

氏名	柚木謙一
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成7年2月8日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和43年3月 九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了
学位論文題目	円形ダクトにおける音波の伝搬と放射に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 曾根 敏夫 東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 米山 務 東北大学教授 中村 信良 東北大学助教授 鈴木 陽一

論文内容要旨

空気調和設備などの機械設備に付属しているダクトを伝搬し、放射される騒音が、しばしば騒音公害問題を引き起こしている。その対策のためには、適切なダクトの消音設計を行う必要がある。従来、断面が円形および矩形のダクトについて研究がなされてきたが、詳細な資料に乏しく、またその特性が統一的に表わされておらず、ダクト設計者が利用するには不便な点が多かった。

本論文は、真直で円形断面をもつ、壁に厚みのある硬いダクトおよび吸音材を内張りした吸音ダクトにおける音波の伝搬と放射について、理論と実験の両面から論じている。厚みのある硬い円形ダクトにおいては、ダクト壁の厚みの開口端近傍における音波伝搬特性と開口端からの放射特性への影響について、また吸音ダクトにおける音波伝搬と放射については内張り吸音材の効果を統一的に論じている（図1）。このため、本研究では、厳密な Wiener-Hopf 法による理論解析の適用法を明確にし、その数値計算法を明らかにした。また、それらの数値計算結果を簡便な設計チャートで表示

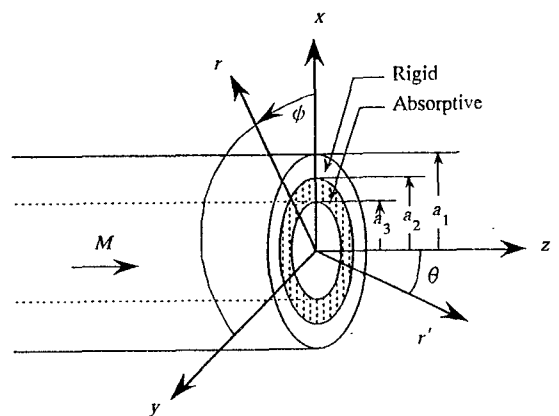


図1 吸音ダクトと円柱座標 (r, ϕ, z) 、球座標 (r', θ, ϕ) . M は流体のマッハ数.

した。更に、以上の数値計算結果を実験で検証した。

第1章は序論で、主に円形ダクトにおける音波の伝搬と放射に関する従来の理論的、実験的研究を概説した。

第2章では、まず音波の基礎方程式、波動方程式、固有値方程式を示した。次に、Wiener-Hopf法について、積分方程式による方法とJonesの方法の2つの方法を述べた。そこでは円形ダクトのスプリット関数 $K_F(\kappa_m)$ を説明し、詳細な計算結果を表として示した。一方実験では、信号源としてトーンバースト信号とそれから生成される擬似インパルス信号を円形ダクトに加え、時間波形、スペクトルなどを観測した。更に、ダクトの複素音圧反射係数やインテンシティの測定手法について述べた。

第3章では、厚みのある硬い円形ダクトへのWiener-Hopf法の適用法を示し、平面波領域での開口端における音波の反射係数と分布の数値計算を行なった。平面波領域でダクトの厚みを変えて、開口端における基本モード波の複素反射係数と高次の反射波の反射係数の一般特性を与えた。それは、従来の研究結果のごく限られた場合の値を大幅に補完するものとなった。また、開口端近傍の音波の二次元、三次元分布を図示した。その検討により、平面波領域でも、開口端の極く近傍において不規則な波動現象の存在を確認し、その空間領域を評価した。一方、擬似インパルスを用いた

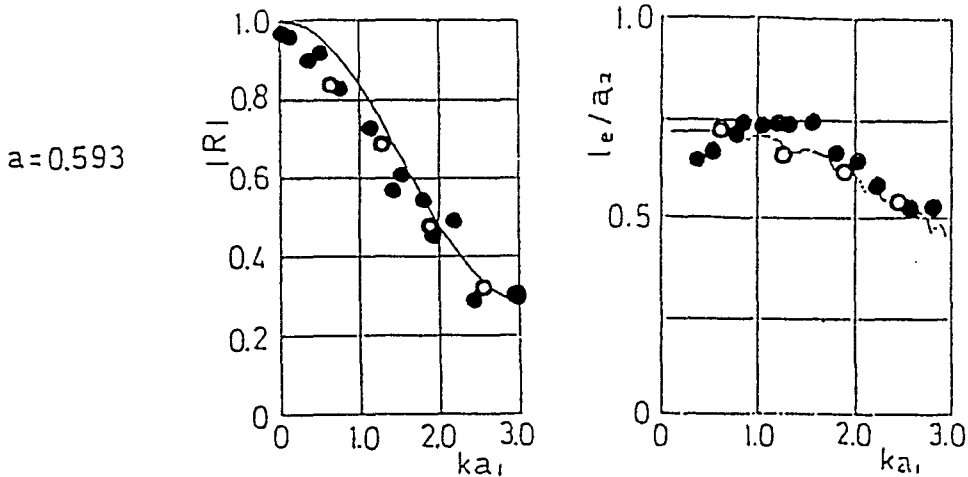


図2 厚みのある硬い半無限長円形ダクトの開口端における基本モード波の複素反射係数 $|R|$ と開口端補正 l_e/a_2 、—：理論値、○、●：実験値（○：音響管法、●：J. R. Chungらの方法）。

伝達関数法により、厚みの異なる3種類のダクトの軸上の音圧分布を測定し、また音響管法と伝達関数法を採用して基本モードの複素反射係数を測定した。得られたこれらの実験値は、理論計算値にほぼ一致した（図2： $a = a_2/a_1$ ）。

第4章では、厚みのある硬い円形ダクトからの音波の放射について、Wiener-Hopf法を適用し、平面波領域においてダクトの厚みと周波数を細かく変えて、開口端面における音波の分布と放射指向係数の数値計算を行なった。その結果、開口端面における音波の分布特性には、ダクトが薄く周波数が高くなるにつれ、脈動のある分布が認められた。また、開口端面の粒子速度と放射指向係数との間には、相関があることが分かった。ここでは、よく知られた無限大バフル付きの面音源による放射指向係数の特性とも対比した。一方、擬似インパルス音を用いて測定した、厚みの異なる3種類のダクトの開口端面の音圧と放射指向係数の実験値は、理論特性にほぼ一致し、理論特性の妥当性が検証された(図3)。

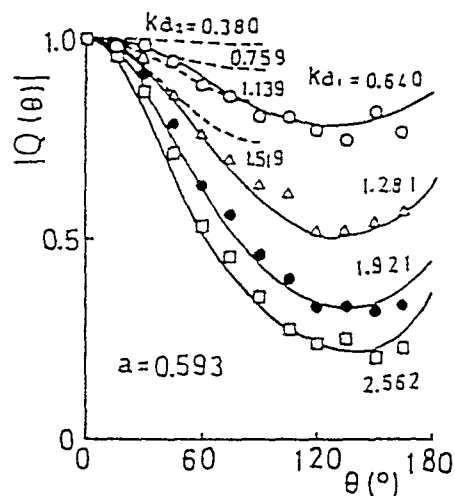


図3 厚みのある硬い円形ダクトの放射指向係数 $|Q(\theta)|$ 、—: Wiener-Hopf法による理論値、…: 理論値(無限大バフル)、○, ●, □, △, ▽: 実験値。

第5章では、従来、円形吸音ダクトの固有値方程式が難解なため固有値の計算を詳細には行っていないことから、その固有値の解法とその計算結果を示した。従来提案されているように、固有値方程式を複素変数の非線形微分方程式に変換した後、本研究では、それに級数展開法やRunge-Kutta法をあてはめて解く方法を与えた。級数展開法では、固有値の解の非収束領域の存在が明らかになった。また、Runge-Kutta法では、複素変数の微分方程式を実変数の微分方程式に変換して適用した。両方法による固有値の計算結果はお互いによく一致し、計算結果が信頼できるものであることが明らかとなった。これらの解法により、各モード波の固有値を得て、それらの振舞を複素平面上に図示した。特に、本研究では、円形吸音ダクトの吸音材表面における複素反射係数に対する各モード波の固有値の振舞を図示し、周波数に対する軌跡を考察した。以上のほか、一次元の気流のある円形吸音ダクトの固有値方程式についても、これらの解法を適用できる形に誘導できることを示した。

第6章では、円形吸音ダクトの音響特性を与えるため、従来の研究におけるパラメータの代りに、吸音材表面において直感的にとらえやすい垂直入射複素音圧反射係数をパラメータとして導入した。まず、従来の理論式を用いて、断面内の分布特性と減衰特性(実用的な設計チャート)を、吸音材の垂直入射複素反射係数をパラメータとして計算した。その特性において、各モード波やその合成波が周波数に対してどのように断面内に分布し、どの程度減衰するかを明らかにした。そこでは、低次のモード波ほど減衰量が小さく、音波の伝搬に大きく寄与していることが分かった。また、合成波の減衰量の周波数特性では、 $L/D=3$ (L は長さ、 D は直径)の場合について、複素反射係数 $R (= |R|e^{i\phi})$ の絶対値、位相をパラメータとして広範囲に変えて表示した。その特性は、周

波数に対して単峰特性となり、パラメータ η ($=D/\lambda$, λ : 波長) の変化に対して規則的に変化するとの結果を得た (図4)。複素反射係数の位相の変化に対しても、その減衰量の特性に規則的な変化が見られた。この減衰量の理論特性において、わずか $L/D=3$ でも 100dB 程度の大きな値に達することがあるという興味深い知見を得た。更に、 L/D に対して、減衰量は必ずしも比例しない周波数範囲があることが示された。以上のように、内張り材料の複素音圧反射係数が与えられれば、その場合の減衰量がチャートから正確に予測できるようになった。一方、吸音材表面の複素反射係数を、擬似インパルスを用いて伝達関数法により、円形吸音ダクト内の音波の分布と減衰量を、インテンシティ法により測定した。市販されている吸音材を内張りした円形吸音ダクト内の音波の分布と減衰について、ほぼ理論特性に合致する満足な実験結果が得られた。

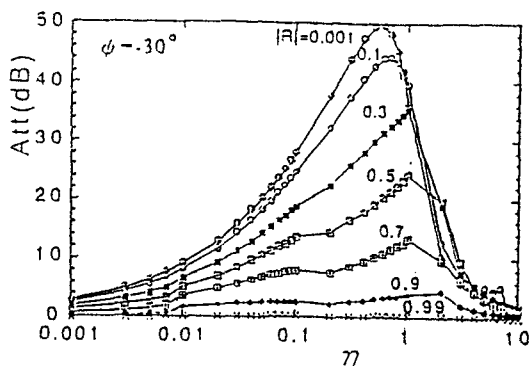


図4 吸音材表面の複素反射係数の $|R|$ をパラメータとした円形吸音ダクトにおける音波の減衰の理論特性 ($\phi = -30^\circ$)

第7章では、円形吸音ダクトからの音波の放射に関する理論近似と実験を行なった。円形吸音ダクトに Wiener-Hopf 法を適用する場合の開口端における連続条件式を誘導した。しかし、この式を含む数値計算は現段階では困難であるため今後の課題である。そこで、円形吸音ダクトの放射の理論を、等価半径を用いて Wiener-Hopf 法を適用した硬いダクトの理論で近似した。即ち、固有値が吸音材表面における垂直入射の複素音圧反射係数によって決まることから、その位相から等価半径を誘導した。そして、この等価半径を用いたダクトの開口端における反射エネルギー、放射指向係数、ダクト内の音波の放射による減衰量などの理論値を求めた。一方、正弦波を測定信号として音圧、クロススペクトルなどを測定して求めた実験値と比較した。その結果、両者はほぼ合致する結果となった。以上から、円形吸音ダクトからの音波の放射について、等価半径を用いた理論近似がある程度有効であることが分かった。

第8章は結論である。その他、付録に円形ダクトに関係のある理論式の誘導と数値計算のために作成したプログラムを示した。

以上の円形ダクトの音響特性についての研究成果により、このダクト騒音の消音装置の設計に資するとの目的は達せられた。また本研究の成果は、他の複雑な媒体の状態や形状のダクトについての音響特性研究、最近の重要な研究課題であるダクト騒音の能動制御系の構築、マイクロホンなどの音響測定機器の設計に役立つものと思われる。

審 査 結 果 の 要 旨

空調ダクトや排気管から放射される音は、室内騒音や環境騒音の大きい要因となっており、ダクトにおける騒音の伝搬と放射特性を明らかにすることは、快適な音環境の実現のために重要である。著者は、解析が困難であるためこれまで殆ど検討が行われていなかった、管壁に厚みのある円形ダクトに着目し、ダクト内の音波伝搬特性と開口端からの音の放射特性について、Wiener-Hopf法を用いて解析し、数値計算結果と実験結果との対応を求める研究を行ってきた。本論文は、その研究の成果をまとめたもので、全編8章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、音波解析におけるWiener-Hopf法の基本的な適用法と、実際のダクトでの測定手法について述べている。

第3章では、壁面に厚みのある硬い円形ダクトにWiener-Hopf法を適用し、ダクト開口端における反射係数とその近傍の管内音圧分布を、様々な周波数とダクト壁厚について詳細に計算した。併せて、厚みの異なる3種類のダクトについて測定を行い、実験値がWiener-Hopf法によって得られた理論的結果と良く一致することを示している。これは有用な知見である。

第4章では、壁面に厚みのある硬い円形ダクトからの音波の放射について、平面波領域での放射音の音圧分布と指向性係数に対する厚さの影響を理論的に明らかにし、いくつかの新しい知見を得た。また、厚さの異なるダクトについて測定を行い、計算結果と良好な一致を示す結果を得ている。

第5章では、騒音制御に使われる、吸音材料を内張りした円形吸音ダクトの固有値方程式の数値解法について、級数展開法とRunge-Kutta法を用いて解く方法を提案し、実際に詳細な計算を行っている。これは円形吸音ダクトの解析を行うための基礎として、有用な成果である。

第6章では、前章での結果を基に、円形吸音ダクトにWiener-Hopf法を適用し、その減衰特性について詳細な計算を行うと共に、実際のダクトについて実験を行い、計算結果の妥当性を示している。またダクト設計の便を図るため、この結果をチャート化している。これらは工学的に意義のある成果であり、評価できる。

第7章では、円形吸音ダクトからの音波の放射について、吸音ダクトを吸音材料の反射係数の位相から求まる等価半径を持つ硬いダクトで近似することにより数値解析し、その結果が実験結果とほぼ合致することを示している。これは、吸音ダクトの理論的設計に道を拓く有用な成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、円形ダクト内の音波の伝搬と開口端からの放射特性を理論的に解析する手法を明らかにし、騒音低減のための円形ダクトの精密な設計を可能としたもので、音響工学ならびに騒音制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。