

筋出力の大きさと α -Motoneurons (α -MNs) の抑制率の関係
— 伏臥位・立位姿勢とヒラメ筋脊髄 α 運動ニューロンの興奮性について —

Relationship between static- and dynamic-motor output and
soleus H reflex on the different posture

中 島 剛*, 山 縣 孝 司**, 内 藤 祐 子***

Tsuyoshi NAKAJIMA *, Takashi YAMAGATA ** and Yuko NAITO ***

ABSTRACT

Objective: In this study, we investigated the relationship between maximal strength and control of α -motoneurons as indicator of changes in maximal voluntary contraction (MVC) and/or dynamic muscle output at pedaling exercise(reserve power), and in soleus H reflex with prone- and stand-postures.

Methods: Nine subjects had to voluntarily contract their quadriceps muscle. MVC and reserve power(RP) was measured by isometric-output of knee extension and dynamic pedaling exercise. Reflexes of the experimental measurements were elected in the relaxed standing posture and of the control measurements were made with prone posture on comfortable prescription bed. Furthermore, a mount of inhibition in soleus motoneurons(PR_{TA-vib}) was measured by means of tonic vibratory reflexes on tibialis anterior muscle as indicators of the reciprocal inhibition in interneurons.

Results: MVC and RP outputs in all subjects were 252.08 ± 91.57 (Nm) and 73.09 ± 40.07 (watts), respectively, and its were showed the tendency of proportional relation ($r=0.686$, $p=0.089$). Moreover, H reflex gain of the prone posture (PR_H), the standing posture (ST_H) and PR_{TA-vib} were 1.88 ± 0.49 (mV), 0.97 ± 0.33 (mV), and 0.89 ± 0.24 (mV), respectively. ST_H depressed significantly as compared to its of PR_H ($p<0.05$). Further PR_{TA-vib} was depressed significantly more than its of PR_H ($p<0.01$) and that was depressed as compared to its of ST_H . On the other hand, ST_H / PR_H (%) vs MVC was correlated negative regression line ($r=0.72$, $p=0.068$), and ST_H / PR_H (%) vs RP was also correlated significantly negative regression line ($r=0.75$, $p<0.05$).

Conclusion: It is suggested that the reason why inhibition of α -motoneurons (ST_H / PR_H (%)) was greater in strong subjects of MVC or RP may have been that this muscle output task involved motor control of neural circuit for spinal domain originating from peripheral proprioceptive factor and/or reciprocal nervous system.

Key words; MVC, Tonic vibratory reflex, H-reflex, Soleus, Motor control

* 国士舘大学体育学部体育学科 (現在: 筑波大学大学院体育研究科 健康生理学研究室) Dept. of Physical Education, Faculty of Physical Education, Kokushikan University. (Now: Lab. of Health and Exercise Physiology, Master Program in Health and Sports Sciences, University of Tsukuba.)

** 東邦大学医学部 運動生理学研究室 (Lab. of Exercise Physiology, Toho University, School of Medicine.)

*** 国士舘大学体育学部スポーツ医科学科 (Dept. of Sport and Medical Science, Faculty of Physical Education, Kokushikan University.)

はじめに

伸張反射のゲインは筋の張力、背景筋電図、運動のタスク、運動の予測などによって補償的に制御されている⁹⁾。最近、この反射のゲインは持続的な運動やトレーニングによって変化すると報告されている。Mynarkら¹²⁾やNeilsenら¹⁵⁾はバレエダンサーのような不安定姿勢保持のトレーニングを行っている場合、立位姿勢時のH反射は一般健康人と比べてダンサーの方に有意な減少が認められることを報告した。その原因は不安定姿勢保持の反復トレーニングによって、脊髄Ia終末に投射する下行性由来シナプス前抑制が強化されるためだとした。また、Crone⁵⁾らは足関節底屈動作において軽底屈時にH反射の抑制が認められ、その振幅の抑制は10-20%程度であり、大きいときには40%にも及ぶこともあるとし、その抑制の大きさはスポーツ活動量と正の相関関係をもっていると報告した。

これらの報告は日常的にスポーツトレーニング^{3) 8)}、不安定な姿勢保持訓練^{12) 15)}がより精密な運動制御機構の構築に役立つことを示唆した。このときのH反射の顕著な減少はアルファ運動ニューロン(α -MNs)の抑制機構の強化と筋力増加との関係を示唆するものであった。筋出力は中枢性要素¹¹⁾と筋線維自身の機能的要素^{2) 11) 14)}の組み合わせによって得られるが、とくに中枢性要素は重要と考えられている。その要素はH反射の変化から推測することができる。

そこで本研究はヒラメ筋のH反射が伏臥位から立位姿勢変化による減少量(α -MNsの抑制量)と大腿四頭筋の最大膝伸展力の関係を明らかにすることを目的にした。

方法

本実験における被検者は健康な成人、男女9名(平均年齢28.5±9.2歳)を対象にした。被検者には事前に実験目的及び手順を説明し、同意を得た。

静的筋出力による最大膝伸展力、動的筋出力としてペダリング運動によるクリティカルパワー(critical power: CP)伏臥位と立位時のヒラメ筋(Soleus: Sol)のH反射の測定とした。

最大筋力の測定は多用途筋機能評価装置(BIODEX MEDICAL社製: BIODEX)を使用し、各被検者ごとにあらかじめ大腿四頭筋の最大筋力を発揮する至適関節角度を決め、その後最大随意収縮(MVC)2秒間、試行間隔は30秒間測定し、3回の平均値をMVCとして用いた。

CPの測定は自転車エルゴメーター(コンビ社製: Aerobike 800)を用いて異なった3種類の負荷(250W, 300W, 400W)でペダリング運動(60rpm)を実施し、総仕事量(W_{lim})一限界時間(T_{lim})の関係から活動した筋肉群のもっている無酸素的能力(潜在的貯蔵エネルギー)と有酸素的能力(エネルギー代謝機能分)要素を求めた。 W_{lim} と T_{lim} から一次回帰式を求めることによりCPを算出した。そしてその一次式の係数(a)をCPとし、切片(b)を無酸素的能力の指標としてリザーブパワー(Reserve power: RP)とした。CP及びRPは次式より求めた。

$$W_{lim} (W \cdot \text{sec}) = a \times T_{lim} (\text{sec}) + b$$

H反射の測定には神経刺激装置(日本光電製: ニューロパックΣ)を使用し、脛骨神経を膝窩部より経皮的に電気刺激(1 msec, 2 mA~10mA)してSolのH波を誘発した。その誘発EMG記録は表面双極誘導法により導出し、そしてH波の刺激強度を一定にするために、M波の振幅指標とした。

各電極を約1.5cm離して設置し、アースは記録電極と刺激電極の中間地点に設置した。

H反射の測定条件は、伏臥位(Prone Position: PR)と立位姿勢(Stand Position: ST)で行い、刺激頻度を10秒間隔で5回のアベレーシングを行った。さらにPR時に、前脛骨筋(Tibialis anterior: TA)の遠位の腓部に携帯バイブレーター(100Hz)の振動刺激を与えたときのH反射を測定した。そして、各条件ごとに得られたH波の振幅は、PR姿勢の振幅(PR_H)をコントロール群とし、ST姿

勢の振幅 (ST_H)、TAへの振動刺激時におけるPR姿勢の振幅 (PR_{TA-vib}) からH波の抑制の割合を計算し、Sol-MNsの抑制率の評価に用い、その抑制率は次式から求めた。

(1) はSTによって活動が調節される抑制率を、(2) 式はTAへの振動刺激による相反性抑制率を意味する。

$$ST_H/PR_H \times 100 (\%) \dots\dots (1)$$

$$PR_{TA-vib}/PR_H \times 100 (\%) \dots\dots (2)$$

有意差検定には各H波振幅の比較、姿勢変化におけるST_H/PR_H比とPR_{TA-vib}/PR_H比の比較に t-検定を用いた。また、ST_H/PR_H比とMVC、RPとの関係に、Pearsonの相関係数検定法を用いた。いずれも、確率水準5%以下を有意限界とした。

結 果

大腿四頭筋のMVCは平均252.08Nm±91.57、RPは平均73.09watts±40.07であった。MVCは筋肉量が一定であれば中枢神経性のインパルス発射頻度と運動単位の動員興奮度に、RPは筋肉内の貯蔵エネルギー量を活用できる時間によって異なる。MVCとRPには静的筋出力と動的筋出力の特徴的關係が存在し、両者には正の相関傾向が認められた (r= 0.686, p= 0.089) (Fig.1)。

次に下腿三頭筋運動ニューロンに対する伏臥位と立位姿勢変化の下位中枢性調節をSol-H反射から調べた (Fig.2)。H反射は、PRが平均1.88mV±0.49とSTが平均0.97mV±0.33であった。PRのH反射はSTのそれよりも有意に大きかった (p< 0.05)。さらに既知のTA振動刺激によるSol-MNsの抑制をPRで調べると、PR_{TA-vib}のSol-H反射は平均0.89mV±0.24であった。同じ伏臥位姿勢の条件で得られたSol-H反射はPRよりもPR_{TA-vib}の方が小さい傾向を示した。姿勢変化によるSol-H反射は、PR_Hに最も大きく出現し、PR_{TA-vib}に最も小さく出現した。このPR_HとPR_{TA-vib}の間には顕著な有意差が認められた (p< 0.01)。さらに姿勢変化で最も大きなSol-H反射を出現したPRに対するSTとPR_{TA-vib}

の相対的变化はそれぞれ約50%以下であった (Fig.3)。相対値の平均は、ST_H/PR_H比が50.6%±12.36、PR_{TA-vib}/PR_H比が40.95%±5.81であったが、

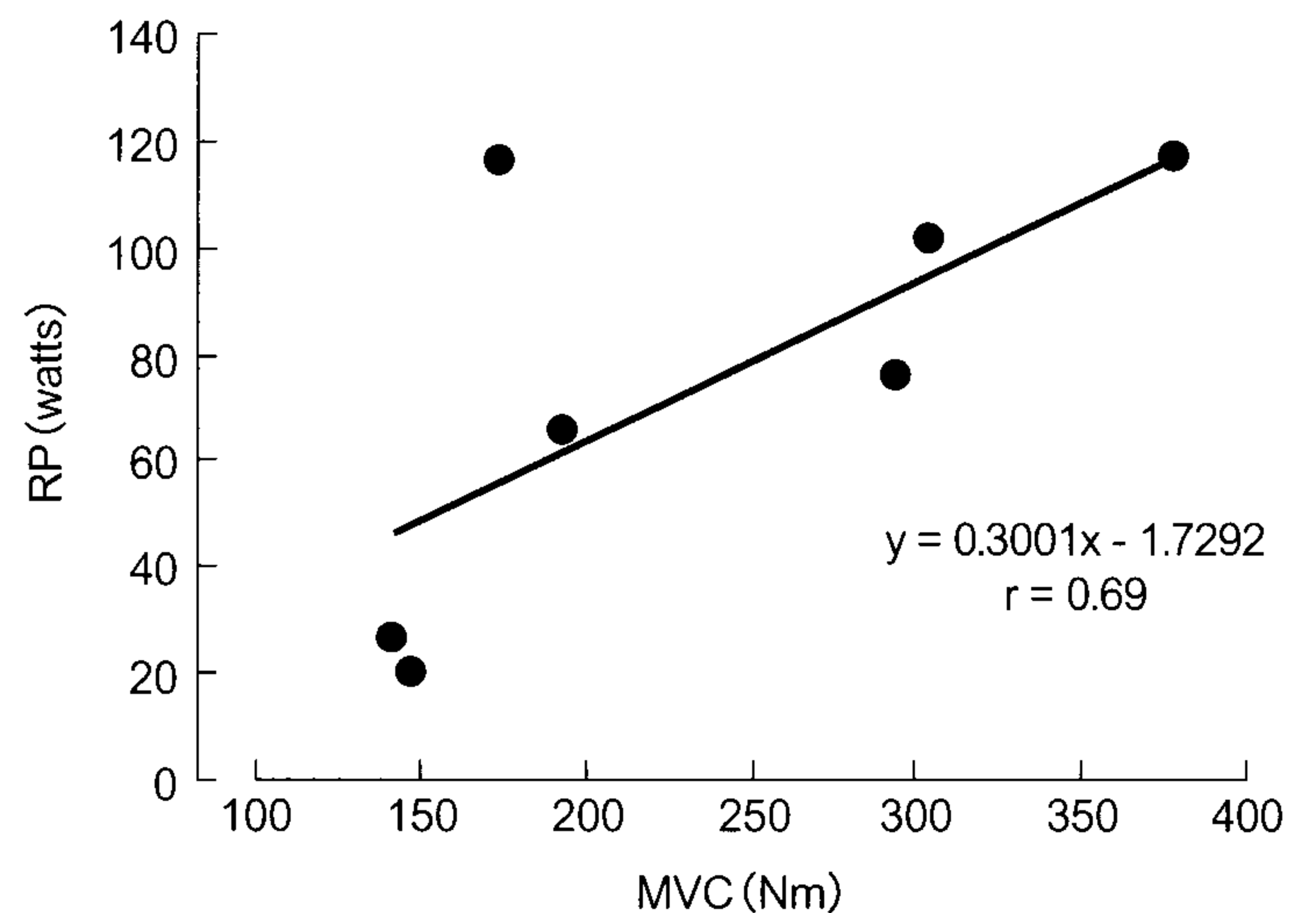


Fig.1 Relationship between Maximal Voluntary Contraction(MVC) and Reserve Power(RP) in knee extension.

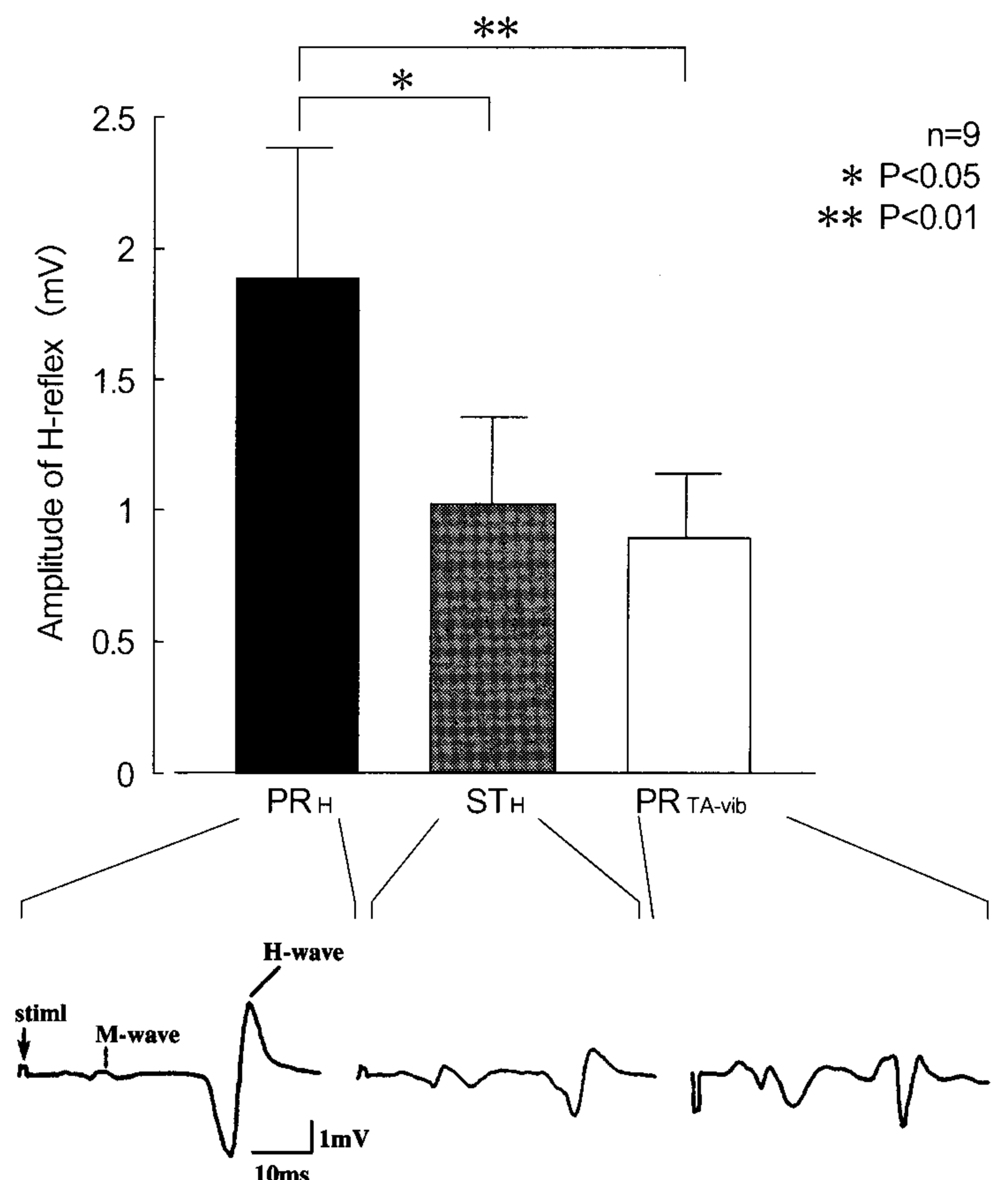


Fig.2 The average amplitude of the soleus H-reflex in prone, stand posture and by means of tonic vibratory reflexes on tibialis anterior muscle (PR_{TA-vib}). Bottom traces show M and H responses in a typical subject.

両者間には有意な差が認められなかった。

筋出力（静的と動的）の大きさとSol-MNsの下位中枢性抑制の関係を調べるために、MVC・RPとST・PRのSol-H反射間の相関関係を求めた(Fig.4)。MVCに対するPR_Hは正の相関傾向が認められたが ($r = 0.516$, $p = 0.23$)、RPには認められなかった。RPに対するPR_Hは弱い相関傾向がみられた ($r = 0.363$, $p = 0.423$)。しかし、ST_HにはMVCと同様にその傾向が観察されなかった。筋出力の大きさはPR時のSol-MNsの下位中枢性抑制に強く関連していることが示された。さらに筋出力(MVCまたはRP)の大きさとSol-H反射の相対的ST_H/PR_H比との関係は負の相関関係を示した(Fig.5)。またRPに有意な相関関係が認められたが、($r = 0.75$, $p < 0.05$) MVCには有意な相関関係

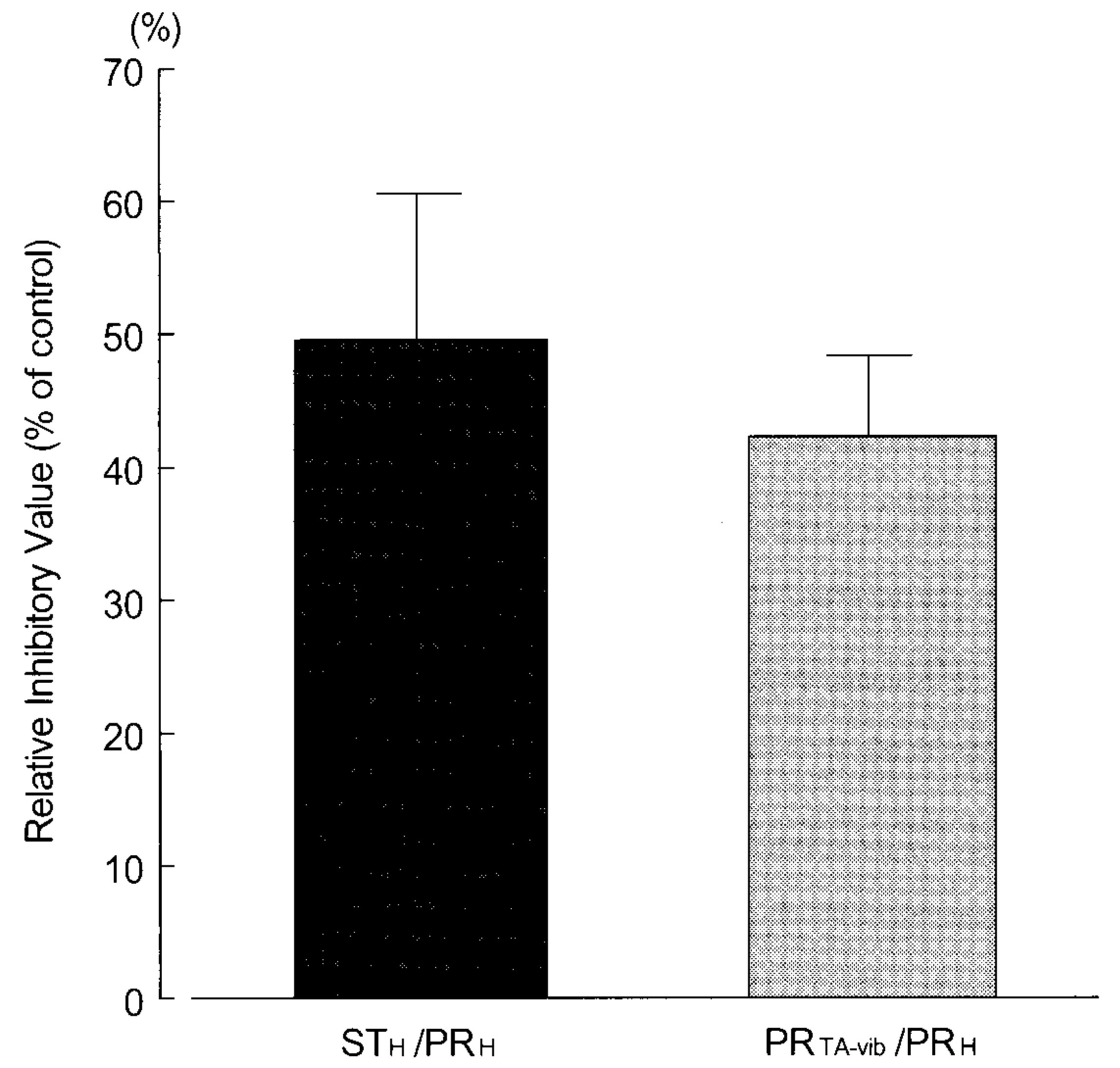


Fig.3 Comparison of the relative H-reflex value between relative ST_H/PR_H and PR_{TA-vib}/PR_H.

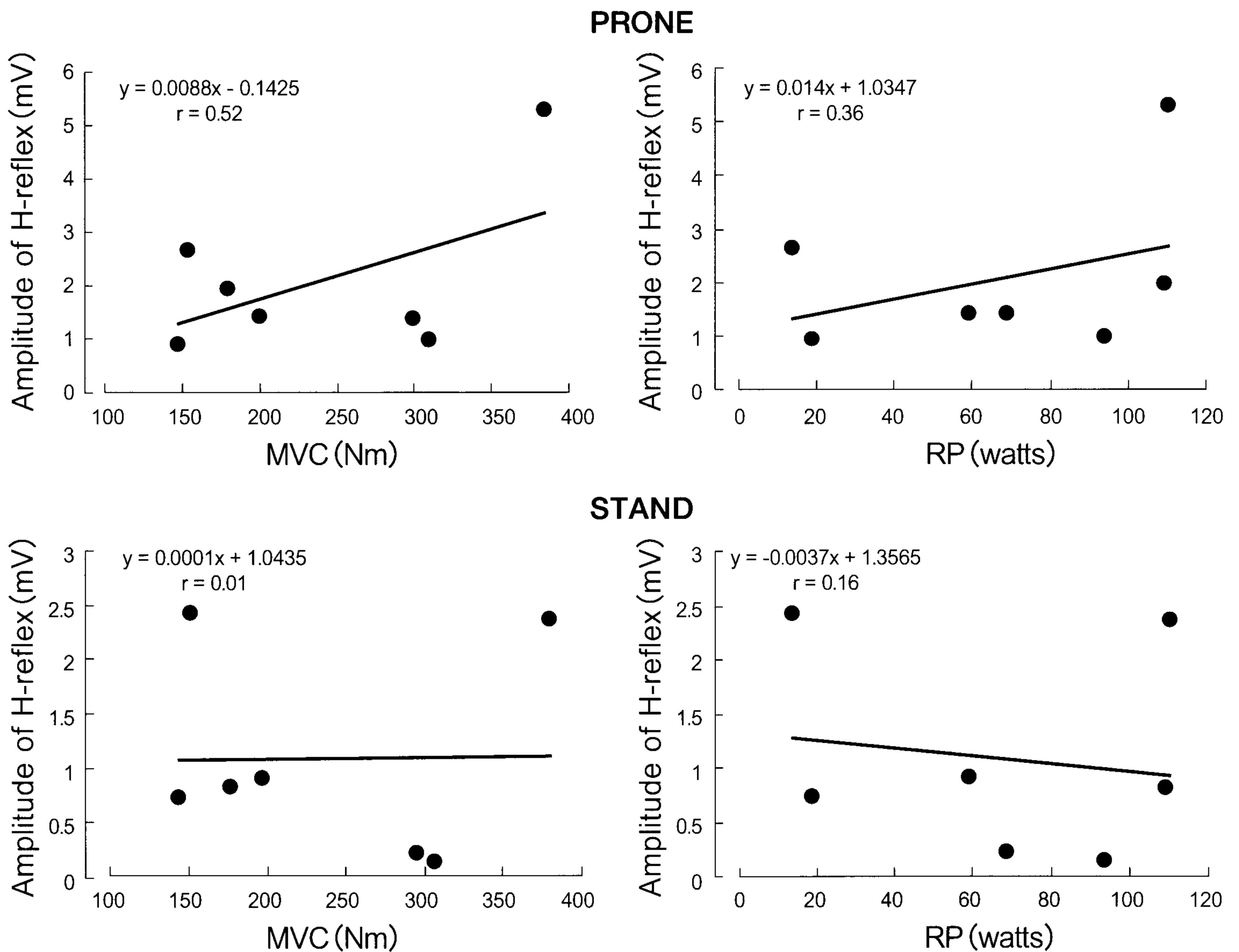


Fig.4 Correlation of MVC or RP vs H-reflex at prone and stand posture.

が認められなかった ($r=0.72$, $p=0.068$)。静的および動的筋出力はSol-MNsの下位中枢性抑制が強いほど大きくなっている。

考 察

MVCは静的筋出力の能力を評価する代表的な指標に用いられる。このMVCの大きさは大脳皮質興奮水準¹¹⁾や相動性錐体路運動ニューロン (phasic pyramidal tract motoneurons: PPT-MNs)^{2) 11)}の活動の大きさ (頻度など) によって決まる。パワー競技選手は持久性の競技選手に比べてMVCが大きい。これは運動ニューロンプールの緊張性錐体路運動ニューロン (tonic pyramidal tract motoneurons: TPT-MNs) とPPT-MNsの含有比に違いをもつことに依存する。例えばPPT-MNsは速筋線維を支配することから、素早く大きな張力発揮に関与することが知られている。したがってPPT-MNsの活動頻度が高くなれば、 α -MNsに支配されている多数の速筋線維が活動され、大きいMVCを発揮することができる^{2) 11)}。一方、RPは動的筋出力 (パワー) の能力を評価する指標になる。

RPは活動筋中に貯蔵されているエネルギー (グリコーゲン・クレアチンリン酸) 量に依存するだけでなく、その貯蔵エネルギーを活用する筋

活動パターンにも関係している¹¹⁾。

それはダイナミックな最大筋出力の場合もMVCと同様にPPT-MNsの活動頻度が高まることから指摘される。Citterioら⁴⁾は、ペダリング強度を増加すると、遅筋線維の活動に加えて速筋線維の活動が多く引き出されることを報告している。本実験での高強度負荷時のペダリング運動は、下肢筋群のPPT-MNsの参画によって筋内貯蔵エネルギーを利用して継続されると考えられる。

それらのことから静的筋出力と動的筋出力は中枢性興奮のインパルス発射頻度さらに運動単位の動員と筋肉内の貯蔵エネルギー量の両方に関係していることが、MVCとRPの強い相関関係から確認された。

そこで筋出力の大きさに脊髄 α -MNsの神経調節が関与していることは推測できる。しかしMVCやRPの大きさと α -MNsの抑制的調節について関連づけた研究はみられないので、その関わりについて伏臥位と立位姿勢のSol-H反射から検討した。

Nielsenら¹⁵⁾、Mynarkら¹²⁾、Komiyamaら⁸⁾は相反Ia抑制やシナプス前抑制機構の発達が発達筋出力の大きい運動選手にみられることをH反射の変化から明らかにしている。また随意的な筋力トレーニングは、運動動作に対する上位および下位中枢性の神経機構への適応を生み出し、運動制御の正確

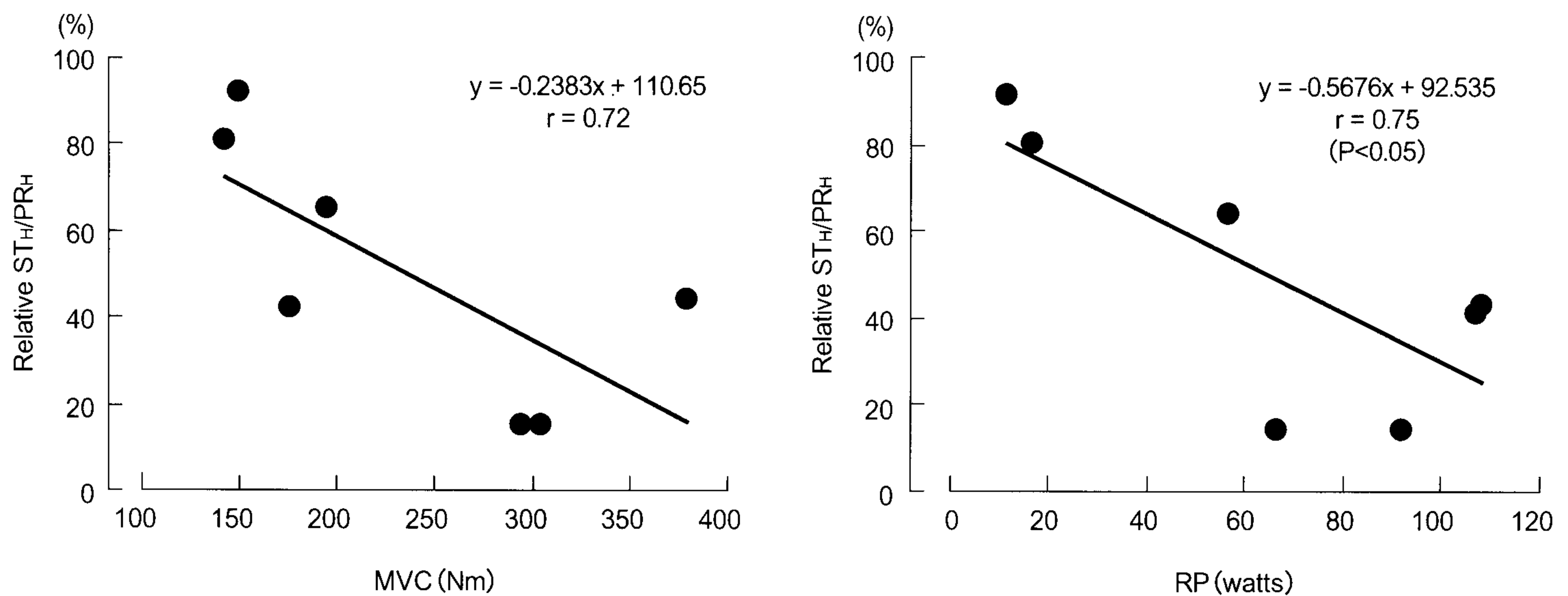


Fig.5 Correlation of MVC or RP vs relative ST_H/PR_H.

性を向上させる¹⁴⁾。換言すると、トレーニングによって活動筋群に対するタスクに応じた効率のよい筋出力発揮機構が発達していることに対応する。

本実験の結果は大腿四頭筋筋出力が発達している被検者ほど姿勢変化に対するSol-H反射の大きな抑制傾向を示した。これは下肢筋群間の神経制御機構の適応を示唆するものである。日常的な動きや運動の場面では複数筋群間の協調的相互作用によって筋収縮が行われていることを考え合わせると、Sol-H反射の抑制に筋出力の神経調節機構が影響していることを示唆している¹⁶⁾。

Zehrら¹⁷⁾は上肢の随意的緊張 (jendrassik maneuver: JM) 状態に起こるH反射の変化から、その神経制御回路について調べた。それによるとJMはSol-MNsに結合する抑制介在ニューロン (Inter neuron: IN) の脱抑制によってシナプス前抑制を減少させるように作用する。またHultbornら⁶⁾は異名筋からの入力伸張反射のゲインを調節していると報告した。さらに、Mynarkら¹³⁾は姿勢変化によるH反射抑制量と異名筋条件刺激における抑制量の間には高い相関関係を認めている。これらの報告から異名筋のSol-MNsの調節は強い反射的抑制の存在を支持している。

姿勢変化によるH反射の減少はシナプス前抑制が大きく影響した結果、生じるものと考えられている^{12) 13) 15)}。本実験で得られた PR_{TA-vib}/PR_H 比と ST_H/PR_H 比では、その両者間に有意な差が現れていない。これは異名筋の反射的抑制機構の存在を支持するものである^{6) 13)}。Moritaら¹⁰⁾は加齢ともなってシナプス前抑制量に変化が起こると報告した。またシナプス前抑制の変化要因の一つとして、速筋線維の萎縮を上げている。一方でNielsenら¹⁵⁾は神経調節機構に優れた運動選手でシナプス前抑制量の上昇を報告している。しかし、脊髄疾患や脊髄損傷による痙攣患者ではほとんどシナプス前抑制が現れない¹⁶⁾。このシナプス前抑制の強さは下位中枢神経の運動制御に大きな影響力を持つことに関連しているものと思われる。高

い筋出力発揮に関わるPPT-MNsの活動は大きな筋出力を得るためのシナプス前抑制機構の構築に関与していることが考えられる。

以上の結果から高い筋出力は末梢性の固有感覚受容器または相反性神経抑制によって α -MNsの強い活動を引き起こすことに関連していることが示唆された。

ま と め

本研究では健康な男女9名を対象とし、伏臥位時、立位時、前脛骨刺激時におけるH反射の測定を実施し、伏臥位から立位姿勢に変化した時のH反射の抑制量に注目し、姿勢変化に伴うH反射の抑制される割合と、最大筋出力との関係を探るべく実験を行った結果、以下のように結論された。

- 1) 静的筋出力の指標であるMVCと動的筋出力の指標であるRPにおいて正の相関傾向が認められた ($r=0.686$, $p=0.089$)。
- 2) 筋出力と姿勢変化によるH反射振幅はPRにおいて正の相関傾向が認められたが (MVC: $r=0.516$, $p=0.23$; RP: $r=0.363$, $p=0.42$)、ST時ではまったく相関関係がみられなかった。
- 3) 筋出力と姿勢変化におけるH反射抑制率を比較した場合、RPでは有意な負の相関関係が認められ、MVCでは負の相関傾向が観察された (MVC: $r=0.717$, $p=0.068$, RP: $r=0.751$, $p<0.05$)。
- 4) 姿勢変化によるH反射抑制率と前脛骨筋に振動刺激を与えたときのH反射抑制率に有意な差が認められなかった。
- 5) 以上のような結果からダイナミックな筋力、スタティックな筋力が発達しているものほど姿勢変化による α -MNsの興奮性抑制量が大きいことがわかった。したがって姿勢変化によるH反射抑制量とMNsの抑制機能に強い関連性のあることが示唆された。

なお本研究のすべてのデータは国士舘大学体育

学部卒業研究のために収集されたものである。稿を終わるにあたりデータ収集ならびに有益なご助言をいただきました東邦大学医学部運動生理学研究室 室増男教授に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Bour, L.J., Ongerboer, B.W., Koleman, J.H., Bruggen, G.J., Speelman, J.D.:SoleusH-reflex tests in spasticity and ditonia: a computerized analysis.J Electromyogr Kinesiol, **1**:9-19, 1991.
- 2) Buchthal, F., Schthalbruch, H.:Contraction times and fiber type in intact Human muscle. Acta Physiol Scand **79**:435-452, 1970.
- 3) Casabona, A., Polizzi, M.C.and Perciavalle, V.:Difference in H-reflex between athletes trained for explosive contractions and non-trained subjects., Eur.J.Appl. Physiol., **61**: 26-32, 1990.
- 4) Citterio, G.,Agostoni, E.:Selective activation of quadriceps muscle fiber according to bicycling rate., J.Appl.Physiol, **57**:371-379, 1984.
- 5) Crone, C. Hultborn, H., Jespersen,B and nielsen, J.: Reciprocal Ia inhibition between ankle flexors and extensors in man., J.Physiol, **389**:163-185, 1987.
- 6) Hultborn, H., Meunier, S., PierrotDeseilligny,. E and shindo, M.:Change in presynaptic inhibition of Ia Fibres at the onset of voluntary contraction in man., J.Physiol., **389**:757-772, 1987.
- 7) Koceja, D. M., Trimble, M. H., Earles. D. R.:Inhibition of the soleus H-reflex in standing man., Brain Res **629**:155-158, 1993.
- 8) Komiyama, T., Fumoto, M.,Mattsumura, H., Yamazaki, A:Long-lasting inhibition of Soleus H-reflex induced by Suuccessive twitch contractions of Tibialis Anterior in trained and sedentary human subjects., Adv. Exerc. Sports Physiol. **3**:3-92, 1997.
- 9) Llewellyn, M., Yang, J.F., Prochazka, A.:Human H-reflexes are smaller in difficult beam walking than in normal treadmill walking., Exp Brain Res, **83**:22-38, 1990.
- 10) Morita, H. Shindo, M., Yanagisawa, S., Yoshida, T., Momoi, H., Yanagisawa, N:Progressive decrease in heteronymous monosynaptic Ia facilitation with human ageing. Exp Brain Res, **104**: 67-170, 1995.
- 11) 室増男：運動科学,理工学社, 1999.
- 12) Mynark, MG., Koceja, D. V.:Conparision of soleus H-reflex gain from prone and standing in dancers and controls., Electroenceph. clin. Neurophysiol. **105**:135-140, 1997.
- 13) Mynark, R. G., Koceja, D. M., Lewis, C. A.:Heteronymous monosynaptic Ia facilitation from supine to standing its rerationship to the soleus H-reflex., Intern. J. neuro science, **92**:171-186, 1997.
- 14) 永田晟, 室増男：神経一筋の調節システムとトレーニング効果.システム/制御/情報., **36**:244-253, 1992.
- 15) Nelsen, J., Crone, C., and Hultbon:H-reflexes are smaller in dancers from the Royal Danish Ballet than in well-trained athletes. Eur. J. Physiol **66**:116-121, 1993.
- 16) Stein, R. B.:Presynaptic inhibition in human., Prog in Neurobiol, **47**:533-544, 1995.
- 17) Zehr, E. R., Stein, R. B.:Interaction of the jendrassik maneuver with segmental presynapric inhibition., Exp Brain Res., **124**:474-480, 1999.