

## 論文の内容の要旨

論文題目 **The effects of cognitive load on human postural control**

(ヒト立位姿勢制御における認知負荷の影響)

氏名 萩尾 耕太郎

### 【背景と目的】

日常生活において、我々は歩きながら考え事をする、立ち止まって他者と会話をするなど姿勢や歩行の制御をしながら認知的活動も同時におこなうことができる。これら2つの課題を同時におこなう二重課題法を用いた先行研究において、立位姿勢制御と認知処理はお互いに影響していることが示唆されており(Woollacott and Shumway-Cook, 2002, review)、立位中は認知的な処理を必要とする課題の成績が座位よりも低下することが示されている(Kerr et al, 1985)。一方で、姿勢にも変化がみられたとする報告が複数なされている。特に高齢者では反応時間課題や暗算などの認知課題の実行により姿勢動揺が顕著に増加することが示された(Woollacott and Shumway-Cook, 2002, review)。若年者においても姿勢動揺が増加するとする報告(Pellecchia, 2003; Mitra, 2003)がある一方で、姿勢動揺が減少するとする報告(Riley et al., 2003; Swan et al., 2007)が増えている。

姿勢動揺の増加は、認知課題の処理と立位姿勢制御が互いに干渉することで、両方または片方のパフォーマンスが低下すると考えられている(Fraizer and Mitra, 2008)が、姿勢動揺が減少する場合、そのメカニズムとして先行研究では、覚醒度の上昇による姿勢制御の促進(Riley et al., 2003)や運動の自動化(Ueta et al., 2014)など仮説が提唱されている。しかし、その背景にあるメカニズムは解明されていない。そこで本研究では認知的な介入が立位姿勢の制御に与える影響を明らかにすることを目的とした。

## 【研究I】 立位姿勢制御に対する認知的介入の影響

立位姿勢制御に対する認知的介入の影響を明らかにするために、(1)3桁の数字から1桁の数字を繰り返し引き続ける暗算条件(MAS<sub>t</sub>)、(2)自身の姿勢に意識をして、できるだけ揺れないように意識するよう教示した制揺条件(CS<sub>t</sub>)、そして(3)比較の基準として安静立位条件(QS<sub>t</sub>)の3条件を設定した。

### (実験I-1) 床反力中心(COP)の変化 キネマティクスの解析

まず床反力データから床反力中心(COP)を計算し、姿勢動揺の評価をおこなった。その結果、動揺振幅を示すCOPの平均2乗平方根(RMS)は暗算条件で減少すること、そしてCOPの平均速度は制揺条件で増加することが明らかとなった(図1)。さらに、認知的介入によって姿勢動揺が変化するメカニズムを明らかにするために、光学モーションキャプチャシステムによる動作解析を併せておこなった。結果から、股

関節角度の変動が暗算条件で有意に減少することが明らかとなった。各関節のスティフネスの推定値には条件間の差はみられなかった。また身体質量中心(COM)安定化に寄与する関節間協調を示すUCM比率にも条件の差はみられなかった。

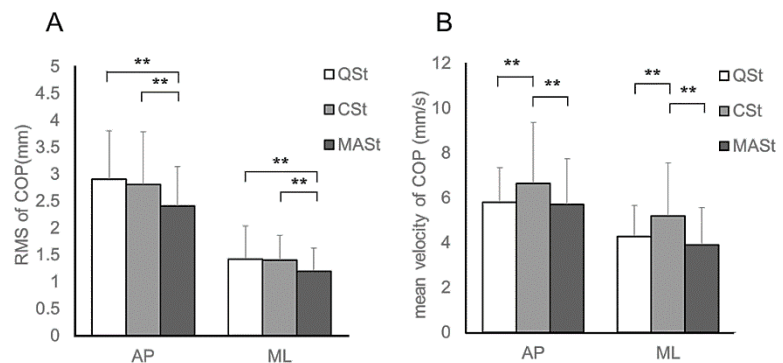


図1 各条件での前後(AP)、左右(ML)方向についてのCOP指標(A: RMS, B: 平均速度)の平均。(\*\*:  $p < .01$ )

### (実験I-2) 暗算課題中の立位

#### 姿勢動揺減少のメカニズム: 呼吸の影響に着目して

姿勢動揺を変化させる身体的な要素として、呼吸や心拍の影響が考えられる。認知課題による呼吸や心拍などの自律神経系の変化が報告されている(Allen and Crowell, 1989)。特に呼吸は姿勢動揺との関わりが強いことが示めされている

(Hodges et al., 2002, Kuznetsov and Riley, 2012)。

そこで呼吸に着目し、呼吸とCOP、そして関節運動との関連性を調べた。呼吸に関する指標の比較では、計算条件において呼吸数が増大し、呼吸の振幅は減少した。また、各被検者における条件間の呼吸振幅の変化率と股関節RMSの変化率に正の相関がみられた。また、条件間の呼吸振幅の変化率とCOP振幅の変化率の間に正の相関がみられた(図2)。この結果は呼吸の振幅の減少が立位中の重心動揺の減少に関連していることを示している。

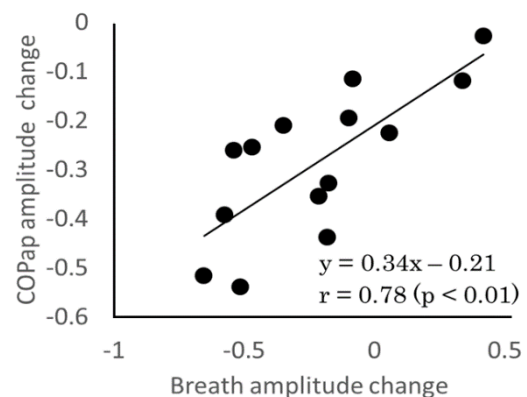


図2 COP 振幅の変化と呼吸振幅の関係

### (実験I-3) 筋活動の解析による制御活動の評価

COP指標の変化は姿勢調整に関わる下腿の筋活動と関連することが考えられる．そこで認知介入の制御活動への変化を明らかにするために、ヒラメ筋(Sol)、腓腹筋外側頭(MG)、そして前脛骨筋(TA)の筋電図(EMG)を測定した．その結果、全体的な筋活動量を示唆するEMGのRMSには条件間の差はみられなかった．EMGの周波数解析の結果から、暗算条件においてMGの低周波(0.1-5.1 Hz)成分の積分値が減少していることがわかった．底屈筋の低周波成分は能動的な姿勢調整を反映すると考えられる(Loram et al. 2005)．動揺振幅が減少していたことから、揺れが少ないために筋活動による調整を必要としなかった可能性が考えられる．そのため、正規化したCOMの位置と速度を7段階に分け、同じ姿勢状態で筋活動が起こっている確率を比較したところ、制揺条件でTAが活動している率が高く、暗算条件でMGが活動している率が少なくなっていることが明らかとなった(図3)．これは、制揺条件では姿勢調整のための筋活動が増加することを示唆している．また、暗算条件では同様な姿勢状態(COM位置、速度)にもかかわらず、安静条件と比較すると姿勢調整が減少していることを示唆する．

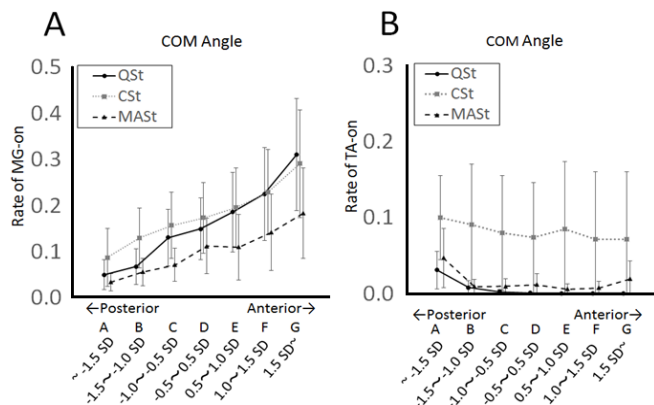


図3 標準化した各 COM 位置における筋活動(A: 腓腹筋 B: 前脛骨筋)が on である確率．横軸は右に行くほど COM が前方にあるときを表している．

### 【研究Ⅱ】外乱に対する姿勢応答に及ぼす認知的介入の影響

先行研究において認知課題条件では姿勢動揺の減少がみられることから姿勢制御が安定化すると考えられていたが、実験I-3の結果より反対に姿勢調整が減少している可能性が示唆されたこと．そこで本当に姿勢調整が安定しているのかについて検討するために、認知課題が外乱への姿勢応答に及ぼす影響を評価した．被検者に対し立位中に前後方向への水平外乱を与え、その後の姿勢応答を測定した．暗算条件と安静立位条件で計測をおこない、姿勢応答のパフォーマンス(COP)と制御のための出力(EMG)について比較したところ、暗算条件では前方外乱後のCOP軌跡の最大値が増大していることが示された(図4A)．つまり、暗算条件では外乱による摂動を抑えられていないことが示唆された．しかし、前方外乱で主動筋となるTAの活動について、全ての時間区間の活動量(EMG積分値)に有意差はみられなかった(図4B)．

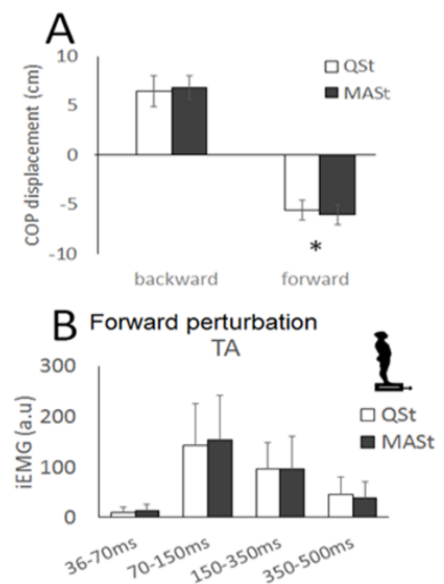


図4 A 外乱後の COP 軌跡の最大値． B 前方外乱の onset からの各時間帯の EMG 積分値(TA)．

### 【研究Ⅲ】立位中の脊髄興奮性に及ぼす認知的介入の影響

研究Ⅰ，Ⅱの結果より，暗算などの認知課題中は，姿勢調整の筋活動が減少すること，そして外乱後の姿勢動揺が悪化することが示唆された．さらに，自らの姿勢に注意すると立位を維持するための姿勢調整が増加することが示唆されている．その背景にある神経メカニズムを明らかにするために，電気刺激により誘発されるHoffman反射(H反射)を用いて各条件での立位中の脊髄興奮性を評価した．背景筋電図には各条件での差はみられなかった．結果として暗算条件ではH反射振幅が有意に増加していた(図5)．

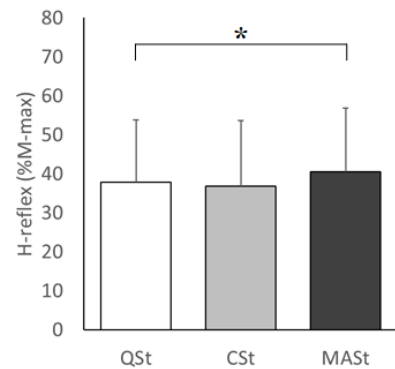


図5 各条件のH反射振幅．安静立位条件(QSt)からの変化の割合を示している．(\*:QStと比較し有意差が確認されたことを示す， $p<.05$ )

### 【考察】

研究Ⅰ-1より，姿勢へ注意を向けるとCOPの平均速度が増加することが示された．先行研究において，姿勢の揺れに注意を向けることは，意識的なプロセスでの制御につながるか，関節スティフネスの増加や共収縮による関節固定の戦略による制御が想定されていた(Ueta et al., 2014; Reynolds, 2010)．本研究の一連の結果は，関節スティフネスや，共収縮では，制揺条件でみられたCOPの平均速度の増加を説明できないことを示した．研究Ⅰ-3でみられたTAの活動の増加は，能動的な姿勢調整活動の頻度を増加させることを示唆している．

一方，研究Ⅰ-1より，暗算条件ではCOP振幅が減少することが示された．先行研究では，認知課題中の姿勢動揺の減少は，立位姿勢がより自動的な制御プロセスに変化するため(Ueta et al., 2014)，または覚醒度の増加による安定化(Riley et al., 2003)に起因するのではないかと説明されていた．本研究の結果から，暗算課題中は関節の協調関係，関節スティフネスの変化を伴わずに，足関節および股関節の変動が減少することがわかった．さらに，呼吸運動を測定した結果(研究Ⅰ-2)によると，暗算課題中に呼吸数が増加し，呼吸振幅が減少することから交感神経系の賦活が示唆された．そしてこの呼吸振幅の減少がCOP振幅の減少に関連していることが示された．筋活動の変化(研究Ⅰ-3)と外乱後の姿勢応答(研究Ⅱ)の結果から，姿勢動揺の減少は姿勢制御の安定化とは言えないことが明らかとなった．さらに研究ⅢにおいてH反射振幅の増大がみられたことから，脊髄レベルでの変調が姿勢制御の変化に関わっている可能性が示された．この変調には交感神経系の賦活もしくはシナプス前抑制による脱抑制が影響していると考えられる．

結論として，姿勢制御の変化は認知介入の種類によって異なることが明らかになった．認知課題の実行中は姿勢動揺の振幅が減少していたが，その減少には呼吸振幅の減少が関連していることが示めされた．またその制御は，安定化したとは言えず，反射による自動的な立位制御の要素が強くなっていることが示唆された．一方で，自身の姿勢により注意を払うことは，意識的で頻回な制御に変化することが示唆された．