

103 オフィス機器の音の感性的評価

Sensibility evaluation of the machinery noise emitted from office equipments

○正 高田 正幸 田中 一彦 正 岩宮 眞一郎 正 河原 一彦 (九州芸工大)
正 高梨 彰男 正 森 厚夫 (キヤノン)

Masayuki TAKADA, Kazuhiko TANAKA, Shin-ichiro IWAMIYA and Kazuhiko KAWAHARA
, Kyushu Institute of Design, 4-9-1 Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka, 815-8540
Akio TAKANASHI and Atsuo MORI, CANON INC., 3-30-2 Shimomaruko, Ohta-ku, Tokyo, 146-8501

Abstract: The sound quality of the machinery noise of laser printers was evaluated by a semantic differential method. The averaged rating values were applied to a principal component analysis. According to the relationships between factor scores on each factor and acoustical properties of the machinery noise, acoustical indices were proposed to predict subjective impression of the machinery noise. Furthermore, to evaluate the sound quality of manual operation sounds of copy machines, such as opening and closing front cover, drawing and loading paper trays, and locking and releasing hooks, the free description experiment using onomatopoeic representation was examined. The obtained onomatopoeic representations represent the features of sound quality and acoustical characteristics of operation sounds.

Key words: sound quality, office equipments, semantic differential method, acoustical index, onomatopoeia

1. はじめに

最近、パーソナルコンピュータや周辺機器から発生する音によりオフィスや家庭の音環境が悪化し、これらのオフィス機器から発生する音に対する対策が望まれている。このような騒音に対する対策として、従来の量的な対策の他に、音の質的な側面からの対策が重要視されるようになってきた。著者らのグループは、こういったオフィス機器に類するプリンタや複写機の稼動音の音質をSD法により測定し、音質に影響を及ぼす物理的特徴について検討を行ってきた。本報告では、レーザープリンタの稼動音を対象とした音質評価の例を紹介し、音質に影響を及ぼす物理的特徴を反映した音響指標を提案する。

さらに、プリンタや複写機の商品性に影響を及ぼす音として、稼動時に発生する音の他に、カバーを開いたり、給紙トレイを挿入するといった、メンテナンス操作時に発生する音など(以降、操作音と呼ぶ)も挙げられる。これらの音に対して、一般のユーザーがクレームする場合、「ボタン」「ガシャッ」といった擬音語による表現がしばしば用いられる。こういった日常的な表現を利用すれば、より自然な形態で音質を捉えることが可能になると考えられる。著者らのグループは、プリンタや複写機の操作音を対象として、擬音語表現実験を行い、擬音語と製品イメージや音質の関連を検討している。本報告では、擬音語表現と音から感じられる快適性との関連から、擬音語を用いた自由記述回答による音質評価の可能性を検討した。

2. レーザープリンタ稼動音に対する音質評価実験と音質予測モデルの検討

2.1 音質評価実験

(1)刺激 レーザープリンタ 18 機種稼動音を用いた。稼動音とは紙を排出している状態での音である。

(2)実験方法 刺激の印象をSD法により測定した。評価尺度には、表1に示す17個の形容詞対(7段階評価尺度)を用い

た。被験者への刺激の提示はヘッドフォンを用いて行った。

(3)被験者 健聴な、19歳から28歳までの計19名(男性13名、女性6名)である。

2.2 実験結果

被験者全員の平均評定値をもとに、評価尺度を変量として、主成分分析(バリマックス回転)を行った。結果として、3因子解を選択した。得られた主成分負荷量を表1に示す。表1の主成分負荷量の大きさから、第1因子は快適感因子、第2因子は金属性因子、第3因子は躍動感因子と、それぞれ解釈できる。

Table 1 Adjective scales and factor loadings

形容詞対尺度	因子1	因子2	因子3
気になる - 気にならない	0.963	-0.080	-0.192
不快な - 快い	0.872	-0.223	-0.367
うねりのある - 滑らかな	0.843	0.349	0.180
うるさい - 静かな	0.837	0.122	0.499
ばらばらな - まとまりのある	0.733	0.178	-0.475
軟らかい - 硬い	-0.706	0.566	0.114
心安まる - 苛立つ	0.582	-0.171	-0.012
鈍い - 鋭い	-0.129	0.971	0.126
暗い - 明るい	0.050	0.935	0.069
軽い - 重い	-0.229	-0.892	-0.346
高い - 低い	0.193	-0.882	-0.406
甲高い - 落ち着いた	0.631	-0.743	-0.133
速い - 遅い	-0.024	0.117	0.964
躍動感のある - 躍動感の無い	0.140	0.124	0.949
高級な - 安っぽい	-0.402	0.310	0.815
信頼できない - 信頼できる	0.453	-0.302	-0.786
力強い - 弱々しい	0.037	0.582	0.770
寄与率(%)	31.6	29.8	27.8

2.3 刺激の物理的特徴と音響指標の検討

各刺激の主成分得点(以降、因子得点と表記)を求め、因子軸上での各機種付置と対応する物理的特徴を調べ、因子得点と対応する音響指標を検討した。さらに、これらの指標を利用し

て、重回帰分析により音質予測モデルを構成した。

2.3.1 金属性因子

高周波数帯域に大きなエネルギーを持つ音ほど、鋭さや甲高さが増すことは既に知られている²⁾。図1に、金属性因子軸上で「鋭い」方向に位置する機種と「鈍い」方向に位置する機種の1/3オクターブバンドスペクトルの比較を示す。

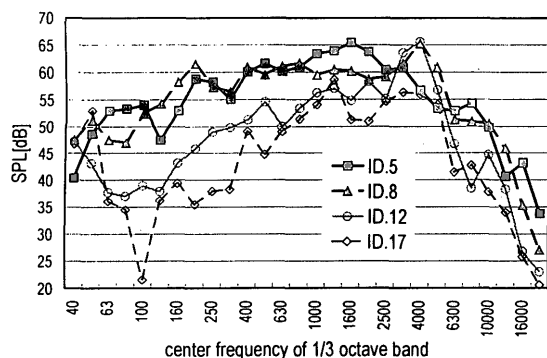


Fig. 1 1/3 octave band spectra of dull sounds (5, 8) and sharp sounds (12, 17)

より鋭い印象を持たれる12, 17番の機種は中心周波数が1kHzを境により高域のパワーが卓越し、より鈍い印象を持たれる5, 8番の機種はより低域のパワーが卓越している。この特徴に対応する指標として、A特性の1/3オクターブバンドスペクトル上において、中心周波数1kHz以上の帯域のエネルギーと全周波数帯域エネルギーの比の対数値を求め、これをenergy ratioとする(式(1))。

$$\text{energy ratio} = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{fc \geq 1\text{kHz}}}{I_{\text{overall}}} \right) \quad (1)$$

$I_{fc \geq 1\text{kHz}}$: 1/3オクターブバンドスペクトルにおける
中心周波数1kHz以上の帯域のエネルギー

さらに、金属性因子得点とスペクトルの対応から、鋭い印象には、高周波数帯域に見られる突出成分が、energy ratioで見積もる以上の貢献をしている。この特徴に対応する指標として、狭帯域スペクトルの1kHz以上の周波数帯域で刺激のノイズエンベロープから3dB以上突出している成分のエネルギーに、周波数重みと突出係数を掛け、その合計エネルギーと全成分エネルギーの比の対数値を求め、salience indexとする(式(2))。

$$\text{salience index} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N I_{si} \times W_i \times \frac{I_{si}}{I_{ei}}}{I_{\text{overall}}} \right) \quad (2)$$

I_{si} : 1kHz以上の周波数帯域でノイズエンベロープから3dB
以上突出した周波数成分のエネルギー (N : 突出成分数)

I_{ei} : 突出成分と同じ周波数におけるノイズエンベロープ
のエネルギー

W_i : 突出成分が属する臨界帯域に対応する周波数重み
周波数重みには、von BismarckのSharpness予測モデル³⁾を利用し、突出成分が属する臨界帯域に対応する重み値を用いた。また、注目した成分のノイズエンベロープからの突出度を反映する突出係数として、突出成分のエネルギーと、同じ周波数におけるノイズエンベロープのエネルギーの比を用いた。

これらの二つの物理的特徴が金属性因子に貢献していると考え、対応するenergy ratioとsalience indexの二つの指標から成

る、重回帰モデルを構成し、金属性因子得点を予測した。その結果、重相関係数は0.846** (以降、**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, -: $p \geq 0.05$) となり、モデルが有意であることが示された。重回帰モデルで用いた各指標の標準偏回帰係数は、energy ratioに対しては0.610**, salience indexに対しては0.471**であり、両指標は共に有意である。また、標準偏回帰係数はenergy ratioの方が大きく、金属性因子に対しては、高周波数帯域における狭帯域の突出成分よりも、高周波数帯域に含まれる成分全体としての影響の方が大きいと考えられる。以上から、金属性因子は、高周波数帯域のエネルギーの割合を反映した指標energy ratioと突出高周波数成分による印象に対応する指標salience indexを用いて、概ね予測できると考えられる。

一方、音の鋭さに対応する指標として、von BismarckによりSharpnessが提案され³⁾、ソフトウェアが市販されている。しかし、ソフトウェアから計算されたSharpnessと金属性因子得点との相関係数の絶対値は0.118- となり、有意な相関は得られなかった。これはBismarckモデルが、金属的な印象に大きく貢献する、非常に狭帯域の突出高周波数成分を考慮していないため、などの理由が考えられる。

2.3.2 快適感因子

一般的に、音の大きさが大きいほど不快な印象を与えられ⁴⁾。また表1から、快適感因子では、「うねりのある-滑らかな」「ばらばらな-まとまりのある」などの形容詞対で主成分負荷量が大きく、稼動音における時々刻々の変動が快適感に大きな影響を及ぼしていると推測できる。図2にISO532Bに基づくラウドネスの変動の比較を示す。

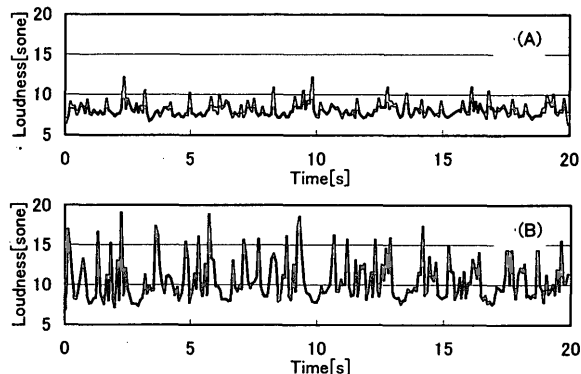


Fig. 2 Loudness fluctuation of a pleasant sound (A) and an unpleasant sound (B)

機種(A)に比べて不快な印象が強い機種(B)の方が、その変動が大きい。これらの特徴に対応する指標として、ISO532Bに基づく、試験音のオーバーオールラウドネス (以降、Loudness) と、その時間変動における標準偏差 (以降、Lsd) を用いた。

さらに、快適感因子は「甲高い-落ち着いた」の形容詞対でも主成分負荷量が比較的大きく、高周波数帯域成分のエネルギーが実際に快適感に影響している。この点を考慮する指標として、式(1)のenergy ratioを用いた。Loudness, Lsdおよびenergy ratioを用い、式(4)のような快適感因子得点を予測する重回帰モデルを構成した。その結果、重相関係数は0.818**となり、モデルが有意であることが示された。重回帰モデルで用いた各指標の標準偏回帰係数は、Loudnessに対しては0.049-, Lsdに対しては-0.636**, energy ratioに対しては-0.571**となり、Loudness以外のLsdとenergy ratioが有意な指標となっている。

さらに, energy ratio に比べると, Lsd の係数が比較的大きい。これは, 稼動時の動作音が非常に目立ち, 全体的な音の大きさや高周波数帯域成分よりも, 動作に伴う音の変動の方が快適感に影響していることを反映したものと考えられる。

以上から, 快適感因子は, 音全体の大きさに対応する Loudness, 機器の動作に伴う音の大きさに対応するラウドネス変動の標準偏差 Lsd, および高周波数帯域のエネルギーの割合を反映した指標 energy ratio を用いて, 概ね予測できると考えられる。

2.3.3 躍動感因子

躍動感因子は「速い-遅い」などの形容詞対で主成分負荷量が大きいことから, 紙を 1 枚排出するのにかかる時間 (以降, 動作周期と表記) が, 躍動感因子に関係していると考えられる。紙面の都合上示さないが, 時間波形を比較すると, 躍動感の強い機種ほどその動作周期が短いという傾向が見られる。躍動感因子得点と動作周期の相関係数は 0.878** となり, 躍動感因子得点の予測には動作周期が有効であると言える。

3. 複写機やプリンタの操作音の擬音語表現と音から感じられる快適性の関係

擬音語は, 例えば機械から異音が発生し, トラブルの内容を他者に伝達するといった場面でしばしば用いられる。擬音語を発生するという行為は, 音の特徴を捉え, 似せた音を声で作出す作業であり, 発生された擬音語表現の中には, 元の音の物理的特徴だけでなく, 音に対する印象を反映した情報が含まれていると考えられる。ここでは, 各種の複写機の操作音に対して, 擬音語による自由記述実験を行い, 擬音語に含まれる音声学のパラメータに基づいた操作音の分類を試み, 擬音語表現の有効性について検討した。さらに, 同じ刺激に対して, 音の快適性に関する印象評価実験を行い, 擬音語表現から推定される音響的特徴との関連を検討した。

3.1 実験方法

(1) 刺激 レーザープリンタ 3 機種, 複写機 2 機種のカバー開閉音 29 個, 給紙トレイ挿入時に発生する音 6 個, ドラム挿入時に発生する音 2 個, 給紙トレイの用紙サイズ調節部のスライド音, トナー脱着の際のロックを解除する音など, 計 44 個を刺激とした。全ての刺激は衝突音を含む。刺激の提示音圧レベルは, 時間波形上で音圧がピークに達する衝突音付近のおよそのラウドネスが, この部分の全刺激の平均的なラウドネスである 75sone になるように調節した。

(2) 実験方法 刺激に対して, 自由記述による擬音語表現実験と, 快適性に関する印象評価実験を行った。快適性の評価尺度には, 「心地よい-不快な」の形容詞対 (7 段階評価尺度) を用いた。刺激の提示はヘッドフォンを用いて行った。

(3) 被験者 健聴な, 19 歳から 29 歳までの計 14 名 (男性 6 名, 女性 8 名) であり, 何れも日本語を母国語としている。

3.2 実験結果

3.2.1 擬音語中の音声学のパラメータによる音の分類

各被験者による擬音語表現は個人差があり, 一つの刺激に対して多様な表現が見られる。しかし, 音声学の特徴に着目すると, 被験者間に共通する傾向が見られる。そこで, 擬音語表現に含まれる音声学のパラメータによって刺激を分類し, 擬音語

表現の有効性を検討した。

各被験者の各刺激に対する擬音語表現を, 小泉による調音位置 (唇歯, 両唇, 歯茎, 歯茎後部, 硬口蓋, 軟口蓋, 声門), 調音様式 (閉鎖音, 摩擦音, 鼻音, 歯擦音, 接近音, はじき音)⁵⁾, 日本語の母音 5 種 (/a/, /i/, /u/, /e/, /o/), 有声子音, 無声子音, 撥音, 促音, 拗音, 長音の計 24 個のパラメータによって符号化した。さらに, 被験者全員の回答から, 各刺激に対する各パラメータの累積度数を求めた。この累積度数を, 各パラメータを軸とした場合の座標と考え, 24 次元空間内での各刺激のユークリッド平方距離を測度とした, クラスタ分析を行った。図 3 に, クラスタ分析の結果として得られたデンドログラムを示す。

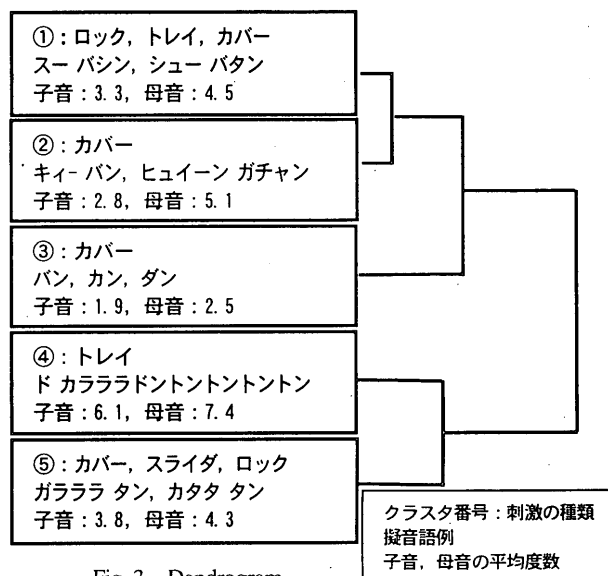


Fig. 3 Dendrogram

44 個の刺激は, 大まかに見て 5 グループに分れ, 主に擬音語を構成する音韻数によって分類されている。

クラスタ①, ②に分類された刺激は, 主にカバーを閉じる際の音やトレイを挿入する際の音などである。これらの音では, カバーを閉じる際などに発生する衝突音の前に, 擦れる音が発生している。この擦れ音を表現するために, 「スー」や「キー」などの長音が用いられている。特に, クラスタ②は, 衝突音の前に, 金属的な擦れ音が発生する刺激のクラスタである。これらの刺激に対して, 「キーバン」「ヒューンガチャン」などの, 母音 /i/ を長音化した擬音語が多く見られる。/i/ の第 2 フォルマント周波数は, 日本語母音 5 種の中では最も高く (2800Hz 付近), 高い周波数の音に対して /i/ が用いられると考えられる。サイン音の物理的特徴と擬音語の特徴の関連を検討した岩宮らも, 擬音語表現に母音 /i/ が用いられるサイン音の基本周波数やスペクトル重心は, 他の母音が用いられるサイン音よりも高い, と述べている⁹⁾。一方, クラスタ①では, 衝突音の前の擦れ音が金属的な音ではない。対応する擬音語には, 「ズー ガタン」「シュー バタン」などのように, 主にサ行やシャ行などの歯茎, 歯茎後部を調音位置とした摩擦音と, その長音表現 (/i/ 以外) が多く見られる。

クラスタ③の擬音語では, 他のクラスタよりも, 擬音語の音韻数が少ない (クラスタ内平均度数 子音: 1.9, 母音: 2.5)。クラスタ③に分類された刺激は, カバーを閉じる際に発生する短い衝突音のみであった。これらの刺激に対して用いられた擬

音語も、「バン」「ダン」「カン」などの、比較的短く、単純なものが多い。

クラスタ④は子音、母音の数が他のクラスタに比べ最も多い（クラスタ内平均度数 子音：6.1，母音：7.4）。クラスタ④に分類された刺激はトレイを閉じる際の音であり、衝突音の後、衝突部位の振動が長く続く。この特徴に対して、「トントントン」のような、繰り返し表現が用いられている。

クラスタ⑤に分類された刺激は主に、カバーを閉じる音や用紙サイズ調節部のスライド音などであり、衝突音の前に短い音が連続している。この特徴に対して、「ガラララ タン」「カタタ タン」のように、主に歯茎を調音位置とした閉鎖音やはじき音を用いた擬音語が多い。岩宮らは、サイン音を対象とした検討の中で、サイン音の音列の周期が短いときに、「ピリリリ」のように、「ピ」で始まる音韻がラ行の音韻に変化する、と述べている⁶⁾。同様の傾向が、衝突音の前に短い音が連続するスライド音に対する表現にも見られる。

以上のように、各被験者による擬音語表現は多種多様であるが、音声学のパラメータで見ると共通点が多い。このようなパラメータを有効に利用すれば、擬音語表現を音質評価に利用できるものと考えられる。

3.2.2 音の快適性を規定する擬音語表現

ここでは、擬音語表現の音質評価への適用の一例として、音の快適性評価と擬音語表現の特徴の対応について検討する。

被験者全員の平均評定値が「やや不快な」に相当するカテゴリー5以上の刺激の中に、クラスタ分析の結果として得られた、クラスタ②の金属的な擦れ音を含む刺激が全て（4 刺激）含まれている。「キイー」や「ギイー」といった擬音語で表現される金属的な擦れ音は、不快な印象であると考えられる。衝突音に対しては、全体的に「バン」「バン」「ガタン」などの閉鎖音で始まる擬音語が用いられている。この中で、不快な印象の刺激における衝突音に対しては、「ガン」「ガチャン」「ボタン」といった有声子音の閉鎖音で始まる表現が多く見られる。田中らは、擬音語とその物理的特徴の対応を検討し、有声子音と無声子音の周波数スペクトルを比較している⁷⁾。有声子音のスペクトルは、無声子音のスペクトルと比べて高周波数帯域のエネルギーが大きく、より雑音に近づく傾向にある。図4に、最も不快であると評価されたカバーを閉じる際の音のウェーブレット変換図を示す。周波数帯域が1~5kHzの金属的な摩擦音が発生し、続いて衝突音が発生している。衝突音の部分では1~10kHzの広い周波数帯域でエネルギーが大きい。スペクトル上で広帯域に渡って大きなエネルギーが分布し、不快な印象を伴う衝突音に対して、有声子音の閉鎖音で始まる表現が用いられると考えられる。この刺激に対する擬音語の例は、「ギイーバン」「ギィヤーア ガン」などであった。

快適性と擬音語の対応を定量的に検討するために、被験者全員の擬音語の回答を音韻に分解し、用いられた音韻の累積度数を求めた。累積度数は、刺激中の衝突音とその前・後部に分け、部分毎に求めた。擬音語に用いられた音韻のうち、累積度数が少ない（15以下）音韻は除き、音韻の累積度数と「心地よいー不快な」の平均評定値の順位相関係数を求めた。相関係数が有意であった音韻と相関係数を表2に示す。衝突後の音に対する

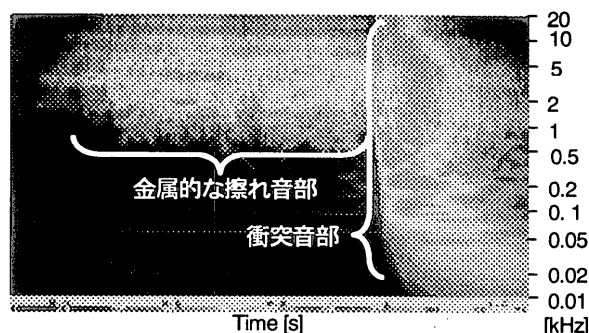


Fig. 4 Wavelet analysis of a sound during closing front cover
擬音語に用いられた音韻の中では、平均評定値と有意な相関を示すものは無い。有意な相関を示した音韻の中で、衝突前の音に対する擬音語に用いられた音韻には、「イ」「キ」「キュ」「ギ」などの、金属的な擦れ音の表現に用いられた音韻が多い。また、衝突音に対する擬音語の音韻には、「ガ」「ベ」「ギャ」「グア」などの有声子音の閉鎖音が多く見られる。

このように、音から感じられる快適性に対応する擬音語表現が存在し、擬音語から快適性や対応する音の物理的特徴との関連を検討することができるものと考えられる。

Table 2 Phonemes and rank correlation coefficients between their cumulative frequencies and pleasantness scores ($p < 0.05$)

音韻（相関係数）	
衝突前	イ (0.439), ヒ (0.417), ユ (0.466), ヨ (0.314), キ (0.379), キュ (0.445), ヒョ (0.329), ビュ (0.379), ギ (0.302)
衝突音	ア (0.600), イ (0.303), ラ (0.437), ガ (0.406), ベ (0.453), ギャ (0.320), グア (0.393)

4. 結論

レーザープリンタの稼働音を対象とした、SD 法による音質評価実験を行い、主観評価値と対応する物理的特徴を検討し、この特徴を反映した音響指標をもとめた。重回帰分析を用いて音響指標を組み合わせ、各因子得点を予測できることを示した。さらに、複写機等の操作音を対象として、自由記述による擬音語表現実験と快適性評価実験を行った。刺激に対する被験者の擬音語表現は多様であるが、音声学のパラメータで見ると共通した部分が多い。また、不快な印象の原因と考えられる衝突音に対しては、有声子音の閉鎖音が多く用いられるなど、快適性に関連する音の物理的特徴と擬音語の特徴に対応が見られた。今後の検討により、音から受けるさまざまな印象と対応する擬音語表現を明らかにすれば、擬音語を用いた音質評価が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 高田 他, オフィス機器から発生する音の音質評価, 日本音響学会聴覚研究会・音楽音響研究会資料, MA00-55 (H-2000-14) (2000)
- 2) G. von Bismarck, "Timbre of Steady Sounds: A Factorial Investigation of its Verbal Attributes", ACUSTICA, Vol.30, 146-159 (1974)
- 3) G. von Bismarck, "Sharpness as an Attribute of the Timbre of Steady Sounds", ACUSTICA, Vol.30, 159-172 (1974)
- 4) E. Zwicker and H. Fastl, "Psychoacoustics: Facts and Models, Second Updated Edition", Springer, 243-246 (1999)
- 5) 小泉保, 音声学入門, 大学書林 (1996)
- 6) 岩宮 他, 擬音語を用いたサイン音の分類, サウンドスケープ 2 巻, 23-30 (2000)
- 7) 田中 他, 機械の異常音の擬音語表現, 日本音響学会誌 Vol.53, No.6, 477-482 (1997)