

平成15年度第2回10月8日

演題：スポーツにおける身体の回転

演者：池上 康男

はじめに

バイオメカニクスでは身体を関節によって区切られた部位（セグメント）の集合として扱う（モデル化すること）が多く、リンクセグメントモデルと呼ばれる。身体運動にこのようなモデルを適用すると、身体運動は各セグメントの関節を軸とした回転運動の合成として表すことができる。このような理由からバイオメカニクスにおける身体運動の研究では身体各部の回転運動に注目し、分析が行われる。

今回はこういった身体各部の個別の回転ではなく、身体全体を回転させようとする運動に注目し、スポーツバイオメカニクスの観点から考察を加えてみた。取り上げた運動は3種類で、その内の2種目は、身体の回転そのものが運動成果（パフォーマンス）に直接結びつく体操の鉄棒の終末演技である降り技と、フィギュアスケートにおけるジャンプ動作である。残る1つは、身体の回転によってパフォーマンスが生み出されるハンマー投げである。前の2種目においては身体の回転数の多いことが高い評価をうけるため、回転を伴った降り技や、ジャンプを成功させるための力学的条件について、また、後者のハンマー投げでは回転による投擲で飛距離を伸ばすための要因について取り上げる。

1. 鉄棒における4回宙返り降り

体操競技の中でも鉄棒では最後の降り技、すなわち、鉄棒から離手した後、いかに高難度の演技を行い、しかも着地を成功させるかが演技の評価の上で極めて重要になっている。オリンピックや世界選手権といった高レベルの試合では、降り技で離手の後、空中で3回転（3回宙返り）しての着地も行われる。単なる宙返りよりも2回宙返りの方が難度が高く、それに捻りが加わったり、さらに回転が加わった3回宙返りの演技はより難度が高く、成功すれば高得点が得られる。

現在、鉄棒の宙返り降りでは最多で3回転であり4回転の宙返り降りは国際試合では一度も行われていない。しかし、床運動でも3回の宙返りは行われており、鉄棒であれば、床運動に比べ高い位置から空中に飛び出すこと、離手前の車輪によって身体の大きな回転速度（角運動量）を確保できること等から4回の宙返りも可能ではないかと考えられる。そこで、実測した何人かの世界レベルの優秀選手の離手時の初速度、角運

動量と空中姿勢をもとにシミュレーションを行い、4回宙返り降りの可能性を調べた。空中での身体の4回転を可能にするための条件として、離手時の身体の角運動量が大きいこと、離手時の身体重心の上向き（垂直）の速度が大きいことの2つがある。角運動量が大きいことは同じ姿勢であれば回転が速いことであり、上向きの速度が大きければ身体の空中での上昇高は高く、床面に落下するまでの滞空時間が長くなり、いずれも身体のより多くの回転を可能にする。離手時にさらに大きな角運動量と垂直初速度が得られれば4回宙返り降りは容易に実現可能と考えられる。しかし、離手前の車輪の回転数はルールで3回に限定されているので車輪の間に角運動量や垂直初速度を増加させることには限界がある。さらに、離手直前に角運動量を増加させるように鉄棒に力を加える動作は垂直初速度を減らし、逆に、垂直初速度を増加させるように力を加える動作は角運動量を減少させるという相矛盾する関係にある。空中での回転速度は、離手時の角運動量が等しければ空中での身体の慣性能率が小さいほど大きくなる。身体の慣性能率は膝を抱え込んだような姿勢では小さく、逆に身体を伸ばした（伸身）状態では大きい。

シミュレーションでは世界レベルの3人の実測データを用いた。空中姿勢は最も回転速度が大きくなる（抱え込み姿勢の強い）ハリコフ選手の姿勢を採用し、離手時の条件として、滞空時間が最も長い抱え込みの3回宙返りを行ったリュウキン選手の初期条件と、角運動量が最も大きな伸身の2回宙返りを行った許選手の初期条件を用いた。シミュレーションの結果では、高さを稼ぐリュウキン選手の初期条件では4回宙返りで着地することは不可能であったが、角運動量の大きな許選手の初期条件では4回宙返りの後にぎりぎり着地姿勢をとれることが明らかとなり、今日の現役選手の能力でも4回宙返りを成功させる可能性は十分に高いと考えられた。

2. フィギュアスケートにおける4回転ジャンプ

今日の世界の男子一流フィギュアスケート選手では演技の中で4回転のジャンプを行うのは全く珍しいことではなくなった。長野で冬季オリンピックが開かれた当時では4回転ジャンプを成功させる選手は世界でも数えるほどしかいなかった。鉄棒の降り技での身体の回転が宙返り（回転軸が水平）であるのに対し、フ

フィギュアスケートのジャンプでは身体の回転は長軸回り（垂直）という違いはあるが、演技が成功するための力学的な条件は類似している。踏切時の回転の速度と滞空時間である。より速い回転でより高く跳び上がればより多くの回転を空中で行うことができる。

1998年の長野オリンピックにおけるIOC科学研究プロジェクトの一環として行われたフィギュアスケートのバイオメカニクス研究において得られたデータから回転数の多いジャンプを成功させるための条件について検討した。当時は4回転のジャンプを演技の中に取り入れる選手が現れて間もない頃であり、ジャンプも最もやさしいと思われるトゥループジャンプ（クワッドトゥループ）であった。日本代表の本田選手は試合の演技では4回転ジャンプを行っていないが、公式練習で4回転ジャンプを試み、僅かに手を付きかけているが成功している。4回転ジャンプを試合の演技で成功させたのは優勝したクーリック選手とグオ選手の2名であった。両選手のジャンプ動作と本田選手の公式練習中のジャンプ動作の比較を行った。

4回転のジャンプが失敗となるのは、回転数が不足のまま着地（着氷）する（4回転が3回転になる）場合と着地時に転倒する場合である。回転数が減ってしまうこと自体は減点とはならないが、回転数が少ないジャンプは難易度が低く高得点は出ない。着地時に転倒しないためには着地時の着地足と重心位置、重心の移動速度とその方向が適切な組合せになっている必要があるが、それ以外に着地時のブレード（スケートの刃）の向きと身体の移動方向の関係がある。スケートはブレードに対し横向きには滑らないので、身体の移動方向に対し着地時のブレードが横向きであるほど急に急ブレーキがかかり転倒しやすくなる。従って、回転が不十分であることも失敗の要因となる。

分析の結果、日本の本田選手は他の2選手に比べジャンプ高を決定する垂直初速度が小さく従って滞空時間も短くなっていた。ところが、水平初速度では他の2選手に比べ際立って大きくなっている。水平速度が大きいことは先に述べた着地時のブレードの向きによる転倒の可能性をさらに助長させることになる。

今日では3回転や3回転半（トリプルアクセル）のジャンプは女子選手でも特に珍しい演技ではなくなっている。特に層が厚く、レベルの高い日本の女子ジュニア選手の中にも4回転や3回転半のジャンプに挑戦する選手がいる。ジュニア選手の強化策の一環として行った測定の結果から、彼女らのジャンプはまだ不完全なものであり、共通する特徴としてジャンプ高（滞空時間）の不足がみられた。今後はフィギュアスケート選手でも跳躍能力を高めるための補強トレーニング

が必要であろう。

3. ハンマー投げ

ハンマー投げは、砲丸と同じ重さのハンマーをワイアーの先に着けられたハンドルを握って身体ごと3ないし4回転して加速し、投げる競技である。ハンマーの加速は回転中にハンマーを遠心力に逆らって引きつけることによってなされる。日本の室伏広治選手の実測によると、ハンマーを引く力のピーク値は350kgを越える。この力は静的な筋力によって発揮される力より遥かに大きい。それは、身体が回転することによって発生する遠心力によっている。したがって、ハンマー投げの回転ではハンマーだけが身体の周りに回転するのではなく、ハンマーと身体の合成重心（共通重心）の周りをハンマーと身体の両方が回転していることになる。共通重心の位置はハンマーと身体の重量の比によって決まる。ハンマーの重量は同じなので、体重の大きな選手程、回転の中心は身体に近づいてくる。逆に、軽量選手では共通重心が身体から離れ、身体の回転半径が大きくなる。回転半径が大きくなれば身体の持つ運動エネルギーも大きくなる。このことは、体重の少ない選手は身体の発揮したエネルギーのより多くの部分が身体の運動エネルギーになり、逆に体重の多い選手では、より多くのエネルギーがハンマーの運動エネルギーになることを示している。

室伏広治選手はこれまで順調に記録を伸ばし、現在では世界のトップクラスのハンマー投げ選手となっている。彼の記録の変遷と体重の変化の関係をみると、体重と記録の間に、なんと0.98という驚くべき高い相関が得られた。かれは体重の増加とともに直線的に記録を伸ばしてきている。このことから、身体の回転によって投げるハンマー投げにおいて体重が決定的に重要なファクターであることが示されよう。現在98kgの体重が2%増の100kgになれば、直線による外挿では世界記録に到達する。もちろん、体重の増加といっても重くなった身体を加速できる筋力が伴わなければならないから、体重の増加は筋量の増加によらなければならないことは言うまでもない。

薬物の使用などの不正な手段によらずどこまで筋量を増やせるかが、今後の彼の記録を決める最も重要なファクターになるであろう。