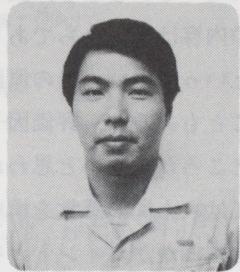


エンジン異音の定量的評価手法について



第1研究部研究課 前田 修

1. はじめに

一般にエンジンは低速回転時にピストン打音、バルブ着座音、ギヤ打音などの周期性衝撃音を発生することが多い。そのような音は単にやかましいだけでなく、場合によっては異音として捉えられ、運転者を不安にさせることがある。特にモーターサイクルの場合、エンジンが露出しており、その位置もライダーに近いため、このようなエンジン音の低減が重要な課題となっている。

そこで問題となるのは、評価手法である。普通、エンジン音の評価は騒音レベル（音圧に対して周波数による補正を加え、対数表示した値であり、

感覚的な音の大きさと対応する）によって行われているが、衝撃音のやかましさは必ずしも騒音レベルと対応しないため、アイドリングでのエンジン音の評価は、これまで主に聴感によって行われていた。しかし、官能評価は評定の個人差や再現性などの問題があるため、正確に評価するには多人数で行わねばならず、実際にはなかなか面倒な評価手法である。そこで、エンジン音を客観的、定量的に評価するための新手法が求められていた。

今日、環境騒音などに対しては様々な評価手法があるが、周期性衝撃音のやかましさについては、残念ながら良い手法がまだ確立されていないため⁽¹⁾⁽²⁾、自動車メーカーなどでは独自に研究を進め、

	対象音	評価手法	資料
1	エンジンタベット打音	特定のバンドパスフィルターを通したエンジン振動波形のピーク値の大きさで評価	「タベット打音検査装置の開発」宇佐美ほか、トヨタ技術、'78.3
2	エンジン周期性衝撃音	音圧波形の波高率の対数値で評価 (周期と周波数によって補正)	「エンジン騒音における衝撃音の評価手法について」三角ほか、自技会講演前刷集、822B51
3	トランスアクスル打音	音圧信号を8個のバンドパスフィルターに通し各バンド毎に基準値と比較して、その合計点数により評価	「最終検査における回転騒音分析の自動化」芹沢ほか自動車技術、'83. No.12
4	エンジンゴロゴロ音	音圧波形の包絡線形状を構成するうなり周波数成分とその倍音成分の大きさの和で評価	「加速時車内騒音の音色に関する一考察」柘植ほか、自動車技術、'85. No.12
5	ディーゼル アイドルノック音	スペクトルの包絡線の傾きとノック発生周期及び、100Hz以下の低周波音の大きさで評価	「車外騒音の音色評価手法の開発」赤間ほか、自技会講演前刷集、No.861044
6	ディーゼルアイドルノック音	音の衝撃性（クレストファクター）と高周波成分の大きさ及び、騒音レベルで評価	「Towards an Objective Estimate of the Subjective Reaction to Diesel Engine Noise」M.F.Russell et al., SAE870958

表1 エンジン異音定量評価手法の例

表1のようにいくつものエンジン音評価手法が開発されている。しかし、表を見てわかるようにそれらの内容はまちまちであり、統一された手法はないといってよい。この原因は対象となる音が異なることもあるが、評価因子の抽出方法の違いによるところが大きいと思われる。この種の研究においては、人間の感覚を構成する因子を如何にして抽出するかがポイントとなるからである。

本研究では、モーターサイクルのエンジン音を対象に、人間の聴感を多次元尺度構成法を用いて解析し、主要な評価因子の抽出を行った。さらに、これらの因子と物理量の関係を調べ、聴感を物理量で表わす評価モデルを作成した。このモデルに基づいてエンジン異音評価計を製作し、エンジン音の評価に用いたところ、聴感評価とよく一致する結果が得られたので報告する。

2. 聽感の解析

2-1 実験の方法

聴感実験の方法と装置を図1に示す。この実験では、シリング近傍で録音された8種類のモーターサイクルのエンジン音が、供試音として用いられた。その内訳を表2に示す。尚、各音の録音

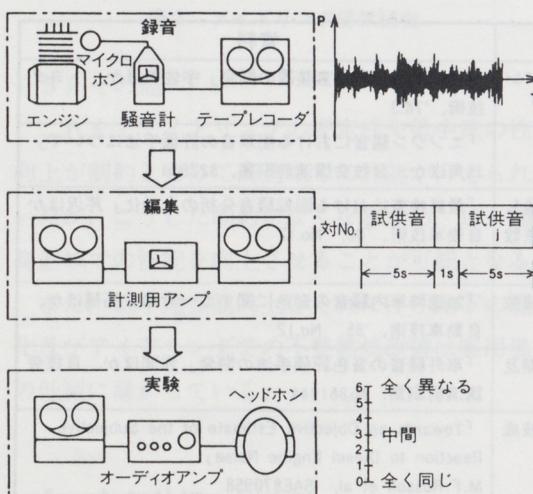


図1 聴感実験の方法と装置

番号	エンジンの種類	運転	仕様
1	2サイクル単気筒 96cc	F	スタンダード
2	↑	F	ピストン隙間大
3	↑	M	スタンダード
4	↑	F	異音対策A
5	↑	F	↑ B
6	↑	F	↑ C
7	↑	F	↑ D
8	4サイクル単気筒499cc	F	スタンダード

F: ファイアリング、M: モーテリング
(エンジン回転速度は1300r.p.m.)

表2 供試音一覧

レベルは適当な範囲に収まるよう調整した。この八つの音から、組合せの繰返しや、同じ音同士の組合せを含む64対の組合せがつくられ、テープに編集録音された。この64対の音の提示順序はランダムで、対番号を告げるアナウンスの後、提示されるようにした。各音の提示時間は5秒間で、対の間隔は1秒間である。

聴感実験はヘッドホンによるモノラル両耳聴で行われ、再生レベルは全供試音の平均値がほぼ80dB(A)になるよう調整された。被験者は供試音を聞き、各対毎に音の非類似度を判定した。その評価尺度は「全く同じ」(0)から、「全く異なる」(6)までの7段階とした。

被験者の総数は34名で、その内訳は実験部門の男性が22名、生産部門の男性が7名、事務部門の男性が3名、女性が2名である。年齢は20歳から42歳までの範囲に分布する。

2-2 解析方法

まず、被験者 k の評定データを行列 D_k として表わすことにする。ここで、その要素 d_{ijk} は供試音 i と j の対に対する非類似度の評定結果を示す。

図2は解析の手順を示したものである。最初に、非類似度行列の対称性と対角要素の値を調べることにより、各被験者の評定能力を調査した(式1)。もし被験者が完全な評定をしていれば、この行列は対称で対角要素が0になるはずであるが、実際には評定上の誤差があるため必ずしもそうはなら

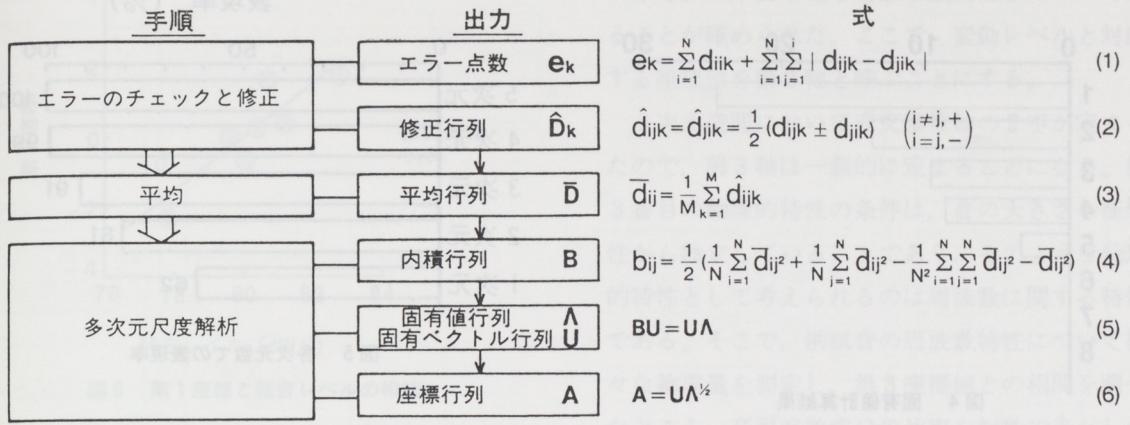


図2 解析方法

ここで N : 供試音の数
M : 被験者の数

ず、その度合を見ることによって被験者の信頼性を確かめることができるからである。

次に、各被験者の非類似度行列の上三角要素と下三角要素の平均をとって行列を対称形とし、対角要素は0として、行列の誤差を修正した(式2)。その後、全被験者の修正非類似度行列の平均を求め(式3)、多次元尺度構成法によって解析を行い、心理空間における供試音の座標を求めた(式4, 5, 6)。尚、多次元尺度構成法の詳細については、参考文献⁽³⁾⁽⁴⁾を参照されたい。

2-3 結 果

各被験者のエラーワン点数を図3に示す。この図をみると評定の信頼性において、かなり大きな個人差や部門差があることがわかる。例えば、実験部門の平均エラーワン点数は明らかに他部門のそれよりも低い。このような結果となった理由は、被験者のエンジン音に対する経験の違いによるものと考えられる。

また、この図ではエラーが飛び抜けて大きい被験者が2名居ることがわかる。この2名について解析から除外することも検討したが、最終的な結果に大きな違いはなかったので、ここでは全被験者のデータを解析した結果を報告する。

なお、各供試音対に対する評定の標準偏差は最少で0.37、最大で1.41であり、音の種類によって個人差の幅に違いがあることもわかった。これさらに詳しく調べると、被験者はその評定の特徴からいくつかのグループに分けられることがわかった。但し、その結果はここでは省略する。

解析の結果、固有値は図4に示すように、6番目、7番目、8番目は殆ど0になった。YoungとHouseholderの定理⁽⁵⁾によれば、この場合、心理

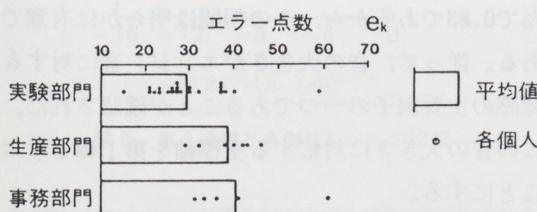


図3 被験者のエラーワン点数

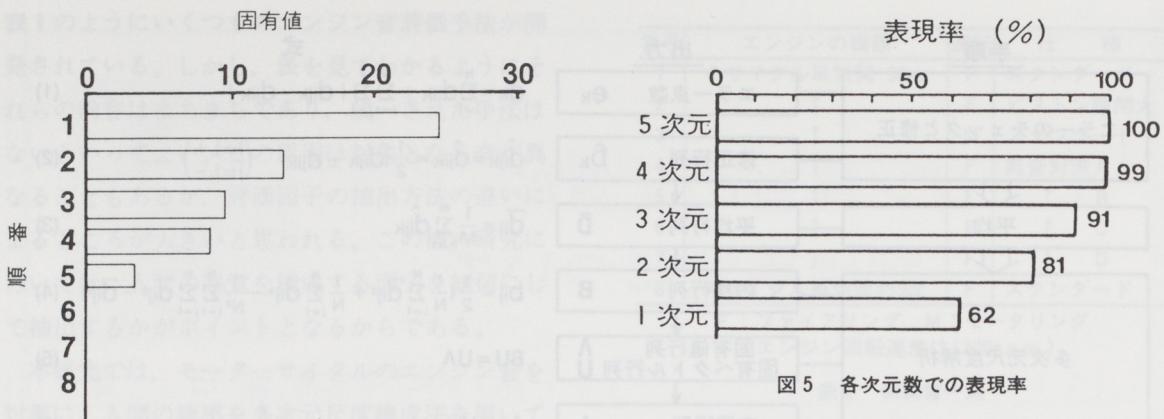


図4 固有値計算結果

図5 各次元数での表現率

空間の次元数は5であるとみなされるので、供試音の座標は表3のように、 8×5 の行列で表わされる。

但し、この心理空間の次元数はその表現率をあまり落とさずにもっと減らすことができると考えられる。この表現率とは、ある空間に布置した供試音の距離関係が元の非類似度データをどの程度満足しているかを示すものであり、内積行列B*の全要素の分散を行列Bのそれと比較することによって得られる。また、行列B*はある次元数の座標行列Aにその転置行列A'を掛けることによって得られる。図5は様々な次元数における表現率を示したものであり、この図によると3次元空間でも元の心理的距離関係を91%まで表わせることがわかる。そこで、この後の解析を簡略にするため、供試音の心理空間は3次元空間に縮小することとし、座標行列Aの左3列をそれぞれX、Y、Z座標とした。

供試音番号	次元				
	1	2	3	4	5
1	1.571	2.385	-0.731	-0.167	0.855
2	3.442	-1.849	0.747	-0.844	0.066
3	-1.649	-1.779	-1.385	0.545	0.775
4	1.201	0.109	-1.214	1.659	-0.945
5	-0.588	1.084	0.056	-1.053	-0.502
6	-1.683	-0.219	0.004	-1.005	0.159
7	-1.485	-0.059	0.254	-0.681	-0.720
8	-0.807	0.329	2.270	1.547	0.314

表3 供試音の座標

2-4 物理量との対応

供試音に対する心理空間は上記のように3次元ではほぼ表わすことができる。このことはアイドリングエンジン音に対する聴感の主要因子は三つであることを意味している。これらの因子はそれぞれ何らかの物理的特性と対応していると考えられ、それは供試音の特性と心理空間における座標との相関を調べることによって解明される。

ここで考える騒音の物理的特性としては、物理的意味の明確さと測定の簡便さが要求される。この観点からすると、騒音レベルと対応している「音の大きさ」がまず第一番に挙げられる。そこで、供試音の座標とその騒音レベルとの関係を調べたところ、座標系をある角度回転させたときに、X座標と騒音レベルとの相関係数が0.85となった(図6)。この場合の相関係数の臨界値は危険率1%で0.83であるから、この相関は明らかに有意である。従って、音の大きさがエンジン音に対する聴感の主要因子の一つであることが確認された。この音の大きさに対応する座標軸を第1軸と呼ぶこととする。

次に、騒音の物理的特性として音の衝撃性を取上げてみた。本研究では衝撃性を音圧実効値の瞬時変化の大きさの対数によって表わし、それを変動レベルと呼ぶことにした。供試音の座標とその変動レベルを比較したところ、第1軸と直交する方向において0.90という相関係数が得られた(図

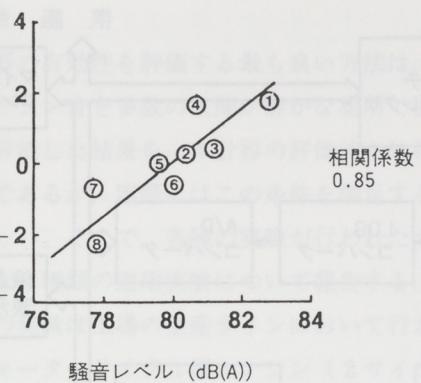


図 6 第1座標と騒音レベルの相関

7)。従って、衝撃性も聴感の主要因子の一つであることが認められた。ここで、変動レベルと対応する座標軸を第2軸と呼ぶことにする。

3次元空間において直交座標軸の2本が定まつたので、第3軸は一義的に定まるうことになる。第3番目の物理的特性的条件は、音の大きさや衝撃性から独立していることであり、そのような物理的特性として考えられるのは周波数に関する特性である。そこで、供試音の周波数特性について様々な物理量を測定し、第3座標値との相関を調べたところ、高周波成分の比率を対数で表わした

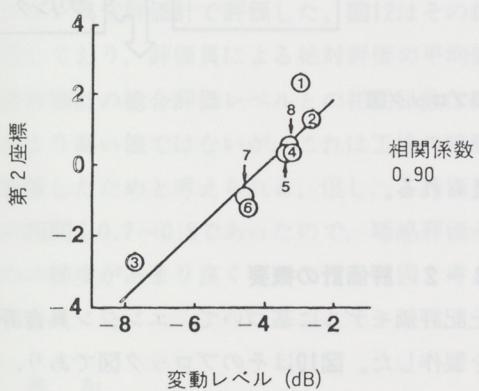


図 7 第2座標と変動レベルの相関

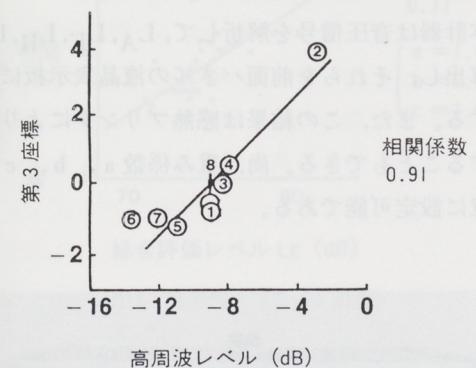


図 8 第3座標と高周波レベルの相関

聴感因子	物理量	計算式
大きさ	騒音レベル	$L_A = 20 \log_{10} (P_A / P_0)$ (7)
衝撃性	変動レベル	$L_F = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T P'_A - P_A / P_A dt \right)$ (8)
かん高さ	高周波レベル	$L_H = 20 \log_{10} (P_H / P_A)$ (9)

ここで P_A = 音圧実効値 (A特性) $\tau = 1\text{ sec}$
 P_A' = 音圧実効値 (A特性) $\tau = 0.02\text{ sec}$
 P_H = 高周波音圧実効値 (A特性) $\tau = 1\text{ sec}$
 P_0 = 最小可聴音圧実効値 ($20\mu\text{Pa}$)

表 4 聽感因子と対応する物理量

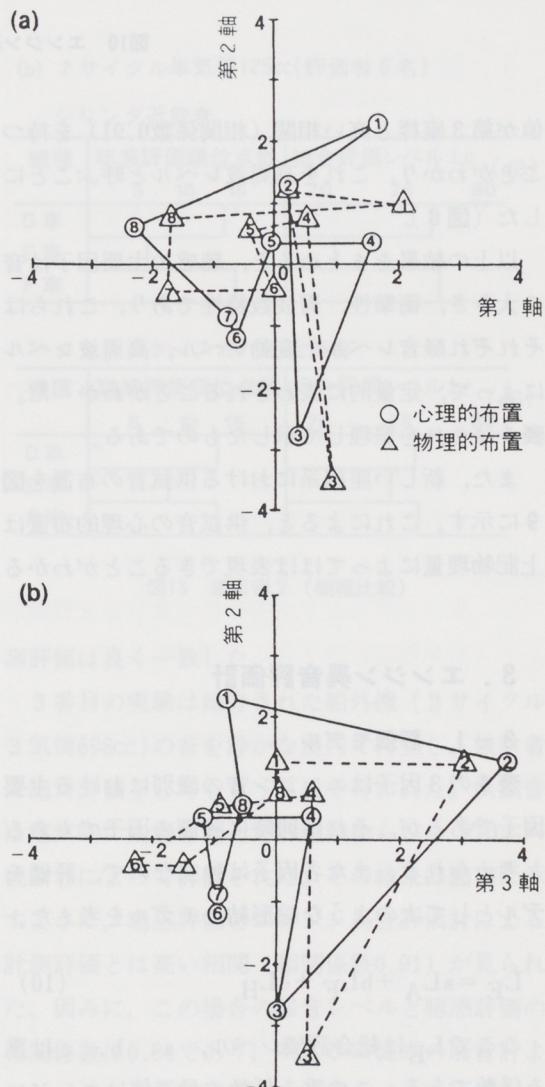


図 9 供試音の空間布置

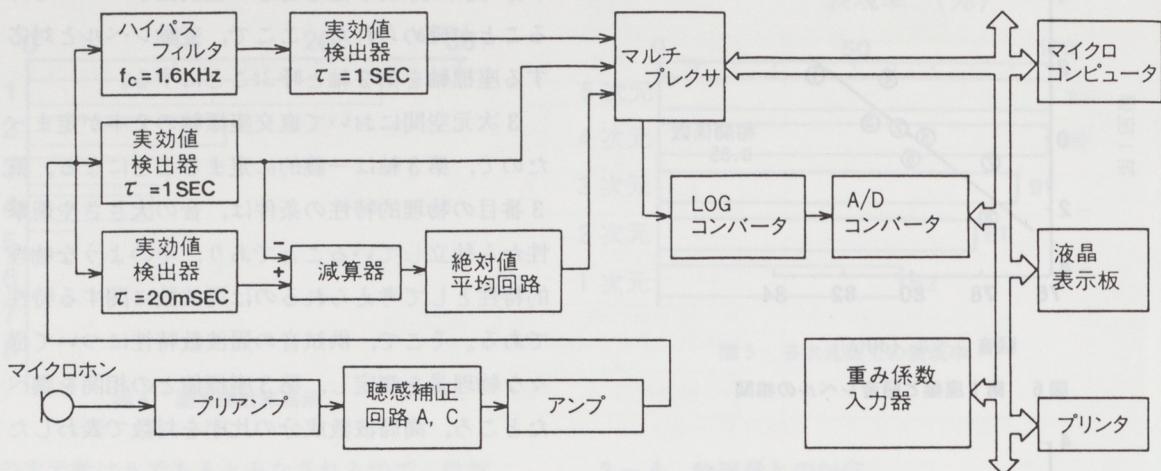


図10 エンジン異音評価計のブロック図

値が第3座標と高い相関（相関係数0.91）を持つことがわかり、これを高周波レベルと呼ぶことにした（図8）。

以上の結果をまとめると、聴感の主要因子は音の大きさ、衝撃性、周波数特性であり、これらはそれぞれ騒音レベル、変動レベル、高周波レベルによって、定量的に表わされることがわかつた。

表4はこれを整理して示したものである。

また、新しい座標系における供試音の布置を図9に示す。これによると、供試音の心理的布置は上記物理量によってほぼ表現できることがわかる。

考えられる。

3-2 評価計の概要

上記評価モデルに基づいて、エンジン異音評価計を製作した。図10はそのブロック図であり、図11はその外観を示す。その寸法は幅270mm、高さ150mm、奥行き300mmで重量は8kgである。

本計器は音圧信号を解析して、 L_A , L_F , L_H , L_E を算出し、それらを前面パネルの液晶表示板に表示する。また、この結果は感熱プリンタにより印字することもできる。尚、重み係数a, b, cは任意に設定可能である。

3. エンジン異音評価計

3-1 評価モデル

表4の3因子はエンジン音の識別における主要因子であるが、それは同時に評価の因子でもあると考えられる。また各因子は独立なので、評価モデルとして次のような線形結合モデルを考えた。

$$L_E = aL_A + bL_F + cL_H \quad (10)$$

ここで L_E は総合評価レベル、a, b, cは重み係数である。この重み係数の最適値はエンジンのタイプや、評価者の属性などによって変わると

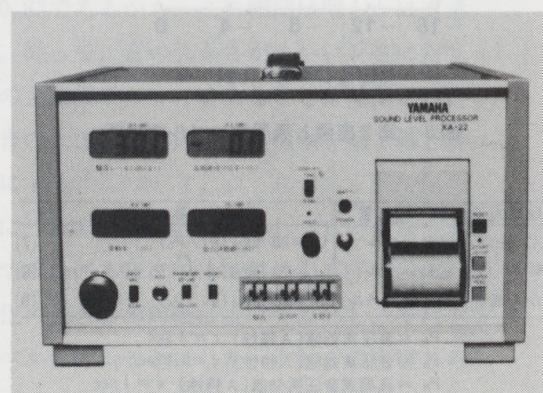
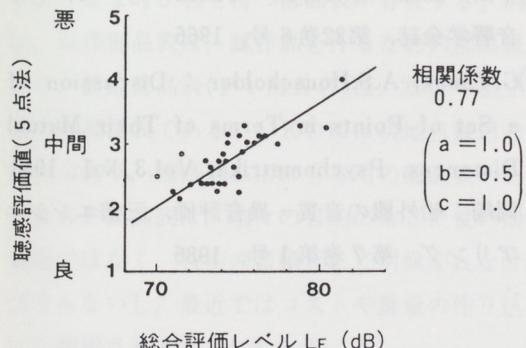


図11 エンジン異音評価計

3-3 適用

本計器の有効性を評価する最も良い方法は、多数のエンジン音を多数の人間が静かな場所で直接聞いて評価した結果を、本計器の評価値と比較することであるが、実際にはこの条件を満足する実験は難しい。そこで、各種の実験が行われたが、ここでは3種類の適用実験について報告する。

最初の実験は工場の生産ラインにおいて行われ、32台のモーターサイクル用エンジン（2サイクル単気筒96cc）のアイドリング音を4名の評価員とエンジン異音評価計で評価した。図12はその結果を示しており、評価員による絶対評価の平均値と異音評価計の総合評価レベルとの相関係数は0.77とあまり高い値ではないが、これは工場の暗騒音が影響したためと考えられる。但し、各評価員同士の相関も0.7~0.8であったので、聴感評価そのものの精度があまり良くないことも原因と考えられる。



この工場実験の結果を踏まえ、2番目の実験は暗騒音の小さい場所で、3機種のモーターサイクルエンジン音の相対評価により行った。図13は聴感評価と計測評価との比較を示したものである。ここで、聴感評価順位点数とは音の評価順位1位、2位、3位に対し、それぞれ1点、2点、3点を与え、集計したものであり、この点数が低いほど聴感が良いことを示す。相対評価は絶対評価よりも精度が高いためか、この実験では聴感評価と計

(a) 4サイクル2気筒400cc(評価者5名)

シリンダ近傍音

機種	聴感評価順位点数			総合評価レベル LE (dB)		
	5	10	15	70	75	80
A車						
B車						
C車						

クランクケースカバー近傍音

機種	聴感評価順位点数			総合評価レベル LE (dB)		
	5	10	15	70	75	80
A車						
B車						
C車						

(b) 2サイクル単気筒125cc(評価者6名)

シリンダ近傍音

機種	聴感評価順位点数			総合評価レベル LE (dB)		
	5	10	15	70	75	80
D車						
E車						
F車						

クランクケースカバー近傍音

機種	聴感評価順位点数			総合評価レベル LE (dB)		
	5	10	15	70	75	80
D車						
E車						
F車						

図13 適用例2（機種比較）

測評価は良く一致した。

3番目の実験は録音された船外機（2サイクル3気筒698cc）の音を静かな室内で再生し、被験者に絶対評価をしてもらう方法で行われた。⁽⁶⁾供試音は電気的に変更を加えて27種類作られ、270名の被験者によって評価された。その結果は図14に示すように、聴感評価とエンジン異音評価計による計測評価とは高い相関（相関係数0.91）が見られた。因みに、この場合の騒音レベルと聴感評価の相関係数は0.84であり、明らかに従来の騒音計よりエンジン異音評価計の方が優れていることがわかる。

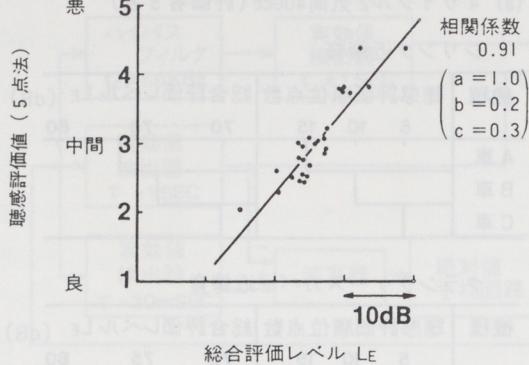


図14 適用例3（実験室評価）

4. 結論

本研究により、次のことが明らかになった。

- (1) アイドリングエンジン音は、聴感上五つの因子で識別されており、その主要因子は三つである。
- (2) この三つの主要因子とは音の大きさ、衝撃性、周波数特性であり、これらはそれぞれ騒音レベル、変動レベル、高周波レベルによって定量化される。
- (3) 上記物理量の線形結合によって得られる総合評価レベルは聴感と高い相関がある。
- (4) 今回試作したエンジン異音評価計は、アイドリングエンジン音のやかましさを客観的、定量的に評価することができる。

今後の課題としては、暗騒音の影響除去、重み係数の最適化、計器のリファインなどが挙げられる。また、アイドリングだけではなく、空吹かしなどについても対応できるようにして行きたい。

5. おわりに

本稿は、1986年5月に自技会、1987年4月にSAEにて発表した論文を殆どそのまま転用したものですので、いささか堅苦しく分りにくい文章に

なったのではないかと思いますが、その点は何卒御容赦願います。

尚、本研究で用いた多次元尺度構成法は、音の分野だけでなく色々な方面で人間の感覚や感性を解析する際、強力なツールとなるものと思われます。これについては、簡単なパソコン用ソフト（因子分析、数量化理論などもある）を用意しておりますので、興味をお持ちの方は是非お試し下さい。

最後に、本研究を進めるに当り、御協力、御指導を頂いた多くの方々に御礼を申上げます。

【参考文献】

- (1) ISO: Guide to International Standards on the Measurement of Airborne Acoustical Noise and Evaluation of its Effects on Human Beings, ISO2204-1979
- (2) 日本建築学会編：騒音の評価法，彰国社
- (3) 林、飽戸：多次元尺度解析法，サイエンス社
- (4) 中山、三浦：音質評価の方法論について，日本音響学会誌，第22巻6号，1966
- (5) G.Young, A.S.Householder : Discussion of a Set of Points in Terms of Their Mutual Distances, Psychometrika, Vol.3, No.1, 1938
- (6) 岡崎：船外機の音質・異音評価，三信エンジニアリング，第7巻第1号，1986