

## バドミントン・スマッシュ動作のヘッドスピード獲得メカニズム におけるラケットシャフト部のしなりの影響

橋口 友洋<sup>\*1</sup>, 小池 関也<sup>\*2</sup>

### Influence of Racket Shaft Deformation on Mechanism Generating Racket Head Speed during Badminton Smash Motion

Tomohiro HASHIGUCHI<sup>\*1</sup> and Sekiya KOIKE<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> University of Tsukuba, 1-1-1 Ibaraki, 305-8574 Japan

The purpose of this study was to quantify the dynamical roles of racket shaft elasticity during badminton smash motion. The racket shaft was divided into a set of rigid segments connecting to its adjacent segments via virtual joints with rotational springs. The deformation of racket shaft was approximated by using a 2nd order polynomial function from measured data during swing motion. The contribution of the joint torques to the racket head speed was obtained from the equation of motion for the system. Furthermore, with use of the equation, a recurrent equation with respect to the expanded generalized velocity vector, which consists of generalized acceleration and velocity vectors and the time integration of the velocity vector, was derived to calculate the contribution of the joint torque terms, external joint force term, and gravity term to the generation of the expanded generalized velocity vector. In order to realize stable numerical calculation for stiff system, the Newmark-beta method was used at the computation of recurrent equation. From the results, motion dependent term (M.D.T.), which plays significant roles for the generation of racket-face speed, was generated by shaft restoring torque at the middle phase of swing, and by joint torque term toward the impact. The shaft deformation was caused by wrist radial-ulna and shoulder internal-external rotation joint torques. These results indicate that racket face was accelerated by wrist and shoulder joint torques which generated M.D.T. by bowing racket shaft.

**Key Words** : Badminton Smash, Shaft Deformation, Dynamics Analysis, Newmark-beta Method

#### 1. はじめに

バドミントンの特徴は、多くの球技スポーツの中でも、打球の際のシャトルの打ち出し速度が大きいことである。特に決定打として用いられることが多いスマッシュ動作においては、その初速は最大 400 km/h にも達するとされている。このような大きなシャトル速度を獲得するために、ラケットのフェース部は、弾性を有するシャフトを介して急加速されている。近年、素材開発の進歩、およびユーザーの用具に対する軽量化志向に伴い、シャフト部には CFRP 材が使われ、より「軽く」「しなる」打具が登場している。これらの機械的特性に着目して、これまでに、バドミントンあるいはゴルフといったスポーツにおいて、ラケットおよびクラブのシャフトに関する研究がいくつか行われてきている<sup>(6),(7)</sup>。加えて、バドミントン・スマッシュは野球の投動作、バレーボールのスパイク動作などと同様に、全身運動によって身体の中心部から末端部へと順次各部位を加速させるスウィング動作であり、対象とする系の運動方程式に基づく動力学的分析がこれまでに行われている<sup>(2),(9),(10)</sup>。しかしながら、いずれの報告も、シャフト部の特性の違いが打具の挙動に及ぼす影響、もしくは、身体動作のスピード獲得メカニズムそのものに着目した研究であり、末端部、あるいは打撃部のスピード獲得メカニズムに対して、打具の弾性特性がどのように影響を及ぼしているかを詳細に定量化している研究は、著者らの報告を除いて、ほとんど行われていない。

<sup>\*1</sup> 学生員, 筑波大学 大学院 人間総合科学研究科 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

<sup>\*2</sup> 正 員, 筑波大学 体育系

E-mail: koike@taiiku.tsukuba.ac.jp

これまでに著者らは、まずシャフト部を複数の剛体リンクセグメントによって分割したモデルを用いて、ラケットヘッドスピード生成に対するシャフト部のしなりによる弾性トルク項の動力的貢献を求め、さらに拡大系の運動方程式を利用して導出した漸化式を用いて、運動依存項、および弾性トルク項を他項へと変換することにより、弾性構造を有する打具のヘッドスピード生成に対する身体の各関節トルクの貢献を詳細に分析可能な手法を提案している<sup>(4),(5)</sup>。しかしながら、この手法では、分割するセグメント数の増加に伴い、多くのセグメント変数が必要となり、個々のセグメントの質量や慣性モーメントは小さくなることになる。このため、バドミントン・スマッシュ動作のような、軽量でシャフト部の剛性が大きい打具を、高速でスウィングする動作を分析対象とする場合、解析が煩雑となり易い。また、拡大系の運動方程式を用いて運動依存項、および弾性トルク項の両項を他項へと変換した場合、スウィング動作において大きな役割を担っているとされる運動依存項の生成に対して、ラケットシャフト部のしなりがどのような影響を及ぼしているかについては詳細に定量化されていない。さらに、対象とする身体モデルが上腕部、前腕部、および手部よりなるラケット腕であったため、例えばラケットを把持していない側の上肢や、体幹の各関節トルクの働きについては分析されていない<sup>(5)</sup>。

そこで本論文では、シャフト部のしなりを考慮して構築した上半身—ラケット連成モデルを用いて、バドミントン・スマッシュ動作におけるラケットヘッドスピード獲得メカニズムを分析する際に、上述の課題を解決可能な手法を提案し、シャフト部のしなりが及ぼす影響について詳細に検討することを目的とした。具体的には、まずシャフト部のしなりを考慮可能なラケットモデルを構築し、10の剛体セグメントよりなる身体上半身モデルと連成させることにより、系の運動方程式を導出する。続いて、シャフトの変形特性を曲線近似により表現することによって、セグメントの状態変数を安定に求める手法を提案する。そして、小池ら<sup>(2)</sup>の手法を用いて運動依存項のみを選択的に他項へと変換し、運動依存項の発生要因としての弾性トルク項の役割について検討する。最後に、運動依存項に加えて弾性トルク項を他項へと変換する際の解析を安定に行うため、ニューマークβ法を採用した拡大系の運動方程式を導出し、ヘッドスピードに対する各項の貢献を算出し、そのメカニズムについて考察する。

## 2. 方 法

本章では、シャフトの変形特性を曲線近似によって表現したラケットモデルを用いて、人体—ラケット連成系の運動方程式を導出する手法について述べる。そして、運動依存項の他項への選択的帰着法、ならびにニューマークβ法を用いて導出した拡大形の一般化状態変数ベクトルに対する漸化式を利用して、シャフトの弾性トルク項および運動依存項を他項へと安定に変換する方法について述べる。

### 2・1 系の運動方程式の導出<sup>(3)</sup>

上半身を分析の対象として、左右の上肢については、手部、前腕、および上腕の各セグメントに、体幹については上腕および左右肩甲帯の各セグメントにそれぞれ分割して、頭部を含めた計10セグメントモデルとした。

図1に示すセグメント*i*に対する並進および回転に関する運動方程式を全セグメント分まとめると、

$$M\dot{V} = PF + P_{\text{ext}}F_{\text{ext}} + QN + H + G \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $M$ は慣性行列、 $P$ および $Q$ は各関節に加わる関節作用力 $F$ および関節作用モーメント $N$ に対する係数行列、 $P_{\text{ext}}$ は系に作用する外力 $F_{\text{ext}}$ に対する係数行列、 $G$ は重力加速度項を示すベクトルであり、 $H$ は各セグメントのジャイロモーメント項を表すベクトルである。なお、本モデルにおいては、体幹部仮想関節に作用する関節力を外力として扱うこととした。

つぎに、隣り合うセグメントが関節により連結されるための拘束条件式を微分したのち、一般化速度ベクトル $V$ を用いて、各隣接セグメントについてまとめると次式として表すことができる。

$$C\dot{V} + \dot{C}V = 0 \quad (2)$$

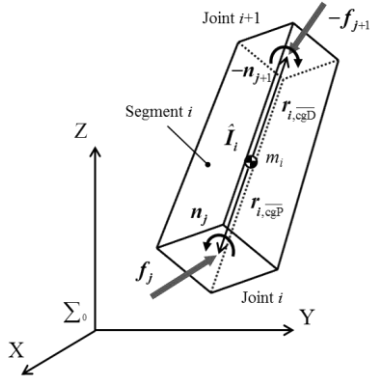


Fig.1 Free body diagram of a segment

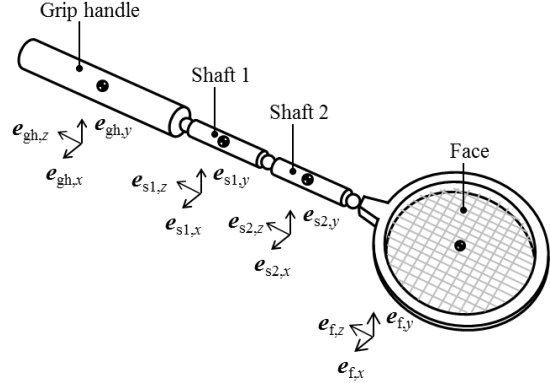


Fig.2 Schematic representation of the racket

さらに、各関節における受動的な関節軸自由度を考慮するための拘束式は、同様に、一般化速度ベクトル  $\mathbf{V}$  を用いて、下記の通り表すことができる。

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{V}} + \dot{\mathbf{A}}\mathbf{V} = \mathbf{0} \quad (3)$$

最後に、式(1)～(3)を連立し、関節作用力  $\mathbf{F}$  および関節トルクの受動的成分として生じる  $\mathbf{T}_{psv}$  を消去することにより、対象とする系の運動方程式は、

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_{Fe}\mathbf{F}_{ext} + \mathbf{A}_{Ta}\mathbf{T}_{act} + \bar{\mathbf{A}}_v\mathbf{V} + \mathbf{A}_G\mathbf{G} \quad (4)$$

として求められる。ここで、行列  $\mathbf{A}_{Fe}$ ,  $\mathbf{A}_{Ta}$ ,  $\bar{\mathbf{A}}_v$ , および  $\mathbf{A}_G$  はそれぞれ、外力、関節トルクの能動的成分  $\mathbf{T}_{act}$ , 一般化速度ベクトル, および重力加速度項に対する係数行列である。

## 2・2 ラケットシャフト部の簡易モデル化

ラケットシャフト部のしなりについては、図2に示すように、まずシャフト部を複数の剛体セグメントに分割し、隣接するセグメント間に設定した回転ばねを有する仮想関節の角変位に応じて復元トルクが作用するものとして表現している。本研究では、ラケットシャフト部の径が概ね均一な円筒形状であるという特徴を考慮して、スウィング中のシャフト部の変形を多項式によって曲線近似することとした。具体的には、まず、3次元動作自動分析装置によって得られたスウィング中のラケットシャフト部各点(6点)のしなりによる変位から近似曲線を求め、その曲線を用いて各点を再構築した。つぎに、再構築した座標値をもとにシャフト部を剛体セグメントとして分割し、次式に示すように、分割した各セグメントの速度および角速度を、グリップ部の速度と角速度、およびグリップ座標系から見たシャフト先端の変位を用いて算出した。

$$\dot{\mathbf{x}}_{s,i} = \dot{\mathbf{x}}_g + \boldsymbol{\omega}_g \times {}^0\mathbf{R}_G \mathbf{L}_{s,i} + {}^0\mathbf{R}_G \mathbf{D}_{s,i} {}^G \dot{\boldsymbol{\eta}}_s \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{s,i} = \boldsymbol{\omega}_g + {}^0\mathbf{R}_G \mathbf{B}_{s,i} {}^G \dot{\boldsymbol{\eta}}_s \quad (6)$$

ここで、 $\dot{\mathbf{x}}_g$ ,  $\boldsymbol{\omega}_g$  はグリップ部の重心速度および角速度、 ${}^0\mathbf{R}_G$ ,  ${}^G \dot{\boldsymbol{\eta}}_s$  はそれぞれグリップ部に設定した座標系およびその座標系から見たシャフト先端の変位、 $\mathbf{L}_{s,i}$ ,  $\mathbf{B}_{s,i}$  は係数行列である。図3に、実際に得られた座標値をもとに算出したシャフト各セグメントの重心速度および角速度、ならびに式(4)および(5)を用いて推定したシャフト各セグメントの速度および角速度の各値を示す。同図から、いずれのセグメントにおいても測定値と推定値が概ね一致していることがわかる。これにより、シャフト部の分割セグメント数に依らず、2次多項式を用いた近似曲線により、各セグメントの変数を安定に計算可能であることが示された。

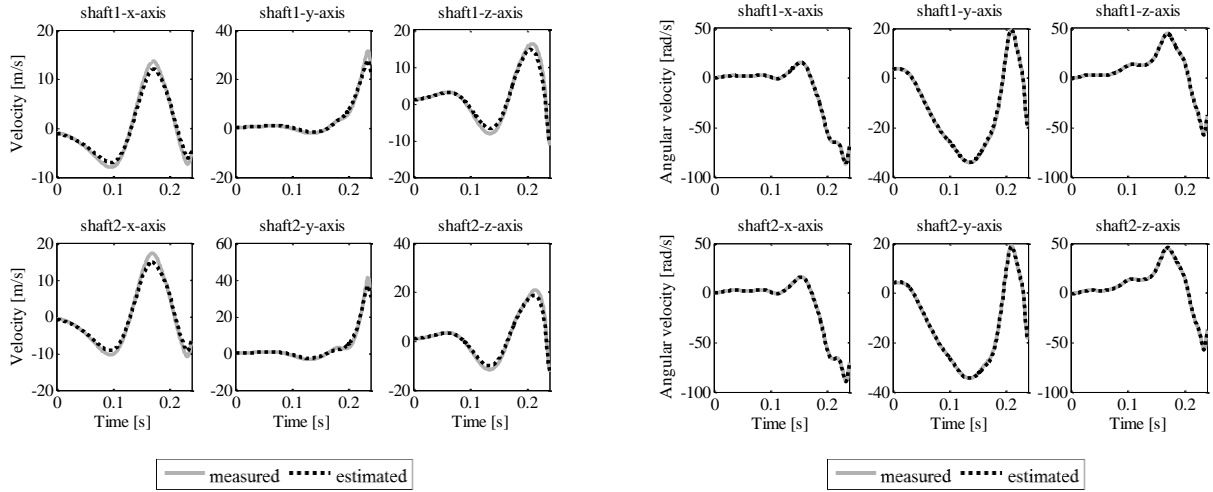


Fig.3 Comparison of velocity and angular velocity between measured and estimated values

### 2・3 シャフトのしなりの取り扱い<sup>(5)</sup>

本研究では、スウィング中のシャフト部のしなりを表現するために、分割したシャフト間に設けた仮想関節の角変位に応じた復元トルクが各仮想関節に作用するものとして、しなりを取り扱っている。すなわち、まず式(4)内における関節トルク項を式(7)に示すように、人体が能動的に発揮するトルク  $T_H$  と、シャフトに作用するトルク  $T_S$  とに分けて表す。

$$A_{Ta}T_{act} = A_{TH}T_H + A_{TS}T_S \quad (7)$$

つぎに、シャフト部に作用するトルクは、一般化速度ベクトル  $V$  の積分値である  $X$  を用いて、

$$T_S = K_S X \quad (8)$$

と表すことができる。なお、 $K_S$  は各シャフト仮想関節に対する剛性行列を含む係数行列である。式(4)、(7)、および式(8)より、シャフトのしなりを考慮したラケット-上半身連成系の運動方程式は、

$$\dot{V} = A_{TH}T_H + A_{TS}K_S X + \bar{A}_v V + A_G G + A_{Fe} F_{ext} \quad (9)$$

と求めることができる。式(9)の右辺はそれぞれ、一般化加速度ベクトル生成に対する関節トルク項、弾性トルク項、運動依存項、重力項、および外力項の貢献を示している。なお、上式を数値積分することにより、系の一般化速度ベクトル生成に対する各項の貢献も定量化でき、さらには、各セグメントの重心あるいは特徴点のスピード獲得に対する各項の貢献を求めることができる。

### 2・4 運動依存項の他項への変換<sup>(2)</sup>

先行研究により、テニスサーブや投球動作などにおいては、身体末端部あるいは打撃部の速度獲得に運動依存項が大きく貢献することが報告されている<sup>(2),(9)</sup>。バドミントンにおけるスマッシュ動作についても、これらの動作と同様に、打具の打撃部のスピード獲得を目的としたスウィング動作であるため、ここでは、小池ら<sup>(2)</sup>の提案した手法を用いて、運動依存項を外力項、関節トルク項、弾性トルク項、重力項へと変換することを考える。すなわち、式(9)を、 $k$  を時刻とする離散システムによって表し、一般化加速度ベクトルに対する差分近似式を連立することにより一般化速度ベクトルに関する漸化式が下記の通り導出される。

$$V(k+1) = \Delta t A_v(k) + \Psi_v(k) V(k) \quad (10a)$$

$$A_v(k) = A_{Fe}(k) F_{ext}(k) + A_{TH}(k) T_H(k) + A_{TS}(k) T_S(k) + A_G(k) G(k), \quad \Psi_v(k) = E + \Delta t \bar{A}_v(k) \quad (10b)$$

そして、式(10a)を順次遡ることにより、一般化速度ベクトルに対する各時刻の各種入力項の貢献を、次式として求めることができる。

$$\mathbf{V}(k) = \mathbf{V}_{F,ext}(k) + \mathbf{V}_{T,act}(k) + \mathbf{V}_{T,shaft}(k) + \mathbf{V}_G(k) + \mathbf{V}_{v_0}(k) \quad (11)$$

## 2・5 ニューマークβ法を用いた弾性トルク項の他項への変換

シャフトの変形特性を考慮した上半身 - ラケット系の運動方程式をそのまま用いた場合、一般化速度ベクトルに対する弾性トルク項の貢献が  $\mathbf{A}_{Ts}\mathbf{K}_s\mathbf{X}$  の積分により算出されることになる。また、先述した運動依存項のみを選択的に他項へと変換する手法を採用しても、依然として弾性トルクの貢献が計上される。しかし、系への入力は関節トルクによるものが大半であり、元々関節トルクによって受動的に生じたものである。そこで、弾性トルクを関節トルク項、重力項など他項に変換するため、著者らはこれまでに一般化速度ベクトルおよびその積分値よりなる一般化速度ベクトル  $\mathbf{Z}$  を定義し、拡大系の運動方程式を用いることによって、運動依存項と弾性トルク項を他項へと変換する手法を提案している<sup>(4),(5)</sup>。しかし、この手法をシャフトのように慣性パラメータが小さく、変形剛性が大きな場合に適用すると、系が数値的に硬い系となるため、その演算課程は不安定となり易い。そこで本論文では、この問題を解決するために、陰解法であり、硬い系 (stiff system) に対して比較的安定に計算可能である全変位形のニューマークβ法<sup>(8)</sup>を用いて、弾性トルク項を他項へと変換することを考える。

具体的には、時刻  $k+1$  に対する時刻  $k$  からの状態量の変化式

$$\dot{\mathbf{V}}(k+1) = \dot{\mathbf{V}}(k) + \Delta\dot{\mathbf{V}} \quad (12)$$

$$\mathbf{V}(k+1) = \mathbf{V}(k) + h\dot{\mathbf{V}}(k) + \frac{1}{2}h\Delta\dot{\mathbf{V}} \quad (13)$$

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{X}(k) + \frac{1}{2}h^2\dot{\mathbf{V}}(k) + \beta h^2\Delta\dot{\mathbf{V}} \quad (14)$$

を使用する。ここで、 $\Delta\dot{\mathbf{V}}$  は未知の加速度増分であり、 $h$  は刻み時間、 $\beta$  は係数である。式(12)より、

$$\Delta\dot{\mathbf{V}} = \dot{\mathbf{V}}(k+1) - \dot{\mathbf{V}}(k) \quad (15)$$

と表すことができる。これを式(13)、(14)にそれぞれ代入すると、

$$\mathbf{V}(k+1) = \mathbf{V}(k) + \frac{1}{2}h\dot{\mathbf{V}}(k) + \frac{1}{2}h\dot{\mathbf{V}}(k+1) \quad (16)$$

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{X}(k) + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)h^2\dot{\mathbf{V}}(k) + \beta h^2\dot{\mathbf{V}}(k+1) \quad (17)$$

を得る。ここで、式(9)を  $k+1$  を時刻として離散化すると、次式として示される。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}(k+1) &= \mathbf{A}_{TH}(k+1)\mathbf{T}_H(k+1) + \mathbf{A}_G(k+1)\mathbf{G}(k+1) + \mathbf{A}_{Fe}(k+1)\mathbf{F}_{ext}(k+1) \\ &\quad + \mathbf{A}_{Ts}(k+1)\mathbf{K}_s(k+1)\mathbf{X}(k+1) + \bar{\mathbf{A}}_v(k+1)\mathbf{V}(k+1) \end{aligned} \quad (18)$$

さらに、式(16)～(18)を用いることにより、時刻  $k+1$  の  $\dot{\mathbf{V}}$ 、 $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{X}$  はそれぞれ、

$$\dot{\mathbf{V}}(k+1) = \Phi_h^{-1}\mathbf{A}_z(k+1) + \mathbf{A}_a\dot{\mathbf{V}}(k) + \mathbf{B}_a\mathbf{V}(k) + \mathbf{C}_a\mathbf{X}(k) \quad (19)$$

$$\mathbf{V}(k+1) = \frac{1}{2}h\Phi_h^{-1}\mathbf{A}_z(k+1) + \mathbf{A}_b\dot{\mathbf{V}}(k) + \mathbf{B}_b\mathbf{V}(k) + \mathbf{C}_b\mathbf{X}(k) \quad (20)$$

$$\mathbf{X}(k+1) = \beta h^2\Phi_h^{-1}\mathbf{A}_z(k+1) + \mathbf{A}_c\dot{\mathbf{V}}(k) + \mathbf{B}_c\mathbf{V}(k) + \mathbf{C}_c\mathbf{X}(k) \quad (21)$$

と表すことができる。但し、

$$\Phi_h = \mathbf{E} - \frac{1}{2}h\bar{\mathbf{A}}_v(k+1) - \beta h^2 \mathbf{A}_{TS}(k+1)\mathbf{K}_S(k+1) \quad (22)$$

$$\mathbf{A}_Z = \mathbf{A}_{TH}(k+1)\mathbf{T}_H(k+1) + \mathbf{A}_G(k+1)\mathbf{G}(k+1) + \mathbf{A}_{Fe}(k+1)\mathbf{F}_{\text{ext}}(k+1) \quad (23)$$

$$\mathbf{A}_a = \frac{1}{2}h\Phi_h^{-1}\bar{\mathbf{A}}_v(k+1) + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)h^2\Phi_h^{-1}\mathbf{A}_{TS}(k+1)\mathbf{K}_S(k+1) \quad (24a)$$

$$\mathbf{A}_b = \frac{1}{2}h\mathbf{E} + \frac{1}{4}h^2\Phi_h^{-1}\bar{\mathbf{A}}_v(k+1) + \left(\frac{1}{4} - \frac{\beta}{2}\right)h^3\Phi_h^{-1}\mathbf{A}_{TS}(k+1)\mathbf{K}_S(k+1) \quad (24b)$$

$$\mathbf{A}_c = \left(\frac{1}{2} - \beta\right)h^2\mathbf{E} + \frac{1}{2}\beta h^3\Phi_h^{-1}\bar{\mathbf{A}}_v(k+1) + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)h^4\Phi_h^{-1}\mathbf{A}_{TS}(k+1)\mathbf{K}_S(k+1) \quad (24c)$$

$$\mathbf{B}_a = \Phi_h^{-1}\bar{\mathbf{A}}_v(k+1), \quad \mathbf{B}_b = \mathbf{E} + \frac{1}{2}h\Phi_h^{-1}\bar{\mathbf{A}}_v(k+1), \quad \mathbf{B}_c = \beta h^2\Phi_h^{-1}\bar{\mathbf{A}}_v(k+1) \quad (25)$$

$$\mathbf{C}_a = \Phi_h^{-1}\mathbf{A}_{TS}(k+1)\mathbf{K}_S(k+1), \quad \mathbf{C}_b = \frac{1}{2}h\Phi_h^{-1}\mathbf{A}_{TS}(k+1)\mathbf{K}_S(k+1), \quad (26)$$

$$\mathbf{C}_c = \mathbf{E} + \beta h^2\Phi_h^{-1}\mathbf{A}_{TS}(k+1)\mathbf{K}_S(k+1)$$

である。ここで、拡大系の一般化速度ベクトル  $\mathbf{Z}$  を、状態変数である  $\dot{\mathbf{V}}, \mathbf{V}, \mathbf{X}$  を用いて次式として定義する。

$$\mathbf{Z}(k) = \left[ \dot{\mathbf{V}}(k)^T \quad \mathbf{V}(k)^T \quad \mathbf{X}(k)^T \right]^T \quad (27)$$

このとき、拡大系の一般化速度ベクトル  $\mathbf{Z}$  に関する漸化式が

$$\mathbf{Z}(k+1) = \mathbf{P}_h(k+1)\mathbf{A}_Z(k+1) + \mathbf{Q}_h(k+1)\mathbf{Z}(k) \quad (28)$$

$$\mathbf{P}_h(k+1) = \begin{bmatrix} \Phi_h^{-1} \\ \frac{1}{2}h\Phi_h^{-1} \\ \beta h^2\Phi_h^{-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_h(k+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_a & \mathbf{B}_a & \mathbf{C}_a \\ \mathbf{A}_b & \mathbf{B}_b & \mathbf{C}_b \\ \mathbf{A}_c & \mathbf{B}_c & \mathbf{C}_c \end{bmatrix}$$

と導出できる。この漸化式を用いて、運動依存項および弾性トルク項を他項に変換でき、各時刻の  $\mathbf{Z}$  の生成に対する各時刻の各項の貢献を求めることが可能となる。なお、式 (28) を用いると、評価時刻  $k_{\text{eval}}$  の  $\mathbf{Z}$  に関する各時刻の各項の貢献式を下記の通り求めることができる。

$$\mathbf{Z}(k) = \sum_{h=1}^{k-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k-h}^{k-1} \mathbf{Q}_h(j) \right\} \mathbf{P}_h(h-1)\mathbf{A}_Z(h-1) \right] + \left\{ \prod_{j=0}^{k-1} \mathbf{Q}_h(j) \right\} \mathbf{Z}(0) \quad (29)$$

この式は、次式の通り、関節トルク、外力、重力、初期値それぞれの項による貢献に細分化できる。

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{Z}_{\text{F,ext}}(k) + \mathbf{Z}_{\text{T,act}}(k) + \mathbf{Z}_{\text{G}}(k) + \mathbf{Z}_{\text{V0}}(k) \quad (30)$$

$$\mathbf{Z}_{\text{T,act}}(k) = \sum_{h=1}^{k-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k-h}^{k-1} \mathbf{Q}_h(j) \right\} \mathbf{P}_h(h-1)\mathbf{A}_{\text{Tn}}(h-1)\mathbf{T}_{\text{act}}(h-1) \right] \quad (31)$$

$$\mathbf{Z}_{F,\text{ext}}(k) = \sum_{h=1}^{k-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k-h}^{k-1} \mathbf{Q}_h(j) \right\} \mathbf{P}_h(h-1) \mathbf{A}_{F_e}(h-1) \mathbf{F}_{\text{ext}}(h-1) \right] \quad (32)$$

$$\mathbf{Z}_G(k) = \sum_{h=1}^{k-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k-h}^{k-1} \mathbf{Q}_h(j) \right\} \mathbf{P}_h(h-1) \mathbf{A}_G(h-1) \mathbf{G} \right] \quad (33)$$

$$\mathbf{Z}_{Z_0}(k) = \left\{ \prod_{j=0}^{k-1} \mathbf{Q}_h(j) \right\} \mathbf{Z}(0) \quad (34)$$

このように、ニューマークβ法を利用した漸化式を用いることによって、トルク項、重力項、および外力項などの各項が、拡大系の一般化速度ベクトル $\mathbf{Z}$ の生成にどれくらい貢献しているかを、安定に算出することが可能となる。なお、末端部のスピードやラケットシャフト部の角変位といった各種の評価量の算出については、拡大系の一般化速度ベクトル $\mathbf{Z}$ から随時必要となる変数を抽出することによって対応できる。

### 3. スマッシュ動作実験

#### 3.1 実験方法

大学のバドミントン部に所属する男性競技者11名(身長:  $1.75 \pm 0.07\text{m}$ , 体重  $65.3 \pm 5.2\text{kg}$ )を被験者とし、ネット越しに前方より投げ出されたシャトルに対して、ターゲットへの全力のジャンピングスマッシュ動作を行わせた。被験者の身体各代表点(47点)およびラケット各点(10点)に反射マーカを貼付し、各点の3次元座標値を、光学式3次元動作自動分析装置(Vicon Motion Systems社製, VICON-MX, 500Hz)を用いて検出した。なお、本実験は筑波大学研究倫理審査委員会の承認を得て行われた。

#### 3.2 データ処理

測定データにおけるセグメントの伸縮に起因するモデル化誤差を低減させるため、各セグメントの平均長と姿勢を用いて、肋骨下端中心を基準とし、近位から遠位の身体代表点を順次再定義することにより、セグメントの伸縮を除去した。分析区間は図4に示すように、スウィング開始後ラケットヘッドスピードが最小になる時点からインパクトまでとした。なお、インパクトの判断は、シャトルコックのコルク部分に貼付した反射素材のテープが、フレームのガット表面上に位置することを、3次元動作分析装置を用いて検出することにより行った。

### 4. 結果および考察

本章では、ラケットフェーススピード生成に対する各項の貢献として、まず、シャフトのしなりによる弾性トルクの貢献を求めたもの、次に、ヘッドスピードの生成に大きく貢献する運動依存項のみを選択的に他の項へと変換したもの、最後に、運動依存項に加えて弾性トルク項を他の項に帰着させたもののそれぞれについて、分析結果の典型例を示し、各項目の貢献の違いについて考察する。

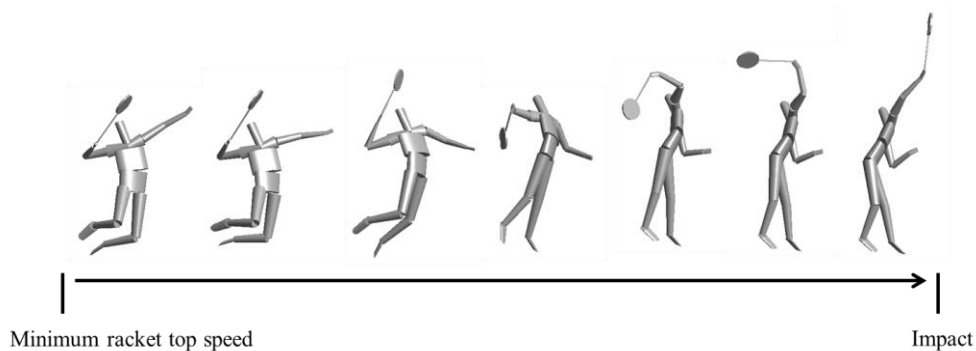


Fig.4 Stick picture of the smash motion

#### 4・1 ラケットフェーススピードに対する各項の貢献

図5(a)および(b)はそれぞれ、(a)ラケットヘッドスピード生成に対する各項の貢献を求めた結果、および(b)その際の総関節トルク項の貢献の内訳を求めた結果である。なお、以降、各関節トルクの貢献については、その値が大きかった右肩関節内外転軸(shR-AA)、右肩関節水平内外転軸(shR-HAA)、右肩関節内外旋軸(shR-IER)、右肘関節屈曲伸展軸(elbR-FE)、右肘関節回内外展軸(elbR-IER)、右手首掌背屈軸(wrR-PDF)、右手首橈尺屈軸(wrR-RU)、および右胸鎖関節水平内外転軸(scR-HAA)についてのみをグラフに掲載する。

図5(a)は、ヘッドスピード生成に対する関節トルク項、弾性トルク項、運動依存項、重力項、外力項について、各時刻における貢献を示したものである。同図から、スウィング序盤から弾性トルク項の貢献が増加していること、ならびに、中盤から終盤にかけては運動依存項および関節トルク項の貢献が増加し、弾性トルク項の貢献の符号が変化していることがわかる。そして、図5(b)から、この場合の総関節トルク項の貢献の内訳については、スウィング中盤において肩関節水平内外転トルクおよび手首関節橈尺屈トルクの貢献が負の値を示し、終盤では肩関節内外旋トルクと並んで正の貢献を示していることが認められる。

#### 4・2 運動依存項のみを選択的に変換した際の各項の貢献

図6(a),(b)はそれぞれ、運動依存項のみを選択的に他項へと帰着させた際の各項の貢献、および関節トルク項の貢献の内訳についての結果を示したものである。

まず図6(a)から、ヘッドスピードに対する各項の貢献の特徴として、スウィング序盤から中盤にかけて弾性トルク項の貢献が大きく増加していることがわかる。一方、関節トルク項の貢献については、スウィング終盤に大きな正の貢献が認められた。これらのことから、変換以前に見られたスウィング中盤から終盤にかけての運動依存項の貢献の主な発生要因は、スウィング中盤においてはシャフトの復元トルク、終盤では関節トルクであると考えられる。なお、各関節軸トルクの貢献では、スウィング終盤における肩関節内外旋トルクが正に大きく増加していることが確認された。

#### 4・3 運動依存項および弾性トルク項を変換した際の各項の貢献

図7(a),(b)はそれぞれ、ニューマークβ法を用いて運動依存項と弾性トルク項を他項へと変換した後の各項の貢献、ならびに総関節トルク項の貢献の内訳についての結果を示したものである。

図7(a)から、ヘッドスピードに対する運動依存項、および弾性トルク項の貢献は、ほとんどが関節トルク項の貢献へと変換されていることがわかる。また図7(b)から、各関節トルクの貢献では、スウィング序盤から中盤にかけて手首関節橈尺屈トルクおよび胸鎖関節水平内外転トルクが正に増加しており、中盤から終盤にかけては肩関節水平内外転トルクの符号が大きく変化し、肩関節内外旋トルクは大きく増加していることが認められた。

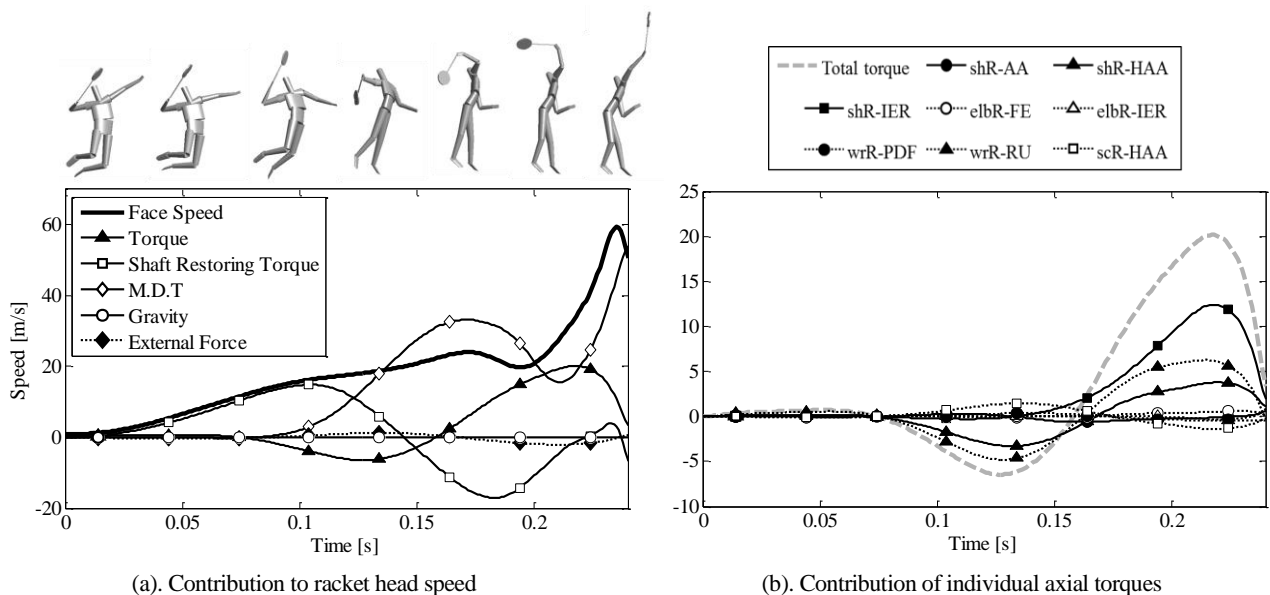


Fig.5 Contribution of the terms using elastic shaft model



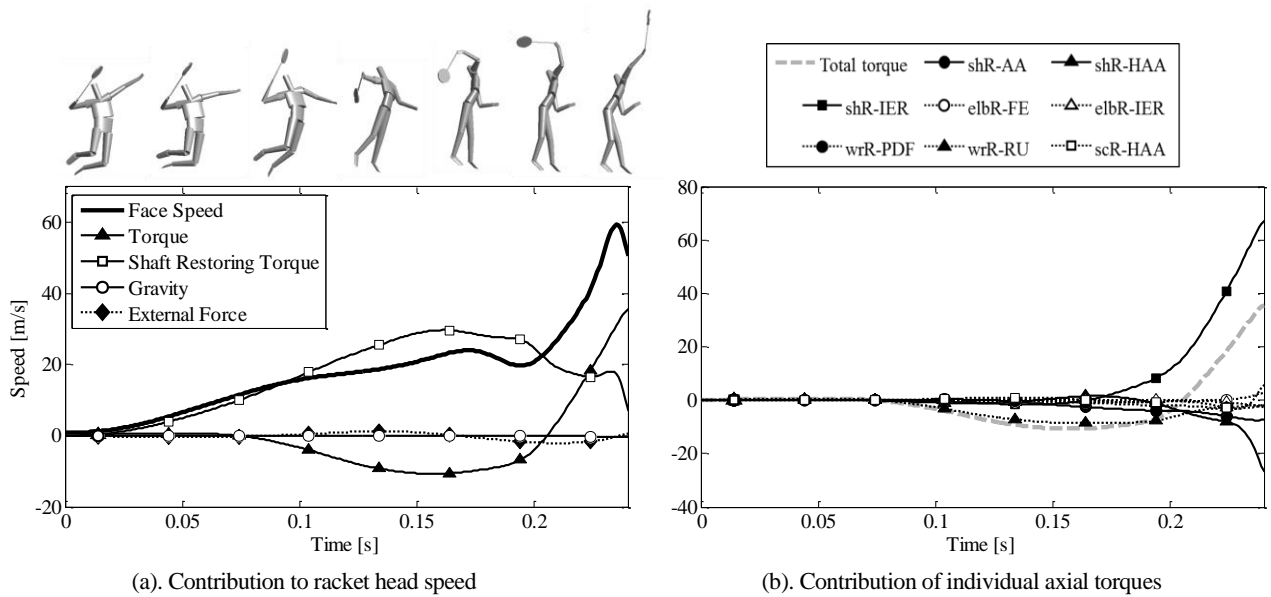


Fig.6 Contribution of the terms using conversion algorithm

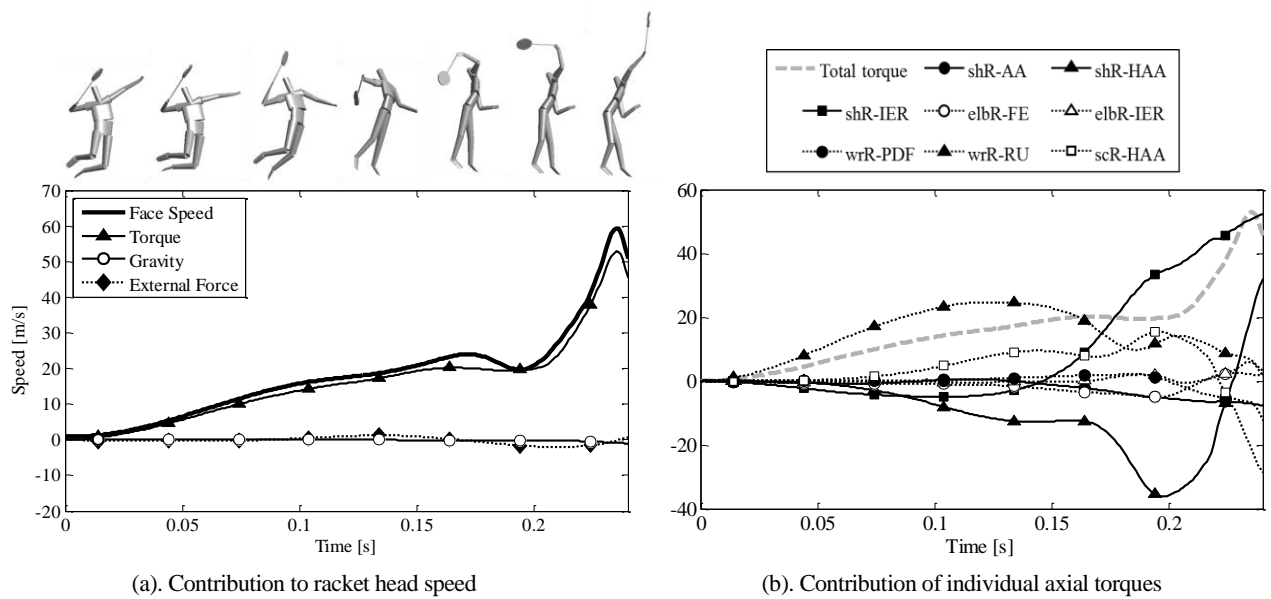


Fig.7 Contribution of the terms using Newmark-beta method

以上の結果より、ラケットヘッドスピードの獲得に大きく貢献する運動依存項について、運動依存項のみを他項に変換した際の各項の貢献から、この運動依存項の発生要因は、スウィング中盤においては弾性トルク項、終盤では関節トルク項であった。従って、弾性トルク項としてのラケットシャフト部のしなりは、スウィング中盤における運動依存項の生成に大きく貢献しており、ヘッドスピード獲得メカニズムに寄与していると考えられる。さらに、運動依存項に加えて弾性トルク項を他項へと変換した際の各関節トルクの貢献から、ヘッドスピード獲得メカニズムにスウィング中盤では手首関節橈尺屈トルクが、終盤では肩関節内外旋トルクがそれぞれ大きく貢献しており、シャフトのしなりの生成には、これらの関節トルクが大きく寄与していると考えられ、バドミントン・スマッシュ動作のヘッドスピード獲得には、これらのトルク発揮が重要であることが示唆された。

## 5. おわりに

本論文では、バドミントン・ラケット・シャフトのしなりを考慮した動力学的分析を行うにあたり、シャフトの変形を2次多項式で近似したモデルを構築し、さらに、ニューマーク $\beta$ 法を採用した拡大系の運動方程式を導出することにより、解析を安定に行う手法を提案した。

本手法を用いて分析を行った結果、ヘッドスピード獲得に大きく貢献する運動依存項の生成要因として、シャフト部のしなりが寄与していることが明らかとなった。また、肩関節内外旋トルクおよび手首関節橈尺屈トルクは、そのしなりの生成要因として、スマッシュ動作において重要な役割を担っていることが示唆された。

なお、本論文では、バドミントンにおけるスマッシュ動作を分析対象としたが、本手法は、ゴルフクラブやその他弾性構造を有する打具による打撃動作を分析する手法として応用可能であるため、用具の弾性特性が身体動作に及ぼす影響についての詳細なメカニズム解明の際の一助になると考えている。

## 文 献

- (1) 阿江通良, “日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性特性”, *Japanese J. Sports Sci.*, 15(3) (1996)
- (2) 小池関也, 石川達也, “身体動作の順動力学的分析における運動依存項の関節トルク項への帰着”, 日本機械学会ジョイントシンポジウム 2009 講演論文集, pp. 355-360.
- (3) 小池関也, 石川達也, “受動的関節軸自由度を考慮した身体動作の順動力学的分析手法の定式化”, 日本機械学会ジョイントシンポジウム 2009 講演論文集, pp. 349-354..
- (4) 小池関也, “シャフトの変形を考慮したゴルフスウィングの動力学的分析手法の定式化”, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012 講演論文集 USB
- (5) 小池関也, 橋口友洋, “ラケットシャフト部の変形を考慮したバドミントン・スマッシュ動作の動力学的分析 (ラケットの慣性パラメータがスイング動作に及ぼす影響)”, 日本機械学シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集, pp. 305-310.
- (6) 小泉孝之, 辻内伸好, 富居富, 木村弘之, “ゴルフクラブ動特性と人体動特性との最適調和”, 日本機械学会ジョイントシンポジウム 2000 講演論文集, pp. 71-75.
- (7) 寺田恭平, 石井伸幸, 岩原光男, 長松昭男, 寺西幸弘, “モード解析によるバドミントンラケットの振動特性評価”, 日本機械学会ジョイントシンポジウム 2009 講演論文集, pp. 72-75.
- (8) 日本機械学会, “マルチボディダイナミクス (2) —数値解析と実際—”, コロナ社, 東京, 2007.
- (9) K. Naito and T. Maruyama, “Contributions of the muscular torques and motion-dependent torques to generate rapid elbow extension during overhand baseball pitching”, *Sports Engineering* 11(1), (1986), pp. 65-69.
- (10) M. Hirashima, K. Yamane, Y. Nakamura and T. Ohtsuki, “Kinetic chain of overarm throwing in terms of joint rotations revealed by induced acceleration analysis”, *Journal of Biomechanics* 41, (2008), pp. 2874-2883.