Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00052

Received date : 1 February, 2021

Accepted date : 30 June, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 12 July, 2021

音源の移動による周波数・振幅変調が放射音特性に及ぼす影響

牧野 裕介^{*1}, 高野 靖^{*2}

The influence of frequency and amplitude modulation due to the sound source movement on radiated sound characteristics

Yusuke MAKINO^{*1} and Yasushi TAKANO^{*2}

^{*1,*2} Graduate School of Engineering, Kyoto University
C1-4, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan

Abstract

The variation of the noise metrics of a group of sound sources due to its movement at a constant velocity along a straight track is discussed in the paper. When sound sources move, frequency and amplitude modulation is observed in the radiated sound field. The frequency and amplitude increase when sound sources are approaching and decrease when going away. We found that when frequency and amplitude modulation were considered, the calculated noise levels L_{Amax} , L_{ASmax} , $L_{Aeq,T}$ became larger than the calculated levels without their consideration. The difference of the calculated levels between the cases increased with respect to the sound source velocity. This difference was independent of distance between the track and the receiving point. Approximating discrete sound sources in line by a finite line source would underestimate the noise level. The level of this underestimation would increase by decreasing source division. The underestimated level was calculated for sources with reference noise spectrum for rolling stocks with a constant sound power level as we focused on the influence of frequency and amplitude modulation on the radiated sound field. The underestimated level was large for L_{Amax} and L_{ASmax} compared with $L_{Aeq,T}$. The difference of the calculated levels between the cases decreased monotonically with respect to the source frequency.

Keywords : Moving source, Doppler effect, Noise prediction, Distance attenuation, Source discretization, Frequency component

1. 緒 言

音源が移動すると放射音に周波数変調（Doppler 効果）や振幅変調が起こる。しかし、音速の 0.1～0.3 倍程度で居住地域付近を通過する新幹線などの高速車両についても、音源の移動速度より音の伝搬速度の方が十分大きいことを前提とした騒音推計手法が一般的である。例えば Harmonoise や CNOSSOS-EU では、交通流を道路や線路に沿って位置する静止した線音源に置き換え、離散化された各線音源要素からの騒音のエネルギー和を求めることで交通騒音を求める、という手法が採用されている（Defrance et al., 2007, Kephelopoulous et al., 2012）。

Morse と Ingard は自由空間中を音源が等速度運動する際の音場を、波動方程式から解析的に求めている（Morse and Ingard, 1968）。土肥らはその手法を用いて、音源の高速移動と計測機器の時定数が、受音点の音圧レベルの最大値と音圧が最大値を記録する時刻での音源位置に及ぼす影響を明らかにしている（土肥他, 1997）。鶴らはこの手法を用いて、移動音源による音波の数値シミュレーションおよび音波の可聴化を行っている（鶴他, 2000）。

No.21-00052 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00052]

^{*1} 学生員, 京都大学 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-4)

^{*2} 正員, フェロー, 京都大学 工学研究科

E-mail of corresponding author: makino.yusuke.77e@st.kyoto-u.ac.jp

Duhamel は境界要素法で数値的に求めた 2 次元音場を直交方向に積分変換することで、3 次元音場の解を求める手法を提案している (Duhamel, 1996) . これは防音壁など、3 次元空間のうち一定方向に障害物の断面が一樣な空間における音場シミュレーションにおいて、計算時間を短縮することに効果的である。この手法を用いて防音壁のある屋外の音響伝搬を解いた例としては、他に Chandler-Wilde が挙げられる (Chandler-Wilde, 1997) . Jean はこの手法を鉄道騒音による 3 次元音場の解析へ適用している (Jean, 1998) . 坂本はこの手法を FDTD によって求めた 2 次元音場に対して適用している (Sakamoto, 2009) .

Duhamel はこの積分変換手法を、障害物の断面に直交する方向に音源が移動し周波数・振幅変調の起こる場合へ適用している (Duhamel, 1996) . この手法を用いて、緒方らは超高速移動音源に対する防音壁の遮音量を算出している (緒方他, 2003) . Kasess と Waubke は 3 次元音場を求める際、オーディオファイル等の離散的サンプリングデータを音源信号として利用しつつ、この手法を用いる際の計算効率を向上させる手法を提案し、その際の計算誤差について明らかにしている (Kasess and Waubke, 2019) .

しかし、これらはいずれもひとつの無指向性点音源しか音源モデルとして用いられていない。一方で交通騒音は音源となる車両等が複数連なって移動しているところから発生するため、在来鉄道や新幹線の走行時の騒音を線路方向に分布する点音源列でモデル化する手法が提案されている (長倉, 善田, 2000, 小林他, 2010) . 騒音源を点音源列でモデル化した場合の放射音に周波数・振幅変調が起こる場合の放射音特性の変化を明らかにした事例は少ない。また緒方らの文献における Doppler 効果による音波の周波数の計算方法は、音源の移動速度より音の伝搬速度の方が十分大きい場合にしか成立しない (緒方他, 2003) .

音源からの放射音に起こる周波数・振幅変調については、Doppler 効果による周波数変動から航空機の位置を追跡する研究が行われている (Martin et al., 2013) . また、移動音源より放射される放射音から音源移動による周波数・振幅変調の影響を除去 (De-Dopplerization) し、もとの音源信号を復元する研究も行われている。例えば航空機騒音の De-Dopplerization については、Howell ら、Kelly と Wilson 等が挙げられる (Howell et al., 1986, Kelly and Wilson, 1995) . しかし、これらの変調が騒音評価量として用いられる騒音レベルに与える影響について検討した例は少ない。

そこで本研究では、直線音源軌道上を音源群が等速度運動する場合について、音源移動による周波数・振幅変調を考慮に入れて騒音レベルを数値計算し、計算結果を周波数・振幅変調を考慮に入れない場合の騒音レベル計算結果と比較することで、音源移動によって騒音伝搬性状に及ぼされる変化について明らかにすることを目的とした。

本報告では、騒音レベルを計算する際、音源側の条件として鉄道騒音を想定する。ただし、放射音の伝搬における周波数・振幅変調の影響について検討するため、音源側の音響パワーにおける速度依存性を考慮せず、音源の音響パワーは速度に対し一定であると仮定している。

2. 移動する音源からの放射音

自由空間中に 3 次元直交座標を設け、受音点 $R(x, y, 0)$ 、直線の音源軌道 m 、 m 上を速度 V [m/s] で等速度運動する点音源群を仮定する。音源軌道は z 軸に平行で、 x 座標と y 座標をそれぞれ、 $x = x_0$ 、 $y = y_0$ とおく。音源軌道 m と受音点 R 間の距離を $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ [m] とする。点音源は無指向性点音源群が同一速度で移動するもので、長さを l [m]、点音源の個数を N とおき、音源群の存在する区間を N 等分して各区間の中点に音源を 1 個ずつあてはめる。音源群の先頭 S_{Top} と最後尾 S_{End} の座標をそれぞれ (x_0, y_0, Vt) 、 $(x_0, y_0, Vt - l)$ とおき、 S_{Top} から n 番目の音源 S_n の座標を $(x_0, y_0, z_{S_n}) = (x_0, y_0, Vt + z_n)$ とする。 t [s] は時刻、 z_n [m] は時刻 $t = 0$ における S_n の z 座標で、 $z_n = -l(2n - 1)/2N$ となる。全ての音源信号 (体積速度) $a(t)$ [m³/s] は同一とし、 $a(t) = \mu \exp(-i\omega_s t)$ とする。 μ [m³/s] は体積速度の振幅、 ω_s は音源から放射される信号の角周波数である。各音源から放射される音波は非干渉性とする。これらを図 1 に示す。

2.1 音圧の導出

S_n から放射される音波の音圧 p_n [Pa] は、速度ポテンシャル $\phi_n(x, y, z, t)$ 、時刻 t [s]、空気密度 ρ [kg/m³] を用いて以下のように表現できる。

$$p_n = \rho \frac{\partial \phi_n}{\partial t} \quad (1)$$

速度ポテンシャルは、音速 $c[\text{m/s}]$, S_n の位置ベクトル (x_0, y_0, z_{S_n}) , Dirac のデルタ関数を用いて、以下に示す波動方程式の解として用いられる.

ここで ϕ_n を t と z で Fourier 変換した関数を, 以下の通り Φ_n と定義する.

また、音源移動の影響を含めて $a(t)$ を Fourier 変換した関数として、 $A_{xy,n}(k_z, \omega)$ を以下の通り定義する。

式(2)の両辺を t と z で Fourier 変換すると、波数 $k = \omega/c$ [rad/m] を使い、 $k_{xy} = \sqrt{k^2 - k_z^2}$ として以下のように表現できる。

この式は、2次元空間における座標 (x_0, y_0) にある点音源 $A_{xy,n}$ による、波数を k_{xy} とする音場での Helmholtz 方程式に相当する。この解は、 $A_{xy,n} = 1$ とする方程式

© The Japan Society of Mechanical Engineers

の解を $\Phi_{xy,n}(x, y, k_{xy})$ として、 $\Phi_n = A_{xy,n} \Phi_{xy,n}$ となる。これを t と z で Fourier 逆変換をすれば ϕ_n が求められるので、以下のように表現できる。

$$\phi_n = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{xy,n}(k_z, \omega) \Phi_{xy,n}\left(x, y, \sqrt{k^2 - k_z^2}\right) \exp(ik_z z) \exp(-i\omega t) dk_z d\omega \quad (7)$$

ここで、音源波形の周波数特性を表す $a(t)$ の Fourier 変換 $A(\omega)$ を

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \exp(i\omega t) dt \quad (8)$$

と定義すると、 $z_{Sn}(t) = z_n + Vt$ であることから、式 (4) より以下のように表現できる。

$$A_{xy,n} = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \exp(-ik_z z_n) \exp[i(\omega - k_z V)t] dt = \exp(-ik_z z_n) A(\omega - k_z V) \quad (9)$$

これを式 (7) に代入して以下のように表現できる。

$$\phi_n = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega - k_z V) \Phi_{xy,n}\left(x, y, \sqrt{k^2 - k_z^2}\right) \exp[ik_z(z - z_n)] \exp(-i\omega t) dk_z d\omega \quad (10)$$

$\Phi_{xy,n}$ は xy 平面内に構成された 2 次元空間における速度ポテンシャルなので、音源が等速度運動する場合について 2 次元音場の特性 $\Phi_{xy,n}$ を計算しておけば、音源の周波数特性 $A(\omega)$ が変化した場合でも周波数合成のみから ϕ_n を得ることができる。 $a(t) = \mu \exp(-i\omega_S t)$ より、

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu \exp[i(\omega - \omega_S)t] dt = 2\pi\mu\delta(\omega - \omega_S) \quad (11)$$

なので、これを代入して式を整理することで、以下のように表現できる。

$$\phi_n = \frac{\mu \exp(-i\omega_S t)}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{xy,n}\left(x, y, \sqrt{\left(\frac{\omega_S + k_z V}{c}\right)^2 - k_z^2}\right) \exp[ik_z(z - z_n - Vt)] dk_z \quad (12)$$

$\Phi_{xy,n}(x, y, k)$ は xy 平面内の 2 次元自由音場における単一点音源によって構成されるため、0 次第 1 種 Hankel 関数 $H_0^{(1)}$ を用いて、以下のように表現できる。

$$\Phi_{xy,n}(x, y, k) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \quad (13)$$

これを式 (12) に代入して以下のようになる。

$$\phi_n = \frac{\mu \exp(-i\omega_S t)}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i}{4} H_0^{(1)}\left(r \sqrt{\frac{(\omega_S + k_z V)^2}{c^2} - k_z^2}\right) \exp[ik_z(z - z_n - Vt)] dk_z \quad (14)$$

ここで、 $k_z = uk'_z + v$ 、 $u = c/\sqrt{c^2 - V^2}$ 、 $v = V\omega_S/(c^2 - V^2)$ とおいて積分変換し、実数 K 、積分変数 α を用いて

$$\frac{\exp\left(iK\sqrt{r^2 + z^2}\right)}{4\pi\sqrt{r^2 + z^2}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i}{4} H_0^{(1)}\left(r\sqrt{K^2 - \alpha^2}\right) \exp(i\alpha z) d\alpha \quad (15)$$

$$\left(0 < \arg\left(\sqrt{K^2 - \alpha^2}\right) < \pi, 0 < r\right)$$

が成立する (Ryzhik and Gradshteyn, 1980) ことを利用して式を整理すると、受音点 $R(x, y, 0)$ においては、 $z = 0$ を代入して以下の通り表現できる。

$$\phi_n = \frac{\mu \exp(-i\varphi)}{4\pi r'} \quad (16)$$

$$r' = \sqrt{(1 - M^2)r^2 + (-z_n - Vt)^2} \quad (17)$$

$$\varphi = \frac{\omega_S t}{1 - M^2} + \left(\frac{\omega_S}{c}\right) \frac{Mz_n - r'}{1 - M^2} \quad (18)$$

式(1)から

$$p_n = -\frac{\rho\mu \exp(-i\varphi)}{4\pi r'} \left(i\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{1}{r'} \frac{\partial r'}{\partial t} \right) \quad (19)$$

となるが、これは以下の通りの近似ができる。(付録参照)

$$i\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{1}{r'} \frac{\partial r'}{\partial t} \approx i\frac{\partial\varphi}{\partial t} \quad (20)$$

つまり p_n は以下の通り表現できる。

$$p_n \approx -i\frac{\partial\varphi}{\partial t} \frac{\rho\mu \exp(-i\varphi)}{4\pi r'} \quad (21)$$

2.2 A 特性音圧レベルの計算

音波の周波数は音圧の位相の時間微分と表現できるので、 R における S_n からの音波の周波数 ω'_n は以下のよう
に計算できる。

$$\omega'_n = \frac{\partial\varphi}{\partial t} = \frac{\omega_s}{1-M^2} \left(1 - \frac{Mz_{Sn}}{\sqrt{(1-M^2)r^2 + z_{Sn}^2}} \right) \quad (22)$$

R における S_n からの音波の A 特性音圧を $p_{A,n}$ [Pa] とおく。 p_n の実効値を $\bar{p}_n$ [Pa] とおくと、 $p_{A,n}$ の実効値 $\bar{p}_{A,n}$ [Pa] に対する A 特性音圧補正において以下に示す式(23)(24)の関係式が成立する (IEC, 2013)。

$$A_w(f) = \frac{f_4^2 f^4}{(f^2 + f_1^2) \sqrt{f^2 + f_2^2} \sqrt{f^2 + f_3^2} (f^2 + f_4^2)} \quad (23)$$

$$10\log_{10} \left(\frac{\bar{p}_{A,n}}{\bar{p}_n} \right)^2 = 10\log_{10} \left[\frac{A_w(f'_n)}{A_w(1000)} \right]^2 \quad (24)$$

ただし、 $f'_n = \omega'_n/2\pi$ [Hz], $f_1 = 20.60$ Hz, $f_2 = 107.7$ Hz, $f_3 = 737.9$ Hz, $f_4 = 12194$ Hz である。音源群を構成する各音源から放射される音波は非干渉性なので、周波数・振幅変調を考慮して計算する場合、音源群全体から放射される騒音レベル L'_A [dB] は、各音源からの音圧のエネルギー和を計算して以下の通り求められる。ただし、 $\bar{p}_A$ [Pa] は音源群全体から放射される音波の R における A 特性音圧の実効値、 $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ である。

$$L'_A = 10\log_{10} \left(\frac{\bar{p}_A}{p_0} \right)^2 \quad (25)$$

$$\bar{p}_A^2 = \sum_{n=1}^N \bar{p}_{A,n}^2 = \sum_{n=1}^N \left[\bar{p}_n \frac{A_w(f'_n)}{A_w(1000)} \right]^2 \quad (26)$$

なお、次章以降、数値計算において、音速は $c = 340$ m/s として計算した。空気密度は $\rho = 1.293$ kg/m³ とした。音源群長さは、一般的な 16 両編成の高速鉄道車両の列車長と等しい $l = 400$ m とした (長倉, 善田, 2000)。

2.3 周波数変調

音源の移動に伴って、Doppler 効果が発生し、受音点に届く音波の周波数は音源そのものの周波数から変化する。音源進行方向と S_n から見た受音点 R の位置する方向とのなす受音点との方位角を θ とおくと、 θ は S_n から放射された音波が R に到達するまでの間に S_n の移動によって変化する。この変化を無視し θ が一定値であるとした場合、 S_n に由来する R における音波の周波数 ω_n は以下のようになる。

$$\omega_n = \omega_s \frac{c}{c - V \cos \theta} = \omega_s \left(1 + M \frac{z_{Sn}}{\sqrt{r^2 + z_{Sn}^2}} \right)^{-1} \quad (27)$$

ω_n , ω'_n の変化を図 2 に示す。図 2(a) は ω_s に対する ω'_n と ω_n の比の変化を示し、図 2(b) は ω_n に対する ω'_n の変化を示す。図より音源の移動とともに z_{Sn}/r の値が上昇するにつれ ω'_n と ω_n も単調減少していることがわかる。音源速度が大きいほど、Doppler 効果によって周波数変調によって周波数の変化する範囲が大きくなる点も共通している。しかし、 ω'_n の方が ω_n より周波数が急激に減少し始める時間が遅くなり、その時間差は音源速度が上昇するほどより顕著になる。つまり、受音点の方位角 θ の変化を考慮することで、音波が放射されてから受音点に届くまでの時間差をより正確に求めることができることがわかる。

Fig. 2 Frequency modulation due to a single source movement ($M = 0.1, 0.3$). When azimuth angle variation in time is considered, the time when calculated frequency of the radiated sound drops delay.

2.4 振幅変調

音源群が等速度運動する場合の騒音レベル（A 特性音圧レベル）を，周波数・振幅変調を考慮して計算する場合と考慮しないで計算する場合とで比較する．

周波数・振幅変調を考慮しないで計算する場合， $L_{A,n}(t)$ [dB]， $L_A(t)$ [dB] をそれぞれ， S_n から放射される音波の騒音レベル，音源群全体から放射される音波の騒音レベルとする．これらは以下の通り計算する． L_{wA} [dB] は点音源 1 個の A 特性音響パワーレベルを表す． $d_n(t)$ [m] は音源 S_n と受音点 R 間の距離を表す．図 1 に示す通り，音源は全空間放射であり，地面による反射もないものと仮定する．

$$L_A(t) = 10 \log_{10} \left(\sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{A,n}(t)}{10}} \right) \quad (28)$$

$$L_{A,n}(t) = L_{wA} - 10 \log_{10} [4\pi d_n^2(t)] \quad (29)$$

$$d_n(t) = \sqrt{r^2 + z_{Sn}^2} = \sqrt{r^2 + (Vt + z_n)^2} \quad (30)$$

S_n から放射される音波の音圧レベル $L_{p,n}(t)$ [dB]，音源群全体から放射される音波の音圧レベル $L_p(t)$ [dB] についても， L_{wA} を点音源 1 個の音響パワーレベル L_w [dB] に置き換え，以下のように計算できる．

$$L_p(t) = 10 \log_{10} \left(\sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{p,n}(t)}{10}} \right) \quad (31)$$

$$L_{p,n}(t) = L_w - 10 \log_{10} [4\pi d_n^2(t)] \quad (32)$$

これより，点音源の音響パワーレベル L_w と体積速度 μ との対応関係について示す．式 (17)～(19) に $M = V/c = 0$ ， $z_n = 0$ を代入すると， $r' = \sqrt{r^2} = r$ ， $\varphi = \omega_S t - r\omega_S/c$ となるから， p_n は以下のように計算できる．

$$p_n = -\frac{\rho\mu \exp(-i\varphi)}{4\pi r'} \left(i \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{r'} \frac{\partial r'}{\partial t} \right) = -i\omega_S \frac{\rho\mu}{4\pi r} \exp \left[-i \left(\omega_S t - r \frac{\omega_S}{c} \right) \right] \quad (33)$$

音源周波数を $f_S = \omega_S/2\pi$ [Hz] として，音圧の実効値は $\bar{p}_n = f_S \rho \mu / 2\sqrt{2}r$ [Pa] となる．式 (30)(32) より， μ は以下のように計算できる．

$$L_{p,n}(t) = L_w - 10 \log_{10} (4\pi r^2) = 10 \log_{10} \left(\frac{f_S \rho \mu}{2\sqrt{2} p_0 r} \right)^2 \quad (34)$$

$$L_w = 10 \log_{10} \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{f_S \rho \mu}{p_0} \right)^2 \right] \quad (35)$$

$$\therefore \mu = \frac{p_0}{f_S \rho} \sqrt{\frac{2}{\pi} 10^{\frac{L_w}{10}}} \quad (36)$$

L'_A , L_A の変化を図3に示す。図3(a)は L'_A , L_A の計算結果を示し、図3(b)は両方の騒音レベルの差分 $\Delta L_A = L'_A - L_A$ [dB] を示す。移動速度 300 km/h, $r = 7.5$ m, $L_{wA} = 120$ dB, $N = 16$ (音源間隔 25 m) として数値計算を行った。各音源の周波数特性は鉄道車両音源を想定し、EN 規格に掲載の鉄道騒音標準スペクトログラム (BS EN, 2012) (図4) とした。ただし、 L'_A については、計算された音圧波形に 5 ms の時定数処理を行って得られた実効値を使用し、求めた。単一の音源の移動を考慮した場合には、騒音レベルの最大値が増大し、その時の時刻は正面通過直前となること文献 (土肥他, 1997, 緒方他, 2003) において示されている。また、音源の移動を考慮した騒音レベルの計算結果は、各音源が R の正面を通過する直前は音源の移動を考慮しない場合より増大し、通過後は音源の移動を考慮しない場合より減少することが文献 (鶴他, 2000) にて示されている。これらのことが複数音源の場合でも示される。

Fig. 3 Amplitude modulation due to a source group movement (source velocity 300 km/h, $r = 7.5$ m, $L_{wA} = 120$ dB, $N = 16$, source interval 25 m). When amplitude modulation is considered, the maximum noise level is observed just before the time when each source is at the closest position from the receiving point shown by vertical dotted lines.

Fig. 4 Normalized railway noise spectrum (EN 16272-3-1: 2012)

3. 放射音の騒音レベルの変化

音源移動による周波数・振幅変調を考慮する場合と考慮しない場合についての以下の騒音レベルをそれぞれ計算し、周波数・振幅変調が音源群からの放射音の騒音レベルに及ぼす影響について検討する。

- 騒音レベル最大値 L_{Amax} [dB]
- Slow 特性騒音レベル最大値 L_{ASmax} [dB]
- 音源群通過時 (R から m に下ろした垂線の足 $(x_0, y_0, 0)$ を S_{Top} が通過してから S_{End} が通過するまで) の等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ [dB]

周波数・振幅変調を考慮しないで計算する場合、騒音レベルを式 (28)~(30) より計算する。周波数・振幅変調を考慮して計算する場合、第 2.1~2.2 節に示す手法と式 (36) によって計算する。これによる騒音レベル計算結果をそれぞれ L'_{Amax} , L'_{ASmax} , $L'_{Aeq,T}$ と表現する。また、周波数・振幅変調を考慮して計算する場合と考慮しないで計算する場合の騒音レベル差を、それぞれ ΔL_{Amax} [dB], ΔL_{ASmax} [dB], $\Delta L_{Aeq,T}$ [dB] とおき、 $\Delta L_{Amax} = L'_{Amax} - L_{Amax}$, $\Delta L_{ASmax} = L'_{ASmax} - L_{ASmax}$, $\Delta L_{Aeq,T} = L'_{Aeq,T} - L_{Aeq,T}$ とする。

3.1 音源離散化の影響

音源離散化の影響を確認するため、音源群全体の音響パワーを一定に保ったまま N の値を 1 から順に増やしていき、鉄道車両の音源モデルとしてよく利用される有限長音源群に近似させる。これを図 5 に示す。本研究では、音源速度 100 km/h, $r = 7.5$ m の場合に、音源群を有限長線音源に十分近似できる N の値を求めた。音源群の周波数特性は EN 規格の鉄道騒音標準スペクトログラム (BS EN, 2012) (図 4) とした。なお、音源群全体の A 特性音響パワーレベルは前章の計算例と等価な 132 dB とし計算を行った。

Fig. 5 The model of finite line source and its calculation model.

Fig. 6 Noise metrics for different source division N (source velocity: 100 km/h, $r = 7.5$ m). Calculated noise levels decrease as the number of source division increases. The levels converge fast in order of $L_{Aeq,T}$, L_{ASmax} and L_{Amax} . All the levels converge at about $N = 10000$ within 0.1 dB.

計算結果を図6に示す。 N の値の増加に伴って計算された騒音レベル最大値 L_{Amax} , L'_{Amax} , L_{ASmax} , L'_{ASmax} の値は低下する。 N の値の増加に伴い、音源群中における音源の密度が増加し、音圧の時間変動が小さくなるからであると考えられる。 L_{ASmax} , L'_{ASmax} , $L_{Aeq,T}$, $L'_{Aeq,T}$ は $N = 30$ 程度までにいずれも 0.1 dB 以内に収束しているが、 L_{Amax} は $N = 100$ 程度まで 0.1 dB 以内に収束せず、 L'_{Amax} も N の値が数千程度の場合に 0.1 dB 以内に収束する。つまり、音源が離散的な場合、有限長線音源による近似により騒音レベルを推計すると騒音レベルを過小評価する可能性がある。過小評価となる騒音レベル値は、等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$, Slow 特性騒音レベル最大値 L_{ASmax} , 騒音レベル最大値 L_{Amax} の順に大きくなることが示される。本手法で移動音源をモデル化して L_{Amax} や L_{ASmax} を評価する場合は、もとの音源分布を簡略化しすぎないことが必要であると考えられる。

3.2 音源速度および音源軌道からの距離による騒音レベルの変化

音源速度および音源軌道からの距離による騒音レベルの変化を求める。音源離散化によって騒音レベルに及ぼされる影響を排除するため、音源群を有限長線音源に近似させる。前節の計算結果より、 $N = 10000$ として数値計算を行った。計算結果を図7, 図9に示す。図7は、音源速度と騒音レベルの関係について、 $r = 7.5$ m, $r = 25$ m, $r = 100$ m の3通りの条件における計算結果をまとめたものである。図9は、音源軌道からの受音点の距離と騒音レベルの関係について、音源速度が 100 km/h, 300 km/h, 500 km/h の3通りの条件における計算結果をまとめたものである。両方のグラフから、いずれの騒音レベルにおいても、周波数・振幅変調を考慮する場合の方が騒音レベルの値は大きくなることが示される。また、図7, 図9について、周波数・振幅変調を考慮する場合と考慮しない場合の騒音レベル差 ΔL_{Amax} [dB], ΔL_{ASmax} [dB], $\Delta L_{Aeq,T}$ [dB] の計算結果を図8, 図10に示す。図8より、音源速度が大きいほど周波数・振幅変調を考慮する場合と考慮しない場合の騒音レベル差は増大している。音源速度が 300 km/h の場合は図8(a)~(c) 全てにおいて、 ΔL_{Amax} , ΔL_{ASmax} , $\Delta L_{Aeq,T}$ は全て 1.2 dB に達している。音源速度が 500 km/h の場合は (a)(b) において全レベル差が 3.0 dB に達している。(c) の条件においては、 $\Delta L_{Amax} = 3.3$ dB, $\Delta L_{ASmax} = 3.2$ dB, $\Delta L_{Aeq,T} = 3.0$ dB に達している。図10より、周波数・振幅変調を考慮する場合と考慮しない場合の騒音レベル差は r の値に依存した 1 dB 以上の差がみられなかった。図10に示された計算結果のうち、最も騒音レベルの種類による騒音レベル差の値のばらつきが大きかったのは (c) の条件のうち $r = 320$ m の場合で、 $\Delta L_{Amax} = 3.7$ dB, $\Delta L_{ASmax} = 3.6$ dB, $\Delta L_{Aeq,T} = 2.9$ dB に達していた。

点音源が移動すると、音源進行方向に波面が密集する。その際、音源進行方向に強い指向性を持つことで、速度の増加に伴い音源の進行方向では音圧レベルが高くなり、受音点の音圧レベルの最大値が大きくなる(緒方ら, 2003)。そのため、周波数・振幅変調を考慮する場合と考慮しない場合の騒音レベル差は音源速度の上昇とともに増大していくと考えられる。また、音源の移動によって指向性に変化が生じたものの、点音源であることに変わりはないため、これらの変調を考慮しない場合と同様の距離減衰が発生する。そのため、周波数・振幅変調を考慮する場合と考慮しない場合の騒音レベル差は音源軌道からの受音点の距離に依存しないと考えられる。以上のことから、周波数・振幅変調を考慮する場合と考慮しない場合の騒音レベル差は音源速度の上昇とともに増大していくが、音源軌道からの受音点の距離に対する依存性は少ないことが示される。

Fig. 7 Influence of finite line source velocity on noise metrics ($N = 10000$). Calculated noise levels L_{Amax} , L_{ASmax} and $L_{Aeq,T}$, when frequency modulation and amplitude modulation are considered, are larger than the levels without their modulation.

Fig. 8 Relative noise levels (ΔL_{Amax} [dB], ΔL_{ASmax} [dB] and $\Delta L_{Aeq,T}$ [dB]) from Fig. 7. Difference between the calculated levels with and without considering amplitude and frequency modulation effects increase monotonically with respect to sound source speed, and their difference reaches ca. 1 dB at a speed of 300 km/h.

Fig. 9 Influence of finite line source velocity on noise metrics ($N = 10000$). Calculated noise levels L_{Amax} , L_{ASmax} and $L_{Aeq,T}$, when frequency and amplitude modulation are considered, are larger than the levels without their modulation.

Fig. 10 Relative noise levels (ΔL_{Amax} [dB], ΔL_{ASmax} [dB] and $\Delta L_{Aeq,T}$ [dB]) from Fig. 9. Difference between the calculated levels are independent of distance from the source track between the cases with and without considering amplitude and frequency modulation effects.

3.3 音源モデルの違いによる騒音レベルの変化

音源となる鉄道車両を音源群で離散化してモデル化した場合と有限長線音源でモデル化した場合における騒音レベル計算結果の差について示し、音源群を離散化してモデル化することが周波数・振幅変調に及ぼす影響について明らかにする。前節より、音源群で離散化してモデル化する場合は $N = 16$ （音源間隔 25 m）としてモデル化し、有限長線音源でモデル化する場合は $N = 10000$ （音源間隔 0.04 m）としてモデル化して騒音レベルを計算した。

計算結果を図 11, 図 12 に示す。図 11 は $r = 7.5$ m の条件における計算結果を示している。図 11(a) より、 $N = 16$ の場合の L_{Amax} , L'_{Amax} は、 $N = 10000$ （以下有限長線音源）の場合の計算結果よりそれぞれ約 1.2 dB, 約 3 dB 増大している。図 11(b) より、音源速度が 100 km/h 以下の場合において、 $N = 16$ の場合の L_{ASmax} , L'_{ASmax} は有限長線音源の場合の計算結果より増大している。これは音源速度が遅いため音源の通過する時間が長くなり、Slow 特性の時定数処理による騒音レベルピーク値の減少が小さくなるためと考えられる。それ以外には、図 11(b)(c) より、 $N = 16$ の場合と有限長線音源の場合との間で L_{ASmax} , L'_{ASmax} , $L_{Aeq,T}$, $L'_{Aeq,T}$ の計算結果に変化はみられない。

図 12 は音源速度が 300 km/h の場合における計算結果を示す。 L'_{Amax} のみ、 $N = 16$ の場合の計算結果は有限長線音源の場合の計算結果と比較して、1 dB 以上騒音レベルが増大している。以上の内容から、周波数・振幅変調を考慮した騒音レベル L'_{ASmax} , $L'_{Aeq,T}$ の値に変化がなくとも、音源間隔の違いによって L'_{Amax} の値が過大もしくは過小評価される恐れがある。その場合、計算された騒音レベルと実際の騒音の聴感上の特性が対応しなくなる恐れがあると考えられる。

Fig. 11 Influence of the source division N on noise metrics ($r = 7.5$ m). Calculated levels L_{Amax} for $N = 16$ is larger than the results for $N = 10000$ (finite line source) by ca. 1 and 3 dB, respectively.

Fig. 12 Influence of the source division N on noise metrics (source velocity 300 km/h). Calculated levels L'_{Amax} for $N = 16$ are larger than the results for $N = 10000$ (finite line source) by ca. 1 dB.

4. 音源周波数の違いによる騒音レベルの変化

実在する騒音は広帯域の周波数成分を含んでいる．騒音に含まれる，ある周波数成分について，A 特性の周波数特性が同一な場合に，音源移動に伴う周波数・振幅変調によって騒音レベルの増大に大きく寄与する周波数について検討する．第 3・3 節と同様に， $N = 10000$ として有限長線音源に近似させた音源群が直線の音源軌道上を等速度運動する場合について検討を行うが，音源群の条件を単一の周波数成分のみ放射する条件に変更する．音源群全体の A 特性音響パワーレベルを 132 dB に保ったまま音源周波数を 100 Hz～5 000 Hz の範囲で変化させて騒音レベルを計算する．また，本章では，以下の Z 特性の音圧レベルにおける，振幅変調の考慮の有無による音圧レベル差の計算結果も示す．

- 音圧レベル最大値 $L_{\max}$ [dB]
- Slow 特性音圧レベル最大値 $L_{S\max}$ [dB]
- 音源群通過時の時間平均音圧レベル $L_{eq,T}$ [dB]

(a) Relative sound pressure levels $\Delta L_{\max}$, $\Delta L_{S\max}$ and $\Delta L_{eq,T}$

(b) Relative noise levels $\Delta L_{A\max}$, $\Delta L_{AS\max}$ and $\Delta L_{Aeq,T}$

Fig. 13 Relative sound pressure and noise levels for different source frequencies at $r = 25$ m increase with velocity increase. Increase of noise level (A-weighted sound pressure level) is high at lower frequencies due to its frequency weighting.

周波数・振幅変調の考慮の有無による Z 特性音圧レベル差 $\Delta L_{\max}$, $\Delta L_{S\max}$, $\Delta L_{eq,T}$ ，および A 特性音圧レベル差 $\Delta L_{A\max}$, $\Delta L_{AS\max}$, $\Delta L_{Aeq,T}$ の計算結果を，それぞれ図 13(a)(b) に示す．音源速度は $M = 0.1, 0.3$ の 2 通りの条件について，音源軌道からの受音点の距離は $r = 25$ m の条件についての計算結果を示す．図 13(a) より，音源速度が大きいほど周波数・振幅変調の寄与が増大し，音圧レベル差が増大することが示される．また，図 13(b) より，音源周波数が低いほど A 特性の重みによる寄与により，A 特性での音圧レベル差が増大することが示される．

これらの内容より，音源の周波数特性が広帯域にわたる場合，音源の周波数成分のうち低周波数域成分の方が周波数・振幅変調によって騒音レベル計算結果を大きく増大させると考えられる．また，音源周波数が一定であれば，音源速度が大きいほど振幅変調により騒音レベル計算結果をより増大させることが示される．

5. 結 論

本研究では、音源の移動によって起こる周波数変調（Doppler 効果）や振幅変調が音源群の放射音特性に及ぼす影響について明らかにした。

直線音源軌道上を音源群が等速度運動する場合の騒音レベルを計算し、音源移動による周波数・振幅変調を考慮に入れて計算した場合の騒音レベルを求めた。その結果を、周波数・振幅変調を考慮に入れない場合の騒音レベル計算結果と比較した。音源側の条件として鉄道騒音を想定したが、放射音の伝搬における周波数・振幅変調の影響について検討するため、音源の音響パワーが速度に対し一定であると仮定して騒音レベルを求めた。その結果、音源移動による放射音の振幅・周波数変調について以下の結論が示された。

1. 音源群が等速度運動する場合についても、音源の移動によって振幅変調が起これば、受音点に接近する音源は振幅が増大し、受音点通過後の音源は振幅が減少する。
2. 周波数・振幅変調を考慮する場合と考慮しない場合を比較すると、前者の方が等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ 、Slow 特性騒音レベル最大値 L_{ASmax} 、騒音レベル最大値 L_{Amax} の値は増大する。
3. 周波数・振幅変調を考慮することで増大する騒音レベル幅は音源速度に対して単調増加し、300 km/h の場合はいずれの騒音レベルも約 1.2 dB 増大することが示されるが、受音点の音源軌道からの距離にはほぼ依存しない。これらの変調を考慮に入れない場合、騒音レベルが実際よりも過小評価される可能性がある。
4. 音源が離散的な場合、有限長線音源による近似により騒音レベルを推計すると騒音レベルを過小評価する可能性がある。過小評価となる騒音レベル値は、等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ 、Slow 特性騒音レベル最大値 L_{ASmax} 、騒音レベル最大値 L_{Amax} の順に大きくなる。
5. 音源の周波数特性が広帯域にわたる場合、音源の周波数成分のうち低周波数域成分の方が周波数変調・振幅変調を考慮に入れることによって騒音レベル計算結果が増大する。音源周波数が一定であれば、音源速度が大きいほどより騒音レベル計算結果が増大する。

また、今後の課題としては、指向性、周波数特性や音響パワーの速度依存性などの音源特性や、音源周囲の構造物が放射音に及ぼす影響について明らかにすることなどが挙げられる。

文 献

- BS EN 16272-3-1:2012, Railway applications - Track - Noise barriers and related devices acting on airborne sound propagation - Test method for determining the acoustic performance - Part 3-1: Normalized railway noise spectrum and single number ratings for diffuse field applications (2012).
- Chandler-Wilde, S.N., Tyndall Medal lecture: the boundary element method in outdoor noise propagation, Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol.19, No.8 (1997), pp.27-50.
- Defrance, J., Salomons, E., Noordhoek, I., Heimann, D., Plovsing, B., Watts, G., Jonasson, H., Zhang, X., Premat, E., Schmich, I., Aballea, F., Baulac, M. and Roo, F.D., Outdoor sound propagation reference model, Acta Acustica United With Acustica, Vol.93 (2007), pp.213-227.
- 土肥哲也, 廣江正明, 加来治郎, 高速移動音源からの放射音を測定する際の問題について, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集 (1997), pp.739-740.
- Duhamel, D., Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier, Journal of Sound and Vibration, Vol.197, No.5 (1996), pp.547-571.
- Howell, G.P., Bradley, A.J., McCormick, M.A. and Brown, J.D., De-doppleization and acoustic imaging of aircraft flyover noise measurement, Journal of Sound and Vibration, Vol.195, No.1 (1986), pp.151-167.
- IEC 61672-1:2013, Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications (2013).
- Jean, P., A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise, Journal of Sound and Vibration, Vol.212, No.2 (1998), pp.275-294.
- Kasess, C.H. and Waubke, H., Moving sources and the 2.5D Helmholtz boundary element method, Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics (2019), pp.7475-7482.
- Kelly, J.J. and Wilson, M.R., De-dopplerization of aircraft acoustic signals, Journal of Aircraft, Vol.32, No.5 (1995), pp.1012-1017.

- Kephalopoulos, S., Paviotti, M. and Anfosso-Ledee, F., Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU), Publications Office of the European Union (2012).
- 小林知尋, 横山 栄, 矢野博夫, 橘 秀樹, 在来鉄道騒音の音源特性のモデル化, 日本音響学会誌, Vol.66, No.6 (2010), pp.257-264.
- Martin, S.R., Genescà, M., Romeu, J. and Pàmies, T., Aircraft tracking by means of the Acoustical Doppler Effect, Aerospace Science and Technology, Vol.28 (2013), pp.305-314.
- Morse, P. M. and Ingard, K. U., Theoretical Acoustics, McGraw-Hill (1968), pp.717-725, New York.
- 長倉 清, 善田康雄, 新幹線沿線騒音予測手法, 鉄道総研報告, Vol.14, No.9 (2000), pp.5-10.
- 緒方正剛, 鶴 秀生, 中島弘史, 藤原恭司, 超高速移動音源に対する防音壁の遮音量算出に関する研究, 日本音響学会誌, Vol.59, No.12 (2003), pp.713-722.
- Ryzhik, I.M. and Gradshteyn, I.S., Table of integrals, series and products (1980), Academic Press.
- Sakamoto, S., Calculation of sound propagation in three-dimensional field with constant cross section by Duhamel's efficient method using transient solutions obtained by finite-difference time-domain method, Acoustical Science and Technology, Vol.30, No.2 (2009), pp.72-82.
- 鶴 秀生, 中島弘史, 高橋宏治, 移動音源の数値シミュレーションと可聴化, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集 (2000), pp.667-668.

References

- BS EN 16272-3-1:2012, Railway applications - Track - Noise barriers and related devices acting on airborne sound propagation - Test method for determining the acoustic performance - Part 3-1: Normalized railway noise spectrum and single number ratings for diffuse field applications (2012).
- Chandler-Wilde, S.N., Tyndall Medal lecture: the boundary element method in outdoor noise propagation, Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol.19, No.8 (1997), pp.27-50.
- Defrance, J., Salomons, E., Noordhoek, I., Heimann, D., Plovsing, B., Watts, G., Jonasson, H., Zhang, X., Premat, E., Schmich, I., Aballea, F., Baulac, M. and Roo, F.D., Outdoor sound propagation reference model, Acta Acustica United With Acustica, Vol.93 (2007), pp.213-227.
- Doi, T., Hiroe, M. and Kaku, J., A study on the measurement of sound radiated from a high-speed moving source, Proceedings of the Spring Meeting of Acoustic Society of Japan (1997), pp.739-740 (in Japanese).
- Duhamel, D., Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier, Journal of Sound and Vibration, Vol.197, No.5 (1996), pp.547-571.
- Howell, G.P., Bradley, A.J., McCormick, M.A. and Brown, J.D., De-doppleization and acoustic imaging of aircraft flyover noise measurement, Journal of Sound and Vibration, Vol.195, No.1 (1986), pp.151-167.
- IEC 61672-1:2013, Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications (2013).
- Jean, P., A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise, Journal of Sound and Vibration, Vol.212, No.2 (1998), pp.275-294.
- Kasess, C.H. and Waubke, H., Moving sources and the 2.5D Helmholtz boundary element method, Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics (2019), pp.7475-7482.
- Kelly, J.J. and Wilson, M.R., De-dopplerization of aircraft acoustic signals, Journal of Aircraft, Vol.32, No.5 (1995), pp.1012-1017.
- Kephalopoulos, S., Paviotti, M. and Anfosso-Ledee, F., Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU), Publications Office of the European Union (2012).
- Kobayashi, T., Yokoyama, S., Yano, H., Tachibana, H., Modeling of sound sources for conventional railway noise, The Journal of the Acoustical Society of Japan, Vol.66, No.6 (2010), pp.257-264 (in Japanese).
- Martin, S.R., Genescà, M., Romeu, J. and Pàmies, T., Aircraft tracking by means of the Acoustical Doppler Effect, Aerospace Science and Technology, Vol.28 (2013), pp.305-314.
- Morse, P. M. and Ingard, K. U., Theoretical Acoustics, McGraw-Hill (1968), pp.717-725, New York.

Nagakura, K. and Zenda, Y., Prediction Model of Wayside Noise Level of Shinkansen, RTRI Report, Vol.14, No.9 (2000), pp.5-10 (in Japanese).

Ogata, S., Tsuru, H., Nakajima, H. and Fujiwara, K., Investigation on insertion loss of noise barrier for high-speed moving sound source, The Journal of the Acoustical Society of Japan, Vol.59, No.12 (2003), pp.713-722 (in Japanese).

Ryzhik, I.M. and Gradshteyn, I.S., Table of integrals, series and products (1980), Academic Press.

Sakamoto, S., Calculation of sound propagation in three-dimensional field with constant cross section by Duhamel's efficient method using transient solutions obtained by finite-difference time-domain method, Acoustical Science and Technology, Vol.30, No.2 (2009), pp.72-82.

Tsuru, H., Nakajima, H. and Takahashi, K., Numerical simulation and auralization of moving sound source, Proceedings of the Autumn Meeting of Acoustic Society of Japan (2000), pp.667-668 (in Japanese).

付録：音圧導出時の近似の妥当性について

式 (37) のように $\tilde{p}_n$ をおく.

$$\tilde{p}_n = -i \frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{\rho \mu \exp(-i\phi)}{4\pi r'} \quad (37)$$

すると式 (19) より以下のように表記できる.

$$\frac{p_n}{\tilde{p}_n} = 1 - \alpha i \quad (38)$$

$$\alpha = \frac{1}{\frac{r'}{\partial \phi}} \frac{\partial r'}{\partial t} = \left(1 + \frac{M z_{Sn}}{\sqrt{(1-M^2)r^2 + z_{Sn}^2}} \right) \frac{V z_{Sn}}{\omega_S (r^2 + z_{Sn}^2)} \quad (39)$$

ここで, $p_n/\tilde{p}_n \approx 1$ と近似を行った際における振幅の誤差・位相の誤差をそれぞれ E_{amp} , E_{ph} とおき, 以下のように定義する. いずれの値も十分小さい場合, $E_{\text{amp}} \approx 0$, $E_{\text{ph}} \approx 0$ となり, $p_n/\tilde{p}_n \approx 1$ となる.

$$E_{\text{amp}} = 20 \log \left| \frac{p_n}{\tilde{p}_n} \right| = 20 \log |1 - \alpha i| \quad (40)$$

$$E_{\text{ph}} = \frac{1}{2\pi} \arg \left(\frac{p_n}{\tilde{p}_n} \right) = \frac{1}{2\pi} \arg (1 - \alpha i) \quad (41)$$

音源周波数が 20 Hz, $r = 7.5$ m とした場合における E_{amp} , E_{ph} は図 14 のように計算できる. ω_S や r の値の増大に伴って α は単調減少していくため, 高速車両の条件において $p_n/\tilde{p}_n \approx 1$ とし, 式 (20) のように近似できると考えられる.

Fig. 14 Approximation error of amplitude E_{amp} and approximation error of phase E_{ph} (source frequency : 20 Hz, $r = 7.5$ m). We can express $p_n/\tilde{p}_n \approx 1$.