

振幅変調純音を考慮した 協和音付加によるポンプ快音設計

Comfortable Sound Design for Pump by Adding Consonance in Consideration of Amplitude Modulated Pure Tones

精密工学専攻 53号 広沢 隼士
Hayato Hirose

1. はじめに

回転機器であるポンプの動作時に生じる音（以下、ポンプ動作音）は、モータやギアなどから生じる純音成分を有する。背景音に対する音量が特に大きい純音成分は不快感の原因となる⁽¹⁾他、純音成分同士が干渉して起こる振幅変調も変動や粗さといった変調感を生じ不快感に影響する⁽²⁾ため、快適な音創りが求められている。

先行研究では、これら不快な純音成分と調和する協和音付加により印象を改善⁽³⁾している。しかし、純音成分の周波数が異なる場合や複数存在する場合、また純音成分が振幅変調する場合など、異なる条件における考慮がなされていない。

そこで本研究では、振幅変調しない定常純音および振幅変調する振幅変調純音（以下、変調純音）に着目して協和音付加による快音設計を目指し、実用化に向けて検討する。まず、ポンプ動作音の模擬音を用いて定常純音への協和音付加に対する印象評価を行い、快適感が向上する協和音の付加条件を把握する。次に、変調純音への協和音付加に対する印象評価を行い、変調感に与える影響および快適感が向上する協和音の付加条件を把握する。

最後に、上記検討に基づき不快な変調純音を有するポンプ動作音へ協和音付加を行い、快音設計を実施する。

なお、本研究におけるすべての評価実験は、中央大学「人を対象とする研究」倫理審査委員会の承認を得た上で、被験者に十分なインフォームドコンセントを得ている。

2. 顕著な定常純音への協和音付加

本章では、ポンプ動作音の模擬音を用いて背景音に対する音量が特に大きい定常純音への協和音付加に対する印象評価を行い、快適感が向上する協和音の付加条件を把握する。

2.1 顕著な純音成分の定義

ポンプ動作音が有する複数の純音成分に関して、背景音に対する純音成分の相対的な大きさを表すトナリティを求め、特に不快な純音成分が把握できる。トナリティ規格⁽⁴⁾では純音成分が不快か否かの閾値を 0.40 tuHMS と定めている。この値を超える純音成分を顕著な純音成分と定義し、これを振幅変調しない顕著な定常純音、振幅変調する顕著な変調純音に分類する。ポンプ動作音の模擬音を用い、まず顕著な定常純音への協和音付加に対する印象評価を行う。

2.2 顕著な単一定常純音への協和音付加

2.2.1 協和音の付加条件および評価方法

模擬音は背景音と顕著な定常純音で構成する。背景音はポンプ動作音に周波数特性が類似したラウドネスが 9 sone のピンクノイズを用い、顕著な定常純音は周波数 f_{pro} =250 Hz、1000 Hz または 4000 Hz で、トナリティは 0.40 tuHMS を超える 0.80 tuHMS に統一し、シャープネスは f_{pro} =250 Hz が 2.54 acum, f_{pro} =1000 Hz が 2.80 acum, f_{pro} =4000 Hz が 2.96 acum とする。

Fig. 1 および Table 1 に顕著な定常純音の周波数を協和

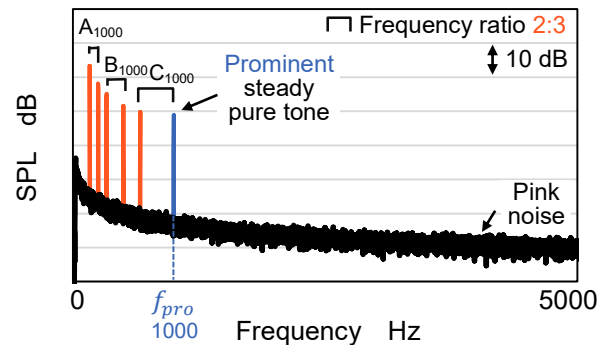


Fig. 1 Simulated sound with a prominent steady pure tone

Table 1 Addition condition for a prominent steady pure tone

Addition condition	Consonance parameter			
	Frequency Hz	Tonality tuHMS	Sharpness acum	
$f_{pro} = 250$ Hz	A ₂₅₀	42:63(-2 Octave)	1.09	1.95
	B ₂₅₀	83:125(-1 Octave)	0.87	2.04
	C ₂₅₀	167:250(f_{pro})	0.51	2.34
$f_{pro} = 1000$ Hz	A ₁₀₀₀	167:250(-2 Octave)	0.62	2.35
	B ₁₀₀₀	333:500(-1 Octave)	0.69	2.53
	C ₁₀₀₀	667:1000(f_{pro})	0.64	2.69
$f_{pro} = 4000$ Hz	A ₄₀₀₀	667:1000(-2 Octave)	0.70	2.82
	B ₄₀₀₀	1333:2000(-1 Octave)	0.85	2.88
	C ₄₀₀₀	2667:4000(f_{pro})	0.74	2.96

音付加 A~C の下付き文字で表す。 f_{pro} の高周波側への協和音付加は快適感が低下する⁽⁵⁾ため、低周波側へラウドネスが等しく周波数比が 2:3（完全 5 度）の協和音を付加する。

協和音の周波数に関して、予備実験において f_{pro} と協和音の周波数差が大きいと協和感が消失したため、それぞれの f_{pro} において f_{pro} の -2 オクターブの A、-1 オクターブの B、および f_{pro} と周波数比が 2:3 となる C までの 3 条件ずつとし、協和音付加前後で快適感に関する 7 段階の相対評価を行う。各付加条件はヘッドホンでランダムに提示し、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。

2.2.2 評価結果および考察

快適感の評価値を Fig. 2 に示す。 f_{pro} =250 Hz では、A₂₅₀、B₂₅₀ の快適感が低く C₂₅₀ の快適感が高い。これはトナリティの影響が考えられ、Table 1 より f_{pro} のトナリティ 0.80 tuHMS より C₂₅₀ のトナリティが小さいため、背景音に対して付加された協和音の音量が適切であり、快適感が向上したと考えられる。 f_{pro} =1000 Hz では、協和音の周波数が高くなるにつれ快適感が低下した。Table 1 より、協和音付加前のシャープネス 2.80 acum に対して A₁₀₀₀、B₁₀₀₀ はシャープネスの変化が大きいいため、 f_{pro} に対して周波数の低い協和音付加により快適感が向上したと考えられる。

f_{pro} =4000 Hz では、A₄₀₀₀~C₄₀₀₀ すべての快適感が低い。 f_{pro}

のトナリティ 0.80 tuHMS より B_{4000} のトナリティが大きい他、協和音付加前のシャープネス 2.96 acum に対して $A_{1000} \sim C_{1000}$ のシャープネスの変化が小さいため、快適感が向上しなかったと考えられる。

以上より、 $f_{pro}=250$ Hz や 1000 Hz のような低～中周波の顕著な定常純音に対しては、トナリティとシャープネスが低い低周波側への協和音付加で快適感が向上することを示した。また、 $f_{pro}=4000$ Hz のような高周波の顕著な定常純音に対しては、協和音付加により快適感が向上しにくいことがわかった。

2.3 顕著な複数定常純音への協和音付加

2.2 節同様の模擬音を用いて顕著な複数定常純音に対して快適感が向上する協和音の付加条件を把握する。

2.3.1 協和音の付加条件および評価方法

Fig. 3 に協和音付加 Ad1, Ad2 を示す。2.2 節より、高周波の顕著な定常純音に対しては協和音付加により快適感が向上しにくいいため、低～中周波の顕著な定常純音について検討し、 $f_{pro1}=350$ Hz または 700 Hz、 $f_{pro2}=1000$ Hz に統一する。 f_{pro1} 、 f_{pro2} のトナリティについて、 f_{pro1} が 0.80 tuHMS、 f_{pro2} が 0.40 tuHMS で f_{pro1} のトナリティが大きい条件 (Th)、 f_{pro1} が 0.40 tuHMS、 f_{pro2} が 0.80 tuHMS で f_{pro1} のトナリティが小さい条件 (T1)、 f_{pro1} 、 f_{pro2} が共に 0.60 tuHMS でトナリティが同程度の条件 (Eq) の 3 条件を検討する。2.2 節より、 f_{pro1} もしくは f_{pro2} と調和するように協和音付加する。

上記トナリティ 3 条件それぞれで、 f_{pro1} への付加 Ad1 (233:350 Hz)、 f_{pro2} への付加 Ad2 (167:250 Hz) をそれぞれ評価する。なお、 $f_{pro1}=350$ Hz の場合 Ad1 は 233 Hz のみ付加する。その他、実験条件は 2.2 節同様である。

2.3.2 評価結果および考察

快適感の評価値を Fig. 4 に示す。トナリティ 3 条件 Th, T1, Eq を Ad1, Ad2 の下付き文字で表す。 $f_{pro1}=350$ Hz および $f_{pro2}=1000$ Hz では、トナリティの条件に依らず Ad1 の快適感が高い。Ad2 と f_{pro1} の周波数差が比較的小さく、かつ Ad2 と f_{pro1} の周波数比が協和音の周波数比ではないことで違和感が生じ、Ad2 は快適感が低くなったと推察される。

$f_{pro1}=700$ Hz および $f_{pro2}=1000$ Hz では、 f_{pro1} のトナリティが大きい Th では Ad1、 f_{pro1} のトナリティが小さい T1、および f_{pro1} 、 f_{pro2} のトナリティが同程度の Eq では Ad2 の快適感が高い。この評価では Ad2 と f_{pro1} の周波数差が大きく、前述した違和感は生じていないと推察される。その上で、トナリティが異なる場合トナリティが大きい純音成分が気になりやすい一方、トナリティが同程度の場合高周波の純音成分が気になりやすいため、快適感に差異が生じたと考えられる。

以上より、顕著な複数定常純音の周波数が低～中周波のときは低周波の純音成分への協和音付加、中周波のみのときはトナリティが異なる場合トナリティが大きい純音成分へ、トナリティが同程度の場合高周波の純音成分への協和音付加により快適感が向上することがわかった。

3. 顕著な変調純音への協和音付加

3.1 顕著な単一変調純音への協和音付加

2 章同様の模擬音を用いて顕著な単一変調純音への協和音付加に対する印象評価を行い、変調感に与える影響および変調純音への協和音付加における有効性を確認する⁽⁶⁾。

3.1.1 顕著な変調純音の条件

変調純音を、Fig. 5(a) に示す変調周波数が低い変動を感じる低速変調純音と、Fig. 5(b) に示す変調周波数が高い粗さを感じる高速変調純音に分類し、低速変調純音、高速変調純音それぞれへの協和音付加に対する印象評価を行う。模擬

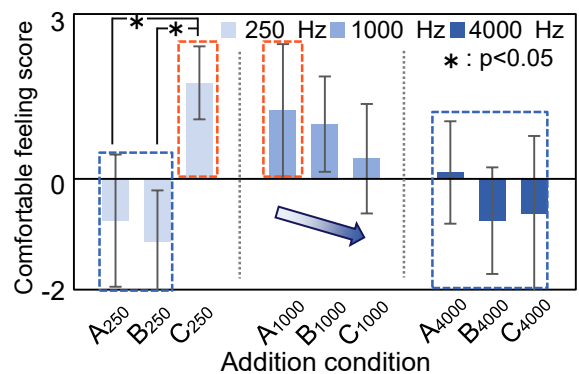


Fig. 2 Evaluation results for a prominent steady pure tone

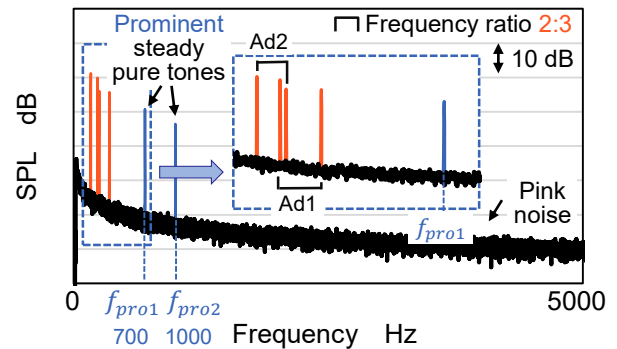


Fig. 3 Simulated sound with prominent steady pure tones

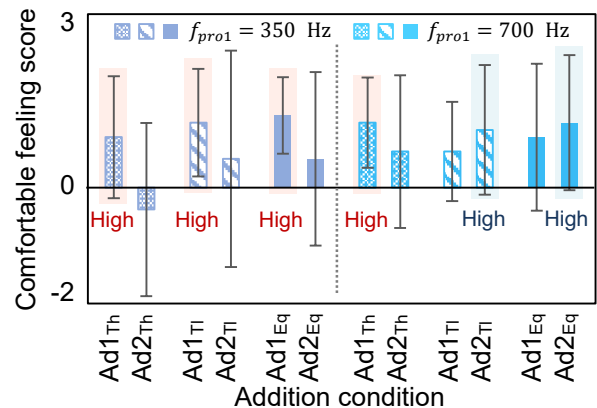


Fig. 4 Evaluation results for prominent steady pure tones

音は 2 章同様の背景音と顕著な変調純音で構成する。顕著な変調純音は周波数 $f_{pro,m}=250$ Hz または 1000 Hz で、変調周波数は低速変調純音が変動強度の大きい 4 Hz に統一し、高速変調純音がラフネスの大きい 40 Hz (250 Hz) または 70 Hz (1000 Hz) とする⁽⁷⁾。変調度は共に 0.3 で、トナリティは 0.80 tuHMS とする。

3.1.2 協和音の付加条件および評価方法

$f_{pro,m}$ にラウドネスが等しく周波数比が 2:3 の協和音を付加する。2 章より、 $f_{pro,m}=250$ Hz では 167 Hz を付加 (Ad_250)、 $f_{pro,m}=1000$ Hz では 167:250 Hz を付加 (Ad_1000) する。協和音付加前後で変調感、快適感に関する 7 段階の相対評価を行う。比較のため、快適感は顕著な定常純音にも同様に協和音付加して評価する。その他、実験条件は 2 章同様である。

3.1.3 評価結果および考察

変調感の評価値を Fig. 6(a) に示す。評価値が高いほど変調感が改善したことを示し、 $f_{pro,m}=250$ Hz、1000 Hz 共に高速変調純音の方が協和音付加により変調感が改善した。低速変調純音は振幅変調の山谷を聞き分けられるため認知しやすいのに対し、高速変調純音は山谷を聞き分けられないため、やや認知しにくい⁽⁸⁾⁽⁹⁾。ゆえに、高速変調純音の方が協和音

付加により変調感が改善しやすいと考えられる。

また、快適感の評価値を Fig. 6(b) に示す。 $f_{pro,m}=250$ Hz, 1000 Hz 共に変調純音の快適感がやや低い、絶対値は大きく、定常純音に加え変調純音に対しても協和音付加により快適感が向上するといえる。

以上より、協和音付加により特に高速変調純音に対して変調感が改善されることを示し、顕著な変調純音に対しても協和音付加が有効であることを確認した。

3.2 顕著な定常純音と変調純音への協和音付加

顕著な定常純音と変調純音が共に存在する場合において快適感が向上する協和音の付加条件を把握する。

3.2.1 協和音の付加条件および評価方法

2.3 節で中周波の $f_{pro1}=700$ Hz および $f_{pro2}=1000$ Hz への協和音付加において、トナリティが異なる場合トナリティが大きい純音へ、トナリティが同程度の高周波の純音への協和音付加により快適感が向上した。しかし、顕著な変調純音に対しては評価が変わる可能性がある。そこで、 $f_{pro,m1}=700$ Hz は定常純音または変調純音、 $f_{pro,m2}=1000$ Hz は定常純音に統一する。トナリティの条件は $f_{pro,m1}$ が 0.40 tuHMS, $f_{pro,m2}$ が 0.80 tuHMS でトナリティが異なる条件、 $f_{pro,m1}$, $f_{pro,m2}$ が共に 0.60 tuHMS でトナリティが同程度の条件の 2 条件を検討する。

2.3 節同様、 $f_{pro,m1}$ と調和するように 233:350 Hz を付加した M1, $f_{pro,m2}$ と調和するように 167:250 Hz を付加した M2 をそれぞれ評価する。その他、実験条件は 2 章同様である。

3.2.2 評価結果および考察

変調感は各付加条件で明確な傾向が見られなかったため、ここでは Fig. 7 に示す快適感に着目する。定常純音が St, 低速変調が Lo, 高速変調が Hi を M1, M2 の下付き文字で表す。トナリティが異なる条件では、 $f_{pro,m1}$ が定常純音、変調純音の場合共に M2 の快適感が高い。これは、トナリティが異なる場合トナリティが大きい純音成分が気になりやすいためと推察される。トナリティが同程度の条件では、 $f_{pro,m1}$ が定常純音では M2, 変調純音では M1 の快適感が高い。これは、トナリティが同程度の場合、定常純音よりも変調純音の方が気になりやすいためと推察される。

以上より、顕著な定常純音と変調純音のトナリティが異なる場合トナリティが大きい純音成分へ、トナリティが同程度の場合変調純音への協和音付加により快適感が向上することがわかった。

4. 顕著な変調純音を有するポンプ動作音への協和音付加

2, 3 章より、顕著な変調純音を有するポンプ動作音への協和音付加に対する印象評価を行い、快音設計を検討する⁽⁶⁾。

4.1 協和音の付加条件および評価方法

ポンプ動作音は無響室にて、ポンプ正面 1m の位置で収録した。 Fig. 8 に帯域ごとのトナリティを、 Fig. 9 に変調周波数特性を示す。このポンプ動作音が有する顕著な純音成分 $f_{pro,m1}$, $f_{pro,m2}$, $f_{pro,m3}$ のうち、最も低周波の $f_{pro,m1}$ がトナリティが最も大きい $f_{pro,m2}$ とおおむね同程度のトナリティ、かつ粗さを感じる高速変調純音であり、気になりやすい。 $f_{pro,m1}$ に対してラウドネスが等しく周波数比が 2:3 の協和音 $f_{PSL}:f_{PSH}$ を Fig. 10 に示す低周波側に付加し、無加工の音 Ori. P, 協和音付加後の音 Con. P をそれぞれ評価する。

評価方法は SD 法による絶対評価で、ポンプ動作音の印象を表す 11 形容詞対を用いる。なお、事前調査により被験者がポンプの知識を十分に有しなかったため、本評価は顕著な

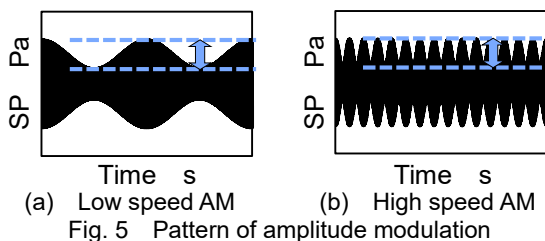


Fig. 5 Pattern of amplitude modulation

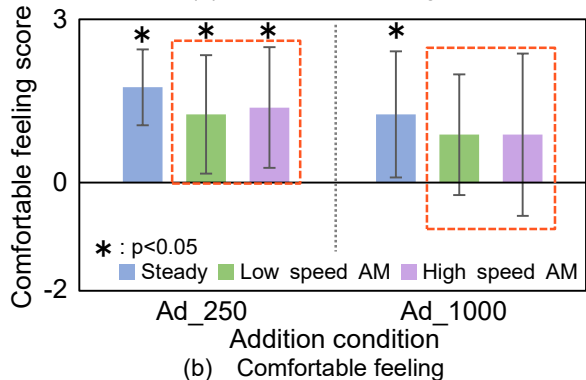
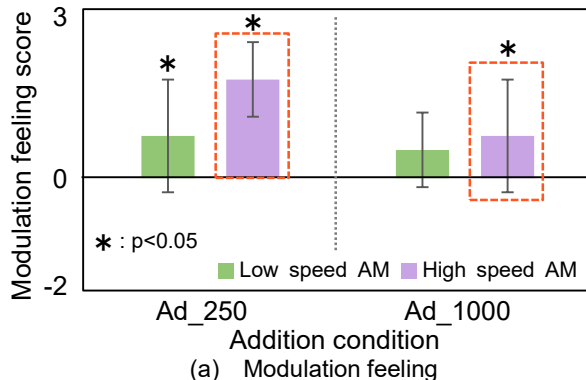


Fig. 6 Evaluation results for a prominent amplitude modulated pure tone

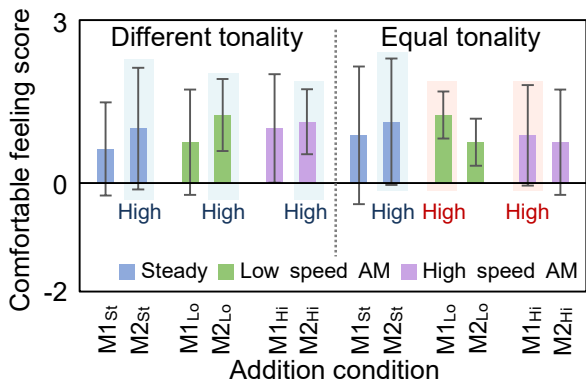


Fig. 7 Evaluation results for a prominent steady and amplitude modulated pure tones

変調純音を有する機械動作音として行う。その他、実験条件は 2 章同様である。

4.2 因子分析および考察

印象評価に対する因子分析より、「厚みのない-厚みのある」「軽い-どっしりとした」などを含む重厚因子、「粗さを感じる-粗さを感じない」「淀んでいる-澄んでいる」などを含む調和因子、「作業しにくい-作業しやすい」「安心感のない-安心感のある」などを含む快適因子の 3 因子を抽出した。回転法にはバリマックス法を、抽出法には主因子法を用いた。

各因子得点を Fig. 11 に示す。ばらつきはあるが、Ori. P に対して Con. P はすべての因子得点が向上し、ノンパラメト

リック検定により快適因子は有意水準 5%未満で有意差を確認した。各因子に着目すると、重厚因子は顕著な変調純音の低周波側に音が付加されたことで向上したと考えられる。シャープネスが低い協和音付加は、重厚感の向上にも寄与するといえる。調和因子は、協和音付加により変調感が改善された他、不快な変調純音が調和したことで向上したと考えられる。トナリティが低い協和音付加により、背景音に対して付加された協和音の音量が適切であり、調和して聞こえたと推察される。快適因子は、不快感の原因である顕著な変調純音が協和音付加により気になりにくくなったことで、向上したと考えられる。

以上より、顕著な変調純音を有するポンプ動作音などへ協和音付加を行い、重厚感、調和感、快適感といった様々な印象が向上する快音設計の可能性を示した。この結果はポンプ動作音のような複数の純音成分を有する機械動作音とした評価結果であり、ポンプ動作音以外への適用が可能である。

5. 研究成果

- (1) 250 Hz, 1000 Hz のような低～中周波の顕著な定常純音に対し、トナリティとシャープネスが低い低周波側への協和音付加により快適感が向上することを示した。
- (2) 顕著な複数定常純音の周波数が低～中周波のときは低周波の純音成分への協和音付加、中周波のみのときはトナリティが異なる場合トナリティが大きい純音成分へ、トナリティが同程度の場合高周波の純音成分への協和音付加により快適感が向上することがわかった。
- (3) 協和音付加により特に高速変調純音に対して変調感が改善されることを示し、顕著な振幅変調純音に対しても協和音付加が有効であることを確認した。
- (4) 顕著な定常純音と振幅変調純音のトナリティが異なる場合トナリティが大きい純音成分へ、トナリティが同程度の場合振幅変調純音への協和音付加により快適感が向上することがわかった。
- (5) 顕著な振幅変調純音を有するポンプ動作音などへ協和音付加を行い、重厚感、調和感、快適感が向上する快音設計の可能性を示した。

参考文献

- (1) Karl D. Kryter, Karl S. Pearsons, Some Effects of Spectral Content and Duration on Perceived Noise Level, The Journal of the Acoustical Society of America, **35-6** (1963) pp.866-883.
- (2) 柴橋和真, 金澤立哉, 田辺総一郎, 戸井武司, 周波数および振幅変動を考慮した純音認知の高感度パラメータの推定, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, 2118-22-03 (2022) pp.1-4.
- (3) 柳澤秀吉, 横尾俊輔, 村上存, 大富浩一, 穂坂倫佳, 製品音のデザインにおける和音性特徴量の感性評価, 日本デザイン学会研究発表大会概要集, **57** (2010) pp. 114-115.
- (4) ECMA 418: Psychoacoustic metrics for ITT equipment - Part 2 (models based on human perception), 2nd edition (2022).
- (5) 広沢隼士, 和久井康平, 松田道昭, 戸井武司, 定常純音に着目した協和音付加によるポンプ快音設計, 日本音響学会講演論文集 (春), 1-9-2 (2024).
- (6) 広沢隼士, 和久井康平, 松田道昭, 戸井武司, 振幅変調純音に着目した協和音付加によるポンプ快音設計, 日本音響学会講演論文集 (春), 1-9-3 (2024).
- (7) Fastl, H. and Zwicker, E., PSYCHO-ACOUSTICS, Springer (2006) pp.61-66.
- (8) 広沢隼士, 和久井康平, 松田道昭, 戸井武司, 変調感へ

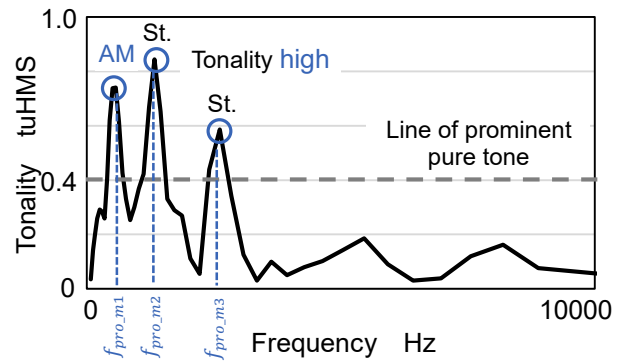


Fig. 8 Specific tonality of pump sound

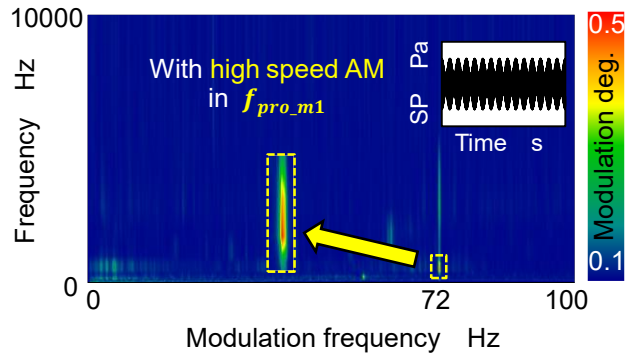


Fig. 9 Modulation frequency characteristics of pump sound

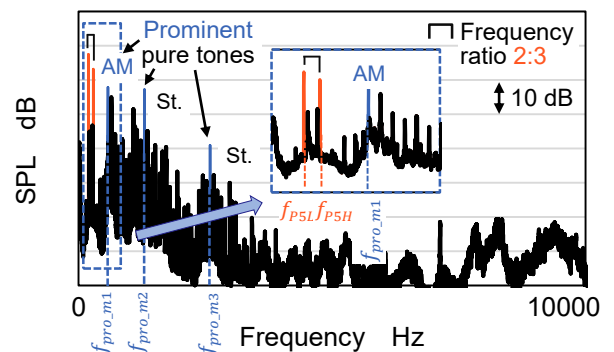


Fig. 10 Pump sound with prominent steady and amplitude modulated pure tones

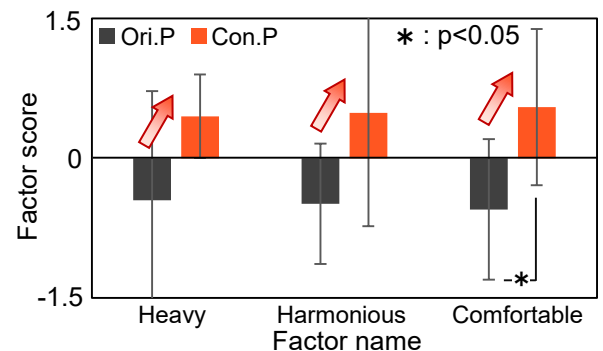


Fig. 11 Evaluation results for pump sound

の影響を考慮した快適な協和音付加条件の考案, 日本音響学会講演論文集 (秋) (2023) pp. 1511-1512.

- (9) 広沢隼士, 和久井康平, 松田道昭, 戸井武司, 協和音付加による振幅変調に対する変調感の改善, 日本音響学会講演論文集 (春) (2023) pp. 1003-1004.