噴流の振動現象に関する数値シミュレーション

Numenical Simulation of Oscillation of Jet Flow

北 清仁, 電通大院, 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, E-mail:kita-k@kuroda.mce.uec.ac.jp 伊東 元重, 電通大, 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1 黒田 成昭, 電通大, 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, E-mail:kuroda@mce.uec.ac.jp

Kiyohito KITA, Univ. of Electro-Communications, Chofugaoka 1-5-1, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan Motoshige ITO, Univ. of Electro-Communications, Chofugaoka 1-5-1, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan Shigeaki KURODA, Univ. of Electro-Communications, Chofugaoka 1-5-1, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

Jet flow in a rectangular area is simulated using MAC method. In this sumulation, the behavior of oscillation of jet flow is studied and the frequency of oscillation is proportional to the speed of jet flow.

1. 緒論

ノズル部を有する矩形管内に障害物を置くと、ノズルから出た噴流は発振を起こし、流体振動現象として捉えることができる⁽¹⁾。

本研究では噴流の発振現象を数値シミュレーションに よって捉え、噴流の偏向周期と管内平均流速との関係を明 らかにすることを目的とする。

2. 解析モデル

解析モデルは Fig.1 に示すように、ノズル部分とターゲットと呼ばれる障害物が配置された形状とし、ノズル内平均流速を代表流速 U_0 、ノズル幅 FW を基準長さにとって各寸法を無次元化している。

各部名称と記号・各部の無次元寸法を Table.1 に示す。



Fig.1 Analysis Model.

Table.1 Model Name and Non-Dimendional	Size	
--	------	--

各部名称・記号		無次元寸法
ノズル幅	FW	1.0
ターゲット距離	FT	4.85
ターゲット厚さ	CT	0.3
発振室長さ	D	10.0
ターゲット幅	WT	1.0
発振室幅	W	10.0
後流幅	RW	2.0

3. 支配方程式

支配方程式として Navier-Stokes 方程式(1)と連続の式(2) を用いる。時間差分については一次精度の前進差分、空間 微分項については二次精度の中心差分を、対流項について は河村・桑原スキームを用いて離散化を行い、MAC法に 基づいて計算を行った。速度・圧力の計算には陰解法を用 いて SOR 法で収束計算を行った。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ D \equiv \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases}$$
(1)

4. 解析方法 4.1 計算条件

ノズル幅を基準長さとしてレイノルズ数と各部の無 次元寸法を決定し、レイノルズ数を変化させる。計算 条件を Table.2 に示す。

Table.2 Co	ondition of Cal	culation
	1 1/4	

X 方向 格子点数	230
Y 方向 格子点数	159
レイノルズ数	625 ~ 2085
毎次元時間刻み	0.003

4.2 境界条件

[速度について]

入り口では中心の無次元速度が 1.0 になるポアズイ ユ流れを定常的に用い、出口では Sommerfeld 放射条件 ⁽⁴⁾を用いた。また、物体表面上ではすべり無しの条件を 用いた。

[圧力について]

入り口では圧力 0 の一定にし、出口では過去の一次 補間⁽⁵⁾を用いた。また、物体上では法線方向の勾配を 0 とした。

5.計算結果および考察

5.1 数値計算と実験との比較

本計算の信頼性を確かめるために Table.1 に示す条件の下で計算を行ない、実験での噴流の偏向との比較を行なった。

[検証 1] 発振状況

実験による発振状況の結果を Fig.2-1~Fig.2-4 に、 計算による発振状況の結果を Fig.3-1~Fig.3-4 に示す。

Fig.2-1~Fig.2-4 から、ノズルから出た噴流がター ゲットに当たり偏流が起こり始め(Fig.2-1) 偏流を 起こした噴流はの部分へ流れ込み流量が増加する。 (Fig.2-2) 増加した流体は質量保存を満たそうと してノズルから出た噴流を押し(Fig.2-3)流れが切 り替わる様子(Fig.2-4)が、数値計算による結果で も再現されており、実験結果と比較して良好な一致 を見せていると言える。

また Fig.1 の測定点において速度の Y 方向成分の 時間波形とFFT 解析結果をFig.4-1~Fig.4-5 に示すと、 時間波形のグラフから計算を行なったどのレイノル ズ数においても噴流の偏向は規則正しく継続して行 なわれることがわかり、また FFT 解析結果から大き なピークが一つ出ており、噴流が一定周期で偏向を 繰り返していることがわかる。





Fig.2-1





Fig.2-2





Fig.2-3



Fig.3-3





[検証 2]レイノルズ数と振動数の関係

レイノルズ数を変化させたときに、本計算で得られ る発振状況・振動数が実験結果と一致を見せているか、 検証を行なった。 レイノルズ数を変化させたときに 発振の振動数がどのように変化するかを計算と実験の 両方で行ない、レイノルズ数と発振の振動数の関係を 調べた。

[実験結果]

数値計算と同じ条件で行なったときの実験結果を Table.3 に示す。

Table.3 Result of Experiment		
レイノルズ数	振動数 [Hz]	
738.0	0.88	
1480.0	1.88	
1893.0	2.50	
2476.0	3.25	

[計算結果]

計算から得られたレイノルズ数と偏向の振動数の 関係を Table.4 に示す。

Table.4 Result of Simulation		
レイノルズ数	振動数 [Hz]	
625.0	0.62	
833.0	1.12	
1250.0	1.83	
1668.0	2.41	
2085.0	2.63	

Table.3・Table.4 から、計算結果も実験結果もレイノルズ数が大きくなると振動数が上昇することがわかった。

また、レイノルズ数と振動数の関係をFig.6に示すと、 計算結果・実験結果ともにレイノルズ数と偏向の振動 数は線形関係にあることがわかり、どちらの結果も同 一直線上に乗っていると見なせるので本計算の信頼性 を確認することができた。このことから、本計算が発 振室の設計に有用であることが言える。



5.2 発振室のサイズと比例係数の関係

数値解析による噴流の発振確認と信頼性が確認でき たので発振室の大きさが噴流の発振に及ぼす影響を調 べた。検証に使用したモデルの寸法を Table.5 に示す。 モデル 2 は発振室長さ・発振室幅の有次元寸法がモデ ル1の寸法の 1/2 となっている。

モデル 1・モデル 2 に関して Table.2 の計算条件に基 づいて計算を行ない、得られたレイノルズ数と偏向の 周波数の関係を Table.6 に示す。

Table.5 Bize of Woder			
各部名称		無次元寸法	
		モデル1	モデル2
ノズル幅	FW	1.0	1.0
ターゲット幅	CT	1.5	1.5
ターゲット距離	FT	4.85	4.85
発振室長さ	D	10.0	10.0
発振室幅	W	10.0	10.0
後流幅	RW	2.0	4.0

Table.5 Size of Model

Table.6 Result of Simulation

レイノルズ数	モデル1	モデル2
625.0	2.47	0.62
833.0	4.20	1.12
1250.0	6.31	1.83
1668.0	6.51	2.41
2085.0	8.48	2.63

この結果を Fig.7 に示す。



Fig.7 から発振室のモデル 1 の比例係数が 0.0013、モ デル 2 の比例係数が 0.0040 となり発振室のサイズが小 さくなると比例係数が高くなることがわかる。この原 因として、発振室のサイズが小さくなることにより噴 流と発振室に囲まれる部分に流れ込むことができる流 量が減少し、ノズルから出た噴流を押し返すまでの時 間が短縮されることによって振動数が高くなるからと 考えられる。

5.3 発振室のサイズと無次元の振動数との関係

発振室のサイズが変化したときにレイノルズ数と偏 向の周波数の関係を表す比例係数が変化したので、発 振室のサイズが比例係数に及ぼす影響を調べた。

レイノルズ数をRe 偏向の振動数をF 動粘性係数 をvとすると、ReとFは線形関係にあることがわか ったので比例係数をKとして、

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{R}\mathbf{e} = \mathbf{K} \cdot \frac{\mathbf{U} \cdot \mathbf{F}\mathbf{W}}{\mathbf{v}} \qquad (3)$$

と表すことができる。

ここで、ノズル部の平均流速を U として無次元の振 動数 F を導入すると、

$$\overline{F} = F \frac{FW}{U}$$
(4)

となる。(3)式と(4)式から

$$\overline{F} = \frac{K \cdot FW^2}{v}$$
(5)

という関係が導かれる。

ここで、各部の寸法に相似則が成り立つ二つのモデ ルを考える。相似則が成り立つことから、あるレイノ ルズ数における二つのモデルの無次元振動数は同じ値 となる。

相似比をAとすると、

$$\overline{\mathbf{F}} = \frac{\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{F} \mathbf{W}_1^2}{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{K}_2 \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{F} \mathbf{W}_1)^2}{\mathbf{v}}$$
(6)

と表せる。(6)式から二つのモデルに相似則が成り立つ ならば、比例係数と相似比の2乗は反比例の関係にあ ることが言える。この関係から、実験モデルの相似比 がわかっていれば、比例係数の予測に有効であるとい える。

6. 結言

本研究での解析結果を以下のように要約する

(1) 本研究で用いた解析モデルによって、実験による噴流 の発振現象の様子を数値シミュレーションによって捉え ることができた。

(2) レイノルズ数と偏向の振動数は線形関係にあり、実験 値とも一致しているのでシミュレーションの有用性を確 認することができた。

(3) 発振室の大きさが小さくなると、レイノルズ数と偏向の振動数の関係を表す比例係数は大きくなることがわかった。

(4) 計算で使用する二つのモデルに相似則が成り立つ場合、有次元の比例係数と相似比の2乗は反比例の関係にある。

参考文献

[1] 山本圭治郎,兵藤和人,廣木富士男 "201 ターゲット型 フルイディック流量計の発振機構"可視化情報 Vol.16 Suppl.No.1,1996

[2] 山崎弘郎,本田敏 "2次元噴流の振動による新しい流 体発振器とその流量測定への応用"計測自動制御学会論 文集,Vol.24,No.10,1023-1028,1988

[3] 山崎弘郎,岡林誠"新しいフルイディックガスメータ の開発研究"計測自動制御学会論文集, Vol.29,No.5,512-519,1993

[4] 吉田尚夫,中村育夫,渡辺崇 "角柱流れに対する境界条件と差分スキームに関する数値的研究"機会学会論文 集,B,59-558,1993

[5] 宮内敏雄,苗木学 "空間的に発達する流れ場の境界条件について"機械学会論文集,B,57-542,1991