研究論文

テニスラケットの打撃シミュレーションに関する研究

須貝　裕之[*]　片山　聡[**]　村木　智彦[*]　阿部　淑人[*]
吉川　英之[***]　宇野　寿一[***]　池永　昌弘[***]　米山　亘[***]

Study of Ball Hitting Simulation of Tennis Racket

SUGAI Hiroyuki[*]，KATAYAMA Satoshi[**]，MURAKI Tomohiko[*]，ABE Yoshito[*]
YOSHIKAWA Hideyuki[***]，UNO Toshikazu[***]，IKENAGA Masahiro[***] and YONEYAMA Wataru[***]

抄　　録

テニスラケット開発の迅速・高度化を図るため，従来試打により行われていたラケットによるボールの打撃試験をコンピューターシミュレーションにより計算するシステムを開発した。研究では炭素繊維シートの積層により成形されるラケットフレーム，初期張力をもった編み合わせで構成されるストリング，ゴムによる弾性や減衰特性をもつボール，そしてスイング軌跡の解析モデル化の方法について検討した。最後に各解析モデルを統合し，打撃シミュレーションを行った。

1.　緒　　言

テニスラケットには回転の強いボールを打つ性能や広いスイートエリア，テニス肘を低減させる高減衰能など，様々なレベルや年代のユーザーによって異なる多様な特性が求められている。これに対する開発の方法として，ラケットの試作と試打による評価が行われてきた。しかしこの方法だけでは時間的・技術的制約があり，多様で高性能な製品を迅速に開発するのには限界がある。そこで CAE（Computer Aided Engineering ）による打撃シミュレーションシステムを構築する。これにより試作・試打の低減を図ると共に，打撃状況分析能力の高度化を実現し，高性能なラケット開発を目指す。

既報[1)]ではマルチスケールシミュレーションにより，CFRP（炭素繊維強化プラスチック）製テニスラケットフレームに対する構造シミュレーション技術を確立した。本報では打撃シミュレーションに必要なストリング，ボール，そしてスイング軌跡のモデル化について検討し，最後にそれらを統合した打撃シミュレーションについて報告する。

*　研究開発センター
**　中越技術支援センター
***　ヨネックス株式会社

2.　打撃シミュレーション

ここでは本研究で検討した各種の解析モデルと，それらを統合した打撃シミュレーションについて説明する。なお，解析にはLivermore Software Technology Corporation製の動的陽解法有限要素法ソフトウエアLS-DYNAを使用した。

2.1　ストリング

図1にラケット打撃面とフレームのCADモデルを示す。ラケットの打撃面は縦横に編まれたストリングで構成されている。ストリングは張力をかけて張られており，これがラケットの特性に大きな影響を与えることが知られている。また，この張力によりフレームのストリング支持部は内側に向かって引張を受けて変形し，応力が生じている。従って打撃解析では，最初にこのような状態のフレームとストリングを計算しておく必要がある。

そこで実際のラケットのストリング張力を測定した。図 2 及び図 3 に測定結果を示す。測定にはストリングテンションメータ（TOURNA 製 STRINGMETER）を使用し,すべてのストリング交点における張力を調べた。なお，本研究ではラケット長手方向のストリングを縦ストリング，それに直交するストリングを横ストリングと呼ぶ。測定の結果，フレームの端から端に張られたストリングはどの部分においてもほぼ同じ張力であったため，各ストリングごとの平均値として結果をまとめている。測定したラケットでは，縦ストリングは平均 171N（38.5 ポンド），横ストリングは平均 139N（31.3 ポンド）で縦と横が異なっており，さらに同じ方向のストリングでも場所により値が異なっていた。

次にこのような状態を解析モデルで再現する方法について検討した。このモデル化の要点は「張力が作用した状態で編み込まれているストリングの変形状態」と「張力により変形したフレームの応力状態」を同時に計算することである。しかし，この二つは相互に影響を及ぼすため計算は容易ではない。すなわち，縦横どちらか一方のストリングの張力を増加させると，楕円形状のフレームは張力が増加した方向に収縮して張力の増加分を吸収する一方で，直角方向には伸張するため，反対側ストリングの張力まで増加させてしまう。

そこで本研究では，最初に目標とする張力によるフレーム単体の変形・応力状態のみを計算し，次にストリング単体の編み込み計算のみを行い，最後にストリング張力を目標の値に変更することによって解析モデルを作製する方法を考案した。この方法により，いかなるストリング張力を持ったラケットの解析モデルも作製することができる。図 4 にこの方法で先の測定結果を再現した解析モデルを示す。フレームの応力状態とストリング張力の釣り合いがとれており，測定結果とほぼ同じ状態が再現できている。

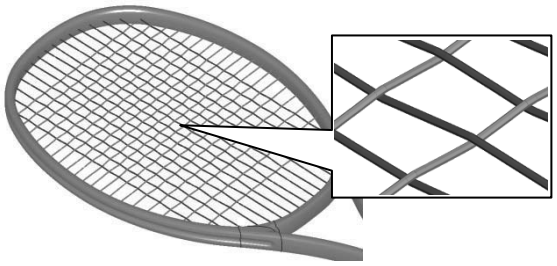

図 1　ラケット打撃面の CAD モデル

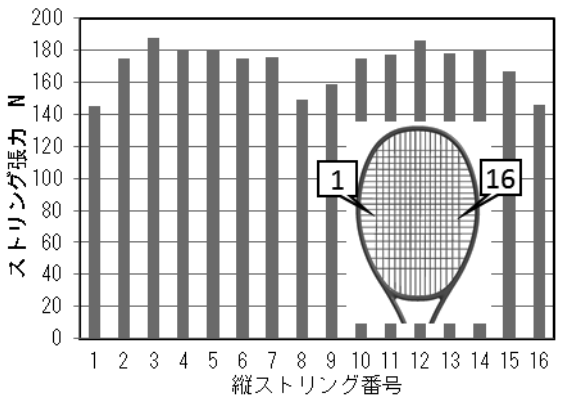

図 2　縦ストリングの測定結果

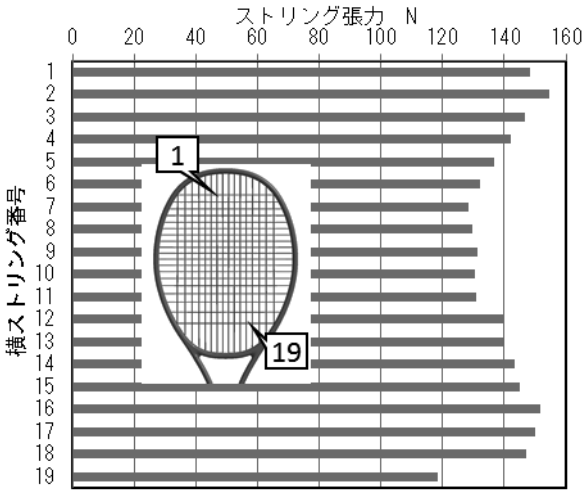

図 3　横ストリングの張力測定結果

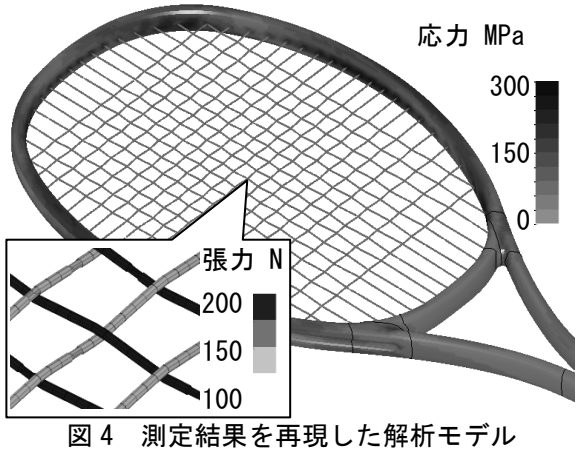

図 4　測定結果を再現した解析モデル

2.2　ボール

テニスボールは 1.8 気圧前後の気体を厚さ数 mm の中空ゴム球に封じ込め，表面をフェルトで覆った構造となっている。これを解析モデル化する際の要点として，下記２点を考慮した。

ゴム材料の特性

ゴム材料は金属等と比較して極めて大きな伸びを有する超弾性材料であり，さらに打撃シミュレーションにおいては減衰も無視できない[2)]。そこで解析に用いるこれらの材料特性を決定するため，試験片による引張試験（図 5）と圧縮したボールの応力緩和試験（図 6）を行い，それぞれの材料特性を決定した。

空気圧の取り扱い

ボール内部の空気圧は状態方程式の近似式に従って変化するものと仮定し，図 7 に示すボールの圧縮試験を行い，その係数を決定した。

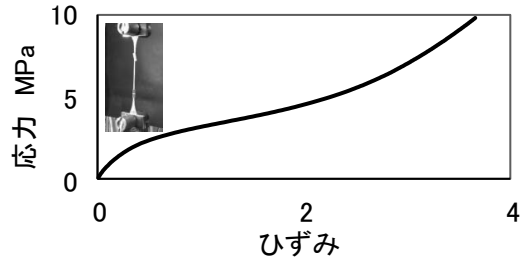

図 5　ゴム材料の引張試験

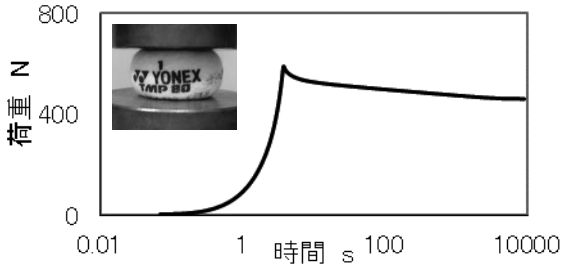

図 6　ボールの応力緩和試験

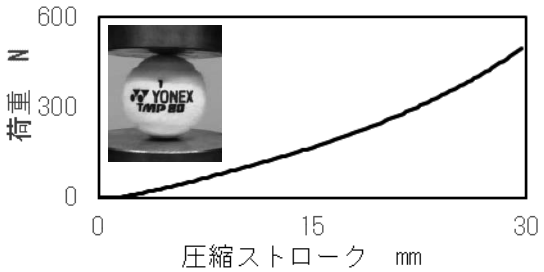

図 7　ボールの圧縮試験

前述の試験結果をもとに，基礎的なボールモデルを作製した。次に，実際にボールをコンクリート壁面に衝突させ，その変形挙動をハイスピードカメラで詳細に測定した。その結果の一例を図 8 に示す。ボールは衝突時に大きく変形し，跳ね返る過程でも変形を回復させるための振動を減衰させながら飛行しているのがわかる。

この時の変形挙動と同条件における解析をもとに，高速度域での減衰性の合わせ込みを行った。完成したボールモデルによる壁面衝突速度と反発係数の実験との比較を図 9 に示す。なお，反発係数は衝突後の速度を衝突前の速度で割ったものである。実験とほぼ同等な解析結果が得られている。衝突速度の増加に伴い反発係数が減少するのは，ボールの変形が大きくなることにより，ボールの運動エネルギーのうち減衰によって消費される割合が増加するためである。

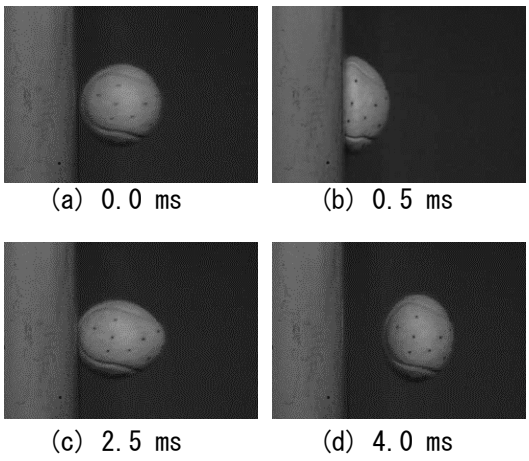

図 8　ボールの衝突状態

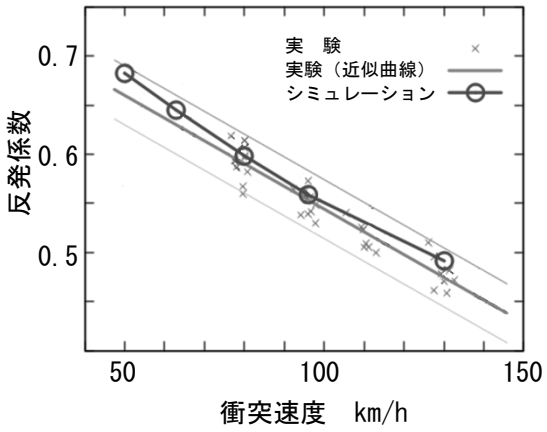

図 9　衝突速度と反発係数

2.3　スイング軌跡の測定

より実際の打撃に近いシミュレーションを行うため，ラケットを単純に直線運動や円運動させるだけではなく，実測したプレーヤーのスイングに基づいて動かす方法について検討した。本研究では複数台のカメラ使用したモーションキャプチャーによる測定装置を使用した。測定ではラケットのグリップ部分三箇所にマーカーを取り付け，スイング中の位置を 0.5 ms 単位で測定した。表 1 に測定結果の一例を示す。マーカー中心位置に相当する測定点１～３について，空間上の座標が得られている。この結果をもとにしてラケットのグリップ中心位置の並進３方向と回転３軸，合わせて６自由度を求める。次に，測定誤差による急激な加速度成分を除くためスムージング処理を施した後，解析に使用した（図 10）。

表 1　マーカー測定結果

時間	測定点1			測定点2			測定点3		
ms	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標
	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.5	0.0005	0.0044	0.0002	0.0006	0.0045	0.0002	−0.0001	0.0035	0.0006
1.0	0.0010	0.0092	0.0005	0.0012	0.0092	0.0004	−0.0004	0.0065	0.0021
1.5	0.0015	0.0140	0.0008	0.0018	0.0138	0.0007	−0.0006	0.0096	0.0036
2.0	0.0020	0.0188	0.0011	0.0024	0.0184	0.0010	−0.0009	0.0126	0.0051
2.5	0.0025	0.0236	0.0015	0.0029	0.0231	0.0013	−0.0012	0.0157	0.0066
3.0	0.0029	0.0285	0.0019	0.0035	0.0278	0.0017	−0.0015	0.0186	0.0081
3.5	0.0034	0.0333	0.0023	0.0040	0.0325	0.0021	−0.0017	0.0218	0.0094
4.0	0.0038	0.0381	0.0028	0.0046	0.0372	0.0025	−0.0020	0.0249	0.0108
4.5	0.0043	0.0430	0.0033	0.0051	0.0420	0.0030	−0.0022	0.0282	0.0121
5.0	0.0047	0.0478	0.0038	0.0056	0.0468	0.0035	−0.0025	0.0314	0.0135
5.5	0.0051	0.0527	0.0044	0.0061	0.0517	0.0040	−0.0027	0.0345	0.0149
6.0	0.0056	0.0576	0.0050	0.0066	0.0565	0.0046	−0.0031	0.0374	0.0163
6.5	0.0060	0.0625	0.0057	0.0071	0.0614	0.0053	−0.0035	0.0404	0.0178
7.0	0.0064	0.0675	0.0064	0.0075	0.0663				
7.5	0.0068	0.0724	0.0072	0.0079					
8.0	0.0072	0.0774	0.0080	0.0084					

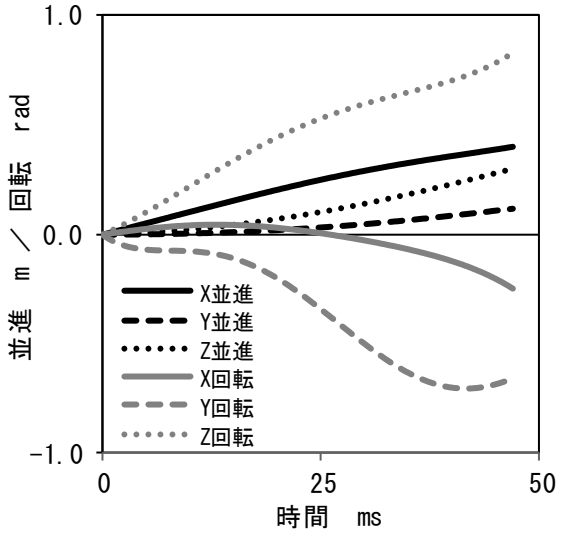

図 10　グリップ中心６自由度の時間変化

2.4　全てを統合した打撃シミュレーション

これまで検討した解析モデルを全て統合して，打撃シミュレーションを行った。図 11 に解析モデルを示す。ストリングの張力は先の測定結果に合わせて縦横それぞれ 171N（38.5 ポンド），139N（31.3 ポンド）とし，フレームはそれに対応した変形・応力状態となっている。なお，解析では計算時間を短縮するため，スイング開始から打撃直前までの過程を省略し，打撃直前から計算を始めている。このため，解析開始時にラケットに初速度を定義している。テニスロボットによる打撃実験ではボールを下から真上に打ち上げた後，その軌道の頂点付近で打撃を行う。一般的にボールの衝突時間は数 ms であるため，この間のボールの移動は極めて小さい。そこでボールは静止状態とした。図 12 にボール無しでラケットをスイングさせた際の軌跡を示す。

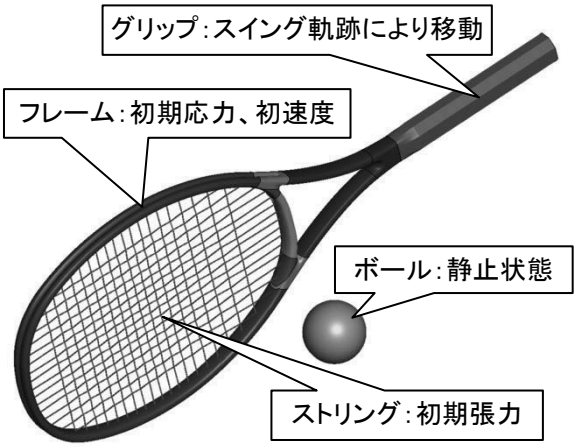

図 11　打撃シミュレーションモデル

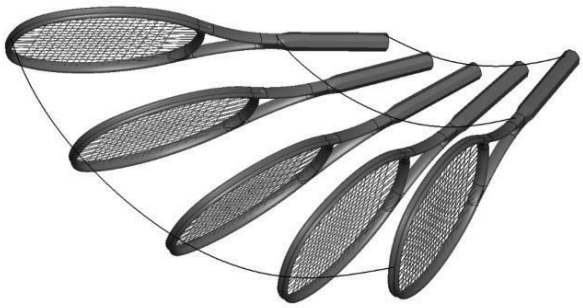

図 12　ラケットのスイング軌跡

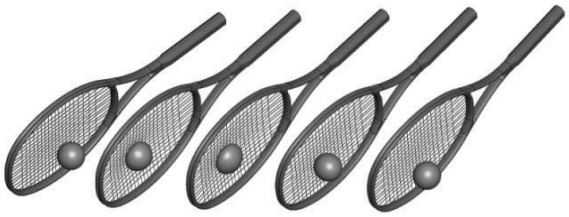

図 13　打撃時のラケットとボールの挙動

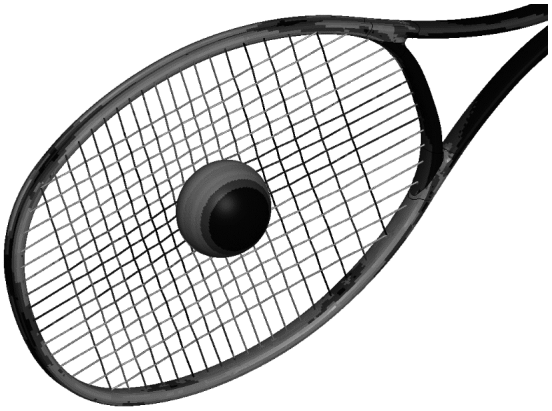

図 14　打撃時の状態（拡大）

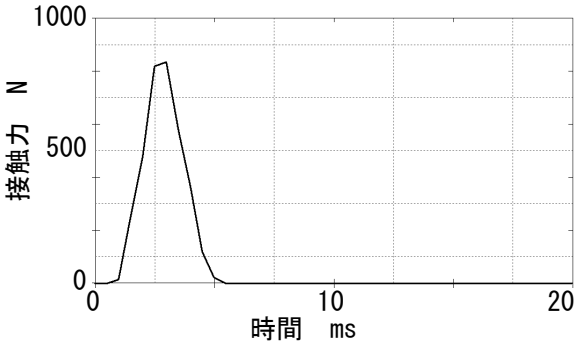

図 15　ストリングとボール接触力の時間変化

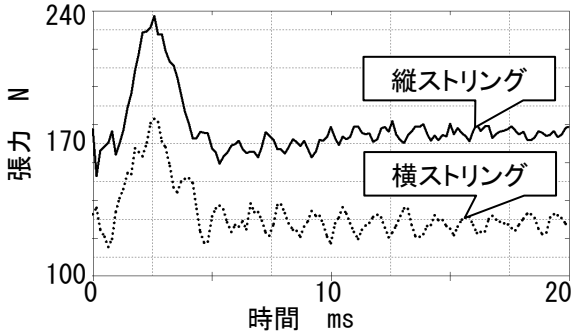

図 16　ストリング張力の時間変化

2.5　打撃シミュレーション結果

図 13 に打撃時のラケットとボールの挙動を示す。衝突により，ボールとストリングが大きく変形すると共に，図ではわかりにくいが，フレームにもゆがみが生じている。また，ボールはストリングから離れた後も，壁面への衝突試験の時と同様に，伸縮・減衰をしながら飛行している。図 14 に打撃時のフレームやボールの応力，ストリングの張力を拡大して示す。ボールと接触して伸張した縦ストリングの色が濃くなり張力が増加しているのがわかる。図 15 にストリングとボールの接触力の時間変化を，図 16 にストリング張力の時間変化を示す。ボールとの接触中にストリングの張力が増加しているのがわかる。また，計算によって得られたこれらのデータをもとにラケットやボールに加えられた力学的エネルギーを計算することもできる。以上，本研究で開発した打撃シミュレーションは，応力や張力の分布や時刻歴データなどラケット開発に必要な様々なデータを計算することができる。

3.　結　　言

（1）指定した張力が作用した状態で編み上げられたストリングと，それによる変形・応力が生じているフレームの解析モデルを作製する方法を開発した。

（2）超弾性や減衰そして空気圧による特性を考慮したボールモデルを開発し，実現象と近い挙動が計算できることを確認した。

（3）スイング軌跡をモーションキャプチャーにより測定し，打撃シミュレーション用のデータとする方法を確立した。

（4）全ての要素を統合した打撃解析シミュレーションを開発した。

参考文献

1）片山ら，“CAE 技術を用いた高性能テニスラケットの開発”，工業技術研究報告書，No.47，2017，pp.3-8

2）鮑ら，“ストリングス間隔･張力･粘性によるボールの反発挙動への影響”，Journal of Txtile Engineering，Vol.56，No.1(2010)，pp.1-8