

音圧、粒子速度とインテンシティ

鈴木久晴^{†1}

概要: 初学者の方向けに、音圧、粒子速度とインテンシティについて定義に触れ、測定方法について解説を行う。

キーワード: 音圧、粒子速度、インテンシティ、p-p 法、インパルスレスポンス

Sound Pressure, Particle Velocity and Intensity

HISAHARU SUZUKI^{†1}

Abstract: The definition and measurement method of sound pressure, particle velocity and intensity will be introduced.

Keywords: Sound Pressure, Particle Velocity, Intensity, p-p method, impulse response

1. はじめに

音場の計測・評価・制御というトピックについて理解するための基礎知識は広範囲にわたるが、本セッションでは、種々の音響量について定義と計測について解説を行う。当該分野の基礎知識が全くない人を対象とするため、説明もなるべく直感的に理解できるように努める。ご自身で論文や報告書等を書かれる際には、理論的な理解は種々の専門書で補っていただくことを強く推奨する。

2. 種々の音響量について

(1) 音圧、粒子速度、インテンシティ

音は、空気中を伝わる疎密波であり、縦波である。図 1 のように、管の中でピストンが速度 u で移動すると、ピストンの近傍では空気の密度の変化が起こり、その変化は音速 c で伝搬していく。密度の変化によって生じる大気圧からの圧力の変動分が音圧であり、ピストンの振動速度 u が粒子速度と呼ばれるものである。音圧と粒子速度についての関係を微分方程式で整理すると、

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{dp}{dx} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = \kappa \frac{du}{dx} \quad (2)$$

と書くことができる。 ρ は空気の密度、 κ は体積弾性率、 p は音圧、 u は粒子速度である。

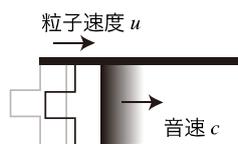


図 1 ピストン内の密度と圧力の変化

瞬時インテンシティは、音圧と粒子速度の積をとったベクトル量であり、

$$I(t) = pu \quad (3)$$

と書くことができる。瞬時インテンシティの時間平均を取ったものをアクティブインシティと呼び、実効的なエネルギーの流れを表しているものと考えられる。より一般的な形として、Heyser[1]の表現に従うと複素瞬時インテンシティを

$$I(t) = \frac{1}{2}(p(t) + jp_h(t))(u(t) - ju_h(t)) \quad (4)$$

と書くことができる。ただし、 j は純虚数、 $p_h(t)$ 、 $u_h(t)$ は音圧と粒子速度のヒルベルト変換である。複素瞬時インテンシティの時間平均値の実部はアクティブインシティと一致し、虚部はリアクティブインシティと呼ばれ、その場にとどまるエネルギーを表していると考えられる。

(2) 球面波音場

実際の種々の音響量がどのような形で場に現れるかを確認するため、点音源という非常に小さな点が呼吸するように振動している音源を考える。



図 2 点音源からの音圧の放射イメージ
点音源からの音波は、その振幅を距離に反比例する形で進行し、定常状態での音圧と粒子速度は

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (5)$$

^{†1} エヴィクサー(株)
Evixar Inc.

$$u = \frac{A}{\omega \rho r} \left(k - \frac{j}{r}\right) e^{j(\omega t - kr)} \quad (6)$$

と書くことができる。ωは各周波数、kは波数である。当然であるが、計測対象として音圧を考えると、音源に近ければ大きい値をとる。球面波のアクティブインテンシティ I_a 、リアクティブインテンシティ I_r は

$$I_a = \frac{A^2}{2r^2 \rho c} (1 + \cos 2(\omega t - kr)) \quad (7)$$

$$I_r = \frac{A^2}{2r^3 \rho \omega} \sin 2(\omega t - kr) \quad (8)$$

と書くことができる。両者の大きさの比は $|I_a|/|I_r| = kr$ となり、音源に近ければリアクティブ成分が支配的であり、音源から遠ざかればアクティブ成分が支配的である、ということがわかる。音源がそれなりに小さく、その音源からそれなりに離れている位置でアクティブインテンシティの方向を計測すると、その反対方向に音源が位置する、といった情報が得られることになる。

3. 種々の音響量の計測

(1) 音響量の測定について

広く入手可能な音響センサとしては、マイクロホンが挙げられる。マイクロホンは音圧に連動するものであるので、音圧のみを対象にする場合は、指向性を考慮して測定を行えばよい。指向性としては

- 無指向性:音圧感度が全方向に一定
- それ以外:音圧感度が特定の方向に強い

といった形で分類でき、例えばガンマイク等は特定の方向に強い指向性を持つため、特定方向の音源からの音圧を取得することができる。

粒子速度については直接測定するためのセンサも存在するが、まだマイクロホンほどは一般的ではないようである。音圧信号から粒子速度を推定する方法として、図3のようにマイクロホンを2つ近接させ、空間微分を差分で近似することで測定する p-p 法が提案されている。

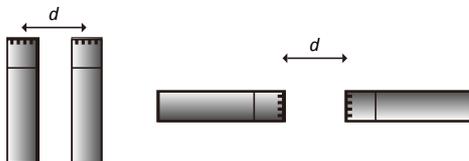


図3 マイク配置例.左:並列型 右:対向型

式(1)を時間で積分すると

$$u = -\frac{1}{\rho} \int \frac{dp}{dx} dt \quad (9)$$

と書くことができる。2つのマイクの音圧をそれぞれ p_1, p_2 とし、 $dp/dx = (p_2 - p_1)/d$ という形で差分近似すると、2つのマイクロホンの音圧信号の差をとり、それを時間積分すれば粒子速度が得られ、

$$u = -\frac{1}{\rho d} \int p_2 - p_1 dt \quad (10)$$

と書くことができる。

インテンシティについては、音圧と粒子速度の両方が計測できる必要があり、粒子速度を2つのマイクロホンの中心で差分計算したと考えると、中心での音圧を $p = (p_1 + p_2)/2$ で近似し、

$$I = -\frac{1}{2\rho d} (p_1 + p_2) \int p_2 - p_1 dt \quad (11)$$

と書くことができる。微分を差分で近似しているため、マイクの間隔が大きいと高い周波数の測定誤差につながる。

(2) インパルスレスポンスについて

分野を問わず、あるシステムの伝達関数を計測することは広く行われている。音響の分野ではインパルスレスポンス測定といった名称で測定が行われている。室内にスピーカーとマイクを設置、その間のインパルスレスポンスを測定すると室内の反射と共鳴が伝達関数に含まれ、反射音の時間構造や周波数特性を調べることができる。図4は、著者の Macbook のスピーカーとマイクの間でのインパルスレスポンスである。特段高価な測定システムを用いなくても、Github 等に公開されているプログラム[2]でも測定を行うことができる。得られたインパルスレスポンスから、室の残響時間を推定したり、初期反射音と後期反射音のエネルギー比を観測したりすることができる。また p-p 法の考え方を組み合わせて、粒子速度やインテンシティのインパルスレスポンスを考えていくことも可能である。

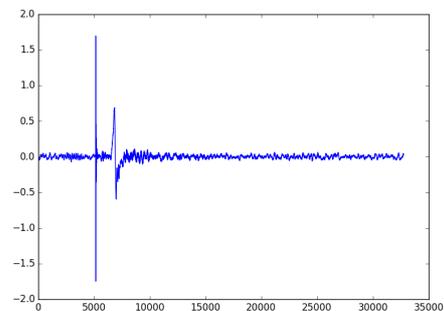


図4 インパルス応答の例(横軸:サンプル 縦軸:相対音圧)

4. おわりに

音圧、粒子速度、インテンシティについて定義に触れ、インパルスレスポンスも併せて計測方法を紹介した。音場を評価する際に、音圧測定のみでインパルスレスポンスを議論する場合もあれば、音源の方向を議論する際に指向性を鑑みて音圧を測定したり、インテンシティを測定したりするアプローチもあり得る。

参考文献

[1] Instantaneous intensity. R. C. HEYSER 1986 AES 81st Convention, Audio Engineering Society, Preprint 2399.
 [2] "Imp-tsp". https://github.com/sh01k/imp_tsp, (参照 2017-05-30).