

波-任意形状物体相互作用解析のための境界要素法

秋田大学 学生会員 ○小山大貴

秋田大学 正会員 平川知明

1. はじめに

海洋の浮体や構造物に波が与える影響を予め数値的に解析することは、形状最適化による浮体揺動の最小化や性能改善の観点から重要である。浮体や構造物と波の相互作用の数値解析手法として、非線形ポテンシャル理論に基づく境界要素法が 1970 年代から研究開発されてきた¹⁾。境界要素法は、任意形状の連続体の計算が可能であり、また、計算領域全体ではなく表面のみに関する支配方程式を扱うため、代数連立 1 次方程式の数が比較的少ないのが特徴である。一方で、複雑な構造物上を水面が這うように時間発展させながら境界積分解析をすることは、以下の理由から未だ困難である。

1. 構造物表面上の水粒子（格子点）が、次の時刻にどこに移動するか計算することが困難。
2. 水粒子（格子点）の位置が構造物表面上のある位置に決まったとしても、格子点をどのように結ぶか（水面と構造物の交線をどのように引くか）を決めることが困難。

このため、複雑形状を有する構造物が水面を貫くような計算対象は、境界要素法では扱われていない²⁾³⁾。

そこで、本研究では、CAD で作成した 3D オブジェクトの交点及び交線を計算できるライブラリを開発し、さらに、これを利用して境界積分解析の時間ステップ毎に計算格子を生成することにより、複雑な構造物と水面の相互作用の数値シミュレーションを可能にすることを目的とする。

2. 数値計算

非粘性、非圧縮流体と渦なし流れを仮定すると連続の式は、 $\nabla \cdot \nabla \phi = 0$ となる。これとグリーンの定理を合わせると境界積分方程式が得られる：

$$c\phi(\mathbf{a}) = \int_s (\phi \nabla G - G \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} ds \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{n}$ は計算領域表面の単位法線ベクトル、 $G = \frac{1}{\|\mathbf{x}-\mathbf{a}\|}$ 、定数 c は滑らかな境界面上では 2π 、角点では π と仮定する。速度ポテンシャル ϕ と流体粒子位置 X の時間発展は、次の常微分方程式を 4 次のルンゲクッタ法で積分することで行う。

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{1}{2}(\nabla \phi \cdot \nabla \phi) - gz - \frac{\rho}{\rho g}, \quad \frac{DX}{Dt} = \nabla \phi \quad (2)$$

2.1. 三角非構造格子間の交点と交線の計算

複数の非構格子から計算領域を生成するためには、格子同士の交点を計算し、さらに交線を繋ぎ合わせる必要がある。格子同士の交わり方は、図-2-1 の(1)、(2)の 2 つに分類でき、赤い点で示すように交線を引くことができる。また、複数の交点の連結によって結ばれた交線は基本的にループ状に結ばれる(図-2-2)。

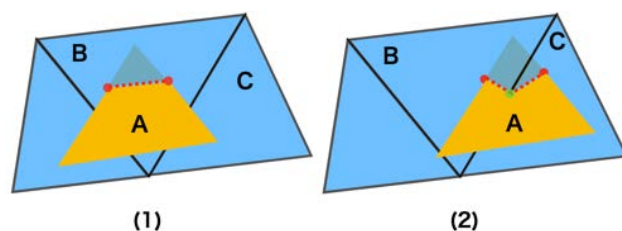


図-2-1 青色 (B と C) と黄色 (A) の格子が互いに交差している様子。赤色の点線が交線。

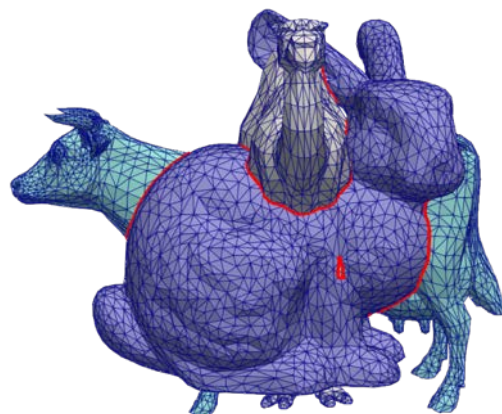


図-2-2 複雑な三角非構造格子間の交線（赤）の計算例

3. 結果と考察：自動格子生成と境界要素法を組み合わせたシミュレーションの例

キーワード: 境界要素法, 水面波

連絡先 (010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1 番 1 号) TEL018-889-2884

作成した格子自動生成ライブラリを境界要素法と組み合わせ、構造物と波の相互作用の数値シミュレーションを行なった。構造物と矩形水槽を CAD ソフトを使って、図-3-1 のように作成した後、初期水面を設定した。作成された計算格子は縦横 5x7.4m で水深 2.5m。初期波形の振幅は 0.03m である。

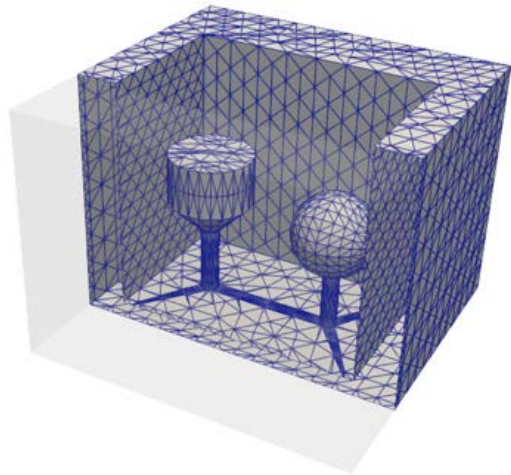


図-3-1 作成した構造物

図-3-2 は、シミュレーション結果である。初期に中央に設定した波は、水槽側面で反射し、また左右の構造物を回折して伝播した。図-3-3 は、シミュレーションにおける非構造格子の変化の様子である。水面が球体状の構造物の表面を這うように移動し計算格子が自動で生成されている。

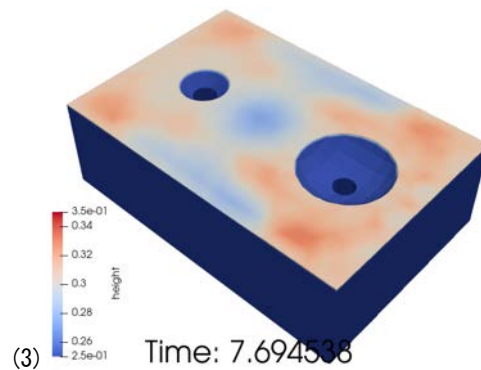


図-3-2 波-構造物相互作用シミュレーション結果（秒）

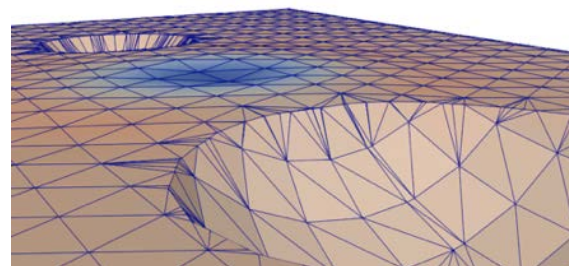
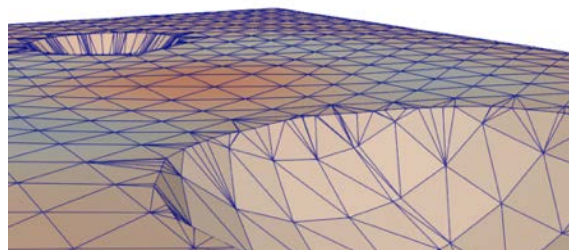


図-3-3 非構造格子の変化の様子

4. まとめ

境界要素法を使った、水面と構造物の相互作用に関する数値シミュレーションにおいて、これまでは複雑に水面を貫く構造物を対象にできなかった。本研究では、非構造格子間の交点および交線を計算することで、計算領域を時間ステップ毎に生成し、これによって複雑な構造物を対象として、水面と構造物の相互作用を計算することに成功した。しかし、計算精度の確認や大振幅波、浅水波の場合にどのような問題が発生するかをさらに調査する必要がある。

参考文献

- 1) Society, T. R., Society, R., & Sciences, P. (1976). The deformation of steep surface waves on water - I. A numerical method of computation. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 350(1660)
- 2) Feng, X., & Bai, W. (2017). Hydrodynamic analysis of marine multibody systems by a nonlinear coupled model. Journal of Fluids and Structures, 70, 72-101.
- 3) Dombre, E., Harris, J. C., Benoit, M., Violeau, D., & Peyrard, C. (2019). A 3D parallel boundary element method on unstructured triangular grids for fully nonlinear wave-body interactions. *Ocean Engineering*, 171(September 2018), 505-518.

