

有限要素法による消音器内部空間の三次元音場解析

小嶋 直哉*・周 海*・末松 孝修**
三好 尚文**

3D Acoustic Field Analysis in Mufflers Using Finite Element Method

Naoya KOJIMA, Hai ZHOU, Takanobu SUEMATSU and Naofumi MIYOSHI

Abstract

This paper describes the 3D analysis of acoustic field in mufflers and its acoustic attenuation using FEM. In applying the FEM to the open region of the muffler, the finite region was set to the muffler exit and the hemi-infinite region was set combining with the finite region outwards. The finite elements were introduced to the finite region and the decay type infinite elements to the hemi-infinite region. This method was applied to a cavity type muffler and the results were compared with both obtained through the transfer matrix method and pure tone experiments. The frequency characteristics of the attenuation of the muffler calculated by this method showed good agreements with the experiment results.

1. 緒 言

快適な環境を作るために機械類から放射される騒音の低減について様々な対策が施されている。例えば、内燃機関の排気音などは、騒音の発生そのものが防げないので消音器が用いられている。消音器の設計の際に計算によりその効果が予測できれば、その開発において有用な手法となり得る。

消音器についての音場解析に関するこれまでの研究として、加川ら⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾は解析対象モデルとして軸対称の消音器モデルを用い、吸音壁や関数展開による解析的な表現手法により消音器出口からの開領域を取り扱い、実験値と計算値との比較検討を行なっている。また山崎ら⁽⁵⁾は開放端を持つ音響管の音圧特性について、音響管出口から一定の領域を設け、その領域を有限要素により分割し、その外側を吸音壁により吸音するという方法を提案している。しかしこれらは軸対象としているので、本質的には二次元空間であり任意形状の消

音器モデルの消音量の予測は不可能である。三次元解析についてはD.F.Ross⁽⁶⁾により多孔管を持つ消音器の解析が行なわれている。しかし、消音器出口については考慮されていない。

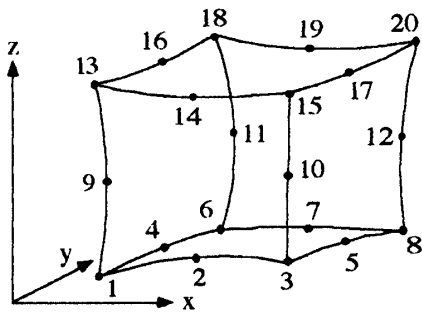
そこで本研究では有限要素法を用いて消音器モデルについて三次元音場解析を試み、定常状態における消音特性および内部音場の予測を行なった。本研究では、開領域を含む三次元音場の有限要素解析を行ない、消音器を設計する際に最も基礎的なデータである消音特性を予測する方法として確立させることを目的とする。まず、単純な音響管モデルを用いて、計算結果と実験結果を比較することにより、開口部を有する音場に関して精度よく解析できることを確認した。また、各種形状を持つ消音器について適用を行ない、消音特性および空洞内部音圧分布を求め検討を行ない、本法の有用性を確かめた。

2. 有限要素モデル

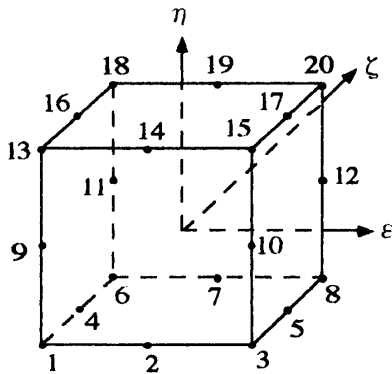
音場を支配する方程式は、調和振動に対象を限れば次式のようなヘルムホルツ方程式となる。

*機械工学科

**大学院機械工学専攻



(a) 全体座標系



(b) 局所座標系

図1 20節点を持つ6面体アイソパラメトリック要素

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \tag{1}$$

ただし

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad k = \frac{\omega}{c} \tag{2}$$

このヘルムホルツ方程式を適当な境界条件のもとでガラーキン法⁽⁷⁾を用いて定式化および各要素に対して離散化を行なう。

ここでは三次元の任意形状を扱うことを目的としているため、六面体アイソパラメトリック要素を採用し、形状関数も内挿関数と同様、二次関数を用いて近似することにする。実際に計算を行なうために、全体座標系から局所座標系へ座標変換を行なう。図1に示すような20節点アイソパラメトリック要素⁽⁷⁾を考える。図(a)は全体座標系、図(b)は局所座標系である。ε、ζ、η方向ともに形状関数は二次関数で近似するものとする。

開領域を含む音場の解析方法として、図2に示すように消音器出口からの半無限空間を有限領域と半無限領域とに分け、有限領域には通常の有限要素、半無限領域には減衰型無限要素を用い半無限空間を含む音場の

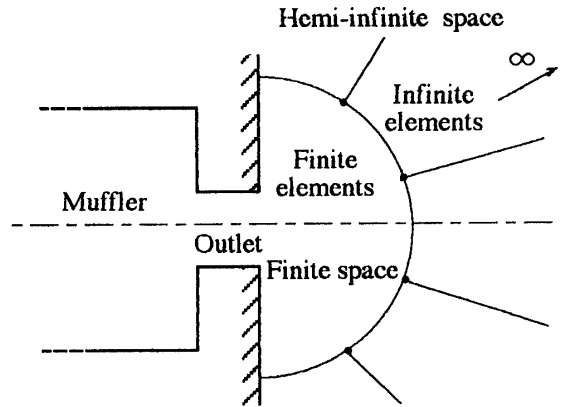


図2 消音器出口の音響放射モデル

解析を行なうこととした⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

3. 基礎的検討

減衰型無限要素を用いることによって、一端が半無限空間に向かって開放されている音場空間の解析ができるかを検討するために、直管の中心軸上音圧について、本法による計算値と実験値、および平面波理論に基づく解析解との比較を行なった。直管の長さは600mm、直径は100mmであり、要素分割は直管の長さ方向に20分割、断面を4分割した。その結果、要素数は80、節点数は621となり出口部分に図3に示すような半無限空間を表わす要素を接合し、総要素数は296、総節点数は1628となった。

管入口部の音圧レベルを0dBとして、管内中心軸上音圧の相対レベルを図4に示す。図中の実線は本法による計算結果、破線は一次元音響理論に基づき計算した結果であり、丸印は実測値である。1kHzにおいては多少の差異はあるものの実測値と計算値は良く一致している。計算値と実測値との誤差があるのは、計算においては音響管壁が完全な剛体と仮定しているが、実験にはアクリル樹脂を使用したため壁面での吸音により実測値は幾分小さくなったものと思われる。また2kHzにおいては、本法による計算結果と実測結果は多少の差異はあるものの一致しているといえる。計算結果と音響理論による解析結果は違いがみられるが、これは理論解析の結果1993Hzにおいて管内の周方向の第一次共鳴が生じるため、これ以上の周波数域においては管内に平面波の仮定が成立しなくなり、一次元音響理論に基づく計算では正確な解を得ることは出来ないからである。

以上の結果から、本法により開口部を有する音場に

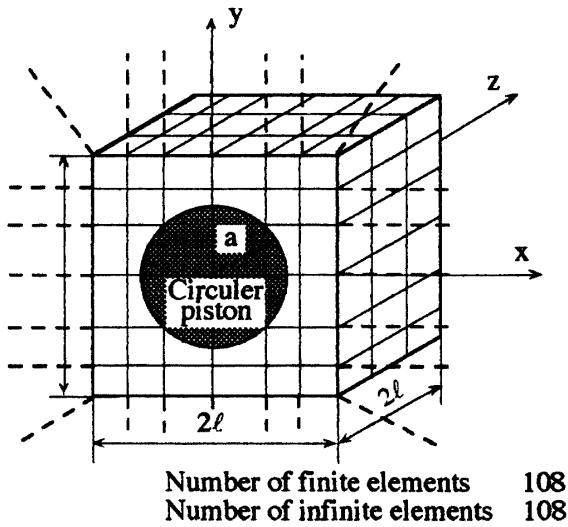
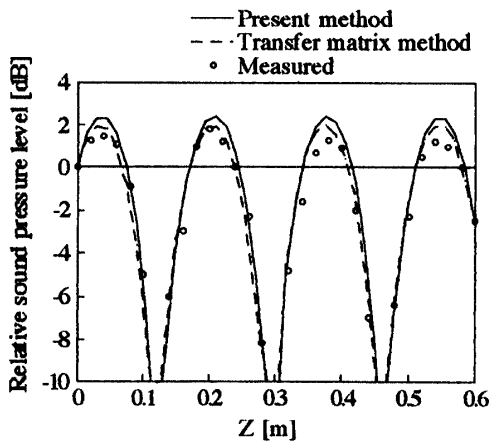
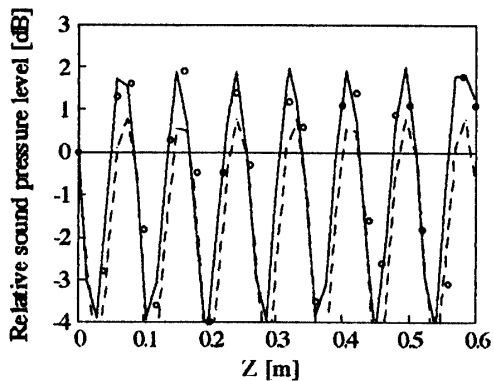


図3 消音器出口要素と外部要素

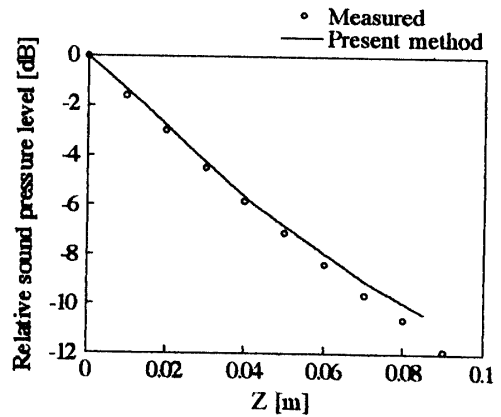


(a) 1kHz

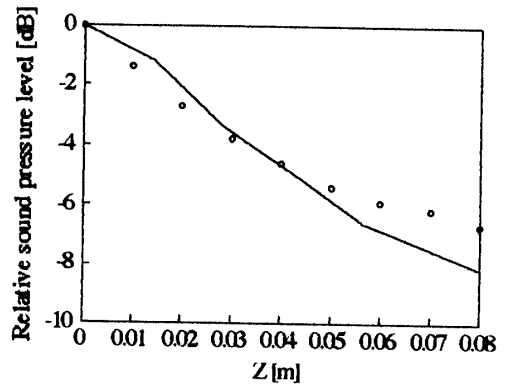


(b) 2kHz

図4 一端開放直管の中心軸上音圧



(a) 1kHz



(b) 2kHz

図5 一端開放直管の出口中心軸上音圧

ついて、直管内部空間の音圧分布の予測を正確に行なえることが確認された。

次に、同じ音響管の中心軸上で、出口から外部空間における音圧値を実測と比較した結果を図5に示す。実線は本法による計算結果を示し、丸印は実測値を示している。音圧レベルは音響管出口端面の音圧を0dBとした相対レベルで表わしている。計算において音響管出口からの有限領域を波長の0.25倍としたため出口端面から1kHzでは85mm、また2kHzにおいては有限領域を波長の0.5倍としたため85mmまでの計算結果を示す。計算結果と実測結果を比較してみると、各周波数とも若干の差異はあるものの良く一致している。

以上の結果から本法が音場内部空間のみでなく半無限空間への音響放射問題に対しても精度良く解析できることがわかった。

4. 消音器への適用

4.1 解析条件と消音効果

消音器の消音特性を算出するにあたり、以下に示す計算条件を与えた。

(1) 音源は定音圧音源、すなわち消音器を付けても付けなくても音源部から出る音圧は一定である。

(2) 壁面は振動せず音響エネルギーは透過しない、すなわち壁面は剛壁である。

(3) 消音器内の気流による影響は無視する。

(4) 管内の媒質の密度、および音速は一定である。

(5) 媒質の粘性による影響やエネルギー損失は無視する。

なお、媒質の音速および密度はそれぞれ実験状態に合わせて算出した。

消音器の評価方法として消音効果 Att (Attenuation)を用いた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。Att は、管出口端から一定の距離における消音器を付けないときの音圧レベル SPL から、消音器を付けたときの同方向同距離の音圧レベル SPL を差し引いたもので、次のように表わされる。

$$\text{Att}[\text{dB}] = \text{SPL}' - \text{SPL} \quad (3)$$

Att を求める計算においては消音器を付けないとき、すなわち基準直管の長さは、入口管の長さと同じとした。また計算における音圧値は、それぞれ出口端面の音圧値を代表として算出した。

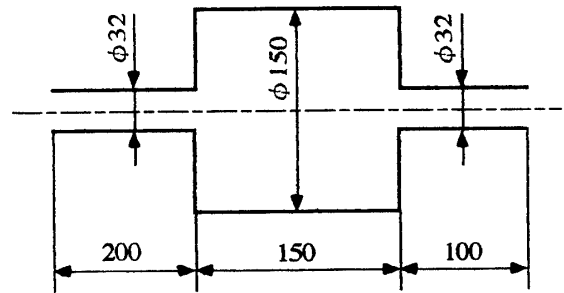
4.2 単純空洞型消音器

4.2.1 消音器の消音効果

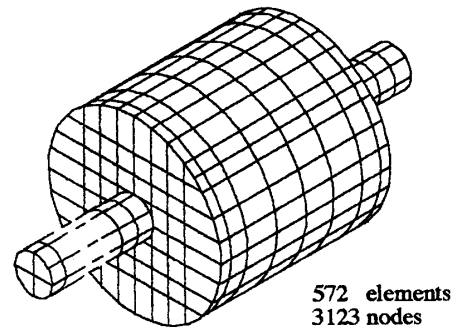
解析の基本となる消音器モデルの各部寸法および要素分割を図6に示す。消音器内に要素数は572、節点数は3123であるが、尾管出口端に図3に示す半無限空間を表わす要素が結合され、総要素数684、総節点数3123となった。

図6に示した単純空洞型消音器の消音効果 Att について、本法による計算と実験により求めた結果とを比較して図7に示す。図中の実線は計算値、丸印は実測値を示す。この図において、消音効果 Att が大きいほど消音器を取り付けたことによる消音効果が大きく、逆に Att が負の値をとるところでは消音器を取り付けることによりかえって大きな音を発生してしまうことを表わしている。

単純空洞型消音器においては入口管、空洞および尾管内部の共鳴、反共鳴により消音を行なう。ここで用いたモデルにおいて反共鳴周波数は入口管は425Hz、1.3



(a) 寸法



(b) 要素分割

図6 単純空洞型消音器モデルの寸法及び要素分割

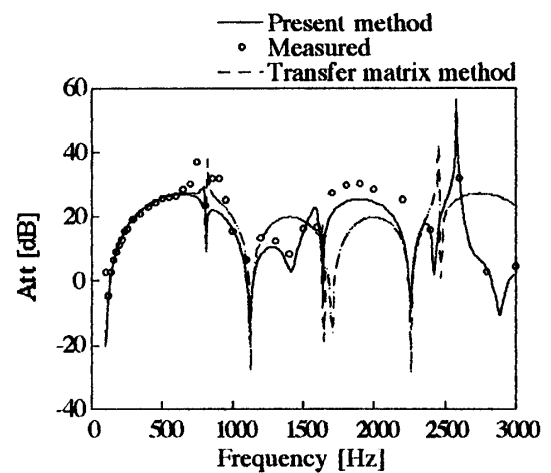


図7 単純空洞型消音器の消音効果

kHz、2.1kHz 付近、空洞は567Hz、1.7kHz、2.8kHz 付近、尾管は850Hz、2.6kHz 付近でありこのような周波数付近において消音が期待できる。また Att が負の値をとる原因は各部の内部に生じる共鳴によるものであり、800Hz 付近は入口管、1.1kHz 付近は空洞、1.7 kHz 付近は尾管のそれぞれ軸方向の第一次共鳴が生じるため、Att はこれらの周波数およびこれらの二次、三

次共鳴周波数付近において負の値をとる。

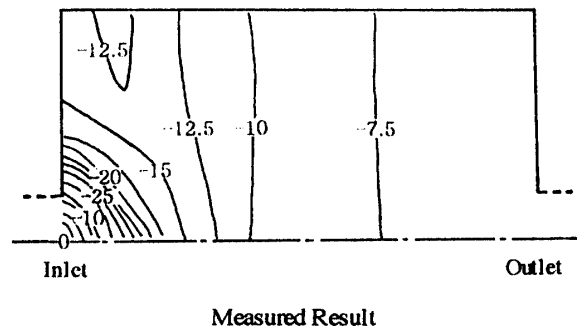
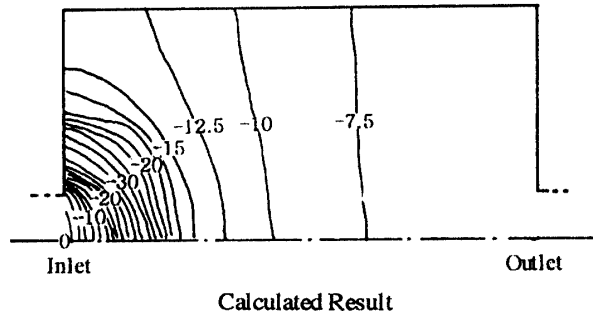
計算結果と実測値とを比較してみると低い周波数域では良く一致しているが、600Hz~800Hz、1kHz以上の周波数域では数dB程度の誤差がみられる。この原因として、先にも述べた通り800Hz付近は入口管の長さ方向の第一次共鳴にあたり、この共鳴周波数付近においては1~2Hzの違いで音圧レベルがかなり変化してしまうためである。実験において基準直管を測定したときの周波数と消音器を取り付けて測定したときの周波数を正しく一致させなければならないのだが、完全な一致がとれなかったため共鳴周波数付近で実測値に誤差が出たものと思われる。1kHz以上においては、先の計算条件の(2)に挙げたように、計算においては壁面は剛壁としているが、実験にはアクリル樹脂を使用したため消音器壁面における吸音が影響して数dBの差が生じたと思われる⁽¹²⁾。しかし、計算値と実測値との間では若干の差異があるものの全体としてかなり良好な一致を示しているといえる。

これまで行われてきた伝達マトリックス法による消音器の消音特性の予測は、数値計算における計算時間や計算機容量が小さくてもすむという利点がある反面、断面積と長さ以外の具体的な形状が計算に反映できず、任意形状を持つ消音器の消音特性を評価できない。さらに限界周波数以上の高周波数領域での消音特性を導くことも不可能である。そこで本法と伝達マトリックス法では、どのように計算結果に違いが出るのかを調べてみた。

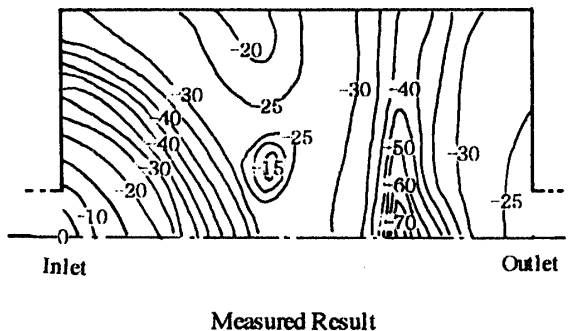
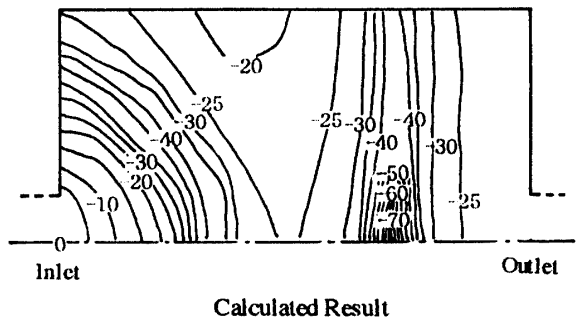
図7に、本法および伝達マトリックス法により求めた前節と同じ形状の単純空胴型消音器のAttを示す。図中の実線は本法による計算結果、破線は伝達マトリックス法による計算結果である。伝達マトリックス法における計算には入口管および尾管の開口端補正が必要となるため、補正長 Δl として $0.6a$ (a :入口管および尾管の直径)をそれぞれ与えた⁽¹²⁾。両者を比較すると1.2k~1.4kHzにおいて、伝達マトリックス法により算出したAttが本法によって求めた値よりも大きくなっている。これは1328Hzにおいて空胴の周方向の第一次共鳴が生じ、これ以上の周波数域では空胴部において平面波の仮定が成立しなくなるため、波動を一次的に考える伝達マトリックス法では解析が不可能となるためである。すなわち本解析で用いた消音器の場合、1.1kHz付近が伝達マトリックス法の上限周波数である。このことより、高い周波数域まで解析するには本法のように三次元解析が必要であることが明らかである。

4.2.2 消音器内部音場

消音器モデルの空胴内部に平面波が形成されていると考えられる500Hzの場合と、1328Hzよりも高い周波数である2kHzを代表として空胴内部音圧の分布を本法による計算と実測により求め、その結果を図8に示



(a) 500Hz



(b) 2kHz

図8 空胴内部音圧分布

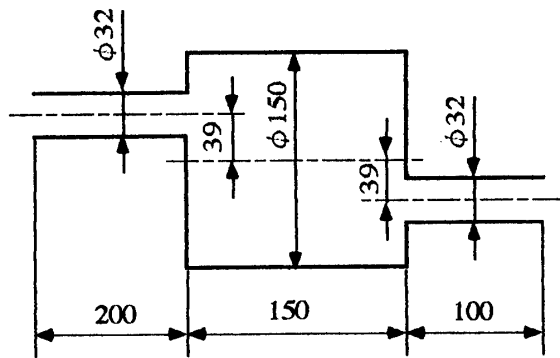


図9 オフセット型消音器の寸法

す。図の左側が空胴入口部にあたり、図中のレベルはそれぞれ空胴入口部の音圧値を0dBとした相対的な音圧レベルで示してある。500Hzでは軸方向の音響モードしか現われていないが、2kHzにおいては空胴内部に軸方向の音響モードに加え半径方向の音響モードも現われており、もはや平面波が成り立っていないことが確認できる。すなわち比較的高い周波数域まで音場を解析するには、軸方向だけでなく周方向および径方向についても考慮しなければならず、消音器の音場解析には三次元解析が不可欠であるといえる。また、两周波数とも計算結果と実測結果では多少のレベル差はあるものの音圧レベル、波面の分布状況とも良く一致しており本法により音場内部の状況を比較的正確に求められることがわかった。

4.3 オフセット型消音器

入口、出口管を中心軸からずらしたオフセット型消音器は、気流を伴う場合において流れが空胴部入口から出口へ直接ぬけて行くのを妨げるために考えられたもので、気流を伴わない場合は単純空胴型の音響特性との違いはあまり無いものとされているが、これは波動が一次的であると仮定して求められた結果である。ここでは三次元の音場解析を用い、オフセット型と単純空胴型消音器とを比較して消音特性を検討する。解析モデルを図9に示す。要素分割数および計算条件は、先程の単純空胴型消音器と同じである。

消音効果 Att について、本法による計算と波動を一次的に考える伝達マトリックス法により求めた消音効果を図10に示す。実線は本法による計算結果、破線は伝達マトリックス法による計算結果である。伝達マトリックス法では消音器各部の長さおよび断面積しか考慮せず、それらの配置については何も考慮していな

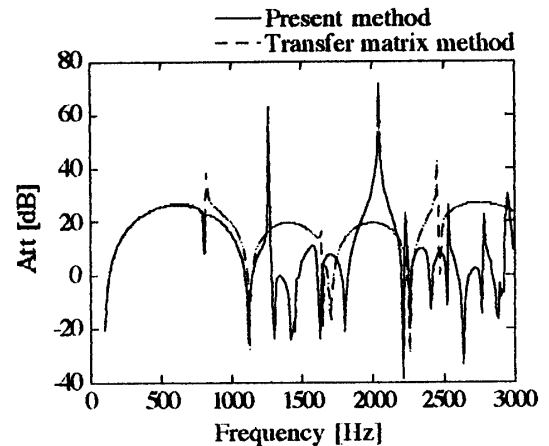


図10 オフセット型消音器の消音効果

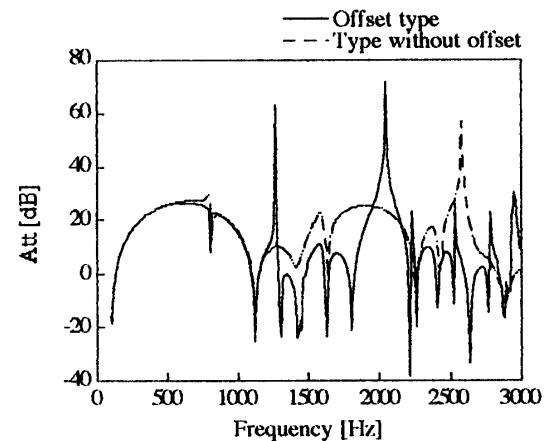


図11 単純空胴型とオフセット型消音器の消音効果の比較

いので、計算結果は単純空胴型消音器と同一となっている。次に本法により求めた単純空胴型消音器の Att と比較した結果を図11に示す。実線がオフセット型、破線は単純空胴型である。この図から波動を三次元的に考えた場合では、波動が一次的であると考えられる低周波数域においてはほぼ同様な消音効果を示しているが、空胴の周方向の共鳴が生じる1300Hz付近からはまったく異なる特性を示している。このように空胴の形状は同じでも入口、出口管をオフセットさせて取り付けることにより、高周波数域では消音効果は変わってしまうことが三次元解析により確認できる。このことから消音器について解析するには内部空間の三次元解析が不可欠であることが示唆された。

5. 結 言

本研究では、開領域を含む三次元音場の有限要素解析を、内燃機関などに用いられている消音器の設計に適用するための基礎検討を行なった。以下にその結果を要約する。

(1) 消音器への適用に先立ち、まず、有限要素および減衰型無限要素の解析条件について検討を行なった。次に、簡単な音響管モデルに適用して、本法による計算結果を解析および実験結果と比較して検討を行なった。さらに本法により開領域を含む音場についても精度良く音場解析が行なえることを確認した後、消音器構造に適用した。

(2) これらの解析手法の妥当性を検証するために、従来、実用消音器の設計に用いられている伝達マトリックス法による計算結果、および実験結果との比較を行なった。

(3) 本法を消音器に適用し、消音効果と消音器空洞内部音圧分布について、本法による計算結果と実験結果は良く一致し、本法が消音器解析において有用であることが確認できた。

(4) 各種消音器モデルにおいて、消音効果および空洞内部音圧分布について本法による計算を行ない、消音器について解析を行なうのであれば三次元の音場解析が不可欠であることが示唆された。

以上のことから、本法の消音器への適用の妥当性、有用性が確認でき、実規模消音器への音場解析として適用できる見通しを得ることができた。

6. 参考文献

- (1) Y.Kagawa and T.Omote, "Finite-element simulation of acoustic filters of arbitrary profile with circular cross section", Jour.Acoust.Soc. Am., 60-5, (1976), pp.1003-1013
- (2) Y.Kagawa, T.Yamabuchi and A.Mori, "Finite element simulation of an axisymmetric acoustic transmission system with a sound absorbing wall", J.Sound&Vib., 53-3, (1977), pp.357-374
- (3) 加川, 山淵, 森, "任意の吸音壁を持つ音響フィルタの有限要素シミュレーション", 日本音響学会誌, 33-5, (1977), pp.259-266
- (4) 加川, 山淵, 吉川, "有限要素法による開放端を持つ音響フィルタの伝達特性予測", 電子通信学会誌, 62-A, 10, (1979), pp.697-704
- (5) 山崎, 瀬谷, "開放型段付き管内音圧分布の有限要素計算と実験", 日本音響学会誌, 46-9, (1990), pp.133-143
- (6) D.F.Ross, "A finite element analysis of perforated component acoustic systems", J.Sound&Vib., 79-1, (1981), pp.133-143
- (7) 加川, 有限要素法による振動・音響工学/基礎と応用, 培風館, (1981)
- (8) 加川, 開領域問題のための有限/境界要素法, サイエンス社, (1983)
- (9) P.Bettess, "Infinite elements", Int.J.num. Meth.Engng, 11, 53-64, (1977)
- (10) 福田, 和泉, "空どう形消音器の特性に関する研究(単純化した理論式による計算と実験)", 日本機械学会論文集(第2部), 34-263, (1968), pp.1294-1309
- (11) 福田, 和泉, "空どう形消音器の特性に関する研究(消音効果の一般式)", 日本機械学会誌, 72-604, (1969), pp.603-611
- (12) 福田, 奥田, 騒音対策と消音設計, 共立出版, (1973)

(平成7年10月11日受理)