快音性デザインのための感性工学的手法に基づくモータ騒音の価値構造モデル*

○山﨑陽一，長田典子（関西学院大・工），
保月孝志，樋渡天次郎，佐竹彰（三菱電機・先端技術総合研）

1　はじめに

自動車の電気自動車（EV）化やデジタルトランスフォーメーション（DX）の推進に伴い，モータをアクチュエータとした製品がより身近になり，モータの音は環境音を構成する主要な要素の一つになっている．先行研究では，モータ音など回転駆動系の騒音の評価に関して多くの評価指標が検討されてきたが[1]，音環境の快音化を目的としたモータ音の包括的な検討についての報告は少ない[2]．

これまで我々は，この感性工学的アプローチに基づき，製品やサービスなどのモノの価値と物性の関係性を感性の階層構造モデル[3]として明らかにしてきた[4,5]．感性工学は，物理要因と，それが喚起する感性的反応を計測し，得られた感性量を真値（grandtruth）として物理量との関係をモデル化することで価値・印象を実現する物理要因を求めることを可能とする技術である．本研究では，モータ音の快音性デザインにおいて必要な快音性の価値構造を明らかにするため，感性工学的アプローチに基づきインバータ制御により生じるモータ駆動音の快音性に関する価値構造モデルを構築する．快音性の価値構造モデルを構築するため 2 つの研究を実施する．研究 1 では，モータ駆動音の快音性に関する評価項目を抽出するために，評価グリッド法というインタビュー手法を実施する．研究 2 では，研究 1 で抽出した評価語を用いた主観評価実験と価値構造モデルの構築を行う．

2　研究 1：快音性の評価項目の選定

2.1 目的

本研究では，インバータ制御により生じるモータ駆動音の快音性の評価構造を明らかにし，モータ駆動音の快音性評価に適切な評価項目を選定するため，評価グリッド法[6]によるインタビューを実施する．評価グリッド法は，認知構造のうち評価に関わる評価構造を引き出すインタビュー手法であり，快音性を構成する評価項目の抽出に用いる．

2.2 方法

参加者　聴覚に異常がない健康な 21 歳から 24 歳までの大学生・大学院生 10 名（平均年齢 22.5 歳, 男性 7 名, 女性 3 名）が参加した．

実験刺激　実験刺激は，周波数特性が異なる 24 種類のモータ駆動音である．各音源は，回転数を 1 秒間で 30 回転となるように統制した上でインバータ制御のパラメータ（制御方式，変調率，キャリア周波数）を変え，半無響室において録音した．全実験刺激はラウドネスが等しくなるように振幅を調整した．

提示環境　参加者は，インタビュー時にヘッドホンから実験刺激を聴取した．再生環境は，再生用端末，オーディオアンプ(iFi Audio nano iDSD)，ヘッドホン(Sony MDR-CD900ST) により構成した．各刺激は，ヘッドホンから 11 [sone] (65dBA 相当)で提示された．

手順　本実験は関西学院大学工学部の心理実験用チャンバールーム内で実施した．参加者は，実験室内に設置された椅子に着座した後に，実験者から研究目的の説明を受け，自由意志において書面による研究の同意を得た．同意を得た後に，参加者はオージオメータによる聴力検査を行った．次にヘッドホンを装着し，タッチパネルインターフェースを介して実験刺激の聴取方法を確認した．その上で評価グリッド法の手順を参考にして，類似性に基づく実験刺激の分類，刺激音グループの順位付け，評価グリッド法によるインタビューの 3 段階の調査を実施した．

第一段階の類似性に基づく実験刺激の分類において，参加者は実験刺激を聴感的特徴の類似性に基づき手続き的に少数のグループに

* Hierarchical Structure Model of Motor Drive Noise based on Affective Engineering for Pleasant Sound Design for ASJ 2024 Spring meeting, by Yoichi Yamazaki, Noriko Nagata (Kwansei Gakuin Univ.), Takashi Hozuki, Tenjiro Hiwatari, Akira Satake (Mitsubishi Electric Corp.)

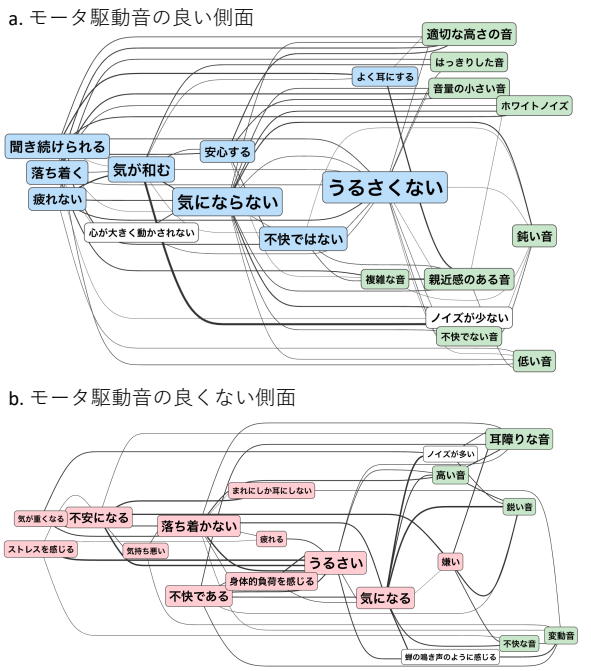

Fig. 1 Evaluation structure for the pleasantness of motor drive sound (Katz centrality=0.1)

分類した．

第二段階で、参加者は分類した刺激音グループを音の良さに基づき順位付けを行い，各グループに音の良さを 7 段階で評価した．評価は，最も良いグループは 7 点，最も良くないグループは 1 点の相対評価であった．さらに得点に基づき刺激音グループを，低評価群（1 から 2 点），中評価群（3 から 5 点），高評価群（6 から 7 点）の 3 群に分類した．

第三段階では，これらの比較判断の理由に関する聴取（ラダーリング）を行った．ラダーリングにはラダーアップ質問とラダーダウン質問の 2 種類がある．ラダーアップ質問では，比較判断の基準となった価値，本研究では音の良さについて，上位項目だとどうして良いと思うのか，どのような良いことがあるのかという質問に回答した．ラダーダウン質問では，下位項目では具体的にどういうことか，どのような点からそう感じるのかという質問に回答した．

なお，本実験は関西学院大学人を対象とする行動学系研究倫理の規定に則り実施した．

2.3 結果

評価構造可視化システム（ESV: Evaluation Structure Visualization）[4,5]を用い，参加者から得た回答からモータ駆動音の快音性に関する評価構造図を可視化した．Fig. 1 はモータ駆動音の良い面，良くない面それぞれの評価構造図である．評価構造図は，ノードとエッジから構成されるグラフであり，ノードは評価構造を構成する概念と対応しており，エッジは概念間の関係性の有無を表している．評価項目の重要性を定量的に評価する指標として Katz 中心性 (Katz Centrality) がある．本研究では，Katz 中心性が 0.1 の状態で現れるノードを快音性を構成する主要な概念として評価項目として採用した．

Table 1 Evaluation word pairs for value

価値層の評価項目		
うるさい	ー	うるさくない
いらいらする	ー	落ち着く
不安になる	ー	安心する
不快	ー	快
腹が立つ	ー	気が和む
気が重くなる	ー	気が楽になる
気になる	ー	気にならない
嫌い	ー	好き
まれにしか耳にしない	ー	よく耳にする

Table 2 Evaluation words for perception

印象層の評価項目	
1 澄んだ	14 落ち着いた
2 美しい	15 かん高い
3 汚い	16 はっきりした
4 不快な	17 鈍い
5 快い	18 鋭い
6 物足りない	19 高い
7 迫力のある	20 低い
8 力強い	21 自然な
9 弱々しい	22 安定した
10 小さい	23 どっしりした
11 騒々しい	24 激しい
12 金属性の	25 音の高さが適切な
13 深みのある	

Fig. 2 の青色及び赤色で表したノードは，感性の階層性モデルの観点から，快音性の価値を表している．これらのノードは一般音に対する感情表現の評価語対[7]の多くと対応が認められた．本研究では，この対応の認められた 9 評価語対を価値の評価項目として選定した (Table 1) ．また，緑色のノードはモータ駆動音の音質・音色に関する要因である．この要因に着目すると，良い面については「鈍い音」「低い音」「不快でない音」「適切な音の高さ」「親近感のある音」「はっきりした音」「小さな音」「ホワイトノイズ」「複雑な音」がその形成に関係することが分かる．一方で，良くない面については「鋭い音」「高い音」「不

快な音」「耳障りな音」「変動音」といったように良い面と異なる要素がその形成に関わることが分かる．本研究では，これらの両面を包括する 25 評価項目を選定した (Table 2) ．

3　研究 2：快音性予測モデルの構築

3.1 目的

研究 2 では，価値・印象・物理の 3 層からなる感性の階層構造モデルに基づき，モータ駆動音の快音性を表す価値構造モデルを構築する．まず研究 1 で選定された評価項目を用いた主観評価実験を実施する．次に，価値・印象・物理特性の各層を構成する特徴量を抽出する．最後に共分散構造分析により価値構造モデルを構築し，その妥当性も評価する．

3.2 主観評価実験

参加者　聴覚に異常がない健康な 21 歳から 24 歳までの大学生・大学院生 10 名（平均年齢 22.5 歳, 男性 7 名, 女性 3 名）が参加した．

実験刺激　研究 1 で用いた 24 種の実験刺激の提示音圧が 11 [sone] (65 [dBA]相当)及び 20 [sone] (75 [dBA]相当)となるように調整した 48 種類のモータ駆動音を刺激に用いた．

手順　研究 1 と同様の音源提示環境下で実験を実施した．参加者は，最初に実験室内に設置された椅子に着座した後に，実験者から研究目的の説明を受け，自由意志において書面による研究の同意を得た．同意を得た後に参加者はオージオメータによる聴力検査を行った．その後，評価する全刺激の聴感的特徴を把握するため各刺激を 2 秒間，1 秒の間隔を空けて聴取した．

参加者は，各刺激を価値，印象の順番で評価した。最初に，安静状態で刺激を 10 秒間聴取し，その直後に参加者はどのように感じたのかを Table 1 の評価項目に関して 5 段階の SD 法により回答した．次に，参加者は Table 2 の印象に関する評価項目にどの程度当てはまると感じたのかを 5 段階のリッカート尺度により回答した．なお，印象評価時に参加者は実験刺激の再聴取を任意に行えた．また実験刺激はランダマイズされ，各刺激は 1 回評価された．

3.3 特徴量抽出

印象層　印象層を構成する特徴量を抽出するため主観評価データに対して因子分析を行った．因子抽出法は最尤法，回転法は Promax 回転，因子数を並行分析で推定した．その結果として，モータ駆動音の印象を説明する FI1:美的因子，FI2:迫力因子，FI3:金属性因子の 3 因子が抽出された．また，モデル化においては実験刺激の音響特徴量との対応を検討するため，全参加者の因子得点の平均値を代表値として用いた．

価値層　価値層の 9 評価項目を印象層の 3 因子との関係から分類した．全参加者の価値層の評価項目の平均値を目的変数，印象層の代表値を説明変数とした重回帰分析を実施し価値の評価項目を，うるさくない（うるさくない, 快, 気にならない), 落ち着く（落ち着く，安心する，気が和む)，好き（好き，気が楽になる)，の 3 種類に分類した．これはモータ駆動音の快音性が 3 つの要素から捉えられていることを示唆するものである．また，各要素は「うるさくない」「落ち着く」「好き」の評価項目の平均値により代表されるものとした．

物理層　代表的な音質評価である Loudness, Sharpness , Roughness , Fluctuation Strength, Tonality をモデル構築に用いた[8]．また，中心周波数，尖度，周波数の広がり，エントロピー，Major コードの割合などの特徴量も用いた．これらの特徴量は，Matlab 上で動作する Audio Toolbox、MIR Toolbox を用いて計算した．また Tonality として国際規格 IEC 61400-11:2012 の純音性可聴度 (TA: Tonal Audibility)[1]を採用した．なおモデル構築時には各刺激で抽出された全 TA 値の平均値を代表値として用いた．また，Major コードの割合は，MIR Toolbox の周波数特性から和音の出現割合を算出する関数を用いて計算した．

3.4 モデル構築と評価

手続き　感性の階層構造モデルでは，最上位を価値, 最下位を物理層とした階層性を持つ．本研究では，上位の層の要素は下位の層の要素の影響を受けることを仮定し，上位の層の各要素を目的変数，下位の層の各要素を説明変数とした重回帰分析を上位層と中間層の全要素について実施した．重回帰分析は，AIC (Akaike’s Information Criteria) を基準とした変数選択法（ステップワイズ法）を採用した．さらに共分散構造の観点からもモデル構造が妥当であるかを補足的に検討した．具体的には，重回帰分析により得られた階層構造モデ

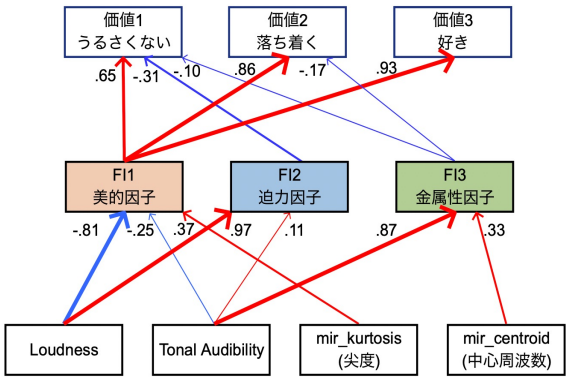

Fig. 2 Hierarchical structural model for the pleasantness of motor drive sound

ルに対して共分散構造分析を適用し適合度の観点から妥当性を評価した．なお，重回帰分析には統計分析ソフトである JMP 14 Pro を，共分散構造分析には統計分析ソフトである R で動作する lavaan パッケージを用いた．

結果　Fig. 2 は本研究で構築された価値構造モデルである．共分散構造分析時の適合度は，GFI=0.998，AGFI=0.995 と良好な値を示しておりモデルが観測データに適合していると評価された．次に，音響特徴量から価値・印象層の各要素の予測精度を決定係数の観点から評価した．印象層の FI1:美的因子、FI2:迫力因子、FI3:金属性因子は音響要素から決定係数で 0.86，0.95，0.83 の良い精度で予測できることが分かった．価値層の各要素についても検討すると，「うるさくない」は 0.88、「落ち着く」は 0.81、「好き」は 0.77 と、価値についても概ね良い精度で音響特徴量から快音性を予測できることが分かった．

さらに構築モデルの有効性を予測精度の観点から検証した．検証では，Aures により提案された音の感覚的な快さのモデル [9]と比較した．なお Aures のモデルパラメータは本研究のデータに適合するものを採用した．また，構築モデルについては「うるさくない」の予測値を評価した．各モデルの予測値と観測値との関係を Fig.3 に示した．Fig.3 から Aures の快さのモデルの決定係数が 0.78 であるのに対して，構築したモデルは 0.88 とより高い精度で快音性を予測できることが分かった．また，Aures のモデルと構築モデルは式の構造が異なっており，この結果は本研究で採用したモデル構造がモータ駆動音の快音性の説明上より妥当であることを示唆している．

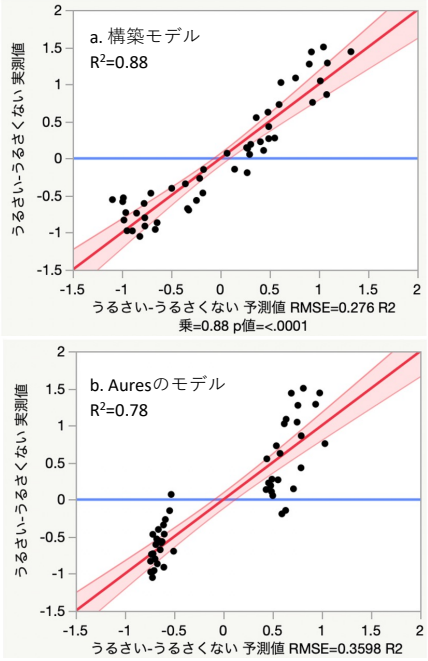

Fig. 3 Evaluation results

4　まとめ

本研究では，モータ駆動音の快音性の特性を感性工学的観点から理解するため，感性の階層構造モデルに基づいた快音性の価値構造モデルを構築した．構築したモデルは，快音性を形成する心理的・音響的要素の関係性を包括的に説明し，また高い精度で音響特徴量から快音性を形成する心理反応を予測することができることを確認した．さらに従来の快さのモデルとの比較を通して快音性予測における構築したモデル構造の有効性も示した．

参考文献

[1] 坂本，日本音響学会誌，77（12），798-805，2021.
[2] 星野，戸井，ヒューマンインターフェース学会論文誌, 19 (3), 231-242, 2017.
[3] 片平等，日本感性工学会論文誌, 17(4), 453-463, 2018.
[4] 竹澤等，ヒューマンインタフェース学会論文誌, 23(3), 337-348, 2021.
[5] 濱田等，日本感性工学会論文誌, 22(2), 207-216, 2023.
[6] 讃井，品質, 33(3), 13-20, 2003.
[7] 安倍等，日本音響学会誌, 56(12), 793-804, 2000.
[8] 高田，日本音響学会誌, 75(10), 582-589, 2019.
[9] W. Aures et al., Acta Acustica united with Acustica, 59(2), 130-141, 1985.