

耳が振動板に接した際に聞こえる 低周波域固体音の大きさに関する実験的検討

Experimental study of loudness of low frequency sound
directly heard by the ear on the vibrating board

藤本卓也

Takuya Fujimoto

四元音響設計事務所

Yotsumoto Acoustic Design Inc.

内容梗概：固体音には直接人体に振動が伝わり聴覚で感知できるものも含まれる。このような固体音のうち、振動板の表面に耳をあてがった際に聞こえる音について、その大きさが空気音と比較してどの程度のものであるか主観実験を行った。50～180Hzの純音に対する実験の結果、振動板の速度レベルに約 20dB 加えた音圧レベルに相当する大きさが感じられることが解った。

1. はじめに

固体音は、振動が建物の構造体中を伝搬し、着目している場所の壁などを振動させて空気中に放射される音で、その最終的な評価は放射された音に対して行われるのが一般的であり、NC 曲線、N 曲線、dBA 等による各種評価値が用いられる。

一方、空気中に放射されず（あるいは放射される前の段階で）、直接人体に振動として伝わり聴覚で感知できるものも固体音の一種とされている¹⁾。このような直接的に聞こえる固体音の感覚を評価するための基準については、検討課題として取り上げられているものの²⁾、ほとんど進展はみられない。

ところが最近、実際にこのような固体音が問題となり得るケースがあった。大型ディーゼル機関が稼動するプラントの周辺家屋（3 階建集合住宅）において、就寝時等に騒音が床から聞こえる、という報告がなされた。調査の結果、プラント騒音や低周波音の空気伝搬以外に、地盤振動が家屋床面に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低減するとはいうものの、確かに問題となり得る騒音源であると判断された。しかしながら、このような直接的な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は困難であった。

本研究は、このような直接的に聞こえる固体音のうち、特に振動板の表面に耳をあてがった場合の感覚について実験的な検討を行ったものである。

2. 主観実験

2.1 概要

固体音発生器とスピーカを用意し、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、固体音と空気音が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）で、左右あわせて計10耳について実験を行った。

2.3 音源信号

固体音と空気音の音源信号は、それぞれ1秒間継続する純音を4秒間隔で提示するものとし、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、あらかじめwaveファイルとして作成し（L,R両チャンネルを利用）、これをCD-Rに書き込んだものを音源媒体として用いた。周波数は、50Hz、63Hz、80Hz、100Hz、125Hz、160Hzの6周波数とした。

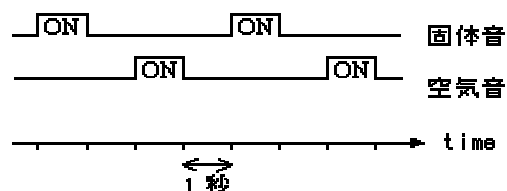


図1 音源信号の提示間隔

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2および図3にその構造を示す。

スピーカボックスにはフランジ取付けのためのボルトが8本、ユニット周囲に予め用意されている。まずスピーカを上向きに設置し、15mm厚の合板で蓋をした上、これをボルトにより固定した。スピーカから音が放射されると、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、合板の中央部外側に角材(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。

振動板の振動量を把握するため、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。

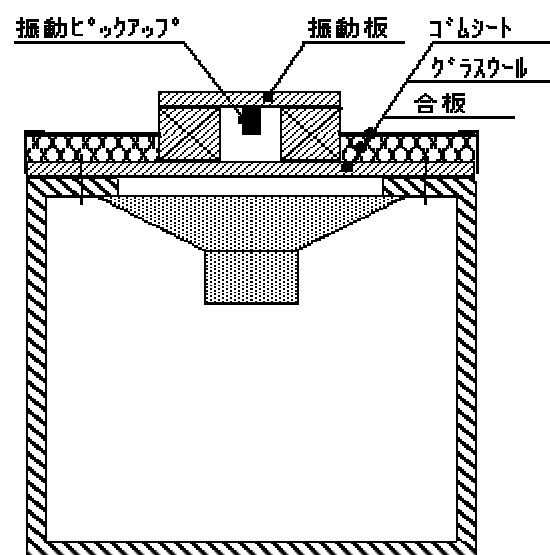


図2 固体音発生器断面図

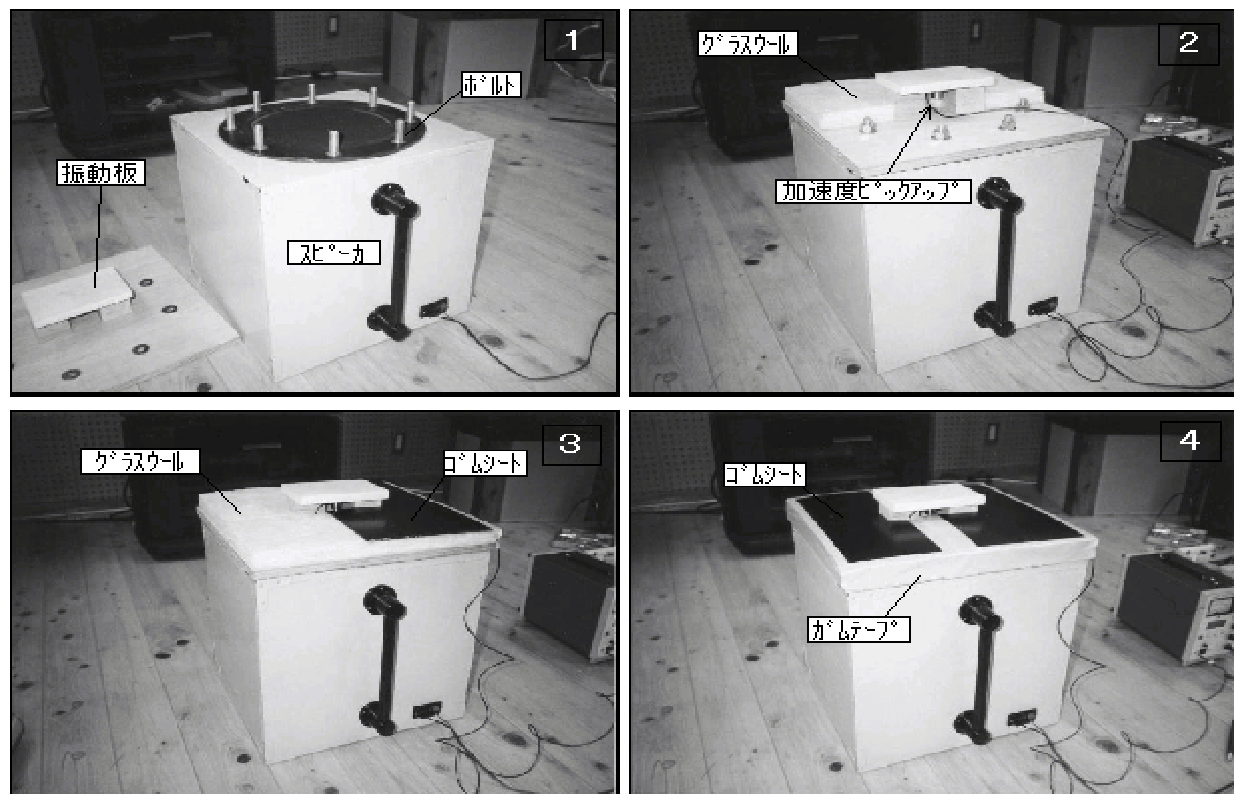


図3 固体音発生器の構造

2.5 実験方法

実験のブロックダイアグラムを図-4に示す。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-5参照）。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、スピーカーから出した空気音を同じ耳で聞く。この音が、直前に聞いた固体音と同じ大きさに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。調整できるのはスピーカー音量のみとする。固体音と空気音は交互に提示されるので、被験者は納得するまで音量を調整することができる。

振動板の振動加速度レベルはレベルレコーダに記録し、被験者が固体音を聞いている時のレベルを読み取った。また音量調整後、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、周波数ごとに設定した。

また、寝具等による低減量を把握するため、振動板の上に枕（そば殻）を乗せた状態でも同様の測定を行った。

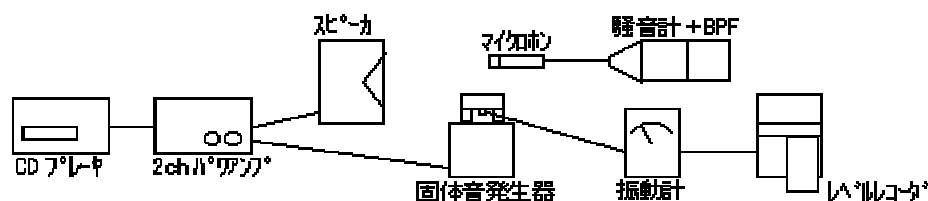


図4 ブロックダイアグラム



図5 実験風景（枕使用時）

2.6 実験結果

実験結果を表1 および図6 に示す。

固体音発生器の振動板の速度レベルは、各周波数で入力レベルを一定としても、耳の当て方の個人差によってわずかに変化した。ただしその差は小さく、125Hz 以下で最大 1dB、160Hz で 4dB であった。表1 と図6 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 の範囲におさまリ、周波数依存性は無いと判断された。

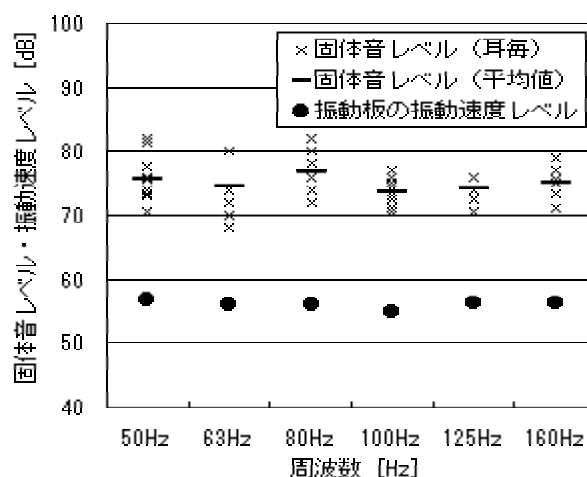


図6 固体音レベルと振動速度レベル

表1 固体音レベル・振動速度レベル測定結果一覧（枕無し）

単位：dB

周 波 数		50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz
固体音レベル	被験者A－右耳	82.0	80.0	82.0	77.0	78.0	71.0
	被験者B－右耳	74.0	80.0	78.0	75.0	74.0	71.0
	被験者C－右耳	70.5	70.0	76.0	75.0	74.0	79.0
	被験者D－右耳	73.0	72.0	72.0	71.0	70.5	75.0
	被験者E－右耳	78.0	80.0	78.0	73.0	72.5	75.0
	被験者A－左耳	81.5	74.0	78.0	72.5	78.0	75.5
	被験者B－左耳	77.5	72.0	74.0	70.5	74.0	78.0
	被験者C－左耳	76.5	74.0	78.0	78.0	74.0	76.5
	被験者D－左耳	73.5	68.0	72.0	72.5	76.0	73.5
	被験者E－左耳	73.5	74.0	80.0	74.5	78.0	77.0
平均値		75.7	74.4	78.8	73.7	74.8	75.2
振動板の振動速度レベル		56.8	56.0	56.0	56.0	56.1	56.3
[固体音レベル]－[振動速度レベル]		18.8	18.4	20.8	18.7	18.2	18.9

2.7 枕を使用した場合

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表2および図7に示す。図6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測定結果を図7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を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3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。

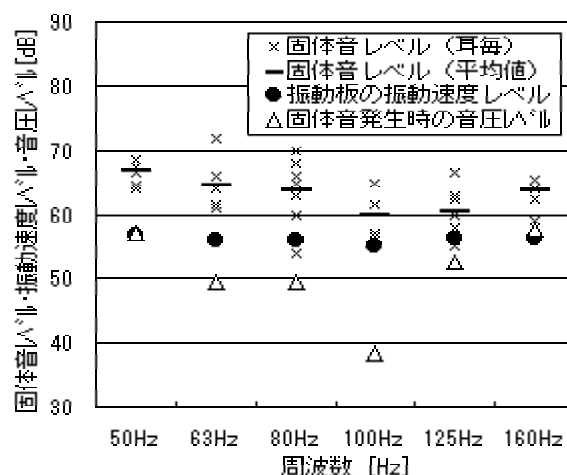


図7 音圧レベルと振動速度レベル測定結果

表2 固体音レベル・振動速度レベル測定結果一覧（枕有り）

単位：dB

周 波 数		50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz
固体音レベル	被験者A－右耳	68.5	66.0	69.0	65.0	62.5	59.0
	被験者B－右耳	69.5	72.0	70.0	65.0	66.5	64.0
	被験者C－右耳	69.5	64.0	66.0	57.0	62.5	64.0
	被験者D－右耳	64.6	64.0	64.0	67.0	66.0	64.0
	被験者E－右耳	66.6	61.6	69.0	67.0	60.0	64.0
	被験者A－左耳	67.6	64.0	68.0	61.5	58.0	62.5
	被験者B－左耳	64.0	68.0	68.0	61.5	69.0	62.5
	被験者C－左耳	67.5	68.0	65.0	61.5	69.0	65.5
	被験者D－左耳	64.0	61.0	60.0	56.5	58.0	65.5
	被験者E－左耳	67.6	61.0	60.0	66.6	66.0	66.6
平均値		66.7	64.6	63.7	59.9	60.5	63.7
振動板の振動速度レベル		58.9	58.0	58.0	55.0	56.1	56.3
[音圧レベル]－[振動速度レベル]		9.8	8.6	7.7	4.9	4.3	7.4
固体音発生時の音圧レベル		57	50	50	39	53	58

表3 枕による固体音レベル低減効果

単位：dB

周 波 数	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz
固体音レベル平均値（枕無し）	75.7	74.4	76.6	73.7	74.3	75.2
固体音レベル平均値（枕有り）	66.7	64.6	63.7	59.9	60.5	63.7
固体音レベル差	9.0	9.8	12.9	13.8	13.8	11.5

3. 実例への適用

ここでは、前章で得られた結果を元に、冒頭で述べた集合住宅での固体音の評価を試みる。

3階リビング床面の振動速度レベルの測定値を図8に示す。この内、50Hz～160Hzの帯域についてA特性固体音レベルを求めると47dB(A)となる(表4)。一方、室内の騒音レベルは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、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」と表現される大きさであるものと判断できる。

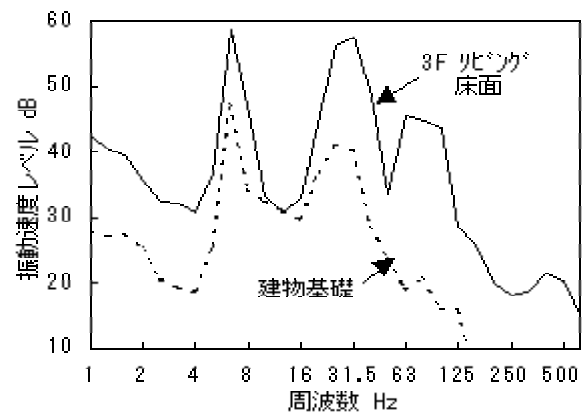


図8 床面の振動速度レベル

表4 A特性固体音レベルの算出

単位: dB

周波数	0A	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz
振動速度レベル	50	34	48	45	44	28	28
固体音補正	—	19	19	21	19	19	19
固体音レベル	69	52	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

4. おわりに

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(50Hz～160Hz)。そば殻の枕を介すると約10dBの減衰がみられた。

固体音発生器の改良、周波数範囲の拡大、多くの被験者でのデータの拡充、音源信号の検討が今後の当面の課題である。また、頭部が受ける振動感覚との関連、気導と骨導の影響度合いなどの検討も必要になるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) 井上勝夫, “固体音の評価尺度と問題点,” 騒音制御 18巻4号, 4-5 (1994)