

臨界レイノルズ数における 回転球周りの流れ

可視化情報学会/第20回ビジュアリゼーションカンファレンス 2014年11月7日

京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻 武藤昌也





はく離点位置: 下流へ移動

(Takami et al., 2009)

■ 通常のマグヌス揚力 ■ 負のマグヌス揚力 流速: 高 境界層:層流 圧力:低 LIFT 流速: 低 圧力: 高 U LIF Т <u>従来の機構の説明</u> 境界層: Taneda (1957) 層流状態 => 乱流遷移

背景 2: 主要な無次元数



 $Re_p = \frac{D_p U}{v}$ *D_p*: 球径 [m] レイノルズ数 U: 相対速度 [m/s] v: 動粘性係数 [m²/s] $\Gamma = \frac{\omega r}{U}$ *ω*:角速度 [rad/s] 無次元回転数 r:球の半径[m] U: 一様流速度 [m/s] $C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$ *F_D*: 流体抵抗力 [N] 抗力係数 *ρ*: 流体の密度 [kg/m³] A: 投影断面積[m²] $C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$ 揚力係数 *F_I*: 揚力 [N]

背景 3: レイノルズ数でまとめた球に関する従来研究





背景 4: 非回転球を対象とした過去の研究







背景 5: 非回転球を対象とした過去の研究



■ *Re_p*=10⁴~10⁶における流れの可視化





(b) FIGURE 4. Photographs of smoke in the wake. (a) $R = 2.3 \times 10^4$. (b) $R = 5.8 \times 10^5$.

$$Re_p = 5.8 \times 10^5$$

Taneda, 1978



 $Re_p = 2.3 \times 10^4$

背景 6: 非回転球を対象とした過去の研究



■ *Re_p*=10⁴ ~ 10⁶ における数値解析



Constantinescu & Squires, 2004



負のマグヌスカが計測された物理条件 (Re_p, Γ)



▶ 近年でも負のマグヌス揚力に関する従来研究はほとんどない

・ 高Re_p数条件での実験計測,数値解析が容易でない



非構造有限体積法に基づくLarge-eddy simulation を用いて、臨界レイノルズ数における静止球周り、 および回転球周りの流れ場を解析し、

▶ 負のマグヌスカの再現 ▶ 周囲の流れ場との関係の考察

を行った

解析領域と解析手法



• 解析領域





(Blockage ratio: <1%)

- 支配方程式
 - ▶ 連続の式とナビエ=ストークスの式
- 解析手法

▶ 非構造格子による有限体積法 & LES

• 流れ場の条件

▶ レイノルズ数: Re_p = 1.0×10⁴, 2.0×10⁵, 1.14×10⁶

10/19

使用した計算機資源とソフトウェア

- 大型計算機:
 - ➤ T2K HA8000 @ 東京大学
 - cpu: AMD Quad Core Opteron (64並列計算)
 - memory: 8GB*4 (/1 node)
 - ≻ SR11000 @ 東京大学
 - cpu: IBM POWER5+ (64, 256並列計算)
 - memory: 128GB (/1 node)





- ソフトウェア: FrontFlow/red 公開版 ver. 3.0 beta
 Frontier Simulation Software for Industrial Science FSIS
 - IT-program project by MEXT (Educational Ministry), Japan
 - IIS, University of Tokyo (2002~2005)
 - Revolutionary Simulation Software RSS21
 - Next IT-Program project by MEXT
 - IIS, University of Tokyo (2005~2007)





数値解析結果 1: 亜臨界条件下での球周りの流れ場 Re_p=1.0×10⁴





回転軸に垂直な方向の 球表面平均圧力分布 (非回転と *Г*=0.2 のときの比較)

Averaged, $\Gamma = 0.2$

Ζ.





数値解析結果 3: 臨界条件下での球周りの流れ場 Re_p=2.0×10⁵





数値解析結果 4: 臨界条件下での球周りの流れ場 Re_p=2.0×10⁵





回転軸に垂直な方向の 球表面平均圧力分布 (非回転と *Г*=0.2 のときの比較)

数値解析結果 5: 臨界条件下での球周りの流れ場 Re_p=2.0×10⁵







➤はく離点が下流へ移る





可視化結果 1: 球表面のはく離位置 2 (瞬時, *Re_p*=2.0×10⁵)





Γ=0 (静止)



Γ=0.2 (回転)

Γ=1.0 (回転)

■ 乱流遷移に伴い一部不連続に分布する
 ■ 無次元回転数 *Г* = 0.2 のとき,

Forward moving side では上流へ移動し, Backward moving side では下流へ移動する 無次元回転数 Γ = 1.0 のとき, 回転方向へ移動 する

可視化結果 2: 速度勾配テンソルの第二不変量の等値面 2 (Γ= 0.2)





 $Re_p = 1.0 \times 10^4$ (亜臨界)

 $Re_p = 2.0 \times 10^5$ (臨界) Re_p=1.14×10⁶ (超臨界)

- 無次元回転数 「= 0.2 のとき, Backward moving side (球の下側) で乱流遷移が促進され, はく離の位置が下流へ移動する
- レイノルズ数の増大とともに、球近傍の空間的に大きな渦構造が抑制される





臨界レイノルズ数およびその前後で回転球周りの流れ場 解析を試みた

・臨界レイノルズ数における静止球の解析から、球表面の境界層の層流はく離、再付着が数値的によく再現された。また、その前後のレイノルズ数では抗力の変化をよく捉えた。

・ 負のマグヌス揚力についても、 Γ=0.2 のときに発生することが再現された.