

# 人体の振動感覚特性と振動基準\*1

正会員 松本 互平 \*2

## Characteristics of Vibration Sensation of Human Body and Vibration Standard

By Kouhei MATSUMOTO (Member)

Vibration guideline for passenger and merchant ships (ISO6954) was revised at the end of 2000. The main aim of this revision is to establish compatibility with vibration standard of whole body vibration of human body. (ISO2631-1-1997) In this paper, the transition and features of ISO2631 was introduced at first. Correlation of vibration standard between human body and ships were discussed. A method to represent sensitivity curve was proposed as functions of frequency-weighting curve and vibration severity value. A general mathematical expression for sensitivity curve with folded straight lines and frequency-weighting functions having product of hyperbolas was derived. It became possible to compare vibration standards for different evaluation methods. Some examples of comparison between different ISO standards were discussed.

**Keywords :** *Vibration Sensation of Human Body, Evaluation of Vibration, ISO 2631 Standard, ISO 6954*

### 1. 緒言

商船の振動基準である ISO6954 が 2000 年 12 月に 16 年ぶりに改訂された<sup>1)</sup>。この基準は人体の全身振動に対する ISO 基準 ISO2631 との整合性をはかることが最も大きな目的であり、そのため新基準は旧基準 (ISO6954-1984) に比較して大幅な変更になった。新基準の適用に対して、誤解や誤用を避けるためには、ISO TC108 全体の振動基準、とりわけ人体の振動基準 ISO2631<sup>2)</sup> を理解する必要がある。

一般に、乗り物の振動基準を扱う場合、二つの方向がある。一つは機械や構造物の振動において、実測した振動量とその感覚評価を実績として許容値を決めようとする方法であり、他方は人体そのものに対して許容すべき振動を定めようとする方法である。どちらも人間の振動感覚である生理的かつ心理的の反応を対象とするだけにばらつきが大きく、理論的にも曖昧さの多い学際的分野である。

人体の振動実験による振動感覚の研究は 1930 年代から盛んに行われるようになり、それらの研究成果をも

とに人体の全身振動の振動基準 ISO2631 が 1974 年に発行された<sup>3)</sup>。一方、その頃すでに 400 隻におよぶ実船計測値をもとにして、船舶の振動基準 ISO2631 の第一次ガイドラインができあがっていたにも関わらず、発行が 1984 年までずれ込んだのは SC2(船舶)と SC4(人体)との両部会の確執によるものである。特別委員会が設置され 1979 年には ISO2631 の妥協案 Addendum 3 が提示されたが解決には至らず、改訂を前提とした上で、分かりやすいが問題点も多い ISO6954-1984<sup>4)</sup> が誕生した。

その後、特別委員会で検討された Addendum 3 が ISO2631-2<sup>5)</sup>(建築物の振動)の荷重曲線としてそのまま使われ、ISO6954 の新基準もそれを漸近線とする荷重曲線が使われることになった。その意味では、上下方向と水平方向の区別なく、新しい混合型の荷重曲線(後に Whole Body combined と呼ばれる)の創造は両期的なものであったといえる。

人体の振動感覚の研究もその後、実験室での実験や疫学的調査が進み新しいデータが蓄積され ISO2631 は 1997 年全面改訂された。ISO6954 はこの新基準に整合するように改訂されたものであり、ISO の新しい考え方のもとに整合がはかられたとすることが出来る。すなわち、製品個別の振動基準の評価法は姿を消し、

\*1 平成 13 年 11 月 17 日 造船三学会秋季連合大会において講演、原稿受付 平成 13 年 12 月 25 日

\*2 近畿大学

どの製品にも人体中心の振動評価法に変わっていくことを意味している。製品の性能をよくなるための技術偏重の時代から人間の生活環境を重視した製品への社会的変遷を反映している。

本論文では、まず人体の全身振動を中心とした ISO 振動基準に眼を向け、その特徴と船舶の振動基準との比較関連について述べる。次に、これらの各種 ISO やその他の振動許容曲線などの相互比較が可能のように、一般的な振動感覚曲線の数式表示する方法について考察する。また、この方法を使用して ISO 振動基準の相互比較や旧基準の実船データ値と人体の新振動基準との比較などを示すこととする。

## 2. 人体の全身振動の振動基準 (ISO2631)

ISO2631-1974 は人間の全身振動に対する世界で最初の国際基準である。それ以前にも Reiher & Meister, Beksey, Dickmann, Zeller などにより生体振動実験をもとにした振動感覚特性曲線が提案されていたが ISO2631 が発行された後には、この特性曲線に準拠した規格が各種の乗り物や構造物の振動基準として定着している。最近竣工したセミサブリグにおいても、ISO2631-1974 に準拠した NORSOK Standard が適用されている。

ISO2631 は単一振動数で評価する。複数の振動数を含む場合にはスペクトル解析した個々の振動量で評価する方法で Rating method と呼ばれている。

ISO2631-1974 の特徴は次の通りである。

- (1) 振動による影響の評価目的は (1) 疲労・能率減退限界、(2) 暴露限界、(3) 快感減退限界であり、それぞれは同じ振動特性曲線 (荷重曲線) が使われている。
- (2) 人体の受ける振動の方向によって、上下・水平 (前後および左右) は異なった振動特性曲線で評価する。
- (3) 振動に暴露される時間によって、1 分から 24 時間まで 9 段階の範囲で許容振動量が与えられる。
- (4) 振動は実測加速度実効値 (r.m.s.) で評価する。

この基準に対しても、その後新しい研究成果、実験データの累積や計測技術やデータ処理法の進歩などにより改訂案が出された。主な問題点は、座席に座っている人への振動の評価、評価対象によって振動暴露時間の影響は異なるという実験結果、疲労・能力減退の概念やその時間依存性、衝撃振動などの大きなクレストファクターに対する扱いなどである。これらの問題は長い間審議が重ねられたが、1997 年やっと ISO2631-1 の改訂版が発行された。最も大きな変更点は、0.5Hz から 80Hz までの振動評価に初めて Frequency-weighting method が採用されたことであろう。人間の振動感覚

特性に準じた振動数の関数である荷重曲線を定め、実測加速度の振動数成分にそれぞれ weight をかけ、ある周期にわたり全体として overall 値を二乗平均より求めるものである。こうした方法は騒音計測などに用いられている方法であり、振動計に荷重曲線の回路を組み込むことにより、容易に overall の計測値が得られる便利な方法である。

また、新基準では振動の評価目的が (1) 人間の健康、(2) 快適性、(3) 振動知覚および (4) 動揺病からなっており旧基準での「疲労・能率減退限界」がはずされた。これは作業能率に及ぼす振動の影響は、乗り物や構造物の作業環境によって大きく変わること、また実際には他の感覚と複合した感覚として作用するため、ある特定の特性曲線を規定するのが難しいためと思われる。建築物に対しては ISO2631-2 が 1989 年に発行されており (現在改訂審議中) また船舶に対する ISO6954 が改訂されたことを勘案すると「疲労・能率減退限界」を ISO2631-1 で取り上げない理由がわかる。このように考えると、ISO の振動基準に関する全体像も見えてくるし、ISO6954 の斬新な新基準の出現もその位置づけや必然性がはっきりとしてくるのである。

ISO6954-2000 では、客船やフェリーの乗客を含むことが明記されているが、ISO2631 の立場からすればこれらはむしろ ISO2631-1 の快適性の評価を適用すべきなのであろう。船員は作業能率中心であっても、乗客の基準はあくまでも快適性であるからである。

上記二つの大きな変更点のほか、新 ISO2631-1 の主な特徴を列記すれば次のようになる。

- (1) Sensitivity curve (振動限界曲線) は直接示されていない。Frequency weighting curve を本文中に与え、振動限界値は Annex に載せている。
- (2) Frequency weighting curve は 6 種類の曲線 (Annex に数式表示あり) で与えている。
- (3) 時間依存性を表す暴露時間の影響の表現がなくなった。
- (4) 評価方法が Frequency weighting method に変わったので、評価量は物理量から感覚量 (Frequency weighted r.m.s. acceleration) に変わった。
- (5) 動揺病の評価が加わり、振動数範囲は 0.5Hz~80 Hz になった。
- (6) 3 方向成分にそれぞれ weight を掛け、そのベクトル和で評価するようになった。
- (7) Crest factor が大きい衝撃振動に対して新しい評価法 (the running r.m.s. method, the 4-power vibration dose method) が導入された。

このように、船舶の新振動基準 ISO6954-2000 は基本的な部分はほとんど新 ISO2631 に整合している。感覚量を使った新しい評価法が採用されたため、旧基準のベースとなった原始データの姿が直接見えなくなってしまった。新基準の位置づけを認識する上でも振動基準を相互に比較することは重要なことである。そのため、振動基準曲線を表す一般的な方法を考察することにする。

### 3. 振動感覚特性を数式で表す方法

人体の振動感覚特性は振動数によって変わる。人間が同じ大きさと感じる振動感覚に対して、振動数を 1Hz から 80Hz まで変えて振動量(変位, 速度, 加速度など)をプロットした, いわゆる等感度曲線は下に凸な特性を示す。最低値を与える振動数範囲はその物理量で最も感じやすい領域があることを示し, 振動許容曲線や振動基準を定めるときにはその物理量が使用される。上下振動の場合, 加速度では 4~8Hz, 速度ではそれ以上 50Hz までが人間の感じ易い物理量の領域といえる。船舶の場合, 起振源は動揺から音響域まで幅広く存在するが, 速度および加速度が用いられる。人体の場合, 加速度が用いられるのは人間の固有振動数つまり等感度曲線の最低値が 4~8Hz のあたりにあるためである。

人間の振動感覚特性を表す等感度曲線が与えられていると計測した加速度値をそのままプロットすれば, 振動の大きさが直接評価できる。人間の感覚を主体とした感覚量により評価する方法では, まず同じ振動感覚量として振動数の影響による差異を修正するために荷重曲線を導入する。そして weight づけされた加速度の自乗和平均をとることによって感覚量である Overall frequency weighted acceleration が評価量として求められる。したがって, 感覚量としての加速度は物理量としての加速度より次式で表される<sup>6)</sup>。

$$A_w = W_A(f)A(f) \quad (1)$$

$$A_w = \text{Frequency-weighted acceleration}$$

$$W_A(f) = \text{Weighting curve for acceleration}$$

振動許容限界曲線を考えるときには, 左辺の値が許容基準値に相当する。

ISO 振動基準の基本的な考え方は許容基準値を規定することではなく, 評価の方法を示すことにある。したがって, 基準値は示されてはいるが weighting curve にその力点が置かれている。

各種の振動基準の比較を行うに当たっては, 各基準の数式化が必要になる。次にその具体的な表し方を示す。

振動の評価量となるのは速度, 加速度, 変位などである。ある振動数において, これらの量は相互に次式を用いて変換できる。

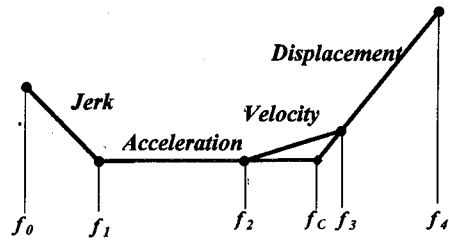


Fig. 1 Typical sensitivity curve.

$$\text{Jerk} = (2\pi f)\text{Acceleration}$$

$$\text{Acceleration} = (2\pi f)\text{Velocity}$$

$$\text{Velocity} = (2\pi f)\text{Displacement}$$

まず, 振動感度曲線が, Fig.1 に示したように相対数目盛で直線状の折れ線で表される場合には, 各直線部分は一般に次式で表される。

$$\text{Acc.} = C_A \left( \frac{f}{f_c} \right)^{n(i)} \quad (f_{i-1} \leq f \leq f_i) \quad (2)$$

ここに,  $C_A$  は加速度表示振動感度曲線の最小値(基準値),  $f_c$  は corner frequency と呼ばれ, それぞれの直線の加速度値が  $C_A$  になる振動数に相当する。

また, Frequency-weighting curve に関しては, (1),(2) 式より次式で与えられる。

$$W_A(f) = \left( \frac{f_c}{f} \right)^{n(i)} \quad (3)$$

ここに,  $n(i)$  は各直線領域における直線の勾配である。

例えば, ISO2631-1974 の振動基準曲線は (2) 式の形で次のように表現できる。

For vertical vibration

$$\text{Acc.} = C_A \left( \frac{f}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1 \leq f \leq 4)$$

$$\text{Acc.} = C_A \quad (4 \leq f \leq 8)$$

$$\text{Acc.} = C_A \left( \frac{f}{8} \right) \quad (8 \leq f \leq 80)$$

For horizontal vibration

$$\text{Acc.} = \frac{C_A}{\sqrt{2}} \quad (1 \leq f \leq 2)$$

$$\text{Acc.} = \frac{C_A}{\sqrt{2}} \left( \frac{f}{2} \right) \quad (2 \leq f \leq 80)$$

ここに,  $C_A$  は上下振動に対する振動基準値であり, 9 種類の暴露時間に対して与えられている。

このように数本の直線よりなる折れ線により振動許容曲線が表される例は、古くは Janeway(1948), Dickmann(1957), 関東地区部会 (1959), VDI(1963) などがあり、ISO では、ISO2631-1974, ISO6954-1984, ISO2631-2(1989) などがある。

一方、ISO の新基準で使用されているのは曲線状の weighting curve である。ISO8041-1990(人体の応答の計測法) および Amendment 1 には weighting function の数式表示の方法とそれによる 8 種類の frequency weighting に使う transfer function の parameter が与えられている。このうち ISO2631-1997 には 6 種類のものが使われ、ISO6954-2000 はこの内の一つである Whole Body combined が使われている。この規格は振動計測機器に関するものであるので、フィルターの回路設計が容易なかつ人体の振動感度特性を近似する振動特性曲線が用いられている。

weighting function を構成する transfer function は基本的には同一形式の曲線である。この曲線は一般に次式で与えられる<sup>7)</sup>。

$$H(f) = \left[ \left( \frac{f}{f_c} \right)^n + \left( \frac{f}{f_c} \right)^{\frac{n}{2}} \left( \frac{1}{Q^2} - 2 \right) + 1 \right]^{-m} \quad (4)$$

ここに、 $f_c$  は corner frequency と呼ばれる。これはこの曲線の持つ二つの漸近線の交点振動数である。また共振減衰係数  $Q$  は通常のフィルターでは臨界減衰  $Q = 0.707$  が使われるので (4) 式は双曲線になる。その漸近線は次式で与えられる。

$$H(f) = \left( \frac{f_c}{f} \right)^{nm} \quad (5)$$

$$H(f) = 1$$

Weighting function は一般に (4) 式の transfer function を掛け合わせるにより次式で求められる。

$$W_A(f) = \prod H_i(f) \quad (6)$$

それぞれの曲線は、dB 表示した場合、和の形で表現される。漸近線の一つが  $H = 1$  となっているので、もう一つの漸近線に沿った振動数領域だけその特性が weight づけされることになる。

#### 4. ISO 振動基準の相互比較

ISO 新旧振動基準では評価方法が異なるため、直接、振動感度曲線を比べることはできないが、単一方向の単一成分の正弦波を想定すれば、相互比較が可能である。

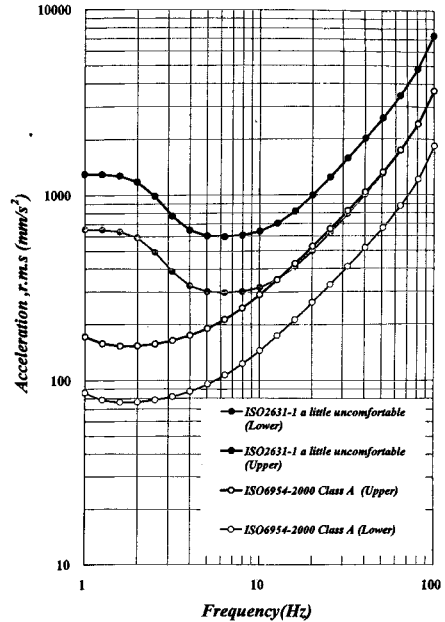


Fig. 2 Comparison of sensitivity curve between human comfort and ship passenger's habitability.

ここでは、sensitivity curve や weighting curve の数式表示法を使い異なる ISO 振動基準間の比較例について述べる。

#### (1) 船の乗客と人間の快適性の振動基準

Fig.2 には ISO6954-2000 の class A の上下界 (白印) と ISO2631-1 の快適性評価の「少し不快」 $315\text{mm/s}^2 \sim 630\text{mm/s}^2$  (a little uncomfortable) 領域 (黒丸印) を示している。人体評価には上下方向の weighting function ( $W_k$ ) を使っているので低い振動数では差異がでて高い振動数では不快に感じない上限が class A (客室) の上限に一致している。ISO2631-1 の快適性評価ではこれより下の領域 ( $315\text{mm/s}^2$  以下) は not uncomfortable の領域であることを考えると船の客室基準に比べるとかなり緩やかといえる。

#### (2) 船の作業環境と建物内の作業室の振動基準

Fig.3 には ISO6954-2000 の class C (working area) と ISO2631-2(1989) の建物の振動基準の中から workshop の比較を示す。建物の振動基準の weighting function は前述したように、人体 (SC4,ISO2631) と船体 (SC2,ISO6954) の振動基準の整合性を図るため設置された合同特別委員会で ISO2631-1 Addendum3 として提案されたもの

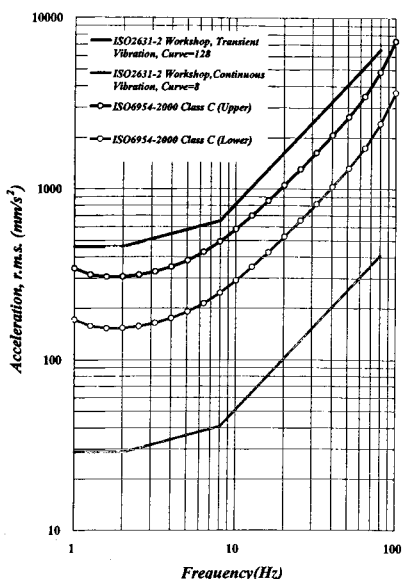


Fig. 3 Comparison of sensitivity curve between working area of ship and building.

である。この三つの直線よりなる折れ線状の weighting function は ISO2631-1974 の暴露時間 8 時間の vertical および horizontal の許容限界線の最小値を結んで作られたものである。当時、SC2 はこの提案を退け、独自案の ISO6954-1984 の制定に踏み切った。

その後、建物の振動の weighting function として採用されることになった。今から考えるとこの weighting function は低い振動数範囲では水平方向が支配的であり、高い振動数範囲では上下方向が敏感である人体の振動感覚を表現し、構造物の振動方向を特定しない weighting function として工学的に優れたものであると評価される。さらにこの三つの直線に内接した双曲線は W.B.Combined と呼ばれる weighting function として新しい ISO6954 に採用されることになった。Fig.3 よりわかるように、この 4 本の sensitivity curve は直線と曲線との違いがあるとは言え、同じ weighting function に基づいていることは傾向的にみても明らかであろう。

一方、建物の振動基準値については場所、時間 (Day or Night)、連続振動か断続振動などにより大幅に値が変化する。例えば、病院の手術室の連続振動が基準倍率 1 に対して、一日に数回の頻度でおこる Office や Workshop の基準値の最大値は 128 である。Fig.3 における一番下の折線は、Workshop における連続振動の基準倍率が 8 の場合に相当する。また一番上の折れ線は Workshop における一日に数回の頻度でおこる振動の最大基準倍率が 128 の場合である。建物の場合、連続あるいは断続的におこる振動の基準倍率の最大値が 8 であるのに比べて、商船の作業区画の振動基準は

連続的な振動を受ける割には建物内よりかなりゆるやかであることがわかる。その差は lower line にたいして 13.6 dB また upper line に対して 23 dB もの差があるので船員の慣れなどによる特殊性を考慮に入れても両者の基準値には開きがあるように思われる。

## 5. 実船計測データと快適性評価

ISO6954 は主に 1960 年代までに建造された各国の 400 隻にわたる実船振動計測データと乗組員の苦情アンケートをもとにして作成されたものである。当時は振動計測データの周波数分析をおこなう spectrum analyzer も普及しておらずデータを直接読み取った精度のあらいものであった。また乗組員の生活環境に対する意識も今とはかけ離れたものであることを考えると、これらのデータのもつ意味も今や曖昧である。その後 ISO6954 の改定作業が進む中で、新しい建造船に対して周波数分析器を使用した新しい計測法によるデータが集められその互換性が検証されたが、そのデータが基本的に ISO6954 の改定に生かされることはなかった。

古い振動計測データを用いて新しい振動基準を検証するのは意味のないことかもしれない。しかしこの作業は ISO2631 との合同特別委員会のおきにも、さらに ISO6954 の改訂作業のおきにも参考資料として当然あつて然るべきものであつたはずである。Multi-frequency の影響、Maximum Repetitive Amplitude と R.M.S の換算、加速度と速度、weighting curve の形状などが複雑に関係するので比較すること自体が難しいと考えられたからであろう。本論文で示した方法を使えば、異なる Sensitivity curve 同士の相互比較は勿論のこと、計測データを加工して振動基準と比較することも容易にできる。計測値の物理量の変換や weighting をかけた値に変換して表示が可能である。

比較の実例として、まず ISO6954-1984 の基準曲線のベースとなった実船計測値を ISO6954-2000 の振動基準値と比較する。上下および水平方向の 400 個の振動計測データに新基準の weighting function (Whole Body Combined) をかけ、また r.m.s. に換算した値を Fig. 4 にプロットしている。新基準では、frequency-weighted r.m.s. velocity が Classification A (客室) では  $2\text{mm/s} \sim 4\text{mm/s}$ 、Classification C (作業区画) では  $4\text{mm/s} \sim 8\text{mm/s}$  となっている。Weight づけされた計測値の苦情判定マークは、strong complain が黒丸、slight complain が灰色、そして no complain が白色である。通常、multi-frequency の影響は single frequency の約 1.23 倍 (1.8 dB) である。しかし本計測データは記録波形から直接読み取ったものであるから、周波数分析値より大きい目と考えられこの図で直接比較できる

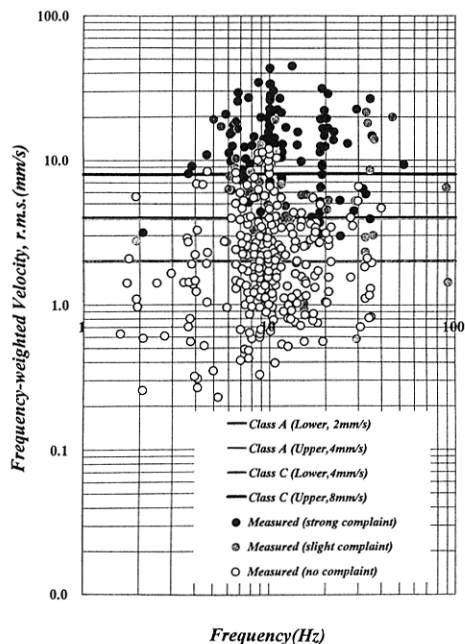


Fig. 4 Comparison between ISO6954-2000 and frequency weighted velocity of 400 measured data.

ものとする。総合的に判断すると新基準は少し緩めであるような感じをもつ。

次にこの実船振動計測値を人体の振動基準 ISO2631-1 と比較することを試みる。振動計測値は速度から r.m.s. の加速度に変換し、frequency-weighting として上下方向振動に対応する  $W_k$  の weighting をかける。また、振動評価には快適性 (Comfort) 評価のカテゴリーを適用する。ISO2631-1(1997) の Annex C には 6 段階の振動許容値のガイドが示しており、その中から「少し不快である」(a little uncomfortable  $0.315m/s^2 \sim 0.63m/s^2$ ) に当てはめる。実船振動データは上下方向のデータのみを使い、Fig.5 にその比較を示した。いろいろな仮定のもとに単純に判断して、少し不快の範囲に strong complaint のデータがあること、不快感なしの領域に slight complaint のデータが数点存在することを考えれば、先に述べたと同じように、この許容値は船のデータからみて緩和なもののように思われる。

## 6. 結言

人体の振動感覚特性に基づいたいくつかの振動基準を相互比較する方法について述べた。本論文の結論をまとめると次のようになる。

- (1) 人体の全身振動の振動基準 (ISO2631) の変遷と特

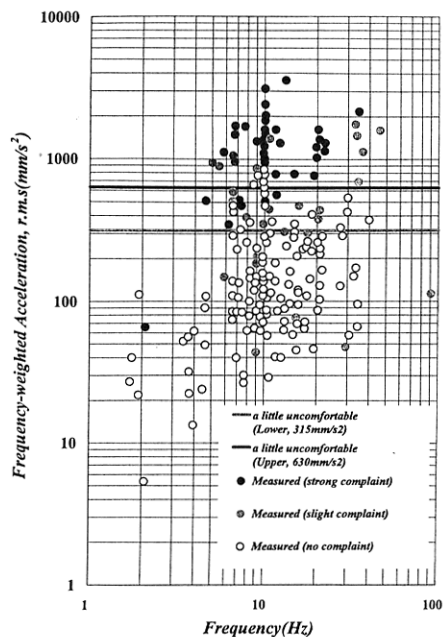


Fig. 5 Human discomfort boundary and frequency weighted acceleration of measured data of 400 ships.

徴について述べ、商船の振動基準 (ISO6954) との関連を示した。

- (2) 人体の振動感覚特性の一般的特徴について述べた。1Hz~80Hz の全身振動の振動数範囲において、速度および加速度値に最も敏感な領域が存在する。振動許容曲線は振動感覚特性曲線に比例し、その等価感覚量は加速度などの物理量に Frequency-weighting function をかけることにより求まる。
- (3) 振動感覚特性を数式表示する方法を示した。その形式は折れ線状のものと曲線状のものに分けられる。すべての振動許容曲線は振動数、加速度などは dB 表示した両対数目盛を使って首尾よくあわすことができ、その相互比較が可能である。
- (4) ISO の人体の快適性、建物の作業環境、商船の居住性などの振動基準に対して、振動基準の相互比較をおこないその関連を定量的に示した。

## 参考文献

- 1) ISO6954-2000, Mechanical Vibration - Guide lines for the Measurement, Reporting and Evaluation of Vibration with Regard to Habitability on Passenger and Merchant Ships, 2000.

- 2) ISO2631-1, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration. Part 1: General Requirement, 1997.
- 3) ISO2631-1974, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration.
- 4) ISO6954-1984 (E), Mechanical Vibration and Shock - Guidelines for the Overall Evaluation of Vibration in Merchant Ships.
- 5) ISO2631-1, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration. Part 2: Continuous and Shock - induced Vibration in Buildings (1 to 80 Hz), 1989.
- 6) 松本互平, 齋藤年正, 修理英幸: 商船の新振動基準の特徴と予測解析技術への適用, 関西造船協会論文集, 第 235 号, 2000, pp.145-150.
- 7) 松本互平: 振動許容限界曲線の数式および図式表示法, 関西造船協会平成 13 年春季講演会梗概 (技術報告), 2001, pp.169-170.