

テニスラケットの性能予測

テニスのインパクトの謎を解く

テニスのインパクトの謎

錦織選手の素晴らしい活躍により、テニスがテレビや新聞雑誌で多く取り上げられるようになりました。しかし、ときどき気になることがあります。

たとえば、ウィンブルドンテニスのテレビ中継において、錦織選手がラケットを取り換えた時、「ストリングスは、テンションを上げるとボールは飛ばなくなります。テンションがゆるくなるとボールは飛ぶようになっていきます。」と解説されていました。これは、客観的な事実でしょうか。

実は、テニス界で活躍の福井烈さんが若いころ（1980年）訳された「(ドン・レアリー著) テニスの急所191」という本には、「ガットが堅く張ってあればあるほど、パワーボールを打てますが、そのかわりコントロールは悪くなります（ボールがガットからより早く離れるからです）。ガットがゆるければゆるいほど、打球のコントロールはよくなりますが、パワーは落ちます。（ボールがガットに接触する時間が長くなるからです）。この本のもとになったレアリーの新聞コラムの読者は世界で3000万人以上とされているので、当時は、現在と反対のことが世間の常識だったわけです。

テニスのインパクトの謎を解く

では、なぜ、真逆になったのでしょうか。それは、ボールを100インチ（2.5m）程度の高さからストリング面に落下させたとき（時速30キロ程度まで）、テンションがゆるいほど跳ね返りが良いという実験結果が報告されたからです。その後、実際に近い速度での衝突実験が行われ、理論的にも明らかになり、実際のインパクトでは反発性も接触時間もテンションには影響されないということがわかりました。

デ杯で活躍された元プロテニスプレーヤー神和住純さん（法政大学教授）が、30ポンド～70ポンドまで5種類のテンションで張ったラケットでご自分のサービス速度を測られた実験結果があり、ゆるく張っても強く張っても違いがないという報告も興味深く拝見しました。

2005年あたりからそれまで謎であったスピンのメカニズムの解明が進み、ストリングの設計論が従来とは180度変わってきました。「ナイロン、天然ガット、ポリエステルという素材の違いは反発性に影響しない」、「テンションの違いは反発性に影響しない」、「スピン量には素材の違いが大きく影響し、ポリエステルが最大、ナイロンが最小」、「スピン量にはテンションの違いは影響しない」、「スピン量はガットを張り替えた時点から時間の経過とともに低減する（ボールコントロールが難しくなる）」、したがって、「試合の途中で選手がラケットを変えるのは、ストリングにノッチができることにより低減するコントロール性能を回復させるためである」などが、最新の科学的な常識です。

テニスラケットの性能予測

テニスのインパクトにおいてストリングとボールが接触している時間は約1000分の3秒程度なので（衝突速度が速いほど短く、ドロップショット：1000分の8秒～ハードヒット：1000分の2秒）、インパクトで起こっている現象をプレーヤーは感知できないのです。達人といわれるストリンガーも50ポンドで張った弦楽器としてのラケット性能には熟知できても、テンションが200ポンド以上になるインパクトにおける武器としてのラケット性能は予測できないのです。

本研究では、従来経験的に評価されていた種々のテニスラケットのインパクトにおける性能を、ボール・ラケット・ストリングの物理特性を実験的に同定して衝突現象を解析することにより、工学的に予測・評価しました。

（事例1）

マッケンローのラケット・ハイテク化批判をどう理解すべきか :テニスラケットのハイテク化とテニスのパフォーマンス

元トップ・プレーヤーのマッケンローら数人が、国際テニス連盟 (ITF) に対して、ラケットの影響力を抑える対策を要求しました。

「プレーヤーは最近のラケットを使って、以前では考えられなかった時速 240 キロメートルというスピードでボールが打てる」、「グリップ内部にチップを埋め込んでボールに当たった瞬間にラケットが堅くなるようなものまである」、「ラケットの長さは 27 インチ以下、幅は 9 インチ以下にすべきだ。そうすればボールを打つ面がかなり狭くなり、もっと面白い試合をせざるをえなくなる」、「プロ野球では木製バットが使われる」、「ほとんどのトップ・プレーヤーは、どんな道具を使っても、いいプレーヤーであり続けると思う」と言っています。

図 1 に示すフォアハンド・グランド・ストロークのスイング・モデルを用いて、ボールの飛びに関するラケット性能を予測しました。肘と手首の関節角度を一定にして、肩関節トルク N_s を与え、ラケットを 90 度回転したときのヘッド速度 V_{R0} で V_{B0} で飛んでくるボールを打撃します。

図 2 は、軽量・高剛性ラケット (EOS100, 290g : フレーム 275g, ストリング 15 g) と木製ラケット (Wood, 375 g : フレーム 360 g, ストリング 15 g) を比較したものです。(a) は ラケット・ヘッド速度 V_{R0} , (b) はボールの飛び V_B の比較です。横軸はラケット面中心から打点位置までの距離、インパクト速度は女子トップ・プロのラリーにおけるフォアハンド・グランド・ストロークを想定して肩関節トルク $N_s = 56.9 \text{ N}\cdot\text{m}$, インパクト前のボール速度 $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$ を与えています。

両者のボールの飛びは、37 m/s, 36 m/s 程度であり、それほど大きな違いではありません。

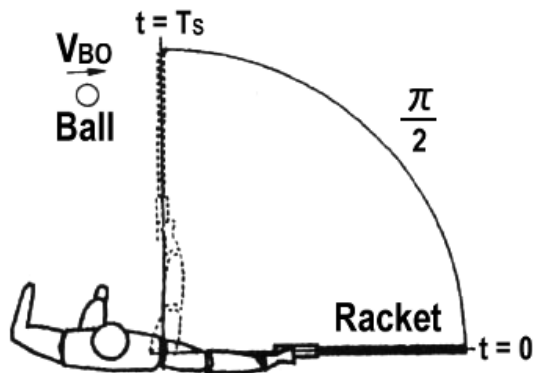
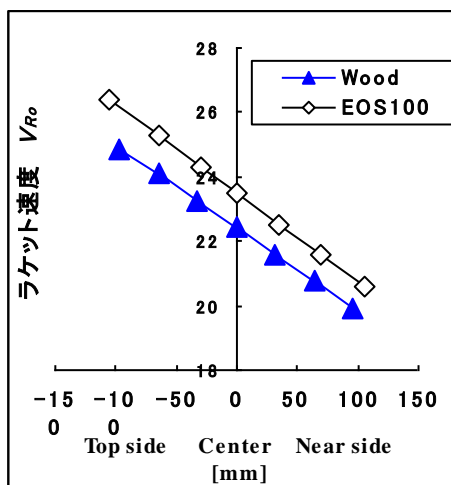
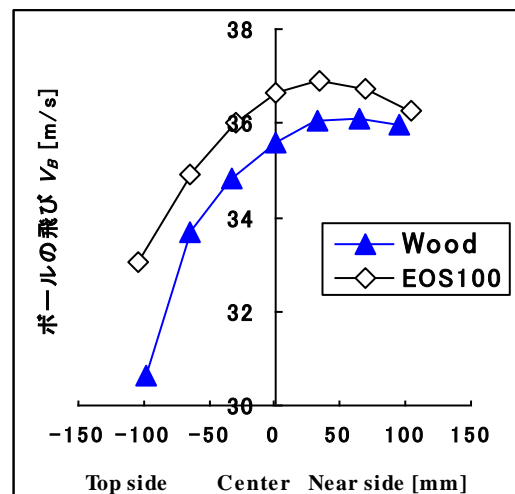


図 1 フォアハンド・ストロークのスイング・モデル
(肘と手首の関節角度を一定にして、肩関節トルク N_s を与え、ラケットを 90 度回転してインパクト)



(a) ラケットヘッド速度 V_{R0} .



(b) ボールの飛び V_B

図 2 フォアハンド・グランドストロークにおける軽量・高剛性ラケット (EOS100, 290g : フレーム 275g, ストリング 15 g) と木製ラケット (Wood, 375 g : フレーム 360 g, ストリング 15 g) のヘッド速度とボールの飛び V_B の予測結果 (肩関節トルク $N_s = 56.9 \text{ N}\cdot\text{m}$, インパクト前のボール速度 $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$ の場合)

図3は、マッケンローが指摘する圧電素子と制御回路を組み込んだ軽量「インテリ・ファイバー」ラケット IS-10 (241g: フレーム225g, ストリング16g) のパワー (打球速度) の予測結果です。

「インテリ・ファイバー」のパワーは、世界最軽量ラケット TSL (224 g: フレーム208 g, ストリング16 g) に比べると、特にラケット面先端側で優れています。一般的な軽量ラケットで反発性の良い EOS120A (120 平方インチ (292g: フレーム276 g, ストリング16 g) と大して変わりません。

「インテリ・ファイバー」は、木製ラケットと比較すると、ラケット面センターで打撃したとき 5%、ラケット面の極端な先端寄りで打撃したとき 14% 程度、打球が速いことになります。ただし、スイング・フォームが同じと仮定した場合の比較です。これが30数年間のラケットの変化ということになります。したがって、プレーの変化の方が、ラケットの変化に比べて、はるかに大きいように思えます。

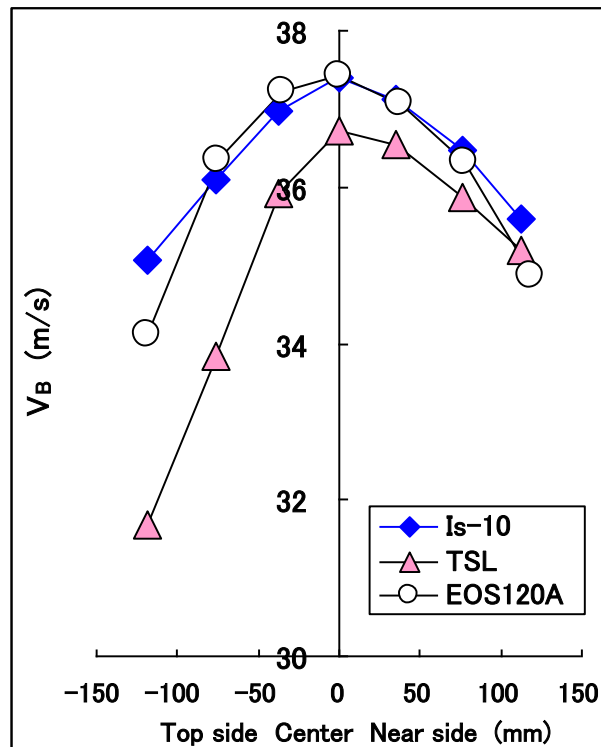


図3 木製ラケット (Wood, 375 g: ストリング15 g を含む) と軽量・高剛性ラケット EOS100 (290 g: ストリング15 g を含む) のヘッド速度とボールの飛びVB (フォアハンド・グランドストローク) の予測結果ボールの飛び

(事例2) テニスの新しい物理学

ラケットのスピニング性能のメカニズムとスピン打撃実験

: ツルツルで硬く、張りあがりの新しいストリングほど、スピンのかかる

テニスのトップスピン打撃におけるインパクトの超高速ビデオ画像解析とシミュレーションによりラケットのストリングとスピンの関係を明らかにしました。すなわち、

- (1) 従来の仮説とは逆に、ストリング表面の摩擦が小さいほど、トップスピン打撃において縦糸と横糸の交差点がずれてボールが食い込み、縦糸が戻るときストリング面内復原力によりボールのスピニング量が増す (スナップバック効果)。
- (2) 縦糸と横糸の交差点にノッチができたストリングスでも、交差点を潤滑すると、ボールのスピニング量が回復し、接触時間も長くなる (図1, 図2)。
- (3) 接触時間が長くなると、ラケットや手に伝わる衝撃振動も低減する。
- (4) すでに世界のトップ・プレーヤーは天然ガットよりもツルツルで硬いポリエステルを使っている。

たとえば、図3に示すように、ストリング（ナイロン・ガット）を張ってから1日3時間、1週間ほど使用してノッチのできたラケットの場合、新品のストリングスと比べるとスピンの量は平均 40%低減します。ところが、縦糸と横糸の交差点に潤滑剤を塗るとスピンの量は平均 30%回復し、接触時間は平均 16%長くなりました。

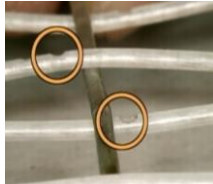


図1 ノッチ（溝）



図2 スナップバック現象

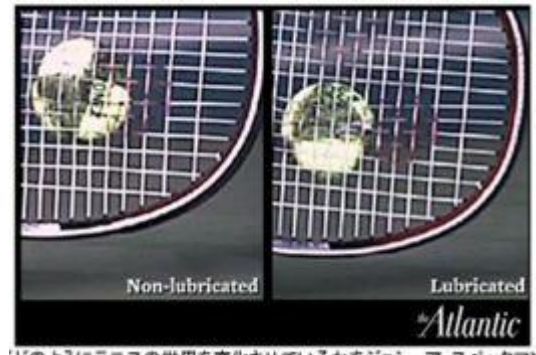


図3 通常ナイロン ノッチ潤滑ナイロン

図1 ラケット使用後にストリングスの縦糸・横糸の交差点にできたノッチ

図2 横にずれたストリング縦糸が元に戻るときの復原力（スナップバック効果）によるスピン増大

図3 左：スナップバック現象が小さい 右：ノッチを潤滑するとスナップバック現象が大きい

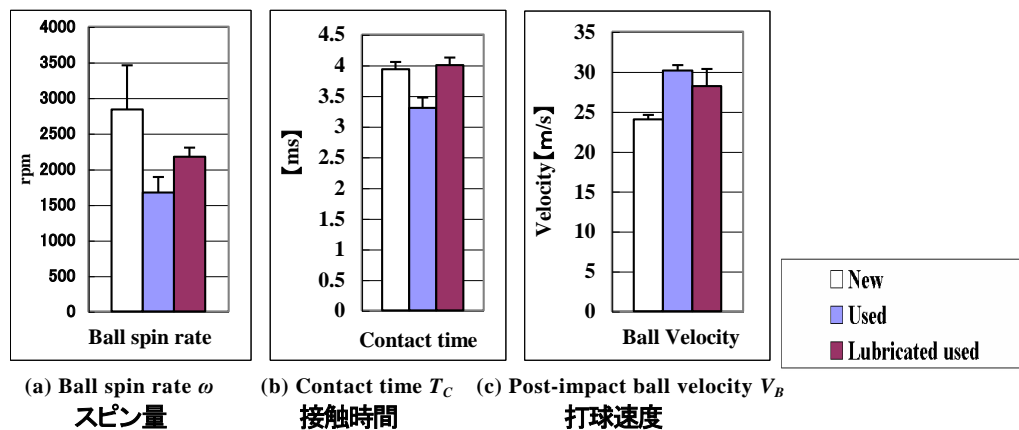


図4 ナイロン・ストリングス(新品, 使用後, 使用後潤滑)とスピン性能(3 回平均値と標準誤差)

図5は、新品ナチュラルガット（天然）および試合後のナチュラルガット（天然）を張って、プロ・テニスプレーヤーが打撃したときのトップ・スピン実験解析結果を比較したものです。

図6は実験風景です。

試合後のガットには交差点に深い溝ができており、トップ・スピン打撃において、縦糸の横方向へのズレと戻りによる面内復原力（スナップバック効果）が少ないために、スピンの量が顕著に低減し、接触時間も短くなっています。スピンの量が少ないために、インパクト直後の打球速度は速く、したがって、強打した時のボール・コントロールが難しくなります。

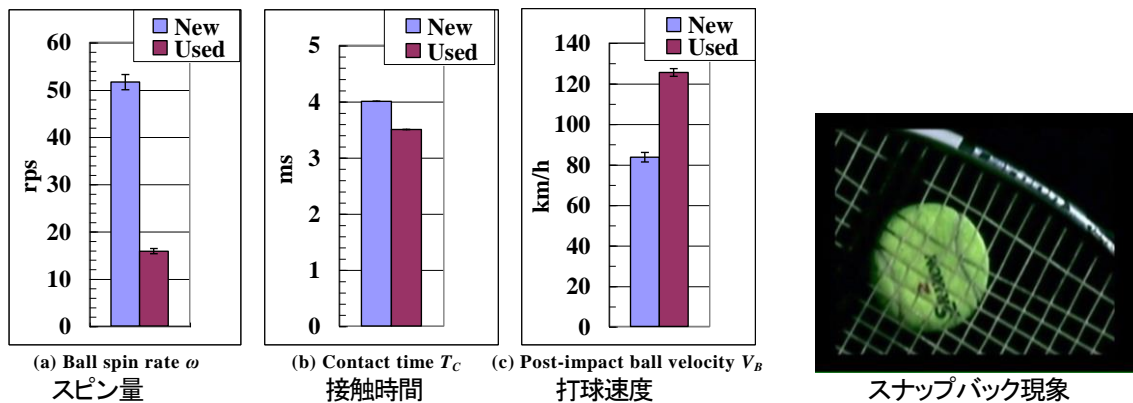


図5 プロ・テニスプレーヤーが新品ナチュラル・ガットと試合後のナチュラル・ガットで打撃したときのトップスピン挙動の比較(NHK との共同実験)



図6 NHK との共同実験風景

(事例3)

テニスボールの毛羽の役割：スピン量増大とボール・コントロール性能アップ

プロ・テニスプレーヤーがトップスピンとアンダースピンで打撃したときのテニスボールとフェルト（毛羽）なし（滑面）ボールのスピニング性能を超高速度ビデオカメラにより測定・解析し、フェルト（毛羽）のスピニング量におよぼす影響を明らかにし、流れの可視化によりボール・コントロールにおよぼすフェルト（毛羽）の役割を考察し、テニスボールの毛羽とスピンとボール・コントロールの謎を始めて明らかにしました。

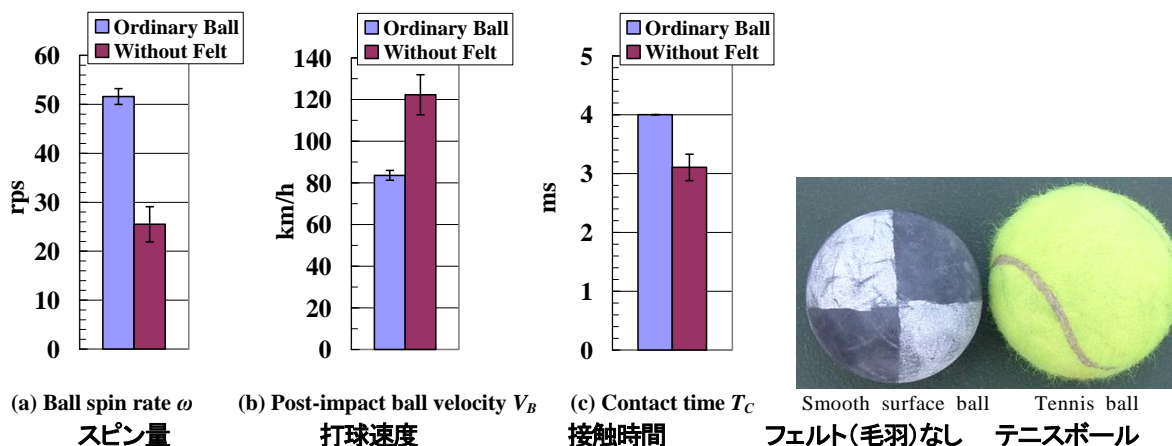


図1 プロのトップスピン打撃におけるテニスボールとフェルト(毛羽)なしボールのスピニング性能測定値(NHK との共同実験)

フェルト（毛羽）なしボールは、スピン量（図 a）が顕著に低減し（平均 50% 低減）、接触時間（図 c）も短くなっています（平均 23% 短い）。スピン量が大きく減少するために、インパクト直後の打球速度（図 b）は速く（平均 42% 速い）、したがって、フェルト（毛羽）なしボールを強打すると、コート内に収まらないで、コート外に飛び出しやすくなります。

トップスピンにおけるボール周りの流れ

(火花追跡法による回転飛翔の可視化)

川副嘉彦・武田幸宏・中川慎理・青木克巳,日本機械学会スポーツ工学シンポジウム2009

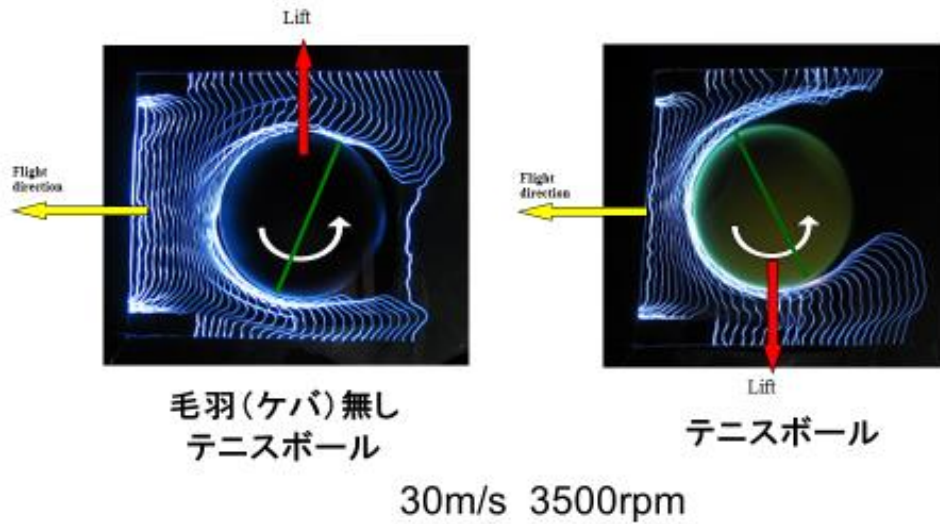


図2 (a) フェルト(毛羽)なしボール(滑面ボール)と(b) テニスボールのトップスピン(打球速度30m/s 左向き, トップスピン量3500rpm: 矢印方向)に相当するボール周りの流れの測定

: テニスボールにトップスピンがかかると, ボールのフェルト(毛羽)により揚力は下向きに働き, 強打してもボールをコート内の狙ったところに落としやすくなるが, フェルト(毛羽)なしボールの場合は, 揚力は上向きに働き, ボールが浮いてコントロールが難しくなることを示唆しています.

(事例4)

ゆるいガットはテニス肘防止になるか?

:フォアハンド・ストロークにおける手首関節およびサービス・ストロークにおける肘関節の衝撃振動の測定

テニスラケットのストリングスを緩く張ると, ボールの衝撃を多く吸収し, 振動を低減し, プレーヤーの肩・肘・手首の傷害を防止するのに良いと一般に言われているようです.

しかし, これらを実証する研究は見あたりません.

また, テンションの影響は大きくないという研究結果もあります.

本研究では, ストリングス・テンションの異なるテニスラケットでボールを打撃したときのプレーヤー上肢系(肘関節, 手首関節)とラケットハンドルの衝撃振動を測定しました.

ストリングス初張力(テンション)は45ポンド(低め)と65ポンド(高め)の2種類です.

図1は, 手首関節およびラケット・ハンドル部(グリップ端から210mm)の加速度計取り付け位置, 図2は, 肘関節の加速度計取り付け位置, 図3は実験風景を示しています.

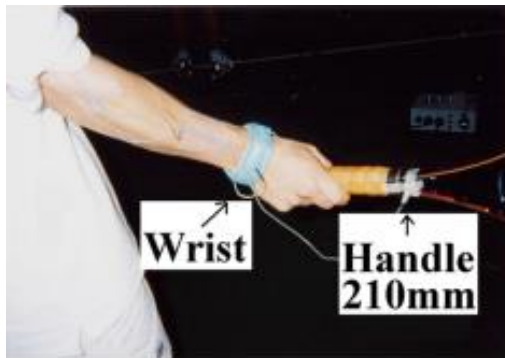


図1



図2

図1 手首関節とラケット・ハンドル部取り付けた加速度計
図2 肘関節とラケット・ハンドル部に取り付けた加速度計



図3 実験風景

図4は、男子上級プレーヤー（全日本ランカー）のフォアハンド・ストローク（フラット）における手首関節とラケット・ハンドルの実測波形です。ラケット面先端側（オフセンター）で打撃した場合です。

図5は、サービス・ストロークにおける肘関節とラケット・ハンドルの実測波形です。

ラケット面のほぼセンタ（わずかに先端側寄り）で打撃した場合です。

主な結果は以下のようになります。

(1) フォアハンド・ストロークにおけるラケット・ハンドルと手首関節の衝撃振動は、ラケット面の先端側オフ・センタ打撃では、45 ポンドの方が 65ポンドに比べてやや小さくなっています。

しかし、20 ポンドのテンション差に対する衝撃振動の差は小さく、テンションの影響はないとみなせます。

(2) サービス・ストロークでは、テンション45 ポンドは 65 ポンドに比べて、ラケット・ハンドルの衝撃振動は大きめ、肘関節の衝撃振動はやや小さめになっています。

この場合も、20 ポンドのテンション低減に対する衝撃振動低減の効果は小さく、テンションの影響はないとみなせます。

ストリングを張ったときの 20 ポンド程度のテンションの差は、インパクト時（ボールとストリングが接触してから離れるまでの間）のテンション 200 ポンド～ 300 ポンドに比べると、大きくはないので、よく考えると、当然のことと言えます。

したがって、ストリングスを緩く張っても、手首関節および肘関節の衝撃振動低減には大きな効果は無く、ゆるいガットはテニス肘防止に効果的とは言えないことになります。

ゆるいガットは腕の傷害防止にはならないことを認識して、別の対応を考えることが必要です。

これはナチュラルガット、ナイロン、ポリエステルなどの素材の違いについても同様なことが言えます。インパクトのときに、ボールとストリングの間に作用する衝突力は、ボールとラケットの衝突の速度とその間に失われるボールのつぶれによるエネルギー損失でほぼ決まります。テンション 200 ポンド～ 300 ポンドのインパクトの瞬間においては、ストリング素材の違いによる面圧（面の硬さ）の違いは小さく、ボールの変形量にほとんど違いがないので、素材の違いも、腕の傷害防止にはならないことになります。

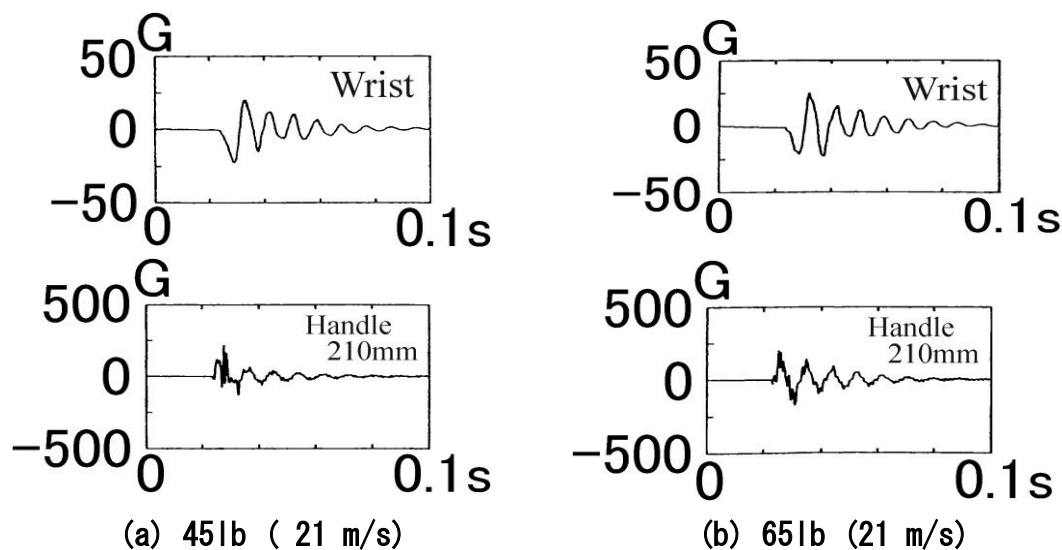


図4 フォアハンド・ストローク（フラット）における手首関節（wrist）とラケット・ハンドル(Handle)の衝撃・振動実測波形（ラケット面先端側オフセンタで打撃）．横軸は時間，縦軸は加速度（衝撃振動による力に相当する）．

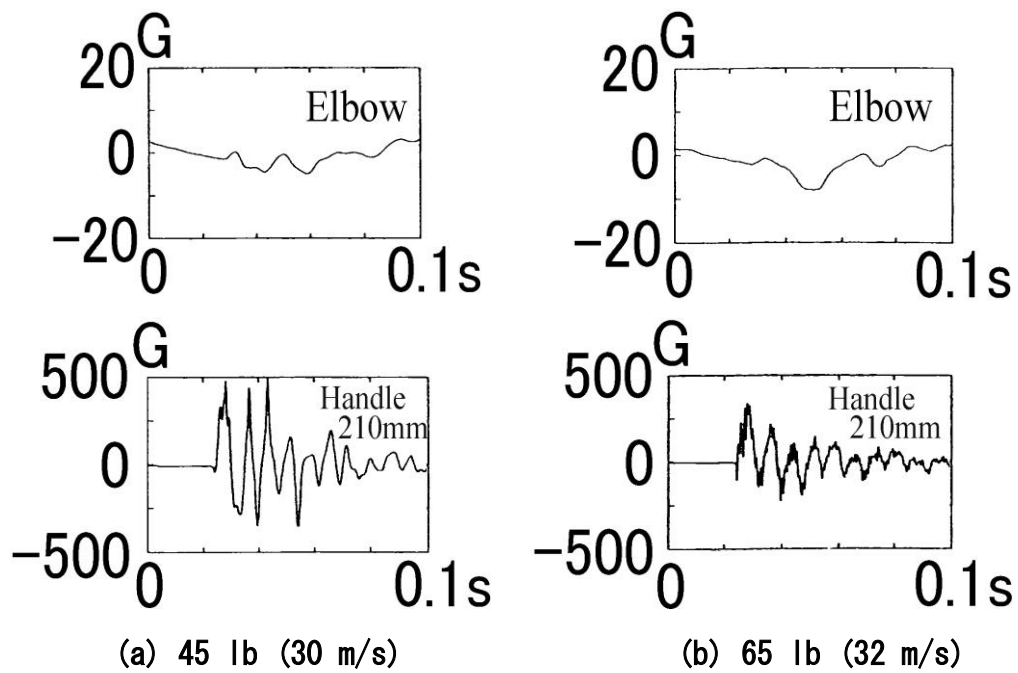


図5 サービス・ストロークにおける肘関節とラケット・ハンドル（グリップ端から210 mm）の衝撃振動実測波形（ラケット面のほぼセンタで打撃）．
横軸は時間，縦軸は加速度（衝撃振動による力に相当する）．