

なぜプロは試合中にラケットを替えるのか

— ストリングの武器としての性能と弦楽器としての性能のメカニズム（実験と理論に基づく考察） —

川副嘉彦（川副研究室）

テニス雑誌やネットでのラケット性能についての解説には、ピン外れの珍説が多い。本論では、誤解の多いストリング性能について吟味する。テニスにおけるラケットとボールの衝突現象は、ボールとストリングの大変形およびラケット（フレームとストリング）の振動をともなう非線形の力学であり、現実の打撃ではさらに人間系が絡んでくる複雑系である（川副 1993, 1995, 1999, 川副ら 1998）。

図 1 は、グリップを手で持った場合（左）と万力で固定した場合（右）の、ボールとの衝突における振動モード（形）を示す。固定条件は実際とは異なる。ストリング面の節の位置（スイートスポット）で打撃したときは振動が起こらない。ハンドルの節の位置を握ると、振動が起こっても、手に伝わらない。図 2 は、ボールとラケット（フレーム、ストリング）の衝突シミュレーションであり、先端側のオフセンターで打撃したときの初期振動振幅（最大値、次第に減衰していく）を示す。

図 3 において、インパクトにおける実際のテンション S は、 $S = S_0 + (AE/2L_s^2)X^2$ と書ける。ただし、 S_0 : 一般にテンションと呼ばれる初張力、 L_s : ヘッド・サイズ、 A : ストリング・ゲージ太さ、 E : ストリング素材強度（ヤング率）、 X : 変形（面に直角方向）量である。第 1 項のテンション S_0 は、無視しても、インパクト挙動に大きくは影響しない。インパクトにおける実際の面圧、物理用語では、面（バネ）剛性 $K_s = S_0(2/L_s) + 3(AE/L_s^3)X^2$ も、 S_0 を含む第 1 項は第 2 項に比べて小さい（川副ら 1997）。打球に関係する「武器としての性能」は第 2 項であり、ボールがストリングを離れたインパクト後のラケット残留振動が関与する「弦楽器としての性能」が第 1 項であり、打球感として残る。

図 4 は、インパクトにおける面圧（面バネ剛性）、ストリングのたわみ量、 V_B : ボールとラケットの衝突速度、（張り上がり）テンション 3 種類の関係を示す。テンションは「面圧」（面バネ剛性）にほとんど影響しない。衝突前の「面圧」（面バネ剛性）の 10 倍近くまで変化する。

図 5 は、各テンションでのサービス速度の測定値（試行者は神和住・元デ杯選手）をグラフ化したものである。テンションの影響はほとんどなく、ばらつきの範囲である。図 6 は、グリップ万力固定でのテンションとボール・ラケットの反発係数 $e = V_{out} / V_{in}$ （＝ボールの跳ね返り速度/入射速度）の実験結果（外山・桜井 2004）をグラフ化したものである。反発係数におよぼすテンションの影響は、ばらつきの範囲である。図 7 は、テンションとボール・ストリングの反発係数（R Cross ら 2010）の平均値のグラフ化であるが、素材の影響もテンションの影響もばらつきの範囲である。

図 8 は、4 年経過して古くなったストリングでも、反発係数の低下はないことを示す。

図 9 の反発係数実測値も、テンションの影響はばらつきの範囲である。

図 10 は、ノッチのできた試合後のストリングは、スナップバック効果が小さく、スピン量が大きく低減することを示している（川副ら 2010, NHK との共同実験）。

なぜプロは試合中にラケットを替えるのか: (1) ストリングが古くなっても反発性は低減しない。(2) ストリング・テンション（初張力、取付荷重）は、弦楽器としての性能（感知できる振動、音、心理的に影響しても、武器としての反発性（打球速度）には影響しない。(3) ストリングは使用するほど、ノッチ（溝）ができて、スピン性能が低下するので、特に、トップ・スピン打撃ではコントロールが難しくなる。したがって、試合の途中で選手がラケットを替える主たる理由は、時間の経過とともに低減するスピン量、コントロール性能を回復させるためである。

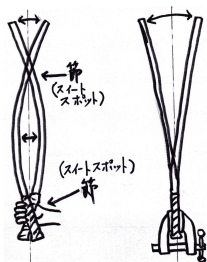


図 1 振動(変形)の形

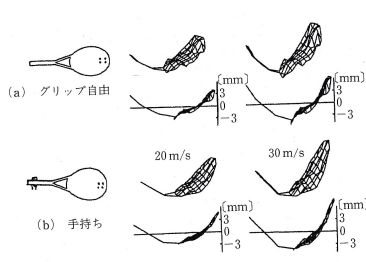


図 2 振動の初期振幅

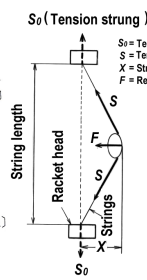


図 3 実際のテンション

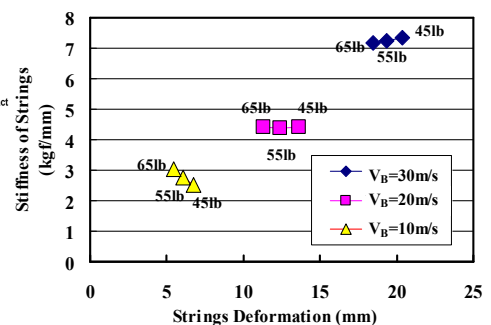


図 4 インパクトでの実際の面剛性

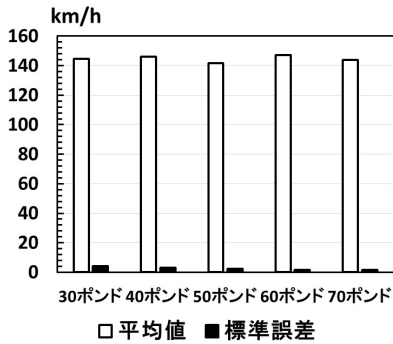


図 5 スtring・テンション vs. サービス速度：神和住純，法政大学「小金井論集」第 3 号(2006)掲載データ（各 5 回試行）をグラフ化。

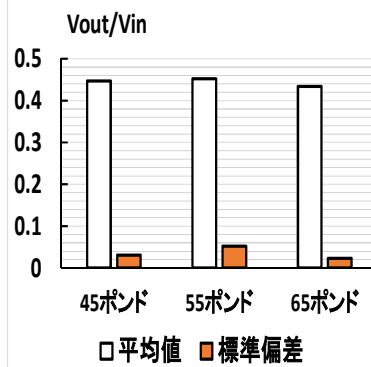


図 6 スtring・テンション vs. ボール・ラケットの反発力係数：Vout / Vin（＝ボールの跳ね返り速度/入射速度）（グリップ端から 75mm 固定）外山・桜井の実験結果(2004)をグラフ化，

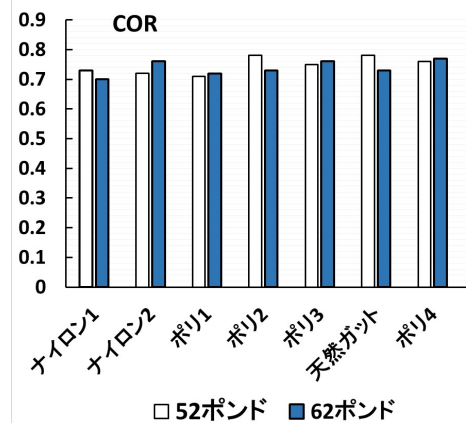


図 7 スtring・テンション vs. ボール・String の反発係数（平均値）：素材は，Wilson NXT, Techfiber NRG2, Polyfiber TCS, Luxilon Alu Power, Luxilon Original, Babolat Tonic Gut, Luxilon ALU Rough. R Cross ら(2010)のデータをグラフ化。

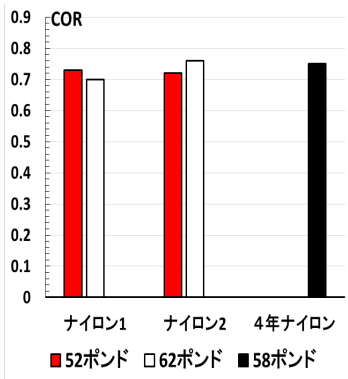
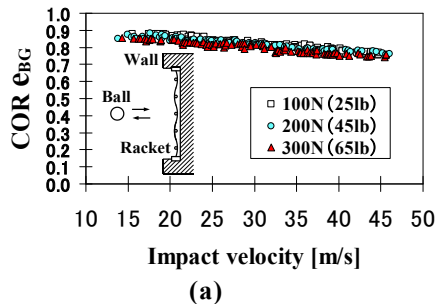


図 8 スtring 反発係数の寿命：1-WilsonNXT, 2-Tecfiber NRG2, Old Nylon(4 年経過).R Cross らのデータ(2010)をグラフ化（平均値）。



(a)は 25, 45, 65 ポンドの比較（横軸：衝突速度），(b)は 25, 45, 65 ポンドの比較（20 m/s, 30 m/s における平均値）

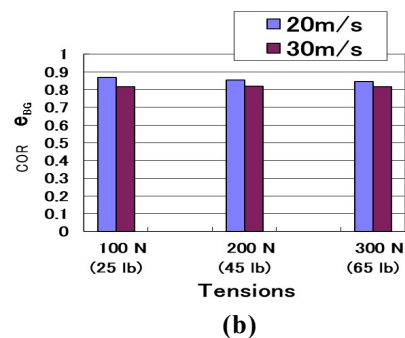


図 9 テンション vs. ボール・String の反発係数 e_{BG} ：ラケットヘッド固定。（川副ら 2010）

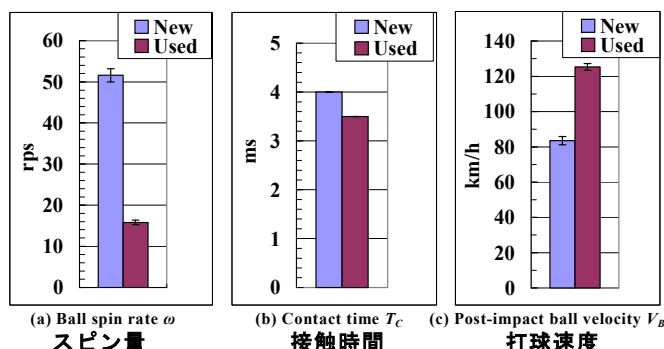
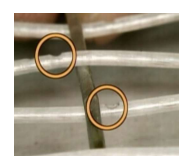


図 10 プロ・テニスプレイヤーによるトップスピン打撃における新品（スナップバック効果：大）と使用後（スナップバック効果：小）のスピニング性能比較（天然ガット）.川副ら(2010, NHK との共同実験)



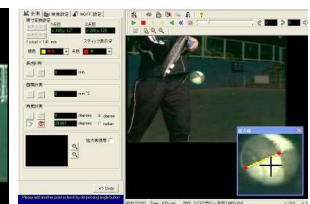
(d) スナップバック



(e) ノッチ（溝）



(f) フォアハンド・トップスピン



(g) コンピュータ解析画面

文 献

1) 川副嘉彦，“手で支持したテニスラケットの実験的同定とボールとの衝突における振動振幅の予測”，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 61 (1995) No. 584, pp.1300-1307.（他は省略）*

* 関連の学術論文，シンポジウム講演論文，解説記事などを「川副研究室のホームページ：テニスを科学する」<https://kawazoe-lab.com/> で公開しているので，ご参考までに。