

国際テニス連盟性能試験用ラケットITFの 打球感に関連する性能予測と評価

Prediction and Estimation of Shock Vibrations of Handled Racket ITF for ITF Performance Test

○川副嘉彦（埼玉工大） 武田幸宏（埼玉工大） 中川慎理（埼玉工大）

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama, Japan
Yukihiro TAKEDA, Saitama Institute of Technology
Masamichi NAKAGAWA, Saitama Institute of Technology

Several former top players sent a letter to the ITF (International Tennis federation) that tennis has become unbalanced and one-dimensional, because rackets today allow players to launch the ball at previously unthinkable speeds. Modern racket technology has developed powerful, light, wide-bodied rackets. There's even a racket with a chip built into the handle that allows the racket to stiffen upon impact with the ball. All of this technology has led to major changes in how the game is played at the top level. ITF seems to have started the test to examine the performance of tennis racket against the above claims. Since the sport should be learned from the experience, it is the subjective thing. Accordingly, it is quite difficult to see how the physical property of equipment has an effect on the performance of a player. The terms used in describing the performance of a tennis racket are still based on the feel of an experienced tester or a player even today. This paper investigated the physical properties of the racket that was manufactured by ITF for performance test, predicting its performance in terms of the impact shock vibrations of player's wrist joint, which might be related to the feel. It is based on the experimental identification of the racket-arm dynamics and the simple nonlinear impact analysis. The result showed that the magnitude of shock vibration at the handle and the wrist joint with the racket ITF is remarkably small due to the stiffer handle compared to the recent representative racket. Prediction and estimation of power will be reported in a separate paper.

Key Words: Dynamics of Machinery, Sports Engineering, Impact, Tennis Racket, Performance Test, ITF, Shock Vibrations, Feel, Wrist Joint, Racket Handle, Performance Prediction

1. 緒言

元トッププレイヤー数人が国際テニス連盟（ITF）に対して、最近のテニスラケットのゲームへの影響力を抑える対策を要求したということもあり、ITFは新開発の性能測定装置を用いてラケットやシューズ、ボール、コートなどの性能測定実験を精力的に進めている。ラケットについては、パワー測定装置を用いて、上から落ちてきたボールをマシンに取り付けたラケットで打撃して打球速度を測定し、主要メーカーのラケット・パワー値に関するデータベースが作成されている⁽¹⁾。別報⁽¹⁾では、性能試験用の標準として製作されたラケットITF（27in：680mm，351g）のボールの飛びに関連する性能予測・評価を行い、最近の標準的な市販ラケットV-CON17（27.5in：698.5mm，300g）と比較し、パワーに関連する性能の違いのメカニズムを衝突解析に基づいて吟味した。

本論文では、国際テニス連盟・性能試験用の標準として製作されたラケットITF（27in：680mm，351g）の打球感に関連する性能予測・評価を行う。実験的に同定したラケット・腕系とボールの特性に基づく衝突解析によりボールを打撃したときのラケット・ハンドルと手首の衝撃振動波形を予測し⁽²⁾⁽¹⁴⁾、最近の代表的な市販ラケットV-CON17（27.5in，699

mm，300g）と比較し、衝撃振動の違いのメカニズムを明らかにする。

2. インパクトにおけるラケットと手首関節の衝撃振動の予測法⁽²⁾⁽¹⁴⁾

図1はプレイヤーがボールを打撃した瞬間に手に伝わる衝撃力を求めるためのモデルを示す。図2は手首関節の加速度予測位置を示す。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。手で支持したラケットの実験モード解析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ボールと衝突したときのラケットの握りの位置の振動加速度成分を求めることができる。

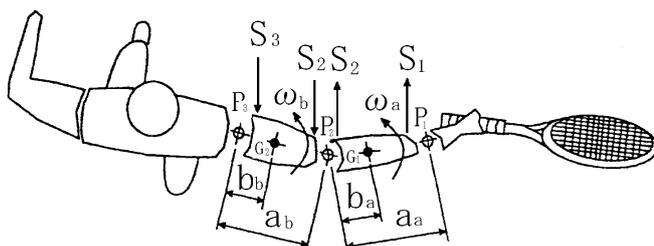


Fig.1 Model for the prediction of the shock force transmitted to the arm joint from a racket.

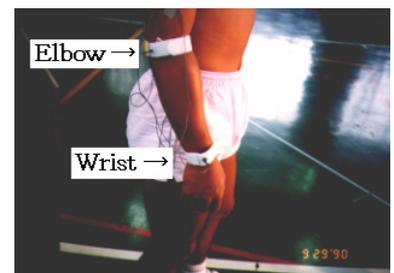
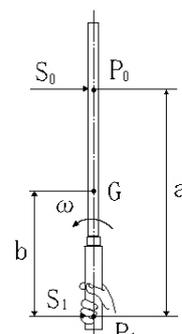


Fig.2 Location of wrist joint

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。衝撃振動加速度波形 A_{grip} は以下のように衝撃加速度成分（第1項）、振動加速度成分（第2項）の和で表せる。

$$A_{grip} = A_{nv} \sin\left(\frac{\pi t}{T_c}\right) + \sum_{i=1}^4 A_{vi} e^{-\sigma_i t} \sin 2\pi f_i t$$

図3は、手首の衝撃振動加速度の実測波形と予測波形の例と実打実験状況を示す。

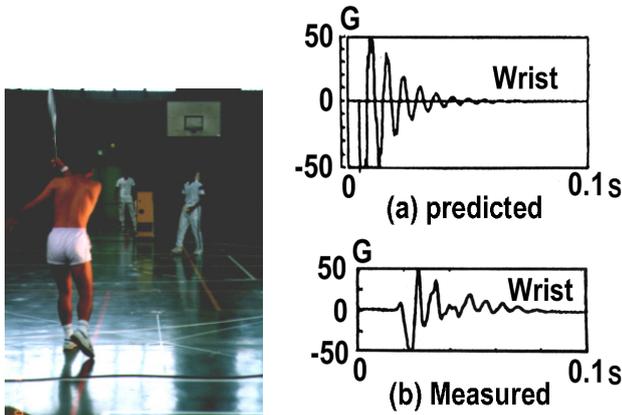


Fig.3 Predicted shock vibrations of a wrist joint compared with the experimental.

3. ラケットで打撃したときの手首関節の衝撃振動の予測

図4と図5は、それぞれラケット V-CON17 (27.5 in: 699 mm, 300g) とラケットITF (27in : 680mm, 351g) を示し、表1 は

仕様および物理特性である。ラケット質量はストリングスの質量を含み、 I_{GY} は重心まわりの慣性モーメント、 I_{GR} は握りの位置（グリップ端から70mm）まわりの慣性モーメント、 I_{GX} は長手方向軸まわりの慣性モーメントである。図6 は、実験モード解析により同定した振動モード形状であり、低次からフレームの2節曲げ（1次）、2節ねじり（2次）、3節曲げ（3次）、ストリングスの膜振動1次（4次）を示す。

フォアハンド・ストロークを想定したスイング・モデルを用いて、手首と肘の関節角度を一定に保って肩関節だけに一定の回転トルク N_s を与え、腕・ラケット系が肩関節まわりに $\pi/2$ 回転したところでボールとラケットが衝突する。

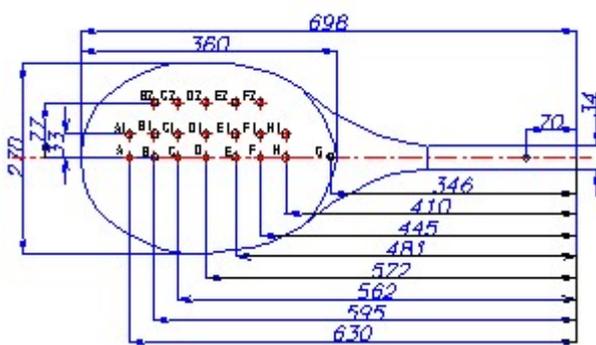
図7 は手首関節に伝わる衝撃振動の予測・評価システムのブロック図である。

Table 1 Physical property of tennis rackets

Racket	ITF	V-CON17
Total length	680mm	699mm
Face area	633 cm ²	690 cm ²
Mass	351g	300g
Center of gravity from grip end	324mm	345mm
Moment of inertial I_{GY} about Y axis	17.69gm ²	13.73gm ²
Moment of inertial I_{GR} about grip	40.33gm ²	36.42gm ²
Moment of inertial I_{GX} about X axis	1.57gm ²	1.383gm ²
1st frequency	141Hz	161Hz
Strings tension	※56lb	55lb



(a)



(b)

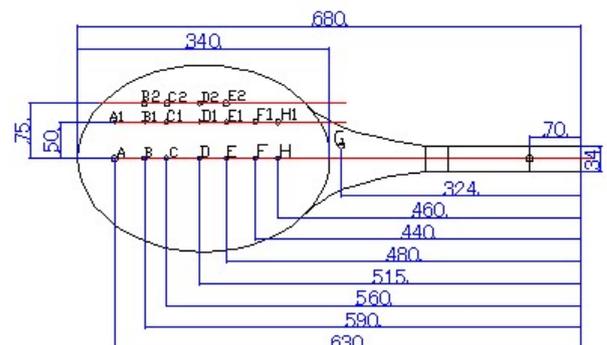


(c)

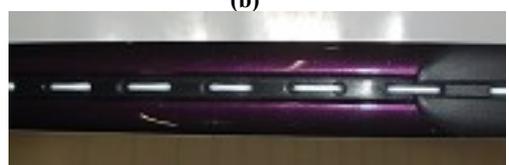
Fig.4 Geometry of Racket V-CON17



(a)



(b)



(c)

Fig.5 Geometry of Racket ITF

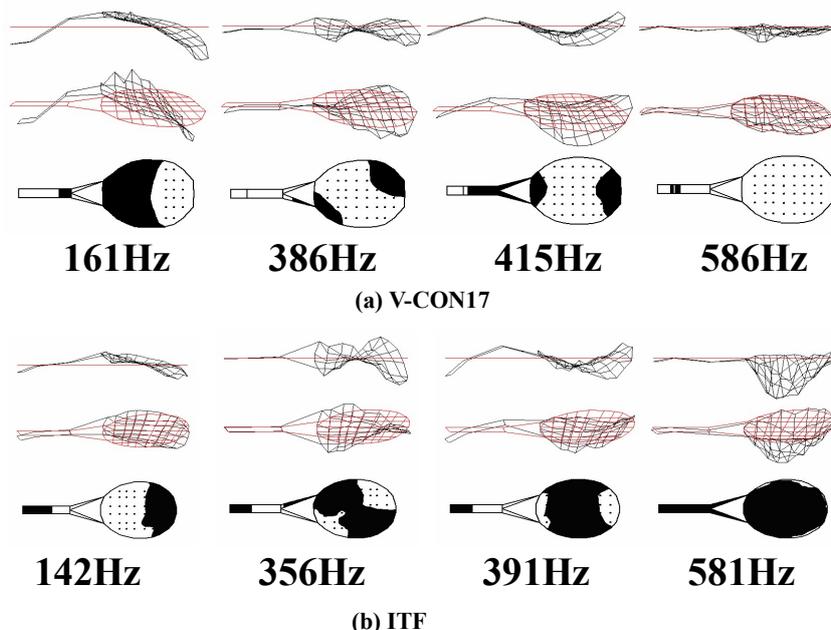


Fig.6 Experimentally identified vibration modes.

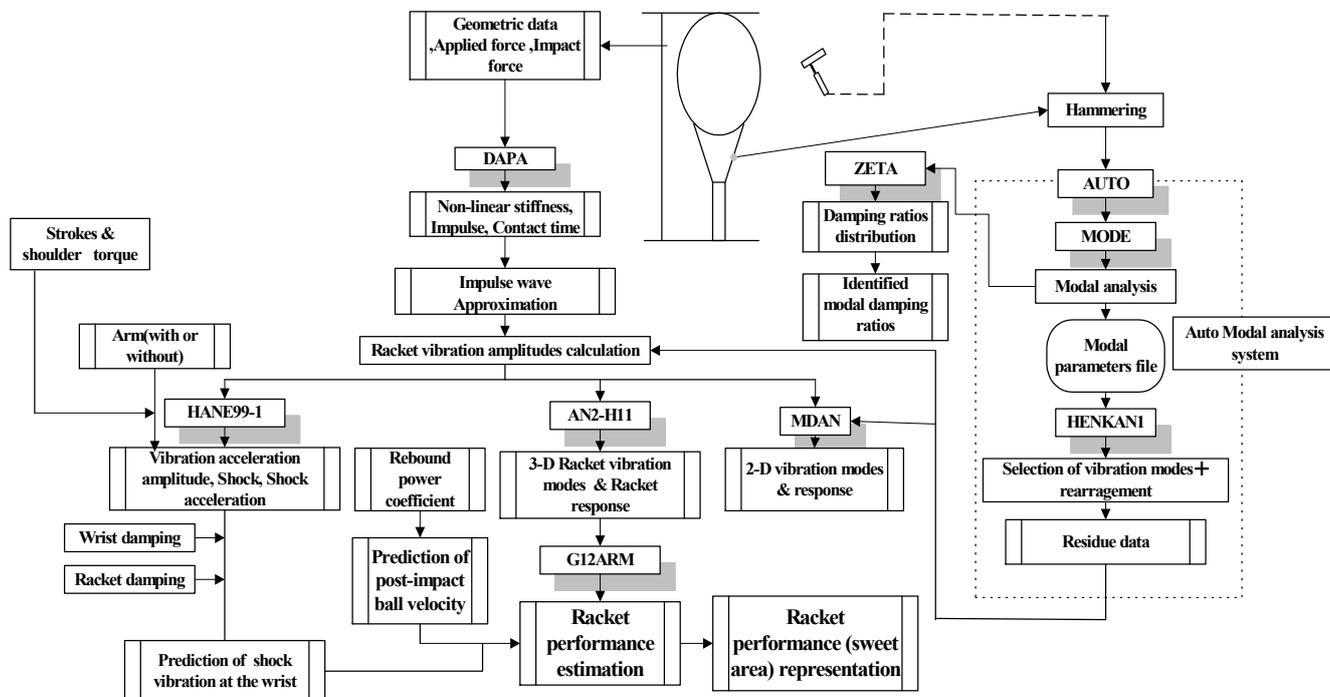


Fig.7 Computer aided prediction and estimation system for racket performance in tennis (Shock and vibrations at the wrist joint)

図8は、グランド・ストロークで打撃したときのインパクトにおける手首関節の衝撃振動の予測波形である。ストリング面の全範囲の打点で打撃したときの手首・衝撃振動を比較することができる。従来型重量バランスのラケットITFは、軽量型ラケットV-CON17に比べて、手首に伝わる衝撃・振動が著しく小さく、衝撃振動の減衰も大きい。特に一般に衝撃振動の大きいストリング面先端や手前側のオフセンターで打撃したときの手首関節の衝撃振動が小さいのが目立つ。

4. 手首関節に伝わる衝撃振動の低減に関する考察

インパクトにともなう手首関節の衝撃振動加速度の大きさを波形のピーク値（最大最小の絶対値の和）で評価すると、図9のような比較になる。ラケット面中心からの距離を横軸にとったのが図10である。

図11は、各打点A～Hでのインパクトにおける手首関節の最大衝撃成分の値の比較を示す。手首関節に伝わる衝撃成分は振動成分に比べて小さい。

図12、図13、図14は、それぞれストリング面の打撃位置B（先端側）、D（ほぼ中心）、F（手前側、根元側）でボールを打撃したときの4つの振動モード成分の比較を示す。上から振動1次成分、2次成分、3次成分および4次成分の減衰波形である。ラケット面の先端側および根元側で打撃したときのラケットV-CON17の場合の手首関節の1次振動成分が顕著である。ラケットITFの場合は非常に小さい。

図15は、ラケット面先端のA打点で打撃したときの1次振動の初期振幅を示す。両ラケットのフレーム全体の振動振幅の大きさに大きな違いは無いが、手の握りの中心に相当するグリップ端から70 mmの位置（○印で表示）の振幅に大きな違

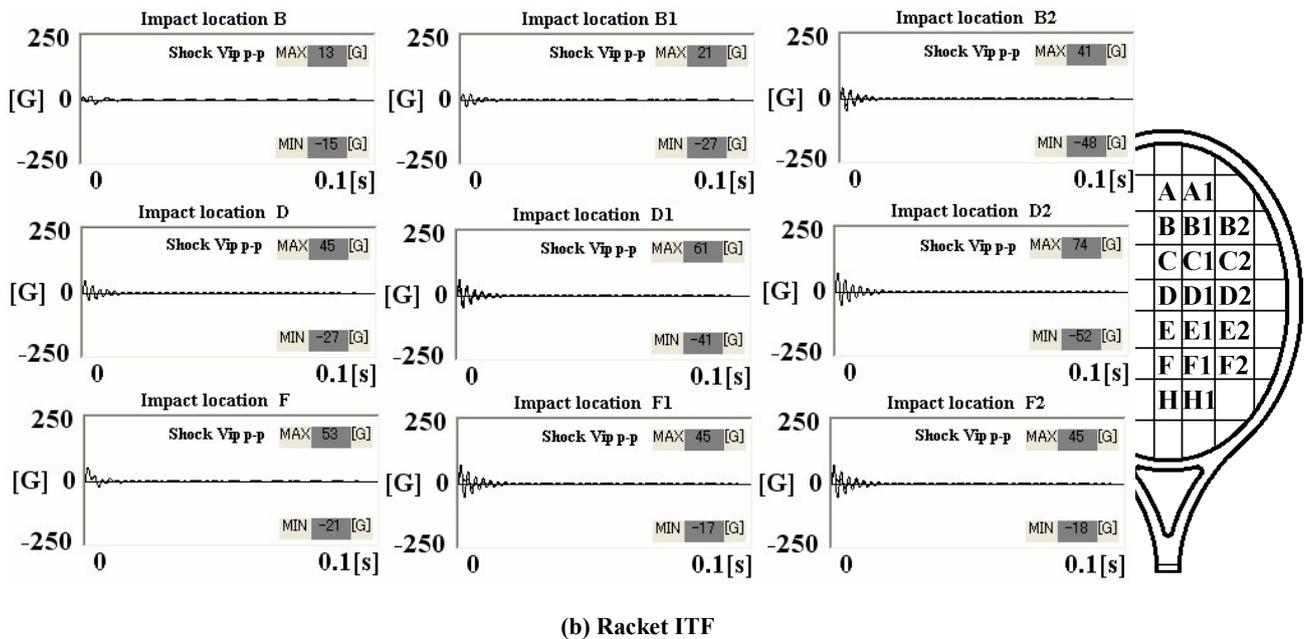
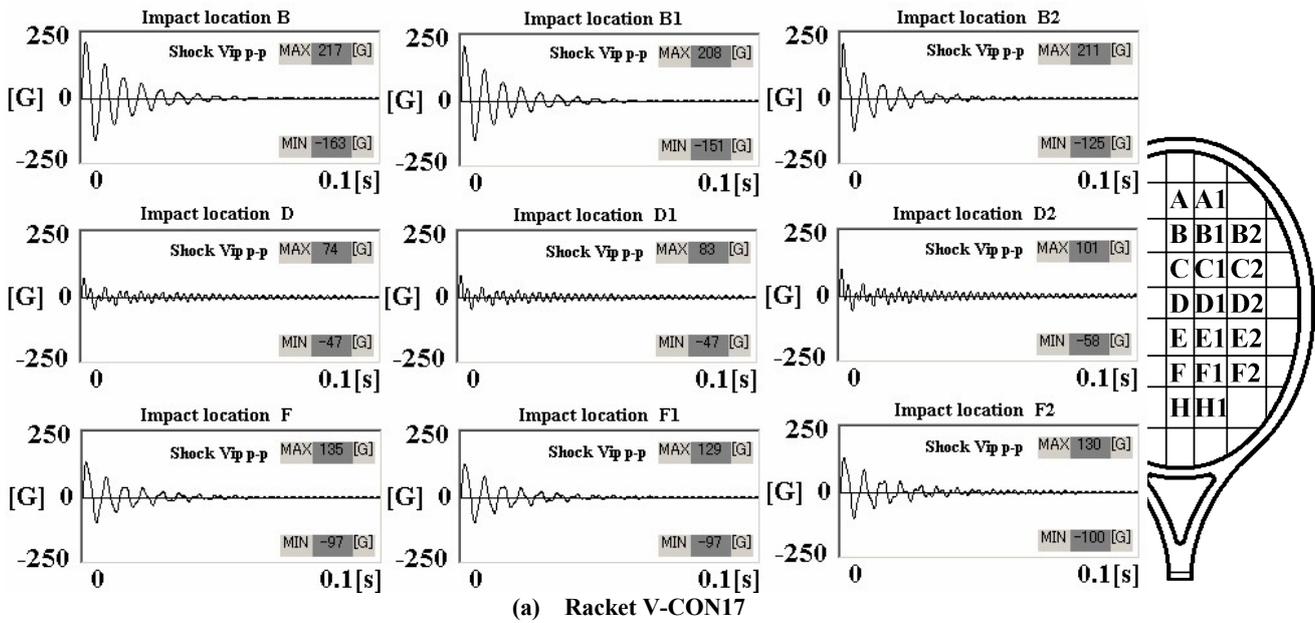


Fig.8 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting a ball with flat forehand drive at the various impact locations of racket face (impact: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$).

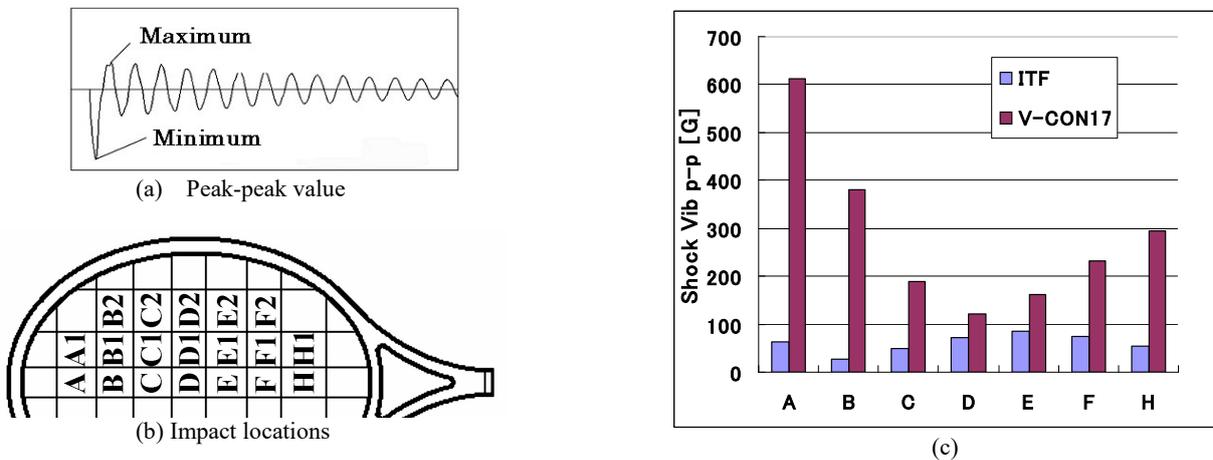


Fig.9 Predicted shock vibrations maximum peak-peak values at the wrist joint vs. representative impact locations of string bed (impact: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$).

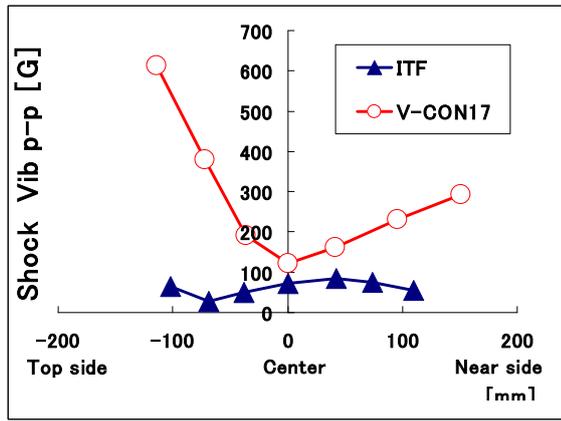


Fig.10 Predicted shock vibrations maximum peak-peak values at the wrist joint vs. representative impact locations of string bed (impact: $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s).

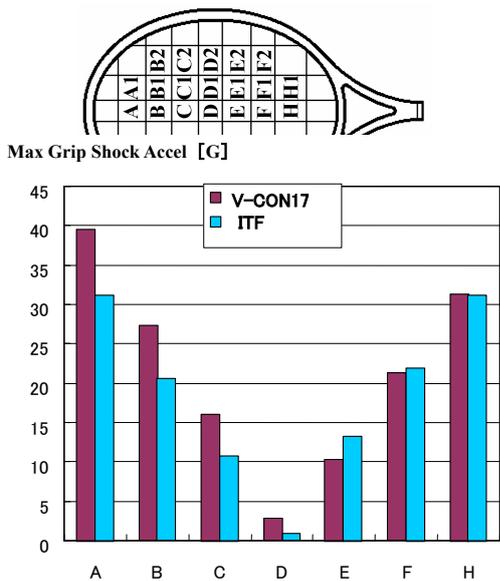


Fig.11 Predicted maximum shock acceleration at the wrist joint when hitting a ball with flat forehand drive at the various impact locations of string bed (impact: $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s).

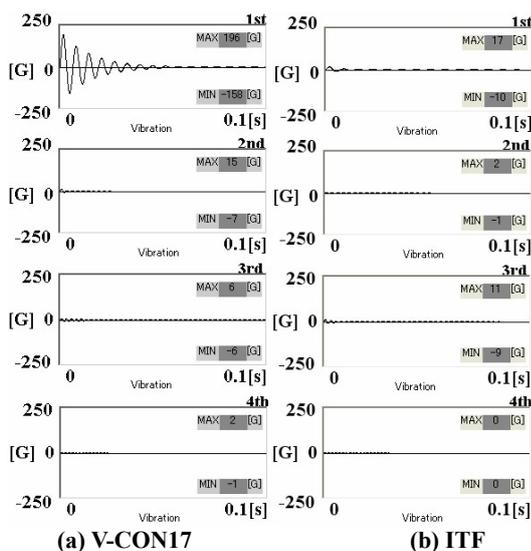


Fig.12 Predicted vibrations components at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s). 1st mode vibration component, 2nd, 3rd and 4th from upside.

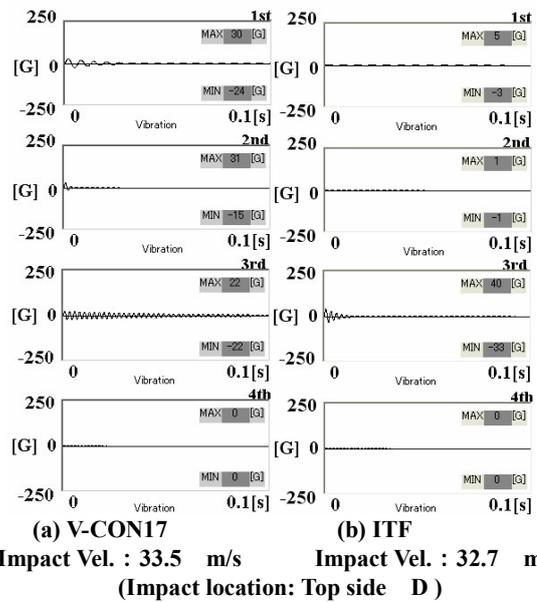


Fig.13 Predicted vibrations components at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s). 1st mode vibration component, 2nd, 3rd and 4th from upside.

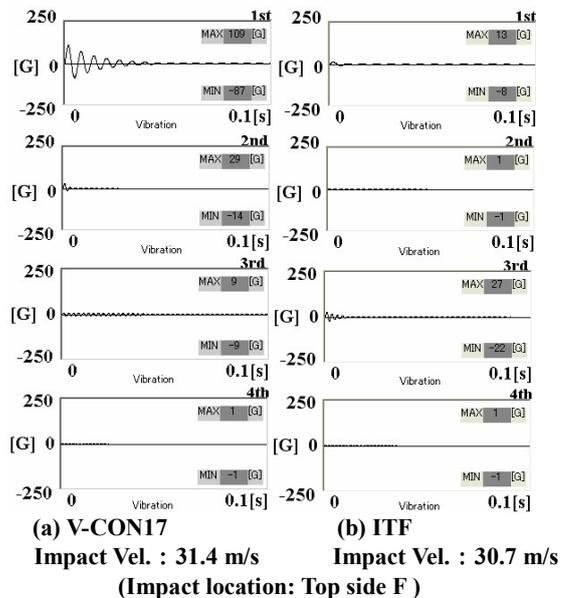


Fig.14 Predicted vibrations components at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s). 1st mode vibration component, 2nd, 3rd and 4th from upside.

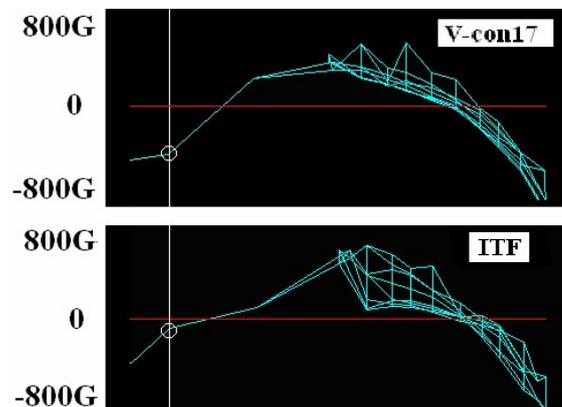


Fig.15 Initial acceleration amplitude of 1st vibration mode component of racket frames (Impact location: A, $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s).

がみられる。

図16のように打球面側とハンドル側を段付はりでモデル化して⁽¹⁵⁾、全質量（ストリングの質量を含む）、1次および2次の曲げ固有振動数をラケットの実系にほぼ一致させたときの両ラケットの打球面側とハンドル側の剛性と線密度を算出してみた。剛性は線密度比に比例させた。ハンドル部質量の実測値と計算値を比較してみたら（ラケットEOS100）、誤差は3%であった（図17）。

計算結果によると、ラケットITFはラケットV-CON17に比べ、(1)剛性はフレーム部で7%低く、ハンドル部で10%高い。(2)線密度はフレーム部で14%高く、ハンドル部で33%高い。(3)重量はフレーム部で11%重く、ハンドル部で30%重い。

ラケットITFのハンドル部の剛性と重量が大きいことが手首関節に伝わる衝撃振動が著しく小さい理由である。

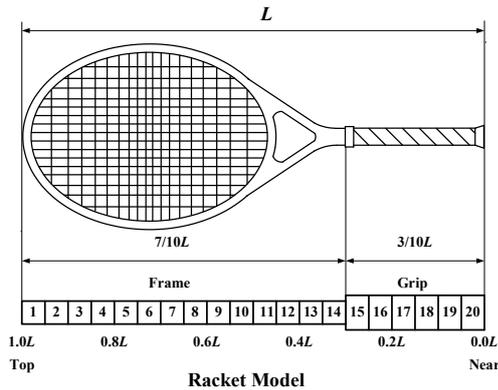


Fig.16 Racket frame model with two beams.



Fig.17 Comparison between measured and predicted weights of racket handle.

5. 結論

国際テニス連盟・性能試験用の標準として製作された従来型重量バランスのラケットITF (27in : 680mm, 351g) の打球感に関連する性能予測・評価を行い、最近の代表的な市販ラケットV-CON17(27.5 in, 699 mm, 300g)と比較した。ラケットITFの手首関節の衝撃振動がラケットV-CON17に比べて極めて小さいという興味深い結果になった。ラケットハンドル部の剛性が10%高く、線密度が33%大きいことが主な理由である。

文献

- (1) 川副嘉彦・武田幸宏・中川慎理, 国際テニス連盟性能試験用ラケットITFのボールの飛びに関連する性能予測と評価, 日本機械学会ジョイントシンポジウム2009講論集, No.09-, (2009), 掲載予定
- (2) 川副嘉彦, テニスラケットの動力学とコンピュータ援用設計(モード特性におよぼす諸因子の影響と設計への指針), 機論, C, 56-526(1990), 1511-1517.

- (3) 川副嘉彦・友末亮三, テニスのインパクトにおけるラケット・ハンドルと手首関節の振動, 日本機械学会論文集, 第59巻560号C編 (1993), pp.1001-1008.
- (4) 川副嘉彦・友末亮三・吉成啓子, テニスのフォアハンド・ドライブにおけるラケット・ハンドルの衝撃振動のメカニズム, 日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集, Vol.A, No.96-5(I), (1996), pp.501-504.
- (5) 川副嘉彦・友末亮三・吉成啓子・F. Casolo, テニスのフォアハンド・ドライブにおけるラケット・グリップと手首関節の衝撃振動, 機械学会ジョイントシンポジウム講論集, No.97-34, (1997), 28-32.
- (6) 川副嘉彦・友末亮三・吉成啓子, テニスのインパクトにおけるラケット・グリップと手首関節の衝撃振動の予測(打球面サイズの異なる従来型質量バランス・ラケットの場合), 機械学会・機械力学計測制御講演論集, No.98-8, Vol.B, pp.133-136.
- (7) 川副嘉彦・友末亮三・吉成啓子, テニスのインパクトにおけるラケット・グリップと手首関節の衝撃振動の予測(打球面サイズの異なる超軽量ラケットの場合), 日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集(Vol.B), No.98-8(I), (1998), pp.137-140.
- (8) Y. Kawazoe, R. Tomosue & A. Miura, Impact Shock Vibrations of the Wrist and the Elbow in the Tennis Forehand Drive: Remarks on the Measured Wave Forms Considering the Racket Physical Properties, Proc. of Int. Conf. on New Frontiers in Biomechanical Engineering (Edited by K. Tanishita & M. Sato), Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo, (1997), pp.285-288.
- (9) 川副嘉彦・荻原史浩, テニスにおける木製ラケットと複合材ラケットの性能予測(ラケットと手首関節の衝撃振動), 日本機械学会75期通常総会講論集, No.98-1(1998), 543- 544.
- (10) Kawazoe Y. (2000). Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel. Theoretical and Applied Mechanics, Vol.49, pp.11-19.
- (11) Kawazoe, Y. & Yoshinari, K. (2000). Prediction of the Impact Shock Vibrations of the Player's Wrist Joint: Comparison between Two Super Large Sized Rackets with Different Frame Mass Distribution. In Tennis Science & Technology (Edited by Haake S. & Coe A.), pp.91-99. Blackwell Science.
- (12) Kawazoe, Y., Tomosue, R., Yoshinari, K. and Casolo, F. (2003). Prediction of the shock vibrations at the wrist joint with the new large ball compared to the conventional ball impacted to the tennis racket during forehand Stroke. In Tennis Science & Technology (Edited by S.Miller), pp.105-112. International Tennis Federation.
- (13) Y. Kawazoe, R. Tanahashi and F. Casolo, Experimental and theoretical criticism of the effectiveness of looser strings for the reduction of tennis elbow, In Tennis Science & Technology, (Edited by S.Miller), pp.61-69. International Tennis Federation.
- (14) Y. KAWAZOE and R.TANAHASHI, Sweet Spots Prediction in Terms of Feel with the Effect of Mass and Mass Distribution of a Tennis Racket, Sports Dynamics: Discovery and Application (Edited by Subic A. & Trivailo P., Alam F.), (2003), pp.57-62. RMIT University Publishing.
- (15) Kawazoe, Y. and Kanda, Y., Analysis of Impact Phenomena in a Tennis Ball-Racket System (Effects of Frame Vibrations and Optimum Racket Design), JSME International Journal, Series C, Vol.40, No.1, pp.9-16. (1997)