

壁面圧力計測と流れのシミュレーションの融合による 非定常流れのリアルタイム解析

Real Time Analysis of an Unsteady Flow by Integrating Wall Pressure Measurement and Flow Simulation

○山縣貴幸*, 柴田光*, キャスパーシMITT**, 早瀬敏幸***

○Takayuki Yamagata*, Hikaru Shibata*, Kasper Smit**, Toshiyuki Hayase***

*東北大学, **University of Twente, ***東北大学流体科学研究所

*Tohoku University, **University of Twente,
***Institute of Fluid Science, Tohoku University

キーワード: 圧力計測(Pressure measurement), 計測融合シミュレーション(Measurement-Integrated simulation), オブザーバ(State observer), カルマン渦列(Karman vortex street), リアルタイム解析(Real time analysis)

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 流体融合研究センター
超実時間医療工学研究分野, 山縣貴幸, Tel.: (022)217-5313, Fax.: (022)217-5254, E-mail:
yamagata@reynolds.ifs.tohoku.ac.jp

1. 緒言

流体工学において、流れ場の速度分布や圧力分布を得ることは非常に重要である。従来、流れ場の情報を得る手法としては、実験計測と数値シミュレーションが主であり、それぞれに得られる情報の特徴がある。実験計測では、データの信頼性の評価が容易であり、実現象そのものの状態量を取得することができるが、流れ場全体の状態量を得ることは困難である。数値シミュレーションは、流れ場全体の詳細な状態量が得られるが、実際の流れの初期条件や境界条件を厳密に設定することは困難である。

流れの実現象の詳細な情報をコンピュータ上に再現するために、数値シミュレーションと

実験計測とを一体化した計測融合シミュレーションが提案されている¹⁾。計測融合シミュレーションの概念図をFig. 1に示す。計測融合シミュレーションは、制御工学のオブザーバ理論を流れの解析に応用し、実現象のモデルとして低次元の線形常微分方程式の代わりに流れの数値シミュレーションを用いた手法である。本

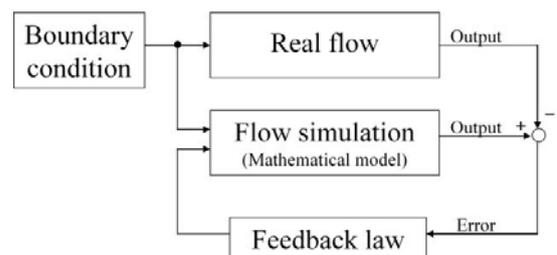


Fig. 1 Structure of the flow observer.

手法を応用し、ハイブリッド風洞での角柱後流のカルマン渦解析²⁾、オリフィス流れを対象とした管内流れ解析³⁾、超音波計測を用いた血流解析⁴⁾が行われ、その有効性が報告されている。ハイブリッド風洞は、風洞実験と数値シミュレーションを一体化したオンラインシステムである⁵⁾。カルマン渦列は、流れの中に物体を置いたときに、その後方に交互にできる渦で、基礎的な流れの一つである。ハイブリッド風洞でのカルマン渦解析では、通常の数値シミュレーションには不十分な精度である計算条件において、実験値と一致する速度の変動周波数や振幅、また風洞壁面圧を再現できることがわかっている^{2, 6)}。実流れの再現では、リアルタイムに流れ場を解析することも重要であり、計算負荷を小さくできる計測融合シミュレーションの二次元解析では、リアルタイム解析実現が期待される。

本研究では、角柱後流に発生するカルマン渦列を対象として、ハイブリッド風洞によるリアルタイム解析に必要な計算条件に関して検討を行う。また、リアルタイムに再現された圧力場の有効性を確認する。

2. 方法

2-1 ハイブリッド風洞の構成

本稿で扱うハイブリッド風洞は、Fig. 2に示すように流路中に角柱を配置した風洞、圧力センサ(SSK, DP8A-2, 20 Pa, 260 Hz)、ワークステーション(SGI, OCTAIN, 300 MHz, 2CPU)、スーパーコンピュータ(SGI, Silicon Graphics Prism, 1.6 MHz, 128CPU)で構成される。ワークステーションは、圧力センサとスーパーコンピュータとのインターフェイスや計算結果の表示に使用される。Fig. 3は、風洞の平面図である。風洞は、200 mm×200 mmの断面をもつ長さ2510 mmの正方形管路で、流路中に30 mm×30 mm

×200 mmの角柱を有する。整流装置として、流路の上流端にフィルタ(ブリジストン, エバーライト SRHR-13, 厚さ30 mm)とスチールメッシュ(5 mm 矩形格子, 厚さ1 mm)を設置した。風洞の下流にフレキシブルチューブ(内径175 mm)を介して接続した送風機(西村電機, NK-200)により吸気することで流れを発生させる。送風機の吸気流量は、インバータ(三菱電機, FR-520-1.5K)により制御した。実際の流れの情報を数値シミュレーションに取り込むため、風洞の中央平面での角柱正面と両側面の

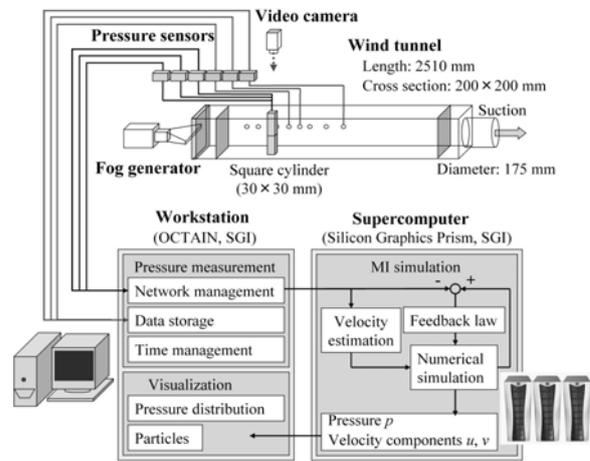


Fig. 2 Configuration of the hybrid wind tunnel.

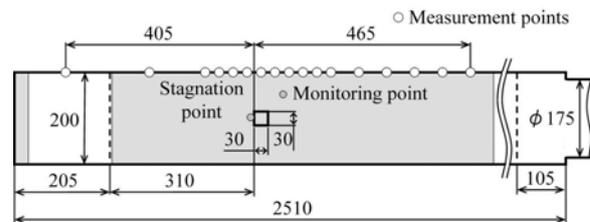


Fig. 3 Geometry of the wind tunnel and position of pressure measurement.

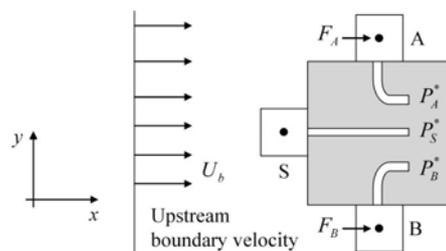


Fig. 4 Details of the square cylinder.

圧力を計測する(Fig. 4 参照). 圧力センサの出力信号は, ローパスフィルタ(NEC 三栄, 9B02, 10 Hz)および A/D 変換器(VMIC, VMIPCI-3322, 1000 Hz, 16 bit)を介してワークステーションに取り込まれる. ワークステーションは, 圧力データをソケット通信を用いてスーパーコンピュータに転送する. スーパーコンピュータでは, 計測融合シミュレーションが行われ, 計算機上に実際の流れ場が再現される. 本システムでは, 角柱に対して垂直な風洞の中央平面を計算領域とする二次元解析を行っている. 詳細な解析方法は次節に示す. 計算結果は, 再びワークステーションに転送され, 圧力場が可視化表示される.

2-2 計測融合シミュレーション

計測融合シミュレーションは, 通常の流れの数値シミュレーションと同様に Navier-Stokes 方程式(1)と連続式(2)を支配方程式としている. 本稿で対象としたのは, 風洞の中央平面の二次元領域で, 流体は非圧縮の粘性流体とした.

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

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

本手法と通常の数値シミュレーションとの差異は, 計算と計測との差に比例したフィードバック信号 \mathbf{f} がナビエ・ストークス方程式に体積力として加えられる点である. ハイブリッド風洞では, Fig. 4 に示す角柱側面とよどみ点との差圧 $P_{AS} (= P_A - P_S, \text{以下同様}), P_{BS}$ と対応する計測圧力の P_{AS}^*, P_{BS}^* から式(3)で定義されるフィードバック信号が, 各計測点の左側の主流方向の運動方程式に対応する計算のコントロールボリュームに加えられる.

$$\begin{pmatrix} F_A \\ F_B \end{pmatrix} = -K^* \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{L} \begin{pmatrix} P_{AS} - P_{AS}^* \\ P_{BS} - P_{BS}^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで, K^* はフィードバックゲイン(無次元量), $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ はそれぞれコントロールボリ

ームの各辺の長さ, L は次元を揃えるための代表長さ(角柱幅 $D = 30 \text{ mm}$)である. 仮想力 F_A, F_B が加えられることにより, 計算圧力と計測圧力の差が減少するようにフィードバック点の主流方向の速度が加減速される. 前報⁶⁾では, フィードバック信号はコントロールボリュームの断面積と圧力差に比例した力として定義されており, フィードバックの効果が計算格子間隔 Δx に依存していた. 本稿では, より一般的なフィードバック則である式(3)を用いる⁷⁾. なお, 前報のフィードバックゲイン K と本報のフィードバックゲイン K^* は, 以下の式により対応付けられる.

$$K^* = \frac{L}{\Delta x} K \quad (4)$$

数値シミュレーションに与える上流境界条件は平行一様流とし, 流入速度 U_b は式(5)で与える. 式(5)の右辺は, 計測された淀み点圧と角柱側面の圧力からピトー管の原理を用いて求められた流入速度, 式(5)の左辺はノイズの影響を取り除くための1次のローパスフィルタである.

$$T_c \frac{dU_b}{dt} + U_b = K_e \sqrt{\frac{2P_m^*}{\rho}} \quad (5)$$

ここで, T_c はフィルタの時定数, K_e は速度係数, P_m^* は P_{AS}^* と P_{BS}^* の平均値である.

計算領域は, 風洞のほぼ全領域を対象とし, 計算格子は, 248×21 点のスタガード直交格子である. 格子間隔は角柱一辺 $D = 30 \text{ mm}$ の1/3である $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ mm}$ とし, 幅方向のみ風洞壁面の位置を一致させるため, 風洞壁面近傍において格子間隔が小さくなる不等間隔格子を用いた. 通常の数値シミュレーションにとっては粗い計算格子だが, フィードバックの効果により角柱後流のカルマン渦に伴う速度場が良好に再現できることが確認されている²⁾.

2-3 圧力計測

計測融合シミュレーションによるリアルタイム解析のためのパラメータ設計や再現された圧力場の有効性は、風洞壁面の圧力計測との比較により評価した。Fig. 3 に示す計測点に直径 2 mm、深さ 4 mm の圧力孔を設け、微差圧計によりゲージ圧を計測した。微差圧計の出力信号は、ローパスフィルタおよびA/D変換機を介してワークステーションに取り込まれる。ワークステーションでは、バイアスのドリフトの影響を取り除くために、風洞が無風状態のときの出力を 30 秒間計測し、ゼロ点の補正を行った。また、デジタルローパスフィルタ(IIRフィルタ, 20 Hz)により高周波の電気ノイズを除去した。圧力計測の精度は、 ± 0.05 Paであった。流れは、レイノルズ数 $Re=1200$ の流量一定とし、流れが落ち着いた状態から 30 秒間計測し、平均値およびRMS値を計算結果と比較するために 15~30 秒の 15 秒間で求めた。⁶⁾

3. 解析結果および考察

3-1 パラメータの設定

ハイブリッド風洞における計測融合シミュレーションの設計パラメータは、フィードバックゲイン K^* 、速度係数 K_e 、時定数 T_c である。本節では、これらの設計パラメータとリアルタイム解析のための計算条件について述べる。

フィードバックゲイン K^* は、フィードバック点Aの圧力変化が実験とよく一致する値を選択し $K^*=5.4$ とした。Fig. 5 は、フィードバ

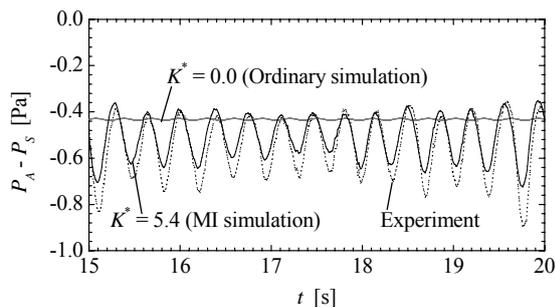
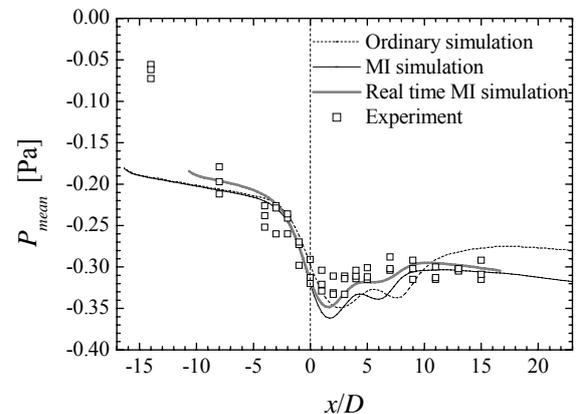


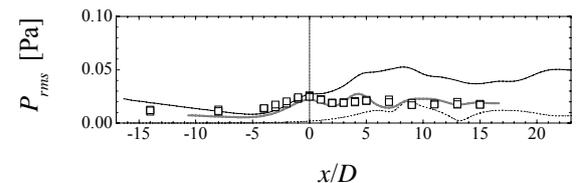
Fig. 5 Pressure at feedback point A.

ック点Aの圧力変化を実験、通常のシミュレーション($K^* = 0.0$)、計測融合シミュレーション($K^* = 5.4$)とで比較している。上流境界条件は、実験条件と一致させるために $Re=1200$ となる流入速度の一樣分布を与え、時間刻みは、 Δt に依存しない解が得られた $\Delta t=0.01$ sとした。実験では、カルマン渦の影響による一定周期の圧力変化が見られ、発振周波数は 2.8 Hzであった。通常のシミュレーションでは、粗い格子を用いているために角柱後流のカルマン渦が再現できず、角柱側面の圧力変化は非常に小さい。一方、計測融合シミュレーションでは、通常のシミュレーションと実験との差を減少させるようにフィードバック信号を加えているため、フィードバック点の圧力変化が実験計測に追従しており、位相および振幅がほぼ一致している。

ハイブリッド風洞における計測融合シミュレーションの上流境界には、角柱側面の計測圧力から式(5)を用いて算出された速度 U_b の平行一樣流が与えられる。式(5)の速度係数は、実



(a) Mean pressure.



(b) Root-mean-square pressure.

Fig. 6 Comparison of pressure along the side wall of the wind tunnel.

験時のレイノルズ数 $Re = 1200$ と一致させるため $K_c = 0.63$ を用いた。フィルタの時定数は、値を小さく設定すると、計算の上流および下流に実験値よりも大きな圧力変動が現れた。一方、時定数の増加は、流量変化に対する応答性が悪化することになる。そのため、風洞の上流および下流での圧力変動のRMS値が極端に増加しない時定数を選択し $T_c = 0.9$ sとした。

Fig. 6は、風洞壁面の圧力を実験、通常のシミュレーション、計測融合シミュレーションで比較している。通常のシミュレーションは、上流境界に $Re = 1200$ となる一定速度の平行一様流を与え、計測融合シミュレーションには上述のパラメータを用いて算出した速度を用いた。Fig. 6(a)は、風洞壁面での平均圧力の比較である。通常のシミュレーションと計測融合シミュレーションでは、計算の上流境界に与えた流量はほぼ同じであることから、壁面圧力も同程度の値を示している。しかし、計測融合シミュレーションでは、角柱直後の圧力が最も降下する位置が、通常のシミュレーションと比べて実験に近づいている。Fig. 6(b)は風洞壁面での圧力変動のRMS値を比較している。通常のシミュレーションでは、角柱付近の圧力変動がほとんど見られず、角柱から離れた下流においてRMS値が最大値を示している。一方、計測融合シミュレーションでは、角柱付近のRMS値が実験値と良く一致している。

以下では、リアルタイム解析のための計算条件について述べる。

精度の良い計算を行うためには多くの計算時間を必要とするため、本報では一定の誤差を許容することでリアルタイム解析を実現した。

計算領域は、Fig. 3の灰色で示した角柱の周囲(計算格子 85×21)とし、時間刻み $\Delta t = 0.03$ s、フィードバックゲイン $K^* = 5.4$ とした。さらに、収束判定値にも一定の誤差を許容した。計算条件を表1にまとめる。計算条件を緩和した計測融合シミュレーションでは、設定した時間刻み $\Delta t = 0.03$ sに対して、1ステップあたりの計算時間が0.025 sであり、リアルタイム解析を実現できた。解析に使用した計算機は、Silicon Graphics Prism (SGI, 1.6 MHz)の1CPUである。

Fig. 6にリアルタイム解析で得られた風洞壁面の平均圧力と圧力変動を十分な精度での計算結果と合わせて示す。Fig. 6(a)の平均圧力では、上流および下流を短くした影響が見られるが、角柱直後の圧力が降下する位置は、精度の良い計測融合シミュレーションと一致している。Fig. 6(b)の圧力変動の比較では、通常のシミュレーションでは角柱近傍の圧力変動を再現できなかったが、リアルタイム解析では角柱近傍の圧力変動が実験値とよく一致している。以前の研究⁹⁾では、計測融合シミュレーションでは、フィードバック点の位置から $-4D \leq x \leq 3D$ の範囲では、風洞側壁面の圧力変動について正の相関が得られ、効果的にフィードバックが作用していることが確認されている。

3-2 流量が変化する流れのモニタリング

ハイブリッド風洞は、実際の流れ場の計測、解析、可視化を一体化したシステムであり、計測だけでは得られない流れ場全体の状態量をモニタリングできる点が利点である。そこで、前節で設定したリアルタイム解析の計算条件を用いて、流量が変化する流れの解析を行った。

Table 1. Computational conditions.

	Grid points	Convergence criterion ϵ	Computational time step Δt [s]	Computational time for one step [s]
Real-time MI simulation	85×21	1.0e-01	0.03	0.025
MI simulation	248×21	1.0e-05	0.03	1.421
Ordinary simulation	248×21	1.0e-05	0.03	0.930

流量は、送風機につながれたインバータにより制御され、レイノルズ数をおおよそ $Re = 1200, 2200, 0, 1200$ と変化させて、ハイブリッド風洞によりその流れを解析した。

Fig. 7は、フィードバック点 A の圧力変化を実験とリアルタイム解析とで比較している。Fig. 7(a)は、実験全体の圧力変化である。初めに $Re = 1200$ 程度の定常状態から、 $t = 33$ s で $Re = 2200$ へと加速されている。流れが加速されることにより、フィードバック点での平均圧力が低下している。その後、 $t = 41$ s で流れを停止させ、 $t = 50$ s から再び $Re = 1200$ の定常状

態に戻した。Fig. 7(b)から(d)は、それぞれ初期の定常状態、加速された状態、停止状態からの過渡状態での圧力変化の詳細である。Fig. 7(b)では、計測融合シミュレーションの設計パラメータの設定時に用いた $Re = 1200$ の流れに近い流れであることから、実験と計算が非常に良く一致している。Fig. 7(c)は、加速された状態であり、定常状態よりもカルマン渦の発振周波数が増加しているが、計測融合シミュレーションの圧力変化は、実験結果と位相がよく一致している。Fig. 7(d)は、流れを停止からの過渡状態である。過渡状態では、実験と計算に差が見ら

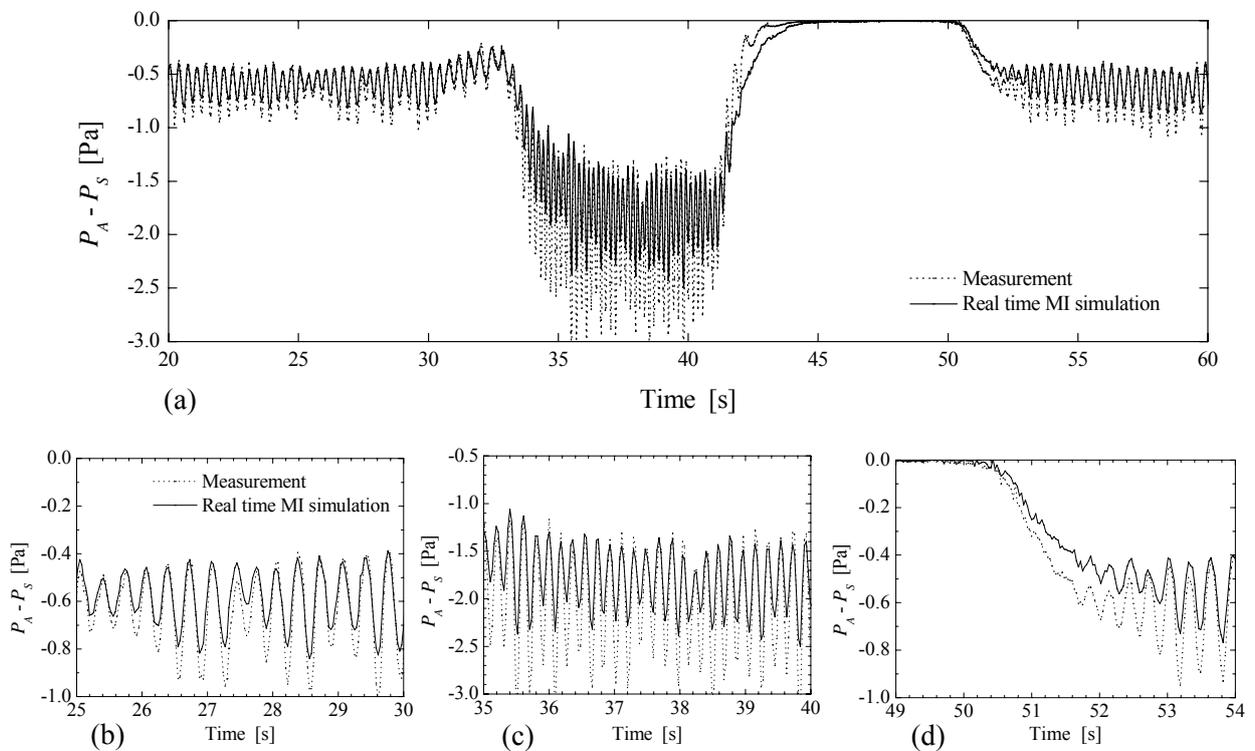


Fig. 7 Comparison of pressure at feedback point A. (a) full time; (b) steady phase; (c) accelerated phase; (d) stop phase.

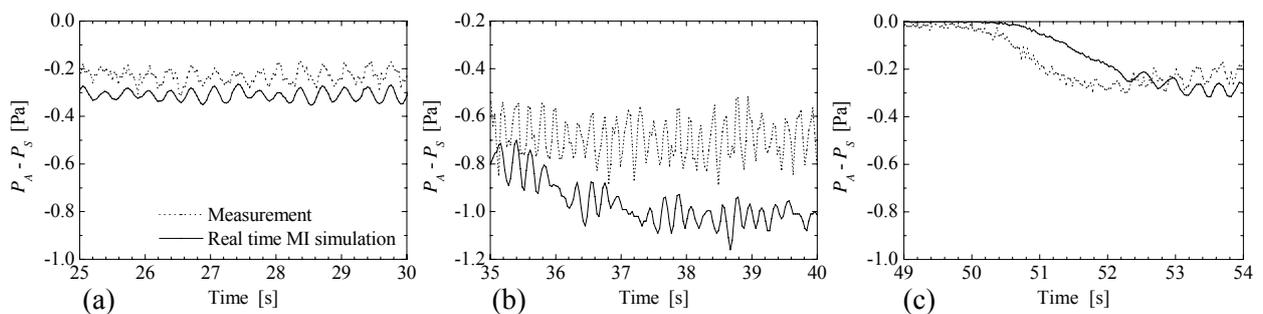


Fig. 8 Comparison of pressure on the sidewall of the wind tunnel ($x = 0$). (a) steady phase; (b) accelerated phase; (c) stop phase.

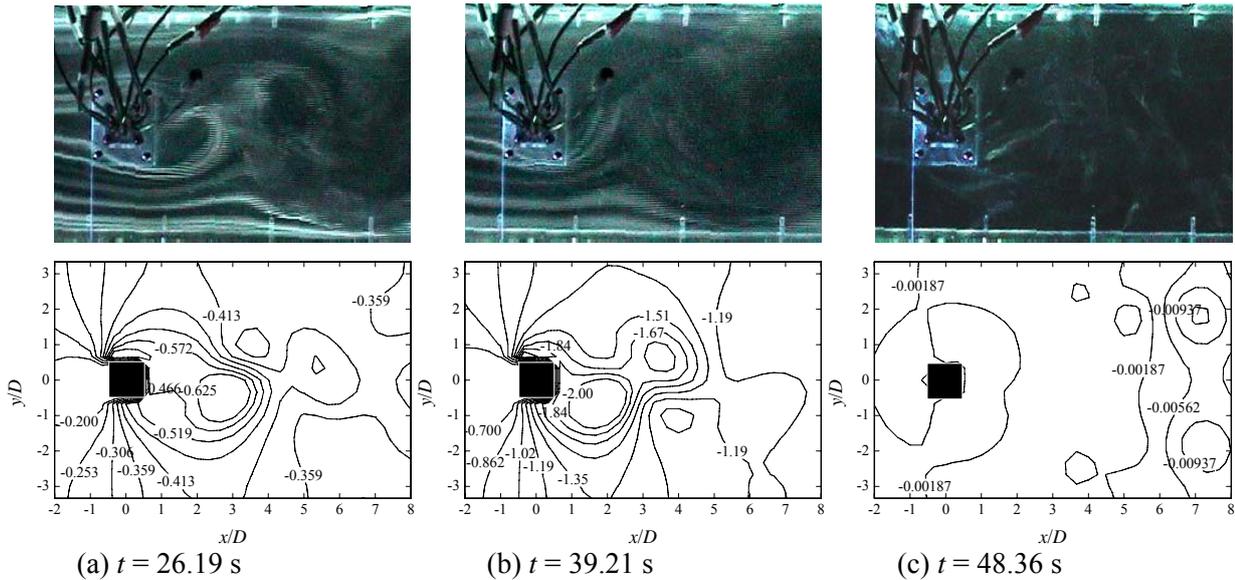


Fig. 9 Experiment and real time MI simulation of Karman vortex at the same instant. Top: Experiment; bottom: MI simulation for pressure field; (a) steady phase; (b) accelerated phase; (c) stop phase.

れるが、実験が定常状態に達してからは、2, 3 周期の圧力変動で計算が実験に収束している。Fig. 8 は、角柱位置($x = 0$)の風洞壁面での圧力変化である。Fig. 8(a)は、定常状態の圧力変化で、平均値に差が見られるが、圧力変化の位相および振幅が実験結果と良く一致している。Fig. 8(b)の加速された状態では、不規則な圧力変動が一部に見られるが、実験と位相が一致した圧力変動も再現されている。Fig. 8(c)は過渡状態であり、フィードバック点の圧力変化と同様に、実験の圧力変動が定常状態に達してからは数周期で実験結果に追従している。

Fig. 9 は、瞬時の圧力場と対応する可視化実験画像を比較している。Fig. 9(a)は定常状態での比較で、実験画像では角柱下側から渦が発生している。下段の対応する圧力分布では、低圧力部が交互に並んでおり、カルマン渦が再現されている。Fig. 9(b)の加速された状態では、低圧力部の間隔が短くなっており、カルマン渦の発振周波数が高くなっていることが確認できる。また、定常状態に比べると渦中心の圧力が定常状態より低下している。Fig. 9(c)は、停止

状態の圧力分布である。流れが停止しているため圧力は、前の二つに比べると非常に小さい。従来は、変動する圧力場を計測することや、実際の流れの瞬時の圧力場をシミュレーションにより再現することは困難であった。リアルタイムに実際の流れ場を解析できる本手法は、流れの制御やモニタリングに有効に利用できると考えられる。

4. 結言

本研究では、圧力計測と流れのシミュレーションを一体化した計測融合シミュレーションにより、角柱後流のカルマン渦列を対象としてリアルタイム解析を行った。計測融合シミュレーションでは、通常のシミュレーションには不十分な空間解像度および時間解像度においても実際の流れの特徴が再現できることから、計算負荷の低減によりリアルタイム解析が実現された。リアルタイム解析によりレイノルズ数が増える流れ場の解析を行い、実際の流れに対応する瞬時の圧力場が再現され、ハイブリッ

ド風洞が流れのモニタリングシステムに有効に利用できることが示された。

参考文献

- 1) T. Hayase and S. Hayashi: State Estimator of Flow as an Integrated Computational Method With the Feedback of Online Experimental Measurement, *Trans. ASME*, **119**, 814/822 (1997)
- 2) T. Hayase, K. Nisugi and A. Shirai: Numerical realization for analysis of real flows by integrating computation and measurement, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **47**, 543/559 (2005)
- 3) 井上慎太郎, 川嶋健嗣, 船木達也, 香川利春: 計測融合シミュレーションを用いた非定常管内流れ場のモニタリング, 計測自動制御学会論文集, **42-7**, 837/843 (2006)
- 4) K. Funamoto, T. Hayase, A. Shirai, Y. Saijo and T. Yambe: Fundamental Study of Ultrasonic-Measurement-Integrated Simulation of Real Blood Flow in the Aorta, *Ann. Biomed. Eng.*, **33-4**, 415/428 (2005)
- 5) K. Nisugi, T. Hayase and A. Shirai, Fundamental Study of Hybrid Wind Tunnel Integrating Numerical Simulation and Experiment in Analysis of Flow Field, *JSME Int. J. Series B*, **47-3**, 953/604 (2004)
- 6) 山縣貴幸, 柴田光, Kasper Smit, 早瀬敏幸, 壁面圧力計測と流れのシミュレーションの融合による実流れの圧力場の再現, 計測自動制御学会東北支部第 232 回研究集会, 232-11 (2006)
- 7) 山縣貴幸, 柴田光, 早瀬敏幸, Kasper Smit, ハイブリッド風洞による角柱後流のカルマン渦列の非定常圧力場の再現, 日本機械学会論文集(投稿中)