

女性の性周期が筋機能，腱組織の力学的および代謝的特性 に及ぼす影響

東京大学 久保 啓太郎
(共同研究者) 国士舘大学 宮本 麻奈
同 池袋 敏博
同 角田 直也

Effects of Menstrual Cycle Phase on the Mechanical and Metabolic Properties of Muscle and Tendon in Humans

by

Keitaro Kubo

*Department of Life Science,
University of Tokyo*

Mana Miyamoto, Toshihiro Ikebukuro, Naoya Tsunoda

*Faculty of Physical Education,
Kokushikan University*

ABSTRACT

The present study aimed to investigate the changes in the mechanical and metabolic properties of human muscle and tendon during the menstrual cycle in vivo. The subjects were young healthy women ($n = 8$, age 22.5 ± 0.9 years) with a normal menstrual cycle. Cycle phases were divided into the menstrual, (when estradiol and progesterone concentrations were low) ovulatory (when estradiol was elevated and progesterone was low), and luteal (when progesterone was elevated). Measurements included maximal

isometric voluntary contraction (MVC), muscle thickness (using ultrasonography), muscle activation level (using interpolated twitch method), tendon stiffness (using ultrasonography), blood volume and oxygenation of muscle and tendon (using near-infrared spectroscopy) in knee extensors and plantar flexors. No significant changes in MVC, muscle thickness and activation level during the menstrual cycle. Similarly, there were no significant differences in the tendon properties (maximal tendon elongation and stiffness) among the three phases. These results suggested that the changes in female steroid hormones during the menstrual cycle did not affect the mechanical and metabolic properties of human muscle and tendon.

要 旨

本研究の目的は、性周期に伴う膝伸筋群および足底屈筋群における筋・腱の力学的および代謝的特性の変動を検証することである。8名の成人女性を対象に、月経期、排卵期、黄体期の3期において、等尺性最大筋力、筋厚、筋活動水準（電気刺激法）、腱ステイフネス（超音波法）、筋および腱の血液量と酸素飽和度（近赤外分光法）を測定した。血清中の性ホルモンより、排卵期では黄体化ホルモン、エストラジオールが高値を示し、黄体期ではプロゲステロンが高い値を示し、妥当な時期に測定が行われたことが推察された。膝伸展筋群および足底屈筋群ともに、最大筋力、筋厚、筋活動水準、血液量および酸素飽和度が性周期に伴い変動を示さなかった。同様に、両部位における腱の最大伸張量、ステイフネス、血液量および酸素飽和度も3つの期ではほぼ同様の値を示した。以上の結果より、膝伸展筋群および足底屈筋群ともに、性周期に伴う最大筋力、筋活動水準、筋および腱の力学的特性および代謝的特性が変動しないことが明らかになった。

緒 言

腱や靭帯におけるスポーツ障害は、女性が男性よりも高い割合で発生する事が知られている²⁾。

この原因については内因性の要素である女性ホルモンの関与が示唆されている。例えば、女性の前十字靭帯損傷はエストロゲン濃度の高い排卵期に多く発生する事が報告されている¹⁶⁾。従って、性周期に伴って腱や靭帯の力学的および代謝的特性に変化が生じ、それらが若年女性における障害発生の一因になっている事が推察される。実際に、動物を用いた研究により、女性ホルモンが腱や靭帯の強度やコラーゲン含有量に影響を及ぼすことが示されている^{7,15)}。しかし、ヒト生体で性周期に伴う腱特性の変化を検証した研究は存在しない。

一方、性周期に伴い最大筋力が変動することが報告されている^{3,10,14)}。例えば、Sarwarら¹⁴⁾は等尺性の膝伸展筋力が排卵期に有意に増大することを示した。しかし、最大筋力は筋の形状や活動水準の影響を受けるが⁸⁾、性周期に伴う最大筋力の変動の要因について十分に明らかにされていない。さらに、上述の腱組織や靭帯におけるスポーツ障害は、腱や靭帯の組織そのものの特性変化に加えて、筋機能変化との関連も重要な因子と考えられる。

以上より、性周期に伴い、最大筋力、筋の活動水準および腱特性が変動することが、女性に多くみられる腱や靭帯における障害発生に影響している可能性が考えられる。そこで本研究では、性周期に伴う膝伸筋群および足底屈筋群における筋・

腱の力学的および代謝的特性の変動を検証することを目的とした。

1. 方法

1. 1 被検者

被検者は、健康な成人女性8名（年齢 22.5 ± 0.9 歳，身長 160.2 ± 5.1 cm，体重 56.4 ± 3.7 kg）であった。被検者は定期的な運動習慣を持たず，経口避妊薬や常備薬の服用，飲酒および喫煙の習慣などはなかった。被検者の月経周期を確認するために，本測定前1ヶ月にわたり基礎体温を記録させた。その結果，8名全員の被検者が低温相と高温相の2相が認められ，定期的な25～35日周期の正常月経周期を有していた。被検者には，あらかじめ実験の趣旨を説明した上で，実験参加についての同意を得た。

1. 2 測定時期

本研究では，月経周期の中でも性ホルモンが著しく異なると予想される以下の3つの時期に測定を実施した^{3,4)}。測定時期は基礎体温グラフで推定したが，測定日に採血を行い，血清中の黄体化ホルモン，エストラジオール，プロゲステロン濃度を測定し，妥当な時期に測定出来たかを確認した（下記参照）。

月経期：月経開始後1～3日の3日間

排卵期：月経開始後12～16日の排卵周辺の4日間

黄体期：排卵後8～10日の3日間

各測定（下記参照）に対する学習効果の影響を除くことを目的として，本測定の前に筋力測定などの測定に慣れるために，測定練習を実施した。さらに，各被検者で，異なる性周期の時期から測定を開始するように設定し，順序をランダムにした。

1. 3 測定項目

1. 3. 1 血清ホルモン値

採血は測定の前に行い，血清を分離した。血清中の黄体化ホルモン，エストラジオール，プロゲステロンの分析は，三菱化学に委託した。

1. 3. 2 筋厚

Bモード超音波装置（SSD-2000，アロカ社）を用い，仰臥位姿勢にて大腿前部および伏臥位姿勢にて下腿後部の筋厚を測定した。大腿前部については大腿直筋上の大腿長の30%（近位），50%（中央），70%（遠位）の3ヶ所，下腿後部については外側腓腹筋上の下腿長の20%（近位），30%（中央），40%（遠位）の3ヶ所とし，それぞれの部位で最も筋厚が大きくなる部位（筋腹付近）を測定した。本研究では，大腿前部および下腿後部それぞれ3ヶ所の筋厚の平均値を膝伸展筋群および足底屈筋群の筋量の指標とした。

1. 3. 3 等尺性随意最大筋力

被検者は通常のウォーミングアップの後，膝伸展および足底屈動作における等尺性随意最大筋力（Maximum voluntary contraction; MVC）を測定した。膝伸展筋力については，特別に作成した筋力測定器（アプライドオーフィス社製）を用いて座位姿勢にてストラップを用いて体幹部を固定し，膝角度90度（完全伸展位を0度）で足部をアタッチメントに固定した。足底屈筋力については，特別に作成した筋力測定器（バイン社製）を用いて伏臥位姿勢にてストラップを用いて体幹部を固定し，膝角度0度および足角度90度にて足部をアタッチメントに固定した。被検者には最大下の強度で練習を行わせ，実験プロトコルに慣れさせた。間に2分以上の休息を挟んで，2回の測定を実施し，最大値をその期の代表値とした。なお，測定の順序は，以下の測定項目（1.3.4，1.3.5）を含めて，膝伸展運動課題を最初に行い，充分な

休息の後に足底屈運動課題を行った。

1. 3. 4 筋活動水準

上述（測定項目1.3.3）のMVCの測定と同様の手順で、力発揮を行わせている際に膝伸展筋群および足底屈筋群の筋活動水準を電気刺激により測定した。電気刺激には、高電圧刺激装置（SEN-3301, 日本光電社製, 日本）を用いた。膝伸展筋群については鼠径部, 足底屈筋群については膝窩部の中で最も刺激が大きく感じられる箇所（筋腹中央部）に電気刺激用のパットを付着した。各被検者には最大努力による筋力発揮を行わせ、MVC発揮中に電気刺激を加えた（Twitch force during MVC）。全ての被検者に対して同様の測定を2回実施した。筋活動水準（% activation）の算出には以下の式を用いて算出¹³⁾し、2回の平均値を筋活動水準の値として採用した。

$$\% \text{ activation} = \{ \text{MVC} / (\text{MVC} + \text{Twitch force during MVC}) \} \times 100$$

1. 3. 5 腱の力学的特性

被検者の姿勢は上述（測定項目1.3.3）のMVCの測定時と同様である。運動課題は安静からMVCまで約5秒間で達するようなランプ状の力発揮であった。力発揮を行わせている際の外側広筋および腓腹筋内側頭の縦断画像を超音波診断装置を用いて30Hzにて撮影し、トルク信号と同期させるためにタイマーを入れてビデオ録画した。測定箇所は、大腿長50%部位の外側広筋の筋腹中央部および下腿長30%部位の腓腹筋内側頭の筋腹中央部とした。得られた画像から、筋束と腱

膜の交点の移動距離（伸張量）を計測した。MVC発揮時の腱伸張量を最大腱伸張量、張力-腱伸張量関係の50~100%MVCの範囲における傾きから腱ステイフネスを算出した⁵⁾。

1. 3. 6 筋および腱の血液量および酸素飽和度

被検者の姿勢は上述（測定項目1.3.2）の筋厚の測定時と同様であった。近赤外分光装置を用いて、安静時における筋および腱の総ヘモグロビン量（血液量に相当）および酸素飽和度を測定した。

1. 4 統計処理

各データは、平均値±標準偏差で表した。すべてのパラメータについて、反復測定による一元配置の分散分析を行い、月経周期の変動を検討した。F値が有意であった場合は、Tukey's HSD法による多重比較を行った。有意水準は5%未満とした。

2. 結果

表1に各期の血清中の黄体化ホルモン、エストラジオール、プロゲステロン濃度を示した。黄体化ホルモンおよびエストラジオールは排卵期に有意に高い値を示し、黄体期ではプロゲステロンが有意に高い値を示した。月経期は、すべてのホルモンが低い値であった。

図1に膝伸展筋群および足底屈筋群における各期のMVCを示した。膝伸展筋群では3期の間で有意な差は認められなかった（月経期 113.8 ± 21.6 Nm, 排卵期 112.2 ± 22.7 Nm, 黄体期

表1 各性周期（月経期, 排卵期, 黄体期）における黄体化ホルモン, エストラジオール, プロゲステロンの濃度

	黄体化ホルモン (mIU/ml)	エストラジオール (pg/ml)	プロゲステロン (ng/ml)
月経期	2.2 (0.9)	33.0 (11.2)	0.7 (0.2)
排卵期	11.3 (8.0) *	131.2 (49.3) *	0.7 (0.4)
黄体期	3.7 (1.8) #	82.8 (32.1) *	8.3 (5.3) #

* p<0.05 (月経期から)

p<0.05 (排卵期から)

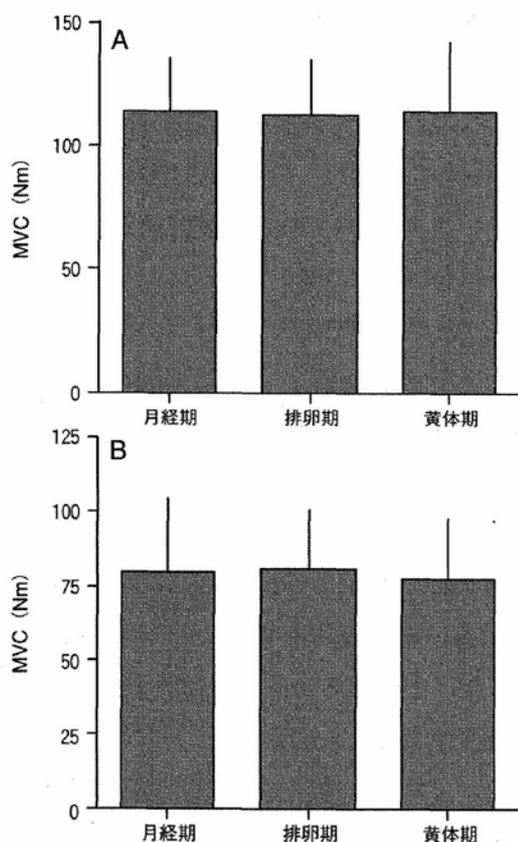


図1 各性周期(月経期, 排卵期, 黄体期)における膝伸筋群(A)および足底屈筋群(B)の等尺性随意最大筋力

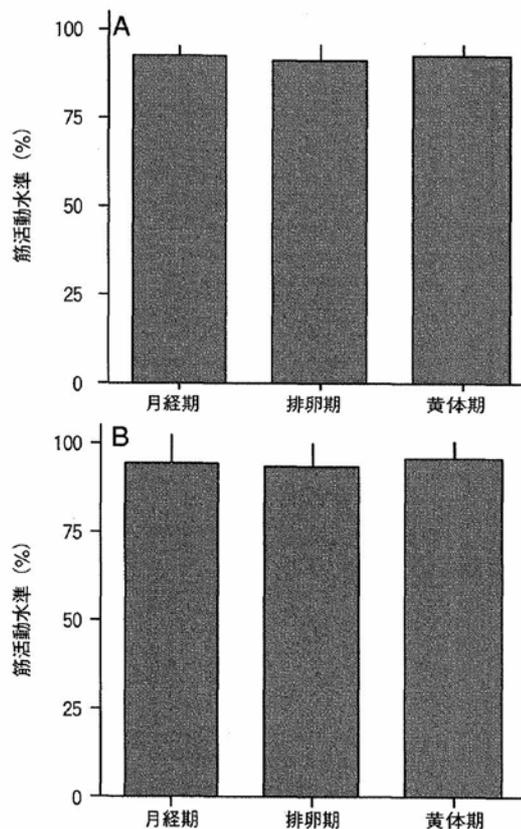


図2 各性周期(月経期, 排卵期, 黄体期)における膝伸筋群(A)および足底屈筋群(B)の筋活動水準

113.6 ± 28.5 Nm). 同様に, 足底屈筋群でも3期の間で有意な差は認められなかった(月経期 80.0 ± 24.4 Nm, 排卵期 80.8 ± 19.7 Nm, 黄体期 77.8 ± 20.3 Nm).

図2に膝伸筋群および足底屈筋群における各期の筋活動水準を示した. 足底屈筋群の活動水準が, 膝伸筋群よりも高い傾向を示したが, 膝伸筋群(月経期 92.6 ± 2.6 %, 排卵期 91.2 ± 4.7 %, 黄体期 92.3 ± 3.5 %)および足底屈筋群(月経期 94.5 ± 7.9 %, 排卵期 93.4 ± 6.5 %, 黄体期 95.7 ± 4.5 %)ともに3期の間で有意な差は認められなかった.

図3に膝伸筋群および足底屈筋群における各期の筋厚を示した. 膝伸筋群(月経期 32.4 ± 3.7 mm, 排卵期 33.1 ± 2.4 mm, 黄体期 33.6 ± 3.9 mm)および足底屈筋群(月経期 38.3 ± 2.5 mm, 排卵期 37.9 ± 3.0 mm, 黄体期 38.4 ± 2.0 mm)ともに, 3期の間で有意な差は認められなかった.

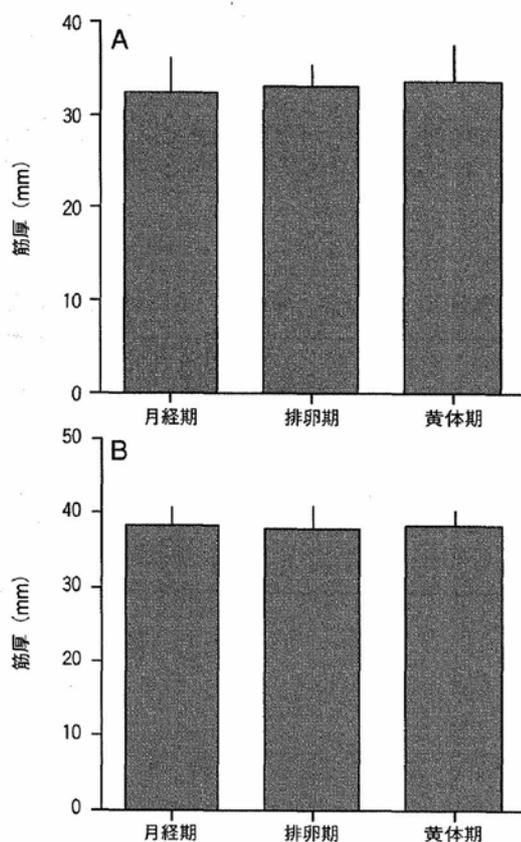


図3 各性周期(月経期, 排卵期, 黄体期)における膝伸筋群(A)および足底屈筋群(B)の筋厚

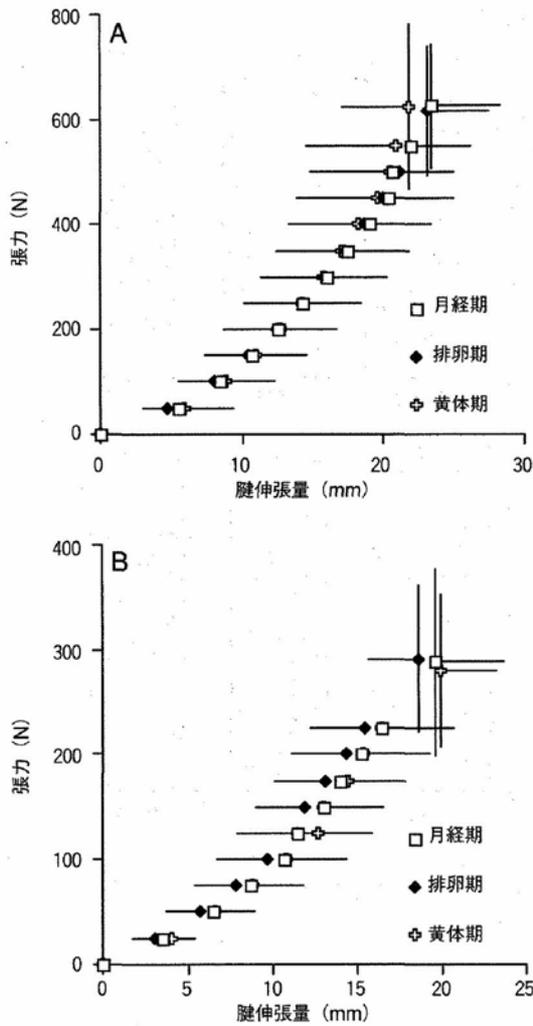


図4 各性周期(月経期, 排卵期, 黄体期)における膝伸展筋群(A)および足底屈筋群(B)の張力-腱伸張量関係

図4に各期における張力-腱伸張量関係を示した。膝伸展筋群および足底屈筋群ともに、すべての張力レベルにおける腱伸張量に有意な差は認められなかった。同様に、腱の最大伸張量および腱ステイフネスについても、3期の間で有意な差は認められなかった(表2)。

表3に、筋および腱の血液量および酸素飽和度を示した。膝伸展筋群および足底屈筋群ともに、3期の間で有意な差は認められなかった。

3. 考察

本研究では、女性に多くみられる腱や靭帯のスポーツ障害の発生原因を探ることを目的にして、性周期に伴う下肢筋群の筋および腱の力学的および代謝的特性の変動を検証した。その結果、膝伸展筋群および足底屈筋群ともにそれらのパラメータに性周期の各期による差はみられなかった。

実際のスポーツ現場においては、女性スポーツ選手の性周期に伴う主観的コンディションの変化がみられることが知られている^{6,12)}。これらのスポーツパフォーマンスの根幹をなす筋機能については、性周期に伴う最大筋力の変動の有無について一致した見解が得られていない。Phillipsら¹⁰⁾は、母指内転筋の等尺性最大筋力が排卵期に他の

表2 各性周期(月経期, 排卵期, 黄体期)における膝伸展筋群および足底屈筋群の腱最大伸張量と腱ステイフネス

	膝伸展筋群		足底屈筋群	
	腱最大伸張量 (mm)	腱ステイフネス(N/mm)	腱最大伸張量 (mm)	腱ステイフネス(N/mm)
月経期	23.4 (4.9)	40.0 (13.7)	19.6 (4.0)	21.4 (7.1)
排卵期	23.1 (4.5)	43.3 (14.0)	18.6 (3.0)	24.2 (9.7)
黄体期	21.8 (4.8)	41.0 (11.9)	20.0 (3.2)	20.1 (10.2)

表3 各性周期(月経期, 排卵期, 黄体期)における膝伸展筋群および足底屈筋群の筋および腱の血液量と酸素飽和度

	膝伸展筋群		足底屈筋群	
	筋血液量 (μ M/l)	筋酸素飽和度 (%)	腱血液量 (μ M/l)	腱酸素飽和度 (%)
月経期	13.5 (1.9)	58.7 (6.5)	5.7 (1.6)	42.4 (8.5)
排卵期	13.6 (1.5)	56.2 (6.0)	5.9 (2.2)	42.6 (8.9)
黄体期	13.4 (1.7)	57.6 (7.4)	6.1 (1.4)	48.6 (10.4)
	足底屈筋群		足底屈筋群	
	筋血液量 (μ M/l)	筋酸素飽和度 (%)	腱血液量 (μ M/l)	腱酸素飽和度 (%)
月経期	15.1 (2.1)	53.9 (8.5)	5.4 (1.3)	56.3 (6.1)
排卵期	15.7 (3.1)	57.4 (4.8)	5.9 (1.5)	61.1 (5.4)
黄体期	14.6 (3.0)	58.6 (9.2)	6.4 (0.8)	60.1 (5.2)

期に比べて約11%高いことを報告している。同様に、岩本ら³⁾も等尺性の肘屈曲筋力が、排卵期に有意に高いことを示している。しかし、その他の多くの研究では、性周期に伴う最大筋力の変動はみられないことが報告されている^{1,4,9)}。本研究では、膝伸展筋力および足底屈筋力ともに、性周期に伴う最大筋力の変動はみられず、これまでの多くの先行研究の見解を支持した。性周期に伴う最大筋力の変動がみられたPhillipsら¹⁰⁾や岩本ら³⁾の報告との相違の原因については不明であるが、部位差の影響が可能性として挙げられる。すなわち、彼等の報告では上肢の筋機能が対象とされたが、その他の先行研究および本研究は主に下肢筋群が対象であった。

最大筋力にはさまざまな要因が複雑に関与しているが、主に筋量と神経系が大きく影響を及ぼしている⁸⁾。本研究では、筋量については各部位3ヶ所の筋厚の平均を指標とし、神経系の活動(筋活動水準)についてはMVC発揮中に電気刺激を挿入することにより評価した。その結果、筋量および筋活動水準ともに、性周期に伴う変動はみられなかった。性周期に伴う筋機能変動の要因として、これら2つを検討した岩本ら³⁾によると、最大筋力は排卵期が有意に高い値を示したにも関わらず本研究と同様の結果が示されている。すなわち、筋量や神経系については性周期の影響を受けないことが示唆された。

女性のスポーツ参加の増加に伴い、女性の腱や靭帯損傷の発生率が高く、さらに性周期により発症頻度が異なることが知られるようになってきた^{2,16)}。この原因として、性周期に伴う性ホルモンが腱や靭帯の特性に影響を与えていることが示唆されている。実際に、高濃度のエストラジオールは線維芽細胞で生成されるコラーゲンを減少させ⁷⁾、卵巣を切除した家兎の靭帯の破断強度が減少する¹⁵⁾ことが示されている。本研究では、ヒト生体の下肢筋群における腱の力学的特性(最大

伸張量、ステイフネス)および代謝的特性(血液量、酸素飽和度)が性周期の影響を受けるか否かを検証した。その結果、いずれのパラメータも性周期に伴う変動がみられなかった。同様に、前十字靭帯の弛緩程度を評価するテストにおいても、性周期の影響を受けないことが報告されている¹¹⁾。したがって、性周期に伴うスポーツ障害発症頻度の相違の原因は、先述の筋機能および筋活動水準に加えて、腱特性でも説明できず、その他の要因が関与していることが示唆された。

本研究では、本測定の前1ヶ月以上前からの基礎体温をもとに、各自の性周期を推定した。実際に、各性ホルモンの変動からも、妥当な時期に測定が行われたことが確認できた。しかし、実際には性ホルモンの個人差が非常に大きいことも明らかになり(表1)、このことが測定されたパラメータが性周期による影響を示さなかった可能性が考えられる。Janse de Jongeら⁴⁾も同様に、性周期に伴う最大筋力の変動がみられなかった原因として、性ホルモンの個人差の大きさを挙げている。したがって、実際に障害を起こす患者の場合には、腱や靭帯の特性と関連が示されている性ホルモンの分泌量が異常に高い可能性がある。今後は例数を増やし性ホルモンと各パラメータとの関連、さらに障害を発症した患者の特徴などを明らかに出来れば、スポーツ現場における腱や靭帯の障害を予測できるスクリーニングの資料が得られるかもしれない。

4. まとめ

本研究では、女性に多くみられる腱や靭帯のスポーツ障害の発生原因を探ることを目的にして、性周期に伴う下肢筋群(膝伸展筋群および足底屈筋群)の筋および腱の力学的および代謝的特性の変動を検証した。その結果、膝伸展筋群および足底屈筋群ともに、性周期に伴う最大筋力、筋活動水準、腱の力学的特性および代謝的特性が変動し

ないことが明らかになった。この結果は、女性における腱や靭帯のスポーツ障害の発生頻度が性周期により異なる原因が、筋・腱の特性以外の要因と関わっていることを示唆するが、さらに例数を増やして詳細に検証する必要があるだろう。

謝 辞

本研究に対して助成を賜った(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、採血等でご協力頂いた国士舘大学の牧亮准教授に感謝致します。

文 献

- 1) Gur, H.: Concentric and eccentric isokinetic measurements in knee muscles during the menstrual cycle: a special reference to reciprocal moment ratios. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 78, 501-505 (1997)
- 2) Huston, L.J., Greenfield, M.L.V.H., Wojtys, E.M.: Anterior cruciate ligament injuries in the female athletes. *Clin. Orthop.*, 372, 50-63 (2000)
- 3) 岩本陽子, 久保潤二郎, 伊藤雅充, 竹宮隆, 浅見俊雄: 月経周期に伴う等尺性随意最大筋力の変動, *体力科学*, 51, 193-202 (2002)
- 4) Janse de Jonge, X.A., Boot, C.R., Thom, J.M., Ruell, P.A., Thompson, M.W.: The influence of menstrual cycle phase on skeletal muscle contractile characteristics in humans. *J. Physiol.*, 530, 161-166 (2001)
- 5) Kubo, K., Kawakami, Y., Fukunaga, T.: Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in humans. *J. Appl. Physiol.*, 87, 2090-2096 (1999)
- 6) Lebrun, C.M.: The effect of the phase of the menstrual cycle and the birth control pill in athletic performance. *Clin. Sports Med.*, 13, 419-441 (1994)
- 7) Liu, S.H., Al-Shaikh, R.A., Panossian, V., Finerman, G.A., Lane, J.M.: Estrogen effect the cellular metabolism of the anterior cruciate ligament. A potential explanation for female athletic injury. *Am. J. Sports Med.*, 25, 704-709 (1997)
- 8) Narici, M.V., Roi, G.S., Landoni, L., Minetti, A.E., Cerretelli, P.: Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 59, 310-319 (1989)
- 9) Petrofsky, J.S., Ledonne, D.M., Rinehart, J.S., Lind, A.E.: Isometric strength and endurance during the menstrual cycle. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 35, 1-10 (1976)
- 10) Phillips, S.K., Sanderson, A.G., Birch, K., Bruce, S.A., Woledge, R.C.: Changes in maximal voluntary force of human adductor pollicis muscle during the menstrual cycle. *J. Physiol.*, 496, 551-557 (1996)
- 11) Pollard, C.D., Braun, B., Hamill, J.: Influence of gender, estrogen and exercise on anterior knee laxity. *Clin. Biomech.*, 21, 1060-1066 (2006)
- 12) Posthuma, B.W., Bass, M.J., Bull, S.B.: Detecting change in functional ability in women with premenstrual syndrome. *Am. J. Obstet. Gynecol.*, 156, 275-278 (1987)
- 13) Reeves, N.D., Narici, M.V., Maganaris, C.N.: Strength training alters the viscoelastic properties of tendons in elderly humans. *Muscle Nerve*, 28, 74-81 (2003)
- 14) Sarwar, R., Beltran Noclos, B., Rutherford, O.M.: Changes in muscle strength, relaxation rate and fatigability during the human menstrual cycle. *J. Physiol.*, 493, 267-272 (1996)
- 15) Slauterbeck, J., Clevenger, C., Lundberg, W., Burchfield, D.M.: Estrogen level alters the failure load of the rabbit anterior cruciate ligament. *J. Orthop. Res.*, 17, 405-408 (1999)
- 16) Wojtys, E.M., Huston, L.J., Lindenfeld, T.N., Hewett, T.E., Greenfield, M.L.V.H.: Association between the menstrual cycle and anterior cruciate ligament injuries in female athletes. *Am. J. Sports Med.*, 26, 614-619 (1998)