音色の測定法・評価法*

桑野園子**

Method for Measurement and Evaluation of Sound Quality of Machinery Noise / Sonoko KUWANO

Key words: sound quality, machinery noise, evaluation, loudness, sharpness, masking

1. はじめに

音楽の聴取や人との会話、テレビや電話の聴取など、日常生活で音から得ている情報、音によって与えられる楽しみははかりしれない。これらの音が美しく、明瞭に聞こえるよう、楽器音の音色や、ステレオなどの再生装置、電話の音質や明瞭度の向上などをめざして、以前から音色に関する多くの研究が行われてきた¹⁾。

一方、日常生活の中で利用している洗濯機、掃除機、エアコン、OA 機器、自動車など、多くの機械からも音が発生している。これらの機械の音は、本来音を出すことを目的としたものではないので、その音は騒音と受け止められることが多い。騒音とは、“望ましくない音”²⁾、“なければよいなと思う音”³⁾であり、文字どおりないことが望まれる。しかし、技術的、経済的に音のレベルを下げるには限界があり、また、機械から出る音は、機械が正常に動作していることや、自動車が近づいてくることなど重要な情報も提供している⁴⁾。さらに、スポーツカーの音やスポーツの打撃音のように、ドライバーやプレイヤーにとっては積極的に快適感を与える音もある⁵⁾。それ故、騒音レベルを下げることにともな、音質を不快でない音、快適な音に改善しようとする試みが行われるようになってきた^{6)~8)}。ここでは、機械音の音質評価に関連する、検知閾と音色について、主観的な印象とそれを予測するための物理的指標について概観したい。なお、心理学的測定法の詳細について

ては、別書を参照されたい⁹⁾。

2. 検知閾とマスキングノイズ

西村、久島¹⁰⁾は空調音の音質を左右する重要な要因として、純音成分や変動成分をあげている。このような異音成分に関しては、たとえ異音が発生しても検知されなければ、主観的に問題はないので、音質を劣化させないために、異音成分が検知されないことが望まれる。すなわち、異音成分が背景騒音によってマスクされて聞こえなければ影響がない。マスキングに影響を及ぼすのは、異音となる音の周波数を中心周波数とする臨界帯域に含まれる背景騒音の周波数成分と考えられるので、背景騒音のオーバーオール音圧レベルではなく、その臨界帯域¹¹⁾に含まれる周波数成分(N)と異音のレベル(S)との関係で評価ができるであろう¹²⁾。すなわち、臨界帯域の背景となっている臨界比の概念からいって、 $S/N > 0$ dB であれば異音成分が検知され、 $S/N < 0$ dB であれば異音成分の影響がないと考えられる。しかし、音が変動する場合にはこの保証はない。CMR (Comodulation Masking Release; 共変調マスキング解除)¹³⁾の現象にみられるように、背景となる空調音全体が同期して変動する時、マスキング量は減少し、異音成分が聞き取りやすくなってしまいう可能性がある。また、Green ら¹⁴⁾によって提案された profile analysis においても複合音中のあるスペクトル成分が断続する時、極めて低い S/N でもその変動成分が検知されるとの報告がある。

また、このようなマスキング効果を積極的に取り入れて、音声や音楽などの有意味音を空調音などでマスクすることにより、音環境を改善することが期待できる¹⁵⁾¹⁶⁾。近年、高級マンションなどでは、遮音性能が向上し、室内の騒音レベルが非常に低くなってきたが、それ故、かすかな

* 原稿受付 平成 11 年 8 月 23 日

** 大阪大学人間科学部 (吹田市山田丘 1-2)
1967 年大阪大学文学部卒、工学博士。大阪大学助手、講師、助教授を経て、現在教授。研究分野：騒音評価、非正常音の知覚、都市環境の評価など。著書 (共著)：「騒音の評価法」、「聴覚ハンドブック」、「音の評価のための心理学的測定法」など。日本音響学会会長

音が聞こえると気になるという訴えが珍しくない。このようなレベルの低い音についてマスキングノイズは有効と思われる。この時、マスキング音として用いる音は、慣れやすい、気にならない音でなければならない。さもないとマスキング音自身が騒音となり、騒音を付加することになってしまうからである。音環境問題を考える上で慣れやすい音の性質を追求することも有意義であろう¹⁷⁾¹⁸⁾。

3. 音 色

3.1 音色の定義

音色の定義に関しては、様々な意見が提案されているが、難波¹⁹⁾は次のように2つの方向から音色を定義している。(1)音源が何であるか認知(識別)するための手掛かりとなる特性。(2)音を聞いた主体が音から受ける印象の諸側面(多次元的属性)の総称で感情的色彩をおびる。この音色的印象は種々の音色表現語で記述しうる。

機械音の音色に関しては、どの機械の音であるか、あるいはある機械が正常に作動しているかの手がかりを与えるのは(1)の側面である。難波、桑野²⁰⁾や Lyon²¹⁾が述べているように、音の印象は、騒音レベルなど物理量が同じであっても、音源の持つ主観的意味、音源の認知(識別)によって異なるので、この(1)の側面の結果は(2)の側面にも影響を及ぼす。次に(2)の側面について、物理量との関連について述べる。

3.2 音色の評価法

機械音の音質改善を考える時、物理量と心理量との関係を明らかにし、物理量を制御する時、それによって変化する心理量を予測することが必要である。

音色の評価法に関して、音圧レベル、周波数特性、時間変化などが基本的な物理量としてあげられ、それらを基礎として、loudness level, sharpness, roughness, fluctuation strengthをはじめとする心理物理量が提案されている。

(1) L_{Aeq} と loudness level

広帯域の周波数成分を含む種々の変動音の大きさは一般に次式で定義される L_{Aeq} ²²⁾ (Equivalent Continuous A-weighted Sound Pressure Level) とよい対応があることが知られている²⁰⁾。

$$L_{Aeq,r} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right]$$

T : 時刻 t_1 に始まり時刻 t_2 に終わる実測時間

$p_A(t)$: A 特性音圧

p_0 : 基準音圧 (20 μ Pa)

しかし、卓越した周波数成分があると、A 特性による周波数補正では不適當であり、このような音には、耳の臨界帯域の特性を考慮に入れた Zwicker のラウドネスレベルを用いることが適當であろう。なお、この Zwicker のラウドネスレベルは ISO 532 B²³⁾ として、国際基準として定

図1 Sharpness 算出のためのウェイト $g(z)$

められているが、ISO では定常音のみが対象とされている。我々の周囲にある音のほとんどが時間的に変動していることを考える時、変動音への適応は重要な課題である。難波・桑野は、レベル変動する音の大きさがエネルギー平均値とよい対応を示すことから、ラウドネスレベルの基礎となる臨界帯域 (1/3 オクターブバンド) のラウドネス (N' : specific loudness) も臨界帯域 (1/3 オクターブバンド) の音のエネルギー平均値と対応すると仮定し、1/3 オクターブバンドのエネルギー平均値に基づいて ISO 532 B により全体のラウドネスレベルを求めると、大きさの印象とよい対応を示すことがわかった¹²⁾²⁴⁾。このようにして求めた modified loudness level を LL_z と略す。 LL_z は適用範囲が広いが、算出に手数がかかるという欠点がある。一方、A 特性音圧レベルに基づく L_{Aeq} は広帯域の周波数成分を含む音に適用でき、算出は容易である。これらの長所、短所を理解した上で使い分ける必要があろう。

(2) sharpness

sharpness は von Bismarck²⁵⁾ によって音の鋭さの印象を評価する方法として提案され、次式で定義されている。

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24\text{Bark}} N' g(z) z dz}{\int_0^{24\text{Bark}} N' dz} \text{ acum}$$

S : 60 dB の 1 kHz を中心とする臨界帯域幅の狭帯域ノイズの鋭さの印象を 1 acum とする鋭さの印象

N' : 各臨界帯域のラウドネス

$g(z)$: 各臨界帯域にかかるウェイト。図1のグラフから読みとる。

z : 各臨界帯域の番号

この定義にみられるように、高周波数成分のウェイトを高くした指標で、かん高さの印象に起因する「金属性」の印象を評価するのによい指標といえる。種々の音について、sharpness は周波数に依存する「金属性因子」の印象とよい対応を示すことが報告されている¹²⁾。しかし、継続時間や立上がり時間が短くなっても、音の印象は「鋭く」感じられるが²⁶⁾、時間要因による鋭さの印象の変化は sharpness では評価できない。

なお、われわれの聴覚は刺激の変化に対して、非線形の応答を示し、図2に示されるような聴覚の動特性のモデルが提案されている²⁷⁾。阿部²⁸⁾はこの聴覚の動特性のモデル

図2 聴覚の動特性のモデル²⁷⁾

に基づいて、自動車のギア音の衝撃的な印象を少なくすることにより音質を改善する方法を提案している。

(3) fluctuation strength と roughness

fluctuation strength (変動感)²⁹⁾ と roughness (あらさ)³⁰⁾ は、振幅変調音や周波数変調音を用いた基礎実験に基づいて提案された評価法であり、変調周波数に伴って時間的に変化する印象を表すものである。変調周波数が、4 Hz および 70 Hz 付近の時、fluctuation strength, roughness がそれぞれ最大になると報告されている。自動車のアイドリング音の不快感と roughness の間にある程度の対応があるという報告³¹⁾があるが、これらの指標をランダムにレベルが変化する現実の音に適用するには、今後、慎重な検討が必要であろう。

(4) 総合評価法

Khan ら³²⁾ はディーゼルエンジンの音のうるささの評価を求め、種々の要因のうるささへの寄与について検討した結果、うるささの 98.7% は loudness で、2.5% は sharpness で説明できると報告している。羽藤ら³³⁾ も自動車交通騒音の不快感について同様の結果を得ており、音色の評価も loudness の影響が大きく、loudness に次いで、sharpness が影響していることが示唆される。菊池ら³⁴⁾ はエアコンの音の場合、その快適性は LL_z と sharpness の関数として表されることを報告している。

その他、音質に関連する評価法として、unbiased annoyance (UBA) や sensory pleasantness, psychoacoustic annoyance (PA) などが提案されている³⁵⁾。いずれも、loudness, sharpness, roughness, fluctuation strengthなどを基礎とし、種々のウェイトをかけた形で定義されている。これらの妥当性については今後の検討が必要である。

4. おわりに

機械音の音質に関する研究は近年注目を集めている。個々の機械音について、物理量と心理量の対応が詳細に検討されてきており、機械音の音質が改善されることが期待される。ただ、中には物理的な指標の性格があいまいであったり、Zwicker らが変動音の処理として用いている統計値 N_5 (ラウドネスの 5% 値) や N_{10} (ラウドネスの 10% 値) のように係数の妥当性が保証されないものもある。

る。

音質評価方法を標準化し、製品のラベリングに取り入れようという提案もあり³⁶⁾、A 特性音圧レベルではなく、ラウドネス (sone) が採用されている例もある²¹⁾。現在、音質評価を実用化するには個別の研究とともに一般性をもった法則の研究も望まれる。

また、機械音の音質を改善しようとする時、1つの機械でも種々の発生源があり、それぞれの音について改善を考えると同時に、その機械全体について、さらには種々の音が存在する環境全体としての評価も念頭におくことも必要であろう。ある音が聞こえなくなった時、その音にマスクされてそれまで聞こえなかった別の音が聞こえて、より不快になる可能性等もあるからである。また、自動車やモーターバイクの音、ゴルフやテニスの音などの場合、ユーザーにとって“快適な”、“楽しい”音が、一般住民には“騒音”になる可能性があることも忘れてはならない。

なお、音質に関する種々の評価法を算出するソフトを組み込んだ装置が市販されるようになり、複雑な計算をしなくても求められるようになった。しかし、これらの指標が機械音のどのような印象と対応するのかまだ明確ではない。また、ISO の国際基準になっている L_{Aeq} , LL_z 以外の指標については、これらのソフトのアルゴリズムが確定したものであるわけではないので、装置によって測定値が必ずしも一致するとは限らない³⁷⁾。時間変動パターンが複雑な現実の機械騒音や環境騒音の評価にこれらの指標を適用するためには今後、より詳細に系統的にパラメータを変化させた刺激を用いて検討することが必要であろう。

引用文献

- 1) 宮坂栄一：音色、難波精一郎 (編)「聴覚ハンドブック」、ナカニシヤ出版、(1984) 139~188.
- 2) JIS Z 8106：音響用語 (一般)、(1988).
- 3) 守田 栄：騒音と騒音防止、オーム社、(1961).
- 4) 桑野園子：機械の音の語るもの、メカライフ、39 (1995) 42.
- 5) S. Kuwano, S. Namba, K. Ohta, H. Takeda, K. Sato and Y. Tsuji: Relation between Envelope Pattern and Sound Quality of Impulsive Sounds, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 20, (1999) 153.
- 6) S. Namba: Noise - Quantity and Quality, Proc. Int. Congress on Noise Control Engineering, (1994) 3.
- 7) P. Davis and G. Ebbitt (eds.): Sound Quality Symposium, INCE/U. S. A., (1998).
- 8) 日本音響学会誌、小特集 機械騒音の音質改善、53 (1997) 450~482.
- 9) 例えば、難波精一郎、桑野園子：音の評価のための心理学的測定法、コロナ社、(1998).
- 10) 西村正治、久島俊也：空調器騒音の定量的音質評価について——純音、変動音の分析、日本音響学会講演論文集、(1982. 10) 449.
- 11) E. Zwicker: Subdivision of the Audible Frequency Range into Critical Bands (Frequenzgruppen), J. Acoust. Soc. Am., 33, (1961) 248.
- 12) S. Namba, S. Kuwano, K. Kinoshita and K. Kurakata: Loudness and Timbre of Broad-band Noise Mixed with Frequency Modulated Sounds, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 13, (1992) 229.
- 13) J. W. Hall, M. P. Haggard and M. A. Fernandes: Detection in Noise by Spectro-temporal Pattern Analysis, J. Acoust.

- Soc. Am., 76, (1984) 50.
- 14) D. M. Green : Profile Analysis, Oxford Univ. Press, (1988).
- 15) 古澤隆彦：オフィスの音環境，騒音制御，15 (1991) 230.
- 16) S. Namba, S. Kuwano and H. Fastl : Loudness of Road Traffic Noise Using the Method of Continuous Judgment by Category, Proc. Noise 88, (1988) 241.
- 17) S. Namba and S. Kuwano : Measurement of Habituation to Noise Using the Method of Continuous Judgment by Category, J. Sound Vib., 127, (1988) 507.
- 18) 溝口耕三，岡本健久，田中 洪：選択的注意から見た「慣れ」の測定法の研究，日本音響学会誌，55 (1999) 343.
- 19) 難波精一郎：音色の測定・評価法とその適用例，応用技術出版，(1992).
- 20) 難波精一郎，桑野園子：種々の変動音の評価法としての Leq の妥当性，並びにその適用範囲の検討，日本音響学会誌，38 (1982) 774.
- 21) R. H. Lyon : Theory of Sound (or Is It Noise?), Rayleigh Medal Lecture, IOA Meeting, (1995) 1.
- 22) ISO 1996 : Acoustics - Description and Measurement of Environmental Noise - Part 1: Basic Quantities and Procedures, (1982).
- 23) ISO 532, Acoustics - Method for Calculating Loudness Level, (1975).
- 24) S. Kuwano, S. Namba and H. Miura : Advantages and Disadvantages of A-weighted Sound Pressure Level in Relation to Subjective Impression of Environmental Noises, Noise Control Eng. J., 33, (1989) 107.
- 25) G. von Bismarck : Sharpness as an Attribute of Timbre of Steady Sounds, Acustica, 30 (1974) 159.
- 26) 難波精一郎，桑野園子，加藤 徹：音の立上がり時間と大きさについて——エネルギー値との関係，日本音響学会誌，30 (1974) 144.
- 27) S. Namba, S. Kuwano and T. Kato : The Loudness of Sound with Intensity Increment, Jap. Psychol. Res., 18, (1976) 63.
- 28) 阿部 武：自動車騒音の発生メカニズムと主観評価を用いた自動車騒音の制御，学位論文，(1995；大阪大学).
- 29) H. Fastl : Fluctuation Strength and Temporal Masking Patterns of Amplitude-modulated Broad-band Noise, Hearing Res., 8, (1982) 59.
- 30) E. Terhardt : On the Perception of Periodic Sound Fluctuations (Roughness), Acustica, 32, (1974) 300.
- 31) T. Hashimoto and S. Hatano : Roughness Level as a Measure for Estimating Unpleasantness: Modification of Roughness Level by Modulation Frequencies, Proc. Inter-noise 94, (1994) 887.
- 32) M. S. Khan, Ö. Johansson and U. Sundbäck : Development of an Annoyance Index for Heavy-duty Diesel Engine Noise Using Multivariate Analysis, Noise Control Eng. J., 45, (1997) 157.
- 33) 羽藤 律，桑野園子，難波精一郎：道路交通騒音のやかましき——音色に影響を及ぼす要因とその交互作用，日本音響学会講演論文集，(1999.3) 615.
- 34) 菊池芳正，稲塚 徹，木下欽治郎，鳥越那和，難波精一郎，桑野園子：空調機騒音の音質評価，日本音響学会講演論文集，(1992.10) 699.
- 35) E. Zwicker and H. Fastl : Psychoacoustics, Springer, (1999).
- 36) I-INCE Technical Initiative : Noise Labels for Products (Proposed).
- 37) H. Fastl : Comparison of Loudness Analysis Systems, Proc. Inter-noise 97, (1997) 981.