

# 熱影響及び加速追従性を考慮した中型ディーゼル車用 アクティブ排気消音器の開発

田中 丈晴\* 李 克強\*\*

## Development of an active muffler for medium-duty diesel vehicle considering thermal influence and tracking control ability

by

Takeharu Tanaka\* Keqiang Li\*\*

### Abstract

The practical active exhaust muffler using ANC system was studied for reducing the harmonics of basic frequency which are the main components of exhaust noise generated by a medium size diesel engine truck during the period of acceleration. The muffler structure which reduces the thermal affect to ANC speaker by exhaust gas, was designed, and the time base Synchronized Filtered-X method with a modified variable stepsize algorithm was proposed as the control strategy in time-varying environment. The effectiveness are verified after applying the ANC system to the exhaust noise control of the truck on the condition of accelerated running.

---

原稿受付：平成 17 年 1 月 17 日

\* 環境研究領域

\*\* 中国清華大学自動車安全環境重点研究所教授

## 1. まえがき

アクティブノイズコントロール（以下、ANC法という）は、一部の分野では、実用段階にあるが、エンジン回転数や負荷の変動が大きく、さらに、熱影響など技術的な課題の多い自動車騒音低減への応用例は少ない。<sup>(1)</sup>

しかしながら、ANC法を自動車の排気騒音対策に応用した場合、背圧の上昇を抑制できる利点があり、エンジン出力及び燃費の向上につながる他、排気消音器の小型化や配置に自由度が増し、エンジン排気系騒音の一層の低減につながると考える。

これらの点から、筆者らは、貨物自動車の排気騒音低減対策の一つとしてANC法を用いた実用可能な排気騒音低減システム（以下、アクティブ排気消音器という）を開発した。ANC法の自動車用排気消音器への応用例では、二次音源用のスピーカ等の熱対策や加速時の制御における収束性や安定性の確保が実用上の課題となっている。<sup>(2)</sup>

本研究では、中型ディーゼルトラックの加速走行時における排気騒音の解析結果から、低周波数域のエンジン回転次数成分に着目し、これらを抑制するための実用的なアクティブ排気消音器を検討した。消音器の試作にあたっては、排気熱の影響を軽減できる構造とし、また、制御方式として、加速走行時における制御の収束性と安定性を確保するため、ステップサイズパラメータを可変にして収束させる方式を導入した時間ベースサンプリングによる同期式フィルタ法（SFXTB法）を提案した。実車台上実験の結果、これらの方式が加速走行時の排気騒音の低減に有効であることが確認できた。<sup>(3)(4)</sup>

Table 1 Specifications of test vehicle

Gross Vehicle Mass	7,780 (kg)
Engine Displacement / Number of Cylinders(Layout)	5,785 (ml) / 6 (in Line)
Maximum Power	136/3,000 (kW/rpm)
Maximum Torque	520/1,800 (Nm/rpm)
Model Year	1988 year

## 2. 加速時の排気騒音特性に関する検討

表1の中型ディーゼルトラック（4サイクル直6気筒）を供試車両として、加速時の排気騒音特性を把握するため、床面が15m×15m、室内高が約7mの半無響室内の台上試験装置上に車両を固定し、排気騒

音の測定を行った。測定位置は、アクティブ排気消音器と組み合わせて用いるパッシブ型副消音器の排気吐出口近傍とし、マイク設定位置の制約から、排気流に対し60度、0.2mの位置とした。運転条件は、ローラ上でのタイヤ騒音の影響を少なくするため低い車速範囲で、エンジン回転数の変化を大きくするため、定積載条件での変速段2速による緩加速運転を行った。この加速運転時の排気騒音のトラッキング解析結果を図1に示す。一般に、欧州及び国内において加速走行騒音試験の進入速度の基準とされているエンジン回転数（最大出力時のエンジン回転数の75%）は、表1から2,250rpmとなる。このエンジン回転数を概ね上限とする加速走行を検討対象とすると、図1から、加速時の排気騒音は、気筒数( $Z$ )とエンジン回転数( $m$ )から、式(1)で示される燃焼周波数( $f_0$ )を基本周波数とする高調波成分で構成され、エンジン回転の3次成分である基本周波数が主なものであることが確認できる。

$$f_0 = (Z/\tau) \times (m/60) \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

ただし、 $\tau$ は、定数 ( $\tau=2$ )。

したがって、アクティブ排気消音器の制御対象は、周期音である低次のこれらのエンジン回転次数成分に限定した。

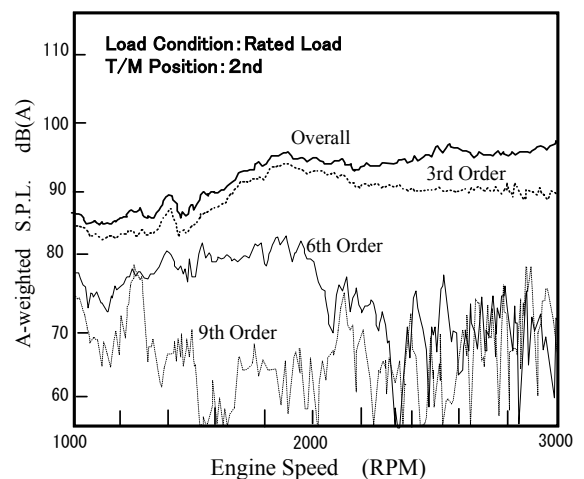


Fig.1 Tracking analysis result for exhaust noise during vehicle acceleration

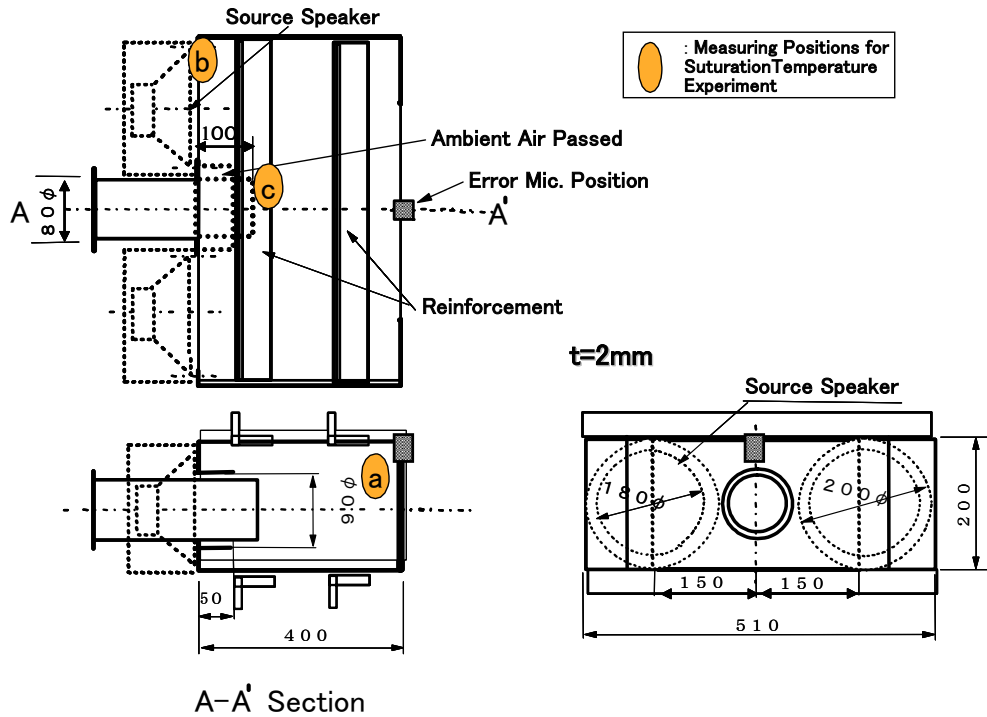


Fig.2 Schematic layout of the active system muffler and the measuring positions of the active muffler for saturation temperature experiment.

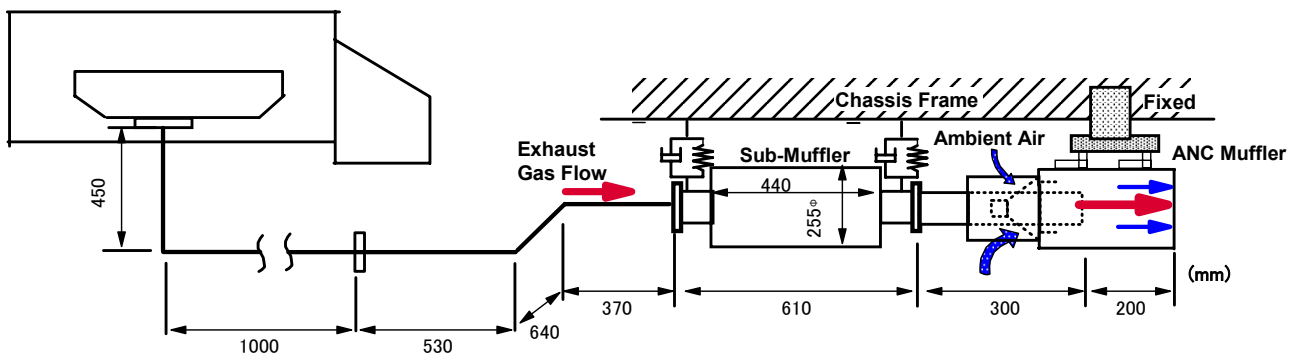


Fig.3 Schematic layout and dimension of exhaust system with the sub-muffler and the active muffler

### 3. アクティブ排気消音器の基本的考え方と熱対策

#### 3. 1. 基本的考え方

排気システムの基本的考え方は、排気騒音のエンジン回転次数成分をアクティブ排気消音器で減音し、それへの負担を軽減するとともに、中高周波数域の騒音をパッシブ型の副消音器で低減する方式とした。

ANC法は、音源からの放射音を二次音源から放射された逆相の音波によって減衰させる方法で、音源により近接して二次音源を配置することにより、低減効果が、より高い周波数域まで得ることができ

る。アクティブ排気消音器における二次音源の配置に関して、熱影響を考慮した研究例として、排気本管から枝管を分岐して二次音源を設置する方法や二次音源に接続された導入管を用いる方法<sup>(1)(5)(6)</sup>、排気管出口部に、直接、二次音源を設置する方法<sup>(7)</sup>などがある。しかし、導入管や枝管を用いる方法では、管の形状や長さによって共鳴や反射などの影響が避けられないこと、また、排気システムの小型化が困難となる。後者では、排気管出口部との接続方法によっては、熱伝達の影響が無視できない。また、いずれも、パッシブな低減効果が付加されない。

本研究では、熱影響と車両への搭載性並びに製作の簡便性を考慮し、アクティブ排気消音器として、二次音源を有する矩形断面のチャンバーを用いる方式を検討した。図2に試作したアクティブ排気消音器の外形図及び断面図を示す。図3に、アクティブ排気消音器の車両への取り付けと走行風の流入状況、並びに車両の排気システム全体の寸法諸元を示す。二次音源の配置に関しては、消音器内で排気流れと直行する方向の音響モードの発生を抑制するため、1次音源となる排気管吐出口に左右対称な位置にスピーカーを配置した。さらに、消音器の上下面のパネル振動による音の発生を抑制するため、図2のように各面をリブで補強した。

また、熱影響に関しては、排気管からの熱伝達を抑制するとともに、排気熱の影響を直接受けないようにするため、図2及び図3に示すように、副消音器出口フランジに接続された尾管を消音器内に挿入する方式とした。また、挿入部には、走行風を消音器内に導くことができるように隙間を設け、両者が接触しないようにして、車体のフレームに固定した。これにより、排気管からの熱伝達は抑制されるとともに、走行風による消音器内部の冷却効果が保持で

きると考える。また、消音器内部の温度上昇を防ぐとともに、パッシブな低減効果を考慮し、消音器出口部に、上下幅 200mm×水平幅 300mm の開口面を設けることとした。

### 3. 2. エラーマイク・二次音源間の音響伝達関数の測定

アクティブ排気消音器のエラーマイクと2個の二次音源間の音響伝達関数の測定結果を示す。アクティブ排気消音器のエラーマイクは、図2に示すように、2次音源から等距離の位置で、排気ガスが可能な限り直接エラーマイクに触れないように固定した。音響伝達関数の測定結果を図4に示す。測定は、入力及び出力側に、遮断周波数 350Hz のローパスフィルターを配置して行い、得られた伝達関数の振幅及び位相特性を表示した。

図4に示すように、二次音源A、または、Bの一個の音源を駆動した場合には、390Hz 付近に共鳴によるピークが発生し、かつ、その位相は、各条件で逆相となっている。二次音源A、Bを同時に駆動した場合には、このピークは、消失している。これは、二つのスピーカを同時に駆動することにより、消音器

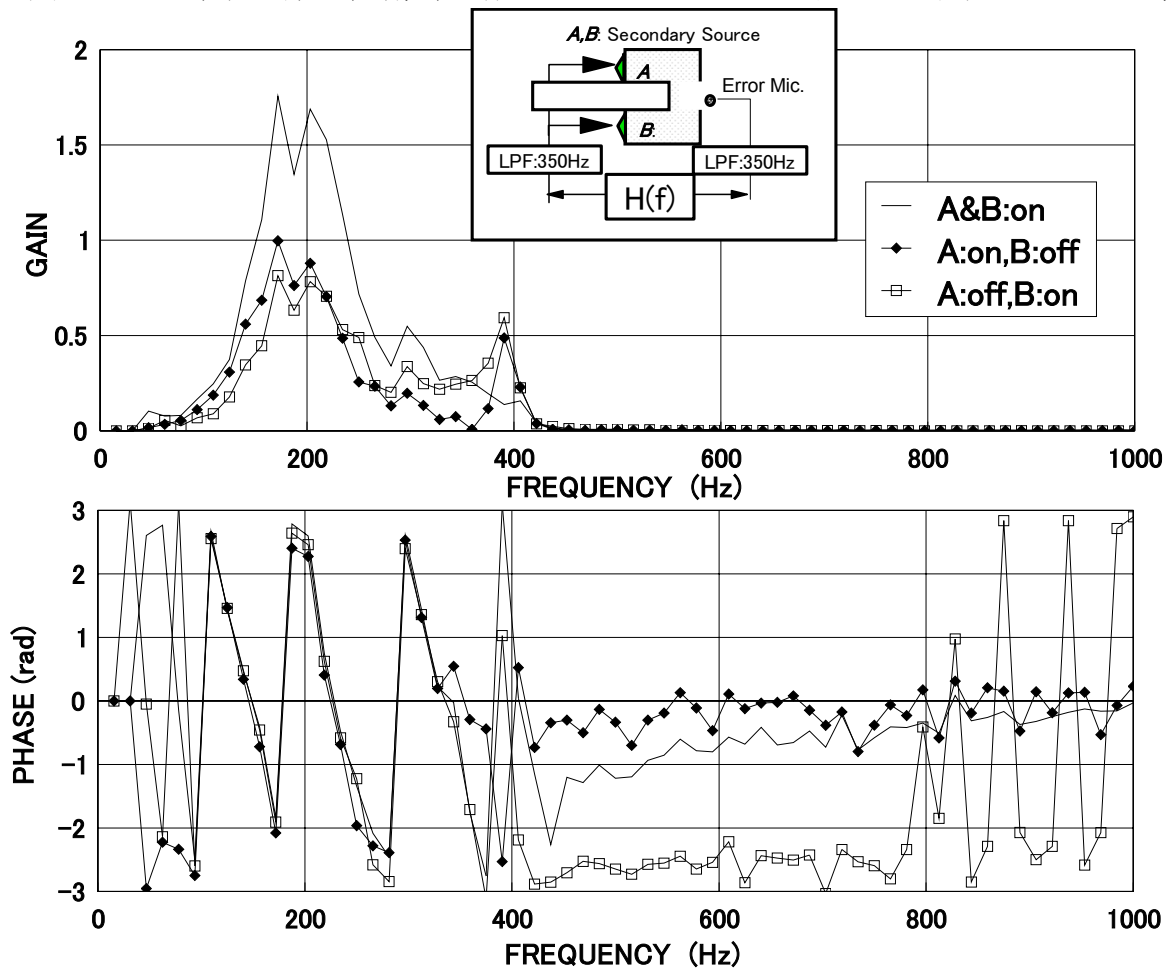


Fig.4 Measured result of acoustic transfer function  $H(f)$  between the error microphone and the dual source speaker of the muffler with L.P.F. ( $f_c=350\text{Hz}$ )

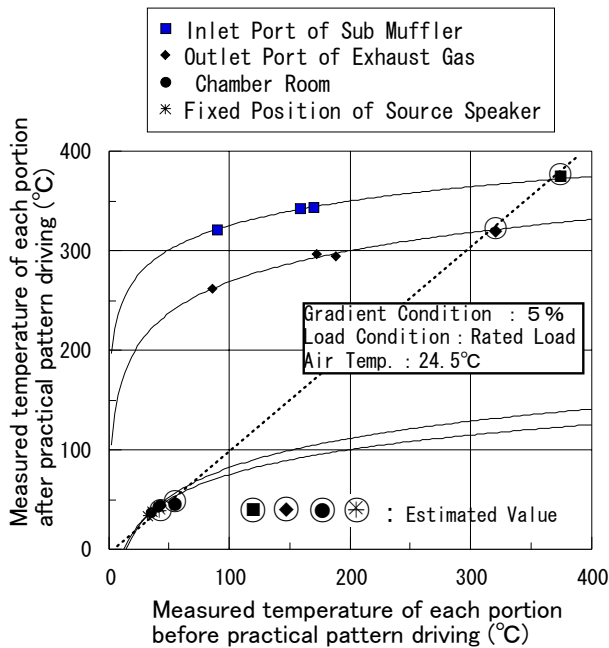


Fig.5 Estimated results for saturation temperature at the measuring positions of the active muffler under +5% ascending driving condition on CH-DY

チャンバー内部の排気流れ方向に直交する水平方向の1次共鳴による音響モードの発生が抑制されるためと推測される。

本 ANC システムでは、二つのスピーカを同時に駆動することにより、二次音源とエラーマイク間では、少なくとも 390Hz 近くまでは、平面波に近い音響伝播が形成されていると考えられる。

### 3. 3. 熱影響軽減方策の効果の検証

熱影響の軽減方策の効果を確認するため、これを試験車両に装着し、室内台上で 5% 勾配相当の登坂路走行実験を行った。温度の測定位置は、図 2 に示すように、消音器内部の雰囲気温度 (図 2 の a) とスピーカ取り付け部の表面温度 (図 2 の b)、サブマフラ入り口のガス雰囲気温度 (図 3 参照)、排気管出口部のガス雰囲気温度 (図 2 の c) の 4 カ所とし、各部位の飽和温度を実用上、簡便法として用いられている以下の測定法により推定した。温度測定は、CA の熱電対を用いた。

飽和温度の推定は、台上で任意の走行を行った場合の走行前と走行後における消音器の各部温度を測定し、これらを XY 軸上にプロットした点を外挿した曲線と走行前後の各部温度が等しくなる直線との

交点が各部の飽和温度に近似的に相当すると考えられる。本方法により飽和温度を推定した結果を図 5 に示す。

図 5 から、各部の温度は、サブマフラ入りロガス温度で約 370°C、排気管出口部で約 320°C 程度であるのに対し、消音器内部及びスピーカ取り付け部ではともに 50°C 程度である。標準的なスピーカの取り付け部及びコアの耐熱温度は 80~90°C とされており、二次音源として熱対策の施されていない標準的なスピーカでも、排気熱による影響は、本方式により十分に許容できる範囲にあることがわかる。

## 4. 制御アルゴリズムの検討

### 4. 1. 可変ステップサイズ方式の同期式適応フィルタ法

同期式適応フィルタ法 (Synchronized Filtered-X Algorithm, 以下、SFX 法という) は、入力信号の基本周期に同期したインパルス列を入力として仮想することにより、リファレンス信号の計算を簡略化できることから、収束計算を大幅に短縮できる方法であり、エンジンのアクティブ振動制御への適用例もある。<sup>(8)(9)</sup>

図 6 に、SFX 法を用いたアクティブ排気消音器の考え方と制御ブロック図を示す。

図 6 に示すように、仮想参照入力を次式のようにインパルス列と仮定する。

$$x(n) = \sum_{\beta=-\infty}^{\infty} \delta(n - \beta N) \quad (2)$$

ここで、 $\delta(\ )$  は、Kronecker delta 関数で、N は、

(1) 式で与えられる燃焼周波数に相当する周期性入力の一周期当たりのサンプリングポイント数である。Filtered-X で必要とされるリファレンス信号  $r(n)$  は、次式のようになる。

$$\begin{aligned} r(n) &= \sum_{j=0}^{N-1} c(j)x(n-j) = \sum_{\beta=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{N-1} c(j)\delta(n-j-\beta N) \\ &= \sum_{\beta=-\infty}^{\infty} c(n-\beta N) \equiv C(n) \end{aligned}$$

ここで、 $C(n)$  は、エイリアスされた周期時間数列 (Aliased periodic sequence) と呼ばれるもので、 $c(j)$  は、二次音源からエラーマイクまでのインパルス応答である。

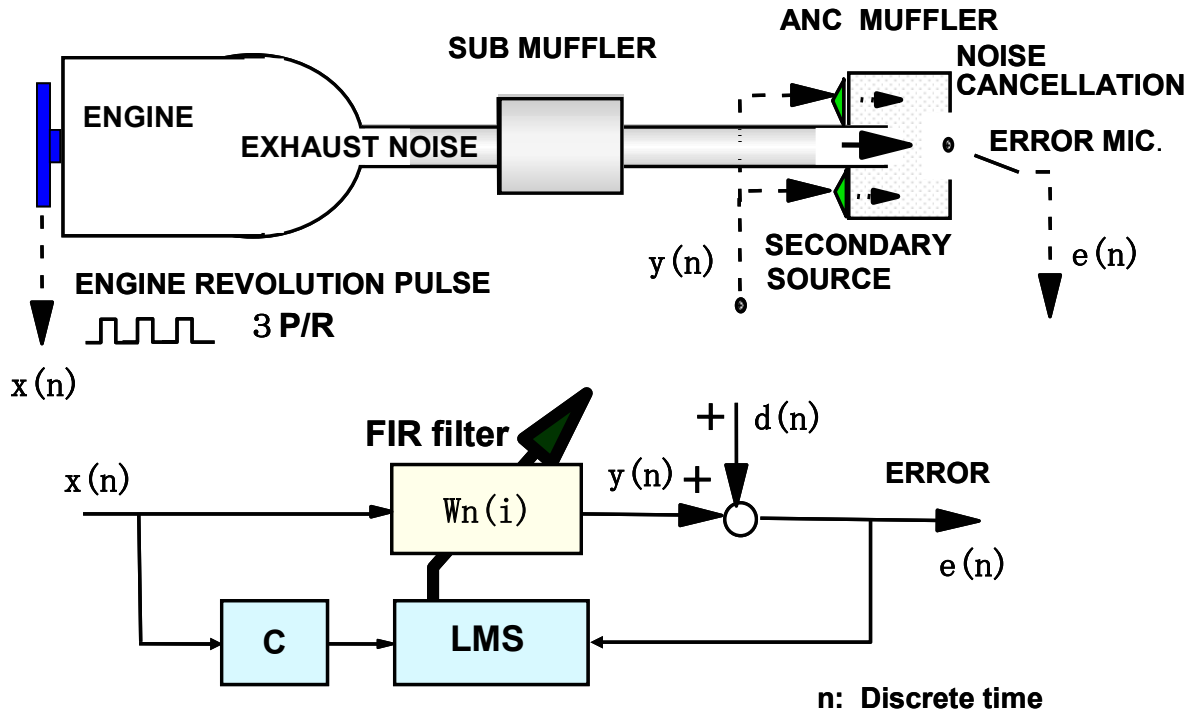


Fig.6 Block diagram of the SFX method as applied to exhaust noise control

S F X法では、時刻  $n$  における F I R フィルタの  $i$  タップ目の係数  $W_i(n)$  の更新式及びフィルタ出力は、次式で示される。

$$W_i(n+1) = W_i(n) - \mu e(n)r(n-i), \quad i = 0, 1, \dots, L-1 \quad (3)$$

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} W_i(n)x(n-i) = \sum_{i=0}^{L-1} W_i(n) \sum_{\beta=-N+1}^{N-1} \delta(n-\beta N-i) \\ = W_{j(n)}(n), \quad L = N \quad (4)$$

ここで、 $j(n) = n \bmod L$ 、 $L$  はフィルタのタップ数、 $e(n)$  は、時刻  $n$  におけるエラー信号、 $\mu$  は、ステップサイズパラメータである。

ここで、サンプリングを時間ベースで一定とすれば、エンジン回転数の変化に対して  $c(j)$  は不変であり、また、同時に変化する  $N$  に対してフィルタタップ長  $L$  も比例して変化させれば、エンジン回転数の変化に対しても S F X法が適用できると考える（以下、S F X-T B法という）。

また、適応制御においては、 $\mu$  を大きくすると制御の収束が速くなる一方、制御が不安定になりやすく、逆に、 $\mu$  を小さくすると制御安定性を向上させることができるが、制御の収束性が低下する。<sup>(10)(11)</sup>

したがって、ステップサイズパラメータ  $\mu$  をエラー信号の大きさによって変化させ、効率よく収束させる可変ステップサイズパラメータを用いた S F X-T B法を提案する。この場合のフィルタ係数更新式は、以下の式(5)、式(6)で示される。

$\mu > \mu_0$  のとき

$$W_i(n+1) = W_i(n) - \mu e(n)r(n-i) \quad (5)$$

$\mu \leq \mu_0$  のとき

$$W_i(n+1) = W_i(n) - \mu_0 e(n)r(n-i) \quad (6)$$

この場合；  $\mu = \mu_k A_k / A_0$ 、

$$A_0 = \max\{|e(0)|, |e(1)|, \dots, |e(n)|\}$$

$$A_k = \max\{|e(M+0)|, |e(M+1)|, \dots, |e(M+N_k-1)|\}$$

$$M = N_1 + N_2 + \dots + N_{k-1}$$

$A_0$ ；エラー信号絶対値の最大値、 $A_k$ ；第  $k$  番目基本周期内のエラー信号絶対値の最大値、 $\mu_0$ ； $\mu$  の最小値、 $\mu_k$ ； $\mu$  の最大値とする。

$\mu$  の最大値と最小値を設ける目的は、 $\mu$  限界値を設けることによって、制御安定性と制御収束性を保証するためである。式(5)に示すように、本方法は、ステップサイズパラメータ  $\mu$  をエラー信号の大きさ

によって変化させるものである。即ち、制御の初期段階において、大きな $\mu$ を選び、速く収束させ、エラー信号の値が小さくなった段階で、 $\mu$ 値を小さくする方法である。さらに、システムの応答が変化した場合には、 $\mu$ 値もそれに応じて変化する。

#### 4. 2. シミュレーションによる検討

ステップサイズパラメータを固定した場合と可変にした場合のSFX-TB法の制御追従性及び安定性を比較するため、MATLAB/Simulinkを用いたシミュレーション解析を行った。本解析においては、制御精度を向上させるため、ハイブリッドシステムの考えを導入した。即ち、システムモデルの作成が困難な二次音源とエラーマイク間のインパルス応答は、直接、実験モデルで置き換え、システムの他の部分は、MATLAB/Simulinkブロックでモデリングすることとした。図7に、シミュレーションのシステムブロック図を示す。

図中のブロック”Chirp”は、加速時における排気騒音のエンジン回転次数成分の変化を模擬する部分である。ここでは、基本周波数と各次数成分の掃引

開始周波数、掃引終了周波数及び掃引時間を設定する。また、掃引時間を無限大に設定すればエンジンの定常な回転状態を模擬できる。

ブロック”Chirp1”は、参照入力インパルス列を生成するために必要なもので、排気騒音のエンジン回転次数成分の基本周期と同期した状態を模擬する部分である。この両者のブロック間には、相関がある。

ブロック”Noise”は、システムに混入するノイズを模擬する部分で、上記のブロック”Chirp”及び”Chirp1”の信号とは、無相関である。

図8(a)(b)に、シミュレーション結果を示す。横軸は、計算回数を示し、サンプリングは2kHzで行い、1計算は500msに相当する。

図8(a)は、エンジン回転数が一定(1200rpm)である場合の制御結果を比較したものであるが、ステップサイズパラメータ $\mu$ を可変にした方がより安定な収束結果が得られている。図8(b)は、エンジン回転数が1200rpmから2400rpmまでの加速時における制御結果を比較したものであるが、同様に、 $\mu$ を可変にした方が収束も速く、安定性にも優れている。

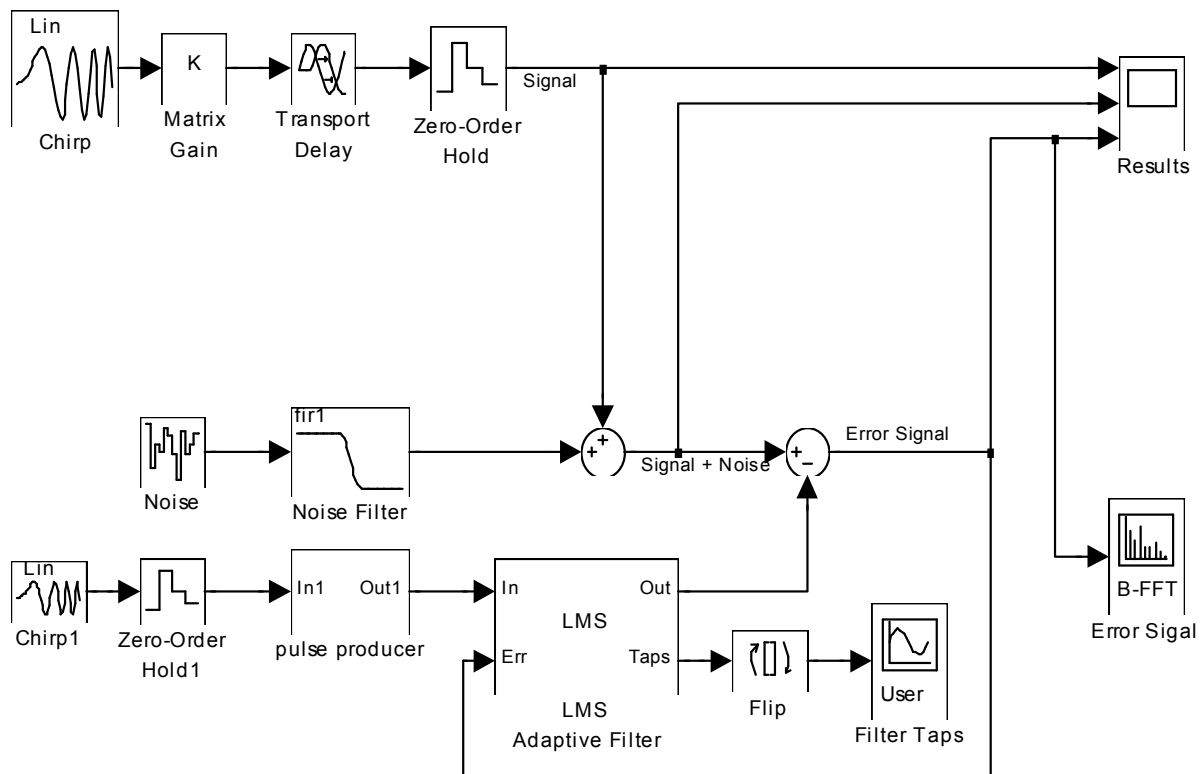


Fig.7 Block diagram of the simulation system



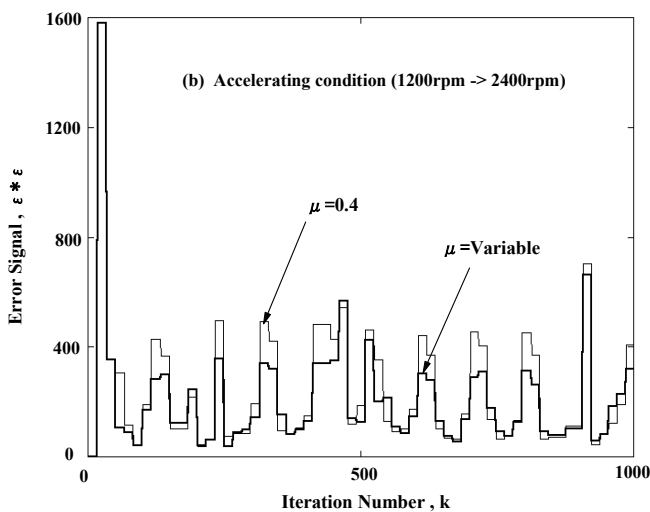
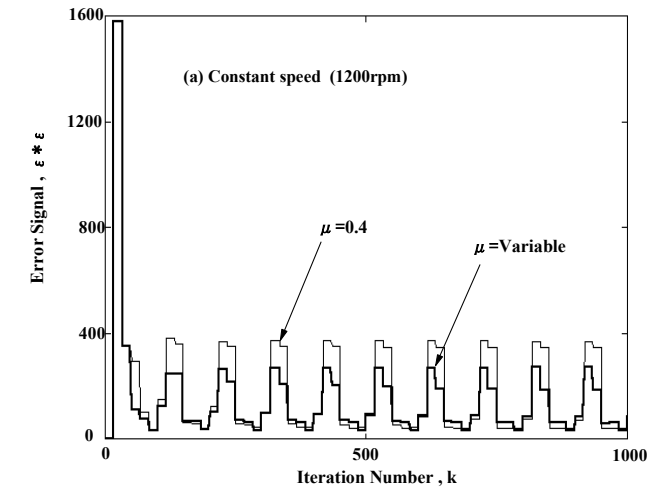


Fig.8 Simulation results for both methods. (a) Constant speed (1200rpm); (b) Under acceleration (1200rpm>2400rpm)

これらのシミュレーション結果から、可変ステップサイズパラメータを用いたSFX-TB法は、制御の収束性及び安定性ともにステップサイズパラメータを固定する方式よりは、優れていることが確認できた。

### 5. 実車実験の概要

試作したアクティブ排気消音器を実車に装着し、加速走行時の制御の収束性及び安定性について考察した。

実験は、表1の試験車両を実車台上試験装置上に設置して、空積載条件での平坦路走行抵抗を設定し、人為運転による加速走行を行った。運転条件として、変速位置3速、エンジン回転数1200rpmの条件から加

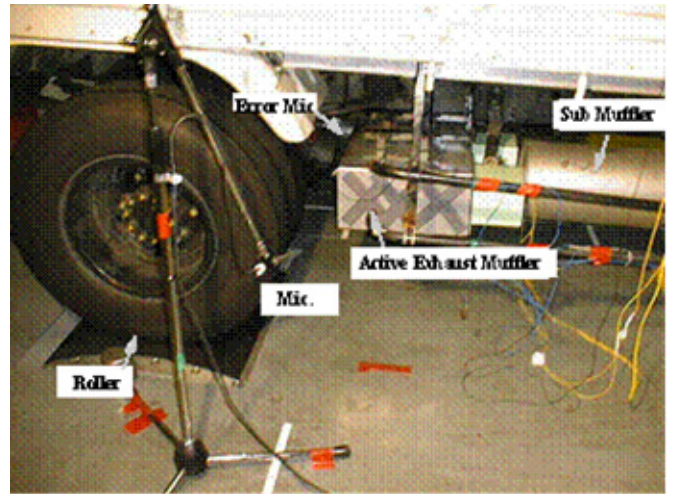


Fig.9 Active muffler and vehicle test set up

速を開始し、2400rpmに到達した後加速を終了することとし、エンジン回転増加率は、100rpm/secを目標とした。本試験車両の場合、JIS等において規格化された加速走行騒音試験法に基づけば、加速走行時のエンジン回転増加率は、90rpm/sec~120rpm/secの範囲にあり、上記の目標値は概ね妥当であると考ええる。

騒音測定位置は、近傍に後輪タイヤが位置しており、図9に示すように試作消音器の排気出口中心から排気ガス流れに対して90度方向に60cmの位置とした。また、騒音測定時の周波数特性は、アクティブ排気消音器の低減効果が、概ね300Hz以下の低周波数域に限定されることから、主として、FLAT特性を用いた。また、実験に用いたANC制御システム及びアクティブ排気消音器のスピーカーの各仕様を表2、表3に示す。

Table 2 Specification of ANC Control System

DSP Board	HERON (DSP6031)
Clock Frequency	40 MHz
Sampling Rate	3.2 kHz
Filter Tap Total Number	32

Table 3 Specification of ANC Muffler

Source Speaker	FOSTEX-FW127×2
Diameter of Source Speaker	160 (mm)
Rated Input	17 (W)
Max. Input	50 (W)
Amplifier	Roland SRA-1200(2ch)



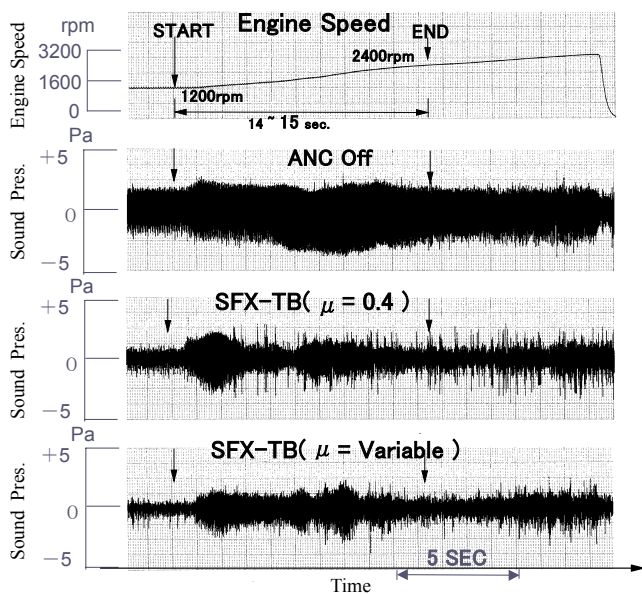


Fig.10 Sound pressure time history of exhaust noise with the ANC system on/off during acceleration

## 6. 実験結果と考察

加速走行時におけるSFX-TB法による制御効果を比較するため、制御オン及びオフの場合における排気騒音の音圧波形を比較した結果を図9に示す。

結果から、ステップサイズパラメータを $\mu = 0.4$ に固定した場合、加速開始直後において制御の収束が遅くなっており、低減効果が十分得られていないが、ステップサイズパラメータを可変にする方法では、この点が、ある程度改善されている。また、加速途中においても、後者の方が、制御安定性が向上している。また、このときの排気騒音についてエンジン回転数によるトラッキング解析を行った結果を図11に示す。図10と同様に、図11では、ステップサイズパラメータを固定した場合には、加速開始直後のエンジン回転数1300rpm前後において、制御オフの場合を上回る音圧レベルの上昇がみられるが、ステップサイズパラメータを可変にした方法では、大幅に改善され、制御オフの場合に比較し、加速走行時の全般を通じて、約3dB~10dB程度の低減効果が得られていることが確認できる。

これらの実験結果から、今回、新たに提案した可変ステップサイズパラメータを用いたSFX-TB法は、加速走行時におけるエンジン回転数の変化に対して、制御の収束性と制御安定性が、ともにステ

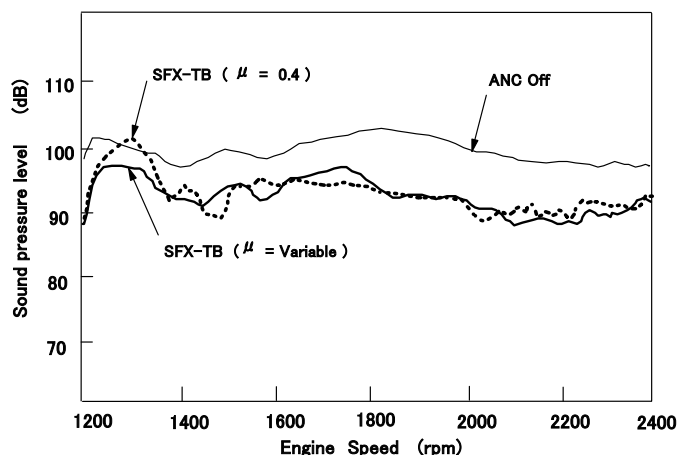


Fig.11 Tracking analysis results for exhaust noise with linear weighting during acceleration.

ップサイズパラメータを固定した場合より、大幅に向上することが明らかとなった。

## 7. 結論

中型ディーゼルトラックを対象にして、加速走行時の排気騒音の主要成分を占めるエンジン回転次数成分の低減を目標としたアクティブ排気消音器を開発した。

(1) アクティブ排気消音器における排気熱による影響を軽減する方策の有効性を実車実験により確認した。これにより熱対策の施されていない標準的なスピーカを二次音源として使用することが可能となった。

(2) 制御アルゴリズムとして、可変ステップサイズパラメータ方式を用いた時間ベースサンプリングによる同期式適応フィルタ法(SFX-TB法)を提案した。

(3) 可変ステップサイズパラメータによるSFX-TB法では、加速時の制御の収束性と安定性が、ステップサイズパラメータを固定した場合より大幅に向上することをシミュレーションと実車実験により確認した。

(4) 室内台上においてエンジン回転数が1200rpm~2400rpmまでの実車による加速走行(100rpm/sec目標)を行った結果、今回のアクティブ排気消音器では、制御オフの場合に比べて、エンジン回転次数成分のオーバーオール値で、約3dB~10dB程度の低減効果が得られた。

以上の結果から、従来、ANC法を応用した自動車用アクティブ排気消音器の実用上の課題とされて

きた排気熱による影響への対策及び加速時の制御の追従性や安定性の確保について一つの解決方を明らかにすることができた。

今後は、消音量の向上や耐久性に関しても検討を進めるとともに、制御システムの安定性を高めるためオンライン同定法を導入していく予定である。

最後に、本研究の実施にあたって、ご協力を戴いた関係各位に謝意を表します。

## 文 献

- (1)大久保他；ディーゼル機関用アクティブ排気消音システムの研究開発、(社)自動車技術会シンポジウム、20004505、平成12年11月
- (2) T.Mori et al., Inter-Noise91(1991), 529-532
- (3) T.Tanaka, K.Li, Development of an Active Muffler for Medium-duty Diesel Vehicles considering Thermal Influence and Control Trackability, Noise Control Eng. J. 51(2), 2003 Mar-Apr
- (4) 田中、李；熱影響及び加速追従性を考慮した中型ディーゼル車用アクティブ排気消音器に関する研究、(社)日本機械学会論文集(C編)、67巻、655号、(2001-3)
- (5) 林 卓郎；音響パワー制御によるアクティブ騒音制御の研究、
- (6) H.S.Kim et al., Active Noise Control with the Active Muffler in Automotive Exhaust System, JSME International Journal, Series C, Vol 41, No.2(1998), 178-183
- (7) T.Ohnuma et al., Active Control of Exhaust Noise of Diesel Engine by Wave Synthesis Method, Proc. International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Tokyo (1991), 267-272
- (8) 浜田他、同期式適応フィルタとそのアクティブ騒音・振動制御への応用、音講論、平成4年3月
- (9) 青木他；適応制御を用いたアクティブコントロールエンジンマウント(ACM)について、(社)自動車技術会シンポジウム、20004507、平成12年11月
- (10) S.M.Kou, D.R.Morgan, *Active Noise Control System*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996
- (11) B.Widrow, S.D.Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1985