

平成 13 年度

卒業論文

「テニスラケットの振動解析」
(人体に及ぼす影響)

指導教員

井上喜雄 教授

甲斐義弘 助手

高知工科大学工学部

知能機械システム工学科

1020142

原 裕美子

目次

1・緒言	1
2・実験モード解析	3
2.1 実験モード解析とは	3
2.2 実験	5
2.2.1 実験目的	5
2.2.2 実験方法	5
2.2.3 実験結果	8
2.2.4 考察	12
3・ANSYS による有限要素解析	12
3.1 有限要素を用いる目的	12
3.2 有限要素による理論モード解析の流れ	14
3.3 本解析で行った ANSYS を用いた有限要素解析の流れ	15
3.3.1 方法	15
3.3.2 結果・考察	17
3.3.3 2 回目の解析方法	18
3.3.4 2 回目の結果	18
3.3.5 2 回目の考察	20
4・結言..考察	21
5・謝辞	22
6・参考文献	22
7・付録	23

1・緒言

現在,日本のテニス人口は,アメリカに次いで世界第2位だと言われている.その人口は統計によると約1千万人に及びテニスは多くの人に愛されているスポーツである.

最近のテニスラケットメーカーの開発意欲は, **軽量化・反発力重視・操作性向上の3要素**に傾注していて,この性能は,ベテラン・(選手を除く)上級者・(マーケットの主流である)女性にターゲットを絞ったものと言ってよいかも知れない.またメーカーは選手用とレジャー用に,明らかにターゲットを分けて商品開発する傾向にあり,選手向けには, **重め・反発力不重視・コントロール重視**,の性格を明らかにしたラケットを提供している.

反発力重視はラケット自身がどのように振動しているか,またその部分部分で振動の変化がどうなっているのかが重要なポイントとなってくる.ラケットの反発性能を向上させる要因としてボールとラケットの固有振動数を一致させる方法がある.ちょうどこの方法はテニスラケットのスイートスポットと呼ばれる部分にあたる.スイートスポットとは,インパクト時(ボールとラケットの衝突)において手に伝わる振動が最も小さい領域,ボールがガット部分から飛び出す速度が大きい領域,打球が安定する領域だとされている.

テニスプレーヤーは誰しも気持ち良くプレーを行いたい・上手になりたいと考えているだろう.気持ち良くプレーをする・上手になりたいと言うことは,プレーヤー本人の技術も関わるがテニスラケットの性能・設計を把握することも重要になってくる.気持ち良いと思うのは,手に伝わる振動・ボールを打つことにより伸びる飛距離にも関わってくる.

一方,問題となってくるのがグリップ部への度重なる衝撃振動の負担が「テニス肘」と呼ばれる障害を起こしてしまう恐れがあるということである.テニス肘については,内側型テニス肘・外側型テニス肘・後方型テニス肘がある.(付録参考p23)医学的にはテニスのフォームが原因とされておりラケット自体にも原因があるとは書かれていないことが多い.

本研究では,打球時の振動がどのように人体に影響しているのかを明らかにする第一歩としてテニスラケットへの手に伝わる衝撃・振動のメカニズムに関する研究を行う.

まず,実験モード解析により,実験的な立場からテニスラケットの振動特性をモデル化し,プレーヤーへの影響について検討する.テニスラケットにインパルス位置(振動させる点=加振点)を全73点とり,それぞれの点で振動の大きさ・振動の様子をデータにとり実験モード解析を行う.その際,各振動が「テニス肘」にどう関係してくるのかを検討する.またこの時,手に伝わる振動を探るには,手に持った時と,Free-Freeの状態ではどう違うかを検討したかつ

たため

(a) ラケットの端を人間の手により握持した場合

(b) ラケットの端を紐で吊り下げる場合

この2つの境界条件を用いた．

次に ANSYS を用いて有限要素解析を行う．実験モード解析の結果と有限要素解析の結果を比較させることにより，有限要素解析の妥当性を検証し，定量的な評価のモデルの構築を行う．

2・実験モード解析

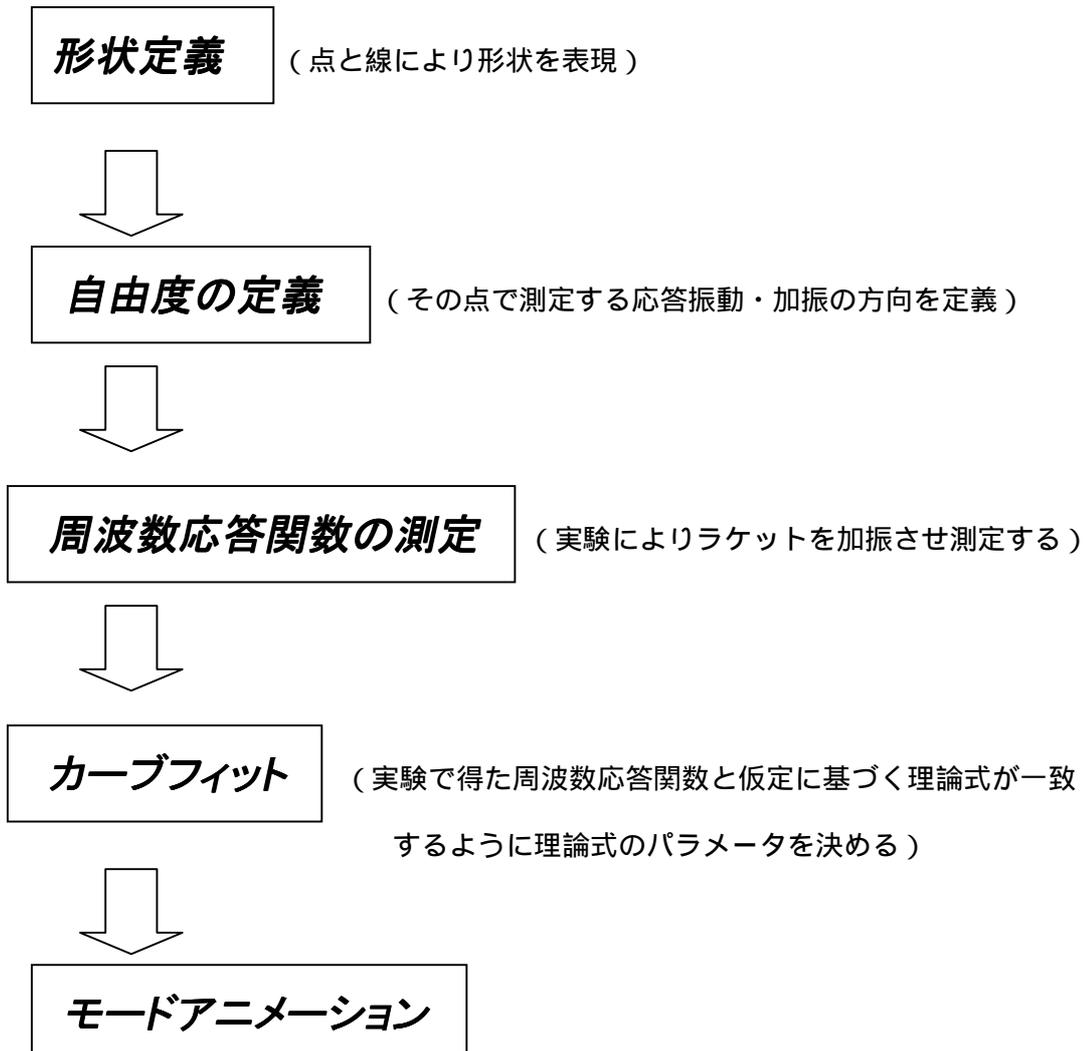
2.1 モード解析とは

モード解析とは、定常・非定常に関係なく対象物の振動を振動センサ（加速度ピックアップなど）で検出し、時間変化や振幅量を求めたり、周波数分析器（FFTアナライザなど）で周波数解析を行い固有振動数などを求め評価する。実験モード解析は、実際にある機械や構造物に特殊な振動試験を行い、その周波数で求めた固有振動数の一つ一つに注目してその構造の振動状態を可視化する最も一般的な方法である。

モードとは？

すべての物体は、振動する時のそれぞれ固有の形を持っていてこれ以外の形では振動することができない。そのそれぞれが持っている形をモードと言う。

実験モード解析の流れ



形状定義・・・構造物の形状を表せる点，または注目するモードのモードシェイプを表せることのできる点の測定点をとる．点だけで表現するのは分かりずらいため，点と点を結ぶ線で構造物の形状を表現する．

自由度の定義・・・形状定義で定義した各点について，その点で測定する応答振動・加振の方向を定義する．

周波数応答関数の測定・・・モード解析の精度よく行うためには，周波数応答関数をいかに精度良く測定するかにかかっている．測定の仕方については，**図4**に示す．方法として，構造物のある一点で応答振動を測定し形状定義で定義した各点で加振していく方法と構造物のある一点に加振力を加え，形状定義した各点で応答振動を測定していく方法とがある．今回は前者を用いる．

カーブフィット・・・指定域内において，実験により得られた周波数応答関数と仮定に基づく理論式とがフィットするように理論式のパラメータを決める．時間応答に関してフィットさせる方法もある．

モードアニメーション・・・ME' skope によりアニメーション化する．

2.2 実験

2.2.1 実験目的

テニスラケットのメカニズムを検討するため以下の境界条件2つの場合に関して、テニスラケットがどのように振動しているのかを実際実験をすることにより、データを得る。

2.2.2 実験方法

FFT アナライザ(高速フーリエ変換機)を用いてテニスラケットグリップ部に圧電型加速度ピックアップを取り付け、インパルスハンマで加振して周波数応答関数(伝達関数)を求める。その時、加速度の方向は打球面に対して垂直に行う。

加振点をテニスラケット(図1)に73点取りそれぞれについて平均化を行いながら測定。

テニスラケットにインパルス位置を73点とった理由として、細かい精度で振動実験を行い結果を得るために73点が妥当だったためである。

テニスラケットの境界条件を、

(a) グリップ部を人間により握持する場合

ラケットを握持し、右手にインパルスハンマで加振する。

(b) グリップ部の端を紐で吊り下げる場合 (Free-Free)

ラケットを紐で吊り下げ、インパルスハンマで加振する。

の2つとする。測定図を図2に示す。

FFT アナライザによって得られた伝達関数データをフロッピーに入れ、パソコン(ME'skope)により解析・アニメーション化する。

また手に伝わる振動を探るには、ラケットを手に持った時と、持っていない時(Free-Free)の状態ではどう違うかを検討したかったためこの2つの境界条件を用いた。

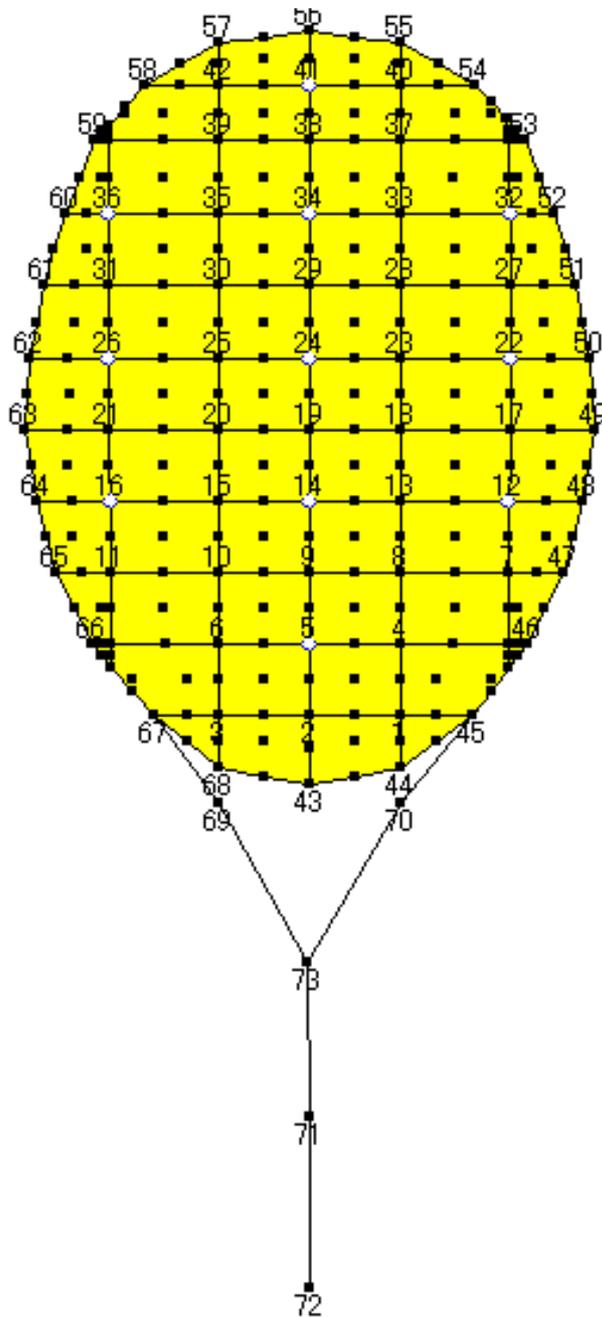


図1 テニスラケット図

ペイントによりテニスラケット図を作図．インパルス位置は全部で73点とる．うち1～42はガット部分・43～70まではフレーム部分・71～73まではグリップ部分とする．

実際，実験に使用したラケットは，フェイス面積：110平方インチ

フレームウエイト：278～292g

全長：27.5インチ=69.85cm

素材：グラスファイト+グラスファイバー とする

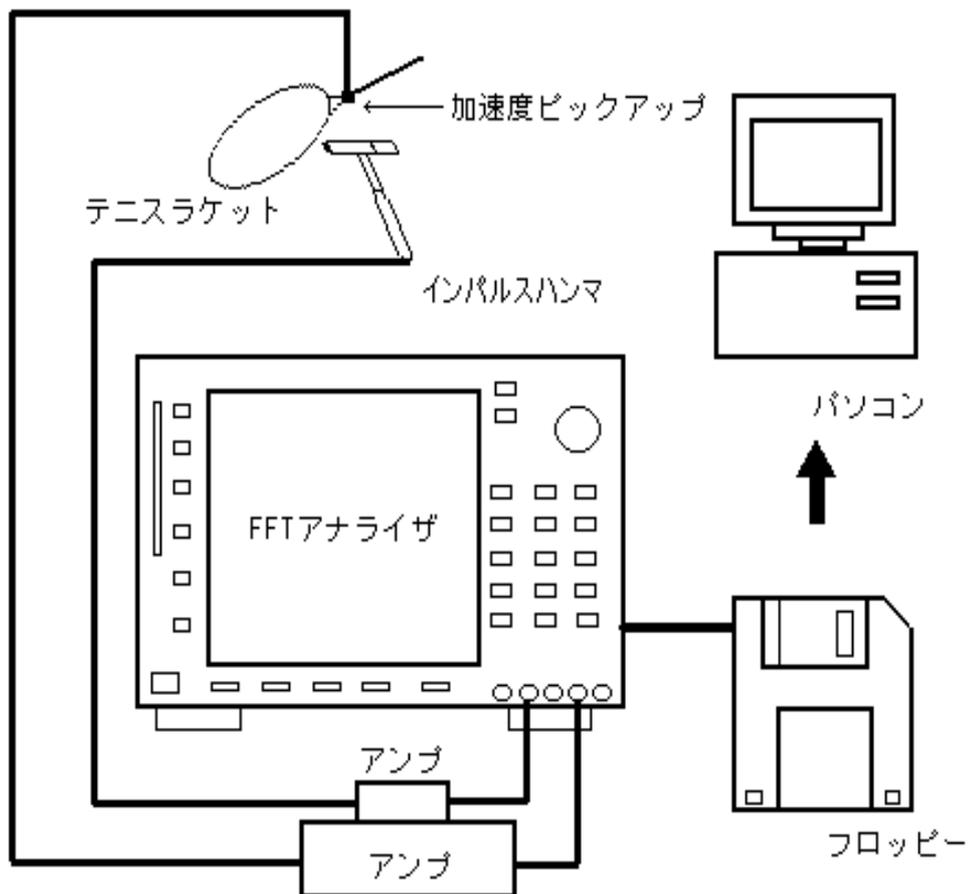


図2 測定図

加速度をインパルスハンマでラケットを叩いた時の加振力で割ったものが伝達関数となるが、叩くときの力によって加速度が変化するため、平均をとったものをFFTアナライザによって求めた。

2.3 実験結果

下の図は、実験モード解析の結果より得られた伝達関数とカーブフィットした図を示す。2つの境界条件についてそれぞれ示す。

M#1 ONO SOKKI CF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER <:1z>

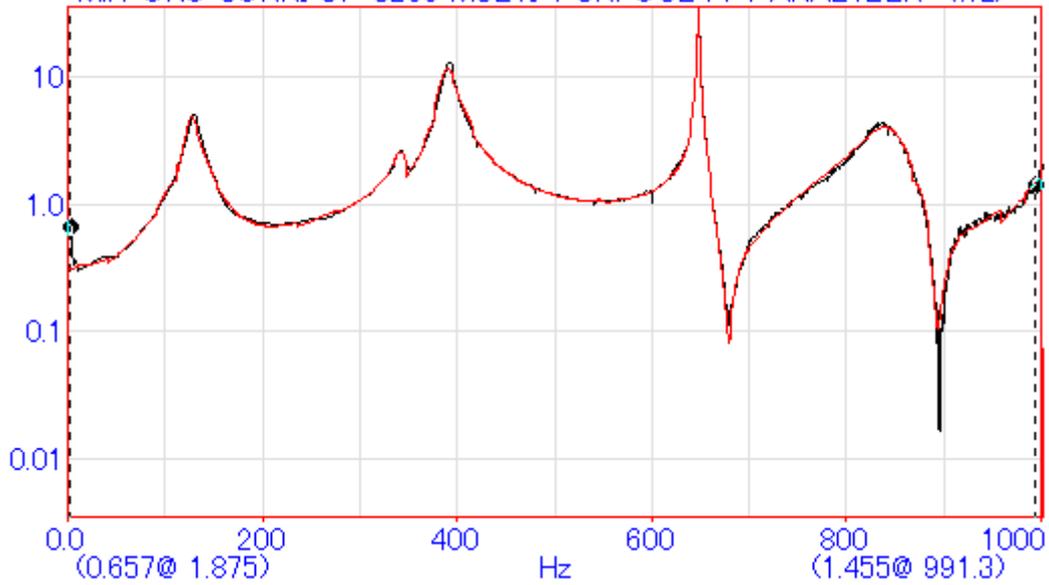


図3(a) ラケットを握持した場合

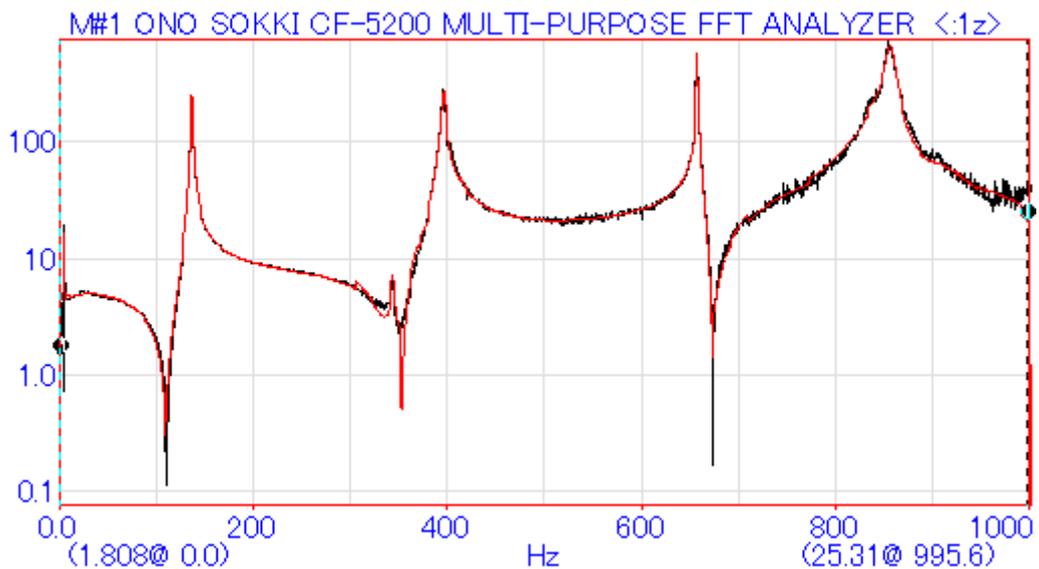


図3(b) ラケットを紐で吊り下げた場合
(Free-Free)

前ページの結果で黒い線が FFT アナライザで測定した伝達関数．加振点を 73 点とったので図の様な伝達関数は各 73 ずつ存在する．伝達関数は，固有振動数・振動モード・減衰比によって表現することができる．その式によって得られた理論値と測定した伝達関数を同定させることをカーブフィットと言う．実測した伝達関数に最小二乗法を適用し構造物の伝達関数を得る．できるだけ同定させることで，モード解析を行う際正確なデータが得られる．ここで赤い線がカーブフィットした線である．ほぼ一致させることができた．この図で山になっているところがモードを表す．5つの山・ピーク時があることが分かる．このことより，テニスラケットには5つの振動モードが存在することが分かる．

2つの境界条件における，各モードの固有振動数と減衰比を下の表に表す．

表 1 人間の手で握持した場合

モード	固有振動数(Hz)	減衰比(%)
1	124.56	7.551
2	342.476	1.295
3	390.629	4.279
4	646.263	0.116
5	848.428	2.227

表 2 紐で吊り下げた場合 (Free Free)

モード	固有振動数(Hz)	減衰比(%)
1	134.62	0.444
2	342.712	0.534
3	394.077	0.514
4	655.903	0.008
5	854.092	0.557



1次モード・・・124.56Hz



2次モード・・・342.476Hz



3次モード・・・390.629Hz



4次モード・・・646.263Hz

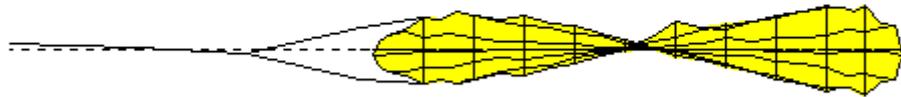


5次モード・・・848.428Hz

図4(a) グリップ部を人間の手により握持した場合の
各モードと固有振動数



1次モード・・・134.62Hz



2次モード・・・342.712Hz



3次モード・・・394.077Hz



4次モード・・・655.903Hz



5次モード・・・854.092Hz

図4(b) グリップ部の端を紐で吊り下げる場合(Free-Free)の各モードと固有振動数

2.2.4 考察

1次モードに注目してみると人間の手で握持した場合と、紐で吊り下げたときとでは、固有振動数・減衰比共に大きな差が生じていることが分かる。その他の4つモードに関しては大きな変化がないが1次モードの減衰比に関して言うと、握持した場合が7.551%、紐で吊り下げた場合が0.444%となっていた。このことにより考えられることは、1次モードがプレーヤに最も影響しているということである。2次モード～5次モードの固有振動数に関してほぼ変化がないため手で持った時も紐で吊るした時も同じだと考える。またダンピング(振動を止めようとする動き)が増加しているということはラケットの振動エネルギーが手に伝達していることを意味している。このことから1次の振動モードに関して言うと、



スイートスポット部分での振動モード成分が小さく、スイートスポットに当たった時には1次モード成分はほとんど発生しないことがわかる。またスイートスポットを離れたところでの振動モード成分が大きく打球時に1次モードが発生することが分かる。このことは、例えばボールがテニスラケットの真ん中に当たった時さほど手に振動は伝わらないが、ラケットの端に当たった時手にはジーンと伝わり伝わる振動は大きいということである。スイートスポットとは、インパクト時(ボールとラケットの衝突)において手に伝わる振動が最も小さい領域、ボールがガット部分から飛び出す速度が大きい領域、打球が安定する領域だとされている。また、スイートスポット部分では、振幅は0である。この時現れるモードは4次モードである。テニスをしたことがある方は分かると思いますが、ボールがラケットの真ん中に当たった時にはコンと当たったぐらいで手にはさほど振動は伝わらないが、ラケットの端または真ん中より離れた部分にボールが当たった時には手にジーンときて振動が大きく伝わっていることが分かる。こういうことを意味している。実際、自分自身でもラケットでボールを打ってみた結果、上と同じ感じを得た。

また各モードを見てみると、1次モード・2次モード・3次モード・5次モードについては、グリップ部に振動が影響しているが、4次モードに関しては、ガット部分のみ振動していることが明らかとなった。よって4次モードに関しては人体に影響がない(テニス肘には関係ない)ことが分かった。2次モード・

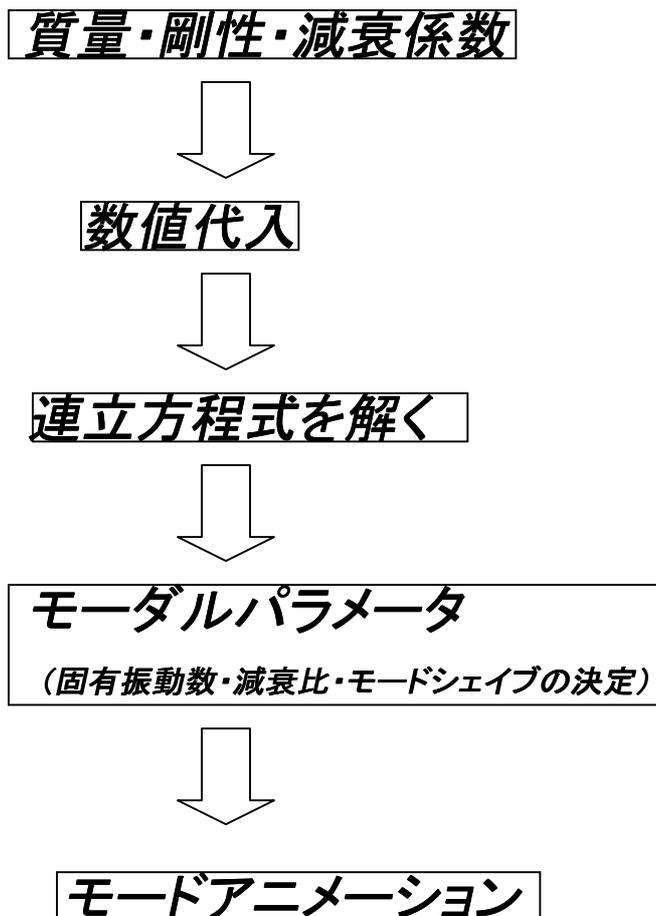
3次モード・5次モードについては，テニスラケットのどの部分にボールが当たってもやすい．

3・ANSYS による有限要素解析

3.1 有限要素を用いる目的

実験モード解析は、実際に実打実験を行わないと結果が得られないため、手間もかかるし時間も必要としてしまう。しかし ANSYS ではパラメータを入力するだけで結果が得られるため、有限要素法で解析することで手間ははぶくことができ、時間も大幅に短縮できることが可能である。良好的なラケットを設計するためには解析技術が必要となる。本研究では、この ANSYS を使って定量的な評価のモデルの構築を行う。また、テニスを行う際に問題となってくる障害「テニス肘」について、この解析を用いながら原因である固有振動数のモードを探り検討する。

3.2 有限要素による理論モード解析の流れ



3.3 本解析で行った ANSYS を用いた有限要素解析の流れ

3.3.1 方法

今回、テニスラケットのモデルを ANSYS で構築する際、ラケットの図面がなかったため実際にラケットを切断して実測値により行った。実測値により得られたもの、密度・断面積・断面二次モーメント。まず、3次元ビーム要素を使いテニスラケットのモデルを構築した。3次元ビーム要素は、変形しやすい物体に用いることまた、断面が小さい物体に用いられることより使用した。節点 767 点・768 個の要素からなる有限要素モデルを構築した。

ラケットの密度については、フレーム部・ガット部の断面係数は実際にラケットを切断し、実測値により求めた。グリップ部に巻いてあるテーピングについては、大きな影響はないのではないかと考えグリップ部の質量として考えた。材料特性に関しても実測値により求めた。

解析法としては、Subspace 法を使用。

表 3 テニスラケットの材料特性

	グリップ部	フレーム部	ガット部
断面積 [m ²]	2.53E-04	7.00E-03	1.33E-06
断面2次モーメント(Z 方向) [m ⁴]	5.41E-09	4.20E-09	1.40E-13
断面2次モーメント(Y 方向) [m ⁴]	2.11E-08	2.26E-09	1.40E-13
密度 [kgf/m ³]	1.92E-22	1.92E-22	1.57E-23
ヤング率 [kgf/m ²]	4.08E-05	4.08E-05	2.00E-06



図5 テニスラケット切断図



図6 グリップ部分切断面

3.3.2 結果・考察

各モードの固有振動数は大きくことなり，実験モード解析で得られた結果とは異なったものとなった．振動数が高くなった．また，ガット部に影響していると思われる4次モードは表現できなかった．パラメータを同定させることはできなかった．

固有値解析がうまくいかなかった理由として

文献で調べた炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は，いろいろな種類があり，選択に困難だったので一般的なヤング率を使用したため
断面形状を実測により求めたため，測定誤差がでたのではないかと
ガットのモデル化に3次元ビーム要素を用いたことにより，ガットが硬くなり有限ひずみを考慮できなかったため

ではないかと考えた．

3.3.3 2回目の解析方法

次はガットを除けて固有値解析を行うことにした。これは実験モード解析の時の結論にも書いたように、4次モードだけフレーム部分しか振動していなく、手には影響をしていない。今回はテニス肘について検討するため、グリップ部に振動の伝わらないガット部分は必要がないと考えガットをのけてモデルを構築し解析を行った。

節点 81 点，要素 82 点での有限要素法モデルを構築した。炭素繊維強化プラスチック (CFRP) のヤング率を $29.21\text{Gpa} = 3050\text{kgf/mm}^2$ に変更させた。この時のフレームヤング率は $32.4\text{Gpa} = 33\text{kgf/mm}^2$ とする。このことによりパラメータを一致させることに成功した。解析方法は前回と同じ Subspace 法を用いた。

3.3.4 結果

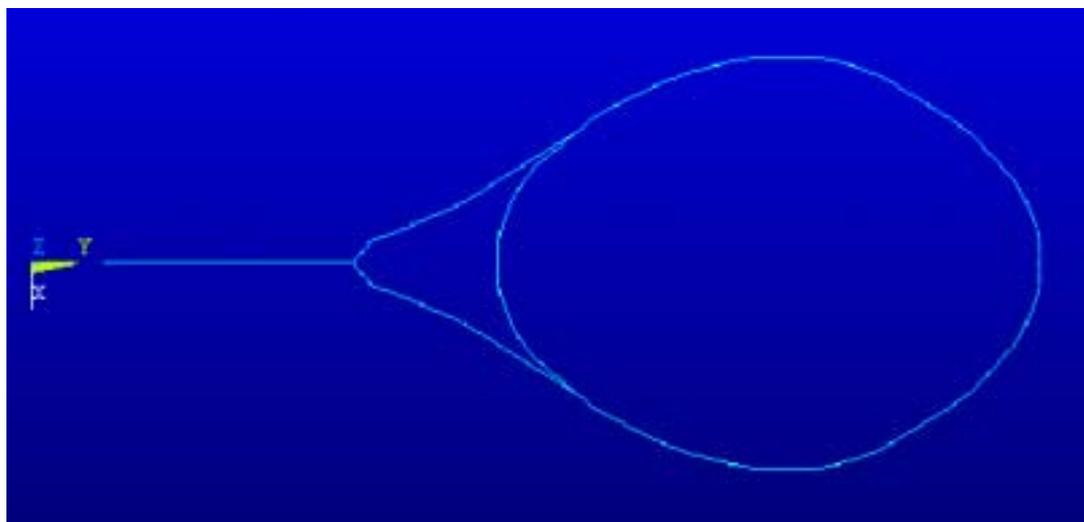


図7 ANSYSにより構築したテニスラケットモデル(ガットなし)

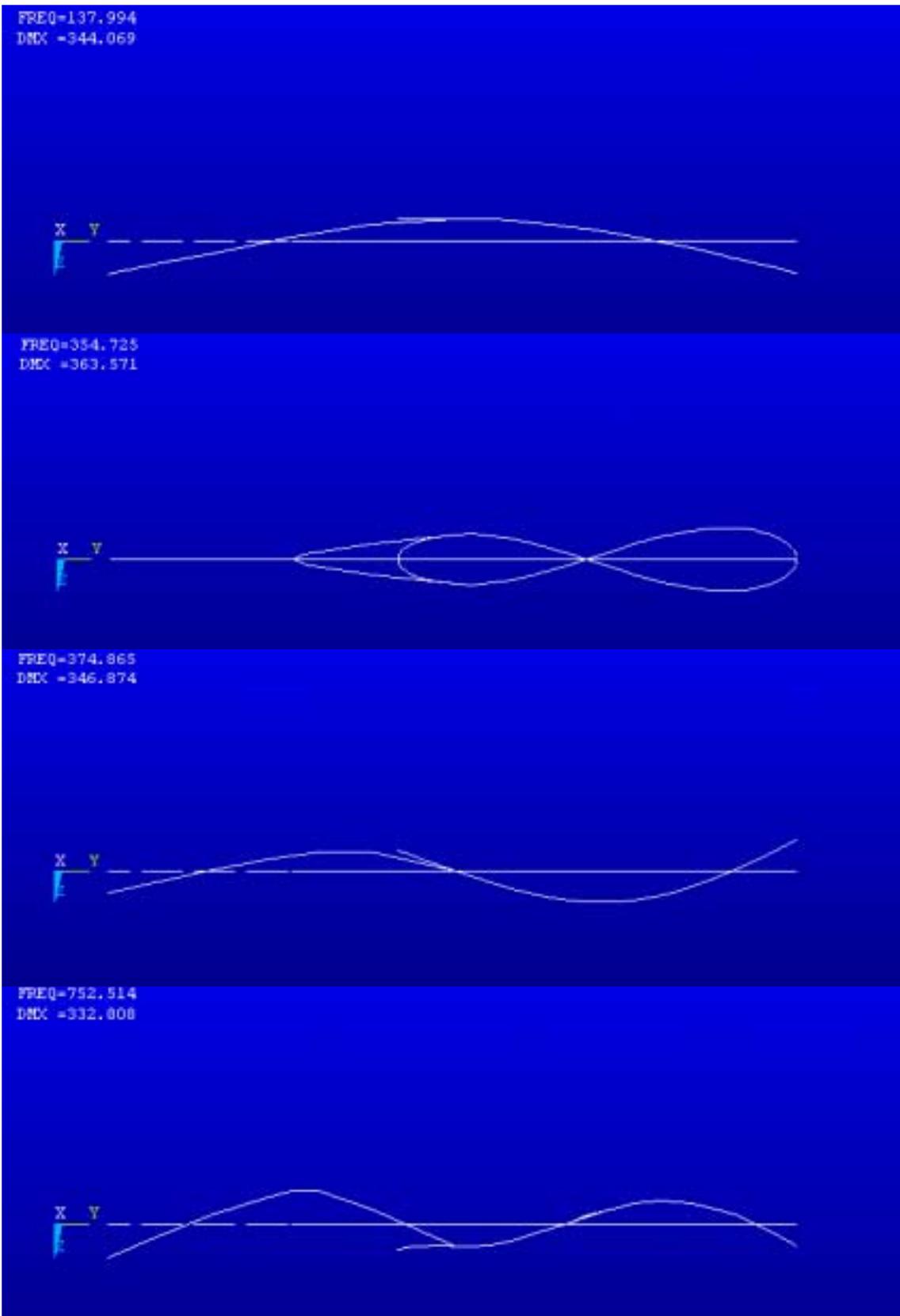


図8 有限要素解析による各モードと固有振動数

3.3.5 考察

ANSYS で解析すると

1次モード・・・137.994 Hz
2次モード・・・354.725 Hz
3次モード・・・374.865 Hz
5次モード・・・752.514 Hz という結果が得られた.

図6で言うと FREQ が固有振動数である.

表4 固有振動数比較結果

	実験モード解析(Hz)	有限要素解析(Hz)
1次モード	134.62	137.994
2次モード	342.712	354.725
3次モード	394.077	374.865
5次モード	854.92	752.514

実験モード解析のラケットを紐で吊るした場合 (Free-Free) の結果と有限要素解析結果をほぼ同じ固有振動数が得られるモデルを作ることができた. 最低でも 88% の割合でモデルを作ることができた. ヤング率の変更またガットを除けたことにより, 節点・要素が減ったため実験モード解析の結果と同じ結果が得られたのではないかとと思われる. 有限要素解析は, はりを有限個の要素でモデル化をするため, 自由度が低減するだけ固有振動数が高くなる. 今回ほぼ同じ結果を得られたことによりデータ・解析結果より実験をしなくても必要なデータを入力するだけで, 求めることができると考える. ただ実験モード解析結果と有限要素解析結果の固有振動数を比較した場合に誤差が生じてしまった理由として, モデルを作成する際, 図面がなかったためラケットを切断し実測値により構築したためだと考える. またガットには影響がないとして今回解析を行ったがガットとガットを留めている部分がなんら影響しているのではないかと考えた.

4・結言・考察

本研究では、テニスラケットを実打実験およびハンマリングを用いた実験モード解析による実験的検討と有限要素法による解析的検討を行い両者を比較した上で有限要素解析の妥当性を検討した。また得られた結果より、テニス肘のメカニズムを探った。まとめると以下の結果となる。

- (1) 2つの境界条件、ラケットを握持した場合と紐で吊り下げた場合の実験を行った実験モード解析の各モードの様子と固有振動数を示し、両者がほぼ一致していることを示した。ただし、1次モードに関しては固有振動数・減衰比に大きな変化が見られた。4次モードはガット部分のみ振動しており、グリップ部の振動には影響していない。つまりテニス肘には関係していないことが分かった。
- (2) ラケットを握持した場合のANSYSを用いた有限要素解析を行い、実験モード解析の結果を比較しパラメータを修正することにより、解析モデルを作ることができた。
- (3) テニス肘の原因となるのは、握持した場合の1次モードが影響していることを付きとめた。
1次モードでは、グリップ部を手で握持することにより、手に振動が吸収されちょうどダンピング(振動を止めるようとする動き)の役割をしてしまうためテニス肘が起こり易くなってしまう。このダンピングを減らすことによりテニス肘を起こりにくくできる。

今後の課題としてこの手に伝わる振動を減らすためにはどうしたらよいのかについて検討していこうと考える。多くの人が楽しんでテニスをプレーできることを望む。

5・謝辞

本研究をするにあたり，ご指導くださいました井上喜雄教授，甲斐義弘助手には深く感謝し，厚く御礼申し上げます．また本研究を行うに伴いご助言，ご指導をいただきました知能力学研究室大学院生，嵯峨知行氏に深く感謝致します．そしてご協力，ご助言をいただきました知能機械力学研究室の皆様にも深く感謝致します．

6・参考文献

- (1) 井上喜雄ら他 8 名：振動の考え方・とらえ方，オーム社，1998
- (2) 神田芳文：スピンを伴うテニスボールとラケットの衝突解析，No00 - 38，シンポジウム講演論文集，39 - 43 (2000)
- (3) 神田芳文：有限要素法によるテニスラケットとボールの衝突解析，No97 - 10 - 2，D&D ' 97 スポーツ工学シンポジウム講演論文集，222 - 225 (1997)
- (4) 川副嘉彦：質量および質量配分の異なるラージサイズ・テニスラケットの打球感に関する性能予測，No00 - 38，シンポジウム講演論文集，225 - 229 (2000)

7・付録

A) 「テニス肘 (tennis elbow)」について

テニス肘とは、フォアハンドで生じやすい内側型障害と、バックハンドで生じやすい外側型障害、さらに、まれにサーブで生ずる後方型障害とにわけられる。テニスボールのスピードは平均時速 50km といわれ、このボールを 1 回打つと、約 20kg の物を持ち上げるのと同じくらいの負担が肘の筋肉にかかるとされている。テニスは見た目は優雅でも、肘にとっては過酷なスポーツである。

a : 外側型テニス肘

バックハンドストロークにより生じやすい障害。バックハンドストロークは、向かってくるボールに対して構えた状態(準備期)、インパクトの状態(加速期)、ラケットを振り切った状態(フォロースルー期)の3相からなる。

バックハンドは手首をそらせ、手のひらを少し上に向けた状態でボールを打つが、インパクトの瞬間にはこれとは逆方向に力が加わる。このとき、上腕骨外側上顆についている手首をそらせ、手のひらを上に向ける筋肉は、ボールの威力に負けずに腕の位置を保とうと一生懸命収縮している。外側型テニス肘(上腕骨外側顆炎)とは、この動作がくりかえされることにより、外側上顆につく筋肉や腱に負担がかかり、炎症を起こしてしまった状態を言う。

この障害はテニスプレーヤーだけでなく、日常よく手を使う人、たとえばピアニスト、タイピスト、主婦などにもみられる。

b : 内側側副靭帯損傷

くりかえし外反方向にかかる力で、内側側副靭帯が徐々に伸ばされて損傷する場合と、加齢や使いすぎによって変性した靭帯が、ストローク動作で断裂を起こす場合とがある。

c : 後方型テニス肘

頻度は高くないが、サーブで生じる障害。サーブのときに肘頭は肘頭窩にゴツンゴツンとぶつかる動きをする。そのため肘頭に骨棘(骨の一部が棘のようにとがること)が作られたり遊離体(骨の一部が分離し関節の中に存在することで、いわゆる“関節ねずみ”)を生じたりする。ひどい場合は、肘頭の疲労骨折を起こしてしまう。

テニス肘の大きな要因は、テニスのストロークのフォアハンドとバックハンドにある。フォアは手首のスナップを使うので、負荷が前腕の回内・屈筋群にかかりその起始部である上腕骨内側上顆にかかる。バックでは手根関節の撓屈・背屈による強い固定が必要になるので前腕の回外・伸筋群に負荷がかかりその起始部である上腕骨外側上顆に負荷がかかる。

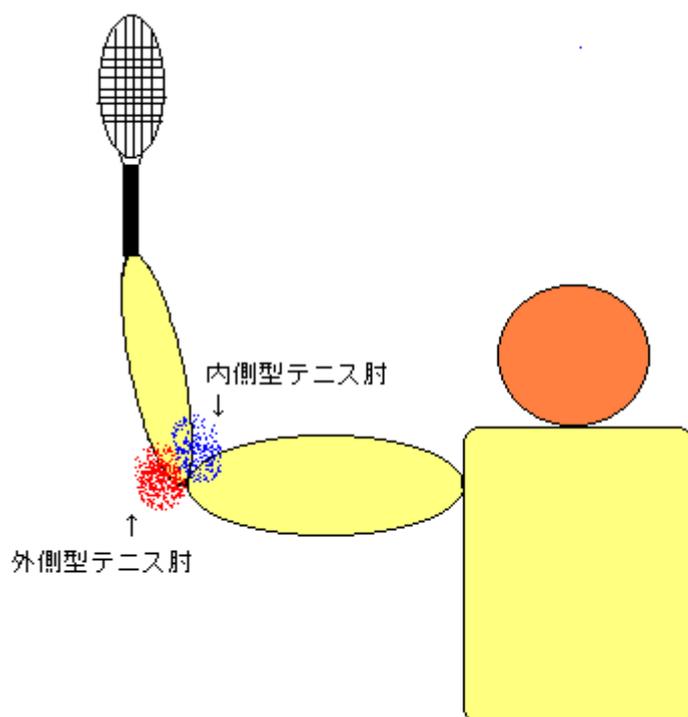


図9 テニス肘の位置

テニス肘は内側よりも外側に多い。その原因の一つとして、前腕伸筋群と屈筋群の筋力の差がある。伸筋群の筋力が屈筋群の筋力よりも弱いため、バックハンドストロークならば伸筋群に負荷がかかり、インパクト時の衝撃が繰り返されることが発生原因と考えられている。

B) テニスラケットのインパクト位置における打球感について

実打実験

実験方法

実際に自分でインパルス位置 11 点 (5 , 1 2 , 1 4 , 1 6 , 2 2 , 2 4 , 2 6 , 3 2 , 3 4 , 3 6 , 4 1) のところをテニスラケットでボールを打ち打球感を調べる．その時どのように感じたか検証する．打球位置は図 1 に示す．

実験結果

表 5 打球感評価

位置	感想
5	痛くて腕に響く感じ
12	左右に振れ、手が重い
14	振動が少ない
16	12と同じ
22	12よりも左右に振れるが軽い
24	振動が腕にあまり伝わらない
26	16と同じ
32	12に比べ軽いが左右に振れる
34	24と同じだが振動は大きい
36	16に比べ軽いが左右に振れる
41	最も重たく感じ、手が痛い