

空気中の物体の飛翔過程の解析

日本大学大学院 学生会員 ○大野 卓実
日本大学 フェロー 野村 卓史

1. はじめに

強風災害には、強風そのものによる被害と、風で飛来した物体の衝突による被害がある。空気中を飛翔する物体に作用する空気力は、物体そのものの形状、落下速度、風速などの様々な要因により変動する。そのため、筆者らは物体の飛翔運動と、周辺流体の気流とを相関させる数値解析過程の開発を進めている^{1), 2)}。具体的には、空気中を物体が飛翔するときの物体周辺の流れを有限要素法に基づく数値流体解析で解き、物体の運動を Newmark β 法により解く。構造流体相関解析の方法には、物体の移動とともに流体解析メッシュを移動、変形させる ALE 法 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian method) を適用する³⁾。

本研究は飛翔物体を剛体の立方体とし、空気中での飛翔過程の解析を行ったので報告する。

2. 解析方法

飛翔物体の並進運動は次式で表される。

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} \quad (1)$$

ここで、 m は物体の質量、 $\mathbf{a}$ は物体の加速度、 $\mathbf{F}$ は物体に作用する空気力と重力のベクトルである。

物体の回転運動の主軸を ξ, η, ζ とすると、物体の回転運動は次式で表される。

$$I_{\xi} \dot{\omega}_{\xi} = T_{\xi} + (I_{\eta} - I_{\zeta}) \omega_{\eta} \omega_{\zeta} \quad (2a)$$

$$I_{\eta} \dot{\omega}_{\eta} = T_{\eta} + (I_{\zeta} - I_{\xi}) \omega_{\zeta} \omega_{\xi} \quad (2b)$$

$$I_{\zeta} \dot{\omega}_{\zeta} = T_{\zeta} + (I_{\xi} - I_{\eta}) \omega_{\xi} \omega_{\eta} \quad (2c)$$

ここで、 $\dot{\omega}$ は物体の角加速度、 ω は物体の角速度、 I は物体主軸まわりの慣性モーメント、 T は物体に作用する空気力による各主軸まわりのモーメントである。

流体の運動方程式は ALE 記述をもとに与えられる。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}) \times \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は流体粒子の速度ベクトル、 $\hat{\mathbf{u}}$ はメッシュ

速度のベクトル、 p は流体の圧力、 ρ は流体の密度、 μ は粘性係数である。運動方程式(3)を有限要素法で離散化する。相関解析の方法は文献¹⁾に示した。

3. 解析条件

解析対象物体は一辺が 2.0cm、質量 0.1026kg の立方体の剛体である。立方体まわりの流体解析メッシュを図 1 に示す。図 1 の解析メッシュが、立方体の変位、回転とともに剛体的に変位、回転する。境界条件は立方体の表面を no slip 条件、球の表面をトラクション・フリーとした。時間積分間隔は 0.005s とした。

なお、重力加速度は 9.8cm/s²とした。実際の値 980cm/s²より小さいのは、解析条件を緩和し、少ない解析メッシュでも安定して解析できるようにしたためである。

4. 解析結果

4.1 回転の向きが異なる場合の軌道の比較

図 2 に示すように、立方体の y 方向に初速度 5cm/s のみを与えた場合と、初速度に加えて x 軸まわりの初期角速度 5rad/s を与えた場合 (バックスピン)、その逆回りに 5rad/s を与えた場合 (トップスピン) の比較を行った。

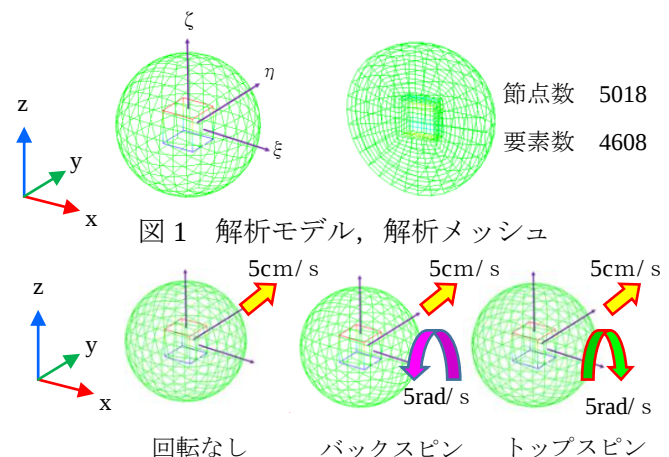


図 2 4.1 の解析条件

キーワード 構造流体連成解析, ALE 法, 立方体の飛翔, 回転運動

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学理工学部土木工学科 TEL 03-3259-0411

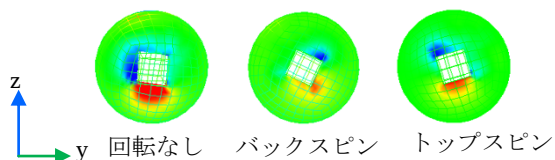


図3 x軸から見た圧力の比較(t=2.5s)

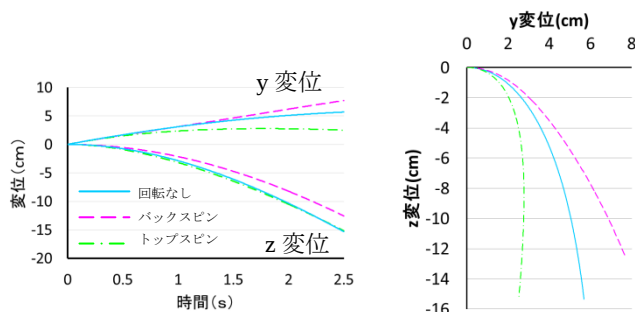


図4 4.1の変位の比較

圧力の比較(図3)では、回転なしの場合、立方体はy方向への圧力を受けにくい姿勢に変化し重力によってかかる圧力が中心になっていったのに対し、バックスピン、トップスピンは、回転しながら姿勢を変え、立方体の前方にも圧力を受けつつ運動していた。この時、バックスピンの場合は負圧が物体上部の前方より作用していたが、トップスピンの場合は後方より作用していた。

変位の時刻歴の比較(図4)では、バックスピンを与えた場合のy方向の変位が最も大きく、z方向の変位が最も小さくなった。これは、回転運動により重力に逆らう力が生じたためと考えられる。一方でトップスピンの物体はz方向の変位は回転なしの物体とほぼ同じであったが、y方向の変位は最も小さかった。どの場合もx方向にはほとんど変位しなかった。

4.2 回転軸が異なる場合の変位の比較

図5に示すように、立方体のy方向に初速度のみを与えた場合と、初速度に加えy軸まわりに角速度5rad/sを与えた場合、z軸まわりに角速度5rad/sを与えた場合の比較を行った。

0.055s時点での圧力分布の比較(図6)を行った。進行方向への圧力はz軸を中心に回転する場合が最大となっていることが確認できる。

変位の比較(図7)では、回転のない場合がz方向に最も大きく変位していた。このことから回転運動によって重力に抵抗する力が生じたと考えられる。

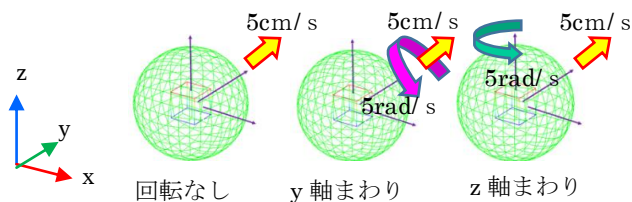


図5 4.2の解析条件

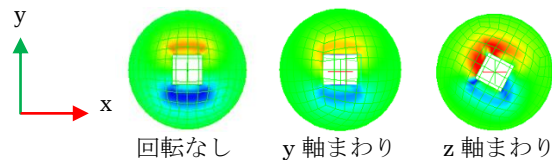


図6 z軸から見た圧力の比較(t=0.055s)

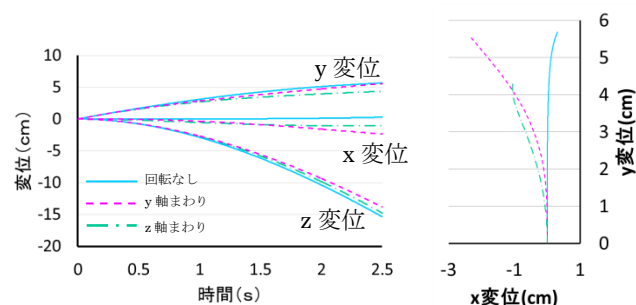


図7 4.2の変位の比較

y方向の変位は圧力が最大だったz軸まわりの回転をする場合が最小となった。一方で、y軸まわりに回転をする場合と、回転なしの場合のy方向の変位は似た時間変化となった。このことから、y軸中心の回転をしてもy方向への運動に与える影響は少ないと考えられる。

y,zの各軸に回転を与えた場合は、回転がない場合と比べx軸方向に大きく変位していることが確認できた。いずれも回転面がx軸に直交しているためと考えられる。

5. まとめ

トップスピン、バックスピン、回転なしの立方体運動の比較では、それらの回転がボールにかかった場合と似た軌道が確認できた。y軸、z軸を中心に回転する立方体にはx軸方向へ水平変位が生じていた。

参考文献

- 1) 野村卓史, 本橋拓磨: 空気中を落下する球の数値流体解析, 第23回風工学会シンポジウム論文集, pp. 481-486, (2014).
- 2) 野村卓史, 渡邊光太郎, 酒井純生: 空気中を落下した球による衝撃力に関する数値流体解析, 第24回風工学シンポジウム論文集, pp. 271-276, (2016).
- 3) Nomura, T. and Hughes, T. J. R., An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.95, pp.115-138, (1992)