

○藤本 卓也（四元音響設計事務所）

1. はじめに

固体音の評価は、一般にその放射音に対して行われ、NC曲線、dBAなど空気音と同じ評価値が用いられる。一方、直接人体に振動として伝わり聽覚で感知できるものも固体音の一類とされている¹⁾。このような直接的に聞こえる固体音の評価手法については、検討課題として取り上げられているものの²⁾、あまり進展はみられない。

ところが実際にこのような固体音が問題となるケースがあった。大型ディーゼル機関が稼働するプラントの周辺家屋において、就寝時に床から騒音が聞こえる、という報告がなされた。現地調査の結果、プラント騒音の空気伝搬と共に、地盤振動が家屋床面まで伝搬していることが確認された。この床振動による放射音は低レベルであったが、床板に耳をつけるとディーゼル機関特有の音が明確に確認できた。就寝時には寝具を介すことで多少は低減すると予想されるが、確かに問題となり得る騒音源であると思われた。ただし、このような直接聞こえる固体音に関する知見が不足しているため、睡眠影響などを評価することが困難であった。

そこで本稿では、このような直接聞こえる固体音の大きさについて実験的検討を行うとともに、気導／骨導で聽取される音の大きさについて検討した結果について報告する。

2. 固体音聽取実験

2.1 概要

固体音発生器とスピーカーを用意し、被験者に固体音と空気音の両方を交互に聞かせた。固体音の大きさは調整不可、スピーカ音量は調整可能とし、空気音が固体音と同じ大きさ

に感じるよう、スピーカ音量を調整させ、その音圧レベルを測定した。本稿では便宜上、この音圧レベルを「固体音レベル」と呼ぶ。固体音レベルの測定と共に、固体音発生部の振動速度レベルを測定し、これらを比較した。

2.2 被験者

被験者は5名（男性4名、女性1名：27歳～52歳）の健聴者で、左右あわせて計10耳を測定対象とした。

2.3 音源信号

固体音と空気音の音源信号は、それぞれ、1秒間継続する純音が4秒間隔で提示されるものとし、固体音と空気音が1秒間の空白時間を隔てて交互に現れるよう作成した。周波数は、50Hz, 63Hz, 80Hz, 100Hz, 125Hz, 160Hzの6周波数とした。

2.4 固体音発生器

固体音発生器は、別途用意したスピーカボックスを利用して製作した（図1参照）。まずスピーカを上向きに設置し、合板15mmの蓋を

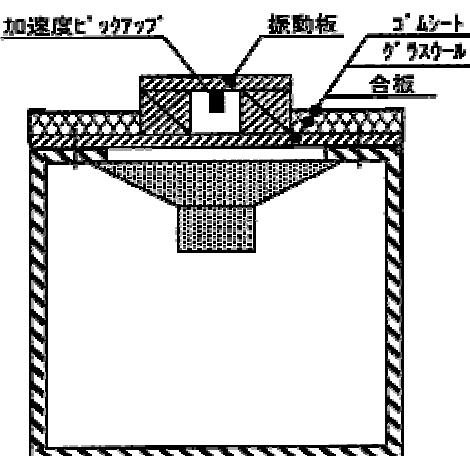


図1 固体音発生器断面図

*A study of the strength of low frequency sound heard by the ear on a vibrating board,
by Takuya Fujimoto(Yotsumoto Acoustic Design Inc.)

ボルトで固定した。スピーカの駆動により、合板は特に中央部が音圧加振される。耳を当てるための振動板は、合板の中央部に角材(50mm×50mm×100mm)2個により固定した。振動板は木製で、大きさは100mm×150mm、厚さは15mmとした。

振動板の振動量を測定するため、振動加速度ピックアップを振動板裏面の角材間に取り付けた。また、振動板取付け部以外からの透過音を低減するため、合板の上には25mm厚のグラスウールとゴムシートによりラギング処理を施した。

2.5 実験方法

被験者は簡易ベッドにうつ伏せに横たわり、頭部を横に向けて耳を固体音発生器の振動板に当て、直接的な固体音を聞く(図2)。このとき、逆の耳には耳栓をしておく。次いで耳を振動板から離し、スピーカから出した空気音と同じ耳で聞く。この音が、直前に聞いた固体音と同じ大きさを感じるレベルになるよう、被験者自らパワーアンプの音量を調整する。



図2 実験風景（枕使用時）

被験者は納得するまで音量調整できる。

振動板の速度レベルは、被験者が固体音を聞いている時の加速度レベルをレベルレコード波形から読み取り、これを速度レベルに変換して求めた。

固体音レベルは、被験者による音量調整後、被験者頭部位置の空気音の音圧レベルを精密騒音計により測定し、これを固体音レベルとした。なお、固体音発生器への入力レベルは振動板の速度レベルがほぼ一定となるよう、周波数毎にあらかじめ設定した。

また、寝具等による低減効果を把握するため、振動板の上に枕(そば殻)を乗せた状態でも同様の実験を行った。

2.6 実験結果

実験結果を図3に示す。振動板の速度レベルは、耳の當て方の個人差によってわずかに変化したが、その差は小さく、125Hz以下で最大1dB、160Hzで4dBであった。図3に示した速度レベルは、それらの平均値である。

固体音レベルは個人差がかなり大きく、80Hz以下ではその差が10dB以上に及んだ。ただし、それらは全て振動板の速度レベルよりも12dB以上高い値であった。

固体音レベル平均値と振動速度レベルの差は18~21dBの範囲におさまり、周波数依存性はほとんど無いと判断された。

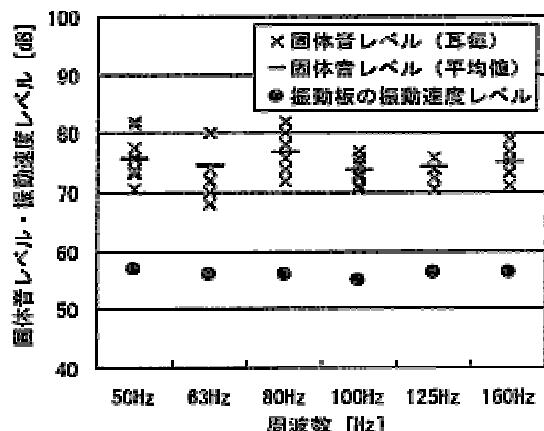


図3 固体音と振動速度（枕無し）

2.7 枕による低減効果

振動板と耳の間に枕（そば殻）を挿入した場合の測定結果を図4に示す。図3と比べると、枕の効果で固体音レベルが減少し、その平均値は振動速度レベルを4dB～10dB上回るレベルとなった。

なお、固体音発生器には透過音対策を施してはいるが、枕を使用した場合には透過音の影響が無視できないレベルとなった。固体音発生時（スピーカからの空気音は無い状態）における、頭部位置の音圧レベルを図4に併記する。その値は固体音レベルよりも小さいため、枕を介しても固体音が感じられていることがわかる。ただし、耳毎の固体音レベルの中には固体音発生器の音圧レベルと2dBしか差がないものもあり、固体音の聴取に透過音が影響を及ぼしていると考えられる。

枕の有／無によって生じる固体音レベルの差を表1に示す。枕による固体音低減効果は9dB～14dBであり、高い周波数ほど効果が大きくなる傾向がみられた。

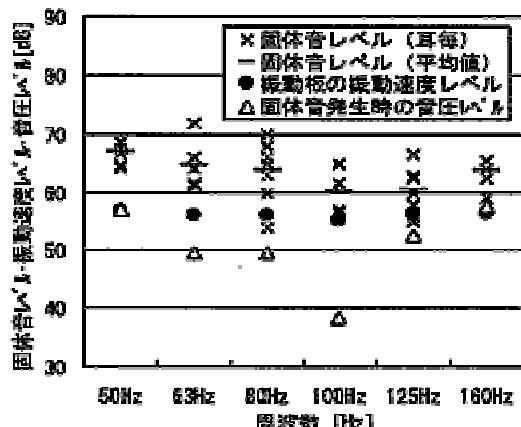


図4 固体音と振動速度（枕有り）

表1 枕による固体音レベルの低減効果

周波数 [Hz]	50	63	80	100	125	160
固体音レベル平均値	枕無し	75.7	74.4	76.6	73.7	74.3
枕有り		66.7	64.6	63.7	59.9	60.5
固体音レベル差		9.0	9.8	12.9	13.8	13.8
						11.5

3. 気導・骨導で聴取される大きさの検討

3.1 気導音について

実耳のインピーダンス測定結果³⁾を用い、振動量と音圧の関係を検討する。計算モデルを図5に示す。JISの人工耳⁴⁾を参考に、耳甲介腔入口は直徑25mmの円形開口とし、その面積をS、音響インピーダンスを Z_A とする。振動板は円形開口部からわずかな隙間を設けて設置する。これは、振動板と耳介との間で生じる音漏れを模擬するものであり、隙間の音響インピーダンス密度は ρc 、円形開口部に対する隙間の面積比を δ とする。振動速度が v のとき耳甲介腔内に生じる音圧を p とおく（低周波問題により、分布は無視する）。体積速度の連続条件により次式が成り立つ。

$$Sv = p/Z_A + \delta S p/\rho c \quad (1)$$

これを整理すると、音圧レベル L_p と振動板の速度レベル L_v の差 dL は次式で表される。

$$dL = L_p - L_v \\ = 20 \log_{10} \frac{v_0}{p_0} - 20 \log_{10} \left| \frac{1}{SZ_A} + \frac{\delta}{\rho c} \right| \quad (2)$$

ここで、 $v_0 = 5 \times 10^{-8}$ [m/s]

$$p_0 = 2 \times 10^{-5}$$
 [N/m²]

計算に用いた Z_A を表2に、結果を図6に示す。隙間が全く無い状態（ $\delta=0$ ）では dL は低域で40dBを越えるが、隙間が生じると急激に小さくなる。隙間率10%で dL は約20dB、その周波数特性はほぼ平坦となり、固体音聴取実験による結果とほぼ合致する。上記計算条件において10%の隙間率は0.6mmの均一な隙間に該当する。聴取実験結果にみられる個人差には、このような隙間による音漏れの影響が大きく関与しているものと考えられる。

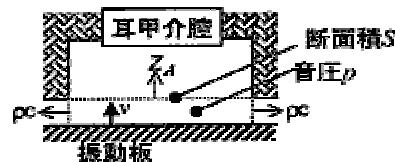


図5 振動板と耳甲介腔のモデル

表2 実耳の音響インピーダンス³⁾

Hz	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160
Re	3.8	3.0	2.3	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9
Im	-2.6	-3.1	-3.6	-3.0	-7.2	-6.2	-5.0	-3.8	-2.0
$\times 10^7 [\text{N}\cdot\text{m}^{-5}]$									

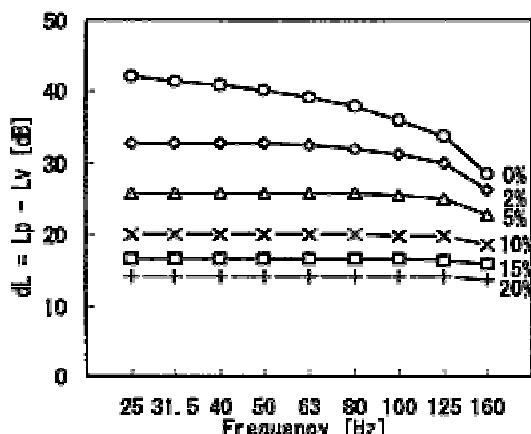


図6 隙間率による dL の変化

なお、これに類似する問題として、聴力検査で用いられるイヤホンの種類による影響に関し、耳当て型と耳覆い型で、100Hz 付近の外耳道入口音圧に 25dB 程度の差がみられ⁵⁾、本聴取実験と同じオーディオで音漏れの影響が発生していると考えられる。

3.2 骨導音について

骨導音については、聴力検査用の骨導受話器とメカニカルカプラの特性値⁴⁾を用いた検討を行う。

骨導受話器の基準等価閾値の力のレベルの外挿値(76dB : 125Hz)と、メカニカルカプラの機械インピーダンス(49dB : 125Hz)から、基準等価閾値で生じる振動速度レベルは 53dB と計算される。今回の聴取実験結果によると、振動板が速度レベル 53dB で振動している場合、固体音レベルは 73dB となり、これは音圧最小可聴値を約 50dB もオーバーしている。骨導受話器と振動板とでは、接触面積や圧力、接触部位などの差があるとしても、その影響が 50dB に及ぶとは考えにくく、このことより、振動板から直接聞こえる音の経路として、骨導による影響は極めて小さいと判断される。

4. 實例への適用

ここでは、聴取実験結果を元に、冒頭で述べた集合住宅での固体音の評価を試みる。

居室床面の振動速度レベルの測定値(50Hz ~160Hz)から、A特性固体音レベルを求めた所、47dB(A)となった(表3参照)。室内的騒音レベルは 36dB(A)であったことから、寝具により固体音レベルが 10dB 程度減衰したとしても、固体音レベルは室内騒音とほぼ同レベルまでしか下がらず、確かに「床から騒音が聞こえる」と表現されるレベルであると判断できる。

表3 A特性固体音レベルの算出

周波数 [Hz]	0A	50	63	80	100	125	160
振動速度レベル	50	34	46	45	44	28	26
固体音補正	—	19	18	21	19	18	19
固体音レベル	69	62	64	65	62	47	45
A特性補正	—	-30	-26	-23	-19	-16	-13
A特性固体音レベル	47	22	38	43	43	30	31

5.まとめ

振動する構造物に直接耳をつけた場合に聞こえる固体音は、その振動速度レベルに 20dB 加えた音圧レベルとほぼ同じ大きさに感じられることがわかった。また、枕による減衰効果は約 10dB であった。

固体音の聽覚への経路は、骨導よりも気導音が主で、耳介との隙間で生じる音漏れが固体音レベルにばらつきを与えることが、実耳のインピーダンスを用いた計算により明らかとなった。

【参考文献】

- 日本音響材料協会編、騒音・振動対策ハンドブック(技報堂、東京、1982), p.331
- 井上勝夫: 固体音の評価尺度と問題点、騒音制御、18巻4号, pp.4-5(1994)
- M. E. Delany: The acoustical impedance of human ears. J. Sound. Vib. 1, pp. 455-467 (1964)
- JIS T 1201-1:2000:オージオメータ—第1部：純音オージオメータ
- 鈴木陽一、竹島久志: 最小可聴域と等ラウドネス曲線をめぐる最近の話題、日本音響学会誌 58巻2号, pp. 130-137 (2002)