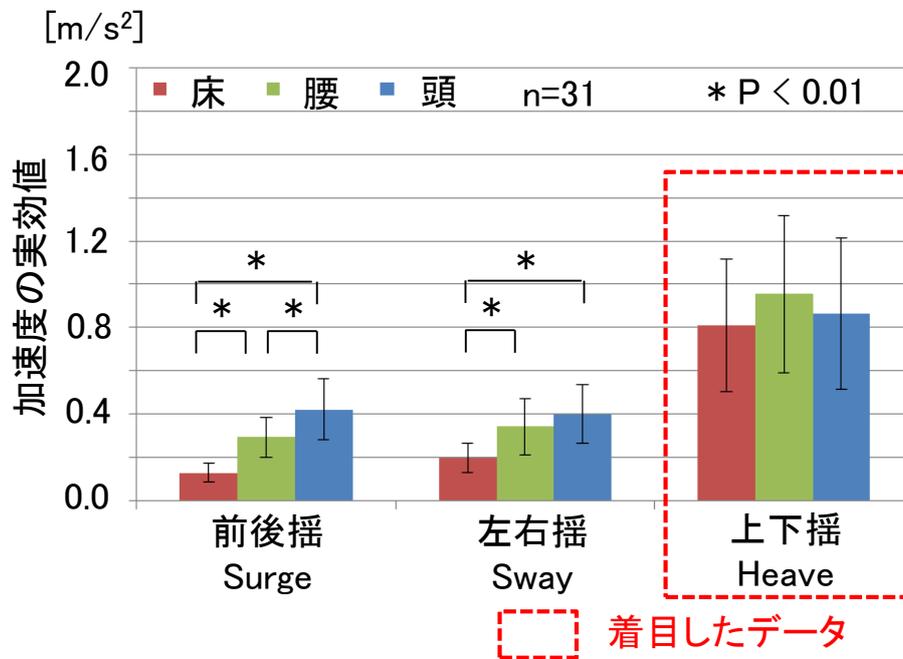
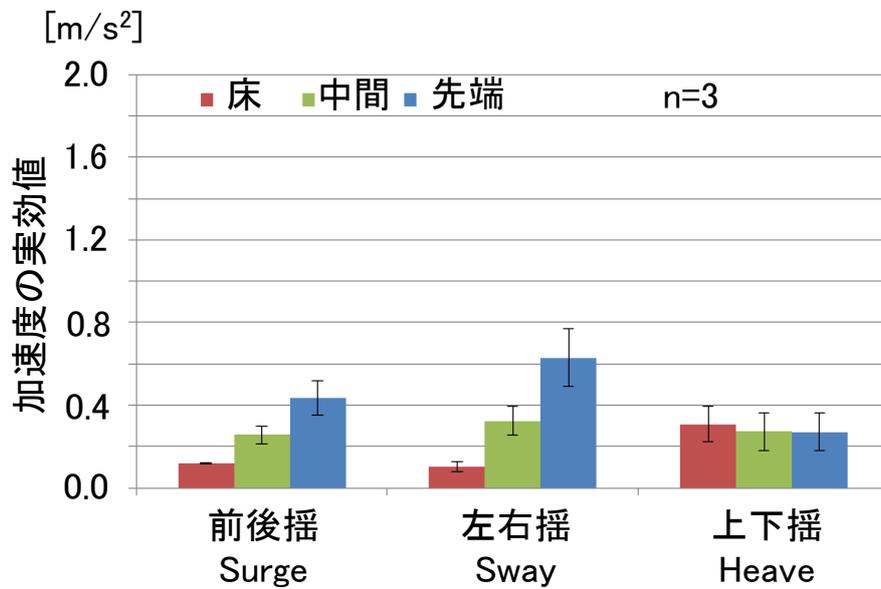


図 3-30 小型船舶の床の座標系を基準とした小型船舶動揺と棒の立位姿勢動揺の時系列データ (回転運動)

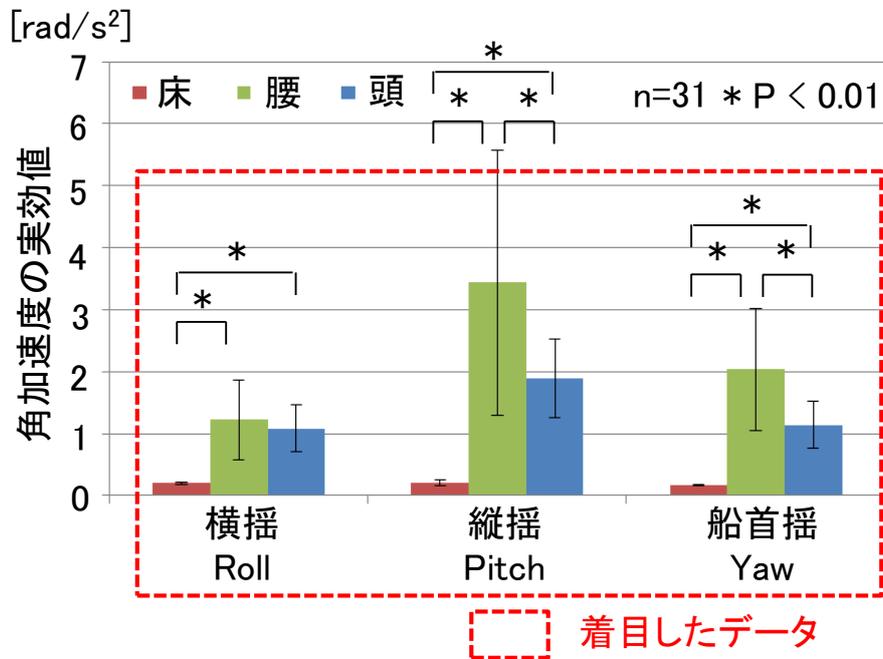


(a) 実験協力者

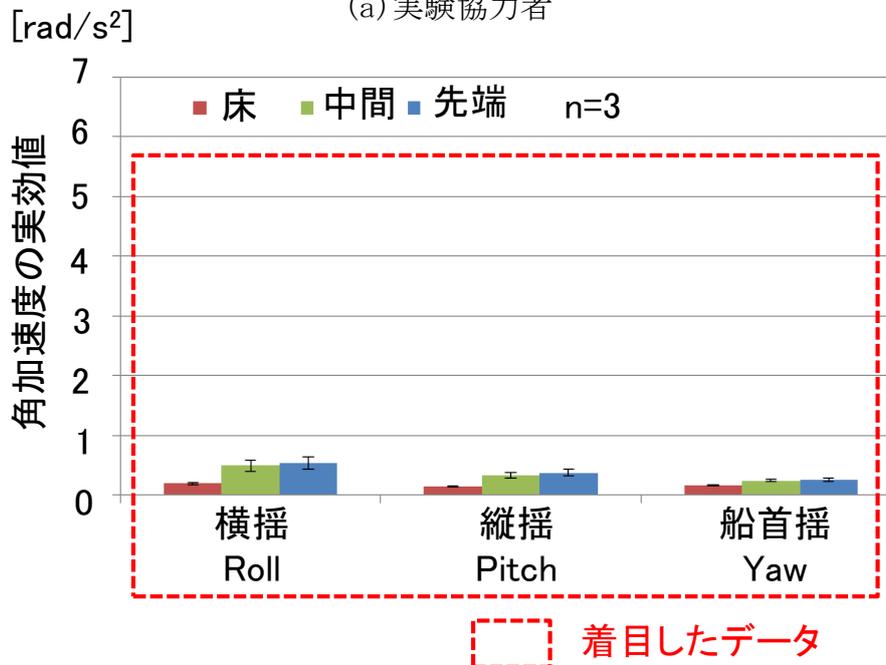


(b) 床に垂直に立てた棒

図 3-31 固定座標系を基準とした小型船舶動揺および立位姿勢動揺（並進運動）

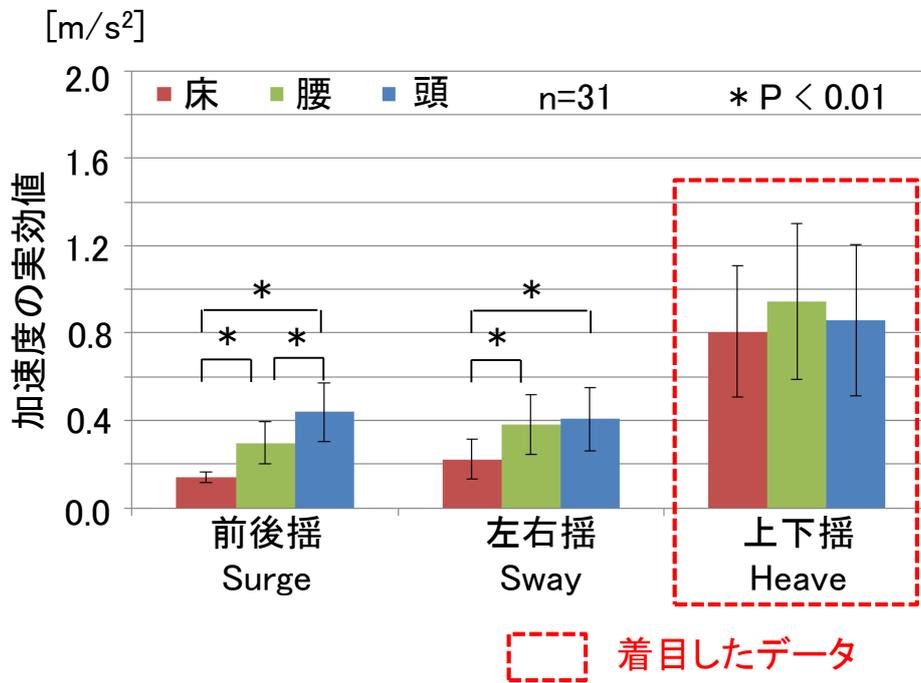


(a) 実験協力者

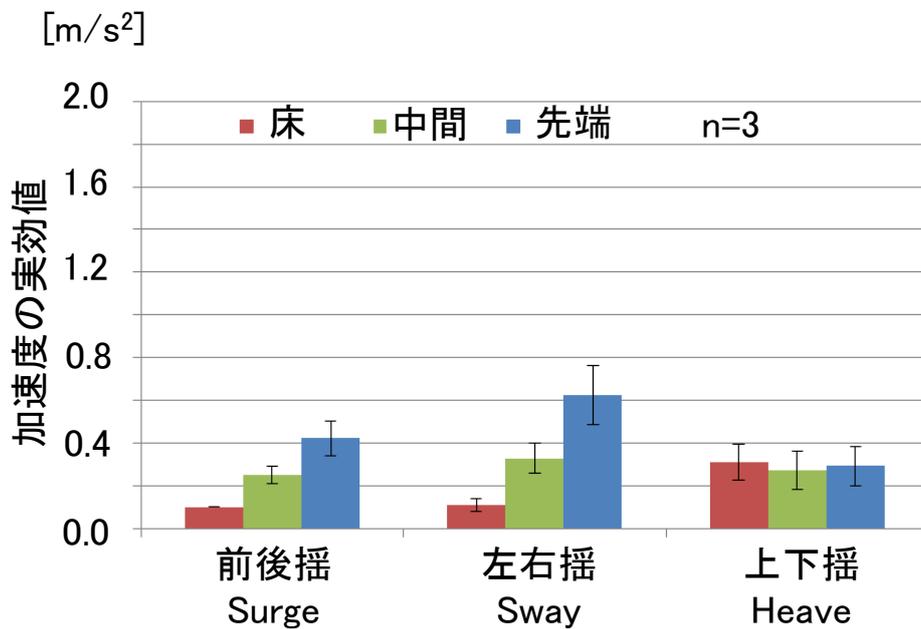


(b) 床に垂直に立てた棒

図 3-32 固定座標系を基準とした小型船舶動揺および立位姿勢動揺 (回転運動)

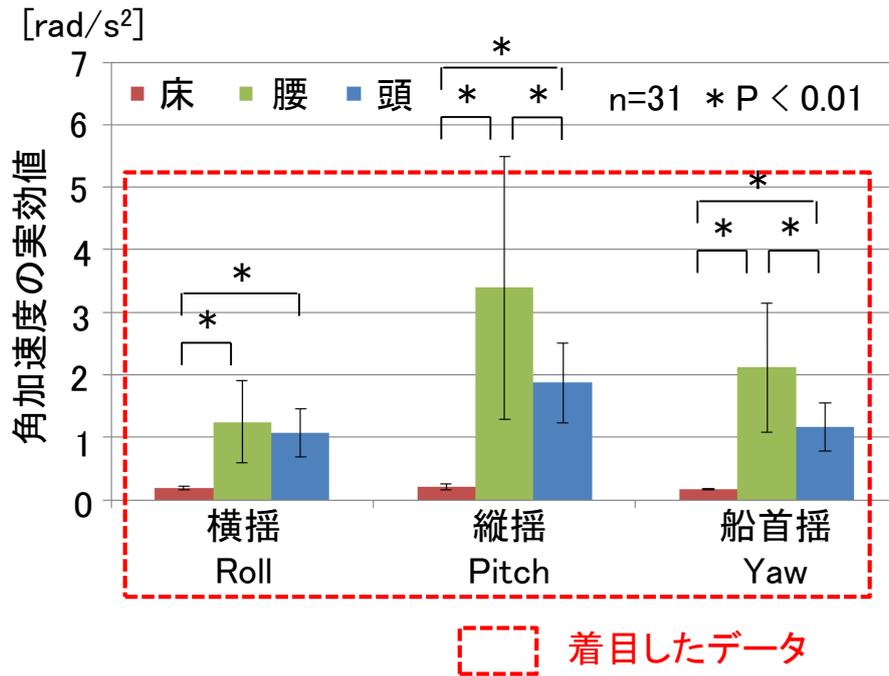


(a) 実験協力者

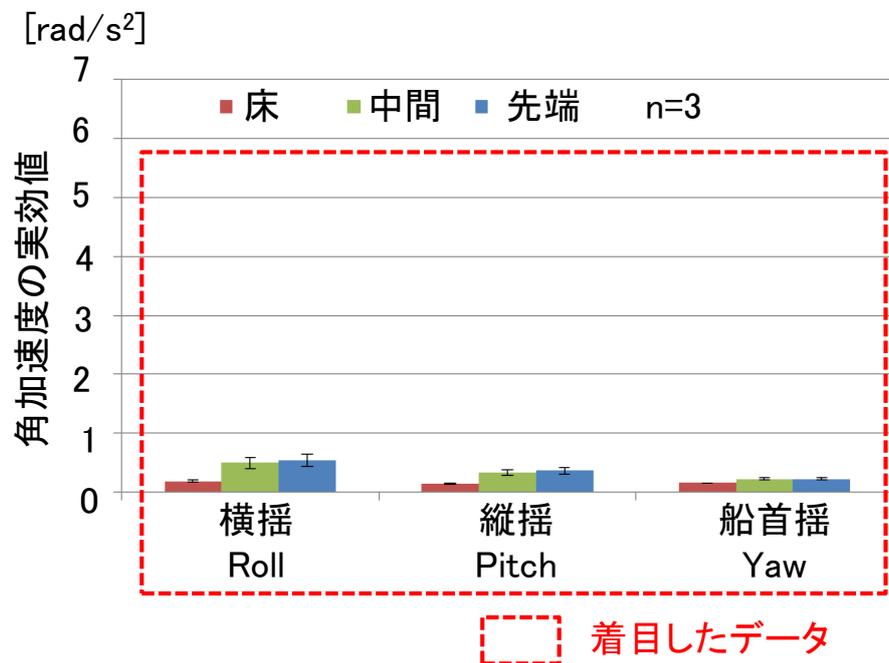


(b) 床に垂直に立てた棒

図 3-33 小型船舶の床の座標系を基準とした小型船舶動揺および立位姿勢動揺(並進運動)



(a) 実験協力者



(b) 床に垂直に立てた棒

図 3-34 小型船舶の床の座標系を基準とした小型船舶動揺および立位姿勢動揺(回転運動)

3. 4. 2 考察

実験協力者（男性，20歳）の実効値の時系列データから，座位姿勢および立位姿勢の実験協力者の腰部と頭部の動揺は，小型船舶動揺に比べて大きいことがわかった．これは，実験協力者が小型船舶動揺に対してバランスを崩し，姿勢維持が必要となったことが原因と考えられる．また，小型船舶の床の上下揺（Heave）の出現とともに，実験協力者の腰部，頭部の動揺が大きくなっていた．これは，小型船舶が滑走状態となり，前方からの波をきって走行するために，上下揺（Heave）が顕著に発生し，実験協力者の姿勢維持の動作が必要になったことが原因と推察される．

固定座標系，および小型船舶の床の座標系を基準とした小型船舶動揺および立位姿勢動揺を算出した結果，小型船舶の床，実験協力者の腰部，頭部の上下揺（Heave）には有意差がなかった．これより，実験協力者の腰部や頭部は，小型船舶動揺の上下揺（Heave）の影響をうけて，上下に動揺するものと考えられる．実験協力者の回転運動（横揺，縦揺，船首揺）については，実験協力者の頭部の実効値に比べて腰部の実効値が大きくなる傾向が観察された．一方，棒の動揺は，小型船舶の床から棒の先端に向かって大きくなっていく様子が観察された．これは，小型船舶動揺に対し，実験協力者がバランスを崩し，棒にはない関節を用いた姿勢維持の動作を行ったことが原因と考えられる．

固定座標系および小型船舶の床の座標系を基準とした場合は，実験協力者の腰部の縦揺（Pitch）が他の回転運動に比べて大きくなる傾向が観察された．これは，小型船舶動揺に対する姿勢維持の動作が，主に回転運動である縦揺（Pitch）として生じることを示している．基準とする座標系を変えても，実験協力者の立位姿勢動揺の傾向に変化がなかったのは，小型船舶が常時前進し，滑走状態となっているため，小型船舶の床面が大きく傾くような動作がほとんどなかったことが原因と推察される．

3. 5 まとめ

本章では、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響の解明を目的とし、小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の動揺を計測した。動揺は、小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部に3軸方位角センサを設置し、加速度・角加速度として計測した。小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部に設置した3軸方位角センサの設置位置は、小型船舶および乗船者の動作によって変化するため、座標変換による加速度・角加速度データの座標系の統一を行った。計測実験は、陸上および小型船舶上で実施した。本実験は、鳥羽商船高等専門学校生命倫理委員会規則に則り実施された。実験協力者には実験開始前に実験内容の説明を行い、実験への参加について同意を得た。

小型船舶における乗船者の立位姿勢動揺の解析の結果、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響として、小型船舶動揺に対する姿勢維持の動作により、乗船者の腰部に上下揺（Heave）と縦揺（Pitch）が特に生じることがわかった。

第4章 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響の計測

本章では、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響の計測・解析手法、および得られた知見について述べる。

本章では、先ず、陸上および小型船舶において実施した計測実験の方法について述べる。次に、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響の計測・解析手法である「エネルギー消費量計測システム」、および「エネルギー消費量の解析手法」について述べる。最後に、実験により得られた知見について述べる。

4. 1 実験

4. 1. 1 実験方法

小型船舶動揺が乗船者に与える影響を解明するためには、小型船舶動揺に対する姿勢維持の動作による乗船者の運動を考えることが重要である。生体は、エネルギー代謝により、筋肉を動かすためのエネルギーを作り出すことで運動を行う。このとき、身体全体の筋肉で消費された総エネルギー量がエネルギー消費量である。小型船舶動揺の乗船者の立位姿勢への物理的影響の解明を目的とした実験方法の概念図を図 4-1 に示す。本章では、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響の解明を目的とし、小型船舶動揺に対して乗船者の立位姿勢維持に必要なエネルギー消費量の解析を行った。さらに、乗船者の立位姿勢維持に必要なエネルギー消費量に相当する運動の解析を行った。

計測実験は、小型船舶および陸上で実施した。本章では、実験協力者ごとの年齢や性別、および計測実験の環境の差を吸収するために、生体の運動時のエネルギー消費量（運動時代謝量）を安静時のエネルギー消費量（安静時代謝量）で除したエネルギー消費量の比を算出することで正規化した。乗船者の立位姿勢維持に必要なエネルギー消費量に相当する運動の解析は、乗船者のエネルギー消費量の比と陸上での踏み台昇降運動時のエネルギー消費量の比を比較することにより行った。

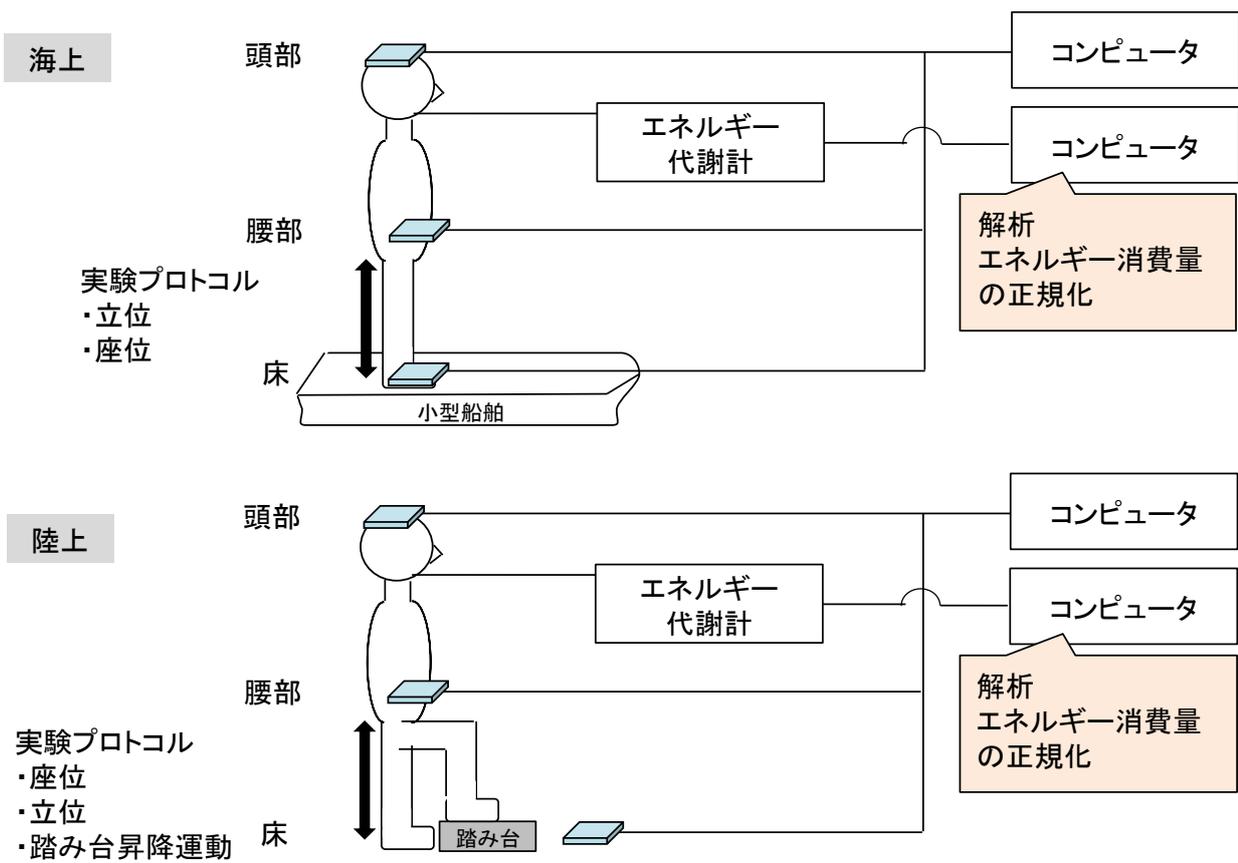
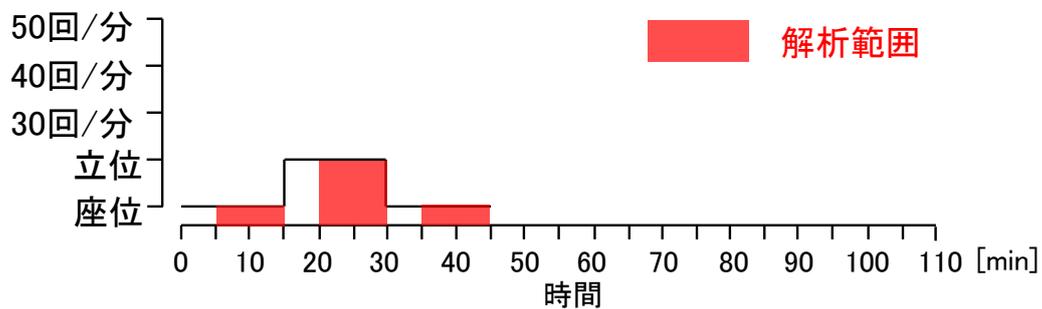


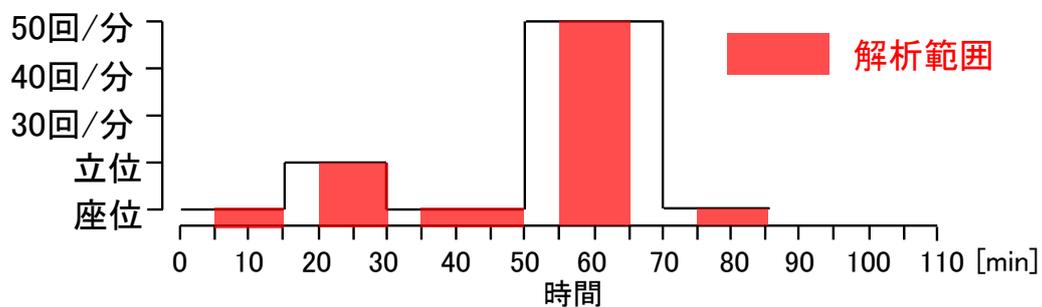
図 4-1 実験方法の概念図

4. 1. 2 陸上における計測実験

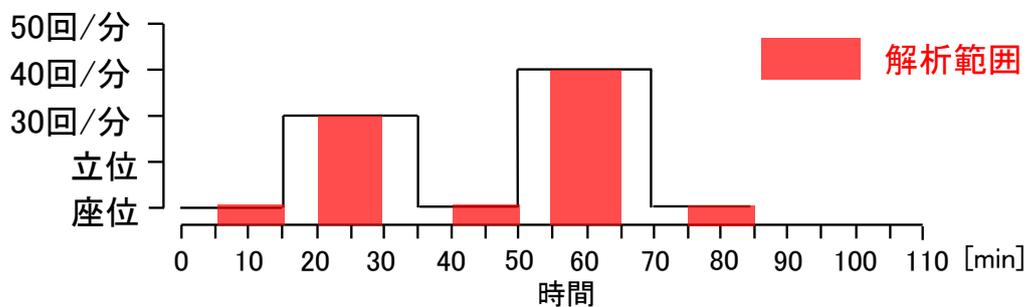
陸上における実験プロトコルおよび実験風景を図 4-2, 図 4-3 に示す. 本研究では, 乗船者のエネルギー消費量が陸上でのどの程度の運動に相当するのか調査を行うために, 陸上で実験協力者に踏み台昇降運動を実施した. 踏み台昇降運動は, 陸上で生体に運動負荷を与える試験に用いられる手法であり⁷⁰⁾, 踏み台の高さや昇り降りのタイミングによって, 生体を与える運動負荷の強度を変化させることができる. 本研究における踏み台昇降運動は, マスターの 2 階段負荷試験ではない独自の方法で実施した. 踏み台昇降運動の昇り降りのタイミングは, 30 回/分, 40 回/分, 50 回/分とし, メトロノームを鳴らして実験協力者に知らせた. 図 4-4 に踏み台昇降運動の流れを示す. 実験協力者には, メトロノームが 1 回なるごとに, 図 4-4 に示した 1~4 の流れで片足ずつ昇り降りするよう指示した. 踏み台昇降運動は, 高さ 14cm の 1 階段を片足で昇る, 又は降りる動作を 1 回とした, 踏み台昇降運動に使用した踏み台の仕様は表 4-1 に示す. また, 実験協力者および実験プロトコル一覧を表 4-2 に示す.



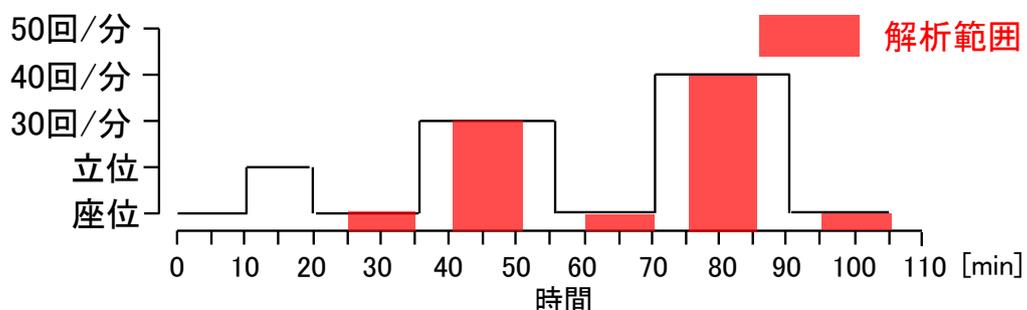
(a) 実験プロトコル A



(b) 実験プロトコル B



(c) 実験プロトコル C



(d) 実験プロトコル D

図 4-2 陸上における実験プロトコル

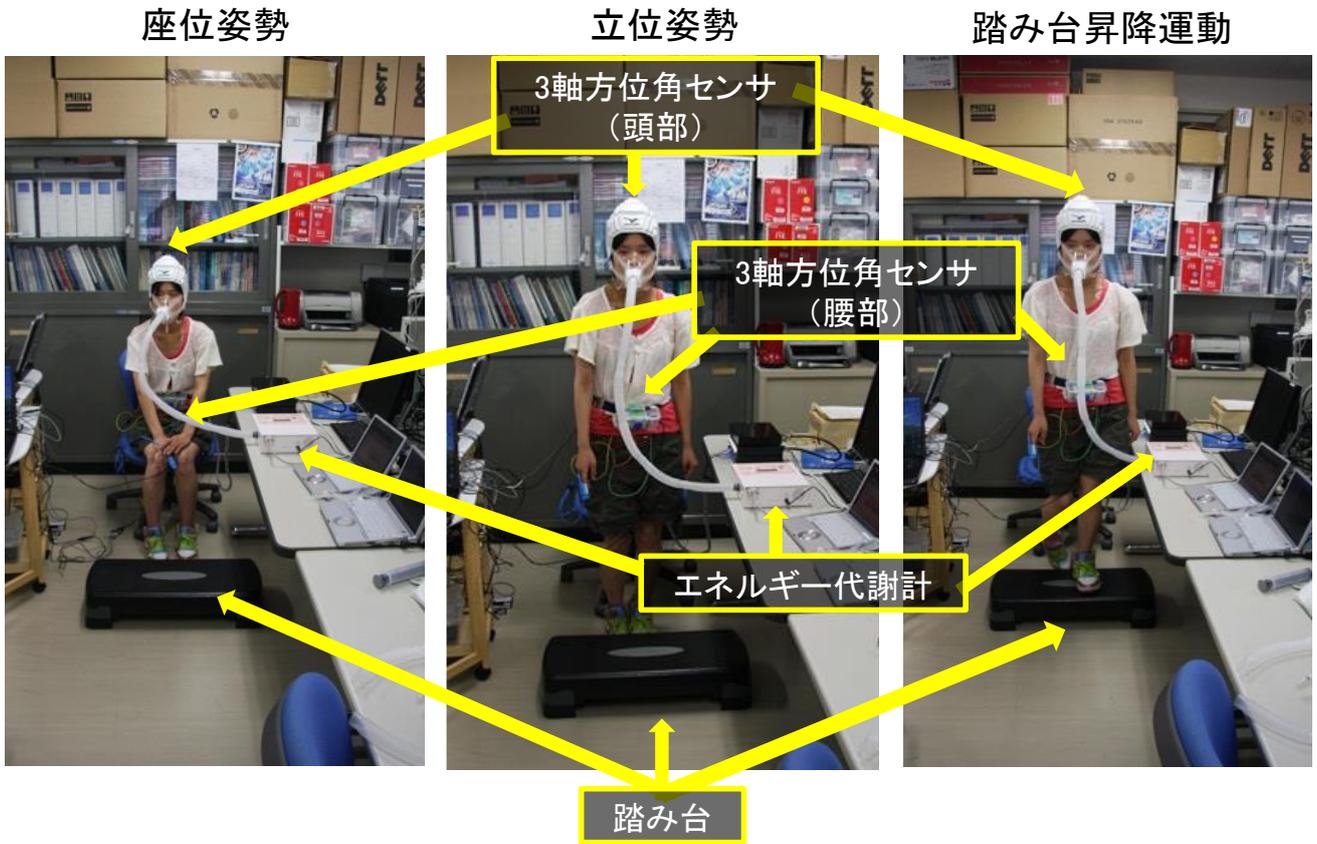
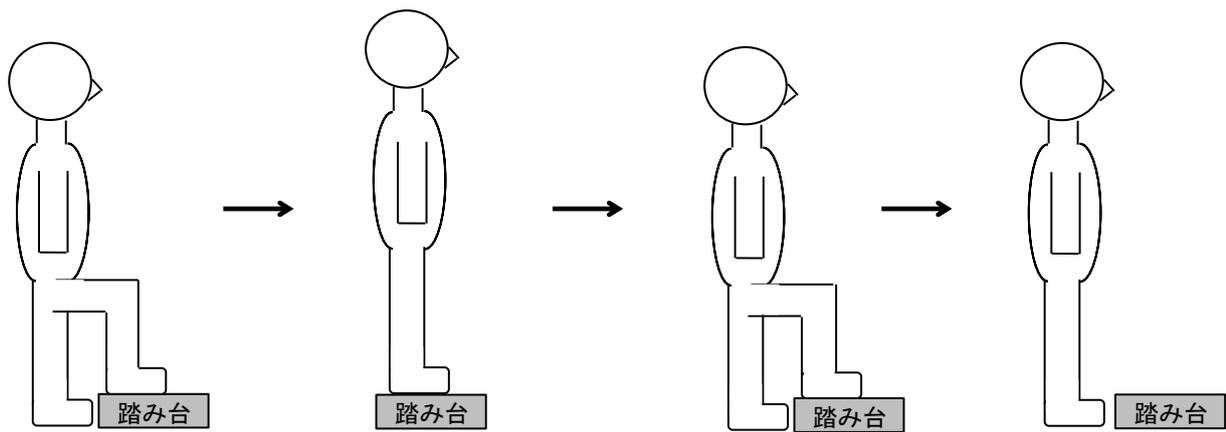


図 4-3 陸上における実験風景

表 4-1 踏み台の仕様

項目	仕様
高さ	14 [cm]
幅	66 [cm]
奥行	27 [cm]



1. 片足で昇る
2. もう一方の足で昇る
3. 片足で降りる
4. もう一方の足で降りる

図 4-4 踏み台昇降運動の流れ

表 4-2 実験協力者および実験プロトコル一覧

No.	実験日	実験協力者				実験プロトコル
		性別	年齢 [歳]	身長 [cm]	体重 [kg]	
1	2011/8/9	女性	18	162	57	A
2	2011/8/29	女性	18	149	53	A
3	2011/8/29	女性	18	153	41	A
4	2011/8/30	女性	18	151	45	A
5	2011/8/30	女性	18	153	48	A
6	2011/9/4	女性	23	150	48	A
7	2011/9/4	男性	49	175	75	A
8	2011/9/10	男性	19	168	53	A
9	2011/9/10	男性	19	170	75	A
10	2012/8/29	女性	19	156	54	B
11	2012/9/2	男性	23	173	69	B
12	2012/9/2	男性	23	169	75	B
13	2012/9/6	男性	20	175	95	B
14	2012/9/6	男性	18	169	53	B
15	2012/9/7	男性	20	175	95	C
16	2012/9/7	男性	23	169	75	D
17	2012/9/7	男性	23	173	69	D
18	2012/9/28	女性	24	150	48	D
19	2012/9/28	男性	50	175	75	D
20	2012/12/16	女性	19	156	54	D
21	2013/3/20	女性	18	156	56	D

4. 1. 3 小型船舶における計測実験

計測実験は、第2章の表2-1に示した鳥羽商船高等専門学校が所有する実習船「あさま」（総トン数14t、定員23名）の船舶内で実施した。小型船舶における実験風景を図4-5に示す。実験プロトコルは、第3章図3-4に示したプロトコルと同様である。また対象とした実験協力者は、第3章表3-2で示した。実験時の小型船舶の速度は、可能な限り一定とし、急な変針は行わないようにした。また視覚情報を排除するために、実験協力者の立位姿勢動揺は、小型船舶動揺の予測を可能とする船外の風景が見えない場所で計測した。実験協力者には、開眼状態で、船首方向である船内の壁を正面とするように指示した。座位姿勢の際は、実験協力者を船舶内に固定されたクッション性のある椅子に座らせた。運動や食事のエネルギー消費量への影響を除去するため、実験協力者には、実験前の激しい運動や飲食は控えさせた。計測実験は、実験協力者16名に対し実施された。小型船舶の速度は可能な限り一定とした。

座位姿勢

立位姿勢



図 4-5 小型船舶における実験風景

4. 2 解析方法

4. 2. 1 エネルギー消費量計測システム

エネルギー消費量計測システムを図 4-6 に示す。同システムは、小型船舶の床、実験協力者の腰部、頭部に設置した 3 台の 3 軸方位角センサとエネルギー代謝計から構成される。3 軸方位角センサとエネルギー代謝計は、RS232C を介してコンピュータに接続された。サンプリングインターバルは、3 軸方位角センサを 0.01s、エネルギー代謝計を 10s とした。の立位姿勢動揺は、3 軸方位角センサにより加速度・角加速度として計測された。実験協力者のエネルギー消費量は、呼気から酸素摂取量に基づき測定される。図 4-7 にエネルギー代謝計を、表 4-3 にエネルギー代謝計の仕様を示す。エネルギー代謝計の構造、およびエネルギー消費量の詳細な測定方法は、本論文の付録 1.2 に示す。

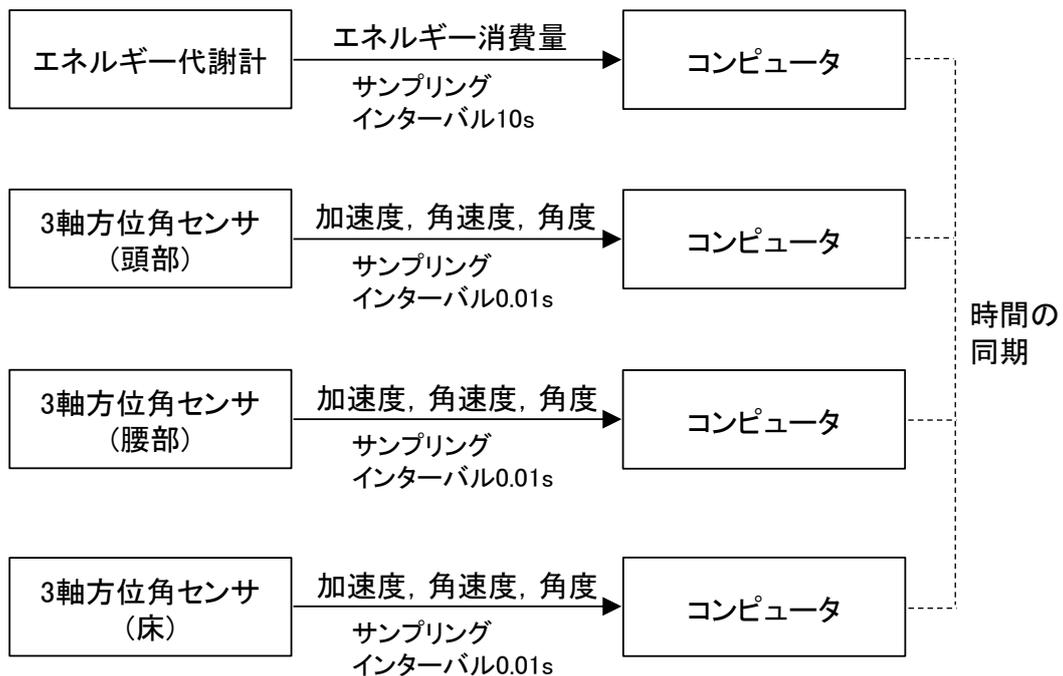


図 4-6 エネルギー消費量計測システム

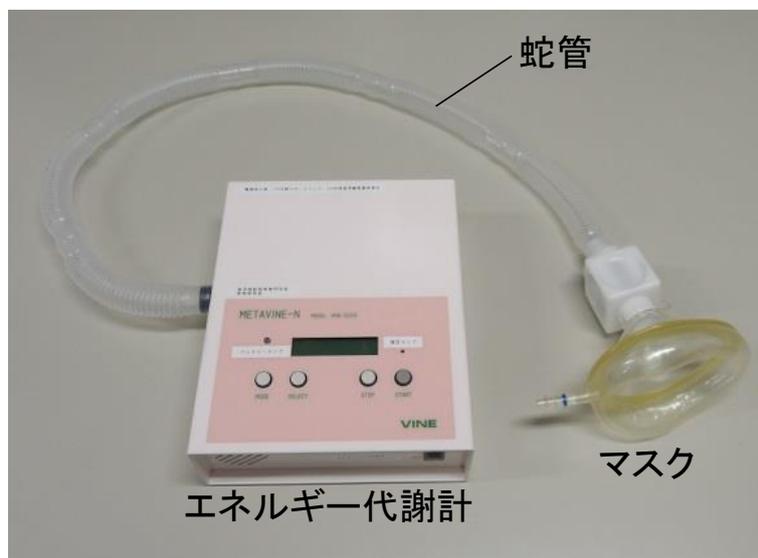


図 4-7 エネルギー代謝計の外観

表 4-3 エネルギー代謝計の仕様

項目	仕様
製品名	METAVINE-N(株式会社ヴァイン)
測定方法	酸素摂取量 [L/min]
測定項目	エネルギー消費量 [kcal]
サンプリング周期	10 [s]
外寸	228 × 70 × 220 [mm]
重量	1.5 [kg]
インターフェース	RS232C

4. 2. 2 代謝的影響の解析方法

(1) 立位姿勢動揺

実験協力者の立位姿勢動揺の大きさは、加速度・角加速度の実効値として解析された。実効値は式(3-5)により定義される。本研究では、実験協力者ごとに、立位開始5分後から15分後までの加速度・角加速度の10分間の実効値を算出した。実験協力者の立位姿勢動揺の特徴は、実験協力者16名から抽出した実効値31例の平均値と標準偏差を求めることで解析した。加速度・角加速度の実効値の有意差の検定には、分散分析およびテューキーの母集団平均の対比較検定を用い、有意水準は5%および1%とした。

(2) エネルギー消費量の比

実験協力者のエネルギー消費量には、個人差が生じるため、本研究では、式(4-1)によりエネルギー消費量の比を求めた⁷¹⁾。運動時のエネルギー消費量は、立位開始5分後から15分後までの解析範囲におけるエネルギー消費量の平均値とした。安静時のエネルギー消費量は、座位開始5分後から15分後までの解析範囲におけるエネルギー消費量の平均値の最小値とした。

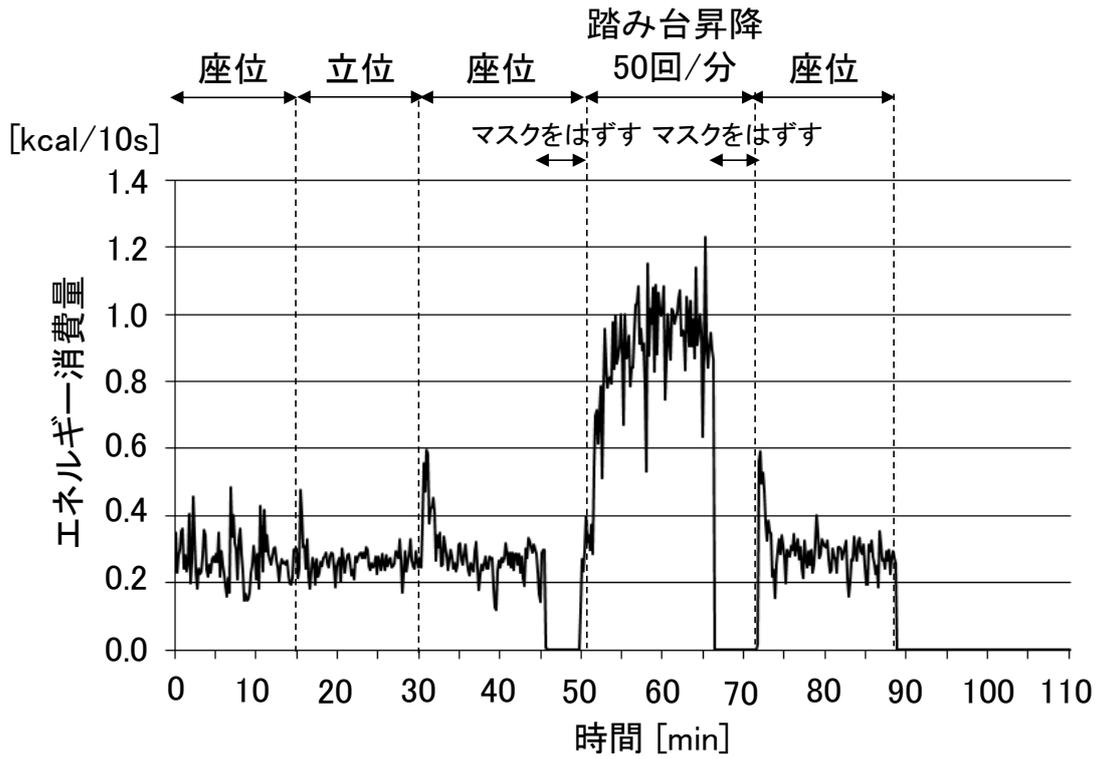
$$\text{エネルギー消費量の比} = \frac{\text{運動時のエネルギー消費量}}{\text{安静時のエネルギー消費量}} \quad (4-1)$$

エネルギー消費量の比の解析は、小型船舶および陸上での踏み台昇降運動の計測実験に参加した実験協力者16名を対象として行った。陸上における実験協力者のエネルギー消費量の比と小型船舶における実験協力者のエネルギー消費量の比の有意差の検定には、マン・ホイットニーのU検定を使用し、有意水準は5%とした。

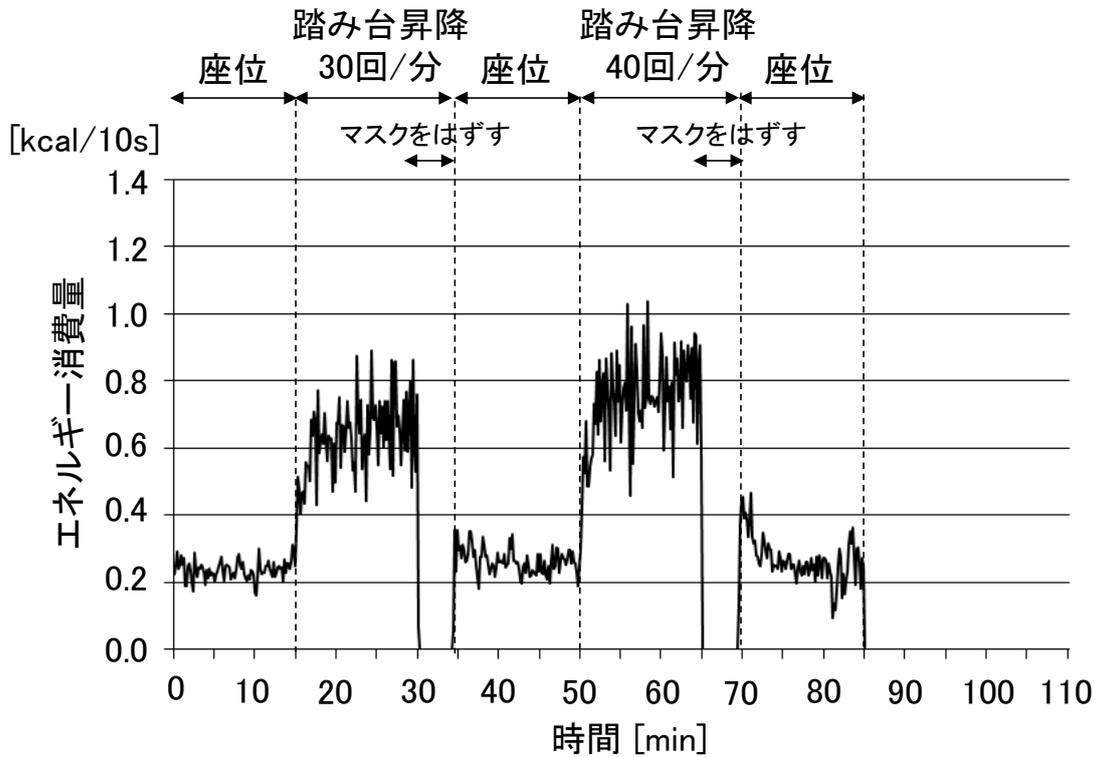
4. 3 陸上における立位姿勢動揺のエネルギー消費量

4. 3. 1 結果

陸上における実験協力者（男性，23歳）のエネルギー消費量の時系列データの例を図4-8に，陸上における実験協力者のエネルギー消費量の比の平均値および標準偏差を図4-9に示す．本論文における検討項目とは別に行っている唾液計測のため，実験の途中でエネルギー代謝計のマスクを外しているが（図4-8），この区間は，本実験の解析対象から除外している．実験協力者のエネルギー消費量は，踏み台昇降運動の強度に伴い，上昇する様子が観察された．踏み台昇降運動時の解析の対象とした範囲におけるエネルギー消費量の平均値は，30回/分で0.23kcalから0.66kcal（心拍数では，71bpmから102bpm），40回/分で0.31kcalから0.78kcal（心拍数では，79bpmから105bpm），50回/分で0.52kcalから0.95kcal（心拍数では，75bpmから95bpm）であった．図4-9をみると，立位姿勢時のエネルギー消費量の比は，座位姿勢時のエネルギー消費量の比と近い数値であった．また，エネルギー消費量の比は，踏み台昇降運動の強度に伴い増加した．



(a) プロトコルB



(b) プロトコルD

図 4-8 陸上における実験協力者のエネルギー消費量 (男性, 23 歳)

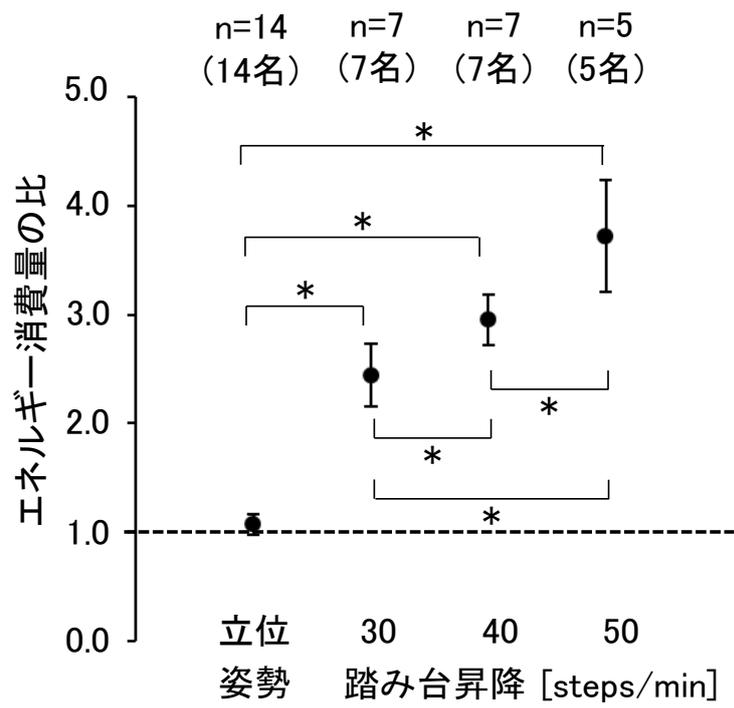


図 4-9 陸上における実験協力者のエネルギー消費量の比

4. 3. 2 考察

実験協力者のエネルギー消費量は、踏み台昇降運動の強度に伴い、上昇する様子が観察された。これは、踏み台昇降運動の強度に伴い、実験協力者の酸素摂取量が増加したことが原因と推察される。陸上における静止立位時のエネルギー消費量は座位姿勢時と近い数値を示したが、やや増加する傾向にあった。これは、実験協力者が立位姿勢を維持するための筋肉を使用しており、座位姿勢時に比べて酸素摂取量が増加したことが原因と推察される。

4. 4 小型船舶動揺に対する立位姿勢動揺のエネルギー消費量

4. 4. 1 結果

固定座標系を基準とした実験協力者（18歳，女性）の並進運動および回転運動とエネルギー消費量の時系列データの一例を図4-10，図4-11に示す。また小型船舶の床の座標系を基準とした同実験協力者の並進運動および回転運動とエネルギー消費量の時系列データの一例を図4-12，図4-13に示す。小型船舶の床，腰部，頭部の上下揺（Heave）は，同期して変化していた。またエネルギー消費量は，実験協力者の回転方向の立位姿勢動揺に伴い増加する様子が観察された。実験協力者ごとのエネルギー消費量の詳細は，付録4.2に示した。

本研究では，小型船舶における実験協力者のエネルギー消費量の比と，陸上における実験協力者のエネルギー消費量の比の比較を行った。図4-14に，小型船舶における実験協力者のエネルギー消費量の比の平均値と，陸上における実験協力者のエネルギー消費量の比の平均値を示す。小型船舶における実験協力者のエネルギー消費量の比は，陸上における立位姿勢時の実験協力者のエネルギー消費量の比に比べて有意に大きくなった。一方，小型船舶における実験協力者のエネルギー消費量の比と，陸上における立位姿勢時，30回/分，40回/分，50回/分の踏み台昇降運動時のエネルギー消費量の比には，有意差が確認された。そこで，本研究では，小型船舶動揺の中でも顕著に観察された上下揺（Heave）に着目した。小型船舶の上下揺（Heave）が 1.0m/s^2 以上となった7例について，エネルギー消費量の比の平均値を算出した結果を図4-15に示す。小型船舶における実験協力者のエネルギー消費量の比（ 2.12 ± 0.45 ）と，陸上における30回/分の踏み台昇降運動時の実験協力者のエネルギー消費量の比（ 2.44 ± 0.29 ）には，有意差が確認されず，近い数値を示した。

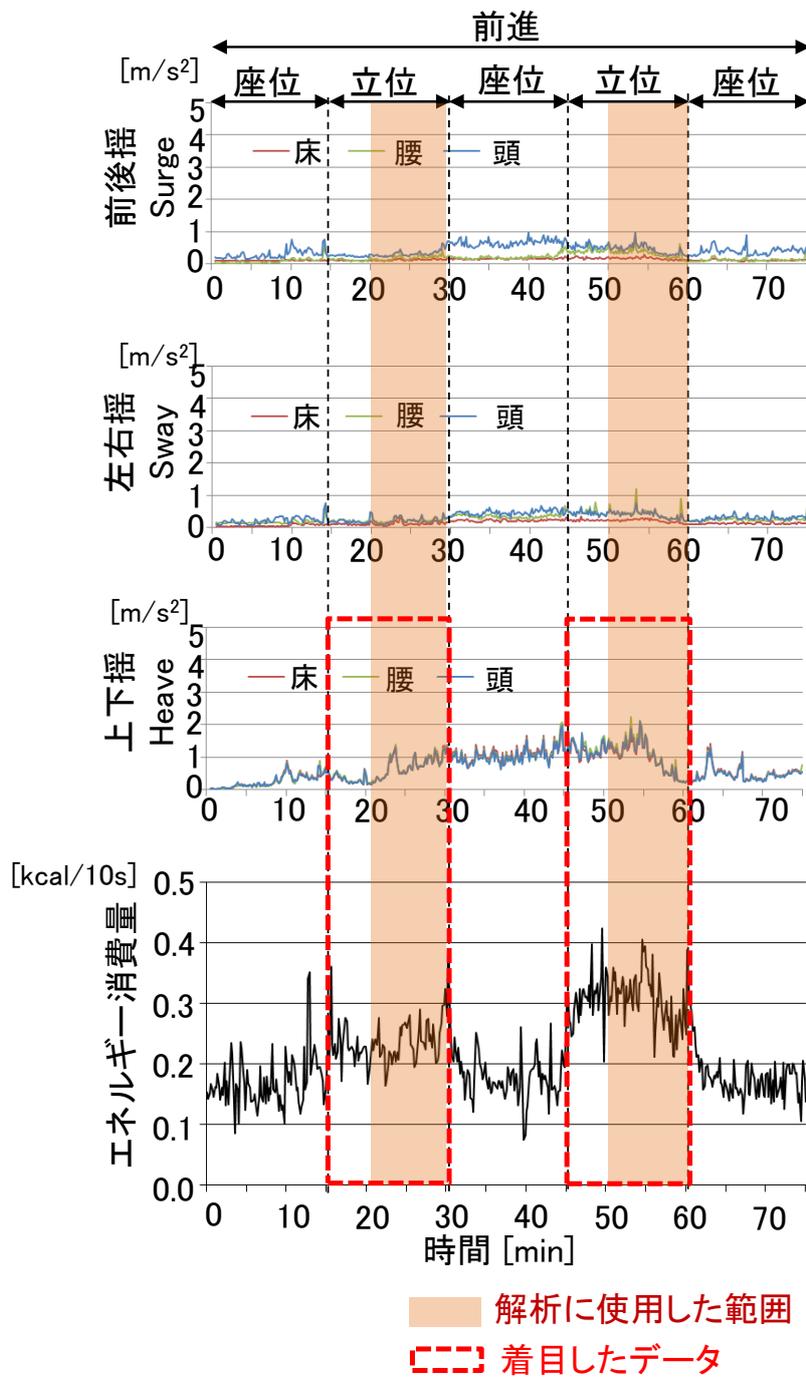


図 4-10 固定座標系を基準とした並進運動とエネルギー消費量の時系列データ

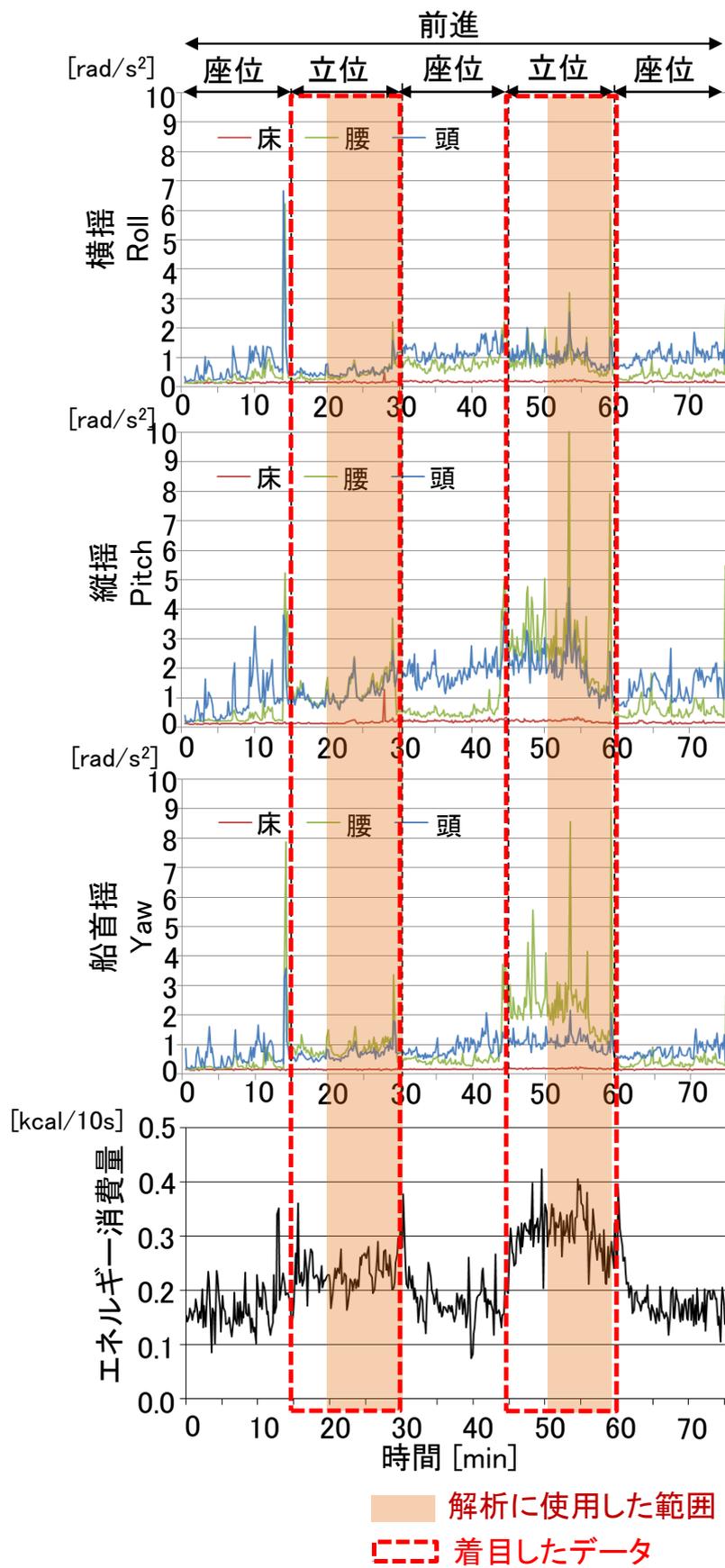


図 4-11 固定座標系を基準とした回転運動とエネルギー消費量の時系列データ

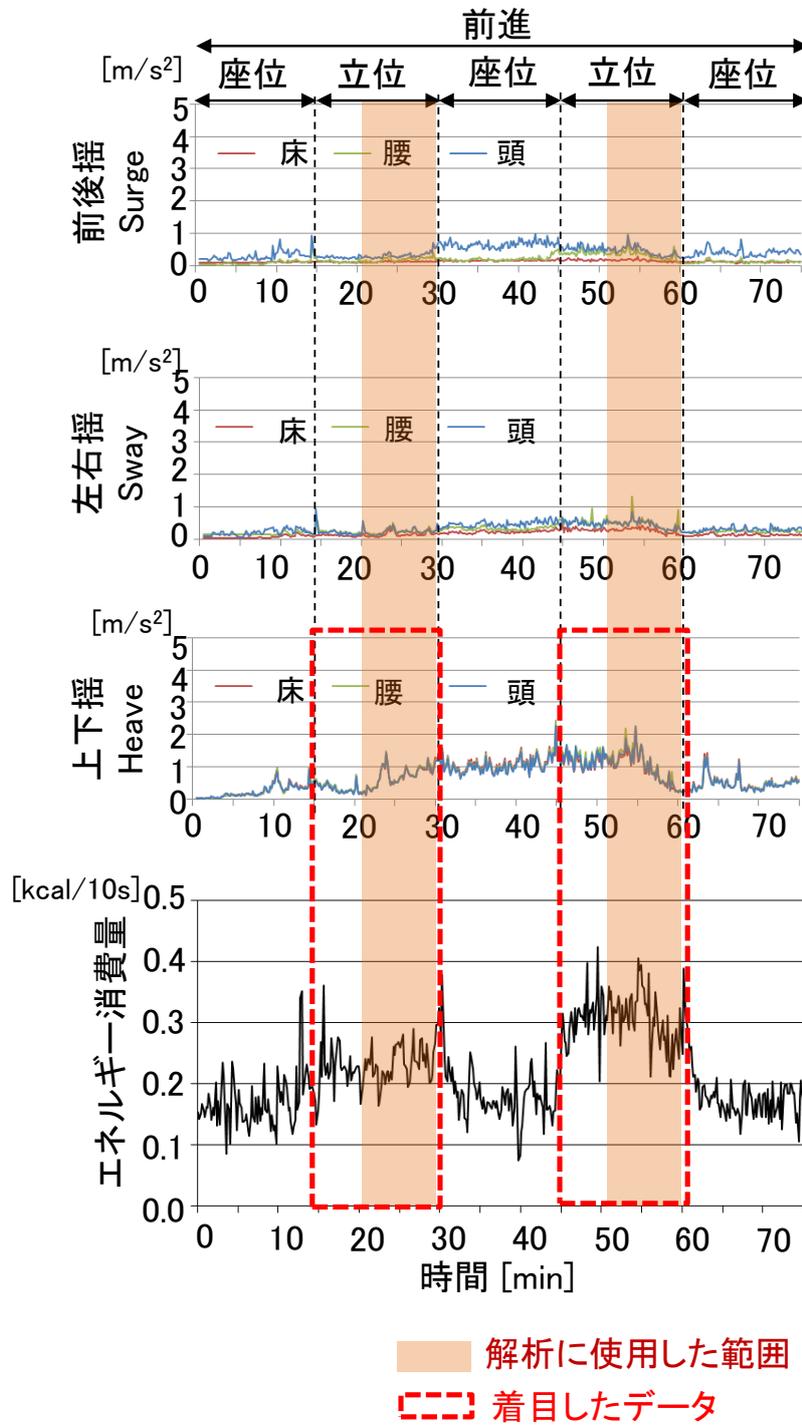


図 4-12 小型船舶の床の座標系を基準とした並進運動とエネルギー消費量の時系列データ

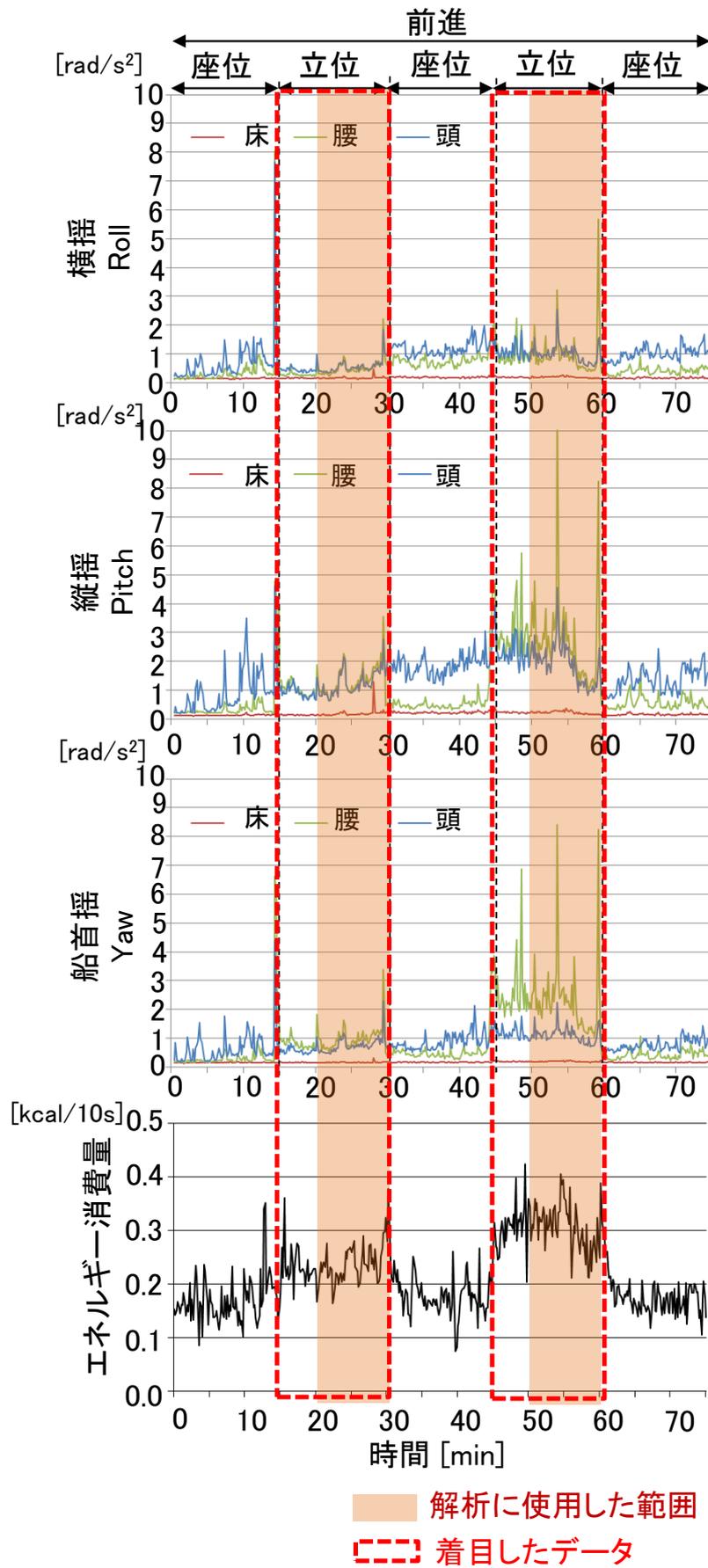


図 4-13 小型船舶の床の座標系を基準とした回転運動とエネルギー消費量の時系列データ

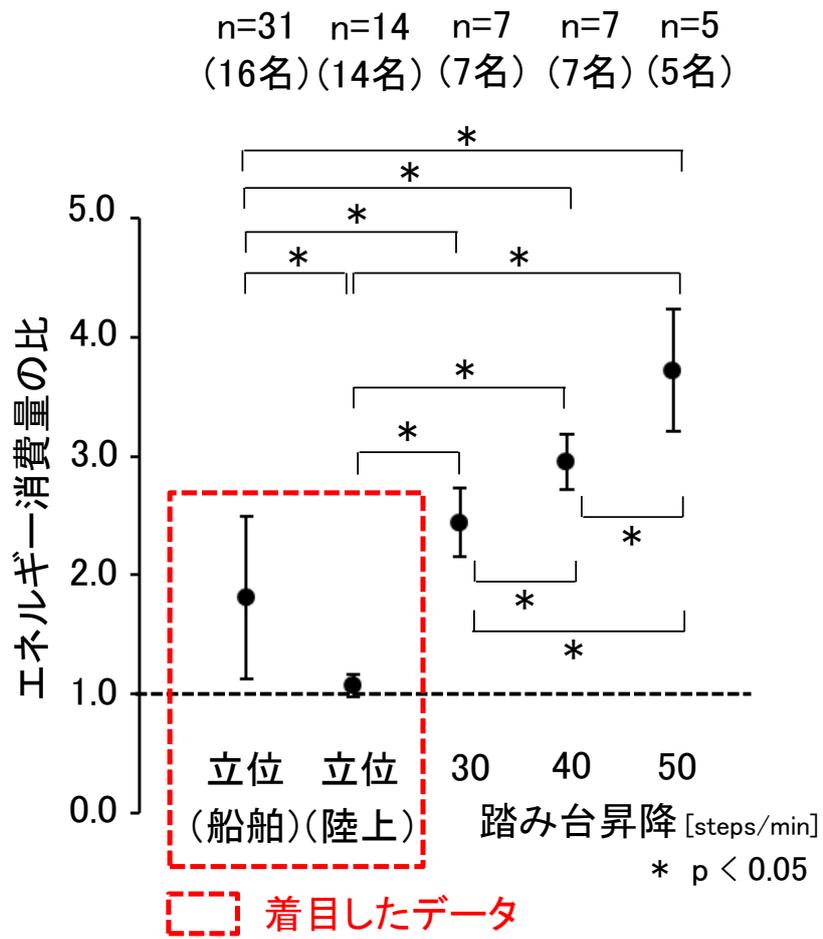


図 4-14 エネルギー消費量の比の平均値と標準偏差

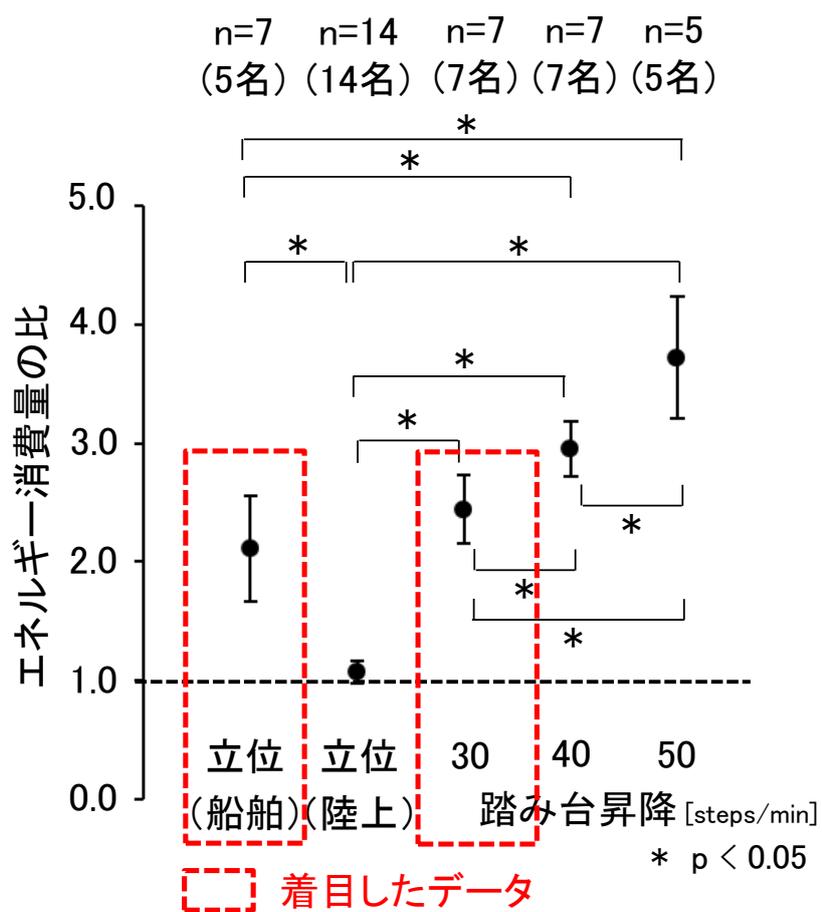


図 4-15 エネルギー消費量の比の平均値と標準偏差
 (小型船舶の上下揺 (Heave) が 1.0m/s^2 以上となった実験協力者)

4. 4. 2 考察

小型船舶における実験協力者のエネルギー消費量の比が，陸上における立位姿勢時の実験協力者のエネルギー消費量の比に比べて有意に大きくなった．これは，実験協力者が小型船舶動揺に対し，姿勢維持のための動作を行ったことが原因と推察される．

小型船舶における実験協力者のエネルギー消費量の比 (2.12 ± 0.45) と，陸上における30回/分の踏み台昇降運動時の実験協力者のエネルギー消費量の比 (2.44 ± 0.29) には，有意差が確認されず，近い数値を示した．これより，小型船舶における実験協力者の立位姿勢動揺のエネルギー消費量は，陸上での静止立位時のエネルギー消費量よりも大きく，また30回/分の踏み台昇降運動のエネルギー消費量に相当するものと考えられる．

4. 5 まとめ

本章では、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響の解明を目的とし、小型船舶動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺のエネルギー消費量の計測を行った。さらに、乗船者の立位姿勢動揺のエネルギー消費量に相当する陸上での運動の解析を行った。

計測実験は、小型船舶および陸上で実施した。本研究の実験プロトコルは、国立鳥羽商船高等専門学校の倫理委員会の承諾を得ている。実験協力者には実験開始前に実験内容の説明を行い、実験への参加について同意を得た。本研究では、実験協力者ごとの年齢や性別、および計測実験の環境の差を吸収するために、生体の運動時のエネルギー消費量（運動時代謝量）を安静時のエネルギー消費量（安静時代謝量）で除したエネルギー消費量の比を算出することで正規化した。

以上より、小型船舶における乗船者の立位姿勢動揺のエネルギー消費量は、陸上での静止立位時のエネルギー消費量よりも大きく、小型船舶の上下揺 (Heave) の実効値が 1.0m/s^2 以上となった場合には、30 回/分の踏み台昇降運動のエネルギー消費量に相当することがわかった。

第5章 小型船舶動揺が乗船者に与える影響の総合的な解析

本章では，小型船舶動揺が乗船者に与える影響の総合的な計測・解析手法，および得られた知見について述べる．

本章では，先ず，小型船舶において実施した計測実験の方法について述べる．次に小型船舶動揺が乗船者に与える影響の総合的な計測・解析手法である「エネルギー消費量を支配する動揺の同定方法」について述べる．最後に，得られた知見について述べる．

5. 1 実験方法

本章では、小型船舶動揺が乗船者に与える影響の総合的な解析を行うために、エネルギー消費量を支配する動揺および身体的特徴を同定した。エネルギー消費量を支配する動揺および身体的特徴の同定は、エネルギー消費量を目的変数とし、小型船舶動揺および、実験協力者の立位姿勢動揺を説明変数とする重回帰分析により行った。

小型船舶における計測実験は、第4章4.4.3で述べた実験方法と同様である。実験プロトコルは、第3章図3-4で示したものと同様である。

5. 2 解析方法

5. 2. 1 計測データの評価指標

(1) 小型船舶動揺と立位姿勢動揺

小型船舶動揺および立位姿勢動揺の大きさは、図 3-5 に示す立位姿勢動揺算出のための処理（①座標変換，②重力加速度の除去，③微分処理，④ローパスフィルタの適用，⑤実効値の算出）を行うことにより定量化した．実効値は式(3-5)を用いて，立位開始 5 分後から 15 分後までの解析範囲を対象として算出した．

(2) エネルギー消費量

エネルギー消費量の大きさは，実験協力者が立位開始 5 分後から 15 分後までの解析範囲におけるエネルギー消費量の平均値として評価した．

5. 2. 2 重回帰分析

エネルギー消費量を支配する動揺および身体的特徴の同定は、重回帰分析により行った。重回帰分析とは、結果といくつかの原因を結ぶ最適な関係式を求めることにより、結果に結びつく原因の寄与率を同定する手法である。重回帰分析に用いた重回帰式を式(5-1)に示す。yは目的変数、xは説明変数、aは偏回帰係数を表す。目的変数とは、重回帰分析における結果を表し、小型船舶における実験協力者の解析範囲におけるエネルギー消費量の平均値とした。説明変数は、重回帰分析における結果につながる原因を表し、小型船舶の床、実験協力者の腰部、頭部で計測した加速度・角加速度の解析範囲における実効値、体表面積（デュポア式、藤本式、新谷式）、身長、体重、性別（女性：1，男性：-1）とした。体表面積は、身長をH[cm]、体重をW[kg]式(5-2)～(5-4)により計算した。小型船舶の床、実験協力者の腰部、頭部で計測した加速度・角加速度の実効値については、固定座標系を基準とした場合と小型船舶の床の座標系を基準とした場合で、重回帰式のあてはまりを比較した。

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n \quad (5-1)$$

$$\text{体表面積 (デュポア)} [m^2] = H^{0.725} \times W^{0.425} \times 0.007184 \quad (5-2)^{72)}$$

$$\text{体表面積 (新谷式)} [m^2] = H^{0.725} \times W^{0.425} \times 0.007358 \quad (5-3)^{73)}$$

$$\text{体表面積 (藤本式)} [m^2] = H^{0.663} \times W^{0.444} \times 0.008883 \quad (5-4)^{74)}$$

最適な重回帰式の算出は、ステップワイズ法により行った。説明変数間の共線性を防ぐため、以下の条件で説明変数の選択を行った。

- ①説明変数となる動揺と動揺の間に0.8以上の相関が確認された場合は、エネルギー消費量との相関係数が低い説明変数を削除する
- ②体表面積と身長、体重は独立変数ではないため、身長と体重は削除する
- ③体表面積と性別は、互いに相関係数が0.8以上であるため、性別を削除する

重回帰分析は、小型船舶における実験協力者 16 名に対し 31 回施行したデータから、スミルノフの棄却検定⁷⁵⁾により判定した外れ値 3 データを除いた 28 データを対象に行った。実験協力者の身長、体重、性別を選択した場合の重回帰分析の結果の詳細は、付録 4.3 に示した。固定座標系および小型船舶の床の座標系を基準とした場合における重回帰分析に使用した実験協力者およびデータ一覧を表 5-1、表 5-2 に示す。

表 5-1 重回帰分析に使用した実験協力者およびデータ一覧 (固定座標系を基準とした場合)

No.	実験日	実験協力者				体表面積				加速度・角加速度の実効値												エネルギー消費量 [kcal]						
		性別	年齢 [歳]	身長 [cm]	体重 [kg]	デュボア	新谷	藤本	小型船舶の床				腰部				頭部											
									前後揺 [m/s ²]	左右揺 [m/s ²]	上下揺 [m/s ²]	横揺 [rad/s ²]	縦揺 [rad/s ²]	船首揺 [rad/s ²]	前後揺 [m/s ²]	左右揺 [m/s ²]	上下揺 [m/s ²]	横揺 [rad/s ²]	縦揺 [rad/s ²]	船首揺 [rad/s ²]								
1	2011/7/27	女性	19	149	39	1.28	1.31	1.25	0.07	0.14	0.50	0.18	0.17	0.16	0.17	0.23	0.54	0.81	1.15	1.21	0.27	0.35	0.51	0.83	1.36	1.36	0.86	0.25
2	2011/7/27	女性	19	149	39	1.28	1.31	1.25	0.08	0.15	0.58	0.18	0.17	0.16	0.21	0.29	0.72	1.05	1.67	1.77	0.28	0.38	0.62	1.10	1.47	1.47	1.01	0.29
3	2011/7/27	男性	19	170	75	1.86	1.91	1.82	0.06	0.13	0.39	0.17	0.15	0.16	0.24	0.18	0.58	1.29	4.47	4.46	0.26	0.26	0.40	0.52	1.01	1.01	0.51	0.48
4	2011/7/27	男性	19	170	75	1.86	1.91	1.82	0.08	0.15	0.64	0.18	0.18	0.16	0.36	0.36	0.98	2.47	7.77	3.60	0.37	0.39	0.66	0.99	1.44	1.44	0.80	0.52
5	2011/7/28	女性	18	149	53	1.46	1.50	1.43	0.14	0.14	0.76	0.18	0.25	0.16	0.21	0.25	0.78	0.59	1.45	1.04	0.35	0.24	0.76	0.62	1.37	1.37	0.78	0.23
6	2011/7/28	女性	18	149	53	1.46	1.50	1.43	0.18	0.22	1.12	0.20	0.23	0.19	0.37	0.45	1.23	1.24	3.03	2.63	0.48	0.41	1.16	1.07	1.99	1.10	1.10	0.31
7	2011/7/28	女性	23	150	48	1.41	1.44	1.37	0.17	0.24	1.14	0.20	0.24	0.17	0.34	0.45	1.24	2.14	3.35	2.82	0.50	0.50	1.16	1.31	2.15	1.33	1.33	0.28
8	2011/7/29	女性	18	162	57	1.60	1.64	1.56	0.10	0.16	0.75	0.18	0.19	0.16	0.26	0.24	0.87	0.61	1.43	1.22	0.35	0.39	0.76	0.87	1.31	1.31	0.97	0.24
9	2011/7/29	女性	18	162	57	1.60	1.64	1.56	0.09	0.20	0.76	0.20	0.21	0.17	0.25	0.25	0.78	0.91	1.87	1.34	0.34	0.36	0.80	1.08	1.76	1.17	1.17	0.21
10	2011/7/29	男性	49	175	75	1.95	1.99	1.90	0.17	0.27	1.38	0.21	0.27	0.17	0.40	0.47	1.52	1.80	4.69	2.37	0.74	0.62	1.52	1.66	3.06	1.96	1.96	0.44
11	2011/7/29	男性	49	175	75	1.95	1.99	1.90	0.08	0.16	0.62	0.18	0.18	0.17	0.20	0.18	0.70	0.53	2.94	0.99	0.50	0.31	0.73	0.74	2.06	0.94	0.94	0.34
12	2011/8/22	女性	18	153	41	1.34	1.37	1.30	0.10	0.17	0.55	0.17	0.16	0.16	0.26	0.30	0.62	1.03	2.48	2.31	0.44	0.36	0.60	1.26	2.09	1.57	1.57	0.21
13	2011/8/22	女性	18	153	41	1.34	1.37	1.30	0.10	0.19	0.71	0.21	0.19	0.17	0.30	0.35	0.86	2.23	3.37	3.00	0.49	0.41	0.78	1.60	2.52	1.99	1.99	0.18
14	2011/8/22	男性	19	168	53	1.59	1.63	1.55	0.20	0.34	1.57	0.24	0.32	0.18	0.62	0.66	1.94	2.43	6.36	4.58	0.67	0.81	1.89	2.09	3.66	1.58	1.58	0.37
15	2011/8/22	男性	19	168	53	1.59	1.63	1.55	0.10	0.29	0.69	0.24	0.22	0.17	0.26	0.33	0.82	0.89	2.74	1.71	0.32	0.49	0.84	1.03	2.31	0.93	0.93	0.24
16	2011/8/23	女性	18	151	45	1.38	1.41	1.34	0.12	0.28	0.69	0.20	0.18	0.17	0.36	0.53	0.87	1.56	4.32	3.09	0.41	0.53	0.75	1.51	1.89	1.56	1.56	0.19
17	2011/8/23	女性	18	151	45	1.38	1.41	1.34	0.17	0.41	1.33	0.29	0.30	0.20	0.41	0.56	1.60	2.36	5.67	3.65	0.64	0.55	1.42	1.71	3.10	1.32	1.32	0.21
18	2011/8/23	女性	18	153	48	1.43	1.46	1.39	0.07	0.15	0.41	0.17	0.15	0.16	0.15	0.16	0.46	0.42	0.88	0.72	0.29	0.20	0.43	0.68	1.22	0.89	0.89	0.11
19	2011/8/23	女性	18	153	48	1.43	1.46	1.39	0.09	0.15	0.70	0.20	0.20	0.16	0.16	0.14	0.74	0.36	1.11	0.72	0.28	0.24	0.69	0.69	1.39	0.90	0.90	0.07
20	2011/8/24	女性	23	150	48	1.41	1.44	1.37	0.16	0.24	0.99	0.21	0.22	0.17	0.26	0.41	1.06	0.57	1.40	1.29	0.36	0.47	1.01	1.13	1.64	0.91	0.91	0.25
21	2011/8/24	女性	23	150	48	1.41	1.44	1.37	0.18	0.33	1.29	0.24	0.26	0.18	0.33	0.55	1.47	0.95	2.29	2.05	0.46	0.61	1.38	1.30	1.99	1.09	1.09	0.29
22	2011/8/24	男性	49	175	75	1.95	1.99	1.90	0.18	0.18	1.23	0.24	0.27	0.17	0.35	0.32	1.34	1.58	5.17	1.70	0.68	0.41	1.30	1.26	2.73	1.62	1.62	0.38
23	2011/8/24	男性	49	175	75	1.95	1.99	1.90	0.13	0.15	0.60	0.19	0.17	0.16	0.24	0.23	0.69	0.93	3.40	0.71	0.53	0.27	0.66	0.55	1.91	0.71	0.71	0.35
24	2012/8/30	女性	19	156	54	1.52	1.56	1.49	0.18	0.21	0.97	0.21	0.21	0.17	0.34	0.43	1.12	1.28	3.68	2.06	0.65	0.53	1.01	1.56	2.52	1.60	1.60	0.26
25	2012/8/31	男性	23	173	69	1.82	1.87	1.77	0.16	0.19	0.61	0.18	0.17	0.17	0.35	0.51	0.90	1.61	6.26	3.55	0.33	0.42	0.62	1.27	1.26	1.64	1.64	0.42
26	2012/8/31	男性	23	169	75	1.86	1.90	1.81	0.15	0.16	0.53	0.18	0.16	0.17	0.27	0.28	0.65	0.56	2.22	1.89	0.29	0.27	0.55	0.84	1.16	0.92	0.92	0.31
27	2012/9/3	男性	20	175	95	2.10	2.16	2.06	0.18	0.17	0.89	0.20	0.22	0.17	0.39	0.42	1.51	2.04	10.25	2.61	0.56	0.42	1.05	1.27	2.03	1.30	1.30	0.43
28	2012/9/5	女性	18	156	56	1.55	1.58	1.51	0.13	0.11	0.44	0.18	0.15	0.17	0.22	0.21	0.46	0.58	1.60	1.39	0.28	0.27	0.44	0.68	1.25	0.73	0.73	0.21
29	2012/9/5	男性	18	169	53	1.60	1.64	1.55	0.15	0.12	0.78	0.17	0.18	0.16	0.33	0.33	0.87	1.68	4.41	3.11	0.25	0.23	0.76	0.71	1.40	0.78	0.78	0.27
30	2012/9/12	女性	24	150	48	1.41	1.44	1.37	0.14	0.17	0.58	0.19	0.17	0.17	0.24	0.26	0.65	0.53	1.13	1.14	0.27	0.31	0.59	0.78	1.33	0.81	0.81	0.16
31	2012/9/12	男性	49	175	75	1.86	1.91	1.82	0.16	0.19	0.89	0.18	0.19	0.17	0.34	0.34	1.05	0.90	3.97	1.30	0.59	0.46	1.01	0.87	2.03	1.10	1.10	0.40

スミルノフの乗却検定により除去したデータ

表 5-2 重回帰分析に使用した実験協力者およびデータ一覧 (小型船舶の床の座標系を基準とした場合)

No.	実験日	実験協力者				体表面積				加速度・角加速度の実効値												エネルギー消費量 [kcal]							
		性別	年齢 [歳]	身長 [cm]	体重 [kg]	デューボア	新谷	藤本	小型船舶の床				腰部				頭部												
									前後揺 [m/s ²]	左右揺 [m/s ²]	上下揺 [m/s ²]	横揺 [rad/s ²]	縦揺 [rad/s ²]	船首揺 [rad/s ²]	前後揺 [m/s ²]	左右揺 [m/s ²]	上下揺 [m/s ²]	横揺 [rad/s ²]	縦揺 [rad/s ²]	船首揺 [rad/s ²]	前後揺 [m/s ²]		左右揺 [m/s ²]	上下揺 [m/s ²]	横揺 [rad/s ²]	縦揺 [rad/s ²]	船首揺 [rad/s ²]		
1	2011/7/27	女性	19	149	39	1.28	1.31	1.25	0.11	0.15	0.49	0.18	0.17	0.16	0.17	0.16	0.17	0.26	0.54	0.81	1.12	1.24	0.30	0.32	0.51	0.82	1.35	0.89	0.25
2	2011/7/27	女性	19	149	39	1.28	1.31	1.25	0.12	0.15	0.58	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.22	0.32	0.71	1.05	1.66	1.78	0.30	0.37	0.62	1.08	1.47	1.03	0.29
3	2011/7/27	男性	19	170	75	1.86	1.91	1.82	0.11	0.10	0.40	0.17	0.15	0.17	0.15	0.17	0.24	0.22	0.58	1.26	4.40	1.69	0.32	0.21	0.40	0.52	1.01	0.53	0.48
4	2011/7/27	男性	19	170	75	1.86	1.91	1.82	0.12	0.15	0.63	0.18	0.18	0.17	0.18	0.17	0.36	0.42	0.96	2.52	7.50	4.09	0.41	0.37	0.65	0.99	1.43	0.81	0.52
5	2011/7/28	女性	18	149	53	1.46	1.50	1.43	0.13	0.17	0.74	0.18	0.25	0.17	0.21	0.21	0.21	0.27	0.77	0.59	1.45	1.09	0.34	0.27	0.74	0.62	1.33	0.81	0.23
6	2011/7/28	女性	18	149	53	1.46	1.50	1.43	0.17	0.28	1.12	0.20	0.23	0.20	0.37	0.20	0.37	0.51	1.22	1.27	3.11	2.63	0.48	0.47	1.16	1.05	2.02	1.14	0.31
7	2011/7/28	女性	23	150	48	1.41	1.44	1.37	0.16	0.27	1.14	0.20	0.24	0.17	0.35	0.17	0.35	0.47	1.24	2.16	3.32	2.90	0.50	0.52	1.15	1.34	2.08	1.38	0.28
8	2011/7/29	女性	18	162	57	1.60	1.64	1.56	0.13	0.17	0.74	0.18	0.18	0.17	0.25	0.17	0.25	0.29	0.77	0.62	1.44	1.20	0.40	0.38	0.75	0.88	1.30	0.97	0.24
9	2011/7/29	女性	18	162	57	1.60	1.64	1.56	0.13	0.19	0.77	0.20	0.21	0.17	0.24	0.17	0.24	0.30	0.86	0.93	1.87	1.33	0.38	0.35	0.79	1.09	1.77	1.15	0.21
10	2011/7/29	男性	49	175	75	1.95	1.99	1.90	0.19	0.35	1.37	0.21	0.27	0.18	0.39	0.18	0.39	0.55	1.50	1.76	4.57	2.61	0.77	1.50	1.60	3.08	2.05	0.98	0.44
11	2011/7/29	男性	49	175	75	1.95	1.99	1.90	0.12	0.15	0.62	0.18	0.18	0.17	0.19	0.19	0.19	0.24	0.69	0.54	2.85	1.21	0.52	0.34	0.72	2.05	3.08	1.98	0.34
12	2011/8/22	女性	18	153	41	1.34	1.37	1.30	0.14	0.16	0.56	0.17	0.16	0.16	0.26	0.16	0.26	0.34	0.62	1.05	2.37	2.42	0.46	0.35	0.60	1.26	2.06	1.60	0.21
13	2011/8/22	女性	18	153	41	1.34	1.37	1.30	0.14	0.21	0.70	0.21	0.19	0.17	0.30	0.19	0.30	0.39	0.85	2.28	3.39	2.93	0.51	0.39	0.77	1.59	2.49	2.04	0.18
14	2011/8/22	男性	19	168	53	1.59	1.63	1.55	0.21	0.45	1.54	0.24	0.32	0.19	0.62	0.19	0.62	0.77	1.91	2.48	6.25	4.71	0.67	0.85	1.86	2.09	3.63	1.67	0.37
15	2011/8/22	男性	19	168	53	1.59	1.63	1.55	0.15	0.35	0.65	0.24	0.22	0.18	0.26	0.18	0.26	0.39	0.81	0.90	2.68	1.80	0.32	0.45	0.84	1.03	2.29	0.98	0.24
16	2011/8/23	女性	18	151	45	1.38	1.41	1.34	0.15	0.25	0.70	0.20	0.18	0.17	0.36	0.18	0.36	0.53	0.87	1.56	4.26	3.18	0.44	0.52	0.75	1.51	1.90	1.55	0.19
17	2011/8/23	女性	18	151	45	1.38	1.41	1.34	0.19	0.49	1.30	0.29	0.30	0.20	0.41	0.20	0.41	0.66	1.56	2.38	5.56	3.80	0.64	0.60	1.40	1.64	3.12	1.37	0.21
18	2011/8/23	女性	18	153	48	1.43	1.46	1.39	0.12	0.15	0.41	0.17	0.15	0.16	0.15	0.16	0.15	0.21	0.46	0.42	0.88	0.72	0.34	0.18	0.43	0.67	1.20	0.92	0.11
19	2011/8/23	女性	18	153	48	1.43	1.46	1.39	0.13	0.15	0.69	0.20	0.20	0.16	0.16	0.16	0.16	0.21	0.73	0.36	1.12	0.70	0.33	0.22	0.69	0.71	1.38	0.90	0.07
20	2011/8/24	女性	23	150	48	1.41	1.44	1.37	0.15	0.24	0.99	0.21	0.22	0.17	0.26	0.17	0.26	0.42	1.06	0.57	1.40	1.28	0.36	0.48	1.01	1.15	1.62	0.92	0.25
21	2011/8/24	女性	23	150	48	1.41	1.44	1.37	0.18	0.33	1.29	0.24	0.26	0.18	0.33	0.18	0.33	0.57	1.46	0.95	2.31	2.03	0.46	0.62	1.38	1.32	1.95	1.14	0.29
22	2011/8/24	男性	49	175	75	1.95	1.99	1.90	0.17	0.25	1.22	0.24	0.27	0.17	0.35	0.17	0.35	0.36	1.33	1.58	5.10	1.89	0.68	0.43	1.29	1.22	2.76	1.59	0.38
23	2011/8/24	男性	49	175	75	1.95	1.99	1.90	0.13	0.17	0.59	0.19	0.17	0.17	0.24	0.17	0.24	0.24	0.69	0.93	3.35	0.93	0.53	0.28	0.66	0.54	1.90	0.74	0.35
24	2012/8/30	女性	19	156	54	1.52	1.56	1.49	0.14	0.24	0.97	0.21	0.21	0.17	0.34	0.17	0.34	0.44	1.12	1.29	3.61	2.18	0.55	0.53	1.01	1.55	2.48	1.67	0.26
25	2012/8/31	男性	23	173	69	1.82	1.87	1.77	0.14	0.21	0.61	0.18	0.17	0.17	0.33	0.17	0.33	0.51	0.91	1.69	6.19	3.65	0.33	0.41	0.62	1.22	1.27	1.67	0.42
26	2012/8/31	男性	23	169	75	1.86	1.90	1.81	0.13	0.17	0.53	0.18	0.16	0.17	0.27	0.17	0.27	0.30	0.64	0.61	2.19	1.91	0.30	0.28	0.54	0.82	1.17	0.93	0.31
27	2012/9/3	男性	20	175	95	2.10	2.16	2.06	0.14	0.23	0.98	0.20	0.22	0.17	0.43	0.17	0.43	0.46	1.49	2.20	10.17	2.79	0.55	0.44	1.04	1.21	2.00	1.39	0.43
28	2012/9/5	女性	18	156	56	1.55	1.58	1.51	0.11	0.12	0.44	0.18	0.15	0.17	0.22	0.17	0.22	0.22	0.45	0.60	1.59	1.39	0.29	0.28	0.42	0.65	1.25	0.75	0.21
29	2012/9/5	男性	18	169	53	1.60	1.64	1.55	0.12	0.18	0.78	0.17	0.18	0.17	0.32	0.17	0.32	0.36	0.86	1.73	4.36	3.15	0.25	0.26	0.75	0.70	1.38	0.82	0.27
30	2012/9/12	女性	24	150	48	1.41	1.44	1.37	0.12	0.18	0.58	0.19	0.17	0.17	0.26	0.17	0.26	0.27	0.64	0.56	1.15	1.11	0.27	0.32	0.58	0.77	1.32	0.84	0.16
31	2012/9/12	男性	49	175	75	1.86	1.91	1.82	0.12	0.24	0.88	0.18	0.19	0.17	0.37	0.17	0.37	0.36	1.03	0.97	3.92	1.41	0.59	0.47	1.01	0.85	2.01	1.16	0.40

スミルノフの棄却検定により除去したデータ

5. 3 結果

スミルノフの棄却検定により外れ値を除いた28データの固定座標系を基準とした場合の小型船舶動揺、立位姿勢動揺とエネルギー消費量の散布図および相関係数を図5-1～図5-3に示す。また、小型船舶の床の座標系を基準とした場合の小型船舶動揺、立位姿勢動揺とエネルギー消費量の散布図および相関係数を図5-4～図5-6に示す。エネルギー消費量との相関係数が最も高い動揺は、実験協力者の腰部の縦揺（Pitch）であった。

表5-3に固定座標系における加速度・角加速度とエネルギー消費量の重回帰分析の結果を、表5-4に小型船舶の床の座標系における加速度・角加速度とエネルギー消費量の重回帰分析の結果を示す。表5-3の重回帰分析のあてはまりは0.70、表5-4の重回帰分析のあてはまりは、0.70であった。エネルギー消費量を支配するパラメータとしては、体表面積と腰部の縦揺（Pitch）が確認された。

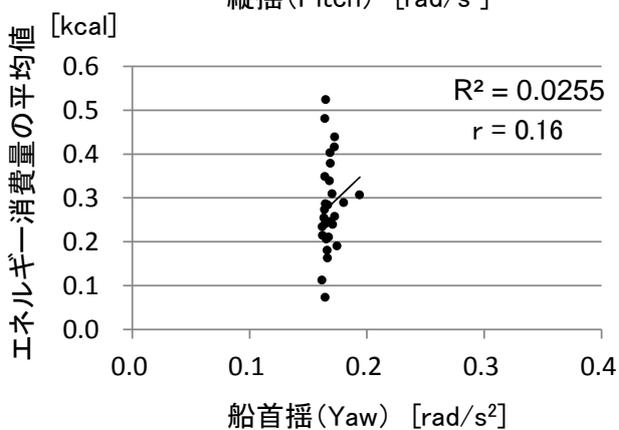
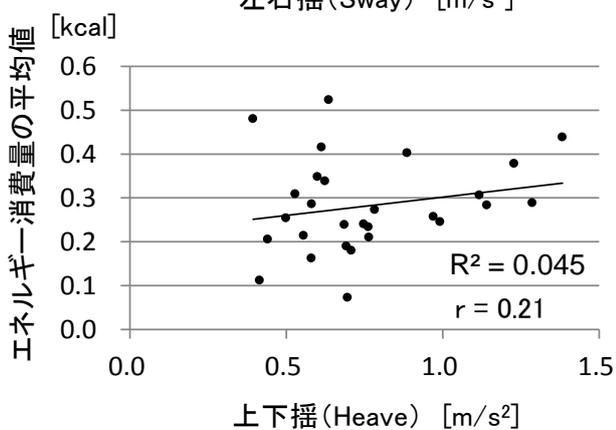
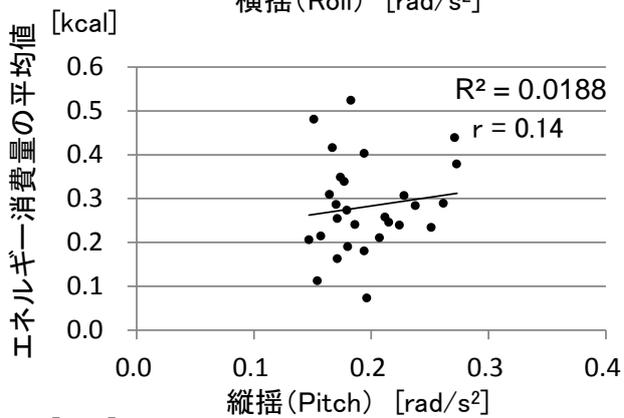
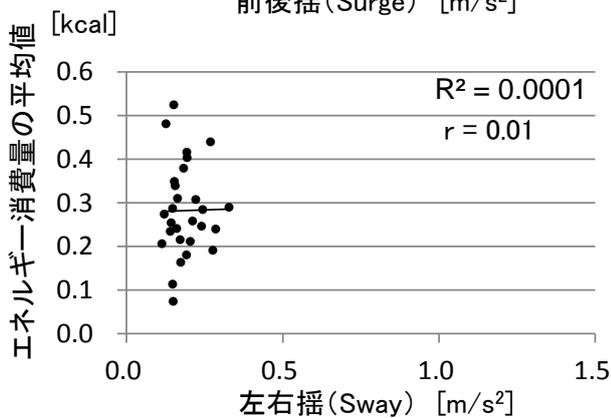
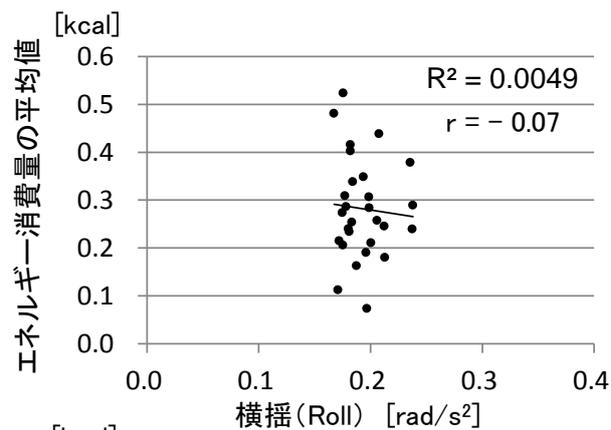
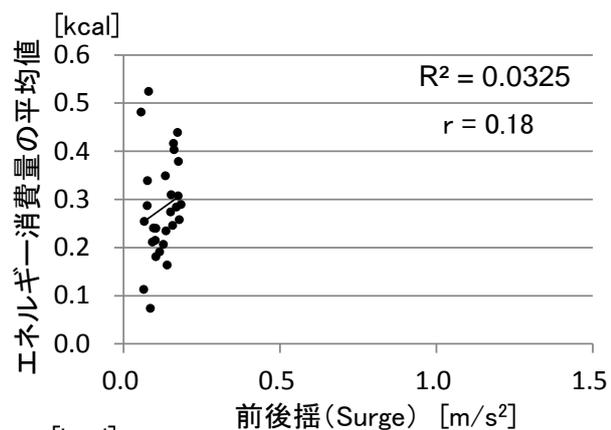


図 5-1 小型船舶動揺とエネルギー消費量の散布図（固定座標系）

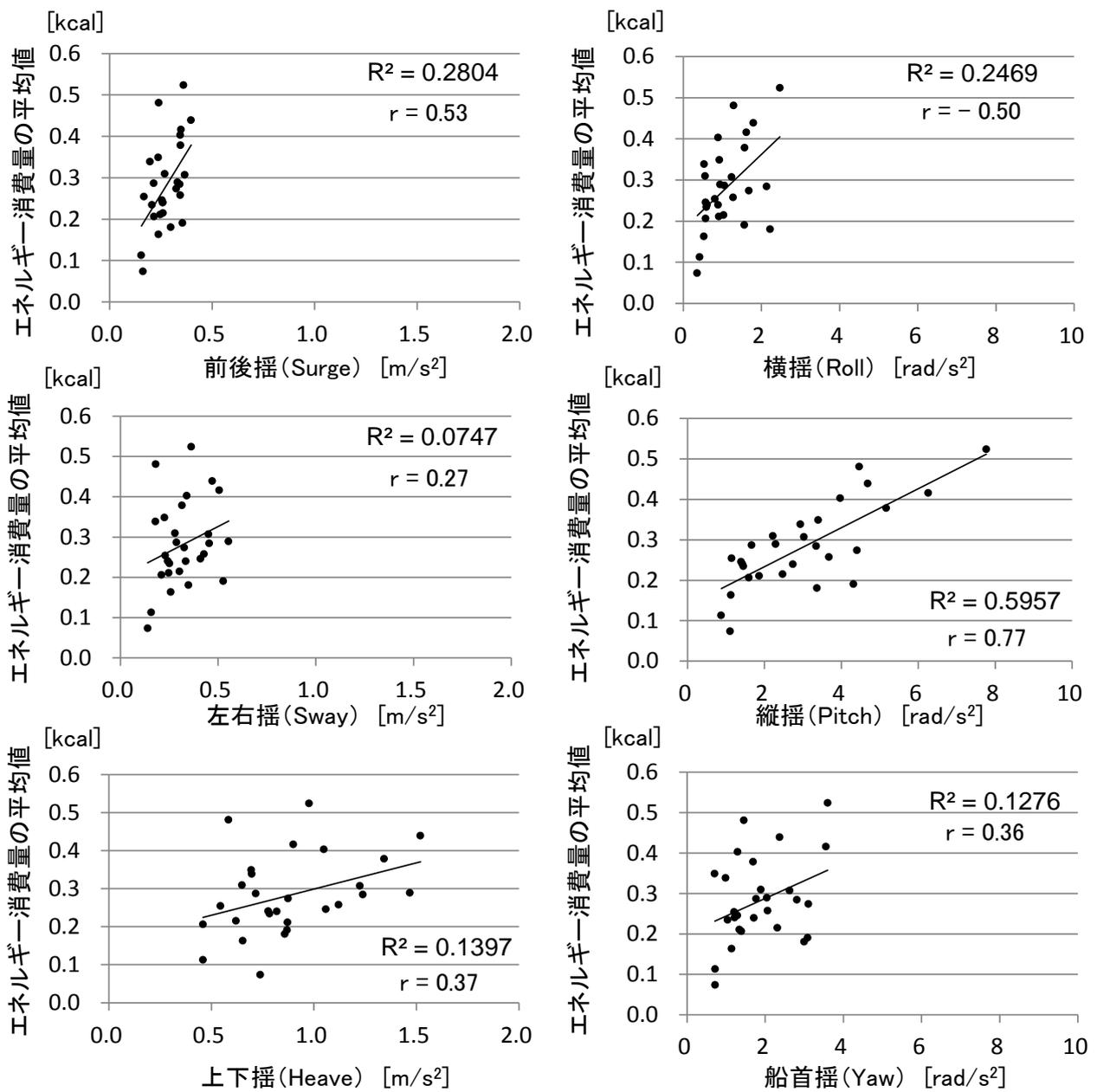


図 5-2 実験協力者の腰部の立位姿勢動揺とエネルギー消費量の散布図 (固定座標系)

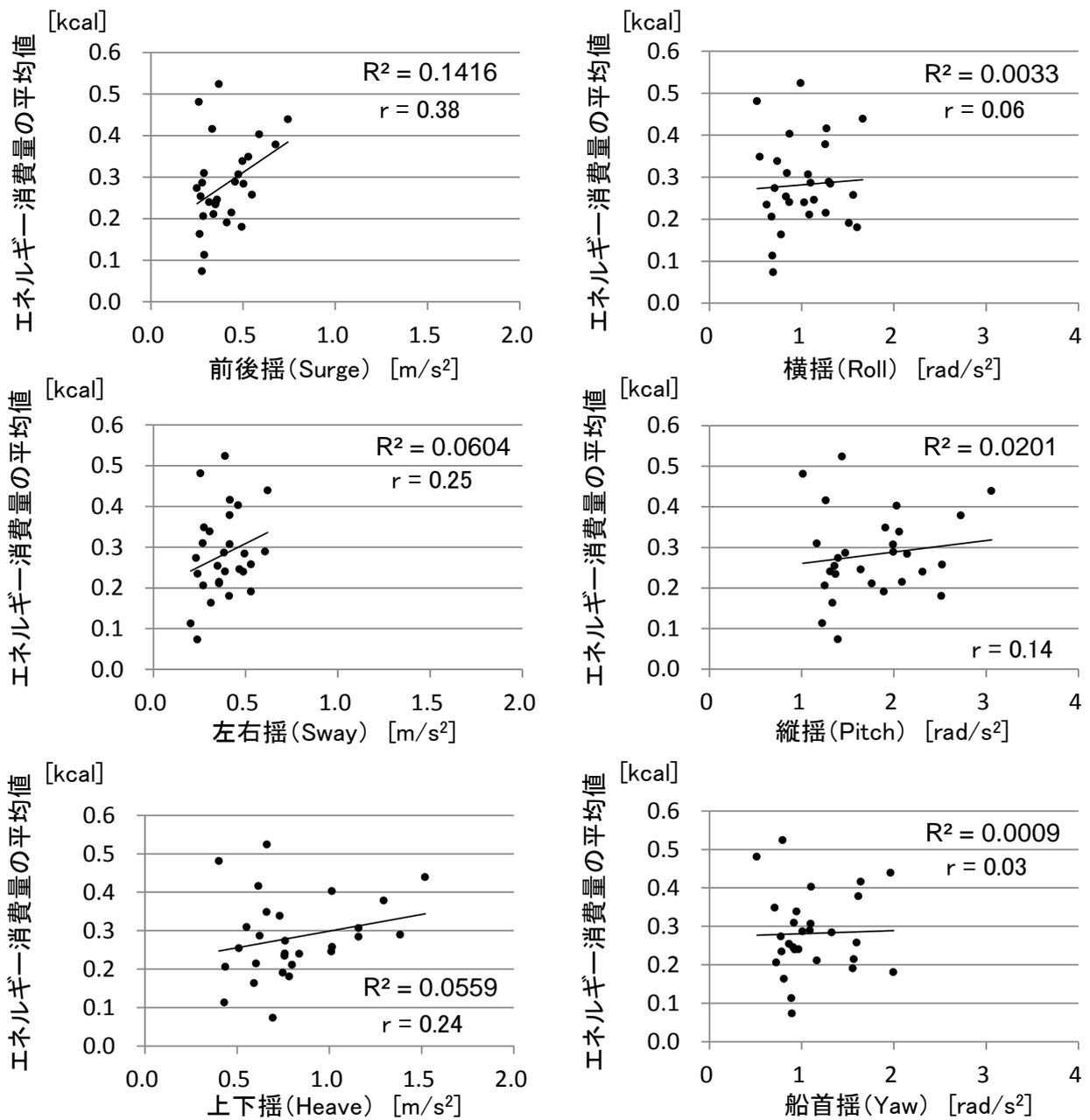


図 5-3 実験協力者の頭部の立位姿勢動揺とエネルギー消費量の散布図（固定座標系）

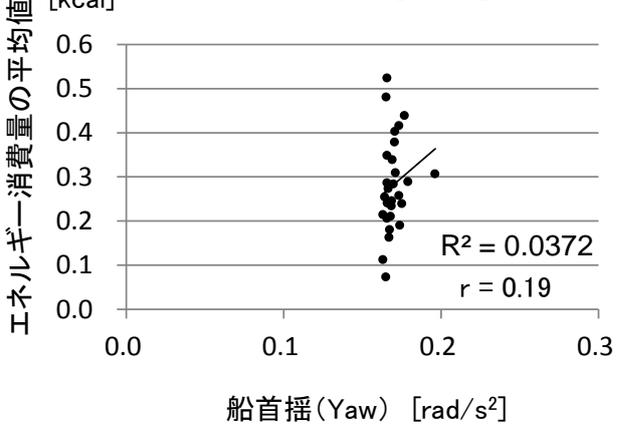
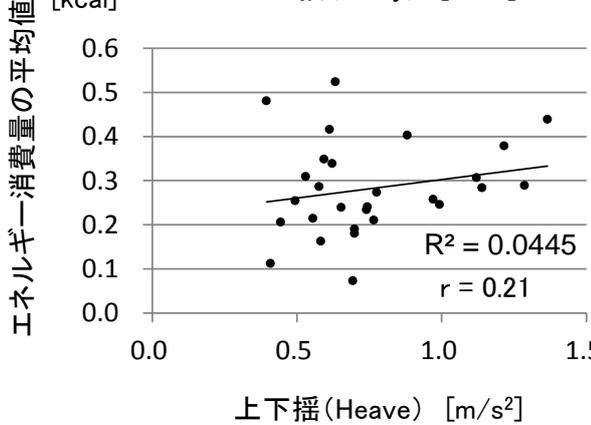
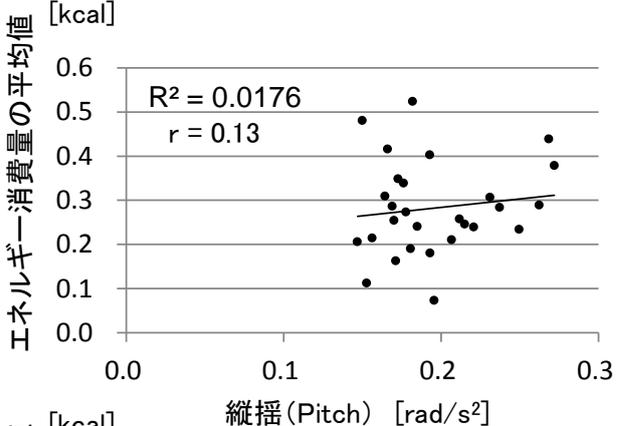
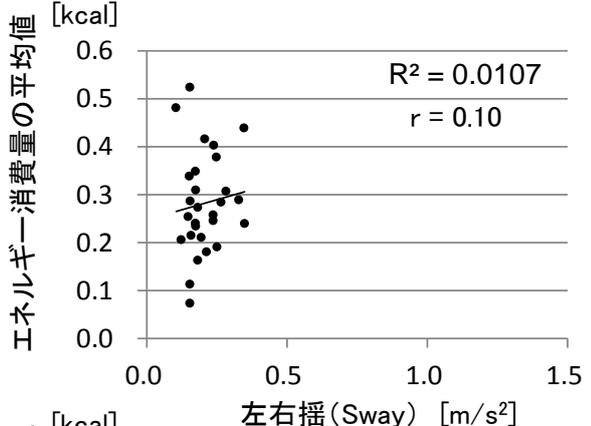
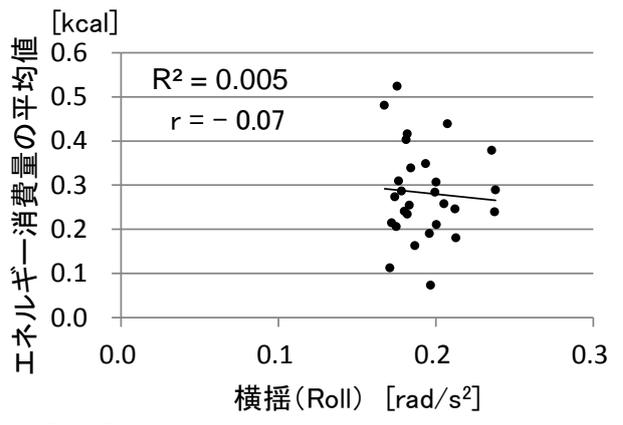
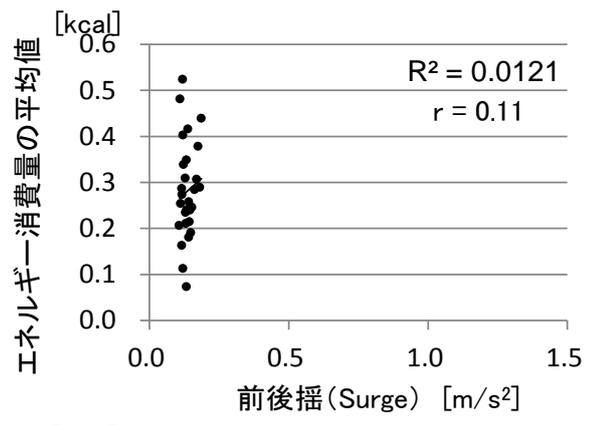


図 5-4 小型船舶動揺とエネルギー消費量の散布図 (小型船舶の床の座標系)

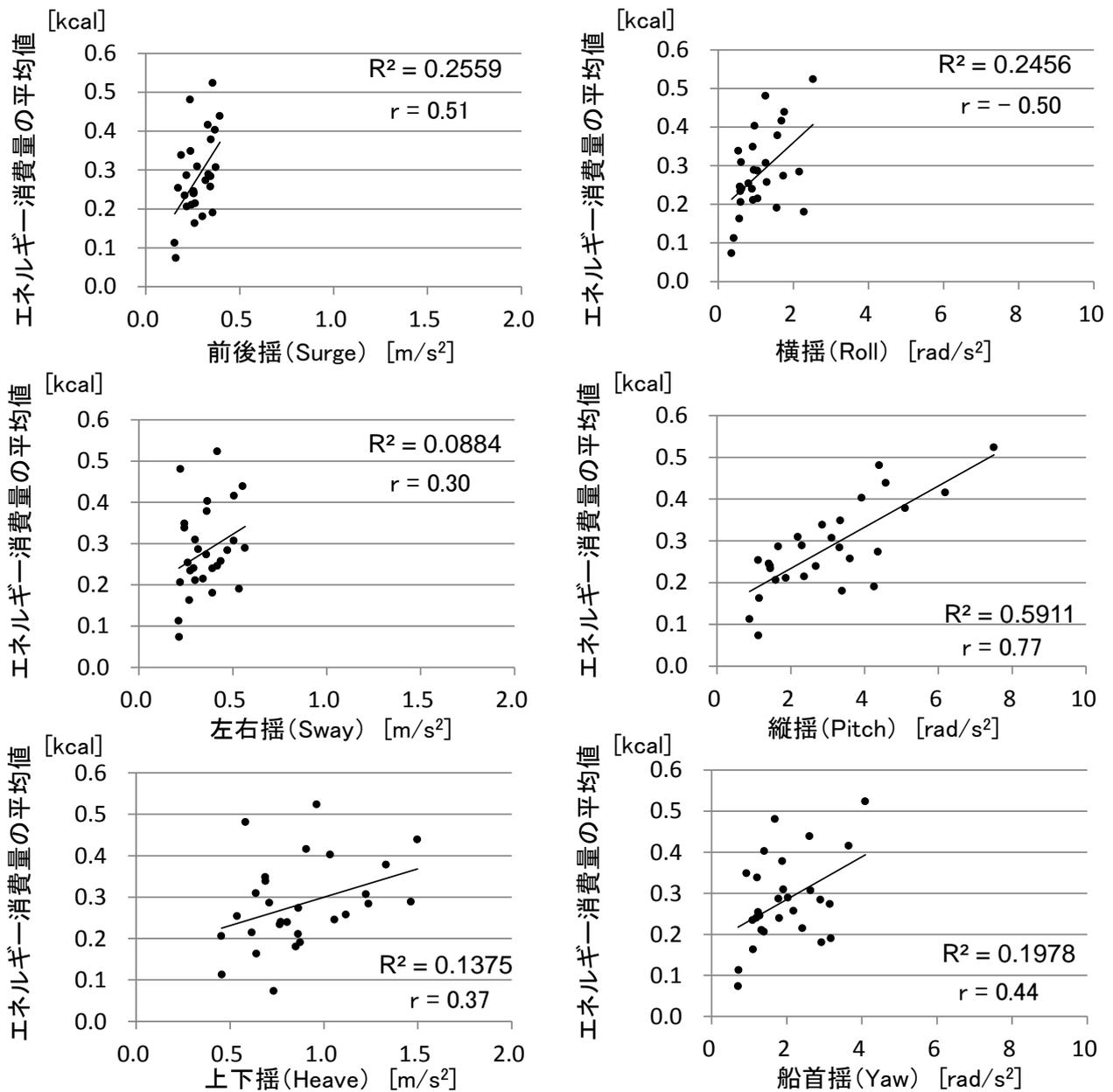


図 5-5 実験協力者の腰部の立位姿勢動揺とエネルギー消費量の散布図
(小型船舶の床の座標系)

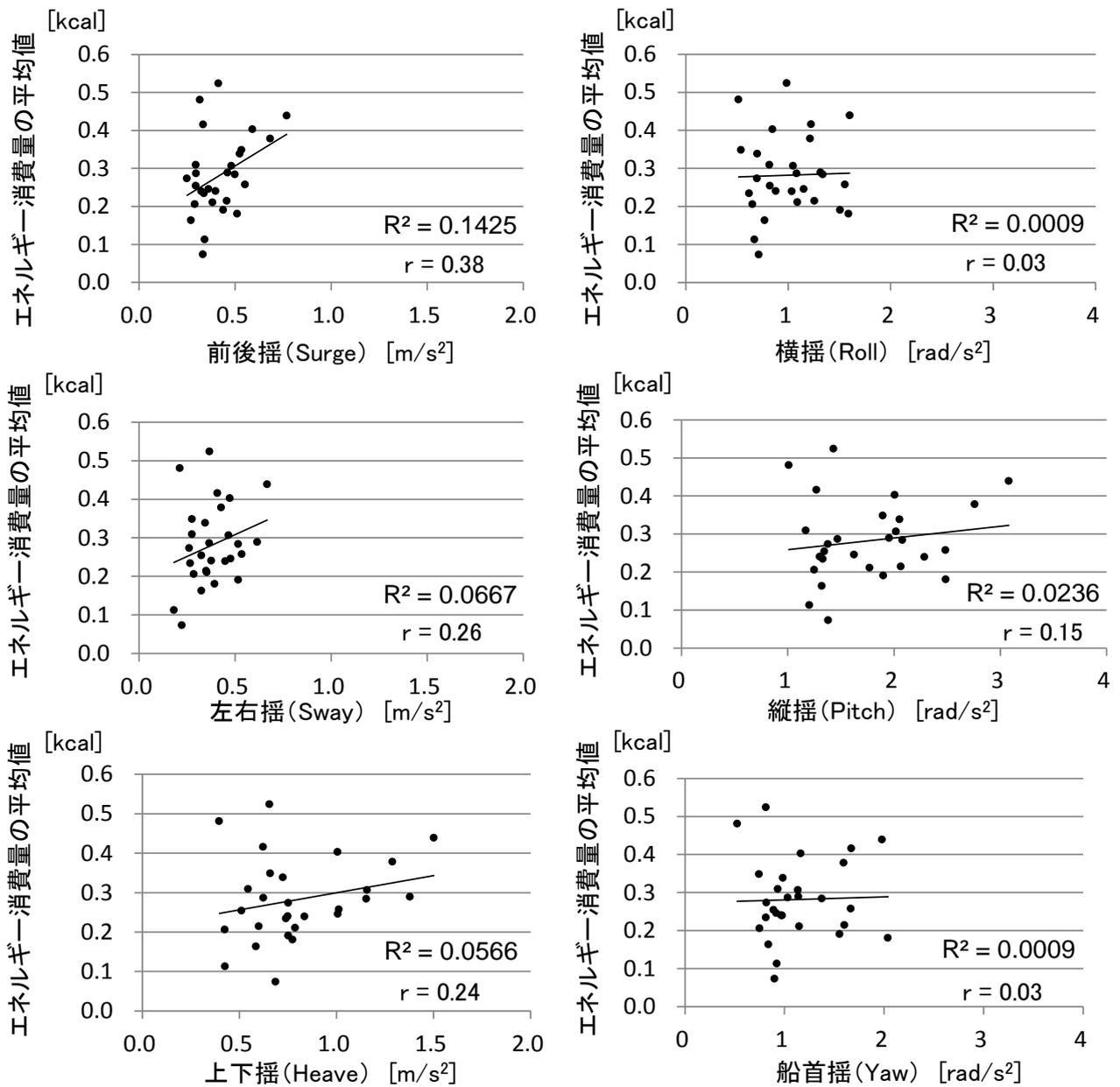


図 5-6 実験協力者の頭部の立位姿勢動揺とエネルギー消費量の散布図
(小型船舶の床の座標系)

表 5-3 重回帰分析の結果（固定座標系）

		標準偏回帰係数		
		デュポア式	新谷式	藤本式
切片		-0.14	-0.14	-0.13
体表面積		0.44	0.44	0.44
頭部	前後揺 (Surge)	-	-	-
	左右揺 (Sway)	-	-	-
腰部	前後揺 (Surge)	-	-	-
	上下揺 (Heave)	-	-	-
	縦揺 (Pitch)	0.51	0.51	0.51
小型船舶の床	前後揺 (Surge)	-	-	-
	横揺 (Roll)	-	-	-
	船首揺 (Yaw)	-	-	-
重相関係数R		0.83	0.83	0.83
自由度調整済決定係数R ²		0.69	0.69	0.70

- 係数なし

表 5-4 重回帰分析の結果（小型船舶の床の座標系）

		標準偏回帰係数		
		デュポア式	新谷式	藤本式
切片		-0.14	-0.14	-0.13
体表面積		0.44	0.44	0.44
頭部	前後揺 (Surge)	-	-	-
	左右揺 (Sway)	-	-	-
腰部	前後揺 (Surge)	-	-	-
	上下揺 (Heave)	-	-	-
	縦揺 (Pitch)	0.51	0.51	0.51
小型船舶の床	前後揺 (Surge)	-	-	-
	横揺 (Roll)	-	-	-
	船首揺 (Yaw)	-	-	-
重相関係数R		0.83	0.83	0.83
自由度調整済決定係数R ²		0.69	0.69	0.70

- 係数なし

5. 4 考察

(1) エネルギー消費量を支配する身体的特徴および動揺

重回帰分析より、目的変数の予測値と実測値の相関係数を表す重相関係数 R は、表 5-3, 表 5-4 共に 0.8 以上の高い相関を示したことから、乗船者のエネルギー消費量は、体表面積と腰部の縦揺 (Pitch) により説明できるものと推察される。また重回帰式のあてはまりの良さを表す自由度調整済決定係数 R^2 が 0.695 から 0.697 の値を示したことから、乗船者のエネルギー消費量のおよそ 7 割は、乗船者の体表面積と腰部の縦揺 (Pitch) で説明可能であることがわかった。重回帰式で説明することのできなかつた乗船者のエネルギー消費量に影響を及ぼす要因の 3 割は、実験協力者の小型船舶動揺に対する姿勢維持の方法の違いや実験時の体調、小型船舶内の気温などが考えられる。また実験協力者の中には、普段から小型船舶に乗り慣れている者とそうでない者がおり、実験協力者ごとに姿勢維持の動作が異なることが予想される。さらに男性と女性では基礎代謝が異なるため、同じ小型船舶動揺を与えたとしても、それにより生じるエネルギー消費量は異なることが予想される。

(2) エネルギー消費量を支配する動揺を同定するための座標系

固定座標系を基準とした場合の動揺および小型船舶の床を基準とした場合の動揺を使用した重回帰分析の結果を比較すると、重回帰式のあてはまりを表す自由度調整済決定係数 R^2 に大きな差はなかった。これは、小型船舶の床面が大きく傾くような実験を実施しておらず、固定座標系を基準とした場合と小型船舶の床を基準とした場合の動揺に大きな差が生じなかったことが原因と推察される。今後、乗船者のエネルギー消費量を支配する動揺を詳細に研究するためには、動揺装置のような人工的に様々な動揺を発生させる装置を作成し、検討を進めていく必要があると考えられる。

本研究で提案した座標変換による動揺計測手法を床面が大きく傾く小型船舶や大型船舶、その他の乗り物に应用することを想定すると、座標変換の際に基準とする座標系は、乗り物の動きに応じて常時変化する床の座標系に比べて、地球表面の接平面に定義される固定座標系が適切と考えられるが、今後検討が必要である。

(3) 船酔いや疲労の発生メカニズム解明への応用

船酔いに関する先行研究では、船舶動揺や動揺装置における並進運動と船酔いに関する主観的なアンケートの関係を調査することにより、船酔いを助長する動揺の解明を目指した研究が多い。中でも乗り物の上下揺 (Heave) に着目した研究が多く、McCauley らは、動揺装置を用いた実験により、0.167 Hz の上下揺 (Heave) が、生体の嘔吐率を最も高くする動揺であることを報告している¹⁰⁾。また乗船者の疲労に関する先行研究では、疲労に関する主観的なアンケートにより評価されており、動揺と疲労の関係については定量的に評価されていない。本研究成果により、小型船舶動揺が乗船者に及ぼす影響を解明するためには、乗船者の姿勢維持の動作に着目し、小型船舶動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺およびエネルギー消費量を計測することが重要である可能性が示された。また並進運動だけでなく回転運動の計測を行ったことから、乗船者の腰部の縦揺 (Pitch) が重要である可能性が示された。これより、船酔いや疲労の原因解明のためには、乗り物の動揺の計測だけでなく、生体の身体の動揺計測が重要であると考えられる。頭部の内耳が刺激されることにより船酔いが発生するという内耳異常刺激説があることから、将来、乗船者の頭部の動揺と心電図や心拍数などの生体信号を同時に計測することにより、船酔いの発生原因の解明につながる可能性がある。

乗船者の腰部の縦揺 (Pitch) が特に大きく観察されたのは、乗船者が姿勢を維持するために、小型船舶動揺を腰部で吸収している可能性を示唆している。一方、実験にご協力頂いた女性の実験協力者の中には、腰部に比べて頭部の回転運動が発生する実験協力者も存在した。これは、実験時の小型船舶動揺の大きさや実験協力者の身長、姿勢維持の方法、船舶動揺への慣れなどの様々な原因が考えられる。乗り物酔いに関する先行研究では、Sébastien らが、生体の姿勢動揺が大きいほど、酔いを発症する傾向にあることを報告していることから⁴⁹⁾、床の動揺に対する姿勢維持を適切に行うことができるかどうか、生体の酔いの症状の発生に関連している可能性があると考えられる。本研究により、動揺環境における生体の立位姿勢動揺の評価が可能となったことから、今後、生体の姿勢維持の動作と酔いの関連性の解明につながる可能性がある。

(4) 動揺環境で使用可能な医療機器開発への応用

船舶において医療機器を使用する場合があるが、必ずしも船舶用にデザインされているわけではない。本研究の結果は、乗船者のエネルギー消費量と立位姿勢動揺は、陸上での低強度の運動に相当することを示していることから、船舶のための医療機器の研究と開発に応用できると考えられる。例えば、近年のホルター心電計には、患者の動作を記録するための加速度センサが搭載されている。ホルター心電計に角加速度センサを搭載することができれば、船舶特有の姿勢維持の動作やエネルギー消費量を考慮したペーシング制御を行うことができると期待される。

(5) 乗り心地の良い船舶設計への応用

造船分野では、国際標準規格が、客船における乗船者の居住性に関する評価、報告、計測のためのガイドライン IS06954 が発表されている²⁸⁾。一方、これらのガイドラインは、大型船舶を対象とした振動の評価であり、船舶の回転運動および乗船者の生理学的指標は考慮されていない。本研究の成果は、将来、船舶動揺に対する乗船者の姿勢維持の動作およびエネルギー消費量を考慮した振動評価のガイドラインの開発および、乗り心地の良い船舶設計への応用が期待される。

5. 5 まとめ

本章では、エネルギー消費量を目的変数とした重回帰分析を行うことにより、乗船者のエネルギー消費量を支配する動揺および身体的特徴を同定した。乗船者の身体的特徴を表す重回帰分析のパラメータには、体表面積（デュポア式，藤本式，新谷式）および、固定座標系を基準とした加速度・角加速度の実効値，小型船舶の床の座標系を基準とした加速度・角加速度の実効値を使用した。

重回帰分析の結果より、エネルギー消費量を支配するパラメータは、体表面積と腰部の縦揺（Pitch）であることがわかった。

第6章 結論

本章では，本論文の結論について述べた．

本研究では、小型船舶動揺が乗船者に与える影響を解明するために、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的・代謝的影響を目的とし、小型船舶動揺および立位姿勢動揺の計測および解析のための動揺計測解析手法の考案を行い、エネルギー消費量を指標とした乗船者の運動の計測および解析を行った。本研究では、小型船舶の床、乗船者の身体の腰部・頭部における動揺を、加速度・角加速度として捉え、小型船舶動揺に対する乗船者の身体の動揺を、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響として扱った。また、乗船者の運動をエネルギー消費量として捉え、小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響として扱った。

計測実験は小型船舶および陸上において実施した。小型船舶の速度は可能な限り一定とし、急な変針などはないように走行させた。乗船者のエネルギー消費量に相当する陸上での運動を調査するために、陸上における計測実験では、実験協力者 15 名に対して踏み台昇降運動を実施した。踏み台昇降運動は、マスターの 2 階段負荷試験ではない独自の方法で実施した。踏み台昇降運動のタイミングは、30 回/分、40 回/分、50 回/分とした。

本研究では、座標変換および実効値を使用した小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の動揺の計測解析手法の提案を行うことにより、①小型船舶の床、乗船者の腰部、頭部の動揺の比較、②並進運動および回転運動における動揺間の比較、③エネルギー消費量を支配する動揺の同定が可能となった。なお、本研究の実験は、鳥羽商船高等専門学校生命倫理委員会規則に則り実施された。実験協力者には実験開始前に実験内容の説明を行い、実験への参加について同意を得ている。

以下に本論文の結論をまとめた。

(1) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす物理的影響

小型船舶動揺に対する姿勢維持の動作により、乗船者の腰部に上下揺 (Heave) と縦揺 (Pitch) が特に生じることがわかった。

(2) 小型船舶動揺が乗船者の立位姿勢に及ぼす代謝的影響

①小型船舶の上下揺 (Heave) の実効値が 1.0m/s^2 以上の場合には、立位姿勢時の乗船者のエネルギー消費量は 30 回/分の踏み台昇降運動のエネルギー消費量に相当する

ことがわかった

- ②乗船者のエネルギー消費量を支配するパラメータは, 体表面積と腰部の縦揺(Pitch)であることがわかった

謝辞

本研究テーマにて研究が実施できたこと，そして懇切にご指導頂きました東京電機大学大学院先端科学技術研究科教授・本間章彦先生に深くお礼申し上げます。

東京電機大学大学院先端科学技術研究科教授・宮脇富士夫先生，東京電機大学大学院先端科学技術研究科教授・内川義則先生，東京電機大学大学院先端科学技術研究科准教授・大越康晴先生，東京電機大学参与・福井康裕先生には，お忙しい中，貴重な時間を割いて本論文の査読をして頂き，数多くの助言を賜りましたことを深く感謝致します。

本研究の基盤を築かれ，データ収集，データ検討，研究の方針，研究に対する姿勢など，ご指導頂きました国立鳥羽商船高等専門学校制御情報工学科教授・坂牧孝規先生に深くお礼申し上げます。小型船舶における計測実験，および実験データの検討に関してご協力頂きました国立鳥羽商船高等専門学校商船学科准教授・瀬田広明先生に深く感謝致します。また実験データの検討，および研究に関連する多数の文献を提供して頂きました国立鳥羽商船高等専門学校名誉教授・伊藤政光先生に深く御礼申し上げます。小型船舶における計測実験にご協力頂きました国立鳥羽商船高等専門学校の実習船「あさま」，および練習船「鳥羽丸」関係者の皆様，また実験に参加してくださいました鳥羽商船高等専門学校制御情報工学科，商船学科，生産システム工学専攻，海事システム学専攻の学生の皆様に厚く御礼申し上げます。

本研究は，JSPS 科研費 19651075，公益財団法人長岡技術科学大学技術開発教育研究振興会による研究助成（2008 年），公益財団法人日本科学協会 笹川科学研究助成（24-724，2012 年）により実施したものです。

本研究は，鳥羽商船高等専門学校校長裁量経費（教育研究活動支援）の援助を受けています。

参考文献

- 1) 東司：医学的側面から見た船酔いのメカニズムとその対策，関西造船協会 船酔い・乗り心地特集「らん：纜」，20，pp.1-6，1993.
- 2) 公益社団法人 日本海難防止協会：海と安全 平成八年版「海難審判の現況」概要，454，pp.1-28，1996.
- 3) 公益社団法人 日本海難防止協会：海と安全 疲労と海難 また幽水，456，pp.1-10，1997.
- 4) 海上保安庁：海難の現況と対策について～大切な命を守るために～（平成26年度版），pp.1-107，2015.
- 5) 朝山正己，今村裕行，大西範和，彼末一之，藤原素子，三木健寿，宮側敏明，村上太郎，寄本明：イラスト運動生理学，pp.41-57，134-138，2013.
- 6) 中村和志：図解入門 よくわかる筋肉・関節の動きとしくみ，pp.152-155，2011.
- 7) Dragana Nikolic, Richard Collier, Robert Allen : Monitoring and Assessing Crew Performance in High-Speed Marine Craft - Methodological Considerations, The Conference of Wireless Mobile Communication and Healthcare - Second International ICST Conference, MobiHealth, Ayia Napa, Cyprus, pp.18-20, 2010.
- 8) 松本互平，藤井智弘：乗り物酔いの実用的評価法，近畿大学生物理工学部紀要，12，pp.37-47，2003.
- 9) James F. O' Hanlon and Michael E. McCauley : Motion Sickness Incidence as a Function of the Frequency and Acceleration of Vertical Sinusoidal Motion. Aerospace Medicine, pp.366-369, 1974.
- 10) Michael E. McCauley, Jackson W. Royal, C. Dennis Wylie, James F. O' Hanlon and Robert R. Mackie. Motion sickness incidence: Exploratory studies of habituation, pitch and roll, and the refinement of a mathematical model. Goleta CA : Human Factors Research Division, Canyon Research. Group Inc., Technical Report, 1733-2, 1976.
- 11) Anthony Lawther and Michael J. Griffin : Prediction of the incidence of motion sickness from the magnitude, frequency, and duration of vertical oscillation, The Journal of the Acoustical Society of America, 82(3), pp.957-966, 1987.

- 12) J. L. Colwell : Protocol for an Experiment on Controlling Motion Sickness Severity in a Ship Motion Simulator, Defence R&D Canada - Atlantic, pp.1-22, 2004.
- 13) Henrietta V. C. Howarth and Michael J. Griffin : Effect of Roll Oscillation Frequency on Motion Sickness, Aviation, Space, and Environmental Medicine, 74(4), pp. 326-331, 2003.
- 14) Donohew, Barnaby E., Griffin, Michael J. : Motion Sickness: Effect of the Frequency of Lateral Oscillation, Aviation, Space, and Environmental Medicine, 75(8), pp. 649-656(8), 2004.
- 15) Samson C. Stevens1 and Michael G. Parsons : Effects of Motion at Sea on Crew Performance: A Survey, Marine Technology, 39(1), pp, 29-47, 2002.
- 16) 岸本雅裕: 上下加速度の周波数分布と船酔いの関係に関する一考察, 関西造船協会論文集, 238, pp. 191-196, 2002.
- 17) J. E. Bos and W. Bles : Modelling motion sickness and subjective vertical mismatch detailed for vertical motions, Brain Research Bulletin, 47(5), pp. 537-542, 1998.
- 18) 池田良穂, 高田浩, 石原慎一, 副島信: 旅客船設計における耐航性能評価に関する研究, 関西造船協会誌, 214, pp. 105-112, 1990.
- 19) 大仲茂樹: 揺れない船 ハイステイブルキャビン艇, 日本造船学会誌, 815, pp. 347-350, 1987.
- 20) Bob Cheung and Ann Nakashima : A review on the effects of frequency of oscillation on motion sickness, Defence R&D Canada Toronto Technical Report, pp. 10-11, 2006.
- 21) Jelte E. Bos, Willem Bles : Theoretical considerations on canal-otolith interaction and an observer model, Biological Cybernetics, 86(3), pp. 191-207, 2002.
- 22) Bles, Willem, Wertheim, Alexander H. : Appropriate Use of Virtual Environments to Minimise Motion Sickness, The Netherlands, RIO HFM Workshop, MP-058, pp. 13-15, 2000.

- 23) Fujisawa N, Masuda T, Inaoka Y, Fukuoka H, Ishida A, Minamitani H. : Human standing posture control system depending on adopted strategies, *Med Biol Eng Comput*, 43(1), pp.107-114, 2005.
- 24) 木村暢夫, 甫喜本司, 天下井清 : 船体運動が身体機能に与える影響について—船酔い, 疲労と船体運動との関係—. *日本航海学会論文集*, 50, pp.377-385, 1994.
- 25) Norimasa Kamiji, Yoshinori Kurata, Takahiro Wada and Shun'ichi Doi : Modeling and Validation of Carsickness Mechanism, *Proceedings of SICE Annual Conference*, 1-8, pp.1134-1139, 2007.
- 26) J. F. Golding, W. Bles, J.E.Bos, T. Haynes, and M. : A. Motion Sickness and Tilts of the Inertial Force Environment : Active Suspension Systems vs. active Passengers, 74(3), pp. 220-227, 2003.
- 27) 上野満雄, 小河孝則, 中桐伸五, 有沢豊武, 三野善央, 雄山浩一, 小寺良成, 谷口隆, 金沢右, 太田武夫, 青山英康 : 振子電車の動揺病に関する研究 揺れの評価と乗客・乗務員に及ぼす影響, *産業医学*, 28(4), pp.266-274, 1986.
- 28) International Organization for Standardization: Mechanical vibration - Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships. Second edition. ISO6954. 2000.
- 29) 重廣律男: 船酔いしない漁船への挑戦 (その1) - 人間工学からの乗り心地評価法とその応用 -. *Citation 水産工学*, 40(3), pp.229-234, 2004.
- 30) 後藤大三 : 人体応答よりみた振動限界, *日本造船学会誌* , 583, pp.10-21, 1978.
- 31) International Organization for Standardization: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration -. Part 1. ISO2631-1. 1997.
- 32) International Organization for Standardization: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration -. Part 5. ISO2631-5. 2004.

- 33) Karen Van Ooteghem, James S. Frank, and Fay B Horak : Practice-related improvements in posture control differ between young and older adults exposed to continuous, variable amplitude oscillations of the support surface, *Exp Brain Res.*, 199(2), pp.185-193, 2009.
- 34) 長谷公隆:立位姿勢の制御, *リハビリテーション医学:日本リハビリテーション医学会誌*, 43(8), pp.542-553, 2006.
- 35) 斎藤之男, 大島徹, 石神重信, 吉良仁 : 姿勢維持訓練・評価システムの研究, *バイオメカニズム*, 10, pp.205-215, 1990.
- 36) B. N. Smetanin, G. V. Kozhina, A. K. Popov : Human upright posture control in a virtual visual environment, *Human Physiology*, 35(2), pp.177-182, 2009.
- 37) 朝長昌三:視覚情報による重心動揺の安定性, *長崎大学教養部紀要 人文科学篇*, 35(1), pp.1-20, 1994.
- 38) Ishida, A., Imai, S. and Fukuoka, Y. : Analysis of the Posture Control System under Fixed and Sway-Referenced Support Conditions, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 44(5), pp.331-336, 1997.
- 39) Ishida A., Miyazaki S. : Maximum Likelihood Identification of a Posture Control System, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-34(1), pp.1-5, 1987.
- 40) Young-Kyun Shin, Mohammad A. Fard, Hikaru Inooka, and Il Hwan Kim : Human Postural Dynamics in Response to the Horizontal Vibration, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 4(3), pp.325-332, 2006.
- 41) Johansson, R., Magnusson, M., Akesson, M. : Identification of Human Postural Dynamics, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 35(10), 1988.
- 42) Fard M. A., Ishihara T., Inooka H. : Dynamics of the Head-Neck Complex in Response to the Trunk Horizontal Vibration: Modeling and Identification, *J Biomech Eng.*, 125(4), pp.533-539, 2003.

- 43) T. de Boer, M. Wisse, F. C. T. van der Helm : Mechanical Analysis of the Preferred Strategy Selection in Human Stumble Recovery, *Journal of Biomechanical Engineering*, 132(7), 2010.
- 44) T. C. Gupta : Identification and Experimental Validation of Damping Ratios of Different Human Body Segments Through Anthropometric Vibratory Model in Standing Posture, *J Biomech Eng*, 129(4), pp.566-574, 2006.
- 45) Jingzhou (James) Yang and Joo H. Kim : Static Joint Torque Determination of a Human Model for Standing and Seating Tasks Considering Balance, *J. of Mechanisms Robotics*, 2(3), pp. 031005-1 - 031005-9, 2010.
- 46) A. Ishida S. Imai : Responses of the posture-control system to pseudorandom acceleration disturbances, *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, 18, pp.433-438, 1980.
- 47) 村上公克 : 不安定リンク機構の姿勢維持, *生産研究*, 18(6), pp.135-141, 1966.
- 48) 工藤俊亮, 幸村琢, 池内克史 : 全身を用いたバランス保持動作のモデル化とその生成, *電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理 J88-D-II(8)*, pp.1583-1591, 2005.
- 49) Sébastien J. Villard, Moira B. Flanagan, Gina M. Albanese, and Thomas A. Stoffregen : Postural Instability and Motion Sickness in a Virtual Moving Room, *Hum Factors*, 50(2), pp.332-45, 2008.
- 50) 朝長昌三 : 慣れない環境における姿勢維持, *長崎大学教育学部紀要 教育科学*, 57, pp.107-112, 1999.
- 51) 朝長昌三 : 船上における姿勢維持, *長崎大学教養部紀要 人文科学篇*, 38(1), pp.217-226, 1997.
- 52) 今枝彬郎, 中原壽喜太, 木村隆一, 三木楯彦 : 船体運動による直立時の身体動揺-I, *日本航海学会論文集*, 72, pp.117-124, 1985.
- 53) 木村暢夫, 天下井清, 稲葉恭人 : 船体運動と人体の応答に関する基礎研究-IV, *日本航海学会論文集*, 81, pp.55-65, 1989.

- 54) 木村暢夫, 天下井清, 川崎潤二, 甫喜本司: 船上における人体の応答とバランス判定関数について, 日本航海学会論文集, 88, pp. 1-9, 1993.
- 55) 谷川智宏, 品川佳満, 藤谷恭信, 太田茂, 長尾光城: 携帯型加速度計を用いた運動強度の計測: 加速度波形と運動強度の関係, 川崎医療福祉学会誌, 11(1), pp. 99-105, 2001.
- 56) 塩野谷明, 橋本哲雄: 長岡技術科学大学体育・保健センター: 運動負荷漸増に伴う酸素摂取量と心拍数の関係 - AT(無酸素性作業閾値)との関連から -, 長岡技術科学大学研究報告, 12, pp. 63-70, 1990.
- 57) 菅原正志: 心拍数と酸素摂取との関係 第1報 運動群と非運動群の比較, 長崎大学教養部紀要 自然科学, 15, pp. 49-58, 1974.
- 58) Wertheim AH, Heus R, Vrijkotte TGM: Energy expenditure, physical work load and postural control during walking on a moving platform. TNO Defense Research, Soesterberg, 1994.
- 59) Ronald Heus, Alexander H. Wertheim, George Havenith: Human energy expenditure when walking on a moving platform, European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 77(4), pp. 388-394, 1998.
- 60) Breidahl T, Christensen M, Jepsen JR, Johansen JP, Omland Ø: The influence of ship movements on the energy expenditure of fishermen: a study during a North Sea voyage in calm weather. Int Marit Health. 3, pp. 114-120, 2013.
- 61) 日高昇, 中根重勝: 小型漁艇乗組員の船上におけるエネルギー代謝と海況との関係, 長崎大学水産学部研究報告, 28, pp. 189-193, 1969.
- 62) (財)日本船舶職員養成協会: 小型船舶操縦士学科教本1 (第3版), 舵社, pp. 84-93, 2007.
- 63) Herbert Goldstein, Charles Poole, John Safko: 古典力学(上) 第3版, 株式会社吉岡書店, pp. 225-229, 2013.
- 64) 元良誠三: 船体運動力学(電子訂正版), (社)日本船舶海洋工学会, p. 6, 2005.
- 65) Japan Captains' Association: A Guide to Ship Handling, p. 73, 2008.

- 66) MicroStrain : 3DM-GX3-25 Single Byte Data Communications Protocol (Revision015), p. 39, 2012.
- 67) 土井根礼音, 坂牧孝規, 瀬田広明, 伊藤政光, 本間章彦, 福井康裕 : 船舶動揺に対する乗船者の立位姿勢動揺の解析, ライフサポート, 27(2), pp. 45-53, 2015.
- 68) Thor I. Fossen. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 15-25, 2011.
- 69) 伊佐弘, 谷口勝則, 岩井嘉男, 吉村勉, 見市知昭 : 基礎電気回路 第2版, 森北出版株式会社, pp. 53-54, 2011.
- 70) 岡村吉隆, 大久保なつみ, 大森優奈, 口野暢子 : 多段階ステップテストによる運動負荷を用いた運動強度と血中乳酸値の関連性, 千里金蘭大学紀要 生活科学部・人間社会学部, 6, pp. 1-6, 2009.
- 71) Renon Doine, Takanori Sakamaki, Hiroaki Seta, Masamitsu Ito, Akihiko Homma and Yasuhiro Fukui : The Exercise Load of Passengers' Postural Control Against Ship Motion Using Human Energy Expenditure, Advanced Biomedical Engineering, 4, pp. 164-169, 2015.
- 72) DuBois D, DuBois EF : A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known, Arch Intern Med, 17, pp. 863-71, 1916.
- 73) 新谷二郎: 邦人ト白人トノ體表面積ヨリ觀タル體型ノ比較, 国民衛生, 8(4), pp. 477-511, 1931.
- 74) 藤本薫喜, 渡辺孟, 坂本淳, 湯川幸一, 森本和江 : 日本人の体表面積に関する研究 第18篇 三期にまとめた算出式, 日衛誌, 23(5), pp. 443-450, 1968.
- 75) 市原清志 : バイオサイエンスの統計学, 株式会社南江堂, pp. 284-287, 2013.
- 76) 細谷 憲政 : 今なぜエネルギー代謝か—生活習慣病予防のために, 2000.
- 77) 広瀬茂男 : ロボット工学 (改訂版) —機械システムのベクトル解析— 第19版, 裳華房, pp. 44-45, 2010.

付録1 計測装置の仕様

1. 1 3軸方位角センサ

3軸方位角センサのブロックダイアグラムを図A1-1に示す。3軸方位角センサには、加速度センサ、ジャイロセンサ、磁力センサが内蔵され、3軸方向の加速度 ($\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$)、3軸まわりの角速度 ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$)、センサの水平面からの傾きおよび方位を表す3軸まわりの角度 (ϕ, θ, ψ) を出力する。加速度センサおよびジャイロセンサの出力値には、アンチエイリアスフィルタが適用される。A/Dコンバータによりデジタル信号へと変換された加速度、角速度、磁気データには、高周波のノイズを除去するためのFIR型ローパスフィルタが適用される。加速度、角速度、磁気の単位は電圧値[V]から、それぞれ[g], [rad/s], [G]へと変換される。またセンサは、積分器により角度と速度の変化を算出する。3軸方位角センサは、加速度、角速度、磁気に加え、3軸方位角センサの姿勢を計算し、水平面からの傾斜角である ϕ, θ および真北に対する方位 ψ を出力する。

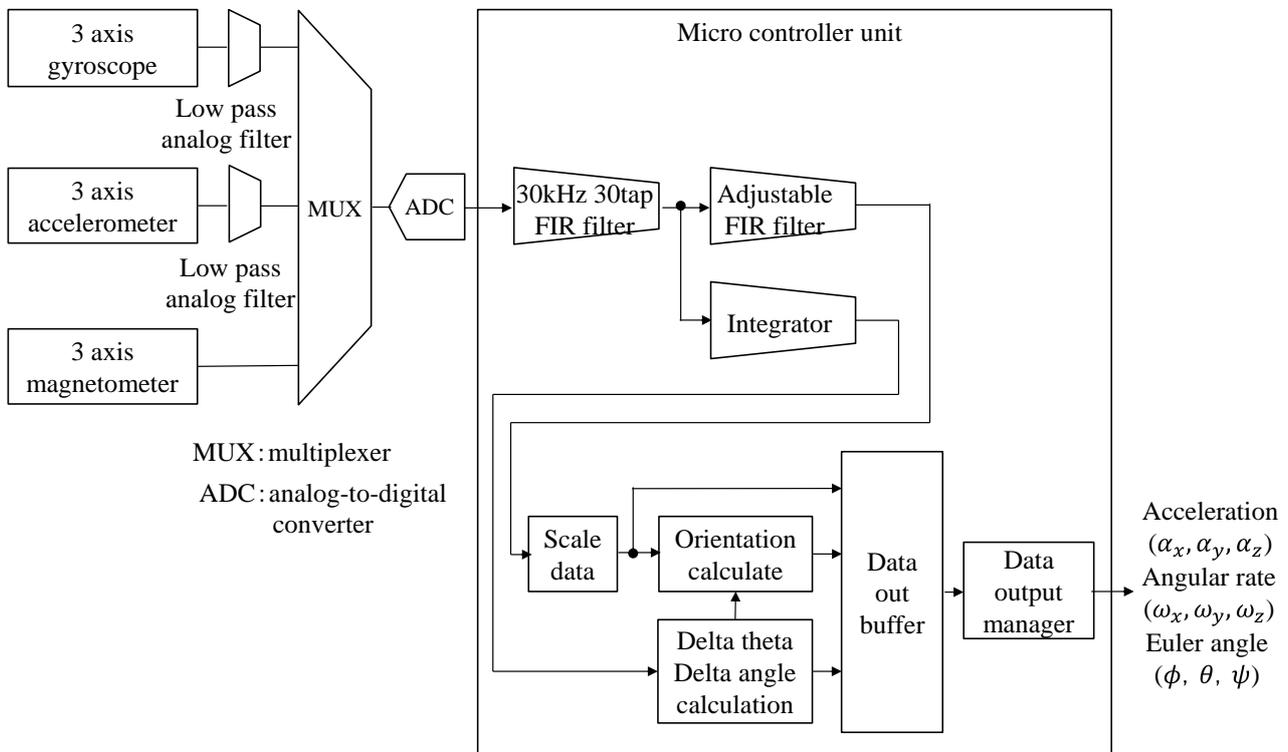


図 A1-1 3軸方位角センサの構成

(3DM-GX3-25 Single Byte Data Communications Protocol⁶⁶⁾ より改変)

1. 2 エネルギー代謝計

エネルギー代謝計は、株式会社ヴァインの METAVINE-N を用いた。実験協力者の呼気ガスは、蛇管により流量計をとおり、ミキシングチャンバーにとりこまれる。ミキシングチャンバーにとりこまれた呼気ガスは、チャンバー内で攪拌され、ガス分析器により、呼気酸素濃度が測定される⁷⁶⁾。流量計は、実験協力者の呼吸量をフローセンサーにより計測する。ガス分析器には、ジルコニアセンサが用いられ、チャンバー内の呼気ガス中の酸素濃度が測定される。呼気酸素濃度の測定は、マスクや蛇管内の残留呼気の測定を防ぐため、流量計により人間の呼気が認識されてから 0.3 秒後に測定が開始される。呼気酸素濃度は、50ms ごとの酸素濃度の平均値として測定される。エネルギー消費量の算出式を式(A1-1)、(A1-2)に示す。

$$\text{酸素摂取量} = (\text{基準酸素濃度} - \text{排出酸素濃度}) \times \text{呼吸量} \times \frac{\text{飽和水蒸気圧定数}}{100} \quad [\text{lit./min}] \quad (\text{A1-1})$$

$$\text{分時エネルギー消費量} = \text{酸素摂取量} \times 5 \quad [\text{kcal/min}] \quad (\text{A1-2})$$

付録2 小型船舶動揺と自動車の動揺の比較

2. 1 概要

小型船舶動揺の特徴を解析するために、小型船舶（実習船「あさま」）、および軽自動車の床に3軸方位角センサを設置し、床の動揺の大きさおよび周波数分布の比較を行った。動揺の大きさは加速度・角加速度の実効値として算出した。実効値は加速度・角加速度 2048 データごとに算出した。動揺の大きさの比較は、実効値 15 データ（307.2s）の平均値を算出することにより行われた。

2. 2 方法

小型船舶は、国立鳥羽商船高等専門学校の実習船「あさま」を使用した。軽自動車はホンダのザッツを使用した。小型船舶には、可能な限り前進を続けさせた状態で床の動揺を計測した。軽自動車には、40km/h の速度で一般道を走行させた状態で床の動揺を計測した。実験風景を図 A2-1 に示す。小型船舶の床の動揺は、加速度・角加速度を計測する 3 軸方位角センサを船員の食事用の机の下設置することで計測された。軽自動車の床の動揺は、加速度・角加速度を計測する 3 軸方位角センサを助手席の後方（軽自動車の中心となる位置）に設置することで計測された。



3軸方位角センサ

(a) 小型船舶



ノートPC

後部座席



3軸方位角センサ

(b) 軽自動車

図 A2-1 実験風景

2. 3 動揺の大きさ

図 A2-2 に小型船舶動揺を，図 A2-3 に軽自動車の床の動揺を示す．小型船舶動揺では，軽自動車に比べて上下揺（Heave）が発生する傾向にあることがわかった．

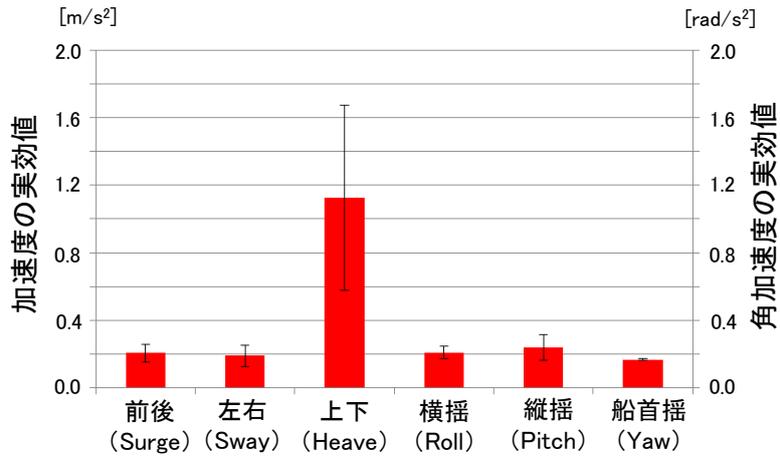


図 A2-2 小型船舶動揺

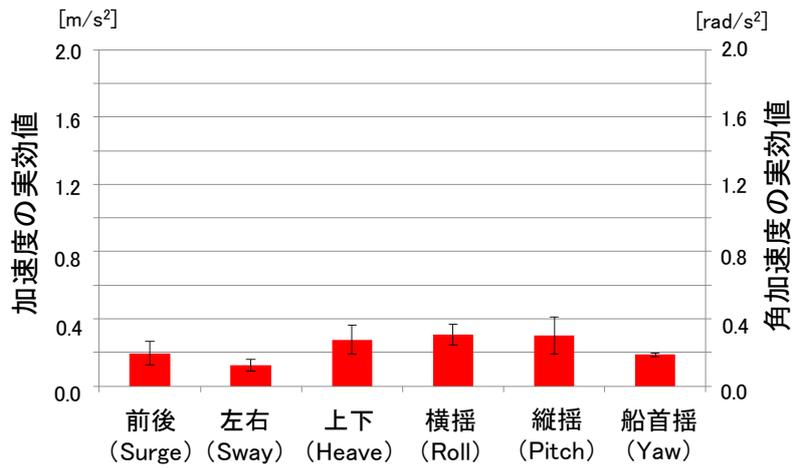


図 A2-3 軽自動車の床の動揺

2. 4 動揺の周波数

図 A2-2 において、上下揺 (Heave) が顕著に観察されたため、上下揺 (Heave) の周波数解析を行った。図 A2-4 に小型船舶の上下揺 (Heave) のパワースペクトル密度の 15 分間の時系列変化を、図 A2-5 に軽自動車の 1600s (26 分 40 秒) の上下揺 (Heave) のパワースペクトル密度の時系列変化を示す。小型船舶の上下揺 (Heave) には、1Hz 付近にスペクトルのピークが見られた。軽自動車の上下揺 (Heave) には、1~2Hz の区間にピークが見られるが、小型船舶動揺に比べて上下揺 (Heave) が小さいことがわかった。また 10~12Hz の区間に自動車の振動と思われる周波数スペクトルが観察された。これより、小型船舶の上下揺 (Heave) は軽自動車よりも大きく、低周波の動揺であることがわかった。

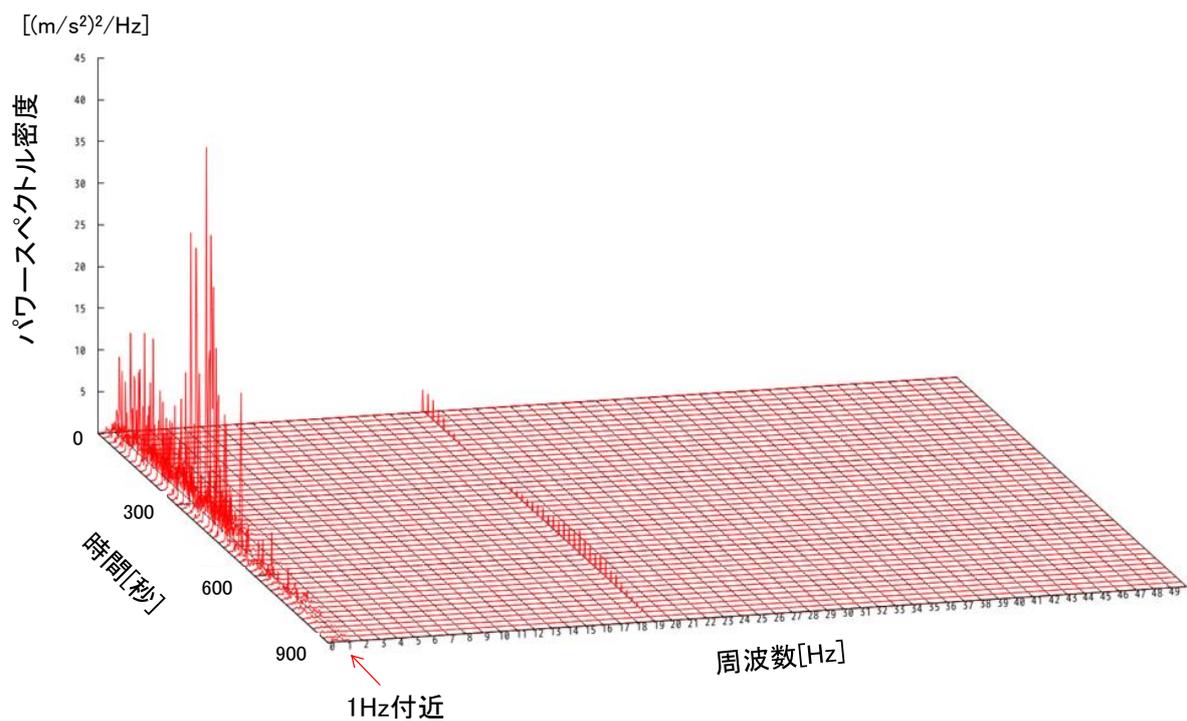


図 A2-4 小型船舶の上下揺 (Heave) のパワースペクトル密度の時系列変化

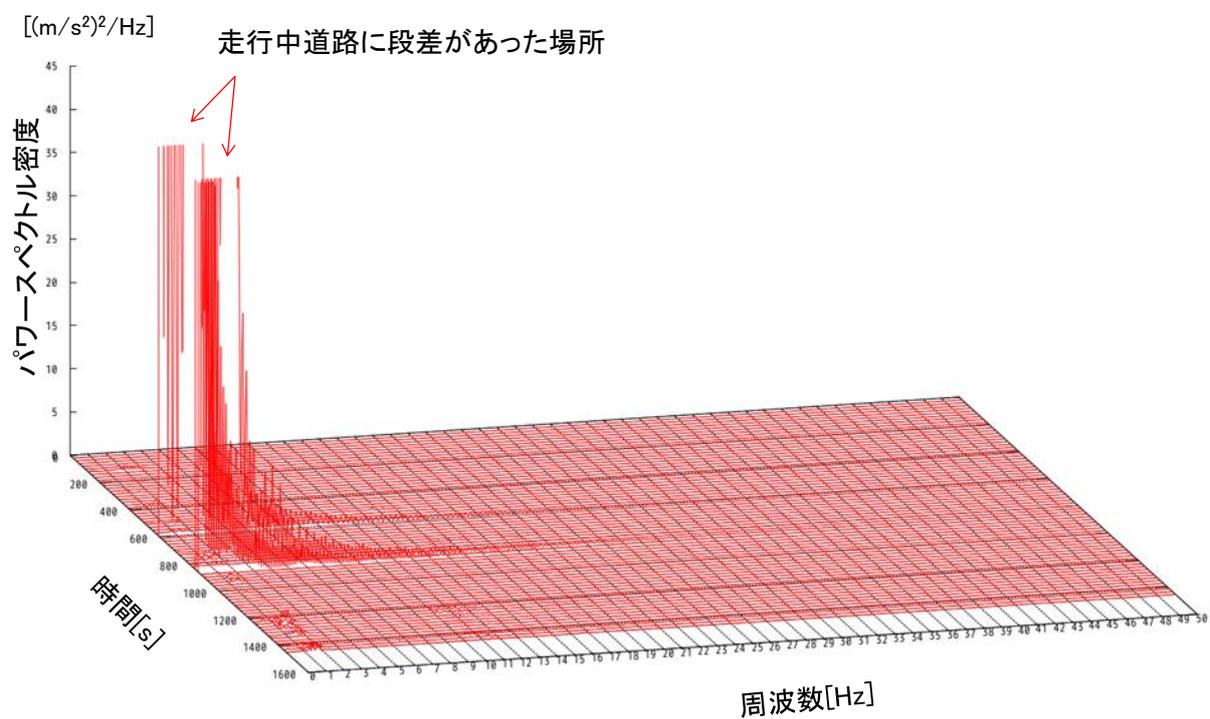


図 A2-5 軽自動車の床の動揺のパワースペクトル密度の時系列変化

付録3 座標変換

3. 1 加速度・角速度のベクトル表現

加速度・角速度は、共にベクトルで表現される。本研究では、加速度・角速度をベクトルとして扱うことにより、統一した座標系による加速度・角速度の解析を可能とした。

加速度のベクトルおよび角速度のベクトル表現を図 A3-1 に示す。加速度ベクトル α は、 x, y, z 軸の各成分を $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 、単位ベクトルを i, j, k とすると式(A3-1)で表される。

$$\alpha = \alpha_x i + \alpha_y j + \alpha_z k \quad (\text{A3-1})$$

角速度は、回転軸の方向を向くベクトルである角速度ベクトルとして定義される⁷⁷⁾。このため、角速度ベクトル ω は x, y, z 軸の各成分を $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 、単位ベクトルを i, j, k とすると式(A3-2)で表される⁷⁷⁾。

$$\omega = \omega_x i + \omega_y j + \omega_z k \quad (\text{A3-2})$$

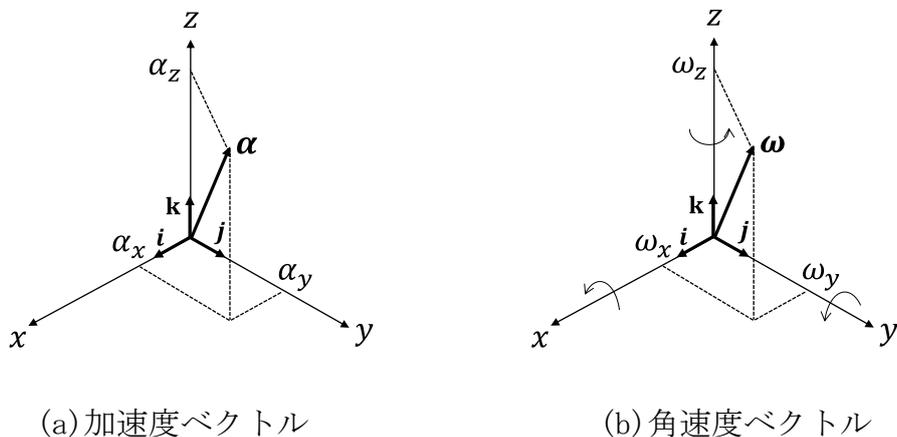


図 A3-1 加速度のベクトルおよび角速度のベクトル表現

3. 2 座標変換のための回転行列の導出

回転による座標変換の表現には、回転行列が用いられる。加速度ベクトル α を計測した3軸方位角センサの座標系 $O-xyz$ を、 x 軸まわりに角度 ϕ だけ回転させ、固定座標系 $O_e-x_e y_e z_e$ に変換する例を図A3-2に示す。加速度ベクトル α の座標系 $O-xyz$ への投影成分を $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ とし、座標系 $O_e-x_e y_e z_e$ への投影成分を $\alpha_{xe}, \alpha_{ye}, \alpha_{ze}$ とする。また y 軸から加速度ベクトル α までの角度を β と定義する。図A3-2より加速度ベクトル α の投影成分 $\alpha_{xe}, \alpha_{ye}, \alpha_{ze}$ を求めると、式(A3-3)～(A3-5)となる。式(A3-3)～(A3-5)を行列として表現したものを式(A3-6)に示す。式(A3-6)は、座標系を x 軸まわりに角度 ϕ だけ回転させる回転行列である。 y, z 軸まわりの回転に関しても、 x 軸まわりの回転と同様に回転行列を求めることができる。

$$\alpha_{xe} = \alpha_x \quad (\text{A3-3})$$

$$\begin{aligned} \alpha_{ye} &= \alpha \cos(\phi + \beta) \\ &= \alpha \{ \cos\phi \cos\beta - \sin\phi \sin\beta \} \\ &= \alpha_y \cos\phi - \alpha_z \sin\phi \end{aligned} \quad (\text{A3-4})$$

$$\begin{aligned} \alpha_{ze} &= \alpha \sin(\phi + \beta) \\ &= \alpha \{ \sin\phi \cos\beta + \cos\phi \sin\beta \} \\ &= \alpha_y \sin\phi + \alpha_z \cos\phi \end{aligned} \quad (\text{A3-5})$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{xe} \\ \alpha_{ye} \\ \alpha_{ze} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad (\text{A3-6})$$

一般にベクトルを取り扱う空間において x, y, z 軸がそれぞれ直交する向きで座標系を定義したとき、座標系を x 軸まわりに角度 ϕ だけ回転させる回転行列 $\mathbf{R}_{x,\phi}$ 、 y 軸まわりに角度 θ だけ回転させる回転行列 $\mathbf{R}_{y,\theta}$ 、 z 軸まわりに角度 ψ だけ回転させる回転行列 $\mathbf{R}_{z,\psi}$ は、式(A3-7)～式(A3-9)で表される⁶⁸⁾。 x, y, z 軸で表されるベクトルの座標変換は、各軸まわりの回転行列を掛けあわせることで実現できる。従って、加速度ベクトル α を計測した3軸方位角セ

ンサの座標系 $O - xyz$ を、 x 軸まわりに角度 ϕ 、 y 軸まわりに角度 θ 、 z 軸まわりに角度 ψ だけ回転させて固定座標系 $O_e - x_e y_e z_e$ へと変換するとき、固定座標系における加速度ベクトル α_e は、式(A3-10)により求められる。

$$\mathbf{R}_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (\text{A3-7})$$

$$\mathbf{R}_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{A3-8})$$

$$\mathbf{R}_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A3-9})$$

$$\alpha_e = \mathbf{R}_{z,\psi} \mathbf{R}_{y,\theta} \mathbf{R}_{x,\phi} \alpha \quad (\text{A3-10})$$

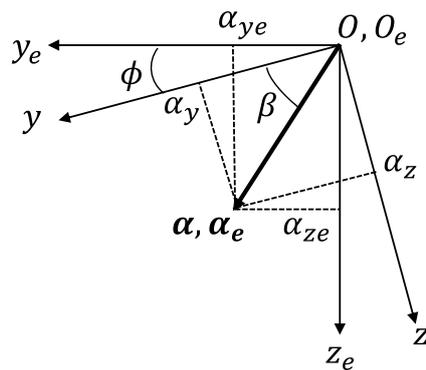


図 A3-2 x 軸まわりの角度 ϕ の回転

3. 3 座標変換処理プログラムの検証

座標変換処理プログラムの入出力を図 A3-3 に示す. 座標変換処理プログラムの入力データは, 3 軸方位角センサの傾きや方位を表す①x軸の水平面からの角度(ϕ), ②y軸の水平面からの角度(θ), ③z軸まわりの角度(ψ), 並進運動として④x軸方向の加速度(α_{xi}), ⑤y軸方向の加速度(α_{yi}), ⑥z軸方向の加速度(α_{zi}), 回転運動として⑦x軸まわりの角速度(ω_{xi}), ⑧y軸まわりの角速度(ω_{yi}), ⑨z軸まわりの角速度(ω_{zi})がある. 加速度・角速度の座標変換の式を式(A3-11), 式(A3-12)に示す.

$$\begin{bmatrix} \alpha_{xo} \\ \alpha_{yo} \\ \alpha_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{xi} \\ \alpha_{yi} \\ \alpha_{zi} \end{bmatrix} \quad (\text{A3-11})$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{xo} \\ \omega_{yo} \\ \omega_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{xi} \\ \omega_{yi} \\ \omega_{zi} \end{bmatrix} \quad (\text{A3-12})$$

例として, 加速度($\alpha_{xi}, \alpha_{yi}, \alpha_{zi}$) = (1, 1, 1), 角速度($\omega_{xi}, \omega_{yi}, \omega_{zi}$) = (1, 1, 1)を考える. 座標変換に用いる角度は, $\phi=90, \theta=90, \psi=90$ とする. 以下に式(A3-11), 式(A3-12)を用いた座標変換の計算例を示す.

$$\begin{bmatrix} \alpha_{xo} \\ \alpha_{yo} \\ \alpha_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{xo} \\ \alpha_{yo} \\ \alpha_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{xo} \\ \alpha_{yo} \\ \alpha_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{xo} \\ \alpha_{yo} \\ \alpha_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (\text{A3-13})$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{xo} \\ \omega_{yo} \\ \omega_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{xo} \\ \omega_{yo} \\ \omega_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{xo} \\ \omega_{yo} \\ \omega_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{xo} \\ \omega_{yo} \\ \omega_{zo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

(A3-14)

座標変換後の座標は、それぞれ加速度 $(\alpha_{xi}, \alpha_{yi}, \alpha_{zi}) = (1, 1, -1)$ 、角速度 $(\omega_{xi}, \omega_{yi}, \omega_{zi}) = (1, 1, -1)$ となる。座標変換処理プログラムへの入力データおよび出力データを図 A3-4 に示す。入力データは、時間(1列目)、および図 A3-3 で示した角度 (①～③)、加速度 (④～⑥)、角速度 (⑦～⑨) がそれぞれカンマ区切りで保存されている (図 A3-4 (a))。座標変換処理プログラムにより計算された座標変換後の加速度 (⑩～⑫)、角速度 (⑬～⑮) は、式 (A3-13)、式 (A3-14) と等しくなることを確認した。

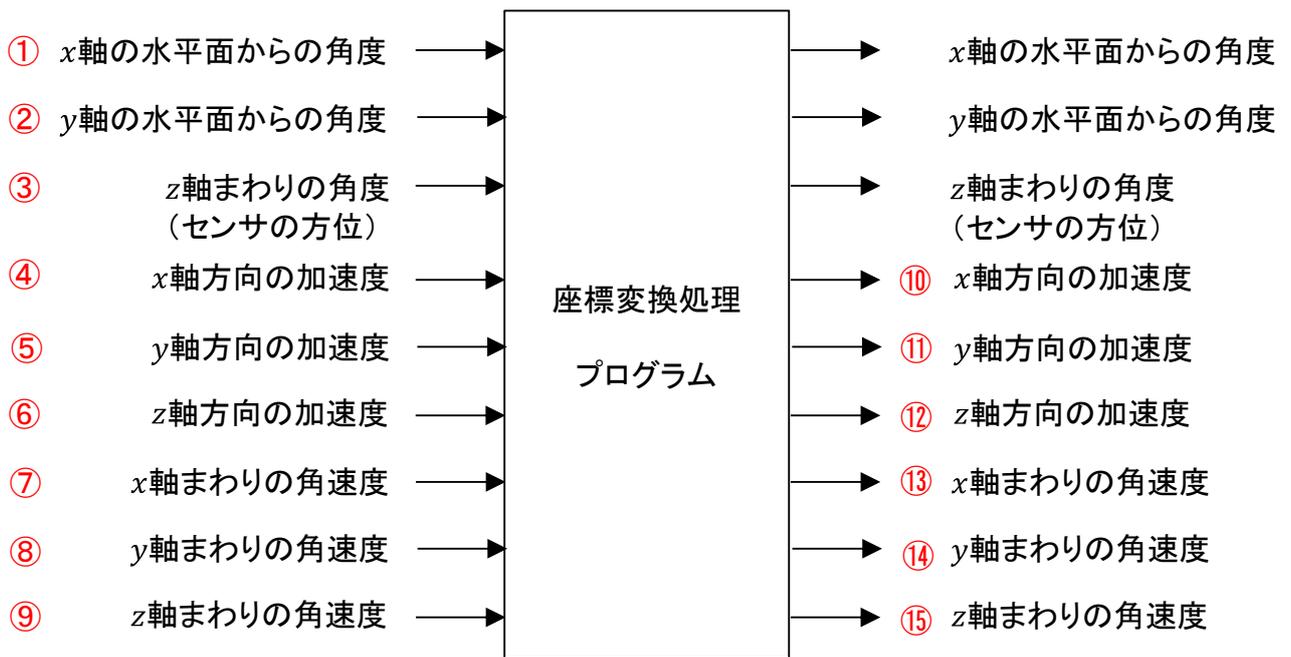
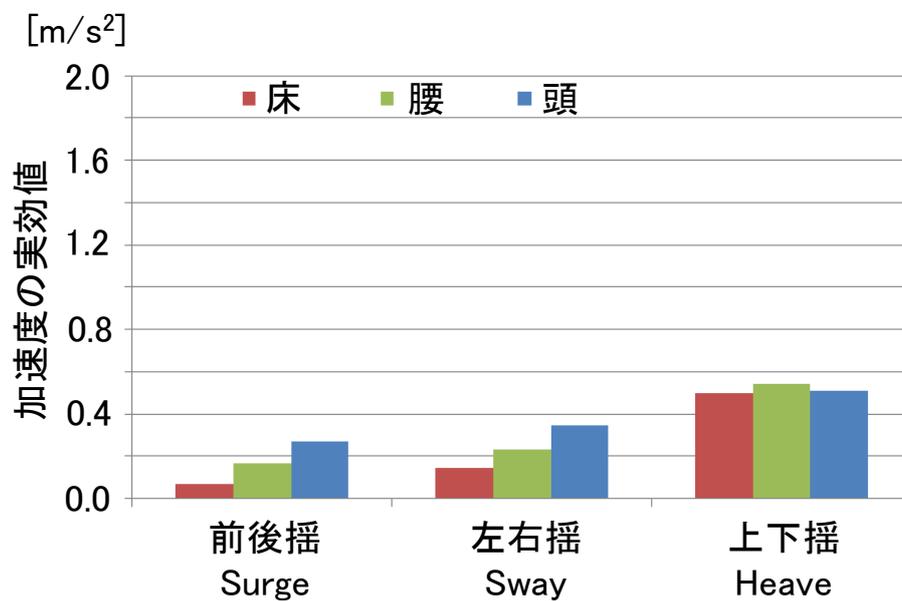


図 A3-3 プログラムの入出力

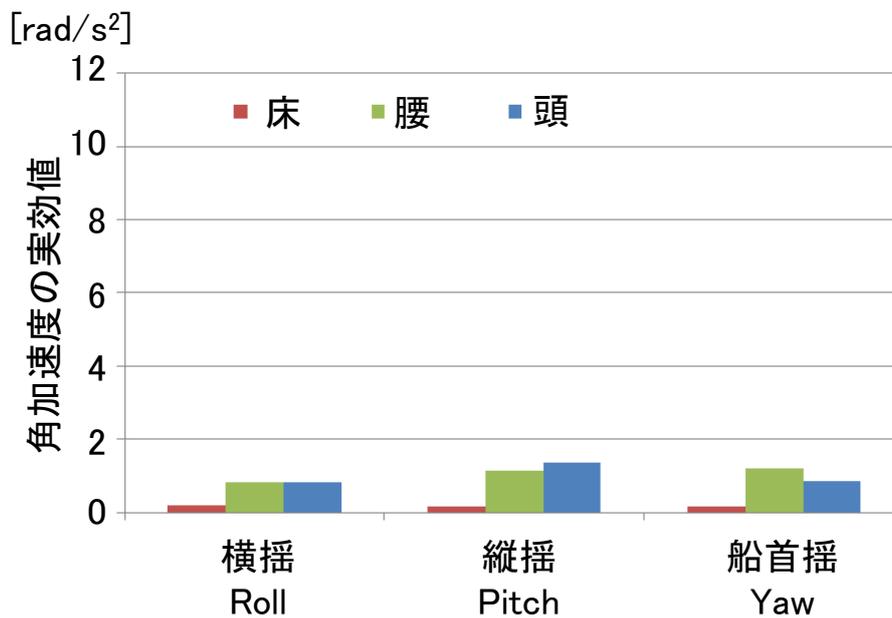
付録4 実験データ

4. 1 加速度・角加速度の実効値

表 3-2 に示した実験協力者の加速度・角加速度の実効値を図 A4-1～図 A4-62 に示す。また表 3-3 に示した棒における解析範囲 3 箇所での加速度・角加速度の実効値を図 A4-63～図 A4-68 に示す。実験協力者の多くは、腰部と頭部に、並進運動として上下揺 (Heave)、回転運動としては、縦揺 (Pitch) が特に発生する傾向が観察された。また縦揺 (Pitch) は、実験協力者の頭部に比べて腰部が大きくなる傾向が観察された。一方、実験協力者の中には、腰部の縦揺 (Pitch) よりも頭部の縦揺 (Pitch) が大きくなる傾向も観察された。これは、実験時の船舶の航行状況や、実験協力者ごとの姿勢維持の動作の違いが表れているものと推察される。



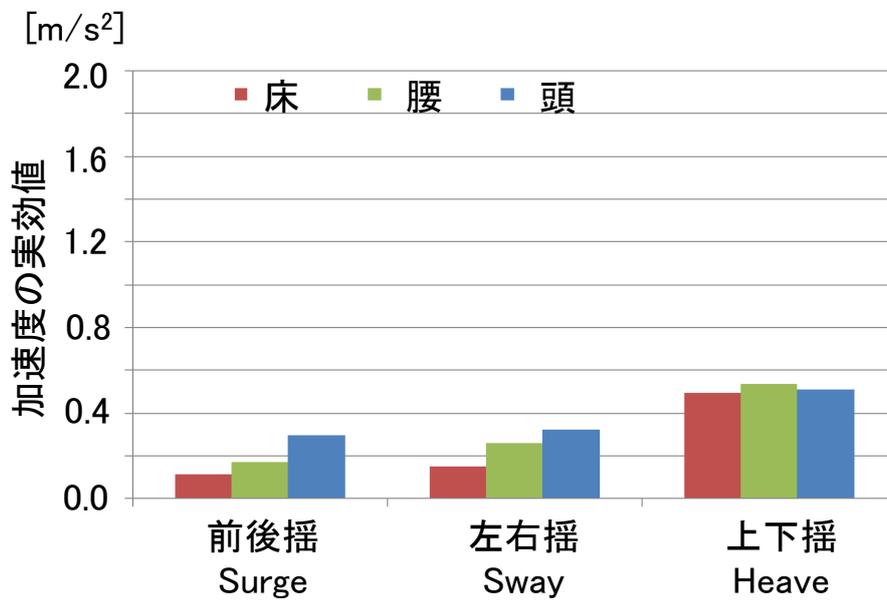
(a) 加速度の実効値



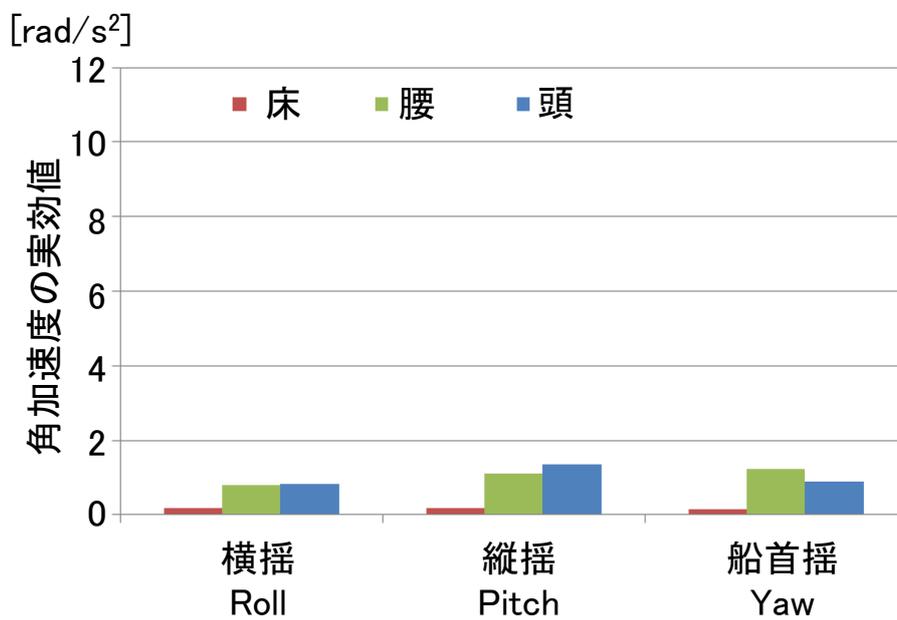
(b) 角加速度の実効値

図 A4-1 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 1, 女性, 実験 1 回目)



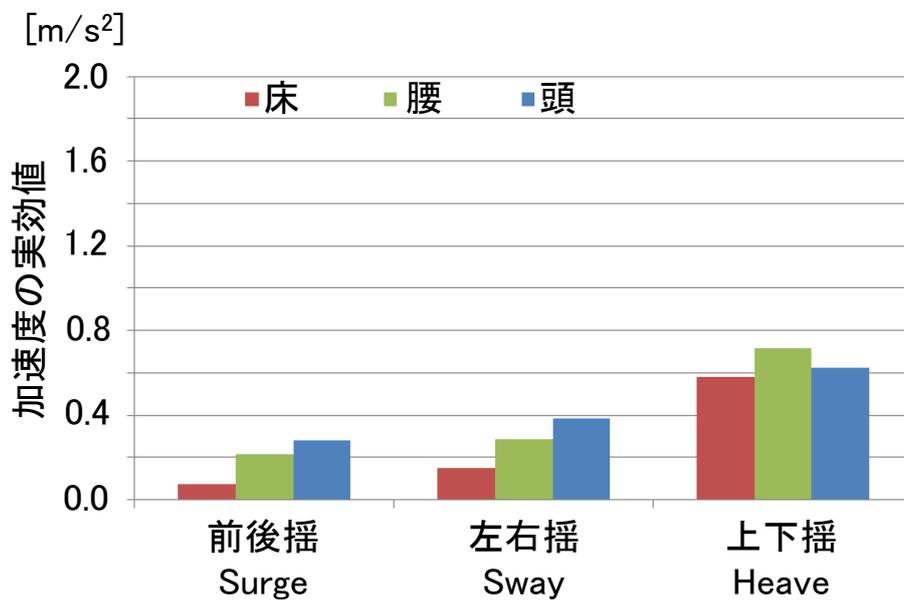
(a) 加速度の実効値



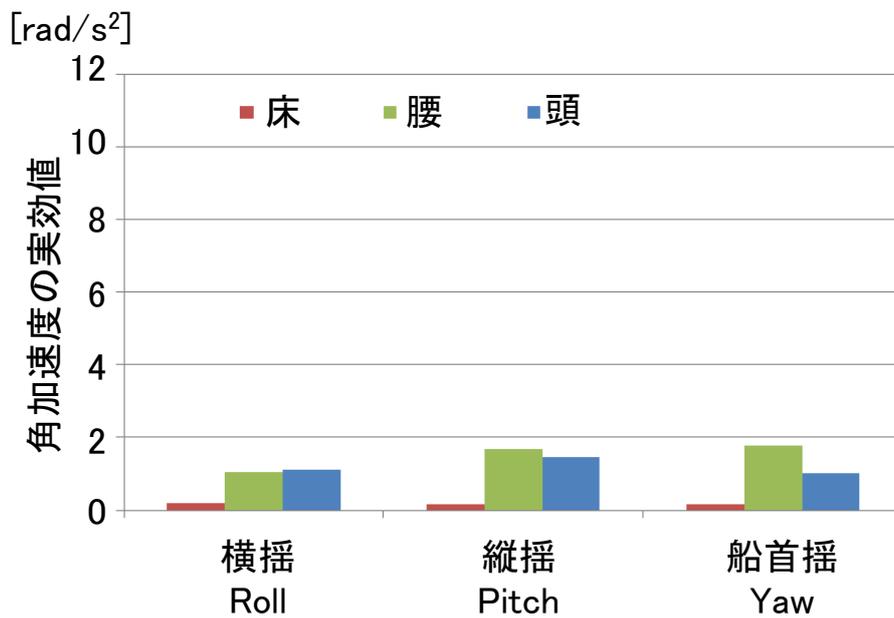
(b) 角加速度の実効値

図 A4-2 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 1, 女性, 実験 1 回目)



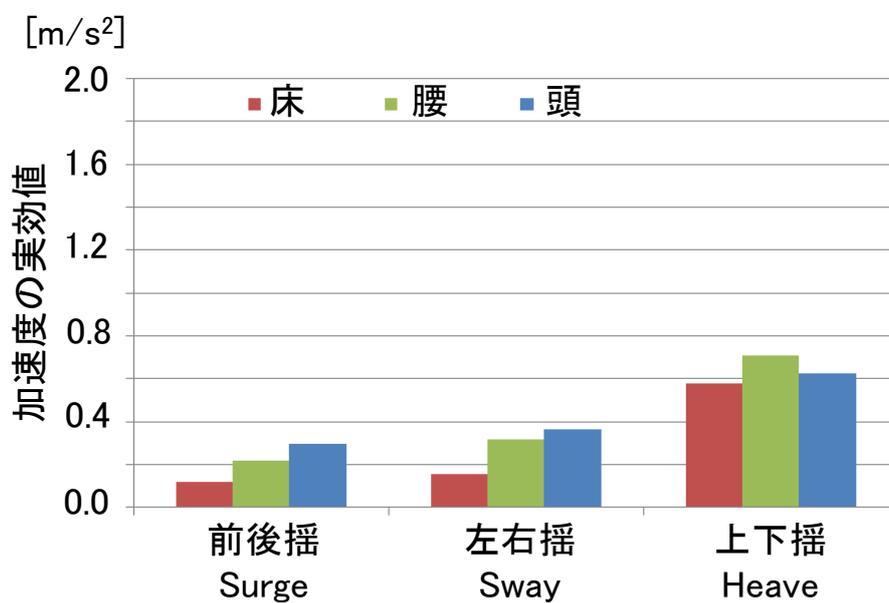
(a) 加速度の実効値



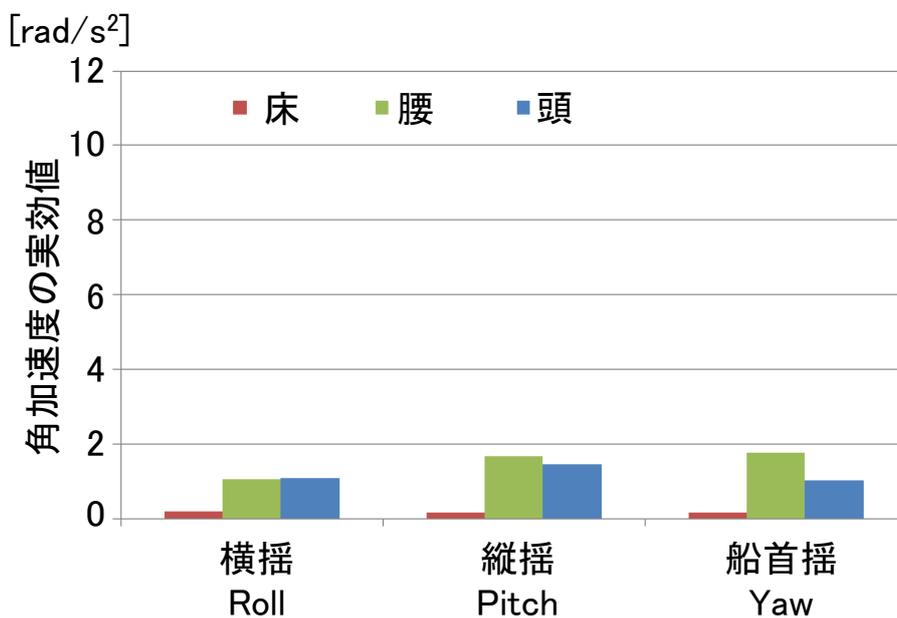
(b) 角加速度の実効値

図 A4-3 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 1, 女性, 実験 2 回目)



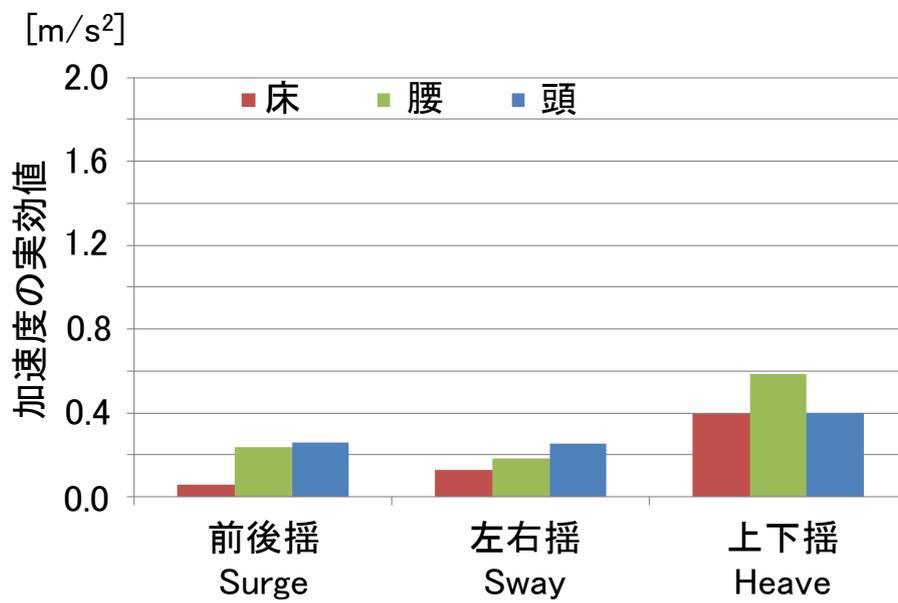
(a) 加速度の実効値



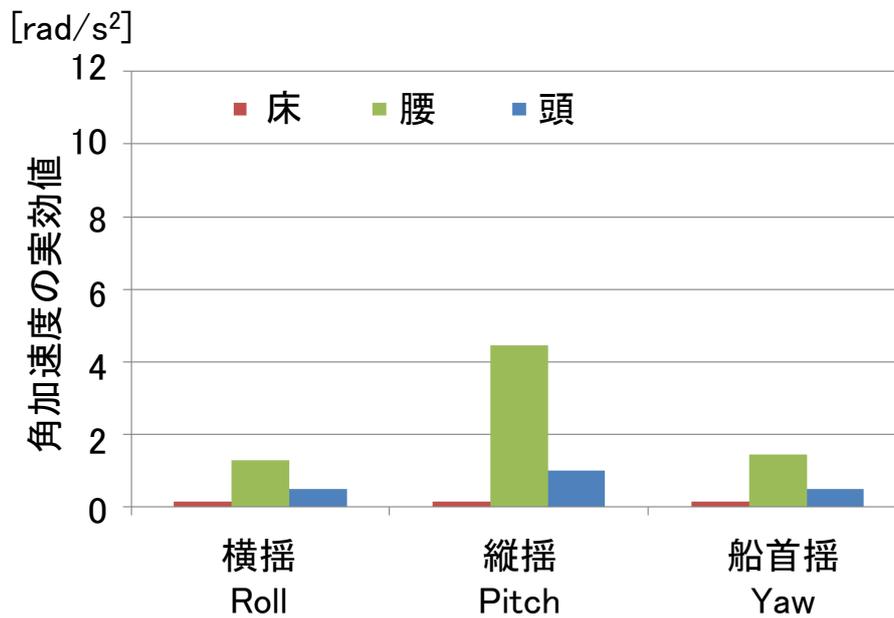
(b) 角加速度の実効値

図 A4-4 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 1, 女性, 実験 2 回目)



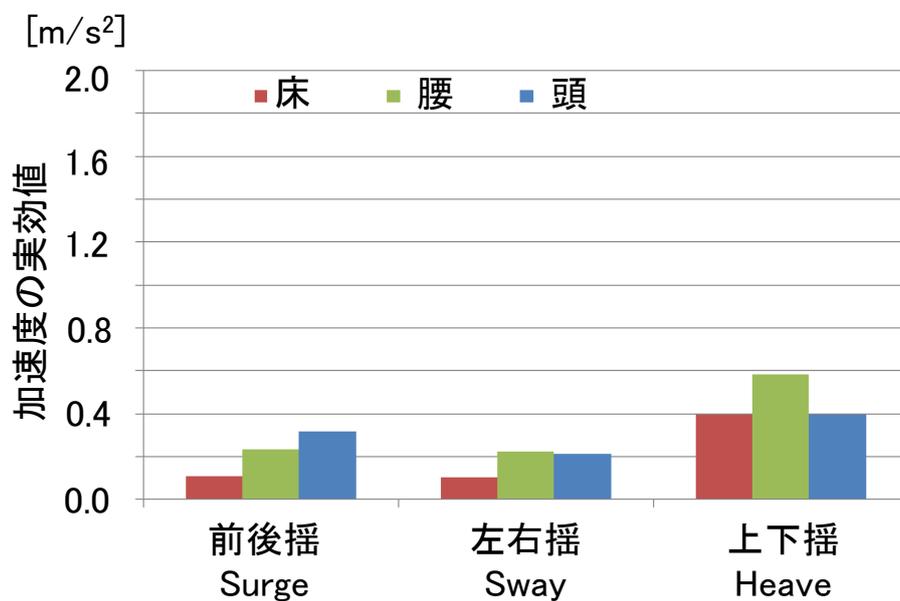
(a) 加速度の実効値



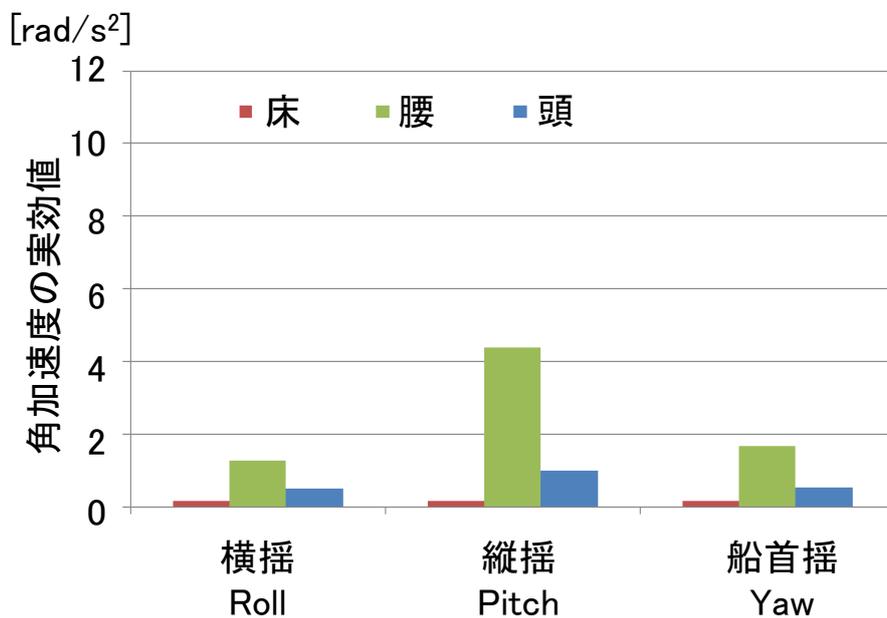
(b) 角加速度の実効値

図 A4-5 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 2, 男性, 実験 1 回目)



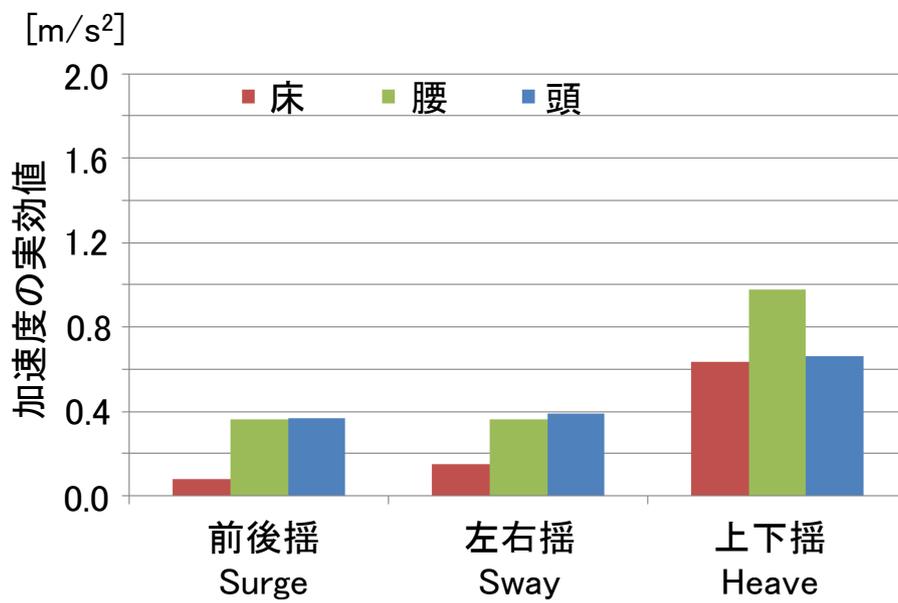
(a) 加速度の実効値



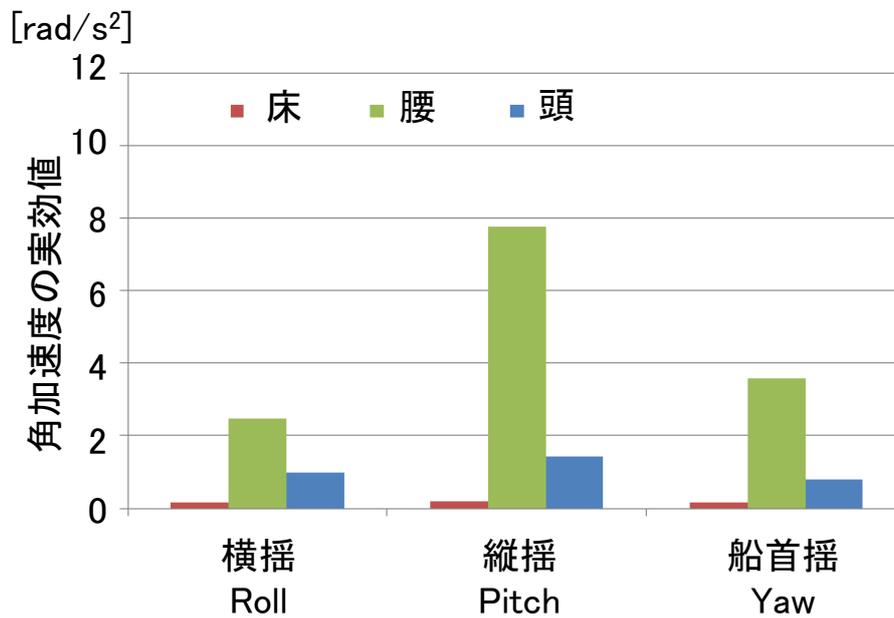
(b) 角加速度の実効値

図 A4-6 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 2, 男性, 実験 1 回目)



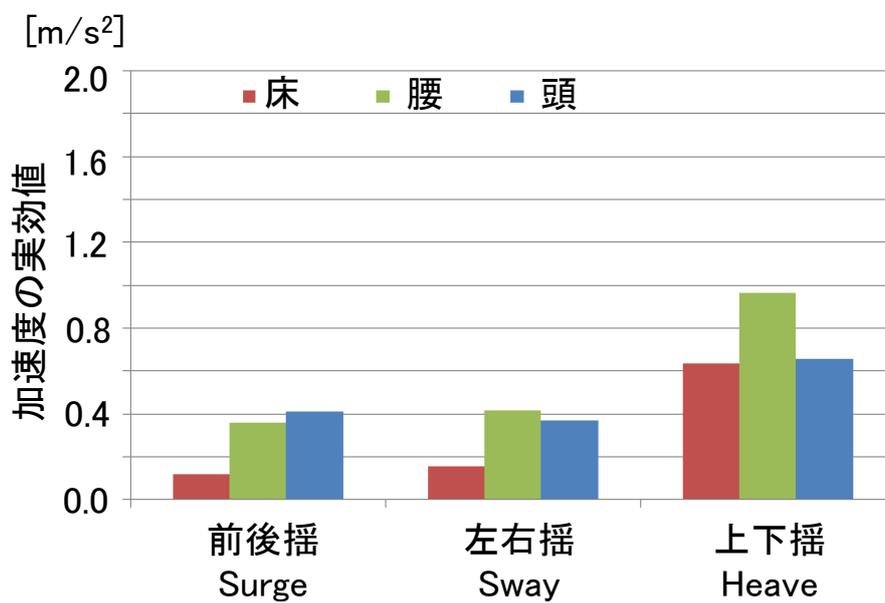
(a) 加速度の実効値



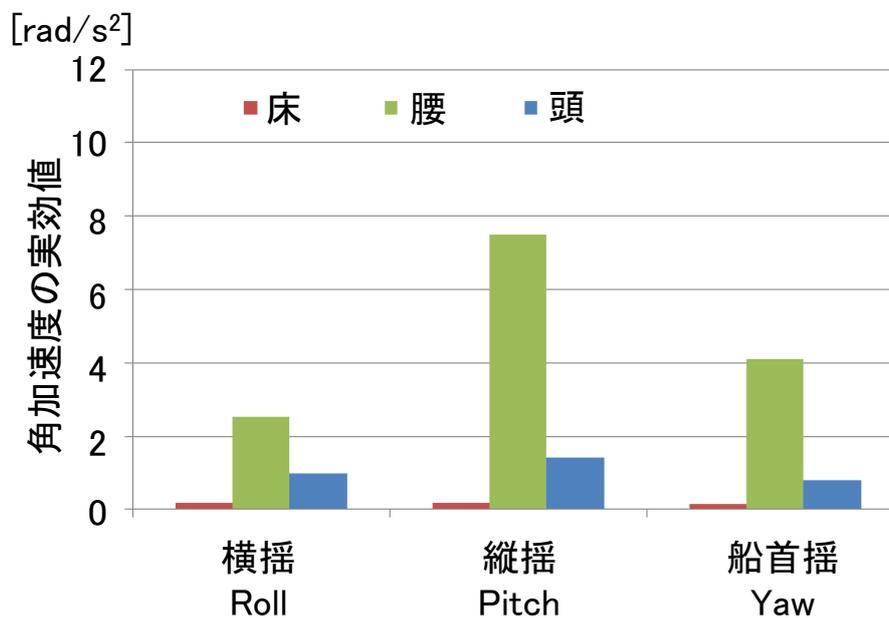
(b) 角加速度の実効値

図 A4-7 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 2, 男性, 実験 2 回目)



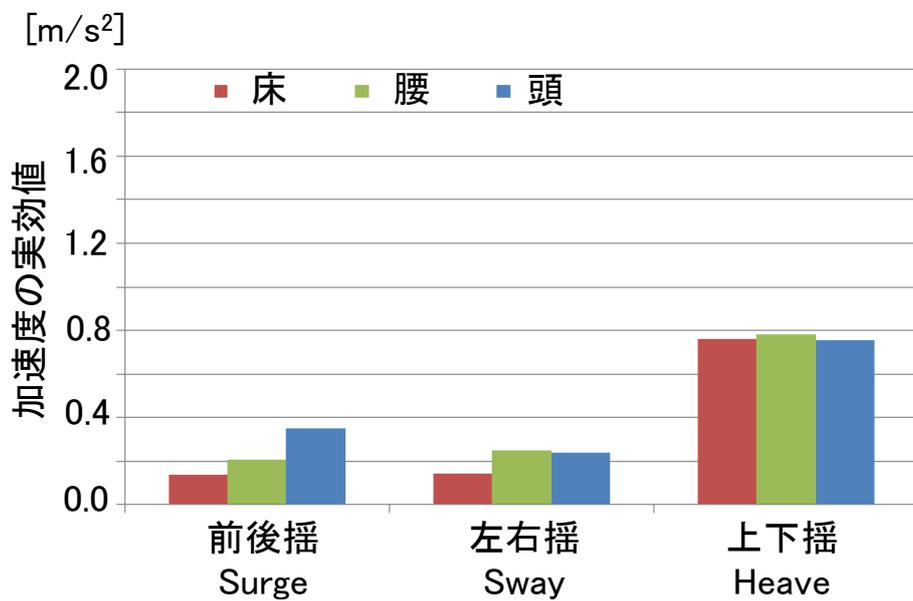
(a) 加速度の実効値



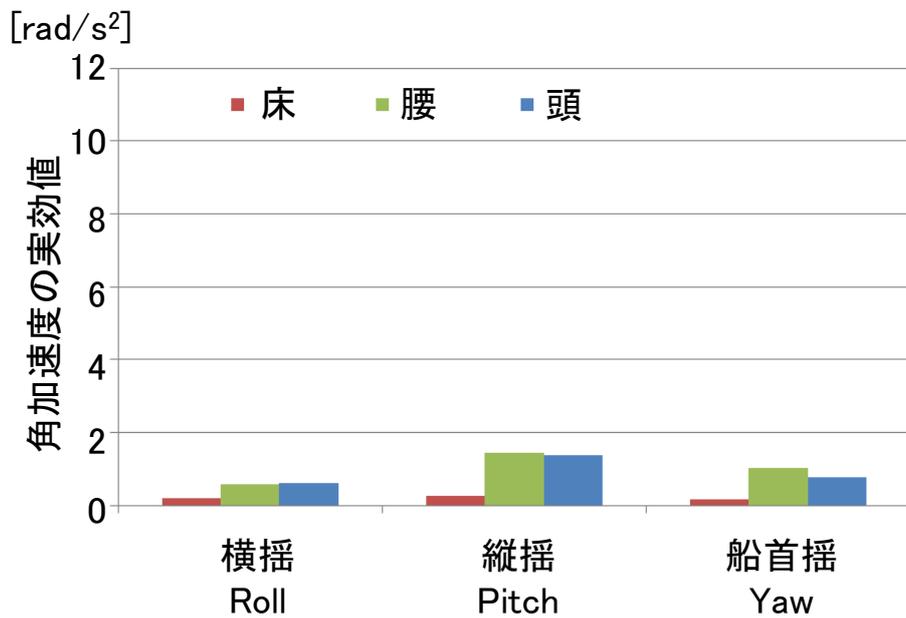
(b) 角加速度の実効値

図 A4-8 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 2, 男性, 実験 2 回目)



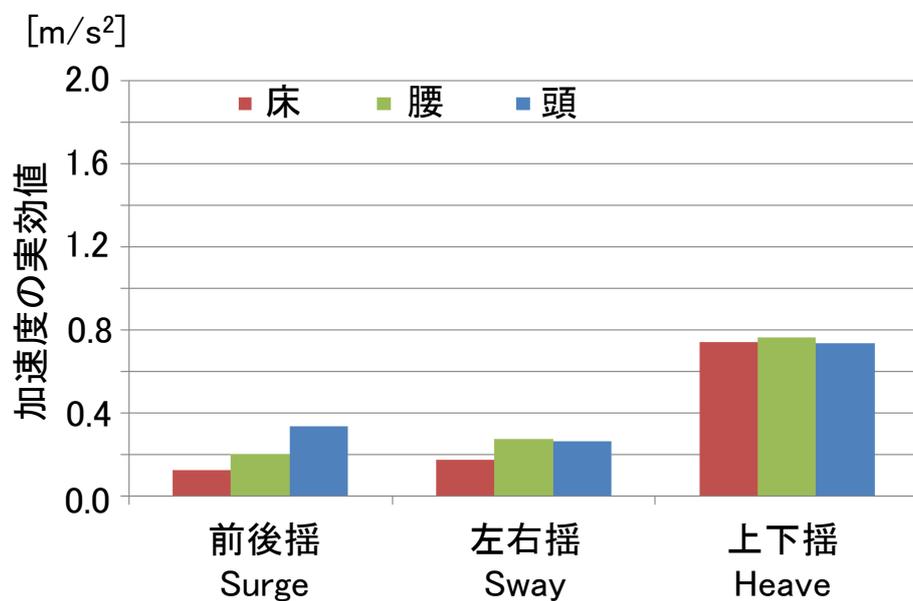
(a) 加速度の実効値



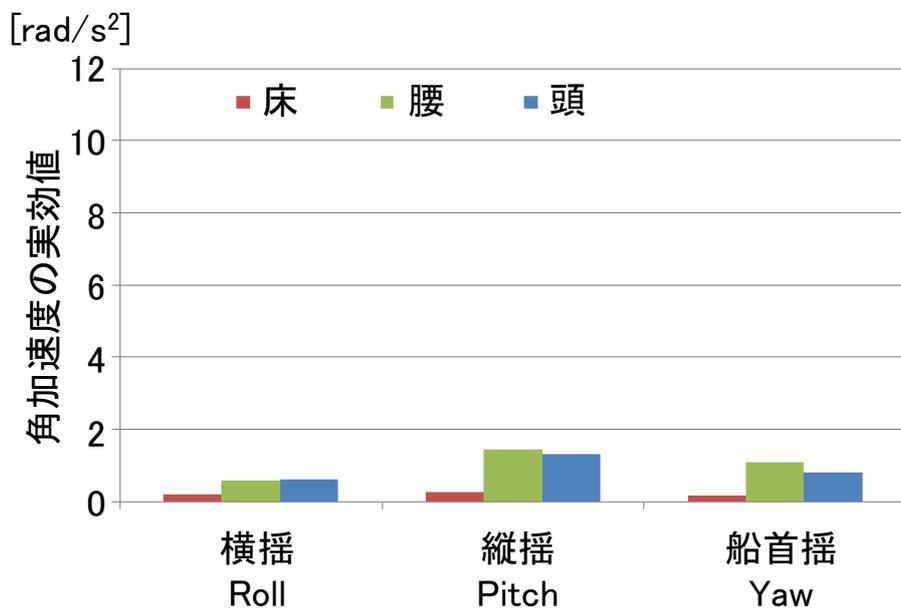
(b) 角加速度の実効値

図 A4-9 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 3, 女性, 実験 1 回目)



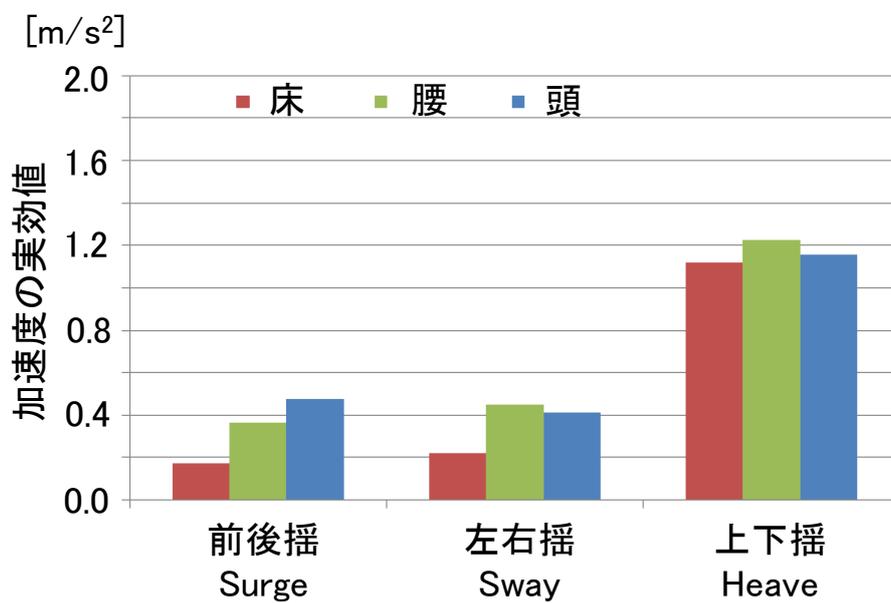
(a) 加速度の実効値



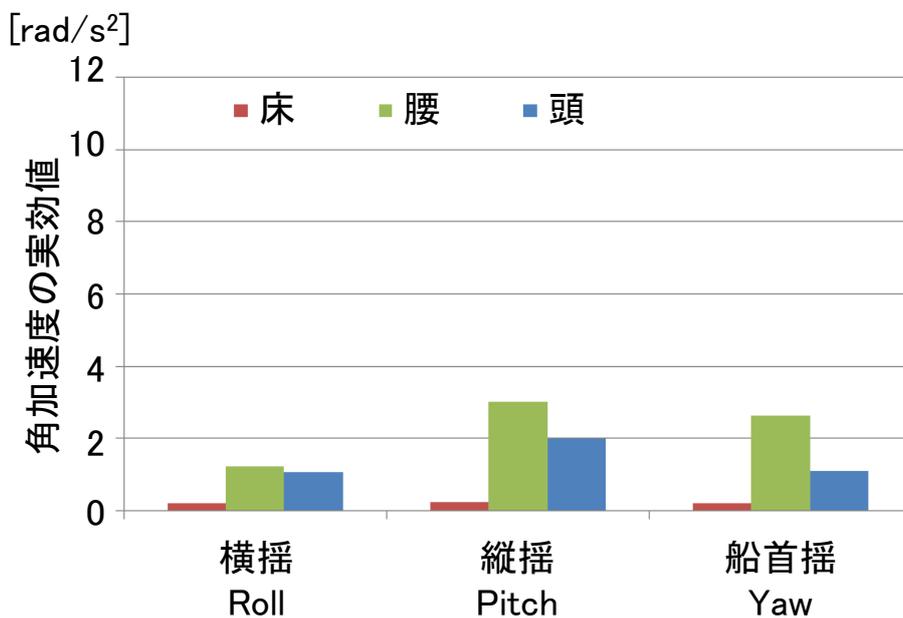
(b) 角加速度の実効値

図 A4-10 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 3, 女性, 実験 1 回目)



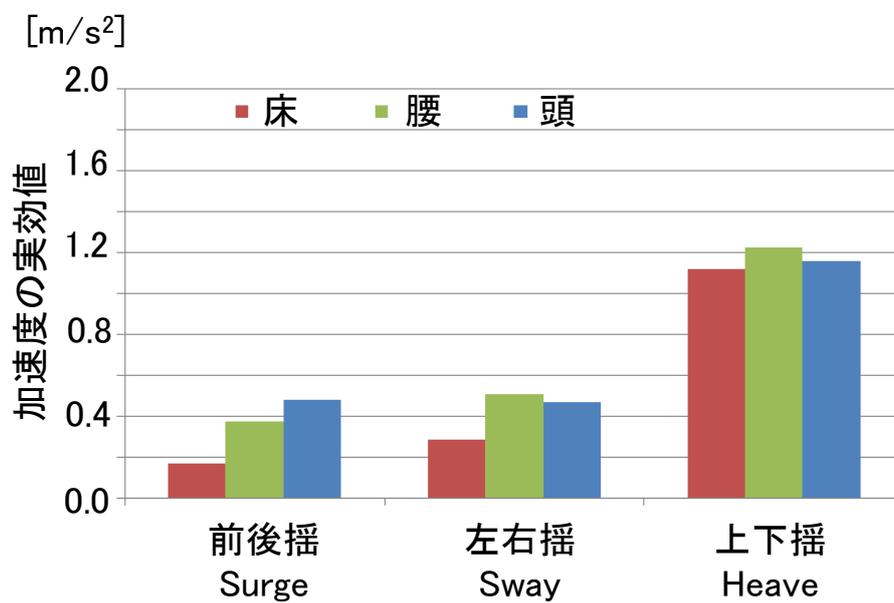
(a) 加速度の実効値



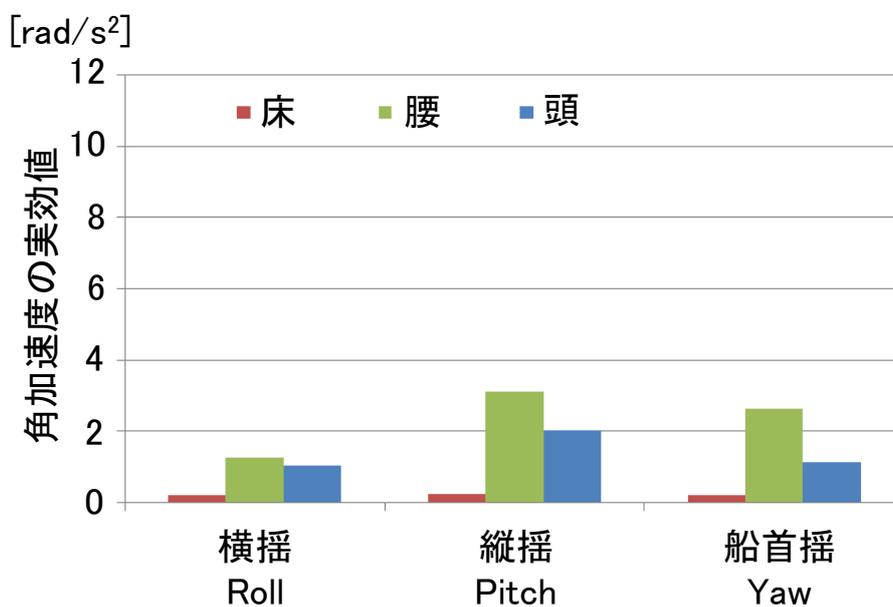
(b) 角加速度の実効値

図 A4-11 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 3, 女性, 実験 2 回目)



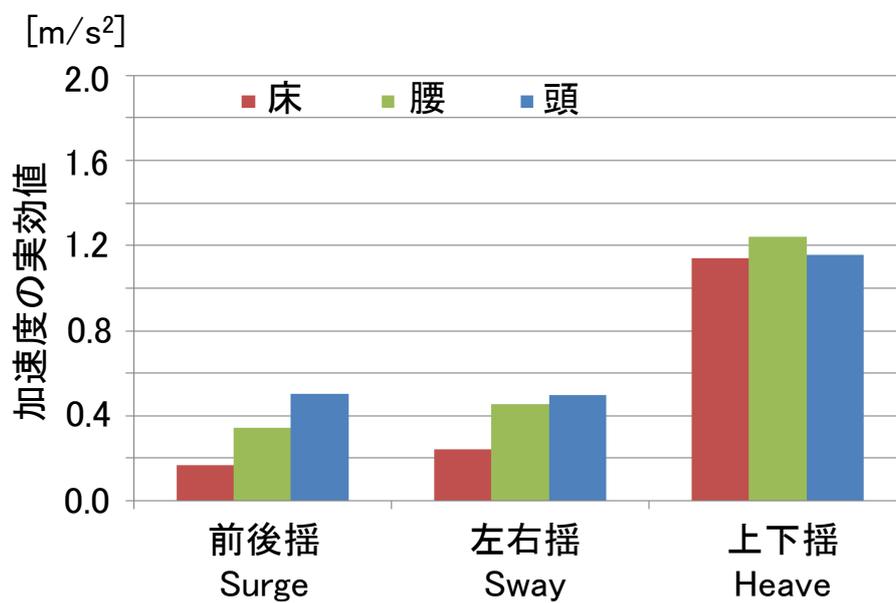
(a) 加速度の実効値



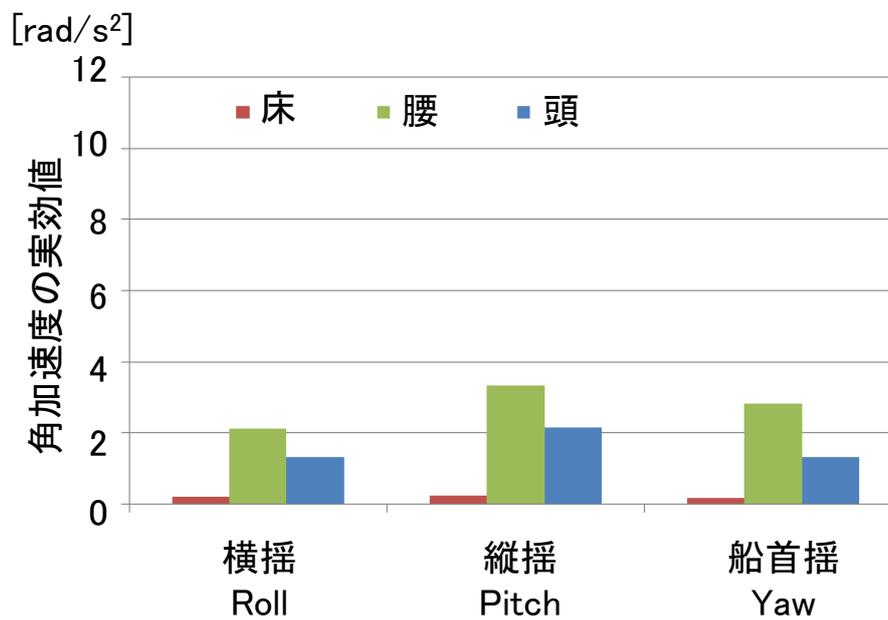
(b) 角加速度の実効値

図 A4-12 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 3, 女性, 実験 2 回目)



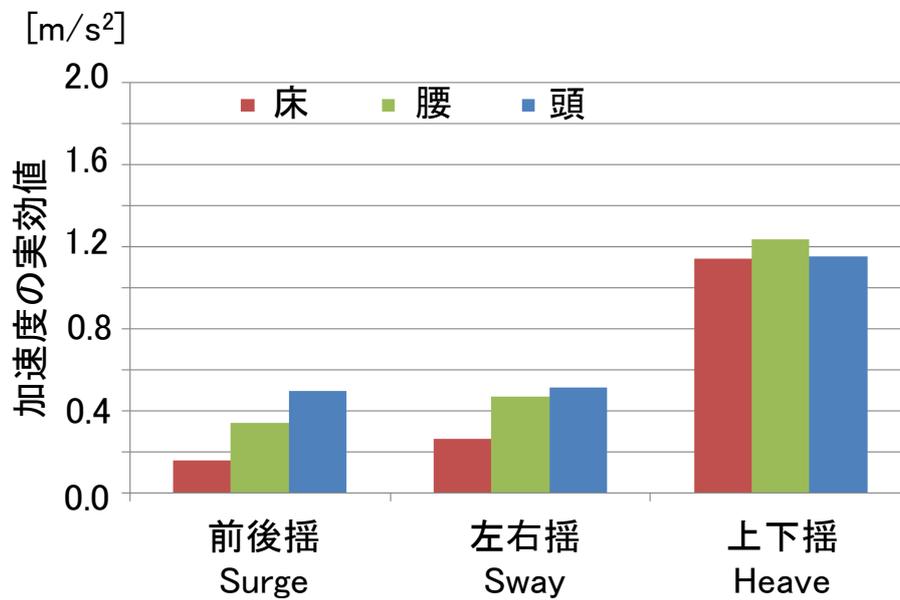
(a) 加速度の実効値



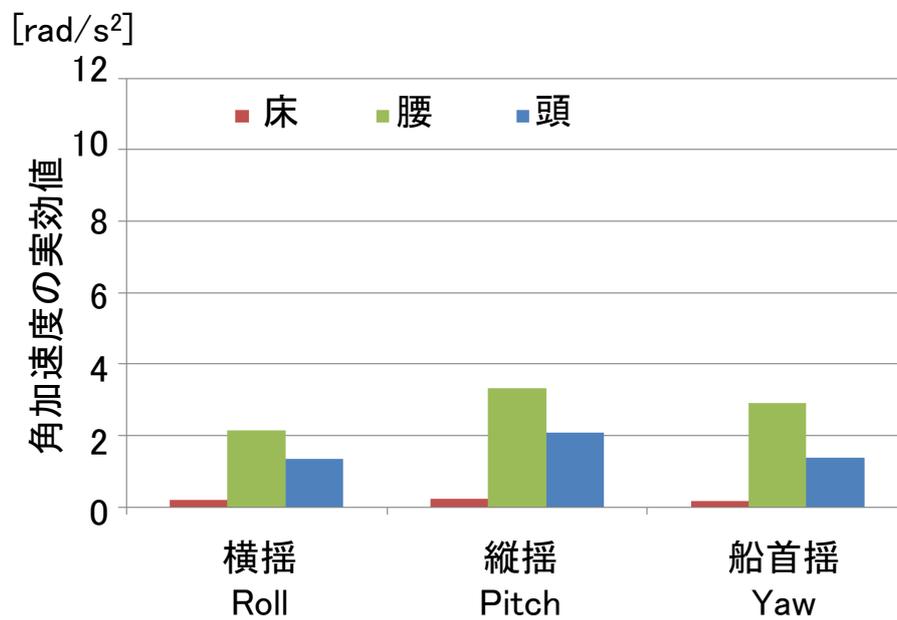
(b) 角加速度の実効値

図 A4-13 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 4, 女性, 実験 1 回目)



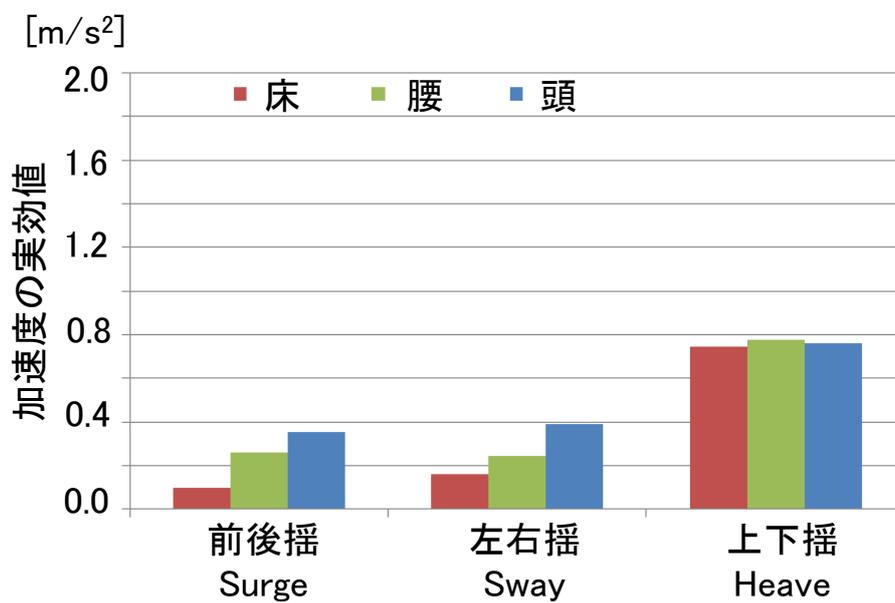
(a) 加速度の実効値



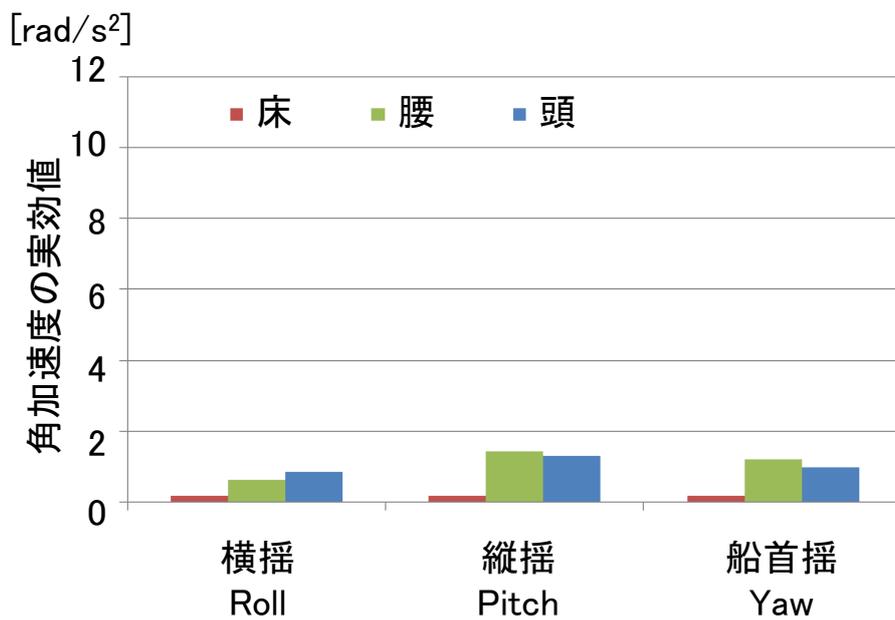
(b) 角加速度の実効値

図 A4-14 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 4, 女性, 実験 1 回目)



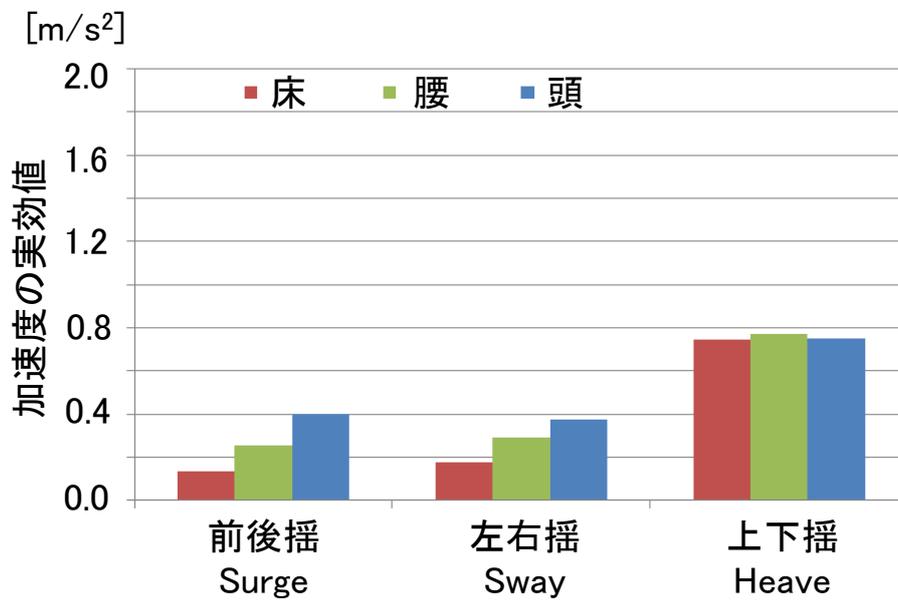
(a) 加速度の実効値



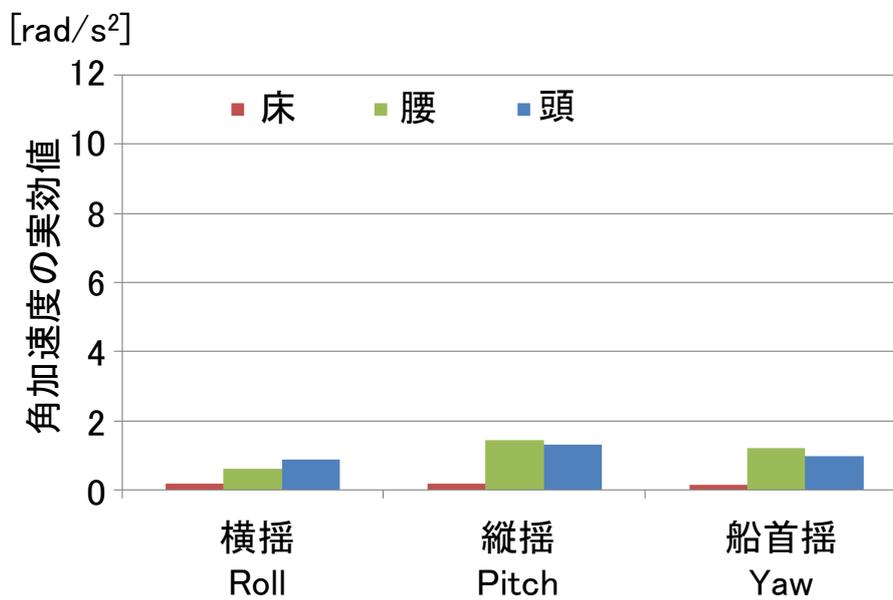
(b) 角加速度の実効値

図 A4-15 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 5, 女性, 実験 1 回目)



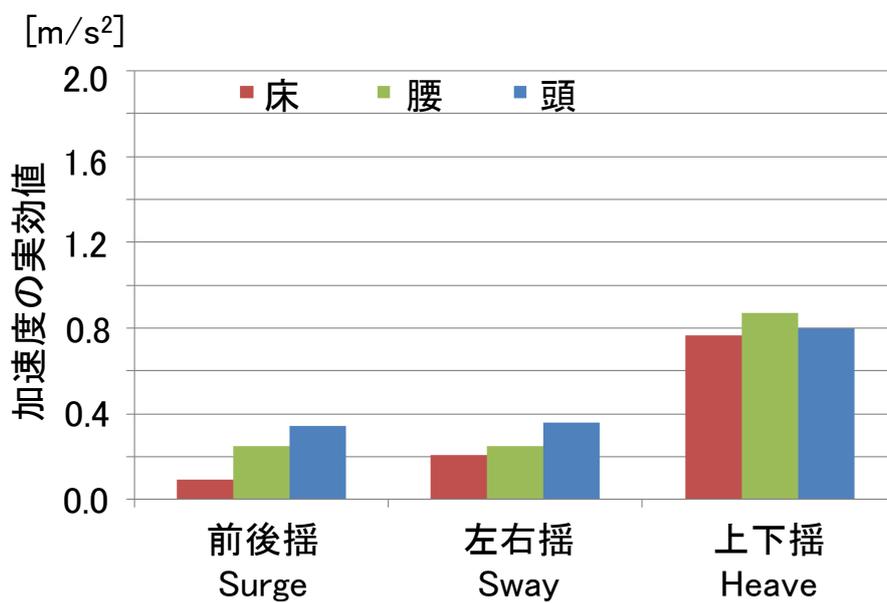
(a) 加速度の実効値



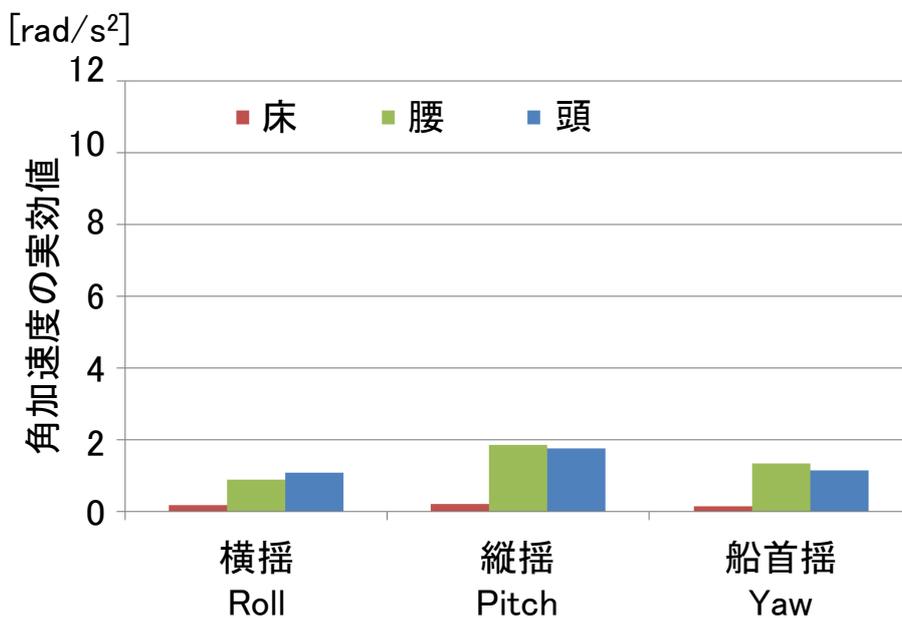
(b) 角加速度の実効値

図 A4-16 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 5, 女性, 実験 1 回目)



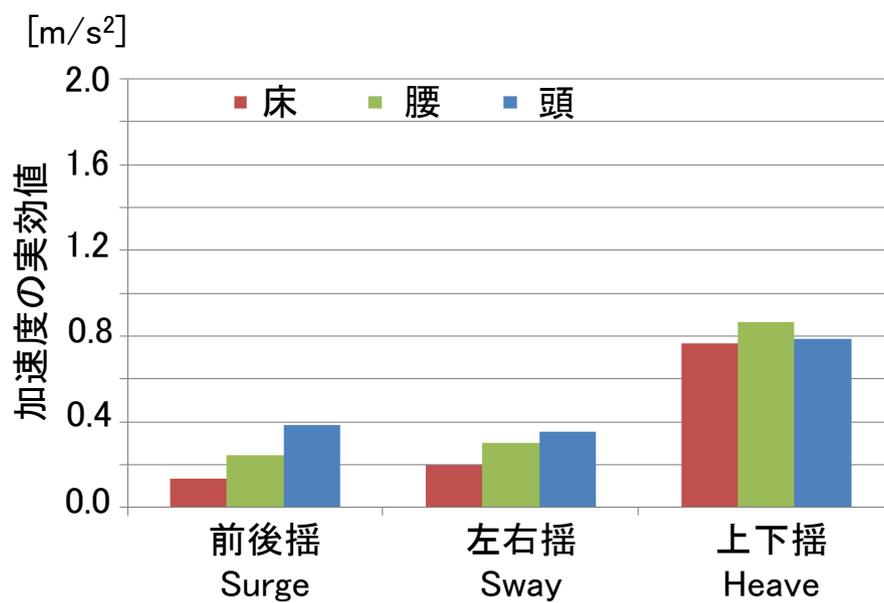
(a) 加速度の実効値



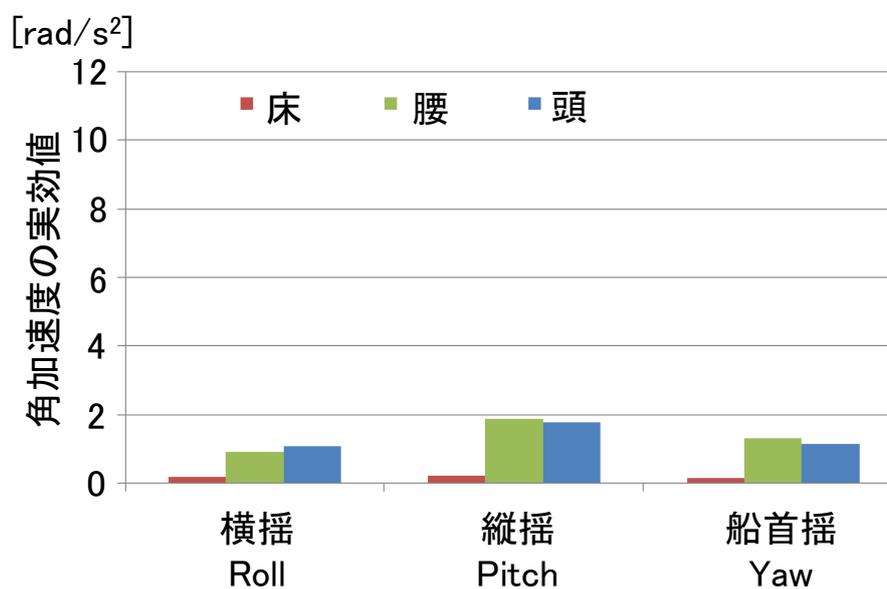
(b) 角加速度の実効値

図 A4-17 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 5, 女性, 実験 2 回目)



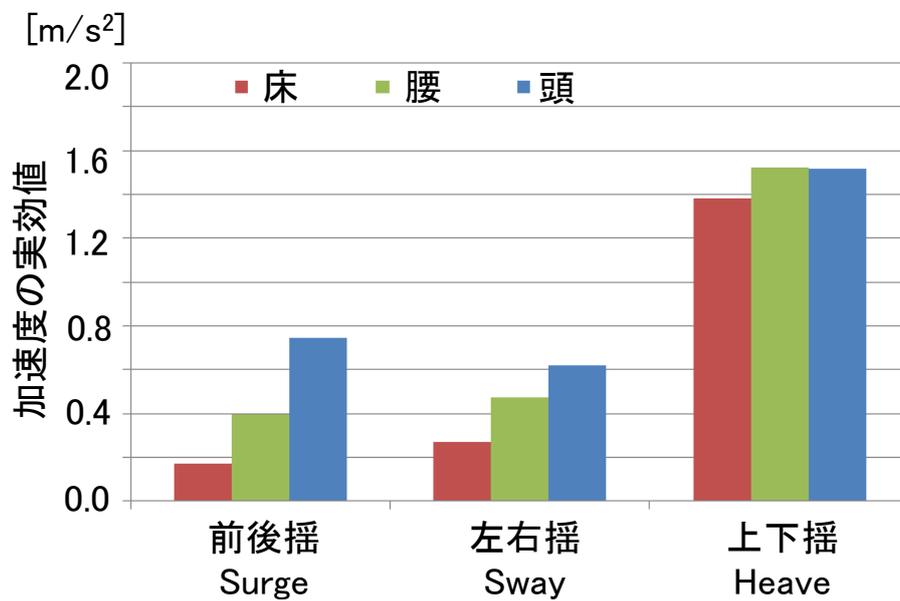
(a) 加速度の実効値



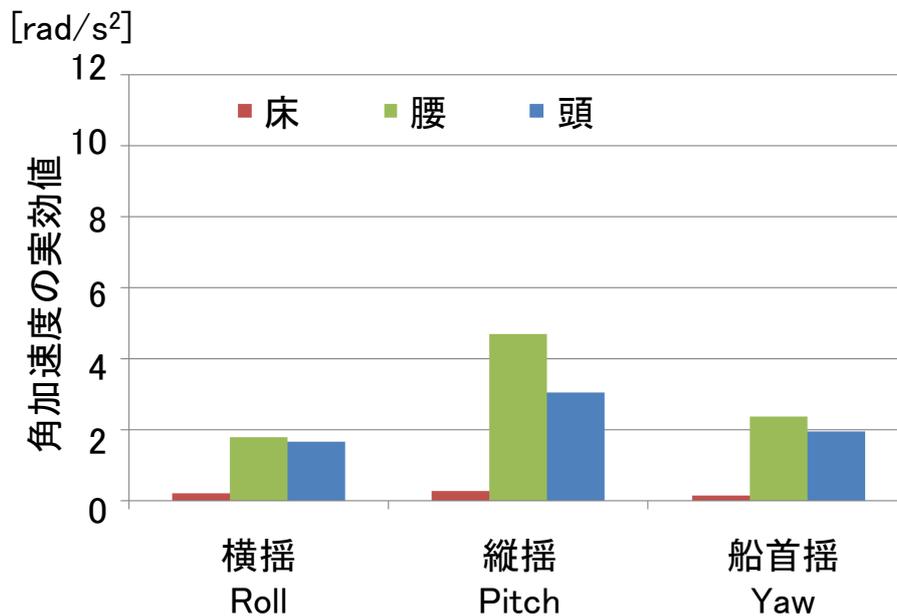
(b) 角加速度の実効値

図 A4-18 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 5, 女性, 実験 2 回目)



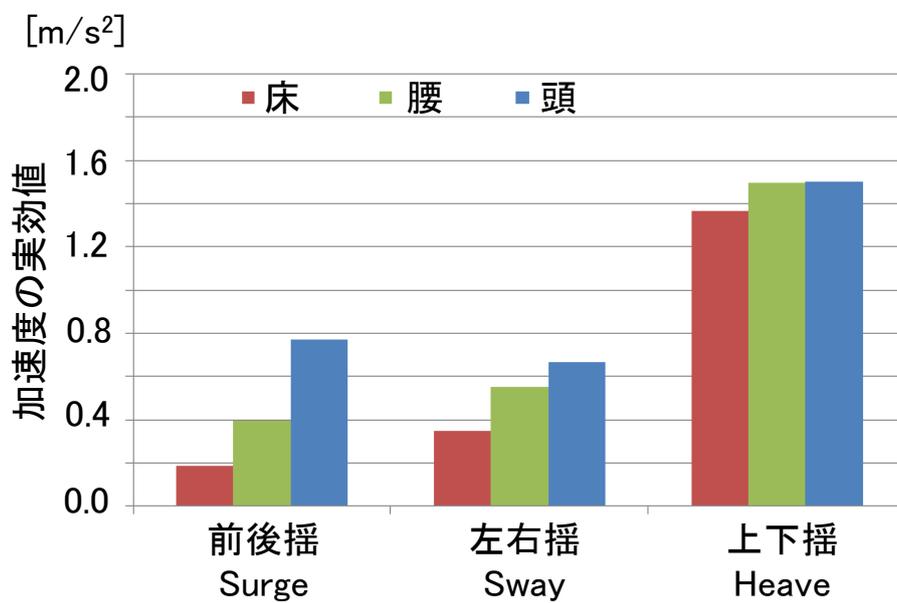
(a) 加速度の実効値



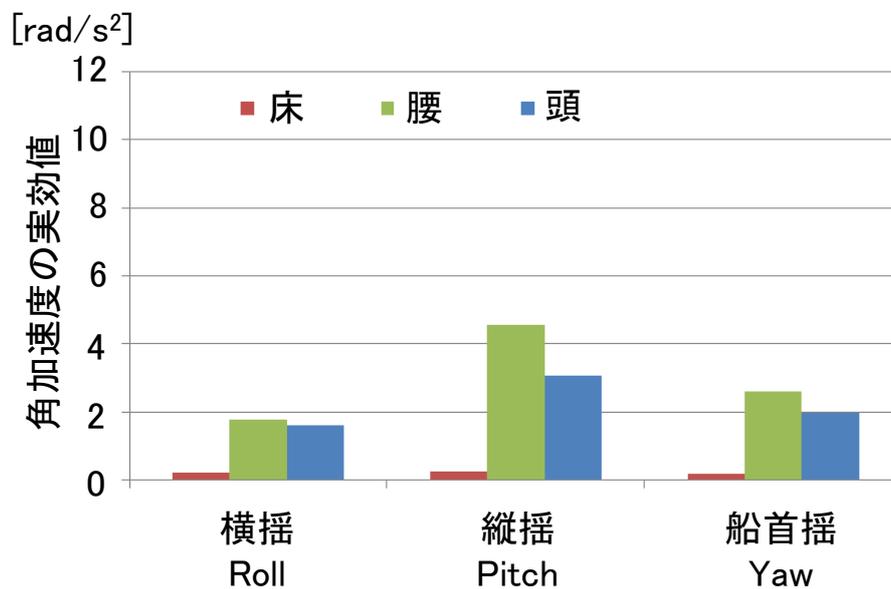
(b) 角加速度の実効値

図 A4-19 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 6, 男性, 実験 1 回目)



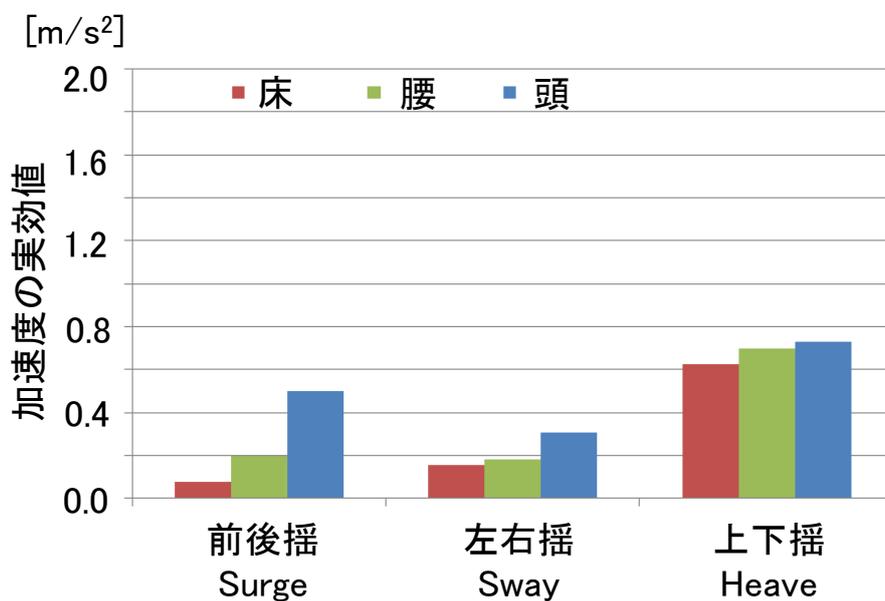
(a) 加速度の実効値



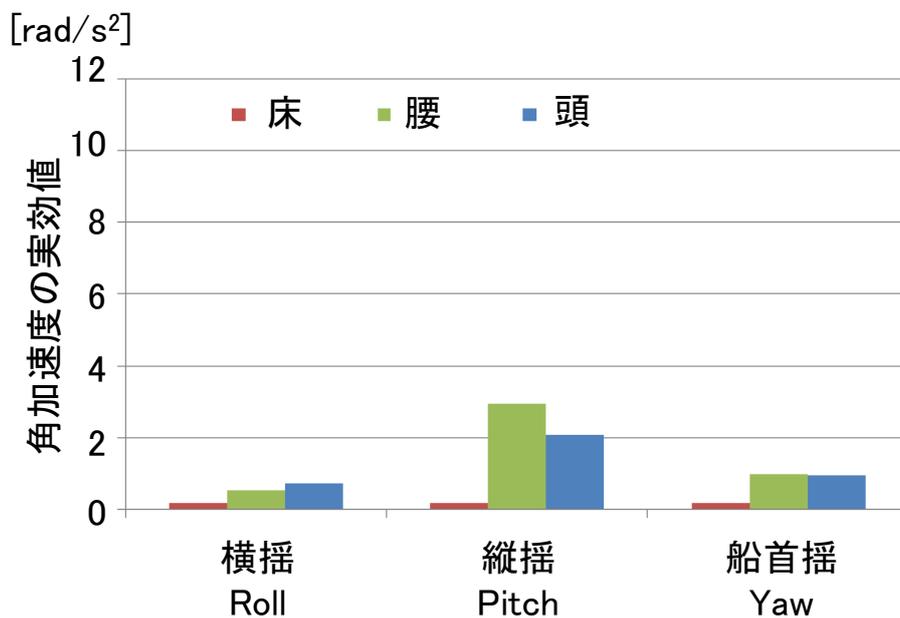
(b) 角加速度の実効値

図 A4-20 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 6, 男性, 実験 1 回目)



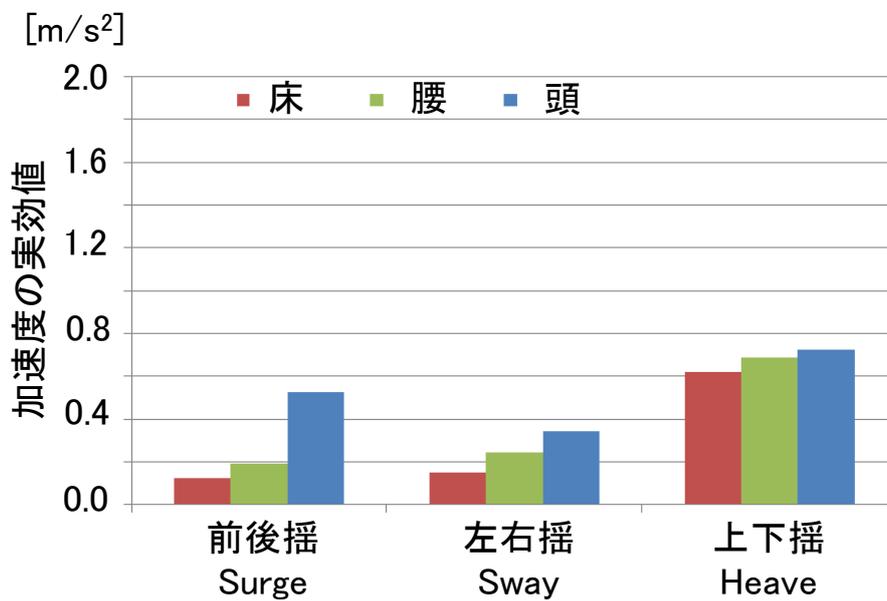
(a) 加速度の実効値



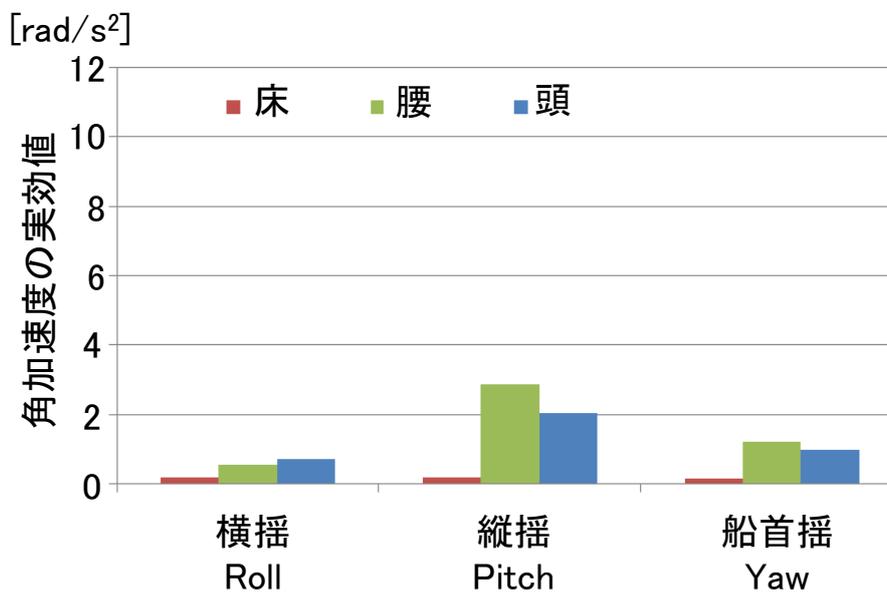
(b) 角加速度の実効値

図 A4-21 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 6, 男性, 実験 2 回目)



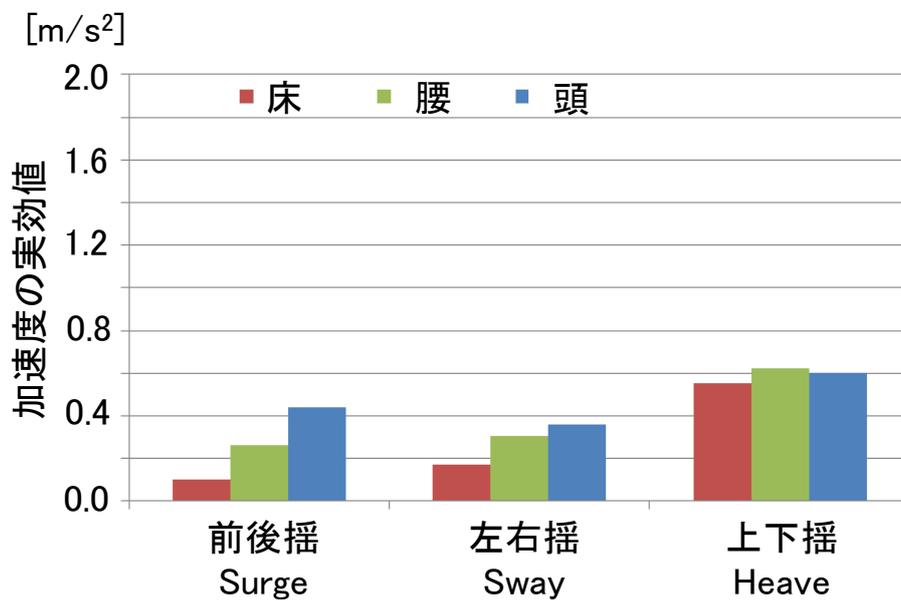
(a) 加速度の実効値



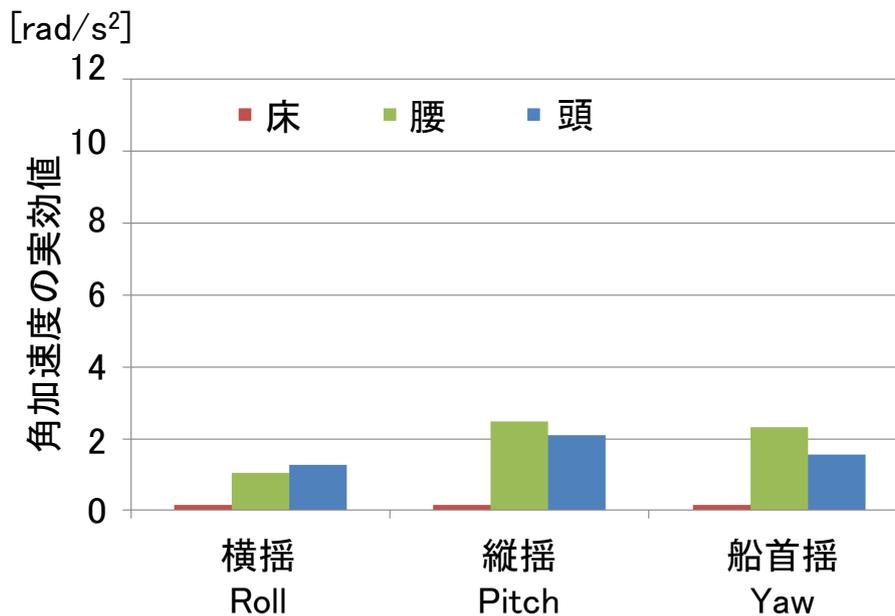
(b) 角加速度の実効値

図 A4-22 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 6, 男性, 実験 2 回目)



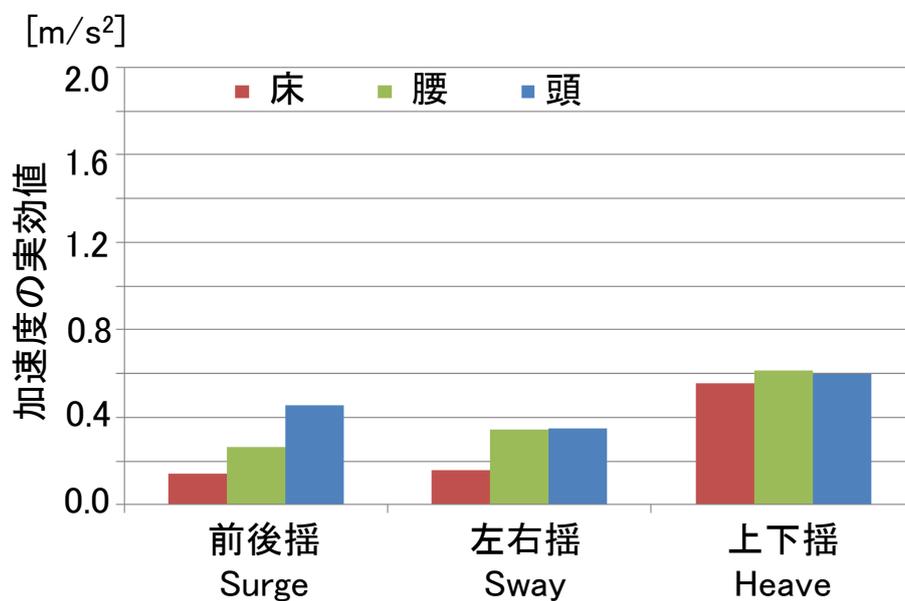
(a) 加速度の実効値



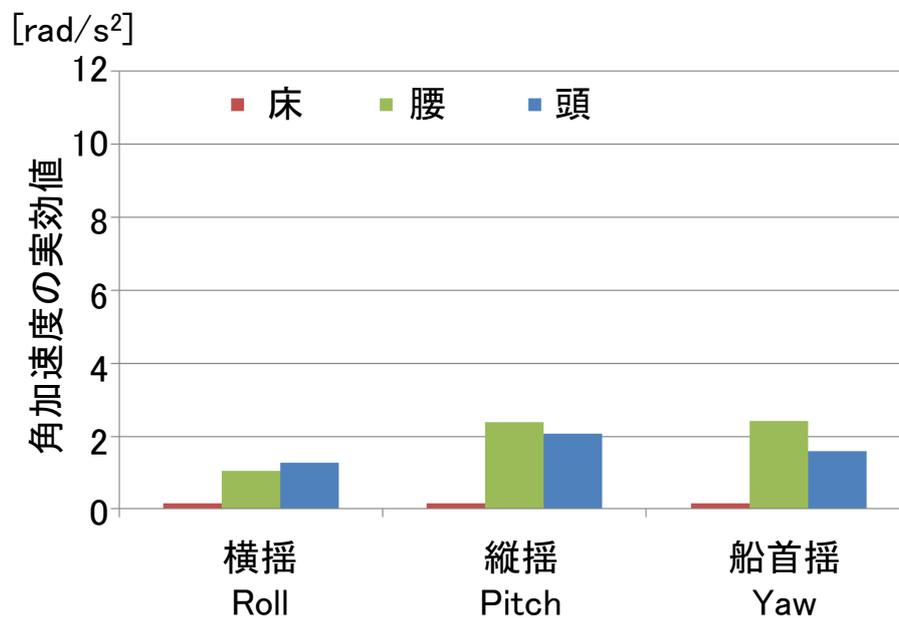
(b) 角加速度の実効値

図 A4-23 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 7, 女性, 実験 1 回目)



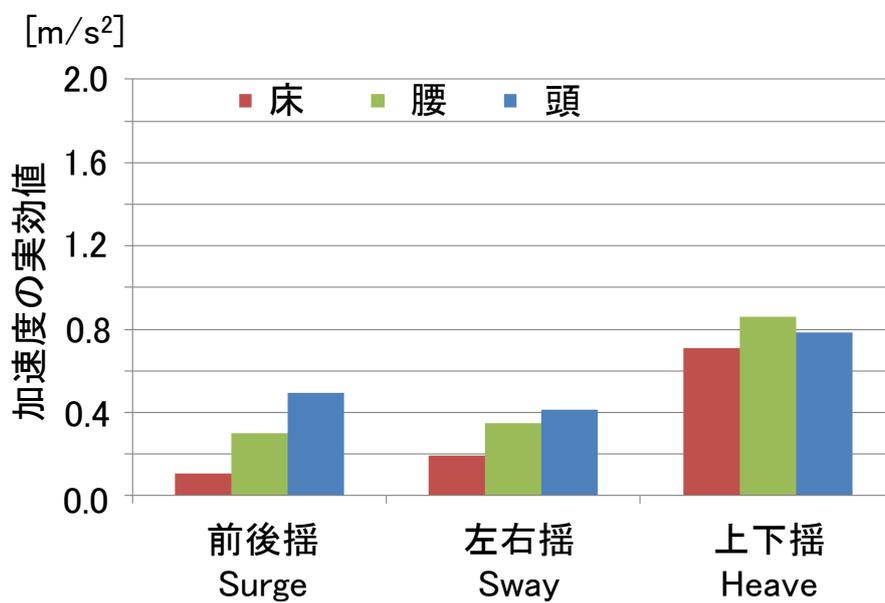
(a) 加速度の実効値



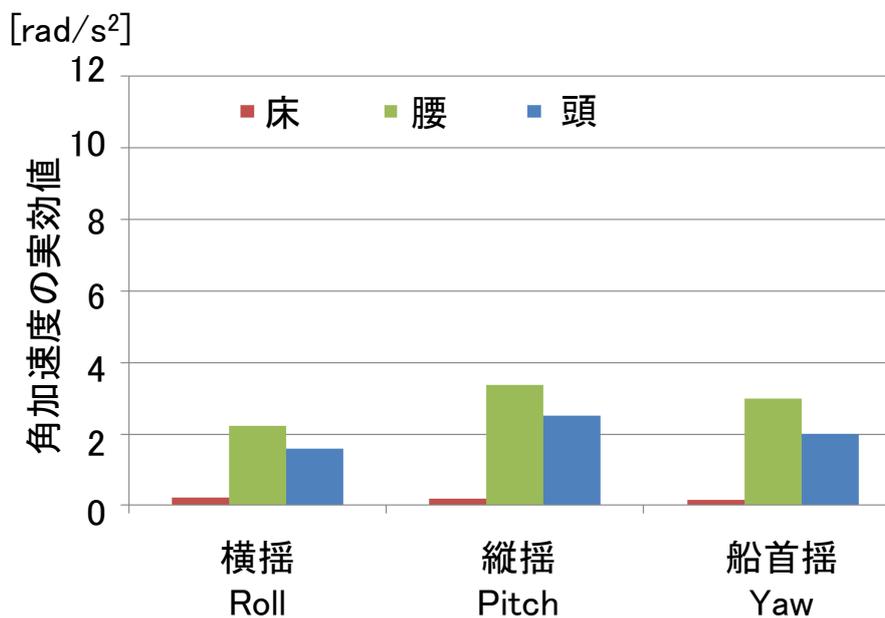
(b) 角加速度の実効値

図 A4-24 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 7, 女性, 実験 1 回目)



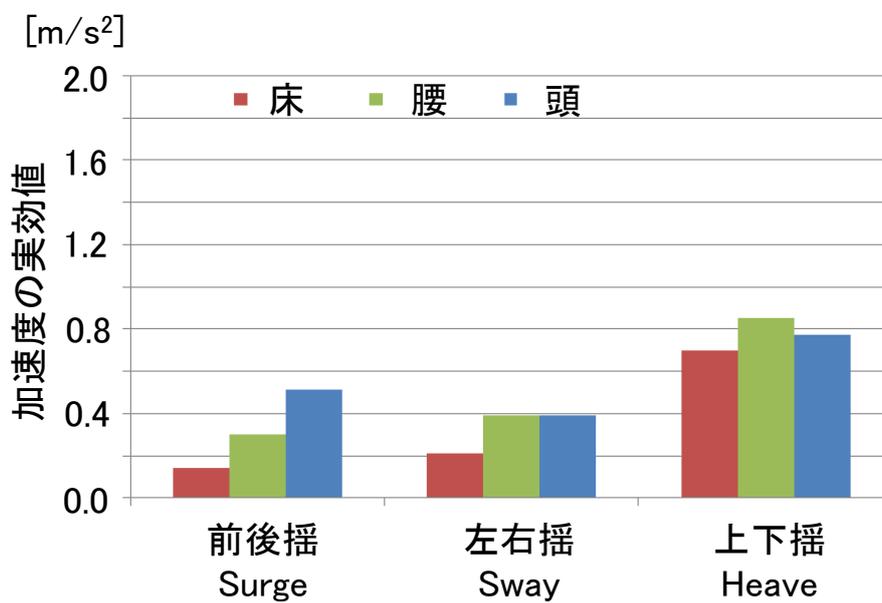
(a) 加速度の実効値



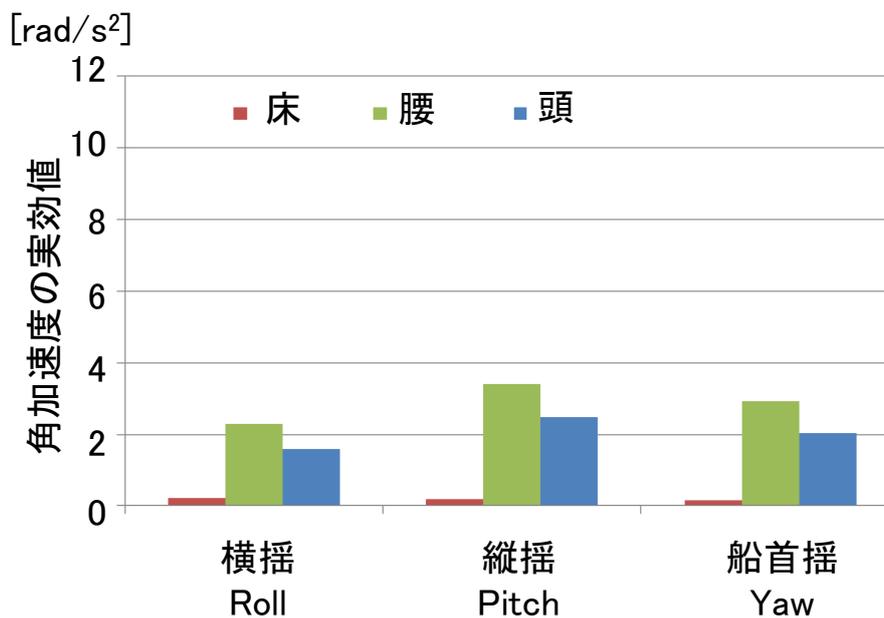
(b) 角加速度の実効値

図 A4-25 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 7, 女性, 実験 2 回目)



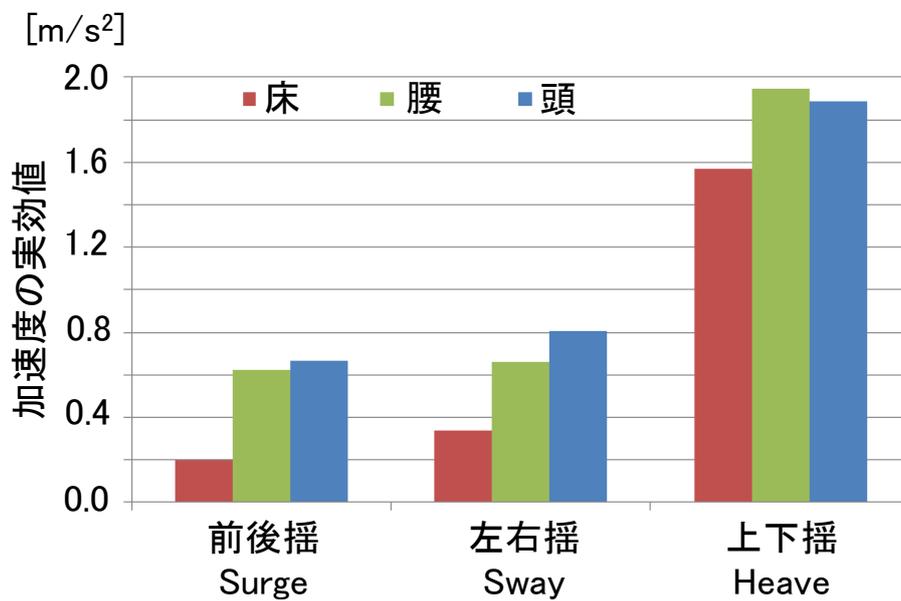
(a) 加速度の実効値



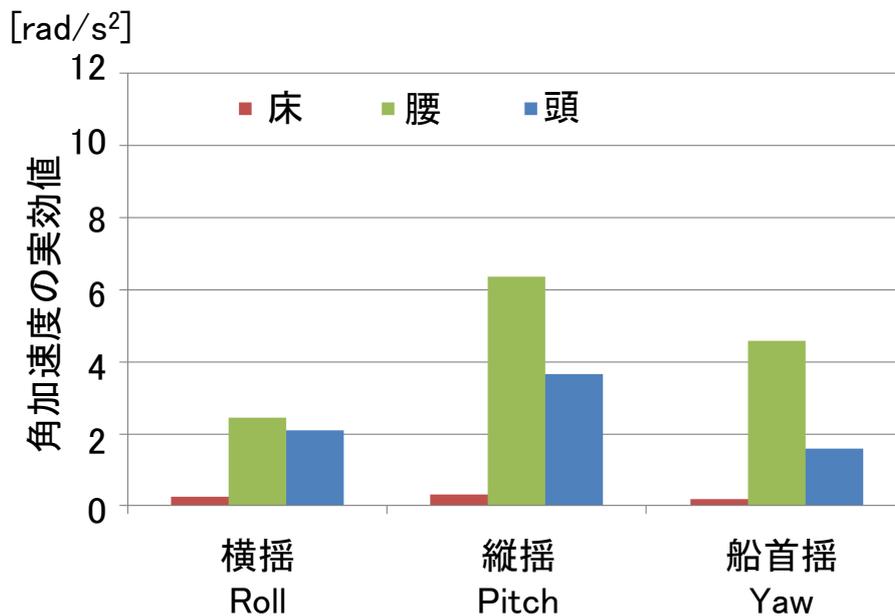
(b) 角加速度の実効値

図 A4-26 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 7, 女性, 実験 2 回目)



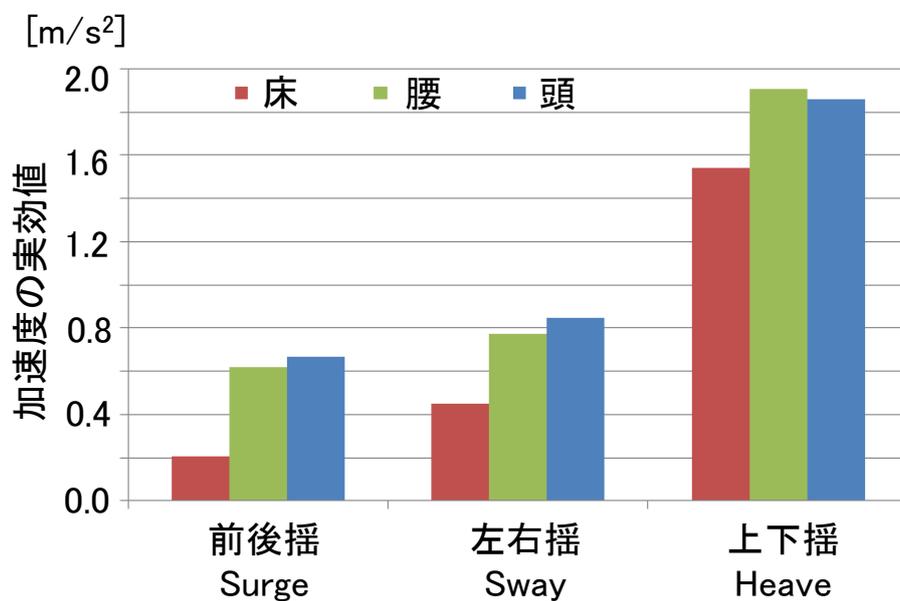
(a) 加速度の実効値



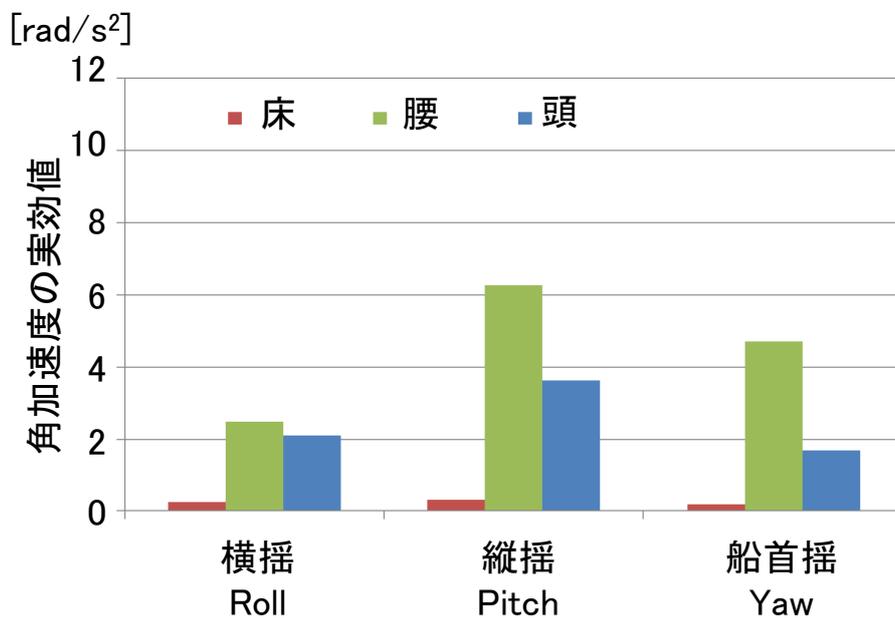
(b) 角加速度の実効値

図 A4-27 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 8, 男性, 実験 1 回目)



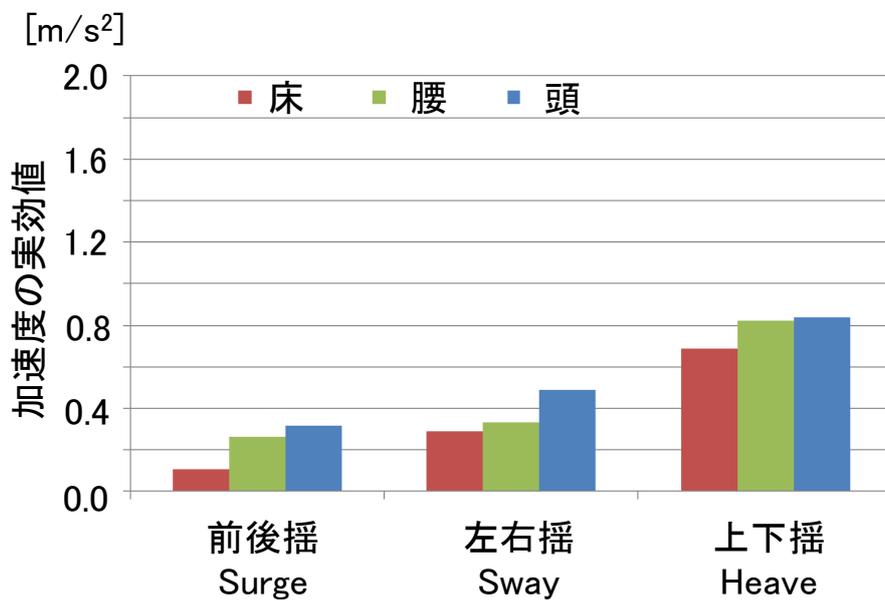
(a) 加速度の実効値



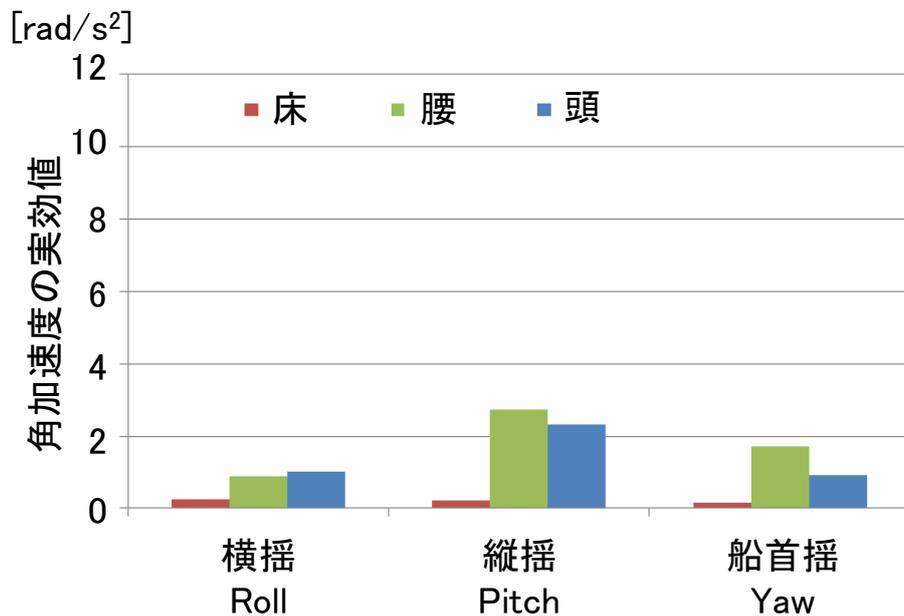
(b) 角加速度の実効値

図 A4-28 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 8, 男性, 実験 1 回目)



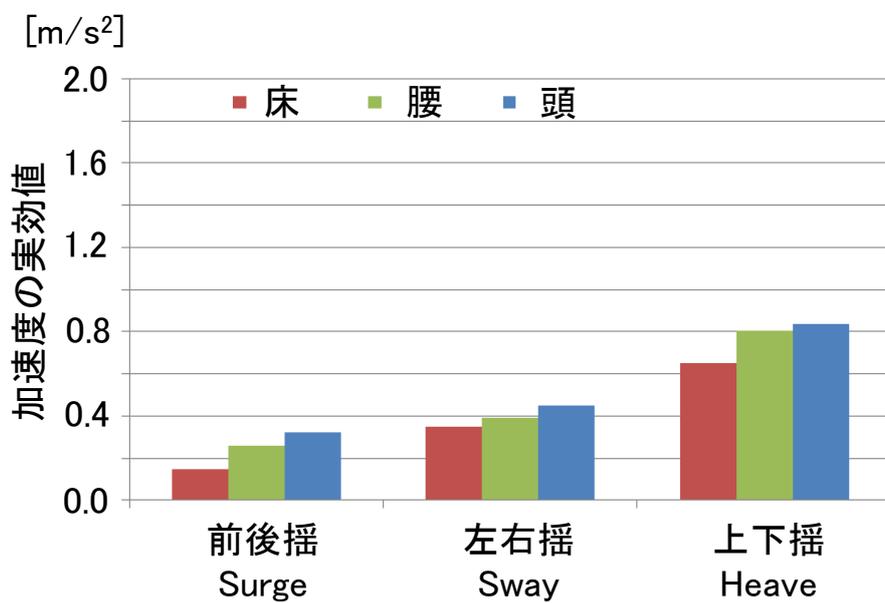
(a) 加速度の実効値



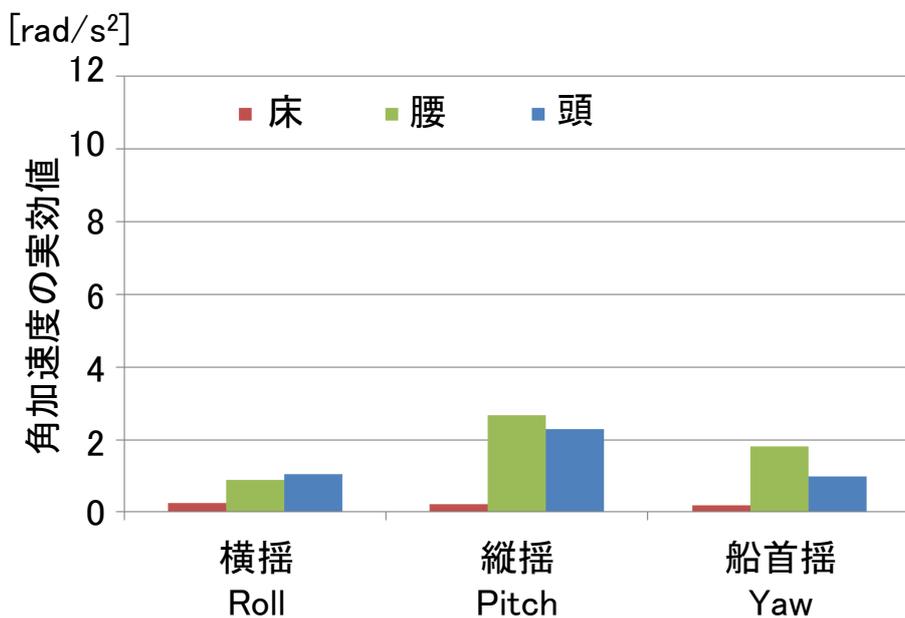
(b) 角加速度の実効値

図 A4-29 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 8, 男性, 実験 2 回目)



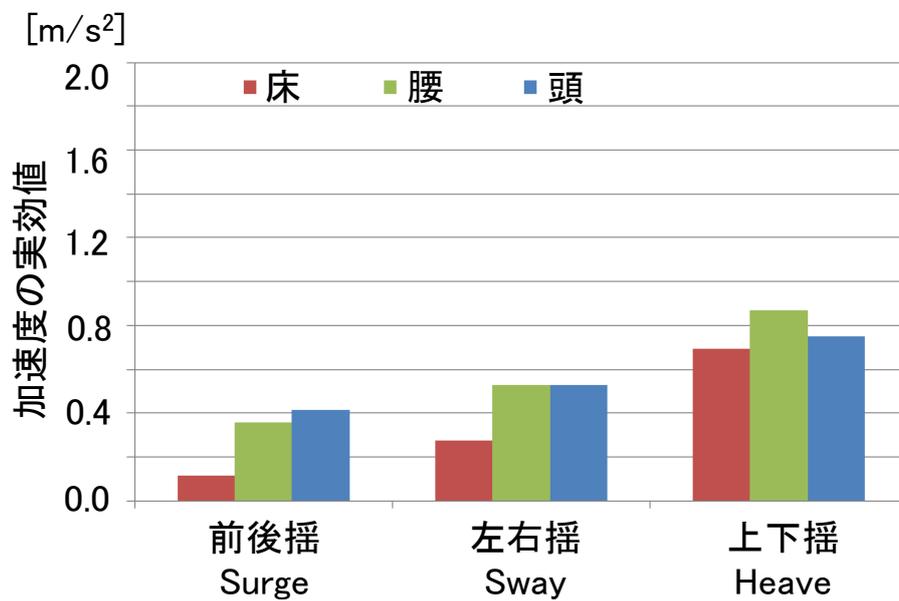
(a) 加速度の実効値



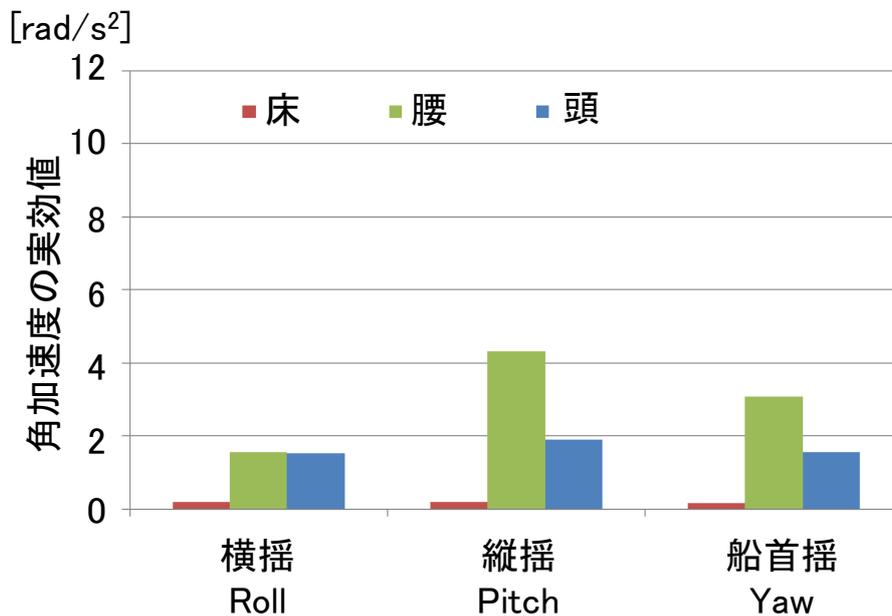
(b) 角加速度の実効値

図 A4-30 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 8, 男性, 実験 2 回目)



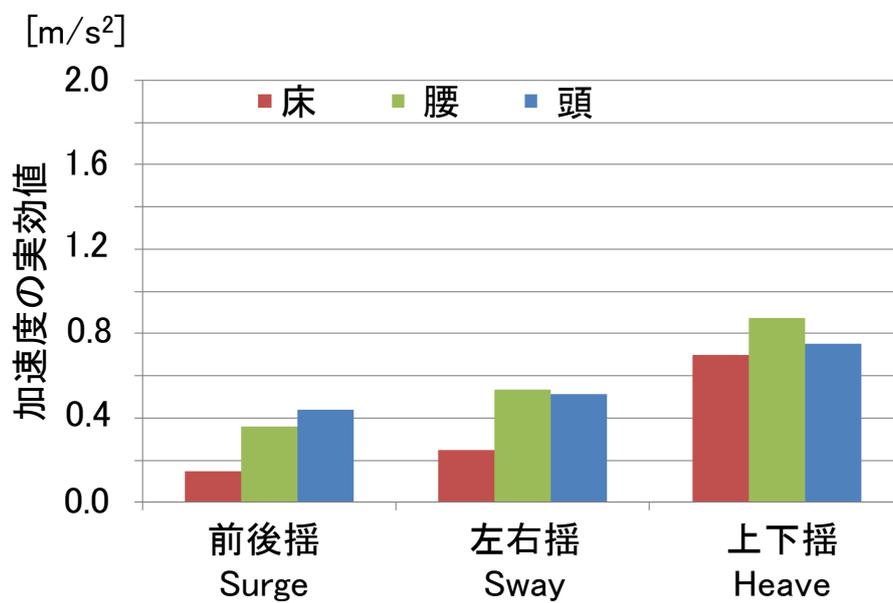
(a) 加速度の実効値



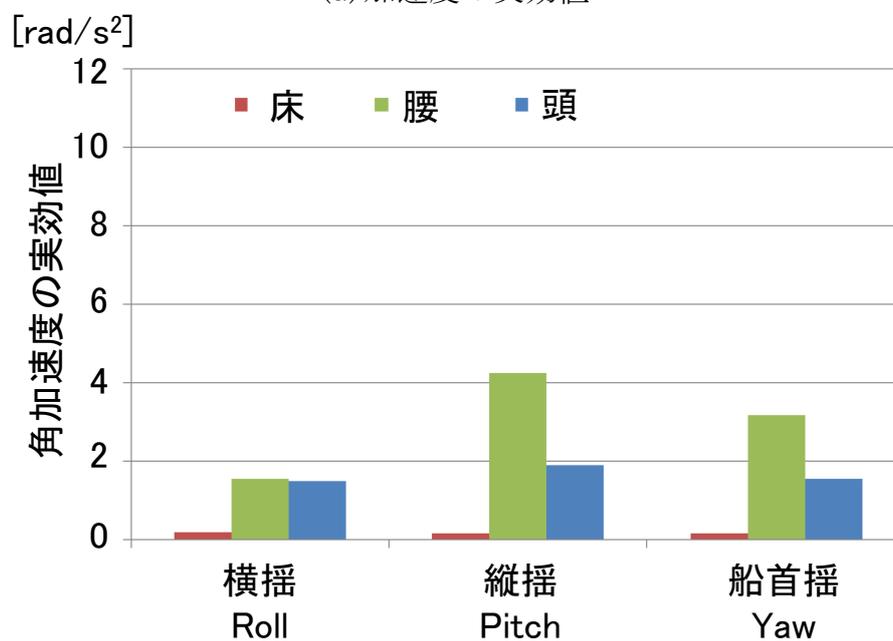
(b) 角加速度の実効値

図 A4-31 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 9, 女性, 実験 1 回目)



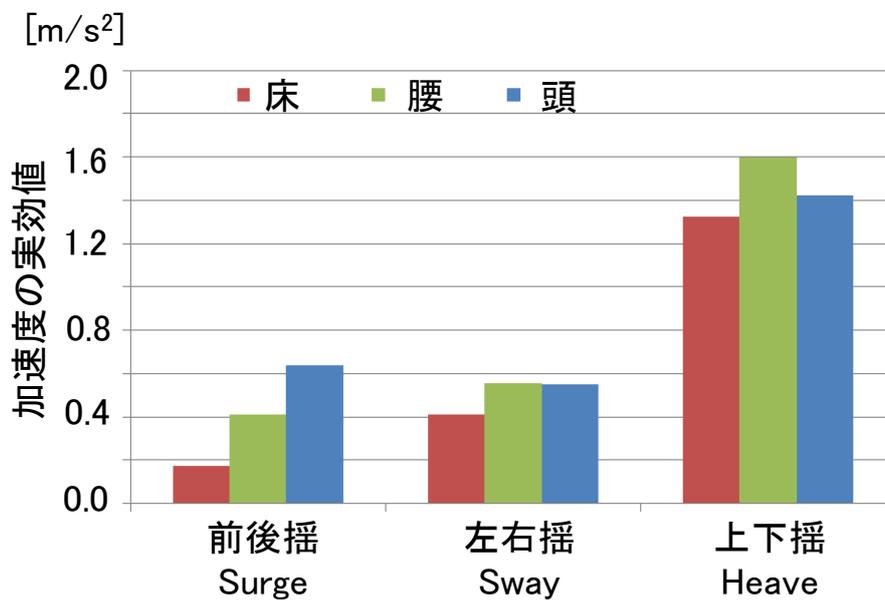
(a) 加速度の実効値



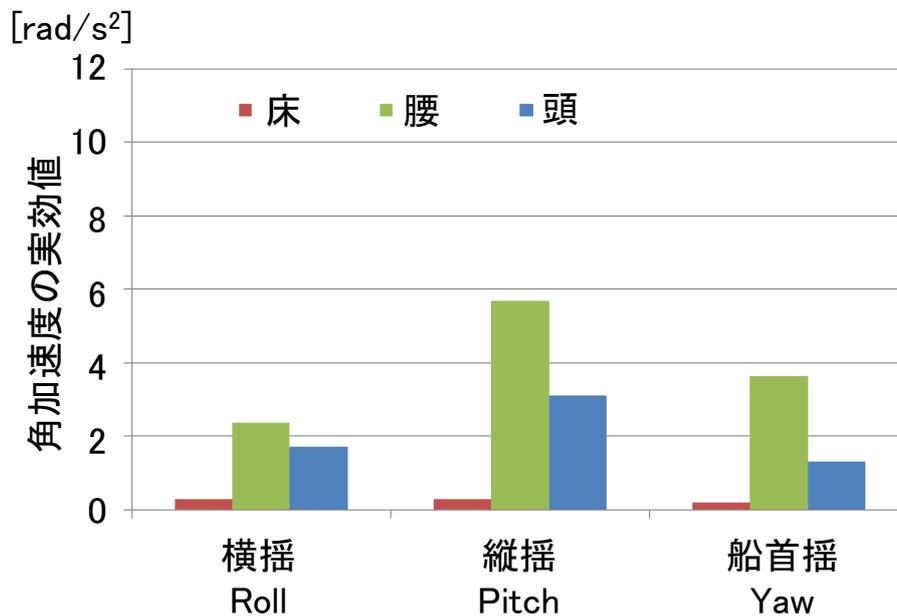
(b) 角加速度の実効値

図 A4-32 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 9, 女性, 実験 1 回目)



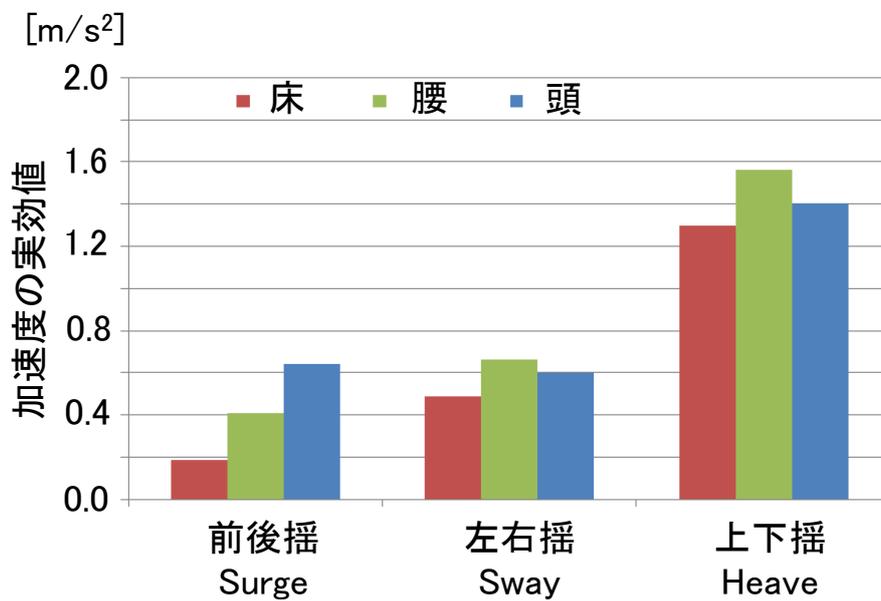
(a) 加速度の実効値



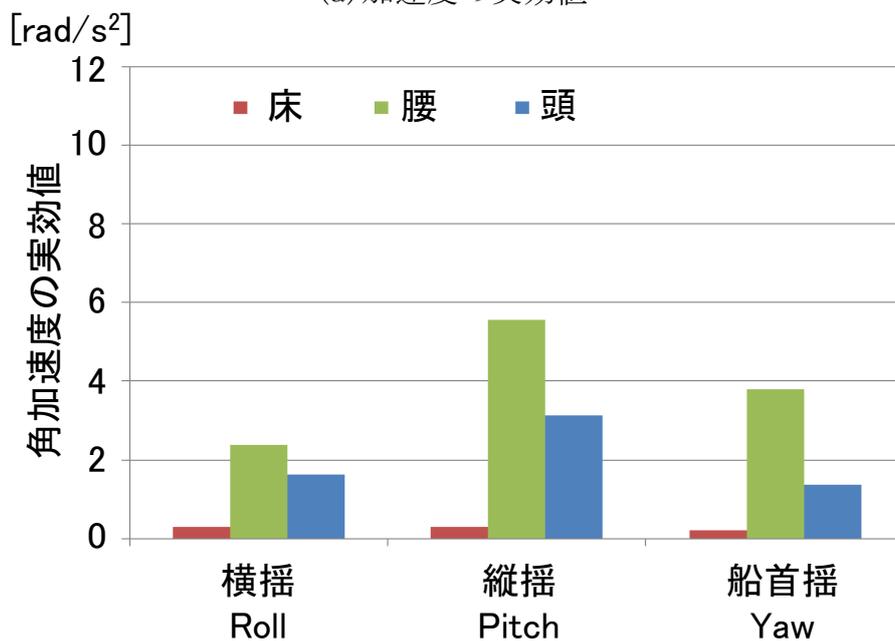
(b) 角加速度の実効値

図 A4-33 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 9, 女性, 実験 2 回目)



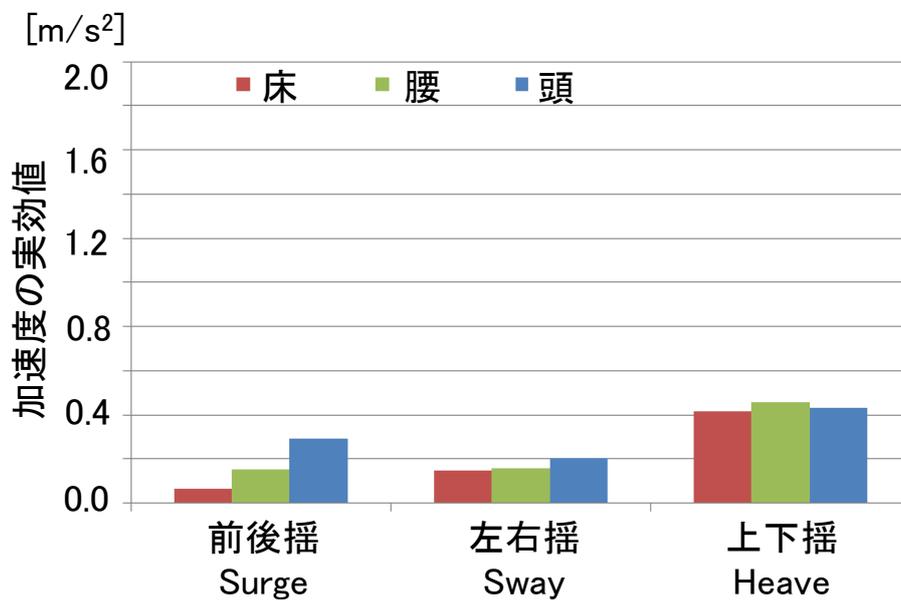
(a) 加速度の実効値



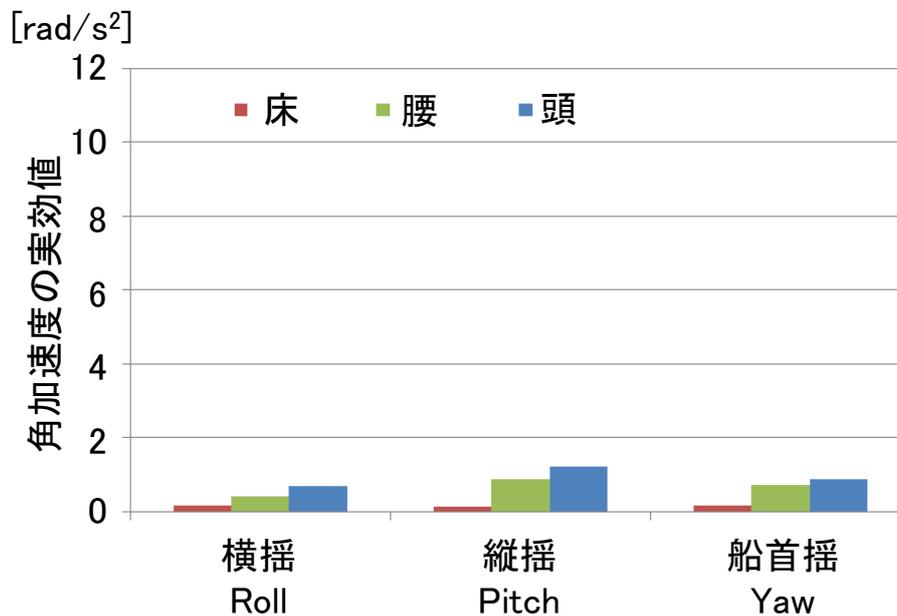
(b) 角加速度の実効値

図 A4-34 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 9, 女性, 実験 2 回目)



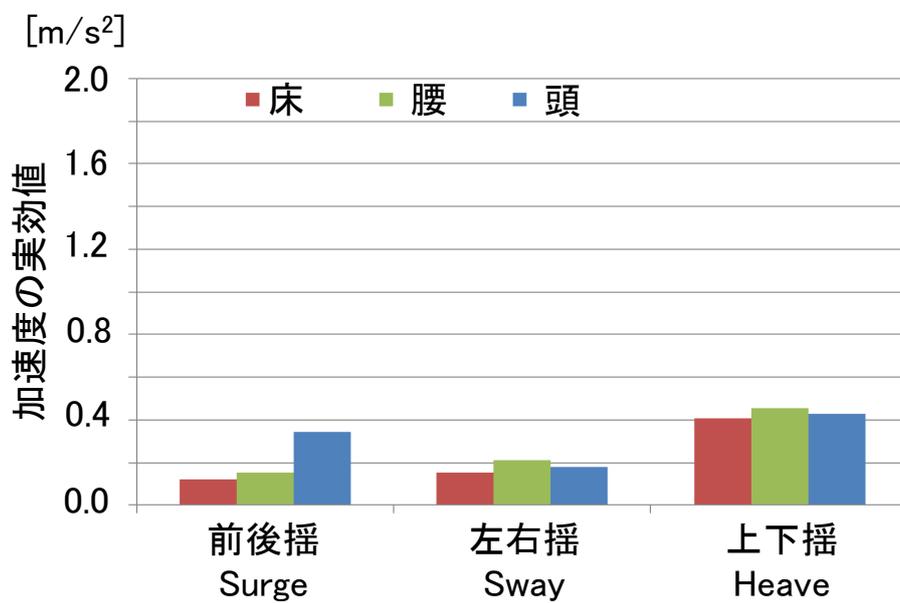
(a) 加速度の実効値



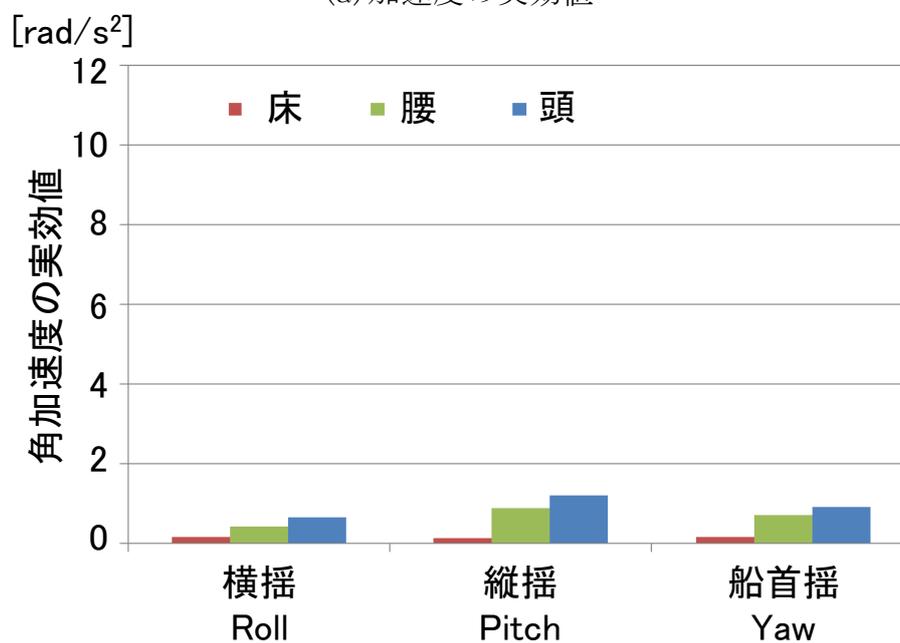
(b) 角加速度の実効値

図 A4-35 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 10, 女性, 実験 1 回目)



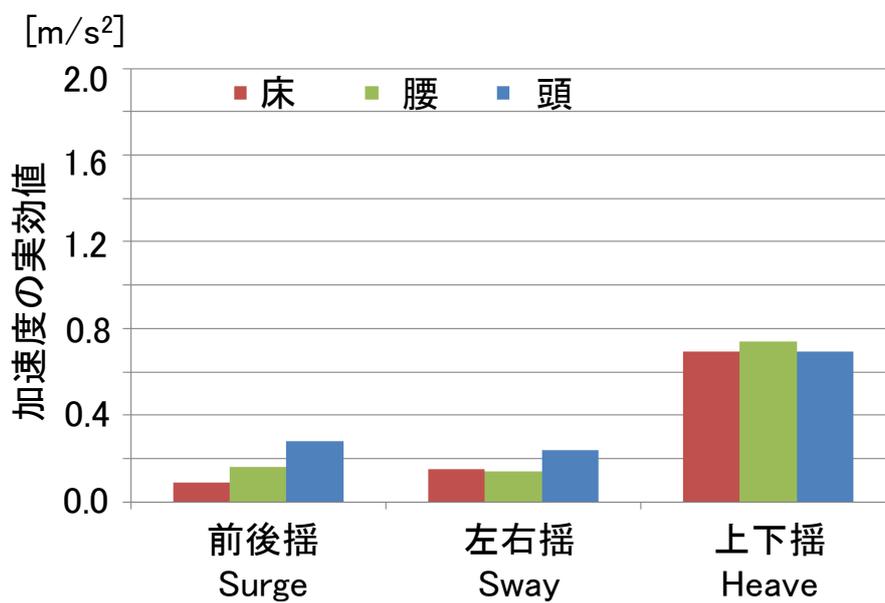
(a) 加速度の実効値



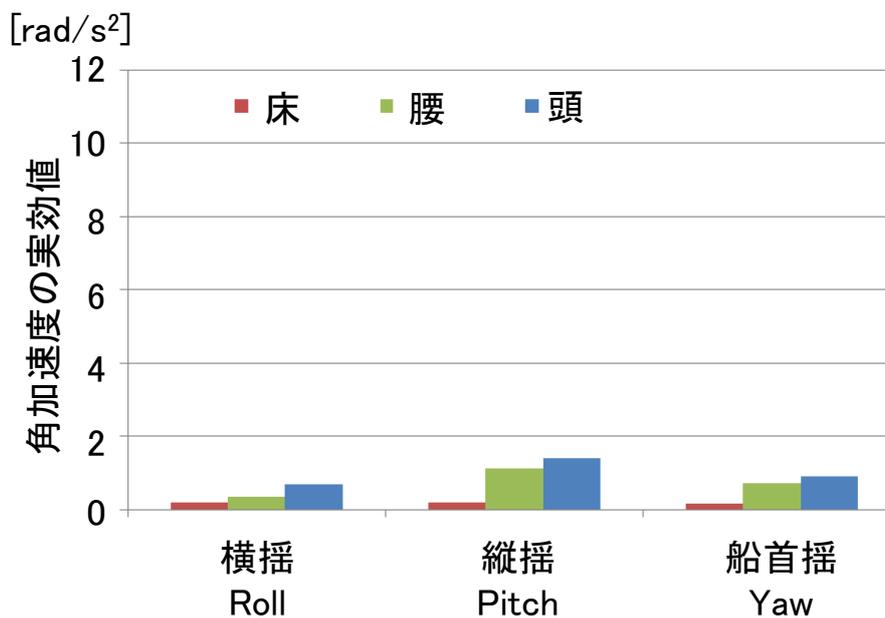
(b) 角加速度の実効値

図 A4-36 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 10, 女性, 実験 1 回目)



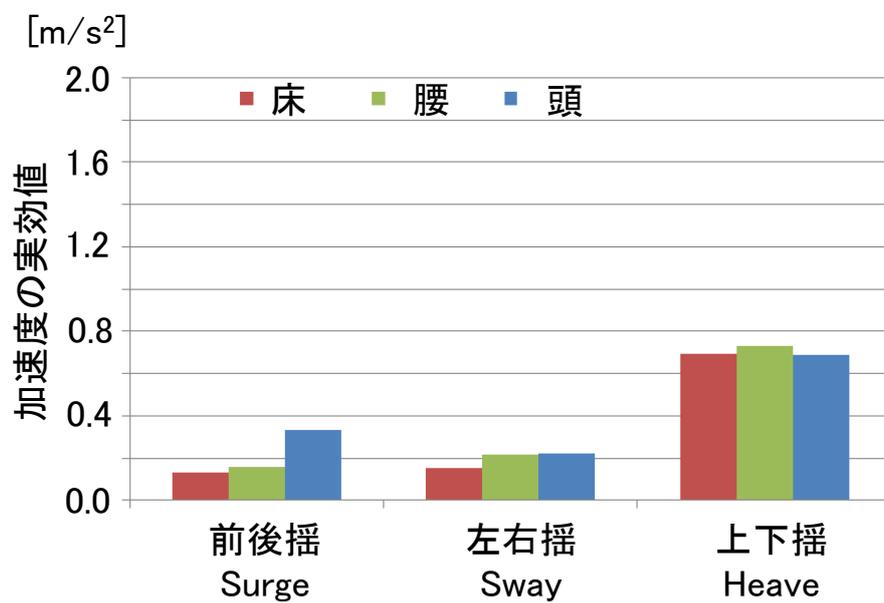
(a) 加速度の実効値



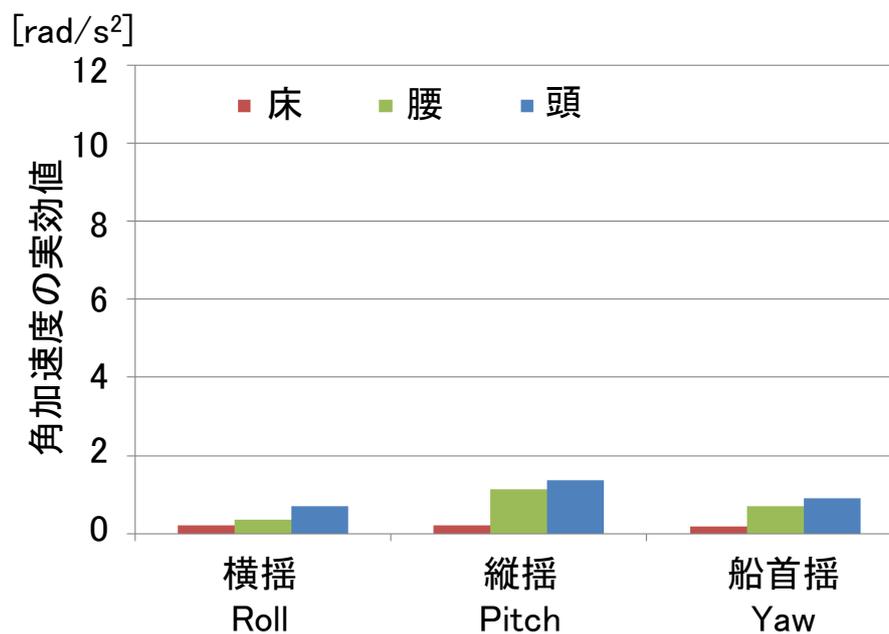
(b) 角加速度の実効値

図 A4-37 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 10, 女性, 実験 2 回目)



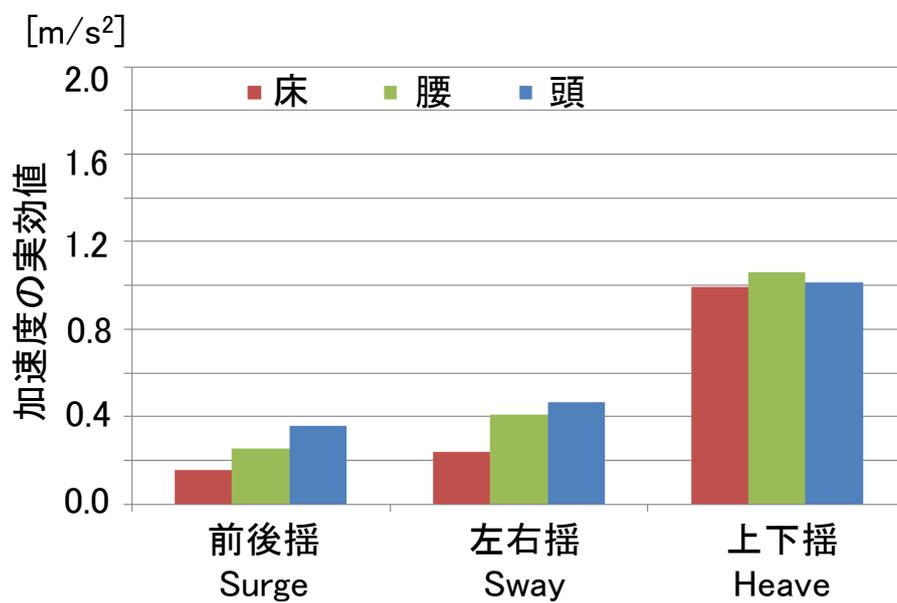
(a) 加速度の実効値



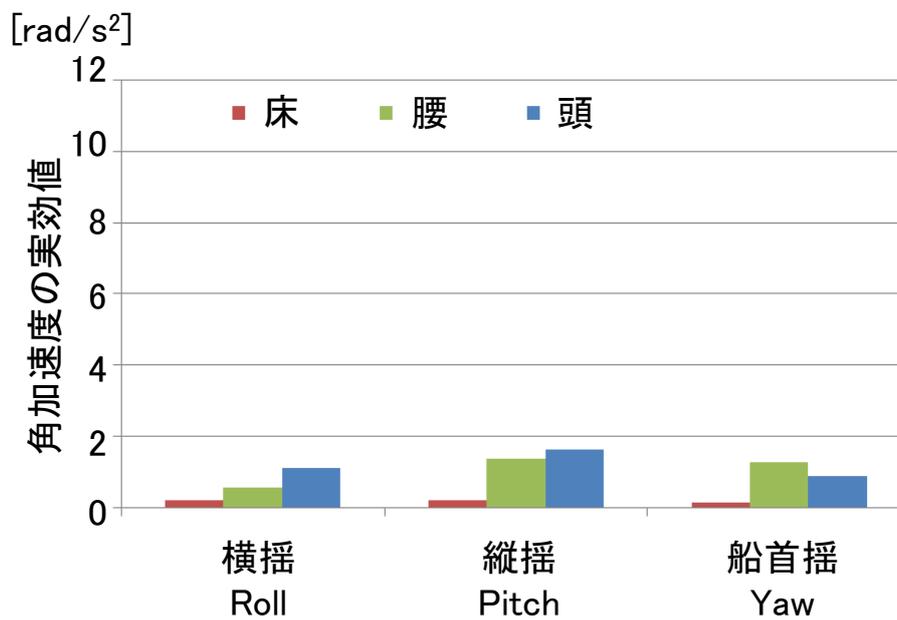
(b) 角加速度の実効値

図 A4-38 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 10, 女性, 実験 2 回目)



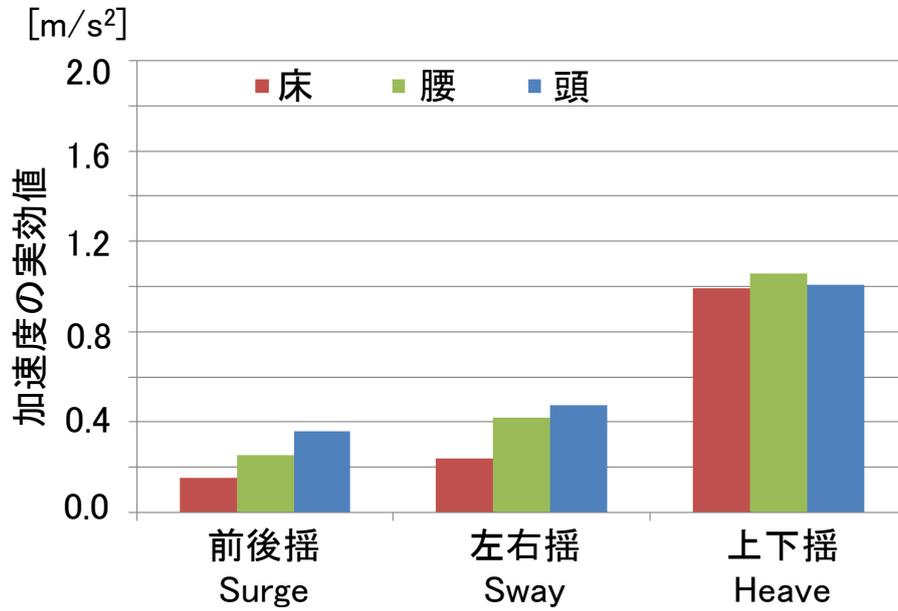
(a) 加速度の実効値



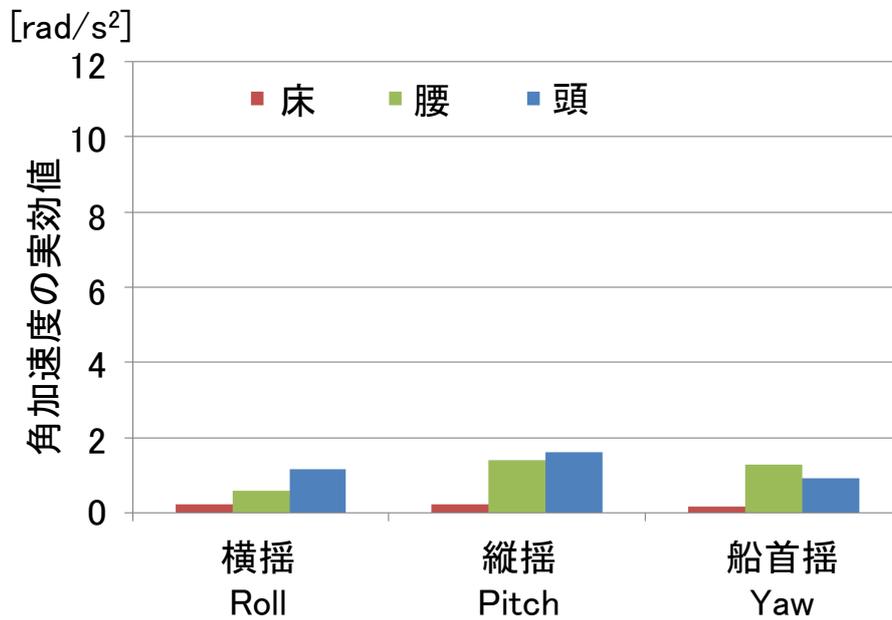
(b) 角加速度の実効値

図 A4-39 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 11, 女性, 実験 1 回目)



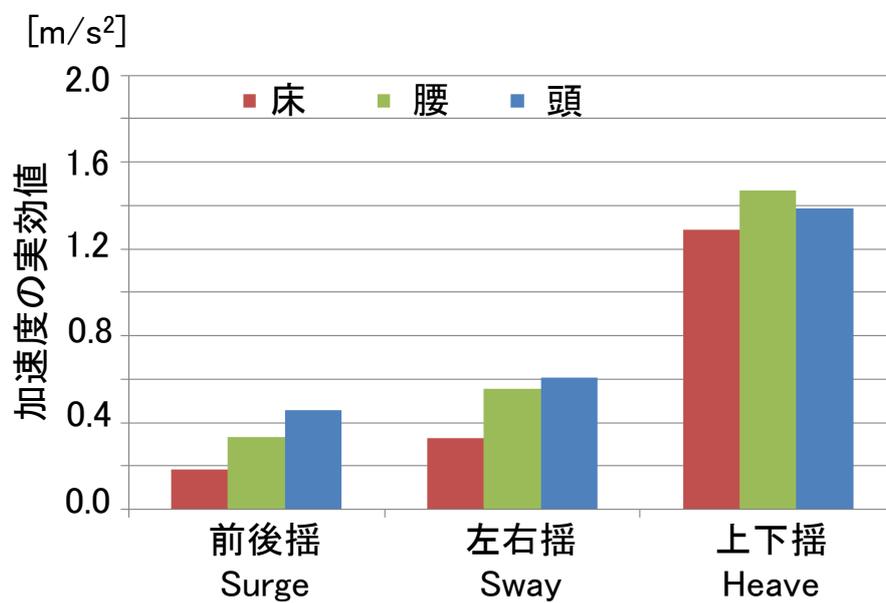
(a) 加速度の実効値



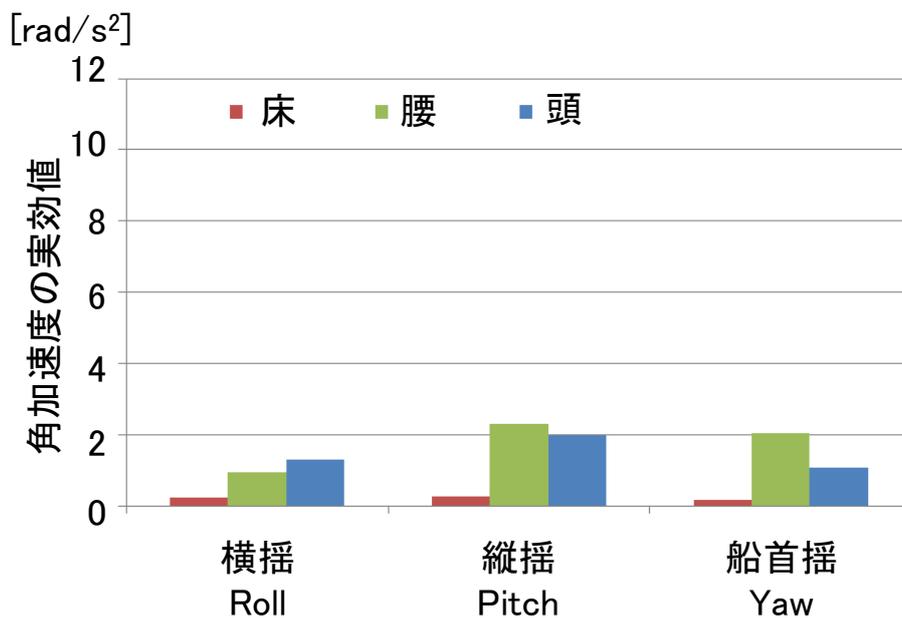
(b) 角加速度の実効値

図 A4-40 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 11, 女性, 実験 1 回目)



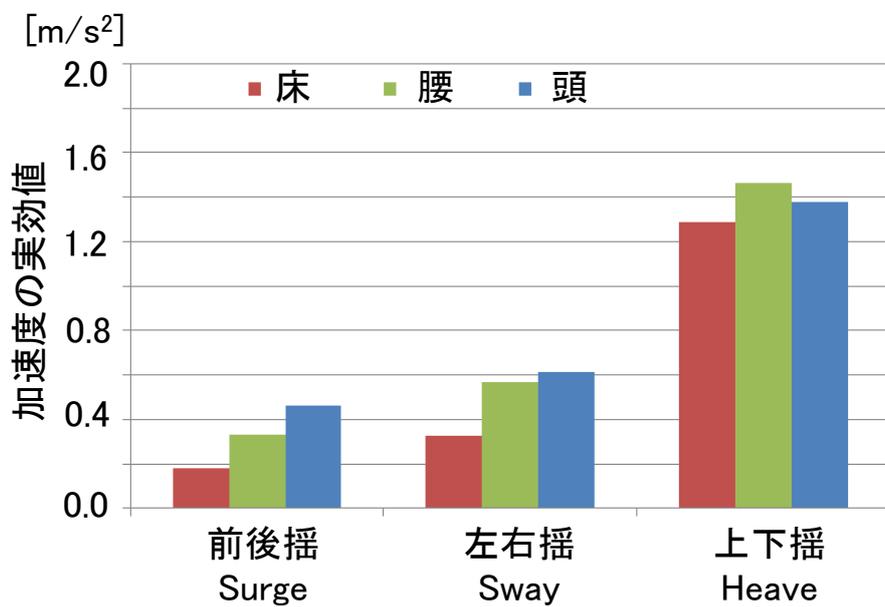
(a) 加速度の実効値



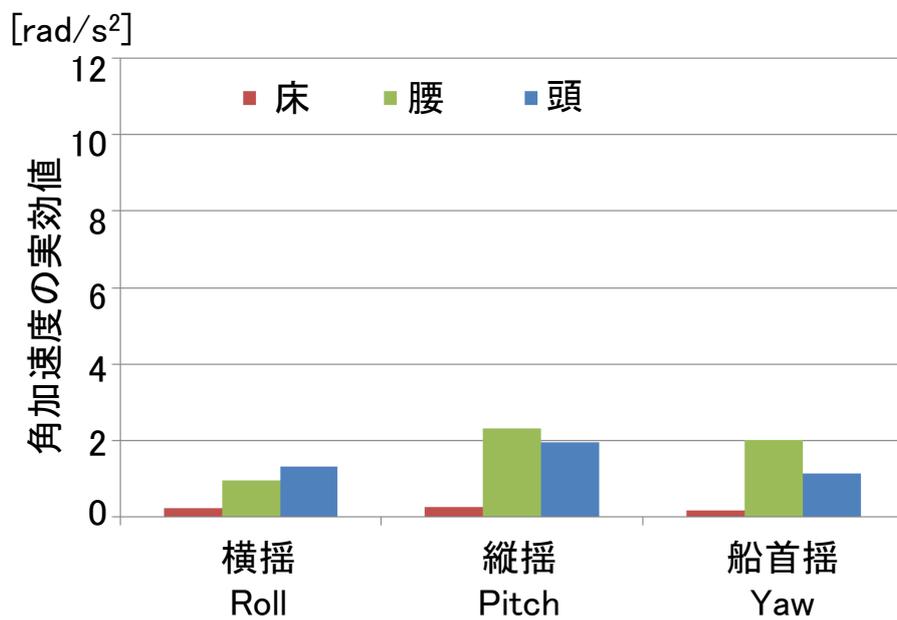
(b) 角加速度の実効値

図 A4-41 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 11, 女性, 実験 2 回目)



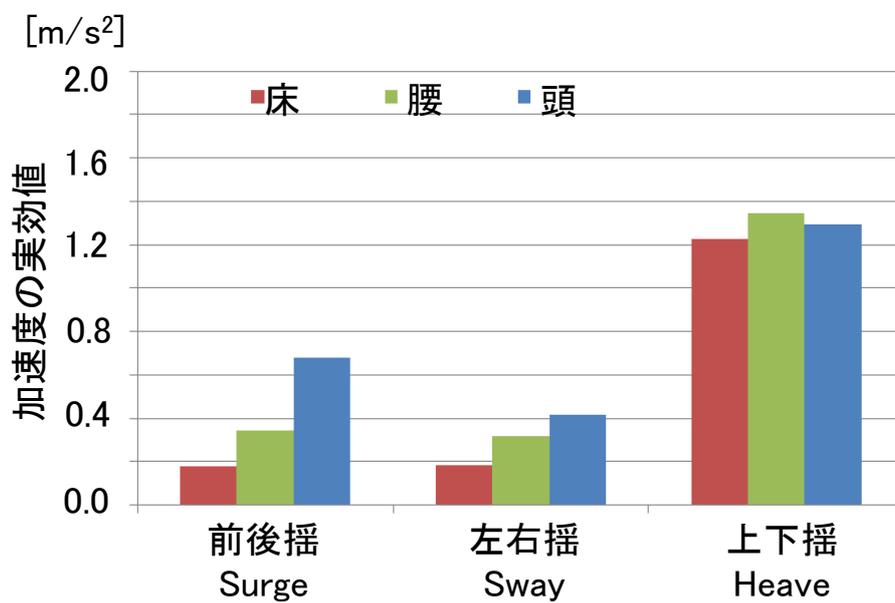
(a) 加速度の実効値



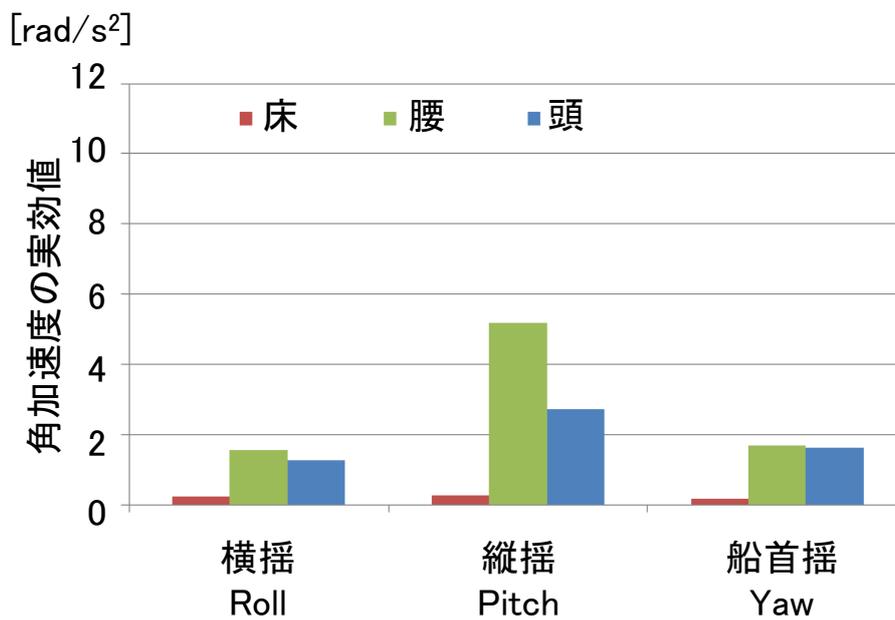
(b) 角加速度の実効値

図 A4-42 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 11, 女性, 実験 2 回目)



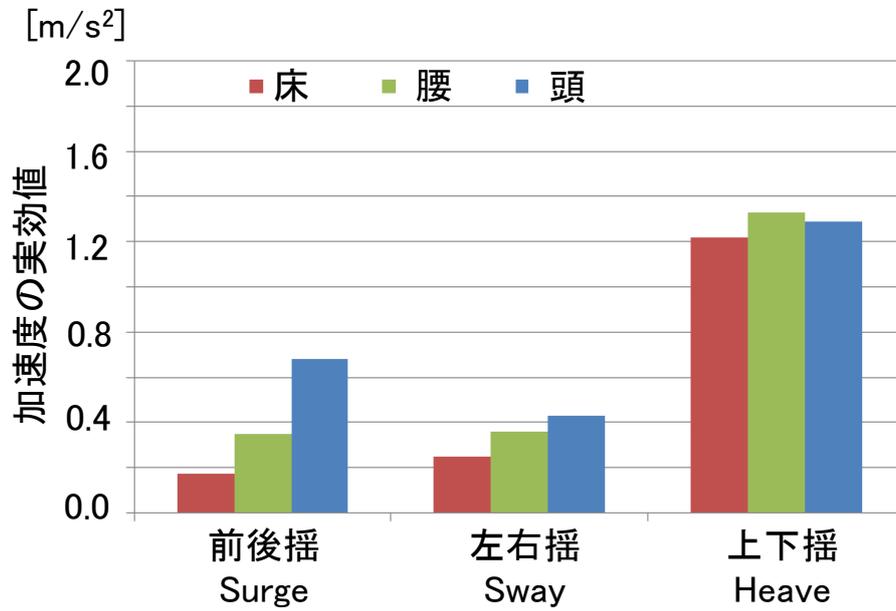
(a) 加速度の実効値



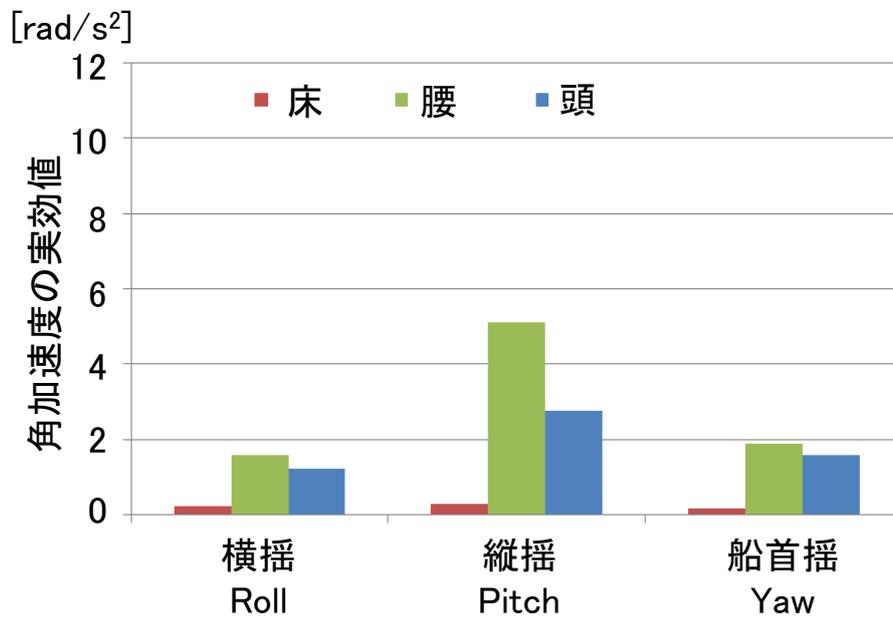
(b) 角加速度の実効値

図 A4-43 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 12, 男性, 実験 1 回目)



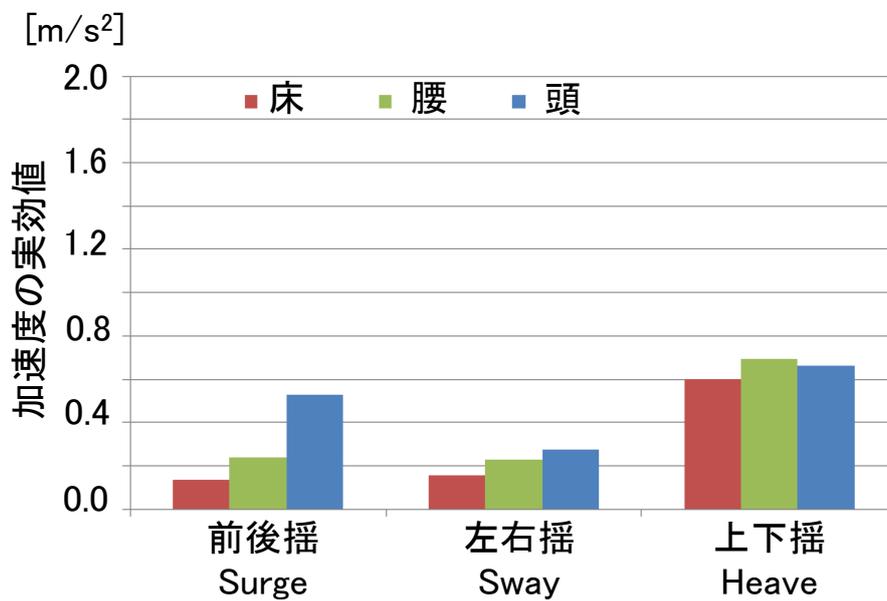
(a) 加速度の実効値



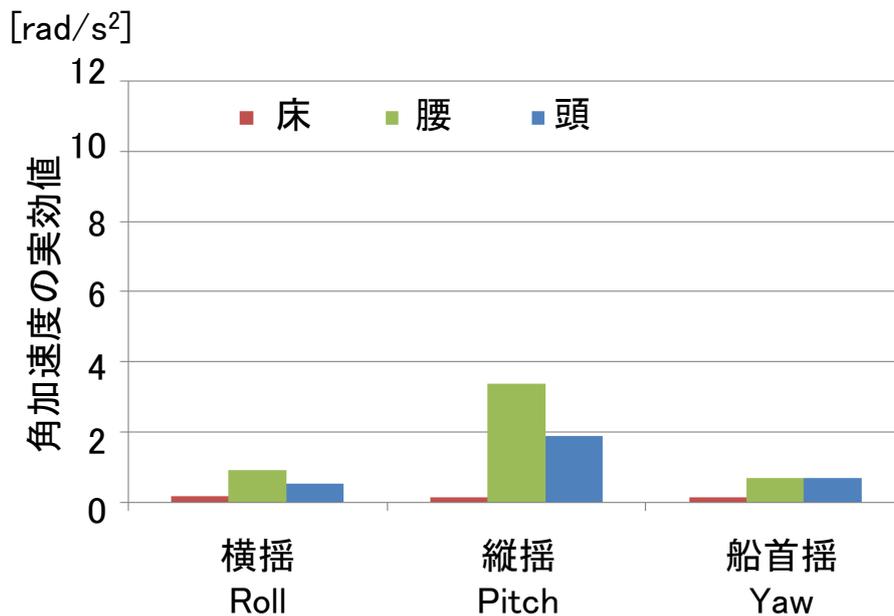
(b) 角加速度の実効値

図 A4-44 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 12, 男性, 実験 1 回目)



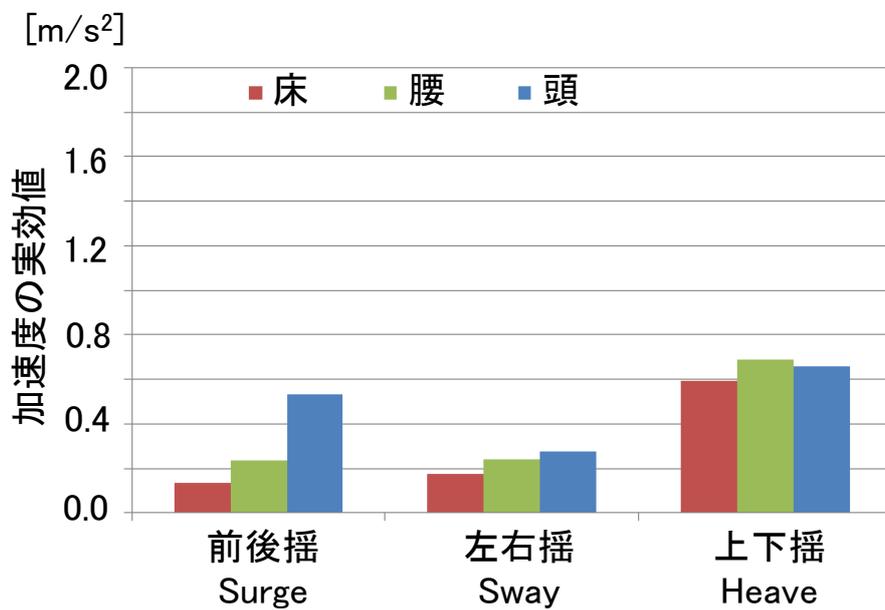
(a) 加速度の実効値



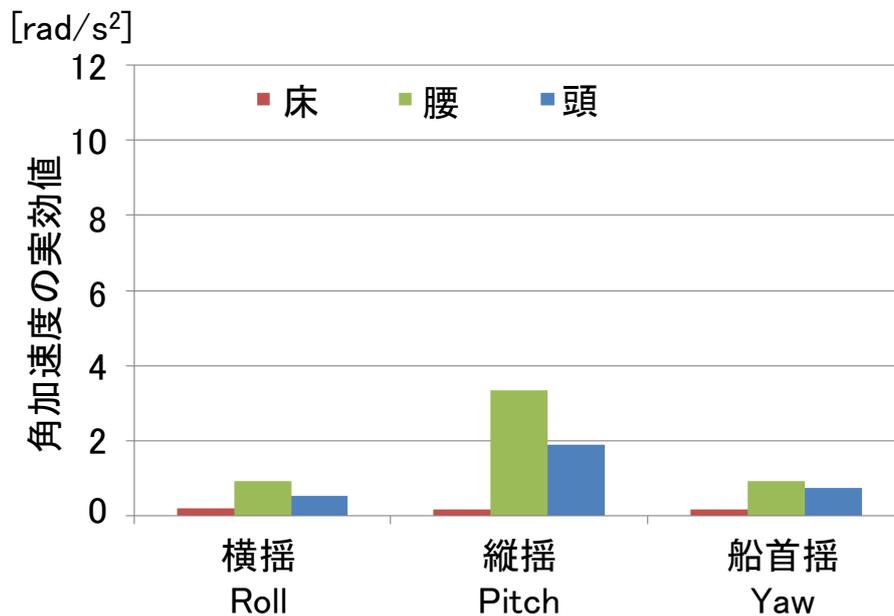
(b) 角加速度の実効値

図 A4-45 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 12, 男性, 実験 2 回目)



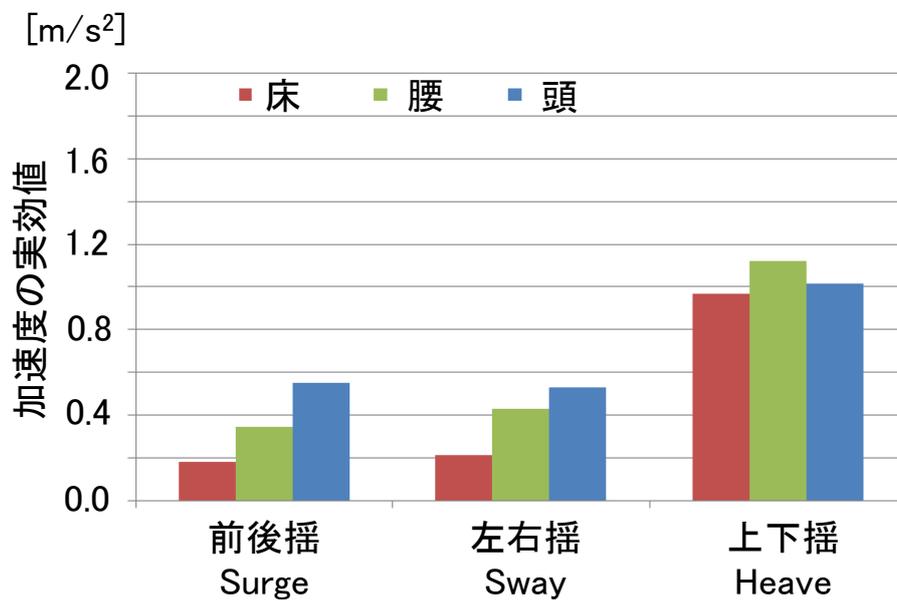
(a) 加速度の実効値



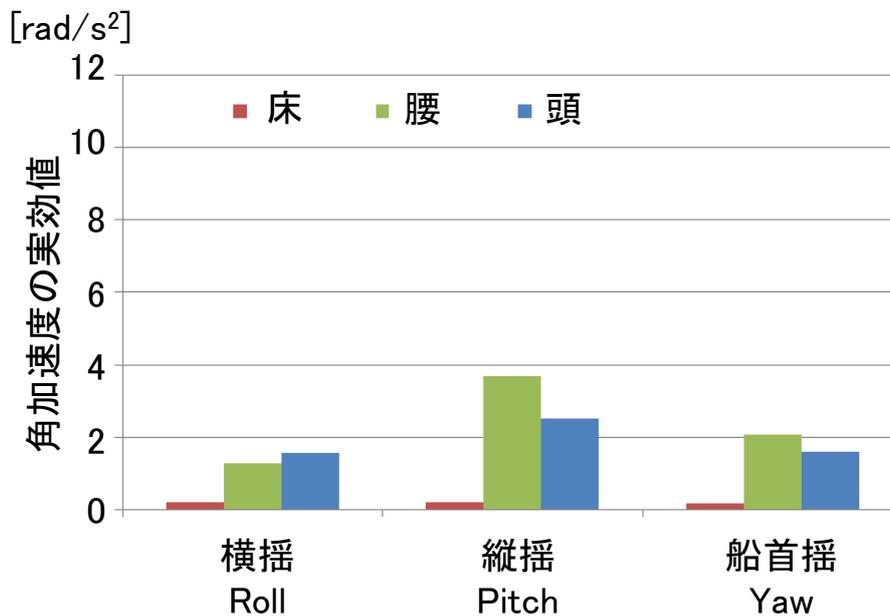
(b) 角加速度の実効値

図 A4-46 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 12, 男性, 実験 2 回目)



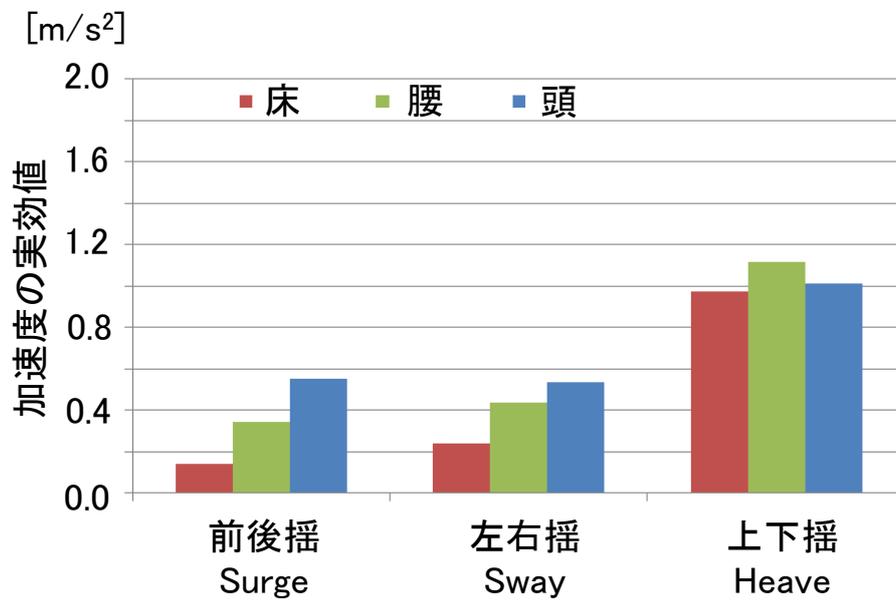
(a) 加速度の実効値



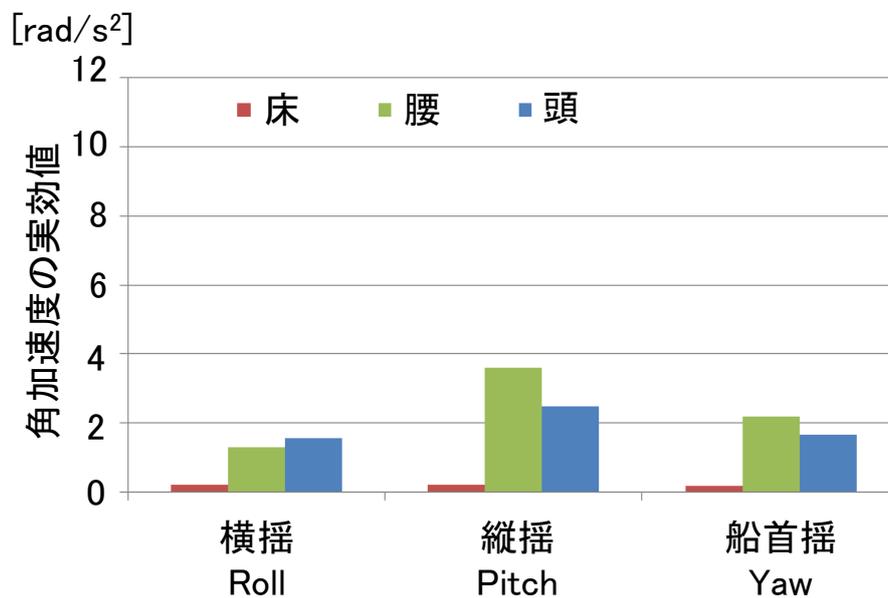
(b) 角加速度の実効値

図 A4-47 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 13, 女性)



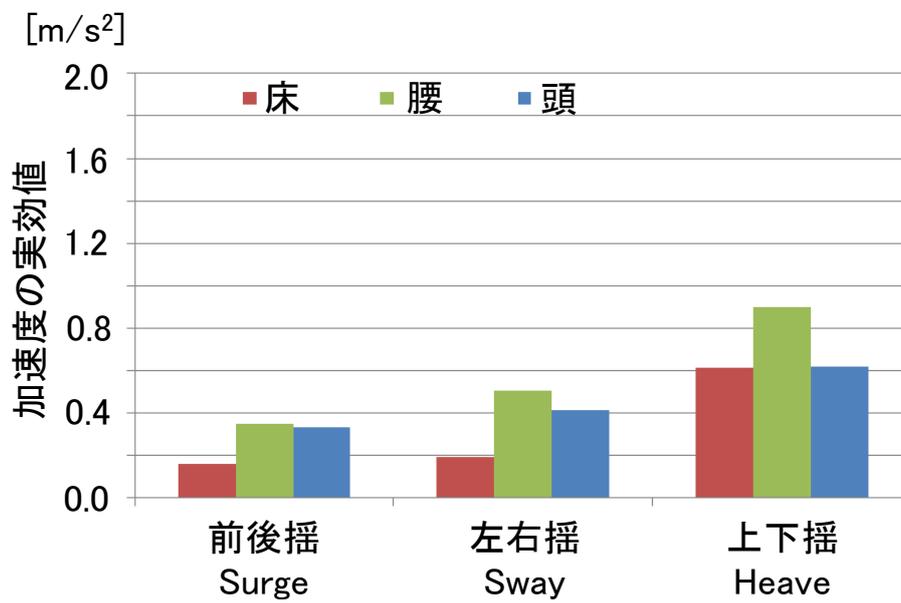
(a) 加速度の実効値



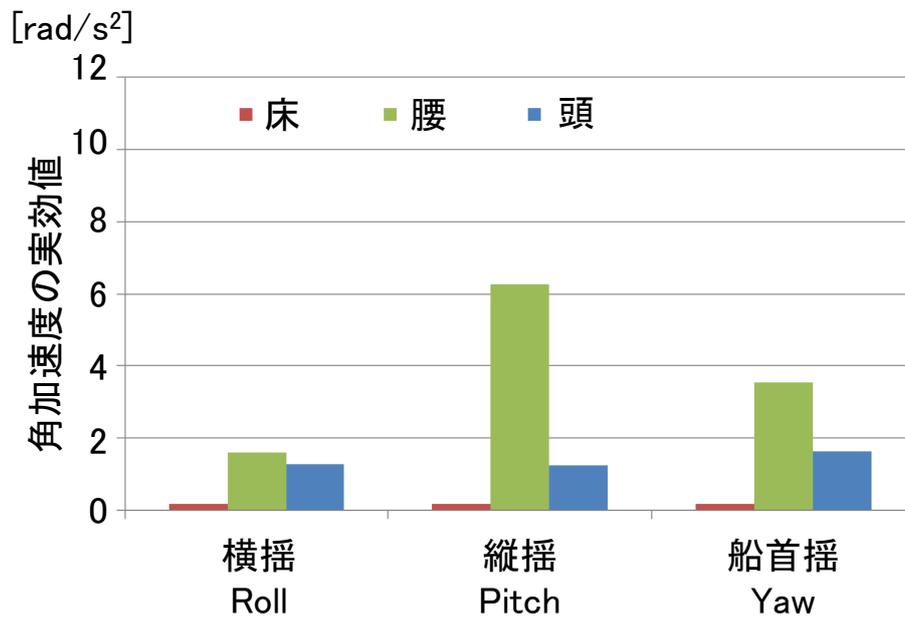
(b) 角加速度の実効値

図 A4-48 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 13, 女性)



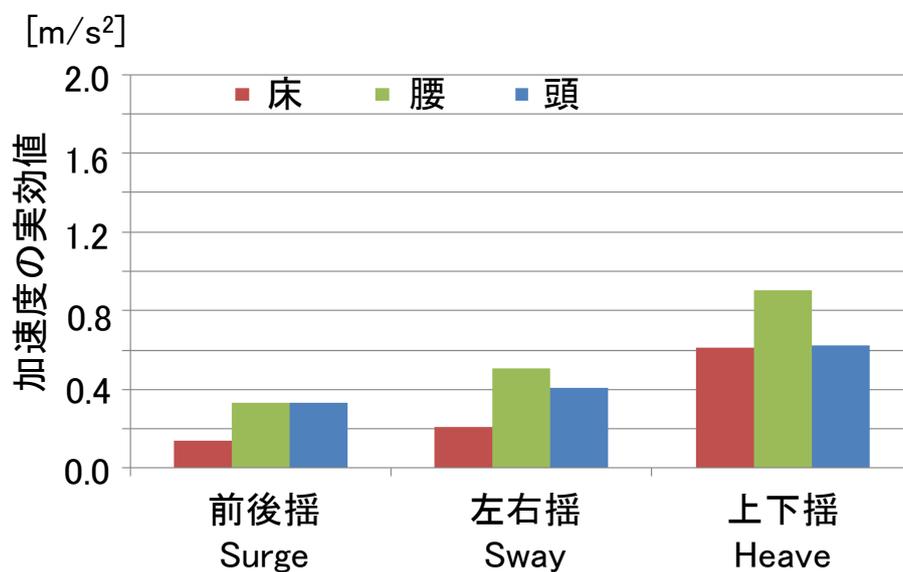
(a) 加速度の実効値



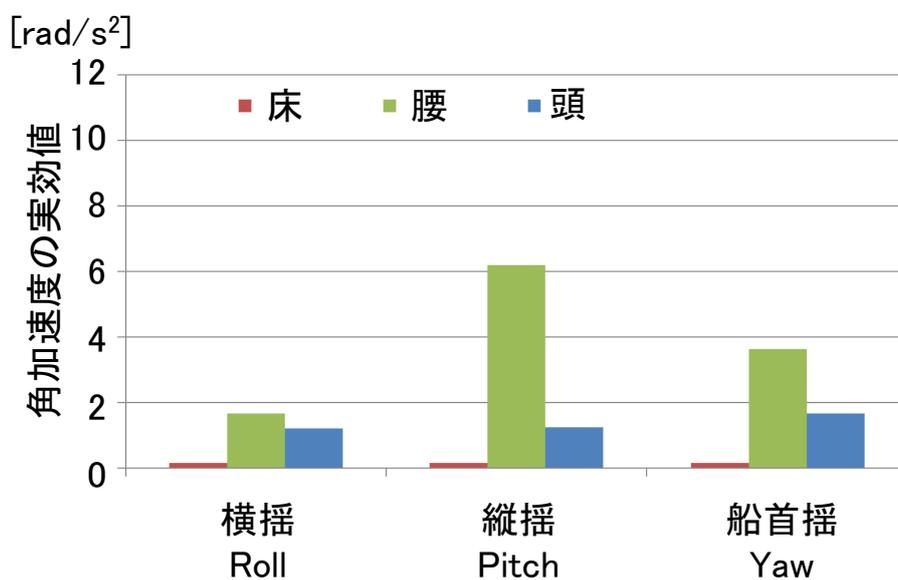
(b) 角加速度の実効値

図 A4-49 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 14, 男性)



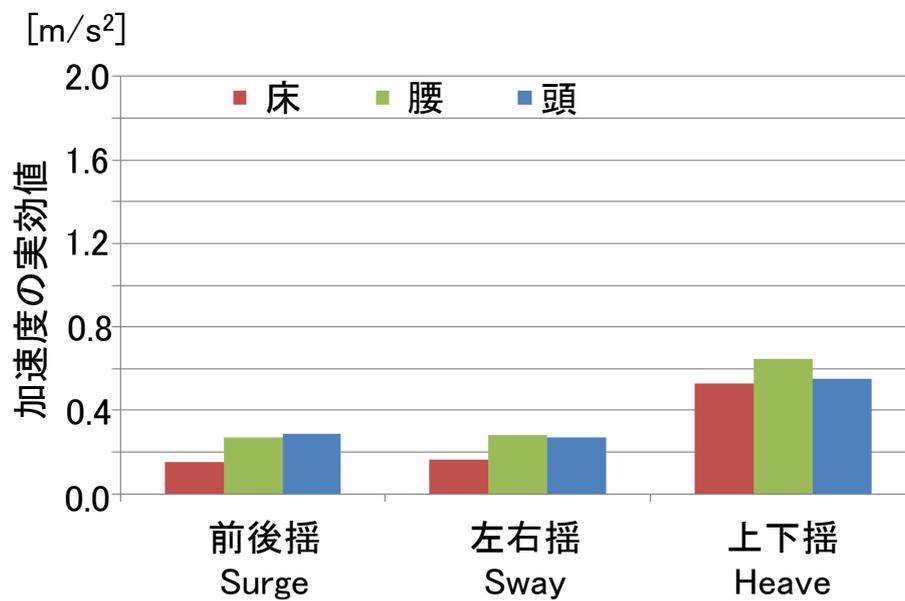
(a) 加速度の実効値



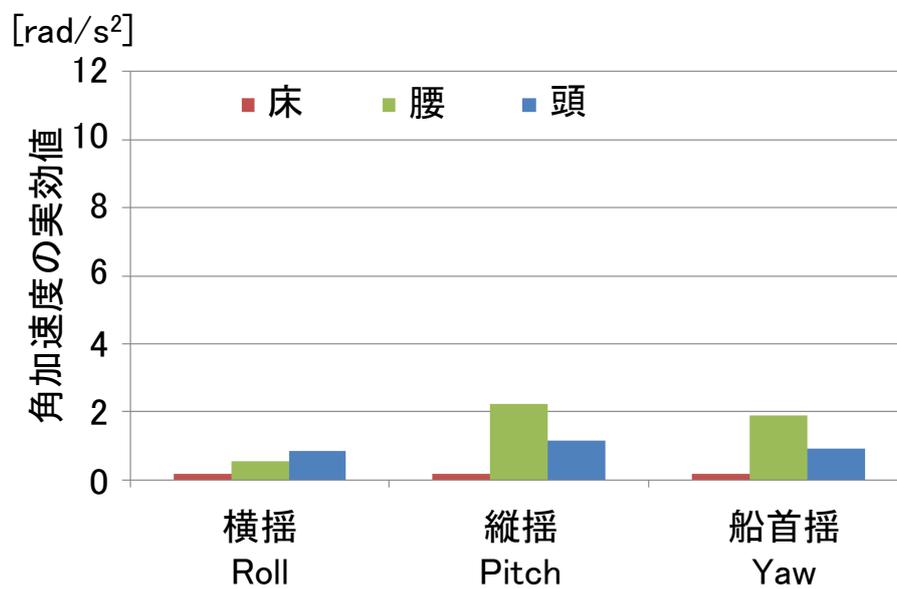
(b) 角加速度の実効値

図 A4-50 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 14, 男性)



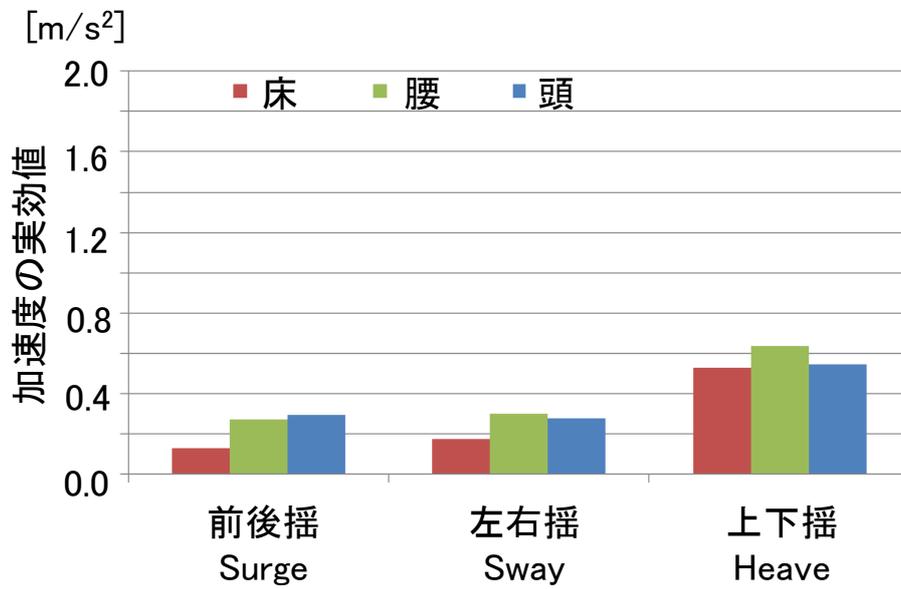
(a) 加速度の実効値



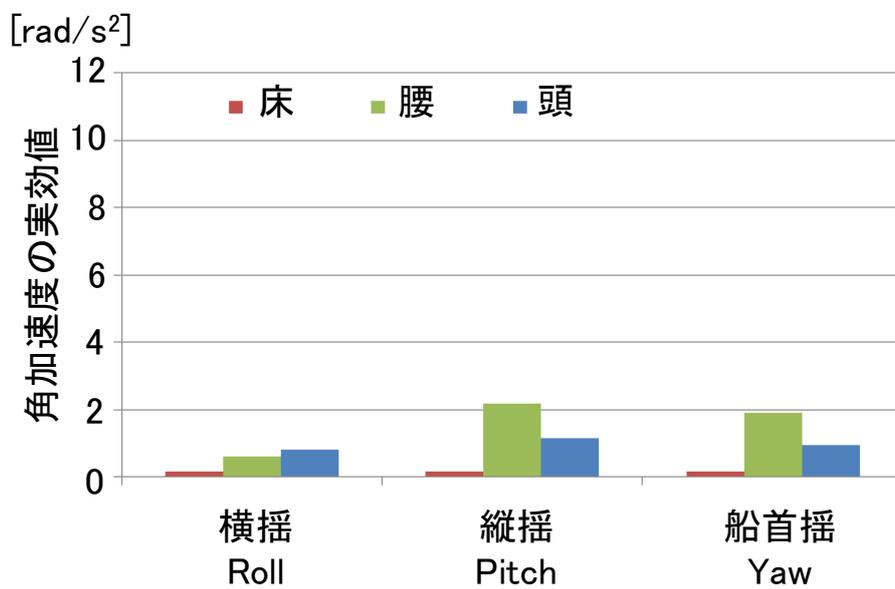
(b) 角加速度の実効値

図 A4-51 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 15, 男性)



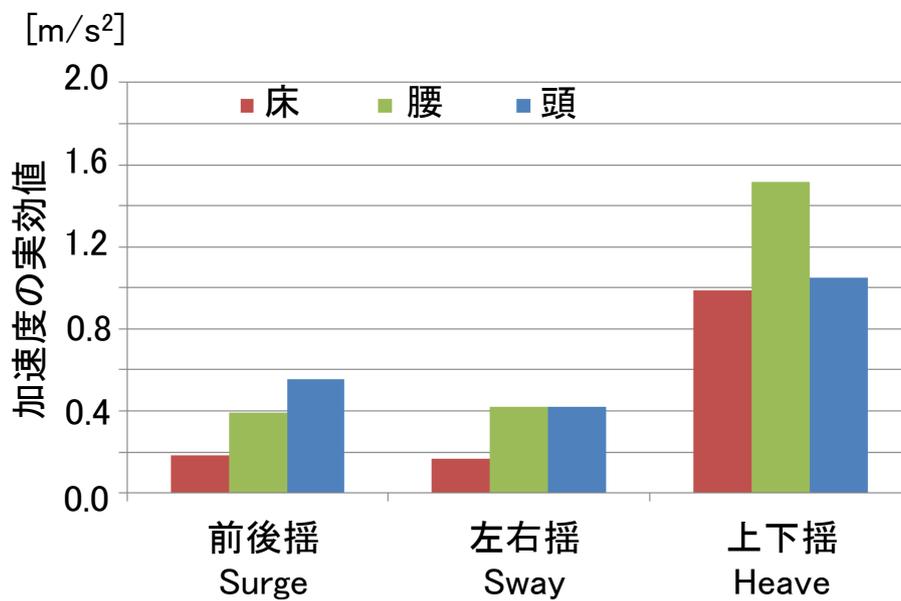
(a) 加速度の実効値



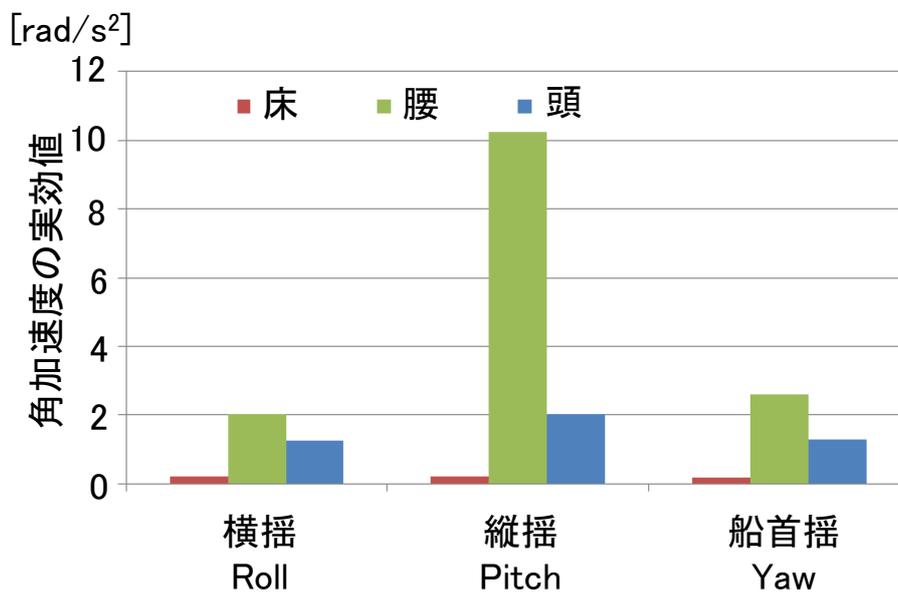
(b) 角加速度の実効値

図 A4-52 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 15, 男性)



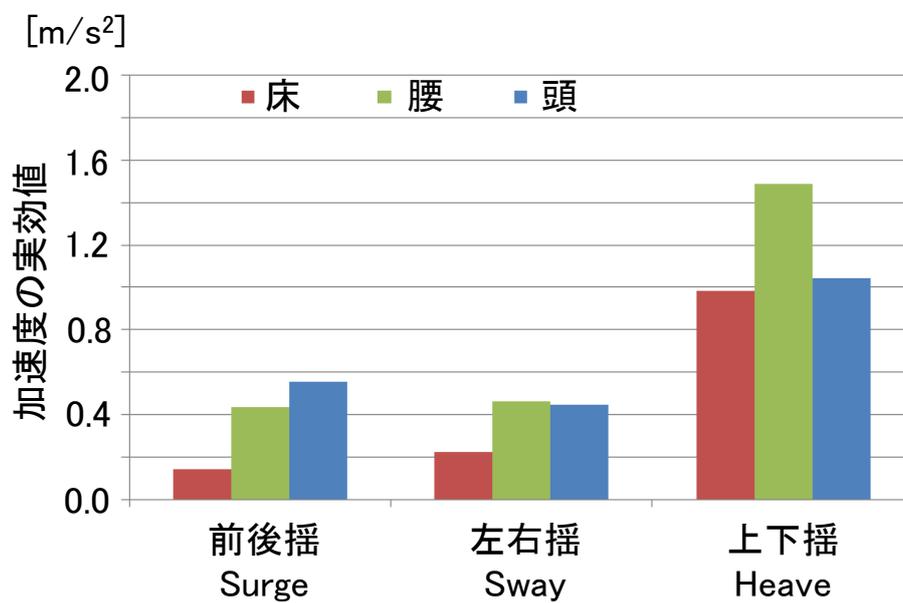
(a) 加速度の実効値



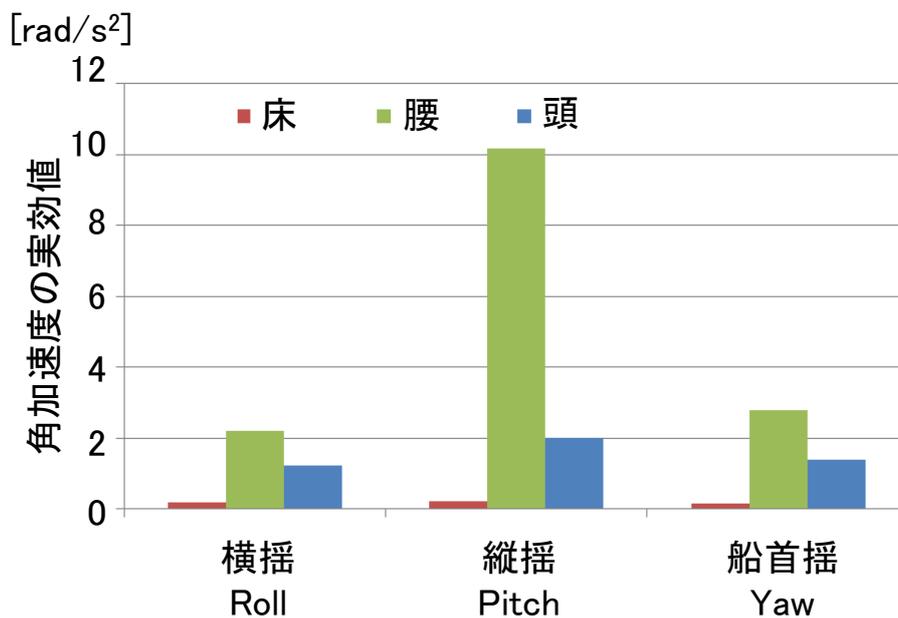
(b) 角加速度の実効値

図 A4-53 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 16, 男性)



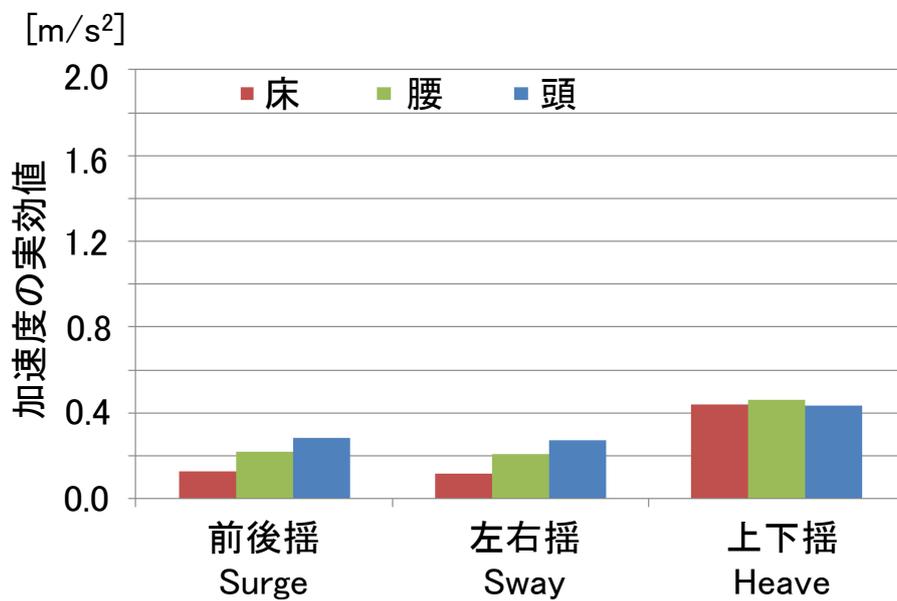
(a) 加速度の実効値



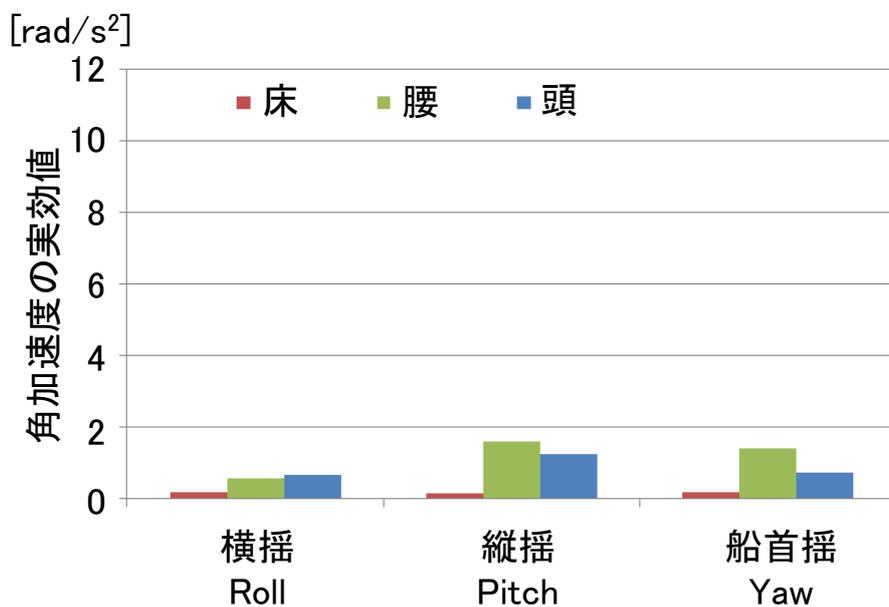
(b) 角加速度の実効値

図 A4-54 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 16, 男性)



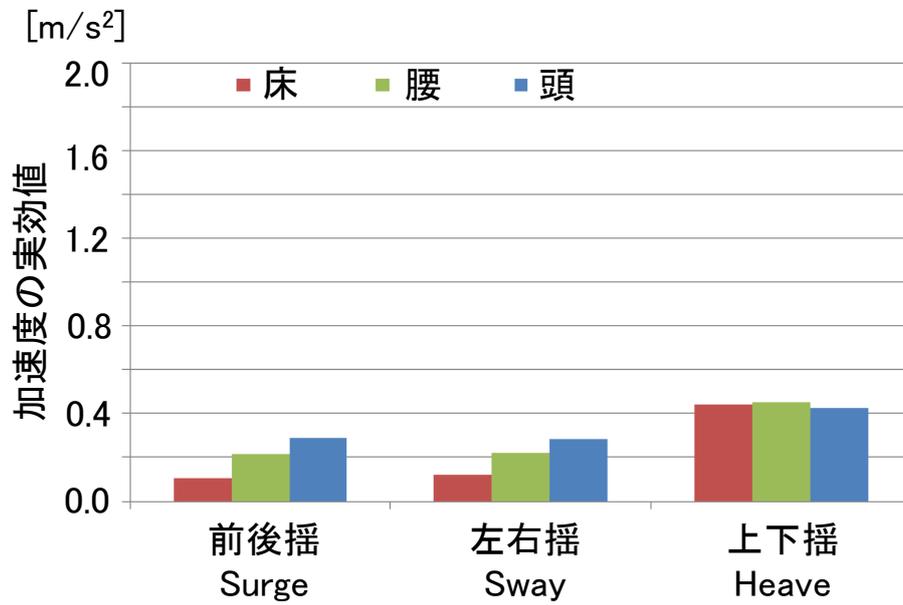
(a) 加速度の実効値



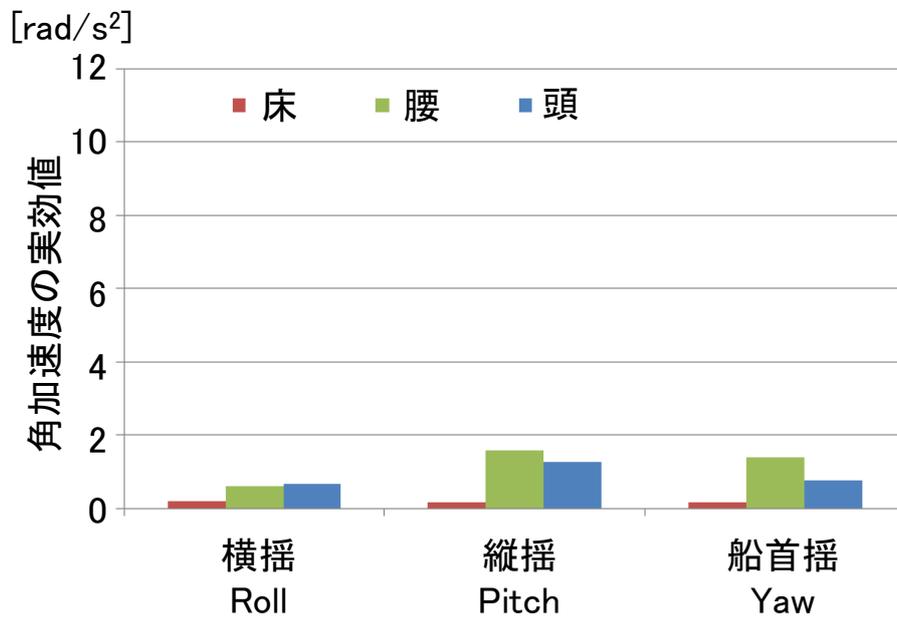
(b) 角加速度の実効値

図 A4-55 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 17, 女性)



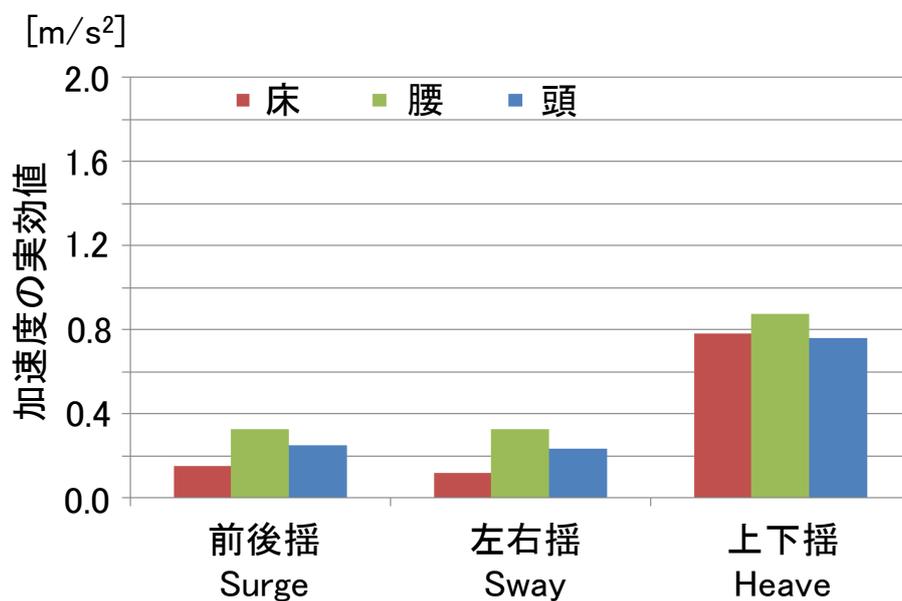
(a) 加速度の実効値



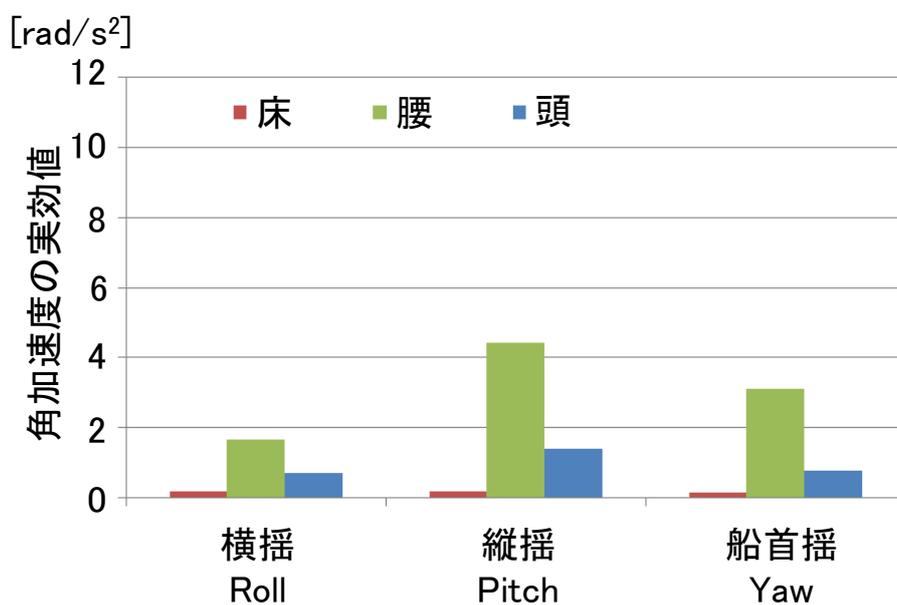
(b) 角加速度の実効値

図 A4-56 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 17, 女性)



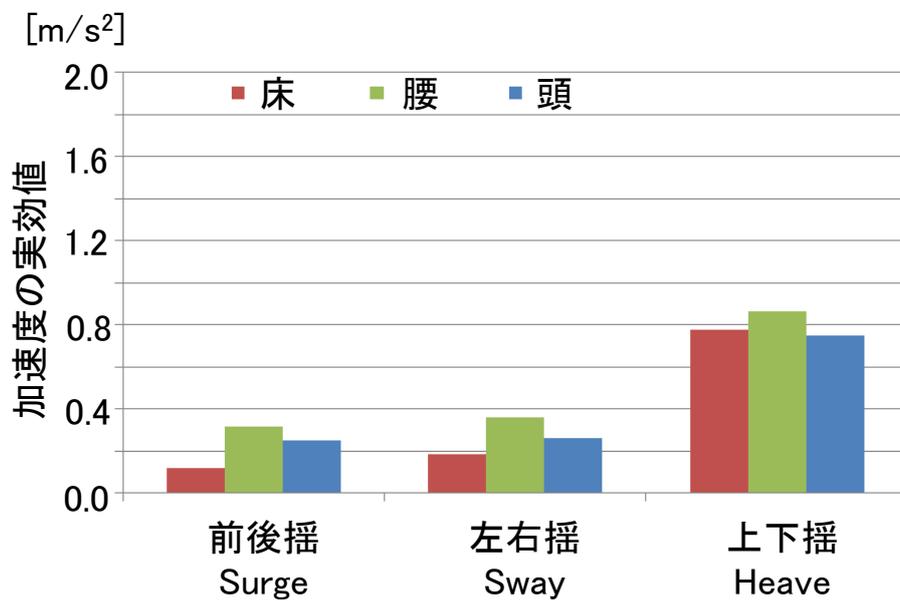
(a) 加速度の実効値



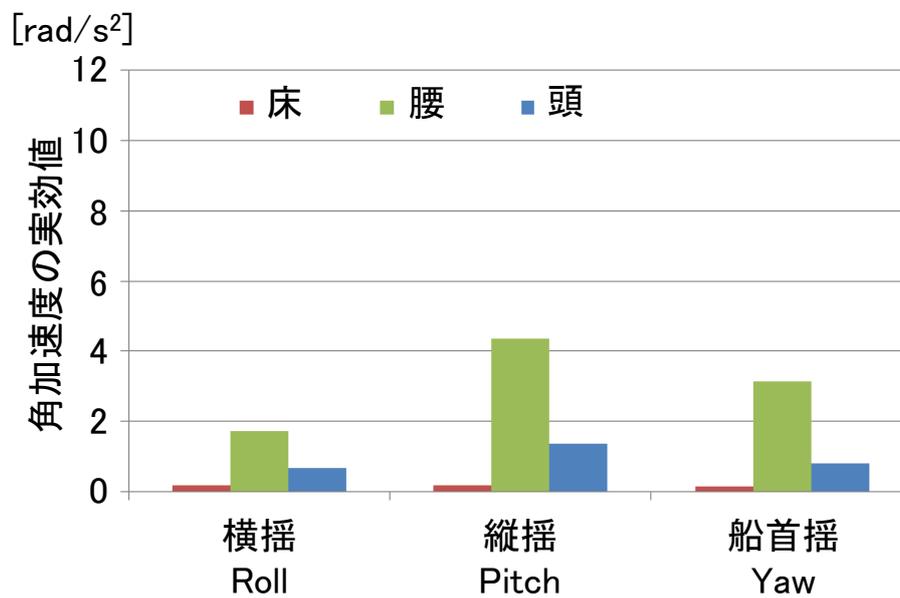
(b) 角加速度の実効値

図 A4-57 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 18, 男性)



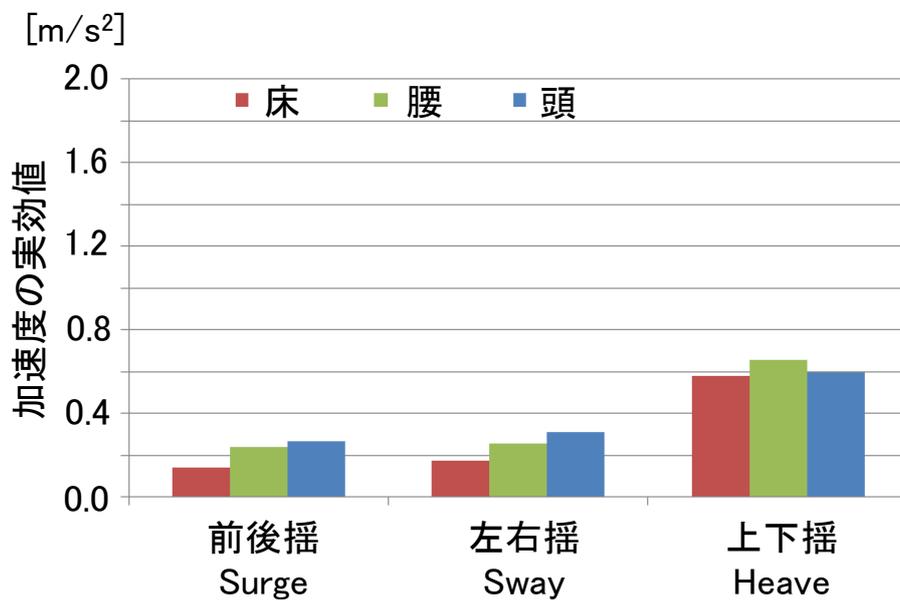
(a) 加速度の実効値



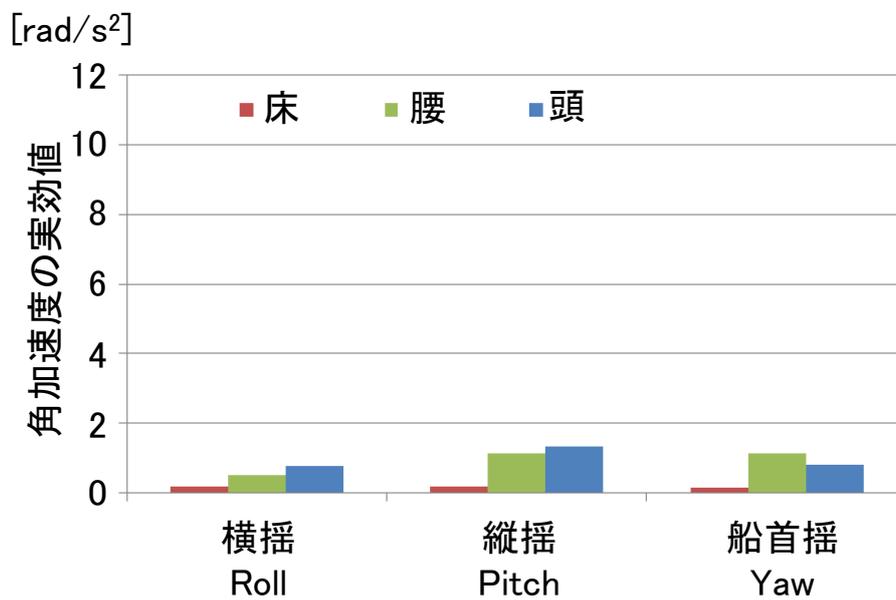
(b) 角加速度の実効値

図 A4-58 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 18, 男性)



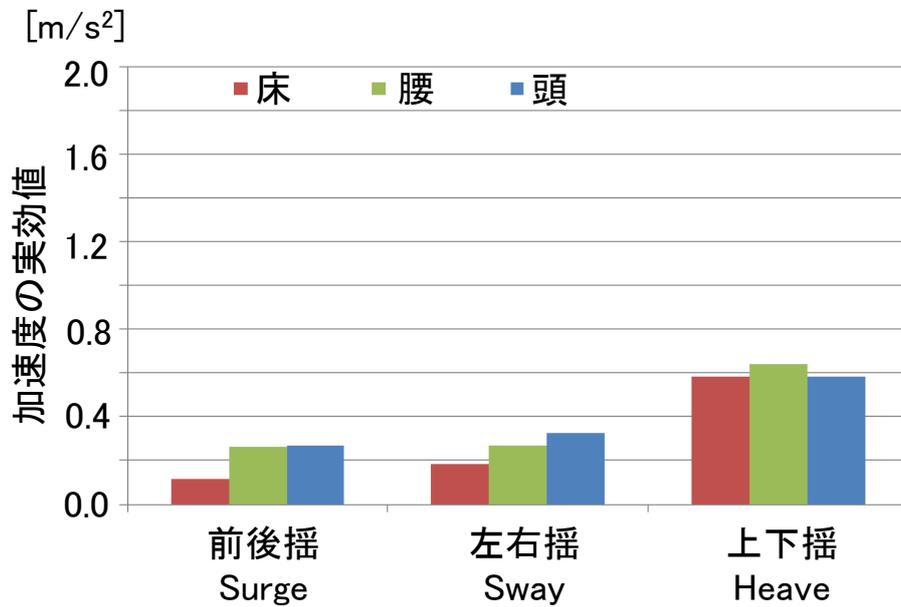
(a) 加速度の実効値



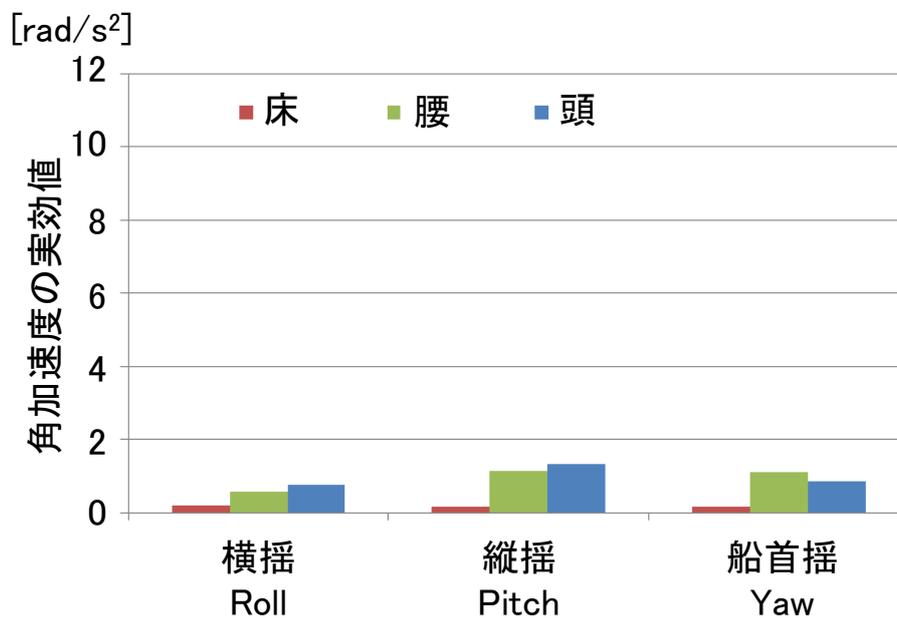
(b) 角加速度の実効値

図 A4-59 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 19, 女性)



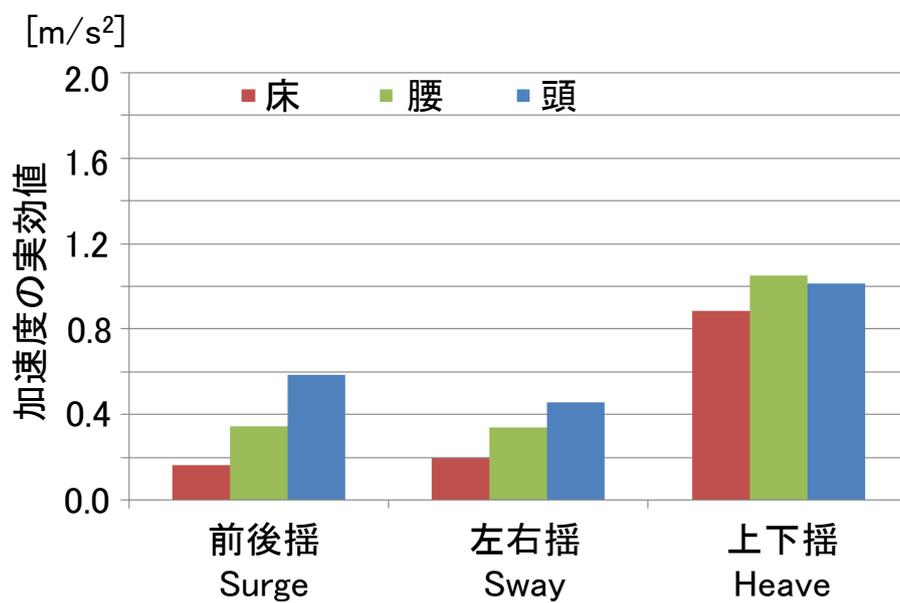
(a) 加速度の実効値



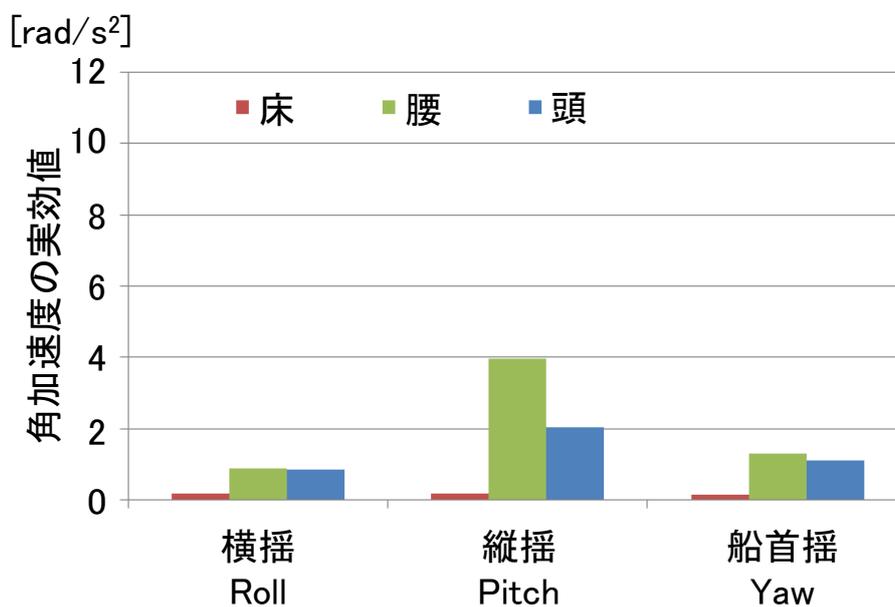
(b) 角加速度の実効値

図 A4-60 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 19, 女性)



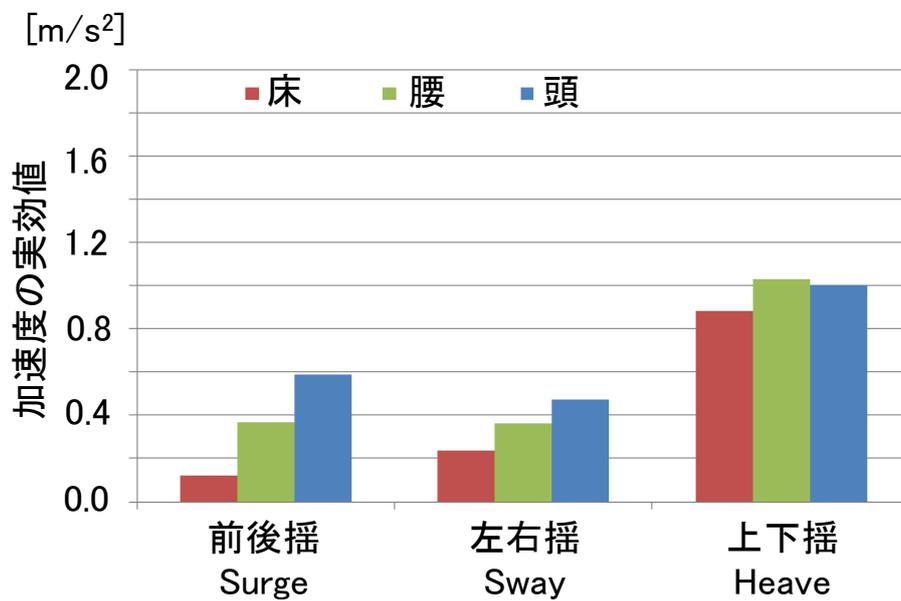
(a) 加速度の実効値



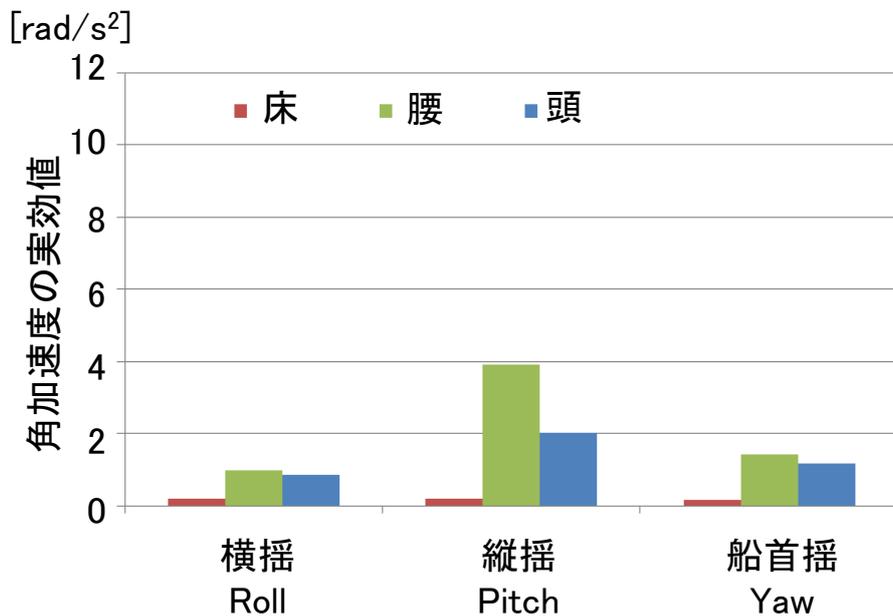
(b) 角加速度の実効値

図 A4-61 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 20, 男性)



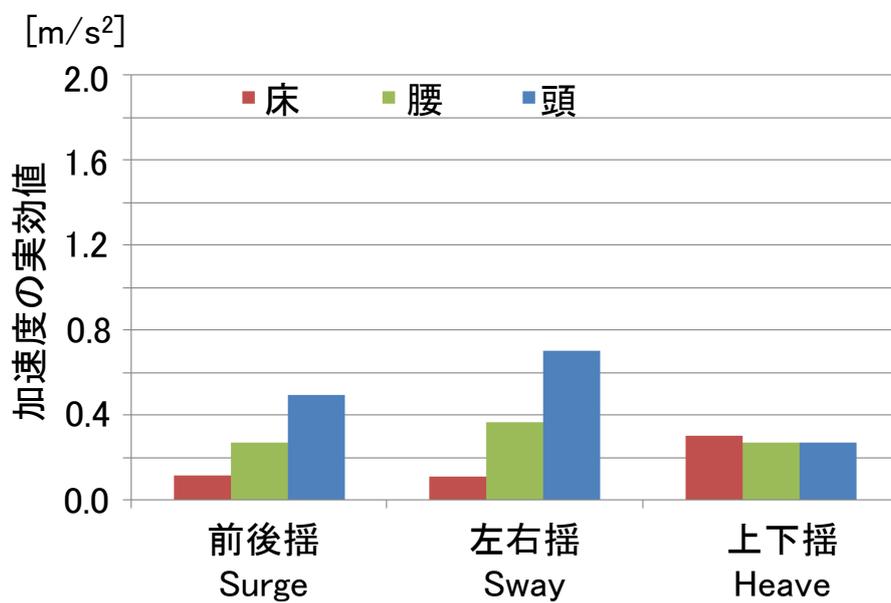
(a) 加速度の実効値



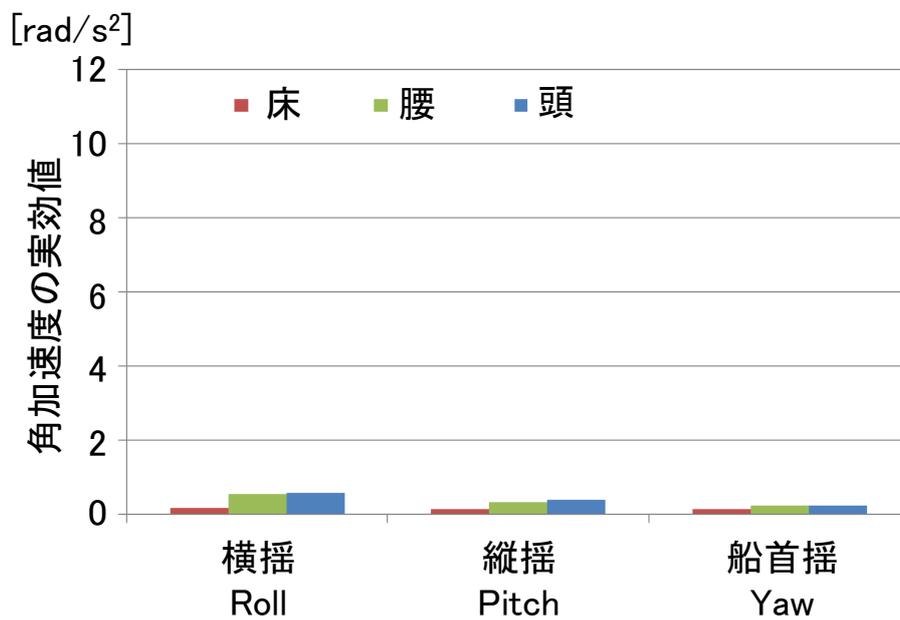
(b) 角加速度の実効値

図 A4-62 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(No. 20, 男性)

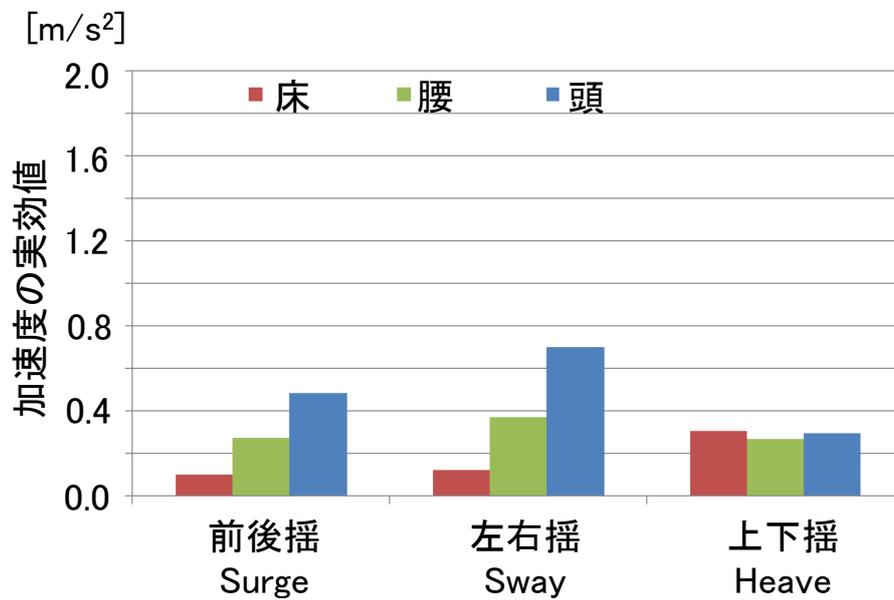


(a) 加速度の実効値

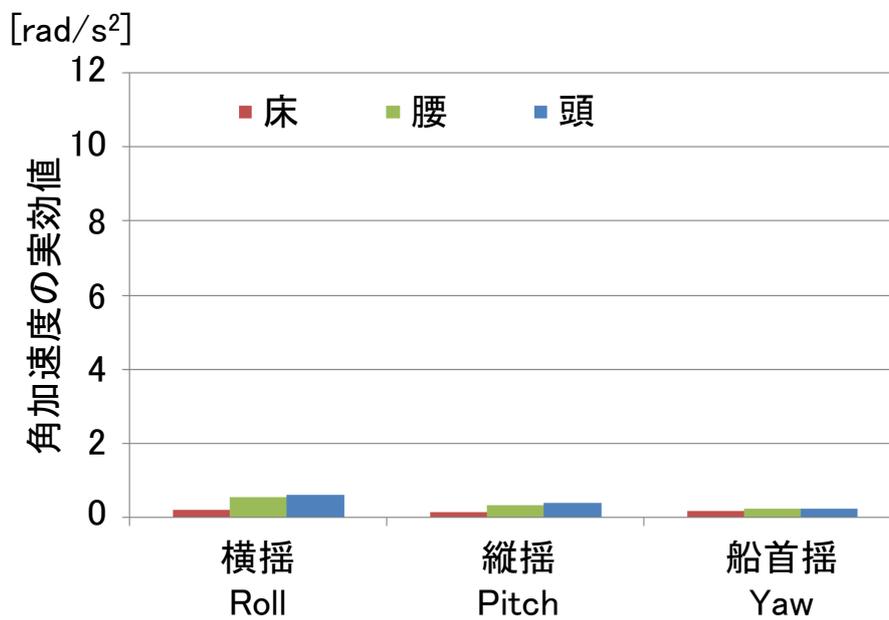


(b) 角加速度の実効値

図 A4-63 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値
(棒, 解析範囲 1)



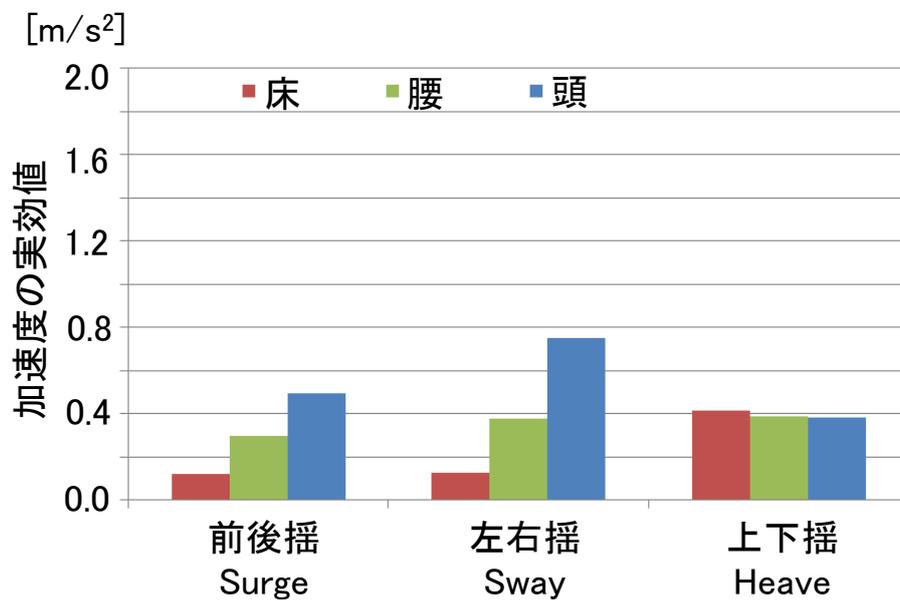
(a) 加速度の実効値



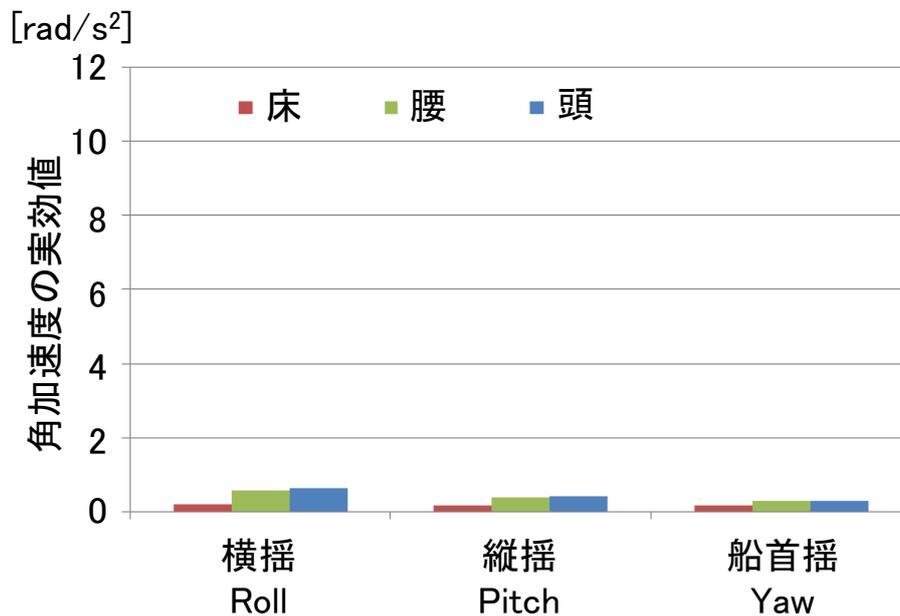
(b) 角加速度の実効値

図 A4-64 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(棒, 解析範囲 1)

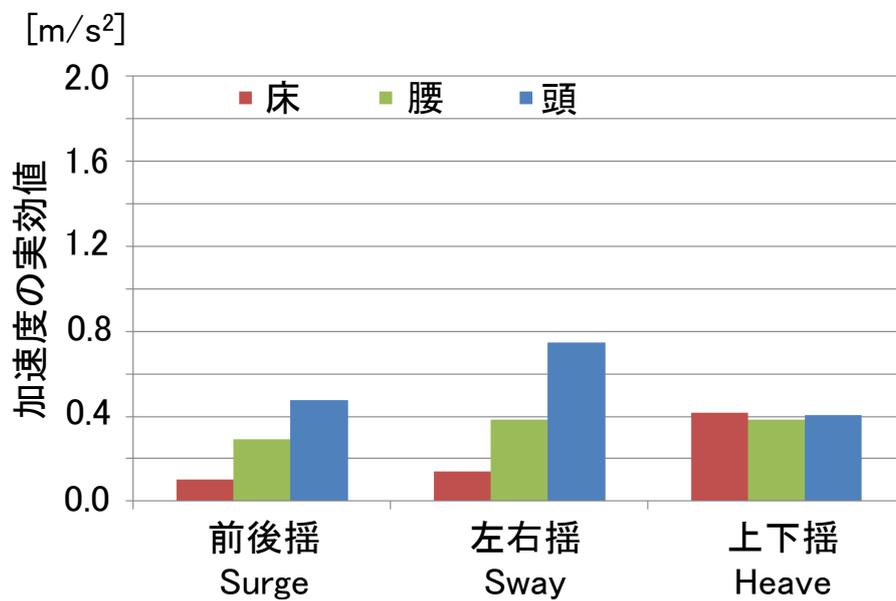


(a) 加速度の実効値

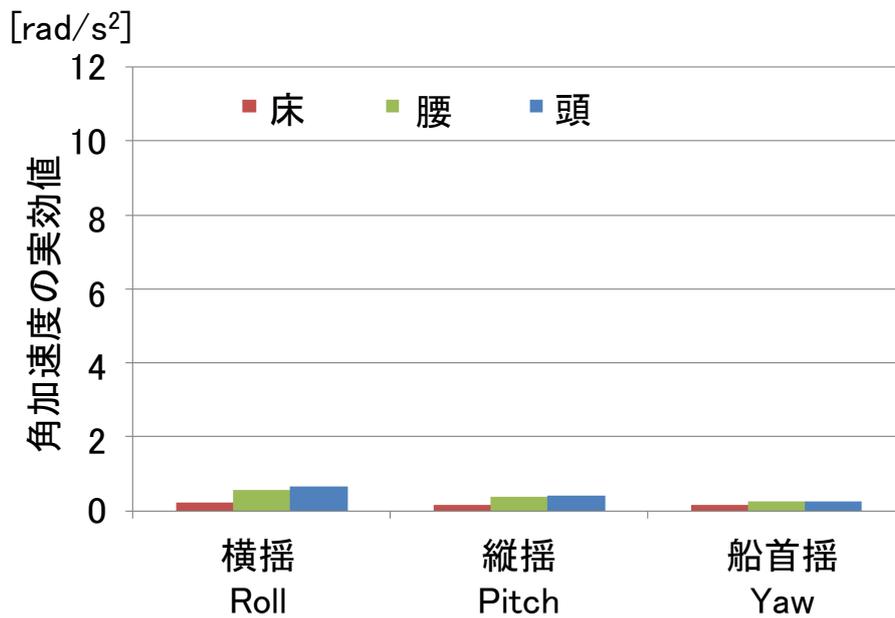


(b) 角加速度の実効値

図 A4-65 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値
(棒, 解析範囲 2)



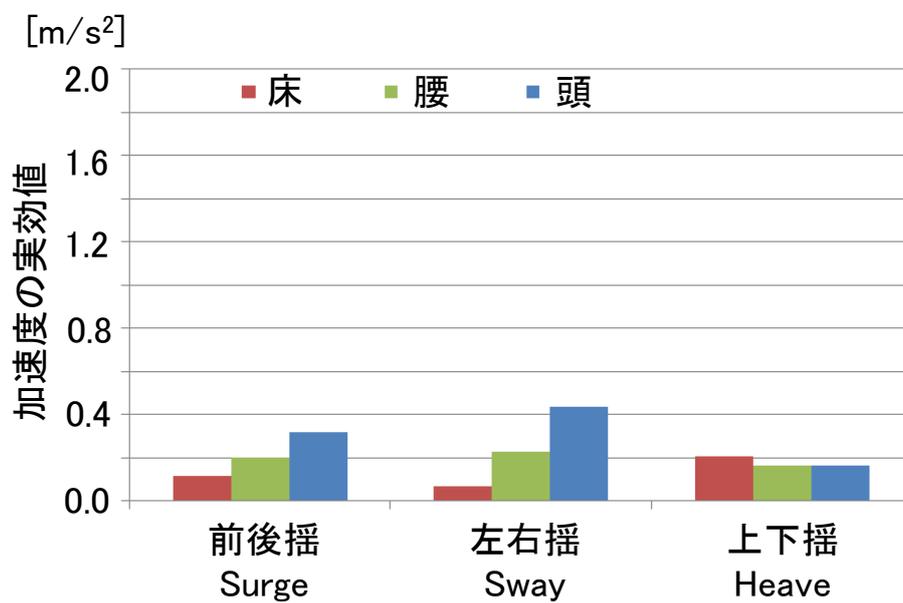
(a) 加速度の実効値



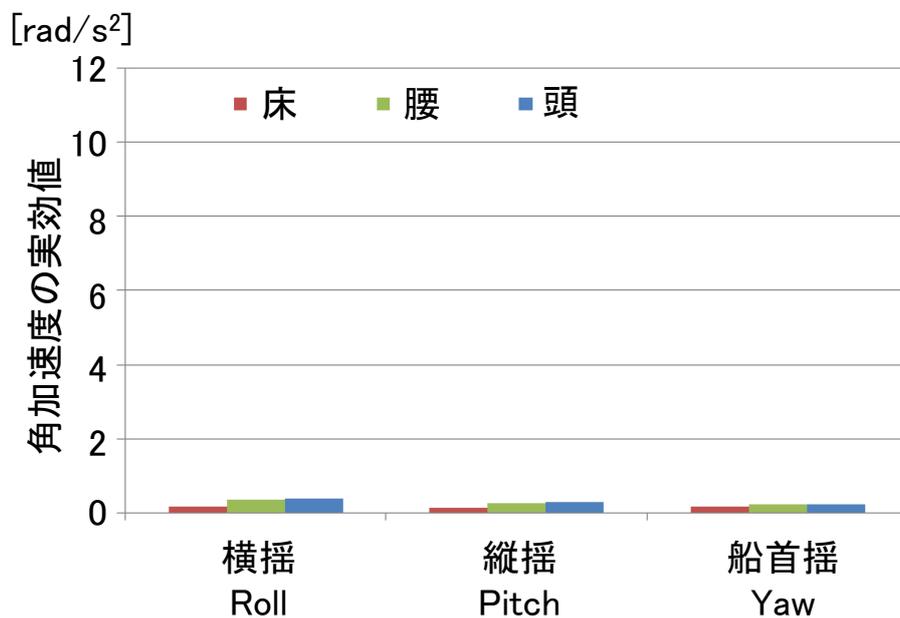
(b) 角加速度の実効値

図 A4-66 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(棒, 解析範囲 2)

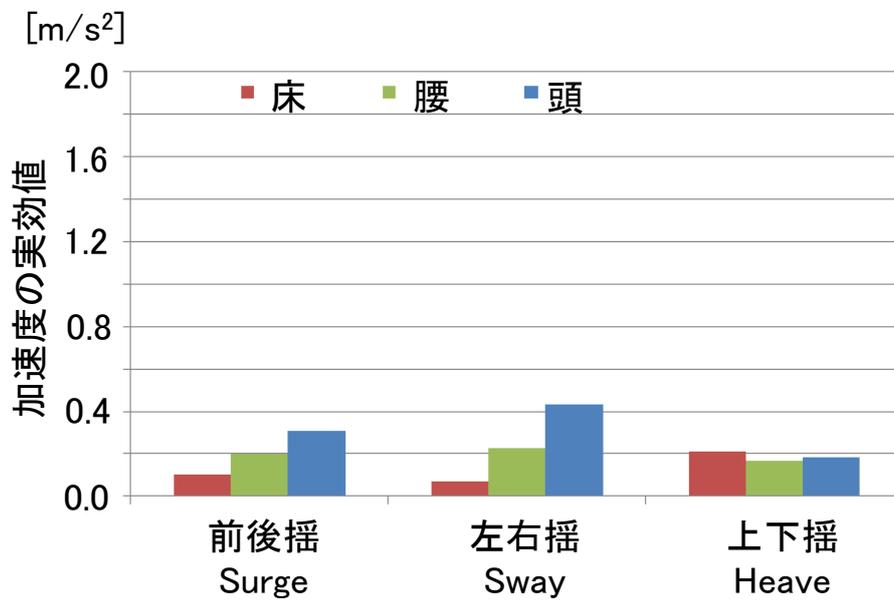


(a) 加速度の実効値

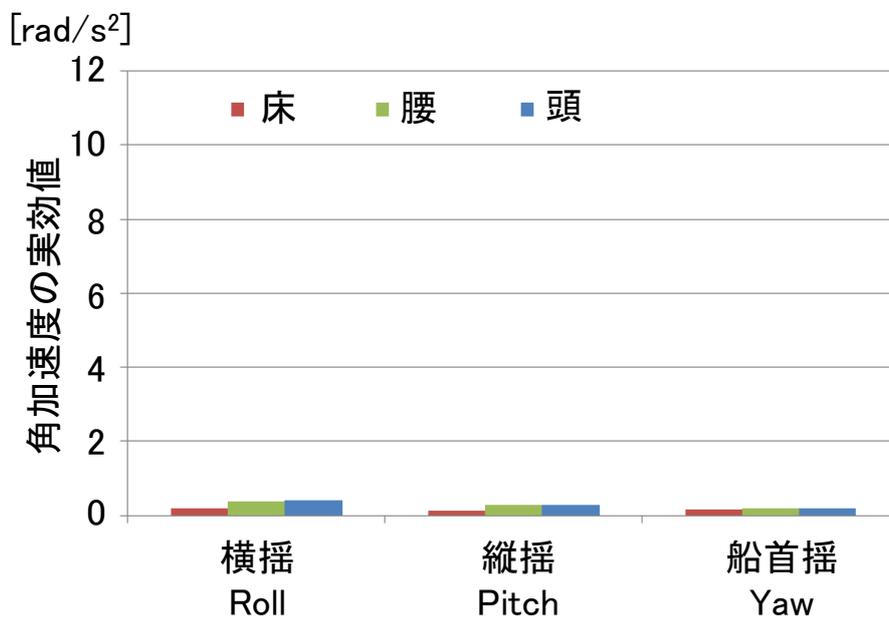


(b) 角加速度の実効値

図 A4-67 固定座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値
(棒, 解析範囲 3)



(a) 加速度の実効値



(b) 角加速度の実効値

図 A4-68 小型船舶の床の座標系を基準とする加速度・角加速度の実効値

(棒, 解析範囲 3)

4. 2 エネルギー消費量

表 3-2 に示した実験協力者のエネルギー消費量の時系列データを図 A4-69～図 A4-88 に示す。実験協力者の多くは、座位姿勢時のエネルギー消費量に比べて、立位姿勢時のエネルギー消費量が増加する傾向が観察された。

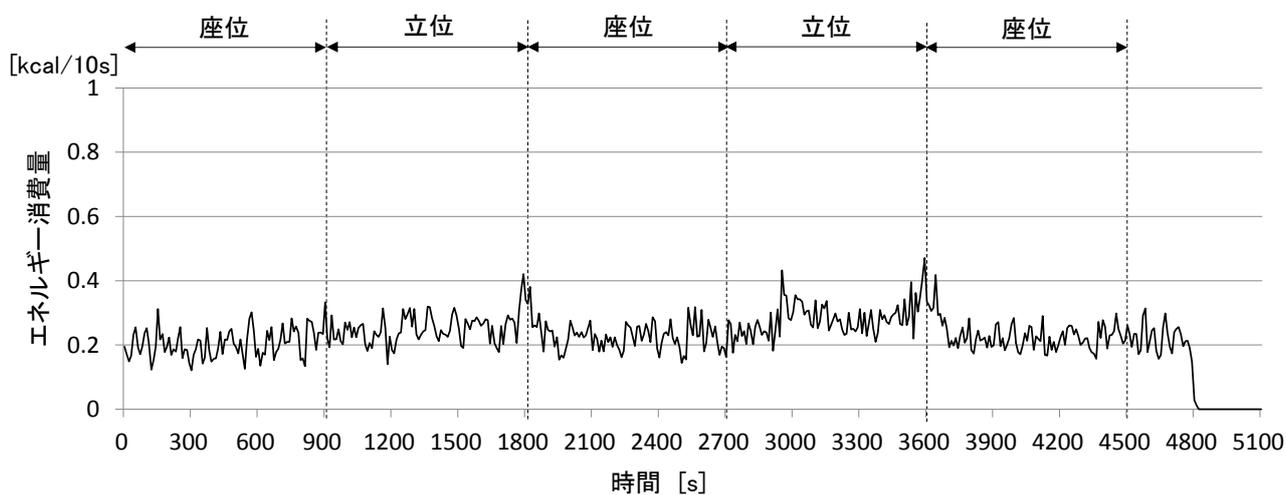


図 A4-69 エネルギー消費量 (No. 1, 女性)

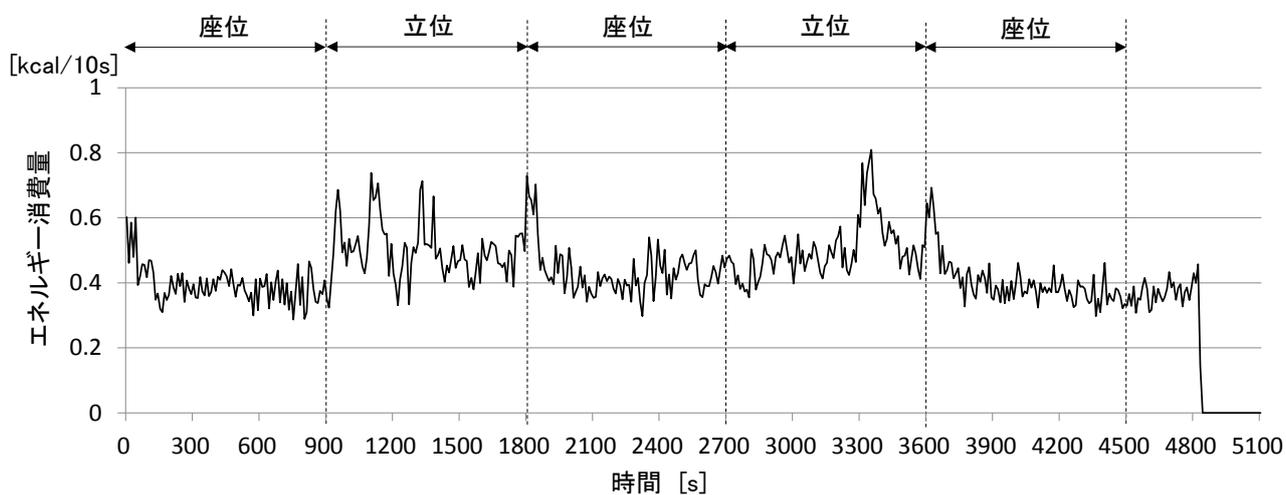


図 A4-70 エネルギー消費量 (No. 2, 男性)

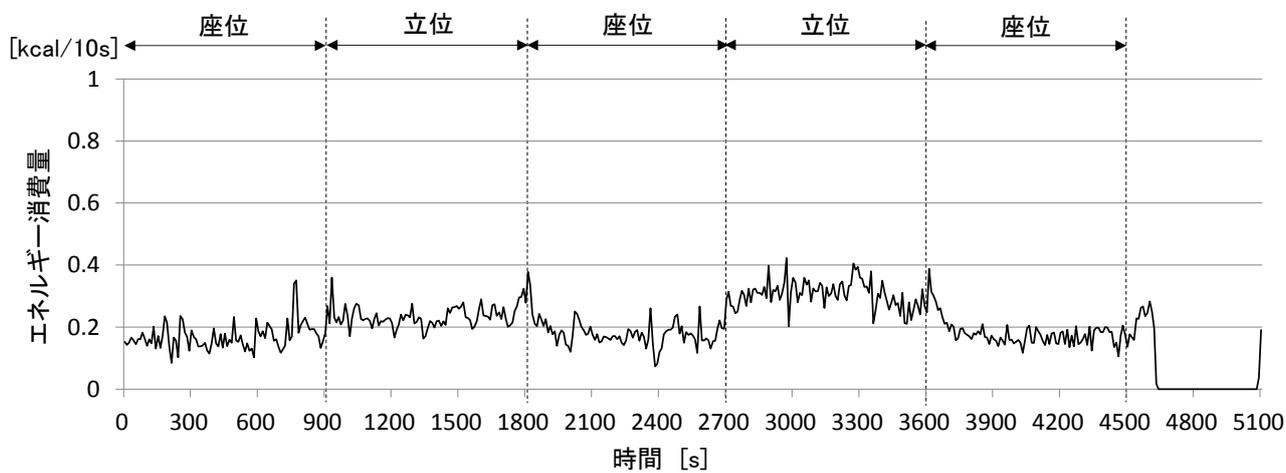


図 A4-71 エネルギー消費量 (No. 3, 女性)

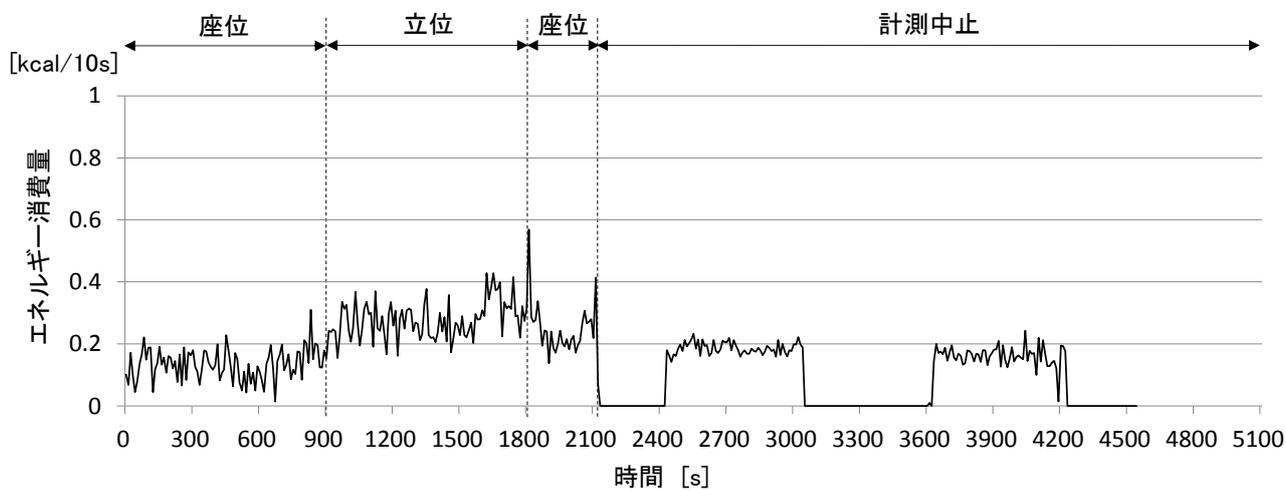


図 A4-72 エネルギー消費量 (No. 4, 女性)

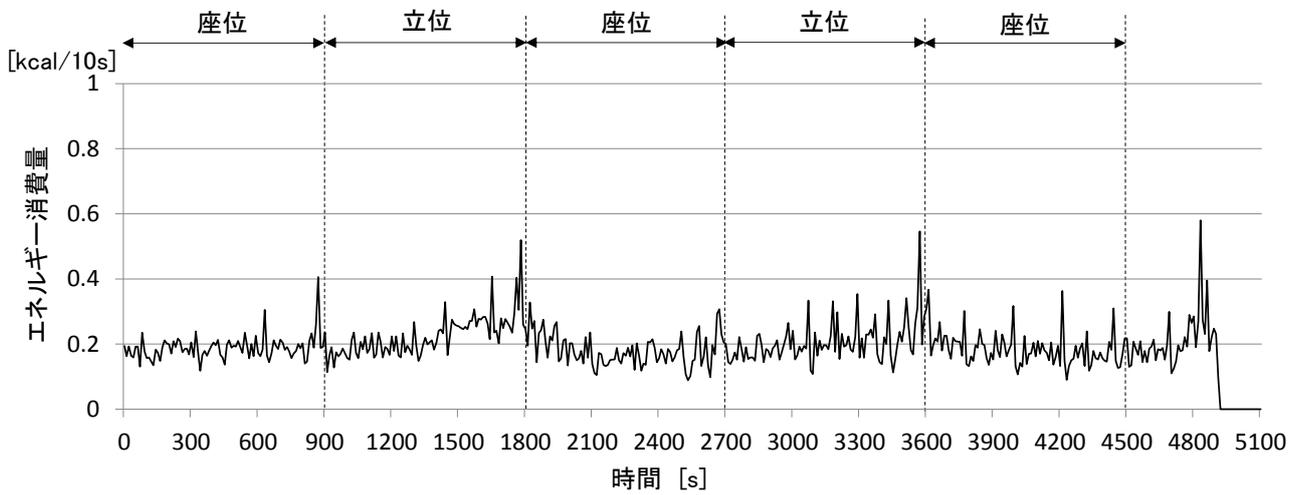


図 A4-73 エネルギー消費量 (No. 5, 女性)

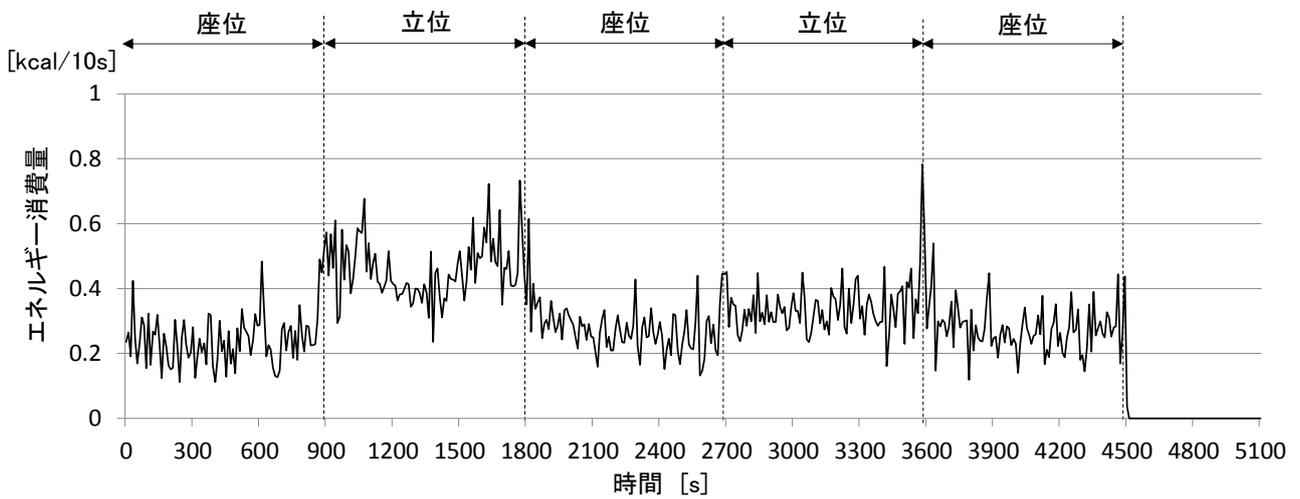


図 A4-74 エネルギー消費量 (No. 6, 男性)

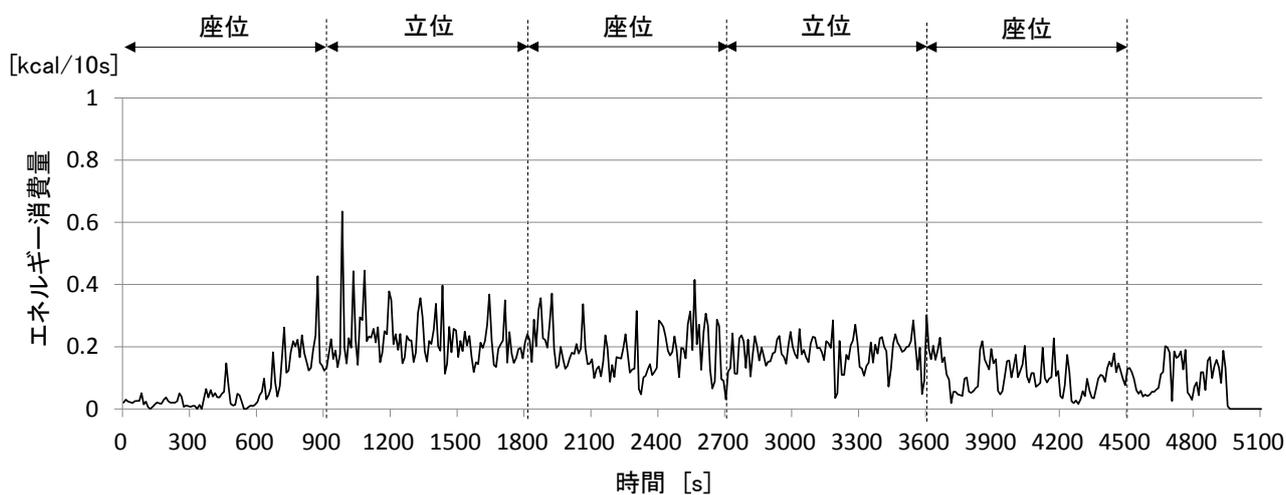


図 A4-75 エネルギー消費量 (No. 7, 女性)

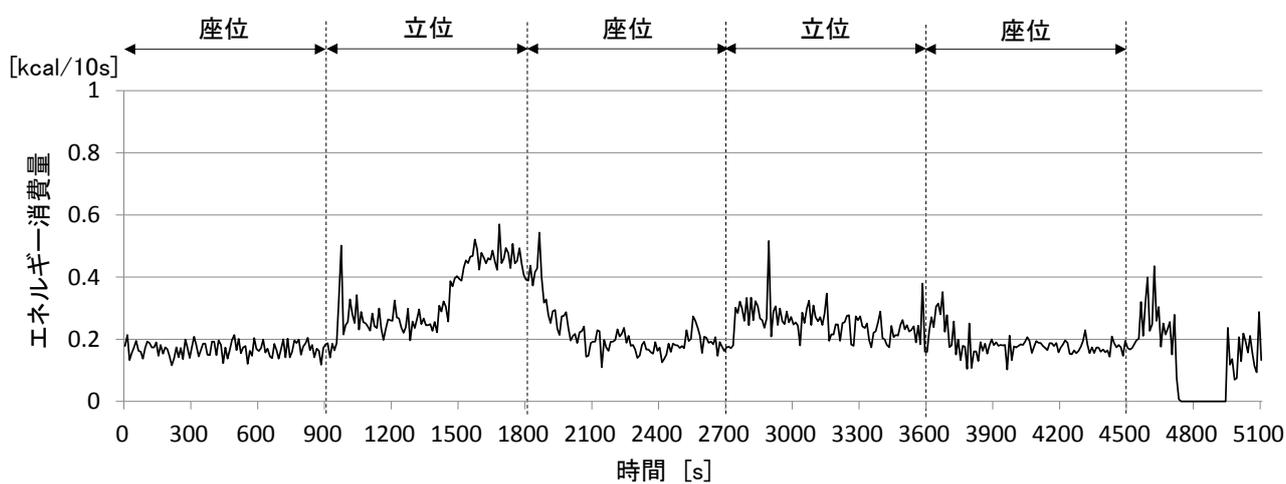


図 A4-76 エネルギー消費量 (No. 8, 男性)

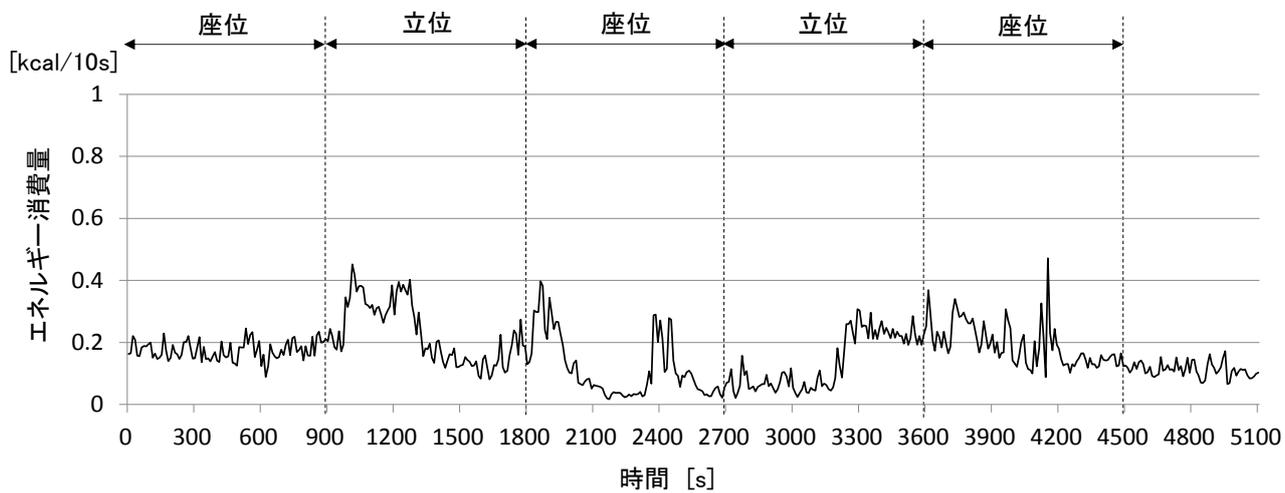


図 A4-77 エネルギー消費量 (No. 9, 女性)

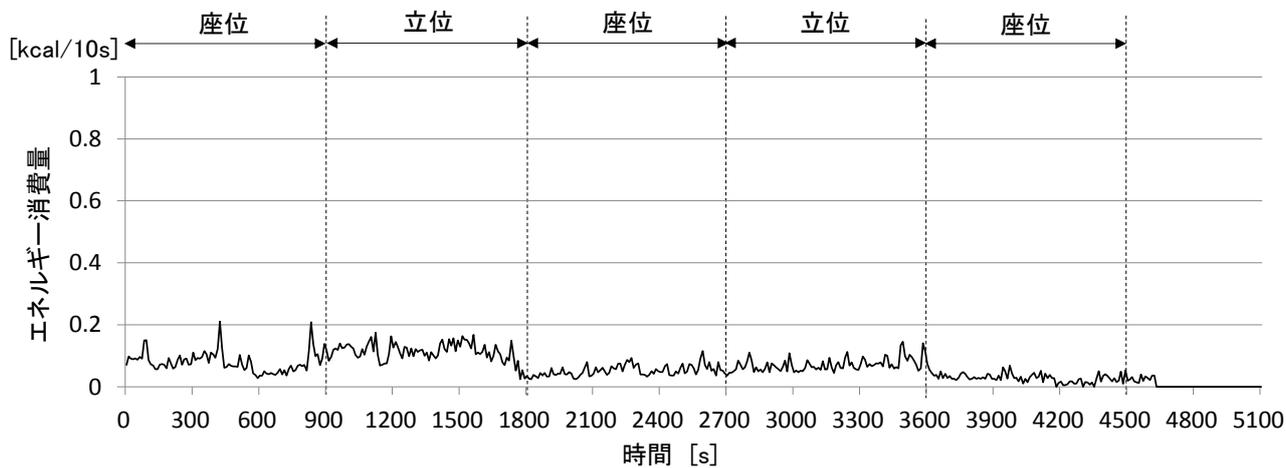


図 A4-78 エネルギー消費量 (No. 10, 女性)

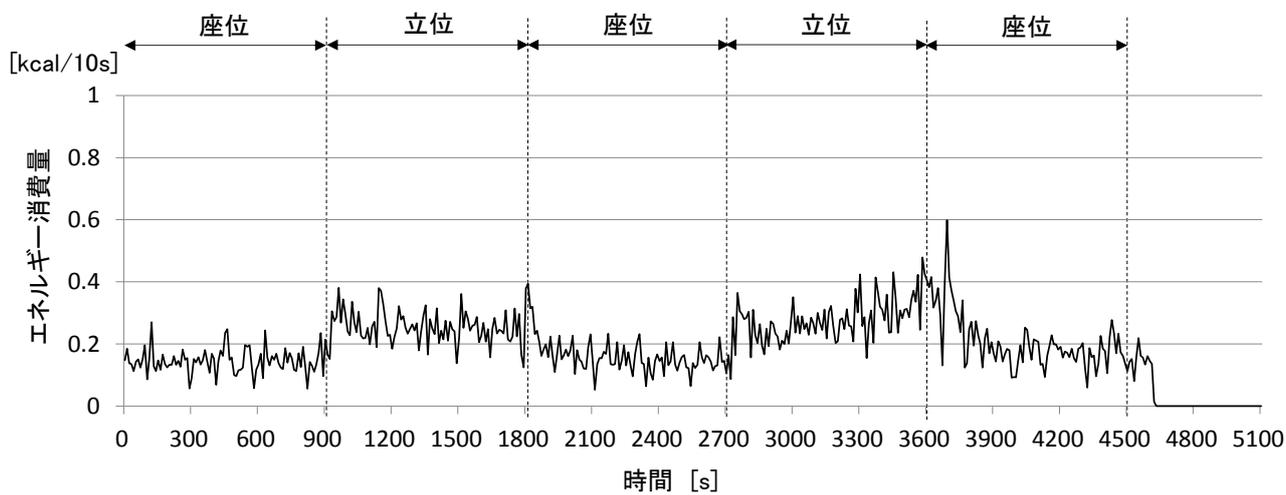


図 A4-79 エネルギー消費量 (No. 11, 女性)

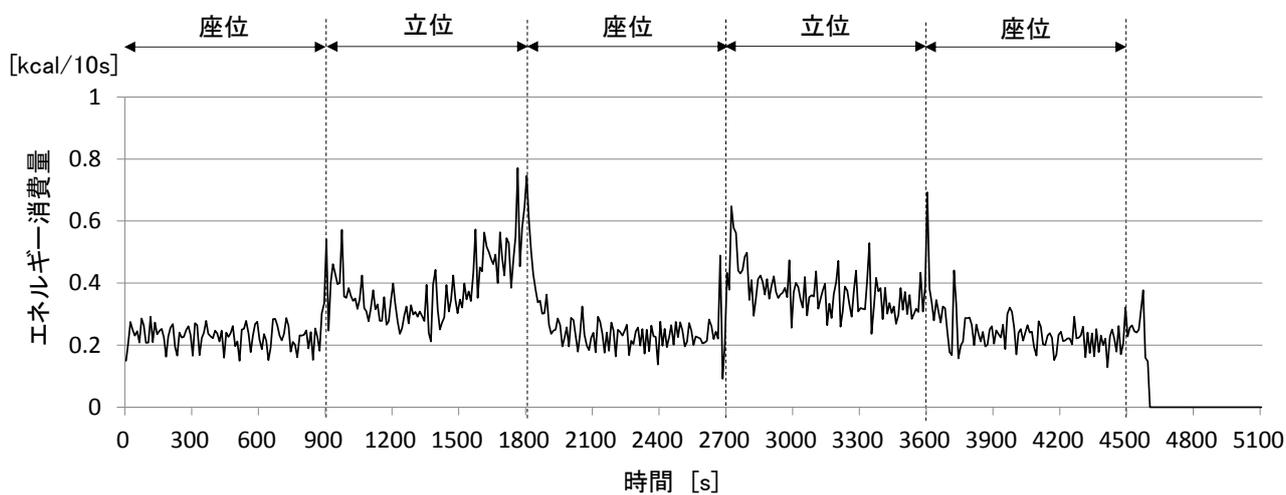


図 A4-80 エネルギー消費量 (No. 12, 男性)

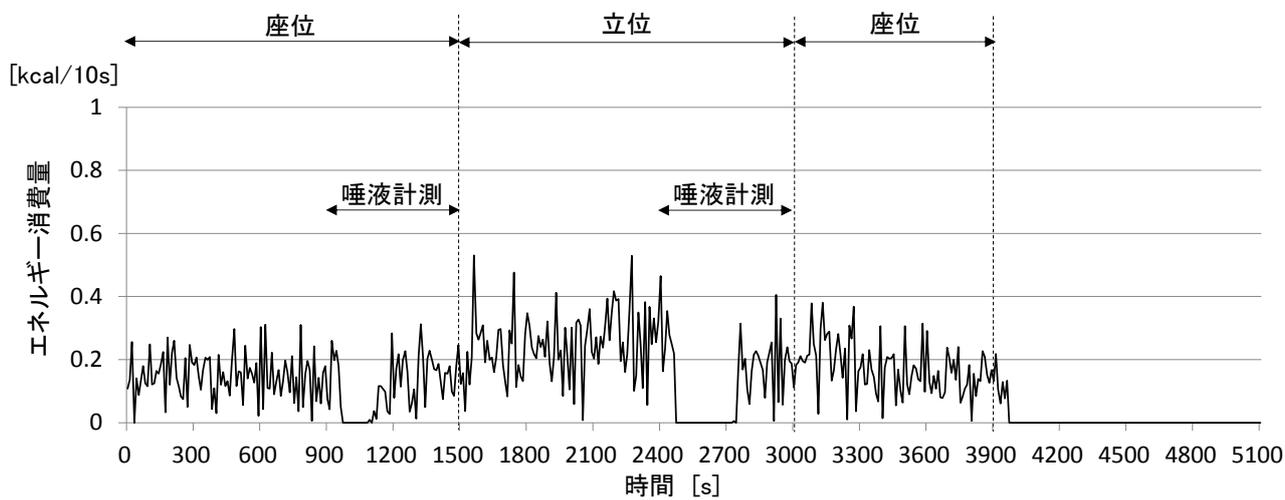


図 A4-81 エネルギー消費量 (No. 13, 女性)

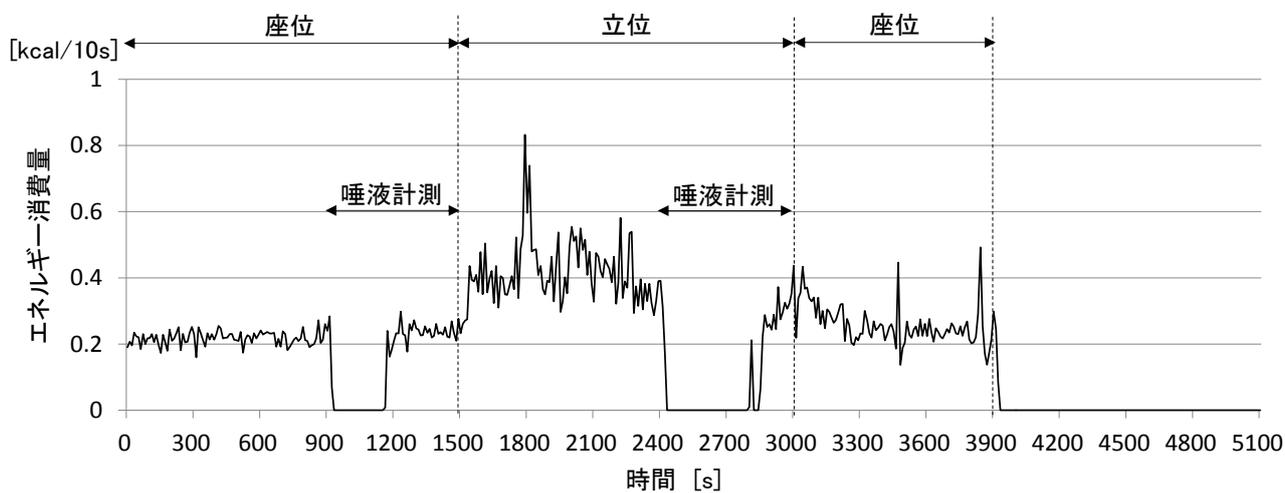


図 A4-82 エネルギー消費量 (No. 14, 男性)

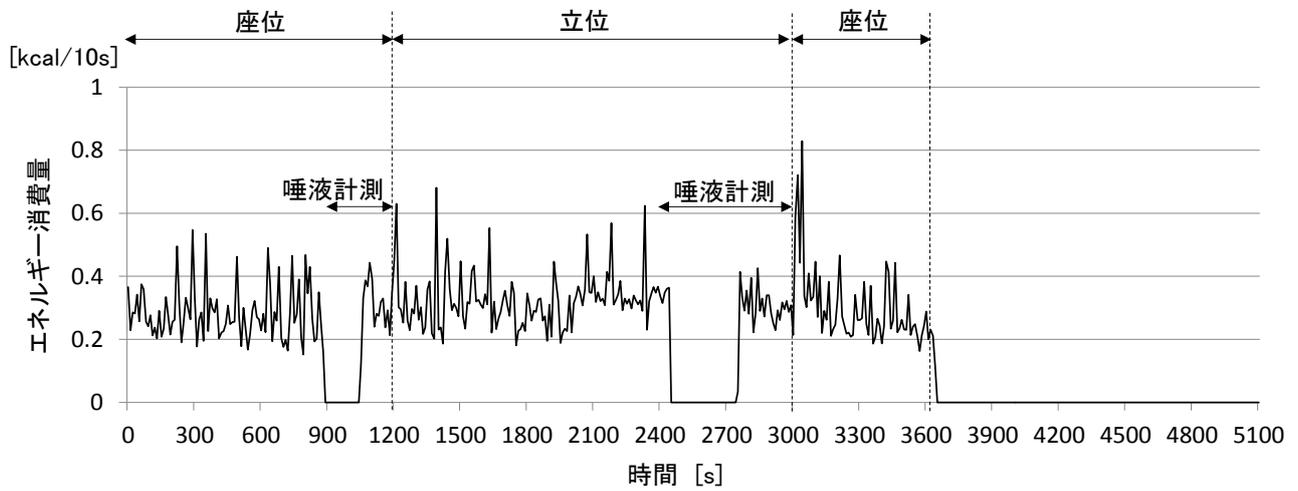


図 A4-83 エネルギー消費量 (No. 15, 男性)

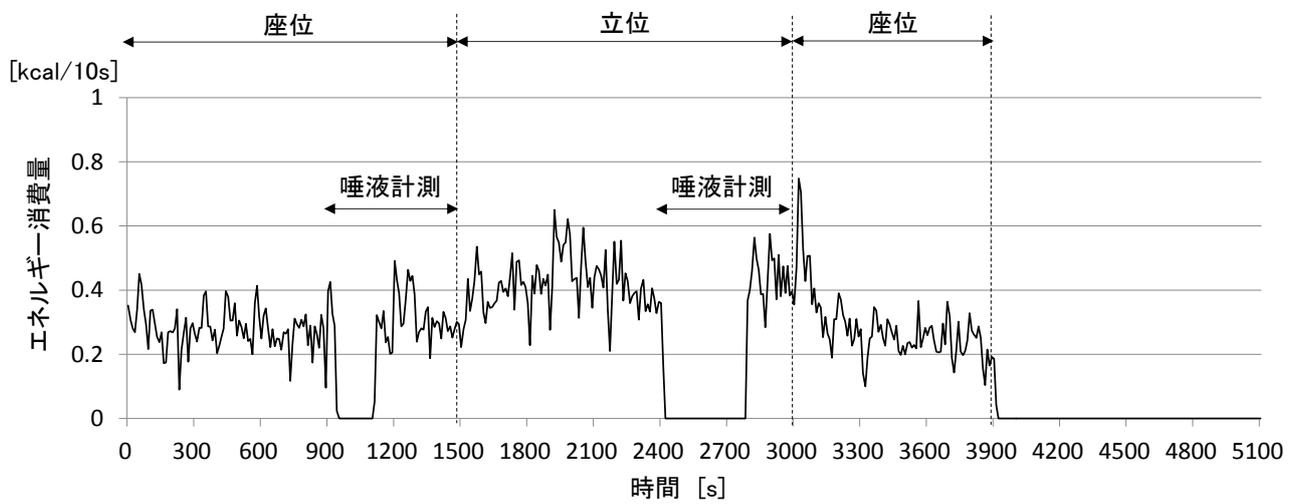


図 A4-84 エネルギー消費量 (No. 16, 男性)

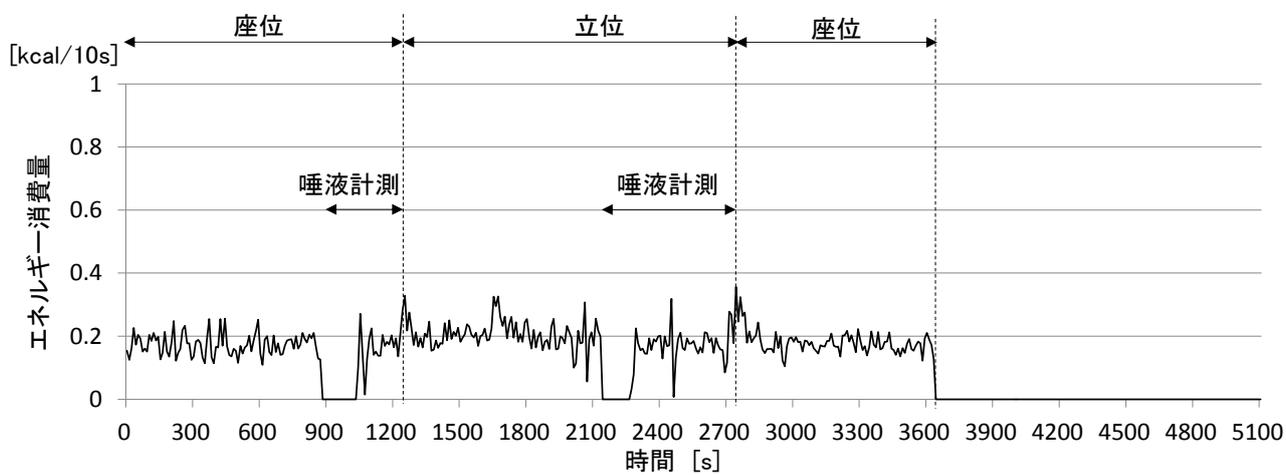


図 A4-85 エネルギー消費量 (No. 17, 女性)

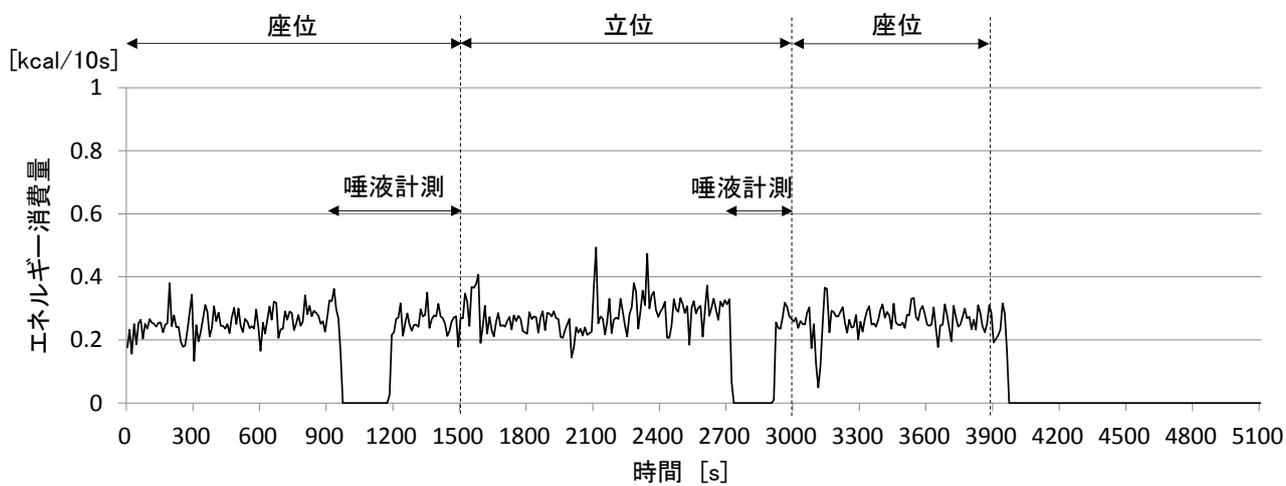


図 A4-86 エネルギー消費量 (No. 18, 男性)

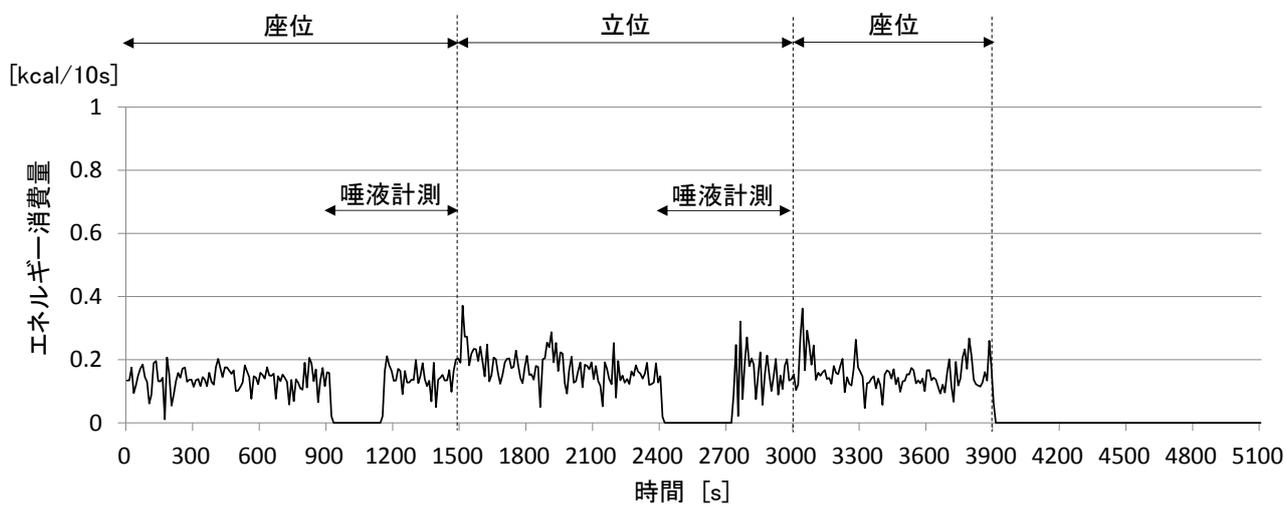


図 A4-87 エネルギー消費量 (No. 19, 女性)

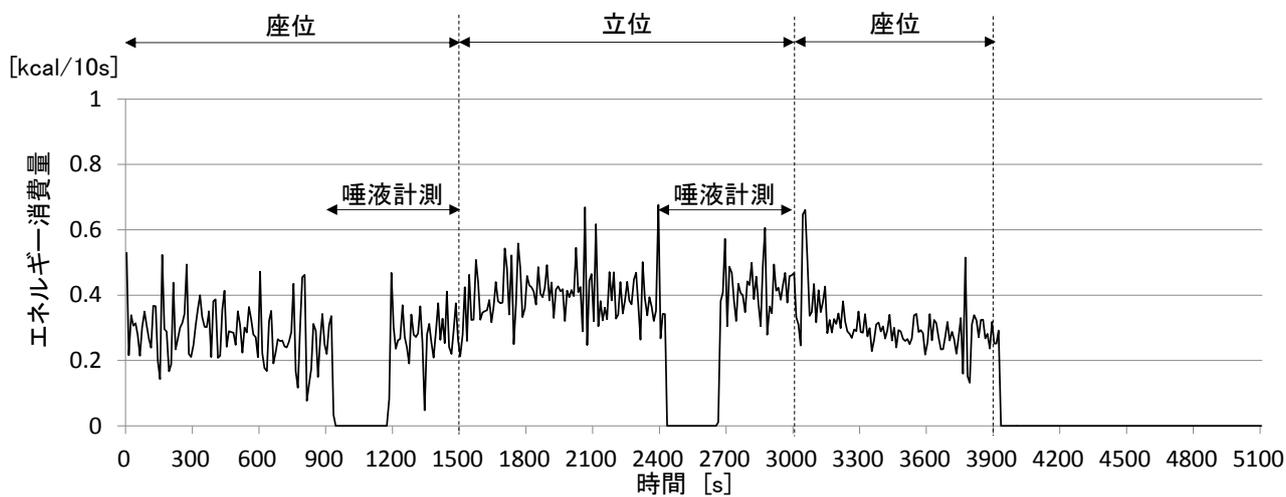


図 A4-88 エネルギー消費量 (No. 20, 男性)

4. 3 標準偏回帰係数

重回帰分析の説明変数として、実験協力者の身体的特徴のうち身長、体重、性別（女性：-1，男性：1）それぞれを選択した場合の標準回帰係数を表 A4-1～A4-6 に示す。重回帰式のあてはまりの良さを表す自由度調整済決定係数 R^2 は、高い数値を示した。身長と体重で比較すると、固定座標系を基準とする場合は体重（表 A4-1，表 A4-3）、小型船舶の床の座標系を基準とする場合は身長（表 A4-2，表 A4-4）を説明変数とすることで、重回帰式のあてはまりが良くなることが確認された。また今回の実験では、性別の標準偏回帰係数がマイナスであることから、男性に比べて女性の方がエネルギーを消費しやすいことがわかった（表 A4-5，表 A4-6）。

表 A4-1 標準偏回帰係数（身長，固定座標系）

		標準偏回帰係数
切片		-0.38
身長		0.34
頭部	前後揺 (Surge)	-
	左右揺 (Sway)	-
腰部	前後揺 (Surge)	-
	上下揺 (Heave)	-
	縦揺 (Pitch)	0.57
小型船舶の床	前後揺 (Surge)	-
	横揺 (Roll)	-
	船首揺 (Yaw)	-
重相関係数R		0.80
自由度調整済決定係数R ²		0.64

- 係数なし

表 A4-2 標準偏回帰係数（身長，小型船舶の床の座標系）

		標準偏回帰係数
切片		-0.14
身長		0.34
頭部	前後揺 (Surge)	-
	船首揺 (Yaw)	-
腰部	前後揺 (Surge)	-
	上下揺 (Heave)	0.46
	縦揺 (Pitch)	0.47
小型船舶の床	横揺 (Roll)	-
	船首揺 (Yaw)	-
重相関係数R		0.85
自由度調整済決定係数R ²		0.73

- 係数なし

表 A4-3 標準偏回帰係数（体重，固定座標系）

		標準偏回帰係数
切片		0.15
体重		0.53
頭部	前後揺 (Surge)	-
	左右揺 (Sway)	0.34
腰部	前後揺 (Surge)	-
	上下揺 (Heave)	-
	縦揺 (Pitch)	0.39
小型船舶の床	前後揺 (Surge)	-
	横揺 (Roll)	-0.27
	船首揺 (Yaw)	-
重相関係数R		0.87
自由度調整済決定係数R ²		0.75

- 係数なし

表 A4-4 標準偏回帰係数（体重，小型船舶の床の座標系）

		標準偏回帰係数
切片		0.00
体重		0.45
頭部	前後揺 (Surge)	-
	船首揺 (Yaw)	-
腰部	前後揺 (Surge)	-
	上下揺 (Heave)	-
	縦揺 (Pitch)	0.52
小型船舶の床	横揺 (Roll)	-
	船首揺 (Yaw)	-
重相関係数R		0.84
自由度調整済決定係数R ²		0.71

- 係数なし

表 A4-5 標準偏回帰係数（性別，固定座標系）

		標準偏回帰係数
切片		0.42
性別		-0.48
頭部	前後揺 (Surge)	-
	左右揺 (Sway)	-
腰部	前後揺 (Surge)	-
	上下揺 (Heave)	0.42
	縦揺 (Pitch)	0.30
小型船舶の床	前後揺 (Surge)	-
	横揺 (Roll)	-0.32
	船首揺 (Yaw)	-
重相関係数R		0.84
自由度調整済決定係数R ²		0.71

- 係数なし

表 A4-6 標準偏回帰係数（性別，小型船舶の床の座標系）

		標準偏回帰係数
切片		0.56
性別		-0.66
頭部	前後揺 (Surge)	-
	船首揺 (Yaw)	-
腰部	前後揺 (Surge)	-
	上下揺 (Heave)	0.60
	縦揺 (Pitch)	-
小型船舶の床	横揺 (Roll)	-0.45
	船首揺 (Yaw)	-
重相関係数R		0.84
自由度調整済決定係数R ²		0.70

- 係数なし