超軽量・長尺テニスラケットの性能向上に関する研究

(重量付加による反発性とボールの飛びの

簡略有限要素法モデルによる検討)

Performance Improvement with Super-Light/Long-Body Tennis Racket: Search for Optimal Weight Attachment by using a Simple FEM Analysis)

〇正 川副嘉彦(埼玉工大) 神田芳文(成蹊大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology,1690 Okabe,Saitama Yoshifumi KANDA, Seikei University

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 unclear points regarding the relationship between the performance estimated by a player and the physical properties of a tennis racket. This paper investigates the improvement performance relevant to the power of super-light weighted long-body tennis racket, which has some disadvantage with the restitution coefficient and the rebound power coefficient. It searches the optimal weight attachment for improving the rebound power coefficient and the post-impact ball velocity simultaneously with tennis racket available on the market by using a simple FEM analysis. It is based on the FEM with an equivalent ball-strings compound system. The result shows that the rebound power coefficient and the post-impact ball velocity increase simultaneously by attaching mass to the topside of racket head.

Key Words: Dynamics of Machinery, Sports Engineering, Impact, Tennis Racket, Coefficient of Restitution, Rebound Power Coefficient, Post-Impact Ball Velocity, Long Body Racket, Super-light Weighted Racket, FEM

1. 緒言

過去の木製ラケットに変わって 1976 年に現れた 110 in²の「デカラケ」, 1987年の「厚ラケ」, そして1995年の「長ラケ」はもっとも革新的なラケットだと言われている⁽¹⁾. 「長ラケ」は全長を従来の 27 インチ (約685mm) より長くしたラケットであり, 現在テニスショップに並んでいるのはほとんどが「長ラケ」である. 国際テニス連盟は, 最近, 全長 29 in 以上のラケットの使用を禁止した. 一方, 当初は, 約半インチ (約12~13mm) 刻みで全長を長くしたラケットが市販され, 29 inのラケットも多く見られたが, 最近はもっと小刻みであり, むしろ従来の 27 in に近いラケットがよく使用されているようである. 長ラケをわざわざ短く改造して使うユーザーもある. このように, 長ラケの客観的な性能評価は明らかではなく, 現状ではユーザーの評価も必ずしも良くない⁽²⁾.

前報⁽²⁾では、有限要素法による簡単な衝突モデル^{(3) — (8)}を用いて軽量型の市販ラケットを長ラケした場合の性能変化について以下のことを明らかにした。

- (1) 「長ラケ」化すると一般的に固有振動数が低下し、フレーム振動が大きくなり、「反発力係数」が低下する.
- (2) ラケット重量を増やさないかぎり、「反発力係数」(跳ね返りの良さ)は低下する.
- (3) 軽量ラケットの質量を増やさないで長ラケ化した場合は、あまり重要でないストリングス面中心から根元側でボール

の飛びは良くなるが、ストリングス面中心から先端側での向上はあまり見られない.

- (4) スイングのスタートからインパクトまでの時間が長くなる.
- (5) 100 in ² の超軽量ラケットの先端から約 70mm の位置に長ラケ化した分の重量を付加して計算してみたところ,ラケット面中心から先端側の打点での打球がかなり速くなった.

ラケットの反発性はボレーに重要であり, ラケット速度はサービスやグランド・ストロークに重要である⁽⁶⁾.

本研究では,異なるフェース面積 100 in 2 と 120 in 2 の超 軽量型 29 in 長ラケについて,質量を付加することによりラケットの反発性とボールの飛びを同時に向上させる可能性を探る.

2. **衝突モデ**ルとFEMシミュレーションの概要⁽²⁾⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾

衝突解析では、ボールとストリングの強い非線形復原力とエネルギー損失を考慮したボール・ストリング複合系の1自由度モデルがフレーム・モデルに衝突するモデルを用いた。ボールはストリングと接触する片側のみ変形し、ボールの中心に質量を集中させたボールがボールとストリングの複合ばねと複合減衰を介してフレームに衝突するとみなしている。ボールとストリングの所定数は荷重実験と衝突実験から同定した。ラケットフレームは段付はりで模擬し、ノーマル・ラケット(27 in)のフレーム・モデルは、全長・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ている。ラケットの線密度・剛性分布・全長・総質

量・重心位置・ラケットおよび腕系の慣性モーメント・ボール 質量・ボール減衰係数比・ボール初速度などを与えて計算する.

プレーヤーのスイング・モデルは女子プロのラリーにおけるグランド・ストローク程度のラケット・ヘッド速度を想定し、手と肘の関節角度を一定に保って、静止状態で肩関節に一定のモーメントを与え、ラケットは角変位 $\pi/2$ だけ回転した位置で衝突する。衝突後のラケット・グリップ部は自由としている。

任意の打点における反発係数 e , および反発力係数 e は シミュレーション計算結果から以下のように求められる^{(2),(6)}.

$$e_r = - (V_B - V_R) / (V_{BO} - V_{RO})$$
(1)
$$e = - (V_B - V_{RO}) / (V_{BO} - V_{RO})$$
(2)

ただし、衝突前後のボール速度をそれぞれ V_{BO} , V_B , ラケット速度をそれぞれ V_{RO} , V_R としている.

3. 質量付加ラケットの性能予測

3.1 市販ラケットと長ラケ化ラケットの性能予測(2)

図1に 100 in 2 (606 cm 2) のラケットEOS100 とその全長を 50 mm (約 2 インチ) だけ長くした仮想長ラケの概略形状を示す. ストリングス面のサイズは変更しないで打球面側はりを全長増分 50mm の 7/10, グリップ側はりを 50mm の 3/10 だけ長くする. ラケット総質量が同じという条件で長ラケ化したラケットを (ラケット名—L50) , 線密度が同じという条件で長ラケ化したラケットを (ラケット名—H50) という条件で長ラケ化したラケットを (ラケット名—H50) と記す. 質量付加は-L50 の方にH50 とL50 の質量差 21 gを付加する.

図 2 は質量を付加する位置を示す。全長を L として、図中の番号の位置に 0.1L 刻みで集中質量を付加して計算を繰り返す。

ラケット EOS-100 は、ラケット全長が公称 27 in(685mm)、ラケット・フェース面積が 100 in 2 である。ラケット 全長とフレーム質量の実測値はそれぞれ 680[mm]、274 [g] である。ストリングスを含むラケット質量は 290 [g]であり、重心位置 $L_{\rm Go}$: 350 [mm]、重心まわりの慣性モーメント $L_{\rm Go}$: 10.9 [gm²]、グリップまわりの慣性モーメント $L_{\rm GR}$: 33.6

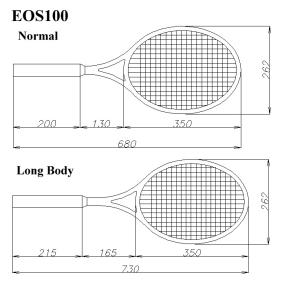


Fig.1 100in ² normal racket and its Long body Virtual racket

Number of attached mass location

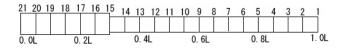


Fig.2 Location of attached mass to the racket frame.

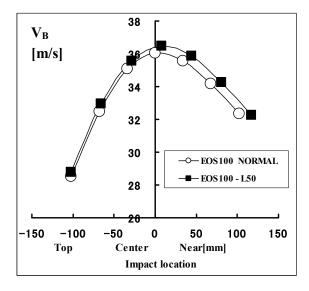


Fig.3 Post-impact ball velocity V_B of a normal EOS-100 and 29 in long body EOS100-L50 $(V_{B0}=10 \text{ [m/s]}, N_S=56.9 \text{ [N·m]})$

 $[gm^2]$, 腕系とラケットの肩関節まわりの慣性モーメント $E: 235 \ [gm^2]$ である. 長ラケEOS100-L50 は, $L_{Go}: 376 mm]$, $E: 247 gm^2]$ となる. 図3は, 市販の 27 in EOS100 と仮想 長ラケ $EOS\cdot100\cdot L50$ の打球速度(ボールの飛び)の予測結果である. ストリング面の先端側ではほとんど差がなく, ストリング面中心から根元側で長ラケは飛びが良くなるので, あまり意味がない.

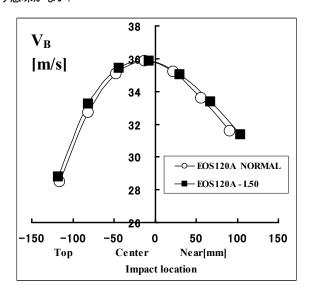


Fig.4 Post-impact ball velocity $V_{\rm B}$ of a normal EOS-120A and 29 inch long body EOS120A-L50 ($V_{\rm B0}$ =10 [m/s], $N_{\rm S}$ =56.9 [N·m])

フェース面積 120 in ² の EOS-120A は, 全長 690 [mm], フレーム質量 276 [g]である. ストリングスを含む質量は 29 2 [g]であり、重心位置 LGo: 363 [mm]、重心まわりの慣性 モーメント I_{Go} : 11.0 [gm²]. グリップまわりの慣性モーメン ト I_{GR} : 36.1 [gm²], 腕系とラケットの肩関節まわりの慣性 モーメント I_{S} : 241 [gm²]である.

長ラケEOS120A-L50 は、LGo: 389 [mm]、LS: 254 [gm 2]となる. 図4は、市販の EOS-120A と長ラケ EOS-120A-L50 の打球速度 (ボールの飛び) の予測結果の比 較である.

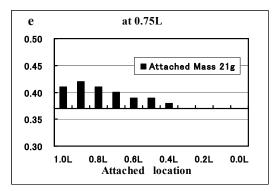


Fig.5 Rebound power coefficient e when a ball strikes the center of string face with attached mass, where the baseline is that of EOS100-L50 without attached mass. Impact velocity: 30m/s)

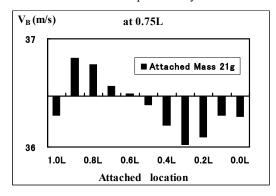


Fig.6 Post—impact ball velocity V_B when a ball is struck at the center of string face with mass at various locations, where the baseline is that of EOS100-L50 without attached mass.

 $(V_{B0}=10 \text{ [m/s]}, N_{S}=56.9 \text{ [N·m]})$

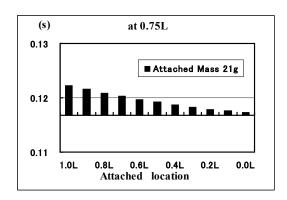


Fig.7 Time required from start of swing to impact when a ball is struck at the center of string face with attached mass at various locations, where the baseline is that of EOS100-L50 without attached mass ($Ns=56.9 [N \cdot m]$)

3.2 フェース面積 100 in 2 軽量長ラケの質量付加による性能 向上

図5は、ストリングス面中心(0.75L)にボールが衝突した ときの質量付加位置による反発力係数 e の変化を示す. 基準線 は質量を付加する前のラケット EOS100-L50 の値である.

図6は、ストリングス面中心(0.75L)で打撃したときのボ ールの飛び(打球速度) VB に及ぼす質量付加位置の影響を示 す. 基準線は EOS100-L50 の値を示す.

図7は、図2のスイング・モデルにおいてスイング開始から インパクトまでの所要時間と質量付加位置の関係を示す.

図8は、先端側 0.9L の位置に質量を付加したときの衝突位 置と反発力係数e の値を示す. 横軸の Center はラケット面 中心、 Top 側はラケット面上の先端側、Near はラケット面 上のグリップ側の意味である. ラケット面中心から先端側での 衝突において反発力係数が大幅に増大している.

図9は、ラケット面先端側 0.9L に質量を付加したときの衝 突直前の衝突位置のラケット・ヘッド速度 VRo を示す.

図10は、ラケット面先端側 0.9L に質量を付加したときの衝突 位置によるボールの飛び1/8 の変化を示す.

ラケット面中心 (0.75L, L:680 [mm]) で打撃したときの打 球速度が最大になる位置 0.9L に質量を付加したラケット EOS100-L50#0.9L は, L_{Go}: 395 [mm], I_S: 268 [gm²]となる.

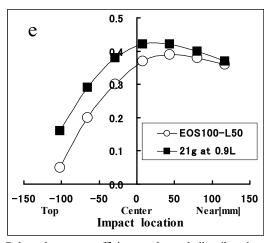


Fig.8 Rebound power coefficient e when a ball strikes the various locations on the string face with attached mass at 0.9L

(Impact velocity: 30m/s)

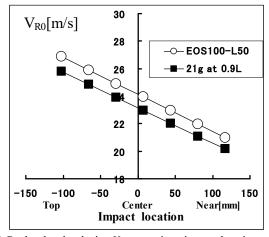


Fig.9 Racket head velocity V_{R0} at various impact locations on the string face with attached mass at 0.9L (Ns=56.9 [N·m])

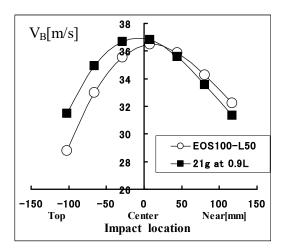


Fig.10 Post—impact ball velocity $V_{\rm B}$ when a ball is struck at the various locations on the string face with attached mass at $0.9 \text{L}V_{\rm B0} = 10$ [m/s], $N_{\rm S} = 56.9 \, [\text{N} \cdot \text{m}]$)

3.3 フェース面積 120 in² 軽量長ラケの質量付加による性能 向上

図11は、ストリングス面中心 (0.732L, L=690 mm) にボールが衝突したときの質量付加位置による反発力係数e の変化を示す。基準線は質量を付加する前のラケットEOS120A-L50の値である。

図12は、ストリングス面中心(0.732L、L=690mm)で打撃したときの打球速度 V_B に及ぼす質量付加位置の影響を示す。基準線はEOS120A-L50 の値を示す。

図13は、先端側 0.8L の位置に質量を付加したときの衝突位置と反発力係数 e の変化を示す.

図14は、ラケット面先端側 0.8L に質量を付加したときの衝突直前の衝突位置のヘッド速度 V_{R0} を示す.

図15は、ラケット面先端側 0.8L に質量を付加したときの衝突位置によるボールの飛び V_B の変化を示す。 ラケット面中心 (0.732L, L=690 [mm])で打撃したときの打球速度が最大になる付加位置 0.8L に質量を付加したラケット EOS120A-L50#0.8L は、 L_{Go} : 390 [mm], L_{SO} : 265 [gm 2]となる.

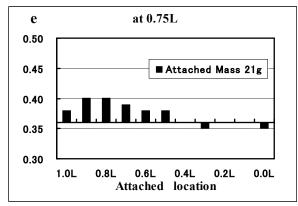


Fig.11 Rebound power coefficient e when a ball strikes the center of string face with attached mass, where the baseline is that of EOS120A-L50 without attached mass (Impact velocity: 30m/s)

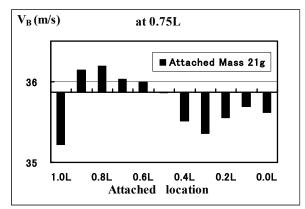


Fig.12 Post—impact ball velocity $V_{\rm B}$ when a ball is struck at the center of string face with mass at various locations, where the baseline is that of EOS120A-L50 without attached mass

 $(V_{B0}=10 \text{ [m/s]}, N_{S}=56.9 \text{ [N·m]})$

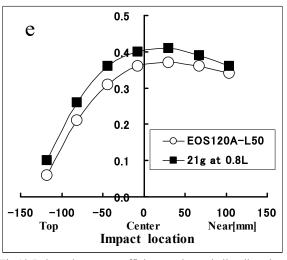


Fig.13 Rebound power coefficient e when a ball strikes the various locations on the string face with attached mass at 0.8L

(Impact velocity: 30m/s)

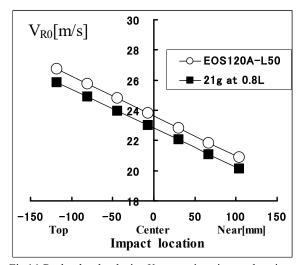


Fig.14 Racket head velocity V_{R0} at various impact locations on the string face with attached mass at 0.8L (N_{S} =56.9 [N_{T}])

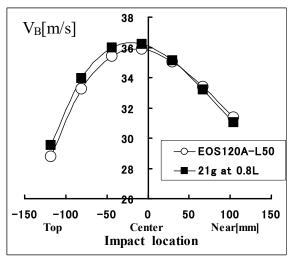


Fig.15 Post—impact ball velocity $V_{\rm B}$ when a ball is struck at the various locations on the string face with attached mass at $0.8 \rm L$

 $(V_{B0}=10 \text{ [m/s]}, N_{S}=56.9 \text{ [N·m]})$

3.4 パワーに関連する性能とフェース面積

以上の結果から、フェース面積100 in 2 超軽量長ラケの場合には、ラケット全長の 10% だけ最先端から根元側の位置に重量を付加した EOS100-L50#0.9L が、また、フェース面積120 in 2 超軽量長ラケの場合は、先端から 20% だけ根元側の位置に付加した EOS120A-L50#0.8L が最もパワーに関連する性能がよいことになる.

図16は、100 in 2 長ラケ EOS100-L50#0.9L と 120 in 2 長 ラケ EOS120A-L50#0.8L の衝突位置による反発力係数e の変化を示す

図17は、 100 in ^2 長ラケ EOS100-L50#0.9L と 120 in ^2 長 ラケ EOS120A-L50#0.8L の衝突位置による打球速度 (ボールの飛び) V_B の変化を示す.

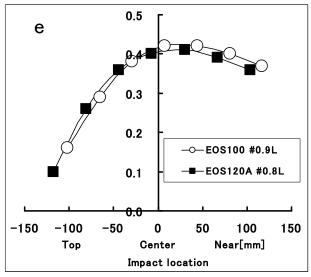


Fig.16 Rebound power coefficient *e* when a ball strikes the various locations on the string face of the long body racket EOS100-L50#0.9L and EOS120A-L50#0.8L

(Impact velocity: 30m/s)

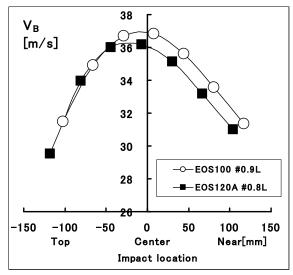


Fig.17 Post—impact ball velocity $V_{\rm B}$ when a ball is struck at the various locations on the string face of the long body racket EOS100-L50#0.9L and EOS120A-L50#0.8L

 $(V_{B0}=10 \text{ [m/s]}, N_{S}=56.9 \text{ [N·m]})$

4. 結論

有限要素法による簡単な衝突モデルを用いて、超軽量型29 インチ長ラケに重量を付加することにより、ボールの飛びと反 発性を同時に向上させる可能性を探った。

その結果、フェース面積 100 in ^2 の超軽量長ラケの場合は ラケット全長の 10% だけ最先端から根元側の位置に重量を付加するのが、フェース面積 120 in ^2 の超軽量長ラケの場合は先端から 20% だけ根元側の位置に付加すると最も有効であることが明らかになった。

おわりに、図表作成にご助力いただいた埼玉工大・平成10年度4年生 小長井真吾・田辺健治、平成11年度 市川英樹・中山紘文、および平成12年度 熊谷真祐・関口英臣の諸君に深謝する。なお、本研究は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) 川副嘉彦, 計測と制御, 第38巻第4号, (1999) pp.268-273.
- (2) 川副嘉彦・桜井匠・神田芳文、機械学会ジョイントシンポジウム講論集、No.99-41(1999), pp.217-221.
- (3) Kawazoe, Y., Theoretical and Applied Mechanics, Vol.41(1992), pp.3-13.
- (4) Kawazoe, Y., Theoretical and Applied Mechanics, Vol.42(1993), pp.197-114.
- (5) Kawazoe, Y., Theoretical and Applied Mechanics, Vol.43(1994), pp.224-232.
- (6) 川副嘉彦・友末亮三, 機論(C), 64-623(1997), pp.2382-2388.
- (7) Kawazoe, Y. & Kanda, F., JSME Int. J., 40-1(1997), pp.9-16.
- (8) 川副嘉彦・神田芳文, 機論(C), 59-566(1993), pp.3108-3115.
- (9) 川副嘉彦・神田芳文,機械学会ジョイントシンポジウム講論 集、No.00-38(2000)掲載予定