



楽しみ追求の科学

～スポーツ工学～

宇治橋研究室～情報理工学研究科



宇治橋 貞幸 教授

これから余暇の時代を迎えるにあたり、スポーツは私たちの生活にますます欠かせないものになるだろう。宇治橋先生もスポーツ、中でもランニングを楽しんでおられ、ご自身の体験を基にスポーツ工学の研究を始めたとのことだ。スポーツ工学の研究とは、どのようなものなのだろうか。現在、情報理工学研究科に所属され、機械科学科の授業も担当されている宇治橋先生の研究室を訪ねた。



スポーツ工学とは？

まず、スポーツを取り巻く現状について考えることから話を始めよう。人間がスポーツをする目的は、体を動かす欲求をただ満たすだけでなく、楽しさや充実感を味わうことにもある。さらに、能力や技術を向上させることにより、この楽しさや充実感が増すことはもちろんのこと、人間が持っている向上心を満足させることもできる。このような要素を考えたとき、スポーツには文化的意義が濃厚にあると言えるだろう。

ただし、スポーツを楽しむためには、ウェアやシューズなどといった用具、そして、競技を行う場所である施設とサーフェス（競技を行う地面）これらが必ず必要になる。これらはスポーツにおけるハードウェアと言えるが、現代のスポーツはハードウェアによって支えられているのである。大多数の人々にとって、スポーツをする第一の目的は楽しむことにあるので、これらハードウェアはまず、安全で快適であることが大前提となる。そして次の段階として技術の向上を目指すようになると、人々は性能のよいハードウェアを求めるようになる。

しかし、ここで問題がある。安全で快適、かつ

性能のよいハードウェアの開発を目指すとなると、困難が伴うことも少なくないのだ。1991年に東京で行われた世界陸上競技選手権大会を覚えているだろうか。会場となった千駄ヶ谷の国立競技場では、大会に備えて人工走路の舗装を新しくした。この人工走路には、一流選手による試走を経て最も記録が出やすい製品が選ばれたのである。結果は100m決勝で世界新記録が誕生（カール・ライス、9秒86）、さらには6位までが9秒台を出すなど記録ラッシュが続き、新しい人工走路の評判は決定的となった。しかし一方では故障者が出るなど、記録と故障が紙一重という事実も明らかになつた。つまり、性能を優先させた結果、安全性が犠牲になってしまったわけである。

安全で快適、かつ性能のよい スポーツのハードウェアの開発を目指すためには、工学的アプローチが必要不可欠となる。また、人が直接身につけるものであるから、人間の特性や感覚など学際的な研究が必要になる。そこで、スポーツにおけるハードウェア開発を中心課題とする学問、スポーツ工学が生まれたのである。一口に工学的アプローチを加えるといつても、イメージが湧きづら

いかも知れない。具体的には、スポーツ時の様々な場面における物理現象の解析、さらには解析結果を基にしたハードウェアの設計、こういったところで工学的アプローチが必要になるのだ。物理現象の中でも、衝撃、つまりインパクトを解析することや材料の影響を調べることが非常に重要な要素になってくる。これらの特性は競技によって異なるから、スポーツ工学的な研究により最適なハード

ウェアが開発できると期待されているわけだ。

宇治橋先生が現在研究しておられるのは、主にゴルフのインパクト、ランニングやサーフィンのインパクト、そして各種ヘルメットのインパクトである。もちろんその研究結果を用いた、競技に最適で安全なハードウェアの開発にも挑戦している。ここではゴルフ及びランニングの研究について、具体的に見ていこう。



ゴルフ ~飛びの科学~

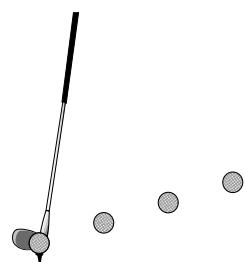
ゴルフは飛距離を競う競技ではないが、一般的なプレイヤーの興味はもっぱらボールの「飛び」に集中している。そこで先生は、インパクトを通じた力の解析を基にして、より飛距離の出るクラブやボールは理論的にはどういうものなのかを調べている。飛距離を決定するのはいうまでもなくボールが受ける力である。この力は地面に対して水平方向に働く力と鉛直方向に働く力とに分けて考えることができるから、それぞれの方向に分けて力を解析してみる。

まず水平方向に働く力であるが、この力の大部分はインパクトを通して人間がボールに与える力である。インパクトはボールとクラブのヘッドの間で起こるから、ボールに力が伝わると並行してインパクトの情報は人間の手まで返ってくる。この、戻ってきた情報を解析すればインパクトを制御できると期待されたが、ここで問題が生じた。シャフトに長さがあるため、情報が伝わるのに時間がかかるのだ。インパクトの瞬間からボールが離れるまでの時間はわずか5/10000秒しかない。シャフトを通して手に情報が返ってきたときには既にインパクトは終わっているから、制御の対象はすでに過去のものとなってしまっている。そこで、クラブ・ヘッドとボールとの衝突現象だけに的を絞って研究するために、クラブヘッドに見立てたハンマーをボールに衝突させ、飛び方を調べる実験を繰り返し、結果を基に解析を行った。

解析にあたって、先生には一つの疑問があった。ゴルフの指導書などには、インパクトの時はグリップをしっかり握らなければいけないと書かれている。しかし、グリップをしっかり握ることで本当に飛距離に差が出来るのだろうか。この疑問を解決すべく、クラブの先端をしっかり固定したク

ラブとゆるく固定したクラブを用意し、実際にボールに当てるインパクトを調べてみた。その結果、両者の反発係数には変わりはなかった。すると、グリップの握り方は飛距離とは無関係ということになってしまう。しかし、グリップをしっかり握る目的は別の部分にあることがわかった。スイングの速さによってたわみが生じるシャフトを、インパクトの際にまっすぐにすることが重要なのである。まっすぐにすれば方向性が定まるのはもちろんだが、それ以上にヘッドのスピードを上げることにつながるからである。ムチで打つときのことを考えて欲しい。ムチの先端のスピードを上げるには、力をずっとかけ続けるのではなく、打つ瞬間に一旦止めるといい。同じ原理がゴルフのインパクトにも適用できるわけだ。つまり、グリップをしっかり握ることで、インパクトの瞬間にスイングを一旦止めるという動作が無意識のうちにできやすくなる。本当の目的はここにあったのである。このように、インパクトの瞬間に生じる物理現象を解析することで、どうすればクラブ側の水平方向に働く力を強くすることが出来るかがわかつてきた。

次に鉛直方向に働く力であるが、飛び出したボールには一様に重力がかかる。だから、それに打ち勝つ上向きの力をかけてやれば飛距離を伸ばす



ことができる。上向きの力は打ち出し角（図1）によって生じる。実験の結果、打ち出し角の大きさはロフト角よりやや小さいことがわかったから、ロフト角を調節すればよい。さらに、ロフト角の調節によりボールにバックスピンをかけてやることも重要である。バックスピンがかかると、ボールの下部の方が上部より空気の圧力が高くなり、上向きの力が生じる。このとき、ボールの表面がつるつると圧力差が出来にくい。ここで、ボールの表面にあるくぼみ（ディンプルという）が重要な役割を果たしているのだ。ディンプルの役割はそれだけではなく、ボールにかかる空気抵抗を減らす効果もある。ディンプルのパターンは作っているメーカーによって違い、シミュレーションを繰り返して研究している。

性能のよいゴルフ用具を開発するためには、ここに挙げた以外にもたくさんの要素が関わってくる。十分な剛性を保ちつつ軽量化されたクラブ、

接触によるエネルギーロスの少ないクラブとボールを作るための材料開発。さらに、人間の感性に訴える用具、例えば振ったときに感じのいい音をするクラブの開発など、挙げればきりがない。まだまだ未知数であり、大きな可能性を秘めていると言えるだろう。

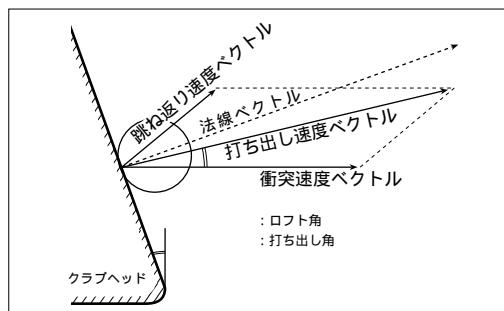


図1 ゴルフボールのインパクト



市民ランナーのためのスポーツシューズを

宇治橋先生は東工大的学生時代に陸上部に入つて長距離選手として活躍していた。それまで運動部の経験がなかった先生にとって、とても新鮮で充実した生活だったそうだ。そのとき初めてスポーツ用品店で売られているランニングのための“シューズ”を履いた先生に驚きと感動が走った。「この軽さ、走りやすさ、それに耐久性、靴屋で買った普通の“運動靴”とここまで違うのか…」

それから20年。機械工学科（現在の機械科学科）の教官となっていた先生は学生時代から抱いていたシューズについての疑問を解きあかしてみたくなった。先生はこのようないきさつからランニングシューズの研究を始めて、ひいては「スポーツ工学」という新たな研究領域を生み出すきっかけにもなったのである。

ランニングシューズをはじめ、スポーツシューズは欠かせないハードウェアの一つである。どのスポーツでもプレー中に力を発揮するためには、自分の足にフィットして、しかもサーサスにもあっていいるシューズを履くことが必要だ。そうしないと力を出しきれないばかりでなく、けがをする危険性もある。

オリンピックや世界陸上に出場するような優秀

な選手やプロのスポーツ選手の場合には、専用のシューズを作ってもらえるのでとくに問題はない。ところが、趣味でスポーツを楽しむ人たちの場合はそんなぜいたくなことは望めない。シューズのメーカーは、一般ランナーが履くようなシューズは少ない種類でなるべく多くの人間に対応できるようなラスト（靴型）を作りて採算を合わせている。しかし一人一人の足の形は千差万別であるため、自分に合ったシューズを買おうとしても、満足のいくものはなかなか見つからないものだ。私たちがシューズを選ぶときに手がかりとなる表示は、足の長さ（足長）とJIS規格で定められたE・EE・EEEなど数種のサイズ（足幅および足幅）ぐらいしかない。シューズを履いたときの感覚などは履いてみるまでわからないので、結局試行錯誤して探してゆかねばならない。

ランニングシューズの場合に必要な機能や性能としては、軽くて丈夫なのはもちろんのこと、運動の性格上、足とシューズとがぴったりとフィットした履き心地のよいものでなければならない。また、一般ランナーは固いアスファルトの上を走るので、足が着地した瞬間にかかる衝撃がなるべく小さいものを履いて、疲労を少なくし、けがを

防ぐ必要がある。デザインも当然考慮に入れなければならない。

もし、快適なランニングシューズに必要な条件をなんらかの尺度を使って数値で表すことが出来ればシューズを作る側にもそれを履く側にも好都合である。店に行って自分にあったシューズを簡単に見つけることが出来るような尺度をつくれないのだろうか。宇治橋先生はこの問題を解決すべく、ランニングシューズの特性を調べ始めた。

長距離走者の走りかたはまず地面にかかとがついてそれから足の裏、爪先と順番に地面を蹴ってゆく動作の繰り返しだ。中でも一般ランナーは、比較的ゆっくりと走ることが多い。図2は一般ランナーのゆっくりとしたジョギングの場合に足にかかる力の大きさを表したものである。AとBの二つの山に分かれているのがわかる。Aの部分はかかとにかかるインパクトで時間的に非常に短い。これはPassive Impact(受動的衝撃)と呼ばれるもので空中に飛んでいた足が着地する瞬間の波形である。一方Bの部分はActive Impact(能動的衝撃)と呼ばれる、足の裏と爪先が地面を蹴るときの波形である。後者の場合、かかとが支点になっているので筋肉を使ってゆっくり着地することができる、つまり衝撃強度の調節が可能である。だが前者は空中を飛んでいる足が地面に衝突する形になるので、着地した時の衝撃はランナーのスピード、フォーム、体重などによって決まってしまい、人がそれをコントロールすることはできない。このPassive Impactを緩和することはランニングシューズの役割の中でも大きなウエイトを占めているといえる。

そこで、シューズのなかでその役割を担っているソールの部分の衝撃実験を行った。まず、陸上部の選手10人と一般ランナー10人にそれぞれ10種

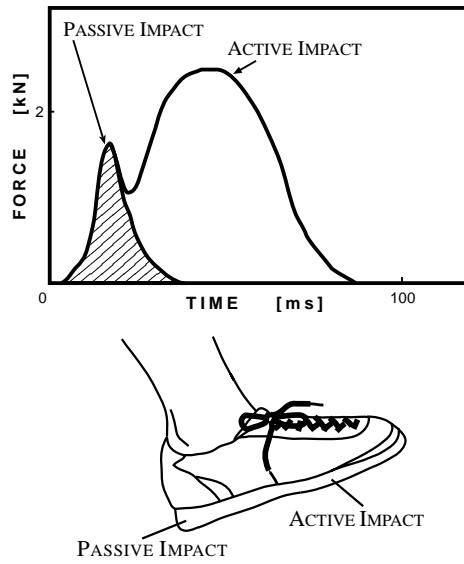


図2 足にかかる力

類のシューズを履いて軽いジョギングをしてもらいどのように感じたか、官能評価のアンケートを取った。その結果、被験者はソールが軟らかいほどよいシューズであると答える傾向が見られ、ソールの硬さがシューズの善し悪しを決める要素の一つになっていることがわかった。

次にシューズのソールの部分の衝撃緩衝性や反発性を示す力学的な指標を定義した(表1)。これらの力学量からシューズを選ぶための尺度を作ろうというわけだ。これらが人間の感覚に対応したものなのかどうかを調べるために、官能評価試験で使った10種類のシューズに対して衝撃試験(人間の足に見立てたおもりをソールを衝突させて、物理量を測定する)と静的試験(ソールに一定の圧縮速度で少しずつ力を加えていって最大荷重2kNまで達したのち、同じ速度で除荷したときの

(表1)

衝撃緩衝性、反発性を示す指標

- ・最大荷重：ソールにおもりを衝突させたときにかかる最大の力(衝撃試験の場合のみ)
- ・最大変形量：ソールに力を加えたとき
- ・荷重上昇時間：最大変位に達するまでの時間。
- ・エネルギー吸収量：図3の斜線部分。荷重・変位の関係より求める。

硬さを示す指標

- ・弾性率：荷重・変位の履歴に着目して、立ち上がりの傾きを初期弾性率、最大荷重に達

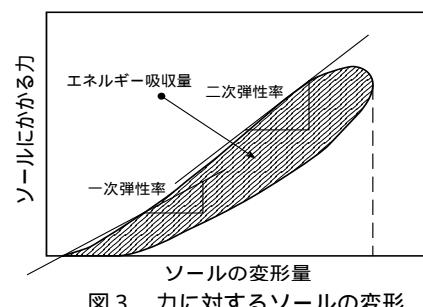


図3 力に対するソールの変形

物理量を測定する)の二つの実験をした。

その結果、官能評価試験との相関がみられたのは、衝撃試験では最大荷重や荷重上昇時間、エネルギー吸収量など、実際のランニング時の衝撃条件を決定づけるような力学量だった。これに対し、静的試験では2次弾性率やエネルギー吸収量など、静的な材料特性に関係があると思われるものであった。

この実験より、定義した力学量が人間が感じるシューズの善し悪しにある程度関係していることがわかった。しかしあまだ多くの問題点が残されているのも事実だ。まず、この相関にはある程度のばらつきが見られた。これは、人間の感覚が人によってそれぞれ違うあいまいなものであり、また同じ人でもそのときの体調の善し悪しや気分によって変わってしまうなど再現性のないものだからだ。また、軟らかいほど快適なシューズなのかというと、それでもない。ソールを軟らかくすればその分だけ安定性が悪くなり、はだしでは絶対に起きないような傷害を起こす可能性もある。軟らかすぎても硬すぎてもよくないのだ。このことが、シューズ選びのための尺度を作ることを難しくしている。

現在、宇治橋先生はこの複雑きわまりない問題に対して、一つ一つきっちりと詰めていくことを考えている。今回紹介した実験もその布石となるものだが、人間が判断したシューズの善し悪しにきちんと対応する力学特性を測るのはまだ難しく、これから課題だと先生は言う。

* * * * *

先生の最終目標はサーフェースと足の両方に相性のいいシューズとは力学的に表すとどのようなものかをはっきりさせることだ。そのためには人体のかかとの研究もしなければならないそうだ。かかとは人間に生まれつき備わっている衝撃吸収機構なのである。将来的にはこの研究も行っていきたいそうだ。

私は今回の取材をする前、ランニングシューズの研究と聞いたので、優秀な選手がさらに早く走るためのシューズを研究しているのかと思った。ところが宇治橋先生がめざしているものは違った。一般の人が気軽に楽しくランニングできるシューズの研究だった。大学で行われている研究対象は、すぐには役に立たないかもしれない一般企業



写真1 国立競技場での測定風景

先生はシューズの研究とともに競技場のサーフェスについての研究もなさっている。スポーツをしているとき、シューズには足だけでなくサーフェスも接触している。当然のことながら足にかかる力はサーフェスにかかる力と同じである。だから、シューズの衝撃を測定する機器でサーフェスの衝撃に対する特性も同様に測定できるのである。この機器の特長は、大がかりな装置ではなく持ち運びが可能であることである。今年は「記録とけが紙一重」と言われた国立競技場にもシューズと同様の力学量を測りにいったそうだ(写真1)。サーフェスの力学特性を測ることで、サーフェスの最適な弾力とはどのようなものなのかがわかつたり、時間が経過して劣化したサーフェースの力学特性を測ることで舗装し直しの時期もわかるようになる可能性があるそうだ。これらもシューズの研究と並行して解明されてゆくだろう。

では扱いにくいものが多い。そんななかで一般市民のための運動用具を研究している宇治橋先生に新鮮味を覚えた。この先、スポーツ用品店でランニングシューズをためらうことなしに選べるような力学特性が示される日が来ることを祈ってやまない。

(早川知宏・橋本真理子)

