

重心動揺における軌跡の幾何学的分析からみられる 姿勢の非線形的特徴

— ASD児, ID児, 大学生の比較 —

野 田 満*

要 約

大学生 ($n=12$), ASD児 ($n=11$), 知的能力障害 (ID)児 ($n=7$) の足圧中心 (center of pressure; COP) 動揺をバランス Wii ボードを用いて比較検討した。ASD児やID児はCOPの値から左右の揺れが顕著で、特にASD児の右側への揺れの偏りが確認された。一方で大学生は左右よりも前後の揺れが示され、それぞれ特徴的な相違を示した。幾何学的な指標としてアルファ形状 (外形の縮小率) を検討した結果も、同様の傾向を示しただけでなく、頂点の数を比較すると障害を持った子どものCOPの輪郭が大学生に比べ複雑であることが示された。また、凸包を描出すると、面積が障害児で拡大することが示された。幾何学的形状の分析の可能性が示された。また姿勢の保持の結果生じる重心動揺は自己 (固有) 受容感覚と関連があり、メンタルローテーションにおける身体利用でのシミュレーションにも通じていることが示唆された。

キーワード: 重心動揺, ASD児, ID児, 自己 (固有) 受容感覚, メンタルローテーション

人は静止して立っていてもわずかに揺れ動いている。身体各部分の接合箇所を軸に緩やかな揺らぎのなかにあるとあってよい。であるならば、人は何らかの問題解決的な心的活動を行っている際にはどのような揺らぎが生じるのだろうか。

メンタルローテーションの研究において、Parsons (1994) は、ディスプレイに示した身体部分の向きと実際の観察者の向きとが一致しているか否かで成績が異なってくることを見出し、身体の一部をイメージ上で回転させるメンタルシミュレーション (mental simulations) が、身体そのものの感覚運動的な構造の制約を受けることを指摘した。しかしParsonsの研究では刺激対象が観察者とは切り離されたモノではなく、刺激対象が観察者も同じく所有する身体の一部であったため、自分が自分の一部を眺める、場合により投影

的に眺めるという2重性における複雑さが生じていた。

我々は日常生活でなにかモノを扱う際、自然に自分の身体の一部が見えてしまう。Parsonsが取り上げた身体のイメージ回転という問題は、刺激-反応適合性 (S-R compatibility) の文脈で取り上げられてきた内容でもあり、自己と見えている自己との関係性の認識と考えられてきた (野田, 2010)。

リハビリテーション訓練の視点から姿勢とメンタルローテーションの関係について興味深い研究がある。大学生を対象に身体の一部を刺激としたメンタルローテーションを行うと姿勢の安定性が改善されるという結果が示された (Kawasaki & Higuchi, 2013; Kawasaki, Yasuda, Fukuhara, & Higuchi, 2014)。プリ-ポスト実験デザインでメンタルローテーションの効果を見たもので、姿勢動揺の測定でCOPを算出している。Kawasaki

2020年11月30日受付

* 江戸川大学 人間心理学科教授 空間認知発達心理学

達は姿勢改善の理由として、その実験では Parson と同じく手とか足といった身体の一部を視覚刺激として用いて、メンタルローテーションに含まれている運動プランニングや実行に要した認知プロセスが、姿勢の動揺を避けようとして自己（固有）受容感覚が改善され安定的な姿勢がより保たれるようになったのではないかと考えている。また、身体各所で連動する身体的な揺らぎが就学前児のメンタルローテーション遂行中に確認されている（野田, 2015b）。後頭部と手に加速度センサーを装着し測定したところ、両方の身体部位が同期して揺れていることが確認された。

メンタルローテーションへの自己の身体のかかりとして姿勢の動揺だけではなく、手や指の動きやジェスチャーが報告されてきている（Chu & Kita, 2008; Ehrlich, Levine, & Goldin-Meadow, 2006; Göksum, Goldin-Meadow, Newcombe, & Shipley, 2013; 野田, 2015a, 2016）。

確かに、我々はジェスチャーを用いながらイメージ上の対象を操作しようとしているといえるだろう。他の領域、例えば計数課題や Piaget 型の保存問題を解く上で、課題を解決するためのガイドとなる指や手の動きが観察される（Goldin-Meadow, 2003）。積み木の置き換え課題において、自発的な身振りの中に単位の認識を見出した Piaget & Inhelder (1960) は、身体の初期の役割が認識の基盤にあることに言及している。課題解決が心内でのみ実現できるようになるには、はるかに後の年齢になってからであるが、初期の身体を用いた認識の重要性を指摘している。

本研究では精神活動による身体的な動きと自然な状態での身体の揺れとのあいだはどうつながっているかという問いの前に、通常の立位姿勢の測定から始め、身体の揺れやできればそのパターンの探求を進めることにした。以下に、重心動揺を中心とした関連する知見を整理した。

姿勢制御の発達には3つの異なるプロセスに基づいている。ひとつは感覚統合プロセスであり、視覚、体性感覚、前庭感覚が中枢神経系（CNS）に統合されていくプロセス。第2は感覚運動反応の

適切なスケールリングや協調の実行に含まれている運動調整（motor adjustments）、第3として子どもの時期に緩やかに成熟してくる身体図式（body schema）の内的表象があるとされている（Cuisiner, Oliver, Vaugoyeau, Nougier, & Assaiante, 2011）。これら感覚の寄与についてであるが、乳児期はまだ前庭感覚が優位であり、脳幹や小脳が姿勢維持のために感覚情報を統合しており、身体の定位や内部モデルはこれらの領域で生成されるといわれている（Kandel, 2013 金澤・宮下訳, 2014）。乳幼児期では重心の高低差に対する敏感さが働いている。成長するにつれ視覚優位へと変化していくが、多くの信号が脳幹-小脳-前庭-皮質の間で行き交っているとされ（市川・渡邊, 1991）、大脳皮質の成熟と関係している。視覚は身体のかかりを抑制し安定させる上で手掛かりを与えてくれる。さらに歩行などの移動経験とともに体性感覚が優位に働くようになり（Chen, Metcalfe, Chang, Jeka, & Clark, 2008）、統合されていく。姿勢制御の研究において、成人に比して子どもの身長は低いため重心位置が異なる。そのために子どもは成人よりも早い速度で動揺するが、発達に伴う自発性動揺は2~14歳の間に改善されるとしている（Kirshenbaum, Riach, & Starkes, 2001）。また、頭部と体幹のそれぞれの動きを検討した結果、3, 4歳から7, 8歳にかけて調整ができるようになっていくことが見出されている（Assaiante, Mallau, Viel, Jover, & Schmitz, 2005）。姿勢制御のためにはバランスを取るための内部モデルを形成しなければならない。身体図式（body schema）は、いくつもの感覚情報を中枢で統合させ、身体と環境との関係の内部モデルも組み込まれていて、身体図式は動作の予想も行っており更新され続けているとされる（Kandel, 2013 金澤・宮下訳, 2014）。

定型発達の姿勢の発達とは別に、障害を持っている子どもの場合は特異な変化を示すことがある。自閉症スペクトラム障害（以下 ASD）児は、運動面での問題が多く指摘されてきており、姿勢と関係する内容として動きの不器用さや筋緊張、力の入れ具合、不随意的な動き、姿勢維持の困難

さ等が保護者から報告されており身体的不器用さや協調運動の弱さが指摘されている（是枝, 2014）。しかしながら, ASD 児の姿勢制御を取り上げ, 彼らの特徴について検討している研究が少ないことも指摘されている（栗田・平田・奥住・國分, 2015）。Bhat, Landa, & Galloway (2011) も ASD 児の運動面での障害を幾つかの種類に区分けして特徴を述べているものの, 姿勢について ASD 児者はともに研究例が少ないことを指摘している。そうした中で軽度発達障害児を対象とした重心動揺計による研究が行われた（松田他, 2012）。対象は 4~6 歳児で立位姿勢で行われている。興味深い結果として, 健常児に比べ開眼・閉眼時とも軌跡長, 矩形面積等や左右方向の動揺速度が大きく, 開眼時では左右方向, 閉眼時では前後方向の重心動揺変化や重心動揺速度が大きくなった。立位姿勢制御の未熟さが原因と考えられたが, 6 歳辺りで成人同様の体性感覚が優位に働き始め立位姿勢制御に変わっていくことから（Foudriat, Di Fabio, & Anderson, 1993）, 立位姿勢制御がまだ未熟で体性感覚よりも視覚優位の姿勢制御が行われたのではないかと考えている。ASD とは別に DSM-5 の区分において知的能力障害（Intellectual disability, 以下 ID）児の身体動揺はその顕著さに関し多くの研究が行われその展望が報告されている（奥住, 2000）。身体動揺が健常者に比べて大きいことがあげられ, 知的レベルの低い者が高い者に比べると動揺量が大きくなることなど指摘されている（松崎・中田, 1982）。

重心動揺の測定においては, 国際的な検査基準が一致しておらず, 足位の違いや検査時間・回数, サンプリング周波数の相違が指摘されている（浅井, 2016）。ただし日本平衡神経科学会の手引きによると, 重心動揺検査における面積では外周面積, 矩形面積, 実効値面積が用いられ, 外周面積は最外周が囲む面積, 矩形面積は左右径と前後径の積, 実効値面積は XY の 2 次元実効値を半径とする円の面積とされている（鈴木・松永・徳増・田口・渡辺, 1996）。

一方で, 高価な重心動揺計に代わりバランス Wii ボード（Nintendo Wii balance board）によ

る重心動揺の測定の妥当性や信頼性の研究が行われるようになった（堀内・佐藤・見崎・今中・石原, 2017; 兵頭・鶴埜, 2012）。また, 国外においてもバランス Wii ボードの重心動揺計としての利用について信頼性が検証され（Clark, Bryant, Pua, McCrory, Bennell, & Hunt, 2010; Bartlett, Ting, & Bingham, 2014; Holmes, Jenkins, Johnson, Hunt & Clark, 2012; Leach, Mancini, Peterka, Hayes, & Horak, 2014）, 一定の評価を得ている。ただ医療用機器としての認証を受けていない点で注意が必要とされた（倉山・村越・影原・近藤・大高, 2012）。

目的

そこで, 本研究ではバランス Wii ボードを利用し, 姿勢動揺における研究例が少ないながらも特徴的な揺れを示す ASD 児と ID 児を取り上げ, 比較の上で大学生を対象としてその特徴の違いを明らかにすることを目的とした。その際に, 重心動揺のあり方を幾何学的な形状から捉えるひとつの試みとして, 回帰モデルおよび計算幾何学からアルファ形状を用いて特徴の記述を試みることにした。また, メンタルローテーションが姿勢保持の改善に影響するという知見があることから, 重心動揺で生じる自己（固有）受容感覚とイメージ変換との関連性について新たな可能性を検討することを第 2 の目的とした。

方法

参加児者：千葉県放課後デイサービスに通う児童 18 名（平均年齢 7 歳 10 ヶ月, 男児 14 名女児 4 名）, 大学生 12 名（平均年齢 21 歳 8 ヶ月, 男子 6 名, 女子 6 名）。児童 18 名の内, 2 名が ID と ASD を合併し, 別の 2 名は ASD と ADHD（注意欠陥多動性障害）を合併していた。他の症候を示していない ID 児が 5 名, ASD 児が 9 名であった。指導記録において主たる障害とみなされている区分から, 先の ID と ASD がともに認められる子どもを ID 児群に加え計 7 名（平均年

齢 7 歳 2 ヶ月, 男子 5 名, 女子 2 名) とした。また同様に ASD と ADHD (注意欠陥多動性障害) がともに認められる子どもを ASD 児群に加え計 11 名 (平均年齢 8 歳 3 ヶ月, 男児 9 名, 女児 2 名) とした。対象となった児童の保護者には事前に同意書を配布し, 調査の同意を得た。

実験調査者: 対象施設で臨時指導員として従事している者 (当時大学 4 年生) が主に課題を遂行し, 補助的に協力施設の指導員の助けを得た。

装置: 重心測定には重心動揺計として評価されている任天堂のバランス Wii ボードを用いた。データ取得には PC に接続した Bluetooth にバランス Wii ボードを認識させ, 入力情報については重心動揺ソフト WBBSS Analysis ver 1.1 (兵頭, 2018) を利用した。測定においては, 脚を肩幅まで開いて立位姿勢を保たせるため, バランス Wii ボード上には足型をプリントした用紙を貼り付けてある。足形の大きさは対象となる児童の年齢平均から大きさを調整した足形を用意した。

手続き: 施設内の事務所の一面を借り個別に測定を行った。壁から 90cm 離れた箇所にバランス Wii ボードを置き, 壁に注視点のシールを貼ったお面を児童の目線の高さになるように貼り付けた。指導員により子どもは個別に誘導され部屋に入り, 教示を与えてから 30 秒間立位姿勢でボードに乗ってもらい測定が行われた。教示は「今から 30 秒間ボードの上に乗ってもらいます。背筋を伸ばし, 前を見て (お面のシール), 右足 (対象児童の右足を指さして) をここ (足形の右を指さし) に, 左足 (対象児の左足を指さし) をここ (足形の左を指さして) に乗ってください。30 秒経過したら終わりの合図を出します。」とした。

データの整理と分析の仕方: 取得した個々の重心座標データ (単位は mm) は, ボード中央を原点としそこからの隔たりを示す。大学生, ASD 児群, ID 児群の 3 群の重心動揺の違いを捉えるために線形回帰モデルの指標 (傾き, y 切片, 決定係数), 重心動揺の座標の特徴 (COP 平均, COP 標準偏差, RMS (root mean square)), 座標データが描く幾何学的パターンを示す指標 (アルファ形状, α 値 1, 0 での頂点, 各面積) を算出し, 3

群間の一元配置の分散分析及び Kruskal-Wallis 検定, また要因間を比較する場合は混合型 2 要因分散分析を行った。線形回帰モデルへのあてはめにより, 重心座標の分布傾向が示されると捉えた。傾きにより身体の主たる揺れ方向, y 切片からは身体の揺れ方向とバランス Wii ボード上の前後軸 (ボード平面の上下軸) との接点を得た。決定係数は回帰式のあてはまりの良さを示す。また, 重心動揺の座標として COPx と COPy を求めた。前後・左右方向の座標の平均値となる。また COP の標準偏差 (*SD*) は平均からの偏りであるが, RMS は時間経過による重心座標の変動の大きさを示し, RMS 値が高いほど動揺性が高く安定性が低いとされる。

また座標パターンを捉えるために, 幾何学的特徴のひとつとしてアルファ形状を算出した。形状を生成する α 値は動揺の複雑さの一側面を示すであろうと考え取り上げた。計算幾何学からの援用であるが, α 値とはサンプリングされた重心座標を点集合とみなし, それら全ての点を囲む最も小さいアルファ形状を生成する値である。点集合に形状をフィットさせる上での縮小率とされる。輪郭だけではなく内部も含むので凹領域も示されるが, $\alpha=0$ のときは, 点集合を囲む通常の凸包 (convex hull) と一致する。また, ここでは, α 値だけでなく生成されたアルファ形状の持つ点 (points) も変数とした。実際に測定された重心動揺の座標値は重なり合っただけで同じ数値が連続している。よって形状生成で用いられた点を広がり の指標として利用した。また α 値が 0 の場合と 1 の場合における頂点数とそれぞれの面積を求めた。分析には MathWorks 社の Matlab R2020 を使用した。

結果

1) 線形回帰モデル

個々の参加児者について x 軸と y 軸の COP データに関して線形回帰モデルをあてはめたところ, *F* 検定の結果, ID 児群の 1 名 ($p=.33$) を除く全ての参加児者で有意であった。傾き, y 切

Table 1 大学生, ASD 児, ID 児の統計的指標と 3 群間の比較結果

	大学生		ASD児		ID児		F
	M	SD	M	SD	M	SD	
傾き	-.50	.81	.01	.25	-.02	.31	2.63 †
y 切片	-1.82	26.13	6.41	28.97	1.91	40.67	.18 n.s
決定係数	.21	.21	.10	.21	.13	.17	.86 n.s
相関係数	-.26	.38	-.01	.32	.08	.35	2.15 n.s
COP x	.28	11.34	19.38	13.19	16.56	27.39	3.67 *
COP y	-2.79	28.93	4.91	28.37	6.14	43.69	.20 n.s
COP_SDx	2.79	1.54	19.07	23.69	17.69	12.59	3.31 †
COP_SDy	4.79	1.48	10.72	5.82	15.92	10.37	6.69 **
RMSx	9.93	6.33	30.77	22.96	35.70	14.88	6.61 **
RMSy	25.37	15.05	28.65	12.53	46.65	11.47	5.41 *
α 値	1.05	.63	7.81	9.81	10.96	14.82	2.60 †
頂点数	1557.25	77.70	1835.45	111.42	1826.86	66.18	30.66 **
α=1の面積	140.17	63.28	4623.25	9220.23	4449.73	4415.12	交互作用 *
α=0の面積	223.60	117.59	6585.13	11603.33	8155.90	7745.51	F=4.20
α=1の頂点数	127.00	40.38	120.64	48.81	109.43	38.04	α 主効果 **
α=0の頂点数	15.33	2.05	17.55	3.23	16.00	2.78	F=147.21

注) 表右端に一元配置分散分析の F 値と有意性を示したが、α=1, 0 の面積と頂点数は 2 要因分散分析での結果を表す。* $p < .05$, ** $p < .01$, † $.5 < p < .10$ 。

片, 決定係数, 相関係数それぞれについて, 3 群間の一元配置を行ったところ, 傾きのみ有意傾向を示し ($F(2, 27) = 2.63, .5 < p < .10$), 他の変数では有意差は認められなかった。傾きの平均値を比較すると大学生 ($M = -.50$) が ASD 児 ($M = .01$) や ID 児 ($M = -.02$) に比べ, 絶対値にすると高い値を取っていた。回帰直線は大学生が右肩下がりであるのに比べ, ASD や ID の子ども達はフラットであることが示された (Table 1 参照。以下, 主たる統計的数値は表内に要約した)。

2) 重心座標

重心動揺の座標データ COP について, 3 群×座標軸の 2 方向についての混合型分散分析を行ったところ, 有意差は得られなかった。分散が極めて高いことが原因していると考えられ, 改めて一元配置の分散分析を座標軸方向ごとに行ってみた。COP x では 3 群間で有意差が認められ ($F(2, 27) = 3.67, p < .05$, 効果量 = .522), HSD 法による多重比較をしたところ ASD 児群 ($M = 19.38$) は大学生 ($M = .28$) より有意に高い値 (x

軸の右方向に偏った値) であった ($p < .05$, HSD = 18.585)。一方 ID 児も高い値を示したが ($M = 16.56$), 偏差が高く, そのために大学生との間で有意な差は得られなかった。Kruskal-Wallis 検定を行うと 3 群間の平均順位に有意差があり ($p < .05$, $H = 7.55$), Steel-Dwass による多重比較を行ったところ, 同様に大学生 (平均順位 = 10.17) が ASD 児群 (平均順位 = 19.82) より低かった ($T = 3.016, p < .05$)。COPy では分散分析および Kruskal-Wallis 検定ともに有意差は得られなかった。つまり, COPx では ASD 児や ID 児は大学生より高い値を示し, 右方向に重心が偏在していたが, COPy では差が生じなかったことが示された (Figure 1)。

COP の標準偏差 (SD) であるが, 2 要因混合型分散分析を行ったところ, 3 群間に主効果が認められ ($F(2, 27) = 4.15, p < .05$, partial $\eta^2 = .235$), 座標軸方向には差は認められなかった。Bonferroni 法による多重比較を行ったところ, Figure 2 に示すように大学生 ($M = 3.79$) が ASD 児 ($M = 14.89$) や ID 児 ($M = 16.80$) より有意に低い値

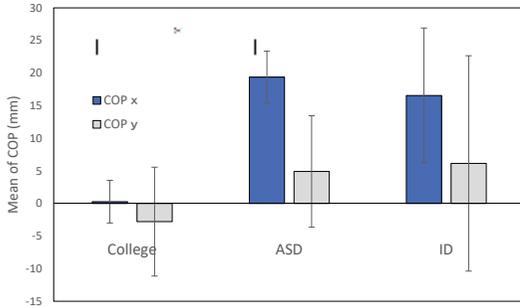


Figure 1. COP の軸方向による 3 群間の比較.

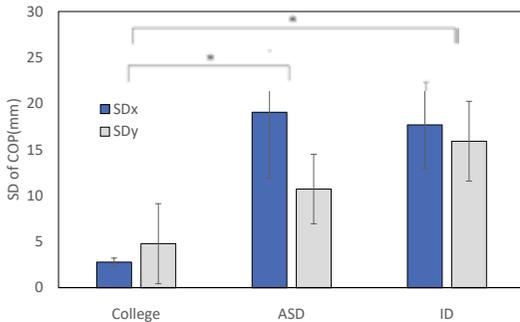


Figure 2. COP の標準偏差の軸方向による 3 群間の比較.

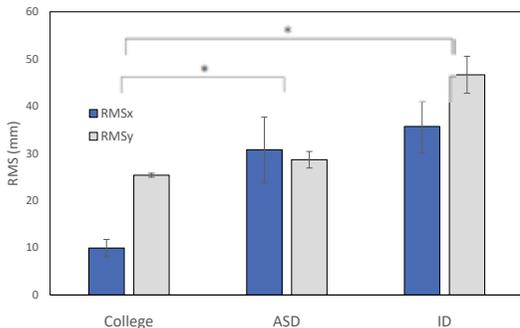


Figure 3. RMS の軸方向による 3 群間の比較.

を示した ($p < .05$)。座標軸ごとに一元配置分散分析を行ったところ、SDx で 3 群間に有意傾向が認められ ($F(2, 27) = 3.31, .5 < p < .10$, 効果量 = .495), SDy では 3 群間に有意差が認められた ($F(2, 27) = 6.69, p < .05$, 効果量 = .704)。

RMS はデータの変化の大きさを表す。3 群 × 座標軸方向の 2 要因混合型分散分析を行ったところ、3 群間に主効果が認められ ($F(2, 27) = 9.00$,

$p < .01$, partial $\eta^2 = .400$), Bonferroni による多重比較の結果、Figure 3 に示されるように ASD 児 ($M = 29.71$) や ID 児 ($M = 41.18$) に比べて大学生 ($M = 17.65$) は有意に低い値を示した ($p < .05$)。軸方向にも有意差が得られた ($F(1, 27) = 4.70, p < .05$, partial $\eta^2 = .148$) ので、群別に平均値の差の検定を行ったところ、大学生のみ有意差が確認され RMS y ($M = 4.79$) が RMS x ($M = 2.79$) よりも高い値となった ($t = 3.664, p < .01$)。交互作用はなかった。

3) 幾何学的指標

アルファ形状の縮小率を表す α 値については 3 群間に有意傾向が求められた ($F(2, 27) = 2.60, .5 < p < .10$)。多重比較では差はなかったが、Kruskal-Wallis 検定では 3 群間に有意差が認められ ($H = 11.21, p < .01$)、多重比較の結果、大学生 (平均順位 = 10.17) は ASD 児 (平均順位 = 17.86) に比べて有意に低い値を示した ($T = 2.954, p < .05$)。また、アルファ形状で得た頂点数について、3 群間に有意差が認められ ($F(2, 27) = 30.66, p < .01$, 効果量 = 1.507), HSD 法による多重比較では大学生 ($M = 1557.25$) が ASD 児 ($M = 1835.45$) や ID 児 ($M = 1826.86$) に比べて有意に低い値となった ($HSD = 97.499, p < .05$)。また、Kruskal-Wallis 検定でも 3 群間に有意差が確認され ($H = 20.93, p < .01$)、多重比較の結果、大学生 (平均順位 = 6.5) は ASD 児 (平均順位 = 21.27) に比べて有意に低い値を示した ($T = 20.93, p < .05$)。つまり縮小率が 3 群間で異なり、大学生で最も低く、ASD 児や ID 児で高く現れていた (Figure 4)。

α 値による面積比較であるが、3 群 × α 値 ($\alpha = 1.0$) の 2 要因混合型分散分析を行った。群間の主効果はみられなかったが、 α 値の違いによる面積の主効果が有意であった ($F(1, 27) = 14.11, p < .01$, partial $\eta^2 = .343$)。交互作用が認められ ($F(2, 27) = 4.20, p < .05$, partial $\eta^2 = .237$)、ASD 児で $\alpha = 1$ の面積 ($M = 4623.25$) が $\alpha = 0$ の面積 ($M = 6585.13$) より有意に少なく、ID 児においても $\alpha = 1$ の面積 ($M = 4449.73$) が $\alpha = 0$ の

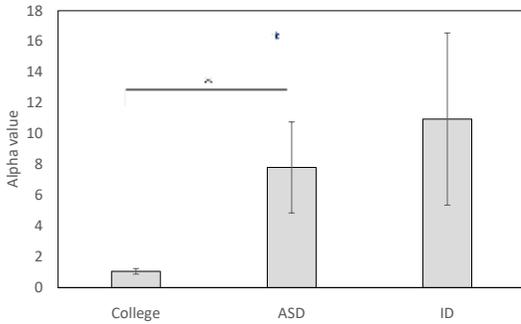


Figure 4. α 値の 3 群比較.

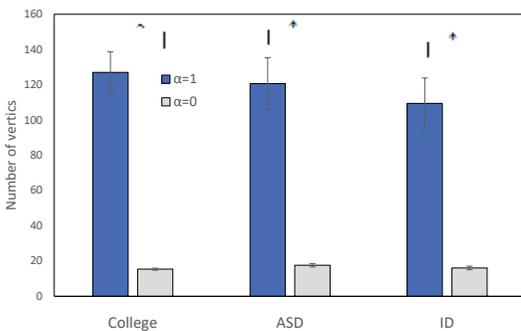


Figure 5. α 値の違いによる面積の 3 群比較.

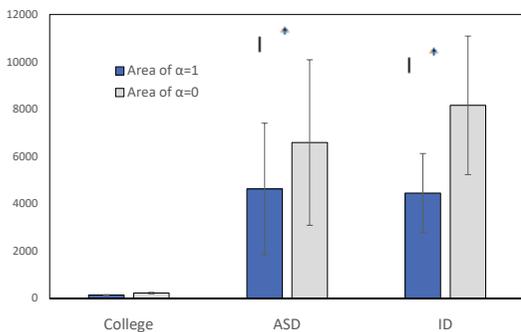


Figure 6. α 値の違いによる頂点数の 3 群比較.

面積 ($M=8155.89$) より有意に少なかった。大学生では面積に差はなかった (Figure 5)。 $\alpha=0$ の場合は凸包となり、面積は拡張し頂点数が少なくなる。幾何学的特徴を得るために頂点数の違いを分析した。3群 $\times\alpha$ 値 ($\alpha=1, 0$) での頂点数の 2 要因混合分散分析を実施した。群間差はなく、 α 値の違いによる頂点数差が認められ、Figure 6 に示されるように 3 群とも $\alpha=1$ の頂点数が $\alpha=0$

の頂点数より多かった ($F(1, 27) = 147.21, p < .01$, partial $\eta^2 = 2.335$)。大学生において α 値が 1 と 0 とで面積で差が無かったにもかかわらず頂点数で差があったのは、縮小率 α そのものが他児の群に比べ低かったことに起因する。

4) 幾何学的パターン

統計的な結果とそのデータ動向をグラフにより記述してきたが、以下に実際の重心動揺の座標の分布パターンを示した。まず、個々の参加者により動揺範囲は異なるので、各図の縮尺は x, y 軸のみ等しくしたが、個々により異なっている。 x 軸は Wii ボードの左右 (Left-right), y 軸は前後 (front-back) を表し、単位は mm である。Figure 7a~d は同一の女子大学生の重心動揺を示したものである。a はアルファ形状で描出したもの、b は $\alpha=1$ の場合の重心動揺の座標と輪郭を示している。また c は $\alpha=0$ の場合であり、凸包が輪郭を取り巻く形状となっている。d は重心動揺の座標の時系列変化をトレースしたものである。

Figure 7 に示した参加者のパターンは大学生に多く見られる特徴を備えている。点集合の分布が細長く、多くは前後方向に分布し回帰モデルをあてはめると右肩下がりとなっていることがみられた。左右方向より前後方向への散らばりが顕著で、面積も少ないことがわかる。一方で、Figure 8 に示した参加児は ASD 児 (男児 CA 8;10, ADHD はみられない) で回帰モデルでは傾きが小さく、 COP_x, COP_y ともに高く右上寄りの重心を示した。 SD も高く左右、前後方向の変動が大きい。 α 値も高く複雑な重心座標の変動を示唆している。面積も大学生に比べ非常に大きく、広範囲に重心動揺が拡大したことを示している。Figure 9 は ID 児の例である (女児 CA 8;8, ASD はみられない)。Figure 8 で示した ASD 児と同じく回帰モデルでの傾きは小さく、バランス Wii ボードの中央から右下に重心が位置していて、 COP_x はさらに右方向にずれていた。大学生の事例に比べ左右や前後方向の標準偏差 (SD_x, SD_y) の値が高かった。面積も大学生に比べて大きく、広範囲の動揺がみられる。

重心動揺における軌跡の幾何学的分析からみられる姿勢の非線形的特徴

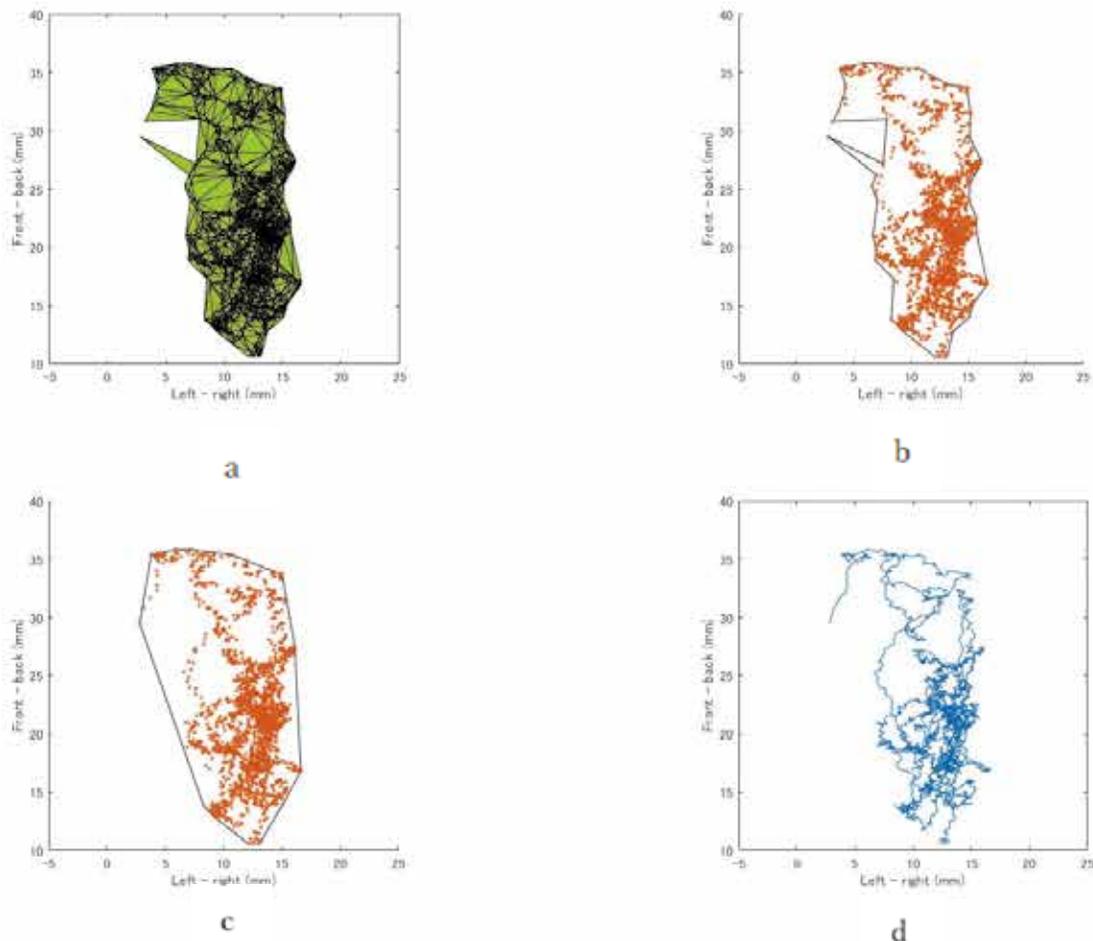


Figure 7. 大学生の重心動揺パターン (女子, 20歳)

左上 a の図はアルファ形状での描出, 右上 b は重心動揺の点集合と, $\alpha=1$ の場合の輪郭, 左下 c は $\alpha=0$ (凸包) の場合の輪郭, 右下 d は重心動揺の時系列にトレスした座標変化。この例では $y = -.572x - 28.657$, $R^2 = .053$, COP x = 12.15, COP y = 21.71, SDx = 2.24, SDy = 5.56, RMSx = 12.35, RMSy = 22.42, $\alpha = 2.67$, $\alpha = 1$ の面積は 201.22, $\alpha = 0$ の面積は 248.15。

考 察

本研究は、重心動揺の従来の指標 (COP, RMS 等) の測定と合わせて、幾何学的指標 (座標データを点集合とみなした場合による集合の傾き、アルファ形状) を得ることで示される幾何学的パターンが、姿勢の状態の違いを反映する有効な指標となり、ここでの参加児者の違いとして検証されるかどうかを検討することが第1の目的であ

た。第2の目的は重心動揺という指標が姿勢保持の研究文脈に限局するのではなく、そこでの自己 (固有) 受容感覚とイメージとの関連性について検討しておくことであった。

参加児者は大学生 (平均年齢 21 歳 8 ヶ月)、ASD 児 (平均年齢 8 歳 3 ヶ月)、ID 児 (平均年齢 7 歳 2 ヶ月) であり、3 者間に明らかに揺れの違いが現れるであろうと予想した。重心の平均位置であるが、左右方向の重心動揺の平均値 (COPx) が大学生に比べて ASD で右方向へずれ、

重心動揺における軌跡の幾何学的分析からみられる姿勢の非線形的特徴

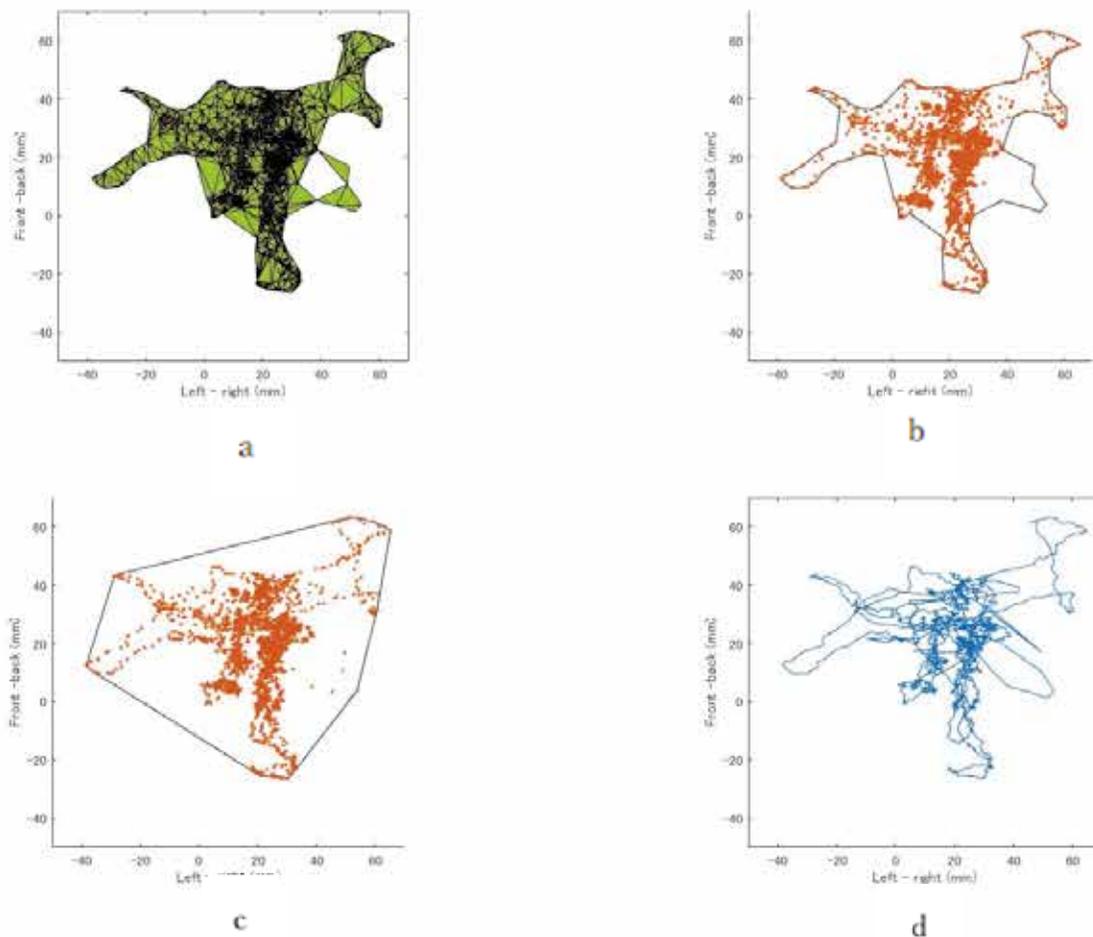


Figure 8. ASD 児の重心動揺パターン例 (男児, 8 歳 10 ヶ月)

大学生に比べて揺れる面積が広範囲を占め、また左右の揺れがみられる。この例では $y = .1187x + 18.055$, $R^2 = .0106$, $COP_x = 20.07$, $COP_y = 20.44$, $SD_x = 13.78$, $SD_y = 15.86$, $RMS_x = 24.34$, $RMS_y = 25.87$, $\alpha = 8.14$, $\alpha = 1$ の面積は 3146.30, $\alpha = 0$ の面積は 5981.60。

前後方向では特に差が無かった。ID 児も比較的、右方向にずれていたが、結果で示したように偏差が大きく、個人差の影響が出たものと推測される。ID 児の中には 2 名 ASD 傾向を示す子どもが含まれていたことを考えると、右方向への多少ながらのずれは ASD の性質がそうさせたのかもしれない。重心座標の標準偏差 (SD) は、重心動揺の座標平均からの偏りであり、個人差の幅を示す。大学生に比べ障害を持った子どもたち (ASD 児, ID 児) はともに重心位置の違いの幅が大きく立位姿勢制御の不十分さがみられる一

方、大学生は 12 名ともがまとまった座標位置に重心があり、完成した姿勢制御が働いていたと予測される。動揺性あるいは不安定性の指標として RMS を得たが、これも大学生に比べて ASD 児や ID 児は高い値を示したことから、障害を持った子ども達は不安定な姿勢制御を行っていたことがわかるが、大学生だけが左右方向 (RMS_x) より前後方向 (RMS_y) で動揺しており、障害を持った子どもとは対照的な方向で不安定になっていた。

一般的に発達に伴い自発性動揺が改善されてく

重心動揺における軌跡の幾何学的分析からみられる姿勢の非線形的特徴

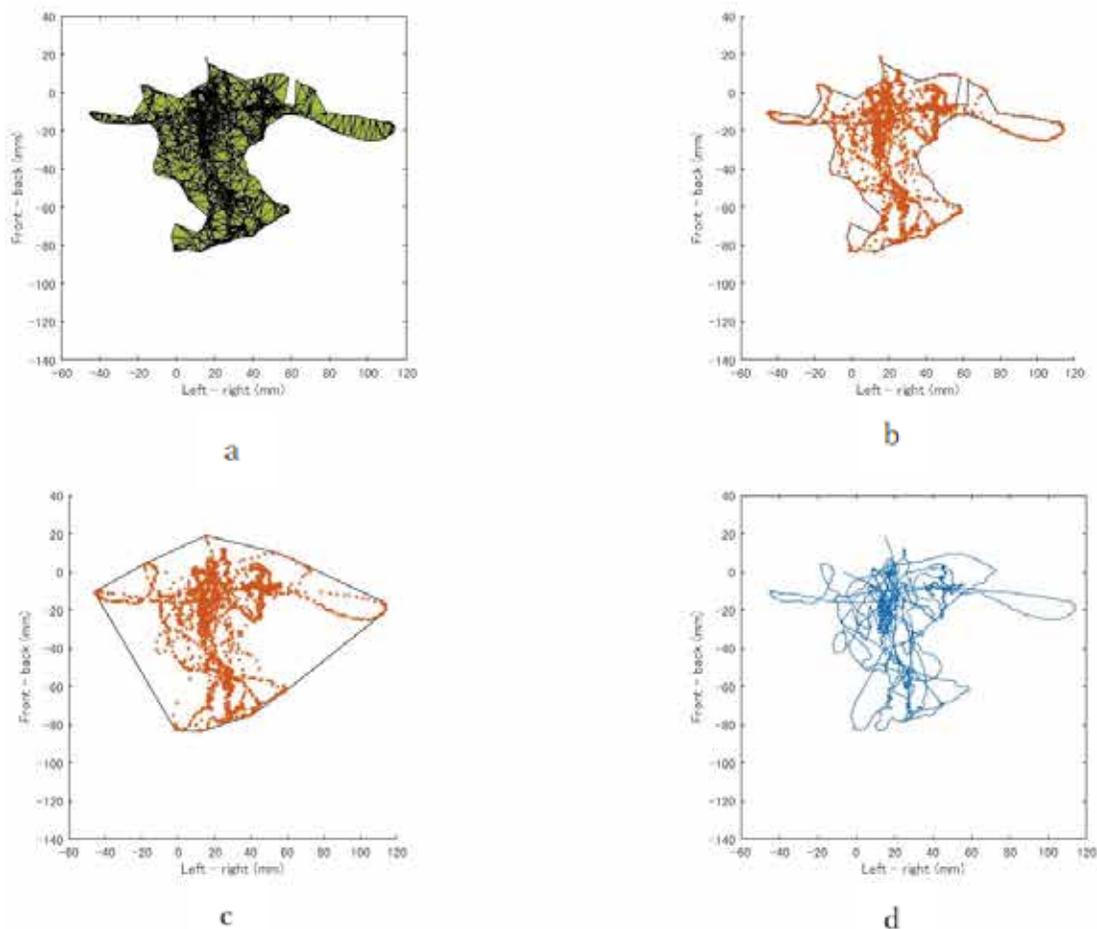


Figure 9. ID 児の重心動揺パターンの例（女児，8 歳 8 ヶ月）

大学生に比べ動揺範囲が広く左右に広がっている。この例では、 $y = .0429x - 24.644$, $R^2 = .00159$, $COP_x = 25.20$, $COP_y = -23.56$, $SD_x = 21.60$, $SD_y = 23.21$, $RMS_x = 33.19$, $RMS_y = 33.07$, $\alpha = 7.14$, $\alpha = 1$ の面積は 5229.70, $\alpha = 0$ の面積は 9680.10.

ることから (Kirshenbaum et al., 2001), COP の偏差や RMS の改善は了解できるが、発達的に左右の揺れから前後の揺れへのシフトについて指摘している研究はそれまでに無い。松田達 (2012) は軽度発達障害児の開眼時で左右動揺が見られ、閉眼すると前後の動揺となると報告していた。対象児が成人のような体性感覚優位ではなく、年齢的にもまだ視覚優位なレベルであるために生じたものと解釈している。開眼で行われた本研究の ASD 児や ID 児にも同様なことが見られたことから、前庭系や体性感覚より視覚系優位が原因したであろうと推測される。ここで改めて開眼して

いる際の視覚のあり方が問われる。実験場面では開眼し、姿勢を維持させるために立位前方に視覚的な定位目標が設定されていた。注意を向け定位する場合は、姿勢制御の点からすると体性感覚と処理しなければならない視覚情報とを皮質で統合することのオーバーフローが生じていたのではないだろうか。ただ、大学生における前後の揺れが何に由来するのか、現在の時点ではわからない。

今回新たに検討した幾何学的パターンは興味深い結果をもたらした。回帰モデルへのあてはめによる傾きは、分布の偏りに影響を受けるので、左右の動揺が優勢であると傾きは 0 に近づき、前後

の動揺では ± 1 に近づく。すなわち身体の揺れを垂直からのバイアスとしてみたことになる。大学生の絶対値がASD児やID児に比べて高かった意味は、大学生が前後の動揺を示した一方で、ASDやID児はそうでなかったことを示す。この結果は本研究のRMSと同じ傾向を示すものであった。

アルファ形状による α 値は重心動揺の座標データを点集合とみなした場合に得られる縮小率であり、広がり指標として利用した。3群間で有意傾向が得られ、大学生の広がり最も抑えられていたことを示していた。一方でアルファ形状の頂点の数においてASD児が大学生よりも多く、一般的に複雑な輪郭線を形成していることが示された。さらに便宜的に α の値を1と0(凸包)とした場合、大学生で $\alpha=1$ での面積と $\alpha=0$ (凸包)との面積差が無く、ASD児やID児で凸包の面積が $\alpha=1$ の面積に比べ明らかに拡大されることが示された。このことは大学生と障害を持った子どもの重心の分布の違いが原因したものではないかと考えられる。大学生は点集合の密度が均等であった一方で、障害を持った子どもの場合は、重心の核となるような点集合が認められるが、周辺領域に顕著に離散していたために面積が拡大したものと推測される。COPの標準偏差(SD)の分析からも明らかのように、特にASD児の右側への偏りが見られたことも特徴を示している。本研究の結果は、暦年齢に従って動揺面積が縮小していくという報告(Cuisinier et al., 2011; 中林, 1997)と一致しており、新たな指標の可能性も確認できたと思われる。

Kawasaki et al. (2013, 2014)の研究では、効果測定用に用いられメンタルローテーション課題の前後で重心動揺が改善されたことが報告されていた。彼らは身体の一部を呈示刺激とするメンタルローテーションに運動のプランニングや実行にとって必要な認知プロセスが含まれているのではないかと考えている(Kawasaki et al., 2014)。またメンタルローテーションが自己(固有)受容感覚(proprioceptive sensitivity)の改善を促し姿勢の安定性を改善したのではないかとしている

(Kawasaki & Higuchi, 2013)。また、刺激対象を能動的に手操作回転する場合と、通常の受動的なメンタルローテーション課題を用いた場合とを比較すると、回転する運動方向が一致するか不一致であるかについての適合性効果の生じ方が年齢により異なることが報告されている(Frick, Daum, Walser, & Mast (2009)。Frick達の研究では、エミュレーション理論に基く説明を試みていた。この理論によると運動領域は身体の内部モデルを形成するためにエミュレーターを駆動し、オフラインで働き、運動に関連する自己(固有)受容及び運動感覚(kinesthetic)をシュミレーションすると想定されている。対象の回転をイメージするためには、実際の運動命令がエミュレータに送られ、視覚入力に対応する変化をシュミレーションすると考えられている。そうした内部モデルから、実際に子どもは年齢とともにメンタルローテーションの刺激方向とは不一致である手の回転動作についての運動命令や自己(固有)受容感覚のフィードバックを無視することで、認知的な制御を発達させてきているのではないかと推測している。

身体運動によって生じる自己(固有)受容感覚は、重力に抗して姿勢を保持し身体の空間位置を認識するだけでなく、身体の部位そのものの動きや位置に関する情報をもたらす。見えていなくても運動している際の身体部位の空間位置を認識できるのはこの感覚によるものである。自己(固有)受容感覚は、なんらかの自己の行為の身体感覚の予期的変化を扱っているもので、姿勢変化だけでなく、上記のような運動を伴ったイメージ変換において主要な役割を果たしていることが予想される。

その意味で、幼児期から児童期にかけての子どもが、メンタルローテーションにおける運動を予測する際に身体を用いた特別なジェスチャー「ひきうつし」を行うことがあるが(野田, 2015, 2016, 2019)、上記のような自己(固有)受容感覚と関連した現象ではないかと考えられる。つまり、知覚的な手掛かりを与えるフィードバック機能だけではなく、重心動揺で示される身体の揺れ

と対象の動きのシミュレーションを代行する手の動きとが深く関連している可能性が示唆される。これらの関係性については今後の研究課題となると思われる。

以上、まとめると、重心動揺の測定で新たな指標をも検討し、ASD児、ID児の揺れが左右に大きく傾く一方で、大学生の場合は前後の揺れが見られた。視覚優位から体性感覚への移行が関与していると考えられた。重心動揺の形状パターンを記述する上で、重心の点集合から得られた回帰モデルの傾きや、 α 形状における α 値の利用は、その特徴を明示する上でも一定の利用可能性を示したとも言える。さらに、姿勢保持それ自体で働く自己（固有）受容感覚が、メンタルローテーションでの運動を予測するための自発的な運動や身体揺れの関連が示唆された。

謝辞

本実験データの結果は大島卓君（2019年度卒業生）の卒業論文を更に分析し直したものである。有意義な研究方向へ繋がる契機となったことに感謝する。また、データサンプリングやその後の処理等についてアドバイスをいただいたWBBSSの開発者、兵頭勇己氏（高知大学医学部附属医学情報センター）に記して感謝の意を表する。

引用文献

- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders. Fifth Edition: DSM-5*. Washington, D.C: American Psychiatric Association (高橋三郎・大野裕監訳 DSM-5 精神疾患の分類と診断の手引 2014 医学書院)
- 浅井正嗣 (2016). 重心動揺検査の国際標準化とわが国の問題点と今後の動向. *Equilibrium Research*, 75 (3), 135-141.
- Assaiante, C., Mallau, S., Viel, S., Jover, M., & Schmitz, C. (2005). Development of postural control in healthy children: a functional approach. *Neural Plasticity*, 12, 109-118.
- Bartlett, H. L., Ting, L. H., & Bingham, J. T. (2014). Accuracy of force and center of pressure measures of the Wii Balance Board. *Gait & Posture*, 39 (1), 224-228.
- Bhat, A. N., Landa, R. J., & Galloway, J. C. (2011). Current perspectives on motor functioning in infants, children, and adults with autism spectrum

- disorders. *Physical Therapy*, 91 (7), 1116-1129.
- Chen, L. C., Metcalfe, J. S., Chang, T. Y., Jeka, J. J., & Clark, J. E. (2008). The development of infant upright posture: sway less or sway differently? *Experimental Brain Research*, 186 (2), 293-303.
- Chu, M., & Kita, S. (2008). Spontaneous gestures during mental rotation tasks: Insights into the microdevelopment of the motor strategy. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137 (4), 706-723.
- Clark, R. A., Bryant, A. L., Pua, Y., McCrory, P., Bennell, K., & Hunt, M. (2010). Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board for assessment of standing balance. *Gait & Posture*, 31 (3), 307-310.
- Cuisinier, R., Olivier, I., Vaugoyeau, M., Nougier, V., & Assaiante, C. (2011). Reweighting of sensory inputs to control quiet standing in children from 7 to 11 and in adults. *PLoS One*, 6 (5), e19697.1-4.
- Ehrlich, S. B., Levine, S. C., & Goldin-Meadow, S. (2006). The importance of gesture in children's spatial reasoning. *Developmental Psychology*, 42 (6), 1259-1268.
- Foudriat, B. A., Di Fabio, R. P., & Anderson, J. H. (1993). Sensory organization of balance responses in children 3-6 years of age: a normative study with diagnostic implications. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 27 (3), 255-271.
- Göksun, T., Goldin-Meadow, S., Newcombe, N., & Shipley, T. (2013). Individual differences in mental rotation: what does gesture tell us? *Cognitive Processing*, 14 (2), 153-162.
- Goldin-Meadow, S. (2005). *Hearing gesture: How our hands help us think*. Cambridge: Harvard University Press.
- Holmes, J. D., Jenkins, M. E., Johnson, A. M., Hunt, M. A., & Clark, R. A. (2013). Validity of the Nintendo WiiR balance board for the assessment of standing balance in Parkinson's disease. *Clinical Rehabilitation*, 27 (4), 361-366.
- 堀内健太郎・佐藤壮平・見崎大悟・今中國泰・石原正規 (2017). 任天堂バランス Wii ボードによる静止立位姿勢の計測と重心動揺の検討 (ヒューマン情報処理). 電子情報通信学会技術研究報告=IEICE technical report: 信学技報, 117 (259), 17-22.
- 兵頭勇己・鶴埜益己 (2012). 重心動揺計による測定値を外的基準としたバランス Wii ボードの併存妥当性の検証. 四国理学療法士会学会誌, 34, 122-123.
- 市川真澄・渡邊悟 (1991). 直立姿勢に対する視覚情

- 報の影響 (〈特集〉姿勢制御と感覚情報). バイオメカニズム学会誌, 15 (2), 59-64.
- Kandel, E.R., Schwartz, J. H., Jessell, T.M., Siegelbaum, S.A., & Hudspeth, A.J. (2013). Principles of neural science. New York: McGraw-Hill Professional. (金澤一郎・宮下保司 (2014). カンデル神経科学. メディカル・サイエンス・インターナショナル)
- Kawasaki, T., & Higuchi, T. (2013). Immediate beneficial effects of mental rotation using foot stimuli on upright postural stability in healthy participants. *Rehabilitation Research and Practice*, 2013, 1-7.
- Kawasaki, T., Yasuda, K., Fukuhara, K., & Higuchi, T. (2014). Relationship between mental rotation of body parts and postural stability during quiet stance. *Journal of Imagery Research in Sport and Physical Activity*, 9, 39-46.
- Kirshenbaum, N., Riach, C., & Starkes, J. (2001). Non-linear development of postural control and strategy use in young children: a longitudinal study. *Experimental Brain Research*, 140 (4), 420-431.
- 是枝喜代治 (2014). ASD (Autistic Spectrum Disorder) 児者の初期運動発達の偏りに関する研究. 自閉症スペクトラム研究, 12 (3), 23-33.
- 倉山太一・村越大輝・影原彰人 (2012). 汎用 IT 機器とリハビリテーション Wii ボードによるバランス評価: ゲーム機器を用いた足圧中心 (COP) の計測. 総合リハビリテーション, 40 (1), 89-91.
- 粟田晏代・平田正吾・奥住秀之・國分充 (2015). 自閉症スペクトラム障害児における姿勢制御についての研究動向. 東京学芸大学紀要. 総合教育科学系, 66 (2), 203-212
- Leach, J. M., Mancini, M., Peterka, R. J., Hayes, T. L., & Horak, F. B. (2014). Validating and calibrating the Nintendo Wii balance board to derive reliable center of pressure measures. *Sensors*, 14 (10), 18244-18267.
- 松田雅弘・新田収・宮島恵樹・塩田琴美・高梨晃・野北好春・川田教平 (2012). 軽度発達障害児と健常児の立位平衡機能の比較について. 理学療法科学, 27 (2), 129-133.
- 松崎保弘・中田英雄 (1982) 重心動揺からみた精神遅滞児の直立姿勢保持能力. 障害者体育, 2, 18-22.
- 野田満 (2010). 「対象になる」ということ——身体とかわり——江戸川学園人間科学研究紀要, 26, 1-35.
- 野田満 (2015a). 身体性とイメージ——「ひきうつし」という手操作方略のイメージにおける役割——イメージ心理学研究, 13 (1), 29-33.
- 野田満 (2015b). 発達的に見たイメージ変換におけるからだの動き. 江戸川大学紀要, 25, 145-157.
- 野田満 (2016). 空間的な変換を要する課題で生じる身体的動き. 江戸川大学紀要, 26, 33-41.
- 野田満 (2019). 傾いた図形の同一性認知の発達の研究. 風間書房
- 奥住秀之 (2000). 知的障害者の身体動揺に関する研究の概要と課題. 特殊教育学研究, 37 (4), 99-104.
- 大島卓 (2019). 発達障がいを持つ児童と健常者の重心動揺の違い. 未刊行卒業論文, 千葉, 江戸川大学
- Parsons, L. M. (1994). Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20 (4), 709-730.
- Piaget, J., Inhelder, B., & Szeminska, A. (1960). *Child's conception of geometry*. London: Routledge & Kegan Paul. (Trans. Lunzer, E.A., La Géométrie Spontane'e de l'Enfant. Paris, P.U.F.)
- 鈴木淳一・松永喬・徳増厚二・田口喜一郎・渡辺行雄 (1996). 重心動揺の Q&A, 手引き, *Equilibrium Research*, 55 (1), 64-77.

Non-linear characteristics of posture as seen from geometric analysis of trajectories in body sway

– A comparison of children with ASD, children with ID, and university students –

Mitsuru Noda

Abstract

The center of pressure (COP) sway of university students ($n = 12$), children with ASD ($n = 11$), and children with intellectual disabilities (ID; $n = 7$) was compared using the Wii Balance Board. Based on COP values, left and right sway was remarkable in children with ASD and children with ID, and in particular, the bias of sway to the right side was confirmed in children with ASD. On the other hand, university students showed more anterior-posterior sway than left-right sway, showing distinctive differences. The results of examining the alpha shape (reduction rate of the outer shape) as a geometric index not only showed the same tendency but also that the contour of the COP of children with disabilities was more complicated than that of university students when comparing the number of vertices. In addition, when the convex hull was visualized, it showed that the area was enlarged in children with disabilities. The possibility of analyzing geometric shapes was shown. It was also suggested that the sway of the center of gravity resulting from the maintenance of posture is related to one's self (proprioceptive) sensitivity and is also related to the simulation of physical use in mental rotation.

Keywords: COP sway, ASD, ID, proprioceptive sensitivity, mental rotation