

Undisturbed flow を考慮した植生流れの巨視的数値予測

静岡大学 大学院総合科学技術研究科 工学専攻 数理システム工学コース

学生会員

○平井 俊也

静岡大学 学術院工学領域 数理システム工学系列

正会員

横嶋 哲

広島大学 大学院先進理工系科学研究科 社会基盤環境工学プログラム

正会員

内田 龍彦

広島大学 防災・減災研究センター

正会員

河原 能久

1. はじめに

都市域の風環境や樹木群を有する河川流予測において、個々の障害物形状を織り込んでその周囲流れを再現することは工学的に現実的でなく、障害物周りの流動と抗力の関係を何らかの巨視的パラメータを用いて適切にモデル化することが必要となる。一般に見付面積 A 、抗力係数 C_D の任意の物体に作用する力 $\mathbf{F}$ は、ニュートンの抵抗則に基づいて

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} C_D \rho A |\mathbf{u}_{\text{rep}}| \mathbf{u}_{\text{rep}} \quad (1)$$

のように近似でき、いわゆる抗力モデルとして、これまでに多くの適用例が報告されてきた。ここで $\mathbf{u}_{\text{rep}}$ は物体に対する流体の接近速度 (fluid velocity seen by object) の代表値、 ρ は流体密度を表す。

障害物群が幾何学的に単純であれば見付面積 A は一意に決まるのに対して、適切な抗力係数 C_D を導く標準的な手法は単純な障害物群に対しても存在しない。横嶋・河原^{1,2)} は、対象流れに対してどのような観測値も存在せず、キャリブレーションが不可能な場合にも、適切な抗力係数 C_D を推定できる方法の確立に向けた基礎的知見の蓄積を目指して、以下のようなアプローチを試みた。円柱群 (樹木群模型) を過ぎる直線開水路流れ³⁾ の幾何学的最小ユニットを対象として、個々の円柱周りの流動および各円柱に作用する流体力を支配方程式に基づいて近似無しに算出した数値シミュレーション (予備解析と呼称) 結果から個々の円柱の C_D 値を算出し、得られた C_D 分布を式 (1) に基づく LES 解析 (主解析と呼称) に導入することで、どれほどの予測精度が得られるかを調べた。個々の円柱の抗力係数 C_D を評価する際に必要な代表速度 (式 (1) 中の $|\mathbf{u}_{\text{rep}}|$) として、横嶋・河原¹⁾ は断面平均流速 U_b を全ての円柱に様に用いた (代表速度に U_b を用いて得られた抗力係数を $C_{D,\text{global}}$ と呼称) のに対して、横嶋・河原²⁾ は個々の円柱に対する接近流速 u_a を個別に算出した (u_a に基づいて得られた抗力係数を $C_{D,\text{local}}$ と呼称、 u_a の定義等は文献²⁾ を参照)。

それに対して本研究では、代表速度として undisturbed flow u_{un} ⁴⁾ を用いる。 u_{un} に基づく抗力係数 $C_{D,\text{un}}$ を用いて式 (1) に基づく巨視的流動解析 (上述の主解析) を行い、 u_{un} を代表速度とすることの有用性や問題点を議論する。

2. Undisturbed flow

最もシンプルな場合として、一様流入 U_0 を有する系に孤立円柱が存在し、この円柱に働く抗力 F_D ($\mathbf{F}$ の主流方向成分) を式 (1) で評価する場合を考える (図-1(a))。代表速度 u_{rep} ($\equiv |\mathbf{u}_{\text{rep}}|$) は円柱が存在しない場合にその円柱位置

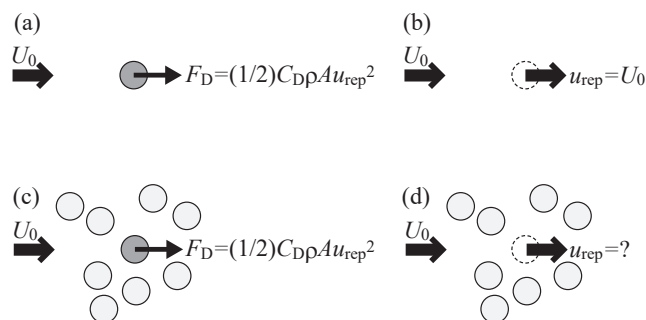


図-1 式 (1) に基づいて巨視的に円柱抗力を評価する際に必要となる代表流速 u_{rep} ($\equiv |\mathbf{u}_{\text{rep}}|$)。 (a) 孤立円柱を過ぎる流れ、と (b) (a) の円柱に対する代表流速の考え方 (当該円柱を除去した場合に当該円柱位置を過ぎる流速)。 (c) 円柱群を過ぎる流れ、と (d) (c) のグレーで色付けされた円柱に対する代表流速の考え方 (当該円柱は存在せず、それ以外の円柱は全て存在する場合に、当該円柱位置を過ぎる流速)。

を過ぎる流速 (当該円柱の影響を受けない場合の流速であるので、undisturbed velocity と呼称し、 u_{un} と記載) であり、この場合、明らかに $u_{\text{rep}} = U_0$ となる (図-1(b))。孤立円柱の C_D 値もよく知られているので、抗力 F_D は式 (1) を用いて容易に評価できる。次に、円柱群中のある円柱に働く抗力を評価する場合を考える (図-1(c))。この場合、先述の孤立円柱を過ぎる流れにおける代表速度の考え方を拡張すれば、当該円柱に対する undisturbed velocity は、その円柱は存在せず、それ以外の円柱は全て存在する場合に当該円柱位置を過ぎる流速となつて、一般に $u_{\text{un}} \neq U_0$ であり、実際に当該円柱のみを除去した系を新たに観測/数値解析対象としない限り、その算出は全く容易ではない (図-1(d))。

3. 検討対象流れと数値解析法

検討対象流れの概略を図-2 に示す。幅 80 cm の水路に対して、幅 27 cm の円柱群を主流方向に連続的に水路中央に沿って配置した場合を Case 1、99 cm × 27 cm の円柱群パッチを 99 cm 間隔で主流方向に離散的に配置した場合を Case 2 とする。図中の ‘vegetation zone’ (グレーで色付けされた領域) は、キャノピー領域を表す。この流れの実験計測結果等については文献³⁾ を参照されたい。

室内水理実験結果³⁾ によれば、検討対象流れは水深方向に概ね一様であるので、本研究では水平 2 次元モデルを導入する。図-2 中の破線の長方形領域はこの 2 次元モデルの計算領域を表す。これは Case 2 における幾何学的な最小ユニットに当たり、どちらの Case においても主流方向に周期

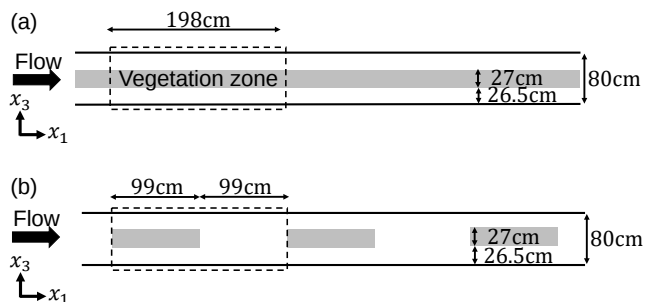


図-2 検討対象とした円柱群（樹木群模型）を有する直線開水路流れ¹⁾の概略: (a) Case 1, (b) Case 2. 破線の長方形領域は本研究の数値解析の計算対象領域（Case 2の幾何学的最小ユニット）を示す。

境界条件（周期長：198 cm）を課した。

数値解析では、全てのケースにおいて、断面平均流速 U_b と円柱直径 D に基づく円柱レイノルズ数 Re_D を 700 に固定した。次章では、主解析の抗力モデル（式(1)）に $C_{D,global}^{1)}$, $C_{D,local}^{2)}$, $C_{D,un}^{4)}$ の3種類の抗力係数を与えて得られた結果と、予備解析結果を比較する。

4. 結果と考察

主解析から得られた時間平均主流速分布に対して、主流方向にも空間平均操作を施した、水路横断方向1次元主流速分布を予備解析結果と併せて図-3に示す。Case 2では計算領域を主流方向に6等分し、それぞれの区間で主流方向に空間平均操作を施した。その内、樹木群パッチを含む3区間におけるデータを示した（図-3(b)-(d)）。Case 1においては、樹木群領域の内外で分けて評価した断面平均流速（図中の破線データ）に関して、予備解析結果と $C_{D,un}$ および $C_{D,local}$ を課した結果が非常に良く一致した（図-3(a)）。Case 2では、樹木群パッチ前縁部（図-3(b)）で、いずれの主解析も樹木群内外での運動量交換を十分に再現できずに流速を過小評価するものの、流れが流下して樹木群に順応するにつれてCase 1（図-3(a)）に似通った状況となった（図-3(d)）。これは抗力モデル（式(1)）の非平衡性が強い領域への適用性に課題があることを意味する。

式(1)の代表速度として新たに注目した undisturbed velocity u_{un} を用いた場合に、Case 1, 2とも、定量的にも非常に良好な予測結果が得られた。また、接近流速 u_a に基づく抗力係数 $C_{D,local}$ を用いた主解析結果は $C_{D,un}$ に基づく結果にかなり近いものとなった。つまり、接近流速 u_a は、評価に多大なコストを要する u_{un} の簡易推定値と位置付けられる。今後の検討課題としては、(i) 障害物が主流方向に平行に配置されることが定義の前提となっている接近流速 u_a の一般化、(ii) 主解析の空間解像度が予測精度に及ぼす影響の把握、などが挙げられる。

参考文献: 1) 横嶋, 河原, 土木学会論文集 B1, **71**(4), I.1051, 2015. 2) 横嶋, 河原, 土木学会論文集 A2, **71**(2), I.703, 2015. 3) Yokojima, Kawahara & Yamamoto, *J. Hydro-environ. Res.*, **9**, 295, 2015. 4) 横嶋, 平井, 安藤, 風早, 内田, 河原, 風工学研究論文集, **26**, 31, 2020.

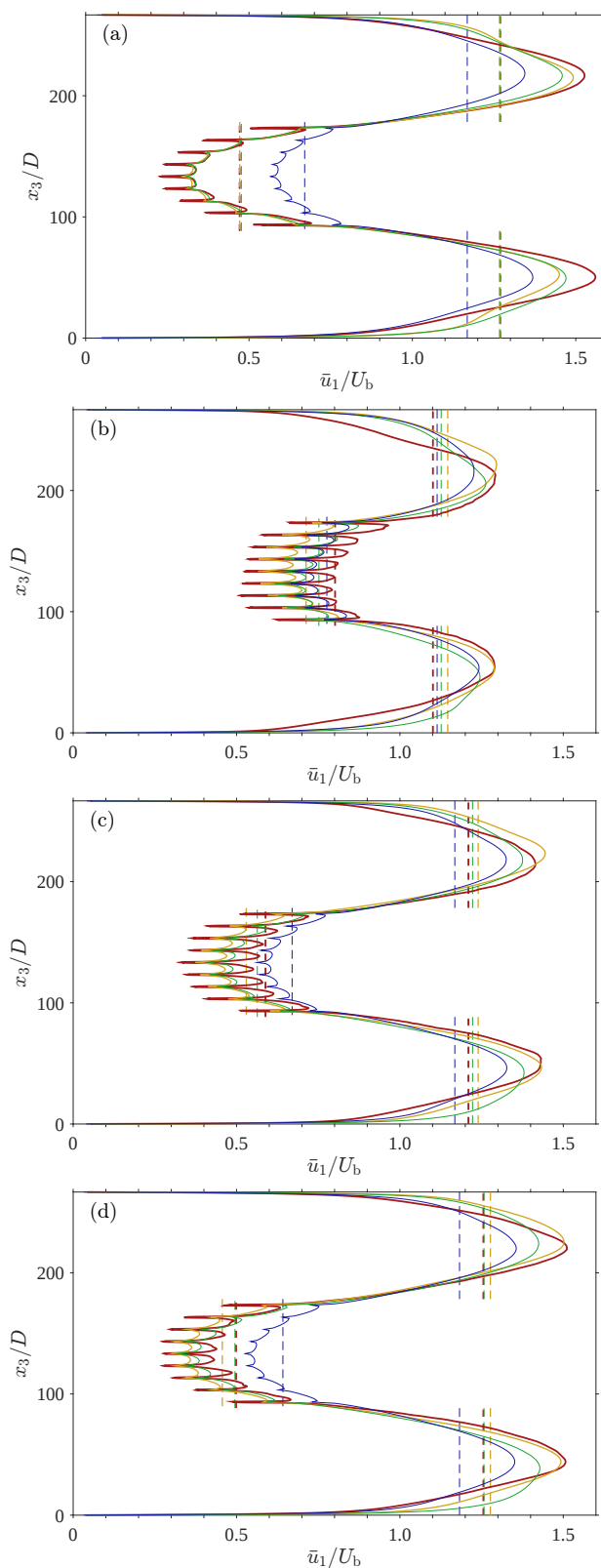


図-3 Case 1, 2 に対する、時空間平均された主流速の水路横断方向分布。Case 1 では、時間平均主流速 $\bar{u}_1(x_1, x_3)$ を主流方向の全区間に渡って空間平均した ((a))。Case 2 では領域を主流方向に6等分し、それぞれの区間で $\bar{u}_1(x_1, x_3)$ を主流方向に空間平均した。その内、植生パッチを含む3区間を (b)-(d) に示す。赤-予備解析; 緑- $C_{D,un}$ を用いた主解析; 青- $C_{D,global}$ を用いた主解析; 黄- $C_{D,local}$ を用いた主解析。破線はそれぞれの1次元分布を樹木群領域内部と外部に分けて評価した断面平均値を示す。