

正方形角柱周りの煙濃度の移流拡散に関する有限要素解析

日本大学大学院 学生会員 ○小林丈紘
 日本大学理工学部 フェロー 野村卓史
 日本大学理工学部 正会員 長谷部寛

1. はじめに

橋のまわりの飛来塩分の分布を予測することは、維持管理の効率を高めるための課題の1つである。そのため、気流の可視化実験における煙の濃度分布から飛来塩分濃度分布を推定する実験¹⁾が行われている。この実験を対象とする移流拡散解析を実施したので報告する。

2. 解析対象とする可視化実験

正方形角柱周りの流れを煙で可視化した画像を図 1 に示す。この実験では、可視化画像の輝度を煙の濃度に換算しており、その濃度分布を数値解析で再現することが本研究の課題である。可視化実験における煙濃度の時間変化を本解析の上流境界の境界条件として用いるため、図 1 の点 A の位置の濃度の時間変化を取得した。また図 1 に示す 2 つの位置 B、C における濃度の時間変化を解析結果と比較する。

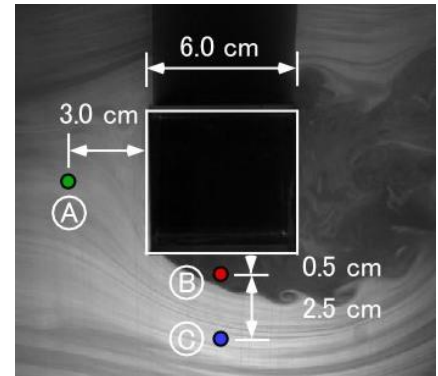


図 1 可視化した正方形角柱周りの流れと濃度の時間変化を解析と比較した点

3. 解析手法・解析条件

本解析で用いる移流拡散方程式は次式である。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla(u_i \phi - k \nabla \phi) = 0 \quad \dots (1)$$

ここで ϕ は濃度、 t は時間、 k は拡散係数、 u_i は移流速度ベクトル、 $\nabla = \langle \partial/\partial x, \partial/\partial y \rangle^T$ である。

移流拡散方程式 (1) の SUPG 法による有限要素方程式は次式である²⁾。

$$M\dot{\Phi} + (S(u) + K)\Phi = 0 \quad \dots (2)$$

ここで、 M は質量行列、 $S(u)$ は移流行列、 K は拡散行列、 Φ は節点濃度ベクトルである。本解析ではあらかじめ正方形角柱周りの $Re = 2000$ の乱流解析を実施し、得られた節点流速の値を式 (2) の節点移流速度ベクトル u にステップごとに与えている。図 2 に用いた境界条件を示す。流れの可視化実験より取得した濃度の時間変化を図 3 に示すように放物線に単純化し、角柱前方 $D/2$ の位置に境界条件として一様に与えた。また、この境界より上流の節点濃度は数値解析を安定させるために全面的に $\Phi = 0$ とした。解析は拡散係数 $k=0.1, 1, 5, 10$ の 4 通り行った。時間積分法には Euler 法を用いた。

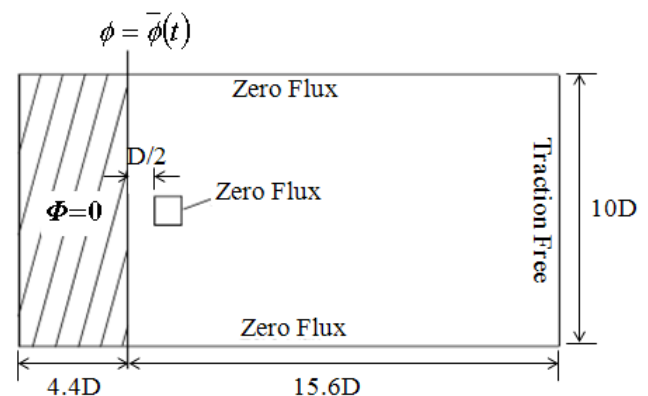


図 2 境界条件

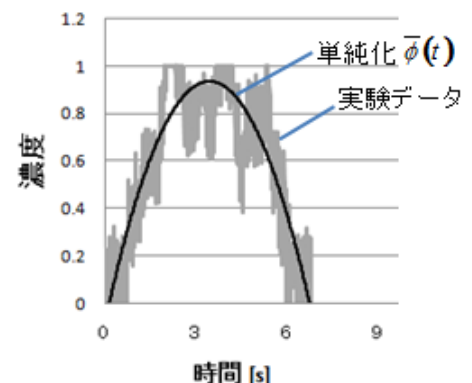


図 3 放物線に単純化した上流境界における煙濃度の時間変化

キーワード 飛来塩分 可視化実験 煙濃度 移流拡散解析

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

日本大学理工学部土木工学科応用力学研究室 TEL03-3259-0411

4. 解析結果

4.1 角柱近傍の濃度の時間変化

解析で得られた角柱近傍 C, B 2 点の濃度の時間変化を実験値と比較して図 4, 5 に示す. C 点の濃度の時間変化は, $k=0.1, 1, 5, 10$ のどの場合でもほぼ同じ変化をしており, 実験データの時間とおおよそ同じように変化している. しかし図 5 に示すように, 剥離せん断層内にある B 点の濃度の時間変化は, $k=5, 10$ の場合では濃度が上昇するのが早く, また最大値も実験値より大きい. $k=0.1$ の場合では最大値は実験値と近いが, 最大値に到達する時間が大きく異なっている. $k=1$ の場合が最大値に到達するまでの時間と到達した値の両方とも実験データと近かった. ただし濃度が減衰する過程には, 実験より長い時間がかかった.

4.2 解析領域全体の濃度分布の時間変化

$k=1$ の場合の $t=1.0\text{s}$ と $t=4.0\text{s}$ の時点での解析領域全体の濃度分布を図 6, 7 に示す. ここで図 1 の可視化画像と対比するために濃度が高いことを明るい色で表わした. 図 6 の $t=1.0\text{s}$ では煙が角柱の後方まで到達し, 図 7 の $t=4.0\text{s}$ では煙が下流の境界に既に達している. 図 6 では剥離せん断層内や角柱の背後には煙が入り込んでいない. 図 7 では角柱背後にも煙が少し入り込みつつある.

図 8 は $k=10$ の場合の $t=4.0\text{s}$ の濃度分布である. 図 7 と比較すると, 拡散的作用により煙が剥離せん断層内および角柱背後により多く入り込んでいる. これは図 5 に示した剥離せん断層内の B 点における濃度変化の違いと対応している.

5. まとめ

拡散係数 4 ケースの計算をし実験値と比較した結果, $k=1$ の場合に濃度の最大値到達まで実験値と比較的近い濃度変化が得られた. また拡散係数ごとに濃度分布に差異があることを確認した. 今後は乱れの強さに応じた拡散係数の導入を検討する予定である.

参考文献

- 1) 小杉翼, 畑元詩音, 長谷部寛, 野村卓史: 可視化実験の画像処理に基づく橋梁の飛来塩分濃度分布特性の検討, 土木学会年次学術講演会概要集 I-319, 2012
- 2) 桜井宏之, 野村卓史, 長谷部寛: 有限要素法による移流拡散解析の拡散を考慮した透過境界条件, 土木学会第 65 回年次学術講演会, CS8-003, 2010.9

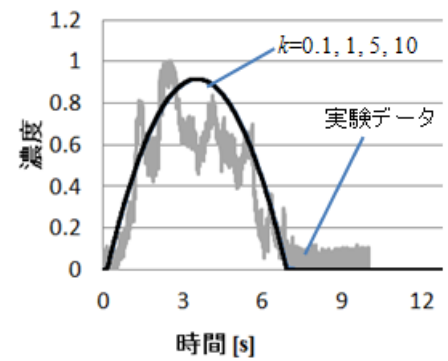


図 4 点 C における濃度の時間変化

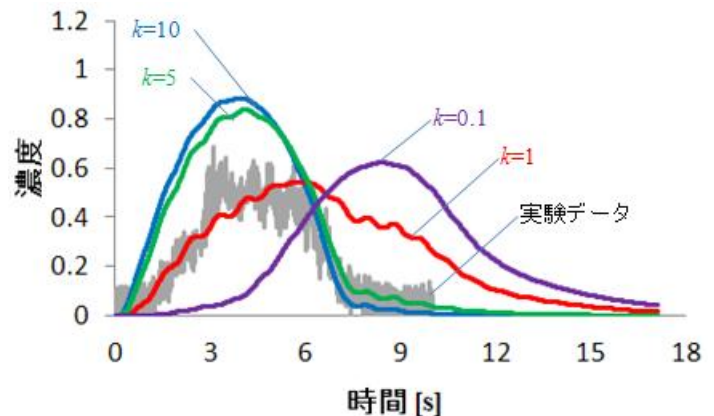


図 5 点 B における濃度の時間変化

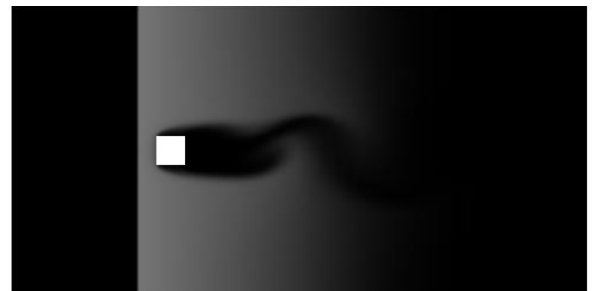


図 6 濃度分布($k=1$ $t=1.0\text{s}$)

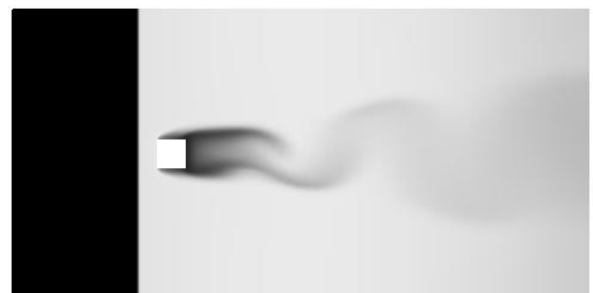


図 7 濃度分布($k=1$ $t=4.0\text{s}$)



図 8 濃度分布($k=10$ $t=4.0\text{s}$)