

テニスにおけるボール・ラケット系の衝突現象の解析* (ラケットハンドル部の境界条件の影響)

神田 芳文*¹, 川副 嘉彦*²

Analysis of Impact Phenomenon with a Ball-Racket System in Tennis (Effects of Boundary Condition at the Racket Handle)

Yoshifumi KANDA and Yoshihiko KAWAZOE

In tennis, it is important to determine whether the performance of the racket is influenced by the grip condition on the racket handle, and how this affects player performance and racket design processes. Although it is a well-known fact that ball-rebound velocities after impact are almost constant in both free and fixed grip, the mechanism behind this remains unknown. The objective of the present study is to determine the mechanism of this phenomenon by computer simulation. Investigation of the propagation of deflection waves in the frame induced by impact showed that in general, the deflection wave which is reflected at the grip end does not reach the impact location during the impact phase and the reflected wave does not disturb the interaction between ball and frame.

Key Words: Shock, Transient Response, Vibration of Continuous System, Tennis Racket, Deflection Wave, Modal Analysis, Finite-Element Method, Coefficient of Restitution

1. 緒 言

テニスのラケットは、フレームの素材としてCFRP(炭素繊維強化プラスチック)が主流になってくるにつれ設計の自由度が大幅に増して、打球面積、剛性・質量分布などにいろいろな工夫がなされ、さまざまな種類のラケットが開発されるようになってきた。それに伴ってラケットの設計に寄与する目的の研究⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾も次第に活発になってきて、ボール・ストリングス・フレーム系の衝突振動特性を調べることにより、ラケットの性能(ボールの反発およびコントロール、人体への負荷など)のうち反発性能について、ようやく性能向上のための設計指針が明確になりつつある状況である。

このような最近の研究においては、ラケットのハンドル部(いわゆるグリップ部)は実際には人間の手によって握られているにもかかわらず、拘束のまったくない自由の状態とみなした解析が多い。この点を正当化する理由としては、人間系を切り離して純粹にボール・ラケット系だけの基本特性を知ることがそもそも

の目的であるということも少なからずあるが、ボールのはね返り速度がグリップ部を万力で固定した場合とグリップ端を地面に接してラケットを立てた場合とでほとんど変わらないという実験事実⁽⁵⁾が知られており、グリップ部の境界条件の設定の違いがラケットの反発性能評価に影響を与えないであろうという判断による場所が大きい。

ボールのはね返り速度と入射速度の比(本論文ではこれを反発係数と定義する)がグリップの固定の度合いに影響を受けないことを、力学モデルを使って解析的に説明しようとする試みはLiu⁽⁶⁾やMissavageら⁽⁷⁾によってすでに行われている。これらの研究では、ボールと剛体フレームの偏心衝突モデルにおいて、接触時間、衝突前後のボールとフレームの相対速度比などがグリップ部の境界条件にかかわらず一定であるとみなし、ストリングス面の中央にボールが衝突するものとして解析を行い、反発係数を支配する因子のうちグリップ部の境界条件の影響を受けるのはグリップ端の反モーメントのみであって、しかもその値は実際上零とみなせることを示して、反発係数がグリップ端の影響を受けないと結論づけている。グリップ端の反モーメントが無視できることを、Liuは実験事実を基にした考察より、Missavageらは弾性はりの運動方程式

* 原稿受付 平成6年5月23日。

*¹ 正員, 成蹊大学工学部 (〒180 武蔵野市吉祥寺北町3-3-1)。

*² 正員, 埼玉工業大学 (〒369-02 埼玉県大里郡岡部町普濟寺1690)。

において調和振動を仮定し、軸方向に差分法を用いて解くことにより求めている。

しかし、これらの研究ではボールとラケットの衝突という物理現象において、どのようなメカニズムによってグリップ端の境界条件の違いが反発係数に影響を及ぼさないかについてはほとんど明らかにされていない。したがって、従来のラケットとは特性がかなり異なる新開発のラケットの場合や、人間系までも考慮した最適設計を行おうとする場合においても、グリップ端の境界条件をどのようにモデル化すれば適切かについて信頼できる知見を与えているとはいえない。

そこで、本研究においては、シミュレーションによりボール・ラケット系の衝突現象をグリップ部の境界条件を変えて解析し、それによる反発速度、接触時間の変化を調べ、その結果に至るメカニズムを明らかに

する。

2. 力学モデルと解析方法

力学モデルは前報⁽¹⁾と同様に図1(a)に示すものを用いる。ボールのスピンは無視してボールとラケットの正面衝突を考える。静止したラケットにボールが衝突するものとするが、ボールの衝突速度をボールとラケットの衝突位置の相対速度とすれば、ラケットの基本特性を調べる上では問題がないと考えられる。ボール・ストリングス複合系は1自由度で近似し、ストリングスの質量はフレーム質量に含め、ボールを質量 $m_b (=55 \text{ g})$ の質点とみなし、この質点がボールとストリングスを一体化した複合ばねで衝突位置においてフレームと接続している。このとき複合ばねは強い非線形性を有するが、変形量は衝突速度 V_{B0} ごとに定まるので、複合ばねの等価線形剛性 K_{GB} を衝突速度ごとに求めて、線形化している⁽⁸⁾。具体的には、表1に示す打撃面上の平均的な値を K_{GB} の値として用いる。

ボール・ストリングス系の複合減衰 C_{GB} は、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実験では衝突速度に拘らず反発係数がほぼ一定の値0.83になることから同定可能で、等価減衰係数比 ζ が一定値0.059となり、 $C_{GB} = 2\zeta\sqrt{m_b K_{GB}}$ により算定される⁽¹⁾。しかし、メカニズム探求の目的においては、複合減衰は不可欠な因子ではないので、これを無視したほうが理解しやすい。したがって、本解析のほとんどの場合において減衰は無視している。

フレームは段付きの Bernoulli-Euler はりとみなし、20要素の有限要素で近似する。標準的なラケットを想定し、全長 $L=680 \text{ mm}$ および図1(a)に示す曲げ剛性 EI 、単位長さ当たりの質量 ρA を採用する。これによりラケット実系と全長、全質量(360 g)、重心位置(グリップ端から308 mm)、1次および2次の曲げ固有振動数(それぞれ122 Hz および337 Hz)が一致

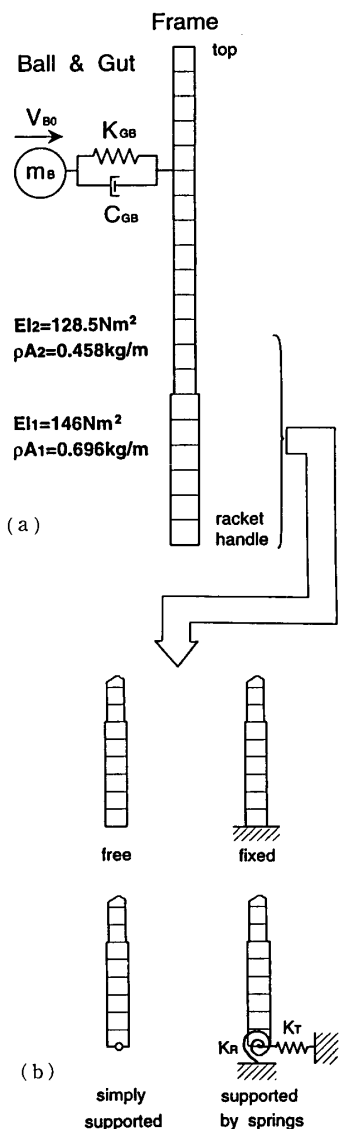


図1 解析モデルとそのグリップ端の境界条件

表1 ボール・ストリングス複合系の等価ばね定数 K_{GB} の値

V_{B0} (m/s)	K_{GB} (N/m)
5	1.21×10^4
10	1.37×10^4
20	2.74×10^4
30	5.00×10^4
40	8.33×10^4

する。

さらに、はりにおいて高次の固有振動(すなわち、波長の短い振動)が関与する場合には、はりのせん断剛性と回転慣性を考慮した Timoshenko はりを用いて解析することが必要となる。この点を配慮してフレームを段付きの Timoshenko はりとみなした解析も併せて行っている。Timoshenko はり要素は Bernoulli-Euler はり要素に比べて収束が遅いので要素分割数を2倍にしている。標準的なラケットのせん断剛性を同定するため Bernoulli-Euler はりの場合に加えて3次の曲げ固有振動数(669 Hz)まで実系と一致させている。このとき、せん断剛性は $(kGA)_1 = 1.556 \times 10^6$ N, $(kGA)_2 = 1.369 \times 10^6$ N となる。

グリップを手で握る位置をグリップ端で代表させて、図1(b)に示すような境界条件で解析する。最も一般的な境界条件として図1(b)の下段に示すよう

に、グリップ端を並進ばね K_T と回転ばね K_R で支えた場合も解析する。

衝突現象の解析はボール・ラケット全系に対して Runge-Kutta 法に基づく直接積分とモード解析を同時に行って、両者の結果を互いにチェックしながら進めている。Runge-Kutta 法では時間きざみを $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 秒としている。モード解析においては、剛体モードを含めて低次から9個のモードを採用している。さらに、フレームの個々の振動モードがどの程度ずつ寄与しているかを明確にするため、後述のようにフレームのみをモード解析し、ボール・ストリングス系と結合して Runge-Kutta 法により直接積分を行う方法も併用している。

3. 解析結果および考察

3・1 境界条件の影響 当然ながら、Runge-

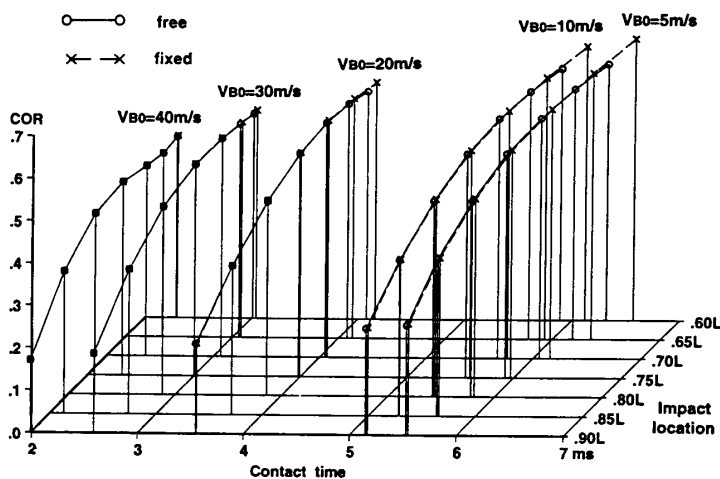


図2 衝突速度と衝突位置に関する反発係数と接触時間の変化(標準ラケット, $\zeta=0$)

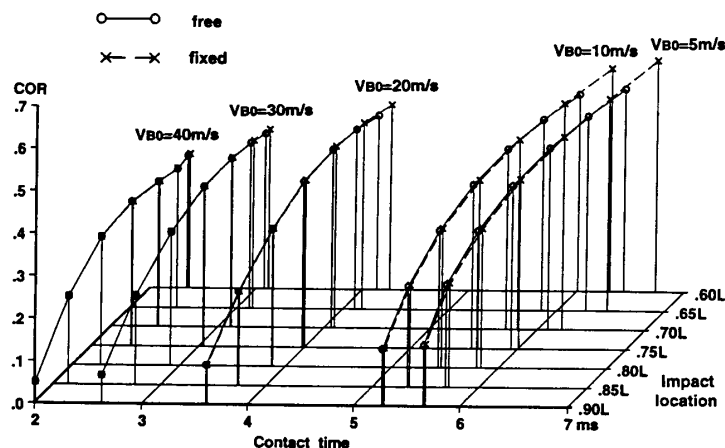


図3 衝突速度と衝突位置に関する反発係数と接触時間の変化(標準ラケット, $\zeta=0.059$)

Kutta 法とモード解析による解析結果は完全に一致する。したがって、どちらの手法による結果であるかについては明示しない。衝突速度と衝突位置(衝突位置 l_{imp} はグリップ端からの距離をフレーム全長 L との比で示す)を変えたとき、反発係数と接触時間がどのように変化するかを、グリップ端の境界条件を自由と固定の両方で計算して両者を比較した。その結果についてボール・ストリングス複合系の減衰を無視した場合を図 2 に、等価減衰係数 $\zeta=0.059$ に相当する減衰を与えた場合を図 3 に示す。これらの図より、全体的に境界条件の違いによる差は小さく、その差は衝突速度が高い場合(すなわち接触時間が短い場合)には極めて小さく、衝突速度が低い場合(すなわち接触時間の長い場合)にはいくぶん大きくなり、さらに衝突位置がグリップ端に近いほど大きくなっているなどの点が読取れる。図 2 と 3 を比較すると、ボール・ストリングス系の減衰により反発係数はほぼ一律に 0.125 ± 0.015 だけ下がり、接触時間はごくわずか(3%程度以下)長くなることがわかる。

3.2 高剛性ラケット ラケットの剛性が高い場合にどうなるかを調べるため、打球方向のフレーム厚さが標準ラケットの約 1.5 倍の高剛性ラケット(全長が 680 mm, 全質量が 370 g, 重心位置がグリップ端より 317 mm, 1 次および 2 次の曲げ固有振動数がそれぞれ 215 Hz および 562 Hz)について、図 1 (a) のモデルの曲げ剛性 EI , 単位長さ当たりの質量 ρA を基本特性がラケット実系と一致するように定めれば、 $EI_1=298 \text{ Nm}^2$, $EI_2=441 \text{ Nm}^2$, $\rho A_1=0.667 \text{ kg/m}$, $\rho A_2=0.492 \text{ kg/m}$ となる。この高剛性ラケットに対して図 2 と同様な解析を行った結果が図 4 である。図 2 と 4

を比較すると、高剛性ラケットではオフセンタ ($0.75L$ の衝突位置がほぼ打撃面のセンタである) の衝突において反発係数が標準ラケットよりも増加し、その増加量は打撃面グリップ側において衝突速度が高いほど大きく、衝突速度 $V_{B0}=40 \text{ m/s}$, 衝突位置 $l_{imp}=0.6L$ においては 0.14 程度である、接触時間は両ラケットの間で最大 5% 程度までの差が生じていることなどがわかる。しかし、ここで注目すべきことは、グリップ端の境界条件の違いによって反発係数および接触時間に差が生じている領域が、高剛性ラケットにおいて広がっていることである。この差は衝突速度が低いほど、そして衝突位置がグリップ端に近いほど大きくなっている。

3.3 Timoshenko はりモデル 図 2~4 はフレームを Bernoulli-Euler はりとした解析の結果であるが、同様の解析を Timoshenko はりで行った結果と比較すると、両者の差は反発係数で 0.002 以下、接触時間で 0.4% 以下で非常に小さい。このことは、ボール・ラケット系の衝突・振動現象に、フレームの高次振動が関与していないことを物語っている。

3.4 現象のメカニズム 図 2~4 の結果が生ずるメカニズムを探るため、ボールの衝突によってフレームに生ずるたわみ波がフレームの中をどのように伝ばしていくかに着目する。この目的のため、標準ラケットのボール・ストリングス系の複合減衰を(この減衰はフレーム内の減衰とは無関係なので、フレーム内のたわみ波の伝ば速度に直接影響を与えないと判断して)無視した場合について代表的な二つのケースについて考察する。すなわち、グリップ端の境界条件の違いにより結果に差がほとんど現れない $V_{B0}=30 \text{ m/s}$, l_{imp}

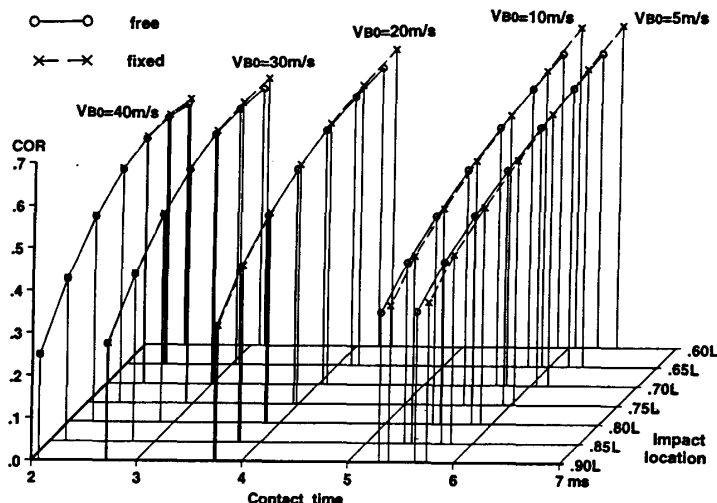


図 4 衝突速度と衝突位置に関する反発係数と接触時間の変化(高剛性ラケット, $\zeta=0$)

$=0.75L$ の場合といくぶんの差が現れる $V_{B0}=10$ m/s, $l_{imp}=0.6L$ の場合について比較する。

両ケースについて、衝突間のフレームの変形を時系列的に示した結果が図5の上段および中段である。この図から、ボールの衝突により衝突位置に発生したフレームのたわみ波が、時間の経過に伴ってフレーム内を伝ばしていくようすが読取れる。この図の観察により、ボール・ラケット系の衝突現象におけるグリップ端の境界条件のかかわり方のメカニズムについて次のように考えることができる。すなわち、グリップ端の方向へ伝ばしたたわみ波はグリップ端で反射して衝突位置のほうへ戻ってくる。このとき、グリップ端の境界条件が違えば反射の様相も当然異なり、異なった反射波が戻ってくることになる。したがって、この異なった反射波が衝突位置まで戻ってきてボールに作用して異なった反力を与えれば、ボールの反発速度やボールとラケットの接触時間に差を生じることとなるし、逆にこの反射波が衝突位置まで戻ってくることがなければ、ボールの作用に何らの差を与えず、グリップ端の境界条件の違いが影響を及ぼさないこととなる。

上述のメカニズムを裏づけるため、たわみ波がグリップ端で反射することなく伝ばしていく状況を仮想的に作り、リリースするまでにたわみ波がどこまで伝ばするかを調べる。このため、フレームを模擬したはりを

をグリップ端側に半無限に伸ばした(実際には、全長を $10L$ とし、半無限側 L の長さまではグリップ端に関して対称とし、それより先はトップ側の剛性および単位長さ当たりの質量をもつものとした)モデルにボールを衝突させたときの解析を行い、結果を図5の下段に示す。さらに、フレームを模擬したはりのたわみから半無限長はりのフレーム相当部分のたわみを差引くと、フレーム内でのたわみ波のグリップ端での反射波のみが得られ、より関心の高い反射波の接触時間内での挙動が明確になる。こうして得られたグリップ端での反射波の挙動をグリップ端の境界条件が自由と固定の場合についてそれぞれ図6の上段と中段に示す。図6の下段はグリップ端の境界条件が単純支持の場合の反射波であって、この場合反射波は図5の下段の透過波をグリップ端に関して点対称になるように折り返したものである(ただし、図6(b)において反射波がフレームのトップでさらに反射することの影響分だけは透過波とずれる)ことが示されている。

図5(a)によると、 $V_{B0}=30$ m/s, $l_{imp}=0.75L$ では、グリップ端の境界条件が自由と固定の場合において、フレームの変形はグリップ端近傍を除いてほとんど差異がみられず、これらと半無限長はりを比べても衝突位置附近では差は極めて小さい。この場合、図5(a)の下段および図6(a)からわかるように、接触時間の範囲内では、主要な反射波は衝突位置から離れた所ま

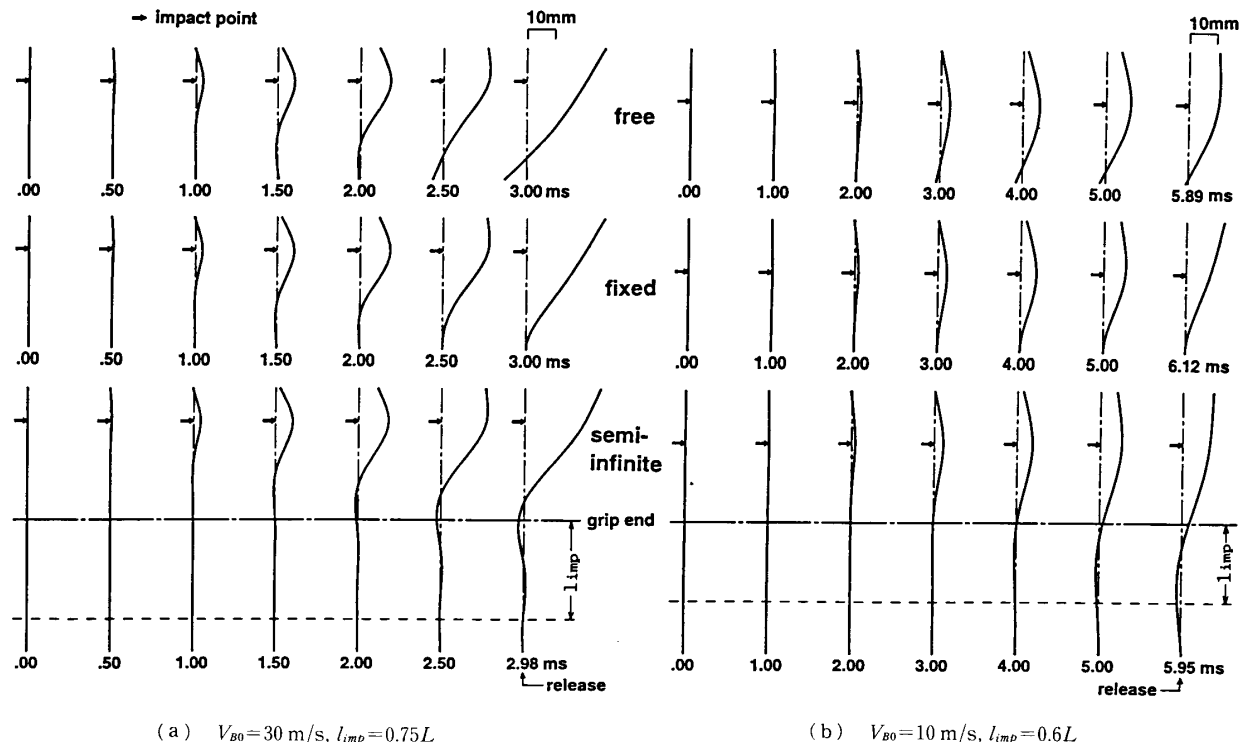
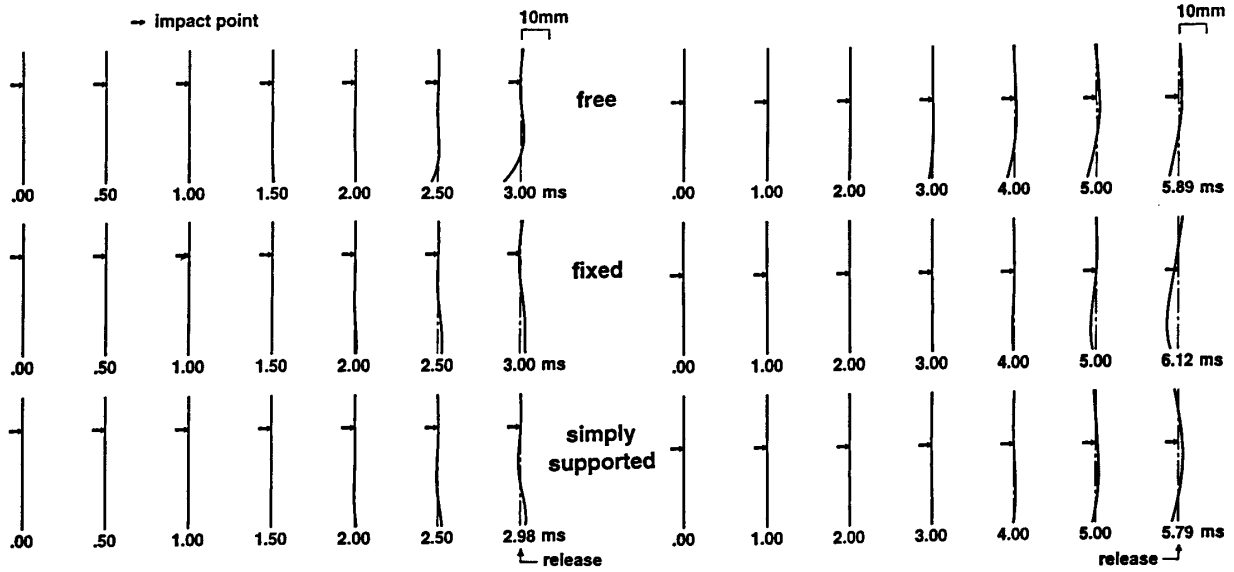


図5 フレームの変形形状の時系列的变化



(a) $V_{B0}=30 \text{ m/s}$, $l_{imp}=0.75L$

(b) $V_{B0}=10 \text{ m/s}$, $l_{imp}=0.6L$

図 6 グリップ端で反射するたわみ波の時系列的変化

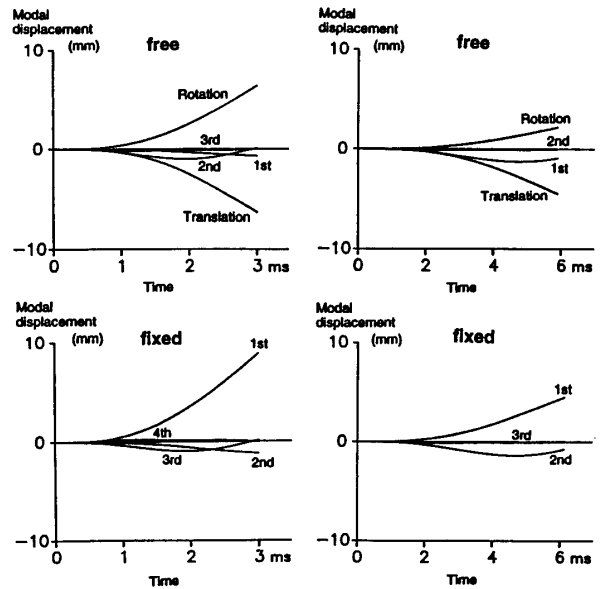
でしか届いておらず、反射波の影響がほとんどないことが理解できる。

これに対して図 5 (b) および図 6 (b) の $V_{B0}=10 \text{ m/s}$, $l_{imp}=0.6L$ の場合においては、グリップ端で反射したたわみ波のうち接触時間内に衝突位置まで届くものの大きさは、図 5 (a) および図 6 (a) の場合に比べていくぶん大きくなっている。その結果、グリップ端の境界条件が自由と固定の場合のリリース時の変形形状にいくらかの差が生じていると判断できる。

3・5 メカニズムの数値的検討 以上に述べたことを大雑把ではあるが、数値的に確認する目的で接触時間内に反射波が進む距離を概算する。これはグリップ端の反射に減衰がないものとするれば、半無限長はりの透過波の到達距離を算定することによって得られる。

はりの中を伝ばするたわみ波は分散性の波であって、波長の短い高次の波ほど伝ば速度(すなわち位相速度)が大きい。これら位相速度の異なる多くの次数の波の合成されたものがたわみ波を形づくっており、この合成波は群速度で伝ばしていく。したがって、衝突現象に関与するフレームのたわみ振動の次数成分を知り、これらの次数成分の合成波としてのたわみ波の群速度を知ることが必要である。

そこでまず、フレームを単独でモード解析し、得られたモード変位(モード座標)を用いて、ボール・ストリングス複合系を含めた全系の運動方程式をたて、この運動方程式を Runge-Kutta 法で解くことにより衝突解析を行う。こうすることによって、フレームのモ



(a) $V_{B0}=30 \text{ m/s}$, $l_{imp}=0.75L$

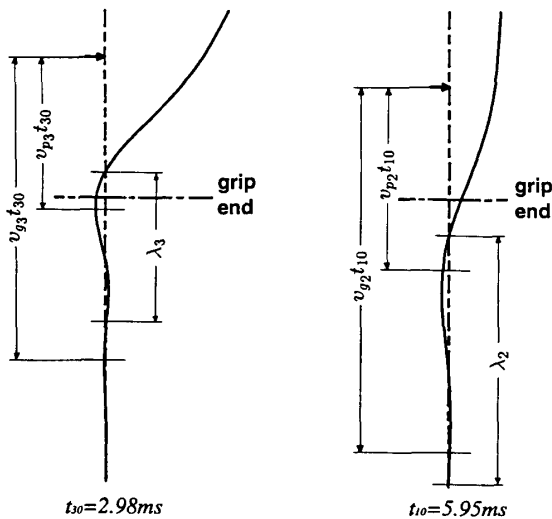
(b) $V_{B0}=10 \text{ m/s}$, $l_{imp}=0.6L$

図 7 フレームのモード変位の時刻歴

ード変位の大きさから、フレームの各次の固有振動成分の寄与度が明確になる。この解析を上述の二つのケースについて行った結果が図 7 であり、フレームのモード変位の接触時間内での変化が描かれている。ここで、フレームの振動次数の表現では剛体運動(振動数 0 Hz)を除いてカウントしている。図 7 よりフレームの振動のうちせいぜい 3 次までの低次のモードのみが関与していることがわかる。

具体的な計算の簡略化のため、フレームは $EI=135 \text{ Nm}^2$, $\rho A=0.529 \text{ kg/m}$ の一様はり(全長 680 mm のフ

レーム・モデルにおいては、段付きはりとし、1次および2次の曲げ固有振動数がほぼ一致する)とし、近接場の影響は無視して進行波のみを考える。このとき、 $c = \sqrt{EI/\rho A} = 15.97 \text{ m}^2/\text{s}$ である。 $V_{B0} = 30 \text{ m/s}$ 、 $l_{imp} = 0.75L$ では無視できない最高次のモードはグリップ端が自由のとき2次、固定のとき3次で、両者の進行波は波長が $\lambda_3 = 4L/5$ 、位相速度が $v_{p3} = 2\pi c/\lambda_3 = 184 \text{ m/s}$ の同一な波である。群速度 v_{g3} は、Bernoulli-Eulerはりとして、 $v_{g3} = 2v_{p3}$ が成り立つとみなせば、 $v_{g3} = 368 \text{ m/s}$ であり、フレームを打球方向の厚さが 19 mm の長方形断面のTimoshenkoはりとし、 $v_{g3} = 363 \text{ m/s}$ である⁽¹⁰⁾。半無限長はりにおいて、この進行波が無視できない大きさの波としては最も速く進む、接触時間 $t_{30} = 2.98 \text{ ms}$ の間にこの進行波が進む距離 $v_{g3}t_{30} = 1.6L$ を、リリース時の半無限長はりの変形状の図に書き込むと図8(a)のようになる。この到達位置近くまで進んでいる波の一波長に合せて進行波の波長 λ_3 を書き入れてみると図8(a)に見られるようにほぼ一致する。すなわち、半無限長はりモデルでグリップ端位置を透過した進行波はリリース時に衝突位置から $1.6L$ 離れた位置に到達する。したがって、透過波は反射波が衝突位置に戻ってくるまでの距離 $2l_{imp} = 1.5L$ にようやく達した程度である。この計算が概算であって誤差を含むことや、到達した群の先端の振幅は零であり、この先端から群の構成成分である調和波の半波長 [図8(a)でいえば、 λ_3 の幅を示した波の下側の半波長] ぐらいまでのたわみ波の振幅は極めて小さくほとんど問題にならないことを考慮すると、



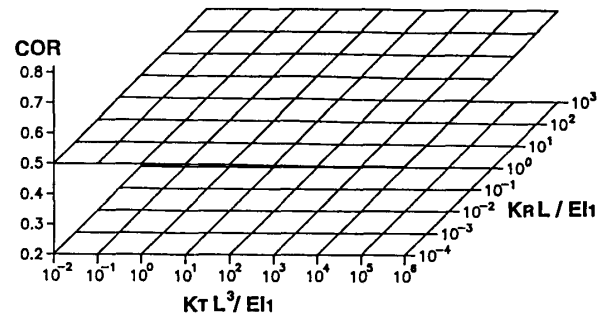
(a) $V_{B0} = 30 \text{ m/s}$, $l_{imp} = 0.75L$ (b) $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$, $l_{imp} = 0.6L$

図8 たわみ波の到達距離

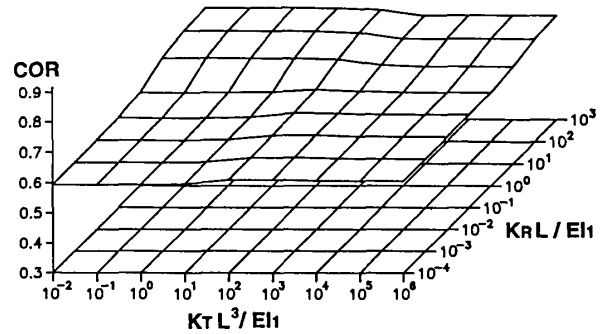
反射波のうち影響を与え得る部分は衝突位置まで戻ってきていないと結論づけられる。これに対して、 $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$ 、 $l_{imp} = 0.6L$ では無視できない最高次のモードはグリップ端が自由のとき1次、固定のとき2次で、両者の進行波は波長が $\lambda_2 = 4L/3$ 、位相速度が $v_{p2} = 2\pi c/\lambda_2 = 111 \text{ m/s}$ の同一な波である。群速度 v_{g2} は、Bernoulli-Eulerはりとして $v_{g2} = 222 \text{ m/s}$ であり、Timoshenkoはりとして $v_{g2} = 220 \text{ m/s}$ である。リリース時の半無限長はりの変形状の図に進行波の到達距離 $v_{g2}t_{10} = 1.94L$ を書き込むと図8(b)のようになる。この到達位置近くまで進んでいる波の一波長に合せて波長 λ_2 を描くと前と同様にほぼ一致する。このケースでは、リリース時に進行波は衝突位置から距離 $1.94L$ だけ進み、反射波が衝突位置に戻ってくるまでの距離 $2l_{imp} = 1.2L$ より十分長い距離を進み、衝突位置まで戻ってきた反射波はすでに無視できない振幅であることが図8(b)よりわかる。

3.6 境界条件の一般化

グリップ端の境界条件は自由と固定がその両極端な場合とはいいい切れない。したがって、グリップを手で握った場合のような、より一般的な境界条件で、どうなるかを調べておく必要がある。そこで、図1(b)の下段右に示すようにグリ



(a) $V_{B0} = 30 \text{ m/s}$, $l_{imp} = 0.75L$



(b) $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$, $l_{imp} = 0.6L$

図9 グリップ端を支える並進ばねのばね定数 K_T と回転ばねのばね定数 K_R の変化が反発係数に及ぼす影響

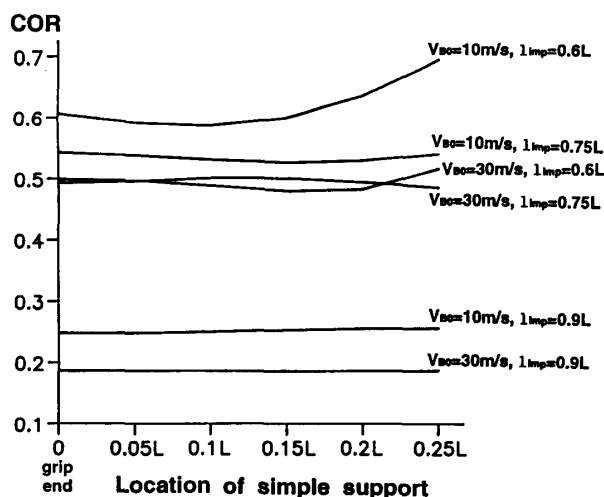
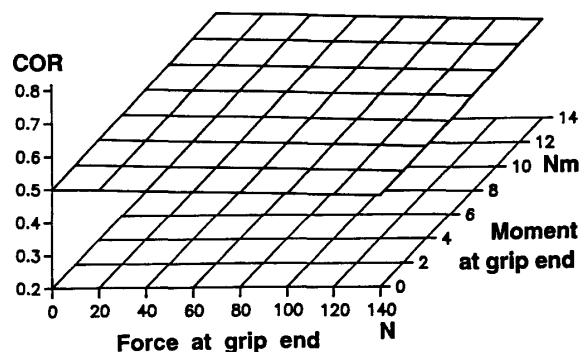


図 10 グリップ部を単純支持する位置が反発係数に与える影響

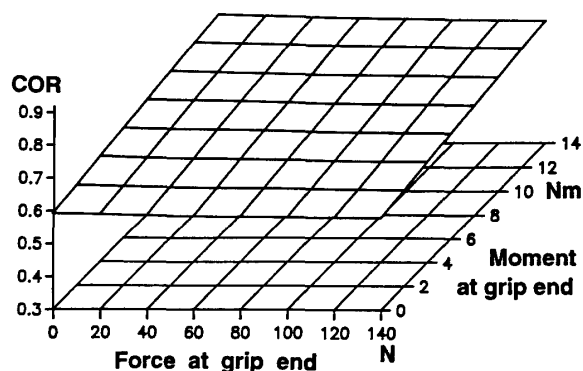
ップ部を並進ばねと回転ばねで支えて、これらのばね定数を変化させたとき反発係数がどう変わるかを、標準ラケットで $C_{GB}=0$ Ns/m とした場合について調べ、結果を図 9 に示す。この図から、 $V_{B0}=30$ m/s, $l_{imp}=0.75L$ では、グリップ端を支持するばねのばね定数にかかわらず反発係数はほぼ一定であるが、 $V_{B0}=10$ m/s, $l_{imp}=0.6L$ では、反発係数はばね定数によっていくぶん変化し、グリップ端が自由 ($K_T=K_R=0$) と固定 ($K_T=K_R=\infty$) の場合よりも、それらの中間のばね定数のほうがその変化が大きいことがわかる。

グリップを手で握るとき、その位置はプレーヤによってかなり差がある。そこで、グリップの握りを境界条件としての単純支持で模擬して、握りの位置の違いによる反発係数の変化を調べる。標準ラケットで $C_{GB}=0$ Ns/m としたときの結果を図 10 に示す。この図より、握り位置と衝突位置が十分に ($0.45L$ 以上) 離れていたり、衝突速度が高くて、反射波の影響を受け難い場合には、握りの位置の違いが反発係数に与える影響は十分に小さいことがわかる。

ラケットを振る動作からすれば、握りの作用はその位置を拘束することとともに、そこに力とモーメントを加えることに意味がある。そこで、拘束のないフレームのグリップ端に、一定の力とモーメントを加え、その大きさの違いによって反発係数がどのように変化するかを調べてみる。力とモーメントを一定値とすることは、接触時間がストローク全体の時間からみて十分に短く、その間の変化を無視できるので妥当と考える。加える力とモーメントの範囲については、ストローク中の最大値が力で 100 N 程度、モーメントで 10 Nm 程度であることが実測されている⁽⁹⁾ ので、これを



(a) $V_{B0}=30$ m/s, $l_{imp}=0.75L$



(b) $V_{B0}=10$ m/s, $l_{imp}=0.6L$

図 11 グリップ端に加える力とモーメントの大きさが反発係数に及ぼす影響

目安にしている。標準ラケットで $C_{GB}=0$ Ns/m としたときの結果を図 11 に示す。この図から反発係数は、 $V_{B0}=30$ m/s, $l_{imp}=0.75L$ ではわずかな変化 (± 0.02 以下) しか示さないが、 $V_{B0}=10$ m/s, $l_{imp}=0.6L$ ではモーメントの増加に伴って、0.1 程度増加することがわかる。この傾向はグリップ端をばねで支えてばね定数を変化させたときの傾向と大まかには似ている。

4. 結 言

グリップの握りをラケットの境界条件とみなしたとき、境界条件の違いがボール・ラケット系の衝突現象に与える影響をシミュレーションにより調べ、次の結論を得た。

(1) ボールとの衝突によりフレーム内に生じたたわみ波は、グリップ端 (より一般的には、握りの位置) で反射する。この反射の様相は境界条件によって異なる。したがって、反射波が接触時間内に衝突位置まで戻ってこなければ、境界条件の違いがボールの反発に影響を与えないし、逆に十分な大きさの反射波が戻ってくればボールの反発に差が生ずる。これがグリップ部の境界条件がボールの反発に関係する際のメカニズ

ムである。

(2) 標準的なラケットにおいて、ボールがラケットの縦の中心線上に衝突する場合、速度と位置が通常範囲の衝突では、グリップ部の境界条件の違いはボールの反発に影響を与えない。しかし、衝突速度が低くしかも打撃領域のグリップ側に衝突する場合にはこの限りではなく、反発に若干の差が出る。さらに、この差は高剛性ラケットではより出やすくなる。

(3) 人間系との接続を考慮しても、ボールとラケットが接触しているごく短い時間内では、一般的に境界(接続)条件の違いはボールの反発に重要な影響を与えないと判断できる。しかし、打球速度は反発に加えてラケット速度によって決まるので、人間がグリップを握って行うラケット操作は、打球動作全体で考えるべきものである。将来、より詳細なラケットの最適設計を可能にするためには、打球感、コントロール性能などの因子をも考慮して、人間系を含めた打球動作全

体の解析が必要となるが、この場合にポイントとなるラケットと人間系の接続モデルの簡略化に関して、本研究の成果は有益な指針を与え得ると思われる。

文 献

- (1) 川副・神田, 機論, 59-563, C(1993), 2116.
- (2) 川副・神田, 機論, 59-566, C(1993), 3108.
- (3) 山口・大貫・岩壺, 機論, 58-551, C(1992), 2165.
- (4) 松久・ほか5名, スポーツ工学シンポジウム, No. 930-69(1993), 166.
- (5) Baker, J. A. W. and Putnam, C. A., *Research Quaterly*, 50-2 (1979), 164.
- (6) Liu, Y. K., *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 15-5(1983), 388.
- (7) Missavage, R. J., Baker, J. A. W. and Putnam, C. A., *Reserch Quaterly*, 55-3(1984), 254.
- (8) 川副, 機論, 59-562, C(1993), 1678.
- (9) 平野・左海, 打つ科学, (1992), 74, 大修館書店.
- (10) Goldsmith, W., *Impact*, (1960), 36, Edward Arnold Ltd.