アメリカンフットボールの投球軌道シミュレーション

理学専攻 情報科学コース　駒崎 真以美

1　はじめに

球を扱うスポーツでは，その球を扱う技術が試合の勝敗を大きく分ける．球の大きさ，形，利用方法などは各スポーツにより様々であるが，野球やサッカーなどのメジャースポーツに関しては多くの研究がすでに行われている．そのどちらも球を投げる，もしくは蹴る際には周囲の状況に応じて投げ方や蹴り方を変化させる必要がある．投げ方や蹴り方の影響でボール周りの流れやボールにかかる圧力変化も大きく変わると考えられる．

日本ではあまりメジャーではないがアメリカンフットボールは屋外スポーツでありながらパスのコントロールが重要な競技である．4 回のプレーで 10 ヤード（約 10m）以上距離を稼がなければ攻守交代となるため，長距離のパスを成功させることが得点に繋がる．投手はプレーが始まり数秒で状況判断をしてパスをする必要がある．そのためパスのコントロールが非常に重要になる．[3]

本研究では，屋外スポーツであり，かつ楕円体のボールを遠方へパスすることでゴールラインへと近づけていく，アメリカンフットボールの投球軌道についてボール周りの空気の流体計算と剛体計算を連成させたシミュレーションを行って解析した．

2　格子生成

格子数を　61 × 126 × 102 とした球座標（r,θ,ϕ) をベースとし，それを原点からの距離方向に適正に伸縮させることによりボールまわりの計算格子を作成した．(Fig.1,Fig.2)

（r:原点からの距離，θ:経度，ϕ:緯度）

このときボールの表面上から外の空間に向かって格子幅が広くなるような格子を用いている．なお最小格子幅は（短軸を 1 としたとき）0.01 である．また経度は 3 度，緯度は 2 度間隔になっている．

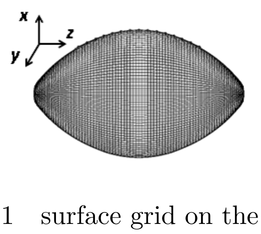

Fig 1　surface grid on the ball

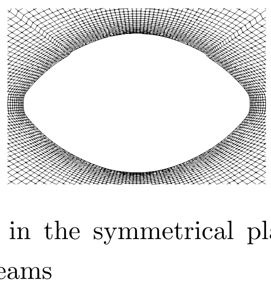

Fig 2　Grids in the symmetrical plane including ball seams

3　計算方法

無次元化した連続の式と Navier-Stokes 方程式を使用する．この際格子生成に用いた球座標を一般座標に変換し計算を行っている．

連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1}$$

Navier-Stokes 方程式

$$\begin{aligned}&\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\\&\quad=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\\&\quad=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)-g\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\\&\quad=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)\end{aligned} \tag{4}$$

ここで u,v,w はそれぞれ流速の x,y,z 方向成分を示している．
p:圧力，Re:レイノルズ数

ボールの軌道は y=0 の両面にあると仮定した．このときボールの重心は
ニュートンの運動方程式

$$m\frac{du}{dt}=D_x \tag{5}$$

$$m\frac{dw}{dt}=D_z-mg \tag{6}$$

に従う．
D_x, D_z は流体計算から求めた各方向にかかる抵抗
g は重力加速度，m は質量を表す．
本研究では，g=9.8 [m/s^2] m=400 [g] とした．

ボールの回転軸は z 方向を向いていると仮定した．このときボールの傾斜角 θ は
オイラーの運動方程式

$$I\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2}=N \tag{7}$$

に従う．I は慣性モーメント，N:流体計算から求めた y 軸まわりのトルクを表す．

4　解法

上記の (1)〜(4) 式をフラクショナルステップ法を用いて解いた．ただし，時間発展にオイラー陰解法を用いた．[1] なお，これらの式は前述したように球座標をベースに，一般座標を組み合わせて変換し計算を行った。Re=20000 でシミュレーションした．
また，(5)〜(7) 式を 2 次精度のルンゲ・クッタ法を用いて解いた．

5　結果および考察

まず，投球後のボールの空中での状態について着目した．
それぞれ投球直後　t=0(Fig.3)，t=5(Fig.4)，t=10(Fig.5) の状態を表す．投球方向は画像右向きに投げる．時間が経つに連れ時計周りに回転することが分かった．本来アメフトボールは長軸を軸として回転をかけて投球する．これによりジャイロ効果が見られ図のような回転が起こらなくなるが，本研究ではこの自転をかけていないため，このように回転する結果が得られた．

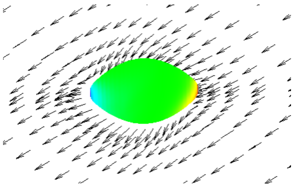

Fig 3　t=0

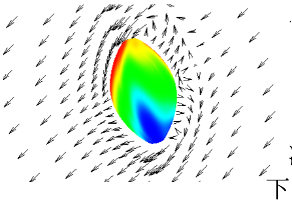

Fig 4　t=5

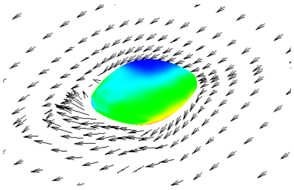

Fig 5　t=10

次にボールにかかる抵抗係数値の比較結果を以下のグラフで示す (Fig.6)．楕円型球体では球体のように抵抗係数値が安定しないことが分かった．

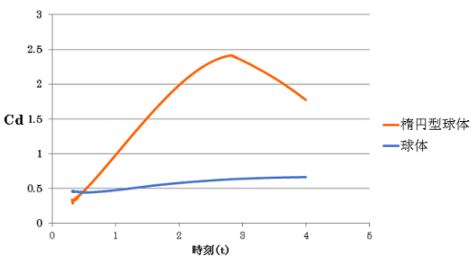

Fig 6　Drag

アメフトボールを投球時の初期条件は以下のようにし，ボールの投球軌道についての計算結果 (Fig.7) を示す．

$$\begin{cases} \text{高さ}：h = 2.0[m] \\ \text{初速度}：v = 30.0[m/s] \\ \text{迎角}：\theta = 30 \end{cases} \tag{8}$$

グラフ赤線が楕円球体の軌道，グラフ青線が同条件での球体の軌道である．これよりアメフトボールのような楕円球体では普通の球体より飛距離が落ちることが分かった．しかしながら，ボールの高さの最高点などに違い大きな差は見られず，それまでの軌道もほぼ同じことから，落下時にかかる抵抗に球体と楕円型球体での差が大きくなると考えられる．

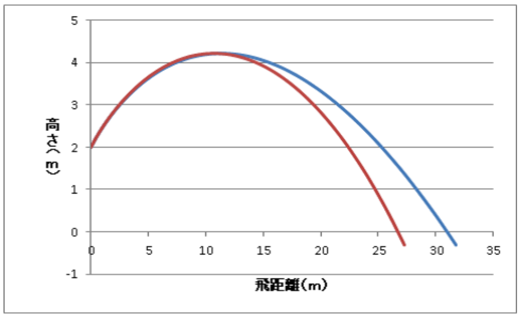

Fig 7　Pitching track

次に，迎角変化による投球軌道について調べた．以下のグラフ (Fig.8) では迎角 θ=0,10,20,30 を比較したものである．迎角が大きくなるにつれて飛距離、最高点も伸びることが分かった．また，迎角が 30 度のときは迎角 0 度の場合よりも約 3 倍ほど飛距離が伸びることが分かった．一方で迎角 0 度と 10 度では最高点は 0.1m 程の差であるのに対し、飛距離は 5m 程伸びることが分かった．

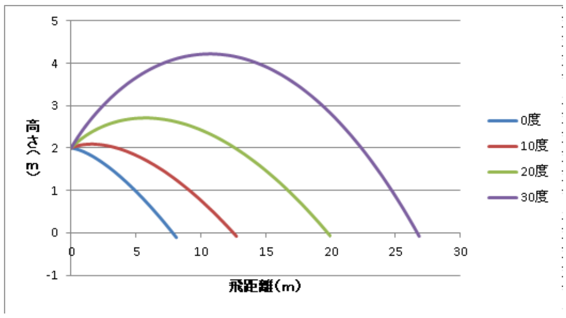

Fig 8　Pitching track

6　参考文献

参考文献

[1] 河村哲也　「数値シミュレーション入門」サイエンス社，2006.

[2] Schlichting Hermain　Boundary-Layer Theory springer，2003.

[3] 大橋誠 「よくわかるアメリカンフットボール」実業之日本社，2011.