

超音波曝露の許容値に関する検討*

○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

近年、パラメトリックスピーカの用途展開や超音波フェーズドアレイの登場により、強力な超音波がより身近なものになってきている。そのような状況では、強力な超音波が人体にどのような影響を与えるかをよく知っておく必要がある^[1]。超音波曝露の許容値についてはこれまでも議論が行われてきた。現状、国際的には 110 dB SPL が許容値として周波数によらず推奨されている。しかしこの許容値は 1900 年代半ばの少数の論文に依拠するものであり、根拠が薄いため再検討されるべきであると指摘されている^[2]。

筆者は上述の課題意識にもとづいて有志による勉強会(空中超音波 Study Group)を 2020 年に立ち上げ、安全基準について議論を重ねた^[1]。大学・研究所の研究者、および関連企業の担当者にご参加いただいた。本稿では超音波が人体に与える影響を俯瞰する。そして空中超音波 SG で議論した結果として、暫定許容値となりうる音圧レベルを提案する。

2 従来の許容値

2.1 安全基準についての考え方

日本国内では労働安全衛生法^[3]に「事業者は有害な超音波による健康被害を防止するため必要な措置を講じなければならない」と定められているものの、超音波曝露について具体的に許容値を定めた法規制は存在しない。国際的な許容値については各国のガイドラインや研究報告があるが、それらは過去の報告の焼き直しやレビュー論文でありルーツを辿ると少数の論文に集約されると報告されている^[2]。それらが立脚する安全基準の考え方は 2 系統に分類できると筆者は考えている。超音波の知覚が生じない範囲を安全とみなすか、もしくは聴覚を過剰に疲労させない範囲を安全とみなすか、という分類である。

超音波の知覚が生じない範囲を安全とする代表格としてカナダ保健省の安全基準^[4]が挙

げられる。アメリカ労働安全衛生局^[5]をはじめ、多くの安全基準がこれを参照している。これは過去(1900 年代半ば)の論文を丹念に引用しながら超音波が人体に与える影響について語っている。それらの論文の紹介や補足情報をまとめた論文^[6]があり、併せて読むと参考になる。この安全基準では超音波が人体に与える影響を「皮膚の温度上昇」「聴覚閾値変化」「耳鳴り・眩暈などの知覚」に分類し、20 kHz 周辺の知覚閾値から許容値 110 dB SPL を推奨している。

聴覚を過剰に疲労させない範囲を安全とする考え方は、国際放射線防護学会国際非電離放射線委員会 INIRC/IPRA (現・国際非電離放射線防護委員会 ICNIRP) の安全基準^[7]に窺える。そこでは労働者が週 5 日、1 日 8 時間曝露してよい許容値として 110 dB SPL と定めている。また一般市民の場合にはさらに低い 100 dB SPL を許容値とし、一般市民が 1 日最大 24 時間まで曝露しうることを考慮したものと説明されている。「曝露した音響エネルギーの総和が同じであれば聴覚の疲労も同等であろう」という仮説が背景にあることが考えられる。それにもとづく 1 日 24 時間、週 7 日間曝露する場合の等価音圧レベルは週 5 日、1 日 8 時間の許容値から 6.23 dB (= $10 \log \{(24 \cdot 7) / (8 \cdot 5)\}$) を引いたものとなる。さらに一般市民には労働者よりも不確定要素が多いことを加味し、より明確なデータが得られるまでの暫定措置として 10 dB 引いた値を設定したと述べられている。

2.2 聴覚閾値変化

聴覚閾値変化は聴覚の疲労によって生じるとされ、一過性閾値変化 (TTS, Temporal Threshold Shift) と永続性閾値変化 (PTS, Permanent Threshold Shift) に分類される。超音波曝露に関しては TTS が報告されている。それは 17-37 kHz, 148-154 dB SPL の超音波に曝露すると可聴音帯域において TTS を生じるというものである^[8]。この TTS はすぐ

* Study on Tolerance of Ultrasound Exposure, by HOSHI, Takayuki (Pixie Dust Technologies, Inc.).

に回復したことも述べられている。ただし詳細なデータがなく、37 kHz の場合に TTS が生じた閾値となる音圧レベルは不明である。

なお、TTS は主に曝露した超音波の周波数の一次および二次の低調波の周波数で生じたとも報告されている^[8]。ここから 40 kHz の超音波の場合は 20 kHz と 13 kHz に対する聴力が低下すると考えられ、通常の聴力検査が対象とする 8 kHz までの聴力には影響しないのではないかという仮説も考えられる。

2.3 対象周波数

カナダの安全基準^[4]を見る限り、従来の許容値について根拠として参照されている論文は 20 kHz 周辺について報告するものが多く、それより高い周波数についての言及は少ない。様々な基準が 50 kHz - 100 kHz など高い周波数までの許容値を定めているが、それらは 20 kHz 周辺について定めた許容値を高い周波数まで引き延ばした可能性が疑われる。

パラメトリックスピーカや超音波フェーズドアレイは市販の超音波振動子を使用することが多く、その共振周波数である 40 kHz 周辺の超音波を使用する。そのような高い超音波帯域において 20 kHz と同様の現象や知覚が生じることは必ずしも自明ではなく、周波数ごとに検証する必要がある。

本稿では以下、特に「(近年応用が広がっている) 40 kHz 周辺の超音波帯域」に着目して「超音波」という語句をその意味で使用するものとする。また超音波が騒音に埋もれるような状況ではなく、ほぼピュアトーンとして存在する状況を想定する。騒音を考える際はしばしば 1/3 オクターブバンドが用いられ、従来の超音波曝露の検討もそれに倣っている。ピュアトーンの場合にはそのスペクトルのピーク値と 1/3 オクターブバンドをかけた値は理想的には一致するため (FFT の周波数精度などの要因により多少異なる可能性もあるが) それらを区別せずに文献値を使用する。

3 超音波の知覚閾値

3.1 触覚 (温覚)

超音波が皮膚に照射されると一部が吸収されて熱に変換される。その熱で皮膚の温度が上昇すると、程度によっては温覚が生じる。しかし医工学の分野では MHz 帯の超音波は温熱的作用を生じるが kHz 帯の超音波は主

に機械的作用を生じるとされており^[9]、40 kHz による熱の発生は微小と考えられる。

温熱的影響の評価指標は音響パワーとメカニカルインデックスである^[10]。空気と皮膚の音響インピーダンスが著しく異なるため、皮膚に侵入する空中超音波の音響パワーは 0.1 % 程度であることが計算により求められる。仮に皮膚表面に 160 dB SPL の超音波が照射された場合、皮膚内部に透過する音響パワーは 0.98 mW/cm^2 である。これは FDA が超音波エコー診断装置について定めている許容値 $I_{\text{SPTA}} = 720 \text{ mW/cm}^2$ の 1/735 であり、十分に小さい。逆算すると、この場合の許容値は 188.7 dB SPL と推定される。またメカニカルインデックス MI は周波数依存するパラメータであり、40 kHz の場合 0.019 と算出される。こちらも FDA の定める許容値 1.9 の 1/100 であり、十分に小さい。

上述のように 40 kHz、160 dB SPL の温熱的影響は無視できるほど小さい一方で、皮膚の溝 (例えば手の指をぴったり閉じたときの隙間など) においては 140 dB SPL で発熱し始めることも報告されている^[11]。詳細不明だが周波数は 20kHz とと思われる。周波数は異なるものの、非接触触覚提示^[13]ではこの音圧レベルを超えている。仮に発熱しても即座に火傷するわけではないが、ユーザ体験を損ねる要因になるため注意する必要がある。

温熱的影響に関する報告として、無毛マウスが超音波によって死亡したという報告がなされている^[12]。それは無毛マウスの全身を 22 kHz、162 dB SPL の超音波で包み込んだところ、40 分経過後に深部体温が $15 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 上昇して死亡したというものである。またそこから人間は 180 dB SPL の超音波により死に至ると計算されている^[8]。この計算はマウスとヒトの超音波の吸収率の差にもとづいている。しかし人間の全身を包み込むような強力超音波の音場が生じる状況は考えにくく、皮膚の超音波照射部位が多少発熱することはあるとしても、深部体温が上昇して死亡まで至ることはほぼないと想定される。

3.2 触覚 (圧覚・振動・気流)

非接触触覚提示は、強力超音波の非線形作用のひとつ音響放射圧により皮膚表面を押すことで触覚を生起させる^[13]。超音波の振幅が一定であれば静圧を生じ、超音波を照射した

瞬間は感じるものの、順応によりすぐに感じなくなる。超音波を変調することで振動刺激を与えることもできる。人間の触覚は 200 Hz において感度がよいことが知られており、手のひらにおける知覚閾値が報告されている。文献 [14] は、AM (amplitude modulation) 変調の知覚閾値は放射圧ピーク値 560 Pa, STM (spatiotemporal modulation) 変調で 338 Pa であったと報告している。これらは音圧レベルでそれぞれ 170.2 dB SPL, 168.0 dB SPL であり、筆者の経験に照らすと明らかに触覚を感じるほど大きい値であることから、何らかの間違いが疑われる。仮に放射圧ピーク値ではなく音圧ピーク値と読み替えると 146.0 dB SPL, 141.5 dB SPL となる。また文献 [15] は超音波フェーズドアレイの最大出力を 0 dB として AM 変調の知覚閾値は -28.5 dB, LM (lateral modulation) 変調で -36.5 dB であったと報告している。文献 [16] で用いられたフェーズドアレイ (焦点における音圧レベルの最大値 171 dB SPL) と同じものを使用しており、音圧が焦点距離に反比例することを仮定して補正 (250 mm^[16] から 200 mm^[15] に変更) すると、音圧レベルの最大値は 172.9 dB SPL と推定される。このとき AM 変調および LM 変調の知覚閾値は(上記の相対値が音圧についてのものと仮定すると)それぞれ音圧レベル 144.4 dB SPL, 136.4 dB SPL となる。

顔面の額、目尻、頬、下顎などにおける知覚閾値についても報告がなされている^[16]。200 Hz 振動刺激を AM 変調で与えた場合はどの部位でもほぼ変わらず知覚閾値 170 dB SPL 程度であったのに対して、LM 変調の場合は鼻横の頬でもっとも感度が高く知覚閾値 166.5 dB SPL であった。また放射圧と同時に音響流も生じており、それによって気流が皮膚に吹きつけてくるような (あるいは冷覚のような) 感覚も生じる。この気流の感覚については下顎における感度をもっとも高く、変調なしで 163.5 dB SPL, AM 変調で 166.0 dB SPL, LM 変調で 163.0 dB SPL が知覚閾値として報告されている。

3.3 聴覚 (聞こえ)

ここで「聞こえ」は「キーン」もしくは「ツーン」と表現されるような高周波の主観的な知覚を意図している。なお気圧が変化したかのような感覚 (おそらく文献 [2] において

uncomfortable feeling of pressure in the ears と表現している感覚) も知覚されるが、知覚閾値実験では質の区別までは困難であることから、便宜上区別せず同じカテゴリとして扱う。

超音波は人間の可聴域に含まれない、すなわち蝸牛基底膜には超音波の周波数に対応する有毛細胞が存在しないことから、通常の聴覚機序によって聞こえが知覚されるとは考えにくい。しかしそのような状況でも、ある程度以上のパワーの超音波が入射すると高周波音のような聞こえが発生することが知られている。それは骨導超音波において研究報告がなされている^[17]。骨導超音波の知覚閾値についてラウドネスバランステストで等価音圧レベルを求めたところ、35 kHz に対しては 87 dB SPL 程度であった。90 dB SPL の騒音の大きさの目安は「犬の鳴き声 (5 m), 騒々しい工場の中」などとされており、小さくはないものの日常生活でも遭遇する程度の音圧レベルである。強力な空中超音波による聞こえも (骨導と気導という違いはあるものの) 同様の機序によって生じていると推測される。

超音波の聞こえに関して、40 kHz, 120 dB SPL では明確には知覚されなかったという報告がなされている^[18]。またその音圧レベルで聴性脳幹反応が見られなかったという報告もあり、心理学的にも生理学的にも聴覚が反応していないことが示されている^[19]。

超音波の聞こえの閾値については 142.0 dB SPL という報告^[20] と 133.3 dB SPL という報告^[21] がある。これらの間には 8.7 dB とやや大きい差があるが、実験環境のほか人種や年齢などの要因が考えられる。今後の追試が待たれるが、これらの音圧レベル周辺に知覚閾値が存在するであろうことが推測される。

気導だけではなく骨導でも空中超音波による聞こえが生じることが報告されている^[16]。変調なしの場合は鼻横の頬と下顎で 167.0 dB SPL, AM 変調の場合は目尻で 167.3 dB SPL, LM 変調の場合は鼻横の頬で 166.3 dB SPL が知覚閾値として報告されている。3.1 節でも述べたように、空気と皮膚の音響インピーダンスが著しく異なるため、皮膚に侵入する空中超音波の音響パワーは 0.1 % 程度である。この音響パワーが骨導超音波知覚を生じる接触型振動子と同程度に達したときに超音波の聞こえが生じると考えられる。

4 提案する暫定許容値

聴覚閾値変化および超音波の知覚閾値について Fig. 1 にまとめる. 空中超音波が人体に与える影響をほぼ網羅したと考えている. これらを俯瞰した上で, 空中超音波 SG では

- 140 dB SPL 未満の 40kHz 空中超音波が危険であるというエビデンスは, 現在のところ存在しない.
- ただし音圧レベルによらず違和感を覚えた際には念のため使用を中止する.

を合意事項とした. 前者の文言では, TTS や発熱などの健康被害を排することを意図している. これを暫定的な許容値とすることを提案する. また後者の文言は, 超音波を聞こえとして感じる個人差が大きい (110 dB SPL でも感じる人もいる) ことへの対応である.

なお超音波の聴覚的な知覚閾値^[20]を根拠として 31.5 kHz での許容値を 140 dB SPL とするような提案がなされたことはあるものの, 採用されてはいない. Health Canada^[4]によると, 皮膚の溝において発熱し始める音圧レベルである^[11]ことが理由のようである.

影響		部位	閾値 [dB SPL]
触覚	発熱	皮膚の表面	188.7 (推定値)
		皮膚の隙間	140
	振動 気流	手のひら	136.4 - 141.5
		顔面	163.0 (下顎)
聴覚	聞こえ	耳	133.3 - 142.0
		顔面	166.3 (鼻横の頬)
	TTS	耳	148

(注) 曝露する超音波の周波数が 40 kHz 周辺の場合

Fig. 1. 超音波が人体に与える影響の閾値.

5 おわりに

本稿では 40 kHz 超音波による人体への影響を俯瞰し, 暫定許容値として 140 dB SPL を提案した. これは現時点の暫定許容値であり, 現在までの報告に依拠したものである. 今後新たな研究報告がなされるたびに適切に見直されるべき値である. また超音波曝露の許容値は対象周波数ごとに定める必要がある. すなわち本稿で提案した暫定許容値は 40 kHz 周辺以外の周波数には適用できない想定である. 調査報告が多い 20 kHz 周辺については信頼性が高いため, 従来の許容値 110 dB SPL を適用すべきであろうと考えられる.

音圧レベルについては, マイクロホンの保護グリッドによる影響を考慮する必要もある. コンデンサマイクロホンはグリッドなしであれば超音波帯域までフラットな特性を示すが, グリッドを装着すると可聴音帯域はフラットなままであるものの超音波帯域において周波数特性に数 dB のオフセットがのることが知られている^[22]. 先行研究において使用したマイクロホンの種類やグリッドの有無が記載されていないものに関しては, グリッドを装着したまま測定した可能性 (つまり実際の値に数 dB のオフセットがのっている可能性) を考慮する必要がある. そのような不確実性があるものの, 本稿においては先行研究に記載された音圧レベルをそのまま採用した. 将来に向けては, これらの測定器具に関する情報を論文に記載することを推奨したい.

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] 労働安全衛生法, 第 22, 576, 585 条.
- [4] Health Canada, Safety Code 24, 1991.
- [5] OSHA, Technical Manual, Sec. III, Chap.5, Appendix C, 2013 updated.
- [6] Lawton, Health and Safety Executive Contract Research Report, 343/2001, 2001.
- [7] INIRC-IPRA, Health Physics, 46 (4), 969-974, 1984.
- [8] Parrack, Int. Audiology, 5 (3), 294-308, 1966.
- [9] Sussman & Bates-Jensen (ed.), Wound Care, 4th ed., Wolters Kluwer, 2012.
- [10] FDA, Marketing Clearance of Diagnostic Ultrasound Systems and Transducers, 2019.
- [11] Acton, Ultrasonics, 124-128, 1974.
- [12] Danner *et al.*, J. Acoust. Soc. Amer., 26 731-739, 1954.
- [13] Hoshi *et al.*, Trans. Haptics, 3 (3), 155-165, 2010.
- [14] Howard *et al.*, Proc. WHC, 503-508, 2019.
- [15] Takahashi *et al.*, Trans. Haptics, 13 (2), 334-342, 2020.
- [16] Mizutani *et al.*, Proc. HAVE, 1-6, 2019.
- [17] 伊藤, 中川, 音講論 (秋), 2-Q-14, 575-576, 2007.
- [18] 伊藤他, 信学技報, 111 (272), 19-22, 2011.
- [19] Carcagno *et al.*, Acta Acoustica united with Acustica, 105, 1183-1197, 2019.
- [20] Herbertz, Proc. Ultrasonics Int., 226-231, 1983.
- [21] 土井他, 音講論 (春), 2-7P-6, 2021.
- [22] Barrera-Figueroa, Proc. ICA, 6381-6388, 2019.