

# テニスのインパクトにおよぼすラージ・ボールの影響 (プレイヤーの上肢系衝撃振動の測定とシミュレーション)

Larger Ball's Effect on the Shock Vibrations at the Wrist Joint  
during the Tennis Impact with Experiment and Simulation

川副 嘉彦(埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology  
FAX: 048(585)6717 E-mail: kawazoe@sit.ac.jp

It is intended that the two new ball types, in addition to the existing ball type, be introduced and developed to improve the appeal and enjoyment of tennis at all levels for players and spectators alike. This paper shows the comparison between the predicted shock vibrations and the measured ones at the wrist joint when using the normal ball and the larger ball with the same mass during the off-center impact and the center impact with the forehand stroke. The simulated results have fairly agreed with the experimental results. The waveforms of the shock vibrations at the wrist joint when using the larger ball is almost the same as those when using the normal ball independent of the string tensions. Since the drag force of larger ball should be larger than that of normal ball, the shock vibrations of a larger ball should be smaller.

## 1. 緒言

国際テニス連盟(ITF, The International Tennis Federation)は、コートの条件に応じて試験的に新しい2種類のボールを導入することを決めた。2000年1月1日から2年間の期限付きで、クラブ・レベルの試合から国別対抗のデビスカップ、フェドカップの地域グループなどで使用されている。室内コートや天然芝のような高速コートでは現在のボールより直径を約8%大きくして球速を抑え、逆にクレーコートのような球足の遅いコートではスピードが出るボールを使用し、また、中間のコートでは通常のものを使用するという試みである。ラージ・ボールの導入は、男子のテニスはスピード化が進んでラリーが続かなくなってしまうという状況に対する歯止めであり、プレイヤーにとっても観客にとってもテニスの魅力と楽しみを増そうという意図である。本研究は、ITF主導によるラージ・ボール導入の影響に関する一連の研究の一部であり、プレイヤーの上肢に加わる衝撃振動におよぼす影響を実験および衝突解析により定量的に明らかにする。

## 2. グリップと手首関節の衝撃振動加速度の予測法概要<sup>(2)(12)</sup>

ラージ・ボールの質量および反発試験に関する規則は、従来のノーマル・ボールの場合と同一である。図1は、ノーマル・ボールとラージ・ボールの寸法を示す。質量は約58gである。実打実験に用いたラケットは Prince Super Graphite (Prince SG) である。質量は 338 [g]、全長 685 [mm]、重心位置はグリップ端から 327 [mm] である。図2は、テニスプレイヤーがボールを打撃した瞬間の衝撃力を求めるためのモデルを示す。図3は、ラケット・ハンドルと手首関節に取り付けた加速度計の位置を示す。

ラケットの各打点に換算した換算質量  $M_r$  を導入し、衝突速度に依存するボール・ストリングス複合系の等価ばね  $K_{GB}$  と等価減衰  $C_{GB}$  からなる1自由度振動モデルを仮定すると、フレーム振動を無視したときの衝突の力積波形が式(1) のように数値計算により得られる。ただし、時間を  $t$ 、衝突力の最大値を  $F_{MAX}$ 、接触時間を  $T_c$  とする。

$$F(t) = F_{MAX} \sin(\pi T_c) \quad (0 \leq t \leq T_c) \quad (1)$$

式(1)のフーリエ・スペクトルを  $S(f)$  ( $f$ : 振動数 [Hz]) とすると、ラケット面上の点  $j$  における衝突によるラケット上の点  $i$  における  $k$  次モードの応答振幅成分 (固有振動数  $f_k$ )  $X_{ijk}$  が近似的に求まる。さらに、フレーム振動の速度振幅分布とフレーム質量分布から、フレーム振動によるエネルギー損失  $E_1$  が求まり、ボールとストリングスのエネルギー損失  $E_2$  が衝突速度の関数として求まる。  $E_1$  と  $E_2$

との和からボールとラケットの反発係数分布  $e_r$  が求まる。反発係数  $e_r$  を用いるとフレーム振動のエネルギー損失を考慮した衝突力  $F_{MAX}$ 、接触時間  $T_c$  などの衝突諸量が求まる<sup>(13), (14)</sup>。

ラケットと手首関節の衝撃振動波形を剛体運動成分と振動成分との合成により導く。インパクトの瞬間には重力や筋力は衝突力にくらべて小さいとし、腕関節はピン結合として扱い、ハンドルの握りの位置と手首関節の位置の距離を無視し、肩関節に作用する力  $S_3$  は肩関節の速度には影響しないと仮定し、ボールとストリングスに作用する衝突力を  $S_0$ 、プレイヤーの手首関節  $P_1$ 、肘関節  $P_2$ 、肩関節  $P_3$  に作用する力をそれぞれ  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  とすると、手首関節、肘関節、肩関節の衝撃力成分および衝撃加速度成分を求めることができる。

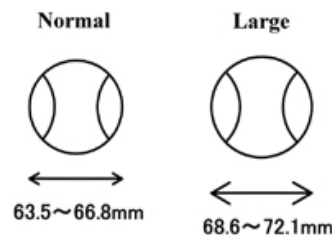


Fig.1 New Larger ball and conventional normal ball with the same mass.

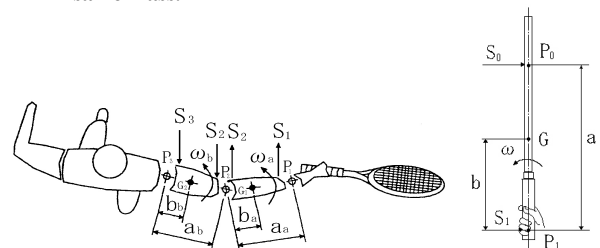


Fig.2 Impact model for the prediction of the shock force transmitted to the arm joint from a racket.

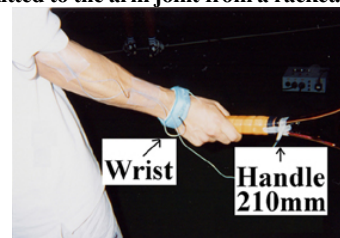


Fig.3 Location of accelerometers at the wrist joint and the racket handle in the forehand ground stroke.

手で支持したラケットの実験モード解析<sup>(5)</sup>および実打実験の加速度実測波形から減衰を同定することにより、ラケット面上の任意の打点でのボールとの衝突に対してラケットの握りの位置における振動加速度成分を求めることができる。フォアハンド・グランド・ストロークにおいてラケットで打撃したときの手首関節の実測加速度波形と予測波形は、衝撃成分とフレーム振動の2節曲げ、3節曲げ、2節ねじり、ストリングス面振動1次の4つの振動モード成分を考慮するとかなり一致する。

### 3. フォアハンド・ストロークにおける手首関節の衝撃振動

図4と図5は、平均衝突力と接触時間の解析結果を示す。横軸はラケット面中心からの長手方向の距離である。衝突速度は実打実験での衝突速度の値に近い 25 [m/s] を用いた。ノーマル・

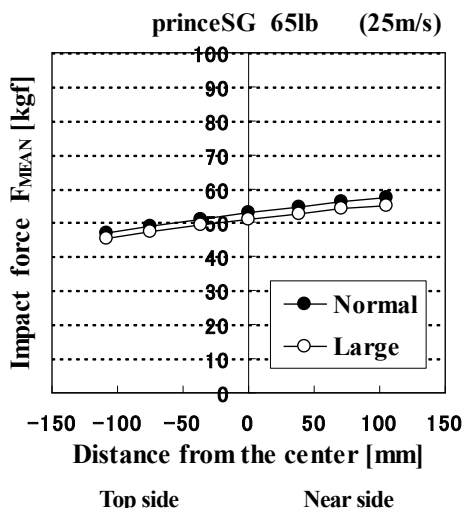


Fig.4 Predicted impact forces (Mean) (25 m/s)

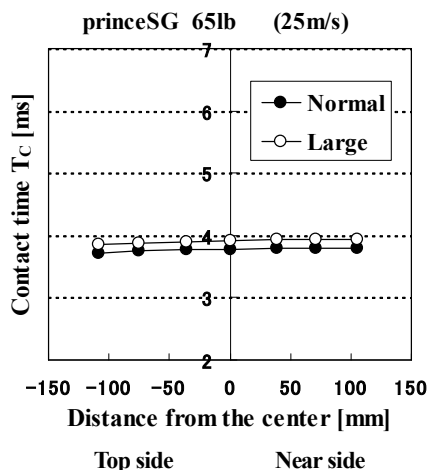


Fig. 5 Predicted contact time between a ball and strings (25 m/s)

ボールに比べてラージ・ボールは、衝突力はわずかに小さく、接触時間は長くなっている。

図6は、フォアハンド・ストロークにおけるノーマル・ボール打撃とラージ・ボール打撃の場合の手首関節・衝撃振動の予測波形と実測波形の比較である。打点はラケット面先端側寄りのオフセンターである。予測計算における衝突速度は 25 [m/s]を与えた。衝突速度実測値の多少のばらつきもあって予測波形と実測波形が多少異なるものもあるが、予測波形は実測波形の特徴をとらえている。

図7は、衝撃振動加速度波形の最大・最小のピーク値を示す。

図8は、図7の Maximum と Minimum の値の差を手首関節・衝撃振動のピーク値として縦軸にとり、横軸にラケット面中心を基準にした各打点の位置をとったものである。ボールとラケ

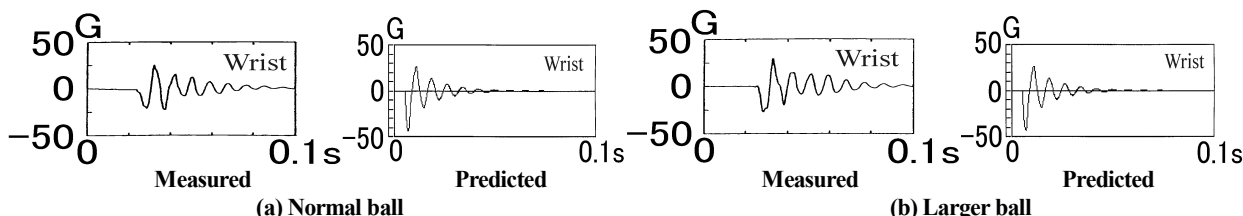


Fig.6 Shock vibrations at the wrist joint when hitting flat forehand drive at the off-center (Top side) of racket face strung at 65 lbs.

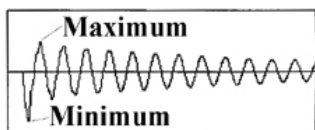


Fig.7 Peak value of shock vibrations

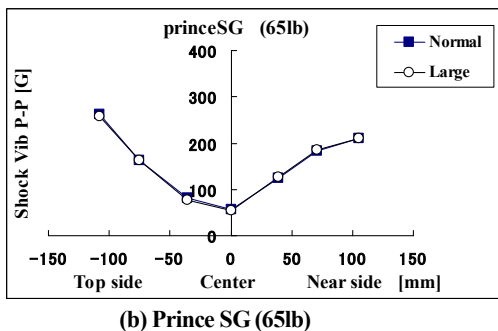


Fig.8 Shock vibrations Peak values of larger ball compared with the normal ball against the location of string face (impact velocity: 30 m/s).

ットの衝突速度は30[m/s]を与えた。ラージ・ボールとノーマル・ボールの差はほとんどない。したがって、ラリーにおけるラージ・ボールは空気抵抗の増大により速度が低減し、その結果、インパクト条件が同じであれば、腕系の衝撃振動も低減することになる。

### 4. 結論

(1) ラージ・ボールとノーマル・ボールをフォアハンド・ストロークで打撃したときのラケット・ハンドルと手首関節の衝撃振動を予測した結果は実測波形の特徴を比較的良く表した。

ラージ・ボールとノーマル・ボールの予測結果による比較より、

(2) オフセンタ打撃でもセンタ打撃でも、また、ストリングス初張力が異なる場合も、ラージ・ボールとノーマル・ボールには大きな違いがないという実験結果を裏付けることができた。

(3) したがって、ラリーにおけるラージ・ボールは空気抵抗の増大により速度が低減し、その結果、インパクト条件が同じであれば、腕系の衝撃振動も低減することになる。

(4) ラージ・ボールは、ノーマル・ボールの場合に比べて、衝突力はわずかに小さく、接触時間はやや長い。(文献省略)