

自由落下する球まわりの気流の CFD 解析

CFD Analysis on Flows around a Free-Falling Sphere

発表者： 田中 慎太郎

指導教員： 坪井 一洋

1. はじめに

物体が加減速運動をしているときに、非定常な流体力が働いていることは、古くから知られている。例えば航空機の事故が最も多い時間帯は、機体に加減速運動をする離着陸の時間帯である[1]。

一般に流体力を測定するためには、風洞実験が主に用いられている。しかし、固定された物体に一樣な風を送る風洞実験では、加減速状態を十分に再現することは困難で、そのため非定常流体力については不明な点が多い。

それを解消する手段として、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 以下 CFD と略記する) を用いる。先行研究では加減速運動をする簡単な例として、2次元円柱の自由落下の CFD 解析が行われた[2]。しかし、2次元物体を対象としたシミュレーションでは、実際の落下現象を再現する上で不十分である。

そこで本研究では球の自由落下を対象とした、3次元の解析を行い、球まわりの気流をシミュレーションにより再現するとともに、加速運動する球に作用する非定常流体力解明への知見を得る。

2. 基礎方程式

気流の支配方程式である非圧縮性ナビエ・ストークス方程式の無次元表示は(1)式と(2)式である。

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_B) \cdot \operatorname{grad}\} \mathbf{v} = -\operatorname{grad} P + \frac{1}{\operatorname{Re}} \Delta \mathbf{v} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{v} と P は気流速度と圧力、 \mathbf{v}_B は球の落下速度であり、それぞれ球の直径 d と基準速度 U_0 で無次元化している。(2)式中の Re はレイノルズ数という無次元パラメータであり、空気の動粘性係数 ν を用いて次式のように表せる。

$$\operatorname{Re} = \frac{U_0 d}{\nu} \quad (3)$$

さらに(2)式において、左辺第2項の $\mathbf{v} - \mathbf{v}_B$ は移動境界の効果を表している。物理空間では球は静止した空気中を動いているため、球の落下に伴い、球と空気の境界も常に移動する。ここでは、その移動する境界を計算領域では静止状態となるような座標変換を行う。物理座標系から計算座標系へ変換することで、 $\mathbf{v} - \mathbf{v}_B$ は計算領域の対流速度が、物理座標系に関する相対的な速度に置き換えられることを示している[3]。

3. シミュレーションとその結果

球の落下速度を2種類の異なる方法で与える。1つは抵抗が速度に影響を与えないという条件で、これを強制条件と呼ぶ。他は抵抗係数と落下速度の相互作用を考慮する条件で、これを連成条件と呼ぶ。

強制条件の落下速度は無次元表示として(4)式で表せる。

$$v_z = \tanh\left(\frac{\pi \rho d^3}{8m} C_z t\right) \quad (4)$$

ここで v_z は鉛直方向を z 方向とした落下速度の z 成分、 m は球の質量、 ρ は空気密度、 d は球の直径、 C_z は z 軸方向の抵抗係数でこの場合は一定である。

なお、強制条件においては抵抗の変化が速度に影響を及ぼさないため、水平方向の落下速度 (v_x , v_y とする) は、ともに $v_x = v_y = 0$ である。

一方、連成条件での球の運動方程式の無次元表示は(5)式となる。連成条件において抵抗係数は時間の関数であるため、運動方程式を簡単に解くことはできない。そこでオイラー法により落下速度を数値的に求める。 F_x は x 方向の流体力を示し、 F_z は z 方向の抵抗である。なお、運動方程式の y 成分は、 x 成分と同様の式なので省略する。

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = \frac{\rho d^3}{m} F_x \\ \frac{dv_z}{dt} = \frac{\rho d^3}{m} F_z - \frac{dg}{U_0^2} \end{cases} \quad (5)$$

(4)式と(5)式を用いて落下速度を計算した結果が図1である。 $\operatorname{Re} = 4 \times 10^5$ とした。図1から、連成条件の終端速度は強制条件より遅く、終端速度に達するまでの時間も長いことがわかる。連成条件での水平方向の速度変化を図2に示す。図2より連成条件において球は水平方向にも速度変化が生じている。この結果は、球が左右に揺れながら落ちていることを表している。

次に抵抗係数の変化について考える。図3は強制条件、連成条件それぞれの鉛直方向の抵抗係数の時間変化を示したもので、図4と図5は連成条件の $t = 42$ と $t = 95$ での球まわりの等圧面である。落下初期の加速域において抵抗係数は大きく増減を繰り返し、 $t = 20 \sim 40$ で変動は減衰し始める。図4から減衰する原因は球後方に発生した渦輪によるものだと考えられる。減衰した後の抵抗係数の変動は $t = 80 \sim 100$ でピークをもつ。この原因は図5から球後方

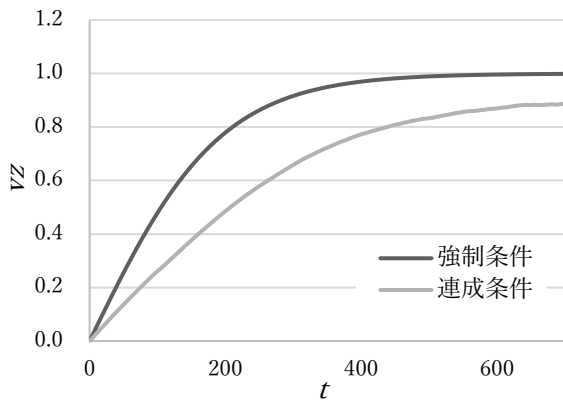


図 1: 強制条件と連成条件の落下速度

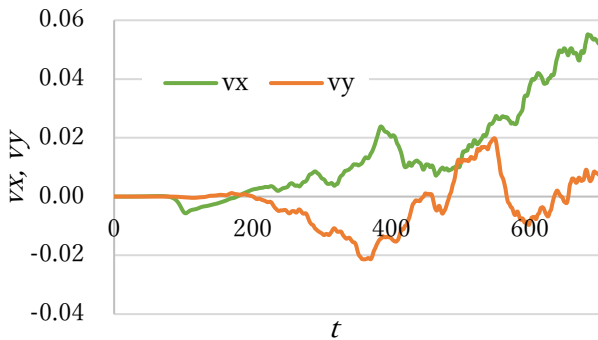


図 2: 連成条件における水平方向の速度変化

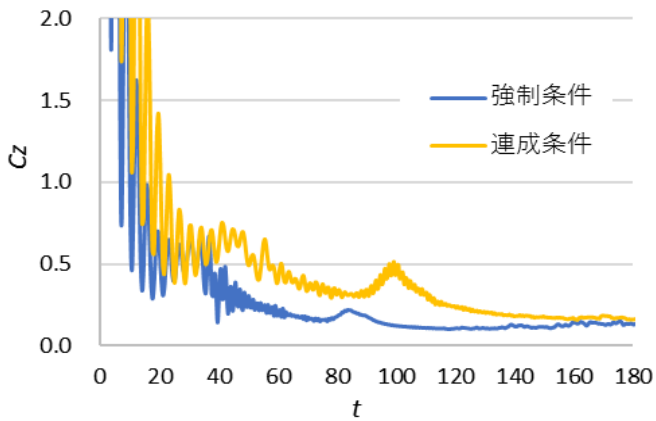


図 3: 強制条件と連成条件の抵抗係数の比較

の渦輪の剥離によるものだと考えられる。その後、抵抗係数はほぼ一定値に収束し、その平均値は約 0.15 であった。両者の違いについて、強制条件よりも連成条件の方が変動は大きく、減衰までの時間も長い。また、渦輪の剥離による抵抗係数のピーク値も、連成条件の方が大きくなった。

4. まとめと今後の課題

加速する物体に作用する非定常流体力を解明するため、球の自由落下を対象とした CFD シミュレーションを行った。落下速度は抵抗係数に影響しないという強制条件と、実際の落下現象に対応した、抵抗係数と落下速度の相互作用を考える連成条件という 2 種類の条件で計算を行った。

連成条件は強制条件よりも終端速度に達するまでの時間が遅く、強制条件では見られなかった水平方向の速度

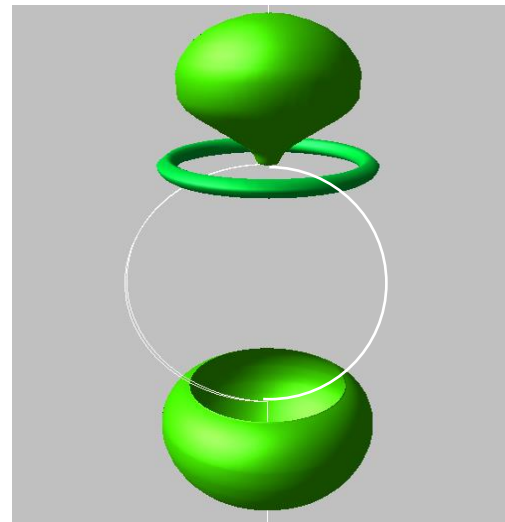


図 4: 球まわりの等圧面図 ($t = 42$)

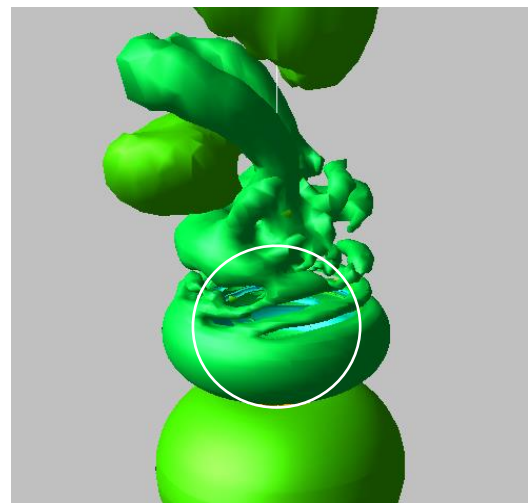


図 5: 球まわりの等圧面図 ($t = 95$)

変化が確認された。さらに、落下初期の加速段階において抵抗係数は大きく増減を繰り返した。球後方に渦輪が生じる段階になると抵抗係数の変動は減衰するが、渦輪の剥離によって一時的にピークをもつことも確認された。また、強制条件よりも連成条件の方が変動の幅が大きく、減衰までの時間も長いことが判明した。

今後の課題としては、現在の解析方法では球後方の計算格子が粗いため、空間解像度が悪く数値粘性の影響が大きい。そのため、球後流域の格子を増やした、より詳細なシミュレーションを行う必要がある。

参考文献

- [1] A Statistical Analysis of Commercial Aviation Accidents 1958-2017, Airbus S.A.S. (2018)
- [2] 荒木田 祐希, 加速運動する 2 次元円柱まわりの気流の CFD 解析, 茨城大学大学院理工学研究科知能システム工学専攻修士論文 (2018)
- [3] K. Tsuboi, T. Tamura, K. Kuwahara, 27th Aerospace Science Meeting (1989) AIAA-89-0294