

心理音響メトリクスおよび不協和度に着目した 複数回転次数音の快音設計

Comfortable Sound Design of Multiple Rotational Order Sounds Focused on Psychoacoustic Metrics and Dissonance

精密工学専攻 53号 花井 奏太
Sota Hanai

1. はじめに

昨今、エンジンに代わる電動機械が普及し、低騒音化が進んでいる。その一方で、モータや油圧ポンプなどの回転次数に起因する純音成分が相対的に目立ち、不快な音環境の要因となっているとともに、複数回転次数系列を有することで、周波数の組み合わせにより音質が顕著に変化する。

本研究では、物理量では人間の聴感とは合致せず、音質評価による定量化が難しいため、心理音響メトリクスのトナリティ^[1]およびラウドネスに着目し、純音認知度を定量的に評価することにより、各メトリクスの純音認知への影響を把握し、純音成分が不快となる閾値を明らかにする。次に、回転次数同士の不協和度^[2]に着目し、適切に周波数比を設定することで不協和度を変化させ、快適感が向上する組み合わせを明らかにする。

なお、本研究は、「中央大学における人を対象とする研究倫理に関する規程」に準じ、実験参加者に十分なインフォームド・コンセントを得て実施している。

2. 単一純音における純音認知評価

本章では、単一純音を用いてトナリティとラウドネスの純音認知への影響を把握する。

2.1 定常純音における周波数とメトリクスが純音認知に与える影響

トナリティとラウドネスの純音認知度合いへの寄与を求め、周波数およびラウドネス毎に、純音が気になり始めるトナリティ許容閾値を求める。

2.1.1 評価音の条件および評価方法

評価音は全オクターブ域で、聴感上同じ大きさとなるピンクノイズと単一純音で、Table 1 に示す条件にて作成する。純音の周波数は臨界帯域の21中心周波数である。

評定尺度法により純音認知度合いについて7段階の絶対評価を行う。評価音は周波数特性補正を行ったヘッドホンでランダム提示し、実験は無響室で行い、被験者は正常な聴力を有する20代8名である。

2.1.2 臨界帯域に基づいた純音認知評価

目的変数を純音認知度合いの評価得点、説明変数を各条件のトナリティ、ラウドネスとして周波数ごとに重回帰分析を行った。また、重回帰式の標準偏回帰係数を正規化することにより求めた、トナリティとラウドネスの寄与率を Fig. 1 に示す。ラウドネスの寄与率が中心周波数 350 Hz-1000 Hz にかけて低下し、3000 Hz-4000 Hz で最低となる。それ以上の周波数で上昇する。同じトナリティでも聴感上聴こえにくい周波数帯域では、ラウドネス変化によって純音の聴こえ方が異なることがわかった。

2.1.3 ラウドネス毎のトナリティ許容閾値

各周波数の重回帰式から、純音認知度合いの評点が5(少し気になるが許容)をトナリティ許容閾値とした。トナリティ許容閾値の実験推定式を式(1)、プロットを Fig. 2 に示す。

Table 1 Evaluation sound

No.	Tonality of pure tone	Loudness of pink noise sone
1	Std.	10
2		20
3		30
4	Std.×2.5	10
5		20
6		30
7	Std.×4.0	10
8		20
9		30

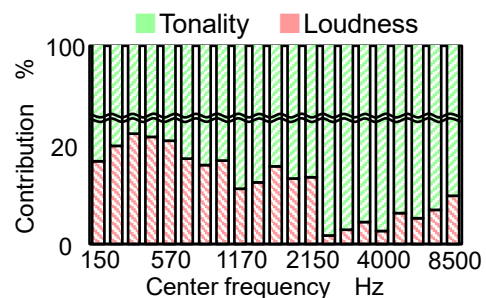


Fig. 1 Contribution rate of Tonality and Loudness to pure tone tolerance threshold

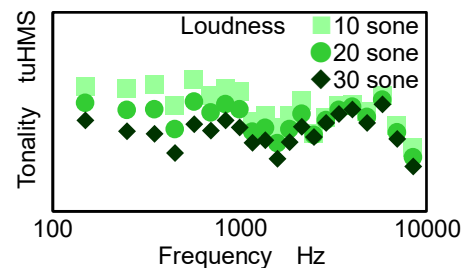


Fig. 2 Scatter plot of Tonality tolerance threshold

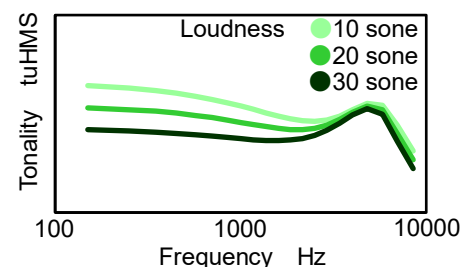


Fig. 3 Tonality tolerance threshold line by regression analysis

$$T = \frac{P - LL - c}{t} \quad \dots(1)$$

ただし、 T はトナリティ、 P は純音認知度合いの評点、 L はラウドネス偏回帰係数、 L はラウドネス、 t はトナリティ偏回帰係数、 c は定数とする。

トナリティ許容閾値に用いている重回帰分析の決定係数は、0.84以上となっており、トナリティとラウドネスの主効果のみで純音認知度合いが説明できていると言える。

また、式(1)より算出したトナリティ許容閾値は、周波数ごとに算出しているため、該当の周波数以外では適用できない。

そこで、トナリティと各周波数で回帰分析を行い、ラウドネスごとのトナリティ許容閾値式(2)およびFig. 3となる。

$$T = F_5 f^5 + F_4 f^4 + F_3 f^3 + F_2 f^2 + F_1 f + c \quad \dots(2)$$

T はトナリティ、 F_n は n 次回帰係数(回帰係数と任意のラウドネスの和)、 f は周波数、 c は定数とし、周波数は5次とし、ラウドネス変化は線形であったため1次とした。回帰分析の決定係数は0.75となった。

回帰分析の結果、Fig. 1においてラウドネスの寄与率が高い周波数では各ラウドネスのトナリティ許容閾値に変化がみられた。

2.2 トナリティ許容閾値の有効性検証

2.1節で求めた、周波数およびラウドネス毎のトナリティ許容閾値に基づき、回転次数音にブラウンノイズを付加することでトナリティを低下させて印象評価を行い、単一純音で求めたトナリティ許容閾値が複数純音の場合にも適用できるのか、その有効性を検証する。

2.2.1 評価音の条件および評価方法

評価音はブラウンノイズと回転次数音で構成し、Table 2に示すようにブラウンノイズのラウドネスを5水準変更する。回転次数音3の周波数特性をFig. 4に示す。

SD法による12形容詞対の7段階の絶対評価を行う。その他の評価条件は2.1節と同様とする。

2.2.2 ブラウンノイズ付加によるトナリティ低下の印象評価

純音認知度合いの評価結果をFig. 5に示す。これより、純音認知度合いの評点が5点となる評価音は3-3となる。Fig. 6に3-3のトナリティ分析結果を示す。なお、トナリティの算出時に二次平均^[3]に基づき、左右の結合処理を行っている。これより、トナリティ許容閾値付近まで低下することで純音認知度合いの評点が5点付近となることが示された。

次に、形容詞対によるSD法の因子分析結果のうち快適感の因子得点をFig. 7に示す。トナリティ許容閾値付近まで低下し、純音認知度合いが5点となる3-3で快適感も最大となり、以降さらにラウドネスの上昇する3-4において快適感が低下した。これより、ラウドネスが純音認知評価の水準内の場合には単一純音で求めたトナリティ許容閾値は複数純音の場合にも適用でき、純音認知度合いの低下と快適感の上昇に相関があることが示唆された。

3. 複数純音における純音認知評価および印象評価

本章では、純音同士の周波数比を適切に設定し、不協和度を変化することで純音認知度合いを低下し、快音化を目指す。

3.1 二純音におけるメトリクスが純音認知に与える影響把握

本節では、2章で用いた単一純音に対し、周波数比および不協和度が異なる純音を付加した二純音と広帯域音を用いて純音認知評価を行い、二純音のトナリティと不協和度変化が純音認知度合いに与える影響を把握する。また、不協和度毎にトナリティ許容閾値を求める。

Table 2 Evaluation sound

Rotational order sound	Sound 3				
Sound symbol	3-0	3-1	3-2	3-3	3-4
Loudness sone	22	23	24	25	27

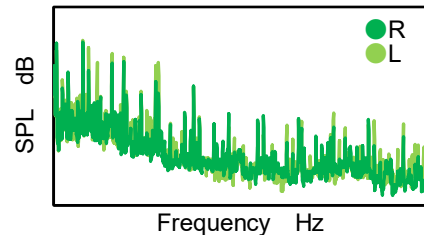


Fig. 4 Rotational order sound 3

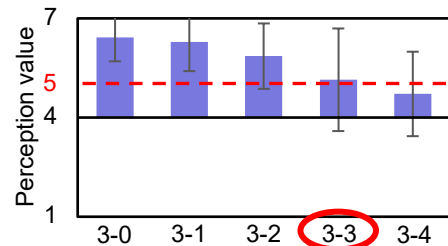


Fig. 5 Pure tone perception value

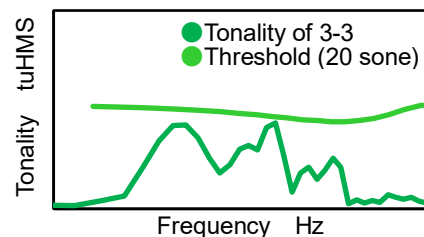


Fig. 6 Tonality analysis result of 3-3

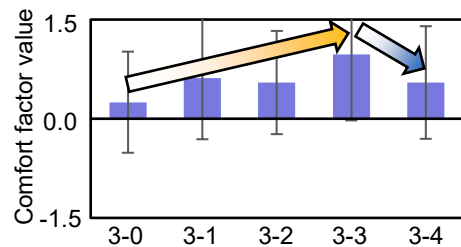


Fig. 7 Comfort factor value

Table 3 Evaluation sound pattern

No.	Tonality of pure tone 1	Tonality of pure tone 2	Dissonance
1	Std.	Std.	0.00
2		Std.×2.5	0.24
3		Std.×4.0	0.32
4	Std.×2.5	Std.	0.24
5		Std.×2.5	0.32
6		Std.×4.0	0.00
7	Std.×4.0	Std.	0.32
8		Std.×2.5	0.00
9		Std.×4.0	0.24

3.1.1 評価音の条件および評価方法

評価音は全オクターブ域で、聴感上同じ大きさとなるピンクノイズと2本の純音で、Table 3に示す条件にて作成する。

純音はTable 4に示す1オクターブごとの5周波数に対して不協和度を満たすように設定した。その他の評価条件は2.1節と同様とする。

3.1.2 低周波数の純音付加による純音認知評価

目的変数を純音認知度合いの評価得点、説明変数を各条件のトナリティ、不協和度として周波数ごとに重回帰分析を行った。なお、トナリティの算出時に二次平均^[3]に基づき、2本の純音の結合処理を行っている。

重回帰式の標準偏帰係数を正規化することにより求めた、トナリティと不協和度の寄与率をFig. 8に示す。

周波数の重回帰式から、純音認知度合いの評点が5（少し気になるが許容）をトナリティ許容閾値とし、周波数と不協和度により再度回帰分析を行い、不協和度毎のトナリティ許容閾値式を式(3)、プロットをFig. 9に示す。

$$T = f_1F + d_1D + f_2F^2 + fdFD + c \quad \dots(3)$$

T はトナリティ、 f_1 は周波数回帰係数、 F は周波数、 d_1 、 d_2 は不協和度回帰係数、 D は不協和度、 fd は交互作用回帰係数、 c は定数とし、決定係数は0.87となった。

Fig. 8より250 Hz、500 Hz、2000 Hzの3周波数において不協和度の寄与率が高い。また、Fig. 9より不協和度によって純音認知度合いが異なり、不協和度が0.00と0.24、0.32でトナリティ許容閾値が大きく変化している。また、不協和度が0.24の条件で純音認知度合いが最も低い結果であったが、重回帰分析が線形近似であるという特性上、トナリティ許容閾値においては0.32の方がわずかに高くなった。不協和度が最も低い0.00よりも、わずかに不協和度の高い0.24で純音認知度合いが低くなり、純音が気にならなくなる可能性が示唆された。

4000 Hzのような高周波数で不協和度によるトナリティ許容閾値の差が小さいのは2本の純音の周波数の差が大きく、2本の純音がそれぞれ独立に聴取されてしまうためと考えられる。また、単一純音におけるトナリティ許容閾値と比べると、低周波数ではトナリティ許容閾値が上昇しているが、周波数が離れてしまう高周波数では低下している。これより、2000 Hz以下の複数純音においては、周波数比を適切に設定することで不協和度が変化しトナリティ許容閾値の上昇が期待できる。

3.2 複数オクターブ倍音におけるメトリクスが印象に与える影響把握

本節では、3.1節の純音成分2本から、5周波数のオクターブ倍音をそれぞれ純音1と純音2として計10本を用いて、複数純音成分のトナリティと不協和度における印象への影響を把握する。

3.2.1 評価音の条件および評価方法

評価音はピンクノイズとTable 4に示す1オクターブ毎の5周波数の純音1と純音2の計10本の純音成分で構成し、No. 1a-No. 9aの9水準とする。トナリティおよび不協和度の条件は3.1節と同様でTable 3に示す。複数純音のトナリティをまとめて変更しているため、水準毎にラウドネスが異なる。No. 1a-No. 5a、No. 7aは25 sone-30 sone程度、No. 6a、No. 8a、No. 9aは35 soneを超える。SD法による7段階の絶対評価を行う。その他の評価条件は2章と同様とする。

3.2.2 トナリティおよび不協和度に着目した印象評価

形容詞対によるSD法の因子分析結果のうち快適感の因子得点をFig. 10に示す。Fig. 10より、不協和度が0.24となるNo. 2a、No. 4aで快適感が高く、不協和度が0.00か、ラウドネスが35 soneを超えるNo. 6a、No. 8a、No. 9aで快

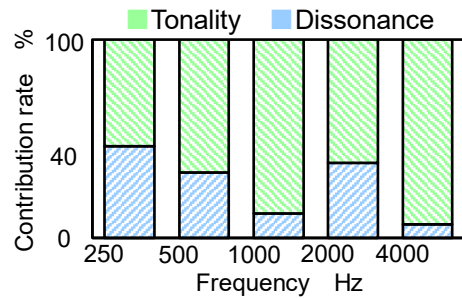


Fig. 8 Contribution rate of Tonality and Dissonance to pure tone perception

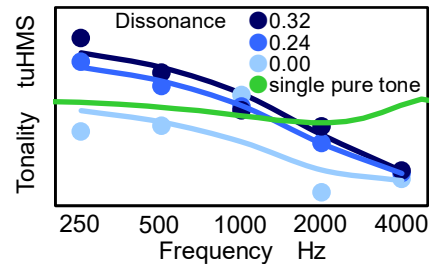


Fig. 9 Scatter plots and regression analysis line of Tonality tolerance threshold

Table 4 Pure tone as evaluation sound

Frequency of pure tone 1 Hz	Frequency of pure tone 2 Hz		
250	125	150	188
500	250	300	375
1000	500	600	750
2000	1000	1200	1500
4000	2000	2400	3000
Dissonance	0.00	0.24	0.32

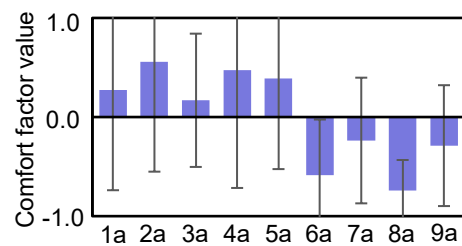


Fig. 10 Comfort factor value

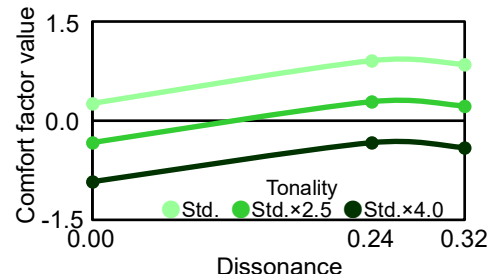


Fig. 11 Predicted comfort factor value

適感が大きく低下した。

快適感の因子得点を不協和度とトナリティで回帰分析を行い、回帰式(4)およびFig. 11に示す。

$$V = t_1T + d_1D + t_2T^2 + tdTD + c \quad \dots(4)$$

V は因子得点、 t_1 はトナリティ回帰係数、 T はトナリティ、

d_1 , d_2 は不協和度回帰係数, D は不協和度, td は交互作用回帰係数, c は定数とし, 回帰分析の決定係数は 0.92 となった. Fig. 11 より, トナリティが低く, 不協和度が 0.24 付近のときに快適感が最も高く, Fig. 9 に示す, 二純音での純音認知評価より求めたトナリティ許容閾値が高かった, 不協和度が 0.24 の場合は複数純音において快適感が高いことがわかった.

3.3 複数回転次数音におけるメトリクスが印象に与える影響把握

3.2 節では, 複数オクターブ倍音を純音成分とする評価音にてトナリティおよび不協和度が印象に与える影響を把握した. 本節では, 実際の回転次数音に近い純音成分を用いて, 複数純音成分のトナリティと不協和度における印象への影響を把握する.

3.3.1 評価音の条件および評価方法

評価音はピンクノイズと2系列の次数倍音の純音成分で純音1は250 Hzの次数倍音を10次まで, 純音2はTable 5に示す1次から5次までの次数倍音で計15本の純音成分で構成し, No. 1b-No. 9bの9水準とする. トナリティおよび不協和度の条件は3.1節と同様でTable 3に示す. 複数純音のトナリティをまとめて変更しているため, 水準毎にラウドネスが異なる. No. 1a-No. 5は25 sone-30 sone程度, No. 6a-No. 9aは35 soneを超える. 評価条件は3.2節と同様とする.

3.3.2 トナリティおよび不協和度に着目した印象評価

形容詞対によるSD法の因子分析結果のうち快適感の因子得点をFig. 12に示す. Fig. 12より, トナリティが低いNo. 1b, 不協和度が0.24となるNo. 2b, No. 4bで快適感が高く, ラウドネスが35 soneを超えるNo. 6a-No. 9aで快適感が大きく低下した.

3.2節と同様に快適感の因子得点をトナリティと不協和度で回帰分析を行い, 回帰式(3)およびFig. 13に示す. 回帰分析の決定係数は0.87となった. Fig. 13より, トナリティが低く, 不協和度が0.24付近のときに快適感が最も高い.

次数倍音の場合, 異なる次数同士の純音の関係で不協和やうなりが生じる場合が懸念されるが, 本研究では, 1次同士の不協和度に着目して印象評価を行った. その結果, 二純音, オクターブ倍音と同様に, 不協和度が最も低い0.00よりもわずかに高い0.24付近で最も快適感が高くなるという結果となり, 次数倍音においても1次同士の不協和度を適切に設定することで快音化が実現できる可能性を示した.

4. 研究成果

- (1) 臨界帯域に基づいた21周波数での純音認知評価から, 周波数ごとのトナリティおよびラウドネスの純音認知度合いへの寄与率と, トナリティ許容閾値を求め, 同じトナリティでも聴感上聴こえにくい周波数帯域では, ラウドネス変化によって純音の聴こえ方が異なることがわかった.
- (2) 単一純音による純音認知評価より求めたトナリティ許容閾値を複数の純音成分を有する回転次数音にも適用し, その有効性を示した. また, トナリティ低下とラウドネス上昇のバランスにより, 最も快適感が高い音の設計領域が存在することを明らかにし, ラウドネスが30 soneを超えない場合は純音認知度合いと快適感に相関がみられた.

Table 5 Pure tone as evaluation sound

Order of rotation	Frequency of pure tone series 2 Hz		
	1	500	417
2	1000	833	667
3	1500	1250	1000
4	2000	1667	1333
5	2500	2083	1667
Dissonance	0.00	0.24	0.32

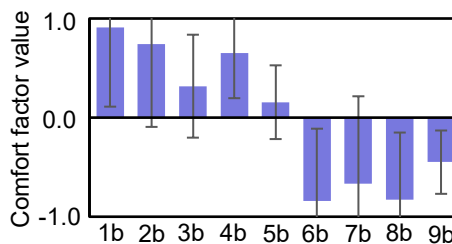


Fig. 12 Comfort factor value

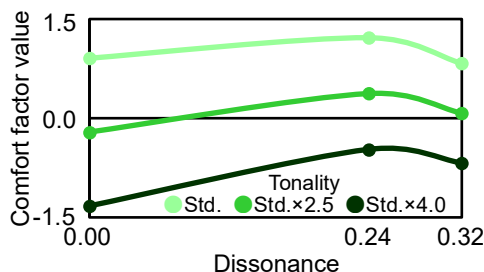


Fig. 13 Predicted comfort factor value

- (3) 純音間の不協和度に着目した二純音での純音認知評価から, 不協和度およびトナリティの純音認知度合いへの寄与率と, トナリティ許容閾値を求め, 不協和度により純音認知度合いに変化があり, 単一純音よりもトナリティ許容閾値が上昇することを明らかにした.
- (4) 複数オクターブ倍音, 複数回転次数音において, 1次同士の不協和度が0.24付近のとき純音認知度合いが低下し, 快適感が高く, ラウドネスが35 soneを超えると快適感が下がることを明らかにした.

参考文献

- [1] ECMA-418-1, Prominent discrete tones, 2nd edition (2022).
- [2] Helmholtz Hermann von, Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik (1863).
- [3] ECMA-418-2, Models based on human perception, 2nd edition (2022).
- [4] 花井奏太, 河野篤史, 寺内昇平, 西晃住, 田辺総一郎, 戸井武司, 純音成分の認知を考慮した回転次数音の快音設計, 日本音響学会講演論文集 (春), 1-6-2 (2025).
- [5] 花井奏太, 麻生海, 田辺総一郎, 戸井武司, 複数回転次数音の不協和度に着目した快音設計, 日本音響学会講演論文集 (春), 1-6-3 (2025).