

論文の内容の要旨

逆上がりの成否を規定する力学的メカニズム

Dynamic Mechanisms Regulating the Success of Kicking Pullovers

鴻巣 暁

【背景と目的】

逆上がり (Upward circle または Pullover) は「上がる一回る一下りる」から構成される鉄棒運動の代表的な上がり技である。小学校の体育教育ではカリキュラムの1つとして特に高い注目を集めており、その成否が精神面で児童に及ぼす影響は大きい。すなわち、逆上がりは人が生涯にわたり運動に親しむための身体的、精神的基盤の形成に強く関与する技能である。

先行研究では、成功動作と不成功動作、熟練動作と非熟練動作、練習前後といった動作の間で身体軌道、筋活動、床・鉄棒反力の比較がなされてきた。しかしながら、動作中に各関節で発揮される力の絶対的な大きさやその反力との関係は分析されていないため、関節の力発揮が床・鉄棒反力の獲得を通して逆上がりの達成に必須の重心挙上や後方回転を引き起こす力学的メカニズムは明らかにされていない。

体育教育では、生徒が主体的に課題に取り組むとともに、教師が生徒一人一人の状況に合わせて適切な練習方法を設定することが重要である。これらのためには取り組む課題のメカニズムについての理解が不可欠である。そこで本論文は片脚振上げ型逆上がりの成否を規定する力学的メカニズムを明らかにすることを目的とした。具体的には、以下3つの課題に取り組んだ。

【研究1】逆上がり達成のメカニズム (第2章)

逆上がり達成のメカニズムを明らかにすることを目的とした。成人男性10名以上による成功動作を対象として逆動力学演算により上下肢関節で発揮される関節トルクを算出し、その床・鉄棒反力との関係を分析した。遊脚期(両脚離地から腹部と鉄棒の接触までの期間)に肘・肩関節はそれぞれ 1.01 ± 0.14 , 2.08 ± 0.30 Nm/kg のピーク伸展トルク(両腕合計値)を発揮した。これ

らは一般成人男性の等尺性最大トルクに迫る大きさである (1 節). 踏切期 (支持脚の着地から離地までの期間) の支持脚 3 関節 (股・膝・足関節) のトルク波形は, 大まかには走跳びと類似していた. また, 床反力が重心周りに及ぼすモーメントは, ピークが踏切期の中で長期間に渡る概形を示した. このパターンは, 床反力が踏切期初・末期に前方へ, 中盤に後方へ傾くという向きの変化により実現されていた (2 節). 遊脚期に支持脚股関節は屈曲トルクと最大 $331 \pm 66 \text{ deg/s}$ の屈曲角速度の発揮により, 大きなエネルギーを生成した (3 節).

【研究 2】鉄棒反力を規定するメカニズム (第 3 章)

逆上がりを達成するために鉄棒反力等のパラメータが満たすべき条件を明らかにすることを目的とした. 遊脚期の重心運動の定式化により, 離地の鉛直速度 $v \text{ (m/s)}$ を大きくとること, 遊脚期の動作時間 $T \text{ (s)}$ を適度に小さくとることで鉄棒反力は低下し, 特に

$$vT = 2h$$

の関係が満たされるとき必要鉄棒反力が効率的に低下することが示唆された. ここで $h \text{ (m)}$ は離地から逆位の間に必要な重心の上方移動距離である. 成人男性 10 名に身長比 65% から 105% の鉄棒高で逆上がりを行わせたところ, 75% 以上の条件で上式に近いパラメータの組み合わせがとられていた (1 節).

鉄棒との接触の可能性から, 遊脚期に身体がとり得る高さには限度がある. そこで, 先のデータに対しこの制約 (空間的制約) が鉄棒反力に及ぼす影響を定量した. 鉄棒高を低下させると, 重心の上方移動距離の減少に伴い空間的制約による鉄棒反力の下限が増加し, 身長比 65% の鉄棒高条件では測定値の 90% 前後に上ると推定された (2 節).

【研究 3】動作間の差をもたらすメカニズム (第 4 章)

動作間の差をもたらすメカニズムを明らかにすることを目的とした. 研究 1 の成功動作データを対象に, 肘・肩関節伸展ピークトルクと関連するキネマティクス要因を調べた. 両ピークトルクとの間に相関を示したのはピーク時刻の鉄棒反力の大きさであり, その関節周りのモーメントアームではなかった. 具体的には, ピークトルクの低かった被験者は両関節周りの鉄棒反力のモーメントアームの拡大する遊脚期前半の鉄棒反力を集中的に低下させていた. このような反力パターンを示す被験者には, 遊脚期の肘関節角度が大きく, 肩関節が鉄棒の周りを大きく弧を描くように移動する特徴が見られた (1 節).

小学 5 年生の成功動作 (12 名) と不成功動作 (13 名) を比較した. 離地のキネマティクスの中で, 身体重心の水平速度に有意差が見られた. この差は踏切期始終の水平速度の変化量の差に起因しており, この変化量と強く相関したキネマティクス項目が踏切期の振上脚大腿セグメント角度 ($r=0.89$) であった. 成功動作は, 振上脚を比較的下に向けた状態で振ることで, 支持脚足部を軸に体を後方へ倒す力を獲得していたと考えられる (2 節).

【考察】

本結果から、逆上がりの達成には大きな肘・肩関節伸展筋力が必要であると考えられる（2章1節）。したがって、これら必要筋力やその原因である鉄棒反力を低下させられれば、逆上がりは容易になると推察される。

はじめに、鉛直鉄棒反力について考察する。研究2より、鉛直鉄棒反力を効率的に低下させる離地の鉛直速度と角運動量の適度な比率が存在すると示唆される。遊脚期の動作時間は離地の角運動量と対応する変数であると考えられる（研究1のデータより）ためである（3章1節）。

成功動作で観察された支持脚3関節トルクと床反力のパターン（研究1）は、離地の鉛直速度と角運動量の獲得に対して合理的である。すなわち、走跳びと類似の跳躍技術によって大きなピーク床反力と鉛直速度を得つつ、持ち得る支持脚股関節伸展力で床から最大限の角力積を受ける方略であると推察される（2章2節）。

研究2の重心運動の定式化により、鉄棒高を下げるほど遊脚期の鉛直鉄棒反力は低下し、逆上がりが容易になると推察された。しかし、本測定では、鉄棒高条件間で鉄棒反力は大きく変化しなかった（3章1節）。空間的制約によって鉄棒反力や必要な上肢関節筋力が規定されることがその一要因であると考えられる（3章2節）。

身体―鉄棒間の連結も重要な制約である。研究3で肘・肩関節ピークトルクの大きかった被験者は、肘関節屈曲位をとり肩の動きが制限されていたことで、後方回転の遂行に大きな重心加速と肘・肩関節伸展筋力を必要とした。先行研究より、肩を大きく動かし必要筋力を低下させる方策の1つは、離地前の上腕二頭筋の活動を抑えることであると示唆される。ただし、本研究でピークトルクの大きかった被験者に頭部―胴体間関節を強く屈曲させる傾向が見られたことから、逆位になることへの恐怖心を克服することが根本的な課題であると推察される（4章1節）。

続いて、水平鉄棒反力について考察する。遊脚期では重心を鉄棒の真下周辺へ導くことが課題の1つとなる（研究1のデータより）。成人および小学生の成功動作（研究1, 3）では、身体重心は離地時に鉄棒の真下近くに位置し、水平速度は小さかった。これらは遊脚期に小さな水平鉄棒反力で重心を鉄棒直下へと導く合理的な選択である。他方、助走により得られる水平速度は、踏切期に鉛直速度と角運動量の獲得を促進することで逆上がりの達成に間接的に貢献している（2章2節）。そこで、助走の水平速度を遊脚期に持ち越さないことが重要となる。

研究3より、小学5年生の不成功動作は踏切期の水平速度の低下が十分でなかったと考えられる。この速度低下に重要なのは振上脚を下に向けた状態で振ることであり、そのためには胴体を立て振上脚股関節を最大限伸展させた姿勢で着地することが必要であると示唆される（4章2節）。

【結論】

本論文では、両脚離地瞬間の身体各速度成分、および身体―鉄棒間の制約が肘・肩関節の必要筋力を規定するメカニズムを体系化し、逆上がりを容易にするために身体がとるべき軌道と関節トルクの発揮について論じた。