

衝突現象を考慮したテニスラケットのCAE* (ボールとの衝突におけるラケットの応答予測と反発性能の評価指針)

川 副 嘉 彦*

CAE of Tennis Rackets with Impact Phenomena (Prediction of Racket Response and a View of Restitution in Racket-Ball Impact)

Yoshihiko KAWAZOE

There are a number of unclarified points regarding the impact phenomena and the optimum design of tennis rackets. The present study is based on the idea that the dynamics of a racket consists of the dynamics of a rigid body with an arm swing given at a grip as a boundary condition, an impact between a ball and strings with racket frame as an input force, and the structural vibration of the racket. In this paper, impact force and impact duration are investigated, considering the strong nonlinearity of the restoring force of ball and strings. Furthermore, the coefficient of restitution of the tennis racket is estimated using a personal computer on the basis of the impact phenomena and the experimental modal analysis. In order to predict the contact duration, which has an influence on the racket vibration, a simple impact model has been proposed, i. e., that the contact duration is determined by the natural period of a whole system composed of the mass of the ball, the stiffness of the ball and strings, and the reduced mass of the racket at the impact point on the racket face. The calculated results agree fairly well with the experimental results.

Key Words: Sports Engineering, Impact, Nonlinear Vibration, CAE, Modal Analysis, Natural Frequency, Strings, Tennis Racket, Coefficient of Restitution

1. 緒 言

スポーツ用具は、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使用者との整合を考慮したきめの細かい設計を目指す段階に至り、理論武装したテニスラケットも現れ始めた。しかし、人間系と機械系(用具系)が複雑に絡んでいるためにラケットの性能やインパクト現象について不明な点が多い。

ラケットフレームに保持されたガット面とボールの衝突現象についての従来の実験は、衝突現象の複雑さを示しているだけで、ストリングスとフレームとボールの相互作用についてはほとんど解明していない。ボールとの衝突速度を考慮してラケットの応答を理論的に研究した報告も見当たらないようである。

また、現状では高速度カメラなどによる画像処理だけでは、ラケットの剛性・質量・減衰の分布やストリングスの張力、あるいは衝突速度が反発力(ボールの飛び)、グリップ部の衝撃や振動、ボールのコントロール

性などのラケット性能に及ぼす影響について物理的説明を与えることは難しい。プレーヤの技術および身体的条件の客観的評価などに関しても不明な点が多く、どのような物理特性を組み合わせれば期待されるラケット性能が得られるかが明らかではない。

本報告では、ラケットの質量分布、ストリングスの張力、ラケットの剛性、ラケットのサイズなどの組み合わせやラケットのスウィングの速さがボールとラケットの接触時間(衝突時間)と衝突力、および反発力性能(ボールの飛び)に与える影響を明らかにするための第一段階として、近似的な衝突モデルに基づいてラケット応答を予測する方法を示す。

ボールとラケットの衝突におけるボールの回転(スピン)は、ボールのコントロールに関連して非常に重要であるが、ここでは議論を簡単にするためにボールの回転はないものとする。

2. ボールとラケットとの衝突現象の謎

“ラケットの厚さ(剛性)がインパクト・タイム(ボールとラケットとの接触時間)に影響しないという実験結果は、人間の感覚と相反する”というプレーヤの指摘がある。また、“ボールを長くラケットに乗せるように打つと良い”などとよくいわれる。しかし、接触時

* 平成3年7月8日 ダイナミクスとデザインにおけるコンピュータと計算力学シンポジウムにおいて講演、原稿受付平成4年1月6日。

*1 正員、埼玉工業大学(☎369-02 埼玉県大里郡岡部町普濟寺1690)。

間の長短が何により決まり、何に影響するかについて明解な説明はない。

また、ストリングスの張力とフレームの剛性が、どのように、なぜ、ボールの飛びに影響するのか、あるいは、ストリングス面上の打球位置の違いやスイング速度によりボールの飛びが、どのように、なぜ違うのかについてもさまざまな解釈がなされている。

例えば、ストリングスの張力を小さくすると、接触時間が長くなり、ボールがよく飛ぶといった説明がある。しかし、ストリングスを緩く張るとボールの変形に対するストリングスの変形の割合は増すが、変形が大きくなるとボールもストリングスも急激に硬さを増すから、ボールとストリングスとの接触時間（衝突時間）には衝突速度が大きく影響し、接触時間とストリングスの張力の関係は複雑である。

衝突における接触時間が非常に短いから、ラケットフレームは振動する。ラケットの振動特性あるいは剛性とボールの飛びの関係も不明である。

本研究では、いくつかの基本的な衝突実験結果とボールとストリングスの非線形復原力の測定値を考慮して衝突現象をモデル化し、まずラケットの振動を無視した場合の反発性能を予測し、次に衝突によるラケットの応答を予測する。衝突において作用する力と衝突時間は、ラケットの振動モード特性と関連して、ラケット・フレームの振動のエネルギー損失の大小に影響し、その結果が微妙な飛びの違いとして現れると考える。

3. ボールとストリングスの非線形復原力特性

ボールとラケットとの衝突の瞬間を示す高速ビデオ写真において、衝突速度が非常に大きな場合を除けば、衝突時のボールはストリングスと接触している片側のみ主に変形しているように見える。

まず、ボールに荷重を加えた場合〔図1(a)〕の変位(変形量)およびフレーム外周を固定したストリングスの上のボールに荷重を加えた場合〔図1(b)〕のボー

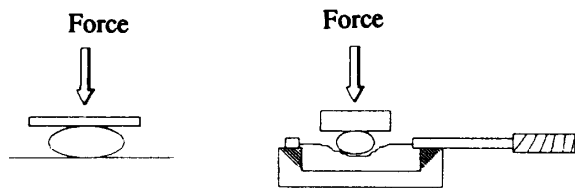


図1 復原力特性を求めるためのボールおよびボール・ストリングス複合系の荷重方法

ールとストリングスの変位の和を測定し、図式的にストリングスの非線形復原力特性 F_C を求める。

次に、中心に質量を集中させたボールが衝突においてストリングスに接触する片側だけ変形すると仮定したボールの復原力特性 F_B を求め、ボール・ストリングス複合系の復原力特性 F_{CB} を上記のボールとストリングスの特性 F_B, F_C から図式的に求めると、図2のようになる。最小二乗法により多項式近似すると、ストリングス（俗称ガット）、ボールおよびボール・ストリングス複合系の復原力特性 F_C, F_B, F_{CB} はそれぞれ式(1)~(3)のようになる。

$$F_C = 2.49X - 0.0147X^2 + 0.0090X^3 \dots\dots\dots (1)$$

$$F_B = 0.915X + 0.3077X^2 - 0.0233X^3 + 0.00091X^4 \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{CB} = 1.28X - 0.020X^2 + 0.00140X^3 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、荷重； F [kgf], 変位； X [mm], $1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N}$ である。また、復原力 F_C, F_B, F_{CB} の変位 X に関する微分、すなわちばね剛性 K_C, K_B, K_{CB} は図3および式(4)~(6)のようになる。

$$K_C = 2.49 - 0.0294X + 0.027X^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$K_B = 0.915 + 0.0616X - 0.070X^2 + 0.00364X^3 \dots\dots\dots (5)$$

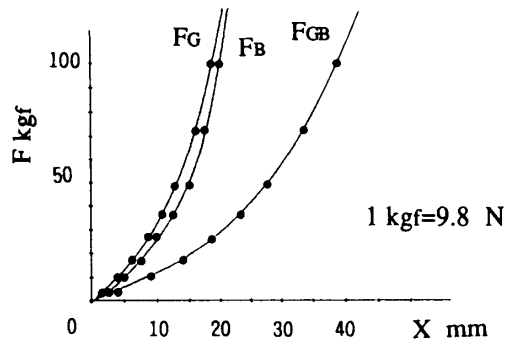


図2 ボールが片側のみ変形すると仮定した場合のボール、ストリングス、ボール・ストリングス複合系の非線形復原力特性

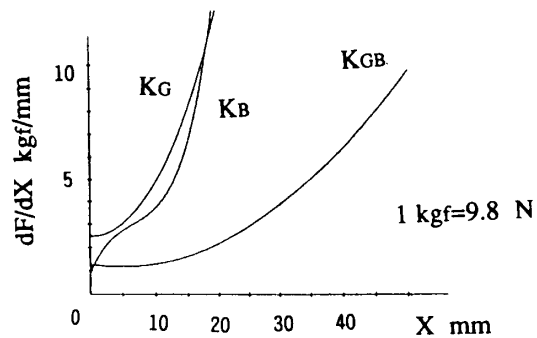


図3 ボールが片側のみ変形すると仮定した場合のボール、ストリングス、ボール・ストリングス複合系の非線形ばね剛性

$$K_{CB} = 1.28 - 0.040X + 0.00420X^2 \dots\dots\dots (6)$$

ただし、ばね剛性： K [kgf/mm], 変位： X [mm],
 $1 \text{ kgf/mm} = 9.8 \times 10^3 \text{ N/m}$ である。

ボールもストリングスも変形量の増大に伴ってばね剛性が增大する非線形特性を示し、ボール・ストリングス複合ばね系の複合変位が約 20 mm を超えると、ばねは急激に硬くなる。

式(3)と(6),あるいは図2および3から、ボール・ストリングス複合系の復原力 F_{CB} とばね剛性 K_{CB} の関係が求まる。標準張力 55 lb [246 N] の場合の最小二乗近似式は

$$F = 55.2 + 65.2K_{CB} - 16.6K_{CB}^2 + 2.29K_{CB}^3 - 0.103K_{CB}^4 \dots\dots\dots (7)$$

4. ストリングス周りのフレームを固定して、ストリングスにボールを衝突させた場合の反発係数

図4は、ラケット・フレームを固定したストリングスにボールを衝突させた場合のボールの衝突前の速度(入射速度)に対するボールの跳ね返り速度の比、すなわち反発係数 e_{BC} の測定結果である。ボールの入射速度が 14 m/s と 25 m/s の実験範囲(通常のスロークにおける衝突速度)では反発係数 e_{BC} の値はほとんど一定である。また、ストリングスの張力が 30 lb のときと 60 lb のときの値はほとんど同じであり、どちらが反発が良いともいえない。すなわち、ボールを壁に衝突させた場合の反発係数が衝突速度の増大とともに減少するのに対して、ストリングスまわりのフレームを固定したストリングスにボールを衝突させた場合のボールおよびストリングスのエネルギー損失は、通常の衝突速度の範囲では張力と衝突速度にほとんど依存しないことを示している。

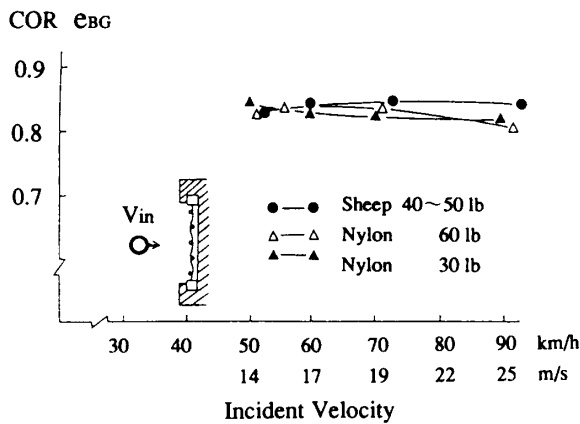


図4 ストリングスまわりのフレームを固定した場合のボールの反発係数実測値

ストリングスは、ボールが離れるときには、変形する前の状態に戻り、その瞬間にボールは離れていく。ストリングスの質量は小さいから、残留振動および振動のエネルギーは小さいのである。したがって、衝突におけるストリングスの変形のエネルギーは、ほとんどボールに戻されると考えられる。ボールも、ストリングスから離れたのち小さく振動するが、それによるエネルギー損失も、通常の衝突速度では小さいことになる。

ストリングスまわりのフレームが固定されている場合、通常のスイング速度に相当するボールとストリングスとの衝突において、衝突によるエネルギー損失が張力と衝突速度にほとんど依存せず、反発係数が一定の値約 0.83 になることに注目すると、この反発係数をボールとストリングスという素材の間の衝突における固有の反発係数とみなすことができる。

ストリングスまわりのフレームを固定した場合の反発係数約 0.83 というこの実験結果は、従来の多くの文献の結果ともほぼ一致しており、グラス、アルミ、木などのラケット素材の違いによる差異もほとんどない。

5. ボールと超高剛性ラケットの衝突モデル

5.1 衝突モデルの概要 ボールとラケットとの衝突実験およびインパルス・ハンマによるラケットの打撃実験において、ラケット・フレームの振動がボールとストリングスとの接触時間(衝突時間)およびハンマとストリングスの接触時間の差異としてほとんど現れないという事実に着目したことが、このモデルの特長である。

まず、質量分布は同じで、剛性を無限に高めた(振動を無視した)ラケット・フレームを想定し、非線形復原力を考慮したボールとストリングスの一自由度モデルを用いて反発係数および、接触時間、衝突力などの衝突現象を解析する。この振動を無視したラケットとボールとの衝突現象の解析結果と現実のラケットの衝突実験結果と対照する。次に、パーソナルコンピュータ援用の実験モード解析⁽⁴⁾に基づいて実験的に同定したラケットの振動モデルに、上記の衝突現象の解析から求めたインパクトの力を衝突時間だけ作用させ、ラケットの振動を予測する。

衝突におけるフレーム振動によるエネルギー損失を考慮して反発係数を修正すると、ラケットの振動による反発性能の微妙な差異を評価できるはずである。

ボールを質量とばねをもつ一自由度系に近似すると、ボールのばねとストリングスのばねを間に挟んで、

ボールの質量とフレームとが衝突すると考えることができる。打撃点（ボールが当たったところ）に換算したラケットの質量（ラケットの回転を考慮した換算質量）とボールの質量とが、ボールとストリングスを組合せた合成ばね、すなわち一種の緩衝装置を挟んで衝突するのである。

したがって、衝突現象を決める要素は、一つはボールの質量に対する打撃点でのラケットの換算質量であり、もう一つはボールとストリングスを組合せた合成ばねの特性である。

5・2 ラケットの換算質量と反発係数 フレームを固定した場合のボールとストリングスの反発係数 $e_{BC}(0.83)$ は、ラケットの質量が無限に大きい場合に相当するから、ボールの質量を $m_B(55\text{ g})$ 、振動しないラケット（超高剛性ラケット）の打撃点における換算質量を M_r 、衝突直前のボールとラケットの速度をそれぞれ V_{Bo} 、 V_{ro} とすると、運動量保存則と反発の式から、ボールの衝突後の速度 V_B は、

$$V_B = -V_{Bo}(e_{BC} - m_B/M_r)/(1 + m_B/M_r) + V_{ro}(1 + e_{BC})/(1 + m_B/M_r) \dots\dots\dots(8)$$

ボールが入射速度 V_{ro} で換算質量 M_r のラケットに衝突する場合 ($V_{Bo}=0$) の反発係数は

$$-V_B/V_{ro} = (e_{BC} - m_B/M_r)/(1 + m_B/M_r) \dots\dots(9)$$

と表され、計算結果は図5のようになる。

5・3 ストリングス面上の換算質量 フレームが振動しないと仮定した超高剛性ラケットの打撃点に換算した換算質量は、ラケットのバランス（質量分布）から求めることができる。現実のストロークにおける打撃点の換算質量は身体運動のダイナミクスを考慮する

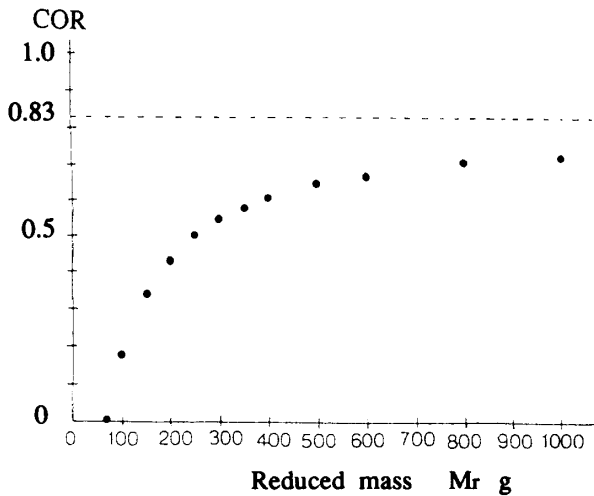


図5 ラケットの打撃点における換算質量に対する反発係数（計算値）

必要があるが、衝突の瞬間にグリップ位置を支点としてラケットが回転する（打撃点が縦の中心線にある）場合は、

$$M_r = I_A/L_A^2 \dots\dots\dots(10)$$

のように書ける。ただし、 I_A ：ラケット支点（グリップ位置）まわりの慣性モーメント（ $=M_R k_A^2$ 、 M_R ：ラケット質量、 k_A ：回転半径）、 L_A ：ラケット支点（グリップ位置）と打撃点の距離である。

ラケット面の中心近くの打撃点では、グリップを解放したラケットが重心まわりに回転する場合の換算質量とグリップを支点として回転する場合のそれはほぼ等しい。

縦の中心線まわりにラケットが回転する（打撃点が中心から横に外れた）場合は、

$$M_r = I_C/(a^2 + k_C^2) \dots\dots\dots(11)$$

のように書ける。ただし、 I_C ：ラケットの縦の中心線まわりの慣性モーメント（ $=M_R k_C^2$ 、 M_R ：ラケット質量、 k_C ：回転半径）、 a ：ラケットの縦の中心線と打撃点の距離である。

標準的ラケット ($M_R=360\text{ g}$) について、打撃点が縦の中心線にある場合と中心から横に外れた場合のラケットの換算質量を求めると、図6(a)、(b)のよう

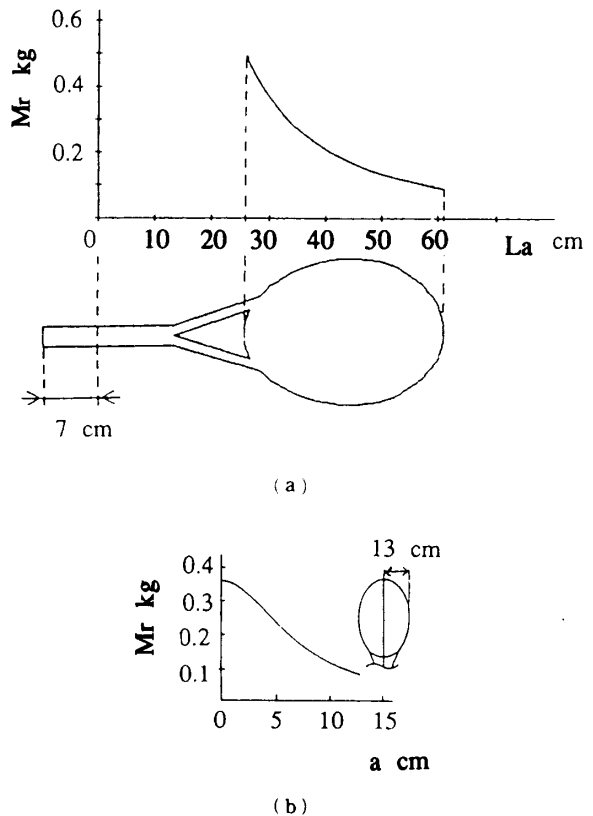


図6 ラケットの打撃点における換算質量

になる。

5.4 ラケットの打撃点と反発係数 図7は、グリップ端から70mmの位置を支点としてラケットが回転するとして、各打撃点でのボールの衝突後の速度と衝突前の速度の比（反発係数）を式(9)を用いて計算した結果である。横軸はストリングス面上の打撃点を示す。反発係数は、ストリングス面の先端側打撃で小さく、グリップ側打撃で大きいことを示している。図8は、グリップを拘束しないで自由にした場合とグリップを固定した場合について、ボールをラケットに衝突させたときのボールの反発係数の実測値を示す。横軸はストリングス面上の先端側からの距離である。図7におけるストリングス面グリップ側の点6Pで反発係数の計算値は約0.51、先端側の点6Pで約0.25であり、実測値（図8）に近い値を示している。

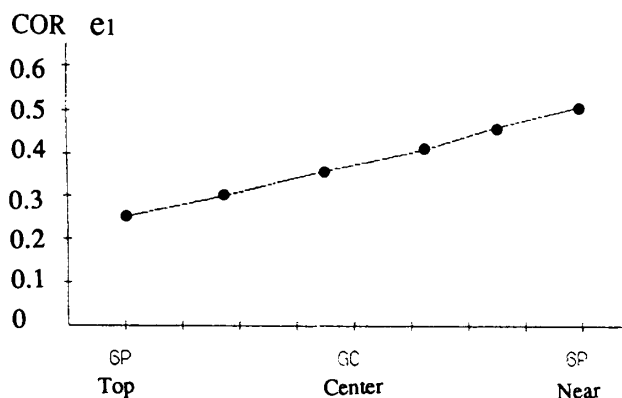


図7 グリップ端から70mmの位置を支点としてラケットが回転する場合のストリングス面上の反発係数（計算値）

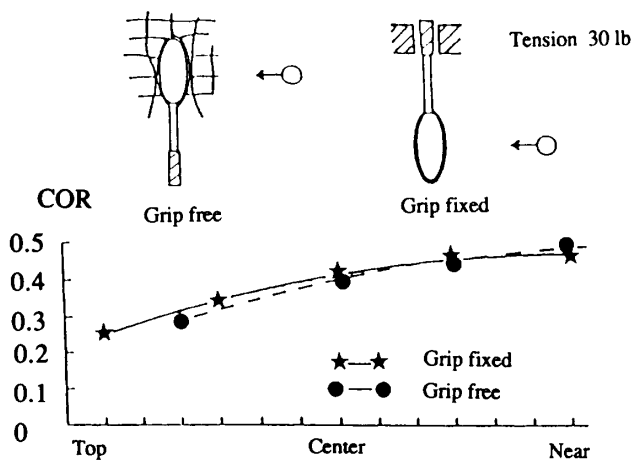


図8 グリップを固定した場合とグリップを解放した場合のストリングス面上の反発係数（実測値）

図9は、ラケットがグリップ端から70mmの位置を支点として回転するとして、打球後のボール速度を予測したものであり、式(8)、(10)を用いている。衝突直前のボール $V_{Bo}=5\text{ m/s}$ とし、ラケットスイングの遅い場合（ラケット面中心で $V_{Ro}=-10\text{ m/s}$ ）と、やや速い場合（ラケット面中心で $V_{Ro}=-20\text{ m/s}$ ）を示している。

スイングが速くなると、反発係数は低くても先端で打撃したほうが打球後のボール速度は大きくなる。

5.5 ボールとストリングス間に作用する力と接触時間 図10(a)、(b)は、三浦・友末ら⁽²⁾の接触時間の測定結果を衝突速度とボール変形率に関してプロットしたものである。グリップを固定したラケットにボールを衝突させた場合の結果であり、フレーム剛性の異なる中厚ラケットと厚ラケット（剛性が大きい）を比較したものである。接触時間（衝突時間）に及ぼすラケット剛性の影響は小さい。また、剛性が約4倍異なるフレームについて、インパルス・ハンマによる打撃実験を行って見たところ、この場合も、フレーム剛性の接触時間に及ぼす影響は小さかった。したがって、接触時間に関しては、フレームの振動を無視したラケットの理論でも良い近似を与えるはずである。

衝突直前および衝突直後のボールの速度をそれぞれ V_{Bo} 、 V_B 、衝突直前のラケットの速度を V_{Ro} とし、接触時間 T_c 間の平均の力を F とすると、衝突における力積は、

$$FT_c = m_B V_{Bo} - m_B V_B \dots\dots\dots (12)$$

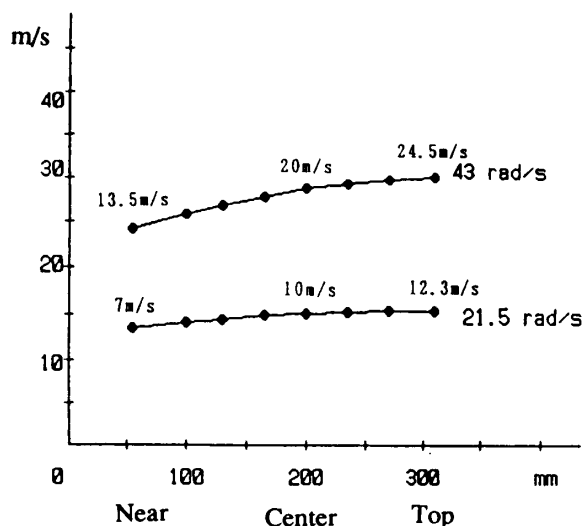


図9 ラケットがグリップ端から70mmの位置を支点として回転する場合の打撃点に対する打球後のボール速度の予測値（フレームの振動を無視した場合）

と書ける。式(8)を用いると

$$FT_C = (V_{Bo} - V_{Ro})(1 + e_{BC})m_B / (1 + m_B/M_r) \quad \dots\dots\dots(13)$$

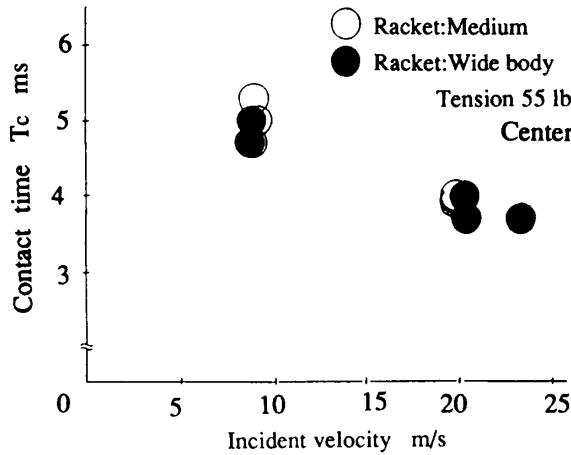
と書ける。

ボールと接触するストリングスの変形は、ボールが離れるときに元に戻るから、衝突時のボールとストリングスの接触時間をボール・ストリングス・ラケット複合系の固有周期の1/2と仮定し、ボールとストリングスが接触している間の平均衝突力 F に対応するばね剛性を K_{CB} とすると、接触時間は

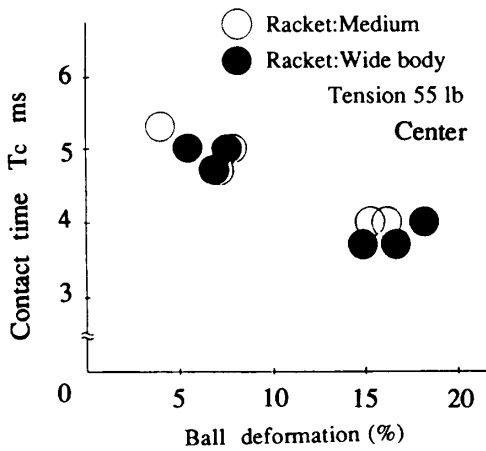
$$T_C = \pi \sqrt{m_B} / \sqrt{K_{CB}(1 + m_B/M_r)} \quad \dots\dots\dots(14)$$

となる。式(13)、(14)からボール・ストリングス複合系の復原力とばね剛性 K_{CB} の関係を次式のように求めることができる。

$$F = (V_{Bo} - V_{Ro})(1 + e_{BC})\sqrt{m_B} \sqrt{K_{CB}}$$



(a)



(b)

図10 衝突速度およびボールの変形量に対する接触時間の実測値

$$/ \pi \sqrt{(1 + m_B/M_r)} \quad \dots\dots\dots(15)$$

衝突の関係式から導いた式(15)と非線形復原力特性の式(7)を連立させると、図11に示すように図式あるいは数値計算により、衝突速度 ($V_{Bo} - V_{Ro}$) を与えたときの複合ばね剛性 K_{CB} を求めることができる。衝突速度に対する複合ばね剛性 K_{CB} が決まると、平均の衝突力 F と対応するボールとストリングスの変形量、接触時間 T_C なども決まる。

図12、13はそれぞれストリングス面中心、先端、根元で打撃した場合の衝突速度に対する衝突力と接触時

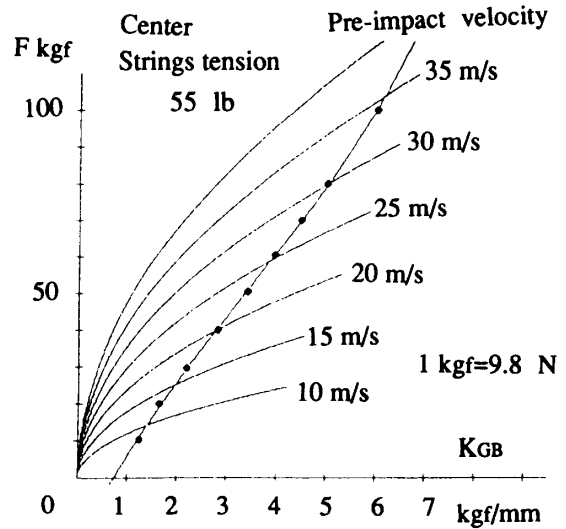


図11 インパクトにおける衝突速度に対するボール・ストリングス複合系の平均力とばね剛性の決定法

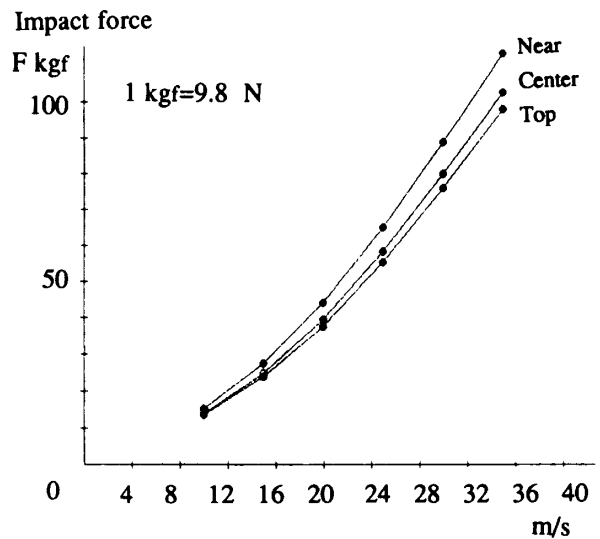


図12 インパクトにおける衝突速度に対する平均力(計算値)

間の計算結果であり、ストリングスは標準張力(55 lb)である。接触時間の計算値はボールをグリップ固定のラケットに衝突させた場合の実測値(図10)に近い。

接触時間を振動数に換算すると、図14のようになる。この振動数とラケットの固有振動モードとの関係

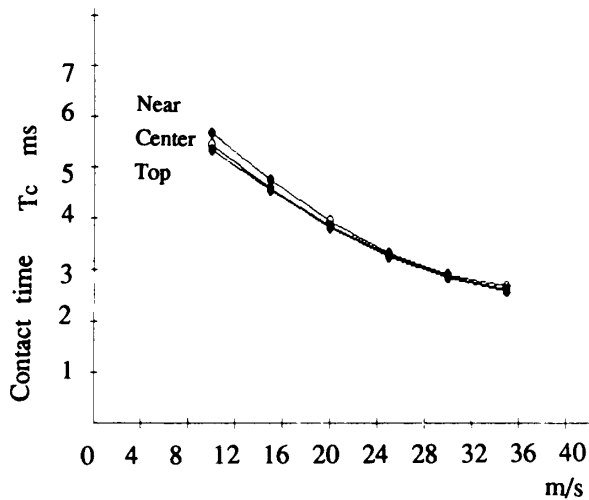


図13 インパクトにおける衝突速度に対する接触時間(計算値)

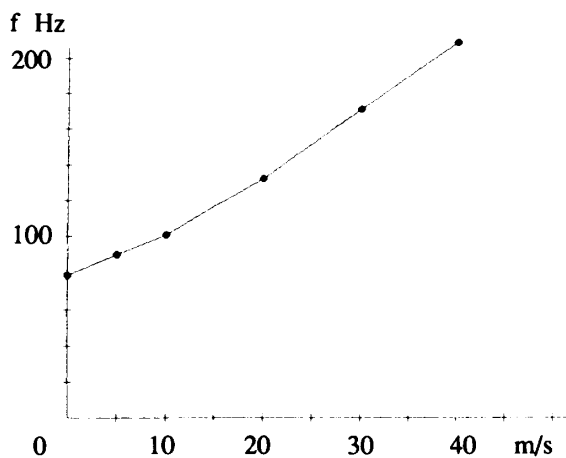


図14 接触時間から換算した振動数(計算値)

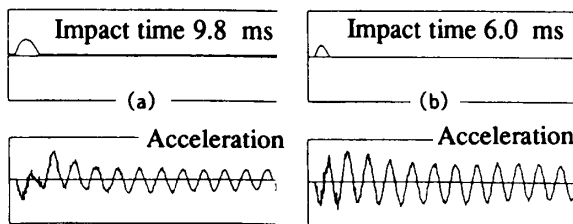


図15 接触時間の長短とラケットの振動の大きさ(実測値)

でラケットの振動の大きさが決まる。図15(a), (b)は、インパルスハンマを使って、ストリングスを打撃した場合のインパルス力波形とラケット・フレームの振動を示している。図15(b)は図15(a)の場合より小さいハンマで打撃した場合であり、図15(b)の衝突力は図15(a)より小さいが、衝突時間は、図15(b)のほうが短いので、振動は図15(b)のほうが大きくなっている。

6. 衝突によるラケットの振動振幅の予測と反発係数の評価指針

6.1 ボールとの衝突を考慮したラケットの応答変位振幅の予測方法 周波数領域では、平均衝突力 F 、接触時間 T_c のとき、 k 次の固有振動モード(固有振動数 $\omega_k = 2\pi f_k$) に対する打撃点 j における衝撃力成分 $S_j(\omega_k)$ は

$$S_j(2\pi f_k) = F \times \frac{2}{2\pi f_k} \left| \sin \left(\frac{2\pi f_k T_c}{2} \right) \right| \dots\dots\dots (16)$$

となる。ラケット面上の点 j に $S_j(\omega_k)$ なる衝撃力が作用した場合のラケット上の点 i における応答振幅の和 X_{ij} は、

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^n r_{ijk} \times S_j(\omega_k) = \sum_{k=1}^n \left| \frac{r_{i0k} \cdot r_{j0k}}{r_{00k}} \right| \times S_j(\omega_k) \dots\dots\dots (17)$$

と近似できる⁽³⁾。

ただし、 k : モード(1~ n)、 r_{i0k} : モード解析から得られたラケット上の打撃点 i と固定された応答点(参照点) 0 の間の既知の留数、 $r_{j0k} (= r_{j0k})$ 打撃点 j と応答点 0 の間の既知の留数、 r_{00k} : 参照点(ピックアップ部) 0 における既知の駆動点留数である。

したがって、衝突速度とストリングス面上の打撃点を与えると、ラケット各点の応答変位振幅の大きさが式(16)、(17)を用いて予測・評価できることになる。

6.2 ラケットの振動応答特性の評価法 打撃点を指定したときのラケット上の各点の応答振幅の大きさを基準のラケットの場合と比較するために、基準とするラケットの各点の応答振幅に対するほかのラケットの各点の応答変位振幅の比を計算し、振幅比の分布を表示することができる。また、この比をラケット全体にわたって平均した値を用いると、基準のラケットの場合のラケット全体の振動の大きさを1として任意のラケットのラケット全体の大きさを打撃点ごとに数値で表すことができる。バランス(質量分布)が同じで剛性が異なるラケットの場合、速度振幅の大きさを評価することにより振動エネルギー損失の大きさを比較し、反発特性への剛性の影響も調べることができる。

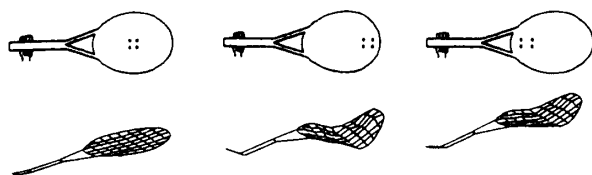


図 16 衝突直後のフレーム振動変位振幅の予測
(衝突力 1 kN, 接触時間 4 ms の場合)

6.3 ラケットの応答予測と反発係数の評価指針

図 16 は、手でグリップをしっかりと握った場合の衝突によるラケット振動変位振幅の和を評価したもので、ストリングス面中央、先端、グリップ側に接触時間 4 ms、衝突力 1 kN を等しく与えている。中央打撃の場合は 2 節曲げモードの節に近いので振動は小さい。

ラケットの打撃点の位置によりフレーム振動の大きさは異なる。また、衝突速度により力と接触時間が異なるから、振動の大きさも異なる。

したがって、衝突速度とラケット面上の打撃点を与えて、これまでに述べた方法により接触時間と衝突の力積を計算し、衝撃力波形を近似してフレームの振動を計算し、振動のエネルギーを評価すると、剛性やストリングス張力の異なるラケットの微妙な反発特性の違いを識別することができるはずである。これについては、インパクトにおける衝突波形の近似を高めた場合も含めて別報に述べる。

7. 結 論

ボールとストリングスの非線形復原力およびラケッ

トの打撃点における換算質量を考慮した衝突モデルによりラケットの応答を予測する方法を示し、ラケットの反発力（飛び）の評価指針を与えた。主な結果を要約すると以下ようになる。

(1) ラケットの換算質量が大きいほどボールの反発は良い。

(2) 衝突速度が一定の場合の接触時間(衝突時間)は、ボールの質量、ラケットの換算質量、およびボールとストリングスの複合ばねの硬さで決まる。

(3) 衝突速度が増すと、ボール・ストリングス複合系のばね剛性が増し、接触時間は短くなる。

(4) 接触時間とラケットの固有振動モードが関連してフレームの振動の大きさが決まる。

フレームの振動を無視した場合の反発係数に振動によるエネルギー損失を考慮してやると、振動するラケットの反発係数を予測することができる。衝突速度と打撃点を与えたときのフレームの振動を考慮したラケット性能の予測結果については、別報に述べる。

終りに一部資料の提供をいただいたヤマハ(株)スポーツ事業部および日本テニス研究会の諸氏、そして日頃ご討論いただいている日本スポーツ産業学会スポーツ工学分科会、精密工学会スポーツ用具のダイナミックス専門委員会の諸氏に厚くお礼申し上げる。また、実験にご協力いただいた卒研究生諸君に深く感謝する。

文 献

- (1) 川副, 機論, 56-526, C(1990), 1511.
- (2) 三浦・ほか 6 名, 日本テニス研究会第 2 回講演会資料, (1990), 17.
- (3) 川副, 機講論, No. 910-53(1991), 187.