

研究報告

バランス能力評価のためのCOPおよびCOMの動揺指標の比較検討

山口 瑞生¹⁾・桜井 伸二²⁾

Comparison of Perturbation Index of COP and COM for Assessing the Balance Ability

Mizuki YAMAGUCHI, Shinji SAKURAI

I 緒言

バランス能力は、全身が発揮する筋骨格系や神経系などの機能をうまく連携させて働かせる役割を持つ。子どもの時期に十分なバランス能力を獲得することは、その後の成長に伴う運動機能の発育発達を促し、さらに、高齢になった際の運動機能に起因する疾患や障害を予防できると期待される。

バランス能力に関する研究の多くでは、静止立位における重心動揺を測定する手法が用いられている。これは、フォースプレートを用いて地面反力の作用点位置を求め、これを水平面内の重心位置（COM）の指標とみなして重心動揺の総軌跡長や動揺面積などを算出し、静的バランス能力の指標とするものである。この地面反力の作用点位置を一般に圧力中心（COP）と呼ぶ。

例えば、今岡らは3-94歳という広い年齢範囲の男女を対象にCOPの変動を測定し、低年齢または高齢ほどその動揺が大きいことを報告している¹⁾。また、岩見らは5歳児の男女を、村田らは平均月齢67.4ヶ月児童を対象にそれぞれCOPの測定をしている^{2)、3)}。

このように、COPは静止立位におけるバランス能力の指標として広く用いられているが、水平面上においてCOPとCOMの位置が常に一致

しているわけではない⁴⁾。図1に静止立位における身体の簡易モデルを示した。COMは足関節周りの回転運動を繰り返し、それが重心動揺として表される。COMの移動に伴う加速度成分によってCOMとCOPの間にはずれが生じる。換言すれば、COMが身体の前方向へ移動した場合、その前方向への加速度を低減させて転倒を防ぐためにはCOPがより前方向へ素早く移動することが必要である。静止立位では、呼吸や心臓の鼓動、身体各部のわずかな運動など様々な要因の影響を受けて、COMは常に前後左右へ動揺し続ける。この動揺を小さく抑えるために、COPがより大きく移動していると考えられる。

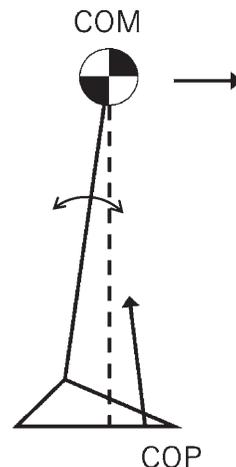


図1 静止立位における身体の簡易モデル

¹⁾中京大学大学院体育学研究所

²⁾中京大学スポーツ科学部

COMの動きが本来の意味での重心動揺であり、またCOPに関する動揺よりもCOMに関する動揺を小さく抑えることが静止立位においてより重要とも考えられる。

そうしたことから、COPとCOMとの間の関係を検討しておくことが必要である。さらに、成人に比べ相対的に動揺の大きいと考えられる発育期の子どもに関する研究においては、このCOPとCOMとの間の関係を検討しておくことはより一層重要であろう。

動作解析の分野では、一般にCOMは、身体を剛体リンクモデル化し、平均的な身体慣性係数 (Body Segment Parameters) を適用し、その剛体リンクモデルの重心点として求められている。近年の光学式モーションキャプチャシステムの発展により、測定精度は飛躍的に向上し、条件によっては身体各部位の動揺を1mm、あるいはそれ以下の精度で求めることが可能になってきた。

そこで本研究では、静止立位における重心動揺について、フォースプレートによる地面反力測定から求められたCOPと、光学式モーションキャプチャシステムから求められた身体の剛体リンクモデルのCOMの関係を、それぞれの動揺の大きさやパターンから調査することを目的とした。得られた結果は、子どもの発育発達に伴うバランス能力の変化をCOPおよびCOMから検討していく際の基礎資料となるものと考えられる。

II 方法

1. 被験者

被験者は中京大学大学院体育学研究科に所属する健康で活動的な成人男性4名(年齢23-27歳、身長168.9 ± 6.7 cm、体重69.8 ± 12.7 kg)で、1年以内に筋骨格系を含め大きな疾病や障害の無い者であった。

2. 実験

フォースプレート (Kistler社, 9287C) 上で、(a) 開眼両足立位、(b) 閉眼両足立位、(c) 開

眼片足立位、(d) 閉眼片足立位の4種目をこの順に実施した。それぞれの種目において、被験者を40秒間できる限り静かに立たせる試技を5回ずつ実施した。(a) および (b) の両足立位については、自然な立位姿勢を保持できる足位を取るよう指示したため、全ての被験者において両足の踵間の距離が約10 cmとなった。(c) および (d) の片足立位については、全ての被験者が両手を腰に置き、右足で実施した。特に (d) 閉眼片足立位については40秒間の姿勢保持ができなかった場合、その試技を失敗とし、以降の分析対象から除外した。すべての試技は裸足で実施した。

3. データ収集

被験者の全身34箇所にも再帰性反射マーカーを貼付し、14台の赤外線カメラ (VICON-MX, VICON Motion System社)を用いて、250 Hzで試技中の動作を撮影した。また、フォースプレートの出力データは、サンプリング周波数1kHzでAD変換し、圧力中心位置 (COP) を得た。測定にあたってはカメラとフォースプレートを電気的に同期させた。

4. データ分析

マーカー位置座標データは、線形補間によってデータ数を4倍に増加し、フォースプレートの力量データと同じくサンプリング周波数1 kHzに相当させた。さらに、身体各部の座標データから全身の剛体リンクモデルを作成し、その重心位置 (COM) を推定した⁵⁾。COPデータおよびCOMデータを遮断周波数4Hzの4次のバターワース型ローパスフィルターによってそれぞれ平滑化した。

記録した40秒間のデータのうち、最初と最後の5秒間を除いた30秒間を分析範囲とした。COPおよびCOMについて、前後方向および左右方向の平均値がゼロになるように規格化した。続いて、動揺の大きさを表す指標として総軌跡長・矩形面積・実効値面積を算出した。さらに、これらの項目についてCOPに対するCOMの比率を求めた。各種目の成功した試技につい

て被験者ごとに平均値を求め、被験者全体の平均値と標準偏差を算出した。

前後方向と左右方向のCOPとCOMについてそれぞれ高速フーリエ変換を用いて周波数解析を行った。本研究では、遮断周波数4 Hzのローパスフィルターに通したCOPとCOMに対して周波数解析を行った。そのため、COPとCOMの動揺が持つ周波数は全て0-4 Hz帯に含まれているとして、縦軸を振幅として得られた周波数スペクトルについて、低周波数帯として0-1 Hz面積を、全周波数帯として0-4 Hz面積をそれぞれ算出した。さらに、全周波数帯に対する低周波数帯の比率を算出した⁶⁾。これらの項目についても、成功試技について被験者ごとに平均値および被験者全体の平均値と標準偏差を算出した。

Ⅲ 結果

閉眼片足立位のみ、1名が5試技全てにおいて、2名が1試技において40秒間姿勢を保持できなかったため、これらの試技については分析対象から除外した。図2は (a) 開眼両足、(b) 閉眼両足、(c) 開眼片足、(d) 閉眼片足におけるCOP（細線）とCOM（太線）の軌跡の例である。一般にCOPおよびCOMの軌跡とも、(a) および (b) の両足の場合には左右方向に比べ前後方向に長く、また (c) および (d) の片足の場合には左右方向と前後方向の長さの差は小さかった。

表1にはCOPとCOMの総軌跡長・矩形面積・実効値面積、およびそれぞれのCOPに対するCOMの比率を示した。測定した4種目の総軌跡長・矩形面積・実効値面積の全てにおいてCOP

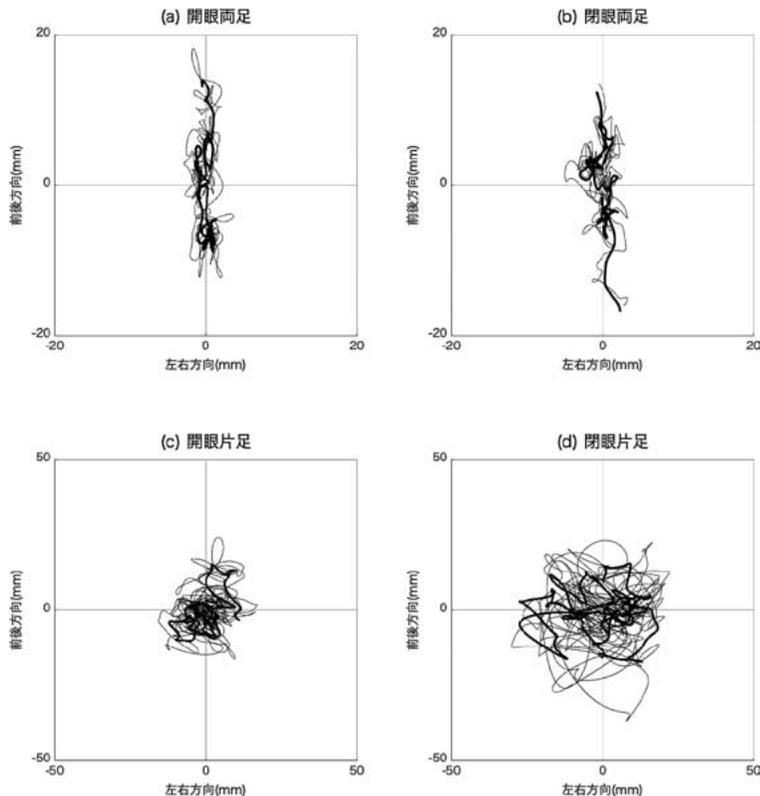


図2 COPとCOMの軌跡の例（細線：COP、太線：COM）
 (a) 開眼両足、(b) 閉眼両足、(c) 開眼片足、(d) 閉眼片足
 前後方向と左右方向の平均値が0となるように規格化した。

の方がCOMよりも大きな値を示しており、そのCOM/COP比は開眼両足立位では総軌跡長が $33 \pm 3\%$ 、矩形面積が $48 \pm 7\%$ 、実効値面積が

表1 COPとCOMの総軌跡長・矩形面積・実効値面積、およびCOM/COP比

	COP	COM	COM/COP 比 [%]
(a) 開眼両足 (n=4)			
総軌跡長 [mm]	269 ± 14	89 ± 6	33 ± 3
矩形面積 [mm ²]	206 ± 21	100 ± 19	48 ± 7
実効値面積 [mm ²]	90 ± 25	78 ± 26	83 ± 4
(b) 閉眼両足 (n=4)			
総軌跡長 [mm]	308 ± 42	99 ± 3	33 ± 4
矩形面積 [mm ²]	194 ± 32	88 ± 31	45 ± 9
実効値面積 [mm ²]	70 ± 17	56 ± 18	77 ± 10
(c) 開眼片足 (n=4)			
総軌跡長 [mm]	1623 ± 312	334 ± 57	21 ± 1
矩形面積 [mm ²]	2046 ± 517	893 ± 147	45 ± 7
実効値面積 [mm ²]	453 ± 108	283 ± 75	63 ± 11
(d) 閉眼片足 (n=3)			
総軌跡長 [mm]	2432 ± 276	526 ± 53	22 ± 1
矩形面積 [mm ²]	3410 ± 201	1493 ± 256	43 ± 9
実効値面積 [mm ²]	781 ± 79	412 ± 83	53 ± 11

$83 \pm 4\%$ であった。また、閉眼両足立位ではそれぞれ $33 \pm 4\%$ 、 $45 \pm 9\%$ 、 $77 \pm 10\%$ であった。さらに、開眼片足立位では $21 \pm 1\%$ 、 $45 \pm 7\%$ 、 $63 \pm 11\%$ 、閉眼片足立位では $22 \pm 1\%$ 、 $43 \pm 9\%$ 、 $53 \pm 11\%$ であった。

図3は開眼両足立位における前後方向と左右方向のCOPとCOMのスペクトル図の例(細線:COP、太線:COM)である。全ての試技において1 Hz以下の低周波数帯における振幅が大きい傾向が見られた。

表2にはCOPとCOMのスペクトル面積および全周波数帯に対する低周波数帯の比率を示した。測定した4種目全てにおいて、前後方向と左右方向の両方とも、COPよりもCOMの方が低周波数帯の比率が大きくなった。その比率は、開眼両足立位において、前後方向のCOPとCOMが $75.4 \pm 1.5\%$ と $83.7 \pm 3.2\%$ 、左右方向のCOPとCOMが $65.2 \pm 7.6\%$ と $81.1 \pm 3.6\%$ であった。また、閉眼両足立位では前後方向のCOPとCOMが $72.3 \pm 2.4\%$ と $84.3 \pm 0.6\%$ 、左右方向のCOPとCOMが $63.2 \pm 7.8\%$ と $81.8 \pm 2.1\%$ であった。同様に、開眼片足立位では前後方向が $62.7 \pm 7.8\%$ と $85.7 \pm 3.7\%$ 、左右方向が $50.7 \pm$

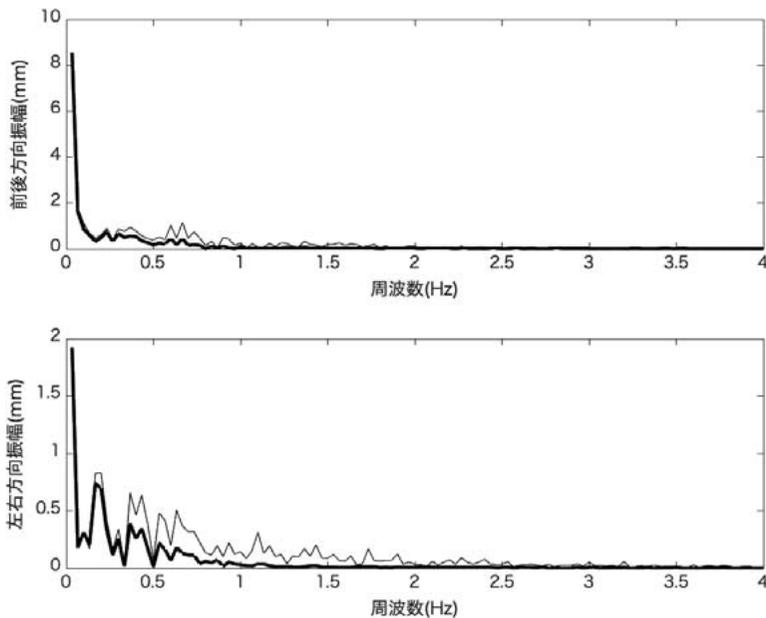


図3 COPとCOMのスペクトル図の例：(a) 開眼両足立位の場合
細線：COP、太線：COM

表2 COPとCOMのスペクトル面積および低周波数帯比率

	前後方向		左右方向	
	COP	COM	COP	COM
(a) 開眼両足 (n=4)				
0-1 Hz 面積	0.75±0.09	0.61±0.11	0.31±0.06	0.20±0.05
0-4 Hz 面積	0.98±0.11	0.73±0.15	0.47±0.06	0.25±0.06
低周波数帯比率 [%]	75.4±1.5	83.7±3.2	65.2±7.6	81.1±3.6
(b) 閉眼両足 (n=4)				
0-1 Hz 面積	0.74±0.05	0.58±0.07	0.30±0.06	0.20±0.05
0-4 Hz 面積	1.02±0.09	0.70±0.11	0.48±0.05	0.25±0.06
低周波数帯比率 [%]	72.3±2.4	84.3±0.6	63.2±7.8	81.8±2.1
(c) 開眼片足 (n=4)				
0-1 Hz 面積	1.71±0.32	1.20±0.21	1.36±0.24	0.91±0.12
0-4 Hz 面積	2.74±0.49	1.40±0.19	2.69±0.52	1.10±0.16
低周波数帯比率 [%]	62.7±7.8	85.7±3.7	50.7±2.6	83.0±2.6
(d) 閉眼片足 (n=3)				
0-1 Hz 面積	2.24±0.16	1.51±0.15	1.85±0.19	1.28±0.12
0-4 Hz 面積	3.93±0.49	1.84±0.21	3.78±0.31	1.60±0.09
低周波数帯比率 [%]	57.3±7.0	82.4±2.4	49.1±1.0	80.1±3.0

2.6%と83.0±2.6%、閉眼片足立位では前後方向が57.3±7.0%と82.4±2.4%、左右方向が49.1±1.0%と80.1±3.0%であった。

IV 考察

本研究では、静止立位を開眼両足・閉眼両足・開眼片足・閉眼片足で行った際のCOPとCOMの動揺の量および様相を調査して比較した。

一般に閉眼立位の方が開眼立位よりも重心動揺が大きくなる¹⁾。しかしながら、本研究の結果では、両足立位の矩形面積と実効値面積がCOPとCOMの両方とも閉眼の方が開眼よりも小さな値を示した。本研究では、重心動揺に関する研究で広く用いられる両足内縁を接したロンベルグ姿勢ではなく、両足の踵間が約10 cm離れた姿勢を採用したため、この足位の違いが影響したかもしれない。しかし、総軌跡長は閉眼の方が開眼よりも大きな値を示しており、先行研究と一致した傾向を示した。また、片足立位については、すべての算出項目において開眼よりも閉眼の方が大きな値を示した。COPに対するCOMの比率は、特に総軌跡長において、両足立

位と片足立位のそれぞれで開眼と閉眼の値がほぼ一致した。また、矩形面積と実効値面積においても、開眼と閉眼の値が近くなる傾向を示した。これは、開眼立位に対して閉眼立位では一定の割合で動揺が大きくなることを示唆する。

総軌跡長、矩形面積、および実効値面積という動揺の大きさの指標をCOMとCOPの間で比較する。本研究の結果によれば、これらの動揺の大きさはCOPよりもCOMの方が常に小さく、したがって、COPから算出した動揺はCOMの動揺を過大評価していると考えられる。

次に、動揺に含まれる低周波数成分比率を比較したところ、COPおよびCOMの両方で、あらゆる課題において左右方向に比べ前後方向で低周波成分が多かった。また、全ての課題において、COPに比べCOMで低周波の成分が大きかった。一方、開眼時と閉眼時の比較では、COPとCOMの間に一定の傾向は認められなかった。

COPとCOMについて、ある時刻における位置関係を正確に求めることは不可能である。その最大の要因は、COMは全身に貼付したマーカー位置座標を基にした剛体リンクモデルの重心位置であり、実際の身体の重心位置の一指標

ともいうべきものだからである。一方、COPもフォースプレートの特性上必ず誤差を含む値である。しかし、COPに対するCOMの比率を用いることで、静止立位のバランス能力を評価できる可能性も考えられる。動揺の様相が通常と大きく異なる場合などについては、その影響を考慮して改めて指標を検討することが必要であろう。

今後、子どもを対象としてCOPとCOMの関係に着目して研究し、成人のデータと比較することで、子どもの発育発達に伴ってバランス能力がどのように形成され、獲得されるかが明らかにできるかもしれない。それにより、どの発育発達段階でどのようなバランス能力向上のためのトレーニングをすべきか、新たな指針を提言できるものと考えられる。

本研究は、中京大学特定研究助成（1611224）を得て行われた。

参考文献

- 1) 今岡薫, 村瀬仁, 福原美穂: 重心動揺検査における健常者データの集計. *Equilibrium Res*, 12 Supplement: 1-84, 1997.
- 2) 岩見文博, 阿部千春, 加藤英世, 万年宏美, 石野晶子, 大久保良彦, 片桐朝美, 林幹泰: 幼児における重心動揺量に関する基礎的検討. *杏林医会誌*, 40: 16-23, 2009.
- 3) 村田伸, 安彦鉄平, 中野英樹, 満丸望, 久保温子, 八谷瑞紀, 古後春基, 野中紘士, 松尾大, 上城憲司: 幼児の重心動揺と歩行パラメータとの関連. *ヘルスプロモーション理学療法研究*, 9: 7-11, 2019.
- 4) David A.W., Aftab E.P., James S.F.: Assessment of balance control in humans. *Medical Progress through Technology*, 16: 31-51, 1990.
- 5) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志: 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. *バイオメカニズム*, 11: 23-33, 1992.
- 6) 時田喬, 宮田英雄, 青木光広: 重心動揺の周波数解析—ピーク面積—周波数スペクトル検査の提唱—. *Equilibrium Res*, 72: 238-246, 2013.

1) 今岡薫, 村瀬仁, 福原美穂: 重心動揺検査