

フレーム・ストリング・一体化構造テニスラケットの 手に伝わる衝撃振動特性の予測と評価

Prediction and Estimation of Shock Vibrations of Handled Tennis Rackets with Clamped Strings Compared to those with Wheels on the Sides

正 川副嘉彦 (埼玉工大) 正 友末亮三 (安田女子大)
吉成啓子 (白百合女子大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, 1690 Okabe, Saitama
Ryoso TOMOSUE, Yasuda Women's College
Keiko YOSHINARI, Shirayuri Women's College

The lightweight racket with head-heavy configuration is recent tendency of high-tech rackets, increasing power with an increasing racket swing speed. Racket frames as light as 200 grams have appeared in the market. However, the predicted results showed that the lightest racket at present in the market has advantageous for racket head speed, but disadvantageous for coefficient of restitution, rebound power, and post-impact velocity for ground stroke, and it has also large shock vibrations at the racket handle compared to the ordinary super-light weight racket. This means a limit to the weight lightening of tennis racket from the viewpoint of performance. The engineers and racket designers at the racket companies seem to be under intense pressure to keep pumping out new and better technologies every year. This paper investigated the physical properties of new type of rackets appeared in the market with wheels or with clamped strings by contraries replacing conventional grommets on the sides, predicting racket 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 shock vibrations at the handle and the wrist joint using the racket with clamped strings are larger than those using the racket with wheels, though the racket with clamped strings provides higher coefficient of restitution around the center of strings face than the racket with wheels on the sides.

Key Words: Dynamics of Machinery, Sports Engineering, Impact, Tennis, Racket with Wheels on the Sides, Racket with Clamped Strings, Shock Vibration, Feel, Wrist Joint, Racket Handle, Performance Prediction

1. 緒言

最近のラケットの特長は軽量化であり、軽量化によりテニスラケットはパワーに関する性能を向上させてきたが、反発係数、反発特性、およびオフセンター・インパクトにおける手首関節の衝撃振動に関する軽量化の限界が明らかになった。一方、打球感の改善をめざした新しい発想・試みのラケットが次々と市販されるようになってきた⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。

本論文では、ラケット・ヘッドの横のグロメット部でストリングスを動きにくく（滑りにくく）したフレーム・ストリング・一体化構造ラケットの撃振動伝達特性を予測し、動きやすくなったローラー（滑車）付ラケットと比較し、打球感に関連した性能評価を試みる。

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と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。

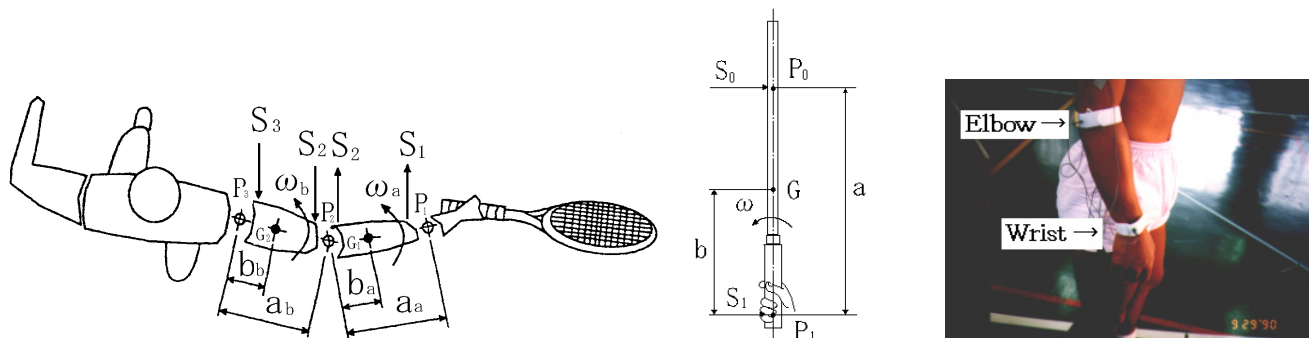


Fig.1 Model for the prediction of the shock force transmitted to the arm joint from a racket, and location of wrist joint.

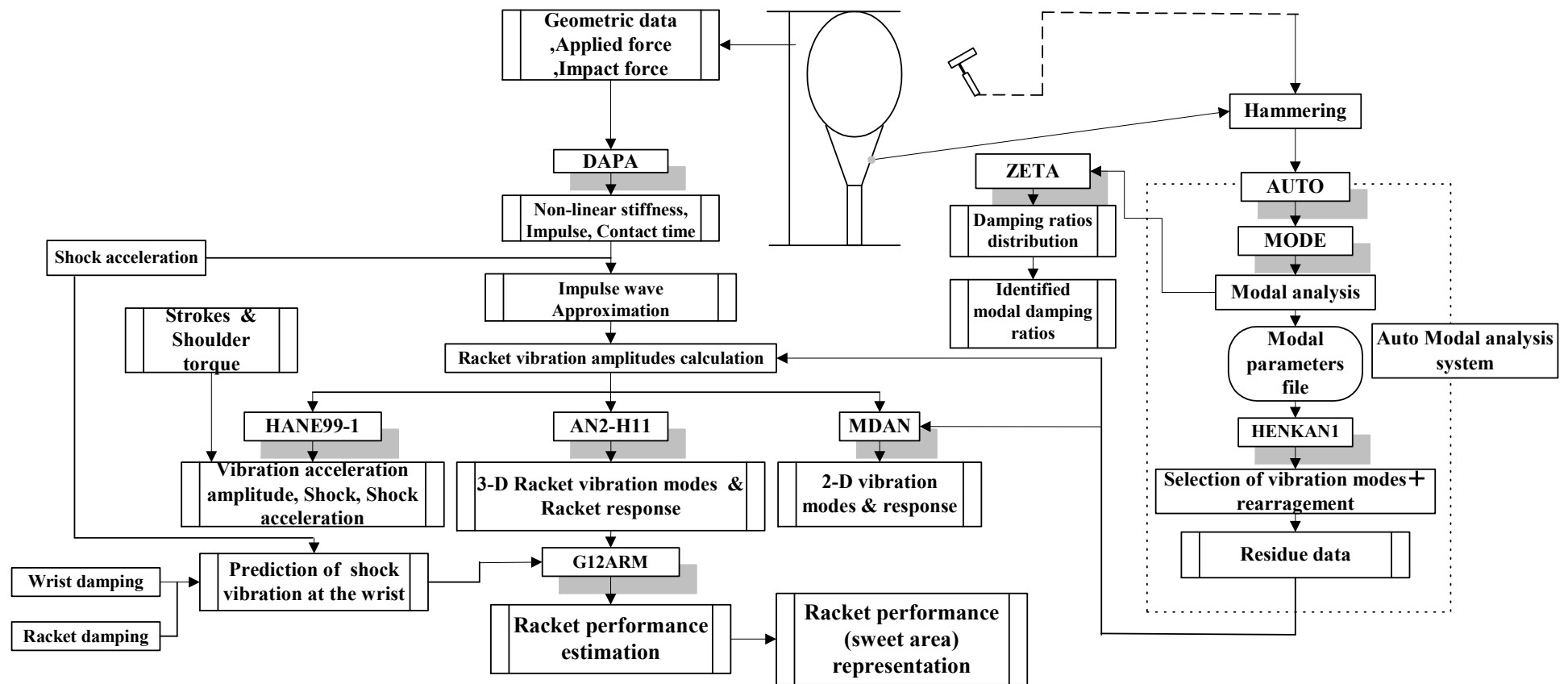


Fig.2 Computer aided prediction and estimation system for tennis racket performance in terms of shock vibrations.

図2にラケットの打球感に関連する性能予測・評価システムの流れを示す。

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、および実打実験状況を示す。

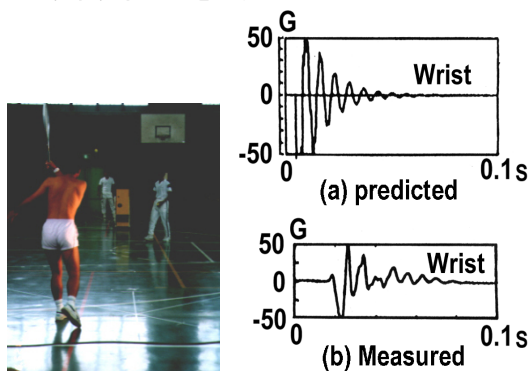


Fig.3 Predicted shock vibrations of a wrist joint compared with the experimental.

3. 宙ぶりラケットにボールが衝突したときのハンドル衝撃振動の比較

表1に、ストリングスを動きにくくしたフレーム・ストリング・一体化構造ラケットV-CON20（図4(a)参照）と動きやすくしたローラー（滑車）付ラケット ROLLERS 3.1（図4(b)参照）の物理特性を示す⁽⁸⁾。ラケット質量はストリングスの質量を含み、 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4は、宙ぶりラケットの実験モード解析により求めた減衰比であり、1次：フレームの2節曲げ、2次：2節ねじり、3次：3節曲げ、4次：トリングス面振動1次である。ストリング振動の減衰に図4(b)のローラー（滑車）が良く効いている。

図5は、宙ぶりラケットのハンドル（グリップ端から70mm）の衝撃振動の予測波形である。ストリングス面上の各打点位置を英数字の打点名称で示している⁽¹⁾。衝撃振動は、衝撃加速度成分と4次までの振動加速度成分の合成である。ボールとラケットの衝突速度は30m/sである。図6は、衝撃振動波形のピーク値（波形のmaximumとminimum差、すなわち絶対値の和）の取り方を示す。図7は、宙ぶりラケットのハンドル・衝撃振動予測波形のピーク値である。フレーム・ストリング・一体化構造ラケットV-CON20はローラー（滑車）付ラケット ROLLERS 3.1にくらべてハンドルの衝撃振動はストリング面全体の打点で大きい。図8は、ストリング面の代表的な打撃位置でのインパクトの瞬間の（ハンドル）衝撃振動成分を分析したもので、(a)は衝撃成分、(b)はインパクトの瞬間の振動ピーク成分、(c)は衝撃成分と振動成分の和を示す。

Table 1 Physical property

Racket	V-CON20	Rollers3.1
	Vibration Control	Rollers
Total length	700 mm	705 mm
Face area	755 cm ²	742 cm ²
Mass	275g	268 g
Center of gravity from grip end	360 mm	369 mm
Moment of inertia I_{GY} about Y axis	12.2 gm ²	13.2 gm ²
Moment of inertia I_{GR} about grip	35.3 gm ²	37.2 gm ²
Moment of inertia I_{GX} about X axis	2.049 gm ²	1.913 gm ²
1st frequency	170 Hz	205 Hz
Strings tension	55lb	58/53 lb
Reduced mass (center)	0.18 kg	0.17 kg

4. ラケットで打撃したときのハンドルの衝撃振動

図9は、グランド・ストロークで打撃したときのハンドル（グリップ端から70mmの位置）の衝撃振動予測波形のピー

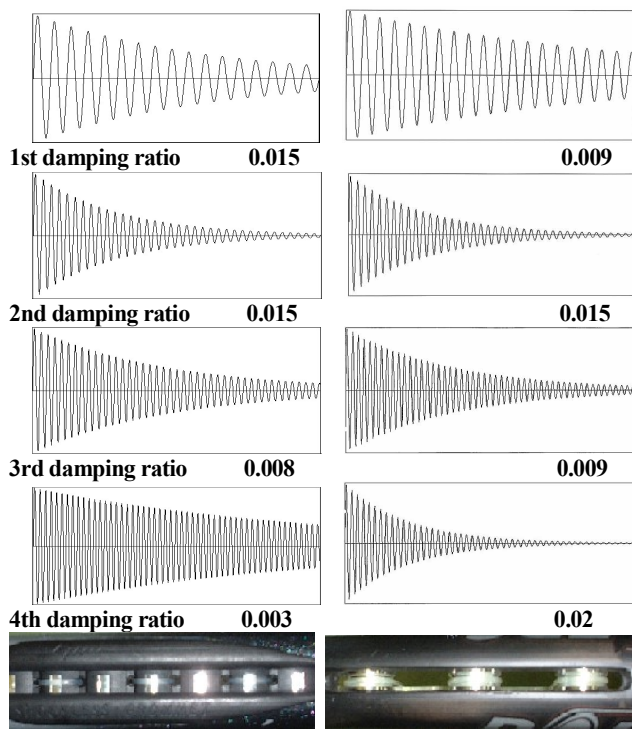


Fig.4 Damping ratios of freely suspended racket.

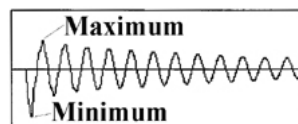


Fig.6 Peak-peak value.

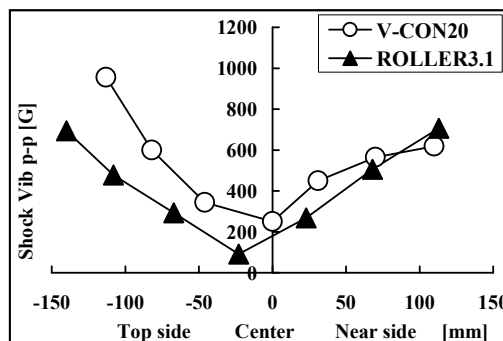


Fig.7 Predicted shock vibrations peak values at the handle of freely suspended rackets vs. impact locations of string face (impact velocity: 30 m/s).

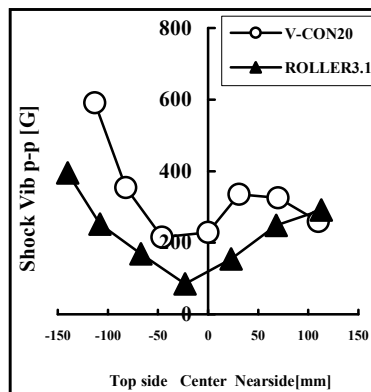


Fig.9 Predicted shock vibrations at the grip 70 mm from the grip end when hitting a ball with flat forehand drive (impact velocity: 30 m/s).

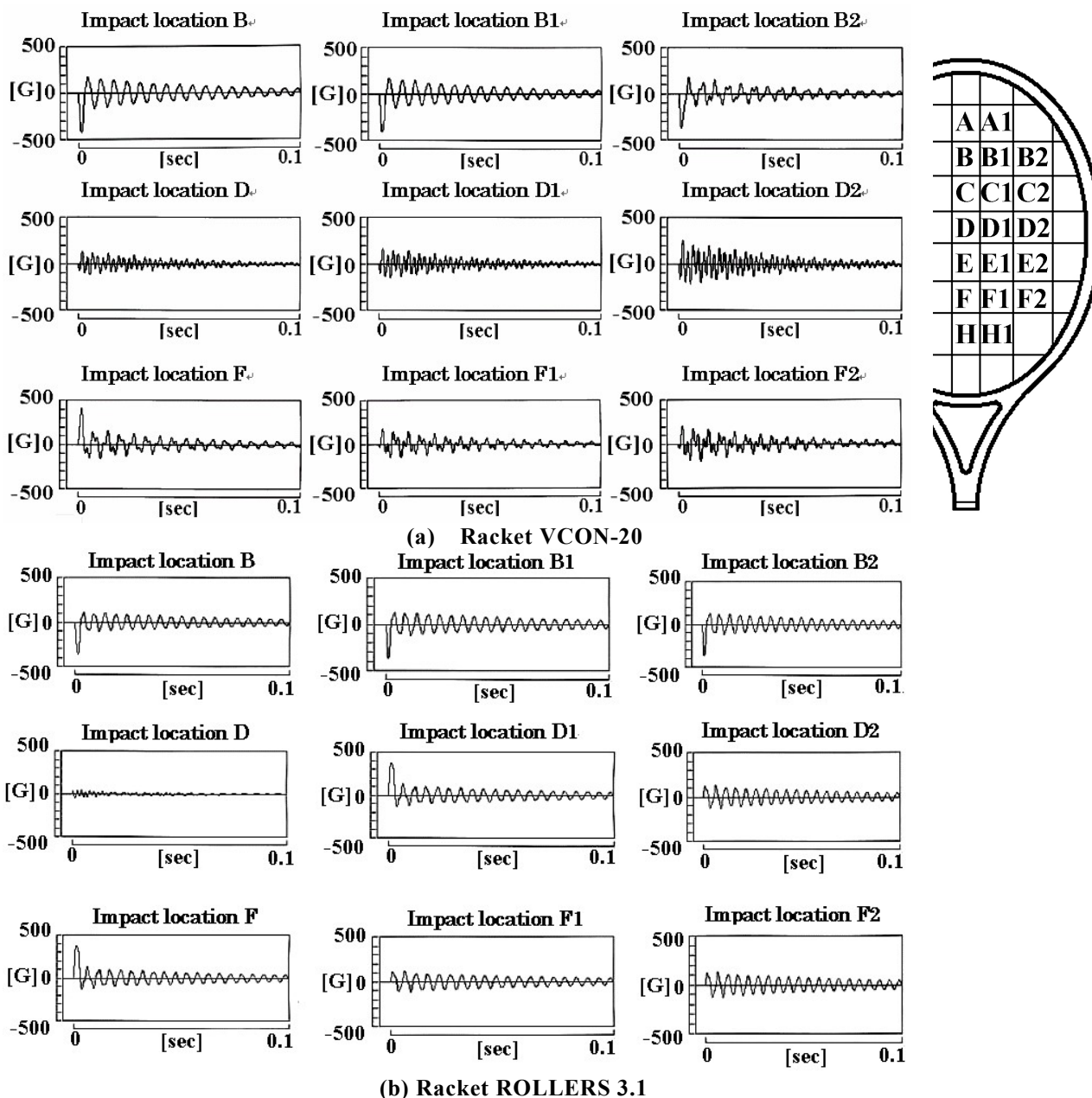


Fig.5 Predicted shock vibrations at the grip 70 mm from the grip end when a ball strikes the freely suspended racket (impact velocity: 30 m/s).

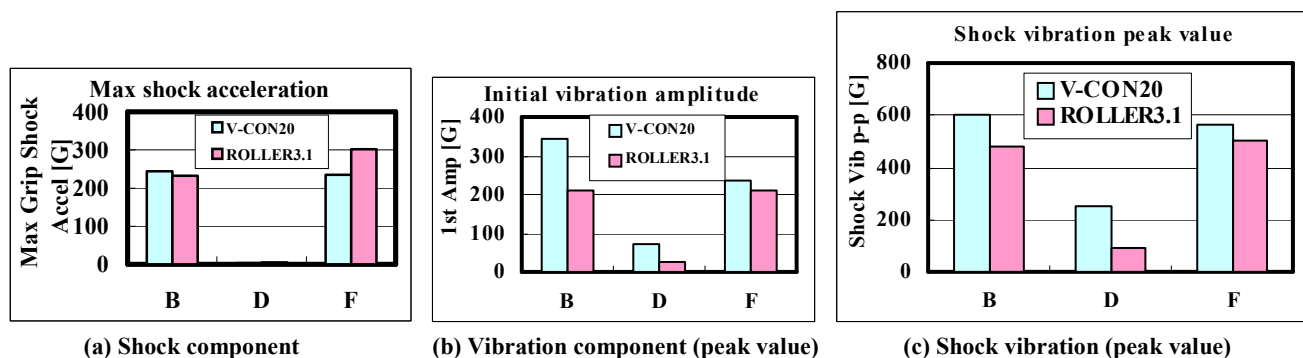
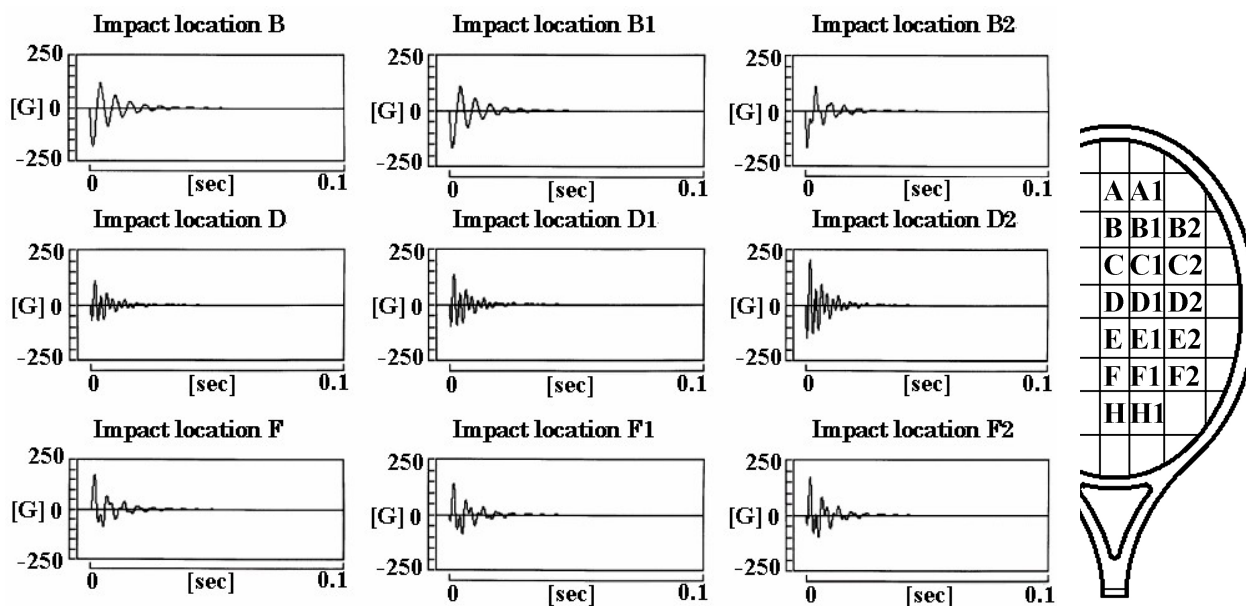


Fig.8 Predicted shock vibrations components at the handle of freely suspended rackets vs. impact locations.

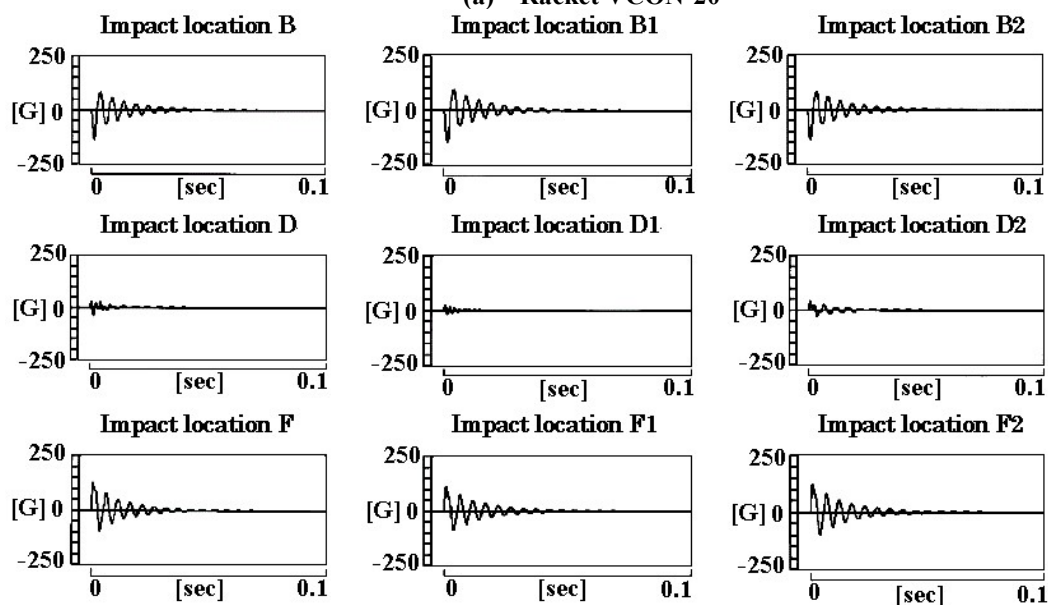
ク値である。ストリングスを動きにくくしたフレーム・ストリング・一体化構造ラケットV-CON20の衝撃振動はストリング面全体でやや大きく、ラケット面先端側で打撃したときの違いが大きい。

5. 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10は、グランド・ストロークの場合のインパクトにおける手首関節の衝撃振動の予測波形の比較である。ボールとラ



(a) Racket VCON-20



(b) Racket ROLLERS 3.1

Fig.10 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting a ball with flat forehand drive at the various impact locations of racket face (impact velocity: 30 ms^{-1}).

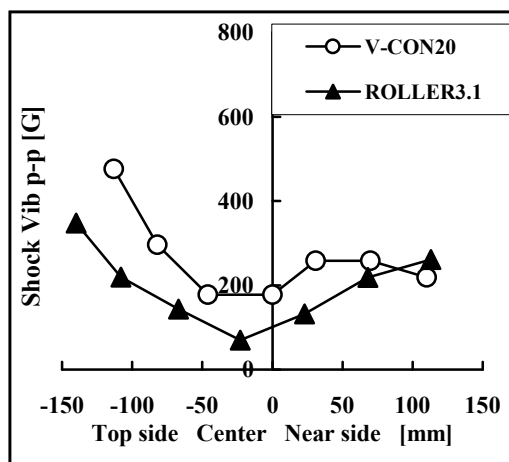


Fig.11 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting a ball with flat forehand drive at the various impact locations of racket face (impact: 30 ms^{-1})

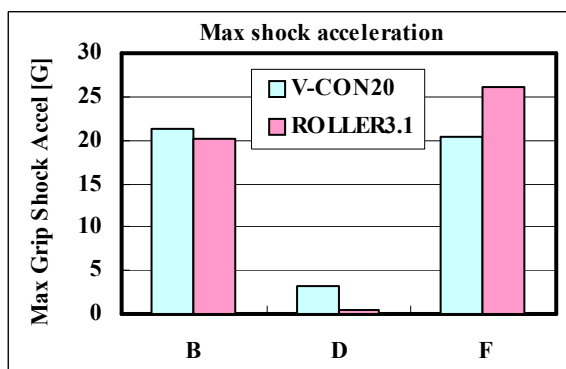
ケットの衝突速度は 30 ms^{-1} である。

図11は、手首関節・衝撃振動予測波形のピーク値である。フレーム・ストリング・一体化構造ラケットV-CON20の衝撃振動はストリング面全体で大きく、ラケット面先端側で打撃したときの違いが大きい。

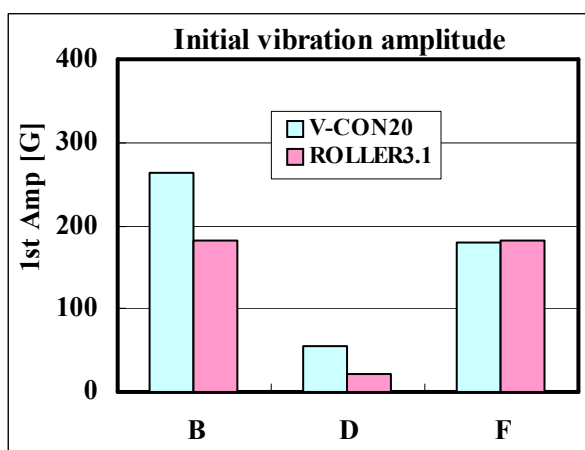
図12は、ストリング面の代表的な打撃位置でのインパクトの瞬間の手首関節・衝撃振動成分を分析したもので、(a)は衝撃成分、(b)はインパクトの瞬間の振動ピーク成分、(c)は衝撃成分と振動成分の和を示す。腕系の質量分布の影響により衝撃成分は小さい。腕系の減衰はインパクト直後の振動振幅ピーク値にはあまり効果がない。ラケット面先端側で打撃したときの手首関節の振動成分が大きい。

5. 結論

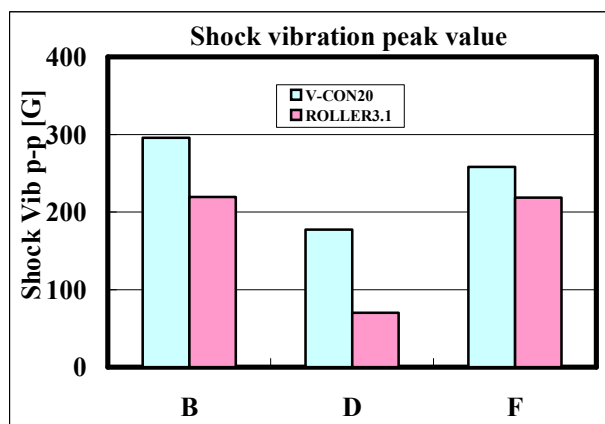
別報の結果によると、ラケット・ヘッドの横のグロメット部でストリングスを動きにくく（滑りにくく）したフレーム・ストリング・一体化構造ラケットは、動きやすくした



(a) Shock component



(b) Vibration component (peak value)



(c) Shock vibration (peak value)

Fig.12 Predicted shock vibrations components at the wrist joint vs. representative impact locations of string face (impact velocity: 30 m/s).

ローラー(滑車)付ラケットに比べて、反発係数は面中心付近でやや高く、打球速度も面中心付近ではやや速いが、先端側ではやや遅かった。

ボールとの衝突あるいはボールを打撃したときのハンドルおよび手首関節の衝撃振動に関しては、ストリングスを動きにくく(滑りにくく)したフレーム・ストリング・一体化構造ラケットは、ローラー(滑車)付ラケットに比べて、ストリング面全体でやや大きく、特に先端側での打撃において違いがある。

終わりに、図表作成にご助力いただいた埼玉工大・平成13年度4年生・江原将充および平成15年度・野沢悠樹の両君に感謝する。なお、本研究の一部は平成13,14,15年度科学研究費基盤研究(B)、平成15,16年度科学研究費基盤研究(C)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) Y. Kawazoe, Impact Phenomena between Racket and Ball during Tennis Stroke, *Theoretical and Applied Mechanics*, 41, pp.3-13. (1992).
- (2) Y. Kawazoe, Coefficient of Restitution between a Ball and a Tennis Racket, *Theoretical and Applied Mechanics*, 42, pp.197-208. (1993).
- (3) Y. Kawazoe, Effects of String Pre-tension on Impact between Ball and Racket in Tennis. *Theoretical and Applied Mechanics*, 43, pp.223-232. (1994).
- (4) Y. Kawazoe, Experimental Identification of Hand-held Tennis Racket Characteristics and Prediction of Rebound Ball Velocity at Impact, *Theoretical and Applied Mechanics*, 46, 165-176. (1997).
- (5) Kawazoe Y. (2000). Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel. *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.49, pp.11-19.
- (6) KAWAZOE, Y., Mechanism of High-Tech Tennis Rackets Performance, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.51, (2002), pp.177-187.
- (7) 川副嘉彦, テニスラケットの素材・構造と性能, *バイオメカニクス研究(特集)素材とスポーツ*, 7-2, (2003), pp. 136-151.
- (8) 川副嘉彦, 機械学会ジョイントシンポジウム講論集, No.04-, (2004), 掲載予定
- (9) 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.
- (10) 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.