

直立堤で生じる越波飛沫の発生および飛散に関する数値シミュレーション

九州大学大学院 学生会員 山田 翔喜
九州大学大学院 正 会 員 山城 賢
九州大学工学部 児玉 充由

1. はじめに

防波堤や護岸等の海岸構造物は波浪制御等の役割を果たす一方で、**図-1** にみられるように塩風害の原因となる大量の越波飛沫の発生源となり得る。しかし、越波飛沫の発生および飛散過程は複雑で未解明な部分が多い。著者ら^{1)~3)}はこれまでに、造波風洞水路を用いた越波飛沫の可視化実験および画像解析を行い、越波飛沫の発生および飛散過程について検討した。また、数値流体解析ツール OpenFOAM⁴⁾を使用した数値シミュレーションにより、越波飛沫の輸送過程の再現を試みた。しかし、現段階では微小な飛沫の発生や飛来塩分の拡散については十分に再現できておらず、検討の余地は多い。そこで本研究では、微小な飛沫の発生および飛来塩分濃度の移流拡散を対象に、OpenFOAM を用いた数値シミュレーションによる再現性の向上について検討した。



図-1 大規模越波の様子

2. 数値シミュレーション

OpenFOAM は、有限体積法を採用した流体解析ライブラリに特化したオープンソフトウェアである。本研究における自由表面解析のソルバーとして、微小な飛沫の再現では、気液界面の追跡にVOF(Volume Of Fluid)法を用いて多相の圧縮性流体を計算できるmultiphaseEulerFoamを使用し、濃度の移流拡散の検討にはパッシブスカラの輸送方程式を計算できる scalarTransportFoam を使用した。

3. 越波飛沫の発生状況の比較

図-2に示す赤色で示した水柱を護岸前面で薄く高く打ち上がった水膜に見立て、これに風を作用させることで、微小な越波飛沫の発生過程の再現を試みた。計算時間間隔は 1.0×10^{-7} s、総計算時間は 5.0×10^{-4} s とした。また、境界左端から右方向に風速 4.5m/s の風を与えた。その他の計算条件は**表-1**に示す。**図-3**上に模型実験結果³⁾、下にOpenFOAMによるシミュレーション結果を示す。実験結果から、水膜が風で膨らみ破裂して多数の微小な飛沫が発生する過程が確認できる。これに対してシミュレーションでは、水膜が膨らむ現象は再現できていないが、水膜が風によって分裂し微小な飛沫が発生する様子がみられ、風によって微小な飛沫が発生するという点については模型実験と同様の結果が得られた。本シミュレーションでは、計算格子サイズが大きく、個々の飛沫そのものの形状や動きを再現することが難しかったと思われるが、このシミュレーション結果からも大規模越波によって発生する大量の微小な飛沫が、風に起因していることが理解できる。

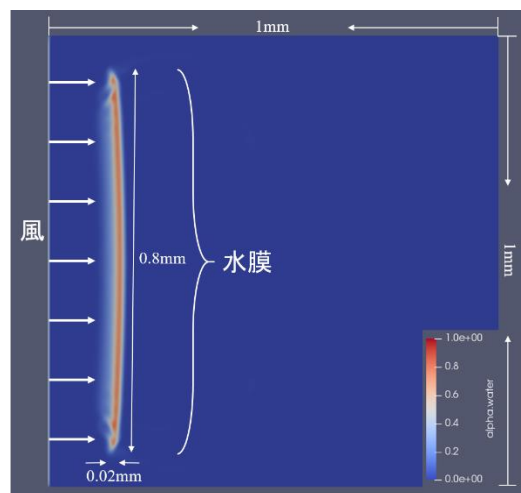


図-2 計算領域

表-1 計算条件

総格子数	800,000
風速 (m/s)	4.5
計算領域 (mm)	1×1×0.1
水柱の大きさ (mm)	0.02×0.8×0.1
表面張力 (N/m)	1.00×10^{-12}
総計算時間 (s)	5.00×10^{-4}
書き出し時間間隔 (s)	1.00×10^{-7}

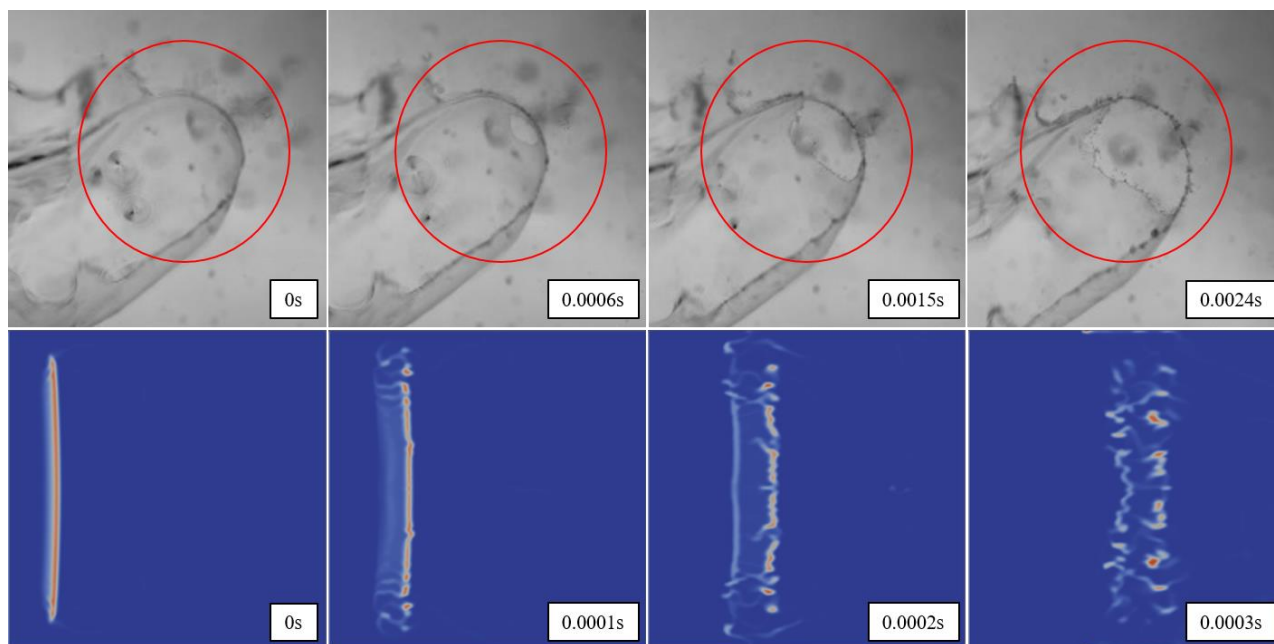


図-3 模型実験とシミュレーション結果の比較

4. 飛来塩分濃度の移流拡散シミュレーション

微小な越波飛沫が飛来塩分となって風により拡散していく様子を忠実にシミュレートするための第1段階として、濃度の移流拡散シミュレーションを試みた。なお、ここでの「濃度」とは特定の物質の濃度ではなく、便宜的に設定したものである。計算領域および計算条件を図-4および表-2に示す。境界左端上部から一定の濃度を流入させ、風速を変化させて濃度拡散の様子を可視化した。図-5にその結果を示す。図より、風速が大きくなるほど、濃度が高いまま遠くに飛散していることが分かる。また、輸送速度も風速に比例して速くなっている。現段階では限られた領域での計算であるため、現実のスケールでの検討が必要であるが、風速による飛来塩分濃度分布の時空間変化は本シミュレーションにより再現できるものと思われる。



図-4 計算領域

表-2 計算条件

総格子数	12,225
計算領域 (mm)	300×50×1
流入濃度	1
総計算時間 (s)	0.1

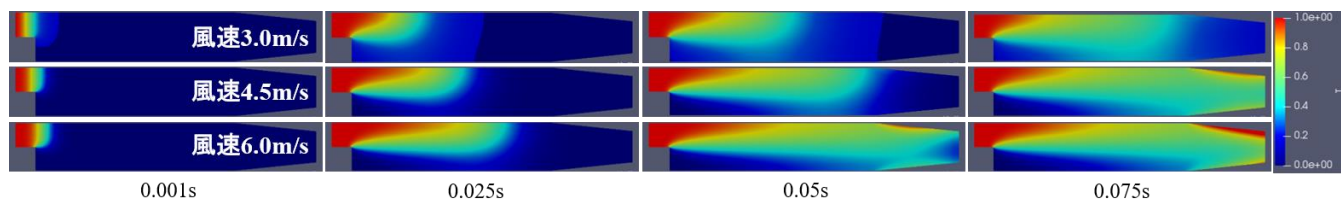


図-5 風速による濃度拡散の違い

5. 結論

本研究では、直立堤で生じる微小な越波飛沫の発生過程および飛来塩分濃度の移流拡散を対象に数値シミュレーションによる再現性の向上について検討した。その結果、現時点では、定性的には概ね再現できたといえる。今後は、より現実に近いシミュレーションに発展させ、波の打上げと風の状況に応じた越波飛沫の発生量と飛散量の変化など定量的な検討を可能とすることが必要である。

<参考文献>

- 山城ら：越波飛沫の輸送過程に関する実験的研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.73，No.2，pp.1_847-1_852，2017。
- 古賀ら：直立堤での越波飛沫に関する水理模型実験と数値シミュレーション，令和2年度九州大学修士論文，2021
- 山田ら：直立護岸における越波飛沫の発生過程に関する可視化実験，令和2年度土木学会全国大会，2020
- OpenFOAM Foundation：OpenFOAM User Guide，参照 2020-12-22