

研究種目：若手スタートアップ
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19800045
 研究課題名（和文）上・下肢の協調運動の制御機構の解析
 研究課題名（英文）Analysis of the coordination between upper and lower limbs during rhythmic movement

研究代表者

坂本 将基 (SAKAMOTO, Masanori)
 早稲田大学・スポーツ科学学院・助手
 研究者番号：80454073

研究成果の概要：

本研究では、歩行中にみられる上・下肢の協調運動の制御機構を解明することを目的とした。特に、上肢と下肢の協調関係が脊髄反射を中心とした制御機構によりどの程度無意識に（反射的に）調節されているのか、また、脳を中心とした意識的な制御がどのように遂行されているのか、についてペダリング運動を用いて検討を加えた。脳部位の興奮性の測定には、経頭蓋的磁気刺激法によって筋電図上で得られる運動誘発電位を、脊髄部位の興奮性の測定には電気刺激法により筋電図上で得られる H 反射を用いた。その結果、律動的な上肢（下肢）の運動は、下肢（上肢）を制御する脳部位へは促進性の影響を、脊髄部位に対しては抑制性の影響を及ぼすことが明らかとなった。ヒトの上・下肢の協調運動において、脳部位と脊髄部位が異なる役割を果たしていることが示唆された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,280,000	0	1,280,000
2008 年度	1,180,000	354,000	1,534,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,460,000	354,000	2,814,000

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：上肢，下肢，協調，ペダリング

1. 研究開始当初の背景

ヒトは歩行中に、下肢ばかりでなく上肢も律動的に動かす。通常、無意識な歩行状態では上肢は下肢と 180 度の位相差をもって対称的に動く。しかし興味深い点は、ヒトは歩行

時に上肢を意識して止めることも、また足と同じ方向に動かすことも可能なことである。それには、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といった状況が想起される。このような歩行中の上肢と下肢の協調関係がどの程度無意識に

(反射的に)調節されているのか、また、脳を中心とした意識的な制御がどのように遂行されているのかについては不明な点が多い。

近年、歩行と同様に、リズムカルな律動運動である移動式もしくは固定式自転車エルゴメーターによるペダリング運動が、ヒトの歩行を制御する神経機構を検索する運動モデルとして用いられてきている (Brooke et al. 1997). 先行研究の結果から、ペダリング運動は歩行と類似した神経機構によりそのリズムが発現している可能性が示されている (Zehr and Duysens 2004). また、下肢のみならず、上肢によるペダリング運動もその制御が非常に自動化されたものであること、さらに、上肢ペダリング運動は下肢ペダリング運動と同様の神経機構により制御されていることなども報告された (Zehr and Duysens 2004). つまり、上肢および下肢ペダリング運動を実験モデルとすることで、歩行中に見られる上肢と下肢の律動的な運動を再現できる可能性が示唆されている (Sakamoto et al. 2006).

本来上肢と下肢の運動を制御する脳や脊髄内の領域は独立している。しかしながら歩行や走行中に見られる上・下肢の協調運動では、上肢と下肢を制御する脳および脊髄内の異なる領域間に何らかの神経連絡が存在するものと思われる。四足歩行動物であるネコやラットなどでは、脳を取り除いた状態でも前肢と後肢の協調運動が残存することから、脊髄内にある神経機構だけで前肢と後肢の協調運動が成立することが明らかになっている (Orsal et al. 1990). 一方、ヒトの上・下肢の協調動態を探る研究は着手されはじめたばかりであり、研究成果が圧倒的に少ない。そんな中、上肢と下肢を同時に動かすのではなく、どちらか一方の肢のみを律動的に動かし、静的にしているもう一方の肢に生じる変化を観察する研究が行われ、成果をあげている。近年、上肢(下肢)ペダリング運動が安静状態にある下肢(上肢)筋の脊髄反射を変化させることが明らかになった (Frigon et al. 2004). このことから律動的な上肢の運動により下肢を制御する脊髄領域の興奮性に変化が及ぶ可能性が示唆された。しかしながら現在まで、上肢ペダリング運動が下肢筋を制御する脳部位に及ぼす影響については明らかにされていない。上・下肢の協調に脳が関与するのかどうかの検討は、ヒトとネコにおける歩行制御の差異を観察することにもつながり、強く興味を引く問題である。もし、上・下肢の協調運動に脳皮質を含む脳領域が貢献するとしたら、同様の実験を行うことにより脳部位の興奮性にも何らかの変化が生じることが予想される。また、下肢の律動的な運動が上肢筋に与える影響と、上肢の律

動的な運動が下肢筋に及ぼす影響を直接比較した研究も見あたらない。両結果を比較することで、歩行制御機構における四足歩行と二足歩行の類似点および相違点の一端が浮き彫りになるものと思われる。

2. 研究の目的

本研究ではヒト上・下肢の協調運動の神経メカニズムを解明することを目的とした。そのために、ペダリング運動を実験モデルとして、上・下肢の協調運動に脳や脊髄部位がどのように貢献するのかについて検討した。

3. 研究の方法

被験者は神経学的疾患の健康な成人男性とした。

上肢筋および下肢筋を制御する脳部位の興奮性の評価には経頭蓋的磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation: TMS) を用いた。TMS は被験者の頭皮上に置いたコイルに電流を流すことによりパルス磁場を作り、その磁場に沿って発生する渦電流によって頭蓋骨下にある大脳皮質神経細胞を興奮活動させる方法であり、非侵襲的にヒト大脳皮質の運動関連領域の細胞を刺激することができる (Endoh et al. 2005; Tazoe et al. 2007). TMS を与えた後、対象とする筋に貼付した筋電図上からは運動誘発電位 (motor evoked potential: MEP) が確認できる。この MEP 振幅の変化は、すなわち大脳皮質の運動関連領域の興奮性の変動を反映する (図 1)。

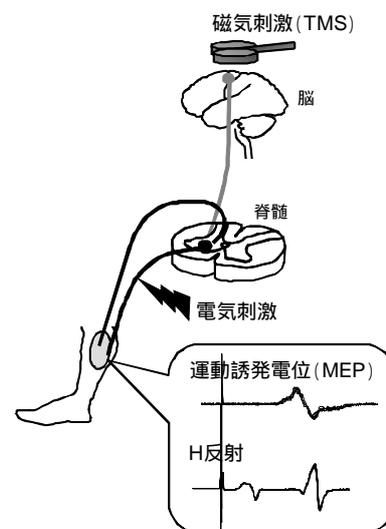


図 1. MEP と H 反射の発現経路

脊髄レベルの興奮性の評価には脊髄反射の一つであるH反射を記録した。H反射とは脊髄の運動細胞を経由して出現する反射で、古くから脊髄の興奮性の指標として用いられてきた(Sakamoto et al. 2004; Tazoe et al. 2005)。H反射は神経を電気刺激することで対象とする筋の筋電図上から記録可能である。MEP同様、H反射の振幅の変化は、脊髄レベルの興奮性の変動を間接的に示す。こうすることで脊髄レベルの興奮性の指標であるH反射と、大脳皮質レベルの興奮性の指標であるMEPの変動を比較することができる。

実験では、自転車のペダル位置を時計盤に相当させて定義した。例えば、上死点(top dead center)を12時とし、3時および9時を被験者の右肘と右膝がともに伸展および屈曲する位置とした。TMSとH反射を誘発するための電気刺激は、ペダルクランクが時計盤の12時、3時、6時、9時に相当する位置にあるときに与えた。これは上肢もしくは下肢筋の力発揮の状態により、対象となる筋を制御する脳部位および脊髄部位の興奮性が異なるのかを検討するためである。さらにペダリング運動は、1分間に30回転、45回転、60回転の3つの異なる速度で遂行した。また、45回転の速度でペダルの負荷のみを0kp、0.5kp、1kpの3つの異なるレベルで変化させる条件も加えた。ペダリング運動の速度や負荷を変化させると、脳や脊髄の神経機構に異なる変化が生じることが明らかにされている(Sakamoto et al. 2004)ため、上肢(下肢)を動かす速度や負荷によって、下肢(上肢)筋を制御する脳部位および脊髄部位の興奮性に対する影響が異なるのか否かを観察した。

課題は、上肢でペダリング運動を行い、下肢は安静を保持する課題、下肢でペダリング運動を行い、上肢は安静を保持する課題の2つであった(図2)。ペダリング中にペダルクランクが時計盤の12時、3時、6時、9時に相当する位置でMEPとH反射を記録した。上肢筋のMEPとH反射は右側の橈側手根屈筋と橈側手根伸筋から、下肢筋のMEPとH反射は右側のヒラメ筋と前脛骨筋から記録した。

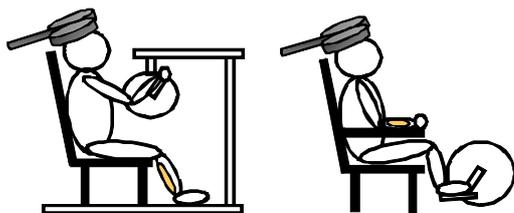


図2. 実験状況

4. 研究成果

上肢ペダリング運動中、安静状態にあるヒラメ筋と前脛骨筋のMEPの振幅は増大したが、H反射の振幅は減少した。このときのMEPとH反射の振幅は4つの異なるペダル位置で変化が認められなかった。また、上肢ペダリングの回転数増加に伴い、MEPとH反射の変動の程度が大きくなった。ペダリング運動の負荷を増大させたときにも同様の傾向が認められた。

また、下肢ペダリング運動中にも、安静状態にある橈側手根屈筋と橈側手根伸筋のMEPの振幅が増大し、H反射の振幅が減少した。このときのMEPとH反射の振幅は4つの異なるペダル位置で変化が認められなかった。さらに、ペダリング運動の回転数や負荷を増大させると、MEPとH反射の変動の程度が大きくなった。

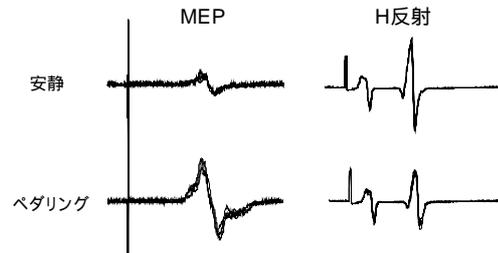


図3. 結果の典型例

これらの結果は、上肢(下肢)ペダリング運動は下肢(上肢)筋を支配する脳部位へは促通性の影響を与えるが、下肢(上肢)筋を支配する脊髄部位へは抑制性的影響を与えることを示している。

更なる実験を遂行し、得られた結果を実用化するためには、本研究で得られた結果の機能的な意義について考察する必要がある。先行研究では不安定な基底面上での立位時には安定した地面での立位に比して、ヒラメ筋のMEPは増大し、H反射は抑制されることが報告されている(Solopova et al. 2003)。さらに、座位と立位の比較において、後者でMEPの増大とH反射の減少が確認されている(Goulart and Valls-Solé 2001)。これらは姿勢を適切に保持するために、皮質運動野を含む脳からの運動指令を優先させ、末梢からの入力による反射活動を制限させるための制御機構を反映しているものと考えられる。これらの知見を踏まえると、上肢のペダリング運動

は下肢筋の皮質脊髄路活動を必要とする運動場面に有効に適用できるかもしれない。その一つの例としてリハビリテーションでの応用などが挙げられる。近年、不完全脊髄損傷患者の歩行トレーニング後に下肢筋の MEP が増大することが報告されており

(Thomas and Gorassini 2005), 歩行能力の改善と皮質脊髄路の変容の関係性に注目が集まっている。そのため本研究で得られた、上肢ペダリング運動が安静状態にある下肢の皮質脊髄路の興奮性に影響を及ぼすという結果は、上肢を効果的に使用した歩行機能訓練等につながる可能性がある。一方、ペダリング運動は安静状態にある筋の H 反射を減少させるため、脊髄反射が亢進している脳卒中や脊髄損傷患者に対して上肢の律動的な運動が反射亢進を減弱させることも考えられる。しかしこれらの可能性は推測に過ぎないため、今後更なる検討が必要である。

得られた成果の一部は、2007 年 11 月にアメリカ・サンディエゴで開催された北米神経科学大会で発表した。

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 1 件)

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 (2), 2008, 271-284, 査読有り

〔学会発表〕(計 1 件)

Masanori Sakamoto, Toshiki Tazoe, Shinichiro Shiozawa, Shigeki Ohmori, Mikihiro Tatematsu, Tomoyoshi Komiyama. Differential modulation of motor-evoked potentials and H-reflexes in the leg muscle during rhythmic arm cycling. Society for Neuroscience 37th Annual Meeting, San Diego. USA, November 2007.

6. 研究組織

(1)研究代表者

坂本 将基 (SAKAMOTO MASANORI)

早稲田大学・スポーツ科学学術院・助手

研究者番号: 80454073