

S17 ラージ・ボールを打撃したときのテニス・プレイヤー 上肢系衝撃振動の予測 (フォアハンド・グランドストロークにおける手首部の加速度)

Comparison between the New Larger Ball and the Conventional Normal Ball in Tennis: Prediction of the Shock Vibrations at the Wrist Joint during the Forehand Ground Stroke

○ 川副嘉彦(埼玉工大), 友末亮三(安田女子大)
村松 憲(慶応大), 吉成啓子(白百合女子大)
柳 等(国立スポーツ科学センター)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Inst. of Tech., 1690 Okabe, Saitama
Ryoso TOMOSUE, Yasuda Women's College
Tadashi MURAMATU, Keio University
Keiko YOSHINARI, Shirayuri Women's College
Hitoshi YANAGI, Japan Institute of Sports Sciences

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 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.

Key Words: Tennis Racket, Larger Ball, Shock Vibrations, Wrist joint, Performance Prediction, Sports Engineering

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種類のボールを公認した⁽¹⁾。さらに、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従来のボールより直径を約8%大きくして球速を抑え、逆にクレート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、さらに、中間の速さのコートでは従来のボール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によりラリーが続かなくてつまらないという状況に対して歯止めをかけ、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さを増そうという意図である。

本論文は、ラージ・ボール導入に関するITF主導による一連の研究の一部であり、現在試行期間として使用されているラージ・ボールの上肢系におよぼす影響を検討した研究である。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プレイヤーの手首に加わる衝撃振動を予測し⁽²⁾⁽¹²⁾、実測結果および従来のノーマル・ボールの場合の結果と比較してラージボール使用による影響について考察する。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。

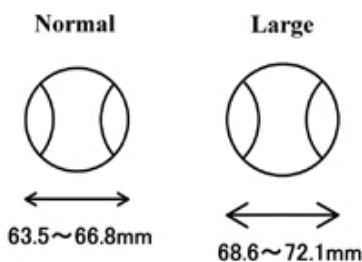


Fig.1 New Larger ball and conventional normal ball

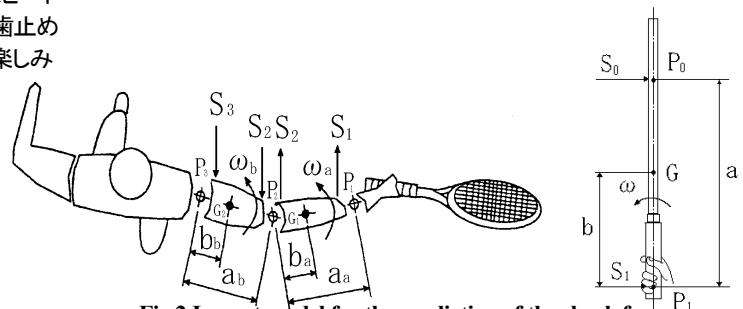


Fig.2 Impact model for the prediction of the shock force transmitted to the arm joint from a racket.

質量は、両ボールとも約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。

2. グリップと手首関節の衝撃振動加速度の予測法概要⁽²⁾⁽¹²⁾

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。

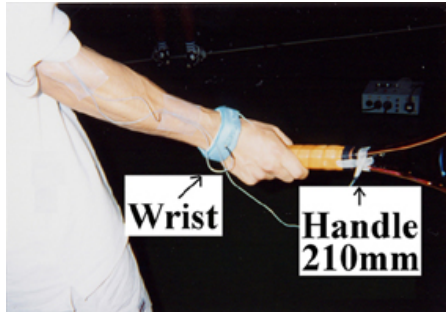


Fig.3 Location of accelerometers at the wrist joint and the racket handle in the forehand ground stroke.

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。

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

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、エネルギー損失に対応する反発係数 e_{BG} を用いて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^{(13), (14)}。

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。腕系の衝撃振動は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。

インパクトにおける宙づりラケットのグリップ部の衝撃加速度 A_{mv} は、グリップ位置と重心の距離 x_0 、重心と打点の距離 a_0 、ラケット質量 M_R 、ラケットの重心まわりの慣性モーメント I_G 、衝突力 $F(t)$ を与えると剛体運動から算出できる。

また、手で握ったラケットのグリップ部の衝撃加速度 A_n は、グリップ部に腕系の等価質量 ($M_r=1.0$ [kg]) を付加することにより、ラケット-腕系のグリップ位置と重心の距離 x 、ラケット-腕系の重心と打点の距離 a 、ラケット-腕系の重心まわりの慣性モーメント I_G を与えると、宙づりラケットと同様に剛体運動から算出できる。

衝突力 $F(t)$ に最大値 F_{MAX} を代入すると、それぞれ最大衝撃加速度を得ることができる。衝撃加速度を与えると、手の等価質量を

考慮することにより衝撃力を算出することもできる。

手で支持したラケットの実験モード解析⁽⁵⁾ 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。

図4と図5は、ラケットのストリングスのテンション45lb, 65lb の場合の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。テンションにかかわらず、衝突力はラージ・ボールの方がノーマル・ボールよりわずかに小さく、接触時間はラージ・ボールの方がノーマル・ボールより長くなっている。

3. フォアハンド・ストロークにおけるラケット・ハンドルの衝撃振動

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ラケット・ハンドル部(グリップ端から 210 mm) 衝撃振動加速度の予測波形と実測波形を比較したものである。打点はラケット面先端側寄りのオフセンターである。ストリング・テンションは 45 lbs である。図7は、ラケット面中心で、

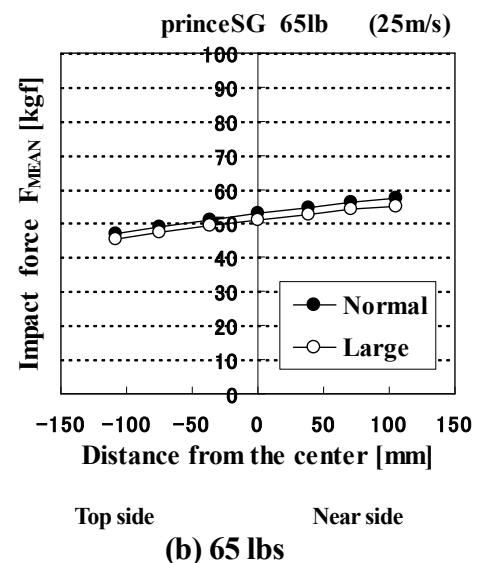
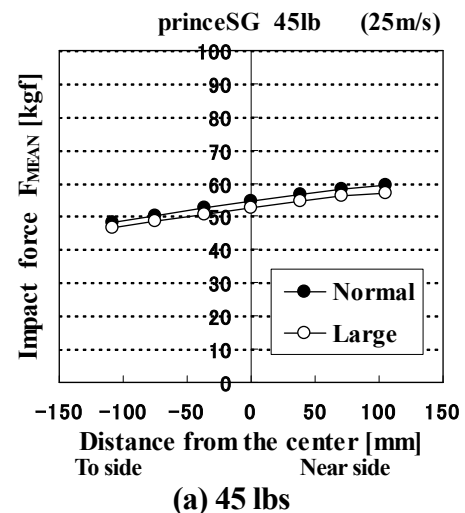


Fig.4 Predicted Impact forces (25 m/s)

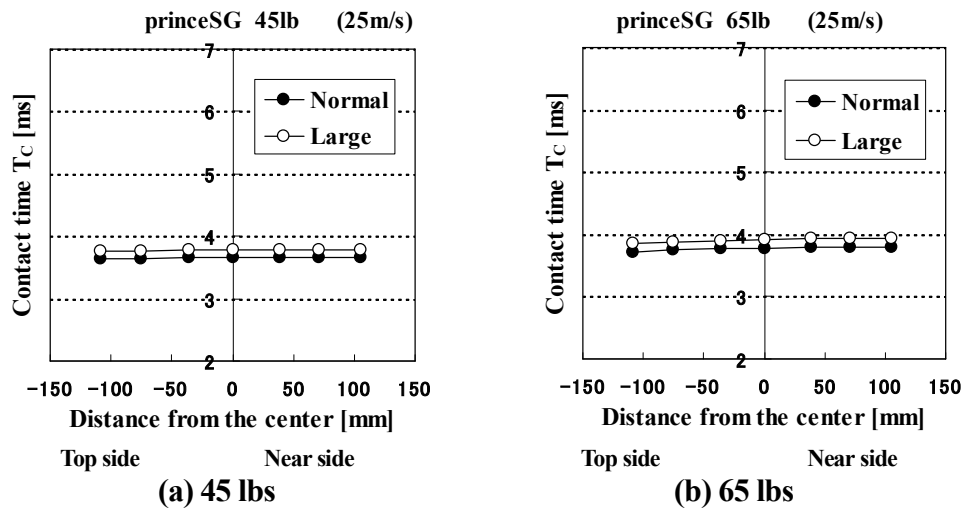


Fig. 5 Predicted contact time between a ball and strings (25 m/s)

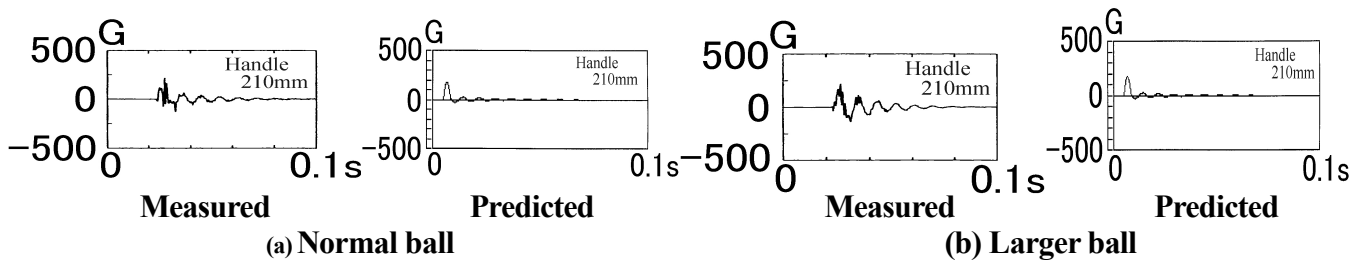


Fig. 6 Shock vibrations at the handle 210 mm from grip end when hitting flat forehand drive at the off-center (Top side) of racket face strung at 45 lbs.

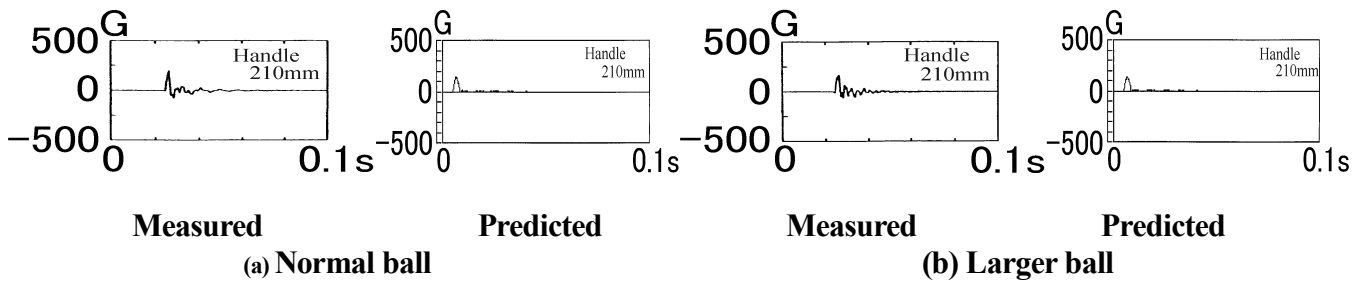


Fig. 7 Shock vibrations at the handle 210 mm from grip end when hitting flat forehand drive at the center of racket face strung at 45 lbs.

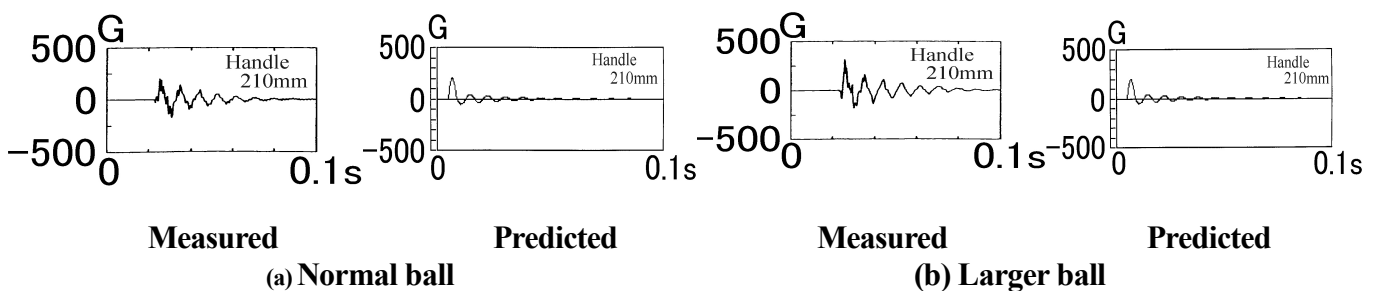


Fig. 8 Shock vibrations at the handle 210 mm from grip end when hitting flat forehand drive at the off-center (Top side) of racket face strung at 65 lbs.

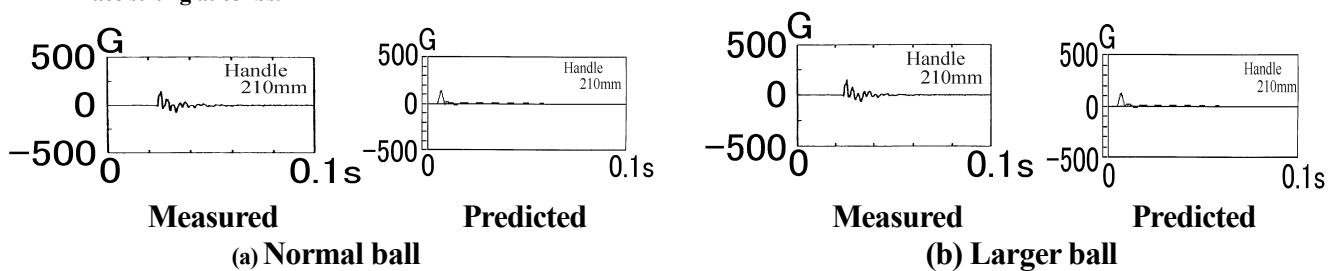


Fig. 9 Shock vibrations at the handle 210 mm from grip end when hitting flat forehand drive at the center of racket face strung at 65 lbs.

打撃した場合である。予測計算におけるラケットとボールの衝突速度は実測値に近い 25 [m/s]を与えた。

図8は、ストリング・テンションが 65 lbs でのノーマル・ボール打撃とラージ・ボール打撃であり、ラケット・ハンドル部(グリップ端から 210 mm)衝撃振動加速度の予測波形と実測波形を示している。打点はラケット面先端側寄りのオフセンターである。図9は、打点がラケット面中心の場合である。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。

4. フォアハンド・ストロークにおける手首関節の衝撃振動

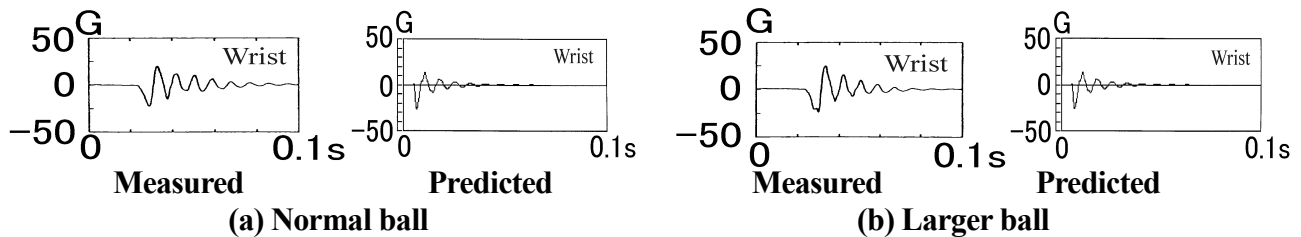


Fig.10 Shock vibrations at the wrist joint when hitting flat forehand drive at the off-center (Top side) of racket face strung at 45 lbs.

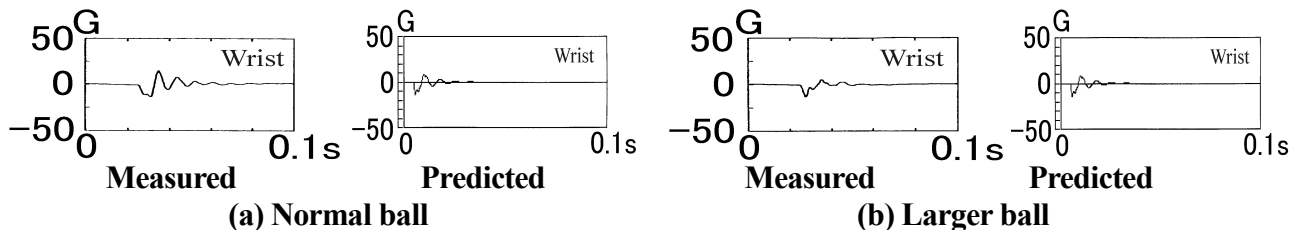


Fig.11 Shock vibrations at the wrist joint when hitting flat forehand drive at the center of racket face strung at 45 lbs.

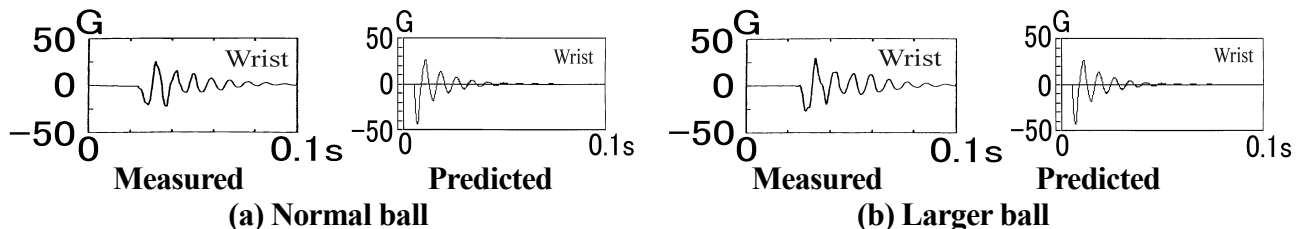


Fig.12 Shock vibrations at the wrist joint when hitting flat forehand drive at the off-center (Top side) of racket face strung at 65 lbs.

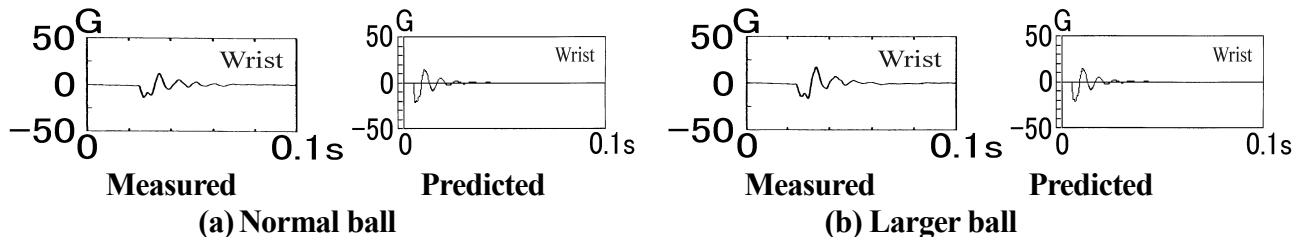


Fig.13 Shock vibrations at the wrist joint when hitting flat forehand drive at the center of racket face strung at 65 lbs.

5. 衝撃振動予測波形によるラージ・ボールとノーマル・ボールの比較

図14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の比較である。ラケット面先端側寄りのオフセンターでの打撃であり、ストリング・テンションは 45 lbs である。図15は、ラケット面中心で打撃した場合である。

図10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り、ストリング・テンションは 45 lbs である。予測計算における衝突速度は 25 [m/s]を与えた。図11は、打点がラケット面中心の場合である。

図12は、ストリング・テンションが 65 lbs でのノーマル・ボール打撃とラージ・ボール打撃であり、手首関節・衝撃振動の予測波形と実測波形を示す。打点はラケット面先端側寄りのオフセンターである。図13は、ラケット面中心で打撃した場合である。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。

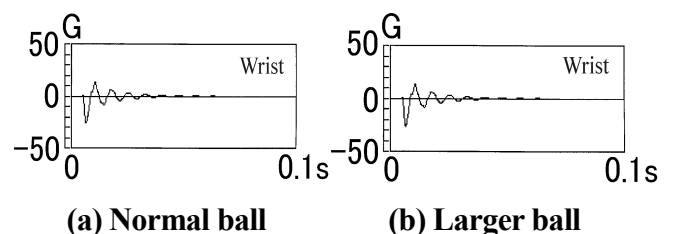
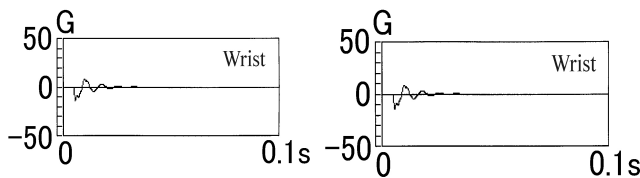


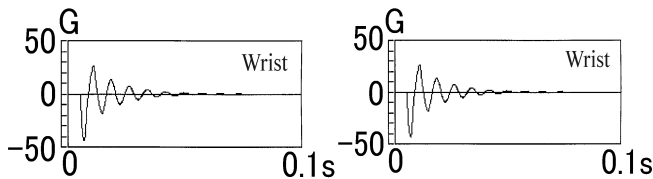
Fig.14 Predicted Shock vibrations at the wrist joint when hitting flat forehand drive at the off-center (Top side) of racket face strung at 45 lbs.



(a) Normal ball (b) Larger ball

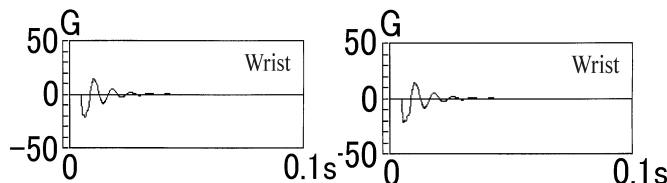
Fig.15 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting flat forehand drive at the center of racket face strung at 45lbs.

図16は、ストリング・テンションが 65 lbs でのノーマル・ボール打撃とラージ・ボール打撃であり、手首関節・衝撃振動の予測波形と実測波形を示す。打点はラケット面先端側寄りのオフセンターである。図17は、ラケット面中心で打撃した場合である。



(a) Normal ball (b) Larger ball

Fig.16 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting flat forehand drive at the off-center (Top side) of racket face strung at 65 lbs.



(a) Normal ball (b) Larger ball

Fig.17 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting flat forehand drive at the center of racket face strung at 65 lbs.

図 18 は、衝撃振動加速度波形の最大・最小のピーク値を示す。図 19 は、図 18 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。ボールとラケットの衝突速度は 30[m/s]を与えた。ストリングス・テンションが 45 lbs と 65 lbs の場合を示している。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、

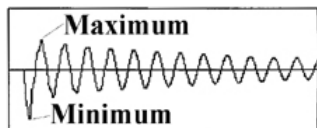


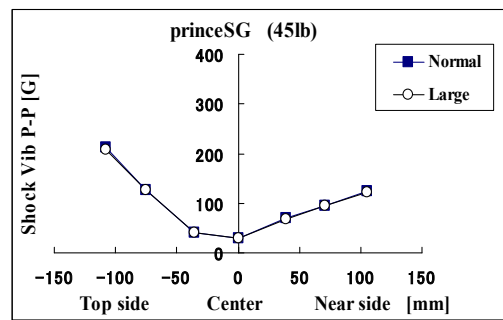
Fig.18 Peak value of shock vibrations

6. 結論

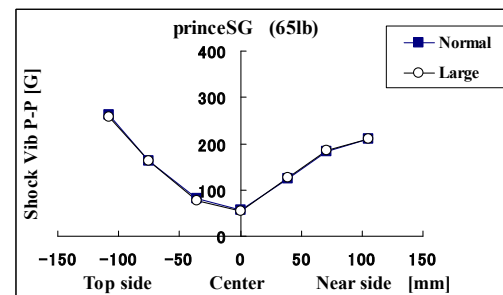
(1) ラージ・ボールとノーマル・ボールをフォアハンド・ストロークで打撃したときのラケット・ハンドルと手首関節の衝撃振動を予測した結果は実測波形の特徴を比較的良く表した。

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。



(a) Prince SG (45lb)



(b) Prince SG (65lb)

Fig.19 Shock vibrations Peak values of larger ball compared with the normal ball against the location of string face (impact velocity: 30 m/s).

(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。

おわりに、図表作成にご助力いただいた埼玉工大・平成 12 年度 4 年生 山田裕昭・北村和浩の両君に深謝する。なお、本研究の一部は平成 13 年度科学研究費 基盤研究(B), 基盤研究(C)の援助および埼玉工業大学 ハイテク・リサーチセンターの援助によって行われたことを付記する。

文 献

- (1) ITF (2000) ITF approved Tennis Balls, p.3.
- (2) 川副・友末・吉成・Casolo, スポーツ工学シンポジウム講演集, 97-34 (1997), pp.28-32.
- (3) 川副嘉彦, 計算工学講演集, 3-1 (1998), pp.295-298.
- (4) 川副・友末・吉成, 機械学会・機械力学計測制御講演集, No. 98-8, Vol. B, pp. 133-136.
- (5) 川副嘉彦, 機論, 56-526 (1990), pp.1511-1517.
- (6) 川副嘉彦, 機論, 58-552 (1992), pp.2467-2474.
- (7) 川副嘉彦, 機論, 59-558 (1993), pp.521-528.
- (8) 川副嘉彦, 機論, 59-562 (1993), pp.1678-1685.
- (9) Casolo, F. et al., Meccanica 26 (1991), pp.67 - 73.
- (10) 川副嘉彦, 機論, 61-584 (1995), pp.1300-1307.
- (11) 川副・友末・吉成, 日本機械学会講論, 96-51 (1996), pp.501-504.
- (12) Kawazoe, y., Theoretical & Applied Mechanics, Vol.49, (2000), pp.11-19.
- (13) 川副嘉彦, 日本機械学会, 第8回計算力学講演集, No.95-4 (1995), pp.235-236.
- (14) 川副嘉彦・友末亮三, 日本機械学会論文集, 64-623,(1998), pp.2382-2388.