

水中（弱重力）環境での立位姿勢調節 ～重心動揺と筋活動の対応関係を中心に～

Postural control strategy under water environment

○井原壽一（芝浦工業大学） 山本紳一郎（芝浦工業大学） 河島則天（国立リハ研）

Hisakazu IHARA, Shibaura Institute of Technology

Shin-ichiro YAMAMOTO, Shibaura Institute of Technology

Noritaka KAWASHIMA, National Rehab Center for Persons with Disabilities, Japan

Abstract: We here attempted to characterize postural control strategy under water environment. Our hypothesis was that viscosity-dependent resistance and reduction of the gravity effect through buoyancy would change the postural control strategy. The experiment was established under three different water height conditions. Center of pressure (CoP), electromyographic (EMG) activity of lower limb muscles and position of markers placed on landmarks of lower limbs were recorded. The plantar flexor muscle activity and the relationship CoP and plantar flexor muscle activity under water condition was reduced compared with that on ground. In addition, profound time shift was found between CoP and pelvis under water environment. Our results suggest that buoyancy affect to reduce amount of anti-gravity muscle activity in plantar-flexors and viscosity-dependent resistance alter muscle activation pattern in response to postural sway. It is likely that compensatory descending motor command is required to maintain upright standing posture in water.

Key Words: Postural control strategy, Under water environment, Buoyancy, Viscosity-dependent resistance

1. 背景・目的

立位姿勢の調節は明確な意図を必要とせず半ば自律的に行われる。外部環境の変化や運動課題が課せられた場合には、高位中枢系からの随意的な調節が重畳される事によって運動出力を適切に調節している。水中環境での立位姿勢は、重力場が浮力によって軽減され、かつ速度依存性の水抵抗によって陸上とは異なる調節様式となるものと予測できる。水中環境での立位姿勢調節に関する先行研究では、主に浮力による弱重力作用に焦点を充てており、水抵抗の影響について検討したものは少ない。本研究では水中環境での立位姿勢保持中の下肢筋活動、キネマティクス、床反力計測を実施し、この結果から水中環境が立位姿勢調節に及ぼす影響を詳細に検討することを目的とした。

2. 実験方法

本研究では、静止立位実験と前後動揺実験の2つの実験を行った。静止立位実験では、浮力に焦点を充て水中環境下における自然な立位姿勢調節の変化に着目し、閉眼の静止立位を30秒間保持するよう指示した。前後動揺実験では、随意運動によって水抵抗が立位姿勢調節に及ぼす影響に着目し、被験者の快適な動揺周期と動揺範囲で前後動揺を行うよう指示した。

2-1 実験システム

本実験では水中環境下における3次元動作解析を可能にするシステム構築を行った。具体的には、被験者の下肢標点13ヶ所にLEDマーカーを貼付し、マーカーの座標データを3次元動作解析システム(OptiTrack, Natural Point社製, U.S.)を用いてサンプリング周波数100[Hz]で取得した。立位姿勢中の筋活動電位(EMG)を前脛骨筋(TA)、内側腓腹筋(Gas)、ヒラメ筋(Sol)から導出し、サンプリング周波数1000[Hz]で記録した。同時に水中の床面に設置したフォースプレート(9253B11, Kistler社製, Japan)から得られたデータをサンプリング周波数1000[Hz]で計測した。

3. 実験結果

3-1 静止立位実験

Figure.2に各条件下における筋活動、足圧中心(center of pressure: CoP)の典型例を示す。立位姿勢の振る舞いを示すCoPの動揺範囲は陸上に比べて水中環境では姿勢の動揺が増加した(Fig.3 A)。下腿筋活動は、抗重力筋であるヒラメ筋の筋活動量が水中において有意に減少した(Fig.3 B)。これらの結果を踏まえて、筋活動とCoPの対応関係について検討するため相互相関解析を用いて2つの変数の関連性を定量的に評価した(Fig.3 C)。

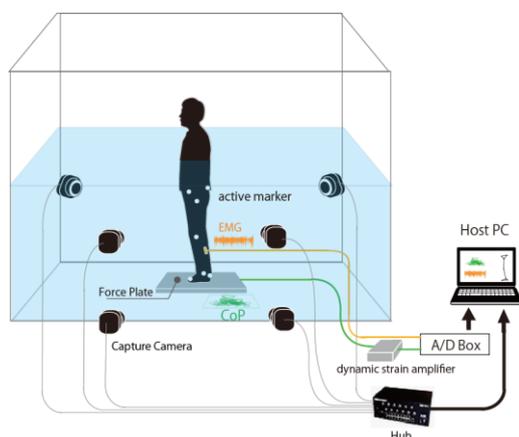


Fig. 1 Experimental set-up

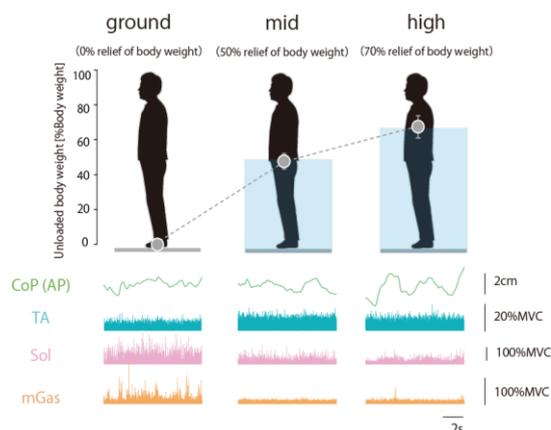


Fig. 2 Representative example of CoP and EMG (Sol, mGas, TA) during quiet standing under three different conditions

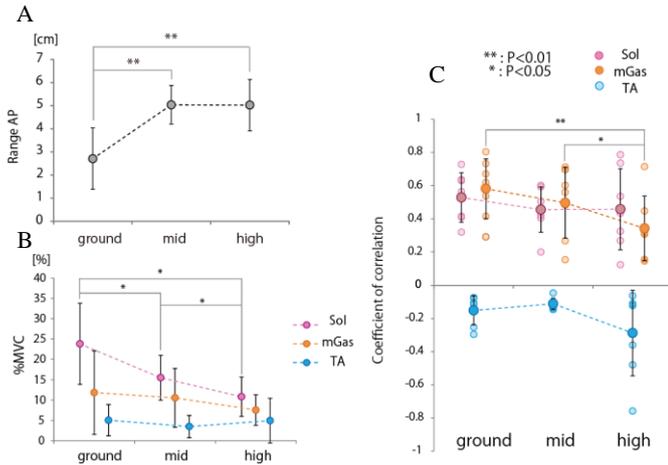


Fig. 3 A: Range of CoP in AP direction B: Mean of EMG (Sol, mGas, TA) C: Relationship between CoP and EMG (Sol, mGas, TA) which was calculated by cross-correlation analysis

陸上においては、CoPと足関節底屈筋群であるヒラメ筋と腓腹筋の関連性が高い、一方で水中環境においてはCoPと足関節底屈筋群の関連性が有意に減少し、CoPと前脛骨筋の関連性が増加する傾向がみられた。

3-2 前後動揺実験

Figure. 4 Aに各条件の下肢キネマティクス計測によって得たスティックピクチャーを示す。Figure.4 BにCoPの典型例を示す。CoPから姿勢の動揺周期数と動揺範囲算出したところ (Fig.4 C), 動揺周期は水位の上昇に伴い減少する一方で、動揺範囲は変化が認められなかった。この結果から水位の上昇に伴って水抵抗が作用した結果、姿勢動揺の速度が減少したと考えられる。次に、筋活動とCoPおよび下肢キネマティクスの変化の関連性に着目するため大転子マーカーの前後変位の切り替わり時点を基準とした加算平均波形をFigure.5 Aに示した。筋活動とCoPが、姿勢の変位(大転子の変位)と一定の時間差を示していることがこの結果から窺える。この時間差を定量的に評価するために相互相関解析を用いて、筋活動を基準としたCoPと姿勢変化の時間差を算出した (Fig.5 B)。陸上においては、CoPと姿勢変位に時間差はない一方で、水中環境下においては、CoPと姿勢変位に時間差が生じ、かつ姿勢変位の後に筋活動が生じる結果を示した。

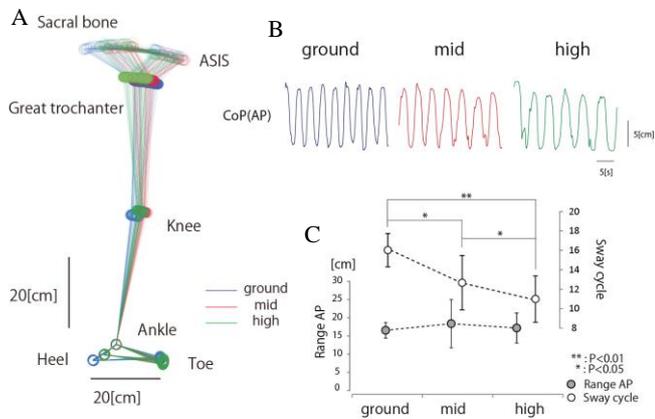


Fig. 4 A: Stick diagram B: CoP displacement during voluntary sway under three different environmental conditions C: Sway cycle and Range obtained from CoP displacement

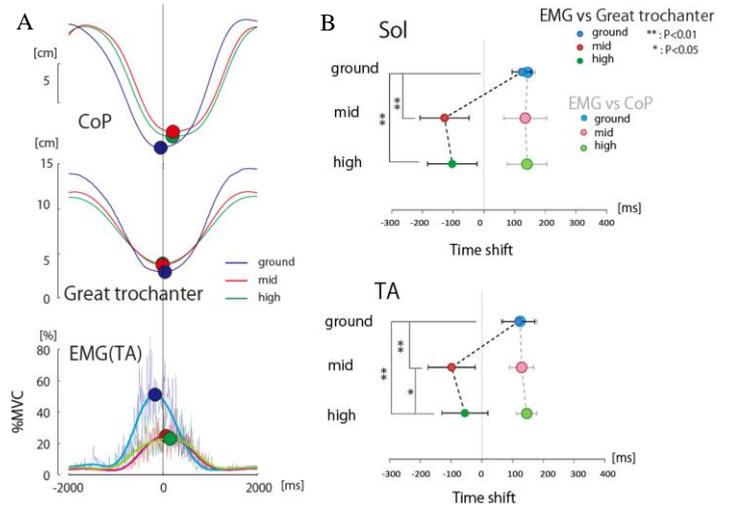


Fig. 5 A: Typical ensemble averaging data of CoP, movement of pelvis and EMG (Sol, TA) B: Relationship among CoP, movement of pelvis and EMG (Sol, TA) which was calculated by cross-correlation analysis on the basis of EMG

4. 考察

本研究では水中環境が立位姿勢に調節に及ぼす影響を検討するため、①浮力によって生じた自然な姿勢調節の変化に着目した静止立位実験、②随意的な前後方向への姿勢動揺によって生じる水抵抗の影響を検討した前後動揺実験を行い、双方の結果から水中環境における姿勢調節機序について検討することを目的とした。

静止立位実験の結果より、水中環境において抗重力筋であるヒラメ筋の筋活動量が減少すると共に、CoPの動揺に対し足関節底屈筋群の関連性が減少し、前脛骨筋との関連性が増加する傾向にあった。この結果は、浮力による重力場の減少によって姿勢制御に対する足関節底屈筋群の貢献度が減少したことを示している。前後動揺実験の結果より、水中環境では速度依存性的水抵抗が加わることによって、姿勢の動揺の特性が変化することが示された。さらに水中環境では姿勢変位とCoPの間に時間差が生じ、姿勢の変化と筋活動の時間的対応関係が変化したことから、水中では、浮力や水抵抗によって陸上とは異なる環境制約(物理的特性)が生じているものと考えられた。

先行研究において、前脛骨筋では皮質レベルでの神経制御により筋の応答性を高めることで外乱に対応し、立位姿勢の安定を図っているという報告⁽³⁾されていることを踏まえ、水中環境における立位姿勢調節は反射経路を介した自律的な神経調節の貢献度が減少する一方で、補償的に高位中枢の関与が増加する可能性が示唆された。

参考文献

- (1) Dietz V., et al., Human postural reflexes and gravity – an under water simulation, *Neuroscience Letters*, 106(3), 350-355, 1989.
- (2) Nakazawa K., et al., Effects of loading and unloading of lower limb joints on the soleus H-reflex in standing humans, *Clinical Neurophysiology*, 115(6), 1296-1304 2004.
- (3) Obata H, et al., Enhanced excitability of the corticospinal pathway of the ankle extensor and flexor muscles during standing in humans, *Exp Brain Res*, 197, 207-213, 2009