

移動する音源による音波の伝播の数値シミュレーション

寺町幸希子 (指導教員：河村哲也)

1 はじめに

我々は、自動車等の乗り物の音や工事現場の音、生活音、音楽など様々な音に囲まれて日々暮らしている。それらの音は、人によって、また時と場合によって心地よいと感じることもあれば騒音と感じることもある。騒音に関する問題は、近年深刻化しておりトラブルの原因にもなっている。この騒音問題が弊害となっているものの一つに、代替エネルギー源として近年注目されてきた風力発電がある。しかし風力発電は日本ではあまり実用化されておらず、その理由の一つとして風車騒音が挙げられている。

そのため本研究では、風車ブレードから発生する音を移動する音源とみなし、発生する音波がどのように伝播するかをシミュレーションすることで、風車騒音への応用を考えることを目的とした。

2 モデル化・格子生成

2.1 計算領域

縦横それぞれ 1，奥行き 0.5 の直方体の領域を考え、音波伝播の様子を調べる。

具体的には Fig.2.1 のように音源を設定し、音源が静止している時、音源を平行移動または回転させた時の音波伝播の様子を比較する。また吸収層を設定することで、Fig.2.2 の色のついた面のみ音波が反射するようにし、吸収層なしの場合とありの場合とで比較する。

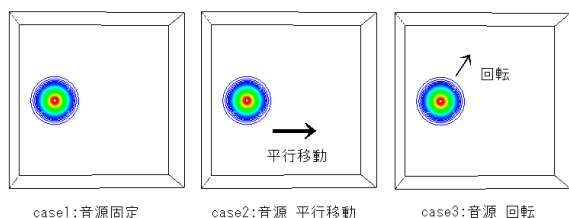


Fig. 2.1: 音源

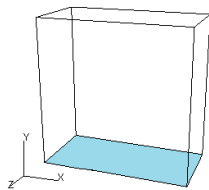


Fig. 2.2: 吸収層

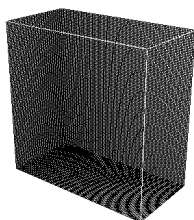


Fig. 2.3: 格子

2.2 格子

格子数は $200 \times 200 \times 100$ とした。各方向の比率が $x: y: z = 1: 1: 1$ である直交等間隔格子を用いる。(Fig. 2.3)

3 計算方法

3.1 基礎方程式

以下の線形化オイラー方程式を使用する。

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla P \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{V} + Q \quad (2)$$

P : 圧力, \vec{V} : 速度ベクトル, Q : 音源

3.2 境界条件

数値シミュレーションは限られた領域で行うが、実際はとても広い領域で音波が伝播する。そこで、PML法 (Perfectly Matched Layer) を利用して吸収層を設定することで実際の領域に近づくようにした。

$\vec{V} = (u, v, w)$ とし、それに対する補正項 1 を $\vec{V}_1 = (u_1, v_1, w_1)$ とする。また、 P に対する補正項 2 を P_1 とすると、

$$\begin{aligned} u_1 &= m_4 u + n_4 \int u \, dt + n_5 \int (\int u \, dt) dt \\ &\quad + m_1 \frac{\partial}{\partial x} \int P \, dt + n_1 \frac{\partial}{\partial x} \int (\int P \, dt) dt \\ v_1 &= m_4 v + n_4 \int v \, dt + n_5 \int (\int v \, dt) dt \\ &\quad + m_1 \frac{\partial}{\partial y} \int P \, dt + n_1 \frac{\partial}{\partial y} \int (\int P \, dt) dt \\ w_1 &= m_4 w + n_4 \int w \, dt + n_5 \int (\int w \, dt) dt \\ &\quad + m_1 \frac{\partial}{\partial z} \int P \, dt + n_1 \frac{\partial}{\partial z} \int (\int P \, dt) dt \\ P_1 &= m_4 P + n_4 \int P \, dt + n_5 \int (\int P \, dt) dt \\ &\quad + m_1 \frac{\partial}{\partial x} \int u \, dt + n_1 \frac{\partial}{\partial x} \int (\int u \, dt) dt \\ &\quad + m_2 \frac{\partial}{\partial y} \int v \, dt + n_2 \frac{\partial}{\partial y} \int (\int v \, dt) dt \\ &\quad + m_3 \frac{\partial}{\partial z} \int w \, dt + n_3 \frac{\partial}{\partial z} \int (\int w \, dt) dt \end{aligned}$$

となる。ここで補正項に現れるパラメータは、

$$\begin{aligned} m_1 &= \sigma_y + \sigma_z & n_1 &= \sigma_y \sigma_z \\ m_2 &= \sigma_z + \sigma_x & n_2 &= \sigma_z \sigma_x \\ m_3 &= \sigma_x + \sigma_y & n_3 &= \sigma_x \sigma_y \\ m_4 &= \frac{m_1 + m_2 + m_3}{2} & n_4 &= n_1 + n_2 + n_3 \\ & & n_5 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z \end{aligned}$$

である。 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ はそれぞれ x 座標, y 座標, z 座標の吸収率を表している。 $\sigma_x = 0$ または $\sigma_y = 0$ または $\sigma_z = 0$ とすることで吸収層なしの部分を表せる。

上記の補正項と式 (1)(2) より

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla P - (\text{補正項 1}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{V} + Q - (\text{補正項 2}) \quad (4)$$

3.3 解法

式 (3)(4) をコンパクト差分法を用いて解く。 $\Delta t = 0.002$, 計算ステップは 2,000 回とした。

4 結果と考察

4.1 音源 固定

音源固定で, Fig.4.1 は吸収層なし Fig.4.2 は吸収層ありの場合の同時刻での密度分布を等値線で表した図である。

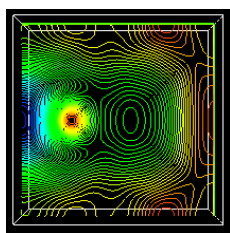


Fig. 4.1: 音源固定
吸収層なし

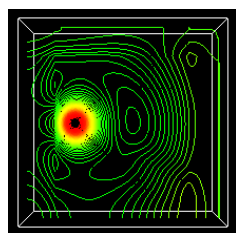


Fig. 4.2: 音源固定
吸収層あり

Fig.4.1 では, 音波が反射して入り乱れており, 全体の音波の密度が音源付近とほとんど変わらない。一方 Fig.4.2 では音源付近に音波が密集していることが分かる。これは音波の反射が吸収層がない下面からのみで, 反射波が少ないからであると考えられる。また, Fig.4.2 では音源から遠い程音が小さいと考えられる。

4.2 音源 平行移動

音源を一定速度で平行移動させ, Fig.4.3 は吸収層なし Fig.4.4 は吸収層ありの場合の同時刻での密度分布を等値線で表した図である。

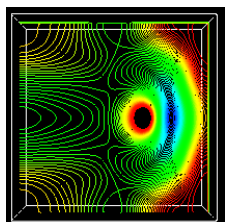


Fig. 4.3: 音源平行移動
吸収層なし

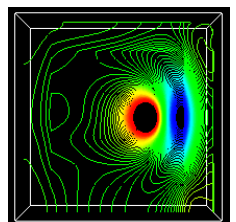


Fig. 4.4: 音源平行移動
吸収層あり

Fig.4.3 では, 移動する音源の音波と反射した音波がぶつかり, 音源の位置がはっきりとしない程複雑になった。一方 Fig.4.4 では音波の反射が下面からのみであるため, 音波の流れが音源の移動とともに動くも

の, 音源の移動とは反対方向に動くもの, 反射したものの主に三つに分かれた。音源を固定した場合と同様 Fig.4.4 では音源から遠い程音が小さいと考えられる。また, 両方ともドプラー効果が確認できた。

4.3 音源 回転

音源を一定速度で回転させた時, Fig.4.5 は吸収層なし Fig.4.6 は吸収層ありの場合を同時刻での密度分布を等値線で表した図である。

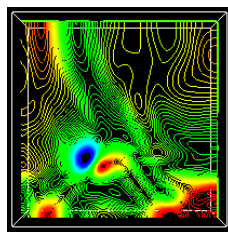


Fig. 4.5: 音源回転
吸収層なし

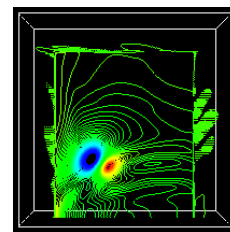


Fig. 4.6: 音源回転
吸収層あり

Fig.4.5 では Fig.4.1 や Fig.4.3 と同様に, 移動する音源の音波と反射した音波がぶつかり複雑に入り乱れた。一方 Fig.4.6 では, 音源付近に最も音波が密集している。また, Fig.4.2, Fig.4.4 と比べて音波の様子が複雑にならなかったのは, 音源が吸収層の近くを回転移動しているため, すぐに音波が吸収されてしまったからであると考えられる。

5 まとめと今後の課題

音源が移動することによって音波がどのように伝播するか, また, 吸収層なしの場合とありの場合とで音波伝播にどのような違いがあるのかをシミュレーションにより検証した。その結果, 音源を移動させると, 音波が後から遅れて伝わるドプラー効果が観察できた。また, 音源の移動を複雑にするほど音波も複雑に入り乱れることがわかった。吸収層を設定した部分では音源の状態に関わらず, 音波は反射することなく吸収されていた。また, 吸収層なしと比べて吸収層ありの方が音源付近に音波が集中しており, 音源から離れるにつれて密度が小さくなることから, 音源から遠くなる程音が小さくなっているのではないかと推測した。

今後は, 音源の設定位置を再検討し, 音源を風車のブレードに近い形にして回転させる, また吸収層における音波の吸収のされ方が, 風車を実際に設置する環境により近づくような吸収層を探求することで, 風車騒音への応用を考えていきたい。

参考文献

- [1] 河村哲也. 数値シミュレーション入門. サイエンス社, 2006.
- [2] 鶴秀生, 岩津玲磨. 音響設計のための時間領域差分法の高精度化. 数理解析研究所講究録, 2009.