

実験計測と数値解析を統合したハイブリッド風洞に関する基礎的研究 (リアルタイム処理に向けた計算速度と精度の検討)

Fundamental Study of Hybrid Wind Tunnel -Validation of Computational Speed and Accuracy for Realtime Operation-

○ 仁杉 圭延*, 白井 敦*, 早瀬 敏幸*

○ 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：実験計測(Experimental measurement), 数値解析(Numerical analysis),
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 早瀬研究室

仁杉圭延, Tel.: (022)217-5678, E-mail: nisugi@reynolds.ifs.tohoku.ac.jp

1. 緒言

流体解析は工学，産業における様々な分野に利用され，設計，開発上で重要な役割を担っている．従来，流れ場の解析は風洞実験に代表される実験的手法と，近年の計算機の性能向上に伴い発展した計算機シミュレーションでの数値解析的手法が主として行われている．これら二つの手法はそれぞれ長所短所があり，対象とする問題ごとに使い分けられている．一般に実験的手法ではデータの信頼性の評価が容易であるが，流れ場全体の情報を得るのは基本的に困難である．近年，PIV などの手法により流れ場内の任意の断面における速度計測が行われているが，流れ場内への散乱粒子の混入や強力なレーザー光源などの装置を必要とする難点を持つ．一方，数値解析では流れ場全体の情報は容易に得られるが，データの信頼性はモデルに依存する．

また，乱流を含む非定常流の解析においては，流れ場の統計量に関する再現性は期待されるが，未知の外乱などの不確定性を含んだ実際の流れ場を表現することは原理的に困難である．

そこで，制御工学におけるオブザーバの概念を流れ場に対して構成することで二つの解析手法を融合した流れのオブザーバが早瀬[1]により提案されている．流れのオブザーバの概念図を Fig. 1 に示す．流れのオブザーバとは，まず 解析対象である実際の流れがあり，

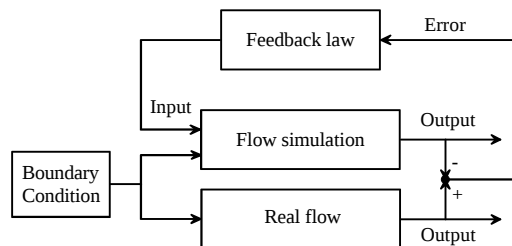


Fig. 1 Basic structure of flow observer

それと同様な境界条件を有するナビエストークス式，連続式に基づいてモデル化された流れ場を計算機上に構成する．そしてそれら二つの流れ場から観測出力を取り出し，その偏差をフィードバック則に従って，境界条件，あるいは体積力として数値解析にフィードバックする．それにより数値解析上の流れ場を実際の流れ場に収束させ，実際の流れ場の情報を得るというものである．基本的な構成は一般のオブザーバと同じであるが，Flow simulation の部分で一般のオブザーバで用いられる低次元の線形モデルではなく，流れ場の差分方程式に基づいた数千次元の非線形モデルを用いる点と，フィードバック則を流体力学的な考察から決定する点で異なる．

流れのオブザーバは PIV のように特殊な装置を用いずに，容易に計測可能な観測出力から流れ場内の状態量を推定することが可能である．また，従来の手法では実測が困難であった流れ場の解析が可能となり，温度場など他の状態量への拡張も期待される．

本論文では代表的な流体解析装置である実験風洞と数値解析を用いて流れのオブザーバを構成し，両者の長所を併せ持つハイブリッド風洞システムを実現する．特に，角柱後流のカルマン渦列を発生する流れ場を対象として取り上げる．前報では，角柱壁面上の流体に体積力を加えるハイブリッド風洞について検討したが，代表点での速度の平均値や周波数が実験値と一致するものの，変動位相などは一致しなかった[2]．今回は，フィードバック則について検討し，ハイブリッド風洞の解析性能を流れ場全体で評価する．また，リアルタイムでの解析を実現するため，計算条件を緩和した場合の解析性能について検討する．

2. ハイブリッド風洞

ハイブリッド風洞の模式図を Fig. 2 に示す．装置は大別して 2 つの部分に分けられる．一つは風洞実験と測定を行う実験部であり，一つは数値解析を行う

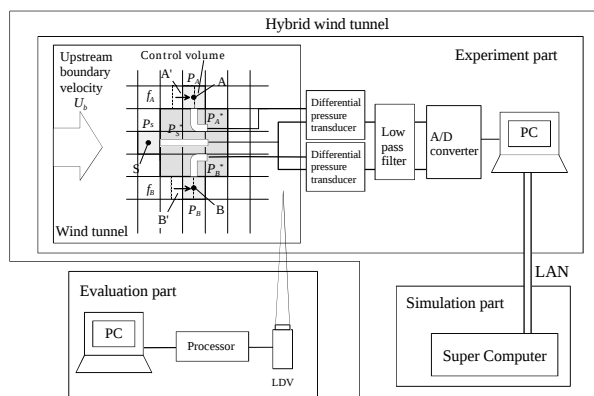


Fig. 2 Hybrid wind tunnel

数値解析部で，これらよりハイブリッド風洞は構成される．実験部では角柱前面と両側面の中央に圧力孔を設け，微差圧計(SSK, DP8A-2)に接続し，角柱前面のよどみ点圧力を基準圧として角柱側面の圧力を測定する．測定された圧力信号は，対象とするカルマン渦の発振周波数がほぼ 3Hz であることを考慮して，10Hz のローパスフィルタを介し，A/D 変換された後に PC に取り込まれる．

得られた圧力測定値は高速ネットワークで結ばれたスーパーコンピュータへ転送される．数値解析部では圧力測定値を用いた数値解析を行い，計算機上に実際の流れを実現する．

さらに，ハイブリッド風洞の解析結果を検証するための評価部を設けた．ここでは実際の流れ場をレーザドップラ流速計を用いて計測し，ハイブリッド風洞の解析結果と比較評価する．

本節では各構成要素について述べた後に，それらを統合する手法を説明する．

2.1 実験手法

ハイブリッド風洞の実験風洞部の平面図を Fig. 3 に示す．実験風洞の流路部分は全長 2510mm で 200 × 200mm の正方形管である．3m のフレキシブルチューブ(内径 82mm)を通して接続された送風機(西村電機, NK-200)をインバータ(三菱電機, FR-E520-1.5K)により制御し，右端から吸気することで，風洞内に

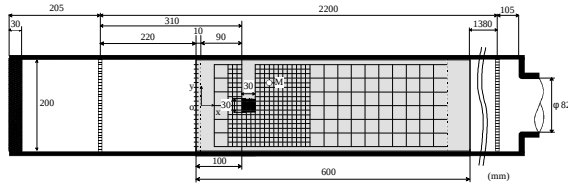


Fig. 3 Domain and coordinate system

流れを発生させる．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 SR HR-13，厚さ 30mm)を設置し，さらに上流端から 205mm，2405mm の位置にスチールメッシュ(5mm 矩形格子，厚さ 1mm)を設置した．上流端から 515mm の位置の流路中央に 30 × 30 × 200mm の角柱(アクリル樹脂製)を設置した．角柱の上流側 100mm の位置を上流断面として，主流方向に 600mm の領域をハイブリッド風洞による解析の対象とする(グレー領域)． x, y, z はそれぞれ主流方向，幅方向，垂直方向座標を表しており，幅方向，垂直方向の流路中心軸上で，角柱から上流側に 90mm の点を原点とした．実験条件として $x=0$ の断面における平均流速 U_0 を 0.6m/s とした．対応するレイノルズ数 $Re(=U_0 D/\nu, D$:角柱幅)は 1200 である．

評価部では，フォグジェネレータ(DANTEC, 2010)によって発生させたオイルの微粒子を流路内に導入し，レーザドップラ流速計(TSI, LDP100, 以下, LDV と称す)によって x 方向速度成分を測定する．今回使用した測定点は Fig. 3 に示される解析領域内の格子上の点である．特に流速の変動が激しい角柱周りは測定点の間隔を 10mm とし，それ以外の領域は 30mm 間隔とした．総測定点数は 413 点である．角柱面上の圧力計測と各測定点での流速計測はパルス信号をトリガーとして入力することで同期させ，それぞれ 30 秒間の測定を行った．

2.2 数値解析手法

数値解析では，角柱の軸に垂直な 2 次元領域を対

象とする．対象とする流体を非圧縮の粘性流体とし，ナビエーストックス式と連続式を基礎方程式とする．

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

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

ここで，式(1)において外力項 $\mathbf{f}$ が加えられていることに注意する．この外力項は後に述べるハイブリッド風洞における数値解析へのフィードバックに関する項である．

境界条件として上流端に速度 U_b の一様流を与える．

$$u(y)=U_b, \quad v(y)=0 \quad \text{at } x=0 \quad (3)$$

ここに u, v はそれぞれ x, y 方向の速度成分であり，上流境界速度 U_b はフィードフォワードのための入力変数として取り扱う．また，下流端は自由流出とし，物体壁にはすべりなし条件を与え，速度場を 0 とする初期条件を与える．

対象とする 2 次元領域 (Fig. 3 グレー領域) に，格子間隔を角柱一辺の 1/3 である 10mm とした $N_x \times N_y=60 \times 21$ の等間隔スタッガード格子系を設定した．対象とする流れ場を数値解析において正確に再現するには，より細かな格子が必要と考えられるが，ここでは，計算負荷の軽減によるリアルタイム処理の実現を考慮し，また，フィードバックの効果による解析精度の改善を期待して，比較的粗い格子系を用いている．なお，数値風洞の壁面の位置は実験風洞より幅方向に 5mm 外側になっているが，本論文ではカルマン渦を考察の対象としているので，実験と数値解析における風洞壁位置のわずかな違いは，大きな影響を与えないと考えられる．

上で述べた基礎方程式群を有限体積法の一つである SIMPLER 法に類似の方法を用いて数値的に解く [3]．対流項には 3 次精度の QUICK スキーム，時間微分項には 2 次精度の陰解法を使用した [4]．主な計算条件を Table 1 に示す．

Table 1 Computation condition

Square cylinder diameter	D	0.03m
Mean velocity	U_0	0.605m/s
Density of air [20]	ρ	1.229kg/m ³
Reynolds number	Re	1200
Computational domain	$L_x \times L_y$	$20D \times 7D$
Grid points	$N_x \times N_y$	60×21
Grid spacing	$h_x \times h_y$	$D/3 \times D/3$

2.3 実験計測と数値解析の統合

実験による測定と数値解析の統合手法について述べる．対象とする流れ場において，角柱後流の流れは角柱表面からの剥離に大きく支配されると考えられる．そこで，本研究では，Fig. 2 に示す角柱側面上の A, B 点に注目し，数値解析へフィードバックする観測出力として角柱前面と両側面の圧力孔から取り出した圧力(P_A^* , P_B^* , P_S^*)の差圧(P_{AS}^* , P_{BS}^*)を用いる．

$$\begin{pmatrix} P_{AS}^* \\ P_{BS}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_A^* - P_S^* \\ P_B^* - P_S^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

以下では，*は実験値を表す．

数値解析では，実験での圧力測定位置と対応するコントロールボリュームにおける圧力(P_A , P_B , P_S)から同様に， P_S を基準とした圧力差(P_{AS} , P_{BS})を求める．

$$\begin{pmatrix} P_{AS} \\ P_{BS} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_A - P_S \\ P_B - P_S \end{pmatrix} \quad (5)$$

これらの観測出力の偏差に比例した体積力をフィードバック量として数値解析に与える．

$$\begin{pmatrix} f_A \\ f_B \end{pmatrix} = -KA_C \begin{pmatrix} P_{AS} - P_{AS}^* \\ P_{BS} - P_{BS}^* \end{pmatrix} \quad (6)$$

式(6)において， f_A , f_B はコントロールボリューム A', B' (Fig. 2 の破線)での x 方向の運動方程式に対する体積力を表し， K はフィードバックゲイン， A_C はコントロールボリュームの x 方向境界面面積を表す．このフィードバックにより，数値解析における圧力のコントロールボリュームの左側の界面での x 方向

速度成分が加減速され，その結果，圧力方程式により圧力の偏差が減少することが期待される．

この局所的なフィードバックは，カルマン渦の発生に伴う変動成分についてはフィードバックの効果が期待できるが，上流側の境界条件に支配される流れ場全体の定常速度成分には効果がない．そこで，上述した体積力に加え，流れ場の一樣流速度を，実験により得られる角柱前面と側面の圧力データから推定し，上流境界速度にフィードフォワードする．一樣流速度の推定値 U_e は，ピトー管計測の原理を応用して，次式により求める[5]．

$$U_e = K_e \sqrt{\frac{2P_m^*}{\rho}} \quad (7)$$

ここで K_e は速度係数であり，設計パラメータとして取り扱う．動圧の推定値 P_m^* は，観測出力である角柱側面の圧力(P_{AS}^* , P_{BS}^*)がカルマン渦の発生により変動の位相が 180 度ずれる性質を利用し，次式により求めた．

$$P_m^* = -\frac{P_{AS}^* + P_{BS}^*}{2} = P_S^* - \frac{P_A^* + P_B^*}{2} \quad (8)$$

式(8)に従い P_m^* を求めることで P_m^* のカルマン渦による変動は抑制されるものの，主流の乱れやノイズによる高周波数の変動成分が存在する． U_e に含まれるその影響を取り除くため次式に従う 1 次のローパスフィルタを介して上流境界速度 U_b を与えた．

$$T_c \frac{dU_b}{dt} + U_b = U_e \quad (9)$$

ここに T_c は時定数である．

以上に述べたハイブリッド風洞のブロック線図を Fig. 4 に示す．本研究では実際の流れの観測出力である角柱壁面上の圧力を利用し，3 つの信号を数値解析に与える．2 つは渦発振に伴う変動成分の偏差を体積力としてフィードバックし (Fig. 4 一点鎖線)，もう 1 つは流れ場の定常成分を上流境界速度としてフィードフォワードする (破線)．設計パラメータは式(6)

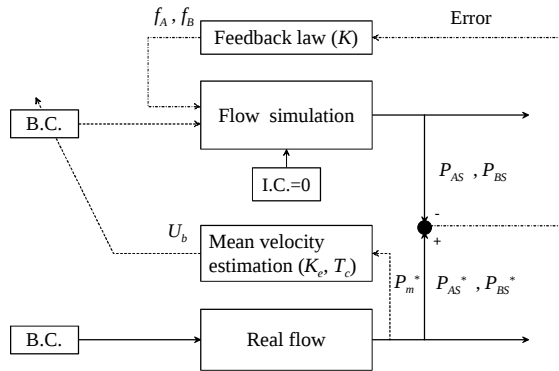


Fig. 4 Structure of hybrid wind tunnel

のフィードバックゲイン K ，式(7)の速度係数 K_e ，式(9)の時定数 T_c の3つである．

3. ハイブリッド風洞による解析結果

ハイブリッド風洞の設計パラメータは，種々の組み合わせについて計算を行い，カルマン渦の速度変動が明瞭に現われる流れ場中の代表点 $M[(x,y,z)=(5D,1.67D,0)]$ (Fig. 3 参照)における x 方向速度が最も良く実験結果に一致するように設定した．

また，今回は計算速度に関する計算条件について検討し，リアルタイム処理を実現する．以下では，まず，十分な精度が期待されるが，多くの計算時間を必要とする厳密条件と，計算負荷を軽減させた緩和条件でのハイブリッド風洞の解析精度，計算速度について流れ場の代表点で検討した後，流れ場全体についてハイブリッド風洞の解析結果をフィードバックを与えない通常の数値解析と比較する．

3.1 代表点における比較

時間刻み，収束判定値，行列解法の収束判定値について種々の組み合わせについて計算を行った．時間刻みは対象とするカルマン渦の発振周期 0.3s に対して十分な分解能をもつ範囲で決定した．その結果，十分な精度が期待される従来と同じ厳密条件と，リアルタイム処理が可能な緩和条件 B が Table 2 のように得られた．点 M における速度変動を Fig. 5 に示す．

Table 2 Computational condition related to calculation speed

	厳密条件 A	緩和条件 B
時間刻み	1ms	25ms
収束判定値	10^{-3}	10
行列解法の収束判定値	10^{-6}	10

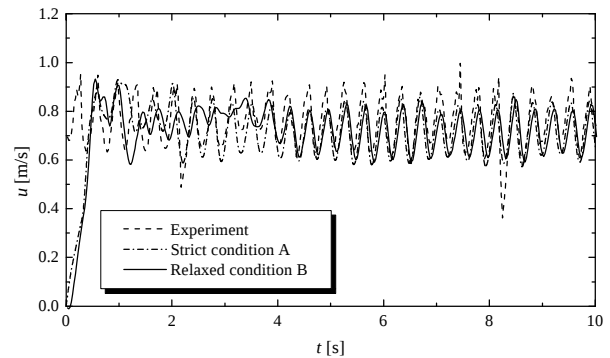


Fig. 5 u -velocity at monitoring point M

Table 3 Comparison among characteristic values at monitoring point M obtained with experiment and hybrid wind tunnel of strict and relaxed condition.

	平均値	Rms	ピーク周波数	経過時間
実験	1	1	1	1
ハイブリッド風洞 厳密条件	0.94	0.84	1.00	515
ハイブリッド風洞 緩和条件	0.96	0.76	1.00	0.96

初期速度を全て 0 とした厳密条件 A でのハイブリッド風洞の結果（一点鎖線）は $t=0-3s$ の間の過渡状態の後，実験波形（破線）を正確に再現している．また，緩和条件 B でのハイブリッド風洞の解析結果を実線で示す．過渡状態の長さが厳密条件の場合より長くなっているが，過渡状態以後の変動は厳密条件の場合とほぼ一致している．

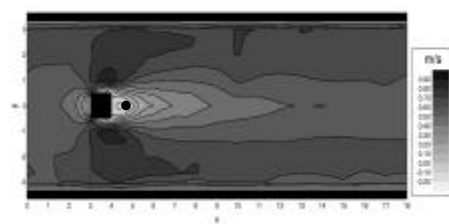
これらの解析結果を定量的に評価したものを Table 3 に示す．評価量として，それぞれの波形の平均値，変動成分の rms 値，FFT 解析によるピーク周波数，および，経過時間を用いた．経過時間を除く表の値は 30 秒間のデータのうち 通常の数値解析における過渡状態を除いた 10s から 30s までのデータで求めた．ハイブリッド風洞を用いた結果では平

均値, rms 値は実験に漸近し, ピーク周波数は完全に一致した. 緩和条件を用いた場合でも, これらの精度に関して顕著な違いはみられない. 経過時間に関しては, 厳密条件を用いた場合, 実験の経過時間よりも 515 倍の計算時間を要するが, 緩和条件を用いた場合, 0.96 となり, リアルタイムでの処理が可能となる. これらの結果から, 緩和条件を用いたハイブリッド風洞は, 厳密条件の場合とほぼ同じ解析精度で, リアルタイムでの解析が可能となることが示された.

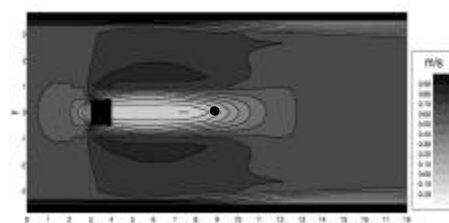
3.2 流れ場全体での比較

次に x 方向速度 u の速度場について, LDV による測定結果と通常の数値解析結果, およびハイブリッド風洞の解析結果の比較を行った. 実験風洞における速度場は Fig. 3 の格子点の各位置で LDV により 30 秒間速度を計測し, その際同時に角柱表面の圧力も計測した. 全格子点(413 点)における計測を行った後に, 各測定点における速度計測に対応する圧力データを用いたハイブリッド風洞による解析を行い, 得られた結果を LDV の測定結果と比較した. LDV の測定値とハイブリッド風洞の結果の比較には速度 u の平均値, u の変動成分 u' の rms 値を用いた. これらの値を算出する際には, 前節と同様に数値解析の過渡状態の影響を取り除くため $t=10\text{--}30\text{s}$ の値を用いた. 評価対象領域を $x=0\text{--}18D$ (Fig. 3 破線)とし, レーザー光が角柱によって遮断される領域($x=3D\text{--}4D$, $y=-0.5D\text{--}3.5D$)は, 便宜上, 対象領域の中心軸($y=0$)について対称な点でのデータで補間し, 角柱前方($x=D$)と角柱後流($x=8D\text{--}18D$)の格子間隔の大きな領域では, y 方向に $D/3$ の間隔での値を与えるため, y 方向の測定点のデータで線形補間し 壁面での値を 0 とした. なお, 以下に示す等値線図の x, y 座標は簡単のため, 角柱幅 D を代表寸法とした無次元量で表した.

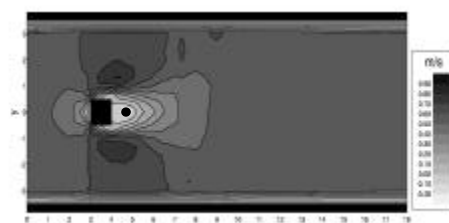
実験, 数値解析およびハイブリッド風洞における



(a) Experiment



(b) Simulation

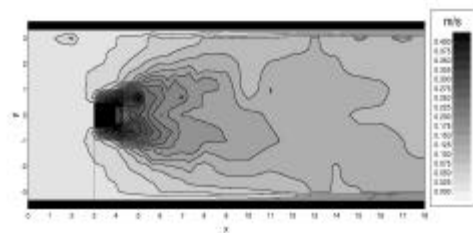


(c) Hybrid wind tunnel

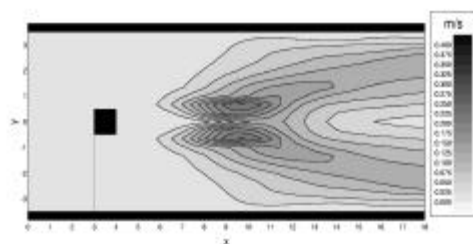
Fig. 6 Distribution of averaged u -velocity

速度 u の平均値の等値線図をそれぞれ Fig. 6(a)-(c)に示す. 図の等値線レベルは白から黒へ値が大きくなる. また, 速度 0 の線に $\bullet$ を付す. (a)の実験結果では, 角柱背後に平均速度が負になる逆流領域が存在している. また, 角柱側面から斜め下流方向に伸びる平均速度の相対的に大きな領域が存在する. 一方, 数値解析結果(b)では, 角柱下流域の逆流領域が実験結果に比べて下流方向に長くなっている. 速度の最小点の x 座標は実験結果では $4.3D$ であるのに対し, 数値解析結果では $7.7D$ となっている. ハイブリッド風洞(c)では, 数値解析(b)に比べてより実験に近い平均速度場が得られ, 速度の最小点の x 座標は $4.7D$ となっている. すなわち, 角柱背後の逆流領域の大きさ, 速度の最小点の位置などもほぼ実験と一致し, 幅方向の放射状の速度分布も再現されている.

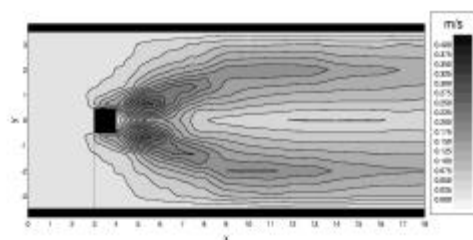
次に, 実験, 数値解析およびハイブリッド風洞に



(a) Experiment



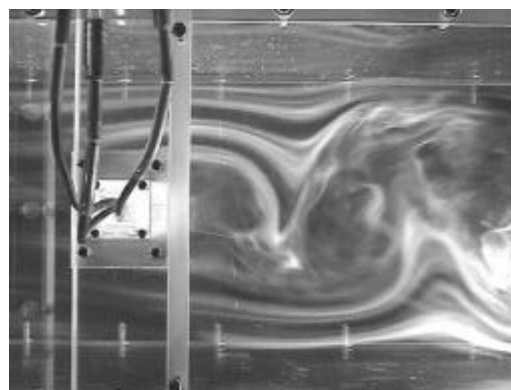
(b) Simulation



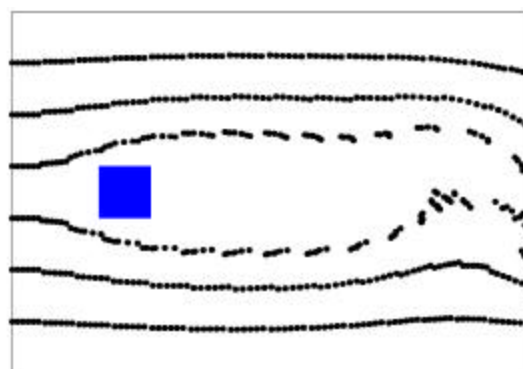
(c) Hybrid wind tunnel

Fig. 7 Distribution of rms of u -velocity fluctuation
 おける変動成分 u' の rms 値の等値線図をそれぞれ Fig. 7(a)-(c) に示す．実験結果(a)では，カルマン渦の発生による速度の変動に対応して，角柱背面のコーナー付近に大きな rms 値が生じている．また，rms 値の分布は角柱前縁から放物線状に分布し， $x = 10D$ 以降では大きな変化は見られない．数値解析結果(b)では，カルマン渦が実験に比べてより下流の領域で発生するために，rms 値の大きい領域が角柱の直後ではなく，角柱のかなり下流の位置で見られる．これに対し，ハイブリッド風洞(c)では，角柱背面付近の高 rms 値の位置がわずかに異なるものの，その大きさや全体的な放物線状の分布は実験とよく一致している．

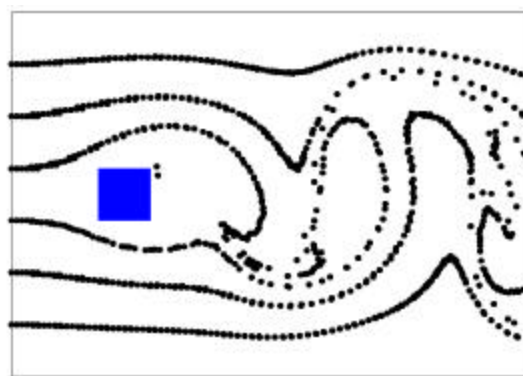
次に，流脈線図による比較を行った．ある任意の瞬間($t=26.5s$)における実験の流脈線，通常の数値解析およびハイブリッド風洞の流脈線図をそれぞれ Fig. 8(a)-(c) に示す．(a)の実験風洞による流脈線では図の



(a) Experiment



(b) Simulation



(c) Hybrid wind tunnel

Fig. 8 Streak lines ($t=26.5$)

角柱上面から下方へと巻き込む流脈と，その下流に発達したより大きな逆向きの流脈が見られる．(b)はフィードバックを与えない通常の数値解析の流脈線である．この数値解析では，比較的粗い格子系を使用しているため，実験で見られる角柱直後の強い逆流領域を表現できず，角柱のかなり下流領域で上方へ巻き込む流脈がみられるが，その大きさは実験に

比べて小さい．これに対して(c)のハイブリッド風洞で得られた流脈線は，(b)と同一の格子系を用いたにもかかわらず，実験結果とよく一致していることがわかる．すなわち，ハイブリッド風洞では，流れ場の変動の位相を含めて，実験を良く再現できることが明らかとなった．

4. 結言

本論文では，流れの数値解析と実験計測を融合した流れの新しい解析システムとしてのハイブリッド風洞について基礎的検討を行った．風洞内の角柱後流のカルマン渦を生ずる流れ場を対象として，角柱表面の圧力の測定値と流れの数値解析による計算値の偏差を数値解析の体積力にフィードバックするとともに，測定値から算出された一様流速度を上流境界条件にフィードフォワードすることにより，ハイブリッド風洞を構築した．

本論文では，流れ場中の代表点における速度について，厳密な計算条件とそれを緩和した条件の場合の比較を行い，緩和条件を用いた場合に，厳密条件とほぼ同精度で，なおかつ，リアルタイムでの解析が可能となることを示した．

さらに，緩和条件を用いた解析結果を流れ場全体について実験および，数値解析と比較した結果，角柱直後の狭い領域で若干誤差が大きいものの，流れ場の広い範囲で実際の流れがよく再現できることが明らかとなった．この解析結果は同じ計算格子を用いた通常の数値解析結果と比較して，大幅な精度向上を示すとともに，通常の数値解析では本質的には困難な，外乱の影響等を含んだ，現実の流れ場の再現が可能となることを示している．

今後は，通信時間を含めたシステム全体としてのリアルタイム処理の実現と，フィードバック則の改良による解析性能の改善について検討したい．

参考文献

- [1] Hayase, T., Hayashi, S., 1997, “State Estimator of Flow as an Integrated Computational Method With Feedback of Online Experimental Measurement,” *J. Fluids Eng.*, **119**, pp. 814-822.
- [2] 武田ら, 2000, “角柱まわりの流れ場のオブザーバに関する実験,” 計測制御学会東北支部第 192 回研究集会.
- [3] Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Washington, DC/New York: Hemisphere.
- [4] Hayase, T., “Monotonic Convergence Property of Turbulent Flow Solution with Central Difference and QUICK Scheme,” *J. Fluids Eng.*, **121**, pp. 351-358.
- [5] Robert P. Benedict, 1980, *Fundamentals of Pipe flow*, New York, John Wiley and sons.