

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K13113

研究課題名(和文)循環・立位バランス両調節システムの協働効果の解明

研究課題名(英文) Physiological impact of connection between cardiovascular and postural control systems during quiet standing

研究代表者

木村 哲也 (KIMURA, Tetsuya)

神戸大学・人間発達環境学研究科・准教授

研究者番号：60533528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、静的な二足立位姿勢において自然に発生する身体動揺と、それに応じてバランスを維持するための低強度な下腿筋活動が、循環調節に与える効果の大きさ、ならびにその因果関係について実験的に検討を行った。その結果、(1)身体動揺とそれに付随する下腿筋活動が循環調節に実質的に貢献していること、(2)循環動態の変化に応じて身体動揺も変化することが明らかとなった。従って、立位バランス調節システムと循環調節システムが静的立位時には、互いに生理学的な影響を与えていることが新たに明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトの二足立位は不安定な構造であり、立位バランス調節システムが働くことにより姿勢が維持される。一方で、立位時には、重力の影響に対して各組織への血流を維持するために、循環調節システムが働く。二足立位時には、これら2つの調節システムが同時に活動するが、従来互いに独立して機能すると捉えられてきた。一方で近年、両調節システムが双方向に関連している可能性が指摘されているが、その生理学的意義やメカニズムに関して不明な点が多い。これに対し、本研究は両調節システムが生理学的に影響を及ぼし合う可能性を実験的に示したものであり、不明な点が多い立位バランス調節システムの基礎メカニズム解明に貢献しうるものである。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to experimentally determine the physiological impact of spontaneous body sway and corresponding lower leg muscles contractions on the cardiovascular system during quiet standing. The physiological effect of cardiovascular system on the postural control system was also investigated. The results suggested that 1) muscles contractions associated with spontaneous body sway provide substantial impact on the cardiovascular system during quiet standing; 2) the changes in circulation dynamics affect the postural control in this stance. These results support the physiological impact of connection between cardiovascular and postural control systems during quiet standing.

研究分野：身体運動システム

キーワード：静的二足立位 身体システム 筋活動 身体動揺

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの二足立位は、重心位置が高く、支持基底面が狭い構造のため、力学的に不安定な姿勢である。静的二足立位においては、主に下腿三頭筋の筋活動による足関節底屈トルク生成により、立位平衡が保たれる。常に変動する身体重心位置に対して、視覚・前庭感覚・体性感覚によるフィードバック情報に応じた足関節底屈トルクの調節という、立位バランス調節システムにより、立位平衡が保たれる。

一方で、立位姿勢時、重力の影響で血液が下半身に貯留し、静脈還流が減少する。そのため、心拍出量の減少による血圧低下を生じる要因となる。これに対し、各組織への血流を維持するために、循環調節システムは、交感神経活動の亢進などから、血圧の維持に働く。

このように、立位姿勢時は、立位バランス調節システム、循環調節システムの2つの調節システムが同時に活動し、従来これらは互いに独立して機能すると捉えられてきた。一方で近年、収縮期血圧と筋放電の時系列分析より、両調節システムが双方向に関連している可能性が指摘されている (Garg et al. 2014; Xu et al. 2017)。一方で、その生理学的意義やメカニズムに関して不明な点が多い。

## 2. 研究の目的

以上より本研究は、静的二足立位時の循環・立位バランス両調節システムの協働効果と、そのメカニズムを明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究における全ての実験は、ヘルシンキ宣言を遵守し、事前に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受けた。また、全ての研究対象者には本研究の内容について事前に十分な説明を行い、研究参加の同意を署名により得た。統計分析において、有意水準は5%とした。

### (1) 筋収縮が循環調節システムに与える効果の検討

静的立位姿勢における自発的な身体動揺、およびそれに伴った低強度の下腿三頭筋収縮活動が、実質的に循環調節システムに効果をもたらすのかについて実験的検討を行った。足関節周りの倒立振子モデル (Winter et al. 1998) で近似される静的二足立位姿勢において、足関節運動を外部から固定し、実験的に身体動揺を抑制した条件 (Support Standing; SS 条件) を設定した。研究対象者は健常成人 8 名とし、床反力計上における通常の静的立位条件 (Normal Standing; NS 条件) 及び SS 条件を各 5 分間実施した。各試行中、循環調節システムのパラメータ (毎拍血圧、心電図 RR 間隔 (R-R interval; RRI))、呼吸リズム、表面筋電図 (ヒラメ筋、腓腹筋内側頭・外側頭、前脛骨筋)、筋音図 (ヒラメ筋)、足圧中心位置、腰部前後動揺を記録し、各測定値を条件間で比較した。NS・SS 条件間の休憩時に、安静座位における 30 秒間の筋電図・筋音図測定を行った (Rest 条件)。

実験的な身体動揺抑制時に下腿筋収縮活動を電気刺激により誘発した際の、循環系パラメータの応答から、静的立位姿勢で生じる低強度の下腿筋収縮活動が循環調節システムに与える効果を検討した。対象者は健常成人 10 名とし、身体動揺を外部から抑制した 250 秒間の立位保持課題を床反力計上でを行い、開始 120 秒後より両脚の下腿筋収縮活動を誘発した。電気刺激の強度は、各対象者の通常静的立位時に測定された足関節底屈トルクの 0, 50, 100, 150% 相当のトルクを誘発する 4 つの強度を設定し、各設定強度に対して 1 試行ずつ行った。通常静的二足立位に見られる低周波の身体動揺 (0~1Hz) に応じて、電気刺激サイクルは 1.0 秒間刺激 / 1.0 秒間休止とした。試行中、RRI、毎拍血圧を測定した。

### (2) 身体動揺が循環調節システムに与える効果の検討

下腿の筋活動量を一定のまま身体動揺の大きさだけを変化させ、それに伴う循環応答の変化を明らかにすることで、身体動揺が循環調節システムに与える効果を検討することを目的とした。健常成人 7 名が、床反力計上で 330 秒間の二足立位課題を行った。研究対象者に「できるだけ動かないようにじっと立ってください」と指示する Still 条件と「身体の揺れは気にせず、リラックスして立ってください」と指示する Easy 条件の 2 条件を 1 試行ずつ計 2 試行を行った。先行研究 (Loram et al. 2001) を念頭に、本研究では Still 条件では Easy 条件に比べ下腿筋活動量は変化せず、身体動揺のみ減少することを想定し、身体動揺の大きさと循環応答の関連性を検証した。各試行中、足圧中心動揺、推定身体重心動揺、表面筋電図 (ヒラメ筋、腓腹筋内側頭・外側頭、前脛骨筋)、RRI、毎拍血圧、換気量、酸素摂取量、二酸化炭素排出量、換気波形を同時記録した。

### (3) 循環調節システムから立位バランス調節システムへの制御則検討

静的立位時に寒冷昇圧負荷により循環調節システムへ外乱を入力した際の、立位バランス調節応答を記録し、その応答から循環調節システムが立位バランス制御に与える影響を検討した。健常成人 7 名が静的立位課題 (310 秒) を行い、開始 120 秒経過後、水槽内の水に左手関

節までを浸してもらった。浸水により外乱を与える課題（水温 10℃、WT10 条件）とコントロール課題（水温 40℃、WT40 条件）の 2 課題を設定し、ランダム順で各 1 試行を行った。立位バランス調節応答を推定身体重心動揺、足圧中心動揺、下腿筋群の表面筋電図から記録した。また、循環応答を RRI、毎拍血圧より測定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 筋収縮が循環調節システムに与える効果の検討

NS 条件に比べ SS 条件にて足圧中心動揺の軌跡長・2 乗平均平方根 (Root mean square; RMS) ならびに推定身体重心動揺の RMS 値は有意に減少した。また、腓腹筋内側頭・外側頭、ヒラメ筋において表面筋電図の RMS 値は、NS 条件に比べて Rest 条件、SS 条件で有意に減少した。一方で、Rest 条件と SS 条件間で差は認められなかった。ヒラメ筋における筋音図 RMS 値についても同様の結果を示した。これらより、本研究において設定した NS 条件と SS 条件の循環調節システムへ与える効果について検証する妥当性が示された。そして、NS、SS 各条件の毎拍血圧データより、収縮期血圧 (Systolic blood pressure; SBP)、拡張期血圧 (Diastolic blood pressure; DBP) の時系列を取得し、5 分間の平均値を算出したところ、DBP は NS 条件に比べて SS 条件にて有意に増加していた。一方で、SBP と RRI については条件間で変化は認められなかった。また、呼吸リズム (平均周波数) も条件間で差が認められなかった。

これらの循環調節の結果は、SS 条件において筋ポンプ効果の低下などから静脈還流量が減少したことに対し、主に心肺圧受容器反射により総末梢血管抵抗が増加したことを反映していると解釈することができる。すなわち、通常の静的立位 (NS 条件) においては、身体動揺ならびにそれに伴った下腿三頭筋活動が、循環調節システムに実質的に貢献していることが新たに明らかとなった。

各刺激条件において前半 120 秒間 (0~120 秒) 及び後半 120 秒間 (130~250 秒) の RRI、SBP、DBP 各平均値を算出したところ、身体動揺抑制時に誘発される下腿筋収縮活動はその強度が通常の静的立位時に発揮されるトルクレベル以下である場合、これらの値に変化をもたらさなかった。一方で、150%トルク誘発時のみ、RRI の有意な延長が確認された。

この結果は、静的立位時の身体動揺に付随する下腿筋活動は、循環調節システムへ直接的な効果を及ぼさない可能性を示している。従って、この結果とあわせて考えると、身体動揺自体が循環調節に重要な役割を担う可能性を示唆するものである。一方で、本研究は電気刺激を用いた筋収縮であったことから、運動単位の動員様式や協働筋間の活動パターンが通常の静的立位時と異なっていたことが予測されるため、さらなる検討が必要である。

##### (2) 身体動揺が循環調節システムに与える効果の検討

実験設定どおり、筋電図 RMS 値で定量化した下腿部各筋の筋活動量に、Easy・Still 条件間で差は認められなかった。また、推定身体重心動揺の前後方向において RMS 値が Easy 条件より Still 条件で有意に減少した。一方で、DBP の平均値が Easy 条件に比べ、Still 条件で有意に低下した。SBP と RRI の平均値には条件間で変化は認められなかった。

この結果は、Still 条件において身体動揺が減少し、その効果を補うための DBP の上昇という予測と反する結果であった。1 分間あたりの換気量と酸素摂取量は Still 条件において有意に増加していたことから、Still 条件において股関節運動に関する筋群などの活動が生じ、循環調節システムに影響していた可能性が考えられる。従って、(1) とあわせて、身体動揺および付随する筋活動それぞれの貢献度については明らかではなく、実験設定の改良も含めて今後の詳細な検討が必要である。

##### (3) 循環調節システムから立位バランス調節システムへの制御則検討

両条件で得られた各 310 秒間のデータについて、浸水開始により身体動揺が生じた 120~130 秒、寒冷昇圧負荷開始により血圧が非正常であった 130~190 秒を除いた、2 つの時間区間 (浸水前: 0~120 秒、浸水中: 190~310 秒) に分割し、解析を行った。その結果、循環調節システムの出力値である SBP 平均値において、有意な交互作用 (条件×時間) が確認された。さらに、浸水中において SBP 平均値は WT10 条件で WT40 条件よりも有意に上昇していた。一方で、立位バランス制御システムの出力値である推定身体重心動揺の RMS 値に有意な交互作用 (条件×時間) が認められた。さらに、浸水中の RMS 値は WT10 条件で WT40 条件よりも有意に減少していた。

この結果は、静的立位において、立位バランス制御システムが循環調節システムの出力値の変化に調節する仮説を支持するものであり、両調節システムが互いに影響している可能性を生理学的観点から支持するものである。

以上、研究(1)~(3)の結果より、両調節システムが静的立位時に、互いに生理学的に影響を与えることが新たに明らかとなった。そのメカニズムに関してはより詳細な検討が必要であるとともに、動的な立位姿勢も含めたさらなる研究の展開が期待される。

<引用文献>

- Garg A, Xu D, Laurin A, Blaber AP. Physiological interdependence of the cardiovascular and postural control systems under orthostatic stress. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 307:H259-264, 2014.
- Loram ID, Kelly SM, Lakie M. Human balancing of an inverted pendulum: is sway size controlled by ankle impedance? *J Physiol* 532:879-891, 2001.
- Winter DA, Patla AE, Prince F, Ishac M, Gielo-Perczak K. Stiffness control of balance in quiet standing. *J Neurophysiol* 80:1211-1221, 1998.
- Xu D, Verma AK, Garg A, Bruner M, Fazel-Rezai R, Blaber AP, Tavakolian K. Significant role of the cardiopostural interaction in blood pressure regulation during standing. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 313:H568-H577, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 成瀬亮; 木村哲也
2. 発表標題 循環調節システムへの外乱が立位バランス制御則に及ぼす影響
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 成瀬亮; 瀧千波; 木村哲也
2. 発表標題 静的二足立位における身体動揺が血液循環に及ぼす効果
3. 学会等名 日本体育学会第68回大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木村哲也
2. 発表標題 循環・立位バランス両調節システム協働の解明に向けた実験的試み～生理学の観点から～
3. 学会等名 BioMecForum21 第92回研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oyanagi W; Kimura T
2. 発表標題 Effect of time-lag between heartbeat and postural sway on arterial blood pressure during quiet standing
3. 学会等名 International Society of Electrophysiology and Kinesiology XXIII Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----