



北海道公立大学法人
札幌医科大学
Sapporo Medical University

SAPPORO MEDICAL UNIVERSITY INFORMATION AND KNOWLEDGE REPOSITORY

Title 論文題目	運動イメージと腱振動刺激による求心性入力との統合で生じる運動知覚に関する研究
Author(s) 著者	柴田, 恵理子
Degree number 学位記番号	甲第 24 号
Degree name 学位の種類	博士 (理学療法学)
Issue Date 学位取得年月日	2013-09-30
Original Article 原著論文	
Doc URL	
DOI	
Resource Version	Author Edition

運動イメージと腱振動刺激による求心性入力との統合で
生じる運動知覚に関する研究

The study of kinesthetic perception
attend on integration of motor imagery and
afferent inputs with tendon vibration

札幌医科大学大学院保健医療学研究科 博士課程後期
理学療法学・作業療法学専攻 スポーツ理学療法学分野
柴田 恵理子 Shibata Eriko

目次

I. はじめに

1. 背景	1
2. 問題提起	2
3. 目的	4
4. 仮説	4
5. 研究意義	4
6. キーワード	5
7. 用語の定義	5

II. 文献検討

1. 筋紡錘からの求心性入力	6
1-1. 筋紡錘とは	6
1-2. 深部感覚の脊髄上行路	6
2. 運動錯覚	7
2-1. 運動錯覚が生じるメカニズム	7
a. 筋紡錘からの求心性入力による運動錯覚	7
b. 皮膚入力による運動錯覚	7
c. 視覚入力による運動錯覚	8
2-2. 運動錯覚により賦活する脳部位	8
2-3. 運動錯覚強度の心理物理的指標	8
2-4. 振動刺激の周波数と運動錯覚強度の関係	9
3. 運動イメージ	10
3-1. 運動イメージとは	10
3-2. 運動イメージによる生理学的な影響	10
3-3. 運動イメージにより賦活する脳部位	11
3-4. 利き手と非利き手の比較	11
3-5. 背景筋電図の影響	11
3-6. 心理物理実験において運動イメージを用いる妥当性	12
4. 運動感覚	12
4-1. 運動感覚とは	12
4-2. 感覚入力の統合	12
a. 筋紡錘からの求心性入力の統合	12
b. 異なる感覚モダリティの統合	14
4-3. 筋紡錘からの求心性入力と運動イメージの統合	14
4-4. 脳機能イメージングを用いた研究	15

III. 方法論

1. 対象	16
-------------	----

1-1. 取込基準.....	16
1-2. 除外基準.....	16
2. 実験概要.....	16
2-1. 実験 1.....	16
2-2. 実験 2.....	16
3. 実験環境.....	17
4. 振動刺激.....	19
5. 運動イメージ.....	19
6. 実験条件.....	21
7. 測定項目.....	24
8. データ解析.....	25
8-1. 実験 1.....	25
8-2. 実験 2.....	25
9. 統計学的解析.....	27
9-1. 実験 1.....	27
9-2. 実験 2.....	27
10.倫理的配慮.....	27
10-1. 遵守すべき諸規則.....	27
10-2. 説明と同意.....	27
10-3. 個人情報の保護.....	28
11.安全面への考慮.....	28

IV. 結果

1. 実験 1.....	29
1-1. イメージした運動の角速度.....	29
1-2. 振動刺激により知覚する運動の角速度.....	30
1-3. 運動イメージを重畳した際の角速度.....	31
1-4. 運動イメージを重畳した際の角速度の変化量.....	31
2. 実験 2.....	33
2-1. 片側刺激と両側刺激により知覚する運動の角速度.....	33
2-2. 片側刺激において運動イメージを重畳した際の角速度.....	33
2-3. 両側刺激において運動イメージを重畳した際の角速度.....	34
2-4. 運動イメージを重畳した際の角速度における 片側刺激と両側刺激の比較.....	34

V. 考察

1. 実験 1 における結果の解釈.....	37
1-1. イメージした運動の角速度.....	37
1-2. 振動刺激による周波数依存的な運動の知覚.....	37
1-3. 動筋・拮抗筋に対する同周波数の振動刺激で生じる運動錯覚.....	37

1-4. 動筋・拮抗筋に対する同周波数の振動刺激で生じる 運動錯覚と運動イメージの統合	38
2. 実験 2 における結果の解釈	41
2-1. 動筋・拮抗筋に対する異なる周波数の振動刺激で生じる運動錯覚....	41
2-2. 片側への振動刺激で生じる運動錯覚と運動イメージの統合	41
2-3. 動筋・拮抗筋に対する異なる周波数の振動刺激で 生じる運動錯覚と運動イメージの統合	43
2-4. 両側刺激での周波数の差と片側刺激での周波数が 一致した条件下における運動イメージとの統合	45
3. 動筋・拮抗筋関係にある筋からの求心性入力に対する 運動イメージの影響	47
3-1. 運動イメージが脊髄レベルで筋紡錘からの 求心性入力に及ぼす影響	47
3-2. 皮質下における動筋・拮抗筋関係にある筋からの 求心性入力の統合	48
3-3. 運動イメージに伴う大脳皮質からの下行性入力の影響.....	50
4. 本研究の限界	50
 VI. 結語	 51
 VII. 謝辞	 51
 VIII. 引用文献.....	 52

別紙 1: 説明文書

別紙 2: 同意書

I. はじめに

1. 背景

運動感覚は、複数の感覚を包含する意味で使用される¹⁾。それは、①関節位置および四肢または体幹の動きなどの感覚、②努力感、筋の張力、重量そしてステイフネスなど筋の力に関連した感覚、③筋収縮のタイミングに関する感覚、④姿勢および身体図式の大きさの感覚、の4つである²⁾。運動感覚の生成には、深部感覚受容器や皮膚受容器からの求心性入力だけではなく、中枢からの遠心性入力も寄与している^{3, 4)}。本研究では、その中でも筋紡錘からの求心性入力と脳内での運動イメージに着目した。

Goodwinらは、上腕二頭筋腱に適切な周波数で振動刺激を行うことによって、実際の運動を伴わずに肘関節が伸展しているという運動錯覚を生じさせた⁵⁾。筋や腱に振動刺激を行うと、主に筋紡錘のI a群線維が発火し、実際には関節運動が生じていないにも関わらず、あたかも刺激された筋が伸張した方向へ関節運動が生じたような運動を知覚する⁶⁾。このことは、筋紡錘からの求心性入力が運動感覚の生成に寄与しているということを示す。そしてGilhodesらは、肘関節の動筋・拮抗筋関係にある筋に対して、異なる周波数で同時に振動刺激を行うと、より高い周波数で刺激された筋が伸張される方向への運動を知覚することを報告した⁷⁾。これに対して、両筋を同周波数で刺激した際には運動を知覚しなかったことを明らかにした⁷⁾。振動刺激の周波数と、振動刺激によって動員されるI a群線維の発火頻度は1対1の関係にある⁸⁾。すなわち、振動刺激の周波数が高くなると、I a群線維の発火頻度が高くなる。Gilhodesらは自らの研究結果から、動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの感覚信号に不均衡が生じた場合のみ、その差に依存して知覚する運動の速度が変化すると報告している⁷⁾。さらに、手関節の掌屈筋と背屈筋に様々な周波数で振動刺激を行った研究においても、肘関節と同様の現象が生じたことが報告されており、Gilhodesらの報告を支持している^{9, 10)}。これらの背景として、それぞれの筋紡錘からの求心性入力が、収束や発散を繰り返しながらシナプスを介して中枢へ入力する過程において、それぞれの求心性入力が統合されるような生理学的メカニズムが存在するものと考えられてきた¹¹⁾。

運動イメージとは、運動計画・実行の心的リハーサルである¹²⁾。実際の運動は伴わないものの、その運動をイメージすることによって、ワーキングメモリにおいて内的に運動を再現する能動的な過程とされている¹³⁾。運動イメージが身体に及ぼす生理学的な影響を検証した報告は、多数みられる¹⁴⁻¹⁷⁾。Yahagiらは、運動イメージ中のMEP振幅は安静時と比較して有意に増大することを報告した¹⁴⁾。その一方で、運動イメージ中のH反射振幅は安静時と比較して変化がなかったことから、運動イメージによるMEP振幅の増大は、脊髄レベルではなく、皮質レベルで生じている可能性があるとして結論づけた。同様に、運動イメージが脊髄よりも上位の中枢において、皮質脊髄路の興奮性を増大させるような影響を及ぼすことを支持する報告が示されてきた^{15, 16)}。Kitadaらは、振動刺激を用いて運動錯覚を生じさせ、同時に運動イメージを行った際に知覚する関節運動の角度が変化するこ

とを報告した¹⁸⁾。彼らの研究結果では、振動刺激によって手関節掌屈の運動錯覚が生じている対象者に、手関節掌屈の運動イメージをさせると、運動錯覚による手関節掌屈角度が増大した。さらに、手関節掌屈の運動錯覚が生じている対象者に、手関節背屈の運動イメージをさせると、運動錯覚による手関節掌屈角度が減少した。このことから、運動イメージを行うことによって、筋紡錘からの求心性入力の結果として生じる運動の角度が変化したということが示唆される。Thyrionらは、手関節が橈屈する運動錯覚が生じている対象者に、手関節が背屈する運動イメージを行わせると、それぞれの運動の方向と距離を合成したような運動を知覚することを報告した¹⁹⁾。これは、Kitadaらの報告を支持する結果であり、筋紡錘からの求心性入力によって知覚する運動の方向と距離は、運動イメージによって変化するということが示唆される。これらの結果が得られた背景として、運動イメージによる脳活動が、筋紡錘からの求心性入力を修飾するような生理学的なメカニズムが存在している可能性があると考えられる。しかし、これらの研究は、単一筋の筋紡錘のみから求心性入力が生じるような状況下で行われている。これに対して、動筋・拮抗筋関係にある筋からの筋紡錘から同時に求心性入力が生じる場合にも、運動イメージによる脳活動によってそれらの入力が修飾される可能性がある。しかしこれまでの研究からは、複数筋の筋紡錘から同時に求心性入力が生じているような状況下で運動イメージを行った場合に、知覚する運動がどのように変化するのは明らかにされていない (図1)。

2. 問題提起

動筋・拮抗筋関係にある筋への振動刺激を行った報告^{7, 9, 10)}により、運動感覚が生成される背景には、動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの求心性入力が統合されるようなメカニズムが存在する可能性が示唆される。さらに、振動刺激による運動錯覚と運動イメージを用いた報告などにより¹⁸⁻²⁰⁾、筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動が統合されるようなメカニズムが存在する可能性も示唆される。しかし、運動感覚が生成される過程において、このような機構が同時に働くような状況下でどのように運動を知覚するのかは明らかでない。すなわち、運動イメージ中に動筋・拮抗筋関係にある複数筋の筋紡錘からの求心性入力が同時に中枢に入力されることによって、どのように運動を知覚するのかは明らかでない。

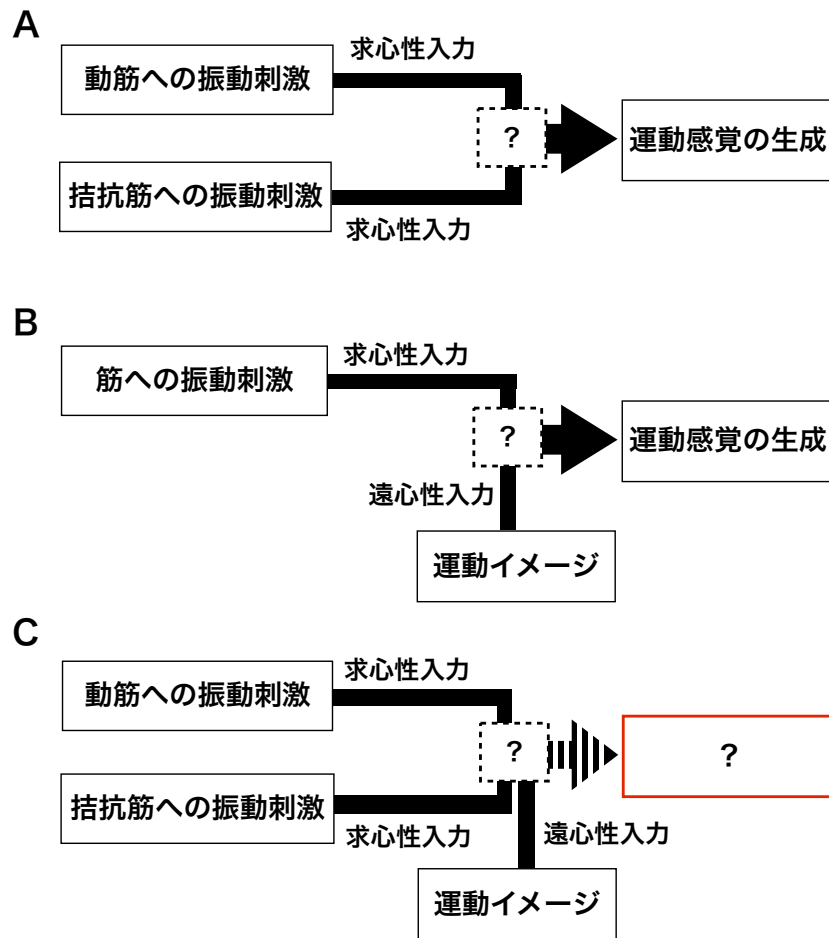


図1. 運動感覚の生成

- A: 振動刺激によって複数筋からの求心性入力と同時に生じると、それぞれ単独で行った時とは異なる運動を知覚する。
- B: 振動刺激による筋からの求心性入力と運動イメージによる脳活動が同時に生じて、それぞれ単独で行った時とは異なる運動を知覚する。
- C: 複数筋からの求心性入力と運動イメージによる脳活動が同時に生じた場合、どのように運動を知覚するのは明らかでない。

3. 目的

本研究の目的は、動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの求心性入力と運動イメージが同時に生じる状況下において、それらが統合されることによって知覚する運動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。

そこで実験 1 として、動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力統合され、運動錯覚を生じないような状況下において同時に運動イメージを行うと、運動知覚が生じるのかを明らかにした。さらに、動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力量が、知覚する運動に及ぼす影響を検証した。次に実験 2 として、動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力統合され、運動錯覚を生じるような状況下において同時に運動イメージを行うと、どのように運動を知覚するのかを明らかにした。さらに動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力の差が知覚する運動に及ぼす影響を検証した。

4. 仮説

1) 実験 1

動筋・拮抗筋を同周波数で刺激する運動錯覚を生じないような状況下においても、運動イメージを重畳することによって、①それに伴う生理学的な影響に付随し、運動錯覚の知覚が脊髄より上位の中枢において修飾されることで変化する、あるいは、②末梢からの求心性入力状況が変化するために運動を知覚する、という可能性があると考えられる。

2) 実験 2

実験 1 と同様に、振動刺激と運動イメージを同時に行かせた際には、運動イメージに伴う生理学的な影響に付随し、振動刺激単独で知覚する運動とは異なる運動知覚が生じると考える。

さらに、動筋・拮抗筋に対して同時に振動刺激を行った際には、その周波数の差に依存して知覚する運動の速度が変化することが明らかになっている⁹⁾。筋紡錘からの求心性入力による周波数依存的な運動の知覚における利得が、運動イメージによって変化するのであれば、運動イメージを行う条件と行わない条件で、知覚する運動の角速度の差が振動刺激の周波数によって異なる。これに対して、筋紡錘からの求心性入力による周波数依存的な運動の知覚における利得が運動イメージによって変化しないのであれば、運動イメージを行う条件と行わない条件で、知覚する運動の角速度の差が全ての条件で一定になると考える。すなわち、全ての周波数において、運動イメージの有無による角速度の変化が一定になると考える。

5. 研究意義

本研究は、運動感覚の生成機構を解明するための一助となる基礎的研究である。本研究の結果は、理学療法において感覚フィードバックや運動イメージを効果的に用いるための基礎的な知見になると考える。

6. キーワード

運動感覚, 運動イメージ, 筋紡錘, 振動刺激

7. 用語の定義

1) 運動感覚

運動感覚は、複数の感覚を包括する意味で使用される¹⁾。それは、①関節位置および四肢または体幹の動きなどの感覚、②努力感、筋の張力、重量そしてステイフネスなど筋の力に関連した感覚、③筋収縮のタイミングに関する感覚、④姿勢および身体図式の大きさの感覚、の4つである²⁾。

2) 運動感覚の生成

本研究では、筋紡錘からの求心性入力や運動イメージを行った結果として、最終的に運動を知覚することを運動感覚の生成と定義する。

3) 運動イメージ

運動イメージとは、運動計画・実行の心的リハーサルである¹²⁾。実際の運動は伴わないものの、その運動をイメージすることによって、ワーキングメモリにおいて内的に運動を再現する能動的な過程とされている¹³⁾。

4) 運動錯覚

運動錯覚とは、実際には筋収縮による運動が伴わないにも関わらず、あたかも運動をしているというような自覚的感覚が脳内で生じることである。運動イメージとは異なり、脳内で運動出力時と類似した動態が再現されているにも関わらず、随意的に運動出力のような努力はしない。腱への振動刺激⁵⁻¹⁰⁾や視覚刺激^{21, 22)}、皮膚への伸張刺激²³⁻²⁵⁾などで生じることが報告されている。

5) 振動刺激

筋や腱に対して、物理的に低周波数の振動を加える刺激である。振動刺激を行うと、主に筋紡錘のIa群線維が発火し、実際には関節運動が生じていないにも関わらず、あたかも刺激された筋が伸張した方向へ関節運動が生じたような運動を知覚する⁵⁾。

6) 微小神経電図

微小神経電図とは、針電極を神経に刺入することにより、神経活動を直接計測する方法である²⁶⁾。この方法は主にIa群線維や自律神経系の活動を記録する方法として使用されている。

7) 利得

電気回路における入力と出力の比を利得と呼ぶ²⁷⁾。本研究では、筋紡錘からの求心性入力が「入力」、その結果として知覚する運動の角速度が「出力」である。

II. 文献検討

1. 筋紡錘からの求心性入力

1-1. 筋紡錘とは

体性感覚とは、特殊感覚（視覚、聴覚など）や内蔵感覚（自律神経）以外の感覚神経がつかさどる身体組織、すなわち皮膚、粘膜、筋、腱、骨膜、関節囊などに存在する、さまざまな受容器の興奮が体性感覚神経によって中枢に伝えられて生じる感覚をいう²⁸⁾。体性感覚受容器は、皮膚、粘膜、筋、腱、関節などにあり、主として外部から与えられた刺激に応じ興奮するもの（皮膚受容器）と、筋、関節など深部にあつて通常、自己の運動によって刺激され興奮するもの（深部感覚受容器）とがある²⁸⁾。このうち、主として深部感覚受容器が運動感覚に寄与している。

深部感覚受容器の一つである筋紡錘は、四肢の動きの方向と速度の感知に貢献している。筋紡錘は特殊に分化した錘内筋線維、感覚神経、運動神経の三つの要素から構成されている²⁹⁾。このうち、錘内筋線維に終止する感覚線維として、太いIa群線維と細いII群線維がある。Ia群線維の終末は、核袋線維と核鎖線維の両者にらせん状にからみついて終わっている²⁹⁾。この終末を一次終末という。これに対してII群線維の終末は、二次終末といい、主として核鎖線維に終わる²⁹⁾。筋が伸張すると筋紡錘も引き伸ばされ、一次終末と二次終末が刺激されることによって感覚神経の求心性発射活動が生じる²⁹⁾。この求心性発射活動には静的反応と動的反応がある。静的反応とは、筋を伸張し保持した際に、一次終末と二次終末の発射頻度が増加する反応である²⁹⁾。この発射頻度は、筋の長さにはほぼ比例することから、静的反応は筋の長さの情報を伝えていることがわかる。これに対して、動的反応とは、筋が伸張されつつある間、一次終末の発射頻度が一過性に増大する反応である²⁹⁾。動的反応の大きさは、筋長が変化する速さにほぼ比例することから、動的反応は筋の長さが変わる速さの情報を伝えていることがわかる。以上より、一次終末と二次終末は筋の長さを求心性に伝えることができ、さらに一次終末は筋の長さが増加する速さを求心性に伝えることができるということがいえる。

1-2. 深部感覚の脊髄上行路

運動に伴う情報は、主として筋紡錘、腱受容器、関節の機械受容器で感知され、末梢神経は後根となって脊髄に入り、上行路を形成する。そして中継核を介すたびに、入力同士のあるいは皮質からの下行性の修飾をうける。この際、これらの深部感覚情報を上位中枢に伝える伝導路として、主に後索-内側毛帯路がある。

皮膚の触・圧覚受容器や筋紡錘、関節受容器からの太い有髄線維は、脊髄に入り、後角の細胞とシナプスを形成することなしに同側の後索を上行する。そして、脊髄と延髄の接合部に位置する後索核に達する²⁹⁾。後索核のニューロンから出る軸索は、腹側および内側延髄に湾曲しながら向かい、対側に交叉する³⁰⁾。その後、後索核の軸索は内側毛帯を上行し、視床の後外側腹側核にシナプス接続する。後

外側腹側核からの線維は、一次体性感覚野を経て、二次体性感覚野および頭頂連合野に投射する。

2. 運動錯覚

2-1. 運動錯覚が生じるメカニズム

運動錯覚とは、実際には筋収縮による運動が伴わないにも関わらず、あたかも運動をしているというような自覚的感覚が脳内で生じることである。四肢の運動錯覚は、振動刺激⁵⁻¹⁰⁾や視覚刺激^{21, 22)}、皮膚への伸張刺激²³⁻²⁵⁾などによってもたらされ、現在までにも多岐にわたる報告がみられる。

a. 筋紡錘からの求心性入力による運動錯覚

Goodwin らは、右上腕二頭筋腱に適切な周波数で振動刺激を行うことによって、実際の運動を伴わずに肘関節が伸展しているという運動錯覚を生じさせた⁵⁾ (図 2)。筋や腱に振動刺激を行うと、主に筋紡錘の Ia 群線維が発火し、実際には関節運動が生じていないにも関わらず、あたかも刺激された筋が伸張した方向へ関節運動が生じたような運動を知覚する⁶⁾。筋や腱への振動刺激を用いて運動錯覚を生じさせた報告は多数みられ、肘関節のみならず、手関節^{9, 10, 20, 31-34)}や足関節^{35, 36)}、肩関節³⁷⁾などでも同様の運動錯覚を生じることが明らかになっている。このことは、筋紡錘からの求心性入力が運動感覚の生成に寄与していることを示す。

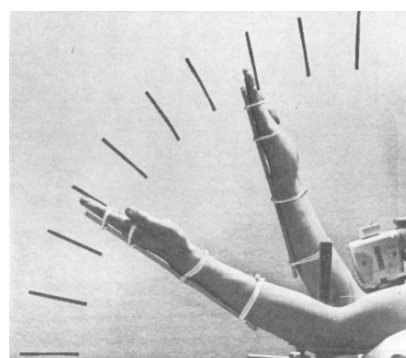


図 2. 上腕二頭筋への振動刺激で生じる運動錯覚⁵⁾

b. 皮膚入力による運動錯覚

Collins らは、手指 MP 関節周囲の手背部の皮膚を一定方向に伸張することによって、MP 関節が屈曲方向に運動しているという錯覚を生じさせることに成功した^{23, 24)} (図 3)。また、MP 関節のみならず、手指の PIP 関節や肘関節、さらに膝関節においても皮膚の伸張による運動錯覚が生じることは明らかにされており、MP 関節にのみ特異的に生じる現象ではないということが示された²⁵⁾。皮膚の伸張による運動錯覚は、関節周囲の皮膚にテープを貼付し、そのテープに紐をつけて一定方向に引っ張ることによって生じさせており、運動錯覚の程度は伸張する強度や方向に依存することがわかっている。このことから、筋紡錘からの求心性入力と同様に皮膚入力も運動感覚の生成に寄与しているということがいえる。

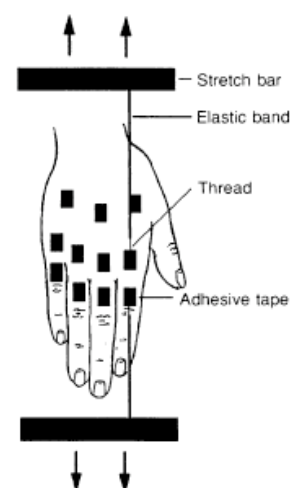


図 3. 皮膚の伸張で生じる運動錯覚²³⁾

c. 視覚入力による運動錯覚

Kaneko らは、被験者の前腕上にパソコンの液晶モニターを設置し、他者の示指が内外転運動を反復している動画を映した。そして、モニターに映し出された手の大きさや位置を調整することによって、被験者が一人称的に運動しているような錯覚を引き起こすことができると報告した²¹⁾ (図 3)。そして、第一背側骨間筋 (以下, FDI) から運動誘発電位 (以下, MEP) を測定したところ、安静時と比較して、動画の示指が外転するタイミングで MEP の振幅が増大することを示した。これに対し、示指が内転するタイミングや、小指が運動する動画を呈示しても振幅は変化しなかった。このことから、視覚入力による運動錯覚は体部位と運動方向に依存性を持つことが示唆された。さらに、Aoyama らは同様の手法を用いて、足関節底屈・背屈の運動錯覚を生じさせることに成功した²²⁾。以上より、対象とする身体部位によって効果の有無に違いはあるが、視覚入力を用いても運動感覚が生成されることが明らかとなった。



図 4. 視覚入力で生じる運動錯覚²¹⁾

2-2. 運動錯覚により賦活する脳部位

Naito らは、fMRI を用いて、振動刺激による運動錯覚を体験している際の脳活動を測定した^{33, 38, 39)}。その結果、振動刺激による運動錯覚が生じている際には、体性感覚野や頭頂連合野、小脳が賦活することが明らかとなった。さらに、実際の運動や被験者の運動意図がないにも関わらず、一次運動野や背側運動前野、帯状回運動皮質、補足運動野、大脳基底核などの運動領野も活動することが示された。また、一次運動野や背側運動前野の活動は、運動錯覚の自覚的強度に依存して変化することも明らかとなった^{10, 33, 40)}。以上より、筋紡錘からの求心性入力の処理には、体性感覚野のみならず、頭頂連合野や、一次運動野を中心とする運動領野の活動も関与するということがいえる。

2-3. 振動刺激の周波数と運動錯覚強度の関係

Roll らは微小神経電図法を用いた研究により、筋や腱に振動刺激を行うと筋紡錘の I a 群線維が発火することを示した⁶⁾。I a 群線維は、筋が伸張し続けることにより発火する感覚神経である²⁸⁾。そのため、I a 群線維が発火することで筋が伸張されていることを示す入力が生じ、関節が動いているように知覚する。過去の研究から、振動刺激の周波数と I a 群線維の発火頻度は正の比例関係にあることが示されており、I a 群線維の発火頻度の増加に伴い、運動錯覚の自覚的強度が増大することが報告されている (図 5)。図 5 は振動刺激の周波数を 10Hz ずつ増大させていった場合の I a 群線維の発火頻度を示している。振動刺激周波数と I a 群線維の発火頻度は 1 対 1 の関係にあり、周波数の増大に伴い、I a 群線維の発火

頻度が増大していることがわかる。

多段階の振動刺激周波数を用い、その周波数の差異が運動知覚に及ぼす影響を検証した報告は多数ある^{6, 9, 34, 38}。それらの報告で用いられている最小の周波数差異は 10Hz である。振動刺激周波数が 10Hz 異なると、被験者はそれらの振動刺激によって生じる運動を、異なる角速度の運動として弁別することができる。しかし、10Hz 未満の振動刺激周波数の差異を用いた報告はない。そのため、周波数の差異が 10Hz 未満の場合、運動知覚を弁別することができるか否かは不明である。ただし、少なくとも 10Hz の差異があれば異なる角速度の運動として認識することができるため、現時点では振動刺激によって生じる運動知覚は 10Hz の精度をもっているということがいえる。Roll らは角速度を指標として、振動刺激の周波数が 60~80Hz の時に運動錯覚の自覚的強度が最大となると報告した⁶。これに対して、Naito らは 70~80Hz で筋腱を刺激したとき、運動錯覚の自覚的強度が最大となると報告した³⁸。以上のことから、70~80Hz で筋腱に振動刺激を行うと、最も鮮明な運動錯覚を生じさせることができるといえる。

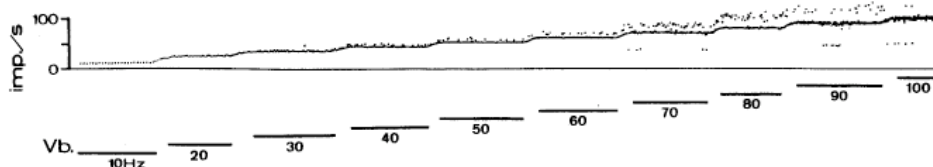


図 5. 振動刺激によって発火する Ia 群線維⁶⁾

2-4. 運動錯覚強度の心理物理的指標

心理物理的手法を用いた研究では、筋や腱への振動刺激によって生じる運動錯覚を客観的な指標で示したものはない。そのため、これらの研究では運動錯覚が生じていたかを定量的に評価する手法として、被験者の主観的な指標が用いられている。Goodwin らは知覚した関節運動を非刺激側で再現させ、その際の関節角度を記録した⁵。これに対し、Roll らの研究グループでは、知覚した関節運動を非刺激側で再現させた際の角速度を指標として用いている⁶⁻¹⁰。

振動刺激による運動錯覚は、筋紡錘の Ia 群線維が発火することによって生じる⁶。II 群線維が筋長の変化にのみ感受性があるのに対し、Ia 群線維は筋が伸張される速度への感受性が

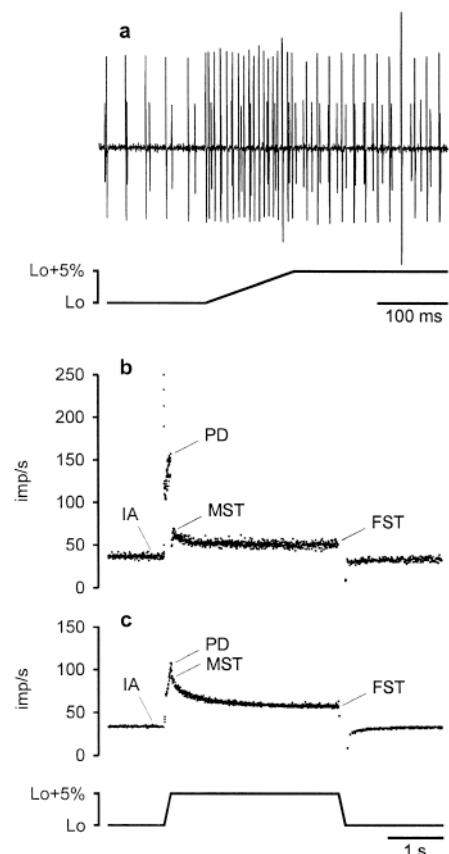


図 6. 動的応答と静的応答⁴¹⁾

高い²⁸⁾。そのため、筋が伸張されている最中には I a 群線維の発火頻度も増大し、筋が一定の長さを維持している最中には I a 群線維の発火頻度も一定となる²⁸⁾ (図 6)。図 6 は筋を伸張している最中の一次終末と二次終末の発射様式である。a の長い線が一次終末、短い線が二次終末の発射様式である。b は一次終末、c は二次終末の発火頻度を示す。最下部のグラフは筋長の変化である。筋が伸張されている最中には、一次終末の発火頻度が増大していることがわかる。また、筋がより速く伸張されている場合には、それに依存して I a 群線維の発火頻度も増大する。つまり、I a 群線維の発火頻度は筋長が変化する速度を反映しているということがいえる。

以上の理由から、振動刺激によって I a 群線維の発火頻度が増大した場合、結果として筋がより速く伸張されているということを知覚する。つまり、I a 群線維の入力状況を心理物理的指標で表すと、関節運動の角速度を用いることができる。そのため、本研究では振動刺激による運動錯覚の強度を評価する指標として、知覚した運動の角速度を採用した。

3. 運動イメージ

3-1. 運動イメージとは

心理学的な領域において、運動イメージとは、運動計画・実行の心的リハーサルである¹²⁾。実際の運動は伴わないものの、その運動をイメージすることによって、ワーキングメモリにおいて内的に運動を再現する能動的な過程とされている¹³⁾。運動イメージは、外的イメージと内的イメージに分類される⁴²⁾。外的イメージは、自身が運動している光景を第三者の立場から観察するような視覚的イメージであり、三人称的イメージともいわれる。それに対して、内的イメージとは、自身が運動を行っている際の体性感覚を再現するような筋感覚的イメージであり、一人称的イメージともいわれる。

3-2. 運動イメージによる生理学的影響

運動イメージが身体に及ぼす生理学的な影響を検証した報告は、多数みられる¹⁴⁻¹⁷⁾。Yahagi らは、示指外転運動の運動イメージ中に FDI から MEP と H 反射を記録した¹⁴⁾。その結果、運動イメージ中の MEP 振幅は安静時と比較して有意に増大することを報告した。その一方で、運動イメージ中の H 反射振幅は安静時と比較して変化がなかったことから、運動イメージによる MEP 振幅の増大は、脊髄レベルではなく、皮質レベルで生じている可能性があるとして結論づけた。Kasai らも、手関節掌屈運動の運動イメージ中に FCR から MEP と H 反射を記録し、Yahagi らの報告を支持する結果を示した¹⁵⁾。そしてさらに、手関節掌屈運動中に拮抗筋である ECR の MEP 振幅も増大することを報告し、運動イメージは動筋及び拮抗筋における大脳皮質運動野に対して促通作用を有することを示唆した。また、Kaneko らは、ギプス固定患者を対象として、ギプス除去直後には運動イメージ中に記録した MEP 振幅が減少するが、H 反射振幅は変化しないことを明らかにした¹⁶⁾。これらの報告から、運動イメージは大脳皮質運動野の興奮性と密接な

関係があるということについては、一定の見解を得られている。

しかし近年、Aoyama らは運動イメージ中の H 反射と伸張反射を測定し、H 反射振幅は変化がないが、伸張反射振幅は安静時と比較して有意に増大したことを報告した¹⁷⁾。この結果は、運動イメージによって γ 運動ニューロンの興奮性が選択的に向上し、筋紡錘の感度変化が生じる可能性を示すものである。つまり、運動イメージによる生理学的影響は皮質レベルのみならず、脊髄反射弓にも及ぶことが示唆される。このことから、本研究においては、運動イメージを行うことによって筋紡錘の感度変化が生じることで、振動刺激に伴う一次終末からの入力状況が変化する可能性があると考ええる。

3-3. 運動イメージにより賦活する脳部位

運動イメージ中の脳活動に関する報告は多数みられるが、運動実行時に活動する運動関連領域が運動イメージ想起中にも同様に活動することが確認されており、一定のコンセンサスが得られている⁴³⁻⁴⁷⁾。これらの先駆的な研究として、Roland らは母指と残りの 4 指との順序だった対立系列運動時とその運動イメージ時における脳活動を測定した⁴³⁾。その結果、実際に運動を行った時と同様に、運動イメージを行った時も補足運動野と運動前野が賦活することを報告した。これ以降、fMRI などを用いた研究が報告され、運動イメージ時には、高次運動野のみならず一次運動野も活動することが明らかとなった^{44, 45)}。そして、運動イメージ中には、一次運動野、補足運動野、運動前野、帯状回、頭頂葉といった部位が賦活することが示されている。

3-4. 利き手と非利き手の比較

利き手と非利き手の運動イメージによる効果を比較した研究として、Yahagi らは右利きの対象者に対して、左右の示指外転運動をイメージさせ、それぞれの運動イメージを行った際に左右の FDI から MEP 振幅を記録した¹⁴⁾。その結果、右示指外転の運動イメージを行った場合のほうが、左示指外転の運動イメージを行った場合よりも、イメージした筋から得られた MEP 振幅が増大した。このことから、利き手の運動と非利き手の運動では、運動イメージを行った際に皮質脊髄路の興奮性に及ぼす影響が異なることが示された。

3-5. 背景筋電図の影響

運動イメージは、実際の運動を伴わずに内的に運動を再現する行為であり、運動イメージ中は筋紡錘からの求心性入力が生じていない。しかし、運動イメージ中に筋収縮が生じると、それに伴い筋紡錘からの求心性入力が生じてしまう。そのため、本研究においては、筋収縮による筋紡錘からの求心性入力と振動刺激による筋紡錘からの求心性入力を区別することができなくなる可能性がある。以上の理由から、本研究においては、事前に筋収縮を伴わずに運動イメージができるようになるまで十分に練習を行わせる必要があると考ええる。

3-6. 心理物理実験において運動イメージを用いる妥当性

心理物理的手法を用いた研究で運動イメージを実験課題として用いる場合、課題中に運動イメージを行っていたかを確認することは困難である。これは、運動イメージの可視化は困難であり、現実運動イメージを行なっているか否かは被験者の主観的な感覚に依存するためである。しかし、運動イメージは心理物理的手法を用いた研究においても実験手法として用いられている。それらの研究では、事前に運動イメージを反復して練習させた上で実験を行なっている^{19, 21, 22)}。具体的な方法は、イメージする運動に関わる筋から筋電図を記録し、その筋活動の有無を聴覚あるいは視覚フィードバックしながら運動イメージを反復させるというものである。これを、被験者が運動イメージをできるようになったと自覚できるまで繰り返す。本研究においても、過去の研究^{21, 22)}に基づき、短橈側手根伸筋と橈側手根屈筋に電極を貼付して、20インチのモニターにオンラインで筋電図を表示しながら運動イメージの練習を行わせた。これにより、筋収縮なしに運動イメージを行なっていることを確認させた。そして、運動イメージができていると被験者が自覚できるようになったことを確認した上で実験を行なった。その結果、振動刺激中に運動イメージを行なった場合と行わなかった場合では異なる運動を知覚しており、それは過去の研究とも矛盾しない結果であった。さらに、過去の研究では行なわれていないが、本研究においては実験課題中にイメージした運動を課題後に再現させ、運動イメージを行なっていたかについても確認した。その上で、被験者がイメージした運動を再現できなかった試技は除外している。以上のことから、本研究においても実験課題中に被験者は運動イメージを行っていたものと考えられる。

4. 運動感覚

4-1. 運動感覚とは

運動感覚は、複数の感覚を包括する意味で使用される¹⁾。それは、①関節位置および四肢または体幹の動きなどの感覚、②努力感、筋の張力、重量そしてステイフネスなど筋の力に関連した感覚、③筋収縮のタイミングに関する感覚、④姿勢および身体図式の大きさの感覚、の4つである²⁾。運動感覚の生成には、深部感覚受容器や皮膚受容器からの求心性入力だけではなく、中枢からの遠心性入力も寄与している^{3, 4)}。四肢の動きの感覚は狭義の運動感覚であり、これは何らかの動きの要素がある時のみ用いる。これに対して、関節の位置など静止した状態に関わる場合には、位置覚を用いる。

4-2. 感覚入力の統合

a. 筋紡錘からの求心性入力の統合

Gilhodes らは、左上腕二頭筋と上腕三頭筋に同周波数あるいは異なる周波数で振動刺激を行い、その際に知覚した運動を反対側で同時に再現させた⁷⁾ (図7)。図7は、振動刺激中に知覚した運動の角度変化を示している。両筋を同周波数で刺激した結果、再現した運動の角速度は0から有意に変化しなかった。これに対

して、両筋に異なる周波数で振動刺激をした際には、より高い周波数で刺激された筋が伸張される方向への運動の角速度が増大した。振動刺激の周波数と、振動刺激によって動員される Ia 群線維の発火頻度は 1 対 1 の関係にある⁶⁾。すなわち、振動刺激の周波数が高くなると、Ia 群線維の発火頻度が高くなる。Gilhodes らは自らの研究結果から、動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの感覚信号に不均衡が生じた場合のみ、その差に依存して知覚する運動の速度が変化すると報告している⁷⁾。さらに、手関節の掌屈筋と背屈筋に様々な周波数で振動刺激を行った研究においても、肘関節と同様の現象が生じたことが報告されており、Gilhodes らの報告を支持している^{9,10)}。

これらの背景には、拮抗関係にある筋からの求心性入力収束と発散を繰り返しながらシナプスを介し、最終的にあたかも加算や減算といった演算処理がなされたかのような関係で統合され、運動を知覚するような何らかの生理学的なメカニズムが存在していると考えられる。つまり、動筋・拮抗筋関係にある筋を異なる周波数で振動刺激した際には、両筋の筋紡錘からの求心性入力複数のシナプスを介し、それらの求心性入力統合されるような機構が働いたため、結果としてより高い周波数で刺激された筋の筋紡錘からの求心性入力に由来するような運動錯覚が生じた可能性があると考えられる。また、両筋を同周波数で刺激した際には、両筋の筋紡錘からの求心性入力統合され、最終的に運動として意識にのぼらない閾下での神経活動となったため、結果として運動錯覚が生じなかったと考えられる。

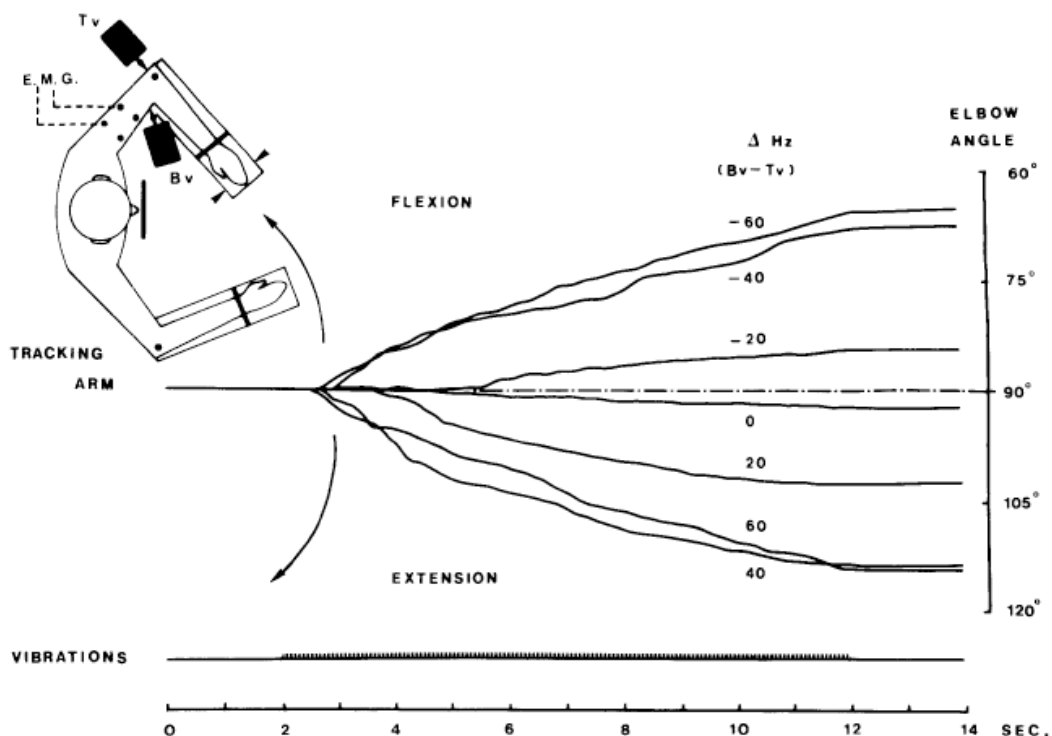


図 7. 動筋・拮抗筋への振動刺激によって生じる運動錯覚⁷⁾

b. 異なる感覚モダリティの統合

Collins らは、手指 MP 関節周囲の手背部の皮膚を一定方向に伸張することによって、MP 関節が屈曲方向に運動しているという錯覚を生じさせた^{23, 24)}。さらに、MP 関節より近位部で手指の伸筋腱を振動刺激することによっても、MP 関節が屈曲方向へ運動している錯覚は生じるが、振動刺激と皮膚の伸張を同時に行うことによって、この運動錯覚がより鮮明に生じることを明らかにした²³⁾。つまり、同方向への運動を知覚するような皮膚入力と、振動刺激を用いた筋紡錘からの求心性入力を同時に行ったことによって、結果として運動錯覚の強度が増大したということが示唆される。また、Kavounoudias らは、様々な速度で回転するディスクを用いた皮膚入力と振動刺激を用いた筋紡錘からの求心性入力を同時に行った際に知覚する運動を報告した¹¹⁾。その結果、それぞれ単独で刺激を行った時に知覚する運動とは異なる速度の運動を知覚したことを示した。さらに Blanchard らは、同様の手法を用い、ディスクの回転する速さが遅いほうが、振動刺激を同時に行う時と行わない時に知覚した運動速度の差が大きかったということを明らかにした⁴⁸⁾。つまり、一定の周波数で振動刺激を行っても、ディスクの回転する速さによって、知覚する運動が異なるということがいえる。

この背景として、皮膚入力と筋紡錘からの求心性入力のように、複数の異なる感覚入力が同時に生じた際には、それらの感覚モダリティが統合されるような生理学的なメカニズムが存在する可能性がある^{と示唆される}。そして、それぞれの受容器からの感覚信号の量によって、運動の知覚における利得が異なる可能性がある^{と考える}。

4-3. 筋紡錘からの求心性入力と運動イメージの統合

筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動の統合について、Kitada らは、運動イメージが筋紡錘からの求心性入力によって生成された運動感覚に影響を及ぼすのかを検討した¹⁸⁾。その結果、振動刺激によって手関節掌屈の運動錯覚が生じている対象者に、手関節掌屈の運動イメージをさせると、運動錯覚による手関節掌屈角度が増大した。さらに、手関節掌屈の運動錯覚が生じている際に手関節伸展の運動イメージをさせると、運動錯覚による手関節掌屈角度が減少した。このことから、運動イメージを行うことで、筋紡錘からの求心性入力の結果として生じる運動の知覚が変化したということが示唆される。さらに、

Thyrior らは振動刺激を用いて手関節が橈屈・尺屈する運動錯覚を生じさせ、適当にタイミングで手関節が掌背屈する運動イメージを行わせた¹⁹⁾。図 8 は、黒の点線が振動刺激による運動錯覚、灰色の点線が運動イメージ、黒の実線が結果として知覚した運動を示している。Thyrior らの研究では、被験者は結果として円を描くような運動を知覚した。このことから、筋紡錘からの求心性入力と運動イ

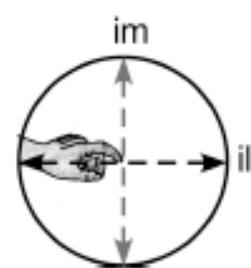


図 8. 振動刺激と運動イメージによって生じる運動知覚¹⁹⁾

メージを同時に行うことで、どちらかの入力が増大もしくは減少するような運動の大きさのみならず、運動錯覚と運動イメージの両者とも全く異なる方向と距離を持った運動を知覚することが明らかとなった。これは、Kitada らの報告を支持する結果である。

以上より、これらの研究結果の背景として、運動イメージ中に筋紡錘からの求心性入力が中枢に投射されることで、運動イメージによる脳活動と統合するような生理学的なメカニズムが存在している可能性があると考ええる。

4-4. 脳機能イメージングを用いた研究

運動錯覚中には体性感覚野、小脳、一次運動野、背側運動前野、帯状回運動皮質、補足運動野、大脳基底核が活動することが報告されている^{33, 38-40}。これに対して、運動イメージ中には、一次運動野、補足運動野、背側運動前野、帯状回運動皮質、頭頂間溝、小脳といった部位が活動することが報告されている⁴³⁻⁴⁷。脳機能イメージングを用いた研究において、運動錯覚中に運動イメージを行わせ、脳活動を測定した報告はない。

これらの報告を考え合わせると、運動イメージと運動錯覚では、背側運動前野、帯状回運動皮質、補足運動野、小脳が共通して賦活されるということが示唆される。このことから、筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動が統合される部位はこれらの領域で起こっている可能性があると考ええる。このことも、筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動が統合される可能性を支持する結果であると考ええる。

Ⅲ. 方法論

1. 対象

1-1. 取込基準

実験 1 の対象者は、健康な右利きの成人 20 名とし、そのうち 14 名が実験 2 に参加した（男性 15 名，女性 5 名，平均年齢 23.6 ± 4.7 歳，平均身長 170.7 ± 6.5 cm，平均体重 65.7 ± 6.8 kg）。測定対象は左上肢に統一した。

本研究では、運動知覚強度の指標として、知覚した運動の角速度を用いているが、この角速度という指標は被験者の内観を運動で再現させたものであり、予備知識に基づいて操作される可能性は否定できない。そこで、本研究においては、振動刺激による運動知覚を体験したことがない被験者を採用し、かつ振動刺激によって生じることが予想される運動知覚の詳細については、事前に説明しなかった。これにより、被験者が知覚した運動を再現する際、先入観によって再現する運動が誘導されることを防ぐことができた。その上で、事前に振動刺激による運動錯覚が生じるかを確認し、運動錯覚が鮮明に生じる者、運動イメージを行うことができる者を選択した。

1-2. 除外基準

除外基準は、神経学的徴候を有する者、左上肢に整形学的疾患を有する者もしくは整形学的疾患の既往により運動制限をきたす者、その他体調不良を有する者とした。

また、得られたデータが全体の平均値から $3SD$ 以上外れた者は、データの信頼性を高める目的で研究対象から除外した。

2. 実験概要

本研究は横断的研究である。実験課題として、手関節掌屈筋と背屈筋に様々な周波数で振動刺激を行い、同時に手関節が掌屈する運動イメージを行わせた。そして、刺激中に知覚した運動を刺激側で再現させた。その後、運動知覚強度の指標として再現した運動の角速度を算出し、条件間で比較した。

2-1. 実験 1

動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力統合され、運動錯覚を生じないような状況下において、筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動は統合されるのか、さらに統合された場合どのような運動を知覚するのかを明らかにした。そのため、手関節掌屈筋と背屈筋に同周波数で振動刺激を行い、同時に手関節が掌屈する運動イメージを行わせた。そして、運動イメージを行う条件と行わない条件で知覚した運動の角速度を比較した。

2-2. 実験 2

動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力統合され、運動錯覚を生じるような

状況下において、筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動は統合されるのか、さらに統合された場合どのような運動を知覚するのかを明らかにした。そのため、手関節掌屈筋と背屈筋に多段階の周波数で振動刺激を行い、同時に手関節が掌屈する運動イメージを行わせた。そして、運動イメージを行う条件と行わない条件で知覚した運動の速度を比較した。

3. 実験環境

測定肢位は、安楽な椅子座位とした。左手関節は掌背屈中間位とし、自作の台（以下、手置き台）に第 5 中手骨が接地するようにリラックスした状態で前腕を置いた（図 9-A）。被験者の目の前にモニターを設置し、左手関節の位置をリアルタイムに表示した。各条件において、被験者には手関節角度を中間位に合わせるよう教示し、その後閉眼させ、振動刺激を実施した。刺激中、被験者には自身の左手関節の運動に知覚の焦点をあわせるよう教示した。

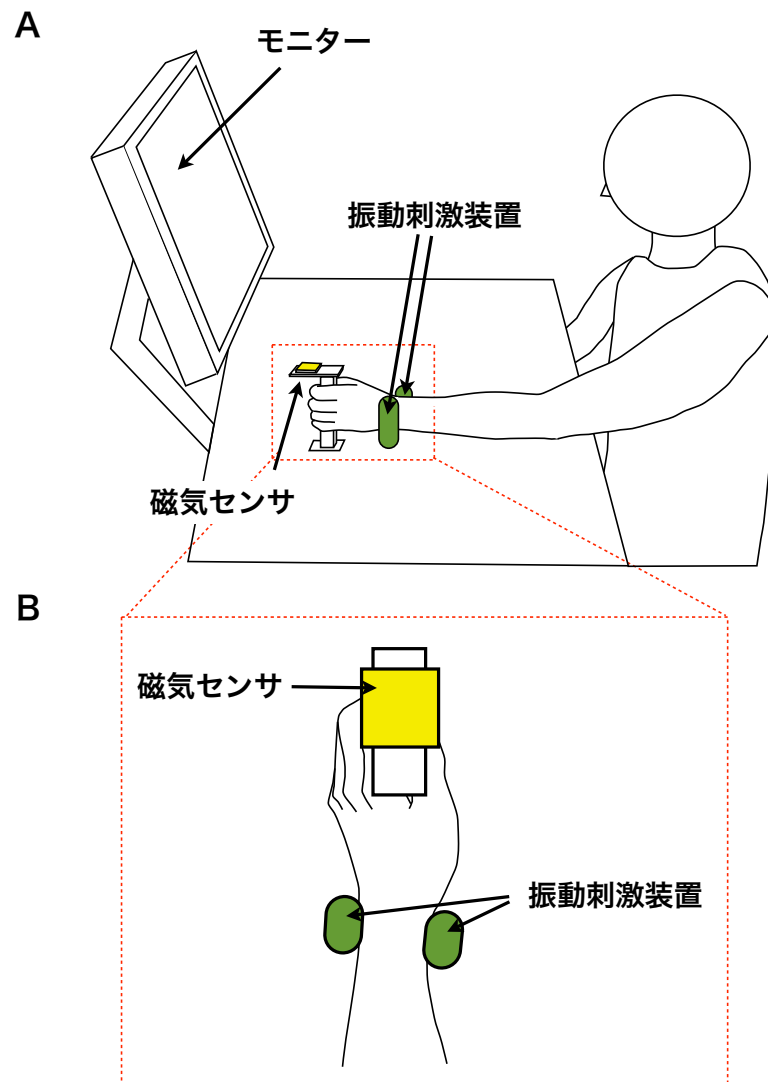


図9. 実験環境

実験1, 2における実験環境の模式図である。

- A: 測定肢位を示す。被験者の目の前にモニターを設置し、左手関節の位置をリアルタイムに表示した。
- B: 左手関節を上方からみた模式図である。刺激端子は、左手関節掌屈筋と背屈筋を刺激するよう、前腕遠位部の掌側と背側に固定した。磁気センサは、手置き台に固定することで、手置き台の回転角度を記録した。

4. 振動刺激

筋紡錘からの求心性入力を生じさせるために、振動刺激装置 (VB115, TECHNO CONCEPT, France) を用いた。刺激端子は、長さ7cm、幅3.5cmのものを使用し、左手関節掌屈筋と背屈筋を刺激するよう、前腕遠位部の掌側と背側に固定した (図9-B)。手関節掌屈筋に振動刺激を行うと、被験者は自身の手関節が背屈しているような運動錯覚を生じる。これに対して、手関節背屈筋に振動刺激を行うと、手関節が掌屈しているような運動錯覚を生じる。過去の研究⁷⁾から、振動刺激の周波数 (1~100Hz) と I a群線維の発火頻度は正の比例関係にあることが示されており、I a群線維の発火頻度の増加に伴い、運動錯覚の自覚的強度が増大することが明らかになっている。そのため、事前に40Hz, 60Hz, 80Hz, 100Hzで両筋にそれぞれ振動刺激を行い、周波数に依存して運動錯覚の強度が増大することを確認した。さらに、刺激中に知覚した運動を刺激後に同側で再現させ、実験1と実験2における角速度データを被験者内で比較することによって、データの再現性を確認した。

振動刺激装置はパーソナルコンピューターに接続し、刺激周波数と刺激開始のタイミングを付属のソフトウェア (Pivot VB 115, TECHNO CONCEPT, France) で制御した。振動刺激の周波数は40~100Hzとし、周波数に関わらず、パルス幅は5ms、振動幅は0.25mmとなるよう設定した。刺激時間は、全ての条件で3秒間とし、両筋への刺激開始のタイミングが一致するようにした (図10)。

5. 運動イメージ

イメージさせる運動は、手関節が掌屈する運動とし、2パターン設定した。

1つ目のパターンでは、手関節背屈筋へ60Hzで振動刺激を行った時に知覚する運動をイメージさせた (以下、MI-60Hz)。まず、左手関節背屈筋に60Hzで振動刺激を3秒間行った。その後、刺激中に知覚した運動を刺激側で再現させた。その際、被験者には知覚した運動の速度と角度に留意して運動を再現するよう教示した。その後、再現した運動を実行しているようなイメージを行わせた。

2つ目のパターンでは、左手関節が3秒間で中間位から最大掌屈位まで掌屈する運動のイメージをさせた (以下、MI-max)。まず、一定の速度で手関節中間位から最大掌屈位まで掌屈できるようになるまで練習させた。その際、目の前に設置したモニターに手関節角度をリアルタイムに表示させ、自身の手関節角度を確認できるようにした。また、60BPMのメトロノームに合わせ、3拍で運動を行うよう教示した。その後、練習した運動を実行しているようなイメージを行わせた。

運動イメージを開始するタイミングは、音刺激で制御した。振動刺激が開始する150ms前に、パーソナルコンピューターからブザーによる音刺激を呈示し、被験者にはブザーが鳴ったらすぐに運動イメージを開始するよう教示した (図10)。

また、MI-60Hz, MI-maxともに、筋収縮を伴わずに運動イメージができるようになるまで、事前に筋電図を視覚フィードバックしながら練習を行わせた。筋電図の記録には、Neuropack (MEB2200, 日本光電, 東京) を使用した。電極は表面皿電極を使用し、短橈側手根伸筋と橈側手根屈筋に電極間距離18mmにて貼

付した。アース電極は、左肘関節に設けた。さらに、事前に皮膚の電気抵抗を減少させる目的で、皮膚を消毒用アルコールおよび研磨剤を用いて処理した。導出された筋活動は、増幅後にフィルター（5.3Hz～1000Hz）をかけた。20 インチのモニターにオンラインで筋電図を表示し、二人以上の検者によって運動イメージ中の 3 秒間に明らかな背景筋電図が混入していないか確認した。50 μ V 以上の筋電図が 5 回連続で入らなくなるまで練習を行わせた。

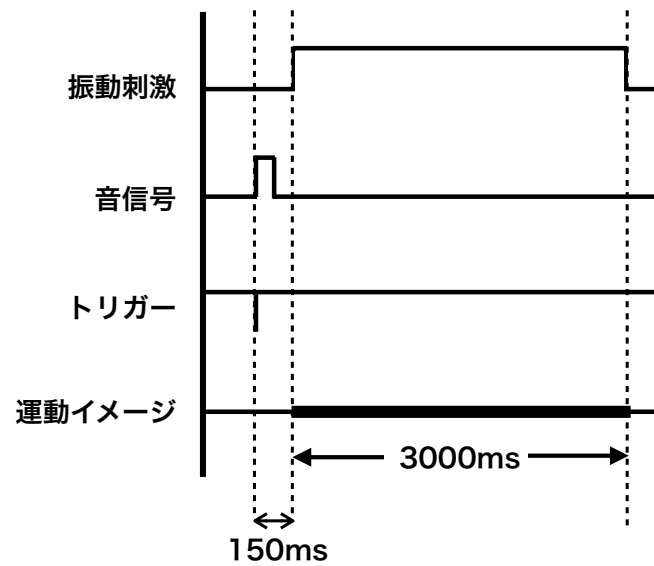


図 10. プロトコル

実験1, 2のプロトコルを示す。パーソナルコンピューターからトリガーを出力し、音信号を呈示した。そして、その150ms後に振動刺激と筋電図の記録が開始されるように設定した。被験者には、音信号が鳴ったらすぐに運動イメージを開始するように教示することで、振動刺激と運動イメージの開始するタイミングを同期させた。

6. 実験条件

本実験では、実験 1, 2 をそれぞれ別日に実施した。

実験 1 では、手関節掌屈筋と背屈筋に同周波数で振動刺激を行い、同時に手関節が掌屈する運動をイメージさせた。振動刺激の周波数は、40Hz, 60Hz, 80Hz, 100Hz を用い、両筋での周波数の差が 0Hz になるよう 4 条件を設定した (掌屈筋 vs. 背屈筋: 40Hz vs. 40Hz, 60Hz vs. 60Hz, 80Hz vs. 80Hz, 100Hz vs. 100Hz)。振動刺激の周波数と、振動刺激によって動員される Ia 群線維の発火頻度は 1 対 1 の関係にある。そしてそれに伴い、振動刺激によって生じる運動錯覚の主観的な強度も、周波数と正の比例関係にある⁷⁾。そこで本研究では、複数の周波数条件を設定し、両筋に同周波数で刺激を行った。このことにより、動筋・拮抗筋からの求心性入力の差が一定の状態、合計量が多段階となるような求心性入力状況を設定することができる。また、運動イメージとして、MI-60Hz と MI-max, さらに運動イメージを行わない条件 (以下, MI-none) を合わせて、合計 3 条件設定した。以上より、振動刺激 4 条件と運動イメージ 3 条件を組み合わせ、合計 12 条件設定した (表 1-A)。各条件につき 3 試技ずつ行い、順番はランダムとした。

実験 2 では、手関節掌屈筋と背屈筋に対して同時に多段階の周波数で振動刺激を行う条件 (以下, 両側刺激) と、それぞれ片側ずつ刺激する条件 (以下, 片側刺激) を設定し、両条件とも同時に手関節が掌屈する運動イメージを行わせた。片側ずつ刺激する条件では、40Hz と 70Hz の振動刺激周波数を用い、手関節掌屈筋と背屈筋をそれぞれ単独で刺激するよう 4 条件を設定した (掌屈筋 vs. 背屈筋: 40Hz vs. None; -40Hz, 70Hz vs. None; -70Hz, None vs. 40Hz; 40Hz, None vs. 70Hz: 70Hz)。動筋・拮抗筋を同時に刺激する条件では、95Hz と 55Hz, 110Hz と 40Hz の振動刺激周波数の組み合わせを用い、動筋・拮抗筋への振動刺激周波数の差が 40Hz と 70Hz となるよう 4 条件を設定した (掌屈筋 vs. 背屈筋: 95Hz vs. 55Hz; Δ -40Hz, 110Hz vs. 40Hz; Δ -70Hz, 55Hz vs. 95Hz; Δ 40Hz, 40Hz vs. 110Hz: Δ 70Hz)。このことにより、動筋・拮抗筋からの求心性入力の差と、それぞれ片側ずつ刺激した場合に生じる求心性入力量を一致させることができる。また、全ての振動刺激条件において、運動イメージとして MI-max と MI-none の 2 条件設定した。以上より、振動刺激 8 条件と運動イメージ 2 条件を組み合わせ、合計 16 条件設定した (表 1-B)。各条件につき 3 試技ずつ行い、順番はランダムとした。

条件	振動刺激周波数		運動イメージ
	掌屈筋刺激	背屈筋刺激	
1	40Hz	40Hz	MI-60Hz
2	60Hz	60Hz	
3	80Hz	80Hz	
4	100Hz	100Hz	
5	40Hz	40Hz	MI-max
6	60Hz	60Hz	
7	80Hz	80Hz	
8	100Hz	100Hz	
9	40Hz	40Hz	MI-none
10	60Hz	60Hz	
11	80Hz	80Hz	
12	100Hz	100Hz	

表 1-A: 実験条件 (実験 1)

実験 1 における実験条件を示す。振動刺激 4 条件と運動イメージ 3 条件を組み合わせ、合計 12 条件設定した。

条件	振動刺激周波数			運動イメージ
	掌屈筋刺激	背屈筋刺激	掌屈筋-背屈筋	
1	40Hz	-	40Hz	MI-max
2	70Hz	-	70Hz	
3	-	40Hz	-40Hz	
4	-	70Hz	-70Hz	
5	95Hz	55Hz	△40Hz	
6	110Hz	40Hz	△70Hz	
7	55Hz	95Hz	△-40Hz	
8	40Hz	110Hz	△-70Hz	
9	40Hz	-	40Hz	MI-none
10	70Hz	-	70Hz	
11	-	40Hz	-40Hz	
12	-	70Hz	-70Hz	
13	95Hz	55Hz	△40Hz	
14	110Hz	40Hz	△70Hz	
15	55Hz	95Hz	△-40Hz	
16	40Hz	110Hz	△-70Hz	

表 1-B : 実験条件 (実験 2)

実験 2 における実験条件を示す。振動刺激 8 条件と運動イメージ 2 条件を組み合わせ、合計 16 条件設定した。

7. 測定項目

すべての実験において、刺激中に知覚した手関節運動を刺激後に刺激側で再現させ、手関節角度を記録した。被験者には、60BPM のメトロノームに合わせて手関節運動を再現するよう教示した。手関節運動を再現する際には、速度と角度に留意して行わせた。

手関節角度の記録には、3次元小型ワイヤレスモーションキャプチャシステム (i4Motion, TECHNO CONCEPT, France; 以下、磁気センサ) を使用した。磁気センサは、縦 49mm, 横 38mm, 高さ 19mm, 重量 25g の小型で軽量の無線式角度計である。サンプリング周波数は 100Hz であり、3次元における角度データをオンラインでパーソナルコンピュータに記録することができる (図 11)。

磁気センサは、手置き台の先端に固定することで、手置き台の回転角度を記録した (図 9-B)。本研究では、水平面上における手置き台の回転角度を手関節掌背屈角度と定義した。



図 11. 磁気センサ (TECHNO CONCEPT 社ホームページより転載)

磁気センサは縦 49mm, 横 38mm, 高さ 19mm, 重量 25g の小型で軽量の無線式角度計である。サンプリング周波数は 100Hz であり、3次元における角度データ (deg.) をオンラインでパーソナルコンピュータに記録することができる。

8. データ解析

8-1. 実験 1

本研究では、知覚した運動がどのようなものであったかを心理物理学的指標で表すために、知覚した運動の速度と方向を関節運動で再現させた際の角速度を用いた。過去の研究から、振動刺激の周波数と、振動刺激によって動員される Ia 群線維の発火頻度は 1 対 1 の関係にあることが分かっている⁷⁾。そして、振動刺激の周波数が増加するにつれて、Ia 群線維の発火頻度が増加し、それに伴い、知覚した運動を再現させた際の角速度が増大することも明らかになっている⁷⁾。そのため、多くの研究において、振動刺激によって知覚した運動を表現するための指標として、その運動を再現させた際の角速度が用いられている⁶⁻¹⁰⁾。以上の理由より、本研究においても、知覚した運動がどのようなものであったかを表す指標として角速度を用いた。

解析手順として、まず記録した角度データをローパスフィルター (1Hz) にかけた(図 12)。知覚した運動は、加速期、減速期、さらに等速運動が行われる時間帯を含めた運動として表現される。そのため、等速運動の部分のみではなく、明確な運動を知覚した時間帯の運動を表現するために、その区間を分析区間として切り出した。分析区間は、運動開始点から運動終了点までの区間とした。運動開始前、安静時 1 秒間の角度データを平均し、平均値 $\pm 3SD$ の時点を運動開始点と規定した。同様に、運動終了後、安静時 1 秒間の角度を平均し、平均値 $\pm 3SD$ の時点を運動終了点と規定した。分析区間の角度データから近似曲線を算出し、微分することで角速度を算出した。そして、分析区間の角速度を平均して代表値とすることによって、知覚した運動を表現した。各条件で 3 試技の平均値を算出した。

さらに、得られた角速度データから MI-none に対する MI-max と MI-60Hz の変化量を算出した。各被験者において、各条件で得られた角速度の平均値を用い、MI-60Hz あるいは MI-max の角速度から MI-none の角速度を減じ、各周波数条件における変化量とした。

8-2. 実験 2

実験 2 においても、実験 1 と同様に知覚した運動の速度と方向を関節運動で再現させた際の角速度を指標として用いた。解析は実験 1 と同様に行った。

さらに、得られた角速度データから MI-none に対する MI-max の変化量を算出した。各被験者において、各条件で得られた角速度の平均値を用い、MI-max の角速度から MI-none の角速度を減じ、各周波数条件における変化量とした。

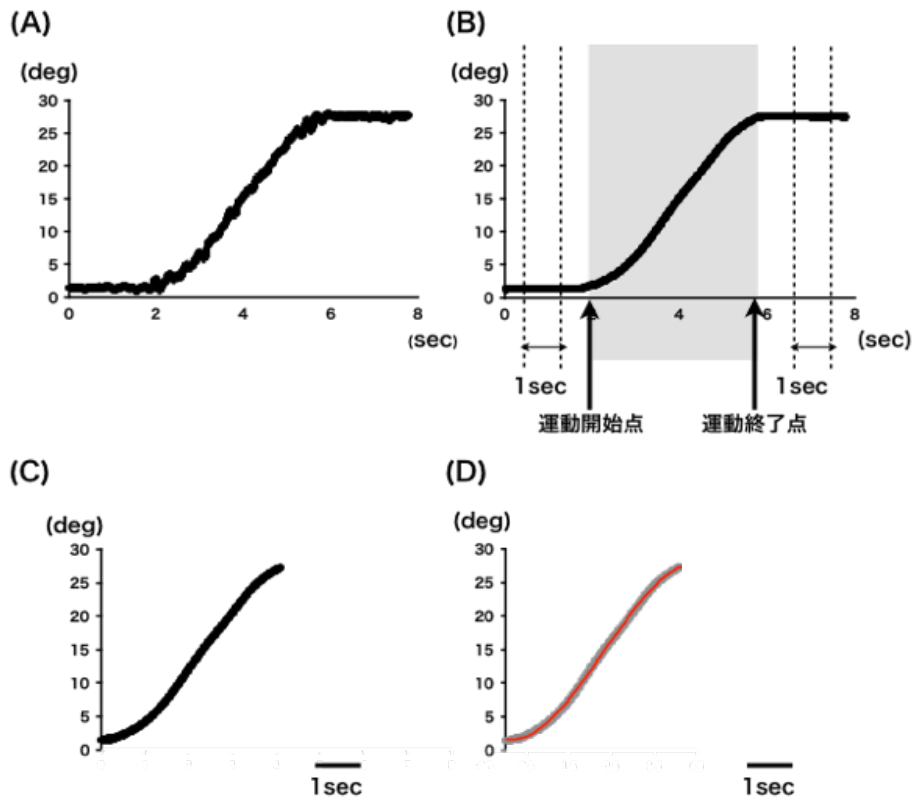


図12. 角速度の算出方法

角度データの解析手順を示す。まず、記録した角度データ(A)をローパスフィルター（1Hz）にかけた(B)。分析区間は、運動開始点から運動終了点までの区間とし、得られたデータを切り出した(C)。この際、運動開始前、安静時1秒間の角度データを平均し、 $\text{平均値} \pm 3\text{SD}$ の時点をも運動開始点と規定した。同様に、運動終了後、安静時1秒間の角度データを平均し、 $\text{平均値} \pm 3\text{SD}$ の時点をも運動終了点と規定した。次に、分析区間の角度データから近似曲線を算出し(D)、微分することで角速度を算出した。分析区間の角速度を平均し、平均角速度とした。各条件で3試技の平均値を算出し、各条件における個人の代表値とした。

9. 統計学的解析

統計学的分析には、統計処理ソフト (IBM SPSS Statistics 19, IMB 社製) を使用した。

9-1. 実験 1

実験 1 では、振動刺激の周波数 (40Hz vs. 40Hz, 60Hz vs. 60Hz, 80Hz vs. 80Hz, 100Hz vs. 100Hz) と運動イメージ (MI-60Hz, MI-max, MI-none) を要因とした反復測定による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、多重比較として、単純主効果の検定を行った。有意水準は 5%とした。

次に変化量に関して、MI-max と MI-60Hz でそれぞれ周波数 (40Hz, 60Hz, 80Hz, 100Hz) を要因とした一元配置分散分析を行った。有意な主効果があった場合、Bonferroni 法による多重比較を行った。有意水準は 5%とした。

9-2. 実験 2

実験 2 では、角速度に関して以下の解析を行った。まず MI-none において、周波数 (40Hz, 70Hz, -40Hz, -70Hz) と刺激部位 (片側刺激, 両側刺激) を要因とした反復測定による二元配置分散分析を実施した。次に、片側刺激の条件において、周波数 (40Hz, 70Hz, -40Hz, -70Hz) と運動イメージ (MI-max, MI-none) と要因とした二元配置分散分析を行った。同様に、両側刺激の条件においても周波数 (40Hz, 70Hz, -40Hz, -70Hz) と運動イメージ (MI-max, MI-none) と要因とした二元配置分散分析を行った。全ての解析において、有意な交互作用があった場合、多重比較として、単純主効果の検定を行った。有意水準は 5%とした。

次に変化量に関して、片側刺激の条件において、周波数 (40Hz, 70Hz, -40Hz, -70Hz) を要因とした一元配置分散分析を行った。同様に、両側刺激の条件においても周波数 (40Hz, 70Hz, -40Hz, -70Hz) を要因とした一元配置分散分析を行った。有意な主効果があった場合、Bonferroni 法による多重比較を行った。有意水準は 5%とした。

10. 倫理的配慮

10-1. 遵守すべき諸規則

本研究は、本学倫理委員会の承諾を得た上で実施した。また、ヘルシンキ宣言に従い、被験者のプライバシーと人権の保護に十分留意をして実験を実施した。

10-2. 説明と同意

被験者には、事前に研究目的・測定内容等を明記した「研究内容に関する説明書」(別紙 1) を用いて、実施者が十分に説明を行った。そして、被験者からの同意が得られた場合、被験者は「同意書」(別紙 2) に日付、氏名、住所、電話番号を記入の上、捺印または署名した上で実験を開始した。

10-3. 個人情報の保護

個人情報の保護には最大限の注意を払い、個人情報や実験データの管理を行った。被験者には ID 番号を振り当て、個人情報と実験データは ID 番号で管理した。ID 番号と個人名を照合させるファイルは個人情報と実験データファイルとは別に作成した。ID にイニシャルは含まない。

以上の記録は、厳重の管理の下に札幌医科大学保健医療学部内に保管した。また、個人情報の入ったファイルは web 上には置かないようにした。

11. 安全面への考慮

本研究では、事前に体調不良等の除外基準に当てはまる項目がないか確認した後実験を開始した。その上で、万が一、実験中に気分不良や何らかの体調の変化が生じた場合には、直ちに実験を中止し、本学の附属病院へ連絡することとした。

また、医師または救急隊が到着するまでの間、以下の応急処置を実施することとした。

- ① 被験者が外傷を負わないように対処する。
- ② 嘔吐がありそうな場合は、被験者の頭を回して嘔吐物を出す。
- ③ 意識消失が認められる場合は、気道を確保し必要に応じて心肺蘇生を行う。
- ④ 救急車が到着するまでの間、バイタルサインを計測し続ける。

しかし、本研究においては、実験中に気分不良や何らかの体調の変化が生じる者はいなかった。

IV. 結果

1. 実験 1

1-1. イメージした運動の角速度

MI-60Hz と MI-max において、イメージした運動を再現させた際の角速度を図 13 に示す。MI-60Hz では $4.73 \pm 2.94 \text{deg/sec}$ の掌屈運動をイメージしていた。その一方、MI-max では、 $12.35 \pm 6.14 \text{deg/sec}$ の掌屈運動をイメージしていた。対応のある t 検定の結果、MI-max における運動イメージの角速度が、MI-60Hz よりも有意に速かった ($t=-6.408$, $p<0.0005$)。このことから、本研究では MI-60Hz よりも MI-max のほうが、速い運動をイメージしていたことが示された。

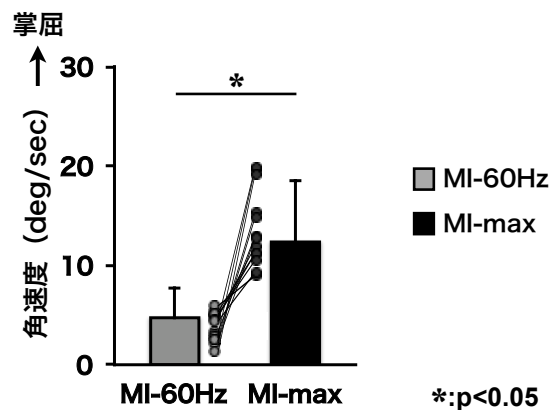


図13. イメージした運動の角速度の平均値

MI-60Hz と MI-max において、被験者がイメージした運動を再現させた際の角速度の平均値と各被験者における個人データを示す。

1-2. 振動刺激により知覚する運動の角速度

背屈筋と掌屈筋にそれぞれ振動刺激を行った際に知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を図 14 に示す。背屈筋を刺激した際には、掌屈方向への運動を知覚した (40Hz; $3.14 \pm 2.95 \text{deg/sec}$, 60Hz; $6.25 \pm 3.83 \text{deg/sec}$, 80Hz; $6.85 \pm 3.33 \text{deg/sec}$, 100Hz; $7.24 \pm 4.38 \text{deg/sec}$)。掌屈筋を刺激した際には、背屈方向への運動を知覚した (40Hz; $3.38 \pm 2.41 \text{deg/sec}$, 60Hz; $6.63 \pm 3.85 \text{deg/sec}$, 80Hz; $9.29 \pm 4.59 \text{deg/sec}$, 100Hz; $9.26 \pm 4.66 \text{deg/sec}$)。

反復測定による一元配置分散分析の結果、背屈筋と掌屈筋ともに、周波数要因において有意な主効果があった (背屈筋刺激: $F=8.547$, $p<0.0005$, 掌屈筋刺激: $F=21.546$, $p<0.0005$)。多重比較の結果、背屈筋刺激では 40Hz よりも 60Hz, 80Hz, 100Hz で角速度が有意に増大した。また、掌屈筋刺激では 40Hz よりも 60Hz, 80Hz, 100Hz で、60Hz よりも 80Hz, 100Hz で角速度が有意に増大した。このことから、背屈筋と掌屈筋をそれぞれ刺激した場合、振動刺激周波数が増大するにつれて知覚する運動の速度も増大することが示された。

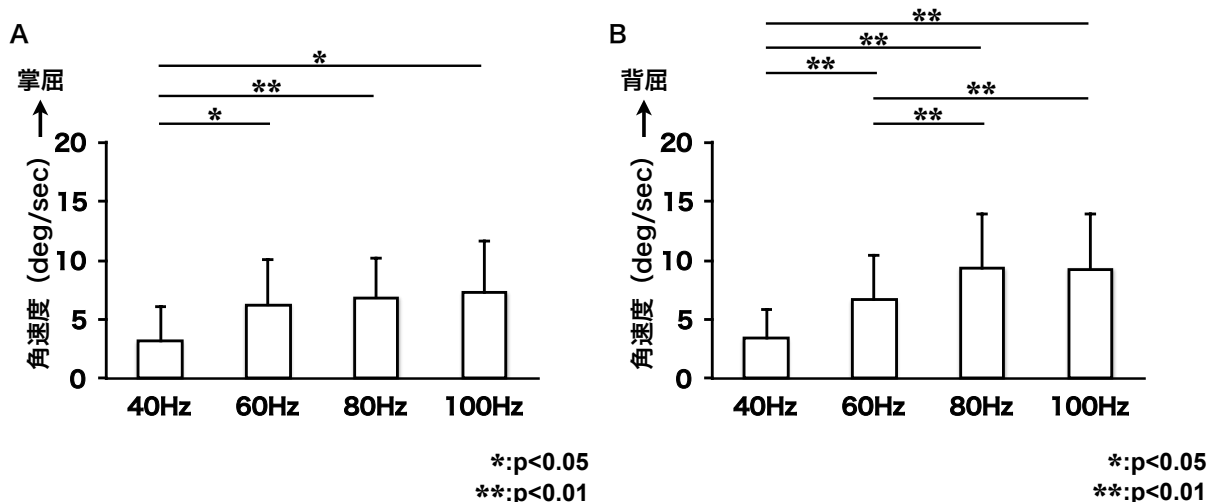


図14. 振動刺激により知覚する運動の角速度の平均値

- A: 手関節背屈筋を振動刺激した際に知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を示す。
- B: 手関節掌屈筋を振動刺激した際に知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を示す。

1-3. 運動イメージを重畳した際の角速度

各条件において、知覚した運動を再現させた際の全被験者における角速度の平均値を図 15-A に示す。全ての周波数条件において、運動イメージを行わない条件で知覚した運動の角速度は非常に小さかった (MI-none: 40Hz; $0.25 \pm 0.83 \text{deg/sec}$, 60Hz; $0.60 \pm 0.78 \text{deg/sec}$, 80Hz; $0.18 \pm 1.10 \text{deg/sec}$, 100Hz; $0.48 \pm 1.04 \text{deg/sec}$)。その一方で、運動イメージを行った条件では、運動イメージを行わない条件と比較して、掌屈運動の角速度が増大した (MI-60Hz: 40Hz; $2.24 \pm 2.07 \text{deg/sec}$, 60Hz; $2.57 \pm 1.56 \text{deg/sec}$, 80Hz; $4.32 \pm 3.40 \text{deg/sec}$, 100Hz; $4.04 \pm 2.82 \text{deg/sec}$, MI-max: 40Hz; $3.21 \pm 2.16 \text{deg/sec}$, 60Hz; $4.43 \pm 3.57 \text{deg/sec}$, 80Hz; $6.04 \pm 5.92 \text{deg/sec}$, 100Hz; $6.10 \pm 5.92 \text{deg/sec}$)。

反復測定による二元配置分散分析の結果、振動刺激の周波数と運動イメージの要因ともに、有意な主効果があった (振動刺激の周波数: $F=7.979$, $p=0.004$, 運動イメージ: $F=17.742$, $p<0.0005$)。さらに、振動刺激の周波数と運動イメージ要因において、有意な交互作用があった ($F=4.302$, $p=0.014$)。単純主効果の検定の結果、全ての周波数において、MI-none と比較して MI-max の角速度が有意に増大した。さらに 80Hz, 100Hz においては、MI-none と比較して MI-60Hz の角速度も有意に増大した。また、MI-max においては、40Hz よりも 80Hz と 100Hz で角速度が有意に増大した。このことから、振動刺激の周波数が高くなる、あるいは運動イメージの速度が速くなると、知覚する運動の角速度が増大することが示された。

1-4. 運動イメージを重畳した際の角速度の変化量

MI-none に対する MI-60Hz と MI-max での変化量の平均値を図 15-B, C に示す。MI-60Hz, MI-max とともに、全ての周波数条件において角速度が掌屈方向へ変化した (MI-60Hz: 40Hz; $1.99 \pm 2.15 \text{deg/sec}$, 60Hz; $1.97 \pm 1.90 \text{deg/sec}$, 80Hz; $4.14 \pm 4.04 \text{deg/sec}$, 100Hz; $3.57 \pm 2.91 \text{deg/sec}$, MI-max: 40Hz; $2.97 \pm 2.69 \text{deg/sec}$, 60Hz; $3.83 \pm 3.39 \text{deg/sec}$, 80Hz; $5.86 \pm 6.35 \text{deg/sec}$, 100Hz; $5.62 \pm 6.18 \text{deg/sec}$)。

反復測定による一元配置分散分析の結果、MI-60Hz と MI-max とともに、周波数要因において有意な主効果があった (MI-60Hz: $F=5.154$, $p=0.003$, MI-max: $F=5.916$, $p=0.016$)。多重比較の結果、MI-60Hz と MI-max とともに、各周波数間に有意差がなかった。このことから、振動刺激の周波数が変化すると、運動イメージを行わない場合と運動イメージを行った場合に知覚する運動の角速度の差が変化することが示された。

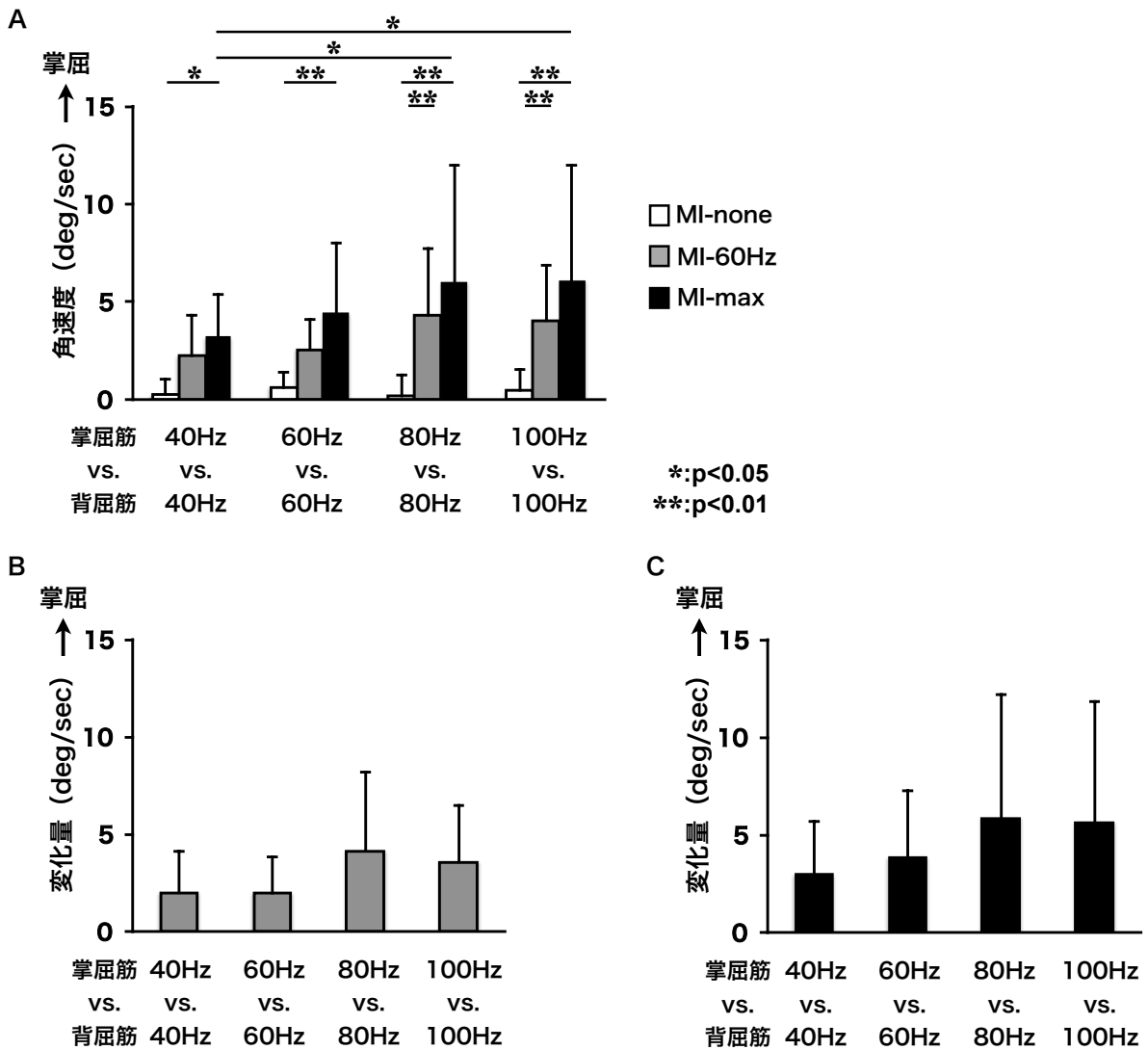


図 15. 運動イメージを重畳した際に知覚する運動の角速度

- A: 手関節掌屈筋と背屈筋に振動刺激を行い、同時に運動イメージを重畳した際に知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を示す。
- B: MI-none と MI-60Hz でそれぞれ知覚した運動の角速度の差を変化量として示す。
- C: MI-none と MI-max でそれぞれ知覚した運動の角速度の差を変化量として示す。

2. 実験 2

2-1. 片側刺激と両側刺激により知覚する運動の角速度

片側刺激と両側刺激の各条件において、振動刺激のみで知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を図 16-A に示す。片側刺激において、背屈筋を刺激した条件では掌屈方向への運動を知覚した (40Hz; $3.63 \pm 1.99 \text{deg/sec}$, 70Hz; $6.16 \pm 4.82 \text{deg/sec}$)。また、掌屈筋を刺激した条件では、背屈方向への運動を知覚した (-40Hz; $-3.09 \pm 2.26 \text{deg/sec}$, -70Hz; $5.29 \pm 2.08 \text{deg/sec}$)。次に両側刺激において、掌屈筋よりも背屈筋を高周波数で刺激した条件では、掌屈方向への運動を知覚した (40Hz; $3.39 \pm 3.27 \text{deg/sec}$, 70Hz; $5.01 \pm 4.13 \text{deg/sec}$)。背屈筋よりも掌屈筋を高周波数で刺激した条件では、背屈方向への運動を知覚した (-40Hz; $-3.49 \pm 2.83 \text{deg/sec}$, -70Hz; $4.74 \pm 3.99 \text{deg/sec}$)。

反復測定による二元配置分散分析の結果、振動刺激周波数の要因に有意な主効果があったが、刺激部位の要因には有意な主効果がなかった (振動刺激の周波数: $F=12.071$, $p=0.003$, 刺激部位: $F=0.319$, $p=0.582$)。また、振動刺激の周波数と刺激部位の要因には、有意な交互作用がなかった ($F=1.218$, $p=0.294$)。このことから、片側刺激と両側刺激ともに振動刺激の周波数が変化すると知覚する運動の角速度も変化し、片側刺激で用いた周波数と両側刺激で用いた両筋への周波数の差が一致した場合、同じ速度の運動を知覚することが示された。

2-2. 片側刺激において運動イメージを重畳した際の角速度

各条件において、知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を図 16-C に示す。全ての周波数条件において、運動イメージを行った条件では、運動イメージを行わない条件と比較して、掌屈運動の角速度が増大した (MI-max: 40Hz; $5.67 \pm 2.59 \text{deg/sec}$, 70Hz; $6.95 \pm 4.87 \text{deg/sec}$, -40Hz; $2.45 \pm 3.16 \text{deg/sec}$, -70Hz; $0.54 \pm 2.52 \text{deg/sec}$)。

反復測定による二元配置分散分析の結果、振動刺激の周波数と運動イメージの要因ともに、有意な主効果があった (振動刺激の周波数: $F=5.167$, $p=0.039$, 運動イメージ: $F=14.956$, $p=0.002$)。さらに、振動刺激の周波数と運動イメージ要因において、有意な交互作用があった ($F=4.080$, $p=0.030$)。単純主効果の検定の結果、40Hz, -40Hz, -70Hz において、MI-none と比較して MI-max の角速度が有意に増大した。また、MI-none と MI-max とともに、-70Hz と -40Hz よりも 40Hz と 70Hz でそれぞれ角速度が有意に増大した。このことから、振動刺激の周波数が変化し、あるいは運動イメージを行うことによって、知覚する運動の角速度が変化することが示された。

2-3. 両側刺激において運動イメージを重畳した際の角速度

各条件において、知覚した運動の角速度の平均値を図 16-D に示す。全ての周波数条件において、運動イメージを行った条件では、運動イメージを行わない条件と比較して、掌屈方向への運動の角速度が増大した (MI-max: 40Hz; 6.10 ± 3.14 deg/sec, 70Hz; 7.28 ± 5.76 deg/sec, -40Hz; 3.90 ± 3.33 deg/sec, -70Hz; -0.51 ± 3.59 deg/sec)。

反復測定による二元配置分散分析の結果、振動刺激の周波数と運動イメージの要因ともに、有意な主効果があった (振動刺激の周波数: $F=16.966$, $p<0.0005$, 運動イメージ: $F=7.567$, $p=0.017$)。さらに、振動刺激の周波数と運動イメージ要因において、有意な交互作用があった ($F=5.254$, $p=0.016$)。単純主効果の検定の結果、MI-none と MI-max とともに、-70Hz よりも 40Hz と 70Hz, -40Hz よりも 70Hz でそれぞれ角速度が有意に増大した。このことから、両筋への振動刺激周波数の差が変化する、あるいは運動イメージを行うことによって、知覚する運動の角速度が変化することが示された。

2-4. 運動イメージを重畳した際の角速度における片側刺激と両側刺激の比較

片側刺激と両側刺激の条件における MI-max での角速度の平均値を図 16-B に示す。反復測定による二元配置分散分析の結果、振動刺激の周波数の要因に有意な主効果があったが、刺激部位の要因にはなかった (振動刺激の周波数: $F=5.672$, $p=0.029$, 刺激部位: $F=1.253$, $p=0.283$)。さらに、振動刺激の周波数と刺激部位の要因には有意な交互作用がなかった ($F=1.026$, $p=0.336$)。このことから、運動イメージを重畳した場合は、片側刺激と両側刺激ともに振動刺激の周波数が変化すると知覚する運動の角速度が変化し、片側刺激で用いた周波数と両側刺激で用いた両筋への周波数の差が一致した場合、同じ速度の運動を知覚することが示された。

次に、MI-none に対する MI-max での変化量の平均値を図 16-E, D に示す。片側刺激、両側刺激ともに、全ての周波数条件において角速度の変化量が掌屈方向へ変化した (片側刺激での変化量: 40Hz; 2.03 ± 2.55 deg/sec, 70Hz; 0.79 ± 2.68 deg/sec, -40Hz; 5.54 ± 4.37 deg/sec, -70Hz; 5.83 ± 4.23 deg/sec, 両側刺激での変化量: 40Hz; 2.71 ± 3.02 deg/sec, 70Hz; 2.27 ± 3.71 deg/sec, -40Hz; 7.39 ± 5.64 deg/sec, -70Hz; 4.23 ± 3.37 deg/sec)。反復測定による一元配置分散分析の結果、片側刺激では振動刺激の周波数要因に有意な主効果があった (片側刺激: $F=9.600$, $p<0.0005$)。多重比較の結果、-70Hz に対して 70Hz, -40Hz に対して 40Hz と 70Hz で変化量が有意に増大した。このことから、振動刺激の周波数が変化すると、運動イメージを行わない場合と運動イメージを行った場合に知覚する運動の角速度の差も変化することが示された。また、両側刺激においても、振動刺激の周波数要因に有意な主効果があった (両側刺激: $F=4.470$, $p=0.029$)。多重比較の結果、-40Hz に対して 40Hz と 70Hz で変化量が有意に増大した。このことから、両筋への振動刺激周波数の差が変化すると、運動イメージを行わない場合と

運動イメージを行った場合に知覚する運動の角速度の差も変化することが示された。

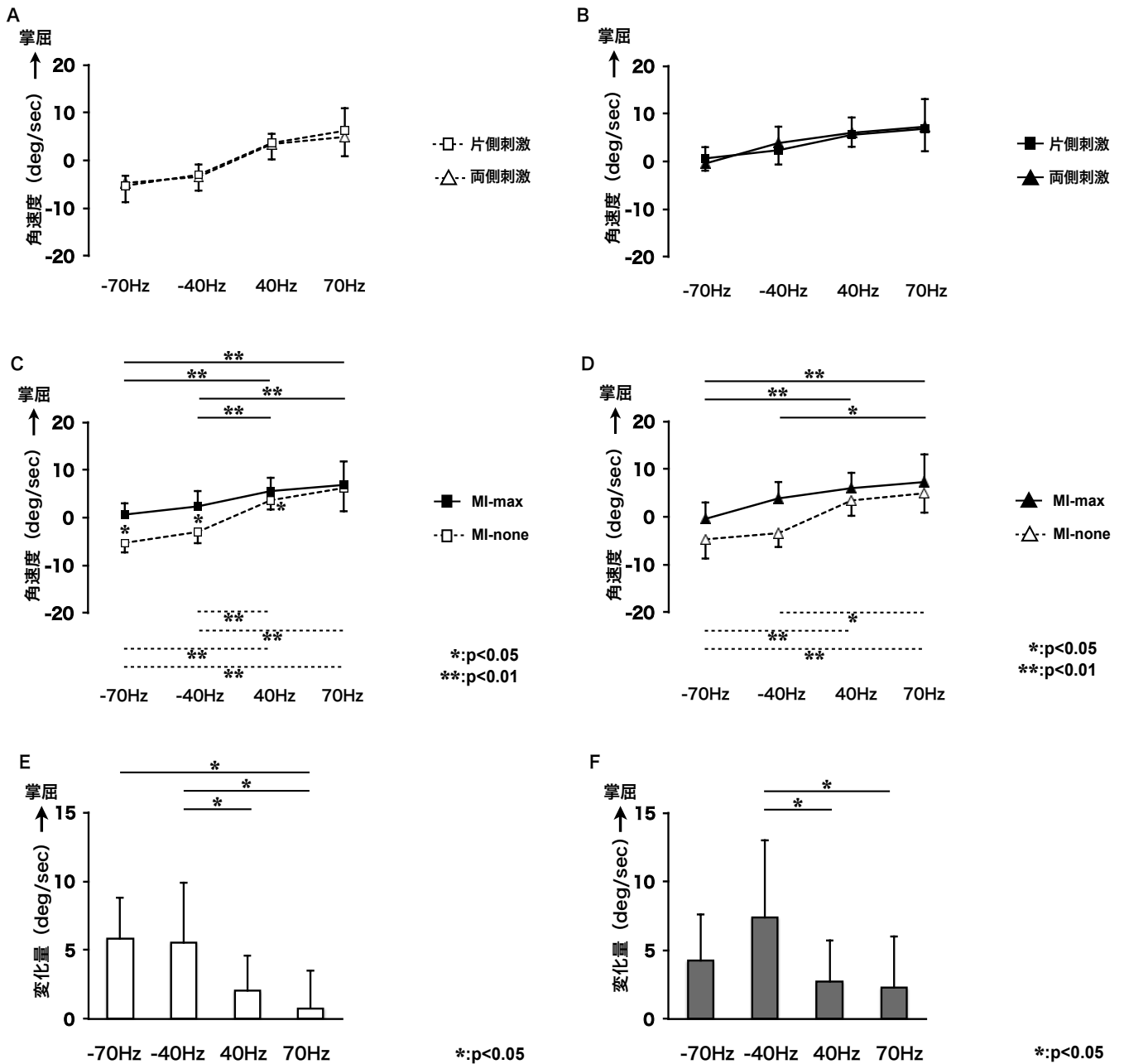


図 16. 片側刺激と両側刺激において、運動イメージを重畳した際に知覚する運動の角速度

A: 片側刺激と両側刺激によって知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を示す。

B: 片側刺激と両側刺激の条件において、運動イメージを重畳した際に知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を示す。

- C: 片側刺激を行い，同時に運動イメージを重畳した際に知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を示す。(有意差を示す線: 実線が MI-max, 点線が MI-none における有意差)
- D: 両側刺激を行い，同時に運動イメージを重畳した際に知覚した運動を再現させた際の角速度の平均値を示す。(有意差を示す線: 実線が MI-max, 点線が MI-none における有意差)
- E: 片側刺激中の MI-none と MI-max で知覚した運動の角速度の差を変化量として示す。
- F: 両側刺激中の MI-none と MI-max で知覚した運動の角速度の差を変化量として示す。

V. 考察

1. 実験 1 における結果の解釈

1-1. イメージした運動の角速度

本研究では、MI-max でイメージした手関節掌屈運動の角速度が、MI-60Hz における角速度よりも速く、それは全被験者でみられた変化であった。MI-60Hz では、手関節伸展筋に対して 60Hz の周波数で振動刺激を行った際に知覚した運動の速度、そして M-max では手関節中間位から最大掌屈位まで 3 秒間で掌屈するような速度の掌屈運動をイメージさせている。このことから、手関節に 60Hz で振動刺激を行った際に知覚する運動の速度は、手関節を中間位から最大掌屈位まで 3 秒間で掌屈させた際の速度よりも遅いということがいえる。そして、全ての被験者において、運動イメージの速度に段階付けができていたことが確認された。

1-2. 振動刺激による周波数依存的な運動の知覚

本研究結果より、手関節背屈筋を振動刺激した際には、掌屈方向への運動、掌屈筋を刺激した際には、背屈方向への運動を知覚することが示された。さらに、背屈筋への刺激と掌屈筋への刺激のいずれにおいても、知覚した運動の角速度は振動刺激の周波数に依存して増大した。過去の研究から、筋腱に対して適切な位置で振動刺激を行った場合には、振動刺激の周波数と Ia 群線維の発火頻度が正の比例関係を示すことが明らかとなっている⁶⁾。そして、Ia 群線維の発火頻度の増加に伴い、運動錯覚の自覚的強度が増大する^{6,38)}。本研究においても、振動刺激によって知覚した運動の角速度は、周波数依存的に変化しており、過去の研究を支持する結果となった。このことから、本研究では振動刺激によって知覚する運動の速度について、振動刺激の周波数による段階付けができていたといえる。

1-3. 動筋・拮抗筋に対する同周波数の振動刺激で生じる運動錯覚

本研究で用いた角速度は運動錯覚強度を示す指標であり、過去の研究でも運動錯覚の強度を表す指標として用いられている。本研究では、運動イメージを行わずに両筋に同周波数で刺激すると、知覚した運動を再現させた際の角速度が非常に小さかった。

Gilhodes らは、左上腕二頭筋と上腕三頭筋に同周波数で振動刺激を行い、その際に知覚した運動を反対側で同時に再現させた⁷⁾。その結果、再現した運動の角速度は 0 から有意に変化しなかった。さらに、両筋に異なる周波数で振動刺激をした際には、より高い周波数で刺激された筋が伸張される方向への運動の角速度が増大した。このことから、拮抗関係にある筋の筋紡錘からの感覚信号に不均衡が生じた場合のみ、その差に依存して知覚する運動の速度が変化すると報告している。さらに、手関節の掌屈筋と背屈筋に様々な周波数で振動刺激を行った研究においても、肘関節と同様の現象が生じたことが報告されている^{9, 10)}。本研究においても、両筋を同周波数で刺激すると運動を知覚しないという結果が得られており、これは過去の研究結果を支持するものである。

1-4. 動筋・拮抗筋に対する同周波数の振動刺激で生じる運動錯覚と運動イメージの統合

本研究では、手関節掌屈筋と背屈筋を同周波数で刺激したにも関わらず、手関節掌屈の運動イメージを行った条件のほうが運動イメージを行わなかった条件よりも、掌屈方向への運動の角速度が増大した。このことから、振動刺激単独では運動錯覚を生じない状況下においても、運動イメージを行うことによって、イメージした方向への運動を知覚することが明らかとなった（図 17-A, B）。

また、本研究では運動イメージの速度が速い場合に、より速い運動を知覚した。つまり、動筋・拮抗筋への振動刺激中に運動イメージを行うことによって知覚する運動の角速度は、イメージした運動の速度に依存して変化するということが明らかとなった（図 17-C）。

さらに本研究では、動筋・拮抗筋をそれぞれ 40Hz, 60Hz, 80Hz, 100Hz で同時に刺激しても、運動イメージを行わない場合には、全ての周波数条件でほとんど運動を知覚せず、知覚した運動の角速度は周波数依存的な変化を検出できなかった（図 18-A, B）。それに対して、運動イメージを重畳した際の角速度の変化量を周波数間で比較した場合、遅い運動をイメージした際には知覚した運動の角速度の変化量に差があったものの、周波数依存的な変化を検出できなかった。一方、速い運動をイメージした場合には知覚した運動の角速度が周波数依存的に変化することが明確になった（図 18-C-F）。このことから、本研究においては、振動刺激単独では運動錯覚を生じない状況下においても、速い速度の運動イメージを重畳した際には、筋紡錘からの求心性入力量に依存した運動を知覚するということが示唆された。

以上のことから、動筋・拮抗筋を同周波数で振動刺激した場合には、両者の筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動が統合され、イメージした方向への運動知覚が生じることが示された。さらに、その運動知覚はイメージした運動の速度と、筋紡錘からの求心性入力量が影響することが示唆された。これは、本研究によって新たに得られた知見である。

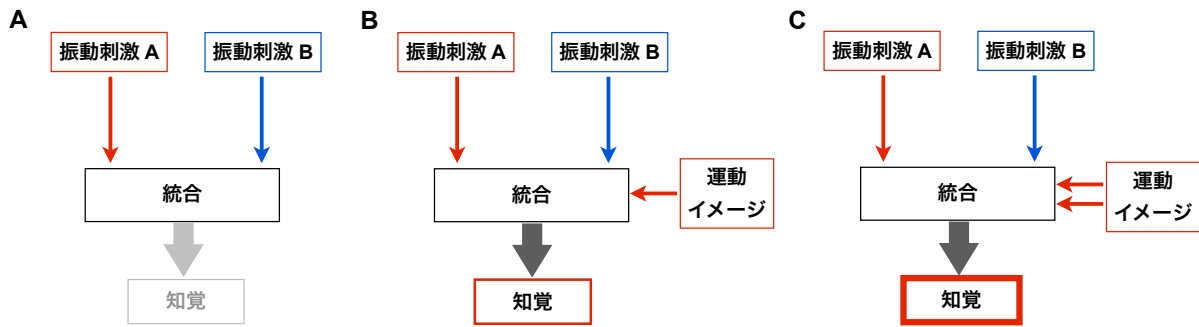


図 17. 動筋・拮抗筋に対する同周波数の振動刺激と運動イメージによって生じる運動知覚

動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力および運動イメージによる脳活動が統合された際に生じる運動知覚を示した模式図である。振動刺激 A と振動刺激 B は拮抗関係にある筋へ振動刺激を行っていることを示している。また、「統合」へ向かう矢印について、赤（掌屈方向）と青（背屈方向）は運動錯覚あるいは運動イメージの方向、矢印（赤、青）の数は筋紡錘からの求心性入力量を示す。「知覚」を囲む四角の太さは運動知覚の強度を示し、赤は掌屈方向の運動知覚が生じたこと、灰色は運動知覚が生じなかったことを示す。

A: 運動イメージを行わない場合、運動を知覚しない。

B: 運動イメージを行った場合、イメージした方向への運動を知覚する。

C: 速い運動をイメージした際には、B よりも速い運動を知覚する。

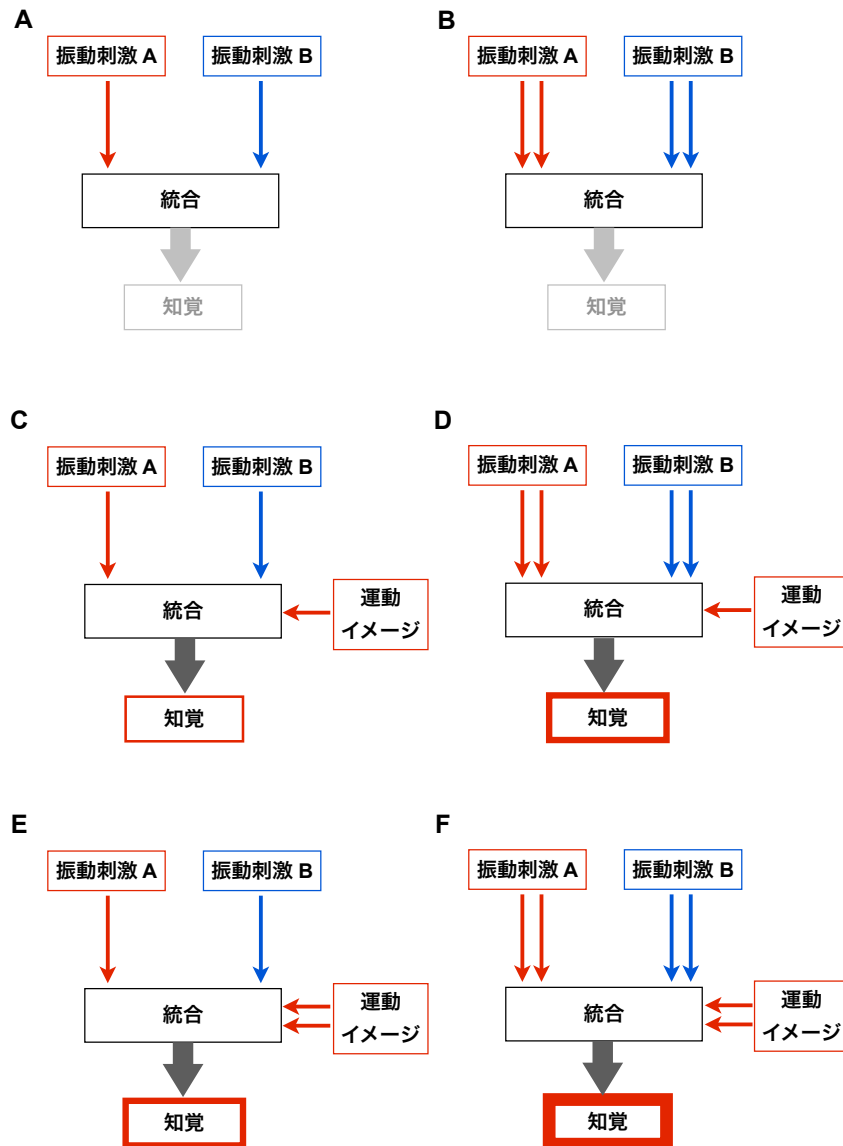


図 18. 筋紡錘からの求心性入力量に依存した運動知覚

動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力量が、運動イメージを重畳した際に知覚する運動に及ぼす影響を示した模式図である。振動刺激 A と振動刺激 B は拮抗関係にある筋へ振動刺激を行っていることを示している。また、「統合」へ向かう矢印について、赤（掌屈方向）と青（背屈方向）は運動錯覚あるいは運動イメージの方向、矢印（赤、青）の数は筋紡錘からの求心性入力量を示す。「知覚」を囲む四角の太さは運動知覚の強度を示し、赤は掌屈方向の運動知覚が生じたこと、灰色は運動知覚が生じなかったことを示す。

A, B: 動筋・拮抗筋を同周波数で振動刺激した場合、筋紡錘からの求心性入力量に関わらず、運動を知覚しない。

C-F: 動筋・拮抗筋を同周波数で振動刺激した場合に運動イメージを重畳すると、筋紡錘からの求心性入力量や運動イメージの速度によって、知覚する運動の速さに変化する。

2. 実験 2 における結果の解釈

2-1. 動筋・拮抗筋に対する異なる周波数の振動刺激で生じる運動錯覚

本研究では、両側刺激で用いた動筋・拮抗筋に対する周波数の差と片側刺激で用いた周波数を一致させた場合、知覚する運動の角速度も一致した。

Figuiere らは、手関節掌屈筋と背屈筋に様々な周波数で振動刺激を行った場合、知覚する運動の角速度は刺激に用いた周波数の差に依存して変化することを報告した⁹⁾。さらに、その周波数の差と同じ周波数を用いて片側の筋のみを刺激した場合は、両側の筋を同時に刺激した場合と同じ角速度の運動を知覚することを明らかにした。この結果は Gilhodes らが述べているように、動筋・拮抗筋関係にある筋を同時に振動刺激した場合、知覚する運動の速度は両側の筋紡錘からの感覚信号の差に依存する⁷⁾という報告と矛盾しない。本研究においても、Figuiere らと同様の結果が得られており、これは過去の研究結果を支持するものである。

2-2. 片側への振動刺激で生じる運動錯覚と運動イメージの統合

本研究では、背屈筋への振動刺激によって掌屈の運動錯覚が生じる条件において、運動イメージを行った際に知覚する掌屈方向への運動の角速度が増大した。このことから、運動イメージと同じ方向への運動錯覚が生じるような振動刺激を行った場合、運動イメージを重畳することによって知覚する運動の角速度がイメージした方向へ増大することが示された (図 19-A, B)。また、掌屈筋への振動刺激によって背屈の運動錯覚が生じる条件において、運動イメージを行った際には知覚する運動の方向が掌屈方向へ変化した。このことから、運動イメージと異なる方向への運動錯覚が生じるような振動刺激を行った場合、運動イメージを重畳することによって知覚する運動の角速度が減少した、つまり、知覚する運動がイメージした方向へ偏移するような現象が生じたことが示された (図 19-C, D)。

Kitada ら¹⁸⁾は、手関節背屈筋に 83Hz で振動刺激を行い、手関節掌屈の運動錯覚を生じさせた。そして、振動刺激と同時に手関節掌屈の運動イメージを行わせると、運動錯覚によって知覚する手関節掌屈角度が増大することを示した。さらに、同様の被験者に対して背屈方向の運動イメージをさせると、運動錯覚によって知覚する手関節掌屈角度が減少することを報告した。このことから、運動錯覚と同じ方向のイメージを行った際には運動錯覚によって知覚する関節角度が増大し、異なる方向のイメージを行った際には運動錯覚によって知覚する関節角度が減少することが示された。本研究においても、Kitada らの報告を支持する結果が得られたものと考えられる。

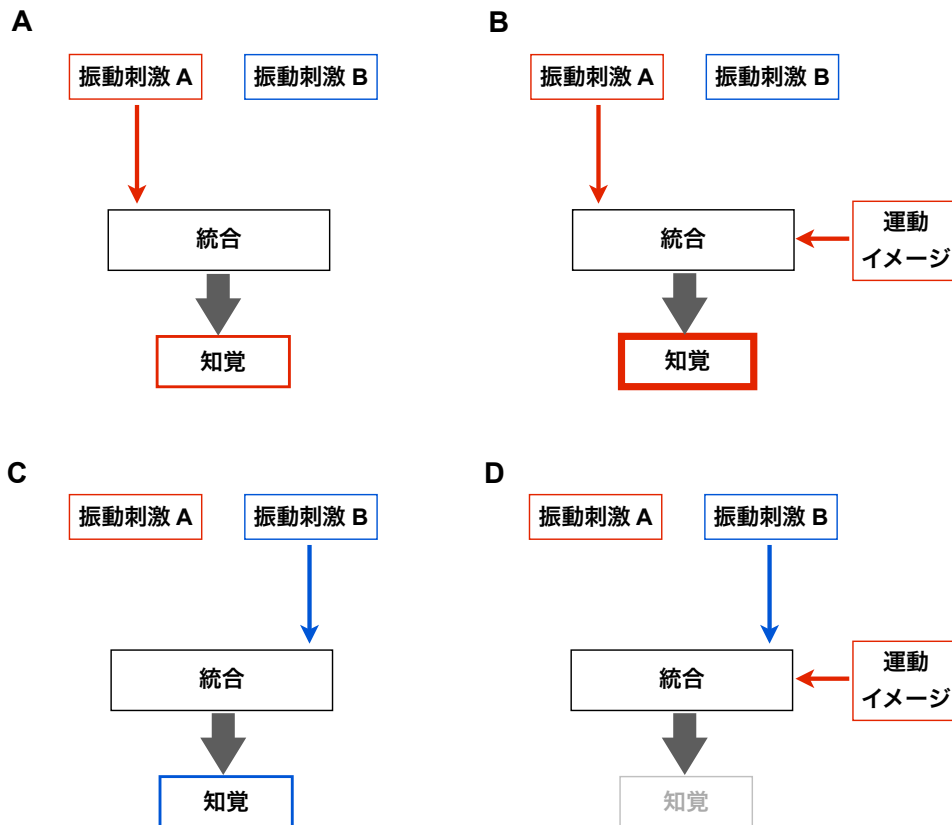


図 19. 片側への振動刺激と運動イメージによって生じる運動知覚

動筋と拮抗筋へそれぞれ単独で振動刺激を行い、同時に運動イメージを重畳した際に生じる運動知覚を示した模式図である。振動刺激 A と振動刺激 B は拮抗関係にある筋へ振動刺激を行っていることを示している。また、「統合」へ向かう矢印について、赤（掌屈方向）と青（背屈方向）は運動錯覚あるいは運動イメージの方向、矢印（赤、青）の数は筋紡錘からの求心性入力量を示す。「知覚」を囲む四角の太さは運動知覚の強度を示し、赤は掌屈方向、青は背屈方向の運動知覚が生じたこと、灰色は運動知覚が生じなかったことを示す。

A, B: 振動刺激によって生じる運動錯覚と、運動イメージの方向が同じ場合、運動イメージを重畳することによって、知覚する運動の角速度が増大する。

C, D: 振動刺激によって生じる運動錯覚と、運動イメージの方向が異なる場合、運動イメージを重畳することによって、知覚する運動の角速度が減少する。

2-3. 動筋・拮抗筋に対する異なる周波数の振動刺激で生じる運動錯覚と運動イメージの統合

本研究では、掌屈筋よりも背屈筋へ高周波数の振動刺激を行った条件において、運動イメージを重畳した際に知覚する掌屈方向への運動の角速度が増大した。このことから、動筋・拮抗筋に対して同時に異なる周波数の振動刺激を行い、運動イメージと同じ方向への運動錯覚が生じる場合には、運動イメージを重畳することによって知覚する運動の角速度がイメージした方向へ増大することが示された（図 20-A, B）。また、背屈筋よりも掌屈筋へ高周波数の振動刺激を行った条件において、運動イメージを重畳した際に知覚する運動の方向が掌屈方向へ変化した。このことから、動筋・拮抗筋に対して同時に異なる周波数の振動刺激を行い、運動イメージと異なる方向への運動錯覚が生じる場合には、運動イメージを重畳することによって知覚する運動の角速度が減少した、つまり、知覚する運動がイメージした方向へ偏移するような現象が生じることが示された（図 20-C, D）。

以上のことから、動筋・拮抗筋の関係にある筋紡錘から同時に異なる求心性入力が生じ、運動錯覚が生じる状況下においても、運動イメージを行うことによって、知覚した運動がイメージした方向へと変化することが明らかとなった。これは、本研究によって新たに得られた知見である。

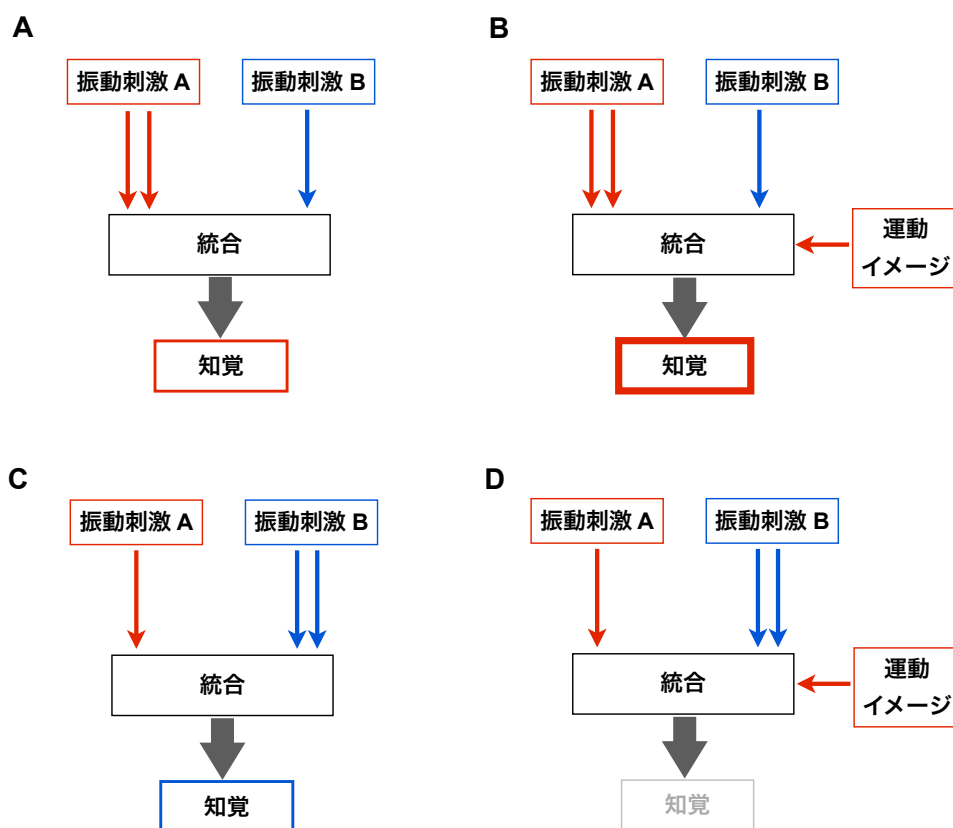


図 20. 動筋・拮抗筋への異なる周波数の振動刺激と運動イメージによって生じる運動知覚

動筋と拮抗筋へ異なる周波数で振動刺激を行い、同時に運動イメージを重畳した際に生じる運動知覚を示した模式図である。振動刺激 A と振動刺激 B は拮抗関係にある筋へ振動刺激を行っていることを示している。また、「統合」へ向かう矢印について、赤（掌屈方向）と青（背屈方向）は運動錯覚あるいは運動イメージの方向、矢印（赤、青）の数は筋紡錘からの求心性入力量を示す。「知覚」を囲む四角の太さは運動知覚の強度を示し、赤は掌屈方向、青は背屈方向の運動知覚が生じたこと、灰色は運動知覚が生じなかったことを示す。

- A, B: 振動刺激によって生じる運動錯覚と、運動イメージの方向が同じ場合、運動イメージを重畳することによって、知覚する運動の角速度が増大する。
 C, D: 振動刺激によって生じる運動錯覚と、運動イメージの方向が異なる場合、運動イメージを重畳することによって、知覚する運動の角速度が減少する。

2-4. 両側刺激での周波数の差と片側刺激での周波数が一致した条件下における運動イメージとの統合

本研究では、両側刺激で用いた両筋への周波数の差と、同じ周波数を用いて片側刺激を行った。その結果、周波数の差が等しい条件間では、運動イメージを重畳した際に同じ速度の運動を知覚することが示された（図 21）。このことから、動筋・拮抗筋の関係にある筋への振動刺激中に運動イメージを行うことによって生じる運動知覚は、動筋・拮抗筋からの求心性入力 of 合計量に関わらず、その差に依存して変化することが示唆された。これは、本研究によって新たに得られた知見である。

また、本研究では運動イメージを重畳したことによる角速度の変化量が、片側刺激と両側刺激ともに周波数依存的な変化を示した。さらに、運動錯覚と運動イメージの方向が異なる場合には、両者の方向が同じ場合と比較して、運動イメージを重畳したことによる角速度の変化量が大きかった。このことから、振動刺激による求心性入力と運動イメージによる脳活動が統合される際には、運動錯覚と運動イメージの方向が一致するか否かによって、知覚する運動の角速度に及ぼされる影響が異なる可能性が示唆された。

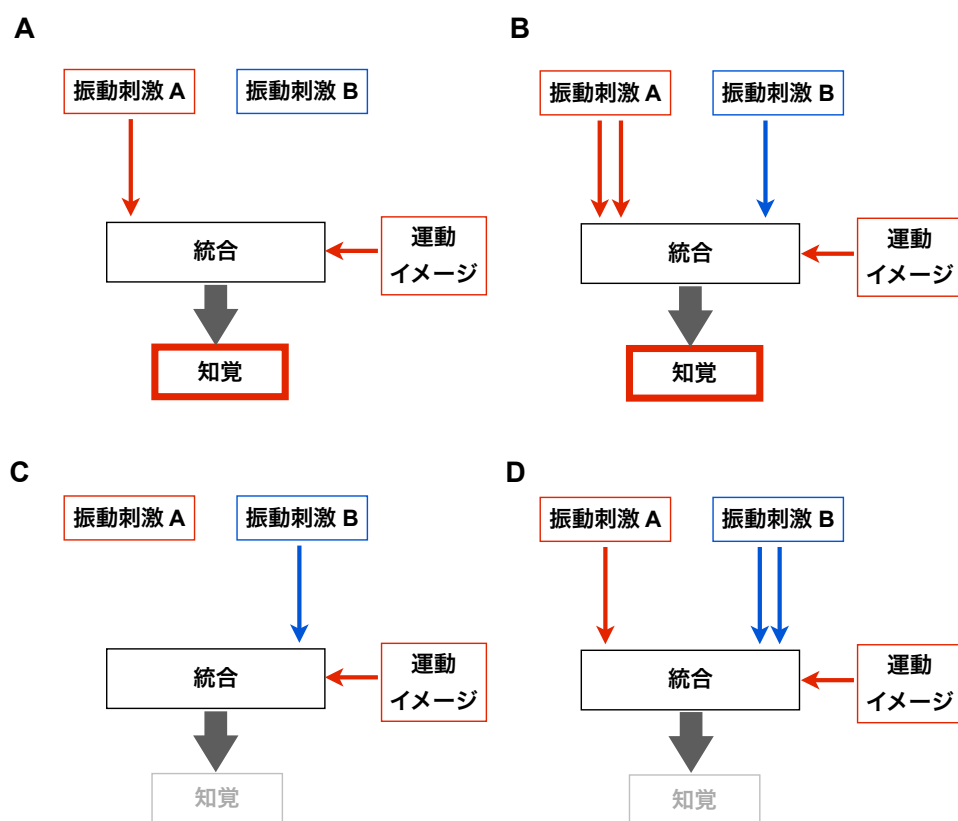


図 21. 両側刺激での周波数の差と片側刺激での周波数を一致させた場合に運動イメージとの統合によって生じる運動知覚

動筋・拮抗筋への刺激周波数の差が、同時に運動イメージを重畳した際に生じる運動知覚に及ぼす影響を示した模式図である。振動刺激 A と振動刺激 B は拮抗関係にある筋へ振動刺激を行っていることを示している。また、「統合」へ向かう矢印について、赤（掌屈方向）と青（背屈方向）は運動錯覚あるいは運動イメージの方向、矢印（赤、青）の数は筋紡錘からの求心性入力量を示す。「知覚」を囲む四角の太さは運動知覚の強度を示し、赤は掌屈方向の運動知覚が生じたこと、灰色は運動知覚が生じなかったことを示す。

- A, B: 振動刺激によって生じる運動錯覚と、運動イメージの方向が同じ場合、運動イメージを重畳することによって生じる運動知覚の変化量は、片側刺激と両側刺激で等しい。
- C, D: 振動刺激によって生じる運動錯覚と、運動イメージの方向が異なる場合、運動イメージを重畳することによって生じる運動知覚の変化量は、片側刺激と両側刺激で等しい。

3. 動筋・拮抗筋関係にある筋からの求心性入力に対する運動イメージの影響

過去の研究では、運動感覚の生成機構に関して、動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの求心性入力の統合、および筋紡錘からの求心性入力と運動イメージの統合について、それぞれ個別に検証されてきた。それに対して、動筋・拮抗筋関係にある複数筋からの求心性入力と同時に生じている状況下において、運動イメージによる脳活動がどのような関係で統合され、運動感覚が生成されるのかについて明らかにした知見は存在せず、推測の域を出なかった。その点、本研究では動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの求心性入力および運動イメージが同時に生じると、それぞれ単独で知覚する運動とは異なる運動を知覚することが新たに明らかとなった。このことから、動筋・拮抗筋からの求心性入力に対して、運動イメージによる脳活動が何らかの影響を及ぼしていることが示唆される。以下に、動筋・拮抗筋関係にある筋紡錘からの求心性入力がある複数のシナプスを介して上位中枢に入力される過程において、運動イメージによる脳活動が及ぼす影響を過去の知見を用いて考察する。

3-1. 運動イメージが脊髄レベルで筋紡錘からの求心性入力に及ぼす影響

運動イメージが身体に及ぼす生理学的な影響を検証した報告は、多数みられる¹⁴⁻¹⁷⁾。Yahagiらは、示指外転運動の運動イメージ中にFDIからMEPとH反射を記録した¹⁴⁾。その結果、運動イメージ中のMEP振幅は安静時と比較して有意に増大することを報告した。その一方で、運動イメージ中のH反射振幅は安静時と比較して変化がなかったことから、運動イメージによるMEP振幅の増大は、皮質レベルで生じている可能性がある^{15, 16)}と結論づけた。この他にも同様の結果を示した報告^{15, 16)}がみられ、運動イメージは大脳皮質運動野の興奮性と密接な関係があるということについて、一定の見解を得られている。

しかし近年、Aoyamaらは運動イメージ中における動筋のH反射と伸張反射を測定し、H反射振幅は変化しないが、伸張反射振幅は安静時と比較して有意に増大することを明らかにした¹⁷⁾。この結果は、運動イメージによって動筋を支配する γ 運動ニューロンの興奮性が選択的に増大し、筋紡錘の感度変化が生じる可能性を示すものである。運動イメージによって、イメージした運動の動筋の γ 運動ニューロン興奮性が選択的に増大するのであれば、それに伴い錘内筋が収縮し、Ia群線維が発火しやすい状態になっている可能性がある⁶⁾と考える。これまで述べてきたように、振動刺激による運動錯覚は刺激した筋のIa群線維が発火することによって生じ、運動錯覚の強度はIa群線維の発火頻度に依存する⁶⁾。このことから、振動刺激中に刺激した筋を収縮するような運動イメージを重ねることによって、振動刺激単独の場合よりもIa群線維の発火頻度が増大する可能性がある。その場合、結果として知覚する運動はイメージした方向と反対方向へ偏移するはずである。しかし、本研究では振動刺激した筋を収縮するようなイメージ、つまり、運動錯覚と異なる方向への運動イメージを行った場合には、運動イメージを行わなかった場合と比較して、知覚した運動がイメージした方向へ偏移した。このことから、本研究結果は上述した機構のみでは説明することができない。

これに対して、Kasai らは手関節掌屈運動の運動イメージ中には動筋である FCR の MEP 振幅が増大するのみならず、拮抗筋である ECR の MEP 振幅も増大することを示した。このことから、運動イメージは動筋および拮抗筋における大脳皮質運動野に対して促通作用を有することを示唆している¹⁵⁾。さらに Aoyama らは、足関節底屈イメージ中には動筋であるヒラメ筋のみならず、拮抗筋である前脛骨筋から記録した伸張反射振幅も増大することを報告した¹⁷⁾。これらのことから、運動イメージによる生理学的な影響は、動筋のみならず、拮抗筋の皮質レベルと脊髄反射弓にも及ぶことが示されている。

以上を考え合わせると、運動イメージを行った場合には、イメージした運動の動筋・拮抗筋を支配する大脳皮質運動野と脊髄反射弓に対して促通作用が生じていることが示唆される。このことから、本研究結果に影響を及ぼした要因の一つとして、運動イメージによって動筋・拮抗筋の筋紡錘の感度に変化していた可能性をあげる。運動イメージによって、動筋・拮抗筋の筋紡錘に感度変化が生じていたとすれば、それらの筋を振動刺激することによって生じる筋紡錘からの求心性入力量に変化し、結果として運動イメージを行わなかった場合とは異なる運動を知覚した可能性があるものと推察する。

3-2. 皮質下における動筋・拮抗筋関係にある筋からの求心性入力の統合

筋腱に対して振動刺激を行った場合、振動刺激による筋紡錘からの求心性入力は、主に後索-内側毛帯路を上行し、大脳皮質に投射される³⁰⁾。後索-内側毛帯路では、延髄の後索核と視床の後外側腹側核でシナプスを介する²⁹⁾。そして、後外側腹側核からの線維は、一次体性感覚野を経て、二次体性感覚野および頭頂連合野に投射し、それらの体性感覚情報が集約、統合されて運動知覚が生じる。この後索-内側毛帯路において筋紡錘からの求心性入力は、中継核を介するたびに末梢からの入力同士の、あるいは大脳皮質から下行性の修飾をうける⁴⁹⁾。過去の研究から、中継核である後索核には、異なる受容野をもつ隣接した二次感覚ニューロン間で抑制し合ったり (図 22-A)、重複した受容野をもつ複数の二次感覚ニューロン間で相互に活動を高めたりする (図 22-B) 機構があるとされている⁴⁹⁾。そして、そのような機構によって修飾された求心性入力が上位中枢に送られ、最終的に運動を知覚する。このように筋紡錘からの求心性入力は、大脳皮質に投射されるまでにいくつかの中継核でシナプス伝達を繰り返す。そして、そのシナプスが形成される中継核において、筋紡錘からの求心性入力が修飾されることが示唆されるため、本研究では動筋・拮抗筋からの求心性入力が統合される部位については言及できない。しかし、先に述べたように後索核においては、図 22 で示す機構が存在することがわかっていることから、少なくとも後索核でシナプスを介す際には動筋・拮抗筋からの求心性入力が互いに抑制し合ったりするような現象が生じていた可能性があるものと考えられる。ただし、他の部位でも同様の現象が生じていた可能性は否定できない。以上のことから、動筋・拮抗筋を同時に振動刺激した際には、それによって生じた筋紡錘からの求心性入力が様々な中継核でシナプスを介す際に、互いに抑制し合い、最終的にあたかも演算処理がなされたかのような

関係で統合されることが説明づけられた。

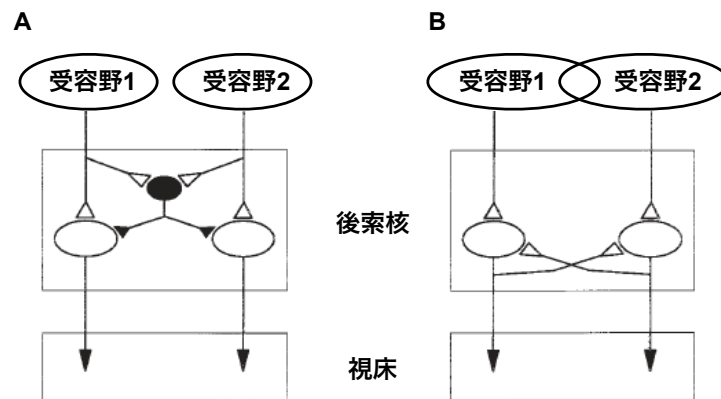


図 22. 後索核における求心性入力の統合（文献 49 を改変し引用）

末梢から複数の二次感覚ニューロンが投射され、後索核でシナプス接続をしている模式図である。○は促進性の三次感覚ニューロン、●は抑制性の介在ニューロンを示す。

- A: 異なる受容野をもつ二次感覚ニューロンが後索核でシナプスを介す際には、抑制性の介在ニューロンを介して互いに抑制し合う。
- B: 重複した受容野をもつ二次感覚ニューロンが後索核でシナプスを介す際には、三次感覚ニューロン同士で促進し合う。

3-3. 運動イメージに伴う大脳皮質からの下行性入力の影響

前述したように動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力は、収束と発散を繰り返して、脊髄上行路の中継核で修飾されながら大脳皮質に伝達し、統合される。さらに、この促進・抑制機構は大脳皮質からの遠心性の修飾を受けている⁴⁹⁾。そのため、動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力は、皮質下にある後索核などの中継核において、末梢からの入力同士による修飾と大脳皮質からの遠心性の修飾を受けた後に大脳皮質に入力することになる。前者については、3-2で述べた通りである。後者について、大脳皮質と延髄には線維連絡があり、皮質脊髄路の軸索は、副側枝を後索核に接続していることがわかっている⁵⁰⁾。そのため、本研究結果が得られた要因の一つとして、運動イメージを行うことによって生じた大脳皮質からの遠心性入力が、後索核あるいは他の中継核で筋紡錘からの求心性入力を修飾する可能性があるものと推察する。

運動イメージを行う際には、補足運動野や運動前野といった高次運動野で計画された運動指令の一部が、随伴発射として感覚野へ伝えられ、知覚過程に影響を及ぼすとされている²⁰⁾。そのため、本研究において運動知覚に影響を及ぼす要因には、筋紡錘からの求心性入力のみならず、運動イメージに伴う随伴発射の両者があるものとする。そのため、振動刺激による運動錯覚と運動イメージを同時に行ったことにより、両者によってもたらされた異なる感覚情報が統合され、その結果としてそれぞれ単独で行った場合とは異なる運動を知覚したものと推察する。本研究では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状況下においても、運動イメージを行うことによって、運動を知覚することが示された。これは、動筋・拮抗筋を同周波数で刺激しているため、振動刺激単独では関節運動が生じていないという感覚情報が知覚されるが、同時に運動イメージを行うことによって関節運動が生じているという感覚情報が高次運動野から感覚中枢に伝えられ、結果としてイメージした方向への運動を知覚した可能性があるものと推察する。また、動筋・拮抗筋の筋紡錘からの求心性入力により、振動刺激単独でも運動を知覚するような状況下においても、運動イメージを行うことによって知覚する運動が変化した。これは、振動刺激による筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動によってもたらされる感覚情報の不一致が生じたため、それらが統合され、結果としてそれぞれ単独で行った時とは異なる運動を知覚した可能性があるものと推察する。

4. 本研究の限界

本研究は、筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動の統合で生じる運動知覚を、知覚した運動の角速度の変化から推察するという心理物理実験に基づくものである。扱っている変数は、振動刺激の周波数と運動イメージの速度、そして知覚した運動を再現させた際の角速度である。本研究は、それらの関係性から運動イメージによる脳活動と筋紡錘からの求心性入力が統合された結果を観察するものであり、解剖学的ならびに生理学的にどの部位でどのような神経活動によって統合が生じているのかまでは言及することができない。以上が本研究に

おける研究限界の一つであり、今後の研究課題である。

VI. 結語

本研究では、動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの求心性入力と運動イメージによる脳活動が同時に生じる状況下において、それらが統合されることによって知覚する運動にどのような変化が生じるのかを検証した。本研究結果から、動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの求心性入力統合され、運動錯覚を生じないような状況下においても、運動イメージを重畳することによって、イメージした方向への運動知覚を生じることが明らかとなった。さらに、その運動知覚はイメージした運動の速度と、筋紡錘からの求心性入力量が影響することが示唆された。また、動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの求心性入力統合され、運動錯覚を生じるような状況下においては、運動イメージを重畳することによって生じる運動知覚がイメージした方向へ偏移することが明らかとなった。さらに、その運動知覚は動筋・拮抗筋関係にある筋の筋紡錘からの求心性入力の合計量に関わらず、その差に依存して変化することが示唆された。本研究結果は、運動感覚の生成機構を解明するための一助となるものである。

VII. 謝辞

指導教員である札幌医科大学保健医療学部理学療法学第二講座の片寄正樹教授は、学部生の頃は担任として、そして大学院の博士課程に進学してからは指導教員として、長年に渡って本当にお世話になりました。研究面はもちろんのこと、理学療法士としての姿勢や考え方など、片寄教授のもとで非常に多くのことを学ばせていただきました。心より深く感謝の意を表します。

また、副指導教員である保健医療学部理学療法学第二講座の金子文成准教授には、本論文の作成にあたり、研究内容の検討から論文執筆にいたるまで、大変多くのご指導をいただきました。私が将来、研究者を志したのは、金子准教授の研究に対する姿勢に感銘を受け、同時に一つの研究を形にしていく面白さを、金子准教授のもとで身をもって体験させていただいたからです。研究を進めていく上で何度も困難に行き当たりましたが、その度に丁寧に指導いただき、本当に有難うございました。心より深く感謝の意を表します。

医学部神経科学講座の長峯隆教授には、研究方法を検討上で多くのご助言をいただきました。神経生理学の奥深さと難しさ、興味深さを改めて感じました。心から感謝申し上げます。

最後に、金子研究室の関係者各位には、オペレーターや被験者などでたくさんのご協力いただきました。また、本研究を行う上で困難が生じた際には、ともに解決方法を模索し、励まし合いながら研究を進めてまいりました。心より御礼申し上げます。

VIII. 引用文献

- 1) 金子文成: 運動感覚機能の向上は運動機能の向上に結びつくか. バイオメカニズム学会誌. 31: 196-200, 2007
- 2) Gandevia S.C.: Kinesthesia: roles for afferent signals and motor commands. Rowell B.L., Shepherd T.J. ed. Handbook of Physiology 12. New York, Oxford University Press, 1996, p128-172
- 3) 小川哲郎: 膝状体外視覚系, 感覚の生理学. 「新生理科学大系9」 田崎京二, 小川哲郎 編, 医学書院, 1989, p151
- 4) Donaldson I.M.: The functions of the proprioceptors of the eye muscles. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 355: 1685-1754, 2000
- 5) Goodwin G.M., McCloskey D.I., Matthews P.B.C.: The contribution of muscle afferents to kinesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents. Brain. 95: 705-748, 1972
- 6) Roll J.P., Vedel J.P.: Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography. Exp. Brain Res. 47: 177-90, 1982
- 7) Gilhodes J.C., Roll J.P., Tardy-Gervet M.F.: Perceptual and motor effects of agonist-antagonist muscle vibration in man. Exp. Brain Res. 61: 395-402, 1986
- 8) Roll J.P., Vedel J.P., Ribot E.: Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. Exp. Brain Res. 76: 213-222, 1989
- 9) Figuiere S.C., Romaguere P., Gilhodes J.C., et al.: Antagonist motor responses correlate with kinesthetic illusions induced by tendon vibration. Exp. Brain Res. 124: 342-350, 1999.
- 10) Romaguere P., Anton J.L., Roth M., et al.: Motor and parietal cortical areas both underlie kinaesthesia. Cogn. Brain Res. 16: 74-82, 2003
- 11) Kavounoudias A., Roll J. P., Anton J. L., et al.: Proprio-tactile integration for kinesthetic perception: an fMRI study. Neuropsychologia. 46: 567-575, 2008
- 12) Jeannerod M.: The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. Behav. Brain Sci. 17: 187-245, 1994
- 13) Decety J., Grezes J.: Neural mechanisms subserving the perception of human actions. Trends Cogn. Sci. 3: 172-178, 1999
- 14) Yahagi S, Kasai T.: An increase in cortical excitability with no change in spinal excitability during motor imagery. Percept Mot. Skills. 83: 288-290, 1996
- 15) Kasai T., Kawai S., Kawanishi M., et al.: Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery. Brain Res. 744: 147-150, 1997

- 16) Kaneko F., Murakami T., Onari K., et al.: Decreased cortical excitability during motor imagery after disuse of an upper limb in humans. *Clin. Neurophysiol.* 114: 2397-2403, 2003
- 17) Aoyama T., Kaneko F.: The effect of motor imagery on gain modulation of the spinal reflex. *Brain Res.* 1372: 41-48, 2011
- 18) Kitada R., Naito E., Matsumura M.: Perceptual changes in illusory wrist flexion angles resulting from motor imagery of the same wrist movements. *Neuroscience.* 109: 701-707, 2002
- 19) Thyriou C., Roll J.P.: Perceptual integration of illusory and imagined kinesthetic images. *J. Neurosci.* 29: 8483-8492, 2009
- 20) Naito E., Kochiyama T., Kitada R., et al.: Internally simulated movement sensations during motor imagery activate the cortical motor areas and the cerebellum. *J. Neurosci.* 22: 3683-3691, 2002
- 21) Kaneko F., Yasojima T., Kizuka T.: Kinesthetic illusory feeling induced by a finger movement movie effects on corticomotor excitability. *Neuroscience.* 149: p976-984, 2007
- 22) Aoyama T., Kaneko F., Hayami T., et al.: The effects of kinesthetic illusory sensation induced by a visual stimulus on the corticomotor excitability of the leg muscles. *Neurosci. Lett.* 514: 106-109, 2012.
- 23) Collins D.F., Prochazka A.: Movement illusions evoked by ensemble cutaneous input from the dorsum of the human hand. *J. Physiol.* 496: 857-871, 1996
- 24) Collins D.F., Refshauge K.M., Gandevia S.C.: Sensory integration in the perception of movements at the human metacarpophalangeal joint. *J. Physiol.* 529: 505-515, 2000
- 25) Collins D.F., Refshauge K.M., Todd G., et al.: Cutaneous receptors contribute to kinesthesia at the index finger, elbow, and knee. *J. Neurophysiol.* 94: 1699-1706, 2005
- 26) Hagbarth K.E.: Microelectrode recordings from human peripheral nerves (microneurography). *Muscle Nerve. Suppl* 11: S28-35. 2002
- 27) マーク L・ラタッシュ 著, 笠井達哉, 道免和久 監訳: 運動神経生理学講義. 第 10 章 単一筋の随意収縮制御. 東京, 株式会社大修館書店, 2002, p95
- 28) 吉村恵: 体性感覚. 小澤澗司, 福田康一郎, 本間研一, 他編. 標準生理学 第 7 版. 東京, 医学書院, 2009, p221-233
- 29) 工藤典雄: 脊髄. 小澤澗司, 福田康一郎, 本間研一, 他編. 標準生理学 第 7 版. 東京, 医学書院, 2009, p320-340
- 30) M.F. ベアー, B.W. コノーズ, M.A. パラディーソ 著, 加藤宏司, 後藤薫, 藤井聡, 山崎良彦 監訳: 神経科学 脳の探求 第 2 版. 第 12 章 体性感覚. 東京, 西村書店, 2009, p299-327

- 31) Figuiere S.C., Romaguere P., Gilhodes J.C., et al.: Relations between the directions of vibration-induced kinesthetic illusions and the pattern of activation of antagonist muscles. *Brain Res.* 881: 128-138, 2000
- 32) Naito E., Ehrsson H.H.: Kinesthetic illusion of wrist movement activates motor-related areas. *Neuroreport.* 12: 3805-3809, 2001
- 33) Naito E., Roland P.E., Ehrsson H.H.: I feel my hand moving: A new role of the primary motor cortex in somatic perception of limb movement. *Neuron.* 36: 979-988, 2002
- 34) Shibata E., Kaneko F.: Kinesthetic perception based on integration of motor imagery and afferent inputs from antagonistic muscles with tendon vibration. *Neurosci. Lett.* 541: 24-28, 2013
- 35) Roll R., Gilhodes J.C., Roll J.P., et al.: Proprioceptive information processing in weightlessness. *Exp. Brain Res.* 122: 393-402, 1998
- 36) Kavounoudias A., Roll R., Roll J.P.: Foot sole and ankle muscle inputs contribute jointly to human erect posture regulation. *J. physiol.* 532: 869-878, 2001
- 37) Thyryon C., Roll J.P.: Predicting any arm movement feedback to induce three-dimensional illusory movements in humans. *J. Neurophysiol.* 104: 949-959, 2010
- 38) Naito E., Ehrsson H.H., Geyer S., et al.: Illusory arm movements activate cortical motor areas: a positron emission tomography study. *J. Neurosci.* 19: 6134-6144, 1999
- 39) Naito E., Nakashima T., Kito T., et al.: Human limb-specific and non-limb-specific brain representations during kinesthetic illusory movements of the upper and lower extremities. *Eur. J. Neurosci.* 25: 3476-3487, 2007
- 40) Hagura N., Takei T., Hirose S., et al.: Activity in the posterior parietal cortex mediates visual dominance over kinesthesia. *J. Neurosci.* 27: 7047-7053, 2007
- 41) Fischer M, Schafer SS: Temperature effects on the discharge frequency of primary and secondary endings of isolated cat muscle spindles recorded under a ramp-hold stretch. *Brain Res* 840: 1-15, 1999
- 42) Jeannerod M.: Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia.* 33: 1419-1432, 1995
- 43) Roland P.E., Larsen B., Lassen N.A., et al.: Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *J. Neurophysiol.* 43: 118-136, 1980
- 44) Porro C.A., Francescato M.P., Cettolo V., et al.: Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: A functional magnetic resonance imaging study. *J. Neurosci.* 16: 7688-7698, 1996
- 45) Roth M., Decety J., Raybaudi M., et al.: Possible involvement of primary

- motor cortex in mentally simulated movement: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroreport*. 7: 1280-1284, 1996
- 46) Stephan K.M., Fink G.R., Passingham R.E., et al.: Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *J. Neurophysiol.* 73: 373-386, 1995
 - 47) Ehrsson H.H., Geyer S., Naito E.: Imagery of voluntary movement of fingers, toes, and tongue activates corresponding body-part-specific motor representations. *J. Neurophysiol.* 90: 3304-3316, 2003
 - 48) Blanchard C., Roll R., Roll J.P., et al.: Combined contribution of tactile and proprioceptive feedback to hand movement perception. *Brain Res.* 1382: 219-229, 2011
 - 49) Marino J, Martinez L, Canedo A: Sensorimotor integration at the dorsal column nuclei. *News Physiol. Sci.* 14. 231-237, 1999
 - 50) Bentivoglio M, Rustioni A: Corticospinal neurons with branching axons to the dorsal column nuclei in the monkey. *J. comp. Neurol.* 253. 260-276, 1986

研究説明書

平成 年 月 日

様

研究課題

運動イメージと腱振動刺激による求心性入力との統合で生じる運動知覚に関する研究

1. はじめに

この文書は、運動感覚が生成されるメカニズムの解明に関する研究内容について説明したものです。実験実施者からこの研究に関する説明をお聞きになり、研究の内容を十分に理解した上で、この研究に参加されるかどうかあなたの意思で決めて下さい。この研究に参加しても良い場合には、「同意書」にご署名をいただきますようお願い致します。

たとえ参加されない場合でも、不利益が生じることはありません。また、この研究の参加に同意した後でも、自由に参加を辞退することが出来ます。

2. この研究の目的

本実験では、加齢や疾病による運動機能低下を予防・治療するために体性感覚入力や運動イメージなどの介入が、運動学習をはじめとしたヒトの運動制御機構および体性感覚知覚機構にどのような影響を与えるかについて明らかにすることを目的とし、実施しているプロジェクトの一つです。このような実験で得られた知見は、疾病後の運動障害に対するリハビリテーションや、加齢による運動機能低下予防方法を確立するために役立てます。

3. 研究の方法

3-1. 介入方法

本研究では、左手関節周囲筋に対する振動刺激を行います。振動刺激を与える事により、安静にしているにもかかわらず自身の手が動いているような錯覚を生じます。また、振動刺激と同時に運動イメージを行います。運動イメージとは、実際の運動をしない状態で、運動している状況を頭で思い浮かべることです。実際に行ってもらおう運動イメージは手関節を動かしているものになります。

3-2. 測定装置ならびに測定方法

本研究では、下記の装置を用いて計測を行います。

1) 筋電計

筋の活動状況を計測するための装置です。1セット2つの電極を皮膚上に合計2セット貼付します。詳細については実験の際に実物を見せながら説明します。

2) 3次元小型ワイヤレスモーションキャプチャ

関節角度や角速度を測定する装置です。小型で軽量であり、装着時や検査時に不快感や痛みを生じることはありません。詳細については実験の際に実物を見せながら説明します。

3-3. 実験期間

学位論文計画書審査会の承認日以降に開始し、平成25年3月31日まで実施します。

4. 研究への予定参加人数

健康な成人を対象とし、15名程度測定します。

5. 対象者が受ける不利益および危険性と安全対策

対象者が何らかの費用を負担することはありません。

実験中に体調が悪くなった場合には、直ちに実験を中止し、病院等に運ぶなどの措置をとります。また、健康被害が生じた場合には、理学療法士賠償責任保証制度を利用し、必要となった医療費の健康保険自己負担分の補償を行います。

一つの実験課題について、休憩を含めて計測にかかる時間は3時間程度となるように、適切な試技を設定して実施します。

6. 個人情報の保護

実験に関連して、身長・体重・年齢などの体格に関する情報、過去の病歴と現在の身体状況、運動経験などを聞き取り調査します。しかし、これらの情報は実施責任者しか見ることがないよう厳重に管理されます。そのため、第三者に個人情報が漏れる心配はありません。また、取得データは個人を特定できる形で公表することはありません。今回取得するデータに個人の不利益になるような特徴は現れません。

7. 実験対象者が実験に参加しないことへの自由等

- 1) 実験への参加を承諾する際には、実験に関する説明を受ける必要があります。
- 2) 実験対象者は、この実験に参加しない自由を持ち、参加しないことによる不利益はありません。
- 3) 実験参加への同意をした後であっても、不利益を受けることなくいつでも同意を撤回できます。それまでに得た実験データは完全に消去するとともに、紙媒体のものはシュレッダーにかけて破棄します。

4) 実験実施中であっても、実験の中止要求をいつでも口頭または書面で要求できます。また、実験が中止された場合、途中までの実験データは完全に消去するとともに、紙媒体のものはシュレッダーにかけて破棄します。

8. この研究に関する資料の閲覧

あなたが、この研究の内容をもっと詳しく知りたい場合には、研究実施計画書を閲覧することができます。希望される場合には実施責任者にお申し出下さい。

9. 研究結果の取り扱い

この研究の結果は 2012～2013 年頃に公表する予定です。結果を実験対象者の方にお知らせする事はありませんが、実施責任者に申し出て頂ければお知らせ致します。

本研究の結果により何らかの新たな知見が得られる事があります。その際に生じる特許、その他知的財産に関する権利（特許権）は、提供されたデータに対してではなく、研究者達が研究やその成果の応用を行う事によって生まれた新しいアイデアに対するものです。そのため、特許権の発生により経済的利益が生じても、あなたはその権利を主張できません。本研究の結果によって生じる特許、その他知的財産に関する権利は札幌医科大学に帰属します。

10. 問い合わせ先

この研究について、心配な事や分からない事、何か異常を感じられた時はいつでも遠慮なく下記までご連絡ください。

・研究実施者

札幌医科大学大学院 保健医療学研究科 理学療法学・作業療法学専攻
柴田恵理子

E-mail : shiba-e@sapmed.ac.jp

平日 : 011-611-2111 (2967)

夜間・休日 : 080-1832-0783

・主任指導教員

札幌医科大学大学院 保健医療学研究科 理学療法学・作業療法学専攻
片寄正樹

E-mail : katayose@sapmed.ac.jp

平日 : 011-611-2111 (2844)

研究協力同意書

平成 年 月 日

札幌医科大学大学院保健医療学研究科
片寄 正樹 様

私は次の1-5の事項について了承し、調査・研究について協力いたします。

- 1 本研究の目的と方法
- 2 予期される危険性
- 3 同意しない場合でも不利益を受けないこと
- 4 同意をいつでも撤回できること
- 5 その他のプライバシーの保護など被験者の人権に係る事項

(研究協力者)

氏 名 _____ ⑩

住 所 _____

電 話 : _____

研究実施者：札幌医科大学大学院保健医療学研究科
理学療法学・作業療法学専攻スポーツ理学療法学分野
院 生 名 柴田 恵理子
(連絡先) 札幌市中央区南1条西17丁目
電話：011-611-2111 (内線2967)

主任指導教員：札幌医科大学大学院保健医療学研究科
理学療法学・作業療法学専攻スポーツ理学療法学分野
教 授 片寄 正樹
(連絡先) 札幌市中央区南1条西17丁目
電話：011-611-2111 (内線2844)