

## サッカーサイエンス

山形大学地域教育文化学部助教授 浅井 武

### 1. はじめに

現代サッカーでは、フリーキックやコーナーキックなどのリスタートからの得点が4割近くにも上っている。なかでも、ゴール前のフリーキックは直接得点をあげることが多く、極めて重要なテクニックであると同時に、ゲームの華でもある。ここでは、ロベルトカルロス選手に代表されるインステップキックによるストレート系フリーキックと、中村俊輔選手に代表されるインフロントキックによるカーブ系フリーキックについて、力学的にみてみたい。

### 2. パワフルな弾丸フリーキック

トップ選手における、フルスイングでのインステップキックのボールスピードは約30～35m/sとされている(我々の研究グループが計測した最高速度は、ロベルトカルロス選手の39m/s)。例えば、ボール速度を30m/sとした場合の、そのボールの運動エネルギーは、ボール質量(0.45kg)×ボール速度(30m/s)の2乗÷2なので、約200Jとなる。そして、ボールと足との接触時間は、ほぼ一定の0.01秒であり、単位時間あたりのエネルギーであるパワーは、200Jを0.01秒で割って約20000Wということになる。これは、100Wの電球を200個、同時に灯すことができるパワーであり、極めて大きな値である。よくトレーニングされた人間の筋肉1kgあたりのパワーは250W程度であるとされており、そのパワーを発揮するためには、20000÷250で80kgの筋肉が必要と計算される。しかし、体重80kgの人間における片側下肢の質量は、骨軟組織を含めてもせいぜい15kg程度であり、下肢筋肉の持つエネルギー供給能力だけでボールを30m/sに加速させることは、物理的に不可能であるといえる。したがって、足の筋力だけでなく、他の部分が発揮するエネルギーを活用することが重要になってくる。

図1は、トップ選手がインステップキックを行った場合におけるけり足の各関節速度を示したものであり、足関節の速度がほぼスイング速度と考えてよ

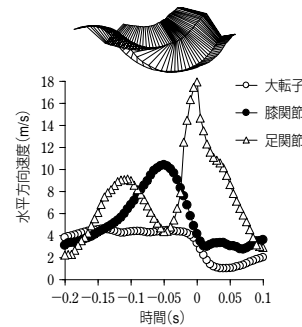


図1 トップ選手がインステップキックを行った場合におけるけり足の各関節速度。まず、最初に大転子(腰関節)速度のピークがあり、次に膝関節速度がピークとなり、最後に足関節速度がピークとなってインパクトしているのが分かる。

い。まず、最初に大転子(腰関節)速度のピークがあり、次に膝関節速度がピークとなり、最後に足関節速度がピークとなってインパクトしている。これは、直線的に連結された幾つかの関節が連鎖的に関係して動き、根幹部のエネルギーを末端部に伝達するメカニズムが働いていると考えられる。このメカニズムは、多くの関節の運動連鎖により、末端部の速度を飛躍的にアップさせることができ、「鞭の運動」、「殻竿の働き(flail-like action)」、「キネマティック・リンク(またはチェーン)」等と呼ばれている。

このエネルギー伝達の運動原理を分かり易く把握するためには、鞭の運動を考えるとよい。実際の鞭の場合、先ず始めに鞭の握りの部分に力を加えて加速し、その仕事によって運動エネルギーを鞭に与える。次に、握りの部分を止めると力は手に掛かるが、手は止まっている(静止)ので変位を伴わない、つまり、鞭は手に対して仕事をしないことになる。手が止まった後の鞭の運動エネルギーは、ほぼ保存される(実際には熱等で、若干損失する)と考えられ、鞭が手元の方から連続的に静止していくので、この運動エネルギーが次々と鞭の先端側の質量の小さい部分に移動していくことになる。物体の運動エネルギーは、 $\frac{1}{2}mv^2$  ( $m$ :質量,  $v$ :速度)で表されるので、鞭の末端部の非常に質量が軽い部分は、結果的に音速を超えることになる。もちろん、人間は、鞭のような連続体ではないが、このメカニズムを利用して、多くの関節の運動連鎖により、末端部の速度を飛躍的にアップさせることが可能となるわけである。

### 3. 曲がるフリーキック

一般にカーブキックというと、ボールに摩擦で回転(スピン)をかけるため、「ボールの横を擦り上げるように蹴る」といわれることが少なくない。また、トッププロ選手のカーブキックによるフリーキックがよく決まるため、一般の選手より、よりたくさんスピがかかっていると思われがちである。しかし、実際はどうであろうか。図2は、選手がカーブキックによるフリーキックを蹴った時の上から見た高速VTR映像である。この映像をみても分かるように、ボールのサイドを擦るというより、ハンマーパンチ(膝関節の曲げ伸ばしは使っている)のようにインフロント部をボールにインパクトしている。そして、脚の運動パターンはインステップキックのそれと類似しており、全身を使って爆発的なスイング速度を得ている。では、このような蹴り方で、なぜボールにスピがかかるのであろうか? また、このカーブキックの技術ポイントはなんであろうか? その秘密は、インパクトする足の部位の向き(フェイスベクトル)とスイングの向き(スイングベクトル)にある。例えば、インサイドキックのようにインパクトする足の部位の向きとスイングの向きが同じである場合、これは、いいかえるとフェイスベクトルとスイングベクトルの向きが同じ方向であるといえ、この場合、ボールにサイドスピンは発生しない(図3)。インステップキックでも、足関節が伸びた形になるが、多くの場合、フェイスベクトルとスイングベクトルの向きが同じあり、これもサイドスピンはかからないことになる。一方、インフロントキックによるカーブキックの場合、映像を



図2 カーブキックによるフリーキックを蹴った時の上から見た高速VTR映像。インパクトする面の向きとスイングの方向がずれており、それがスピを生み出している。

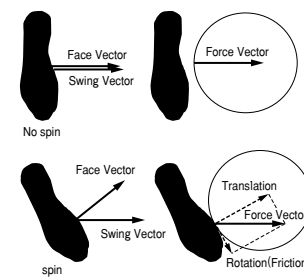


図3 インサイドキックのようにインパクトする足の部位の向きとスイングの向きが同じである場合、ボールにスピは発生しないが、フェイスベクトルとスイングベクトルの向きがずれてボールをインパクトすると、回転方向の力が発生し、ボールがスピンする。

みてもわかるように、フェイスベクトルとスイングベクトルの向きが、ずれてボールをインパクトしており、これが、回転方向の力を生み出し、サイドスピンを発生させるメカニズムとなっているのである(図3)。したがって、このフェイスベクトルとスイングベクトルの向きのずれ(迎え角)があれば、ボールサイドを擦る必要は無く、極端に言えば、この迎え角さえ作れば、ボールの中心をインパクトしてもサイドスピンは発生するのである。実際、このフリーキックのボールスピードと回転数は、27.5m/s、毎秒7.5回転程度となっており、かなり速いボールスピードで3m以上曲がっていることがわかる。

では、なぜこのようなサイドスピがかかったボールが曲がるのであろうか。回転するボール(球体)に対する流体(空気)は、ボールの周りを通る際、ボールの回転方向と同一方向に流れる側面と反対方向に流れる側面とに分岐する(図4)。その時、回転方向と同一方向に流れる側面の流体の速度は大きく、反対方向に流れる側面の流体の速度は小さくなるという相対的速度差が生まれ、その速度差はベルヌーイの定理(Bernoulli's principle)によって圧力差を発生させることになる。この不均衡(imbalance)な圧力差は、ボールの進行方向に対する横方向の力(揚力)となる。また、回転の速度差によってボールの後流が、ボールの進行方向に対して偏向していることが分かる。この偏向する後流が舟の舵のように働き、その反作用力(ニュートンの第3法則)によって横方向の力が発生するのである。この回転により横方向の力(マグナス力)が発生することをマグナス効果といい、その働きによってボールの飛翔軌跡が偏向し、結果的に曲がっていくのである。

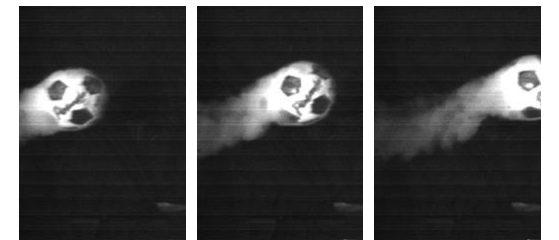


図4 回転しながら飛翔するサッカーボール周りの空気の流れ(ボールは左から右に移動し、回転は反時計回り)。