刺激条件の違いが手固有筋の皮膚反射に及ぼす影響

中 島 剛¹⁾ 遠 藤 隆 志¹⁾ 坂 本 将 基¹⁾
田 添 歳 樹¹⁾ 小宮山 伴与志²⁾

EFFECTS OF ALTERING PARAMETERS FOR ELECTRICAL STIMULATION ON CUTANEOUS REFLEXES IN HUMAN INTRINSIC HAND MUSCLE

TSUYOSHI NAKAJIMA, TAKASHI ENDOH, MASANORI SAKAMOTO,
TOSHIKI TAZOE and TOMOYOSHI KOMIYAMA

Abstract

The present study investigated an effective method of eliciting medium and long latency cutaneous reflexes in normal human subjects. The effect of changes in stimulus conditions (number of pulse train, duration of electrical pulse and inter-stimulus interval) on cutaneous reflexes in the first dorsal interosseous muscle (FDI) following non-noxious electrical stimulation to the hand digits (digit 1; D1, digit 2; D2 and digit 5; D5) were investigated in seven healthy volunteers. Cutaneous reflexes were elicited while the subjects performed isolated isometric contraction of FDI (D2 abduction). Under all experimental conditions, the level of muscle contraction was set at 10% of the maximal EMG amplitude, which was determined during maximal voluntary contraction. Intensity of the electrical stimulation was set at 2.0 times the perceptual threshold under all experimental conditions.

Although the amplitude of E2 (excitatory response, peak latency ~60~90 ms) was independent of the number of pulses (1, 2, 3, and 5 pulses, pulse frequency at 333 Hz) that of I1 (inhibitory response, ~45~60 ms), I2 (inhibitory response, ~90~120 ms) and E3 (excitatory response, ~120~180 ms) was significantly increased depending on the number of pulses ($p < 0.001$). Amplitudes of E2 and I2 were significantly affected by the digit stimulated ($p < 0.01$). For all four components of the cutaneous reflexes, there were no significant differences in magnitude even by alternating both the inter-stimulus interval (fixed at 1, 2 and 3 Hz and random between at 0.7 and 2 Hz) and the duration (0.1, 0.5 and 1 ms) of the electrical stimulation.

These findings suggest that the susceptibility of responsible interneurons impinging on each reflex pathway to temporal summation of the test impulse differs depending on the digit stimulated. It is also likely that almost the same population of the cutaneous afferent fibers were activated by test stimulation with different durations as far as the same stimulus intensity was utilized. As a practical application, double or more pulses up to 3 Hz without causing pain is recommended to effectively evoke medium and long latency cutaneous reflexes in FDI, which would reduce possible effects arising from fatigue.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2005, 54 : 315~324)

key word : Cutaneous reflexes, number of stimulus, stimulus duration, inter-stimulus interval, habituation

I . 序 論

手指の巧緻な運動は、他の哺乳動物には見られないヒト特有のものである。この巧緻性の背景には大脳皮質運動野による手指筋運動ニューロンの支配の

強さや筋や皮膚感覚受容器を介した反射経路の発達があるものと考えられる^{1~3)}。特に、低閾値の皮膚感覚受容器を介した反射(皮膚反射)は物体把握時の素早いフィードバック制御に重要な役割を果たすと考えられている⁴⁾。

¹⁾ 東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科
〒263-5822 千葉県稲毛区弥生町1-33

²⁾ 千葉大学教育学部
〒263-5822 千葉県稲毛区弥生町1-33

United Graduate School of Education, Tokyo Gakugei University,
1-33, Yayoicho, Inage-ku, Chiba City, Chiba, 263-5822

Department of Health and Sports Sciences, Chiba University,
1-33, Yayoicho, Inage-ku, Chiba City, Chiba, 263-5822

ヒトでは手指皮膚神経に対する低閾値電気刺激により, 手固有筋から潜時の異なる多相性の反射効果を誘発することが可能であり, 各皮膚反射成分は独立した反射経路を持つことが示唆されている^{5,6)}. Jenner and Stephens⁷⁾は, 短潜時促通成分(潜時約 30 ms, E1)および短潜時抑制成分(潜時約 40 ms, I1)は脊髄由来の寡シナプス性反射反応であること, また中潜時促通成分(潜時約 60 ms, E2)は皮質経由の反射であることを明らかにしている. さらに, E2 以上の潜時を有する抑制(I2, 潜時 90 ms)および促通成分(E3, 潜時約 120 ms)も, 皮質経由の反射である可能性が高い^{3~7)}. 近年, 物体把握や手指の連続タッピング等の機能的な運動課題遂行時に得られた実験結果から, 皮膚反射の機能的な意義が明らかにされつつある^{8~10)}.

皮膚反射の機能的意義を検討する上で, 皮膚反射を誘発するための標準的刺激パラメータ, すなわち刺激強度, 刺激パルス数, 刺激時間幅, 刺激間隔等の確立は重要である. 一般的に, 刺激強度に依存して反射振幅は増大することが報告されているが^{5, 11, 12)}, E2 より潜時の長い反射成分に関しては不明な点も多い. 下肢筋群の皮膚反射を対象とした先行研究では, 標的介在ニューロンに対する時間的加重効果を高める目的で, 刺激時間幅 1 ms の矩形波を 3 から 5 発(300 Hz 程度)与えている^{12~14)}. 一方, 手指筋群を対象とした研究では 0.1 もしくは 0.2 ms 幅, 単発刺激が多く用いられている^{7~11)}. しかしながら, 刺激パルス数や刺激時間幅の変化が皮膚反射の振幅に及ぼす影響について系統的に調べた研究は行われていない. これらの刺激条件以外にも刺激間隔(固定もしくはランダム刺激)は反射の振幅に影響を及ぼす重要な因子であることが知られている^{15, 16)}. 高頻度刺激を用いた場合, いわゆる'反射順応現象'を引き起こすことが知られており, 皮質経由と考えられる長潜時伸張反射が減弱することが報告されている¹⁵⁾. 近年, この要因をできるだけ除外するためにランダム刺激法を用いることがあるが^{14~17)}, 手指筋群の皮膚反射に関して刺激間隔の違いが皮膚反射に及ぼす影響については不明な点が多い.

本研究の目的は, 刺激条件, 特に刺激パルス数, 刺激時間幅ならびに刺激間隔に着目して, 手指皮膚神経由来の皮膚反射の各成分がどのような影響を受

けるのかについて明らかにすることである. また, 皮膚反射は刺激部位依存的な変化を示すことが知られている^{18, 19)}. そこで, 各手指由来の皮膚反射に関しても刺激条件による変化動態についても検討を加えた.

Ⅱ. 方 法

A. 被験者

被験者は, 神経学的疾患のない健康な成人男性 7 名(20~45 歳)であった. 実験手順と方法は所属施設における倫理委員会の承諾を得て行った. その後, 被験者には事前に実験の目的と方法を十分に説明し, 実験参加の同意を得た後に実験を行った.

B. 筋電図記録

筋電図(EMG)は, 右第一背側骨間筋(FDI)の筋腹上に約 1 cm の電極間距離に置いた一対の表面電極(直径 10 mm)により, 双極表面誘導法にて, 時定数 0.01 秒, 高域遮断周波数 1 kHz により生体アンプシステム(日本電気三栄, 1253A)で増幅($\times 1000$)することにより得た. 記録電極は, 銀皿電極(日本光電, NT-511G)を用い, その貼付に先立ち, 電極設置部位の皮膚をサンドペーパーで軽く削り, 消毒用エタノールで拭くことにより電極間抵抗を 10 k Ω 以下にした.

C. 電気刺激

第 1 指(D1), 第 2 指(D2)および第 5 指(D5)の近位指節間関節に一対のリング電極(陽極; 遠位部, 陰極; 近位部)を設置し, 指皮膚神経を電気刺激した(日本光電, SEN-7203). 用いた電気刺激は全て矩形波であった.

刺激条件 1: 刺激パルス数として 1, 2, 3 および 5 発を用いた. この実験では, 刺激時間幅は 1 ms を用いた. 2 発以上のパルスを用いた場合のパルス頻度は 333 Hz であった.

刺激条件 2: 刺激時間幅として 0.1, 0.5 および 1 ms を用い, 皮膚反射を誘発した. この実験では, 2 発刺激(パルス頻度 333 Hz)を用いた.

刺激条件 3: 刺激間隔として固定(1, 2, 3 Hz)およびランダム(0.7~2 Hz)を用いた. この実験では, 刺激時間幅は 1 ms, 2 発刺激(パルス頻度 333 Hz)を用いた.

各条件ともに電気刺激回数は100回であった。刺激強度は各条件ともに感覚閾値(PT)の2倍で統一した。この刺激強度は痛み感覚をとまなわないことを全被験者で口頭にて確認した。刺激条件3におけるランダム刺激の刺激間隔は電気刺激装置に連動した汎用コンピュータ(NEC, PC-98VX)を用いて制御した。

D. 運動および実験課題

被験者は、実験用安楽椅子に座り、右前腕を実験用机の上に置き、肘関節を 160° に保持した。手関節およびD1とD2の指節間関節は伸展位とし、D1とD2間の角度は約 50° に保持させ、他の指は屈曲状態となるようにした。運動課題はFDIの等尺性筋収縮によるD2の外転運動であった。最初に、被験者はD2の外転運動を最大努力で約5秒間行った。その際、得られたFDIのEMGを全波整流し、最も振幅が大きい2秒間のEMG量をEMGmaxとして算出した。

被験者は表示されたFDIのEMG量を目標値(10% EMGmax)にあわせ、維持するように指示された。被験者にはFDIのEMG量をアナログ電圧計(サンワ, AX-313TR)により視覚的にフィードバックした。

刺激条件1では、D1, D2およびD5を刺激指としFDIから導出された皮膚反射を解析した。また、刺激条件2および3では、刺激条件1の結果よりFDIに対する刺激効果がD2刺激で最も大きいことが明らかとなったので、D2を刺激指としてFDIに誘発された皮膚反射を解析した。

E. データ解析

皮膚反射の誘発は、EMG信号を全波整流し、平滑化した後、指皮膚神経への電気刺激をトリガーとして100回の加算平均を行なった(Spike2 version 4, CED, UK, サンプリング周波数 3 kHz)。得られた皮膚反射は、先行研究に従い⁵⁻¹⁰⁾、潜時の違いにより短潜時抑制(I1: 頂点潜時: 45~60 ms)、中潜時促進(E2: 頂点潜時: 60~90 ms)、長潜時抑制(I2: 頂点潜時: 90~120 ms)、長潜時促進(E3: 頂点潜時: 120~180 ms)の4成分に分類した。I1, I2, E3の振幅は、刺激前100 msの平均背景EMG量を基準として各反射成分の最大振幅を計測した。従

って、E3は正の値、I1とI2は負の値で表記した。D5刺激により誘発されたE2は平均背景EMG量より低いことが確認された(図1参照)。そこで、E2に関してはI1からE2のpeak-to-peak振幅を測定した。各皮膚反射成分は、最大随意収縮時に得られたEMGを全波整流し、その平均振幅値で標準化を行った。

F. 統計処理

各反射成分の刺激パルス数の違いによる振幅変化に関してはD1, D2およびD5刺激を行ったので、刺激パルス数と刺激指の2要因による繰り返しのある2元配置分散分析(Repeated two-way ANOVA)を行い、有意な差が生じた場合には多重比較検定(Tukey HSD法)によるpost-hoc testを行なった。刺激時間幅および刺激間隔の違いについては、繰り返しのある一元配置分散分析(Repeated one-way ANOVA)後、有意な差が生じた場合に多重比較検定(Tukey HSD法)によるpost-hoc testを行なった。データは平均値と標準偏差で示した。有意水準は危険率5%未満とした。

III. 結 果

図1は1名の被験者より得られたFDIのEMG記録であり、D1(A), D2(B)およびD5(C)を単発(細線)、2発(太線)、3発(2点破線)、5発(灰色線)刺激することにより誘発された皮膚反射の例を示したものである。いずれの指を刺激した場合でも2相性の促進効果(E2とE3)および抑制効果(I1とI2)が観察された。D5刺激における特徴的な点として、E2の最大振幅は背景EMGレベルより低い傾向が見られた。D1刺激時には、刺激パルス数の増大と連動したI1とI2の振幅が増大し、5発刺激時にはE2が減弱した。他指刺激においても、3もしくは5発刺激時でI1とI2振幅が増大する傾向にあった。

図2は、全ての被験者から得られた各皮膚反射成分の平均振幅(標準偏差)を示したものである。2元配置分散分析の結果、刺激パルス数の違いによるI1振幅の変化は有意であることが明らかになった($F(3,18)=36.3, p<0.001$)。一方、刺激指の違いによる差は認められなかった($F(2,12)=0.775, p>0.05$)。E2に関しては、2元配置分散分析の結果、

Figure 1. Typical recordings of cutaneous reflexes in FDI following electrical stimulation (2.0 xPT) of D1 (A), D2 (B) and D5 (C) obtained from a single subject. In each panel, thick, thin, double dotted and gray lines show the cutaneous reflex elicited by electrical stimulation with single, 2, 3 and 5 pulses, respectively. Data were recorded while exerting 10% of maximal EMG.

パルス数の違いによる有意な変化は見られなかった ($F(3,18)=1.324$, $p>0.05$). しかし, 刺激指の違いによる有意差が認められた ($F(2,12)=42.397$, $p<0.001$). Post-hoc test の結果, E2 振幅は全てのパルス数で D1 および D5 刺激に比して D2 刺激時に有意に大きいことが明らかになった (全て $p<0.01$). I2 に関しては, 2 要因 (パルス数, 刺激指) ともに有意な主効果が認められた (パルス数; $F(3,18)=24.294$, $p<0.001$, 刺激指; $F(2,12)=8.994$, $p<0.01$). Post-hoc test の結果, D1 もしくは D2 刺激に比して D5 刺激時に I2 振幅が有意

に増大していることが明らかになった (2 パルス, D1 vs. D5, $p<0.05$, D2 vs. D5, $p<0.01$; 3 パルス, D2 vs. D5, $p<0.05$; 5 パルス, D1 vs. D5, $p<0.05$, D2 vs. D5, $p<0.01$). E3 に関しては, パルス数の違いによる変化は有意であることが明らかになったが ($F(3,18)=27.406$, $p<0.001$), 刺激指には主効果は認められなかった ($F(2,12)=2.318$, $p>0.05$).

図 3 は, 全ての被験者から得られた D2 刺激時における刺激間隔を変化させたときの FDI の皮膚反射成分の平均振幅を示したものである. I1 では刺激間隔の変化による振幅の変化は見られなかった

Figure 2. Grand means (and 1 SE) for I1 (A), E2 (B), I2 (C) and E3 (D) recorded from FDI elicited by stimulating D1, D2 and D5 with different numbers of pulse trains (333 Hz). Data are expressed as a percentage of amplitude of the reflex elicited by a single pulse stimulation. Filled, hatched, gray and open bars show the data for single, 2, 3, and 5 pulses, respectively. Asterisks show significant difference from the size of reflexes following a single pulse. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

(I1, $F(3,18)=0.858$, $p>0.05$). また, E2, I2 および E3 で刺激間隔が短縮するにつれ, 振幅が減少する傾向が見られ, ランダム刺激 (0.7~2 Hz) では 3 Hz の固定刺激時よりも増大する傾向にあったが, いずれの場合も有意差は認められなかった (E2, $F(3,18)=0.858$; I2, $F(3,18)=1.686$; E3, $F(3,18)=3.014$, 全て $p>0.05$).

図 4 は, 全ての被験者から得られた D2 刺激時における刺激時間幅を変化させたときの各皮膚反射成分の平均振幅を示したものである. I1, E2, I2 および E3 において刺激時間幅に依存した変化は認められなかった (I1, $F(2,12)=0.618$; E2, $F(2,12)=2.856$; I2, $F(2,12)=1.211$; E3, $F(2,12)=0.4414$, 全て $p>0.05$).

Ⅳ. 考 察

皮膚反射は侵害刺激によって誘発される屈曲反射とは異なり, 低閾値の皮膚感覚受容器および比較的

伝導速度の速い求心性線維によって引き起こされる反射である^{3~13,21,22}). 現在までに, 上肢および下肢筋群の皮膚反射は予期せぬ外乱に抗して随意運動を円滑に継続するために重要な役割を果たしていることが明らかになっている^{4,8,14,21,22}). しかしながら, 先行研究では, 皮膚反射を誘発する電気刺激のパラメータが必ずしも一致していなかった. そこで, 本研究では FDI を対象として皮膚神経刺激のパラメータを操作し, 皮膚反射の変化を観察した.

A. 刺激パルス数に依存した皮膚反射の変化

皮膚反射は抑制性および興奮性介在ニューロンを介した多シナプス性反射であることが知られている^{5,24}). 電気刺激のパルス数を増大させることは, 皮膚反射経路の標的介在ニューロンに対する時間的加重を強め^{12~14}), 結果として反射効果を増大させると考えられる. 本研究で得られた新たな知見の一つは, E2 は他の反射成分と異なり刺激パルス数に

Figure 3. Grand means (and 1 SE) for I1 (A), E2 (B), I2 (C) and E3 (D) recorded from FDI elicited by stimulating D2 (2.0 xPT, double train pulses: 333 Hz) with different stimulus durations while performing steady D2 abduction at 10% of EMGmax. All data are expressed as a percentage of the EMGmax.

依存した振幅変化を示さないことである。この結果は、皮質を含めた E2 を形成する反射経路に含まれる介在ニューロン群の一部は、他の皮膚反射経路の介在ニューロンとは異なり、刺激の時間的加重に応答しにくい性質を有している可能性を示唆する。

本研究では、E2 と I2 振幅は皮膚反射の振幅が刺激指によって有意に異なることも明らかになった (図 2 参照)。この結果は、E2 と I2 は D1, D2 および D5 の皮膚求心性線維から FDI 運動ニューロンに対する独立した反射経路によって構築されている可能性を示唆する^{14,19,21,23}。この考察は、逆に、I1 および E3 は各手指の皮膚求心性線維から FDI 運動ニューロンに対する共通の反射経路の存在を示唆する。今後、これらの可能性に関してさらに詳細に検討する必要がある。

本研究では、E2 以外の反射において刺激パルス数に依存した変化が大きく、この効果は刺激パルス数が 3 発以上の時に強いことが明らかになった (図 2 参照)。手固有筋の皮膚反射に関する先行研究では、単発刺激を用いた研究が多く^{3,5,7-10}、さらに I2, E3 に関しては報告が少ない¹²。また、単

発刺激によって誘発された I2 は、不明瞭であることが報告されている¹¹。本研究では連発刺激を用いることにより I2 の振幅を増大させ、安定的に誘発可能であることが明らかになったが、連発刺激では侵害受容器を活動させた可能性が残る。しかしながら、伝導速度の遅い侵害受容器由来の求心性線維は、感覚閾値の 5 倍程度から発火してくることが微小神経電図法を用いた研究から報告されている²⁴。また、侵害受容器由来の反射効果は非常に強く、約 50~100 ms 継続する抑制効果が特徴であるが²⁵、本研究で得られた皮膚反射は全て多相性であった。さらに、本研究では全ての条件で感覚閾値の 2 倍の刺激強度を用いていること、ならびに全ての刺激パルス数で各被験者に痛みを伴わないことを確認した。従って、刺激パルス数の増大による反射効果の増大は侵害受容器の活動によるものではないと考えられる。これらのことを考慮すると、I1, I2 および E3 を指標とした実験を行う場合、痛みが生起しないことが保証されれば、3 発以上の連発刺激を用いることが有効であると考えられる。

Figure 4. Grand means (and 1 SE) for I1 (A), E2 (B), I2 (C) and E3 (D) recorded from FDI elicited by stimulating D2 (2.0 xPT, double train pulses at 333 Hz) with different stimulus rates while performing steady D2 abduction at 10% of EMGmax. All data are expressed as a percentage of the EMGmax.

B. 電気刺激の刺激時間幅について

本研究では、先行研究の方法に従い、刺激時間幅 1 ms の矩形波による電気刺激を用いた^{13,14)}。しかしながら、手指筋を対象とした先行研究では刺激時間幅 0.1 もしくは 0.2 ms の電気刺激も用いられている^{7~11,16,26)}。刺激時間幅の違いは、刺激パルス数の変化と同様に属性の異なる皮膚感覚受容器を賦活させ、結果として反射効果を変化させる可能性は否定できない^{6,27,28)}。そこで、本研究では、0.1, 0.5 および 1 ms の異なる刺激時間幅を設定して検討したが各皮膚反射に有意差は観察できなかった。従って、刺激強度を同一とした場合(本研究では感覚閾値の 2 倍)、0.1 から 1 ms 幅の電気刺激で賦活される皮膚感覚受容器はほぼ同一であると推察することが可能であろう。Stephens らのグループは 0.1 ms 幅の単発刺激により顕著な E1 と I1 を報告しているが^{7~10,16)}、1 ms 幅刺激や連発刺激ではこれら反射の出現が不安定となる^{12~14,17)}。この原因は不明であるが、E1 と I1 を構成する反射回路はある限定された求心性線維にのみ応答すること

や、連発刺激による反回抑制やシナプス前抑制の効果が及んで減弱する可能性が考えられる^{5,12)}。

C. I2 および E3 の機序

長潜時の皮膚反射の機序については現在まで不明な点が多い。I2 に関しては閾値が他の反射効果よりも低いことが報告されている^{5,30)}。I2 が潜時約 100 ms で誘発されることを考慮すると、伝導速度の速い求心性線維による皮質経路もしくは長潜時脊髄反射経路の可能性が考えられる³¹⁾。E3 は運動ニューロンに対するシナプス後抑制に引き続いて起こるとされる運動単位の同期的発火の可能性が示唆されていた⁵⁾。しかし、第 2 指電気刺激と経頭蓋的磁気刺激による運動誘発電位の空間的促進を用いた実験により皮質経路の反射効果であることが示されている³²⁾。我々も、FDI による最大随意筋力の 20% 程度の持続的な張力発揮課題の後半では、I2 と E3 は独立して変化することを確認している³³⁾。これらの報告を考慮すると、刺激パルス数の変化による I2, E3 の修飾は、脊髄のみならず脳幹や皮質

レベルで時間的加重が生じている可能性が考えられる。

D. 刺激間隔の違いによる皮膚反射の変化について
本研究では皮膚反射には, 刺激間隔の変化(固定頻度 vs. ランダム)に応じた変化は見られなかった。刺激間隔の短縮による反射の減弱(habituation, 順応)は伸張反射, 特に長潜時伸張反射で著しいことが知られている¹⁵⁾。この機序の一つとして, 伸張反射では高頻度刺激の際に神経伝達物質の放出量低減による, いわゆる同名筋抑制が強いことがあげられる。一方, Harrison et al.¹⁶⁾は, 2 から 9 Hz 頻度での皮膚反射効果の変化を比較しているが, 顕著な変化がなかったことを報告している。近年, この反射順応現象をできるだけ排除するためにランダム刺激法が用いられ, 歩行実験等で応用されている^{11~14)}。本研究ではランダム刺激(0.7~2 Hz)の検討も行なったが, E2, I2, E3 では 3 Hz 刺激より若干増大する傾向にあったが, 有意な差は得られなかった。これらの結果を考慮すると, 皮膚反射は伸張反射とは異なり, 1 から 3 Hz 程度までは皮膚反射の順応は少ない可能性が高い。また, 皮膚反射を構成する神経回路では, 伸張反射と異なり刺激間隔の短縮による伝達物質の放出量の低下が少なく, 反射効果が安定して出現する可能性が考えられる。

感覚閾値の 2 倍程度の電気刺激で誘発される皮膚反射は, 感覚閾値の 5 倍程度で誘発される侵害受容器由来の屈曲反射や引っ込み反射とは異なり, 安静状態では誘発できず, 神経束刺激によって誘発する反射に比して多くの刺激と加算が必要である^{6,19)}。そのため, 試行時間が延長することとなり, 疲労等による影響が少なからずとも含まれることが考えられる。本研究で得られた結果を考慮すると, 皮膚反射では 3 Hz 程度までは刺激間隔を増加させても, "反射の順応現象"は顕著には生じにくいことから, 3 Hz 刺激を用いることにより実験時間を短縮させ, 被験者の疲労を軽減することが可能であると考えられる。

V. 要 約

1. 健常被験者7名を対象として, 刺激条件, 特に刺激パルス数(1, 2, 3, 5 発), 刺激時間幅(0.1, 0.5, 1 ms)および刺激間隔(固定; 1,

2, 3 Hz, ランダム; 0.7~2 Hz)に着目して皮膚反射を第一背側骨筋に誘発し, 短(I1, ピーク潜時~45~60 ms), 中(E2~60~90 ms)および長潜時(I2, ~90~120 ms; E3, ~120~180 ms)反射効果の変化を調べた。

2. 2 元配置分散分析の結果, 刺激パルス数の増加に伴う I1, I2 および E3 振幅の増大は有意であることが明らかになった。(全て $p < 0.001$)。一方, E2 では刺激パルス数に依存した増大は認められなかった($p > 0.05$)。また, E2 と I2 では刺激指に依存して各皮膚反射成分の変化量が有意に異なることが明らかになった(両者ともに $p > 0.01$)。
3. I1, E2, I2 および E3 において刺激の持続時間に依存した変化は認められなかった。また, 刺激間隔や提示方法の違いによる有意な変化も認められなかった。
4. これらの結果は, 各反射成分を中継する介在ニューロンの試験刺激の時間的加重に対する感受性が異なること, ならびに同一の電気刺激強度を用いた場合には試験刺激の時間幅が異なってもほぼ同一の皮膚求心性線維を賦活している可能性を示唆する。
5. 実践応用として, 刺激パルス数 2 から 5 発とし, 3 Hz の刺激間隔で痛覚をともなわない電気刺激を用いることにより, 筋疲労による潜在的な影響を低減しつつ, 皮膚反射を効率的に誘発することが可能と考えられた。

(受理日 平成17年 6月21日)

VI. 参 考 文 献

- 1) Porter, R. The corticomotorneuronal component of the pyramidal tract: corticomotorneuronal connections and functions in primates. *Brain Res. Rev.*(1985) **10**: 1-26.
- 2) Wisendanger, M. & Miles, TS. Ascending pathway of low threshold muscle afferents to the cerebral cortex and its possible role in motor control. *Physiol. Rev.*, (1982) **62**, 1234-1261.
- 3) Evans, A. L., Harrison, L. M., Stephens, JA. Maturation of the cutaneomuscular reflexes recorded from the first dorsal interosseous muscle in man. *J. Physiol (Lond)*(1990) **428**: 425-40.
- 4) Johansson R. S. & Cole K. J. Grasp stability during manipulative actions. *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, (1994) **72**, 511-524.

- 5) Caccia, M. R., McCormas, A. J., Upton, M. R. M., Blogg, T. Cutaneous reflexes in small muscles of the hand. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiat.*(1973) **36**, 960-977.
- 6) Deuschl, G. & Lucking, C. H. Physiology and clinical applications of hand muscle reflexes. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol[suppl]*(1990) **41**, 84-101.
- 7) Jenner J. R & Stephens J. A. Cutaneous reflex responses and their central nervous pathways studied in man. *J. Physiol(Lond)*(1982) **333**, 405-419.
- 8) Evans, A. L., Harrison, L. M., Stephens, J. A. Task dependent changes in cutaneous reflexes recorded from various muscles controlling finger movement in man. *J Physiol(Lond)*(1989) **418**, 1-12.
- 9) Nadler, M. A., Harrison, L. M., Stephens, J. A. Acquisition of a new motor skill is accompanied by changes in cutaneomuscular reflex responses recorded from finger muscles in man. *Exp. Brain Res.*(2000) **134**, 246-254.
- 10) Garnett, R. & Stephens, J. A. Changes in the recruitment threshold of motor units produced by cutaneous stimulation in man. *J. Physiol(Lond)*(1980) **303**, 351-364.
- 11) Chen, R. & Ashby, P. Reflex responses in upper limb muscles to cutaneous stimuli. *Can. J. Neurol. Sci.*, (1993) **20**, 271- 278.
- 12) Aniss, A. M., Gandevia, S. C., Burke, D. Reflex responses in active muscles elicited by stimulation of low-threshold afferents from the human foot. *J. Neurophysiol.*(1992) **67**, 1375-1384.
- 13) Zehr, E. P., Komiyama, T., Stein, R. B. Cutaneous reflexes during human gait : electromyographic and kinematic responses to electrical stimulation. *J. Neurophysiol.*(1997) **77**, 3311-3325.
- 14) Komiyama, T., Zehr, E. P., Stein, R. B. Absence of nerve specificity in human cutaneous reflexes during standing. *Exp. Brain Res.*(2000) **133**, 267-272.
- 15) Rothwell, J. C., Day, B. L., Berardelli, A., Marsden, C. D. Habituation and conditioning of the human long latency stretch reflex. *Exp. Brain Res.*(1986) **63**, 197-204.
- 16) Harrison, L. M., Norton, J. A., Stephens, J. A. Habituation of cutaneomuscular reflexes recorded from first dorsal interosseous and triceps muscle in man. *J. Neurol. Sci.*(2000) **177**, 32-40.
- 17) Zehr, E. P. & Chua, R. Modulation of human cutaneous reflexes during rhythmic cyclical arm movement. *Exp. Brain Res.*(2000) **135**, 241-250.
- 18) Hongo, T., Kudo, N., Oguni, E., Yoshida, K. Spatial patterns of reflex evoked by pressure stimulation of the foot pads in cats. *J. Physiol(Lond)*(1990) **420**, 471-485.
- 19) Deuschl, G., Feifel, E., Guschlbauer, B., Lucking, C. H. Hand muscle reflexes following air puff stimulation. *Exp. Brain Res.*(1995) **105**, 138-146.
- 20) Zehr, E. P. & Stein, R. B. What functions do reflexes serve during human locomotion? *Prog. Neurobiol.*, (1999) **58**, 185-205.
- 21) Zehr, E. P. & Duysens, J. Regulation of arm and leg movement during human locomotion. *Neuroscientist*, (2004) **10**, 347-361.
- 22) Van Wezel, B. M. H., Ottenhoff, F. A., Duysens, J. Dynamic control of the foot during human walking. *J. Neurosci.*(1997) **17**, 3804-3814.
- 23) LaBella, L. A., Kehler, J. P., McCrea, D. A. A differential synaptic input to the motor nuclei of triceps surae from the caudal and lateral cutaneous sural nerves. *J. Neurophysiol.*(1989) **61**, 291-301.
- 24) Burke, D., Mackenzie, R. A., Skuse, F., Lethlean, A. K. Cutaneous afferent activity in medial and radial nerve fascicles: a microelectrode study. *J. Neuro. Neurosurg. Psychiat.*(1975) **38**, 855-864.
- 25) Floeter M.K. Cutaneous silent periods. *Muscle Nerve.*, (2003) **28** : 391-401.
- 26) Datta, A. K. & Stephens, J. A. The effects of digital nerve stimulation on the firing of motor units in human first dorsal interosseous muscle. *J. Physiol (Lond)*(1981) **318**, 501-510.
- 27) McNulty, P. A., Turker, K. S., Macefield, V. G. Evidence for strong synaptic coupling between single tactile afferents and motoneurons supplying the human hand. *J. Physiol(Lond)*(1999) **518**, 883-893.
- 28) McNulty, P. A. & Macefield, V. G. Modulation of ongoing EMG by different classes of low threshold mechanoreceptors in the human hand. *J. Physiol (Lond)*(2001) **537**, 1021-1032.
- 29) Burke, D., Dickson, H. G., Skuse, N. F. Task-dependent changes in the responses to low-threshold cutaneous afferent volleys in the human lower limb. *J. Physiol(Lond)*(1991) **432** : 445-58.
- 30) Serrao, M., Parisi, L., Pierelli, F., Rossi P. Cutaneous afferents mediating the cutaneous silent period in the upper limbs: evidences for a role of low-threshold sensory fibres. *Clin. Neurophysiol.*(2001) **112**, 2007-2014.
- 31) Ghez, C. & Shinoda, Y. Spinal mechanisms of the functional stretch reflex. *Exp Brain Res.*(1978) **32**, 55-68.
- 32) Ohki, Y., Suzuki, T., Ugawa, Y., Uesaka, Y. Characteristics of excitatory E3 phase of cutaneous reflexes in the human. *Jpn. J. EEG EMG(suppl)*(1993) **21**, 175.
- 33) 中島 剛, 遠藤隆志, 坂本将基, 小宮山伴与志. 最大下持続収縮時における皮膚反射および体性感覚誘発電位(SEP)の時系列的変動について. *体力科学*, (2003), **6**, 826 .