

第6章

振動・騒音に対する評価方法

6-1 振動・騒音問題に対する国内外の評価方法

1. 海外の振動評価について

近年のグローバル化した都市・地域環境は、区切りのない 24 時間のライフスタイルの変化に大きな影響を与えてきている。その中で、人体に感じない振動をどのように実現するかが、日常生活にとって、重要なものとなってきている。

振動規制法による「工場・事業場、建設作業および道路交通」による振動は、騒音と同様に経過してきている。騒音と比べて振動の苦情は少ないが、道路交通関係では、要請基準値以下での苦情がある。振動発生源の防止・制御技術、伝搬防止技術としての防振溝・壁あるいは建築構造物への免振技術の導入実験などへ進んできているが、苦情件数の低下が見られない。振動規制法施行時における最新の科学的知見が、現在では、見直しを迫られる状況となってきている。このような現状から、振動評価の動向を「国際標準化機構の情報」や「主要国における情報」の中から調査し、整理したものを紹介する。特に、欧州は、EU 指令による発信により、EU 加盟国の環境保全に貢献をしようとしており、また、欧州各国も状況に応じて振動評価の整備に乗り出してきている。

振動に暴露された人間の全身による振動感覚は、一般に、振動の物理量と対応することから、このような関係を確認する実験的な研究が行われ、今までに振動感覚による等感覚曲線などの成果を得ている。しかしながら、「かすかな振動」などの低いレベルにおける生理的影響における評価法に関して、詳細な研究が必要であり、未だ明らかになっていない状況である。

表-1 欧州各国の規格・指針の名称

略称	正式名	協会	国家規格
1 AFNOR	Association Francaise de Normalisation	フランス規格協会	NF
2 BSI	British Standards Institution	英国規格協会	BS
3 DIN	Deutsches Institut für Normung	ドイツ規格協会	DN
4 DS	Dansk Standard	デンマーク規格協会	DS
5 SIS	Swedish Standards Institute	スウェーデン規格協会	SS
6 NEN	Nederlands Normalisatie-Instituut	オランダ規格協会	NNI
7 NSI	Norges Standards Instituut	ノルウェー規格協会	NS
8 AENOR	Asociacion Espanola de Normalizacion y Certificacion	スペイン規格協会	UNE
9 VDI	Verein Deutscher Ingenieure	ドイツ技術者連合	

このような現状の中で、各国の研究者は、各自の研究

成果を持ち寄って議論を継続し、ISO/TC104/SC4「機械振動と衝撃の人体への影響」を中心に審議が行われている。一方、各国において、ISO の議論をベースに、各国の事情を勘案しながら、先に、規格、指針あるいは法規として発行、施行している場合もある。ここでは、表-1 に示した欧州各国の規格・指針の名称と表-2 に示した欧州各国の規格・指針を中心に紹介する。また、各国の「どの用語が強制力をもっているのか、その意味するところは何か」を表-3 に示した。

表-3 どの用語が強制力をもっているのか

用語	意味*	日本語
act		法律, 条例
assessment		影響評価
criteria	環境の質と環境の量が、個人や集団に及ぼす影響についての定性的・定量的情報の総体	判断基準
directive		指令, 命令
estimation		評価, 判断, 意見
evaluation		評価
guide	望ましい環境の推奨目標	指針
guideline	推奨値を実現するための技術的な値	指針値
law		法律, 法規, 法令
legislation		法律
order		規律, 規則, 慣行
recommendation	推奨値: 指針に安全係数を掛けたもの	推奨, 勧告
regulation	規制基準: 行政的な規制, 指導のためのものさし	規則, 規定, 法規
requirement	要請基準: 行政上の望ましい基準	必要条件
rule		規則, 規約, 命令
standard	基準: 基本となる物差し	基準, 標準, 規格

注) * 長田泰公:「騒音の環境基準を考えるークライテリアからスタンダードへ」,(社)日本音響学会講演論文集, 1993 年

1) 欧州各国の規格・指針について

① イギリスの場合 :

英国標準化機構 (the British Standard Institute) は、英国規格 (British Standard) を発行している。振動に関する規格/基準等には、下記のようなものがある。ここでは、(c)を紹介する。

- (a) BS6841-1987
- (b) BS7385-1-1990
- (c) BS6472-1992
- (d) BS7385-2-1993

「BS6472-1992:Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1Hz to 80Hz)

表-2 各国の全身振動の規格・指針の比較

年	国名	番号	概要	備考
1987	イギリス	BS 6841	機械的振動及び繰返し衝撃における人体の全身振動曝露の測定と評価に対する英国標準ガイド	
1990	イギリス	BS 7385-1	建物振動に対する評価と測定：その1 建物振動の評価及び振動測定の指針	
1992	イギリス	BS 6472	建物振動(1Hz~80Hz)による人体暴露の評価に対するガイド、まだ、結合曲線が導入されていない。改訂版の情報がないので近年のISO2631との乖離が見られる。	ISO2631-2/1989と同様：建物における連続的、衝撃によって発生する振動
1993	イギリス	BS 7385-2	建物振動に対する評価と測定：その2地盤振動からの障害レベルに対するガイド	ISO4356/1977と同様
1997	デンマーク		低周波音、振動に関する環境アセスメントのガイドラインNo. 9/1997, ISO/DIS2631-2が根拠	1983年に環境振動アセスメントのガイドラインとして公開
1997	スウェーデン	SS4604861	振動の判断基準：建物における快適評価のための測定とガイドライン ISO/DIS2631-2が根拠	評価単位：補正振動速度振幅(mm/s)基準：5nm/s
2002	ドイツ	VDI2057-1	人体の全身振動におけるアセスメントのための統一手法及びその評価：健康、快適性及び振動知覚 ISO2631-1/1997が根拠	VDI2057は、1983年から発行
1999	ノルウェー	NS 6176E	建物振動の測定方法及び住宅での全身振動を評価 ISO2631-1/1985, -2/1994が根拠	測定機器：ISO4866/1990のタイプ2
2002	フランス		建物振動による人体のアノイヤンスに対する尺度を定義し、法規や制御方法を策定し、苦情者の評価をする	1986年から建物振動に対する法規を編集
2002	欧州連合	EC-Directive	振動から発生する作業員暴露に対するリスクに関して、最小限の健康と安全要求	指令89/391/EC
1994	ISO	ISO Amendment 2-4866	建物振動-建物への影響評価と振動測定のガイドライン	BS7385-1が同様
2001	ISO	ISO2631-4	全身振動の評価-固定誘導輸送システムの乗客及び乗務員の快適さにおける振動と回転運動の影響評価のためのガイドライン	
1997	ISO	ISO2631-1	全身振動の評価-基本的要求	JISB7760-2
2003	ISO	ISO/DIS8041	振動に対する人体反応-測定器具	JISB7760-1
2003	ISO	ISO2631-2	機械振動と衝撃-全身振動に対する人体暴露の評価-その2建物における振動(1Hz~80Hz)	姿勢の方向が明確であれば、ISO2631-1を利用

本規格は、ISO/TC108/4/2 N186 とリンクしている。内容的には、ISO2631-2-1989と同様で、ISO2631-1-1985を建物振動に適用するための指針である。まだ、この時点では、コンバインカーブ(結合曲線)が導入されていない。この評価基準値は、場所(社会施設、住宅、事務所、作業場)、時間(昼間、夜間)及び振動性状から人体振動応答に関する建物振動の満足すべき大きさのファクターによって定めた。評価は、振動加速度実効値を測定して、計算により振動曝露値(VDV: Vibration Dose Value)を算出する。イギリスの改訂版の情報がないので、これが利用されていると思われるが、ISO2631シリーズとの乖離が見られる。

② ドイツの場合 :

ガイドラインVDI2057は、1963年に初めて発行された。それ以来、ISO2631シリーズは、継続して審議されており、2002年に最新版が発行された。

「VDI2057-1-2002: Human exposure to mechanical vibrations whole-body vibration (英訳)」(表-4及び図-1)

本ガイドラインVDI2057-1-2002は、ISO2631-1-1997にほぼリンクしている。本ガイドラインの目的は、「人体

の全身振動」に関するアセスメントのための統一手法を用意すること、かつアセスメント変数を決定するための一般的な知識を与えることである。下記にその特性を示した。

- (a) 対象 : 振動3方向の周波数補正加速度振幅、継続時間を考慮
- (b) 周波数 : 人体応答周波数
- (c) 測定値 : 周波数補正加速度実効値
- (d) 評価値 : 移動実効値の最大値

③ スウェーデンの場合 :

ガイドラインSS460 48 61は、ISO/2631-2が根拠となって策定され、適用されている。下記のような適用範囲がある。

- (a) 周波数範囲 : 1~80Hz
- (b) 評価 : 補正振動速度振幅の最大値 (mm/s)
ただし、基準値は、5nm/s (1n=10⁻⁹)
- (c) ガイドライン : 建物における快適評価
*振動が非常に少ない..... 0.4~1.0 (mm/s)
*振動が発生する可能性あり > 1.0 (mm/s)
- (d) 感覚閾値 : ほぼ 0.1 (mm/s)

表-4 周波数補正曲線の適用 (VDI2057)

Strain criterion: Health			
Body posture	Measuring point	Direction of vibration	Frequency weighting
Sitting	on the seat	z x, y	W_k W_z
Strain criterion: Well-being			
Sitting	on the seat	z x, y	W_k W_z
	foot platform	x, y, z	W_k
	seat back	x	W_k
	position on the seat	f_x, f_y, f_z	W_k
Standing	foot platform	z x, y	W_k W_z
Recumbency	beneath the back	s (vertical) x, z (horizontal)	W_k W_z
	under the head (without cushion)	s (vertical)	W_k
Undefined body posture	in buildings on the floor	x, y, z	$W_k = W_B$ combined
Strain criterion: Kinetosis			
Sitting or Standing		z	W_k

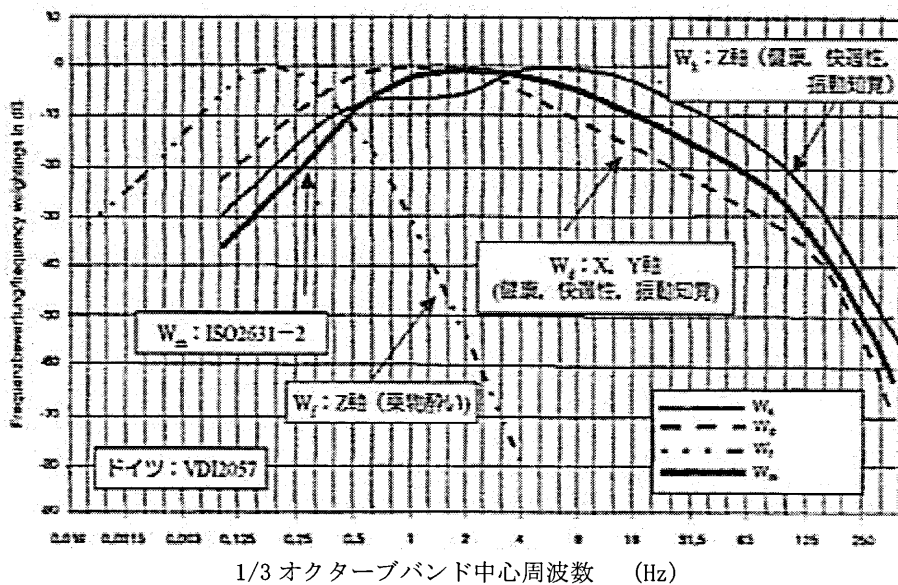


図-1 最も重要な周波数補正曲線

図-2 は、そのガイドラインを示したものである。

④ デンマークの場合 :

「デンマーク環境保護省 No. 9-1997 からのお知らせ」として、1997 年に、環境における低周波音、超低周波音及び振動に関する測定とアセスメントのための一連のガイドラインが公表された。環境振動アセスメントのガイドラインは、すでに、1989 年に公表されている。下記のような適用範囲がある。

- (a) 根拠 : ISO/DIS2631-2-1989
- (b) 評価 : 補正加速度レベル (dB),
振動加速度振幅 (mm/s^2)
補正振動速度振幅 (mm/s)
- (c) 時定数 : slow
- (d) 基準値 : 10^{-6} (m/s^2)
- (e) 感覚閾値における推奨振動限界値 : 72 (dB), 4 (m/s^2)

表-5 は、推奨振動限界値を示したものである。

⑤ ノルウェーの場合 :

この基準は NS-ISO2631-1-1985 及び ISO2631-2-1994 にしたがって、「振動評価のための一般的な判断基準の拡張や適応」を行うことにある。これは、道路交通及び多様な路面電車によって発生する建物振動の具体的な測定方法や建物内に居住する人達の全身振動を評価するための判断基準をも規定している。本基準は、12 章構成になっており、代表的な章について下記に記す。

- (1) 第 7 章 測定機器に対する要求について
 - (a) 測定機器 : ISO4081-1990 のタイプ 2 と一致
 - (b) 時定数 : 1 秒 (IEC60651-1979 の slow と一致)
 - (c) 周波数範囲 : 1~80Hz (1/3 オクターブバンド)
 - (d) フィルター : 結合補正曲線のファクター
- (2) 第 9 章 測定結果について
 - (a) 測定結果 : 統計的な最大値, 最大補正速度振幅及び最大補正加速度振幅

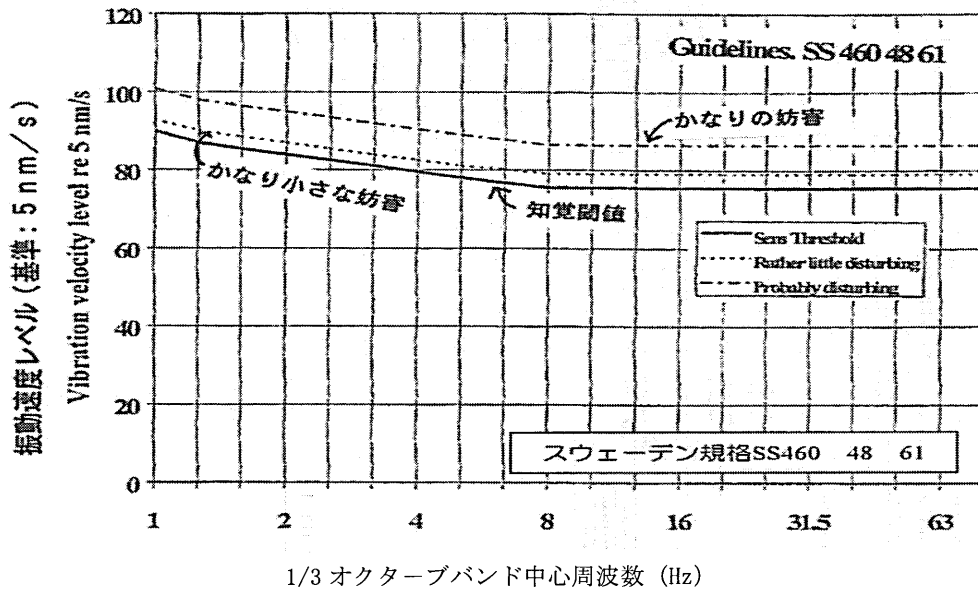


図-2 建物における快適評価のためのガイドライン (SS 460 48 61)

表-5 推奨振動限界値 (ガイドライン)

	補正加速レベル L _w (dB)	振動加速振幅 a _w (mm/s ²)	補正振動速度振幅 V _w (mm/s)
住宅地域の住宅 (昼と夜) あるいは 滞在地域 (昼と夜) 公共施設	75	5.6	0.16
滞在地域における住宅 (昼)、事 務所、学校公共施設	80	10	0.3
事務所におけるその他の部屋	85	17.8	0.5

- (b) 計算値 : Step 1 最大補正速度振幅の平均値
Step 2 最大補正速度振幅の平均値の標準偏差
Step 3 統計的な最大値
- (3) 第12章 付録B 住宅内の振動等級のガイドライン (表-6)
 - (a) 等級 A : ほとんど振動を感じない
 - (b) 等級 B : ある程度振動を感じる
 - (c) 等級 C : 15%の人が振動を感じる
 - (d) 等級 D : 約25%の人が振動を感じる

⑥ フランスの場合 :

環境省は、「振動に対する建物保護に関する法規」を1989年から編纂してきた。衝撃振動及び連続振動に対して、建物に適用する限界値として、下記のように分類している。

- (a) 非常に振動を感じる
- (b) ある程度振動を感じる
- (c) ほとんど振動を感じない
- (d) 周波数範囲 : 4~100Hz
- (e) 評価値 : 振動速度振幅 (mm/s)

図-3, 図-4 は, その限界値を示したものである。

2) EC 指令について

2002年6月25日付けで、欧州議会及び審議会指令2002/44/ECが発令された。振動から発生するリスクとしての作業員への振動曝露に関して、最低限の健康と安全に対する要求が示された。この指令の要求は、作業員が、作業を通じて機械的な振動から暴露されたり、暴露されるかも知れない活動に対して適用されるとしている。全身振動に対する暴露限界値を下記に示している。

- (a) 8時間基準に対して標準化された1日の暴露限界値が、1.15m/s²となっているが、関係各国の選択では、振動曝露値を21m/s^{1.75}とすべきであるとしている。
- (b) 8時間基準に対して標準化された1日の暴露限界値が、0.5m/s²となっているが、関係各国の選択では、振動曝露値を9.1m/s^{1.75}とすべきであるとしている。

2. 日本の振動評価について

振動規制法は、昭和51年12月に施行され、平成6年、平成7年に若干の改正がなされ、今日に至っている。本規制法の対象は、工場・事業場、建設作業および道路交通となっている。新幹線に関しては、「環境保全上緊急を要する新幹線鉄道振動対策について(勧告)」となってい

表-6 住宅内の振動等級のガイドライン

	等級A	等級B	等級C	等級D
補正速度 (V_{rms} mm/s) の統計的最大値	0.1	0.15	0.3	0.6
補正加速度 (a_{eff} mm/s ²) の統計的最大値	3.6	5.4	11	21

- 1) 等級A: 非常に良い振動条件に一致。ここでは、人々は、例外として振動だけを知覚するでしょう
- 2) 等級B: 比較的良好な振動条件に一致 (注) 等級Bの住宅に住む人達はある程度の振動によってじゃまされるかもしれないと思っている。
- 3) 等級C: 新しい住宅建築物、新しい交通基盤の計画や構造物と関連した振動に対する要求限界値に一致 (注) 等級Cの住宅に住む人々の約15%が、振動によってじゃまされるかもしれないと思っている。
- 4) 等級D: 住宅建築物に存在してもたらされるかもしれない振動条件に一致 (注) 約25%の人々が等級Dの住宅における振動によってじゃまされるかもしれないと思っている。計画は、等級Cの要求を満たすようにすべきであるが、費用対効果の検討が等級Cを要求する不合理である場合等級Dを利用することができる。

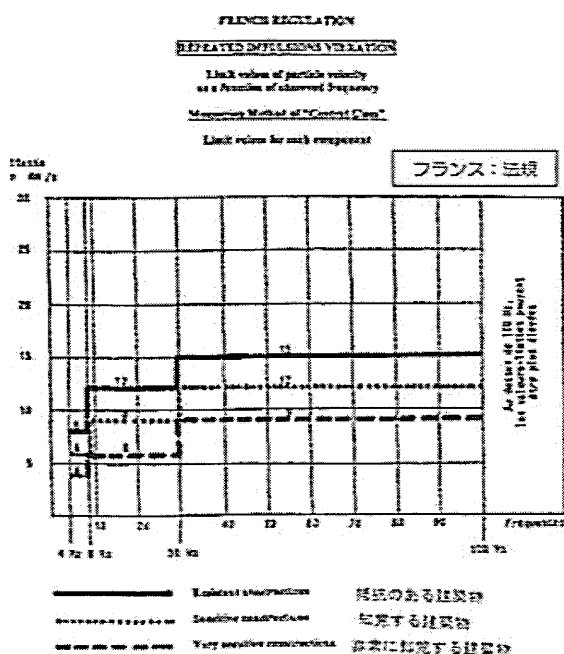


図-3 衝撃振動の場合に適用する限界値

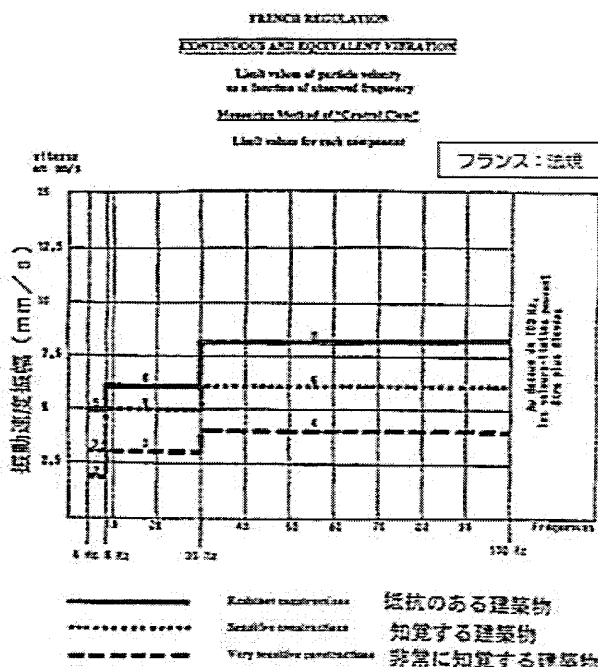


図-4 連続振動の場合に適用する限界値

る。在来線、住宅内の振動/固体伝搬音に関しては、対象になっていない。本規制法では、当時の科学的知見に基づいて、鉛直方向のみを対象とした。その根拠は、一般の地盤表面では、鉛直方向の振動の方が、水平方向の振動よりも大きい場合が多く、また、周波数帯域においても人体の全身では、鉛直方向の振動をより強く感じるとされていたためである。表-7は、振動規制法による評価を示したものである。また、現在の「JIS C 1510」と「ISO 2631-1/1997」の違いを表-8に示した。周波数補正曲線の違いが明らかになっている。

3. おわりに

ISO/TC43 および TC108 の動きは、今後とも「振動評価のグローバルスタンダード」に大きな影響を与えるものといえよう。振動測定手法は、従来の方法、計算方法をも取り入れた手法に大きく変化して行くものと考えられる。振動評価との整合においても「ISO8041-2002: 全身振動測定装置」とのリンクが待たれる。特に、振動評価

における単位は、mm/s, mm/s², m/s², dB と多様である。また、根拠となっている国際規格もかなり以前のものからつい最近のものまで情報が錯綜している状況が伺える。本項を記述するに当たって、多くの参考文献/資料等を収集し、特に、各学会誌や委員会資料など、また、新たに購入した資料を翻訳しながら整理したものである。

参考文献・資料

- 1) ISO2631-1-1997 : Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1 ; General requirements
- 2) ISO2631-2-2003 : Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 2 ; Vibration in buildings (1Hz to 80Hz)
- 3) 前田節雄, 米川善晴: 人体振動の測定・評価の国際動向と日本の対応について, (社) 日本音響学会 騒音・

表-7 振動規制法による評価

対象振動	評価 (dB)
工場・事業場	時間変動特性に応じて異なる： L_{1P} L_{MAX} L_{MIN} の平均
建設作業	時間変動特性に応じて異なる： L_{1P} L_{MAX} L_{MIN} の平均
道路交通	L_{10}
新幹線	L_T

表-8 「JIS C 1510」と「ISO 2631-1/1997」の相違点

項目	JIS C1510/1995	ISO2631-1/1997
単位	dB	m/s ²
周波数補正曲線 (鉛直方向) 平坦特性	4~8 (Hz)	4~12.5 (Hz)
周波数補正曲線 (水平方向) 相対値	1~2 (Hz) 基準3dB	1~2 (Hz) 基準0
周波数補正曲線	2曲線	6曲線
構成基準周波数	未規定	8Hz
周波数許容誤差	1~80Hz, +2, -5 dB	1~80Hz, ±1 dB
対象周波数範囲外の規定	未規定	フィルター特性と許容誤差 (±2dB) 規定

- 1) JIS C1510 : 鉛直方向 (足一頭), 水平方向 (背一胸, 右側一左側)
- 2) ISO2610-1 : 鉛直方向 (座位, 立位, 仰臥位), 鉛直方向 (頭部)
水平方向 (座位, 立位, 仰臥位), 鉛直方向 (座位, 立位: 乗物酔い),
水平方向 (背もたれ), 回転振動 (座位)

振動研究委員会, 騒音・振動研究会資料 資料番号 N-2000-54, pp.1-8, 2000.12.15.

4) 米川善晴: 人体振動の国際規格 ISO が日本に与える影響について, (社)日本音響学会 騒音・振動研究委員会, 騒音・振動研究会資料 資料番号 N-2000-55, pp.1-6, 2000.12.15.

5) 騒音制御 特集: ここまで来た人体振動規格, (社)日本騒音制御工学会, Vol. 25, No. 6, pp. 325-378, 2002.12

6) 騒音制御 特集: 人体振動評価のための実験方法, (社)日本騒音制御工学会, Vol. 26, No. 6, pp. 355-403, 2002.12

7) 松本泰尚: 文献レビューによる ISO2631 シリーズの全身振動評価用周波数補正の検証, 騒音制御, Vol. 27, No. 1, pp. 52-57, 2003.2

8) 塩田正純: 世界各国の振動評価法, 第38回地盤工学研究発表会, DS11 地盤環境振動の高度化と国際化は図れるか? 地盤環境振動の評価・予測・対策の新技术研究委員会, pp.1-5, 2003.7.

9) 塩田正純: 環境アセスメントのための評価法—振動に関する国際的な評価法—, 環境アセスメント学会, 2003年度研究発表会要旨集, pp.155-161, 2003.10.

10) J. Jakobsen: 「Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration」, 9th International Meeting Low Frequency Noise and Vibration, pp.57-64, 2000.

11) O. Backteman: Noisy machines in buildings, 9th International Meeting Low Frequency Noise and Vibration, pp.9-14, 2000.

12) European Commission: Gureen Paper: Future Noise Policy, 1996.

< 附 録 >

ISO 1683-1983 Acoustics-Preferred reference quantities for acoustic level

量の名称	対応英語	基準値	定義	単位
音圧レベル (空气中)	sound pressure level	20 μ (Pa)	20log(P/Po)	dB
音圧レベル (空气中以外)	sound pressure level	1 μ (Pa)	20log(P/Po)	dB
音の強さのレベル	sound intensity level	1p (W/m ²)	10log(I/Io)	dB
振動加速度レベル	vibratory acceleratory level	10 ⁻⁶ (m/s ²)	20log(A/Ao)	dB
振動速度	vibratory velocity level	1n (m/s)	20log(V/Vo)	dB
振動力レベル	vibratory force level	1 μ (N)	20log(F/Fo)	dB
音響パワーレベル	sound power level	1p (W)	10log(W/Wo)	dB
音響エネルギー密度レベル	sound energy density level	1p (J/m ³)	10log(ED/Edo)	dB
音響エネルギーレベル	sound energy level	1p (J)	10log(E/Eo)	dB

注) 1 μ = 10⁻⁶, 1n = 10⁻⁹, 1p = 10⁻¹²

決議 2 : 量, 単位, 記号... ISO/TC12/CD80000-8 [2003 ベルリン会議]

「量と単位—第8部: 音響学」の改訂

< field quantity F の定義 >

$$L_f = 10 \lg [F^2 / F_0^2] \text{ dB}$$

4. 海外の騒音評価について

国際標準化機構 ISO は、1947 年 2 月に設立され、表 9 に示すような形で組織化され、国際的な活動が行われている。日本は、GAT 加盟国であることから、国際規格（例：ISO, IEC）を遵守する義務があり、日本工業規格（JIS）等との整合も重要な審議となっている。多くの規格の中で、音響関係は、(社)日本音響学会が審議団体となって、その役割を担っている。

① 国際規格 ISO について

騒音関係の国際規格は、ISO/TC43/SC1 にて審議され、表 9 の手続に則って発行される。その代表的な規格の例を表-10 に示した。この中から規格化されたものを紹介する。騒音評価は、現在まで、ロビンソン氏&ダットソン氏（英国）の等ラウドネス曲線が基本となって推奨規格 ISO/R226-1961 となり、その後、国際規格 ISO226-1987 を用いてきている。2003 年に見直しが行われ、国際規格 ISO226-2003 として正式に発行した。その経年比較を表-11 に示した。また、聴覚の最小可聴値に関する見直しも行われてきている。これは、ドイツの研究者から、

1000Hz 以下の周波数領域に、大きな誤差が含まれている可能性を示唆され、1985 年以降、改定作業が継続していた。1999 年頃から、日本を中心にした国際共同研究グループの研究活動が始まり、その研究成果により、「新しい等ラウドネス曲線」が、国際規格として採用された。図-5～図-7 は、それらを比較したものである。一方、ISO389-7 では、ISO226-2003 と整合させるための作業が行われているが、図-8 のようにほとんど同様な曲線となっている。

② 欧州各国の騒音評価について

欧州各国では、EU 指令やグリーンペーパーにより、環境騒音の低減に本格的に取り組み始めてきている。「未来の騒音政策：欧州議会グリーンペーパー（1996 年 11 月ブルッセル）」では、現状として、下記のような認識にある。

- 1) 人口の 20%に当る 8000 万人が睡眠妨害などの健康被害にあって、許容できないとされている「60dB 以上」の地域に住んでいる。ブラックエリアと呼ばれている。

表-9 国際標準化機構 ISO の概要

1. 設立	1947年2月23日
2. ISO	ギリシャ語の isos から由来
3. 目的	製品、サービスの国際交流を容易にし、知的、科学および経済的分野における国際間の協力を助長するために世界的な標準化およびその関連活動の発展促進を目指している。
4. 会員団体	メンバーボディ (MB)、通信会員 (CM)、購読会員 (SM)
5. 組織	専門委員会 (TC)、分科委員会 (SC)、作業グループ (WG)
6. 規格発行に至るフロー	1) 振作業項目 (NP) の提案 2) 作業原案 (WD) の作成 3) 委員会原案 (CD) の作成 4) 国際規格原案 (DIS) の照会および策定 5) 最終国際規格案 (FIDS) の策定 6) 国際規格 (IS) の発行

表-10 国際規格の例

項目	国際規格	概要	日本工業規格との対応
聴覚	ISO 226-1997 ISO 226-2003 ISO 389 シリーズ ISO 389-7-1996	音響—推奨周波数 音響—等ラウドネスレベル曲線 音響—オーディオメータ校正用標準等レベル 自由音場と拡散音場における標準最小可聴値	
機械関係	ISO 11201-1995 ISO 11202-1995 ISO 11689-1996 ISO 15667-2000 ISO 15664-2001 ISO 4871-1996	音響—機械・装置による放射される騒音 音響—機械・装置に関する騒音放射の比較方法 音響—囲いや小屋における騒音制御の指針 音響—開放型事業場の騒音制御方法 騒音放射値の表示および検証方法	JIS Z 8737-1 JIS Z 8737-2
自動車関係	ISO 362-1998 ISO 7188-1994 ISO 11819-1997 ISO 13472-2002	音響—加速走行車輛によって放射される騒音の実用測定法 音響—代表的な市街地走行の条件で走る乗用車が放射する騒音の測定 道路交通騒音に対する路面の影響に関する路上測定法 音響—道路面の吸音特性の現場測定法— 第1部：拡張路面法	JIS D 1024
環境騒音関係	ISO 1996 シリーズ： ISO 1996-1-1982 ISO 1996-1-2003 ISO 1996-2-1983 ISO/DIS 1996-2-2003 ISO 9613 シリーズ： ISO 9613-1-1993 ISO 9613-2-1995 ISO 10847-1996	音響—環境騒音の表示と測定 第1部：基本量と手順 第1部：基本量と評価方法 第2部：土地利用に適するデータの取得 第2部：音圧レベルの決定 音響—屋外における音の伝搬減衰 第1部：大気音響吸収の計算 第2部：一般的計算方法 音響—あらゆる種類の屋外防音壁の挿入損失の現場測定法	JIS Z 8731 JIS Z 8731 JIS Z 8738

表-11 ISO226 等ラウドネス曲線の経年比較

年代	概要	備考
1933年	フレッチャー・マンソンの等ラウドネス曲線： 1) 最小可聴値～音の大きさのレベル 100 phon 2) 音の大きさのレベルが大きくなるにつれて、低周波数領域での音圧レベルは大きくなり、かつ音の大きさのレベルによる音圧レベルの差が小さくなる傾向を示している。	米国立物理研究所
1956年	ロビンソン・ダットソンの等ラウドネス曲線： 1) 英国のデータのみ依存	英国立物理研究所
1961年	推奨規格 ISO/R 226-1961	
1985年	ドイツの研究者：H. Fastl & E. Zwicker 1) 1k (Hz) 以下の周波数領域に大きな誤差が含まれている可能性を示唆	ISO/TC 43にて新規規格の策定作業を開始
1987年	国際規格 ISO 226-1987	
2003年	国際共同研究グループ（9名）： 1) 研究参加者：延べ19000名 2) 実験中の「音の大きさ」の判断回数（総聴取回数）：約200万回 3) 実験施設：大無響室（独）産業技術総合研究所 4) 中レベルにおいて、1930年代にフレッチャー氏、マンソン氏によって求められた等ラウドネス曲線に近いものとなった 5) 新（ISO 226-2003）旧（ISO 226-1987：ロビンソン・ダットソン）規格間には、特に1k (Hz) 以下の周波数帯域の広い範囲において、10～15 dBに及ぶ極めて大きな差がみられる	ISO 226-2003 (2003年8月15日付け)として、正式な規格の発行

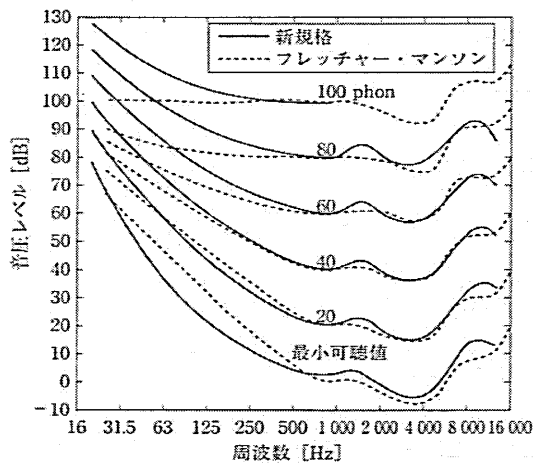


図-5 新規規格とフレッチャー・マンソンによる等ラウドネスレベル

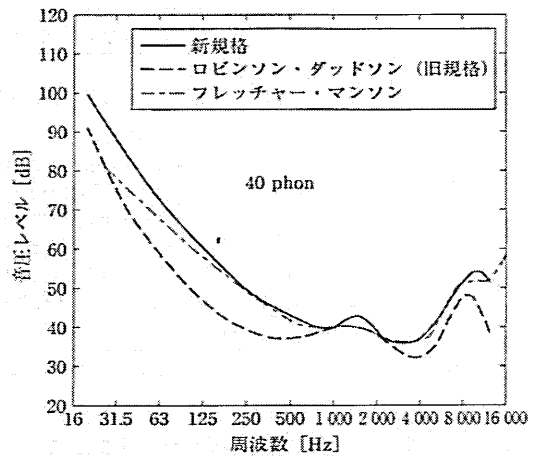


図-6 騒音計のA特性の元であるフレッチャー・マンソンの40Phon曲線と、新規規格およびロビンソン・ダットソン（旧規格）の40Phon曲線

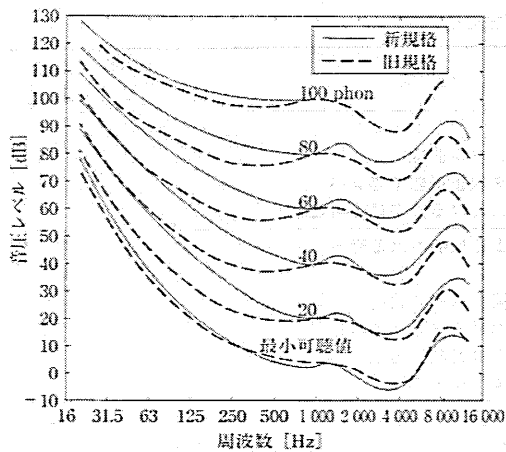


図-7 等ラウドネスレベル曲線の新旧特性の比較

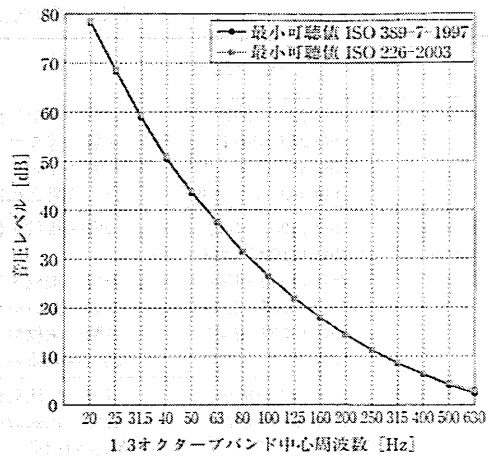


図-8 ISO389-7-1997とISO226-2003の最小可聴値の比較

表-12 欧州各国の騒音評価の規格

国名	工場	道路交通	鉄道	航空機
イギリス	ISO 9613 BS 5228	CRTN : $L_{Aeq,10h}$ で評価	CRN	ECAC DOC 29 (PN dB)
アイルランド	ISO 9613 BS 5228	CRTN	CRN	ECAC DOC 29
フランス	Handleiding metenen rekenen Industrielawaai	NMP 8/XPS 31-133	NMP 8/XPS 31-133	ECAC DOC 29
オランダ	DI 2714/2720 (ISO 9613)	RMV (SRM II)	RMV (SRM II)	ECAC DOC 29
ルクセンブルク	ISO 9613	RLS 90	Schall 03	ECAC DOC 29
ベルギー	ISO 9613	NMP 8/XPS 31-133	RMV (SRM II)	ECAC DOC 29
イタリア	ISO 9613	NMP 8/XPS 31-133	RMV (SRM II)	ECAC DOC 29
スペイン	ISO 9613	NMP 8/XPS 31-133	RMV (SRM II)	ECAC DOC 29
ポルトガル	ISO 9613	NMP 8/XPS 31-133	RMV (SRM II)	ECAC DOC 29
ギリシャ	ISO 9613	NMP 8/XPS 31-133	RMV (SRM II)	ECAC DOC 29
ドイツ	ISO 9613 (VDI 2714/2720)	RLS 90 : L_{Aeq} で評価	Schall 03	AzB
オーストリア	OAL 28	Stl-86	SEMIBEL	OAL 124

(注) ISO 9613 シリーズ : 音響—屋内における音の伝搬減衰
 CRTN : Calculation of Road Traffic Noise CRN : Calculation of Railway Noise
 ECAC DOC 29 : the European Civil Aviation Conference Document 29
 RMV : Reken - en Meetvoorschrift Verrkeerslawai
 RMR : Reken - en Meetvoorschrift Railverkeerslawai
 RLS 90 : Richtlinie für den Larmschutz an Strassen
 Schall 03 : Richtlinie zur Berechnung der Schallimmission von Schienendwegen
 AzB : Anleitung zur Berechnung

表-13 騒音規制法による騒音の大きさの読取値

区分	評価量
変動せず又は変動が小さい場合	その値
周期的又は間欠的に変動し最大値が一定の場合	最大値の算術平均
不規則かつ大幅に変動する場合	90%レンジの上端値 (LA5)
周期的又は間欠的に変動し最大値が一定でない	最大値の90%レンジの上端値

表-14 その他の主な騒音評価量

評価量	説明
L_{Aeq}	等価騒音レベルとよばれ、在来線指針値、環境基準、要請限度に採用された。
WECPNL	航空機騒音に係る環境基準に使用され、 L_{max} と機数により略算される。
L_{den}	小規模飛行場の指針値に採用されており、 L_{Aeq} を夕夜で補正したものである。
L_{max}	最大値とよばれ、新幹線の環境基準に使用されている。
LA5	工場等の騒音規制に使われており、90%レンジの上端値とよばれる。

表-15 等価騒音レベル (L_{Aeq}) の特徴

1	間欠的騒音を含めて総曝露量を正確に反映する。
2	住民反応との対応が中央値 (LA50) より良好である。
3	道路交通騒音等の予測が簡略・明確化できる。
4	中央値 (LA50) に比べて長時間の測定が必要である。
5	国際的な比較が容易である。

2) 人口の40%以上に当たる1億7000万人が、とてもうるさいとされる「55dB~65dB」の地域に住んでいる。グレイエリアと呼ばれている。このような状況の環境において、各国は、騒音源毎の騒音の大きさを定めている。表-12は、欧州各国の騒音評価の規格を紹介したものである。工場関係の騒音評価の根拠は、ほとんどISO9613を基本としている。道路交通関係は、各国の実状により異なっている。鉄道関係も同様な傾向にある。が、航空機関係はドイツ、オーストリアを覗いて、欧州民間航空協議会における規格を採用している。

③ 日本の騒音評価について

騒音規制法は、昭和43年5月第58回国会において成立し、6月10日に公布、12月1日に施行された。これにより、工場騒音、建設作業騒音を対象に地域の指定、規制基準、規制手続等の措置が講ぜられた。その規制における評価量を表-13に示した。また、その他の評価量を表-14に示した。その評価量の特徴は、等価騒音レベルの方向へ進んできている。その等価騒音レベル (L_{Aeq}) の特徴を表-15に示した。

6-2 振動に対する人体感覚の評価量に関して

1. はじめに

環境振動の評価に適用できる人間の振動感覚の評価量として、現在一般的に知られているものは、わが国の振動規制法で用いられている振動レベルのほか、国際規格 ISO 2631 シリーズに規定された方法に基づく評価量などが挙げられる。ISO 2631 シリーズでは、Part 1 (ISO 2631-1, 1997¹⁾)において全身振動評価に関する一般的事項に関する規定、Part 2 (ISO 2631-2, 2003²⁾)において特に建物内の振動評価に関する規定が示されている。すなわち、Part 1 は Part 2 の上位規定にあたるものである。ここでは、振動規制法および ISO 2631 に着目し、これらの規格による規定をまとめ、互いを比較してそれらの相違点を明示する。また、それらの振動評価法で用いられている、人間の振動感覚の周波数依存性を表すとされる周波数補正係数（感覚補正曲線）の根拠とその定義の妥当性について述べる。さらに、環境振動評価にあたり基礎データとなる既往の研究で得られた振動知覚閾値と、それぞれの規格に基づき得られる評価量との対応を示す。

2. 評価法の規定

2.1 振動規制法における評価法

振動規制法は、振動を規制することにより、生活環境を保全し、国民の健康の保護に資することを目的として、1976年公布・施行された。本法で振動規制の体系を定め、関連する政令・省令などで振動の測定方法や規制基準などを定めている。規制の対象は、工場・事業所、建設工事による振動とし、それぞれ「特定施設」および「特定建設作業」を定めることで、規制の対象を明確化している。道路交通による振動に対しては、罰則を伴う規制ではなく、振動防止などの要請の措置を定めている。なお、振動規制法については、文献 3), 4)などで詳細に解説されている。

(1) 測定方法

工場振動、建設作業振動、道路交通振動いずれの場合も、敷地の境界線における鉛直振動のみを規制の対象とする。この場合、生活環境の保全が目的であることから、敷地の境界としては、住居地域に面する境界を選ぶ。振動の測定には、計量法で定められた条件を満たす「振動レベル計」を用いることとされている。

(2) 評価量

振動の計量単位には、計量法に定められた「振動レベル」を用いる。

$$L_v(t_0) = 10 \log_{10} \frac{\{a_w(t_0)\}^2}{a_0^2} \quad (1)$$

$L_v(t_0)$: 振動レベル [dB]

t_0 : 観察時点 [s]

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} \{a_w(t)\}^2 \exp\left(-\frac{t_0-t}{\tau}\right) dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$a_w(t)$: 周波数補正加速度の瞬時値 [m/s²]

τ : 時定数 (= 0.63 s)

周波数補正係数も含め、これらは JIS C 1510³⁾に定められている。図-1 に JIS C 1510 で規定されている周波数補正係数を示す。なお、振動規制法においては鉛直振動のみを評価対象としているが、JIS C 1510 では鉛直、水平それぞれの振動加速度に対する周波数補正係数が規定されている。

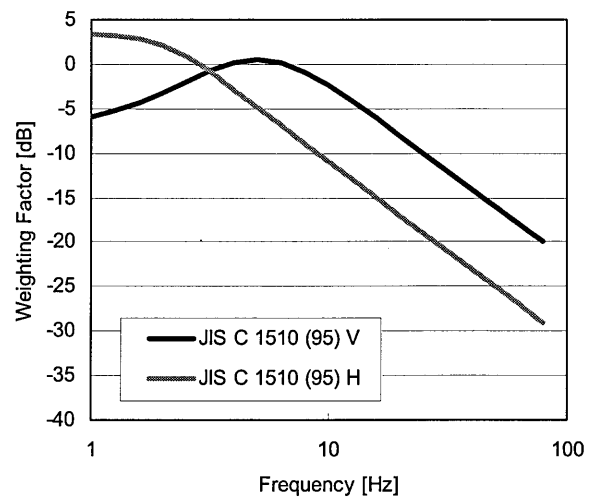


図-1 JIS C 1510³⁾による周波数補正係数

式(1)で得られる振動レベルは、対象とする振動源の特性などにより時間的に変動することもある。このため、例えば、振動レベルが不規則かつ大幅に変動する場合には、測定値の 80%レンジの上端値 (L_{10}) を用いることなどが定められており、道路交通振動についてはこの値により評価することとされている。

(3) 評価基準

工場振動については、「規制基準」が規定されている。すなわち、地域特性および時間帯を考慮した上で、55~70 dB の値が定められている。

建設作業振動については、基準値として 75 dB が定められており、合わせて作業時刻、作業時間に対する基準

を規定することで、振動の規制を実施する。

道路交通振動については、一般に「要請限度」と呼ばれる値として、地域特性および時間帯を考慮し、60～70 dB が定められている。

2.2 ISO 2631-1 (1997) による振動知覚に関する評価法

ISO 2631-1 (1997)¹⁾の目的は、人間の健康と快適性、振動知覚の可能性、及び乗物酔いの発生の観点から、全身振動を定量化する方法を定義することとされている。2004年には、その翻訳 JIS (JIS B 7760-2⁶⁾) が発行された。ここで、上記の快適性については、主に乗物内での快適性を対象としていると判断できることから、環境振動の評価への本規格の適用を考える場合は、主に振動知覚の可能性の観点からの評価法が関係すると言える。以下では、規格で規定されている振動知覚の観点からの評価法について、その概要を述べる。

(1) 測定方法

評価の対象となるのは、あらゆる種類の全身振動で、その周期性、継続性などは問わないものとされている。

ISO 2631-1 (1997) には、振動知覚の可能性の評価に関して、身体の主要支持面での並進3方向(鉛直1方向、水平2方向)の振動を対象とする方法が示されている。身体の姿勢としては、座位、立位、仰臥位の3種類が想定されており、座位に関しては、座席に座った状態が対象とされている。従って、上記の主要支持面とは、座位の場合は座席面、立位と仰臥位の場合は床面となる。主要支持面での振動測定の位置は、座位の場合は座骨結節の直下、立位の場合は身体が最も頻りに指示される位置、仰臥位の場合は骨盤、背中、及び頭の下と規定されている。また、評価対象とする水平2方向は身体の向きに依存し、座位と立位の場合は身体の前方向と左右方向、仰臥位の場合は身体の前方向と左右方向となる。

(2) 評価量

振動の評価は、対象とする各方向について相応する周波数補正を施した加速度の実効値

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$a_w(t)$: 補正加速度の瞬時値 [m/s²]

T : 測定時間 [s]

を求め、方向や測定点、時間に関わらず最大の補正加速度実効値を決定し、その値を用いてなされることとされている。また、補正加速度実効値での評価が振動の影響を過小評価する可能性がある場合(クレストファクタが高い振動、衝撃を時折含む振動、過渡的振動)には、移動加速度実効値(最大過渡振動値: Maximum Transient Vibration Value, MTVV) もしくは四乗則暴露値(Vibration Dose Value, VDV) を用いることが規定されている。

$$MTVV = \max \left[\left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2)$$

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

τ : 移動平均の積分時間 (1 s を推奨)

t_0 : 観察時点 [s]

周波数補正については、姿勢に関わらず、鉛直方向の加速度には W_k 補正係数、水平方向の加速度には W_d 補正係数を適用する。ただし、仰臥位の場合、頭部下での鉛直方向の加速度に対しては、 W_j 補正係数を適用することが推奨されている。これらの周波数補正係数を図-2に示す。なお、比較のため、図-2には、ISO 2631-2 で規定されている W_m 補正係数も示している。

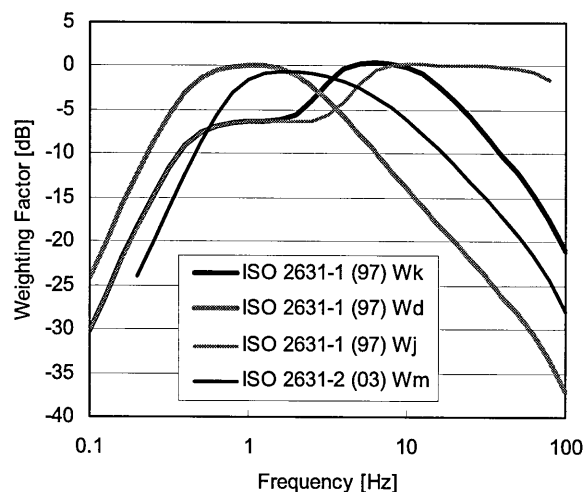


図-2 ISO 2631-1, -2 による振動知覚の評価に関わる周波数補正係数

(3) 評価基準

ISO 2631-1 では、上記の方法で決定した補正加速度実効値を評価する際の基準値は規定されていないが、Annex C に評価の目安が参考情報として示されている。それによれば、「注意深い敏感な人の 50% は、 W_k で補正した加速度のピーク値が 0.015 m/s² の振動を感知し得る」(JIS B 7760-2⁴⁾ より引用) とされている。また、振動知覚の能力の個人差に関する情報として、「知覚の中央値を 0.015 m/s² とすると、25% の人が、ピーク値で、約 0.01～0.02 m/s² の振動を知覚できることになる」(JIS B 7760-2 より引用) と述べられている。ここで、これらの指針は、仰臥位での頭部下で測定した鉛直方向の振動の評価は対象としていない。

2.3 ISO 2631-2 (2003) による評価法

ISO 2631-2 (2003)²⁾ では、建物内の振動や衝撃に対する人間の暴露に関して、快適性やアノイヤンスの観点か

ら、その測定と評価の方法が規定されている。すなわち、環境振動に直接適用するための評価法が規定されている。

(1) 測定方法

建物内で生じる振動及び衝撃について、その種類を問わず全て評価対象としている。振動測定にあたっては、時系列データの記録が推奨されている。

振動の測定方向としては、直交する並進3方向であることは、前述の Part 1 と同様であるが、座標系は人体に対してではなく建物に対して定義するものとしている。

測定場所は、建物の使用形態を考慮し、着目すべき全ての場所や部屋を選定することとされている。部屋の中での測定場所については、建物構造の適切な床面上で、周波数補正後の振動評価値が最も大きくなる場所、あるいは指定された場所とすることが規定されている。

(2) 評価量

Part 1 と同様、周波数補正加速度による評価が規定されている。Part 2 では、振動の測定方向に関係なく適用する W_m 周波数補正係数の使用が推奨されており、Annex A ではその数学的定義が与えられている (図-2)。また、建物内での人の姿勢が決められる場合には、Part 1 で定義されている周波数補正係数が適用できることも記されている。

評価値は、Part 1 で与えられた方法に従って評価値を算出すべきことが規定されている。すなわち、周波数補正後の加速度の実効値を基本評価量とし、基本評価量での評価が振動の影響を過小評価する可能性がある場合には、補足評価法として最大過渡振動値 (MTVV) もしくは四乗則暴露値 (VDV) を用いることとなる。さらに、測定した3方向それぞれに対する評価値のうち、最大となる方向の値のみを対象として評価を行うこととされている。

(3) 評価基準

評価の際には、振動源に基づいて振動を分類することが推奨されている。これは、異なる分類の振動に対しては、許容される振動評価値が異なることが予想されるためであり、i) 連続的過程 (例：工場振動)、ii) 恒久的間欠的活動 (例：交通振動)、iii) 短期的 (非恒久的) 活動 (例：建設工事) の3つの分類が定義されている。また、許容基準値を設定するにあたっての留意事項が記されている。例えば、住居区域の建物内の振動に対する苦情は、振動の大きさが人間の知覚閾値を少しでも超える場合には発生し得ることなどが挙げられている。ただし、振動の許容基準値については、国際規格として設定するには、見込まれる値のばらつきが大きすぎるため、規定されなかったことが記されている。

2.4 評価法の比較とまとめ

振動規制法と ISO 2631 の振動評価法との最も顕著な相違点は、振動の測定位置および方向である。すなわち、振動規制法では屋外の敷地境界線が測定位置であり、評

価の対象は鉛直振動のみであるが、ISO 2631 では屋内に測定位置を設定し、鉛直および水平2方向の振動が評価対象となる。振動規制法における屋外測定値に対する評価基準や要請限度は、いわゆる家屋増幅を建物の種類によらず一律 5 dB と仮定した上で設定されており、その意味で屋内での振動を考慮してはいるが、家屋増幅の仮定の妥当性については確認の必要性が指摘されている。また、近年ではわが国でも、3階建て住宅の増加などに伴い、水平振動に起因すると考えられる環境振動問題の事例が増加しており、水平振動の評価についても今後検討すべきと言える。

評価量については、振動規制法および ISO 2631 とともに、周波数補正加速度の実効値を用いた評価法を規定している。ただし、実効値を算出する際の積分時間 (時定数) が振動規制法と ISO 2631 では異なる。また、適用すべき周波数補正は振動規制法と ISO 2631 で異なるほか、ISO 2631 の Part 1 と Part 2 でも異なる (図-3)。

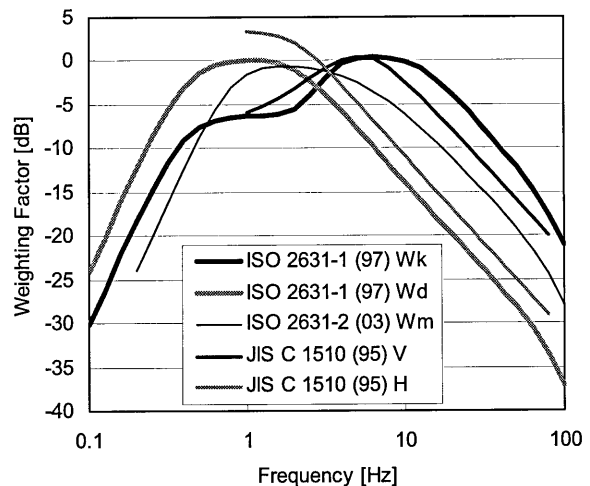


図-3 ISO 2631-1, -2 および JIS C 1510 による周波数補正係数

振動規制法 (JIS C 1510) での周波数補正は、1997年に改訂される以前の ISO 2631/1 で規定されていた周波数補正と基本的に等しい。ただし、鉛直特性は人体に対して定義された座標系の z 軸 (足-頭方向) に対する補正係数、水平特性は同じ座標系の x 、 y 軸 (それぞれ背-胸方向、左右方向) に対する補正係数に等しい。旧 ISO 2631-1 の補正係数は、人体の姿勢により x 、 y 、 z 軸と鉛直・水平の関係が変わるので、厳密にはそれらの補正係数は同一ではない。

一方、ISO 2631-2 の周波数補正係数 W_m は、前述の旧 ISO 2631-1 の x 、 y 軸に対する補正および z 軸に対する補正の複合として定義されたものである。これは、屋内で人体の姿勢が変わることを考慮したものであり、2003年改訂以前の旧 ISO 2631-2 の補正係数をそのまま用いている。しかし、その改訂が1997年に改訂された Part 1 と整合させるためであったとすれば、 W_m 周波数補正

係数は必要ないと言える。すなわち、ISO 2631-1では、基本的に、鉛直振動については W_k 補正係数、水平振動については W_d 補正係数を人体の姿勢に関わらず用いることが規定されている。従って、建物内での振動評価に際して、人の姿勢が決められない場合でも、ISO 2631-1に従って鉛直・水平の別で補正係数を選択すれば問題ないこととなる。図-3では、 W_m 、 W_k 、及び W_d 補正係数を比較している。図より、鉛直振動に関して、3.15 Hz以上の振動数領域では、 W_m 補正係数は、 W_k 補正係数に比べ、振動を過小評価することとなり、8 Hzでその差は5dB、それより高い振動数では差が6dBとなることが分かる。また、水平振動に関しては、2 Hz以上の振動数領域で、 W_m 補正係数は、 W_d 補正係数に比べ、振動を過大評価することとなり、6.3 Hz以上ではその差が6dBを超える。

ISO 2631では、振動評価の際の許容基準値は定めず、振動評価のためのデータ測定、解析及び収集方法の統一的方法のみを規定している。振動に対する人間の反応のうち、特に苦情やアノイアンスといった側面は、期待される技術水準を含んだ社会的また経済的な背景等に影響を受け得るため、世界各国で使用可能な許容基準値の設定を目指さなかった現行の規格は合理的と言える。この場合、国際規格は不要であり、我が国が独自の方法で振動評価を行ってきたように、各国が独自の方法で評価を行うことも考え方の一つである。しかしながら、各国が統一された方法で得た評価値を蓄積していくことは、今後、社会が多様化また国際化していく場合、国際的なデータの比較等、様々な利用方法があり、有意義であると考えられる。

3. 振動感覚補正の根拠について⁷⁾

前述の複数の振動評価法で用いられる振動感覚補正あるいは周波数補正係数 (frequency weighting) は、振動に対する人間の各種反応の周波数特性を表す一種のモデルと解釈でき、加速度記録への適用を基本に、振動の方向や人体の姿勢などに応じて複数定義されている。これらの周波数補正は、基本的には被験者を用いた実験室での振動実験の結果を基に定義されたと考えられている。特に、振動の大きさとそれにより励起される感覚量との関係に関しては、既往の研究で比較的多くの実験結果が得られており、周波数補正係数の根拠となったと考えられる (von Gierke⁸⁾, Griffin^{9,10)}。しかし、既往の研究で得られた実験結果には、異なる研究間でデータのばらつきがあることなど、周波数補正係数の根拠は必ずしも明確ではない。

そこで、以下では、前出のISO 2631-1、-2及びJIS C 1510で定義された周波数補正係数と根拠となる実験データとの関係を検討するため、各規格の参考文献で示されている振動感覚に関する実験結果と周波数補正係数と

の比較を行った結果を示す。

3.1 ISO 2631-1, JIS C 1510の周波数補正係数

ISO 2631-1 (1997), ISO 2631-2 (2003)およびJIS C 1510 (1995)に規定された環境振動評価に関連する主な周波数補正係数は図-3に比較しているが、それらの適用対象をまとめたものを表-1に示す。

前述のとおり、JIS C 1510による鉛直特性は、初版のISO 2631/1での周波数補正係数 W_z と同一のものであり、現行のISO 2631-1での鉛直振動評価用の W_k 補正係数とは異なる特性を持つことが分かる。一方、JIS C 1510による水平特性は、ISO 2631-1での水平振動評価用の W_d 補正係数と比較すると、係数の値自体は異なるものの、相対的な周波数依存性は同一である。鉛直及び水平の特性を複合したISO 2631-2による W_m 補正係数は、鉛直及び水平振動いずれにも適用するものと規定されているため、 W_k 補正係数および W_d 補正係数と比較する。鉛直振動の評価に関して、 W_m 補正係数は、 W_k 補正係数に比べ、1~3.15 Hzで振動を過大評価、3.15 Hzで過小評価をすることとなる。水平振動の評価に関しては、 W_m 補正係数は、 W_d 補正係数に比べ、2 Hz以上の振動数領域で振動を過大評価することとなる。

表-1 ISO 2631-1, -2およびJIS C 1510による周波数補正係数とその適用対象

規格	周波数補正	適用対象の主要例 ⁱ⁾
ISO 2631-1 (1997)	W_k	座位 (座席面) z 軸 (鉛直) 立位 z 軸 (鉛直) 臥位鉛直 (頭部以外)
ISO 2631-1 (1997)	W_d	座位 (座席面) x, y 軸 (水平) 立位 x, y 軸 (水平) 臥位水平
ISO 2631-2 (2003)	W_m	建物、鉛直・水平
JIS C 1510 (1995)	鉛直特性	鉛直
JIS C 1510 (1995)	水平特性	水平

i) ISO 2631-1に関しては、振動知覚に関する適用例のみを例示

3.2 周波数補正と実験データとの比較

前述の各種周波数補正係数の定義にあたっては、ある量の振動感覚を励起する振動加速度の大きさを周波数の関数として表した等感度曲線 (equal sensation contour, equivalent comfort contour) のデータが主に用いられたと考えられる (Griffin^{9,10)}。そこで、ここでは各規格の参考文献で得られる等感度曲線と周波数補正係数との比較を示す。比較の際には、まず各周波数補正係数の逆数を求め、その最小値が0dBとなるように標準化した等感

度曲線を算出し、次に、この周波数補正係数に基づく等感度曲線と実験データとの差が最小となるように最小二乗法により実験データを標準化し、両者を比較した。ここで、一つの文献で等感度曲線が複数の振動の大きさに対して求められている場合、そのうち最小の振動の大きさに対する等感度曲線のみを用いた。また、等感度曲線を正弦振動とランダム振動(1/3オクターブバンドなど)に対して求めた文献も見られるが、ここでは正弦振動に対する結果のみを用いた。これらの文献で認められる振動の大きさや種類による等感度曲線の差異は、周波数補正の定義に影響を及ぼさない程度と考えられたので、以上の実験結果を省略することは、後述の議論に影響を及ぼさないものと判断した。

(1) W_k 周波数補正係数

ISO 2631-1 (1997)の参考文献のうち、 W_k 周波数補正の適用対象となる鉛直振動に対する等感度曲線を求めたものは5編(三輪他¹¹⁾, Corbridge他¹²⁾, Donati他¹³⁾, Griffin¹⁴⁾, Shoenberger¹⁵⁾)あり、国ごとの内訳は、日本1, アメリカ1, イギリス2, フランス1であった。図-4に周波数補正と実験データの比較を示す。図より、10Hz程度までの周波数領域では W_k の特性と類似した実験データが存在することが分かる。それ以上の周波数領域においては、この領域で唯一引用されている三輪他のデータと W_k の傾きは一致しているが、両者の間には5dB程度の差異が認められる。

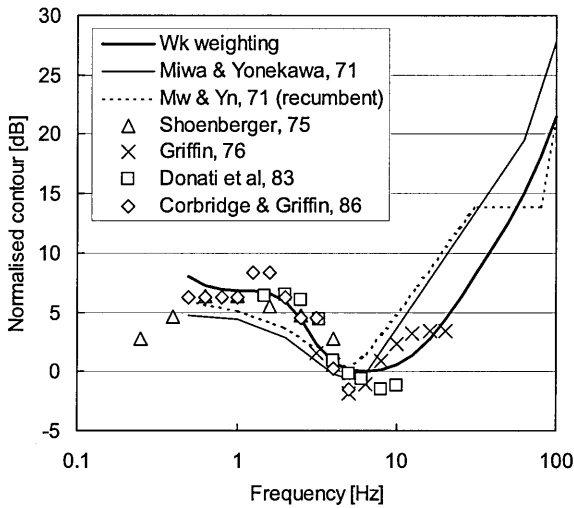


図-4 W_k 周波数補正と鉛直振動に対する等感度曲線実験データ

(2) JIS 鉛直特性

前述のようにJIS C 1510による鉛直特性は、旧版のISO 2631/1における周波数補正係数 W_z と同一の特性を持つ。比較対象とする実験データとしては、オリジナルの定義である W_z に関するデータを用いることを考えたが、 W_z の定義は1974年のISO 2631の初版発行に遡り、その参考文献を確認できなかった(von Gierke⁸⁾)。そこで、ISO 2631-1 (1997)の参考文献のうち1974年以前発

表の三輪他¹¹⁾の実験データを比較に用いた。図-5より、2Hz以上の周波数領域では、 W_z は三輪・米川のデータと非常に良く一致しており、両者の差は±1dB程度であることが分かる。

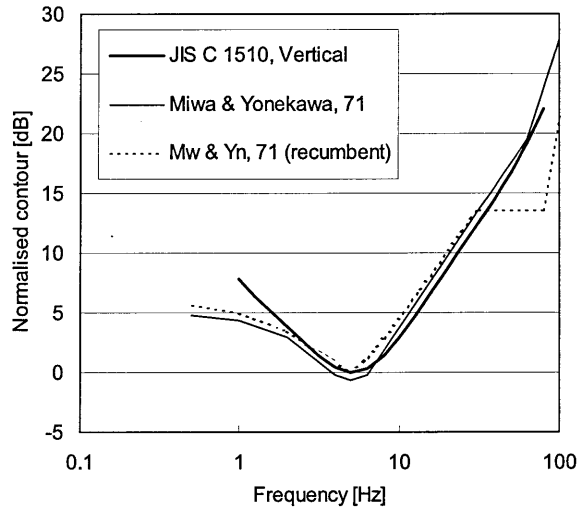


図-5 JIS 鉛直特性と鉛直振動に対する等感度曲線実験データ

(2) W_d 周波数補正およびJIS 水平特性

W_d 周波数補正係数とJIS 水平特性は、周波数依存性に関しては同一の定義であると言える。ここでは、水平振動に対する等感度曲線と W_d 周波数補正との比較を行った。用いた参考文献はISO 2631-1から計3編(三輪他¹¹⁾, Corbridge他¹²⁾, Donati他¹³⁾:日本1, イギリス1, フランス1)であった。図-6より、実験値にばらつきが見られる2Hz以下の領域では、 W_d と実験値の間に5dB程度の差が認められる場合があるものの、対象とする周波数領域全体としては、 W_d はこれらの実験結果を定義の根拠としていると判断できる。

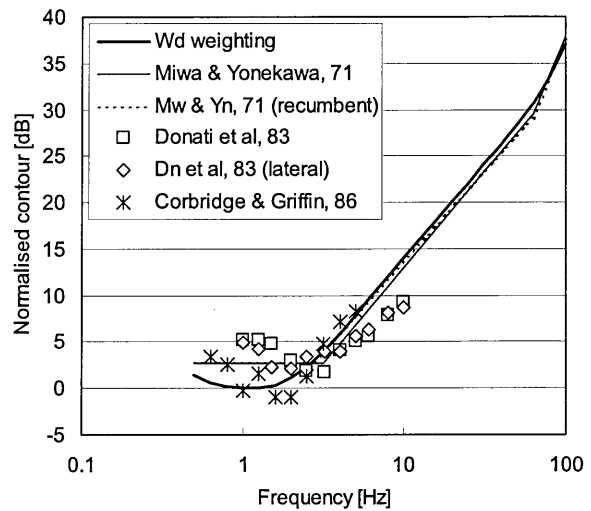


図-6 W_d 周波数補正と水平振動に対する等感度曲線実験データ

3.3 まとめ

ISO 2631-1 (1997)およびJIS C 1510 (1995)で規定されている主要な周波数補正と、規格の参考文献における等感度曲線の実験データとの比較により、各周波数補正の定義の根拠について検討した。ISO 2631-1における W_k 周波数補正係数は、10Hz以下では実験データとの対応が見られたものの、それ以上の周波数領域の定義に関しては明確でなかった。また、JIS C 1510による鉛直特性は、旧ISO 2631の周波数補正に基づいており、対応する実験データも確認できた。しかし、JISの鉛直特性は、より新しい知見に基づくと考えられる W_k とは異なる周波数特性を持っており、これらの周波数補正の差に関しては注意を要する。ISO 2631-1による W_d 周波数補正係数およびJIS C 1510における水平特性は、適用対象の水平振動に対する実験データとの対応が見られ、またISOとJISの間で水平振動評価用の周波数補正係数の間に実質的な差は見られなかった。

4. 現行の環境振動評価と知覚閾値の関係について¹⁵⁾

環境振動の評価には、人間が振動を感じるか否か（振動知覚閾）を基準にすることは妥当と考えられ、同様の指摘はISO 2631-2 (2003)²⁾にも認められる。上述の通り、現行の種々の環境振動の評価方法においては、周波数補正係数を用いて人間の振動感覚を考慮する方法が採られている。前節で述べたように、ISO 2631-1 (1997)¹⁾やJIS C 1510 (1995)⁵⁾で規定されている周波数補正係数は、等感度曲線 (equal sensation contour, equivalent comfort contour) のデータに基づき定義されたことが分かる。その際に用いられた等感度曲線は、振動知覚閾値より高い振動の大きさに対して求められたものである。しかし、既往のデータ (例えば、三輪他¹¹⁾) から明らかな通り、対象とする振動の大きさが異なると、振動感覚の周波数依存性が変化することから、知覚閾値の周波数依存性が、必ずしも各規格で規定されている周波数補正係数と一致するとは言えない。そこで、以下では、既往の振動知覚閾に関する実験データを、ISO 2631-1, -2 およびJIS C 1510による評価値と比較することで、それらの振動知覚の評価の妥当性を検証することを試みた。

4.1 各規格における周波数補正係数および振動評価値と振動知覚閾値の関係

ISO 2631-1, -2 およびJIS C 1510による周波数補正係数は、図-3に示されている。2.2.(3)で述べたように、ISO 2631-1では、 W_k 補正係数で補正された加速度の実効値を用いた際、「注意深い敏感な人」(JIS B 7760-2⁶⁾より引用)の知覚閾値は、ピーク値で 0.015 m/s^2 程度(正弦振動の場合、実効値で 0.011 m/s^2 程度)であると記述されている。ISO 2631-2では、 W_m 補正係数を用いた評価値に対する知覚閾値の目安は示されていないが、同じ

振動に対して W_m 補正係数あるいはISO 2631-1の W_k 補正係数を適用できると解釈できることから、ISO 2631-1での W_k 補正加速度実効値に対する値が参考になるものと考えられる。また、一般に、JIS C 1510に従って測定した振動レベルを用いた際、人間の振動知覚閾値の目安は55dB程度と言われている。

4.2 既往の振動知覚閾に関する実験データと各振動評価法による評価値との比較

既往の実験データとして用いたのは、ISO 2631-1, -2の参考文献に含まれる振動知覚閾値の測定に関する論文4編(三輪他¹¹⁾, Miwa¹⁷⁾, Miwa他¹⁸⁾, Parsons他¹⁹⁾), 建築関連の分野で古くから振動評価に用いられているMeister曲線の根拠となる論文(Reiher他²⁰⁾), 及び最近の日本での閾値測定に関する論文(Yonekawa他²¹⁾)の計6編から、それぞれの論文に掲載されたグラフを参考にデータを電子化することで収集した。図-7から図-12に、振動方向(鉛直, 水平)及び被験者の姿勢(座位, 立位, 仰臥位)別にまとめた正弦振動に対する実験データを示す。ここで、図に示した実験データは、それぞれの研究での平均値あるいは中央値である。また、図には前述の振動評価法による知覚閾値に相当する評価値も示している。前述のとおり、JISについては、振動レベルが55dB、ISOについては、周波数補正加速度実効値が 0.011 m/s^2 となるように図示している。

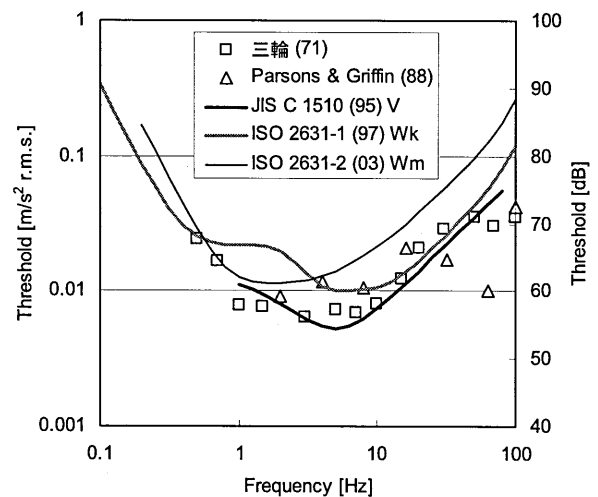


図-7 鉛直振動に対する座位での知覚閾値と各振動評価法による評価値

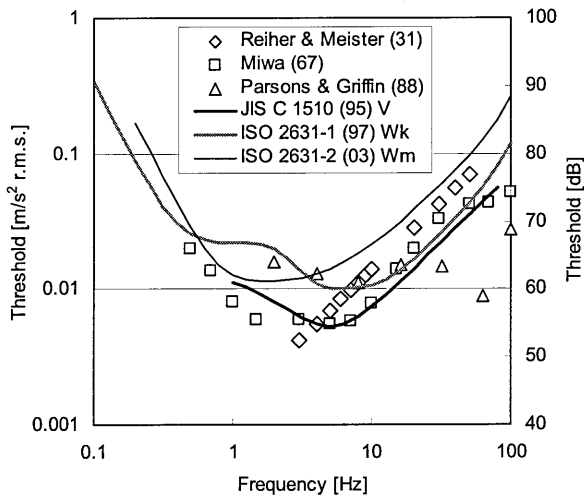


図-8 鉛直振動に対する立位での知覚閾値と各振動評価法による評価値

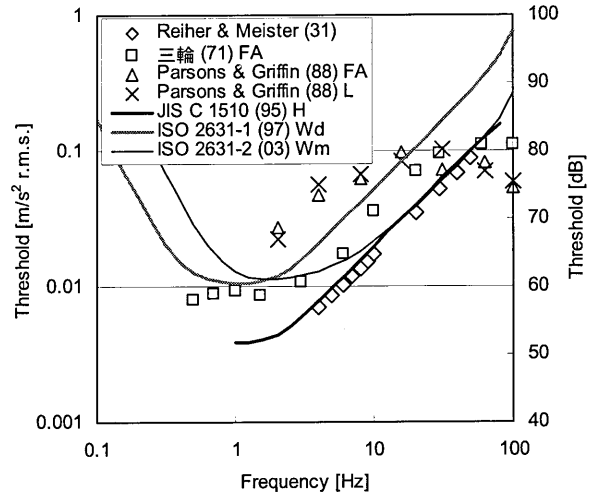


図-11 水平振動に対する立位での知覚閾値と各振動評価法による評価値 (FA: 前後, L: 左右)

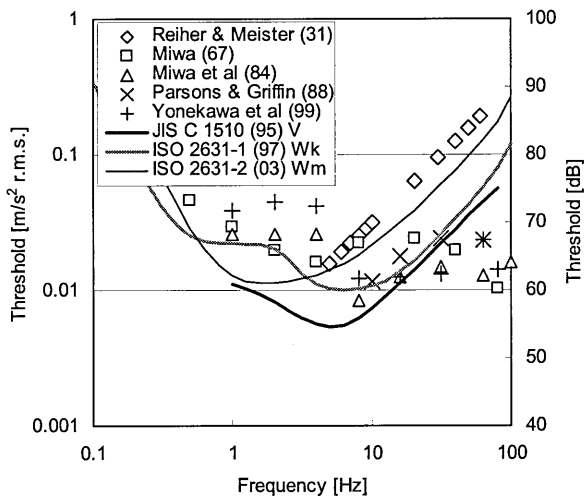


図-9 鉛直振動に対する仰臥位での知覚閾値と各振動評価法による評価値

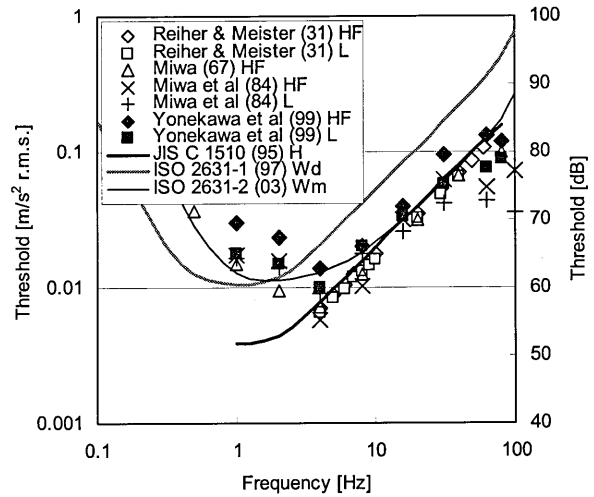


図-12 水平振動に対する仰臥位での知覚閾値と各振動評価法による評価値 (FA: 前後, L: 左右)

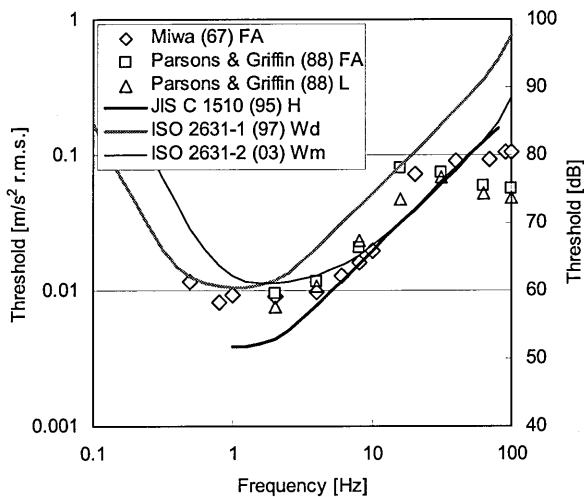


図-10 水平振動に対する座位での知覚閾値と各振動評価法による評価値 (FA: 前後, L: 左右)

図-7から図-12より、異なる研究での実験データ間には相当のばらつきがあることが認められ、また、各振動評価法による知覚閾値に相当する評価値の間にも差があることが分かる。しかし、例えば、JISによる閾値と三輪他¹¹⁾とMiwa¹⁷⁾による実験データのように、ある程度の対応が認められる例も見受けられる。

実験データが振動評価法による評価値より低い場合には、現行の振動評価法では、振動の影響を過小評価する可能性があることとなる。この点に着目すると、特に差異が認められるのは、鉛直振動に対する立位での3Hzより低い周波数領域(図-8)、鉛直振動に対する仰臥位での31.5Hz以上の周波数領域(図-9)、水平振動に対する全ての姿勢での63Hz以上の周波数領域(図-10~12)である。

また、水平振動に関しては、いずれの姿勢においても、4Hzより低い周波数領域において、振動評価法による評

価値が実験データを下回っており、ここで用いた実験データとの比較の限りにおいては、知覚閾値に関して振動を過大評価する可能性があると言える。

4.3 まとめ

以上、振動知覚閾値データに関して、既往の研究結果のうち、正弦振動を用いて複数の被験者に対して測定したデータの平均値や中央値を代表値として、振動評価法による評価との比較検討を行った。その結果、振動方向や姿勢の条件によっては、現行の振動評価法による振動知覚に対する評価が、人間の知覚閾値を過大評価、すなわち危険側の評価をする場合があることが明らかとなった。ここでは、実験データの平均値や中央値と評価値との比較を行っているが、データのばらつきを考慮し、より敏感な被験者のデータを参照することにすれば、知覚閾値を過大に評価する可能性は増大すると言える。

上記の検討では正弦振動に対するデータのみを用いたが、連続的な正弦振動以外の種類の振動に対しては、知覚閾に相当する物理量が必ずしも明確になっているとは言えず、環境振動評価のための基準値を設定する上では、そのような点についても検討が必要である。

5. おわりに

環境振動の評価に際し、我が国も含め世界各国における振動に対する苦情実態とその振動評価値との対応に関する経験やデータの蓄積から、環境振動に対する人間の反応、特に苦情やアノイアンスは、振動の大きさのみならず、それらに影響を与える様々な条件や周辺要因にも依存する可能性が指摘されている。このことを踏まえ、2003年に発行されたISO 2631-2²⁾では、参考情報としてではあるが、建物内での振動に対する人間の反応に関する問題に対処する場合のデータ収集方法について、ガイドラインを与えている (ISO 2631-2, Annex B)。

具体的には、人間の反応に基いて建物内での振動評価を行うためのデータ収集時に考慮すべき条件及び要因として、i) 振動発生源に関する条件、ii) 振動測定に関する条件、iii) 振動に関連する物理現象の3項目に分類し、それぞれ細目を示している。表-2にそれらの条件及び要因を示す。項目 i), ii) で挙げられている条件については、これまでの振動評価においても、その多くは考慮されていたものである。Annex Bの特徴は、関連する物理現象に関する項目 iii) として、振動に対する人間の反応に影響を与える可能性のある周辺要因について、その測定と評価が推奨されていることである。すなわち、表-2に示すとおり、固体伝搬音、空気伝搬音、窓等のがたつき音、視覚的影響の4つが周辺要因として挙げられている。これらの物理現象により、人間が振動の知覚に注意をより向けるようになる効果があると考えられるほか、音に関しては、音自体に対する人間の反応が振動に対する人間

の反応に影響を与える可能性があると言える。また、振動とそれらの物理現象とを混同して認識することもあり得る。Annex Bでは、それらの物理現象に対して、測定や評価を行う際の留意事項が示されている。

表-2 ISO 2631-2, Annex Bで示されているデータ収集時に考慮すべき条件及び要因

i) 振動発生源	ii) 振動測定	iii) 関連する物理現象
対象が振動源となる時間帯	測定・データ処理	固体伝搬音
対象が振動源となる継続時間	測定場所	空気伝搬音
対象が振動源となる回数	測定方法	がたつき音
発生する振動の特性	測定地点での振動の特徴	視覚的影響
	周波数補正	
	暴露時間(継続時間・時間帯)	

我が国でも、苦情実態と振動の測定結果が必ずしも対応しない調査結果が得られるような場合、例えば、人間に対する振動と騒音との複合的な影響の可能性が指摘されることもある。従って、現場での測定の際には、苦情実態の把握のため、振動の測定に加え、ISO 2631-2に示されている騒音等の周辺要因についての測定も実施し、データを蓄積していくことが、将来的には望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) International Organization for Standardization: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, ISO 2631-1, 1997.
- 2) International Organization for Standardization: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), ISO 2631-2, 2003.
- 3) 日本騒音制御工学会：振動規制の手引き，技報堂出版，2003.
- 4) 日本騒音制御工学会：地域の環境振動，技報堂出版，2001.
- 5) 日本規格協会：振動レベル計，JIS C 1510, 1995.
- 6) 日本規格協会：全身振動－第2部：測定方法及び評価に関する基本的要求，JIS B 7760-2, 2004.
- 7) 松本泰尚：文献レビューによるISO2631シリーズの全身振動評価用周波数補正の検証，騒音制御，27(1), pp. 52-57, 2003.
- 8) von Gierke, H. E.: The ISO standard guide for the evaluation of human exposure to whole-body

- vibration, Society of Automotive Engineers, Truck Meeting, Philadelphia, SAE paper 751009, 1975.
- 9) Griffin, M. J.: Evaluation of vibration with respect to human response, Society of Automotive Engineers, International Congress and Exposition, Detroit, SAE paper 860047, 1986.
 - 10) Griffin, M. J.: Handbook of Human Vibration, Academic Press, pp. 415-451, 1990.
 - 11) 三輪俊輔, 米川善晴: 正弦振動の評価法 (振動の評価法 1), 日本音響学会誌, 27 (1), pp. 11-20, 1971.
 - 12) Corbridge, C., Griffin, M. J.: Vibration and comfort: vertical and lateral motion in the range 0.5 to 5.0 Hz, Ergonomics, 29 (2), pp. 249-272, 1986.
 - 13) Donati, P., Grosjean, A., Mistrot, P., Roure, L.: The subjective equivalence of sinusoidal and random whole-body vibration in the sitting position (an experimental study using the floating reference vibration method), Ergonomics, 26 (3), pp. 251-273, 1983.
 - 14) Griffin, M. J.: Subjective equivalence of sinusoidal and random whole-body vibration, Journal of the Acoustical Society of America, 60 (5), pp. 1140-1145, 1976.
 - 15) Shoenberger, R. W.: Subjective response to very low-frequency vibration, Aviation, Space, and Environmental Medicine, 46 (6), pp. 785-790, 1975.
 - 16) 松本泰尚, 佐々木貴史: 振動知覚データの分析に基づく振動評価法の検証, 日本騒音制御工学会平成16年春季研究発表会講演論文集, pp. 17-20, 2004.
 - 17) Miwa, T.: Evaluation methods for vibration effect, Part 1. Measurements of threshold and equal sensation contours of whole body for vertical and horizontal vibrations, Industrial Health, 5, pp. 183-205, 1967.
 - 18) Miwa, T., Yonekawa, Y., Kanada, K.: Thresholds of perception of vibration in recumbent men, Journal of Acoustical Society of America, 75 (3), pp. 849-854, 1984.
 - 19) Parsons, K. C., Griffin, M. J.: Whole-body vibration perception thresholds, Journal of Sound and Vibration, 121 (2), pp. 237-258, 1988.
 - 20) Reiher, H., Meister, F. J.: Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen, Forschung, 2 (11), pp. 381-386, 1931.
 - 21) Yonekawa, Y., Maeda, S., Kanada, K., Takahashi, Y.: Whole-body vibration perception thresholds of recumbent subjects - part 1: supine posture -, Industrial Health, 37, pp. 398-403, 1999.