体力科学 第67巻 第6号 383-391 (2018)
DOI：10.7600/jspfsm.67.383

原　著

陸上短距離選手におけるハムストリングス各筋内の筋横断面積の形態分布の特徴と競技力との関係

上野 薫[1]，前濱 良太[2]，国正 陽子[1]，牧野 晃宗[2]，佐野 加奈絵[3,4]，
貴嶋 孝太[2]，Paavo V Komi[1,5]，石川 昌紀[1,2]

Specific distribution of cross-sectional area in each hamstring muscle of sprint runners and relationship between those and sprint performance

Kaoru Kamino[1], Ryota Maehama[2], Yoko Kunimasa[1], Akitoshi Makino[2], Kanae Sano[3,4], Kota Kijima[2], Paavo V Komi[1,5] and Masaki Ishikawa[1,2]

[1]大阪体育大学大学院，〒590-0496 大阪府泉南郡熊取町朝代台1-1 *(Graduate School of Sport and Exercise Sciences, Osaka University of Health and Sport Sciences, 1-1 Asashirodai, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0496, Japan)*
[2]大阪体育大学，〒590-0496 大阪府泉南郡熊取町朝代台1-1 *(Osaka University of Health and Sport Sciences, 1-1 Asashirodai, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0496, Japan)*
[3]立命館大学グローバルイノベーション研究機構，〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 *(Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, 1-1-1 Noji higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan)*
[4]森ノ宮医療大学，〒559-8611 大阪府大阪市住之江区南港北1-26-16 *(Morinomiya University of Medical Sciences, 1-26-16 Nankokita, Suminoe-ku, Osaka city, Osaka 559-8611, Japan)*
[5]*University of Jyväskylä, LIKES Research Centre, FI-40700 Jyväskylä, Finland*

Received : February 23, 2018 / Accepted : June 28, 2018

Abstract The purpose of the present study was to examine characteristics of muscle anatomical cross-sectional area (CSA) for different regions from proximal to distal parts of each muscle of the hamstring muscles in high-level sprinters, and to examine the relationship with those and the sprint performance. The CSA of the semitendinosus (ST), semimembranosus (SM), biceps femoris long head (BFL) and biceps femoris short head (BFS) at the four different region of hamstring muscles for twenty sprinters (SPRINT) and twenty healthy male control subjects (CTRL) were measured by using B-mode ultrasonography. The measured regions were divided into four parts from proximal to distal parts (PRO1, PRO2, DIS2, DIS1). The results clearly showed that absolute CSA values in distal parts for all muscles together with PRO2 in ST were greater in SPRINT than in CTRL. When relative CSA values to the entire hamstrings muscles in each region were compared, only relative CSA at PRO1 in ST was greater in SPRINT than in CTRL, conversely, that at proximal regions in BFL and distal regions in BFS were smaller in SPRINT. In the relationships with sprint performance, the CSAs at PRO1 and PRO2 in ST and at PRO1 in SM were only related negatively. These results suggest that distal parts of hamstring muscles for SPRINT may be characteristics for sprint runners. However, the movements related to the specific hypertrophy (PRO1 and PRO2 in ST, PRO1in SM) may play important roles of the improvement of their sprint performance.

Jpn J Phys Fitness Sports Med, 67(6): 383-391 (2018)
Keywords : ultrasonography, bi-articular muscle, hamstring, running

緒　言

筋で発揮された力は腱や腱膜に伝えられ，関節をまたぎ力発揮される．筋収縮のミクロレベルにおける筋メカニクスの研究[1,2]が進む中，マクロレベルにおいては，強度に依存した選択的な調整活動が協働筋間で生じること[3]，単関節筋と異なり二関節筋では筋束の長さ変化が筋腱複合体全体の長さ変化と異なり特異的に振る舞うこと[4]や，二関節筋の存在が力発揮や運動制御における外力の方向や制御に深く関与する可能性[5,6]について報告され，ヒトの骨格筋メカニクスを探求する上で協働筋間や多関節筋の形態や機能特性にアプローチすることへの重要性が増している．

複数の超音波装置による協働筋の筋腱形態や機能に関す

る測定や，マルチ電極を用いた二関節筋全体の筋活動[7-9]の測定が可能となり，筋の一部分の筋活動や筋動態（ここでは，筋の長さ変化を筋動態と表現する）のみでの評価から，筋全体や同一筋内の異なる部位での筋活動や筋動態が評価できるようになってきた．そこでは，同一筋内の異なる部位において羽状角や筋厚の均質性が保たれていない点[10,11]や，同一筋内であっても関節運動に依存した筋活動部位や筋活動パターン[12]が存在することが報告されている．協働筋間においても，大腿四頭筋の筋力トレーニングの介入研究で筋肥大の効果が筋間で異なること[13]や，競技スポーツによっては筋間の形態や機能的特性が異なる可能性が示唆されている[14]．しかしながら，各競技スポーツ種目における同一筋内や協働筋間での筋の形態的特徴と競技動作の機能的重要性について詳細に検討した研究はほとんどない．

二関節筋が多く，４つの協働筋からなるハムストリングス筋群に着目した研究では，それら全体の筋厚[15]や解剖学的筋横断面積（以下「CSA」と略す）[16,17]が大きい陸上短距離選手ほど，股関節の伸展トルク，伸展速度や伸展パワーが高く，競技力も高いことが報告されている[18,19]．一方，接地時の股関節伸展動作や遊脚期中盤から後半にかけては，ハムストリングス筋群の肉離れが生じやすく，その負傷部位はハムストリングス筋群間でも各筋内の部位によっても異なることが報告されている[20,21]．そのため，陸上短距離選手の競技力向上や障害予防においてハムストリングス各筋群の部位特異的な形態・機能特性を明らかにする必要性は高い．多くの二関節筋で構成されている大腿部後面のハムストリングス筋群は，坐骨結節周辺の起始（大腿二頭筋短頭は大腿骨粗線外側唇）から，異なる停止に分かれてつながっているだけでなく，異なる筋の形状（紡錘状筋の半腱様筋，大きな羽状角を有する羽状筋の半膜様筋，大腿二頭筋長頭と短頭）や形態的特徴（近位部の広く長い腱膜と遠位部での大きい筋が特徴的な半膜様筋，近位部の筋が比較的大きく遠位腱が長い特徴を有し，さらに腱画を区切りに筋の機能が異なる半腱様筋[22]）を有する協働筋からなっている．しかしながら，ハムストリングス４筋の筋活動や筋動態を同時に測定し，それらの機能特性を調べた研究はほとんどない[23]．また，ハムストリングス筋群の場合，深部筋を含むため，運動中の４筋同時測定は，測定方法上難しい．そのため，陸上短距離走パフォーマンスや陸上短距離走中の障害発生に影響する可能性のあるハムストリングス協働筋間や同一筋内の異なる部位での筋の形態的特徴や筋機能制御に関しては詳細な検討はなされていない．

そこで本研究では，一般人との比較から，陸上短距離選手のハムストリングス各筋のCSAの形態分布の特徴を明らかにすることと，陸上短距離選手内での比較から，部位別のCSAと競技力との関係を明らかにすることを目的とした．

方　法

被験者　被験者は，陸上競技短距離種目（100 m）を専門とし継続的にトレーニングを行っている男子陸上短距離選手20名（陸上群：年齢 21.5±1.5歳，身長 172.0±5.0 cm，体質量 64.0±5.3 kg，100 mの記録 10.78±0.24秒）と，その比較対象としてスポーツの競技経験を有せず，継続的にトレーニングを行った経験のない，身長と体質量が陸上群と同程度の一般男性20名（一般群：年齢 20.8±1.3歳，身長 171.9±4.8 cm，体質量 63.0±6.5 kg）とした．なお，陸上群における100 m走の競技成績は，本実験の実施日から一年以内の公認記録を採用した．被験者には測定に先立って，研究の趣旨，測定に伴う危険性や被験者の権利を十分に説明し，実験参加に対する同意を得た．本研究は，ヘルシンキ宣言ヒトを対象とする医学研究の倫理的原則に従い，大阪体育大学における研究倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号17-1）．

プロトコール　被験者には，脱力した無理のない伏臥位の姿勢を保持させ，右足の大腿部後面におけるCSAの測定を実施した．まず，測定に先立って，被験者の坐骨結節直下（以下「PRO1」と略す），半腱様筋（以下「ST」と略す）の腱画の近位端（以下「PRO2」と略す），坐骨結節と大腿骨の内転筋結節の成す線分上のおよそ50％の部位（以下「DIS2」と略す）と，坐骨結節と大腿骨の内転筋結節の成す線分上の内転筋結節から５cm近位側（以下「DIS1」と略す）の４か所にマーキングした（Fig. 1）．これら４か所の測定部位の決定は，先行研究において腱画を区切りにSTの筋の振る舞いが異なる可能性があると指摘されていること[22]，またハムストリングス筋群のCSAを測定した研究においては，大腿部の50％位置のCSAを採用していること[24]を考慮し実施した．その後，超音波診断装置（Noblus，日立アロカメディカル社製）を用いて，マーキングした各測定部位におけるハムストリングス筋群のCSAの測定を実施した．各筋の部位別のCSAは，大腿部を遠位から近位にかけて超音波プローブを短軸と長軸の両方向から撮像した映像から同定した．

測定・分析項目

解剖学的筋横断面積（CSA）の計測

CSAの測定では，92 mmのリニア形探触子の超音波プローブ（EUP-L53L，日立アロカメディカル社製）を用いて各部位のCSAを撮像し，得られた超音波画像からST，半膜様筋（以下「SM」と略す），大腿二頭筋長頭（以下「BFL」と略す），大腿二頭筋短頭（以下「BFS」と略

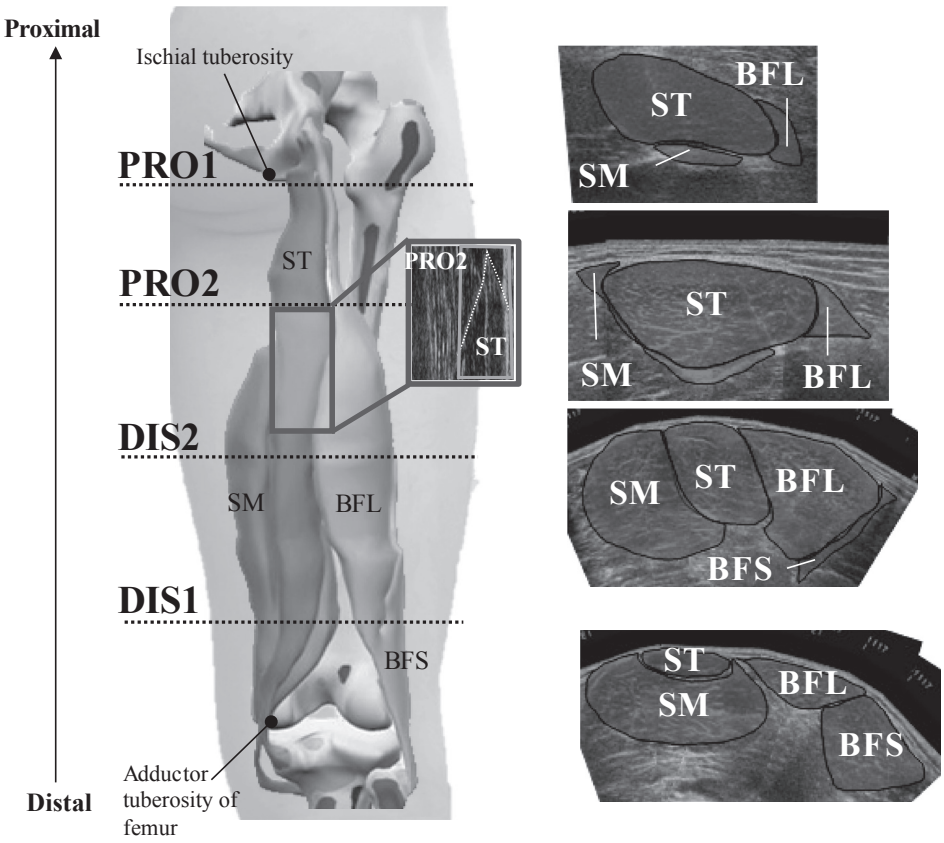

Fig. 1　Distribution measurements of hamstring muscle cross-sectional area and their measurement places.
Left: The measurement places were decided as follows. The DIS1 was the 5 cm proximal point from adductor tuberosity of femur. DIS2 point was the middle point of the line through point of the ischial tuberosity and the point of adductor tuberosity of femur. The PRO1 point was just below of the ischial tuberosity. The PRO2 was the point of the proximal edge of tendinous intersection in ST which was identified by the longitudinal ultrasound image of ST at the PRO 2 point (inserted ultrasound image). Dash lines were measurement places of the traverse ultrasound images.
Right: Typical example of transverse ultrasound images of hamstring muscles from distal (DIS2 and DIS1) to proximal (PRO1 and PRO2) parts.
ST: semitendinosus, SM: semimembranosus, BFL: biceps femoris long head, BFS: biceps femoris short head

す）の4筋それぞれのCSAを画像分析ソフト（Image J, version 1.48, NIH）を用いて計測した（Fig. 1）．計測した各筋における各部位のCSAは，各部位における全4筋のCSAの総和に対する各筋のCSAの相対値（CSA相対値）として算出した．超音波Bモード法による同一験者内繰り返し測定と大腿部におけるCSAの計測に関する信頼性は，すでに先行研究[25]で確認されているが，本研究においても，同一験者内でハムストリングス各筋それぞれの近位から遠位までの4箇所で験者内級内相関係数ICC（1,2）を用いて確認した（PRO1: $ICC_{1,2}$=0.98, PRO2: $ICC_{1,2}$=0.98, DIS2: $ICC_{1,2}$=0.92, DIS1: $ICC_{1,2}$=0.96）．また，超音波診断装置によるCSA計測の信頼性は，MRIで撮像した画像から算出したCSA値との比較を行いICC（1,2）の値は0.91であった．特に，SM，BFLとBFSのCSAは近位側で非常に小さくなり，対象者によっては近位が腱膜のみとなっている場合もあることから，各筋の近位部における短軸方向の超音波画像から筋部位の極端を同定し，測定部位が腱膜だけの場合のCSAは“ゼロ”とした．

統計処理　全ての測定項目は，平均値±標準偏差で示した．各筋における群（陸上群と一般群）と同一筋内の異なる4部位におけるCSAの差の検定には，1要因にのみ対応のある二元配置分散分析を用い，交互作用が有意である場合，事後検定にTukey法を用いて多重比較を行った．100 mの記録と各筋内の各部位におけるCSAとの相関関係は，ピアソンの積率相関関係を用いて検討した．解析には統計解析ソフト（SPSS Statistics ver. 23.0, IBM）を用いた．すべての統計処理において5％水準未満をもって有意と判定した．

結　果

一般群と比較した陸上群のハムストリングス筋形態の特徴　ST，SM，BFLとBFSにおける4部位のCSAにおい

て，群とすべての筋に有意な交互作用が認められた（Fig. 2）．陸上群のSTではPRO2，DIS2とDIS1の3部位において（PRO2とDIS2：$p<0.01$，DIS1：$p<0.05$），SMではDIS2とDIS1の2部位でのみ（それぞれ$p<0.05$），一般群より大きく，STとSMの両筋ともに遠位部で部位別の特徴があったが，STのみ近位側（PRO2）でも部位別の特徴がみられた．また，陸上群のBFLではDIS2とDIS1（それぞれ$p<0.05$），BFSではDIS1においてのみ（$p<0.01$），一般群に比べて大きく，BFLとBFSでも遠位で部位別の特徴がみられた．ハムストリングス各部位における全筋の総CSAに対する相対値においては，STのPRO1においてのみ陸上群が一般群よりも大きく部位別の特徴があり（$p<0.05$），逆に，BFLのPRO1とPRO2（それぞれ$p<0.05$），BFSのDIS2とDIS1（DIS2：$p<0.05$，DIS1：$p<0.01$）においては一般群の方が陸上群よりも有意に大きく，陸上群でCSAが小さい部位別の特徴があった（Fig. 3）．

ハムストリングス各筋の同一筋内での比較　本研究で扱った各筋4か所のCSA測定部位での有意差についてまとめたものをTable 1に示した．STのCSAでは陸上群でPRO2とDIS2が他の部位より大きく，一般群ではPRO2が最も大きかった（Table 1, Fig. 2）．逆に，両群ともDIS1が最も小さく，両群ともPRO2辺りでCSAが大きい特徴を示した．SMでは，陸上群でDIS1が他の部位より大きく，一般群ではDIS1とDIS2が他の部位より大きかった．また，両群ともPRO1とPRO2で他の部位よりも小さい特徴を示した（Table 1, Fig. 2）．BFLでは，両群ともDIS2が他の部位より大きく，BFSでは両群ともDIS1が他の部位より大きかった（Table 1, Fig. 2）．一方，BFLでは陸上群でPRO1が最も小さく（内3名はPRO1で筋実質は確認されず），一般群ではPRO1とDIS1が他の部位より小さかった（内2名はPRO1で筋実質は確認されず）．BFSでは，PRO2において陸上群で1名のみ筋実質が観測されたが，PRO1では両群の全対象者で筋実質は観測されなかった．

陸上群の競技力と解剖学的筋横断面積（CSA）との関係

Fig. 4に，陸上群の各筋の各部位におけるCSAと100 mの記録との関係を示した．STのPRO1とPRO2，およ

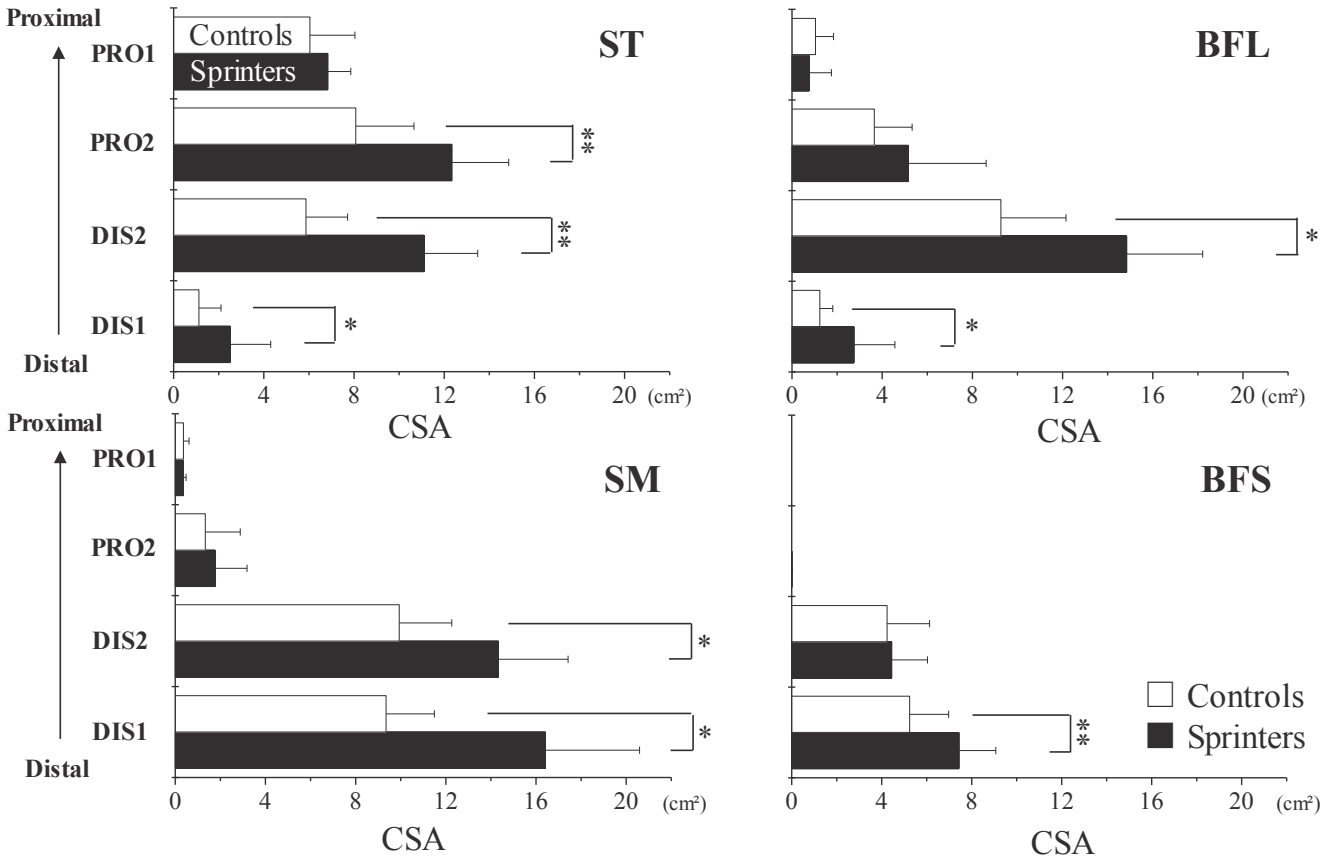

Fig. 2　Comparison of cross-sectional area (CSA) within each hamstring muscle for each region between sprinters and controls. The absolute CSA values were compared for each region between sprinters and controls. ST: semitendinosus, SM: semimembranosus, BFL: biceps femoris long head, BFS: biceps femoris short head. * and ** show significant differences between sprinters and controls at $p<0.05$ and $p<0.01$, respectively.

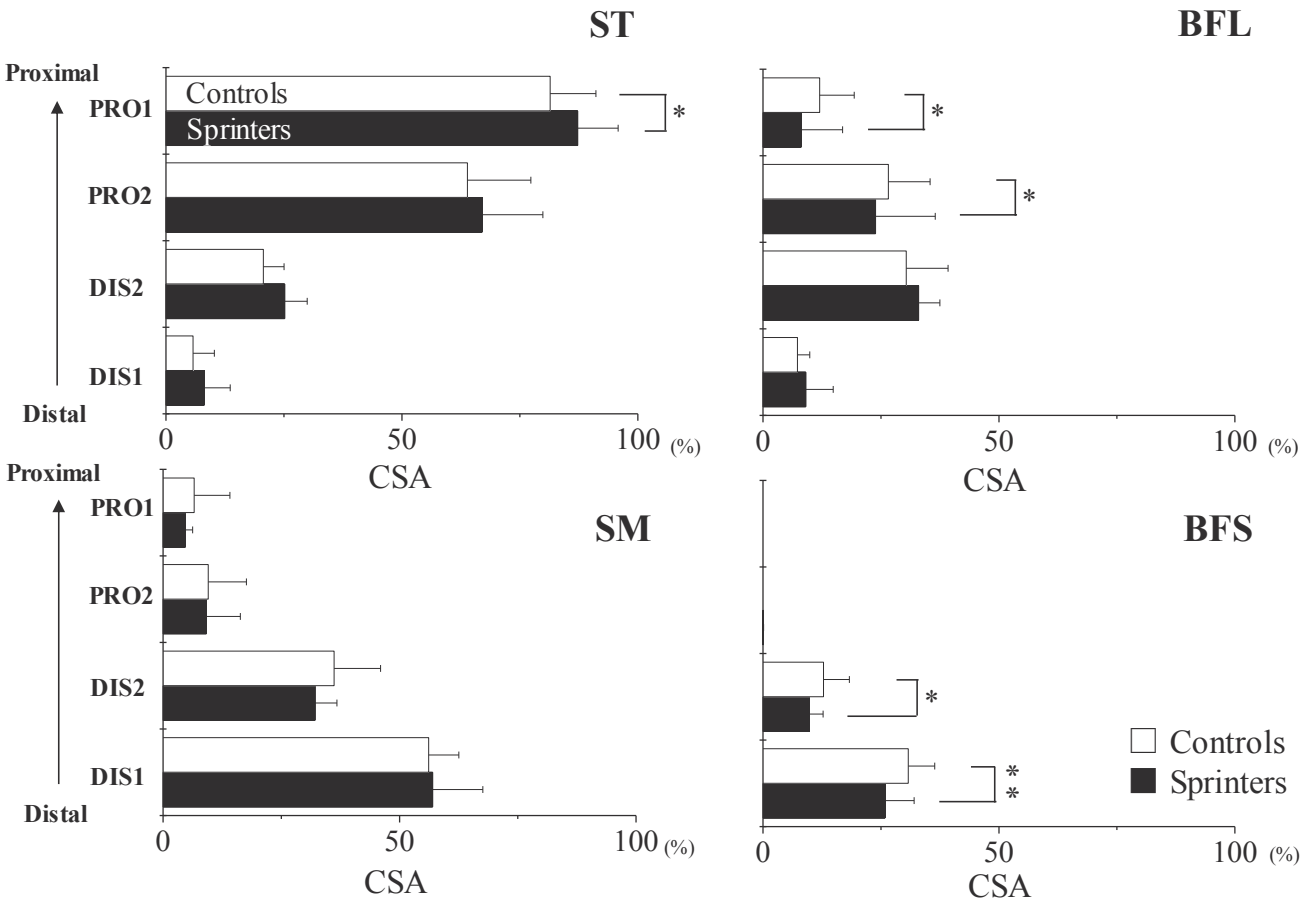

Fig. 3　Relative CSA comparison for each hamstring muscle to entire CSA of hamstring muscles for each region between sprinters and controls.
The relative CSA values for each hamstring muscle to the entire CSA of hamstring muscles were compared for each region between sprinters and controls. ST: semitendinosus, SM: semimembranosus, BFL: biceps femoris long head, BFS: biceps femoris short head.
* and ** show significant differences between sprinters and controls at $p<0.05$ and $p<0.01$, respectively.

びSMのPRO1にのみ，有意な負の相関関係が認められた（Fig. 4）.

考　察

先行研究から，陸上短距離選手は大腿四頭筋[26,27]やハムストリングス筋群[15,28]，大腿部全体[29]のCSAが他の競技種目よりも大きいことが知られている．ハムストリングス筋群の同一筋内の異なる部位（近・遠位）で詳細に調査した結果，４筋それぞれの全部位のCSAが一般群より陸上群で大きいわけではなく，各筋によって部位別の特徴が陸上群であることが明らかとなった．しかしながら，陸上群で陸上短距離走の競技力と部位別CSAの関係を調べた結果，STとSMの近位部の大きさのみが関係し，かつ，CSA相対値においてSTのPRO1で一般群より陸上群で大きかった点とBF群で小さかった点から，陸上短距離選手の走動作，特に，股関節の伸展・屈曲や内外旋時に生じる筋活動・収縮様式を詳細に検討していくことで，ハムストリングス筋群の協働筋間や部位別の特異性を考慮したトレーニングの重要性が明らかにできると考えられ，詳細について下記で考察していく．

これまでの先行研究では，大腿四頭筋，内転筋群とハムストリングス筋群をまとめた大腿部全体のCSAにおける近・遠位部の発達度合いに競技スポーツ特性が存在し[29]，陸上短距離種目で発達しているハムストリングス筋群全体のトレーニングの重要性が指摘されてきた[30]．しかしながら，近年，同一筋内においても筋の機能的な役割が異なる可能性が指摘され，特に，二関節筋における形態的・機能的な違いが同一筋内において存在することが示唆されている[8,31]．本研究で着目した陸上短距離選手のハムストリングス筋群においても，同一筋内における部位による発達度合いの違いが確認され，一般人と比較して，単関節筋と二関節筋を含むハムストリングス４筋の遠位部での発達が確認された．

これら遠位部における筋の発達を神経支配と陸上短距離走動作の特徴から検討すると，先行研究より大腿直筋の筋活動には部位特異性が存在し，運動神経支配枝の違

Table 1. Specific distribution of hamstring muscle cross-sectional area for sprinters.

	ST (Sprinter)			
	PRO1	PRO2	DIS2	DIS1
PRO1		p<0.001	p<0.001	p<0.001
PRO2			n.s.	p<0.001
DIS2				p<0.001
DIS1				

	ST (Control)			
	PRO1	PRO2	DIS2	DIS1
PRO1		p<0.001	n.s.	p<0.001
PRO2			p<0.001	p<0.001
DIS2				p<0.001
DIS1				

	SM (Sprinter)			
	PRO1	PRO2	DIS2	DIS1
PRO1		n.s.	p<0.001	p<0.001
PRO2			p<0.001	p<0.001
DIS2				p<0.001
DIS1				

	SM (Control)			
	PRO1	PRO2	DIS2	DIS1
PRO1		n.s.	p<0.001	p<0.001
PRO2			p<0.001	p<0.001
DIS2				n.s.
DIS1				

	BFL (Sprinter)			
	PRO1	PRO2	DIS2	DIS1
PRO1		Do not test	Do not test	Do not test
PRO2			p<0.001	p<0.01
DIS2				p<0.001
DIS1				

	BFL (Control)			
	PRO1	PRO2	DIS2	DIS1
PRO1		Do not test	Do not test	Do not test
PRO2			p<0.01	p<0.001
DIS2				p<0.001
DIS1				

	BFS (Sprinter)			
	PRO1	PRO2	DIS2	DIS1
PRO1		Do not test	Do not test	Do not test
PRO2			Do not test	Do not test
DIS2				p<0.001
DIS1				

	BFS (Control)			
	PRO1	PRO2	DIS2	DIS1
PRO1		Do not test	Do not test	Do not test
PRO2			Do not test	Do not test
DIS2				p<0.01
DIS1				

Semitendinosus (ST), semimembranosus (SM), biceps femoris long head (BFL) and biceps femoris short head (BFS).

いが影響して遠位と近位で筋活動が異なると報告されている[8]．ハムストリングス各筋においても，それぞれ複数の運動神経支配枝によって制御されていることから[32]，陸上短距離走により筋の各部位で筋活動や筋動態が独立し，部位別CSAの違いとして観察された可能性が考えられる．さらに陸上短距離走動作の特徴においては，遊脚期中盤から後半にかけての下腿の振り出し局面においてハムストリングス筋群に伸張性筋収縮が生じ[33,34]，走速度の増加に伴って膝関節の伸展角速度が増加する[35]．日常生活では得られない陸上短距離走遊脚期後半の膝関節伸展動作による伸張性筋活動がハムストリングス筋群の遠位部の肥大に特異的に作用した可能性があり，先行研究で述べられている伸張性負荷の増加による筋束の伸張が筋腹部でなく遠位部の筋肥大を誘発する可能性が高い[36]点と一致している．しかしながら，競技力との関係では，ハムストリングス筋群の遠位部のCSAの大きさと競技力に関係が認められなかった．この点は，先行研究[18]においても疾走時の遊脚期後半の膝関節の伸展角速度と競技力に関係が認められないと報告している．したがって，日常生活では得られない陸上短距離走動作による特異的な適応によって生じたハムストリングス筋群の遠位部肥大である可能性が高い．

一方，陸上短距離選手の競技力とSTとSMの近位側のCSAの大きさで認められた関係は，膝関節ではなく股関節の伸展トルク，伸展速度や伸展パワーが陸上短距離選手の競技力と関係する報告[18,19]からも支持でき，陸上短距離選手の競技力に関係するハムストリングス筋群の部位別の特異性として重要な知見となる．しかしながら，協働筋であるBFの近・遠位側CSAの大きさと競技力には関係が認められず，部位別の相対的な各筋のCSAの割合においてもBFLの近位部，BFSの遠位部で一般群より陸上群で小さくなったことから，陸上短距離選手の競技力を高める上で重要な役割を担う可能性はSTとSMより低いかもしれない．陸上短距離走の最高走速度を高める上で，接地期後半の股関節伸展局面における骨盤の水平回旋動作の股関節外旋を大きくし[37,38]．膝関節の伸展動作を小さくすること[18]が重要と報告されている．そのため，股関節の外旋動作で短縮性に収縮し，膝関節の伸展動作で伸張性に収縮するBFに対して，遠・近位共に伸張性に収縮するSTとSMの筋の動態，特に

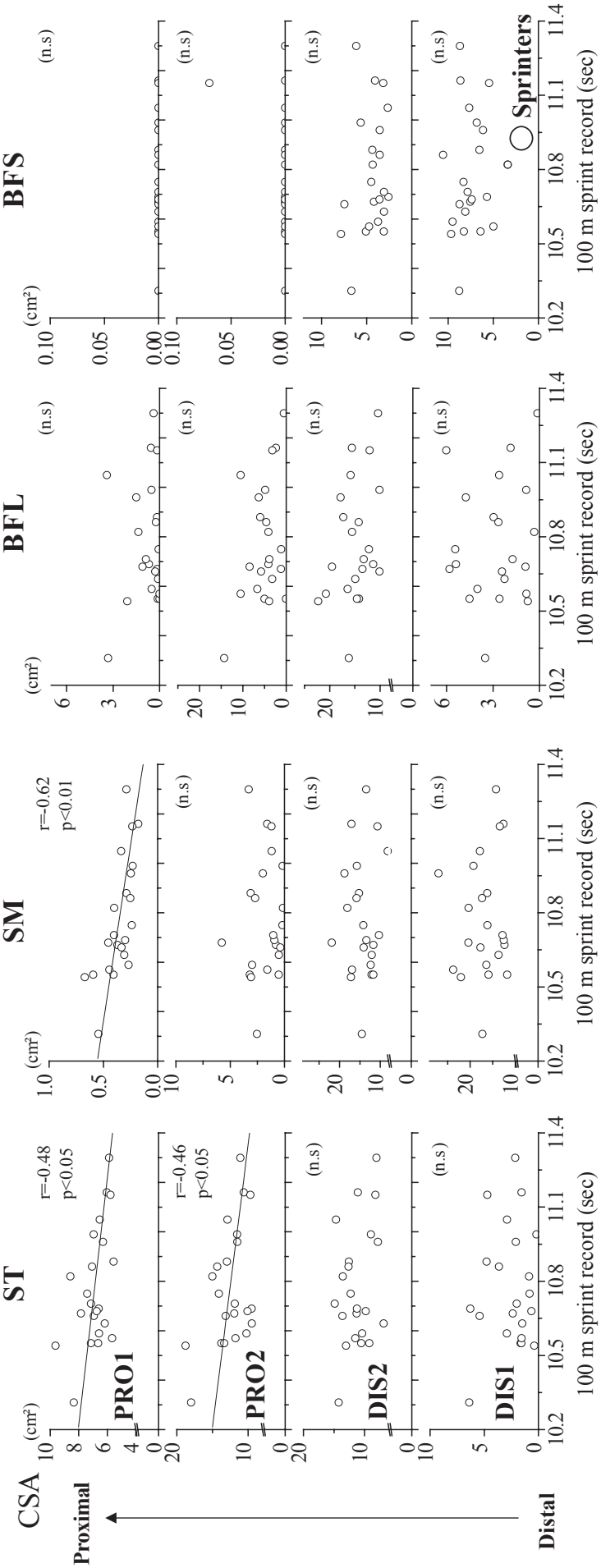

Fig. 4 Relationships between 100 m sprint records and each cross-sectional area of hamstring muscles for sprinters.

近位部の筋収縮の違いが陸上短距離選手の機能的な筋肥大に関係し適応した可能性がある．

本来ならば，解剖学的筋横断面積だけでなく，生理学的筋横断面積についても検討する必要があったが，同じ条件で測定した羽状筋の羽状角の信頼性が十分でなかったため，本研究では取り扱うことができなかった．今後は，陸上短距離選手だけでなく，他の競技種目選手のハムストリングス各筋の形態と機能的な特性を直接測定することで筋形態の競技特性について明らかにし，トレーニングに有益な情報提供を目指していく必要がある．

結　論

本研究では，ハムストリングス各筋における同一筋内のCSAの比較から陸上短距離選手における部位別の筋の形態的特異性について検討した．その結果，陸上短距離選手のハムストリングス各筋の遠位部は一般人より大きい特徴を示した．同一部位の他筋との相対的な比較では，陸上短距離選手のハムストリングス各筋は均一に同程度大きくなっているわけではなく，STの近位（PRO1）で相対的に大きく，逆にBFLの近位とBFSの遠位では相対的に小さく，筋CSAが部位別に特異的に発達していることが確認された．しかしながら，競技力と筋CSAの絶対量の関係では，一般人より大きい遠位部のハムストリングス筋群のCSAの大きさとは関係が認められず，ST（PRO1, PRO2）・SM（PRO1）の近位部のCSAと競技力との間にのみ関係が認められた．これらの形態的な特徴は，陸上短距離走における動作時の特異的な筋活動や筋動態，競技力に関係する特異的な動作が関係している可能性があり，今後，マルチ電極による同一筋内の筋活動パターンの違いや２つ以上の神経支配域の同定，超音波装置による筋動態の部位ごとの違いについて検討し確認していく必要性が確かめられた．

利益相反自己申告：申告すべきものはなし

謝　辞

本研究は，JSPS科研費 17H02156, 15KK0261，大阪体育大学大学院海外学術交流・総合研究事業の助成を受けたものです．また，測定に協力して頂きました皆様に深く御礼申し上げます．

参 考 文 献

1）Herzog W, Leonard TR, Joumaa V, Mehta A. Mysteries of muscle contraction. *J Appl Biomech* 24: 1–13, 2008.
2）Rassier DE, Herzog W. Considerations on the history dependence of muscle contraction. *J Appl Physiol* 96: 419–427, 2004.
3）Moritani T, Oddsson L, Thorstensson A. Activation patterns of the soleus and gastrocnemius muscles during different motor tasks. *J Electromyogr Kinesiol* 1: 81–88, 1991.
4）Ishikawa M, Komi PV. Muscle fascicle and tendon behavior during human locomotion revisited. *Exerc Sport Sci Rev* 36: 193–199, 2008.
5）Elftman H. The function of muscles in locomotion. *Am J Physiol* 125: 357–366, 1939.
6）van Ingen Schenau GJ, Bobbert MF, Rozendal RH. The unique action of bi-articular muscles in complex movements. *J Anat* 155: 1–5, 1987.
7）Vieira TM, Loram ID, Muceli S, Merletti R, Farina D. Postural activation of the human medial gastrocnemius muscle: are the muscle units spatially localised? *J Physiol* 589: 431–443, 2011.
8）Watanabe K, Kouzaki M, Moritani T. Task-dependent spatial distribution of neural activation pattern in human rectus femoris muscle. *J Electromyogr Kinesiol* 22: 251–258, 2012.
9）Hegyi A, Péter A, Finni T and Cronin NJ. Region-dependent hamstrings activity in Nordic hamstring exercise and stiff-leg deadlift defined with high-density electromyography. *Scand J Med Sci Sports* 28: 992–1000, 2018.
10）Maganaris CN, Baltzopoulos V, and Sargeant AJ. In vivo measurements of the triceps surae complex architecture in man: implications for muscle function. *J Physiol* 512: 603–614, 1998.
11）Muramatsu T, Muraoka T, Kawakami Y, Fukunaga T. Intramuscular variability of the architecture in human medial gastrocnemius muscle in vivo and its functional implications. *Adv Exerc Sports Physiol* 8: 17–21, 2002.
12）Watanabe K, Kouzaki M, Moritani T. Regional neuromuscular regulation within human rectus femoris muscle during gait. *J Biomech* 47: 3502–3508, 2014.
13）Narici MV, Roi GS, Landoni L, Minetti AE, Cerretelli P. Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 59: 310–319, 1989.
14）田中重陽, 角田直也：男女スポーツ選手における下肢の筋形態が無酸素性パワーに及ぼす影響, 日本生理人類学会誌, 16: 141–151, 2011.
15）池袋敏博, 久保啓太郎, 岡田純一, 矢田秀昭, 角田直也：重量挙げおよび陸上短距離手における下肢筋群の筋厚と競技成績との関係, 体力科学, 60: 401–411, 2011.
16）狩野 豊, 高橋英幸, 森丘保典, 秋間 広, 宮下 憲, 久野譜也, 勝田 茂：スプリンターにおける内転筋群の形態的特性とスプリント能力の関係, 体育学研究, 41: 352–359, 1997.
17）渡邉信晃, 榎本好孝, 狩野 豊, 安井年文, 宮下 憲, 久野譜也, 勝田 茂：スプリンターの筋横断面積と疾走速度との関係における性差, 陸上競技研究, 39: 12–19, 1999.
18）伊藤 章, 市川博啓, 斉藤昌久, 佐川和則, 伊藤道郎, 小林寛道：100 m中間疾走局面における疾走動作と速度との関係, 体育学研究, 43: 260–273, 1998.

19）阿江通良, 宮下 憲, 横井孝志, 大木昭一郎, 渋川侃二：機械的パワーからみた疾走における下肢筋群の機能および貢献度, 筑波大学体育科学系紀要, 9: 229-239, 1986.
20）Askling CM, Tengvar M, Saartok T, Thorstensson A. Proximal hamstring strains of stretching type in different sports: injury situations, clinical and magnetic resonance imaging characteristics, and return to sport. *Am J Sports Med* 36: 1799-1804, 2008.
21）Askling CM, Tengvar M, Saartok T, Thorstensson A. Acute first-time hamstring strains during slow-speed stretching: clinical, magnetic resonance imaging, and recovery characteristics. *Am J Sports Med* 35: 1716-1724, 2007.
22）久保田 潤, 鳥居 俊：膝関節等尺性屈曲運動時における半腱様筋の収縮動態, 体力科学, 54: 211-217, 2005.
23）Mohamed O, Perry J, Hislop H. Synergy of medial and lateral hamstrings at three positions of tibial rotation during maximum isometric knee flexion. *Knee* 10: 277-281, 2003.
24）服部正明, 鈴木直樹：MRIを基にした三次元構築像より得られた大腿部筋群の形態的差異, 体力科学, 41: 273-275, 1992.
25）Ahtiainen JP, Hoffren M, Hulmi JJ, Pietikäinen M, Mero AA, Avela J. Panoramic ultrasonography is a valid method to measure changes in skeletal muscle cross-sectional area. *Eur J Appl Physiol* 108: 273-279, 2010.
26）Maughan RJ, Watson JS, Weir J. Relationships between muscle strength and muscle cross-sectional area in male sprinters and endurance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 50: 309-318, 1983.
27）角田直也, 金久博昭, 福永哲夫, 近藤正勝, 池上繫樹：大腿四頭筋横断面積における各種競技選手の特性, 体力科学, 35: 192-199, 1986.
28）星川佳広, 飯田朝美, 村松正隆, 内山亜希子, 中島由晴：高校生スポーツ選手の大腿部筋横断面積の性差と競技種目差, トレーニング科学, 18: 375-386, 2006.
29）久野譜也：NMRによる一流選手の筋特性, *J J Sports Sci* 12: 78-82, 1993.
30）渡邉信晃, 榎本靖士, 大山 卞 圭悟, 宮下 憲, 尾懸 貢, 勝田 茂：スプリント走時の疾走動作および関節トルクと等速性最大筋力との関係, 体育学研究, 48: 405-419, 2003.
31）Watanabe K, Kouzaki M, Moritani T. Non-uniform surface electromyographic responses to change in joint angle within rectus femoris muscle. *Muscle Nerve* 50: 794-802, 2014.
32）Woodley SJ, Mercer SR. Hamstring muscles: architecture and innervation. *Cells Tissues Organs* 179: 125-141, 2005.
33）Thelen DG, Chumanov ES, Hoerth DM, Best TM, Swanson SC, Li L, Young M, Heiderscheit BC. Hamstring muscle kinematics during treadmill sprinting. *Med Sci Sports Exerc* 37: 108-114, 2005.
34）Higashihara A, Ono T, Kubota J, Okuwaki T, Fukubayashi T. Functional differences in the activity of the hamstring muscles with increasing running speed. *J Sports Sci* 28: 1085-1092, 2010.
35）Kivi DM, Maraj BK, Gervais P. A kinematic analysis of high-speed treadmill sprinting over a range of velocities. *Med Sci Sports Exerc* 34: 662-666, 2002.
36）Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, Flück M, Williams J, Mitchell WK, Selby A, Beltran Valls RM, Narici MV. Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiol* 210: 642-654, 2014.
37）西守 隆, 伊藤 章：歩行と走行の移動速度変化における骨盤と体幹回旋運動の相互相関分析, 理学療法学, 33: 318-323, 2006.
38）Sado N, Yoshioka S, Fukashiro S. The three-dimensional kinetic behaviour of the pelvic rotation in maximal sprint running. *Sports Biomech* 16: 258-271, 2017.