

## 運動訓練に伴う相反性抑制の経時的変化の研究

三 和 真 人<sup>1)</sup>・鈴 木 克 彦<sup>1)</sup>・宮 崎 純 弥<sup>1)</sup>  
吉 野 直 美<sup>1)</sup>・加 藤 三早己<sup>2)</sup>・大 村 陽 子<sup>2)</sup>  
田 口 直 枝<sup>2)</sup>・中 村 信 義<sup>2)</sup>・解 良 武 士<sup>2)</sup>

### Change of the Reciprocal Inhibitory Conjunctions as Therapeutic Exercise

Makoto MIWA<sup>1)</sup>, P.T., M.A., Ph.D., Katsuhiko SUZUKI<sup>1)</sup>, P.T., Junya MIYAZAKI<sup>1)</sup>, P.T., M.S.,  
Naomi YOSHINO<sup>1)</sup>, P.T., M.S., Misako KATO<sup>2)</sup>, P.T., Yoko OMURA<sup>2)</sup>, P.T.,  
Naoe TAGUCHI<sup>2)</sup>, P.T., Nobuyoshi NAKAMURA<sup>2)</sup>, P.T., Takeshi KERA<sup>2)</sup>, P.T., M.S.

#### Abstract :

Purpose: We would investigate to elucidate the reciprocal inhibitory conjunctions of afferent Ia fiber and inhibitory Ia interneurone through muscle strength exercise. Method: Ten young adult subjects were studied with informed consent, and they were separated into two groups exercising with different speed of isokinetic motion. Since they were fixed on supine with hip and knee flexions at 45 and 90 degrees respectively, they were asked to move ankle joint at the speed of with 60 and 120 deg/sec and to take 10 sets one day using by Cybex machine 6000. Periodically they were examined soleus H-reflex and peak torque among 30, 60, 90 and 120 deg/sec for every 3 weeks. A test H reflex in soleus was evoked by electrical stimulation of the tibialis nerve in the popliteal fossa. The reflex was conditioned by electrical stimulation of the common peroneal nerve at caput fibulae. The effects of reciprocal inhibition were calculated as percentage reduction of the test H reflex amplitude to that of the control H reflex at the rest. Statistical comparisons were made using ANOVA and unpaired t-test, and then probability values less than 0.05 were contemplated significantly. Results: Reduction of the soleus H reflex amplitude attributable to reciprocal inhibition was seen at conditioning test interval 2 and 3 ms in the two groups, and there were significant differences ( $p<0.05$ ) among before and after 6 and 9 weeks respectively. Especially there were significant differences between conditioning test interval 0 and 2, 3ms each other at after 6 and 9 weeks as the before training. Discussion: We have found that the reputation of Therapeutic Exercise changes the Reciprocal Inhibitory conjunction in Spinal Neural Network. It might be important for the maturation of reciprocal inhibition to be maintaining Physical Therapy.

Key words : Reciprocal inhibition, Isokinetic motion, H-reflex

1) 山形県立保健医療大学保健医療学部理学療法学科  
〒 990-2212 山形市上柳 260 番地  
Yamagata Prefectural University of Health Sciences,  
Department of Physical Therapy  
260 Kamiyanagi, Yamagata City 990-2212 Japan.  
Phone & Fax: +81-23-686-6619

2) 早稲田医療技術専門学校理学療法学科  
〒 339-8555 埼玉県岩槻市太田新正寺曲輪 354-3  
Waseda Collage of Medical Arts and Sciences,  
Department of Physical Therapy  
354-3 Shinsyouji-Kuruwa, Ota, Iwatsuki City, Saitama  
339-8555 Japan  
Phone: +81-48-758-7113, Fax: +81-48-758-7120

## はじめに

大脑皮質の機能的局在が Functional MRI や PET など医療機器の進歩で次第に解明されるようになり、脳と運動の関連性も次第に明らかにされつつある。従って、電気生理学をはじめリハビリテーション医学の領域においても、中枢神経系の研究が変革しはじめている。しかしながら、理学療法分野における運動療法の効果に関連して、関節可動域、筋力や筋張力、歩行能力、および日常生活動作（ADL）能力など能力障害を中心に、特定の運動効果器の変化や特性から検討した研究は少ない。ひずみ計など単純な筋力計測機器をはじめ、加速度計、重心動搖計、3次元動作解析装置など工学的分析方法も、治療効果や評価に関する研究として臨床で試みられているに止まっている。今回一つの試みとして、中枢神経系に対する定量的評価法として取り組み可能な H 反射測定に注目し、電気生理学的な視点から運動療法の訓練効果について検討した。

運動訓練の継続が中枢神経系の脊髄神経髓節レベルで直接的に脊髄反射回路網における Ia や Ib の介在ニューロン（interneurone）の抑制や  $\alpha$  motoneurone の活動電位に影響を及ぼすものと仮定し、運動療法で活用されている筋力訓練法のひとつで、比較的容易に条件の統制が可能な等速度運動に注目した。つまり、拮抗筋への効率的な相反性抑制が、motor unit の recruitment の増加や筋疲労の減少に関与し、次第に筋出力を高めていくものと仮定し、脊髄神経調節メカニズムのひとつである相反性抑制を H 反射測定から研究した。

## 対象および方法

中学校・高等学校や大学を通じて、体育の授業以外にスポーツ経験がない平均年齢  $22 \pm 2.5$  歳の健常成人 10 名の右脚を対象とした。今までスポーツの経験がない人に比較してスポーツを実際にしている人では、相反性抑制が大きいとの田中<sup>1)</sup> や Haltborn<sup>2)</sup> らの報告より、速度と運動回数が相反性抑制に影響するものと考え、角速度 60deg/sec と 120deg/sec の足関節底背屈の求心性運動を訓練条件とした 2 群に分けた。なお、群分けでは、身長、体重、足関節底背屈筋の MMT や ROM などに差のないことを確認した。訓練内容と訓練時間は、

足関節運動用 extension equipment を装着した Cybex machine 6000 を用いて 10 回 10 セット、セット毎の休息時間は 30 秒に設定し、1 日 15 分間の訓練時間とした。訓練頻度は、1 週間に 5 回とし、9 週間継続した。等速度運動の訓練肢位は、仰臥位で体幹下部と骨盤をベルトで固定し、更に測定下肢を大腿固定用アダプターで股関節 45°、膝関節 90° のそれぞれ屈曲位で固定した。右足関節はフットレストとユニバーサルアダプターで固定した（Figure 1）。実験開始にあたり、被検者に本研究の意義と目的、方法などの十分な説明を行って同意を得ており、訓練期間中の過度の運動を避けるよう指示した。

ヒラメ筋 H 反射の測定は、下肢筋の緊張が安定した状態を考慮し、20 分以上の安静を取らせてから測定を開始した。測定肢位は、最も容易に反射が誘発される腹臥位とし、頭部は軽度屈曲、両上肢肩関節 90° 外転、肘関節 90° 屈曲、両下肢膝関節軽度屈曲位とした。なお、足関節は、底背屈 0° で装具固定した<sup>3, 4)</sup>（Figure 2）。

H 反射の誘発は、Lloyd<sup>5)</sup> や Laporate<sup>6)</sup> らが相反性抑制を記録するためにヒラメ筋から单シナプス反射を誘発する際に、前脛骨筋に種々の時間間隔で条件刺激を加える手法を活用した。条件刺激は、総腓骨神経を腓骨小頭で刺激した際に前脛骨筋に M 波が誘発される最小閾値強度とし、刺激時間 1ms の矩形波を用いた。試験刺激は、膝窩で脛骨神経を刺激する従来から用いられている H 反射の誘発刺激とし、刺激時間 1ms の矩形波とした。いずれも 0.2Hz の刺激頻度とした。条件刺激および試験刺激の 2 チャンネル刺激装置は、日本光電社



Figure 1 等速度運動の訓練肢位

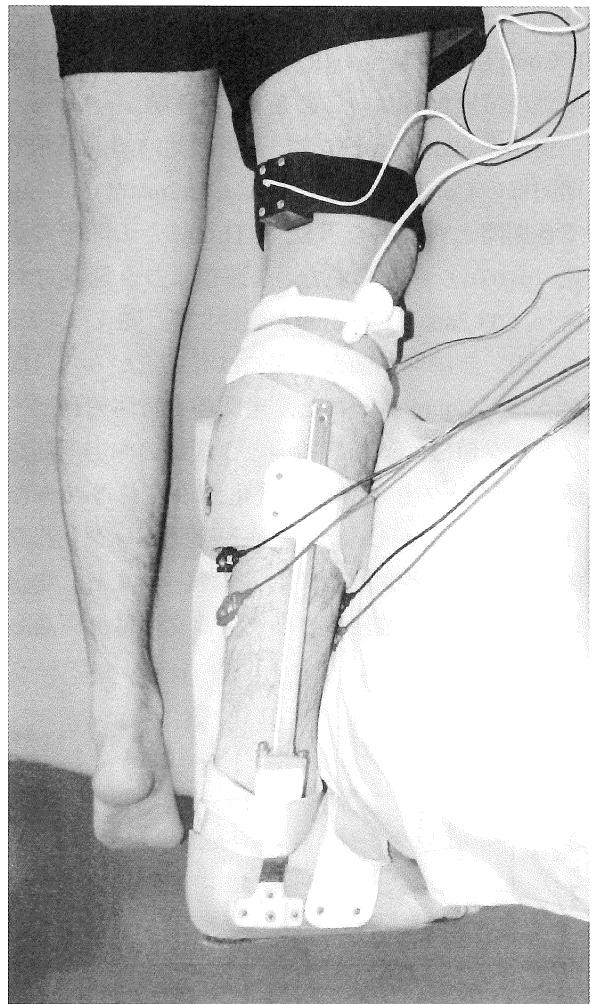


Figure 2 等速度運動の訓練肢位

製 Neuropack Σでコンピュータ制御した。誘発されたH反射は筋電図増幅アンプを経由し、A/D変換した後に前述のコンピュータで保存・処理をした。ヒラメ筋H反射の記録電極は直径1cmで、ヒラメ筋遠位に電極間距離2cmで貼付した。また、条件刺激による最小刺激閾値のM波導出を確認するため、記録電極は前脛骨筋中央に電極間距離2cmで貼付した。

条件刺激と試験刺激の入力部位は脊髄からほぼ等距離であるが、条件刺激のインパルスが、Ia介在ニューロンを経由してヒラメ筋の $\alpha$ 運動ニューロンに到達する時間は、Ia介在ニューロンの発火遅延などインパルスが経由する回路によって異なるため、条件と試験刺激の時間間隔 (Conditioning-Test Interval ; CTI) は0, 1, 2, 3msに設定した (Figure 3)。

抑制効果の判定は、条件刺激なし時のH反射振幅 (Control H ; Cont. H) を基準として、CTI 0, 1, 2, 3msでの条件刺激を加えたときのH反射振幅

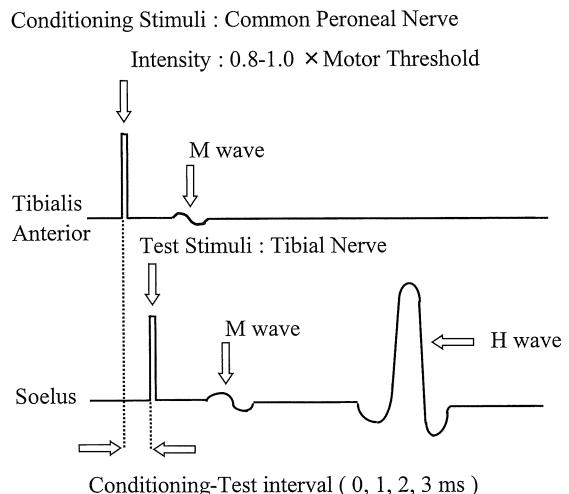


Figure 3 条件刺激を加えたヒラメ筋H反射の測定方法

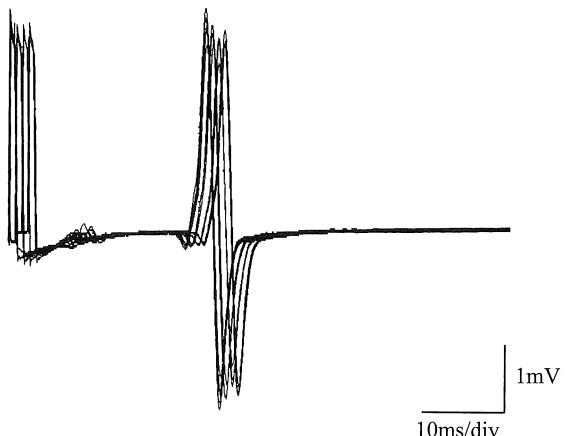


Figure 4 条件刺激を加えたヒラメ筋H反射の波形

(Conditioned H ; Cond. H)をCont. Hで除した比率を抑制の指標とした。すなわち、Cont. Hに対するCond. Hの振幅比率 (Conditioned H reflex per Control H reflex ; Cond. H / Cont. H) が1.0以下であれば、条件刺激としての総腓骨神経刺激によってH反射に抑制が出現したものとし、H反射振幅比率が1.0以上であれば、H反射の抑制は生じないものと解釈した。試行手続きは、Cont. Hと、CTI 0, 1, 2, 3msのCond. Hをそれぞれ3回試行測定した。Figure 4は、ヒラメ筋H反射の波形をCTI毎に重ね合わせたものであり、時間間隔が延びるに連れてH反射振幅が低下している例である。

筋力測定は、足関節の角速度を30～120の30deg/sec毎の10回平均の底背屈運動ピークトルク値(以下、ピークトトルク値と略す)とした。測定は、実験課題の等速度運動訓練と同一肢位とした。測定期間は、H反射振幅の測定と同時とし、

3週間毎にした。

分析方法は、有意水準5%とし、運動訓練期間毎のCond. H/Cont. HとCTI、ピーコトルク値と角速度のそれぞれを、繰り返しのある分散分析(ANOVA)を行い、多重比較による差の検定した。また、角速度60deg/secと120deg/secの運動訓練期間毎のCond. H/Cont. Hの差については、unpaired t-testを用いた。

## 結果

運動開始の前後でCond. H / Cont. Hは、CTI 2msとCTI 3msで運動の前後とも低下を示し、CTI 0msとの間で有意差( $p<0.01$ )がみられた。相反性抑制が、運動の後でも維持されており、三和<sup>7</sup>、Tanaka<sup>8), 9)</sup>やCrone<sup>10)</sup>らの報告と一致していた

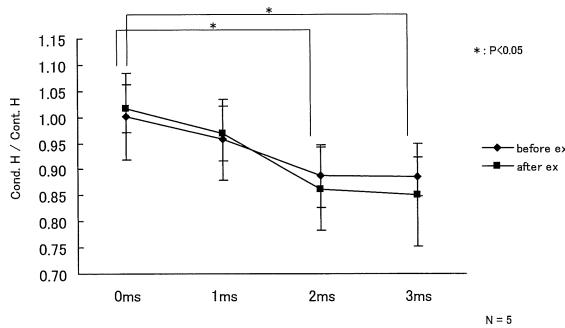


Figure 5 運動訓練前後における各CTI変化

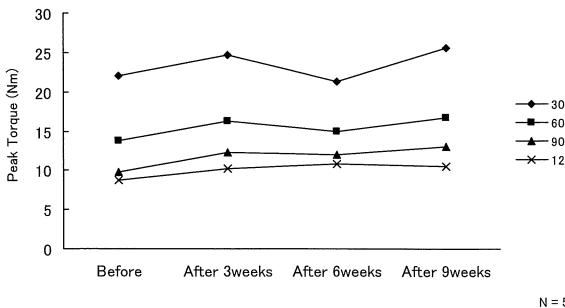


Figure 7 背屈における測定期間毎のピーコトルク値の変化 (60deg/sec)

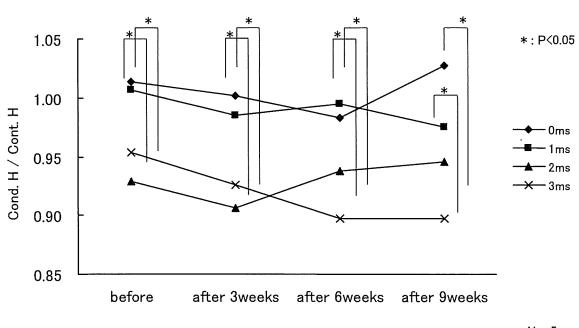


Figure 9 測定期間毎の各CTI変化 (120deg/sec)

(Figure 5)。しかし、運動の前後においてCond. H/Cont. Hに有意差がなく、相反性抑制は1回の運動訓練で変化しないことを示していた。

角速度60deg/sec群では、運動開始前および測定期間毎のCond. H / Cont. Hは、CTI 2msとCTI 3msで各期間とも低下を示し、CTI 0msとの間で有意差( $p<0.01$ )がみられた。3週後より9週後にわたり、CTI 2msとCTI 3msが緩徐に低下をしているものの、訓練開始前との間には有意差がみられなかった(Figure 6)。また、足関節の背屈運動ピーコトルク値は、運動開始前と3週毎の測定期間を通してピーコトルク値に変化がみられなかつた(Figure 7)。しかしながら、底屈運動ピーコトルク値は3週後に各角速度で有意な値( $p<0.05$ )を示したが、逆に6週後のピーコトルク値は低下をし、

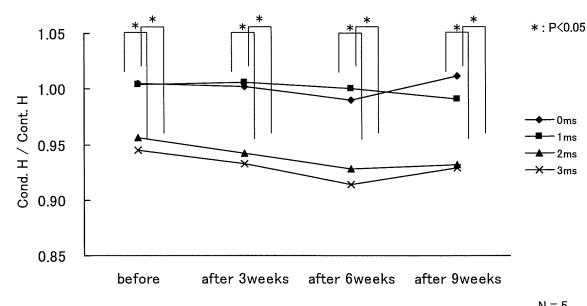


Figure 6 測定期間毎の各CTI変化 (60deg/sec)

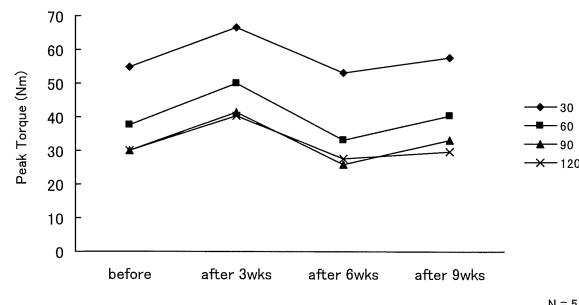


Figure 8 底屈における測定期間毎のピーコトルク値の変化 (60deg/sec)

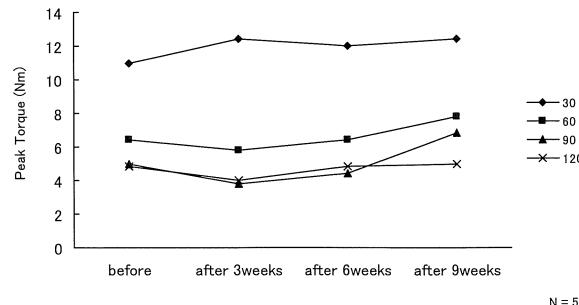


Figure 10 背屈における測定期間毎のピーコトルク値の変化 (120deg/sec)

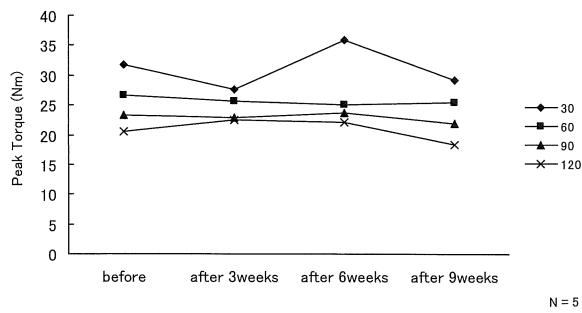


Figure 10 背屈における測定期間毎のピークトルク値の変化 (120deg/sec)

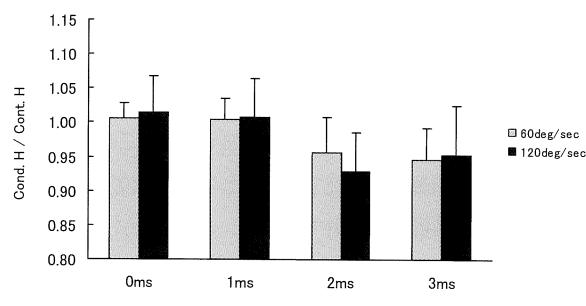


Figure 12 運動開始前の群間比較

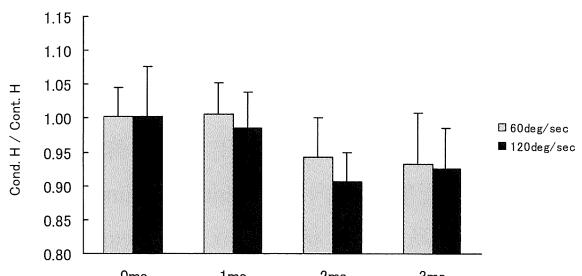


Figure 13 3週後の群間比較

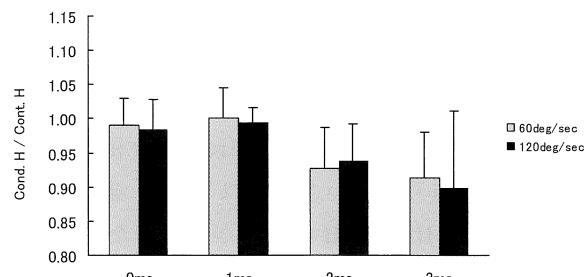


Figure 14 6週後の群間比較

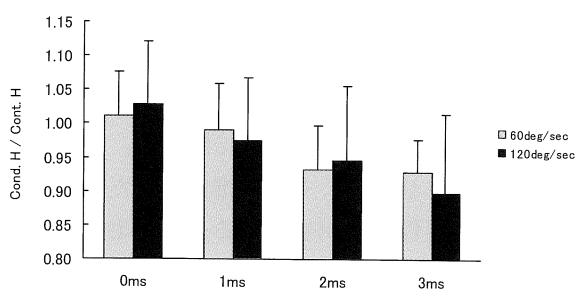


Figure 15 9週後の群間比較

9週後もほぼ運動開始前と同じ値であった (Figure 8)。

一方, 角速度 120deg/sec 群では, 運動開始前および測定期間毎の Cond. H/Cont. H は, 全体的に 3 週後から各 CTI で低下の傾向を示していた (Figure 9)。特に, CTI 3ms は 6 週後と 9 週後で運動開始前に比べて明らかに低下を示し, 6 週後や 9 週後との間に有意差 ( $p<0.01$ ) がみられた。また, Cond. H/Cont. H が 6 週後より CTI 2ms と 3ms で交互作用がみられた。足関節の背屈運動ピークトルク値では, 30deg/sec は 9 週間を通じて高い値を示していたが, 筋出力の改善を示す変化はみられなかった。また, 運動開始前に比べて 9 週後で 90deg/sec にやや高い値を示したが, 運動課題である 120deg/sec では有意差がなく, 経時的な運動訓練の効果は認められなかった (Figure 10)。同様に,

底屈運動ピークトルク値は 6 週後の 30deg/sec で高い傾向がみられるものの, 明らかな差は認められなかつた。また, 測定期間ごとの角速度 60 ~ 120deg/sec のピークトルク値に差がみられなかつた (Figure 11)。

次に, 運動開始前および測定期間別の角速度 60deg/sec と 120deg/sec 群の Cond. H/Cont. H 差を比較すると, CTI 2ms と CTI 3ms が 3 週後以降に両群とも低下を示しており, 運動開始前と比較して両群とも相反性抑制がみられた。特に, CTI 3ms の Cond. H/Cont. H は, 6 週後と 9 週後の CTI 2ms のそれよりも低い傾向がみられた (Figure 12 ~ 15)。

## 考察およびまとめ

運動開始前の Cond. H/Cont. H の低下が 3 週以降も維持され, CTI 0ms と CTI 2ms に有意差がみられる事から, affrent Ia fibers と拮抗筋に対する抑制性 Ia 介在ニューロン (inhibitory Ia interneurone) からなる相反性 Ia 抑制が考えられ, Tanaka<sup>8, 9)</sup> をはじめ諸家<sup>10~14)</sup> らの研究と一致していることを確認できた。また, 運動療法における相反性抑制の変化に対する研究は少なく, 運動訓練の効果を定量的に測定する指標の一つとして活用できるものと考えられる。

各 CTI の Cond. H/Cont. H が, 角速度 60deg/sec

群の運動開始前と6週後以降で低下し、抑制効果がみられた。同様に、120deg/sec群でも各CTIのCond. H/Cont. Hが低下の傾向を示し、特にCTI3msで6週と9週後で顕著となった。この主な原因は、運動訓練を継続することで、上位運動中枢から皮質脊髄路を経由するインパルスが、拮抗筋 $\alpha$ motoneuroneへの抑制量を漸増した可能性や、inhibitory Ia interneuroneの興奮性を効果的に高める可能性を示しているものと考えられた(Figure 16)。しかしながら、 $\gamma$ 運動ニューロン( $\gamma$ motoneurone)など $\alpha-\gamma$ linkageに関係した上位運動ニューロンからの下行性インパルスの影響や、脊髄髓節レベルの反回抑制(recurrent inhibition)の働きも無視できないと思われる<sup>13, 14)</sup>。また、CTI3msでCond. H/Cont. Hの低下がみられたのは、本研究の誘発刺激閾値が1.0×motor thresholdで、しかも刺激時間が1msであることと、Pierrot-Deseilligny<sup>15-18)</sup>らの報告と同じく、Ib介在ニューロン(Ib interneurone)による抑制が影響していると考えられた。特に、Ib抑制は2つのinterneuroneを介するtrisynaptic inhibitionであり、Ia介在ニューロンによるdisynaptic inhibitionよりも遅れて発火する(synaptic delay)特徴がある。このため、CTI3msのCond. H/Cont. Hが低下をしているものと考えられた(Figure 17)。

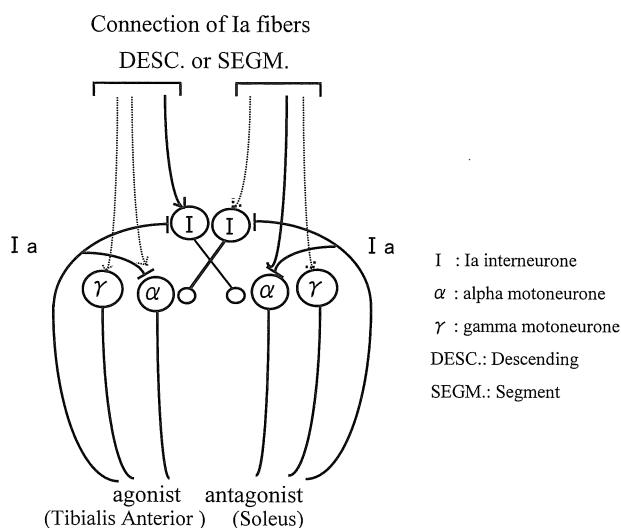


Figure 16 等速性運動による相反抑制が変化する要因

1. 抑制性Ia介在ニューロンの活動によって、拮抗筋の $\alpha$ 運動ニューロンが抑制される。Ia介在ニューロンが抑制性に働く可能性として、上位中枢からの下行性インパルスによるものと、Ia神経纖維からの求心性インパルスによるものとが考えられる。また、拮抗筋に上位中枢から抑制性インパルスが直接働くことも考えられる。

いずれにしても、角速度60deg/secと120deg/secの両群で運動訓練の開始から6週後でCTI2msを中心にCond. H/Cont. Hが低下し、抑制が強化されたと考えられた。つまり、6週前後の運動訓練によって脊髄反射結合が成熟することを意味し、継続した運動訓練が中枢神経系に何らかの影響を与える目安になると考えられた。

また、運動開始と3週毎の等速性運動のピークトルク値変化は、角速度60deg/secと120deg/secの両群とも変化がみられず、著しい筋力の改善は認められなかった。この原因は、1日10~15分間の運動時間で、運動量の高くないことが影響していると考えられた。

これらを考え併せると、筋出力が改善するよりも前に脊髄反射機構内のinhibitory Ia interneuroneの興奮性が高まり、拮抗筋 $\alpha$ motoneuroneに抑制性シナプス後電位(Inhibitory postsynaptic potentials; IPSPs)が発生するものと考えられる<sup>19)</sup>。また、Ib interneuroneが促通され、Ib抑制が出現することも考えられた。したがって、運動を繰り返すことによる拮抗筋への効率的な抑制は、相反性反射結合が発達することで、motor unitのrecruitment増加や筋疲労減少に関与し、次第に筋出力を改善させていくものと推察された。しかしながら、相反性抑制が変化する過程において、角

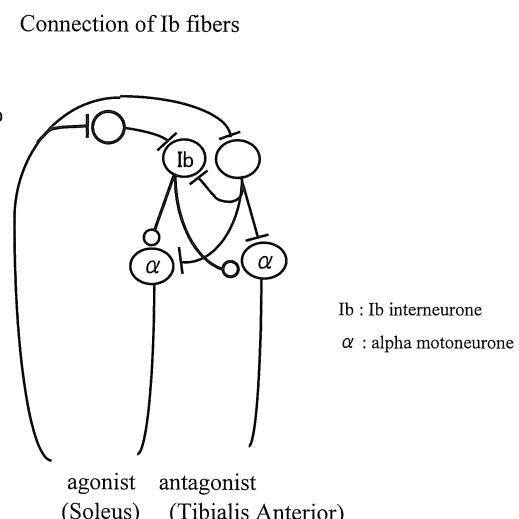


Figure 17 等速性運動による相反抑制が変化する要因

2. Ia介在ニューロンが興奮が中間の介在ニューロンを通して発生し、主動筋と拮抗筋の $\alpha$ 運動ニューロンにシナプス結合する。相対的に主動筋に抑制が働くことが考えられる。

速度 60deg/sec と 120deg/sec の運動負荷量の違いが影響している可能性が少なく、訓練頻度や回数などの運動量が抑制に変化を与えることも考えられるため、今後検討するべき点であろうと思われる。

以上をまとめると、運動開始前の相反性抑制は 6 週後以降に両群で増強し、CTI 2 と 3ms で運動開始前との間に明らかな差がみられ、Disynaptic Reciprocal Inhibition が運動開始後 6 週前後で発達する可能性が示唆された。また、足関節底背屈のピークトルク値は測定期間中に変化がないことから、筋収縮力が変化する前に脊髄反射機構の抑制効率が高くなり、漸次筋力が改善していくことも併せて推察される。

今後の課題として、等張性や等尺性筋収縮を用いた筋力訓練や、低負荷で運動頻度が比較的高く行われる筋耐久性訓練など臨床の場で容易に用いられている運動訓練が、相反性反射結合の成熟性などどのように中枢神経系へ効果を及ぼすのか研究を進めて行きたい。

## 参考文献

- 1) 田中勲作：随意運動制御の脊髄神経機構—筋電図学的解析—. 神経科学レビュー., 3 : 61-91, 1989.
- 2) Hultborn H., Illert M., Santini M., et al.: Convergence on interneurons mediating the reciprocal Ia inhibition of motoneurons. I. Disynaptic inhibition of Ia inhibitory interneurons. *Acta Physiol. Scand.*, 96 : 193-201, 1976.
- 3) Shin J. : Nerve Conduction Techniques. Clinical Electromyography : Nerve Conduction Studies. University Park Press., Baltimore, pp47-64, 1984.
- 4) 三和真人：痙性片麻痺患者の歩行時の相反神経抑制に関する研究. 慶應義塾大学学事振興資金研究報告集録., 229 : 177, 1998.
- 5) Lloyd DPC. : Conduction and synaptic transmission of reflex response to stretch in spinal cats. *J. Neurophysiol.*, 6 : 317-326, 1943.
- 6) Laporat Y. and Lloyd DPC. : Nature and significance of the connection established by large afferent fibers of muscular origin. *Am J Physiol.*, 169 : 609-621, 1952.
- 7) 三和真人：等速性筋収縮における相反性神経結合の成熟の研究. 東京保健科学学会誌., 1 :
- 79-86, 1998.
- 8) Tanaka R. : Reciprocal Ia inhibition during voluntary movement in man. *Exp. Brain Res.*, 21 : 529-540, 1974.
- 9) Tanaka R. : Reciprocal Ia inhibition and voluntary movements in man. *Prog. Brain Res.*, 44 : 291-302, 1976.
- 10) Crone C., Hultborn H., Jespersen B. : Reciprocal Ia inhibition from the peroneal nerve to soleus motoneurons with special reference to the size of the reflex. *Exp. Brain Res.*, 59 : 418-422, 1985.
- 11) Crone C., Hultborn H., Jespersen B., et al. : Reciprocal Ia inhibition between ankle flexors and extensors in man. *J. Physiol.*, 389 : 163-185, 1987.
- 12) Okuma Y., Lee RG. : Reciprocal inhibition in hemiplegia : correlation with clinical features and recovery. *Can. J. Neurol. Sci.*, 23 : 15-23, 1996.
- 13) Shindo M., Harayama H., Kondo K., et al. : Changes in reciprocal Ia inhibition during voluntary contraction in man. *Exp. Brain Res.*, 53 : 400-408, 1986.
- 14) Hultborn H., Meunier S., Pierrot-Deseilligny E., et al. : Changes in presynaptic inhibition of Ia fibers at the onset of voluntary contraction in man. *J. Physiol.*, 389 : 757-772, 1987.
- 15) Pierrot-Deseilligny E. : Control transmission in Ib reflex pathways during movement in man. *Acta Physiol. Scand.*, 508 : 44, 1982.
- 16) Pierrot-Deseilligny E., Bergego C., Katz R. : Reversal in cutaneous control of Ib pathways during human voluntary contraction. *Brain Res.*, 233: 400-403, 1982.
- 17) Pierrot-Deseilligny E., Bergego C., Katz R., et al. : Cutaneous depression of Ib reflex pathways to motoneurons in man. *Exp. Brain Res.*, 166 : 176-179, 1979.
- 18) Hultborn H., Meunier S., Morin C., et al. : Assessing changes in presynaptic inhibition of Ia fibers : A study in man and cat. *J. Physiol.*, 389 : 729-756, 1987.
- 19) Kandel R., Siegelbaum A. : Excitatory and inhibition signals are integrated into a single response by the cell. Chap.12 Synaptic Integration. In: *Principles of Neural Science*. (Kendal R.,

Schwartz H., Jessell M., ed) . 4th Ed., McGraw-Hill., New York, pp222-228, 2000.

— 2001.11.27. 受稿, 2002.1.17. 受理 —

## 要 約

Functional MRI や PET などの医学の進歩によって、脳と運動の関係が次第に明らかになりつつある。しかしながら、運動療法をはじめ、理学療法学分野で中枢神経系に対する直接的な研究はほとんど行われていない。本研究は、脊髄反射回路の相反性抑制を通して中枢神経障害への理学療法効果を探求することを目的としたものである。体育の授業以外にスポーツ経験のない平均年齢 22 歳の健常成人 10 名を角速度 60 と 120deg/sec の 2 群に分けて、等速性運動を 9 週間実施した。その間、3 週毎に電気刺激の条件を加えたヒラメ筋 H 反射振幅と角速度 30 ~ 120deg/sec までのピークトルク値を測定した。なお、H 反射の条件 - 試験刺激間隔 (CTI) は 0 ~ 3ms とし、振幅比率を抑制の指標とした。両群とも、6 週後より CTI 2ms と 3ms で、運動開始時に比して有意に低下していた ( $p < 0.05$ )。一方、ピークトルク値は訓練期間を通して筋出力の改善がみられるものの、両群に差がみられなかった。運動訓練の継続が、筋出力が改善する前に脊髄運動神経機構に何らかの影響を与える、相反性抑制を高めるものと考えられた。

キーワード：相反性抑制・H 反射・運動訓練