

国際テニス連盟性能試験用ラケットITFの ボールの飛びに関連する性能予測と評価

Prediction and Estimation of Power of Tennis Racket ITF for ITF Performance Test

○川副嘉彦 (埼玉工大) 武田幸宏 (埼玉工大) 中川慎理 (埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama, Japan
Yukihiro TAKEDA, Saitama Institute of Technology
Masamichi NAKAGAWA, Saitama Institute of Technology

Several former top players sent a letter to the ITF (International Tennis federation) that tennis has become unbalanced and one-dimensional, because rackets today allow players to launch the ball at previously unthinkable speeds. Modern racket technology has developed powerful, light, wide-bodied rackets. There's even a racket with a chip built into the handle that allows the racket to stiffen upon impact with the ball. All of this technology has led to major changes in how the game is played at the top level. ITF seems to have started the test to examine the performance of tennis racket against the above claims. Since the sport should be learned from the experience, it is the subjective thing. Accordingly, it is quite difficult to see how the physical property of equipment has an effect on the performance of a player. The terms used in describing the performance of a tennis racket are still based on the feel of an experienced tester or a player even today. This paper investigated the physical properties of the racket that was manufactured by ITF for performance test, predicting its performance in terms of the coefficient of restitution, the rebound power coefficient, and the post-impact ball velocity relevant to the racket power. It is based on the experimental identification of the racket dynamics and the simple nonlinear impact analysis. The predicted results could explain the difference in mechanism of performance between the the racket ITF and the recent representative racket. The racket ITF provides higher coefficient of restitution particularly at the topside of string face and slightly higher post-impact velocity despite lower racket head speed compared to the recent representative racket. Prediction and estimation of feel will be reported in a separate paper.

Key Words: Dynamics of Machinery, Sports Engineering, Impact, Tennis Racket, Performance Test, ITF, Coefficient of Restitution, Rebound Power Coefficient, Power of Racket

1. 緒言

最近のテニスラケットの試合への影響力を抑える対策をマッケンローら元トッププレイヤー数人が 国際テニス連盟 (ITF) に対して要求したということもあり, ITFは新開発の性能測定装置を用いてラケットやシューズ, ボール, コートなどの性能測定実験を精力的に進めている. 図1は, ラケットのパワー測定装置であり, 上から落ちてきたボールをマシンに取り付けたラケットで打撃して打球速度を測定できる. 性能測定実験の目的は, 主要メーカーのラケット性能をベンチマークすることによりパワー値に関するデータベースを作成することである.

テニスの科学技術に関する国際会議 (TTS: Tennis Science and Technology, ITF主催) においても, テクノロジーの理解がテニスの将来にきわめて重要だというITF会長のコメントがあり, ラケットのゲームへの影響に関連して, 放送キャスター, プロテニス協会関係者, 英国デビスカップ選手, ITF技術委員, 用具メーカー設計開発者などによる活発な議論がなされている. また, ラインコールの自動化についても, 人間のライン・アンパイアとの違いなどに関して, 自動ラインコール装置製造業社, プロテニス選手, テレビ関係者, テニス協会の代表者などによる広範な議論がなされている. 話題の中心は, 「テニスにおける技術と伝統の調和」である.

ラケットの進歩がテニスのプレイ・スタイルを変えたと言われている. しかし, テニスは体験により修得するものだから主観的なものであり, ラケットが実際のプレーにどのように影響するかを客観的に評価することはきわめて難しい.

一般にラケットに求められる基本的な性能は, パワー, コントロール, 打球感といわれている. 「玉離れが良い」, 「ホールド感がある」, 「面の安定性が良い」などの微妙な性能評価もある. 最近の特長は軽量化であり, 軽量化によりテニスラケットはパワーに関する性能を向上させてきたが, 反発

係数, 反発特性, およびオフセンター・インパクトにおける手首関節の衝撃振動に関する軽量化の限界が明らかになってきた. 一方, 打球感の改善をめざす新しい発想・試みのラケットが次々と市販されるようになってきた.

本論文では, 国際テニス連盟・性能試験用の標準として製作されたラケットITF (27in : 680mm, 351g) のボールの飛びに関連する性能予測・評価を行い, 最近の標準的な市販ラケット V-CON17 (27.5 in : 698.5mm, 300g) と比較し, パワーに関連する性能の違いのメカニズムを衝突解析⁽¹⁾⁽⁹⁾に基づいて明らかにする.

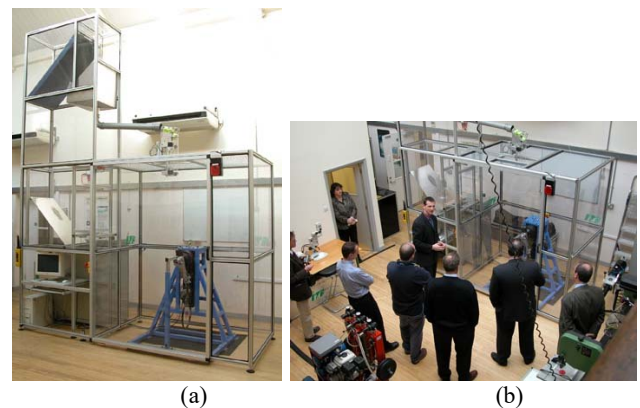


Fig.1 ITF racket performance testing machine to measure the maximum power a racket can generate. The aim is to benchmark all performance rackets from major manufacturers to produce an independent database of racket power values.

2. ラケットとボールの実験的同定と衝突解析の概要

ボール・ストリングス系の非線形復原力特性は, 圧縮試験

における荷重-変位特性実測値を用いて、最小二乗法により同定する。衝突におけるボールとストリングスのエネルギー損失は、ラケット・ヘッド固定でボールをストリングスに衝突させたときの反発係数実測値 e_{BG} を用いて求める。剛体特性は、重心まわり慣性モーメントと長手方向軸まわり慣性モーメントを実験的に算出し、打点に換算した換算質量 M_r として同定する。ラケットの振動特性は実験モード解析に基づいて同定し、線形性を仮定すれば、任意の打点 i に単位衝撃力が作用したときの応答点 j の k 次振動モード成分 r_{ijk} が求まる。ラケットの各打点に換算した換算質量 M_r を導入し、衝突速度に依存するボール・ストリングス複合系の等価ばね K_{GB} と 1 自由度振動モデルを図2 のように仮定すると、フレーム振動を無視したときの衝突の力積波形が式(1) のように数値計算により得られる。ただし、時間を t 、衝突力の最大値を F_{MAX} 、接触時間を T_C とする⁽²⁾⁻⁽⁷⁾。

$$F(t) = F_{MAX} \sin(\pi t / T_C) \quad (0 \leq t \leq T_C) \quad (1)$$

式(1)のフーリエ・スペクトルを $S(f)$ (f : 振動数 Hz) とすると、ラケット面上の点 j における衝突によるラケット上の点 i における k 次モードの応答振幅成分 (固有振動数 f_k) X_{ijk} は、以下のように近似できる⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。

$$X_{ijk} = r_{ijk} * S_j(f_k) \quad (2)$$

図3(a)は、打撃法による実験モード解析を適用してラケットの振動特性を同定する場合の打撃点 (ストリングの交差点) を番号で示している。図3(b)は、ボールとの衝突計算における衝突位置 (四辺形 A~H1) を示し、ボールとストリング面は衝突位置 (四辺形) の4つのストリング交差点で接触する。式(2)から得られるフレーム振動の速度振幅分布とフレーム質量分布から、フレーム振動によるエネルギー損失 E_1 が求まり、ボールとストリングスの反発係数 e_{BG} を用いてボールとストリングスのエネルギー損失 E_2 が衝突速度の関数として求まる。エネルギー損失 E_1 と E_2 との和 E からボールとラケットの反発係数分布 e_r が求まる。ラケット・フレームの剛性が高いほど反発係数は大きい。反発係数 e_r を用いるとフレーム振動を考慮したときの衝突諸量が求まり、接触時間、反発係数などの実測値とかなり良く一致する⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。

3. ラケットの物理特性

図4は、それぞれラケット V-CON17 (27.5 in: 699 mm, 300g) とラケットITF (27in : 680mm, 351g) を示し、表1 は仕様および物理特性である。ラケット質量はストリングスの質量を含み、 I_{GY} は重心まわりの慣性モーメント、 I_{GR} は握りの位置 (グリップ端から70mm) まわりの慣性モーメント、 I_{GX} は長手方向軸まわりの慣性モーメントである。

図5は、ラケット面の打撃位置に換算したラケットの換算質量 M_r (横軸はラケット面中心から長手方向の距離) を示す。腕系の質量分布はハンドル上の手の握りの位置に換算する⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾。長手軸から外れたオフ・センター打撃点における換算質量も同様に求まる。現実のインパクト速度でラケット

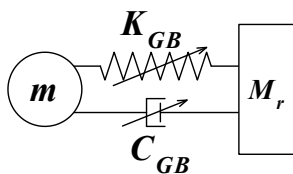
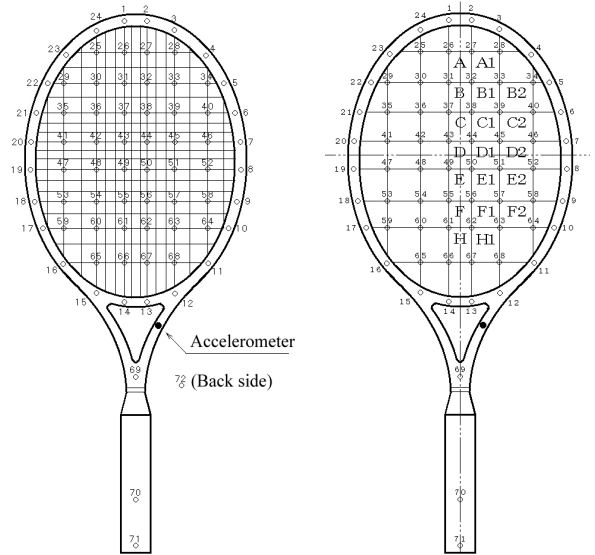


Fig.2 Non-linear Impact model of a ball-string system.

面が長手方向軸まわりに回転するときのハンドルと手の滑

り力の概算値はかなり大きいので、オフセンター・インパクトでは滑りがあると推測し、ラケットが短軸まわりに回転するときの換算質量と長手軸まわりに回転するときの換算質量の小さい方をインパクトにおける換算質量とした⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。重めの従来型重量バランスのラケット ITF が、ラケット V-CON17に比べて、ラケット面の全打点で大きい。

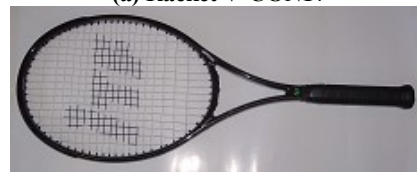
図6は、実験モード解析により同定した振動モード形状であり、低次からフレームの2節曲げ (1次)、2節ねじり (2次)、3節曲げ (3次)、ストリングスの膜振動1次 (4次) を示す。従来型バランスのラケット ITFの固有振動数は、軽量タイプのラケットV-CON17に比べて、やや低めである。



(a) String mesh (b) Impact locations
Fig.3 String mesh and impact locations on the racket face.



(a) Racket V-CON17



(b) Racket ITF

Fig.4 Rackets used in the experiment.

Table 1 Physical property of tennis rackets

Racket	ITF	V-CON17
Total length	680mm	699mm
Face area	633 cm ²	690 cm ²
Mass	351g	300g
Center of gravity from grip end	324mm	345mm
Moment of inertial I_{GY} about Y axis	17.69gm ²	13.73gm ²
Moment of inertial I_{GR} about grip	40.33gm ²	36.42gm ²
Moment of inertial I_{GX} about X axis	1.57gm ²	1.383gm ²
1st frequency	141Hz	161Hz
Strings tension	※56lb	55lb

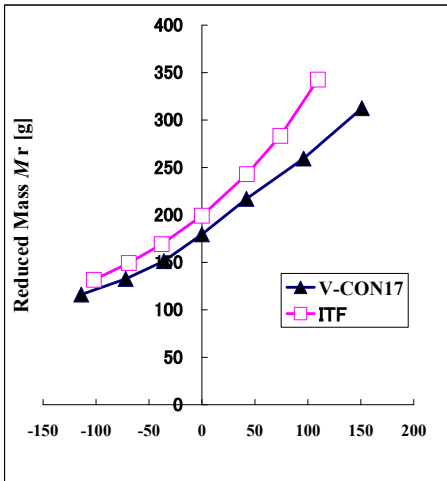


Fig.5 Reduced mass of racket at hitting locations along the longitudinal axis with an arm.

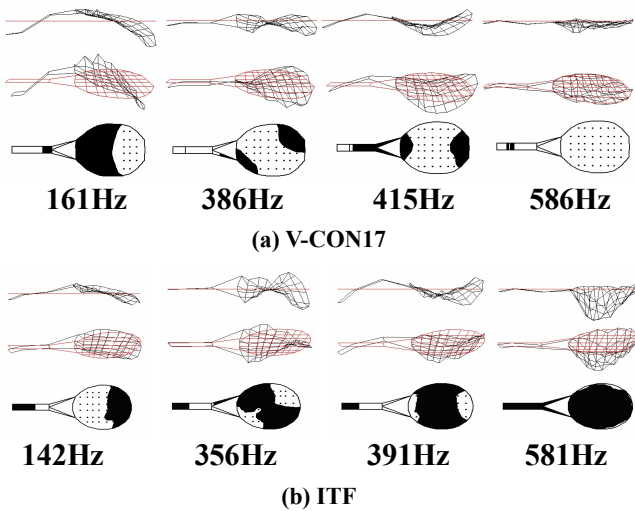


Fig.6 Experimentally identified vibration modes

4. グランドストロークにおけるボールとラケットの反発係数分布の予測

図7はフォアハンド・ストロークを想定したスイング・モデルである。手首と肘の関節角度を一定に保って肩関節だけに一定の回転トルク N_S を与え、腕・ラケット系が肩関節まわりに $\pi/2$ 回転したところでボールとラケットが衝突する。フレーム振動によるエネルギー損失は2節曲げ, 2節ねじり,

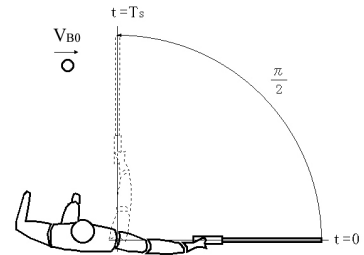


Fig.7 Player's forehand stroke swing model.

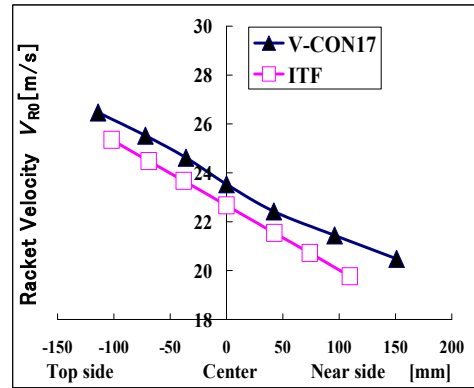


Fig.8 Predicted Pre-impact racket head velocity V_{R0} ($N_S = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

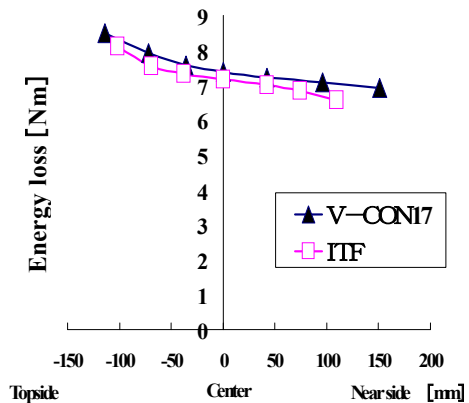
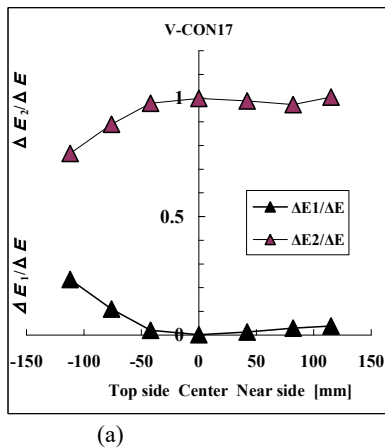
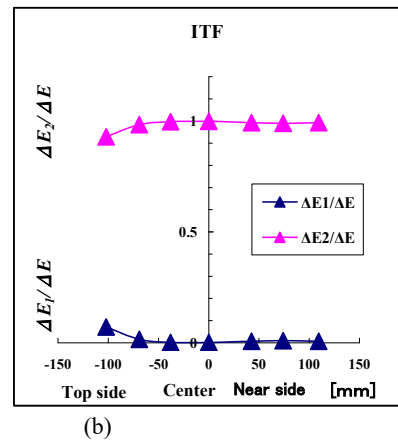


Fig.9 Total energy loss due to impact of ball and racket.



(a)



(b)

Fig.10 Energy loss E_1 due to racket vibrations, Energy loss E_2 due to instantaneous large deformations of a ball and strings corresponding to the coefficient e_{BG} , and total energy loss E .

3節曲げ振動, およびストリングスの振動による成分の4つのモードを考慮して反発係数を算出した⁽²⁾⁻⁽⁷⁾.

図8は, 競技者レベルのラリーを想定して, 肩関節回転トルク $N_S = 56.9 \text{ Nm}$, インパクト直前のボール速度 $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$ を与えたときのインパクト直前のラケット・ヘッド速度である. ラケットITFのラケット・ヘッド速度はラケットV-CON17に比べて遅い. 図9は, グランド・ストロークの場合のインパクトにおけるエネルギー損失 E の予測結果であり, 図10はフレーム振動によるエネルギー損失 E_1 とボール・スト

リングス系のエネルギー損失 E_2 の割合を示す.

図11は, グランド・ストロークの場合の反発係数 e_r の予測結果であり, (b)は長手方向中心線上, (c)は打点Bから横方向, (d)は打点Dから横方向, (e)は打点Fから横方向の打点での値である. 従来型バランスのラケットITFは, 最近の軽量型ラケットV-CON17に比べてラケット面全打点で低くは無く, ラケット面中心から先端側では高い.

図12は, 反発係数の高い領域を示したものである.

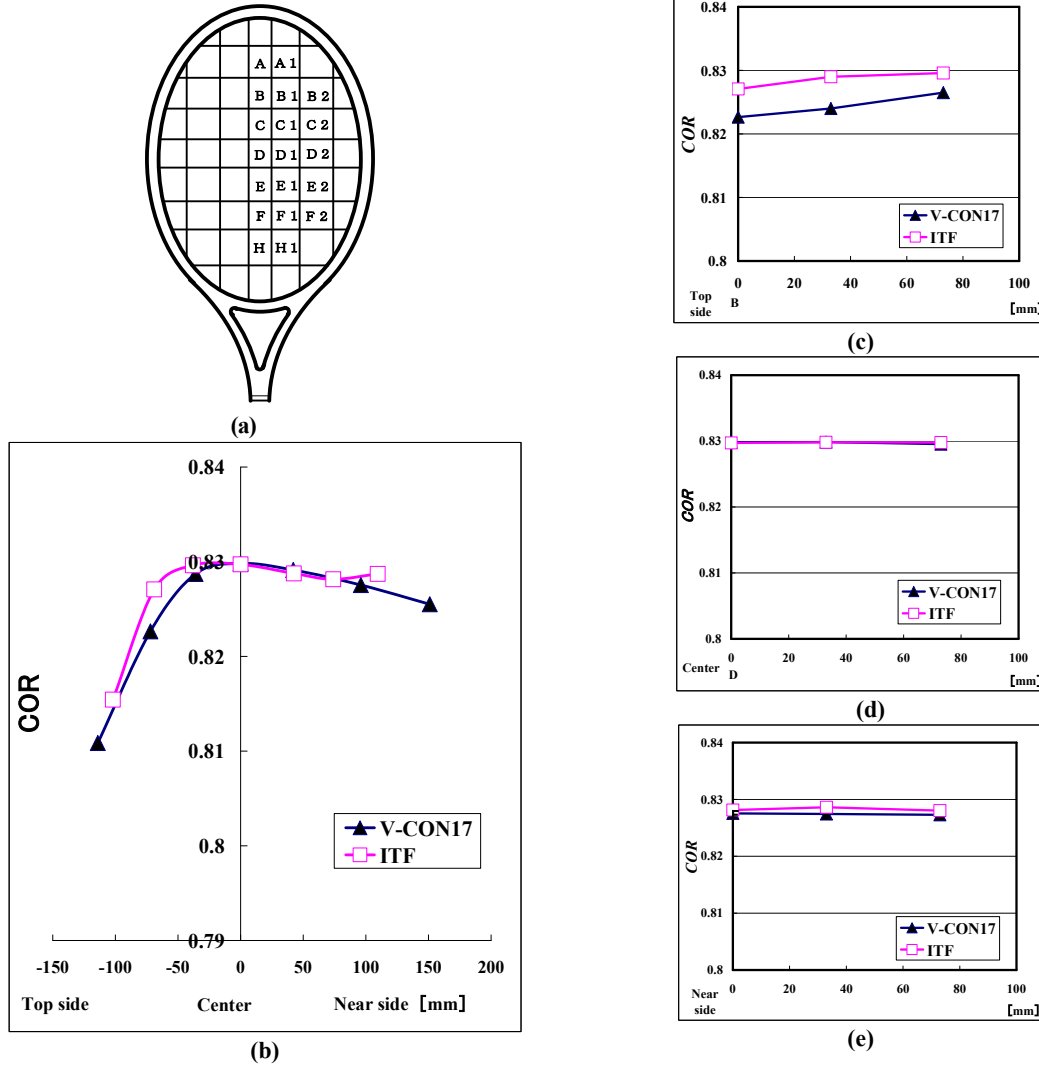


Fig.11 Predicted Restitution coefficient e_r ($N_S = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)
restitution e_r

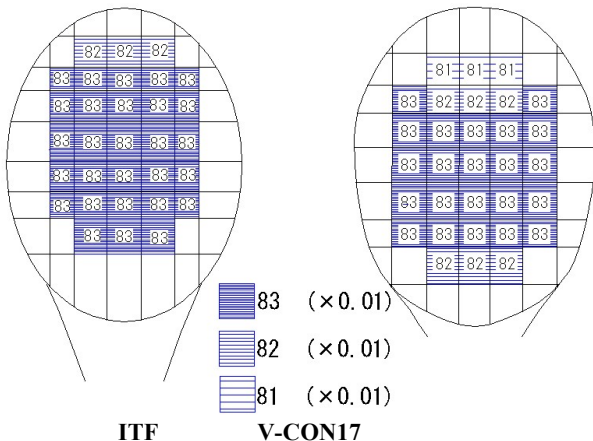


Fig12 Predicted sweet area in terms of coefficient of

5. グランドストロークにおけるラケットの反発力係数分布の予測

静止ラケット ($V_{RO}=0$) にボールを衝突させたときのボールの跳ね返り速度 V_B と入射速度 V_{B0} の比

$$e = -V_B/V_{B0} \quad (3)$$

を実測し, 反発性能を評価することが多い. この係数 e を本論文では反発力係数と呼ぶ. 反発力係数 e は, ラケットでボールを打撃する場合は, インパクト直前のラケット・ヘッドの速度を V_{RO} , 衝突直前と直後のボール速度を V_{B0} , V_B とすると,

$$e = -(V_B - V_{RO}) / (V_{B0} - V_{RO}) \quad (4)$$

と表せる. ボール質量を m_B とすると,

$$e = (e_r - m_B/Mr) / (1 + m_B/Mr) \quad (5)$$

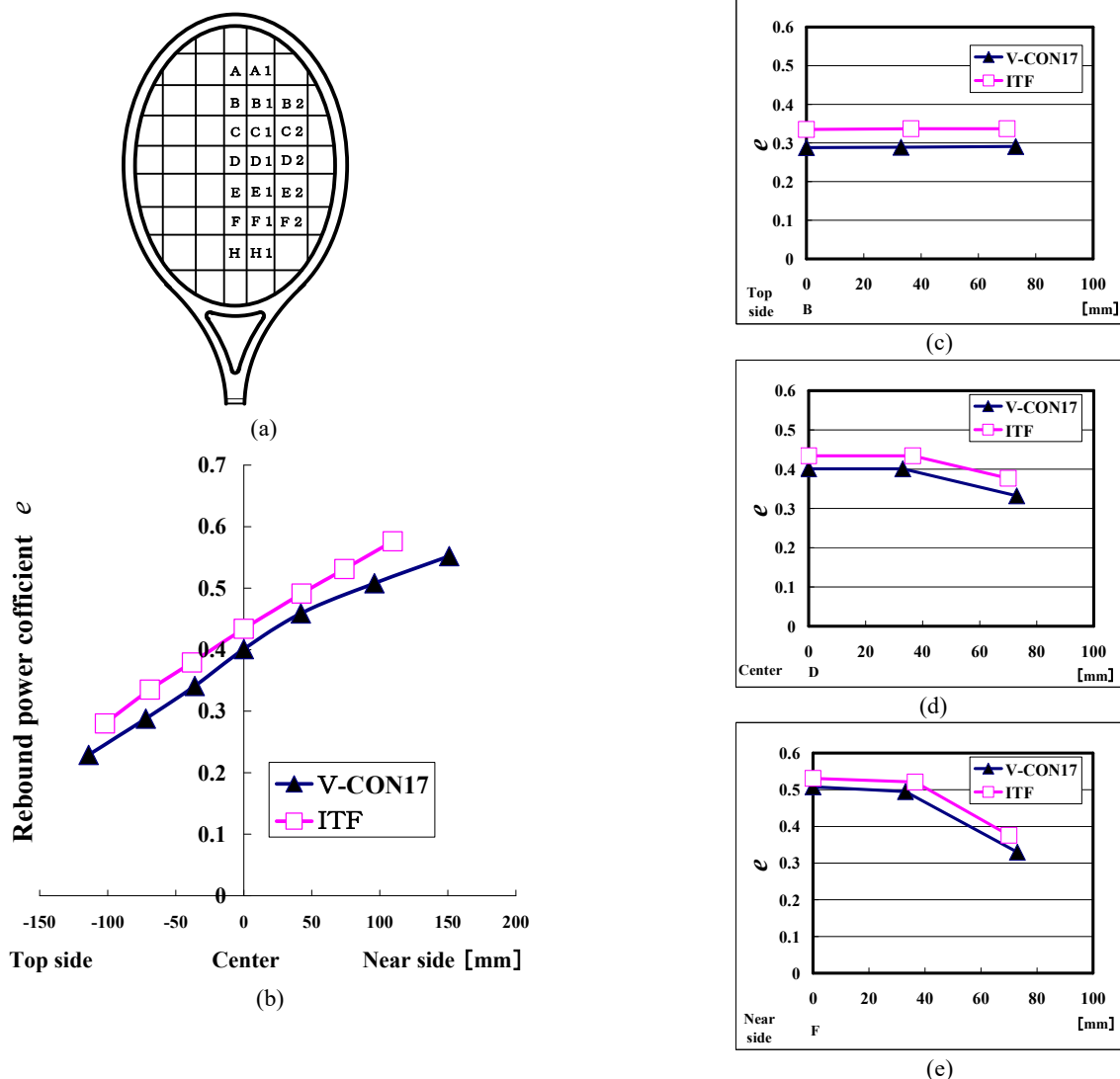


Fig.13 Predicted rebound power coefficient e ($N_s = 56.9\text{Nm}$, $V_{B0} = 10\text{m/s}$)

のように求まる⁽³⁾⁻⁽⁹⁾.

図13は、ラケット面中心から長手方向に外れた場合の反発力係数 e を示す. 図14は、反発力係数に関するスイートエリア (反発性の良い領域) を表示したものである.

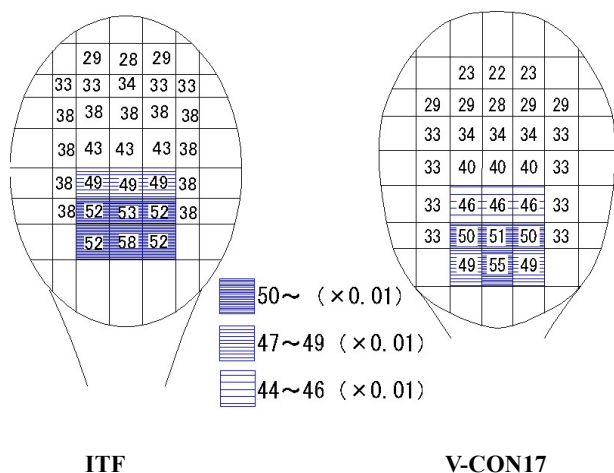


Fig.14 Predicted sweet area in terms of rebound power coefficient e ($N_s = 56.9\text{Nm}$, $V_{B0} = 10\text{m/s}$)

6. ボールの飛び (打球速度) の予測

反発力係数 e を用いると、打球速度 V_B は以下のように

書ける⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾.

$$V_B = -V_{B0}e + V_{R0}(1+e) = (V_{B0} + V_{R0})e + V_{R0} \quad (6)$$

ラケットのパワーは打球速度 V_B で評価できる.

図15はラケット面中心から長手方向に外れた場合および長手方向から横に外れたオフセンタでのボールの飛び V_B の予測結果を示す. 両ラケットの違いは少なく、ITFが先端側でわずかにボールのとびが良い. 図16は、パワー (打球速度 V_B) に関するスイートエリアの予測結果を示す. ラケットITFの方がスイートエリアは先端側にある.

図17は、オフセンター打撃におけるラケット回転角 (根元側での打撃の例) の比較であり、角度が小さいほど面安定性が良いことになる. 両ラケットの差は小さい.

7. 結論

従来型バランスの重めの性能試験用ラケットITFのボールの飛び (パワー) の予測値は、最近の代表的な軽量ラケットV-CON17の場合と比べて、ほとんど差が無かった. ラケットITFのヘッド速度は遅くなるが、反発係数はやや高く、反発力係数はかなり高い. 面安定性についても大きな違いは見られなかった.

テニスのパフォーマンスの向上は、ラケットそのものの性能向上によるというより、ラケットの微妙な変化がプレイヤーのパフォーマンス向上のトリガーになっているとみなすべきであろう. 写真掲載の許可をいただいたITFに感謝する.

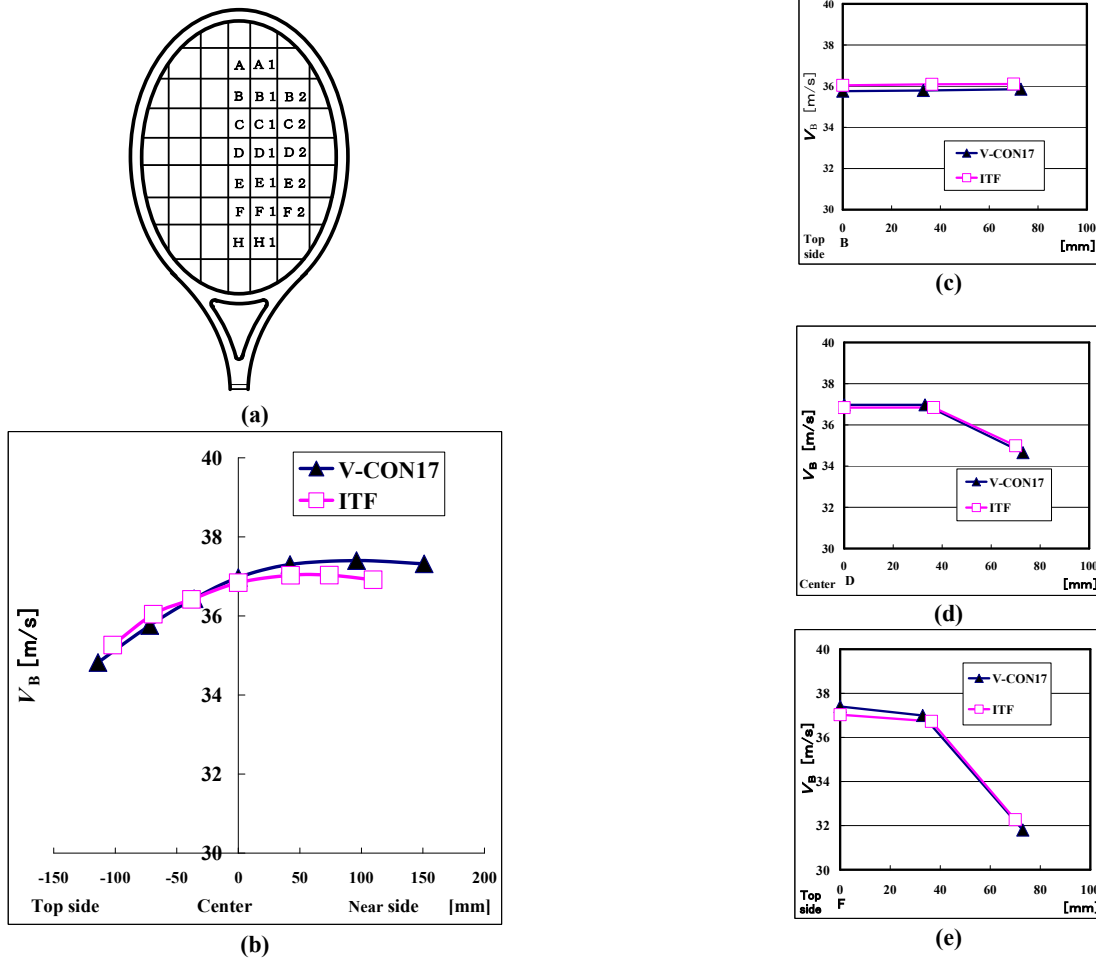


Fig.15 Predicted post-impact ball velocity V_B ($N_s = 56.9\text{Nm}$, $V_{B0} = 10\text{m/s}$)

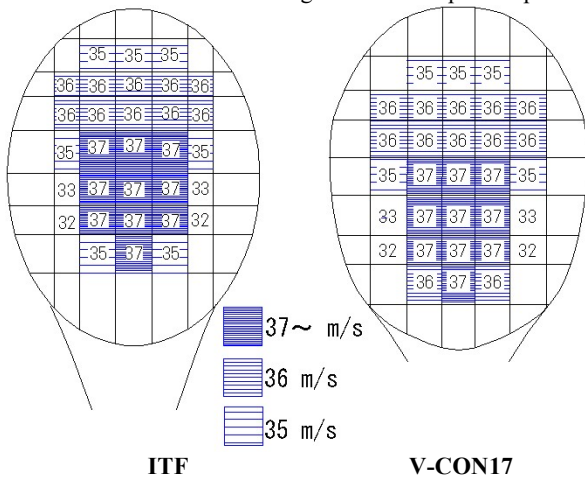


Fig.16 Sweet area in terms of power (post-impact ball velocity V_B) for ground stroke.

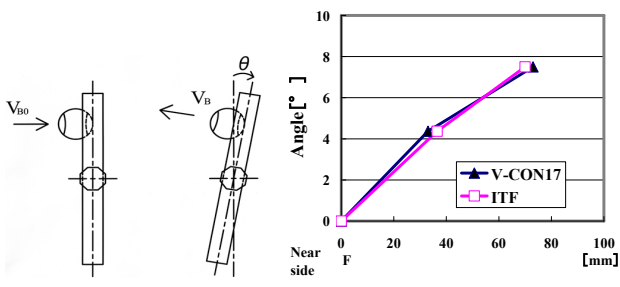


Fig.17 Racket face stability (Rotational angle due to off-center impact)

文献

- (1) Y. Kawazoe, Proc. Int. Symposium on Advanced Computers for Dynamics and Design'89, Japan Society of Mechanical Engineers, pp.243-248. (1989)
- (2) Y. Kawazoe, Impact Phenomena between Racket and Ball during Tennis Stroke, Theoretical and Applied Mechanics, 41, pp.3-13. (1992).
- (3) Y. Kawazoe, Coefficient of Restitution between a Ball and a Tennis Racket, Theoretical and Applied Mechanics, 42, 197-208. (1993).
- (4) Y. Kawazoe, Effects of String Pre-tension on Impact between Ball and Racket in Tennis. Theoretical and Applied Mechanics, 43, 223-232. (1994).
- (5) Y. Kawazoe, Experimental Identification of Hand-held Tennis Racket Characteristics and Prediction of Rebound Ball Velocity at Impact, Theoretical and Applied Mechanics, 46, 165-176. (1997).
- (6) Y. Kawazoe, Computer Aided Prediction of the Vibration and Rebound Velocity Characteristics of Tennis Rackets with Various Physical Properties, Science and Racket Sports (Edited by T.Reilly,M.Hughes and A.Lees), (1994), 134-139. Science and Racket Sports, E & FN SPON.
- (7) 川副嘉彦・友末亮三, テニスのインパクトにおけるラケットのスイートエリアの予測 (反発係数, 反発力, ボールの飛び), 日本機械学会論文集 (C編), 64-623, 2382-2388 (1998).
- (8) 川副嘉彦, テニスラケットの性能予測に基づく軽量化の限界について, 日本機械学会D&D 2002講演集No.02-9, (2002), pp.1-6
- (9) 川副嘉彦, テニスラケットの素材・構造と性能, バイオメカニクス研究 (特集) 素材とスポーツ, 7-2,(2003), 136-151.