

超音波曝露の許容値に関する検討 第三報 超音波焦点における飽和*

○星 貴之, 大岡 佳生 (ピクシーダストテクノロジーズ株式会社)

1 はじめに

強力な超音波による非線形現象を利用するパラメトリックスピーカや超音波フェーズドアレイなどの技術が身近なものになりつつある。これらが本格的に社会実装されていくにあたって、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^[1]。

前々報^[2]において我々は、近年もっぱら使用されている 40 kHz 周辺の超音波に着目して文献調査を行った。その結果、生じうる健康被害には発熱（皮膚の隙間での閾値 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 未満であっても高周波の聞こえが生じることがあるため、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。

また前報^[3]において、強力な超音波が空气中を伝搬すると非線形吸収により急激に減衰し、音源音圧に対して飽和する現象について検討した。40 kHz 超音波の場合、音源がどれほど強力であっても平面波の場合には 1.2 m、球面波の場合には 0.4 m 離れれば暫定許容値を超える音圧に曝露しないという結論を理論より導いた。これにより超音波ビームを放射するパラメトリックスピーカや超音波焦点を形成するフェーズドアレイの安全性を距離の観点から議論できるようになった。

ところで上記の検討では、音源音圧が無限に大きくなることを仮定して飽和音圧を導出した。しかしフェーズドアレイの焦点を音源として想定する場合には、超音波が収束する過程においても非線形吸収が生じていずれ焦点音圧が飽和する^[4]ことから、音源音圧は有限であると考えerるほうが妥当である。

本稿では、収束する球面波の非線形吸収と飽和に関する理論を 40 kHz 超音波に適用する。そして理論値と実験値との比較を行う。

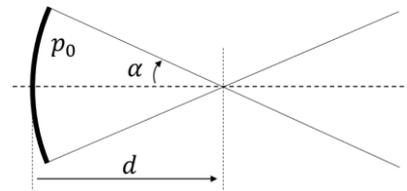


Fig.1 収束する球面波

2 収束音波の非線形吸収と飽和

収束する球面波として球殻状の音源が焦点距離 d [m] の位置に焦点を作る状況を考える (Fig.1)。このとき、非線形吸収を考慮した焦点音圧の基本周波数成分 $p_1(p_0)$ [Pa] は次式で与えられる^[4]。

$$p_1(p_0) = \frac{2}{\pi} p_0 G \left[1 - \frac{1}{\pi} + \frac{\beta \omega d p_0}{\pi \rho_0 c_0^3} \ln G \right]^{-1} \quad (1)$$

ここで p_0 [Pa] は音源表面における初期音圧、 ρ_0 [kg/m³] は空気の密度、 c_0 [m/s] は空気中の音速、 β は空気の非線形係数、 ω [rad/s] は角周波数である。 G は非線形吸収がない場合の集束利得であり、焦点から音源端部を見た仰角 α [rad] を使って表される。

$$G = \frac{\pi d \sin^2 \alpha}{\lambda} \quad (2)$$

式 (1) において $p_0 \rightarrow \infty$ としたとき、焦点音圧の基本周波数成分は次式の極限值をとる。

$$p_1(\infty) = \frac{2 \rho_0 c_0^3 G}{\beta \omega d \ln G} \quad (3)$$

例として焦点距離 10 cm、仰角 45 deg の場合の初期音圧に対する焦点音圧の基本周波数成分を Fig.2 に示す。150 dB SPL を超えると線形から乖離して 184.8 dB SPL に漸近する。

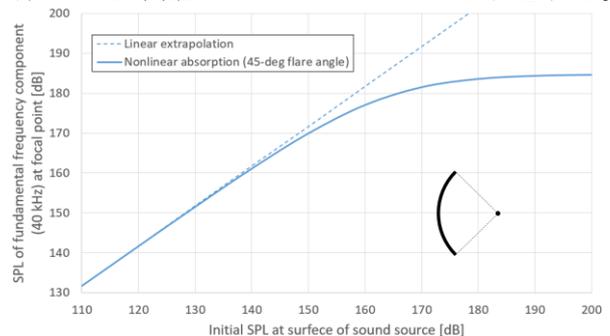


Fig.2 焦点音圧が飽和する様子

* Study on Tolerance of Ultrasound Exposure (3rd Report) Saturation at Ultrasonic Focal Point, by HOSHI, Takayuki and O-OKA Yoshiki (Pixie Dust Technologies, Inc.).

3 焦点音圧の実測

焦点音圧の基本周波数成分が 150 dB SPL を超える際の挙動を実際に観察するため、市販の超音波振動子よりも強力な TAM2101 (タムラ製作所製、直径 10 mm) を採用することで焦点音圧 172 dB SPL を達成できるフェーズドアレイ^[5]を用いて、振動子の駆動信号と焦点音圧の基本周波数成分の関係を調べた。焦点距離 10 cm に設定して、最大音圧を与える距離 9.5 cm における音圧を、高音圧まで測定可能な光ファイバマイクロホン^[6]を用いて測定した。結果を Fig.3 に示す。

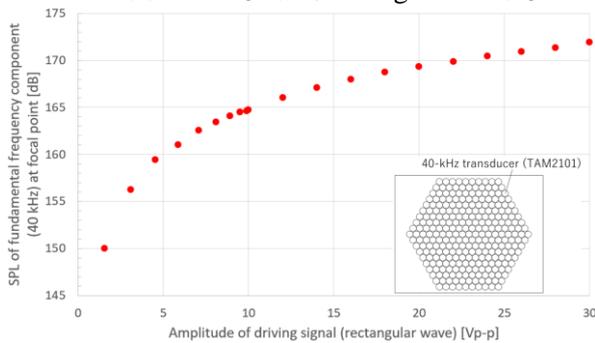


Fig.3 フェーズドアレイの焦点音圧の実測

4 理論値と実測値の比較

前節にて実測された値が非線形吸収を考慮して得られた理論値とどの程度近いかを比較する。その準備として、駆動信号と出力音圧の関係を測定した。振動子ひとつの正面 30 cm 離れた位置に ACO 4158N (保護グリッドなし) を設置し、駆動信号の振幅を変えながら音圧を測定した。結果を Fig.4 に示す。

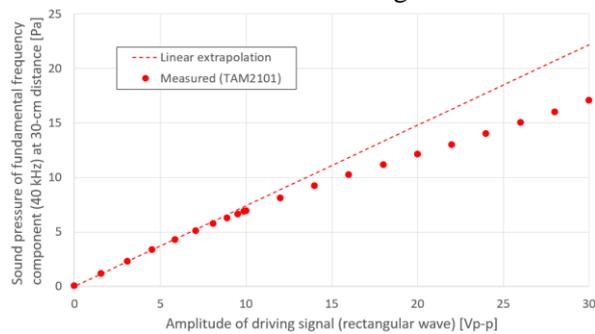


Fig.4 超音波振動子 TAM2101 の出力特性

上記測定により駆動信号と出力音圧は線形の関係から外れ徐々に低減することがわかった。Fig.2 と Fig.3 を比較するにあたって、Fig.3 の横軸を Fig.4 により出力音圧に変換した。そして両グラフにおける焦点音圧 150 dB SPL の点の横軸上の位置が合うように、実測データに対する等価的な初期音圧を算出した。その結果を Fig.5 に示す。

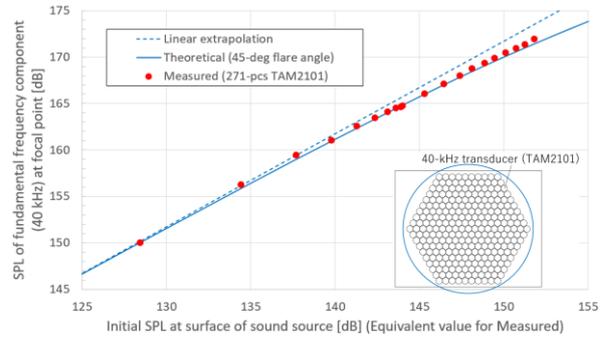


Fig.5 理論値と実測値の比較

厳密には、理論において想定している音源は円形であるのに対して実測では六角形配置であったり、フェーズドアレイ周縁部に配置された振動子については距離減衰や指向性の影響もあるなど、モデル化されていないパラメータは多い。そのような影響を考慮していないものの、フェーズドアレイによる焦点音圧の実測値が同程度の直径の円形音源 (図中の青丸) を仮定した理論値に沿うように線形から乖離していく様子が Fig.5 から読み取れる。

5 おわりに

本稿では超音波焦点において得られる音圧の上限値を見積もるため、収束する球面波の非線形吸収と飽和について検討した。その結果、周波数 40 kHz, 焦点距離 10 cm, 仰角 45 deg の場合の上限値 184.8 dB SPL が得られた。また超音波フェーズドアレイの焦点音圧を最大 172 dB SPL まで駆動信号の振幅を変えて実測したところ、非線形飽和の影響と考えられる線形からの乖離が見られた。音源形状の違いなど無視している要因が多いため理論がそのまま適用できるとは限らないが、理論によってフェーズドアレイの焦点音圧が大まかに予測できる可能性が示された。

なお詳細は省くが、前稿で検討した発散する球面波の非線形吸収において、初期音圧 180 dB SPL を超える場合の音圧と飽和音圧との差は 1 dB 以下にとどまる。すなわち本稿の検討で得られた焦点の飽和音圧 184.8 dB SPL は、距離の観点からの安全性の検討には大きな影響を与えないという結論が得られた。

参考文献

- [1] 星, 信学技報, 120 (295), 24-27, 2020.
- [2] 星, 音講論 (春), 2-7-11, 2021.
- [3] 星, 音講論 (秋), 1-7-4, 2021.
- [4] Duck, *Ultrasound Med. Biol.*, 25 (6), 1009-1018, 1999.
- [5] 星, 信学技報, 122 (36), 6-7, 2022.
- [6] 大岡, 星, 音講論 (秋), 1-7-5, 2021.