

建物換気口のアクティブ騒音制御のための 周波数特性に基づく制御対象音の判別

柴田 拓郎

1. はじめに

近年、省エネルギーの志向から、住宅を始めとするあらゆる建物で高气密・高断熱化が進んでいる。その一方で、シックハウス防止のためには換気量の確保が重要であり、建物外周部には必ず換気口が設けられる。幹線道路沿道など屋外騒音の大きな地域では、この換気口から侵入する音が睡眠妨害などの原因になる恐れがあり、建物の遮音性能のボトルネックとなる換気口に対する効果的な対策が望まれている。換気口の遮音対策としてはキャップ型フードなどのパッシブ手法が一般的であるが、この対策は高音域では遮音能力が高いものの、低音になるにつれて効果が低下していくという弱点がある。

既往の研究¹⁾において、建物換気口の中低音域の遮音性能の向上にアクティブ騒音制御²⁾(ANC)が有効であることが確認された。しかしながら、制御対象の屋外騒音ではなく、室内で発生する生活音がANCシステムへ混入すると、アクティブに制御しないときより室内の音が大きくなるという問題も確認されている³⁾。そこで、本研究では、騒音と生活音の周波数特性の相違に着目して、一般に広帯域である道路交通騒音と比較的帯域の狭い生活音を見極め、ANCシステムに入力される音が制御対象か否かを瞬間的に判別することで、ANCシステムへの生活音の混入を抑制する手法の提案を目的とする。

本研究では、ANCシステムへ入力される音が、予め記憶しておいた制御対象騒音の周波数特性と似ているか否かを経験的に判断するという、経験則に基づいた手法を検討し、その手法をANCシステムに組み込んだ場合の効果を数値実験により確認する。なお、本研究の検討対象音源は表-1に示すとおり、1つの道路交通騒音(密粒舗装・晴天時)と、3つの生活音(ピアノ、男性の朗読音、女性の朗読音)に限定する。

2. 建物換気口のためのANCシステム

2.1 ANCシステムの概要

本研究で想定している、建物換気口とANCの参照点・2次音源の位置関係を図-1に示す。また、本研究で用いるANCシステムのブロック図を図-2に示す。騒音は換気口の屋外側から、生活音は室内側から到来すると考え、建物の屋外側に位置する参照点へ、換気口

表-1 音源の種類

音源	周波数領域	時間変動	特徴
道路交通騒音	広帯域	変動	タイヤ音、エンジン音
ピアノの演奏音	離散純音	変動	演奏音
男性朗読音	狭帯域	間欠	男性の声、無音部あり
女性朗読音	狭帯域	間欠	女性の声、無音部あり

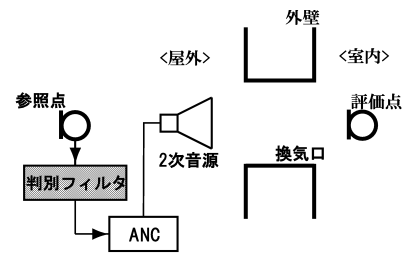


図-1 ANCシステム図

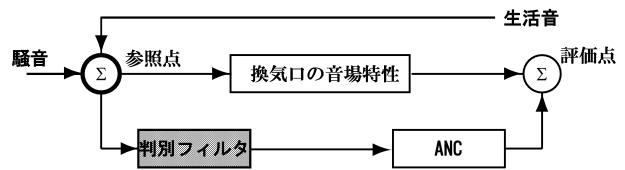


図-2 ANCブロック図

を通過した生活音が入射してANCシステムに混入するという状況を想定している。本研究で用いるANCシステムはフィードフォワード型、フィルタは固定で更新されないシステムである。屋外の参照点へ入射してしまう生活音を除外するため、参照信号を本研究で提案する判別フィルタに通して、騒音と判別された信号に対してのみANCを適用するシステムである。

2.2 ANC効果と生活音の影響(判別フィルタなし)

判別フィルタが存在しない場合のANC効果と、システムの参照点に騒音と同時に生活音も入射した場合に、生活音がANC効果に及ぼす影響を確認する。騒音には道路交通騒音、生活音にはピアノの演奏音(ともに30s間)を使用した。騒音のみ存在した場合のANC効果と、生活音混入の影響を図-3に示す。ANCを適用しないときの室内の音圧レベルを基準(0dB)とし、縦軸の値が小さいほどANCが悪影響を及ぼしていることを表す。入射する生活音の大きさはS/N = +10, 0, -10dBの

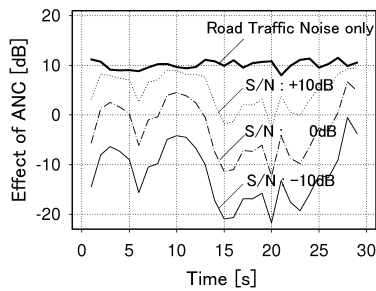


図-3 生活音が混入したときの ANC 効果

3 ケースとした。ここで S/N とは、騒音と生活音の平均音圧レベルの差であり、S/N の値が大きいほど騒音の方が大きいことを示している。なお、ANC 効果を検討する際には、効果が期待できる中低音のみを検討対象にすべきと考え、騒音・生活音とも 562 Hz より高い周波数域は遮断している。

騒音のみの場合は 10 dB 程度の効果が得られているのに対し、生活音がある場合、S/N が小さくなるにつれ ANC 効果が減少し、生活音が騒音より大きくなると ANC 効果は失われ、逆に悪影響を及ぼしていることが見てとれる。つまり、生活音の混入を防御しない ANC システムでは、アクティブに制御しないときよりも室内の音が大きくなってしまう恐れがある。

3. 周波数特性に基づく制御対象音の判別

3.1 騒音と生活音の周波数特性

騒音と生活音の周波数特性の相違を把握する。周波数分析の条件は、サンプリング周波数：8,000 Hz、バンド幅：1/3 オクターブバンド、分析周波数：40～3,150 Hz (20 バンド)、分析時間：0.1 s (800 サンプル)、分析間隔：0.1 s である。全ての音源を平面波 (音圧レベル = 音の強さのレベル)、音場を 1 気圧 20 °C の空気と仮定して、騒音と生活音の周波数特性を音のエネルギー密度 E [Ws/m³] で表すこととする。また、音のエネルギー密度は非常に小さな値であるが、本研究では本来の値を 10²⁰ 倍した数値を便宜的に用いることとする。

各音源 30 s 間の 1/3 オクターブごとのエネルギー密度を図-4 に示す。道路交通騒音は全バンドに渡って広帯域な音であり、生活音は 200～400 Hz が高く、騒音とは異なる周波数特性であることが分かる。また、道路交通騒音は 63 Hz 近辺のゆらぎが大きい。その一方、ピアノや音声は中高音域でゆらいでおり、特に 200～400 Hz が大きくゆらぐ。

騒音と生活音の周波数特性を判別するために、騒音の代表となる周波数特性を求める。本研究で使用した 30 s 間の道路交通騒音は、大別すると 2 種類の周波数特性に分けられた。1 つは、自動車が換気口に対して遠

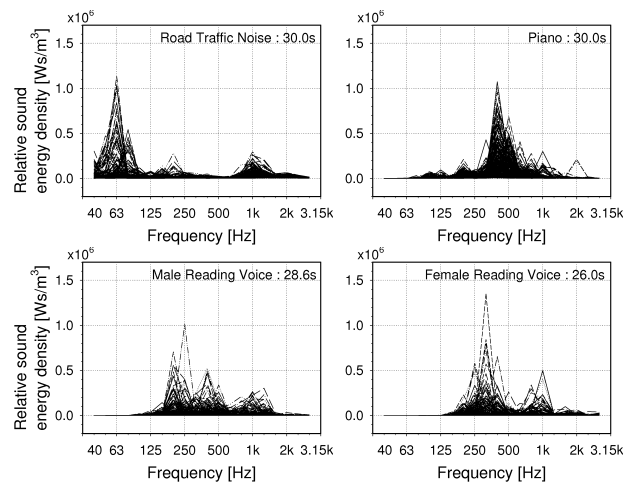


図-4 各音源の周波数特性

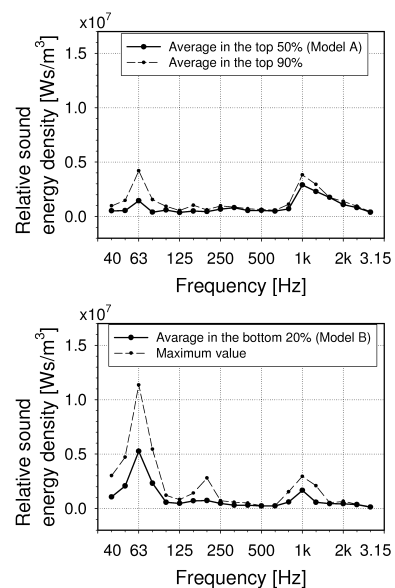


図-5 代表周波数特性-A (上), B (下)

距離を走行しているときの広帯域で 1,000 Hz 帯が少し大きな特性を示す“タイヤ音”であり、もう 1 つは自動車が近距離で走行するときの 63 Hz 近辺の低い周波数帯が大きな“エンジン音”である。30 s 間に占める割合は、前者の時間が長く、後者の割合は少なかった。そこで各バンドごとに、出現頻度の上位 50%・下位 20% の平均値をそれぞれタイヤ音・エンジン音の代表周波数特性と定めることにした (以後それぞれ、代表 f 特-A、代表 f 特-B と呼ぶ)。図-5 に実線で示す。

3.2 騒音と生活音の判別尺度

騒音と生活音の判別尺度には、ユークリッド距離を用いる。参照信号の瞬時の周波数特性が、上述のように求めた代表 f 特-A, B との一定範囲内の距離にあるか否かで騒音と生活音を判別する。ただし、騒音がゆらいでも正しく判別できるように、代表 f 特からのユークリッド距離

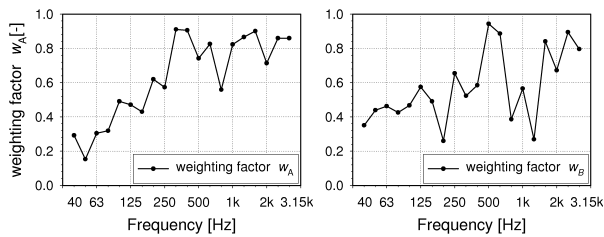


図-6 重み係数

クリッド距離を求める際に1/3オクターブバンドごとのエネルギー密度の差に、ゆらぎに応じた重み係数をかけることを提案する。

すなわち、騒音からの相違の程度 d を、ユークリッド距離を基にした次式で表すこととした。参照点へ入射してきた音の周波数特性 y_i と、予め定めた基準化代表 f 特 x_i の差の 2 乗に重み係数 w_i をかけ、その 20 バンド ($i = 1 \sim 20$) の合計の 2 乗根をとった距離 d となる。

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{20} \{w_i \times (x_i - y_i)^2\}}$$

代表 f 特-A に関する重み係数 w_A は、出現頻度の上位 90% (図-5 上：破線) に対する上位 50% の平均エネルギー密度の割合とし、代表 f 特-B のための重み係数 w_B は、最大エネルギー密度 (図-5 下：破線) に対する出現頻度の下位 20% の平均エネルギー密度の割合とした。求めた重み係数 w_A 、 w_B を図-6 に示す。

さらに、到来してくる音のエネルギー変動に対応するために、騒音の代表 f 特-A, B それぞれの 20 バンドの合計のおよそ中間である $1.0 \times 10^7 [\text{Ws}/\text{m}^3]$ を基準値として定め、瞬間 (0.1 s) のエネルギー密度の総和を上記の値に基準化して判別することとする。

図-7 に騒音の距離 d の時間推移を示し、また 0.1 s ごとに求めた騒音・生活音双方の距離 d の頻度分布を図-8 に示している。ただし、生活音の無音部分に対応するため、0.1 s 間のエネルギー密度が非常に小さいときは周波数特性を検査せずに騒音と判断している。騒音は代表 f 特-A, B からの距離が近い ($d = 0$ に近い) ところを推移し、3 つの生活音に比べて $d = 0$ の近くに多く分布していることが分かる。そこで、この $S/N = \infty$ (騒音のみ)、 $-\infty$ (生活音のみ) の場合の結果から距離 d の閾値を決定する。代表 f 特-A と比較して $d_A \leq 2.2 \times 10^7$ のとき、あるいは代表 f 特-B と比較して $d_B \leq 2.9 \times 10^7$ のときに、その音を騒音と判断することとする。代表 f 特-A を単独で用いた場合、道路交通騒音を正しく騒音と判断する割合は 76.3% であり、また生活音を正しく判断する割合はそれぞれ、ピアノ：100%、男性朗読音：94.0%、女性朗読音 99.2% である。同様に、代表 f 特-B

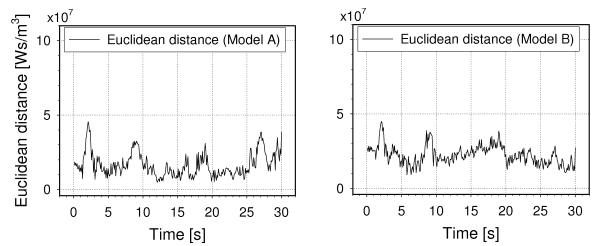


図-7 騒音の代表 f 特-A, B とのユークリッド距離

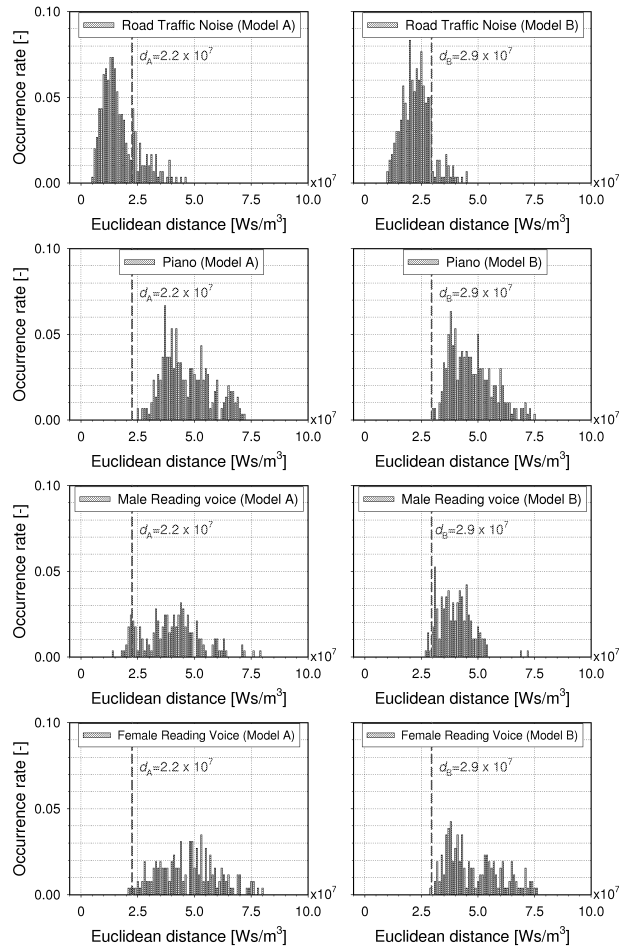


図-8 各音源のユークリッド距離の出現頻度分布

を単独で用いた場合は、道路交通騒音：90.0%、ピアノ：100%、男性朗読音：97.9%、女性朗読音 99.6% である。

図-9 に騒音とピアノの $S/N = -10, 0, +10 \text{ dB}$ の場合の判別結果を示す。入射してきた音を騒音と判断した場合は 1、生活音と判断した場合は 0 という判別結果を出力させている。生活音が騒音よりも平均音圧レベルで 10 dB 大きい場合はほとんど生活音 (0) とみなされ、逆に騒音が 10 dB 大きい場合は総じて騒音 (1) であるとみなされている。

図-10 に $S/N=0 \text{ dB}$ で騒音とピアノが参照点へ入射したときの (0) または (1) と判断したときの周波数特

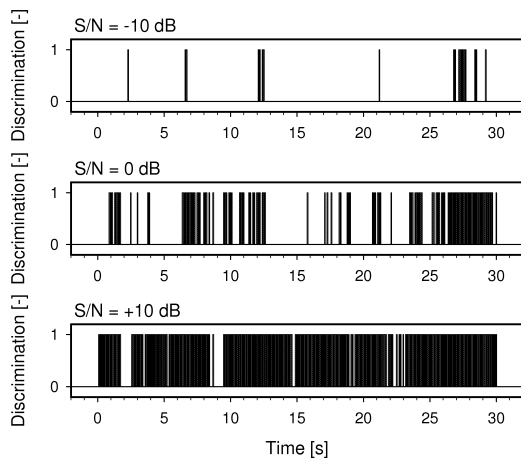


図-9 判別フィルタの判断結果

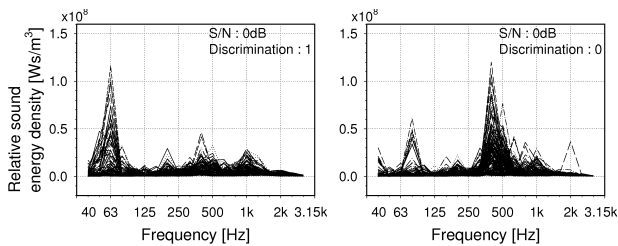


図-10 騒音/生活音と判断したときの周波数特性

性を示す。どちらに判別された場合も、それぞれの代表周波数に酷似しており、判別フィルタが意図どおり機能していることを表している。

4. ANC性能低下の改善効果

判別フィルタを組み込んだANCシステムの効果について、 $S/N = -10, 0, +10$ dBの場合を図-11に示す。音源は道路交通騒音とピアノの演奏音である。特にANCへ与える悪影響の大きかった $S/N = -10$ dBの場合に判別フィルタが生活音を感知することで、ANCの悪影響を排除することができている。 $S/N = 0$ dBの場合でもANCが悪影響を及ぼしていた15s~25sで大きな改善が見られる。もともと悪影響の少なかった $S/N = +10$ dBの場合では、ANCシステムの効果を持続させることに成功している。

以上のことより、今回検討した音源に対しては、周波数特性(代表f特-A,B, 重み係数 $w_{A,B}$, 閾値)に基づいて制御対象音を判別することでANCの誤作動を抑制できたと言える。

5. まとめ

本研究では、騒音と生活音の1/3オクターブバンドの周波数特性の相違に着目して、瞬間の周波数特性から、広帯域な道路交通騒音と比較的帯域の狭い生活音を判別することを提案し、その判別フィルタによりANCシステムの誤作動を抑制できることを確認した。

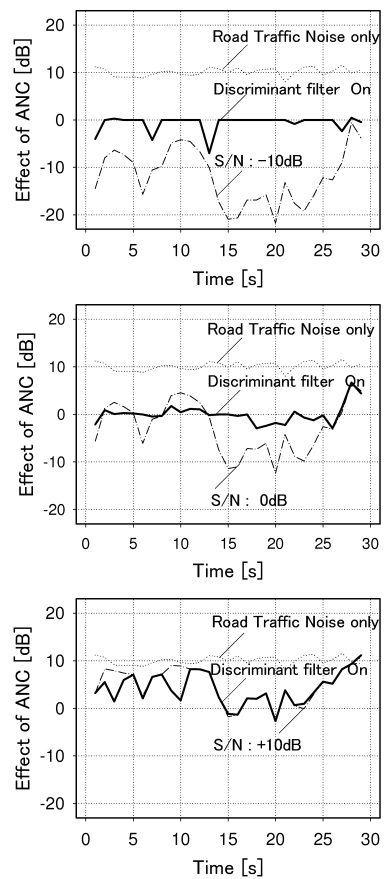


図-11 判別フィルタによる改善効果

本研究では、典型的と思われる周波数特性を判断に利用するという、経験則に基づいた問題解決手法を提案した。このような手法では経験則から外れる現象に対して効果が望めないというデメリットがあるが、周波数特性がゆらぎ、大きさも様々に変化するという複雑な現象を対象としており、論理的な解決を図ることは非常に困難と思われる本課題に対して、一定の効果が認められる解決法を提案することができた。

ただし、本研究では限られた音源のみを取り上げている。あらゆる騒音や生活音に対応するためには膨大な判別ルールが必要なことは明らかであり、これは今後の課題と考えている。

参考文献

- 1) 穴井 謙, 財津洋介, 藤本一壽, 建物換気口に対するアクティブ騒音制御の遮音効果に関する実験的検討, 都市・建築学研究(九州大学大学院人間環境学研究院紀要) 第10号, 65-70, 2006.
- 2) P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active Control of Sound*, Academic Press Ltd., 161-203, 1992.
- 3) 穴井 謙, 志岐朋晃, 平栗靖浩, 藤本一壽, 建物換気口に対するアクティブ騒音制御の遮音効果に及ぼす生活音の影響に関する実験的検討, 都市・建築学研究(九州大学大学院人間環境学研究院紀要) 第14号, 111-117, 2008.