

外側広筋の等尺性随意収縮に伴う形状の変化と等速性筋力 及び最大無酸素性パワー

Relationships between architectural changes due to isometric voluntary contraction and isokinetic force and anaerobic power productions in vastus lateralis muscle.

角田直也*, 蒔野豊**, 須藤明治***

Naoya TSUNODA *, Yutaka MAKINO ** and Akiharu SUDOU ***

ABSTRACT

The purpose of this study was to clarify the relation between the architecture characteristics in isometric contraction and isokinetic force and maximal anaerobic power production in vastus lateralis muscle in varsity athletes. Thirteen male varsity skiers were served as subjects. Angle of pennation for the vastus lateralis muscle in vivo was measured by means of B-mode ultrasonic scanning method in relaxed and maximal isometric contracted conditions on standing position. Pennation angle ratio between relaxes and contracted condition in vastus lateralis was obtained by ultrasonic view. Maximal isokinetic knee extension force during concentric action was measured at velocity of 60, 120 and 240 degrees per second using isokinetic dynamometer. Maximal anaerobic power was determined using cycle ergometer. The pennation angle in all subjects showed larger values of 27.4 ± 2.9 degrees in maximal voluntary isometric condition than that of 20.9 ± 1.7 degrees in resting condition. The pennation angle ratio was significantly closed to knee extension peak torque at all the velocities in all subjects. A higher correlation coefficient was observed at the lower velocity of 60 degrees per second ($r^2=0.886$, $p<0.01$). A similar tendency was observed between maximal anaerobic power production relative to body weight and r pennation angle ratio in all athletes ($r^2=0.732$, $p<0.001$). From these results it is considered that muscle architecture changes due to voluntary isometric contraction of the vastus lateralis muscle reflected isokinetic force of knee extension and maximal anaerobic production capacity in athletes.

Key wards; ultrasonic method, pennation angle, isokinetic force, and maximal anaerobic power.

* 国士舘大学体育学部身体運動学教室 (Lab. of Biodynamics and Human Performance, Faculty of Physical Education, Kokushikan University)

** 日本体育大学大学院体育科学研究科 (Graduate School of Health and Sports Science, Nippon Sport Science University)

*** 国士舘大学体育学部水中運動科学研究室 (Lab. of Swimming and Water exercise Sciences, Faculty of Physical Education, Kokushikan University)

はじめに

ヒトの身体活動やスポーツ競技において、骨格筋の形態的及び機能的特性は身体の発揮しうる能力に大きな影響を及ぼすことは周知の事実である。即ち、関節をまたがって付着している骨格筋の筋線維の収縮によって発生した張力は腱や筋膜に伝わり骨に作用して、関節トルクを生み出し身体外部に発揮される⁵⁾。その関節トルクと筋線維の張力との関係は筋、腱及び関節の構造などの要因に影響されることが指摘されている⁵⁾。

ヒトの生体内における筋の形態的特性については、MRIや超音波などの非侵襲的な画像診断装置を用いて、筋横断面積筋線維長^{8), 11), 13)}、筋線維収縮速度^{11), 13)}、羽状角^{11), 13), 15), 16)}、などに関して比較的多くの報告がなされている。例えば、筋力は筋の横断面積に比例し、筋断面積はトレーニングによって肥大する^{4), 12)}。また、スポーツ競技選手の筋肥大は筋の形状の変化によることが知られている⁹⁾。従って、スポーツのトレーニングやコーチングにおいても生体内の筋の情報を明確にしてトレーニングプログラムを作成することが重要となるであろうことが考えられる。しかし、スポーツ競技者を対象として、下肢の筋形状と等速性筋力や無酸素性パワーとの関わりについての報告はほとんどなされていない。

そこで、本研究では大学生の男子スポーツ競技者を対象とし、超音波法を用いて外側広筋の形状、等速性による脚の伸展力及び自転車エルゴメーターによる最大無酸素性パワーを測定し、筋の形状変化と筋力や無酸素性筋パワーとの関係について検討した。

研究方法

I. 被験者

本研究の被験者は大学の運動部に所属し、専門的なトレーニングを定期的に行っている男子競技者13名であった。被験者の年齢、身長及び体重

の平均と標準偏差値は、それぞれ 19.5 ± 0.2 歳、 173.9 ± 5.2 cm及び 66.6 ± 5.2 kgであった。

各被験者には研究の目的、測定内容等について十分説明し、本研究への任意による参加の同意を得た。

II. 筋の形状の測定

大腿部の筋縦断面像の撮影は、超音波B-mode法 (Echo Camera SSD-650CL, ALOKA製) により、5 MHzのプローブを用いて行った。測定部位は全被験者とも右側の大腿長の遠位50%部位であらかじめ横断面像から外側広筋の筋腹を確認した。羽状角の測定は各被験者とも立位で安静時と随意最大収縮時について行った。そこで観察された深部腱膜と筋束のエコーをトレースして分度器を用いて羽状角を計測した。安静時の羽状角を $\theta 1$ 、収縮時のそれを $\theta 2$ として、羽状角度の変化率 (Pennation angle ratio; PAR) を算出した (図1)。

III. 等速性最大筋力の測定

膝関節の伸展動作での等速性最大筋力は、Biodex System IIを用いて測定した。測定速度は、伸展及び屈曲とも毎秒60, 120及び240度であった。各速度とも被験者は2から3回のウォーミングアップの後、モニター上の動作開始合図により最大努力で3回の膝伸展動作を行った。また、測定に際して、試行順序や筋疲労等が測定値に影響を及ぼさぬよう各速度の試行順序は被験者毎に無作為に設定し、各試行間には十分な休息 (2~3分) を全被験者に与えた。各速度とも3回の測定値のうち最も高い値を各個人の測定値とし、その絶対値と体重比を等速性筋力として採用した。

IV. 無酸素性最大パワーの測定

自転車駆動による最大無酸素性パワーの測定は、パワーマックスV (コンビ社製) を用いて行った。各被験者は、3段階の負荷を8秒間随意最大努力で自転車駆動を試行した。各試行間には2分間の休息をおいて実施した。各試行で得られた

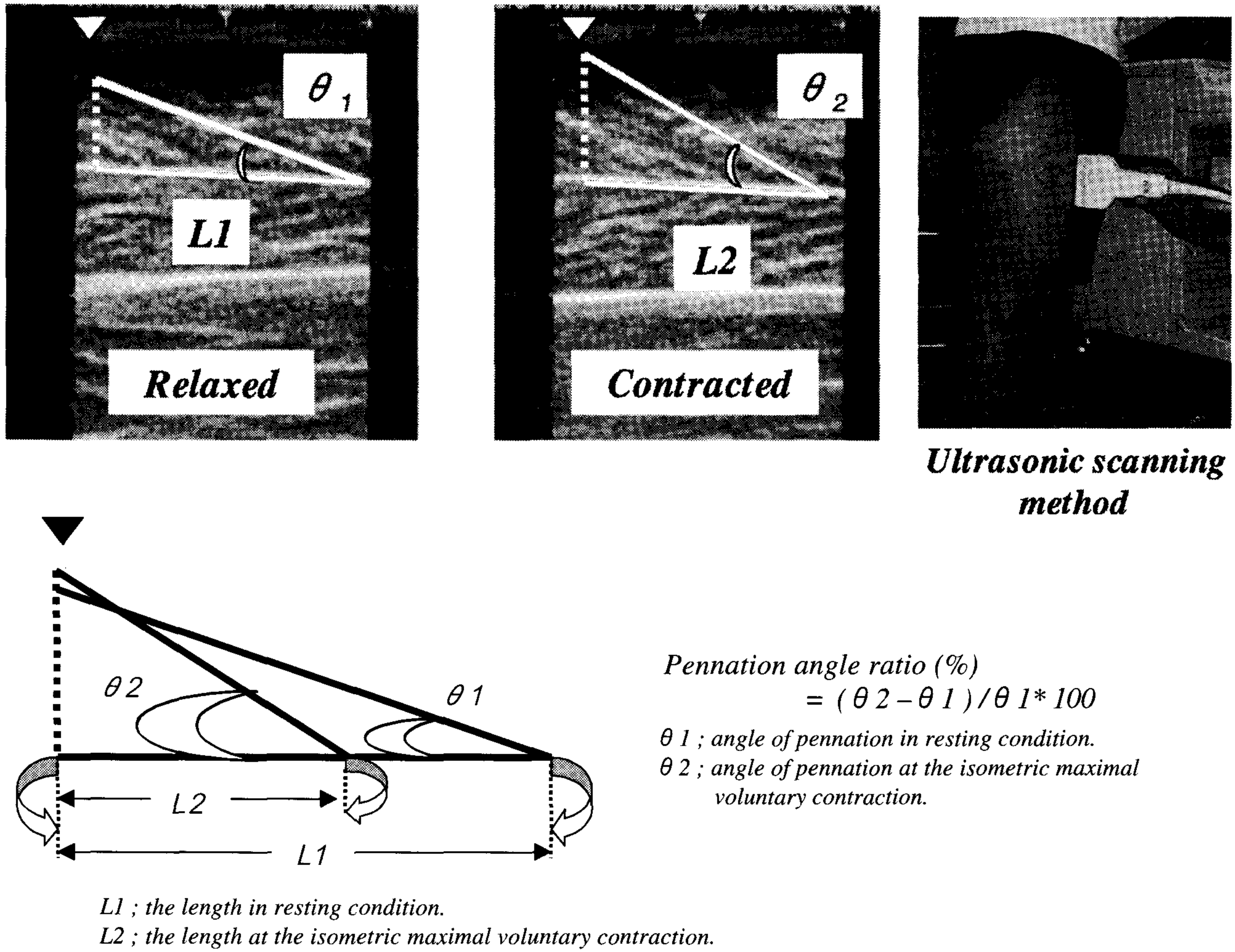


図1 Measurement of pennation angle of the vastus lateralis .

パワー値のうち最高値を最大無酸素性パワーとし、その体重比を求めて採用した。

う羽状角の変化率 (PAR) は、全被験者で31.0±8.3%であった。

V. 統計処理

測定値は平均値及び標準偏差で示した。測定項目間の差を student t-testを用いて検定した。また、各測定項目間の相関関係を単純相関によって求めた。それぞれ危険率5%未満を有意とした。

結 果

表1は、羽状角の安静時 ($\theta 1$) と収縮時 ($\theta 2$) について、全被験者の個人値及びその平均値と標準偏差を示したものである。外側広筋の羽状角の平均値と標準偏差値は $\theta 1$ が20.9±1.7度を示し、 $\theta 2$ では27.4±2.9度となり、全被験者とも収縮時で高い値を示す傾向が認められた。随意収縮に伴

表1 Changes of pennation angle ratio in the vastus lateralis muscle.

	$\theta 1$ (degree)	$\theta 2$ (degree)	Pennation angle ratio (%)
Y.M	20.5	28.0	36.6
T.F	20.0	28.0	40.0
T.A	21.0	30.0	42.9
H.K	17.0	22.0	29.4
K.H	22.0	29.5	34.1
T.K	22.0	30.0	36.4
G.I	22.0	29.5	34.1
H.A	23.0	28.0	21.7
N.K	23.5	29.5	25.5
K.H	21.0	29.0	38.1
M.N	21.0	27.0	28.6
E.T	19.0	23.0	21.1
Y.G	20.0	23.0	15.0
Means	20.9	27.4	31.0
±sd	1.7	2.9	8.3

膝関節伸展動作時における等速性での短縮性活動による最大筋力の絶対値と体重比率について、全被験者の個人値及びその平均値を示したものが表2である。等速性の膝伸展力は毎秒60度の速度が最も高く、 $240.5 \pm 20.6 \text{ Nm}$ であり、角測度の増加に伴ってその値はそれぞれ $120^\circ/\text{s}$ が $189.0 \pm 16.1 \text{ Nm}$ 、 $240^\circ/\text{s}$ では $138.9 \pm 18.3 \text{ Nm}$ と低い傾向を示した。また、等速性脚伸展力の体重比は、平均で $60^\circ/\text{s}$ が365.7%であり、 $120^\circ/\text{s}$ と $240^\circ/\text{s}$ では287.9%と210.0%であった。

そこで、図2は全被験者についてPARと等速性最大筋力との関係について示したものである。両者の間には各測定速度とも有意な正の相関関係が認められ、決定係数は $60^\circ/\text{s}$ との間で0.886 ($p < 0.01$)、 $120^\circ/\text{s}$ とで0.729 ($p < 0.01$)、 $240^\circ/\text{s}$ とでは0.422 ($p < 0.05$)を示し、測定速度の増加に伴ってその関係は弱くなる傾向がみられた。

図3は、大腿外側部の羽状角の変化率と自転車エルゴメーター駆動による最大無酸素性パワーとの関係を示したものである。羽状角の変化率と体重あたりの最大無酸素性パワーとの間には高い有意な相関関係が認められ (決定係数=0.723, $p < 0.01$)、羽状角の変化率の高い被験者ほど最大無酸素性パワーも高い傾向がみられた。

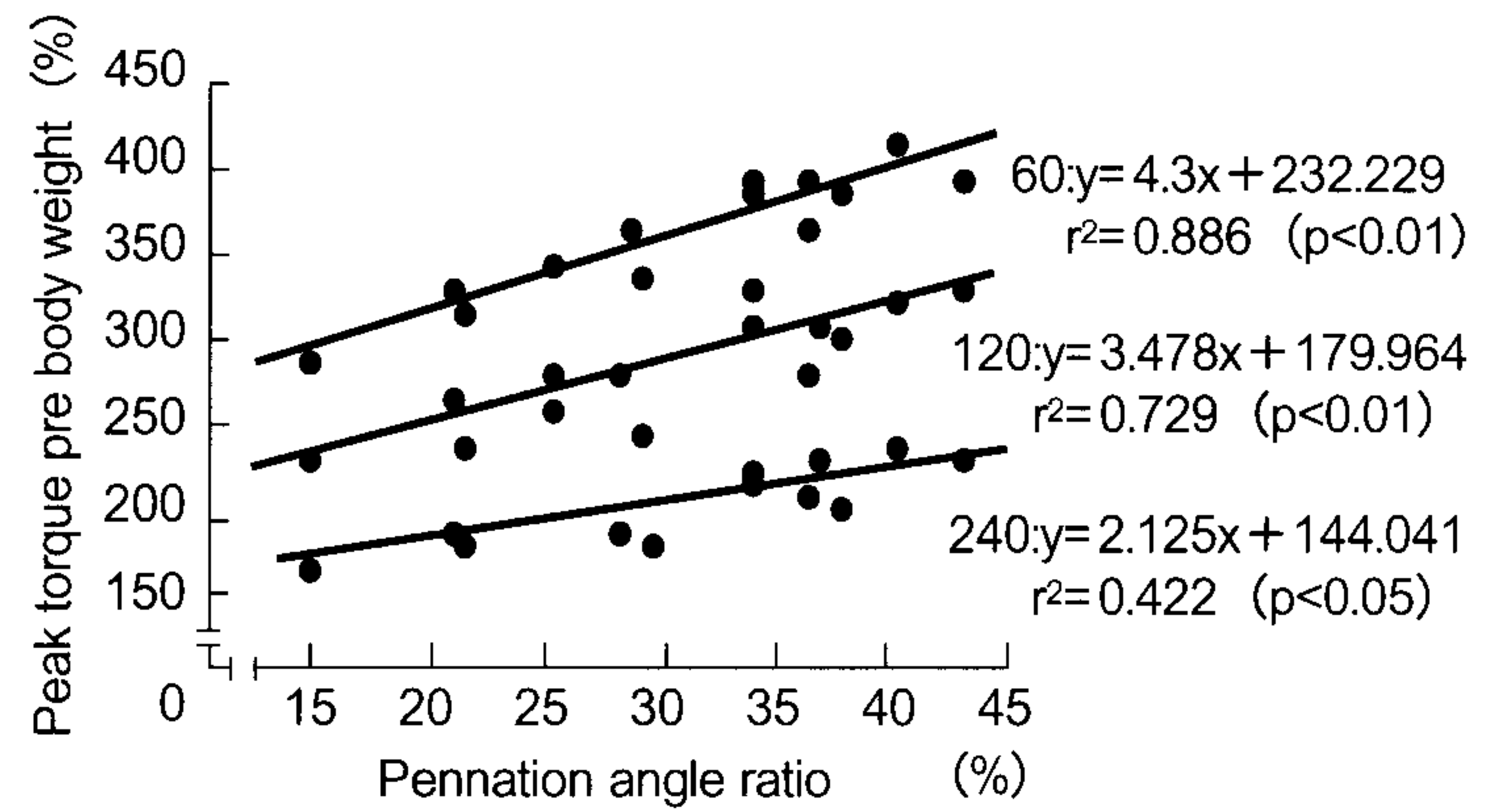


図2 Relationship between pennation angle ratios and peak torque per body weight.

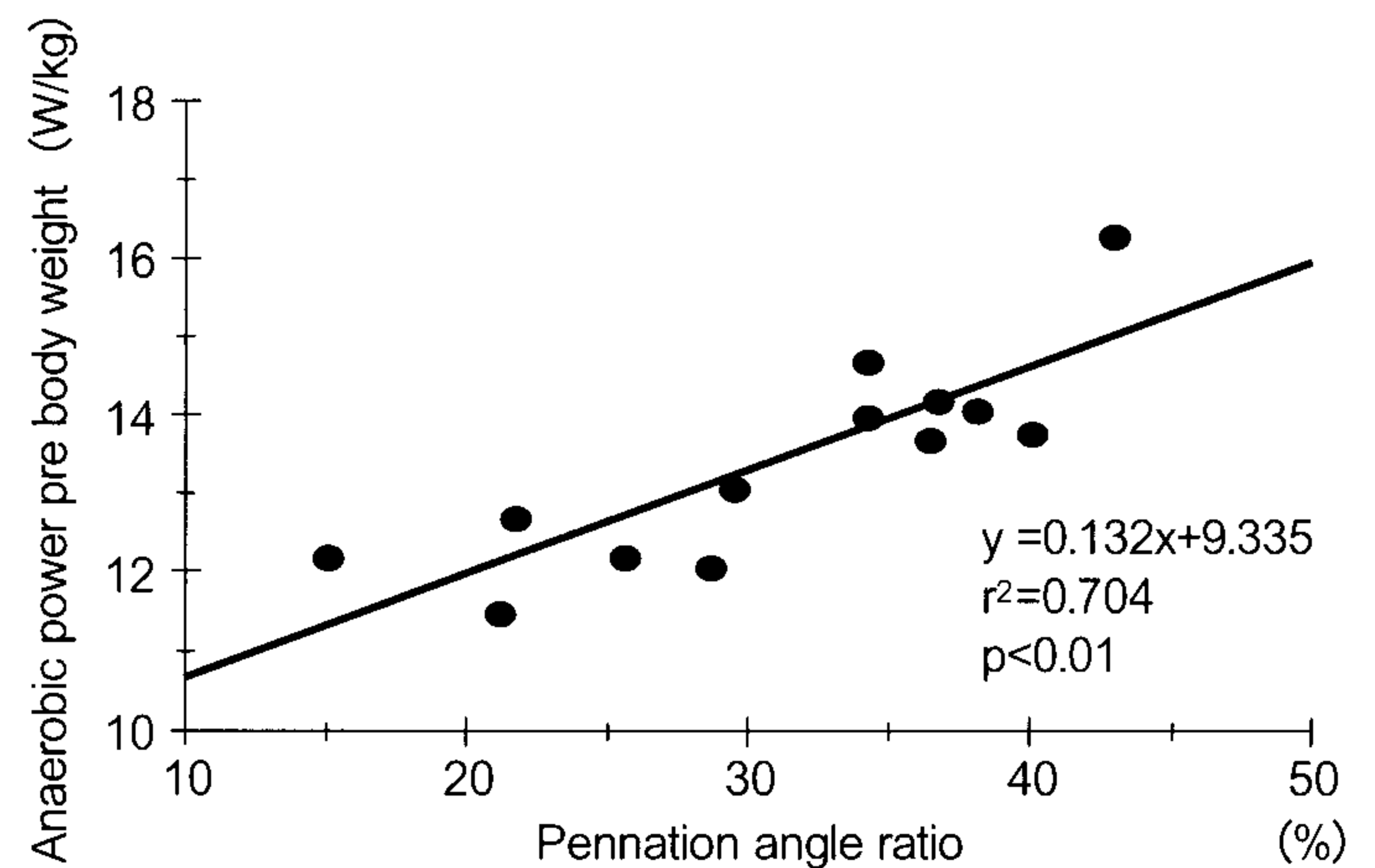


図3 Relationship between pennation angle ratio of the vastus lateralis muscle and anaerobic power to body weight ratio.

表2 Changes of isokinetic peak torque for knee extension on the right leg.

(deg/sec)	Absolute (Nm)			Peak torque/Weight (%)		
	60	120	240	60	120	240
Y.M	242.9	190.1	139.8	399.3	312.5	229.8
T.F	281.5	219.8	163.9	413.4	322.8	240.7
T.A	250.9	209.2	148.8	397.6	331.5	235.8
H.K	236.1	170.4	123.5	342.1	246.9	179
K.H	225.5	193.9	131.7	388	333.7	226.6
T.K	248.4	189.8	139.8	372.2	284.4	209.5
G.I	242.7	187.7	140.3	398.9	308.5	217.3
H.A	241.2	180.2	136.3	322	240.6	182
N.K	247.6	201.9	183.3	345.2	281.5	255.5
K.H	247.1	190	131.5	391.6	301.1	208.4
M.N	254.3	193.8	130.9	368.5	280.8	189.7
E.T	208.3	166.2	119.5	330.1	263.4	189.4
Y.G	199.5	164.5	116.2	285.3	235.3	166.2
Means	240.5	189	138.9	365.7	287.9	210
±sd	20.6	16.1	18.3	38	33.9	27.2

論 議

ヒトの生体における外側広筋の羽状角度については、MRI法や超音波法を用いてこれまでにいくつかの研究がなされている。MRI法を用いた研究によると、Giannini et al.⁶⁾が定期的な身体運動を行っている27から36歳の男子被験者で膝を伸展させての外側広筋の羽状角は、安静時で12度～27.1度であったこと、Narici et al.¹⁵⁾は、17.1度であったことを報告している。超音波法を用いてHenriksson-Karsen et al.⁷⁾は、女性の被験者で安静時が11.0度であり、収縮時では20度～25.1度であったことを報告している。また、Rutherford and Jones¹⁶⁾は、18～40歳の男女被験者の羽状角が安静時で6～9.5度、収縮時では平均14度に増大したことを明らかにしている。本研究で得られた外側広筋の羽状角の平均値は、安静時が20.9度、等尺性随意最大収縮時で27.4度であり、これまでの報告値に比べ高い傾向であった。その理由として考えられることは、本研究の被験者は男子のスポーツ競技者であったことである。日本人の場合、筋力トレーニングによって肥大した外側広筋の羽状角の最大値は、30度であることが示されている(福永⁴⁾)。また、本研究での羽状角の測定は、安静時及び等尺性による筋収縮時とも膝関節を完全に伸展させて実施した。研究筋収縮時の外側広筋の羽状角は膝関節の伸展位(屈曲30度以内)で筋収縮に伴い有意に増加したことから外側広筋の筋線維は伸展に伴って短くなり、より筋線維の付着角度である羽状角が立ってくる傾向を示すことが指摘されている(Fukunaga et al.¹⁾)。これらのことを考慮すると本研究で得られた外側広筋の羽状角は、安静時及び筋収縮時ともに先行研究に比べて高い値を示したことが考えられる。

本研究で得られた脚伸展時の等速性最大筋力の平均値は、各測定速度とも、筆者ら¹⁷⁾が報告している同機種による男子の体育学部生の測定結果とほぼ同値であった。

これまでの研究では、立位で測定した羽状角と

等速性筋力とを直接みた報告はあまり見られていない。本研究では羽状角変化率を筋収縮時と安静時との比率を算出し、等速性最大筋力との関係について検討した結果、各測定速度での等速性最大筋力と羽状角変化率とは有意な相関関係を示し、その相関関係は、遅い測定速度(60°/s)が最も高く、240°/sとが最も低くなる傾向が認められた。即ち、筋力発揮の高さは羽状角の変化率の大きさに関係し、筋収縮速度が速く、筋出力が小さくなる程その変化率の関与度が小さくなることを意味している。

Ichinose et al.⁸⁾はヒトの膝伸展時の筋張力の変化と外側広筋の筋線維長の変化の関係について観察し、屈曲70度で筋張力は最大であり、関節角度が屈曲85度、100度と伸展されるほどその張力は低下することを報告している。また、等速性筋力測定装置を用いて外側広筋の筋線維の短縮速度を測定した結果では、膝関節の屈曲位100度から短縮速度は増加し、60度で最大値が得られている(Ichinose et al.¹⁰⁾)。本研究で測定した羽状角は膝関節伸展位で得られたものであり、等速性最大筋力は発現角度に関係なくピークトルクを採用したにも拘らず両者の間には、各測定速度とも有意な相関関係が得られている。さらに、先行研究の知見を考慮して、羽状角の測定を最大筋張力の発現角度や筋線維速度が最大となる関節角度の屈曲70から60度で実施し、それらを検討する必要性が考えられ、スポーツ競技選手のトレーニング処方に活用できるであろうことが推察された。

また、本研究では脚エルゴメーターを用いての最大無酸素性パワーと羽状角の変化率との間に正の有意な相関関係が認められた。無酸素性パワーの大小は、その運動に参加している筋量に影響されることが考えられる。羽状筋が収縮した場合、その角度が大きくなることは筋の収縮速度が速く、太くなり易いことを意味する。これらの結果をコーチングやトレーニングの指標にするためには、さらに被験者数を増加させることによりスポーツ競技選手の筋力や最大無酸素性パワーを筋の

形状測定からの推定することが可能になるであろうことが示唆された。

ま と め

本研究では男子大学生のスポーツ競技者を対象として、超音波法により外側広筋の形状の筋収縮に伴う変化、等速性による脚の伸展力及び自転車駆動による最大無酸素性パワーを測定し、筋の形状変化とパフォーマンスとの関係について検討した。その結果、次の様なことが明らかになった。

1. 外側広筋の羽状角の平均値は、安静時で 20.9 ± 1.7 度を示し、等尺性随意収縮によって 27.4 ± 2.9 度に増大し、その変化率は $31.0 \pm 8.3\%$ であった。
2. 脚の伸展動作による等速性最大筋力の体重比は、羽状角の筋収縮による変化率との間で各測定速度とも有意な相関関係が認められた。その決定係数は、筋出力が最も大きかった $60/s$ との間が最も高く、測定速度の増大に伴って低くなる傾向がみられた。
3. 脚の伸展動作による等速性最大筋力は、羽状角の筋収縮による変化率と各測定速度とも有意な相関関係が認められた。また、決定係数は $60/s$ が最も高く、 $240/s$ で最も低い値を示す傾向がみられ、羽状筋の角度変化は筋出力に関与することが考えられた。
4. 体重あたりの最大無酸素性パワーは、羽状角の変化率と有意な相関関係が認められた。
5. これらのことから、筋収縮に伴う羽状筋の形状の変化率はその出力やパワーを反映するであろうことが推察された。

本研究は、国士舘大学体育学部附属体育学研究所の2000年度研究助成によって実施した。

引用・参考文献

- 1) Fukunaga, T., Ito, M., Ichinose, Y., Kuno, S., Kawakami, Y. and Fukashiro, S.: Tendinous movement of a human muscle during voluntary contractions determined by real-time ultrasonography. *J Appl Physiol* 81(3):1430-1433, 1996.
- 2) Fukunaga, T., Kawakami, Y., Kuno, S., Funato, K. and Fukashiro, S.: Muscle architecture and function in humans. *J. Biomech.* 30(5): 457-463, 1997.
- 3) Fukunaga, T., Ichinose, Y., Ito, M., Kawakami, Y. and Fukashiro, S.: Determination of fascicle length and pennation in a contracting human muscle in vivo. *J Appl Physiol.* 82(1): 354-358, 1997.
- 4) 福永哲夫: 人体筋の発達の限界を探る. *体育の科学*, 47(5):329-337, 1997.
- 5) 福永哲夫: 身体運動における筋収縮のバイオメカニクス. *体育学研究*, 42:337-348, 1998.
- 6) Giannini, F., Landoni, L., Merella, N., Minetti, A.E. and Narici, M.V.: Estimation of specific tension of human knee extensor muscles from in vivo physiological CSA and strength measurements. *J Physiol (Lond)*. 432:86, 1990.
- 7) Henriksson-Larsen, K., Wretling, M.L., Lorentzon and R., Oberg, L.: Do muscle size and fiber angulation correlate in pennated human muscles? *Eur. J. Appl. Physiol.* 79(3):294-297, 1999
- 8) Ichinose, Y., Kawakami, Y., Ito, M. and Fukunaga, T.: Estimation of active force-length characteristics of human vastus lateralis muscle. *Act Anat.* 159(2-3): 78-83, 1997.
- 9) Ichinose, Y., Kanehisa, H., Ito, M., Kawakami, Y. and Fukunaga, T.: Relationship between muscle fiber pennation and force generation capability in Olympic athletes. *Int. J. Sports Med.* 19(8):541-546, 1998.
- 10) Ichinose, Y., Kawakami, Y., Ito, M., Kanehisa, H. and Fukunaga, T.: In vivo estimation of contraction velocity of human vastus lateralis muscle during isokinetic action. *J Appl Physiol.* 88(3): 851-856, 2000.
- 11) Ito, M., Kawakami, Y., Ichinose, Y., Fukashiro, S. and Fukunaga, T.: Nonisometric behavior of fascicles during isometric contraction of a human muscle. *J Appl Physiol* 85(4):1230-1235, 1998.
- 12) Kanehisa, H. and Fukunaga, T.: Velocity associated characteristics of force production in college weight lifters. *Br. J. Sports Med.* 33(2): 113-116, 1999.
- 13) Kawakami, Y., Ichinose, Y. and Fukunaga, T.: Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. *J Appl Physiol.* 85(2): 398-404, 1998.
- 14) Maganaris, C. N. and Baltzopoulos, V.: Predictability of in vivo changes in pennation angle of human tibialis anterior muscle from rest to maximal isometric dorsiflexion. *Eur. J. Appl. Physiol.* 79(3):294-297, 1999.
- 15) Narici, M.V., Landoni, L. and Minetti, A.E.: Assessment of human knee extensor muscle stress from in vivo physiological cross-sectional area and strength

- measurements. *Eur. J. Appl. Physiol.* **65**:438-444, 1992.
- 16) Rutherford, O.M. and Jones, D.A.: Measurement of fiber pennation using ultrasound in the quadriceps in vivo. *Eur. J. Appl. Physiol.* **65**: 433-437, 1992.
- 17) 角田直也, 多賀恒雄, 浜田 拓, 荒木一彦, 矢田秀昭: 膝関節伸展筋と屈曲筋群の短縮性及び伸張性活動による筋出力特性. 国士舘大学体育研究所報, **10・11**: 41-47, 1992.
- 18) Wickiewics, T.L., Roy, R.R., Powell, P.L., and Edgerton, V.R.: Muscle architecture and force-velocity relationship in humans. *J Appl Physiol.* **57**(2):435-443, 1984.