心理的プレッシャー下における不安定場での立位姿勢制御： 下肢筋活動と足圧中心からの評価

田中 美吏¹⁾ 霜 辰徳²⁾ 野坂 祐介³⁾

Yoshifumi Tanaka¹, Tatsunori Shimo² and Yusuke Nosaka³: Postural control when standing on an unstable surface under psychological pressure: Evaluation from lower limb muscular activity and center of pressure. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 61: 289-300, June, 2016

Abstract : The effects of psychological pressure on lower limb muscular activity and center of pressure (COP) were investigated in a standing, postural control task. Healthy male participants (N=18) performed a balancing task by standing on a balance disk with their dominant foot. Participants were requested to stabilize their posture for 30 s (one-trial). After acquisition trials, participants performed 2 non-pressure and 2 pressure trials in counterbalanced order for a performance-contingent cash reward, or punishment. Stress responses were successfully induced as assessed by state anxiety, perceived pressure, mental effort, and heart rates that increased under pressure conditions. The results indicated that the rate of co-contraction between the soleus (SOL) and tibialis anterior (TA) muscles in the dominant leg increased significantly in association with an increment in the EMG amplitude of the SOL under pressure. Moreover, the COP area in pressure trials was significantly smaller than in non-pressure trials. These functional changes in postural control under pressure could have been modified by internal focus of attention, affective states including anxiety, and movement strategies that enhance muscle and joint stiffness in the lower limbs.

Key words : stress, arousal, body sway, co-contraction, stiffness

キーワード : ストレス, 覚醒, 重心動揺, 共収縮, スティッフネス

序 論

心理的プレッシャーによるパフォーマンスの低下は、多くのスポーツ選手が抱える大きな悩みであり、近年、この問題の背景にある知覚及び身体運動メカニズムを解明する研究が増えている。たとえば、プレッシャー下における視線行動 (e.g., Causer et al., 2011 ; Wilson et al., 2009), 中枢神経活動 (e.g., Hatfield et al., 2013 ; Tanaka et al.,

2012), 筋活動 (e.g., Cooke et al., 2010 ; Moore et al., 2012), キネマティクス (e.g., Tanaka and Sekiya, 2010, 2011) を調べる研究が該当する。

しかしスポーツでは、これらを構成要素とする姿勢制御機能(シヤムウェイック・ウーラコット, 2013, p. 167) もパフォーマンスに関連する (e.g., Richardson et al., 2012 ; Vuillerme et al., 2001)。姿勢とは「任意の時間、自分の意志で一定に保つことができる身体各部の相対的位置関係」と定義されており (大築, 2011, p. 3), こ

1) 武庫川女子大学

〒663-8558 兵庫県西宮市池開町 6-46

2) 福井大学男女共同参画推進センター

〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

3) 福井大学大学院教育学研究科

〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

連絡先 田中美吏

1. Mukogawa Women's University

6-46 Ikebirakicho, Nishinomiya, Hyogo 663-8558

2. Gender Equality Promotion Center, University of Fukui

3-9-1 Bunkyo, Fukui, Fukui 910-8507

3. Graduate School of Education, University of Fukui

3-9-1 Bunkyo, Fukui, Fukui 910-8507

Corresponding author tnk@mukogawa-u.ac.jp

れを制御するための機能が姿勢制御といえるが、高井ほか（2001, p. 13）は姿勢制御を「外乱など姿勢を崩す要因が身体に生じた際、すみやかにもとに立て直す反射・反応」と説明している。

プレッシャーが姿勢制御に及ぼす影響を調べた研究として、佐々木・関矢（2014）が挙げられる。この研究では、安静立位から早さと正確性を要求した1歩踏み出し運動を実験課題に用い、他者評価や他者比較の存在するプレッシャー条件では、安静立位の初期姿勢局面において体幹角度の前傾に伴う足圧中心(Center of Pressure: COP)の前方移動が生じた。さらに、踏み出し運動が開始される直前の予測的姿勢制御局面では、運動脚や支持脚の前脛骨筋における筋放電量の増加及び床反力の増大が示されている。そして、これらの姿勢制御の変化とともに、踏み出し運動の着地位置の変動性も増加した。

プレッシャー下における姿勢制御を調べた研究は、国内外を見渡してもこの研究しか見当たらず、初期姿勢局面や予測的姿勢制御局面とともに、運動課題遂行中の姿勢制御局面や他の運動課題も含めてさらに研究を蓄積する必要がある。そこで本研究では、バランスディスク上での片足立ちを運動課題に用い、運動課題遂行中の重心動揺(COP)や、前脛骨筋及びヒラメ筋の筋放電を調べることで、プレッシャーが運動課題遂行時の姿勢制御機能に及ぼす影響を明らかにし、プレッシャー下における姿勢制御を検討する研究に対して基礎となる1つの資料を提供することを目的とする。

プレッシャー下における上肢(Cooke et al., 2010; Tanaka et al., 2011, 2014; Yoshie et al., 2008, 2009)と同様に、立位姿勢制御において主に足関節運動に関わる前脛骨筋やヒラメ筋の筋活動に関しても、プレッシャーの影響で各筋の筋放電量の増加、ならびに両筋間の共収縮の増加が生じるという仮説を立てた。重心動揺に関しては、バランスディスク上での片足立ちや両足立ちにおいて、足の動きに意識を向ける内的注意焦点によってCOPの平均二乗誤差(RMSE)が増加することが示されている(Wulf et al., 2007, 2009)。

また、高所において両足立ちを行う課題においては、不安感情の生起に伴って前後方向や左右方向におけるCOPの標準偏差が小さくなることが示されている(Adkin et al., 2000; Brown et al., 2006; Carpenter et al., 2001)。プレッシャー下では注意が内的焦点に向くことや、不安感情が生起するなどの多様な心理的变化が生じることから、プレッシャー下においても左右方向及び前後方向の重心動揺の範囲、ならびに左右と前後の両方向の動揺範囲を反映する外周面積が変化しないことを帰無仮説とし、この帰無仮説が棄却されたときに、これらの指標のプレッシャー下における増減について検証した。

方 法

1. 実験参加者

18名の健常な男子大学生（平均年齢 20.06 ± 1.00 歳）が参加した。事前に利き足検査(Waterloo Footedness Questionnaire-Revised: Elias and Bryden, 1998)を実施したところ、17名が右利き($+8.53 \pm 4.87$ 点)、1名が左利き(-2 点)と判別された。実験参加者には、事前に実験協力依頼文を配布し、その中で説明されている実験内容に対する同意を得た後に実験に参加させた。さらに実験開始前には、署名による実験参加の同意も得た。この同意書には、自らの意志で実験から自由に離脱できる旨も記されていた。なお本研究は、実験が行われた研究機関内の研究倫理委員会から承認を得た後に行った。

2. 運動課題

直径28 cm、高さ11 cmのバランスディスク上に、利き足検査によって判別された利き足で片足立ちをさせた。両足安静立位の状態から実験者のスタート合図を受けてディスク上に片足立ちになり、その5秒後にビーブ音を呈示し（姿勢を安定させるための準備時間）、その後の30秒間もディスク上に片足のみで立ち続けることを求めた。30秒の間に非利き足や他の身体部位が床や壁に触れた場合は失敗試行とし、30秒間利き足のみ

で立つことができた場合は成功試行とした。

日本めまい平衡医学会（1983）によれば、開眼での検査時には、眼球運動による重心動揺の誘導を避けるため、身体正面の眼の高さの位置に置かれた点を注視することが推奨されている。その点までの距離の短縮（Lê and Kapoula, 2006）や点の周辺視野情報の利用（Berencsi et al., 2005）によって重心動揺が小さくなるという報告もあり、重心動揺の変化が視線方略に依存しないことを担保するには、本研究においても課題遂行中の視線行動を統制する必要があった。そこで実験参加者から前方 200 cm の位置に、実験参加者の目線の高さに合わせた直径 4 cm の点を呈示し、その点を注視しながら課題を行うよう教示した。

3. 装置

利き足の前脛骨筋とヒラメ筋に、直径 1 cm の Ag-AgCl 双方表面電極を電極間隔 3 cm で装着し、カットオフ周波数帯域 10—2000 Hz で筋活動（Electromyography: EMG）を導出した（ADINSTRUMENTS 社製 PowerLab26T）。心拍数は、ワイヤレスによる送信機（ADINSTRUMENTS 社製 SP0180）と受信機（ADINSTRUMENTS 社製 MLAC35/ST）を用いて記録した。EMG の記録可能幅は両筋において ± 5 mV とし、心拍数とともに ADINSTRUMENTS 社製 Chart7 for Windows を用いて、サンプリング周波数 2000 Hz で記録や解析を行った。COP は、重心動揺計（竹井機器社製 TRR5810）を用いて、サンプリング周波数 100 Hz で記録した。なお、COP の記録は別ソフト（竹井機器社製重心軌跡測定器プログラム ver.1.2.0）を用いたが、EMG と心拍数を記録するための Chart7 for Windows のスタートボタンを押すことで同期して記録できるよう設定した。

4. 手続き

課題に慣れ、課題を成功させることができる状態で非プレッシャー条件とプレッシャー条件に移行することを目的に、30秒間の片足立ちを 3 試行連続で成功するまで練習をさせ、それらの試行

を習得試行とした。習得試行が 3 試行のみで終了した実験参加者が 14 名、4 試行で終了した者が 3 名、12 試行で終了した者が 1 名であった。習得試行の後に、非プレッシャー条件とプレッシャー条件を各 2 試行実施した。両条件を行う順番は、順序効果の影響を除外するために、実験参加者間でカウンターバランスを取った。30秒間の試行中における EMG, COP, 及び心拍数を記録した。

本研究では、課題の成否に対する報酬と罰をプレッシャーとして用いた。プレッシャー条件を開始する前に実験参加に対する謝礼として 1,000 円を実験参加者に渡した。そして、プレッシャー条件の各試行において 30 秒間の片足立ちに成功した場合には謝礼が 500 円ずつ増額になり、逆に失敗した場合には 500 円ずつ減額になることを教示した。減額に関しては、実際に失敗した場合にも減額は無い偽教示であり、このことを実験終了後にディブリーフィングしたうえで、全実験参加者に 2,000 円の謝礼を渡した。非プレッシャー条件では、出来る限り課題を成功させることのみを教示した。

5. 測定項目

(1) 心理指標と心拍数

非プレッシャー条件とプレッシャー条件の開始前に、新版 State-Trait Anxiety Inventory-Form JYZ（STAI：肥田野ほか，2000）を用いて状態不安を測定した。また両条件の各試行を遂行する直前には、10 cm の横線の左端に「全くない」、右端に「非常にある」と書かれた視覚的アナログ尺度（Visual Analog Scale: VAS）上に、課題を成功させることに対する緊張度と心的努力度を回答させた。各試行の終了直後には、左端に「非常に不安定」、右端に「非常に安定」と書かれた VAS 上に、その試行における身体バランスの安定度を回答させた。また、両条件の各試行において課題遂行中の心拍を記録し、各試行における心拍数を bpm で算出した。両条件終了後には、非プレッシャー条件に比べてプレッシャー条件の試行中に意識したことや感じたことの内省報告を復

数回答可の自由記述により回答させた。

(2) EMG

各試行における前脛骨筋とヒラメ筋の EMG 振幅は、30秒間の試行中の EMG (mV) の二乗平均平方根 (RMS: Root Mean Square) より算出した。なお、非プレッシャー条件とプレッシャー条件終了後に、前脛骨筋とヒラメ筋の最大随意等尺性収縮 (Maximum Voluntary Contraction: MVC) による最大筋放電量を記録し^{注1)}、各試行の両筋の EMG 振幅について実験参加者毎に MVC に対する割合 (%MVC) を算出した。このように EMG 振幅の規格化を行うことで、実験参加者間のデータの変動を減らした。前脛骨筋とヒラメ筋の共収縮率 (%) は、%MVC 化された各筋の全波整流波形を基にウインター (2011, pp. 150-151) による以下の計算式より算出した。

$$2 / (\text{前脛骨筋の筋放電の積分値} + \text{ヒラメ筋の筋放電の積分値}) \times 100$$

(3) COP

両条件の各試行における課題遂行中の COP 位置データを基に、左右方向の標準偏差 (前額面上での重心動揺の大きさを反映する指標)、前後方向の標準偏差 (矢状面上での重心動揺の大きさを反映する指標)、ならびに外周面積 (左右前後の両方向を含む二次元上での重心動揺の大きさを反映する指標) を求めた^{注2)}。

6. 統計解析

自由記述以外の全測定項目に対して、対応のある t 検定を行うことで、非プレッシャー条件 2 試行とプレッシャー条件 2 試行の平均値の差を検定した。さらに、実験参加者毎に各変数の非プレッシャー条件からプレッシャー条件にかけての変化率を算出し、全従属変数間のスピアマンの順位相関係数 ($N=18$) を算出することで、プレッシャーによる各変数の変化の相関関係を調べた^{注3)}。これらの分析には SPSS ver.21 を使用し、有意水準を 5% 未満とした (両側検定)。なお、習得試行以外で課題を失敗した実験参加者は、非プレッシャー条件における 1 試行を失敗

した 2 名であった。これらの実験参加者に対しては、非プレッシャー条件を 1 試行追加で実施させ、その試行を成功させた。上述の統計解析では、これらの実験参加者における失敗試行のデータは分析対象とせず、追加で実施した 1 試行の成功試行を分析対象とした。

結 果

1. 心理指標と心拍数

Table 1 には、自由記述以外の全測定項目について、非プレッシャー条件とプレッシャー条件における全実験参加者の平均と標準偏差を示した。STAI を用いて測定した状態不安得点はプレッシャーによる有意な増加が認められ (非プレッシャー 38.06 ± 8.89 ; プレッシャー 44.56 ± 9.02 ; $t(17) = 4.85$, $p < .001$)、心拍数も有意に増加した (非プレッシャー 87.37 ± 13.98 bpm; プレッシャー 94.22 ± 19.02 bpm; $t(17) = 2.67$, $p < .05$)。VAS を用いて測定した主観的緊張度 (非プレッシャー 43.58 ± 19.60 mm; プレッシャー 70.61 ± 20.15 mm; $t(17) = 4.72$, $p < .001$)、心的努力度 (非プレッシャー 63.28 ± 18.79 mm; プレッシャー 80.89 ± 12.04 mm; $t(17) = 4.35$, $p < .001$) も有意な増加が認められた。

2. EMG と COP

Fig. 1 には、前脛骨筋とヒラメ筋の EMG と COP について、非プレッシャー条件からプレッシャー条件にかけて典型的な変化を示した 1 名の実験参加者の各条件における 1 試行目のデータを示した。この実験参加者においては、非プレッシャー条件からプレッシャー条件にかけて前脛骨筋の EMG 振幅が 32% 増加し、ヒラメ筋の EMG 振幅が 16% 増加した。COP の外周面積は 34% 減少した。この実験参加者のように、非プレッシャー条件からプレッシャー条件にかけて、前脛骨筋の EMG 振幅が増加した実験参加者は 18 名中 10 名、ヒラメ筋の EMG 振幅が増加した実験参加者は 14 名であった。非プレッシャー条件からプレッシャー条件にかけて前脛骨筋もしくはヒ

Table 1 Means and standard deviations of all dependent variables in non-pressure and pressure conditions

	Non-pressure	Pressure
State anxiety	38.06 ± 8.89	44.56 ± 9.02***
Perceived pressure (mm)	43.58 ± 19.60	70.61 ± 20.15***
Mental effort (mm)	63.28 ± 18.79	80.89 ± 12.04***
Balance stability (mm)	44.78 ± 16.08	57.25 ± 21.43*
Heart rate (bpm)	87.37 ± 13.98	94.22 ± 19.02*
TA EMG amplitude (%MVC)	19.39 ± 11.86	20.26 ± 11.04
SOL EMG amplitude (%MVC)	35.79 ± 8.90	39.02 ± 9.60*
Co-contraction rate (%)	5.35 ± 2.17	6.04 ± 2.51**
COP area (cm ²)	12.46 ± 4.75	10.46 ± 3.32*
COP M-L SD (mm)	6.89 ± 1.26	6.57 ± 1.26
COP A-P SD (mm)	10.45 ± 2.57	9.49 ± 2.27

Note. TA = tibialis anterior; SOL = soleus; M-L SD = medial-lateral standard deviation; A-P SD = anterior-posterior standard deviation; *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

Fig. 1 Typical rectified raw EMG waveforms for tibialis anterior (TA) and soleus (SOL), as well as raw COP paths recorded from one participant during the first trial in non-pressure and pressure conditions.

ラメ筋のどちらかの EMG 振幅が増加した実験参加者は16名であったが、このうち前脛骨筋の EMG 振幅の増加率の方が大きかった実験参加者

は8名、ヒラメ筋の EMG 振幅の増加率の方が大きかった実験参加者は8名であった。COP の外周面積が減少した実験参加者は13名であった。

ヒラメ筋の EMG 振幅に関しては、全実験参加者の平均値においてもプレッシャーによる有意な増加が認められたが（非プレッシャー $35.79 \pm 8.90\%$ MVC；プレッシャー $39.02 \pm 9.60\%$ MVC； $t(17) = 2.32$, $p < .05$ ）。前脛骨筋に関しては有意差が見られなかった（ $p = .397$ ）。前脛骨筋とヒラメ筋間の共収縮率においては、プレッシャーによる有意な増加が認められた（非プレッシャー $5.35 \pm 2.17\%$ ；プレッシャー $6.04 \pm 2.51\%$ ； $t(17) = 3.28$, $p < .01$ ）。COP の外周面積においては、プレッシャーによる有意な減少が認められたが（非プレッシャー $12.46 \pm 4.75 \text{ cm}^2$ ；プレッシャー $10.46 \pm 3.32 \text{ cm}^2$ ； $t(17) = 2.46$, $p < .05$ ）。左右方向の標準偏差（ $p = .171$ ）、前後方向の標準偏差（ $p = .121$ ）に有意差は見られなかった。

3. 従属変数間の相関分析

Table 2 には、各変数の非プレッシャー条件からプレッシャー条件にかけての変化率に対する相関分析の結果を示した。主観的緊張度と心的努力度（ $r = .928$, $p < .001$ ）の間に有意な正の相関が認められ、プレッシャー条件において主観的緊張度が高まるほど心的努力も高まった。前脛骨筋の EMG 振幅と共収縮率（ $r = .796$, $p < .001$ ）の間に有意な正の相関が認められ、プレッシャー条件における共収縮の増加は、前脛骨筋の EMG 振幅の増加に関与していた。また、COP の左右方向

の標準偏差と状態不安（ $r = .497$, $p < .05$ ）、前脛骨筋の EMG 振幅（ $r = .501$, $p < .05$ ）、共収縮率（ $r = .612$, $p < .01$ ）の間に正の相関が認められた。プレッシャー下において状態不安、前脛骨筋の EMG 振幅、前脛骨筋とヒラメ筋間の共収縮率が高まるほど、身体の左右方向における重心動揺が大きかった。主観的緊張度と COP の前後方向の標準偏差の間には有意な負の相関（ $r = -.505$, $p < .05$ ）が認められ、主観的緊張度が大きいほど前後方向の重心動揺は小さくなった。

4. パフォーマンス

30秒間の片足立ち課題の成功率は、非プレッシャー条件では94.74%（36/38試行）、プレッシャー条件では100.00%（36/36試行）であった。VASを用いて測定した試行中における身体バランスの安定度に関しては、プレッシャーによる有意な増加が認められた（非プレッシャー $44.78 \pm 16.08 \text{ mm}$ ；プレッシャー $57.25 \pm 21.43 \text{ mm}$ ； $t(17) = 2.80$, $p < .05$ ）。

5. 内省報告

Table 3 には、非プレッシャー条件に比べてプレッシャー条件の試行中に意識したことや感じたことに関する自由記述への回答内容とその人数を示した。8名が足の動きを意識し、6名が身体の動きを意識したように、動作に対して内的注意を

Table 2 Matrix of the results of Spearman rank-order correlation coefficients between dependent variables

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. State anxiety	.215	.182	.082	.409	.147	.164	.349	.087	.497*	-.082
2. Perceived pressure		.928***	.267	.404	.133	-.317	.088	-.337	-.232	-.505*
3. Mental effort			.368	.298	.269	-.255	.129	-.220	-.162	-.401
4. Balance stability				.148	-.185	-.201	-.383	.096	-.079	.230
5. Heart rate					-.276	-.158	-.199	-.323	-.077	-.226
6. TA EMG amplitude						.302	.796***	.335	.501*	-.090
7. SOL EMG amplitude							.465	.443	.426	.278
8. Co-contraction rate								.280	.612**	-.090
9. COP area									.525*	.872***
10. COP M-L SD										.267
11. COP A-P SD										

Note. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

Table 3 Self-reports about consciousness and awareness during the pressure condition compared with those in the non-pressure condition

Items of consciousness and awareness (number of participants)
Conscious processing for foot movements (8)
Conscious processing for body movements (6)
Awareness of increasing force on the foot (3)
Success of the task (3)
Anxieties about failure (3)
Awareness of changes in body movement (2)
Eye movement for the dot in front of participants (2)
The reward (2)
Calm and easygoing mind (2)
Arousal regulation (1)
Concentration on the task (1)
Awareness of trembling feet (1)
Impatience (1)

向けた実験参加者が多かった。足の力発揮の増大 (3名) や震え (1名), ならびに身体の動きの変化 (2名) を知覚する実験参加者も見受けられた。

考 察

本研究のように、実験室環境において疑似的なプレッシャーを実験参加者に負荷する研究において先ずクリアすべき点は、プレッシャー操作によってストレスを喚起することに成功したかである。本研究では、課題の成否に対する報酬や罰をストレッサーに用いたが、非プレッシャー条件からプレッシャー条件にかけての状態不安 (STAI) の増加は、全実験参加者の平均において約7点、主観的緊張度 (VAS) の増加は約27 mmであった。心拍数においても約7 bpmの増加が見られたことから、プレッシャーの負荷によって実験参加者の心理面と生理面の双方にストレスを喚起することに成功したといえる。しかしその強度に関しては、実験室環境でのバッティング・シミュレーション課題において STAI の状態不安得点がプレッシャーの影響で約10点増加することや (Higuchi et al., 2002), ピストル射撃課題において警官を相手にする条件では人形を相手にす

る条件よりも VAS による主観的緊張度が約40 mm 増加することが示されている (Nieuwenhuys and Oudejans, 2010)。心拍数に関しても、ピアノの演奏会ではリハーサルに比べて約34 bpm 増加することや (Yoshie et al., 2009), 実験室環境での姿勢制御課題においてプレッシャーの影響で約21 bpm 増加することが示されている (Tanaka, 2015)。したがって、本研究において誘発されたストレスの強度は、これらの先行研究に比べると低強度であったと考えられる。

なお、本研究の非プレッシャー条件からプレッシャー条件にかけての心拍数の増加は、後述するプレッシャー条件における筋活動や重心動揺の変化を含む動作様式の違いに起因する可能性も考えられる。心拍数の増加がストレス反応に起因するか、動作様式の変化に起因するかは、心拍数の測定を運動課題遂行中に行っているため、本研究では区別することができなかった。今後の研究では、運動開始前の心拍数も記録することで、プレッシャー下における心拍数の増加がストレス反応に起因することを明確に示す必要がある。

このように低強度のストレスが喚起されたなかで、足関節運動に関わる前脛骨筋やヒラメ筋の筋活動に関しては概ね仮説通りの結果が得られ、プレッシャー条件ではヒラメ筋の筋放電量が増加するとともに、ヒラメ筋と前脛骨筋間の共収縮も増加した。立位姿勢制御において、ヒラメ筋などの下腿の後面の筋は姿勢の保持に関わり、前脛骨筋などの前面の筋は姿勢の修正に関わることから (藤原, 2011, pp. 26-27; 藤原ほか, 1988), プレッシャーの影響は姿勢保持に関わる筋の活動に顕著であったと考えられる。しかしながら、前脛骨筋の筋放電量においては有意差こそ見られなかったが、18名中10名の増加が見られ、このうち8名はヒラメ筋の筋放電量の増加よりも大きかった。つまり、プレッシャーによるヒラメ筋の筋放電量の増加は多くの実験参加者に共通して生起する現象であるのに対し、前脛骨筋の筋放電量の増減は個人差が大きかった。このような個人差が何に起因するかについては、他の従属変数との相関分析の結果から、左右方向の重心動揺が関連して

いた。つまり、プレッシャー条件で左右の動揺が小さくなった実験参加者は姿勢を修正する機会が少なかったために前脛骨筋の活動が小さくて済み、左右の動揺が大きくなった実験参加者は姿勢を修正する機会が多かったために前脛骨筋の活動が大きくなったと考えられる。

一過性の心理的ストレスによって力発揮が増大する理由として、覚醒仮説 (arousal hypothesis) や神経運動仮説 (neuromotor hypothesis) が提唱されている (Jaśkowski et al., 2000)。覚醒仮説とは、ストレス下における覚醒水準の亢進に伴い運動出力が増大することを指し、本研究のプレッシャー下においても心拍数の増加が見られたことから、プレッシャー条件における筋放電量の増加は覚醒水準の亢進に起因している可能性がある。神経運動仮説とは、ストレス下では脳から筋に至るまでの神経インパルスや運動出力に内在するノイズが増大し、そのノイズによるパフォーマンスの低下を防ぐために、主動筋と拮抗筋間の共収縮を高める運動方略を採用し、筋や関節のスティッフネス (stiffness) を高めることを指す。本研究のプレッシャー下における前脛骨筋とヒラメ筋間の共収縮の増加は、この仮説を支持する結果と考えられる。相関分析の結果からも、プレッシャー下において身体の左右方向の重心動揺が生じた際には、前脛骨筋の筋活動、ならびに前脛骨筋とヒラメ筋間の共収縮を高めることで動揺を抑えたことが示唆される。自由記述による内省報告においても、プレッシャー条件では足や身体の動きを意識した実験参加者が多く、そのなかには意図的に足や身体を硬直させる運動方略を採用したと報告する者も存在した。神経運動仮説はこのような内省報告からも支持される。

重心動揺の指標として測定した COP に関しては、プレッシャー条件では外周面積が減少し、プレッシャーの影響で身体の前後と左右の両方向を反映する重心動揺の範囲が小さくなることが明らかとなった。プレッシャー条件における重心動揺の範囲の縮小にも、スティッフネスを高める運動方略が関連していると考えられる。高所において立位姿勢制御課題を行う際にも、重心動揺の範囲

が縮小することが報告されており (Adkin et al., 2000; Brown et al., 2006; Carpenter et al., 2001)、高所恐怖や転倒不安といった感情面の作用とともに、転倒や転落を防ぐためにスティッフネスを高める運動方略が採用されることによって、重心動揺の範囲が縮小すると考えられている。しかしながら、立位姿勢制御課題時に足の動きに意識を向ける内的注意焦点によって重心動揺の範囲が大きくなるという報告もあり (Wulf et al., 2007, 2009)、プレッシャー下における重心動揺の範囲の縮小が何に起因するかについては、感情、注意、運動方略の側面からその原因を探る研究が今後は必要である。

その研究を行う際に応用できるのが、COP の時系列データの周期性を調べる周波数解析、規則性を調べるフラクタル解析、ならびに複雑性を調べるエントロピー解析である (樋口, 2015, pp. 196-197)。たとえば、立位姿勢制御課題における COP の周波数に関しては、注意の内的焦点化によって平均周波数が増加することや (Ueta et al., 2015; Vuillerme and Nafati, 2007)、反対に減少することも報告されている (McNevin and Wulf, 2002)。さらに高所では、平均周波数が増加することが示されている (Adkin et al., 2000; Carpenter et al., 1999; Huffman et al., 2009; Stins et al., 2011)。スティッフネスの増加と COP の高周波成分の増加は関連しているという報告もあり (Winter et al., 1998)、これらの解析の活用により、プレッシャー下における重心動揺の範囲縮小のさらに詳細な質的側面を感情、注意、スティッフネスの要因を絡めて検討することが可能になる。

ところで本研究のプレッシャー条件では、重心動揺の範囲が縮小するなかで、全実験参加者が全ての試行において課題を成功させた。さらに、VAS を用いて測定した主観的な身体バランスの安定度も、非プレッシャー条件からプレッシャー条件にかけて増加した。つまり、立位姿勢制御課題のパフォーマンスに関しては、プレッシャー下でも維持もしくは向上させたといえる。しかしながら、筋活動の結果と照合すると、プレッシャー

条件では筋放電量や共収縮が増加するなかで課題を成功させていることから、運動のエネルギー効率の側面からは非効率的（非経済的）な運動を実施していたと考えられる。このようなエネルギー効率の低下が、プレッシャーが大きいスポーツの試合場面では、身体的疲労が促進するというスポーツ選手の主観的報告（村山ほか，2009）に繋がる事が示唆される。

最後に、プレッシャー下における姿勢制御機能を調べる今後の研究に対して3つの提案を行う。1つ目は、プレッシャーによって喚起されたストレス強度の問題である。本研究では、プレッシャーによって低強度のストレスが喚起されたなかで、筋放電量や共収縮の増加、ならびに重心動揺の範囲縮小が生じることが明らかになったが、さらに高強度のストレス下においても同様な変化が生じるかについて疑問を残した。高強度のストレスが喚起されやすい性格特性を有する高特性不安者に限定して実験を行うこと（Weinberg, 1978 ; Wilson et al., 2007）や、大勢の観衆の前で課題を行うなどのようにプレッシャーの負荷方法を変えること（Murray and Raedeke, 2008 ; Yoshie et al., 2009）が今後の研究では必要である。また、実験参加者数をさらに増やしたうえで、事後的に高強度のストレスが喚起された実験参加者を抽出して分析を行うこと（Hasegawa et al., 2013 ; 長谷川ほか, 2011）も有効と考えられる。

2つ目は、他の運動課題においても、本研究と同様な姿勢制御機能の変化がプレッシャーの影響で生じるかという問題である。特に本研究では、バランスディスク上での片足立ちを課題に用い、立位姿勢を維持することをパフォーマンス目標とする運動課題に設定した。しかし、スポーツや日常生活における多くの運動課題は、立位姿勢を維持すること自体が主目標ではなく、他のパフォーマンス目標があるなかで副次的に立位姿勢の制御が求められる。本研究のように立位姿勢を維持することを主目標とする運動課題とともに、副次的に立位姿勢の制御が求められる運動課題も対象に研究を拡張する必要がある。

3つ目は、課題遂行中における視線行動の確認

である。本研究では、重心動揺が視線行動の変化に依存しないよう、実験参加者までの距離と高さが定められた位置に点を呈示し、その点を注視しながら課題を行うよう指示した。しかしながら内省報告では、プレッシャー条件では非プレッシャー条件に比べて前方の点に対する視線行動への意識を高めた実験参加者が2名存在した。また、プレッシャー下において運動課題を行うときには、注視時間の短縮や（e.g., Vine and Wilson, 2010 ; Wilson et al., 2009）、注視頻度の増加（e.g., Williams and Elliott, 1999 ; Williams et al., 2002）などの視線行動の変化が生じることが多くの研究で報告されている。これらより、本研究のプレッシャー条件においても、実験者からの言語指示による視線行動の統制は行ったが、意図的もしくは非意図的に視線行動が変化し、その変化が姿勢制御に影響を及ぼした可能性も推察される。今後の研究では、アイカメラを用いて運動課題遂行中の視線行動も計測し、プレッシャー下における視線行動と姿勢制御の関係も合わせて検討する必要がある。

謝辞

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科研費（研究種目名：若手研究（B）、課題番号：25750290）の助成を受けて行われました。

注

注 1) 座位で膝関節角度を90°にし、前脛骨筋の MVC はつま先を地面から約 10 cm 浮かし、ヒラメ筋の MVC は踵を地面から約 10 cm 浮かした状態で測定した。各筋に対して3秒以上の最大等尺性随意収縮を3回実施させ、その中から1秒の時間窓の RMS が最も大きかった区間を MVC 時の EMG 振幅（mV）とした。

注 2) 本研究では、重心動揺計の上にバランスディスクを置き、その上で片足立ちを実施させた。そのため COP に関しては、足の裏面の足圧中心を直接的に反映するものではなく、バランスディスクの底面を介した近似値といえる。バランスディスクを介した近似値による COP の評価は、Tanaka (2015) や Wulf et al. (2007) においても実施されている。

注 3) 相関分析に用いた全ての変数に対して, コルモゴロフ・スミルノフ検定を行い, データの正規性を調べた. その結果, 多くの変数において正規性が認められなかったため, スピアマンの順位相関係数を求めた.

文 献

- Adkin, A. L., Frank, J. S., Carpenter, M. G., and Peysar, G. W. (2000) Postural control is scaled to level of postural threat. *Gait Posture*, 12: 87-93.
- Berencsi, A., Ishihara, M., and Imanaka, K. (2005) The functional role of central and peripheral vision in the control of posture. *Hum. Mov. Sci.*, 24: 689-709.
- Brown, L. A., Polych, M. A., and Doan, J. B. (2006) The effect of anxiety on the regulation of upright standing among younger and older adults. *Gait Posture*, 24: 397-405.
- Carpenter, M. G., Frank, J. S., and Silcher, C. P. (1999) Surface height effects on postural control: A hypothesis for a stiffness strategy for stance. *J. Vestib. Res.*, 9: 277-286.
- Carpenter, M. G., Frank, J. S., Silcher, C. P., and Peysar, G. W. (2001) The influence of postural threat on the control of upright stance. *Exp. Brain Res.*, 138: 210-218.
- Causser, J., Holmes, P. S., Smith, N. C., and Williams, A. M. (2011) Anxiety, movement kinematics, and visual attention in elite-level performers. *Emotion*, 11: 595-602.
- Cooke, A., Kavussanu, M., McIntyre, D., and Ring, C. (2010) Psychological, muscular and kinematic factors mediate performance under pressure. *Psychophysiology*, 47: 1109-1118.
- Elias, L. J. and Bryden, M. P. (1998) Footedness is a better predictor of language lateralization than handedness. *Laterality*, 3: 41-51.
- 藤原勝夫 (2011) 立位姿勢の保持機構. 藤原勝男編, 姿勢制御の神経生理機構. 杏林書院, pp. 1-28.
- 藤原勝夫・中野綾子・池上晴夫・幸山彰一 (1988) 水平床振動を繰り返し負荷した場合の立位姿勢調節の変化. *体力科学*, 37: 25-36.
- Hasegawa, Y., Koyama, S., and Inomata, K. (2013) Perceived distance during golf putting. *Hum. Mov. Sci.*, 32: 1226-1238.
- 長谷川弓子・矢野円都・小山 哲・猪俣公宏 (2011) プレッシャー下のゴルフパッティングパフォーマンス: 不安の強度とパッティング距離の影響. *スポーツ心理学研究*, 38: 85-98.
- Hatfield, B. D., Costanzo, M. E., Goodman, R. N., Lo, L. C., Oh, H., Rietschel, J. C., Saffer, M., Bradberry, T., Contreras-Vidal, J., and Haufler, A. (2013) The influence of social evaluation on cerebral cortical activity and motor performance: A study of "Real-Life" competition. *Int. J. Psychophysiol.*, 90: 240-249.
- 肥田野 直・福原真知子・岩脇三良・曾我祥子・Speilberger, C. D. (2000) 新版State-Trait Anxiety Inventory-Form JYZ. 実務教育出版.
- 樋口貴広 (2015) 姿勢制御. 樋口貴広・建内宏重編, 姿勢と歩行: 協調からひも解く. 三輪書店, pp. 189-255.
- Higuchi, T., Imanaka, K., and Hatayama, T. (2002) Freezing degrees of freedom under stress: Kinematic evidence of constrained movement strategies. *Hum. Mov. Sci.*, 21: 831-846.
- Huffman, J. L., Horslen, B. C., Carpenter, M. G., and Adkin, A. L. (2009) Does increased postural threat lead to more conscious control of posture? *Gait Posture*, 30: 528-532.
- Jaśkowski, P., van der Lubbe, R. H. J., Wauschkuhn, B., Wascher, E., and Verleger, R. (2000) The influence of time pressure and cue validity on response force in an S1-S2 paradigm. *Acta Psychol.*, 105: 89-105.
- Lê, T. T. and Kapoula, Z. (2006) Distance impairs postural stability only under binocular viewing. *Vision Res.*, 46: 3586-3593.
- McNevin, N. H. and Wulf, G. (2002) Attentional focus on supra-postural tasks affects postural control. *Hum. Mov. Sci.*, 21: 187-202.
- Moore, L. J., Vine, S. J., Cooke, A., Ring, C., and Wilson, M. R. (2012) Quiet eye training expedites motor learning and aids performance under heightened anxiety: The roles of response programming and external attention. *Psychophysiology*, 49: 1005-1015.
- 村山孝之・田中美吏・関矢寛史 (2009) 「あがり」の発現機序の質的研究. *体育学研究*, 54: 263-277.
- Murray, N. P. and Raedeke, T. D. (2008) Heart rate variability as an indicator of pre-competitive arousal. *Int. J. Sport Psychol.*, 39: 346-355.
- Nieuwenhuys, A. and Oudejans, R. R. D. (2010) Effects of anxiety on handgun shooting behavior of police officers: a pilot study. *Anxiety Stress Coping*, 23: 225-233.
- 日本めまい平衡医学会 (1983) 平衡機能検査の基準.

- Equilibrium Research, 42: 367-369.
- 大築立志 (2011) 姿勢研究の視点. 大築立志ほか編, 姿勢の脳・神経科学—その基礎から臨床まで—. 市村出版, pp. 1-20.
- Richardson, A., Hughes, G., and Mitchell, A. (2012) Center of pressure excursion during the golf putting stroke in low, mid and high handicap golfers. *Int. J. Golf Sci.*, 1: 127-139.
- 佐々木丈予・関矢寛史 (2014) 心理的プレッシャーが1歩踏み出し運動の初期姿勢ならびに予測的姿勢制御に及ぼす影響. *体育学研究*, 59: 577-589.
- シャムウェイック・ウーラコット: 田中 繁・高橋明監訳 (2013) モーターコントロール—研究室から臨床実践へ—. 医歯薬出版, pp. 163-198. <Shumway-Cook, A. and Woollacott, M. H. (2012) Motor control: Translating research into clinical practice (4th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.>
- Stins, J. F., Roerdink, M., and Beek, P. J. (2011) To freeze or not to freeze? Affective and cognitive perturbations have markedly different effects on postural control. *Hum. Mov. Sci.*, 30: 190-202.
- 高井逸史・宮野道雄・中井伸夫・山口武彦・吉村知倫・白濱晴美・村上将典・井上健太郎・柄崎隆治・周藤 浩 (2001) 加齢による姿勢変化と姿勢制御. *日本生理人類学会誌*, 6: 41-46.
- Tanaka, Y. (2015) Spinal reflexes during postural control under psychological pressure. *Motor Control*, 19: 242-249.
- Tanaka, Y., Funase, K., Sekiya, H., and Murayama, T. (2012) Modulation of corticospinal motor tract excitability during a fine finger movement under psychological pressure: A TMS study. *Int. J. Sport Health Sci.*, 10: 39-49.
- Tanaka, Y., Funase, K., Sekiya, H., Sasaki, J., and Takemoto, T. (2011) Multiple EMG activity and intracortical inhibition and facilitation during a fine finger movement under pressure. *J. Mot. Behav.*, 43: 73-81.
- Tanaka, Y., Funase, K., Sekiya, H., Sasaki, J., and Tanaka, Y. M. (2014) Psychological pressure facilitates corticospinal excitability: Motor preparation processes and EMG activity in a choice reaction task. *Int. J. Sport Exer. Psychol.*, 12: 287-301.
- Tanaka, Y. and Sekiya, H. (2010) The influence of audience and monetary reward on putting kinematics of expert and novice golfers. *Res. Q. Exer. Sport*, 81: 416-424.
- Tanaka, Y. and Sekiya, H. (2011) The influence of monetary reward and punishment on psychological, physiological, behavioral, and performance aspects of a golf putting task. *Hum. Mov. Sci.*, 30: 1115-1128.
- Ueta, K., Okada, Y., Nakano, H., Osumi, M., and Morioka, S. (2015) Effects of voluntary and automatic control of center of pressure sway during quiet standing. *J. Mot. Behav.*, 47: 256-264.
- Vine, S. J. and Wilson, M. R. (2010) Quiet eye training: Effects on learning and performance under pressure. *J. Appl. Sport Psychol.*, 22: 361-376.
- Vuillerme, N., Danion, F., Marind, L., Boyadjiane, A., and Prieur, J. M. (2001) The effect of expertise in gymnastics on postural control. *Neurosci. Lett.*, 303: 83-86.
- Vuillerme, N. and Nafati, G. (2007) How attentional focus on body sway affects postural control during quiet standing. *Psychol. Res.*, 71: 192-200.
- Weinberg, R. S. (1978) The effects of success and failure on the patterning of neuromuscular energy. *J. Mot. Behav.*, 10: 53-61.
- Williams, A. M. and Elliott, D. (1999) Anxiety, expertise, and visual search strategy in karate. *J. Sport Exer. Psychol.*, 21: 362-375.
- Williams, A. M., Vickers, J., and Rodrigues, S. (2002) The effects of anxiety on visual search, movement kinematics, and performance in table tennis: A test of Eysenck and Calvo's processing efficiency theory. *J. Sport Exer. Psychol.*, 24: 438-455.
- Wilson, M., Smith, N. C., and Holmes, P. S. (2007) The role of effort in influencing the effect of anxiety on performance: Testing the conflicting predictions of processing efficiency theory and the conscious processing hypothesis. *Br. J. Psychol.*, 98: 411-428.
- Wilson, M. R., Vine, S. J., and Wood, G. (2009) The influence of anxiety on visual attentional control in basketball free throw shooting. *J. Sport Exer. Psychol.*, 31: 152-168.
- ウインター: 長野明紀・吉岡伸輔訳 (2011) バイオメカニクス—人体運動の力学と制御—. ラウンドフラット, pp. 150-151. <Winter, D. A. (2009) Biomechanics and motor control of human movement (4th ed.). Wiley.>
- Winter, D. A., Patla, A. E., Prince, F., and Ishac, M. (1998) Stiffness control of balance in quiet standing. *J. Neurophysiol.*, 80: 1211-1221.
- Wulf, G., Landers, M., Lewthwaite, R., and Töllner, T.

- (2009) External focus instructions reduce postural instability in individuals with Parkinson disease. *Phys. Ther.*, 89: 162–168.
- Wulf, G., Töllner, T., and Shea, C. H. (2007) Attentional focus effects as a function of task difficulty. *Res. Q. Exer. Sport*, 78: 257–264.
- Yoshie, M., Kudo, K., Murakoshi, T., and Ohtsuki, T. (2009) Music performance anxiety in skilled pianists: effects of social-evaluative performance situation on subjective, autonomic, and electromyographic reactions. *Exp. Brain Res.*, 199: 117–126.
- Yoshie, M., Kudo, K., and Ohtsuki, T. (2008) Effects of psychological stress on state anxiety, electromyographic activity, and arpeggio performance in pianists. *Med. Probl. Perform. Art.*, 23: 120–132.
- (2015年11月25日受付)
(2016年1月28日受理)
- Advance Publication by J-STAGE
Published online 2016/2/25