ラケットとテニスボールの衝突解析[†]

中 川 紀 壽^{*} 弓 取 正 治^{**}

Analysis of Impact between Racket and Tennis Ball

by

Noritoshi NAKAGAWA^{*} and Masaharu YUMITORI^{**}

In this research, the impact between the racket and the ball was studied experimentally. The behavior of the ball during the impact was analyzed using high speed images. The purpose of this research is to clarify the effect of both impact area and strings tension on the rotational speed and the velocity of ball after impact. The deformation of the ball, the impact time, and the movements of the ball during the impact were studied experimentally. According to the experimental results, the following conclusions can be obtained. It was found that the rotational speed and the velocity after the impact increased with increasing deformation of the strings and decreasing deformation of the ball. Moreover, the rotational speed and the velocity after the impact increased with increasing impact time. And, the rotational speed of the ball after the impact increased with increasing displacement of the ball in the parallel direction to the surface of the strings.

Key words : Tennis ball, Racket, Strings, Impact, High speed camera, Rotational speed

1 緒 言

現在、テニスは幅広い人に親しまれるスポーツである。そのため、多くの人が性能の良いラケットを要求するようになった。しかし、ラケットの性能評価は使用者の主観によるため、良いラケットを定義することが難しく、要求に応じたラケットを短期間で開発することが必要となってきた。また、ラケット開発のためには数値シミュレーションなどの工学的手法が重要となってきたが、ラケットとテニスボールの衝突現象は非常に複雑であり、その解析が困難である。現在までにボールの反発やフレーム振動による研究¹⁾、ボールやラケットの近似モデルによるシミュレーションなどの研究^{2), 3)}が行われているが、実際の衝突現象を連続的に詳細に観察したものはまだ少ないと思われる。

本研究では、実際にラケットとテニスボールの衝突現象を高速度カメラで撮影する実験を行った。これまでの研究^{4), 5)}により、ストリングステンションやボールが衝突するストリングス面のエリアの違いによって、衝突後のボールの反発・回転特性が変化することがわかってきている。しかし、その特性の変化がどのような原因で起こっているかはまだ解明できていなかった。

そこで、今回はその原因を探るためにボールとストリングスの衝突中の挙動に注目して実験を行った。ストリングステンションやエリアを変化させた時、衝突中のボールとストリングスの変形や衝突時間、ボールの動きなどを観察した。この結果より、ボールの特性に影響を与える要素について解明することを目的とする。

2 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略図、Table 1 に実験装置の詳細を示す。ラケットはストリングス面を地面に対して垂直に、高速度カメラに対してフレームのトップ部が正面になるようにフレームを固定し、ストリングス面だけが変形を起こすようにしている。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、また、ストリングス面の法線に対して $\theta = 25^\circ$ で目標点にボールを衝突させた。なお、撮影速度は 6000 fps (frame per second) で行った。

今回使用したラケット (全長 700mm, 重量 395.09g) を Fig. 2 に示す。フレームの先端部分の一部を切り取り、その部分を弓状のスチールプレート (長さ 120mm,

Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup.

[†] 原稿受理 平成 19 年 8 月 13 日 Received Aug. 13, 2007 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 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

Table 1 Details of experimental setup.

Systems	Type	Maker
High speed camera	MEMRECAM fxk4	nac Image Technology
Projecting machine	PM20 SH2	Silver Seiko
Tennis racket	RIMBREED Tour-S	Sumitomo Rubber
Tennis ball	DUNLOP FORT	Sumitomo Rubber
Strings	MICRO SUPER 16	GOSEM

Fig. 2 Modified racket for experiment.

幅 20mm、厚さ 3mm) で作り変えることで、撮影可能範囲を 100mm 確保した。この改良により、ストリングス面に衝突中のボールの挙動をフレームに隠れることなく撮影することができる。また、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様子も同時に撮影して 3 次元的に解析を行った。Fig. 3 は高速度カメラによる画像の例である。Fig. 3 (a) はラケットとボールを側方から見たものであり、Fig. 3 (b) は鏡に写っているボールを後方から見たものである。

この実験装置により、ストリングステンションとボールが衝突するストリングスエリアを変化させた時の衝突中のボールの挙動を調べるために衝突実験を行った。今回のストリングスエリアは Fig. 4 に示す 3 つのエリアで行った。また、ボールの衝突速度は 9.5m/s、衝突前の回転数は 0rps、ストリングスは太さ 1.30mm、ストリングステンションは 155.7, 200.2, 244.7N (35, 45, 55lbs) の 3 種類を用いた。ストリングステンションとはラケットにストリングスを張る時の初張力である。また、衝突前の回転数は装置の構造上、ある程度の小さなばらつきはあるが、ほぼ 0rps で発射されており、衝突前の回転による影響は小さい。

3 衝突後の回転数と速度

ボールの重心を原点とする座標を考える。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 が点 P_2 , Q_2 に移動したとする。これらの座標

Fig. 3 Image of high speed camera.

Fig. 4 Areas of strings plane.

値から Fig. 5 のような回転軸と点 P_1 、回転軸と点 P_2 を通る平面 N_1 , N_2 を計算により求め、これらの面がなす角 ϕ を求めると回転数 N rps は、コマ間隔を Δt s とすると式 (1) で得られる。なお、その間のボールの回転数は一定であるとする。詳しい方法は前報⁵⁾と同様であるために省略する。また、速度は高速度画像からボールの中心点の移動を計測して計算により求めた。

$$N = \frac{\phi}{2\pi\Delta t} \quad (1)$$

Fig. 6 に衝突後のボールの回転数の結果を示す。横軸はエリア、縦軸は衝突後のボールの回転数を示している。また、Fig. 7 に衝突後のボールの反発速度の結果を示す。横軸はエリア、縦軸は衝突後のボールの速度を示している。

ストリングステンションを高くすると衝突後の回転数はどのエリアでも小さくなった。また、エリア 3 での回転数が最も大きかった。ストリングステンションを高くすると衝突後の速度も全てのエリアで小さくなったが、回転数よりは変化が小さかった。このように、ボールが衝突するエリアにより衝突後のボールの特性は異なる。これらの原因を衝突中の挙動から探っていく。

Fig. 5 Angular displacement.

Fig. 6 Rotational speed of ball after impact.

Fig. 7 Velocity of ball after impact.

4 ボールとストリングスの変形

ストリングステンションとエリアをそれぞれ変化させた時の衝突中のボールとストリングスの変形を高速画像より計測した。Fig. 8 に高速画像の概略図を示す。Fig. 8 (a) の d は衝突前のボールの直径を示している。また、Fig. 8 (b) の x は衝突中における水平方向のボールの幅であり、 G をストリングス面の水平方向の変形とする。そして、 D を水平方向のボールの変形とする。この G と D をそれぞれ衝突開始から終了まで 0.5ms ごとに計測した。

4・1 ボールの変形過程

Fig. 9 にエリア 1, 2, 3 においてストリングステンションを変化させた時の衝突中のボールの変形過程を計測した結果を示す。横軸は経過時間、縦軸はボールの変形を示している。

ボールの水平方向の変形は、どのエリアにおいても衝突開始から徐々に変形を始めて最大変形に達し、元の形に戻る。最大変形に達するまでに要する時間よりも、その後に元の形に戻るまでに要する時間のほうが比較的に長いことが多かった。また、ストリングステンションを高くするとボールの変形過程が早くなり、最大変形が大きくなった。初張力が大きいためストリングスが変形せずにボールがその影響を受けたと考えられる。また、エリア 3 は変形過程が他に比べて早く、ボールの最大変形も比較的大きかった。エリア 3 はストリングスの端であるため、変形量が小さかったと考えられる。

Fig. 8 Schematic illustration of high speed image.

(a) Area 1

(b) Area 2

(c) Area 3

Fig. 9 Deformation of ball.

4・2 ボールの最大変形

Fig. 10 は Fig. 9 の結果からボールの最大変形をそれぞれの条件に対して比較した結果を示している。横軸はエリア、縦軸はボールの最大変形を示している。

ストリングステンションを高くするとボールの最大変形は大きくなった。Fig. 6, 7 より、ストリングステンションを高くすると衝突後のボールの回転数と速度は小さくなったので衝突中のボールの変形の大きい方が衝突後のボールの回転数と速度は小さくなりやすいと考えられる。これは、衝突中にボールの変形が大きくなったことにより衝突中や衝突後のボールの振動が大きくなりエネルギーが損失したものと考えられる。また、ボールのすべりによりエネルギーを損失していることも考えられる。エリアによる最大変形の違いは、ストリングス面が変形しにくいと考えられるエリア 3 が最も大きい結果であったが、全体的にはエリアの違いによる差は小さかったため、ボールの最大変形がエリア別の特性に与える影響は小さいものであると考えられる。

Fig. 10 Maximum deformation of ball.

4・3 スtrings面の变形過程

Fig. 11 はエリア 1, 2, 3 においてストリングステンションを変化させた時の衝突中のストリングス面の变形過程の結果を示している。横軸は経過時間、縦軸はストリングス面の变形を示している。

ストリングス面の水平方向の变形はボールの变形の場合と同様にどのエリアにおいても衝突開始から徐々に变形を始め、最大变形に達した後元に戻る。最大变形に達するまでに要する時間とその後に元に戻るまでに要する時間はほぼ同じ長さの場合が多かった。また、ストリングステンションを高くするとストリングス面の变形過程が早くなり、最大变形は小さくなった。この変化はボールの場合より顕著に現れた。また、エリア 1 とエリア 2 は似たような变形過程の結果を示したのに対し、エリア 3 は变形過程が他のエリアに比べて早く、ストリングス面の最大变形が最も小さかった。ストリングスの端であるため变形が小さいことがわかった。また、エリア 2 と 3 は同様な結果になると思われたがフレーム先端の改良部により、エリア 2 のストリングスが变形しやすくなっているためエリア 1 に近い結果になっていると考えられる。

4・4 スtrings面の最大变形

Fig. 12 は Fig. 11 の結果からストリングスの最大变形をそれぞれの条件で比較した結果を示している。横軸はエリア、縦軸はストリングスの最大变形を示している。

ストリングステンションを高くするとストリングス面の最大变形は小さくなった。Fig. 6, 7 より、ストリングステンションを高くすると衝突後のボールの回転数と速度は小さくなったので衝突中のストリングス面の变形は大きい方が衝突後にボールの回転数と速度が大きくなり易いと考えられる。これは、衝突時にストリングス面の变形が大きくなったことにより、ボールの变形が抑えられたこととストリングス面がボールを押し出す反発エネルギーが大きくなったためだと考えられる。またエリア別による最大变形量の違いは、エリア 1 がエリアの中心部であるためにストリングス面の变形量が大きく、エリア 3 はエリアの端であるためにその面の变形量が小さかったと思われる。エリア 2 がエリアの端であるにもかかわらず变形量が大きい結果になっているのはラケット先端部の改良により变形し易くなってしまっているためだと考えられる。同じエリアではボールの变形が小さく、ストリングス面の变形量が大きいほど回転数が大きくなり易いが、回転数が他のエリアより大きいエリア 3 はボールの变形

(a) Area 1

(b) Area 2

(c) Area 3

Fig. 11 Deformation of strings.

Fig. 12 Maximum deformation of strings.

が大きく、ストリングス面の变形量が小さかった。すなわち、エリアが異なる場合はボールの特性に影響を与える要素がボールとストリングス面の变形量以外にも存在すると思われる。特にエリア 3 はラケットの重心に近

いエリアであるため、反発エネルギーの大きいことが原因であると考えられる。

4・5 衝突時間

ボールがストリングス面に接触してから離れるまでの衝突時間を計測した。Fig. 13に衝突時間をそれぞれの条件で比較した結果を示す。横軸はエリア、縦軸は衝突時間を示している。

ストリングステンションを高くすると衝突時間は短くなった。これはストリングステンションを大きくすることによりストリングス面の最大変形が小さくなるため、衝突時間が短くなったと考えられる。また、Fig. 6, 7の結果より、衝突時間が長くなるストリングステンションを低くした場合においてボールの速度も回転数も大きくなっている。すなわち、一般的に衝突時間が長いと回転がかかりやすいと言われるのは、ストリングス面の変形が大きくなりボールとの接触面積が大きくなること、ボールとストリングス面が長く接することになり、ボールがストリングス面からより多くのエネルギーを受けるためであると考えられる。また、エリア別に比較するとストリングス面の変形が大きいエリア1とエリア2は比較的衝突時間は長く、ストリングス面の変形の小さいエリア3が短かった。すなわち、衝突時間はストリングス面の変形に影響されることが考えられる。

5 ストリングス面上でのボールの挙動

5・1 ボールの動き

斜めから衝突したボールは衝突中にFig. 14 (b)に示すような動きをする。この動きがストリングス面の変形により変化していると考えられる。そこで、衝突後のボ

Fig. 13 Impact time.

Fig. 14 Orthogonal coordinates.

ールの回転数に影響する要因を衝突中のボールの動きに注目してその軌跡を計測することで探っていった。

衝突中のストリングス面上でのボールの動きの軌跡を計測するために衝突中のボールの中心点の移動を5msごとに計測した。まず、ボールがストリングス面に最初に接触した際のボールの中心を原点としてFig. 14 (a)のような直交座標を考えた。そして、衝突開始からボールの中心点の軌跡を計測した。なお、衝突中はボールが変形するため変形したボール形状の x 方向・ y 方向における中間点を中心位置とした。

Fig. 15に衝突中におけるストリングス面上でのボールの中心点の動きを計測して軌跡を描いた結果を示す。横軸は x 方面の移動距離、縦軸は y 方面の移動距離を示している。

ボールの中心点の動きの軌跡はどのエリアにおいてもストリングステンションを高くすると全てのエリアで x 方向および y 方向の移動距離が短くなった。 x 方向の移動距離が短くなるのはストリングス面の変形が小さくなったためだと考えられる。また、ストリングス面の変形が小さ

(a) Area 1

(b) Area 2

(c) Area 3

Fig. 15 Movements of ball on surface of strings.

くなるとストリングス面上でのボールの移動距離は x および y 方向に短くなった。この y 方向の移動はボールの回転方向への運動であるボールの転がりであり、衝突後の回転数に大きく影響していると考えられる。また、ストリングステンションを変化させても反射角度の変化は小さかった。

エリア別にみると、エリア1と2よりもエリア3の x 方向の移動距離と y 方向の移動距離が短く、反射角度も小さくなった。エリア3はFig. 12の結果より、ストリングス面の変形が小さいために x 方向の移動距離が小さくなったと考えられる。また、ここでもエリア2がエリア1と似た結果を示したが、実際はもっとエリア3のような結果になると考えられる。

5・2 ボールの y 方向への動き（転がり）

Fig. 14のLで示される y 方向への移動に注目した。Fig. 16にストリングステンションとストリングスエリアで比較した結果を示す。横軸はエリア、縦軸は y 方向への移動距離を示している。

ストリングステンションを高くすると全てのエリアで y 方向の移動距離は短くなった。また、Fig. 6, 7の結果よりストリングステンションを高くするほど衝突後の回転数と速度は小さくなる。すなわち、ストリングステンションを高くすることにより y 方向の移動距離が短くなって回転数が上昇しにくく、衝突後に回転数が小さくなったと考えられる。また、この y 方向の移動距離がストリングス面上でのボールの転がりである。ストリングス上でボールが長く転がることによりストリングスから回転方向の力を多く受け回転数が大きくなると考えられる。

同じエリアでは転がりの距離が長いほど回転数が大きくなり易いが、回転数が他のエリアより大きいエリア3は他のエリアより転がり距離が短かった。つまり、ボールが衝突するエリアが異なる場合は転がりの距離だけではなく、ラケットの重心やボールのすべりなどの反発速度などの影響があると考えられる。

今回の実験では現象自体をよく観察するために衝突速度を実際のプレーのものより遅くしているために衝突速度による差がエリアであり出なかったと考えられる。今後、さらに実際のプレーに近い衝突速度での検討が必要である。

Fig. 16 Displacement of ball in y direction.

6 結 言

本研究ではテニスボールとラケットの衝突中におけるボールとストリングスの変形、衝突中のボールの動きについて実験的に解析した。

ストリングステンションを高くするとボールの変形は大きく、ストリングス面の変形は小さくなった。また、エリアの端であるエリア3でのストリングスの変形が最も小さかった。

ストリングステンションを高くすると衝突時間は短くなる。また、ストリングスの変形が小さいエリア3で最も小さかった。

ストリングス面の変形を大きく、ボールの変形を小さくすることにより衝突後のボールの回転数は大きくなった。すなわち、ボールが変形によるエネルギーを損失せず、ストリングス面の変形を大きくしてボールとの接触面積を大きくしてエネルギーを多く受けることが重要である。

同じエリアでは、ストリングステンションを低くするとボールの x 方向の移動距離だけでなく y 方向の移動距離も長くなった。これが、ストリングステンションを低くした時にボールの回転数が大きくなる原因である。つまり、ボールの y 方向の移動距離（転がり）が長くなるとボールの回転数は大きくなると考えられる。

ストリングスエリアの違いにより、ストリングス面とボールの変形に違いがある。これが衝突中のボールの y 方向の移動距離（転がり）に影響を与え、その距離が変化する。これがボールの衝突するエリアで衝突後のボールの反発・回転特性が異なる原因であると考えられるが、エリア3においてはラケットの重心の影響などその他の影響も存在すると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Y. Kawazoe and T. Sakurai, "Effect of Player's Arm on the Rebound Power Coefficient and the Power of a Tennis Racket", Symposium on Sports Engineering and Symposium on Human Dynamics, pp.207-211 (1999).
- 2) H. Maeda, M. Okauchi and Y. Shimada, "A MODEL OF IMPACT BETWEEN A TENNIS RACKET AND A BALL", Symposium on Sports Engineering and Symposium on Human Dynamics, pp.35-38 (2000).
- 3) Y. Kanda and M. Takatsuka, "Finite Element Analysis of Impact a Ball on a Racket in Tennis (Characteristics of Impact at Off-center of Clamped Strings)", Symposium on Sports Engineering and Symposium on Human Dynamics, pp.31-33 (2000).
- 4) 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).
- 5) N. Nakagawa, Y. Sekiguchi and H. Bai, "Analysis of Impact Characteristics of Tennis Ball", The Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.9, pp.807-812 (2006).