

Science & Global Security, 第9巻, 165-234 ページ

© 2001 年 テイラーとフランシス

0892-9882/01 \$12.00 + .00

音響兵器 – 将来的評価

ユルゲン・アルトマン¹

音響兵器は一部の国で研究開発が進められています。非致死性武器の一種として宣伝されており、相手を即座に無力化しつつ、永久的な物理的ダメージを回避すると言われています。しかし、仕様や効果に関する信頼できる情報は乏しいです。本記事は、大振幅音人間に与える影響、潜在的な高出力音源、強い音の伝播など、いくつかの分野で基本情報を提供することを目的としています。最初の分野に関しては、ジャーナリズム記事でよく見られる低周波音は、人間に対して主張されるような劇的な影響は与えないことが判明しました。音圧の上昇により、不快感、不快感、痛みが生じます。一時的な聴力の悪化は、レベル、頻度、持続時間などによって永久的な聴力損失に発展することもあります。非常に高い音レベルでは、1回か数回の短い露光でも部分的または完全に聴覚を失うことがあります。しかし、耳の保護はこれらの影響を防ぐのに非常に効果的です。聴覚以外にも、バランスの乱れや主に胸部に耐え難い感覚が現れることがあります。爆発による爆発波は、近距離での過圧が非常に高いため、他の臓器、最初は肺に損傷を与え、致命的な結果を招くことがあります。強い音源には主にサイレンや口笛が使えます。例えば内燃機関で駆動されるこれらの装置は、低周波で数十キロワットの音響出力を、高周波でキロワットを発生させることができます。爆発を利用すれば、最大でメガワット級の電力も可能になるでしょう。指向性使用の場合、電源のサイズは約1メートル程度で、必要な電源なども同様のサイズです。しかし、強い音がある程度遠くまで伝播させるのは難しいです。低周波では回折によりエネルギーが球状に拡散され、指向性ビームを防ぎます。ビームが可能な高周波では、非線形過程で音波がシヨ

この原稿の原稿は 1998 年 6 月 2 日に *Science & Global Security* に受領され、短縮・更新版は 1999 年 7 月に発行されました。

¹ ドイツ・ドルトムント大学の Experimentelle Physik; ボーフム検証プロジェクト、ドイツ・ルール大学ボーフム研究所。この研究は、ジョン・D・アンド・キャサリン・T・マッカーサー財団の助成金で資金提供され、米国ニューヨーク州イサカのコーネル大学平和研究プログラムでの 1 か月間の研究滞在中に開始されました。この作品はドルトムント大学で完成し、ドイツのノルトライン・ヴェストファーレン州科学研究省の資金提供を受けました。

ックを受けた鋸歯状の形に変形し、人間に顕著な効果を与えるために必要な音圧が十分に高い場合、異常に高い伝播損失が生じます。約 50m 以上の距離でメートルサイズの音源では、聴覚的な痛みや平衡感覚の問題、その他の深刻な影響を引き起こすような音レベルを達成することは不可能に思われます。建物内部では状況が異なり、特に共振を利用できる場合はなおさらです。音響兵器は、最近禁止された眩みを放つレーザー兵器ほど劇的な影響はないでしょう。一方で、ビーム拡散による無差別な効果の可能性も高まります。多くの場合、音響兵器は軍や警察にとって根本的な改善をもたらさず、特に相手が耳栓を使用している場合、予防的な制限の可能性があるかもしれません。音響兵器は用途に応じて多様な形態があり、爆風兵器も広く使われているため、そのような制限は段階的かつ詳細に設定する必要があります。

INTRODUCTION1

「非致死性」兵器の一部としての音響兵器

1990 年代初頭以降、主に米国で、人に永久的かつ深刻な被害を回避または最小限に抑えつつ、装備や人員を無力化することを目的とした非致死兵器(NLW)への関心が高まっています。NLW は冷戦後の状況下で軍事力を行使するための新たな選択肢を提供すると考えられていますが、警察の文脈でも使用される可能性があります。² 軍事革命や「死なき戦争」を予見する人もいれば、多くの人は NLW が致死性兵器の増強に過ぎず、実際の戦争では両タイプが連続または並行して使われると予測または推奨しています。³ しかし、戦争以外の状況では、殺害の閾値以下でより多くの武力行使の選択肢を持つことで、例えば警察(暴動、人質事件)や平和維持活動などで死亡の防止や減少に役立つ場合があります。多岐にわたる技術が挙げられており、その中には、目をくらませるレーザー、高出力マイクロ波パルス、腐食性化学物質、微生物、接着剤、潤滑剤、コンピュータウイルスなどがあります。

現在は主に米国がこれらの技術の研究開発を推進していますが、これらが導入されれば複数の分野で新たな質的軍拡競争が起こる可能性があります。また、敵対者やテロリストが新兵器を使用すると拡散の危険があり、それが「裏目に出る」可能性があります。一部の概念は既存の軍縮条約に明確に違反し、例えば微生物を反物資兵器として利用するなどです。⁷ その他は国際人道法の規範を危険にさらしたり違反したりする可能性がある。⁴ したがって、NLW の開発と展開に同意する前に批判的な検討を行う十分な理由があります。

このような批判的分析は、科学技術、軍事作戦、政治的側面を考慮しなければなりません。ある程度、後者二つの側面は前者に依存しています。NLW の働き、ターゲットへの輸送・伝播、そしてそれが生じる効果についての根拠のある分析が緊急に求められています。このことはさらに有効で、公開された資料は科学的・技術的詳細に関して驚くほど沈黙しています。NLW の研究開発に関わる軍当局や契約者は技術情報を提供しません。また、信頼できる情報がなければ、NLW 支持者の根拠の薄い見解や約束が政治的な重みを過剰に得たり、狭い軍事的視点に基づいて決定がなされてしまう危険もあります。

そのような約束の一般的な例として、次のような記述があります。¹⁰ 「これらの技術 (NLW、J.A.) の開発に関わる科学者たちは、資金と支援以外に限界を知りません。もし努力すれば、最終的には必要なことを何でもできるようにできるだろう」と主張し、まず自然法則や、次に対抗策の可能性を考慮していません。

NLW は非常に異なる技術を含んでいるため、各兵器の種類について詳細な分析が必要です。本記事では、低周波音響に重点を置きつつ音響兵器の分析を提示します。これらの武器は一方で混乱、吐き気、痛みを引き起こすが、持続的な影響はないと言われています。一方で、深刻な臓器損傷や死の可能性も言及されており、したがって「非致死性」というラベルはすべての種類や用途に当てはまるわけではありません。表 1 には音響兵器に関するいくつかの疑惑が記載されています。これらの多くは公に記録された事例ではなく伝聞に基づいているため、信頼できる情報とはみなされず、独立した分析が必要な方向を示す指標として捉えられています。

表 1: 利用可能な文献から選ばれた音響兵器の特性、効果、標的の例; 出典はあまり示されていません。ただし、いくつかの矛盾点があります。例えば、「音響弾丸」で高周波が使われているのか非常に低周波なのか(参考文献 18-21)などです。場合によっては、それぞれの著者が何かを誤解したり混同したりした印象を避けられないこともあります。例えば、音響弾によって生成されるプラズマや、非回折と非貫通の等等(参考文献 18)などです。¹² ARDEC: アメリカ陸軍兵器研究開発工学センター、ピカティニー兵器庫(ニュージャージー州)、LOL: ロスアラモス国立研究所(ニューメキシコ州ロスアラモス、米国)、サラ: 科学応用・研究、カリフォルニア州ハンティントンビーチ、米国。

音源	影響	ターゲット	参考文献。
まだ存在しなかった非常に大きなスピーカーや高出力アンプのバンクからの低周波音源であり、新しい冷却設計と新材料が必要でした	不快感、混乱、吐き気、嘔吐	人質救出、群衆/暴動鎮圧、心理的運行	18
ARDEC および LANL が SARA と共同開発中の高出力超低周波音響ビーム兵器; フェーズドアレイ構成により小型車両では約 1m ³ の小型化が可能です。将来的にはより小型化が可能	大きなエアホーンの近くに立つこと(特定の周波数や強さ)などの不快感	米国の海外施設(例: 大使館)の保護、暴動鎮圧	19
ARDEC で調査中のアンテナアンテナディ		バンカーや	20

テナから発射される非常に低周波の音響弾丸		車両内の人員に対する攻撃能力	
1～2m アンテナディテナからの高出力、非常に低周波の音響弾丸	不快感から死に至るまでの段階的な影響		21
高周波で回折しない(すなわち貫通しない)音響弾丸は、目標の前方にプラズマを発生させます	鈍器による外傷		19
野球ボール大の音響パルス(約 10Hz)がロシアで数百メートルにわたって発達しました	非致死レベルから致死レベルまで選択可能		22
ロシアで開発された、通常は聞こえない2つのビームの交差点での「敬意音」			22

音響兵器の歴史的側面

低周波音は軍が砲兵を検知・発見するために受動的に使うことが多かったのに対し、軍による実際の武器使用については何も知られていません。2つの低周波レビュー記事では、イギリスと日本がこの可能性を調査した兆候があり、一定の距離での致死的使用には非現実的な高い電源出力が必要であることが示されています。²³ 低周波音の非致死的使用に関しては、1969年の暴動鎮圧に関する書籍で、音を武器として使う理論が多くの科学論文で議論されていた(ただし原著者は確認できない)、超音速および亜音速の音響装置が暴動鎮圧のために試験され、これらの機械は一般的に高価すぎるということが判明したと述べている。扱いが悪くて焦点が定まらない。²⁴ 唯一詳細に議論された音響装置「カードラー」または「ピープルリペラー」は、350Wの増幅器で増幅され、10m距離で120dBの悲鳴のような脈動音を発すると言われていました。²⁵ 1971年、英国王立軍事科学大学の短期調査では、尋問抵抗の減少、敵部隊のストレスの誘発、低周波音速の障壁の生成、敵構造物の迅速な破壊が言及されていました。²⁶ 少し後、雑誌『ニュー・サイエンティスト』は、北アイルランドで抗議者に対して英国陸軍が使用した武器の報道の文脈で、「スクワークボックス」という装置の成功した試験について報じました。これは、2つのほぼ超音波周波数(例:16.000kHzと16.002kHz)を発生し、耳の中で結合してビート周波数を形成するとされる装置です。例えば、2Hzは耐え難いと言われていました。²⁷ 国防省は装置の存在を否定した。²⁸ 後の書籍では、この作品が完全には発展していなかったと仮定されていました。²⁹(この可能性については下記5.1.2を参照)。同時期に、95～115dBのレベルでめまいや吐き気などの低周波効果を示す一連の記事がありましたが、他の実験者たちはこれを確認できませんでした。^{1989年} 30人のアメリカ軍は大音量の音楽を使ってノリエガ氏をパナマの避難所から追い出した。³¹

このような音響の応用は物理的な損傷よりも煩わせることで機能するため、ここではこれ以上議論しません。

実際の展開

ニュージャージー州ピカティニー兵器工場にある米陸軍兵器研究開発工学センター (ARDEC) は、低付随被害弾薬プログラムにおける陸軍の取り組みを担当しています。³² 低周波音響学の一つのプロジェクトは、ピストンまたは爆発物駆動のパルサーで空気をチューブ内に強制送り込み、高出力ビームを発生させて小さな密閉体積に照射する方法です。別のプロジェクトは、高周波音を使って1~2mのアンテナディッシュから非回折音響「弾丸」を投射する可能性を扱っています。いずれもカリフォルニア州ハンティントンビーチのサイエンティフィック・アプリケーションズ・アンド・リサーチ・アソシエイツ (SARA) によって実施される予定でした。^{ロシアでも}³³ 件の類似プロジェクトが進行中とみられています。モスクワの非致死性影響装置試験センターでは、長年の米国 NLW 支持者 J. と C. モリス夫妻が、野球ボール大の約 10Hz の音響パルス数百メートルにわたって発射し、致死レベルまで拡大可能な装置を見せられたと報告されています。もう一つの原理は、通常は聞こえない2つのビームの交差点で発生する「ディフェランス」(おそらく差分)音でした。³⁴(音響弾丸や2つの超音波場からの可聴または低周波の生成については、下記 5.1.3 および 5.1.2 を参照)。米国のプロジェクトと同様に、信頼できる公的情報は得られていません。

現在入手可能な最も具体的な情報は、1996 年の SARA 報告書の最初の数ページに収められており、最近の概観記事で報告されています。³⁵

- ◆ 人間への影響に関しては、いくつかの主張があります:110~130 dB の低周波は腸の痛みや激しい吐き気を引き起こすとされています。極端な不快感や気が散ることは、低周波(5~200 Hz)で 90~120 dB のレベルに数分間曝露され、140~150 dB で強い物理的外傷や組織損傷、170 dB を超える瞬間的な爆風型外傷(レベル単位デシベルの説明は下記参照)から生じます。低周波では体内の共鳴が出血や痙攣を引き起こします。中音域(0.5~2.5kHz)では、体の気腔内の共鳴が神経刺激、組織損傷、熱を引き起こします。5kHz から 30kHz の高音・超音波周波数は、致死的な体温への熱化、組織の火傷、脱水を引き起こします。そして、より高い(またはより)の周波数や短いパルスで、キャビテーションから泡が形成され、組織内の微小病変が進行します。
- ◆ 現在開発中ののは、ヘリコプター展開用の非致死音響兵器(100Hz から 10kHz まで調整可能、射程 2km 以上、目標 10km)、車両搭載の燃焼サイレン(数キロワット出力、低周波音響)、そして大量破壊兵器収容施設向けの地域遮蔽用の音響ビーム兵器で、熱音響共振器を用いて 20~340Hz で動作します。
- ◆ 化学燃料の燃焼を用いて、平均出力をメガワットに拡大することも可能で、燃料タンクの貯蔵能力は固定場所で 1 か月以上維持可能です。
- ◆ 音響兵器は、包囲された米国大使館、群衆制御、境界線や国境のバリア設置、地域封鎖

や地域攻撃、兵士や職員の無力化などに使用されます。特に低周波および音声領域に関して、効果に関するいくつかの主張は批判的な評価に耐えられないことに注意が必要です。³⁶ 同じことがキロメートルの範囲でも同様です。³⁷ SARA は以前の主張をその正確性を確認せずにそのまま受け取っているようです。³⁸ ドイツでは、ミュンヘンのダイムラー・ベンツ・エアロスペース(DASA)が 1995 年に国防省のためにあらゆる種類の非致死兵器の詳細な調査を行いました。技術や効果の説明の多くは健全ですが、音響兵器のセクションには誤りがあります。³⁹ 最近、ドイツのフラウンホーファー化学技術研究所は、試作機の開発と強い音の抑止効果の試験を任されました。⁴⁰

この記事の目的

私の知る限り、音響兵器は詳細な公共科学的分析の対象にはなっていません。これらは 1978 年の書籍の一部と 1994 年の会議の寄稿で議論されており、いずれも人道法上の懸念を動機にしたものでした。しかし、これらはかなり短く定量的ではありません。⁴¹ 最近の記事ははるかに包括的ですが、音響兵器の開発に携わる企業、防衛メディア、軍事研究開発機関の一般的な見解に大きく依存しています。著者は「高出力音響ビームによる被害について、より洗練され、より包括的な理解」を求め、人道法コミュニティに評価と議論への関与を求めています。⁴² 本記事は、軍事作戦、人道支援、軍縮、その他の政治的側面に関する真剣な分析が不完全または不明瞭な情報源に頼らなくて済むよう、より多く信頼できる情報を提示することで、その目標に寄与することを意図しています。この研究は、音響兵器の研究開発で得られた科学技術データや独自の実験にアクセスできず、公開文献と私自身の理論分析に基づいています。何か見落とされていたのかもしれませんが。時には推測が避けられない場面もあります。そしていくつかの疑問は未解決のままであり、今後の研究で答えが出ることを願っています。答えるべき質問は以下の通りです：

- ◆ 強い、特に低周波の音が人間に与える影響は何でしょうか？
- ◆ 永久的な損傷の危険はありますか？
- ◆ 音源の特性(特にサイズ、質量、必要な電力)はどうなるのでしょうか？
- ◆ 強い音はどのように、そしてどこまで伝播するのでしょうか？
- ◆ 警察や軍による実用的な使い方について結論を出せるのでしょうか？

以下の小節では、音響に関するいくつかの一般的な注意事項が紹介されています。主要なセクションは、強い音が人間に与える影響、強い音の発生、保護措置、そして治療について扱っています。最後に予備的な結論が示されます。付録ではまず、空気中の圧力波のいくつかの性質について言及しています。次に、ジャーナリズム記事でなされた音響兵器に関する疑惑を分析します。

音響に関する一般的な考察

広義には、時間をかけた空気圧の変化は音を構成します。正弦波の時間経過では、時間

単位あたりの繰り返し回数を周波数と呼び、ヘルツ=1/秒で測定されます。通常、20Hz 以下の周波数領域は「インフラサウンド」と呼ばれますが、これは絶対的な聴覚上限ではなく、圧力が十分に高ければ、より低い周波数の音も聞こえたり、他の方法で知覚されたりすることができます。「可聴」という用語の誤解を避けるため、本記事では 20 Hz から 20 kHz の範囲を「オーディオ」と呼びます。聴覚、痛み、損傷の閾値は、数 Hz から 20~250Hz の間で周波数が増加するにつれて低下します(下の図 2 参照)。したがって、低周波効果は低音の音響でより強く感じられます。したがって、ジャーナリスティックな記事では低周波に重点が置かれているにもかかわらず、ここでは 1Hz から 250Hz の範囲を「低周波」と区別し、共通して扱っています。20kHz を超える周波数では、通常の「超音波」という用語が使われます。気圧変動とは、平均気圧から高圧・低圧への偏差を意味し、過圧と過少圧で表されます。通常、これらの偏差は空気圧よりもはるかに小さいです。これらは音圧と呼ばれます。音圧や強度は桁違いに変化し、人間の音量感覚はほぼ対数的であるため、これらの物理量はしばしば対数スケールのレベル L(デシベル単位)として表されます。

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) \text{dB} \quad \text{and} \quad L_I = 10 \log \left(\frac{I_{rms}}{I_{ref}} \right) \text{dB} \quad (1)$$

P_{rms} と I_{rms} は、それぞれ音圧(静気圧からの偏差、パスカルで測定)と音の強度(面積あたりの音響出力、音圧の二乗に比例し、ワット/平方メートルで測定)の平均二乗平方根の値です。圧力が 10 倍に増加すると、強度は 100 倍に増加し、レベルは 20dB 増加します。音響系では基準値として通常

$$P_{ref} = 20 \mu\text{Pa} \quad \text{and} \quad I_{ref} = 10^{-12} \text{W}/\text{m}^2 \quad (2)$$

選ばれている。これらの値は、最も感度の高い周波数に近い 1 kHz の人間の聴覚閾値に相当します。したがって、式(A-2)と音響空気インピーダンスが通常条件下で、圧力と強度の両レベルは等しい。 $\rho_0 c_0 \sim 400 \text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})$ 本記事では通常「44 レベル」がこれらの値を指します。人間の感度を含む周波数加重レベルスケール(dB(A)など)は、使用時にそのように表されます。

空気中の圧力波の最も重要な特性は付録 1 で述べられています。音圧が非常に強くない場合、例えば 100 Pa(レベル 134 dB)、通常圧力の 0.1%未満の場合、その効果は線形方程式で記述できます。音速は一定であり、重ね合わせ原理は例えば光学(線形音響)において次のように成り立ちます。より高い値では、それでも大気圧以下では、圧力に伴う伝播速度の増加が重要になり、波は伝播するにつれて急になります。過圧はほぼ同じで、伝播速度は小振幅(非線形音響、弱い衝撃波形成)と変わりません。このような非線形効果は、音響兵器で起こるとされる周波数変換において重要となるでしょう。過圧が静止時の圧力より大きい場合、例えば爆発による爆風の場合のように、衝撃速度は大幅に速くなり、低圧の振幅が等しくなくなる(強い衝撃)。爆風兵器を「音響」兵器として数えるのは問題があるように思えます。そうでなければ、多くの種類の爆発砲弾、爆弾、燃料空気爆薬が同じカテゴリーに入るでしょう。⁴⁵ しかし、完全性を保つために、一方から他方への

滑らかな遷移と、この文脈で爆風波が言及されているため、⁴⁶ 強い衝撃波も本件の考慮に含めています。

強い音が人間に与える影響⁴⁷

強い音は一時的または恒久的に聴力を低下させ、前庭器官に影響を及ぼすことがあります。極端なレベルでは、短時間の曝露でも耳の臓器に物理的な損傷が起こることがあります。さらに高レベルでは、爆発による過圧パルスでしか起こりませんが、他の臓器も損傷し、特に肺が最も敏感です。

この節では、まず耳の一般的な特性と損傷について説明します。以下の部分では、低周波に特に重点を置いています。これは、低周波の効果が音声領域よりも知られておらず、音響兵器に関する多くの出版物で言及されているためです。高周波の音響や超音波については比較的簡単に扱われます。特別な小節では、爆発性爆発などの衝撃波を扱います。

このセクションの最後の表9は、異なる周波数帯域におけるさまざまな効果の簡略化した要約を示しています。

耳に関する一般的な考察⁴⁸

聴力と聴力の損傷

人間の耳(図1)では、耳道に入る音波が鼓膜を振動させます。この動きは、迷路の入口にある楕円形の窓に3つの中耳小骨と結びついています。蝸牛外リンパを伝わる圧力波は基底膜を曲げ、蝸牛を縦方向にスカラ前庭とスカラティパニへと分離させます。これら2つの管は蝸牛の先端でつながっており、後者は中耳の丸い窓へと戻っています。基底膜はコルチの有毛細胞を運び、これらの細胞は変形を感知し、この情報を神経節細胞を通じて脳に伝えます。耳管は中耳と鼻腔をつなぎます。蝸牛には前庭器官の空洞と3つの半規管があり、頭部の動きを感知し平衡を維持するのに役立ちます。

中耳には内耳にかかる振動を減らす仕組みがあり、これにより聴覚の限界を定義し、強い音による損傷を軽減します。非常に低い周波数では、耳管が圧力均等化を提供できません。強い騒音の発生から約0.2秒後に中耳の筋肉(鼓膜テンソルとマリウム)を収縮させる聴覚反射は、耳小骨の伝達を弱めます。耳小骨の機械的特性により、約20kHz以上の周波数は送信されません。

強い音にさらされると、聴覚系は通常感度が低下します。つまり、聴覚の閾値がより高いレベルにシフトされます。周波数依存の音響レベルや持続時間の制限を下回り、次の休養期間が十分であれば回復が可能です。これは一時的しきい値シフト(TTS)と呼ばれ、通常はノイズ終了から2分後に測定されます。TTSレベル約40dBまでは回復がスムーズで、ほぼ16時間以内に完了します。一定の限度を超えると回復は不完全であり、永久的な閾値シフト(PTS)、すなわち永久的な聴力損失が残ります。このいわゆる「騒音性聴覚

障害」は何らかの累積性があるため、曝露基準にはスペクトルの組成やレベルに加え、持続時間と回復時間も含めなければなりません。⁵⁰

TTS は人間を対象とした実験で研究可能ですが、PTS は事故や作業音などで怪我をした人に頼る必要があります。もう一つの方法は動物実験ですが、もちろんその結果は人間に直接適用することはできません。モデルシステムの動物種として、チンチラ、モルモット、猫などが選ばれ、人間よりも感受性が高いと考えられています。また、犬やサル、爆風には羊も使われています。

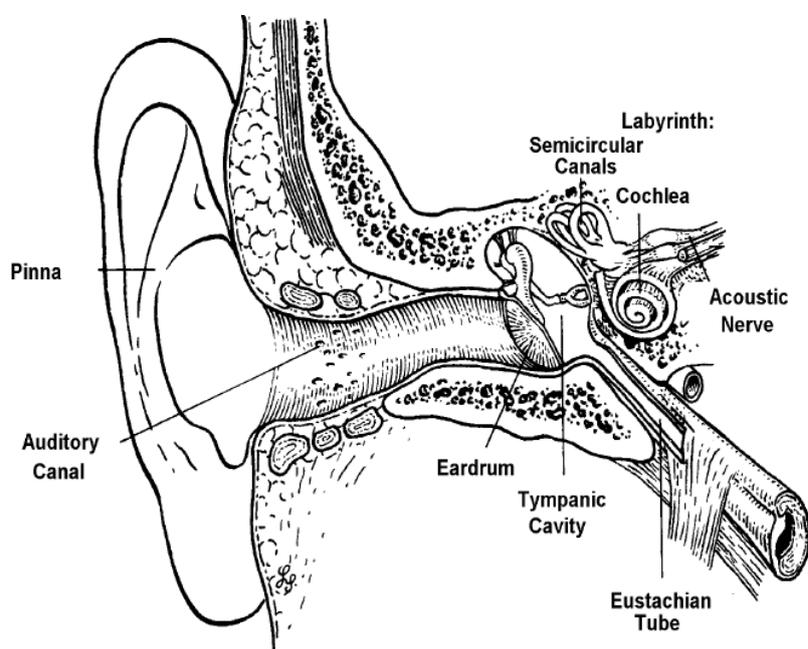


図 1: 人間の耳は外耳、中耳、内耳の 3つの部分で構成されています。耳細根に反射され、耳道を伝わる音波は鼓膜(鼓膜)に振動を生み出します。中耳の 3つの耳小骨(槌骨、砧骨、鐙骨)はこの動きを伝達し、圧力を増加させて迷路の入口の楕円形の窓と内側の外リンパに伝えます。その結果生まれた圧力波は蝸牛に伝わり、蝸牛を縦方向に分けて感覚毛細胞を運ぶ基底膜を曲げます。その興奮は聴神経によって脳に伝達されます。中耳の圧力均等化は耳管を通じて可能です。中耳筋(写真には描かれていません)は、耳小骨鎖の伝達を抑制することがあります。迷路の第二部は前庭器官で、その空洞と運動を感知するための半円状のチャンネルがあります。(参考文献 49 から修正、著者および出版社の許可を得て使用;元の著作権:Springer-Verlag)

どのノイズがより大きな PTS(高レベルまたは長時間)を発生させるかは TTS に基づいて予測できます。期待 TTS を使ってノイズから PTS を定量的に推定する複雑な手法があ

り、20年間ほぼ毎日曝露された後のPTSは8時間後のTTSとほぼ同じであると推論しています。PTSは、蝸牛の基底膜上の感覚有毛細胞を損傷する機械的および代謝的プロセスによって生じると考えられています。PTSもTTSも、被験者によって比較的ばらつきがあります。通常、最初に4kHzで最も強く発生し、その後低周波や高周波に広がり、職場の雑音スペクトルとは比較的独立しています。聴力損傷の測定と記録、生理学的メカニズムの理解、リスクの定量的推定、予防措置の限度提案、許容可能な損傷の検討、影響を受ける人の割合など、あらゆる側面に関する文献はかなり多いです。主な懸念は、例えば職場でのPTSが80dB(A)未満のレベルで検出されるなど、長年曝露の累積影響にあります。通常は80から105dB(A)の範囲が重要です。しかし、強い音に一時的に一度または数回の短期的な曝露による損傷も生じます。これはしばしば「音響外傷」と呼ばれます。

⁵¹ その内耳への影響は、毛細胞の毛の乱れからコルティの臓器の完全な破壊まで多岐にわたります。さらに、神経節細胞や神経線維が退化することがあります。

図2は、人間の聴覚閾値と非常に低い周波数から高周波までの等しい知覚音量の曲線を示しています。⁵² ご覧の通り、電話で測定された知覚される音量は、各周波数の音圧に伴って約対数的に増加します。また、音響兵器の判断に重要な聴覚システムへのダメージ効果の閾値も描かれています。

◆ 聴覚の危険の閾値 - 最初の閾値を超えると、特定の条件下で永久的な難聴の危険があります。騒音レベル、持続時間、曝露回数とスケジュール、個人の変数。閾値に近い場合、その期間は長年にわたって1日数時間の曝露に及ぶことがあります。第2閾値、120dBを超えると、不快感が始まる場所では、短時間かつ少ない曝露(インパルス音を除く)でも難聴のリスクが高いです。

◆ 聴覚痛 - これは音声領域全体で約140dB(200Pa)以上で発生します。しかし、低周波帯域では周波数が低下するにつれて閾値が160および170dB(2kPaおよび6kPa)に増加します。静圧の場合、約173dB(9kPa)の過圧、約177dB(14kPa)の過圧で痛みが発生します。痛みは中耳系の機械的限界を超えたときに生じると考えられており、感覚過敏や聴力の損傷とは直接関係していません。痛みがなくても損傷が起こることもあれば、その逆もあります。しかし、通常の条件下では痛みを感じたら曝露を中止すべきです。

◆ 鼓膜破裂 - 音声領域の閾値は約160dB(2kPa)です。静的過圧へのステップでは、閾値は186~188dBです

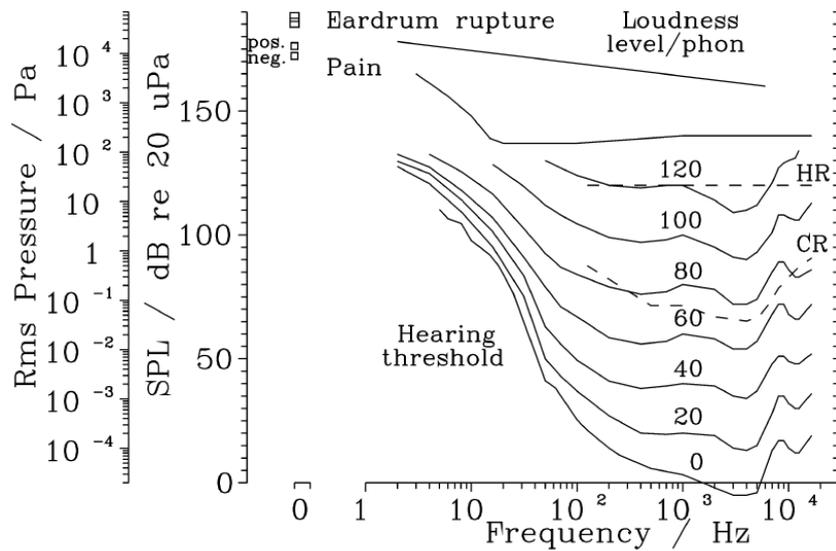


図2: 聴覚のしきい値(0の電話対応)、20、40、60、80、100、120の電話で等しい知覚音量の曲線、rms音圧(対数スケール)、およびその音量と周波数の比較。しきい値は純音のバイノーラル聴覚用です。モノラル知覚の閾値は高いです。また、条件付き(CR)と高リスク(HR)の永久難聴(ダッシュ)、聴覚痛、鼓膜破裂の閾値も示されています。高リスク閾値は不快感にも当てはまります。くすぐり感覚の閾値は痛みの閾値より少し低いです。特に鼓膜破裂の場合、閾値は大まかにしか分かっています。左側には静圧の痛みと鼓膜破裂の閾値が示されています。痛みの場合、過圧(pos.)とアンダープレッシャー(負)の値はわずかに異なります。通常大気圧は101 kPaであることにご注意ください。⁵³

(ピークは42~55kPaです)。膜破裂は通常治癒しますが、中耳や内耳の損傷は残ることがあります。しかし、破裂は一種のヒューズとして内耳に伝わる圧力を減らし、その結果、内耳の永久的な損傷を防ぎます。

前庭系

内耳の前庭系には、線形加速度のセンサーを備えた空洞(瞳孔と包)と角加速度を感知する3つの半円形チャンネルがあります。前庭系は、中枢神経系の複数の、主に無意識のチャンネルを通じて眼球運動や姿勢の変化を引き起こし、動きや方向感覚の知覚を提供します。前庭系は乗り物酔いの原因となるセンサーの一つであり(他の2つ、視覚系と体性感覚系は現在の文脈ではあまり重要ではありません)。

前庭器官の液体(内リンパおよび外リンパ)は、螺旋蝸牛の液体とつながっています。したがって、バランス器官への音響刺激は原理的に可能であり、これが超音波によるめまいや吐き気の発生メカニズムとされています。以下では、人間と動物で観察された効果と閾値について、異なる周波数帯域について説明します。

低周波音の影響

1960年代から1970年代にかけて、低周波音に誇張された効果を帰する動きが一般メディアだけでなく起こりました。⁵⁴ これらの多くは逸話的なものでした。場合によっては、ある実験室で観察された効果が別の実験室で再現できない場合もあります。その一因は、テストシステムにおける高調波の発生かもしれません。

低周波における聴覚閾値と響き知覚

聴覚は20Hzを下回ると突然止まることはありません。慎重な測定が示すように、十分な音圧があれば耳は約1 Hzまで低周波を感知できます。しかし、約50Hz未満では、周波数が低下するにつれて聴覚閾値が急激に増加し、図2.55に示されています。低周波数では等大きき曲線がより近くなります。つまり、音圧レベルの方が高音域よりも音圧の方がはるかに速く増加することを意味します。また、低周波では痛みの閾値が聴覚閾値に近いです。

低周波音が耳と聴力に与える高強度の影響

人間の聴覚系は低周波曝露に対して比較的耐性があるようで、特に低周波では非常に高いレベルでもTTSは一部だけでPTSは発生しません(表2)。低周波音は、中耳の(準)静的負荷が内耳への伝導を減らすため、高周波ノイズからのTTSも減少します。例えば、職場で低周波ノイズにさらされた人々で観察されたPTSは、主に高周波の存在によるものである可能性が高いです。

表 2: 人間における低周波音の聴覚的影響。聴覚範囲ではるかに感度が高いチンチラは、1~30Hzの周波数、150~172dBのレベルにさらされた後、中耳と内耳に明確な損傷が見られました。

周波数 /Hz	レベル / dB	期間	効果
<1 - 20	125-171	分	多くの場合、音声周波数でTTSが行われます。 30分以内に回復 3 または 23 130 1 h
3 か 23 か	130	1 時間	TTS はありません
低い音	90	多くの 営業時 間	TTS、最大 2 回の回復 日々
≤ 40	140-150	0.5~2 分	PTS はありません

シミュレーションエア バッグ インフレ:			
低周波部分(約 5Hz)	165 のピーク	0.4 秒	TTS はありません
高周波部分 (0.5-1 kHz)	153 rms	0.4 秒	TTS 5-8 dB、1.5-12 kHz
両方を一緒に分割しま す	約 170 年のピ ーク	0.4 秒	TTS 2-3 dB(1.5-12 kHz)での
ソニックブーム (主に 2-20Hz)	162-171 ピー ク	秒	PTS はありません

低周波音が前庭系に与える高強度の影響

前庭の興奮は反射的に生じる眼球運動(眼振)や、人間の場合はバランス試験の性能によって測定できます。動物でも人間でも、130~172 dB の低周波による影響は観察されませんでした。したがって、ジャーナリスティック記事で強烈な低周波音に起因するとされるめまいや吐き気の影響は確認できません。一方で、50~100Hz の低音域で 150~155dB の低音域は軽い吐き気やめまいを引き起こしました。

低周波音が呼吸器に与える高強度の影響

0.5Hz の強い低周波音は人工呼吸のように働くことがあります。154 dB(1.0 kPa)から 171 dB(ピーク 6.9 kPa)の間のソニックブーム(主エネルギー)への曝露は、人間の呼吸器系に悪影響を及ぼしませんでした。

50Hz 以下の低音域では、最大 150 dB(0.63 kPa)への曝露により、胸部壁の振動や呼吸リズムの変化、さらに咽下部満腹感(むせる)感覚が現れました。これらの影響は不快感がありましたが、明らかに耐えやすいものでした。しかし 50~100Hz の間では主観的な許容差に達し、150~155 dB(0.63~1.1 kPa)で露出が中断されました。呼吸関連の影響には、肋下不快感、咳、重度の胸骨下圧迫感、窒息呼吸、咽下部不快感が含まれます。⁵⁸

低周波音のその他の高強度効果

他にも、150dB 程度の強烈な低周波(30~100Hz)音に曝露された際には、いくつかの効果が観察されました。その中には脈拍の増加、皮膚のほたみ出し、唾液分泌、嚥下時の痛みなどが含まれていました。視野が振動し、視力が低下しました。被験者は曝露後に著しい疲労感を示しました。一方で、短時間の低周波音は視力、運動活動、発話には影響を与えませんでした。

振動の考慮事項

低周波は外部の振動が身体に加わるのと同様に臓器を動かすと主張されることもあります。共通点はあるが、重要な違いもある。

立っている人や座っている人の垂直振動励起の場合、2Hz 未満では全身が動く。上記では、共鳴による増幅は、体の部位、個人、姿勢によって周波数によって起こります。主な共鳴は約 5 Hz で、最も不快感が発生します。その理由は、腹腔内のすべての臓器が同位位で動き、それに伴い肺の容積や胸壁に変化が生じるためです。⁵⁹

ゆっくりとした気圧の変化が人体に影響を及ぼす場合、条件は異なります。低周波では、体の寸法が波長より小さい場合、例えば 170 Hz 以下の周波数で 2m 以上の場合、同じ瞬間圧力がどこにでもかかり、組織は空気よりもはるかに低い粘弾性流体として振る舞います。⁶⁰ これにより多少の振動が生じますが、大きなインピーダンスのミスマッチにより、ほぼすべてのエネルギーが反射されます。例外は、耳のように空気の体積が柔らかくなっている場合や、肺のように外部からの圧力や力を加えると胸壁や腹部が動きやすくなる場合です。外部圧力が同時に気管を通過して肺に入り出る空気の流れを生み出すため、内圧が胸壁や腹部の動きを打ち消します。このシステムは単方向振動励起よりもはるかに硬く作用し、共鳴(音圧あたりの最高速度、したがって組織ひずみも最大)は 40~60Hz で、その 10 分の 1 ではありません。

高強度・高周波音声の影響

耳と聴力への影響

PTS は主に 10 年以上にわたる職業曝露で観察・研究されており、80 dB(A)未満の加重レベルから通常 120 dB(A)未満まで幅広く見られます。TTS と PTS に対する感度は、だいたいラウドネスの輪郭に沿っています。しかし現時点では、問題はより高いレベルでの短期エクスポージャーに関するものです。

単発または少数の曝露(音響外傷)による永久的な損傷の危険性については、人間を対象とした実験研究は当然ながらあまり多くありません。期待される効果を推定するために、関連する TTS 実験を評価し、TTS と PTS の並列性から得られる損傷基準を用い、動物実験から慎重に結論を導き出すことができます。表 3 は、高濃度での短時間曝露が必ずしも人間で PTS を発生させる必要はないことを示しています。表 4 は動物を用いた PTS 実験の結果を示しています。

表 3: 高周波音響が人間に与える聴覚的影響。高い音域では、人間は約 1kHz よりはるかに感受性が低いです。

頻度 / kHz	レベル / dB	期間	TTS	PTS	発言
0.1, 1, 2, 4	110, 120, 130	1 - 64 分	最強の場所 4 kHz、かなり	いいえ 証拠	

			1歳の時は少なくなかった および2 kHz、 ましてや 0.5 kHz; 回復 60 dB から TTS は最大で 5日間		
0.25 - 5.6	最大>140 人	多くの 秒		当然だ なし	くすぐりの 検査 そして痛み しきい値
ブロードバンドノイズ (0.5-1 kHz、シミュレート) エアバッグ インフレ)	153 rms	0.4 秒	TTS 4-8 dB 1.5-12で kHz、消失 その後 分	なし	若く、 健康な男性
ジェットアフターバーナー 騒音	> 140	秒単 位で ある 時		一貫性はあり ません PTS 数回の後 数ヶ月	フライトデ ッキ/ 飛行場の敷 地 参加メンバ ー
9 - 15	140 - 156	5 分	露出時の TTS 周波数 および あれは速い 回復	なし	

表 4: 動物における高周波音響による PTS および生理的損傷。猫実験では、すべての周波数で 10dB の増加が蝸牛の最小限から深刻な破壊への移行を示しました。

動物	周波数 / kHz	レベル / dB	期間	PTS	生理学的 被害
チンチラ		~ 120	~ 1 時間		毛細胞への損傷な

					ど。
モルモット	0.19 -8.0	135-140	数分		重度の毛細胞損傷
		>40	数分		コルティのオルガンはそれぞれ最も影響を受けた場所で破壊されました
猫	0.125	150	4 時間	なし	一般的な毛細胞の損失-機能障害に類似する
		153-158	4 時間	部分的に/ 完全聴覚障害者	
	1.0	120	1 時間	なし	
		130	1 時間	55 dB 2kHz	
		140	1 時間	全周波数で聴覚障害者	
	2.0	140	1 時間	2 kHz で聴覚障害者	
	4.0	135	1 時間	害者 \geq	
		140	1 時間	なし 4 で 60dB kHz	

短時間の露光による音響外傷は、レベルと持続時間の臨界的な組み合わせを超えて発生し、これはコルティの臓器の一種の「弾性限界」に対応します。チンチラとモルモットの実験では、持続時間と強度の二乗が一定であれば、広範囲の損傷はほぼ同じでした。つまり、レベルが 5dB 増加するごとに持続時間を 10 で割る必要があります。同じ法則が人間にも当てはまると仮定し、人間の感度に近いモルモットの聴覚外傷による聴力損失を分離した臨界値を取ると、例えば 135 dB で 40 秒の曝露、140 dB に 4 秒、150 dB に 0.4 秒の曝露という代替の組み合わせが導かれます。61 したがって、痛み閾値での単発曝露は音声範囲(140 dB)は危険になり、影響を受けた大多数の人で約 30 秒後に顕著な PTS が発生し、それ以上は徐々に短い間隔で現れます。

高音域での鼓膜破裂は 160 dB(2 kPa)を超える閾値を超えると予想されます。⁶²

高強度・高周波音響の非聴覚的效果

人間の前庭反応は約 125 dB を超える音によって誘発されます。ジェットエンジン付近の約 140dB のレベルでは、臨界回転速度で平衡乱れが感じられました。これらの著者は類似した影響についていくつかの口頭報告を引用し、自身も頻繁に引用されていますが、そ

の条件や原因は十分に分析されていないようです。⁶³ 動物における高レベルの影響は、眼球運動から前庭臓器の重篤な病変まで多岐にわたります。高周波の音声では、圧力変化があまりにも速く起こり、体壁や臓器、気管内の空気の大きな動きには耐えられないため、呼吸に悪影響は期待できません。しかし、開いた口や鼻腔、副鼻腔での共鳴は、120dB を超える触覚やくすぐったさを感じることがあります。

160dB 以上のレベルでは加熱が重要になります。インピーダンスの不一致により裸の皮膚では吸収が小さいのに対し、繊維、髪、毛、狭い管など、強い摩擦が空気の動きを妨げる場所では強く吸収されます。高周波音声領域で 140 dB を超えるレベルは非常に稀であり、職場の人々はそもそも耳を保護する必要があるため、このような騒音による聴覚的・非聴覚的損傷はほとんど説明されていないようです。⁶⁴

高強度超音波の影響

1950 年頃、新たに導入されたジェット機の周辺で働く職員が頭痛、吐き気、疲労などの症状に関連した「超音波病」の話題と恐怖が増えました。その後、産業界で洗濯機やその他の超音波機器を扱う人々からも同様の苦情が寄せられました。しかし、これらの効果はむしろ高周波および時には低周波のオーディオノイズが同時に存在することによって引き起こされたようです。

強い超音波の聴覚的影響

聴力の上限は被験者によって異なり、年齢とともに低下します。骨伝導による聴覚効果は引き起こされますが、空気中の超音波(20kHz 以上)はほとんどの人が聞こえるわけではなく、人間の耳に顕著な影響を与えません。被験者が 17 kHz の高音波および 21~37 kHz の超音波音を 148~154 dB のレベルにさらした際、最初のサブハーモニクス(半周波数)で TTS が見られ、高 2 つの励起周波数では 2 番目の倍音でも TTS が見られました。これらのシフトは急速に消え、PTS は残りませんでした。

モルモットやチンチラの電気生理記録で観察されるサブハーモニクスの非線形発生を考慮し、損傷リスク基準を超音波領域に拡張し、110 dB の制限を提案しました。

強い超音波の非聴覚的影響

労働者が疲労、頭痛、耳鳴り、吐き気を経験した超音波洗浄機やドリルの分析では、可聴周波数でもかなりのレベルがあり、それが原因と特定されました。TTS 検査では最大 154 dB まで前庭への影響は報告されませんでした。急激な気圧変化のため呼吸器への影響は期待できません。

極端な音量、最大 160~165dB のサイレンに近い音速では、超音波でも口や鼻のくすぐったいが観察され、高周波の音声でも観察されました。このようなレベル、例えば高音周波数では、加熱は主に狭い通路や摩擦の強い場所で起こります。⁶⁵ 上記では、裸の肌

でも熱を感じます。

インパルスノイズと爆風効果

インパルスノイズは射撃や産業現場で発生します(表 5 参照)。ここで特に注目すべきは、玩具の武器や爆竹による過圧が、実際のライフルや砲兵の砲手が受ける圧力と同じ範囲にあることです。ただし、持続時間やパルスエネルギーは異なる場合があります。

爆発時には、過圧は通常の大気圧の何倍ものもの圧力に達することがあります。圧力の時間経過は通常、強い衝撃波の流れ、すなわち急速に増加し、その後負の位相を介して緩やかでほぼ線形に減少する過程です。しかし、壁があると反響が起これ、耳が曝露される時間とエネルギーが増加します。

表 5: 複数のインパルスノイズ源のピーク圧力値(作業員、射手、砲手の)耳位置で測定。通常大気圧は 101 kPa であることにご注意ください。

出典	ピーク過圧 / kPa	ピークレベル/dB
ドロップフォージ	0.11	135
壁にボルトを撃つ、80 CM	0.63	150
8 種類の玩具ピストル、50cm 口径	0.63-2.0	150-160
3 種類の玩具紙キャップ銃、30 CM	0.89	153
8 種類の爆竹、3 m	0.063-63	130-190
ソニックブーム低空飛行 航空機(N 波)	2.4-6.9	162-171
ピストル	5.0	168
ライフル	1.7	159
4 丁のライフル	1.78-8.43	159-173
自動小銃	7.2	171
フィールドキャノン 105	50.3	188.0
第 17 ポンドロイト T/A 砲	54	188.6
3 インチ迫撃砲ショート	58	189.2

インパルスノイズの聴覚的影響

インパルスノイズへの曝露は連続ノイズと同様の効果を引き起こします。低レベルでは TTS が存在し、最初は 4~6kHz で始まります。長期間にわたる繰り返し曝露では、これが PTS に発展し、より広い周波数帯域に影響して悪化することがあります。高レベルでは、たとえ一つか数回の出来事でも永久的な損傷が起こることがあります。インパルスの

場合、個々の感受性は連続ノイズよりもさらに大きく異なります。これは、人間の TTS および PTS データを示す表 6 の最初の項目で示されています。0.36 kPa の過圧(145 dB)でも耳の痛みが起こることがありますが、両方の鼓膜が破裂しても痛みを感じないケースもあります。表 7 は動物実験の結果を示しています。インパルスノイズの場合、TTS は曝露後最初の数時間で増加することが多いです。

表 6: インパルスノイズと爆風波が人間に与える聴覚的影響。

ピーク レベル / dB	パルス 期間	番号 パルス	TTS	PTS	発言
140	2 ミリ 秒	75	4 kHz で 40 dB	なし	最も敏感な 主題
155	2 ミリ 秒	75	< 4 kHz で 40 dB	なし	イースト・ センシティブ 主題
159	ライフル 射撃		30 - 80、回復 最大 6 日間で	なし	射手 ポジション
189	銃声		30 - 80、回復 最大 6 日間で	なし	砲手 ポジション
180-183	ブラン クショ ット		30~80 日、回復 は最大 6 日で済 みます	なし	ライフル近 くの耳 マズル
186-189	3 イン チモル タル	最初の 一発 80 分後 の 2 発 目。	5.8kHz で最大 75dB 2 ヶ月で 5.8kHz までの回復	8.2kHz および 9.7kHz での 50 dB	モノラル 曝露 - 痛 み、耳鳴り 鼓膜破裂、 出血
爆竹は耳から 0.5m 離れた 場所です		1		3 kHz で 60-80 dB \geq	男子学生
0.5m で 150- 160	玩具の 武器		人口の 2~ 5%(600 人)で す。	人口の 2.5%で、 4kHz で平均降温 は 29dB です	インドの村 祭り
3m で 130-	爆竹		人口の 2~	人口の 2.5%で、	インドの村

190			5%(600人)です。	4kHzで平均降温は29dBです	祭り
162-171	40～400 m	多くの		なし	ソニックブームN波

表7: 動物におけるインパルスノイズによるTTS、PTS、生理的損傷

動物	動物	番号 パルス	パルス 期間	TTS	PTS	生理学的 損傷
リスサル	168	2 10 - 20 もつ と	60 S ポ μ 、100 ミリ秒のネガプリント。	14kHzで 33 dBの 中央値	いく つか 最大 15人 まで dB 中 央値	眼球または長期的な 毛細胞の喪失
チンチラ	131, 135,139, 147	1, 10, 100	～5ミリ秒(反響)	平均15 - 90 dB	0-45 dB 平 均	PTS とほぼ並行する 毛細胞の損失
ギニア豚	153	500	35 μ S Pos. Press。(おもちゃのキャップガン)			局所的な有毛細胞損傷は2kHzで125～130dBの範囲で4時間持続しています

インパルスノイズへの安全な曝露を考慮する際には、ピークレベル、持続時間、スペクトル内容、一時停止間隔、インパルス数を考慮する必要があります。短いインパルスの基準として、ピークレベルは162 dB(2.5 kPa)とされています。⁶⁶

爆発による過圧の高さについては、戦争や爆撃、そして稀に産業事故で苦しんだ人間の経験が存在します。人体の遺体や動物を用いた製剤の実験も行われています。鼓膜破裂の過圧閾値は35 kPa(ピークレベル185 dB)と示されています(表8)。より短い時間帯でのみ、鼓膜や中耳の慣性が高压に耐える役割を果たします。

爆弾爆発の被害者の中で鼓膜破裂の発生率が高いです。中耳の耳小骨の骨折や転位は稀です。難聴、痛み、耳鳴り、めまいが最も一般的な症状です。後者はしばしば直接的な

頭部外傷に関係している。小さな鼓膜の破裂でもかなり治癒します。他の症状も通常は時間とともに軽減しますが、しばしば永久的な難聴が残ります。

動物では、大気中の核爆発、ショックチューブ、実弾などを用いて、爆発による鼓膜破裂が何十年も研究されてきました。犬、羊、豚、サルのピーク過圧は人間と似ています。

表 8: 強衝撃波による人間への深刻な被害(例えば爆風によるもの)(圧力が急速に上昇し、その後持続時間に依りてほぼ線形に減少)。各効果には3つの圧力が示されます:影響が起らない閾値、被害が曝露者の50%に影響を及ぼすと予想されるレベル、そして100%のレベルです。圧力はピーク有効過圧(平行なら自由場、垂直入射なら自由場プラス、大きな面の前なら反射圧)です。変動性や人間の場合は実験の利用困難のため、固定値ではなく範囲が示されています。繰り返し曝露した場合、ダメージ閾値は低くなります。短期間の場合は閾値が高くなります。通常大気圧は101 kPaで、ピークレベルは194 dBに相当します。

被害	しきい値 過圧 / kPa	50%の入射率/kPaに 対する過圧	100%の発生率/kPaに 対する過圧
鼓膜破裂 急速上昇、持続時間3およ び400ms。 ゆっくりと上昇/静止中	35 42-55	105 ~150	
肺破裂 持続時間 3 ms 持続時間 400 ms	260-340 83-103	「深刻」 680 260	「深刻」 680 260
死去 持続時間:3 ms 持続時間:400 ms	770- 1100 260-360	1100-1500 360-500	1500-2100 500-690

呼吸器の毛細血管の非常に小さな病変からの出血(無害で自己治癒性のある点状出血)が提案されています。これらは数十キロパスカル(ピークピークレベル約180 dB)で発生します。しかし圧力が高いと、気管だけでなく肺にも大きな出血が発生します。これは打撲によるものです。組織の裂け目は肺の大規模な出血や浮腫、さらには窒息や血管閉塞による死亡につながることもあります。羊が86~159 kPa(193-198 dB)の衝撃波にさらされ、持

続時間は約5ミリ秒の場合、肺損傷は中程度から強いものの、依然として致命的ではありませんでした。人間の肺損傷および死亡に対する過圧の推定値は表8に示されています。

67

表9: 音響兵器に関連するさまざまな効果の閾値(dB)を、異なる周波数帯域(rms レベル)および爆風(ピークレベル)で表現した音響閾値の簡略化まとめ。レベルはおおよそであり、効果は頻度とともに滑らかに変化し、持続時間に依存し、また大きな個別変動があることに注意してください。詳細は本文内の各小節およびそこに示された参考文献をご参照ください。K:キロ(1000)。

分布域	周波数/Hz	耳の痛み	短時間露光による PTS	鼓膜破裂	一過性前庭効果	呼吸器
低周波音	1 - 20	160 ..140 (1 ...20 Hz)	170 まではない	>170	170 まではない	170 まではない
低音	20 - 250	135 - 140	150 まではありません	160	軽度の吐き気	150 の耐え難い感覚
高音	250 - 8 k	140	120 ..135...1501 時...7 分...1-4 kHz で 0.4 秒の最強	160	140 わずかな平衡乱	口の中のくすぐりなど 140。160 の加熱
非常に高い音声/超音波検査	8 k - 20 k/> 20 k	140	156 まではありません	?	154 点まではありません	口の中のくすぐったいなど、140 度。 160 ヒーター
爆風波		145	150 - 160	185	160	200 肺破裂 210 年の死

『ストロング・サウンド』の制作

音声の発生源はよく知られていますが、低周波の音源、特に日常生活で驚くほど高いレベルで発生する低周波音についてはあまり知られていません。したがって、いくつかの低周波源を最初に記述します。次に、武器に使える強力な情報源について議論します。

低周波音の発生源

本来の低周波は、海波、雪崩、山岳地帯の風の乱流、火山噴火、地震などによって自然に発生します。これらの波はごくわずかにしか吸収されず、地面での高反射や大気中の屈折チャネルによって増強されて何千キロも伝わりますが、圧力や周波数は人間には聞こえず、さらに悪影響を受けません。雷鳴は低周波音から低音まで時間的に変化するスペクトルピークがあり、もちろん聞こえます。突風はかなり高い動圧を生み出すことがあります。動圧の式から

$$Pd = \rho_0 v^2 / 2 \quad (3)$$

(海面の大気密度は $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$ です)、したがって最大風速 = 10 m/s の場合、ピーク気圧は 65 Pa、すなわち 130 dB のレベルに相当します。強風速度 40 m/s の場合、1.04 kPa または 154 dB となります。このような圧力変動が痛みを生まないのは、風が秒単位で変動するため、すなわち周波数は 1 Hz 以下かそれ以下です。人為による低周波音は同等かそれ以上の振幅を持つことがあります。密度 ρ_w の水に $\Delta h = 2 \text{ m}$ の深さまで潜ると圧力が上昇します。

$$Dr = \rho_w g \Delta h \quad (4)$$

($g = 9.81 \text{ m/s}^2$ は海面での重力加速度) 約 1 秒間に $p = 19.6 \text{ kPa}$ (レベル 180 dB) の差が出ます。68 他人の耳に吹きかけると 170 dB の音が発生します。走ってもかなりの振幅が出ます。(4) を RMS ヘッド運動振幅 $H = 0.1 \text{ m}$ と空気密度 ρ_0 で適用すると、1.3 Pa (レベル 96 dB) となります。

これらの例は 1 Hz 付近かそれ以下で支配的な周波数を持つ一方で、ジェット機やロケット、エアバッグの膨張音は音声範囲まで届きます。

下層は風力タービン、空調・換気、車内やトラックの内部で発生します。窓を開けると、低周波領域が著しく増加します。産業界では、低周波音はコンプレッサー、クラッシャー、炉などによって発生します。船の機関室では高濃度が発見されています。

最後に、爆風についても触れなければなりません。過圧振幅は任意に大きくなる場合がありますが、その後の負の波はもちろん負の大気圧(海面で 101 kPa)に限定されます。⁶⁹

低周波音の効果を試験するために、特別な試験装置が開発されました。耳のみのテストのために、低周波の 15-W30cm スピーカーにプレートが密着しています。この穴がヘッドセットのイヤードیفENDERに接続されていました。そのため、最大 140 dB (400 Pa) のレベルが達成されました。全身曝露を試験するために、1~2 m³ の試験室がいくつか建設されました。ここでも、チャンバー寸法より大きい波長で外部との圧力均等化を防ぐために密閉が必要です。1つのチャンバーで6つの0.46m スピーカーを組み合わせると 140dB (200Pa) の出力が達成されました。71 しかし、スピーカーは膜の移動範囲が 1cm 以下に限られています。より強い圧力変動は、例えば油圧駆動のピストンで可能です。例えば、米国オハイオ州ライトバタースン空軍基地で建設された動圧チャンバーは、1つのピストンが 0.46m、もう1つのピストン直径 1.83m、最大トラベル 12cm を持っています。この圧力レベルは 0.5 Hz から 10 Hz まで 172 dB (8.0 kPa) に達し、30 Hz では 158 dB (1.6

kPa)に低下します。注意してください。注意すべきは、同じピストンが 10 Hz で自由空気に入って動作した場合、半径 1 m で 82 Pa rms 圧力(132 dB)の球状源に相当することです。1 Hz では 0.82 Pa(92 dB)が維持され、距離が 2 倍になるごとに 6 dB 減少します。これは自由空気中で高強度の低周波音を生成することの難しさを示し、試験チャンバーの密閉が必要な理由を示しています。

表 10 には、いくつかの低周波音源が記載されています。

表 10: 低周波音源、支配的な周波数範囲、および典型的な距離における音圧レベル(直訳: 自らの計算)。

出典	ドミナント周波数 距離 / Hz	音圧 レベル / dB	参考文献。
地球物理学	< 0.01-10	54 - 104	74
1km 地点のサンダー	< 4 - 125	<114	75
風の変動	~ 1	最大で>160	O.C.
ランニング	< 2	95	76
他人の耳に息を吹きかけて	~ 0.5	170	76
2m の水深に潜る	~ 1	180	76
風力タービン、風下 150m 地点	2 - 10	80	77
換気・空調	1 - 20	60 - 90	77
産業	5 - 100	70 - 110	78
車の中で(窓は閉めている)	5 - 100	100	78
車内で(窓は開いている)	1 - 30	120	78
ジェット機(空港の飛行経路下)	10 - セブ。1000	135	79
アフターバーナー付きジェットエンジン (滑走路の境界付近)	20 - 800	148	80
大型ロケット、乗員区画	10 - 2000	135	81
1.6km の大型ロケット	1 - 200	130	82
ソニックブーム	1 - 100	120 - 160	83
エアバッグの膨張	~ 5 / 500 - 1000	170	84
船の機関室		133	85
爆風波	< 1 - 100	無制限	
スピーカーヘッドセット	1 - 200	146	70
全身チャンバー、スピーカー	2 - 100	140	71

全身チャンバー、ピストン	0.5 - 10/30	172/158	72
--------------	-------------	---------	----

兵器に使える可能性のある音響源

もちろん、アンプに接続されたスピーカーによって強い音が出ることもあります。⁸⁶ 十分な電力供給には発電機や重いバッテリーが必要で、屋外で非常に高い音量を得るには大量のスピーカーバンクが必要です。1つのスピーカーに供給される典型的な最大電力は数00W程度で、そのうち1~2%のみが膜と空気のインピーダンス不一致のために音響電力に変換されます。スピーカーの前に(指数関数的または他の)ホーンを配置することで、指向性も向上し、87 10%から50%の効率向上が可能です。低周波の場合は、ホーンが大きくなければなりません。⁸⁸

スピーカーの主な利点、すなわち大きな歪みなく広い周波数帯を発生できる能力は、音響兵器には必ずしも必要とされないかもしれません。もし大きな音だけを出すなら、サイレンや口笛など、もっと簡単な方法もあります。表11はそのようなソースとその性質を一覧にしています。

サイレンでは、空気の流れが定期的に関断され、ローターの穴がステーターの穴を通過して遮断されます。初期型の効率は1~2%でしたが、1941年にはすでに52 kWの空気流量出力から約37 kW(460 Hz)の音響出力を発生させるモデルが製造され、効率は約70%でした。この装置は、コンプレッサーとローター用の71kWおよび15kWの内燃機関を備え、小型トラックに搭載されていました。直径0.71mの6本の指数関数的なホーンは、軸から約40°の半圧力角を持つ方向パターンを提供し、0.75m波長の回折にほぼ適合していました。ホーン内の圧力レベルが170dBを超えていたため、最初に使用された木製ホーンは最初の5分間の試験中に破壊され、鋼製のホーンに交換せざるを得ませんでした。開けた地形での伝播と幅1.42mの延長ホーンにより、球形伝播による最大圧力が約1/r低下し、500m以上の距離で観察されました。軸上のレベルは、保護されていない耳の痛み閾値付近の137dBで30m、100mで127dBでした。⁸⁹

同じ出力レベルでややコンパクトなサイレン設計も可能ですが、必要な入力電力、サイレン内の流量と圧力の制限、インピーダンスマッチングや数百ヘルツまでの指向性達成のためのホーンのサイズにより、1メートル以上のサイズが発生します。これは、頻度が深ければ深いほど。この装置には少なくともピックアップトラックが必要です。

サイレンは超音波領域までの高周波音の発生にも使用できます。例えば、0.3mサイズ、質量25kg(コンプレッサーなし)の装置が200 kPaの過圧、0.1 m³/sの空気流量で動作した場合、3~20 kHz以上で20 kW以上の音響出力で160~165 dBのレベルが生成され、効率は20%でした。別の装置は低超音波周波数で約160 dB、150 kHzで140 dB以上を発生しました。音声範囲ではより高いレベルも可能でした。⁹¹

サイレンの原理、すなわち空気の流れを穴の開閉によって変調する原理は、任意の波形の音を生成するためにも利用できます。そのような低周波対応サイレンスピーカーの一

例が、ミシシッピ大学物理音響センターが米陸軍研究所の戦場環境局のために開発したモバイル音響源システム(MOAS)です。この独特なシステムは、長さ 17m、最大直径 2.3m の指数関数的なホーンを通じて 20kW の音響出力を供給できます。カットオフ周波数は 10Hz です。115 kW のディーゼルコンプレッサーとともに、伸縮式セミトレーラーに搭載されています。ここでは、周囲にスリットを持つシリンダーを、固定シリンダー上の対応するスリットを通して電気力学的に移動させ、駆動ボイスコイルの電流によって気流を変調させることができます。63 Hz から 500 Hz までの軸上の周波数応答はほぼ平坦で、同等の点源であれば半径 1 m で約 152 dB です。下では 10Hz で 1メートルで約 130dB まで低下します。最初の数値から、軸上の音量は 137 dB 以下、これは保護されていない耳の痛み閾値付近で、仮定点源(ホーン開口部の中央に位置)から 5.6 m、すなわちすでにすぐ近くにある位置で低下することを計算できます。⁹³ 120 dB の範囲は 40 m です。低周波では、痛み閾値の増加とホーンの効率低下が組み合わさって、口の近くでも耳痛を防ぎ、自由空気中で非常に高い低周波振幅を生み出すのがいかに難しいかを改めて示しています。MOAS の主な目的は、数キロメートルにわたる大気の伝播を試験することです。もう一つは車両の騒音をシミュレートすることです。この装置の強い非線形性はこれらの用途を妨げません。

周期的な強い低周波空気振動は、オルガンパイプやホイッスルのように共鳴器と相互作用する乱流の非線形発生によって空力的に生じることもあります。ガルトンホイッスルでは、環状の開口部からの空気の流れが鋭い円形の縁に当たり、その内部には円筒形の共鳴体積があります。このホイッスルタイプは、主に共振器のサイズに応じて、低周波から超音波までの周波数を生成するために使われてきました。共振周波数の一部は、キャビティの長さを調整することで可能です。40~200Hz の範囲では、他のホイッスルタイプがキロワット級まで高い音響出力を生み出し、サイズは約 1メートル程度です。⁹⁴ 低周線音には、はるかに大きな共振器(周波数は共振器の長さに反比例)とコンプレッサー出力(空気流量の拡大)が必要です。

高音波や超音波の場合、ガルトンホイッスルは環状の開口部が開放ノズルに置き換えられるハートマンホイッスルよりも威力が劣ります。これらは数 kHz から約 120kHz までの周波数を生成します。改良型では 4~8kHz で最大 2kW、最大 30%の効率を実現しています。直径 200mm の放物線反射鏡を用いて、ビーム幅(最大圧力の半分の全幅)を約 30° 達成しました。超音波では、約 10kHz および 33kHz で最大 600W のマルチホイッスルが使用されました。

空気中で高出力超音波を生成するためには、より大きなディスクを振動させる圧電トランスデューサーが使用されます。ある設計では、節円があっても同位相放射を実現するための段差厚ディスクがあり、直径 20cm の円盤の前方で 160dB(2kPa)を超える音レベルに達しました。破損を防ぐために水冷が必要でした。効率は約 80%で、音響出力は約 200W まで上昇しました。共鳴帯域幅は数 Hz しかありませんでした。半強度ビーム幅は

5° (直線回折にほぼ適合)であり、軸上のレベルは1 mの距離で150 dB(0.63 kPa)に減少していました。96 したがって、10 mでは130 dB(63 Pa)が線形伝搬となり、吸収により8 dB(圧力の0.4倍)の減衰が加わります。しかし、約0.1 mで衝撃が発生し、損失が増加します。97 実験では、発生源のレベルが153 dB(0.89 kPa)の場合、5.7 mの距離で約123 dB(28 Pa)しか残りませんでした。98

最後に、爆発による衝撃パルスが発生させる可能性もあります。球形伝播の場合、1 kg TNTのかなりの爆薬でも約200 m先まで耳痛を引き起こすことがあります。負傷や死亡は数メートル程度で予想されます。99 後者の使用はもちろん伝統的な武器およびダメージメカニズムを表します(多くの兵器では、爆破の周囲に破片を詰めて致死半径を増やすことに注意してください)。球状に拡大するショックで耳痛のメカニズムを利用するのは、いくつかの理由で問題があります。効果に関しては、使用者を守る必要があるため、距離を保つことが最も効果的であるため、通常は点火前にチャージを投げます。各電荷は1パルスのみを生じるため、頻繁に繰り返す必要があることもあります。一方で、人道法や非致死性の観点から見ると、狙いが正確でなく、爆薬が誰かの近くで爆発し、永久的な負傷や死亡を引き起こす危険性があります。ごく小さな料金で例外がある場合があり、特に閉ざされた部屋で驚きや混乱を引き起こすことがあります。しかしここでは、伴う光の閃光の視覚効果の方がさらに重要であり、そのような武器はすでに使用されている。非常に小さな装薬(グラムから数十グラム)では、ライフルのような武器が一定の距離まで爆発弾を撃つ主な可能性もあります(後述)。爆発が自由空気中ではなく、開いた空洞や管内で起こる場合、共鳴は特定の周波数帯域を強めることがあります。

もし衝撃波を誘導でき、放出されるエネルギーの球状分布を避け、理論的には一定幅のビームの場合に、例えば空気の衝撃加熱による $1/r$ の減少を回避できればよいとすればよいとすれば、衝撃波兵器に対する新たな視点が生まれるでしょう。公表されたデータがないため、予備分析のための推測も正当化されます。理論上、爆発による球状に拡大する衝撃波は周囲の管に捕らえられ、その他の端は円形でほぼ平面的な送信領域で並行に束ねられる可能性があります。適切な曲げによって、管の長さが増え、個々の衝撃波がほぼ同時に開口部に到達し、そこで共通の大きな衝撃波となり、ほぼ平面的な前線から始まります。これは、ほぼ同時に発射エリアに均質な爆薬層が走火するのと同じです。もちろん、ガソリンと空気を混ぜて小さなノズルから噴霧し、複数のスパークプラグで点火することでも形成されることがあります。ここでの主な問題は、ビーム半径がどれだけ変わらず、あるいは距離とともに衝撃波の $1/3$ 減少を伴う球状の拡散がどれくらい早く始まるかということです。しかし、強い衝撃波が自由空気に拡大すると、速度の圧力依存性によって変化しても、最初から回折を受けます。100 したがって、エネルギーを円錐に集中させることは可能であっても、球形の伝播は源径の数倍の距離からも持続すると考えられます。より明確な記述には詳細な調査が必要です。

また、もしそのような爆発が起きた場合に何が起きるかも推測できます。最初に

平面的で境界化された波面は繰り返し生成されました。内燃機関のように、各シリンダーで1分間に何千回もの点火が起こり得るため、液体燃料では100Hzの周波数が考えられ、マイクロ機械式バルブなどによりはるかに高い値が可能となります。もちろん、冷却、過圧パルス耐性、反動は手強いが解決可能な工学的問題をもたらします。推定によると、メガワット出力、約180 dB(数十kPa圧力、ほぼ対称な弱衝撃領域にわずかに位置する)の101源レベルが、燃料消費量が数十グラム毎秒で、タンク機関車と同等であることが示されています。¹⁰²

最初の衝撃の後、十分な衝撃はすでに加熱されたガスの中でそれに対応する速度で伝播します。したがって、後の衝撃は連続して第一前線に到達し補充しました。ビーム軸から離れると圧力と温度が低下するため、追従波面は前方へこみが増し、軸から離れると回折損失の影響が強くなります。軸からの距離や角度に比例して過圧が減少する量的推定は、これらのシステムの開発者によるさらなる明確化や詳細な理論的研究を必要とします。¹⁰³

距離が増すにつれて振幅が減少する問題を克服するために、ターゲットに近づける小さな光源を使うこともできます。この原理は爆発音や口笛を吹く爆竹に例えられます。後者にはホイッスルやサイレンが内蔵されており、加圧ガス容器やガス発生器(例えばエアバッグ内)で駆動され、サイズによって数十秒から数分まで機能することがありました。

数百グラムの質量を持つ両タイプとも手投げでもライフルで撃つこともでき、より重い「音響手榴弾」はより大きな(空気)砲で撃つことも可能でした。¹⁰⁴

表 11: 音響兵器に使用可能な強力な音源。示される値は典型的なもの、または特定の装置(仮定の反復爆風装置の概念)に適用されるものです。K:キロ(1000);O.C.:自らの計算です。発生源に近い非常に高いレベル、高い可聴または超音波周波数では、非線形効果により強い吸収と距離とともに圧力レベルが急速に低下することに注意してください。

出典	直径 発信 面積 / m	頻度 / Hz	音響 パワー / kW	サウンド 圧力 レベル / dB	あの 時 距離 / m	参考文 献。
大きなサイレン	1.4	200 - 600	37	137	30	89
小さなサイレン	0.3	3 k -20 k	2	165	閉じ る	90 91
大型エアフローモジュレーションスピーカー	2.3	10 - 500	20	126	27	92
巨大なホイッスル	0.2	40 - 200	数名	160	閉じ る	94
ハートマンホイッスル	0.2	4 k - 8	2	160	閉じ	95

		k 20 k	0.6		る	
ディスク付き圧電トランスデューサー	0.2	20 k	0.2	160	閉じ る	96 98
爆発性爆発	1	< 1 - 100	無制限	無制限		
仮定の反復爆風	1	100	1000	180	閉じ る	O.C.

結論として、ある程度調整可能な強力な低周波音源や任意の波形を生成できる音源を10%から70%の効率で構築することが可能である。ビームの幅が広がることは、おおよそ回折に対応します。共振器、空気流量制限、指向性のためのホーン、電力要件は、補助装置によるこれらの音源のサイズを1メートル以上に押し上げ、質量を数百キログラム以上にまで高めています。

高周波のオーディオや超音波の音源はやや小さくできるかもしれませんが、それらの消費電力のため、システム全体の大幅な縮小は難しいようです。(必要なエンジン、発電機、コンプレッサーのサイズと、商用ガソリンエンジンの交流発電機の1~5kWのサイズを比較してください。)

爆発物駆動の音源は爆風を発生させることができ、おそらく低音周波数でも繰り返し発生する可能性があります。メガワットの電力は達成可能であり、これも1メートル程度のソースサイズで可能です。

数十メートルの射程を持つピストルやライフルサイズの手持ち音響銃はほぼ確実に除外されます。唯一の例外は、小さな笛のような音や爆発する「サウンドグレネード」が標的から数メートル以内に投げられたり撃ち込まれたりすることです。

高強度音からの保護

鼓膜に作用する音圧は、外耳道に挿入する耳栓や外耳を覆う耳罩によって軽減できます。両タイプとも高周波数(500Hz以上、超音波を含む)で15~45dBの減衰が可能ですが、イヤーマフは低周波数(250Hz以下)では効率が劣ります。一部の低周波周波数では、さらには音量を増幅することさえあります。ここでは耳栓の方が良い;プレモールド型やユーザーが成形可能なタイプのものは、低周波で10~30dB減衰します。最も優れた低周波保護は、回復の遅いクロードセルフフォーム製の耳栓です。これらは深く挿入すると35dBに達することもあります。160dB以上の衝動的なピーク音レベルから身を守るために、耳栓とイヤーマフの組み合わせが推奨されます。イヤホンと吸音ヘルメットの組み合わせで、0.8kHzから7kHzまで30~50dBの減衰を実現できます。外耳でより強い減衰はあまり効果的ではありません。なぜなら、音は骨や組織の伝導によって内耳にも届くから

です。¹⁰⁵

全身への曝露からの保護は、主に振動で音を内部に伝わらせにくいほど十分に剛性の高いエンクロージャーや、音吸収性の多孔質素材で覆われた内張りによって提供されます。ジェットエンジン技術者には防護服が存在します。¹⁰⁶ 吸収機構は低周波で価値を失います。ライニングが約 1/4 波長より薄くなる(例:250 Hz で 0.34 m)すると、吸収は周波数の低下とともに減少します。¹⁰⁷ 非常に高いインピンジングレベルで高周波の場合、吸収材料の加熱が問題となることがありますが、現在の文脈では距離による強い減少のため理論的な問題に過ぎません。

装甲車両は完全に密閉されていれば、低周波音に対してかなりの保護を提供するはずですが。一方、通常の道路車両は気密性がなく、窓やパネルも低周波の圧力変動を伝わらないほど硬くはありません。同様に、低周波の音はスリットや閉じた窓から建物に入ることがあります。周波数が部屋の共鳴に対応する場合、インピンピング圧力をはるかに上回る¹⁰⁸ の内部圧力が発生することがあります。この効果を利用するには、可変周波数の電源と現地でのモデリングや実験が必要です。共鳴の際に、人間の痛み閾値以下の範囲に広範囲のウィンドウが割れて共鳴効果を再び弱める可能性もあります。

一方、高周波では壁や窓、金属板などがかなりの減衰をもたらすことがあります。

音響外傷および爆発外傷の治療

ここではいくつかの示唆のみを述べます。¹⁰⁹ 音への過剰曝露による即時的な影響の一部は、聴力低下、耳鳴り、痛み、めまいなど、数分から数ヶ月で単純に消えることがあります。しかし、一部は永久に残る可能性もあります。これらはおそらく蝸牛の基底膜の有毛細胞などの内耳損傷や、前庭系の類似の影響によって引き起こされます。このような損傷は音響外傷後数時間にわたって進行するようで、血流の減少と関係している可能性があります。そのため、血行促進薬が投与されることが多いです。この治療の成功については相反する研究があります。¹¹⁰

強い騒音へのさらなる曝露は損傷を増大させ、治癒過程を妨げるため、負傷した耳をできるだけ早く静かにさせること(例:耳栓による)ことが治療の重要な一部です。¹¹¹

爆撃によるティンパニック膜破裂は、80~90%の症例で自然治癒しました。膜を閉じる操作は、主に穿孔が3分の1を超える場合に必要です。中耳の耳小骨の骨折や転位はまれに起こり、より重度の爆風損傷を負います。これらははるかに複雑な手術を必要とします。¹¹²

両耳膜破裂後もほぼ完全に回復したケースもありますが、中等度から重度のPTSが起る可能性の方が高いです。¹¹³ 治療だけではあまり解決できません。補聴器の提供が事後の主な支援手段となる場合もあります。ほぼ難聴の場合、感覚や神経細胞に直接電気刺激を行う人工内耳や脳幹インプラント(高額な治療)を提供することで、聴覚や発話知覚能力が大きく回復する可能性があります。¹¹⁴ 予防、例えば耳の保護具は、永久的な聴力損

失を避ける唯一の信頼できる方法です。¹¹⁵

結論

音響兵器の判断は特に複雑です。なぜなら、多くの側面があるからです。潜在的な影響は、一時的な聴力の悪化による単なる煩わしさから、耳の生理的損傷、さらには他の臓器の損傷に至るまで多岐にわたり、場合によっては死に至るまで多岐にわたります。基準は意図された文脈や使用シナリオによっても異なります。スペクトラムは固定施設の近距離防護から移動システムまで、一方では法執行機関、他方では武力紛争のためのものにまで及びます。開発プロジェクトに関する公式情報の欠如や、音響兵器の特性や効果に関する根拠のない告発が、判断をさらに困難にしています。

すべての可能な武器の種類や使用オプションを完全に判断しようとするのではなく、本記事は議論を進め、最終的に音響兵器への対応に関する責任ある決定に至る助けとなる事実を提供することを目指しています。このセクションでは研究の主な結果をまとめ、いくつかの一般的な指摘で締めくくります。

人間への影響

防衛メディアのいくつかの記事とは異なり、高出力の低周波音は人間に深い影響を与えません。痛みの閾値は音声範囲よりも高く、内臓や前庭系、嘔吐、170 dB 以上の制御不能な排便に対する確固たる証拠はありません。

音声領域(20~20,000Hz)全体で、特に音が嫌いだったり長期間続く場合、身体的な不快感よりはるかに低いレベルで不快感が生じることがあります。これは、例えば犯罪者が占拠する建物の包囲など、特定の状況で意図した効果をもたらすことがあります。通常、永続的な被害は生じないため、人道的な側面から懸念する理由はありません。

状況は高音量で変わり、不快感は約 120dB から始まり、耳の痛みは約 140dB 以上で発生します。強い音の結果として、最初は可逆的な聴力の劣化(一時的な閾値シフト)が起こります。しかし、レベル、持続時間、周波数、個人の感受性によっては、例えば 135 dB 以上のレベルの短時間の曝露は、聴力に持続的な損傷をもたらすことがあります(永久的な閾値シフト)。被害者はそのような損傷をすぐに感じる必要はありません。劣化は後になって初めて明らかになるかもしれません。主に内耳に存在します。鼓膜は約 160 dB で破裂します。治癒しても、永久的な難聴が残ることがあります。

低音域(50~100Hz)では、主に胸部で耐え難い感覚が生じることがあり、耳を保護していても 150dB 以上必要です。

中高音域では、保護されていない耳では約 140 dB を超えると平衡の乱れが生じる可能性があります。さらに高いレベルでは、鼻や口の空気で満たされた空洞でくすぐったい感覚や熱感が起こることがあります。

10kHz 以上の高音域はしきい値シフトを生じさせず、超音波検査時の音量が 140dB 未

満なら耳はほぼ影響を受けません。これらの周波数帯では、空気の空洞、繊維、髪の加熱が約 160 dB 以上で重要になることがあります。

早期の治療は音響外傷の後、改善につながる可能性があります。しかし、一度起こった永久的な難聴は本当に元に戻すことはできず、補聴器や人工内耳が影響を軽減する主な手段となっています。

爆発的な爆発による衝撃波は、その名称が「音響」に疑問を持つことがありますが、さまざまな影響を及ぼすことがあります。中程度の高音量(約 140dB まで)では一時的な難聴が生じ、より高い数値では永久的な難聴に発展することもあります。185 dB を超えると鼓膜が破裂し始めます。さらに高いレベル(約 200 dB、すでに大気圧の 3 倍の過圧)では肺が破裂し、約 210 dB を超えると一部の死亡が起こります。

強い音の潜在的な発生源

スピーカーはホーンと組み合わせない限り、強い音を出す効率はありません。より高いレベルは、内燃機関などで駆動される可変周波数の単音音を出すことでより容易に達成できます。低周波では、170 dB のソースレベルで数十キロワットの音響出力を達成しています。高音響および超音波帯域では、出力は数キロワット、160 dB です。サイレントタイプのスピーカーでは、任意の波形の低周波音を同じような出力と圧力レベルで発生させることができます。ホイッスルの場合も、主に音調的な音が出ます。低周波では数十キロワット、高音域では数キロワット、超音波領域では約 1 キロワットが可能であるべきです。

爆薬は爆風を発生させ、その過圧は(一定距離で)放出されるエネルギーに比例して線形に増加します。したがって、近距離では実質的に上限が存在しません。爆発が一度に一つずつではなく、低音域などの周波数で高速で連続して起こる場合、新しいタイプの音源が生まれます。ここでは、メガワットの音響出力と 180 dB のソースレベルが原理的に達成可能に思えます。

挙げられたほぼすべてのソースタイプで、典型的なサイズは 1 メートル以上です。これは、発射面積を持つ電源本体および関連する電源、例えば内燃機関にも当てはまります。ライフルのような手持ち式音響武器は、銃弾があつてバンや口笛を鳴らす場合のみ考えられます。その他の供給源はすべて固定されるか、車両やヘリコプターなどを担う必要があります。

2 本の超音波ビームを非線形に重ね合わせて強い低周波音を生成するのは現実的ではありません。

伝播問題

前述の音源の種類すべてで不快で痛みを伴う、または有害な音圧を得ることは可能です。爆発的な爆発は致命的にも、標的が音源の近くにある場合、遠距離でそのような音圧

を達成するには大きな困難や克服困難があります。

最初の障害は回折です。波長が光源より大きい場合、発生源から放出される波は即座に球面的に発散します。すなわち、電力は距離とともに広がる面積に分散し、その結果、強度と音圧は距離とともに減少します。1メートル程度のソースサイズでは、数百ヘルツ未満の周波数でもこの傾向が当てはまります。「低周波ビーム」には信用性がありません。しかし、より高い周波数で波長が短く、一定の距離まで集束や一定幅のビームが達成できる場合でも、最終的には球状拡散が支配的になります。

第二の問題は空気非線形特性から導かれます。即座に効果が出るために必要な音圧が十分に高くなると、波の頂上はトラフよりも速く動き、一定距離を取ると波はノコギリ型に変わります。その後の衝撃前線は波のエネルギーをより強く散逸させ、ビーム拡散のない平面波であっても音圧は距離の逆数で減少し、発散の場合はより強く減少します。球面爆風の場合、過圧が通常の大気圧より大きい限り、その減少は逆距離の三乗分です。

衝撃波はより早く発生し、それに伴うエネルギー損失は頻度が増すほど強くなります。したがって、回折が十分な周波数で遠距離の音圧を著しく低下させなかったとしても、衝撃波損失によってビーム沿いの圧力は最初の高いレベルから低下します。あるレベルをどれだけ遠く投影できるかは、ソースサイズ、周波数、開始波面の形状、空気の湿度、目標の意図レベルなど多くの詳細によりますが、経験則として、メーターサイズの音源では非常に高いレベル(例えば 140 dB 以上)を 50 m 以上に投影するのは現実的とは思えません。0.1 kg TNT を超える大規模な爆薬によって発生する単一爆風波でのみ、その距離で衝撃過圧がそのレベルを超えることができます。衝動に対する人間の耐性は高く、距離が離れるにつれて急激に低下するため、肺破裂や死の可能性を持つ過圧はより近距離でも持続します。数百メートルの距離でも致死的でありうる「バスケットボールサイズの音響弾丸」のもっともらしいメカニズムは私の知る限りありません。この主張を明確にしたり、信頼できる反証を行ったりするにはさらなる研究が必要です。

強い音響波が屋内で設置され、壁からの反響で電力が維持される場合は状況が異なります。高いレベルを達成することは、特に部屋の共鳴で効果的です。換気ダクトなどを通じた直接連結が最も効率的です。次に、窓に密着した管を押し付けて音圧をかけることが考えられます。遠くから音を放射すると結合が最悪ですが、特定の条件下では共鳴振動を起こすのに十分かもしれません。

さらなる研究

いくつかの分野には、より詳しい科学技術的な研究や明確化が必要になることがあります。より重要な問題は以下の通りです:

- ◆ 衝撃波の有界ビーム(弱い衝撃波と強い衝撃波)の伝播に関する定量的側面;
- ◆ 多重爆発爆風波源の動作原理と仕様;および
- ◆ 特に渦環を用いて、高出力音響パルスの「回折なし」伝播(「音響弾丸」)がかなりの距

離にわたって伝播する可能性。

一般的な発言

他のタイプの「非致死性」兵器と同様に、音響兵器にも用量や感受性が個人差がある問題があります。同じ音レベルにさらされると、感受性の高い人は永久的な難聴を経験するかもしれませんが、他の人にとっては閾値の変化は一時的なものです。

呼吸器の平衡感覚に顕著な影響を与えるのは、永久的な聴覚障害の即時的な危険を伴う音のレベルでのみ起こります。したがって、音響兵器支持者が「残留損傷なし」と約束するものは、かなり厳しい制限、例えば誰の耳にも 120dB を超えない音レベルを設けることでしか実現できませんでした。しかし、これにより音響兵器の期待された多くの効果は失われることとなります。

耳の保護はあらゆる周波数で非常に効果的であるため、少なくとも敵が音響兵器を初めて使った経験をした後は、軍隊や組織化された民兵、バンドによって確実に使用されるでしょう。しかし、防護は非常に簡単で簡単に手に入るため、おそらく近いうちに「普通の」人々もデモンストレーションなどで使うようになるでしょう。

国際人道法の側面を考慮すると、完全な分析はまだ行われていません。現時点では、いくつかの予備的な考えが妥当に思えます。

音響兵器は、最近禁止されたブラインドレーザー兵器とはいくつかの点で異なります。

- ◆ 人間の感覚入力の 80~90%が目から提供されるという主張は、明らかに耳には当てはまりません。したがって、不必要な苦痛についての議論は、盲目武器と同じ根拠で成立することはできません。¹¹⁶

- ◆ 爆発による耳の生理的損傷は、通常兵器ではよくあることです。

- ◆ 鼓膜が破裂していても、治癒や少なくとも聴力の改善は可能です。

- ◆ 補聴器やインプラントは存在しますが、視覚系向けの同等の補助具はほとんど存在しません。

したがって、国際戦争法の側面に基づく予防的禁止の根拠は、眩しいレーザーの場合ほど明確ではありません。

一方で、音響兵器は短距離であっても無差別効果の危険性が高いです。複数の種類の音響兵器は、回折によって波の拡散が生じるため、一人の人、ましてや身体の一部に向けるのは困難です。したがって、いくつかの考えられる状況では、非戦闘員や傍観者が影響を受ける可能性があります。効果が一時的であったり、恒久的なものであれば、特定の状況下では許容される場合があります。

固定施設では、近距離でかなりの持続的な被害を与えられる音源であっても強い反発を受けないことがあります。なぜなら、接近時に人々がその音を聞いて痛みを感じ、ほとんどの場合自発的に撤退できるからです。しかし、背後から圧力をかけてくる群衆の中で

はそれが不可能になる場合があり、物理的なバリアで 120dB 未満の非破壊的な圧力レベルを要求することは可能です。

例えば、半径 10m や 20m の範囲で恒久的な損害を与えられる移動式音響兵器は、特に法執行の文脈でははるかに問題が起きるでしょう。武器使いが一定の制限を守ってくれるとは限らないだろう。もし守るなら、システムに組み込まれる必要がある(例えば、絶対的な上限や目標距離に応じた実際の出力や持続時間の制限など、部屋内の目標に対して特別な注意が必要)。

国際赤十字委員会は、武器の設計依存的かつ予見可能な影響が不必要な傷害や不必要な苦痛に該当するかどうかを判断するための 4 つの基準を提案しています。最初の基準は、武器が「特定の病気、特定の異常生理状態、特定の異常な心理状態、特定かつ永続的な障害、または特定の變形」を引き起こす場合に満たされます。¹¹⁷ この一般論で、特定の音響兵器もこの枠組みに該当します。

要するに、音響兵器は時に宣伝されるような驚異の兵器ではないことは明らかです。武力紛争や法執行機関での使用は、不必要な苦しみ、外部者の保護、比例性に関する重要な問題を提起します。音響兵器が正当な力の行使をより人道的に行使する選択肢を追加する特別な状況、例えば人質事件などが考えられます。しかし、特に準備万端の敵に対しては、その効果は報告されているほど劇的ではなく、彼ら自身のダメージを与える能力が著しく低下することはありませんでした。したがって、軍や警察のこれらの武器への関心は、支持者が望むよりも低い可能性が示される可能性がある。

これは、人道・国際法コミュニティが特定の音響兵器を予防的に禁止しようとする決意を固めることが成功を約束する可能性を意味している。多様な兵器の種類、人間への影響、そして音の強度の幅が広がる可能性があるため、この目的のために明確な定義と基準が必要となります。一つの方法は、例えば固定された強信号源の場合、公開可能な任意の点で 120 dB の制限を求めることもあります。移動式音響兵器は、例えば 5m 距離で 130dB 以上を発生できる場合、特定の警察用途で非常に少数の数に限定される可能性があります。制限には周波数依存の人間の聴覚感度も含まれ、0.5kHz から 6kHz の範囲でより厳格に設定されることがあります。これらの制限は、武力紛争において通常通常被る通常の火器に比べて著しく少ない被害を保証することを目的としています。したがって、議論が戦争法自体に限定されると、一般的な受容が問題になる可能性があります。

盲点レーザー兵器禁止に採用されたより一般的なアプローチ、つまり人を永久に聴覚を失わせるために設計された武器を禁止するというアプローチは、ここではあまり合理的とは言えません。なぜなら、それは現在の音響兵器開発の主な目的ではなく、近距離での耳をつんざく効果が、遠距離での一時的な効果しか生じさせない武器の副次的な影響として容易に起こり得るからです。さらに、戦争手段としての聴覚を消すことを全面的に禁止することは、軍の兵器庫にある膨大な爆風兵器を考えると非現実的です。

防衛が容易であるため、武力衝突は最も重要性の低いシナリオとなり、群衆制御など

他の作戦の方が現実的になるかもしれません。したがって、禁止や制限に関する検討は、法執行機関やその他の音響兵器の使用を最初から彼らの視点から考慮すべきです。

これらの議論は、合理的な行動方針に至るために詳細な熟考が必要であることを示しています。この記事がその議論に貢献することを願っています。

謝辞

コーネル大学の平和研究プログラム(PSP)、特にジュディス・レッピー氏に 1997 年 11 月にゲスト研究者として招かれてくださったことに感謝申し上げます。また、米国イリノイ州シカゴのジョン・D・アンド・キャサリン・T・マッカーサー財団が、PSP の技術兵器管理プロジェクトのための資金を提供して下さり、コーネル大学での滞在資金を提供して下さったことにも感謝しています。また、ドイツ・ノルトライン・ヴェストファーレン州科学研究省には、新兵器技術の予防的兵器管理プロジェクトのためにドルトムント大学に資金を提供して下さり、この研究のもとでこの研究を完了させていただきました。最後に、軍縮問題の科学技術研究を支援し、申請者として参加したドルトムント大学の Experimentelle Physik 3 のフランツ・フジャラに感謝します。

付録 1: 空気中の圧力波 ¹¹⁸

線形音響 ¹¹⁹

空気中では、発生源で発生する圧力変動が音波として伝播します。正確な波動方程式は非線形です。しかし、例えば静圧の約 0.001 倍の音圧、つまり 100Pa(レベル<134dB)を下回るような小さな変動については、空気の圧力-体積曲線をその接線に置き換え、方程式を線形化することができます。この線形音響の場合、静圧 $P_0=101$ kPa、温度 $T_0=20^\circ$ C、密度 $\rho_0=1.20$ kg/m³ のとき、音速は $c_0=343$ m/s です。

音圧 p は静圧 P_0 からの偏差です。単純な音源の推定には、単極子(すなわち呼吸球体)が開口で球面波を放っていると仮定できます。 v_{rms} が正弦振動の二乗平均平方根(rms)の表面速度である場合、遠方場において中心から r だけ離れた二乗平均平方根の音圧は次のようになります。

$$P_{rms}(r) = \rho_0 c_0 k A v_{rms} / (4 \pi r) \quad (A-1)$$

ここで $k=2\pi/\lambda$ は角波数、 $\lambda=c_0/v$ は波長、 v は周波数、 A は振幅です。二乗平均平方根強度、すなわち波とともに輸送される面積あたりの二乗平均平方根出力は

$$I_{rms}(r) = p_{rms}^2(r) / (\rho_0 c_0) \quad (A-2)$$

積 $Z_0 = \rho_0 c_0$ は自由空気インピーダンスと呼ばれます。強度は $1/r^2$ で減少します。なぜなら、圧力の二乗平均平方根は $1/r$ で減少するためです。放出される総出力 P_{rms} は、 r における球面全体の積分で求めます。

$$P_{rms} = 4\pi r^2 I_{rms}(r) \quad (A-3)$$

それは他の損失がなければ常に続くことです。

波場が球対称でなく、立体角 Ω の円錐に閉じ込められている場合、その円錐内の強度は $4\pi/\Omega$ より高くなり、圧力はその平方根で増加します。もし波源が無限で固い隔壁内の半径 a のピストンで、二乗平均平方根速度が v_{rms} 、周波数 ν で振動している場合、遠方場における距離 r 、角度 θ での二乗平均平方根圧力は次のようになります。

$$P_{rms}(r, \theta) = \frac{\rho_0 c_0}{4\pi r} k 2\nu v_{rms} \pi a^2 \frac{2J_1((ka) \sin \theta)}{(ka) \sin \theta} \quad (A-4)$$

ベッセル関数式 $2J_1(x)/x$ は、 $x=0$ から約 $\pi/2$ までにおいては1に近いです。(A-1)と比較すると、軸上 ($\theta=0$) の音圧は、等しい表面積または体積流量の単純な球状音源からの音圧の2倍であり、隔壁での反射、または半無限体内への拡張により、強度は4倍強くなることがわかります。隔壁が取り除かれ、ピストンがパイプの口の中で動くように考えられた場合、¹²⁰ 強度の係数2または4は消え、パイプの端は軸上で、等面積または等体積流量の単純な発生源のように作用します。¹²¹ 波長 λ がピストンの円周の $2\pi a$ よりも長い場合、ベッセル関数項の引数は $\theta=\pi/2$ であっても $\pi/2$ 未満になり、(A-4)の2番目の分数は1になります。つまり、音圧は隔壁に沿った方向を含め、すべての方向で本質的に同じです。また、パイプの場合は $\lambda \geq 4\pi a$ であれば後方でも同じです。これは、低周波での指向性放射を実現するために、非常に大きな送信領域が必要になることを意味します。たとえば、 $\nu = 50$ Hz ($\lambda = 6.8$ m) の場合でも、明らかに1.1 mを超える半径 a が必要になります。

十分に高い周波数の音波を特定の円錐に主に伝えるには、音源の前に反射壁があり、音源を後ろで囲むホーンによって実現できます。¹²² 断面積が大きくなるため、インピーダンス変圧器として機能し、音響生成効率を、例えば直接スピーカーの場合の1~2%から10~50%に高めることができます。¹²³ 一定強度の平行波が円形領域から放射される場合、遠方場における最も内側のフラウンホーファー回折点は、(A-4)のベッセル関数の最初の零点の角度 ϕ_1 によって制限されます。

$$\sin \phi_1 = 1.22\lambda/D \quad (A-5)$$

ここで D はアンテナの直径です。右の式が1より大きい場合、ゼロは存在しません。軸上の強度は

$$I_{max}(r) = P\pi D^2/(4\lambda^2 r^2) \quad (A-6)$$

屋外音響伝播の場合、いくつかの影響による修正が加えられますが、その多くはここで扱う距離(10~100m)では小さく、本評価の単純な推定では無視されています。しかし、特定の状況では評価が難しいものもあり、約50メートルを超える距離での音響兵器の使用には予測不可能な要素がかなり加わります。

非線形音響 - 弱衝撃レジーム¹²⁴

音波による摂動が静的値に比べてもはやそれほど小さくない場合は、伝播速度がもはや

一定ではなく、圧力、密度、または粒子速度とともに増加するという事実を考慮する必要があります。したがって、圧縮率の高い領域は通常の音速よりも速く移動し、密度の低い領域は通常の音速よりも遅く移動します。これは、最初は正弦波であっても、波形が歪むことを意味します (図 A.1 a)。ゼロ交差を基準として、圧力のピークは前方に移動し、谷は後方に移動し、最終的に鋸歯状の波を形成します。この波では、空間の特定のポイントで最初に正の圧力ジャンプが発生し、次に負の音圧最小値まで線形に減少し、これが定期的に繰り返されます (図 A.1 b)。これは、元の周波数の高調波が連続的に増加することとしても説明できます (理想的な鋸歯状波の場合、 n 番目の高調波の振幅は $1/n$ に比例します)。媒体における散逸損失は最初のビルドアップ領域では重要ではありませんが、衝撃波面が形成されるとすぐに大きく増加します。この第二段階では、振幅と非線形歪みは徐々に減少し、圧力が十分に低下して再び線形伝播が優勢になるまで続きます (図 A.1 c)。

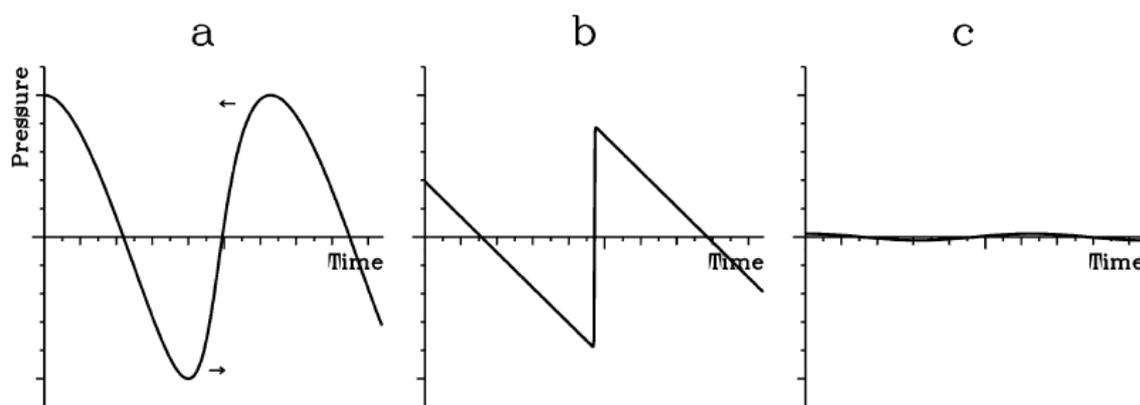


図 A.1: 衝撃形成前後の元調和波の波形。第1段階(a)では、圧力ピークはより速く動き、谷はゆっくりと動き、波が伝播するにつれて変形します。第2段階では、衝撃前線(b)で強い散逸を伴う丸みを帯びたノコギリ波が形成されます。前方は厚くなり振幅は弱くなり、最終的に小さな正弦波(c)が残ります。(伝播方向で空間座標に対してプロットすると、波は右に動く。)

詳細は複雑です。平面波の場合、実効音圧は第一段階ではほぼ一定です。衝撃波形成後、実効音圧は距離に反比例して減少します。ただし、この減少は波面が無限に広がった場合に当てはまり、幾何学的な広がりによるものではないことに注意してください。この段階は、初期値に依存しない低い飽和振幅で終了します。第三段階では、指数関数的な減衰が支配的になります。

球面波の場合、収束時には非線形擾乱の成長が加速し、発散波では振幅が半径 r に比例して増減するため減速します。発散波に対して衝撃波が起こる場合、振幅減少は $1/r$ のときよりも速く、ある半径で衝撃波は止まります。

境界波(ビーム)の場合、ある距離での振幅は非線形効果と回折効果の相対的な寄与に依

存します。定量的な記述には詳細な研究が必要です。¹²⁵

非線形音響 – 差分周波数の生成、

デモジュレーション¹²⁶

異なる角周波数の 2 つの波 ω_1, ω_2 が非線形媒質上で伝播すると、重ね合わせの原理は成り立ちなくなり、一般的に組み合わせ周波数($n\omega_1 + m\omega_2$, n, m の整数)が生じます。特に本例では、ほぼ等しい角周波数の二つの差は興味深いかもかもしれません。なぜなら、前者はその低い値を用いるため、後者よりも空気に吸収されにくいからです。また、回折によるビーム幅の広がりにはるかに低くなります。 $\Omega = \omega_1 - \omega_2$

同じ周波数の 2 つの波の重ね合わせは、まず振幅変調波に似た振幅の変化を周波数差に伴わせます。平面波の場合、変調波または差分周波数波の振幅 ρ_Ω は最初、距離とともに線形に増加します。しかし衝撃波形成後は、元の振幅 p_0 に線形依存する一定の飽和状態になります

$$\rho_\Omega = \pi m \Omega p_0 / (4\omega) \quad (\text{A-7})$$

($m \leq 1$ は変調度数です)。これは三角形波にも成り立ち、元々正弦波だった場合は差周波数についても定数係数が異なります。(A-7)とは、低周波の音圧が元の波の開始圧力よりも常に Ω/ω 未満であり、上記の仮定のもとでは1よりもはるかに小さいことを意味します。

ストロングショック・レジーム¹²⁷

爆発による強い衝撃では、過圧は通常の大気圧を著しく上回ります。その後の低圧パルスはもちろん大気圧に限定されます。高い過圧のため、衝撃前線は音速を明らかに上回る速度で動きます。任意の距離で、まず急速な過圧ジャンプが起こり、その後、低圧相を経て通常圧力への緩やかな低下が続きます。衝撃波が通過した後、ガスは高温で密度が低下したままです。最大過圧はエネルギーにほぼ線形にスケールし、三次元伝搬では距離の逆三乗にほぼ比例して減少します。過圧が大気圧を下回るとすぐに弱い衝撃波へ、そして最終的に通常音速と逆距離の指数関数的振幅減少を伴う直線伝播が起こります。

図 A.2 は、海面上の自由空気中で 0.1kg および 1 kg の TNT 爆発の複数の量を示しています。図 A.2a は衝撃波の過圧を示しています。 $r-3$ (強い衝撃波)から $r-1$ (弱衝撃/線形伝播)への依存性の遷移は、3m から 7m の距離付近で、過圧が通常圧力の約 3分の1で見られます。興味深いことに、1kg でもかなりの量の爆発物(手榴弾の約 10 倍)が入っても、鼓膜破裂の閾値(約 35 kPa、2.5 参照)は 5m 未満で越えられます。一方で、ピークレベルは 145 dB(0.36 kPa)を超え、ほとんどの被験者が実験室で痛みを感じた 128 m から約 200 m の範囲です。

図 A.2 b は衝撃波の正過圧部分の持続時間を示しています。小規模な化学爆発の場合、該当する距離でのパルス持続時間はミリ秒程度であることは明らかであり、表 8 では短時間の損傷閾値が適用されます。

このような短波では、物体はあらゆる方向から同じ過圧に非常に早く浸かり、衝撃の後ろに動く空気の動圧抗力によって大きな正味の力が生じます。図 A.2c は、抗力係数が 1 の場合の面積あたりのおおよそ動的インパルスを示しています。

強い衝撃波も回折の影響を受けますが、伝播速度が局所圧力に依存するという修正があります。拡張面や球面波の場合、このメカニズムは衝撃の前方を安定化させます。もし後方の膨らみがどこかに発生した場合、そこでの電力の合流がその部分を再び加速させ、その逆もまた然りです。しかし、管の開口端から発生する衝撃波は、管の外側に沿って逆方向にでも即座に広がり、伝播します。

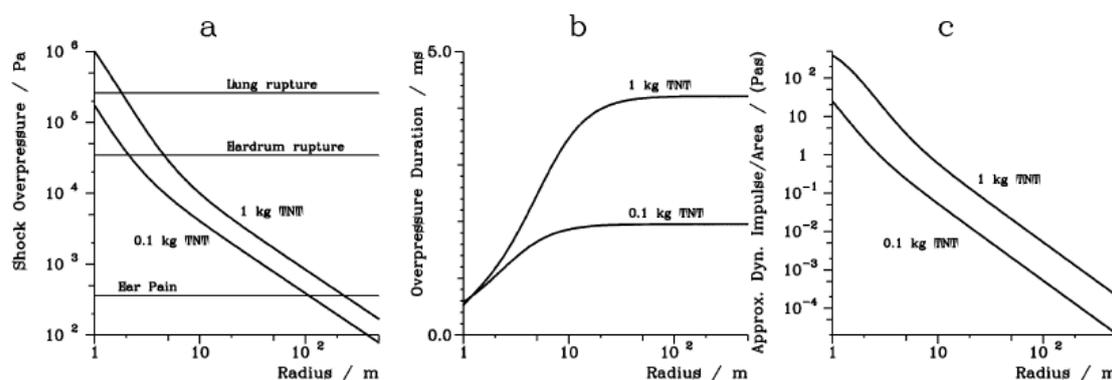


図 A.2: 衝撃過圧(a)、過圧パルス持続時間(b)、および抗力係数(c)に対する面積あたりの動圧原因インパルス近似値(1 抗力係数)と、海面上での 0.1 および 1 kg TNT の通常爆発の距離 r の比較。強衝撃波の圧力低下率はそれぞれ約 2m と 5m まで維持されます。硬い地面での爆発の場合、エネルギーを 2 倍、または距離に $2^{1/3}=1.26$ を掛けなければなりません。(a)では、いくつかのダメージ閾値が示されています。肺の損傷は 0.8m または 1.8m 未満で起こり、鼓膜破裂は 2m 以下と 5m 未満で予想され、100m や 200m 未満では耳の痛みを感じる人もいます。1m を超える距離では、過圧パルス持続時間(b)はミリ秒程度です。小さな物体に伝わる面積あたりの抗力インパルスは、(c)の近似曲線から抗力係数を掛けて得ることができます。

兵器原理に関する疑惑

指向性源からの低周波ビーム?

いくつかのジャーナリズム記事では「低周波ビーム」について言及されています(表 1 参照)。最初から(式(A-6 参照))は、長波長の場合、ある程度の距離でかなりの強度を得るためには大きな放出面積が必要であることが明らかです。¹³⁰ 保守的に見積もるために、発信機の直径 3m と仮定します。これはすでにかなり扱いにくいもので、「低周波」の概念に適合する最短波長、すなわち 340 m/s の周波数で $v=20$ Hz の場合 $\lambda=17.2$ m です。音響出力については $P=10$ kW としますが、これは例えば 30~60 kW の内燃機関から来る場合もあります。発生源の RMS 圧力は 0.77 kPa(レベル 152 dB)となります。波長がエミッタよりはるかに

大きいため、遠方場の強度はすべての方向で同じです。ビームは存在しない。代わりに球面膨張が起きます(低周波源の節で言及されたやや小型の MOAS デバイスで観察されています)。

大きな発生源と低周波数のため、衝撃波は発生せず、半径に比例して振幅が $1/r$ 減少する通常の線形伝播が至る所で起きます。 $r=50m$ の推定距離では圧力は 3.2 Pa (レベル 104 dB) となり、低周波の影響が実感できる数桁低い数値です。もちろん、音波が発信範囲を出る前に、より狭いダクトを高強度で通過した場合、そこで衝撃が発生し、外部の強度がさらに低下する可能性があります。

次に、約 150 dB レベルでより強い非聴覚効果が観測された上限である 100 Hz の低音周波数を検証し、同じ大きなエミッターサイズが 3 m であると仮定します。前進方向では衝撃なく球状の伝播が続いています。 $50m$ 距離での圧力は 16 Pa (レベル 118 dB) で、非常に大きな音ですが、明らかに痛みの閾値以下です。約 150 dB で観察される内臓器の影響は、その音のすぐ前に。聴覚が保護されていない場合、数メートルまでの距離で聴覚の痛みや短期間の曝露による損傷が予想されます。

高周波数では、波長が短いことで焦点伝播が促進されます。しかし、ビームが形成され狭くなるにつれて、非線形吸収は並列で強くなります。聴力や前庭系など劇的な影響を伴う非常に高いレベルの痛みは近距離で可能ですが、 $50m$ 以上離れた場所で痛みの閾値に達するのはほぼ不可能です。

2つの指向性超音波ビームの非線形重ね合わせによる低周波

初期の音響兵器の一つ(序文で言及された「スクワークボックス」)は、耳の中で結合して耐え難い低周波差周波数(超音波の和周波数とともに)を生み出す二つの準超音波波を利用してと言われています。131 音響兵器の簡単な一般分析では、そのような生成に非線形性の必要性が明確に言及されました。ここで、例えば $40,000\text{ kHz}$ や 40.007 kHz から発生する 7 Hz の低周波成分が前庭を乱すと言われました

しかし、いずれの場合も変換効率の定量的な推定は行われていません。

この主張を分析するには、まず制御された実験において、 140 dB を超えるレベルの低周波が前庭系に影響を与えなかったことを思い出す必要があります。差周波数信号の非線形生成は、空気中または耳の中で伝播中に起こり得ます。¹³³

まず空気中の変換について:式(A-7)で述べたように、平面波の場合、差周波数波の音圧は元の波の開始圧力よりも差と元の周波数の比率の倍で小さいです。保守的に高周波周波数 20 Hz と低超音波周波数 16 kHz を取ると、この比率は $1/800$ となり、超音波圧は 800 倍以上小さくなります

発生源から放出される圧力、すなわちレベルは 58 dB 以上低くなります。 1 m のエミッターサイズでは、平面波のケースはほぼ満たされます。

前庭効果に必要な低周波レベルを 140 dB (200 Pa rms 圧力)と保守的に仮定すると、発

生源の超音波レベルは約 200 dB(200 kPa = 大気圧の 2 倍)で、すでに強い衝撃領域に入り、利用可能な最強超音波源より 100 倍または 40 dB 高い数値です。この圧力は 100 MW/m² の強度に相当し、送信所面積 0.79 m² に積分すると、総音響出力は 79 MW となります。低周波効果の場合は、これを数秒間維持する必要があるでしょう。このような出力レベルを達成するのは非常に困難であり、反射鏡の前で毎秒 16,000 回のガソリン空気爆発を直接変換しても達成は難しいようです。出力をエミッターサイズを小さくしても効果はありません。なぜなら、その場合ビーム幅が短距離で大きくなり、強度が低下し、非線形変換効率が低下するからです。この仮想的な高速ショックの連続性の定量分析は別の研究が必要です。実際には、発生源で 1 MW/m² 程度の強度が最終的に可能になるかもしれません(180 dB、式(A-7)が成り立つ弱い衝撃に近い、潜在的な兵器源に関する節を参照)。これは周波数比の関係で最大 120 dB に換算され、低周波領域では無害です。

したがって、超音波から超音波への非線形差周波数生成が耳や前庭器官に顕著な影響を及ぼすレベルに達することは非常に考えにくいです。

第二に、耳の非線形なプロセスによって変換が起こり得ます。耳の高レベル超音波による差周波低周波発生に関する論文がないため、もっともらしいまたは保守的な仮定を用いて単純な推定を行います。一つ目は、人間の最も感度の高い周波数(約 2 kHz)から高聴覚限界に向かって増加するにつれて、鼓膜の動きとそれに伴う内耳への伝達が減少し、主に関与する質量の慣性によるものです。cat の場合、1kHz から 10kHz の間で 20 倍の減少が観察されています。保守的に 134 で、16kHz 以上ではこの値を取っています。次に、静圧とウンボ(槌がつながる鼓膜中心)の角度との間に保守的に単純化された非線形関係を用います。再び 140 dB レベルの前庭効果を仮定すると、必要な超音波レベルは 180 dB(19 kPa)以上となります。

これは利用可能な最強の周期超音波源の能力より約 10~20dB 高い数値です。それでも、そのようなレベルが生成可能であると仮定しましょう。標準的な仮定では、16kHz の波はこのレベルで始めると 1.4cm ですすでにショックを受け、その後強い吸収が始まり、39m で振幅不変の第 3 段が 60dB のレベルで始まるまで続きます。したがって、必要なレベルは仮想の発生源の直近に限定されます。しかしここでは、直接的な損傷が痛みの閾値を超えた耳の過負荷が起こる可能性が高く、むき出しの肌でも加熱を加えること(超音波の小節を参照)とともに、より劇的な影響を示します。

保守的な仮定を考慮すると、空気中でも耳でも周波数差(または変調)を生み出す非線形メカニズムのいずれも、前庭効果や聴覚痛が発生する内耳の低周波レベルに近いものを生み出すことはできないようです。ただし、発生源のすぐ近くを除いては。

一方で、空気中や耳中で異なる音源からの 2 つの非可聴(超音波)ビームが交差する(「敬意音」表 1 参照)によって可聴音を生成することは可能に思われます。なぜなら、聴覚には数十 dB のレベルが十分だからです。

回折無音響「弾丸」

米国およびロシアの音響兵器開発に関しては、非回折音響「弾丸」が報告されていますが、いくつかの報告では高周波で動作し、他では低周波で動作するという、やや矛盾する性質があります。アメリカでは1~2mサイズのアンテナが言及されています。ロシアでは、弾丸はバスケットボールサイズで周波数10Hz、数百メートルの範囲で非致死性から致死性まで選択可能とされていました(表1参照)。

これらの疑惑の背後に何があるのかは明らかではありません。付録1に示されているように、回折は線波、弱波、強い衝撃波の3種類すべてで起こります。特に低周波の場合、回折は前述のように全方向の伝播を可能にします。「10 Hz」という記述は波長が34mであることを示唆しているように見えますが、これは「バスケットボールサイズ」の波束には全く当てはまりません。しかし、より高い周波数や衝撃が起きた場合、回折は最終的にビームの拡散を可能にするため、1m程度の音源からの音響波では「数百メートル」にわたって強い擾乱をほぼ一定の大きさと伝播することは不可能に思えます。この傾向は、発生源の異なる部分で生成される信号が本質的に似ていて周期的である限り保持されます。

異なるパルス波形を発生させる主な可能性として、それらがソース領域内で制御された方法で変化し、それらの重ね合わせによってパルスが狭いビーム内で局所的に保たれ、同じソース領域からの均一な励起よりもはるかに広い距離にわたって局在するパルスが生まれます。ビーム幅は、最初から光源より波長単位で小さくすることができます。しかし、ソースが有限サイズであれば、実際のデバイスに求められるため、最終的に振幅が $1/r$ 減少する遠方場が発生します。このような波は「回折なし」ビーム、音響(または電磁)の「ミサイル」や「弾丸」、音響(または電磁気)の「指向性エネルギーパルストレイン」と呼ばれています。この効果の条件は、明確な(空間変動的)波形と広い帯域幅(すなわちかなりの高周波成分)を持つ過渡的なソース信号、そして線形伝搬です。音響学に関しては、水面で数十センチメートルの超音波実験を行った最初の実験では、源アレイの均一な連続波励起による軸方向の強度が少なくともある程度増加することが示されました。¹³⁵しかし、電磁気学とは異なり、音響学には2つの相反する効果があります。1つ目は線形吸収で、周波数の2乗に比例して増加し、パルスが伝播するにつれて高周波が順次減少します。次に、強い音の場合、非線形伝播は衝撃波の発生を引き起こし、早いほど振幅と周波数が高くなります。

付録1にもあるように、衝撃前線では異常な散逸損失が発生し、一定幅のビームでは $1/r$ 減少します。詳細な理論的研究や実験でそれに反することが証明されない限り、音響高出力パルスの伝播に対しては、ほぼビーム拡幅を避けて、均一信号の回折では不可能な距離を無視するのが望ましいと思われます。小信号の「ペンシルビーム」は実現可能であっても、振幅が大きい場合非線形吸収が効果を破壊してしまう可能性があります。

あるいは、ソリトン、すなわち非線形媒体中を伝播する1パルス波を、振幅や形状が変わらないものとも考えることもできます。これは、非線形性による高励起速度(付録1参照)が分散または散逸、またはチャンネルや管内での一次元伝搬、あるいは(本質的に)無限大の平面

波として相殺されることを要求します。¹³⁶ しかし自由空気中では、関心のある周波数での分散は無視可能であり、散逸は低すぎます。衝撃波形成の過程が示すように。ソリトンを運ぶ媒体でも、三次元ではビームは光源サイズに対して大きく膨張し、振幅が減少します。

137

さらに、渦環という可能性があります、これは回転性質のため通常の波動方程式では記述されません。渦輪、例えばスモークリングは、通常、流体のパルスオリフィスから排出することで生成されます。その周辺で回転が生じ、周囲の流体が巻き込まれ、その後回転リングは粘性相互作用によって安定した存在として周囲の媒体を通過します。トーラス内の流体は変わらず、渦環は煙の粒子で示されるように何かを運ぶことができます。渦輪移動中、粘性抗力がより多くの外部流体を巻き込み、後流を生じさせるため、リングはインパルスを失い、大きく遅くなります。ここでは回折は適用されず、距離に伴うサイズ増加も比較的遅いことに注意が必要です。最後に、リングは一般的な乱気流に分裂します。¹³⁸ 渦環の生成、伝播、影響の評価は時間的・空間的理由からここでは行われなかった。¹³⁹ もしリングの目的が圧力をかけることではなく、熱いガスや刺激物などの物質を運ぶことだけであれば、回転速度はそれほど重要ではありませんが、この場合、渦輪本物の本物にはすでに疑問視されていた「音響」兵器としての資格は、もちろんもはや適用されません。渦輪も詳細な研究が必要な分野です。¹⁴⁰

また、ジャーナリストや観察者が何かを誤解している可能性もあります。例えば、目に見えないレーザー光の集束ビームがターゲットの前方に衝撃波を発生させたプラズマ(下記参照)場合、焦点への伝播はもちろん「音響的」とはみなされません。また、低周波と高周波の不一致や、「非回折」と「非浸透」を同一視すること(表1参照)からも誤解が示唆されます。

ターゲットの前で生成されたプラズマ、鈍器による衝撃

防衛メディアでは、米統合軍小火器プログラムの小火器プログラム連絡役が、音響「弾丸」は「目標の前にプラズマを作り出し、鈍器のような衝撃波を生じさせることで無力化する」と述べたと引用されています。...野球ボールに当たるような鈍器による外傷を引き起こします。従来の弾丸は裂けたり裂けたりします。これは違う。なぜならプラズマが衝撃を引き起こすからだ。」¹⁴¹

プラズマ生成には、爆発する電荷のすぐ近くで発生するため、数メガパスカルの過圧が必要です(実際、数000Kの温度により空気は可視光を放出し、部分的にイオン化されています)。¹⁴²

「鈍器」という概念を受け入れれば、衝撃波の大きさは少なくとも人間の体の大きさと同等になるでしょう。これにより耳や肺にも影響が及び、ダメージ閾値は1 MPaを大きく下回ることになります。

したがって、過圧をはるかに超える衝撃誘発プラズマは確実に致命的です。第二の問題

は、これほど強い衝撃を引き起こす可能性に関するものです。集中衝撃波(すなわち内爆)では、球状衝撃管の中心の極めて小さな焦点でもギガパスカルの圧力を得ることができますが、¹⁴³ は衝撃波の圧力を $1/r^3$ 減少させることで球面膨張を避けつつ、発生源よりはるかに広い距離に投影できるようです
達成不可能(上記参照)。

したがって、かなりの距離でのプラズマ生成の可能性は除外できます。ジャーナリストたちが誤って音響兵器のせいとしているのではないかと推測することもできますが、実際には同じ記事の 1 ページ後に説明されているパルス化学レーザーを指しており、再び「ターゲット表面の前方に高温高圧プラズマを発生させ、爆発波を発生させ、変動する」しかし、物資や人員への影響を制御する」と述べた。¹⁴⁴ その場合、かなりの距離に焦点を合わせる作業は

レーザー光の短波長(約 m のオーダー)によって緩和され、短いパルスを使うことで高い瞬間出力を得やすくなります。

同様の議論は、「鈍器外傷」が一定の距離で衝撃波によって生じる可能性があるかどうかを問う場合にも当てはまります。最初に境界があった波はすぐに人体よりも大きくなり、その周囲を高速回折してほぼ同じ過圧を生み出し、作用します

主に圧縮力であり、空気で満たされた空洞を除いて組織が耐えられます。衝撃前線の後ろに動く空気の抗力だけが正味の力を及ぼします。通常の爆発では、約 100 kPa の衝撃過圧が必要で、1 kg TNT が約 3 m の距離で球状に爆発するためです。¹⁴⁵ この圧力では鼓膜破裂が 50%を超えることが予想されており、これはもちろんより劇的なことでしょう
怪我。

したがって、鈍器による外傷は衝撃波源の非常に近く、または衝撃波ビームが人体より小さい場所でのみ起こり得ます。また、レーザー生成プラズマの同じ混同もおそらく起きており、同じ文脈で言及されていました。渦環の場合、つまり物体の一部だけに作用する場合、別途分析が必要です(上記参照)。

インフレーションサウンドによる局所地震

非致死性兵器の概要では、音響兵器は窓を割るだけでなく、「局所的な地震」によって建物に影響を与える可能性があると言われています(明確な原因は示されていません)。¹⁴⁶ 地震は、建物を危険にさらすほどの土壌運動によって定義でき、土壌速度は 10 mm/s を大きく超える。¹⁴⁷ これを保守的な限界とし、最大音響・地震伝達係数 10-5 m/(Pas)を用いると、¹⁴⁸ その土壌速度を達成するには 1 kPa(レベル 154 dB)の低周波音圧が必要です。前述の通り、このようなレベルは低周波源のすぐ近くでのみ可能であり、数十メートル以上は維持できません。したがって、建物に損傷を与える振動レベルを生じさせるとすれば、それは周囲の地面の振動によって伝播されるのではなく、建物内や内部の共鳴によって、特に特定の大きな部屋内で低周波音エネルギーによって直接励起されることが多くなります。実際、

食器のガタガタ音や窓の割れ、漆喰のひび割れ、極端な状況では脆い壁の崩壊など、「地震のような現象」を引き起こす可能性があります。これには発生源からの非常に良い結合が必要です(保護に関する節も参照)。「地震のような」という表現の誤解がこの主張の根拠である可能性があります。

同様に、低周波音による「コンクリートの崩壊」と呼ばれる現象⁽¹⁴⁹⁾は、単純なインピンピングで起こるように聞こえ、インピーダンスの不一致が大きいため信じがたいですが、適切な建物共鳴を発生させ、良好な結合を得られる場合にのみ考えられます。¹⁵⁰ 金属の脆化や疲労、複合材料の剥離なども同様です。¹⁵¹

人への影響に関する疑惑

高出力の効果音が人間に響き、読んだときに強い印象を与えるといういくつかの主張がありますが、科学文献からは確認が難しいです。これは主に嘔吐と制御不能な排便に関するものです。¹⁵²

強い音源の近くでのめまいや吐き気は科学論文で報告されており、しばしば軽度または一時的と特徴づけられていますが、実際の嘔吐は高音波や超音波では報告されていません(ここではめまいはむしろ音声の影響によるものと考えられています)。¹⁵³ ジェットエンジンの近くで、系統的な研究では不安定さやバランスの乱れが観察されましたが、吐き気は一部の従業員にしかなく、時には曝露後に起こることもあり、嘔吐はありませんでした。これらの著者は「アメリカの報告」に言及し、ある情報源は 13kHz と 1W の電力でイライラや頭痛が続く、吐き気や嘔吐を伴うと述べています。しかし、その出典は示されていません。

¹⁵⁴ 他の実験では、9.2、10、12、15、17 kHz の音量を 140~156 dB のレベルに 5 分間曝露し、吐き気すら言及されなかったことを考えると、¹⁵⁵ さらなる情報がないため、この嘔吐の単一の主張はあまり重みを持たないようです。激しい低周波音については、最も極端な実験では、50~100Hz、約 150 dB で軽い吐き気やめまいが報告されましたが、嘔吐は起こりませんでした。¹⁵⁶ 172 dB までの低周波で動物をテストした場合、嘔吐は一切言及されませんでした。¹⁵⁷

腸の痙攣や制御不能な排便の証拠はさらに少ないです。本記事で調査した文献の中で、唯一のヒントは強い 16Hz サイレンを用いた実験中に観察された「消化器不調」に関するものでした。しかし、これらは全く明示されておらず、その直後の説明では、衣服のポケットの中で物体が振動しているという説明がありました。¹⁵⁸ 150 dB までの低周波曝露では腸の痙攣は観察されませんでした。¹⁵⁹ 低周波の動物実験でも同様です。ここで注目すべきは、振動実験の復習においても腸痙攣や制御不能な排便について言及されなかったことです。¹⁶¹

信頼できる資料が見つからない第三の効果は、例えば心臓の非常に低い周波数での共鳴が死に至る可能性があるというもので、初期の書籍で(詳細はない)と主張されています。¹⁶² 参照 極端な 150dB の 50~100Hz の露光は、被験者が胸部に複数の問題を抱えていたことを示していますが、心電図で監視された心臓は問題とは言及されませんでした。¹⁶³

同様に、低頻度で発生するとされる内出血の兆候も見当たらない。¹⁶⁴

したがって、これらの主張される効果は科学的証拠よりも伝聞に基づいているようです。特定の周波数帯域で高い音響レベルでは嘔吐、制御不能な排便、心臓の問題が起こる可能性は否定できませんが、それらの証拠はせいぜい乏しく、ある程度の距離でそのような音レベルを達成するのは非常に困難です。

NOTES AND REFERENCES

1. A more detailed version of this article with more references and full appendices appears simultaneously: J. Altmann, *Acoustic Weapons - A Prospective Assessment. Sources, Propagation, and Effects of Strong Sound* (Ithaca NY: Peace Studies Program, Cornell University 1999).
2. Most of the information on non-lethal weapons comes from journalistic articles in the defence or general press. The following overview articles and books discuss various problems of non-lethal weapons and provide many references: R. Span, J. Altmann, G. Hornig, T. Krallmann, M. Rosario Vega Laso, J. Wüster, "‘Non-lethal’ Weapons – Fantasy or Prospect of More Humane Use of Force?" (in German), Dossier Nr. 17, *Wissenschaft und Frieden* (June 1994); R. Kokoski, "Non-lethal weapons: a case study of new technology developments," in: *SIPRI Yearbook 1994: World Armaments and Disarmament* (Stockholm/Oxford: SIPRI/Oxford University Press, 1994): 367-386; S. Aftergood, "The Soft-Kill Fallacy," *Bulletin of the Atomic Scientists* (Sept./Oct. 1994): 40-45; A. Roland-Price, "Non-Lethal Weapons: A Synopsis," in: U.S. Congress, Office of Technology Assessment, "Improving the Prospects for Future International Peace Operations - Workshop Proceedings," OTA-BP-ISS-167 (Washington DC: U.S. Government Printing Office, Sept. 1995); J. Altmann, "‘Non-Lethal’ Weapons," in: J. Rotblat (ed.), *Security, Cooperation and Disarmament: The Unfinished Agenda for the 1990s* (Singapore etc.: World Scientific, 1998); M. Dando, *A New Form of Warfare - The Rise of Non-Lethal Weapons* (London/Washington: Brassey's, 1996); N. Lewer, S. Schofield, *Non-Lethal Weapons: A Fatal Attraction? Military Strategies and Technologies for 21st- Century Conflict* (London/New Jersey: Zed Books, 1997). There are not many systematic and comprehensive publications by proponents of non-lethal weapons. The following references give some examples of proponents' writing: "Nonlethality: A Global Strategy Whitepaper" (Washington DC: U.S. Global Strategy Council, 1992); J. B. Alexander, "Nonlethal Weapons and Limited Force Options," presented to Council of Foreign Relations, New York, 27 Oct. 1993; Milt Finger, "Technologies to Support Peacekeeping Operations," in: U.S. Congress, Office of Technology Assessment (ibid.); G. Yonas, "The Role of Technology in Peace Operations"; in: U.S. Congress, Office of Technology Assessment (ibid.); C. Morris, J. Morris, T. Baines, "Weapons of Mass Protection - Nonlethality, Information Warfare, and Airpower in the Age of Chaos," *Airpower Journal* 9, no. 1 (Spring 1995): 15-29; D. A. Morehouse, *Nonlethal Weapons – War Without Death* (Westport CT/London: Praeger, 1996). For a balanced view from inside the U.S. military, see: J. W. Cook III, D. P. Fiely, M. T. McGowan, "Nonlethal Weapons - Technologies, Legalities, and Potential Policies," *Airpower Journal* 9, Special Issue (1995): 77-91. NLW developments for

law-enforcement purposes are presented in considerable detail e.g. in: J. Alexander, D. D. Spencer, S. Schmit, B. J. Steele (eds.), "Security Systems and Nonlethal Technologies for Law Enforcement," Proc. SPIE 2934 (1997). All kinds of activity are described in the contributions to the conference of the National Defense Industrial Association "Non-Lethal Defense III," Johns Hopkins University, 25 and 26 Febr. 1998, <http://www.dtic.mil/ndia/NLD3/index.html>.

3. Morehouse (note 2).

4. E.g.: A. W. Debban, "Disabling Systems: War-Fighting Option for the Future," *Airpower Journal* 7, no. 1 (Spring 1993): 44-50; Roland-Price (note 2).

5. It seems that other Western industrialized countries rather take a wait-and-see approach, mainly doing paper studies to keep up to date, see: Altmann 1996 (note 2); reports from Russia indicate that there is considerable interest in non-lethal weapons as well, examples include directed-energy weapons and an acoustic bullet, see: Kokoski (note 2), 373; M.T., "Russians Continue Work on Sophisticated Acoustic Weaponry," *Defense Electronics* 26, no. 3 (March 1994): 12.

6. These considerations may have been among the motives in the recent rethinking by the U.S. of its position towards laser blinding weapons. In June 1995 the Department of Defense was on the verge of buying 50 LCMS laser blinding rifles and planned to acquire 2,500 more. But in September 1995 it changed its policy, and in December 1995 (after the wording had been changed to accommodate US and other interests) the U.S. signed the new Additional Protocol to the UN Convention on Prohibitions or Restrictions on the Use of Certain Conventional Weapons Which May Be Deemed to Be Excessively Injurious or to Have Indiscriminate Effects ("Certain Weapons Convention," "Inhumane Weapons Convention") of 1980. See: "Blinding Laser Weapons: The Need to Ban a Cruel and Inhumane Weapon," *Human Rights Watch Arms Project* 7, no. 1 (Sept. 1995); text of the Protocol in: "Trust and Verify," no. 62 (London: Verification Technology Information Centre, Nov./Dec. 1995).

7. The Biological Weapons Convention of 1972 bans any hostile use of biological agents, irrespective of whether the target is a living organism or equipment; Finger (note 2) is wrong in this respect. See: Altmann 1996 (note 2); Cook et al. (note 2). However, the Chemical Weapons Convention of 1992 only prohibits toxic chemicals which can cause death, temporary incapacitation or permanent harm to humans or animals.

8. The most prominent example is the case of laser blinding weapons, use of which fortunately has been banned in 1995, see note 6.

9. See also: B. Starr, "Non-lethal weapon puzzle for US Army," *International Defense Review* 4 (1993): 319-320.

10. Morehouse (note 2), p. 119.
11. Such assessment of new military technologies is one part of preventive arms limitations; for examples of other technologies see: J. Altmann, "Verifying Limits on Research and Development - Case Studies: Beam Weapons, Electromagnetic Guns," in: J. Altmann, T. Stock, J.-P. Stroot (eds.), *Verification After the Cold War - Broadening the Process* (Amsterdam: VU Press, 1994).
12. Additional sources not included in the table: B. Starr, "U.S. tries to make war less lethal," *Jane's Defence Weekly* (31 Oct. 1992): 10; A. and H. Toffler, "War and Anti-War. Survival at the Dawn of the 21st Century" (Boston etc.: Little, Brown and Co. 1993) (here: ch. 15, "War without Bloodshed?") (quoted after the German translation: "Überleben im 21. Jahrhundert" (Stuttgart: DVA 1994)); Debban (note 4). Alexander (note 2); J. Barry, T. Morganthau, "Soon, 'Phasers on Stun,'" *Newsweek* (7 Febr. 1994): 26-28; Kokoski (note 2); Aftergood (note 2), G. Frost, C. Shipbaugh, "GPS Targeting Methods for Non-Lethal Systems," Reprint RAND/RP-262 (1996) (reprinted from IEEE Plans 94); Cook et al. (note 2); Morehouse (note 2), p. 20, 119 f.; Dando (note 2), p. 11 ff; SARA report of 10 Febr. 1995 (revised 13 Febr. 1996) and other references as reported by: W. Arkin, "Acoustic Anti-personnel Weapons: An Inhumane Future?," *Medicine, Conflict and Survival* 14, no. 4 (1997): 314-326.
13. M. Lumsden, *Anti-personnel Weapons* (Stockholm/London: SIPRI/Taylor&Francis 1978): 203-205.
14. "Army tests new riot weapon," *New Scientist* (20 September 1973): 684; C. Ackroyd, K. Margolis, J. Rosenhead, T. Shallice, *The Technology of Political Control* (2nd ed.) (London: Pluto, 1980): 224-225. See also: R. Rodwell, "'Squawk box' technology," *New Scientist* (20 September 1973): 667.
15. "Non-lethality ..." (note 2).
16. V. Kiernan, "War over weapons that can't kill," *New Scientist* (11. Dec. 1993): 14-16.
17. Lewer/Schofield (note 2), 8 ff.
18. P. R. Evancoe, "Non-Lethal Technologies Enhance Warrior's Punch," *National Defense* (Dec. 1993): 26-29.
19. M. Tapscott, K. Atwal, "New Weapons That Win Without Killing On DOD's Horizon," *Defense Electronics* (Febr. 1993): 41-46.
20. Starr (note 9).
21. "Army Prepares for Non-Lethal Combat," *Aviation Week & Space Technology* (24 May 1993): 62.
22. M. T. (note 5).

23. N. Broner, "The Effects of Low Frequency Noise on People - A Review," *Journal of Sound and Vibration* 58, no. 4 (1993): 483-500; O. Backteman, J. Köhler, L. Sjöberg, "Infrasound - Tutorial and Review: Part 4," *Journal of Low Frequency Noise and Vibration* 3, no. 2 (1984): 96-113. Broner cites: J. F. J. Johnston, *Infrasound - a Short Survey* (Royal Military College of Science, England, 1971). Backteman et al. have copied the respective paragraph from Broner virtually identically, leaving out two sentences and two references, without giving the source.
24. R. Applegate, *Riot Control - Material and Techniques* (Harrisburg PA: Stackpole, 1969): 273.
25. Applegate (note 24), 271-273. In 1973 the British government bought 13 such systems for the use in Northern Ireland, but they seem to not have been used there. See: Ackroyd et al. (note 14), 223-224.
26. Johnston (note 23), quoted in Broner (note 23). For the use of white noise on prisoners see also: Lumsden (note 13) and references given there.
27. "Army tests ..." (note 14); Ackroyd et al. (note 14), 224-225. See also: Rodwell (note 14).
28. In a subsequent press conference, the British Army instead presented the 350-W amplifier/speaker system (see note 24) of which 13 copies had been bought, but "forgot" to invite the *New Scientist* reporter who had written the "squawk box" article, see: R. Rodwell, "How dangerous is the Army's squawk box?," *New Scientist* (27 September 1973): 730.
29. Ackroyd et al. (note 14), 224-225.
30. M. Bryan, W. Tempest, "Does infrasound make drivers drunk?," *New Scientist* (16 March 1972): 584-586; R. Brown, "What levels of infrasound are safe?," *New Scientist* (8 Nov. 1973): 414-415; H. E. von Gierke, D. E. Parker, "Infrasound," ch. 14 in: W. D. Keidel, W. D. Neff (eds.), "Auditory System - Clinical and Special Topics," *Handbook of Sensory Physiology*, vol. V/3 (Berlin etc.: Springer, 1976): section VII.
31. Starr (note 9).
32. Tapscott/Atwal (note 19). See also: <http://www.pica.army.mil/pica/products/tbiwc.html>.
33. Starr (note 9). See also: <http://www.sara.com/documents/future.htm>. Similar information is provided by Tapscott/Atwal (note 19); they state that Los Alamos National Laboratory (LANL) is involved in acoustic beams, too, whereas Starr mentions LANL only for optical munitions and high-power microwave projectiles. A LANL brochure on non-lethal weapons contains the latter two, but not acoustic weapons: "Special Technologies for National Security" (Los Alamos NM: Los Alamos National Laboratory, April 1993).
34. M. T. (note 5).

35. SARA Report, 10 February 1995 (revised 13 February 1996) and other references as reported by Arkin (note 12).
36. With infrasound, no pain or nausea was observed even up to 172 dB, see section 2.2 below. With audible sound, there was no physical trauma and damage to tissues up to above 150 dB, see 2.3.
37. Tens of meters are more realistic, see appendix 2.
38. Note that the infrasound research seems to have been refocused recently, see: J. Hecht, "Not a sound idea," *New Scientist*, 20 March 1999, 17.
39. E.g., vertigo, nausea, and vomiting are ascribed to infrasound at 130 dB (correct: none to 172 dB, see section 2.2.3.2 below), and a blast wave would lead to eardrum rupture at 130 dB (correct: above 185 dB, see 2.5): Kap. 3.8, see "Konzeptbeschreibungen akustischer Wirkmittel" in J. Müller et al., *Nichtletale Waffen, Abschlußbericht, Band II, Dasa-VA-0040-95=OTN-035020, Daimler-Benz Aerospace*, 30. 4. 1995, 307-333.
40. A. Dähn, "Angriff auf das Trommelfell"; *Berliner Zeitung*, 24 March 1999; K.-D. Thiel, "Non-Lethal Weapons Activities at ICT," in *Non-Lethal Defense III* (note 2), file ict.pdf.
41. Lumsden (note 13); L. Liszka, "Sonic Beam Devices - Principles" in *Expert Meeting on Certain Weapon Systems and on Implementation Mechanisms in International Law*, Geneva, 30 May - 1 June 1994, Report (Geneva: International Committee of the Red Cross, July 1994), 89-91.
42. Arkin (note 12).
43. My subject is only sound in air. Potential underwater applications, e.g., against divers or animals, need a separate study.
44. For transient pressure variations the level is often defined using the maximum pressure occurring, not the rms value.
45. For a discussion of blast weapons, see Lumsden (note 13) chap. 6.
46. SARA (note 12)
47. For space reasons, in the section on effects several details and references have been left out. For the complete information see Altmann (note 1).
48. F. G. Hirsch, "Effects of Overpressure on the Ear - A Review," *Annals of the New York Academy of Sciences* 152(Art. 1) (1968): 147-162; W. D. Keidel, W. D. Neff (eds.), "Auditory System - Anatomy, Physiology (Ear)," in *Handbook of Sensory Physiology*, vol. V/1 (Berlin etc.: Springer, 1974); Karl D. Kryter, *The Effects of Noise on Man* (New York etc.: Academic 1970; second edition 1985), ch. 1; v. Gierke/Parker (note 30); W. Melnick, "Hearing Loss from Noise Exposure," in C. M. Harris (ed.), *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control* (New York etc.: McGraw-Hill, 1991) ch. 18; W. D. Ward,

“Noise-Induced Hearing Damage,” in M. M. Paparella et al. (eds.), *Oto laryngology* vol. II (3rd edition Philadelphia etc.: Saunders 1991) ch. 45; B. Berglund, P. Hassmén, “Sources and effects of low-frequency noise,” *Journal of the Acoustical Society of America* 99(5) (May 1996): 2985-3002.

49. H.-G. Boenninghaus mit T. Lenarz, *Hals-Nasen-Ohrenheilkunde für Studierende der Medizin*, 10. Aufl., Berlin etc.: Springer, 1996.

50. Note that PTS can accumulate over a long time even if recovery from TTS occurs daily

51. Note that sometimes also long-term injury comes under this heading, and damage from short exposure is called acute acoustic trauma

52. Loudness is measured by comparing subjective perception of tones at other frequencies with the one at 1 kHz. At 1 kHz, loudness levels in phone are defined to be equal to the respective sound pressure levels in decibels.

53. N. S. Yeowart, M. J. Evans, “Thresholds of audibility for very low-frequency pure tones,” *Journal of the Acoustical Society of America* 55, no. 4 (April 1974): 814-818; A. M. Small, Jr., R. S. Gales, “Hearing Characteristics,” in Harris (note 48), chap. 17. H. Møller, J. Andresen, “Loudness of Pure Tones at Low and Infrasonic Frequencies,” *Journal of Low Frequency Noise and Vibration* 3, no. 2 (1984): 78-87; Berglund/Hassmén (note 48); Melnick (note 48); H. E. von Gierke, C. W. Nixon, “Effects of Intense Infrasound on Man,” in W. Tempest (ed.), *Infrasound and Low Frequency Vibration* (London etc.: Academic, 1976), ch. 6, 134; v. Gierke/Parker (note 30), 604.

54. E.g. see the sensational article “The Low-Pitched Killer - Can sounds of silence be driving us silly” (*Melbourne Sunday Press*, 7 Sept. 1975), reproduced in Broner (note 23); see also note 30. Within science, it is interesting what Lumsden writes about a meeting of the British Association on the Advancement of Science where the “Director of the [British] Noise Abatement Society reported that at a research centre at Marseille, France, an infrasound generator had been built which generated waves at 7 Hz. He said that when the machine was tested, people in range were sick for hours. The machine could cause dizziness, nervous fatigue and ‘seasickness’ and even death up to 8 km away (*Associated Press*, Leicester, England, 9 September 1972).” Lumsden (note 13), 204. This obviously refers to Gavreau's work done at Marseille, see V. Gavreau, R. Condat, H. Saul, “Infra-Sons: Générateurs, Détecteurs, Propriétés physiques, Effets biologiques,” *Acustica* 17, no. 1 (1966): 1-10; V. Gavreau, “Infrasound,” *Science Journal* 4, no. 1 (Jan. 1968): 33-37. Note that today scientists at the same institute have some doubts about the conclusions drawn by Gavreau on the effects of infrasounds, because his experiments and observations have not been replicated and confirmed under accurate experimental conditions. G. Canevet, *Laboratoire de Mécanique et*

d'Acoustique CNRS, Marseille, personal communication.

55. Thus, in the determination of the capabilities of hearing much care is needed to keep nonlinearities in sound production very low lest the externally generated harmonics at higher and better audible frequencies lead to erroneously high values.

56. With dogs and cats, less pathological damage was observed. On the other hand, thirty seconds of exposure to 172 dB infrasound did not even produce reddening in a human eardrum.

57. There is one documented case where at 6.5 kHz, a small rupture and blood in the external ear canal was observed with one experimenter after 5 minutes exposition to about 158 dB (1.6 kPa): H. Davis, H. O. Parrack, D. H. Eldredge, "Hazards of Intense Sound and Ultrasound," *Annals of Otology, Rhinology, Laryngology* 58 (1949): 732-738.

58. C. Mohr, J. N. Cole, E. Guild, H. E. von Gierke, "Effects of Low Frequency and Infrasonic Noise on Man," *Aerospace Medicine* 36, no. 9 (1965): 817-824. Concerning the stronger effects at low audio frequencies reported by Mohr et al., note that there are doubts at the same laboratory today whether these were due to oil droplets in the compressor air and not to the sound. The experiments are to be repeated in 1999. R. McKinley, Aural Displays and Bioacoustics Branch, Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, OH, U.S., personal communication.

59. Humans can stand quite high accelerations. In experiments with frequencies between 1 and 25 Hz, the subjective tolerance was reached at a few times the normal gravity acceleration ($g=9.8 \text{ m/s}^2$); subjects suffered, inter alia, from dyspnoea, chest and periumbilical pain, and sometimes gastrointestinal bleeding. However, no lasting effects were observed.

60. If the sound pressure would affect only a part of the body surface, sideward movement and shear waves in the tissue would result with much greater energy deposition.

61. Note that for near-daily exposition of humans over 10 years to short tones, much lower damage-limiting levels of 130 to 115 dB were estimated. For the maximum instantaneous sound pressure occurring in an isolated event during a working day, 200 Pa (140 dB) has been given.

62. See note 57.

63. The authors described a "most unpleasant and disturbing sensation of general instability and weakness"; nausea, true dizziness, visual disturbances, or nystagmus were not observed. Ear protection stopped the effect. See E. D. D. Dickson, D. L. Chadwick, "Observations on Disturbances of Equilibrium and Other Symptoms Induced by Jet Engine Noise," *Journal of Laryngology and Otology* 65 (1951): 154-165. This seems to be the only article which reasonably reliably and completely describes the symptoms and circumstances

of equilibrium disturbances close to jet engines. Later studies of ground or flight-deck personnel do not mention equilibrium problems, even though personnel was exposed to levels up to above 140 dB, often without ear protection. Dickson/ Chadwick of 1951 was cited to the 80s.

64. Among the about 1800+450 articles produced by a Medline search for (injury or impairment) and (sound or noise or ultrasound), or (acoustic trauma), respectively, from 1966 to 1998, I have only found four (potentially) describing injury due to tonal or broad- or narrow-band noise of level about or above 140 dB. On the other hand, there are many articles about damage due to impulse noise of levels of 150 dB and more, see section 2.5 in Altmann (note 1).

65. Rats and mice were killed by overheating within minutes at audio and ultrasound frequencies.

66. Pulses of fast rise time and duration above 3 ms, produced at repetition rates of 6-30/min to no more than 100 at one exposure, would not cause excessive hearing loss in 75% of the exposed people.

67. Knocking a person down, which occurs with nuclear blasts of 0.5 to 1 s duration at 7-10 kPa overpressure (171-174 dB), see G. F. Kinney, K. J. Graham, *Explosive Shocks in Air* (New York etc.: Springer, 1985), table XV, is not relevant with shock waves from conventional explosions. Durations of conventional-explosion shock waves are only a few ms and thus the impulse transferred, i.e., the time integral over the drag force, is correspondingly smaller for equal peak overpressure. Only at very close distance (below a few meters) would the impulse suffice, but here other damage (to the ear drum, the lungs) would be more relevant, see appendix 1.

68. For this and the following examples see also: D. L. Johnson, "The Effects of High Level Infrasound," in: H. Møller, P. Rubak (eds.), *Conference on Low Frequency Noise and Hearing*, 7-9 May 1980, Aalborg, Denmark.

69. See Altmann (note 1), appendix A.4.

70. N. S. Yeowart, M. E. Bryan, W. Tempest, "The Monaural M.A.P. Threshold of Hearing at Frequencies from 1.5 to 100 c/s," *Journal of Sound and Vibration* 6 (1967): 335-342; see also: M. J. Evans, "Physiological and Psychological Effects of Infrasound at Moderate Intensities," in Tempest (note 53) chap. 5.

71. N. S. Yeowart, M. E. Bryan, W. Tempest, "Low-frequency Noise Thresholds," *Journal of Sound and Vibration* 9 (1969): 447-453; see also: v. Gierke/Nixon (note 53).

72. D. L. Johnson, "Various Aspects of Infrasound," in L. Pimonow (ed.), *Colloque international sur les infra-sons* (Paris: Centre National de Recherche Scientifique, 1974): 129-153, cited after: v. Gierke/Parker (note 30). Fig. 2 in v. Gierke/Nixon (note 53) shows

“piston stroke 12 cm d.a.”

73. Assuming a large baffle, from equation (A-10) in: Altmann (note 1).
74. For an overview over natural sources, see T. B. Gabrielson, “Infrasound” in M. J. Crocker (ed.), *Encyclopedia of Acoustics* (New York etc.: Wiley, 1997) ch. 33, and literature cited there. Note that for very slow pressure variations the Eustachian tube provides equalization of the middle-ear pressure.
75. R. D. Hill, “Thunder” in R. H. Golde (ed.), *Lightning*, vol. 1 (London etc.: Academic, 1977) chap. 11.
76. Johnson (note 68); own calculations.
77. Backteman et al. (note 23); Berglund/Hassmén (note 48).
78. Backteman et al. (note 23).
79. Johnson (note 68); v. Gierke/Nixon (note 53).
80. From own measurements of MiG-21 and Tornado fighter-bombers, see J. Altmann, R. Blumrich, “Acoustic and Seismic Signals during Aircraft Take-offs and Landings” (in German) in *Fortschritte der Akustik - DAGA 94* (Bad Honnef: DPG-GmbH. 1994): 417-420; R. Blumrich, *Sound Propagation and Seismic Signals of Aircraft used for Airport Monitoring - Investigations for Peace-keeping and Verification* (Hagen: ISL, 1998).
81. Mohr et al. (note 58); v. Gierke/Parker (note 30).
82. v. Gierke/Nixon (note 53).
83. v. Gierke/Nixon (note 53); v. Gierke/Parker (note 30).
84. H. C. Sommer, C. W. Nixon, “Primary components of simulated air bag noise and their relative effects on human hearing,” Report, AMRL-TR-73-52 (Wright-Patterson Air Force Base OH: Aerospace Medical Research Laboratory 1973), cited after: v. Gierke/Parker (note 30), section V; Johnson (note 68).
85. H. G. Leventhall, “Man-made infrasound - its occurrence and some subjective effects” in Pimonow (note 72), quoted after v. Gierke/Nixon (note 53).
86. For general articles on loudspeaker arrays, see the special issue of *Journal of the Audio Engineering Society Audio/Acoustics/Applications* 38, no. 4 (April 1990).
87. With layers of extremely porous, but stiff aerogels on the membrane, impedances could match and coupling could be much improved. This possibility is also mentioned by Finger (note 2).
88. For the efficiency figures see: B. M. Starobin, “Loudspeaker Design” in Crocker (note 74) chap. 160; see also V. Salmon, “Horns,” in Crocker (note 74) ch. 61, and literature cited there.
89. The 40° held for the 68 cm long exponential horns with combined diameter 71 cm; there was also a 2.1 m long extension. R. C. Jones, “A Fifty Horsepower Siren,” *Journal of the*

Acoustical Society of America 18, no. 2 (Oct. 1946): 371-387.

90. C. H. Allen, I. Rudnick, "A Powerful High Frequency Siren," *Journal of the Acoustical Society of America* 19, no. 5 (Sept. 1947): 857-865; C. H. Allen, H. Frings, I. Rudnick, "Some Biological Effects of Intense High Frequency Airborne Sound," *Journal of the Acoustical Society of America* 20, no. 1 (Jan. 1948): 62-65.

91. H. O. Parrack, "Ultrasound and Industrial Medicine," *Industrial Medicine and Surgery* 21, no. 4 (April 1952): 156-164.

92. J. Sabatier, "Acoustical Characterization of the Mother of All Speakers" (master's thesis, National Center for Physical Acoustics, 1993); <<http://w3.arl.mil/tto/ARLDTT/FoxProdata/fac50.html>>.

93. Assuming that the sound pressure is approximately equal across the 2.3 m wide mouth, the area ratio to the equivalent 1-m-radius sphere emitting 20 kW results in about 4.8 kW/m² (157 dB). Spherical spreading with 1/r² decrease of intensity can be assumed already close to the mouth. Note also that there is frequency-dependent directivity: the sound pressure decreases off the horn axis the faster, the higher the frequency (but above the frequency where the first null of (A-4) occurs the decrease is not monotonical because of sidelobes). With a slightly smaller horn of 2.1 m diameter, at 40 Hz ($ka=0.8$) the intensity was still essentially the same in all directions.

94. E.g., with meter-size enlarged models of police whistles or Levavasseur whistles 196 and 37 Hz have been produced at up to about 2 kW power, more would have been possible with higher air flow and larger whistles. See: Gavreau et al. 1966 (note 54); see also: Gavreau 1968 (note 54).

95. Yu. Ya. Borisov, "Acoustic Gas-Jet Generators of the Hartmann Type," in L. D. Rozenberg (ed.), *Sources of High-Intensity Ultrasound* (New York: Plenum 1969) part I; see also Parrack 1952 (note 91); H. Kuttruff, "Physik und Technik des Ultraschalls" (Stuttgart: Hirzel, 1988): 140 f.

96. J. A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez-Corral, L. Gaete-Garreton, "An ultrasonic transducer for high power applications in gases," *Ultrasonics* 16 (November 1978): 267- 271.

97. According to equation (A-14) to (A-24) in Altmann (note 1).

98. J. A. Gallego-Juarez, L. Gaete-Garreton, "Experimental Study of Nonlinearity in Free Progressive Acoustic Waves in Air at 20 kHz," 8e Symposium International sur l'acoustique non linéaire, *Journal de Physique* 41, Colloque C-8, suppl. au no. 11 (Nov. 1979): C8-336 C8-340; the total level was estimated from the levels of the individual harmonics

99. Altmann (note 1), appendix A.4 and fig. A.2.

100. Altmann (note 1), appendix A.4.

101. Megawatt power was mentioned by SARA (note 12).
102. Altmann (note 1), section 3.2.
103. For treatments of slightly related problems see: Y. Inoue, T. Yano, "Propagation of strongly nonlinear plane waves," *Journal of the Acoustical Society of America* 94, no. 3 pt. 1 (Sept. 1993): 1632-1642; Y. Inoue, T. Yano, "Strongly nonlinear waves and streaming in the near field of a circular piston," *Journal of the Acoustical Society of America* 99, no. 6 (June 1996): 3353-3372.
104. The DASA report discusses concepts of a 0.5 kg whistling system for hand throwing to 10-50 m (working about 30 seconds), and a 5 kg system for air-gun delivery to 300 m from a small truck (duration about 5 minutes), both producing 120 dB in 1 m at 1-10 kHz, see: Müller (note 39).
105. C. W. Nixon, E. H. Berger, "Hearing Protection Devices" ch. 21 in Harris (note 48). For individual attenuation values, including the helmet, see J. C. Webster, P. O. Thompson, H. R. Beitscher, *Journal of the Acoustical Society of America* 28, no. 4 (July 1956): 631-638.
106. G. Jansen, "Influence of High Noise Intensities on the Human Organism" (in German), *Wehrmedizinische Monatsschrift* no. 10 (1981): 371-379.
107. R. Moulder, "Sound-Absorptive Materials," in Harris (note 48) chap. 30
108. For a rectangular room, half of the longest resonance wavelength equals the longest dimension. Thus, e.g., for 5 m length 34 Hz is the lowest resonance frequency.
109. There is of course a considerable body of medical literature on aural injuries and their treatment, see e.g.: Paparella et al. (note 48). Therapy for sub-lethal blast damage to other organs than the ear will not be discussed here, because the ear damage will be prominent, and because the former does not come under the "acoustic" rubric.
110. Ward 1991 (note 48). See also R. Probst et al., "A Randomized, Double-blind, Placebo- controlled Study of Dextran/Pentoxifylline Medication in Acute Acoustic Trauma and Sudden Hearing Loss," *Acta Otolaryngologica* (Stockholm) 112, no. 3 (1992): 435- 443.
111. Ward 1991 (note 48).
112. R. H. Chait, J. Casler, J. T. Zajtchuk, "Blast Injury of the Ear: Historical Perspective," *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology* 98, no. 5 pt. 2, Suppl. 140 (May 1989): 9-12; J. D. Casler, R. H. Chait, J. T. Zajtchuk, "Treatment of Blast Injury to the Ear," *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology* 98, no. 5 pt. 2, Suppl. 140 (May 1989): 13-16; and respective references.
113. See e.g.: A. G. Kerr, J. E. T. Byrne, "Concussive effects of bomb blasts on the ear," *Journal of Laryngology and Otolaryngology* 89, no. 2 (Febr. 1975): 131-143.
114. Papers of International Cochlear Implant, Speech and Hearing Symposium, *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology* 104, no. 9 pt. 2, Suppl. 166/ (Sept. 1995): 1-468; for

acquired deafness with potential induction by noise see J. S. Thomas, "Cochlear Implantation in the Elderly," *ibid.*, pp. 91-93; R. K. Shepherd et al., "The Central Auditory System and Auditory Deprivation: Experience with Cochlear Implants in the Congenitally Deaf," *Acta Otolaryngologica* (Stockholm) Supplement 532 (1997): 28-33; M. J. A. Makhdoum, A. F. M. Snik, P. van den Broek, "Cochlear implantation: a review of the literature and the Nijmegen results," *Journal of Laryngology and Otology* 111 (Nov. 1997): 1008-1017; papers of third European Symposium on Pediatric Cochlear Implantation, *American Journal of Otology* 18, no. 6 Suppl. (Nov. 1997): S1-S172.

115. Ward 1991 (note 48).

116. L. Doswald-Beck (ed.), "Blinding Weapons: Reports of the Meetings of Experts Convened by the International Committee of the Red Cross on Battlefield Laser Weapons, 1989-1991" (Geneva: International Committee of the Red Cross 1993): 336; "Blinding laser weapons ..." (note 6): 28 ff.

117. R. M. Coupland (ed.), "The SIRUS Project - Towards a determination of which weapons cause 'superfluous injury or unnecessary suffering'" (Geneva: International Committee of the Red Cross, 1997).

118. For details, see appendices A.1-A.4 of Altmann (note 1).

119. E.g.: E. Skudrzyk, *The Foundations of Acoustics - Basic Mathematics and Basic Acoustics* (New York/Wien: Springer, 1971); P. M. Morse, K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics* (New York etc.: McGraw-Hill, 1968); A. D. Pierce, *Acoustics - An Introduction to Its Physical Principles and Applications* (Woodbury NY: Acoustical Society of America, 1991).

120. Without the pipe, acoustic short-circuit between the front and back of the piston would occur at low frequencies - this is the reason why loudspeakers are usually mounted in closed boxes.

121. See also: H. Levine, J. Schwinger, "On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe," *Physical Review* 73 (1948): 383-406.

122. See e.g.: Salmon (note 88) and literature cited there.

123. Starobin (note 88).

124. See e.g.: O. V. Rudenko, S. I. Soluyan, *Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics* (New York/London: Consultants Bureau, 1977); G. B. Whitham, *Linear and Nonlinear Waves* (New York etc.: Wiley, 1974); M. F. Hamilton, D. T. Blackstock (eds.), *Nonlinear Acoustics* (San Diego etc.: Academic, 1998).

125. Non-linear sound propagation and the interaction with diffraction and absorption are fields of active research. Especially for pulsed sources, there is a need for more work, see the concluding remarks of: J. N. Tjøtta, S. Tjøtta, "Nonlinear Equations of Acoustics" in M. F. Hamilton, D. T. Blackstock (eds.), *Frontiers of Nonlinear Acoustics: Proceedings of 12th*

ISNA (London: Elsevier, 1990): 80-97. For on-going research, see the series of International Symposia on Non-linear Acoustics.

126. See e.g.: Rudenko/Soluyan (note 124).

127. Ya. B. Zel'dovich, Yu. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*, vol. I (New York/London: Academic Press, 1966); Whitham (note 124); S. Glasstone, P. J. Dolan, "The Effects of Nuclear Weapons" (Washington DC: Government Printing Office, 1977) (ch. III); Kinney/Graham (note 67).

128. W. D. Ward, W. Selters, A. Glorig, "Exploratory Studies on Temporal Threshold Shift from Impulses," *Journal of the Acoustical Society of America* 33, no. 6 (June 1961): 781-793.

129. For details, see: Altmann (note 1), section 5. and appendices A.5-A.7.

130. The detailed analysis, including estimates from 500 Hz to 10 kHz, is given in: Altmann (note 1), appendix A.5.

131. "Army tests ..." (note 14).

132. Liszka (note 41).

133. Both cases are treated in: Altmann (note 1), appendix A.6.

134. J. J. Guinan, Jr., W. T. Peake, "Middle-Ear Characteristics of Anesthetized Cats," *Journal of the Acoustical Society of America* 41, no. 5 (1967): 1237-1261. Note that in their anesthetized animals the middle-ear muscles were relaxed so that the aural reflex reducing transmission was not working. Thus the estimate made here is even more conservative.

135. There is much more literature on electromagnetic and optical than on acoustic narrow pulsed beams, and much more theoretical work than experimental. See e.g.: R. W. Ziolkowski, "Localized transmission of electromagnetic energy," *Physical Review A* 39, no. 4 (Febr. 15, 1989): 2005-2033, and references cited therein; Gang Wang, Wen Bing Wang, "Beam characteristics of short-pulse radiation with electromagnetic missile effect," *Journal of Applied Physics* 83, no. 10 (15 May 1998): 5040-5044. Note that the "bullet" notion is even used for a pulse "shot" through a conically expanding "rifle": A. Stepanishen, "Acoustic bullets/transient Bessel beams: Near to far field transition via an impulse response approach," *Journal of the Acoustical Society of America* 103, no. 4 (April 1998): 1742-1751. For the ultrasound experiment see: R. W. Ziolkowski, D. K. Lewis, "Verification of the localized-wave transmission effect," *Journal of Applied Physics* 68, no. 12 (15 Dec. 1990): 6083-6086.

136. E.g.: E. Infeld, G. Rowlands, *Nonlinear waves, solitons and chaos* (Cambridge etc.: Cambridge University Press 1990); M. Remoissenet, "Waves Called Solitons – Concepts and Experiments," (Berlin etc.: Springer 1994).

137. For a discussion of non-amplitude-preserving collapsing or expanding "solitons" in two- or three-dimensional plasma and other media, see Infeld/Rowlands (note 136), chap. 9.

138. For vortex-ring dynamics, see: H. Lamb, *Hydrodynamics* (6th edition, Cambridge: Cambridge University Press 1932), chap. VII; P. G. Saffman, *Vortex Dynamics* (Cambridge: Cambridge University Press 1992), chap. 10; K. Shariff, A. Leonard, "Vortex Rings," *Annual Review of Fluid Mechanics* 24 (1992): 235-279; and respective references. For experiments and theory on propagation losses see: T. Maxworthy, "The structure and stability of vortex rings," *Journal of Fluid Mechanics* 51, no. 1 (1972): 15-32; T. Maxworthy, "Turbulent vortex rings," *Journal of Fluid Mechanics* 64, no. 2 (1974): 227- 239; T. Maxworthy, "Some experimental studies of vortex rings," *Journal of Fluid Mechanics* 81, no. 3 (1977): 465-495.
139. For a few preliminary indications see: Altmann (note 1), section 5.1.3.
140. For some information on U.S. efforts at vortex-ring weapons, see G. Lucey, L. Jasper, "Vortex Ring Generators," in *Non-Lethal Defense III* (note 2), paper [lucy.pdf](#); J. Dering, "High Energy Toroidal Vortex for Overlapping Civilian Law Enforcement and Military Police Operations" (*ibid.*), paper [jd.pdf](#).
141. Tapscott/Atwal (note 19), p. 45.
142. Altmann (note 1), appendix A.7.
143. See e.g.: I. I. Glass, J. P. Sislian, *Nonstationary Flows and Shock Waves* (Oxford: Clarendon, 1994), chap. 12.
144. Tapscott/Atwal (note 19), p. 46.
145. Altmann (note 1), appendix A.7.
146. Lewer/Schofield (note 2), p. 12.
147. 5 mm/s is the threshold for "architectural" damage, and was discussed as safe limit for intermittent vibrations. Residential buildings in good condition should stand 10 mm/s. "Minor damage" occurs above 50-60 mm/s: A. C. Whiffin, D. R. Leonard, "A survey of traffic-induced vibrations," RRL Report LR 418 (Crowthorne Berkshire: Road Research Laboratory 1971), p. 14, table 4.
148. With grassy soil this maximum value occurs typically around several times ten Hz; at different frequencies, it may be 5-10-fold lower. See: J. M. Sabatier et al., "Acoustically induced seismic waves," *Journal of the Acoustical Society of America* 80, no. 2 (1986): 646-649; Altmann/Blumrich (note 80); W. Kaiser, *Sound and Vibration from Heavy Military Vehicles - Investigations of Frequency Assignment and Wave Spreading with respect to Monitoring under Disarmament Treaties* (Hagen: ISL, 1998).
149. "Non-lethal devices slice across science spectrum," *National Defense* (October 1993): 25, quoted after: Arkin (note 12).
150. Note that modern industrial buildings without plaster can stand earthquakes with soil vibrations of 20-40 mm/s: Whiffin/Leonard (note 147).
151. Lewer/Schofield (note 2), p. 12.

152. Vomiting: “Non-lethality ...” (note 2); Evancoe (note 18); Kiernan (note 16); Morehouse (note 2). Uncontrolled defecation or diarrhoea: Kiernan (note 16), Toffler/Toffler (note 12), p. 187; bowel spasms: “Non-lethality ...” (note 2); Morehouse (note 2).
153. High audio frequencies: Allen et al. 1948 (note 90); ultrasound: Parrack 1952 (note 91); H. O. Parrack, “Effect of Air-borne Ultrasound on Humans,” *International Audiology* 5 (1966): 294-307; W. I. Acton, M. B. Carson, “Auditory and Subjective Effects of Airborne Noise from Industrial Infrasound Sources,” *British Journal of industrial Medicine* 24 (1967): 297-304.
154. Dickson/Chadwick (note 63).
155. Parrack 1966 (note 153).
156. Mohr et al. (note 58).
157. E.g. with whole-body-exposed awake guinea pigs and monkeys: D. E. Parker, “Effects of Sound on the Vestibular System,” ch. 7 in *Tempest* (note 53).
158. Gavreau et al. 1966 (note 54), p. 9.
159. Mohr et al. (note 58). Note that testicular aching (a different potentially embarrassing effect) of one subject was reported here.
160. See note 157.
161. Section 5.3 in: M. J. Griffin, *Handbook of Human Vibration* (London etc.: Academic, 1990).
162. Lumsden (note 13), p. 203.
163. Mohr et al. (note 58).
164. SARA (note 12). For vibration-induced gastrointestinal hemorrhages, on the other hand, see the sub-section on low-frequency vibration.