

# 生体計測を用いた快音評価技術の開発

## Development of Evaluation Technology on Pleasant Sound Using Biometrics

麻植 雄樹\*  
OE Yuki

### 抄 録

本研究では、生体情報を用いた製品の快音評価法の確立とポータブル式評価システムの開発を行った。定常音については、心電図から得られる LF/HF（低周波・高周波エネルギー）による評価を行った。また、非定常音については、視覚追従課題による作業成績の評価が可能なシステムを構築し、評価を行った。ものづくり企業の開発現場での適用を見据え、提案した評価法を組み込んだ小型ポータブル式の評価システムを開発した。

### 1 はじめに

最近、消費者のニーズは多様化しており、基本性能のみを満足する低価格追求の製品と基本性能に加えて、ユーザーの満足感を高める質感の高い製品に二極化している。低価格追求の製品は、製品が備えるべき最低限必要な品質である“当たり前品質”のみを満足しているのに対し、質感の高い製品は、当たり前品質に加えて、付加価値である“魅力品質”を付与している<sup>1)</sup>。製品の低コスト化や量産化が進行する中で、ものづくり企業は、使いやすさ等の基本的性能に加えてユーザーの感性に訴える付加価値の高い製品の市場投入を行い、他社製品と差別化を図っていくことが求められている。

人間の五感の中で聴覚に着目すると、製品音を人間が快適に感じる音（以下、快音）に変えることで、ユーザーの満足感を高めることができる。製品の快音評価は、一般的に主観評価で行われることが多いが、被験者の気分や疲労状態などの特定が難しく、解析のばらつきが大きくなることが想定され、企業単独では実施し難い現状である。一方、被験者が快・不快を感じる際、無意識に現れる脳波、心拍変動、動作等の生体情報を捉えることで、客観的な評価を行うことが可能であると言われている<sup>1) 2)</sup>。

本研究では、製品音の快音について、生体計測から得られる生体情報に基づく客観的な音質評価法と評価システムの開発を行った。

### 2 方法と結果

#### 2・1 方法

製品音は、ほぼ一定の音圧で時間的に連続な定常音と音圧が時間的に大幅に変動する非定常音に分類される。一例として、定常音は、モータやエンジンの動作音、非定常音においては、ドアの操作音が挙げられる。時間的に連続的な刺激の付与に対しては、快・不快の客観的指標として脳波や心拍変動の指標の有効性が報告されている<sup>2) 3)</sup>。本研究では、定常音の評価方法として、心拍変動（Heart Rate : HR）に着目した。心拍変動は、胸部に電極を貼付し計測される心電図（Electrocardiogram : ECG）から算出される。心電図は、脳波センサーのように装着に時間を要せず、装置が小型であるというメリットがある。心電図から算出される心拍変動は、交感神経と副交感神経系が快・不快の感情に寄与しており、安静状態やリラックス状態においては、副交感神経活動が活発になる一方で、緊張状態やストレス状態においては、交感神経活動が活発になると言われている<sup>3)</sup>。そこで、定常音の暴露時の心拍変動を計測し、交感神経系と副交感神経系の活動の寄与度のバランスを推定し、製品音の聴取時の快・不快の感情の評価を行った。

一方で、脳波や心拍変動による評価は定常的な刺激を付与して有用性が示唆されており、非定常音などの一瞬の刺激に対する生体反応は起こり難い<sup>2) 4)</sup>。そこで、心理物理学的手法により、タスク遂行中に

\* 電子・情報技術担当 麻植 雄樹

一瞬の刺激を行った際に作業成績への影響について評価した。そして、これらの評価法をものづくり企業の製品開発現場で手軽に適用できるように、評価システムのポータブル化について検討した。

## 2・2 定常音の評価と結果

まず、定常音について快・不快音の暴露時の心拍変動について評価を行った。具体的には、被験者にストレス課題を付与した後に、快音・不快音をそれぞれ暴露し、音暴露前後における心拍変動と主観評価結果の変化についての関係性について調査した。図1に実験プロトコル、図2に評価実験の様子を示した。被験者は、着座状態で4分間の閉眼で安静状態を取った後に、4分間のストレス課題を行った。ストレス課題は、先行研究<sup>4)</sup>で用いられている暗算課題とした。暗算課題は、着座状態でディスプレイに自動的に表示されており、1分間に20項目の2桁の暗算を行うものである。被験者には、暗算結果を机上の紙面に記入していくように指示した。ストレス課題を付与した後に、ヘッドフォン（SONY製MDR-900ST）から4分間の快音、不快音の暴露をそれぞれ行った際の心電図を計測した。心電図は、ワイヤレス心電センサ（追坂電子機器製OE-WS2523C）を用い、誘導モニターは第II誘導とし、計測を行った。心電センサーのサンプリング周波数は200Hzと設定した。表1に暴露音の音響特性を示した。暴露音については、モータ音を模擬した基本周波数523Hzの複合音である。快音は、基本周波数523Hz（音楽のC4）とし、ピーク音階の周波数の組み合わせにおいて、協和度が高い音（協和音）である。不快音は、ピーク音階の周波数の組み合わせにおいて不協和度が高い音（不協和音）である。なお、各暴露音の音圧レベルは58dB、温度は24~26℃、暗騒音レベルは43dB以下、被験者は20代前半から30代前半の健常な男性6名とした。また、主観評価は、音暴露前と暴露後にRusselの感情円環図（図3）による感情用語（興奮した、うれしい、明るい、リラックスした、眠い、退屈な、悲しい、不愉快な、怒った、警戒した）の10語とし、評価尺度はVAS（Variable Analog Scale :VAS）とした。図4にVASによる評価アンケートの一例を示した。これにより、アナログ的に感情の心理計測が可能となる。

計測した心電図データは、心電図のR波を検出し、隣接するR波どうしの時間間隔であるRRI（R-R Interval）を検出した。図5に示したように、RRIから周波数解析を行い、低周波数（Low Frequency : LF）成分（0.94Hz~0.15Hz）と高周波数（High Frequency : HF）成分（0.15~0.40Hz）を算出した。LF成分は、0.1 Hz付近に出現し、血管の血圧のフィードバック調節に伴う交感・副交感神経系活動の変調を反映していると言われている。一方、HF成分は呼吸に同調した変調である呼吸性洞性不整脈（Respiratory Sinus Arrhythmia : RSA）を反映していると言われている<sup>4)</sup>。L/F成分とH/F成分の割合を求め、LF/HF（Low Frequency/High Frequency）を算出することで、交感・副交感神経系の活動のバランスを推定することが可能となる。LF/HFが大きいほど、交感神経の活動が活発であり、LF/HFが小さいほど、副交感神経が活発であることを示している。

図6に、音暴露中のLF/HFの時系列変化の一例を示した。縦軸のLF/HFは、音暴露前15秒前から音暴露開始までのLF/HFの平均値に対する変化率を示した。快音暴露時のLF/HFは、不快音暴露時の値よりも大きくなっていることがわかる。また、不快音条件では、立ち上がりの速度が大きくなり、立ち上がり時間が小さくなった。先行研究<sup>5)</sup>において、ストレス刺激により、急激に心臓血管反応性が急激に大きくなる結果に対応していると考えられる。さらに、図7に音暴露前に対する音暴露後のLF/HFの変化率と主観評価の変化率の関係を示した。図7から、「怒った」の感情は、LF/HFが最も相関があった（ $R=0.52$ ）。「怒った」以外の感情については、主観評価の変化率が小さく、音の暴露によってそれらの感情の変動が生じ難いことがわかった。以上から、定常音の評価において、「怒った」感情を推定するには、心電図から得られるLF/HFが有効であることが示された。

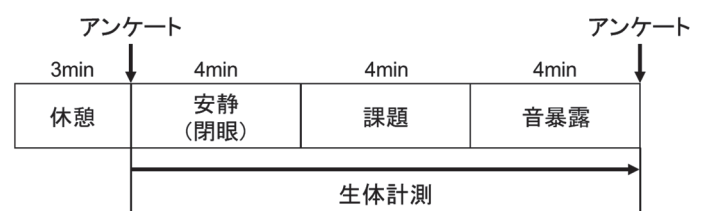


図1 実験プロトコル（定常音）

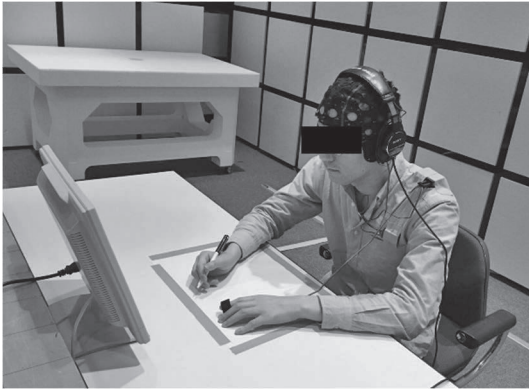


図2 評価実験

表1 暴露音の音響特性

音質	音階	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	音圧[dB]
快音	C-E-G	523	659	784	58
不快音	C-C#-D#	523	554	622	

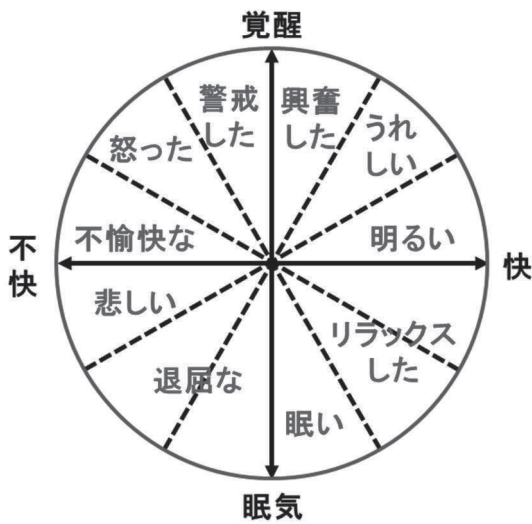


図3 Russelの感情円環図

今の気持ちを記入してください。

うれしい 全く感じない \_\_\_\_\_ 非常に感じる

明るい 全く感じない \_\_\_\_\_ 非常に感じる

興奮した 全く感じない \_\_\_\_\_ 非常に感じる

警戒した 全く感じない \_\_\_\_\_ 非常に感じる

図4 VAS 評価アンケートの一例

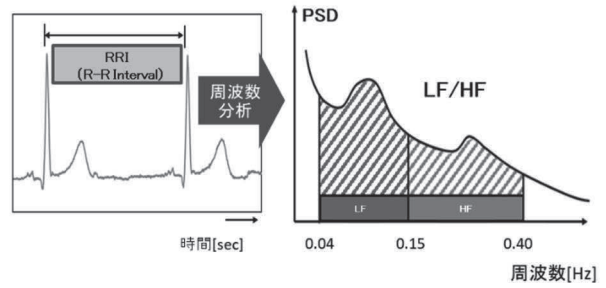


図5 LF/HFの評価<sup>3)</sup>

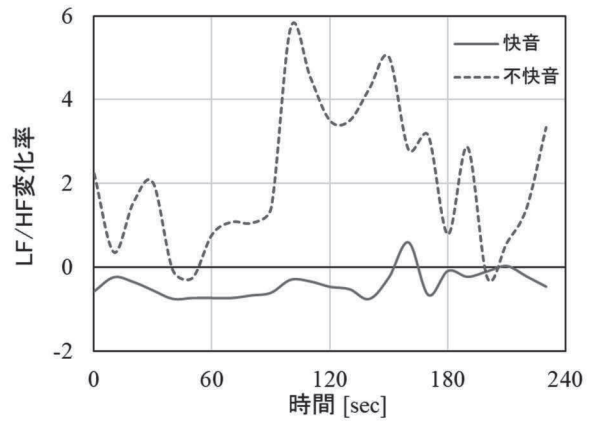


図6 LF/HFの時系列変化(音暴露中)

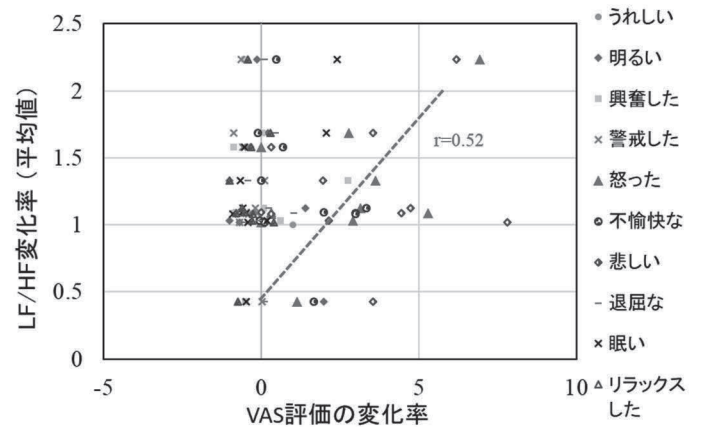


図7 LF/HFと主観評価の関係

### 2・3 非定常音の評価と結果

非定常音において、聴取時の作業成績の影響を調べ、評価を可能にするため、タスク成績の計測が可能である視覚追従課題の評価システムの構築を行った。視覚追従課題は、一般的に心理物理学の運動制御モデルで用いられる。運動する物体に対し、不完全な視覚情報の下でターゲットの運動を予測し、予測制御のもと追従運動することが要求されるので、フィードフォワード制御のメカニズムについて研究するのに適したタスクである<sup>7)</sup>。外部から人間の五感に与えられる刺激は運動制御に分配し、各々に分

配された処理資源の量に従って処理精度が決定されている。タスクに必要な感覚による負担は、メンタルワークロード (MWL) と呼ばれている<sup>8)</sup>。例えば、視覚的タスク遂行時に聴覚的刺激により、MWL が増加すると視覚的注意に配分できる処理資源量が低減する。つまり、人間にとって、不快に感じる聴覚的刺激が入力されると、MWL が増加することで、視覚タスクの作業成績に影響を及ぼすことが考えられる。図 8 に開発した視覚追従課題システムのインターフェースを示した。システムは、Dart (Google 社製) 及び Python により開発を行った。システムにより、被験者は、ヘッドフォンで音呈示を行った状態で、マウスでターゲット (目標範囲) を追従し、対象音を呈示した際のターゲットからの追従マーカー (マウス位置) のずれ量 (作業成績) の計測が可能である。マーカーはランダムな運動 (ブラウン運動) を行うように設定し、計測時間、マーカー速度、マーカーの大きさは実験に応じて自由に設定可能となった。サンプリング周波数は 50Hz と設定している。対象音を呈示した際のタスク成績の変化だけでなく、生理的变化についても同時に評価を行う必要があるため、心電センサーとの同期計測も可能になった。

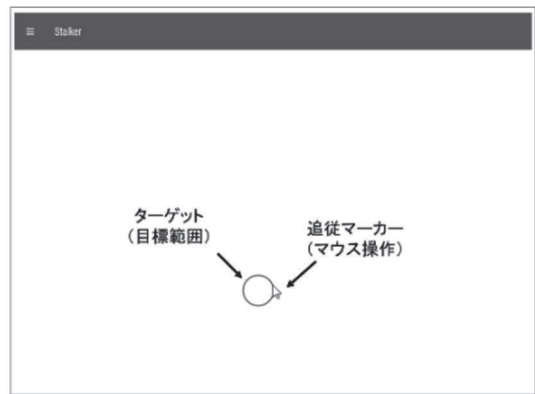


図 8 視覚追従課題

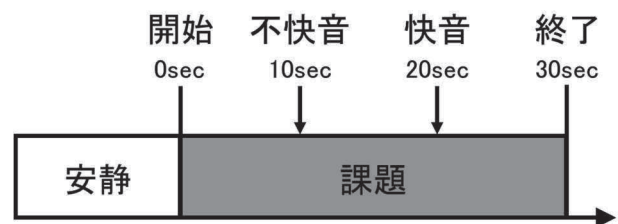


図 9 実験プロトコル (非正常音)

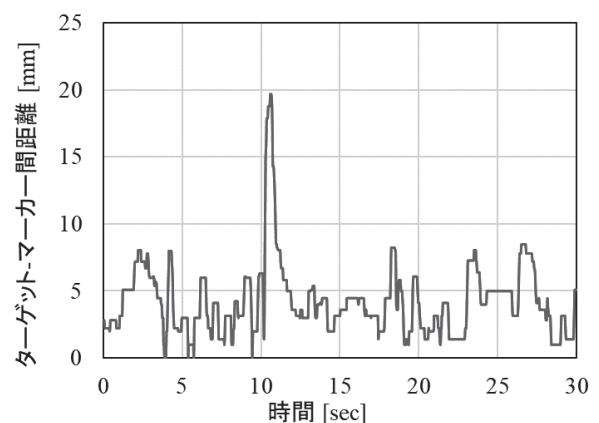


図 10 計測結果の一例

開発を行った計測システムを用いて、図 9 の実験プロトコルに基づき、計測を行った。被験者は、安静状態を取った後に、タスクとして視覚追従課題を行った。被験者には、タスク開始後 10 秒後に不快音、20 秒後に快音を呈示した。なお、実験で用いた快音は正常音の評価で用いたモータ模擬を模擬した複合音、不快音は飛蚊音<sup>9)</sup>とした。本実験で用いるディスプレイ (イーヤマ製 15JN1) のサイズは 15 型、解像度は 1024×768 ピクセルとした。図 10 に計測結果の一例を示した。図 10 から、作業タスク開始 10 秒後の不快音呈示時において、ターゲットからのずれ量は 20mm 程度となっており、音刺激を呈示しない時に対して、大きくなっていることがわかった。一方、作業タスク開始 20 秒後の快音呈示時において、ターゲットからのずれ量は音刺激を呈示しない時と変化が認められなかった。以上から、視覚追従課題の遂行時において、非正常音の刺激による作業成績の計測が可能システムを構築し、評価が可能となった。

## 2・4 ポータブル式評価システムの開発

企業の現場での適用を見据え、開発した音質評価法を組み込んだ小型の計測評価システムの開発を行った。図 11 にシステムの構成図を示した。ディスプレイへの視覚追従課題の出力は Dart、心電センサー及び音の出力は Python の実行により、小型コンピュータから制御を行った。これらの全体の制御は、Python のライブラリの組み合わせにより行った。図 12 に開発したポータブル式評価システムを示した。計測制御は、小型コンピュータ (LattePanda 製 LattePanda) で行った。本研究で提案した評価法を小型コンピュータに組み込み、評価システムのポータブル化を実現した。

価や労働環境の改善などで幅広い分野で適用を行っていく予定である。

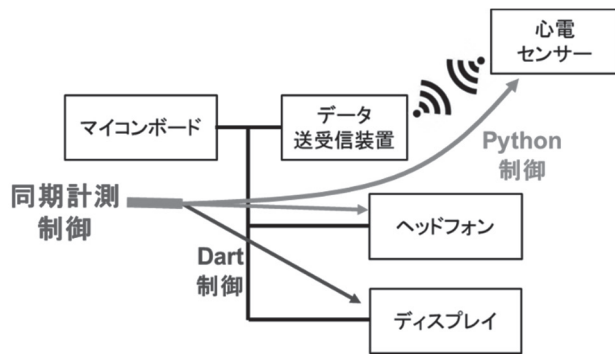


図 11 システム構成図

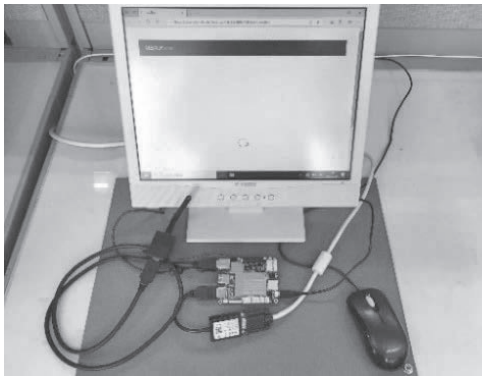


図 12 計測・評価システム

### 3 まとめ

製品を模擬した定常音について、心拍変動に基づく評価と主観評価の結果との比較を行い、これらの整合性について確認できた。また、非定常音の評価を可能とするため、視覚追従課題による計測評価システムの構築を行った。提案したこれらの評価法を小型コンピュータに組み込み、企業の開発現場での適用を可能にした。今後、開発した評価技術を用途に応じてアレンジし、ものづくり企業の開発品の評

### 参考文献

- 1) 柳瀬徹夫. “新商品開発における【高級感・上質・本物】感を付与・演出する技術”. 技術情報協会, 2012, p. 3-25.
- 2) 小川梢, 芝垣佑美, 萩原啓. “心拍動間隔の変動を用いた音刺激が人の心拍動間隔の変動に与える影響”. 人間工学, Vol.44, 2008, p. 334-340.
- 3) 中川千鶴. “特集③人間工学のための計測手法 第4部：生体電気現象その他の計測と解析(5)-自律神経系指標の計測と解析-”. 人間工学, Vol.52, 2016, p. 6-12.
- 4) 曾我知絵, 三宅晋司. “計算課題遂行における自律神経系の変化”. 人間工学, Vol.52, 2009, p. 294-302.
- 5) 長野祐一郎. “ストレス・リラックス状況における末梢皮膚温の変化”. バイオフィードバック研究, Vol.40, 2013, p. 21-23.
- 6) 林叔克, 田村友里恵, 佐瀬一弥, 菅原研, 沢田 康次. “ヒトの視覚運動系における位置誤差補正運動と予測運動の混在と分離”. 計測自動制御学会論文集, Vol.46, 2010, p. 391-400.
- 7) 森島圭祐, 水内淳, 林田吉正, 高嶺恭平, 山中仁寛, 大本浩司. “追従眼球運動時のメンタルワークロードと有効視野の関係”. 人間工学, Vol.49, 2013, p. 203-210.
- 8) 諸岡晴美, 廣村江利子, 長岡千紗, 諸岡英雄. “脳波解析を用いた感性の客観評価”. Journal of Textile Engineering, Vol.57, 2011, p. 61-68.