

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：20101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11290

研究課題名（和文）女性アスリートの足アーチ構造とジャンプ着地動作に与えるエストロゲン濃度の影響

研究課題名（英文）The impact of the fluctuation in female hormone levels during the menstrual cycle on foot alignment

研究代表者

片寄 正樹（Katayose, Masaki）

札幌医科大学・保健医療学部・教授

研究者番号：50221180

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）：月経周期中の女性ホルモンの変動は、スポーツ中の下肢傷害発生と関連する可能性が議論されている。本研究は、ジャンプ着地動作時の下肢アライメントを変化させる一因である足部アライメントに着目し、エストロゲンとプロゲステロンの比率の変化が足部アライメントに影響を与える重要な因子であることを示した。加えて、スポーツ中の足部アライメント保持に重要となる筋持久力に及ぼす性差の影響に着目し、若年成人男女では運動前にエネルギー摂取を行った場合でも血糖値変動および運動時血流調節に性差はないことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで月経周期とスポーツ活動中の下肢傷害発生との関連を見てきた研究ではエストロゲンのみに着目した報告が多かった。本研究では「エストロゲンとプロゲステロンの比率」が足部アライメント変化に影響する重要な因子であることを示した。そのため、女性ホルモン濃度の詳細な評価が女性アスリートの下肢傷害発生の予防に貢献できる可能性を示した学術的・社会的に意義のある研究となった。

研究成果の概要（英文）：Fluctuations in female hormone levels during the menstrual cycle have been discussed as a possible link to the incidence of lower limb disorders in sport. The present study focused on foot alignment, which is a contributing factor to changes in lower limb alignment during jump landing movements. It was shown that changes in the ratio of estrogen to progesterone are important factors affecting foot alignment. Additionally, we examined the effect of sex differences on muscle endurance, which is crucial for maintaining foot alignment during sports activities. The study demonstrated that there were no significant sex differences in blood glucose fluctuations and blood flow regulation during exercise in young adult men and women, even after energy intake before exercise.

研究分野：スポーツ理学療法学

キーワード：月経周期 女性ホルモン 足部内側縦アーチ 運動時血流調節 性差

1. 研究開始当初の背景

月経周期中の女性ホルモン濃度の変動は女性アスリートの外傷発生に関与することが近年注目されている。エストロゲンは靭帯や腱の弾性を低下させ、関節弛緩性を強める作用がある。実際、女性の ACL 損傷はエストロゲン濃度が高い周期で発生率が高い。しかし、エストロゲン受容体は全身に存在するため、他の組織にも影響を与えている可能性がある。ACL 損傷のリスク因子である動作時の膝外反角度は足内側縦アーチ高の低下により増大する。しかし、月経周期中の足内側縦アーチ高の変化に関しては検討されていなかった。

2. 研究の目的

我々はエストロゲン濃度の増加が足内側縦アーチ支持組織の弾性を低下させアーチ高の低下に関与し、動作時の下肢アライメントを変化させる可能性があると考えた。そのため本研究は、①エストロゲン濃度が足内側縦アーチ高に及ぼす影響を検証し、さらに②月経周期中の足内側縦アーチ高の変化がジャンプ着地動作時の下肢アライメントに及ぼす影響を検証することを目的とした。

加えて、女性ホルモン濃度の変動により生じる下肢傷害発生リスクの変動に対し、女性特有の身体機能への介入の必要性を明らかにするため追加の実験を行なった。追加実験の目的は、筋疲労に影響を及ぼす性差の存在に着目し、「食後運動中の活動肢における血流調節機能に与える影響」に性差があるかを検討した。

3. 研究の方法

(1) 実験 1：月経周期中の女性ホルモン濃度の変動が足部アライメントに及ぼす影響

<対象者>

健康成人女性 34 名をリクルートし、23 名 (21±1 歳, BMI 19.9±1.4kg/m², 月経周期 31.7±3.6 日) が本実験に参加した。被験者の月経周期は、実験開始 2 ヶ月前から予定月経日の前後 4 日以内に月経が来ているかを聴取した。加えて、排卵予測検査薬にて排卵日を予測した。月経周期の乱れや採血による体調不良の訴えなど 11 名の被験者が実験前に除外された。

<測定項目および解析方法>

卵胞期初期、卵胞期後期、黄体期中期に女性ホルモン濃度、静的および動的足部アライメント計測を行なった。本実験の 2 ヶ月前より、アンケート、基礎体温計、排卵日予測検査薬を用いて事前調査を実施し、実験日程を決定した。女性ホルモン濃度は看護師が静脈血を採取し、エストロゲン濃度、プロゲステロン濃度、リラキシン濃度(黄体期のみ)を解析した。

・主要アウトカム：足部アライメント

足部アライメント計測には 3 次元動作解析装置 (VICON, Oxford Metrics, UK) および床反力計、赤外線カメラ 10 台を使用した。解析には Visual3D (C-motion, Inc) を使用し、Multi-segment Foot Model による足部のアライメントの算出を行なった。測定は利き足とした。

静的足部アライメントは座位、両脚立位、片脚立位の 3 条件における足内側縦アーチ角、後足部外がえし角度を計測した。計測は各肢位 10 秒間を 3 回とし、初めと終わりの 2 秒を除いた 6 秒間の平均値を算出した。測定中は液晶画面に基準線を引いたリアルタイム映像を描出し、被験者はその線に合わせて各測定肢位をとることで、測定中の姿勢の統一を図った。(図 1)

動的足部アライメントは 30cm 台からの片脚ジャンプ着地動作を計測し、成功した 3 試技を解析した。着地位置は 30cm 台から前方 40cm の床反力計上に貼付したテープ上とした。足部アライメントに加え、ヘレンヘイズのマーカセットを用いて下肢アライメントの計測を行った。着地後、2 秒以上静止できた試技を成功とし、成功した 3 試技を解析対象とした。解析区間は、床反力鉛直成分 10N 以上が記録された点から膝関節最大屈曲角度までとし、足内側縦アーチ角、後足部外がえし角度、膝関節外反角度の最大値を算出した。



図 1：リアルタイムフィードバック映像
(片脚立位姿勢)

(2) 実験2：糖負荷後運動が血糖値変動、血管機能および全身循環に与える影響における性差の

検討

<対象者>

糖尿病と診断されていない成人若年男女 22 名を対象とし、高血糖刺激後の血糖値が 140 mg/dL 以上となった 11 名（男性 7 名と女性 4 名、 24 ± 4 歳、BMI 21.8 ± 1.2 kg/m²）を解析対象とした。性差を検討するべく若年女性については卵胞期前期（月経開始 7 日以内）に測定した。

<測定項目および解析方法>

測定は、高血糖刺激である 75g 経口ブドウ糖負荷（高血糖刺激）または 75g 経口果糖負荷（対照刺激）の前後で安静時の血管拡張能を評価した。さらに、運動時の血流調節を評価するため、糖負荷後 40 分から運動時血流調節の評価を行った。2 種類の糖負荷は、それぞれ別日に行うため、実験は計 2 日を 28 日以上の間隔をあけて実施した。

背臥位にて、左上肢の握力（最大随意収縮強度、MVC）をデジタル握力系計（竹井機器、グリップ-D）を用いて 3 回測定し、その平均値の 15% 強度（15%MVC）を運動時血流測定時の運動強度と決定した。20 分の安静背臥位後、血压監視装置を用いて収縮機上腕動脈血圧（SBP）、拡張期上腕動脈血圧（DBP）を測定した。血压測定後、安静時の血管拡張能の指標である血流依存性血管拡張反応（FMD）を測定し、空腹時採血を行った。その後、高血糖刺激または対照刺激となる糖負荷を実施し、30 分後、40 分後、47 分後、および 60 分後に採血した。運動時血流調節の評価は、糖負荷の 40 分後から測定し、糖負荷の 60 分後時点で FMD 測定を再度実施した。

・主要アウトカム：前腕血管コンダクタンス（FVC）

運動時の活動肢における血流調節の指標として測定した。左上腕動脈の血管径および血流速度を超音波診断装置（Vivid iq）およびリニア型プローブ（6.0-1.3 MHz、12L-RS プローブ）を用いて測定した。2 分間の安静後、15%MVC に相当する重錘を用いた動的ハンドグリップ運動を 5 分間行った。運動は収縮 1 秒、弛緩 2 秒のサイクルとなる律動運動とし、運動の後半 2 分間に交感神経刺激として低強度（-20 mmHg）の下半身陰圧負荷（LBNP）を行った。血管データの測定は安静開始 1 分後から運動終了まで連続的に測定し、動画記録は 30Hz で連続的にキャプチャーBOX（Epiphan systems, DVI2USB 3.0）を通じてコンピュータに取り込み、ハードディスクに保存した。解析は、動画解析ソフトを用いて行い、血流量（BF）、血管コンダクタンス（FVC）、および運動中の FBP に対する FVC の減少率（ $\Delta\%FVC$ ）を以下の式にて算出した。

$$BF \text{ (mL/min)} = \text{血管断面積} \times \text{平均血流速度} \times 60 \times 100$$

$$FVC \text{ (mL/min/mmHg)} = BF / \text{平均血圧}$$

$$\Delta\%FVC \text{ (\%)} = (FVC_{\text{運動+LBNP}} - FVC_{\text{運動}}) / FVC_{\text{運動}} \times 100$$

4. 研究成果

(1) 実験 1：

エストロゲン濃度は卵胞期初期、卵胞期後期、黄体期中期の順で有意に高かった。プロゲステロン濃度は黄体期中期が他の周期よりも有意に高かった。エストロゲン/プロゲステロン比は各周期間に有意な差がなかった。

静的および動的足部アライメントに関しては、卵胞期初期に比べ卵胞期後期に有意に後足部外がえし角度が大きかった。足内側縦アーチ角は各周期間で統計的に有意な差はなかった。

女性ホルモン濃度の変化量と足部アライメント変化に関しては、エストロゲン/プロゲステロン比の変化量と後足部外がえし角度変化量との間には全ての測定肢位で有意な正の相関があった（座位： $\rho=0.323$, $p=0.013$ 、両脚立位： $\rho=0.284$, $p=0.031$ 、片脚立位： $\rho=0.344$, $p=0.008$ ）（図 2）。エストロゲン/プロゲステロン比変化量と動的足部および膝関節アライメント変化量との間に有意な相関はなかった（足内側縦アーチ角： $\rho=0.228$, $p=0.086$ 、後足部外がえし角度： $\rho=0.221$, $p=0.096$ 、膝関節外反角度： $\rho=0.205$, $p=0.123$ ）。

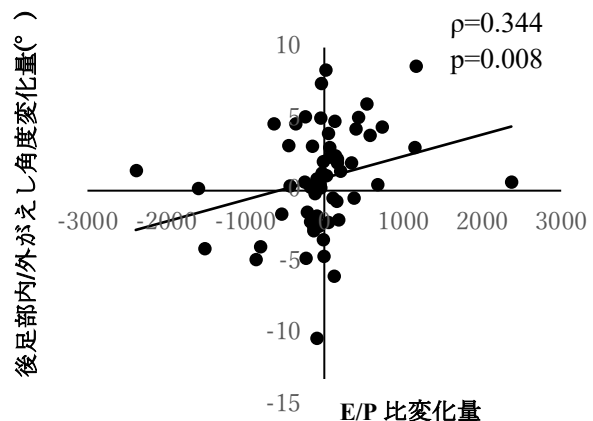


図 2：エストロゲン/プロゲステロンの比率変化と片脚立位時の後足部外返し角変化量の関係

また、プロゲステロン濃度の変化量と静的足内側縦アーチ角の変化量との間で有意な負の相関を認めた（座位： $\rho = -0.311$, $p=0.018$ 、両脚立位： $\rho = -0.285$, $p=0.030$ 、片脚立位： $\rho = -0.381$, $p=0.003$ ）。動的足部および膝関節アライメントに関しては、プロゲステロン濃度変化量と片脚ジャンプ着地動作時の足内側縦アーチ角の変化量の間には有意な負の相関があった（ $\rho = -0.293$, $p=0.025$ ）。

従来の研究で着目されてきた、エストロゲン濃度の変化量と足部アライメントの変化量の間には静的及び動的条件ともに有意な相関を認めた変数はなかった。

(2) 実験 2 :

糖負荷後の血糖値変動は、高血糖刺激条件のみ血糖値が上昇し、対照条件より高値を示した（糖負荷後全ての時点で $P < 0.01$ ）。しかし、血糖値変動に対する性差の影響は認めなかった（性別の主効果 $P=0.18$ ）。上腕動脈のFMDは、糖負荷前のFMDに試行間の差を認めず（高血糖条件 vs. 対照条件, $7.6 \pm 2.8\%$ vs. $6.5 \pm 2.4\%$, $P=0.34$ ）、糖負荷60分後には高血糖条件のFMDが低値を示した（ $6.1 \pm 2.2\%$ vs. $9.0 \pm 3.3\%$, $P=0.02$ ）。しかし、性差が上腕動脈のFMDおよび糖負荷による変化に影響を与えなかったが（性別×条件×時間の交互作用, $P = 0.36$ ）、性差を認める傾向を示した（性別の主効果 $P=0.053$ ）。

一方、主要アウトカムであるFVCについては、運動中の交感神経刺激によるFVCの有意な低下を認めず（時間の主効果, $P = 1.00$, 図3）、高血糖による影響も認めなかった（条件の主効果, $P = 0.98$ ）。さらに、（性差の主効果, $P=0.28$ ）。また、 $\Delta\%FVC$ についても交互作用を認めず（ $P = 0.82$ ）、性差（ $P = 0.37$ ）および条件間の差（高血糖条件 vs. 対照条件, $-0.70 \pm 2.2\%$ vs. $-3.7 \pm 14.0\%$, $P=0.65$ ）も認めなかった。

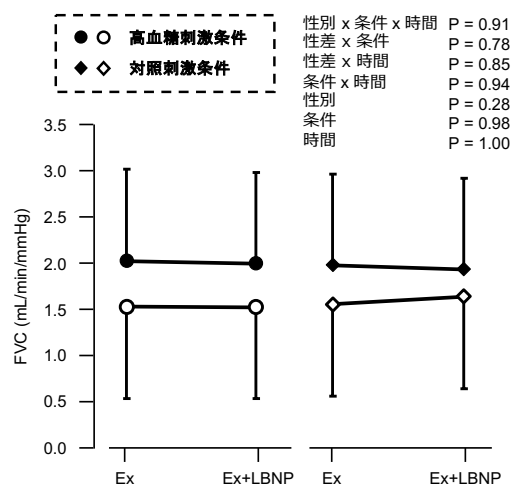


図3：前腕血管コンダクタンス
平均±SD, Ex; 運動中, Ex+EBNP; 運動中のLBNP刺激時, 白抜き; 女性, 黒塗り; 男性

<考察>

これまでの研究では、エストロゲンが関節弛緩性や筋骨格系組織に及ぼす影響を調査した報告が多かった。本研究では、月経周期中の3つのフェーズで実際にエストロゲンとプロゲステロンを計測し、エストロゲンではなくエストロゲン/プロゲステロン比の変化量およびプロゲステロン濃度の変化量と足部アライメントの間に有意な相関を認めた。プロゲステロンは抗エストロゲン作用や組織のコラーゲンや線維芽細胞を増殖させる働きを持つことが報告されている。また、エストロゲン/プロゲステロン比の高い卵胞期後期から排卵期にかけて関節弛緩性が増大するとされている。これらのことから、エストロゲン/プロゲステロン比が高い状態では、エストロゲンの作用が有意に働き静的足部アライメント計測時の足内側縦アーチ低下、後足部外がえし角度増大を認めたと考える。

現在のスポーツ現場において、月経周期を考慮した傷害予防戦略は行われていない。本研究の結果は、月経周期を考慮した傷害予防戦略立案の必要性を示唆しており、今後は、女性ホルモン濃度の変化に応じたウォーミングアップやインソールの使用などを具体的な傷害予防戦略の立案につながる知見を蓄積していく必要性が考えられる。

加えて、実験2において、糖尿病でない若年成人男女では経口ブドウ糖負荷による血糖値変動および血管内皮機能、運動時血流調節に性差を認めなかった。また、急性の高血糖は、糖負荷後の血管内皮機能を一過性に低下させるが、運動時の血流調節は減弱させない可能性が示唆された。以上のことから、空腹時血糖値が正常な若年成人において、血糖値上昇は、安静時の血管拡張能を低下させるが、運動時の活動筋血流調節機能を低下させなかった。すなわち、運動前にエネルギー摂取を行った場合でも、筋疲労に伴う運動パフォーマンスの低下に性差がない可能性が示唆され、今回検討した視点では女性特有の介入の必要性は高くはないことが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐々木翔平, 戸田創, 片寄正樹
2. 発表標題 月経周期中の女性ホルモン濃度の変動が静的足部アライメントに及ぼす影響
3. 学会等名 第33回日本臨床スポーツ医学会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木翔平, 戸田創, 岩本えりか, 片寄正樹
2. 発表標題 月経周期中の女性ホルモン濃度の変動がジャンプ着地動作時の足部アライメントに及ぼす影響
3. 学会等名 第9回日本スポーツ理学療法学会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuki Kamoda, Rintaro Sakamoto, Koki Akanuma, Arata Tsunekawa, Masaki Katayose, Toru Neki, Kota Watanabe, Erika Iwamoto
2. 発表標題 Effect of postprandial hyperglycemia on functional sympatholysis in young non-diabetic adults
3. 学会等名 71st American College of Sports Medicine
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鴨田樹, 坂本琳太郎, 赤沼航季, 恒川新, 根木亨, 片寄正樹, 岩本えりか
2. 発表標題 食後高血糖は運動時における活動肢の血流増加を抑制する
3. 学会等名 第25回日本体力医学会北海道地方会
4. 発表年 2024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
研究分担者	寒川 美奈 (Samukawa Mina) (40360953)	北海道大学・保健科学研究院・准教授 (10101)	
研究分担者	谷口 圭吾 (Taniguchi Keigo) (90381277)	札幌医科大学・保健医療学部・教授 (20101)	
研究分担者	岩本 えりか (Iwamoto EriIa) (40632782)	札幌医科大学・保健医療学部・講師 (20101)	
研究分担者	戸田 創 (Toda Hajime) (40516580)	札幌医科大学・保健医療学部・講師 (20101)	
研究分担者	青木 信裕 (Aoki Nobuhiro) (20554653)	札幌医科大学・保健医療学部・助教 (20101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------