

水による体性感覚への刺激が 立位バランス調節機能に与える効果 ～水中運動の神経生理学的効果の検証～

神戸大学大学院 木村 哲也
(共同研究者) 京都大学大学院 神崎 素樹
立命館大学 塩澤 成弘

Effect of Water Immersion of Fingertip Somatic Sensation on Quiet Bipedal Stance: A Basic Study for Neurophysiological Effect of Water Exercise

by

Tetsuya Kimura
*Graduate School of Human Development and Environment,
Kobe University*
Motoki Kouzaki
*Graduate School of Human and Environmental Studies,
Kyoto University*
Naruhito Shiozawa
Faculty of Sport and Health Science, Ritsumeikan University

ABSTRACT

Studies have shown that a fingertip lightly touching a stable surface reduces postural sway, by providing additional tactile feedback information to the postural control system. In the present study, we examined whether or not water immersion of a fingertip enhances the postural control system during quiet standing. Eight young and nine elderly subjects maintained quiet standing for 40s with the index fingertip in the water (water touch, WT) or on the stable surface (light touch, LT). The temperature

of water in the WT condition was 20, 30, or 40°C for young subjects and 30°C for elderly subjects. In the control condition (CON), a no touch trial, the subject quietly stood on a force platform for 40s, with their arms by their sides. In the young subjects, eight trials were conducted for each condition; while the elderly subjects completed three trials for each condition. The results showed that, in the young subjects, the mean velocities of the foot center of pressure (CoP) in the anteroposterior (AP) direction was significantly reduced in the LT and WT at individual optimal temperature, compared to that in the CON condition ($P<0.05$). On the other hand, in the elderly subjects, the power of low-frequency CoP sway (below 1Hz) in the AP direction significantly decreased at LT and WT conditions ($P<0.05$). These results indicate that WT can enhance the postural control system, as well as the LT. This promises the neurophysiological effect of water exercise on the postural control system.

要 旨

本研究は水中運動における水と皮膚の接触による体性感覚フィードバック情報の入力、立位バランス調節システムに与える効果について実験的に検証した。若年者8名、高齢者9名を被験者とし、床反力計上にて40秒間の静的立位課題を行った。若年者は、左手示指をピーカー内の水中(20°C, 30°C, 40°C)へ浸すWT条件と、固定点に示指で軽く触れるライトタッチ(LT)条件、何も触れないコントロール(CON)条件の5条件、高齢者はWT30°C, LT, CONの3条件で測定を実施した。その結果、若年者群ではLT条件に加え、至適温度でのWT条件において、足圧中心位置(CoP)軌跡長が、CON条件に比べて有意に減少した($P<0.05$)。高齢者ではLT条件、WT条件ともにCoP揺らぎの低周波成分(1Hz以下)が有意に減少した($P<0.05$)。以上より、水からの体性感覚フィードバック情報により、立位バランス制御機能が向上することが示された。本研究の結果は、水中運動の立位バランスに対する神経生理学的効果を期待させるものである。

緒 言

立位バランス調節機能の低下は、高齢者の転倒の生理学要因である。加齢により骨格筋量が減少する為、高齢者の転倒予防策として一般的に筋量・最大筋力等の力学的要因の改善が着目される。水中歩行などの水中運動は、関節への負担が少ない点で高齢者の運動に適しており、近年我が国においても高齢者の水中運動への参加が盛んになってきている。しかし、水の抵抗による負荷など一定のトレーニング効果は期待されるものの、水中では浮力による抗重力筋への負荷が軽減するため、抗重力筋の筋力増加による立位バランス調節機能の向上に関しては検討の余地がある。

一方、立位バランス調節機能の低下は、力学的要因のみではなく、筋の活動調節の機能低下すなわち立位バランス制御システムの神経要因にも起因することが近年指摘されている¹⁾。また、立位時に手指先で固定点を軽く触れることで、指先触覚からのフィードバック情報により立位バランスが向上することから、体性感覚が立位バランス制御システムにおける身体動揺情報のフィードバック要素として大きく貢献することが、近年示唆さ

れている^{2,3,4)}。さらに、物理学概念である確率共振を応用し、体性感覚器に皮膚上から微弱ノイズ刺激を印加して体性感覚機能を人工的に高めると、立位バランスが向上することが明らかとなっている^{5,6)}。これら先行研究から、体性感覚フィードバック要素の観点からも立位バランス調節機能の改善が期待される。

以上の背景を合わせて考察し、「水中運動において、運動参加者の身体各セグメントへの水の抵抗による体性感覚からの身体動揺の検知に加え、皮膚に衝突する水分子の運動がノイズ刺激と同等に体性感覚を高め、これらから相乗的に立位バランス調節システムの体性感覚フィードバック要素が効果的に刺激される」と仮説を立てた。この仮説を検証するため、実験的に体性感覚器を水中に暴露した際の、立位バランスに対する効果とそのメカニズムを分析し、水中運動の立位バランス調節機能に対する神経生理学的効果を検討することを目的とした。若年者及び高齢者に対して測定を行うことにより、体性感覚器の水への暴露における効果に関して、若年者と高齢者の一致点と相違点を検証した。

1. 研究方法

1. 1 被験者

若年者 8 名 (20.6 (1.8) 才; 平均値 (標準偏差)), 高齢者 9 名 (68.1 (6.5) 才) を対象として測定を実施した。本研究はヘルシンキ宣言に基づき実施した。本研究の実施にあたり、神戸大学大学院人間発達環境学研究科研究倫理審査委員会の承認を事前に得た。全ての被験者は本研究の内容及び目的に関して口頭と文書で十分な説明を受けた後、インフォームドコンセントに署名を行った。

1. 2 実験方法

被験者は、床反力計 (N5901, Sanei) 上に両足で立ち、静的立位課題を行った。両足は平行にし

て立ち、踵間は 15cm とした。測定は全て、若年者は閉眼条件、高齢者は開眼条件とした。若年者において、水からのフィードバック情報が立位バランスを向上させることの検討、及び至適な温度条件の決定を行うために、(1) 左手示指を水中 (20℃) へ浸す (20℃ 水タッチ条件 (WT20)), (2) 左手示指を水中 (30℃) へ浸す (WT30), (3) 左手示指を水中 (40℃) へ浸す (WT40), (4) 左手示指を水に浸さずに固定点に鉛直方向に 1N 以下の力で触れる (ライトタッチ (LT) 条件; 図 1), (5) 何も触れない (コントロール (CON) 条件; 図 1), の 5 条件にて静的立位保持課題を行った。

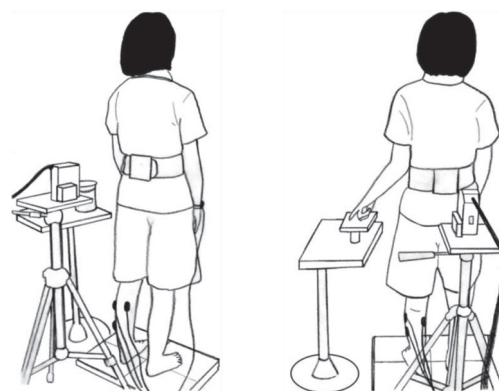


図 1 Diagram of the experimental setup for CON (left) and LT (right) conditions.

各試行は 40 秒間とし、各条件 8 試行、合計 40 試行をランダム順序で行った。水へ示指を浸す条件は、被験者の左側の腰の高さに設置したビーカーの水中に、左手の示指を入れてもらい、その際ビーカーに触れないこと、指の付け根までは水に入れないことを指示し、検者が測定中モニタリングした (図 2)。測定中の水温は温度センサ (DIGI-Meter2, Kotobuki) により記録した。一方、LT 条件においては、同じく被験者の左側の腰の高さに設置した固定板の上に左手示指で軽く触れてもらい、ロードセル (LUR-A-50NSA1, Kyowa) で測定した鉛直方向の接触力が 1N を超えないように被験者に指示し、測定中は検者がモニタリングし

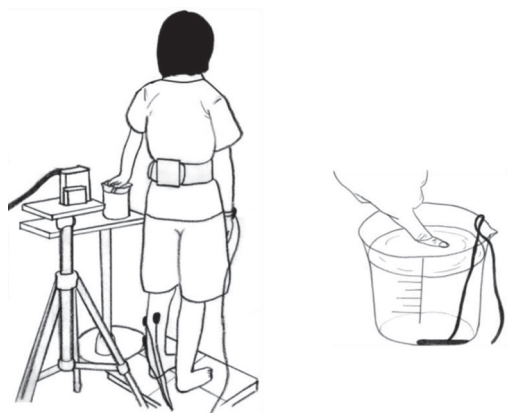


図2 Diagram of the experimental setup for WT condition.
The right illustration is anterior view of fingertip water immersion.

た^{2,3)}(図1).

各試行中, 床反力計より足圧中心位置 (foot center of pressure, CoP) の動揺を測定した. 高解像度レーザー変位計 (LK-500, Keyence) により, 腰部 (L3) の前後動揺を記録し, これを身体重心位置 (center of mass, CoM) の前後動揺と見なした. これらから, 各実験条件における立位バランス調節機能の変化を測定した. さらに若年者においては, 筋電図法 (SX230-1000, Biometrics) を用いて, 静的二足立位時の主要な活動筋である下腿三頭筋 (外側腓腹筋 (LG), 内側腓腹筋 (MG), ヒラメ筋 (SOL)) 及び前脛骨筋 (TA) の神経活動を記録した. 筋電図法は双極誘導, 20-460Hz のフィルタリング, 2.0cm の電極間距離であり, 電極の直径は 1.0cm であった. 各時系列データは 1kHz にてサンプリングし (Powerlab 16SP, AD Instruments), ハードディスクに保存した. 実験室の室温は約 27 度, 湿度は約 50% に調節した.

一方, 高齢者は若年者と同様の実験設定にて測定を行ったが, CON 条件, LT 条件, WT30 条件の 3 条件のみとし, 各条件で 3 試行ずつ, 計 9 試行ランダム順序で測定を行った.

1. 3 解析

1. 3. 1 身体動揺の時間領域・周波数領域における定量化

静的二足立位時においては, 前後方向の身体動揺が主であるため, 本研究は前後方向の動揺のみに着目した. CoP は FIR フィルタにて 15Hz で高域遮断し, CoM は FIR フィルタにて 4Hz で高域遮断した. さらに, CoM を 2 階微分することにより, 腰部にかかる加速度時系列データ (CoMACC) を算出した (図 3). 以上より処理

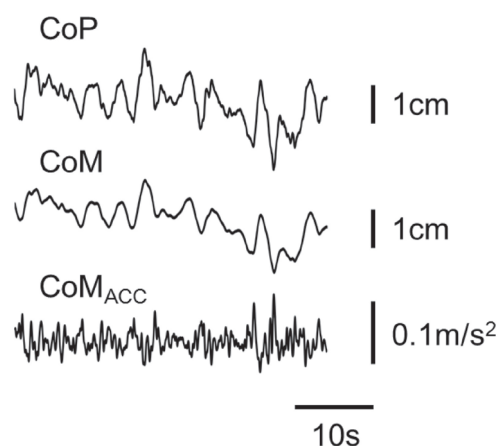


図3 Example time series of foot center of pressure (CoP), center of mass (CoM), and second derivative of CoM (CoMACC) in a young subject.

された各 40 秒の CoP, CoM, CoMACC 時系列データに関して, (1) 単位時間あたり軌跡長, (2) 平均振幅, (3) 最大振幅, (4) 平均 2 乗振幅値を求めた.

さらに, CoP の時系列データに関して, 高速フーリエ変換 (4096 point) を行い, 得られたパワースペクトル密度に関して, 1Hz 以下の低周波成分のパワーの総和 (LF 成分) と 1 ~ 15Hz の高周波成分のパワーの総和 (HF 成分) を求めた⁵⁾. 以上の各測定値に関して, 各被験者において測定条件ごとの平均値を求めた.

1. 3. 2 立位バランスフィードバック制御システムの時間要素の検証

静的立位バランス制御システムは、身体動揺フィードバック情報（入力）に応じた抗重力筋活動（出力）と捉えることができる。そこで、フィードバックシステム入出力の時間要素を評価するために、若年者において CoM 動揺（入力）と下腿三頭筋活動（出力）の時空間関連性を定量化した⁷⁾。各筋から得られた 40 秒間の筋電図時系列データは全波整流した後、4Hz の FIR フィルタにて高域遮断を行った。同様に、CoM 時系列データも 4Hz で高域遮断した。そして、各筋の筋電図と CoM の時空間的関連性を、両変数間の相互相関関数（Cross correlation function, CCF）から定量化した。CCF から、両時系列の時空間的関連性の指標である相互相関係数（ $R_{xy}(\tau)$ ）を求めた。2 つの時系列 $x(t)$, $y(t)$ 間の CCF（ $C_{xy}(\tau)$ ）、及び $R_{xy}(\tau)$ は以下の式で定義される⁸⁾。

$$C_{xy}(\tau) = \frac{x(t) y(t + \tau)}{\sqrt{x^2} \sqrt{y^2}}$$

$$R_{xy}(\tau) = C_{xy}(\tau) / (\sqrt{x^2} \sqrt{y^2})$$

τ は時系列間の時間ずれを示す。本研究では $x(t)$ を CoM, $y(t)$ を筋電図とし、 $-1000\text{ms} \leq \tau \leq 1000\text{ms}$ の間で 1ms の分解能で CCF を算出した。 $R_{xy}(\tau)$ は、各被験者において同一条件間ごとにアンサンブル平均した。各条件に対してアンサンブル平均された $R_{xy}(\tau)$ に関して、 $-1000\text{ms} \leq \tau \leq 1000\text{ms}$ の範囲でピーク値（ R_{xy_peak} ）を求め、 R_{xy_peak} を与える τ を時間ずれ（Time shift, TS）と定義した。

1. 3. 3 統計

若年者群では 5 条件間（CON, LT, WT20, WT30, WT40）、高齢者群では 3 条件間（CON, LT, WT30）の各測定値に対し、一元配置分散分析を行った。主効果が認められた場合、CON 条件を対照とした多重比較（Dunnett 法）を行った。有意水準は 5% とした。尚、本文、図表における

データは平均値（標準偏差）で示した。

2. 研究結果

2. 1 水温及び示指体積

各測定時の平均水温は、若年者において、WT20, WT30, WT40 の各条件でそれぞれ 20.6 (0.3) °C, 29.9 (0.3) °C, 39.9 (0.6) °C であった。高齢者の WT30 条件では、30.3 (0.8) °C であった。また、各測定後に、被験者にビーカー内の水に示指を付け根まで浸してもらい、その時のビーカー全体の重さの変化から、各被験者の示指の体積を推定した。その結果、若年者では 11.8 (3.0) cm^3 、高齢者では 14.0 (3.4) cm^3 であった。

2. 2 身体動揺の時間領域・周波数領域解析

各静的立位条件における立位バランス制御機能の変化を反映する指標として、CoP 動揺、CoM 動揺、CoM2 階微分時系列に関し、時間領域及び周波数領域での定量化を行った。若年者の結果を表 1 に示す。CoP に関して、単位時間あたり軌跡長の上に主効果が認められ（ $P < 0.05$ ）、CoM に関しても同じ結果を示した。さらに、CON 条件との多重比較では、LT 条件で CoP, CoM とともに軌跡長が有意に減少し（ $P < 0.05$ ）、WT20 条件では CoM について軌跡長が減少する傾向が見られた（ $P = 0.089$ ）。一方、腰部の加速度を反映する CoM2 階微分時系列に関しては、全ての測定値で主効果が認められ（ $P < 0.05$ ）、CON 条件と比較して LT 条件で有意に減少した（ $P < 0.05$ ）。一方で、WT 条件ではどの温度においても CON 条件との差は認められなかった。

そこで、WT 条件においては、各被験者に至適温度が存在すると仮定し、CoP の単位時間あたり軌跡長に関して、各被験者において最も値が小さかった条件を各被験者の至適温度条件（WT Optimal, WT-O）と定義し、CON 条件, LT 条件, WT-O 条件の 3 条件間で、CoP 軌跡長に関して分

表1 Results of the postural sway measures at each condition in young subjects. Values are group mean (S.D.).

			CON	LT	WT20	WT30	WT40	ANOVA
Mean velocity	CoP (cm/s)		0.681(0.181)	0.597(0.137)#	0.641(0.152)	0.663(0.157)	0.668(0.179)	$P<0.05$
	CoM (cm/s)		0.289(0.111)	0.249(0.074)#	0.264(0.083)	0.274(0.088)	0.270(0.077)	$P<0.05$
Mean Amplitude	CoP (cm)		0.363(0.110)	0.323(0.077)	0.364(0.104)	0.363(0.105)	0.354(0.072)	$N.S.$
	CoM (cm)		0.402(0.167)	0.340(0.097)	0.387(0.130)	0.383(0.143)	0.369(0.092)	$N.S.$
	CoM _{Acc} (m/s ²)		0.010(0.003)	0.009(0.002)#	0.010(0.003)	0.010(0.003)	0.010(0.003)	$P<0.05$
Peak-to-peak amplitude	CoP (cm)		2.253(0.739)	1.929(0.440)	2.168(0.560)	2.227(0.665)	2.083(0.399)	$N.S.$
	CoM (cm)		2.082(0.841)	1.753(0.528)	2.013(0.615)	2.011(0.722)	1.869(0.393)	$N.S.$
	CoM _{Acc} (m/s ²)		0.097(0.032)	0.082(0.022)#	0.088(0.030)	0.094(0.032)	0.092(0.028)	$P<0.05$
Root mean square amplitude	CoP (cm)		0.453(0.143)	0.396(0.092)	0.447(0.125)	0.451(0.130)	0.433(0.084)	$N.S.$
	CoM (cm)		0.489(0.202)	0.410(0.116)	0.469(0.156)	0.467(0.171)	0.443(0.103)	$N.S.$
	CoM _{Acc} (m/s ²)		0.013(0.004)	0.012(0.003)#	0.012(0.003)	0.013(0.004)	0.013(0.003)	$P<0.05$
LF Power	CoP (cm ² /Hz)		1.393(0.989)	1.094(0.500)	1.276(0.568)	1.477(0.892)	1.260(0.580)	$N.S.$
HF Power	CoP (cm ² /Hz)		0.032(0.019)	0.024(0.014)	0.030(0.018)	0.029(0.013)	0.033(0.023)	$N.S.$
Rxy_peak	MG		0.269(0.137)	0.298(0.115)	0.257(0.139)	0.312(0.146)	0.329(0.148)	$N.S.$
	SOL		0.330(0.120)	0.283(0.068)	0.313(0.112)	0.320(0.107)	0.324(0.105)	$N.S.$
TS	MG (ms)		-310(120)	-275(100)	-246(90)	-275(79)	-259(89)	$N.S.$
	SOL (ms)		-333(123)	-357(65)	-394(154)	-396(77)	-353(70)	$N.S.$

Significantly different from CON ($P<0.05$).

表2 Results of the postural sway measures at each condition in elderly subjects. Values are group mean (S.D.).

			CON	LT	WT30	ANOVA
Mean velocity	CoP (cm/s)		0.899 (0.459)	0.732 (0.358)#	0.871 (0.502)	$P<0.05$
	CoM (cm/s)		0.260 (0.054)	0.219 (0.062)#	0.245 (0.084)	$P<0.05$
Mean Amplitude	CoP (cm)		0.367 (0.095)	0.292 (0.095)#	0.319 (0.091)	$P<0.05$
	CoM (cm)		0.371 (0.101)	0.299 (0.112)#	0.322 (0.083)	$P<0.05$
	CoM _{Acc} (m/s ²)		0.010 (0.002)	0.009 (0.002)#	0.010 (0.003)	$P<0.05$
Peak-to-peak amplitude	CoP (cm)		2.178 (0.525)	1.724 (0.497)#	1.986 (0.516)	$P<0.05$
	CoM (cm)		1.822 (0.410)	1.504 (0.484)#	1.694 (0.388)	$P<0.05$
	CoM _{Acc} (m/s ²)		0.098 (0.028)	0.071 (0.020)#	0.093 (0.032)	$P<0.05$
Root mean square amplitude	CoP (cm)		0.448 (0.111)	0.357 (0.112)#	0.393 (0.106)	$P<0.05$
	CoM (cm)		0.451 (0.116)	0.362 (0.131)#	0.395 (0.097)	$P<0.05$
	CoM _{Acc} (m/s ²)		0.013 (0.003)	0.011 (0.003)#	0.013 (0.004)	$P<0.05$
LF Power	CoP (cm ² /Hz)		1.641 (0.950)	0.893 (0.580)#	1.023 (0.541)#	$P<0.05$
HF Power	CoP (cm ² /Hz)		0.061 (0.052)	0.030 (0.027)#	0.048 (0.057)	$P<0.05$

Significantly different from CON ($P<0.05$).

散分析と多重比較を行った(図4)。被験者8名中、至適温度は20℃が4名、30℃が2名、40℃が2名であった。統計分析の結果、3条件間で有意な主効果が認められ ($P<0.05$)、CON条件と比較し、LT条件及びWT-O条件でCoP単位時間あたり軌跡長が有意に減少した ($P<0.05$)。これらの結果は至適温度条件において、WTによって立位バランス調節機能が向上したことを示している。

高齢者の結果を表2に示す。各指標について有意な主効果が認められた ($P<0.05$)。多重比較においても、全ての指標でLT条件はCON条件より有意な減少を示した ($P<0.05$)。一方、WT30条件において、CoP揺らぎの低周波成分(LF成分)に有意な減少が認められ ($P<0.05$)、CoPの平均振幅 ($P=0.089$)、平均2乗振幅値 ($P=0.092$)

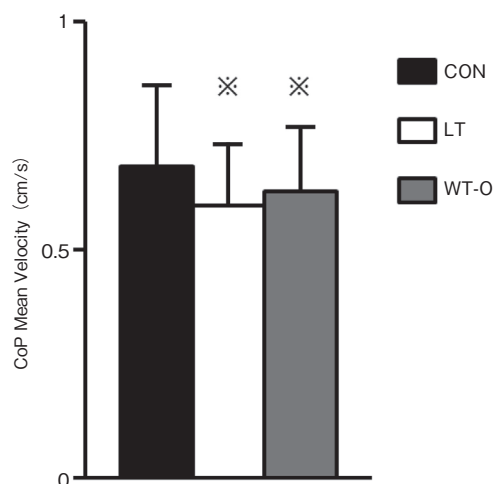


図4 Group data for mean velocity of CoP (CoP total path length/time) at the three conditions, including normal standing (CON), light touch (LT), and immersion into water at optimal temperature (WT-O). * Significantly different from CON ($P<0.05$). The results are expressed as the mean and S.D.

についてはその傾向が見られた。

2. 3 立位バランスフィードバック制御システムの時間要素の検証

若年者において、CoMと各筋の筋電図の相互相関解析より、 R_{xy_peak} とTSを算出した(表1)。CoMの前方への変位を正とすると、COMと全波整流後の筋電図の相互相関関数は正のピークを示す⁷⁾。しかしながら、外側腓腹筋(LG)では6名、ヒラメ筋(SOL)では1名が正のピークを示さなかったため、内側腓腹筋(MG)8名及びSOL7名に対してのみ統計解析を行った。その結果、両筋において R_{xy_peak} 及びTSに条件間で有意な差は認められなかった($P>0.05$)。

3. 考 察

ヒトの二足立位姿勢において、身体重心は狭い支持基底面に対して相対的に高い位置にあり、不安定な状態と捉えることができる。このような不安定なヒトの姿勢は巧みな感覚-運動制御システムで調節されることが明らかとなっており、主に視覚、前庭感覚、体性感覚からのフィードバック情報が統合され、身体動揺に応じて骨格筋への出力が調節される^{9,10)}。従って、これらの感覚器の加齢による機能低下は、立位フィードバック制御に大きな影響をもたらす。これまで、フィードバック情報として視覚と前庭感覚が重要視されていたが、最近になり体性感覚情報の重要な貢献が指摘されている。そこで、体性感覚情報に着目した神経生理学のアプローチによって、安全で効果的な転倒予防が可能になることが期待される。実際に、静的二足立位時に膝関節内の固有感覚に微弱な電気ノイズ刺激を印加することにより、固有感覚の感度が高まり、身体動揺が減少することが明らかになっている⁶⁾。そこで本研究は、「水中運動において、水の抵抗による体性感覚からのフィードバック情報に加え、皮膚に衝突する水分

子の運動がノイズ刺激と同等に体性感覚フィードバック機能をさらに高める」と仮説を立て、実験的に体性感覚器を水中に暴露した際の、立位バランスに対する効果を検討した。

その結果、若年者においては、水温条件に対して一貫した効果は認められなかったものの、至適温度条件を仮定することにより、水による立位バランス制御機能の向上が認められた。しかしながら、その効果はLT条件をさらに高める程度ではなかった。先行研究で、LT条件時に微弱なノイズ振動刺激を指先に印加すると、体性感覚の感度が高まることにより、立位バランス制御機能がLT条件に比べてもさらに高まることが示されている⁵⁾。従って、本研究においても水分子の運動をノイズ刺激と同等とみなし、LT条件よりもさらに身体動揺が減少すると予測していたが、結果は異なるものであった。従って、水への接触は水圧による身体動揺の検知が主に貢献し、体性感覚フィードバック機能を高めると考えられる。

一方、高齢者においてはCoP揺らぎの低周波成分が水への接触により有意に減少した。従って、高齢者に対しても、水からの体性感覚フィードバック情報の効果が認められることが明らかとなった。

また、LTの立位バランスへの効果は、接触力の鉛直成分が1N以下と小さいため力学的なバランス支持ではなく、神経生理学要因であることが明らかにされている^{2,3)}。同様に、本実験において示指の体積が、若年者では11.8 (3.0) cm^3 、高齢者では14.0 (3.4) cm^3 であり、WT条件時には示指は付け根まで水に浸ることはなかった。従って、実測は行っていないが、示指にかかる浮力は1Nを大きく下回っていたと考えられる。すなわち、本研究におけるWT条件もLT条件と同様に指先体性感覚からの身体動揺に関するフィードバック情報による、立位バランス制御機能の向上と捉えることができる。

4. 結 語

本研究の結果、水から体性感覚フィードバック情報を得ることにより、立位バランス制御機能の向上が見られることが示された。本研究の結果は、水中運動における神経生理学的効果を期待させるものである。

謝 辞

本研究の実施に対して助成を賜りました、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます。瀧千波氏（立命館大学大学院）の測定へのご協力に対して、感謝申し上げます。

文 献

- 1) Kouzaki M., Masani K., Akima H., Shirasawa H., Fukuoka H., Kanehisa H., Fukunaga T., Effects of 20-day bed rest with and without strength training on postural sway during quiet standing., *Acta. Physiol.*, **189**, 279-292 (2007)
- 2) Jeka J.J., Light touch contact as a balance aid. *Phys. Ther.*, **77**, 476-487 (1997)
- 3) Kouzaki M., Masani K., Reduced postural sway during quiet standing by light touch is due to finger tactile feedback but not mechanical support. *Exp. Brain. Res.*, **188**, 153-158 (2008)
- 4) 木村哲也, 神崎素樹, 固有感覚系フィードバック情報による歩行バランス向上効果の検証～神経生理学観点による転倒予防を目指して～. デサントスポーツ科学, **32**, 56-63 (2011)
- 5) Kimura T., Kouzaki M., Masani K., Moritani T., Unperceivable noise to active light touch effects on fast postural sway. *Neurosci. Lett.*, **506**, 100-103 (2012)
- 6) Kimura T., Kouzaki M., Electrical noise to a knee joint stabilizes quiet bipedal stance. *Gait. Posture.*, **37**, 634-636 (2013)
- 7) Masani K., Vette A.H., Abe M.O., Nakazawa K., Popovic M.R., Smaller sway size during quiet standing is associated with longer preceding time of motor command to body sway. *Gait. Posture.*, **33**, 14-17 (2011)
- 8) 日野幹雄. スペクトル解析. 朝倉書店 (1977)
- 9) 木村哲也. 体性感覚を生かしたバランス調整能. 体育の科学, **63**, 466-471 (2013)
- 10) Horak F.B., Macpherson J.M., Postural orientation and equilibrium. Rowell LB and Shepherd JT Eds, *Handbook of Physiology: Section 12: Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems*, pp255-292, Oxford University Press (1996)