

新型跳馬の力学的特性 —粘弾性を中心として—

Mechanical Characteristics of New Vaulting Table —Especially about viscoelasticity—

佐野 真也* 池上 康男** 桜井 伸二***

Shinya SANO * Yasuo IKEGAMI ** Shinji SAKURAI ***

From 2001, specification for vaulting horse has been changed, and the new one is called 'vaulting table'. The purpose of this study was 1) to estimate how viscoelasticity have been changed between the old vaulting horse and the new vaulting table, 2) to investigate how viscoelasticity and tilt of surface of new vaulting table have affected on vaulting performance. Elasticity of the new vaulting table was smaller than of the old vaulting horse, but the range of these values were overlapped. This result suggested that physical shock at contact on the new vaulting table was smaller than on the old vaulting horse. In contrast, the hand-contact-impulse from the new vaulting table was larger than from the old vaulting horse. Consequently, the gymnast departed from the new vaulting table with greater vertical velocity, which resulted in greater height of body in postflight than from the old vaulting horse. Larger impulse from the new vaulting table might be a result from the tilt of surface.

背 景

体操競技では4年に一度、オリンピックの翌年にルール改正が行われる。なかでも、2001年度には跳馬の規格が大幅に変更され、従来の跳馬とは全く異なる形状となった^{2),3)}。国際的には2001年の世界選手権から新型跳馬が適用された。一方、日本国内においては新型跳馬の迅速な普及が困難であるなどの理由から、2001年度は特別措置として新型跳馬の使用が見送られていたが、2002年度からは正式に採用される事となった。

新型跳馬の馬背部分を側面から見ると、Fig. 1に示すように水平方向より3度の傾斜がついた直線と、半径100cmおよび25cmの円弧、そして鉛直方向より8度の傾斜がついた直線から成っている。さらに、半径100cmの円弧の中間地点では水平方向より13度、半径100cmの円弧と半径25cmの円弧との境界地点では水平方向

より23度の傾斜となっている³⁾。

また、新型跳馬では形状だけでなく機能特性試験の適正範囲にも変更が加えられている³⁾。跳馬が国際体操連盟 (FIG) より認定を受ける為には、馬背上の定められたポイントへ底面が直径 10 ± 0.5 cmの円で質量 10 ± 0.1 kgである重錘を、馬背表面に対して鉛直で接触時の速度が $2.80\text{m/s} \pm 3\%$ となるよう落下させた時、馬背の沈み込む最大の深さ (Deflection)、跳ね返った後の最大上昇高 (Height of rebound) および反力の最大値 (Fmax) が一定の範囲内に収まるよう定められている。この機能特性試験の適正範囲によって、跳馬の粘弾性の性質を規定するものであると考えられる。Table. 1に示した、変更前後の機能特性試験の適正範囲を比較すると、Deflectionは変更がなく、Height of reboundおよびFmaxに変更が加えられているのがわかる。だが、これらの数値をみただけでは、機能特性試験の適正範囲が変更されたことに伴い、粘弾性が具体

* 名古屋大学大学院人間情報学研究科
** 名古屋大学総合保健体育科学センター
*** 中京大学体育学部
* Graduate School of Human Informatics, Nagoya University
** Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University
*** School of Health and Sport Sciences, Chukyo University

Table1 : Figures for Old Vaulting Horses and New Vaulting Tables

	Deflection (mm)	Height of rebound (mm)	F _{max} (N)
Old vaulting horse	34 ≤ h ≤ 44	150 ≤ h ≤ 200	≤ 2200
New vaulting table	34 ≤ h ≤ 44	120 ≤ h ≤ 180	≤ 2500

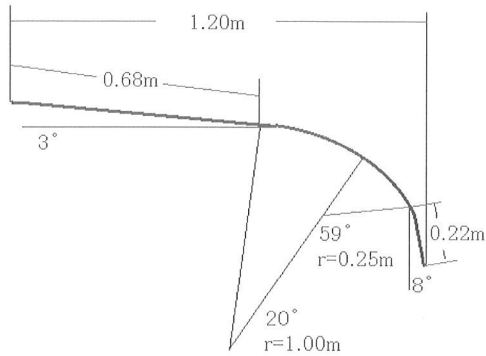


Fig.1 : Standard Profile for Vaulting Tables (Side view)

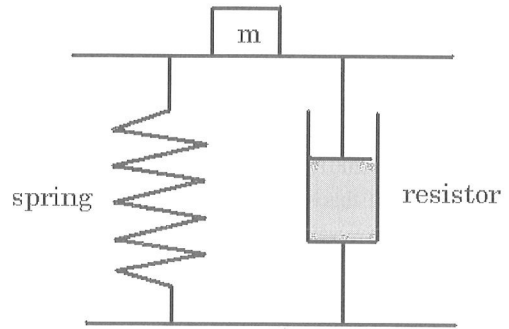


Fig.2 : Viscoelastic Model

的にどのように変化したかはわからない。

さらに、新型跳馬では着手面の大きさも1.60m × 0.35mから1.20m × 0.95mとなった。これによって競技者が馬体に着手する面積が増加した。

本研究の目的は、機能特性試験の適正範囲の変更から粘弾性の変化を推定し、形状および粘弾性の変化がパフォーマンスに与える影響を明らかにすることである。

方法

1. 跳馬の粘弾性係数の算出

Fig. 2に示した粘弾性モデルは、抵抗が十分に小さい時は減衰振動をする。その運動方程式は、

$$m\ddot{x} = -kx - D\dot{x} \quad (1)$$

と書ける。ただし、 m は重錘の質量、 k はバネ定数、 D は粘性を表す定数である。

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad 2D_1 = D \quad (2)$$

とおき、(1) を解くと、

$$x = Ae^{-D_1 t} \sin(\sqrt{\omega_0^2 - D_1^2} t + \alpha) \quad (3)$$

となる。これは減衰振動の一般解である。

ここで、機能特性試験において重錘を落下させた時、重錘が馬体表面に接触している間は(3)式に従って減衰振動を行うものと仮定する。さらに、重錘を載せて静止させた時の沈み込む深さを0であると近似し、上昇局面において馬体表面が元の位置に戻った時(速度が最大になった時)に重錘は馬体表面から離れるものと仮定する。

ここで、Deflectionを x_0 、重錘が馬体表面に接触する時の速度を v_0 、重錘が馬体表面から離れる時の速度を v_1 とおき、 x_0 に到達した時刻を $t = 0$ とする。(3)式を微分し、これらを代入すると

$$v_0 = -x_0 \sqrt{\omega_0^2 - D_1^2} e^{\frac{D_1 \pi}{2\sqrt{\omega_0^2 - D_1^2}}} \quad (4)$$

$$v_1 = x_0 \sqrt{\omega_0^2 - D_1^2} e^{-\frac{D_1 \pi}{2\sqrt{\omega_0^2 - D_1^2}}} \quad (5)$$

となる。これを解くと、

$$\omega_0^2 = D_1^2 - \frac{\nu_0 \nu_1}{x_0^2} \quad (6)$$

$$D_1 = \frac{\sqrt{-\nu_0\nu_1}}{x_D\pi} \log\left(-\frac{\nu_0}{\nu_1}\right) \quad (7)$$

したがって、式(2)により

$$k = m \left(D_1^2 - \frac{\nu_0\nu_1}{x_0^2} \right) \quad (8)$$

$$D = 2 \frac{\sqrt{-\nu_0\nu_1}}{x_D\pi} \log\left(-\frac{\nu_0}{\nu_1}\right) \quad (9)$$

となる。ここで、機能特性試験の基準値にしたがって m, x_0, ν_0, ν_1 を式(8)、(9)へ代入し、旧型跳馬および新型跳馬の k および D の範囲を求めた。

2. 競技会におけるデータ収集

2000年および2001年の中日カップ名古屋国際体操競技大会においてデータを収集した。ハイスピードカメラ(NAC社製、HSV-500C3)2台を観客席上部に設置して同期撮影を行い、映像をビデオテープに録画した。カメラスピードは毎秒250コマ、露出時間は1/500秒であった。2台のカメラより得られた映像から身体各部の3次元座標値をDLT法を用いて計測し、各種力学的変量を求めた。

上記競技会において、2000年は旧型跳馬が使用され、2001年は新型跳馬が使用された。そのため、2000年および2001年の両競技会において同一の被験者が同一の技を実施したものを分析の対象とした。

跳馬の演技は、助走、踏切、第一局面(跳躍板離地から馬体着手までの空中局面)、馬体着手、第二局面(馬体離手から着地までの空中局面)、着地に分類される。これらのうち、馬体着手そのものと、その入力お

よび出力とみなされる第一局面および第二局面に跳馬の規格変更の影響が現れると考えられるため、これらの局面について2000年と2001年の(すなわち、旧型跳馬における演技と新型跳馬における演技の)データを比較した。

結 果

旧型跳馬および新型跳馬における、粘性および弾性の定数の範囲はFig.3のようになった。新型跳馬は旧型跳馬と比較して粘性の定数が大きく、弾性の定数が小さい方へとシフトしていたが大部分は重なり合っていた。

2000年および2001年の中日カップ名古屋国際体操競技大会において同一の被験者によって同一の技が実施されたのは一例のみであった。実施された技は、前転とび前方かかえ込み2回半宙返り(ローチェ)であった。

旧型跳馬で実施された場合と新型跳馬で実施された場合を比較して力学的に意味を持つと考えられるのは、第一局面の角運動量の増加、着手直前の速度の水平成分、着手において馬体から加わる力積の増加および力積の角度の減少、離手直後の速度の水平成分の減少および鉛直成分の増加、身体重心最大上昇高の増加であった(Table.2)。

考 察

新型跳馬の主な変更点は、1.粘弾性の変化、2.馬背部分に傾斜がついた、3.着手部分の面積が増大した、以上の3点にまとめられる。これらのうち、粘弾性の

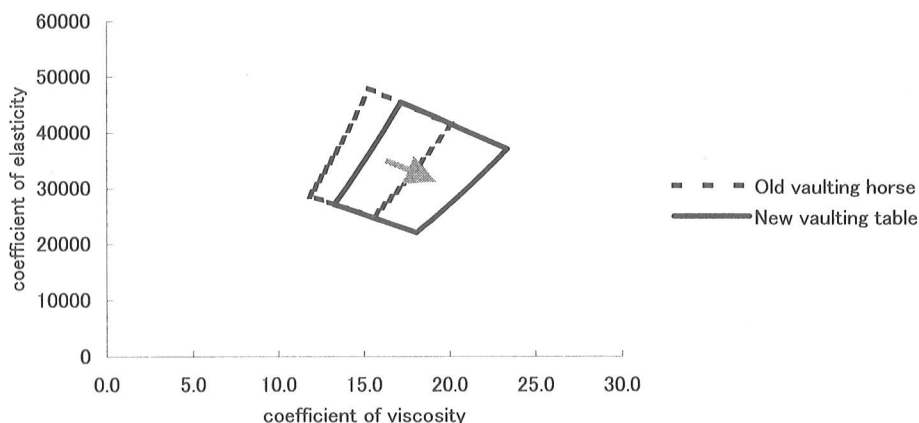


Fig.3 : Coefficient of Elasticity and Viscosity of Old Vaulting Horse and New Vaulting Tables

Table2 : Kinematics and kinetics data on pre-flight, hand placement and post-flight phase

		Old vaulting horse	New vaulting table	
Pre-flight	Velocity at horse contact(m/s)	Horizontal	4.53	4.75
		Vertical	3.25	3.19
		resultant	5.59	5.73
Angular momentum on pre-flight(kgm ² /s)		83.41	92.28	
Hand placement	impulse(N·s/WT)	Horizontal	-0.96	-1.66
		Vertical	1.69	1.91
		resultant	1.94	2.53
Angle of impulse(deg)		60.32	49.04	
Post-flight	Velocity at horse take-off(m/s)	Horizontal	3.57	3.09
		Vertical	3.37	3.54
		resultant	4.92	4.70
	Angular momentum on post-flight(kgm ² /s)		56.90	59.43
Maximum height of CG in post-flight(m)		3.00	3.12	

変化および馬背部の傾斜は力の加わる方向および大きさを変化させる役割を担うと考えられる。一方、着手部分の面積が増大した事は、力学的な役割は小さいものの着手する位置に関して要求される正確性を低減する（容易にする）ことで競技者に思い切った演技を可能とし、パフォーマンスの向上に結びつくものと考えられる。

跳馬だけでなく跳躍板や鉄棒、あるいは自動車のサスペンションなど、弾性を持つものには同時に粘性（速度に比例した抵抗）が存在し、Fig.2に示すような粘弾性モデルで考えるのが一般的である。これは、伸び縮みの長さに比例して力を発揮する弾性要素（いわゆるバネである）と、伸び縮みの速度に比例して力を発揮する抵抗要素（粘性要素）とを組み合わせたものである。この粘弾性モデルの性質は、弾性要素を表すバネ定数（k）と、粘性要素を表す粘性の定数（D）との組み合わせで決定される。kが大きいほど硬いバネとなり、また、Dが大きいほど抵抗が大きく、エネルギーの損失も大きくなる。

新型跳馬は旧型跳馬に比べ、バネ定数kは小さく、粘性の定数Dは大きい方へとシフトしていた。すなわち、新型跳馬はバネ（弾性要素）が柔らかく、その一方で馬背が沈み込む速度に比例して加わる抵抗（粘性要素）が大きくなったと考えられる。このバネは、ヒトが腕を介して発揮する弾性とほとんど等しい時に最も有効に弾性を活用でき、柔らかいほど衝撃を吸収する性能が高いと考えられる。だが、ヒトが腕を介して発揮する弾性に比べて硬すぎると、肘を曲げて衝撃を緩和するなどの緩衝動作が必要となり、弾性を有効に活用する事が出来なくなる（エネルギーの損失が大き

くなる）。

先行研究によって走り幅跳びにおける脚のバネ定数はおよそ10~20kN/mであると推定されている⁴⁾。それに対し跳馬のバネ定数は、旧型跳馬でおよそ25~50kN/m、新型跳馬で20~45kN/mであり、脚のバネ定数よりも大きかった。一般的には、腕を介して発揮される弾性は脚に比べて相当小さいと考えられるため、跳馬のもつ弾性は腕を介して発揮される弾性よりも相当大きいと考えられる。したがって、新型跳馬で弾性が小さくなったことは、弾性を有効に利用するというよりも、むしろ旧型跳馬に比べて身体への衝撃を緩和する働きがあると考えられる。これによって傷害のリスクが低減すると共に、思い切った演技が出来る事でパフォーマンスの向上に結びつく可能性があるものと思われる。

粘性の係数は旧型跳馬、新型跳馬それぞれについて、最大でもおよそ20N/m/s、25N/m/sであった。また、競技会撮影によって得られたデータから馬体着手時における手首の速度を求めると、水平、鉛直成分それぞれについておよそ1.5m/s、-1.5m/sであった。したがって、手首の馬体表面に対して鉛直な速度は鉛直成分にほとんど等しいと仮定すると、馬体着手時において粘性要素によって競技者に加わる力は旧型跳馬、新型跳馬それぞれについて、最大でもおよそ30N、37.5Nと見積もる事が出来る。この値は、競技者の体重が60kgであるとすると、体重の5~6%となる。一方、着手局面において競技者に加わる平均の力の鉛直成分はほぼ体重と等しかったため、最大で2~3倍の力が加わっていたものと思われる。したがって、粘性が変化した事の影響はかなり小さいと考えられる。

新型跳馬の力学的特性

競技会の撮影によって得られたデータをみると、着手局面中に馬体から身体に加わる力積が新型跳馬では大きくなっていった。また、その角度が小さくなっていったものの、力積自体の増加が大きい為に水平成分だけでなく鉛直成分も大きくなっていった。その結果として、離手直後の身体重心速度自体は変化がないにも関わらず、水平成分は小さく、鉛直成分は大きくなったものと思われる。さらに、身体重心速度の鉛直成分が増加したことにより身体重心最大上昇高も増加したと考えられる。(Table. 2)。すなわち、新型跳馬では馬体からより大きな力積が低い角度で加えられるようになったことで、身体重心速度をより鉛直方向へ転換できるようになったものと思われる。このことは着地における余裕を生み、より高難度な技の実施を促すものと思われる。

新型跳馬において、ローチェを含む前転とび系の技で着手されると考えられる範囲には、3～23度の傾斜がついており (Fig. 1)、また、着手部分の面積が増大した。さらに、本研究の結果から新型跳馬では粘性が大きく、弾性が小さくなった事が明らかになった。新型跳馬では傾斜がついたことで力積の方向および大きさが変化する特性を持つと考えられる。それに加えて 1) 粘弾性の変化による身体への衝撃の低減、2) 着手部分の面積の増大による着手位置に要求される正確性の低減、によって競技者が思い切った技の実施をす

ることが可能となり、それによっても力積の方向および大きさが変化したものと思われる。

ま と め

跳馬の規格が変更され、形状が従来のとは大きく異なるものとなった。また、機能特性試験の適正範囲の変更によって性質も変化した。

旧型跳馬と新型跳馬とで粘弾性がどのように変化したかを機能特性試験の適正範囲を元に推定した。その結果、新型跳馬では弾性が小さく (バネ定数が小さく) なっていた。

新型跳馬の形状および性質の変化は着手において馬体から加わる力積の大きさおよび方向を変化させ、それによって跳馬の演技のパフォーマンスが向上すると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 原 康夫：物理学基礎. 学術図書出版社. : 1986.
- 2) International Gymnastics Federation. : Standard specification: Vaulting horses for men artistic gymnastics. : 1989
- 3) International Gymnastics Federation. : Standard specification: Vaulting tables for men artistic gymnastics. : 2001
- 4) Seyfarth, A., A. Friedrichs, V. Wank, R. Blickhn : Dynamics of the long jump. J.Biomech. 32 : 1259-1267, 1999

(2002年12月4日受付)

