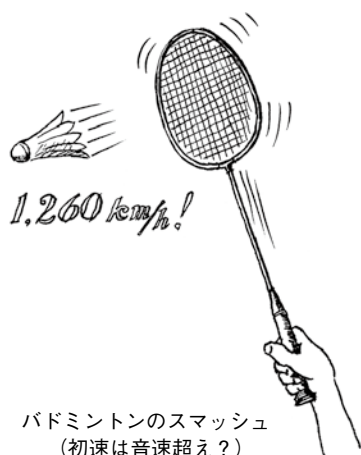


続；バットの重さ，ラケットの重さ



工学博士 西尾 宣明
元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

バドミントンのラケットの重さは？

与太郎 こないだのテニスのラケットと野球のバットの話は難しかったけど，結構面白かったですよ。ちゃんと理屈に合ってるっていうのもね。

ところで，息子が使っていたバドミントンのラケットがあったので調べて見たんだけど，あれは全然6倍なんかじゃないんですね。シャトルコックは5グラムぐらいだけどラケットの方は120グラムもあって，シャトルコックの24倍も大きいんですよ。

あれはテニスのラケットとは違う理屈なんですか？

大 家 ああ，いいところに気がつきましたね。

あれはシャトルコックの構造に違いのもとがあるんですね。

ほら，あれは半球状の頭に円錐形に広がった羽根がついているでしょう？

広がった形状のために空気抵抗が大きいのと，シャトルがうんと軽いことのために減速が激しくて，テニスや野球のボールとは全然違う考えをしなければならいんですね。

シャトルを打った瞬間の速度は一流の選手だと秒速350メートルにもなるそうです。強烈なスマッシュの場合でしょうがね。音速が秒速340メートルぐらいだから超音速と言うことですね。

与太郎 へえー！ 超音速か。凄い速さですね。

時速にするとどのぐらいになるんですか？

大 家 ざっと計算すると時速は1,200キロ以上になると思います。

与太郎 あれ？ 大家さん，今暗算したんですか？

シャトルコックも速いけど，暗算も速かったですね。

大 家 この程度の計算ならどうと言うこともありませんよ。350メートルをちょっと割り引いて0.3キロにして，その代わり1時間の3,600秒のほうを4,000秒に水増しして $0.3 \times 4,000 = 1,200$ キロです。

もっと細かく考えるならば，0.35キロ $\times$ 3,600秒はほぼ35の二乗として，それが30の二乗と40の二乗の中間の値になると考えてもいいですね。

与太郎さんもちょうと計算してご覧。

与太郎 30の二乗は900で，40の二乗は1,600ですね。そして，900と1,600を足すと2,500。それを2で割ると1,250ですか？

大 家 御明算です。念のために電卓で計算してみしましょうか？

$$0.35 \times 3,600 = 1,260$$

与太郎さん，どうですか？ 荒っぽい暗算でも結構役に立つと思いませんか？

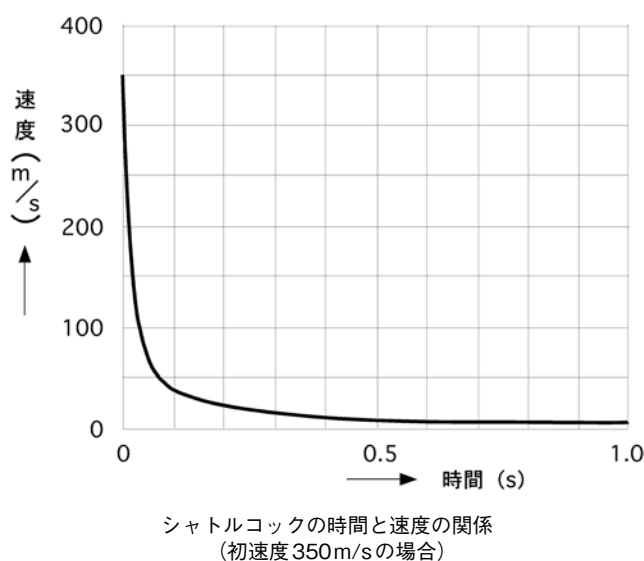
与太郎 納得です。こういう考え方は工事現場でも結構役に立ちそうですね。わたしも見習います。

でも、1,200キロなんて、そんなに速いのをよく打ち返せるもんですね。

大 家 それは、シャトルcockの運動エネルギーはその重さ（質量）に比例してとても小さいこと。それに対して空気抵抗は重さに関係なく、その形（空気抵抗を受ける面積）と速度の二乗に比例するので、シャトルの速さは急激に落ちて行きます。

どんな風に落ちるかをちょっと計算してみました。

初速度は毎秒350メートルと仮定しました。それをグラフにしたのがこの図です（末尾の注を参照）。



打った直後、あっという間に速度が落ちるのが分かるでしょう？ 0.4秒後には速度が毎秒約10メートルに落ちています。

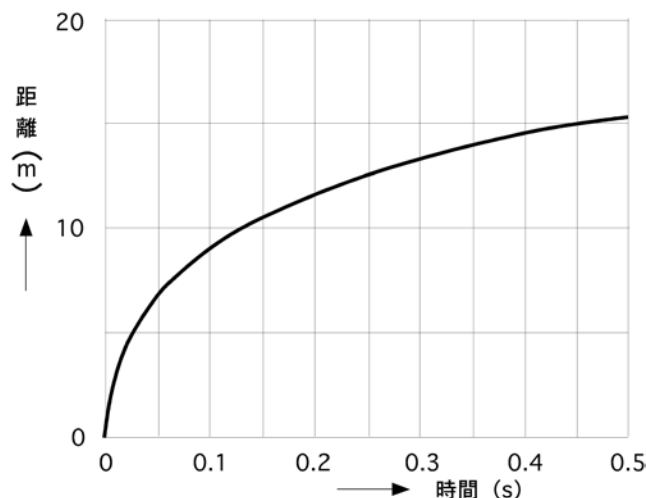
与太郎 本当だ。10メートルっていうと時速にして36キロですか？ 野球だったら超スローボールですよ。それならわたしだって楽に打てますよ。

でも、0.4秒でシャトルcockがどこまで飛んでるかっていうのが分かんないと実感が沸きませんね。

大 家 速度がこうに変化しながらシャトルcockはどれだけの距離を飛んでいるかも計算しておきました。それが次の図です。

0.4秒だと約14.5メートル。これはコート長さ13.4メートルより長いんですね。実際にはコートの中で受けなければならないから、相手のスマッシュの位置から10メートル前後のところで受けることになります。

そうするとスマッシュから0.1秒、遅くても0.2秒



ぐらい後には打ち返さなければなりませんね。

その時刻では、前の図から、シャトルcockの速さは20から40メートル毎秒ということになります。

時速にするとどのぐらいになりますか？

与太郎 ^{あいだ}間を取って30メートル毎秒にしますね。これはえーと、0.03キロですか？ それに3,600秒を掛けて——大家さんの真似をして4,000秒にしますね。

そうすると——120キロですか？ まだ随分速いんですね。われわれ素人じゃとても受けられないですよ。

大 家 しかし、バドミントンのラケットはその程度の速さのシャトルcockを受けるためよりも、350メートル毎秒という速いスマッシュを打つことができるように考えられていると思います。それにはある程度打球面（へっど）が重くなければならないのかも知れません。

一方、受ける場合は0.1秒とか0.2秒という短い時間で反応する必要があります。それには軽いラケットの方が有利です。その攻守両面のバランスからラケットの重さが決まってくるのだと思います。

小太郎君のラケットは120グラムだそうですが、わたしが持っているのもほとんど同じですね。しかもグリップ部分と打球部分の重さがほとんど同じ約60グラムになっています。シャトルcockの12倍といったところですね。

一流選手のラケットがどうなっているかは分かりませんが、われわれのお遊び用よりは少し重くしているのではないのでしょうかね。

卓球の場合はどうですか？

与太郎 そう言えば、卓球もバドミントンと似たところがありますね。ボールはバドミントンに輪をかけて軽いし……。

大 家 そういえば、学会の懇親会などで「6倍の定理」の話をする時、私の説明を良く聞きもしないうちから「じゃあ、ピンポンの場合はどう説明しますか」と突っ込んで来るので、頭の良過ぎる人には困ったものだと苦い思いをしたのを思い出します。

いや、これは余談でしたね。

実際、卓球はバドミントンに似たところがあると思います。ボールは規格で2.7グラムと決まっていますが、直径3.8センチから4センチと規格が変わって、空気抵抗が大きくなったそうです。

ラケットには重さの規格はないらしいですね。しかし、大抵100グラム以上はありますから、6倍どころか40倍50倍と言った重さになっていると思います。

与太郎 それはなぜですか？

大 家 テニス、野球、バドミントンはどれも打球の部分を手から遠く離れていますね。それを手首の回転も利用して効率よく加速することができます。それに対して、卓球では手とラケットがほとんど同じ位置にあるのでそういう「偶力」のような力を利用できませんね。それが大きな理由ではないかと思います。

与太郎 そうなんだ。

ノックバットはなぜ軽い？——1倍の定理

与太郎 ところで、こないだ子供の野球の練習でノックをしたのを思い出したんですがね、ノックのバットは試合のバットよりも随分軽いんですよね。あれは6倍もないんじゃないですか？

大 家 それはいいところに気がつきましたね。

高校野球の練習などをテレビで見ることがありますが、60歳を越したような監督やコーチが元気一杯に野手にノックの嵐を浴びせる様子がよく映されますね。

内野ゴロは結構速いし、外野フライは十分高く遠く飛びます。あんなご老体がよくあれだけの球を打つことができるものだと感心しますが、実際にはそんなに感心するほどのことでもないんですよ。

与太郎さんの指摘通り、ノックバットはかなり軽い

んです。秘密は「1倍の定理」にあるんです。

与太郎 「1倍の定理」ですか？「6倍の定理」じゃなくて……。

大 家 「6倍の定理」はボールもバットやラケットも同じぐらいの運動エネルギーを持っているという条件でのものでした。

しかし、ノックの時はボールの初速度はゼロ、つまり、止まったボールを打つことになります。

その条件で運動量保存の式とエネルギー保存の式の連立方程式を解くと、ボールとバットの重さが同じときにボールが一番良く飛ぶと言う答が得られます。

実は、このことは計算などしなくとも、与太郎さんも経験で知っていることです。

与太郎 ええっ？ わたしが知っている？ほんとですか？

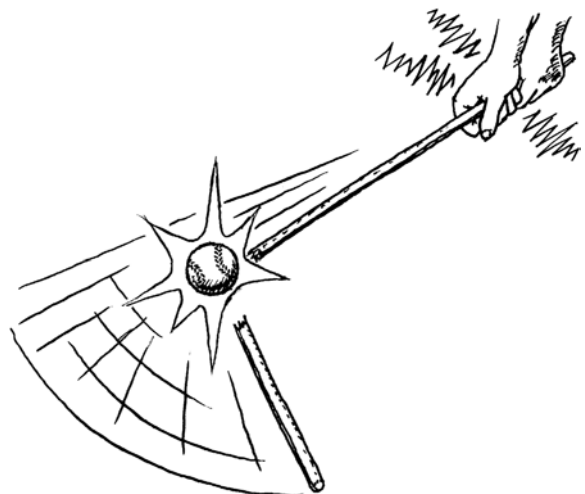
大 家 与太郎さんもビー玉で遊んだことがあるでしょう？ そのビー玉を襖の敷居の溝などに置いて、もう一つの同じ大きさのビー玉をぶつけると、ぶつけた方のビー玉が止まってぶつけられた方のビー玉が転がって行きますね。

ぶつけた方のビー玉の運動量と運動エネルギーが全部ぶつけられた方のビー玉に移ったと言うことなんです。エネルギー伝達の効率が100%なんです。

与太郎 ああ、そういうことなんですか。

でも、バットの重さをボールと同じにするには細い竹かなんかで作んなきゃできないですね。

それに、打った瞬間にバットの方は止まっちゃうんでしょう？ それって凄く腕や手に響くんじゃないですか？



1倍の定理に忠実なノックバットでは……

大 家 大事な問題に気がつきましたね。

与太郎さんの言う通りで、実際にはそう言った理論通りには行かない問題があるんですね。

そこで、バットの重さをボールの何倍ぐらいにすればボールにエネルギーが有効に伝えられるか、また衝撃が我慢できる程度に少なくなるかということが問題になります。

それを判断する材料として、 $V_2/V_1 = \alpha$ という値を考えます。 V_1 はボールを打つ前のバットの速度、 V_2 はボールに当たった後の速度です。そして、バットがボールの重さの何倍かという数字を x ($= M/m$)で表します。 M はバットの重さ、 m はボールの重さです。

計算の過程は省略しますが、

$$\alpha = \frac{x-1}{x+1}$$

という簡単な式になります。

この α を二乗した値は、実はボールを打った後にバットに残されたエネルギーの割合を示しているんですが、与太郎さん、なぜだか分かりますか？

与太郎 えーと、 α を二乗すると—— V_2 の二乗と V_1 の二乗ですね。あっ、分かった。エネルギーって速度の二乗に比例するからでしょう？

大 家 ご明答です！ 与太郎さんもだいぶ分かってきましたね。

ところで、ビー玉の例で分かっているように、 $x = 1$ のときに $\alpha = 0$ です。これはバットの運動エネルギーが全部ボールの方に伝わって、バットに残ったエネルギーはゼロということです。

そこで、次の問題はバットにどのぐらいのエネルギーが残っていれば手や腕にあまり無理が来なくて済むかということですが、実際に使われているノックバットは500から600グラムと言ったところだそうです。これはボールの重さの約4倍前後といったところです。

与太郎 試合用のバットが800から900グラムっていうのに比べると、やっぱり随分軽いですね。

大 家 片手にボール、片手にはバットを持った構えから打つんですからこのぐらい軽くないと正確に扱えないでしょうね。

ところで、 $x = 4$ とすれば $\alpha = 0.6$ になります。ボールを打つ前のバットの速度の6割が打った後にのこる

ということです。

与太郎 6割も残るんですか。それだと腕には響かないかもしれないけど、ボールを飛ばすエネルギーの効率が悪くないかな。

大 家 おう、なかなか鋭い見方ですね。ところが、エネルギーの点ではあまり心配はないですよ。

α を二乗するとボールを打った後にバットに残ったエネルギーの割合になります。それを1から引いたのがボールに伝わったエネルギーの割合になります。

与太郎さん、ちょっと計算してみてください。

与太郎 α の二乗は0.6の二乗で0.36、それを1から引くと0.64か。6割以上もボールに伝わるんですね。それなら大丈夫ですね。

大 家 そうでしょう？ 軽いバットでも結構大丈夫なんですね。

それでもまだ急激にバットの速度が変化するという問題は残りますが、それはボールが当たる場所と握る手の位置がかなり離れていることで和らげられるんですね。スウィートスポットをうまく利用できれば理想的です。

与太郎 スウィートスポットってボールが一番よく飛ぶ点のことですか？

大 家 それをスウィートスポットと呼ぶ人もいますが、それはバットの重心と同じことですね。それじゃあちっとも面白くない。

私が考えるのはボールを打ったとき手が衝撃を受けないような場所のことです。一般には重心から少し離れた位置になります。重心の位置で打っても、手の位置からは離れているので衝撃はそれほど大きくないですがね。

与太郎 そうなんですか。スウィートスポットってよく言われるけど、大家さんのスウィートスポットの考えも一度聞いてみたいです。もう研究済みなんですか？

大 家 お易い御用です。でも、今日はもう遅いからそっちの話はまたの機会にしますね。

ソフトボールは3倍の定理？

大 家 ところで、野球に似たゲームとして、ソフトボールがありましたね。

これは野球によく似ているので6倍の定理の世界と

思っていたんですが、ちょっと調べて見たら全然違うので慌ててしまいました。

与太郎 わたしも子供のソフトボールに付き合ったことがあるけど、そう言えばボールは野球より重くてバットは逆に軽いですね。

大 家 中学生以上の一般用のボールの規格は直径が9.7センチもあって、重さはゴム製のもので190グラムです。

バットの長さは86.36センチ以内で、一番膨らんだ部分の直径は5.72センチ以内ということです。

野球の場合の長さ106.7センチ以下、径6.6センチ以内と言うのに比べると大分小さいですね。

この寸法の比較から推定すると重さは500から600グラムと言ったところですね。

これは野球のノックバットとほとんど同じですが、ボールが重いので $x = \text{約}3$ と言う値になっています。

与太郎 さっき、ノックバットの実際の値は $x = \text{約}4$ ということでしたね。

ソフトボールのほうはノックと違ってピッチャーが投げるボールは結構速いでしょう？ 本当は6倍の定理の方が当てはまるんじゃないんですか？

大 家 与太郎さん、今日は本当に冴えていますね。

今の質問はファストピッチソフトボールの時の問題ですね。

与太郎 ファストピッチってどういうことですか？

大 家 ピッチャーが力一杯速い球を投げてもよい試合のやり方です。

私の考えでは与太郎さんの言う通り6倍の定理が正しいと思います。もともと、ソフトボールは子供から老人まで楽しめるスローピッチ方式が元になったものと思います。

この方式ではピッチャーは山なりの、一番高いところではバッターの肩よりも高いコースを通るような球を投げる決まりになっています。そうすると、当然、力一杯振られたバットのエネルギーの方がボールのエ

ネルギーよりも大きくなります。

この前話したバットとボールのエネルギー比 ϕ と言うのを覚えているでしょう？ その ϕ の値が1よりかなり大きくなります(本誌92号の「バットの重さ、ラケットの重さ」を参照)。そうすると、最適なバットの重さはボールの6倍よりも小さくなります。

かりに $\phi = 2$ として計算すると、 $x = \text{約}1.5$ になるのが理論上最適ということになります。

与太郎 ボールの1.5倍っていうとバットは300グラムぐらいで良いことになりますね。軽過ぎて頼りないんじゃないですか？

大 家 そんな感じがしますね。

実は、このバットとボールの規格はファストピッチでもスローピッチでも同じなんです。そこで両方の中間を取って——つまりボールの1.5倍と6倍の間を取れば3倍に落ち着くということではないかと思います。

実際上も、木製のバットでさっき言ったような長さとかさでは600グラム以上のものを作るのが難しいと思います。3倍というのはそういう現実的な制約もあったのことと思います。

与太郎 それに、野球に比べてボールが軟らかいから衝撃も少ないんじゃないですか？ それからスウィートスポットっていうのがどう効くのか、それも早く知りたいですね。

大 家 軟らかいボールを使うからソフトボールなので、それが一番効いていると思いますね。

スウィートスポットの話は次に会うときにでもね。

注：シャトルコックの速度変化と飛距離の計算に用いた抗力係数 C_D の値については下記の論文を参照しました。「バドミントンシャトルコックの有する高い減速メカニズム」長谷川裕晃(秋田大学), 和田謙治(同前) 村上正秀(筑波大学), 大林茂(東北大学); ながれ32(2013)