

日本トップレベルの女子走高跳競技者における踏切動作のキネマティクスの特徴

柴田篤志¹⁾ 杉浦澄美¹⁾ 荻山靖²⁾ 清水悠³⁾ 奥野哲弥¹⁾ 澤田尚吾¹⁾ 小山宏之⁴⁾

1) 筑波大学大学院 2) 山梨学院大学 3) 島根大学 4) 京都教育大学

1. はじめに

近年の国内における女子走高跳のパフォーマンスレベルをみると、1.90m以上を記録した競技者はおらず、2019年の日本ランキング1位記録は1.78mであり、オリンピックや世界選手権など世界大会への出場目安となる1.95m前後と比較すると厳しい状況にあると考えられる。このような状況に対して、杉浦ほか(2019)は日本の女子走高跳競技者の踏切局面における特徴について、世界の一流競技者との比較から検討をしており、今後も継続した基礎的なデータの収集が必要であると考えられる。

そこで、本稿では2019年日本陸上競技選手権大会で入賞した女子走高跳競技者を対象として、踏切動作の基礎的パラメータを報告するとともに、パフォーマンスに影響する基礎的パラメータを提示することを目的とした。

2. 方法

2.1 分析対象者および分析対象試技

分析対象者は2019年日本陸上競技選手権大会で8位までに入賞した女子走高跳競技者のうち、成功試技を撮影できた7名とし、各競技者の最も記録の高い試技を分析対象試技とした。

2.2 データ収集およびデータ処理

競技会における全ての跳躍をマットの右後方および左後方に固定した2台のハイスピードカメラ(LUMIX FZ-300, Panasonic社製)を用いて240fpsで踏切2歩前からバークリアまでを固定撮影した。撮影範囲はバーの中心を原点に左右(4m)、助走路方向に6mとし、試技の撮影前に撮影範囲内の計測点にキャリブレーションポールを立てて撮影した。なお、この撮影は日本陸上競技連盟科学委員会の活動として行われたものである。

撮影したVTR画像から、踏切2歩前離地の5コマ前からバークリアまでの身体分析点23点をビデオ動作分析システム(Frame DIAS IV, DHK社製)を用いてデジタイズを行った。そして、2台のカメラの身体分析点とコントロールポイントの座標から、3次元DLT法を用いて身体分析点の3次元座標を算出した。なお、3次元座標はバーの midpoint を原点とし、地面と平行かつバーと水平の軸をX軸、地面と水平かつバーと垂直に交わる軸をY軸、鉛直軸をZ軸とする右手座標系を静止座標系と定義した。これらの身体分析点の座標はWells and Winter (1980)の方法を用いて分析点ごとに最適遮断数周波数を決定し、Butterworth low-pass digital filterを用いて4.8Hzから9.6Hzで平滑化した。

2.3 算出項目

身体分析点の3次元座標から、阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて部分および全身の重心座標算出した。それらをもとに以下の項目を算出した。

①身体重心位置

H0: 踏切接地時の身体重心高

H1: 踏切離地時の身体重心高

最大重心高: 踏切離地時の鉛直速度およびH1より算出
(最大重心高 = $H1 + \frac{(VCGV_{T0})^2}{2g}$)

ここで、 $VCGV_{T0}$ は離地時の身体重心鉛直速度、 g は重力加速度 9.81m/s^2 とした。

H2: 空中における身体重心の上昇高

(最大重心高 - H1)

H3: 最大重心高とバーの高さとの差

②踏切位置: 踏切接地時の踏切足つま先とバーとのY軸方向の距離

③身体重心速度

身体重心の変位を時間微分することで、身体重心の水平および鉛直速度を算出した。

④水平速度の変化量: 踏切接地時の水平速度と踏切

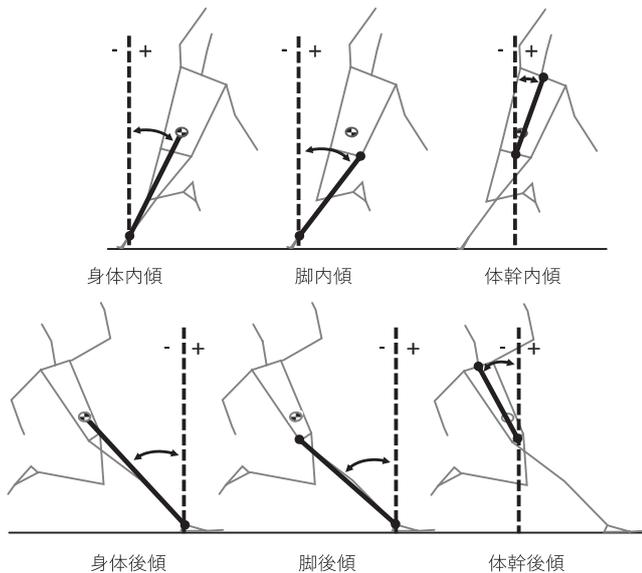


図1 角度定義

離地時の水平速度との差

- ⑤接地時間
- ⑥踏切脚関節角度（伸展および底屈を正，屈曲および背屈を負とする）
- ⑦踏切脚膝関節平均伸展角速度：踏切後半における膝関節伸展量を踏切後半の時間で除した値
- ⑧踏み込み角度および跳躍角度：身体重心速度ベクトルが水平面となす角度
- ⑨全身および部分の内・後傾角度

踏切局面における身体重心速度ベクトルの水平成分（静止座標系のXおよびY成分の合成ベクトル）をY'軸，地面に水平かつY'軸に直行する軸をX'軸，鉛直軸をZ軸とする右手系の移動座標系を定義した。身体重心と踏切脚足関節を結んだ線分，踏切脚股関節と踏切脚足関節を結んだ線分，両肩中点と両股関節中点を結んだ線分をY'-Z平面に投影し，鉛直軸となす角度をそれぞれ全身，踏切脚，体幹の

後傾角とし，正を後傾，負を前傾とした。また，これらの線分をX'-Z平面に投影し，鉛直軸となす角度をそれぞれ全身，踏切脚，体幹の内傾角とし，正を内傾，負を外傾とした（図1）。

2.4 局面定義

踏切脚膝関節の最大屈曲時点を踏切の中間とし，それ以前を踏切前半，以降を踏切後半とした。

2.5 統計処理

各算出項目について，平均値および標準偏差を示した。また，本報告に加えてNicholson et al. (2018) および杉浦ほか (2019) の報告から日本および世界トップレベルの競技者の各算出項目間の関係を検討するために，Pearsonの積率相関係数を算出した。なお，有意水準は5%未満とした。

3. 結果

表1は，対象者の分析試技の公式記録およびパ

表2 接地時間に関するパラメータ

対象者	接地時間(sec)		
	全体	前半	後半
神田	0.154	0.067	0.088
京谷	0.133	0.054	0.079
高橋	0.154	0.071	0.083
仲野	0.154	0.071	0.083
青山	0.142	0.063	0.079
竹内	0.154	0.075	0.079
石岡	0.150	0.075	0.075
Mean	0.149	0.068	0.081
SD	0.008	0.007	0.004

表1 パフォーマンスおよび身体重心位置に関するパラメータ

対象者	記録 (m)	身長 (m)	アーム アクション*	身体重心高 (m)					重心高/身長 (%)		踏切位置 (m)
				H0 (接地)	H1 (離地)	H2	H3	最大(推定)	踏切接地	踏切離地	
神田	1.77	-	s	0.82	1.20	0.75	-0.18	1.95	-	-	0.82
京谷	1.77	1.66	s	0.82	1.16	0.80	-0.19	1.96	49.6	70.0	0.97
高橋	1.74	1.72	s	0.84	1.19	0.73	-0.18	1.92	48.6	69.0	0.72
仲野	1.74	1.66	s	0.77	1.13	0.78	-0.18	1.92	46.5	68.5	0.87
青山	1.74	1.72	s	0.84	1.18	0.64	-0.08	1.82	48.9	68.6	0.86
竹内	1.74	-	s	0.78	1.13	0.66	-0.05	1.79	-	-	0.63
石岡	1.74	1.73	s	0.83	1.19	0.72	-0.18	1.92	47.7	69.0	0.69
Mean	1.75	1.70	-	0.81	1.17	0.73	-0.15	1.90	48.2	69.0	0.79
SD	0.01	0.03	-	0.03	0.03	0.05	0.05	0.06	1.1	0.5	0.11

* s: single arm action, d: double arm action

表3 身体重心速度に関するパラメータ

対象者	水平速度 (m/s)			鉛直速度 (m/s)				踏込角度 (deg)	踏切角度 (deg)	
	接地	離地	変化量	接地	中間	離地	変化量			前半
神田	5.88	3.24	-2.64	-0.10	2.02	3.84	3.94	2.12	-1.0	49.8
京谷	5.65	3.24	-2.41	-0.30	2.43	3.96	4.26	2.73	-3.0	50.7
高橋	5.74	3.43	-2.31	-0.15	2.39	3.80	3.95	2.54	-1.5	47.9
仲野	6.25	3.49	-2.76	-0.25	2.42	3.92	4.17	2.66	-2.2	48.3
青山	5.89	3.65	-2.24	-0.05	2.55	3.55	3.60	2.60	-0.5	44.2
竹内	6.40	4.02	-2.37	-0.09	2.40	3.60	3.68	2.49	-0.8	41.8
石岡	6.12	3.88	-2.24	-0.21	2.82	3.76	3.97	3.03	-2.0	44.1
Mean	5.99	3.57	-2.42	-0.16	2.43	3.78	3.94	2.60	-1.6	46.7
SD	0.25	0.28	0.19	0.09	0.22	0.14	0.22	0.25	0.8	3.1

表4 踏切脚関節角度に関するパラメータ

対象者	足関節角度 (deg)					膝関節角度(deg)					膝関節平均 伸展速度 (deg/s)
	接地	最小	離地	背屈量	底屈量	接地	中間	離地	屈曲量	伸展量	
神田	109.9	98.0	143.6	-11.9	45.6	165.9	143.3	168.6	-22.5	25.2	288.4
京谷	114.7	94.7	138.0	-20.0	43.3	162.7	147.8	168.3	-14.9	20.5	258.5
高橋	126.1	91.6	141.6	-34.5	50.0	163.8	140.2	176.8	-23.6	36.5	438.5
仲野	110.6	97.1	128.6	-13.5	31.5	163.6	140.9	170.9	-22.7	30.0	359.8
青山	107.6	82.4	127.9	-25.2	45.5	165.6	145.0	175.9	-20.5	30.9	389.9
竹内	105.9	91.7	134.2	-14.2	42.5	165.3	136.6	173.7	-28.7	37.1	468.5
石岡	119.2	88.5	141.2	-30.7	52.7	168.2	138.3	173.0	-30.0	34.7	463.1
Mean	113.4	92.0	136.4	-21.4	44.4	165.0	141.7	172.4	-23.3	30.7	381.0
SD	6.6	5.0	5.9	8.3	6.2	1.7	3.6	3.1	4.7	5.7	77.3

パフォーマンスに関するパラメータを示している。

表2は、対象者の踏切接地時間および膝関節角度に関するパラメータを示している。

表3は、対象者の身体重心速度に関するパラメータを示している。

表4は踏切脚の足関節角度、膝関節角度および踏切後半の平均角速度のパラメータを、表5は踏切接地時の身体、脚および体幹の内後傾のパラメータを示している。

図2は最大重心高とH1 およびH2 との関係を示している。最大重心高とH1 およびH2 との間には有意な強い正の相関関係が認められた。

図3は最大重心高と踏切接地時の水平速度および鉛直速度との関係を示している。最大重心高と接地時の水平速度との間には有意な正の相関関係が、接

表5 踏切接地時の内後傾角度

対象者	後傾角度 (deg)			内傾角度 (deg)		
	身体	脚	体幹	身体	脚	体幹
神田	35.2	40.7	15.0	-4.6	0.6	6.7
京谷	30.4	38.2	17.7	-5.4	-0.5	-1.6
高橋	34.4	40.1	12.0	-5.4	0.7	4.6
仲野	36.3	42.7	11.7	-2.9	3.8	10.0
青山	29.3	35.8	13.5	0.0	6.4	4.3
竹内	36.7	43.6	11.7	2.3	10.0	10.7
石岡	32.5	40.5	10.5	0.1	5.1	10.5
Mean	33.6	40.2	13.2	-2.3	3.7	6.5
SD	2.7	2.4	2.3	2.8	3.5	4.1

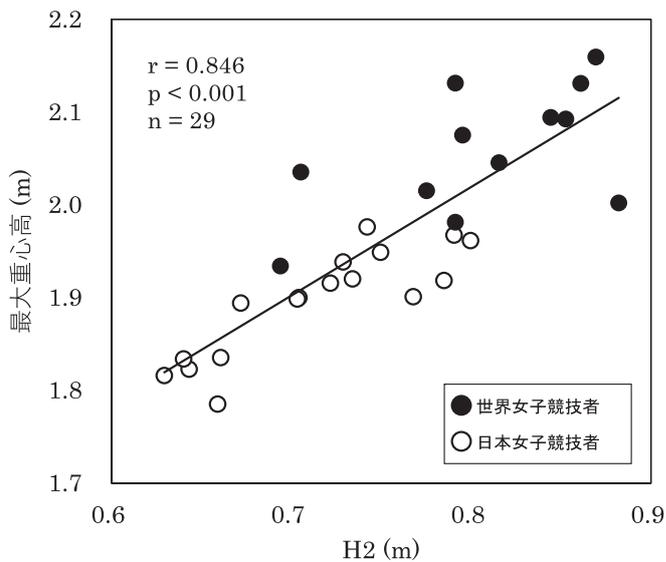
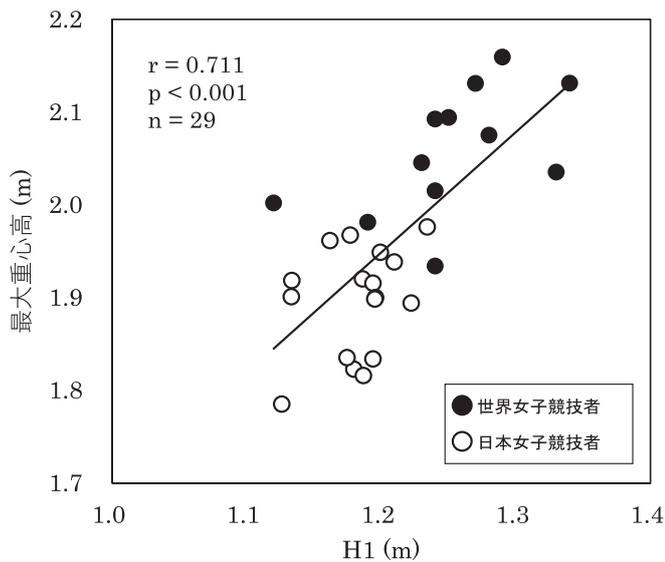


図2 最大重心高とH1およびH2との関係

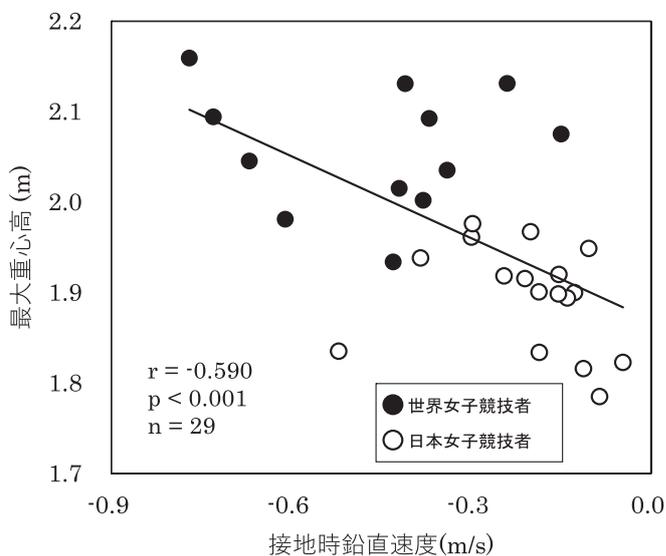
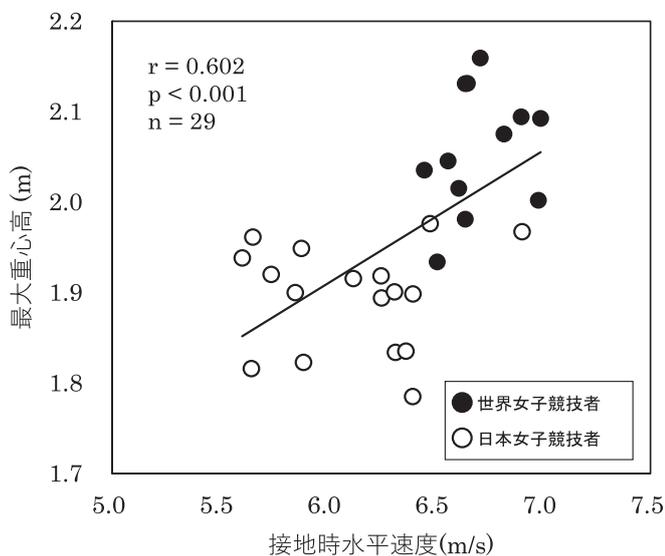


図3 最大重心高と踏切接地時の身体重心速度との関係

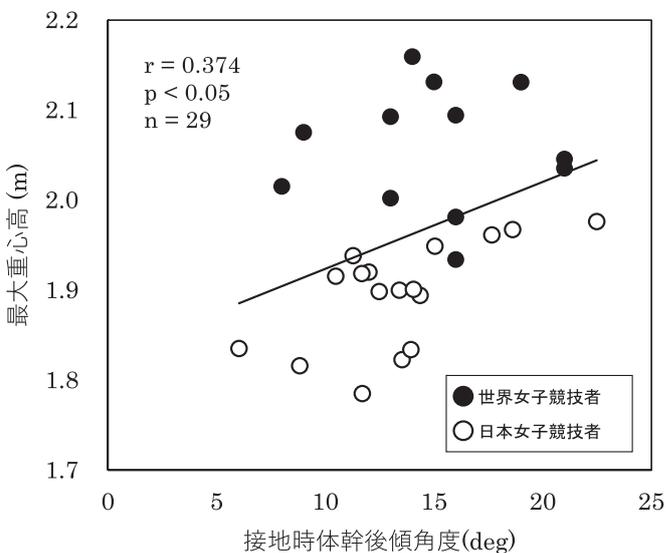
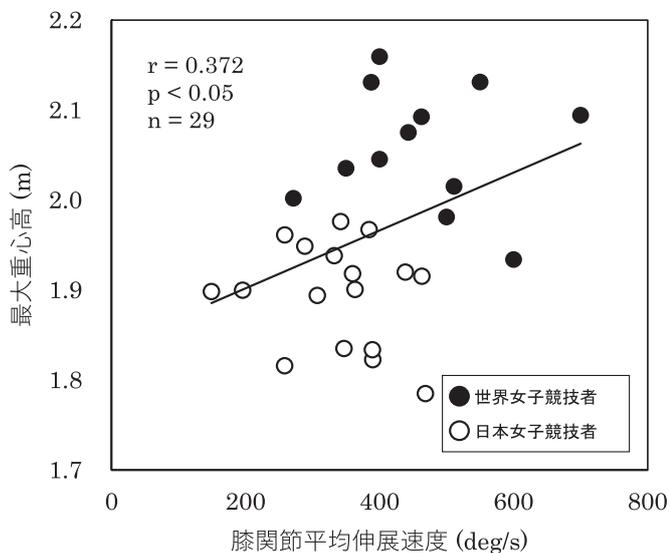


図4 最大重心高と膝関節平均伸展速度および踏切接地時の体幹角度との関係

地時の鉛直速度との間には有意な負の相関関係が認められた。

図4は最大重心高と踏切脚膝関節の平均伸展速度、接地時の体幹後傾角度との関係を示している。最大重心高と踏切脚膝関節の平均伸展速度および接地時の体幹後傾角度との間には有意な正の相関関係が認められた。

4. 考察

本報告は、2019年日本陸上競技選手権大会上位入賞者の基礎的パラメータを示すとともに、パフォーマンスに影響する基礎的パラメータを、世界および日本トップ選手を対象とした先行研究(Nicholson et al., 2018; 杉浦ほか, 2019)を含めて提示することを目的としていた。

走高跳の記録は踏切離地時の重心高(H1)および踏切離地後の身体重心の上昇高(H2)によってその大部分が決定される(Hay, 1973)。また、H1は身長などの身体的特性の影響を大きく受けるパラメータ、H2は踏切離地時の鉛直速度によって決定するパラメータであり(Dapena, 1990)、杉浦ほか(2019)の報告では比較的身長の高い日本トップレベルの女子競技者がさらに記録を向上させるためには大きなH2を獲得することが課題になることを指摘されている。

2018年の報告(杉浦ほか, 2019)と本報告におけるH2の平均値を比較すると $0.70 \pm 0.05\text{m}$ および $0.73 \pm 0.05\text{m}$ とわずかな差はみられたが、分析対象試技の平均記録はいずれも1.75mと大きな変化はみられず、最大跳躍高も同程度であった。一方で競技者個別の記録、最大跳躍高およびH2の変化を例にあげると、神田選手は2018年の1.72mの跳躍と比較して2019年の1.77mの跳躍では記録は5cm、最大跳躍高は5cmそしてH2にも5cmの向上がみられ、H1に変化はなく記録の向上はH2の増加によるものであった。H1は身長などの身体的特性の影響を大きく受けることから、シニア競技者における大幅なH1の増加は困難であり、今回の事例のようにH2を増加させて記録の向上を目指すことが求められるであろう。しかし、現時点で女子走高跳競技者を対象とした研究が少なく、さらに日本トップレベルの競技者を縦断的に検討した研究はみられないことから、今後も継続してデータの収集を行い、パフォーマンスが向上した事例とその特徴を蓄積していくことが日本の女子走高跳におけるパフォーマンス改善のために必要になると考えられる。

図2～図4には本報告の対象者7名、Nicholson et al. (2018) および杉浦ほか(2019)の報告における対象者22名の計29名の最大跳躍高と各パラメータとの関係を示した。H1、H2ともに最大重心高との間に有意な相関関係が認められ、特にH2との間には相関係数0.85と強い正の相関関係があったことから、この点からもH2を増加させることは重要であると考えられる。また、踏切接地時の水平速度および鉛直速度と最大跳躍高の間にも有意な相関関係が認められ、最大跳躍高の大きい競技者はより大きな助走スピードを獲得して踏切接地に向かい、さらに踏切接地時の鉛直下向きの速度が大きかったことが示唆された。さらに、踏切脚膝関節の平均伸展速度、踏切接地時の体幹の後傾角度との間にも有意な相関関係が認められ、最大重心高の大きい競技者が踏切接地時に体幹を後傾させており、踏切後半の踏切脚伸展局面における膝関節の伸展速度が大きかったといえる。

以上の結果から、日本の女子走高跳競技者がパフォーマンスの向上を目指すためには大きな助走スピードを獲得し、踏切接地では下向きの速度が過度に小さくならないような踏切接地の動作が必要になる可能性がある。しかし、このような踏切接地時の重心速度の特徴は、踏切接地時により大きな地面反力が踏切脚に作用することが推察され、世界トップレベルの競技者は大きな地面反力によってH2を獲得していると考えられる。踏切中に作用する地面反力のピーク値は、男子走高跳競技者を対象とした先行研究において体重の約6倍近くになることが示されていることから(戸邊ほか, 2019)、助走スピードや踏切接地時の重心速度の特徴を世界トップレベルの競技者に近づけていくだけではなく、大きな地面反力に対応するための踏切脚の基礎的なパワー発揮の能力などについても検討していく必要があるといえる。

これらを踏まえて、今後は踏切局面におけるキネマティクスの特徴を継続的に検討することに加え、女子走高跳競技者の踏切局面におけるパワー発揮の特性や垂直跳、最大脚伸展力などと基礎的なパワー発揮能力といった観点からも日本の女子走高跳競技者の課題を検討していくことが必要だと考えられる。

参考文献

阿江通良(1996)日本人幼少年およびアスリートの身体部分係数. Japanese Journal of Sports

- Science, 15 (3): 155-162.
- Dapena, J., McDnald, C. and Cappaert, J. (1990) A regression analysis of high jumping technique. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6: 246-261.
- Hay, J. G. (1973) The Hay technique ultimate in high jump style. *Athletic Journal*, 53 (7): 113-115.
- Nicholson, G., Bissas, A. and Merlino, S. (2018) Women's high jump - 2017 IAAF World Championships Biomechanical report. 1-36.
- 杉浦澄美・柴田篤志・小山宏之・長澤涼介 (2019) 日本トップレベルの女子走高跳競技者における踏切動作のキネマティクスの特徴 (日本陸連科学委員会研究報告 第17巻 (2018) 陸上競技の医科学サポート研究 REPORT2018). *陸上競技研究紀要*, 14: 191-196.
- 戸邊直人・苅山靖・林陵平・木越清信・尾縣貢 (2019) 走高跳の踏切局面における下肢3関節の力・パワー発揮特性. *体育学研究*, 64 (2) : 625-635.
- Wells, R. P. and Winter, D. A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics normal, pathological and sporting gaits. In: *Human Locomotion 1* (Proceedings of the first biannual conference of the Canadian Society of Biomechanics). pp. 92-93.