

身体動揺の周波数応答から浮かび上がる日常動作における身体性 —プリミティブな暗黙知となる動作の特性—

Embodiment emerging from frequency response of body sway in behavior activity
- Characteristics of activity to become primitive tacit knowledge -

高田 勇^{*1,2}
Yu Takada

跡見 順子^{*2}
Yoriko Atomi

清水 美穂^{*2}
Miho Shimizu

高田 有希^{*1}
Yuki Takada

^{*1} 宇野病院
Uno Hospital

^{*2} 東京農工大学材料健康科学寄附講座
Material Health Science, Tokyo University of Agriculture and Technology

富田 昌夫^{*3}
Masao Tomita

跡見 友章^{*4}
Tomoaki Atomi

長谷川 克也^{*5}
Katsuya Hasegawa

^{*3} 藤田保健衛生大学
リハビリテーション学科
Department of Rehabilitation,
Fujita Health University

^{*4} 帝京科学大学
理学療法学科
Department of Physical Therapy,
TEIKYO University of Science

^{*5} JAXA
宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

In this study, we measured body sway as acceleration during maintaining a certain posture and performing basic motions such as waking up, getting up and walking, and analyzed frequency characteristics of acceleration data. By qualitatively evaluating and interpreting frequency responses of human body from the viewpoint of "localization" of ecological psychology, I made a new proposal about characteristics of behavior activity such as postural control, basic motion and objective motion, the embodiment appearing therein and its changes due to therapeutic intervention.

1. はじめに

人の身体は剛体ではなく分節的かつ動的に安定するよう設計されている。その一例として、テンセグリティ仮説が挙げられる [Turvey 2014]。また我々が行ってきた静止立位の研究においても、その分節性や動的な制御の意味性や重要性は徐々に明らかとなりつつある [高田 2016; 八木 2016]。人はその分節的かつ自由度の高い身体を巧みに協調させて動作を行っている。誰もが出来る日常動作では、行為の際に四肢の動きを無自覚的かつ自律的に行い、これはプリミティブに獲得される。しかし、その特性を評価することは難しかった [高田 2016]。今回は日常動作における身体動揺の周波数解析を行っている報告 [MacDougall 2005] を参考にしながら、立位や動作時の身体動揺を加速度として計測し周波数解析を行った。人の身体動揺の周波数応答を、後述する生態心理学の“定位”という側面から捉え、動作の特性やそこに表れる身体性、治療的な介入によるそれらの変化について、定性的な評価を中心に検討した。

1.1 定位

人が行為をする際、実際に動いて触って分かること(身体知覚)と見て分かること(空間知覚)が一致することにより、今ある環境に身体を定位させ、日常のスムーズな行為が可能となる [富田 2004]。なお、身体知覚による定位を“基礎的定位”、空間知覚による定位を“空間的定位”という [富田 2007]。基礎的定位とは、体性感覚を主体とした知覚システムによって重力の方向や支持面との接触を知覚し、それを身体と関連づける、ということである。また空間的定位とは、視覚や聴覚といった遠隔受容器の知覚システムによって空間の情報を取り込み、対象の位置や方向を自分の身体と関連づける、ということである。

1.2 バランス戦略

立位のバランス戦略で広く知られているものとして、姿勢制御を少ない自由度で表現できる股関節戦略や足関節戦略がある [Horak 1986]。しかし静的で部分的な表現に限られ [Bardy ら 1999]、実際に今回のような動作の評価や分析には適応し得ない。そこで我々は、Counter weight を活性化する戦略と Counter Activity 戦略 [Klein-vogelbach 1990; 富田 2000] に着目している。Counter weight を活性化する戦略は、身体の表面に存在する表在筋や多関節筋といった比較的大きな筋が、頭頸部から胸部、腰部から骨盤帯というように体幹をいくつかの大きな塊としてセグメントを形成し、そのセグメント同士の重さの均衡を保つことで身体動揺を制御する、という「錘の釣り合いによるバランス戦略」である。この戦略は、遠い対象物へリーチするなどの動作では活用されるべき重要な戦略であるが、身体動揺や外乱に対して柔軟に対応することができないという欠点があり、過剰な安定に繋がりがやすい戦略である可能性がある。一方、Counter Activity 戦略は、身体の深部に存在する深層筋や脊柱を構成する個々の椎骨を結ぶ単関節筋といった比較的小さく短い筋が姿勢制御に積極的に参加し、体幹の分節的な制御によって身体動揺を身体全体で分散する、という「拮抗筋活動によるバランス戦略」である。この戦略は、身体動揺に対して姿勢の微調整が可能になる他、外乱には柔軟に対応できる可能性がある。

1.3 運動と周波数、リズム

近年では神経活動に関わるリズム [Karalis 2016] も注目されている。動作に関しては、日常生活に欠かせない歩行や咀嚼、発話や書字などの経時的な運動の制御には、その構成要素である単一の運動には解消できない特質として、運動の時間管理の役割を担うリズムがあるとされており [長崎 1997]、運動や動作の周波数やリズムに着目することは重要である。

2. 実験内容

2.1 対象

40歳代の健康男性1名、BMI 20.68、腰痛の訴えあり。

2.2 計測および解析方法

加速度計(ATR-Promotions 社製、小型無線ハイブリッドセンサ WAA006、sampling 周波数 200Hz) 4つを使用し、対象の足関節前面(足)、上前腸骨棘(骨盤)、剣状突起(胸部)、額(頭部)に1つずつ、両面テープと伸縮性バンドで固定した。胸と頭は正中線上に、足と骨盤は徒手的に骨盤の左右方向の可動性を評価してその可動性が低下している側(本実験の対象では右側)に、加速度計を装着した。なお加速度計の X 軸が身体の左右方向(右; +方向, 左; -方向)、Y 軸が身体の上下方向(上; +方向, 下; -方向)、Z 軸が身体の前方向(前; +方向, 後; -方向)となるように設定した。以下の評価項目における身体動揺を、加速度として計測した。解析には Matlab_R2016b を使用した。各評価項目の 20 秒間の X 軸のデータについて、hanning window を用いてパワースペクトル(Power)、スペクトルコヒーレンス(振幅二乗コヒーレンス、Magnitude-Squared Coherence; MSC)、クロススペクトルによる位相(Phase)を算出した。なお、MSC は 2 つの時系列間の周波数領域の相関や関連度を特定することができ、Phase は周波数領域の著しい相関がある場合に有効であり、今回は主に MSC を利用することとした。

2.3 評価項目(計測順に列挙)

1 回目 治療的介入前(pre)

①安静背臥位 ②歩行(快適な速度で歩く) ③タンデム歩行(一直線上に足を揃えて歩く) ④リーチ動作(ペットボトルの水を飲む仕草をする) ⑤静止立位(真っ直ぐ立つように指示する) ⑥基本動作(臥位から起立歩行着座を経て臥位に戻る) ⑦揺すり運動(背臥位で能動的に体幹を左右に揺する)

1 回目 治療的介入後(post1)

⑧安静背臥位 ⑨静止立位 ⑩タンデム歩行

2 回目 治療的介入後(post2)

⑪安静背臥位 ⑫歩行 ⑬タンデム歩行 ⑭リーチ動作 ⑮静止立位 ⑯基本動作 ⑰揺すり運動

2.4 治療的介入

(1) 頸部からの他動的な揺すり運動

頸部から脊柱を小さく揺すり、その揺すり刺激を全身に伝播させていく、他動的な運動療法である。小さな振幅で揺ることによって筋に生じる単位長あたりの刺激は、短く小さな筋、すなわち深層筋において大きくなる。つまり小さく揺することは、脊柱の深層筋を選択的に刺激し、その活動性を高められる可能性がある。方法は、富田[富田 2010]によって報告されているように行った。軽度屈曲位で頭頸部を支え、十分に力を抜くように指示し、胸鎖乳突筋を基準として左右の筋緊張を触診する。力を抜いた後の筋緊張に左右差が残る時、頸部を側屈、回旋し両側の筋緊張が同じになる位置を探す。その位置で頸部を小さく左右、あるいは長軸方向に揺すり、左右の筋緊張が同じであることを確認しながら正中まで戻す。正中で小さく揺ることを続け、胸鎖乳突筋だけでなく頸部の伸筋を含めて筋緊張が整ったら、頭部の正中線と体幹の正中線が一致したところで胸郭、骨盤、そして全身的に揺すり刺激を伝播させる。揺るることによ

り表在筋の余分な緊張が抜けたことを確認した後、胸郭や骨盤の関節包や靭帯といった結合組織の硬さを解くように他動的に動かし、十分な可動性を引き出す。

(2) 歩行様運動(2 回目治療的介入時のみ実施)

背臥位で対象自身の歩行リズムに合わせ、上下肢をリズムよく交互に運動する。まずは上肢を組むように右手で左肘を、左手で右肘を軽く支え、気楽に左右に揺する。下肢は、股関節が外転外旋せず両膝蓋骨が天井を向くようにし、左右交互に屈伸させる。上肢が右に移動した際に、右下肢が屈曲位、左下肢が伸展位となるように、上下肢を協調的に運動させる。

3. 結果・考察

前述した評価項目から、安静背臥位、静止立位、タンデム歩行、揺すり運動を取り上げた。なお自省の意味も込めて、今回は定性的な評価が中心であり、今後検討すべき課題が山積していることを先に述べておく。

3.1 周波数応答としての身体動揺

物には固有の振動数があり、長く大きな物はゆっくり、短く小さい物は速く揺れる。それを人の身体に当てはめると、頭頸部、胸腹部、下肢といった大きなセグメント(体節)に分けるとそれらの固有振動数は低くなる。胸腹部を胸郭上部、胸郭下部、腹部、骨盤といったように小さなセグメントに分けるとそれらの固有振動数は高くなる。周波数解析によって算出される Power との関係を考えて、1Hz のような低い周波数帯の Power は、身体がある程度まとまった大きなセグメントでゆっくりと動揺した結果と考えられる。また、Power にはいくつかのピーク値が存在し、そのピーク周波数の前後の周波数帯域が広がっていない場合は、限られた周波数帯域でしか身体が動揺しておらず、変化の許容範囲が狭く、身体内部の柔軟性が乏しい状態と考えられる。逆に、ピーク周波数の前後の周波数帯域にある程度の広がりがある場合は、変化の許容範囲が広く、柔軟に動ける可能性のある身体であると考えられる。特に、それが人の運動の中では比較的高く、反復運動やリズム運動の鬼門の周波数とも言われる 4Hz よりも高い周波数帯で見られる場合は、身体内部の柔軟性が高く、筋活動で屈曲伸展して身体やセグメントの長さがわずかながらも変化できる状態で揺れている可能性が考えられる。それ以上に高い周波数帯の Power については小さなセグメントの内部が更に小さいセグメントに分かれ、それが独立して細かく動揺したり振動したりしている可能性も考えられる。その場合でもピーク周波数の前後の周波数帯域が広がっていない場合は、更に小さく分かれたセグメントの形状変化は乏しく固定的な状態である可能性が考えられる。

3.2 姿勢保持、基本動作、目的動作の特性

ここでは身体動揺の周波数応答と姿勢や動作の特性の結びつきを考えてみたい。

(1) 姿勢保持(安静背臥位, 図 1)

計測中に、視診で確認できる寝返りなどの体動が生じていないことを確認している中で、安静背臥位で計測し得る身体動揺やその要因とは何だろうか。足は 4-5Hz、骨盤は 0-1Hz と 4Hz、胸郭は 0-1Hz と 5Hz、頭部は 5Hz 以上と様々なピーク周波数があり、近年画像解析から微量な身体動揺から心拍を推定する技術が開発されている[Yang 2017]ことも考慮すれば、安静背臥位では呼吸や心拍など生命維持活動に関連したものを含めた様々な振動系が反映されている可能性が考えられる。その中でも、後述する治療的介入による変化を鑑みれば、特に呼吸運動

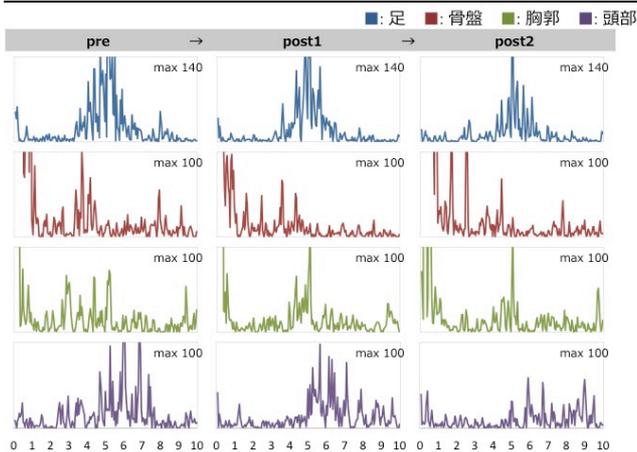


図1 安静背臥位におけるPower Spectrum (Hz)

に関連する筋緊張が身体動揺に反映されやすい可能性が考えられる。なお静止立位については後述する。

(2) 基本動作(図2)

評価項目の歩行や基本動作が該当すると考える。今回は考察の対象として取り上げなかったが、ピーク周波数の前後の周波数帯域に広がりが見られず、ピーク周波数そのものの変化も見られない。これらには後述する目的動作ほど、ある程度の幅や柔軟性あるいは自由度を持った調整や細かな調整は必要とせず、身体をある程度大きなセグメントとしてまとめて扱い、それを重力方向あるいは鉛直方向に対して相互に内部調整(クローズな制御)をして安定させるという前庭と体性感覚に基づいた基礎的な定位による反応と解釈できないだろうか。

(3) 目的動作(図2)

評価項目のタンデム歩行やリーチ動作、静止立位、揺すり運動が該当すると考える。タンデム歩行では、視覚的に確認しながら足尖と踵を合わせて一直線上を歩くという目的を持って、また静止立位は単にボーッと立っているのではなく実験的环境下で真っ直ぐ立つという目的を持った動作を行っており、これは単なる姿勢という点で分析するには事足りず、課題を遂行するための動作、すなわち目的動作として考え解釈する必要がある。これは前述した基本動作のような基礎的な定位による反応で調整できることを前提として、それ以外の対象となる物や課題などの外部に対しても身体を都合よく調整して合わせられるように、セグメントの繋がりを作ってその関係性を調整しながら、身体を空間的に定位する反応が表れた結果と解釈できないだろうか。

3.3 治療的介入による身体性の変化

ここでは pre-post1-post2 あるいは pre-post2 を比較し、治療的介入による身体動揺の周波数応答の変化を捉え、そこから推察される身体性について考えてみたい。

(1) 安静背臥位(①-⑧-⑩, 図4)

治療的介入の前後の全体的な変化として捉えておきたいこととして、MSC のピーク周波数の変化あるいは遷移である。①から⑧への変化としては、2 峰性であった骨盤-頭部と胸郭-頭部

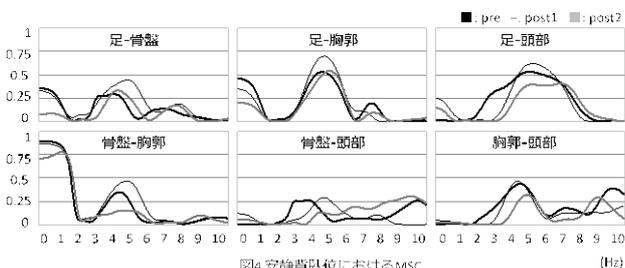


図4 安静背臥位におけるMSC (Hz)

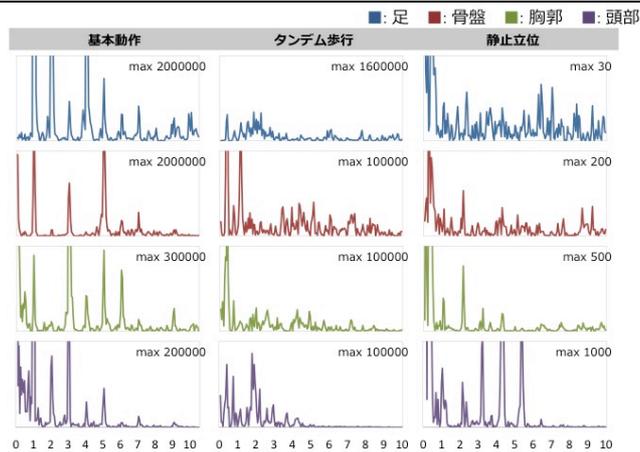


図2 基本動作、タンデム歩行、静止立位におけるPower Spectrum (Hz)

の波形が 1 峰性になったこと、また全ての部位間においても 4-5Hz のピークが強調されたことが挙げられる。さらに ⑩への変化としては、⑧で強調された 4-5Hz の関連度が薄れるとともに、一定かつ共通した変化ではないものの、骨盤-頭部、胸郭-頭部を主として 4Hz 以下の低周波数帯の関連度が低下し、それ以上の高周波数帯の動きにわずかながらの関連が出始めている。これらでは特定かつ固有の要因を挙げることはできないが、全体的な MSC のピーク周波数の変化あるいは遷移や、高周波数帯の変化を考慮した時に、単なる姿勢保持(安静背臥位)という外部環境との接触あるいは相互作用であったとしても、治療的介入によって身体内部に何らかの環境変化が生じた結果、振動系つまり周波数応答に変化が生じた可能性が考えられる。その中でも、変化の要因として推察されるものに、呼吸運動のパターンとそれに関連した筋緊張が挙げられる。頸部から最終的に全身まで揺すり刺激を伝えることによって、(1)頸部に多く存在する呼吸補助筋を含めて頸部や肩甲帯の筋、ひいてはそれらと間接的かつ直接的に繋がりを有する全身の筋の緊張が緩和されて動きやすくなる、(2)その可動性を利用して呼吸補助筋に依存しない横隔膜による呼吸が優位になる、(3)それに伴う身体動揺そのもの、あるいはその動揺の伝播の仕方が変化する、(4)筋緊張と併せて皮膚も含めた体表面の性状が変化する、(5)それに伴って身体内部の様々な自律的反応、あるいは支持面などの外部環境との関係が変化する、といったことが考えられる。言い換えれば、身体内部の固定的な基礎的な定位から解放されるといった身体内部の変化に併せて、外部環境の情報への反応性も高まり、より適応的な安静背臥位を保持しようとする動作になったとも言えないだろうか。

(2) 静止立位(⑤-⑨-⑬, 図5)

治療的介入前⑤において胸郭-頭部の MSC が特徴的であり、0-1Hz を優位に比較的大きな値を示し、これは支持面から遠い体節が分節的に動くというよりも、ある程度のまとまりとしてゆっくりと揺れていた可能性が考えられ、これは Counter-Weight の活性化が優位なバランス戦略と捉えることができるのではないだろうか。足-骨盤、足-胸郭の関連度が低いことから床反力に対して足-骨盤-胸郭を協調的に動かし調整するという Counter-

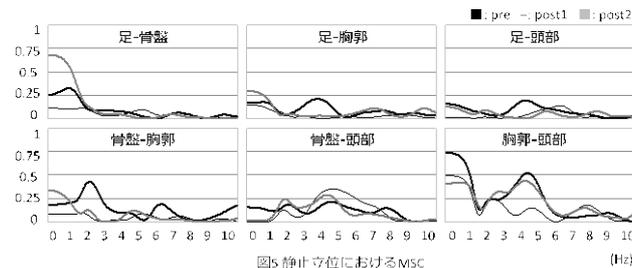


図5 静止立位におけるMSC (Hz)

Activity 戦略の要素が乏しいと考えられる。1 回目治療的介入後⑨では、治療的介入前⑤で優位であった胸郭-頭部の 0-1Hz の MSC が減少したが、足-骨盤、足-胸郭の関連度が低いことには変わりはない。2 回目治療的介入後 ⑩では、胸郭-頭部の 0-1Hz の MSC がさらに減少し 3-5Hz も同程度の関連を持ち始め、胸郭や頭部それぞれが持つ柔軟な動きを協調させるような空間的な情報に基づいた調整も出てきていると同時に、0-1Hz で足-骨盤、足-胸郭の関連を持ちながら動かし調整するという Counter-Activity 戦略の要素が含まれてきた可能性が考えられるのではないだろうか。

(3) タンデム歩行(③-⑩-⑬, 図 6)

治療的介入前③において胸郭-頭部の 0-1Hz の MSC が特徴的であり、これは身体を固定的な状態の中で基礎的の定位をとり全体の動作やバランスを保障していることが考えられる。1 回目 2 回目と治療的介入が進むごとに、胸郭-頭部の 0-1Hz の MSC が減少し、骨盤-胸郭は 8-10Hz、骨盤-頭部は 5Hz 周囲とそれぞれ異なる周波数帯である程度の関連を持ちながら調整しており、これは基礎的の定位と併せて空間的の定位も併いながら分節的かつ内部調整的に課題を遂行した結果と考える。その他にも、それぞれ異なる周波数帯において治療介入前③よりも治療介入後⑩⑬ともに骨盤と胸郭と頭部の足との関連度がわずかながら高まっており、これも基礎的の定位と空間的の定位との調整を図っている表れであると考えられることができる。

(4) 揺すり運動(⑦-⑩, 図 7)

おおよそどの部位間においても共通して表れている 1-3Hz の MSC の高まりが、リズム良く能動的に行っている揺すり運動の周波数を表現していると考えられる。一方、揺すり運動を持続的にに行おうとするとリズムが乱れたり、どのように運動すれば良いのか分からなくなったりと、運動が一定しないことがあり、その乱れやノイズがそれ以外の周波数帯の MSC の高まりに表れると考えられる。治療的介入後の変化として明確に捉えられることの一つとして、足-骨盤や足-胸郭の 4Hz 以上、骨盤-胸郭では 6Hz 以上の関連度が低下することが挙げられ、それはまさにリズムが乱れることなく 1-3Hz のリズム運動に集約された結果であると考えられる。これは治療的介入によって、運動を阻害していたと考えられる硬く固定した筋を含めて全身の筋の緊張状態が変化して柔軟性が高まり、全身的に動かさなかった筋や部位が動かせるようになった可能性が考えられる。またもう一つ、治療的介入後の変化として明確に捉えられることとして、足と骨盤と胸

郭の頭部との関連度が全周波数帯域において顕著に低下することが挙げられる。これは前述したように柔軟性が高まったことと同時に、身体や運動時の分節性が高まったことが考えられ、頭部が独立して安定しながら体幹内部の運動が行っている可能性が考えられる。

4. まとめ

リズムや周波数応答から読み取れる動作の特性や身体性を、生態心理学の“定位”という側面から評価し、それらの枠組みを体系化する可能性がみえた。新たな視点で身体や動作を捉える上で、今回のような定性的な評価を大切にしながらも、今後は対象を増やしたり、同一被検者から反復してデータ収集を行ったりして、データの再現性や妥当性を検討していく予定である。

参考文献

- [Turvey 2014] Michael T. Turvey, et al.: The Medium of Haptic Perception: A Tensegrity Hypothesis. *Journal of Motor Behavior*. 2014; 46(3): 143-187.
- [高田 2016] 高田勇ら: 立位におけるバランス戦略の評価方法に関する検討 -足圧中心と頭部・体幹制御における姿勢調節の特性に着目して-. *理学療法学*. 2016; 43(2): 194-195.
- [八木 2016] 八木崇行ら: 立体角を用いた若年者、高齢者、脳卒中患者の静止立位制御モデル. *日本生理人類学会誌*. 2016. 21(3): 97-105.
- [高田 2016] 高田勇ら: 歩行,歩行様運動,動作における身体動揺の周波数分析から捉える自己組織化の形. 第 4 回「生態心理学とリハビリテーションの融合」研究会. 2016.
- [MacDougall 2005] MacDougall HG, et al.: Marching to the beat of the same drummer: the spontaneous tempo of human locomotion. *J Appl Physiol*. 2005; 99(3): 1164-1173.
- [富田 2004] 富田昌夫: 感受性のたかい身体づくり-定位改善のための運動学習-. *愛知県理学療法士会誌*. 2004. 16: 17-23.
- [富田 2007] 富田昌夫: 自分のことを自分でもわからない-知覚システム間の乖離-. *理学療法学*. 2007. 34: 129-131.
- [Horak 1986] F. B. Horak, et al.: Central Programming of Postural Movements: Adaptation to Altered Support-Surface Configurations. *JOURNAL OF NEUROPHYSIOLOGY*. 1986; 55: 1369-1381.
- [Bardy 1999] B.G. Bardy, et al.: Postural Coordination Modes Considered as Emergent Phenomena. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1999; 25: 1284-1301.
- [Klein-vogelbach 1990] Susanne Klein-vogelbach: *Functional Kinetics*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990, pp. 74-143.
- [富田 2000] 富田昌夫: クラインフォーゲルバッハの運動学. *THE JOURNAL OF Clinical Physical Therapy*. 2000; 3: 1-9.
- [Karalis 2016] Nikolaos Karalis, et al.: 4 Hz oscillations synchronize prefrontal-amygdala circuits during fear behavior. *Nat Neurosci*. 2016; 19(4): 605-612.
- [長崎 1997] 長崎浩: からだの自由と不自由 身体運動学の展望. 中央公論社, 東京, 1997, pp. 89-150.
- [富田 2010] 富田昌夫: 運動療法, その基本を考える. *理学療法学*. 2010. 37: 343-346.
- [Yang 2017] Cheng Yang, et al.: Estimating Heart Rate and Rhythm via 3D Motion Tracking in Depth Video. *IEEE Xplore*. 2017; PP(99): 1-13.

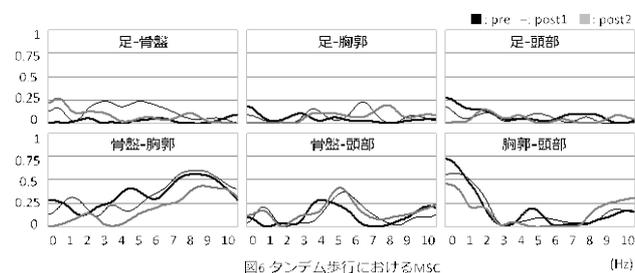


図6 タンデム歩行におけるMSC

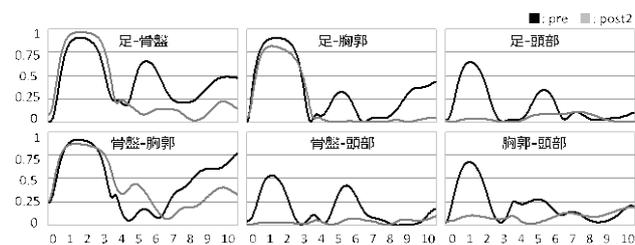


図7 揺すり運動におけるMSC