

テニスのストロークとボレーにおけるラケットの最適性能設計 — 反発性とスイングウェイトのバランス —

川副嘉彦（川副研究室）

1. 誤解されやすいラケット、ストリング、ボールのインパクトにおける性能

インパクトにおけるストリングやボールの性能は、約1000分の3秒間の現象をプレーヤーもストリンガーも感知できないこと、テニスの専門書に信頼できるデータの記述がないこと、などから誤解されやすい（川副 2014）。たとえば、インパクト挙動（図1）に示すように、インパクトにおけるテンション S は、幾何学的条件から、式 $S = S_0 + (AE/2L_s)X^2$ （強い非線形）で表現することができ、通常テンションと呼ばれる第1項の張り上がりテンション（初張力、取付張力） S_0 は、第2項（変形によるテンション）に比べて小さく、無視してもインパクト挙動に大きくは影響しない。テンション S は、 S_0 の数倍高い（インパクトでのテンションは200ポンド以上になる）。前報（川副 2014）のほかに、これまでの研究成果により以下のような知見が得られている。（川副 1995、2003、ほか）

- (1) ヘッドを固定したストリングに鉄球を衝突させた場合：ストリングのエネルギー損失はほとんどゼロに近く、ボール入射速度の100%に近い速度で跳ね返る。
- (2) ボールを剛体壁に衝突させた場合：衝突速度に反比例して、反発係数が低下する。
- (3) ラケット・ヘッドを固定したストリングにボールを衝突させた場合：通常のインパクト 30 m/s 以下では、入射速度の80~90%の速度で跳ね返る（図3(b)(c)参照）。（ボールのエネルギー損失による。）
- (4) 手で支えたラケットにボールを衝突させた場合：ラケット面の根元に近いほど跳ね返りが良く、ラケット面中心付近では入射速度の40%程度の速度で跳ね返る。

図2(a)は、よく知られているBrody (1987)の接触時間とテンションの関係図であるが、これは衝突速度が12 m/s 以下のデータ（図2(b)参照）であり、現実的な通常の衝突速度 20 m/s ~30 m/s を含む広い範囲では図2(c)のようになる。通常のインパクトでは、テンション（初張力）は接触時間にほとんど影響しない。図3に接触時間の実測値の例を反発係数実測値とともに示している（川副2003、Kawazoe ら2013）。衝突速度が増すほどストリング変形量も増し、変形量が増すほど復原バネ剛性が増し、接触時間が短くなる。

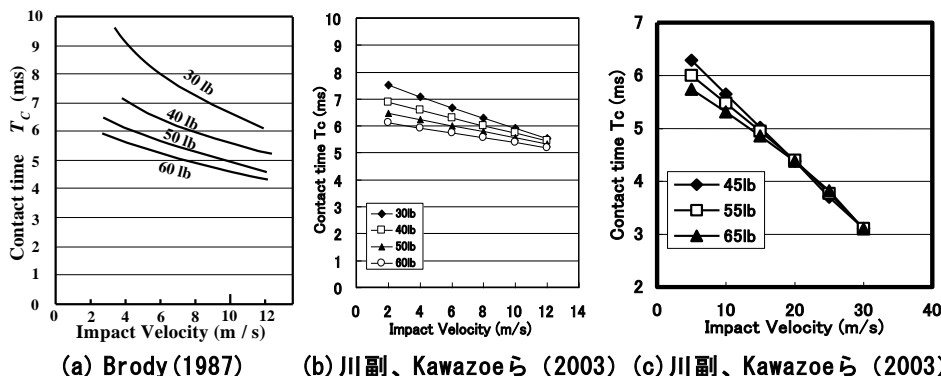
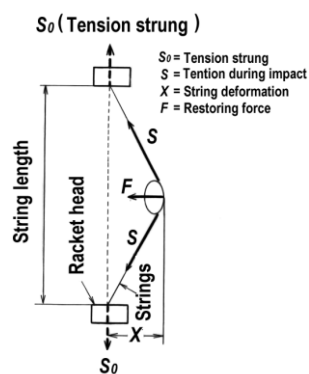


図2 接触時間、テンション、衝突速度の関係

テンション（インパクト）：
 $S = S_0 + (AE/2L_s)X^2$
 復原力：
 $F = S_0 (2/L_s) X + (AE/L_s^3)X^3$
 面圧(ストリング面剛性)
 $= dF/dX = S_0(2/L_s) + 3(AE/L_s^3)X^2$
 記号
 S_0 : テンション(打撃前)
 L_s : ラケットヘッド・サイズ
 A : ストリング・ゲージ太さ
 E : ストリング素材強度
 X : 変形(たわみ)量

図1 インパクトにおけるストリング・テンション S (S_0 は打撃前テンション)

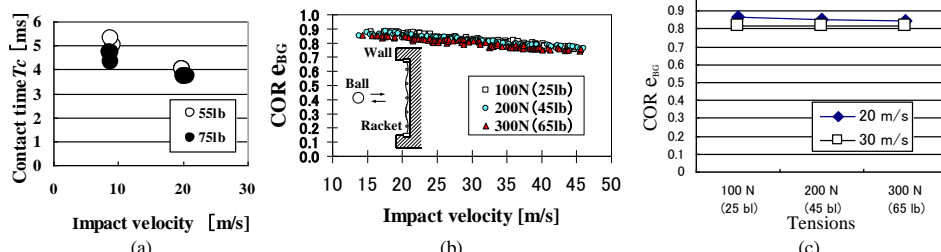


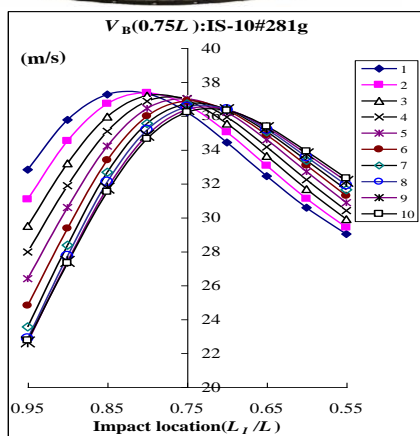
図3 接触時間、テンション、衝突速度、反発係数の関係（実測例）（川副2003、Kawazoe ら2003）

2. ラケットの操作性と反発性のバランス設計

最近のラケットの特長は、軽量化、特にハンドル部の軽量化である。極端なオフセンター打撃を除くと、ラケットのフレーム剛性は十分であり、反発性にはほとんど影響がなく、フレームの反発性、パワー（打球速度）、手に伝わる衝撃振動には重量分布、特にストリング面打撃位置に換算した重量が

大きく影響する。メーカー・カタログでは、グリップ端から 10 cm の位置を支点とした慣性モーメント値をスイングウェイトとし、ハンドルを握った手の長さを 10 cm とすると、グリップ端側を手から 5 cm 残した状態に相当する。しかし、我々は、グリップ端から 7 cm の位置、すなわち、グリップ端側を手から 2 cm 残した位置、を支点とした方が適切だと考えて性能評価に採用している。スイングウェイトが大きいほどラケットの反発力係数 e (ラケットに相対的なボールの跳ね返り速度) は高く、逆に、スイングウェイトが小さいほどラケット・ヘッド速度 V_{Ro} は高い。飛来ボールの速度がパラメーターとなり、反発力係数 e とヘッド速度 V_{Ro} のバランス (トレードオフ) により打球速度 (パワー) が決まる。本研究では、有限要素法による簡単な衝突モデルとスイングモデルを用いて、従来重量型ラケットから最近の超軽量ラケットまでの代表的な市販ラケットをベースにして広範囲のラケット総重量に対して、グラウンドストロークでの打球速度に支配的な操作性 (衝突前のラケット速度 V_{Ro}) とボレーでの打球速度に支配的な反発力係数 e を同時に向上させる仮想ラケットを探索した。

図 4 (a) はラケット仮想ラケット IS-10#281g の例であり、重量配分 10 種類について、ラケット面打撃位置とボールの打球速度の関係を示し、図 4 (b) はグラウンド・ストロークを想定したプレーヤーのスイング・モデルを示す (川副ら 1993)。図 5 はラケット面中心でボールを打撃したときにパワー (打球速度 V_B) を最大にするように最適重量配分した重量 (横軸) の異なるラケットとそれらの重心位置 (縦軸、グリップ端からの距離/全長) の関係を示す例である。結論として、ラケット面中心でボールを打撃したときに市販ラケット TSL (224g)、IS-10 (241g)、EOS (290g)、EX-2 (360g) のパワーを越えるラケットは、市販ラケット重量をカバーする 264g~370g (ストリング重量 15g を含む) の範囲で重心位置が全長のほぼ 55~60% になっており、市販ラケットよりも先端側にある。



Top (a) Near

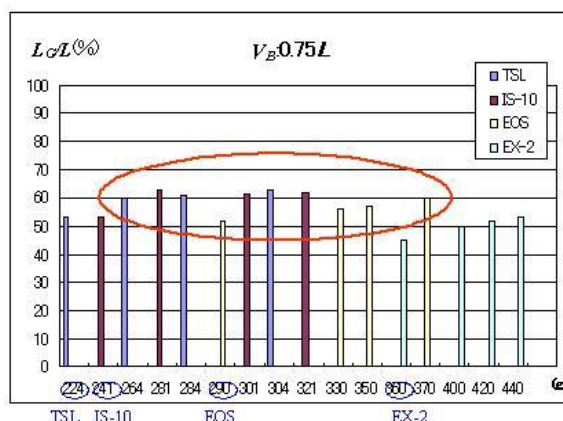
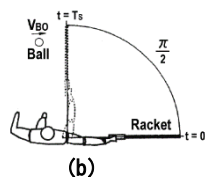


図 5 ラケット面中心でボールを打撃したときにパワー (打球速度 V_B) を最大にするように最適重量配分した重量 (横軸) の異なるラケットとそれらの重心位置 (縦軸、グリップ端からの距離/全長) の関係 ($V_{Bo}=10$ [m/s], $M_0 = 56.9$ [N·m]).

図 4 仮想ラケット IS-10#281g の例：質量配分 (凡例：10 種類) とラケット面打撃位置 L_1 (横軸、グリップ端からの距離、 L は全長、 $L_1/L=0.75$ はラケット面中心) と打球速度 V_B (縦軸)。ボール飛来速度 $V_{Bo} = 10$ [m/s]、肩関節トルク $M_0 = 56.9$ [N·m]

文献

- 1) 川副嘉彦, “なぜポリ系ストリングが天然ガットとナイロンを凌駕したのかー テニスラケットの新しいストリング性能論とプレースタイル変革の視点からー”, テニスの科学, 第 22 巻, (2014), pp. 86-87.
- 2) 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, https://www.istage.jst.go.jp/article/kikaic1979/61/584/61_584_1300/pdf
- 3) Brody, H., "Tennis Science for Tennis Players. University of Pennsylvania Press, (1987), pp.5-22.
- 4) 川副嘉彦, “テニスにおけるシミュレーションとラケット性能の予測”, シミュレーション (日本シミュレーション学会誌), 第 22 巻 1 号, (2003), pp.3-9.
- 5) Kawazoe, Y., Tanahashi, R. and Casolo, F., “Experimental and theoretical criticism of the effectiveness of looser strings for the reduction of tennis elbow”, Tennis Science & Technology 2, pp.61-69. (2003). ITF.
- 6) 川副嘉彦, 神田芳文, “テニスにおけるボール・ラケット系の衝突現象の解析 (フレーム振動の影響とラケットの最適設計, 日本機械学会論文集, C 編, Vol. 59 (1993) No. 563, pp. 2116-2123. https://www.istage.jst.go.jp/article/kikaic1979/59/563/59_563_2116/article/-char/ja/ (以下、省略)