

立位での二重課題における加齢に伴う 身体各関節の協調性の変化

(研究助成金 50万円)

代表研究者 社会医療法人玄真堂 川島整形外科病院

井原拓哉

I はじめに

我が国では高齢者の転倒の発生頻度は増加傾向にあり、転倒に伴う骨折は要介護状態発生の主たる原因となっている¹⁾。このため、転倒予防対策は緊急の課題として捉えなければならない。高齢者の転倒の原因には数多くの因子が挙げられているが、近年その中でも二重課題への対応能力の低下が、高齢者の転倒発生に関連しているとの報告が散見されるようになってきている²⁻⁴⁾。これらの中で、二重課題には感覚機能や反応時間、筋力、バランス機能などに加え、注意分散機能が大きく関与しているといわれている⁴⁾。動作中の注意分散機能の指標として、課題達成の所要時間や足圧中心の総軌跡長、片脚立位保持時間、歩行スピード、トゥクリアランスなどが挙げられている⁵⁻¹⁰⁾が、これらは課題の要求に対する結果であると考えられる。

また、課題に対する「部分」の変動とタスク変数に対する「全体」の変動の関係を検討する手法の一つとして、非制御多様体解析法 (Uncontrolled Manifold Analysis : 以下, UCM 解析) が注目を集めている。UCM 解析は、「部分」の変動が課題達成のために「タスク特異的」に協調しているのかを判定することが可能である (図 1)。ここでタスク変数とは課題において制御されるべきパラメータであり、要素変数とはタスク変数の変化に寄与する変数である。

UCM 解析によって課題指向性の身体の協調性の定量化が可能となり、二重課題を構成するそれぞれの課題に対して、身体各部位が協調的に運動しているか否かを明らかにすることができる。即ち UCM 解析を用いると、二重課題の要求に対して結果不良を引き起こしていると考えられる身体の協調性の低下が明らかとなり、二重課題に直面した高齢者に発生する転倒原因の解明の一助となると考えられる。

2本の指A・Bで机表面に
圧力 F_a ・ F_b を加える動作を
1試行とし、タスク変数は
A・Bの圧力の合計を一定
の値10 [N]に維持

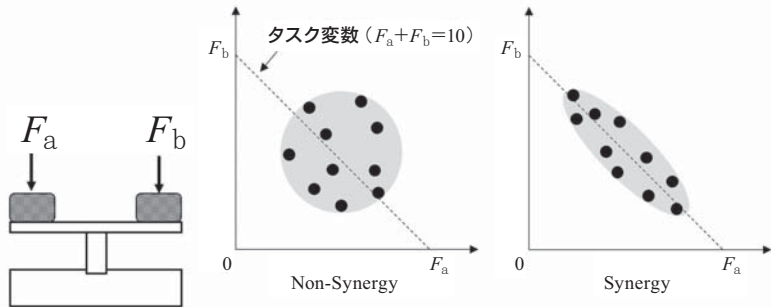


図1 UCM 解析と試行プロットの例 (Latash, 2002¹¹⁾)

シナジーが形成されなければ、試行間の分散は左側のような円形の分布 (Non-synergy) となる。しかし、もしシナジーが形成され、タスクを達成するように、要素間の協調が実現しているならば、仮に F_a が相対的に小さい値となった場合でも、それを補うように F_b は相対的に大きな値となり、タスク変数の変動は少なくなり、右側のような分布となる。

本研究は、高齢者の身体的な二重課題への対応を、UCM 解析を用いて動作の質的側面を、課題特異的な身体の協調性の観点で検討する。そして加齢に関する新たな知見を基に、転倒予防に奏効する身体制御戦略の提示とともに、効果的な転倒予防プログラムを提案して、健康寿命の延長の一助とすることを目的に行った。

II 方法

1 対象

被験者は健常若年者 20人 (以下, 若年群: 身長: 1.60 ± 0.06 [m], 体重: 54.8 ± 7.0 [kg], 年齢: 30.9 ± 10.3 [歳], BMI: 21.6 ± 2.6 [kg/m^2]), 健常高齢者 12人 (以下, 高齢群: 身長: 1.59 ± 0.08 [m], 体重: 59.8 ± 12.0 [kg], 年齢: 73.0 ± 5.6 [歳], BMI: 23.4 ± 3.4 [kg/m^2]) であった。高齢群の適合条件には、転倒経験を有していないこと、コップを把持する側の上肢および両下肢に入院加療を要する整形外科的疾患の既往および現病歴を有していないこと、65歳以上であることを定めた。なお、高齢群は全員が Barthel Index は満点 (100/100点) であった。

2 課題動作

課題動作にはコップを片手で把持したままの片脚立位動作 (One leg standing: 以下, OLS) と椅子からの立ち上がり動作 (Sit to stand: 以下, STS) を採用した。両動作ともコップは、一般的なマグカップを使用し、水で満たされた状態にした (図2)。

OLS では、両足部間の距離は任意とし、胸の前で一側の手でコップを把持し、他側の手は自由とした両脚起立姿勢から、コップを把持した手の反対側の股関節を 90° 屈曲するよう指示した。膝関節および足関節は自由とした。動作中は 60 [bpm] のテンポに設定したメトロノームを鳴らし続け、その2拍間 (1秒) で動作を完了するよう指示した。屈曲後は1秒間同一姿勢を保持したのち、指示に従って屈曲した下肢を降ろすよう指示した。



図2 水で満たされたコップ

STS では、両足部間の距離は任意とし、胸の前で一側の手でコップを把持し、他側の手は自由とした座位姿勢から、足部を動かさないよう立ち上がるよう指示した。椅子は、肘掛のない座面の高さ 400 [mm] の椅子を使用した。初期座位姿勢は大転子と膝関節裂隙の midpoint が椅子座面の先端に位置するよう設定した。OLS と同様に、動作中は 60 [bpm] のテンポに設定したメトロノームを鳴らし続け、その 2 拍間（1 秒）で立ち上がるように指示した。立ち上がり後は指示があるまで 1 秒間同一姿勢を保持するよう指示した。

各動作はそれぞれ 5 回ずつ試行し、各試行間は椅子座位にて十分な休憩をとり、OLS および STS の動作の順序はランダムとした。

3 データ収集

データ収集には、サンプリング周波数を 100 [Hz] とした赤外線カメラ 8 台を用いた三次元動作解析システム Vicon MX (Vicon Motion Systems 社製) を用いた。身体各標点に赤外線反射マーカを貼付し (図 3)、課題動作中のマーカを Vicon MX にて追従し、BodyBuilder (Vicon Motion Systems 社製) を用いて各マーカ座標を計算した。

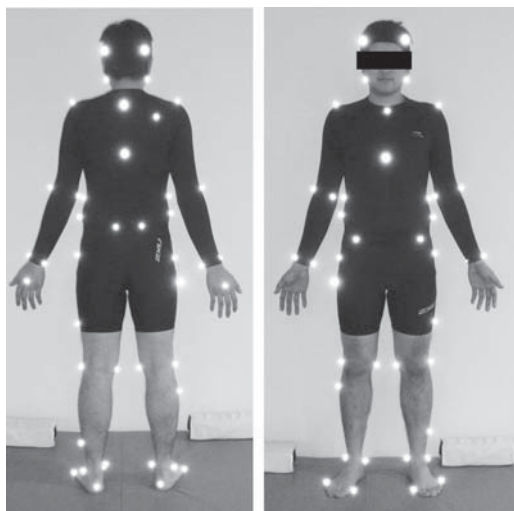


図3 マーカ貼付部位

4 解析

A) UCM 解析

UCM 解析は、収集したデータを基に MATLAB 2014a (MathWorks 社製) を用いて行った。ここで UCM 解析には、STS は体幹セグメントの角速度を、OLS は挙上側の大腿セグメントの角速度を基に、動作の開始および終了時点を同定し、動作開始から終了までの時間を100%として時間正規化したデータを用いた。

UCM 解析では、身体の質量中心 (Center of mass : 以下, COM) 座標としてコップを把持した側の足部, 下腿, 大腿, 体幹, 上腕, 前腕, 手部の質量中心座標を, コップの角度としてコップを把持した側の手部セグメントの角度をそれぞれタスク変数とした。COM 座標の算出には Winter¹²⁾ の身体部分慣性特性を用いた。また, それぞれの変化に寄与する要素変数には Hsu¹³⁾ のモデルを参考に, 足部と床のなす角度, 足関節角度, 膝関節角度, 股関節角度, 肩関節角度, 肘関節角度, 手関節角度を用いた (図 4)。

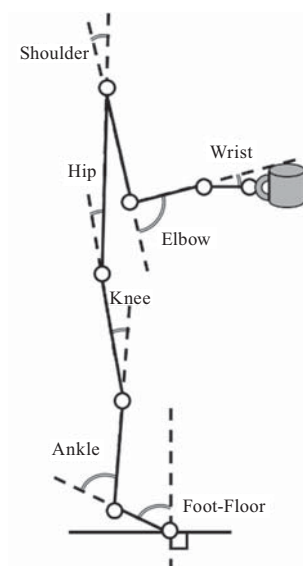


図 4 解析用半身モデル

次にこれらの変数を用いて UCM 空間を作成し, UCM に直交する成分と平行する成分を求め, タスク変数のばらつきを抑える関節間の協調性を評価した。ここで UCM に平行な成分はタスク変数に影響を与えない望ましい変動 (V_{UCM}) であり, UCM に直交する成分はタスク変数に影響を与える望ましくない変動 (V_{ORT}) である (図 5)。

さらに, V_{UCM} と V_{ORT} と分散の合計量 V_{tot} を用いて次式 (f1) より協調性の指標である ΔV を算出した。

$$\Delta V = \frac{(V_{UCM} - V_{ORT})}{V_{tot}} \quad (f1)$$

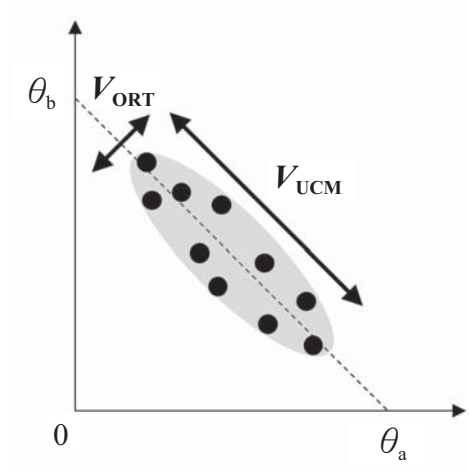


図5 V_{UCM} と V_{ORT}

ここで ΔV は、 $\Delta V > 0$ でタスク変数が安定するよう協調していることを示し、 $\Delta V \cong 0$ で協調性が存在しないことを示す。また $\Delta V < 0$ ではタスク変数が不安定となるよう協調していることを示す。UCM解析では、動作中の V_{UCM} 、 V_{ORT} 、 ΔV を算出し、それぞれの平均値を採用した。

B) 動作中の身体運動の結果の解析

COM座標の総軌跡長、コップからこぼれた水の総量、課題動作の所要時間を測定・計算した。COM座標の総軌跡長、動作の所要時間は、UCM解析で規定した運動の開始から終了に要した期間を算出した。また、COM座標の総軌跡長は身長で除して正規化した。コップからこぼれた水の総量は、電子はかりKD-187 (TANITA社製)を用いて課題の試行ごとに測定・計算した。

C) 統計学的解析

統計学的解析にはDr. SPSS II for windows (エス・ピー・エス・エス社製)を用い、データの正規性、等分散性を考慮して以下の3項目を検討した。なお、有意水準は5%未満とした。

(a) 各動作での動作中の身体運動の結果の群間の比較

それぞれの課題動作で、若年群と高齢群のCOM座標の総軌跡長、コップからこぼれた水の総量、動作所要時間に有意な差が存在するかを2標本の差の検定で検討

(b) タスク変数から見た各動作での身体協調性の群間の比較

それぞれの課題動作で、若年群と高齢群の身体各関節間の協調性に有意な差が存在するかを対応のある因子と対応のある因子の2元配置分散分析で検討

(c) 高齢群における身体協調性および身体運動の結果の動作間の比較

高齢群で動作の違いにより身体各関節間の協調性、およびCOM座標の総軌跡長、コップからこぼれた水の総量、動作所要時間に有意な差が存在するかを1標本の差の検定で検討

5 倫理的配慮

本研究はヘルシンキ宣言に則り、当施設の倫理審査委員会の承認を得た後、被験者に十分な説明を行い、研究参加への同意を得て実施した。

III 結 果

(a) 各動作での動作中の身体運動の結果の群間の比較

OLS での COM 座標の総軌跡長は、両群間に有意な差は認められなかった（若年群： 0.021 ± 0.002 [m/BH]，高齢群： 0.027 ± 0.004 [m/BH]）。また STS でも COM 座標の総軌跡長には、両群間に有意な差は認められなかった（若年群： 0.29 ± 0.37 [m/BH]，高齢群： 0.27 ± 0.41 [m/BH]）。

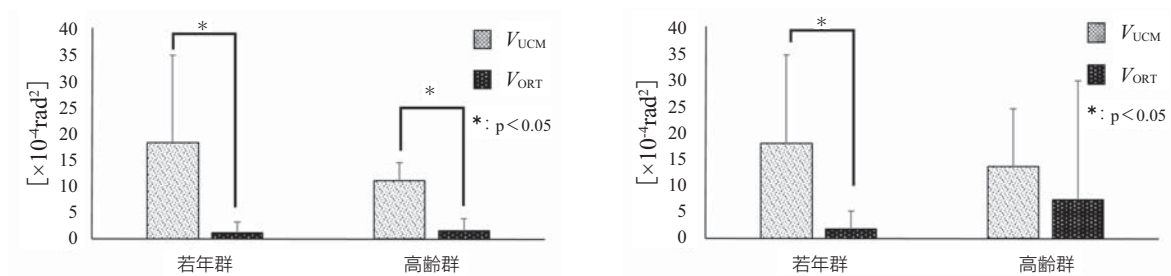
両課題動作で、両群とも全例でコップからの水のこぼれた試行は皆無であった。

OLS では動作の所要時間には、両群間に有意な差は認められなかった（若年群： 1.37 ± 0.18 [s]，高齢群： 1.42 ± 0.35 [s]）。STS でも動作の所要時間には、両群間に有意な差は認められなかった（若年群： 2.2 ± 0.37 [s]，高齢群： 2.4 ± 0.62 [s]）。

(b) タスク変数から見た各動作での身体協調性の群間の比較

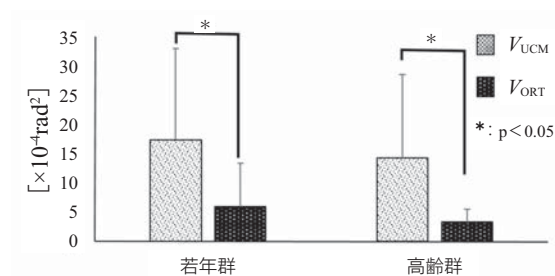
OLS の V_{UCM} と V_{ORT} の比較では、若年群ではタスク変数が COM 座標の前後方向，鉛直方向，手部の角度のいずれでも、 V_{ORT} と比較して V_{UCM} は有意に高値を示した（図 6 a)～c)）。高齢群では、COM 座標の前後方向と手部の角度の二つのタスク変数では、 V_{ORT} と比較して V_{UCM} は有意に高値を示したが（図 6 a), c)），COM 座標の鉛直方向では有意な差は認められなかった（図 6 b)）。

また、両群間の比較では、三つのタスク変数，COM 座標の前後方向，鉛直方向，手部の角度は、いずれでも、 V_{UCM} と V_{ORT} には両群間に有意な差は認められなかった（図 6 a)～c)）。



a) タスク変数：COM 座標の前後方向

b) タスク変数：COM 座標の鉛直方向



c) タスク変数：手部の角度

図 6 OLS 中の V_{UCM} と V_{ORT}

STS の V_{UCM} と V_{ORT} の比較では、両群ともタスク変数が COM 座標の前後方向、鉛直方向、手部の角度のいずれでも、 V_{ORT} と比較して V_{UCM} が有意に高値を示した (図 7 a)~c)。

また、両群間の比較では、タスク変数が COM 座標の前後方向、鉛直方向、手部の角度のいずれでも、 V_{UCM} と V_{ORT} には両群間に有意な差は認められなかった (図 7 a)~c)。

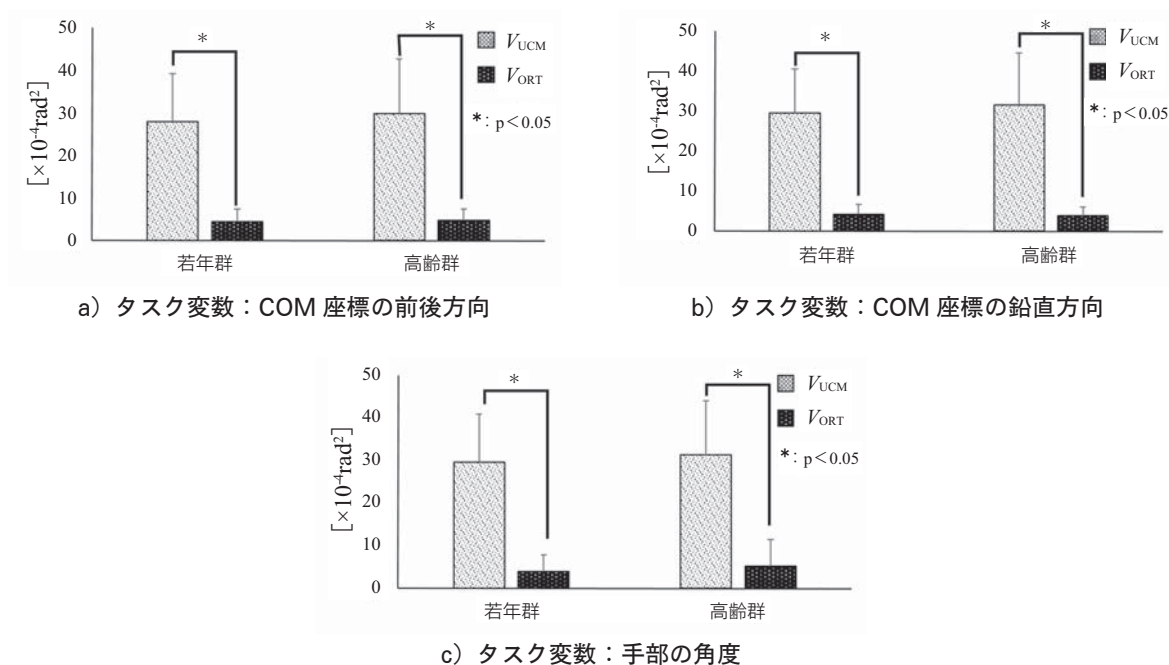


図 7 STS 中の V_{UCM} と V_{ORT}

OLS では、 ΔV はタスク変数が身体の COM 座標の前後方向、鉛直方向、手部の角度のいずれでも両群間に有意な差は認められなかった (図 8 a)~c)。

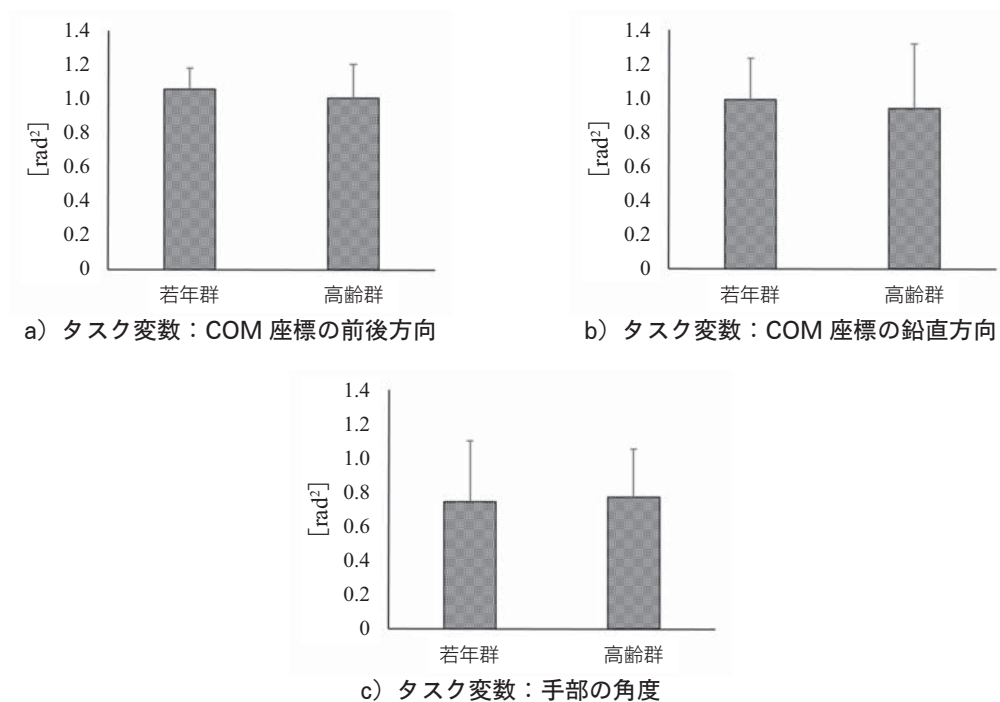


図 8 OLS 中の ΔV

STS では、 ΔV はタスク変数が COM 座標の前後方向、鉛直方向、手部の角度のいずれでも両群間に有意な差は認められなかった (図 9 a)~c)。

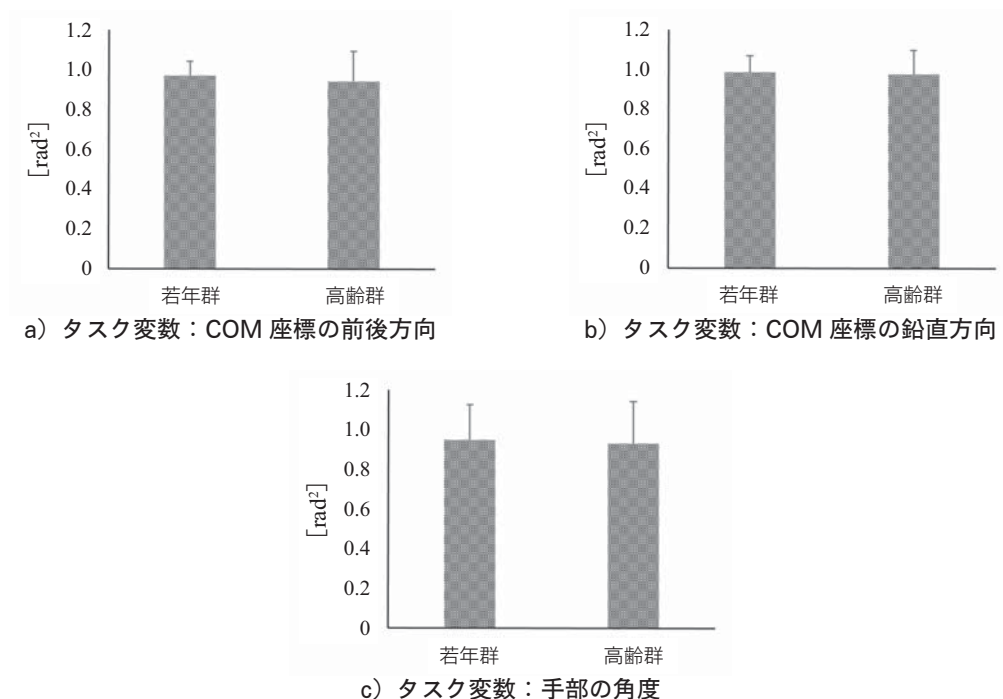


図 9 STS 中の ΔV

(c) 高齢群における身体協調性および身体運動の結果の動作間の比較

V_{UCM} は、COM 座標の前後方向、鉛直方向、手部の角度のいずれのタスク変数でも、STS が OLS と比較して有意に高値を示した ($p < 0.05$)。

V_{ORT} はタスク変数が COM 座標の前後方向、鉛直方向では、STS が OLS と比較して有意に高値を示した ($p < 0.05$)。タスク変数が手部の角度では両動作間には有意な差は認めなかった。

ΔV はタスク変数が COM 座標の前後方向では、STS が OLS と比較して有意に低値を示した ($p < 0.05$)。タスク変数が COM 座標の鉛直方向、手部の角度では、両動作間に有意な差は認められなかった。

COM 座標の総軌跡長には有意な差を認め、STS が OLS に比べ有意に高値を示した ($p < 0.05$)。両動作ともコップからの水のこぼれはなかった。動作所要時間は STS が OLS に比べ有意に高値を示した ($p < 0.05$)。

IV 考 察

(a) 各動作での動作中の身体運動の結果の群間の比較

COM 座標の総軌跡長、コップからこぼれた水の総量、動作所要時間のいずれにおいても若年群と高齢群の間に有意な差を認めなかったことから、量的な評価からは高齢群と若年群の動作中の身体運動の結果に差は認められないことが示された。

(b) タスク変数から見た各動作での身体協調性の群間の比較

UCM 解析による質的な評価からは、 ΔV に両群間で有意な差を認めなかったことから、高齢者であっても、必ずしも動作中の課題に対する身体の協調性が低下しているわけではないことが示された。Greve ら¹⁴⁾も、高齢者は課題達成のため、若年者よりも制御されるべきパラメータを安定化する運動の自由度を増加させて筋力の低下を代償していると述べている。しかしながら本研究では、UCM 解析の結果から、OLS 中の COM 座標の鉛直方向の V_{UCM} と V_{ORT} 間に有意な差は認められなかった。これは、OLS では対側の下肢の挙上を要求されるため、安静両脚立位から片脚立位への移行では支持基底面が減少するため COM の前額面での安定化が損なわれることになり、結果的に鉛直方向の課題達成に及ぼす望ましくない分散が特に増加したためと考えられた。したがって、量的な観点からは、動作は若年者と同等に達成できていても、質的な観点からは、高齢者は運動の自由度を増加させる戦略をとるものの、増加する運動の分散は必ずしも安定性に寄与せず、身体の制御は不十分なままで、複数課題を身体の協調性を並行して高めながら実行する能力は低いことが示唆された。

(c) 高齢群における身体協調性および身体運動の結果の動作間の比較

高齢群の STS では OLS と比較して、動作の所要時間、COM 座標の総軌跡長ともに延長していた。動作の実施に先立ち同様の指示を与えていたにも関わらず延長した理由は、矢状面において OLS より大きな COM の移動を要する STS の動作特性のためであると考えられる。そのためこれらの量的な指標からは動作が安定して達成されていたかは判断できない。

しかし、COM 座標の前後方向を身体の協調性の観点から観察すると、高齢群では V_{UCM} 、 V_{ORT} はともに STS が OLS に比較して高値を示している一方で、 ΔV は OLS が STS に比較して高値を示した。ここで STS と比較して OLS は支持基底面が狭く、COM の制御要求が高いため、課題の難易度は高いと考えられる。STS では COM の移動量が大きいため、身体各関節の運動の分散も大きく、OLS と比較して V_{UCM} 、 V_{ORT} 共に大きな値を示したと考えられるが、難易度の高い OLS では V_{ORT} と比較して相対的に V_{UCM} を増大させ、COM 座標の前後方向の協調性を高めていると推察される。一方で、COM 座標の鉛直方向および手部の角度に関しては、 ΔV は両動作間で有意な差は認められなかった。このことから高齢群では、STS と比較して難易度の高い OLS で、COM 座標の鉛直方向および手部の角度に関して身体の協調性を高めることができていないと考えられる。この理由として、OLS では、COM の前後方向の安定性は片脚立位姿勢への移行の達成と水をこぼさないことの両方に

関与するため、優先度が高かったことが挙げられる。さらに、 V_{UCM} は COM 座標の鉛直方向および手部の角度の両方に関して OLS が STS と比較して低値を示したが、 V_{ORT} は COM 座標の鉛直方向のみで OLS が STS と比較して低値を示した。つまり COM 座標の鉛直方向に関しては望ましい分散である V_{UCM} と、望ましくない分散である V_{ORT} の両方が小さくなっているが、手部の角度に関しては望ましくない分散である V_{ORT} を小さくできていないと推察される。このことから、STS と比較して難易度の高い OLS では、特に手部の角度に関して V_{ORT} の相対的な増大を招き、COM の鉛直方向と手部の角度に対しては協調性を十分に高めることができなかつたと考えられる。また COM 座標の鉛直方向の安定性は COM 座標の前後方向と比較すると、その向きの違いのため片脚立位姿勢への移行の達成と水をこぼさないことの両方に対する関与は少なく、コップの中の水は運動できる猶予があり、手部の角度にも許容範囲に余裕があったため、COM 座標の鉛直方向と手部の角度に対しては身体の協調性を高める優先度が低かつたと考えられる。

従って、高齢者では課題の難易度が増した際、運動の自由度を高めた戦略を採用して、課題達成のために制御すべきパラメータを安定化させようとするが、その能力は十分でなく、複数の課題を同時に達成する必要がある際には、優先度が高くない課題に対する身体の協調性を犠牲とすることで主たる課題を達成しようと試みていると推察される。ここでもし COM の制御が犠牲にされる課題を実行すると、COM の安定性が失われ、定位を保つことが出来ず、ひいては転倒発生に繋がる危険性が示唆される。

本研究の結果より高齢者では、二重課題に直面した際に運動の自由度を高めることで課題の達成を図っているが、課題達成のために制御すべきそれぞれのパラメータの全てを十分に制御できているわけではなく、優先度の低いパラメータでは安定性が失われる望ましくない変動が増大することで犠牲にされている可能性があり、COM の定位が犠牲とされる場合には転倒発生を惹起する危険性が示唆された。転倒予防のためには運動の自由度を増さずとも身体を制御できる十分な筋力とともに、複数の課題に対して適切に身体運動を分配する能力が必要であることが示された。

V 結 論

1. 量的な評価からは、両動作とも高齢群と若年群に差は認められなかつた。
2. UCM 解析を用いた質的な評価からは、高齢者では複数の課題に対して運動の分散を増して対応しているが、制御すべきパラメータを不安定とする分散も増していることが示された。
3. 高齢者では難易度の高い二重課題下では、各課題に対して身体の協調性を並行して高めることが困難となっており、COM の制御が犠牲とされたときには転倒を惹起する可能性が示唆された。

VI 参考・引用文献

- 1) 厚生労働省. 国民生活基礎調査2013. <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa13/index.html>, cited Jan/30/2016
- 2) 山田実: 二重課題条件下での歩行時間は転倒の予測因子となりうる地域在住高齢者を対象とした前向き研究. 理学療法科学 22: 505-509, 2007
- 3) 相馬正之, 中江秀幸, 安彦鉄平, 島村亮太, 川間健之介: 二重課題条件下での非転倒経験者と転倒経験者の障害物をまたぐ際の歩行調整の違いについて. ヘルスプロモーション理学療法研究 1: 117-121, 2012
- 4) Lundin-Olsson L, Nyberg L, Gustafson Y: "Stops walking when talking" as a predictor of falls in elderly people. Lancet 349: 617, 1997
- 5) 平島賢一, 鶯春夫, 田頭勝之, 平野康之, 近藤慶承: 地域在住高齢者における二重課題下動的バランスの特徴. 理学療法科学 28: 403-406, 2013
- 6) Toulotte C, Thevenon A, Watelain E, Fabre C: Identification of healthy elderly fallers and non-fallers by gait analysis under dual-task conditions. Clin Rehabil 20: 269-276, 2006
- 7) 高田ゆみ子, 對馬均: 二重課題が若年者及び高齢者の歩行動作に与える影響—Toe clearance に着目して—. 理学療法研究 28: 27-32, 2011
- 8) 山田実: 注意機能トレーニングによる転倒予防効果の検証—地域在住高齢者における無作為化比較試験—. 理学療法科学 24: 71-76, 2009
- 9) 横川吉晴, 征矢野あや子, 甲斐一郎: 在宅高齢者の二重課題歩行の関連要因. 日本公衛誌 60: 30-36, 2013
- 10) 島浩人, 池添冬芽: 加齢による二重課題バランス能力低下と転倒及び認知機能との関連について. 理学療法科学 24: 841-845, 2009
- 11) Latash ML, Scholz JP, Schönner G: Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. Exerc Sport Sci Rev 30: 26-31, 2002
- 12) Winter DA: Biomechanics and Motor Control of Human Movement, fourth ed. John Wiley & Sons, Hoboken. pp 86. 2009
- 13) Hsu WL: Adaptive postural control for joint immobilization during multitask performance. PLoS One 9: 2014
- 14) Greve C, Zijlstra W, Hortobagyi T, Bongers RM: Not all is lost: old adults retain flexibility in motor behaviour during sit-to-stand. PLoS One 8: 2013