

新型渦流量計における渦放出の数値シミュレーション

濱畑 貴之¹⁾ ・ 菊地 正憲²⁾ ・ 平野 公孝³⁾

Numerical Simulation on Vortex Shedding in a New Vortex Flowmeter

Takayuki HAMAHATA, Masanori KIKUCHI, Kimitaka HIRANO

Abstract

In order to measure velocities in low flow-rate flows, a new small vortex flowmeter has been developed. A shape of a vortex shedding body is not two-dimensional. Characteristics of the flowmeter are studied with the numerical simulation technique. Under conditions of three-dimensional, unsteady, incompressible and laminar flows, velocity fields are analyzed by the software (FLUENT) of the finite volume method (FVM). Reynolds number and Strouhal number are defined with characteristic velocity and length as the velocity near the vortex shedding body and the width of the body. The Strouhal numbers are constant of the value 0.15 in the $Re=959$ to $Re=11,986$ range. For flow visualization experiment, a model of the flowmeter which size is ten times as large as that of the new flow meter is made. The Strouhal number from the flow visualization coincides completely with those from the numerical simulation.

Key Words:

Vortex flowmeter, Vortex shedding, Karman Vortex, Reynolds number, Strouhal number, CFD

1. はじめに

工業的に重要な流量計の1つに渦流速計がある。この渦流量計は流れの中に円柱や三角柱などの柱状の渦発生体を置き、その後流に形成されるカルマン渦の放出周波数を用いて、流速を測定するものであり、管内流の流速測定に広く用いられている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

近年、機器類の小型化や多様化に応えるため、細い管路に挿入される装置、更には、低流量を測定できる技術が必要となっている。このために、旭有機材工業株式会社(宮

崎県延岡市)では、新しい渦発生体の開発(特許出願中)が行われ、従来の渦流量計では計測できなかった低流量域での流量測定を可能にしている。

本研究では、このような背景のもとで層流管路内にこの新型渦流量計を配置したときの流れ場について、数値解析を行うことにより渦発生体近傍の流れと渦発生状況について明らかにすることを目的とする。

2. 主な記号

以下に本実験で用いられた主な記号を示す。

A : 渦発生体近傍の流路面積 [m^2]

U : 渦発生体近傍の代表速度 [m/s]

1) 機械システム工学専攻大学院生

2) 機械システム工学科教授

3) 宮崎大学名誉教授

- d : 渦発生体の代表長さ [m]
- Δt : 時間刻み [s]
- ν : 動粘性係数 [m^2/s]
- f : カルマン渦の放出周波数 [Hz]
- Re : レイノルズ数 ($Re = Ud/\nu$)
- St : ストローハル数 ($St = fd/U$)

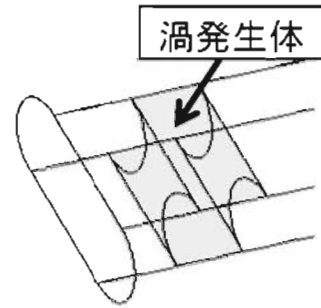


図2 渦発生体の拡大図

3. 新型渦発生体について

本研究で対象とした新型渦発生体を、図1に示す。また、渦発生体の部分の拡大図を図2に示す。更に、その流路形状を図3に示す。

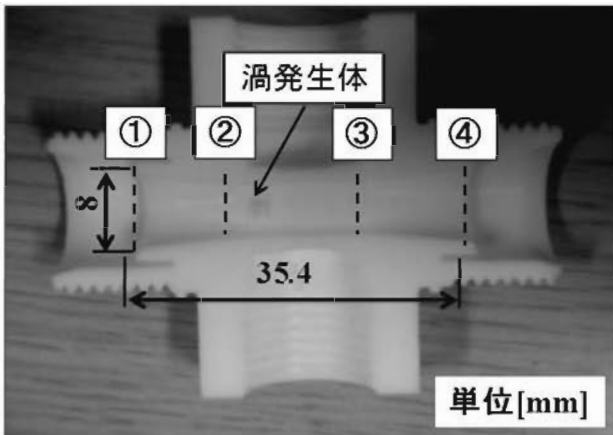
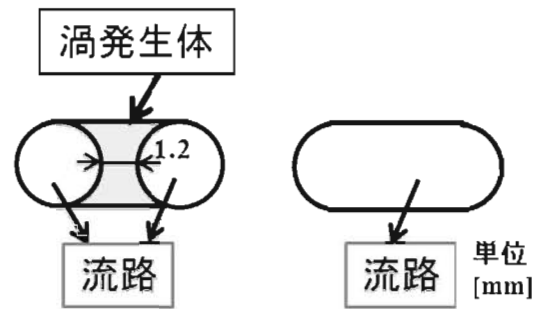


図1 新型渦流量計

図1の断面①と断面④は、直径 $D=8mm$ の円形であり、一方、断面②と③は、図3(b)に示すように二つの円形を直線で結ぶ形状である。渦発生体は断面②と断面③の間に置かれ、その断面は、図3(a)となっている。

ここで、図3(a)の二つの円(直径 2.3mm)で構成される流



(a) 渦発生体の断面 (b) 断面②と断面③

図3 流路の形状

路部分の面積を $A=8.31mm^2$ とし、ここを通過する平均流速を代表速度 U とする。また、 d を渦発生体の最小幅 $d=1.2mm$ とする。

この渦発生体は、従来の渦流量計で用いられてきた円柱や三角柱のような二次元性の強い形状ではなく、渦発生体の幅は変化し、三次元性のある構造となっている。従って、三次元構造物から本当に流れ場への渦放出が可能となるのかどうか不明であり、この確認が本研究の課題となっている。



図4 メッシュ分割モデル

4. 解析手法

本研究の数値解析では、FLUENT(ANSYS Japan)を用いた。本研究での解析モデルを作成する際には、FLUENT とセットになっているプリプロセッシングソフトウェアである GAMBIT と TGrid を用いた。

4.1 流れ場空間のメッシュ分割

図4には、解析で用いる流れ場のメッシュ分割モデルを示す。全長 35.4mm の範囲を計算対象とした。このとき、メッシュ数は約 60 万である。

4.2 渦発生体表面のメッシュ分割

本研究での計算領域をメッシュ分割する際に、渦発生体の先端部分がカスプ状になってしまう。これにより、分割されたメッシュ形状のひずみが大きくなり、安定的に計算を進めることが困難となった。この原因は、渦放出体や流量計の管路壁の内部は計算対象外であり、このため、渦放出体の先端部は流れに接する面のみを境界とすることにより生ずる見かけのカスプとなっているためである。(図5(a)を参照)

このため、本研究では渦発生体のモデルを流路の円と渦発生体の接点から 0.1mm の位置において図5(b)のように直線を引いたモデルをつくりカスプを回避し、メッシュを張ることにした。

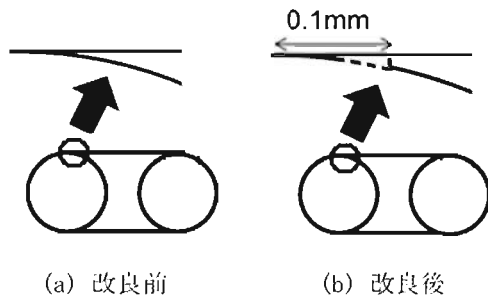


図5 モデルの改良

4.3 解析条件

解析条件を表1に示す。本研究では、図4の管路入口の流入境界条件として、管断面に一樣な入口流速 U_i を与えて非定常計算を行った。このとき、時間刻み Δt を変化させて、計算精度を確認した。

4.4 レイノルズ数とストローハル数の定義

結果を整理するために、無次元量としてレイノル

表1 解析条件

入口流速 U_i	0.033m/s ~ 1.66m/s
管内流量	100ml/min ~ 50l/min
代表速度 U	0.200m/s ~ 10.0m/s
入口レイノルズ数 Re_i	57 ~ 1,982
出口境界条件 (圧力)	0Pa (基準圧)
壁面	滑りなし条件
時間刻み Δt	1×10^{-4} s, 5×10^{-5} s, 2.5×10^{-5} s

ズ数 Re とストローハル数 St を用いた。それぞれの定義は以下である。

$$Re = \frac{Ud}{\nu}, \quad St = \frac{fd}{U}$$

また、管路入口の平均流速 U_i と管直径 D で定義される入口レイノルズ数 $Re_i = U_i D / \nu$ も表1に示されている。

5. 解析結果及び考察

5.1 速度分布

図6に、流路の上下の対称面内における速度コンター図を示す。即ち、時間刻みを $\Delta t = 2.5 \times 10^{-5}$ s と設定した場合に、図6(a)は速度 $U_i = 0.066$ m/s ($Re = 479$)、図6(b)は速度 $U_i = 0.133$ m/s ($Re = 956$)、図6(c)は速度 $U_i = 0.199$ m/s ($Re = 1,438$) の、それぞれに対応する速度コンター図である。

図6(a)では、渦発生体から流れへの渦放出はなく、一方、図6(b)と図6(c)では渦発生体から交互に流れに放出されているカルマン渦が確認できる。この結果より、 $U_i = 0.133$ m/s ($Re = 959$) 以上でカルマン渦が発生していると考えられる。

5.2 カルマン渦の放出周波数

カルマン渦の放出周波数を、速度変動のパワースペクトルから求めるため、速度変動に関する測定点を渦発生体の後方に5ヶ所設定した。

図7に、一つの測定点における流れはじめ以降の速度の時間的变化を示す。カルマン渦が発生していない場合は、速度の変化がなく、図7(a)のように速度は一定の値をとっている。カルマン渦が発生している場合は、図7(b)のように過渡的な期間以降では、

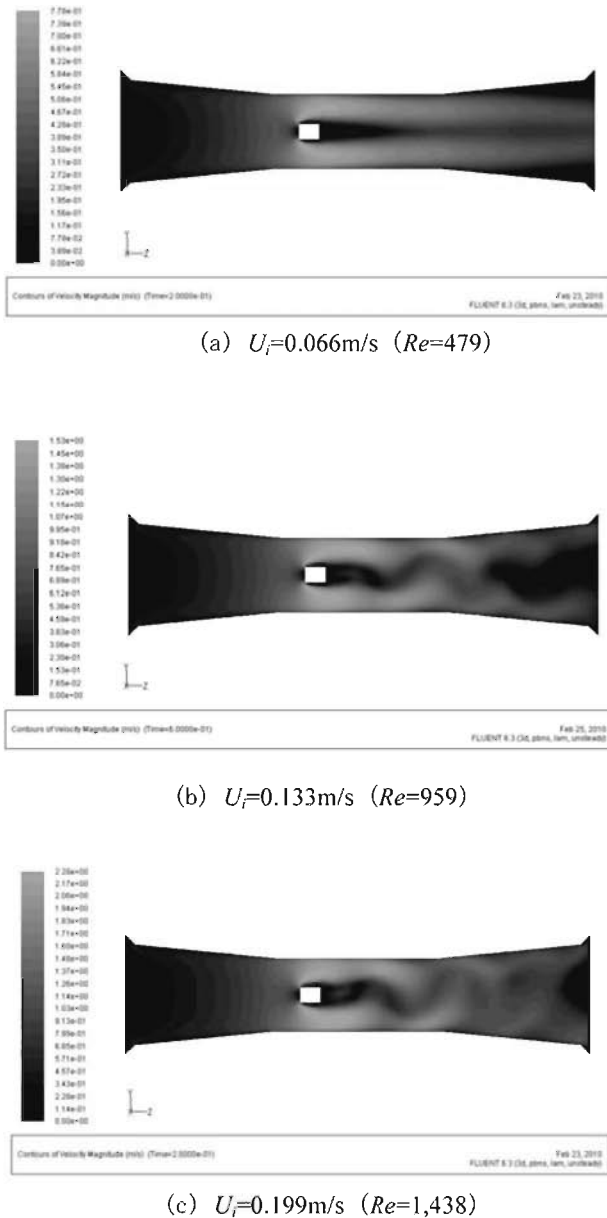


図6 流路上下対称面内の速度コンター図

周期的な速度の変化があることが分かる。

カルマン渦が発生している場合には、安定した周期変動する範囲（ここでは、0.1s から後の期間）の速度データに対してFFTを施すことにより、速度変動のパワースペクトルを求めた。図8に、パワースペクトルの一例を示す。図8においてスペクトルのピーク値を示す周波数をカルマン渦の放出周波数 f とした。ここで求めた f を用いてストローハル数 St が求められた。

5.5 可視化実験

この新型渦流量計の大きさを10倍にした模型を用いて、流れの可視化実験を行った。流量計の模型は、可視化できるように透明のアクリルで作られた。また、染料としてイ

ンクが用いられた。図9(a)および(b)に大きさが比較的近いレイノルズ数の流れに対して、可視化実験における流脈線と数値解析の速度コンター図をそれぞれ示す。この結果より、カルマン渦の発生が確

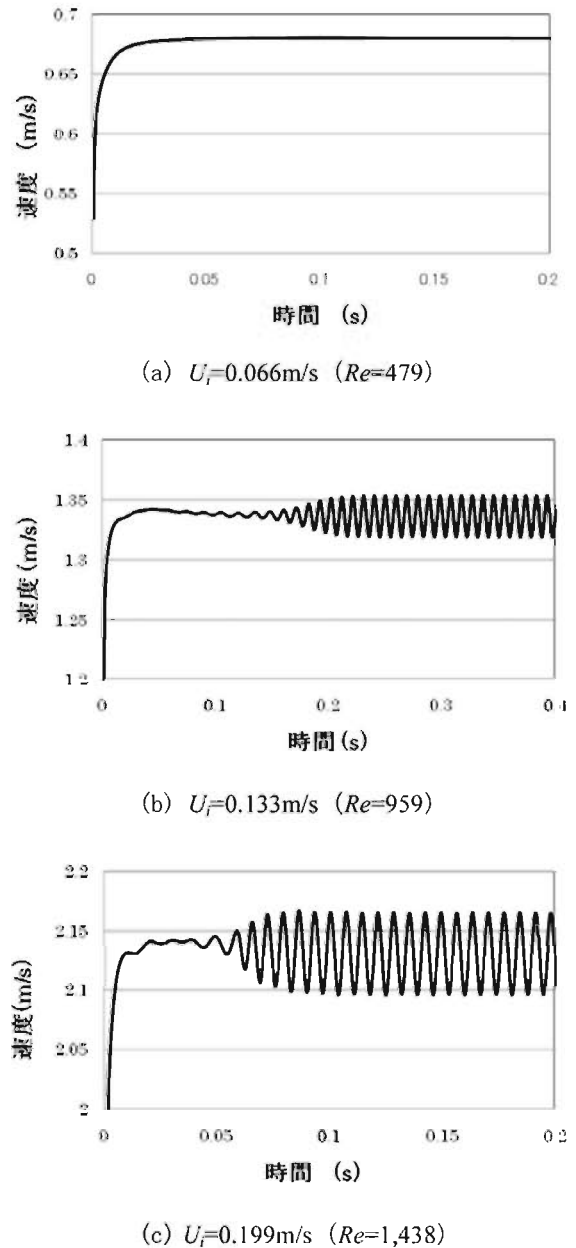


図7 流れ場の速度の時間的变化

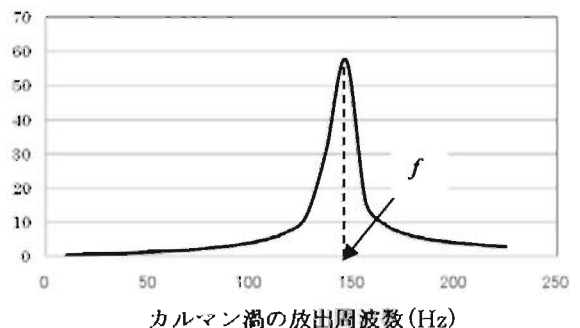
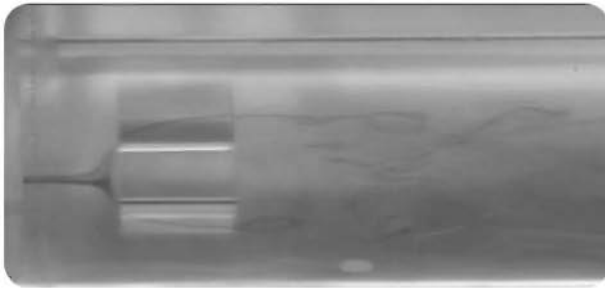
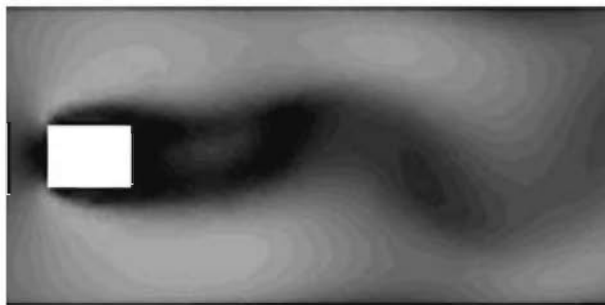


図8 速度変動のスペクトル

認められた。



(a) 可視化実験 ($Re=1,267$)



(b) 数値解析 ($Re=1,438$)

図9 可視化実験と数値解析

5.4 実験値及び可視化実験との比較

本研究での数値解析結果と流れの可視化実験の結果を用いて、レイノルズ数 Re によるストローハル数 St の依存性を検討する。数値計算結果は、時間刻みを変化させても結果に差がほとんど表れない時間刻み $\Delta t = 2.5 \times 10^{-5}$ sの結果を用いる。この結果を図10に示す。参考として図10には、既存の二次元円柱の結果も破線で示されている。この円柱の実験では、あるレイノルズ数の範囲ではストローハル数が一定の値になることが、良く知られている⁽⁴⁾。

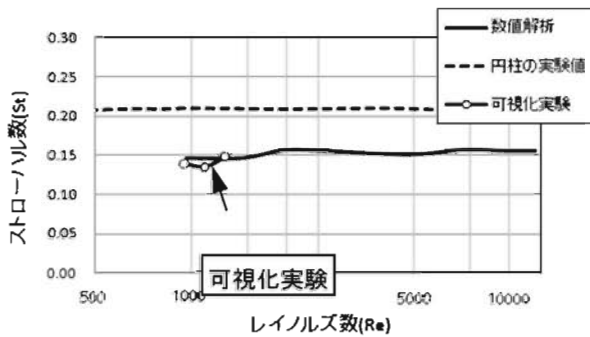


図10 ストローハル数

また、流れの可視化実験のレイノルズ数は、渦放出の周波数が良く観察できるように、比較的低いレイノルズ数の範囲となっている。数値解析の結果として得られたストロ

ーハル数は、可視化実験の結果から得られたストローハル数と非常に近い値であることが示された。

この可視化実験値と数値解析の結果から、この新型渦流量計においても、レイノルズ数 Re が約 1,000 以上の範囲では、ストローハル数 St が一定の値になることが分かった。

今後、更に広いレイノルズ数の範囲について実験を行い、数値解析の結果が示すストローハル数とレイノルズ数との関係について検証する必要がある。

6. まとめ

本研究の新型渦流量計の数値解析で以下のことを明らかにした。

- (1) 新型渦流量計において、カルマン渦が発生していることが明らかになった。
- (2) 新型渦流量計の場合でも、 Re が約 1,000 以上では、数値解析の結果においてストローハル数 St は一定の値をとることが示された。
- (3) 数値解析の結果は、可視化実験値のストローハル数 St の値と非常に近い値が得られた。

参考文献

- (1) 日本機械学会, 流体力学, 丸善株式会社, pp. 119-122, 2005.
- (2) 平野公孝, 菊地正憲, 円管内を横切る円柱に働く抗力と放出渦, 日本機械学会論文集(B編), 53巻, 492号, pp. 2390-2394, 1987.
- (3) 崔海晩, 寺尾吉哉, 高本正樹, 松井剛一, カルマン渦流量計内部の流れ構造に関する実験の研究, 計量研究所報告, pp. 263-269, 1998.
- (4) H. Schlichting, Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill Book Company, pp. 32, 1968.

謝辞

本研究を行うにあたり、可視化実験を行った王忠恵氏に深く感謝いたします。また、可視化実験における新しい渦発生体の開発品(特許出願中)および模型作製等で協力いただいた旭有機材工業(株)の方々に心から感謝いたします。