

走幅跳びの踏切時における加速度計測の有用性の検討

田原 亮二¹⁾ 下永田 修二²⁾ 田口 正公¹⁾

Examination of utility of measurement of
acceleration in takeoff of the long jump

Ryouji TAHARA Shuuji SHIMONAGATA Masahiro TAGUCHI

Abstract

We developed a measuring device (termed WiMAS) by using sensor ICs and a telemeter for real-time feedback. Real-time feedback by kinetic data is effective for improving sports skill and it improves the efficiency of coaching.

In this study, the acceleration in takeoff of the long jump was calculated as applying the previous studies. The purpose of this study was to show the utility of measurement of the acceleration in takeoff on the long jump.

The result were obtained were as follows;

- 1) There were significant relations between acceleration and flight distance in takeoff of the long jump ($r=0.60$, $p<0.05$)
- 2) There were significant relations between acceleration revised by measurement axis angle and flight distance in takeoff of the long jump ($r=0.59$, $p<0.05$).
- 3) There were significant differences between accelerations of students and accelerations of the long jumper who could jump long distance.

These results show that strong takeoff is necessary for jumper to jump long distance. It is possible to evaluate takeoff skill in the long jump from acceleration measured by WiMAS. Evaluation and real-time feedback of takeoff skill using WiMAS will be useful for training of the long jump.

1) 福岡大学スポーツ科学部
Fukuoka University, Faculty of Sports and Health Science
2) 千葉大学教育学部
Chiba University, Faculty of Education

緒言

走幅跳びの跳躍距離は踏切距離、空中距離、着地距離に分けられ、中でも空中距離すなわち重心の空中移動距離の大小が跳躍距離に最も影響を及ぼすことが報告されている。⁵⁾ さらに空中距離と踏切水平初速度に高い相関があることが阿江¹⁾ (1996) によって報告されており、走幅跳びの跳躍距離を増大させるためには、助走において高い速度を獲得し、踏切時にいかに獲得した速度を維持したまま跳躍につなげるかが重要となる。

一方、踏切時の地面反力に関する研究では Mikhailov⁸⁾ (1981) らが、踏切時に身体が発揮した鉛直方向の推力 (地面反力) と跳躍距離に有意な相関 ($r=0.75$) があることを報告している。これは走幅跳びの踏切技能を評価する一つの要素として捉えられる。

一流競技者に関する踏切動作の研究は数多く行われており、踏切動作のパターンが分類されている。²⁾³⁾⁶⁾ しかしいずれの動作においても、水平方向の速度を鉛直方向の速度に変換する際に重要となるのは、膝の伸展筋力であり、とりわけエキセントリックな筋収縮によるパワー発揮が大きな役割を果たすことを示している。²⁾³⁾ 走幅跳びの指導現場における練習方法に着目すると、種目の習熟度を問わず、鉛直方向への力発揮を意識した踏切練習が行われている。学校体育での指導現場では、ロイター板やハードル等の補助具の使用による、上方への踏切を意識させた指導が行われている。また専門競技としての指導現場においても、踏切脚を屈曲させない固定式接地を意識した踏切練習が取り入れられている。¹¹⁾¹⁴⁾ 水平方向の速度が跳躍距離に最も影響を及ぼすという報告⁵⁾ はあるものの、これらの練習はいずれも鉛直方向への力発揮を意識させるものであり、指導者および競技者が踏切技術において鉛直方向への力発揮を重要視していることを裏付けている。

近年、動作の計測に利用可能なセンサーやワイヤレスユニット、記録装置等の進歩は目覚ましく、多種多様なフィールドで、少ない労力で動作の計測が行えるようになってきている。⁷⁾ センサー計測の特徴は力学的なデータを少ない手間でリアルタイムに計測できる点である。最近では画像分析も自動的にデータ出力まで行えるように進歩してきているが、セッティングが大掛かりで時間を要し、また屋内でしか撮影が行えない等の制約があるという欠点もいまだ解消されてはいない。

田原¹²⁾ (2005) は、無線データ送信モジュールとIC型加速度センサーを利用した自作の計測装置 (WiMAS) (図1) で垂直跳びの計測を行い、フォースプレートの計測方法との比較から跳躍高を精度良く計測している。この計測方法は同じく跳躍動作である走幅跳びにも応用可能であると考えられる。センサー計測の利点である競技フィールドでの計測および、リアルタイムフィードバックを踏切動作の評価に利用することは、実際の競技に限りなく近い環境で、試技の感覚が残っている状態で跳躍者に動作の情報が与えられるため、走幅跳びの指導に有用であると考えられる。

そこで本研究は、WiMASを用いて走幅跳びの加速度計測を行い、踏切における加速度と跳躍距離との関係性を見ることから、踏切時の加速度計測の有用性を検討することを目的とする。

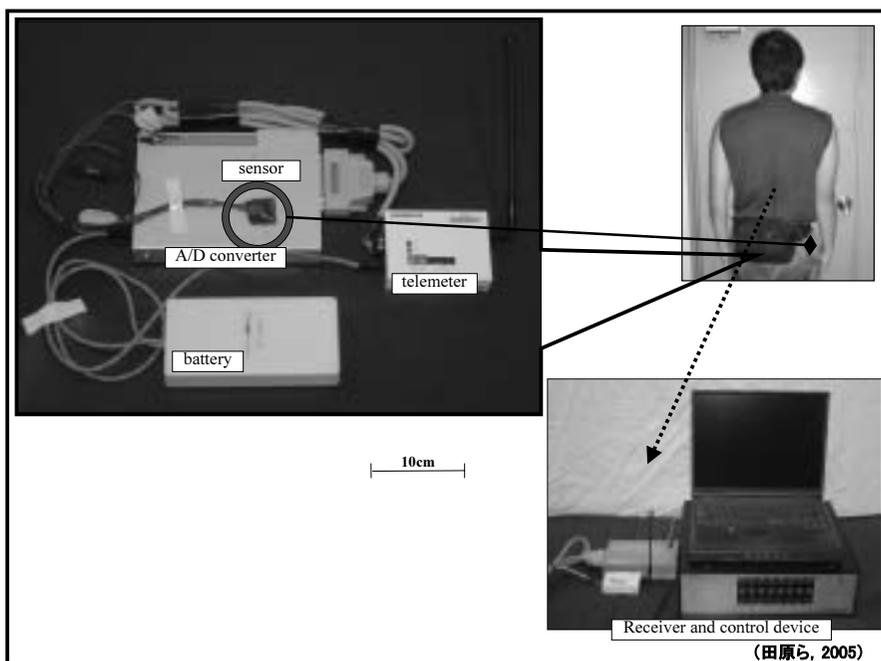


図1 WiMAS イメージ

方 法

1. 被験者

被験者は、走幅跳びを専門とする陸上競技選手1名(男性)を含む体育専攻の男女大学生9名(男性6名, 女性3名: 身長 $1.68 \pm 0.09\text{m}$, 体重 $65.3 \pm 10.5\text{kg}$)とした。

2. 実験試技

試技はWiMASを身体に装着した状態で、各被験者に5回の走幅跳びの跳躍を行わせ、合計45試技を分析の対象とした。被験者には助走距離、歩数等の制限はせず最大努力での走幅跳びを行うよう指示した。

3. 加速度計測

跳躍動作中の加速度はWiMASを使用し、鉛直下方を感度軸としてサンプリング周波数1000Hzにて計測した。感度軸は動作に応じて回転するため計測される加速度(実測加速度)は鉛直方向と水平方向の合成加速度となる。各試技前に直立静止状態での加速度計測によるキャリブレーションを行い、跳躍動作中の加速度を算出した。加速度センサーは、皮膚の振動による計測誤差を最小限にするため、被験者の左右腸骨稜上に貼付した。分析には踏切脚側の加速度データを用いた。

4. 画像分析

跳躍動作局面と加速度波形の同期および、踏切時の感度軸角度を算出するため、2台のハイスピードカメラ（ディテクト社製 Sports Corder）を用いて、全試技を被験者右側方からサンプリング周波数200Hzにて撮影した（図2）。

跳躍動作局面と加速度波形の同定は、踏切局面および着地局面を基準点として行った。

踏切時の感度軸角度は数値演算処理ソフト『MATHEMATICA 4.0』を用いてデジタイズを行い、股関節点と膝関節点を結んだ線と水平線のなす角度（ θ ）として算出した（図3）。

5. 跳躍距離

跳躍距離は、実際の跳躍距離を計測するため、踏切脚のつま先から着地時の踵までを、メジャーを使用して実測した。

6. 加速度の補正

走幅跳びの踏切局面において、踏切脚が地面から離れる時点で加速度センサの感度軸は傾いているため、加速度センサによって計測される加速度は鉛直方向の加速度が測定されていない。この誤差を補正するために感度軸角度を用いて鉛直方向の加速度を算出した。

鉛直方向の加速度である補正加速度は、 $x = a \cdot \sin \theta$ （ x ：補正加速度， a ：実測加速度）から算出した。

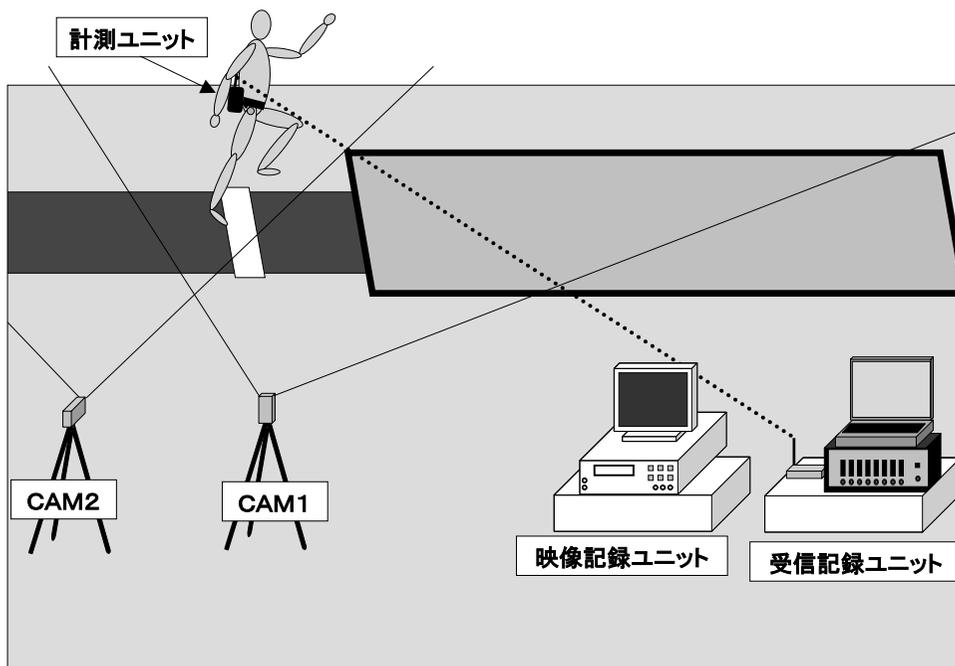


図2 実験設定図

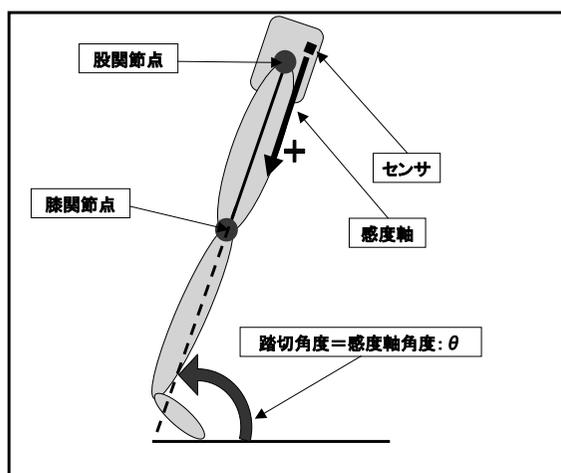


図3 感度軸角度の定義

7. 統計処理

統計処理は、一般大学生に対する競技者の跳躍距離、踏切角度、実測加速度および補正加速度の差については対応のないt検定を用いた。また、実測および補正加速度と跳躍距離との関係性は、ピアソンの積率相関係数を用いて検討した。いずれも危険率5%以下を有意とした。

結果

1. 加速度波形

各被験者固有の波形変化が認められたものの、全試技の加速度データは跳躍における離地および接地局面が判断できる波形変化を示した(図4)。踏切局面における加速度波形は、離地前の二峰性の正のピークは見られないものの鉛直方向の地面反力(図5)と同様の波形であった。映像との同期を行った結果、全試技の加速度データにおいて走幅跳びの動作局面を示す波形が確認できた。

助走局面においては一定リズムの変化をし、踏切、着地の局面で大きな波形変化を示した。被験者の跳躍動作によって異なるが、助走後に2～3箇所の負のピーク値が出現していた。第1ピークはつま先が地面から離れる離地局面であり、第2のピークは踵が地面に接地する着地局面であった。第3ピークは被験者によって確認されない者もいた。第1ピークから第2ピーク前後の波形変化は田原¹²⁾が報告した、垂直跳びの計測データと合致していた。

2. 跳躍距離

跳躍距離は最大値6.26 (m)、最小値3.30 (m)、平均値±標準偏差は4.88±0.75 (m)であった(n=45)。また競技選手の平均値±標準偏差は6.10±0.30 (m)であり、一般大学生の平均値±標準偏差は4.70±0.60 (m)であった。両者には0.1%水準で有意な差が認められた(表1)。

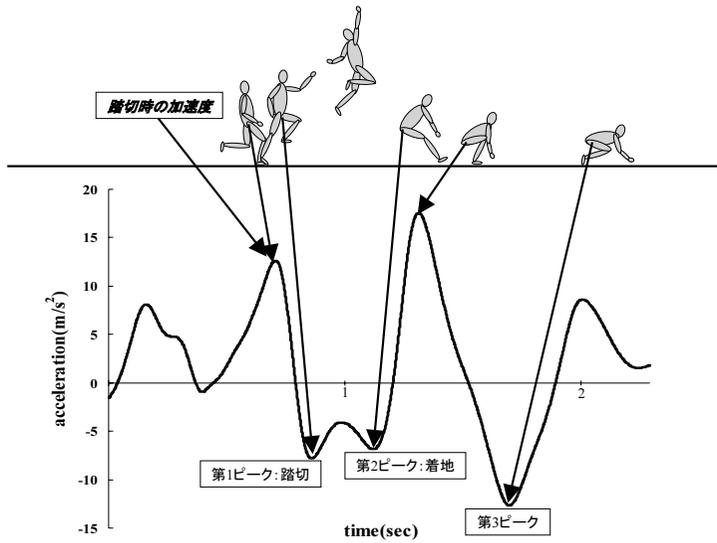


図4 加速度波形と跳躍局面の例

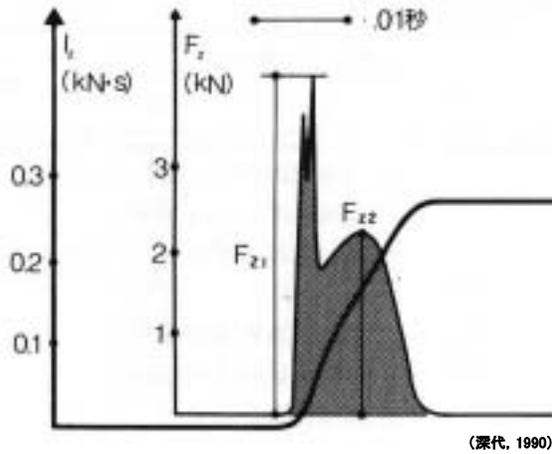


図5 走幅跳びの踏切地面反力

表1 測定項目のグループ別平均値

	跳躍距離 (m)	踏切角度 (deg)	実測加速度 (m/s ²)	補正後加速度 (m/s ²)
全体平均 (n=45)	4.88±0.75	79.4±5.7	8.0±3.3	7.8±3.1
競技者平均 (n=5)	6.07±0.26***	69.7±2.5***	13.6±1.9***	12.7±2.0***
一般大学生平均 (n=40)	4.73±0.65	80.6±4.8	7.4±2.8	7.2±2.7

***: 一般大学生に対する有意差 (p<0.001)

3. 踏切時の加速度

踏切時の加速度は最大値 $14.9 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、最小値 $1.4 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、平均値 \pm 標準偏差は $8.0 \pm 3.3 \text{ (m/s}^2\text{)}$ であった。また、競技選手の平均値 \pm 標準偏差は $13.6 \pm 1.9 \text{ (m/s}^2\text{)}$ であり、一般大学生の平均値 \pm 標準偏差は $7.4 \pm 2.8 \text{ (m/s}^2\text{)}$ であった。両者には 0.1% 水準で有意な差が認められた (表1)。

4. 踏切角度および補正加速度

踏切角度 (感度軸角度) は最大値 86.2 (deg) 、最小値 65.3 (deg) 、平均値 \pm 標準偏差は $79.4 \pm 5.73 \text{ (deg)}$ であった。上記の角度変化によって生じる加速度の誤差 (実測の加速度 - 角度補正による加速度) は最大値 $0.97 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、最小値 $0.02 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、平均値 \pm 標準偏差は $0.21 \pm 0.27 \text{ (m/s}^2\text{)}$ であった。補正加速度の標準誤差は $0.46 \text{ (m/s}^2\text{)}$ であった。また、競技選手の平均値 \pm 標準偏差は $69.7 \pm 2.5 \text{ (deg)}$ であり、一般学生の平均値 \pm 標準偏差は $80.6 \pm 4.8 \text{ (deg)}$ であった (表1)。両者には 0.1% 水準で有意な差が認められた。

WiMAS によって計測された加速度と跳躍距離との間に相関係数 $r = 0.60$ の有意な相関が認められた ($p < 0.05$)。感度軸角度を用いて補正した鉛直方向加速度と跳躍距離にも相関係数 $r = 0.59$ の有意な相関が認められた ($p < 0.05$) (図6, 図7)。両者に有意差は認められなかった。

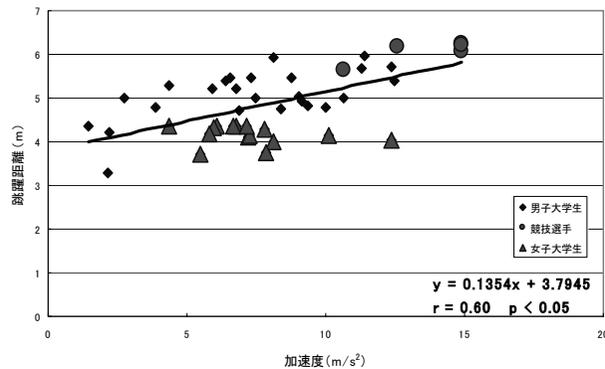


図6 実測加速度と跳躍距離

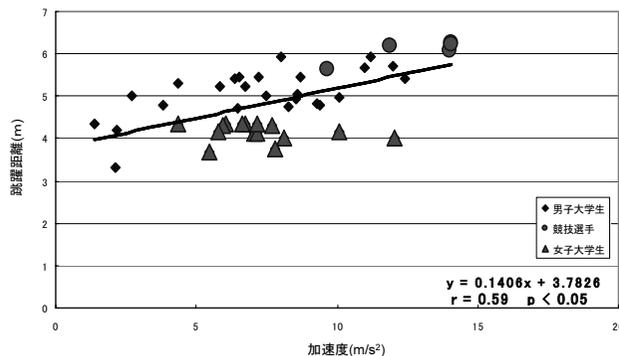


図7 補正後加速度と跳躍距離

考 察

全ての試技において同様の時系列変化を示す加速度データが計測されたことから、本研究の方法による加速度計測を利用した走幅跳びの動作分析は可能であると考えられる。第1ピークと第2ピークがそれぞれ離地と着地の局面に対応することは、田原らの報告¹²⁾した垂直跳びの計測データと合致しており、この区間が空中局面を示していることが分かる。第3ピークは着地後の動作を示しており、前方へ大きく移動する着地をした場合はこの値が小さくなることが推察される。田原らの報告¹²⁾では、垂直跳びにおいて鉛直方向の加速度データが鉛直方向の地面反力と同様な性質を持つことが示されているが、走幅跳びは踏切および着地において大きな衝撃力を伴う動作であり、踏切局面における加速度波形が必ずしも地面反力と同様の波形を示さないことが懸念される。この点に関しては今後、踏切局面および着地局面それぞれについて、同一試技における地面反力と加速度の同時計測による検証の必要があろう。しかしながら、本研究における踏切局面の加速度波形は、離地前の二峰性のピークは見られないものの鉛直方向の地面反力と同様の傾向を示す波形であった。このことから本研究の計測データは、走幅跳びの踏切局面における鉛直方向への力発揮を反映しており、地面反力の代替データとして利用可能であると考えられる。

跳躍距離は競技選手が有意に大きな値を示していた。当然であるが、競技選手と一般大学生との間に大きな技能差があることを示していることがわかる。したがって、ここからは競技選手と一般大学生との違いに焦点を当て考察を進めることとする。

踏切角度では、競技選手が一般大学生よりも有意に小さい結果が示された。踏切角度が小さいことは、踏切時に身体重心が前方に移動していることを示している。Hay⁵⁾(1986)の報告では、踏切時の重心移動によって獲得される踏切距離の、跳躍距離に占める貢献度は空中距離と比較して非常に少ないとされている。しかしながら cm の単位長で順位が変わる競技選手にとっては重要な要素であり、このことも一般大学生との技能差を示していると考えられる。

実測値および補正後の加速度も共に競技選手が有意に高い値を示していた。このことは競技選手の方が強い踏切をしていたことを示している。補正後の加速度は、感度軸角度が小さくなるほど減少率が大きくなるため、競技選手の減少率は高くなる傾向にある。しかしながら、補正後の加速度も競技選手が有意に大きいことは、鉛直方向への力発揮が的確にできていることを示唆している。

一方、一般大学生の加速度が小さいことは、鉛直方向への力発揮が的確にできていないことを示している。踏切角度が大きいことは、体が直立に近い姿勢で跳躍していたことを示している。これは踏切前のブレーキング動作による、助走速度の著しい減少によって生じる現象として捉えられる。そして踏切時に再び前方へ身体を投げ出すために、後方に踏切脚を蹴りだそうとした結果、鉛直方向への力発揮が小さくなることが推察される。この点は一般大学生が競技選手と比較して踏切技能で大きく劣っている点であると考えられる。したがって、これらの結果から本測定装置を利用した、走幅跳びの踏切の技能評価が可能であることが示唆される。

補正後の加速度と跳躍距離との間に有意な正の相関が認められた。この点も、本測定装置を利用し

た技能評価の有用性を示唆していると考えられる。Hayの研究⁵⁾において跳躍距離に最も貢献する要素は水平方向の初速度であることが報告されている。このことから、十分な助走速度が確保されているという前提条件付となるが、鉛直方向の強い踏切動作をすることで跳躍距離が伸びることが示唆される。このことは、Mikhailovら⁸⁾が踏切時の鉛直方向の地面反力と跳躍距離には正の相関があることを示していることから明らかである。したがって、助走速度を保つことを意識させた上で、加速度データを計測することで、踏切動作の技能評価が可能になると考えられる。

また、元データとなった実測加速度と跳躍距離との間にも補正後加速度の場合と同程度の正の相関が認められた。実測加速度は鉛直方向と水平方向の合成加速度を示しており、鉛直方向への力発揮による身体の加速だけでなく、水平方向への加減速を内包した結果であることが推察される。走幅跳びの踏切動作も鉛直方向への単純なキック動作ではなく、助走により身体が水平方向に大きな速度を持った状態での運動の方向を変える動作である。したがって実測加速度と跳躍距離の間には補正後加速度と同程度か、それ以上の精度での関係性が推察される。このように、計測された加速度の補正が不用である事は、リアルタイムフィードバックの面においても有益である。このことから、本研究の計測方法を用いた実測加速度を補正せずに用いても、走幅跳びにおける踏切動作の技能評価が可能であり、より実用性が高いと考えられる。

まとめ

計測をした全試技において、同様の時系列変化を示す加速度データが計測された。

鉛直方向の地面反力と同質の加速度データが踏切局面において計測された。

踏切局面の加速度と跳躍距離に有意な相関が認められた。

以上の点から、WiMASを用いて走幅跳びの動作を計測することでの、踏切動作における技能評価の有用性が示された。さらにWiMASの特徴を生かしてリアルタイムで評価結果をフィードバックすることは、走幅跳びの技術指導において有用であると考えられる。

踏切・着地時の地面反力との違いに関しては、更なる検討の必要性があるが、それにより評価精度の向上、また着地局面の技能評価といった付加機能が加わることも考えられる。さらに今後は多チャンネルでの計測が可能であるという特徴を生かし、水平方向のデータも同時に計測し、鉛直方向と合わせて2つの要素で判定することや、膝関節、足関節部とのデータとの比較から、より詳細な動作の評価が行えると考えられる。またこれらのデータを継続的に取り続けることで、動作の変容の観察や、動作の修正などにも役に立つと考えられる。

【参考文献】

- 1) 阿江通良：トレーニングによる動作の変化：トレーニング科学ハンドブック（トレーニング科学研究会編），384-393，朝倉書店，1996.
- 2) 阿江通良ら：トルク及びパワーからみた走幅跳における踏切脚筋群の機能，陸上競技紀要，2：29，1994.
- 3) 深代千之ら：走幅跳のバイオメカニクス. 世界一流陸上競技者の技術（佐々木秀幸・小林寛道・阿江通良監修），169-184，ベースボール・マガジン社，1994.
- 4) 深代千之：跳ぶ科学，84-89，大修館書店，1990.
- 5) Hay, J. G. : The biomechanics of the long jump. *Exerc. Sport Sci. Reviews*, 14 : 401-446, 1986.
- 6) Koh, T. J., Hay, J. G. : Landing leg motion and performance in the horizontal jumps. . the long jump., *Int. J. Sport Biomech.*, 6 : 343-360, 1990.
- 7) 小島基永：加速度計を用いた高齢者歩行の安定性評価，バイオメカニズム学会誌，30(3)：138-142，2006.
- 8) Mikhailov, N. G., N. A. Yakunin and S. Y. Aleshinsky : Biomechanical analysis of the take-off in the long jump (Russian). *Teor. Prakt. Fiz. Kult.* 5 : 13-15, 1981.(in Hay 1986a)
- 9) 村木 有也，阿江 通良：走幅跳の踏切における脚のばね的特性（特集 新しい視点からみた筋の働き），*体育の科学*，52(8)：612-616，2002.
- 10) 志賀 充，尾懸 貢：走幅跳競技者の下肢筋力と踏切中のキネマティクス及びキネティクスの関係--膝関節と股関節に着目して，*体力科学*，53(1)：157-166，2004.
- 11) 立石晃義：足跡，71-78，2000.
- 12) 田原亮二，下永田修二：無線式加速度計測装置による垂直跳びの計測，*千葉体育学研究*，29：17-24，2005.
- 13) 山本利春，山本正嘉，金久博昭：陸上競技における一流および二流選手の下肢筋力の比較——100m走・走幅跳・三段跳選手を対象として——，*J.J.Sports Sci*，11：72-76，1992.
- 14) 財) 日本陸上競技連盟：走幅跳. 陸上競技のコーチング マニュアル——基本編——，108-116，ベースボール・マガジン社，1987.