ハードル走における踏切時間を短縮する要因

山 田 憲 政¹⁾ 宮 下 憲²⁾

Factors reducing the takeoff time in hurdling

Norimasa Yamada¹ and Ken Miyashita²

Abstract

The purpose of this paper was to obtain the basic data necessary for studying the technique to reduce the takeoff time in hurdling. For our experimental subjects, we used two of Japan's top class hurdlers. We analyzed the center of gravity (CG) height from the touchdown point of the last stride to the point of toe-off on the takeoff, and the vertical reaction forces of the support phase of the last stride and the takeoff phase.

The results were summarized as follows;

1) The vertical velocity of the CG of the last stride was 0.35 m/s or 45% less in the toe-off compared to the touchdown. Thus, reducing the vertical velocity of the toe-off of the last stride and the CG height of the airborne phase of the last stride would lead to a reduction in the vertical momentum of the body in the touchdown, and was therefore effective in reducing the takeoff time.

2) The vertical momentum at touchdown was smaller than that of the last stride, but the initial peak of the vertical reaction force was 1.9 times greater. This force was effective in reducing the vertical momentum of the body at touchdown in a short time, and was therefore considered to be an important factor for reducing the takeoff time.

(Japan J. Phys. Educ., 35: 53-61, June, 1990.)

結 言

はじめに、本研究で用いるハードル走の用語の定義をスティック図を用いて図1に示す。

ハードル走が走と異なる点の1つとして、ハードルを越えるために身体重心(CG)を少なくともハードルより高く上昇させなければならないことが挙げられる。そのために、ハードル走における踏切の離地時のCGの鉛直方向の速度は、走の離地時のそれよりも大きい必要がある。樋口ら^{7),8)}は、ハードル走の踏切動作を力学的に分析し「踏切局面においてはハードルを越すために身体重心を積極的に上方に移動させている。」と報告している。

Mann and Herman¹⁴⁾は、ロサンゼルスオリンピック(1984年)の女子100mハードルの決勝時のハードラーの動作を分析し、踏切時間が短いことが優れたハードラーの1つの要因であることを報告している。しかし、この踏切時間を短縮する要因を明らかにした研究は見当たらない。

走り高跳びや走り幅跳びの踏切に関する研究では、踏切局面ばかりでなく、踏切に至るまでの準備局面の重要性が報告されている^{1),6)}が、ハードル走の踏切においても、短時間で走より高い鉛直方向速度を得るために有利になるような準備局面があると考えられる。陸上競技の指導書¹⁰⁾にはハードル間疾走について「第一歩目

1) 北海道大学教育学部
〒060 札幌市北区北11条西7丁目

2) 筑波大学体育科学系
〒305 つくば市天王台1-1-1

1. Faculty of Education, Hokkaido University, Sapporo-City, Hokkaido (060),

2. Institute of Health and Sports Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba city, Ibaraki (305)

TD(Touchdown): first instant of contact of the support foot with ground (着地時)
 TO(Toe-off): last instant of contact of the support foot with ground (離地時)
 LP(Lowest point): Lowest point of CG height during the support phase

Fig. 1 Definitions of the hurdling terms

はハードル間疾走のリズムを生み出すとともに一定の速度を維持する。踏切一步前では生み出されたリズムをある程度調節する。」と、踏切一步前の重要性が述べられている。どのようにリズムを調節するかについては記されていないが、この調節は次の踏切に有利になるように行なわれると推察される。また、磯と石井¹¹⁾のハードル間疾走中のCGの上下動のデータも、踏切一步前では踏切二歩前と比較してCGの上下動が減少することを示している。

本研究の目的は、ハードル走の踏切時間を短縮する技術を究明するための基礎資料を得ることであり、日本国内のトップレベルのハードラーの踏切一步前の着地時から踏切の離地時までのCGの上下動、および踏切一步前の支持局面と踏切局面の地面反力の鉛直成分の分析を行

なった。

方 法

1. 実験方法

1-1. 被験者

被験者は110mハードルの日本国内のトップレベルのハードラー2名を用いた。このうちの1人は110mハードルの手動日本記録保持者である。被験者の身体特性および110mハードルの最高タイムを表1に示した。

1-2. 実験の装置と条件

本研究では、図2に示した条件で55mハードル走を全力で行なわせた。4台目のハードルの踏切一步前と、踏切における地面反力をキスラー社製 Force plate を用いて測定するとともに、2台の16mm高速カメラ(Photo Sonic 1PL,

Fig. 2. Construction of experimental instruments

Table 1. Characteristics of subjects

Subject	Height (m)	Mass (kg)	Best record (s)
S	1.80	70.0	13.9
W	1.77	68.0	14.2

Milliken DBM-5D) を用いてこの範囲の動作を撮影した。この時の撮影コマ数は、パルスジェネレータからの電気信号(100Hz)をフィルムに写し込むことによって算出したが、それぞれ毎秒126コマ、125コマであった。

force plate を用いて運動中の足に作用する外力を測定する場合、force plate を踏まなかったり、無理に force plate を踏んだ試技は分析に用いられないため、自然なフォームで force plate を踏むまで試技を繰り返し行なうのが一般的である^{13),20)}。しかし、ハードル走の場合はハードル間の距離があらかじめ決定しており、その間を3歩で走るため、ほぼハードルに対して足の接地する位置が決定する。よって、本研究では試合の時と同様に、force plate を踏むことを意識させずに全力で5台のハードルを走りきらせたが、2人の被験者とも1回で2台の force plate を自然なフォームで踏むことがで

きた。

DLT 法¹⁹⁾を用いて2台のカメラから得られる2次元座標から3次元座標を得るため、あらかじめ撮影範囲内の9箇所(45点)に校正器(直径5cmの白い玉が50cm間隔で5個縦につながったもの)を設置し、2台のカメラに写し込んだ。

2. 分析方法

2台のカメラで撮影した2人の被験者のフィルムは、コマ毎に23点の身体の各分析点およびハードルの各コーナーの4点の計27点の座標をディジタイザーにより読み取り、マイクロコンピュータに入力した。2台のカメラから得られた27点の2次元座標は、踏切の着地時のコマを基準に120fpsのサンプリングで3次スプライン関数を用いて補間した。このようにして、2台のカメラから得られた27点の2次元座標を同期させDLT法を用いて3次元座標を得た。3次元座標はバターワース型デジタルフィルタを用いて10Hzの遮断周波数で平滑化した。なお、校正点の座標値の実際の値と、DLT法で算出した校正点の座標値の最大誤差そして標準誤差はそれぞれ、前後方向で0.04と0.0016m、左右方向で0.042と0.0016m、上下方向で0.013と0.003m

Fig. 3. Vertical velocity for subject S from touchdown of the last stride to toe-off of the takeoff. Solid line represents velocity from film data and broken line represents velocity calculated using force data.

であった。各被験者の身体重心位置は、Chandler et al.⁵⁾の値を用いて算出した。

地面反力のデータはA/D変換器を介し、サンプリングタイム5msでデジタル化し、マイクロコンピュータに取り込んだ。

結 果

1. CGの鉛直方向速度について

CGの鉛直方向速度は、フィルム分析から得られる座標値を数値微分して求める方法と、地面反力を用いて以下の式によって算出する方法が考えられる。

$$V_{yi} = V_{y0} + \frac{1}{m} \int_0^i (F_{yi} - mg) dt \quad (1)$$

ここで、 V_{yi} は時間*i*における垂直方向のCGの速度で、 $i=0$ が着地時であり V_{y0} はフィルム分析から得る必要がある。 m は被験者の身体質量、 g は重力加速度、 F_{yi} は時間*i*における地面反力の鉛直成分である。図3に被験者Sのフィルム分析から得られたCGの鉛直方向速度（実線）と、地面反力を用いて(1)式から算出したCGの鉛直方向速度（波線）の踏切一步前の着地時から踏切までの時間的变化を示す。2つの波形は、振幅、位相、そして極値とも非常に類似

している。本研究では、(1)式から算出した速度を用いることにした。

2. 鉛直方向地面反力とCGの上下動

図4に被験者Sの踏切一步前の着地時から踏切の離地時までのCGの高さと（波線）、その間に足に作用する地面反力の鉛直成分（実線）の時間的变化を示す。この2つの波形は時間的に同期されて示されている。CGの波形上に示されている1から7までの数字の1から3は、踏切一步前の着地時(TD)、CGが最も下降した瞬間(LP)、離地時(TO)を示しており、同様に、5から7は踏切におけるTD、LP、TOを示している。また、4は踏切一步前の滞空中のCGが最も上昇した瞬間(HP)を表している。これらの各数字に示されるポイントに対応したスティック図を図の上に示した。同様に、被験者Wについては図5に示した。また、踏切一步前の支持時間とTDからLPおよびLPからTOまでの時間、支持時間に対する割合、そしてそれらの間のCGの鉛直方向の変位をまとめたのが表2である。踏切一步前では2人の被験者ともTD-LPよりもLP-TOの時間そしてCGの変位ともにやや大きい値を示した。これに対し踏切では、TD-LPの支持時間に対する割合は被

Fig. 4. Vertical reaction forces during support phases of the last stride and takeoff (—), and CG height from touchdown of the last stride to toe-off of the takeoff (.....) for subject S. The numbers along the broken line represent the following: 1, Touchdown of the last stride 2, Lowest point of CG height during the last stride 3, Toe-off of the last stride 4, Highest point of CG height during airborne phase of the last stride 5, Touchdown of the takeoff 6, Lowest point of CG height during the takeoff 7, Toe-off of the takeoff

Table 2. Support times and CG displacements during the last stride and during the takeoff

Subject		Last stride			Takeoff		
		TD-LP	LP-TO	TD-TO	TD-LP	LP-TO	TD-TO
S	Time (s)	0.051	0.066	0.116	0.019	0.101	0.119
	Time (%)	43.530	56.470	100.000	15.550	84.450	100.000
	Dis. (m)	-0.025	0.027	0.002	-0.006	0.137	0.131
W	Time (s)	0.053	0.077	0.130	0.016	0.123	0.139
	Time (%)	40.540	59.460	100.000	11.510	88.490	100.000
	Dis. (m)	-0.024	0.038	0.014	-0.004	0.187	0.183

TD: touchdown, LP: lowest point of CG height, TO: Toe-off

験者 S で 15.55%, W で 11.51% と非常に少なく, この間の CG の変位もそれぞれ LP-TO 間の 1/20, 1/46 と非常に小さい。踏切一步前と踏

切での支持時間は 2 人の被験者ともほぼ等しい値を示したことから, 踏切では踏切一步前と比較して, CG の下降時間および下降距離が減少

Fig. 5. Vertical reaction forces during support phases of the last stride and takeoff (—), and CG height from touchdown of the last stride to toe-off of the takeoff (-----) for subject W. The numbers along the broken line represent the following: 1, Touchdown of the last stride 2, Lowest point of CG height during the last stride 3, Toe-off of the last stride 4, Highest point of CG height during airborne phase of the last stride 5, Touchdown of the takeoff 6, Lowest point of CG height during the takeoff 7, Toe-off of the takeoff

Table 3. Vertical velocities of CG and vertical momentums of the whole body at touchdown and toe-off of the last stride and the takeoff

Subject			Last stride		Takeoff	
			TD	TO	TD	TO
S	Velocity	(m/s)	-0.78	0.43	-0.49	2.05
	Momentum	(kg•m/s)	-54.60	30.10	-34.30	143.50
W	Velocity	(m/s)	-0.78	0.47	-0.43	2.29
	Momentum	(kg•m/s)	-53.04	31.96	-29.10	155.72

TD: touchdown, TO: toe-off

し、CGの上昇の占める割合が大きいといえる。

力波形は、走運動における地面反力の報告と同様2つのピークをもつ二峰性の波形^{3),15),16),18)}を示した。2人の被験者とも踏切一步前に対し

踏切での地面反力は、第一のピークでは約1.9倍、第2のピークでは約1.3倍の値を示した。

3. 鉛直方向の速度・運動量

表3に踏切一步前と踏切における着地時と離

地時の鉛直方向の速度と運動量を示す。上方の速度を正としている。踏切では、離地時の速度の絶対値は着地時に対して、被験者 S では約 4 倍、被験者 W では約 5 倍の値を示し増加したのに対し、踏切一步前では被験者 S では約 0.55 倍、W では約 0.6 倍の値を示し減少した。

考 察

1. 2 人の被験者のデータからの考察について

本研究で用いた被験者は日本トップクラスのハードラー 2 人である。得られる結果は競技レベル、身体の解剖学的特性等によって変わってくると考えられる。しかし、ハードル走の踏切時間短縮という本研究の目的からデータを眺めた場合、2 人の被験者ともに共通する結果のみで、相反する結果は得られず踏切の目的に添うものであった。よって、本研究で得られた結果はハードル走の踏切における上級ハードラーの共通の特徴であると考えて良いと判断した。

2. 踏切時間を短縮する要因について

走およびハードル走ではそのパフォーマンスは水平方向の速度で競われる。よって、いかに水平方向の速度を落とさないようにハードルを超えるかがハードル走のパフォーマンスを決定する主な要因となる。ここで、滞空局面が含まれる人の移動様式である走は、小さな跳躍の連続と考えることができ²⁾、その意味では、1 歩 1 歩の跳躍の中で重力に対して身体的位置エネルギーを変動させることが走運動の 1 つの本質であると考えられる。よって、走行中にハードルを飛び越えるハードル走では、CG の上下動を分析することがその運動の本質を追及する 1 つの重要な方法であると考えられる。

連続した跳躍では下降する運動量を一旦 0 とし、再び上昇する運動量を得る必要がある。従って、地面反力の鉛直成分は、身体の重量に対して、身体の鉛直方向運動量を変化させるために作用される。よって、踏切時間を短くするには次の 3 つの条件が考えられる。

- 1) 着地時の鉛直方向の運動量を小さくする。
- 2) 短時間に下降の運動量を 0 とする。
- 3) 短時間にハードルを超えるために必要な上昇の運動量を得る。

1) については、踏切の一步前で決定されることから、このことは踏切時間短縮の準備動作と考えられる。走運動中の着地時と離地時の鉛直方向速度の大きさはほぼ等しい値を示す⁴⁾のに対し、本研究で用いた 2 人の被験者ともにハードル走での踏切一步前では離地時の方が着地時より約 0.35m/s、割合にして約 45% 少ない値を示した。その結果、踏切一步前の滞空中の CG の上昇距離も減少し、踏切の着地時の鉛直方向の速度・運動量を小さくすることになる。

このように、踏切一步前の離地時の鉛直方向速度を小さくし、踏切一步前の滞空局面の CG の上昇距離を小さくすることは、踏切における着地時の身体の鉛直方向運動量を減少させることにつながり、踏切時間を短縮するために効果的であると考えられる。

2) については、運動量を短時間に 0 にするためには、短時間に大きな力が作用する必要がある。そのためには、踏切の着地直後に見られる大きな衝撃力は有効であると考えられる。Munro et al.¹⁶⁾は、各種走速度における地面反力を測定し、走速度の増加に伴い、着地中の鉛直方向の速度変化量の増加と、着地直後の衝撃力の鉛直成分の増加を報告している。この結果は、走運動における着地時と離地時の鉛直方向の速度の大きさがほぼ等しいことから、走速度の増加に伴い、着地時の鉛直方向の速度・運動量が増加し、着地直後の衝撃力が増加すると言い換えることができる。しかし、本研究で用いた 2 人の被験者ともに、着地時の運動量が踏切より踏切一步前の方が大きいのに対し（被験者 S で 1.6 倍、被験者 W で 1.8 倍）、着地直後に見られる地面反力の第一ピークは踏切の方が踏切一步前より大きくなり（2 人の被験者ともに 1.9 倍）、着地時の鉛直方向運動量が増すと着地直後の衝撃力も増すという結果と逆の結果を示した。このことは、ハードル走の踏切においては

Table 4. Impulses, operation times, and mean forces in the decreasing and increasing phases of the vertical momentum of the whole body during the last stride and during the takeoff

Subject			Last stride		Takeoff	
			VMDP	VMIP	VMDP	VMIP
S	Impulse (N•s)		54.600	30.100	34.300	143.500
	Time (s)		0.051	0.066	0.019	0.101
	Mean force (N)		1081.188	459.542	1854.054	1427.861
W	Impulse (N•s)		53.040	31.960	29.100	155.720
	Time (s)		0.053	0.077	0.016	0.123
	Mean force (N)		1010.286	415.065	1818.750	1266.016

VMDP: decreasing phase of the vertical momentum of the whole body

VMIP: increasing phase of the vertical momentum of the whole body

いかに短時間で下降の運動量を 0 にすることが重要であることを示唆しているものと言える。どのようにしたら踏切の着地時に大きな衝撃力が生じ、着地時の鉛直方向運動量をいち早く 0 にすることが可能かについては、本研究の分析方法から得られる結果からでは言及することはできないが、着地時の緩衝動作が主に足関節と膝関節で行なわれている¹⁷⁾ことから、着地時にこれらの関節による緩衝動作を余り行なわないことが着地直後の衝撃力を大きくする技術であると考えられる。串間¹³⁾は、Diasenta の提唱したハードル走の踏切技術である Griffe 動作（踏切局面の着地時に膝関節をほぼ伸展させたままで着地するという動作特徴を持つ⁹⁾）を大学陸上競技部員 3 名に対し行なわせたところ、「踏切脚接地中の身体重心を、早期に鉛直方向に引き上げることができた」と報告しているが、このことは、本研究の結果を実践的に裏付けているものと言える。

3) については、鉛直方向の運動量が 0 となった後、ハードルを超えるために上昇の運動量をいち早く獲得する必要がある。鉛直方向の地面反力を、鉛直方向運動量が 0 になるまでの局面（VMD 局面）と、その後離地するまで運動量が再び増加する局面（VMI 局面）に分け、この局面の身体重量を差し引いた平均力を次式で算出した。

$$\bar{F}_{VMD} = \int_0^{t_1} (F_{yi} - mg) dt / t_1 \quad (2)$$

$$\bar{F}_{VMI} = \int_{t_1}^{t_2} (F_{yi} - mg) dt / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{F}_{VMD}$ は VMD 局面での平均の力、 $\bar{F}_{VMI}$ は VMI 局面での平均の力、そして着地時を 0 とし、 t_1 が鉛直方向の速度が 0 となる時間、 t_2 が離地の時間である。その結果を表 4 に示した。踏切の VMI 局面では 2 人の被験者とも踏切一步前の約 3 倍の平均力を示し、作用時間も約 1.5 倍を示した。この局面では、1000N 以上の力を踏切の接地時間の約 80% の時間作用させてハードルを超えるための鉛直方向の運動量を得ている。これらのことから、踏切一步前と踏切では支持時間がほぼ等しいが、踏切では踏切一步前と比較して、VMD の局面の時間を減少させることにより VMI 局面の時間を増加させ、且つ、VMI 局面に作用する力も増加させる必要がある。しかし、走り高跳びなどとは異なり、できるだけ大きい離地時の鉛直方向速度を得ることが目的ではなく、むしろハードルを超えるために必要最小限の鉛直方向速度を得ることが目的であり、よって、この局面では大きな力を作用させるばかりではなく、その力の大きさと作用時間を調整する能力も必要となってくると考えられる。

要 約

本研究は、ハードル走の踏切時間を短縮する技術を究明するための基礎資料を得るために、2名の国内トップレベルのハードラーを用い、踏切一步前の着地時から踏切の離地時までのCG高、および踏切一步前の支持局面と踏切局面の地面反力の鉛直成分を分析した。得られた結果は以下のとおりである。

1) 踏切一步前のCGの鉛直方向速度は、離地時の方が着地時より約0.35m/s、割合にして約45%少ない値を示した。このように、踏切一步前の離地時の鉛直方向速度を小さくし、踏切一步前の滞空局面のCGの上昇距離を小さくすることは、踏切における着地時の身体の鉛直方向運動量を減少させることにつながり、踏切時間を短縮するために効果的であると考えられた。

2) 踏切の着地時の鉛直方向運動量は踏切一步前のそれより小さいが、着地直後に生じる鉛直方向の衝撃力は約1.9倍の値を示した。この大きな衝撃力は、着地時に身体の持つ鉛直方向の運動量を短時間に減少させることに対して有効であることから、踏切時間短縮の重要な要因であると考えられた。

引用・参考文献

- 1) Ae, M., Sakatani, Y., Yokoi, T., Hashiura, Y. and Shibukawa, K., "Biomechanical analysis of the preparatory motion for takeoff in the Fosbury flop," *Int. J. Sport Biomechanics*, 2: 66-77, 1986.
- 2) アレキサンダー(平本幸男 訳), バイオメカニクス, 講談社, 1976. pp. 49-56.
- 3) Bates, B.T., James, S.L., Oslering, L.R. and Sawhill, J.A., "Effects of running on ground reaction force," in Morecki, A., Fiedelus, K., Kedzior, K. and Wit, A. (Eds.), *Biomechanics*, VII-B, University Park Press: Baltimore, 1981. pp. 226-33.
- 4) Cavagna, G.A., Saibene, F.P. and Margaria, R., "Mechanical work in running," *J. Appl. Physiol.*, 19-2: 249-56, 1964.
- 5) Chandler, R.F., Clauser, C.E., McConville, J.T., Reynolds, H.M. and Young, J.W., "Investigation of inertial properties of the human body," *Aerospace Medical Research Laboratory Technical Report*, Wright Patterson Air Force Base: Ohio, 1975. pp. 74-137.
- 6) Hay, J.G., Miller, J.A. and Canterna, R.W., "The technique of elite male long jumpers," *J. Biomechanics*, 19-10: 855-66, 1986.
- 7) 樋口憲生・湯浅景元・松尾彰文・福永哲男「地面反力から見たハードリングの特性」*体育の科学*, 38: 313-17, 1984.
- 8) 樋口憲生・浅川正一・湯浅景元・斉藤昌久・平岡寿弘「ハードリングの力学的分析」*中京体育学研究*, 23: 44-51, 1982.
- 9) 平岡秀雄「Drut guyの走法—110mハードル—」*東海大学体育学部紀要*, 7: 133-38, 1977.
- 10) ホメソコフ(織田幹雄・小野耕三 訳), 陸上競技トレーナー用教科書, ベースボール・マガジン社, 1978. pp. 241-42.
- 11) 磯 繁雄・石井喜八「110M障害走の記録向上の要因分析」*日本体育学会第36回大会号*, p. 620, 1985.
- 12) 串間教郎「ハードル走の踏切技術に関する力学的考察」*筑波大学体育科学系修士論文*, 1987. pp. 55-65.
- 13) Mann, R.V., "A kinetic analysis of sprinting," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 13: 325-28, 1980.
- 14) Mann, R. and Herman, J., "Kinematic analysis of Olympic hurdle performance: Women's 100 meters," *Int. J. Sport Biomechanics*, 1: 163-73, 1985.
- 15) 宮地 力・小林一敏・牛山幸彦「ランニング中の着地衝撃の粘弾性モデルによるシミュレーション」*筑波大学体育科学系紀要*, 11: 253-63, 1988.
- 16) Munro, C.F., Miller, D.I. and Fuglevand, A.J., "Ground reaction forces in running: A reexamination," *J. Biomechanics*, 20-2: 147-55, 1987.
- 17) 永田 晟・室 増男・日丸哲也「緩衝能の測定に関する研究」*体育学研究*, 24-1: 51-58, 1979.
- 18) Nigg, B.M., Denoth, J. and Neukomm, P.A., "Load on the human body," in Morecki, A., Fiedelus, K., Kedzior, K. and Wit, A. (Eds.), *Biomechanics*, VII-A, University Park Press: Baltimore, 1981. pp. 88-105.
- 19) Walton, J.S., "Close-range cine-photometry: Another approach to motion analysis," in Terauds, J. (Ed.), *Science in Biomechanics Cinematography*, Academic Publishers: California, 1979. pp. 69-97.
- 20) 山田憲政・小林一敏・関岡康雄「走行中の下肢の運動のフーリエ級数による分析」*体育学研究*, 31-1: 67-76, 1986.

(平成元年11月30日受付)