

# 音波伝播のシミュレーション-風車騒音への応用をめざして

藤林 紗和子 (指導教員：河村 哲也)

## 1 はじめに

風力発電は、地球温暖化現象が問題視されている中、自然の風を利用したクリーンで安全な発電法として注目されている。しかしその一方で騒音問題や電波障害などの欠点が挙げられている。本研究では、ダリウス風車の騒音を予測するシミュレーションの前段階として、2次元空間における波動の基本現象および、八角形上を回転移動する音波のドップラー効果と波の干渉のシミュレーションを行い、音波の伝播の様子を調べた。

## 2 波動の理論

波動の基本現象「波の回折」・「波の干渉」・「波のドップラー効果」を取り上げた。

### 2.1 波の回折

光や音波など、すべての波動に対し障害物が存在する時、影の部分に回りこみ、また強度に大小ができる現象を回折という。一般に壁の穴に対して波長が大きいほど回折角(壁の背後に回り込む角度)は大きい。

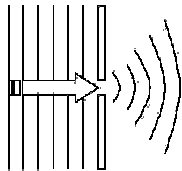


Fig.1 壁の穴に入射した平面波の回折

### 2.2 波の干渉

複数の波の重ね合わせによって新しい波形ができることを干渉という。波の重ね合わせの原理とは、ある点に生じた波の振幅が、その点に影響するすべての波の振幅の和と一致することを指す。例えば2つの波の変位を  $U_1(x,y,t), U_2(x,y,t)$  とすると、各点の変位  $U(x,y,t)$  は次のような式で表すことができる。

$$U(x,y,t) = U_1(x,y,t) + U_2(x,y,t) \quad (1)$$

### 2.3 波のドップラー効果

波の発生源と観測者との相対的な速度によって、波の周波数が異なって観測される現象のことを指す。発生源が近づく場合には波の波長が縮められて周波数が高くなり、逆に遠ざかる場合には波長が伸ばされて低くなる。

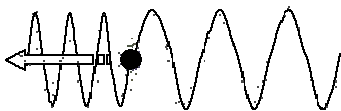


Fig.2 物体が左に向かって動く場合のドップラー効果

## 3 モデル化

風車の騒音シミュレーションを行う平面を  $400 \times 400$  の2次元格子に分割した。風車は垂直軸揚力型風車のダリウス風車をモデルとする。1つの風車の回転域は  $70 \times 70$  格子に収まる八角形上とし、ブレードの形状から音源を二箇所においた。八角形は一辺が格子数にして  $30$  と  $20\sqrt{2}$  が交互になっている。

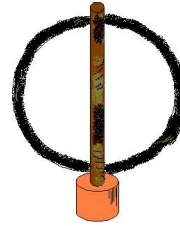


Fig.3 ダリウス風車

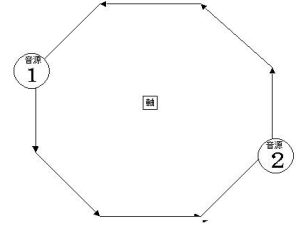


Fig.4 風車の八角形モデル

## 4 計算方法

### 4.1 基礎方程式

基礎方程式として、2次元の波動方程式

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

を用いた。ここで、 $c$  は波の伝播速度である。

### 4.2 差分方法

波動方程式(2)を中心差分し、陽解法によって近似した式を下に示す。

$$\begin{aligned} U^{n+1,j,k} &= 2U^{n,j,k} + r(U^{n,j+1,k} - 2U^{n,j,k} + U^{n,j-1,k}) \\ &\quad + s(U^{n,j,k+1} - 2U^{n,j,k} + U^{n,j,k-1}) - U^{n-1,j,k} \\ r &= a^2 \left( \frac{dt}{dx} \right)^2 \quad s = a^2 \left( \frac{dt}{dy} \right)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

### 4.3 ドップラー効果

時間刻みを無次元で  $\Delta t = 0.004$  の場合、1周を無次元時間  $t = 24$  で計算し、 $t = 24$  より後は繰り返すを行う。音源の移動は速度ではなく、時間で計算する。例えば  $100$  格子(格子幅は  $1/100$ )の距離を  $t = 12$  で移動するとすると、 $100/12 \times 0.004 = 1/30$  で  $t = 0.004$  ごとに距離  $1/30$  を移動することになる。斜めに移動する場合は  $x$  方向  $y$  方向それぞれの格子移動を、音源を表記する式に当てはめる。  $50 \times 50$  の2次元格子を  $t = 6$  で斜めに端から端まで移動する場合は、 $x$  方向  $y$  方向ともに  $t = 0.004$  ごとに距離  $1/30$  移動することで斜めに音源を移動させることができる。

### 4.4 周期境界

周期境界はシミュレーション領域を大きな系の一部と見なし、境界の影響が現れにくい場合に用いる。本研究では、広大な土地に設置された2台のダリウス風車を対象とし、風車の騒音伝播シミュレーションを行う。

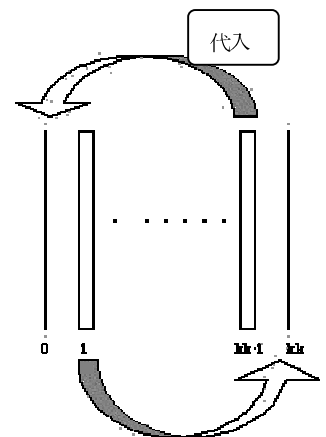


Fig.5 周期境界理論図

## 5 計算結果

### 5.1 回折

等間隔正方形格子(100×100)で、平面波の進行方向と垂直に、隙間の大きさの異なる壁をおいて計算を行った。境界条件は波の進行方向に固定端反射、垂直方向に自由端反射に設定した。Fig.6に  $t=1$ 、隙間の大きさを case1 で 30/100 (30 格子)、case2 で 10/100 (10 格子) の波の回折シミュレーション結果を示す。等高線は、波の振幅である。壁の隙間の小さい case2 の場合の方が、回折が著しい様子が分かる。

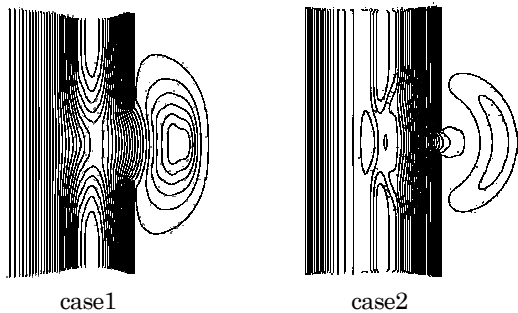


Fig.6 回折シミュレーション

### 5.2 干渉

等間隔正方形格子(100×100)内に、2つの波源を振動させてシミュレーションを行った。境界条件は固定端反射に設定した。時間が経過するごとに境界からの反射波も干渉し、波の振幅が次第に大きくなっていく様子が分かる。(Fig.7)

### 5.3 ドップラー効果

等間隔正方形格子(200×300)に1つの波源を振動させながら x 方向に移動させる。x 方向、y 方向ともに周期境界に設定した。波を振動させながら移動させると、波源前方後方の等高線の疎密が見てとれる。(Fig.8)これにより、ドップラー効果の現象が起きると、音源の前方の音は高くなり後方の音は低くなること分かる。また音速よりも音源の速度を速くした場合に起きる衝撃波の様子を Fig.9 に示す。

### 5.4 風車の音波シミュレーション

等間隔正方形格子(400×400)内に2つの風車が設置されているときのシミュレーション例を示す。風車は2つの音源を持っているとし、八角形の対角線上を回転移動する。境界条件は周期境界に設定した。4つの音源のドップラー効果、干渉の様子を Fig.10 に示す。

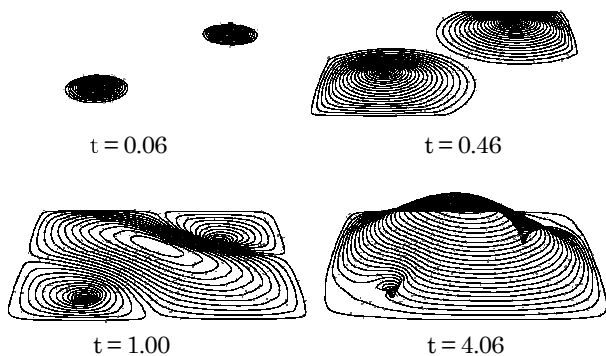


Fig.7 2つの波源の干渉シミュレーション

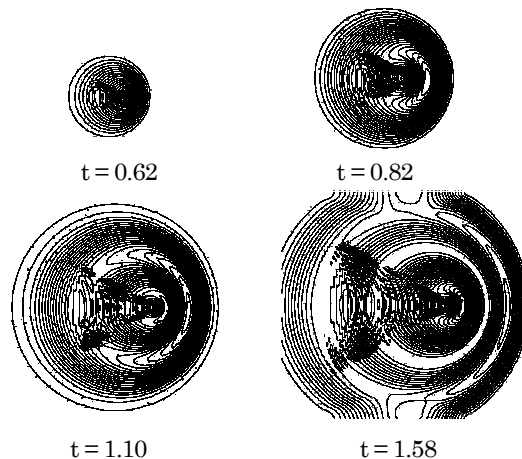


Fig.8 ドップラー効果シミュレーション

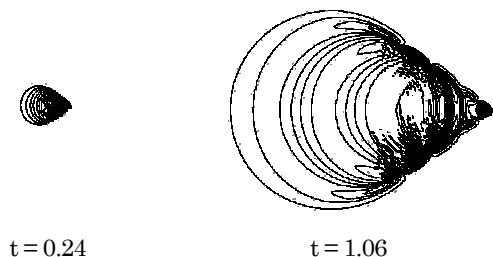


Fig.9 ドップラー効果による衝撃波

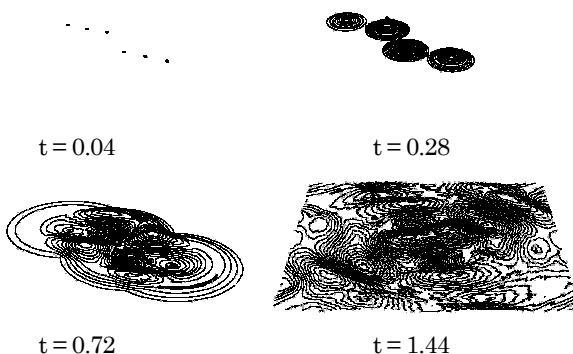


Fig.10 風車の音波シミュレーション

## 6 まとめと今後の課題

「回折」・「干渉」・「ドップラー効果」という波の基本現象とその応用として、2つの音源を持った風車が回転しているときの音の伝播を数値シミュレーションで再現することができた。風車の回転では、2つの風車軸から等距離直線上に波の干渉によって大きな波の波形ができていたことが分かった。今後の課題として、2次元正方形格子から3次元円柱座標への拡張、音波のドップラー効果へ風速の追加、また実際の立地条件など環境を配慮したより現実に近い数値シミュレーションと騒音の解析ができるようにしたい。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、ご尽力くださいました指導教員の河村先生に深く感謝いたします。

### 参考文献

河村 哲也：「エネルギーと風車」山海堂 2003

ISBN4-381-01678-5