

音のデザインと感性

小 西 聖 英

1 はじめに

近年、カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みが、自動車業界および建設機械業界でも活発化しており、電動化技術の開発が加速度的に進展している。この潮流を受け、建設機械分野においては、油圧を使わない完全電動化された機種に加え、既存のエンジンを電動モータに置き換えたハイブリッド型の油圧建設機械の導入が進んでいる。例えば、近年では、バッテリー式の油圧ショベルが開発されており、ディーゼルエンジンを完全に排除し、電動モータによる駆動を可能にしている。これにより、従来機と同等の作業性能を維持しつつ、排出ガスゼロおよび大幅な騒音低減が実現されている。しかしながら、こうした電動建設機械においては、主音源であったエンジンが排除されることにより、従来はエンジン音によりマスキングされていた機械部品の作動音が相対的に顕著になると考えられる。その結果、当社の主要製品である油圧ポンプの作動音が顕在化されることで、顧客からの騒音に対する要求水準が高まり、場合によってはクレームの要因となることが懸念される。このような背景から、さらなる低騒音化の必要性が高まっている。

カヤバでは、これまでも様々な騒音対策技術に取り組んできたが、油圧ポンプにおいては、吸い込み工程および吐き出し工程におけるポンプ室内の急激な圧力変動や、それに起因する管路内の圧力脈動により、音の発生は不可避である。そのため、低騒音化には限界があり、音を完全に抑制することは困難である。そこで本研究では、騒音を単に低減するのではなく、聴感上快適な音へと変換する「快音設計^{注1)}」に着目した。

本稿では、「快音設計」に基づく音質向上アプローチを製品開発に取り入れることを目的とし、音と人の感性の関係性について調査を行った。具体的には、油圧ポンプから発生する音に対して人が抱く印象を感性評価により明らかにし、印象と音響特性との関

連性を分析した。

本稿では、これらの取り組みの概要と得られた知見について紹介する。

2 快音設計の概要と応用事例

現代社会において、人々は、多種多様な製品に囲まれて生活しており、技術の進歩に伴い、それらの製品は年々静音化が進んでいる。しかしながら、単に音圧レベルを低減するだけでは、ユーザにとって快適な音環境が実現されるとは限らない。実際、音量が小さくても「耳障り」「不快」と感じられる音は存在し、たとえ技術的に十分な品質を満たしていたとしても、ユーザの印象を損ね、製品採用の見送りやクレームの要因となる可能性がある。

このような背景のもと、近年注目されているのが「快音設計」と呼ばれる新たな設計思想である。快音設計とは、従来の騒音対策のように単に音圧レベルを低減するのではなく、製品音を「聞こえても不快に感じにくい音」あるいは「人が心地よいと思える音」へと変換する、人の感性に配慮した設計手法である。このアプローチにより、騒音というネガティブな要素を快音というポジティブな要素へと転換し、製品に新たな付加価値を創出することが可能となる。

快音設計に関する取り組みは、すでに多くの企業において実践されている。例えば自動車業界では、電気自動車の普及に伴い、エンジン音が消失したことで静粛性が向上した。一方で、エンジン音は従来、車両の個性や性能を象徴する重要な要素であったことから、あえてエンジン音を模した「疑似サウンド^{注2)}」¹⁾²⁾の付加が行われている。この疑似サウンドは、単なる模倣ではなく、心理的快適性、機能性、安全性を兼ね備えた音のデザインが求められており、加速感やアクセル操作のフィードバックとしても機能している。

注1) 企業によって音色開発、サウンド開発など呼称が異なる場合がある

注2) 企業によって名称は異なる

さらに、サプライヤにおいても、空調やマフラなどの部品に対して、感性に配慮した音響設計の研究が進められている³⁾⁴⁾。これらの取組みは、快音設計の有効性を示す事例として注目されており、関連する研究成果や技術情報も徐々に公開されつつある。加えて、快音設計は製品の音響特性を通じて企業独自のブランドイメージを形成する手段としても期待されており、音のデザインによる差別化が競争力の一因となり得る。

3 人の聴覚特性と感性評価

人間の聴覚は、単に音の有無を検知するだけでなく、音の高さ（周波数）、大きさ（音圧）、方向性、時間変化など、複数の情報を同時に処理する高度な感覚器官である。一般的に、可聴域は20Hzから20kHzの範囲とされており、個人差や加齢による変化はあるものの、この範囲内でも周波数によって聴感上の感度が異なるという特性がある。

さらに、聴覚は物理的な音特性だけでなく、心理的・感覚的な要因にも大きく影響される。すなわち、同一の音圧レベルであっても、音色、持続時間、発音のタイミングなどの違いにより、「うるさい」「心地よい」といった主観的印象が異なる場合がある。

このような感性的評価を定量的に捉える手法として、心理音響学に基づく「音質評価指標」が用いられる。音質評価指標は、音に対する人間の心理的反応を数値化したものであり製品音の設計や評価において重要な役割を果たす。表1に音質評価指標の代表例を示す。

表1 音質評価指標の代表例

項目	詳細
ラウドネス (Loudness)	人間が感じる音の大きさを表す指標であり、単なる物理的な音圧レベルとは異なり、周波数特性を考慮して知覚的な大きさを評価する。
シャープネス (Sharpness)	音の鋭さや刺激の強さを表す指標で、高周波成分が多い音ほどシャープネスが高くなる。
ラフネス (Roughness)	音のざらつきや不快感を表す指標で、振幅変調などによる時間的変動が大きい音に対して高くなる。

加えて、音の知覚に関する人間の聴覚特性を考慮した音響信号処理手法も、快音設計において有効なアプローチとして併用されることがある。表2に代

表的な手法を示す。

表2 音響解析に用いる分析手法

項目	詳細
メル周波数ケプストラム係数 (MFCC)	人間の聴覚特性に基づいた周波数スケールで音声の特徴を抽出する手法。音声認識などで広く使用。
オクターブバンド分析	音の周波数成分をオクターブ単位で分割し、音の成分を分析手法騒音評価や音響設計に有効。
フォルマント分析	音声のスペクトルから母音の特徴を示す共振周波数を抽出する手法。音声処理や音響分析の分野で広く使用。

これらの音質評価指標および音響信号処理手法を活用することで、単なる物理的な音圧レベルの測定にとどまらず、人の感性に寄り添った音の評価が可能となる。しかしながら、人の感性には個人差が存在し、主観的評価にはばらつきが生じるため、これらの指標を用いたとしても、感性的な印象を完全に定量化することは依然として困難である。そこで本研究では、音質評価指標および音響信号処理の結果を多面的に活用し、感性評価予測の可能性について検討を行った。具体的には、複数の指標を総合的に分析することで、感性との関連性を高精度に予測するアプローチを試みた。このような多面的な指標の活用においては、それぞれの指標間に存在する相関関係を適切に捉える必要がある。そこで本研究では、これらの関係性を捉え、多次元的に解析する手法として、機械学習を導入した。機械学習の活用により、非線形かつ高次元なデータ構造を扱うことが可能となり、感性評価の予測精度向上が期待される。

4 製品音の収録

ピストンポンプの騒音検査は、図1に示すように、当社の無響音室にて実施した。試験では、対象ポンプをイケールに固定し、騒音測定および録音を行った。従来の録音は、図2に示すように、単一のマイクをポンプと同じ高さに設置し、ポンプから1m離れた位置で実施している。しかしながら、人の聴覚特性は左右の耳に届く音の時間差や音圧差、周波数特性の違いをもとに、音源の方向や距離、奥行きなどを知覚する能力を有している。そのため、モノラル録音では実際の音環境における臨場感を再現することが困難である。そこで本研究では、感性評価においてより自然な聴取環境を再現するため、バイ

ノーラル録音を採用した。バイノーラル録音は、人間の頭部形状および耳介構造を模倣したダミーヘッドを用いる録音方法であり、左右の耳位置に内蔵されたマイクにより、音の伝達経路を忠実に再現することが可能である（図3）。

録音対象には、カヤバ製ピストンポンプを採用し、試験を実施した。実際の立ち合い評価の状況を模擬するため、ポンプ前方に人が立った状態を想定し、ダミーヘッドをポンプ前方の正面かつ人の耳の高さに相当する位置（平均的な成人身長）に設置し、録音を行った。ただし、ポンプの左右に吸い込み側と吐出側が配置されるため、空間定位（音の方向や距離感）に関する効果は限定的であると考えられるが、実聴感の再現性を重視し、この構成を選択した。

機械学習によるモデル構築には、データの量および多様性が必要となるが、実機的设计仕様を変更して異なる音響特性を持つサンプルを収集するには限界がある。そこで、音響編集ソフトを用いて、ポンプの次数成分や周波数帯を操作することで、音色に意図的な変化を加えた派生サンプル音を作成した。

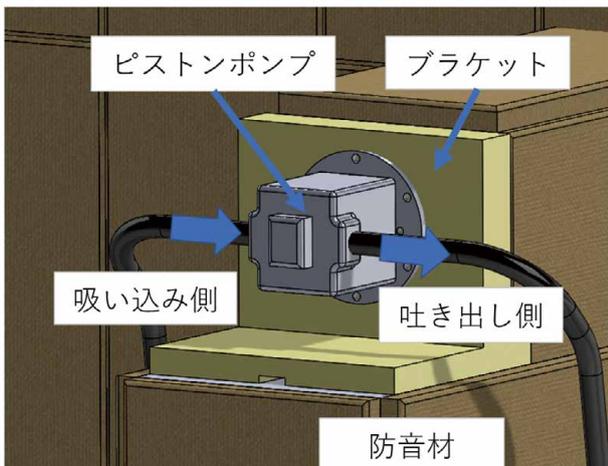


図1 試験装置

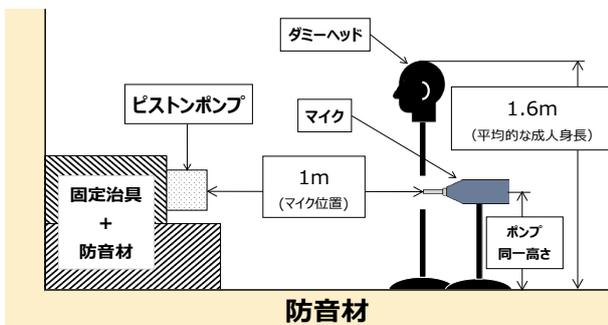


図2 録音機器の設置位置（側面図）

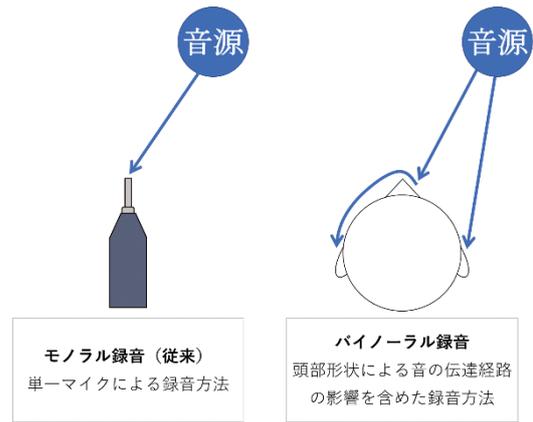


図3 モノラル録音とバイノーラル録音の違い

5 感性評価手法

本研究における感性評価には、SD法（Semantic Differential Method）を用いた。SD法は、対となる形容詞（例えば「快い－不快」「鋭い－鈍い」など）を用いた多段評価形式のアンケート手法であり、被験者が対象に対して抱く印象や感覚を定量的に測定することが可能である。この手法を適用するにあたっては、評価対象に適した評価項目の設定が重要となる。本研究では、建設機械の感性評価の先行研究⁵⁾を参考にし、図4に示す10項目について7段階の尺度による評価を実施した。

音の感性評価においては、「感性の変動性」および「主観的評価の一貫性の欠如」が重要な課題となる⁶⁾。すなわち、同一の音に対しても、同一被験者による評価結果にばらつきが生じる可能性があり、結果の再現性が損なわれる危険性がある。この課題に対応するため、感性評価の実施に際して以下の2つの対策を講じた。

5.1 評価基準の明確化

被験者には、実稼働中のピストンポンプの稼働音を基準音として視聴させた後に、派生サンプル音を聴取させることで、評価基準の統一を図った。

5.2 再評価による確認

被験者が一度行った評価結果を参考に再評価を実施し、評価内容に矛盾や誤解がないかを確認することで、評価の正確性と信頼性の向上を図った。1回目の評価結果を提示することでバイアスが生じる可能性はあるが、本研究では評価者自身の自己整合性の確認を目的としており、誤認識や一貫性の欠如を防ぐための手段として導入している。

図5に、これらの対策を踏まえた感性評価フローを示す。なお、過去のSD法を用いた音の感性評価の経験から、同一被験者による同一サンプル音の複数回評価においては、評価値に±1点程度のばらつき

きが生じることが経験的に確認されている。したがって、本研究における機械学習による感性評価の予測においても、このばらつきを考慮する必要がある。以上を踏まえ、予測精度の評価においては±1点の誤差範囲を許容範囲と定義し、この範囲内での予測が可能であれば、ロバストな予測が実現されていると判断した。



図4 SD法による評価項目

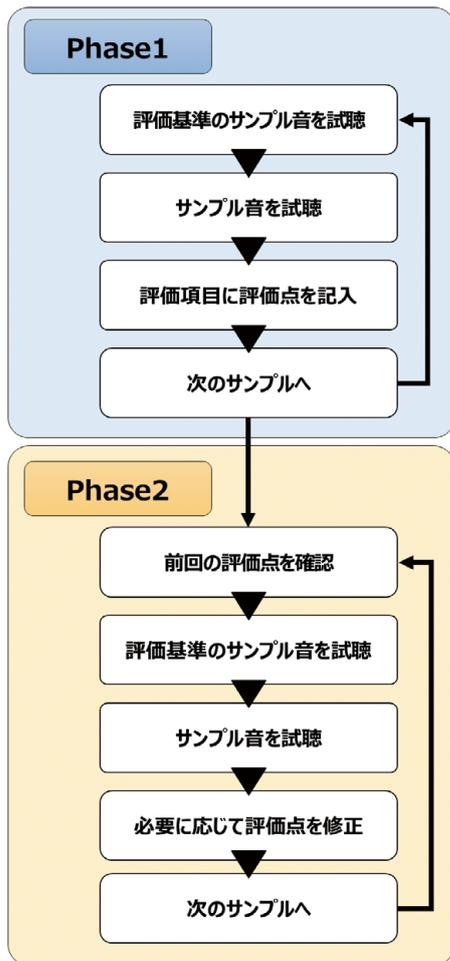


図5 感性評価フロー

6 機械学習による予測モデル構築

本研究では、感性評価の予測モデルを構築するために、音響分析に基づく複数の特徴量を用いた機械学習を実施した。使用した音響指標は以下のとおりである。

- ①音質評価指標
(ラウドネス, シャープネス, ラフネス)
- ②メル周波数ケプストラム係数 (MFCC)
- ③オクターブバンド分析
- ④フォルマント分析

これらの分析により得られた特徴量と、SD法によって得られた感性評価結果を教師データとして、2種類の機械学習アルゴリズムを用いて予測モデルを構築した。採用したアルゴリズムは、ランダムフォレスト (分類) およびベイズ推定である。

図6に各アルゴリズムの概要図を示す。ランダムフォレストは、学習データから複数の決定木を構築し、それぞれの予測結果を多数決により統合する学習手法である。過去、社内で実施した感性評価においても良好な予測精度を示した実績があり、本研究においてもその有効性を検証する目的で採用した。

一方、ベイズ推定は、事前に設定した確率分布に基づき、学習データによってその分布を更新することで予測を行う手法である。本手法は確率論に基づいており、データに欠損やばらつきが存在する場合でも柔軟に対応可能であるという利点を有している。

これら2つの異なるアプローチを用いることで、感性評価に内在する主観的ばらつきを含むデータに対しても高精度かつロバストな予測が可能なモデルの構築を目指した。

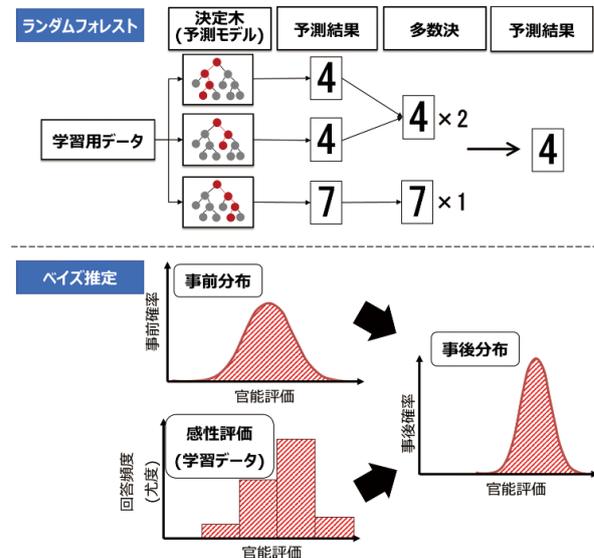


図6 アルゴリズムの概要

7 モデルによる予測結果と考察

図7に、ランダムフォレストおよびベイズ推定の2種類の機械学習アルゴリズムを用いて感性評価を予測した結果を示す。横軸は被験者による実際の感性評価値、縦軸は機械学習によって予測された評価値を表している。図中の赤線は回帰直線を示しており、いずれのアルゴリズムにおいても相関係数は0.9以上と高く、強い相関が示唆された。ただし、アルゴリズムによって予測誤差の傾向に差異が見られた。図7(a)に示すランダムフォレストの予測結果では、一部において誤判定が生じる可能性が示唆された。これは、ランダムフォレストが複数の決定木による多数決で予測を行う手法である。一方、感性評価のようにばらつきの大きいデータに対しては、各決定木の予測結果が分散し、結果として誤差が拡大したと考えられる。また、分類アルゴリズムとして用いたため、予測値は離散的な整数値（例：1, 2, 3など）に限定され、連続的な評価のばらつきを十分に表現できていない可能性がある。

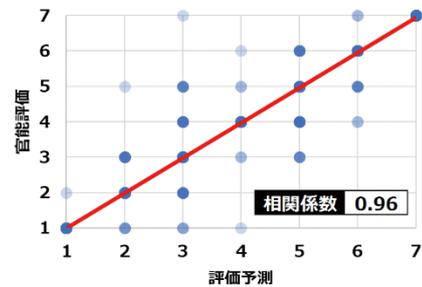
図7(b)に示すベイズ推定による予測結果では、ランダムフォレストのような大きな誤差は見られず、予測値は実際の評価値に近い位置に分布している。これは、ベイズ推定が事前分布と観測データを統合することで、被験者の評価傾向をモデルに反映できるためと考えられる。さらに、ベイズ推定は予測値に対する不確実性も同時に扱うことが可能であり、評価のばらつきが大きい感性評価に対して柔軟に対応できる点が有効に機能したと考えられる。

図8には、各アルゴリズムにおける予測誤差（評価値-予測値）の分布を示す。ランダムフォレストでは、誤差の発生頻度は低いものの、最大誤差が5点に達するケースが確認され、予測のばらつきが大きいことが明らかとなった。一方、ベイズ推定では誤差の範囲が±2点以内に収まっており、より安定した予測が可能であることが示された。

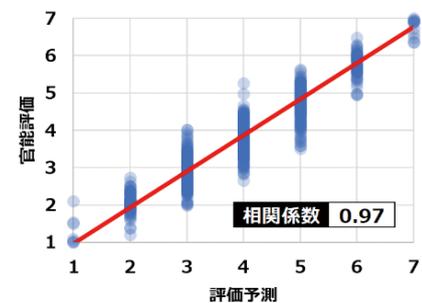
表3には、各アルゴリズムの正解率を示す。この正解率は、第5章で述べた評価誤差の許容範囲（±1点以内）に基づいて算出したものと完全一致したときの値である。表3より、±1誤差の正解率を見るとランダムフォレストが84%であるのに対し、ベイズ推定では99%と高い予測精度を示している。また、誤差の小ささから誤判定のリスクを低減しているため、感性評価の予測における手法の有効性が示唆された。

以上の結果から、実機のピストンポンプ音および音響編集によって生成された派生サンプル音を用いた範囲ではあるが、感性評価の予測が可能であるこ

とが示唆された。ただし、今回使用した派生サンプル音は、音響編集によって生成されたものであり、実際の製品において同様の音響特性が再現可能かどうかは未検証である。したがって、今後は実機における音響の再現性や、実装時の設計的調整点を含めた検証が必要である。



(a) ランダムフォレスト (分類)



(b) ベイズ推定

図7 機械学習による感性予測結果

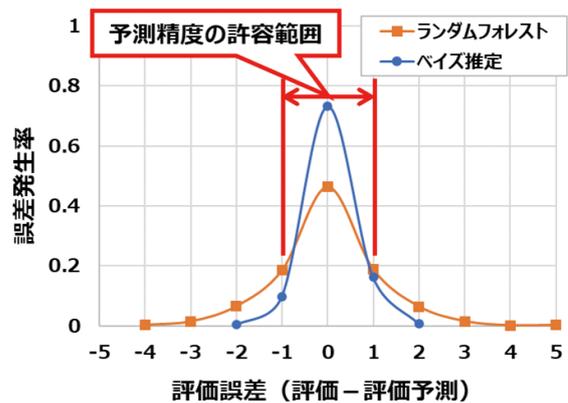


図8 評価誤差

表3 アルゴリズムによる正解率

アルゴリズム	正解率 (±1 誤差)	正解率 (完全一致)
ランダムフォレスト	84%	46%
ベイズ推定	99%	74%

8 今後の課題と展望

本研究では、音響分析指標と機械学習を組み合わせることで、人の感性評価を予測する可能性が示唆された。特に、ベイズ推定を用いた予測モデルにおいては高い精度と安定性が確認され、感性評価の定量的予測に対する有効性が示された。しかしながら、依然としていくつかの課題が残されている。第一に、各音響指標が感性評価に与える寄与度や影響の詳細なメカニズムについては十分に解明されておらず、今後は特徴量の選定および重要度分析を通じた因果関係の明確化が求められる。第二に、音響編集ソフトを用いて「心地よい音」を再現することは比較的容易である一方で、実際の製品においてその音響特性を実装するために必要な設計上の変更点や技術的な要点については、現時点では明確な指針が得られていない。すなわち、感性に基づく音響設計と製品設計との整合性を確保するための技術的基盤については、十分な構築が進んでいない。

したがって、今後の展望としては、以下の2点が重要な研究課題となる。

8.1 音響指標と感性評価の関係性の定量的解明

特徴量の寄与度分析や説明可能なAI（XAI：説明可能な人工知能）技術の導入により、感性評価に寄与する音響要素の特定とその影響度の可視化を進める。

8.2 実機への音響特性の実装技術の確立

快音となる理想的な音を、実際の製品設計に反映させるため、構造設計・材料選定・制御技術との関

係調査を進め、感性に基づく音響設計の実用化を目指す。

これらの課題に取り組むことで、感性工学と製品開発の融合が促進され、よりユーザ志向の製品設計が実現されることが期待される。

9 おわりに

最後に本活動を推進するにあたり多大なるご支援、ご協力をいただいた関係部署の方々にこの場をお借りして厚くお礼申し上げます。

本活動の推進にあたり、関係各部署の皆様のご尽力により、円滑に進めることができました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 久保典央, “HV/EV車両用疑似エンジン音をサウンドデザインする信号処理”, 製品音の快音技術S&T出版 (2012)
- 2) 山内勝也, “次世代自動車の静音性による新しい音デザイン課題の展望”, 日本音響学会誌 (2017)
- 3) 株式会社 三五 <https://sango.jp/>
- 4) 高尾秀男, “乗用車空調音におけるSD法による音質評価” 2025年度春季自動車技術会 学術講演会
- 5) 川口正隆ほか, “建設機械の車外騒音の音質分析評価に関する研究”, 日本機械学会論文 (1992)
- 6) 難波・桑野, “音の評価のための心理学的測定法”, コロナ社 (1998)

著者



小西 聖英

2012年入社. 技術本部 基盤技術研究所 要素技術研究室. 新技術の調査ならびに振動騒音関連の研究に従事