

### ゴルフボールの飛距離シミュレーション 3

今回はいよいよゴルフボールの飛距離シミュレーションです。空気抵抗によってボールの飛ぶ距離がどのくらい影響されるのか、そしてディンプルはどの程度影響するのかについて調べてみよう。

#### 6. 抵抗係数の評価

「3. ゴルフボールの運動方程式」でボールに働く空気抵抗はボールの速度の自乗に比例することを述べた。ゴルフボールの軌道シミュレーションを行なうためには具体的な空気抵抗の値を求める必要がある。運動方程式に現れた空気抵抗の係数  $k$  は、物体が球の場合、次の形で与えられる。

$$k = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi}{4} d^2 C_D$$

ここで、 $d$  は球の直径、 $\rho$  は空気の密度である。また、 $C_D$  は抵抗係数と呼ばれる無次元 (単位をもたない) の数である。

表面が滑らかな球に働く空気抵抗  $C_D$  の変化を実験により求めた結果が図 6.1 である。横軸  $R$  はレイノルズ数という無次元数 (ここではボールの速度と置いてよい) で、縦軸が  $C_D$  である。また、両軸とも対数表示になっていることに注意する。さて、ゴルフボールの飛ぶ速度を 40m/s (時速 144 キロ) とすると、横軸に示したレイノルズ数は約  $10^5$  となる。そこで、図の対応する辺りを見てみると、 $R=2 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$  の付近で  $C_D$  値が急に減少しているのがわかる。つまり、ボールのスピードがある程度速くなると突然、ボールの受ける空気抵抗が小さくなるのである。空気力学では、この現象を「抵抗の急減現象」と呼んでいる。

ここで、この結果は表面が滑らかなボールに対するものであることに注意しよう。面白いことに、球の表面に凹凸を付けると、表面が滑らかな場合よりも遅い速度でこの「抵抗の急減現象」が起きるのである (図 6.2 参照)。ゴルフボールのディンプルとは、実は、空気力学で知られている抵抗の急減現象を応用して飛距離を伸ばすための工夫だったのである。

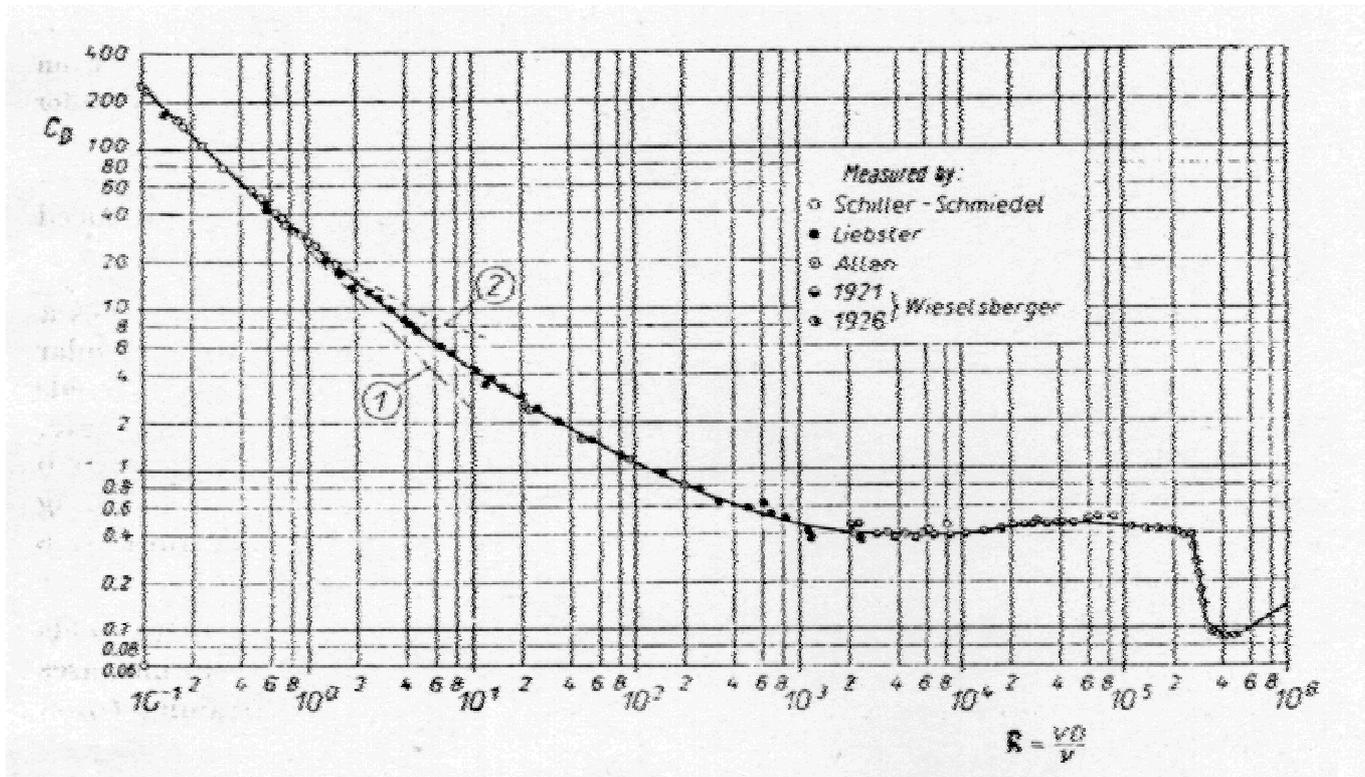


図 6.1 表面が滑らかな球に働く空気抵抗

(Schlichting: "Boundary Layer Theory" 7th Edition より)

**課題 8** .  $R=2 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$  付近での  $C_D$  値を図 6.1 から読み取り，ディンプルの有無による空気抵抗係数  $k$  の値をそれぞれの場合で計算してみよう．なお，ゴルフボールの直径を 4cm，空気の密度を  $1.176\text{kg/m}^3$  として計算する．さらに，ゴルフボールの質量を 50g として，空気抵抗係数  $k$  をボールの質量  $m$  で割った  $k/m$  をそれぞれの場合について求めよう．

(注)Windows には電卓が用意されているので計算に使ってみよう．

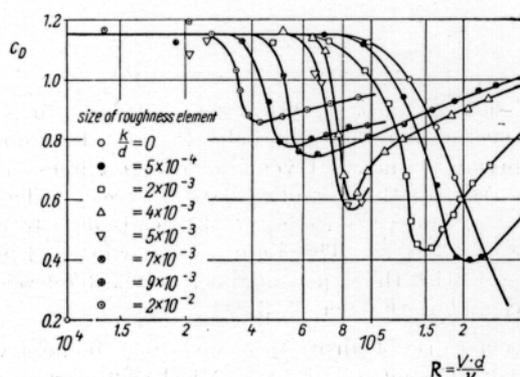


図 6.2 表面凹凸の空気抵抗への影響

## 7. 空気抵抗を受けるボールのシミュレーション

### 7.1 シミュレーションの実行

求めた空気抵抗係数の値を使って，ディンプルの影響について調べてみよう．

**課題 9** . ディンプルのある場合とない場合のボールの軌道を計算し，それぞれをグラフに表してみよう．抵抗係数値と出力ファイル名以外の入力データは「4. 準備」で用いた値と同じにすること．また，理論値も表示させてみると空気抵抗の影響がよくわかる．方法は「4. 準備」を参照すること．

### 7.2 飛距離の算出

さて，Excel の関数を使って計算結果から飛距離を算出する方法について説明する．今回は，「飛距離」とはボールが地上に落下した地点までの距離とする（つまりボールのバウンドは考えない）ので，ボールの  $y$  座標が 0 となったときの  $x$  座標である．飛距離の求め方はいろいろあるが，ここでは地面 ( $y=0$ ) を挟む 2 時刻のデータを線形補間して求める．

(1) それぞれのワークシートにあるグラフを「F」列にかからないように移動する．

(2) 「F1」セルを選択し，次の関数を入力する．

$$=IF(C1*C2<0,(B1*C2-B2*C1)/(C2-C1),0)$$

(3) 「F1」セルをコピーし，「F 列」の残りのセルに貼り付ける．

(4) 飛距離に相当するセルにその値が表示され，他のセルには「0」が表示される．

**課題 10** . 上の方法を使って，ディンプルのある場合とない場合の計算結果からそれぞれの飛距離を求めてみよう．ディンプルによってどのくらい飛距離が延びているだろうか．また，抵抗のない場合についても，この方法で正確な飛距離を求めてみよう．

参考のためにシミュレーション結果をまとめた図を示します．この図の描き方は次回に行います．

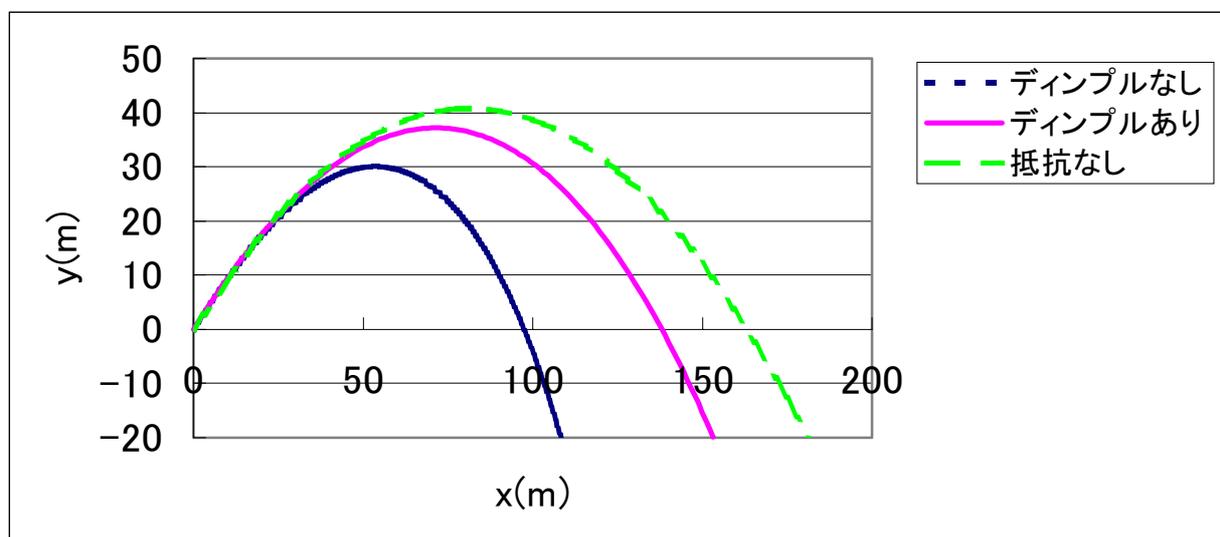


図 7.1 ゴルフボールのディンプルによる軌道の違い