

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02141

研究課題名(和文)環境の幾何学条件に応じた役割切替え能力の発達

研究課題名(英文)Role switching ability depending on geometrical feature of behavioral coordination environment

研究代表者

木島 章文(KIJIMA, Akifumi)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：10389083

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文):三者跳躍課題(Kijima, et al., 2017)を用いて2, 4, 6年生の身体的社会性の発達の变化を検討した。先導児童と追従児童, その中間的な児童との3名で構成される異質群に課題を行わせた結果, (1)環境の幾何学制約から他に追従すべき状況であっても, 先導児童がその制約を破って他を先導した傾向が有意に高かったこと, (2)ただし, その先導特性の作用は, 環境の幾何学構造による制約を覆すには及ばなかったこと, (3)学年が上がるにつれ, 環境・先導特性双方の制約を含む役割分担の構造が不安定になることがわかった。現在, これらの知見を基盤としてアスペルガー症者の身体的社会性を開発する研究を開始した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

与えられた場に様々な個性が集まり, 各自が自他の立ち位置を理解しながら共通の目的に向かって協力する。

我々はこの基盤をなす知性を身体的社会性と呼び, その育成を体育の課題と考える。

従来から社会性の数理を検討した例はあるが(e.g. Strogatz, 1988), これらはモデルの挙動を計算機で検証するにとどまり, 実社会における人間のふるまいとの対応を検討していない。本研究では環境の物理構造と人間の意思決定が身体行為を介して結びつく構造を解明した。その秩序を象る代数の規則は従来の理論研究に生態学的な妥当性を付与する。さらに本研究が解明した秩序の発達変化は身体的社会性の教育基盤をもたらすはずである。

研究成果の概要(英文): Even in crowded places, we can reach our destination without disrupting others' way. This ability to coordinate with others can be termed "Physio-sociality". We therefore investigate developmental changes in this ability using the triadic jumping task (Kijima et al., 2017). Three children from 2nd, 4th, and 6th grades, with varied personality traits were asked to perform triadic jumps. Each of the 10 triads included a "leader," a "follower," and an "intermediate" child in the context of daily classroom activities. Analysis of the action coordination revealed: (1) the "leaders" tended to lead the other two whenever the environmental geometry forced them to follow others, (2) the effect of their leadership trait never exceeded that of the geometry, and (3) the "leadership" effects and geometrical constraints gradually reduced as the school grade advanced. These findings constitute the cornerstone for the development of "Physio-sociality" for people with Asperger's syndrome.

研究分野: 知覚運動制御と学習

キーワード: 環境の幾何学的対称性 協応行為の対称性 児童期の発達

1. 研究開始当初の背景

力学系 (dynamical systems) を背景に、複数要素の運動の組み合わせから協応パターンが創発する仕組みが研究されてきた。一連の研究で確認された身体動作の現象の一例に両手協応動作 (bimanual coordination) がある。両手を左右逆方向 (内-外, 外-内など) に振る動作を健常者におこなわせ、その周波数を一定以上に高くすると、位相差に大きなゆらぎが発生して、やがて同相 (in-phase pattern : 内-内, 外-外といったように同方向に左右の手を振るパターン) へと相転移する。この協応動作は、周波数を制御パラメータ、位相差を秩序パラメータとする微分方程式で模式化される (HKB model; Haken, Kelso and Buntz, 1985)。

これに続いて動作の周波数を手がかりとして位相差の非線形的な変化を捉える実験がおこなわれた。そして個人の両手協応と同じく、個人間 (inter personal) の動作協応に関しても、システムの構成要素の対称性 (e.g.固有周波数など) に応じて、その系が持つ最も対称性が高いパターンが協応動作の安定解となることがわかった。例えば、全く同じ規格の安楽椅子に腰掛けた二者が互いに相手の前後揺動を見ると、両者の揺動が自発的に同相同期する。しかし片方の椅子に錘をつけて固有周波数に差をつけると同相同期の安定性は大きく損なわれる (Richardson et al., 2007)。

Kijima らは実験室課題の積み重ねで構築されてきた個人間協応の研究手法を、遊びやスポーツといった日常行為の研究に応用してきた。その一例にタグ鬼ごっこ (play-tag) の学習における位相差解析がある (Kijima et al, 2012)。この遊びでは2名のプレイヤーが相手の腰についた札を互いに取り合う。このとき二者の目的は背反する。学習初期においては、相手に詰めよる動作と相手から引く動作の位相差は不安定で、ゲームが始まると直ちに相手の互いが詰めより、複雑な位相差で協応しながら場当たりの勝敗が決していた。しかしゲームを繰り返して学習が進行すると、互いに相手が詰めたら引き、引いたら詰めるという逆相同期が長時間安定した。この逆相同期の安定は最先端水準の剣道競技においても確認された (Okumura et al, 2012, Yamamoto et al., 2013)。一連の結果は、背反する;つまり非対称な意思をもつ要素 (プレイヤー) の協応行為は、逆相;つまり非対称なパターンで安定することを示している。

2. 研究の目的

Yamamoto and Yokoyama (2011) はスポーツにおける協応パターンの解析を三者以上に拡張した。そして実際のサッカー競技では、特定の選手数名のみが交代しながらピッチ上でボールをコントロールしていることを報告している。2つのゴールを含むピッチ上の各点は異なる意味合いを持つ。この非対称性から創発する2チーム22名の協応パターンは非対称である。この解析結果から、プレイヤーの役割の (非) 対称性ととも、空間の (非) 対称性が、行為者群の協応パターンの (非) 対称性を規定していると推察される。そこで空間の幾何学構造と行為者の個性が協応パターンに与える制約を実験的に再現しようと考えた。

この同期のもと、空間の対称性を幾何学的に操作できる実験系を考案し、成人と児童それぞれを別個の実験に参加させ、彼らに三者跳躍 (triadic jumping) という協応動作課題を課した。最初の実験の目的は、成人を参加者として、幾何学的構造が異なる環境下で彼らが創発する協応パターンの対称性を質的に比較することであった。その結果を土台に、児童を参加者として個性の関与を検討する実験系を組み立てた。

3. 研究の方法

(1) 参加者

① 成人: 健康な男女大学生からランダムに選抜し3人組を10組構成した。参加者は某大学教育学部体育科専攻生であり、全員が三者跳躍課題を練習してから実験に参加した。

② 児童: 某大学教育学部附属小学校の2年生・4年生・6年生から3人組を選抜した。選抜にあたって各学年の担任教諭に調査票を配布し、各学級における日常的な活動で所属する児童が先導的あるいは追従的に振る舞う傾向を調査した。その結果から先導児童・追従児童・その中間的な児童から構成される異質組をおよそ10組程度、3名とも中間児童を集めた等質組を10組程度選抜した。

(2) 三者跳躍課題

成人と児童: 3つあるいは4つの (成人実験については5つあるいは6つ;本書面では省略) のプラスチック製の輪 (hoop, $\phi=0.65\text{m}$) を、それぞれが頂点となるように、そしてそれぞれが接するように正多角形状に配置する。このうちの3つそれぞれに参加者を一人ずつ図1に示すように配置する。正三角条件における参加者の配置の対



図1: 三者跳躍環境の幾何学的と参加者配置の対称性

称性は位数3の二面体対称性 (Dihedral symmetry: D_3) と定義できる. 一方で正方条件における参加者の配置の対称性は, 位数1の二面体対称性 (D_1) と定義できる.

予備信号につづいて3秒に一回, メトロノームを鳴動させた. この鳴動にあわせて三者全員が位置を移動させた. 輪の個数に関係なく, 衝突せずに位置を移動するには三者の跳躍方向が揃っていないなければならない. これを20回成功させるまで各組に試技を継続させた. 実験室に入室してから全ての条件で20回の移動を成功するまで, 参加者同士の会話あるいは非言語コミュニケーションを一切禁じた.

(3) 動作の計測と主な従属変数

一般仕様のビデオカメラで全試技を撮影し, 20回の跳躍を完了するまでの衝突試技回数, 反時計回りに跳躍した回数などを計上した.

また参加者の頭部に反射マーカを付着し, 光学式三次元動作計測器でマーカ位置を計測した. 1回の跳躍ごとに三者の頭部の位置変動を数値化し, 頭部の高さがピークに達した時点に参加者ごとに算出した. 最初の跳躍者から2番目と3番目の跳躍者の時差をそれぞれ別個に割り出し, その平均 (跳躍時間差) と1-2番目と1-3番目の比 (跳躍時間比), ならびに20回の成功試技において各者が最初に跳び出した確率 (Who jump first ratio: WJF%) を計算した.

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

成人: 正三角条件では三者が他を先導して跳躍する傾向に差はなかったが, 正方条件では, 跳躍方向に対して空き地 (黒) を隣を持つ参加者が他を先導した. この結果は, 環境の幾何学的構造が, 三者の連携パターンを組織的に制約したことを示す.

まず正三角地形そのものの対称性は二面体対称性 D_3 であり, 全ての輪に機能的に対称で可換な参加者 (S_3) を入れたときの参加者配置の対称性は D_3 と S_3 の共通部分群のうち最大位数のものとして D_3 (あるいは S_3) と定義される. 一方で図2左にしめしたように正三角条件における参加者の先導-追従性に関する対称性は配置の対称性と同型の S_3 となる. 同様に正方地形における参加者配置の対称性は D_4 (正方形の二面体対称性) と S_3 との共通部分群のうち最大位数のものとして D_1 となる. そして図2右に示されるように跳躍方向に対して隣に空き地を持つ一者以外の二者のみが可換であることから, 参加者の先導-追従性に関する対称性は S_1 となり, これも参加者配置の対称性と同型となる. このように三者跳躍をおこなう成人跳躍者の協応パターンは跳躍環境の幾何学形状の対称性から予測できることがわかった.

児童: 成人と同様に, 等質組 (EQV) の協応パターンは環境の幾何学的対称性から予測されるものであった (図3右). 一方で異質組 (DIF) に課題を行わせた結果, 図3左に示したとおり, 幾何学的には他に追従すべき状況にあっても, 一定以上の確率で先導児童がその制約を破って他の児童を先導したこと, ただしこういった先導特性の作用は, 環境の幾何学構造による制約を完全に侵害するには及ばないことが確認された. 加えて学年が上がるにつれて役割分担が不安定になる発達段階があることがわかった. これらの結果は, 環境の幾何学構造による制約を強く受けながらも, それと並行して児童の個性: 先導-追従特性が彼らの協応パターンを制約していることを示唆する. そして個性による制約を減弱しながら環境の物理的制約に応じていき, そのなかで自由自在に他者と意図をすり合わせられるようになる. 異なる個性が集まる児童の協応行為においては, こういった物理制約・心理制約への適応が科せられると推察される.

(2) 得られた成果の国内外における位置づけ

知覚と行為に関する国際学会 (international conference for perception and action: ICPA) を中心に, 身体運動・スポーツ研究を専門のセミナー (Seminar Complexity of tactical behavior in sport, Lisbon 大学, 2018年7月5日) で公表するほか, Macquarie 大学 (オース

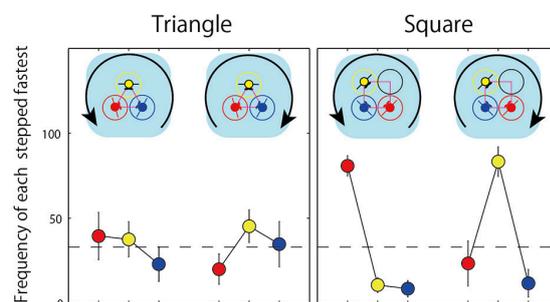


図2: 成人三者が先導する確率. 左: 正三角条件. 右: 正方条件. それぞれ, 左右に反時計回り・時計回りの結果を配置した.

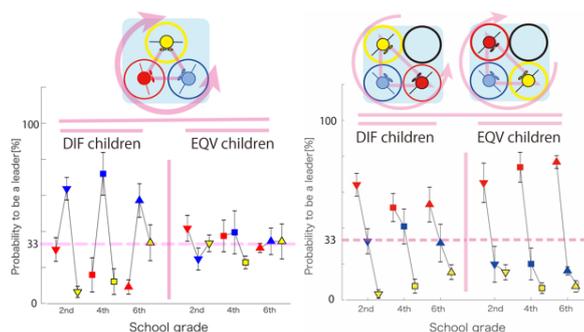


図3: 児童三者 (2,4,6年生) が先導する確率. 左: 正三角条件. 右: 正方条件. それぞれ, 左右に反時計回り・時計回りの結果を配置した. DIF は異質組, EQV は等質組.

トラリア) と山梨大学の相互連携セミナーの立ち上げ (The first seminar on the interdisciplinary science for multi-agent coordination, 山梨大学, 2018年8月20日) などにより成果を波及させた。

また国内では、日本体育学会の招待講演 (第68回大会キーノートレクチャー: 協応秩序の切り替えにみられる体育-徳育融合のかたち, 静岡大学, 2017年, 9月8日), 特別支援学校の教諭が構成する研究会の講師 (仲間との協調運動メカニズム-体育に内在する徳育的価値-, 東京都立臨海青海特別支援学校, 2019年11月22日), 理学療法士が構成する研究会 (第6回生態心理学とリハビリテーションの融合研究大会, 2020年2月29日予定, コロナ禍で中止) の特別講演の依頼を受けた。

以上のように公表した成果をまとめ、Michael J. Richardson (Macquarie 大学) らと共同で一般科学誌に投稿する準備をしている。

(3) 今後の展望

小児神経学を専門とする相原正男 (山梨大学医学部) との共同で、三者跳躍を用いて、アスペルガー者に自発的な協応行為を促す訓練を開発している。プロトタイプ訓練の試験結果を第56回日本臨床神経生理学会にて公表した (シンポジウム18 共感の神経生理学: 三者跳躍課題にあらわれるアスペルガー行為者の先導・追従特性, 2019年11月29日)。また群論に基づく解釈を拡張し、三者の意思のすり合わせに基づく跳躍方向の切り替え過程を圏論から解釈する試みにも着手している。その構想の一部を研究会 (圏論的世界像からはじまる複合知の展望, 2020年1月25日) にて公表した。

<引用文献>

- Haken, H., Kelso, J. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological cybernetics*, 51(5), 347-356.
- Kijima, A., Shima, H., Okumura, M., Yamamoto, Y., & Richardson, M. J. (2017). Effects of agent-environment symmetry on the coordination dynamics of triadic jumping. *Frontiers in Psychology*, 8, 3.
- Kijima, A., Kadota, K., Yokoyama, K., Okumura, M., Suzuki, H., Schmidt, R. C., & Yamamoto, Y. (2012). Switching dynamics in an interpersonal competition brings about “deadlock” synchronization of players. *Plos One*, 7(11), e47911.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R., & Schmidt, R. C. (2007). Rocking together: Dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human movement science*, 26(6), 867-891.
- Okumura, M., Kijima, A., Kadota, K., Yokoyama, K., Suzuki, H., & Yamamoto, Y. (2012). A critical interpersonal distance switches between two coordination modes in kendo matches. *Plos One*, 7(12), e51877.
- Yamamoto, Y., Yokoyama, K., Okumura, M., Kijima, A., Kadota, K., & Gohara, K. (2013). Joint action syntax in Japanese martial arts. *Plos One*, 8(9), e72436.
- Yamamoto, Y., & Yokoyama, K. (2011). Common and unique network dynamics in football games. *PloS one*, 6(12), e29638.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Kijima, A., Shima H., Okumura, M., Yamamoto, Y. and Richardson, M. | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Effects of Agent-Environment Symmetry on the Coordination Dynamics of Triadic Jumping | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Frontier in Psychology | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2017.00003 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Kijima, A., Shima H., Okumura, M., Yamamoto, Y. and Richardson, M. | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 Who Should Jump First? Three Peoples' Teamwork in a Symmetrical and Asymmetrical Game Space | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Frontier for Young Minds | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi: 10.3389/frym.2018.00005 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 木島章文 | 4. 巻 66 |
| 2. 論文標題 体育授業とリーダーシップ研究 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 体育科教育 | 6. 最初と最後の頁 42-45 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 6件/うち国際学会 4件）

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 木島章文 |
| 2. 発表標題 最先端身体運動学から見える身体と社会性の未来 |
| 3. 学会等名 圏論的成果像から始まる複合知の展望（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 木島章文 |
| 2. 発表標題 仲間との協調運動メカニズム |
| 3. 学会等名 令和元年度「社会性の学習」研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Akifumi Kijima |
| 2. 発表標題 The effects of leader-follower traits on the symmetrical structure of joint actions performed by school children |
| 3. 学会等名 International conference for perception and action 20（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akifumi Kijima |
| 2. 発表標題 An effect of leader-follower personality on symmetrical structure of triadic jumping performed by school children |
| 3. 学会等名 DYNAMICS OF HUMAN PERFORMANCE (In Complex Multiagent Settings)（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 位田光翼，木島章文，木下雄一郎，郷健太郎 |
| 2. 発表標題 実空間と仮想空間における協調行動の比較 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会第24回研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akifumi Kijima |
| 2. 発表標題 An effect of leader-follower personality on symmetrical structure of triadic jumping performed by school children |
| 3. 学会等名 DYNAMICS OF HUMAN PERFORMANCE (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akifumi Kijima |
| 2. 発表標題 Symmetry of co-working behavior and it's development in triadic jumping |
| 3. 学会等名 The first seminar on the interdisciplinary science for multi-agent coordination |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Akifumi Kijima |
| 2. 発表標題 Co-working action symmetry and it's development in triadic jumping |
| 3. 学会等名 SEMINARIO Complexity of Tactical Behavior in Sport (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 木島章文, 山本裕二 |
| 2. 発表標題 協応秩序の切り替えに見られる体育 - 徳育融合のかたち |
| 3. 学会等名 日本体育学会第66回大会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 樋口 貴広 (HIGUCHI Takahiro) (30433171) | 首都大学東京・人間健康科学研究科・教授 (22604) | |
| 研究分担者 | 島 弘幸 (SHIMA Hiroyuki) (40312392) | 山梨大学・大学院総合研究部・准教授 (13501) | |
| 研究分担者 | 奥村 基生 (OKUMURA Motoki) (90400663) | 東京学芸大学・教育学部・准教授 (12604) | |
| 研究分担者 | 鈴木 聡 (SUZUKI Satoshi) (70633816) | 東京学芸大学・教育学部・准教授 (12604) | |