

U00068

市販テニスラケットの軽量化による性能向上と限界
(これらの限界を克服するために新しく設計された種々のモデルの
反発特性と打球速度の検証)

Performance Improvements and Limitations due to the Lightweighting of Tennis Rackets
(Verification of Rebound Characteristics and Ball Speed in Newly Designed Models
to Overcome These Limitations)

○正 川副 嘉彦^{*1}Yoshihiko KAWAZOE^{*1}^{*1} 川副研究室 Kawazoe Laboratory

The enlargement of racket faces and the reduction in racket weight have made topspin techniques more common, drawing increased attention to racket types and their performance. However, this trend has also revealed the limitations of further weight reduction. To address these challenges, new rackets featuring innovative designs aimed at overcoming the constraints of lightness were introduced to the market. While many of these rackets emphasized high performance, they have since disappeared from shelves. This study examined racket performance by analyzing the experimentally identified physical properties of various racket models and conducting collision simulations. The findings indicate that racket weight and weight distribution are the most critical design factors.

Key Words : Tennis Racket, Impact, Top spin, Racket face, Lightening of racket, Coefficient of rebound power, Ball speed, Performance design of racket, Racket weight and weight distribution.

1. 緒 言

テニスラケットの打球面の大型化と軽量化により、トップスピン打法が一般的になり、ラケットの種類と性能に関心が集まる一方で、軽量化の性能限界も明らかになってきた。一方、軽量化の性能限界を克服するための新しい発想や試みを取り入れたラケットが高性能を強調して次々と市販されたが、その多くが市場から姿を消していった。テニスは体験により修得するものであるために主観的なものである。ラケットが実際のプレーにどのように影響するかを客観的に評価することは難しい。用具の微妙な変化がパフォーマンスに大きく影響するためである。(1)-(6)

本研究では、実験的に同定したラケットとボールの物理特性および衝突シミュレーションに基づいて、これらの革新的なデザインの種々のラケットの反発性能と打球速度（ボールの飛び）を吟味し、様々な発想や試みがあっても、ラケットの重量と重量配分が最も重要な設計要素であることを示す。

2. スtringの打撃用具としての性能と弦楽器的性能⁽⁷⁾⁻⁽¹⁶⁾

図1は、(a)ボールおよび(b)ボール・ストリングス複合系の復原力・変形特性の実測例である。たわみ量 X に対するストリング、ボール、およびボール・ストリングス複合系の等価ばね剛性 (K_G は一般に面圧と呼ばれる) は、変形量の増大にともなって強い非線形の硬化ばね特性を示す。硬い壁にボールをぶつけたときのボールと壁の反発係数実測値は、入射速度が増すほど、ボールの変形（つぶれ）によるエネルギー・ロスの割合が大きくなり、反発係数が下がっていく。一方、図2は、ラケットヘッドを固定して、ストリング面にボールをぶつけたときの（ボールとストリングスの）反発係数実測値 e_{BG} である。鉄のボールをストリングスに衝突させたときの反発係数は 100 % に近く（反発係数は 0.97）、ストリングスの優れた弾性によって、ボールとストリング面の反

発係数は衝突速度が増大しても大きくは低下しないで、0.8 程度であり、これが楽にボールを打つことができる理由である。テンションと呼ばれる初張力の有用範囲は 45 [lbs]~65 [lbs] であり、反発係数におよぼすテンションの影響はほとんどない。「面圧」と呼ばれるストリングスの「たわみ剛性（面バネ剛性）」は、たわみ量の増大、すなわち、衝突速度が増すほど高くなる。

図 3 に、打撃用具の性能に直結する「インパクトにおけるテンション」と弦楽器的性能（打感）に関する「張り上がりテンション」のメカニズムを示す。ラケットにストリングを張るときのテンション（張り上げテンション）の違いは、インパクトでの反発力（ボールを弾く復原力）にはほとんど影響しない。影響するのは衝突速度 10 [m/s] 以下の非実用範囲である。「インパクトにおけるテンション」がボールを跳ね返す復原力になるので、プレーにおいて重要なのは「インパクトにおけるテンション」である。ボールとラケットヘッドの衝突速度が大きいほど、ボールの変形（つぶれ）とストリング面のたわみ量も大きく、したがってストリング・テンション、ボールを跳ね返す復原力も大きく、ボールの反発速度も大きいことになる。弓を強く引くほど、弦のテンションは大きく、矢を飛ばす復原力も大きく、矢の飛び出す速度も大きいことと同じ原理である。インパクトにおけるボールとストリング面の接触時間は 3 ~ 4 ms, ボールと接触しながらラケット面が移動する距離は 4 ~ 5 cm であり、インパクトはプレーヤーが感知できない一瞬であり、インパクト後の残留振動と音が打感（弦楽器的な性能）として残る。ストリングを緩く張るとボールの飛びが良く、硬く張るとボールの飛びが悪いというプロのストリンガーなど専門家による説明が多く見られるが、これはインパクト後の弦楽器的性能ともいえるべき感覚的な打感であろう。

図 4 は、オンコートでのストリング・テンション（張り上がり）とボールの飛び（打球速度）の関係についてのトラックマンによる測定値である。フォアハンド（フラット）、バックハンド（フラット）、サーブ（フラット）それぞれについて、40 ポンド、50 ポンド、60 ポンドの場合の平均値の測定結果をグラフにして比較したものである。張り上げテンションの違いがあっても打球速度には違いがないことを示している。トラックマンの測定精度については学術研究においても実証されており⁽⁶⁾、現場で簡単に精度の良い測定ができれば、世の中の常識と学術的研究との乖離の改善が期待できそうである。

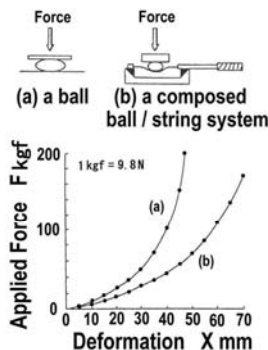
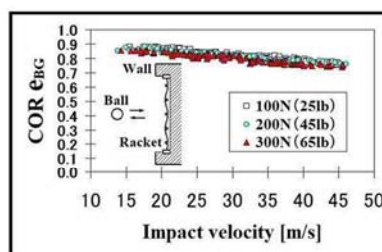
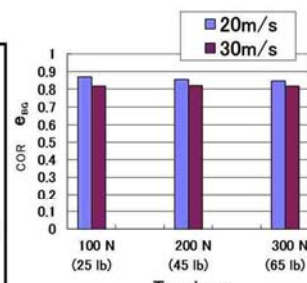


Fig. 1 Applied force- deformation test



(a) Measured COR



(b) Average

Fig. 2 Measured coefficient of restitution between a ball and strings vs. impact velocity showing the effect of string tensions

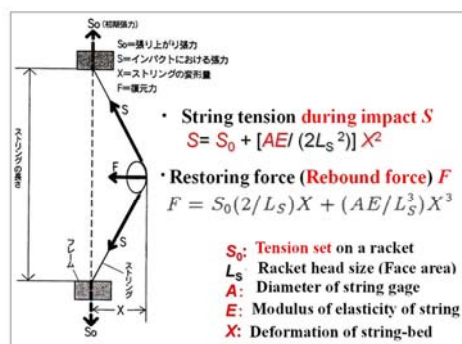
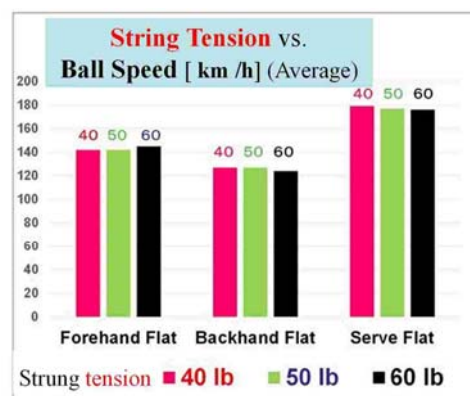


Fig. 3 Deformation, tension, restoring force during impact.



Measurement: Trackman Test Racket TV edited by Kawazoe

Fig. 3 Deformation, tension, restoring force during impact. Fig. 4 String tension vs ball speed measured by TRACKMAN

3. テニスラケットの性能予測・評価システム

ボール・ストリングス系の非線形復原力特性は、圧縮試験における荷重－変位特性実測値から同定する。

衝突におけるボールとストリングスのエネルギー損失は、ラケット・ヘッド固定でボールをストリングスに衝突させたときの反発係数実測値 e_{BG} を用いて求める。剛体特性は、重心まわり慣性モーメントと長手方向軸まわり慣性モーメントを実験的に算出し、打点に換算したラケット・腕系の換算質量 M_r として同定する。ラケットの振動特性は実験モード解析に基づいて同定し、線形性を仮定すれば、任意の打点 i に単位衝撃力が作用したときの応答点 j の k 次振動モード成分 r_{ijk} が求まる。ラケットの各打点に換算した換算質量 M_r を導入し、衝突速度に依存するボール・ストリングス複合系の等価ばね K_{GB} と 1 自由度振動モデルを図 5 のように仮定すると、フレーム振動を無視したときの衝突の力積波形が式(1) のように数値計算により得られる。ただし、時間を t 、衝突力の最大値を F_{MAX} 、接触時間を T_c とする。

$$F(t) = F_{MAX} \sin(\pi t / T_c) \quad (0 \leq t \leq T_c) \quad (1)$$

式(1)のフーリエ・スペクトルを $S(f)$ (f : 振動数 Hz) とすると、ラケット面上の点 j における衝突によるラケット上の点 i における k 次モードの応答振幅成分 (固有振動数 f_k) X_{ijk} は、以下のように近似できる。

$$X_{ijk} = r_{ijk} * S_j(f_k) \quad (2)$$

ボールとストリング面は 4 つのストリング交差点で接触するとし、式(2)から得られるフレーム振動の速度振幅分布とフレーム質量分布から、フレーム振動によるエネルギー損失 E_f が求まり、ボールとストリングスのエネルギー損失 E_s との和からボールとラケットの反発係数分布 e_r が求まる。反発係数 e_r を用いると衝突諸量が求まる。

図 6 は、フォアハンド・ストロークを想定したスイング・モデルである。手首と肘の関節角度を一定に保って肩関節だけに一定の回転トルク N_s を与え、腕・ラケット系が肩関節まわりに $\pi/2$ 回転したところでボールとラケットが衝突する。図 7 に、ラケットのパワー (反発速度、打球速度) に関連する性能予測・評価システムの流れを示す。図 8 は、グリップ自由の (手の支えない) ラケットにボールを衝突させたときの各打点の反発力係数 (実測値とシミュレーション計算値) を示す。宙ぶりの静止ラケット (ヘッド速度) にボールを衝突させたときのボールの跳ね返り速度と入射速度の比 e の実測値と予測値である。この比 e の実測値が、メーカーなどではラケットの反発性能の評価によく使われる。横軸はストリング面上の衝突位置である。この係数 e は、衝突位置における反発係数 e_r 、ラケットの換算質量 M_r 、およびボールの質量 m により決まり、比 e の値が大きいほどボールの跳ね返りの良さ、あるいはラケットのはじきの良さを表す。これを反発係数 e_r と区別して「反発力係数」 e と定義している。

「反発力がある」と「反発係数が高い」という表現が混同して使われることが多く、「反発係数」が高いから「反発力がある」という説明がなされることが多いが、「反発力がある」と「反発係数が高い」とは直接対応するものではない。

非常に軽い厚ラケのように、反発係数が高くても、ボールの跳ね返りの悪いラケットもある。反発力 (係数)

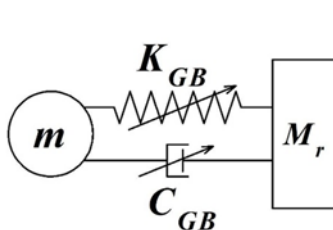


Fig. 5 Non-linear Impact model of a ball-string bed system.

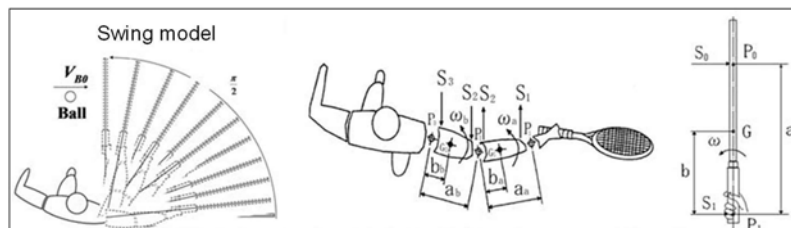


Fig. 6 Player's forehand stroke swing model for the prediction of racket power

が高いラケットというのは、速く振らなくてもボールが良く跳ね返るという意味である。カウンター攻撃が得意なスイング速度が遅いプレーヤーにとって、あるいは時間的余裕のないボレーのときには、この反発性能が打球の速さに直接に影響することになる。

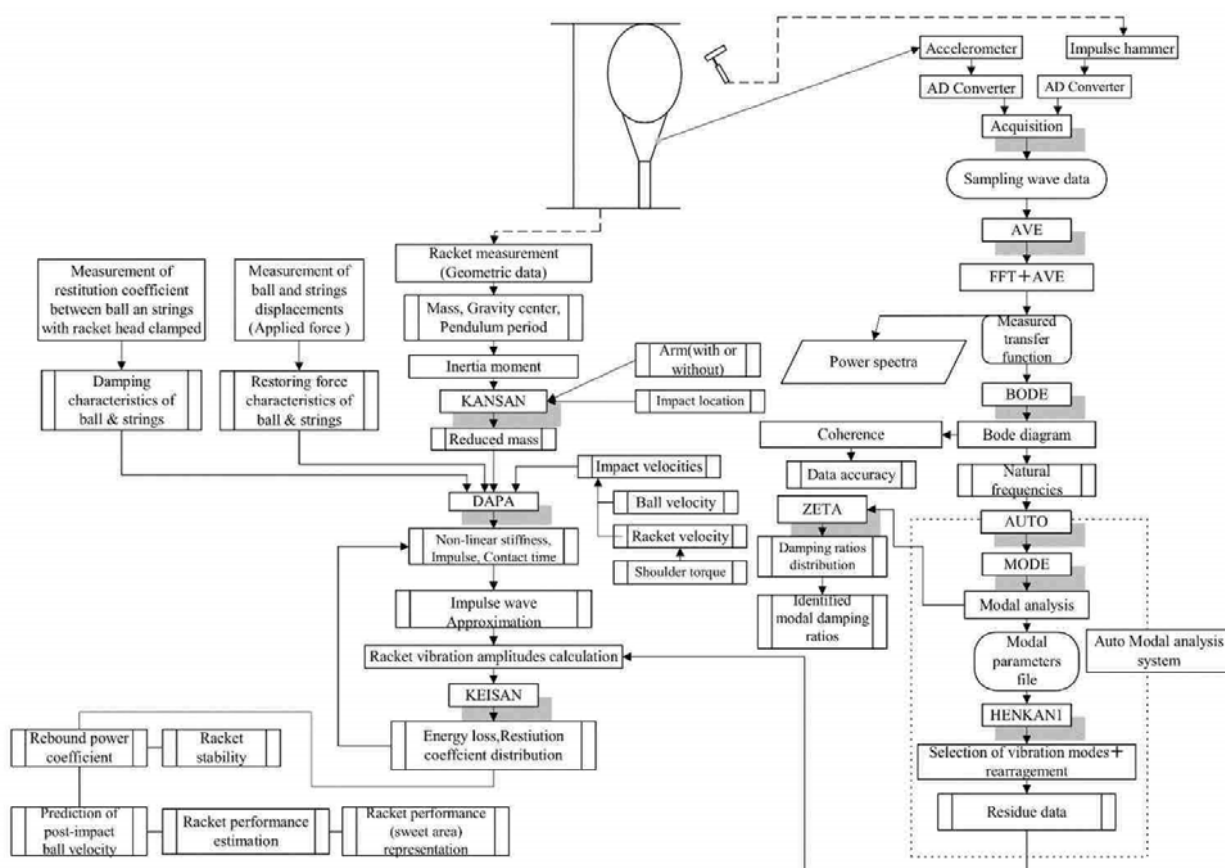


Fig. 7 Computer aided prediction and estimation system for tennis racket performance in terms of power.

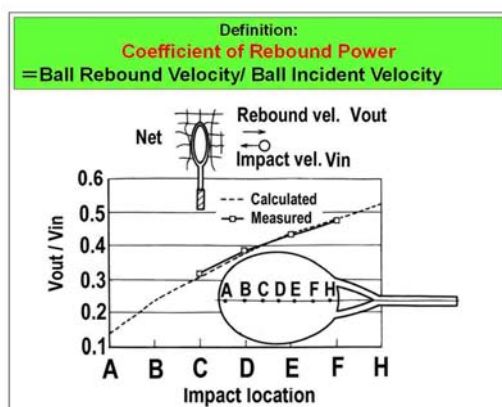


Fig. 8 Definition of coefficient of rebound power
: Ball Rebound Velocity / Ball Incident Velocity

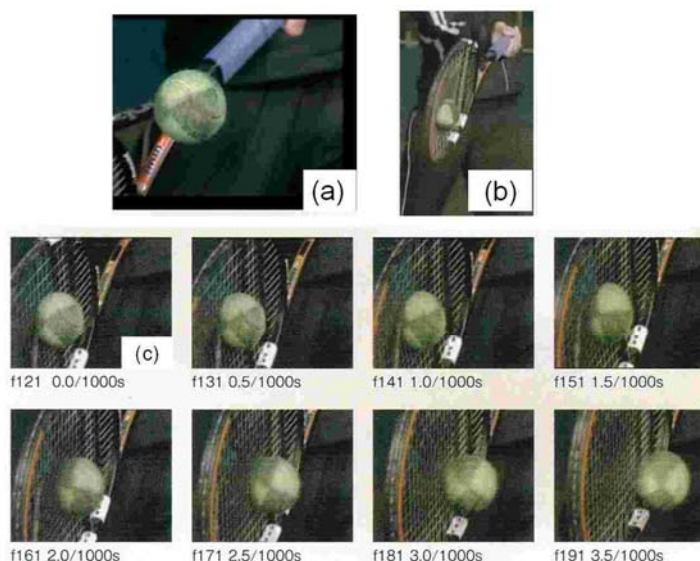


Fig. 9 The impact behavior between the racket and ball in tennis topspin shots
(ball speed and spin generation)

4. スピンのメカニズムとスピン性能⁽¹⁷⁾⁻⁽²⁰⁾

スピンのメカニズムは謎であったが、高速ビデオ画像解析技術の進歩によって明らかになってきた（図9）。ストリングの摩擦が大きいほどスピンがかかるというのが従来の仮説であったが、実際は反対に、摩擦が小さいほど縦糸と横糸が互いに滑って縦糸が横にずれるので、ボールがストリングに食いつきやすく、また横に伸びた縦糸が元に戻るときの復原力によりスピンのかかりやすさが明らかになった。

トップスピン打撃における高速ビデオ画像解析結果によると、ストリングを張ってから1週間ほど毎日3時間使用したラケットの場合、新品のストリングと比べるとスピン量は平均40%低減するという報告がある。縦糸と横糸の交差点にノッチ（溝）ができて滑りにくくなるからである。ノッチのできたストリングでも潤滑剤（国際特許）を塗るとスピン量は平均30%回復し、接触時間は平均16%長くなる。スピンの回復によって、打球速度は平均6%低減する。スピン量が多いとインパクトによる直接的な衝撃力も低減し、接触時間が長くなり、ラケットや手に伝わる衝撃振動も低減する。表面摩擦の大きいスピン・ガットと呼ばれるナイロン系より、摩擦が少ないポリエステルのようなストリングの方が、スピンがかかりやすく、すでに20年前から、世界のテニスは、ナイロン系に代わって硬くてツルツルのポリエステル系が主流になっており、現在、世界のトップ100位以内の選手は、すべてポリエステル・ストリング（ハイブリッドも含めて）を使用しているという報告もある。打撃用具としてのポリエステルの性能は、天然ガットを凌駕している。

図9は、トップ・スピン打撃におけるボールとの接触、ボールのつぶれ、ボールが飛び出す瞬間を示しており、

(1) ボールとの接触、(2) ボールがつぶれた状態（接触してから0.0025秒後）、(3) ボールが飛び出した瞬間（接触してから0.0035秒後）、(4) ラケットの移動距離は4～5センチ、(5) 衝突速度が大きいほど、つぶれ量が大きいほど、ボールはストリング面から短い時間（接触時間）で飛び出すこと、などが画像解析からわかる。

ボールのつぶれ量とストリング面のたわみ量が大きいほど、接触時間が短くなる理由は、ボールとストリング面のバネ剛性（硬さ：面圧と称しているもの：ただし、インパクト時）が大きくなるからである。

5. 市販テニスラケットの軽量化による性能向上と限界

ストリングを張った状態でのラケットの質量は、木製の時代は370g～400g、複合材ラケットの初期の頃は360gから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。最も軽い市販ラケットは220g（フレーム質量は205g）に達した。

ラケット・腕系とボールの実験的同定とフォアハンド・グランドストローク・スイングモデルに基づいて、最軽量ラケットのボールの飛びに関連する性能（反発係数、反発性、ラケット・ヘッド速度、打球速度）および打球感に関連する性能を予測し、フェース面積がほぼ同じで、質量が大きい従来型ラケットと代表的な軽量型ラケットの2種類のラケットについて、性能予測結果を比較してみた。

表1は、現時点での最軽量ラケット Prince-TSL、平均的な超軽量ラケット EOS-120A および従来型重量

Table.1 Physical properties

Racket	TSL	EOS120A	EOS120H
Total length	710 mm	690 mm	685 mm
Face area	742 cm ²	760 cm ²	760 cm ²
Mass	224 g	292 g	349 g
Center of gravity from grip end	379 mm	363 mm	323 mm
Moment of inertia I_{GR} about grip	32.4 gm ²	39.0 gm ²	38.0 gm ²
Moment of inertia I_{GY} about Y axis	11.0 gm ²	14.0 gm ²	16.0 gm ²
Moment of inertia I_{GX} about X axis	1.21 gm ²	1.78 gm ²	2.21 gm ²
1st frequency	200 Hz	137 Hz	142 Hz
Strings tension	55 lb	79 lb	79 lb
Reduced mass (center)	150 g	210 g	210 g

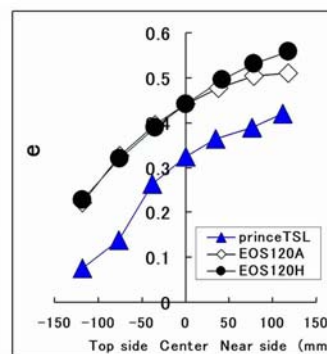


Fig. 10 Predicted rebound power coefficient.

バランス・ラケット EOS-120H の物理特性を示す。表中のラケット質量はストリングを含む。慣性モーメント I_{GX} はグリップ周り（カタログのスイング・ウェイトに対応）、 I_{GY} は縦の中心線（長手方向軸）まわりの値である。最軽量ラケット Prince TSL (224 g) は、ラケット EOS-120A (292 g)、ラケット EOS-120H (349 g) と較べて、ヘッド速度が速いものの、反発力係数 (図 10) が低いため、ヘッド速度の速さよりも反発力性能の低さが影響し、打球速度: V_B (図 11) は低下する結果となっている。しかもグリップ衝撃振動 (図 12) が非常に大きく、軽量化には限界があることを示している。この主要因は、最軽量ラケット Prince TSL の打点に換算した換算質量 150 g が、ラケット EOS-120A、ラケット EOS-120H と比較して、小さすぎることによる。

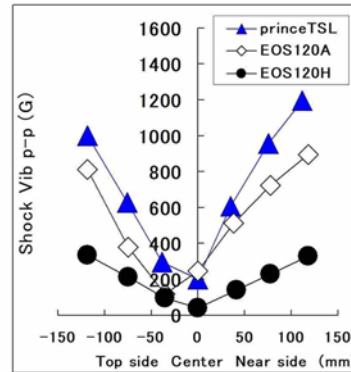
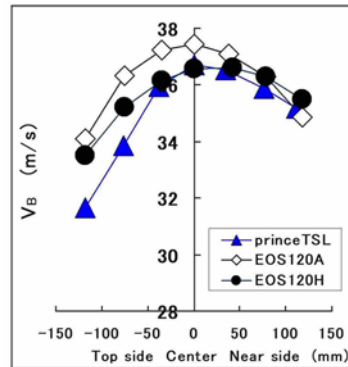


Fig. 11 Predicted post-impact ball velocity V_B . Fig. 12 Predicted shock vibration magnitude at the grip position of a freely suspended rackets.

6. スtringが滑らないフレーム・String・一体化構造と フレームにローラー(滑車)を取りつけてStringが滑る構造のラケット比較

Stringスのグロメット部でStringスを動きにくく（滑りにくく）したフレーム・String・一体化構造テニスラケットのパワーに関連する性能を衝突解析⁽³⁾⁽⁵⁾に基づいて予測し、逆の発想でStringス周りのフレームの横側にローラー(滑車)を取りつけてStringスが滑るラケットと比較を試みた。図 13 は、Stringスのグロメット部でStringスを動きにくく（滑りにくく）したフレーム・String・一体化構造のテニスラケットを示す。図 14 は、逆にStringス周りのフレームの横側にローラー(滑車)を取りつけてStringが滑るラケットを示す。表 2 に物理特性を示す。ラケット質量はStringスの質量を含み、 I_{GR} は握りの位

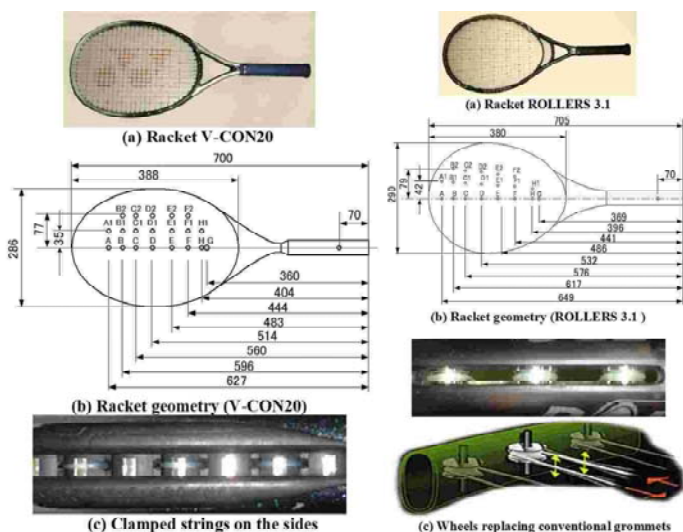


Fig. 13 Racket with clamped strings on the sides.

Fig. 14 Racket with wheels on the sides.

Table 2 Physical properties.

Racket	V-CON20	Rollers3.1
	Vibration Control	Rollers
Total length	700 mm	705 mm
Face area	755 cm ²	742 cm ²
Mass	275g	268 g
Center of gravity from grip end	360 mm	369 mm
Moment of inertia I_{GY} about Y axis	12.2 gm ²	13.2 gm ²
Moment of inertia I_{GR} about grip	35.3 gm ²	37.2 gm ²
Moment of inertia I_{GX} about X axis	2.049 gm ²	1.913 gm ²
1st frequency	170 Hz	205 Hz
Strings tension	55lb	58/53 lb
Reduced mass (center)	0.18 kg	0.17 kg

置（グリップ端から 70 mm）まわりの慣性モーメント， I_{GX} は長手方向軸まわりの慣性モーメントである。図 15 は，宙ぶり状態でのラケット面の打撃位置に換算したラケットの換算質量 M_r （横軸はラケット面中心から長手方向の距離）を示す。長手軸から外れたオフ・センター打撃点における換算質量も腕系を考慮した場合も同様に求まる⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。図 16 は，この場合のインパクト直前のラケット・ヘッド速度である。図 17 は，ラケット面中心から長手方向に外れた場合の反発力係数を示す。図 18 は，ラケット面中心から横に外れたオフセンタでの打球速度 V_B の例を示す。いずれの図においても，両者の値は近い。

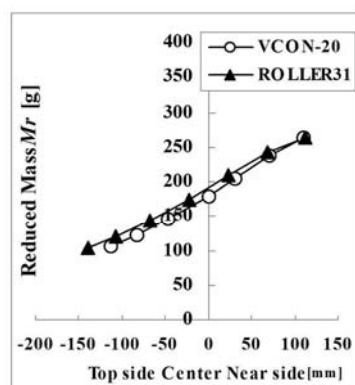


Fig. 15 Reduced mass.

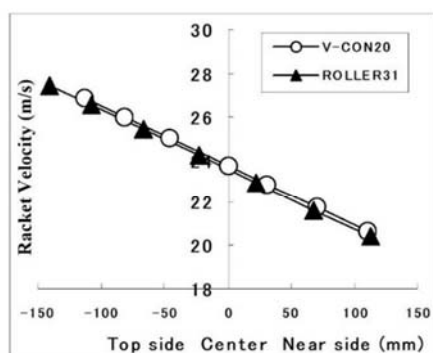


Fig. 16 Pre-impact head velocity.

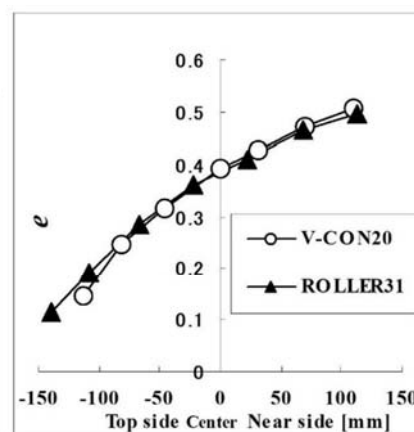
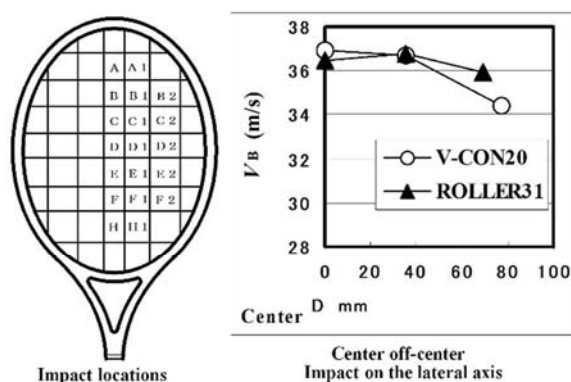
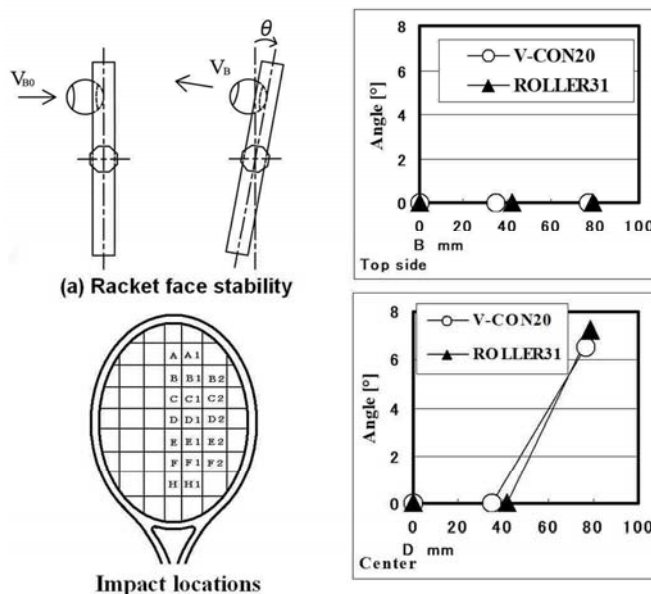
Fig. 17 Rebound power coefficient e
($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

図 19 は，ボールがストリング面に接触してから離れるまでにラケット面が傾く回転角の計算例⁽⁶⁾である。ラケット面の中心から根元側で面が傾きやすく，打球の方向がずれるという両者の結果も似ている。

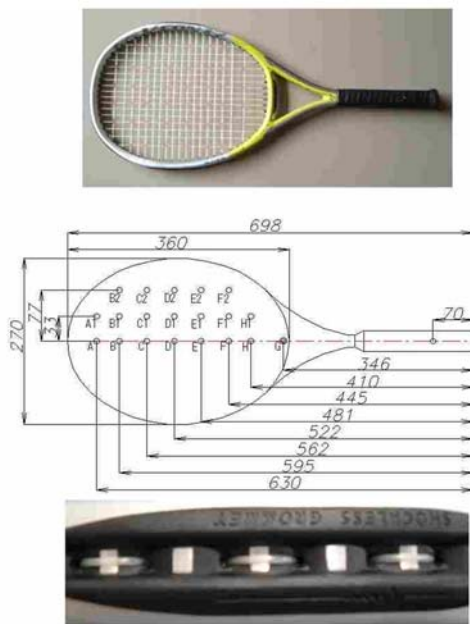
結果をまとめると，ストリングスを動きにくくしたフレーム・ストリング・一体化構造ラケットは，動きやすくしたローラー(滑車)付ラケットに比べて，反発力係数も打球速度もほとんど違いがなく，フレームのストリングス拘束条件はパワー性能にはほとんど影響しないことを示した。

Fig. 18 Predicted post-impact ball velocity V_B
($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)Fig. 19 Racket face rotation angle during ball contact
(around the longitudinal axis)

7. 基本固有振動数設計を意識したテニスラケットのパワー（反発力と打球速度）の検証

メーカー・カタログによると、バイブレーション・コントロール・シャフトを採用してフレームの快適な振動のみを伝えるという基本（一次）固有振動数設計を意識した2種類のラケット、すなわち V-CON 20 と V-CON 17 について、ラケットのパワーと手に伝わる衝撃振動に関する性能を実験的同定に基づく衝突解析^{(7)(12), (14), (15)}により求め、両者の違いを検証してみた。ここでは、ラケットの反発力係数と打球速度について述べる。

図 20 は、ラケット V-CON 17 の写真と打点位置を示す概略図である（V-CON 20 は 6 章参照）。表 3 に物理特性を示す。図 21 は、宙づりラケットの実験モード解析により同定した主要な固有振動数と振動モードであり、低い方からフレームの 2 節曲げ（1 次）、2 節ねじり、3 節曲げ、ストリングスの膜振動 1 次を示す。ラケット V-CON 20 の基本固有振動数は 176 Hz、V-CON 17 のそれは 161 Hz になっている。



Racket V-CON17 with 150 Hz

Fig. 20 Rackets with the design frequencies.

Table 3 Physical property

Racket	V-CON20	V-CON17
	Vibration Control	Vibration Control
Total length	700 mm	698 mm
Face area	755 cm ²	690 cm ²
Mass	275g	300g
Center of gravity from grip end	360 mm	346 mm
Moment of inertia I_{GY} about gravity center	12.2 gm ²	13.9 gm ²
Moment of inertia I_{GR} about grip	35.3 gm ²	36.7 gm ²
Moment of inertia I_{GX} about longitudinal	2.049 gm ²	1.537 gm ²
1st frequency	176 Hz	161 Hz
Strings tension	55lb	55lb
Reduced mass (center)	0.18 kg	0.18 kg

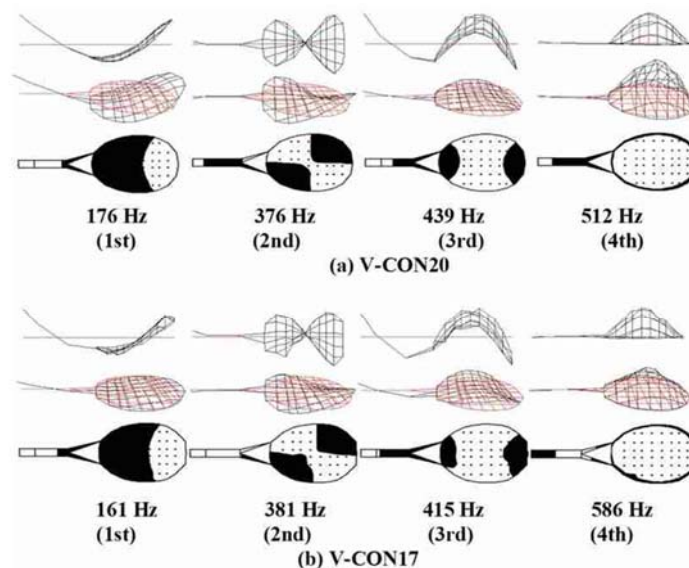


Fig. 21 Experimentally identified vibration modes.

図 22 は、ストリング面のボールを打つ位置の換算質量である。両者とも約 180 g であり、ほとんど同一である。図 23 は、競技者レベルのラリーを想定してインパクト直前のボール速度 $V_{BO} = 10 \text{ m/s}$ ，肩関節回転トルク $N_s = 56.9 \text{ Nm}$ を与えたグランド・ストロークの場合の反発係数 e_r の予測結果である。図 24 は、この場合のインパクト直前のラケット・ヘッド速度である。図 25 は、ラケット面中心から長手方向の反発力係数 e の分布を示す。図 26 は、ラケット面中心から長手方向に外れた場合のボールの飛び V_B の例を示す。

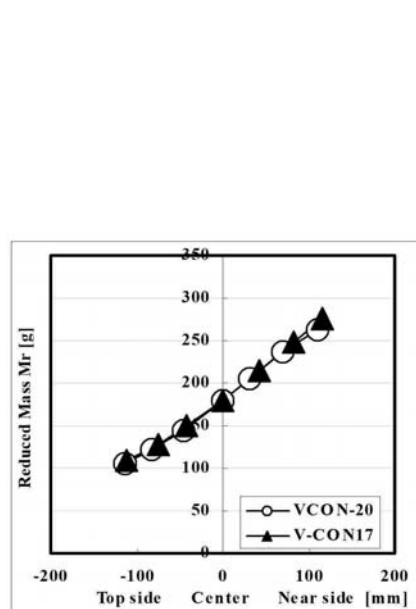


Fig. 22 Reduced mass at hitting locations of freely suspended racket

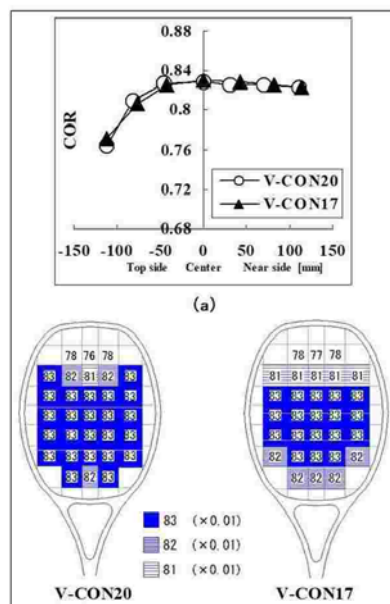


Fig. 23 Predicted Restitution coefficient e_r ($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{BO} = 10 \text{ m/s}$)

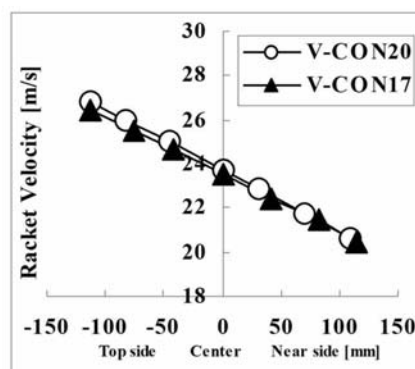


Fig. 24 Predicted Pre-impact racket head velocity V_{Ro} ($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{BO} = 10 \text{ m/s}$)

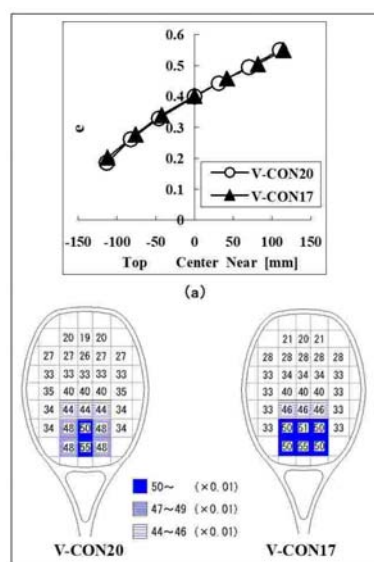


Fig. 25 Rebound power coefficient e ($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{BO} = 10 \text{ m/s}$)

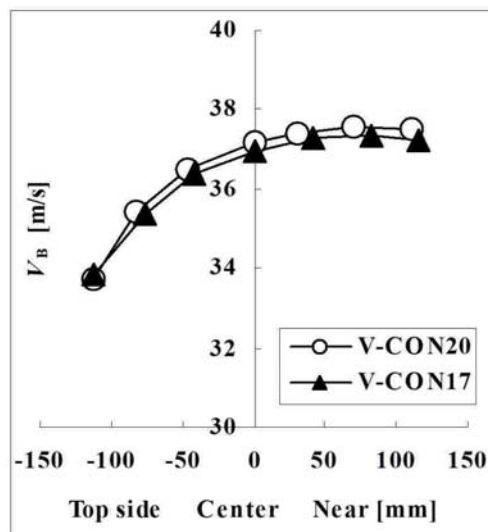


Fig. 26 Predicted post-impact ball velocity V_B ($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{BO} = 10 \text{ m/s}$, impact on the longitudinal axis).

結論としては、メーカーの実際の設計目標・基本振動数は不明であるが、ラケット V-CON 17 と V-CON 20 の反発力係数や打球速度に関連する性能には大きな差は見られなかった。換算質量分布がほぼ同一の場合は、反発力係数もほぼ同一になっている。剛性の指標としてフレーム基本固有振動数を考え、剛性を高めて反発力特性や打球速度を向上させたいという意図があったのかもしれないが、材料の進化により、フレーム剛性はフレーム厚が薄いラケットでも、すでに十分高くなっており、現在のラケットの剛性を上げて反発力の増大は見込めない。

8. ピエゾ・インテリ・ファイバーを装着したラケットのパワー（反発力と打球速度）の検証⁽²¹⁾⁻⁽²²⁾

外部エネルギーを使わないでラケット 1 次振動をアクティブに減衰させるためにピエゾ・ファイバーと制御回路を装着したラケット Is-10 のボールの飛びに関する性能を予測し、最も軽い市販ラケット TSL および最も反発性能に優れている市販ラケット EOS 120 A の性能予測結果と比較した。

図 27 は、メーカーのカatalogによると、ボールとの衝突時にラケットの剛性を増大させるピエゾ・インテリ・ファイバーを搭載した軽量ラケット Is-10（Head 社製、フェース面積 114 in^2 、質量 241 g ：張り上がり）を示す。表 4 は 3 本のラケットの仕様および物理特性実測値を示す。図 28 はストリング面上の打撃位置に換算した宙ぶり状態でのラケットの換算質量 M_r （横軸はラケット面中心から長手方向の距離）を示す。図 29 は、フォアハンドストロークにおける反発係数予測値 e_r の比較である。ラケット Is-10 の反発係数は、ラケット面のどの打撃位置でもほぼ一定で高い値を示し、先端側や根元側のオフセンターおよび長手軸から離れたオフセンターでも低下しない。これは 1 次のフレーム振動モードによるエネルギー損失が小さいことによる。図 30 は、反発力係数 e の予測値の比較である。図 31 は、ボールの飛び V_B （打球速度、ラケットのパワーの評価）の予測値を示す。

要約すると以下ようになる。

- (1) インテリジェント・ラケット Is-10 の 1 次固有振動数は、振動の腹（ラケットの首部）に装着したピエゾ・ファイバーの効果により、最軽量ラケットよりも高い値を示した。
- (2) ラケット Is-10 の反発係数は、ラケット面全体で高く、打球速度 V_B （ボールの飛び、ラケットのパワー）も長手方向中心線上、特に先端および根元の打撃点で大きい。反発性能に優れているラケット EOS 120 A との差はそれほど大きくはない。打球速度 V_B は、木製ラケットに比べて、ラケット面中心での打撃の場合 5 % 大きく、先端での打撃では 14 % 大きいという結果も出ている。
- (3) したがって、最先端とされる近年のラケットが直接的にプレーのパフォーマンスに与える影響は、それほど大きいとは言えず、テニスの元チャンピオン、マッケンロー氏らが指摘する「ハイテク技術によってトッププレーヤーたちの試合スタイルが大きく変わった」という意見は、ラケットの進化による操作性の向上がプレーヤーのパフォーマンスをさらに引き上げた結果と考えられる。

なお、本研究で開発されたラケット性能予測システムは、内部構造が複雑なアクティブ・ピエゾ・ファイバー・ラケットのような最新の先端的ラケットに対しても定量的な性能予測が可能である点が特長である。

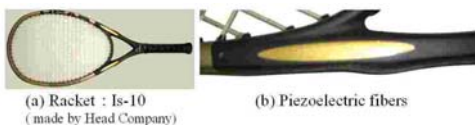


Fig. 27 Racket with active piezoelectric fibers.

Table 4 Physical properties

Racket	IS-10	TSL	EOS120A
Total length	700 mm	710 mm	690 mm
Face area	740 cm ²	742 cm ²	760 cm ²
Mass	241 g	224 g	292 g
Center of gravity from grip end	382 mm	379 mm	363 mm
Moment of inertia I_{GY} about Y axis	11.2 gm ²	11.0 gm ²	14.0 gm ²
Moment of inertia I_{GR} about grip	36.7 gm ²	32.4 gm ²	39.0 gm ²
Moment of inertia I_{GX} about X axis	1.51 gm ²	1.21 gm ²	1.78 gm ²
1st frequency	205 Hz	200 Hz	137 Hz
Strings tension	55 lb	55 lb	79 lb
Reduced mass (center)	179 g	152 g	206 g

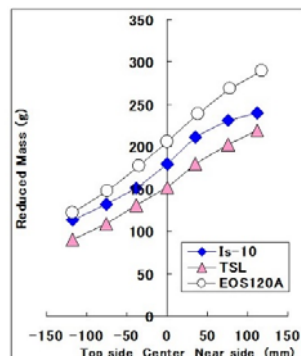


Fig. 28 Reduced mass M_r of racket at the hitting locations.

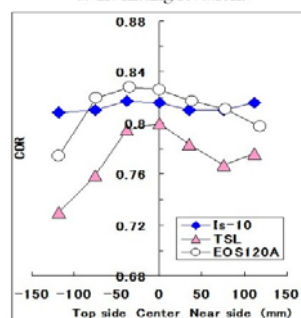


Fig. 29 Predicted Restitution coefficient e_r ($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

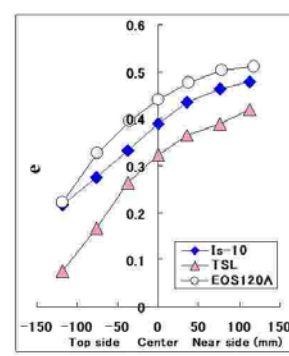


Fig. 30 Predicted rebound power coefficient e ($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

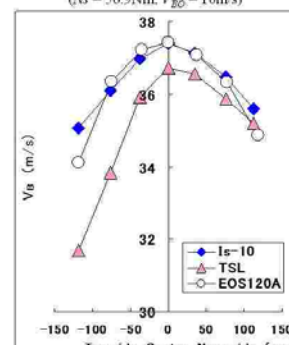


Fig. 31 Predicted post-impact ball velocity V_B ($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

9. 市販テニスラケット変遷の性能論的考察

テニスラケットは、素材の複合化により設計・製造の自由度が大きくなり、身体的条件や技術的条件の異なるプレイヤーとの整合を考慮したきめの細かい設計をめざす段階に至っている。しかし、メーカーのカタログやテニス専門誌の記事などでは、スポーツ工学の進展にも関わらず、主観的な性能評価が多く、物理現象との矛盾や先入観による誤解も多い。したがって、一般ユーザーにとっては、ボールを打ってみて、はじめて性能がわかるというのが現実である。

本研究では、ラケットの仕様・物理特性と性能の変遷について実験とシミュレーションに基づいて吟味し、現在の標準的ラケットに至った理由を考察した。

まとめると、以下のようになる。

- (1) 市販ラケット重量 225g~370g (フレーム 210g~355g) のストリング面中心換算重量 (厳密には質量) は 175g~200g 程度であり、プレイヤーの身体的・技術的条件が異なっても、重量は約 300 g(290g~315g) (フレームのみ重量: 275g~300g) あれば十分である。
- (2) ストリング面中心付近でボールを打撃する場合は、フェイス面積の違いは小さく、フェイス面積 115 in² 以上の軽量 (290g 以下, フレームのみ重量 275g 以下) の大型ヘッドは、オフセンターで打撃したときの手首関節に伝わる衝撃振動が非常に大きい。
- (3) 過去の全長 29 in ラケット (長ラケ) は、ストリング面中心から根元側 (スロート側) で性能が良いが、長ラケの意味がない。
- (4) 薄ラケでもフレーム剛性は十分であり、厚ラケとの違いが出るのは、フレームショットに近い場合である。ストリング面中心付近で打撃する場合、フレームは振動 (変形) しない。
- (5) ストリングの反発性能と衝撃振動には素材による違いが小さい。ポリエステルは、ガット、ナイロンと比べて、スピン量が 20% 以上多く、ボール・コントロール性に優れ、ノッチがでにくいのでスピン性能の寿命も長く、スピン打撃では衝撃振動が少ない。

ラケットの重量、バランス値、スイングウェイトのカタログ表示だけでは性能を評価するのは難しい。これらを統合した「ストリング面中心換算重量」をカタログ表記として導入するよう、メーカーに提案したい。

また、軽量ラケットほどバランス (重心位置) がヘッド側、つまり打球面に近くなり、さらにフェイス面積が大きいラケットでは、重心が打球面の内部に入り込む。これにより、木製ラケットやフェイス面積の小さなラケットのように、左手でバランス位置を持って軽快に操作することが難しくなった。反発力の大きい軽量かつ大型フェイスのラケット使用者が減少したのは、左手でのラケット操作性の悪さが一因ではないかと考えられる。

10. 結 語

テニスラケットの打球面の大型化とラケットの軽量化により、トップスピン技術が普及し、ラケットの種類や性能に対する関心が高まっている。しかし、この傾向はさらなる軽量化の限界も明らかにした。こうした課題に対応するため、軽量化の限界を克服することを目指した革新的なデザインの新しいラケットが市場に投入されたが、それらの多くは高性能を強調しつつも、すでに市場から姿を消している。本研究では、これらの市販ラケットの実験的に特定された物理特性を分析し、衝突シミュレーションを通じてラケットの性能を検討した。

市販ラケットは、細部の設計が極端に異なっているにもかかわらず、換算質量分布がほぼ同一の場合は、反発力係数もスイング・ウェイトもほぼ同一になり、したがって、打球速度も近い値になることがわかった。したがって、ラケットの重量と重量配分が最も重要な設計要素であることが明らかになった。

文 献

- (1) Banwell, G, Roberts, J., Halkon, B. and Rothberg, S., "Understanding the Dynamic Behaviour of a Tennis Racket under Play Conditions", *Experimental Mechanics*, Vol. 54(2014), pp. 527-537.

- (2) Lindsey, C., “New Technologies and Racquet Power”, ITF Coaching & Sport Science Review 2008, Vol. 15, No. 45, (2008), pp. 13-14.
- (3) Kawazoe, Y., “Solution to the Mystery of the Effect of String Tension on the Actual Impact between a Tennis Ball and Racket” ,The Impact of Technology on Sport, ASTA Publishing, (2005), pp. 156-162.
- (4) 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 , International Tennis Federation. (2003),. pp. 61-69.
- (5) 川副嘉彦, “テニスラケットの素材・構造と性能”, バイオメカニクス研究, Vol. 7, No. 2, (2003), pp. 136-151.
- (6) 佐藤文平, (博士論文) “日本人一線級テニス選手におけるドップラー・レーダー追跡システムを用いたサーブ時のボール速度と回転数の関係, II章 実験研究 I : ドップラー・レーダー追跡システム TRACKMAN の測定精度”, 日本体育大学大学院, (2020 年 12 月), PP. 21-36.
- (7) Kawazoe, Y., Takeda, Y., Nakagawa, M., Casolo, F., Tomosue, R. and Yoshinari, K., “Prediction of Impact Shock Vibrations at Tennis Player’s Wrist Joint Comparison between Conventional Weight Racket and Light Weight Racket with Super Large Head Size”, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 4, No. 2, (2010), pp. 331-347.
- (8) Kawazoe, Y., “Impact Phenomena between Racket and Ball during Tennis Stroke” , *Theoretical and Applied Mechanics*, 41, (1992), pp. 3-13.
- (9) Kawazoe, Y. and Kanda, Y., “Analysis of impact phenomena in a tennis ball-racket system”, *JSME International Journal, C*, Vol. 40, No. 1, (1997), pp. 9- 16.
- (10) Kawazoe, Y., “Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel”, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 49, (2000), pp. 11-19.
- (11) Kawazoe, Y. and Tanahashi, R., “Prediction of Contact Forces, Contact Times, Restitution Coefficients and Racket Stabilities”, *Sports Dynamics: Discovery and Application*, (2003), pp. 51-56. RMIT University.
- (12) Kawazoe, Y., “Coefficient of Restitution between a Ball and a Tennis Racket”, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 42, (1993), pp. 197-208.
- (13) Kawazoe, Y., “Effects of String Pre-tension on Impact between Ball and Racket in Tennis”, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 43, (1994), pp. 223-232.
- (14) Kawazoe, Y., “Computer Aided Prediction of the Vibration and Rebound Velocity Characteristics of Tennis Rackets with Various Physical Properties”, *Science and Racket Sports*, (1994), pp. 134-139. E & FN SPON, London.
- (15) Kawazoe, Y., “Experimental Identification of Hand-held Tennis Racket Characteristics and Prediction of Rebound Ball Velocity at Impact”, *Theoretical and Applied Mechanics*, 46, (1997), 165-176.
- (16) Goodwill, S. R. and Haake, S. , “Effect of string tension on the impact between a tennis ball and racket”, The engineering of sport 5. International sports engineering association , (2004),. pp. 3-9.
- (17) Kawazoe, Y., Okimoto, K., and Okimoto, K., “Mechanism of Tennis Racket Spin Performance: Ultra-High-Speed Video Analysis of Spin Performance Improvement by Lubrication of String Intersections”, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 6, No. 2 (2012), pp. 200-212.
- (18) Kawazoe, Y., Takeda, Y., and Nakagawa, A., “Effect of Notched Strings on Tennis Racket Spin Performance (Ultrahigh-Speed Video Analysis of Spin Rate, Contact Time, and Post-Impact Ball Velocity) ”, *Journal of System Design and Dynamics*, vol. 6, No. 2 (2012), pp. 213-226.
- (19) Kawazoe, Y. and Okimoto, K., “Tennis Top Spin Comparison between New, Used and Lubricated Used Strings by High Speed Video Analysis with Impact Simulation”, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol. 57(2009), pp. 511-522.
- (20) Kawazoe, K. and Okimoto, K., “Super High Speed Video Analysis of Tennis Top Spin and Its Performance Improvement by String Lubrication” , The Impact of Technology on Sport, ASTA Publishing, (2005), pp. 379-385.
- (21) Kotze, J., Lammer H., Cottey R. and Zirngibl, W., “The effects of active piezo fibre rackets on tennis elbow”, *Tennis and Science Technology 2*, 2003, pp. 55-60.
- (22) Kawazoe, Y., Takeda, Y., and Nakagawa, M., “ Performance Prediction of Active Piezo Fiber Rackets in Terms of Tennis Power”, (2003), *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 4, No. 1(2010), pp. 77-90.