



カテゴリー判断法による全身振動の評価と尺度構成

Scaling and Evaluation of Whole-body Vibration by the Category Judgment Method

兼子 千夏子 Chikako Kaneko 萩原 孝英 Takahide Hagiwara 前田 節雄 Setsuo Maeda
●研究開発センター システム技術研究室 / 独立行政法人 産業医学総合研究所 人間工学特性研究部

Abstract

Quantitative evaluation of "degree of comfort" is an important aspect to consider when evaluating the nature of products or the establishment of design-objective values during vehicle development. In this research, the category judgment method, which is one of the scaling methods, was used to create an assessment scale for evaluation of whole-body vibration to solve this problem.

To scrutinize the effect of the difference in the frequency component of the vibration on evaluation, three kinds of random signals with different spectrum were used in our experiment. Consequently, while the quantitative relation between a vibration stimulus and degree of comfort became clear, it turned out that when a vibration contained more low frequency components, the degree of comfort declines even though the acceleration level is the same.

要旨

"乗り心地"の定量的評価は商品性の評価や設計目標値の設定のため、乗り物の開発をしていく上でも重要な課題である。本研究ではこの課題解決のために、尺度構成法の1つであるカテゴリー判断法を使用して、全身振動の評価のための尺度構成を試みた。

実験には振動の周波数成分の違いによる評価への影響を見るため、スペクトルの異なる3種類のランダム振動を使用した。この結果、振動刺激と快適性の定量的関係が明らかになると共に、振動の加速度レベルが同じでも、低い周波数成分を多く含む振動の方がより不快に感じることも分かった。

1 はじめに

"乗り心地"の定量的評価は、商品性の評価や設計目標値の設定のため、乗り物の開発をしていく上でも重要な課題である。乗り心地の評価尺度として、一般的には人体振動についての規格であるISO2631-1¹⁾が使われる。そこでは座位の人体が受ける振動について、座面、背もたれ、足の3つの部分で受ける合計12軸の0.5~80Hzの振動を周波数補

正して合算した周波数補正加速度実効値(Frequency-weighted Root Mean Square acceleration 以下、加速度レベルと呼ぶ)で評価するものとしており、快適性との関係を表1のように示している。

しかしISO2631-1の尺度には複数の反応が重複している部分があり、計測された加速度レベルから快適性についての反応を特定できない場合がある(図7)。この問題を解決し、乗り心地の定量的評価尺度を作るため、カテゴリー判断法³⁾を用いて実験を行い、尺度構成を行った。この論文では、この手法の使い方に焦点を当て報告する。

表1 加速度レベルと快適性

加速度レベル	快適性	(参考)
0.315m/s ² 未満	不快ではない	これらの値について山下 ²⁾ は以下の様な実測例を報告している。
0.315~0.63 m/s ²	少し不快	
0.5~1 m/s ²	やや不快	
0.8~1.6 m/s ²	不快	バス 0.737
1.25~2.5 m/s ²	かなり不快	タクシー 0.392
2 m/s ² 以上	極度に不快	ブルドーザー 1.689

2 心理学的測定法

刺激と反応との関係といった直接測定することのできないものを評価する方法は、心理学的測定法と総称され、尺度構成法と定数測定法の2つに大別される(図1)。尺度構成法が人間の感覚を表すのに適切な尺度を構成して評価する作業であるのに対し、定数測定法は既存の尺度に評価を当てはめて行く作業である。この尺度は必ずしも人間の感覚を表すのに適していない場合がある。ISO2631-1が参照している実験もこの方法に基づいて行われたものであったため、尺度構成が適切になされず重複部分が発生したと考えられる。

尺度構成法の1つであるカテゴリー判断法については、前田ら⁴⁾が手腕系に加わる局所振動評価のための尺度構成をこの手法を用いて行い、振動周波数および振動加速度レベルと心理量との関係を明らかにしている。また、住友ら⁵⁾は、新幹線によって引き起こされる振動の感じ方について、1995年の阪神大地震の前後での心理量の変化をカテゴリー判断法を用いて明らかにしている。

本研究ではスペクトルの異なる3種類のランダム振動を用いて実験を行い、カテゴリー判断法を用いて尺度構成をすると共に、振動刺激と快適性の関係を明らかにした。



図1 心理学的測定法

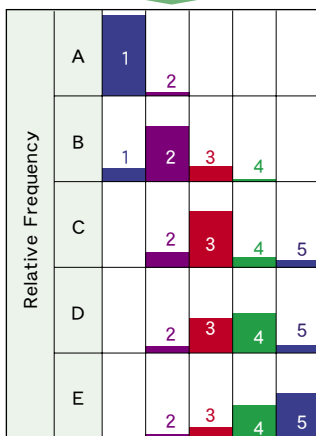
3 カテゴリ判断法による尺度構成

カテゴリ判断法では、刺激に対する反応評価が正規分布に従うものとして、カテゴリの間隔を調整している。実験結果から尺度を構成していく手順を、**図2**の例を用いて説明する。

5種類の刺激A～Eについて13人の被験者がそれぞれ3回ずつ、合計39回ずつ評価した場合の実験結果を、各カテゴリ毎の度数にまとめたものが**図2(a)**である。これを**図2(b)**の相対度数に変換し、これから各カテゴリの上限までの累積比率を求め、その累積比率に対応する偏差比率を刺激ごとに求めたものが**図2(c)**に示すカテゴリ境界である。これは**図2(b)**を各カテゴリの面積比率を保ったまま正規分布に書き換えたものと言える。最後に、刺激ごとに求められたカテゴリ境界を平均して**図2(d)**の平均尺度を求める。

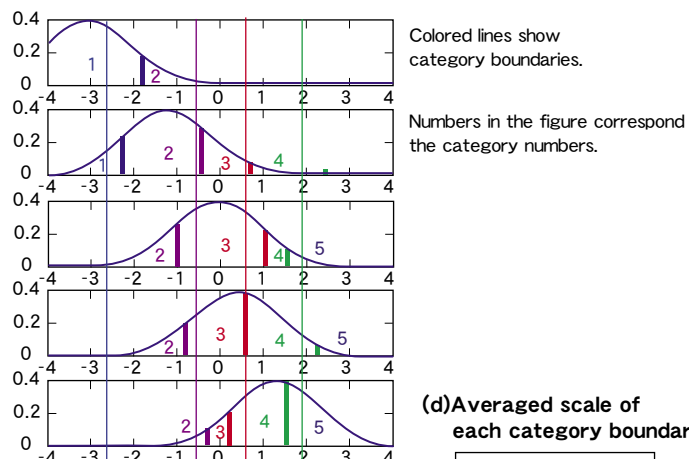
(a)Original frequency data

		category				
		1	2	3	4	5
Frequency	A	38	1	0	0	0
	B	6	25	7	1	0
	C	0	7	27	3	2
	D	0	3	16	18	2
	E	0	1	2	15	21



(b)Converted to relative frequencies regarding each stimulus.

(c)Normalized distribution for each stimulus with category limits.



(d)Averaged scale of each category boundary.



図2 カテゴリ判断法による尺度構成の手順

4 実験

本実験に用いたランダム信号は1~100Hzの周波数範囲を持ち、周波数特性の違いを明確にするため、高い周波数成分と低い周波数成分の比を変えたもの3種類を用意した。スペクトルを図3に示す。これらの信号をISO2631-1に基づくWkにより周波数補正した後、加速度レベルを等しくそろえ、さらにそれらを0.2~1.8m/s² R.M.S.の間で5段階に変えて、15種類の振動刺激とした。これらを3回ずつ繰り返して合計45個の刺激とし、図4に示すように、ランダムに5秒間ずつ、2秒間隔で連続して与える1系列の振動刺激を作成した。振動負荷方向はZ軸方向とし、加振機上に着座した被験者を加振した(図5)。被験者には、それぞれの振動刺激に対する評価を表2の判断カテゴリーの中から選び、対応する番号(1~5)を口頭で回答してもらった。

実験結果を前述の手順に沿って作成したプログラム(付録参照)によって処理し、振動刺激別に加速度レベルVとそれに対応する絶対尺度上の心理量Uとの関係を表す回帰式を、以下のように求めた。Uは加速度レベルVの振動刺激に対して被験者13人の50%の人が心理的に評価した値である。この結果を図6に示す。

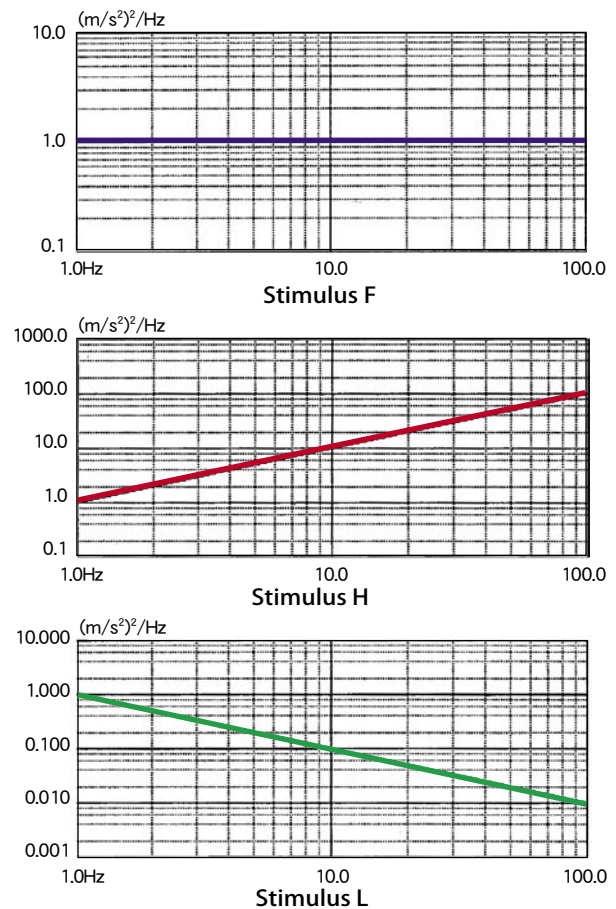


図3 振動刺激のスペクトル

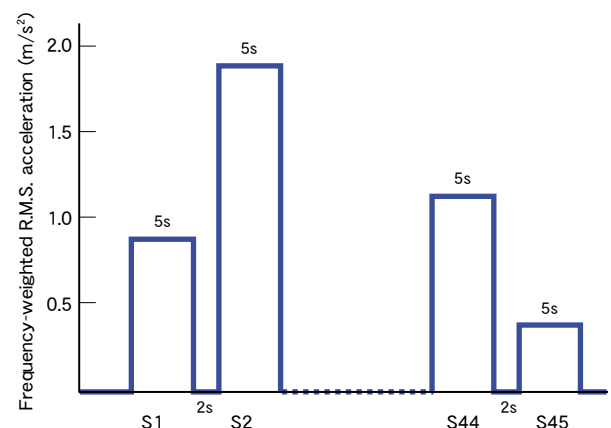


図4 信号系列

表2 実験に使用したカテゴリー

1. 不快ではない
2. 少し不快
3. やや不快
4. 不快
5. かなり不快

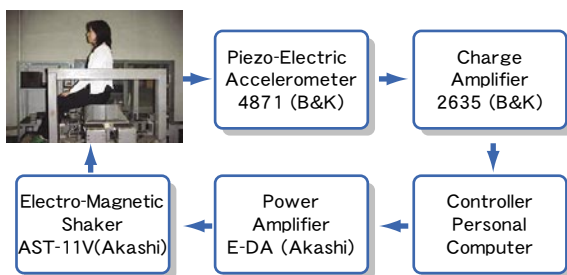


図5 実験装置

$$U = a \log_{10} V + b \quad (1)$$

ここで

- $a=6.8, \quad b=0.7$: 刺激Fの場合
- $a=5.4, \quad b=-0.4$: 刺激Hの場合
- $a=8.6, \quad b=2.0$: 刺激Lの場合

また、この回帰式を変形した式(2)により、各スペクトル別に絶対尺度上のカテゴリー限界 LA_c に対応する加速度レベルを求めた。

$$V_c = 10^{(L_c - b)/a} \quad (2)$$

これにより、隣り合うカテゴリーと重なるの無い境界を求めることができた。この結果とISO2631-1の尺度とを併せ、**図7**に示す。

5 考察

図7を見ると刺激Hから求められたカテゴリーは、刺激Fのものより加速度レベルが高い方へずれていることが分かる。これは高周波成分を多く含む刺激Hでは、刺激Fより高い加速度レベルで同じ快適性の評価を得た結果であり、言い換えれば加速度レベルが同じであれば、刺激Fの方が不快と感じ難いということである。低周波成分を多く含む刺激Lの場合は、逆に、刺激Fと同じ加速度レベルでも不快感が高くなっている。これらのことから、振動刺激のスペクトルが異なった場合、加速度レベルが同じであっても快適性は異なり、低周波成分を多く含む振動の方をより不快に感じるということが明らかになった。また**図6**を見ると、この傾向は加速度レベルが大きい場合に、より顕著となっている。

ISO2631-1の周波数補正 W_k の根拠となった実験は、単一の正弦波振動の周波数を変えて行われたものであった。本研究では、乗車時等に受ける振動を想定して複合した周波数による振動刺激を用いたが、そのため W_k では周波数補正が適切に行われなかったのではないかと考えられる。

6 おわりに

カテゴリー判断法を使って、全身振動の快適性評価のための重なるの無い尺度構成を行うことができた。この方法によれば、数値的に計測することが難しい主観的・心理的な評価と、振動の加速度レベルのように実際に計測できる物理的な値との関係を明らかにすることができる。この他にも〇〇心地と呼ばれる感覚を、寸法や色、速度や加速度など数値に結び付けて評価することが可能であり、定量的な商品性の評価や設計目標値の設定など、今後の研究開発の中で生かしていけるものと考えている。

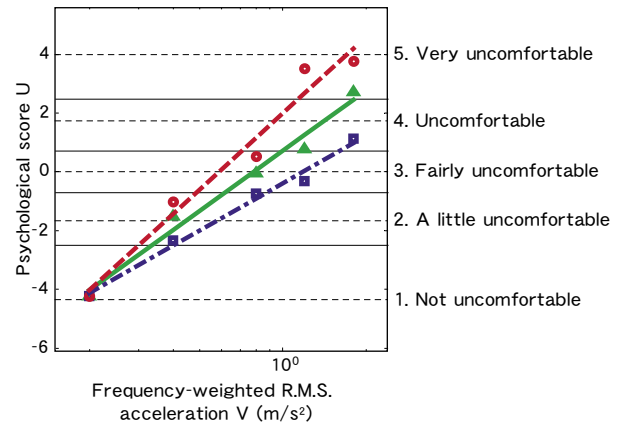


図6 心理量と加速度レベルとの関係

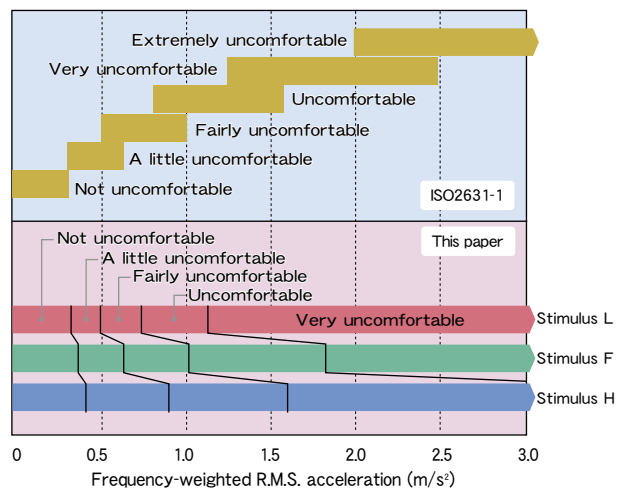


図7 尺度の比較

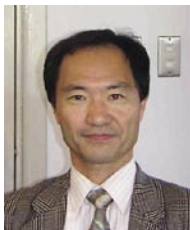
■参考文献

- 1) International Organization for Standardization (1997) Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. ISO 2631-1.
- 2) K.Yamashita , S Maeda (2003) Realization of 12-axis vibration measurement on the seat according to the ISO2631-1 standard. Inter-noise2003
- 3) Guilford JP (1954) Psychometric methods. McGraw-Hill. New York.
- 4) Maeda S, Kume K and Iwata Y (1983) Evaluation of localized vibration using the method of category judgement. Jpn Ind Management Assoc. 34(2), 200-205.
- 5) Sumitomo S, Tsujimoto S, Maeda S and Kitamura Y (1998) The influence of the great Hanshin earthquake on human response to environmental vibration due to the Shinkansen. Industrial Health 36, 290-296.
- 6) MATLAB The MathWorks, Inc.
- 7) Nanba S, Yoshida M (1974) FORTRAN for psychology and education, 457, Seishin-shobo, Tokyo (in Japanese).

■著者



兼子 千夏子



萩原 孝英



前田 節雄

■付録:カテゴリー判断法による尺度構成のためのサンプルプログラム

このプログラムはMATLAB[®]で使用するものであり、「CJM」と打ち込むことで実行できる。簡素化のため本実験で得られたデータをサンプルデータとしてプログラム中に書き込んであるが、他のデータを使って処理する場合はこの部分を書き換えるか、データファイルを読み込むようにプログラムを修正する必要がある。処理概要を以下に述べる。

- (1) 各刺激に対する被験者の評価結果をカテゴリー別に整理して度数分布行列Fを作る。
- (2) これをカテゴリー1から5までの累積比率 G に変換する。
- (3) 次に各カテゴリーの上限までの累積比率に対応した偏差比率 Z を求める。
- (4) これから各カテゴリー幅平均 D とカテゴリー上限 L、およびカテゴリー中央値 C を求める。
- (5) さらに中央に位置するカテゴリー3の中央をゼロと置いた絶対尺度値 A に変換する。
- (6) 次に、おのおのの振動刺激 R_i の度数分布のメディアンにあたる尺度値 M を、カテゴリーの上限の尺度値Lを用いて求める。
- (7) この結果から振動刺激別に加速度レベル V とそれに対応する心理量 U との関係を表す回帰式を求める。この結果を図6に示す。

(1)～(6)は汎用の処理であるが、(7)はサンプルデータの作図の設定になっているため、他のデータを処理する場合は変更する必要がある。

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Category Judgment Method   %
%   Programmed by T.Hagiwara 2003.7.30   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function CJM()

```

% (1) 度数分布行列 F の作成

```

%   --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5 ---           % カテゴリ No
F = [   38   1   0   0   0           % Flat 0.2 m/s^2 R.M.S.
      6  25   7   1   0           % Flat 0.4
      0   7  27   3   2           % Flat 0.8
      0   3  16  18   2           % Flat 1.2
      0   1   2  15  21           % Flat 1.8
      38   1   0   0   0           % High 0.2
      18  19   2   0   0           % High 0.4
      4  16  17   2   0           % High 0.8
      2  13  17   7   0           % High 1.2
      1   2  13  16   7           % High 1.8
      38   1   0   0   0           % Low 0.2
      4  19  14   2   0           % Low 0.4
      0   5  17  16   1           % Low 0.8
      0   0   0  10  29           % Low 1.2
      0   0   1   5  33   ];       % Low 1.8

[n,g] = size(F);           % 配列の大きさの取得  n: 刺激数、g: カテゴリ数
Td = zeros(35,1); L = Td; Sm = 0; Su = 0; Suu = 0;           % 各変数の初期化
cr = setstr(13);           % 作図のための定数設定

```

% (2) 累積比率 G への変換

```

G = cumsum(F./repmat(sum(F,2),1,g),2);           % G(i,j): 累積比率

```

% (3) 偏差比率 Z の算出

```

for i = 1:n           % カテゴリの上限値の計算を刺激ごとに行う
    for j = 1:g       % 各カテゴリについて
        Z(i,j) = ZSCORE(G(i,j));           % Z(i,j): カテゴリの上限値を求める
    end
end

```

% (4) カテゴリ幅平均 D、カテゴリ上限 L およびカテゴリ中央値 C の算出

```

for j = 1:g           % カテゴリ毎に幅の計算を行う
    c = 0;           %
    for i = 1:n       % 各刺激別に計算する
        if j == 1     % 端にあるカテゴリ 1 については個別計算する
            if Z(i,j) ~=-3.75           % カテゴリ 1 に度数がある場合
                d(i,j) = Z(i,j)-(-3.75);           % 偏差比率の下限値を -3.75 として計算
                Td(j) = Td(j)+d(i,j);           % カテゴリ幅を足し込む
                c = c+1;           % 足し込んだ回数をカウント
            end
        elseif (Z(i,j) ~=-3.75) & (Z(i,j-1) ~=-3.75)           % 隣のカテゴリが限界値の場合カウントしない
            d(i,j) = Z(i,j)-Z(i,j-1);           % d(i,j): カテゴリの幅
        end
    end
end

```

```

Td(j) = Td(j)+d(i,j);          % カテゴリー幅を足し込む
c = c+1;                       % 足し込んだ回数をカウント
end                             %
end                             %
if c == 0, c = 1; end          % 度数が0の場合はゼロ割を避けるため1にする
D(j) = Td(j)/c;                % D(j): カテゴリーの平均幅
end                             %

for j = 1:g                     % カテゴリー毎に上限値と中央値の計算を行う
    if j == 1                   % カテゴリー 1 について
        L(j) = D(j);           %
        C(j) = L(j)/2;         %
    else                         % その他のカテゴリーの場合
        L(j) = L(j-1)+D(j);    % D(j): カテゴリーの上限値
        C(j) = (L(j-1)+L(j))/2; % C(j): カテゴリーの中央値
    end                         %
end                             %

% (5) 絶対尺度値 A への変換
A = C-C((g+1)/2);              % A(j): 絶対尺度に変換後のカテゴリーの中央値

% (6) 各刺激のメディアンにあたる尺度値 U の算出
for i = 1:n                     % 各刺激のメディアン、尺度上の値の計算
    for j = 1:g                 % カテゴリー 1 から順番に探し、
        if G(i,j) > 0.5, break, end % 累積比率が 50%以上のところを見つける
    end %
    R = j-1;                    % 手前のカテゴリーを R とする
    if R == 0, M(i) = L(j)/G(i,j)*0.5; % メディアンがカテゴリー 1 にある場合
    else                         % その他の場合
        M(i) = L(R)+(L(j)-L(R))/(G(i,j)-G(i,R))*(0.5-G(i,R)); % メディアンの尺度上の値を補間して求める
    end %
    U(i) = M(i)-C((g+1)/2);      % メディアンを絶対尺度に変換
    Sm = Sm+M(i); %
    Su = Su+U(i); %
    Suu = Suu+U(i)^2; %
end %
Tm = Sm/n;                      % 全刺激の平均尺度値
Tu = Su/n;                      % 全刺激の平均絶対尺度値
Tnn = sqrt(Suu/n-Tu^2);         % 全刺激の標準偏差

disp('d'), disp(d)              % カテゴリーの幅
disp('D'), disp(D)              % カテゴリーの幅の平均
disp('L'), disp(L(1:g))         % カテゴリーの平均幅の累計
disp('C'), disp(C)              % カテゴリーの中央値
disp('A'), disp(A)              % 絶対尺度への変換後のカテゴリーの中央値
disp('SCALE VALUES') %
disp(' 刺激   中央値 絶対尺度値 ') %
disp([1:n] ' M(1:n)' U(1:n)') %
disp(['   Tm   ', num2str(Sm), ' ', num2str(Su)]) %

```



```

disp([' M ', num2str(Tm), ' ', num2str(Tu)]) %
disp([' SD ', num2str(Tnn)]) %

% (7) 刺激とそれに対応する心理量 U との関係を表す回帰係数の算出および作図
s = 3; v = 5; % スペクトルの数 / 加速度レベルの段階数
Va = [0.2 0.4 0.8 1.2 1.8]; % 加速度レベル
XV = [0.75*Va(1) Va(5)/0.75]; % 作図時の X 軸範囲
m=['g^'; 'bs'; 'ro']; % U 点の色と形
l=['g-'; 'b-'; 'r-']; % 回帰線の色と形
Lc = L-C((g+1)/2); % カテゴリー境界値
for i=1:s %
    p=polyfit(log10(Va(1:v)),U((i-1)*v+1:i*v),1); % 一次回帰線の算出 a=p(1), b=p(2)
    semilogx(Va(1:v),U((i-1)*v+1:i*v),m(i,:)), hold on % U 点の作図
    semilogx(Va(1:v),polyval(p,log10(Va(1:v))),l(i,:)) % 回帰線の作図
    Vc = 10.^[Lc(1:g-1)-p(2)]/p(1); % カテゴリー境界を物理量に変換
    disp(['cr ' スペクトル No.' num2str(i) cr ' 一次回帰係数 (a, b) ' num2str(p)])
    disp([' ' カテゴリー境界物理量 ' num2str(Vc)]) %
end %
%
semilogx(XV,A(1:g)^[1 1], 'k') % カテゴリー中心線
semilogx(XV,Lc(1:g-1)^[1 1], 'k') % カテゴリー境界線
axis([XV Lc(1)-D(1) Lc(g)]) % 図示範囲の設定
ylabel('Psychological Score U') %
xlabel('Frequency-weighted R.M.S acceleration V (m/s^2)') %
title('Category Judgment Method') %

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 累積比率 G から偏差比率 Z への変換サブプログラム (Hastings et al による近似式 7) %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Z = ZSCORE(G)

a = [2.516 0.803]; %
b = [1.433 0.189]; %
eps = 0.0001; % 累積比率の下限
if (abs(G) > eps) & (abs(G-1) > eps) %
    if G > 0.5, P=1-G; else P = G; end %
    X = sqrt(log(1/P^2)); %
    Z = X-(a(1)+X*a(2))/(1+X*(b(1)+X*b(2))); %
else Z = 3.75; end % 累積比率の上下限に対応する偏差比率値
if G < 0.5, Z = -Z; end %

% program end

```