

しかし前記の理由により、実際の軸変形モードの固有値はさらに高いことが予想される。

正中面内における、着座時人体の2次元有限要素モデルにより、10 Hz以下に7個の振動モードが計算された。それらはせき柱の曲げ変形、内臓柱の上下動、でん部組織の軸変形、せん断変形、骨盤の前後回転、および頭部の前後回転のさまざまな組合せであり、振動モードの多くは実験モード解析結果とよく一致した。駆動点動質量などに見られる約5 Hzの人体主共振は、でん部組織の軸変形およびせん断変形により、骨盤～せき柱～頭部全体が剛体的に上下する全身モードと、それと同位相で上下方向に相対変位する内臓モードから構成されることがわかった。約8 Hzの第2共振付近においては、骨盤の前後回転モードと内臓の第2モードが観察された。

人体の実験モード解析においては、高減衰に起因する抽出誤差により、モード特性の精度が限定されたが、解剖データに基づく人体モデルの計算結果と比較することにより、10 Hz以下における振動応答の基礎的な理解が得られた。さらに高振動数におけるモードを含めて精度よく抽出するためには、減衰に強い抽出方法の開発が必要である。また、全身振動による腰痛などのせき柱傷害、視認性や手腕操作、乗心地への影響を、モデルを用いて予測するためには、生理機能などを含めてモデルを拡張するとともに、さらに多面的なモデルの検証が必要である。そのためには、人体振動応答や材料物性値の測定技術の開発が不可欠であり、今後の課題である。

18.2 スポーツ用具

18.2.1 ま え が き

スポーツ用具は、素材の複合化により設計・製造の自由度が大きくなり、身体的条件や技術的条件の異なる使用者との整合を考慮したきめの細かい設計を目指す段階に至っている。

この節では、テニスラケットの性能予測へのモード解析の適用例について述べる。ここでの解析法は、ゴルフのクラブや卓球のラケットなど衝突を伴う他の打具についても同様に適用できるはずである。

テニスにおけるラケットとボールの衝突現象は、ボールとストリングスの大変形およびフレームの振動を伴う非線形の力学であり、接触時間および反発係数はストリング面上の衝突位置および衝突速度に依存する。現実の打撃ではさらに人間系が絡んでくるので、現象は複雑であり、現状では、ラケットの性能は深い経験を持つプレーヤーの打球感覚により評価されてい

る。

ここでは、大変形を伴うボールとストリングスの特性は非線形形として扱い、振幅の小さいラケットフレームの振動モデルは線形系として実験的に同定し、簡単な衝突モデルによりハンドルを手で支持したラケットの反発性能^{(28),(29)}と手首の衝撃振動^{(30),(31)}を予測した例を紹介する。また、理論モード解析により、ラケットの反発性能のメカニズムを考察した例⁽³²⁾を示す。

18.2.2 実験モード解析の応用

[1] 手で支持したラケットの実験モード解析

図18.10は、ラケットの打撃加振位置を示す。●印は加速度計の取付位置を示す。

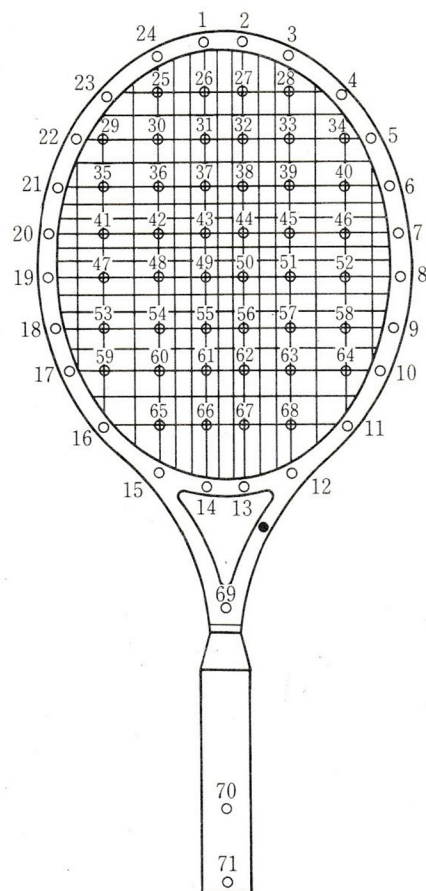


図18.10 ラケットの打撃点と加速度測定位置

図18.11と図18.12は、打撃力と加速度の測定データから求めた10回平均の伝達関数とコヒーレンスの例である。図18.11はラケットフレームを打撃した場合、図18.12はストリング面の中央を打撃した場合を示す。図18.11(a)は、グリップを拘束しないでラケットを軟らかいスポンジの上に横たえて打撃した場合(グリップ自由と呼ぶ)であり、図18.11(b)はラケットハンドルをしっかりと手で握った場合(手持ち

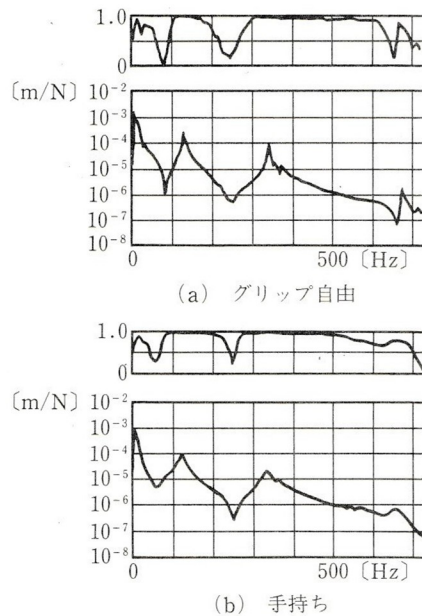


図 18.11 フレーム打撃の場合の伝達関数

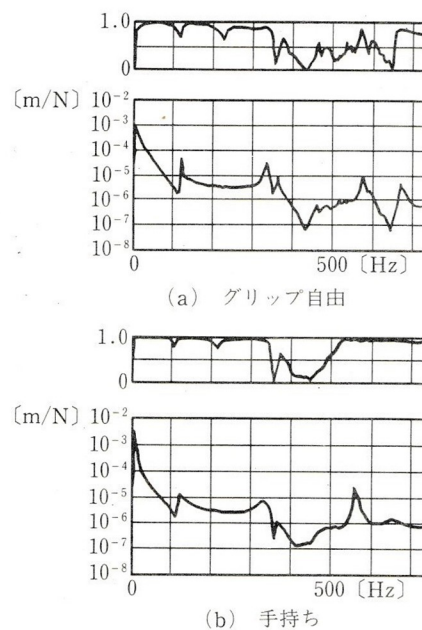


図 18.12 スtrings打撃の場合の伝達関数

と呼ぶ)の結果である。サンプリング周期は $200 \mu\text{s}$ 、周波数分解能は 4.8 Hz であり、ハンマのチップにはプラスチックを用いた。図 18.11 ではフレームの振動モードが明りょうに現れ、図 18.12 ではStringsの振動モードが明りょうに現れる。フレーム打撃においては、2度たたきを避けるにはかなり技巧を要するが、打撃力のスペクトルは高い周波数まで伸びる。一方、Strings面打撃では、フレーム打撃に比べてハンマとStringsの接触時間が長いので、打

撃力スペクトルは高い周波数まで伸びない。

図 18.13 は、偏分反復法³³⁾を用いた振動モード解析結果であり、グリップ自由の場合と手持ちの場合について示している。ラケットを斜めから見た3次元的な図と側面から見た図を示している。横軸と交わる点がフレーム上の振動モードの節になる。図 18.14 は、Strings面上の節の線を示したものであり、白と黒の境界線が節である。このラケットの振動モードは、振動数の低いほうからフレームの2節曲げ、3節曲げ、2節ねじり、Stringsの膜1次である。

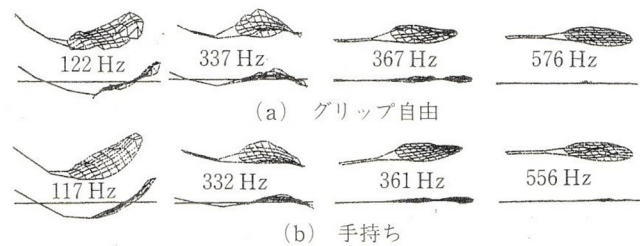


図 18.13 ラケットの振動モード (フレームの節の位置)

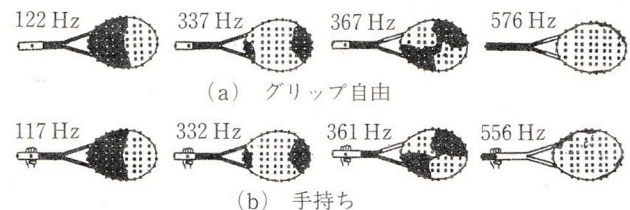
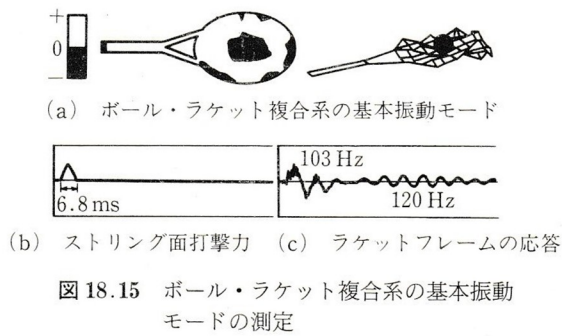


図 18.14 ラケットの振動モード (Strings面上の節の位置)

手持ちの場合の振動モードには、グリップ部を万力で固定したとき現れる低い振動数の片持ちモードは現れず、グリップ自由の場合の振動モードによく似ている。また、ラケット単体のモード減衰比は、ラケットの種類や素材により異なるが、手持ちの場合の減衰比は、グリップ自由の場合に比べてかなり大きい。また、実際にボールを打撃したときの実測波形から推測される減衰比は、打撃ハンマを用いた実験モード解析結果のそれよりさらに大きい。これらについては衝撃振動の予測のところで改めて述べる。

[2] ボール・ラケット複合系の実験モード解析 図 18.15 は、ラケットのStrings面中央にボールを接着したボール・ラケット複合系に実験モード解析を適用してみた結果である。図 (a) は複合系の基本振動モードであり、ボールとフレームがStringsを間に挟んで相互に押し合い引き合いするモードである。黒い部分と白い部分が反対に動く。このボール・ラケット系の基本振動モードの $1/2$ 周期が、衝突における接触時間に相当するとみなすことができる。ただし、ボールとStringsの強い非線形性のために、



衝突速度が大きいほど接触時間は短くなる。図 (b) はストリング面のボールの接点から少し離れた点をハンマで打撃したときの打撃力波形であり、図 (c) は同時に測定したフレームの首部の応答加速度波形である。

また、図 18.16 (a) はラケット単体の場合、図 (b) はボール・ラケット複合系の伝達関数を示す。図 (b) には図 (a) には見られない 103 Hz の固有振動数が新たに現れている。ボールを接着してもフレームの固有振動数はほとんど変わっていない。図 18.15 (c) のフレーム応答の初期に現われた振動はストリング面でボールがフレームと反対方向に往復する 103 Hz の振動モードであり、これが減衰した後 (約 2 周期後) に現れた振動は約 120 Hz のフレーム 2 節曲げ振動である。

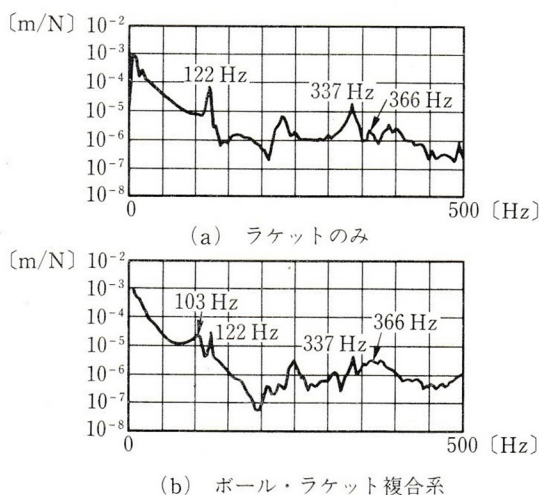


図 18.16 ボール・ラケット複合系の伝達関数

ストリング面でボールが上下する振動数にはフレーム剛性は影響しない。実際のボールとラケットの衝突実験においても同様の結果が見られた³⁴⁾。後に述べるように、接触時間がフレーム剛性に依存しないと仮定すると、近似非線形衝突解析が可能になる。

18.2.3 ボールとラケットの衝突における応答予測

[1] 非線形衝突解析による衝突力時系列波形の近似

ボールとラケットの反発係数は衝突におけるエネルギー損失と密接に関係しており、ボールとストリングスの瞬間的な大変形によるエネルギー損失とフレームの振動によるエネルギー損失が主なものである。

ボールとストリングスのエネルギー損失は、ストリングス周辺のラケットヘッドを固定してボールを衝突させたときの反発係数実測値 e_{BG} から求めることにし、ラケットフレームの振動によるエネルギー損失は、実験的に同定したラケットの振動特性と衝突力の予測波形から導く。

ボールおよびボール・ストリングス複合系の荷重と変形量の実測値に基づいて、中心に質量を集中させたボールがストリングスに接触する片側だけ変形すると仮定し、ボール・ストリングス複合系の復原力特性を最小二乗近似により求めてボール・ストリングス複合系を非線形 1 自由系として近似する。

まず、腕系の等価質量 M_H をグリップの握りの位置に付加したラケットの衝突位置に換算した質量 M_r とボール・ストリングス 1 自由度等価モデルとの衝突を考え、フレームの振動成分は分離して別に扱う。換算質量 M_r に及ぼす M_H の影響は、市販ラケットの場合には小さい。

衝突直前のラケットヘッドの衝突位置での速度およびボール速度が与えられると、運動量保存則と反発の式から接触時間 T_c と力積 $\int F(t)dt$ が求まる。

解析を簡単にするために、時間を t 、衝突力の最大値を $F_{\max}$ として力積波形を

$$F(t) = F_{\max} \sin \frac{\pi t}{T_c} \quad (0 \leq t \leq T_c) \quad (18.1)$$

のように近似し、接触時間 T_c の間一定の剛性を持つようなボール・ストリングス複合系の等価ばね K_{GB} を考えると、平均の衝突力 F_{mean} とそれに対応するばね剛性 K_{GB} の関係から、衝突速度が与えられたときの衝突力 $F_{\max}$ を求めることができる。

[2] ラケットの動的応答の予測 つぎに、ラケットの振動成分について扱う。線形系として実験的に同定したラケットの振動モデルに近似衝突解析から求めた衝突力を適用すれば、ボールとの衝突におけるラケットの振動が予測できる。

衝突力時系列波形の式 (18.1) のフーリエスペクトル $S(f)$ (f は振動数で、単位は Hz) はつぎのようになる。

$$S(f) = \frac{2F_{\max} T_c}{\pi} \left| \frac{\cos \pi f T_c}{(1 - 2f T_c)^2} \right| \quad (18.2)$$

$$\left| \frac{\cos}{1 - (2f T_c)^2} \right|$$

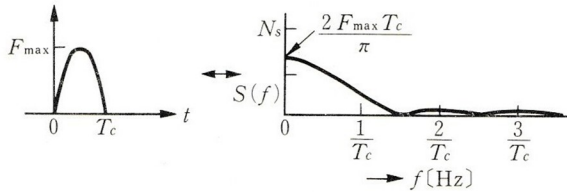


図 18.17 ボールとラケットの衝突力時系列波形の近似とフーリエスペクトル

図 18.17 は、式 (18.1) と式 (18.2) の概略図である。

周波数領域において、ラケットの k 次の固有振動数 ($\omega_k = 2\pi f_k$) 成分に対するラケット面上の点 j における衝突力成分を $S_j(\omega_k)$ と表すと、ラケット上の点 i における k 次モードの応答振幅成分 X_{ijk} は

$$X_{ijk} = r_{ijk} S_j(\omega_k) = \frac{r_{i0k} r_{0jk}}{r_{00k}} S_j(\omega_k) \quad (18.3)$$

と近似できる²⁰⁾。ただし、 r_{ijk} は任意の点 i と点 j の間の k 次の振動モードの留数、 r_{i0k} は実験モード解析から得られたラケット上の打撃点 i と固定された参照点零の間の既知の留数、 r_{0jk} は ($=r_{j0k}$) 打撃点 j と応答点零の間の既知の留数、 r_{00k} は参照点 (ピックアップ部) 零における既知の駆動点留数である。

図 18.18 は、手持ちラケットにボールが衝突したときの衝突直後の基本振動モード成分の変位振幅の予測結果である。ストリング面の極端な先端での衝突例であり、衝突速度が 20 m/s と 30 m/s の場合について示している。

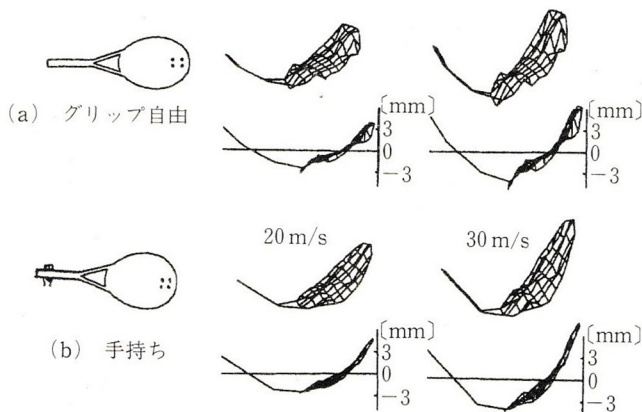


図 18.18 ボールとラケットの衝突におけるラケットフレーム振動の予測 (2 節曲げ振動成分の初期変位振幅)

18.2.4 ラケットの性能予測

[1] ボールを打撃したときのラケットの反発性能予測 ボールとストリングスの瞬時の大変形によるエネルギー損失、ラケットの回転剛体運動によるエネ

ルギー損失、フレームの振動によるエネルギー損失を考慮することにより、反発性能を予測することができる。グリップ自由のラケットにボールが衝突する場合のボールの跳ね返り速度の予測値は、空中についたラケットでの衝突実験結果によく一致する³⁰⁾。

図 18.19 は、グリップ自由の状態および手持ちの静止ラケットにボールが 20 m/s で衝突する場合の反発性能予測値である。静止ラケットにボールが衝突する場合のボールの跳ね返り速度と入射速度の比 ($e = -V_B/V_{B0}$, 反発係数と呼ぶ) はラケットの反発性能を表し、反発係数 e_r とボールの質量とラケット・腕系の換算質量に依存する。

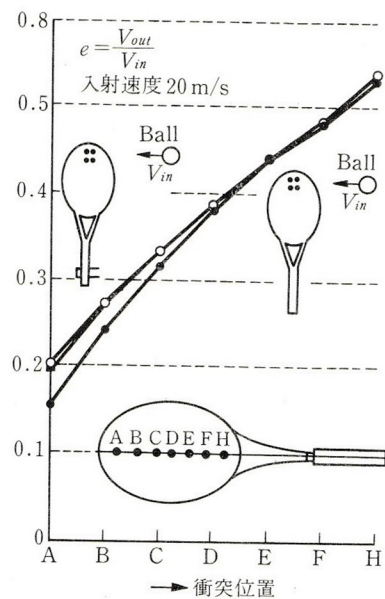


図 18.19 ラケットの反発性能の予測結果 (静止ラケットに衝突速度 20 m/s でボールが衝突するときのボールの跳ね返り速度/入射速度)

図 18.19 の■印と□印は両方とも手持ちラケットの場合であるが、□印はラケットの振動特性に関してグリップ自由で同定した結果を用いた値である。□印と■印はほとんど重なっている。

◆印はグリップ自由のラケットの場合である。手持ちラケット (■印) のほうが、グリップ自由のラケット (◆印) よりストリング面先端側でやや反発がよいのは、ラケットの換算質量がやや大きいことによる。

スイングしてボールを打撃したときのボールの飛び V_B は、ラケットヘッドの打撃点の衝突直前の速度 V_{R0} を与えれば以下の式により予測することができる³⁵⁾。

$$V_B = -V_{B0}e + V_{R0}(1+e) \quad (18.4)$$

[2] ラケットハンドルと手首の衝撃振動の予測 ボールとラケットの衝突の力積波形を式 (18.1) で与えると、腕系の等価質量 M_H を付加したラケットの剛

体運動によるグリップ部加速度 A_{nv} は以下のように導ける。

$$A_{nv} = F(t) \left(\frac{1}{M_R + M_H} - \frac{a}{I_G} X \right) \quad (18.5)$$

ただし、ラケット・腕系の重心位置から握りの位置までの距離を X ，ラケット・腕系の重心と打点の距離を a ，ラケット・腕系の重心回りの慣性モーメントを I_G とする。 $F(t)$ に衝突力の最大値 $F_{\max}$ を与えると、グリップ部の最大衝撃加速度が得られる。

モード減衰比を ζ_k とすると、ラケット面上の打点 j でボールと衝突したときのラケットの握りの位置 i における振動加速度成分は以下ようになる。

$$A_{ij,k}(t) = -\omega_k^2 r_{ij,k} S_j(\omega_k) \times \exp(-\omega_k \zeta_k t) \sin \omega_k t \quad (18.6)$$

式 (18.5) と式 (18.6) の和がグリップの衝撃振動加速度になる。

図 18.20 は、グリップ端から 70 mm の位置に腕系の等価質量 $M_H = 1.0 \text{ kg}$ を付加したときのラケット・腕系の例を示す。重心位置はグリップ端から 131 mm になる。

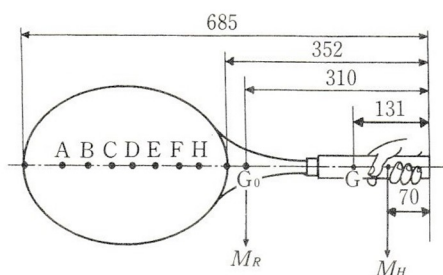


図 18.20 ラケット・腕系（グリップ端から 70 mm の位置に腕系の等価質量 $M_H = 1.0 \text{ kg}$ を付加）

図 18.21 は、ラケットとボールが衝突速度 30 m/s で衝突したときの初期振動加速度振幅の予測値であり、ラケット面の先端側と根元側で衝突したときの 2 節曲げ振動成分を示している。

実際のインパクトにおけるラケットの減衰比は、実験モード解析で得られた減衰比の約 2.5 倍に相当する。また、グリップ部と手首関節の間の手の減衰はさらにその 3 倍以上の大きさに相当する。

図 18.22 は、フォアハンドストロークでボールを打撃した場合のラケットハンドル（グリップ端から 210 mm の位置）の実測波形と予測波形を比較したものである。打撃位置はラケット面上の長手方向中心線上の先端側、衝突速度は 30 m/s である。衝撃振動加速度は衝撃成分とフレームの 2 節曲げ、3 節曲げ、2 節ねじり、ストリングスの膜 1 次の四つの振動モード成分を考慮している。

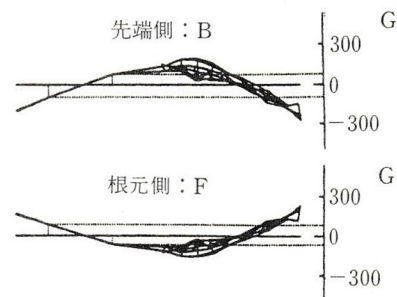
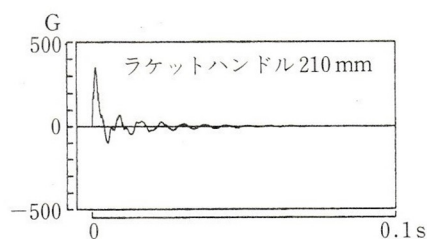
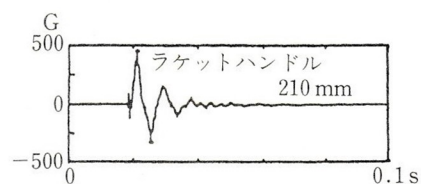


図 18.21 ラケットとボールが衝突速度 30 m/s で衝突したときの初期振動加速度振幅の予測値（2 節曲げ振動成分、衝突位置：ラケット面の先端側と根元側）



(a) 予測



(b) 実測

図 18.22 フォアハンドストロークでボールを打撃した場合のラケットハンドルの実測波形と予測波形の比較（打撃位置：ラケット面上の長手方向中心線上の先端側、衝突速度：30 m/s、実測位置：グリップ端から 210 mm）

図 18.23 は、グリップ端から 70 mm の位置、すなわち手で握った位置のラケット衝撃振動の予測波形である。

図 18.24 は、手首関節の予測波形を実測波形と比較したものである。衝撃振動の予測波形は実測波形の特徴を比較的良好に表しており、ラケットのグリップ位置の衝撃振動が手首関節まで伝わる過程で手の減衰が大きく作用していることを示している。

一方、グリップを拘束しない自由な（宙づり）ラケットのグリップ部（グリップ端から 70 mm の位置）の衝撃振動加速度の予測波形は図 18.25 のようになる。物理特性の異なる種々のラケットの衝撃振動吸収特性を予測することができる。

図 18.26 はテニスプレーヤーがボールを打撃した瞬間

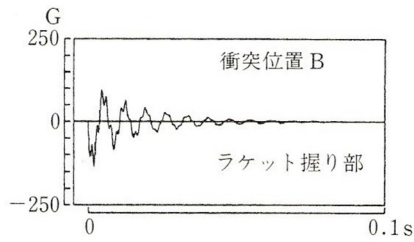
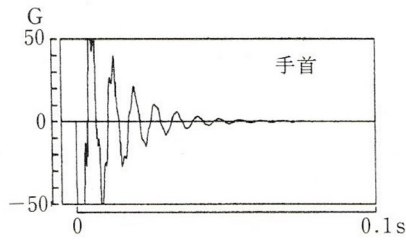
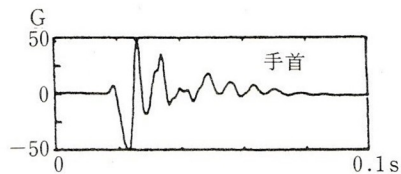


図 18.23 ラケットハンドル上の
グリップ端から 70 mm の位置
の衝撃振動の予測波形



(a) 予 測



(b) 実 測

図 18.24 手首関節の衝撃振動加速度
の予測波形と実測波形の比較

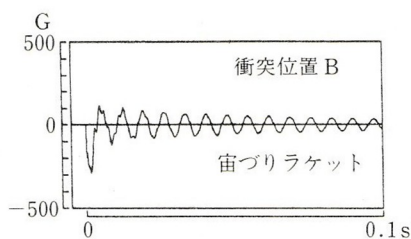


図 18.25 宙ぶりラケットのグリップ端
から 70 mm の位置の衝撃振動加速度の
予測波形

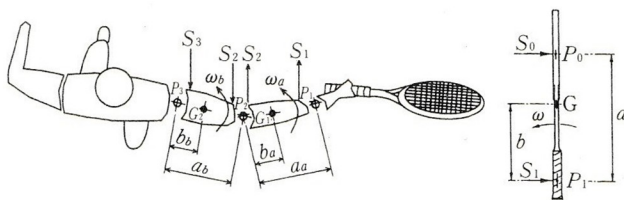


図 18.26 ラケットから腕系に伝わる衝撃振動の
予測のためのインパクトモデル

を示す。打点 P_0 でのインパクトにおいてボールとストリングスに作用する衝突力が S_0 であり、プレーヤの手首関節 P_1 、ひじ関節 P_2 、肩関節 P_3 に作用する力がそれぞれ S_1, S_2, S_3 である。腕系要素を剛体とし、関節はピン結合として近似し、ハンドルの握りの位置と手首関節の位置の距離を無視し、肩関節に作用する力 S_3 は肩関節の速度には影響しないと仮定すると、手首関節 P_1 、ひじ関節 P_2 、および肩関節 P_3 に作用する力を求めることができる。

18.2.5 理論モード解析による衝突の メカニズムの考察

1 自由度近似したボール・ストリングス複合系がラケットフレームを模擬した段付はりに速度 V_{B0} で衝突するモデルの理論モード解析によってもボール速度成分や反発のメカニズムについて考察することができる。

拘束のない（自由な）はりを考え、簡単のためボール・ストリングス複合系の減衰 $\zeta=0$ としてモード解析を行えばボール速度 dX_1/dt がつぎのように得られる。

$$\frac{dX}{dt} = V_T + V_R + V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t + V_3 \cos \omega_3 t + \dots \quad (18.7)$$

ただし、 V_T, V_R はそれぞれ並進剛体運動、回転剛体運動による速度成分であって

$$V_T = \frac{V_{B0} m_B}{m_B + m_R} \quad (18.8)$$

$$V_R = \frac{V_{B0} \alpha m_B m_R}{(m_B + m_R) \{ (1 + \alpha) m_B + m_R \}} \quad (18.9)$$

$$\alpha = \frac{d^2}{I_R m_R} \quad (18.10)$$

m_B はボールの質量、 m_R, I_R はそれぞれフレームの質量と重心回りの慣性モーメント、 d はフレームの重心点と打撃点との距離である。

また、 ω_i, V_i ($i=1, 2, 3, \dots$) は i 次の固有角振動数とその速度成分である。

ボールの衝突速度 V_{B0} ($t=0$) は次式で与えられる。

$$V_{B0} = V_T + V_R + V_1 + V_2 + V_3 + \dots \quad (18.11)$$

フレームを剛体と仮定した場合は、衝突後のボールの速度 dX_1/dt はつぎようになる。

$$\frac{dX_1}{dt} = V_T + V_R + V_1 \cos \omega t \quad (18.12)$$

ただし、 V_1 は固有振動 ω による速度成分であって

$$V_1 = \frac{V_{B0} m_R}{(1 + \alpha) m_B + m_R} \quad (18.13)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\{(1+\alpha)m_B + m_R\}K_{GB}}{m_B m_R}} \quad (18.14)$$

である。

式 (18.12) において $t=0$ とすれば $V_{B0} = V_T + V_R + V_I$ が成り立つことから、式 (18.11) との比較により次式が成立する。

$$V_I = V_1 + V_2 + V_3 + \dots \quad (18.15)$$

式 (18.7) と式 (18.15) より、ボールの跳ね返り速度 V_B にはつぎの不等式が成り立つ。

$$|V_B| \leq |V_T + V_R - V_I| \quad (18.16)$$

したがって、はりが弾性体の場合の跳ね返り速度は、剛体の場合の跳ね返り速度を超えないことになる。

衝突速度と打撃点を与えて式 (18.7) の各項の変化を計算した結果³²⁾によると、ボール・ラケット系の3次 (フレームの2次) 以上の高次振動はほとんど影響を与えないこと、フレームの1次固有振動の節位置での衝突では $V_1=0$ であり、式 (18.15) で V_3 以上の高次の項を無視すると $V_1 \approx V_2$ となり、式 (18.16) の関係より反発速度が大きくなることがわかる。剛体運動は衝突においては運動量を持ち去るので、反発を悪くする。

18.2.6 あ と が き

スポーツ用具の進歩がスポーツの技術やプレースタイルに影響してきたといわれている。しかし、現状では、用具の性能は使用して初めてわかるものであり、人間の評価が優先する。スポーツは体験により修得するものであるからきわめて主観的な面が大きく、用具の性能には人間系が複雑に絡んでくるためスポーツ用具の解析は厄介である。ここでは、テニスラケットの例について一つのアプローチの方法を紹介したが、ゴルフやスキーなど多くのスポーツについても用具に関する同様な工学的研究が行われている。

引用・参考文献

- Coermann, R. R.: The mechanical impedance of the human body in sitting and standing position at low frequencies, *Human Factors*, 4-10, pp. 227~253 (1962)
- Fairley, T. E. and Griffin, M. J.: The apparent mass of the seated human body: vertical vibration, *Journal of Biomechanics*, 22-2, pp. 81~94 (1989)
- Paddan, G. S. and Griffin, M. J.: The transmission of translational seat vibration to the head - I. vertical seat vibration, *Journal of Biomechanics*, 21-3, pp. 191~197 (1988)
- Hinz, B. and Seidel, H.: The nonlinearity of the human body's dynamic response during sinusoidal whole body vibration, *Industrial Health*, 25, pp. 169~181 (1987)
- Panjabi, M. M., Andersson, G. B. J., Jorneus, L., Hult, E. and Mattsson, L.: In vivo measurement of spinal column vibrations, *Journal of Bone and Joint Surgery*, 68-A(5), pp. 695~702 (1986)
- Magnusson, M., Pope, M., Rostedt, M. and Hansson, T.: Effect of bacrest inclination on the transmission of vertical vibrations through the lumbar spine, *Clinical Biomechanics*, 8, pp. 5~12 (1993)
- Coermann, R. R., Ziegenruecker, G. H., Wittwer, A. L. and Gierke, H. E. von: The passive dynamic mechanical properties of the human thorax-abdomen system and of the whole body system, *Aerospace Medicine* 31, pp. 443~455 (1960)
- White, G. H. Jr., Lange, K. O. and Coermann, R. R.: The effects of simulated buffeting on the internal pressure of man, *Human Factors*, 4, pp. 275~290 (1962)
- Sandover, J.: Modelling human response to vibration, *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 49-1, pp. 335~339 (1978)
- Latham, F.: A study in body ballistics: seat ejection, *Proceedings of the Royal Society, B*-147, pp. 121~139 (1957)
- Payne, P. R.: Personnel restraint and support system dynamics, *Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Report No. AMRL-TR-65-127* (1965)
- Suggs, C. W., Abrams, C. F. and Stikeleather, L. F.: Application of a damped spring-mass human vibration simulator in vibration testing of vehicle seats, *Ergonomics*, 12-1, pp. 79~90 (1969)
- Payne, P. R. and Band, E. G. U.: A four-degree-of-freedom lumped parameter model of the seated human body, *Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Report No. AMRL-TR-70-35* (1971)
- Orne, D. and Liu, Y. K.: A mathematical model of spinal response to impact, *Journal of Biomechanics*, 4, pp. 49~71 (1971)
- Belytschko, T., Schwer, L. and Schultz, A.: A model for analytic investigation of three dimensional head-spine dynamics, *Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Report No. AMRL-TR-76-10* (1976)
- Li, T. F., Advani, S. H. and Lee, Y.-C.: The effect of initial curvature on the dynamic response of the spine to axial acceleration, *Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Report No. AMRL-TR-71-29*, pp. 553~569 (1971)
- Cramer, H. J., Liu, Y. K. and Rosenberg, D. U.

- von: A distributed parameter model of the initially loaded human spine, *Journal of Biomechanics*, **9**, pp. 115~130 (1976)
- 18) Kitazaki, S and Griffin, M. J.: Resonance behaviour of the seated human body and effects of posture, *Journal of Biomechanics*, **31**, pp. 143~149 (1998)
 - 19) Kitazaki, S. and Griffin, M. J.: A data correction method for surface measurement of vibration on the human body, *Journal of Biomechanics*, **28-7**, pp. 885~890 (1995)
 - 20) Liu, Y. K. and Wickstrom, J. K.: Estimation of the inertial property distribution of the human torso from segmented cadaveric data. Perspectives in Biomedical Engineering, Proceedings of a symposium organised in association with the Biological Engineering Society at Glasgow, 1972 (1973)
 - 21) Singley III, G. T. and Haley, J. L.: The use of mathematical modeling in crashworthy helicopter seating systems, AGARD Conference Proceedings, **253-A 22**, pp. 1~17 (1978)
 - 22) Dobson, B. J.: A straight-line technique for extracting modal properties from frequency response data, *Mechanical System and Signal Processing*, **1-1**, pp. 29~40 (1987)
 - 23) Kitazaki, S. and Griffin, M. J.: A modal analysis of whole-body vertical vibration, using a finite element model of the human body, *Journal of Sound and Vibration*, **200-1**, pp. 83~103 (1997)
 - 24) Belytschko, T. and Privityer, E.: Refinement and validation of a three-dimensional head-spine model, Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Report No. AMRL-TR-78-7 (1978)
 - 25) Privitzer, E. and Belytschko, T.: Impedance of a three-dimensional head-spine model, *Mathematical Modelling*, **1**, pp. 189~209 (1980)
 - 26) NASA: Anthropometric source book Volume 1: Anthropometry for designers, NASA Reference Publication, 1024, NASA (1978)
 - 27) McConville, J. T., Churchill, T. D., Kaleps, I., Clauser, C. E. and Cuzzi, J.: Anthropometric relationships of body and body segment inertia, Air Force Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Report No. AFAMRL-TR-80-119 (1980)
 - 28) KAWAZOE, Y.: *Theor. and Appl. Mech.*, **42**, pp. 197~208 (1993)
 - 29) 川副嘉彦: *機論*, **C, 61**-584 pp. 1300~1307 (1995)
 - 30) KAWAZOE, Y. et al.: *Proc. of Int. Conf. on New Frontiers in Biomechanical Engineering*, pp. 285~288 (1997)
 - 31) 川副嘉彦 ほか: ジョイント・シンポジウム 1997, スポーツ工学シンポジウム, シンポジウム: ヒューマンダイナミクス, No. **97-34**, pp. 28~32 (1997)
 - 32) 川副嘉彦 ほか: *機論*, **C, 59**-563, pp. 2116~2123 (1993)
 - 33) 長松昭男: *モード解析*, pp. 124, 273, 培風館 (1985)
 - 34) 川副嘉彦: *機論*, **C, 58**-552, pp. 2467~2474 (1992)
 - 35) 川副嘉彦: 日本機械学会 D&D'97 スポーツ工学シンポジウム講演論文集, No. **97-10-2**, pp. 66~73 (1997)