スポーツにおける高速ビデオカメラ*

浅井 武**

High speed video camera in sports

Takeshi ASAI

1. はじめに

テレビでスポーツ番組を眺めていると、必ずといっていいほど見ることができるのは、ハイライトシーンのスローモーションである。これは一般的スピード(約 30 fps)の業務用ビデオカメラによる映像をスロー再生したものと、高速ビデオカメラによる映像を再生したものがあるが、鮮明な画面で詳細にみることができるのは、勿論、高速ビデオカメラによる映像である。この高速ビデオカメラによる映像は、近年はいろいろな場面で用いられ、スーパースロー等のネーミングでその番組の特徴の一つになっていたりもする。一般映像ではなかなか捕らえられない動きや技術をみることができ、スポーツの専門家でなくても興味深いものである。また、このようなブロードキャスティングレベルでなくても、高速ビデオカメラはスポーツに関する研究、教育、教材作成^{1),2)}等、様々な領域で活用されており、ここではその一部を紹介したい。

2. スポーツシューズの開発

スポーツ用具の開発³⁾では、現象を記述、把握したり、分析するため、日常的に高速ビデオカメラが用いられて

いる。ここでは、スポーツシューズに関する例をとりあげる。Fig.1 はバレーボールのスパイク時におけるジャンプ動作の高速ビデオカメラ画像である。

また、Fig.2, Fig.3 はその時の床反力波形を示している。実際のジャンプ時の足部やシューズの動きは 3 次元的な複雑な運動を行なうので、床反力計や足圧分布測定装置、あるいは筋電計等の測定デバイスを目的に応じて多角的に装着して実験を行なう場合が多い。

この動作の特徴を概観すると、先ず、踵から着地し(1)、ブレーキ力が最大の時に、足底全体を用いていることがわかる(2)。また、能動的ジャンプ力を発揮する局面に移

Fig.2 Vertical ground reaction force in jump motion. (ASICS Corp.)

Fig.3 Horizontal ground reaction force in jump motion. (ASICS Corp.)

Fig.1 An example of jump motion for spike in Volley ball. (ASICS Corp.)

* 原稿受付 2003 年 1 月 16 日

** 山形大学 教育学部

行するにしたがって、重心の位置が内側よりになり(3)、加速期では、MP 関節（中足骨骨頭部周辺）に大きな力が働いていることが推察される(4)。これらの分析に対応して、バレーボールシューズのデザインは、踵部分の緩衝特性の向上(1)、足底外側部分のブレーキング機能の向上(2)、重心移動による内側への変形のコントロール(3)、MP 関節周辺部分のエネルギーロスの最小化(4)等が重要となってくるわけである。勿論、実際には前述したいろいろな測定センサーの情報が多角的、かつ総合的に統合して検討され、最終的に製品に結びついていくのである。

一方、別の例として、バスケットボールのターン動作を分析したものがある (Fig. 4)。Fig. 5 はその時の床反力を示している。

バスケットボールは競技特性上、床でのターン動作が極めて重要な技術要素となる。着地時はつま先、母指球部側から着地(1)、ブレーキ最大時も足底前面が中心となっている(2)。重心移行期ではかなり大きな横方向の力が発生しており(3)、加速期では MP 関節に大きな力が働いていることが推定される(4)。これらのデータから、つま先、母指球部側の接地性の向上(1)、足底前面

Fig. 4 An example of turn motion in Basket ball. (ASICS Corp.)

Fig. 5 Grand reaction force in turn motion. (ASICS Corp.)

部の緩衝性の向上(2)、横方向の力に対する変形のコントロール、ソールの横ずれの抑制(3)、MP 関節周辺部分のエネルギーロスの最小化(4)等がデザイン指針としてあげられよう。したがって、バレーボールのジャンプでは、踵周辺の緩衝機能が要求されるのに対して、バスケットボールのターン動作では、足底部前面の緩衝機能が要求されるのである。このように同じ体育館で行なわれるスポーツであっても競技特性によってシューズに要求される機能は異なり、これに個人の身体能力やクセ、感性等が要素として入ってくるので、高機能シューズの研究開発というものは、最先端の多角的知識やノウハウが必要なハイテク分野であると言える。

また、このような高速度ビデオカメラによる分析と同時に、その現象のメカニズムの解明や予測、最適化をねらいとして、コンピュータシミュレーションも並行的に試みられている。例えば、前述のバレーボールのジャンプ動作、バスケットボールのターン動作では、着地する部分は異なるが、加速期では、共に MP 関節周辺、特に母指球サイドに大きな力が発生している傾向がみられている。この原因を探っていくため、足関節の有限要素骨格モデルを開発し、足関節部外側の剛性と内側の剛性が比較されている。Fig. 6 は 15 度傾いて足低部外側から接触した場合の応力分布を、Fig. 7 は -15 度傾いて足低部内側から接触した場合の応力分布を示している。

その時の床反力を比較すると、足関節内側から接触した場合の方が、足関節外側から接触した場合より、素早く大きな力が発揮されているのがわかる (Fig. 8)。これは、足関節構造のアライメントや構造特性が原因の一つになっていると考えられ、足関節内側の方が外側より剛性が高く、エネルギーロスが小さいと推定される。このようなコンピュータシミュレーションによるアプローチも近年は増加してきており、現象を正確に記述、把握すると言う意味でも、モデルの妥当性を検証するという意味でも、今後、高速度ビデオカメラとの連携が益々重要になってくるであろう。

Fig. 6 The stress contours on the deformed shape at outside impact. (front view)

Fig. 7 The stress contours on the deformed shape at inside impact. (front view)

Fig. 8 Comparison of grand reaction force between inside impact and outside impact using computer simulations.

3. サッカーのキックの分析

スポーツにおける高速ビデオカメラというと、トッププロスポーツ選手の動作や技術を、2台以上のカメラを同期させて撮影し、DLT法等⁴⁾で3次元座標を合成して分析するという方法がしばしば用いられる。そして一度、3次元座標値を収集できると、インパースダイナミクスによって関節トルク⁵⁾やパワー、筋モーメント等の検討が可能になる。

例えば、トッププロサッカー選手であるストイコビッチ選手(元ユーゴスラビア代表)と日本のユース選手のインサイドキックを比較した⁶⁾のがFig. 9である。インサイドキックというのは足の内側を使ってボールをミートするキックで、ゴルフのパターのような蹴り方である。蹴り足を外側に捻る(回外)パワーを比較すると、ストイコビッチ選手よりユース選手の方がむしろ大きなパワーを出しているのがわかる。蹴り足を振り出すパワーは、ストイコビッチ選手の方が大きく、総合的にユース

Fig. 9 Comparison of the power in external rotation of kicking leg between top professional player (Pixy) and youth player (Japanese). (Nagoya Univ.)

選手は教科書的な踵を押し出すキック動作を、ストイコビッチ選手はよりインステップキックに近いキック動作をしていることが明らかになった。このストイコビッチ選手タイプのインサイドキックは足部の運動が回転運動と並進運動がミックスされると言う意味でコントロールが難しくなるが、スイングスピードが上げやすい利点があると推測され、速いパススピードを要求されるゲーム展開に適応していると考えられる。また、蹴り足の運動様式だけで言えば、非力なジュニアサッカー選手のインサイドキック動作とストイコビッチ選手のインサイドキック動作が似ていたのも興味深い。

また、我々の研究グループは、英国シェフィールド大学と流体解析ソフト大手のフルーエント社との共同研究プロジェクトとして、サッカーのカーブキックに関する研究^{7),8)}を行っている。これは、実験等で実際の現象を把握しようとするだけでなく、コンピュータシミュレーション技術を活用して、ボール周りの流れやボールの軌跡を予測し、場合によっては動作や用具等の最適化も試みていこうというものである。

まず、ボールスピンを生み出すインパクト過程の分析として、高速ビデオカメラ(4500 fps; フォトロン株式会社)を用いた実験と、固体と流体の連成解析を適用したボールインパクトの衝撃解析を行い、インパクトの瞬間におけるボールとキッカーの足の歪や、ボールスピード、回転数、摩擦係数の関係等を検討している(Fig. 10 & Fig. 11)。そしてボールの回転には摩擦力同様、オフセット距離が重要であることや(Fig. 12)、ボールスピードをそれ程落とさずにキックするためには、オフセット距離を小さくする必要があること等が示唆された(Fig. 13)。

それらの結果より、実際のフリーキックにおけるカーブボールのボール速度は、25~30 m/sであり、回転数は5~10 r/s程度であると考えられた。

それをうけて、サッカーボールの空力特性に関する煙風洞実験を行い、一定の速度範囲における抵抗係数を測

Fig. 10 An example of high speed video image (4500 fps) at impact in curve ball kick.

Fig. 11 The pressure contours on the deformed shape at ball impact.

Fig. 12 Relation of coefficient of friction and spin ratio in curve kick simulation.

定した (Fig. 14). そして, 本実験環境では, スムースなボールとゴルフボールの間である, 10 の 5 乗前後のレイノルズ数において, ドラッグクライシスがかかることが観測された (Fig. 15). また, 類似の条件下で, 数値流体解析 Solver である Fluent 6.0 を用いてコンピュータシミュレーションを行い, ボール周りの流れを可視化すると共に, 変化するボールの軌跡を算出した (Fig. 16). その結果, 25 m/s のボールスピードで回転

Fig. 13 Relation of offset distance, spin ratio and ball speed in curve kick simulation.

Fig. 14 Wind tunnel experiment about soccer ball. (Sheffield Univ.)

Fig. 15 Drag coefficient of non-spinning soccer ball. (Sheffield Univ.)

数が 50 rad./s (毎秒約 8 回転) の場合, インパクト 1 秒後に 3 m 以上もボールコースが偏向することが示された。

これら一連の研究は, 将来的にはシューズ等のスポーツ用具の研究・開発や, スポーツ技術の理解や向上に貢献できると考えている。しかし, 現時点では, 極めて基本的段階であり, 課題も多い。例えば, 回転するサッカー

Fig. 16 CFD analysis of soccer ball. (Fluent Inc.)

ボールのドラッグクライシスが起こる臨界レイノルズ数はよく分かっていない（我々の予備実験では臨界速度が19–22 m/s ぐらいと推定されたが、詳細は不明である）。また、それが起きたとしても、回転の両側で同時に起きるのか、片側ずつタイミングが異なるかなど、問題点は山積している。我々の研究グループは、これらの課題を他の研究グループと複合的にコラボレーションを行なうことによって、一つずつ問題解決していきたいと考えている。どんなことでも、また、どんな分野の方でも結構なので、ご批判、ご助言、ご教示を頂けると幸いである。

4. 動画データベースと教材作り

高速ビデオ画像に限らず、動画を扱うとまたたく間にビデオテープが山積するのが常であり、書棚やビデオケースが8ミリビデオやVHS等のテープでうずまっているのは、我々の研究室だけではないと思われる。一度しか使用しないのであれば、倉庫に眠っていても問題はないが、何度も見返したり、データを取り直したり、他の教材や資料作成に活用したりと、動画を再利用する場合も少なくない。従来、せいぜい使いそうなビデオテープを身近な所に置いて、整理整頓を心がけるといった程度であったが、最近、動画を自動的にデジタルデータ

としてデータベース化してくれるツールが幾つか出てきているようである（Fig. 17）。

これらのツールは、自動データ作成技術や画像インデックス自動生成技術により動画データベースを自動的に構造化することができる。また、XML Web サービス技術を活用して、学生や研究者をはじめ多くのクライアントやユーザーが、テキストや音声でコンテンツを検索、閲覧することが可能である。高速ビデオカメラによる動画やそれに伴うデータは、教材や資料の作成、eラーニングにおけるストリーミングコンテンツの開発等に利用されるが（Fig. 18）、このような動画データベースをシステム化しておくことによって、いちいちビデオテープを探したり、コピーしたりする煩雑なワークから開放されることが期待できよう。また、このようなデータベースの活用は、単独の研究室や研究機関にとどまる必要は無く、インターネットを介して非常に広範囲のコンテンツ流通を可能にすると考えられる。スポーツ関係で言えば（例えば国立スポーツ科学センターが中心となって）、いつでもどこでも様々なスポーツに関連する動画コンテンツや関連するデータにアクセスすることが可能になる日も、そう遠くではないはずである。

5. おわりに

高速ビデオカメラの発達により、全く新しい未知の映像や、これまで見たくても見えなかった映像を見ることが可能になってきている。なにはともあれ、関心のある現象を、直接、映像で見えるということは面白いことであり、ありがたいことでもある。スポーツは本質的に運動が不可欠であり、その映像は非常に重要な意味を持つといえる。今後、もっと高性能で高解像度の高速ビデオカメラ等が開発されてくると予測されるが、それに伴って新しい発見や創造が生まれてくる事が期待され、スポーツ関係者は高速ビデオカメラから目を離せないといっても過言ではないだろう。

謝 辞

本稿で用いた画像やデータ等の資料は、他の研究機関

Fig. 17 An example of tool for motion data base. (Power Index; Photoron Inc.)

Fig. 18 An example of educational program using high speed video image. (Japan Broadcasting Corp.)

とのコラボレーションによるものや、提供して頂いたものが少なくない。この場を借りて、アシックス株式会社、フォトロン株式会社、フルーエント株式会社、エムエスシーソフトウェア株式会社、シェフィールド大学、名古屋大学、日本放送協会（NHK）に心から感謝致します。

参考文献

- 1) 浅井武, 布目寛幸, 岩波科学ライブラリー 見方が変わるサッカーサイエンス, (2002), 岩波書店.
- 2) 浅井武, 布目寛幸, 星川佳広, 橋詰謙, 西脇剛史, 浅井武監修, ファンタジスタの科学, (2002), 光文社.
- 3) T. Nishiwaki, N. Nakabe, Numerical design of running shoes based on human response, The engineering of sport, 4, S. Ujihashi and S. J. Haake Ed., Blackwell Science, (2002), pp 393-399.
- 4) 阿江通良, 藤井範久, スポーツバイオメカニクス 20 講, (2002), 朝倉書店.
- 5) 深代千之, 柴山明, スポーツ基礎数理ハンドブック, (2000), 朝倉書店.
- 6) H. Nunome, T. Asai, Y. Ikegami, S. Sakurai, Three-dimensional kinetic analysis of side-foot and instep soccer kicks, Med. Sci. Sports Exerc., 34, (2002), pp 2028-2036.
- 7) T. Asai, M. J. Carre, T. Akatsuka, S. J. Haake, The curve kick of a football, I : impact with the ball, Sports Engineering, 5, (2002), pp 183-192.
- 8) M. J. Carre, T. Asai, T. Akatsuka, S. J. Haake, The curve kick of a football, II : flight through the air, Sports Engineering, 5, (2002), pp 193-200.

(a) バレーボールのスパイク時におけるジャンプ動作の高速ビデオ画像（アシックス株式会社）

(b) サッカーボール周りの数値流体解析（フルーエント社）

口絵 4 スポーツにおける高速ビデオカメラ

（山形大学 教育学部 浅井 武）

（本文 101 頁参照）