3B02 テニスラケットのフレーム振動におよぼすストリングスの張り方・張力分布の影響
（１本張りと２本張りの張力分布の違いの影響）

Effect of Stringing with Tension Distribution on the Frame Vibrations of a Tennis Racket
(One-Piece Stringing and Two-Pieces Stringing)

○正　川副嘉彦（埼玉工大）　　桜井 匠（埼玉工大院）
一木公央（コートサイド）

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Insttitute of Technology,1690 Okabe,Saitama
Takumi SAKURAI, Saitama Insttitute of Technology
Tadao ICHIKI, Court Side

At the current stage, the terms used in describing the performance of a tennis racket are based on the feeling of an experienced tester or a player. However, the optimum racket depends on the physical and technical levels of each user. Accordingly, there are a number of unclarified points regarding the relationship between the performance estimated by a player and the physical properties of a tennis racket. This paper investigates the difference in the effect on the racket frame vibrations between the stringing both the mains and the crosses with a single length of string(One-piece stringing) and the stringing with two separate pieces (Two-piece stinging),which shows a different tension distribution patterns by predicting the impact shock vibrations at the grip of a racket. It is based on the experimental identification of the racket dynamics and the approximate nonlinear impact analysis.

Key Words: Dynamics of Machinery, Sports Engineering,Impact, Tennis Racket, Shock Vibrations,Stringing, Reference tension, Tension Distribution, One-Piece Stringing,Two-Pieces Stringing,

1. 緒 言

ラケットの進歩がテニスのプレイ・スタイルを変えたと言われている．しかし，テニスは体験により修得するものだから主観的なものであり，ラケットが実際のプレーにどのように影響するかを客観的に評価することはきわめて難しい．一般プレイヤーにとっては，コート上でボールを実際に打ってみてはじめて性能がわかるというのが現実である．

一般にラケットに求められる基本的な性能は，パワー，コントロール，打球感といわれている．

最近は多くの種類のストリングスが市販されるようになり，ストリングスへの関心も高まっている．手で振り回せる程度のラケット重量でも我々が速いボールを打つことができるのは反発性の非常に良いストリングスが存在するからであり，ストリングスの役割はきわめて重要である．しかし，ストリングスの種類・テンション・張り方などの違いが実際のプレーにどう影響するかについてはプレーヤーに多くの議論があるが，ほとんどが推測の域をでておらずメカニズムはほとんど不明である．ストリングスに関連する最近の工学的研究[(1)-(14)]もあるが依然として謎が多い．

ストリンギングの方法として「１本張り」と「２本張り」というのがある．大会などでは２本張りを指定してくる選手と１本張りを指定してくる選手がある．

「１本張り」は縦糸（メイン）を張ってから根元側（下）から横糸（クロス）を張る張り方であり，“通常、世界のトーナメントプースで行われる標準的な張り方”と言われている．トップ側の横糸が硬くなる．

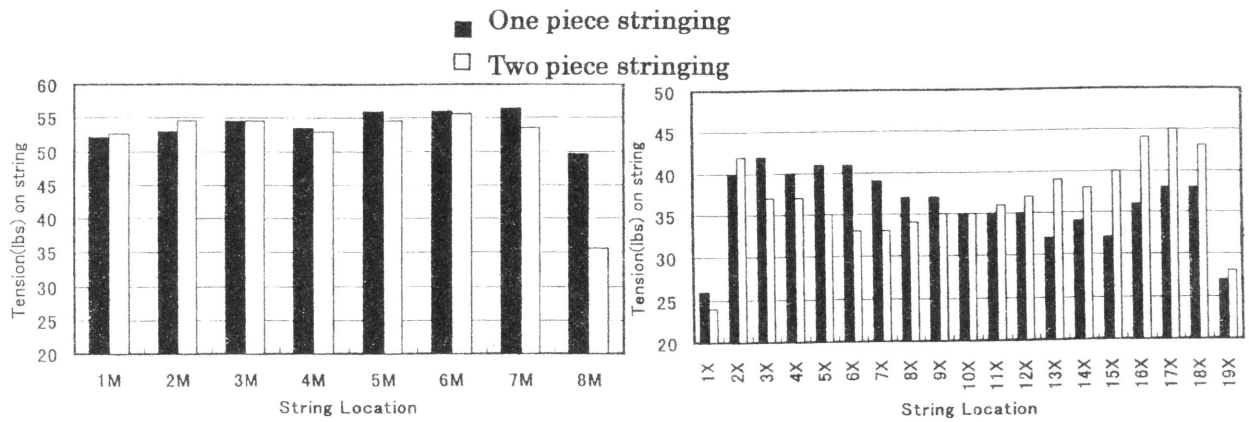
「２本張り」は通常トップ側（上）から横糸（クロス）を張る．大きな違いとしては，上から張って行く方がクロスのテンションの差が少ないことである．

昔の木のラケットの時代には上から下に張る張り方の方が主流だったようである．

木製ラケットの時代の（極端に言うと）ラケットを平行移動させるような打ち方ではヘッドスピードが先端でもスロート部でも差が少なく，上から下に張る張り方の方が打ちやすかったのではないか，一方，最近は体を軸とした回転運動で打つためラケットのヘッドスピードが先端とスロートではかなり異なり，先端部が硬くなる張り方の方が打ちやすくなるのではないかという推測もある．メーカーが２本張りでクロスを上から張るのを標準とするのは，ラケットに強度的な無理をかけない張り方だからであり，プレイアビリティの面からではないらしい．

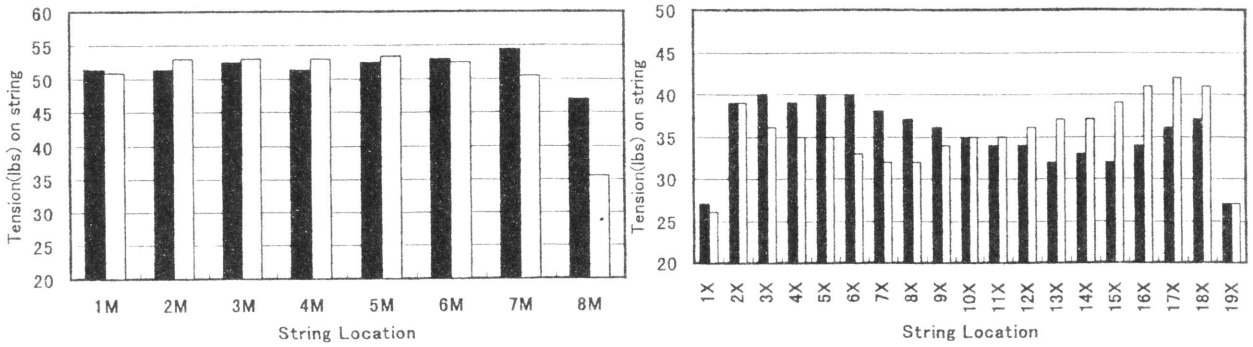
ストリング面の硬さが揃う方が良いのか，硬さに差が有る方が自然に感じるのかもよくわかっていない．ストリンガーの中には“スイートエリア”の広がる張り方，あるいは“スイートスポット”の位置を移動する張り方というような表現も見られる．

本研究ではストリングスの１本張りと２本張りの張力分布の違いを実験的に調べ，実験モード解析法とボールとの衝突解析によりインパクトにおけるラケットの振動を予測し，ストリンギングの違いの影響について考察する．



(a) Tension on main string (b) Tension on cross string

Fig.1 Measured tension distribution(lbs) immediately after stringing vs. string location. Reference tension is 55 lb/52 lb with prestretching only cross string.

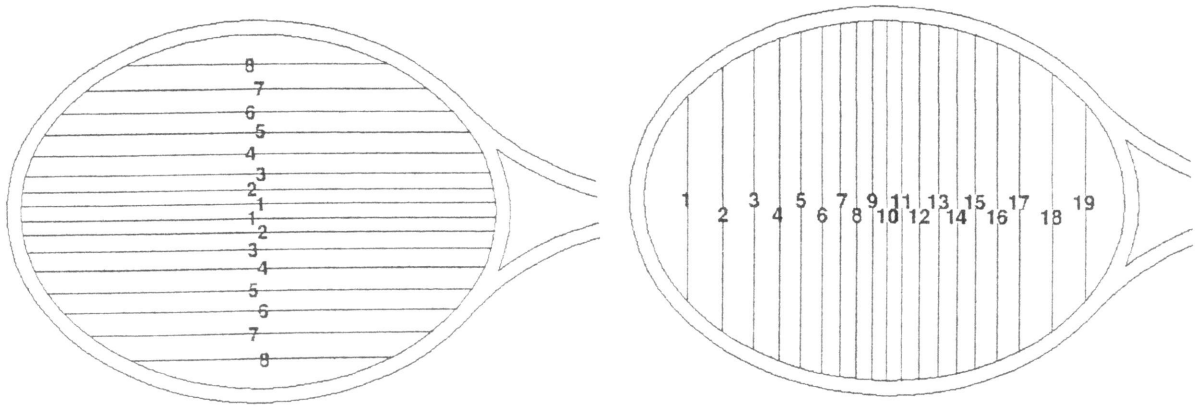


(a) Tension on main string (b) Tension on cross string

Fig.2 Measured tension distribution(lbs) 24 hrs after stringing vs. string location. Reference tension is 55 lb/52 lb with prestretching only cross string.

2．ラケット仕様とストリンギング

供試ラケット2本は，全長 680 mm，フェース面積 110in^2，質量 366 g（ストリングスを含む），重心位置はグリップ端から 325 mm，重心まわりの慣性モーメント 16.9 g·m^2，フレームの基本2節曲げ固有振動数が 132 Hz である．ストリングスは 2709MCS，ゲージ 1.32 mm であり，張り機 4002 を使用して1本張り（クロスは下から張る）は縦 55 lb/ 横 52 lb で横糸にのみ圧 (Pre-stretching) を加えた．2本張り（クロスは上から張る）も 55 lb/52 lb で横糸にのみ圧 (Pre-stretching) を加えた．クロスを 3lbs. 落としてテンションジョーの反対側に圧を加えて 55 で引いている時に 60 程度の表示が出るくらいの力で圧を加えた．ストリング・メーカーの説明によると，縦糸のフリクションロスがあるからクロスの右左では数ポ



(a) Main string (b) Cross string

Fig.3 String number on the mains and crosses

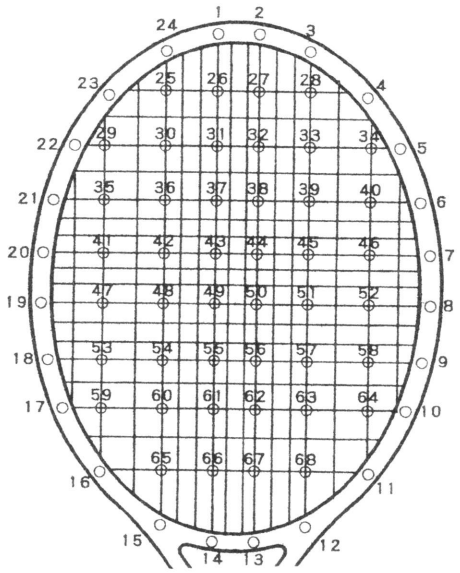


Fig.4 String mesh and hammering points.

ンドのテンション差があり，それを取るために引いている方の反対側に圧を加えるらしい．横糸に圧を加えたほうが横糸が一度強く引かれるため緩みが少ない．

市販の面圧計 RDC による張り上がり直後の面圧は両者とも 69 %，24 時間後は 1 本張りが 63 %，2 本張りが 64 % であった．また市販テニスコンピュータによる DT 値は張り上がり直後は 1 本張りが 38，2 本張りが 37，張り上がりから 24 時間後はそれぞれ 36 と 35 であった．

図 1(a)（縦糸，メイン M）と図 1(b)（横糸，，クロス X）は市販のストリングメーター MK- Ⅳを使用して張りあがり直後の 1 本張りと 2 本張りの定性的なテンション分布の実測結果である．図 2 は張り上がりから 24 時間経過した後の実測結果である．図 1 と図 2 の縦糸（M）と横糸（X）のストリング番号を図 3 に示す．縦糸の数字は中心線からの順番を示す．横糸の番号は上からの順番を示す．横糸の張力は縦糸より低くなっており，1 本張りは先端側の方が高め，2 本張りは根元側の方が高めになる．

3．1 本張りと 2 本張りのラケット振動特性

図 4 はストリングの網目とラケット振動特性の同定のためのハンマリングのときの打点番号である．

図 5 は，ストリング面上の打点 No.31（先端側），No. 43（中心），No.61（根元側）をインパルス・ハンマーで打撃し，スロート部に取り付けたピックアップの応答を出力として求めた周波数応答関数（変位／力：m/N）である．図 6 は実験モード解析により求めた振動モードである．固有振動数 1 次 132 Hz はフレームの 2 節曲げ，2 次 361 Hz は 2 節ねじり，3 次 391 Hz は 3 節曲げ，4 次 615 Hz はストリングスの膜 1 次である．4 次の膜振動数はストリングスの張力に比例する．1 本張りと 2 本張りの振動数は分解能 4.8 Hz の範囲で一致しており，振動数の差は見られない．

4．1 本張りラケットと 2 本張りラケットのボールとの衝突における衝撃振動の予測

図 7 は，ボールが宙づりラケットに速度 30 m/s で衝突したときのラケットの初期振動加速度振幅を各モード成分ごとに表示したものである．(a) はストリング面の先端側，(b) は根元側での衝突であり，それぞれ 1 本張りの場合と 2 本張りの場合を比較している．先端側での衝突では 1 本張りは 1 次の 2 節曲げと 4 次のストリング膜振動の振幅が大きく，2 本張りは 2 次のねじり，3 次の 3 節曲げがわずかに大きい．根元側での衝突では 1 本張りは 1 次，2 次，4 次が大きく，2 本張りは 3 次の 3 節曲げが大きい．

図 8 は，ボールが宙づりラケットに 30 m/s で衝突したときのラケット・グリップ（グリップ端から 70mm）の衝撃振動の予測波形である．衝突位置はストリング面中心である．上から 4 つの振動成分と衝撃成分，さらにそれらの合成波形を示している．2 本張りラケットの場合，振動

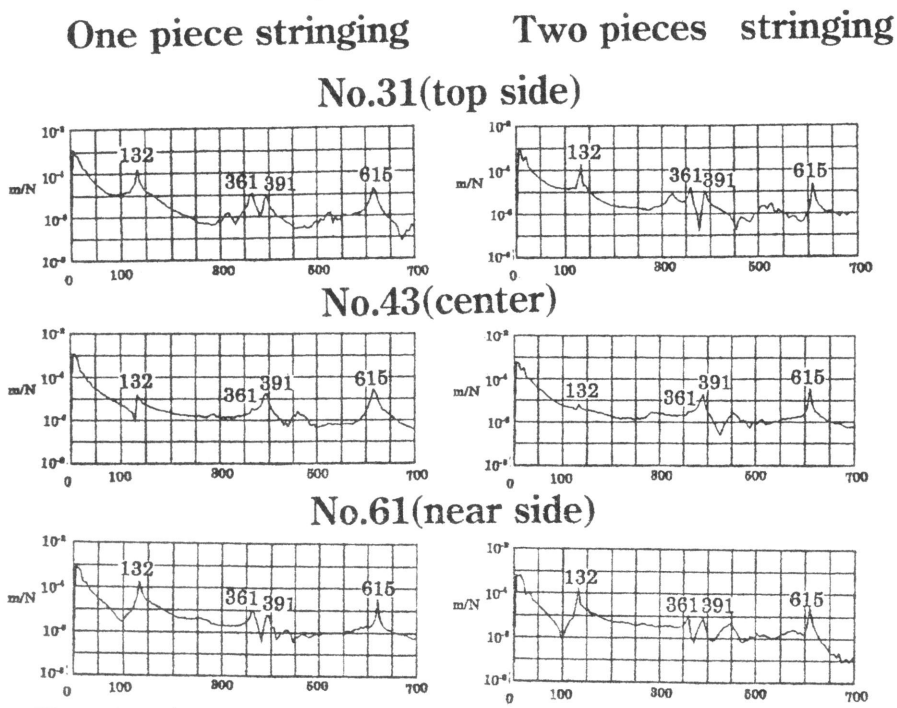


Fig.5 Experimental frequency response functions with hammering on strings.

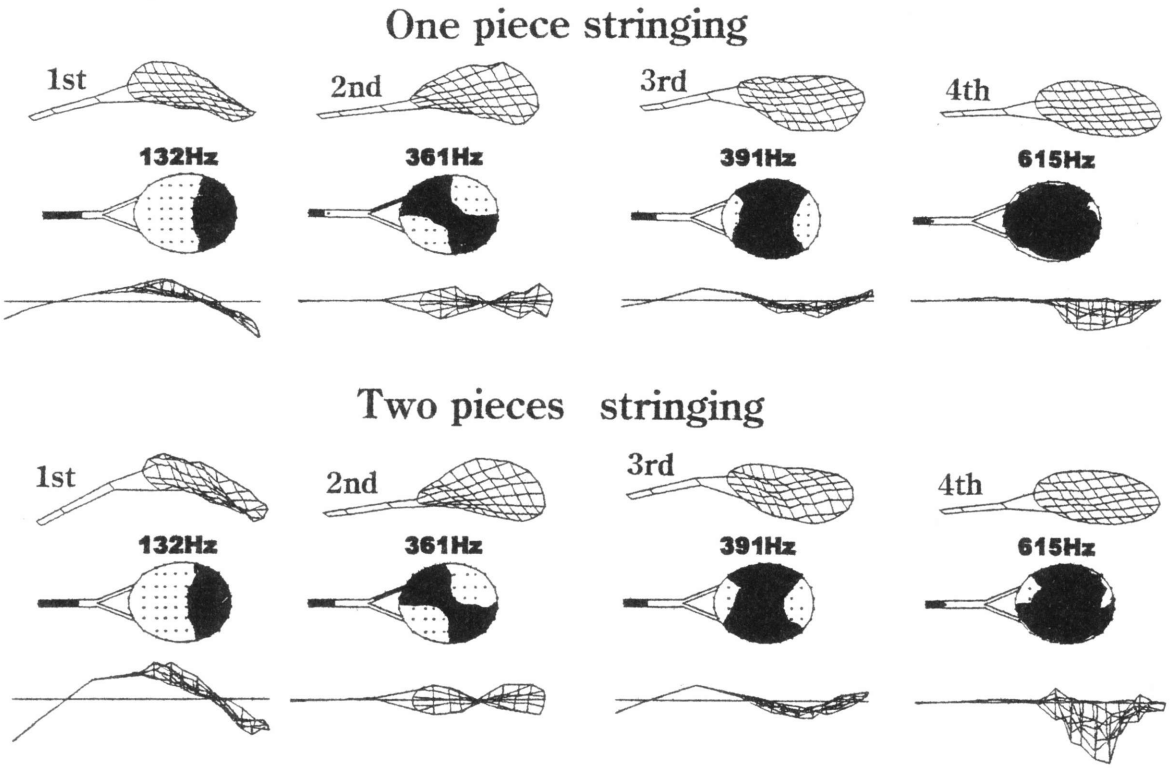
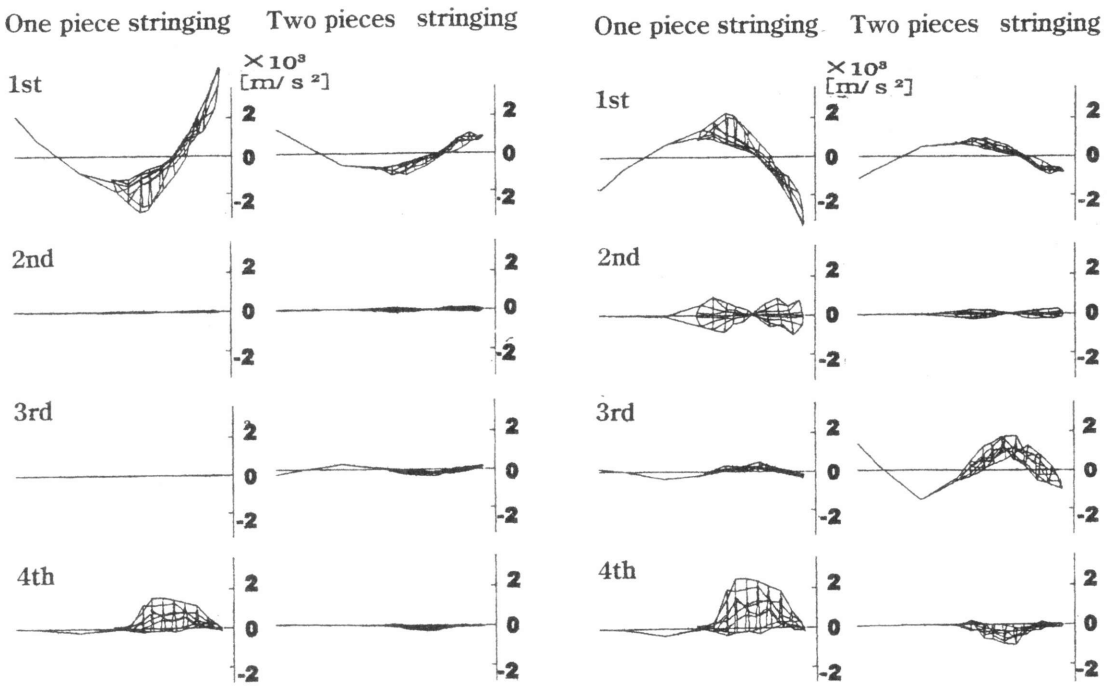


Fig.6 Result of Experimental modal analysis of One-piece stringing racket and two-pieces stringing racket.



(a) hitting at the top side on the strings (b) hittiong at the near side on the strings

Fig.7 Prediction of initial amplitudes of racket vibrations when a ball hit the racket.

数の高い3次の3節曲げ振動が目立つ.

図9は，図10に示す定義にしたがって衝撃振動波形の最大ピーク・ピーク値の比較である．ストリング面の先端側での衝突では2本張り（先端側でのクロスの張力が低め）の最大ピーク値が小さく，根元側では1本張り（根元側でのクロスの張力が低め）の方がピーク値が小さい.

衝突速度30 m/sにおけるフレーム振動によるエネルギ損失の予測値は2本張りの方がラケット面のどの打点でも小さく（先端側ほど差が大きい），反発係数は2本張りの場合の方がやや高いことが予想されるが，わずかな差であ

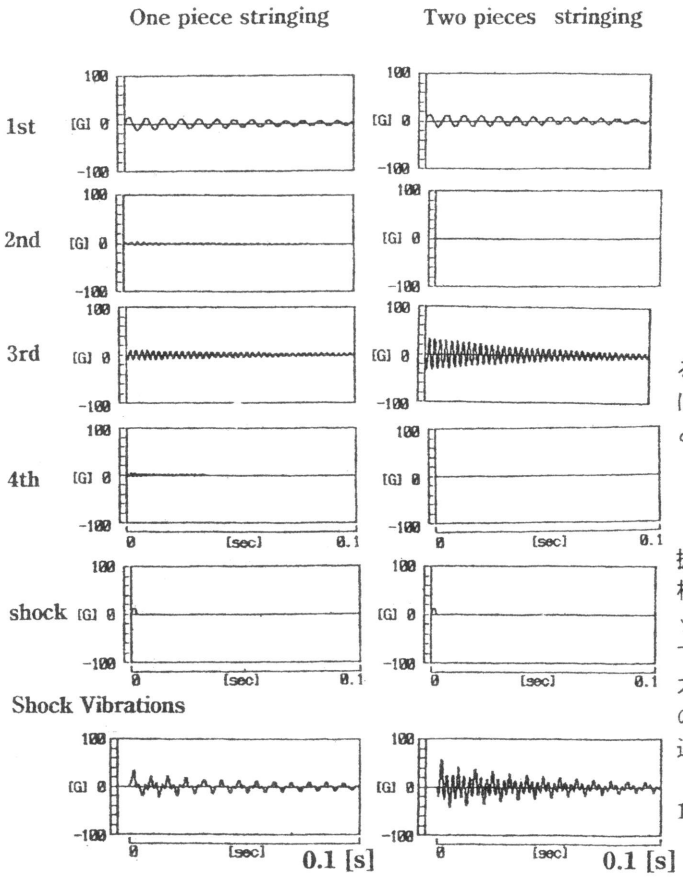


Fig.8 Predicted shock vibration at the grip of freely suspended racket when a ball hit the center on the string face (impact velocity: 30 m/s).

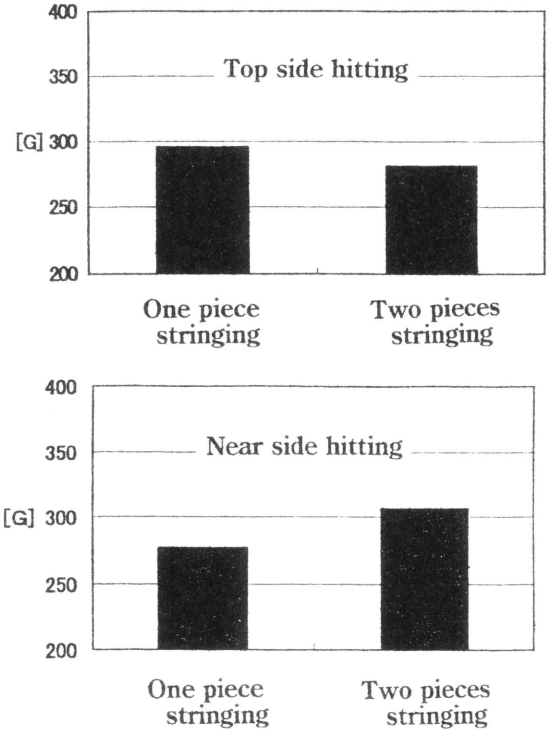


Fig. 9 Peak-peak value of shock vibrations at the grip of freely suspended tennis racket.

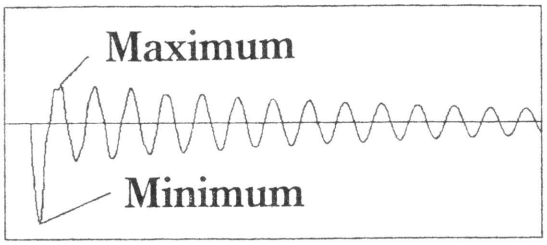


Fig.10 Peak-peak values from the wave forms of the shock vibrations.

る．ラケットの反発性，ボールの跳ね返りの良さ，あるいはボールの飛び（打球の速さ）には大きくは影響しないことが推測される．

5．結　論

ストリングの１本張りと２本張りの張力分布のラケット振動におよぼす影響を実験的に調べ，さらに実験モード解析法とボールとの衝突解析によりインパクトにおけるラケットのフレーム振動を予測しストリンギングの影響について考察した．１本張りの場合と２本張りの場合の両者の張力分布には顕著な違いが見られ，ラケットの振動にも両者の特徴が現れたが，フレーム振動の大小にはさほど大きな違いはなかった．

おわりに，図表作成にご助力いただいた埼玉工大・平成11年度４年生 加藤徳雄・吉田考史の両君に深謝する．

文　献

(1) Y.KAWAZOE,Theoretical and Applied Mechanics, Vol.41(1992),pp.3-13.
(2) 川副嘉彦，機論，59-562C(1993),PP.1678-1685.
(3) Y.KAWAZOE,Theoretical and Applied Mechanics, Vol.42(1993),pp.197-208.
(4) Y.KAWAZOE,Theoretical and Applied Mechanics, Vol.43(1994),pp.223-232.
(5) 川副嘉彦・友末亮三，機論，59-560C(1993),pp.1001-1008.
(6) 川副嘉彦，日本機械学会第68期全国大会講論集，No.900-59(1990),pp.222-224.
(7) 川副嘉彦，日本機会学会・日本ＭＥ学会共催第２回バイオメカニクスコンファレンス講論集 No.910-8 (1991),pp.43-44.
(8) 川副嘉彦，第43回応用力学連合講演会予稿集 (1994), pp.599-602.
(9) 川副嘉彦，日本機械学会第72期全国大会講論集 (Vol.IV),No.940-30(1994), pp.72-74.
(10) 川副嘉彦，日本機械学会機械力学・計測制御講演会講論集 ,No.95-8(I),(1995.8), pp.191-194.
(11) 川副嘉彦・太田智洋，日本機械学会第74期通常総会講論集 ,No.97-1,(1997.3),pp,232-233.
(12) 川副嘉彦・太田智洋，ｼﾞｮｲﾝﾄ・ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ1997（ｽﾎﾟｰﾂ工学ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ，ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ・ﾋｭｰﾏﾝﾀﾞｲﾅﾐｸｽ）講論集，No.97-34(1997.10),pp.23-27.
(13) 川副嘉彦，月刊テニスジャーナル，13巻３号 (1994), pp.80-85.
(14) 川副嘉彦，月刊テニスジャーナル，14巻10号 (1995),pp.55-60.