

## 角柱周りの流れ場のオブザーバに関する実験

### Experiments of the State Observer for the Flow Field around a Square Cylinder

○武田 晋平\*,仁杉 圭延\*,白井 敏\*,早瀬 敏幸\*

○Shinpei Takeda\*, Keisuke Nisugi\*, Atsushi Shirai\*, Toshiyuki Hayase\*

\*東北大学 流体科学研究所

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

キーワード: 実験による測定(Experimental measurement), 数値シミュレーション(Numerical simulation),  
ハイブリッド風洞(Hybrid wind tunnel), オブザーバ(State observer), カルマン渦列(Karman vortex street)

連絡先: 〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学 流体科学研究所 知能流システム研究部門  
生体流動研究分野 早瀬研究室 武田 晋平, Tel: (022)217-5255, E-mail: takeda@reynolds.ifs.tohoku.ac.jp

#### 1. 緒言

流れの解析手法には、実験的手法と数値解析による手法があり、対象とする問題ごとにこれらが使い分けられている。特に、流れ場の解析手法には実験風洞を用いる手法と、実験風洞を数値シミュレーションに置きかえた数値風洞を用いる手法が挙げられるが、両者には次のような相対する長所及び短所がある。

・実験風洞ではデータの信頼性を評価するのが容易であるのに対し、数値風洞ではモデルに依存してしまう。

・実験風洞では流れ場全体の情報を得るのが困難であるのに対し、数値風洞では容易である。そこで、これら2つの解析手法を統合させたハ

イブリッド風洞を構成することにより、両者の長所を合わせ持つ、新たな解析手法が考えられている<sup>1)</sup>。実験風洞と数値風洞を統合したハイブリッド風洞は、オブザーバを流れ場に適用することによって構成される<sup>2)</sup>。この有効性を示すために、基本的な非定常流である角柱後流に生ずるカルマン渦列<sup>3)</sup>を対象として、まず数値シミュレーションによる研究が行われている<sup>3)</sup>。

本研究では、実際にハイブリッド風洞を構成し、角柱側壁上の圧力と角柱下流における速度の推定を行う。その推定値と実測値の比較を行い、ハイブリッド風洞の有効性を検討する。

## 2. ハイブリッド風洞

ハイブリッド風洞の概念図を Fig.1 に示す。実験風洞において、レーザー流速計や圧力計などで測定された信号を、ワークステーションを介して高速ネットワーク(Gigabit Ethernet)でスーパーコンピュータに転送する。その信号をリアルタイムで計算される流れ場の数学モデルにフィードバックする(流れ場のオブザーバ)。実際の流れ場に収束した計算結果は再びワークステーションに転送され、リアルタイムで流れ場全体の情報を表示することができる。

本研究では、数値計算速度の関係から、リアルタイム処理は行わず、オフラインでの検討を行った。

### 2.1 実験風洞

一様流中に置かれた角柱後流に発生するカルマン渦列を解析する場合を考える。本研究で用いる実験風洞の平面図を Fig.2 に示す。実験風洞の流路部分は220cm×20cm×20cmであり、上流端と下流端に整流用のフィルター(ブリジストン製:エンバーライト)を設置し、一様流を生成する。x, y, zはそれぞれ流れ方向、幅方向、垂直方向座標を表し、流路上流端断面の下部コーナーを原点とした。上流端から31cmの位置に3cm×3cm×20cmの角柱を設置した。

### 2.2 数値風洞

数値シミュレーションでは、流体を非圧縮の粘性流体とし、(1), (2)式で表されるナビエ-ストークス式と連続式を基礎方程式とする。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\text{grad}P - (\mathbf{u} \cdot \text{grad})\mathbf{u} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\text{div} \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、f はオブザーバのフィードバックに対

応する体積力である。計算領域は Fig.2 の斜線部で表される2次元領域で、これに  $N_x \times N_y = 60 \times 23$  の等間隔スタaggerド格子系を設定し、離散化方程式群をSIMPLER法を用いて解いた。計算領域の境界条件は、上流端で一様平行流を与え、下流端で自由流出とした。また、固体壁との境界には粘着条件を与えた。主な計算条件を Table1 に示す。なお、以下の諸量は角柱一辺の長さ、一様流速、流体の密度で無次元化されている。

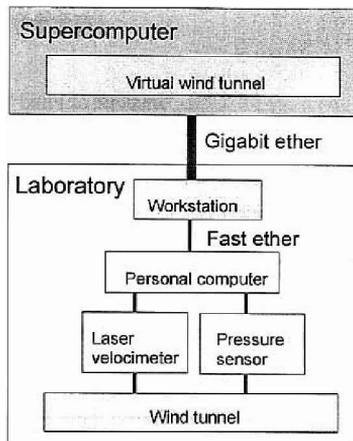


Fig.1 Basic structure of Hybrid Wind Tunnel

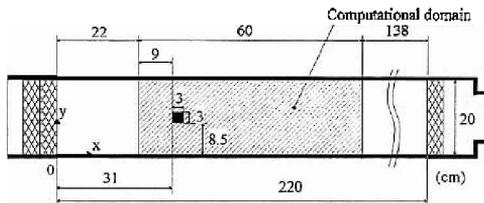


Fig.2 Domain and coordinate system

Table1 Computational condition

$Re$	Reynolds number	1000
$L_x \times L_y$	Computational domain	20×7
$N_x \times N_y$	Grid points	60×23
$h_x \times h_y$	Grid spacing	0.33×0.33
$h_\tau$	Time step	0.0168
	CPU time for one time step	2
$L$	Characteristic length	0.03[m]
$U$	Characteristic velocity	0.504[m/s]
$\rho$	Density of air [20°C]	1.229[kg/m <sup>3</sup> ]

### 2.3 実験風洞と数値風洞の統合

流れ場のオブザーバの構成を Fig.3 に、角柱近傍の拡大図を Fig.4 に示す。オブザーバでは、実際の流れ場の観測出力と数値シミュレーションの対応する計算値との偏差を求め、この信号を数値シミュレーションにフィードバックすることにより、数値シミュレーションの結果を実際の流れ場に収束させる。本研究では、Fig.4 中の A, B 点に注目し、この点での圧力を観測出力として、これを用いて次式に従うフィードバックを行った。

$$\begin{pmatrix} \dot{f}_A \\ \dot{f}_B \end{pmatrix} = -k \begin{pmatrix} P_A - P_A^* \\ P_B - P_B^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3)式において、 $f_A, f_B$  は A, B 点での x 方向の運動方程式に対する体積力、 $P_A, P_B$  は計算値(オブザーバ)の出力、 $P_A^*, P_B^*$  は実験値の出力、

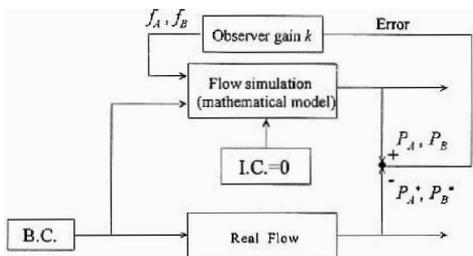


Fig.3 Structure of the flow state observer

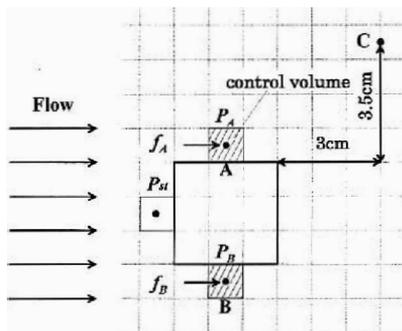


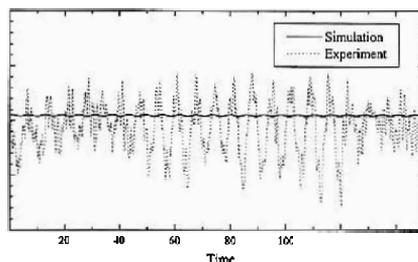
Fig.4 Definition of output signal and control input

$k$  はオブザーバゲインを表す。なお、A 点、B 点における計算値及び実験値の出力は、角柱前面中央のよどみ点圧力( $P_M$ )を基準としている。

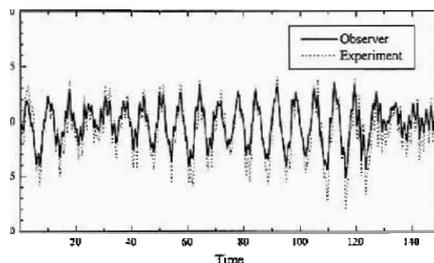
### 3. 結果と考察

まず、角柱側壁上(Fig.4 中 A 点)の圧力について、実験値とオブザーバの推定値の比較を行った。Fig.5(a)に実験及びフィードバックを行わない場合の数値シミュレーション( $k=0$ )によって得られた圧力の時間変化を示す。実験による波形は一様流中に含まれる乱れ成分に対応する高周波の変動とカルマン渦に対応する低周波の変動よりなる。一方、数値シミュレーションではカルマン渦に対応する正弦波状の波形が得られているが、計算格子が粗いため周波数と振幅が実験値とは大きく異なっている。

Fig.5(b)は実験及びオブザーバ( $k=0.7$ )によって得られた結果である。数値シミュレーションに実験出力との偏差をフィードバックすると、



(a) No feedback



(b)  $k=0.7$

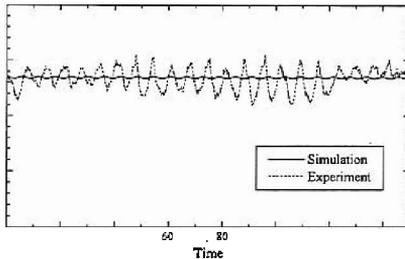
Fig.5 Pressure fluctuation at point A

低周波成分, 高周波成分ともに実験値とよく一致する結果が得られた。

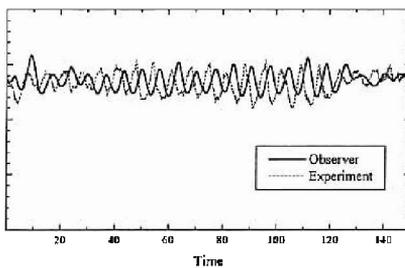
次に, 角柱下流における代表点 C (Fig.4 参照) での流れ方向速度について比較を行った。Fig.6(a)に実験及びフィードバックを行わない場合の数値シミュレーションによって得られた速度の時間変化を示す。Fig.6(b)は実験及びオブザーバによって得られた結果である。オブザーバによって推定された速度波形は, 実験値と定性的に一致した。

フィードバック効果を調べるために, オブザーバゲインを変化させ, 各ゲインにおけるオブザーバの A 点での圧力及び C 点での速度の波形のピーク周波数, 平均値, 標準偏差について, 実験値との比較を行った。ピーク周波数についての結果を Fig.7(a), (b)に示す。オブザーバによって推定された圧力波形及び速度波形の同波数は, わずかなゲインを与えることで実験値に収束した。

次に平均値についての結果を Fig.8(a), (b)に



(a) No feedback

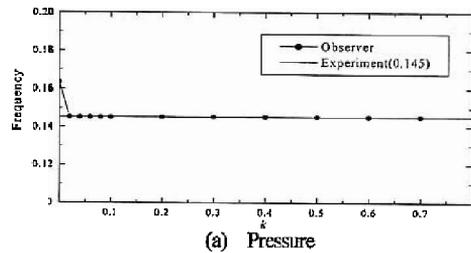


(b)  $k=0.7$

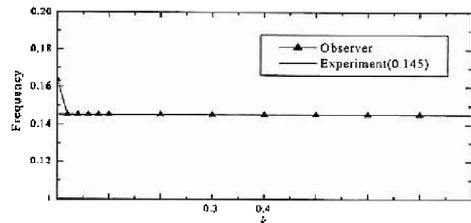
Fig.6 Velocity fluctuation at point C

示す, 圧力及び速度の出力波形の平均値は, ゲインを変化させてもほとんど変化が見られなかった。

次に標準偏差についての結果を Fig.9(a), (b)に示す。ゲインが増加するにつれ, オブザーバの出力波形の標準偏差は, 圧力, 速度のどちらも実験値に漸近している。これはフィードバックを行わない場合の数値シミュレーションでは, 圧力及び速度の出力波形の振幅がほとんど見ら

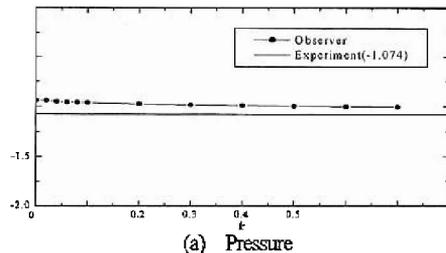


(a) Pressure

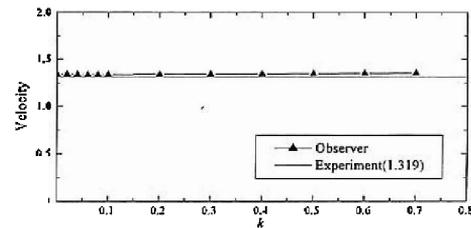


(b) Velocity

Fig.7 Peak frequency of pressure and velocity



(a) Pressure



(b) Velocity

Fig.8 Average value of pressure and velocity

れない(Fig.5(a), (b))のに対して、オブザーバの出力波形はゲインの増加に伴い、振幅が実験値に近づいていることを示している。以上のことから、角柱側壁上の圧力、角柱下流の代表点における速度について、オブザーバはこれらをよく推定しているといえる。なお、ゲインを $k=0.8$ 以上にすると、数値計算の結果は収束せず、発散した。

#### 4. 結言

ハイブリッド風洞の有効性を検討するために、角柱後流に発生するカルマン渦列を対象として、実際にハイブリッド風洞を構成し、実験をオフラインで行った。角柱側壁上の圧力を出力信号として用い、推定誤差を基礎方程式中の体積力にフィードバックすることにより、オブザーバの圧力波形が測定結果の圧力波形に収束することが示された。角柱下流の代表点におけるオブザーバの速度波形は、測定結果と定性的に一致した。今後は、数値計算速度の向上によるリアルタイム処理の実現、流れ場全体の収束性、フィードバック則について検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 早瀬敏幸, 仁杉圭延, 牧野芳和, 白井敬, 林敏: スーパーコンピュータと実験計測を統合したハイブリッド風洞に関する基礎的研究, 計測自動制御学会東北支部 35 周年記念学術講演会資料(1999)29-30.
- 2) 種子田定俊: ターボ機械, 第 7 巻 11 号, (1979)683-691.
- 3) Hayase, T. and Hayashi, S: State Estimator of Flow as an Integrated Computational Method With the Feedback of Online Experimental Measurement, J. Fluids Eng. Trans. ASME, 119, (1997)814-822.

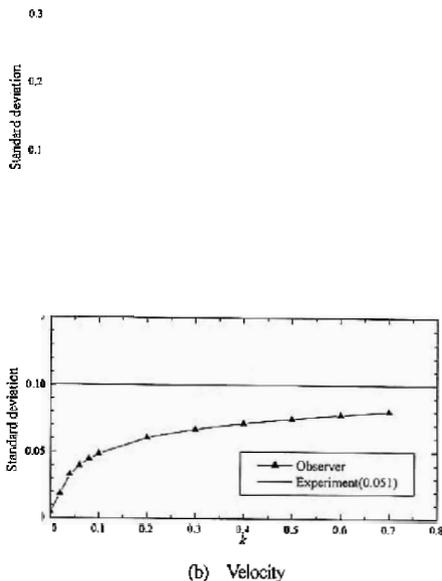


Fig.9 Standard deviation of pressure and velocity