

テニスラケットの動力学とコンピュータ援用設計* (モード特性におよぼす諸因子の影響と設計への指針)

川 副 嘉 彦*¹

Dynamics and Computer Aided Design of Tennis Racket (The Influence of Some Factors on the Mode Characteristics and a View of Optimum Design)

Yoshihiko KAWAZOE

As a step toward the goal, i. e., the establishment of racket dynamics and the proposal of an improved evaluation system for optimum design, the effects of the support conditions of grip and the gut strings on the dynamic characteristics of the two different type of rackets are investigated using experimental modal analysis. The results show that the damping ratio and the decay rate of each mode are much greater and the damping of each mode scatters wider under the grip constraint condition than those of free-support, and also show that the gut strings contribute very little to the modal parameters within the frequency ranges of 600 Hz, in which no membran modes appear, but the damping is very small relative to the time during the ball/racket impact and the acceleration is large even in high-frequency modes. Accordingly, it may be safely assumed that the higher modes and the magnitude of acceleration are responsible for the stability of hitting surface.

Key Words: Dynamics of Machinery, Vibration, Damping, Impact, Support Condition, Experimental Modal Analysis, Identification, Tennis Racket, Gut Strings, Center of Percussion, Computer Aided Design

1. 緒 言

人間の腕によるスイングとラケットのフレーム・ガット(膜), およびボールの間の相互作用は力学系として興味ある対象である。

テニスの科学に関しては三浦ら⁽¹⁾の著書や, ラケットのモード解析に関しては呉ら⁽²⁾⁽³⁾の研究があるが, ラケットの動特性や最適設計については不明な点が多い。

本研究は, 人間の腕の振りによるラケットの剛体運動をグリップ部の境界条件として与え, テニスボールとガットの衝突時のインパルスを入力するという想定のもとに, テニスラケットの動力学と動特性の評価法の確立をめざす。この報告では, 第1段階として代表的な2種類のラケットについて剛体としての動特性を調べたうえで, グリップ支持条件およびガットのモード特性におよぼす影響を調べ, さらに両ラケットの差異を詳細に比較し, その結果に基づいて弾性体としての動的最適設計の指針を探る。

* 平成元年9月7日, 動力学・設計のための高度コンピュータ利用に関する国際シンポジウム'89において講演, 原稿受付平成元年9月19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)。

2. 実験モード解析システム

図1に作成した測定・解析システムの概略を示す。

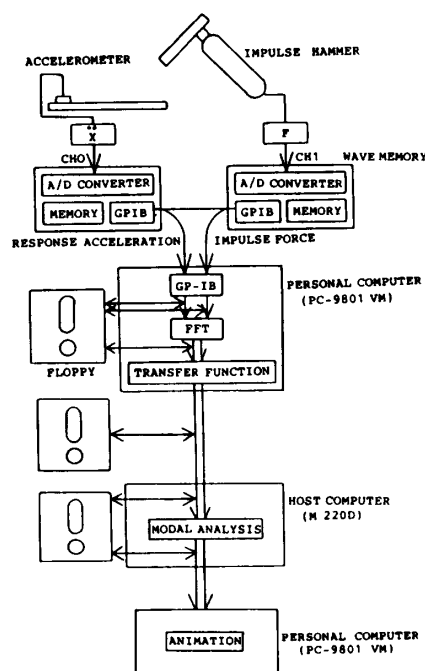


図1 測定・解析システムの概略

モード解析⁽⁴⁾はパーソナルコンピュータ(NEC PC 9801 VM)から転送された伝達関数の測定データを使ってホストコンピュータ(HITAC M 220 D)で実行し、その結果を再びパーソナルコンピュータに転送し、振動モードのアニメーションや結果の評価などのグラフィックス処理をおこなう。

3. 実験に使用したラケットの仕様と剛体としての動特性

供試ラケットの概略形状を図2(a)に示す。左はミッドサイズの標準的ラケット(ガット⁽⁵⁾)を含む重量: 3.53 N{360 gf}, 素材: ファイバグラス, グラファイト, セラミック, ケブラであり(以下, ラケット A とよぶ), 右は打球方向のフレームの厚みが標準ラケットの約1.5倍のラケット(重量: 3.63 N{370 gf}, 素材: 高弾性カーボン)であり(ラケット B とよぶ), 最近の代表的2種類である。両ラケットとも全長 $L=680$ mm, 公称打球面積 626 cm²{ 97 in²}, ガットの張力 246 N{ 55 lb}である。

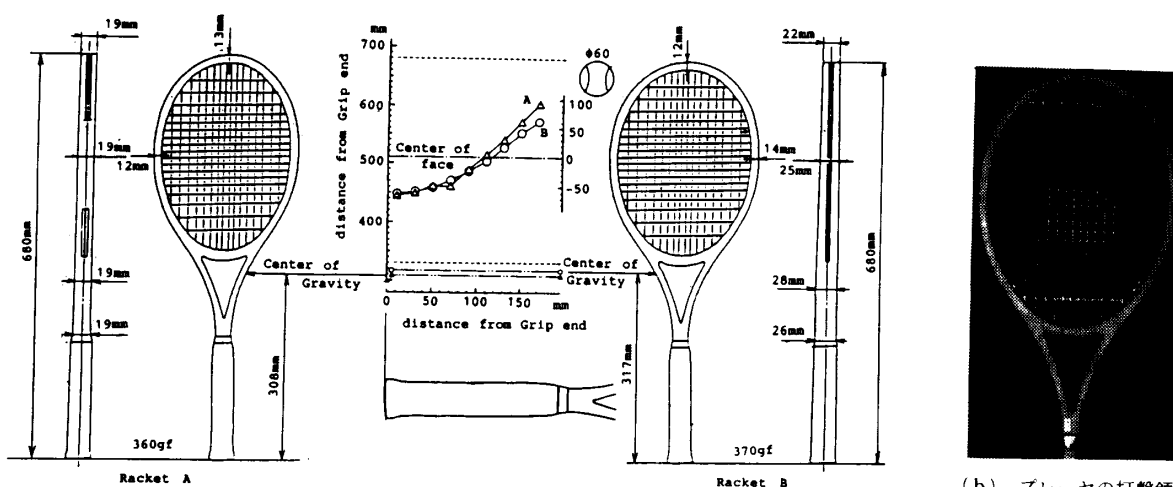
図2(a)の中央の図は、ラケットの重心位置およびラケットをグリップ支点軸まわりの剛体振り子とみなした場合のグリップ上の支点位置に対する打撃の中心位置を示す測定値であり、ラケットの剛体運動に関する動特性を示す。ガット面上の打撃点に対するグリップ上の無衝撃点、あるいはグリップ支点に対する打撃の中心位置がわかる。衝突面の径 60 mm のボールがラケット面の中心に当たると仮定した場合、グリップ上の無衝撃点のグリップ端からの距離は、ラケット A は $0.14L \sim 0.21L$ (平均 $0.17L=116$ mm), ラケット B は $0.15L \sim 0.23L$ (平均 $0.19L=129$ mm) であり、

両ラケットとも握りの位置のほぼ中心(70 mm = $0.11L$)から $50 \sim 60$ mm ずれている。また、 100 mm の握りの幅がグリップ端から 20 mm ($0.03L$) \sim 120 mm ($0.18L$) (平均 70 mm = $0.11L$) の位置にあるとすると、対応する打撃の中心の幾何学的ラケット面中心からの距離は、ラケット A の場合はシャフト側 74 mm から -2 mm の 76 mm 幅(平均位置 36 mm)であり、ラケット B の場合はシャフト側 74 mm から 10 mm の 64 mm 幅(平均位置 42 mm)である。標準的なグリップ位置(握りの中心位置)に対する打撃の中心は、両ラケットとも面の幾何学的中心から約 40 mm シャフト側にあることになる。

コート上のプレーヤ(著者)の打撃点を調べた結果が図2(b)であり、ガットにマジックインキをあらかじめ塗っておき、プレイした後に撮ったガット面の写真である。この写真の打撃領域は、図2(a)の打撃の中心とよく一致している。

4. ラケットの実験モード解析

4.1 研究方針と実験方法 打球時の瞬間的な衝突においては、グリップを強く固定しなくてもラケットはある点を支点として回転するはずであり、自由支持状態における同定のほうが従来のグリップ固定における同定⁽²⁾⁽³⁾よりもラケット固有の特性、とくに減衰を正しく与えるであろう。また、剛性を大きくして固有振動数を高くすると、減衰比は小さくなるはずであり、ガットの張力の大きさが現実の打球感に影響することから、ガットの膜の振動も打球面の安定性およびグリップの振動に關与するはずである。さらに非線形性の検討も必要であろう。この報告では、まず線形性



(a) ラケットの概略形状と剛体運動に関する動特性

図2 供試ラケット

を仮定したモード解析結果をこれらの観点から考察する。

グリップの自由支持条件としては、スポンジの上にラケットを横たえることにし、グリップ固定条件としては、グリップのまわりに柔らかいスポンジを巻き、グリップ端から 56 mm (0.08L) と 84 mm (0.12L) の間 (平均値 70 mm = 0.11L はストロークの際の握りの位置のほぼ中心に相当する) を万力ではさむことにした。加速度ピックアップ (2g) の位置は、グリップ部に近い二股のシャフトの片方のほぼ中央 (グリップ端から $0.41L = 280$ mm) に選んだ。データのサンプリング間隔は 200 μ s (周波数分解能 4.8 Hz) であり、インパルスハンマのチップには硬めのプラスチックを使用した。処理時間を短縮するため、今回は平均処理をしていない。

4.2 モード解析結果 図3は、上から各実験条件における固有振動数と概略の振動モード、ガットを打撃した場合のモード減衰比および減衰率の平均値を示す。また、モードシェイプの詳細を図4に、モード減衰比のばらつきを図5に示す。図6は、両ラケットについて変位 [図6(a)] と加速度 [図6(b)] のモードの大きさを比較したものである。

図4および図6から節の位置および変位の大きさを、図3および図5から減衰特性を考察する。

5. グリップ支持条件のモード特性 におよぼす影響

2種類のラケットについて、自由支持した場合の結果をグリップ固定の場合の結果と対照するとその特徴は以下ようになる。

グリップ自由の条件でのラケットAのモードは、剛体モードを除くと、一次はグリップ端から 0.20L (136 mm) の位置および面上に節がある 122 Hz の曲げであり、振動数はグリップ固定の場合の三次 (122 Hz) に等しく、面上の節の位置はほとんど同じである。しかし、減衰比約 0.007 は固定の 30% 以下である。二次の振動数 337 Hz は 3 節の曲げであり、グリップ端から 0.13L の位置 (固定部 $0.12L = 84$ mm に近い) に節があり、面上の二つの節の位置はほぼグリップ固定の場合の四次 (347 Hz) のモードに似ているが、減衰比 0.006 は固定の 30% である。三次の 366 Hz (2 節ねじり) は固定の五次 396 Hz のモードに似ているが、減衰比 0.009 は固定の 30% である。四次の 576 Hz は、フレームがほとんど振動しない膜 (ガット) の一次振動モードである。五次の 669 Hz は 4 節曲げであり、六次の 874 Hz はねじりの節が縦に一つ、横に

二つ、曲げの節がグリップ端近くに一つある。グリップ固定の片持モード (一次) 20 Hz に対して、自由支持における剛体モードの振動数は約 24 Hz であった。

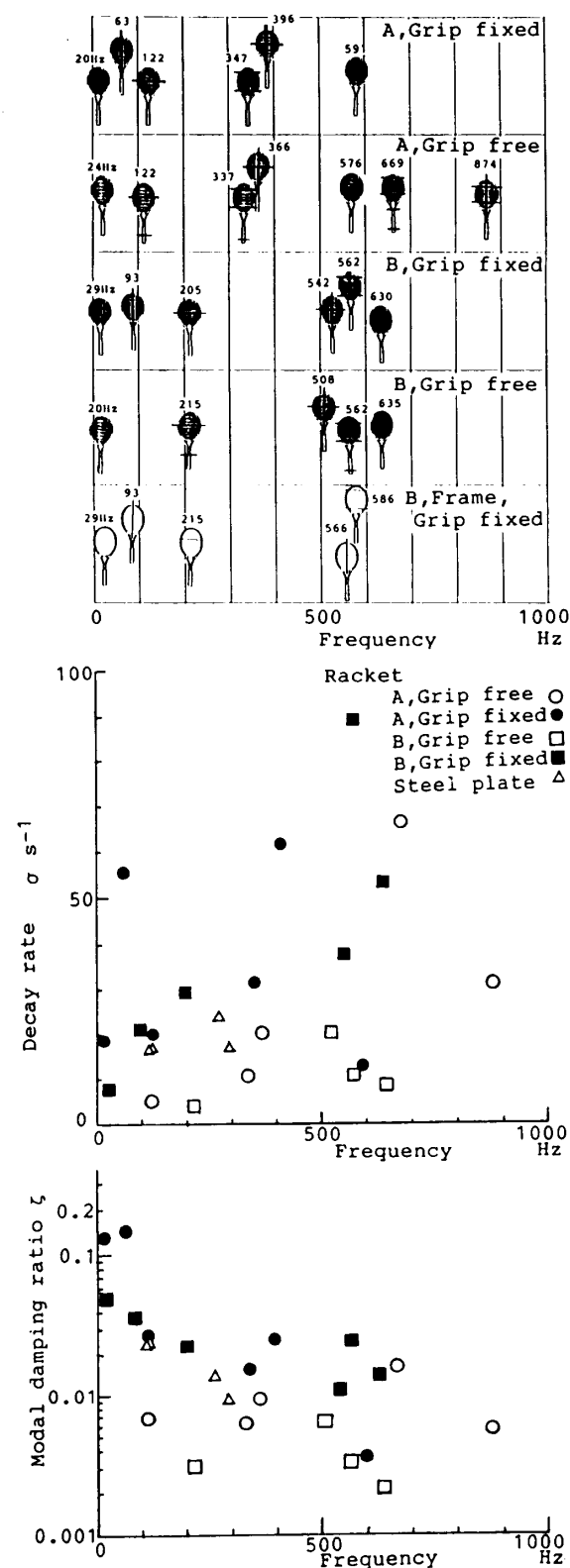


図3 種々の実験条件における概略モード形状・平均減衰率・平均減衰比

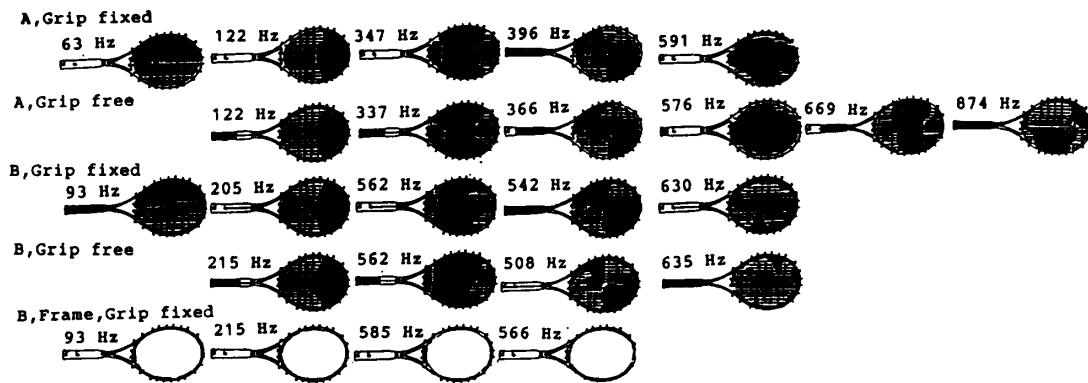


図 4 種々の実験条件における詳細モード形状

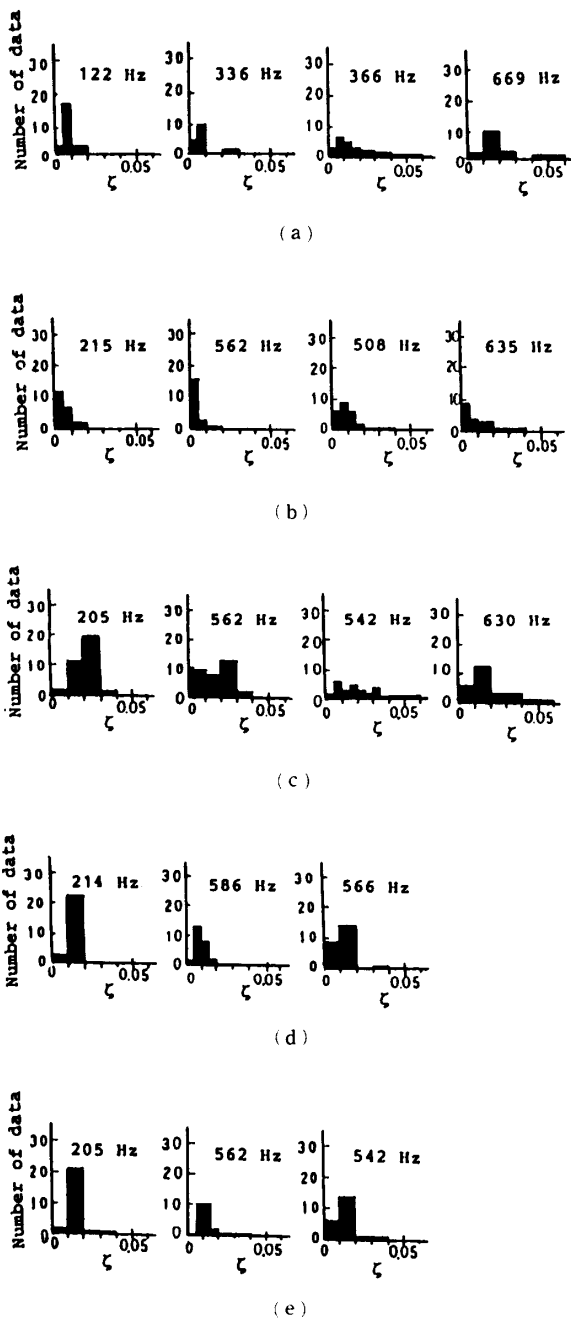


図 5 種々の実験条件におけるモード減衰比のばらつき

グリップ自由の条件でのラケット B(厚ラケ)のモードは、剛体モードを除くと、一次の 215 Hz はグリップ端から 0.30L (204 mm) の位置および面上に節がある曲げであり、グリップ端の変位が大きい。減衰比は非常に小さく (0.002)、固定の 10% である。二次の 508 Hz (2 節ねじり) は固定の四次 542 Hz に似ているが、減衰比 0.006 は固定の 50% である。三次の 562 Hz は固定の五次の 562 Hz のモードに似ており、グリップ端から 0.19L の位置 (固定部 0.12L = 84 mm に近い) に節があり、面上の二つの節の位置はほぼ固定の場合に近いが、減衰比 0.002 は非常に小さく、固定の約 10% である。四次 635 Hz (膜のモード) の減衰比 0.002 も小さく、固定の 10% である。

図 5 は、自由支持より固定のほうが、曲げよりねじりのほうが減衰比のばらつきが大きいことを示している。

6. ガットの影響

公称値 246 N (55 lb) でガットを張った場合とフレームのみの場合のモード特性を、グリップ固定のラケット B について比較すると、膜のモードが現れない 600 Hz 以下の周波数領域では、フレームのみの場合 (質量 4% 減) の振動数はガットを張った場合のそれよりやや高い (4% 増す) が、フレーム上の節の位置は似ている (図 3~6)。また、フレームを打撃した場合の各モードにおける減衰比もガットを張った場合のそれとほぼ等しい [図 5 (d), (e)]。人間の感覚はガットの影響を明らかに識別するから、もっと高次の振動モードも考慮すべきであろう。

7. 両ラケットの比較

ラケット B のモードはラケット A のそれとほとんど同じであるが、振動数はラケット A の約 1.4 倍 (ねじり) ~ 1.8 倍 (曲げ) であり、変位は小さいが、加速度

はむしろ大きい(図6)。また、ラケット B の二次と三次(自由支持)のモードがラケット A の場合と逆になっている。

ラケット B と同種類のラケットに関する各メーカーのカタログによると、設計で重視しているのはグリップ固定における三次の曲げ振動のようであり、剛性を高めて振動数を約 2 倍にして振動の周期をボールとラケットの接触時間に近づけることによりエネルギー伝達率を高め、さらに減衰率も 2 倍にしたという。しかし、ラケット B とラケット A のモード減衰比(図3)は、一次の曲げがそれぞれ 0.002 と 0.007、二次のねじりは両者とも 0.006、三次の曲げは 0.002 と 0.009 であり、ラケット B は A の約 20~25% である。興味

深いのは、両ラケットの減衰率がほぼ等しく、三次でも 20 s^{-1} であり、ラケットとボールの衝突時の接触時間(高速ビデオ測定によると約 0.004 s)にくらべて非常に小さい。図3の減衰率の結果は、グリップ固定でもインパクトの間にほとんど減衰しないことを示している。

図7は、グリップ自由の場合のボールの打撃点と励振されるモードを両ラケットについて推定したものであり、左半が変位、右半が加速度である。図7(a)は面の中心に節のないモードの振幅を足し合せたもので、打撃点が面の中心に近い場合の、いわば上級者の振動モードである。図7(b)は、面の中心に節のあるモードの振幅を足し合せたもので、打撃点が中心を外れて斜

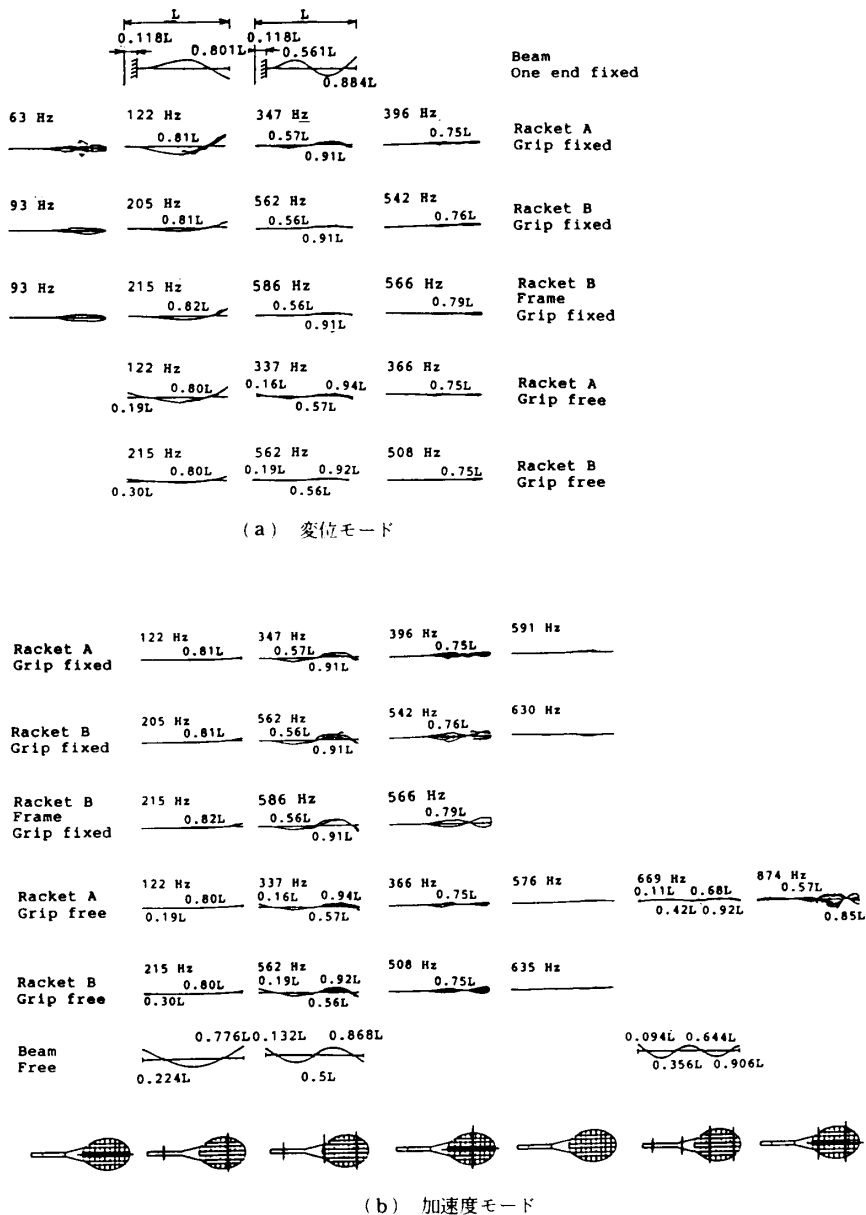


図6 種々の実験条件における振動モードの大きさと節の位置

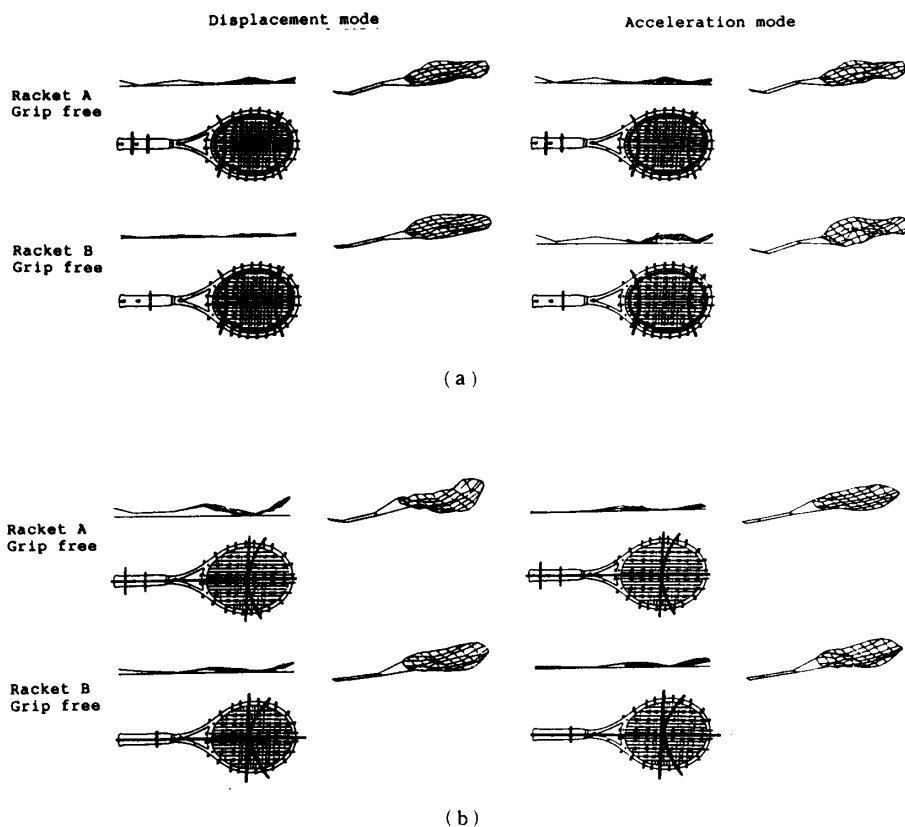


図7 ガット面上の打撃点と励起されるモードの予測

めの場合の、いわば初心者のモードである。

すべての変位モードを足し合せ、変位の小さい領域がスイートエリアとすれば明らかにラケットBのほうが広い。しかし、加速度は大きい。著者の打球感からも、加速度も面の安定性あるいはスイートエリアに関与すると推定する。インパクトの速度が大きいほど影響は大きいであろう。

8. 最適設計の指針

グリップ上の支点と打撃の中心の関係、すなわち剛体としてのバランスをとり、さらに自由支持状態での変位と加速度の大きさ、およびインパクトにおけるボールとガットの接触時間に対する減衰率を評価すべきである。着目する振動モードの節をラケットの励振源(ボールの衝突)の位置に近づければ、そのモードは減少するはずであり、このような方針で構造変更の方法(最適化手法)を探っていけば、容易ではなさそうであるが、最終的には身体的条件や技術レベルに応じたラケットの最適設計法が得られるであろう。

9. 結論

以上の内容を要約すると以下ようになる。

- (1) グリップの握りの中心に相当する位置を固定

した実験は、自由支持の場合にくらべて非常に大きい減衰比と減衰率を与え、減衰のばらつきも大きい。

(2) ガットの振動は600 Hz以上であり、これ以下の振動数範囲ではラケットの振動におよぼすガットの影響はほとんどない。

(3) 実験に使用した代表的な2種類のラケットの減衰比、減衰率は高次までかなり小さく、インパクトにおけるボールとガットの接触時間内にほとんど減衰しない。ただし、どの周波数域まで問題になるかはボールとガットの衝突時のインパルス波形による。

(4) 固有振動を高めたラケットの場合、変位は減少するが加速度は大きい。

(5) グリップの握りの中心を支点とするラケット剛体振り子の打撃の中心がガット面の幾何学的中心にくるようにバランスをとり、自由支持状態でのモード変位と加速度および減衰率を評価すべきである。高次の膜としての振動も面の安定性およびグリップの振動に関与するであろう。

最後に、ご討論をいただいた東京工業大学 長松昭男教授に深謝し、研究室をともにする関口晃教授に日頃のご援助を感謝し、1988年度卒研 大谷篤士・小林正憲・竹田正義の三君のご助力にお礼申し上げる。

文 献

- (1) 三浦・蝶間林, テニスの科学, (1980), 光文社.
 - (2) 呉・廉, 機論, 51-472, C(1985), 2966.
 - (3) 呉・ほか3名, 機論, 53-488, C(1987), 940.
 - (4) 長松, モード解析, (1985), 124, 273, 培風館.
 - (5) JIS S 7009, テニスラケット, (1982).
-