

# 周期音に対するフィードバック型 ANC システムの研究

林 卓 郎\*

## A study on ANC System using feedback control for periodic noise

Takuro Hayashi

### Department of Mechanical Engineering

Active noise control approach has been well known as a powerful tool for machinery noise reduction and the practical applications such as duct systems for air-conditioner or silencers have become popular in recent years. Most of such applications adopt feedforward control based on LMS algorithm. Feedback control, on the contrary, has been less used, because it often causes the unstable oscillation called howling. The author has proposed the new approach of feedback control in which the phase of the loop transfer function is suitably adjusted so as to avoid the system instability. This paper describes the principle of the control method and the comparison between the theoretical estimations and experimental results.

#### 1. 緒言

従来のアクティブノイズコントロールでは Filtered-X LMS アルゴリズムによるフィードフォワード制御を用いることが主流である<sup>1),2)</sup>。これに対しフィードバック制御は、不安定振動が発生しやすいことから、ヘッドホンなどの局所空間制御や一部の内部モデルによる制御<sup>3),4),5)</sup>以外ではあまり用いられてこなかった。しかしフィードバック制御は直感的にもわかりやすく、コントローラーの構成も簡単なので、安定性が確保できれば実用的な利点があると考えられる。一方、騒音源となる機器には、電気機器のように常に特定の周波数スペクトルで騒音を発生するものも多くある。特定の離散的周波数だけを対象にするのであれば、適当な周波数フィルタをデジタル的にかけ、対象周波数での位相を調整することで安定化させることが出来る。筆者は、周期音を対象とし、FIR フィルタによる狭帯域フィルタをフィードバック制御に用いることでシステムの安定化を図る方法を提案している<sup>6)</sup>。本報告はその制御原理、制御システムの構成、得られる制御効果などについて述べ、さらに実験結果との比較や現状の問題点などについて考察した結果を紹介するものである。

---

\* 機械工学科

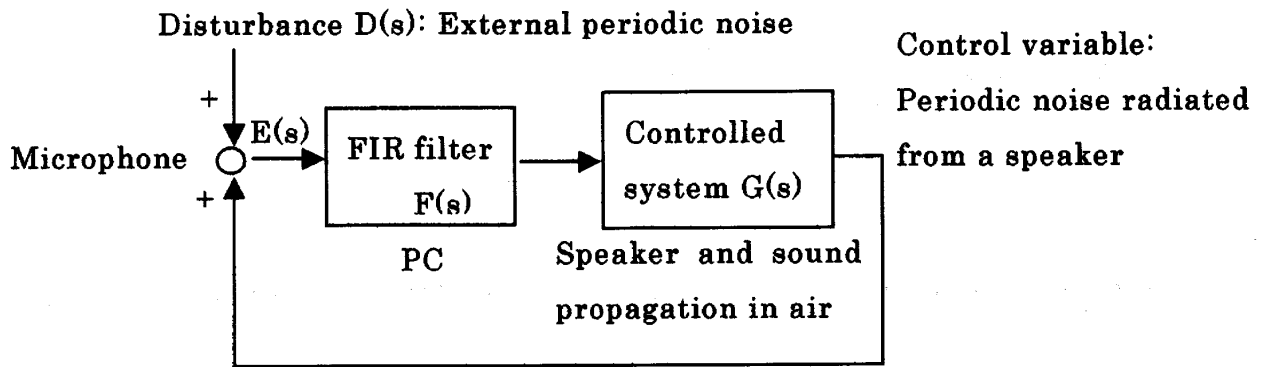


Fig.1 Block diagram of the proposed ANC system in which the FIR filter is used for system stability

2. 制御方法<sup>6)</sup>

図 1 にこの制御法の考え方をブロック線図で示す。消音対象とする音は周期音で、図 1 で外乱音圧  $D(s)$  として表している。図 1 の左端の加え合わせ点はマイクロホンで、外乱音と制御用スピーカから発生させた音を測定する。これらの音は空間で合成されるので、信号としては加算されることになる。この加算された信号をマイクロホンからの出力  $E(s)$  として表してある。 $E(s)$  は A/D 変換器を介して PC(パソコン)に取り込まれ、FIR(有限インパルス応答)フィルタ  $F(s)$  との畳み込み積和を計算した後、D/A 変換器でアナログ信号にもどして PC から出力される。その出力信号はオーディオアンプとスピーカを介して音に変換され、空気中に放射される。図 1 ではこれらの特性をまとめて  $G(s)$  と表している。制御用スピーカから放射された音はマイクロホンに到達し、消音対象の音と合成されて再びマイクロホンの出力信号となる。従来のフィードバック式 ANC システムでは FIR フィルタがなく、この部分に増幅器や位相遅れあるいは位相進み回路が用いられていた。従って安定性に対する補償が難しく、制御用スピーカとマイクロホンの距離が近いヘッドホンタイプ以外にはフィードバック制御方式は適用されていない。本研究では制御系の安定性を確保し、制御性能も満足できるような FIR フィルタの係数を決める方法を見出すことが目的である。いま、図 1 において外乱音圧  $D(s)$  とマイク位置での音圧  $E(s)$  との伝達関数を計算すると、 $E(s) = D(s) + E(s)F(s)G(s)$  より

$$\frac{E(s)}{D(s)} = \frac{1}{1 - F(s)G(s)} \quad \dots\dots(1)$$

である。 $G(s)$  はスピーカの特性と音の空間伝播特性とを含んでいるが、安定性に大きく影響するのは音が空間を伝播するときに生ずる時間遅れである。これはむだ時間要素となるから、制御系のゲインを大きし、 $|F(s)G(s)| \geq 1$  となると必ず不安定になり、発振

する。逆にいうと、この時間遅れの影響を何らかの方法でなくすことが出来れば、フィードバック制御も安定化させることが出来るのである。一つの方法として最近、制御器の中に制御対象のモデルを組み込み（内部モデル）、時間遅れの影響を差し引くことで安定化させる手法が報告されている<sup>3),4),5)</sup>。本研究はそれらとは違って、FIR フィルタを用いて狭帯域周波数フィルタをつくり、その選択された周波数で安定化するように位相調整を図るものである。狭帯域フィルタであるから、対象周波数以外の周波数ではゲインが小さく、従って位相に余裕がなくても安定となる。

### 3. FIR フィルタの設定方法

周波数フィルタとなる FIR フィルタの係数を決める方法の一つとして考えられるのは、FFT（高速フーリエ変換）を用いる方法である。すなわち、FFT で対象周波数に対応するくし型フィルタ（コムフィルタ）をつくっておき、それを逆 FFT で時間領域に戻しフィルタ係数を求める方法である。しかし今回は実際に実証実験を行うこと、そのために出来るだけ途中のプロセスをわかりやすいものにする必要があることなどから、ラプラス変換を利用して FIR フィルタの係数を決定した。対象周波数は、一般には幾つかの離散周波数となるが、今回は簡単のため単一周波数で行っている。

いま、FIR フィルタの係数として時間関数

$$f(t) = Ae^{-\gamma t} \cos(2\pi ft - \alpha) = Ae^{-\gamma t} (\cos 2\pi ft \cos \alpha + \sin 2\pi ft \sin \alpha) \quad \text{-----}(2)$$

を考える。ここで、A は振幅、f は対象周波数、 $\alpha$  は位相、 $\gamma$  は減衰を表す。f(t) を逆ラプラス変換すると

$$F(s) = A \frac{(s + \gamma) \cos \alpha + 2\pi f \sin \alpha}{(s + \gamma)^2 + (2\pi f)^2} \quad \text{-----}(3)$$

となる。F(s) は分子が s の一次式、分母が二次式となり、対象周波数 f の狭帯域フィルタとなる。対象周波数 f で  $s = 2\pi f i$  とおき、 $\gamma$  が小さいとすると

$$F(2\pi f i) = A \frac{(2\pi f i + \gamma) \cos \alpha + 2\pi f \sin \alpha}{4\pi f i \gamma} \cong A \frac{\cos \alpha - i \sin \alpha}{2\gamma} = \frac{A}{2\gamma} e^{-i\alpha} \quad \text{-----}(4)$$

最初  $\alpha$  の値を  $\alpha_{old}$  と与えておき、この狭帯域フィルタを通った信号の対象周波数での位相が  $\theta$  だったとする。安定化させるためには、式の  $-F(s)G(s)$  を正の実数にすること、つまり  $F(s)G(s)$  の位相を  $\pi$  にする必要がある。そこで  $\theta$  の位相が  $\pi$  になるように  $\alpha$  の値を  $\alpha_{new} = \alpha_{old} + \pi - \theta$  と修正し、FIR フィルタの係数を更新するのである。実際には  $\alpha_{old}$  の初期値を零と与えておくと、最初の一回で  $\theta$  の値は  $\pi$  になり、二回目以降の更新でも  $\pi$  になるので一回だけの計算でよい。

#### 4.制御システム

制御システムはPC内の計測制御用ソフト(LABVIEW)、A/D、D/Aコンバータなどの信号入出力用インターフェース、オーディオアンプとスピーカ、マイクロホン、信号発生器からなる。制御の実行の前に、システム同定として前述のFIRフィルタの設定を行う必要がある。図2にFIRフィルタを求めるときのブロック図を示す。PCで発生させたランダム信号をD/A変換器でアナログ信号に変え、アンプで増幅してスピーカから音を出す。その音が空間を伝播してマイクに測定されたときの音響信号をA/D変換器を用いてPCに取り込む。もとのランダム信号と測定信号との伝達関数を計算し、ナイキスト線図にしてPC上に表示する。

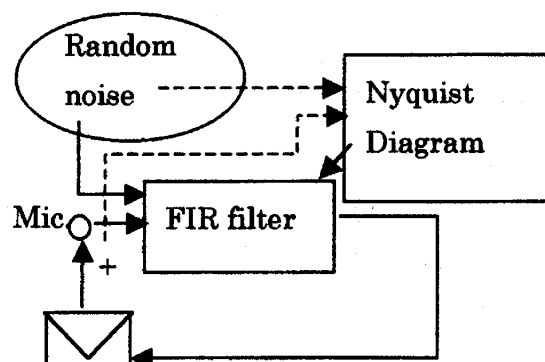


Fig.2 FIR filter identification

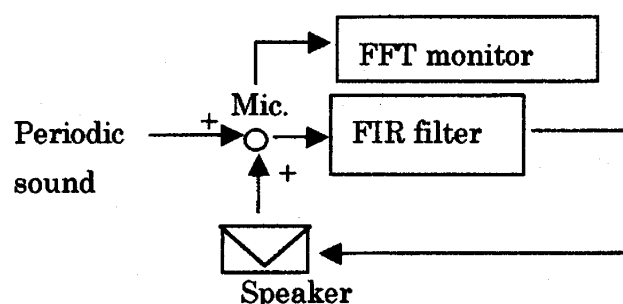


Fig.3 Noise cancellation for periodic sound

その一方でPC内部では、FIRフィルタの係数が対象周波数で伝達関数の位相を $\pi$ にするように自動的に調整される。ここでやっているのは位相の調整だけなので、ゲインはPCに数値入力して調整する。この結果はナイキスト線図に伝達関数が計算されるたびに表示され、システムの安定性を確認できる。なお、実際に制御を行ってみると時間遅れだけでなくスピーカの共振の影響なども現れてナイキスト線図が歪むことがあり、ゲインを大きく取れない場合が生じた。そこで、FIRフィルタの係数自動更新のあと、位相を微調整する機能も付け加えている。制御を実行するときのブロック線図を図3に示す。信号発生器から正弦波を発生させ、その音を音源用スピーカから鳴らす。一方、制御用スピーカからはPCから出力した信号の音を鳴らし、マイクロホンで両者の音の合成音が測定される。マイクロホンの信号はPCに取り込まれ、FIRフィルタを通して狭帯域フィルタをかけられ、ゲインと位相調整された後PCから出力されてまた制御用スピーカに送られる。マイクロホンで測定される音圧は図3に示すようにFFTされ、PC上の画面で消音効果を周波数分析グラフとしてモニターできるようになっている。

### 5. 実験結果と考察

実験は図 4 に示す構成で行った。音源は Function generator で発生させた 200Hz および 400Hz の純音を用いた。図に示すように二つのスピーカを 20 cm 離して対向させ、左側を音源用スピーカ、右側を制御用スピーカとしている。マイクロホンは両者の間でスピーカの中心を結ぶ線から 20cm 離れた所に置いている。はじめに、図 4 の破線矢印のように PC の出力信号を直接 PC の入力に接続したときの伝達関数のゲイン、位相、ナイキスト線図を図

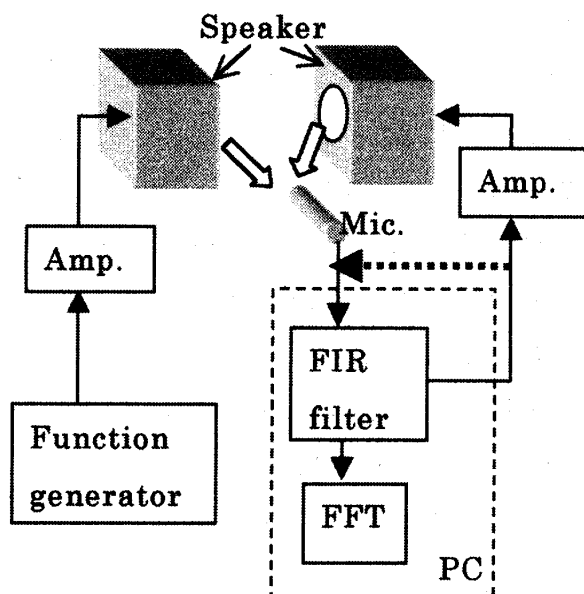


Fig. 4 Experimental setup

5(a)~(c)に示す。図 5(a)のゲインは FIR フィルタによる狭帯域フィルタの特性を示している。図 5(b)に示す位相は、FIR フィルタの選択周波数の前後で 180 度変化するが、それ以外に零 Hz から徐々に変化し、上限周波数（ナイキスト周波数）までで 360 度変化する。これは、PC の入出力の間にサンプリングレートに相当する時間遅れがあり、その分で零 Hz からナイキスト周波数まで直線的に 180 度変化するためである。図 5(c)のナイキスト線図をみると、位相の自動調整が行われていることがわかる。即ち、単位円の (1, 0) の点よりもナイキスト線図の軌跡が左によっており、システムが安定であることがわかる。軌跡が単位円の (1, 0) の点を含むとシステムは不安定になる。以上の結果はスピーカ特性や音の空間伝播特性を含んでいないので、割合きれいな軌跡となる。

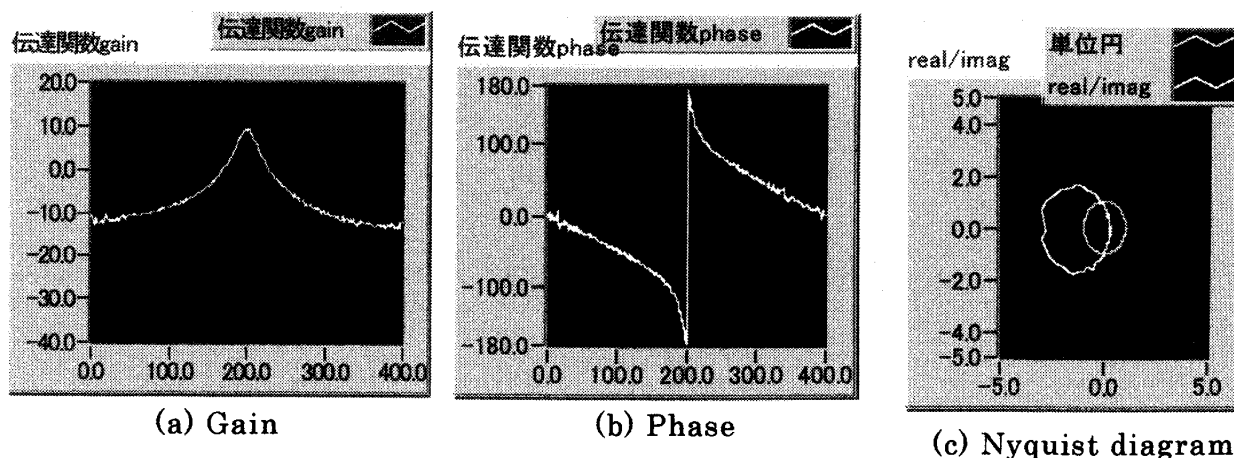


Fig. 5 Loop transfer function of FIR filter and time delay through PC

つぎに、200Hz の音を制御したときの一巡伝達関数のゲインとナイキスト線図、制御 ON/OFF 時の周波数分析結果を図 6(a),(b)と図 7、8 に示す。図 6(a)の伝達関数のゲインは少し低周波側にふくれた形となった。図 6(b)のナイキスト線図は(1,0)の点を含まず、システムが安定であることがわかる。図 7 は FIR フィルタの係数で、図 8 はマイクロホン位置での音圧の周波数分析図である。図 8 の結果は、低周波側で少しもり上がっているものの、200Hz でほぼ 12dB の低減となっており、消音が満足に行われたことを示している。

対象周波数での消音効果はナイキスト線図からほぼ推定できる。すなわち、式 (1) で  $s=j\omega$  とし、対象周波数  $\omega = \omega_0$  で  $F(j\omega_0)G(j\omega_0) = A$  (実数値) とすると、制御前に比べて制御後の音圧レベルは

$$20\log_{10} \frac{1}{1-A} = -20\log_{10}(1-A) \quad \text{----(5)}$$

だけ低下する。図 6(b)から、A の値はほぼ -3 だから、 $20\log_{10}4=12$  dB の低減効果が見込まれ、実験結果もほぼ理論どおりになっている。

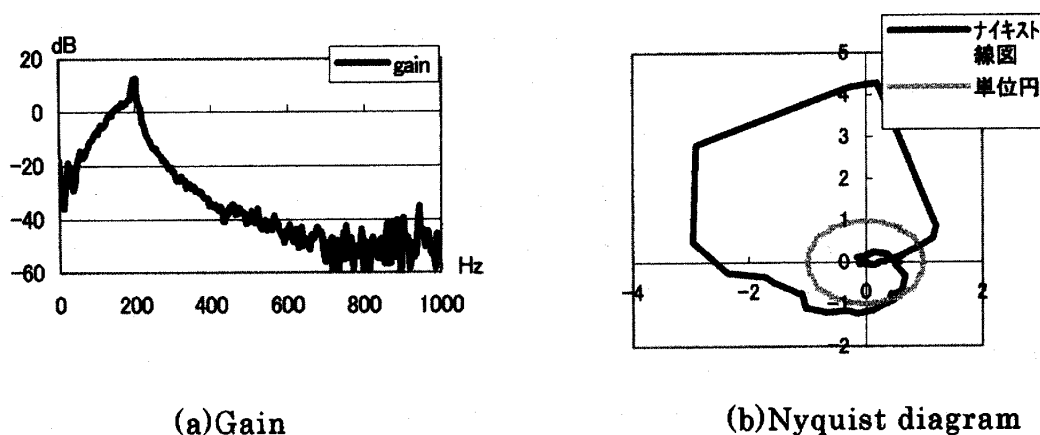


Fig.6 Loop transfer function where the frequency of the FIR filter is set at 200Hz

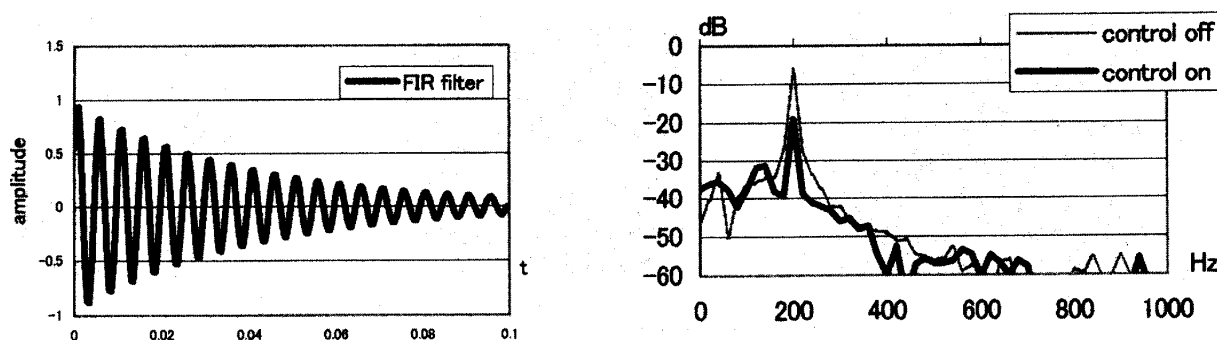


Fig.7 Coefficient of the FIR filter in the case of 200Hz

Fig.8 Comparison of the sound pressure levels at 200Hz with and without control

同様に、図 9(a)、(b)と図 10、図 11 は 400Hz の純音を対象としたときの結果である。図 9(a)は伝達関数のゲインであるが、狭帯域フィルタの対象周波数である 400Hz のほかに、200Hz より少し低いところにピークが見られる。これはスピーカの共振周波数であることがわかった。このため、ナイキスト線図では大きなループ軌跡の内側に小さなループ軌跡ができています。また、消音時に、この共振周波数で音が大きくなっていることが図 11 からわかる。ただし、実際には、消音中に図 11 の図を PC 上に描かせていると、演算が間に合わなくなって処理が途切れ、そのときのノイズがもとになってスピーカの共振が励起されることがわかった。図 11 を PC 上に描かないようにすると、共振周波数での音もなくなった。また、対象周波数での消音効果は上の式で予測すると約 10dB であるが、実際の結果もほぼそのようになっていることがわかる。

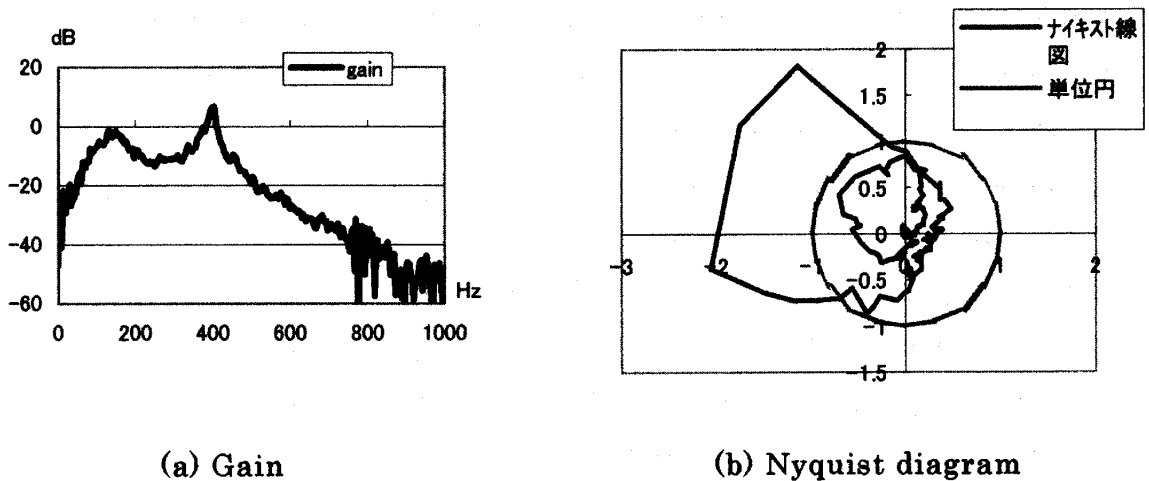


Fig.9 Loop transfer function where the frequency of the FIR filter is set at 400Hz

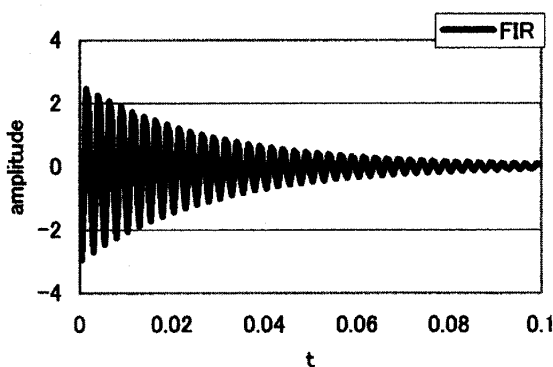


Fig.10 Coefficient of the FIR filter in the case of 400Hz

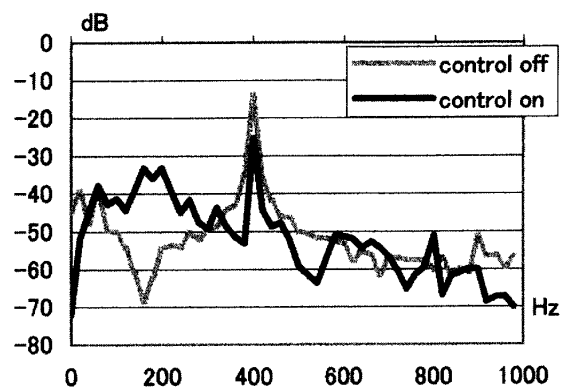


Fig.11 Comparison of the sound pressure levels at 400Hz with and without control

## 6. 結言

フィードバック制御によるANCは不安定になりやすいことが大きな問題となっていたが、周期音を対象にし、FIRフィルタで狭帯域フィルタを構成してゲインと位相を調整すると安定化できることがわかった。本研究では、ナイキスト線図でフィルタ特性や安定性を確認した後制御する手法を試み、ほぼ理論どおりに消音性能が得られることを確認した。スピーカの共振対策などは今後の検討課題である。

## 参考文献

- 1) Nelson, P. A. and Elliot, S.J., Active Control of Sound, (1993), ACADEMIC PRESS
- 2) 林、江波戸、鈴木、三次元空間における能動消音に関する研究 (音響パワー低減の推定における近似誤差)、日本機械学会論文集 (C) Vol.62, No.593(1996), 104 - 109
- 3) Estelle Leboucher 他, A decentralized adaptive feedback active noise control system of periodic sound in free space, Active 99,(1999) 973-984
- 4) Michael O'Brien, Patric Pratt, Active noise control using robust feedback techniques, IEEE International conference on acoustics speech and signal processing 2001, vol.5, 3209-3212
- 5) 佐野、宮本、足立、フィードバック制御にIMCを用いた2自由度騒音制御に関する研究、日本機械学会論文集、Vol.63、No.608、(1997)170-175
- 6) 林、周期音に対するフィードバック型ANCシステムの検討、日本音響学会秋季成果発表会講演論文集、(2002)、499-500

(平成14年11月14日受理)