風と温度勾配を考慮した音場の数値計算

Numerical sound field analysis considering wind and temperature gradient

1W090105-1　小川　智史　　指導教員　及川　靖広　教授

OGAWA Satoshi　　Prof. OIKAWA Yasuhiro

概要：　電波と音波を同時に放射し、ドップラ遷移を利用して温度勾配を測定する RASS(Radio Acoustic sounding system)や屋外拡声において、周囲への騒音を低減し効率のよい放射を行うことのできる平板スピーカやパラメトリックスピーカの利用が検討されている。これらのスピーカによって効率のよい放射を行うことが出来るものの、屋外における拡声の場合は風や温度勾配、湿度といった複雑な大気条件による影響を受け、所望の地点へ音を放射することができなくなる場合がある。また屋外、特に上空の音場については領域全体の厳密な測定が難しい。本研究では、複雑な大気条件の影響を受ける音場の数値計算を目的とし、Navier-Stokes 方程式から大気条件の影響を考慮した音場の非線形な伝搬式を導出し、これを用いてスピーカの放射特性や、屋外および上空に向けた拡声の大気条件を考慮した数値計算を行った。

キーワード：非線形音響、Navier-Stokes 方程式、風、温度勾配

Keywords: Nonlinear acoustics, Navier-Stokes equation, wind, temperature gradient

１．まえがき

RASS(Radio Acoustic Sounding System)レーダや屋外拡声における音場の伝搬を把握する際には、温度勾配や湿度、風などの複雑な大気を考慮する必要がある。本研究では、風と温度勾配といった大気条件の影響を考慮した非線形音場の数値計算を目的として、流体力学における連続の式、Navier-Stokes 方程式と熱力学の関係式を用いて、風の影響などを含めることのできる線形、非線形方程式を導出した。また、導出した式を用いて数値計算を行い、その結果について考察したので報告する。

２．基礎方程式

粘性を考慮した音響伝播の方程式の導出の際には、流体力学における連続式、Navier-Stokes 方程式、エネルギー保存の 3 式

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\boldsymbol{\nabla}\cdot\mathbf{v} = 0 \tag{1}$$

$$\mathbf{f} = \rho\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\boldsymbol{\nabla}P + \eta\boldsymbol{\nabla}^2\mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{\eta}{3}\right)\boldsymbol{\nabla}(\boldsymbol{\nabla}\cdot\mathbf{v}) \tag{2}$$

$$\rho T\frac{DS}{Dt} = \boldsymbol{\nabla}\cdot(\kappa\boldsymbol{\nabla}T) + \frac{\eta}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial v_l}{\partial x_l}\right) + \zeta(\boldsymbol{\nabla}\cdot\mathbf{v})^2 \tag{3}$$

を用いる[1]。断熱変化を仮定し、粘性の影響を音の伝播に比べ十分微小とする。音圧をpとし，ρ，S，Tの平衡値からの微小変化量をρ'，S'，Tと置く。そのほか移流項$\mathbf{v}\cdot\boldsymbol{\nabla}$に風の影響が含まれていると考えて、$\mathbf{v}\cdot\boldsymbol{\nabla}$を微小項として近似せずに式変形することによって、非線形音場伝播の方程式

$$\frac{D\rho'}{Dt} + (\rho_0 + \rho')\boldsymbol{\nabla}\cdot\mathbf{v} = 0 \tag{4}$$

$$(\rho_0 + \rho')\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\boldsymbol{\nabla}p + \eta\boldsymbol{\nabla}^2\mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{\eta}{3}\right)\boldsymbol{\nabla}(\boldsymbol{\nabla}\cdot\mathbf{v}) \tag{5}$$

$$p = {c_0}^2\rho' + \frac{\beta {c_0}^2}{\rho_0}\rho'^2 - \kappa\left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p}\right)\boldsymbol{\nabla}\cdot\mathbf{v} \tag{6}$$

を得る。(4)式から(6)式を用いることによって、風と粘性の影響を考慮した非線形音場伝播の数値計算を行う。

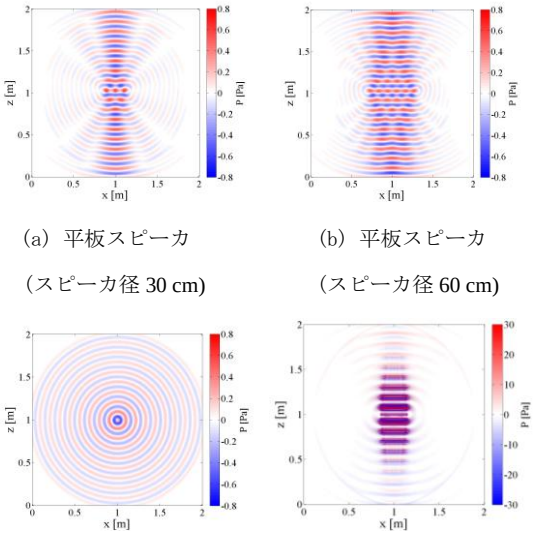
３．放射特性の数値計算

音源近傍の放射特性について数値計算を行った。

スピーカを計算領域2 × 2 m の中心、x 軸に平行に設置する。振動速度を表－1 で与え、結果を図－1 に示す。

表－1　振動速度条件

音源	振動速度［m/s]
平板スピーカ	0.001sin(2π · 3000t)（z 軸方向）
点音源	0.005sin(2π · 3000t)
パラメトリックスピーカ	0.48 (1 + m · sin(2π · 3000t)) · sin(2π · 40000t)（z 軸方向）



(a) 平板スピーカ (スピーカ径 30 cm)　(b) 平板スピーカ (スピーカ径 60 cm)

(c) 点音源　(d) パラメトリックスピーカ

図－1　放射特性(0.003 s 後)

図－1(a)と図－1(b)からはサイドローブの存在を、図－1(d)からは非線形効果による波形歪みが確認できる。

4．屋外拡声の数値計算

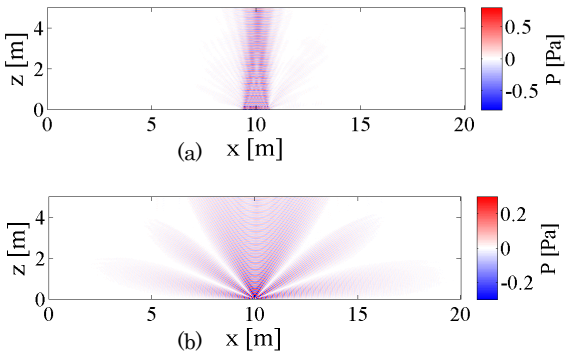
大気条件を考慮した屋外拡声の数値計算を行った。

地表を0 m とした時の高さを z と置き、地面は固定端とした。スピーカを$z = 0.17$ m の点に置き、振動速度を表－1 の条件で与え、大気条件を表－2 としている。平板スピーカの大きさは1.2 m である。

地表面付近の音場の数値計算結果と、上空放射の音場の数値計算結果をそれぞれ図－2 および図－3 に示す。

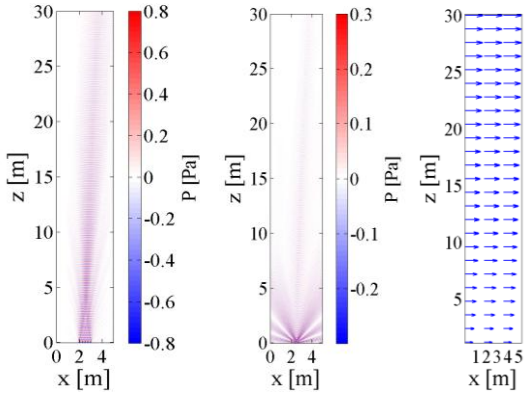
表―2　初期条件

大気圧　P_0	$101325 - 10z$ Pa
温度　T_0	$(300 - 0.006z)$ K
比熱比　γ	1.40
音速　c_0	$\sqrt{\gamma R T_0}$ m/s
密度　ρ_0	P_0/RT_0 kg/m^3
熱伝導係数　κ	0.0241
煎断粘性係数　η	1.8×10^{-5}
体積粘性係数　ζ	-1.2×10^{-5}
定積比熱　c_p	1.006
定圧比熱　c_v	0.719
風速　v[2]	$v = v_0(\frac{z}{z_0})^{\alpha}$ m/s



図－2　地表面付近の音場

a:平板スピーカ、b:点音源



(a)平板スピーカ　(b)点音源　(c)風速

図－3　上空音場

図－2 の結果から点音源と平板スピーカの放射特性の違いによる騒音の伝搬の違いを、図－3 の結果からスピーカから放射された音が風の影響によって右側にずれていることを確認できる。

5．むすび

様々な大気条件を考慮した非線形音場の数値計算を目指し、音場伝搬の基礎方程式を導出し、放射特性や屋外拡声の数値計算を行った。放射特性の数値計算ではそれぞれのスピーカ特有の性質を確認することができ、屋外拡声では風の影響を確認できた。

今後は厳密な境界条件設定と風の流れを考慮した音場の数値計算を検討する。

参考文献：

[1] 鎌倉友男，“非線形音響学の基礎，”愛知出版，東京，1996.

[2] 日本建築学会，“音環境の数値シミュレーション　―波動音響解析の技法と応用―，”日本建築学会，東京，2011