

## 超音波曝露の許容値に関する検討 第二報 非線形減衰の影響\*

○星 貴之 (ピクシーダストテクノロジーズ株式会社)

### 1 はじめに

パラメトリックスピーカや超音波フェーズドアレイの社会実装が試みられるようになり強力な超音波が身近なものになりつつあることを背景として、強力な超音波が人体に与える影響を知ることの重要性が増している<sup>[1]</sup>. 空中における超音波曝露の許容値については従来の国際的な許容値として 110 dB SPL が定められているが、それは暫定的に定められた数値が既成事実化したものであり、再検討すべきものであるという指摘がある<sup>[2]</sup>.

前報<sup>[3]</sup>において筆者は、従来の許容値は制定当時に主流であった 20 kHz 周辺の超音波に関して定められた可能性と、異なる周波数については別途検討すべきであることを指摘した. そして近年応用が広がっている 40 kHz 周辺の超音波が人体に与える影響を文献調査にもとづいて俯瞰した. その結果として健康被害には皮膚の隙間での発熱 (閾値 140 dB SPL) と一時的聴力低下 (閾値 148 dB SPL) があり、それらを回避する暫定許容値として 140 dB SPL を提案した. ただし 140 dB SPL 未満であっても、違和感を覚えた際には念のため使用を中止することを付記している.

ところで 140 dB SPL といえは二次の微小量が無視できなくなるような高い音圧レベルであり、非線形音響学<sup>[4]</sup> の分野に属する. ここでは非線形吸収に伴う減衰が生じるため、通常より素早く減衰することが知られている.

デバイスから発せられた超音波がユーザに届くまでにどの程度減衰するかは、実環境における超音波曝露を検討する上で重要な要因である. 本稿ではまず音波の伝搬に伴う減衰を整理した後、強力な 40 kHz 超音波が伝搬する際の音圧分布を計算する.

### 2 音波の伝搬に伴う減衰

音波の伝搬に伴う減衰として吸収減衰、拡散減衰、散乱減衰、非線形減衰が挙げられる.

**吸収減衰** 媒質の粘性や熱伝導性によって音響エネルギーの一部が熱として散逸することによる減衰. これによる振幅の減少は伝搬距離を  $x$  [m], 吸収係数を  $\alpha_a$  [ $\text{m}^{-1}$ ] として  $\exp(-\alpha_a x)$  で表される.  $\alpha_a$  は周波数が高いほど大きな値をとることが知られている<sup>[4]</sup>. 本稿では粘性および熱伝導性を無視し、吸収減衰を考慮しないものとする.

**拡散減衰** 球面波が  $x$  だけ伝搬したとき、音響パワーが通過する面積が  $x^2$  に比例することに起因する減衰. これにより振幅は  $1/x$  に比例して減少する. なお理想的な平面波の場合には面積が変化しないため、他に減衰する要因がなければ振幅一定のまま伝搬する.

**散乱減衰** 不均一な媒質中で不純物により音波が反射や回折することによる減衰. これによる振幅の減少は散乱係数を  $\alpha_s$  [ $\text{m}^{-1}$ ] として  $\exp(-\alpha_s x)$  で表される. 本稿では伝搬経路が均一であることを仮定し、散乱減衰を考慮しないものとする.

**非線形減衰** 振幅が大きいとき顕著に現れる減衰. 水中ではキャビテーション発生なども関係してくるが、ここでは特に非線形吸収による減衰を扱う. 伝搬に伴って波形が歪み始め、やがて衝撃波化し、音響エネルギーが散逸するようになる. 詳細は次節で述べる.

### 3 非線形減衰

#### 3.1 波形歪み<sup>[4]</sup>

音波の瞬時音速は音圧が高いときに大きく、低いときに小さい. この効果が無視できないほど音圧レベルが大きいとき、当初は正弦波であった音圧波形が伝搬するにつれて歪んでいく様子が観察される (Fig. 1 (a)). これは高調波成分が発生したと言い換えることもでき、それらに音響エネルギーが遷移した分だけ基本周波数成分の振幅が減少する. この段階では、高調波成分と基本周波数成分を合わせた波形全体の音響エネルギーは一定である.

\* Study on Tolerance of Ultrasound Exposure (2<sup>nd</sup> Report) Effect of Nonlinear Attenuation, by HOSHI, Takayuki (Pixie Dust Technologies, Inc.).

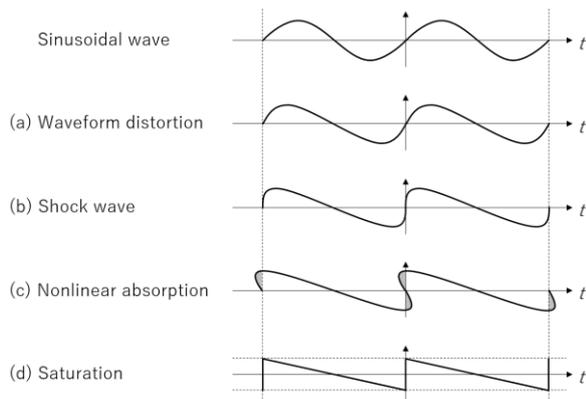


Fig. 1. 非線形減衰の各過程における波形.

### 3.2 非線形吸収<sup>[4]</sup>

波形歪みが進むと、やがて波形がほぼ垂直に立ち上がり衝撃波となる (Fig. 1 (b)). そこからさらに波形歪みが進むと、垂直からはみ出した物理的に存在しえない部分が散逸する非線形吸収が生じる (Fig. 1 (c)). すなわち波形全体の音響エネルギーが減少し始める. そして最終的にはノコギリ波に至る (Fig. 1 (d)). このノコギリ波の振幅は、初期音圧を無限大に近づけたとき一定値に近づく (飽和). これは初期音圧を増大させた分だけ非線形吸収も大きくなるため、結果としてノコギリ波の振幅自体は変わらないと解釈できる.

## 4 飽和音圧の空間分布

### 4.1 平面波の場合

平面波の基本周波数成分の飽和音圧  $p_1(\infty)$  [Pa] は次式で与えられる<sup>[4][5][6]</sup>.

$$p_1(\infty) = \frac{2\rho_0 c_0^3}{\beta \omega x} \quad (1)$$

ここで  $\rho_0$  [kg/m<sup>3</sup>] は空気の密度,  $c_0$  [m/s] は空気中での音速,  $\beta$  は空気の非線形係数,  $\omega$  [rad/s] は角周波数である. 平面波は減衰要因がなければ一定振幅のまま伝搬し続けるが、飽和音圧は距離 (および周波数) に反比例して減少する. Fig. 2 (plane) は 40 kHz 超音波について  $p_1(\infty)$  をプロットしたものである.

### 4.2 球面波の場合

球面波の基本周波数成分の飽和音圧  $p_1(\infty)$  [Pa] は次式で与えられる<sup>[5][6]</sup>.

$$p_1(\infty) = \frac{2\rho_0 c_0^3}{\beta \omega x} \frac{1}{\ln \frac{x}{x_0}} \quad (2)$$

ここで  $x_0$  [m] は球状音源の半径であり今回は 1 cm を仮定する. 文献 [5], [6] は粒子速

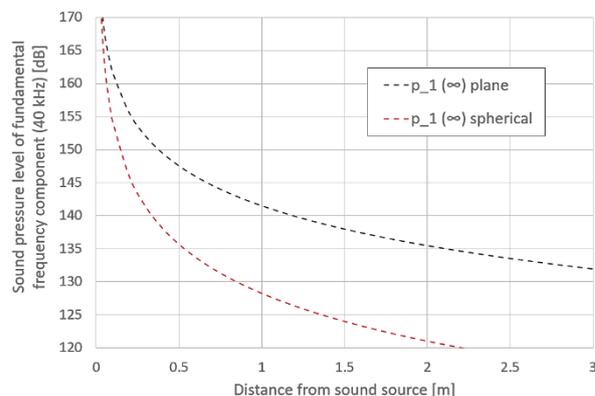


Fig. 2 平面波と球面波の飽和音圧 (40 kHz 超音波の場合).

度で議論しているが、音響インピーダンスが  $\rho c$  であると仮定して音圧に変換した. この減衰は拡散減衰の効果  $1/x$  と、そうやって徐々に弱まる振幅による非線形減衰の効果  $1/\ln(x/x_0)$  の掛け合わせと解釈できる. Fig. 2 (spherical) は 40 kHz 超音波について  $p_1(\infty)$  をプロットしたものである.

## 5 おわりに

前報において筆者は超音波曝露の暫定許容値として 40 kHz に関して 140 dB SPL を提案した. これは非線形減衰を生じるほど高い音圧レベルであることから、本稿では 40 kHz 超音波の非線形減衰について検討した. 初期音圧が無限大に近づくとき非線形減衰の極限として空間中の音圧分布が飽和する. 飽和音圧が 140 dB SPL となる音源からの距離は、平面波の場合は音源表面から 1.2 m, 球面波の場合は音源中心から 0.4 m であった. すなわち音源が放射する超音波がどれほど強力であろうと、音源からこれらの距離以上離れていれば暫定許容値を超えて曝露することはないと言える.

本稿の検討により、これまで音圧レベルで示されてきた超音波曝露の許容値を、音源からの距離と関連付けて議論することが可能となった.

## 参考文献

- [1] 星, 信学技報, 120 (295), 24-27, 2020.
- [2] Leighton, Proc. Royal Soc. A, 472:20150624, 2016.
- [3] 星, 音講論 (春), 2-7-11, 2021.
- [4] 鎌倉 編著, 非線形音響, コロナ社, 2014.
- [5] Rudenko, Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics, Springer, 1977.
- [6] Blackstock, J. Acoust. Soc. Am., 36, 217-219, 1964.