

ハイブリッド渦法を用いた急発進二次元角柱まわりの流れ解析 (リメッシュ法との併用)

Transient Flows around an Impulsively Started Rectangular Cylinder by a Hybrid Vortex Method (Combination with Remeshing Method)

- 野田 健生, 阪府大, 〒 599-8531 堺市学園町 1-1, E-mail: noda@fluid.energy.osakafu-u.ac.jp
植田 芳昭, 阪府大院, 〒 599-8531 堺市学園町 1-1, E-mail: ueda@fluid.energy.osakafu-u.ac.jp
玉野 宏和, 阪府大院, 〒 599-8531 堺市学園町 1-1, E-mail: tamano@fluid.energy.osakafu-u.ac.jp
木田 輝彦, 阪府大院, 〒 599-8531 堺市学園町 1-1, E-mail: kida@energy.osakafu-u.ac.jp

Kensei NODA, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuencho, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan

Yoshiaki UEDA, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuencho, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan

Hirokazu TAMANO, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuencho, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan

Teruhiko KIDA, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuencho, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan

The flow around a rectangular cylinder is one of typical flows with fixed separation and it is important to know the aerodynamic forces from the engineering point of view. It was reported by the experimental works that cutting the edges of the rectangular cylinder resulted the reduction of the drag force, however, the detailed numerical simulation has not been reported for the effect of cutting edges of the rectangular cylinder. The present paper constructs two hybrid vortex methods, (1) the vortex sheet method and the vortex blob and (2) the vortex sheet method and the method of using the local smoothing interpolation function proposed by Cottet. The numerical results of the rectangular cylinder without cutting by the two methods, which is started impulsively with a constant speed, are compared and it is shown that to use the interpolation function affects the increase of the viscosity. The flows around the rectangular cylinder with and without cutting their edges are simulated by the method (1).

1. 緒 言

一様流中におかれた二次元角柱まわりの流れでは、剥離点が固定されているが、剥離した流れが壁面に再付着する場合やそのまま後流を形成する場合などがあり、これまでに既に多くの研究報告がある^{(1)~(20)}。また、矩形物体は例えば吊り橋の主塔などに多く用いられている。このため、矩形物体まわりの流れと空力特性は工学的にも重要であり、多くの研究がなされてきた。

矩形柱の前面部に丸みを持たせた場合や角部を切落とす場合が、抵抗低減の観点から、近年、盛んに研究されている。矩形柱の角部を切落とすと抵抗が減少することは、既に、白石ら⁽⁴⁾、武内ら⁽⁵⁾⁽⁸⁾、岡島ら⁽⁷⁾によって指摘されていたが、角部を切落とした矩形柱の抵抗係数が円柱のそれよりも小さくなり、その抵抗係数は 0.8 まで下がること、倉田ら⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾によって実験的に確かめられた。彼らは、詳細な実験を行い、迎角や切落とし量の影響について報告している。

二次元矩形柱まわりの流れについては、上述したように、これまでに実験や数値解析によって検討されてきた。数値解析に関しては、Davis & Moore⁽²⁾は対流項に 3 次精度の風上差分を用い、レイノルズ数 100 から 2800 における時間発展流れを解析している。Okajima et al.⁽⁹⁾は縦長比 0.2 ~ 10 について数値解析し、縦長比が 2.1 と 6 近辺で流れが大きく変ることを明らかにしている。また、彼らは矩形柱の前端に丸みを持った場合についても解析している。Hwang & Sue⁽¹³⁾はせん断流れ中の矩形柱まわりの流れを解析し、ストローハル数や平均抵抗係数がせん断が強くなれば減少することなどを明らかにしてい

る。Barton⁽¹⁴⁾は Simple 法を用い、角柱まわりの流れをレイノルズ数 250 について数値計算し、急発進後の過渡的な流れを明らかにしている。しかしながら、矩形角部を切落とした角柱まわりの詳細な数値解析は著者の知る限り見当たらない。

一方、渦法は遠方の境界条件が自然に満たされるので、角柱まわりの流れに渦法が用いられている。永野ら⁽¹⁾や Sarpkaya & Ihrig⁽⁶⁾は角柱角部から剥離するとし、角部から離散渦を流出させる手法によって解析している。Chiu & Ko⁽¹⁸⁾は二つの角柱の相互干渉を粘性拡散速度法による渦法によって解析している。また、Otsuka et al.⁽¹⁹⁾は Vortex sheet 法と Vortex blob 法とを組み合わせた渦法によって、矩形柱まわりの流れを数値解析しているが、角柱の空力特性は求めていない。Shirato & Matumoto⁽²⁰⁾は Vortex-in-cell 法によって矩形柱まわりの流れを数値解析している。彼らは、渦の生成は物体表面上の循環分布を物体からある適当な位置に置き、その後の時間発展を求めている。

以上の背景から、本報では渦法の精度を検討するため、これまで筆者等の研究グループが用いてきた Vortex blob & sheet 法と Cottet が提唱している内挿関数を用いる渦法とを用いて二次元矩形柱まわりの流れを数値解析し、これらの手法について比較・検討する。この結果をもとに、矩形柱前面の角部に切落としのある場合について数値解析し、切落としによる流れの変化について調べる。

2. 基礎方程式

図 1 に示されるように、二次元角柱が静止流体中で急発進した場合を考える。ここでは、流体は非圧縮性とす

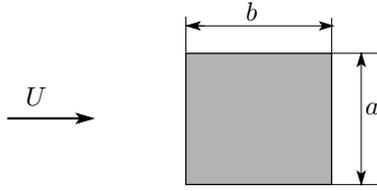


Fig. 1: Physical state

る．このとき，Navier-Stokes 方程式は

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (1)$$

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

ここで， \mathbf{u} は速度ベクトル， p は圧力， ρ は密度， ν は動粘性係数である．

これらの式から，渦度 $\omega = (0, 0, \omega)$ は次式で与えられる．

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \omega = \nu \nabla^2 \omega. \quad (3)$$

速度ベクトル \mathbf{u} は，Biot-Savart の式で関係づけられる．

$$\mathbf{u} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\omega(\mathbf{x}') \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} d\mathbf{x}' + \mathbf{u}_p. \quad (4)$$

ここで \mathbf{u}_p はポテンシャル流れよる速度ベクトルで， $\text{rot} \mathbf{u}_p = 0$ を満足する

渦法では，渦度場を離散化し，式 (4) を利用して離散渦を時間発展させる．ここでは，スプリット法を利用する．まず，物体表面上の法線方向の境界条件を満足するように \mathbf{u}_p を求め，次に，物体表面上の滑り速度を打ち消すように渦度を物体表面に生成する．この生成された渦度は粘性によって流体中に拡散する．本報では，粘性拡散に random-walk 法を採用する．以下に，具体的な計算手法について述べる．

3. 数値計算手法

3.1 パネル法

ポテンシャル流れを求める方法には種々の方法が提案されているが，ここでは，Kida et al.⁽²¹⁾ によって提案された手法を用いる．この手法は物体表面を微小な要素（パネル）に分割し，そのパネルの中央にデルタ関数的な湧き出し σ と，強さがすべてのパネルで同じ循環 γ を分布させる方法である．この手法はアルゴリズムが簡単であり，境界条件を満足させる評点の選び方に依存しないという優れた特徴を持っている．さらに，この手法で求められた湧き出しを各パネルで一様に分布しているとして速度場を求めると精度良く流れ場が求まることが明らかにされている．循環 γ は Kelvin の循環定理を利用して決定される．

3.2 Vortex blob & sheet 法

Vortex blob 法は Chorin⁽²²⁾ によって提案された手法で，離散渦がある有限の核をもったものとして表現され，その核の大きさについては数理的な研究がなされている（例えば Cottet & Koumoutsakos⁽²³⁾ 参照）．本報では，Chorin 提案の山形関数を用いる．

Vortex sheet 法も Chorin⁽²⁴⁾ によって提案された手法で，境界層の概念を利用している．物体表面近くでは流れは物体表面に沿って流れるため，周方向速度の流れ方向勾配は法線方向のそれに比べ非常に小さくなる．従って，粘性拡散は法線方向が主となる．そこで，この物体近傍の流れを渦シートで近似し，粘性拡散は法線方向のみ行う手法である．本報では，このシートに対する cut-off 関数として山形関数を用いた．また，渦シートから渦核への変換は循環が保持されるようにしている．

3.3 Remeshing 法

物体周りに格子を作成し，各格子点に渦点を貼り付ける方法をここでは Remeshing 法と呼ぶことにする．その際，格子内の渦点の強さを各格子点にどのように分配するかが問題であり，本報では，Cottet ら⁽²³⁾ によって提案された格子補間法を適用する．いま x_p を格子点の座標， $\hat{\gamma}_q$ ， \hat{x}_q を 1 ステップ前の値， $\Lambda(x)$ を補間関数とすると，新しく配置された格子点上での循環の値 γ_p は

$$\gamma_p(x_p, \tau) = \sum_q \hat{\gamma}_q(\hat{x}_q, \tau) \Lambda \left(\frac{x_p - \hat{x}_q}{\Delta h} \right), \quad (5)$$

で表される．ただし， Δh は格子間隔を表す．

本報では，直交座標系で格子を形成した．また，仮想境界層外縁近傍（境界面から法線方向に 3 セル）では補間関数として式 (6a) で示される関数 $\Lambda_i(x)$ を用い，その外部では式 (6b) で示される関数 $\Lambda_j(x)$ を用いる（詳細は文献参照⁽²³⁾）．

$$\Lambda_i(x) \equiv \begin{cases} \frac{1}{2}(1-x^2)(2-x), & \text{if } 0 \leq x < 1, \\ \frac{1}{6}(1-x)(2-x)(3-x), & \text{if } 1 \leq x < 2, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6a)$$

$$\Lambda_j(x) \equiv \begin{cases} 0, & \text{if } |x| > 2, \\ \frac{1}{2}(2-|x|)^2(1-|x|), & \text{if } 1 \leq |x| \leq 2, \\ 1 - \frac{5}{2}x^2 + \frac{3}{2}|x|^3, & \text{if } |x| \leq 1. \end{cases} \quad (6b)$$

3.4 渦度の生成

物体表面から生成される渦度を求める際には次の方法に従った．物体表面上では次の境界条件が課せられる．

$$v = \mathbf{u} \cdot \mathbf{e}_n = 0 \quad \text{on } S,$$

$$u = \mathbf{u} \cdot \mathbf{e}_t = 0 \quad \text{on } S.$$

ここで \mathbf{e}_n ， \mathbf{e}_t は物体表面上の法線方向と接線方向の単位ベクトルである．上式の第 1 式は，パネル法により満足させることができるが，第 2 式は満足させることが出来ない．そこで，この条件を満足させるように渦度を生成させる．物体表面上に厚さ h_i の領域を想定する．この領域内では渦度場を渦シートで離散化する．この領域を仮想境界層と呼ぶことにする．ここで (x, y) は境界上に原点をとり，接線方向に x 軸を，法線方向に y 軸をもつ直交座標系であり， (u, v) は速度 \mathbf{u} の (x, y) 方向成分とする．この仮想境界層内では接線方向速度 u の勾配 $\partial u / \partial y$

が法線方向速度 v の勾配 $\partial v/\partial x$ に対して十分に大きく，過度 ξ の定義式より，点 (x, y) での接線方向速度は

$$\begin{aligned} u(x, y) &\approx u_p + \int_y^{h_i} \xi(x, z) dz \\ &\approx u_p + \sum_{y_j \geq y} \xi_j d_j. \end{aligned} \quad (7)$$

ここで u_p は仮想境界層外縁での接線方向速度， $\sum_{y_j \geq y}$ は $y_j \geq y$ を満たし，かつ $0 \leq d_j \leq 1$ となるような渦シートの総和を示す． d_j は渦シートの重なる程度を表し，次式で定義される．

$$d_j = 1 - \frac{|x - x_j|}{l}. \quad (8)$$

ここで， l は注目するパネルの長さである．

また渦シートは自らの持つ循環によって誘起速度が生じ，その大きさは， $\xi/2$ ．従って，仮想境界層内の渦シートの接線方向速度は，(7) 式から

$$u(x_k, y_k) = u_p + \sum_{y_j \geq y} \xi_j d_j + \frac{1}{2} \xi_k. \quad (9)$$

従って，物体表面上で $u = 0$ より，物体表面で生成される循環 ξ_c は

$$\xi_c = -2(u_p + \sum_j \xi_j d_j). \quad (10)$$

本報では，計算精度を維持するため， ξ_c の最大値として適当な ξ_{\max} を設定して， $\xi_c > \xi_{\max}$ のときには数個の小さな過度に分割させる処理を行う．

$$\hat{\xi}_c = \frac{\xi_c}{n_{\xi_c}} \quad n_{\xi_c} = \left\lceil \frac{\xi_c}{\xi_{\max}} \right\rceil \quad \text{for } \xi_c > \xi_{\max}. \quad (11)$$

ここで， $\lceil \cdot \rceil$ は Gauss 記号である．この処理により ξ_c が ξ_{\max} よりも大きくなる場合には ξ_{\max} よりも小さな値を持った $\hat{\xi}_c$ を n_{ξ_c} 個発生させる．生成された渦は random-walk によって粘性拡散させる．

Vortex blob & sheet 法では，仮想境界層から外部流れに流出した渦シートは渦核として取り扱う．従って，渦シートと渦核との間で循環 Γ を保存させる．

$$\Gamma = \xi \times l. \quad (12)$$

Γ は渦核の循環である．また，Remeshing 法ではこの生成された渦シートは直ちに離散渦として式 (6a) と (6b) によって各格子に分配される．

Vortex blob & sheet 法では，渦シートによる誘起速度が外部流れに影響する．これについては，Kida & Kurita⁽²⁴⁾ の方法を採用した．

3.5 Random walk 法

本報では，random walk 法を用い粘性拡散を表現する．ランダムに移動する量 Δr は， Ω を $N(0, 1)$ の正規乱数とすると

$$\Delta r = \sqrt{\frac{2\Delta t}{Re}} \times \Omega. \quad (13)$$

ここで Re はレイノルズ数である．渦核に対しては x, y の両軸方向に，渦シートに対してはその存在するパネルに垂直な方向のみに適用する．

4. 圧力場

圧力場はこれまでに筆者等のグループが開発してきた手法を用いる⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾．二次元 Navier-Stokes 方程式から圧力場は次式で支配される．

$$\nabla^2 H = \nabla \cdot (\mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega}), \quad (14)$$

ただし $H = (p - p_\infty)/\rho + (|\mathbf{u}|^2 - U^2)/2$ ． p_∞ は無限遠方での圧力である．この式に Green の公式を利用すると次の積分方程式が得られる．

$$\begin{aligned} H &= J - \frac{1}{2\pi} \int_C H \frac{\partial}{\partial n} \log |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| ds \\ &\quad + \frac{\nu}{2\pi} \int_C \boldsymbol{\omega} \frac{\partial}{\partial s} \log |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| ds, \end{aligned} \quad (15)$$

ここで C は物体表面を表す閉曲線， n はその外向法線である．また， J は次のように定義されている．

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_D \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (v\omega) - \frac{\partial}{\partial y} (u\omega) \right\} dx' dy'. \quad (16)$$

ここで D は物体外部の流れ場全体である． J は次のように近似的に求められる．

$$\begin{aligned} J &= - \sum_j \frac{\Gamma_j}{2\pi |\mathbf{x} - \mathbf{x}_j|^2} (u_{1j}(y - y_j) - u_{2j}(x - x_j)) \\ &\quad \times (1 - \exp(-|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j|^2/\delta^2)) \\ &\quad - \sum_j \frac{\Gamma_j^2}{4\pi^2 \delta^2} \left[E_1(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j|^2/\delta^2) \right. \\ &\quad \left. - E_1(2|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j|^2/\delta^2) \right], \end{aligned} \quad (17)$$

ここで， (u_{1j}, u_{2j}) は j 番目の離散渦の移動速度であり， $E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$ ．

式 (17) より， J は離散渦点の循環とその点における速度から求められる．そこで，式 (15) から， \mathbf{x} を境界表面上の点にとると，境界積分方程式が構成される．この方程式から境界上の H を求め，式 (15) から圧力場が求められる．

5. 数値計算結果

本報の数値計算には，以下のパラメータを用いた．

(1) Vortex blob & sheet method

- レイノルズ数 $Re = 3000$
- 時間ステップはステップ数 n_1 とすると

$$\Delta t = \begin{cases} 1 - \exp(-(n_1 \times n_1 + 1)/10000) & n_1 \leq 20 \\ 0.05 & n_1 > 20 \end{cases}$$

- パネル数 $n = 80$ ．切落としのある場合では，切落とし面の各面は 10 パネル，横面は 15 パネル，後面は 20 パネル
- $\xi_{\max} = 0.05$
- Cut-off 半径 $\sigma = l_i/\pi$ ，ただし， l_i は渦シートを生成するパネルの幅
- 仮想境界層の厚さ $h_i = 2/Re^{1/2}$

(2) Remeshing 法

- 格子は正方形格子で格子幅 0.05×0.05
- 格子数 200×120
- パネル数, レイノルズ数と時間ステップは Vortex blob & sheet 法と同じ

5.1 矩形断面

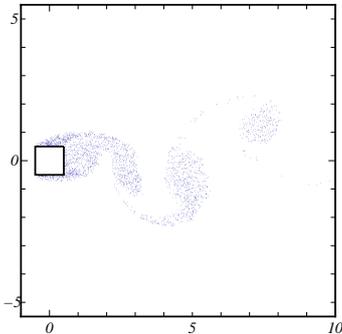


Fig. 2: Vortex blob distribution by Vortex blob & sheet method: $Re = 3000$ and $t = 14.283630$

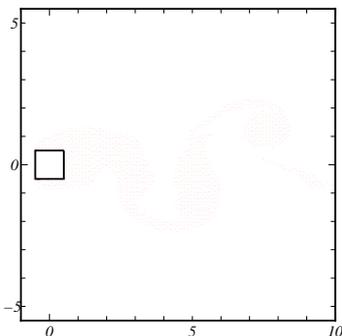


Fig. 3: Vortices distribution by Remeshing method: $Re = 3000$ and $t = 14.283630$

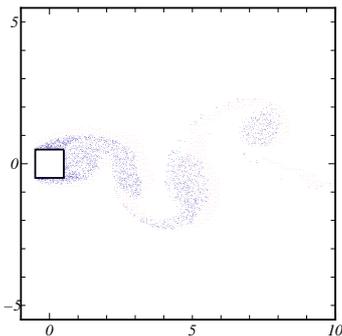


Fig. 4: Comparison of the vortices distributions between the two methods: $Re = 3000$ and $t = 14.283630$

図 2~4 は正方形角柱が急発進したときの流れを示す。図 2 は Vortex blob & sheet 法により得られた渦核分布を示したものである。Remeshing 法による結果を図 3 に示した。この方法では格子点の渦度の値が与えられているので、渦度が 0.05 より大きな値を示すところを図示している。図 4 は、Vortex blob & sheet 法の結果と Remeshing

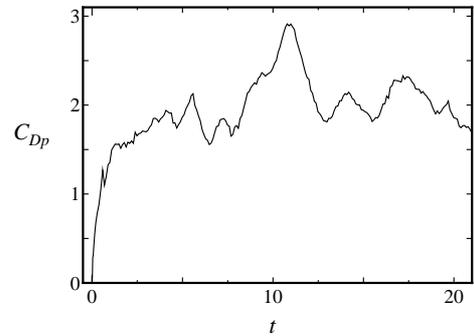


Fig. 5: Time history of the drag coefficient of the rectangular cylinder without cutting: $Re = 3000$.

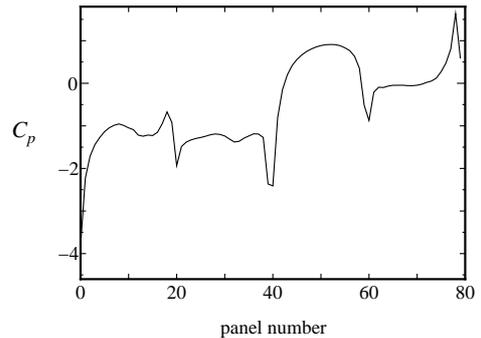


Fig. 6: Pressure distribution on the surface of the rectangular cylinder without cutting: $Re = 3000$ and $t = 20.983630$.

法を用いた場合の結果を重ねて示している。この図からカルマン渦列への移行を示す渦塊の挙動は両手法とも大きな差が見られないが、Remeshing 法では渦度の拡散が大きくなっていると推察される。

図 5 は正方形角柱の C_D の時間履歴を示したものである。この図では粘性抵抗は小さいとして無視している。圧力抵抗は先に述べた手法によって物体表面の圧力を求め、それを積分して求めた。粘性抵抗を無視しているため、急発進開始直後の抵抗は正確に計算できていないが、時間の経過と共に $C_{Dp} \approx 2.0$ 付近で振動している。この結果は Okajima et al.⁽⁴⁾ や Davis et al.⁽²⁾ の差分法によるレイノルズ数 10^3 の結果と比較してほぼ妥当な結果である。特に、Davis et al.⁽²⁾ の結果では $t = 8 \sim 10$ で C_D が大きくなる傾向を示しており、本手法では、 $t = 10 \sim 13$ で同じ傾向が見られる。

図 6 は正方形柱の圧力分布を示したものである。パネ

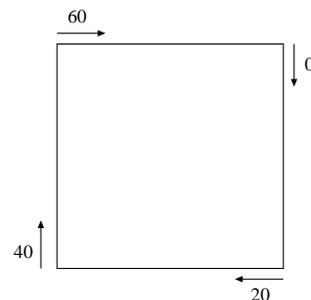


Fig. 7: Panel number

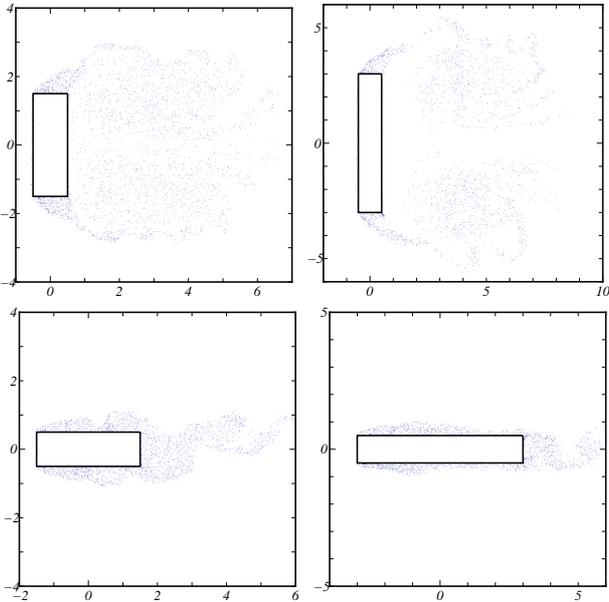


Fig. 8: Vortex blob distributions in the case of aspect ratio 1/3, 1/6 and 3, 6: $Re = 3000$ and $t = 14.283630$.

ルは等間隔であるので、ここではパネル番号を横軸にとっている。パネル番号は後面上端から番号が付けられており、従って、角柱背面と前面のパネル番号は 0 ~ 20 と 40 ~ 60 である (図 7 参照)。

図 8 は矩形断面角柱の縦横比 $b/a = 1/3, 1/6$ および $3, 6$ における渦核分布を描いたものである。縦横比が 1 より小さくなると、矩形端から流出した剥離渦が大きく広がり、それらが不安定となり合体し大きな渦塊になる。それらがさらに合体し後流を形成していく様子が良く分かる。一方、縦横比が 1 より大きくなると、矩形前端で剥離した剥離泡は側面に再付着し、Okajima et al.⁽⁴⁾ の数値結果と定性的に同じ挙動を示すことが分かる。

5.2 切落とし矩形断面

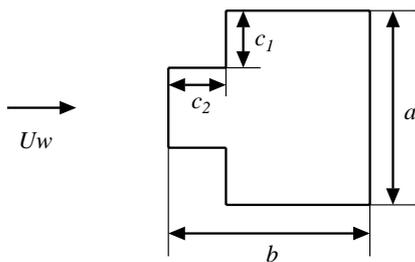


Fig. 9: Rectangular cylinder with cutting

矩形柱の結果から、Vortex blob & sheet 法の結果は妥当であると推察されるので、その方法によって切落としのある矩形柱について数値計算した。図 9 は切落としのある角柱の形状を示す。図 10 は正方形角柱の前方の角部を切落とした場合の渦核分布である。図 2 と比較すると良く分かるように、角部を切落とすとカルマン渦列への移行は遅れる。従って、後流の長さは長くなり、また、後流の幅も小さくなる。この計算時間内ではカルマン渦列への移行が明確ではない。図 11 は倉田ら⁽¹⁷⁾ による水素気泡法による実験結果である。この実験ではレイノル

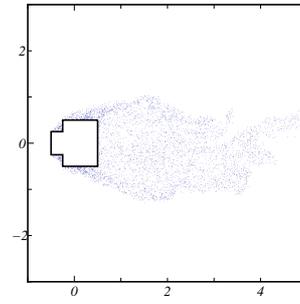


Fig. 10: Vortex blob distribution around the rectangular cylinder with cutting by Vortex blob & sheet method: $Re = 3000, t = 14.283630, c_1/a = c_2/a = 0.25$



Fig. 11: Flow patterns given by hydrogen bubble method: $Re = 1500$, Left side: $c_1 = c_2 = 0$, Right side: $c_1/a = c_2/a = 0.25$

ズ数が 1.5×10^3 であり、定常流れを可視化したものである。本計算は定常流れに至るまでの長時間計算をしていないので、直接の比較検討は出来ないが、定性的には本結果は妥当であると推察される。

図 12 は切落とした角部の速度ベクトルを示したものである。この図から分かるように、角部では強い循環流れはなく、殆どよどんだ状態になっているが、側壁端に近くなると流速が大きくなっている。従って、切落とし部での圧力は一定ではない。切落とし部から剥離した流れは切落とし部のよどみ流れを囲い込むように流れ、側壁端付近で再付着し、再び剥離し後流へ流れている。このため、剥離渦の強さが小さくなり、背圧も小さくなり、それによって抵抗が軽減していると思われる。この定性的な結果は、倉田らの実験結果と良い一致を示している。

6. 結 言

急発進する二次元角柱まわりの流れを渦法によって数値解析した。ここで用いた渦法は、渦核と渦シートを併用する方法 (Vortex blob & sheet 法) と流れ場に格子を形成し内挿関数を用い渦度を格子点に貼り付ける Remeshing 法である。物体表面からの渦度の生成はスプリット法で、粘性拡散は random walk 法によった。以上の結果をまとめると以下のことが分かった: (1) 内挿関数を用いると、渦塊の拡散が大きい。このことは粘性係数が増加した場合に対応していると思われる。(2) 従って、Vortex blob & sheet 法が高レイノルズ数遷移流れをシミュレートするにはより適切と思われる。

次に、矩形柱の前方角部を切落とした場合について Vortex blob & sheet 法によって数値計算した。その結果、次

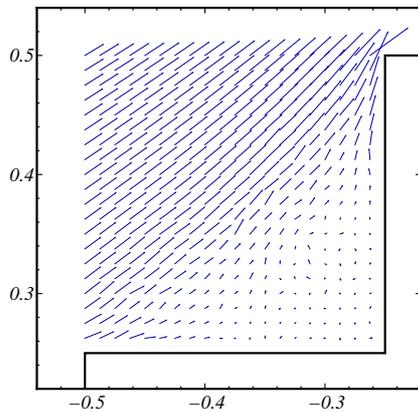


Fig. 12: Velocity field in the cutting region of the edge of the rectangular cylinder: $Re = 3000$, $t = 6.78363$, $c_1/a = c_2/a = 0.25$

のことが分かった。(1) 角部を切落とすと、カルマン渦列の開始の時間が遅れる。また、後流の長さが長くなる。(2) また、後流の幅も小さくなり、抵抗係数が減少すると思われる。

以上の結果は、倉田ら^{(16)~(18)}による定常流れの実験結果と定性的に良く一致している。

本研究は文部科学省科学研究費基盤 C (12650178) の援助を受けた。図 11 は倉田教授 (摂南大学) のご厚意による。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 永野, 内藤, 高田, “うず点法による長方形柱まわりの流れの解析,” 日本機械学会論文集, B-47, (1980), pp. 32–39.
- (2) Davis, R.W. & Moore, E.F., “A numerical study of vortex shedding from rectangles,” *J. Fluid Mech.*, **116** (1982), pp. 475–506.
- (3) Okajima, A., “Strouhal number of rectangular cylinders,” *J. Fluid Mech.*, **123** (1982), pp. 379–398.
- (4) 白石 他 5 名, “隅切りによる矩形断面の空力安定化効果,” 風工学シンポジウム, **33**, (1986), pp. 193–198.
- (5) 武内, 北原, “超長大橋主塔の渦励振の発現と空力制振法に関する基礎的研究,” 風工学シンポジウム, **34**, (1986), pp. 199–204.
- (6) Sarpkaya, T. & Ihrig, C.J., “Impulsively started steady flow about rectangular prisms: Experiments and discrete vortex analysis,” *Trans. ASME, J. Fluids Engr.*, **108** (1986), pp. 47–54.
- (7) 岡島, 上野, 阿部, “隅切り矩形断面柱の空力特性におよぼすレイノルズ数の影響,” 日本風工学誌, **49**, (1991), pp. 1–13.
- (8) 武内, 北原, “隅切り矩形断面のレイノルズ数効果に関する研究,” 構造工学論文集, **38**, A(1992), pp. 851–856.
- (9) Okajima, A., Ueno, H. & Sakai, H., “Numerical simulation of laminar and turbulent flows around rectangular cylinders,” *Int. J. Num. Methods in Fluids*, **15** (1992), pp. 999–1012.
- (10) Ozono, S., Ohya, Y. & Nakamura, Y., “Stepwise increase in Strouhal number for flows around flat plates,” *Int. J. Num. Methods in Fluids*, **15** (1992), pp. 1025–1036.
- (11) Ohya, Y., Nakamura, Y., Ozono, S., Tsuruta, H. & Nakayama, R., “A numerical study of vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges,” *J. Fluid Mech.*, **236** (1992), pp. 445–460.
- (12) Johansson, S.H., Davidson, L. & Olsson, E., “Numerical simulation of vortex shedding past triangular cylinders at high Reynolds number using a k-ε turbulence model,” *Int. J. Num. Methods in Fluids*, **16** (1993), pp. 895–878.
- (13) Hwang, R.R. & Sue, Y.C., “Numerical simulation of shear effect on vortex shedding behind a square cylinder,” *Int. J. Num. Methods in Fluids*, **25** (1997), pp. 1409–1420.
- (14) Barton, I.E., “Comparison of simple- and piso-type algorithms for transient flows,” *Int. J. Num. Methods in Fluids*, **26** (1998), pp. 459–483.
- (15) 倉田 他 4 名, “エッジの小さな切落しによる物体の抗力の軽減 (正方形断面の角柱の場合),” 日本機械学会論文集, B-64, (1998), pp. 397–404.
- (16) 倉田 他 3 名, “角柱の抗力におよぼすエッジの切落し量の効果について,” 日本航空宇宙学会論文集, **47**, (1999), pp. 174–181.
- (17) 倉田 他 3 名, “エッジの切落しによる角柱の抗力軽減と後流について,” 日本航空宇宙学会論文集, **47**, (1999), pp. 403–410.
- (18) Chiu, A.Y.W. & Ko, N.W.M., “Numerical simulation of proximity interference of two square cylinders,” *ASME/JSME Fluids Engr. Conference*, (1999).
- (19) Otsuka, M., Kida, T., Wada, M. & Kurata, M., “Two-dimensional transient flows around rectangular cylinder by a vortex method,” *Vortex Methods*, ed. Kamemoto, K. & Tsutahara, M., World Scientific, Singapore, (2000), pp. 50–56.
- (20) Shirato, H. & Matsumoto, M., “Some application of vortex method to wind engineering problem,” *Vortex Methods*, ed. Kamemoto, K. & Tsutahara, M., World Scientific, Singapore, (2000), pp. 204–211.
- (21) Kida, T., Nagata, T. & Nakajima, T., “Accuracy of the panel method with distributed sources applied to two-dimensional bluff bodies,” *CFD Journal*, **2** (1993), pp. 73–90.
- (22) Chorin, A.J., “Numerical study of slightly viscous flow,” *J. Fluid Mech.*, **57** (1973), pp. 785–796.
- (23) Cottet, G.-H. & Koumoutsakos, P.D., “*Vortex Methods*,” Cambridge, (2000).
- (24) Chorin, A.J., “Vortex sheet approximation of boundary layer,” *J. Comp. Phys.*, **27** (1978), pp. 428–442.
- (25) Kida, T. & Kurita, M., “High Reynolds number flow past an impulsively started circular cylinder (Time

- marching of random walk vortex method),” *CFD Journal*, **4** (1996), pp. 489–508.
- (26) 木田, 坂手, 中嶋, “二次元渦法における非定常圧力場の計算について,” 日本機械学会論文集, B-63 (1997), pp. 378–386.
- (27) Kida, T., Ueda, H. & Kurata, M., “Pressure distribution of transient flow around an impulsively started two-dimensional elliptic cylinder by a vortex method,” *CFD Journal*, **9** (2000), pp. 64–75.