

報告番号	※ 乙 第	号
------	-------	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 力学的情報に基づく跳馬における踏切動作と跳躍板の役割の解明  
氏 名 佐野真也

## 論 文 内 容 の 要 旨

ヒトの身体動作は、身体の力学的（質量、慣性モーメントなど）・解剖学的（骨格や筋の位置関係など）・生理学的（筋や腱の生理的特性など）な条件や制約、および外的（床面や道具などの力学的特性）な条件や制約の中で行なわれる関節動作の総和である。速い動作やダイナミックな動作ほど、これらの条件や制約の影響を大きく受けるため、目的に対して合理的な動作は一定の範囲内に集約されてくる。様々な身体動作のうちスポーツの中で現れる走・投・跳などの非常に速くダイナミックな動作は、ヒトがもつ身体能力の極限の中で合理的な動作を行っており、身体動作のメカニズムの解明に役立つ動作でもある。これらの中でも、外的な条件・制約と相互に強く作用する身体動作は、複雑な身体動作のメカニズムの解明に一層結びつく研究対象である。このような動作の一つとして、跳躍板と呼ばれる弾性機構を有した器械を用いる跳馬の踏切動作が挙げられる。

体操競技の種目の一つである跳馬は、助走、踏切、第1空中局面（踏切と馬体着手の間の空中局面）、馬体着手（馬体上で身体を両手で支持し、身体を空中へ突き放す局面）、第2空中局面（馬体着手と着地の間の空中局面）、および着地の各局面に分けられる。これらのうち、空中で複数回の宙返りおよび捻りが実施され、演技の難易度や出来栄による得点を大きく左右するのは第2空中局面である。したがって選手にとっては、第2空中局面において高難度な技を高い完成度で実施することが目標となり、トレーニングの現場においては、第2空中局面での身のこなしや直前の着手局面における突き放し技術などが技術論として語られることが多い。しかしながら、跳馬の運動を力学的観点からみると、第2空中局面では外力が加わらないため、身体重心の軌道や身体全体の角運動量を空中で変化させることはできない。よって、技の成否に影響する第2空中局面の身体重心最大上昇高や角運動量といった力学的パラメータは、突き放し直後の空中へ飛び出した瞬間の初期値によって決定されている。さらに、馬体着手が短時間で行なわれることや上肢で発揮できる力の大きさが下肢ほどに大きくはないことから、着手局面後の出力値でもある第2空中局面開始時の力学的パラメータは、着手局面の入力値でもある第1空中局面終了時の力学的パラメータの影響が

大きいと考えられている。第1空中局面においても外力が加わらないことは第2空中局面と同様であるため、遡っていくと、力学的な観点では跳馬において重要性が高いのは助走速度と踏切動作であると考えられる。助走は単純に速度の大小が問題となることを考慮すれば、メカニズムを明らかにするうえで、より重要となるのは踏切局面である。

跳馬の踏切動作は、跳躍板と呼ばれる器械を用いて行なわれている。跳躍板は複数のコイルばねと板ばねを組み合わせた構造であり、身体の力学的エネルギーの一部を弾性エネルギーとして一旦蓄え、再び身体へ伝達するという機能をもつ。一方、跳馬の踏切動作は、身体の水平速度による並進運動エネルギーの一部を、位置エネルギー、鉛直速度による並進運動エネルギー、および回転運動エネルギーへと変換する動作であることから、跳躍板はエネルギー変換器であると言えることができる。すなわち、踏切動作に跳躍板を用いることで様々な技を実施することが可能になっているのは、身体の力学的エネルギーの変換をより効率的かつ効果的に行なうことができるためだと考えられる。また、跳躍板の変形の大きさは身体から加えられる力の大きさに依存するため、踏切動作と跳躍板の力学的挙動・応答とは独立したものではなく、相互に影響を及ぼしあうものであると考えられる。

踏切動作の特性や跳躍板の力学的な働き、それらの相互の影響を明らかにすることは、身体動作のメカニズムに対する理解を深めるのみならず、トレーニングの現場で応用することで競技力の向上に寄与することも期待できるものである。しかしながら、これらの詳細は未だ明らかとなっていない。これは、詳細な分析を実施するうえで重要な力学的情報である、跳躍板から身体へ加わる力を計測する妥当な手段が確立されていなかったことが要因の一つである。跳躍板は短時間で加速度的に変形し、また、足部の接触部位も一定ではないことなどから、単に床反力計上へ設置するなどの手法では、足部と跳躍板との間に働く力を正確に計測することができないのである。

本研究では、足部と跳躍板との間に働く力の計測法を確立することを第一の目的とし、踏切動作の特性と跳躍板の力学的な役割を一体的に明らかにすることを第二の目的とした。

本研究で考案したのは、床反力計上へ設置した跳躍板を高速度撮影し、映像から取得した慣性力情報によって床反力情報を補正するという、計測機器を組み合わせた手法であった。この手法において正確性を低下させる可能性のある主な要因として予測されたのは、慣性力の算出に必要な加速度情報を映像から取得するという点であった。なぜなら、映像から加速度情報を取得する手法では、1次情報である計測点の位置情報を加速度情報とするために2階数値微分する過程でノイズが増大しやすく、さらに、ノイズを除去するためのフィルタリングによって加速度情報の時間的変動が部分的に不正確となりやすい、という特性があるためである。そのため、始めに加速度情報の妥当性について検証を行なった。加速度計から得た加速度情報を基準として比較を行なったところ、跳躍板を拡大撮影した映像から取得した加速度情報は十分な正確性を有しており、本研究で考案する計測手法は妥当なものであることが示された。

確立した手法を用い、踏切動作において跳躍板から身体へ加わる力を実際に計測して検討を進めたところ、踏切動作の分析を行なううえで力のピーク値や変動の情報が必要となる状況において特に、本研究で考案した計測手法が有効となることが明らかとなった。さらに、実用面を重視する場合には、跳躍板上の計測点数を4点にまで低減することも可能であることを確認し、本手法は実用性においても利点のある手法であることを明らかにした。

踏切動作の計測を、跳躍板と身体との間に働く力の計測と同時に行なったところ、跳馬

における踏切動作は他のスポーツ種目と比較してレッグスティフネスと呼ばれる指標が非常に大きいという特徴が明らかとなった。これは、脚部の屈曲動作を小さく抑えつつ大きな力が働く踏切動作を行なっているということである。この踏切動作は、跳躍板を大きく変形させ、エネルギーを蓄積することに有効な動作であった。実際、跳躍板の変形は、部材同士の接触による構造的な限度に達することもあるほど大きなものであり、上限にまで弾性エネルギーが蓄積されているということを示していた。

踏切動作に関して、身体の解剖学的・生理学的特性に目を向けてみると、踏切動作では下肢の筋-腱複合体の弾性要素へ一時的に蓄積した弾性エネルギーを利用していることが知られており、身体は内部組織に跳躍板と同様の機構を備えている。身体内部組織はエネルギー効率がそれほど高いわけでないことから、器械である跳躍板の方が高効率で、跳躍板にエネルギーを蓄積することで踏切後の力学的エネルギーの損失を抑制している、ということ仮説においた。しかしながら、跳躍板のエネルギー効率を分析すると、下肢の筋-腱複合体よりも低効率という結果であった。さらに、内部組織だけでなく、身体全体の力学的エネルギーの変化に目を向けてみても、跳躍板を用いたとしても踏切動作に伴うエネルギー損失は抑制されていなかった。したがって、必ずしも跳躍板を用いることにより踏切におけるエネルギー効率を高められているわけではないことが明らかとなった。

踏切動作によるエネルギー変換とは、助走で増加させた身体重心水平速度による並進運動エネルギーの一部を、踏切動作後の位置エネルギー、鉛直速度による並進運動エネルギー、および回転運動エネルギーに変換することであり、変換の過程でエネルギーの一部が跳躍板に流入出するものである。これらについて分析していくと、跳躍板から身体へと流出するエネルギーは、身体全体の回転運動エネルギーにはほとんど配分されず、身体重心の位置エネルギーおよび鉛直速度による並進運動エネルギーへと配分される形で変換されていた。身体重心の位置エネルギーおよび鉛直速度による並進運動エネルギーの増大は鉛直上方への運動方向の変化を反映するものであることから、これらを略して“鉛直上方へのエネルギー変換”と呼ぶこととすると、跳躍板におけるエネルギー移動は、ほぼ全てが鉛直上方へのエネルギー変換に利用されていた。また、跳躍板は身体内部組織である筋-腱複合体よりも低効率ではあったものの、移動するエネルギーの絶対的な大きさ自体は筋-腱複合体よりも大きく、跳躍板でのエネルギー移動を利用しなければ踏切局面で必要となる鉛直上方へのエネルギー変換を行なうことが困難になると考えられるほどであった。したがって、跳馬の踏切動作において弾性エネルギーを蓄積する機能を持つ跳躍板の力学的役割は、エネルギー効率の向上や回転運動エネルギーへの変換ではなく、鉛直上方へのエネルギー変換であるという知見が得られた。

本研究では、跳馬の踏切動作において跳躍板から身体へ加わる力の計測法を確立した。確立した計測手法を利用し、跳馬における踏切動作はレッグスティフネスが大きい、すなわち、脚部の屈曲・伸展動作を抑制しつつ大きな力を加える動作であることを明らかにした。また、この特性を持つ踏切動作によって、跳躍板には弾性エネルギーが最大限に蓄積されていた。さらに、弾性エネルギーを蓄積する機能をもつ跳躍板は、身体重心の鉛直上方へのエネルギー変換を行なう役割をもつことが明らかとなった。以上の結果は、身体外部の器械を利用する踏切動作のメカニズムの一端を、器械の振る舞いと一体的に解明するものであり、加えて、トレーニングの現場に対しても跳躍板の機能を活かす踏切動作についての示唆を与えるものである。