

船舶を用いた災害医療支援と船舶環境下における生体反応

Medical Assistance-ship at a time of Disaster, and Fluctuations of Vital Sign on a Ship

○坂牧孝規(鳥羽商船高専) 土井根礼音(東京電機大学) 瀬田広明(鳥羽商船高専)

伊藤政光(鳥羽商船高専) 山田英生(鳥羽商船高専) 福井裕輝(性障害専門医療センター)

河村剛史(河村循環器病クリニック) 本間章彦(東京電機大学) 福井康裕(東京電機大学)

Takanori SAKAMAKI, Toba National College of Maritime Technology

Renon DOINE, Tokyo Denki University

Hiroaki SETA, Toba National College of Maritime Technology

Masamitsu ITO, Toba National College of Maritime Technology

Hideo Yamada, Toba National College of Maritime Technology

Hiroki FUKUI, Sex Offenders Medical Center

Tsuyoshi KAWAMURA, Kawamura Cardiovascular Clinic

Akihiko HOMMA, Tokyo Denki University

Yasuhiro FUKUI, Tokyo Denki University

Abstract: The transportation of disaster victims using a ship would be an effective method in the event of a large earthquake in the Tokai area. However, many passengers and crews experience physical fatigue on a ship. In our preliminary experiments, we observed some fluctuations in patients' vital signs caused by the many motions and oscillations on a ship. The objective of this research is to investigate the causes of physical fatigue and vital signs' variances in order to use a ship for the patients' transportation. In this paper, first we describe the analysis of the propagation of motions and oscillations inside the human body caused by a ship. Second, we describe our analyses of the changes in metabolic energy expenditure and heart rate caused by posture control against the motions of a ship.

Key Words: Ship, Disaster, Vital Sign, Fatigue, Posture control

1. はじめに

1-1 船舶を用いた災害医療支援

阪神・淡路大震災, 東日本大震災を経験し, 災害発生時の陸海空の交通手段を連携させた災害支援インフラの整備の必要性が認識されるようになった。特に, 船舶の自己完結機能は, 独立したライフラインや通信情報伝達手段の確保, 大量の人や物資の運搬を可能とし, 被災地へ自力で移動し, 宿泊などの生活環境を提供することが可能である。このようなことから, ホテルシップやドクターシップなどの災害時医療船支援船構想も考えられている⁽¹⁾。

一方, 東海地震などの発生が危惧される東海地区においては, 複数の有人離島が存在するため, 災害緊急時における船舶を用いた患者搬送などは有効な手段である。

1-2 船舶動揺と生体反応

船舶環境は, 常に揺れ・振動が発生するため, 船酔いなどの動揺病や, 疲労を感じる人が少なくないなど, 生活環境としては必ずしも快適ではない。このため, 災害時の医療支援に船舶を用いるためには, 船舶環境が生体に与える影響とその原因を特定し, 快適な生活環境を提供できる仕組みを構築する必要がある。

これまでの我々の基礎研究では, 船舶の揺れ・振動に対して, 乗船者が無意識に行う姿勢制御が原因と推察される生体信号の変動が観察された。本稿では, 先ず, 船舶の揺れに対する生体の姿勢制御の状況を解析する手法を示し, 次に, 船舶動揺と姿勢制御の関係と姿勢制御に対するエネルギー代謝量および心拍数の変動について示し, 船舶環境における生体信号の変動原因について考察する。

2. 方法

2-1 計測システム

計測システムの構成を Fig. 1 に示す。計測システムは, エネルギー代謝計, 患者モニタ, 筋電図計, 3 軸方位角センサ, ビデオカメラ, サテライトコンパス, およびコンピュータから構成されている。

3 軸方位角センサは, 船舶の揺れが生体に伝播する仕組みを解析するため, 船舶の床, 生体の腰部, 頭部に設置されている。患者モニタは, 主として, 心電図, 心拍数の計測に用いた。筋電図計の電極は, 乗船者の姿勢制御の動きを把握するため, 左右の頸部傍脊柱筋, 左右の腰部傍脊柱筋, 左右の外側広筋, 左右のヒラメ筋の部位に設置されている。計測インターバルは, 3 軸方位角センサを 0.01s, エネルギー代謝計を 10s, 筋電図計を 0.001s とした。

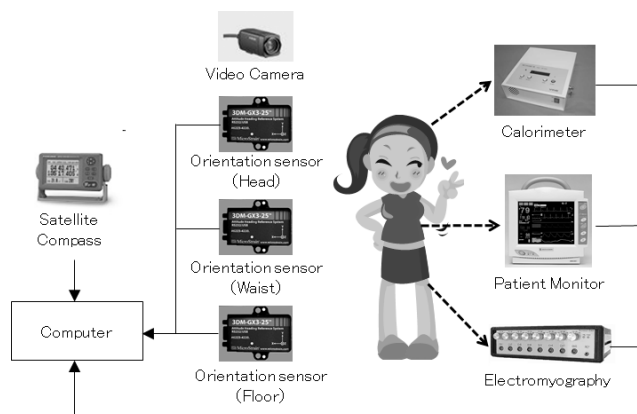


Fig. 1 Schematic of Measuring System

2-2 計測実験

(1) 海上実験

海上実験では、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) を用いて行った。小型船舶を Fig. 2 に、実験の様子を Fig. 3 に示す。実験中の船舶の速度は、可能な限り一定とし、急な変針は行わないようにした。被験者の姿勢は、座位 20min, 立位 15min, 座位 15min, 立位 15min, 座位 15min と連続的に変えて行った。また、生体の関節構造が揺れの伝播方法に与える影響を分析するため、床に垂直に立てた棒(高さ 1.6m) に、生体と同位置に 3 軸方位角センサを設置し、比較実験を行った。計測実験は、これまでに被験者 16 名に対して約 66 時間行った。

(2) 陸上実験

小型船舶環境での姿勢制御による運動量と陸上での運動量を比較するため、屋内環境において、座位、立位姿勢に加え、踏み台昇降運動を実施する実験を行った。被験者には、座位 15min, 立位 15min, 座位 15min の姿勢をとらせた後、30 回/min の踏み台昇降 5min, 座位 15min, 40 回/min の踏み台昇降 5min, 座位 15min, 50 回/min の踏み台昇降 5min, 座位 15min を行わせた。計測実験は、これまでに被験者 15 名に対して約 54 時間行った。



Fig.2 Training Craft (Asama)

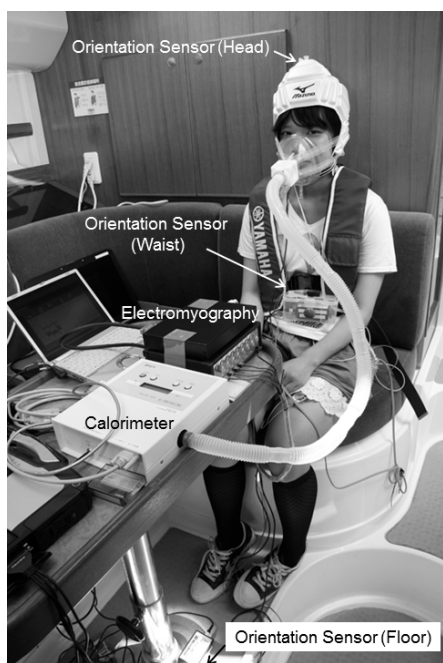


Fig.3 Experimental Environment on a Craft

2-3 船舶動揺の生体伝搬解析のための座標系

本研究で使用する座標系を Fig.4 に示す。座標系 $O - X_0 Y_0 Z_0$ は空間固定座標を、座標系 $G - xyz$ は 3 軸方位角センサに固定された BODY 座標を表す。座標系 $O - X_0 Y_0 Z_0$ は、小型船舶の船首方向に X_0 軸, 右舷方向に Y_0 軸, 鉛直下方に Z_0 軸をとり, $X_0 - Y_0$ 平面は、静水面に一致させた。座標系 $G - xyz$ は、 G を 3 軸方位角センサの重心位置とし、乗船者に対し前後方向を x 軸, 左右方向を y 軸, 鉛直下方を z 軸とした。船舶動揺の伝播解析では、座標系 $G - xyz$ から座標系 $O - X_0 Y_0 Z_0$ への座標変換を行い、船舶の床、腰部、頭部における加速度、角加速度を統一して評価した。

加速度、角速度の座標変換は、式(1)、式(2)を用いて行った。式(1)中の $\dot{u}_b, \dot{v}_b, \dot{w}_b$ は、座標系 $G - xyz$ における x, y, z 方向の加速度を、 $\dot{u}_o, \dot{v}_o, \dot{w}_o$ は、座標系 $O - X_0 Y_0 Z_0$ における X_0, Y_0, Z_0 方向の加速度を表している。式(2)中の p_b, q_b, r_b は、座標系 $G - xyz$ における x, y, z 軸まわりの角速度を、 p_o, q_o, r_o は、座標系 $O - X_0 Y_0 Z_0$ における X_0, Y_0, Z_0 軸まわりの角速度を表している。 ϕ は x 軸まわりの $X_0 - Y_0$ 平面に対する傾斜角を、 θ は y 軸まわりの $X_0 - Y_0$ 平面に対する傾斜角を、 ψ は X_0 軸からみた x 軸の方位を表す。但し X_0 軸は、常に船舶の床に設置された 3 軸方位角センサの x 軸と同じ方位とした。式(1)、式(2)中の s, c は、それぞれ \sin, \cos の省略形である。角加速度は、角速度を微分することにより算出した。

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_o \\ \dot{v}_o \\ \dot{w}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta s\phi & -c\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{v}_b \\ \dot{w}_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} p_o \\ q_o \\ r_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta s\phi & -c\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_b \\ q_b \\ r_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. 結果

3-1 船舶動揺に対する生体の動作

3 軸方位角センサを用いて計測した加速度、角加速度の周波数解析を行った結果、低周波成分に船舶動揺と、それに対する生体の反応があることがわかった。そこで、カットオフ周波数 5Hz のローパスフィルタを適用した加速度、角加速度について、その強度を表す実効値を、式(3)により、2048 サンプル (20.48s) のデータを用いて算出し、各計測部位の値との比較を行った。被験者 (49 歳, 男性) の頭部および船舶の床の実効値の時系列波形を Fig.5 に示す。

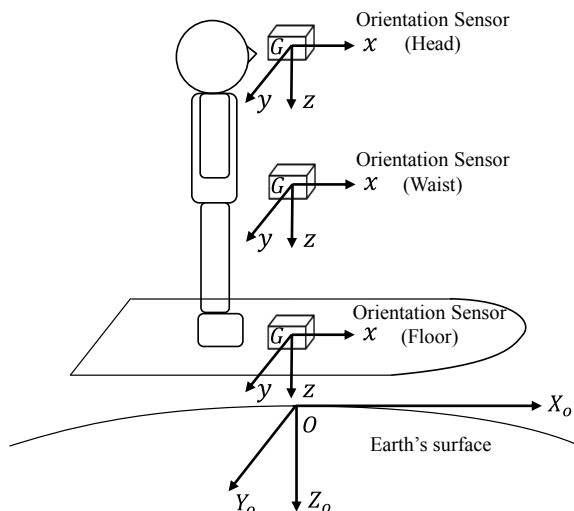


Fig.4 A frame of reference

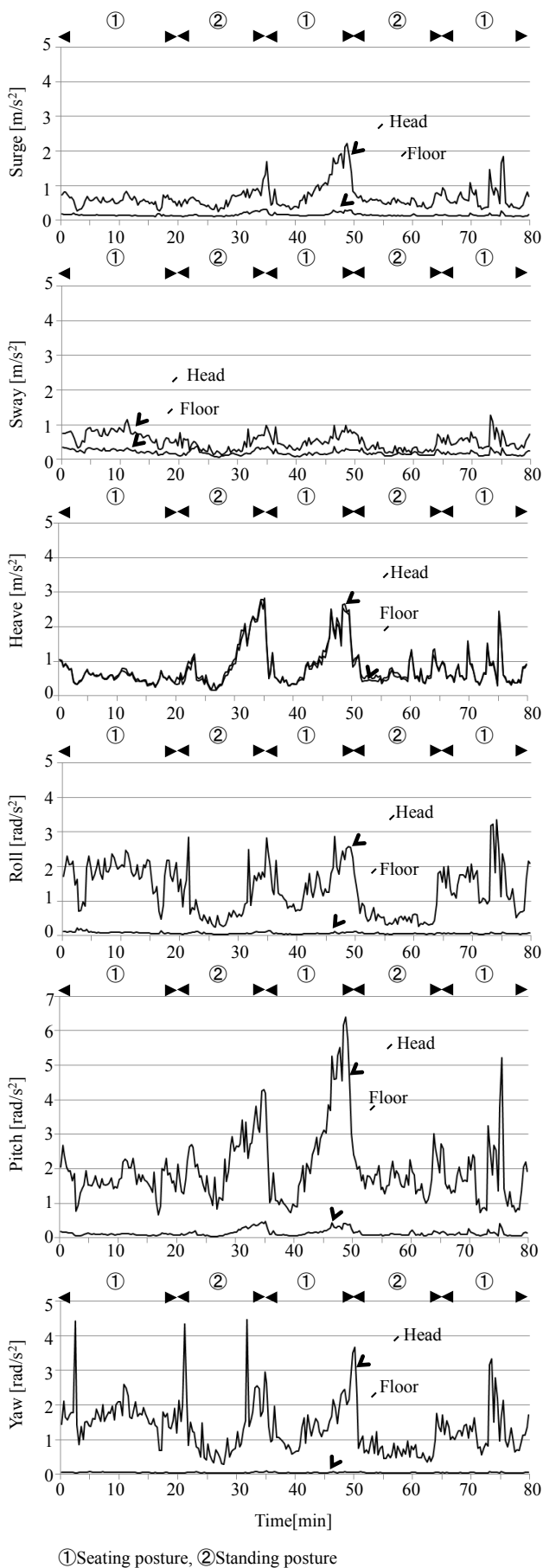


Fig.5 Acceleration and Angular Acceleration (RMS)

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i)^2} \tag{3}$$

船舶の床に、生体と同様な間接構造を持たない長さ 1.6m の棒を立て、床から 0.9m, 1.6m の所に 3 軸方位角センサを設置し、生体と同様の条件で、加速度、角加速度の計測を行った。生体と棒で計測した加速度、角加速度の比較は、実効値 20 データ (409.60s) の平均値、分散を算出することで行った。算出結果の一例について、立位姿勢時の被験者 (49 歳、男性) のデータを Fig.6 に、棒のデータを Fig.7 に示す。生体の実効値のデータでは、Fig.5 と同様に、腰部や頭部では、船舶の床とは異なる揺れが発生している様子が観察され、特に角加速度において顕著であることがわかった。

3-2 船舶動揺に対する生体反応

海上実験における被験者の心拍数とエネルギー代謝量の一例を Fig.8 に、陸上実験における被験者の心拍数とエネルギー代謝量の一例を Fig.9 に示す。図中①は座位姿勢、②は立位姿勢、③は 30 回/min の踏み台昇降運動、④は 40 回/min の踏み台昇降運動、⑤は 50 回/min の踏み台昇降運動の状態を示している。船舶走行時においては、心拍数、エネルギー代謝量が、座位姿勢に比べて立位姿勢の方が大きいことを示している。一方、陸上においては、心拍数、エネルギー代謝量が、姿勢による変化が殆ど無く、踏み台昇降運動時の心拍数、エネルギー代謝量が、船舶走行時の立位姿勢に匹敵することがわかった。これは、他の被験者の実験においても類似の結果が示された⁽²⁾。

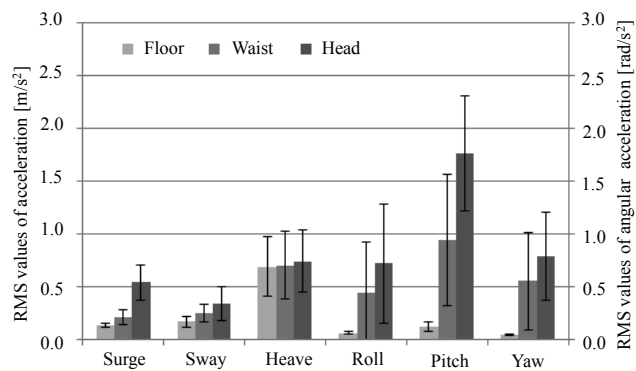


Fig.6 Acceleration and Angular Acceleration of a Human (RMS)

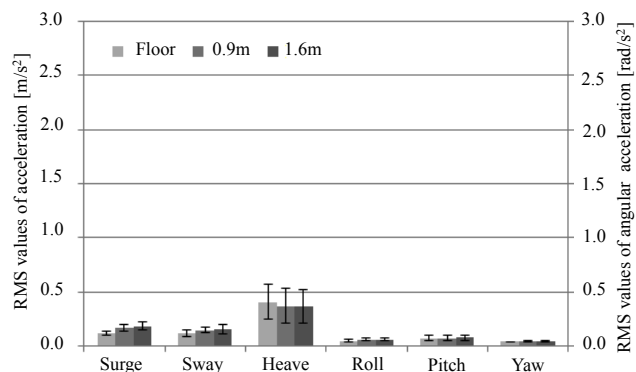


Fig.7 Acceleration and Angular Acceleration of a Stick (RMS)

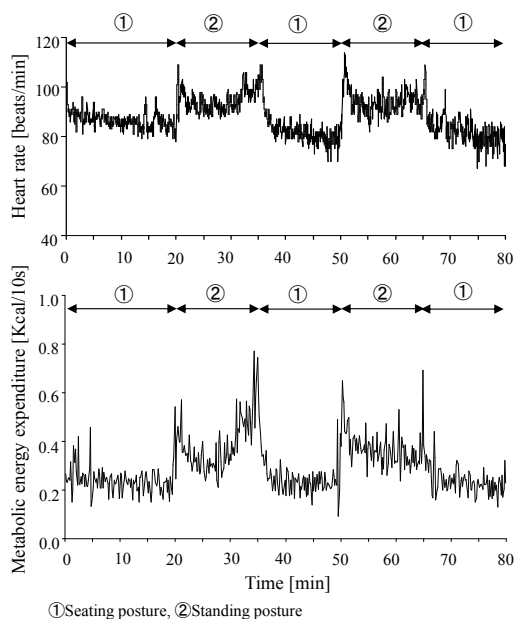


Fig.8 Heart Rate and Metabolic Energy Expenditure on a Craft

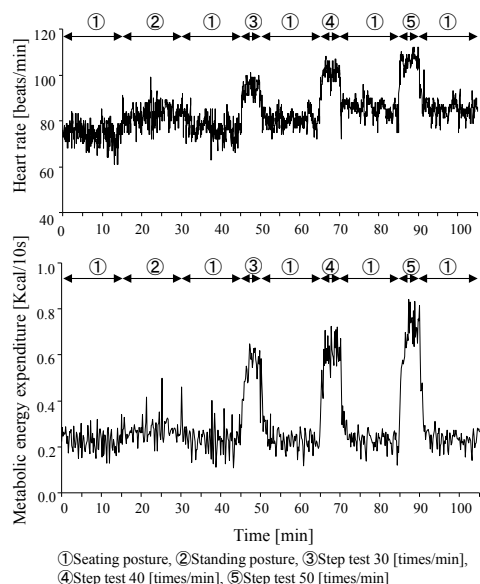


Fig. 9 Heart Rate and Metabolic Energy Expenditure on Load

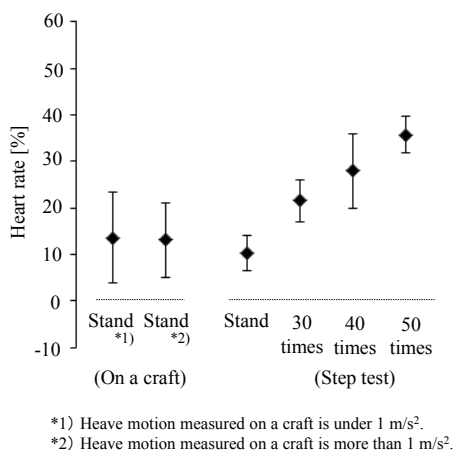


Fig.10 Rate of Increase of Heart Rate

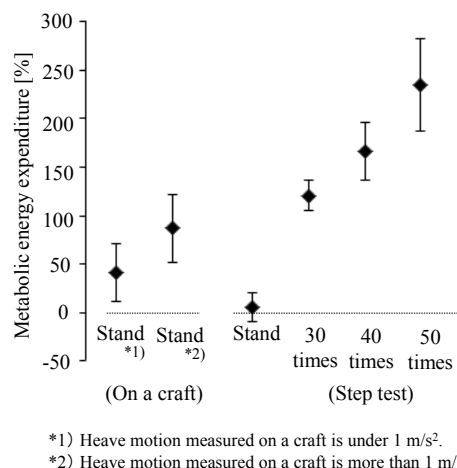


Fig.11 Rate of Increase of Metabolic Energy Expenditure

船舶運航時、船舶床の上下方向の加速度が 1m/s^2 未満である時の座位姿勢における心拍数、エネルギー代謝量を基準に、次の状態を比較対象として、心拍数、エネルギー代謝量の増加率を算出した。比較対象は、船舶運航時における船舶床の上下方向の加速度が 1m/s^2 未満の場合の立位姿勢、同加速度が 1m/s^2 以上の場合の立位姿勢、陸上における立位姿勢、踏み台昇降運動の 30 回/min、40 回/min、50 回/min の状態とした。心拍数の増加率を Fig. 10、エネルギー代謝量の増加率を Fig. 11 に示す。なお、各増加率算出には、海上実験が 10 例、陸上実験が 11 例のデータを用いた。船舶動揺が大きい場合は、陸上における 30 回/min の踏み台昇降運動に近い代謝エネルギーが消費されていることがわかった⁽³⁾。

4. 考察・まとめ

船舶上では、生体が、船舶動揺に対して無意識で行う姿勢制御によって、陸上における 30 回/min 程度の踏み台昇降運動に近い代謝エネルギーが消費されていることがわかった。一方、同時に計測した唾液アミラーゼや、血中乳酸値については、明確な変化が確認できていない。船舶上では、生体の姿勢制御によって持続的に軽度の運動が行われ、かつ平衡感覚を司る頭部に対して、姿勢制御による上体の揺れによって持続的に刺激が加えられている状況にあると推察される。このことは、生体の神経系に対して、陸上とは異なる刺激を与えていることが予想される。

今後、心拍変動の周波数解析などにより、自律神経系などの生体の調節機能の影響を解析し、船舶動揺による姿勢制御が生体に与える影響について解明を目指す。

参考文献

- (1) 井上欣三, 災害時医療支援船構想-これまで・これから-, 東日本大震災検討会講演資料集, (社)日本航海学会, pp. 57-68, 2011.
- (2) 坂牧孝規, 土井根礼音, 瀬田広明, 伊藤政光, 河村剛史, 福井康裕, 小型船舶の乗船者を対象とした疲労度計測のための基礎的研究, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会2011講演要旨集, 86, 同CD-ROM版論文集, pp. 03-1-1-03-1-2, 2011.
- (3) 土井根礼音, 坂牧孝規, 瀬田広明, 伊藤政光, 福井裕輝, 河村剛史, 本間章彦, 福井康裕, 小型船舶乗船者の生体信号変動メカニズムの解明, 第21回ライフサポート学会フロンティア講演会予稿集, p. 58, 2013.