

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：20101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26750191

研究課題名(和文)筋紡錘からの求心性入力によって誘起される運動知覚中の脳波解析

研究課題名(英文) Characteristics of EEG oscillations during kinesthetic illusion induced by afferent input from muscle spindle

研究代表者

柴田 恵理子 (Shibata, Eriko)

札幌医科大学・保健医療学部・研究員

研究者番号：80516568

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、振動刺激や視覚刺激などの感覚入力によって誘導される運動知覚、そして感覚入力と運動イメージを重畳することによって生じる運動知覚について、心理物理学的手法に加え、生理学的手法を用いて検証した。振動刺激に運動イメージを重畳した場合にも、運動を知覚することにより、刺激した筋の拮抗筋の筋活動が増大することが示された。また、振動刺激や視覚刺激によって運動知覚が誘導されることにより、特徴的な神経活動が生じること、そしてその神経活動は頭皮上脳波を用いて感覚運動皮質上で捉えられることが明らかになった。これらの生理学的指標を用いることで、運動知覚が生じているかを客観的に判断できる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Afferent inputs from sensory receptors in muscle spindles and skin, and efferent signals from the central nervous system that trigger intentional movement, contribute to kinesthetic perception. We investigated the characteristics of kinesthetic perception that would be generated by combining motor imagery and sensory inputs on the basis of the physiological index. An excitatory response in antagonistic muscles was induced when subjects perceived movement during combination of motor imagery and tendon vibration. Moreover, the averaged spectrum power in sensorimotor area decreased during kinesthetic perception induced by tendon vibration or visual stimuli. This study suggested that it is possible to detect the induction of kinesthetic perception by analyzing the EEG signals in bilateral sensorimotor areas. We speculate that this knowledge will prove useful for the development of algorithms that can confirm the intensity of kinesthetic perception in clinical rehabilitation.

研究分野：リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：振動刺激 運動知覚 運動イメージ 事象関連脱同期

### 1. 研究開始当初の背景

四肢の筋腱に対して経皮的に振動刺激を行うと、実際には関節運動が生じないにも関わらず、刺激された筋が伸張する方向への運動知覚を生じる。脳機能イメージングによって、その運動知覚には下頭頂小葉や運動前野、一次運動野などの脳部位が関連していることが明らかになりつつある。我々はこれまで、動筋・拮抗筋に対して同時に振動刺激を行なった際に知覚する運動の速度が、脳内で運動をイメージすることにより変化するかについて、心理物理学の指標を用いて明らかにしてきた。その結果、筋紡錘からの求心性入力単独では運動を知覚しないような求心性入力状況下においても、能動的な運動イメージを重ねることによって運動を知覚させることができることを示した (Shibata E., Neurosci Lett, 2013)。この現象の背景として、遠心性コピーによって生じる入力と筋紡錘からの求心性入力、先に述べた運動知覚に關与する脳部位で比較・統合されるような現象が生じ、その誤差によって知覚する運動が変化したものと推察する。しかし、これまで行ってきたような心理物理学的手法を用いた報告では、様々な入力によって最終的に生じる運動という現象を運動知覚の指標としているため、その背景で生じている生理学的な事象については言及できない。そのため、さまざまな刺激を用いた感覚入力や、感覚入力と能動的な運動イメージの想起の組み合わせによって生じる運動知覚は、どのような脳神経回路網活動によるものなのかを生理学的手法を用いて検証していく必要があると考えた。

### 2. 研究の目的

当該研究の目的は、振動刺激を用いた筋紡錘からの求心性入力、四肢の運動映像を用いた視覚入力など、運動知覚を誘導するような感覚入力、そして感覚入力と能動的な運動イメージを組み合わせることによって生じる運動感覚について、心理物理学的手法に加え、生理学的手法を用いて検証することとした。

### 3. 研究の方法

当該研究は、以下の3つに大別される。

(1) 運動イメージと筋紡錘からの求心性入力の統合により生じる運動知覚中の筋活動

拮抗関係にある筋の筋紡錘からの求心性入力が統合され、運動錯覚を生じないような状況下において、運動イメージを行うことにより運動知覚を誘導し、その運動知覚が筋活動に及ぼす影響を検証した。

対象は健康な成人とし、対象側は左とした。実験課題として、様々な周波数条件で手関節掌屈筋と背屈筋に振動刺激を行い、それと同時に手関節が掌屈する運動イメージを行わせた。手関節掌屈筋と背屈筋には同じ周波数で振動刺激を行なった (掌屈筋 vs. 背屈筋: 40Hz vs. 40Hz, 60Hz vs. 60Hz, 80Hz vs.

80Hz, 100Hz vs. 100Hz)。振動刺激時間は3秒間とし、両側への刺激タイミングが一致するよう制御した。振動刺激と同時にイメージする運動は手関節掌屈運動とし、一人称的にイメージ想起させた。各周波数での振動刺激中に運動イメージを行う条件と行わない条件を設定し、各条件とも3試技実施した。なお、各試技間には十分な休憩を挟んだ。振動刺激中、刺激側の左橈側手根屈筋 (FCR) と橈側手根伸筋 (ECR) から表面筋電図を記録した。得られた EMG データは、フィルター処理した後、振動刺激開始1秒後から1秒間の Root Mean Squared (RMS) を算出した。

(2) 感覚入力によって生じる運動知覚中の脳波解析

筋腱への振動刺激や四肢運動の映像を用いた視覚刺激によって運動知覚が生じている最中の脳神経活動の特徴を、頭皮上脳波を用いて探索した。運動の実行や運動イメージ中には、感覚運動皮質直上で記録される脳波のうち 10Hz 付近の周波数成分が減衰することが知られている。これは、神経活動の脱同期によって生じる現象であるとされている。運動知覚に伴う神経活動の時間変化を明らかにするために、本研究ではまず視覚刺激および振動刺激で運動知覚を誘導した際に、神経活動の脱同期が生じるか明らかにすることを目的とした。

実験1: 視覚刺激で誘導される運動知覚

対象は、健康な右利きの成人とし、右手関節屈曲運動の映像をみせることで運動知覚を誘導した。事前に運動知覚を誘導するトレーニングを行い、一定の強さ以上の知覚が生じるものを被験者として採用した。被験者には安静な椅子座位をとらせ、適切な高さの実験机上に中間位で前腕を置いた。被験者の前腕を覆うよう適切な位置にモニタを設置し、被験者の右手関節が3秒間で中間位から最大掌屈位まで掌屈している映像を提示した (錯覚条件)。対照条件として、錯覚条件と同じ動画を上下反転させて映す条件 (非錯覚条件)、実際に動画と同じ運動を遂行 (運動条件) する条件の3条件を設定した。脳波測定にはコロディオン電極を用い、基準電極を耳朶に置き、基準導出法で記録した。電極位置は国際10-20法に準じ、C3およびC4とした。得られた脳波は wavelet 法による時間周波数解析を行い、得られたパワースペクトル密度の時間変化から信号強度を解析した。動画開始あるいは運動開始をトリガーとし、刺激開始0.5秒後から1秒間の区間で安静時の信号強度に対する減衰率を算出した。分析周波数は8~13Hz帯域とし、各条件で20回以上加算した。統計学的解析として、脳波記録部位と実験条件を要因とした反復測定二元配置分散分析を実施した。有意な交互作用があった場合、単純主効果の検定を行なった。有意水準は5%とした。

## 実験 2：振動刺激で誘導される運動知覚

対象は、健康な右利きの成人とし、対象側は右とした。被験者には安静な椅子座位をとらせ、適切な高さの実験机上に中間位で前腕を置いた。振動刺激は掌屈筋と背屈筋にそれぞれ異なる周波数で刺激を行い、運動知覚を誘導する条件（掌屈筋 vs. 背屈筋: 40Hz vs. 110Hz）と、両筋に同じ周波数で刺激を付与し、運動知覚が生じないようにする条件（掌屈筋 vs. 背屈筋: 75Hz vs. 75Hz）を設定した。脳波測定には 64 チャンネルの多チャンネル脳波計を用いた。得られた脳波は高速フーリエ変換による周波数解析を行い、得られたパワースペクトル密度の時間変化から信号強度を解析した。振動刺激の開始をトリガーとし、刺激開始 0.5 秒後から 1 秒間の信号強度変化を算出した。分析周波数は 8~13Hz 帯域とし、各条件で 20 回以上加算した。

### (3) 異種感覚入力統合によって誘導される運動感覚

視覚刺激による運動錯覚の有無が、筋紡錘からの求心性入力と視覚入力統合によって誘導される運動知覚に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

対象は健康な右利きの成人とし、刺激側は右とした。実験課題として、モニタに手関節運動の映像を提示した状態で背屈筋に振動刺激を行った。刺激周波数を増加させると知覚する運動の角速度も増大するため、40、60、80Hz と多段階の周波数を設定することで知覚する運動の角速度を段階付けた。視覚刺激には、背屈筋を 60Hz で振動刺激した際に知覚した掌屈運動を同側で再現させ、手の直上から撮影した映像を用いた。これにより視覚刺激と 60Hz の振動刺激を組み合わせた場合には各刺激によって知覚する運動の角速度が一致し、40、80Hz の場合は不一致となる。映像を提示するモニタは、被験者の視点から映像の手と現実の手が空間的に一致するような位置（錯覚位置）と被験者の正面（非錯覚位置）のいずれかに設置した。実験条件は各周波数につき、振動刺激単独（V 条件）、振動刺激に錯覚位置（V+IL 条件）と非錯覚位置（V+nIL 条件）での視覚刺激を組み合わせた条件とした。知覚強度の指標には、刺激中に知覚した運動を反対側で再現させた際の角速度を用いた。各 5 試技ずつ実施し、最大値と最小値を除外した 3 試技の平均値を採用した。さらに振動刺激単独に対して、視覚刺激との組み合わせによって変化する知覚の程度を評価するため、V+IL 条件と V+nIL 条件では各周波数で V 条件に対する角速度の変化率を算出した。

## 4. 研究成果

### (1) 運動イメージと筋紡錘からの求心性入力統合により生じる運動知覚中の筋活動

拮抗関係にある筋に同周波数の振動刺激を単独で行った場合、刺激周波数に関わらず

全ての被験者で運動知覚が誘導されなかった。そして、RMS は FCR と ECR で差がなかった（図 1-A）。これに対し、振動刺激と運動イメージを同時に行うことにより、イメージした方向への運動知覚が誘導され、FCR の RMS が ECR よりも有意に増大した（図 1-B）。振動刺激による運動知覚中には、刺激した筋の拮抗筋の筋活動が増大することが報告されている。この現象を Antagonist vibratory response (AVR) という。筋腱に振動刺激を行うと、刺激した筋が伸張する方向への運動を知覚するため、刺激された筋の拮抗筋というのは、知覚した運動の主動筋と一致する。本研究において、FCR は知覚している運動を実際に行った場合の主動筋であることから、手関節屈曲運動を知覚している際に FCR の筋活動が増大したことは AVR で生じる現象と矛盾しないものであると考える。

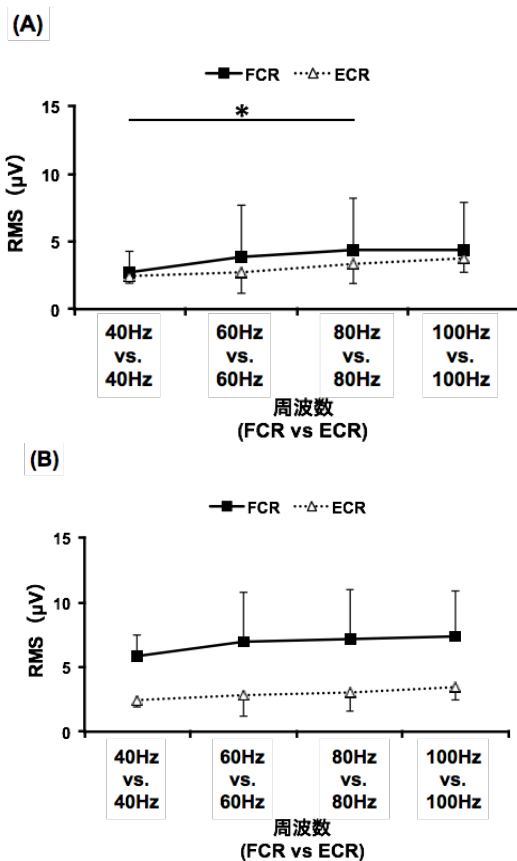


図 1：振動刺激中の筋活動

### (2) 感覚入力によって生じる運動知覚中の脳波解析

#### 実験 1：視覚刺激で誘導される運動知覚

視覚刺激によって運動知覚が誘導された場合、運動実行時と同様に、両側の感覚運動皮質から記録した脳波の信号強度が低下することが明らかになった（図 2）。つまり、視覚刺激によって運動知覚が誘導されることで、神経活動の脱同期が両側性に生じる可能性が示唆された。これに対し、同様の視覚刺激を用いても運動知覚が誘導されていない

場合には、神経活動の脱同期に左右差が生じるという結果が示された。このことから、感覚運動皮質における神経活動の脱同期を両側同時に比較することによって、視覚刺激によって運動知覚が生じているのか、それとも単に動画を観察しているだけなのかを区別できる可能性が示唆された。

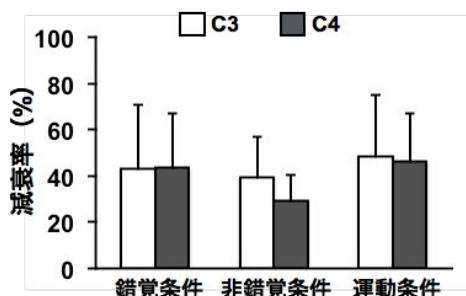


図 2：感覚運動皮質における事象関連脱同期

#### 実験 2：振動刺激で誘導される運動知覚

両筋を異なる周波数で刺激した場合、すなわち運動知覚が生じている場合には、振動刺激中に感覚運動皮質上で 10Hz 付近の周波数帯域の信号強度が低下し、事象関連脱同期が生じた。これに対して、同周波数で刺激した場合、すなわち筋紡錘からの求心性入力が生じていても運動を知覚していない場合には、同様の変化はみられなかった。このことから、筋紡錘からの求心性入力により運動知覚が誘導されることによって、特徴的な神経活動が生じることが示唆された。そして、その神経活動は頭皮上脳波を用いると感覚運動皮質上で捉えられることが明らかになった。

これまでの心理物理学的手法を用いた研究では、実際に運動知覚が生じているかを被験者の主観に基づいて推測しなければならないという点が研究限界であった。しかし、本研究の結果から、感覚運動皮質上で記録した脳波の変化から、運動知覚が生じているかを客観的に判断できるようになった。この点が本研究の意義深い点であると考えられる。

#### (3) 異種感覚入力の統合によって誘導される運動感覚

全条件で刺激周波数の増加に伴い、知覚する運動の角速度が有意に増大した(図 3-A)。V+IL 条件の変化率は刺激周波数によって差があったのに対し、V+nIL 条件では刺激周波数に関わらず変化しなかった(V+IL: 図 3-B, V+nIL: 図 3-C)。

刺激の組み合わせに関わらず、刺激周波数が増加すると知覚する運動の角速度が増大したことから、筋紡錘からの求心性入力と視覚入力の統合で誘導される運動感覚は筋紡錘からの入力量に依存して変化することが示された。さらにその変化の仕方は、同じ視覚刺激を用いたとしても、視覚刺激によって運動知覚が誘導されている場合とされていない場合とは異なることが示唆された。

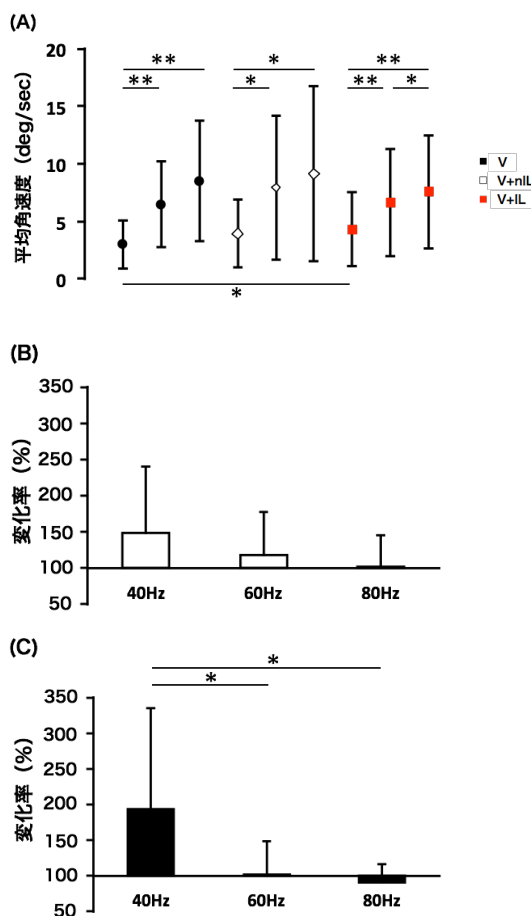


図 3：平均角速度と変化率

#### 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)

柴田恵理子, 金子文成, 高橋良輔: 運動感覚の生成機構に関する心理物理的指標を用いた検討. *バイオメカニズム*. 23 (in press)

[学会発表](計 7 件)

柴田恵理子, 金子文成, 奥山航平, 木村剛英: 動画を用いた視覚刺激による自己運動錯覚中の脳波解析. 第49回日本理学療法学会大会. パシフィコ横浜(神奈川県横浜市). 2014, 5. 30~6. 1

Shibata, E., Kaneko, F., Okuyama, K., Kimura, T.: Characteristics of EEG oscillations in sensorimotor areas during kinesthetic illusion induced by visual stimulation. 9th FENS Forum of

Neuroscience. Milan (Italy). 2014, 7

Shibata, E., Kaneko, F.: Differences between afferent inputs from antagonistic muscles affect kinesthetic perception during motor imagery. 17th International WCPT Congress 2015. Singapore, 2015, 4

柴田恵理子, 金子文成, 高橋良輔: 筋紡錘からの求心性入力と視覚入力の統合によって誘起される自己運動錯覚. 第50回日本理学療法学会大会. 東京国際フォーラム(東京都千代田区). 2015, 6. 5~7

**柴田恵理子**, 金子文成, 高橋良輔: 運動感覚の生成機構に関する心理物理的指標を用いた検討. 第24回バイオメカニズムシンポジウム. 岩室温泉ゆもとや(新潟県新潟市). 2015, 7. 24~26

**柴田恵理子**: 感覚入力を用いた脳卒中片麻痺患者に対する新しい治療アプローチの可能性. JSPTF第2回日本基礎理学療法学会学術集会 JPTF日本基礎理学療法学会第20回学術大会 合同学会. 神奈川県立保健福祉大学(神奈川県横須賀市). 2015, 11. 14

柴田恵理子: 振動刺激による自己運動錯覚に関する生理学的研究と臨床応用. 第93回日本生理学会大会. 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市). 2016, 3. 22~24

[図書](計1件)

**柴田恵理子**, 金子文成: 異種感覚入力の統合により生じる運動感覚-正確な運動を知覚するために必要な感覚は?- . 感覚入力で挑む. 文光堂, 2016, 180-190.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柴田 恵理子 (SHIBATA, Eriko)  
札幌医科大学・保健医療学部・研究員  
研究者番号: 80516568