

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

Reproduction of Pressure Field in Real Flow by Integrating Wall Pressure Measurement and Flow Simulation

○山縣貴幸*, 柴田光*, キャスパーシMIT**, 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), 数値シミュレーション(Numerical simulation), 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)

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

流れ場における速度や圧力などの状態量を取得する方法には, 風洞実験に代表される実験的手法と数値シミュレーションによる解析的手法がある. 実験計測では, データの信頼性の評価が容易であるため, 実現象の状態量を正確に計測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. また, 精度の良い数値シミュレーションを行うためには, 多くの計算時間を要する. 近年, 数値シミュレーションの産業応用が盛んに行われており, その場合

には, 限られた計算機資源や計算時間で信頼できる解を得ることも重要である.

実現象の詳細な状態量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

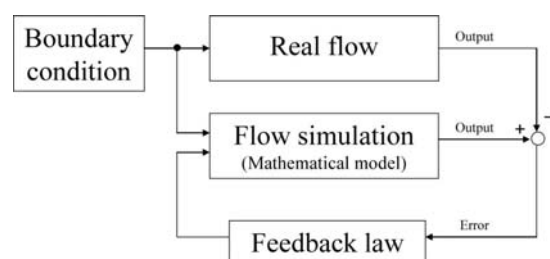


Fig. 1 Structure of flow observer

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。流れのオブザーバである計測融合シミュレーションの概念図を Fig. 1 に示す。本手法を応用し、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、風洞実験と計測融合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。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格子解像度において、実験値と一致する速度の変動周波数や振幅を再現できることがわかっている²⁾。しかし、これまでのハイブリッド風洞では、圧力場の再現に関する検証は行われていない。圧力場は、流れの構造に影響を及ぼす因子であるため、重要な流れの情報である。

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計測融合シミュレーションを行い、ハイブリッド風洞による圧力場の再現性の検証を行う。圧力場の再現性は、風洞側壁における圧力計測と対応する位置における解析結果とを比較し評価する⁵⁾。

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)、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 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。送風機は、インバータ(三菱電機, FR-520-1.5K)により制御され、流量と周波数の関係は予備実験により求められた。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圧力を計測する(Fig. 4 参照)。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。ワークステーションは、フィードバック用に計測された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。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、位相解析による特徴点抽出法⁶⁾を用いて圧力場が可視化表示される。これは、圧力の最大、最小点および鞍点の特徴点を探索し、特徴点のまわりに色の変化の勾配を大きく与えることで、圧力場の特徴的な構造を効果的に表示することができる可視化法である。

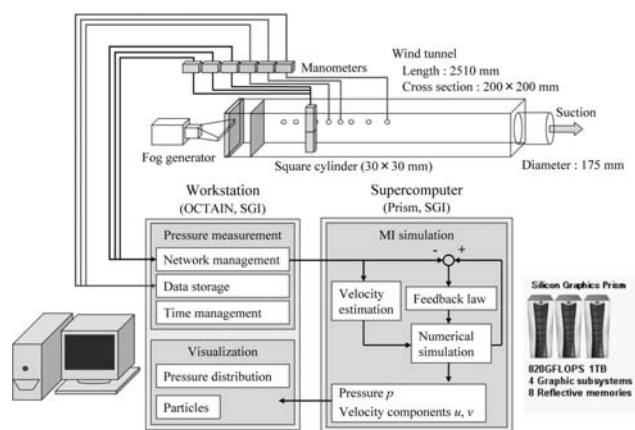


Fig. 2 Configuration of the hybrid wind tunnel

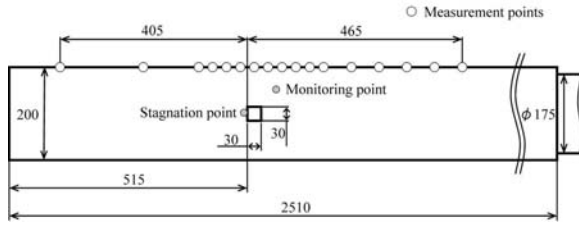


Fig. 3 Geometry of the wind tunnel and position of pressure measurement

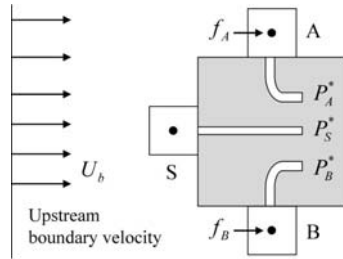


Fig. 4 Details of the square cylinder

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。

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

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

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} が支配方程式に外力項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_{BS} , 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。記号のアスタリスクは、計測結果を表している。

$$\mathbf{f} : \begin{pmatrix} f_A \\ f_B \end{pmatrix} = -KA \begin{pmatrix} P_{AS} - P_{AS}^* \\ P_{BS} - P_{BS}^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 K はフィードバックゲイン、 A はコントロールボリュームの断面積を示す。フィード

バック信号が加えられることにより、計算した圧力が計測した圧力に近づくように主流方向の速度が加減速される。

計算格子は、風洞のほぼ全領域を対象とする 248×21 点の直行格子である。格子間隔は角柱一辺 $D=30 \text{ mm}$ の $1/3$ である $dx=dy=10 \text{ mm}$ 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壁面に近づくほど格子間隔が小さくなる不等間格子を用いた。最小の格子間隔は、 $dy=7.5 \text{ mm}$ である。通常のシミュレーションにとっては荒い計算格子だが、フィードバックの効果により角柱後流のカルマン渦が再現できることが確認されている²⁾。上述の支配方程式を、有限体積法に基づいて離散化し、SIMPLER 法に類似の手法を用いて解いた。

2-3 圧力計測

計測融合シミュレーションによって再現された圧力場の検証のために、計算領域に対応する平面での風洞側壁における圧力を計測した。圧力は、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(SSK, DP8A-2)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(NEC 三栄, 9B02, 10 Hz)および A/D 変換機(VMIC, VMIPCI-3322, 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、 $\pm 0.05 \text{ Pa}$ 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 $15 \sim 30$ 秒の 15 秒間で求めた。

3. 解析結果および考察

3-1 フィードバックゲイン

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、式(3)に示されるフィードバックゲイン K である。最適なフィードバックゲインを設定するために、Fig. 4 に示すフィードバック点 A における圧力変化を比較した。上流境界条件は、実験と一致させるために、 $Re=1200$ となる流入速度の一様分布を与えた。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、フィードバックゲインを $K=0.0, 1.0, 1.5, 1.8, 2.0, 2.2$ と変えて計算を行った。フィードバックゲイン $K=0.0$ は、フィードバックを行わない通常のシミュレーションと等価である。

Fig. 5 にフィードバックゲインを変えた場合のフィードバック点 A における圧力の時間変化をよどみ点からの差圧で示す。計測した圧力が、一定周期で変化していることが確認できる。通常のシミュレーションでは、粗い計算格子を用いたために角柱から発生するカルマン渦を再現できず、下流の離れた場所で渦が発生した。そのため、角柱側面での圧力変化は小さく、また、平均圧力は計測よりも高く見積もっている。一方、フィードバックを行った場合は、圧力変化の位相が計測と完全に一致しており、振幅も比較的よく一致している。フィードバックゲインを比較すると、ゲインが大きい方が、計測値に近づいているが、フィードバックゲインを $K=2.2$ とした場合は、計算が発散した。フィードバックゲイン $K=1.8$ と $K=2.0$ の差がわずかであるのに対して、 $K=2.0$ の方は計算時間が約 2 倍となることから、 $K=2.0$ ではフィードバック信号が大きすぎて計算が不安定になっていると考えられる。したがって、以降の計測融合シミュレーションでは、 $K=1.8$ とする。以前の研究²⁾では、モニター点(Fig. 3 に示す)

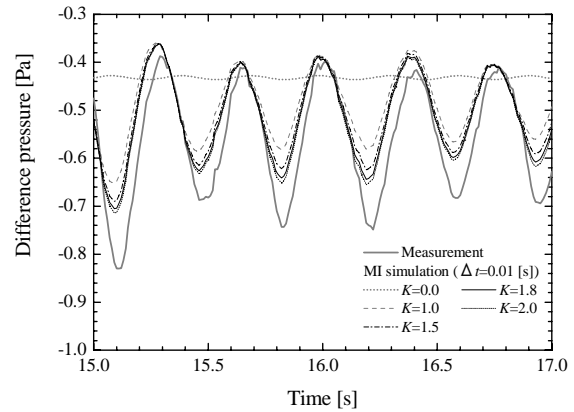


Fig. 5 Comparison of the pressure at the feedback point A between experiment and computation with various feedback gains

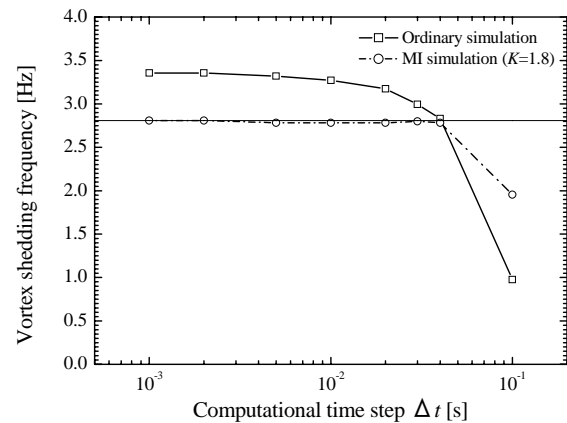


Fig. 6 Vortex shedding frequency with time step

の速度がレーザー Doppler 流速計による計測値と最も良く一致するフィードバックゲインとして $K=1.8$ を用いており、圧力場の再現においても最適ゲインは同じ値であった。

3-2 カルマン渦の発振周波数

通常のシミュレーションと計測融合シミュレーションにおいて計算時間刻みを変えた場合のカルマン渦の発振周波数と実験結果を比較した結果を Fig. 6 に示す。カルマン渦の発振周波数は、フィードバック点 A の圧力変化を用いて、数値解析の過渡状態を除いた 15~30 秒間のデータで求めた。実験計測で得られたカルマン渦の発振周波数は、2.8 Hz である。通常のシミュレーションでは、時間刻みが $\Delta t=$

0.002 s 以下で一定の発振周波数が得られているが、実際よりも高く見積もっている。過去の研究においても、二次元のカルマン渦解析では、レイノルズ数 $Re=1000$ 以上において、渦の発振周波数が実験値と一致しないことが報告されている⁷⁾。一方、計測融合シミュレーションでは、時間刻みを $\Delta t=0.04$ s に設定した場合まで実験と一致する発振周波数が得られている。このように、時間刻みを大きく設定した場合にも実際の流れの特徴を再現できる点は、計算負荷の軽減につながり、リアルタイム解析実現の大きな助けとなる。

3-3 平均圧力と圧力変動

前節において、計測融合シミュレーションは、計算時間刻みを $\Delta t=0.04$ s まで大きくしても実験値と一致するカルマン渦の発生周波数が得られたため、時間刻みが風洞壁面での平均圧力と圧力変動に及ぼす影響を調べた。計算条件は、前節と同様に $Re=1200$ の流量一定とし、フィードバックゲインは $K=1.8$ とする。時間刻みは、 $\Delta t=0.001, 0.002,$

0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 s とした。

Fig. 7 は風洞壁面での平均圧力を実験結果および各時間刻みの計算結果で比較しており、左側が通常のシミュレーション、右側が計測融合シミュレーションである。時間刻み $\Delta t=0.01$ s で時間刻みに依存しない計算結果が得られたため、より小さい時間刻みでの計算結果は省略した。Fig. 7(a)の通常のシミュレーションでは、角柱の位置で圧力が降下した後の圧力の回復が緩やかであり、実験値とは異なった変化を示している。また、時間刻みが大きくなると計算精度が悪くなり、実験結果との差が増加している。Fig. 7(b)の計測融合シミュレーションでは、時間刻みによる違いはわずかであり、通常のシミュレーションよりも実験結果に近い結果が得られた。

Fig. 8 は風洞壁面での圧力の RMS 値の比較である。Fig. 8(a)の通常のシミュレーションでは、角柱近傍で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圧力の RMS 値が最大値を示している。これは、粗い計算格子を用いているために、角柱から発

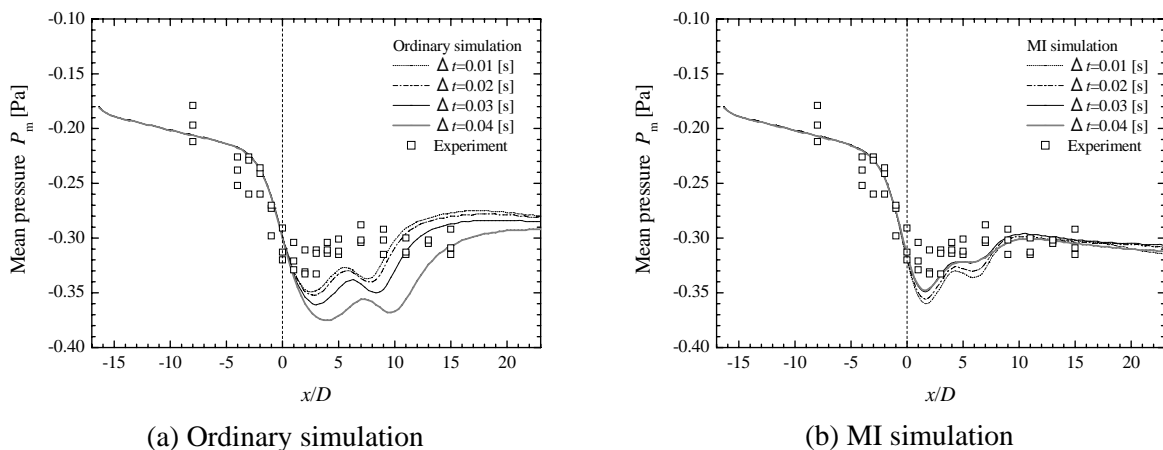


Fig. 7 Comparison of mean pressure with experiment along the sidewall of the wind tunnel

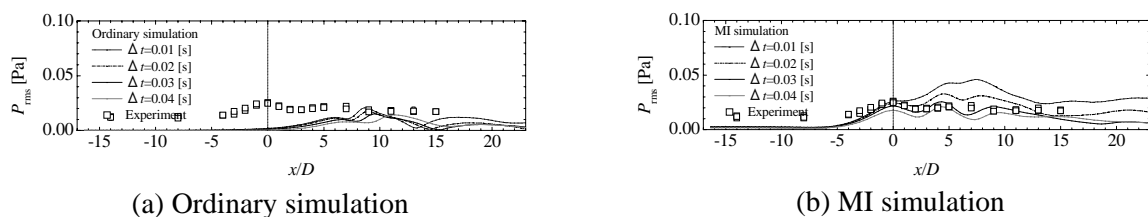
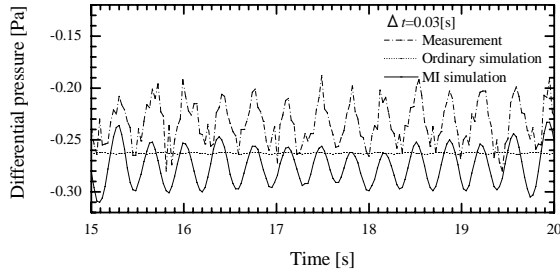
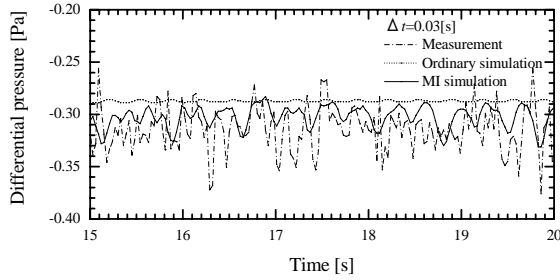


Fig. 8 Comparison of root-mean-square pressure with experiment along the sidewall of the wind tunnel



(a) $x/D = -1D$



(b) $x/D = 15D$

Fig. 9 Variation of pressure on the sidewall of

生するカルマン渦を再現できず、角柱から離れた下流において渦が発生したためである。Fig. 8(b)の計測融合シミュレーションでは、風洞壁面の圧力変動が実験結果とよく一致しており、時間刻みを大きくした場合にも圧力変動を再現できていることがわかる。

3-4 圧力変動の相関

Fig. 9は、風洞壁面における圧力の時間変化の比較である。解析結果は、圧力の平均値およびRMS値が実験値と良く一致した時間刻み $\Delta t = 0.03$ sのものである。Fig. 9(a)は、位置 $x = -1D$ での圧力の時間変化である。通常のシミュレーションにはほとんど圧力の変動は見られないが、計測融合シミュレーションは変動の振幅が計測結果と良く一致している。また、圧力変動の位相も計測結果と一致しており、実際の圧力変化をよく再現できていることがわかる。Fig. 9(b)は、フィードバック点から離れた下流の $x = 15D$ での圧力変化である。フィードバックの影響により、通常のシミュレーションよりも計測融合シミュレーションのほうが、計測結果に

近づいているが、変動の様子は大きく異なっている。

フィードバックの効果が及ぶ領域を評価するために、風洞壁面の各計測点での圧力変化と対応する解析結果から以下の式で定義される相関係数 γ を求めた。

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (p_{ci} - p_{cm})(p_{si} - p_{sm})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_{ci} - p_{cm})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_{si} - p_{sm})^2}} \quad (4)$$

ここで、 p_c および p_s はそれぞれ解析結果および計測結果の圧力、 n はデータ数、添え字の m は平均値である。相関係数は二つのデータの相関を示す指標で、 $-1 \leq \gamma \leq 1$ の値をとる。同じデータを用いた場合の相関係数は1である。Fig. 5に示す解析結果($K=1.8$)と計測結果の相関係数は、 $\gamma = 0.96$ であった。Fig. 10に各計測点における相関係数を示す。各計測点につき3回の実験を行い、各計測データにおける相関係数を求めた。図中の線は、3データの平均値を示している。通常のシミュレーションでは、どの計測点においても相関はほぼゼロである。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において相関にピークが見られる。また、フィードバックの効果は、風洞壁面においてはフィードバック点の位置から $x = \pm 3D$ の領域において大きく作用していることがわかる。

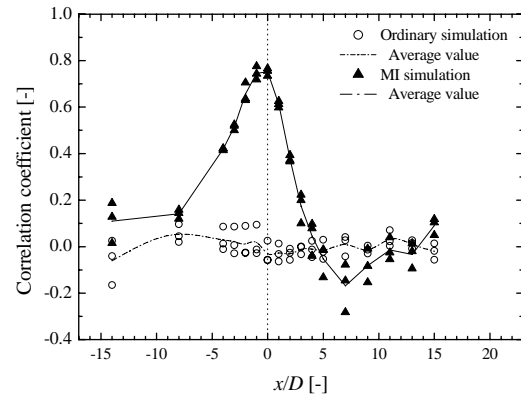


Fig. 10 Correlation coefficient between measured pressure and computed pressure along the sidewall of the wind tunnel

通常の数値シミュレーションにおいては不十分な精度の計算モデルで、計測融合シミュレーションは実際の流れの圧力場を良好に再現することができた。計算負荷の低減は、流れ場のリアルタイム解析を可能とするため、本稿で用いたハイブリッド風洞は、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するシステムへの応用が期待される。

4. 結言

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おける圧力場の再現性の検証のため、解析結果と実験計測により得られた風洞壁面での圧力とを比較した。通常シミュレーションでは不十分な精度である計算条件において、計測融合シミュレーションでは良好に実流れの圧力場を再現できた。特にフィードバック点の位置から±3Dの範囲では、風洞壁面における圧力変動の位相が解析結果と実験結果とで一致した。計算負荷を小さくできる二次元解析では、リアルタイムに流れ場をモニタリングするシステムへの応用が期待される。一方、流れ場の一部の情報から全体の状態量を正確に推定するためには、より実現象に近い三次元計算モデルを用いた検討が必要になると考えられる。

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) 山縣貴幸, 柴田光, K. Smit, 早瀬敏幸: ハイブリッド風洞によるカルマン渦列のリアルタイム解析の検証, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, CD-ROM, (2006)
- 6) S. Takahashi, Y. Takeshima and I. Fujishiro: Topological volume skeltonization and its application to transfer function design, *Graphical Models*, **66**, 24/49 (2004)
- 7) R. W. Davis and E. F. Moore: A numerical study of vortex shedding from rectangles, *J. Fluid Mech.*, **116**, 475/506 (1982)