

## 大学男子サッカー選手の前脛骨筋持久力と筋血流応答

池永 昌弘<sup>1)</sup>, 伊古田 健夫<sup>1)</sup>, 平野 雅巳<sup>1)</sup>, 森村 和浩<sup>1)</sup>, 山田 陽介<sup>2)</sup>,  
進藤 宗洋<sup>1)</sup>, 清永 明<sup>1)</sup>

### Muscular endurance and blood flow of the tibialis anterior muscle in university soccer players

Masahiro IKENAGA<sup>1)</sup>, Takeo IKOTA<sup>1)</sup>, Masami HIRANO<sup>1)</sup>, Kazuhiro MORIMURA<sup>1)</sup>,  
Yosuke YAMADA<sup>2)</sup>, Munehiro SHINDO<sup>1)</sup>, Akira KIYONAGA<sup>1)</sup>

#### Abstract

**Introduction:** The present study, it aims to clarify a tibialis anterior (TA) muscle function of soccer players by comparing the ankle torque, muscular endurance capacity, and muscle blood flow of university soccer players with that of untrained students.

**Methods:** Eight highly and predominantly soccer trained adolescent males (group: S) [estimated  $\dot{V}O_2\text{max}$ :  $62.6 \pm 2.8$  ml/kg/min] and eight untrained adolescent males (control group: C) [estimated  $\dot{V}O_2\text{max}$ :  $46.3 \pm 6.1$  ml/kg/min] participated in this study. The thickness of TA was measured by ultrasound imaging. Each subject performed rhythmic isotonic dorsiflexion exercise (IDE) for 3 minutes (1 sec contraction-to-1 sec rest) at different submaximal loads ranging from 10% to 50% of their maximal voluntary isometric contraction (MVC). We measured blood flow of the calf (mercury-in-rubber strain gauge venous occlusion plethysmography), and pulse rate during rest and immediately after IDE. The maximum number of repetitions and the slope of linear regression line obtained from relationships between the number of repetitions and range of motion were used for to determine muscular endurance index.

**Results:** The torque of plantar flexion MVC was stronger in group S than in group C. The thickness of TA and the torque of dorsiflexion MVC showed no significant difference between group S and C. In contrast, the muscular endurance index was higher in group S than in C at 20~50%MVC. In addition blood flow per pulse rate immediately after IDE was higher in group S than in C at 20~40%MVC ( $P < 0.05$ ).

**Conclusion:** These results suggest that soccer training increases the capacity of muscular endurance and blood flow supply in TA muscle.

---

1) 福岡大学スポーツ科学部  
*Faculty of Sports and Health Science, Fukuoka University*

2) 国立健康・栄養研究所  
*National Institute of Health and Nutrition*

## 【背景】

筋持久力 (Muscular endurance) とは、筋がいかに長く作業を続けることができるかを示す能力であり、あらゆる競技スポーツのパフォーマンスを決定する重要な因子の一つである<sup>24)</sup>。骨格筋の酸素摂取量は筋の有酸素性作業能を規定する重要な因子である。酸素摂取量は、筋での酸素取り込み能と酸素供給量によって決まり、血流量は酸素供給量を規定する因子であることから、活動筋への血流量は筋持久力のパフォーマンスに影響すると考えられている。活動筋への血流量がトレーニングによって増えるか否かについては、鍛錬者と非鍛錬者を比較した研究<sup>20)</sup>や、持久的トレーニングやレジスタンストレーニングによって活動筋の最高血流量が増加したとする報告<sup>5,19)</sup>があり、運動トレーニングにより活動筋への血流供給能が高まる可能性は高いといえる。

これまでの筋持久力に関する研究では、上肢の掌握運動や膝関節伸展の主働筋である大腿四頭筋、足関節底屈の主働筋である腓腹筋やヒラメ筋を対象としている。しかし、足関節背屈の主働筋である前脛骨筋 (TA筋) に関する筋機能や筋血流量に関する研究は少ない<sup>17)</sup>。足関節背屈筋機能は歩行や姿勢維持において極めて重要な役割を担っており<sup>21,23)</sup>、易転倒者は背屈筋機能が低下していることも報告されている<sup>21)</sup>。さらに、筋生検により若年者と高齢者を対象に外側広筋と上腕三頭筋とTA筋の毛細血管を観察した研究によると、TA筋の毛細血管密度 (Capillary density) は他の筋の毛細血管密度よりも若年者、高齢者ともに高く、その他の毛細血管指標には違いがないことが報告されている<sup>12)</sup>。このようにTA筋は他の筋群と異なる特性を持っている。

サッカー競技は、「フットボール」と呼ばれるように足を主に使い競い合うボールゲームである。そして選手に要求されるパフォーマンスは、個人技術、試合時の環境条件、チームの競技レベルおよび戦術・戦略、ポジションなどに影響を受ける。サッカーは競技特性上、またプレーの性質

上、動きが複雑であり、個々の身体的運動能と密接に関係しているといえる。運動中の循環応答は選手がコントロールできない生理反応であるが、パフォーマンス発揮の基盤であり、運動能力を発揮する上で非常に重要な要因となる。サッカーのパフォーマンスと関係する生理学的要因には①持久的運動能②高強度運動能③スプリント能および④筋力発揮などに分けられるが、それらは大きく分けて心臓血管系と骨格筋系に分類される<sup>15)</sup>。さらには運動時の循環調節系・体温調節系機能の維持に重要な役割を果たす循環血液量がパフォーマンスに大きく影響することが考えられる。また、サッカーの主動作であるボールのキック動作に関しては、TA筋への負荷が大きいことが報告されている<sup>16,18)</sup>。特にインステップキック時は、足を振り下ろす局面で足関節背屈トルクが高まり<sup>16)</sup>、さらにボールインパクトの瞬間は足部に約3000Nの力が加わることが3次元力学解析から明らかとされている<sup>18)</sup>。

しかし、サッカー選手を対象とし、TA筋の筋持久力と血流量について調査した研究はない。サッカーは競技特性上、持久的運動や間欠式高強度運動を繰り返すことや、キック動作における足関節への負荷が大きく、屈曲・伸展を繰り返すため、下腿筋群が発達していることが考えられる。本研究ではTA筋に着目し、長期間のサッカートレーニングを実施している大学サッカー選手の筋力および筋持久力ならびにTA筋への運動誘発性血流量を測定し、サッカー選手のTA筋の生理学的特性を明らかにすることを目的とした。

## 【方法】

### 1) 被検者

大学男子サッカー部に所属する学生8名(S群)と、一般学生8名(C群)を対象とした。S群は1回2時間の週6日のサッカートレーニングを行っており、9年以上の競技経験を有していた。C群は過去2年間、規則的な運動習慣がなく、既往歴のない健常若年男性であった。実験は被検者の利き足

(ボールを蹴る際に使う足)とし、本実験での被検者は全て右利きであった。各被検者には事前に実験課題に関して説明し、同意を得た。また本研究は福岡大学研究倫理審査委員会の承認を得た。

## 2) 形態および前脛骨筋組織厚測定

身体組成は、身長、体重、腹囲周囲径を計測し、キャリパー法にて上腕背側部と肩甲骨下部の皮脂厚を測定し、長嶺<sup>26)</sup>の式によって身体密度を算出し、Brozek<sup>6)</sup>の式から除脂肪体重 (Lean Body Mass : LBM) を算出した。

筋組織厚は、超音波画像診断装置 (UF-8900, フクダ電子株式会社) を用いて周波数6.5～13.0MHzのリニアプローブで測定を行った。対象者は直立で肩幅と同程度に足幅を広げ、左右均等に体重を掛けた状態で力が入っていないことを確認してから測定した。測定部位は下腿部前面 (腓骨頭-内果の近位1/3) とした。撮像時は適量のゲル (UFクリアゲル OJ-20, フクダ電子株式会社) をプローブにつけ、圧迫を最小限にして撮像した。その横断画像からAbeら<sup>2)</sup>の報告を参照し、TA筋の皮脂組織厚、筋組織厚を求めた。撮像は3回行い、その平均値を組織厚とした。

## 3) 推定最大酸素摂取量

心拍数を用いた推定最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2\max$ ) 評価のために、固定式自転車エルゴメータを用いた多段階漸増運動負荷試験を行った。自転車エルゴメータで最大下作業を行い、各負荷時の心拍数と仕事率の関係からAstrand<sup>4)</sup>の推定式を用いて計算した。

## 4) 等尺性随意最大足背屈・底屈筋力 (Maximal voluntary contraction: MVC) 測定

MVC測定は筋機能評価運動装置 (BDX-4, Biodex medical system Inc.) を用い、座位にて利き足の下腿を心臓よりやや高い位置に水平に設置し、膝関節角度を130度に固定し行った。上半身および測定肢と逆足の大腿部をベルトで固定し、測定肢の膝が動かないように膝下に台座を置きベルトで固定した。足関節角度は、直角とした状態を0度とし、0度の位置と足背屈側に30度傾けた状態で行った。測定は十分な練習を行った後、等尺

性足底屈を5秒間行い、5秒休息後に同一角度で足背屈を5秒間のサイクルで2回ずつ行った。その後関節角度を足背屈側に30度傾けた状態で同様の測定を行い、それぞれの最大値をMVCとした。

## 5) 足関節背屈筋持久力測定

測定機器並びに測定姿勢はMVC測定時と同様とした。筋持久力評価のために実施した等張性足背屈運動 (以下、足背屈運動) の負荷は10%、20%、30%、40%、50%MVCの計5負荷とした。関節可動域は背屈側に30度、底屈側に10度の40度とした。運動は電子メトロノームを用い、毎分60回の一定のリズムで行い (1秒挙上、1秒休息) 各負荷最大180秒運動を行い、挙上困難と検者が判断するまで作業を継続した。筋持久力評価の指標として、各負荷の最大挙上回数 (筋持久力指標①) と、反復回数と関節可動域減衰との一次回帰式の傾きを筋持久力指標②として定義した (図1)。なお、最大可動域の70%を下回った時点までを最大作業回数としてカウントした。

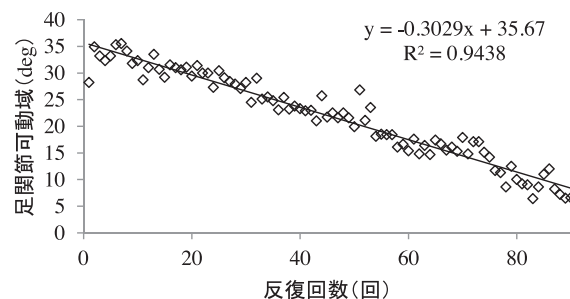


図1. 反復回数と足関節可動域減衰との関係

TA筋持久力評価指標として、最大可動域の70%を下回るまでの反復回数と足関節可動域との一次回帰式の傾きを用いた

## 6) 筋血流量測定

筋血流量の測定は早朝空腹時を条件とし、被検者は足関節背屈筋持久力測定前に30分の座位安静後、血圧および安静時血流量の測定を行った。安静時および運動直後の筋血流量の測定は、水銀封入ラバーストレインゲージ (Strain gauge, Hokanson Inc.) とプレチスモグラフ (EC5R, Hokanson Inc.) を用いた静脈閉塞法により下腿周径変化を記録し、Whitney<sup>22)</sup>の方法にしたがい求めた。水銀ラバーストレインゲージは腓骨頭から脛骨内果の近位1/3の位置に、25gの張力で装着し

た。等張性足関節運動終了後5秒以内に筋血流量の測定を行った。また記録された脈波から脈拍数を算出した。

6) 統計処理

データ処理にはMicrosoft Office Excel 2007 (Microsoft Japan Co., Ltd) を用い、統計処理にはPASW18.0 (SPSS Inc.) を用いた。データは平均値±標準偏差で示した。各測定項目の群間の比較には対応なしのt検定を用いた。等張性足関節運動の負荷増加に伴う筋持久力指標ならびに生理的指標の群間比較には、二元配置の分散分析を用いた。また筋力および筋持久力の指標と各測定変数との関係にはピアソンの積率相関係数を求めた。いずれの場合も有意水準は危険率5%未満とした。

【結果】

表1に身体特性の結果を示す。年齢はC群に比べS群の方が若かった (P < 0.05)。身長と体重は群間差を認めなかったが、C群に比べS群の除脂肪体重が有意に高かった (P < 0.05)。またS群の推定 $\dot{V}O_2max$ はC群に比べ有意に高値を示した (P < 0.01)。TA筋組織厚は群間に有意差を認めなかった。また、TA筋組織厚と足背屈MVC (足関節角度0度時と30度時の平均値) との間に有意な正の相関関係が認められた (r = 0.882, P < 0.01)。

表1. 被検者の身体特性

項目	S群 (n=8)	C群 (n=8)
年齢, y	18.8 ± 0.7**	20.4 ± 0.8
身長, cm	174.6 ± 8.8	170.5 ± 4.8
体重, kg	67.0 ± 5.5	61.4 ± 7.4
BMI, kg/m <sup>2</sup>	22.0 ± 0.8	20.5 ± 2.1
除脂肪体重, kg	58.4 ± 5.3*	52.5 ± 4.6
前脛骨筋組織厚, mm	31.0 ± 2.6	31.2 ± 2.8
推定 $\dot{V}O_2max$ , ml/kg/min	62.6 ± 2.8**	46.3 ± 6.1

平均値±標準偏差

\* P < 0.05, \*\*P < 0.01 vs. C群

BMI, Body mass index;  $\dot{V}O_2max$ , 最大酸素摂取量

表2に足関節筋機能の結果を示す。底屈MVCは関節角度0度においてS群がC群に比べ有意に高く (P < 0.01)、関節角度30度では有意差を認めなかった。一方で足背屈MVCは、関節角度0度も30度においても両群に有意差を認めなかった。筋持久力指標に関しては、20~50%MVC時の反復回数に有意差を認め (P < 0.05)、減衰曲線の傾きにも有意差を認め (P < 0.01)、いずれもS群がC群に比較して高い足関節背屈筋持久力を有していた。さらに作業に伴う関節可動域減衰の傾きに関しては、負荷強度増加に伴って群間に有意な交互作用を認めた (P < 0.05, 図2)。

表2. 足関節筋機能

項目	S群 (n=8)	C群 (n=8)
底屈MVC [0 deg], Nm	121.6 ± 42.2**	72.8 ± 32.8
底屈MVC [30 deg], Nm	36.4 ± 18.9	18.4 ± 9.8
背屈MVC [0 deg], Nm	39.3 ± 9.8	37.5 ± 8.9
背屈MVC [30 deg], Nm	37.3 ± 7.1	39.0 ± 4.2
最大拳上回数, 回		
10%MVC	89.8 ± 0.5	89.6 ± 1.1
20%MVC	89.9 ± 0.4*	70.9 ± 20.2
30%MVC	71.3 ± 17.6*	42.4 ± 20.0
40%MVC	38.6 ± 16.6*	19.0 ± 7.4
50%MVC	23.5 ± 14.0*	8.9 ± 5.8
作業に伴う関節可動域減衰の傾き		
10%MVC	-0.10 ± 0.05	-0.12 ± 0.10
20%MVC	-0.10 ± 0.06*	-0.29 ± 0.20
30%MVC	-0.21 ± 0.07*	-0.60 ± 0.39
40%MVC	-0.31 ± 0.09**	-0.92 ± 0.39
50%MVC	-0.51 ± 0.26**	-1.37 ± 0.51

平均値±標準偏差

\* P < 0.05, \*\*P < 0.01 vs. C群

MVC, Maximal voluntary contraction

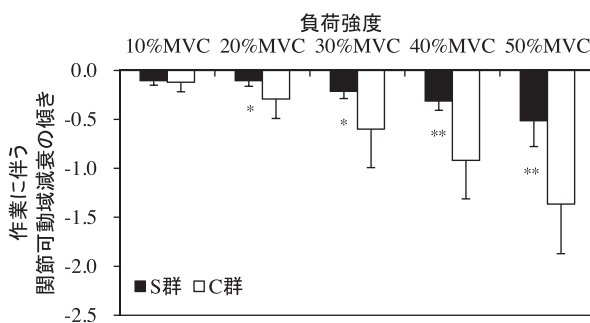


図2. 各負荷強度時の作業に伴う関節可動域減衰の傾き 交互作用あり(負荷強度×群), P < 0.01

\*P < 0.05, \*P < 0.01, vs. S群



足背屈運動終了直後の下腿血流量と脈拍数の結果を図3に示す。安静時に関しては、血流量、脈拍数ともに群間に有意差を認めなかった。脈拍数は10%MVC、20%MVC強度で群間に有意差を認め、C群に比べS群の脈拍数は低い値を示した(図3-A)。また背屈運動終了直後の下腿筋血流量は、30%MVCと40%MVC強度でS群が高い傾向があったが ( $P = 0.08, 0.09$ )、いずれの負荷時でも有意差を認めなかった(図3-B)。一方で、下腿血流量を脈拍数で除した一拍あたりの血流量に関しては、20%MVC、30%MVC、40%MVC強度で有意差を認め、いずれの負荷もS群が高値を示した ( $P < 0.05$ , 図3-C)。

### 【考察】

本研究で得られた主な結果は、1) 等尺性の足底屈MVCはS群の方が有意に高値を示したが、足背屈MVCはS群とC群に差がなく、2) 足背屈筋持久力に関しては最大作業回数(筋持久力指標①)、作業に伴う関節可動域減衰の傾き(筋持久力指標②)ともに有意差を認め、S群の筋の持久的能力が優れていることが明らかとなった。さらに、3) S群は20%MVC、30%MVC、40%MVC強度での足背屈運動直後の一拍あたり血流量が高い事が明らかとなった。これらの結果から、長期間のサッカートレーニングを実施している大学サッカー選手は、足背屈筋持久力が高く、TA筋への血流供給が優れていることが示唆される。

本研究は足背屈MVCに群間差がなく、足底屈MVC(足関節角度が0度のみ)においてはS群がC群に比して有意に高値を示した(表2)。また、TA筋組織厚と足背屈MVCには強い相関関係( $r = 0.882$ )が認められており、TA筋の最大筋力は筋量依存の割合が高い可能性が考えられる。足底屈に関連する腓腹筋やヒラメ筋は、サッカー選手は形態的にも非常に発達しており、本研究においてもTA筋には差がないが、下腿周囲径はS群 $37.0 \pm 1.9$ cm、C群 $33.8 \pm 2.1$ cmであり、有意な群間差が認められている( $P < 0.01$ )。サッカーは競技特性上、ダッシュや跳躍、方向転換といった瞬発的な動作を繰り返すことや、ボールを蹴ることによる足底屈筋群への負荷が多いため、サッカー選手の腓腹筋やヒラメ筋は形態的・機能的に発達したと考えられる。一方、足背屈MVCならびにTA筋組織厚に関しては、群間に有意差を認めなかった。TA筋は横断面積が狭いという形態的特徴や筋線維組成の特異性から、他の部位に比べてトレーニングによる筋肥大効果(筋組織厚を指標とした場合)が認められにくいという報告<sup>1)</sup>もあり、本研究のようにサッカートレーニングを行っている大学サッカー選手であってもTA筋の最大筋力と筋組織厚に関しては非鍛錬者と変わらなかったため、TA筋の筋肥大に関しては頭打ちが起こって

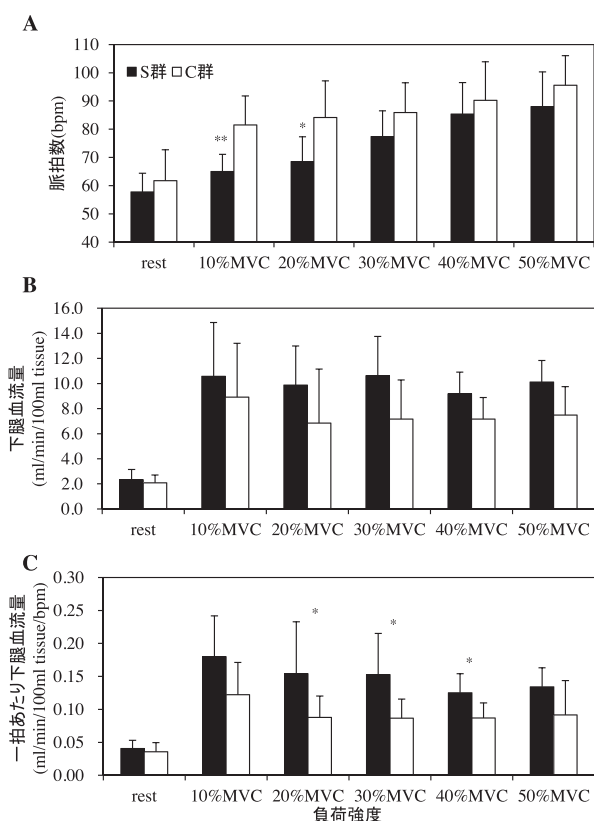


図3. 安静時ならびに足関節背屈運動終了直後の脈拍数(A)と血流量(B, C)  
 A. 下腿容積変化から得られた波形から脈拍数を算出;  
 B. 運動直後の下腿血流量; C. 一拍あたりの下腿血流量  
 \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , vs. C群

いた可能性が考えられる。

一方で筋持久力に関しては、S群はC群に比べて、最大挙上回数が多く、減衰曲線の傾きが小さいことから、高いTA筋の筋持久力を有していることが明らかとなった(表2, 図2)。図2-Aに示した負荷強度増加に伴う脈拍数の変化をみると、C群では10%MVCで脈拍数の顕著な増加が認められており、低強度の段階で交感神経活動の増加が推察される。また、足関節背屈運動終了直後の下腿血流量ではいずれの負荷も平均値ではS群が高いが、有意な群間差は認められなかった( $P = 0.08, 0.09$ )。骨格筋の酸素摂取量は筋の有酸素性作業能を規定する重要な因子であり、酸素摂取量は筋での酸素取り込み能と酸素供給量によって決まる。全身持久力の指標である最大酸素摂取量は、心拍出量×動静脈酸素較差の最大値として表される(Fickの原理)。血流量は酸素供給量を規定する因子であることから、筋持久力を規定する因子として筋血流量が考えられる。動的運動中の筋への血流量は運動強度に伴って一回帰的に増加することが膝伸展運動で示されている<sup>3)</sup>。一方で動的掌握運動や足底屈運動では、一定の強度(25~50%MVC)で血流量が頭打ちとなる<sup>14)</sup>。本研究では両群ともに10%MVCで頭打ちの現象が見られている。これまでのTA筋の筋線維組成に関する研究では、筋生検を用いた報告<sup>9,11,12)</sup>や剖検からのデータが報告<sup>8,10,13)</sup>されているが、いずれも遅筋線維が72~78%を占めると報告されている<sup>8-13)</sup>。Holmbackら<sup>11)</sup>は週当たり1~2時間の中等度身体活動を行っている若年男女を対象に、TA筋を筋生検し、組成を調査したところ、先行研究と同様に約77%が遅筋線維であったことを報告している。筋組成は身体活動量やスポーツ活動に影響を受けることが考えられるが、Holmbackら<sup>11)</sup>の報告からも、TA筋に関してはその影響は少なく、いずれにしても遅筋線維優位であることが考えられる。一方で、木村ら<sup>25)</sup>は解剖学教育のために献体された19歳から101歳までの日本人男性38個体における右側のTA筋を全摘出し、組織標本を作製している。この先行研究の結果では、ヒトのTA筋の

組成は、10代から50代では遅筋線維が35%、中間筋線維が25%、速筋線維が41%であり、60歳代から100代では遅筋線維は39%、中間筋線維が25%、速筋線維が36%となっている。これらの結果は筋生検や剖検を行った先行研究<sup>8-13)</sup>とは異なる結果であるが、TA筋を全摘出して組成を解析した結果は、我々の知る限り木村ら<sup>25)</sup>の報告以外にない。TA筋の組成に関する研究は少ない<sup>8-13,25)</sup>ため、さらなる研究が必要である。

仮にTA筋が遅筋線維優位だとすると、本研究結果において10%MVCの低強度運動で血流量がほぼ最大値を示した理由として、TA筋の筋線維タイプが影響している可能性が考えられる。低強度の運動では運動単位で考えると遅筋線維の動員が多いため、TA筋では10%MVCのような低強度でも多くの筋線維が動員される。ヒトのTA筋における遅筋線維は速筋線維に比べ、筋線維あたりの毛細血管数が多いことが報告されていることから<sup>17)</sup>、低強度での遅筋線維の動員が血流増加をもたらした可能性が考えられる。さらに脈拍数に群間差が認められたため、下腿血流量を脈拍数で除した一拍あたりの下腿血流量を比較した。その結果、20~40%MVC強度において群間に有意差を認め、S群が有意に高値を示した(図3-C)。この要因は本研究結果では言及できないが、一回拍出量と関連している可能性が高い。また、本研究で用いた静脈閉塞法は、組織全体(本研究では下腿)あたりの容積変化を捉えているため、拮抗筋の収縮も結果に影響したと考えられる。さらにこの方法は血液量だけを捉える事は不可能であり、細胞外液量などの水分の変動も同時に引き起こされた可能性も考えられる。

トレーニングによる活動筋への血流量増加のメカニズムとしては、1)血管拡張能の増加と2)血管の断面積の解剖学的な増加が引き起こされたこと、あるいはその両者によるものであると考えられている<sup>7)</sup>。1)のメカニズムとしては、トレーニング前では最大運動でさえも血管拡張予備能が機能しておらず、トレーニングによって利用されるようになったためであると示唆されてい

る<sup>7)</sup>。2) に関しては、トレーニング適応として導管動脈と細動脈の血管新生の拡大が引き起こした血管リモデリングによるものであると考えられている<sup>7)</sup>。またS群の筋持久力が優れていた理由として、血流供給能以外に、筋に含まれるアデノシン三リン酸 (ATP) やクレアチンリン酸 (CP)、筋グリコーゲン貯蔵量の違いも考えられる。しかし本研究では、サッカートレーニングがどのようなメカニズムでTA筋の筋持久力を高め、運動後の高い血流量を発現させたかは不明である。今後、サッカートレーニングやレジスタンストレーニングを用いた介入研究や運動後血流量増加のメカニズムについて解明する必要がある。

本研究結果から、大学サッカー選手は一般大学生に比べて、TA筋の筋持久力が優れており、運動誘発性血流量が高いことが明らかとなった。

## 【参考文献】

1. Abe T, DeHoyos DV, Pollock ML, Garzarella L. Time course for strength and muscle thickness changes following upper and lower body resistance training in men and women. *Eur J Appl Physiol and Occu Physiol* 81 (3):174-180, 2000.
2. Abe T, Kondo M, Kawakami Y, Fukunaga T. Prediction equations for body composition of Japanese adults by B-mode ultrasound. *Am J Hum Biol* 6:161-170, 1994.
3. Andersen P, Saltin B. Maximal perfusion of skeletal-muscle in man. *J Physiol* 366 (SEP):233-249, 1985.
4. Astrand PO, Ryhming I. A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. *J Appl Physiol* 7 (2):218-221, 1954.
5. Blomstrand E, Krustup P, Sondergaard H, Radegran G, Calbet JAL, Saltin B. Exercise training induces similar elevations in the activity of oxoglutarate dehydrogenase and peak oxygen uptake in the human quadriceps muscle. *Pflugers Arch-Eur J Physiol* 462 (2):257-265, 2011.
6. Brozek J, Grande F, et al., Densitometric analysis of body composition: Revision of some quantitative assumptions. *Ann N Y Acad Sci* 110: 113-140, 1963.
7. Calbet JAL, Lundby C. Skeletal muscle vasodilatation during maximal exercise in health and disease. *J Physiol* 590 (24):6285-6296, 2012.
8. Dahman R, Djordjevic S, Simunic B, Valencic V. Spatial fiber type distribution in normal human muscle histochemical and tensiomyographical evaluation. *J Biomech* 38: 2451-2459, 2005.
9. Helliwell TR, Coakley J, Smith PEM, Edwards RH. The morphology and morphometry of the normal human tibialis anterior muscle. *Neuropathol Appl Neurobiol* 13: 59-65, 1987.
10. Henriksson-Larsen KB, Lexell J, Sjostrom M. Distribution of different fibre types in human skeletal muscles. 1. Method for the preparation and analysis of cross-sections of whole tibialis anterior. *Histochem J* 15: 167-178, 1983.
11. Holmback AM, Porter MM, Downham D, Anderson JL, Lexell J. Structure and function of the ankle dorsiflexor muscles in young and moderately active men and women. *J Appl Physiol* 95: 2416-2424, 2003.
12. Jakobsson F, Borg K, Edstrom L. Fiber-type composition, structure and cytoskeletal protein location of fibers in anterior tibial muscle - comparison between young-adults and physically active aged humans. *Acta Neuropathologica* 80 (5):459-468, 1990.
13. Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D. Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J Neurol Sci* 18: 111-129, 1973.
14. Kagaya A, Saito M, Ogita F, Shinohara M. Exhausting handgrip exercise reduces the blood-flow in the active calf muscle exercising at low-intensity. *Eur J Appl Physiol and Occu Physiol* 68

- (3):252-257, 1994.
15. Krustrup P, Mohr M, Steensberg A, Bencke J, Kjaer M, Bangsbo J. Muscle and blood metabolites during a soccer game: Implications for sprint performance. *Med Sci Sports Exerc* 38 (6):1165-1174, 2006.
  16. Nunome H, Asai T, Ikegami Y, Sakurai S. Three-dimensional kinetic analysis of side-foot and instep soccer kicks. *Med Sci Sports Exerc* 34(12): 2028-2036, 2002.
  17. Porter MM, Stuart S, Boij M, Lexell J. Capillary supply of the tibialis anterior muscle in young, healthy, and moderately active men and women. *J Appl Physiol* 92 (4):1451-1457, 2002.
  18. Shinkai H, Nunome H, Isokawa M, Ikegami Y. Ball impact dynamics of instep soccer kicking. *Med Sci Sports Exerc* 41(4): 889-897, 2009.
  19. Sinoway LI, Musch TI, Minotti JR, Zelis R. Enhanced maximal metabolic vasodilatation in the dominant forearms of tennis players. *J Appl Physiol* 61 (2):673-678, 1986.
  20. Snell PG, Martin WH, Buckey JC, Blomqvist CG. Maximal vascular leg conductance in trained and untrained men. *J Appl Physiol* 62 (2):606-610, 1987.
  21. Whipple RH, Wolfson LI, Amerman PM. The relationship of knee and ankle weakness to falls in nursing home residents: an isokinetic study. *J Am Geriatr Soc* 35 (1):13-20, 1987.
  22. Whitney R. The measurement of volume changes in human limbs. *J Physiology* 121:1-27, 1953.
  23. Wolfson L, Judge J, Whipple R, King M. Strength is a major factor in balance, gait, and the occurrence of falls. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 50:64-67, 1995.
  24. 猪飼 道夫 編著. 身体運動の生理学. 杏林書院, 1973.
  25. 木村 忠. 加齢に伴う骨格筋の機能形態変化. *治療* 78(4): 189-192, 1996.
  26. 長嶺普吉. 思春期における皮下脂肪厚の評価に関する研究. *国立栄養研究所報告* 56-58, 1963.

(平成26年10月9日受付)  
(平成26年12月12日受理)