

ハンドスプリングスローインに関する バイオメカニクスの研究

小野 剛 岩橋 英夫
田嶋 幸三 森岡 理右
阿江 通良

近代サッカーにおいては、得点の約40%はセットプレーから生まれていると言われる¹¹⁾ほど、その重要性は高くなってきている。そして従来まではあまり得点に結び付くとは考えられていなかったスローインに関して、その飛距離を伸ばすことができれば有効な攻撃手段となると考えられる。

ところで、近年新しいスタイルのスローインが用いられ、数例は得点にも結び付いている。この技術はハンドスプリングスローインと呼ばれ、器械運動の前方倒立回転とび（ハンドスプリング）を利用することによって、ボールに、より大きな投射スピードを与えようとするものである。

ハンドスプリングスローインが初めて用いられたのはアメリカで、1978年のことである¹²⁾。Mckechney¹³⁾は“Offensive Throw-in”（攻撃的スローイン）という言葉でハンドスプリングスローインを紹介しており、それを用いることによって60ヤードもの飛距離を生み出すことができると述べている。Gammon¹⁴⁾は、大学サッカーに関する記事の中で1人の選手を取り上げ、彼の得意技は“Topsy-Turvy Throw-in”（ひっくり返りスローイン）であり、50ヤードものロングスローを武器にしていたと述べている。しかしこれらの文献は、いずれも学術的なものではなく、その飛距離を実際に測定したものではない。

ハンドスプリングスローインに関する研究報告は極めて少なく、Messier¹⁵⁾のものがあるにすぎない。彼は映画撮影によってハンドスプリ

ングスローインの動作分析を行ない、従来のスローインと比較検討した結果、ハンドスプリングスローインの方がリリース時のボール速度が大きく飛距離を高めるのに合理的であり、ハンドスプリングスローインを用いることによってスローインからの得点機会を高めると報告している。しかし、身体の回転がどの程度ボールの初速度に貢献しているかについての定量的な検討は行っていない。

本研究では、この新しい技術であるハンドスプリングスローインの飛距離を従来のスローインと比較するとともに、その動作を高速度 VTR を用いて撮影することにより、ハンドスプリングスローインをバイオメカニクスの観点から分析し、身体の回転のボール初速度への貢献度を明らかにすることを目的とした。

方 法

1. 被 験 者

被験者は T 大学サッカー部員で器械運動、特にハンドスプリングを得意とする年齢 19～25 歳の男子学生 4 名であった。被験者の平均身長及び体重は、それぞれ 162.8 ± 3.2 cm, 59.9 ± 3.0 kg であった。

ハンドスプリングスローインの練習は 1987 年 9 月より開始し、その後週 2 回のトレーニングを 10 週間行った。

2. 飛距離の測定

トレーニング期間中、2 週間に 1 回の割合でほぼ無風の日を選び、飛距離の測定を行なった。被験者には、タッチラインから垂直に、できるだけ遠い地点をめがけて投げるように指示を与え、従来のスローイン 5 回、ハンドスプリングスローイン 10 回の計 15 回の試技を行なわせた。飛距離は、タッチライン上の投射地点からボールの落下地点までの直線距離で測定した。風速はニシスポーツ社製デジタル風速計 (S-1250) により測定したが、非常に小さかったので無視することにした (0.2 m/s 以下)。

3. 実 験

試技の撮影は NAC 社製ハイスピード VTR カメラ (HSV-200) を用いて毎秒200コマで行い、カメラは動作方向と垂直に30m離れた地点に高さ0.9mで設置した。また、固定点として動作方向の左右に1m間隔にマークを設置した。動作分析に必要な身体各部位19点にマークをつけた後、被験者に、ハンドスプリングスローインを5回行わせ、その中で最も飛距離の大きかった試技を分析に用いることにした。

4. 動作の分析

撮影されたビデオフィルムから、準備動作でのホップの着地からボールリリース後10コマまでの身体各部位19点及びボールの二次元座標を読み取り、パーソナルコンピュータ (NEC PC-9801VX) に入力して実長に換算した後、デジタルフィルターを用いて 8Hz で平滑化した。そして、これらのデータから以下に示す測定項目を算出した^{1) 8) 9)}。

1) 関節角度

得られた身体各部位の位置データより、振り脚及び蹴り脚の膝関節角度 (大転子, 膝中点, 果点のなす角度), 及び腰関節角度 (膝中点, 大転子, 胸骨上縁のなす角度) を算出した (図1参照)。

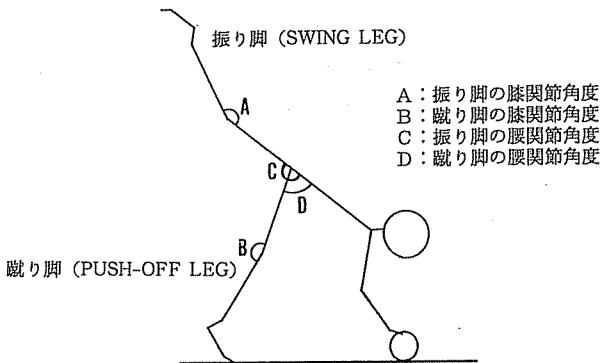


図1 本研究における関節角度の定義

2) 身体重心まわりの角運動学的パラメーター

ハンドスプリングスローインの動作の大部分は、矢状面内で行なわれると考えられるので、本研究では横方向軸（矢状面に垂直な軸）まわりの回転運動のみに着目し、身体重心を通る横方向軸まわりの角運動量（以下、身体重心まわりの角運動量という）、慣性モーメント、および角速度を、以下の方法により算出した。なお、角運動量および角速度においては、時計まわりの回転を負の値で示した。また、身体部分係数は、Chandler, et al.³⁾ のものを用いた。

(1) 身体重心まわりの角運動量 (Angular Momentum; L)

身体重心まわりの角運動量は、身体が14個の剛体からなると仮定して、各部分の質量 (m_i)、その重心まわりの慣性モーメント ($I_i^{(G)}$)、角速度 (ω_i)、身体重心に対する部分重心の相対位置 ($r_{i/G}$) 及びその速度 ($V_{i/G}$) をもとに、式(1)、(2)により算出した。

$$L_i = I_i^{(G)} \omega_i + r_{i/G} \times m_i V_{i/G} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$L = \sum_{i=1}^{14} L_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

(2) 身体重心まわりの全身の慣性モーメント (Moment of Inertia; I)

まず、各部分の質量、その重心まわりの慣性モーメント及び身体重心と部分重心との距離 (d_i) をもとに、平行軸の定理に従って²⁾、式(3)により各瞬間における身体重心まわりの各部分の慣性モーメント (I_i) を求めた。次に、式(4)により各瞬間における全身の慣性モーメントを求めた。

$$I_i = I_i^{(G)} + m_i d_i^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$I = \sum_{i=1}^{14} I_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで慣性モーメントとは本来剛体、すなわち d_i が変化しない場合のみ成り立つ概念である（すなわち慣性モーメントは変化しない）という

考え方もあるが¹²⁾、 $L = (\sum I_i^{(0)} + m_i d_i^2) \times \omega$ であることから剛体系における $(\sum I_i^{(0)} + m_i d_i^2)$ も通常慣性モーメントと同義として扱われており^{5) 7) 8) 15)}、本研究においても「慣性モーメント」と呼ぶことにした。

(3) 身体重心まわりの身体の角速度 (Angular Velocity; ω)

14個の剛体系にモデル化した身体の角速度を求めるには、厳密には、各瞬間における身体の3つの慣性主軸を求め、その方向の時間的変化を知る必要がある¹⁰⁾、計算は容易ではない。しかし、本研究では、ハンドスプリングスローインを矢状面内での平面運動であると仮定していること、角運動量が慣性モーメントと角速度の積であることから、身体重心を通る横方向軸まわりの身体の平均的な角速度を式(5)により算出した。

$$\omega = L/I \quad \dots\dots\dots(5)$$

なお、この方法で求めた全身の角速度をボール接地からボールリリースまで時間積分して求めた角変位と、最も大きな質量および慣性モーメントをもつ体幹の角変位との相対誤差は、6.5%であった。

5. ハンドスプリングスローインの局面分け

図2はハンドスプリングスローインのスティックピクチャーを示したものである。本研究では、このハンドスプリングスローインをいくつかの局面に分けて考えることにし、その局面を以下に示すように定義した。

まず、ボールが地面に接する瞬間をボールプレイスメント (BP) とし、以下、両足とも地面から離れる瞬間をプッシュオフ (PO)、ボールが地面から離れる瞬間をテイクオフ (TO)、足の接地をタッチダウン (TD) とした。そして動作開始からボールプレイスメントまでをアプローチ局面、以下各時点間をそれぞれ準備局面、ボール支持局面、及びフライト局面とした。また、ボールが手から離れる瞬間をリリース (R) とした。

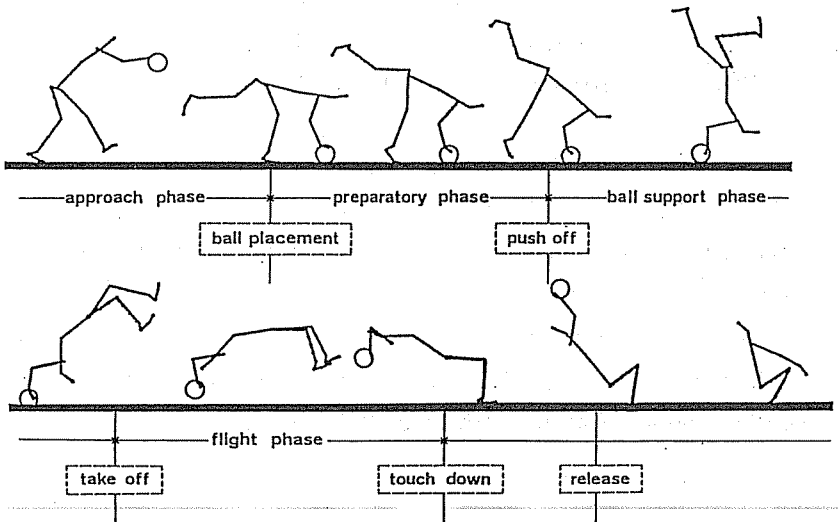


図2 ハンドスプリングスローインの各局面および
そのスティックピクチャー

結果と考察

1. 飛距離の比較

図3は、ハンドスプリングスローイン及び従来のスローインの飛距離の測定結果を示したものである。

本研究における従来のスローインでの飛距離は全試技の平均で $21.5 \pm 0.8\text{m}$ であったが、これは戸荻ら¹⁰⁾の研究における飛距離の平均値 20.7m ($N=12$) とほぼ一致していた。一方、ハンドスプリングスローインでの飛距離は全試技の平均で $28.8 \pm 2.1\text{m}$ と従来のスローインと比較して有意に高い値を示し ($p < 0.01$)、個人毎にみても全被験者において、従来のスローインの1.2~1.4倍の飛距離を出していた。被験者が少ないため一般化するには問題があるものの、これらの結果は、ハンドスプリングスローインの方が従来のスローインより大きな飛距離を生み出すためには有利であることを示している。

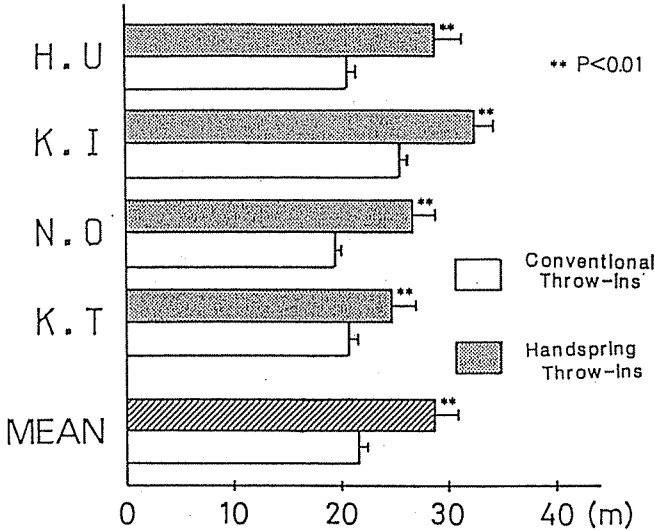


図3 ハンドスプリングスローインおよび従来のスローインの飛距離に関する比較

2. ボールの速度変化

ハンドスプリングスローインにおいては、各被験者ともほぼ同様の動作で投射しており、力学的なパラメーターもほぼ同様の変化を示していたので、ここでは被験者 N. O. のデータを示すことにする。

図4は水平方向及び鉛直方向におけるボールの速度変化を示したものである。ボールの水平速度はテイクオフ0.08秒前より増加し始め、その後一旦減少した後、タッチダウンを境に急激に増加していた。ボール支持局面後半においてテイクオフ以前にボールの水平速度が増加を始めるのは、ボールが地面に接しながらも移動を開始していたことを示している。その後の一時的な減少は、この局面ではボールが上方に持ち上げられており、水平方向ではむしろ減速していることを示している。そして、タッチダウン以降においてはボールの水平・鉛直速度とも著しく増加しながらリリースが行われており、この局面においてボールに大きな力が加わっていると考えられる。したがって、ハンドスプリングスローインでは、タッチダウ

ン後にボールの加速局面が存在するといえる。

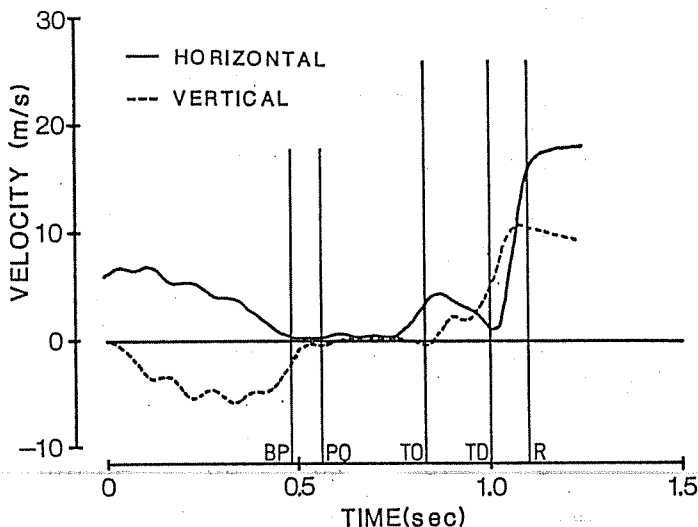


図4 ハンドスプリングスローインの動作中におけるボール速度の変化(被験者 N. O.)

3. 角運動量の変化

図5は、ハンドスプリングスローインにおける身体重心まわりの角運動量、角速度、及び慣性モーメントの変化を示したものであり、図6は腰及び膝関節角度の変化を示したものである。

角運動量はアプローチ局面において著しい増加を示した。これは主として、振り脚の強い振り上げ及び支持脚の強い蹴り上げによるものと考えられる。器械運動においてもハンドスプリングをうまく行なうための技術ポイントとして脚の振り上げ及び蹴り上げが挙げられているが¹⁰⁾、ハンドスプリングスローインにおいても大きな角運動量を得るため、振り脚の強い振り上げ及び支持脚の強い蹴り上げが重要であると考えられる。角運動量はその後ボール支持局面においてはほぼ一定のレベルを維持していたが、タッチダウン直前からは減少していた。角運動量保存の法則によれば、角運動量は滞空時においては保存されるので⁴⁾¹⁰⁾、一定の値を維持するはずで

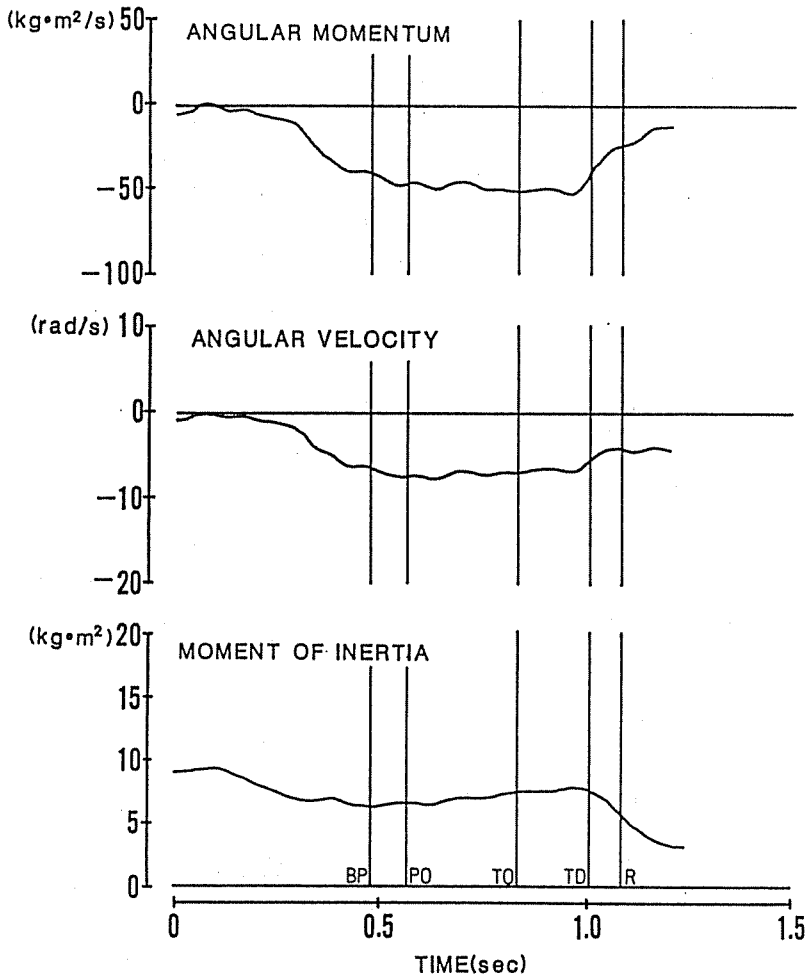


図5 ハンドスプリングスローインの動作中における角運動量、角速度、および慣性モーメントの変化（被験者 N. O.）

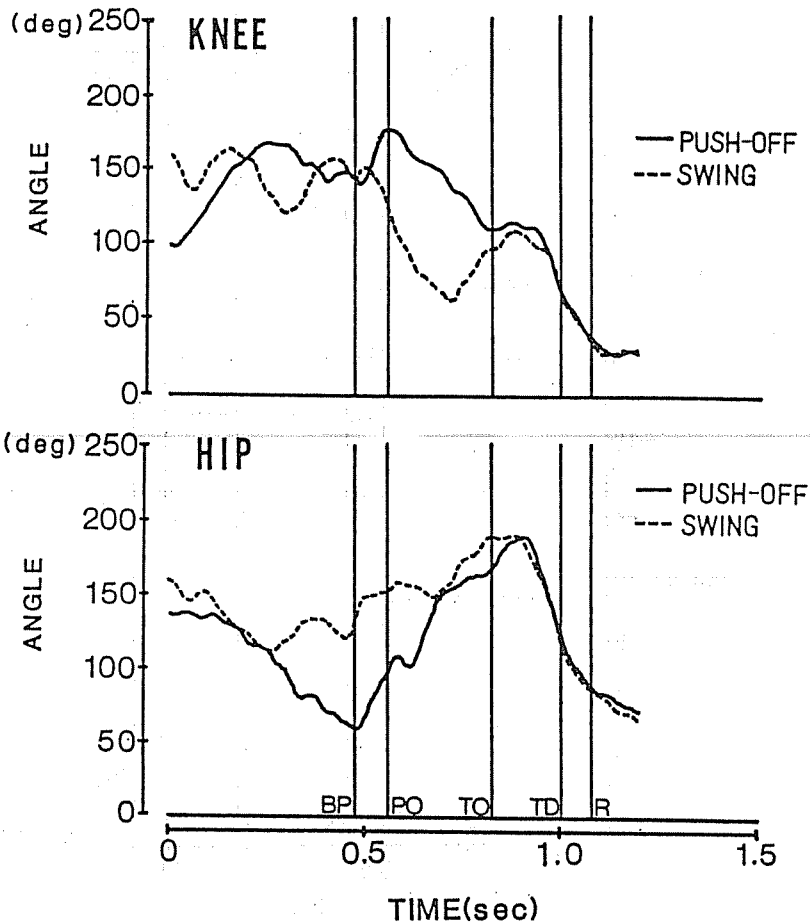


図6 ハンドスプリングスローインの動作中における膝、および腰の関節角度の変化 (被験者 N. O.)

ある。しかし、滞空時においても角運動量に変化したのは、一つには、実際には滞空時において大きく湾曲する胴体を1個の剛体にモデル化したことなどの分析手法上の原因によると考えられる。また、タッチダウン以降の角運動量の減少は、地面反力によるものと考えられる。

一方、タッチダウン直前からリリースまで腰関節及び膝関節は急激に屈曲しており(図6)、それを反映してタッチダウン後は慣性モーメントも大きく減少している。角運動量は、慣性モーメントと角速度の積であるので⁴⁾、この慣性モーメントの減少は、角速度を大きくするために役立っていると考えられる。したがって、器械運動のハンドスプリングでは美的目的のため動作の間を通じて、体をできるだけ伸ばした姿勢で回転を行なうことが重要となるが¹⁰⁾、ハンドスプリングスローインでは角速度の減少を小さくするため、腰、膝の各関節を屈曲することにより慣性モーメントを減少させることが重要であると考えられる。

タッチダウン後は回転の中心が着地点に変わるため、重心まわりの慣性モーメントが小さくても重心と着地点との距離が大きければ角速度は大きくならないと考えられる。しかし、このように腰・膝の関節を屈曲してタッチダウンすることは、重心と着地点との距離を小さくすること、さらに、接地時のボール高を低くし水平方向へのボールの加速距離を大きくすることにも役立っていると考えられる。

しかし、ボールの速度はボールの回転半径に比例するため、リリース時において上肢を屈曲することは、慣性モーメントを小さくするには役立つが、タッチダウン後の回転軸である足からボールまでの距離を小さくしてしまうことになる。上肢は、その長さに対して質量はそれほど大きくないことを考えると、上肢を屈曲してのリリースは望ましい動きではないと考えられる。

前述したように、タッチダウン前には身体重心まわりに回転していた身体は、タッチダウンを境に回転の中心が着地点となり、着地点まわりの回転運動へと変わることになる。Messier¹⁴⁾は身体重心まわりの回転運動のみに着目し、回転の後半に慣性モーメントを小さくすることによって角速

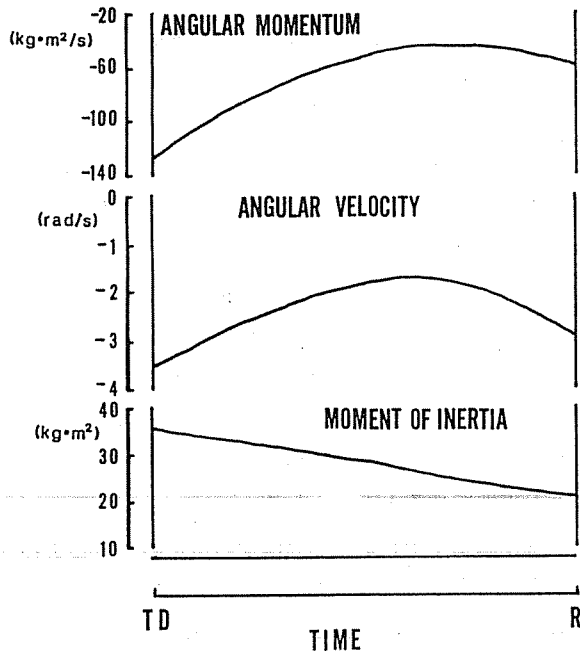


図7 タッチダウン後における足関節まわりの角運動量, 角速度, および慣性モーメントの変化 (被験者 N. O.)

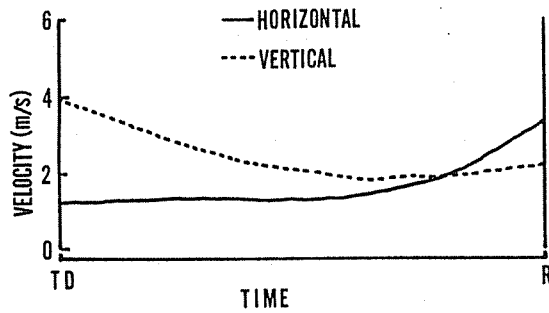


図8 タッチダウン後, 足関節まわりの身体の回転のみによって導きだされるボールの速度 (被験者 N. O.)

度を高めているという結果を得ているが、身体の回転と投動作との関係を定量的に検討するには、タッチダウン後の着地点まわりの身体の回転がボールの速度にどのような影響を及ぼすかについても明らかにする必要がある²⁰⁾。そのため、まず身体重心まわりの角運動量及び慣性モーメントを求めた式(1)~(4)の身体重心に関する部分を足関節に置き換え、足関節まわりの全身の角運動量、慣性モーメント、及び角速度を求めた(図7)。

足関節まわりの全身の角運動量は身体重心まわりのものよりも大きな値を示しているが、慣性モーメントも大きくなるので、角速度はあまり大きくない。しかし、足関節とボールとの距離(回転半径)は大きくなるので、ボール速度も大きくなると考えられる。そこで、足関節まわりの全身の角速度に足関節とボールとの距離を乗じて求めた全身の回転のみによって生じると仮定できるボールの速度を求めてみると図8のようになり、リリース時におけるボールの水平速度は3.3m/sであった。リリース時における実際のボールの水平速度は14.1m/sであったので(図4)、ボールの水平速度に対し、全身の回転が23.4%貢献していたと考えることができる。同様に、全被験者についてみると、全身の回転の貢献度は平均 $24.4 \pm 8.7\%$ であった。

これらのことから、ハンドスプリングスローインでは、ハンドスプリングによって得られた角運動量にタッチダウンによる角運動量に加わり、タッチダウン後に生じる着地点まわりの身体の回転が、上肢そしてボールの水平速度の増加に役立つといえるであろう。また、先述したように、このようにして生じた身体の回転はタッチダウン時の低い姿勢から身体を起こすことにもなるので、ボールの加速距離を大きくすることにも役立つであろう。

以上の結果と考察から、ハンドスプリングスローインを有効に用いるためには、アプローチ局面及びボール支持局面においては強い脚の振り上げ及び蹴り上げによって大きな角運動量を獲得し、滞空局面後半から腰及び膝を屈曲させ、慣性モーメントを減少させることが重要であると考えられる。

結 論

サッカーのスローインにおける飛距離を伸ばすための一つの試みとしてハンドスプリングスローインを行なわせ、その飛距離の測定及び VTR 撮影による動作分析を行なった結果、以下の結論が得られた。

- 1) 飛距離においては従来のスローインよりハンドスプリングスローインの方が約1.2~1.4倍の大きな値を示し、ハンドスプリングスローインを行なうことによりスローインの飛距離を伸ばせることがわかった。
- 2) ハンドスプリングスローインでは、回転の前半に振り脚の振り上げ及び支持脚の蹴り上げによって大きな身体重心回りの角運動量を生み出し、回転後半からは慣性モーメントを減少させることにより着地後の角速度の減少を小さくしている。そして、足の着地により生じる足を軸とした身体前方への回転を利用して、上肢及びボールの速度を増加させ、大きな飛距離を生み出していると考えられる。身体の回転のボールの水平速度への貢献度は20~25%であった。

〔付記〕 本稿は、筆者の修士論文を出発点として、本稿執筆者が新たな検討を加えて作成したものである。

文 献

- 1) 阿江通良他：VTR による動作分析システムの開発。大学体育研究，5：87-94，1983。
- 2) ベアー・ジョンストン（長谷川 節訳）：工学のための力学（上）。ブレイン図書出版，1982，pp. 392-394。
- 3) Chandler, R. F., et al.: Investigation of Inertia Properties of the Human Body. Aerospace Medical Reserch Laboratory, Aerospace Medical Center, U. S. A., 1975。
- 4) ダイソン（金原 勇他訳）：陸上競技の力学。大修館書店，1977。
- 5) ファインマン（坪井忠二訳）：ファインマン物理学 I 力学。岩波書店，1986，p. 259。
- 6) Gammon, C.: The Game Takes a New Turn. Sports Illustrated, Nov. 8: 76-77, 1982。
- 7) 原島 鮮：物理学（上巻）。学術図書出版，1985，p. 136。

- 8) Hay, J. G. : Moment of Inertia of the Human Body. *Kinesiology* IV 4 : 43-52, 1974.
- 9) Hay, J. G., et al. : A Computational Technique to Determine the Angular Momentum of a Human Body. *J. Biomechanics*, 10 : 269-277, 1977.
- 10) ホッホムート (遠藤万里訳) : スポーツ運動のバイオメカニクス. 新体育社, 1981, p. 77.
- 11) Hughes, C. : Soccer Tactics and Skills. BBC, 1980, p. 204.
- 12) 池上康男 : 回転およびひねり運動の力学的基礎. *Jpn. J. Sports Sci.*, 4-2 ; 73-78, 1985, p. 76.
- 13) McKechney, R. : An Offensive Throw-in. *The Athletic Journal*, 59 : 32, 1978.
- 14) Messier, S. P., and M. A. Brody : Mechanics of Translation and Rotation During Conventional and Handspring Throw-ins. *Int. J. Sport Biomechanics*, 2 : 301-315, 1986.
- 15) 永田 晟 : 前転運動のフォームとその習熟. *Jpn. J. Sports Sci.*, 4-2 ; 79-85, 1985, p. 79.
- 16) 中島光広他 : 器械運動指導ハンドブック. 大修館書店, 1983, pp. 88-97.
- 17) 佐野裕司他 : マット運動における前転とびの動作分析的研究. *体育学紀要*, 7 : 77-82, 1973.
- 18) 湯 海鵬他 : 空中における身体の角速度の算出法. *日本体育学会第39回大会号 (A)* : 365, 1988.
- 19) 戸苅晴彦・浅見俊雄 : サッカーのスローインにおける遠投力について(1). *東京大学教養学部体育学紀要*第6号, 33-38, 1971.
- 20) 吉福康郎 : 投げる一物体にパワーを注入する. *Jpn. J. Sports Sci.*, 1-2, 1982.

