

テニスの科学 (三浦・蝶馬林)

【目次】

<科学が見つけた意外な事実>	1
●スマッシュはなぜ難しいか	1
●ボルグ(トップスピン)対コナーズ(フラット)の戦い	1
●テニスにまぐれ勝ちはない	1
<インパクトで何が起こるか>	1
●ボールの運命を決定するのはインパクト	1
●ラケットの振りの速度(ラケットスピード)が2倍になっても、ボールスピードは2倍にはならない	2
●スピンは、なぜ起こるのか	2
●打球の運命は、かくして決まる(インパクト理論)	2
<スイングを分析する>	3
●スイング理論は分からない	3
●ラケットの先端とグリップエンドの動きは位相がずれている	3
●「手首を使う」のではなく、「手首を開放する」が正しい	4
●スイングのとき、腕の筋肉はどう働くか	4
●ステップ・インの意味	4
●なぜ、「バックハンドは背中を見せて」打つのか	4
●「手首を固定する」がボレーをむずかしくした	5
●ボレーの構え	5
●速いサービスのレシーブはボレーと同じ要領で打て	5
<ボールはどのように飛ぶのか>	5
●ベルヌーイの法則	5
●手元にきてグッと曲がって見えるわけ	6
●バウンド後のボールの回転	6
●スピン別の打球の特徴を整理する	6

<科学が見つけた意外な事実>

● スマッシュはなぜ難しいか

人間の視覚は、頭上の空間に浮かんでいる物体が実際より遠くにあるように錯覚する。スマッシュミスをする人はこのワナに落ち込んでいる。初級者のスマッシュ・ミスを見ると、ほとんどの場合、ボールが落ちすぎたところで打っている。やさしいロブを数多く打つ。それが、あなたの視空間のゆがみを肉体に覚えこませ、正しいタイミングでスマッシュする道へとつながる。

● ボルグ(トップスピン)対コナーズ(フラット)の戦い

打球がセーフになる範囲（コートに入る打角範囲）は、トップスピンが圧倒的に有利。（例えば、ある計算例では、ボルグの打角範囲 4.5 度に対し、コナーズは 1 度。）また、トップスピンはサイドラインぎりぎりを狙ったボールが打てる。しかし、トップスピンを打つには、ラケットスイングのスピードが要求され、スイングが必然的に大きくなる。そのため、より早くボールに近寄り、構えを作る必要がある。

逆に、フラットやバックスピンの利点は、スイングがコンパクトにでき、より正確にボールを打てる。さらに、フラットやバックスピんで打ったボールは、低く入ってきて、滑るように低くバウンドし、バウンド直後の速度もあまり落ちない。

このようにデータとしては、それぞれに有利・不利の材料があり、絶対的にどちらが有利ということはない。ボルグ自身「私は、あくまでも確実性を重視してプレーする。トップスピンは、そのためのボールであって、決してパワーで相手を圧倒するものではない。」

● テニスにまぐれ勝ちはない

P と Q という二人のプレーヤーがいて、P 選手の 1 ポイントを取る確率を 0.6、Q 選手の 1 ポイントを取る確率を 0.4 とする。すなわち、P が 3 ポイントとると、Q は 2 ポイントとるという割合を仮定。このとき、確率論で計算すると、P が 1 ゲームをとる確率は 0.736、Q が 1 ゲームをとる確率は 0.264 となる。また、P が 1 セットをとる確率は 0.966、Q が 1 ゲームをとる確率は 0.034 となる。つまり、テニスとは、わずかでも力の上のものが確実に勝てるスポーツである。

<インパクトで何が起こるか>

● ボールの運命を決定するのはインパクト

ボールの運命を決定するのはインパクト（衝突・衝撃）の時であり、スイングは二次的な問題である。飛んでいくボールの速度ベクトル（速度の大きさと方向）は、ラケットに当たる直前（インパクトの直前）のボールの速度ベクトル、ラケットの速度ベクトル、ラケットの面角度で決定される。

- ラケットの振りの速度（ラケットスピード）が2倍になっても、ボールスピードは2倍にはならない

ボールとラケットが垂直にあたる場合（フラットスイング）を想定すると、飛んでいくボールの速度は、以下の式で計算される。

$$\text{<ボールの速度>} = \frac{(\text{<ラケットの速度>} + \text{<衝突直前のボールの速度>})}{2}$$

$$\text{*反発係数 + <ラケットの速度>}$$

反発係数（衝突前後のボールの速度の比）は、衝突の速度（ラケット速度と衝突直前のボール速度との和）が遅いときは0.5ぐらいで、速度が増すほど小さくなり、通常のインパクトでは、0.3から0.2ある。反発係数は、衝突速度が速くなるほど急激に小さくなるので、ラケットスピードが2倍になっても、ボールスピードは2倍にはならない。実際、ラケット速度が毎秒40～50メートルに達する上級者のサービスでは、反発係数は0.2以下になり、ボールはラケット速度に近づいてしまう。

衝突の速度が大きくなると、ボールは衝突で瞬間的につぶれて、反発（復元力）の限界を超えて弾まなくなるのである。

初級者と上級者の計算例を以下に示す。

$$\text{<ボールの速度>} = (\text{<ラケットの速度>} + \text{<衝突直前のボールの速度>})$$

$$\text{*反発係数 + <ラケットの速度>}$$

$$= (18\text{m/s} + 12\text{m/s}) * 0.3 + 18\text{m/s} = 9\text{m/s} + 18\text{m/s} = \underline{27\text{m/s}} \quad \leftarrow \text{初級者}$$

$$= (28\text{m/s} + 12\text{m/s}) * 0.2 + 28\text{m/s} = 8\text{m/s} + 18\text{m/s} = \underline{36\text{m/s}} \quad \leftarrow \text{上級者}$$

ラケットの速度差（18m/sと28m/s）ほど、ボール速度に差がつかない。ラケットの反発による速度が、初級者が9m/s、上級者が8m/sと逆転しているのが主な原因である。

もう一つの結論は、初級者の打球の速度は、ラケットの反発速度に依存することがより大きく、上級者では、反発に頼らず、ラケットの速度に依存することが大きいことだ。

- スピンは、なぜ起こるのか

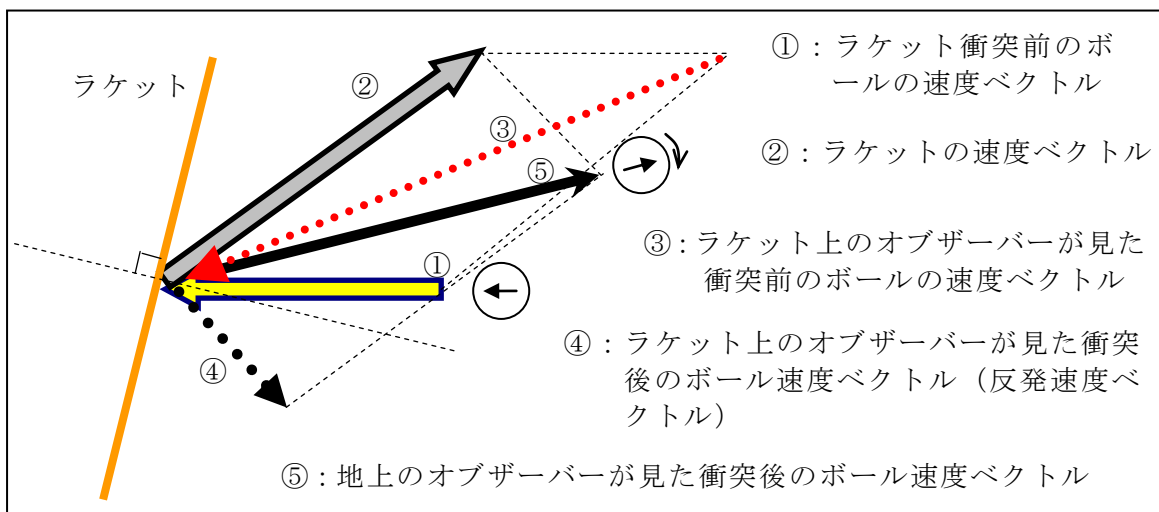
ボールのスピンのには、回転軸が水平のトップスピン（順回転）とバックスピン（逆回転）、サイドスピン（左、右回転）の4種類がある。ボールにスピンをかけるには、ボールの中心を外れた線上に何らかの力を働かせればよい。すなわち、スピンをかけるには、ボールの飛行線に対して、ラケット面を傾ければよい。ボールの飛行線に対して、ラケット面を下向きにすればトップスピン、上向きにすればバックスピがかかる。

- 打球の運命は、かくして決まる（インパクト理論）

トップスピンをかけた場合（反発係数：0.3程度）の計算例を以下に示す。

まず飛んでくるボールの速度ベクトル（下記の①）にラケットの速度ベクトル（下記の②）を逆にして加算する。この加算ベクトルがラケット上のオブザーバーが見た場合の飛んでくるボールの速度ベクトル（下記の③）となる。ラケット上のオブザーバーから、衝突したボールを見ると、入射角にほぼ等しい反射角の方向にボールが飛んでいく。このとき、スピン（下記ではトップスピン）がかかり、速度が反発係数を乗じた速度に落ちる。

このとき、ラケット上のオブザーバーから見たボールの速度ベクトル(反発速度ベクトル)が下記の④である。この反発速度ベクトルにラケット速度ベクトル(下記の②)を加える。これが、地上から見た打球の速度ベクトル(下記の⑤)である。



ラケットで打った後のボールの速度ベクトル(方向と速度)は、次の3つの要素で決まる。

(1) ラケットの面の傾き、(2) 衝突前のボールの速度ベクトル、(3) ラケットの速度ベクトル この3つを「インパクトの3要素」と呼ぶ。

反発速度ベクトルの方向に対してラケット面が下向きだとトップスピン、上向きだとバックスピンがかかる。

初心者はラケット速度が遅いので、飛んで行くボールの速度ベクトルは飛来するボールの速度ベクトルに強く影響される。一方、上級者はラケット速度が速いので、飛んで行くボールの速度ベクトルは飛来するボールの速度ベクトルの影響をあまり受けない。すなわち、上級者はスイングでボールをコントロールしている。

<スイングを分析する>

● スイング理論は分からない

スイングは、インパクトにくらべ二次的な問題である。要は、それぞれのプレーヤーが、自分の肉体的条件にマッチした、より自然なスイングを身につけることが重要。それによって、正しいインパクトを得られる。唯一絶対の正しいスイングなどというものは無い。

● ラケットの先端とグリップエンドの動きは位相がずれている

インパクトの直前、ラケットの先端は急激に加速されてインパクトに備えているが、グリップエンドは、すでに加速を終わって、一挙に減速区間にはいつている。インパクト時のグリップの減速は、ラケット・ヘッドに回転を起こさせ、先端の速度を増加させる作用をしている。

- 「手首を使う」のではなく、「手首を開放する」が正しい

グリップにブレーキがかかり、ラケット先端が加速されるとすれば、当然のこととして、手首の角度も変わらざるをえない。この種の運動は、人間にとっては極めて自然な運動のひとつだ。金槌で釘を打つとき、無意識のうちに、手首の回転・開放と、釘を打つ瞬間に、手首の減速を行っている。

- スイングのとき、腕の筋肉はどう働くか

インパクトの瞬間に力を加えても、ラケットは加速できない。インパクトでの力は、加速に使うのではなく、ラケットの面をしっかりと作ることに使われる。ボールを完全に衝撃中心でとらえることは不可能であり、衝撃中心からずれるほど、グリップにくる衝撃も大きくなる。インパクトで使う力は、このような衝撃に耐えて、しっかりしたラケット面を作るためのものである。つまり、正しいインパクトを作るためには、加速する力と、面を作る力の二種類の力が必要なのである。

上級者はインパクトに必要な時間に必要な力を使っているのに対して、初級者は不必要な時間に力を使っている。上級者では、インパクトの瞬間にぎゅっと締めていて、インパクト後にはリラックスしている。初級者では、インパクトのかなり前から力はいり、インパクト後も持続している。

- ステップ・インの意味

しばしばコーチが口にするアドバイスに「一步踏み込んで打て」、「ステップ・インを忘れないように」というものがある。ステップ・インして打つと、ボールが速くなることは事実である。ステップ・イン、体重をのせる、腰の回転といった動作のタイミングは、ラケットの振り出しのスピードを高めるのに貢献している。ステップ・インは大きくする必要はない。自動車のローギアが、動きはじめにちょっとあればいいように、ステップ・インも、ラケットの振り出しに加速を与えるだけの、小さなものでいいのである。すなわち、ステップ・インが、ラケットの振り出しのスピードを高め、それがその後のラケットの加速を楽なものにし、ひいてはスイング全体をなめらかにし、速くする。

これに対してアメリカのスイング理論がある。オープンスタンスで構え、ひざのばねを使って体重を移動させながら打つものである。このアメリカ式スイング論といえども、体重の移動によってラケットの振り出しのスピードを高めることに変わりはない。腰が回転しすぎて、体の軸が不安定になりやすい危険もあるが、トップスピンが打ちやすくなる利点もあり、一概、どちらがいい、とは言い切れない。

- なぜ、「バックハンドは背中を見せて」打つのか

人間の肘は、あごのむいている方向に突き出されるのが無意識で自然な運動となっている。バックハンドで打とうとすると、あごの向きとは額方向に肘をもっていかなければならない。「ボールに背中をみせるように構えよ」とアドバイスされる。なるほど、そのように構えれば、いやでも肘が後ろに引かれることになる。要は、バックハンドを打つ一球ごとに、「肘を引け」と自分自身に命令すること。この反復練習の成果は、やがて身について、

無意識にできるようになる。

バックハンドスイングは、フォアハンドスイングに比べてどうしてもラケットスピードが落ちる。しかし、スイング全体がコンパクトになって正確さが増し、腰の回転も小さいので体の軸も固定され、そのため、ストロークは安定しやすい。バックハンドでラケットスピードを増したいときにも、「ボールに背を向けよ」という教訓が生きてくる。ボールに背を向ければ肘が引けると同時に、バックハンドスイングも大きくなり、それだけラケットスピードが増す。

とはいえ、フォアハンドに比べれば、やはりラケットスピードは遅い。そこで登場するのが「両手打ち」である。両手打ちは、あくまでもラケットの振り出しのスピードをスムーズに出し、それによってスイング全体のスピードを増そうというもので、決してインパクトの瞬間に力を入れるものではない。ただし、両手打ちはスイングが大きいので、どうしても腰が回りすぎ、スイングが不安定になりやすく、また腰に負担をかけやすくなる。

● 「手首を固定する」がボレーをむずかしくした

時間的に余裕がないことが、ボレーのきわだった特徴。相手のボールが速く、スイング速度が遅いボレーでは、まずは面をきちんと作れるかどうかにかかっている。

手首を固定したままでボールにスピードを付けようとする、バックスイングが大きくなる。バックスイングがおおきくなると、振り遅れる。まさに悪循環。すべての原因は、手首を固定するところにある。正確には、グリップは固定し、手首は解放すべきなのだ。短時間でスイング速度を上げるには、手首の開放を行うのが、もっともよい方法である。小さくて、きちんとスイングすることが、面の安定につながり、ボールにスピードを与える。ボレーは、面に劣らず、スイングも重要なのである。

● ボレーの構え

ボレーは、ややバックサイドに構えたほうがよい。体の正面やフォア側に来たボールに素早く対応できるからだ。

● 速いサービスのレシーブはボレーと同じ要領で打て

速いサービスのレシーブは、ボレーと同じと考えればよい。すなわち、ラケット面とスイングの方向さえしっかりさせれば、十分返球できる。重要なポイントはラケット面をしっかり作ることにある。ボールにスピードあるので、おのずとグリップへの衝撃も強くなってくる。このことから、レシーブの成否は、インパクトの瞬間の小指の締めにかかっているといっても過言ではない。

<ボールはどのように飛ぶのか>

● ベルヌーイの法則

“一本の流線内において、そのどの部分においても速度の二乗に比例する項と圧力に比例する項の和は一定である。”というのがベルヌーイの法則。ここで、流線とは、ある瞬間

における、物体のまわりを流れる空気の方向をつなげたものである。これによれば、ある物体の動きによって生じる流線内で、速度が大（小）になれば、その物体を押し力（圧力）は小（大）となる。

したがって、ボールがトップスピン（順回転）しながら進むボールは、ボールの上側の空気の流速は遅くなり圧力が大になり、下側の流速が相対的に速くなり圧力が小になり、下側に押し付けられる力を受けて、自然落下のときより早く落ちていく。逆に、バックスピン（逆回転）の場合は、ボールが落下していく速度が自然落下のときよりも遅くなる。これを、「マグヌス効果」という。基本的には、ボールのまわりの流れが速くなる方向に、ボールは曲がっていくと覚えておけばよい。

● 手元に来てグッと曲がって見えるわけ

回転によって生じる力（マグヌス力）は、ボールの回転数にほぼ比例する。普通の人では、毎秒 20～30 回転、プロ級のトップスピンになると毎秒 50 回転以上になる。また、毛のあるボールと毛のないボールでは、毛のあるボールの方がはるかにマグヌス力は大となる。

スピンのボールは、1 メートルごとに一定の長さだけずれるのではなく、一定の角度だけずれていく。一定の角度ずつ曲がっていく曲線は、円弧である。すなわち、スピンのボールの曲がり、は、加速度的に大きくなっていく。

● バウンド後のボールの回転

摩擦力は、物体が動く反対の方向に作用し、その大きさは接触面に加わる圧力に比例する。

回転のないフラット状態で飛んできたボールは、コートにぶつかり、そのとき生じる摩擦力によって、進行方向に順回転のトップスピンがかかって跳ね返る。トップスピンボールは、さらに回転数を増して跳ね返る。バックスピンボールは、逆回転の数を減じて跳ね返る。

● スピン別の打球の特徴を整理する

スピンによって弾道のカーブが違う。トップスピンは大きな弧を描いて相手コートに入り、高くバウンドする。バックスピンは低い弾道で入りバウンドも低い。フラットは、おおよそ中間の奇跡を描く。

スピンの違いによるボールの速度の落ち具合はどうか。トップスピンのボールは、コート面に大きい角度で入ってくるので、摩擦が大きくなり、大きく減速する。これに対し、バックスピンのボールは、コート面に低く滑るように入り、文字通り滑っていくので、摩擦は小さくなり速度も落ちない。

以上