

第11回世界陸上大阪大会における男女走幅跳のバイオメカニクスの分析

小山宏之¹⁾ 阿江通良¹⁾ 村木有也²⁾ 高本恵美²⁾ 永原隆¹⁾ 吉原礼¹⁾ 大島雄治¹⁾

1) 筑波大学 2) 大阪体育大学

1. はじめに

第11回世界陸上大阪大会走幅跳決勝は男子が8月30日、女子が8月28日にそれぞれ行われた。男子走幅跳優勝者のサラディノ選手 (PAN) はアフリカ新記録の8.57mを記録した。女子走幅跳は唯一7mを超える跳躍を行ったレベデワ選手 (RUS) が優勝した。現在の男子走幅跳世界記録は第3回世界陸上 (1991) でマイク・パウエル選手 (USA) が記録した8.95mであり、同試合ではカール・ルイス選手 (USA) も前世界記録 (ボブ・ビーモン, 8.90m) を超える跳躍をした。これらの跳躍は、国際陸連および日本陸連で組織されたバイオメカニクス研究班によって分析され、パフォーマンスの改善につながる知見が得られている (深代ら, 1994)。

国際陸連および日本陸連は、第11回世界陸上大阪大会においてもバイオメカニクス研究班を組織した。そして、現在の一流選手の動作のバイオメカニクスの特徴を明らかにすること、そして選手やコーチに情報を提供するために、男女走幅跳予選・決勝の両ラウンドが撮影された。

本報告の目的は、大阪世界陸上男女走幅跳上位3選手のキネマティクスの特徴を報告することである。

2. 方法

2.1 分析試技

表1および2は男女上位3選手の身体的特徴および分析試技を示したものである。

2.2 データ収集および処理

男女走幅跳決勝に進出した選手を、スタンド最上段に設置した2台のハイスピードビデオカメラ (250Hz) および2台のデジタルビデオカメラ (60Hz) を用いて撮影した。2台のハイスピードカメラは踏切2歩前から踏切までを、デジタルビデオカメラは空中から着地までを撮影した。各カメラで撮影した映像から、選手の身体分析点23点の3次元を算出するために、分析範囲内の14箇所につき7つのコントロールポイントを取り付けたキャリブレーションポールを順次立て撮影した。

Table 1. Characteristics of the top three jumpers in the Men's final

Rank	Name	Nation	Height (m)	Weight (kg)	Personal best (m)	Result	Analyzed jump
1	Irving SALADINO	PAN	1.76	70	8.56	6th 8.57 (+0.0)	6th 8.57 (+0.0)
2	Andrew HOWE	ITA	1.84	73	8.41	6th 8.47 (-0.2)	6th 8.47 (-0.2)
3	Dwight PHILLIPS	USA	1.81	81	8.6	1st 8.30 (+0.4)	1st 8.30 (+0.4)

Table 2. Characteristics of the top three jumpers in the Women's final

Rank	Name	Nation	Height (m)	Weight (kg)	Personal best (m)	Result	Analyzed jump
1	Tatyana LEBEDEVA	RUS	1.73	63	7.33	3rd 7.03 (+0.3)	3rd 7.03 (+0.3)
2	Lyudmila KOLCHANOVA	RUS	-	-	7.21	6th 6.92 (-0.3)	6th 6.92 (-0.3)
3	Tatyana KOTOVA	RUS	1.78	57	7.42	6th 6.90 (+0.5)	6th 6.90 (+0.5)

Table 3. Results of the final of the men's long jump

RANK	NAME	NAT	RESULT	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
1	Irving SALADINO	PAN	8.57	x 1.1m/s	8.30 0.5m/s	8.46 0.0m/s	x 0.0m/s	x -0.3m/s	8.57 0.0m/s
2	Andrew HOWE	ITA	8.47	x 1.1m/s	8.13 -0.1m/s	x 0.2m/s	8.12 0.7m/s	8.20 0.2m/s	8.47 -0.2m/s
3	Dwight PHILLIPS	USA	8.30	8.30 0.4m/s	x 0.0m/s	x -0.1m/s	8.02 0.3m/s	x 0.1m/s	8.22 0.0m/s
4	Olexiy LUKASHEVYCH	UKR	8.25	x 0.0m/s	8.17 0.4m/s	x 0.5m/s	8.05 0.7m/s	8.13 0.4m/s	8.25 0.2m/s
5	Godfrey Khotso MOKOENA	RSA	8.19	7.98 0.2m/s	7.86 -0.1m/s	8.19 0.4m/s	8.18 0.7m/s	8.15 0.0m/s	8.19 -0.1m/s
6	James BECKFORD	JAM	8.17	8.09 0.3m/s	8.03 0.6m/s	8.03 0.6m/s	8.17 0.0m/s	8.17 0.1m/s	x 0.0m/s
7	Ndiss Kaba BADJI	SEN	8.01	7.90 0.6m/s	8.01 0.1m/s	x -0.1m/s	7.90 0.4m/s	x 0.0m/s	7.64 0.1m/s
8	Ahmed Faiz BIN MARZOUQ	KSA	7.98	x 0.8m/s	7.98 0.0m/s	7.70 -0.3m/s	x 0.4m/s	-	x 0.1m/s

各カメラの映像をデジタイズし、身体分析点23点の2次元座標を得た後、3次元DLT法を用いて3次元座標へと変換した。3次元座標はButterworth low-pass digital filterを用いて遮断周波数4.8Hzから8.4Hzの範囲で平滑化した。

図1は公式記録 (official distance) , 離地距離 (takeoff distance) , 空中距離 (flight distance) , 着地距離 (landing distance) の定義を示したものである。離地距離 (L1) は踏切板の端 (砂場側) から踏切離地時の身体重心までの水平距離を、空中距離 (L2) は空中で選手が移動した水平距離を、着地距離 (L3) は選手が砂場に着地した瞬間の身体重心と最終的に砂場に残った跡の間の水平距離を示したものである。踏切損失距離 (L4) は踏切離地時の爪先と踏切板の端 (砂場側) の間の距離であ

り、踏切の正確性を表す指標として算出した。

身体重心、踏切脚の関節角度、腰および肩の回転角度、体幹角度を算出した。また、踏切脚の股関節と足関節を結ぶ線分が水平線となす角度を矢状面および前額面で算出し脚角度とした。

3. 結果および考察

3.1 男子決勝

3.1.1 パフォーマンスに関する結果

表3は男子走幅跳決勝の競技結果を、表4は跳躍距離の各要素を示したものである。上位3選手のベスト跳躍における踏切損失距離は1.0~3.0cmの範囲であり、ベスト跳躍では踏切におけるロスが非常に少なかったことがわかる。離地距離は約0.40m

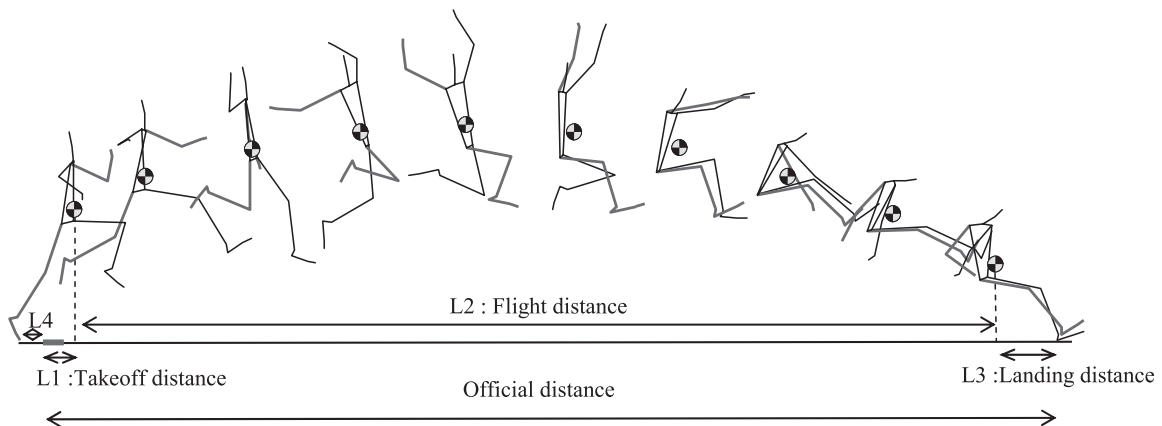


Figure 1. Definitions of components of jumping distance of the long jump

Table 4. Distances within the long jump - Men's final

Parameter	Saladino	Howe	Phillips	1991 Tokyo World Championship*
Official dist. (m) (L1+L2+L3)	8.57	8.47	8.30	8.15±0.17
Takeoff dist. (L1) (m) (%)	0.39 (4.5)	0.41 (4.8)	0.42 (5.1)	-
Flight dist. (L2) (m) (%)	7.80 (91.0)	7.70 (91.0)	7.62 (91.8)	-
Landing dist. (L3) (m) (%)	0.39 (4.5)	0.36 (4.2)	0.26 (3.1)	0.47±0.09
Toe-to Board dist. (L4) (m)	0.01	0.03	0.01	-
Heel displacement @ landing (L5) (m)	8.69	8.48	8.52	-
Loss dist. by landing (m)	0.12	0.01	0.22	-
Actual jump dist. (L4+L5) (m)	8.70	8.51	8.53	-

* Fukushima *et al.* (1994)

であり、公式距離に対する割合は5.0%程度であった。一方、空中距離の公式距離に対する割合は非常に大きく、各選手ともに90%以上を空中距離でかせいでいた(91.0~91.8%)。空中距離はサラディノ選手の7.80m(91.0%)が最も大きかった(ハウ, 7.70m; フィリップス, 7.62m)。上位3選手の着地距離はそれぞれ0.39m(サラディノ), 0.36m(ハウ), 0.26m(フィリップス)であり、世界陸上東京大会における決勝進出者の着地距離(0.47±0.09m)に比べかなり小さかった。しかし、着地瞬間の踵と身体重心の水平距離は、0.51m(サラディノ), 0.48m(フィリップス)であったことから、大阪大会上位3選手は着地動作が良くなかったと言えるであろう。また、フィリップスが着地時に踵で砂場に残した跡は8.53m地点であり、ハウ(8.51m)よりも遠い地点であった。この結果は、フィリップスは着地動作のロスにより順位を落としたことを示している。着地動作は跳躍距離に占める割合は小さいが、ロスの少ない着地動作が重要であると言えよう。

3.1.2 重心速度

表5は踏切2歩前、1歩前および踏切局面の水平および鉛直速度、跳躍角度を示したものである。いずれの選手も踏切2歩前の水平速度が最も大きく、サラディノ選手10.65m/s、ハウ選手10.99m/s、フィリップス選手11.01m/sであった。すなわち、最高速度は優勝したサラディノ選手が最も小さいという結果が得られた。踏切2歩前から踏切への移行局面では、いずれの選手も速度を減少させていた。その減速量を見ると、フィリップス選手の減速が著しく大きく(-0.63 m/s)、踏切2歩前の速度は最も大きかつ

たが、踏切地点では速度は最も小さかった。また、その減速の大部分は踏切1歩前での減速であった。一方、サラディノ選手とハウ選手の減速は0.1m/s程度であり(サラディノ, -0.13m/s, ハウ, -0.12m/s)、踏切2歩前の速度をほぼ維持して踏切に移行していた。特に、踏切1歩前での減速は非常に小さかった。この結果は、サラディノ選手とハウ選手の踏切準備動作は非常に優れたものであったことを示している。

上位3選手の踏切接地時の速度はサラディノ選手10.52m/s、ハウ選手10.87m/s、フィリップス選手10.38m/sであった。この速度を過去の世界陸上の報告と比較すると、パウエル選手(11.00m/s)とルイス選手(11.06m/s)を除いた選手の平均と同程度の速度であった。

踏切離地時の速度を見ると、サラディノ選手の水平速度は3選手で最も小さかったが、鉛直速度は最も大きかった。興味深いことに、サラディノ選手とハウ選手の踏切における減速はほぼ同じであったが(サラディノ, -1.63m/s; ハウ, -1.61m/s)、離地時の鉛直速度には大きな差が見られた(サラディノ, 3.75m/s; ハウ, 3.46 m/s)。この結果は、踏切で鉛直速度を高める技術に両選手の間で差があり、サラディノ選手が優れていたことを示すものである。

3.1.3 身体重心の移動

図2は踏切2歩前から踏切離地までの身体重心の移動を示したものである。上位3選手はいずれも踏切2歩前から重心を下げ踏切に移行していた。重心高の下降は主に踏切2歩前の空中局面で見られ、各選手の重心下降量はサラディノ選手6.3cm、ハウ選手8.6cm、フィリップス選手9.1cmであった。各局面の

Table 5. Horizontal and vertical velocities of the center of gravity (C.G.) of athletes and takeoff angle - Men's final

Parameter	I. SALADINO	A. HOWE	D. PHILLIPS	1991 TOKYO WC*			1997 Athens WC**
				M. POWEL	C. LEWIS	Other Athletes	
Official distance	8.57	8.47	8.30	8.95	8.91	8.15±0.17	8.11±0.18
Horizontal vel. (m/s)							
HV _{TDL2}	10.65	10.99	11.01	-	-	-	-
HV _{TDL1}	10.53	10.89	10.94	-	-	-	-
HV _{TD}	10.52	10.87	10.38	11.00	11.06	10.39±0.14	10.65±0.19
HV _{MKF}	9.23	9.56	8.97	-	-	-	-
HV _{TO}	8.90	9.26	8.96	9.09	9.72	8.80±0.12	8.77±0.22
ΔHV _{TD-TO}	-1.63	-1.61	-1.41	-1.91	-1.34	-1.59±0.10	-1.88±0.32
Vertical vel. (m/s)							
VV _{TD}	-0.28	-0.46	-0.06	-	-	-	-
VV _{MKF}	2.61	2.42	2.70	-	-	-	-
VV _{TO}	3.75	3.46	3.67	3.70	3.22	3.44±0.19	3.42±0.26
VV _{MKF} /VV _{TO} (%)	69.6	69.9	73.5	-	-	-	-
Takeoff angle (deg)							
Y-Z plane	22.9	20.5	22.3	22.1	18.3	21.4±1.5	21.3±1.5
X-Y plane	1.9	-2.5	0.5	-1.4	3.3	1.6±1.4	-

* Fukashiro *et al.* (1994) ** Arampatzis *et al.* (1999)

時間を比較すると、3選手ともに踏切2歩前支持時間は踏切3歩前の支持時間よりも短く、逆に空中局面時間は踏切2歩前の方が長い傾向を示した。これらのことは、踏切2歩前支持の動作を変えることによ

り、その後の空中で重心を大きく下げていることを示すと考えられる。

上記のように重心を下げるタイミングは同様であったが、身体重心の下げ方には大きな相違が見られ

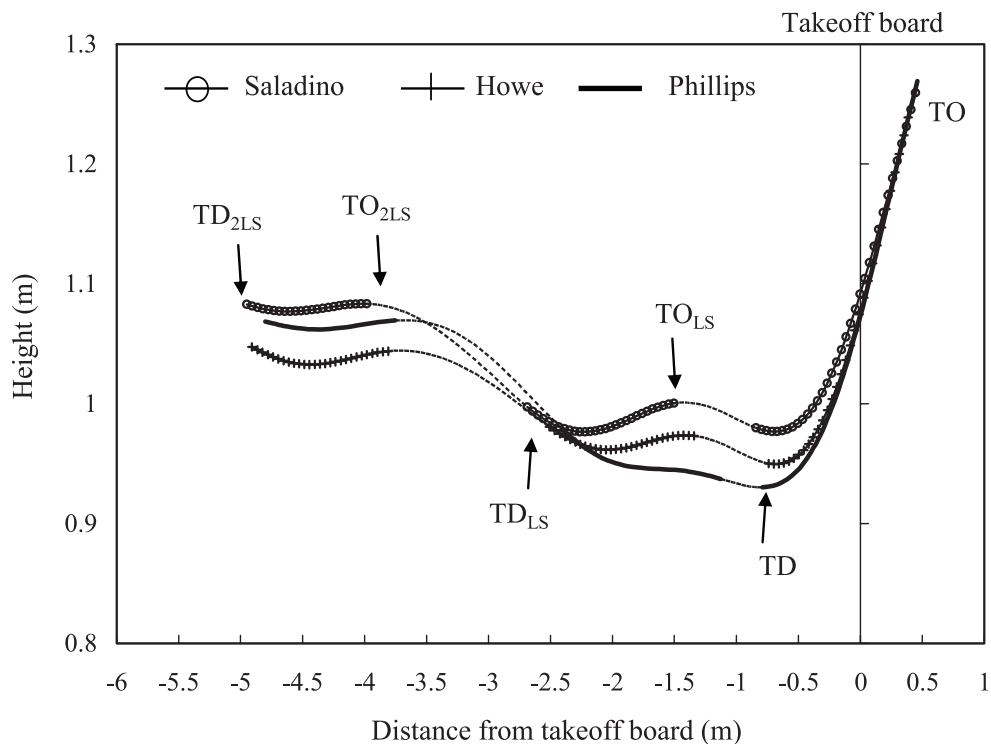
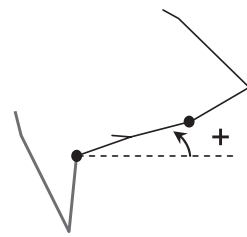


Figure 2. Pathway of the center of gravity of the body from the touchdown (TD) of the 2nd last stride to the toe-off (TO) of the takeoff.

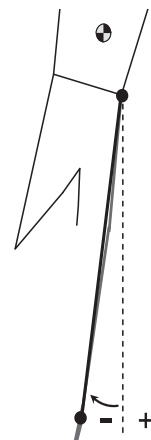
Table 6. Joint angles of the takeoff leg, trunk angle, hip and shoulder rotation angles, and leg angles at the touchdown (TD) and toe-off (TO) of the takeoff

Parameter	Saladino	Howe	Phillips	1991 Tokyo World Championship*
Knee _{TD} (deg)	160.2	160.2	165.4	166.7±3.5
Knee _{MKF} (deg)	143.2	140.7	138.4	145.6±5.3
Knee _{TO} (deg)	168.4	165.2	159.8	172.0±2.3
Flex. / Ext. (deg)	-17.1 / 25.2	-19.4 / 24.5	-27.0 / 21.5	-21.1±4.3 / 26.4±4.8
Maximum Knee Flex. Vel. (deg/s)	-423.2	-452.8	-570.7	
Trunk - Sagittal plane _{TD} (deg)	-2.3	-2.1	-10.1	-4.4±3.9
Trunk - Sagittal plane _{TO} (deg)	5.6	8.0	7.3	5.8±3.7
Shoulder rotation TD (deg)	32.6	14.9	17.8	20.6±5.3
Shoulder rotation TO (deg)	-0.5	-18.6	-13.5	-10.3±8.0
Hip rotation TD (deg)	1.1	-12.6	-5.8	-9.0±4.9
Hip rotation TO (deg)	39.1	21.9	17.8	17.0±10.1
Twist angle (deg)	71.2	68.0	54.9	56.9±10.6
Leg angle Sagittal plane _{TD} (deg)	37.3	36.1	37.2	-
Leg angle Sagittal plane _{TO} (deg)	-25.3	-31.0	-28.3	-
Leg angle Frontal plane _{TD} (deg)	-2.6	-4.7	-1.3	-
Leg angle Frontal plane _{TO} (deg)	-5.1	-5.7	-7.1	-

Rotation angle (shoulder)



Leg angle (sagittal plan)



* Fukashiro *et al.* (1994)

た。サラディノ選手とハウ選手は踏切1歩前後半で重心を上昇させながら離地していたが、フィリップス選手は踏切1歩前離地まで身体重心を下げ続けていた。そして、フィリップス選手は低い姿勢で踏切に移行し、身体重心の上昇量を他の選手より大きくさせていた。このような動作は、踏切局面で鉛直速度を高めることに貢献すると考えられる。しかし、踏切1歩前において水平速度の減少が大きくなる可能性があることに注意すべきであろう。

3.1.4 踏切局面における関節および脚角度

表6は踏切脚関節角度、体幹角度、踏切接地時および離地時の肩、腰の回転角度を示したものである。また、図3は踏切2歩前から踏切までの足跡および身体重心の移動を上方から見たものである。

表6からわかるように、サラディノ選手は踏切接地後の踏切脚膝屈曲角速度が最も小さく、屈曲が最も少なかった。この結果は、サラディノ選手は3選手の中で踏切脚膝関節の屈伸運動が最も少なく、身体の回転運動を利用した踏切動作を行っていたこと

を示している。深代ら (1994) は世界陸上東京大会の結果から、踏切で鉛直速度を高めるための重要な要因は、踏切脚膝の屈曲を抑えることと報告している。本大会においても同様の結果が得られたことは、踏切脚の屈曲を抑えた動作が鉛直速度の獲得に重要であることを強く示唆するものであろう。

踏切接地時および離地時の腰の回転角度はそれぞれ1.1°、39.1° (サラディノ選手)、-12.6°、21.9° (ハウ選手)、-5.8°、17.8° (フィリップス選手) であり、動作範囲は38.0° (サラディノ選手)、33.5° (ハウ選手)、23.6° (フィリップス選手) であった。これらの結果は、上位3選手は踏切中に振上脚側の腰を前方に出す動作を行っていたことを示している。また、その動作はサラディノ選手が最も大きかった。世界陸上東京大会の分析では、腰と肩のひねり動作範囲と跳躍距離の間に有意な正の相関関係が報告されている。大阪大会上位2選手のひねり動作はそれぞれ71.1° (サラディノ選手)、68.0° (ハウ選手) であり、東京大会で大きくひねりを行っていたパウエル、ルイス選手 (パウ

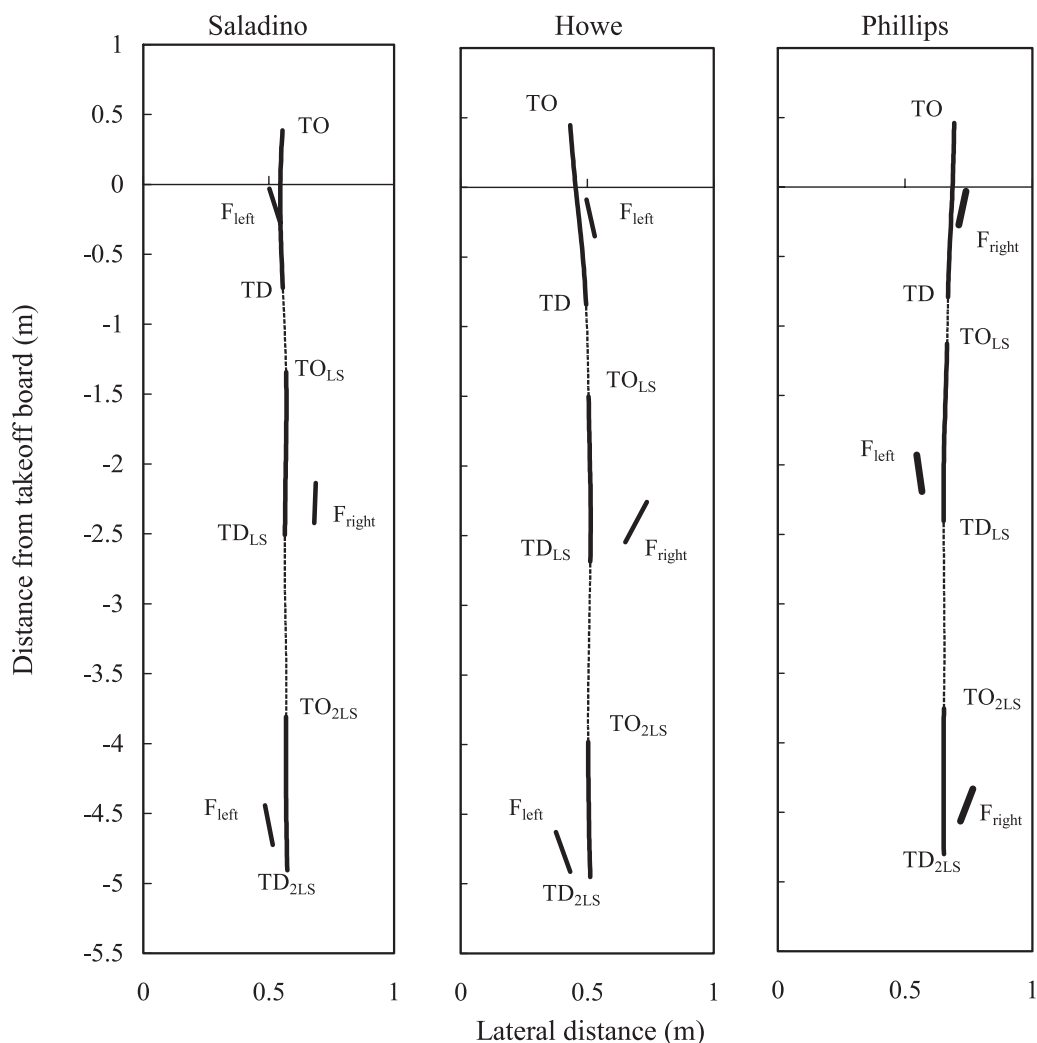


Figure 3. Overhead views of paths of the center of gravity of the body from the 2nd last stride to the takeoff and footprint of each support phase.

エル, 74° ; ルイス, 70°) と同程度であった. このような結果は, 走幅跳の踏切は左右軸回りの動作に着目が行くが, 鉛直軸回りのひねり動作も重要であることを示唆していると考えられる.

図3の足跡で各歩の接地位置を見ると, 上位3選手は踏切1歩前では2歩前より外側に接地, 踏切では身体重心のほぼ真下で接地していた. そこで, 踏切接地時の脚角度 (前額面) を見るとそれぞれ -2.6° (サラディノ選手), -4.7° (ハウ選手) -1.3° (フィリップス選手) であり, いずれの選手もわずかに踏切脚を内傾し踏切接地していた. Okuyamaら (2003) は走高跳であるが, 踏切時に踏切脚の内傾は, 股関節外転筋群の働きを高め, 鉛直速度獲得に有用であることを明らかにし, 脚の内傾が跳躍の重要な要因であると指摘している. 大阪大会上位3選手で見られた特徴は, 走幅跳の踏切局面においても鉛直速度をより高めるために, 股関節外

転筋群を利用することが有用であることを示唆しているのかもしれない.

3.2 女子決勝

3.2.1 パフォーマンスに関する結果

表7は女子走幅跳決勝の競技結果を, 表8は跳躍距離の各要素を示したものである. 優勝したレベデワ選手は最も大きい実測距離を示した. 一方, 2番目に大きい実測距離を示したのは三位のコトワ選手であり, 二位のコルチャノワ選手より10cm大きかった (コトワ, 7.05m; コルチャノワ, 6.95m). この結果はコルチャノワの踏切および着地によるロスが少なく, 順位が逆転したことを示している. 女子上位3選手の着地距離は男子選手の着地距離に比べ大きい値を示した.

3.2.2 重心速度

Table 7. Results of the final of the women's long jump

RANK	NAME	NAT	RESULT	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
1	Tatyana LEBEDEVA	RUS	7.03	6.73 -0.7m/s	7.03 0.7m/s	7.03 0.3m/s	x 0.7m/s	6.98 0.1m/s	-
2	Lyudmila KOLCHANOVA	RUS	6.92	x -0.2m/s	6.84 0.4m/s	x -0.1m/s	6.71 0.7m/s	6.63 1.0m/s	6.92 -0.3m/s
3	Tatyana KOTOVA	RUS	6.90	6.80 -0.6m/s	x 0.0m/s	6.75 1.0m/s	6.70 0.7m/s	x 2.7m/s	6.90 0.5m/s
4	Natide GOMES	POR	6.87	6.87 0.7m/s	6.75 0.3m/s	6.61 -0.5m/s	6.86 0.9m/s	6.85 0.4m/s	6.80 -0.3m/s
5	Bianca KAPPLER	GER	6.81	6.81 -0.7m/s	6.66 0.5m/s	6.78 0.3m/s	6.55 -0.4m/s	x 0.6m/s	6.49 1.0m/s
6	Maurren Higa MAGGI	BRA	6.80	6.41 -2.1m/s	6.64 0.7m/s	6.73 0.1m/s	6.80 1.2m/s	6.62 0.4m/s	6.76 -0.2m/s
7	Keila COSTA	BRA	6.69	6.69 0.0m/s	6.44 -1.1m/s	6.66 0.2m/s	6.66 -0.5m/s	x 1.9m/s	6.61 1.1m/s
8	Brittney REESE	USA	6.60	x 0.1m/s	6.60 -1.5m/s	6.58 -0.3m/s	x 0.7m/s	x 0.8m/s	6.29 -0.3m/s

Table 8. Distances within the long jump - Women's final

Parameter	Lebedeva	Kolchanova	Kotova
Official dist. (m) (L1+L2+L3)	7.03	6.92	6.90
Takeoff dist. (L1) (m) (%)	0.31 (4.4)	0.34 (5.0)	0.34 (5.0)
Flight dist. (L2) (m) (%)	6.20 (88.2)	6.12 (88.5)	6.07 (88.0)
Landing dist. (L3) (m) (%)	0.52 (7.4)	0.46 (6.6)	0.49 (7.1)
Toe-to Board dist. (L4) (m)	0.05	0.00	0.06
Heel displacement @ landing (L5) (m)	7.03	6.95	6.99
Loss dist. by landing (m)	0.00	0.03	0.09
Actual jump dist. (L4+L5) (m)	7.08	6.95	7.05

表9は踏切2歩前，1歩前および踏切局面の水平および鉛直速度，跳躍角度を示したものである。踏切2歩前の水平速度は，レベデワ選手9.52m/s，コルチャノワ選手9.23m/s，コトワ選手9.12m/sであり，その後踏切に向けてわずかに減少し，踏切接地時ではレベデワ選手9.37m/s，コルチャノワ選手9.13m/s，コトワ選手9.08m/sであった。踏切離地時の速度を見ると，レベデワ選手とコルチャノワ選手の水平速度は同じであったが（7.73m/s），鉛直速度には顕著な差が見られた（レベデワ，3.50m/s；コルチャノワ，3.23m/s）。すなわち，レベデワ選手とコルチャノワ選手の跳躍距離の差は鉛直速度の差によるものであったと考えられる。一方，コ

トワ選手の跳躍は他の2選手と大きく異なるものであった。踏切における水平速度の減少を見ると，コトワの減速は他の選手に比べ顕著に少なく（コトワ，-0.94m/s；レベデワ，-1.64m/s；コルチャノワ，-1.40m/s），踏切離地時の水平速度は3選手の中で最も大きかった（8.14m/s）。一方，踏切離地時の鉛直速度は小さく（3.18m/s），このことは水平速度を生かした跳躍を行っていたことを示している。過去の世界陸上の報告（深代ら，1994；Arampatzis et al., 1999）と比較して，大阪大会上位3選手の助走速度は小さかったが，東京大会のカーシー選手とドレクスラー選手を除き跳躍距離に大きな差は見られなかった。重心速度の結果から見ると，レベデワ選

Table 9. Horizontal and vertical velocities of the center of gravity (C.G.) of athletes and takeoff angle – Women’s final

Parameter	Lebedeva	Kolchanova	Kotova	1991 TOKYO WC*			1997 Athens World Championship**
				J. J.Kersee	H.Drechsler	Other Athletes	
Official distance	7.03	6.92	6.90	7.32	7.29	6.95 ± 0.43	6.86 ± 0.12
Horizontal velocity (m/s)							
HV _{TDL2}	9.52	9.23	9.12	-	-	-	-
HV _{TDL1}	9.63	9.11	9.39	-	-	-	-
HV _{TD}	9.37	9.13	9.08	9.85	9.86	9.53 ± 0.11	9.62 ± 0.08
HV _{MKF}	7.95	8.17	8.16	-	-	-	-
HV _{TO}	7.73	7.73	8.14	8.09	8.49	7.92 ± 0.31	8.08 ± 0.26
∠HV _{TD-TO}	-1.64	-1.40	-0.94	-1.76	-1.37	-1.61 ± 0.29	-1.54 ± 0.25
Vertical Velocity (m/s)							
VV _{TD}	-0.38	-0.42	-0.40	-	-	-	-
VV _{MKF}	2.13	1.84	1.24	-	-	-	-
VV _{TO}	3.50	3.23	3.18	3.46	2.80	3.05 ± 0.24	3.10 ± 0.23
VV _{MKF} / VV _{TO} (%)	60.8	57.1	39.1	-	-	-	-
Takeoff angle (deg)							
Y-Z plane	24.4	22.7	21.3	23.2	18.3	21.1 ± 2.0	20.9 ± 1.7
X-Y plane	-0.8	-1.1	3.0	-	-	-	-

* Fukashiro *et al.* (1994) ** Arampatzis *et al.* (1999)

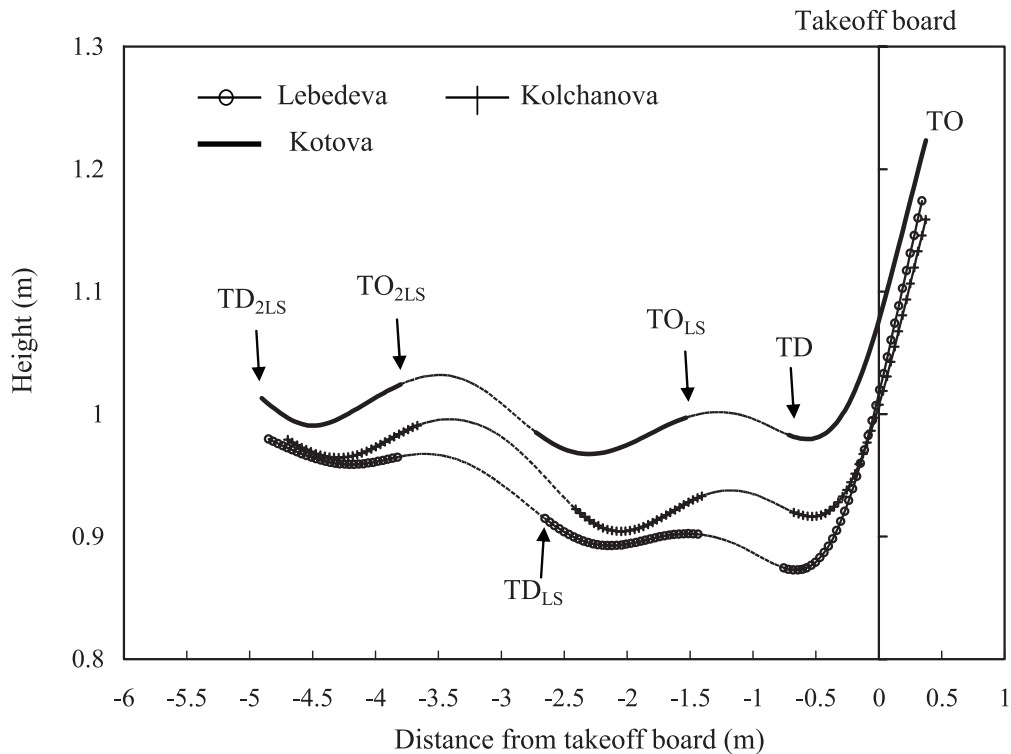


Figure 4. Path of the center of gravity of the body from the touchdown (TD) of the 2nd last stride to the toe-off (TO) of the takeoff

Table 10. Joint angles of the takeoff leg, trunk angle, hip and shoulder rotation angles, and leg angles at the touchdown (TD) and toe-off (TO) of the takeoff

Parameter	Lebedeva	Kolchanova	Kotova	1991 Tokyo World Championship*
Knee _{TD} (deg)	159.5	159.4	152.4	163.6±3.7
Knee _{MKF} (deg)	145.0	143.9	145.8	144.1±2.7
Knee _{TO} (deg)	163.9	163.5	164.5	170.4±4.1
Flex. / Ext. (deg)	-14.5 / 18.9	-15.4 / 19.6	-6.5 / 18.6	-19.5±3.7 / 26.3±3.3
Maximum Knee Flex. Vel. (deg/s)	-360.9	-392.4	-181.7	
Trunk - Sagittal plane _{TD} (deg)	-2.2	-3.9	-4.1	-2.4±2.7
Trunk - Sagittal plane _{TO} (deg)	8.3	6.2	-1.3	-0.7±2.8
Shoulder rotation TD (deg)	13.7	23.7	33.1	23.0±3.8
Shoulder rotation TO (deg)	-7.9	-7.5	0.8	-18.9±9.1
Hip rotation TD (deg)	-12.9	-4.9	4.1	-5.3±4.8
Hip rotation TO (deg)	19.8	14.3	15.3	6.4±4.1
Leg angle Sagittal plane _{TD} (deg)	41.1	37.9	32.2	-
Leg angle Sagittal plane _{TO} (deg)	-26.6	-25.2	-27.5	-
Leg angle Frontal plane _{TD} (deg)	-6.1	-7.7	-4.3	-
Leg angle Frontal plane _{TO} (deg)	-8.1	-5.2	-6.2	-

* Fukashiro *et al.* (1994)

手とコルチャノワ選手は鉛直速度をより大きくし、高い跳躍をすることによって、コトワ選手は踏切での水平速度の減少をより小さくすることによって小さい助走速度にも拘わらず跳躍距離を獲得していたことが明らかとなった。

踏切脚膝関節最大屈曲時までに獲得した鉛直速度は、レベデワ選手は離地時の60.8%、コルチャノワ選手は57.1%、コトワ選手は39.1%であった。この結果は、これまでのLeesら (1993, 1994) の報告 (女子, 64%以上; 男子, 70%以上) に比べて顕著に小さい値であることがわかる。上述したように、コトワ選手はベスト跳躍でさえ40%程度の獲得であったが、踏切後半における鉛直速度の獲得が大きく、離地時には一流女子選手の平均範囲内の3.18m/sの鉛直速度を獲得していた。このような結果は、コトワ選手の速度獲得の技術は他の選手と異なるものであったことを示唆していると考えられる。

3.2.3 身体重心の移動

図4は踏切2歩前から踏切までの身体重心の移動を示したものである。女子上位3選手の身体重心の下降パターンは男子選手と類似していた。一方、その下降量は女子選手は男子選手に比べ少なかった (レベデワ, 5.0cm; コルチャノワ, 6.8cm; コトワ, 3.9cm)。

3.2.4 踏切局面における関節および脚角度

表10は踏切脚関節角度, 体幹角度, 踏切接地時および離地時における肩と腰の回転角度を示したものである。また, 図5は踏切2歩前から踏切までの足跡および身体重心の移動を上方から見たものである。

上位3選手の最大屈曲時の膝関節角度は143° ~ 146° の範囲であり, 踏切前半における屈曲量はそれぞれ, 14.5° (レベデワ), 15.4° (コルチャノワ), 6.5° (コトワ) であり, 男子上位3選手と比較すると女子3選手の屈曲は少なかった。これまで

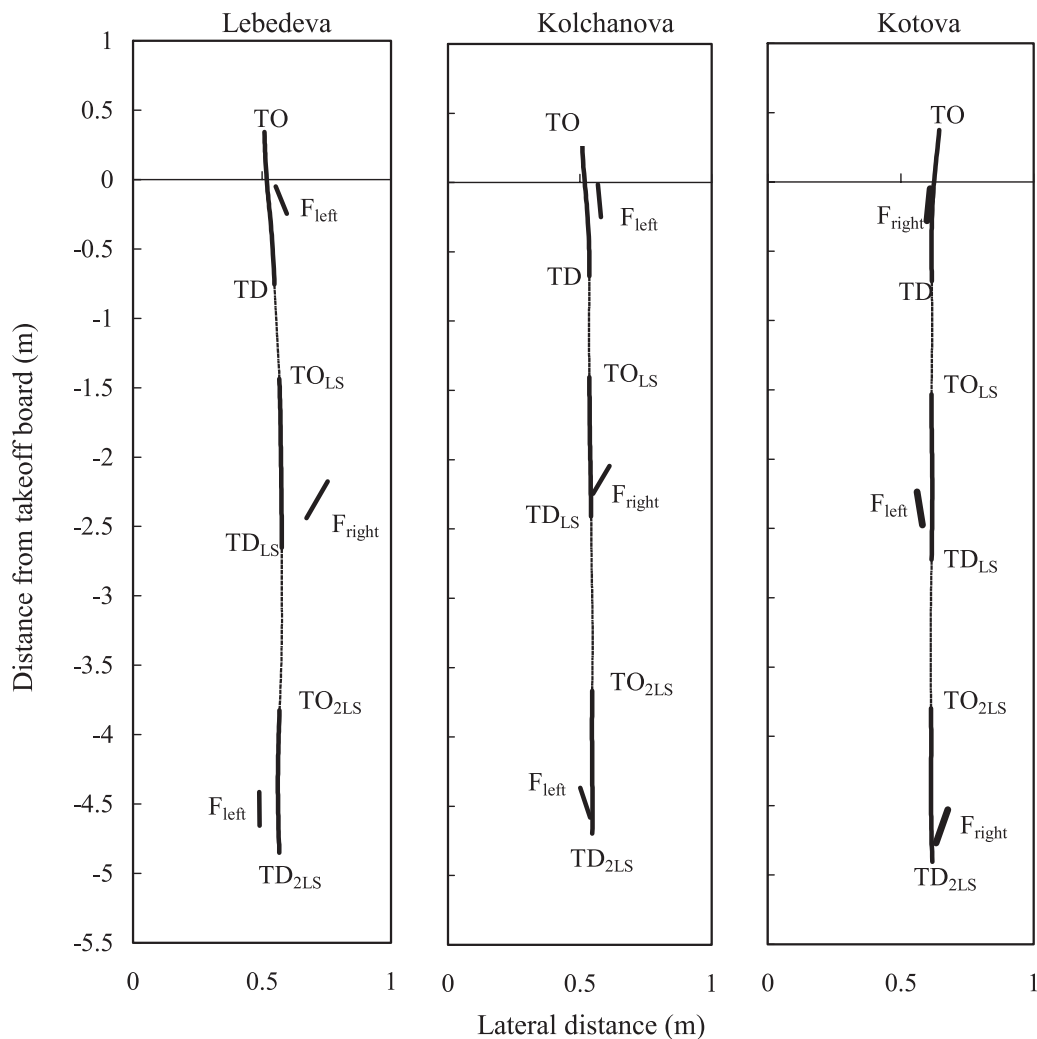


Figure 5. Overhead views of paths of the center of gravity of the body from the 2nd last stride to the takeoff and footprint of each support phase

の報告においても女子選手の屈曲量は男子選手に比べ小さいことが報告されている（女子， $19.5 \pm 3.7^\circ$ ；男子， $21.1 \pm 4.3^\circ$ ，世界陸上東京大会）。このような結果は，男子選手に比べ脚筋力に劣る女子選手は，踏切での効果的な速度獲得のために，脚の屈伸を抑え回転による速度の獲得を行うことがより重要であることを示唆している可能性がある。

踏切接地時における脚角度はそれぞれ -6.1° （レベデワ）， -7.7° （コルチャノワ）， -4.3° （コトワ）であった。また離地時の脚角度も負の値であった（レベデワ， -8.1° ；コルチャノワ， -5.2° ；コトワ， -6.2° ）。これらの結果は，男子選手と同様に女子上位3選手の踏切脚は，踏切局面にわたって内傾していたことを示している。また，踏切脚の内傾は女子選手の方が男子選手よりも大きかった。

図5においても確認できるように，女子上位3選手は踏切脚をかなり内傾させていることから，踏切足は踏切前のストライドよりもかなり内側に位置して

いる。このような踏切脚の振る舞いは，すでに述べたように鉛直速度を高めるために踏切脚外転筋群を動因させていることを示しているかもしれない。

参考文献

- Arampatzis, A., Brüggemann, G.-P., Walsch, M. (1999) Long jump. In Biomechanical analysis of the jumping events. In Biomechanical Research Project Athens 1997: Final Report (edit by G.-P. Brüggemann, D. Koszewski and H. Müller), 82-102.
- 深代千之, 若山章信, 小嶋俊久, 伊藤信之, 新井健之, 飯干明, 淵本隆文, 湯海鵬. (1994). 走幅跳のバイオメカニクス. 世界一流競技者の技術, ベースボールマガジン社, 135-151.
- Hay, J. G. (1986). The Biomechanics of the Long Jump. In K. B. Pandolf (ed.).

Exercise and Sports Sciences Reviews
(Volume 14) , 401-446. New York: Macmillan
Publishing Co.

- Lees, A., Derby, D., and Fowler, N. (1993) .
A Biomechanical Analysis of the Last Stride,
Touch-down, and Takeoff Characteristics of
the Women' s Long Jump. Journal of Sports
Sciences, 11, 303-314.
- Lees, A., Graham-Smith, P., and Fowler, N.
(1994) . A Biomechanical Analysis of
the Last Stride, Touchdown, and Takeoff
Characteristics of the Men' s Long Jump.
Journal of Applied Biomechanics, 10, 61-78.
- Okuyama, K., Ae, M., Yokozawa, T. (2003)
Three dimensional joint torque of the
takeoff leg in the fosbury flop style.
Abstract and Proceedings. International
Society of Biomechanics XIXth Congress.
(CD-ROM) .