

# PS-41 洋上風力発電施設の水中放射音に関する研究

洋上再生エネルギー開発系 \* 塩莉 恵、藤原 敏文  
 水中工学センター 今里 元信

## 1. はじめに

近年、我が国でも洋上風力発電施設の開発が進んでおり、沿岸部に多くの施設が並ぶ光景も見られるようになった。風力発電施設の影響評価については、平成 24 年 10 月から環境影響評価法の対象となり、総設備容量 1 万 kW 以上の事業には法的なアセスメントの義務が課せられるようになった。しかし、この評価項目は基本的に陸上施設を想定しており、洋上施設に対する評価手法は確立されていない。洋上施設に特有な課題のひとつとして、水中放射音による海棲生物等への影響が挙げられる。本研究ではこの評価手法の構築に貢献することを目的とし、洋上風力発電施設からの水中放射音の周辺海域への伝搬状況を、FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method、時間領域差分法) を用いたシミュレーション<sup>1)2)</sup>によって再現することを試みた。

## 2. シミュレーションモデルの作成

### 2.1 支配方程式と FDTD 法による定式化

水中音の伝搬の計算には、下記に示す連続の式(1)および運動方程式(2)～(4)を用いる。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\kappa \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

ここで、 $t$  は時間変数[s]、 $p$  は音圧[ $\mu\text{Pa}$ ]、 $u, v, w$  はそれぞれ  $x, y, z$  方向の粒子速度[m/s]、 $\kappa$  は媒質の体積弾性率 [ $\text{N/m}^2$ ]、 $\rho$  は媒質の密度 [ $\text{kg/m}^3$ ] であり、音速 (音波の位相速度)  $c$  [m/s] は式(5)のように表される。

$$c = \sqrt{\kappa/\rho} \quad (5)$$

FDTD 法では、式(1)～(4)を中央差分で近似し、時空間的に蛙とび差分によって配置して定式化する。図-1 に  $xy$  平面における  $p, u, v, w$  の空間配置および、 $p$  と  $u$  の時間配置の概念図を示す。ただし、 $n$  はタイムステップ、 $i, j$  はそれぞれ  $x, y$  方向のグリッド番号である。

本研究では、上記の定式化により Fortran による 3 次元プログラムを作成した。

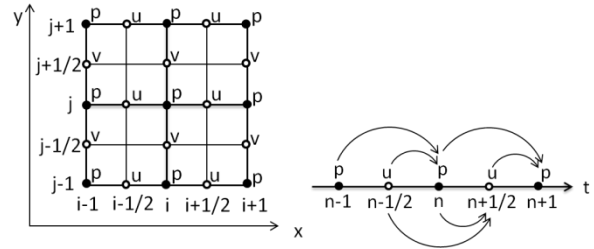


図-1 各変数の  $xy$  平面上の空間配置 (左) と時間配置 (右) の概念図

### 2.2 境界条件の設定

海面および海底面では音波が反射し、それ以外の境界では反射は起こらず、無限遠方まで音波が伝搬していくよう、境界条件を設定した。

音波の反射は、密度や音速の異なる 2 つの媒質の境界において発生し、反射率は入射角・屈折角および、密度と音速の積である音響インピーダンスによって決まる<sup>3)</sup>。海面は海水と空気の境界であり、両者の音響インピーダンスの差は極めて大きく、透過率は小さいと考えられるため、本モデルでは海面において  $p = 0$ 、すなわち全反射の設定とした。一方、海底面での反射については、海底地質の密度・音速を持つセルを海底面に配置し、海水との音響インピーダンスの差によって反射が起こるようにした。

それ以外の境界では反射が起こらないよう、吸収境界条件を設定した。なお、海底地質部分の外部 (計算領域の境界) についても吸収境界条件を適用した。図-2 にモデルの概要を  $xz$  平面における断面で示す。(送波点と受波点は本来同一の断面には存在しないが、便宜上同じ断面に記載した。)

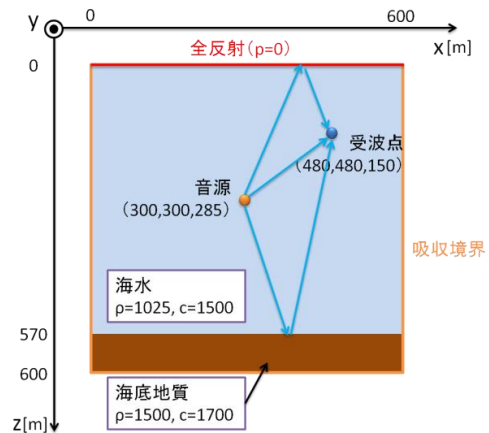


図-2 モデルの概要

## 2.3 モデルの検証

作成したモデルの検証のため、以下の条件で試計算を行った。

- 計算領域
  - ・  $x = y = z = 600$  [m]、 $dx = dy = dz = 3.0$  [m]
  - ・ 水深 570 m ( $570 < z \leq 600$  の領域は海底地質)
- 境界条件
  - ・ 海面は全反射 ( $p = 0$ )
  - ・ 海面以外の境界は Higdon2 次の吸収境界条件<sup>4)</sup>
- 計算時間
  - ・ 計算時間 1.2 s、 $dt = 0.0006$  [s]
- 音の条件
  - ・ 周波数 25 Hz、音圧 100 dB
  - ・ ガウシアンパルス波
- 媒質の条件
  - ・ 海水のパラメータ：密度 1025.0 kg/m<sup>3</sup>、音速 1500 m/s
  - ・ 海底地質のパラメータ：密度 1500.0 kg/m<sup>3</sup>、音速 1700 m/s

計算結果として、図-3 に音源(300, 300, 285)および水中受波点(480, 480, 150)での波形を示す。また、図-4 は計算開始から 0.12 秒後および 0.48 秒後の  $x = 300$  [m] における  $yz$  断面の瞬時音圧分布である。これらの結果から、海面および海底面での反射が再現できていることが確認できた。また、音源と受波点の距離および水中での音速から、受波点で観測された波形の第一波が直接波、第二波が海面からの反射波、第三波が海底面からの反射波であることが推定され、振幅比から計算される減衰量も球面拡散による理論値とよく一致していることが確認できた。

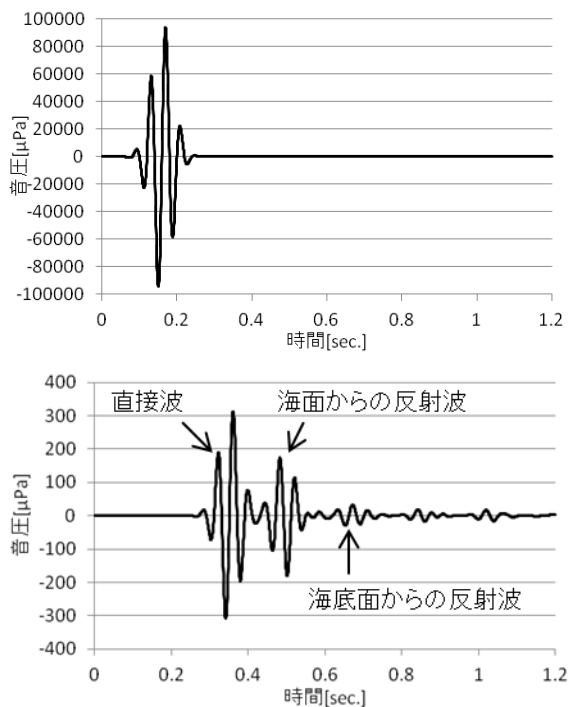


図-3 音源（上）および水中受波点（下）における波形の時間変化

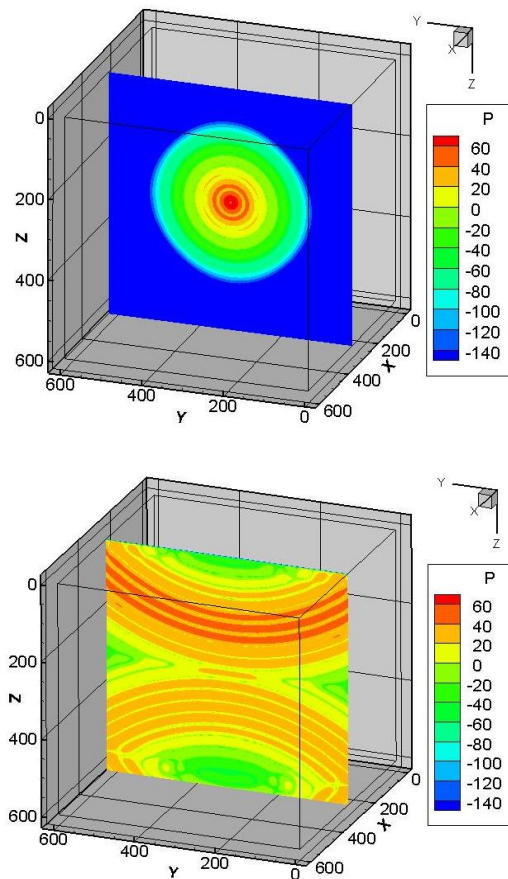


図-4 計算開始より 0.12 秒（上）および 0.48 秒（下）の時点での  $x=300$  [m] の  $yz$  断面における瞬時音圧分布

## 3. まとめ

本研究では FDTD 法による 3 次元水中音伝搬シミュレーションプログラムを作成し、モデル海域における試計算の結果から、海面および海底面での音波の反射の様子が確認できた。今後はこのプログラムを利用し、実海域における風力発電施設からの水中放射音の伝搬状況推定を行う予定である。

## 4. 参考文献

- 1) 佐藤雅弘：FDTD 法による弾性振動・波動の解析入門、森北出版株式会社、2003。
- 2) 土屋健伸：数値解析に基づく海洋内音波伝搬解析、海洋環境と音響技術、海洋音響学会部会報告書、pp. 54-59、2004。
- 3) 鎌田弘志：音響の基礎、海洋音響の基礎と応用第 3 章、pp. 16-25、海洋音響学会編、成山堂書店、2004。
- 4) 宇野亨：FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析、コロナ社、1998。