

剛体回転流体中を移動する球のまわりの流れに関する研究

A study on the flow created by a sphere moving along the axis of a rotating container

○橋村和也, 東京電機大 (院), 東京都千代田区神田錦町 2-2, 09kmm25@ms.dendai.ac.jp

児山秀晴, 東京電機大, 東京都千代田区神田錦町 2-2, hskoyama@cck.dendai.ac.jp

Kazuya Hashimura, Tokyo Denki University, 2-2 Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

Hide S. Koyama, Tokyo Denki University, 2-2 Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

When an object moves in the fluid which carries out rigid-body rotation, being accompanied by the Taylor-Proudman column where it moves at the almost same speed as an object is known. In the present study, the flow around a sphere moving along the axis of a rotating container was measured by PIV with a high-speed, high-resolution digital camera. From the experimental results, it is shown clearly that a conical domain ahead of the sphere and a cylindrical domain back of the sphere stagnate relatively, and the drag coefficient of the sphere increases greatly as compared with the case where it moves in the fluid at rest

1. はじめに

本研究では、PIV (Particle Image Velocimetry) による回転系の流れ場の測定方法を確立し、準剛体回転する流体中を移動する球まわりの流れ場の測定を試み、回転の影響を明らかにする。

2. 実験装置

本研究に用いた実験装置は、主軸駆動装置、回転制御装置、回転円筒容器、球移動装置、恒温水槽およびそれらを保持する回転テーブル・フレームから構成されている。また、PIV は、高速度・高解像度デジタル・カメラ、レーザーおよびそれらを制御する装置から構成されている。

3. 実験結果および考察

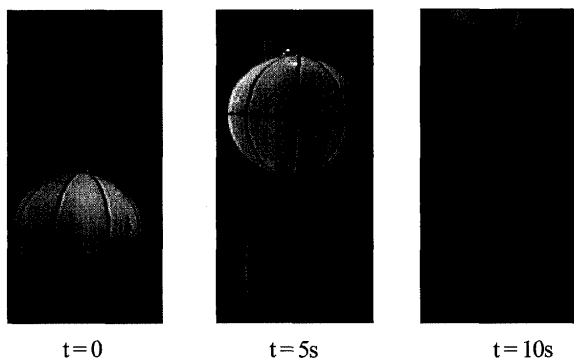


Fig. 1 Flow visualization around a sphere moving in the axial direction

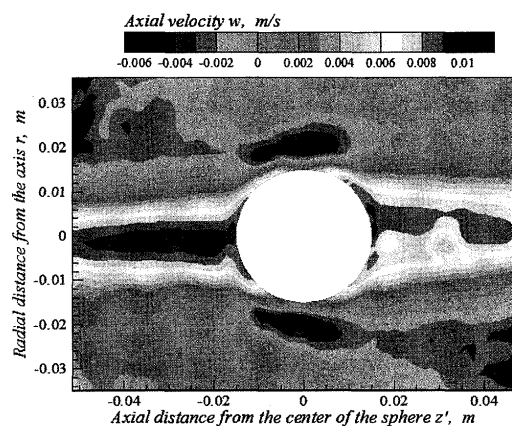


Fig. 2 Axial velocity contour map in the meridional plane

作動流体を満たした円筒容器を回転させ、作動流体が剛体回転に達した後、鉛直上方に移動する球のまわりの流動現象を染料注入法により可視化し、回転系に搭載したカメラで円筒容器側面から撮影・収録した画像を Fig. 1 に示す。

Maxworthy⁽¹⁾による実験結果と同様に、円錐形および円柱形の Taylor-Proudman 柱が、それぞれ球前方および球後方に観察される。また、球は円筒容器の回転角速度より遅く回転することも観察される。特に、球後部近傍では、スパイラル状の遅い放出流れが見られ、球壁面近傍に回転軸方向の極めて遅い流れがあることがわかる。

PIV 解析より求めた円筒容器の子午面内の軸方向速度成分の等値分布を Fig. 2 に示す。ただし、Fig. 2 においては、球が左から右へ移動している。球前部の壁面近傍の一部を除いて、球前方の Taylor-Proudman 柱内の流体は球の移動速度より少し遅い。また、球後方の円筒形の Taylor-Proudman 柱内の中心部の流体は球の移動速度とほぼ同じ速度で移動している。

Taylor-Proudman の定理により、二次元的拘束現象として、球の前方および後方に、それぞれほぼ定んだ領域が現れる。同時に、球の前半球および後半球の壁面近傍に、それぞれ半径方向外側および内側に向う弱い流れが生じる。それらの流れにはコリオリ力が作用し、前半球および後半球で、それぞれ剛体回転方向と逆方向および同方向に偏向される。コリオリ力は均分円に近いほど減少し、均分円で零となる。圧力勾配、コリオリ力および粘性力が釣り合った状態で流れが決まり、Ekman 層と呼ばれる薄い境界層が球の壁面上に生じる。Ekman 層の壁面せん断応力による摩擦力の周方向成分を球全面にわたって積分することにより、球に作用する回転力を求めることができる。球の後半球の Ekman 層からの球後方への流出を考えれば、球が剛体回転方向と逆方向に回転することが理解できる。

4. まとめ

本研究では、染料注入法による球まわりの流れの可視化および PIV 解析による流速測定により、球壁面近傍に Ekman 層が形成し、Taylor-Proudman 柱内に旋回流が生じることを定量的に明らかにした。また、球の前方および後方の流れの相違により、球に働く抗力が増大することの説明を試みた。

参考文献

- (1) Maxworthy, T., "The flow created by a sphere moving along the axis of a rotating, slightly-viscous fluid," J. Fluid Mech., 40-3 (1970), pp. 453-479.