

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名：鴻巣 暁

鉄棒運動の代表的な上がり技である「逆上がり (Upward circle または Pullover)」は、初・中等教育において体育のカリキュラムの典型的な動作として位置づけられている。先行研究では、特に指導法の観点から検討がなされてきたが、その達成にどれだけの大きさの筋力やスキルが必要であるかというメカニズムに関する知見はない。逆上がりは、身体全体の上方移動と後方回転が必要とされ、これらは鉄棒に力をつけるための上肢関節のトルク発揮、床を蹴るための下肢関節のトルク発揮によって達成される。本研究では、鉄棒の逆上がり動作を対象に、上肢と下肢関節トルクの分析と、床反力と鉄棒反力の分析を中心とし、次の3研究を通してバイオメカニカルなメカニズムを解明することを目的としている。その内容は、以下のようにまとめられる。

【研究1】逆上がり達成のメカニズム

逆上がりが達成されるメカニズムを明らかにするため、まず成人男性10名による成功動作を分析した。11セグメントの剛体リンクモデルを用いた矢状面の分析により、キネマティクス・キネティクスを算出した。遊脚期(両脚離地から腹部と鉄棒の接触までの期間)に肘と肩関節が発揮した伸展トルクのピークはそれぞれ 1.01 ± 0.14 と 2.08 ± 0.30 Nm/kg (両腕合計値) であり、一般成人男性の等尺性最大トルクに近い大きさであった。したがって、筋力の強化とともに踏切技術の向上により、必要トルクを低下させることが逆上がりの達成に有効であると推察された。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)のトルク波形は走高跳び・走幅跳びの踏切と類似する結果となった。また、床反力が踏切期初・末期に前方へ傾くことで、重心周りに及ぼすモーメントのピークが踏切期の長期間に渡る結果となった。したがって、助走の水平速度生かした着地により大きな床反力を得るとともに、その向きを着地直後・離地直前に前方へ傾けることが離地の鉛直速度と全身角運動量の獲得に有効であると示唆された。遊脚期に支持脚股関節は屈曲トルクと最大 331 ± 66 deg/s の屈曲角速度の発揮により大きな力学的エネルギーを生成した。

【研究2】鉄棒反力を規定するメカニズム

研究2では、逆上がりを達成するために、離地の鉛直速度や鉄棒反力など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。遊脚期における身体重心の鉛直運動を定式化した結果、離地の重心の鉛直速度 v (m/s)、動作時間 T (s)、遊脚期で求められる重心の上方移動距離 h (m) が

$$vT = 2h$$

の関係を満たすとき、鉛直鉄棒反力が効率的に低下すると示唆された。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が得られた。したがって、離地の鉛直速度と重心周りの角運動量を適度な比率(例えば成人男性が身長比75%の鉄棒高で逆上がりを行う場合、1.00 m/s 対 0.71 Nms/kg の比率)で増加させることが実際の動作でも有効であると示唆された。

また、鉄棒との接触により身体がとり得る高さに限度があること(空間的制約)が鉄棒反力に及ぼす影響を定量した。上記の実動作データに対し、腹部と鉄棒の位置関係から重心の上限高を推定し、空間的制約による鉄棒反力の下限を算出した。身長比65%の鉄棒高条件ではこの下限が測定値の90%前後に上ると推定され、空間的制約が鉄棒反力を実質的に規定する要因となっていることが示唆された。

【研究3】上肢関節トルクの大小および成功・不成功間での動作比較

研究1・2の結果を基に、研究3では関節トルクの大小および成功・不成功間で動作を比較し、逆上がり達成のメカニズムと技術を検討することとした。研究1の成功動作データに対し、肘・肩関節伸展ピークトルクとキネティクス・キネマティクス要因の相関関係を調べた。ピークトルクの低かった被験者は、鉄棒反力の両関節周りのモーメントアームが大きくなる遊脚期前半の鉄棒反力を集中的に低下させていることが明らかとなった。こうした反力パターンを示す被験者には、肩が鉄棒の周りを大きく弧を描くように移動する特徴が観察された。肩と重心の間には距離があるため、小さな重心運動と鉄棒反力で後方回転を達成するためには、肘関節角度を大きくし肩を大きく移動させることが必要であると考えられる。

さらに、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、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、この変化量と強く相関したキネマティクス項目は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下向きにして振ることで支持脚足部を軸に体を後方へ倒すモーメントを得ていたと推察される。

鴻巣暁君の論文は、鉄棒逆上がり動作における上下肢関節トルクの定量化により、逆上がりの達成には、 1.01Nm/kg 以上の肘伸展トルクおよび 2.08Nm/kg 以上の肩伸展トルクが必要であることが明らかにされた。重心運動の定式化と動作間の比較により、離地瞬間の身体各速度成分（水平・鉛直・回転）と身体-鉄棒間の制約（接触・連結）がこれら必要トルクを規定するメカニズムが体系化され、逆上がりの達成に有効な身体軌道と上下肢関節のトルク発揮が示された。これらの実験から得られたデータは、逆上がり達成のための指導法の基となる客観的な機序を明らかにしたものであり、身体運動科学の分野における意義は非常に大きい。したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。