エンクロージャ円形開口部からの放射音の回折*

西 田 公 至** 福 地 雅 夫***

Diffraction of Sound Radiated from Circular Apertures of an Enclosure

Kohshi NISHIDA and Masao FUKUCHI

This paper deals with the diffracted sound field around a rectangular enclosure theoretically and experimentally, which has one or two apertures and contains sound sources inside. The sound pressure level distribution in the diffracted sound field has been computed based on Pierce's approximate expressions for sound diffraction over a single wedge or a three-sided semi-infinite barrier with two edges, and actually measured with the sound visualizing device built as a trial. In the computation, it is assumed that the sound radiation from an aperture can be expressed by a point source or distributed ones according to lower or higher frequencies. Based on these results, the applicability of the approximate expressions is examined to the estimation of the diffracted sound field around actual enclosures. The results may be summarized as follows: (1) When the distances from each edge to adjacent edge, source and observation point are larger than one third wave length, the computed results by Pierce's approximate expressions are in sufficient agreement with the experimental results. (2) The complicated directional patterns of the diffracted sound field can be grasped sufficiently in detail by using the sound visualizing method.

Key words: sound diffraction, circular aperture, rectangular enclosure, sound field computation, sound pressure level, sound visualization, light emitting diode

1. 緒 言

建設機械のエンジン騒音や電動機の騒音等の防音対策として、騒音源の周囲をカバーで覆い、密閉遮音構造とするエンクロージャ方式が多く用いられている。しかし、エンクロージャは内部の過熱防止や吸排気等のために何らかの開口部を必要とし、完全な密閉構造とはなっていない。このため、エンクロージャの内部音源による開口部からの騒音が問題となる。このような場合に、エンクロージャ周囲の音場を予測する計算方法が求めれば、単にエンクロージャ開口部のみの問題にとどまらず、広く騒音予測や騒音対策を考える上で有用な方法となるであろう。音場内に障害物がある場合、反射や回折の影響を考える必要があるが、一般的にはそれらの影響を考慮することは難しく、省略して扱われる場合が多い。一方、回折に関する研究では、障壁に関する研究が多くなされている。例えば、Macdonald¹⁾は任意の外角のくさび状をした半無限

障壁に球面波が入射する場合の回折波の厳密解を、数値計算には向かないが、はじめて求めた。さらに、Pierce²⁾はMacdonaldの厳密解とKeller³⁾の幾何光学的回折理論に基づいて、任意の外角のくさび状半無限障壁と2つのくさびにより構成された3側面をもつ半無限障壁とに、点音源からの球面波が入射した場合の回折波の近似式を提示している。

本研究では、直方体エンクロージャの開口部による外部音場を対象として、エンクロージャの1つの側面の中心に円孔がある場合及び隣接した2つの側面のそれぞれの中心に円孔がある場合について考える。それぞれの場合について、Pierceの近似式の応用による外部音場の計算結果と発光ダイオードを用いた音場の可視化方法による測定結果との比較検討を行い、円孔によりエンクロージャ周囲に形成される外部音場の特性とPierceの近似式の騒音予測への適用性とを検討する。

2. 音 場 の 計 算

Kellerの幾何光学的回折理論によれば、ある物体が存在する音場内の任意の観測点における速度ポテンシャル $\Phi = \phi e^{-i\omega t}$ は、その点を通る幾何光学的音波

* 原稿受付 昭和59年5月5日、昭和57年度精機学会春季大会学術講演会(昭和57年3月24日)にて発表

** 正 会 員 室蘭工業大学工学部(室蘭市水元町27-1)

*** 正 会 員 新日本製鉄(株)(君津市君津1)

Fig. 1 Definition of symbols used in the computation of sound diffraction around a four-sided infinite pillar

ϕ^d と回折波 ϕ^d の和として表される。幾何光学的音波は音源からの直接波と物体表面からの反射波との和として表され、実音源及び鏡像関係による虚音源からの放射音として容易に求めることができる。ここでは回折波について、図1に示すような4本のエッジ E_j ($j=1\sim 4$) をもった無限長の四角柱に点音源からの球面波が入射したときの観測点における回折波 ϕ^d について、一般的に説明する。各エッジ間距離を図示のように $w_{12}(=w_{21})$ のように表し、各エッジのくさび部の外角を β_j ($j=1\sim 4$) と表す。さらに座標系として、各エッジを z 軸とする4つの円筒座標を考え、音源と観測点との位置を、例えばエッジ E_1 について $(r_{s1}, \theta_{s1}, z_s)$ 及び (r_1, θ_1, z) のように表す。Kellerの幾何光学的回折理論によれば、エッジから音源及び観測点までの距離が十分大きく、かつ、エッジ間の距離が十分大きいとき、すなわち波長定数を k として、次に示す式(1)の関係が成り立つとき、

$$kr_{sj} \gg 1, kr_j \gg 1, kw_{ji} \gg 1 \quad (1)$$

音源からエッジ E_j 上に直接波が入射すると、図2に示すように、その点から1重回折波 ϕ_j^d が、エッジとのなす角が入射角と同じとなるような円すい状に、 E_j におけるくさびの外部領域に放射される。さらに、辺 w_{ji} を含む面に沿ってエッジ E_i に入射した1重回折波により、2重回折波 ϕ_{ji}^d が E_i におけるくさびの外部領域に放射される。このようにして順次、多重回折波が各エッジから放射される。したがって、観測点における回折波の寄与はこれらの無限に多くの回折波の和として表されることになる。しかし、後述する式(3)と式(14)との比較からも明らかなように、一度回折すごとに回折波の影響は小さくなり、2重回折波は1

Fig. 2 Diffracted sound waves produced by an incident sound wave which hits the edge of a pillar

重回折波よりもかなり小さくなる。図1に示した四角柱の場合には、3重回折波が存在する領域には必ず1重又は2重回折波が存在する。このため、3重以上の回折波は十分省略しうると考えられる。そこで、3重以上の回折波を無視すると観測点における回折波 ϕ^d は一般的に次のように表すことができる⁴⁾。

$$\begin{aligned} \phi^d = & \eta(\beta_1 - \theta_{s1}) \{ \eta(\beta_1 - \theta_1) \phi_1^d \\ & + \eta(\beta_2 - \theta_2) \phi_{12}^d + \eta(\beta_4 - \theta_4) \phi_{14}^d \} \\ & + \eta(\beta_2 - \theta_{s2}) \{ \eta(\beta_2 - \theta_2) \phi_2^d \\ & + \eta(\beta_3 - \theta_3) \phi_{23}^d + \eta(\beta_1 - \theta_1) \phi_{21}^d \} \\ & + \eta(\beta_3 - \theta_{s3}) \{ \eta(\beta_3 - \theta_3) \phi_3^d \\ & + \eta(\beta_4 - \theta_4) \phi_{34}^d + \eta(\beta_2 - \theta_2) \phi_{32}^d \} \\ & + \eta(\beta_4 - \theta_{s4}) \{ \eta(\beta_4 - \theta_4) \phi_4^d \\ & + \eta(\beta_1 - \theta_1) \phi_{41}^d + \eta(\beta_3 - \theta_3) \phi_{43}^d \} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、

$$\eta(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

エンクロージャの円孔による放射音場の計算では、円孔部を外部に対する音源と考え、円孔を1個の点音源又は分布点音源によって表す。

2.1 1重回折波

式(2)における1重回折波 ϕ_j^d は j 番目のエッジでの単一くさびによる回折として考えることにより、PierceがMacdonaldの厳密解とKellerの幾何光学的回折理論に基づいて、半無限障壁に関して求めた近似式によって表すことができる。その近似式を数値計算に適した表現に改めると次のように表される。

$$\begin{aligned} \phi_j^d = & \frac{e^{ikL_j}}{L_j} \{ V_j(r_{sj}, \theta_{sj}, r_j, \theta_j, 1) \\ & + V_j(r_{sj}, -\theta_{sj}, r_j, \theta_j, 1) \} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに,

$$L_j = \sqrt{(r_{sj} + r_j)^2 + (z - z_s)^2} \quad (4)$$

また, V_j は回折の寄与を表す関数で, 第1近似式及び第2近似式としてそれぞれ, 式(5), 式(6)のように表される.

$$V_j(r_{sj}, \theta_{sj}, r_j, \theta_j, B) = \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{2}} \cdot A_D \{B \cdot X_j(\theta_j - \theta_{sj})\} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_j(r_{sj}, \theta_{sj}, r_j, \theta_j, B) &= \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\pi X_j(\theta_j - \theta_{sj})} \{ [1 + B \cdot \Delta_j(\theta_j - \theta_{sj})] \\ &\quad \times \pi W_j(\theta_j - \theta_{sj}) \cdot A_D \{B \cdot W_j(\theta_j - \theta_{sj})\} \\ &\quad - \Delta_j(\theta_j - \theta_{sj}) \} \end{aligned} \quad (6)$$

式(5), 式(6)における関数 A_D , X_j , W_j , Δ_j は以下のように表される. B 項については次節で述べる.

$$\begin{aligned} A_D\{x\} &= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-u^2}}{(\pi/2)^{1/2} x - e^{-i\pi/4} \cdot u} du \\ &= \text{sgn}(x) \{f(|x|) - ig(|x|)\} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに, $\text{sgn}(x)$ は $x \geq 0$ に対して +1, $x < 0$ に対して -1 の値をとる. $f(x)$, $g(x)$ は補助フレネル関数で, いずれも 0.5 より小さい値をとり, フレネル積分による表示や数表が知られている. ここでは数値計算に適した表式として, $0 \leq x \leq \infty$ の範囲で成り立つ次のような近似式⁵⁾, すなわち式(8), 式(9)を用いて音場の計算を行う.

$$f(x) = \frac{1 + 0.926x}{2 + 1.792x + 3.104x^2} \quad (8)$$

$$g(x) = \frac{1}{2 + 4.142x + 3.492x^2 + 6.670x^3} \quad (9)$$

式(8), 式(9)はともに, $0 \leq x \leq \infty$ の範囲で誤差 $\varepsilon(x)$ が, $|\varepsilon(x)| \leq 2 \times 10^{-3}$ となる近似式である.

$$X_j(\theta) = \Gamma_j \frac{\cos \nu_j \pi - \cos \nu_j \theta}{\nu_j \sin \nu_j \pi} \quad (10)$$

$$W_j(\theta) = \Gamma_j \frac{\cos \nu_j \pi - \cos \nu_j \theta}{\nu_j (1 - \cos \nu_j \pi \cdot \cos \nu_j \theta)^{1/2}} \quad (11)$$

$$\Delta_j(\theta) = \frac{\cos \nu_j \pi}{2} \frac{\cos \nu_j \pi - \cos \nu_j \theta}{1 - \cos \nu_j \pi \cdot \cos \nu_j \theta} \quad (12)$$

ここに,

$$\nu_j = \frac{\pi}{\beta_j}, \quad \Gamma_j = \sqrt{\frac{k r_{sj} r_j}{\pi L_j}} \quad (13)$$

と表される. 式(5), 式(6)で表される第1及び第2近似式はくさびの開きを表す角度 β が 2π となる厚みのない半無限障壁のとき一致する. β が π に近づくときは第1近似式は精度が悪くなる.

2.2 2重回折波

Pierce は2本のエッジをもつ半無限障壁について,

第1近似式を用いて2重回折波を表している. しかし, 第2近似式を用いても同様に表すことができるので, いずれの場合にも適用できるように一般的に表すと, 2重回折波は次の式(14)によって求められる.

$$\begin{aligned} \phi_{jl}^d &= \frac{2e^{ikL_{jl}}}{L_{jl}} \cdot V_j(r_{sj}, \theta_{sj}, w_{jl} + r_l, \alpha_j, B_j) \\ &\quad \times V_l(r_{sj} + w_{lj}, \alpha_l, r_l, \theta_l, B_l) \end{aligned} \quad (14)$$

ここに,

$$L_{jl} = \sqrt{(r_{sj} + w_{jl} + r_l)^2 + (z - z_s)^2} \quad (15)$$

引数 α_j , α_l は回折波がエッジ番号に従って右回りに伝搬する場合, すなわち図1では $l-j=1, -3$ のときは, $\alpha_j = \beta_j$, $\alpha_l = 0$ となる. また, 左回りの場合すなわち, $l-j=-1, 3$ のときは $\alpha_j = 0$, $\alpha_l = \beta_l$ となる. 引数 B_j 及び B_l は第1近似式(5)を用いる場合には X_j について, また第2近似式(6)を用いる場合には W_j について,

$|X_j| \leq |X_l|$ ($|W_j| \leq |W_l|$) のとき, $B_j = B_{jl}$, $B_l = 1$ となり,

$|X_j| > |X_l|$ ($|W_j| > |W_l|$) のときには, $B_j = 1$, $B_l = B_{jl}$

となる. ここに, B_{jl} は次の式(16)により表される.

$$B_{jl} = \sqrt{\frac{w_{jl}(w_{jl} + r_{sj} + r_l)}{(w_{jl} + r_{sj})(w_{jl} + r_l)}} \quad (16)$$

3. 実験

3.1 エンクロージャモデル

実験には, 図3及び図4に示したように, 1個の円孔を有する1面放射モデル及び2個の円孔を有する2面放射モデルの2通りの直方体エンクロージャモデルを用いた. モデルの製作に際しては, 各構成面の振動による放射音の影響を避けるため, 内部には鉛板によるライニングを施すなど十分に注意を払った. 円孔はすべて直径 22 mm とし, 内部音源にはスピーカを用いている. スピーカ入力としては純音及び 1/3 オクターブバンドノイズを用い 1 W で入力した. 2面放射モデルの場合には, 2個のスピーカ入力の位相を同位相と逆位相の2通りとした. エンクロージャモデルはターンテーブル上に設けた支持台上に防振ゴムを介して設置される.

3.2 音場の可視化測定方法

音場の測定には, 発光ダイオード(LED)を利用した試作によるLED走査式自動音場可視化装置⁶⁾を用い, エンクロージャの円孔の中心を通り, 円孔を含む面の長辺に平行で, しかもその面に垂直な走査平面内の音圧レベル分布を可視化測定した. この可視化装置は, 3色(赤黄緑)の発光ダイオードを取り付けたマイ

Fig. 3 Enclosure model with a circular aperture

クロホンを直交する3軸方向に走査させるためのマイクロホン自動走査装置, 5 dB ごとの音圧レベル(SPL)の大きさに従って3色の発光ダイオードを反復点滅させるためのLED式音圧レベル表示装置及び写真撮影装置とから成っている。マイクロホンが音場を走査するにつれ, 5 dB ごとの音圧レベルの大きさに従って, 3色の発光ダイオードは反復点滅しながら光の軌跡を描く。この光の軌跡をカラー写真に記録することにより, 音圧レベル分布を定量的に可視化することができる。従って, 音場の指向性, 回折の状態など音場の特性を詳細に把握することができる。実験は簡易無響室で行った。

4. 結果及び考察

内部音源によりエンクロージャの円孔から放射される音の強さは, 同一の円孔に対しても周波数によって異なる。このため, スピーカ入力の設定周波数はホワイトノイズを入力したときの放射音の周波数分析の結果及び式(1)の条件を考慮して, 315 Hz, 500 Hz, 3 150 Hz, 及び 6 300 Hz を用いた。円孔からの放射音は周波数が 3 150 Hz 以下では, 放射面の近傍ではほぼ半球面状に伝搬するが, 周波数が高い 6 300 Hz では円孔の軸線

Fig. 4 Enclosure model with two circular apertures

上に強い指向性を示すようになる。これらの結果に基づいて, 音場の計算では, 3 150 Hz 以下の周波数に対して, 円孔中心に1個の点音源があるものと仮定し, 6 300 Hz の場合には指向性を考慮するために, 円孔の面積を中心部と周辺部とで9等分し, それぞれの図心に同じ強さの点音源があるものと仮定した。幾何光学的音波 ϕ^g としては, 放射面を含む無限平面前方の空間に存在する直接波のみが対象となり, $\phi^g = 2e^{i\pi r}/r$ と表される。ここに r は音源と観測点との距離である。なお計算には, 円孔中心から軸線上 20 mm の点での音圧レベル測定値を参照値として用いた。図5及び図6に, それぞれ 315 Hz の純音に対する1面放射及び2面放射の場合のエンクロージャ周囲の音圧レベル分布の可視化結果と計算結果とを示す。対象としたエンクロージャ周囲の音場の計算では, 第1近似式によると第2近似式を用いた場合より回折の影響がやや小さめに計算されるが, その差は無視する程度である。1面放射の場合のみ第1近似式を適用した。図5の1面放射の場合では, 80 dB 以上の音圧レベルの領域で測定結果と計算結果とが比較的良好に対応しているが, 放射面に対する裏側とその付近の領域では差が大きくなっている。この主な理由としては, 315 Hz のとき音源と

Fig. 5 Comparison between computed sound pressure levels and visualized ones around the enclosure with a circular aperture for a pure tone of 315 Hz

Fig. 6 Comparison between computed sound pressure levels and visualized ones around the enclosure with two circular apertures for a pure tone of 315 Hz

エッジ間の距離 r_{sj} に対し $kr_{sj}=1.16$ となり、式(1)による条件の $kr_{sj} \gg 1$ が成り立つとはいえないこと、及び計算では無限長の四角柱を仮定しているが、用いたエンクロージャは有限長であり、前後の面からの回折の影響が実際には存在するため、測定値の方が大きくなることによるものと考えられる。なお、放射面の短辺方向では $kr_{sj}=0.87$ とかなり小さい。周波数が高くなるにつれ回折する割合は減少し、500 Hz になると裏側で多少低めに計算されるが、全体的に計算値と測定値とがよく一致するようになる。この場合、対象としている長辺方向では $kr_{sj}=1.85$ となり、短辺方向では 1.39 となっている。さらに周波数が高くなると計算値と測定値とが十分な精度で一致する結果が得られて

いる。図6の2面放射の2つのスピーカ入力とは逆位相となっており、2つの円孔から等距離にあるエンクロージャの対角面上では干渉の結果音圧レベルが小さくなっている。また、全体的に1面放射の場合より、よい対応がみられる。このことは、2面放射の場合、長辺方向と短辺方向とでは、 $kr_{sj}=1.37$ 及び 1.02 となり1面放射の場合よりも大きくなっているためと考えられる。図7及び図8はそれぞれ中心周波数が3150 Hz (逆位相)、6300 Hz (同位相) の1/3オクターブバンドノイズに対する2面放射の場合の結果を示している。いずれの場合も複雑な指向性のある音場を示しているが、計算結果と測定結果とが全体的にかなりよく一致している。この場合、3150 Hz に対して $kr_{sj}=$

Fig. 7 Comparison between computed sound pressure levels and visualized ones around the enclosure with two circular apertures for 1/3 octave-band noise at a center frequency of 3 150 Hz

Fig. 8 Comparison between computed sound pressure levels and visualized ones around the enclosure with two circular apertures for 1/3 octave-band noise at a center frequency of 6 300 Hz

13.68, また 6 300 Hz に対して $kr_{sj}=27.36$ となり, 式 (1) の条件 $kr_{sj} \gg 1$ は十分満足されていると考えられる. 以上の結果から総合的に考えると, 用いたエンクロージャモデルに対しては少なくとも 500 Hz 以上の周波数に対して, Pierce の近似式はかなりの精度で適用できるものと考えられる. 式 (1) の条件すなわち, $kr_{sj}, kr_j, kw_{jl} \gg 1$ について考えるとエンクロージャモデルでは $w_{jl} > r_{sj}$ となっているため, $kr_{sj} \gg 1$ 及び $kr_j \gg 1$ の条件が問題となる. kr_{sj} については以上の結果から $kr_{sj} > 2$ としてよいと考えられる. また, 測定点とエッジとの距離 r_j についての条件 $kr_j \gg 1$ について考えると, 実際には図 7, 図 8 から明らかなように, r_j がわずか数 cm の場合でも計算と測定とによる結果が

よく一致している. 以上の結果から考えて, 式 (1) の条件は少なくとも次式 (17) が成り立てば十分であると考えられる. すなわち,

$$kr_{sj}, kr_j, kw_{jl} > 2 \quad (17)$$

波長を λ とすると $k=2\pi/\lambda$ であるから式 (17) は,

$$r_{sj}, r_j, w_{jl} > \lambda/3 \quad (18)$$

と表すこともできる.

5. 結 言

開口部からの放射音による直方体エンクロージャ周囲の回折音場を Pierce の近似式を適用して求め, 音場の可視化方法による測定結果との比較検討を行った. その結果, 次のような結論を得た.

- (1) エンクロージャの各エッジから音源と観測点とに至るそれぞれの距離、及び各エッジ間の距離が $1/3$ 波長より大きければ、エンクロージャ周囲の回折音場に対して Pierce の近似式は十分な精度で成り立つ。
- (2) エンクロージャ周囲の回折音場の計算では 2 重回折波までを考慮すれば、十分よい結果が得られる。
- (3) 考案した音場の自動可視化測定方法によれば、複雑な指向性の音場に対しても、音圧レベル分布が定量的に求められ、干渉や回折による音場の特性が詳細に把握できることが確認できた。

終わりに、本研究を進めるにあたり、音場の可視化装置の製作に御尽力頂いた元室蘭工業大学大学院生である日立製作所の岩坂貴弘氏及び飛瀬修氏に感謝の意

を表する。なお、本研究は昭和 56 年度文部省科学研究費補助金・一般研究 (C) の補助を受けて行った研究の一部であることを付記する。

文 献

- 1) H. M. Macdonald: A Class of Diffraction Problems, Proc. London Math. Soc., 14, (1915) 410.
- 2) A. D. Pierce: Diffraction of Sound around Corners and over Wide Barriers, Acoust. Soc. Amer., 55, 5, (1974) 941.
- 3) J. B. Keller: The Geometrical Theory of Diffraction, J. Opt. Soc. Amer., 52, (1962) 116.
- 4) 川井孝雄: 厚みのある障壁及び角柱による回折音場, 日本音響学会誌, 34, 7 (1978) 369.
- 5) M. Abramowitz and I. A. Stegun: Handbook of Mathematical Functions, Dover, New York, (1972) 302.
- 6) 西田公至, 飛瀬 修: 直方体エンクロージャの振動による放射音場及び音場の可視化, 精密機械, 49, 12 (1983) 1620.

航空技術の研究開発構想について答申

科学技術庁長官の諮問機関である航空・電子等技術審議会は「長期的展望に立つ航空技術の研究開発構想について」及び「材料設計理論に基づいた新材料の創製に関する総合的研究開発の推進について」と題する両答申をまとめた。

「長期的展望に立つ航空技術の研究開発構想について」の答申は、2000 年を見通したわが国航空技術の長期的研究開発構想を提示することをねらいにとりまとめたもので、「航空輸送の需要はこんごさらに増大すると予想され、大型機、コピュータ（小型機）の開発も進むとみられることから、航空機の国際共同開発への参加、小型機の自主開発を前提に国際的水準の自主技術基盤の確立が必要である」と指摘、さらに今後開発すべき航空機として「超軽量省エネルギー航空機」をあげている。

また「材料設計理論に基づいた新材料の創製に関する総合的研究開発の推進について」の答申では、材料開発が「国家的課題」としたうえで、従来の試行錯誤的手法に代わる、より効率的な開発方法として「理論、経験、データを含めた理論的設計に基づく新材料開発が必要」と強調している。

1. 長期的展望に立つ航空技術の研究開発構想について

まず、現在の航空及び航空技術に関する世界の動向について「航空輸送の需要は 2000 年時点で、現在に比べ旅客で 2.5 倍、貨物で 3 倍になる。これに伴って航空機開発も進むが、100～150 席クラス以上の民間大型旅客機は今後、国際共同開発方式が世界の主流になる。また、コピュータ、ジェット STOL (短距離離着陸機)、飛行艇、ヘリコプタなどは自主技術による開発が予想される」と分析している。

このような世界の潮流に合わせてわが国でも、大型機は国際協力への参加、小型機は自主技術開発を前提に、国際的水準の自主技術基盤を確立することが重要であり、特に国際共同開発については、対等の立場での参加を確保する必要がある、そのために、① 輸送効率を向上させるための省エネルギー技術の確立、② 環境適合性に優れた機材の開発に必要な技術の確立、③ 複雑、高度化する航空機及び運航システムに対応する安全技術の確立——を三本柱とする研究開発を進めるべきであるとしている。

(p.1250 へ続く)