

気流を伴う空胴型消音器の共鳴周波数移行現象に関する研究

和泉 晴夫・三上 真人・小嶋 直哉

機械工学科

気流を伴う消音器内で発生する気流音の特性は、流速や消音器構造に複雑に依存しており、共鳴音を含め音響学的解明は不十分である。本研究は、気流音の発生メカニズムを従来の研究よりさらに深く洞察するために、実験的に空胴部共鳴周波数と尾管部共鳴周波数の間に移行現象があることを認めたので、理論的考察の一方として四端子定数で厳密計算し、周波数移行現象の予測と実験との対応を行い、発生機構の整理を行った。

Key Words : Flow-induced Noise, Muffler, Noise Control, Frequency Transition, Noise Evaluation

1. 序 論

気流を膨張型消音器に流入した場合には、理論的な消音効果が得られず内部の流れ場における速度変動が起き、ある条件下においては気流音の発生と空胴部、及び、尾管部との共鳴によりさらに複雑な音響特性を有することが報告されている。

消音器の特性に関する研究には、Davis⁽¹⁾のTL理論、福田⁽²⁾らのIL理論があるが、これらは気流による影響がないとして解析され、気流が消音特性に与える影響に関しては、福田⁽³⁾、萩⁽⁴⁾らが報告。

また、和泉⁽⁵⁾、小幡⁽⁶⁾らは、内部構造との関連について報じ、小嶋⁽⁷⁾らは気流音と空胴内の速度変動の相関を用いて、消音器内部の気流音の発生場所の特定について報告している。

本報告は、消音器から発生する気流音のうち、空胴部共鳴音と尾管共鳴音との間に移行現象が実験的に認められることについて、実験結果を四端子定数理論による厳密計算と比較し、発生メカニズムを考察した。

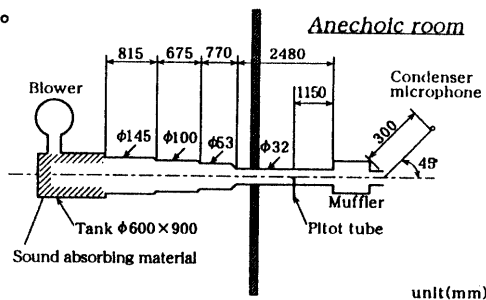


図-1 実験装置

2. 実験装置及び実験方法

消音器に気流を導入するための実験装置の概略を図-1に示す。

気流は、流量可変装置付の送風機に大型の吸音形の消音装置（吸音材貼付けサージタンク）をつけ、段階的に定常高速流を無響音室内に設置した供試消音器に安定供給した。流速は消音器入口部から上流1150mmの位置でピトー管を置いて観測した。

供試消音器から放射される音圧レベル L_p の観測は、消音器出口端（尾管出口管端）中心から45度方向300mmの位置で、B & K社製のコンデンサマイクロホンと精密騒音計・リアルタイム周波数分析計データレコーダ・D/A変換器・マイクロコンピュータ等を接続してFFT演算を含む信号処理解析を行なった。

図-2は、供試消音器の概略図で、空胴部の径は150mm 入口管径と尾管径はいずれも32mm 一定であり、図中の記号は空胴長 L 、空胴径 D 、入口管・尾管径 d 、挿入型消音器では入口部挿入長 l_1 、尾管部挿入長 l_2 、挿入管間隙長 l_0 、気流の流速を V で示した。

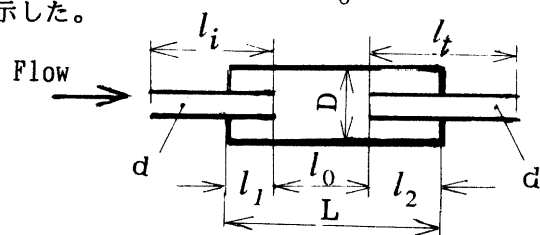


図-2 供試消音器の形状

3. 消音器における気流音・共鳴音

消音器内部に高速の気流を流入させると、空洞入口からの噴流が周囲の流体との剪断により生じる乱流音と、空洞・出口管（尾管等）壁面等に衝突して衝突音が発生する。また、尾管入口部などでは縮流による剥離音などがあり音圧レベルの増減・周波数などの特性が相互に影響し合っ、て、空洞及び尾管内で音響増幅され離散周波数をもつ気流音を発生する。

(1) 尾管共鳴・空洞共鳴周波数

尾管共鳴周波数は尾管の気柱共振（軸方向だけの音響固有モード）で、次式で与えられる。

$$f_n = \frac{nc}{2(l_t + 0.6d)} \quad (1)$$

ここで、 f は尾管共鳴周波数、 n は次数(1,2,3...) c は音速、 l_t は尾管長、 d は尾管径である。

空洞共鳴周波数は、円筒形音場としての波動方程式を適用し、径方向並びに軸方向成分の固有音響モードにより固有値をもち⁽⁸⁾ 次式で整理される。

$$f_{n,m,s} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{2u_{nm}}{D}\right)^2 + \left(\frac{s\pi}{L}\right)^2} \quad (2)$$

これまでの実験で、空洞共鳴周波数が観測されるのは、空洞長が比較的短い場合に限り、空洞の軸方向（ L に關与）成分は固有値にあまり影響せず、式（2）で常に $s=0$ となり径方向のみの空洞共鳴周波数は以下になる。

$$f_{n,m,0} = \frac{cu_{nm}}{D\pi} \quad (3)$$

また、空洞長が長くなると軸方向の音響モードの共振が現われ式（2）において、 $U_{nm}=0$ として径方向モードを無視すれば次式になる。

$$f_{0,0,s} = \frac{sc}{2L} \quad (4)$$

(2) 空洞長の変化と気流音

図-3に空洞長を170mmにおける気流音のスペクトルを示す。図において離散する顕著なピークが現われていることが確認できる。（ F_1 、 F_2 、...等）

なお、周波数特性におけるスペクトルで、極大値とその前後の極小値の差が、8 db以上あるものをピークと見なし解析した。

F_1, F_2, F_3, F_4 Tail pipe resonance
 F_{001}, F_{002} Axial direction resonance of the cavity
 F_{110}, F_{010} Diameter direction resonance of the cavity

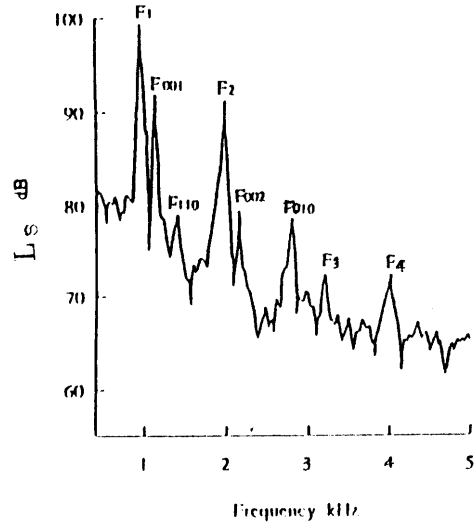


図-3 気流音の共鳴周波数成分
 ($V: 4.5 \text{ m/s}$, $L: 170 \text{ mm}$, $l_t: 150 \text{ mm}$)

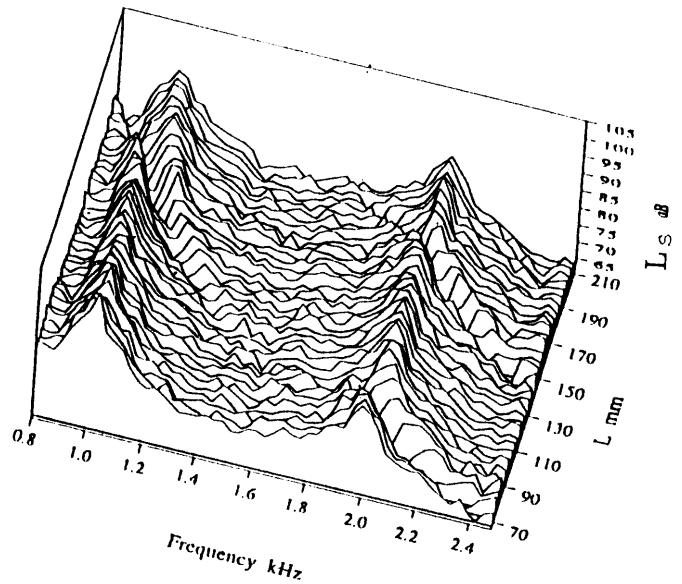


図-4 気流音のピーク周波数の変化
 ($V: 4.5 \text{ m/s}$, $l_t: 150 \text{ mm}$)

図-4は、尾管長を一定とし空洞長を50mmから250mmまで変化したものを立体表示したもので、ピークの位置の多様な変化が確認できる。

この図において空洞共鳴周波数と尾管共鳴周波数の接近により、ピークになる周波数の間に融合と消滅、移動する現象がみられ、特長的なものを図-5に詳細を示す。

図-5の(a)に1kHz、(b)に2kHz付近における空洞長変化に対する共鳴周波数の変化の実測値と、式(1)、式(4)で求めた計算値を実線で示した。図において、空洞長が100mm以下の部分で共鳴周波数が上下に変動する現象が発生し、共鳴音の卓越化により発生する跳躍現象であることが認められた。(9)

(a) 同様に図-5(b)の2kHz付近でも空洞長100、170mm付近で移行現象(ここでは、空洞共鳴周波数が尾管共鳴周波数へ、尾管共鳴周波数が空洞共鳴周波数へ移行することを定義)が発生していることがわかる。

これまでの実験では、空洞型消音器に入口管、並びに尾管を挿入した場合に移行現象がみられたが、単純な消音器構造でも発生していることが認められたので、挿入管型消音器を含め四端子定数理論による計算によって現象の解明と発生予測を行うことにした。

4. 四端子定数による共鳴音の移行現象の考察

消音器の消音効果に、消音器の装着の有無による同一関係位置における音圧レベルの差で示す挿入損失(IL理論: 福田⁽²⁾)の実用式が提案されており、四端子定数に基づく簡略化で消音効果の概要を把握することができる。しかしながら、特性の概要を把握するには都合がよいが、簡略化した計算によるために共鳴音の移行現象までの解明は極めて困難である。

そこで、四端子定数理論に基づく厳密計算を精度よく行ない、ある程度共鳴音の移行現象の発生特性が把握できたので、以下に結果を述べる。

(1) 挿入損失ILと管端からの放射音

図-6は、消音器形状モデルと消音器端からの放射音の概念図を示す。

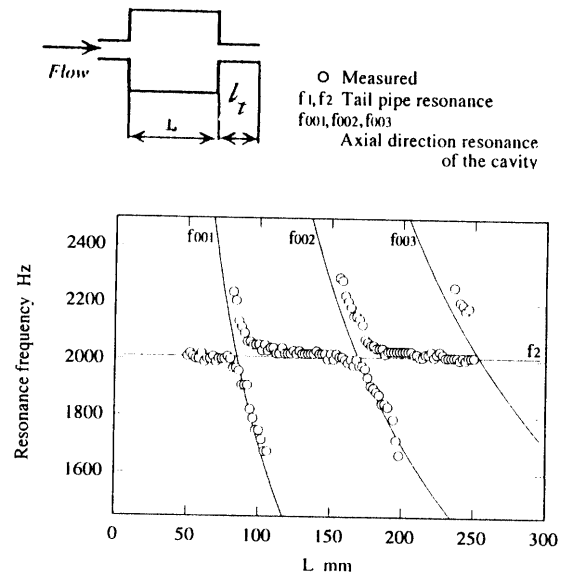
$$IL = L'_s - L_s = 10 \log \frac{P'}{P} \quad [dB] \quad (5)$$

図中の L_s 、及び、 P は放射音のレベルとパワーで、添字'は消音器を装着しない場合を示す。

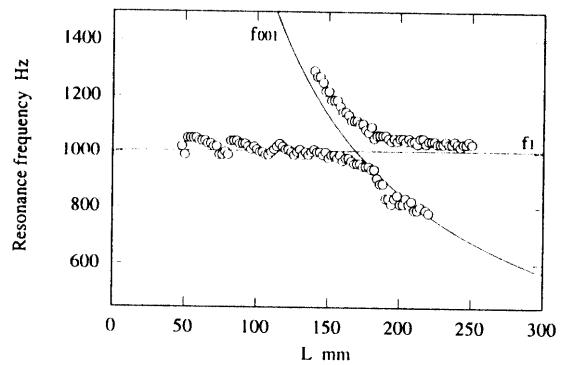
消音器入口からの平面音波が消音器内を軸方向に進進するとし、消音器の有無によって管端部から音波の放出される環境に変化がないものとするれば、挿入損失は次式で表わされる。

$$IL = 20 \log \frac{U'_2}{U_2} \quad [dB] \quad (6)$$

ここで、 U は出口端の体積速度を示す。

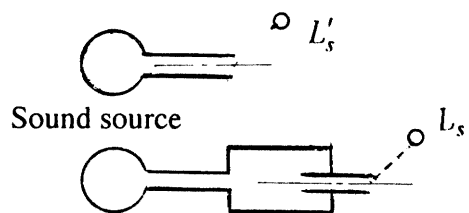


(a) 2000Hz 付近

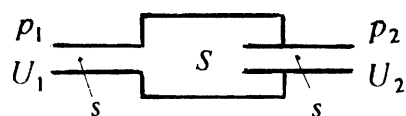


(b) 1000Hz 付近

図-5 共鳴周波数の変化 (V: 4.5m/s, l_t :150mm)



(a) 挿入損失ILと放射音



(b) 形状と四端子定数モデル

図-6 消音器形状モデルと放射音の関係

(2) 四端子定数

四端子定数は、消音器の入口と出口の音圧と体積速度の関係を表わしたもので、消音器の有無により次式のようになる。

消音器をつけないとき

$$\begin{pmatrix} p'_1 \\ U'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p'_2 \\ U'_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

消音器をつけたとき

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで、A、B、C、D は四端子定数で、p は音圧、U は体積速度、添字 1 は入口端、2 は出口端である。

消音器の有無によって音源の体積速度が変わらない定速度音源の場合の IL は、

$$IL = 20 \log \frac{D}{D'} \quad [dB] \quad (9)$$

四端子定数 D を、音源の音圧が変わらない定音圧音源の場合は

$$IL = 20 \log \frac{B}{B'} \quad [dB] \quad (10)$$

四端子定数 B で示される。

モデル図において、入口管部分 l_1 、間隙部分 l_0 の四端子定数は、

$$\begin{pmatrix} A_x & B_x \\ C_x & D_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kl_x & j \frac{\rho c}{S_x} \sin kl_x \\ j \frac{S_x}{\rho c} \sin kl_x & \cos kl_x \end{pmatrix} \quad (11)$$

で表わされる。ここで、 $X = i, o, t$ である。

また、挿入部分 l_1 、 l_2 では、

$$\begin{pmatrix} A_y & B_y \\ C_y & D_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ j \frac{S-s}{\rho c} \tan kl_y & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

で表わされる。

$$k : 2\pi f / c$$

$$s : \text{入口・出口管部断面積} \quad S : \text{空洞部断面積}$$

$$\rho : \text{媒質密度 (空気の密度で計算)} \quad c : \text{音速}$$

図-6(a)において、空洞内のどの位置でも平面波が直進するとすれば、消音器の有無による四端子定数は以下である。

消音器をつけない場合

$$\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} \quad (13)$$

消音器をつけた場合

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{pmatrix} \quad (14)$$

このときの、D、D'、B、B' は以下に明示する。

$$\begin{aligned} D = & \cos kl_i \cos kl_0 \cos kl_t - \frac{S}{S} \sin kl_i \sin kl_0 \cos kl_t \\ & - \sin kl_i \cos kl_0 \sin kl_t - \frac{S}{S} \cos kl_i \sin kl_0 \sin kl_t \\ & - \frac{S-s}{S} \cos kl_i \tan kl_1 \cos kl_0 \sin kl_t + \frac{S-s}{S} \\ & \cdot \sin kl_i \sin kl_0 \tan kl_2 \sin kl_t - \frac{S-s}{S} \cos kl_i \\ & \cdot \cos kl_0 \tan kl_2 \sin kl_t - \frac{S-s}{S} \cos kl_i \tan kl_1 \\ & \cdot \sin kl_0 \cos kl_t + \frac{(S-s)^2}{Ss} \cos kl_i \tan kl_1 \sin kl_0 \\ & \cdot \tan kl_2 \sin kl_t \end{aligned} \quad (15)$$

$$D' = \cos kl_i \quad (16)$$

$$\begin{aligned} B = & j \frac{\rho c}{S} \sin kl_i \cos kl_0 \cos kl_t + j \frac{\rho c}{S} \cos kl_i \sin kl_0 \\ & \cdot \cos kl_t + j \frac{\rho c}{S} \cos kl_i \cos kl_0 \sin kl_t - j \frac{\rho c S}{S^2} \\ & \cdot \sin kl_i \sin kl_0 \sin kl_t - j \frac{\rho c (S-s)}{S^2} \sin kl_i \\ & \cdot \tan kl_1 \cos kl_0 \sin kl_t - j \frac{\rho c (S-s)}{Ss} \sin kl_i \\ & \cdot \tan kl_1 \sin kl_0 \cos kl_t + j \frac{\rho c (S-s)^2}{S^2} \sin kl_i \\ & \cdot \tan kl_1 \sin kl_0 \tan kl_2 \sin kl_t - j \frac{\rho c (S-s)}{Ss} \\ & \cdot \cos kl_i \sin kl_0 \tan kl_2 \sin kl_t - j \frac{\rho c (S-s)}{S^2} \\ & \cdot \sin kl_i \cos kl_0 \tan kl_2 \sin kl_t \end{aligned} \quad (17)$$

$$B' = j \frac{\rho c}{S} \sin kl_i \quad (18)$$

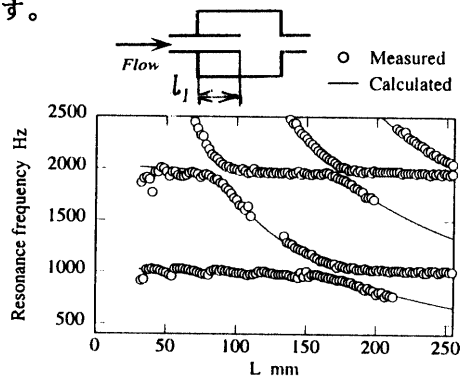
これらの計算により、挿入損失が負で共鳴が起き式(9、10)で D/D' 、 B/B' が0に近づくと挿入損失が負の無限大に発散することが予測できる。

(3) 移行現象の発生と予測

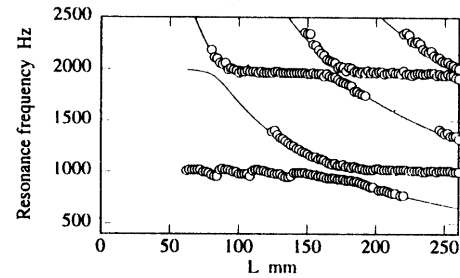
図-7は、単純な空洞と尾管の組合わせ構造で、定常流実験と比較するために、定速度音源として四端子定数によって、 D/D' が0になるときの周波数を計算し、実験における移行現象の推移と比較したものである。図において、とくに移行現象が顕著な1kHz、2kHz付近も計算値と実測値が合致しており計算により移行現象の予測が可能となった。

しかし、空洞長が短い場合の一部に計算値に対して実測では観測されないピーク周波数が存在することが明らかになり、この説明には、空洞内の流れ場の現象説明をさらに深める必要がある。さらには、尾管端から放出される気流が大気に接触する部分での乱れ現象を調べ、放射音の厳密な把握によって計算結果と対応させて予測を完備させたい。

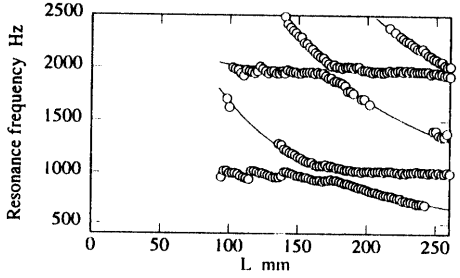
図-8は、空洞入口管を空洞に挿入した場合の比較を示す。



(a) $l_1=30\text{mm}$



(b) $l_1=60\text{mm}$



(c) $l_1=90\text{mm}$

図-8 空洞入口部挿入による共鳴周波数の変化
($V: 4.5\text{m/s}$, $L_1: 150\text{mm}$, $L_2: 0\text{mm}$)

図-9は、空洞内に尾管を挿入した場合の移行現象を示す。

単純な空洞のみの形状、入口管を空洞内部に挿入した場合、尾管部を挿入したいずれの場合においても、四端子定数による厳密計算結果と実験値が比較的によく一致していることがわかった。

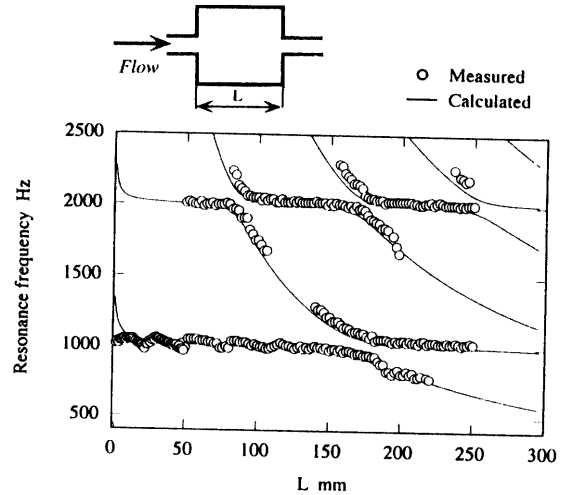
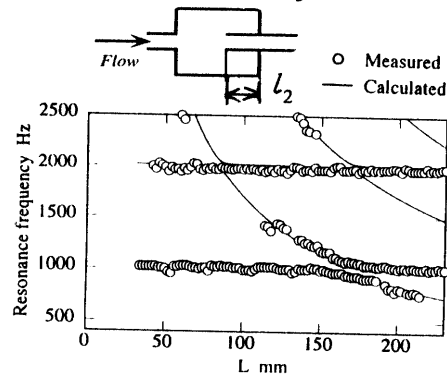
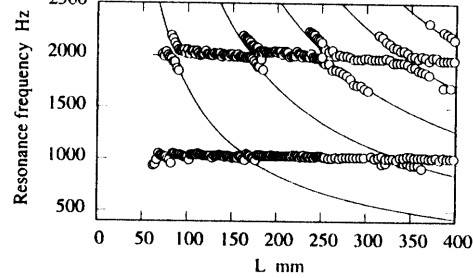


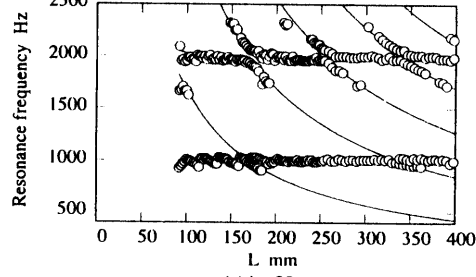
図-7 単純空洞型における共鳴周波数の変化
($V: 4.5\text{m/s}$, $L_1: 150\text{mm}$)



(a) $l_2=30\text{mm}$



(b) $l_2=60\text{mm}$



(c) $l_2=90\text{mm}$

図-9 空洞出口部挿入による共鳴周波数の変化
($V: 4.5\text{m/s}$, $L_1: 150\text{mm}$, $L_2: 0\text{mm}$)

5. 結 言

本研究では、気流を伴う空洞型消音器から発生する気流音の主成分である空洞共鳴音と尾管共鳴音の関係を調べ、共鳴周波数の移行現象の発生について検討した。

また、共鳴周波数と消音器形状の関係を音響学的観点から計算と実験を比較し、移行現象の発生の予測についても考察した。

得られた結果を以下に要約する。

- (1) 空洞型消音器及び挿入管型消音器において、空洞長を変化すると、空洞共鳴周波数が尾管共鳴周波数に、尾管共鳴周波数が空洞共鳴周波数へ移行する現象が発生することがわかった。
- (2) 消音器の消音効果を示す挿入損失が負の無限大となる消音器の場合に共鳴が大きくなるとして計算した共鳴周波数は、実測した値とほぼ一致し、移行現象の発生の予測が可能となった。
- (3) 気流を伴う消音器において、空洞部・尾管部の共鳴を独立して行なわず、消音器全体系で音響特性を考える必要が移行現象の解明でわかった。

消音器全体系での解析が必要なことは、消音器内部構造、形状の変化に対する流れ場においては、体積速度の変化・粒子密度の変化・音響反射条件の変化などによって左右され、解析の課題でもある。

最後に、実験と計算に熱心に情熱を燃やした、鎌田浩樹（大学院生）、中浦大樹・脇本 哲（平成9年度卒業研究生）諸君のほか、研究を協力して頂いた各位に謝意を述べる。

参考文献

- (1) D.D.Davis, Hand book of Noise Control, Mc GROW-HILL BOOK Compay, 1957
- (2) 福田、和泉, 機械学会論文集(B)34-263, pp.1294-1309, 1968
- (3) 福田、小嶋、岩石, 機械学会論文集(B)48-432, pp.1586-1594, 1982
- (4) 萩、村上, 機械学会論文集(B)37-301, pp.1671-1679, 1971
- (5) 和泉、小嶋、福田, 機械学会論文集(B)50-456, pp.1879-1887, 1984
- (6) 小幡、平田, 機械学会論文集(B)34-9, pp.532-542, 1978
- (7) 小嶋、中村、福田, 機械学会論文集(B)53-486, pp.623-628, 1978
- (8) 伊藤 毅, 音響工学原論, コロナ社, 1976
- (9) 劉、三上、小嶋, 機械学会論文集(B)62-600, pp.240-246, 1996

(1998. 5. 15受理)

A STUDY ON FREQUENCY TRANSITION PHENOMENA IN FLOW INDUCED NOISE FROM CAVITY TYPE MUFFLER

Haruo IZUMI, Masato MIKAMI and Naoya KOJIMA

In this study, frequency transition phenomena appeared between cavity resonance frequency and tail pipe resonance frequency were studied experimentally. These phenomena were analyzed by using the 4 terminal constant method. A comparison between experimental results and theoretical analysis showed that the frequency transition phenomena are well predicted by the 4 terminal constant method.