

モード解析によるテニスラケットの振動特性  
に関する研究(テニス(1))

NAGAMATSU, Akio / SUZUKI, Kaoru / IWAHARA, Mitsuo /  
ODATE, Jun / 大館, 淳 / 岩原, 光男 / 鈴木, 芳 / 長松, 昭  
男

(出版者 / Publisher)

日本機械学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集

(巻 / Volume)

2004

(発行年 / Year)

2004-11

## A12 モード解析によるテニスラケットの振動特性に関する研究

The research on vibration characteristic of tennis racket by the modal analysis

○大館 淳(法政大院) 岩原 光男(法政大)  
鈴木 芳(法政大) 長松 昭男(法政大)

Jun ODATE, Hosei University Graduate school, Kajinoty3-7-2 Koganei-si Tokyo  
Mitsuo IWAHARA, Hosei University  
Kaoru SUZUKI, Hosei University  
Akio NAGAMATSU, Hosei University

The purpose of this research is that clarifies and improves the vibration characteristic by experiment and calculation in order to do the countermeasure of the vibration problem by predicting in the design development and to shorten the development time. This study compares and examines the vibration in the case in which the ball was struck actually and was dropped with the experimental mode analysis using familiarly used tennis racket. It was proven that the second mode appeared, when it struck it by excluding sweet spot. Future schedule carries out the structural optimization of model tennis racket using the anti-resonance point transfer theory.

**Keyword:** Vibration, Modal Analysis, Anti-Resonance point, Structural Optimization

### 1. 緒言

快適性や環境との調和がますます重要視される今日において、自動車や電化製品など、工業製品の発生する振動・騒音の人体に与える身体的、心理的影響を考慮することが必要不可欠である。

振動問題を解決するには、対象物の振動特性を正確に把握する必要がある。このためには有限要素法等の理論解析とともに振動実験を実施することが不可欠である。振動実験において最近発展を遂げているのが、実験モード解析である。

実験モード解析は、実物や模型の振動実験で得られたデータから周波数応答関数を求め、実物や模型を数学的にモデル化し、固有振動数・固有モード・モード減衰比を求め一連の解析のことを言う。

現在は数多くの製品がエンジニアの経験と勘により設計され、試作と実験を繰り返すことにより開発されている。今後さらに厳しくなる設計条件を満たし、振動問題を設計開発の段階で予知して対策するため、および開発時間を短縮するために、実験と計算により振動特性を解明し向上させることを目的としている。

今回は身近に使われているテニスラケットを使用し、振動特性が人に与える影響を研究する。まず、実際に球を打った際の振動を実測する。加速度ピックアップは人体に影響する場所としてグリップエンドに接着し、テニスラケットは初心者用と上級者用を比較した。次に、ボール落下実験を行い、実打時の現象を再現した。この実験では実打より詳細にデータを得ることができる。実験モード解析を2種類のテニスラケットに適用し、固有振動数・固有モード・モード減衰比を求め、上記2つの実験結果を説明する。

固有モードの節位置が重要な要因であることを示し、節位置移動の検討を行う。模型テニスラケットとしてアルミの単純板を用い、反共振点理論を使って汎用有限要素法プログラムを用いて反共振点を算出する。今後、反共振点を利用する構造最適化を行う予定である。

### 2. 実打試験

#### 2.1 実験方法

実際に人間がラケットを持ち実際にボールを打ったときの振動を計測する。図1のようにグリップエンドに加速度ピックアップを取り付け、その振動を測定しFFTアナライザを使用し信号処理を行ってグラフ化した。

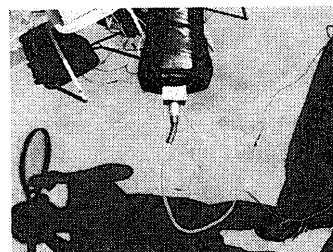


Fig.1 The position of the acceleration pickup

#### 2.2 実験結果

図2に初心者用ラケットの図3に上級者用ラケットの実打時の振動のグラフを示す。

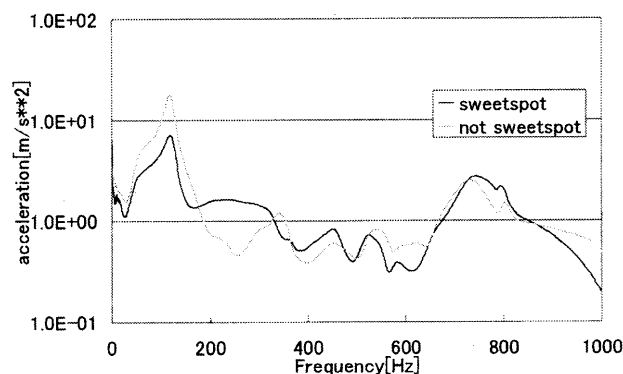


Fig.2 Vibration in striking the sphere for the beginner

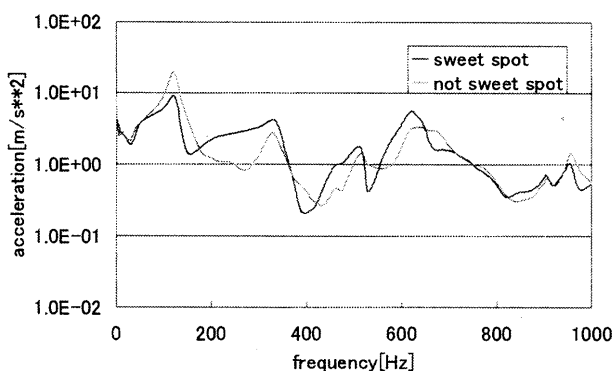


Fig.3 Vibration in striking the sphere for the upper grade person

図はラケットの sweet spot で打ったときと、わざと sweet spot をはずして打ったときの振動のグラフである。初心者用ラケットでは 150Hz 付近に振動のピークがあり、370Hz 付近では sweet spot をはずして打ったときのみにピークがあることがわかる。上級者用ラケットでは、どちらで打った場合の振動も 130Hz、340Hz 付近にピークが見られる。

### 3. ボールの落下試験

#### 3. 1 実験方法

まず図 4 のようにやわらかいスポンジにラケットをはさみ自由支持状態を作る。そして、面の上から 30cm の高さからボールを落とし、そのときに起こった振動を FFT アナライザを使用して信号処理を行い、グラフ化した。

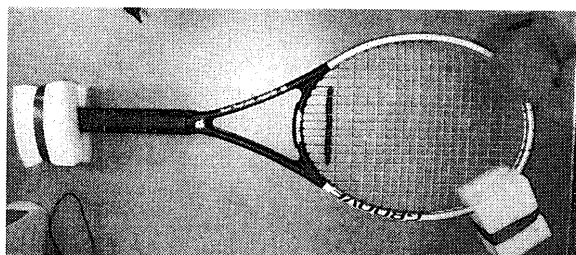


Fig.4 Experiment of dropping ball

#### 3. 2 実験結果

図 5 に初心者用ラケットの図 6 に上級者用ラケットのボール落下時の振動のグラフを示す。

ラケットの面の 5 箇所にボールを落とし、その時の振動を計測した。

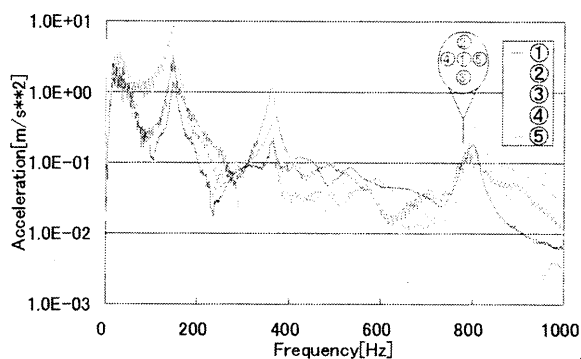


Fig.5 Vibration in dropping the ball for the beginner

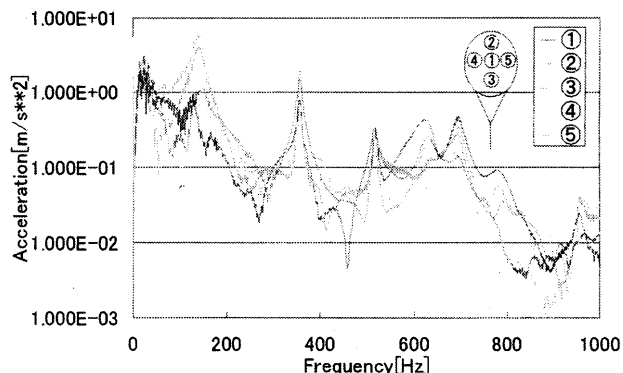


Fig.6 Vibration in dropping the ball for the upper grade person

初心者用ラケットではどの場所でも 150Hz、370Hz 付近に大きなピークを見ることができる。150Hz 付近では①④⑤が小さく②③で大きな振動が得られ、370Hz 付近では①②③で小さく④⑤で大きな振動が得られた。

同様に上級者用ラケットでは 130Hz 付近と 360Hz 付近に大きなピークが現れた。

### 4. 実験モード解析

#### 4. 1 支持条件の違い

まず始めに実験モード解析での支持条件の違いにより差がどう出るのかを検証した。図 7 はその差を表したグラフである。横軸が自由支持の、縦軸が手で握って実験を行った時の固有振動数である。

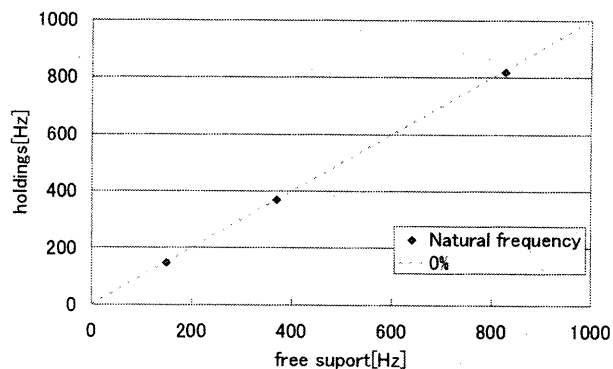


Fig.7 The difference by the support condition

図 7 より自由支持でも手で握ったときでも固有振動数はほぼ変わらない結果が出た。そこで今回の実験は自由支持で行うことにする。モード減衰比は手で握ったときのほうが大きくなった。

#### 4. 2 実験方法

実験モード解析手法として非線形最適化法が提案されている。非線形最適化法は周波数領域法である偏分反復法を正確に多点応答に拡張したものである。この手法を使い実験対象のモード特性を求める。また、非線形最適化法を使いやすくするために MATLAB 言語を使用して構築した実験モード解析システムを使用した。本研究で使用した実験モード解析の流れを図 8 に示す。

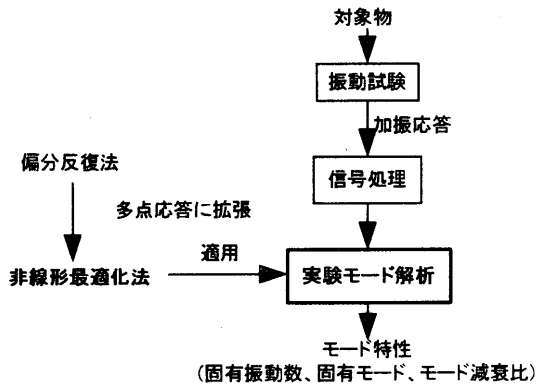


Fig.8 Experiment modal analysis of this study

テニスラケットを細い糸で吊るすことにより自由支持状態を作った。実験の様子を図9に示す。

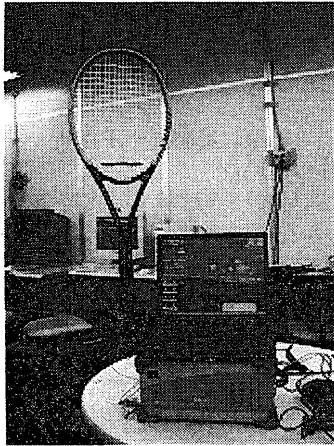


Fig.9 Situation of experiment modal analysis

打撃試験は、加速度ピックアップを1点に固定しインパルス・ハンマで1点ずつ移動して叩き、FFTアナライザを用いて応答を得るといふ多点加振・単点応答という形で行った。試験は5回平均で行い、3軸の加速度ピックアップによって3方向に応答を測定した。

#### 4. 3 実験結果

実験モード解析システムによりモードアニメーションを見ることができる。以下の図10, 11に同定により得られた初心者用ラケットの第1次, 第2次の固有モード形状を、図11, 12に上級者用ラケットの第1次, 第2次の固有モード形状を示す。

$f=150.5[\text{Hz}] \quad \xi=1.11[\%]$

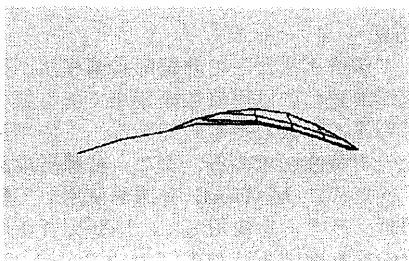


Fig.10 Experiment Mode Shape No.1 for beginner

$f=370.6[\text{Hz}] \quad \xi=1.2[\%]$

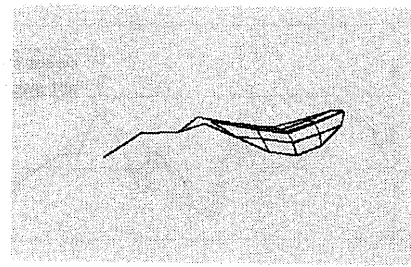


Fig.11 Experiment Mode Shape No.2 for beginner

$f=131.2[\text{Hz}] \quad \xi=3.85[\%]$

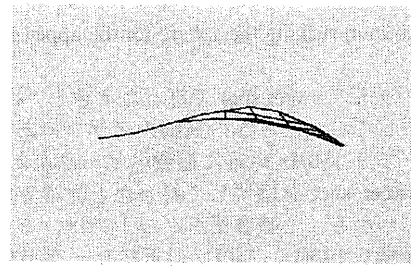


Fig.12 Experiment Mode Shape No.1 for the upper grade person

$f=363.3[\text{Hz}] \quad \xi=0.443[\%]$

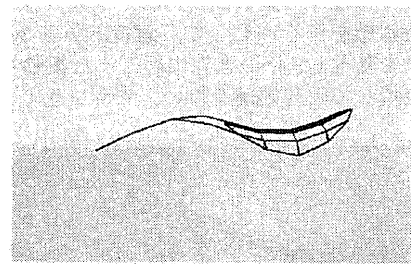


Fig.13 Experiment Mode Shape No.2 for the upper grade person

実打試験の結果から初心者用ラケットでは sweet spot から外れて球を打った場合のみ 370 Hz 付近にピークが出た。よって第2次固有モードは sweet spot から外れて打った場合に起きる振動であると推定できる。

ボールの落下試験からは、初心者用、上級者用共に第1次モードでは①④⑤が小さく②③で大きな振動が得られ、第2次モードでは①②③で小さく④⑤で大きな振動が得られた。これは実験モード解析によって得られた固有モードと一致した。実験モード解析で得られた固有モード振幅の小さい場所ほどグリップエンドの振動が小さくなる傾向がある。

#### 5. 反共振点移動理論を用いた構造最適化

反共振点移動理論とは反共振点を共振点に近づけることにより、モードの節位置を変化させることができるという理論である。

##### 5. 1 共振点と反共振点の計算方法

テニスラケットは様々な材料が混ざり合っていており、また、複雑な形状をしているために正確なモデル化が困難である。

そこで本研究では模型テニスラケットとしてテニスラケットと同じ一次の固有振動数を持った単純板を用いてモデ

ル化し, MSC/NASTRAN による計算から共振点と反共振点を求める。

## 5. 2 計算結果

図 14 に今回得ることができた反共振点を示す。

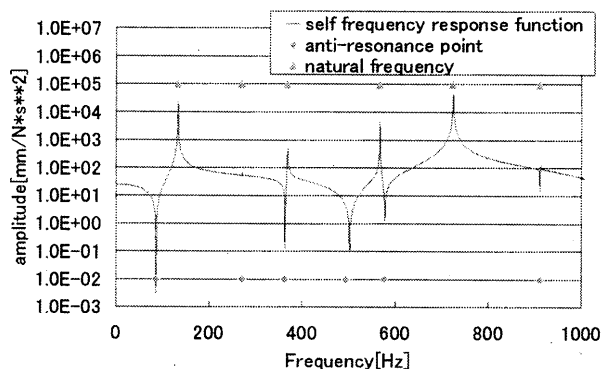


Fig.14 Calculation result of the anti-resonance point

今回, MSC/NASTRAN による計算で自己周波数応答関数と一致する反共振点の計算結果を得ることができた。

## 6. 結論

1. 実打試験から初心者用ラケットでは sweet spot から外れて打った場合には第 2 次モードが現れることがわかった。
2. ボールの落下試験では初心者用, 上級者用共にラケットの面のそれぞれの場所で振動の大きさが異なり, 実験モード解析の結果とも一致する振動が得られた。
3. MSC/NASTRAN により反共振点の計算ができ, 自己周波数応答関数とも一致することが確認できた。
4. 今後の課題としては, 固有振動数を計算より得ることができた反共振点に ①周辺に重りをつける ②剛性分布を変える などのことを行い模型テニスラケットの構造最適化を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 長松昭男, 「モード解析入門」, 1993 年, コロナ社.
- 2) 梶原・ほか 3 名, 機論, 54-505, C (昭 63), 2084.
- 3) 石渡輝行・ほか 2 名, 法政大学計算科学研究センター研究報告, 16, 35-40, 2003 年.
- 4) 石井孝志・ほか 2 名, 法政大学計算科学研究センター研究報告, 16, 41-46, 2003 年.