

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名：原 樹子

人間の最もダイナミックな運動の一つである跳躍動作は、様々なスポーツの中にみられ、また身体運動の機序を解明するための対象動作としても多く用いられてきている。跳躍を対象とした研究として、下肢反動や腕振りが、身体重心変位を増加させることが知られている。垂直跳びの反動動作に関する機序は定量的に解明されているが、腕振りの効果を検討した先行研究では、個々の関節の仕事量が定量されていない。さらに、腕振りをを用いた時の肩関節を通して体幹に及ぼされる作用（肩関節トルクと、体幹の重心まわりに生じる肩関節間力によるトルク）の大きさや方向は、腕の位置・腕振りの方向により異なるため、腕振り方向と跳躍方向の組み合わせの違いにより、腕振り動作が各関節の仕事量や身体重心の変位に及ぼす影響も異なる。

本論文は、「ある系の全力的エネルギーの変化量は、その系になされた仕事量に等しいという仕事-エネルギー関係 (Work-energy theorem)」の観点から跳躍運動をとらえ、腕振りの効果を検討することを目的とした。具体的には、地面反力および画像データもとにした二次元および三次元逆ダイナミクスを用いて、ヒトの跳躍運動における身体重心の変位と身体各関節の力学的変数（角速度、トルク、パワー、仕事）を算出し、また下肢3関節の主働筋の活動水準を測定し、跳躍中に腕振り動作が身体各関節仕事量および身体重心変位量に影響する機構を検討した。その主な内容は、以下のようにまとめられる。

【研究 1：下肢反動を用いない垂直跳びにおける腕振り動作の効果】 下肢反動を用いない垂直跳びにおける腕振りなしの跳躍 (SJ) に対して、腕振りあり (SJA) では、跳躍高が有意に増加した ($n=5$, 増加率 22.9%)。腕振りによる身体全仕事量（各関節仕事量の総和）の増加分のうち 34.1% は上肢関節の増加により、65.9% は下肢三関節の増加によるものであった。下肢関節では股・足関節仕事量が有意に増大し（増加率 14.4%, 18.6%）、膝関節仕事量が有意に減少した（減少率 20.6%）。股関節に関しては、腕振りをを用いると、重心上昇期後半で肩関節を通して体幹に及ぼされる作用が股関節屈曲の方向に大きな負荷を与え、その負荷に対し股関節伸展筋の活動が増加することにより股関節トルクが増加する。また、腕振りによる股関節屈曲方向の負荷により股関節伸展速度が抑えられることによって（大腿二頭筋長頭の筋短縮速度の減少）、力-速度関係により股関節トルクが増加するためと考えられる。

【研究 2：下肢反動垂直跳びにおける腕振り動作の効果】 下肢反動を用いた垂直跳びにおける、腕振りなし (CJ) の跳躍に対して、腕振りあり (CJA) では、跳躍高が有意に増加した ($n=5$, 増加率 17.2%)。腕振りによる身体全仕事量の増加分のうち上肢二関節・下肢三関節が占める比率はそれぞれ 25.1%, 125.1% であった。下肢関節では腕振りにより足関節と股関節の仕事量が有意に増加し、増加率はそれぞれ 19.7%, 30.3% であった。股関節の仕事量が増加する機序は、研究 1 と同様である。

【研究 3：垂直跳びにおける腕振り動作と反動動作の効果の比較】 SJ に対して SJA では、SJ に対して CJ では、SJA に対して CJA では、また CJ に対して CJA では、跳躍高、身体全仕事量および下肢三関節仕事量の和が有意に増加した ($n=5$)。したがって、下肢反動、腕振りを個々に使用しても両者を併用しても、下肢三関節仕事量の和を増加させ、それが跳躍高の増加の原因となっていることが明らかになった。また、腕振り動作、反動動作はどちらも下肢の筋がより大きな仕事をしやすい状況を作り出すが、下肢の各関節において、腕振りと下肢反動の効果が現れるタイミングが異なることが示された。したがって両者の効果はそれぞれ独立しており、両者を併用した場合 (CJA) は効果の合算が起これ、跳躍高が増加するといえる。

【研究 4：下肢反動なし前方跳躍における腕振り動作の効果と腕振り方向の効果】前方跳躍における腕振りなし (FJ)・前方腕振り (FJF)・後方腕振り (FJB) について、FJ に対して FJF では、FJB に対して FJF では水平跳躍距離は有意に増加した (n=7, 増加率 14.9%, 13.9%)。身体全仕事量の増加分のうち上肢二関節・下肢三関節が占める比率はそれぞれ FJ に対して FJF では上肢が 42.5%, 下肢が 57.5%, FJB に対して FJF では上肢が 36.0%, 下肢が 64.0% であり、前方跳躍では前方腕振りがパフォーマンスを増加させた。特に下肢では FJ に対して FJF では、FJB に対して FJF では股関節仕事量が有意に増加し (増加率 12.1%, 7.4%), FJB に対して FJF では足関節仕事量が有意に増加した (増加率 12.0%)。FJF での腕振りによる股関節のなす仕事量増加の主な原因は研究 1, 2 と同様である。さらに、FJF の股関節パワーが上昇する区間の大腿二頭筋長頭の筋活動積分値は有意に増加しており、腕振りにより下肢の筋活動水準そのものに変化を与え、トルクが上昇することがわかった。

【研究 5：下肢反動なし後方跳躍における腕振り動作の効果と腕振り方向の効果】後方跳躍における腕振りなし (BJ)・前方腕振り (BJF)・後方腕振り (BJB) の動作について、BJ に対して BJB では、BJF に対して BJB では跳躍距離は有意に増加した (n=7, 増加率 10.0%, 12.5%)。跳躍距離増加の直接的な原因は身体全仕事量が増加したためであるが、身体全仕事量増加分のうち上肢二関節・下肢三関節が占める比率はそれぞれ BJ に対して BJB では上肢が 62.0%, 下肢が 38.0% を占め、BJF に対して BJB では上肢が 71.0%, 下肢が 29.0% を占めた。上肢では BJF に対して BJB では肩関節仕事量が有意に増加したが、下肢では BJ に対して BJB では、BJF に対して BJB では股関節仕事量が有意に増加し (増加率 68.8%, 33.9%), 膝関節仕事量は減少した (減少率は両者ともに 16.0%)。

【総括論議】本研究では、垂直・前方・後方跳躍において跳躍方向と同方向の腕振りを用いることにより、身体全仕事量および身体重心変位量が増加することを定量的に示した。垂直跳びでは、反動の有無に関係なく足・股関節仕事量が増加し、前方跳躍における前方腕振りでは腕振りなし・後方腕振りに比較して股関節仕事量が増加した。さらに、後方跳躍における後方腕振りでは、腕振りなし・前方腕振りに対して、肩関節仕事量増加の他に股関節仕事量が増加した。すべての跳躍方向で適した腕振り方向を用いた場合は、必ず股関節の仕事量が増加するという共通点がみられた。適した腕振りにより、肩関節を通して体幹に及ぼされる作用が股関節屈曲の方向に大きな負荷を与え、股関節角速度を減少させるために、筋の「力-速度関係」によって股関節トルクを結果的に増大させる。さらに、腕振りと下肢反動動作による下肢仕事量の増加量には差はないが、腕振りと下肢反動は効果の現れるタイミングが異なり、両者の効果は合算が起こる。以上より、パフォーマンスを増加させるという観点において、下肢関節 (特に股関節) 仕事量や下肢筋活動水準を増加させるために、反動動作とともに腕振りが重要な役割を果たすことが定量的に示された。これは、身体運動科学の分野における意義は大きく、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。