

19S テニス・プレイヤー手首部の衝撃振動におよぼす ストリングス・テンションの影響 (フォアハンド・グランドストロークにおける手首部加速度の予測とメカニズム)

Mechanism of the Shock Vibrations at the Grip and the Wrist Joint during the Actual Forehand Stroke with the Loosely Strung Racket Comparing to the Tightly Strung Racket.

○ 川副嘉彦(埼玉工大), 友末亮三(安田女子大)
一木公央(コートサイド(株))

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Inst. of Tech., 1690 Okabe, Saitama
Ryoso TOMOSUE, Yasuda Women's College
Tadao ICHIKI, Courtside. Co.

At the current stage, the terms used in describing the performance of a tennis racket are still based on the feeling of an experienced tester or a player. Accordingly, there are many unknowns in the relationship between the performance estimated by a player and the physical properties of a tennis racket. It is often said recently that lower tensions increase the dwell time of the ball on the strings, offer less impact on the arm, and is better for the arm. Strangely many people thought just the opposite in the past. However, there have been few experimental studies with the actual impact velocities. In our recent measurements with the accelerations at the player's wrist joint and the racket handle during the actual forehand stroke and with the ones at the player's elbow joint and the racket handle during the actual service stroke, there was no big difference between the loosely strung racket and the tightly strung racket. This means it might be not correct that the looser strings are effective for the tennis elbow. This paper has investigated why the loosely strung racket is ineffective for the tennis elbow. It has made clear the mechanism of the effect of the string tensions on the impact shock vibrations at the grip and the arm of a tennis player on the basis of the impact analysis with the loosely strung racket comparing to the tightly strung racket during the forehand stroke.

Key Words: Tennis Racket, String Tension, Shock Vibrations, Forehand Stroke, Tennis Elbow,
Sports Engineering, Performance Prediction

1. 緒言

ストリングス初張力(張り上がりテンション)がどのようにラケット性能に影響するかは、プレイヤーにとって古くからの関心事であり、従来から多くの実験的な検討がなされてきた。しかし、インパクトの速度や供試ラケットの物理特性が異なることもあって、過去の実験結果は複雑であり、そのメカニズムには依然として謎が多い。たとえば、ストリングス・テンションと反発性の関係については、ミッドサイズ・ラケットでは、天然ガットの場合はテンションが 60ポンドのとき最大、ナイロンの場合は 50ポンドのとき最大であり、オーバー・サイズ・ラケットでは70ポンドのとき最大であり、それ以下でもそれ以上でも低下する⁽¹⁾という実験結果がある。また、テンションは反発性には大きくは影響しないという研究もある^{(2)-(7), (8)}。

一方、テニスラケットのストリングスを緩く張ると、ボールの衝撃を多く吸収し、振動を低減し、プレイヤーの肩・肘・手首の傷害を防止するのに良いと一般に言われており、テニスの書物や雑誌などにもたいてい書かれている。しかし、これらを実証する研究はほとんどない。

そこで、著者らが過去に行った研究⁽²⁾⁻⁽⁷⁾の確認も兼ねて、男子上級プレイヤー(全日本ランカー)のフォアハンド・ストロークにおける手首部およびサービス・ストローク(フラット)における肘部の加速度をラケット・ハンドル部と同時に測定し、ストリングス・テンションの異なる

るラケットでノーマル・ボールおよびラージ・ボール⁽⁹⁾を打撃したときのプレイヤー上肢系衝撃振動へのテンションの影響(45 lbs と65 lbs の違い)を実験的に調べた⁽¹⁰⁾。その結果、以下のようなことがわかった。

(1) フォアハンド・ストロークにおけるラケット・ハンドルと手首関節の衝撃振動は、ラケット面センタで打撃した場合はほとんどテンションの違いはなく、ラケット面中心より先端側寄りのオフ・センタ打撃では、45 lbs の方が65 lbs に比べてやや小さかった。ただし、20 lbs のテンション差に対する衝撃振動低減の効果は小さい。(2) サービス・ストロークでは、ノーマル・ボールの場合もラージ・ボールの場合も、テンション 45 lbs は 65 lbs に比べて、ラケット・ハン

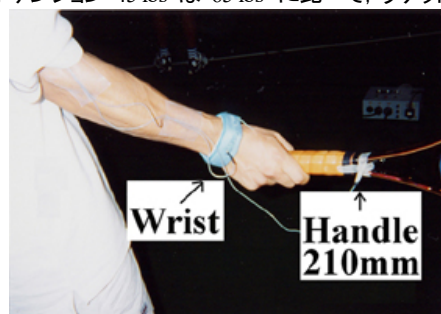


Fig.1 Location of accelerometers at the wrist joint and the racket handle in the forehand ground stroke.

ドルの衝撃振動は大きく、肘関節の衝撃振動はやや小さめであった。この場合も、テンションを高めた方がコントロール性は良いと一般に言われていることもあり、20 lbs のテンション低減に対する衝撃振動低減の効果は大きいとは言えない。(3) したがって、ストリングスを緩く張るとプレイヤーの肩・肘・手首の傷害を防止するのに効果的とは言えない。

本論文では、ストリングス・テンションの異なるテニスラケットでボールを打撃したときのプレイヤー上肢系衝撃振動を予測し、実測結果と比較する。すなわち、ノーマル・ボールおよびラージ・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⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、実測結果と比較するとともに、テンションの影響について考察する。

図1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。図2は、使用したボールの寸法である。使用したラケットの仕様と主な物理特性を表1に示す。

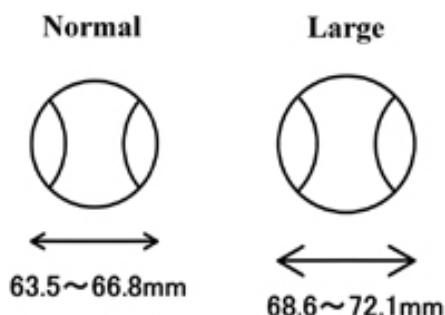


Fig.2 New Larger ball and conventional normal ball

Table 1 Racket specifications and main physical properties

ラケット名	prince SG		
Tention	45lb	55lb	65lb
Total length	687mm	685mm	688mm
Mass	336.5g	338.0g	338.5g
Center of gravity	329mm	327mm	330mm
Face area	694cm ²		
Moment of inertia I_{GY} about Y axis	15.0gm ²		
Moment of inertia about grip (70 mm)	37.3gm ²		
period about Y axis	1.317s		
X axis			
period about X axis	1.055s		
Moment of inertia I_{GY} about X axis	0.935gm ²		

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⁾

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 TC 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、エネルギー損失に対応する反発係数 e_{bc} 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_n 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 ($M_H=1.0$ [kg]) を付加することにより、ラケットー腕系のグリップ位置と重心の距離 X 、ラケットー腕系の重心と打点の距離 a 、ラケットー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 $F(t)$ が最大値 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

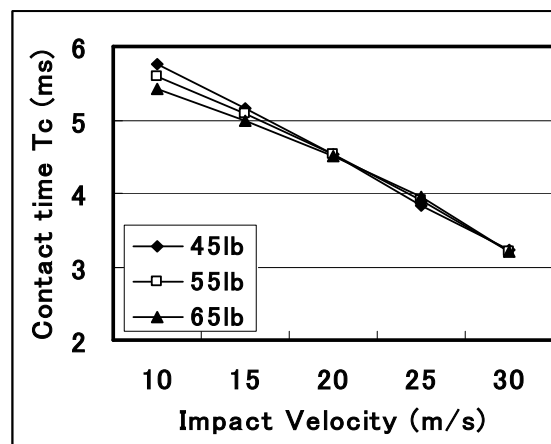


Fig.3 Contact time

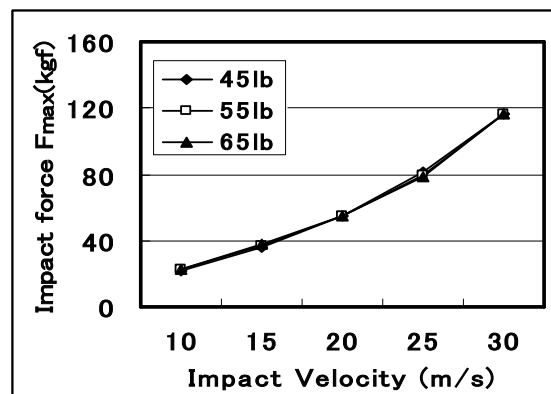


Fig.4 Max. Impact force (1kgf=9.8N)

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なき一致する。

図3、図4、図5、図6は、ラージ・ボールについての衝突解析結果であり、それぞれ、接触時間、最大衝突力、ストリングスの変形量、ボールの変形量についてストリングス・テンション 45lb、55lb、65lb の場合を比較したものである。接触時間は、衝突速度が遅い場合は

テンションが低いほど長い。衝突速度が 20 [m/s] 以上になると、テンションの影響はほとんどない。最大衝突力にはテンションが変わっても差がほとんどない。これはストリングスとボールの硬化ばね特性によるものである^{(2)・(7)}。したがって、ボールの変形量にもテンションはほとんど影響しない。ストリングスの変形量には、テンションが影響し、テンションが低いほどストリングスの変形量は大きい。ノーマル・ボールでも同様な結果であった。

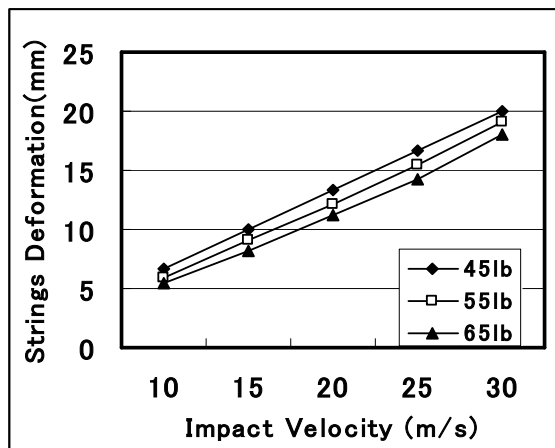


Fig.5 Strings deformations (Large ball)

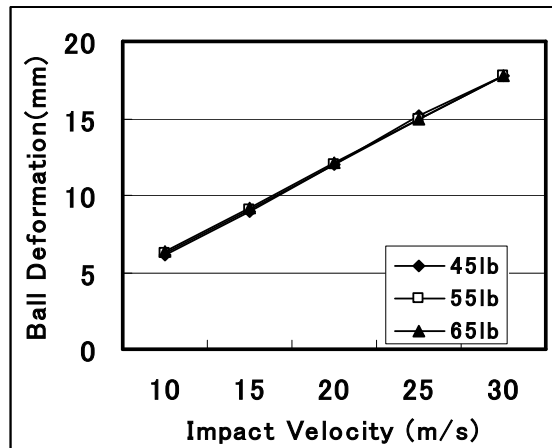


Fig.6 Ball deformations (Large ball)

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 におよぼすテンションの影響

3.1 ノーマル・ボールを打撃した場合

図7は、フォアハンド・ストロークにおけるノーマル・ボール打撃における手首関節・衝撃振動の予測波形と実測波形であり、テンション 45 lbs と 65 lbs の場合を示している。打点はラケット面中心

である。予測計算における衝突速度は実測値に近い25 [m/s]を与えた。図8は、打点がラケット面先端側寄りのオフセンターの場合である。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の振幅が多少異なるが、予測波形は1章に述べた実験結果に関するテンションの違いによる衝撃振動の微妙な特徴を表している。

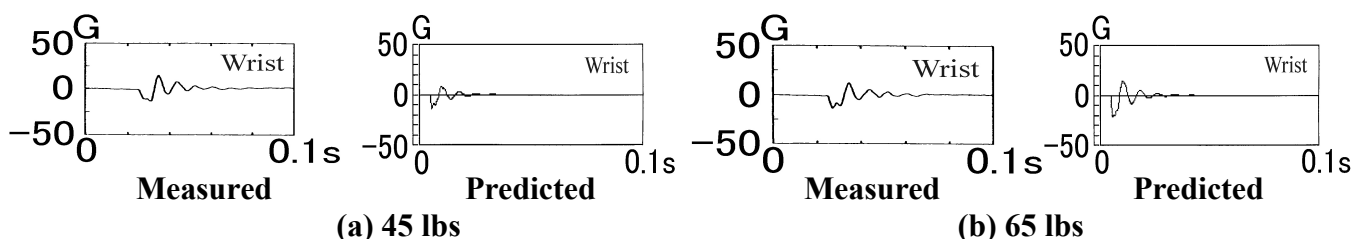


Fig.7 Shock vibrations at the wrist joint when hitting a normal ball with flat forehand drive at the center of the racket face.

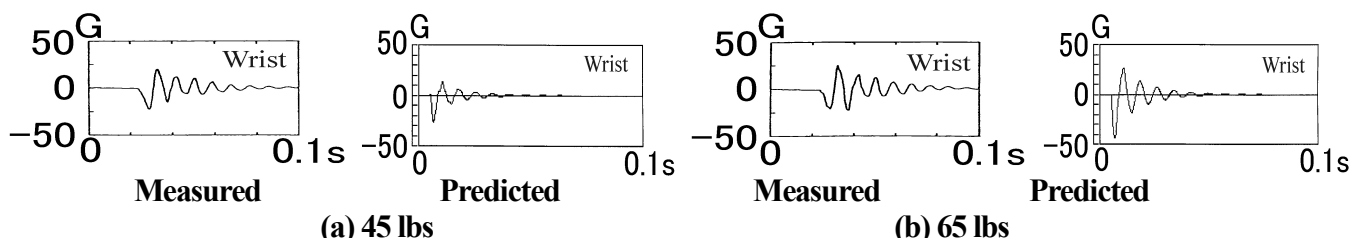


Fig.8 Shock vibrations at the wrist joint when hitting a normal ball with flat forehand drive at the off-center (Top side) of racket face.

3.2 ラージボールを打撃した場合

図9は、ラージ・ボール打撃の場合である。フォアハンド・ストロークにおける手首関節・衝撃振動の予測波形と実測波形であり、

テンション が 45 lbs と 65 lbs の場合を示している。打点はラケット面中心である。予測計算における衝突速度は実測値に近い25 [m/s]を与えた。図10は、打点がラケット面先端側寄りのオフセンターの場合である。衝突速度実測値の多少のばらつきもあって予測

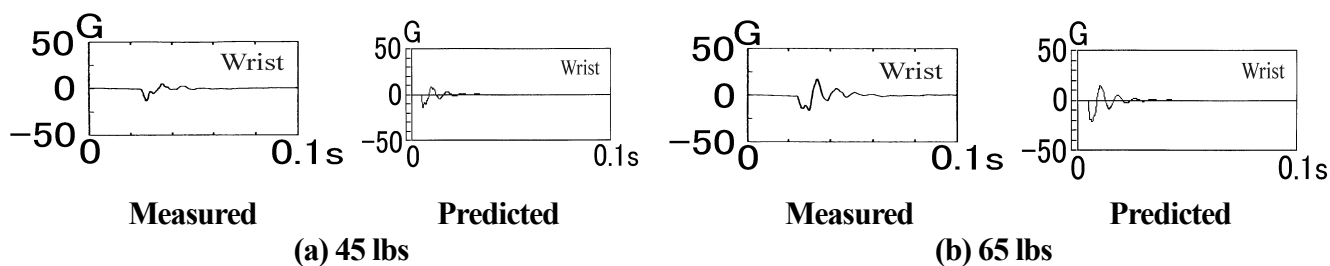


Fig.9 Shock vibrations at the wrist joint when hitting a larger ball with flat forehand drive at the center of the racket face.

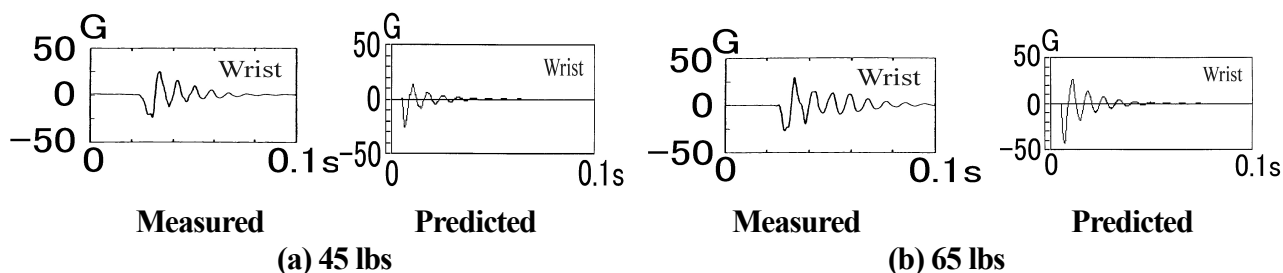


Fig.10 Shock vibrations at the wrist joint when hitting a larger ball with flat forehand drive at the off-center (Top side) of racket face.

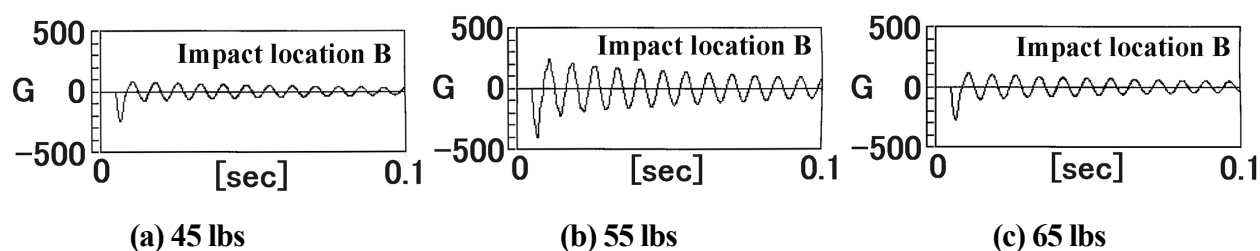


Fig.11 Predicted Shock vibrations at the grip 70 mm from the end when a normal ball strikes the suspended racket at the off-center (Top side) along the longitudinal axis of racket face (Impact velocity: 30 m/s).

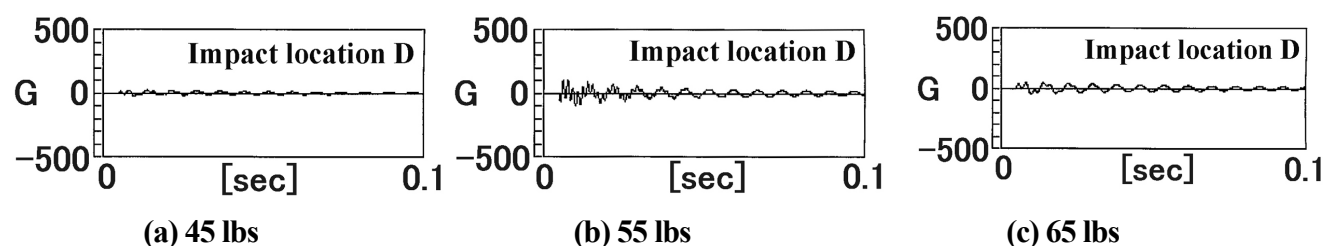


Fig.12 Predicted Shock vibrations at the grip 70 mm from the end when a normal ball strikes the suspended racket at the center of racket face (Impact velocity: 30 m/s).

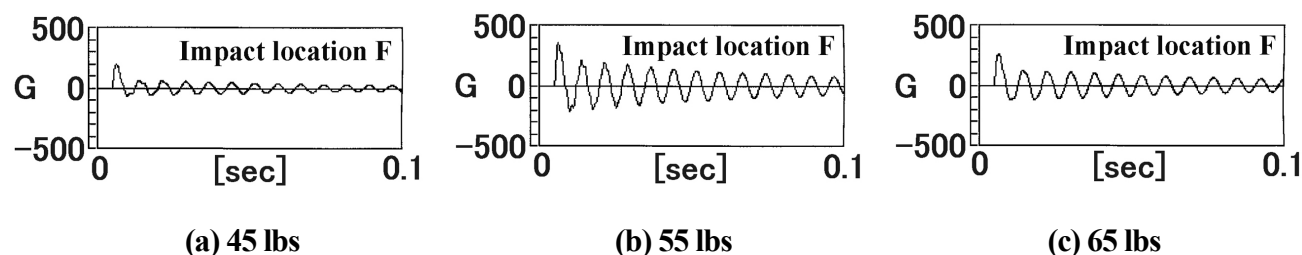


Fig.13 Predicted Shock vibrations at the grip 70 mm from the end when a normal ball strikes the suspended racket at the off-center (Near side) along the longitudinal axis of racket face (Impact velocity: 30 m/s).

波形と実測波形が多少異なるが、予測波形はテンションの違いによる衝撃振動の微妙な特徴を表している。

4. 衝撃振動予測波形によるテンションについての考察

図11は、宙づり状態のラケットにノーマル・ボールを衝突させたときのグリップ位置(握りの手の中心をグリップ端から 70 mm と想定)の衝撃振動加速度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(図11)、ラケット面中心(図12)、ラケット面根元側寄りのオフ・センター(図13)の衝突におけるテンションの違いを比較している。ストリング・テンションは 45 lbs, 55 lbs, 65 lbs であり、ボールとラケットの衝突速度は 30 m/s である。

テンション 45 lbs, 55 lbs, 65 lbs を比べると、ラケット面のどの衝突位置でも、45 lbs が最もグリップ衝撃振動は小さく、次に 65 lbs が小さく、中間のテンション 55 lbs の場合がもっとも大きく振動が大きい。ラージ・ボールの場合も同様の結果が得られた。

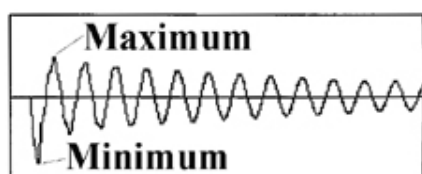


Fig.14 Peak value of shock vibrations

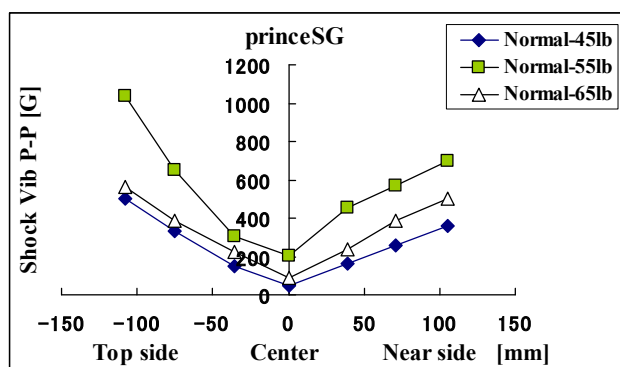


Fig. 15 Shock vibrations peak values of different tensions with normal ball. against the locations of string face (impact velocity: 30 m/s).

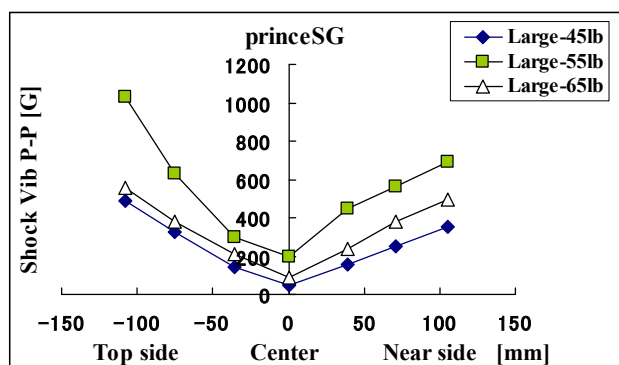


Fig. 16 Shock vibrations peak values of different tensions with larger ball. against the locations of string face (impact velocity: 30 m/s).

ストリングス・テンションの影響は非線形の特徴を示しており、ラケット・フレームとの相性もあるはずであり、フェイス面積が異なると衝撃振動の小さいテンションも異なってくるはずである。

図14は、衝撃振動加速度波形の最大・最小のピーク値を示す。図15は、図14の Maximum と Minimum の値の差をグリップ部・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ている。ノーマル・ボールの場合であり、ボールとラケットの衝突速度は 30 [m/s], ストリングス・テンションが 45 lbs, 55 lbs, 65 lbs の場合を比較している。ラケット面先端側や根元側の衝突位置でグリップ衝撃振動は大きく、面中心では小さい。また、どの衝突位置でも、45 lbs が最も衝撃振動が小さく、次に 65 lbs が小さく、中間のテンション 55 lbs の場合がもっとも大きい。図16は、ラージ・ボールの場合であり、ノーマル・ボールの場合と同様の結果をしめしている。

5. 結論

ストリングス・テンションが異なるテニスラケットでボールを打撃したときのプレイヤー上肢系衝撃振動を予測して実測結果と比較した。ノーマル・ボールおよびラージ・ボールについてフォアハンド・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、さらに、宙づりラケットにボールを衝突させたときの予測結果からテンションの影響について考察した。

(1) ラケット・ハンドルと手首関節の衝撃振動は、先端側寄りのオフ・センタ打撃では、45 lbs の方が 65 lbs に比べてやや小さいという実験結果を予測できた。しかし、テンション差 20 lbs 低減に対する衝撃振動低減の効果は大きいとは言えない。

(2) テンションを 45 lbs, 55 lbs, 65 lbs と変えて宙づり状態のラケットにボールを衝突させたときのグリップ位置の衝撃振動予測波形を比べると、ラケット面先端側や根元側の衝突位置の場合に衝撃振動は大きく、面中心では小さい。また、どの衝突位置においても 45 lbs が最もグリップ衝撃振動が小さく、次に 65 lbs が小さく、中間のテンション 55 lbs の場合がもっとも大きく、ストリングスの非線形の特徴を示した。

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) Groppe, J. L., Shin, I. S., Thomas, J.A. and Welk, G.J., Int. J. Sport Biomech., Vol.3 (1987),40.
- (2) 川副嘉彦, 機論,58-552,C(1992),pp.2467-2474.
- (3) 川副嘉彦, 機論,59-558, C(1993), pp.521-528.
- (4) 川副・友末, 機論,59-560, C(1993), pp.1001-1008.
- (5) 川副嘉彦, 機論, 59-562,C,(1993),pp.1678-1685.
- (6) 川副嘉彦, 機力・計測制御講義, 96-5(A), pp.497-500.
- (7) Kawazoe, y., Theoretical & Applied Mechanics, Vol.43, (1993), pp.223-232.
- (8) Cross, R., Tennis Science & Technology, blackwell Science, (2000), pp.119-126.
- (9) ITF (2000) ITF approved Tennis Balls, p.3.
- (10) 川副・友末・村松・吉成・柳, スポーツ工学シンポジウム 2001講演論文集, No.01-22, (掲載予定)
- (11) 川副・友末・吉成・Casolo, スポーツ工学シンポジウム講義集, 97-34 (1997), pp.28-32.
- (12) Kawazoe, Y., Theoretical & Applied Mechanics, Vol.49, (2000), pp. 11-19.