

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19500492

研究課題名（和文）四肢による協調運動の文脈依存性とその仕組みの解明

研究課題名（英文）Context-dependent modulation of rhythmic upper and lower limb movement in humans

研究代表者

小宮山 伴与志（KOMIYAMA TOMOYOSHI）

千葉大学・教育学部・教授

研究者番号：70215408

## 研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、ヒトにおける中枢パターン発振器の機能を実験的に調べる手段の一つである上・下肢ペダリング運動を用い、その遂行文脈に依存して上肢と下肢の協調関係にどのような変化が生じるのかを明らかにすることである。結果として、上・下肢同時ペダリング運動中、下肢ペダリング運動の速度をフィードバックすると上肢ペダリング運動の速度定常性が特異的に低下する、下肢ペダリングを上肢ペダリングに先行させると下肢のペダリング速度が有意に変化すること、下肢ペダリング運動は上肢皮膚反射の短潜時成分へ筋特異的に影響を及ぼし、その効果は上肢筋の背景筋電図量と回転数に依存すること、が明らかになった。これらの研究結果は、上・下肢のペダリング運動と反射活動は脊髄パターン発振器による制御を受け、その効果は運動の文脈や運動条件に依存して変化することを示唆する。

## 研究成果の概要（英文）：

The present study investigated to what extent interlimb coupling between the arm and leg are modulated depending on the context of movement while performing simultaneous arm and leg pedaling which has been used to investigate the function of central pattern generator (CPG) in humans. We found that (1) the cadence of arm pedaling was significantly changed by visual feedback on the leg cadence, (2) the cadence of arm pedaling was significantly decreased only when the subject first performed arm pedaling at a constant cadence then performed leg pedaling, (3) magnitude of cutaneous reflexes in the arm muscles was significantly modulated depending on the activation level of the arm muscles and the cadence of leg pedaling. These finding suggest that rhythmic arm and leg movement is regulated by CPG, and that these interact depending on the context of movement and biomechanical constrains of movement.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・身体教育学

キーワード：身体システム学

## 1. 研究開始当初の背景

歩行運動や走運動など、日常頻繁に用いられる基本的な移動運動には上・下肢による協調運動を基礎としているものが多い。例えば、ヒトの歩行運動は、基本的には左右両脚による交互運動であり、一側下肢は身体を支えつつ前方への推進運動を行い、他方の足は前方へ振り出される。また、左右両脚の各関節に着目してみると時系列的に合目的に配置された伸展、屈曲運動を繰り返している。一方、上肢運動は下肢運動と180度の位相差をもって対称的に動いている。このような歩行運動は見方を変えると、左右上・下肢によるパターン化され、かつ自立性を備えたリズム運動であるといえる。また、歩行運動は環境の物理的条件や末梢からの感覚情報によっても修飾を受ける。例えば、上り坂と下り坂では歩行リズムや歩幅は大きく変化するし、石などの物体を踏むと瞬時に足の踏み直りが生じる。これらは末梢神経からの求心性インパルスによる反射性調節、および上位中枢からの下行性調節機構によるものと考えられている。従って、通常歩行時のリズムカルな下肢の動きは自動的に調節され、我々はこれらの制御を特に意識することなく、円滑な運動を遂行することが出来る。

しかしながら、ヒトでは荷物を持ちながら歩く、腕を組んで歩く、ポケットに手を入れたまま歩く、等の多様な運動形態を作り出すことが可能な点である。一方、四足歩行動物、例えばネコでは、前肢と後肢の協調を制御する神経機構に関する知見が過去100年以上にわたり多数集約されてきた。その中でも興味深い観察の1つは、中脳レベルで脳を切断した除脳ネコ標本においても、歩行運動遂行時に前肢と後肢の協調が認められる点である。この結果は、前肢と後肢の協調運動には脊髄に存在する神経回路網がそのパターン発現に大きな寄与をしていることを強く示唆する。しかしながら、現時点ではヒトにおける歩行運動時の上・下肢の協調を制御する神経機構については未だ不明な点が数多く残されている。上・下肢による律動運動の調節機序を明らかにすることは、発育発達期にある児童生

徒の四肢協調能力の向上のためのプログラム作成、運動障害や感覚系に障害を有する人たちに対する効果的なリハビリテーションプログラムを作成する上でも重要な研究課題であろう。従って、ヒトの上・下肢の協調動態について検討を加えることは、体育科学、スポーツ科学だけでなくリハビリテーションを含めた神経科学の研究対象としても非常に興味深い研究課題の1つであると考えられる。

## 2. 研究の目的

上述の先行研究ならびに申請者らが行ってきた研究を基礎として、(1)速度定常性に対する速度フィードバックの影響、(2)上・下肢(AL)ペダリング運動の速度定常性に対する運動開始順序の影響、(3)下肢ペダリング遂行時の上肢皮膚反射の変化、について明らかにすることが、本申請研究課題の目的である。

## 3. 研究の方法

### (1)被験者

被験者は、神経学的疾患のない健康な成人13名であった。実験は倫理委員会の承認を得るとともに、被験者に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。

### (2)実験設備

被験者は、自転車エルゴメーターに座り上・下肢ペダリング運動を遂行するよう教示された。上肢(EU6210、松下電器)および下肢(Power Max V、コンビ(株))ペダリング運動で使用したエルゴメーターは機械的に連動していなかったため、被験者は2つのエルゴメーターを独立に動かすことが可能である。上肢および下肢のエルゴメーター内部に取り付けられた光電管センサー(PS-102、ココリサーチ社)により、ペダリング運動1周につき8つのTTLパルスを記録した。被験者には眼前2mに設置したモニター(PS-102、ココリサーチ社)によりペダリングの速度を視覚的にフィードバックした。皮膚反射は、手関節レベルで橈骨神経に対して低閾値電気刺激(感覚閾値の2~2.5倍の強度、1ms矩形波、3発刺激、333Hz)をアイソレータを介

して与えることにより誘発した。筋電図は三角筋後部、上腕二頭筋、前腕屈筋より双極誘導法にて表面電極にて導出した。

### (3) 運動課題

被験者は、上肢もしくは下肢のペダリング運動の速度をフィードバックしながら上・下肢ペダリングを行った。上肢(下肢)のペダリング運動をフィードバックする課題では、被験者は下肢(上肢)のペダリング運動の速度には注意を向けず、そのとき最も行いやすい速度でペダリング運動を遂行するように教示した。フィードバックする速度は 30rpm、45rpm もしくは 60rpm であった。

運動課題順序効果の検討では、被験者は最初に上肢(下肢)ペダリング運動を行い、その後下肢(上肢)ペダリング運動を最も行いやすい速度で遂行するよう教示された。

被験者は下肢ペダリングを、60 もしくは 90rpm、負荷 0.7kp で行った。被験者が下肢ペダリング運動を遂行中に各クランク位置が時計盤の 12、3、6 もしくは 9 時の時点で皮膚反射を誘発した。また、コントロールとして、被験者は各クランク位置で大腿伸筋群の等尺性筋収縮を持続する課題も行い、その間に上肢筋群より皮膚反射を誘発した。

## 4. 研究成果

### (1) 速度定常性に対する速度フィードバックの影響

図 1 に示したように、下肢ペダリングの CV は、被験者が速度をフィードバックした肢(上肢、下肢)にかかわらず一定であった。一方、上肢ペダリングの CV は、被験者が上肢の速度をフィードバックしたときに比して、下肢の速度をフィードバックしたときに有意に増大した。

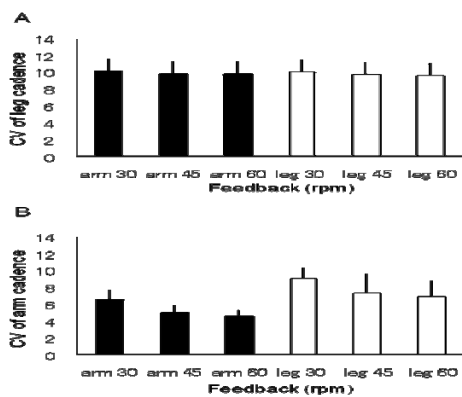


図 1 全被験者から得られた視覚的フィードバック呈示時の下肢 (A) および上肢 (B) ペダリングの速度の変動係数。

図 2 に示したように、被験者が上肢ペダリ

ングの速度のフィードバックを受けているとき、下肢ペダリングの速度はフィードバックする上肢の速度に依存して有意に変動した。また、下肢の速度をフィードバックしたときの上肢ペダリングの速度でも同様の結果が認められた。

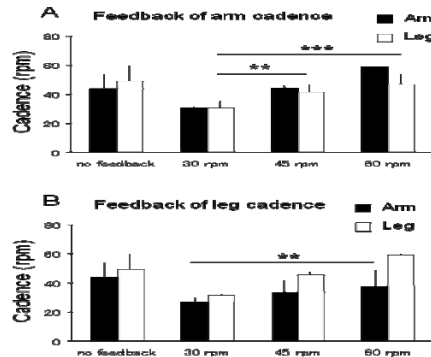


図 2 視覚的フィードバック呈示時における上肢 (黒) および下肢 (白) ペダリングの速度。A は上肢ペダリングを意識させた課題、B が下肢ペダリングを意識させた課題を示す。  
\*\* $p<0.01$ ; \*\*\* $p<0.001$

これらの結果は、上肢ペダリング運動の速度のばらつき (分散) の増大は、被験者が下肢の動きに注意を向けたことにより引き起こされた結果であると考えられる。上肢ペダリング運動を一定に遂行するためには、脊髄 CPG の活動ばかりでなく、ペダリングに注意を向け、脳からの上肢筋群に対する制御が必要であることが考えられる。つまり、上肢ペダリング運動は下肢ペダリング運動に比して、脳を含む上位中枢からの制御を強く受ける可能性が示唆される。すなわち、二足歩行の獲得により上肢における CPG 制御は機能的に退化したが、その代わりに、上位中枢からの下行性指令を受け、複雑な上肢運動やきめ細かい手指運動を行うようになった可能性が考えられる。

### (2) 上・下肢ペダリング運動の速度定常性に対する運動開始順序の影響

フィードバックした全ての速度において、上肢のペダリングを先行させると下肢の最も行いやすい速度は有意に減少していた(図 3)。また、上肢ペダリング運動を先行させたときの下肢の速度は、上肢でフィードバックした速度に依存して有意に変動した。また、図 4 に示したように、フィードバックした全ての速度において、上肢ペダリングの最も行いやすい速度は、下肢ペダリングを先行させると減少することが明らかになった。

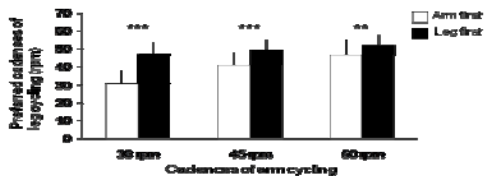


図 3 上肢ペダリングをフィードバックした際の下肢ペダリングの速度変化 \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$

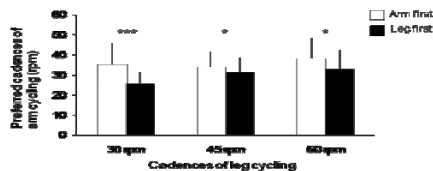


図 4 下肢ペダリングをフィードバックした際の上肢ペダリングの速度変化. \*\*  $p < 0.05$ ; \*\*\*  $p < 0.001$

本研究課題で得られた結果は、上肢ペダリングを下肢ペダリングに先行させるか否かにより、下肢ペダリングの最適遂行速度が変化するということであった。これは AL ペダリング運動中に、上肢ペダリング運動が下肢ペダリング運動の速度に何らかの影響を及ぼしたことを意味する。すなわち、運動課題や運動を行う環境条件等に応じて上肢と下肢の神経学的連結が容易に変化する可能性を示唆している。これらは、運動を行う状況に適切に対応し、下肢による円滑な歩行を継続させるために生じる上・下肢の状況依存的な協調的調節機序を反映したものであると考えられる。

### (3)上・下肢ペダリング運動の速度定常性に対する運動開始順序の影響

上肢皮膚反射は背景筋電図量に応じて増大した有意に増大した(図 5)。また、FCR, BB ならびに PD において下肢ペダリング運動時に皮膚反射の促進成分は有意に増大し、抑制成分は有意に減少することが明らかになった。特に、その効果は上肢筋の背景 EMG 量と回転数に依存し、60rpm 時に比して 90rpm 時の皮膚反射の増大が有意に大きかった ( $p < 0.05$ )。一方、しかし、上肢皮膚反射は下肢のサイクル相に依存せず(図 6 参照)、また下肢の等尺性筋収縮時にも有意な変化は見られなかった。また、下肢の等尺性収縮または単発の下肢ペダリング運動では、ペダリング運動時に観察された反射の修飾は見られなかった。

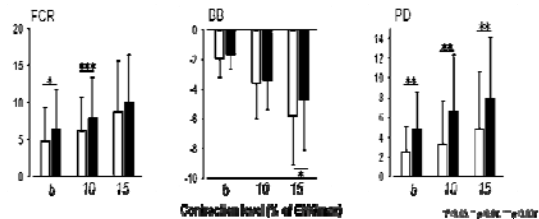


図 5 下肢ペダリング運動が上肢筋群皮膚反射に与える影響。全被験者(n=13)の FCR, BB 及び PD の平均値と標準偏差。\*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$

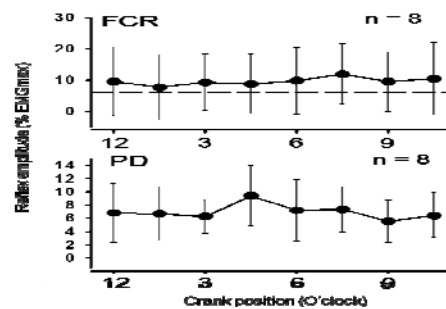


図 6 FCR および PD より得られた皮膚反射のペダリング位相依存性。

歩行運動中、上肢(下肢)の皮膚反射は下肢(上肢)の位相に依存して変化することから、上・下肢の CPG 活動は各種の反射回路に位相依存的に修飾作用を及ぼし、目的運動の円滑な遂行を支援しているものと考えられる。しかし、ひとたび四肢の律動運動が開始されると、律動運動を行っている肢の反射はその肢の位相に非常に強く依存して修飾を受ける。従って、四肢の CPG 間の相互作用をより純粋な形で検討使用とする場合、上・下肢どちらか一方を静止状態とし、もう一方の肢を律動運動させる必要がある。本研究では、これらの諸点を考慮し、上肢を静止状態で等尺性筋収縮を行わせ、下肢のペダリング運動中の皮膚反射の動態を検討した。その結果、下肢の等尺性筋収縮や単発のペダリング運動では有意な変化は引き起こされないが、持続的な下肢のペダリング運動を遂行している間は、上肢皮膚反射を形成する神経ネットワークに大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

本研究では、運動課題依存性を示したが、位相依存性は観察されなかった。従って、反射を検索している肢が律動運動を行わず、静止状態では遠位肢の位相依存を駆動する CPG の影響は限定的であると考えられる。しかし、一方で反射のオフセットは有意に上昇を示すことから、遠位肢の CPG からは反射のオフセットを制御する効果が及んでいる可能性が示唆される。しかしながら、このオフセット効果を発現する CPG システムの詳細については四足動物の実験では明らかにされていない。

本研究で明らかになったもう一つの特徴は、皮膚反射修飾の筋依存性である。この機能的な意義は不明であるが、本研究結果を単純に考えると、PD および FCR の促通と BB の抑制は手指皮膚感覚受容器に加えられた外乱に対して、上肢を効率的に遠ざけようとする、パラシュート反応に類似した反射運動の一種と考えられる。もしこれが事実であれば、姿勢の不安定性等によってこの反射運動は影響を受けることが考えられる。また、被験者は座位状態で運動課題を行った。CPG から皮膚反射に対する効果は運動課題の物理的な制約や運動環境条件、恐怖心等によって強い影響を受けることが明らかになっている。従って、今後これらの条件を検討し、効果的に皮膚反射の変化を引き起こす条件を明らかにすることは、理学療法やリハビリテーショントレーニングの改善のためにも必要であろう。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Nakajima T, Sakamoto M, Tazoe T, Endoh T, Komiyama T. Location-specific modulations of plantar cutaneous reflexes in human (peroneus longus muscle) are dependent on co-activation of ankle muscles. *Exp Brain Res.* 195(3):403-412, 2009. (査読有)
- ② Nakajima T, Kamibayashi K, Takahashi M, Komiyama T. Nakazawa K. Phase-dependent modulation of cutaneous reflexes in tibialis anterior muscle during passive stepping. *Neurol Res*, 30:46-51, 2008. (査読有)
- ③ Nakajima T, Kamibayashi K, Takahashi M, Komiyama T. Akai M, Nakazawa K. Load-related modulation of cutaneous reflexes in the tibialis anterior muscle during passive walking in humans. *Eur J Neurosci.* 27: 1566-1576, 2008.(査読有)
- ④ 坂本将基, 田添歳樹, 塩澤伸一郎, 小宮山伴与志 上肢もしくは下肢ペダリング運動が安静肢における運動誘発電位とH反射に及ぼす影響. *体力科学* 57, 271-284, 2008. (査読有)
- ⑤ Sakamoto M, Tazoe T, Nakajima T, Endoh T, Shiozawa S, Komiyama T. Voluntary changes in leg cadence modulate arm cadence during simultaneous arm and leg cycling. *Exp Brain Res*, 176: 188-192, 2007. (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

- ① 笹田周作・他、上下肢ペダリング運動による上肢筋群皮膚反射の増強効果, 第 60 回日本体育学会大会、広島、8 月 28 日 2009
- ② Sasada et al., Arm pedaling modulates reflex responses from ankle dorsiflexor afferents to knee extensor muscles. The 36th Congress of the international union of physiological sciences, Kyoto, 28July, 2009.
- ③ 笹田周作・他、上・下肢ペダリングによる上肢皮膚反射の位相依存性変化について、第 16 回日本運動生理学会大会、東京、7 月 26 日、2009
- ④ 中島剛・他、受動歩行時における上肢 H 反射経路の興奮性動態について、第 39 回日本臨床神経生理学会学術大会、神戸、11 月 20 日 2008.
- ⑤ 笹田周作・他、Effects of leg pedaling on the cutaneous reflexes in the upper limb muscles. 第 39 回日本臨床神経生理学会学術大会、神戸、11 月 19 日 2008.
- ⑥ Nakajima et al., Differences in phase-dependent modulation of cutaneous reflexes between the ankle flexors and extensors during passive walking. Society for Neuroscience, Washington, 19/Oct 2008.
- ⑦ 笹田周作・他、下肢ペダリング運動が上肢皮膚反射に及ぼす影響. 第 38 回日本臨床神経生理学会学術大会、宇都宮 11 月 21 日 2007.
- ⑧ 中島剛・他、受動歩行運動時における位相依存的な皮膚反射動態について. 第 38 回日本臨床神経生理学会学術大会、宇都宮 11 月 21 日 2007.
- ⑨ Nakajima et al., Load-related modulation of cutaneous reflexes in the tibialis anterior muscle during passive stepping. San Diego, CA, 7/ Nov /2007.
- ⑩ Sakamoto et al., Differential modulation of motor- evoked potentials and H-reflexes in the leg muscle during rhythmic arm cycling. San Diego, CA, 7/ Nov /2007.

[その他]

ホームページ等

<http://www.edu.chiba-u.jp/all/2-5.html>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

小宮山 伴与志 (KOMIYAMA TOMOYOSHI)

千葉大学・教育学部・教授

研究者番号 : 70215408