円柱群を過ぎる2次元流れに対する 抗力モデルの適用性

横嶋 哲¹・河原 能久²

¹正会員 博 (工) 静岡大学 助教 大学院工学研究科 数理システム工学専攻 (〒 432-8561 浜松市中区城北 3-5-1)

E-mail: yokojima@sys.eng.shizuoka.ac.jp

²フェロー会員 工博 広島大学 教授 大学院工学研究科 社会基盤環境工学専攻 (〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

都市キャノピーや植生キャノピーといった複雑な障害物群を過ぎる流れの実用的な予測においては、そこで生じる抵抗をマクロに表現する、いわゆる抗力モデルが一般的に利用される。本研究では抗力係数と見付面積をパラメータとする古典的な抗力モデルの性能評価を、円柱群を過ぎる一様な2次元流れの詳細なデータベース(横嶋ら, 土木学会論文集 B1, 70(4), I_829, 2014.)を用いて行った。対象となる障害物群のマクロな抗力係数を何らかの方法でうまく推定できれば、抗力モデルは流れの大まかな平均流特性を良好に再現できることを確認した。障害物群内部での抗力係数の空間分布をモデルに反映することで、障害物群前縁で典型的に生じるよどみ現象の再現性は高まるものの、その効果は流れ場全体には及ばないことも示した。

Key Words: Canopy model, model test, circular cylinders, drag coefficient, two-dimensional flow, immersed boundary method

1. はじめに

都市域における風環境や氾濫流解析, あるいは樹木群を有する大気境界層や河川流の予測において, 個々の構造物や植生要素の形状を織り込んでその周囲の流れを再現することはそもそも不可能であるか, あるいは禁止的な高コストを要することが多く, 障害物の特性を何らかのパラメータで適切に表現, モデル化することが強く望まれる。一般に見付面積が A , 抗力係数が C_D の任意の物体に作用する力 $\vec{F}$ は

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \rho C_D A |\vec{u}| \vec{u} \quad (1)$$

と表される。 $\vec{u}$, ρ は流体の速度および密度を表す。よって, この物体が単位質量当たりの流体に及ぼす力 $\vec{f}$ は

$$\vec{f} = -\frac{\vec{F}}{\rho V} = -\frac{1}{2} C_D \lambda |\vec{u}| \vec{u} \quad (2)$$

のように近似でき, いわゆる抗力モデル(キャノピーモデル)として, 非常に多くの適用例が報告されている^{1), 2)}。ここで V は物体の体積を表し, $\lambda = A/V$ は障害物の表面積密度と呼ばれる。

このモデルでは, 障害物群落が幾何学的に単純であれば表面積密度 λ はその定義に基づいて一意に決まるのに対して, 抗力係数 C_D を適切に定めるための標準的手段は存在せず, このモデルのボトルネックと言える。本報では, 個々の円柱周囲の流れも再現した, 円柱群を過ぎる2次元流れの数値予測結果³⁾を用いて, 式(2)にも基づく抗力モデルの精度検証を行う。抗力モデルの精度評価を行った例として清水ら⁴⁾および柴山ら⁵⁾が

挙げられる。詳細は3.節で述べるが, 本研究は柴山ら⁵⁾による先行研究を発展させたものと位置づけられる。

2. 検討対象流れの概略

検討対象である, 円柱群を過ぎる2次元流れ³⁾の概略を図-1(a)に示す。直径 D の剛な円柱 50 本から成る円柱群を x_1 軸に沿った U_∞ の一様流れ内に設置した。円柱の配置パターンとして, 正方格子配置(SQ), スタガード格子配置(ST), ランダム配置(RA)の3種類を検討した。それぞれの配置を図-1(b)-(d)に示す。ただしランダム配置については一例である。円柱群領域内の固体占有率 $\phi \equiv (\pi/4)(D/s)^2$ を 0.349, 0.196, 0.126, 0.087, 0.049 の5通りに変化させた。このとき, SQ配置における最近接円柱の中心間距離 s は $1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D, 4.0D$ と変化し, 円柱群領域の大きさ $(L \times W)$ も $15D \times 7.5D$ ($\phi = 0.349$) から $40D \times 20D$ ($\phi = 0.049$) へと拡がる。流入端と最上流の円柱までの距離を ϕ の値に依らず一定とするため, SQおよびST配置における最上流の円柱中心位置が $x_1 = 2D$ となるように円柱群領域を配置した。一様流入流速 U_∞ と円柱直径 D に基づくレイノルズ数は 180 で, これは樹木群模型を過ぎる流れに関する室内水理実験^{6), 7)}と同程度である。このとき, 円柱群領域の x_2 方向サイズ W と一様流入流速に基づくレイノルズ数は円柱群が最も密な $\phi = 0.349$ の場合に 1350, 最も粗な $\phi = 0.049$ の場合に 3600 となる。

上述の流れを埋め込み境界法(IBM)⁸⁾を用いて解いた

表-1 IBM 解析³⁾より得られたバルク抗力係数 $\langle \bar{C}_x \rangle$, および抗力モデルに与えたモデル抗力係数 C_D .

ϕ	s/D	λD	$\langle \bar{C}_x \rangle_{SQ}$	$\langle \bar{C}_x \rangle_{ST}$	$\langle \bar{C}_x \rangle_{RA}$	C_D
0.349	1.5	1/2.25	0.289	0.283	0.290	0.287
0.196	2.0	1/4	0.318	0.339	0.375	0.344
0.126	2.5	1/6.25	0.325	0.420	0.387	0.377
0.087	3.0	1/9	0.472	0.558	0.516	0.516
0.049	4.0	1/16	0.663	0.820	0.689	0.724

(a) schematic configuration of flow past an array of cylinders.

(b) lattice-type square pattern.

(c) staggered pattern.

(d) random array of cylinders for $\phi = 0.126$.

図-1 円柱群を過ぎる流れの概要. (a) は計算領域と円柱群の設置位置を示す. (b), (c), (d) は 50 本の円柱の具体的な配置を示し, (b) は正方格子配置 (SQ), (c) はスタガード格子配置 (ST), (d) は $\phi = 0.126$ の場合のランダム配置 (RA) を表す.

結果³⁾を本研究では参照データとする. 円柱近傍での計算格子間隔は円柱群内の個々の円柱の空力特性を定量的に再現可能な $D/20$ とした⁹⁾. 流入境界では U_∞ の一様流速を, 流出境界では対流流出条件を与えた. また, x_2 方向には周期境界条件を課した. 詳細は横嶋ら (2014)³⁾を参照されたい.

3. 抗力モデルの適用

2. 節で紹介した円柱群を過ぎる流れに抗力モデルを適用する. IBM 解析³⁾との相違点は, IBM において物体表面で粘着・不透過条件を課すために運動方程式に付加する単位質量当たりの体積力 $\vec{f}$ を式 (2) に示した古典的な抗力モデルで置き換える点のみで, 離散化手法や境界条件, 時空間解像度などの他の要素は同一と

した. これによって, モデルの効果・影響だけを抽出することが可能となる. なお, IBM 解析における $\vec{f}$ は以下のように求められる:

$$\vec{U}(\vec{X}_j) = \sum_i \vec{u}(\vec{x}_i) \delta_h(\vec{x}_i - \vec{X}_j) \Delta^3 \quad (3)$$

$$\vec{F}(\vec{X}_j) = \frac{\vec{U}^{(bc)}(\vec{X}_j) - \vec{U}(\vec{X}_j)}{\Delta t} \quad (4)$$

$$\vec{f}(\vec{x}_i) = \sum_j \vec{F}(\vec{X}_j) \delta_h(\vec{x}_i - \vec{X}_j) \Delta V_j \quad (5)$$

ここで $\vec{u}$ はオイラー系で定義される流速を, $\vec{x}$ は $\vec{u}$ や $\vec{f}$ の定義位置を, $\vec{X}$ は物体表現のための埋め込み点 (Lagrangian Force Point, 以下 LFP) の座標を, そして $\vec{U}$, $\vec{F}$ はラグランジュ系での $\vec{u}$, $\vec{f}$ の分布を表す. すなわち, LFP 上での現状の流速 $\vec{U}(\vec{X})$ と流速境界条件 $\vec{U}^{(bc)}(\vec{X})$ との差に応じて体積力 $\vec{F}(\vec{X})$ が求まる. オイラー系とラグランジュ系の情報のやりとりは離散デルタ関数 δ_h を用いて行われる. なお, Δ はオイラー系での計算格子間隔, ΔV_j はそれぞれの LFP が受け持つ微小体積を示す. 詳細は参考文献⁸⁾を参照されたい.

抗力モデルに必要なパラメータのうち, 物体表面積密度 λ は $\lambda = D/s^2 = 4\phi/\pi D$ によって一意に求まる. 他方でモデル抗力係数 C_D の値は未知であるため, ここでは IBM 解析結果を参考に妥当な値を選定する. 表-1 に, IBM 解析から求めた SQ, ST, RA 配置に対するバルク抗力係数 $\langle \bar{C}_x \rangle$ (個々の円柱の, 一様流入流速 U_∞ および円柱直径 D に基づく時間平均抗力係数を全円柱 50 本でアンサンブル平均) の値を示す. 抗力係数を一様に与える限り, 抗力モデルは SQ, ST, RA 配置といった円柱配置の相違を区別できない. このとき抗力モデルは与えられた λ の値に対する‘代表的な’流れ場を再現すると考えられる. よってそのような流れに対応するモデル抗力係数 C_D として, IBM 解析から求めた SQ, ST, RA 配置に対するバルク抗力係数の平均値を円柱群領域内で一様に与えた.

1. 節で触れたように, 抗力モデルの適用性評価を行った先行研究として清水ら⁴⁾および柴山ら⁵⁾が挙げられる. 清水ら⁴⁾はレイノルズ平均操作に加えて水平面内で空間平均を施して鉛直 2 次元空間における支配方程式を導出し, 抗力モデルと線形 $k-\varepsilon$ モデルを適用した. よって彼らの研究は抗力モデルを単独で精度検証したわけ

図-2 時間平均主流方向速度 $\bar{u}_1/U_\infty$ の等値線図. 赤色の長方形は円柱群領域を示す. 凡例は (j) に記載.

ではなく、当時の標準的な植生乱流の予測法の実用性評価を試みたと言える。本研究は図-1 に示すように対象流れの水平面内での流況に注目する点も、清水ら⁴⁾と異なる。柴山ら⁵⁾は角柱群を過ぎる流れに対して水深平均された支配支配方程式を準備し、個々の角柱周りの流れを解像した数値実験結果（本研究における IBM 解析結果に相当）と抗力モデルを適用して得られた結果を比較することで、抗力モデルの適用性を議論した。この試みは、支配方程式に対する水深平均操作とそれに伴うゼロ方程式乱流モデルの導入の有無、そして検討対象とした流れの相違を除けば、本研究に極めて近い。柴山ら⁵⁾に対する本研究の特色として、(i)IBM 解析では樹木群模型を構成する個々の物体の空力特性を定量的に再現できる空間解像度を採用したこと、(ii)IBM 解析と抗力モデル解析の相違を全てのケースで式 (5) を式 (2) で置き換えたことのみとして抗力モデルの厳密な評価を実現したこと、(iii)3 種類の円柱配置によって表面積密度 λ の値は一致する複数の流れを検討に加えたこと、が挙げられる。(iii)については柴山ら⁵⁾自身も λ を

固定して円柱配置を変化させる必要性に言及している。4. 節で示されるように、円柱群が密な場合に、 λ が同じ値でも円柱配置の違いによって全く異なる流況が現れるので、(iii)は抗力モデルの適用性を評価する上で重要な要素と言える。

4. 結果と考察

(1) 時間平均流れの等値線図

固体占有率 $\phi = 0.196, 0.087, 0.049$ の 3 ケースにおける、時間平均主流速および時間平均圧力の等値線図をそれぞれ図-2、図-3 に示す。ここで P_∞ は流入部の圧力を表す。なお、抗力モデルを用いた計算 (DM) では個々の円柱周り流れを解像する IBM 解析のように非定常な渦放出を伴わなかったため、全てのケースにおいて初期条件から過渡状態を経た後に到達した定常解を示す。 $\phi = 0.196$ のスタガード配置 (ST) およびランダム配置 (RA) のみ、他と平均流況が大きく異なる。これは、これらのケースでは円柱群が透過性を有するひとつの鈍

図-3 時間平均圧力 $(\bar{p} - P_\infty)/U_\infty^2$ の等値線図. 赤色の長方形は円柱群領域を示す. 凡例は (j) に記載.

頭物体のように振る舞って 1 対の大きな交番渦を低周波で放出したためである. IBM 解析では $500D/U_\infty$ 時間 (独立円柱の場合のカルマン渦発生周期の約 95 倍相当) に渡る平均化によって時間統計量の評価がなされたが³⁾, 上述の大規模交番渦の発生周期はおおよそ $35D/U_\infty$ 程度と非常にゆったりと振る舞うため, 平均流が収束しきれていない. なお, $\phi = 0.196$ の正方格子配置 (SQ) の場合には非定常な渦放出は生じず, 定常解が得られた.

円柱群領域外に注目すると, 円柱配置が $x_2 = 0$ に関して対称でない ST 配置や RA 配置においても, 個々の円柱から生じる後流成分が複雑に干渉した結果, 平均流構造は $x_2 = 0$ に関してほぼ対称となった. そのため, 平均流構造は円柱群内部の円柱配置に依らず互いに似通っている. $\phi = 0.196$ の ST および RA 配置を除けば, IBM 解析結果では円柱群のすぐ下流では円柱群の x_2 方向サイズ W と同程度の幅を有する速度欠損領域が計算領域の下流端まで存続し, ϕ の増加とともに速度低下が強まる傾向が認められる. 抗力モデル (DM) においてもそういった流況は定性的には捉えられている. ま

図-4 平均流速分布の検査断面位置. W はそれぞれのケースにおける円柱群領域の x_2 方向サイズを表す.

た平均圧力分布においては, IBM 解析では円柱群前縁に流れが衝突して高圧領域が生じるが, 抗力モデルではわずかな圧力上昇が認められるに過ぎない.

(2) 時間平均流れの詳しい検討

4.(1) 節では $\phi = 0.196, 0.087, 0.049$ の 3 ケースにおける平均流速および圧力の等値線図に基づいて, 平均

図-5 $x_0/W = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ の 5 断面での平均流速分布における円柱配置の影響とその抗力モデルによる再現性。

流のおおまかな特徴に触れた。本節では $\phi = 0.349$ および 0.126 も加えた全 5 ケースを対象として、SQ, ST, RA の 3 パターンの円柱配置と抗力モデル (DM) から得られた結果をより詳しく検討する。以下では、円柱群領域の前縁 ($x_1 = 2D - (1/2)s$, 図-1(a) 参照) を原点とし

て主流方向に伸びる新たな座標軸 x_0 を全てのケースに導入する。それぞれのケースにおける円柱群領域の x_2 方向サイズ W を基準長さとして空間座標を規格化すれば、全てのケースの円柱群領域は図-4 に示すように、 $[0, 2] \times [-0.5, 0.5]$ に位置する。以下ではこのように規

図-6 $x_0/W = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ の 5 断面での平均流速分布に見られる固体占有率 ϕ の影響とその抗力モデルによる再現性. 図中のラベル ‘049’, ‘087’, ‘126’, ‘196’, ‘349’ はそれぞれ $\phi = 0.049, 0.087, 0.126, 0.196, 0.349$ を表す.

格化された系における, $x_0/W = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ の 5 つの断面での流速分布に注目する.

図-5 に平均流速 $\bar{u}_1$ および $\bar{u}_2$ の分布を示す. 4.(1) 節で見受けられたように, $\phi = 0.349$ の SQ, ST, RA 配置, $\phi = 0.196$ の ST, RA 配置, そして $\phi = 0.126$ の ST 配置では, 円柱群領域全体が透過性のあるひとつの鈍頭物体のようにして 1 対の大きな交番渦を低周波で下流に放出する. これらのケースに対しては, 4.(1) 節で述べたように統計量算出時間が十分ではないため, 図-5(b), (d), (f) で明瞭に認められるように $\bar{u}_2$ に交番渦の影響が見受けられる. また, 円柱群背後ではスケールの大きな渦に

よって効率よく混合されるため, 主流速 $\bar{u}_1$ の速度欠損は急速に回復する.

モデル抗力係数 C_D の設定法 (3. 節) で述べたように, C_D を一様に与える限り, 抗力モデルは円柱配置パターンの影響を考慮し得ないため, 与えられた λ の値に対する ‘代表的な’ 流れ場を再現すると考えられる. $\phi = 0.087$ および 0.049 においては流れのマクロな性質は円柱配置パターンの影響をあまり受けず, 抗力モデルが再現した ‘代表的な’ 流況が IBM 解析結果と大まかに一致した. 他方で $\phi = 0.196$ および 0.126 の場合には円柱配置の詳細によって流況は大きく異なり, 抗力

図-7 $\phi = 0.087$, SQ 配置のケースにおける抗力係数分布とその円柱群領域内での補間。

モデルは $\phi = 0.196$ においては SQ 配置の、 $\phi = 0.126$ では SQ および RA 配置の結果に近い予測結果を与えた。すなわち、 C_D が一様な抗力モデルでは、円柱群領域全体が透過性のあるひとつの大きな鈍頭物体のように振る舞い、1 対の低周波・低波数な交番渦を放出する流況 ($\phi = 0.126$ における ST 配置、 $\phi = 0.196$ における ST および RA 配置、そして $\phi = 0.349$ における全ての配置パターン) を再現し難い傾向が認められる。モデル抗力係数の分布に円柱配置の影響を反映、あるいはモデル表現自体に手を加えることでこの問題が解決されるかどうか、より詳しい検討が今後期待される。5. 節ではそれらの予備検討として、IBM 解析結果から推測された (すなわち円柱配置パターンの情報を含んだ) 抗力係数を用いることで抗力モデルの予測結果がどのような影響を受けるについて報告する。

次に、固体占有率 ϕ の違いが円柱群周囲の流れに及ぼす影響を検討するため、図-5 のデータを円柱配置パターンごとにまとめ直して図-6 に示した。ただし前述の、低周波・低波数の交番渦が後流を特徴づけるケースは、ここでは検討対象外としてデータを除去した。IBM 解析および抗力モデルによる予測のいずれの結果においても円柱群領域内の固体占有率 ϕ が増加する (円柱群がより密になる) と、円柱群内部で主流速がより抑制され、円柱群を過ぎてもその影響は強く残ること、および後流の影響が x_2/W に関してより広範な領域に及ぶ傾向が認められる。

図-8 $\phi = 0.087$, SQ 配置のケースにおいて、抗力係数の空間分布を考慮した抗力モデルによって得られた時間平均流。凡例は図-2(j) および図-3(j) に倣う。

5. 抗力係数の空間分布の影響

4. 節で行った抗力モデルの精度評価では、抗力モデルは円柱群周囲の平均流構造を大まかには捉えられるものの、円柱群前縁で生じるよどみ現象の再現性が十分でないケースが複数認められた。この主な原因として、モデル抗力係数を円柱群内部で一様に与えていることが考えられる。図-7(a) に $\phi = 0.087$ で SQ 配置の場合の各円柱の時間平均抗力係数の分布を示す。一様流が衝突する最上流の円柱や円柱群中央に位置する円柱で高い C_D 値が認められる反面、下流側や円柱群の側縁を構成する円柱に作用する力はかなり抑制されている。 C_D の最大値は 1.27, 最小値は 0.16 であった。そこで本節では IBM 解析³⁾から得られたこのような C_D 分布を抗力モデルに反映することで、流況がどう変化するのかを検討する。

IBM 解析³⁾で得られた各円柱の時間平均抗力係数を、逆距離加重 (IDW) 法を用いて円柱群領域全体に補間し、抗力モデルのモデルパラメータとして用いた。図-7(a) の場合について、IDW 法により得られた抗力係数分布を図-7(b) に示す。ただし、図-7(b) は計算領域全体を示しており、円柱群領域外 ($\phi = 0.087$ の場合には $0.5 \leq x_1/D \leq 30.5$, $|x_2/D| \leq 7.5$ が円柱群領域) では $C_D = 0$ を陽に与えた。補間法に IDW 法を用いた理由は、推定値が測定値 (IBM 解析より得られた各円柱の抗力係数) の最大・最小値を超えないためである。

本報では円柱群領域の固体占有率 ϕ を 0.196, 0.087, 0.049 の 3 種類、円柱群の配置パターンは SQ 配置と RA

図-9 $\phi = 0.087$, SQ 配置のケースにおいて $x_2/D = 0$ のライン上での圧力 $(\bar{p} - P_\infty)/U_\infty^2$ 分布.

配置の計 6 ケースについて、図-7 のように IBM 解析からモデル抗力係数分布を評価し、抗力モデルによる平均流況予測を行った。

図-8 に、 $\phi = 0.087$, SQ 配置のケースにおいて抗力モデルによって得られた時間平均主流速および圧力分布を示す。このケースで与えられたモデル抗力係数分布は図-7(b) に、IBM 解析および均一な抗力係数分布に基づく抗力モデルから得られた対応する結果は図-2 および図-3 の (b), (k) にそれぞれ示されている。円柱群領域前縁で抗力係数が高められた結果、円柱群遭遇時の主流速の低下と圧力上昇の再現性は確かに改善されていることがわかる。また、急激な圧力上昇の背後ですみやかに圧力が低下する点についても、抗力係数の空間分布を反映することで再現性が高まることが等値線分布から認められる。このよどみ点近傍での圧力分布の変化をより明確にするため、 $x_2/D = 0$ のライン上での時間平均圧力分布を図-9 に示す。図中の MSQ は SQ 配置の IBM 解析結果から得られた抗力係数分布を抗力モデルに反映させたケースを表す。抗力係数の空間分布を考慮することでよどみ点 $x_2/D = 0$ での圧力勾配の予測精度が大きく改善されたことがわかる。ここでは $\phi = 0.087$ の SQ 配置の場合の結果のみを示しているが、他のケースでも同様であった。

他方で円柱群の周囲のマクロな流況に目を向けると、抗力係数の空間分布をモデルに反映したことによる改善点を見出すことが難しい。この点を明確に示すデータとして、図-5 に対応する、複数の検査断面での主流方向平均流速分布を図-10 に示す。図中の MRA は RA 配置の IBM 解析から求めた抗力係数分布をモデルに反映させたケースを示す。モデル抗力係数の違いが流れ場に直接的に影響を及ぼす円柱群領域内部 ($0 \leq x_0/W \leq 2$ かつ $|x_2/W| \leq 0.5$) とその界面局近傍では DM と MSQ あるいは MRA の結果に若干の違いが認められるものの、円柱群周囲では両者の結果はほぼ一致している。すなわち今回検討対象とした流れにおいては、円柱群前

縁でのよどみ現象は流れ場全体のマクロな特性にほとんど影響のない、局所性の強い現象と言える。ただし今回の系は十分に広い流れ場に円柱群がただひとつ孤立して存在するような場合であり、複数の障害物群が近接して相互作用し合うような場合については、改めて検討が必要と考えられる。また、前節で抗力モデルによって捉えられなかった、低周波・低波数の 1 対の交番渦が後流を特徴づける流況は抗力係数の空間分布を考慮しても再現されなかった ($\phi = 0.196$ の RA)。本研究において IBM 解析から得た各円柱の抗力係数は一様流入流速 U_∞ を基準速度としており、これが適切でない可能性が考えられる。個々の円柱に対する接近流速を用いて抗力係数を評価すれば、円柱群内部の抗力係数の値は大幅に高まり、流況は大きく変化すると予想される。また、円柱群全体が大きな鈍頭物体のように振る舞う場合には円柱間隔は狭く、そこを過ぎる流動はかなり遅い傾向にある。そのような条件下では慣性抵抗のみを反映した式 (2) に替わって、粘性抵抗も考慮した抗力モデル¹⁰⁾を用いることで結果が改善されることも期待できる。これらについては今後の検討課題としたい。

6. おわりに

本報では円柱群を過ぎる一様な 2 次元流れを対象として、古典的な抗力モデルの精度検証を行った。円柱群の固体占有率 ϕ を $0.049 - 0.349$ で変化させ、それぞれの ϕ の値に対して正方格子 (SQ)、スタガード格子 (ST)、およびランダム (RA) 配置の 3 パターンの円柱配置を検討した。個々の円柱周り流れを正確にシミュレートした IBM 解析結果と、円柱群の抗力特性をマクロにモデル化した抗力モデル (式 (2)) の結果を比較した。特にモデル抗力係数 C_D の与え方が流れの再現性に及ぼす影響を検討した。

IBM 解析結果より、 ϕ の値が高く、密な円柱群において、円柱配置パターンによっては円柱群全体が透過性を有するひとつの鈍頭物体のように振る舞い、低波数で低周波な交番渦を放出する流況が生じることが確認された。そのようなケースを除けば、円柱群全体を代表するバルクな抗力係数の値を何らかの方法で推定できれば、一様な C_D 分布であっても抗力モデルは流れのマクロな性質を良好に再現できることが示された。

円柱群を構成する各円柱の抗力係数の空間分布は一様にはほど遠く、円柱群前縁で一般に高い値をとる。このような抗力係数の空間分布を考慮することで、抗力モデルによるよどみ点現象の再現性は高まるものの、それによって流れ場全体のマクロ特性の予測精度が改善されるとは言えない。また、上述の低波数で低周波な

図-10 抗力係数の空間分布を考慮した抗力モデルによる平均主流速分布。

交番渦を放出する流況は一樣な C_D 分布を与えた場合だけでなく、IBM 解析結果から推察された（すなわち円柱配置パターンの影響を含んだ）抗力係数分布を用いた場合にも再現されない。個々の円柱に対する接近流速を考慮してモデル抗力係数を与えることで結果が改善される可能性がある。また、低波数で低周波な交番渦を放出するケースでは円柱群の固体占有率が高く、内部の流動はかなり遅いため、慣性抵抗のみを反映した古典的な抗力モデル（式（2））に替わって粘性抵抗も考慮した抗力モデルを導入することによっても流れの再現性の向上が期待される。

謝辞： 本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号 23360215, 23760456）および高橋産業経済研究財団の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 榎木 康太, 石原 孟: 一般化キャノピーモデルの提案と都市域における風況予測への応用, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.1, pp.28-47, 2012.
- 2) Maruyama, T.: Optimization of roughness parameters for staggered arrayed cubic blocks using experimental data, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.46 & 47, pp.165-171, 1993.
- 3) 横嶋 哲, 野田 博, 河原 能久: 円柱群を過ぎる 2 次元流れ

の抗力特性, 土木学会論文集 B1, Vol.70, No.4, pp.I.829-I.834, 2014.

- 4) 清水 義彦, 辻本 哲郎, 中川 博次: 直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究, 土木学会論文集 No.447/II-19, pp.35-44, 1992.
- 5) 柴山 慶行, 音田 慎一郎, 細田 尚: 直立性植生群を有する開水路流れの詳細平面 2 次元解析と空間平均解析の比較, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2, pp.I.541-I.548, 2011.
- 6) Tanino, Y. and Nepf, H. M.: Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.134, pp.34-41, 2008.
- 7) Yokojima, S., Kawahara, Y. and Matsubara, K.: LES of turbulent flows in open channel with patched vegetation zones, *Proc. 7th Int. Conf. Fluvial Hydraulics (River Flow 2014)*, A143, Lausanne, Switzerland, 2014.
- 8) Uhlmann, M.: An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows, *J. Comput. Phys.*, Vol.209, pp.448-476, 2005.
- 9) Kempe, T. and Fröhlich, J.: An improved immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particle laden flows, *J. Comput. Phys.*, Vol.231, pp.3663-3684, 2012.
- 10) 例えば Hsu, C.T. and Cheng, P.: Thermal dispersion in a porous medium, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.33, No.8, pp.1587-1597, 1990.

(2014. 06. 20 受付)

APPLICABILITY OF THE DRAG-FORCE MODEL TO A TWO-DIMENSIONAL FLOW PAST ARRAYS OF CIRCULAR CYLINDERS

Satoshi YOKOJIMA and Yoshihisa KAWAHARA

General applicability of a classical drag-force model widely used in predicting flows past urban and vegetation canopies is examined against a detailed database of two-dimensional flows past arrays of circular cylinders (Yokojima et al., J. JSCE B1, 70(4), I.829, 2014.). It is demonstrated that the model can, in general, predict the mean flow property fairly well, as long as the bulk drag coefficient of the array can be estimated in a reasonable way. By providing the spatial distribution of the drag coefficient within the array obtained from the database, the model can reproduce the stagnation phenomena at the leading edge of the array more accurately, but it hardly improves the prediction accuracy of the macroscopic flow features.