

氏名	ね ころ たけ お 根 来 健 夫
授与学位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 63 年 1 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最終学歴	昭和 31 年 3 月 東北大学工学部電気工学科卒業

学位論文題目 **ダクト構造における騒音減衰の予測手法に関する研究**

論文審査委員	東北大学教授 城戸 健一	東北大学教授 清水 洋
	東北大学教授 中鉢 憲賢	東北大学教授 長友 宗重
	東北大学助教授 香野 俊一	

論 文 内 容 要 旨

近年、騒音公害は大きな社会問題になってきた。^{1,2,24)} そもそも騒音の発生量は、社会全体のエネルギー使用量に比例して増大してきたと云われ、³⁾ 我々の消費の拡大及び生活の便益と密接な関係がある。社会全体の騒音エネルギーは過去10年間に約 6 dB 増加したと推測され、⁴⁾ 日本の騒音発生総量は大きくなり過ぎてしまった。¹⁾ 今後も潜在的に増大するであろう。さらに我が国の場合、可住地面積当りの過大な人口密度のところへ高密度経済社会が戦後の高成長で短期間に出現したこと、同じく可住地面積当りの自動車密度は米国の10倍にまでになったこと、⁵⁾ 住商工混在、騒音に弱い住宅構造等が、騒音公害を一層深刻な問題にした。

いまこれらを対策すべき場所によって分類すれば、(イ)音源対策、(ロ)騒音の伝播経路上での対策、(ハ)受音側での対策 の3つに大別することができる。このうち騒音の伝播経路上での対策は、例えば距離をはなすとか、遮音塀を建てる等、一般に広い空間と莫大な費用を必要とし過密都市の多い我が国においては、やむを得ない場合を除いては必ずしも最善の方法とは云えない。また、受音側での対策はきわめて消極的な手法であり、環境騒音を解決する手段としては適当な方法といえない。

一方、音源対策については、発生源そのものにエネルギーの消費がある限り、騒音を大幅に減少させるのは一般に極めて難しい。例えば、内燃機関の爆発音やピストンの振動による騒音、火力発電所のタービンや送風機などの高速流体による騒音発生等である。もっとも、近年は音源そのもの(機械騒音)の音の発生効率 η に対する研究も進められてきているが、^{6,7,19,20)} これで近い将来騒音

問題の解決を得られる見通しはない。

しかし、このような騒音源については、それを遮音壁でかこみ、排気管や換気、送風のためのダクトを適当な騒音減衰特性のある構造—消音器や消音構造物—に設計すれば、比較的経費も安く、技術的トラブルも少ない確実な対策が可能である。

例えば、自動車の内燃機関の排気消音器についていえば、その騒音制御技術に関する基本的な音響工学の理論は、1960年頃までに一応示された⁸⁾。しかし、車外騒音低減のための消音性能の優れた排気系の開発要求は、前述の騒音総発生量抑制の立場からも、年々高まってきている⁹⁾。低騒音、低排圧の消音器を開発するうえで、リアクティブタイプでは改良に限界があると思われるので、吸音タイプの見直しが今後必要であると思われる⁹⁾。また、排気系の管路の共鳴と車室の共鳴周波数が一致した場合に生ずる車室内のコモリ音の低減は、運転者の疲労防止、安全確保の面からも、最大の問題の一つになっている⁹⁾。

ジェットエンジン試験用消音構造物については¹⁰⁾その排気系に大型の直角曲がりダクトが用いられ、内燃機関のエンジン試験室用の給気用消音装置¹¹⁾ピアノ防音室及び実験用無響室の給排気用ダクトの消音装置、火力発電所の給気用消音構造物¹²⁾等については遮音材でとりかこまれた構造物に換気用の多段の吸音材内貼り直角曲がりダクトが用いられるようになってきたが、それについての伝送特性は明らかでない。そのため、最適の設計が行えないことになり、問題の一つになっている。

空気調和設備については、その騒音制御の基礎は1960年頃までに示されたが^{13,14,15)}その手法や計算方法が現在でも十分生命を保っているものの、いまだに騒音や振動のトラブルが絶えないところに問題がある¹⁶⁾。1962年に東大生産技術研究所に設けられた大規模な実験装置は^{17,18)}その後数々の設計資料を提供してきたが、これらはメーカーの協力によるものも多く、実用的である一方、個性の強いものもあり、一般論に置き換えるときは十分な考察が必要である。また、複数個のダクト要素の連結効果については、従来最も重要な問題の一つでありながら、そのことを避けて通ってきている。さらに、建物の高層化と高密度化が進められた結果、設備の大規模・大容量化による低周波騒音の問題、より快適な仕事や居室空間の確保への要請、2室間漏話の問題等について、空気特性と音響特性がアンバランスになることなく、かつ過剰品質に陥らないで、充分満足のいく設計と対策が求められるようになってきた。

前述の騒音対策に用いられる消音器、消音構造物および空気調和設備のいずれの装置も、それらの系の各要素の原理は、平面波領域においては、反射特性を有するリアクティブな音響フィルタであることが基本であり、反射係数が1になれば透過係数は0になるというものである。そしてそれらの装置は、多くの場合直列多段に縦続接続し、一つのシステムとして高性能の減衰特性を得ようとしている。しかし、反射した音響エネルギーは一体何処へ行ってしまうのであろうかという素朴な疑問を生ずる。この事例から、損失の役割は極めて大きいものと認めなければならない。

本論文は、このような観点から、吸音チェンバと直角曲がりダクトを取り上げ、それらの騒音減衰量が、損失によりどのような影響を受けるかを、体系的かつ実用的に予測しようとするものである。なお、吸音チェンバは、平面波領域で使用すると、音響学的には dissipative な排気系消音器と同じになる。

第1章では、消音器、消音構造物、空気調和設備の各要素を、音響的な問題として取り上げ、本研究の減衰量予測手法に対する基本姿勢として損失を含む伝送回路網理論^{21,22)}を適用したこと、さらに、映像フィルタの映像減衰量やその動作減衰量(通過域)以外の伝送量にまで同理論を実用的に拡張したことに言及し、研究目的を明らかにしている。

第2章では、従来よく知られている膨張形消音器の透過損失(TL)の計算式との整合性をもたせるため、反射波の発生しない無限長尾管を有する損失を含む吸音チェンバの透過損失を計算する方法を述べ、さらに、数値計算及び実証実験により確かめている。また、吸音材による損失の見積方法は、音響管法で求めた吸音材の音圧反射係数と空気特性インピーダンスを、伝送線路の終端抵抗不整合に起因する電圧反射係数と特性インピーダンス及び負荷抵抗の関係諸式に代入し、吸音材のコンダクタンス g' を求めた。さらに、そのコンダクタンスを、分布定数線路の特性方程式に代入して、損失を含む直管ダクトの単位長さ当りの騒音減衰量を求め、Brüelの方法によって求めた単位長さ当りの減衰量と比較し、その妥当性を考察している。

高音域については、室内音場の拡散理論にもとづき、吸音力の少ない場合及び大きい場合について、種々の形状のチェンバについて、実験的検討を行っている。

第3章では、有限長尾管の吸音チェンバを集中定数として取扱い、減衰量を計算する方法を述べている。尾管有限長の場合は、動作伝送係数を簡略化した形の四端子定数でその減衰量が示されるから、まず四端子定数は損失でどのような影響を受けるかを述べ、 s 平面上の極、零点の位置の移動からその特性がわかること、すなわち、その位置から作図によってその特性が得られることを示した。

また、出口管(尾管)と入口管が同寸法のチェンバでは、映像パラメータで四端子定数を表わし、それが損失でどのような影響を受けるかを検討し、任意段数のチェンバの減衰量の計算方法を明らかにしている。

同じく、出口管と入口管とが非対称の吸音チェンバについても減衰量の計算方法を述べ、1段のチェンバについて実験を行った。また集中定数範囲で減衰量を実験する場合は、音源のヘルムホルツ共鳴が問題になることに触れている。

第4章では、有限長尾管の吸音チェンバを、分布定数近似で取扱い、減衰量を計算する方法を述べている。まず、線路定数を用いて四端子定数を表わし、その四端子定数が損失でどのような影響を受けるかを述べ、その理論的根拠と周波数領域の適用限界を明らかにしている。

上述の事柄は、分布定数範囲についての純音実験を注意深く行うことによって確かめられ、更に波数 k について論じ、その結果減衰量の特性の補正を行い、上述で得られた結論を実証した。また、本論の減衰量の計算方法によれば、管路の共鳴周波数における挿入損失を的確に予測できることを示している。さらに、無限長尾管に比べ、減衰量の定義、計算方法、測定方法は全く異なるにもかかわらず、損失を含むときの計算方法は同一に取扱ってよいことも示した。

第5章では、損失を含む直角曲がりダクトの透過損失を平面波近似で計算する方法について述べている。まず、Miles, Lippertらによって明らかにされた直角曲がりダクトの対称格子形回路の余接関数で表わされた各素子を、フォスター第一の方法²³⁾で展開し、その回路網は損失でどんな影

響を受けるかを検討し、その結果減衰量計算の理論的根拠と周波数領域及び吸音率における適用限界を明らかにした。

また、損失の見積方法を述べ、数値計算を行って確かめた。更に、垂直入射吸音率と平行入射吸音率の相違に起因する損失の非対称性があっても、透過損失を計算できることを数式で示した。

上述の事柄は、損失を含む1段及び2段直角曲がりダクトにおいて、計算および実験により実証された。さらに、任意段数の直角曲がりダクトにおいても計算出来ることを示している。

第6章では、多段直角曲がりダクトによる騒音対策の事例として、火力発電所に取り付けられた180°曲がりダクトの減音量の計算と実験について考察している。

まず、種々の形状の縮尺模型実験を行ったが、その結果によれば、低音域はリアクティブであるとして、直角曲がり部は、Lippert が平面波近似で求めた集中定数として取扱い、ダクト部は分布定数線路として取扱い、透過係数を計算できること、さらにダクトの断面の形状は、横寸法は計算上平面波近似の成立する範囲以上の長さであっても平面波近似で計算してよいことを実験で示し、それを実物180°曲がりダクトに応用したことを述べている。中高音域では、結合室として解いたが、エネルギーの出入りがある室として音の強さの方程式をたてて解くとさらに良い近似が得られることがわかった。ダクト長が長いときは、音響エネルギー密度が様な傾斜をもつ2段の吸音チェンバとして解き、良い近似を得ている。平面波領域と高音域の境界のように、計算で求めることが困難な領域では、最大減衰量とその周波数を実験で示した。以上のことは、実物実験によっても実証され、設計上の難点を実用的に解決した。さらに、ダクト開口部から放射される騒音の指向性について、縮尺模型による実験的検討を行っている。

参考文献

- 1) 二村忠元, 曾根敏夫, “日本における騒音・振動公害の現状と規制”, 騒音制御, Vol.1, No.1, p.5-13 (1977).
- 2) 城戸健一, “塵芥焼却工場の騒音公害とその解決”, 産業公害, Vol.4, No.7, p.425-436 (1968).
- 3) 二村忠元, “騒音公害について”, 日本音響学会誌, Vol.32, No.1, p.34-47 (1976).
- 4) 二村忠元, “騒音規制についてその周辺事情を考える”, 騒音制御, Vol.4, No.6, p.1-5 (1980).
- 5) 二村忠元, “日本における騒音公害”, 日本音響学会誌, Vol.32, No.2, p.98-105 (1975).
- 6) 福田基一, “音源制御に関する研究の動向”, 日本音響学会誌, Vol.38, No.5, p.262-269 (1982).
- 7) 福田基一, 小嶋直哉, “内燃機関における燃焼騒音の発生とその制御”, 騒音制御, Vol.1, No.2, p.45-50 (1977).
- 8) 福田基一, “内燃機関の排気消音器に関する研究”, 東北大学工学部博士論文, (1960).
- 9) 三輪智明, “自動車消音器について”, 騒音制御, Vol.5, No.6, p.3-9 (1981).

- 10) B. G. Watters, S. Labate, and L. L. Beranek, "Acoustical behavior of some engine test cell structures", J. Acoust. Soc. Am. 27, 499-456 (1938).
- 11) 大野隆三, "エンジン試験室の給気用消音器", 騒音制御, Vol.10, No.1, p.24-28 (1986).
- 12) 古山 雪, "火力発電所の騒音対策", 騒音制御, Vol.1, No.2, p.17-28 (1977).
- 13) 後藤 滋, "送風設備の騒音制御に関する研究", 東京大学生産技術研究所報告, Vol.10, No.2, p.15-73 (1960).
- 14) ASHRAE: Guide and Data book (1961), Chap.14.
- 15) 長友宗重, "空気調和設備の騒音制御", 鹿島研究所出版会, 東京, (1963).
- 16) 長友宗重, "建築設備設計における音響的問題", 日本音響学会誌, Vol.38, No.11, p.716-720 (1982).
- 17) 渡辺 要, 勝田高司, 石井聖光, 後藤 滋, "無音送風装置に関する研究", 空気調和・衛生工学, 36 (2), p.254-265 (1962).
- 18) 渡辺, 勝田, 石井, 後藤, 寺沢, 坂本, "送風時におけるダクト系統の発生騒音に関する研究", 空気調和・衛生工学, Vol.37, No.5, p.22-33 (1963).
- 19) Warren R. Kundert, "Factors affecting the noise of fan and blower driven cooling systems", Proc. Inter Noise 86, 135-140 (1986).
- 20) Yosihiko Irie, Nobuhiro Imamura and Kiichi Yamamoto, "Acoustic power response of engine cylinder-block", Proc. Inter Noise 86, 217-222 (1986).
- 21) Von W. Cauer, "Theorie der Linearen Wechselstromschaltungen", Bd, 1, (Becker End Erler Kom-ges, Leipzig, 1941), p.322-327.
- 22) Von H. F. Mayer, "Über die Dämpfung von Siebketten im Durchlassigkeitsbereich", E. N. T. Heft 10 (1925).
- 23) Von W. Cauer, "Theorie der Linearen Wechselstromschaltungen", Bd, 1, (Becker End Erler Kom-ges, Leipzig, 1941), p.196-199.
- 24) 根来健夫, "騒音問題の技術的解決方法", テーリー-東北新聞, 昭和57年7月9日.

審査結果の要旨

ダクトを伝搬して到来する騒音の実生活への影響は、騒音発生源の増加により重要性を増してきており、さらに、その低減の要求基準も厳しくなっている。それと共に、経済的要求から、厳密な予測に基づく設計法の確立が強く望まれている。しかし現状では、特に吸音材を用いたダクトについて、残された研究課題が多い。本論文の著者はこの問題を取り上げ、ダクト構造において、吸音チェンバと直角曲がりによる損失が吸音材にどのように影響するかを、理論的並びに実験的に検討した。本論文はその成果をまとめたもので、全編7章からなる。

第1章は序論である。

第2章では無限長尾管を有する吸音チェンバの透過損失を、平面波近似に基づいて考察し、損失を含めた分布定数等価回路で計算する方法を導き、その有用なことを、2段接続の場合を含め、実験的に検証している。

第3章では、実用的に重要な有限長尾管を有する吸音チェンバの低周波数域における特性を検討している。すなわち、集中定数回路によって近似し、影像パラメータを用いた4端子網理論に基づいて透過損失の計算式を導き、波長が各要素の寸法よりも短くない低周波数域ではこの結果が有用なことを、実験によって明らかにしている。

第4章では、有限長尾管を有する吸音チェンバの高周波数域における透過損失を4端子回路網理論によって計算する方法を、分布定数電気回路の理論によって検討し、音響回路では等価電気回路の各素子の損失の割合が一樣であるとして、透過損失の計算式中の複素周波数に損失に基づく実数項を加えればよいことを示し、実験によってそれを確かめている。これは、吸音ダクトの透過損失の実用的な計算法を導くために有用な結果である。

第5章では、直角曲がりダクトに吸音材を内貼りすることによって損失を加えた場合を考察し、前章の場合と同様に複素周波数に損失に基づく実数項を加えることによって透過損失の計算ができることを理論的に明らかにし、実験的に検証している。

第6章では、以上の研究成果を火力発電所の大型換気ダクトの設計に適用し、所望の成果を得たことを述べている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、ダクト内を伝搬する騒音減衰の予測手法を研究し、吸音チェンバおよび吸音材を内貼りした直角曲がりダクトの透過損失の実用的計算法を開発したもので、音響工学ならびに情報工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。