

風や気温の影響下における音の伝播に関する3次元有限要素解析

日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻 学生会員 ○佐藤 真太朗
 日本大学理工学部 フェロー 野村 卓史
 日本大学理工学部 正会員 長谷部 寛
 日本大学理工学部 三村 聖

1. 目的

音の伝播に気象要因が影響することが知られている。例えば上空の風や温度成層の影響で音が思いもよらない遠方まで伝播することがある。このような状態を対象とする基礎方程式¹⁾に有限要素法を適用し、3次元の非定常伝播解析を行ったので報告する。

2. 解析手法

本解析で用いる音圧 p' と流速ベクトル $\mathbf{v}'$ に関する支配方程式は式(1) (2)で表される。

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{v}_0 \cdot \nabla p' + \mathbf{v}' \cdot \nabla p_0 + \rho_0 c^2 \nabla \cdot \mathbf{v}' + c^2 p' \nabla \cdot \frac{\mathbf{v}_0}{c^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} + \mathbf{v}_0 \cdot \nabla \mathbf{v}' + (\mathbf{v}' \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 + \frac{1}{\rho_0} \nabla p' - \frac{p'}{(\rho_0 c)^2} \nabla p_0 = 0 \quad (2)$$

ここで $p_0, \mathbf{v}_0, \rho_0, c$ はそれぞれ音が伝わる媒質である大気の大気圧、流速ベクトル、密度、音速であり、

定常だが空間的に分布しているものとする。すなわち、 $\mathbf{v}_0$ は定常な風速分布に相当する。

式(1) (2)の方程式に重み付き残差法を適用し得られる重み付き残差方程式は次式(3), (4)で表わされる。

$$\iiint_{\Omega} \mathbf{w}_p \left[\frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{v}_0 \cdot \nabla p' + \mathbf{v}' \cdot \nabla p_0 + c^2 p' \nabla \cdot \frac{\mathbf{v}_0}{c^2} + \rho_0 c^2 \nabla \cdot \mathbf{v}' \right] d\Omega = 0 \quad (3)$$

$$\iiint_{\Omega} \mathbf{w}_v^T \left[\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} + \mathbf{v}_0 \cdot \nabla \mathbf{v}' + (\mathbf{v}' \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 + \frac{1}{\rho_0} \nabla p' - \frac{p'}{(\rho_0 c)^2} \nabla p_0 \right] d\Omega = 0 \quad (4)$$

この重み付き残差方程式(3) (4)を六面体要素により離散化して有限要素方程式を導く。

有限要素方程式の時間積分法として後退差分法を、連立一次方程式の解法には Bi-CG 法²⁾を用いた。

3. 気象要因を考慮した解析

気象要因である風と気温の影響に関する解析を行った。

図1に示す領域中央に図2に示すような中心の音圧が2.0、半径が1.6の球状の初期音圧を与えた。その他の条件としては密度 $\rho_0 = 1.0$ 、圧力 $p_0 = 0.0$ とし、すべての境界上で Mur の放射境界条件を適用した。また、時間積分間隔を $\Delta t = 0.01$ とした。

(a) 風の影響を考慮した解析例

風の影響による音の伝播を確認するために図1に示すように x 軸方向に $u_0 = 0.4c$ の一定風を与え音速 $c = 1.0$ として解析を行った。0.70 秒後の $x-y$ 断面での音圧分布を図4に示す。図4から風上側よりも風下側の方が音は早く伝播し広がるという解析結果となった。

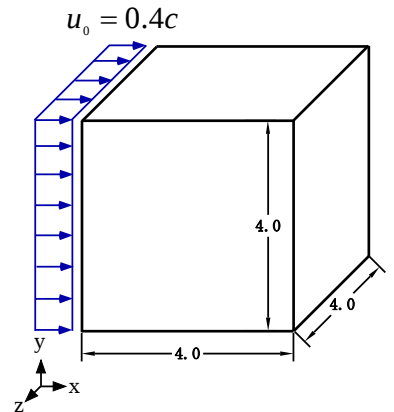


図1 風の影響を考慮する解析モデル

(40×40×40=64000 要素)

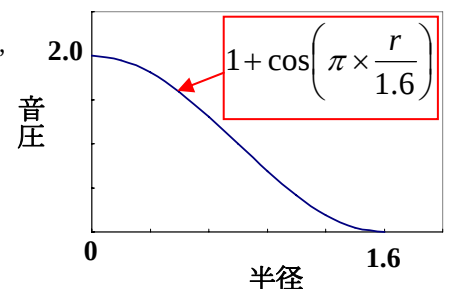


図2 初期音圧分布の断面

キーワード 音, 有限要素法, 気象要因, 風, 気温

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学大学院理工学研究科 TEL03-3259-0411

(b)気温の影響を考慮した解析例

温度勾配を音速勾配に置換することとし図3のような温度分布を与えることとする．風速は $u_0 = 0.0$ として解析を行った．0.70秒後の $x-y$ 断面での解析結果を図5に示す．図5から領域底部よりも領域上部の方に音は早く伝播し，かつ上方に広がるという解析結果となった．

(c)風と気温の両方の影響を考慮した解析例

風と気温の両方の気象要因による影響を確認するため図1の一定風 $u_0 = 0.4c$ ，および図3の音速勾配の両方を与えて，解析を行った．0.70秒後の $x-y$ 断面での音圧分布を図6に示す．図6から風上側よりも風下側の方が音は早く伝播し広がり，なおかつ領域底部よりも領域上部の方が音は早く伝播するという解析結果となった．

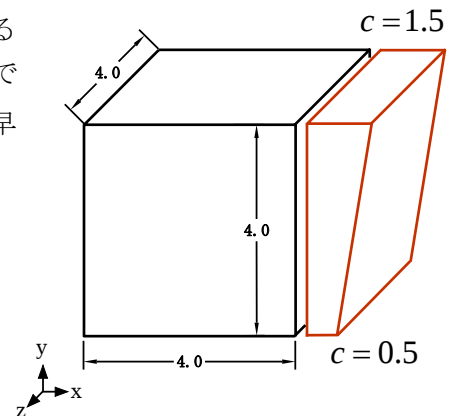


図3 気温の影響を考慮した解析モデル

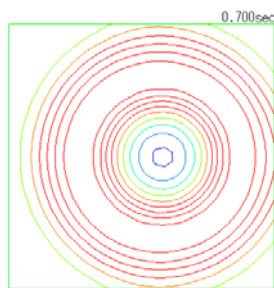


図4 風の解析結果

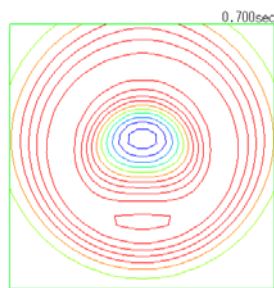


図5 気温の解析結果

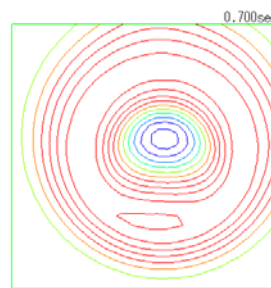


図6 風と気温の解析結果

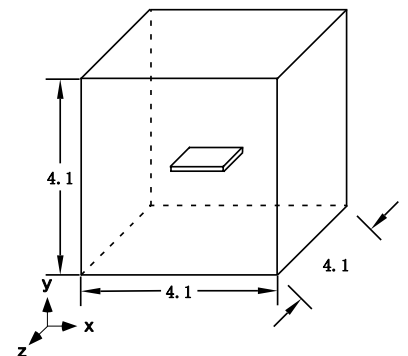


図7 平板が上下振動し音が伝播する解析モデル

(41×41×41=68800 要素)

4. 上下振動する平板を音源とする解析

図7に示すような領域中央の要素を， x 軸方向に1.1， y 軸方向に0.1， z 軸方向に1.1くり抜いて平板とする．平板の上下面上で平板に直交する方向の流速成分に図8に示す周期的流速を与えることにより平板の上下振動を模擬する．その他の条件としては密度 $\rho_0 = 1.0$ ，圧力 $p_0 = 0.0$ ，風速 $u_0 = 0.0$ ，とし図3と同じ音速分布を与えた．1.50秒後の音圧分布を図9に示す．解析結果としては時間の経過と共に平板の上部と下部から交互に正圧と負圧の音が発生し，領域底部よりも領域上部の方が音は早く伝播するという解析結果となった．

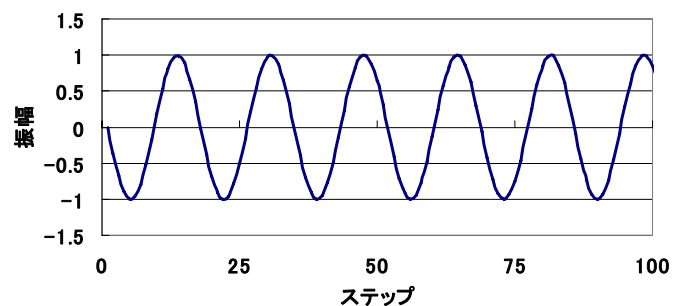


図8 周期的流速図

5. まとめ

気象要因である風及び気温の影響を考慮した解析が3次元空間で行えることを確認できた．今後は地表面条件の導入などを進めていく予定である．

参考文献

- 1) 野村卓史，高木耕平：気象要因の影響を考慮した音の伝播に関する有限要素解析法，応用力学論文集 Vol.9, pp221-230 2006
- 2) 藤野清次，張紹良：反復法の数理，朝倉書店，1996

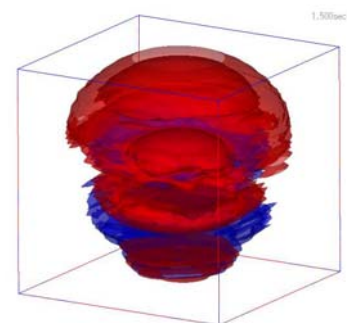


図9 平板の上下振動による解析結果