

超軽量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 Weighted Tennis Racket : Investigation of Optimal Weight Attachment in terms of Power by a Simple FEM Analysis)

○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 performance improvement of the super-light weight racket in terms of power by attaching weight to the racket available on the market. It is based on the simple Finite Element Analysis with an equivalent ball-strings compound system. The result shows that both rebound power coefficient and the post-impact velocity increases with the same total mass by attaching the weight at the topside on the racket face of super-light weighted racket.

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

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。テニスラケットは1960年代前半までは木製でフェース面積 68 in^2 のレギュラーサイズと決まっていたが、1967年にスチール製、1968年にアルミ製の金属ラケットが現れ、1974年には複合材のラケットが登場した。過去30年の間にラケットは大きく変わってきたが、1976年に現れた 110 in^2 の「デカラケ」、1987年の「厚ラケ」、そして1995年の「長ラケ」は最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)から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。ただし、国際テニス連盟は、全長29in以上のラケットの使用を最近禁止した⁽¹⁾⁽²⁾。

さらに最近の特長はラケット・フレームの軽量化である。インパクト直後の打球速度は、ラケットの反発性(反発力係数と呼ぶ)とスイングしたときのラケット・ヘッド速度とで決まる⁽³⁾。軽量化はラケット・ヘッド速度の増大と反発性の低下をもたらすので、ラケットの反発性とラケット・ヘッド速度は相反する性質である。軽量ラケットは、軽量化による反発性の低下をヘッド速度増大によって補い、打球速度を増そうというのがねらいであろう。

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ブやグランド・ストロークに重要である⁽⁶⁾。

本研究では、有限要素法による簡単な衝突モデル⁽⁷⁾⁻⁽⁸⁾を用いて超軽量ラケット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る。

2. 衝突モデルとFEMシミュレーションの概要

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自由度モデルが段付はりのフレーム・モデルに衝突するとした。ラケットのフレーム・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はほぼ一致させている。

図1(a)は、固定したラケットヘッドにボールが速度 V_{Bo} で衝突する場合を想定したボール・ストリング複合系の1自由度モデルである。ボールはストリングと接触する片側のみ変形するとし、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固定した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諸定数は衝突実験から同定した。図1(b)はボール・ストリング複合系がラケットフレームを模擬した段付はりに衝突するモデルである⁽⁷⁾⁽⁸⁾。フレーム(段付はり)を20個のはり要素に分割して離散化し、全長を L として打球面側を $0.7L$ (ラケットヘッドから要素1とし14まで)、グリップ側を $0.3L$ (要素15~20)とし、剛性比が線密度比に比例するとした。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。

図2はグランド・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。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、ラケットは加速しながら角変位 $\pi/2$ だけ回転した位置でボールと衝突する。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_r および反発力係数 e_f 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)}。

$$e_r = - (V_B - V_R) / (V_{B0} - V_{R0}) \quad (1)$$

$$e = - (V_B - V_R) / (V_{B0} - V_{R0}) \quad (2)$$

ただし、衝突前後のボール速度をそれぞれ V_{B0} , V_B , ラケット速度をそれぞれ V_{R0} , V_R としている。

図3は、肩関節トルク $N_s = 56.9$ [N・m], 衝突直前のボール速度 $V_{B0} = 10$ [m/s] を与え、ラケットでボールを打撃した

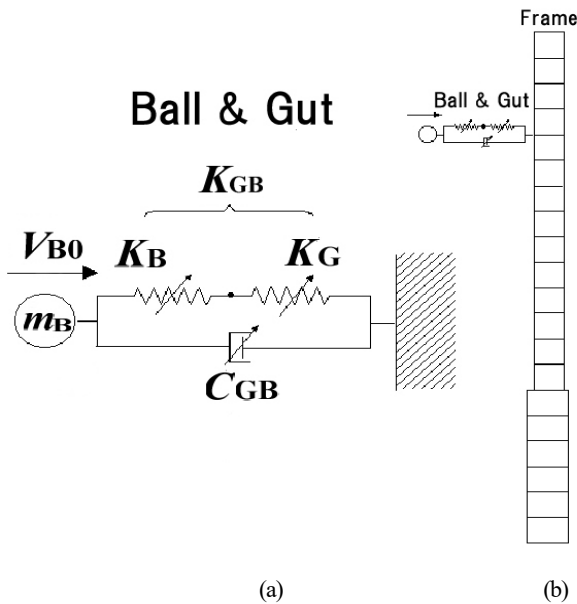


Fig.1 Compound ball/strings system and racket frame model

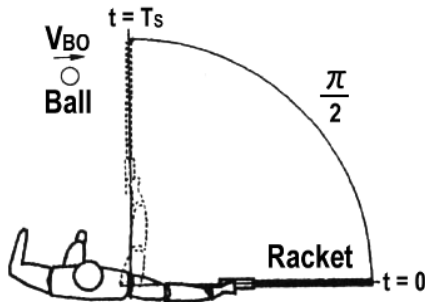


Fig.2 Player's swing model

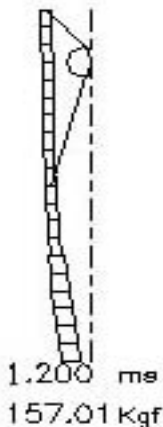


Fig.3 Example of time historical impact behavior

ときの時系列的計算結果の例を示す。ただし横倍率を縦倍率の3倍で表示している。

3. 質量付加ラケットの性能予測

3.1 フェース面積 100 in² のラケット

対象の軽量ラケットとして、全長が公称 27 in (685 mm, ノーマル)で、ラケット・フェース面積が100 in²のEOS-100, 面積 110 in²のEOS-110, 面積 120 in²のEOS-120Aの3種類を選んだ。ラケット全長とフレーム質量の実測値はそれぞれEOS100 : 680 [mm], 274 [g], EOS-110: 685 [mm], 267 [g], EOS-120A: 690 [mm], 276 [g]であり、ストリングス質量を含むラケット質量は、それぞれEOS-100: 290 [g], EOS-110: 283 [g], EOS-120A: 292 [g]である。

図4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刻みで質量を集中して付加して計算を繰り返す。付加質量は、ラケット EOS-120Aの剛性を変えないで重量と重量バランスを変えた従来型EOS120H (ストリングスを含む質量が 349 g) の質量を参考にして、57 g とした。したがって、質量を付加したラケット EOS100-AM57, EOS 110- AM57, EOS 120- AM57 のストリングスを含む質量は、347g, 340 g, 349 g となる。

表1は、ラケットEOS100のフレームの各位置に質量を付加したときのラケットの重心位置 L_{Go} , 重心まわりの慣性モーメント I_{Go} , グリップ(グリップ端から 70 mm)まわりの慣性モーメント I_{GR} , 腕系とラケットの肩関節周りの慣性モーメント I_s を示す。

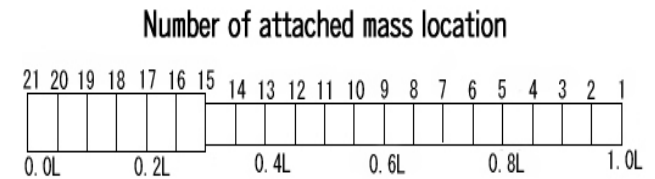


Fig.4 Location of attached mass to the racket frame.

Table 1 Moments of inertia of racket with attached mass at various locations, where L_{Go} : Moment of inertia about the Center of Gravity(C.G.), I_{Go} : Moment of inertia about the C. G. , I_{GR} : Moment of inertia about the grip, I_s : Moment of inertia of arm-racket system about the shoulder joint.

A.L	1.0 L	0.9 L	0.8 L	0.7 L	0.6 L	0.5 L	0.4 L	0.3 L	0.2 L	0.1 L	0.0 L
L_{Go} [mm]	404	393	382	371	360	348	337	326	315	304	293
I_{Go} [gm ²]	16.1	14.2	12.7	11.7	11.1	10.9	11.2	11.9	13.1	14.7	16.7
I_{GR} [gm ²]	54.8	50.4	46.4	43.0	40.1	37.8	36.0	34.7	33.9	33.6	33.9
I_s [gm ²]	294	287	280	273	267	261	256	252	248	244	241

図5は、ストリングス面中心 (0.75 L) 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Normal EOS100の値 0.37 である。

図6は、先端側 0.9 L 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。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7は, ラケット面中心 (0.75 L) の衝突直前の速度 V_{RO} の質量付加位置による変化を示す。基準線は質量を付加する前のラケットNormal EOS100の値23.5[m/s]である。

図8は, スtrings面中心 (0.75 L) で打撃したときのボールの飛び (打球速度) V_B におよぼす質量付加位置の影響を示す。基準線はEOS100の値36.06[m/s]を示す。

図9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。

図10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である。ラケット・ヘッドの先端側に付加するほどインパクトまでの所要時間が長くなる。

3.2 フェース面積 110 in² のラケット

フェース面積 110 in² のラケット EOS110は, 重心位置 L_{Go} : 361 [mm], 重心まわりの慣性モーメント I_{Go} : 10.5[gm²], グリップまわりの慣性モーメント I_{GR} : 34.5 [gm²],

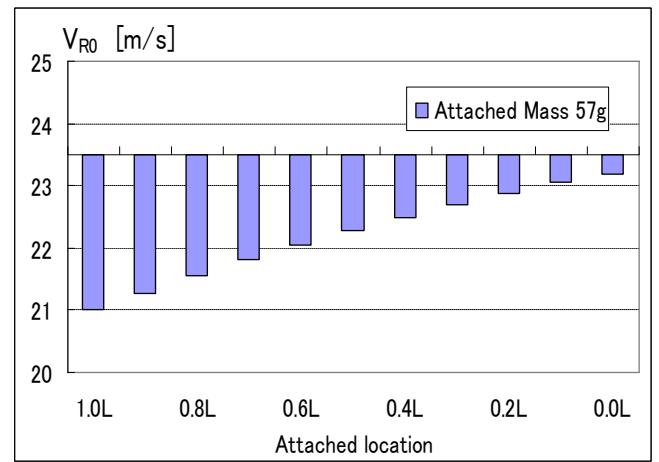


Fig.7 Racket head center velocity V_{RO} with attached mass at various locations, where the baseline is the value of EOS100 without attached mass (Shoulder torque $N_s = 56.9[N \cdot m]$).

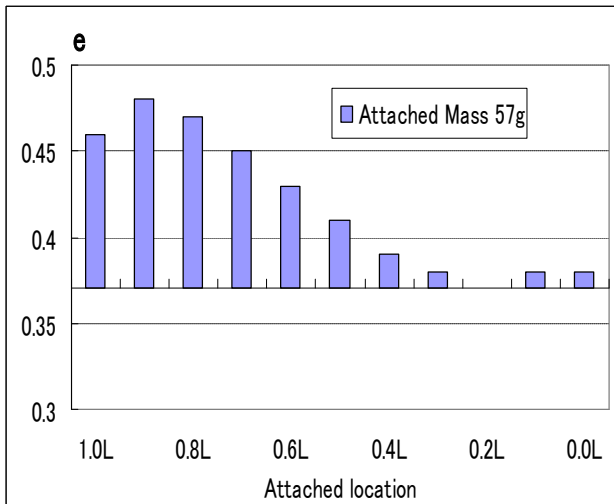


Fig.5 Rebound power coefficient e when a ball strikes the center of string face with attached mass, where the baseline is that of EOS100 without attached mass (Impact velocity: 30 m/s).

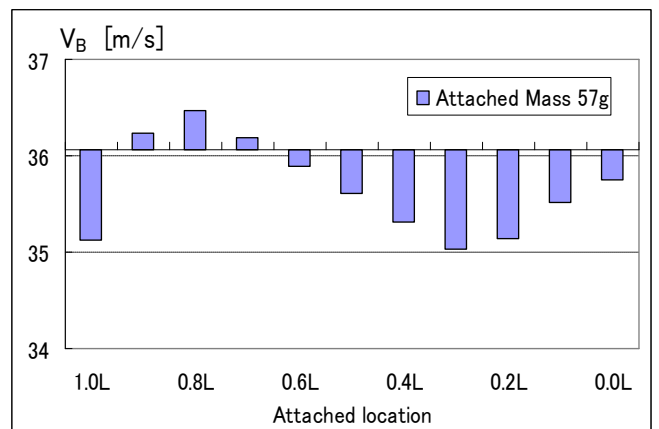


Fig.8 Post-impact ball velocity V_B when a ball is struck at the center of string face with attached mass at various locations, where the baseline is that of EOS100 without attached mass ($V_{B0} = 10$ [m/s], $N_s = 56.9[N \cdot m]$).

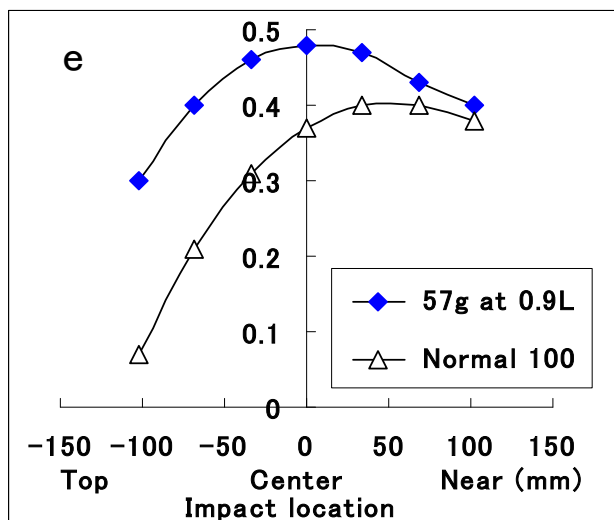


Fig.6 Rebound power coefficient e when a ball strikes the various locations on the string face with attached mass at 0.9 L (Impact velocity: 30 m/s).

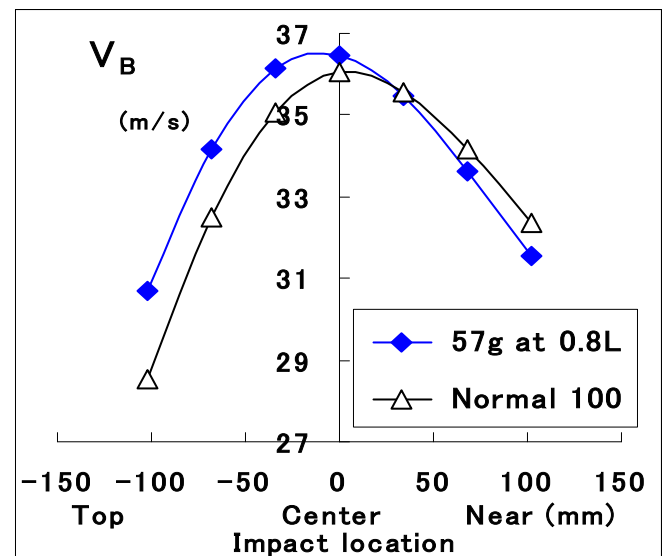


Fig.9 Post-impact ball velocity V_B when a ball is struck at the various locations on the string face with attached mass at 0.8 L ($V_{B0} = 10$ [m/s], $N_s = 56.9$ [N · m])

腕系とラケットの肩関節まわりの慣性モーメント I_S : 235[gm²]である。

ラケット面中心 (0.737L, 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 0.8 L に質量を付加すると、これらの値はそれぞれ L_{Go} : 392 [mm], I_{Go} : 12.2[gm²], I_{GR} : 47.5 [gm²], I_S : 281[gm²]となる。

また、ラケット面中心での反発力係数が最大になる位置 0.9 L に質量を付加すると、これらの値はそれぞれ L_{Go} : 404 [mm], I_{Go} : 13.6[gm²], I_{GR} : 51.5 [gm²], I_S : 288[gm²]となる。

図11は、先端側 0.9Lの位置に質量を付加した時の衝突位置と反発力係数 e の変化を示す。

図12は、ラケット面先端側 0.8 L 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。

$V_{B0} = 10$ [m/s], $N_S = 56.9$ [N · m]である。

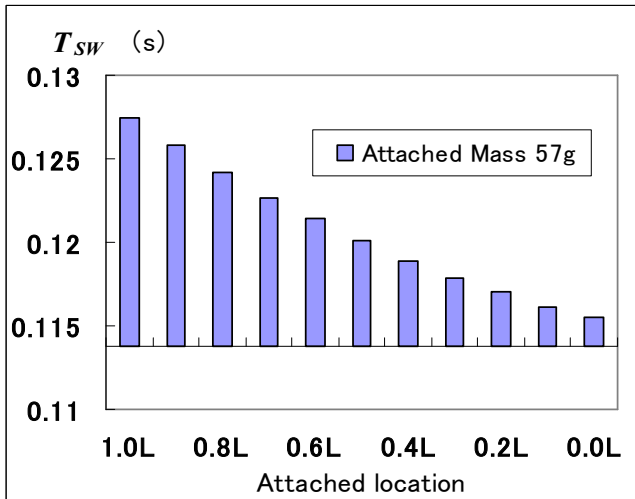


Fig.10 Time required from start of swing to impact when a ball is struck at the center of string face with attached mass at various locations, where the baseline is that of EOS100 without attached mass ($N_S = 56.9$ [N · m]).

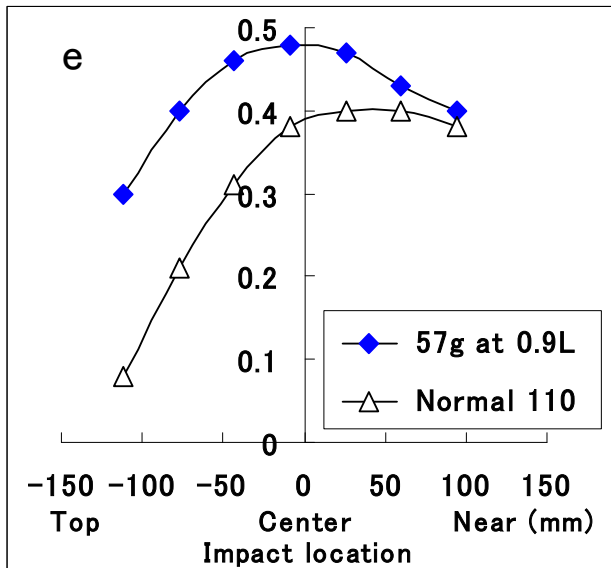


Fig.11 Rebound power coefficient e when a ball strikes the various locations on the string face with attached mass at 0.9 L (Impact velocity: 30 m/s).

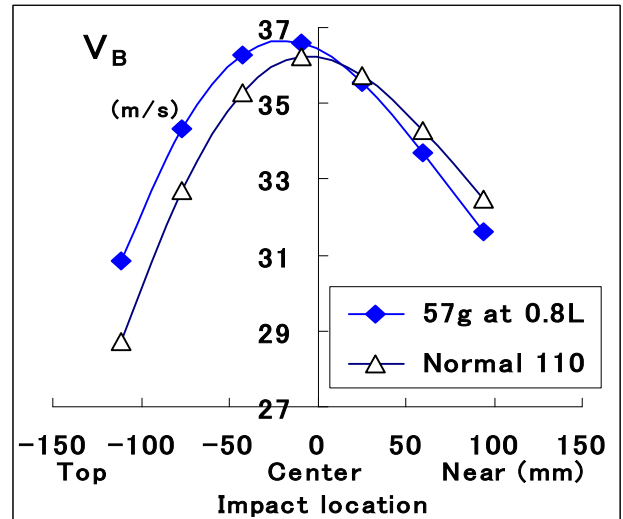


Fig.12 Post-impact ball velocity V_B when a ball is struck at the various locations on the string face with attached mass at 0.8 L ($V_{B0} = 10$ [m/s], $N_S = 56.9$ [N · m])

3.3 フェース面積 120 in² のラケット

フェース面積 120 in² のラケット EOS120Aは、重心位置 L_{Go} : 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。

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 0.8 L に質量を付加すると、これらの値はそれぞれ L_{Go} : 394 [mm], I_{Go} : 12.7[gm²], I_{GR} : 49.3 [gm²], I_S : 287[gm²]となる。

また、ラケット面中心での反発力係数が最大になる位置 0.9 L に質量を付加すると、これらの値はそれぞれ L_{Go} : 405 [mm], I_{Go} : 14.2[gm²], I_{GR} : 53.4 [gm²], I_S : 294[gm²]となる。

図13は、先端側 0.9Lの位置に質量を付加した時の衝突位置と反発力係数 e の変化を示す。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。

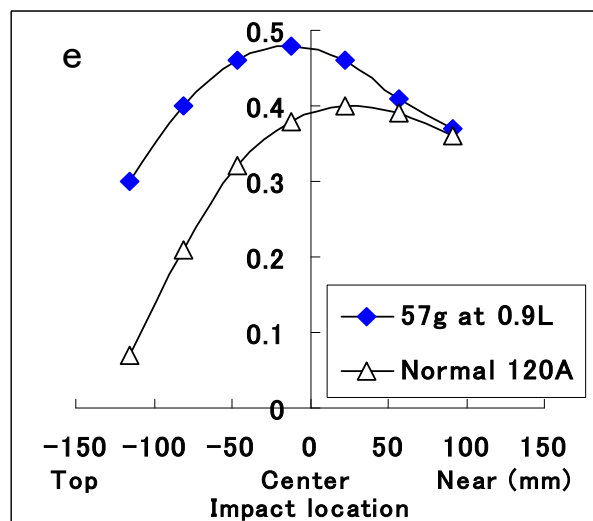


Fig.13 Rebound power coefficient e when a ball strikes the various locations on the string face with attached mass at 0.9 L (Impact velocity: 30 m/s).

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位置によるボールの飛び V_B の変化を示す。 $V_{B0} = 10$ [m/s], $N_s = 56.9$ [N・m]である。

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、どのフェース面積のラケットもストリングス面中心で打撃する場合は、先端側 0.8 L の位置に質量を付加するのが、反発力係数およびボールの飛びをもっとも効果的に向上させることができることがわかった。

図15は、先端側 0.8 L の位置に質量を付加した時の衝突位置と反発力係数 e の変化を示す。横軸の Center はラケット面中心、Top 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。

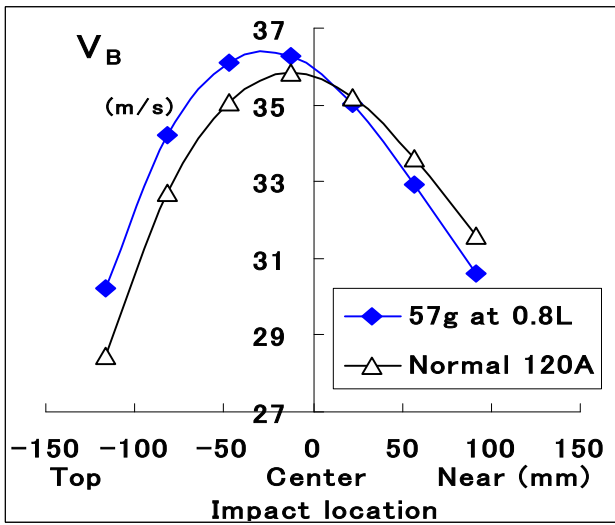


Fig.14 Post-impact ball velocity V_B when a ball is struck at the various locations on the string face with attached mass at 0.8 L ($V_{B0} = 10$ [m/s], $N_s = 56.9$ [N・m])

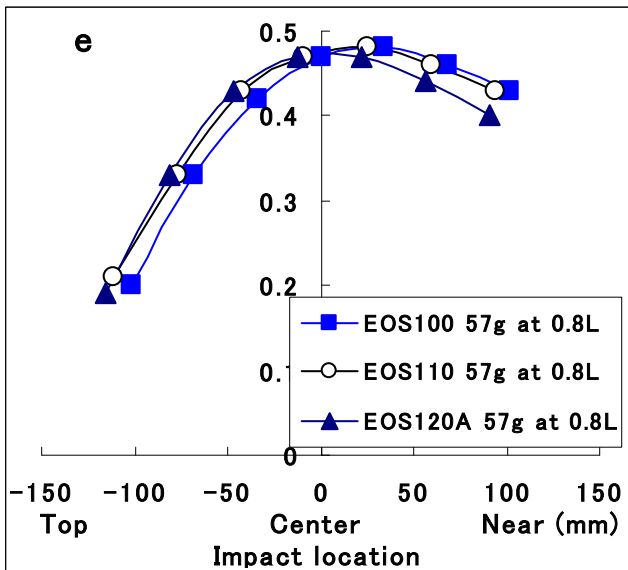


Fig.15 Rebound power coefficient e when a ball strikes the various locations on the string face with attached mass at 0.8 L (Impact velocity: 30 m/s).

図16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。 $V_{B0} = 10$ [m/s], $N_s = 56.9$ [N・m]である。

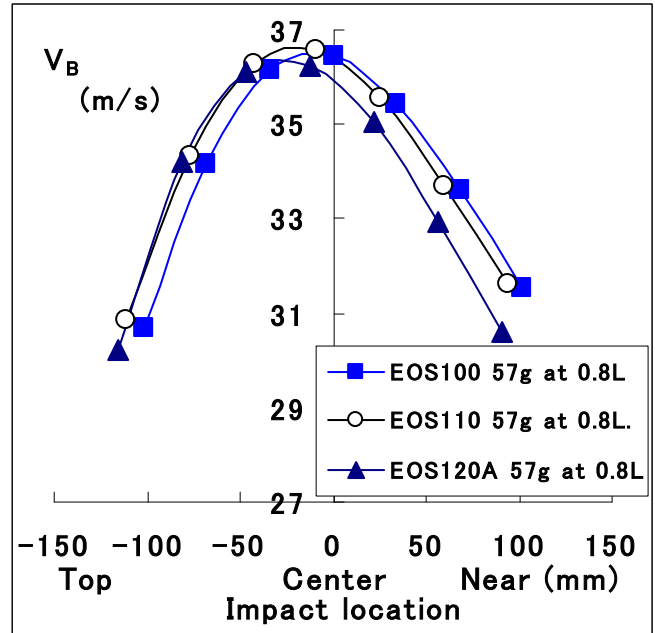


Fig.16 Post-impact ball velocity V_B when a ball is struck at the various locations on the string face with attached mass at 0.8 L ($V_{B0} = 10$ [m/s], $N_s = 56.9$ [N・m])

4. 結論

テニスラケットの反発性はボレーに重要であり、スイングにおけるラケット速度はグランド・ストロークに重要であるが、両者は相反する性質である。

本研究では、有限要素法による簡単な衝突モデルを用いて、ノーマル長さ 27 in の超軽量型ラケット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、超軽量ラケットの先端からラケット全長の20%だけ根元側の位置に重量を付加するのが、フェース面積の大小にかかわらず最も有効であることが明らかになった。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・シンポジウム講演集, 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.