

〔経常研究 B〕

単一の参加者によるデザイン評価技術向上のための 各指標間の因果性と影響度合いの定量化に関する研究

森 亮太

1 目的

デザイン評価においては、体平衡機能を示す COP (Center of Pressure) や筋活動を示す EMG (Electromyography) が重要な指標となる。従来は両者を独立して評価することが多かったが、実際には「重心の変化が筋負担に影響するのか」「筋負担が重心に影響するのか」といった双方向的な関係性が想定される。しかし、その因果性や影響の大きさを定量的に検証した研究は少ない。

本研究では、単一被験者から得られた時系列データを用いて、COP と EMG 間の因果性と影響度を統計的に明らかにすることを目的とする。事例として、中敷きの有無がバランス機能や筋負担に与える影響を検討した。仮説は「中敷きにより COP が安定し、その結果として筋活動が低下する (COP → EMG の因果関係が存在する)」である。

2 実験方法

2.1 実験条件

被験者は筆者本人であり、単一例を対象とした。可搬型フォースプレート (TFG-4060) の上に平坦な中敷きを設置し、その上に被験者が立位姿勢をとった。課題は次の4種類とした。開眼静止立位 (30 秒)、閉眼静止立位 (30 秒)、屈伸運動 (30 秒)、荷物持ち上げ保持 (60 秒)。これらの課題は、中敷きが平衡機能や筋負担に与える影響を多角的に評価するために設定した。計測指標として、フォースプレートにより前後方向の COP を計測し、表面筋電計を用いて両下肢の4筋から EMG を導出した (CH1: 右前脛骨筋、CH2: 右腓腹筋、CH3: 左前脛骨筋、CH4: 左腓腹筋)。

2.2 分析手法

本研究では、COP と EMG の時系列データを同時に扱うため、ベクトル自己回帰モデル (Vector Autoregressive model: VAR モデル)^{1)~6)} を用いた。これは、複数の時系列データが互いに影響し合う関係を数式で表す手法であり、ある変数の「過去の動き」が別の変数にどの程度影響しているかを捉えることができる。本研究のように「COP の変化が筋活動に影響するのか、それとも逆なのか」を調べるのに適している。VAR モデルを基盤として、以下の分析を行った。

・ Granger 因果性検定

ある変数の過去の値を加えることで予測精度が向上するかどうかを調べる手法である。もし COP の過去値を入れて EMG の予測が良くなるなら、「COP は EMG の原因となっている (COP → EMG の因果関係がある)」と判断できる。

・ インパルス応答分析

COP が一時的に変化したとき、EMG が時間の経過とともにどう変動するかをシミュレーション的に示す方法である。たとえば「重心が前にずれたとき、筋活動はすぐ増えるのか、少し遅れて減るのか」など、影響の形や持続時間を視覚的に把握できる。

・ 予測誤差分散分解

EMG の変動が「自分自身の過去の動き」で説明されているのか、それとも「COP の変動」によって説明されているのか、その割合を数値で表す分析である。影響度を%で示せるため、因果関係の強さを直感的に比較できる。

これら3つの分析を組み合わせることで、単に「関係があるかないか」を見るだけでなく、因果性の有無（Granger 因果性検定）、時間的な影響の広がり方（インパルス応答分析）、影響の大きさ（予測誤差分散分解）を統合的に理解できるようになる。こうした点から、本研究の目的である「COP と EMG の因果性と影響度を定量的に明らかにする」ために適した方法といえる。解析は Python を用いて実施した。

3 結果と考察

3.1 因果性の検定

Granger 因果性検定の結果、COP→EMG の因果関係は「閉眼静止立位」においてのみ確認された。対象筋は CH1（右前脛骨筋）、CH3（左前脛骨筋）、CH4（左腓腹筋）であり、いずれも有意性を示した ($p < 0.05$)。一方、EMG→COP 方向の因果性は全ての課題で確認されなかった ($p > 0.05$)。

3.2 インパルス応答分析

COP が 1 単位変化した際の EMG 応答を 100 ラグにわたり算出した (図 1)。その結果、COP 変化は即時的に筋活動に影響を与えるが、その影響は時間とともに減衰または反転することが示唆された。

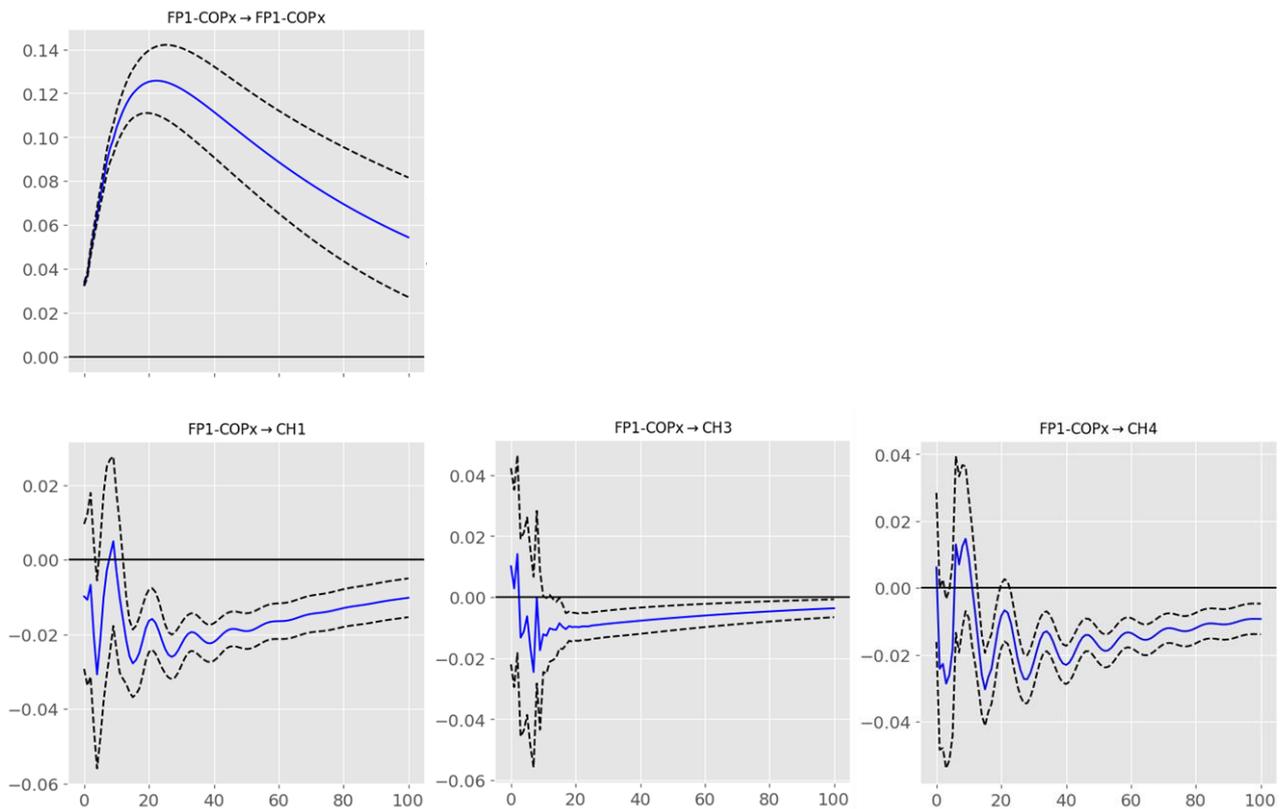


図1 COPの1単位変位がEMG(CH1、CH3、CH4)に及ぼす効果を示すインパルス応答

CH1について、COP変化(図1上図)直後(ラグ1~5)に筋活動が低下する正の反応が観察された。その後ラグ6~10で反転し、一時的な増加を示したが、ラグ20以降は再び低下傾向に移行した。長期的には緩やかな筋活動上昇が持続した。

CH3とCH4について、CH1と同様、初期に一時的な正負の変動が見られ、その後は緩やかな変化に落ち着いた。

3.3 予測誤差分散分解

EMG 変動の要因を自己寄与と COP 寄与に分解した結果は以下のとおりであった（図 2～図 4）。いずれも COP の寄与は小さく、EMG 変動の大部分は自己の過去値に依存していた。

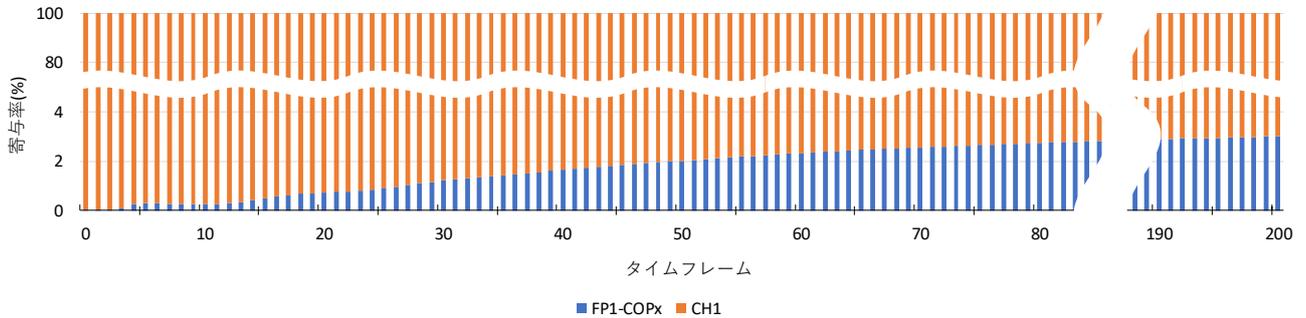


図 2 EMG の分散に占める COP の割合の変化
(CH1：自己寄与が約 98%、COP 寄与は約 3%にとどまる)

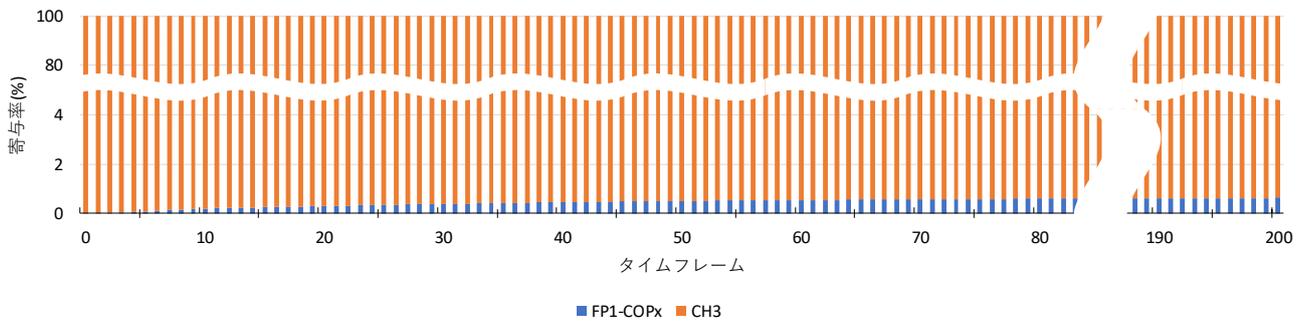


図 3 EMG の分散に占める COP の割合の変化
(CH3：自己寄与が約 99%、COP 寄与は約 1%にとどまる。)

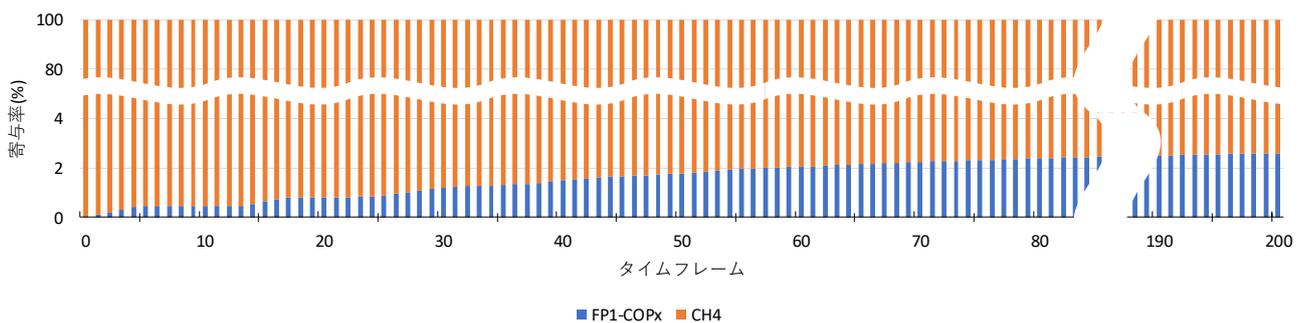


図 4 EMG の分散に占める COP の割合の変化
(CH4：自己寄与が約 98%、COP 寄与は約 2%にとどまる。)

3.4 考察

閉眼条件では視覚情報が遮断されるため、身体は支持面からの感覚に依存しやすくなる。その結果、COP→EMG 間の因果関係が顕在化したと考えられる。ただし、影響度は最大でも 3%程度にとどまり、当初の仮説ほど強い効果は確認できなかった。

先行研究では、不安定姿勢（閉足位など）の方が重心の変化を検出しやすいとされている⁷⁾。本研究の課題設定は十分ではなく、今後は条件を厳密化する必要がある。

本研究の意義は、単一被験者データであっても、VAR モデルを用いて因果性と影響度を統計的に可視化できた点にある。この手法は、デザイン評価の裏付けを与えるだけでなく、筋力トレーニングやリハビリ介入の効果が COP に及ぼす影響⁸⁾を検証する枠組みとしても有効である。

4 結論

本研究では、中敷きを事例として、COP と EMG の因果性と影響度を定量化する手法を提示した。結果として、閉眼条件において COP→EMG の因果が一部筋で確認されたが、その影響は小さかった。

提示した「VAR モデル → インパルス応答分析 → 予測誤差分散分解」の流れは、デザイン評価における観察結果を科学的に裏付け、設計改善へとフィードバックする基盤技術として有用である。今後は適切な実験条件を整備し、応用事例を拡充していく必要がある。

参考文献

- 1) Atwan, T.A. 著, 黒川利明 訳: Python 時系列分析クックブック II: モデル・機械学習, 朝倉書店, 東京, 2023.
- 2) 沖本竜義: 経済・ファイナンスデータの計量時系列分析, 朝倉書店, 東京, 2010.
- 3) 福地純一郎, 伊藤有希: R による計量経済分析, 朝倉書店, 東京, 2011.
- 4) 馬場真哉: 時系列分析と状態空間モデルの基礎: R と Stan で学ぶ理論と実装, プレアデス出版, 東京, 2018.
- 5) 島田直希: 時系列解析: 自己回帰型モデル・状態空間モデル・異常検知, 共立出版, 東京, 2019.
- 6) 高橋威知郎: Python による時系列分析: 予測モデル構築と企業事例, オーム社, 東京, 2023.
- 7) 片岡学, 吉田友英, 清水彩未, 井山建二, 山本昌彦, 鈴木光也: 重心動揺検査における閉足位と 30° 開脚位の比較, *Equilibrium Res*, 77(2): 58-63, 2018.
- 8) 山崎祐輔, 萩野浩: 体幹筋安定化トレーニングが身体運動に及ぼす影響について, *J Yonago Med Ass*, 66: 57-63, 2015.

(問合せ先 森 亮太)

(校 閲 泉 宏和)