「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan), Vol. 55, No. 9, pp. 807-812, Sep. 2006
論　　文

打球時におけるテニスボールの衝撃特性評価†

中川紀壽* 関口泰久* 白　賀**

Analysis of Impact Characteristics of Tennis Ball

by

Noritoshi NAKAGAWA*, Yasuhisa SEKIGUCHI* and He BAI**

The motion of the tennis ball after impact is relative to impact area, impact initial conditions (impact angle, impact velocity, and rotational speed), and the elastic characteristic of racket. Thus, the phenomenon of the impact with a spin is very complicated. To solute this problem, a model of racket-ball impact was developed in the present research based on the numerical method. Impact experiments are conducted, and the entire process of impact between the tennis ball and the racket is recorded by high speed camera. In the experiments, the racket is divided into four areas : central area, top area, side area, and near area. It was found that the each impact area has different effect on the motion of the tennis ball after impact.

Key words : Tennis ball, Racket, Strings, Impact, Spin, Rotational speed

1 緒　　言

テニスは現在，試合での勝利からレクリエーションや健康維持を目的とする人まで幅広い人に親しまれているスポーツである．そのため性能のよいラケットを多くのプレイヤーが要求するようになった．しかし，ラケットの性能評価は主に使用者の主観によるため，どれがよいラケットかを一概に決める事は出来ない．例えば，初心者は上級者に比べて，広いエリアで反発のよいラケットが必要となる．さらに，同じ技量同士でもプレイスタイルによって要求する性能は異なる．その結果，様々なラケットを短期間で開発することが必要不可欠となってきている．また，その開発においては，要求される特性を満たすラケットを数値シミュレーションにより設計するような，工学的手法の重要性がますます大きくなっている.[1]しかし，その際必要となる，テニスラケットのストリングスとボールの衝突現象を連続的に観察し，詳しく調べたものはまだないと思われる．

一般に，ラケットに求められる基本的な性能は，パワー，コントロール性，打球感といわれている．これらすべての性能が満足されるようなテニスラケットの最適設計の手法はまだ確立していないようである.[2]しかし，すべての性能を満たすラケットの設計は困難であるが，使用者のプレイスタイルに適した性能を高めることにより，その人にとって最適なラケットとすることは可能であると思われる．

そこで，本研究では実際にテニスボールをラケットのストリングスに衝突させ，ストリングス面のエリアの違いによるボールの衝撃反発・回転特性などを調べることを目的とする．

2 実 験 方 法

Fig. 1 に実験装置の概略図，Table 1 に実験装置の詳細を示す．テニスラケットはフレームを地面に対して垂直に，高速度カメラに対してトップ部（先端部）が正面にくるように水平に固定し，ラケットの軸とカメラの光軸は平行である．ラケットのストリングス面に対して垂直方向にボール発射装置を設置し，ストリングス面の法線に対

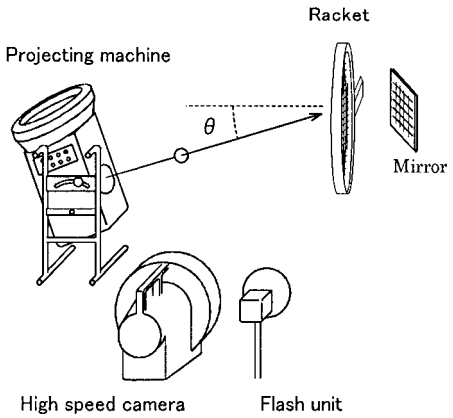


Fig. 1 Experimental system.

Table 1 Experimental apparatus.

Apparatus	Type	Maker	Remarks
High speed camera	DYNAFAX	Nac	~15000 [fps]
Projecting machine	PM20SH Ⅱ	Sliver seiko	6~35 [m/s]
Film scanner	COOL SCAN V	Nikon	
Film	NEOPAN400 PRESTO	FUJIFILM	
Tennis racket	RIMBREED Tour-S	Sumitomo Rubber	
Tennis ball	DUNLOP FORT		Hard type
Stringing machine	GM680	GOSEN	

†　原稿受理　平成 17 年 12 月 22 日　Received Dec. 22, 2005
＊　正 会 員　広島大学大学院工学研究科機械システム工学専攻　〒739-8527　東広島市鏡山，Mech. System Eng., Graduate School of Eng., Hiroshima Univ., Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527
＊＊　広島大学大学院　〒739-8527　東広島市鏡山，Graduate Student, Hiroshima Univ., Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527

して，仰角θ = 20°として後述の目標点（エリア1～4）にボールを衝突させる．また，ラケットの側方に高速度カメラおよび発光装置を設置し，ラケットの側方よりこの衝突現象を撮影する．この時，ボール発射装置とラケットの間にレーザーセンサを張り，発射されたボールがセンサー上を通過しラケットに衝突する直前に，光電スイッチにより発光装置と同期して発光させる．フラッシュの発光時間を11ms，撮影速度を3000fps (frame per second)，撮影間隔を0.33msとする．

本実験で使用したラケット（DUNLOP製：RIMBREED Tour-S：全長700mm）をFig. 2に示す．フレームの先端部分を一部切り取り，その部分を長さ120mm，幅20mm，厚さ3mmの弓状のスチールプレートで作り変えることで，撮影可能範囲を100mm確保する．ラケット全体の重量は395.09gである．改良により，衝突中のボールがフレームに隠れることなく撮影することが出来る．また，フレーム加工位置がトップ部にあることで，グラウンドストロークでのインパクトに近い状態での撮影が可能となっている．一方，ラケットの後方にはストリングス面に対して45°の角度に鏡を設置し，そこに写るラケット後方から見たボールの挙動も同時に撮影する．Fig. 3において，左図はラケットとボールを側方から見たものであり，右図は鏡に写っているラケット後方から見たものを示す．また，FEM用ソフトANSYSを使って，実験と同じ条件で有限要素モデルを作成し数値シミュレーションを行った．用いたボールのゴム皮膜のモデル化には，有限ひずみを考慮した六面体要素を用い，ゴムのヤング率は12.8MPaと設定している．[3)]

それで，ストリングス面のエリアの違いによるボールの衝撃反発・回転特性を調べるために，ボールを衝突させるエリアを変えた実験を行う．Fig. 4にボールを衝突させるストリングスのエリアを示す．エリア1，2，3，4それぞれに無回転，トップスピン，バックスピンのボールを当て，合計12回の撮影を行う．

また，ボールを当てるストリングスのエリアの違いと衝突前のボールの回転の違いのストリング振動への影響を調べるために，加速度ピックアップをストリングスに取り付け，FFT解析装置を用いて測定を行った．Fig. 5に実験装置の概略図を，Table 2に実験装置の詳細を示す．Fig. 6に加速度ピックアップを取り付ける位置を示す．ボールをFig. 4におけるエリア1に衝突させる時は，加速度ピックアップを，Fig. 6のA以外の各位置（B, C, D, E, F）に取り付けてそれぞれ5回ずつ測定を行い，各位置での平均を結果として用いることにする．また，ボールをエリア2，3，4に当てる場合は，加速度ピックアップをAの位置に取り付けてそれぞれ5回ずつ測定を行い，それらの平均をそれぞれエリア2，3，4の結果として用いることにする．なお，用いたピックアップの質量は11gと軽量であり，また，測定した量については，

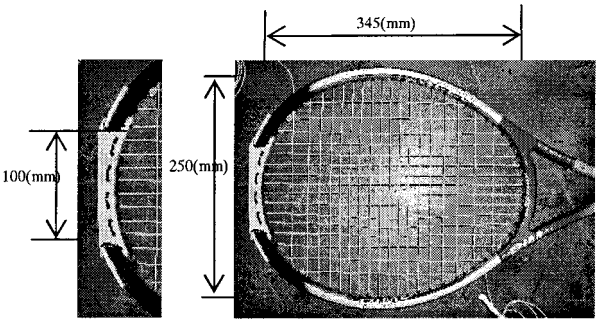


Fig. 2　Modified racket for experiment.

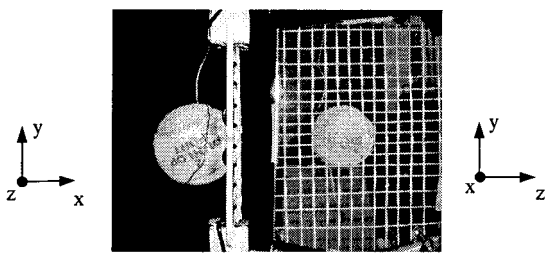


Fig. 3　Photograph of high speed camera.

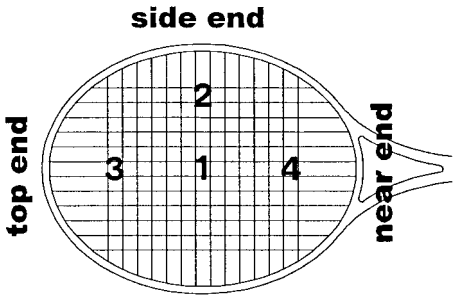


Fig. 4　Areas of string plane.

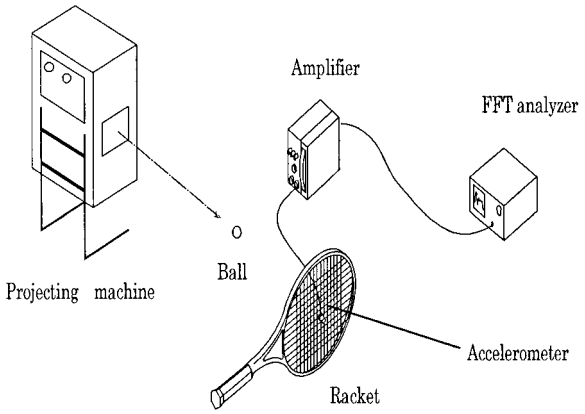


Fig. 5　Experimental system of FFT.

Table 2　Experimental apparatus.

Apparatus	Type	Maker	Remarks
FFT analyzer	CF-5220	Ono Sokki	
Amplifier	type 2635s	Bruel & Kjear	
Accelerometer	4371		0.802[mV/ms^{-2}]
Tennis racket	RIMBREED Tour-S	Sumitomo Rubber	
Tennis ball	DUNLOP FORT		Hard type
Projecting machine	PM20SH II	Silver Seiko	6～35[m/s]

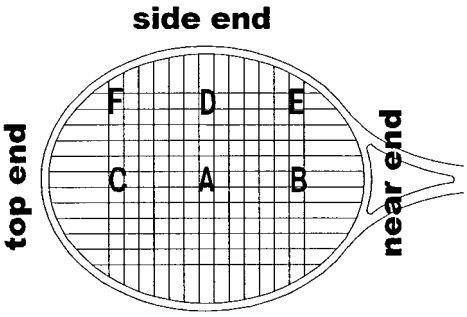


Fig. 6　Acceleration pickup installation position.

各エリア間の相対的な変化を見ているため，ピックアップを取り付けたことによる評価への影響は少ないと思われる．

3　解　析　方　法

Fig. 7 の様にボールの重心を原点 O とする直交座標を考える．実験に使用されるボール上には予めいくつかのマークをつけておき，そのうち任意の 2 点 P_1，Q_1 が衝突後に時刻 t_1 から t_2 の間に点 P_2，Q_2 に移動したものとする．なお，その間のボールの回転数は一定であるとする．

$$\begin{aligned} P_1\,(x_1, y_1) &\rightarrow P_2\,(x_2, y_2) \\ Q_1\,(u_1, v_1) &\rightarrow Q_2\,(u_2, v_2) \end{aligned} \tag{1}$$

ボールの半径を r とし，点 P_1，Q_1，P_2，Q_2 の z 座標をそれぞれ z_1，z_2，w_1，w_2 とすると，

$$\begin{aligned} z_1 &= \sqrt{r^2 - x_1^2 - y_1^2} \qquad z_2 = \sqrt{r^2 - x_2^2 - y_2^2} \\ w_1 &= \sqrt{r^2 - u_1^2 - v_1^2} \qquad w_2 = \sqrt{r^2 - u_2^2 - v_2^2} \end{aligned} \tag{2}$$

よって，点 P，Q の移動ベクトルは，

$$\left.\begin{aligned} \overrightarrow{P_1P_2} &= (x_2 - x_1,\, y_2 - y_1,\, z_2 - z_1) \\ \overrightarrow{Q_1Q_2} &= (u_2 - u_1,\, v_2 - v_1,\, w_2 - w_1) \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

この $\overrightarrow{P_1P_2}$，$\overrightarrow{Q_1Q_2}$ に垂直なベクトルが回転軸の方向ベクトル $\vec{n}$（以後，n 軸まわりの回転数を「衝突後の回転数」と略す）となる．

$$\vec{n} = \overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{Q_1Q_2} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ u_2 - u_1 & v_2 - v_1 & w_2 - w_1 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \tag{4}$$

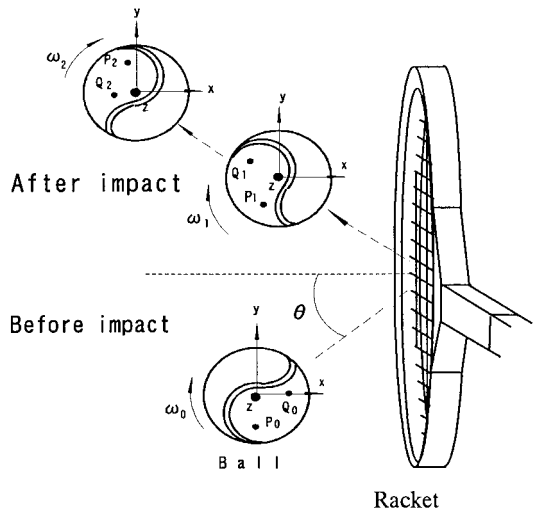


Fig. 7　Coordinate system.

次に，Fig. 8 のように $\vec{n}$ と点 $\vec{P}_1$，$\vec{n}$ と点 $\vec{P}_2$ を通るそれぞれの平面 N_1，N_2 を考え，両者のなす角 ϕ を求める．$\vec{n}$ と $\vec{P}_1$ を通る平面の法線ベクトルを $\vec{N}_1$，$\vec{n}$ と $\vec{P}_2$ を通る平面の法線ベクトルを $\vec{N}_2$ とすると，

$$\vec{N}_1 = \vec{P}_1 \times \vec{n} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 n_3 - z_1 n_2 \\ z_1 n_1 - x_1 n_3 \\ x_1 n_2 - y_1 n_1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\vec{N}_2 = \vec{P}_2 \times \vec{n} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} y_2 n_3 - z_2 n_2 \\ z_2 n_1 - x_2 n_3 \\ x_2 n_2 - y_2 n_1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

よって，$\vec{N}_1$ と $\vec{N}_2$ のなす角，2 平面のなす角 ϕ は，

$$\phi = \cos^{-1} \frac{\vec{N}_1 \vec{N}_2}{\left|\vec{N}_1\right|\left|\vec{N}_2\right|} \tag{7}$$

となり，回転数 N (rps, revolution per second) は，コマ間隔を Δt (s) とすると式 (8) のように表される．

$$N = \frac{\phi}{2\pi\Delta t} \tag{8}$$

入射時のボールの回転方向は，Fig. 3 の z 軸を中心とした x–y 平面に対して時計回り（+ の回転）をトップスピン，反時計回り（–の回転）をバックスピンとする．

4　結果および考察

4・1　衝撃特性の結果

Fig. 4 のエリア 1，2，3，4 において，それぞれに無回転・トップスピン・バックスピンでボールを衝突させ，衝撃特性として回転数・速度の解析を行った．Fig. 9 はエリア 1 に衝突させた写真を示す．ボールがストリングスに衝突する直前から衝突後，ストリングスを離れるまでの間についての連続的なボールの高速変形挙動を示している．また，反射前のボールの速度・回転数はそれぞれ，無回転のとき 12.8m/s・0rps，トップスピンのとき 12.8m/s・30rps，バックスピンのとき 12.8m/s・–30rps である．実験により求めた反射後のボールの回転数，速度を Fig. 10 (a)，Fig. 11 (a)に表す．また，FEM の解析結果より求めた反射後のボールの回転数，速度を Fig. 10 (b)，Fig. 11 (b)に表す．ここで，全ての回転数・速度は，度数分布解析を行い，誤差を分析して（χ 自乗計算値 < χ 自乗基準値となり）ヒストグラムが正規分布図と見なせるもののみを用いている．

Fig. 10，11 より，ストリングスのセンター（エリア 1）

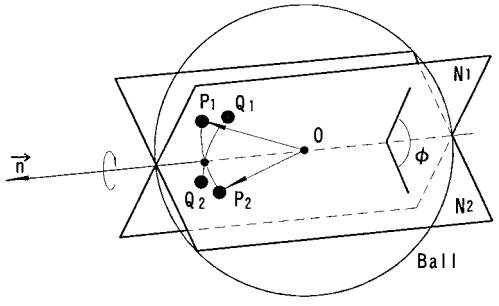


Fig. 8　Angle displacement.

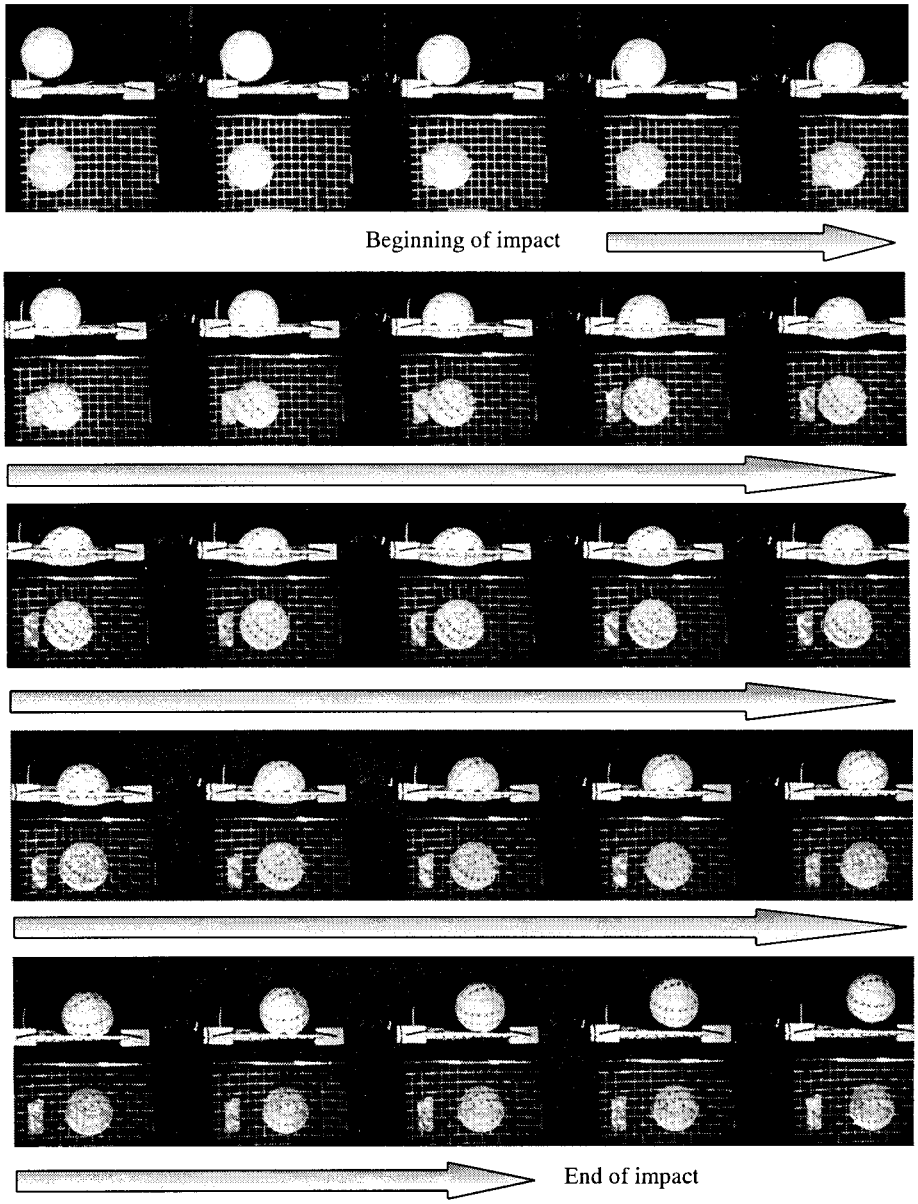


Fig. 9 High speed photograph in case of impact to the racket.
($V = 12.8$m/s, $\theta = 20^{\circ}$, $w = \pm 0$ rps, Area 1)

では，どの回転のボールに対しても，ほぼ一定の回転数・速度で反発していることが分かる．

また，サイドエンド（エリア 2）とトップエンド（エリア 3）では，衝突後のボールの回転数は，衝突前のそれに大きく影響を受けていることが分かる．ただし，反発後の速度については，トップエンド（エリア 3）の方が全ての回転において大きくなっており，反発後の回転数は，サイドエンド（エリア 2）の方が大きくなっている．さらに，エリア 1，4 に比べ，衝突後の速度はエリア 2，3 の方が大きくなっている．

ニアエンド（エリア 4）では，無回転のボールに対して，衝突後に大きく回転数が上がっていることが分かる．また，ボールの速度はどの回転のボールに対してもほぼ一定の速度で反発している．

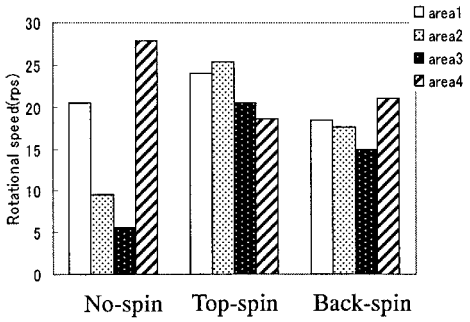
また，解析を行う上で，FEM の解析結果と実験の結果はほぼ一致しており，テニスボールとラケットといった複雑な解析対象の衝突現象を精度良くシミュレーションすることが可能であることが分かった．

4・2 波形解析結果

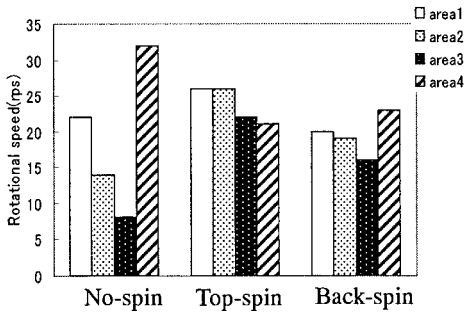
Fig. 4 のエリア 1，2，3，4 において，それぞれに無回転・トップスピン・バックスピンでボールを衝突させ，解析を行った．そこで得られたストリングスの振動の時系列波形を Fig. 12 に示す．

Fig. 12 の時系列波形を見ると，エリア 1 は，どの回転のボールに対してもほぼ一定の振幅の波形を示していることが分かる．これらの振幅は他に比べると小さいものが多く，これは打ち返した時の手に伝わる振動も小さくなることを示していると考えられる．すなわち，エリア 1 ではどのような回転のボールに対しても手に伝わる振動が小さく，打ち返しやすいと言える．

無回転におけるエリア 2 と 3 の波形の振幅が，スピンのある場合に比べ明らかに大きいことが分かる．波形の

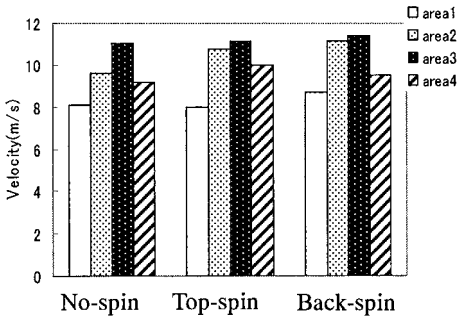


(a) Experiment

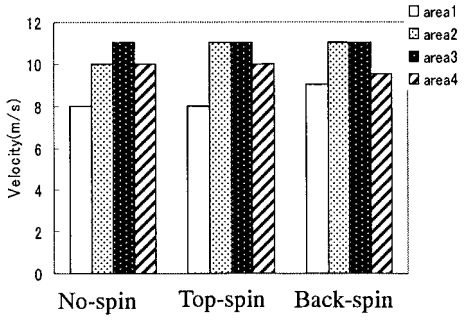


(b) FEM

Fig. 10 Rotational speed of ball after Impact.



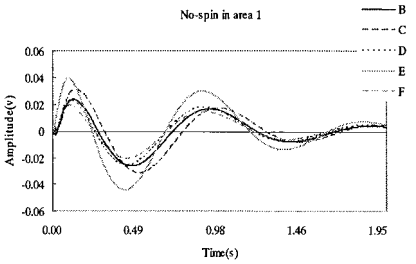
(a) Experiment



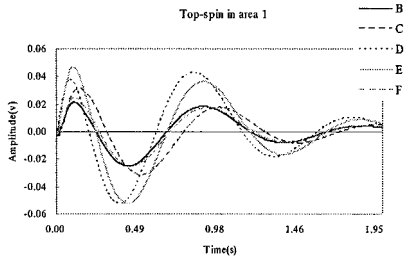
(b) FEM

Fig. 11 Velocity of ball after impact.

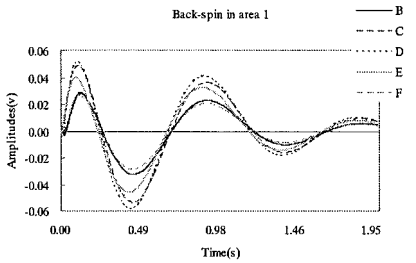
振幅はストリングスの振幅を表している，すなわち，これは無回転のボールをエリア２と３で打ち返したときに，手に伝わる振動が大きいということを示していると考えられる．スピンのかかったボールの場合，エリア別による波形の違いというものに大きな差は見られず，振幅も大きいものはなかった．このことは，スピンのかかったボールは，ストリングスのどのエリアに衝突しても，無回転のボールの場合に比べてストリングス上を転がる量



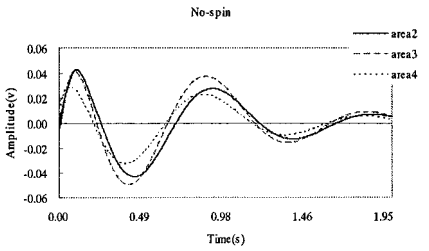
(a) Amplitude-time curve by No-spin in area1



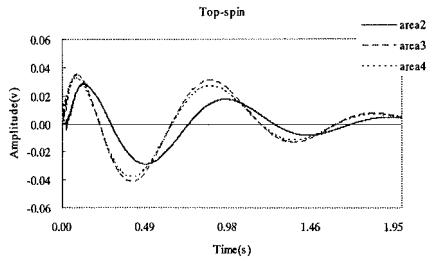
(b) Amplitude-time curve by Top-spin in area1



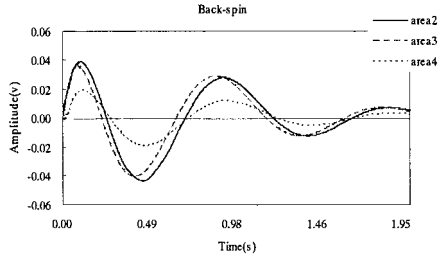
(c) Amplitude-time curve by Back-spin in area1



(d) Amplitude-time curve by No-spin in area2,3,4



(e) Amplitude-time curve by Top-spin in area2,3,4



(f) Amplitude-time curve by Back-spin in area2,3,4

Fig. 12 Time series wave form.

が多いために，ストリングスの振幅が小さくなるのではないかと考えられる．

エリア４もエリア１同様，全ての回転に対して振幅の小さい波形を示している．しかも，エリア１に比べて全ての回転のボールに対して小さな振幅の波形をしている．したがって，エリア４もエリア１のように，どのような回転のボールに対しても手に伝わる振動が小さく，打ち返しやすいと言える．また，無回転のボールの時は更に振幅が小さいので，特に手に伝わる振動が小さく打ち返しやすいのではないかと考えられる．

回転別については，波形の振幅の最大値はどれもほぼ同じであり，波形に大きな差はないことが分かる．

そして，エリア別の衝突後のボールの回転数・速度の特徴と，ストリングスの振幅の大きさを比較してみると，この間には何らかの関係があると考えられる．衝突後のボールの回転数が大きく速度が低いときストリングスの振幅は小さくなり，ボールの回転数が小さく速度が高いときストリングスの振幅は大きくなるのではないかと考えられる．これは，衝突後のボールの回転が大きいということは，ストリングス上で転がる量が多いということであり，ストリングスの振幅が小さくなるのではないか，また，衝突後のボールの速度が大きいということは，ストリングスのボールを反発させるエネルギーが大きいということであり，ストリングスの振幅が大きくなるのではないかと考えられる．

5 結　　言

本研究では，入射時のボールにスピンを与えて，ラケットに衝突させ，衝突中や衝突後のボールの挙動を解析した．その結果を以下に示す．

(1)　ラケットのフレームの先端部を薄くすることにより，テニスボールがストリグスに衝突する時の衝撃変形挙動を高速写真に撮影し，解析を行うことができた．

(2)　ストリングスのセンターでは，どのような回転のボールに対しても，ほぼ一定の回転数・速度で反発していることが分かった．また，そのときのストリングスの振動の波形もほぼ一定であり，ストリングス面のセンター部は，どのような回転のボールに対しても打ち返しやすく，同じようにボールを打ち返すことが出来るという特徴をもつといえる．

(3)　ストリングス面のサイドエンドとトップエンド部では，衝突前のボールのスピンの影響を受けやすく，衝突後のボールの速度が大きいということが分かった．また，無回転におけるストリングスの振幅が大きいことも分かった．すなわち，サイドエンドとトップエンドでは，速度の速い球を打つことが出来るが，ボールのスピンの影響を受け易く，打ち返しにくいという特徴をもつといえる．

(4)　ストリングスのニアエンドでは，スピンのかかったボールに対して，ほぼ一定の回転数・速度で反発しているが，無回転のボールに対しては衝突後に大きく回転数が上がることが分かる．また，ストリングスの振動は，どのような回転のボールに対してもほぼ一定で振幅の小さい波形を示している．すなわち，ニアエンドでは，どのような回転のボールに対しても打ち返し易く，スピンをかけ易いという特徴をもつ．

(5)　数値解析結果と実験の結果はほぼ一致し，FEMの解析モデルとシミュレーションの有用性を示した．今後，実験と組み合わせて，さらに材料学的な立場からも検討を行い，プレイスタイルに合わせた最適なラケットの設計に繋げていく予定である．

参 考 文 献

1）N. Nakagawa, Y. Sekiguchi and N. Okada, “Analysis of Impact between Racket and Ball (Impact Motion of Ball with Spin)”, Symposium on Sports Engineering and Symposium on Human Dynamics, pp.49-53 (2000) JSME.

2）Howard Brody, “How Would a Physicist Design a Tennis Racket ? ”, MARCH 1995 PHYSICS TODAY, pp.26-31.

3）Y. Kanda, “Analysis of Impact of a Ball with Spin on a Racket in Tennis (Impact of a Ball on a Clamped String Face”, Symposium on Sports Engineering and Symposium on Human Dynamics, pp.39-43 (2000) JSME.