

自由落下する球と気流の相互作用に関する CFD 解析

CFD Analysis on the Interaction between a Free-Falling Sphere and Flows around it.

発表者： 18T1125T 溝井 翔太

指導教員： 坪井 一洋

1. はじめに

一般に、飛翔する物体が等速運動をする場合、風洞実験を行うことで物体に働く流体力を詳細に評価できる。しかし、物体が加速運動する場合は飛翔条件が風洞実験とは異なり、物体に非定常な流体力が発生する可能性がある[1]。

そこで、最も簡単な加速運動である自由落下を対象とした CFD 解析を行うことで、加速運動する球に働く非定常流体力の解明が試みられた[2]。しかし、この解析では球の並進運動のみを想定しており回転運動は考慮されていない。

そこで本研究では球の回転運動も考慮した解析を行うことで加速運動する球に気流が及ぼす影響についてより詳細な知見を得ることを目的とする。

2. 基礎方程式

流体の運動は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式に従う。単位系や流れのスケールによらずに現象を解析するために、基礎方程式の無次元化を行う。各物理量は自由落下を特徴付ける重力加速度 $g (= 9.8\text{m/s}^2)$ と球の直径 d で無次元化される。

したがって、慣性力と粘性力の比で定義された無次元量であるレイノルズ数 Re は式(1)で与えられる。

$$Re = \frac{\rho d \sqrt{gd}}{\mu} \quad (1)$$

ただし、 μ と ρ は流体の粘性係数と密度である。

3. シミュレーション条件と結果

球の落下方向を z 軸の負の方向として球の運動に関して3つの異なる条件を考える。ひとつは自由落下する球の抵抗係数を周りの流れ場によらず一定とする強制条件 (one-way condition) である。この条件では球の落下速度 v_z は式(2)となる。

$$v_z = \sqrt{\frac{8m}{\pi\rho d^3 C_D} \tanh\left(\sqrt{\frac{\pi\rho d^3}{8m} C_D t}\right)} \quad (2)$$

ここで m は球の質量、 C_D は抵抗係数である。

これに対して、抵抗係数が時間的に変化する連成条件 (two-way coupled condition) では、重心の並進運動のみを想定する連成条件#1 と回転運動も考慮する連成条件#2 の2つとする。連成条件ではともに球の重心の運動は式(3)から求まる。

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\rho d^3}{m} F_x, \quad \frac{dv_y}{dt} = \frac{\rho d^3}{m} F_y, \quad \frac{dv_z}{dt} = \frac{\rho d^3}{m} F_z - 1 \quad (3)$$

ただし v_x, v_y および v_z と F_x, F_y および F_z は、 x, y および z 軸方向の球の速度と球に働く力をそれぞれ表している。また、連成条件#2 では球の重心まわりの回転の角速度を式(4)から求める。

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{10\rho d^3}{m} N \quad (4)$$

ここで ω は角速度、 N は流体トルクをそれぞれ表している。

落下する球の抵抗係数の時間変化を図 1 に示す。ここでは $m = 0.21 \text{ kg}$, $d = 0.21 \text{ m}$, $C_D = 0.25$ である。 $t = 7$ 付近から条件による抵抗係数の変化に違いが生じており、球の運動が異なることで流れ場に差が出たと考えられる。

図 2 は z 軸まわりの角速度 ω_z と流体トルク N_z の関係を表している。回転の初期段階では角速度にほぼ比例する流体トルクが働くが、角速度の増加に伴って流体トルクの変化は小さくなる。

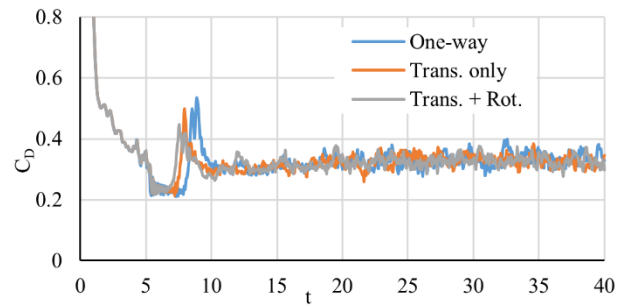


Fig. 1 Computed results of the drag coefficient C_D

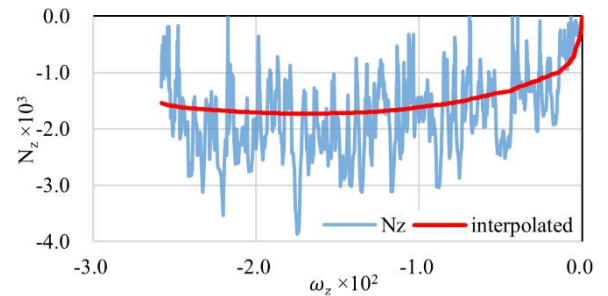


Fig. 2 Computed results of angular velocity ω_z and fluid torque N_z

4. まとめ

加速運動をする物体に働く非定常な流体力を解明するために、自由落下する球に対して3つの異なる加速条件で CFD 解析を行った。シミュレーションによって、運動条件の違いが流体力の非定常性に影響を及ぼすことを確認した。また、角速度と流体トルクの関連についての知見が得られた。

参考文献

- [1] T Miyazaki, et al., Lift crisis of a spinning table tennis ball, Eur. J. Phys., Vol. 38, (2017).
- [2] 田中慎太郎, 自由落下する球まわりの気流の CFD 解析, 茨城大学工学部知能システム工学科学士論文(2018).