



Title: Developmental Changes in Upper Limb Muscle Synergies during Throwing: A Comparison between Preschoolers and Schoolers (投擲動作における上肢筋シナジーの発達変化：幼児と学童の比較)

Authors: Hiroki Saito, Ayane Kusafuka, Taishi Okegawa, Saki Takao, Naotsugu Kaneko, Hikaru Yokoyama, Ken Takiyama, Kenji Takaki, Kimitaka Nakazawa (斎藤 寛樹 (東京工科大学), 草深 あやね (早稲田大学), 桶川 大志 (東京大学), 高尾 沙紀 (東京大学), 金子 直嗣 (東京大学), 横山 光 (東京農工大学), 滝山 健 (東京農工大学), 高木 健志 (東京工科大学), 中澤 公孝 (東京大学))

Journal: iScience (2025) DOI: 10.1016/j.isci.2025.113497

掲載年月: 2025年9月

研究概要: 本研究は、幼児 (3~5 歳) と学童 (6~9 歳) という異なる発達段階の子どもたちが、ボール投擲動作中にどのような上肢筋シナジー (複数筋の協調パターン) を用いているかを比較した。16 チャンネルの表面筋電図 (EMG) を用い、非負値行列因子分解 (NMF) によって筋シナジーを抽出した。その結果、学童では幼児よりも筋シナジー数が同等以上である一方、筋シナジーの選択性 (sparseness) が高く、より精緻な筋制御が行われていることが示された。これらの知見は、成長に伴う神経筋制御の発達メカニズムを理解するうえで重要である。

研究背景: 投擲動作は人間の基本的な運動技能の一つであり、幼児期から学童期にかけてパフォーマンスが大きく向上する。この発達過程の神経筋メカニズムは十分に解明されていない。筋シナジー解析は、中枢神経系がどのように複数の筋活動を協調させて複雑な運動を遂行するかを明らかにする有力な手法であり、発達による制御戦略の違いを検討するうえでも有用である。本研究は、投擲動作における年齢差に伴う筋シナジー構造の変化を明らかにすることを目的とした。

研究成果: 本研究の結果、投擲動作における上肢筋シナジーの構造は、幼児から学童へと成長する過程で質的に変化することが明らかとなった。投擲パフォーマンスは学童で有意に向上しており、特にボール速度の増加と投擲精度の改善が認められた。一方で、筋シナジー数自体には幼児と学童の間で大きな差は認められず、運動発達に伴う変化は、単純な制御単位の増加ではないことが示された。筋シナジーの構成に着目すると、幼児と学童の間には多くの共通シナジーが存在し、投擲動作に必要な基本的な神経筋制御戦略は幼児期から既に形成されていることが示唆された。一方で、学童では筋シナジーの選択性 (sparseness) が有意に高く、より限られた筋を効率的かつ選択的に動員する制御様式が獲得されていることが明らかとなった。さらに、階層クラスタ分析の結果、幼児でみられた筋シナジーが学童では複数のシナジーへと分化 (fractionation) して出現する傾向が認められた。このことは、成長に伴って神経筋制御がより精緻化・専門化し、複雑な運動要求に対応できるようになる過程を反映していると考えられる。以上の結果から、投擲動作の発達は、新たな筋シナジーの追加によって達成されるのではなく、既存の筋シナジーの再編成と分化によって達成されることが示された。

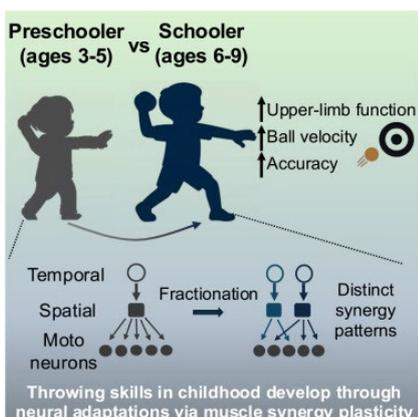


図1 本研究のグラフィカルアブストラクト

社会への影響： 本研究は、運動発達の神経筋制御の変化を定量的に示した点で意義がある。スポーツ科学・リハビリテーション・発達運動学の分野において、どの段階でどのような筋協調戦略が獲得されるかを理解することで、年齢に応じた運動指導・評価基準の構築に貢献する。また、発達障害や神経運動障害を抱える児童に対する介入設計に新たな指標を提供する可能性がある。

専門用語：

筋シナジー： 中枢神経系が複数の筋活動を協調して制御するための基本単位。

非負値行列因子分解（NMF）： EMG データを時間パターンと筋重みの組み合わせに分解する解析法。

Sparseness： 筋シナジーにおける活動の選択性（値が高いほど特定筋のみ活性化）。

Fractionation： 単一シナジーが分化してより細分化された複数のシナジーになる現象。