ノ ー ト

Quantitative Estimation of Smash Feeling for Various Ping-Pong Balls

by

Tetsuya TATEISHI, Yoshio SHIRASAKI^{*1}, Tatsumi TAKAHASHI^{*2},
and Tsutao YAMADA^{*3}

^{*1} Mechanical Engineering Laboratory, Namiki 1-2, Sakuramura,
Niiharigun, Ibaraki 305

^{*2} Central Research Laboratory, DNP, Kagacho, Ichigaya,
Shinjuku, Tokyo 162

^{*3} Packaging Research Institute, DNP, Kagacho, Ichigaya,
Shinjuku, Tokyo 162

In order to disclose the smash feeling of ping-pong balls, regional and directional differences of dynamic compression stiffness of a ball were investigated for conventional celluloid balls and newly designed plastic balls by a viscoelastic spectrometer.

In the conventional celluloid balls, the dynamic compression stiffness of the equatorial (connected) part of the ball at 15 Hz averaged 6.5×10^7 dyne/cm, and the phase-lag was about 4 degrees. The equatorial measurements gave 1.5 times the compression stiffness of the polar regions and about the same degrees of phase-lag.

On the other hand, plastic balls generally had increased values of dynamic stiffness at the polar part and decreased values of stiffness at the equatorial part, and the plastic balls also indicated strain-rate sensitive mechanical behavior. These facts indicate that the newly designed plastic ball tends to be hard and metal-like when it is smashed in play.

卓球ボールの打球感に関する研究

立石 哲也・白崎 芳夫^{*1}・高橋 達見^{*2}・山田 務夫^{*3}

(原稿受理：1981年1月23日)

1. は じ め に

現在使用されている競技用卓球ボールの大多数はセルロイド製であるが、セルロイド原料の入手難、火災防止規制による保存及び加工時における取扱い制限、材料の品質管理と多量生産の困難な点等を考慮して、徐々にプラスチックボールに代替される客観情勢にある。しかしながら、永年慣れ親しんだセルロイドボールの打球感をプラスチックで実現させるためには、材料の選択と処

理及び成形方法等で多くの打球感制御因子を究明しなければならない。現状では、試作したボールを卓球の一流選手に試し打ちさせ、その結果から適当な材料や成形方法を試行錯誤的に決定するという非能率的な官能検査にたよらざるをえない。セルロイドボールの場合でも、静的な硬さ試験はもとより、打球感評価に必要な動的な粘弾性試験はほとんど行われていないのが現状である。

熱可塑性樹脂を射出成形して卓球ボールを作る場合、樹脂が温度及び変形速度感受性であれば、室温と打撃速度によってボールの特性が著しく変化する。ボールのレオロジー的性質の変化を最小限におさえなければ、ボールのコントロールが困難になり、競

^{*1} 機械技術研究所 〒305 茨城県新治郡桜村並木1-2

^{*2} 大日本印刷(株)中央研究所 〒162 東京都新宿区市谷加賀町

^{*3} 大日本印刷(株)包装研究所 同上

技が環境条件によって左右されることになる。さらに樹脂素材の流れによる異方性やボールのつなぎの部分及び樹脂注入口跡等の影響によるボール特動性の非均一性も極力抑える必要がある。

プラスチックボール開発の第一歩として、打球感の定量的評価因子決定のため、ボールの粘弾性を測定し打球感との相関性を検討した。

2. 試料及び実験方法

試験に用いたセルロイドボールは、市販されている日本製ボール4種(1, 2, 3, 4)であり、プラスチックボールは英国製ABS樹脂ボールと試作球(セルロースプロピオネート2種)である。セルロイドボールの一般的な製造工程は、シート打抜き→絞り成形→半球外周カット→半球合せ、接着→乾燥(30°C, 1ヵ月)→形状補正→マット化→検品→マーキングとなる。絞り成形の工程において、中国製ボールは古来からの湯絞め法、日本製ボールは乾熱式(熱風成形)で半球を絞り成形しているが、その詳細は明らかにされていない。

プラスチックボールの試作には、型締圧50 tonの射出成形機を使用した。セルロースプロピオネート系樹脂の射出成形時の配向を除去する目的で、射出成形された半球をオープン中にて加熱し熱処理した。セルロイドボール、プラスチックボールともITTF規格に合格したものを用いた。すなわち、重量(W): $2.40\text{g} \leq W \leq 2.53\text{g}$, 外径(D): $37.2\text{mm} \leq D \leq 38.2\text{mm}$, 反発力(H): $23.5\text{cm} \leq H \leq 25.5\text{cm}$ (30.5cmの高さから鉄ブロック上への落下時)。

卓球ボールの粘弾性測定には非共振、強制振動型の粘弾性試験機を用い、ボールの固定にはFig. 1に示す特殊な治具を使用した。ボールの力学的異方性を明らかにするために、ボールの子午線上0°~180°まで30°おきに測定点を定めた(Fig. 2)。測定周波数は1~100 Hz, 測定温度は-120°C~+120°Cで、異方性の試験はすべて室温23°Cに統一して行った。まずボールに300gの静的荷重を负荷した後、±300gの振動荷重を重畳した。実際の卓球ボールとラケットとの接触時間は1/1000秒程度である。したがって、室温において少なくとも1000 Hz程度の振動数で実験を行う必要があるが、これを低温における同じひずみ速度を与える

周波数に換算して、そのときの動特性をもって打球時の力学的挙動を類推した。

卓球ボールは薄い球殻構造をしており、比較的高い室温やスマッシュ時には非弾性の大変形を起こすので簡単な弾性解での説明は不可能である。そこで球殻の変形に対する荷重応答をボールの動的剛性と定義し、これによってボールの動特性を代表させる。

$$E = E_1 + iE_2 = \frac{\Delta F}{\Delta l} (\cos \delta + i \sin \delta), \tan \delta = E_2/E_1 \quad (1)$$

ここで、 ΔF は荷重振幅、 Δl は変位振幅、 $\Delta F/\Delta l$ は剛性(stiffness)である。

3. 結果と考察

Fig. 3はセルロイドボール、ABS樹脂ボール(英国製)および熱可塑性樹脂(セルロースプロピオネート)を用いた試作ボール(CP)の動的剛性の温度依存性を示す。荷重方向は接合部(赤道)と45°をなす位置をとり、周波数は30 Hzである。各球とも球殻であり、また接合部を有しているため、単純に時間-温度換算則は適用できない。セルロイドボールは他の2球に比較して低温域(-120°C以下)に分散を持っていて、-100°Cから+80°Cの温度領域で剛性の変化は少ない。これは室温を中心とする広い温度領域と広いひずみ速度域に対して安定した動的剛性を保持していることを意味しており、打球のコントロールに環境条件があまり関与しないことを示す。したがって、セルロイドは卓球ボールの素材としてすぐれており、合目的であるがセルロイドボール誕生当時、これ以外の素材は考えられなかったのであるから、偶然がもたらした好結果といえる。

ABSボールは-70°付近に遷移領域があり、剛性は急激に上昇する。これは大きなひずみ速度に対して弾性率が增加することを意味しており、ABSボールがスマッシュ時に金属的な打球感を有することの原因と考えられる。熱可塑性樹脂試作球(CP)はABSボールと同様な温度特性があり、高ひずみ速度域で硬質な感じを与える。

Fig. 4はセルロイドボールと試作ボールの極および赤道におけ

Fig. 1 Holder for a ping-pong ball with the spherical and plane indenters.

Fig. 2 Polar coordinate of the ping-pong ball and sites of viscoelastic measurement.

Fig. 3. Temperature-dependence of the dynamic stiffness of ping-pong balls.

Fig. 4 Frequency-dependence of the dynamic stiffness of the celluloid ball at the polar and equatorial part.

る動的剛性の周波数依存性を示す。セルロイドボールの場合は赤道面の接着部分の影響が強く、接着の補強がない極の部分との差は動的剛性で約30%ある。これはボールとラケットの衝突位置によっては、ボールの反発係数に30%程度の差があることを意味しており、ボールのコントロールを困難にする原因となりうる。これに対し試作ボールの場合、赤道より極の方向で動的剛性が高くなっており、射出成形による樹脂の流れが動的剛性に異方性を与えていることを示す。いずれにせよ動的剛性の異方性はボールの性能低下を意味しており、ボール製造上極力避けなければならない。

セルロイドボールの力学的異方性をより詳細に調べると Fig. 5 のようになる。図の上半分は動的剛性、下半分は位相差の方位依存性を示す。位相差は方位によってほとんど変化しないが、動的

Fig. 5 Directional differences of the dynamic stiffness and the phaselag of the celluloid ball.

Fig. 6 Directional differences of the dynamic stiffness and the phaselag of various ping-pong balls.

剛性は0°方向でとくに増大している。セルロイドには材質的な異方性はほとんど存在しないが、接着による強化という構造的な要因が強く影響していることは明らかである。

一方、セルロイドボール（日本製2社）とプラスチックボール（ABS樹脂、CP樹脂）の60Hzにおける動的剛性および位相差の異方性を比較すると Fig. 6 のようになる。セルロイドボールはいずれも接着部での異方性があるのに対し、プラスチックボールはいずれも極方向に剛性の最大値がある。球の異方性が材質というより製造方法によって決定されるという現状では、異方性の除去はきわめて困難である。極および赤道における剛性の比 $E_{(90)}/E_{(0)}$ を球の異方性の目安とすると、セルロイドボールでは2種共に0.78であるのに対し、ABS樹脂ボールは1.30、試作ボール（CP）は1.25となる。以上の結果から強化方向が90°異なるとはいえ、異方性の度合は大差ないことが判明した。

次に卓球ボールの動的剛性の構造力学的な意味について考察しよう。簡単化のために厚さ h 、半径 R の球殻に集中荷重 f が作用したとき、変位が十分小さいと仮定すると、荷重点における最大変位 ζ は¹⁾、

$$\zeta \propto \frac{fR}{E_0 h^2} \quad (1)$$

で与えられる (Fig. 7)。ここで、 E_0 は球殻素材の弾性率である。卓球ボールの粘弾性試験では、ボールに一定荷重を負荷し、さらに

Fig. 7 Deformation of spherical shell, ζ : deformation, f : concentrated load, R : radius of spherical shell, h : thickness of spherical shell.

振動荷重を重ねて作用させるので、クリープ変形と振動応答が同時に生ずる。材料のクリープ関数 D を $D(t) = D_0 + D_1(1 - e^{-t/\tau})$ とすると、慣性項が無視できる場合には球殻の弾性解(1)と対応原理によって、粘弾性球殻の変形 ζ は次式で表される²⁾。

$$\zeta(t) \propto \frac{Rf_0}{h^2} \left[D(0) \sin \omega t + \int_0^t \sin \omega t' \frac{dD(t-t')}{d(t-t')} dt' \right] \quad (2)$$

ただし、クリープ変形については、荷重 $f(t) = I(t)$ (単位応答関数)、振動荷重は $f(t) = f_0 \sin \omega t$ とする。

式(2)に D を代入すると、

$$\zeta(t) \propto \frac{Rf_0}{h^2} \left\{ D_0 \sin \omega t + \frac{D_1 \tau}{1 + (\tau \omega)^2} e^{-t/\tau} \left[e^{-t/\tau} \left(\frac{1}{\tau} \sin \omega t - \omega \cos \omega t \right) + \omega \right] \right\} \quad (3)$$

遅延時間 τ が観測時間に比べて十分大きいとき ($\tau \gg t$)、式(3)を展開して、 $1/\tau^2$ 以上の次数の項を省略すると、

$$\zeta(t) = \frac{Rf_0}{h^2} \left[\sqrt{D_0^2 + (D_1/\omega\tau)^2} \sin(\omega t - \delta) + \frac{D_1}{\omega\tau} \right], \tau \gg t \quad (4)$$

ここで、位相差 δ は

$$\delta = \tan^{-1}(D_1/D_0\omega\tau) \quad (5)$$

式(5)から明らかなように、卓球ボール素材の τ が小さいと、ボールの見かけ上の δ は大きい。式(4)よりボールの見かけ上の動的剛性は、

$$E = \frac{f_0}{\zeta} \propto \frac{h^2}{R} [D_0^2 + (D_1/\omega\tau)^2]^{-1/2} \quad (6)$$

$\tau \rightarrow \infty$ で弾性球殻の振動に一致し、 $1/D_0$ が素材の弾性率を示すことになる。このようにボールの動的剛性は素材のクリープ特性からある程度類推することができる。

卓球ボールの動的剛性を支配する構造因子は、ボールの半径 (R) と厚さ (h) である。ところが規格によって、ボールの重量は $2.40 \leq W \leq 2.53$, 半径 (R) は $1.86 \leq R \leq 1.91$ という制限をうけるので、ボールの素材の密度を ρ とすると、

$$5.24 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2 \leq h\rho \leq 5.82 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2 \quad (7)$$

$h\rho = k$ とおくと、ボールの動的剛性は

$$E \propto \frac{k^2}{R\rho^2} [D_0^2 + (D_1/\omega\tau)^2]^{-1/2} \quad (8)$$

式(8)より、素材の弾性率が同じなら、ボールの見かけ上の動的剛性は素材の密度の2乗に反比例して減少する。これは卓球ボール素材の選定に対し一つの目安を示す。

ゴルフボールの場合にも大きさに関する規格はあるが、反発力、飛距離に特別の制限はない。したがって、よく飛ぶボールの開発に精力が注がれる。それに対し卓球ボールの場合、微妙なボールコントロールが要求されるので、現在使用されている公式ボールの打球感に近いボールを開発しなければならない。そこで、測定した各種卓球ボールの動特性を E_1 - E_2 座標面にプロットして、大ざっぱなボール開発指針を求めることにする。セルロイド製の公式ボールの測定結果を中心にして、その占める領域を E_1 と $\delta = \tan^{-1}(E_2/E_1)$ で決定すると、この領域 (Fig. 8 のハッチングした部分) がボールの設計目標となる。

この領域の中心に新しい座標を設定すると、第1象限はボールが硬く球離れが悪い、第2象限は軟かくかつねばっこい、第3象

Fig. 8 Relation between the E_1 - E_2 coordinate and the feeling quadrant.

Table I The feeling quadrant

Quadrant	1	2	3	4
Feeling				
hard	○			○
soft		○		
repulsive			○	○
not repulsive	○	○		
speedy	○			○
slowly		○	○	
sticky		○		
metal-like	○			○

Table II The reduced dynamic stiffness of various ping-pong balls at the impact time 0.001 sec., (,): reduced temperature and frequency

	20°C, $\omega = 1000$ Hz		20°C, $\omega = 30$ Hz	
Ball	($\times 10^7$ dyne/cm)	($\times 10^6$ dyne/cm)	($\times 10^7$ dyne/cm)	($\times 10^6$ dyne/cm)
Celluloid, 1 (official)	5.88 (-15°C, 30 Hz)	3.4 (-15°C, 30 Hz)	5.22	3.60
Celluloid, 2 (official)	6.05 (-10°C, 10 Hz)	—	5.33	3.34
Celluloid, 3	5.22	—	4.50	3.60
CP-1	5.53 (0°C, 20 Hz)	4.3 (0°C, 20 Hz)	5.07	4.08
CP-2	6.53	—	5.90	4.49
ABS	5.92 (-15°C, 10 Hz)	—	5.65	3.44
Celluloid, 4	4.65	—	3.93	3.16

限は軟いが球離れが良く軽い感じ、第4象限は硬く球離れも速く金属的な感じ、という官能領域に分けられる。このような分類法は一流プレイヤーによる各球の試し打ちの結果得られた打球感とも良い一致を示した (Table I)。

Table II はボールとラケットの実際の接触時間（約1/1000秒）に対応するひずみ速度状態における各球の動的剛性を示す。時間温度換算則は必ずしも成立しないボールがあったので、ボールの変形、回復までに1/1000秒程度を要する温度、周波数に於ける特性を参考までに示した。

4. む す び

以上の粘弾性試験機による卓球ボールの動的剛性の測定は、ボールと硬質アルミニウムの圧子で構成された測定系について行ったものである。実際には硬質アルミニウムの代りにラバー張りの

ラケットが用いられるので、ボールの動的剛性と打球感との対応は若干ずれるものと思われる。また、打球感を支配する因子として打球音が重要である。これについては打球音の周波数分析が有力な方法であることが判明したので後日報告する。

文 献

- 1) ランダウ=リフシツ, “弾性理論”(佐藤訳), p. 75(1972) 東京図書.
- 2) Flügge, W., “*Viscoelasticity*”, Chap. 3 (1975) Springer.