

# 打球速度を高めるためのテニスラケットの操作性と反発性のバランス設計とバランスの持つ意味

## Balance Design of Maneuverability and Rebound Characteristics for Maximizing Power of Tennis Racket

○ 川副嘉彦(埼玉工大)  
神田芳文(成蹊大)

赤石武章(埼玉工大)

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

At the current stage, the terms used in describing the performance of a tennis racket are based on the feeling or perception of an experienced tester or a player. However, the optimum racket depends on the physical and technical levels of each user. Accordingly, there are many unknowns 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 customizing the weight distribution and total weight of the racket available on the market by balancing design of maneuverability and rebound characteristics. It is based on the simple Finite Element Analysis with an equivalent ball-strings compound system. While this paper did not consider the strength of materials and needs the future research, the result showed that the gravity center of various virtual weighted rackets ranging from 260 g to 320 g with maximum post-impact ball velocity locates at 60 % of the total length of when a ball is struck at the center on the string face.

*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. 研究の背景と目的

最近のラケットの特徴は軽量化である。ラケットの質量は(ストリングスを張った状態で),木製の時代は 370g~400 g, 複合材ラケットの初期の頃は 360g~375g, さらに軽量化が進み超軽量ラケットと呼ばれる 300g を切るラケットが現れた。最近の最も軽いラケットは 220g に達している。しかし, 世界最軽量の市販ラケット Thunder Super Lite (TSL, prince 製, ストリングを含む総質量 224 g, 打球面サイズ 115 in<sup>2</sup>, 全長 28 in (710mm) は軽量化の行き過ぎ, たとえばオフセンターの打撃において反発係数が低下し, 手に伝わる衝撃振動が大きくなることを示した<sup>(1)(2)</sup>。

本報では, 有限要素法による簡単な衝突モデルとスイングモデル<sup>(3)(11)</sup>を用いて, この最軽量ラケットをベースにして, 操作性(衝突前のラケット速度  $V_{Ro}$ )をあまり低下させないで打球速度  $V_b$  と反発係数  $e$  (ラケットが静止していると見なしたときのボールの跳ね返り速度と入射速度との比)を同時に向上させる最適付加質量と付加位置をもつ仮想ラケットを探索した。さらに, 同一のラケット総質量において, 重心位置を同一にして重量配分する方法, 重心周りの慣性モーメントを同一にして重量配分する方法, グリップ周りの慣性モーメントを同一にして重量配分する方法の3種類で線密度を設計し, 線密度分布の決定方法あるいは線密度分布の違いが反発性・打球速度・打球感に関連する性能あるいはボールとラケットの衝突挙動にどう影響するかを調べた。次いで, 図1に示すように, ラケットの操作性と反発性のバランス設計により打球速度(パワー)を最大にするラケット重量配分とバランスと呼ばれる重心位置との関係を, 従来型バランス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考察し, 従来あまり重視されなかったバランス(重心位置)の持つ意味を明らかにする。ただし, ボールとラケットの正面衝突を想定してボールの回転(スピン)は無いものとした。

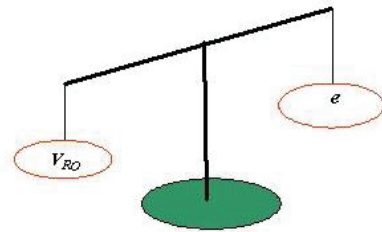


Fig.1 Balance of maneuverability and rebound characteristics.

### 2. 衝突モデルとFEMによる衝突計算の概要

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(ストリングスの質量を含む), 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。図2(a)は,

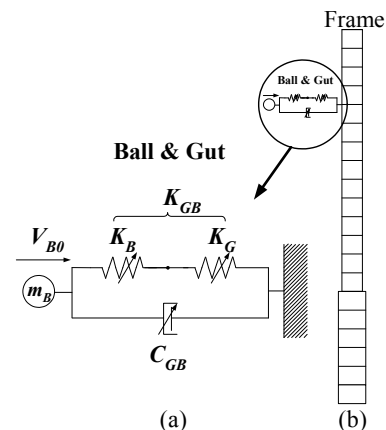


Fig.2 Compound ball/strings system and racket frame model during impact.

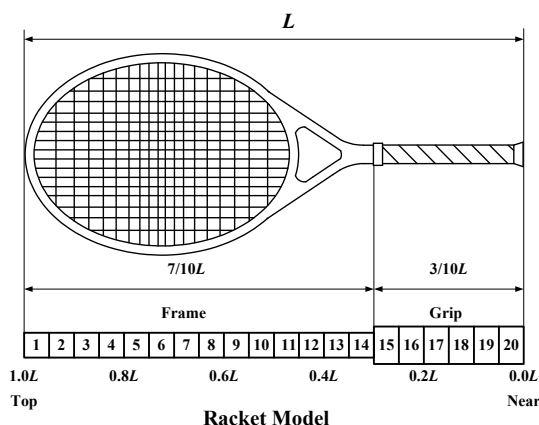


Fig.3 Racket frame model.

ボールが速度  $V_{B0}$  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し、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非線形複合ばね  $K_{GB}$  と非線形複合減衰  $C_{GB}$  を介してフレームに衝突するとみなしている。ストリングスの質量はフレームに含めた。ボールとストリングの諸定数は荷重実験と衝突実験から同定する。  $K_B$  ; ストリングスの非線形等価バネ定数,  $K_G$  ; ボールの非線形等価ばね定数,  $K_{GB}$  ; ボール・ストリングスの非線形等価複合バネ定数,  $C_{GB}$  ; ボール・ストリングスの複合系の非線形等価減衰定数,  $m_B$  ; ボール質量,  $V_{B0}$  ; ボール初速度である。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。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(図3)。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<sup>(8)-(11)</sup>。

各種の市販ラケットの1次(2節曲げ)固有振動数実測値と段付はりモデル計算値を表1に示す。

Table 1 Fundamental (1st) frequency of rackets and models

Racket name	1 st [Hz]	
	Calculated	Measured
EX-2	122	122
PROTO-02	211	215
EOS-100	171	171
EX-110	134	132
EOS120A	139	137
EOS120H	144	142
Cramer(Wood)	105	103
Asymmetric	149	151
EOS110	173	176
IMP-3	138	142
PRINCE-SG	127	127
TSL	200	201
IS-10	205	205

図4はグランド・ストロークを想定したプレイヤーのスイング・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トルクを与え、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する。女子プロテ

ニスプレイヤーのラリーにおける衝突速度データから関節トルクを想定した。任意の打撃点における反発係数  $e_r$  および反発力係数  $e$  (ラケットが静止していると見なしたときのボールの跳ね返り速度と入射速度との比) 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。

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

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

打撃後のボール速度  $V_B$  は

$$V_B = -V_{B0} \cdot e + V_{R0}(1 + e) \quad (3)$$

ただし、衝突前のボール速度を  $V_{B0}$ 、スイング速度を  $V_{R0}$  としている。また  $V_{R0}$  は、次のように与えられる。

$$V_{R0} = L \cdot (\pi \cdot N_s / I_s)^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 $L$  は、グリップ端から肩関節までの水平に投影した距離とグリップからラケット打撃位置までの距離の和である。 $N_s$  は肩関節まわりトルク、 $I_s$  はスイング動作における腕・ラケット系の肩関節まわり慣性モーメントであり、ラケット重量配分により変わる<sup>(3)-(7)</sup>。

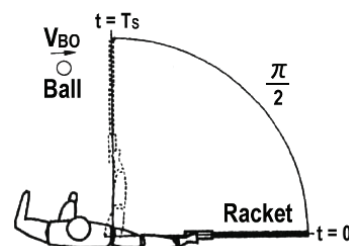


Fig.4 Player's swing model

### 3. 最軽量ラケットをベースとした重量配分設計と性能改善

市販の最軽量ラケット TSL に段階的な質量付加を行うことによって、それぞれのラケット質量において、グリップ衝撃を大きくしないでパワーを最大にするラケットの設計を試みた。式(3)において  $V_{R0}$  と  $e$  が大ほど  $V_B$  も向上するが  $V_{R0}$  と  $e$  は相反する特性をもつので、 $V_B$  を最高にするには  $V_{R0}$  と  $e$  のバランスをうまくとる必要がある。グリップ衝撃力は、ストリングス面中心位置に加わる衝突力に対するグリップ位置(グリップ端より70mmの位置)の加速度で評価した。

図5、図6は、最軽量ラケット TSL に質量を付加して性能改善した3種類の仮想ラケット TSL#254g (数字は総質量)、TSL#274g、TSL#304g の反発力係数  $e$  と打球速度  $V_B$  を示す。横軸の Center はストリングス面中心、Top は先端側、Near は根元側での打撃を意味する。性能向上率は、ストリングス面中心で打撃した場合、 $e$  はラケット TSL#304g (62.6%増)、TSL#274g (49%増)、TSL#254g (36%増) の順であった。打球速度  $V_B$  は、TSL#274g、TSL#304g がともに2.2%で最も向上する。グリップ衝撃力は、TSL#254g は80%減、TSL#274g は81%減、TSL#304g は71%減であった。

段付はりモデルの1点に集中質量を付加して最適な性能をもつラケットを探索するので、実際に製造するときは線密度を設計する必要がある。その際、同一の総質量において、重心位置を同一にして重量配分、重心周りの慣性モーメントを同一にして重量配分、グリップ周りの慣性モーメントを同一にして重量配分する3種類の方法で線密度を設計し、線密度分布の決定方法が反発性、打球速度、グリップ衝撃、衝突挙動にどう影響するかを調べた。

仮想ラケット TSL#274g は、市販の最軽量ラケット TSL に質量50gをラケット全長の根元から80%の位置に付加したラケットである。ラケット TSL#274g と重心位置を等しくしたラケットを TSL#DIST-L<sub>G</sub>、ラケット重心位置周りの慣性モーメントを等しくしたラケットを TSL#DIST-I<sub>G</sub>、

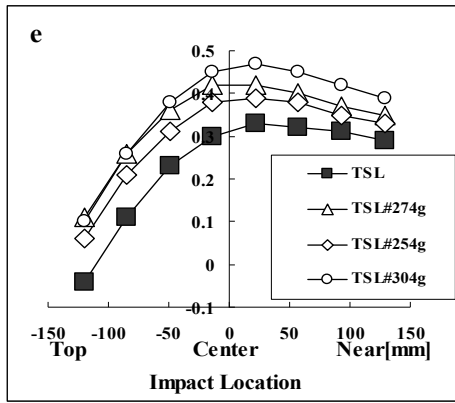


Fig.5 Rebound power coefficient  $e$  when a ball strikes the various locations on the string face ( $V_{BO} = 10$ [m/s],  $N_s = 56.9$  [N·m])

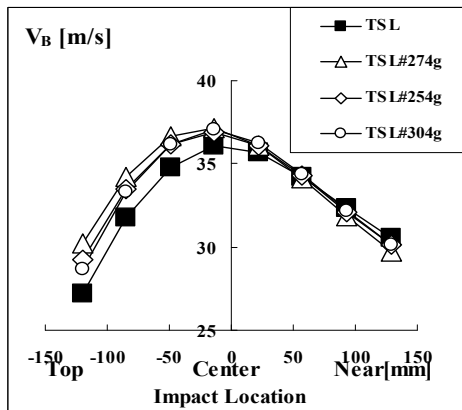


Fig.6 Post-impact ball velocity  $V_B$  when a ball is struck at the various locations on the string face ( $V_{BO} = 10$ [m/s],  $N_s = 56.9$  [N·m])

ラケットのグリップ位置（グリップ端から70mm）周りの慣性モーメントを等しくしたラケットを TSL#DIST- $I_{GG}$  と呼ぶ。ラケット TSL#DIST- $L_G$  と TSL#DIST- $I_{GG}$  が、TSL#DIST- $I_G$  に比べて、TSL#274g に近くて物理特性の差が小さい。表2は、ラケット TSL#DIST- $L_G$  と TSL#274g の物理特性の比較であり、図7、図8、図9は、それぞれ反発力係数  $e$ 、打球速度  $V_B$ 、および衝突位置 0.90L（ラケット面最先端）での衝突におけるラケットの時系列挙動（横倍率を縦倍率の3倍で表示している）の比較をそれぞれ示す。両者は、根元側打撃において多少の差が見られるが、重視されるラケット面中心から先端側ではほとんど差がない。

#### 4. ラケットの操作性と反発性のバランス設計とバランス（重心位置）

図10は、最軽量ラケット TSL(224g、ストリング含む) をベースにして最適な質量配分によりラケット面中心打撃で最大の打球速度  $V_B$  を示すラケットの質量（224g~324g の範囲で10g 違い）と重心位置との関係を示す。質量 224g は TSL である。最適に質量配分したラケットは、264g~324g の範囲で打球速度が最大値を示して飽和し、そのときの重心位置は全長のほぼ60%に収束する。

ラケットの反発性とラケットヘッド速度のバランスが重心位置（バランスと呼ばれる）と直接的に関連している可能性をさらに調べるために、TSL を含めて従来型バランスから最近の軽量ラケット（EX-2, EOS100, TSL, IS-10）までの4種の市販ラケットをベースにしてパワー性能向上を試みた。表3にラケット4種の物理特性を示す。

Table 2 Physical properties of virtual rackets.

Racket name	TSL#274g	TSL#DIST- $L_G$
Length	710 mm	710 mm
Mass	274 g	274 g
Center of gravity: $L_G$	413 mm	413 mm
Inertial moment of racket about the gravity center: $I_G$	10.2 gm <sup>2</sup>	9.1 gm <sup>2</sup>
Inertial moment of racket about the grip: $I_{GG}$	42.6 gm <sup>2</sup>	41.3 gm <sup>2</sup>
Inertial moment of racket about the shoulder joint: $I_{RS}$	167 gm <sup>2</sup>	165 gm <sup>2</sup>
Inertial moment of arm-racket system about the shoulder joint: $I_s$	252 gm <sup>2</sup>	250 gm <sup>2</sup>

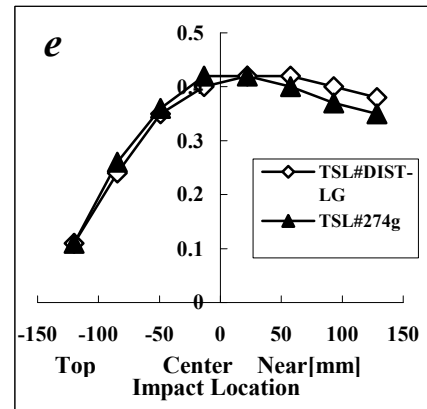


Fig.7 Rebound power coefficient  $e$  when a ball strikes the various locations on the string face of TSL#DIST- $L_G$  and TSL#274g ( $V_{BO} = 10$ [m/s],  $N_s = 56.9$  [N·m])

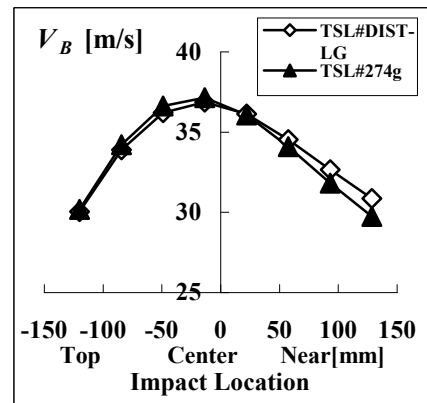
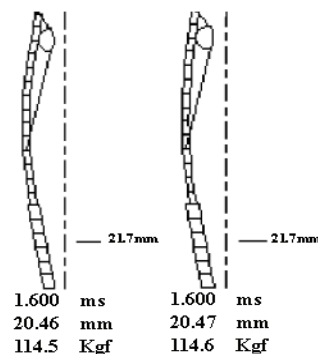


Fig.8 Post-impact ball velocity  $V_B$  when a ball is struck at the various locations on the string face of TSL#DIST- $L_G$  and TSL#274g ( $V_{BO} = 10$ [m/s],  $N_s = 56.9$  [N·m])



(a) TSL#274g (b) TSL#274DIST- $L_G$   
Fig.9 Example of time historical impact behavior



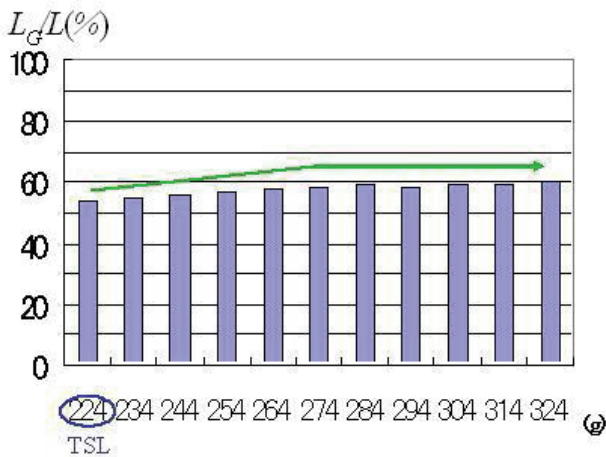


Fig.10 Gravity center location vs. racket mass with maximum power

Table 3 Physical properties of representative four rackets

Racket name	EX-2	EOS100	TSL	IS-10
	Conv.	Super light	Super light	Intelli fiber
Length	680mm	680mm	710mm	700mm
Mass	360g	290g	224g	241g
Center of gravity	308mm	350mm	379mm	382mm
$I_G$	13.1gm <sup>2</sup>	11.4gm <sup>2</sup>	11.0gm <sup>2</sup>	11.2gm <sup>2</sup>
$I_{GG}$	33.5gm <sup>2</sup>	34.1gm <sup>2</sup>	32.4gm <sup>2</sup>	36.7gm <sup>2</sup>
$I_{RS}$	167gm <sup>2</sup>	150gm <sup>2</sup>	135gm <sup>2</sup>	125gm <sup>2</sup>
$I_s$	252gm <sup>2</sup>	235gm <sup>2</sup>	220gm <sup>2</sup>	210gm <sup>2</sup>
Frame stiffness	125Nm <sup>2</sup>	213Nm <sup>2</sup>	232Nm <sup>2</sup>	280Nm <sup>2</sup>
Handle stiffness	190Nm <sup>2</sup>	184Nm <sup>2</sup>	163Nm <sup>2</sup>	172Nm <sup>2</sup>
Frame mass distribution	0.46kg/m	0.44kg/m	0.35kg/m	0.39kg/m
Handle mass distribution	0.70kg/m	0.35 kg/m	0.24kg/m	0.24kg/m

図11はラケットIS-10に40g付加したラケットIS-10+40g (IS-10#281g) の質量付加位置とボールの打球速度の関係を示す。グラフ横の凡例は図3の要素1~10に付加することを示す。横軸は打撃位置(グリップ端からの距離)  $L_1/L$  であり、 $L_1/L=0.75$  はラケット面中心である。

図12は、代表的なグラウンド・ストローク・モデル ( $V_{BO} = 10$  m/s,  $N_s = 56.9$  N·m)により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各ラケットの重量に対するインパクト直前のラケット・ヘッド速度  $V_{RO}$  を示す。ラケット質量264g~370gの間では質量の増加に対してほぼ一様に低減している。

一方、図13は、この場合のラケットの反発力係数  $e$  (ラケットが静止していると見なしたときのボールの跳ね返り速度と入射速度との比) を示す。ラケット質量264g~321gの間では質量の増加に対してほぼ一様に増加している。

図14は、図12と図13から決まる打球速度  $V_B$ 、すなわち、ラケットの操作性と反発性の両者のバランス設計による仮想ラケットのグラウンドストロークにおける最大のパワーと重量の関係を示す。質量264g~321gの範囲のラケットが最大のパワーを示している。

図15は、上記のラケット、すなわち、グラウンド・ストローク・モデルにより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

量配分した各ラケットの重心位置(グリップ端からの距離、カタログではバランスと呼ばれる)とラケット重量の関係を示す。横軸において丸で囲んで名称を示しているのは性能改善のベースにした市販ラケットの質量である。最大のパワーを示す質量264g~321gの範囲の仮想ラケットの重心位置は全長のほぼ60%の値を示す。反発性  $e$  とラケット・ヘッド速度  $V_{RO}$  (操作性を表す) は相反する性質(トレードオフ)をもつ。最近のほとんどのラケット重量をカバーする質量264g~321gの範囲において、ラケット全長の60%という重心位置は、反発性と操作性のバランスを意味することになる。

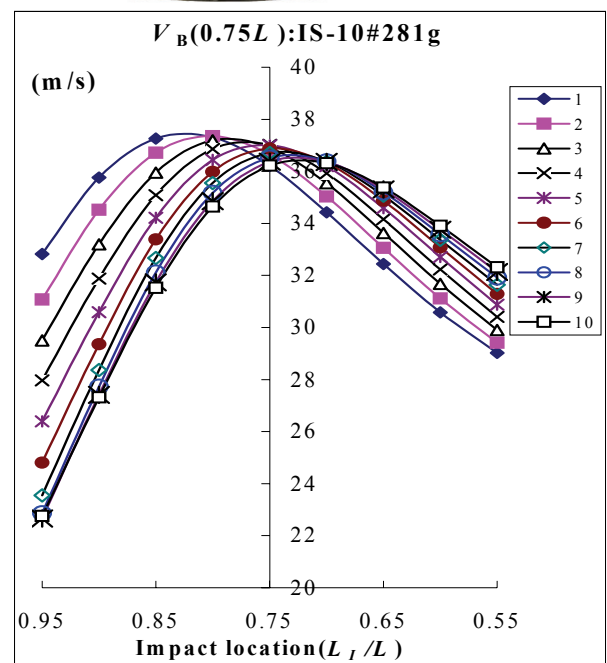


Fig.11 Post-impact ball velocity  $V_B$  when a ball is struck at the various locations on the string face with attached mass of 40 g at various locations ( $V_{BO} = 10$  [m/s],  $N_s = 56.9$  [N·m])

図16は、グラウンド・ストローク・モデルによりラケット面中心でボールを打撃したときにグリップ衝撃力(ラケット・グリップ端から70mmの位置を手の握りの中心と見なしている)  $(12) \cdot (17)$  を最小にするように最適重量配分した各ラケットの重心位置(グリップ端からの距離、カタログではバランスと呼ばれる)とラケット重量の関係を示す。横軸において丸で囲んで名称を示しているのは性能改善のベースにした市販ラケットの質量であり、最小のグリップ衝撃力を示す質量264g~321gの範囲の仮想ラケットの重心位置は全長のほぼ60%の値を示し、パワー最大の場合の重心位置とはほぼ一致している。

図17は、最軽量ラケット(224g)に10gずつ質量を付加してラケット面中心で打撃したときにパワーが最大になるように重量配分設計した仮想ラケットの基本振動モードを示す。ラケット面中心は0.73L、ラケット・ハンドル上の手の中心は0.10Lに相当する。ラケット面上の節の位置は294gまでは面中心に近づき、ハンドル上の節の位置は質量が増すほど手の握りの中心位置に近づくので、手に伝わる振動も低減できる可能性がある。

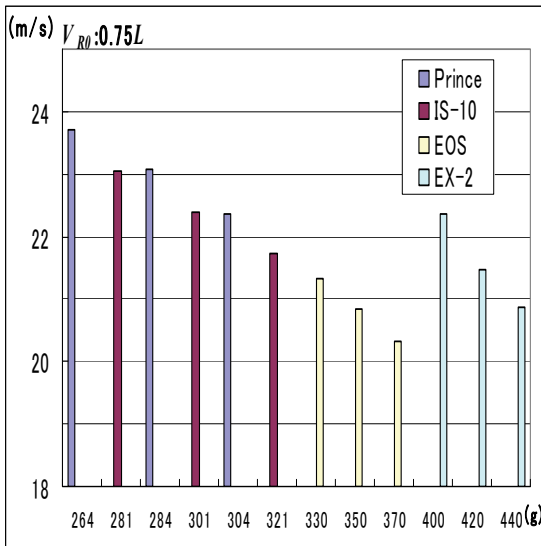


Fig.12 Racket head velocity  $V_{R0}$  at the center of racket face of various weighted rackets ( $V_{BO}=10$ [m/s],  $N_s = 56.9$  [N·m]).

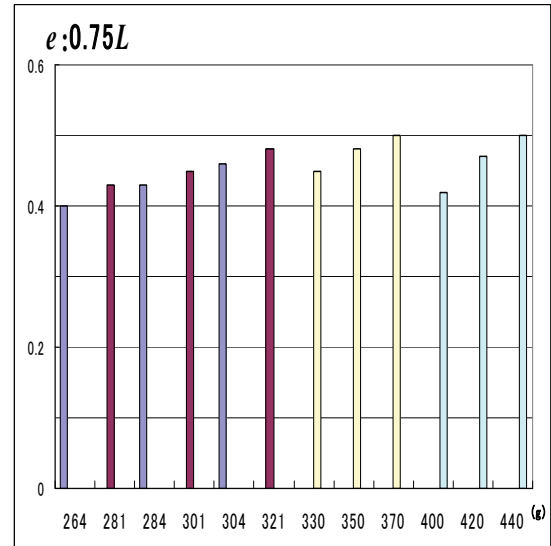


Fig.13 Rebound power coefficient  $e$  when a ball strikes the center on the string face of various weighted rackets ( $V_{BO}=10$ [m/s],  $N_s = 56.9$  [N·m]).

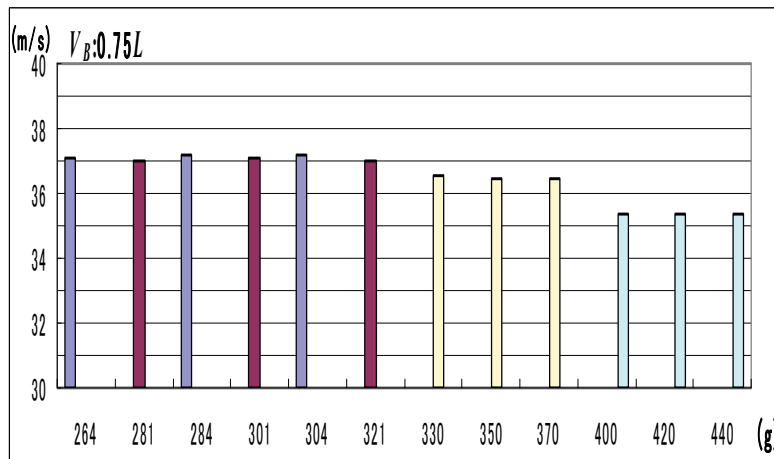


Fig.14 Post-impact ball velocity  $V_B$  when a ball is struck at the center on the string face of various weighted rackets ( $V_{BO}=10$ [m/s],  $N_s = 56.9$  [N·m]).

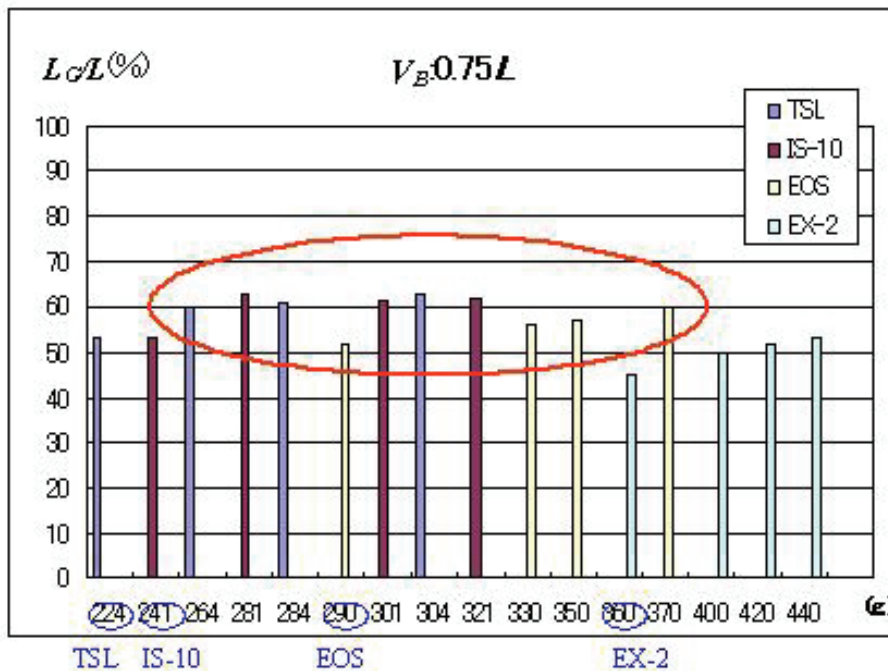


Fig.15 Location of gravity center of various weighted rackets with maximum post-impact ball velocity  $V_B$  compared to the original racket when a ball is struck at the center on the string face ( $V_{BO}=10$ [m/s],  $N_s = 56.9$  [N·m]).

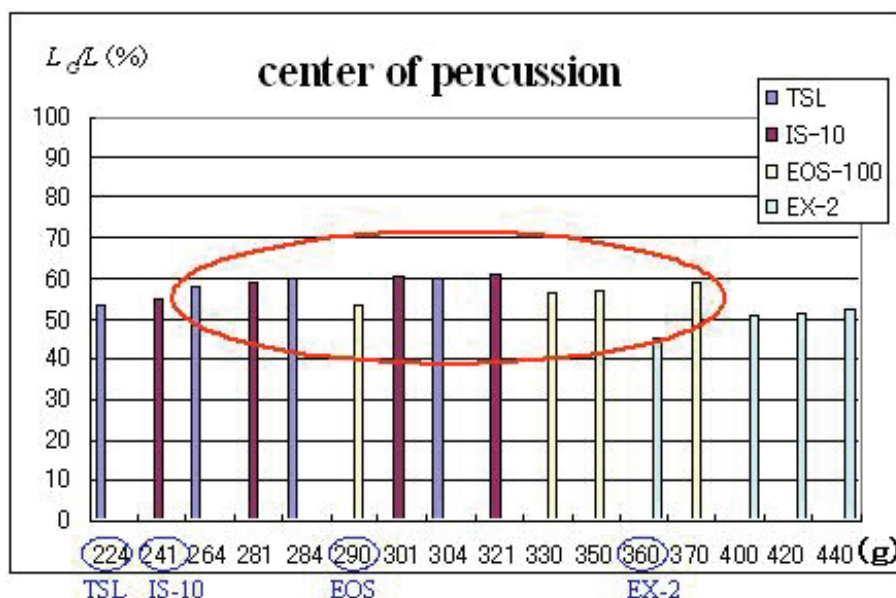


Fig.16 Location of gravity center of various weighted rackets with minimum shock force at the grip compared to the original racket when a ball is struck at the center on the string face ( $V_{Bo}=10[m/s]$ ,  $N_s=56.9 [N \cdot m]$ ).

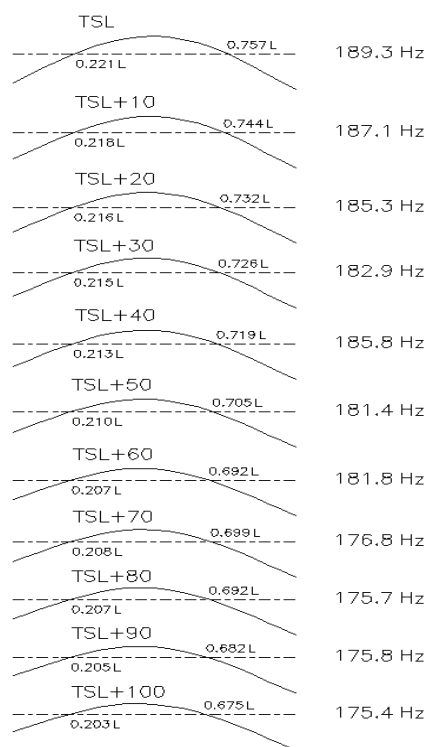


Fig.17 Fundamental vibration mode of various weighted rackets with maximum post-impact ball velocity  $V_B$  when a ball is struck at the center on the string face compared to the original racket .

## 5. 結論

グランド・ストローク・モデルによりラケット面中心でボールを打撃したときに最大のパワーを示す最良のバランスのラケットは、最近のほとんどのラケット重量をカバーする 264g~ 321g の範囲で重心位置 (バランスとよばれる) が全長のほぼ 60 % であった。

グリップ衝撃を抑えてパワー (打球速度) を向上するラケット重量配分設計法を示したが、ラケットを現実化する場合には振動低減のほか材料や強度の問題を検討する必要がある。市販の最軽量に近い超軽量ラケットのグリップ部は重量を限界

近くまで落としているように見えるから、材料が変わらない限り強度的に大きな変更・改善が難しいこともありうる。これらについては詳細な検討が必要であり、別報にて述べてい。

おわりに、計算・図表作成にご助力頂いた卒研 2002 年度 黒崎泰広、2003 年度 高橋良平・芦沢一貴、2004 年度 棚沢昌弘・榎本宏の諸君に深謝する。本研究は、科学研究費基盤研究(B)および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, Dynamics & Design Conference 2002, 講論集 No.02-9, CD-ROM 版, (2002.9) , pp.1-6.
- (2) 川副嘉彦, バイオメカニクス研究, 7-2, (2003), pp.136-151.
- (3) 川副嘉彦, 機論, 第 59 卷 562 号 C 編(1993), pp.1678-1685.
- (4) 川副嘉彦, 機論, 第 61 卷 584 号 C 編(1995)pp.1300-1307.
- (5) 川副嘉彦・友末亮三, 機論, 64-623 号 C 編 (1998) , pp.2382-2388.
- (6) KAWAZOE, Y., *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.51, (2002), pp.177-187.
- (7) Y. Kawazoe, *The engineering of Sport 5*, Vol.2, pp.633- 640. ISEA, (2004)
- (8) Kawazoe, Y. and Kanda, Y., *JSME International Journal, Series C*, 40-1, (1997), pp.9-16.
- (9) 川副嘉彦・神田芳文, 機論, 第 59 卷 563 号 C 編 (1993) , pp.2116-2123.
- (10) 川副嘉彦・神田芳文, 機論, 第 59 卷 566 号 C 編 (1993) , pp.3108-3115.
- (11) 川副嘉彦・神田芳文, ショイント・シンポジウム 2000 (スポーツ工学シンポジウム) 講論集, No.00-38, (2000), pp.115-119.
- (12) 川副嘉彦・友末亮三, 機論, 第 59 卷 560 号 C 編 (1993) , pp.1001-1008.
- (13) 川副嘉彦, 機論, 日本機械学会論文集, 第 61 卷 584 号 C 編 (1995) pp.1300-1307.
- (14) KAWAZOE, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.49, (2000), pp.11-19.
- (15) Kawazoe, Y., Tanahashi, R. and Casolo, F., *Tennis Science & Technology 2* , pp.61-69. (2003). ITF.
- (16) Kawazoe, Y., Tomosue, R., Yoshinari, K. and Casolo, F., pp.105-112. (2003). ITF.
- (17) Y. Kawazoe, F. Casolo, R. Tomosue & K. Yoshinari, *The engineering of Sport 5*, Vol.1, pp.393-399. ISEA, (2004).