九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

音響インテンシティ法を用いた音響パワー評価に関する研究

佐藤, 利和
ブリュエル・ケアー・ジャパン : アソシェイトプロフェッサ

https://doi.org/10.11501/3110737

出版情報：九州芸術工科大学, 1995, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

氏　名・本籍（国籍）　　佐　藤　利　和　（京都府）
学　位　の　種　類　　博士（工　学）
学　位　記　番　号　　甲第 7 号
学位授与の日付　　平成 8 年 3 月 18 日
学位授与の要件　　学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題　ロ　　音響インテンシティ法を用いた音響パワー評価に関する研究
審　査　委　員　会　　幹事　教　授　鈴　本　俊　行
委員　教　授　藤　原　恭　司
委員　教　授　津　村　尚　志

論文内容の要旨

我々は、多くの技術発展の成果を享受し、時にはそれに依存した生活を送っている。その一方で、その副産物である環境破壊にも直面している。音に関する環境破壊は、飛行機、新幹線、乗用車などの騒音問題として表面化しているが、日常生活に用いる機械類の騒音はその利便性の影に隠されている。その反省から、その品質保証項目の１つに騒音の表示を追加することが始められている。

その表示には、音響エネルギーの総量を捕らえる方法（音響パワー）と耳の代用として捕らえる方法（音圧）の 2 通りが存在する。ヨーロッパでは、音響パワーと音圧の両方の評価方法によって法規制している（ＥＵ指令)。音響パワーは国内でも事務機器の分野を中心に自主的に利用され始めているが、その本格利用には至っていない。

また、音響パワー評価（単位時間当たりの音響エネルギー評価）は、騒音の影響を事前調査するためにも本質的な量であり、音をエネルギー保存則に従って測定する方法であるため、騒音対策の有効な指針を提供するものである。

一方、近年の音響計測における技術発展の一つとして、2 マイクロホン音響インテンシティ法（以下音響インテンシティ法）が利用され始めている。これは、近接する 2 マイクロホンを用いて音圧勾配から音響インテンシティベクトルの方向成分を測定する技術である。この手法は、原理的に任意の音場で音響パワー計測を実施できることから、その本格的な利用が期待されている。

このような背景から、本研究は、音響インテンシティ法による音響パワー計測手法（以下本手法）が騒音を伴う一般的作業現場における有効な音響パワー評価方法であることを理論・実験の両面から実証し、本手法による音響パワー計測の各種の利用方法について述べる。

第 1 章の序論では、本研究の背景および動機として、音響パワー評価の重要性および現状における本手法の問題点を整理している。特に、現場用として本手法のスキャン測定が有望であることを強調する。

第 2 章の音響インテンシティ法音響パワー計測の理論では、本手法の理論的背景および周辺パラメータとの関連を説明している。また、本手法が特殊な環境を必要としないこと

および外部騒音の影響を受け難いことなど、その基本的特徴を通常の作業環境（静かな事務室など）において実験的に検証した。

第 3 章では、本手法の特徴の 1 つである外部騒音の影響について詳細に述べている。対象音源の周囲に存在する外部騒音の影響を調べるために、スキャン測定の空間配置・寸法、対象音源と外部騒音の信号の性質やそれらの振幅による影響を調べた。新しい知見として、対象音源および外部騒音が定常または周期的間歇音である場合には、外部騒音を相対的に 5dB 程度まで増加してもその影響はわずかであることが分かった。これによって、外部騒音の伴う現場における定量的かつ有効な音響パワー計測の適用範囲が一段と拡大された。

第 4 章では、本手法の重要な適用例として、音響パワーによる吸音効果の評価を述べている。音源の近傍に置かれた吸音材の効果を、新しく提案する評価方法で調べた。その方法は吸音効果を音響パワーの減少（吸音パワー）として評価するものである。これによって、音源と吸音材までの距離に依存した特徴的な音響パワーの減少を観察した。新たに得られた知見は、この評価法が適用条件に依存した吸音材の効果を適切に表すということである。

第 5 章では、本手法を発展させた応用例を述べている。建築材料や事務機器・家電製品の部材の遮音性能の評価手法である音響透過損失測定に、本手法を有効に利用できることを示した。本手法によるスキャン平均技術を対象の試料面積から透過音響パワーの計測に適用できる。その新規性として、小面積試料の遮音性能を評価するために、小型残響箱と併用することで事務室などの一般的な環境において 500Hz 以上の周波数において簡便に評価できることを示す。

第 6 章では、本手法による騒音対策への具体的な適用を述べている。騒音源の部分面積から放射される音響パワー計測による評価方法を示す。特に、本手法によって騒音の発生原因を明確にするためには、対象に近い測定面の利用が有効であることを示す。しかし、非常に近い測定面では、単純な実寸面積による音響パワー計測の精度は低下する。この問題に対して、音響パワーに対する実効面積による補正方法（等価な音響パワーを得る実効面積の導入）を初めて提案し、その効果を実験的に確認した。

第 7 章では、本論文の結論を述べている。環境に左右される従来手法に代って、音響インテンシティ法が騒音を伴う一般的な作業環境において各種音響パワーの計測に有効に適用できることを理論・実験の両面から実証し、その限界を追求した。さらに、独自に考案した評価方法（吸音パワー、透過損失の簡易測定、実効面積による音響パワーの補正)は、音響パワー評価を中心とした騒音対策技術の評価に役立つものである。本研究の成果は、簡便かつ有効な現場用音響パワー計測手法の確立に寄与するものと信じる。

論文審査の結果の要旨

近年、各種の技術進歩により日常生活は一段と便利になってきたが、一方で飛行機、新幹線、乗用車などの交通騒音、各種家電機器・事務機器等の騒音が問題となっている。これらの騒音の測定・評価・対策には音響パワー評価（単位時間当たりの音響エネルギー評

価）が極めて有効であるが、その理論的背景、具体的な利用方法、騒音を伴うような一般事務室等での測定の是非等、まだ不明な点が多くあった。

一方、近年の音響計測における技術発展の 1 つとして、2 つのマイクロホンを用いた音響インテンシティ計測（以下音響インテンシティ法）が利用され始めている。これは、近接配置した 2 つのマイクロホンを用いて音圧勾配から音響イソテンシティベクトルの軸方向成分を測定する技術であり、原理的に任意の音場で音響パワー計測を実施できるものである。

このような背景から、本論文は音響インテンシティ法による音響パワー計測について、外部雑音を伴う環境下での測定、音源の近傍に置かれた吸音材の効果の新しい評価方法、音源探査への応用など、特別な音響設備のない現場での応用に重きを置いて、理論的実験的研究を行ったものである。

第 1 章の序論では、音響パワー評価の重要性および現状における音響パワー計測の問題点について述べている。

第 2 章では、音響インテンシティ法音響パワー計測の理論的背景および測定諸条件との関連を述べている。また、音響パワー計測法が特殊な環境を必要としないことおよび外部騒音の影響を受けにくいことなど、その基本的特徴を通常の作業環境（静かな事務室など）において実験的に検証している。

第 3 章では、音響パワー計測法の特徴の 1 つである外部騒音の影響を受け難いことに対して高い耐性を示すことについて述べている。対象音源の周囲に存在する外部騒音の影響を調べるために、音源を囲んで作る測定空間（ガウス空間）の空間配置・寸法・対象音源と外部騒音の信号の性質やそれらの振幅による影響を調べている。外部騒音が定常または周期的非定常音である場合には、外部騒音を相対的に 5dB 程度まで追加しても影響は少ないとの知見を得た。これによって、定量的かつ有効な音響パワー計測のための条件が明確になった。

第 4 章では、音響パワー計測法の一つの重要な適用例として、音響パワーによる吸音効果の評価について述べている。音源の近傍に置かれた吸音材の効果を、音響パワーの減少（吸音パワー）として評価する新しい方法を提案している。

第 5 章では、音響パワー計測法を発展させた応用例を述べている。建築材料や事務機器・家電製品の部材の遮音性能の評価手法である音響透過損失測定に、音響パワー計測法を有効に利用できることを示した。すなわち、小型残響箱を利用して、事務室などの一般的な環境において、小面積の試料についてその遮音性能を評価するものである。これによって、ごく小面積の試料で材料の遮音性能を評価できるようになったため、材料開発に威力を発揮するものと期待される。

第 6 章では、音響パワー計測法による音源探査の一応用として、騒音対策への具体的な適用を述べている。特に騒音源の部分面積から放射される音響パワーを計測することによって騒音の発生原因を明確にする。騒音源に近いところでの測定精度を上げるため、音響

パワーの実効面積（等価な音響パワーを得る実効面積）による補正方法を新たに提案し、その効果を確認した。

第 7 章は本論文の結論を述べている。

以上要するに、本論文は、環境に左右される従来手法に代わって、音響インテンシティ音響パワー計測法が騒音を伴う一般的な作業環境において各種音響パワーの計測に有効に適用できることを理論的実験的に研究・実証している。本研究の成果は、音響インテンシティ音響パワー計測法の新しい展開を示すとともに、騒音を伴うホール、事務室等の現場での簡便かつ有効な音響パワー計測法の確立に寄与するところ大である。よって工学博士の学位論文に値するものであると認められる。

最終試験の結果の要旨

本論文を中心にして、音響工学、音響材料等に関して審査委員が口頭で試問した。

すなわち、音響インテンシティ音響パワー計測法の利用できる限界、許容できる外部騒音レベル、測定しうる透過損失の周波数下限と材料の基本特性等についての質問があり、いずれに対しても明快な回答が得られた。

つぎに、本学位論文の公開発表会には学内外から約 40 名近い参加者があり、著者の発表に対して活発な質問が出されたが、著者の適切な応答によって納得が得られた。

目　次　　ﾍﾟｰｼﾞ

第１章　序　論.....1
１．１　音響パワー評価の重要性
１．２　音響インテンシティ法音響パワー計測に関する従来の研究
１．３　本論文の目的および構成

第２章　２マイクロホン音響インテンシティ法の特徴.....8
２．１　はじめに
２．２　２マイクロホン音響インテンシティ法の理論
２．３　音響インテンシティ法による音響パワー計測
２．４　まとめ

第３章　音響インテンシティ法音響パワー計測における外部騒音の影響.....17
３．１　はじめに
３．２　仮想閉空間の違いによる効果
３．３　定常外部騒音の除去
３．４　周期的間歇騒音に対する効果
３．５　まとめ

第４章　音響インテンシティ法音響パワー計測による吸音効果の評価.....31
４．１　はじめに
４．２　測定原理と測定方法
４．３　反射面に垂直に向けられた音源に対する吸音材の効果
４．４　吸音材の面積と音源反射面間距離の関係
４．５　反射面に斜めに向けられた音源に対する吸音材の効果
４．６　吸音率との関係
４．７　まとめ

第５章　音響インテンシティ法による透過損失測定.....45
５．１　はじめに
５．２　測定理論
５．３　小型残響箱による簡易測定
５．４　間仕切り壁の測定
５．５　まとめ

第６章　音響インテンシティ法による音響パワー計測の応用例.....55
６．１　はじめに
６．２　電動掃除機の音響パワー
６．３　音響パワー計測による音源探査
６．４　超近距離音場の音響パワー計測における実効面積について
６．５　まとめ

第７章　結　論.....76
７．１　各章のまとめ
７．２　本研究の意義

謝　辞.....80

参考文献.....81

第1章　序　論

1．1　音響パワー評価の重要性

我々の環境には，文明の象徴として多くの機械や装置が存在する。これらがもたらす恩恵の影には，環境を阻害するいくつかの要因が存在する。その1つが騒音であろう。これらの装置の基本機能を達成し向上させるために，結果として騒音の発生が余儀なくされている。しかし，健全かつ快適な労働および生活環境を守る立場から低騒音機器の開発は社会的な要請である。例えば，ヨーロッパにおいては機械からの放射騒音の程度を機械の仕様やパンフレットに記述することを法律で規制している[1]。また，ドイツではエコロジー的な立場から騒音を含む環境に対する影響が低レベルであることを奨励している[2]。つまり，最低の健康や安全の確保という目的はもちろん，より快適なものを目指す積極的なものとなっている。日本においてもこのような意識が徐々に高まりつつある。

このような静粛性という要求に対して，騒音の影響を評価する方法が問題となる。その方法は大別して，聴取者側と音源側の2通りに分けられる。聴取者の立場から，人に代わって音を客観的に測定する騒音計が開発され，現在広く使用されている。これは，無指向性マイクロホンで代表される音圧計測にもとづいている。その最も一般的な評価方法はA特性音圧レベル（騒音レベル）である。その意味は，1k Hz40dBの正弦波に対する心理的な音の大きさを基準に作られた40phone相当の等ラウドネス曲線（周波数曲線）を根拠として，この40phoneの曲線を大まかに近似するA特性と称する周波数荷重を定義したものとして知られている[3]。これは物理的な音圧測定に聴感特性（A特性周波数荷重フィルタ）を適用することで，聴感特性を加味したA特性音圧レベルを求めている[4]。よって，この評価方法の1つの問題点として，このような周波数補正された音圧レベルは必ずしも音の心理的大きさを完全に表すものではないことが知られている[5]。その1つの解決策として，心理的に意味を持つものとして，StevenseおよびZwickerによってラウドネス評価が規格化されている[6]。しかし，これらの聴取者側の評価手法に共通する問題は，騒音による被害の推定には効果的であるが，騒音の対象が及ぼす全ての影

響を表していないことである。例えば，音源の固有特性以外の要因，例えば距離，方向，環境条件（音場の種類）に依存するため，このような音圧測定に基づく音源の評価においては，音源に対する測定位置の規定および専用の試験環境（無響室，半無響室）を厳密に規定しなければ，それらのデータを直接に比較することは不可能である[7,8]。さらに，得られた結果は，あまりに特殊な環境による測定であるため，実際の生活環境で知覚されるものとは異なることになる。よって，聴取者の占める空間における音圧を評価する方法は音源の持つ影響の１面だけを表すものである。

これに対して音源側の方法として，音源が周辺音場に作用する音響エネルギーを評価する方法が存在する。これは，音源から空間に放射される全音響エネルギーを単位時間当たり量（音響パワー）として表す方法である。そのために，音源を囲う仮想測定面において得られた測定量（音圧または音響インテンシティ）の空間的平均を利用する。得られた音響パワーは音源固有の物理特性を示すものであり，測定点および試験環境に左右されない量である。その利用例としては，スピーカシステムの仕様，重要な騒音発生源（航空機，ブルドーザ，自動車，大型トランスなど）の評価，遮音効果の評価などがある。さらに，それらの値は重要な騒音発生源が周囲の環境に及ぼす影響の事前評価（音圧分布計算による騒音アセスメント）に利用される。このように音響パワーは音源における最も正当な物理量であるため，これを中心とした評価方法は重要である。

次に，音響パワー評価の利用上の問題点を述べる。対象音源の音響パワーを計測するための測定環境は，音響エネルギーの流れが存在する環境（自由音場など）と音響エネルギー密度が存在する環境（拡散音場）または一般の現場であればその環境補正が必要となる。よって，設備コストの高い無響室や残響室または現場で用いる場合に環境補正のための測定が必要である[9,10,11,12]。このように音響パワーは評価量として優れているが，その問題点は，計測方法が現場で簡単に利用できる程度の簡便さを持たないことである。

１．２　音響インテンシティ法音響パワー計測に関する従来の研究

最初に，２マイクロホンによる音響インテンシティ計測手法（本論文では音響インテンシティ法とする）に関する技術の進歩およびその規格化動向を述べ，その後で音響インテンシティ法音響パワー計測の特徴および問題点を議論する。

１．２．１　音響インテンシティ法の経緯

1878年のRayleigh郷の著書には，音響パワーや音響インテンシティ（音の強さ）という言葉は使われていないが，すでにその基本的な考え方は示されている[13)]。その後，音圧測定が音響計測の中心として発展してきた。これに対して，音響インテンシティ計測は多くの研究者がその実用化を試みていたが，初期のマイクロホンや真空管の時代では実用化されなかった[14, 15, 16, 17)]。その後，信号処理技術の進歩の結果，1977年に２マイクロホンと２チャンネルFFT分析によるクロススペクトル法によって音響インテンシティ計測は実用化に至った[18, 19)]。特に自動車関係の分野でその有効性が認められて，1980年代に計測器として開発および商品化が急速にすすめられた[20, 21, 22)]。さらに，測定器およびセンサーの能力を確認するための校正器の開発と精度の検討方法などが確立した[23, 24, 25)]。さらに得られたデータの解釈および処理方法などの検討や確認が行われた[26, 27)]。

平行して，音響インテンシティ測定器およびその応用方法である音響パワーの計測方法に関する規格が作成された。1993年には２マイクロホンによる音響インテンシティ用計測機器の規格（IEC 1043），ポイント測定法音響パワー計測の規格（ISO 9614-1）およびスキャン測定法音響パワー計測の規格（ISO 9614-2）という音響インテンシティに関する３つの国際規格がほぼ完成した[28, 29, 30)]。これらの規格は，計測機器としては２つのマイクロホンによる音響インテンシティプローブとディジタルフィルタによるリアルタイム方式分析器またはＦＦＴ方式分析器に対する要求性能および利用方法の水準を示している。よって，計測技術としては一応の確立が行われたことになる。しかしながら，任意の現場において簡便に音響パワー計測を有効利用するという社会的要求に十分に応えるためには，より効果的な運用方法や改善が必要である。

１．２．２　音響インテンシティ法音響パワー計測の特徴

音響パワーは，音源を囲む閉空間上の平均音響インテンシティにその閉空間の面積を掛け算することで求められる（以下，音響インテンシティ法による音響パワー計測を本手法と書く）。従来法では，自由音場における平面自由進行波に対する音圧の自乗値に基づいて平均音響インテンシティを測定している。これに対して，近年実用化された音響インテンシティ法は，近接する２点の音圧勾配から粒子速度を近似する手法（有限差分近似）を用いて，２点の平均音圧とその粒子速度の積によって求めるものである。これは，音圧と粒子速度の位相関係を含めて測定できるため，音響インテンシティを任意音場において適用することが可能になった。この方法を利用した音響パワー計測の特徴は，ガウス空間による閉空間を利用することで，任意の音場（近距離音場または外部騒音の伴う音場）において音響パワーを計測することができることである。その結果，従来の音圧測定に基づく音響パワー計測では困難であった状況において，特定部分から放射される音響パワーを調べることまで可能となる。しかし，現実のセンサーおよび分析器の能力および測定に要する時間的制限などの影響から，実際の利用には一定の限界が存在するものと考えられるが，その限界は不明確であり問題となっている。

１．２．３　音響インテンシティ法音響パワー計測の問題点

本手法における第１の問題は，対象となる音源を囲う仮想閉空間の決定とその平均方法である。測定面は均等分割が最も簡単であり，立方体や直方体を利用することが一般的である。さらに，その面に対する測定方法はポイント測定（測定面上に均等に配置された固定点において測定する手法）とスキャン測定（分析器のリニア荷重時間平均を用いて音響インテンシティプローブを測定面上を等速に移動させながら測定する手法）の一方を選択することになる。実用的には音響的に重要な面を短時間に正確に捕らえる必要がある。音源の近傍では近距離音場（音圧と粒子速度の位相が一致しない音場）となるため，音響インテンシティ法の特徴が生かされることになる。同時に，近距離音場は複雑でもあるため測定密度を高めることが必要となる。よって，この場合にはスキャ

ン測定が有利である。これらを考慮することで測定精度を確保しながら，測定の労力が最小となるようにポイント測定とスキャン測定の選択およびその内容を決定しなければならない（2章参照）。

第2の問題は外部騒音による影響である。一般に，測定環境は定常的に静かで，反響が少ない（完全反射面が少ない）ことが望ましいが，実用的には常にある程度の外部騒音が存在するため，それらの影響を調べることは重要である。ISO 9614-1，-2では測定空間の近くに大きな反射面および外部騒音源がある場合には，それらを事前に解消するように努力すべきであるとしている。しかし，どの程度まで外部騒音まで除去可能であるか，測定空間の大きさや位置による影響の有無，再現性の劣化などが問題である（3章参照）。

第3の問題は音源近傍の環境による影響である。特に，音源固有の要因が放射特性に影響を与えるものは変更すべきではない。例えば，音源と床面までの距離および床面の反射条件の変更は放射音響パワーを変動させるものである。実例として音源の放射音響パワーが反射面の条件によって大きく変化することがある（4章参照）。

第4の問題は測定対象領域の面積の影響である。音響パワーを計算するための面積はプローブの中点が占める面積を使用すべきであるが，測定位置が音源に極めて近接する場合に面積の値を決定する方法が重要である。音響透過損失および音源探査などの積極的な応用のためには，このような近接した測定が必要とされる（5章および6章参照）。この場合の対処方法が一般化されていない。しかしながら，無制限に近づくと音場が複雑になりすぎるため，測定精度において問題が生じる。原則として，全体の総音響パワーを求めるためには，ISO 9614-1, 2では表面から30cm以上離れることが要求されている。測定密度を十分に大きく取ることと，各測定点または面における精度と再現性のチェックを十分に行うこと以外に測定対象領域の面積の決め方が問題となる。その結果，極端な近距離音場で測定する場合に，測定結果の検証が必要となる（6章参照）。

１．３　本論文の目的および構成

２マイクロホンによる音響インテンシティ計測技術を用いた音響パワー計測（以下本手法とする）の特徴に注目し，現場におけるその有効的利用方法の確立を目的とする。本論文は以下のように構成する。

第１章では，当研究の背景および動機として，音響パワー評価の重要性が注目されていることおよび本手法の特徴と現状の問題点を述べている。特に現場用として，本手法が任意音場で使用できるという点が有望であることを強調している。

第２章では，本手法の理論的背景および周辺のパラメータとの関連を説明する。また，本手法が特殊な環境を必要としないことおよび外部騒音の影響を受けにくいことなど，その基本的特徴を通常の作業環境においてポイント測定とスキャン測定を用いて実験的に実証し，現場におけるスキャン測定の有効性を初めて実証する。

第３章では，本手法がその特徴の１つとして外部騒音の影響を受け難いことを取り上げる。対象音源の周囲に存在する外部騒音の影響を調べるために，スキャン測定の空間配置・寸法，対象音源と外部騒音の信号の性質やそれらの振幅による影響を述べる。その条件として対象音源が定常または周期的間歇騒音であること以外に，新しい知見として外部騒音も定常または周期的間歇騒音であれば，実験的に外部騒音を相対的に10dB程度まで増大してもその影響は少ないことを示す。これによって，定量的かつ有効な音響パワー計測のための条件がより明確となる。

第４章では，本手法の重要な適用例として，吸音効果の音響パワーによる評価を述べる。音源の近傍に置かれた吸音材の効果を，新しく提案する評価方法で調べる。その方法は吸音効果を音響パワーの減少（吸音パワー）として評価するものである。これによって，音源と吸音材までの距離に依存した特徴的な音響パワーの減少を観察することができる。その結果，音圧低減のためには粒子速度の最大部分に吸音材を置くべきという従来の知見の重要性が音響パワー評価においても適用できるという新しい解釈を示す。

第５章では，本手法を発展させた応用例を述べる。建築材料や事務機器・家電製品の部材の遮音性能の評価手法である音響透過損失測定に本手法を利用できることを示す。

本手法によるスキャン平均技術を，対象とする試料面積からの透過音響パワーの計測に適用できる。その新規性として，小面積の試料の遮音性能を評価するために，小型残響箱と併用することで事務室などの一般的な環境において500Hz以上の周波数において簡便に評価できることを示す。

第６章では，本手法による騒音対策への具体的な応用例を述べる。特に騒音源の部分面積から放射される音響パワー計測による評価方法を示す。本手法によって騒音の発生原因を明確にするためには，対象に近い測定面の利用が有効であることを示す。しかし，非常に近い測定面では，単純な実寸面積による音響パワー計測の精度は低下することが問題となる。この問題に対して，音響パワーの実効面積による補正方法（等価な音響パワーを得る実効面積の導入）を始めて提案し，その効果を確認する。

第７章では，本論文の結論を示す。

第2章　2マイクロホン音響インテンシティ法の特徴

2．1　はじめに

2つのマイクロホンによる音響インテンシティ計測手法（以下本手法）は，近接する2マイクロホンの配置によって決まる方向での音響インテンシティの振幅と向きの情報を得ることができる。よって，音源周辺の音場の様子を把握することが可能となる。本章では，これらのパラメータの関係を説明し，次章以降で主に利用する本手法の意義と原理を述べる。

本手法の実証のために，通常の作業環境に既知の基準音源を置き，その音響パワーを計測し，その結果を代表的な従来法（半自由音場における音圧測定）によって測定されたスペクトルの結果と比較し，実用的な見地から議論する。得られた音響パワースペクトルの結果から，本手法の有効周波数範囲が存在することを確認する。さらに，本手法による結果の表示方法として，合理的にデータを整理するためにA特性を用いたオーバーオールの音響パワー（A特性音響パワーレベル）の結果が十分な再現性と有効性を持つことを示す。

次に，実用的な見地から，測定は通常の作業環境で実施することとし，その結果を整理して議論する。すなわち本手法における空間平均の方法による違い（ポイント測定またはスキャン測定およびそれらの分割数）をA特性音響パワーとして整理し，音圧測定による結果と比較する。さらに，本手法に用いる仮想測定空間の大きさの影響を同様にオーバーオール値に整理して音圧測定と比較する。また，同条件において定常外部騒音を付加した場合の影響を調べる。これらの結果から，実用的な見地からは本手法におけるスキャン測定によって得られるA特性音響パワーレベルがもっとも有望な方法であることを述べる。

2．2　2マイクロホン音響インテンシティ法の理論

音響インテンシティ$\vec{I}(t)$はベクトル量として定義され，次式のように表す；

$$\vec{I}(t) = p(t)\vec{u}(t) \tag{2.1}$$

ただし，$p(t)$は音圧，$\vec{u}(t)$は粒子速度ベクトルである。

これは，音場中の1点における音波の進行方向に垂直な単位面積を単位時間に通過する音響エネルギーを意味する。その単位としてW／m^2を用いる。このように，音響インテンシティの次元は単位面積当たりの音響パワーを意味するため，音響パワー計測に直結する量である。

これを1 p W/m^2を基準とした常用対数の10倍で表示したものが，音響インテンシティレベルである。通常大気圧における空気中の平面自由進行波であれば，20μパスカルを基準とする音圧レベルとほぼ同等の数値を示す。また，粒子速度についても50n m/sを基準とする対数表示を行うことで，ほぼ同レベルの数字を得ることになる。

音響インテンシティは，これまでのスカラー量である音圧を計測する方法と根本的に異なり，音源周辺からの音響エネルギー流を表すものである。このことから，音響エネルギーが流れる様子を表現することもできるが，その実用的な使用方法は音響パワー計測と考えられる。

2マイクロホン音響インテンシティ法は，一般的なベクトル量である音響インテンシティに対して，2つのマイクロホンで決定される方向の方向成分を測定する手法である。このことは，測定結果の解釈および測定精度の議論においても注意しなければならない。また，音響インテンシティの次元が単位面積当たりの音響パワーを意味するため，

ある領域を音響エネルギーが通過する場合に，平均音響パワーを求める方法が非常に重要であり，その空間平均のためにポイント法およびスキャン法が利用されている。

音響インテンシティは原理的に音圧と粒子速度の積によって求めることができる。しかし，実際の音響インテンシティ計測では，近接配置された2つの音圧マイクロホンによる音響インテンシティプローブを用いるのが一般的である[28]。このプローブでは，2つのマイクロホンによって決定される軸方向に沿った粒子速度成分を，近接する2点の音圧の差分によって音圧勾配を近似し（有限差分近似），その時間積分から求める。一方，音圧は2点の音圧測定の平均によって求められる。つまり，音響インテンシティのr方向成分を次式で求める；

$$I_r(t) = p(t)u_r(t) \cong \frac{p_1(t)+p_2(t)}{2\rho\Delta r}\int_{-\infty}^{t}(p_2(\tau)-p_1(\tau))\,d\tau \qquad (2.2)$$

ただし，$p(t)$は音圧，$u_r(t)$は粒子速度のr方向成分である。

この粒子速度の計測は音圧計測に比べて簡単ではないため，歴史的に見て2マイクロホンによる音圧勾配の有限差分近似法が開発されるまでは音響インテンシティの実用計測には至らなかった。

2．3　音響インテンシティ法による音響パワー計測[32, 33)]

音響インテンシティは音圧と粒子速度の積で計算される物理量であり，単位面積当たりの音響パワーを表す。音響インテンシティ法は，前述したように，2つの音圧マイクロホンを用いて中点における平均音圧および有限差分近似による音圧勾配から粒子速度成分を求め，それらの積から2点で決まる方向に対する音響インテンシティの方向成分を測定する手法である。この音響インテンシティ法は任意の閉空間から放射される音響パワーを測定する有効な方法である。音圧法に比べてこの方法の最大の特徴は，音響インテンシティがベクトル量であることから，ガウスの定理を利用して任意の閉空間を設定できることである。

まず，音源から放射される音響パワーPは，音源を囲う仮想閉空間の表面Sにおける音響インテンシティの法線成分I_nの面積分として次式のように表される。

$$P=\int_S I_n dS \tag{2.3}$$

今，仮想閉空間表面をN個に分割し，それぞれの法線方向音響インテンシティをI_{ni}，その部分表面積をΔS_iとすれば(2.3)式のPは次式のように近似できる。

$$P \cong \sum_{i=1}^{N} I_{ni}\Delta S_i \tag{2.4}$$

２．３．１　基準音源との比較による現場測定

本手法が通常の作業環境（暗騒音の少ない事務室）において有効であることを確認するために，基準音源（従来の音圧法による音響パワー計測で校正された音源）に対して適用することで，ほぼ実用的な精度で測定できることを確認する。

ここでは，本手法が無響室および半無響室以外の任意音場において測定できることを確認するために，（2.4）式に基づく１０点のポイント測定によって既知の音響パワーを放射する音源の音響パワーを測定した。

対象の音源として，回転ファンによって広帯域騒音を発生させるＢ＆Ｋ社4204型基準音源を選択した。この音源は，半無響室においてISO3745規格に基づく音響パワー計測による校正データ（電源周波数とその電圧で動作条件が規定されている）を持つものである。図２．１に，ISO 3745に準拠して半自由空間における10点の空間平均音圧によって測定されたこの音源の音響パワースペクトルを1/3オクターブバンドのスペクトルで示す。次に，同一の音源を通常の作業環境（暗騒音レベル60dB(A)の事務室）に設置し，規定電圧によって動作させた。得られる放射音響パワーを，半径１ｍの半球面上において，本手法による10点のポイント測定（ISO3745参照）によってを計測した。図２．２に，その結果のスペクトルを示す。1.6kHz以下では非常に良く一致している。これに対して，2k，2.5k，3.15kHzでは２dB程度の過小推定が見られた。この原因は測定環境の影響（反射成分の存在）が主要な要因と考えられる。さらに5kHz以上では単調減少傾向の過小に測定されている。これは，音響インテンシティプローブのもつ有限差分近似の近似限界（Δr=12mmにおいて5kHzで-1dB）を越えた周波数におけるバイアス誤差の影響が反映されている[28]。よって，この場合の上限周波数は５kHzとすべきである。

次に，実用的に良く利用されるＡ特性音響パワー（1/3オクターブ分析結果より計算で算出）について両者の測定結果を比較する。この音源のＡ特性音響パワーレベルは94.9dB re. 1pWであり，作業環境において本手法によって測定結果は94.6dB re. 1pWであった。両者の偏差は0.3dBである。この結果から，本手法は対象音源の既知音響パワーを使用した測定環境において実用的に十分な精度で測定できることが確認できた。

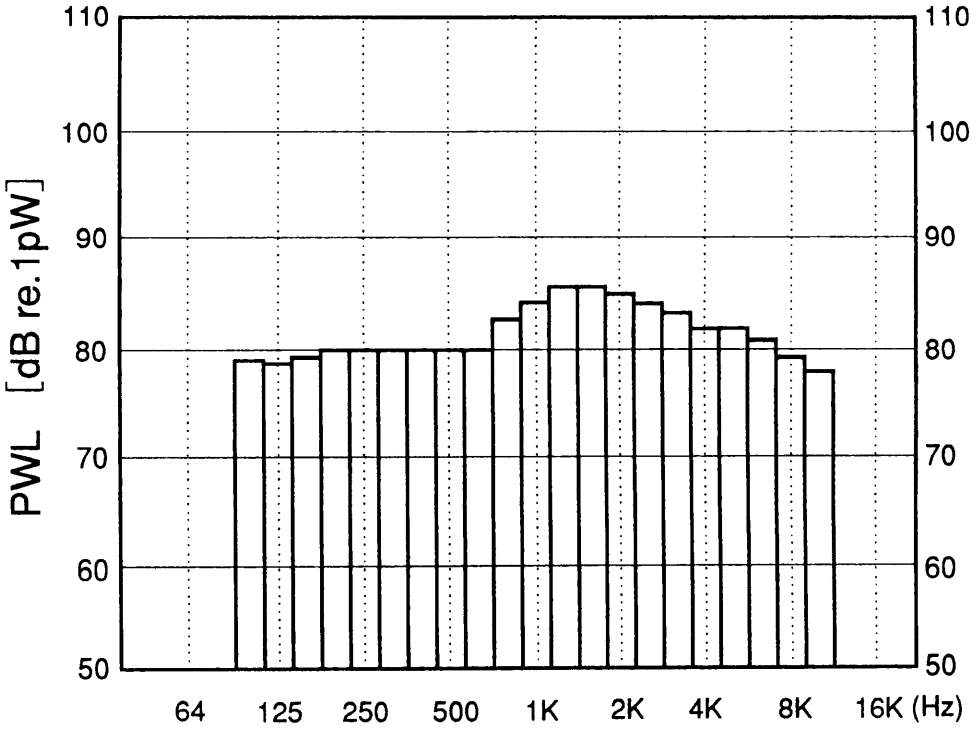


図２．１　半無響室で校正された基準音源の音響パワー

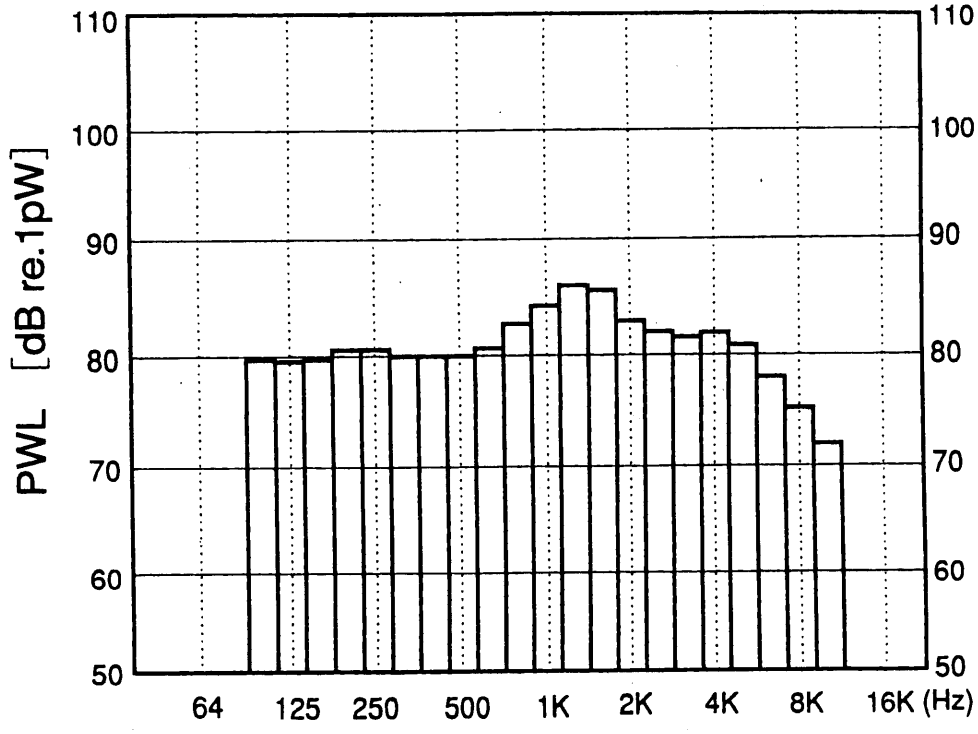


図２．２　通常の作業環境において音響インテンシティ法によって測定された基準音源の音響パワー

２．３．２　空間平均の手法（ポイント／スキャン法）

次に，別の既知音響パワー（75 dB re.1pW，精度1.5 dB)を発生する音源（B&K 4205型）を用いて，空間平均の手法について検討した。図２．３に示すように，立方体の測定空間に対してポイント測定とスキャン測定の２通りの空間平均で音響パワーを測定する。測定空間の大きさは一辺を0.7mとし，それに対して，測定ポイント数を５点，20点，80点とし，同様の数のスキャン面を利用した。測定結果を図２．４に示す。インテンシティによる音響パワーレベルは５点の測定結果だけが大きくなった。これは対象音源の持つ指向特性が反映されているためである。一方，音圧の結果も同様の傾向をもつが，音響インテンシティに比べて大きな値を表示している。

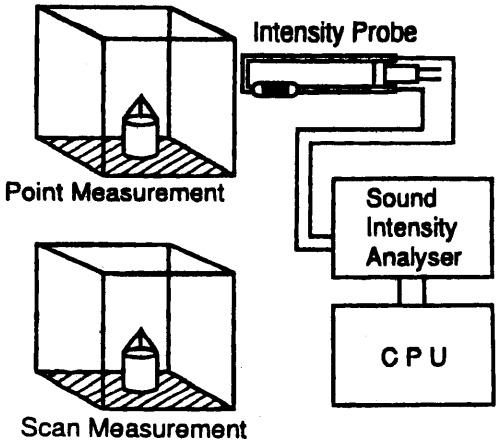


図２．３　立方体の仮想測定空間による音響パワー計測セットアップ

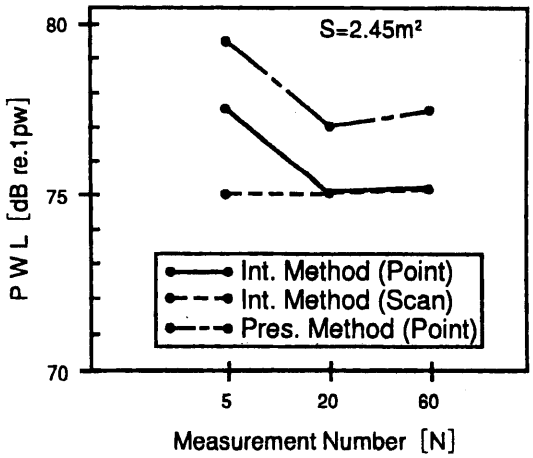


図２．４　測定閉空間に対するポイント測定およびスキャン測定
（実線：ポイント測定による音響インテンシティ法，破線：スキャン測定による音響インテンシティ法，一点鎖線：ポイント測定による音圧法）

２．３．３　空間の大きさによる違い

次に，測定空間の大きさの違いによるついて検討する。立方体の一辺を0.35m，0.7m，1.4mとし，同じ音源を２通りの平均方法で測定した。結果を図２．５に示す。測定面積の増加とともに，音響インテンシティによる結果はほぼ一定していることに対して，音圧による結果は増加している。これは，音圧法では天井や周囲の反射面による影響が現れているためと考えられる。

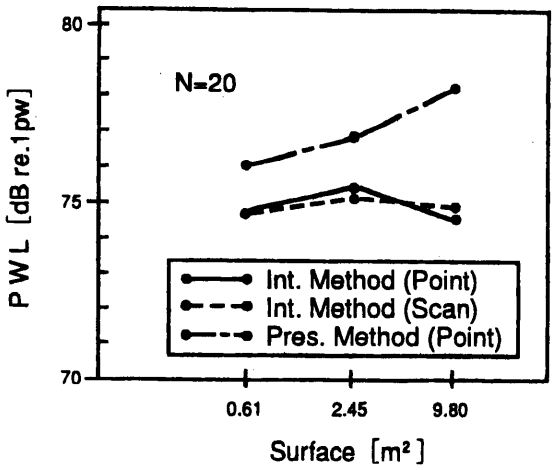


図２．５　測定空間（測定面積）の大きさによる影響
（実線：ポイント測定による音響インテンシティ法，破線：スキャン測定による音響インテンシティ法，一点鎖線：ポイント測定による音圧法）

２．３．４　外部騒音の影響

音響インテンシティ法はベクトルの法線成分を測定しているため，ガウス空間としての仮想測定面に外から入射する成分は，ガウス空間内で吸収することがなければそのエネルギーは外へ抜け出るため，閉空間の内部にある音響パワーの正味量が求められる。この特徴を確認するために，音源の１m離れた位置にピンクノイズによる定常外部騒音を追加し，同じ対象音源の音響パワーを２通りの方法で測定した。ここでは，音源に最も接近する測定空間を使用した。結果を図２．６に示す。この図において破線で示すスキャン測定による結果が，従来法による校正値に最も近い値であった。これらの結果から，音響インテンシティ法にスキャン測定を組み合わせる方法が現場測定に最も適していると判断できる。

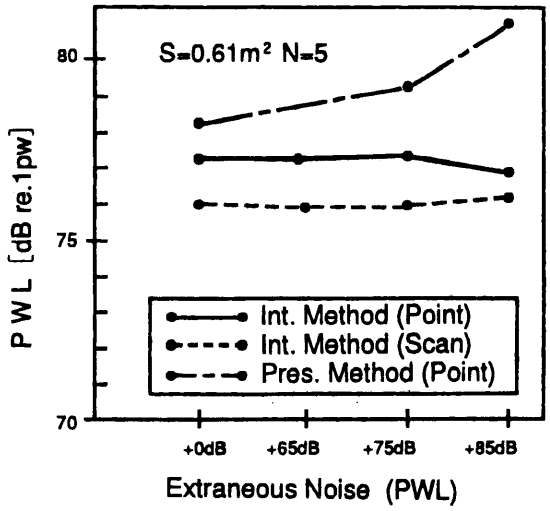


図２．６　定常外部騒音による影響
（実線：ポイント測定による音響インテンシティ法，破線：スキャン測定による音響インテンシティ法，一点鎖線：ポイント測定による音圧法）

２．４　まとめ

本章では，先ず音響インテンシティの理論および２マイクロホン法音響インテンシティについて簡単に述べた。次にこれを利用した音響インテンシティ法音響パワー計測について次の基礎的事項について実験的に確認した。その主な内容は，本手法による基準音源の現場における測定結果は，スペクトルにおいては実用精度（1dB）を満たさない周波数も存在するが，A特性音響パワーにおいては十分な精度をもたらすものであった。

この結果に基づき，本手法を音響パワーの測定に用いた場合に，測定空間の大小による影響がないこと，空間平均のための手法であるポイント法とスキャン法の比較，外部騒音の影響を受け難いことを確認した。その結果，特にスキャン測定は現場用としての再現性の良さが特徴的であった。

第3章　音響インテンシティ法音響パワー計測における外部騒音の影響

3．1　はじめに

本章では，音響インテンシティ法音響パワー計測（本手法）の特徴の1つである外部騒音の影響を受けにくいことを実用的な見地から実験的に調べる。音響インテンシティ法音響パワー計測の多様性，有効性，検証はさまざまな角度から検証されている[38),39),40)]。しかし，外部騒音の影響だけを取り上げた例は少ない。実際の現場では外部騒音が存在する環境で用いることが多いため，外部騒音除去に関する実質的な能力を検証し，その可能性を追求することは重要である。

本手法は，ガウスの定理を利用することから，仮想測定閉空間を任意の寸法に取ることができる。このことは2章（2．3．2）において述べているが，外部騒音が存在する環境においても任意寸法の閉空間を利用できることを確認する。その目的は，比較的に大きな外部騒音環境において本手法による適切な空間平均（2重スキャン測定）によって再現性が確保できることを検証することである。3．2では最初に，この外部騒音存在下においても仮想閉空間の配置の影響を受けないことを調べる。

次に3．3では，本方法による特徴の1つに，定常外部騒音の影響を受け難いことを調べる。ここでは，外部騒音が存在する環境下において実用的な精度で音響パワーを計測するための条件として定常・非定常の外部騒音による影響を実験的に検討する。

ISO 9614-1，-2ではこのような周期的間歇騒音は，平均時間を適切に選ぶことで定常と考えることが述べられている。3．4では，さらに外部騒音についてもこの方法が適用できるかどうかを調べる。対象音源および外部騒音の両方が周期的な間歇騒音であれば，仮想閉空間上のスキャン平均を適切に行うことで，周期的間歇外部騒音の影響を受けずに対象音源の音響パワーを計測できることを示す。

3．2　仮想閉空間の違いによる効果[42)]

3．2．1　はじめに

様々な音場が予想される現場において有効な音響パワー計測を実施することが必要である。この要求に対して，本手法は任意の音場で有効な音響パワーを計測するという可能性を持っている。特にこの方法は，仮想測定閉空間の外から入り込む騒音の影響を受けにくい。本章では，仮想測定閉空間の配置および寸法の影響を実験的に検討し，さらに音圧法による結果と比較した。

3．2．2　実験

実験には，B&K社2133型リアルタイム周波数分析器および3519型音響インテンシティプローブをマイクロホン間距離12mmにて使用し，互いに直交する2重スキャン測定を利用した[30)]。図3．1に示すように半無響室（5.6×6.6×2.4m）の床面に対象音源と外部騒音源を配置した。仮想測定閉空間の表面が外部騒音源に対して90度と45度になる2条件で実験を行った。対象音源と外部騒音源には2組の独立したピンクノイズ発生器，パワーアンプ，小型スピーカ（135×115×85mm，420×270×180mm）を用いた。

実験に先立ち，各音源の放射パワーを決めるために，対象音源の上方（床面から0.5m）の位置に基準点を置き，その点で各音源から単独で65dB(A)の音圧レベルを得るように，各音源の放射パワーを調整した。以下の実験においては対象音源の放射パワーレベルは固定とし，外部騒音の音圧レベルは60dB（-5dB），65dB（0dB）とした。

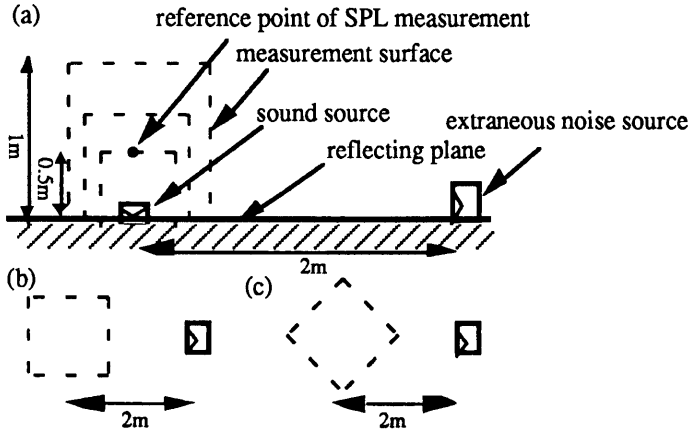


図3．1　外部騒音環境をもたらすための実験セットアップ

３．２．３　仮想測定閉空間の配置による影響

図３．１の(b)，(c)に示す配置によって，外部騒音源と仮想測定閉空間の幾何的配置条件による影響を調べた。外部騒音が60dB（-5dB）の結果を図３．２に示す。外部騒音における音響パワーレベルに及ぼす配置の影響はほとんどないことが分かった。

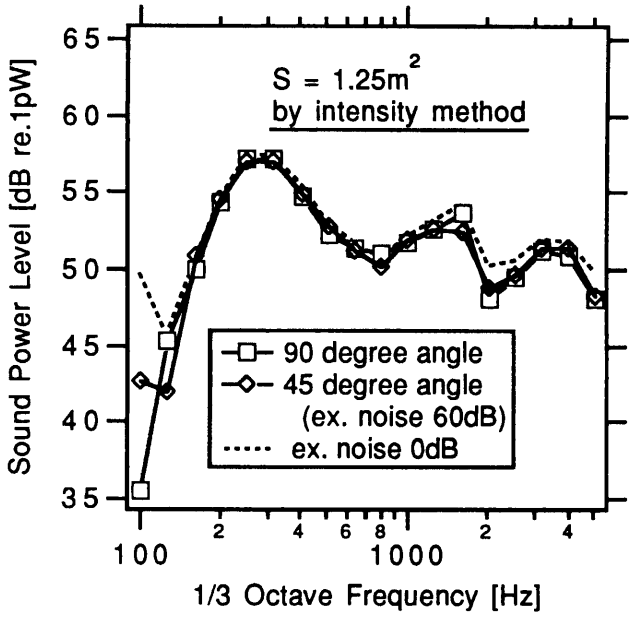


図３．２　外部騒音環境下における測定空間の配置による影響

３．２．４　仮想測定閉空間の面積による影響

仮想測定閉空間の大きさと外部騒音除去効果の関係を調べる。仮想測定閉空間を一辺0.5，0.7，1.0mの立方体とし，65dBの外部騒音レベルの条件で実験を行った。その結果を表３．１にA特性音響パワーレベルL_{WA}として示す。ただしI, pはそれぞれに音響インテンシティ法および音圧法を示す。仮想測定閉空間の大きさを変化させても外部騒音の除去効果は大きく変化しないことが分かる。本手法の特徴として，ガウス空間の大きさ測定現場の状況に合わせた大きさに設定できることになる。また，本手法による仮想測定閉空間の面積を小さくしてもあまり大きな効果は得られなかったが，スキャニング時間の短縮に有効であることが分かる。

表３．１　外部騒音環境下のＡ特性音響パワーレベル測定における測定面積の影響
($L_{WA}(I)$，$L_{WA}(p)$ はそれぞれ音響インテンシティおよび音圧による音響パワーレベル)

meas. surface	1.25 m^2	1.25 m^2	2.45 m^2	5.0 m^2
$L_{WA}(I)$	63.4 (0)	62.75 (-0.65)	62.3 (-1.1)	62.6 (-0.8)
$L_{WA}(p)$	64.9 (0)	67.0 (2.1)	69.6 (4.7)	72.85 (7.95)

(extraneous noise level:65 dB)　　dB re.1pW

３．２．５　まとめ

本手法の特徴の１つである外部騒音の除去効果は，仮想測定閉空間の配置およびその大きさによって変化しないことが分かった。また，対象音源の騒音レベルと同程度の外部騒音下（基準点で同一音圧レベル）において，Ａ特性音響パワーレベルに対する影響は-1dB程度であった。

3．3　定常外部騒音の除去

3．3．1　はじめに

2マイクロホン音響インテンシティ法を現場における有効な音響パワー計測手法として使用するために，定常外部騒音の除去効果を調べる。本報告では，騒音環境下において実用精度で音響パワーを計測するための条件を確認するために，仮想測定閉空間の配置および寸法の影響を実験的に検討し，さらに音圧法による結果と比較した。

3．3．2　実験

前節と同様の実験セットアップを使用した。実験条件として，各音源の放射パワーを決めるために，対象音源の上方（床面から0.5m）の位置に基準点を置き，その点でそれぞれの音源から単独で65dB(A)の音圧レベルを得るように，各音源の放射パワーを調整した。以下の実験においては対象音源の放射パワーレベルは固定とし，外部騒音源の放射パワーレベルを可変とした。

3．3．4　外部騒音のレベル変化による影響

仮想測定閉空間を1.25m^2，外部騒音レベルを65dBを中心に±5dB変化させてその影響を調べた。結果を図3．3および3．4に示す。図3．3は，仮想測定表面上で測定した音圧法からもとめた音響パワーレベルであり，外部騒音のレベル変化に対応して大く上昇している。一方，図3．4は音響インテンシティ法による結果を示し，160Hzから1.6kHzにおいて測定結果は十分に一致しており，この周波数範囲で外部騒音の影響は除去されている。外部騒音の増加に伴う2kHzから2.5kHzの減少は，使用した対象音源の放射パワー自身が特定周波数において外部音源の影響を受けると考えられる。

外部騒音の増加に伴って特定の周波数において過大な音響パワーの減少さらには負の値の音響パワーが見られた。ここでは，このような明確に不良と判断されるデータは割愛した。その判断には，ISO/DIS 9614-2に示される負の部分パワーインジケータ$F_{+/-}$を

用いた。これは外部騒音の影響による負方向の音響インテンシティを示すものである。

表3．2に，図3．3および3．4の結果から求めたA特性音響パワーレベルL_{WA}を示す。ただしI, pはそれぞれに音響インテンシティ法および音圧法を示す。音響インテンシティ法における外部騒音の影響は，-1dB程度であるのに対して，音圧法の影響は8dBまでに及んだ。

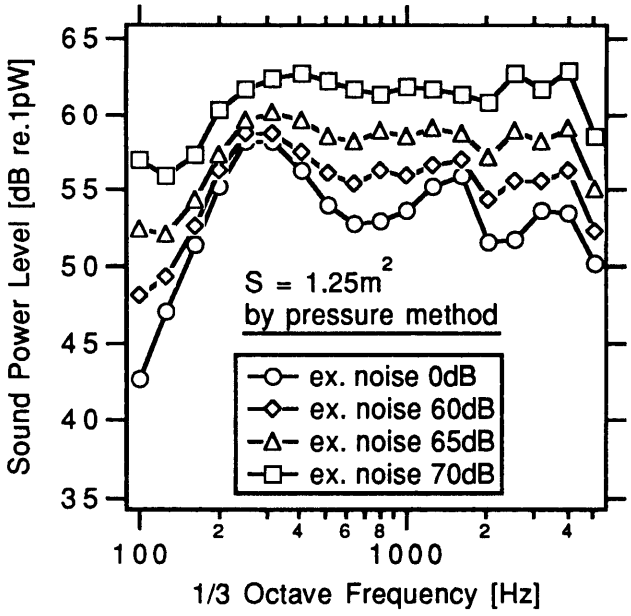


図3．3　音圧計測で得られた音響パワーレベル

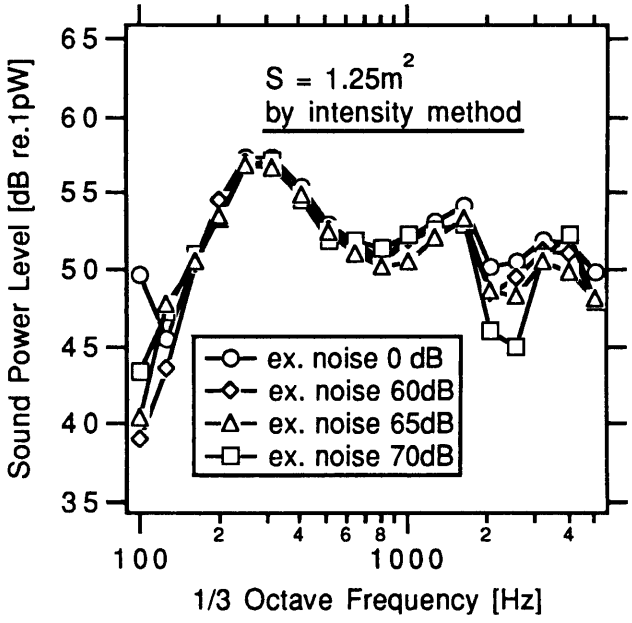


図3．4　音響インテンシティ法で得られた音響パワーレベル

表３．２　外部騒音環境下のA特性音響パワーレベル

($L_{WA}(I)$，$L_{WA}(p)$ はそれぞれ音響インテンシティおよび音圧による音響パワーレベル)

ex.noise level	0dB	60dB	65dB	70dB
$L_{WA}(I)$	63.4 (0)	62.75 (-0.65)	62.3 (-1.1)	62.6 (-0.8)
$L_{WA}(p)$	64.9 (0)	67.0 (2.1)	69.6 (4.7)	72.85 (7.95)

(measurement surface:1.25 m^2)　　dB re.1pW

３．３．５　一般的非定常外部騒音（環境騒音）の影響

現場測定においては，外部騒音はさらに一般的な非定常音と考えられる。ここでは，外部騒音として路上で測定された環境騒音の録音テープを再生して用いた。図３．１の基準点における（等価連続）音圧レベルは61.5dBであり，図３．５にその時間的な変動を示す（騒音計のFast相当の時定数を使用）。この場合の結果を図３．６に示す。周期的間歇音に比べて大きく影響を受けている。よって，精度を確保するためには，最小の測定面毎に再現性を十分に確認することが大切である。特に，対象音源と外部音源との中間に位置する測定面のように，正負両方向のインテンシティが均衡する位置での測定は注意を要する。しかし，好都合なことに，このような面で測定されたインテンシティの値が全体の結果に与える影響は比較的小さい。

ISO 9614-2では，外部騒音は一般に不特定であるため，互いに直交する２重スキャン測定（プローブの移動方向を90度に変更させて測定すること）によって同一領域を２度測定し，その再現性が測定の目標精度を満たすことを要求している。この手順は，スキャン測定法の再現性を確保するために非常に実用的で有効な方法である。これに対して，ポイント測定法であるISO 9614-1では本測定とは別に時間的変動率を表すF1インジケータを調べることを要求している。

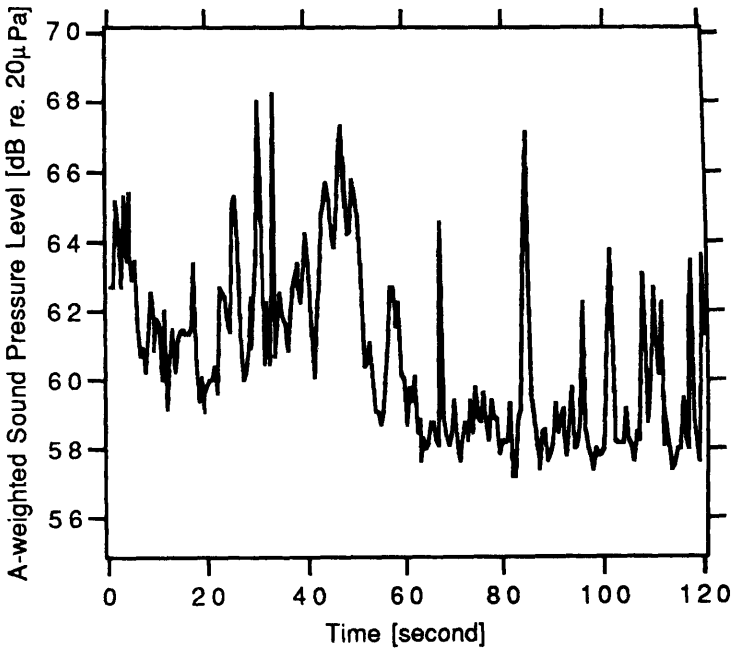


図３．５　代表的非定常外部騒音（環境騒音）の時間変動

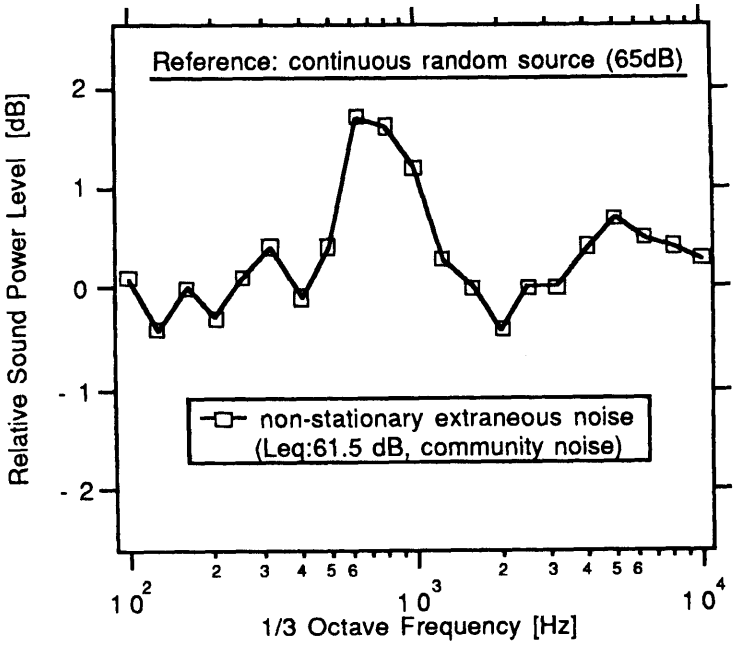


図３．６　定常音の音響パワーに及ぼす非定常外部騒音の影響

3．3．6　まとめ

音響インテンシティ法音響パワー計測は，外部騒音の影響を効果的に抑えることができた。65dBの対象音源の騒音レベルに対して70dBの外部騒音（＋5dB）において，その影響は-0.8dBであった。

これに対して，環境騒音などの非定常外部騒音の場合は，65dBの対象音源に対し61.5dBの外部騒音（騒音レベル-3.5dB）であっても，定常外部騒音に比べて大きく影響されることが確認された。

3．4　周期的間歇音に対する効果[43)]

3．4．1　はじめに

任意の現場で音響パワーを測定する方法として2マイクロホン音響インテンシティ法は注目されている。前節までに，この方法は測定空間の大きさおよび配置に依存しないことおよび定常外部騒音の影響が少ないことを述べた。ガウスの定理を利用して閉空間上で測定を行う場合に，原則として対象音源および外部騒音の両方が定常であることが要求されている。しかし，必要最小限の測定機器を用いて不特定な環境において測定する場合に，これらの条件が必ずしも満たされるとは限らない。よって，対象音源および外部音源の定常性に関して周期的間歇音にまで拡張するために，この方法の有効性と限界を実験的に確認する。

3．4．2　実験方法

図 3．7に示すように床面だけが完全反射とみなせる空間（3m×2m×2.6m）に対象音源と外部騒音源を配置した。それぞれの音源には独立のピンクノイズ発生器，パワーアンプ，小型ラウドスピーカ（100mm× 120mm×150m，130mm×130mm×215mm）を用いた。B&K社2133型リアルタイム周波数分析器および3520型インテンシティプローブをマイクロホン間隔12mmにて使用し，測定はスキャン法を利用した。対象音源を囲う測定用仮想閉空間（610mm × 610mm × 610mm）の床面を除く5面に対して，各面毎に20秒間で（スキャンの移動方向が直交するように）2回のスキャン測定を行い，その再現性などを確認しながら測定を行った。

各音源の放射パワーの設定は，図 3．7に示す基準点で65dBのA特性音圧レベルを得るように調整した。対象音源の振幅を固定し，外部騒音源の振幅を±5dBで変化させた。

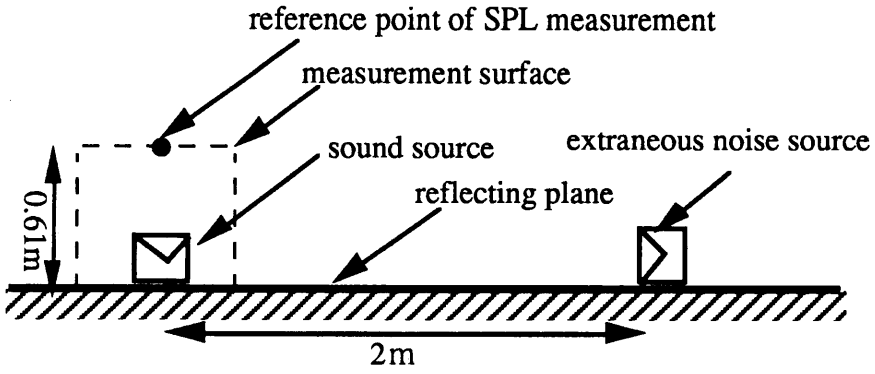


図 3．7　外部騒音源の伴う音響パワー測定の実験セットアップ

3．4．3　周期的間歇音の計測

一般に非定常音の音響パワー計測は困難であるが，対象音源が周期的な間歇音である場合には，1回のスキャン測定の平均時間をその周期の整数倍とすることで，対象音源の信号はこの平均時間によって定常状態とすることができる。これを実験的に確認するために，対象音源から連続ランダム音（音圧レベル65dB），周期バーストランダム音（周期1秒の50%と10%の時間にオン）を発生させた。それらの結果を図 3．8に示す。周期バースト信号のオンオフ比率（50%,10%）に比例した，連続ランダム音とのレベル差（3 dB，10dB）が全周波数帯域において明確に得られていることが分かる。

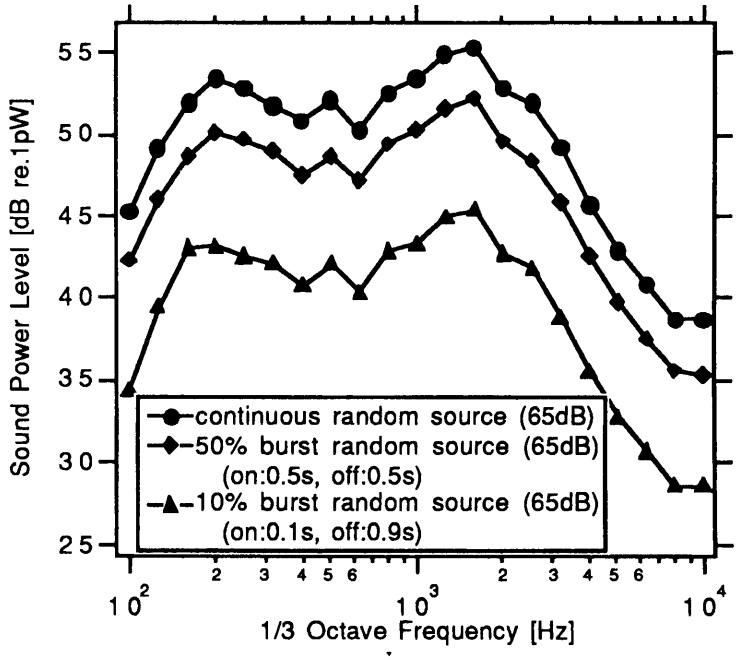


図 3．8　外部騒音のない状態の周期的間歇音の音響パワー

3．4．4　周期的間歇外部騒音による影響

次に，外部騒音が周期的間歇信号である場合に，音響パワーの測定結果に与える影響を同様の方法で調べた（対象音源は連続定常音）。外部騒音は周期バーストランダム音源（周期１秒の50％と10％の時間にオン，定常部分の音圧レベル：60dB，65dB，70dB）を発生させた。それらの結果を相対値として図３．９に示す。60dB，65dBの外部騒音であれば，200Hzから５ｋHzの帯域でおよそ0.5dBの範囲に入ることがわかる。70dBの場合には，さらに大きく影響を受けている。

また，200Hz以下の大きな変動は主に測定能力の不足に起因するものである。つまり，反射や外部騒音の多い環境（音響インテンシティに比べて音圧が大きくなる環境）では，低い周波数において音響インテンシティの測定精度を満たす条件（音場の音圧インテンシティ指数が測定器の音圧残留インテンシティ指数に比べて７から10dB程度小さいこと）の確保が困難となるためである。その主要原因は音場と測定器の能力（２つのマイクロホン間の位相不整合）に依存するものである。さらに，５ｋHz以上に見られる再現性の変動は，実際に用いたスキャンの密度から判断して，波長７cm以下を測定するための空間サンプリングの不足と考えられる。

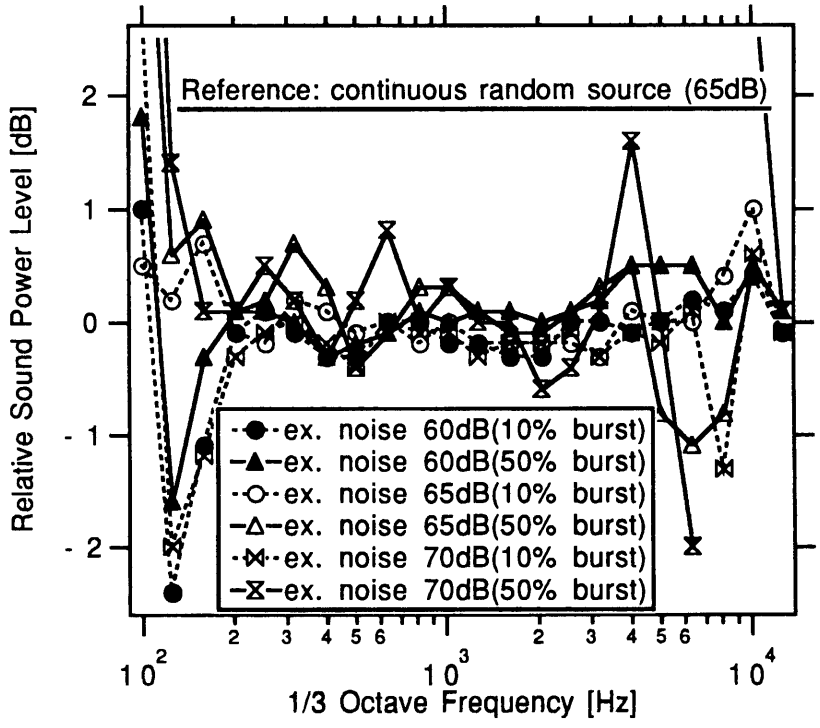


図３．９　音響パワーに及ぼす周期的間歇外部騒音の影響

3．4．5　対象および外部音源が周期的間歇音の場合

さらに，両方の音源が周期的間歇音である場合について調べた。両方の音源は音圧レベル65dBに対する50%と10%のバーストランダム音源として組み合わせた。それらの結果を図 3．10に示す。傾向として，対象音源のパワーレベルが大きい場合に，安定した値が得られることが分かる。また，同一レベルであっても外部騒音源のランダムバーストの比率が小さい程，その影響は少ないことが分かる。

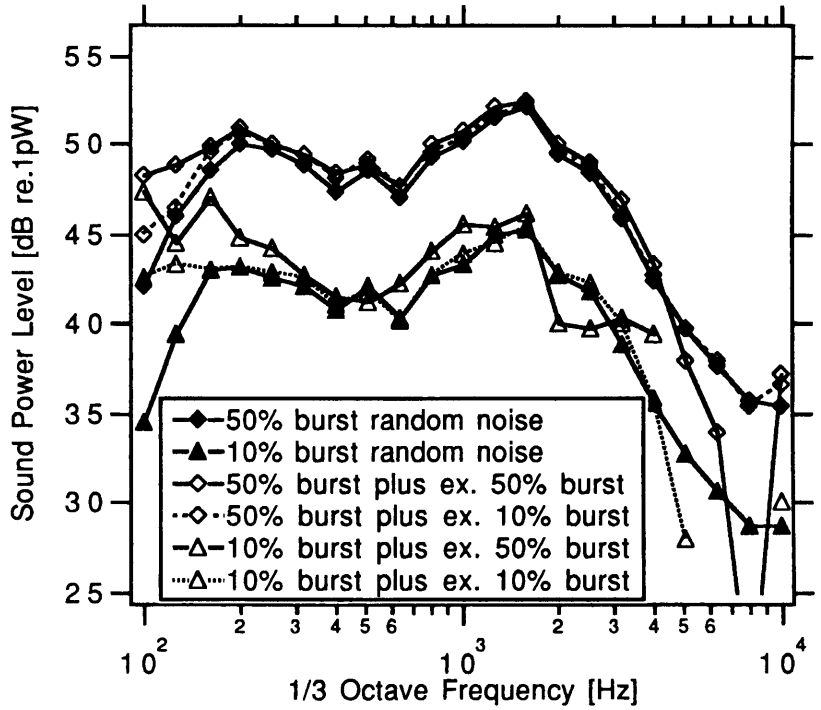


図 3．10　周期的間歇音の音響パワーレベルに及ぼす周期的間歇外部騒音の影響

3．4．6　まとめ

対象音源または外部騒音が周期的間歇騒音である場合，または同時に両方が周期的である場合に，測定面上のスキャン平均において整数回の周期を含めることで，連続的定常音と同様に外部騒音の影響を受けることなく音響パワーを測定できることを示した。

しかし，一般的な非定常の外部騒音の場合には，大きく影響を受ける。その影響を正確に議論することは困難であるが，一般的な環境騒音については，本測定法は通常の騒音測定における暗騒音に対する配慮（対象音源に比べて暗騒音レベルが10dB程度低いこと）で十分な実用精度を確保できると考えられる。

3．5　まとめ

音響インテンシティ法音響パワー計測の原理的な特徴として，閉空間の内部にエネルギーの吸収要素がなければ，閉空間の一部分に対して外から入り込むエネルギー成分は閉空間内を通過（または反射）し，他の部分から外に出るため，閉空間の表面における放線成分の面積分によって外部の影響を相殺できる。本章では，この特徴を実際に利用する場合に必要な条件などを検討した。

通常，１組の音響インテンシティプローブを用いて分割された仮想閉空間（部分平面）を順番に測定するため，対象音源および外部騒音源の両方が定常であることが必要である。しかし，対象音源が周期的間歇騒音であれば，その周期の整数倍のスキャン平均（時間空間平均）を利用することで，対象を定常的に扱うことができた。

また，外部騒音の除去効果は一定条件で有効であることを示した。実験的に確認された本計測方法を外部騒音の除去に用いる条件は，対象音源および外部騒音が定常または周期的間歇音であること，外部騒音の振幅増加によってその再現性は劣化することである。実験的には外部騒音が定常または周期的間歇音であれば最も近傍の測定面において３dB以上の影響を与えなかった。また，外部騒音が非定常であれば最も近傍の測定面において10dB程度低いことが必要と考えられる。

測定時の注意点として，各測定面毎の平均音響インテンシティ測定の再現性が得られることおよびその測定精度の条件（音場の音圧インテンシティ指数が測定器の音圧残留インテンシティ指数に比べて７から10dB程度小さいこと）を満たすことが必要である。

基本的に音響インテンシティはベクトル量であり，その方向成分の情報（正および負のリニア数で表される値）も，スカラー量である音圧と同じような扱いはできない。当面（現行規格）の利用方法としては（ISO9614-1, 2），負方向の音響インテンシティおよび音響パワーが測定されないような保守的な考え方の測定方法が考えられている。しかし，外部騒音が大きい場合には，外部音源に近い測定面では明確な負方向の音響インテンシティは当然のこととして出現する。この現象をより積極的に認めることで，本手法の利点である外部騒音の除去効果の利用範囲を拡張することが可能となる。

第4章　音響インテンシティ法音響パワー計測による吸音効果の評価[44)]

4．1　はじめに

騒音計で代表される音圧測定に比較して，音響パワーに着目した音場の評価方法は騒音の本質的な低減を目指す上で重要である[45)]。たとえば，機械の放射音響パワーは比較的よく議論されているが，吸音材の吸音効果を音響パワー測定によって評価した報告は少ない[46)]。むしろ，音響パワー測定の規格においては，測定精度確保の観点から音源近傍に吸音材を配置することは音響パワー計測の誤差要因の1つとされている[47, 48)]。そこで本章では，2マイクロホン音響インテンシティ測定法を用いて仮想閉空間内に置かれた吸音材による音響パワーの減少量を測定することによって，音響パワーを用いて吸音材の吸音効果を評価する方法を確立するとともに，その有用性を実験的に検証する。

4．2　測定原理と測定方法

2．4節に述べたように，音響パワーはガウス空間としての仮想測定閉空間の表面上における音響インテンシティの法線成分の面積分によって求めることができる（式（2.3）および（2.4）参照）。

次に，音源と吸音材を同時に含むような仮想閉空間から放射される音響パワーを考える。仮想閉空間に音源と完全反射面が存在する場合の音響パワーをP，仮想閉空間に音源と吸音性反射面が存在する場合の音響パワーをP'とすると，吸音材の効果は，次式で示す音響パワーレベルの減少分ΔLとして評価することができる；

$$\Delta L = 10 \log (P/P')$$

$$= 10 \log \left(\sum_{i=1}^{N} I_{ni} \Delta S_i \Big/ \sum_{i=1}^{N} I_{ni}' \Delta S_i \right) \qquad (4.1)$$

ここに，I_{ni}は完全反射面が，I_{ni}'は吸音性反射面が存在する場合の部分表面積ΔS_iを通過する音響インテンシティの法線成分である。以下，本論文ではこれを吸収音響パワーレベルと定義する。PおよびP'を計測する仮想閉空間表面を同じに設定し，それぞれを等分割すれば，（4.1）式の部分表面積ΔS_iを省略できるため，ΔLは同一閉空間表

面上を通過するそれぞれの音響インテンシティの総和に対するレベル差で表すことができる。また，吸音材の効果は音響パワーを減少させるため，$P>P'$であり，(4.1)式のΔLは常に正となる。

本論文の実験では，図４．１に示すように仮想閉空間として完全反射面または吸音性反射面上に置かれた一辺0.35，0.7および1.4mの立方体（仮想測定表面の総面積はそれぞれ0.613，2.45，9.8m^2）を用いた。

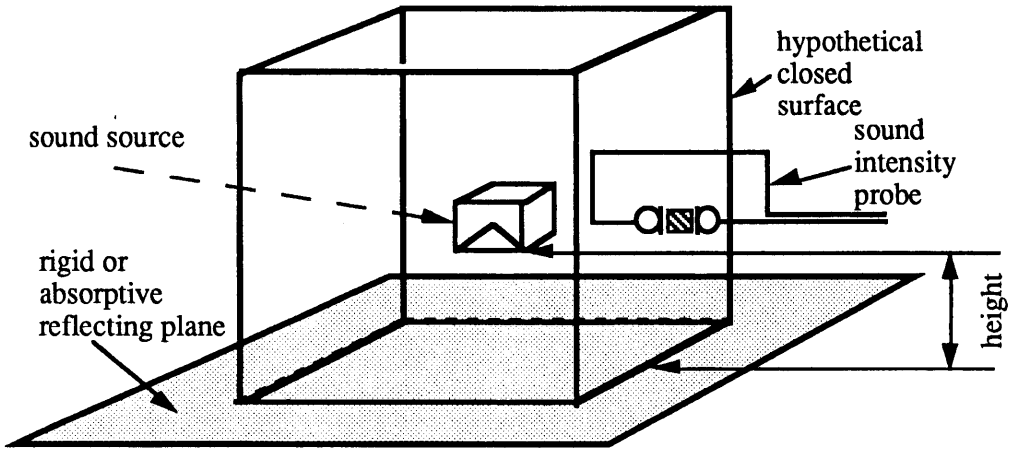


図４．１　仮想閉空間における音源と反射面の配置
（反射面は完全または吸音性反射面を表す）

音響パワーの計測には，音響インテンシティ法に従い，B&K社3360型リアルタイム音響インテンシティ分析器および3519型音響インテンシティ・プローブ（マイクロホン間距離：12mm）を使用した。

各仮想閉空間表面上での音響インテンシティの法線成分は，図４．２に示すように，音響インテンシティプローブを測定面上を均等かつ一定スピードでスキャンして計測した。得られた測定値を計測器内で平均化し，音響インテンシティの空間的な平均値とした（実際の計測では，１面当たりの計測を８秒間で行い，この間のデータを毎秒約67kHzでサンプリングし，８秒間の平均値を得ている）。

これらの実験は，天井だけが吸音処理された通常の部屋（高さ：約2.5m，奥行き：

約10m，幅：約8m程度）で行った。ピンクノイズを入力信号としてパワーアンプによってシングルコーンの小型密閉スピーカ（16.5×16.5×13.5cm）を駆動するものを音源として使用した。部屋の床は完全に反射するものであり，暗騒音または外部騒音は無視できる程度に小さい。

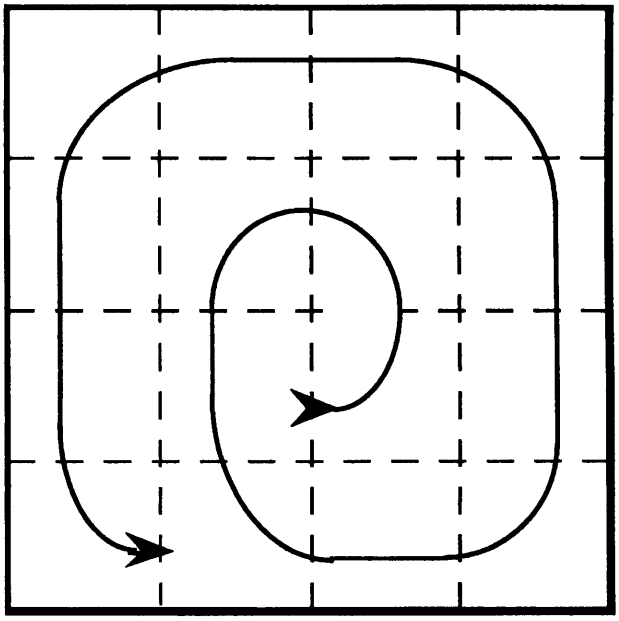


図４．２　仮想閉空間の表面を通過する音響インテンシティの法線成分を測定するための軌跡（各小正方形上を0.5秒で移動）

４．３　反射面に垂直に向けられた音源に対する吸音材の効果

音源から放射される音波を床面で反射させるために，コーンスピーカの放射面を反射面（床面）に垂直に向けた。吸音材の効果を評価するために設けた吸音性反射面は多孔質吸音材であるグラスウール（厚さ100mm，密度24kg/m^3）を完全反射する床面に置いたものであり，仮想閉空間はこの吸音性反射面上に配置した。この実仮想閉空間はこの吸音性反射面上に配置した。この実験では，仮想閉空間の一辺は0.7m，仮想閉空間の反射面を除く総面積Sは2.45m^{2}とし，音源から反射面の表面までの距離h（音源反射面間距離）を4, 8, 17, 35cmのように変化させて，それぞれの条件に対する音響パワーを測定した。P'の計測時には，吸音材の厚みに相当する高さだけ仮想閉空間を完全反射面か

ら上昇させているが，この上昇によって生じる吸音材側面から透過する音響パワーは問題となるレベルでないことを確認している。

音源近傍の吸音性反射面の有無による音響パワーの測定結果を，1/3オクターブのスペクトルとして図４．３に示す。この図において白マークは完全反射面に対する音響パワーPを示し，黒マークは吸音性反射面に対する音響パワーP'を示す。白マークの３曲線および黒マークの３曲線のそれぞれの中で比較すると，スペクトルは中域の周波数帯域において数dB程度の変動が見られる。しかし，各hに対応する白マークと黒マークを比較すると，200Hz以上の周波数において明確なレベル差が現れている。

この図４．３からは吸音性反射面による音響パワーの減少を明確に読み取ることは難しい。そこで(4.1)式に従ってこれらの減少分を吸収音響パワーレベルとして表現し，その結果を図４．４に示した。同図に示されるように，音源反射面間距離hを短くするほど，吸収音響パワーレベルの値は大きくなり，ピークとディップの発生する周波数が高い方向に移動している。

以上のように，音源の近傍に置かれた吸音材は音響パワーの低下をもたらすので，その減少分を吸収音響パワーレベルとして整理することにより，吸音材の効果を評価できる。

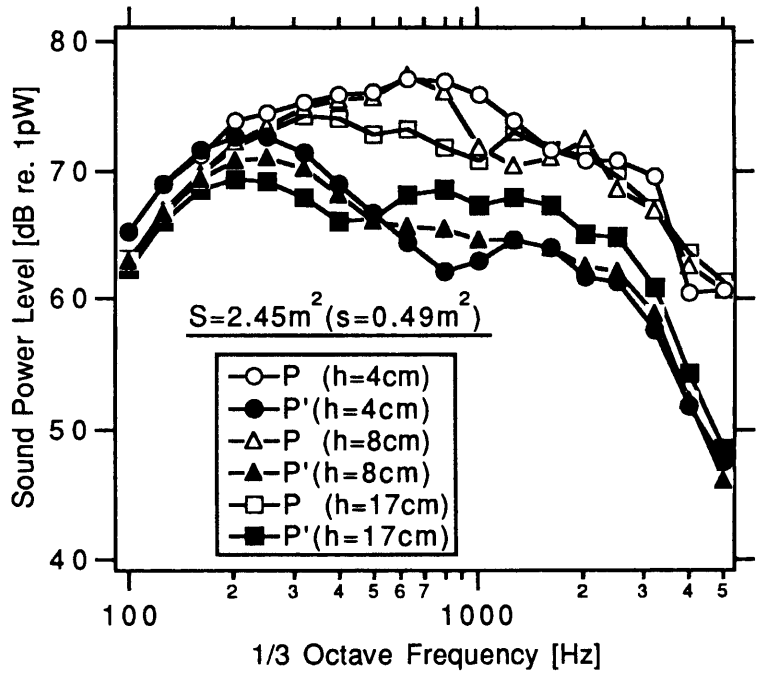


図４．３　完全反射面による音響パワーレベルPと吸音性反射面による音響パワーP'
（測定閉空間の表面積S：2.45m^2，音源反射面間距離h：4cm, 8cm, 17cm,
吸音材：100mm厚グラスウール）

４．４　吸音材の面積と音源反射面間距離の関係

次に，吸音材の面積に対する効果を検討するために，音響パワーの測定に用いる仮想閉空間の大きさを変化させ，吸音性反射面による吸収音響パワーレベルの変化を測定した。図４．１の仮想閉空間の一辺を1.4m，0.35mとすることで，仮想閉空間の反射面を除く総面積（測定総面積）Sは9.8m^2，0.613m^{2}となり，対応する吸音性反射面の面積sは図４．４の一辺0.7mの場合の４倍と1/4倍になる。

図４．５，４．６，４．７，４．８は，それぞれ音源反射面間距離hを４，８，17，35cmとした場合の，測定総面積Sの変化に対する吸収音響パワーレベルの変化を示す。これらの図から，吸収音響パワーレベルの曲線に共通する傾向が２つ見られる。第１点は，Sとは無関係にhに支配されるピーク・ディップが発生したことである。第２点は，個々のhに対する吸収音響パワーレベルはSを増やした場合に上昇したことである。以下にこの２点について詳しく論じる。

まず，第１点は，吸収音響パワーレベル曲線のピークは，その波長をλとするとき，$\lambda/4$の奇数倍が丁度音源反射面間距離hに等しくなる条件で生じ，またディップは

$\lambda/4$の偶数倍がhに等しくなる条件で生じることである。これらのピークとディップは音源と反射面の間に発生する定在波の影響によって生じたものと考えられる。すなわち，吸収音響パワーのピークは吸音材表面での粒子速度が最大（腹）となる周波数において発生し，ディップは最小（節）となる周波数で発生している。

第2点の面積に関する効果としては，吸音性反射面の面積sの変化（4倍または1/4倍）に相当する吸収音響パワーレベルの変化（6 dB）が期待されるが，図4．5～4．8のそれぞれに示される吸収音響パワーレベル曲線の各周波数における変化量は6 dBに満たない。hを固定しsを大きくした場合には，音源から吸音性反射面に（斜め方向に）入射する領域が増加することから，ある程度まで吸収音響パワーレベルが変化する。しかし，音源から反射面上のあらゆる点までの距離が一定ではないこと，および音源に指向性があるため，実際の吸音効果は単純なsの増加では説明できない。一方，sによってピークとディップの周波数は変化しないが，吸収音響パワーレベルそのものは変化しており，その変化量は周波数に対して一様ではない。

以上の議論から，特に200から315Hzの周波数領域に着目すると，その周波数領域での吸収音響パワーレベルを大きくする（吸音効果を上げる）ためには，sの増加とともにhを大きくすることが効果的であることがわかる（図4．7および4．8参照）。つまり，当然のことであるが，音源に対して$\lambda/4$程度の距離に広面積の吸音材を置くことが効果的である。

上述した図4．5～4．8の結果には，音源と仮想閉空間内の吸音性反射面の組合せによる立体角が一定になる場合が存在する。これらの組合せに対する吸収音響パワーレベルの曲線を比較した結果，前述したようなhの変化による影響，すなわちピークとディップの周波数変化のような特徴的な現象は認められなかった。

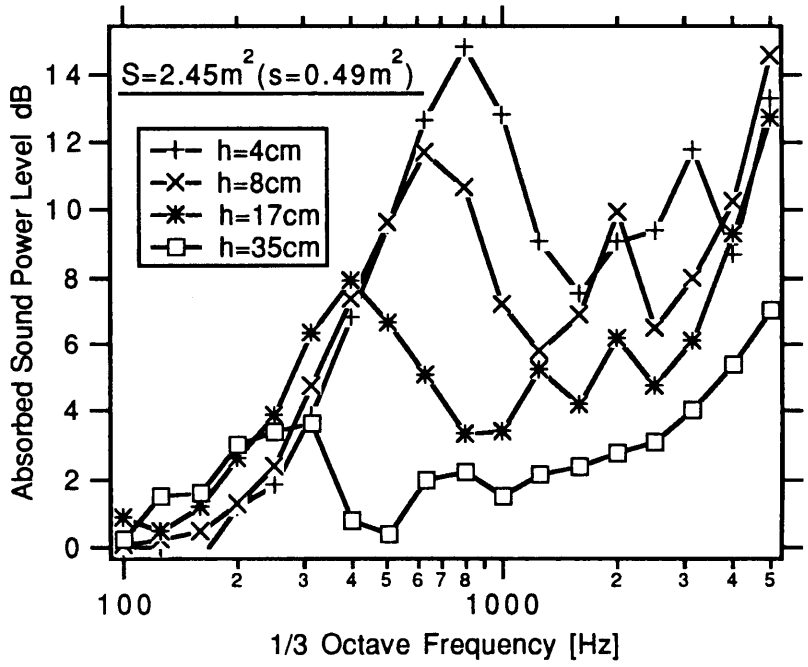


図４．４　吸音性反射面の吸収音響パワーレベル
（測定閉空間の表面積 S：2.45m^2，吸音性反射面の面積 s：0.49m^2）

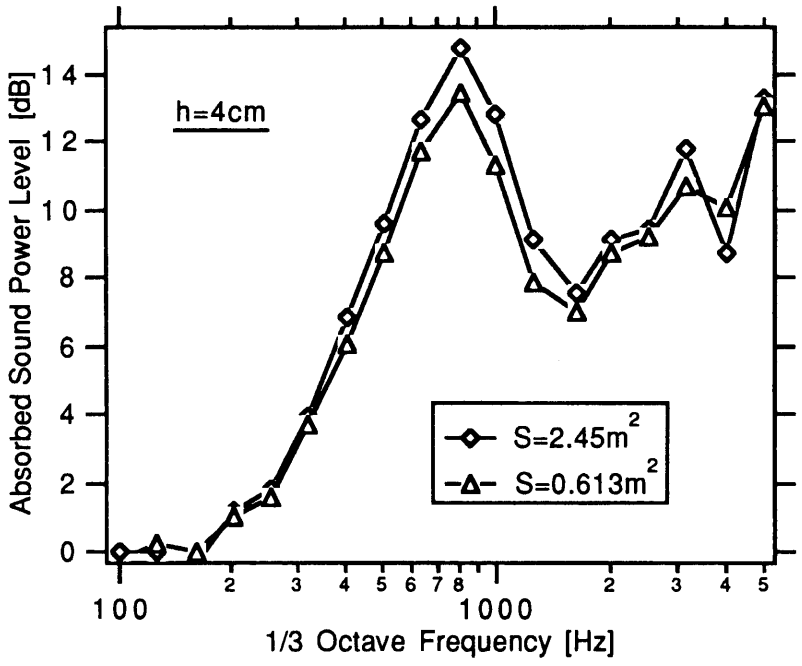


図４．５　測定閉空間の表面積 S の違いによる吸収音響パワーレベルの変化
（h =4cm）

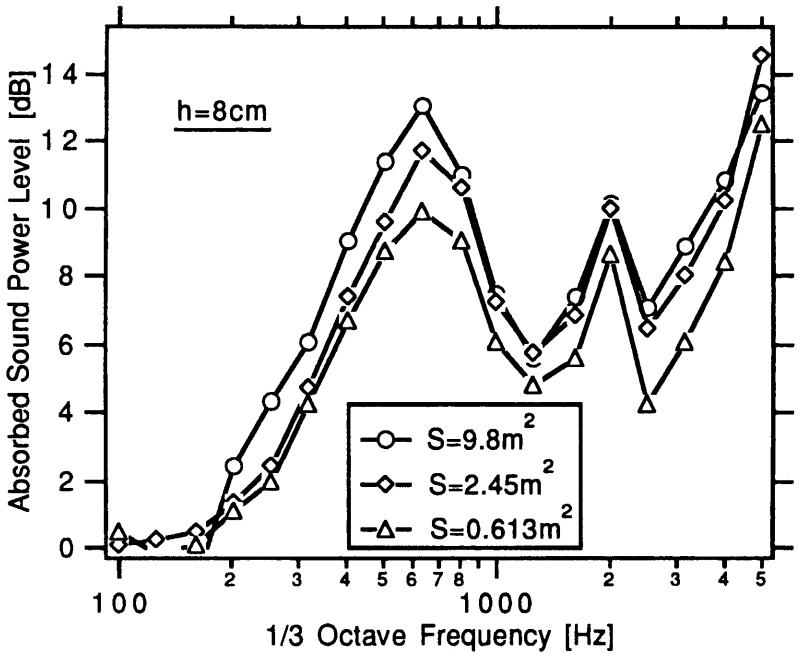


図４．６　測定閉空間の表面積Sの違いによる吸収音響パワーレベルの変化
(h = 8cm)

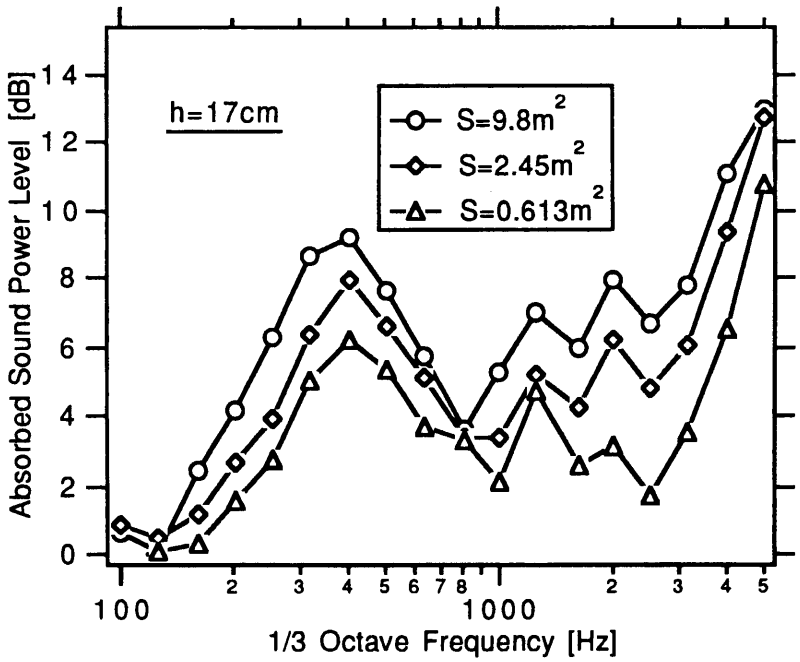


図４．７　測定閉空間の表面積Sの違いによる吸収音響パワーレベルの変化
(h = 17cm)

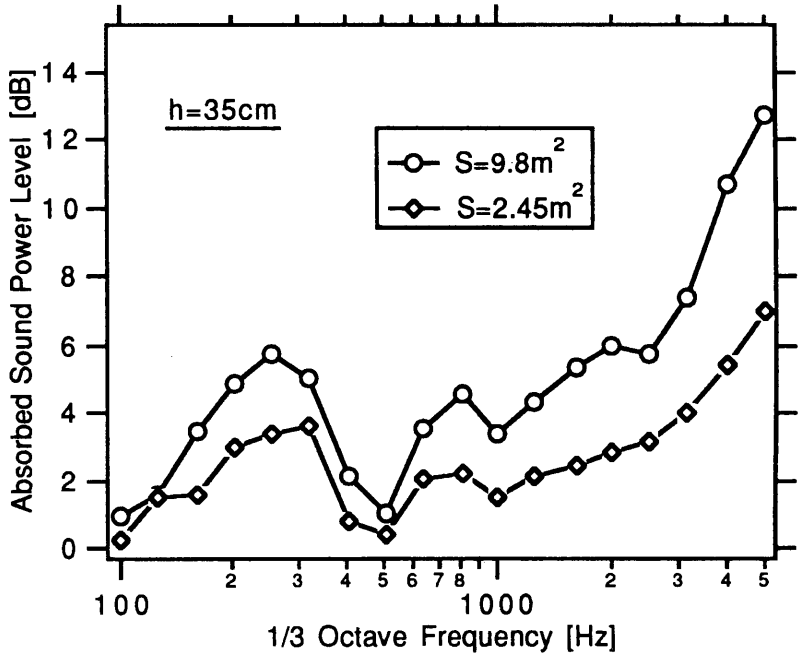


図４．８　測定閉空間の表面積Sの違いによる吸収音響パワーレベルの変化
(h = 35cm)

４．５　反射面に斜めに向けられた音源に対する吸音材の効果

一般的な音源配置に対する本評価法の適用性をさらに検証するために，音源と吸音材が極端な位置関係にある場合を想定して，音源を反射面に接しながら斜めに配置した条件での実験を行った。

図４．９に示すように，コーンスピーカの放射面と反射面のなす角度を60°として，仮想閉空間の角にコーンスピーカを配置した。この時，コーンスピーカの密閉箱の一辺は反射面に接触するように置いた。コーンスピーカの配置を除いて他の実験条件は４．２．で述べた条件と同一である。ただし，音源が仮想閉空間の角に置かれているため，より精密さを期して，音響パワーを求める際の音響インテンシティ・プローブのスキャニングを４倍の密度で行った。

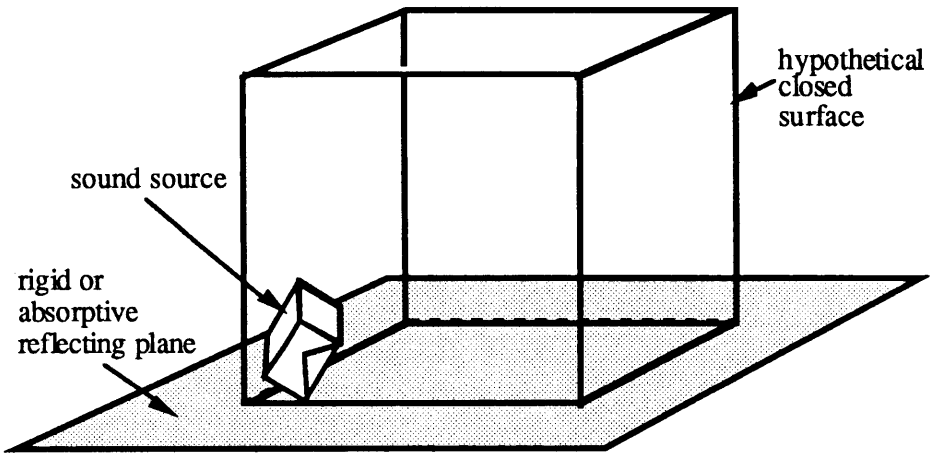


図４．９　斜め配置された音源と吸音材に対する仮想測定空間

斜め配置された音源に対する吸収音響パワーレベルの測定結果を図４．10に実線で示す。この実験において前節で述べた音源反射面間距離 h に相当する距離として，音源（振動面の中心）から反射面までの最短距離（約７cm），および音源の放射方向（コーンスピーカの振動面の法線方向）に測った反射面までの距離（約 14 cm）の２通りが考えられる。そこで，この斜め配置による吸収音響パワーレベルの実験結果をこれまでの垂直配置の $h=8$ cmと $h=17$ cmの実験結果と比較し，図４．10に示した。斜め配置に対する吸収音響パワーレベルの低周波側の第１ピークは，垂直配置の $h=8$ cmのピークではなくて $h=17$ cmのピークに近い。このことから，振動面の法線方向に測った吸音性反射面までの距離が吸音効果に影響していることがわかる。

このように，本手法によれば，音源と吸音材の不特定な配置条件でも，吸音材の効果を吸収音響パワーレベルとして評価できることがわかる。

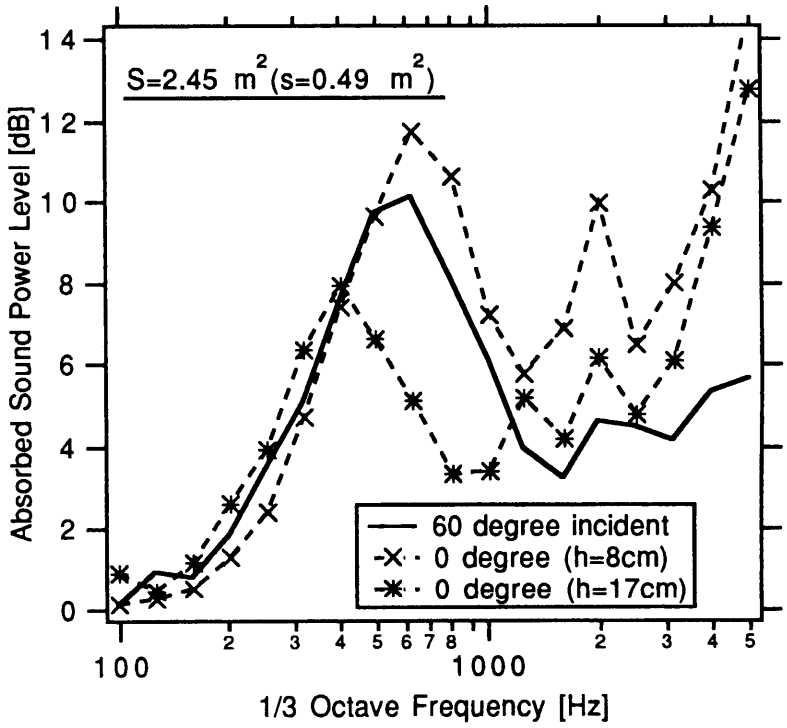


図４．10　斜め配置された音源の吸音性反射による吸収音響パワーレベル
（仮想閉空間の総面積：2.45 m^2，音源と反射面の法線のなす角度：
60°,0°（h = 8 cm, h = 17cm)；供試吸音材：100 mm厚グラスウール）

４．６　吸音率との関係

前述したように，吸収音響パワーレベルは，同一の吸音率をもつ吸音材が吸音材の面積，音源反射面間距離，音源の向きによって異なる値を示している。ここでは，この吸収音響パワーレベルは従来の吸音率へ換算できることを示し，その意味を検討する。

一般に，吸音率 α は（4.2）式のように入射音の音響パワーP_iに対する吸収された音響パワー（反射されずに見かけ上吸収された音響パワー）$P_t + P_a$の比で表される。

$$\alpha = 1 - P_r / P_i = (P_t + P_a) / P_i \qquad (4.2)$$

ただし，P_i，P_r，P_t，P_aはそれぞれ入射音，反射音，透過音，吸収音の音響パワーである。

これまでに述べた実験では吸音材は完全反射する剛体の上に直接置かれているため，

透過音のパワーP_tは無視できる。よって，この場合には（4.2）式は次式のように表せる。

$$\alpha = 1 - P_r / P_i = P_a / P_i \qquad (4.3)$$

本実験に用いたスピーカは前方に強い指向性を有するため，反射面が完全反射である場合に，音源から放射される音響パワーの大部分が反射面で完全反射した後に，周辺音場に放射されるとみなせるので，（4.3）式のP_iは完全反射による音響パワーPで近似できる。同様に（4.3）式のP_rは吸音性反射面による音響パワーP'で近似できる。こうして，（4.4）式に示すように，完全反射面による音響パワーPと吸音性反射面による音響パワーP'から吸音率を近似的に求めることができる。

$$\alpha \fallingdotseq 1 - P'/P \qquad (4.4)$$

（4.4）式は，さらに（4.1）式の吸収音響パワーレベルレベルΔLを使って次式のように示すことができる。

$$\alpha = 1 - 10^{-\Delta L/10} \qquad (4.5)$$

（4.3）および（4.5）式から分かるように，吸音率αは音響パワーの比または吸収音響パワーレベルから求められる。

上述の理論に従って具体的に求めた例として，図４．10の結果から(4.5)式を利用して求めた吸音率を図４．11に示す。この図において実線は吸収音響パワーレベルから求めた吸音率，破線は使用した吸音材の垂直入射吸音率である。この図から分かるように，100Hzから400Hz（第１ピーク付近）までの傾向は良く一致している。さらに，500Hz以上では音源反射面間距離hが短い場合のピークは垂直入射吸音率と良く一致した。つまり，hに対して吸音材の効果が最大となる条件において，吸収音響パワーレベルから求めた吸音率と垂直入射吸音率は一致するものと考えられる。

前節までの実験結果を踏まえ，吸収音響パワーレベルから求めた吸音率に及ぼす測定閉空間の表面積Sと音源反射面間距離hの影響を検討した。その結果，Sが増大する

と低周波域の吸音率が大きくなり，hが小さくなると高周波域の吸音率が大きくかつ平坦になる傾向があることがわかった。全体の傾向として，図４．11に示すように，$S=2.45\ \mathrm{m}^2$，$h=8$ cmの条件が適切であった。

このように，吸収音響パワーレベルから求めた吸音率は，測定条件を限定することで従来の垂直入射吸音率と定量的に比較することが可能であり，音源と吸音材の組合せによる実効的な吸音効果を評価する上で極めて有用な値である。

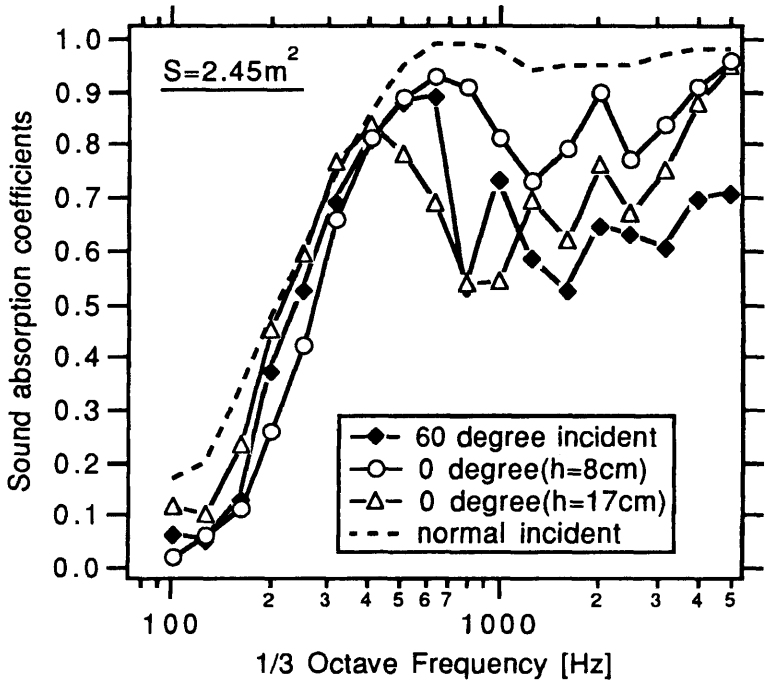


図４．11　図４．10の結果から求めた吸音率
（実線：ΔLによる吸音率；破線：垂直入射吸音率）

4．7　まとめ

本章では，実際の環境下で音源の近傍に置いた吸音材の吸音効果を，音響パワーの減少として評価する方法を提案し，その有用性を実験的に検討した。すなわち，音源近傍に置かれた吸音材に対して，音響インテンシティ法を用いてその吸音効果を音響パワーの減少（吸収音響パワーレベル）として明確に測定できること，さらに得られた吸収音響パワーレベルが主として音源と反射面間の距離および音源の向きに依存して，特徴的な挙動を示すことを実験的に確認した。本実験によって，この吸収音響パワーレベルは音源と吸音材の実際の配置条件での吸音効果を評価する有効な指標となることを示した。さらに，吸収音響パワーレベルを吸音率に換算し垂直入射吸音率と比較することによって，その吸音率が実効的な吸音効果の有用な評価指標となることを示した。

第5章　音響インテンシティ法による透過損失測定[50)]

5．1　はじめに

音響透過損失（Sound Transmission Loss ：以下ＳＴＬ）測定の方法は，２つの残響室間の開口部分に試料を置く方法（残響室法）が一般的である。この方法に対して，２マイクロホン音響インテンシティ法（音響インテンシティ法）と開口部分を持った残響室－無響室を組み合わせる方法は，開口部分から透過する透過インテンシティを直接に測定するため，必ずしも受音側の残響室を用いなくても良い。よって，試験設備のコストを抑えることが可能である。さらに，従来の２残響室による測定では受音室側の等価吸音面積を補正するための残響時間測定が必要である。この残響時間の測定は相当の時間と労力を要していた。このような理由から，音響インテンシティ法による透過損失の計測方法は多くの研究者によって注目され，報告されている[51, 52, 53)]。

また，この方法の第２の特徴は，受音室側に透過する音響エネルギー（透過インテンシティ）測定を透過する部分の直近で測定するため，「音漏れ」の生じている現場において効力を発揮する。従来の音圧計測方法では，複数の音漏れが存在する場合には，総合的な遮音効果（室間平均音圧レベル差）だけを測定することになる。

本章では，最初に音響インテンシティ法によるＳＴＬ測定に関する理論を簡単に説明する。次に，小面積試料の簡易的ＳＴＬ測定を目的として，音響インテンシティ法と１つの残響空間の組合せによるＳＴＬ測定を試みる。これは，無響室の代わりに通常の作業環境を用いるため，本格的な試験環境がなくても簡単な遮音性能の簡単な評価実験を行うことができることを示す。さらに，実際の部屋の音漏れ問題に音響インテンシティ法を適用し，その間仕切り壁の遮音性能と比較する。

5．2　測定理論

材料の遮音性能を表す透過率（τ）は，材料に入射する音響エネルギーに対する材料を透過する音響エネルギーの比で表される。音響信号が定常であれば，音響エネルギーの代わりに音響インテンシティを用いて次式のように表すことができる。

$$\text{透過率}\ (\tau) = \frac{\text{透過音響インテンシティ}}{\text{入射音響インテンシティ}} \tag{5.1}$$

一般に，その逆数を対数表示することで音響透過損失を次式のように表す。

$$\text{音響透過損失}\ (\text{STL}) = 10 \log \frac{1}{\tau} \tag{5.2}$$

さらに，これらの式から音響インテンシティ法で測定する場合には，次式のように整理できる；

$$\text{STL} = 10 \log (I_1 / I_2) \qquad \text{(dB)} \tag{5.3}$$

ただし，I_1，I_2 は開口部分の試料に対する入射音響インテンシティ，透過音響インテンシティを表す。

音響インテンシティを利用する場合には，開口部に対する入射音響インテンシティの推定方法によって，2通りの方法に分けられる。

(a) 直接インテンシティ法

開口部から試料を外せる場合には，入射インテンシティはその開口部において直接測定できる。開口部の面積が大きすぎなければ，残響室内部の音響エネルギー密度が極端に低下しないので，直接測定が可能である。この場合を次式で表現できる。

$$\text{STL}_{\text{di}} = 10 \log (I'_1 / I_2) \qquad \text{(dB)} \tag{5.4}$$

ただし，I'_1 は試料を外した開口部での入射音響インテンシティである。

(b) 音圧ーインテンシティ法

開口部から試料を外せない場合には，音源側残響室内部の空間平均自乗音圧を利用して入射インテンシティを近似する。この方法は通常の開口部で結合された2残響室

による方法に用いられている方法である。この場合，次式で表現できる。

$$STL_{pi} = 10 \log [(p_1^2 / 4 \rho c) / I_2] \qquad (dB) \qquad (5.5)$$

ただし，p_1は音源側残響室内の平均音圧，ρは空気の密度，cは空気中の音速である。以下の実験は(a)および(b)の方法によって行い，それらを比較した。

Lai，Qiの報告によれば，音響インテンシティ法によって測定されたＳＴＬは受音側室の残響時間によって影響されない[54]。このことは，無響室の代わりに通常の部屋を利用できることを意味する。

上記の議論から，図５．１に示す音響インテンシティ法による簡易的なＳＴＬの測定法を提案する。この方法は，開口部を持つ小型残響室を通常の部屋に置き，その内部に音源として小型ラウドスピーカを入れ，通常の部屋に放射される試料からの透過音響インテンシティを音響インテンシティ法によるスキャン平均で測定する方法である。その特徴は，試料が小面積の開口部の面積だけで十分であることである。ただし，対象となる試料のＳＴＬは残響室を構成する壁面より十分に小さいことが必要である。

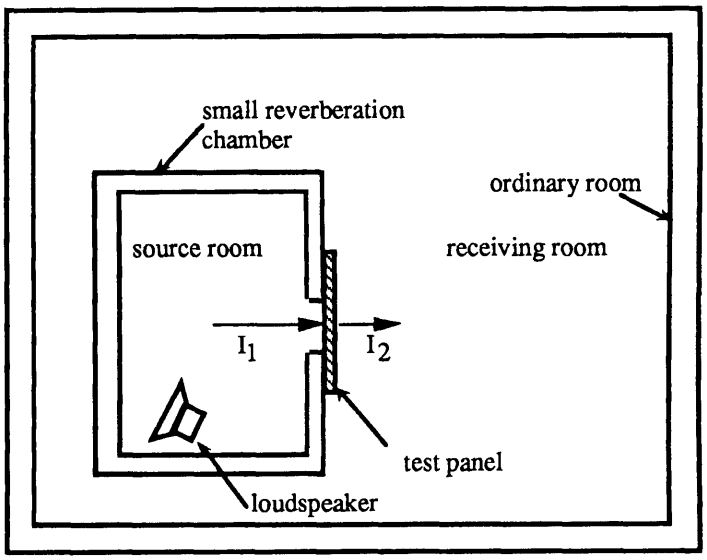


図５．１　音響インテンシティ法による透過損失測定の配置

5．3　小型残響箱による簡易測定

音響インテンシティ法によるＳＴＬ測定の多くは建築材料や建築現場における適用を目的としているため，試料面積の大きさは残響室の開口部面積としている例が多い[51]。

従って，比較的小さな試料を対象とした応用例は少ない。本報告では，意図的に通常の部屋に十分持ち込める程度の寸法の小型残響箱による透過損失の簡易測定を試みる。本手法を鉛シートに適用し，従来法と比較する。

5．3．1 小面積試料の測定システム

開口部付き小型残響箱を実験用に15mm厚のパチクルボードで製作し，暗騒音の少ない通常の部屋においた。小型残響箱の容積は 0.343 m^3 で，立方体(0.7 m x 0.7 m x 0.7 m)とした。その上面に２種類の開口部を持たせた。その大きさは 0.12 m^2 (0.4 m x 0.3 m) および 0.06 m^2 (0.4 m x 0.15 m)とした。

また，部屋の容積は比較的小さいため，拡散音場と見なされる最低周波数の制限に直面する。この場合，ISO R354による最低周波数は1000Hzであった。

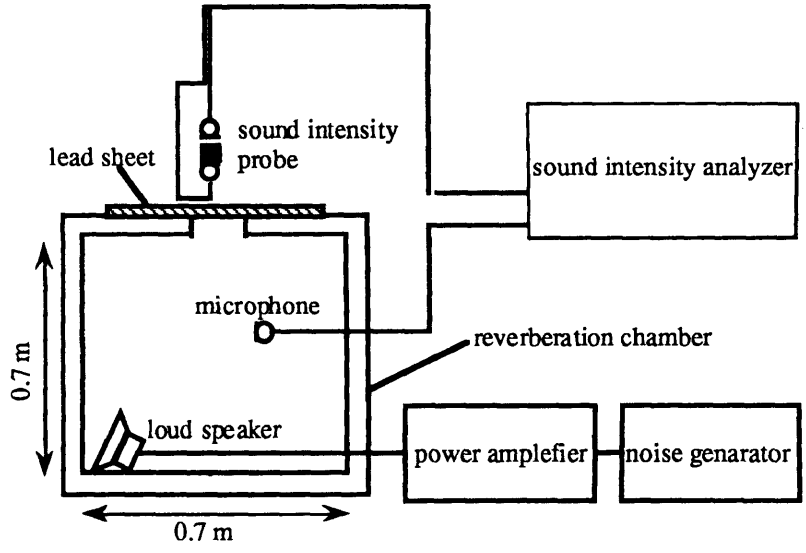


図５．２　２マイクロホン音響インテンシティおよび小型残響箱による音響透過損失測定セットアップ

5．3．2　ＳＴＬの測定手順

図５．２に実験のセットアップを示す。ピンクノイズ発生器の信号をパワーアンプで駆動された小型ラウドスピーカを音源として，残響室内に置いた。この方法の有効性を示すために，既知のSTLをもつ0.5mm厚の鉛シートを選択し，残響箱の開口部を覆った。試料周辺の音漏れを防止するために，周辺部を粘土によって固定した。直接法の場合に，入射および透過音響インテンシティは試料の直前30mmの手前において２マイクロホン音響インテンシティプローブ（B&K 3519型，マイクロホン間距離12mm）によってスキャン測定した。このスキャン測定では，開口部の面積を空間的に均等に平均するために，２チャンネルリアルタイム分析器 （B&K 3360型）の16秒のリニア平均機能を使用した。音圧－インテンシティ法の場合に，残響室内の異なる６点の平均音圧を同分析器によって測定した。

測定前に，暗騒音が十分低いこと，残響箱の周囲または開口部周辺における音漏れがないことに注意した。また，残響箱を構成するパチクルボード部分（例えば開口部周辺）からの透過音（透過インテンシティ）が無視できる程度に十分に小さいことを確認した。

5．3．3　ＳＴＬの測定結果および考察

上記の２つの方法によって厚さ0.5mmの鉛シートのＳＴＬを測定した。図５．３から５．６に示すように得られた結果は，従来法（残響室法）と理論予測（質量則）による結果と比較されている。図５．３および５．４の黒丸は(a)直接法によるＳＴＬ結果を示す。また，図５．５および図５．６の白丸は(b)音圧－インテンシティ法によるＳＴＬの結果を示す。ただし，図５．３および５．５の結果は0.12 m^2 の開口部を利用した場合である。同様に，図５．４および５．６の結果は 0.06 m^2 の場合である。これらの図の破線は従来の残響室法によるＳＴＬを示し，実線は次式のランダム入射による質量則に基づくSTL_{ml}（理論値）である；

$$STL_{ml} = 20 \log (f \cdot m) - 48 \quad (dB) \tag{5.6}$$

ただし，f および m はそれぞれに計算周波数および0.5mm厚鉛シートの面密度である。 図５．３から５．６に示す結果は，従来法の２残響室法および理論予測と一致するものであり，特に中・高域の周波数範囲において良く一致した。低い周波数については，この方法で得られたＳＴＬの値は，従来法または理論値に比べておよそ５dB高いことがわかる。この低周波数の傾向は，用いた小型残響箱の開口部の入射条件がランダム入射ではなくて垂直入射に近いことを意味する。

直接インテンシティ法と音圧－インテンシティ法を比較する場合，前者の結果は400Hzまたは500Hzから数kHzまでのより広い有効周波数範囲であったが，後者の結果は800Hzから以上であった。この差は，音圧－インテンシティ法における６点による空間平均音圧を測定する場合に拡散性の不十分さが原因と考えられる。

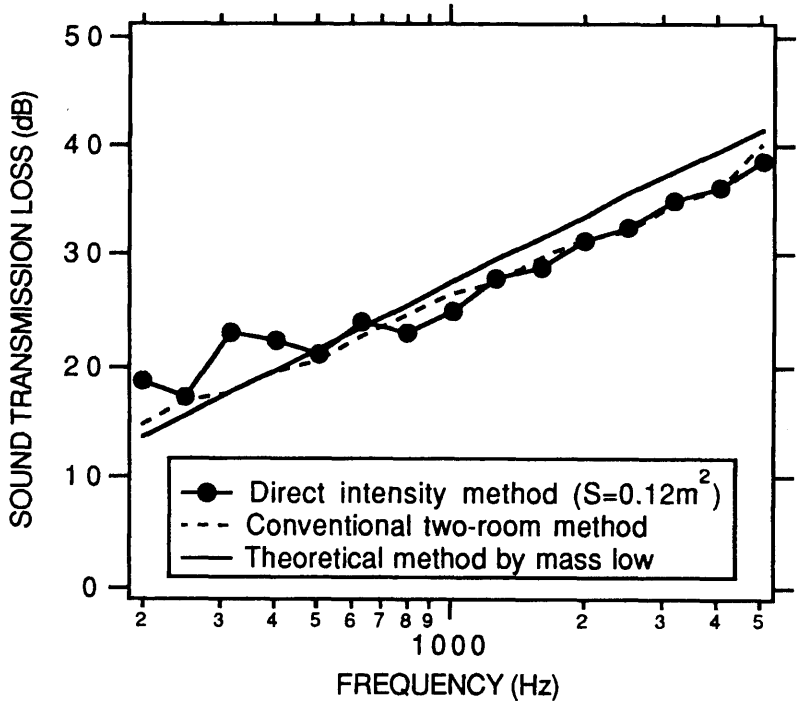


図５．３　0.12m^{2}の開口部を持った小型残響箱における直接インテンシティ測定による0.5mm厚鉛シートの音響透過損失

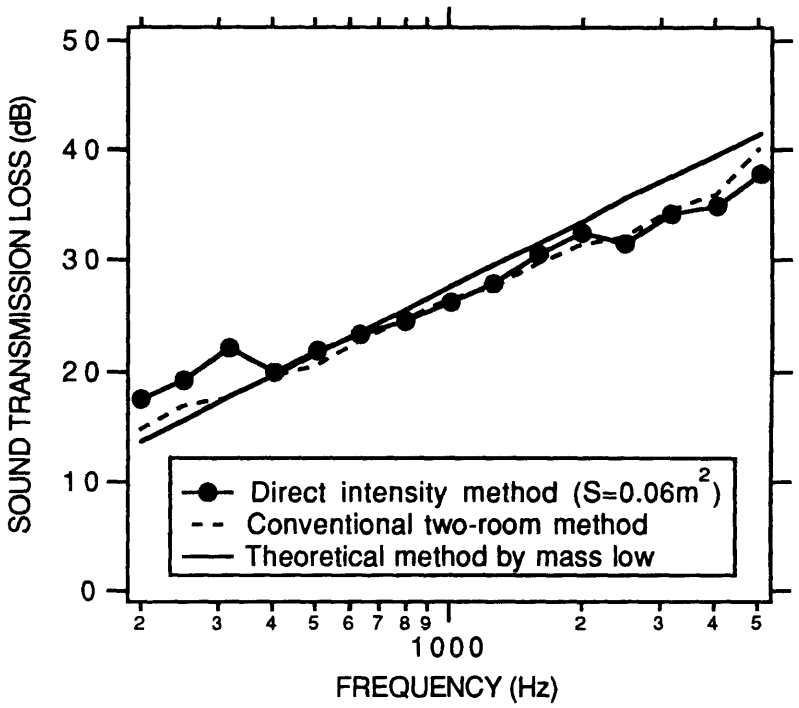


図５．４　0.06m^{2}の開口部を持った小型残響箱における直接インテンシティ測定による0.5mm厚鉛シートの音響透過損失

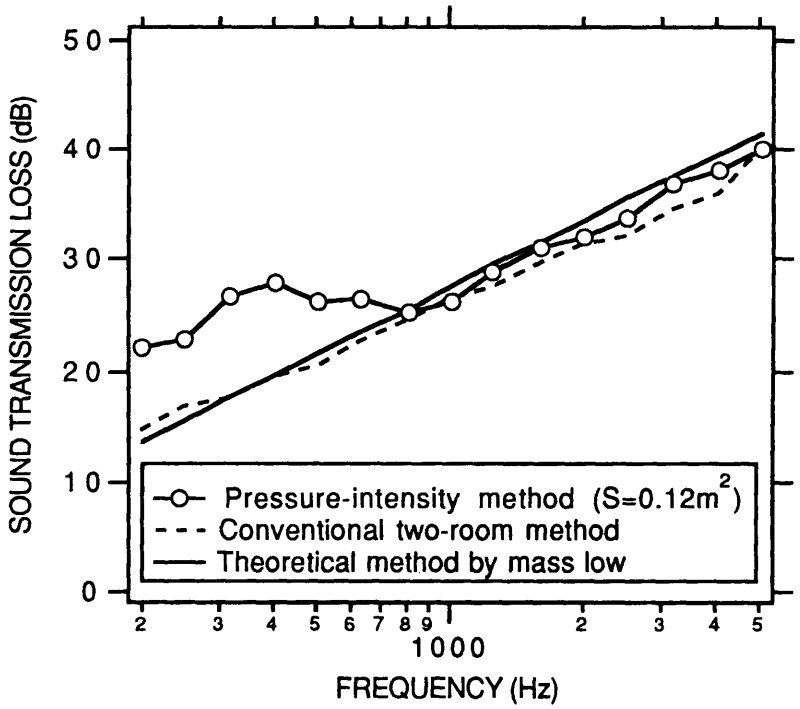


図５．５　0.12m^{2}の開口部を持った小型残響箱における音圧－インテンシティ測定による0.5mm厚鉛シートの音響透過損失

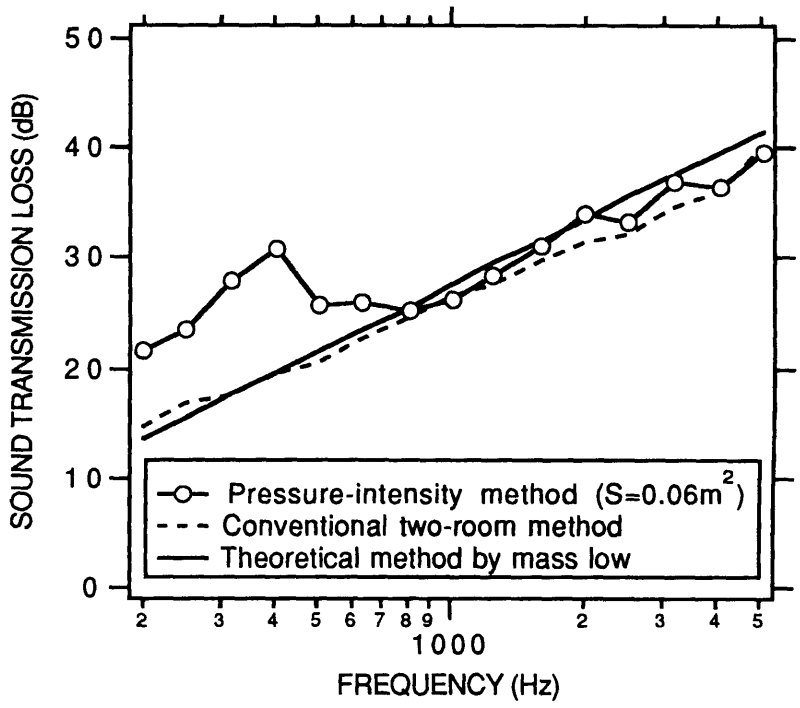


図５．６　0.06m^{2}の開口部を持った小型残響箱における音圧－インテンシティ測定による0.5mm厚鉛シートの音響透過損失

５．３．４　まとめ

小面積の試料を対象とした音響透過損失（ＳＴＬ）を通常の部屋において簡易的に測定する２つの方法を提案した。試料のない開口部の入射音響インテンシティと試料を固定した開口部の透過音響インテンシティを直接に比較する（a）直接インテンシティ法，または試料が固定された状態の音源室内部の空間平均音圧から間接的に入射音響インテンシティを求める方法（b）音圧－インテンシティ法である。これらの方法は，小さな開口部を持つ小型残響箱 (0.343 m^3) と音響インテンシティ法を組み合わせて利用する。この方法の実証のために，小型残響箱 (0.343 m^3) を用いて0.5mm厚鉛シートのＳＴＬを測定した。その結果，500Hzから5 k Hzの中・高域周波数において従来法の結果および質量則の計算値と十分一致することが確認された。

提案する方法の特徴は，音源室として小型残響箱，受音室として静かな通常の部屋を利用でき，例えば0.5 x0.4 m^{2}程度の試料の簡易的なＳＴＬを短時間に得ることである。

５．４　間仕切り壁の測定

次に，実際の部屋の間仕切り壁の測定に適用した例を述べる。集合住宅やホテルにおいては２つの部屋間仕切り壁の性能を確認することは重要である。この例では，施工された状態において特定の壁面のＳＴＬを音響インテンシティ法で測定し，と従来の２残響室法で測定されたＳＴＬと比較する。

結果を図５．７に示す。この図において，実線は５．３節に述べた音圧－インテンシティ法によるＳＴＬであり，破線は従来法によるＳＴＬである。両者は全周波数においてほぼ良く一致した特性が得られた。実際にこの例では，対象壁面以外の梁からの「音漏れ」が存在していることも明らかになった。

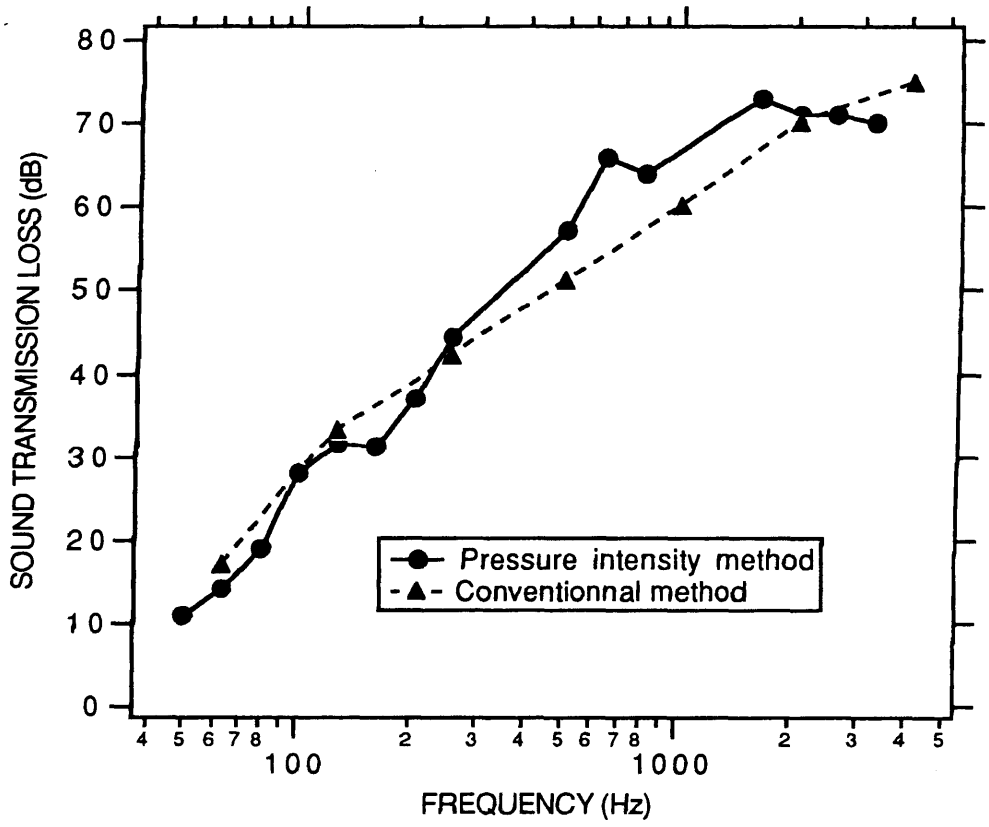


図５．７　間仕切り壁の音響透過損失（STL）

５．５　まとめ

本章では，音響インテンシティ法が音響透過損失（ＳＴＬ）の測定に利用できることを示した。特に，小型の残響箱とその小開口部を利用することで小面積の試料（試作品または事務機器や家電製品などの小さい表面積の機器）についても，本計測方法は有効であることが確認できた。

また，音響インテンシティ法によるＳＴＬ測定は，集合住宅などにおける現場におけるＳＴＬ測定および遮音欠損などの原因の追求にも効果的であることが分かった。

これらのＳＴＬ測定についても，特定領域の面積を通過する音響パワー（透過音響インテンシティ）のスキャン測定は有効であった。

第６章　音響インテンシティ法による音響パワー計測の応用例

６．１　はじめに

本章では，音響インテンシティ計測による音響パワー計測を中心とした騒音対策への具体的応用例について述べる。

音響インテンシティ法の実用化によって，音源近傍に関する情報を提供する手法として音響インテンシティのベクトル図として測定する方法が試みられている[57]。その測定のためにプローブの移動装置の考案も検討されている[58]。また，最近の方法としては２つの加速度ピックアップを利用した構造インテンシティ測定による音源の同定も試されている[59]。これらは音源発生のメカニズムを検討する上で非常に有効である。しかし，騒音対策の効果を知るためには，騒音源の同定と同時に各部分で発生する音響パワー定量的に測定するための方法が必要となる。

本章では，音響インテンシティ法による音響パワー評価を中心として，音源を構成する特定領域から放射する音響パワー計測による騒音発生源の定量化の有効性などを具体的な測定例によって報告する。

6．2　電動掃除機の音響パワー[60)]

6．2．1　はじめに

現場における本手法の利用例として，掃除機について測定した結果を述べる。この音源は，比較的定常騒音を放射するが，音を放射する部分は大きく３つに分かれる。それらの部分から放射される音響パワーを部分音響パワーと定義し，それらを計測するする。さらに全体の音響パワーに対する部分の寄与を調べる。

6．2．2　部分音響パワーおよび寄与率

２．３で述べたように，音源から放射される音響パワーPは（2.3）式で表される。これを計測するためには，仮想閉空間表面をN個に分割することで，(2.4)式で近似できる。

そこで，音響インテンシティ法音響パワー計測による仮想測定表面の自在性と定常外部騒音の影響を受けにくいことを利用して，仮想測定閉空間を音源の構成部分に対応するように分割して音響パワーを計測することを考える。総面積を分割された領域毎の音響インテンシティの法線成分とその小面積から求められた部分音響パワーが有効に測定されるものとする。

さらに，i番目の領域が全体の騒音源に対してどの程度に寄与しているかを音響パワーによって求める。音響パワーの寄与率を次式のように定義する。

$$\text{寄与率} = \frac{I_{ni}\Delta S_i}{\sum_{i=1}^{N} I_{ni}\Delta S_i} \qquad (6.1)$$

6．2．3　半球面上ポイント測定

測定対象を床移動型電動掃除機とし，測定環境を反射性の床と吸音処理された天井を持つ通常の作業場において実験を行った。リアルタイム音響インテンシティ分析器（B&K社3360型，マイクロホン間距離12mm）を用いて半球面上10点のポイント測定を実施した。対象音源を定常状態で動作させ，これを囲う半球面上（半径１ｍ）でISO3745による10点において音響インテンシティの外向き法線成分を測定した（図６．１参照）。得られた測定値の平均値と半球面の面積から音響パワーを計測した。測定結果のスペクトルを図６．２およびその総音響パワーレベルを表６．１に示す。

音響インテンシティ法による３種類の音響パワー計測の結果はほぼ一貫したデータが得られた。１ｍの半球面上（面積6.28m^2）における10点ポイント測定の結果は，直方体測定面（面積5.39m^2）によるスキャン測定に比べて1.1dB低い値であった（表６．１参照）。その原因は，オーバーオール値を決定する周波数成分（この場合には2.5kHz成分）に対して，空間サンプリングの不足によると考えられる。

一方，離れた位置（半径１ｍ）における10点のポイント測定は，波長が長くなる低い周波数成分の測定のためには，近距離音場における音場の複雑さが緩和されるため，逆に好都合と言える。このことは，音源の表面から最短で20cmの位置で測定した図６．４および６．６に存在した160Hzの負方向の音響インテンシティ成分が音源から１ｍ点で測定した図６．３にはないことを説明するものである。

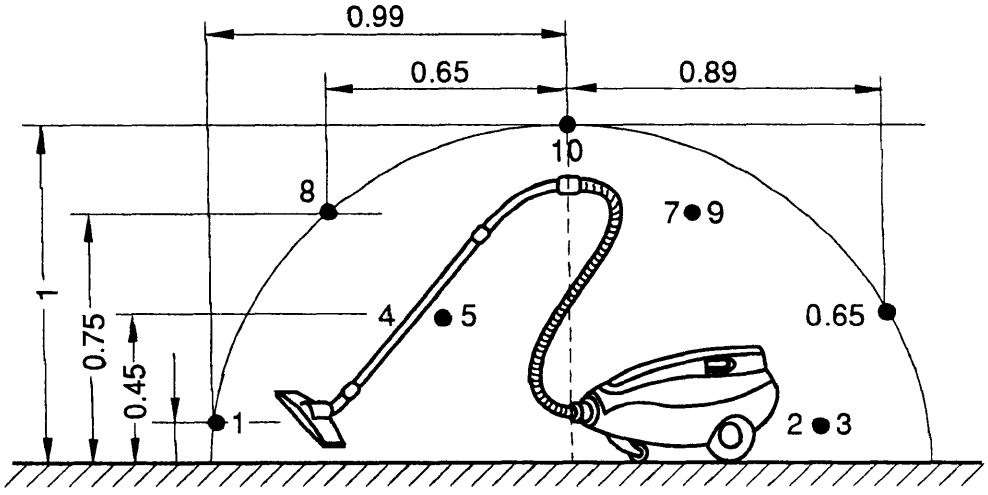


図６．１　掃除機に対する半球面上の測定点

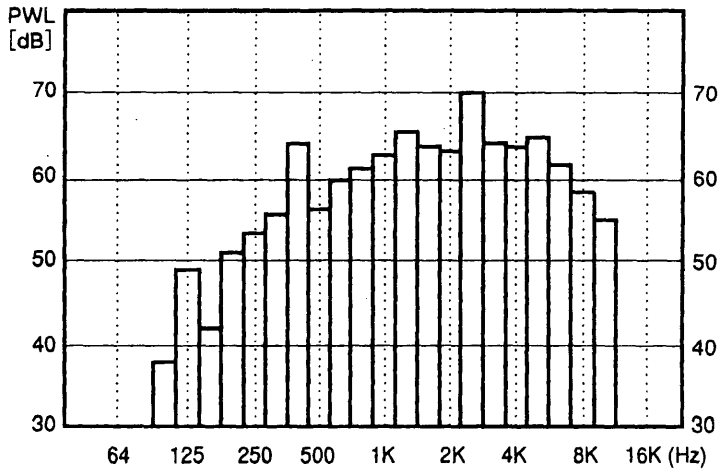


図６．２　ポイント測定（10点）による掃除機の音響パワースペクトル

表６．１　音響パワーによる掃除機の寄与率

対象部分	PWL [dB re. 1 pW/m^2]	寄与率［%］
全体（10ポイン測定）	75.7	(77.6)
全体（スキャン測定）	76.8	100.0
吸い込み口（スキャン測定）	63.4	4.6
吐き出し口（スキャン測定）	63.6	4.8
本体部（スキャン測定）	76.4	91.2

6．2．4　直方体仮想測定表面によるスキャン測定

次に，同じ対象音源に対して図6．3に示す直方体の仮想測定表面を適用し，音響インテンシティ法によって放射音響パワーを計測した。この場合，この測定表面（総面積5.39m^2）を正方形の小領域（0.35×0.35m^2）に分割し，各領域を手動でスキャン測定した（各面8秒のリニア平均）。測定結果のスペクトルを図6．4およびその総音響パワーレベルを表6．1に示す。ただし，この図においてハッチングで示された160Hzの成分は負方向の音響パワーを示している。

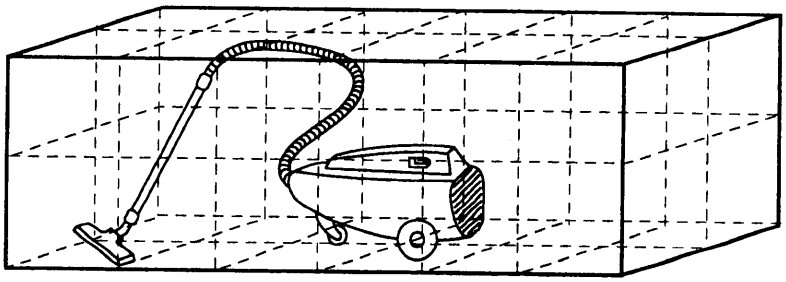


図6．3　掃除機に対するスキャン測定用仮想閉空間

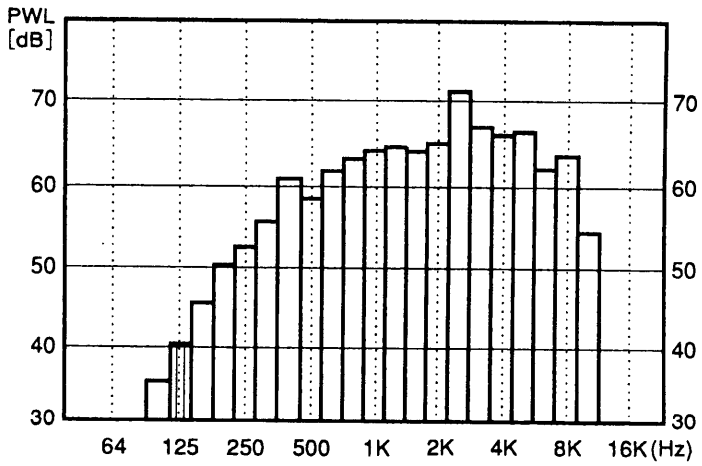


図6．4　スキャン測定による掃除機の総音響パワースペクトル
（ハッチング部分は負方向の音響パワーを示す）

さらに，対象音源の音響パワーを３部分に分けて計測するために，仮想閉空間の中間部に２つの測定面を追加した（図６．５参照）。この測定面の決定について，以下の３点について配慮した。

１．対象音源（掃除機）から放射される全ての音を測定すること。

２．吐き出し口直前における風の影響を避けるために，この部分に対する測定面を音源表面より一定距離まで遠ざけること。

３．仮想閉空間を分割するために，大幅に追加の測定面が増えないこと。

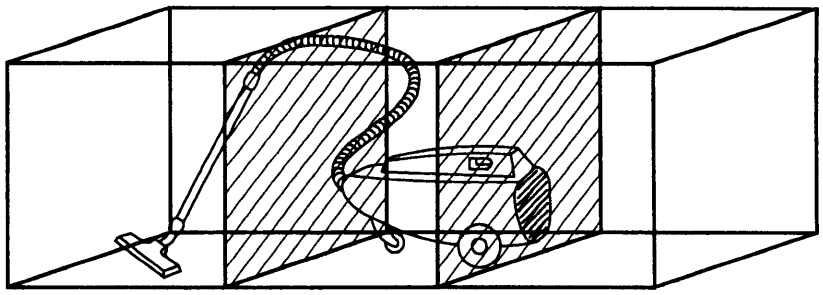


図６．５　部分音響パワー計測のために追加した測定面

このように追加した測定面に対して測定された部分音響パワー（本体部分，吸い込み口，吐き出し口）の結果を図６．６，６．７，６．８に示す。ただし，この図で強調表示されたスペクトルは負の方向の音響パワー成分を示している。また，これらの部分音響パワーレベルとそれらに対応する寄与率を表６．１に示す。

次に，部分音響パワーによる本体部分の結果（図６．６）は，スキャン測定による全体の音響パワー（図６．４）とほぼ同じスペクトルが得られていることがわかる。さらに，に示す寄与率から，この掃除機の主要な騒音の原因は本体部分であることが分かる。これに対して，吸い込み部分のスペクトルは，2.5kHzの成分が特徴的に発生している。一方，吐き出し部分のスペクトルは500Hzから800Hzの広帯域成分を示すが，本体部分に対抗する特徴的なスペクトルではない。また，負方向の音響パワーなどが含まれる50dB以下のスペクトルは，本体部分における60dB以上の主要周波数成分と10dB以上のレベル差が得られていることから，外部騒音（本体部分）の影響による不安定な残留音響パワー成分と考えて，重要でない成分である。

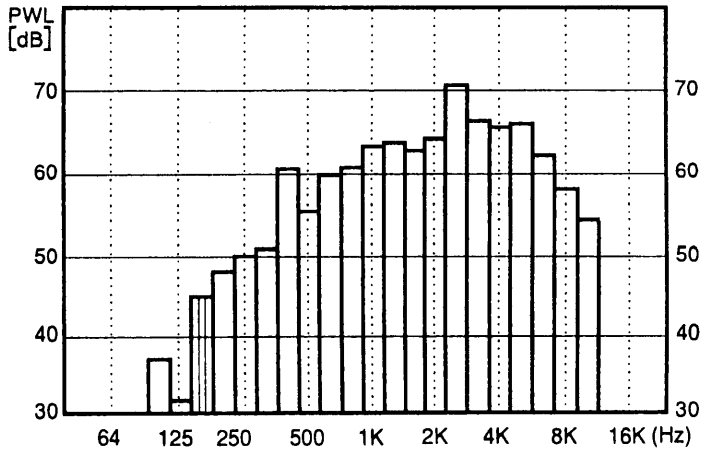


図６．６　掃除機本体部の音響パワースペクトル
（ハッチング部分は負方向の音響パワーを示す）

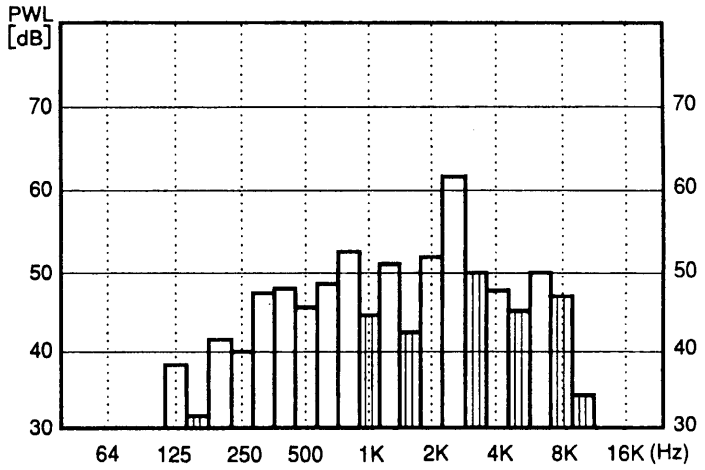


図６．７　掃除機吸い込み部分の音響パワースペクトル
（ハッチング部分は負方向の音響パワーを示す）

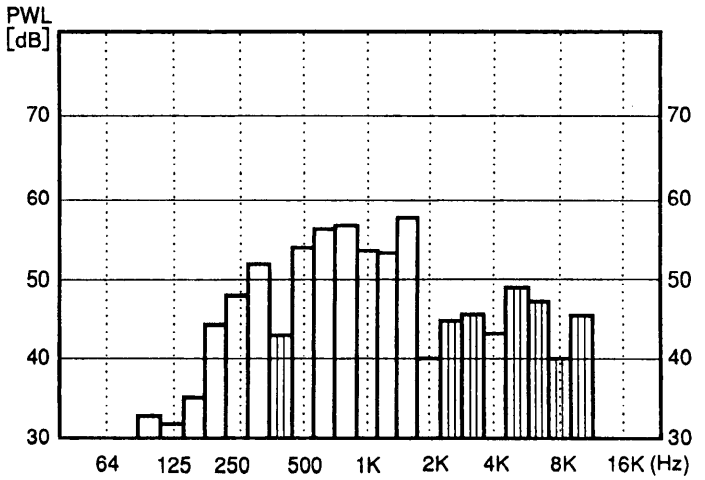


図６．８　掃除機吐き出し部分の音響パワースペクトル
（ハッチング部分は負方向の音響パワーを示す）

６．２．５　超近距離音場によるスキャン測定

前項に述べたように，掃除機の本体部分の音響パワーが最も大きいことが確認された。次の段階として，この音源本体の表面に近接した位置（最短距離３ｃｍ）に34個の格子状（$0.1 \times 0.1 m^2$）測定面を配置し，本手法による４秒のスキャン測定によって音響パワーの分布を調べた。その結果を図６．９に示す。両方の側面の中央部が周辺部分に比べて４～10dB程度大きな値を示している。掃除機のこの部分には分離のための結合部が存在する。そのすき間から発生する気流音が主たる騒音の原因であった。

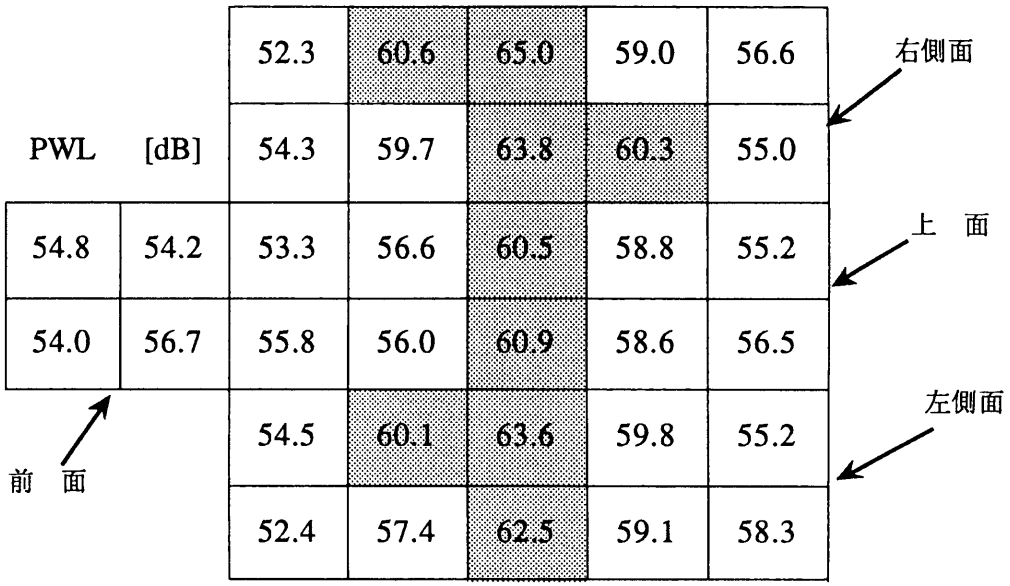


図６．９　超近接音場における掃除機の音響パワー分布
（総音響パワーレベルPWL:75.5 dB re. 1 pW）
（ハッチングした領域は60dB以上の部分を示す）

６．２．６　まとめ

掃除機の全体の音響パワーを計測するために，音響インテンシティ法を利用した半球面上のポイント測定と直方体の測定平面によるスキャン測定を比較した。その結果は，ほぼ同振幅レベル（偏差１dB程度）で，同一形状のスペクトルを得た。

スキャン測定と仮想測定面の分割によって掃除機の吸い込み口，吐き出し口，本体部分に対する部分的に区別した音響パワーを計測した。その結果は，本体部分から放射される音響パワーが全体の90％の寄与であった。

さらに，この掃除機の本体部分の超近傍（3cm程度）から10cm角の測定面のスキャン測定によって，周辺部に比べて４～10dBのレベル差によって騒音発生部位を確認できることが分かった。

6．3　音響パワー計測による音源探査[61)]

6．3．1　はじめに

音響インテンシティ法が音源位置の確認（音源探査）に有効であることを示す例として，実際の事務機器（バーコードプリンタ）に適用した例について述べる。このような使い方は，音響インテンシティがベクトル量であるため，スカラー量である音圧計測に比べて，優れた空間分解能を提供することが期待されることである。また，超近距離音場による音響パワー分布図による評価を試み，その結果の問題点を考察する。

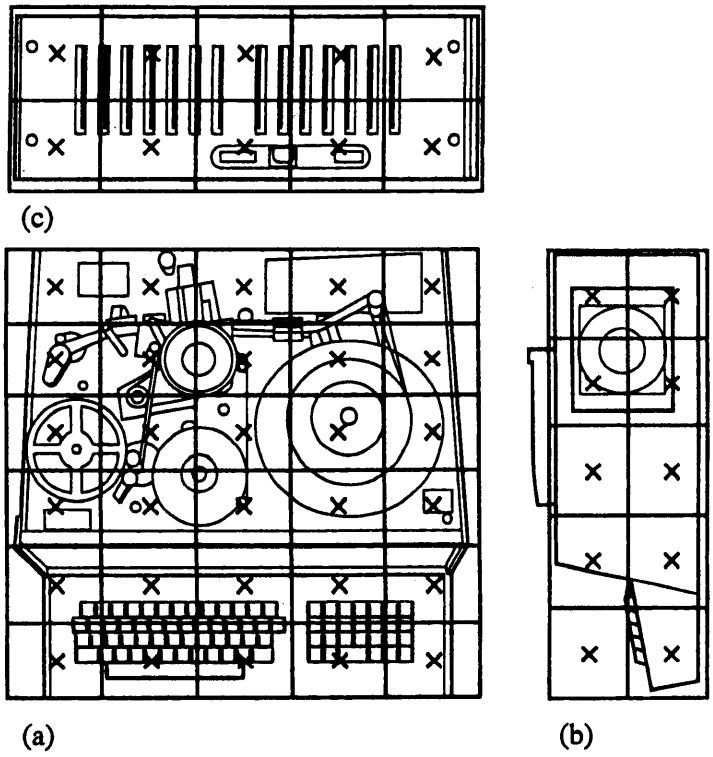
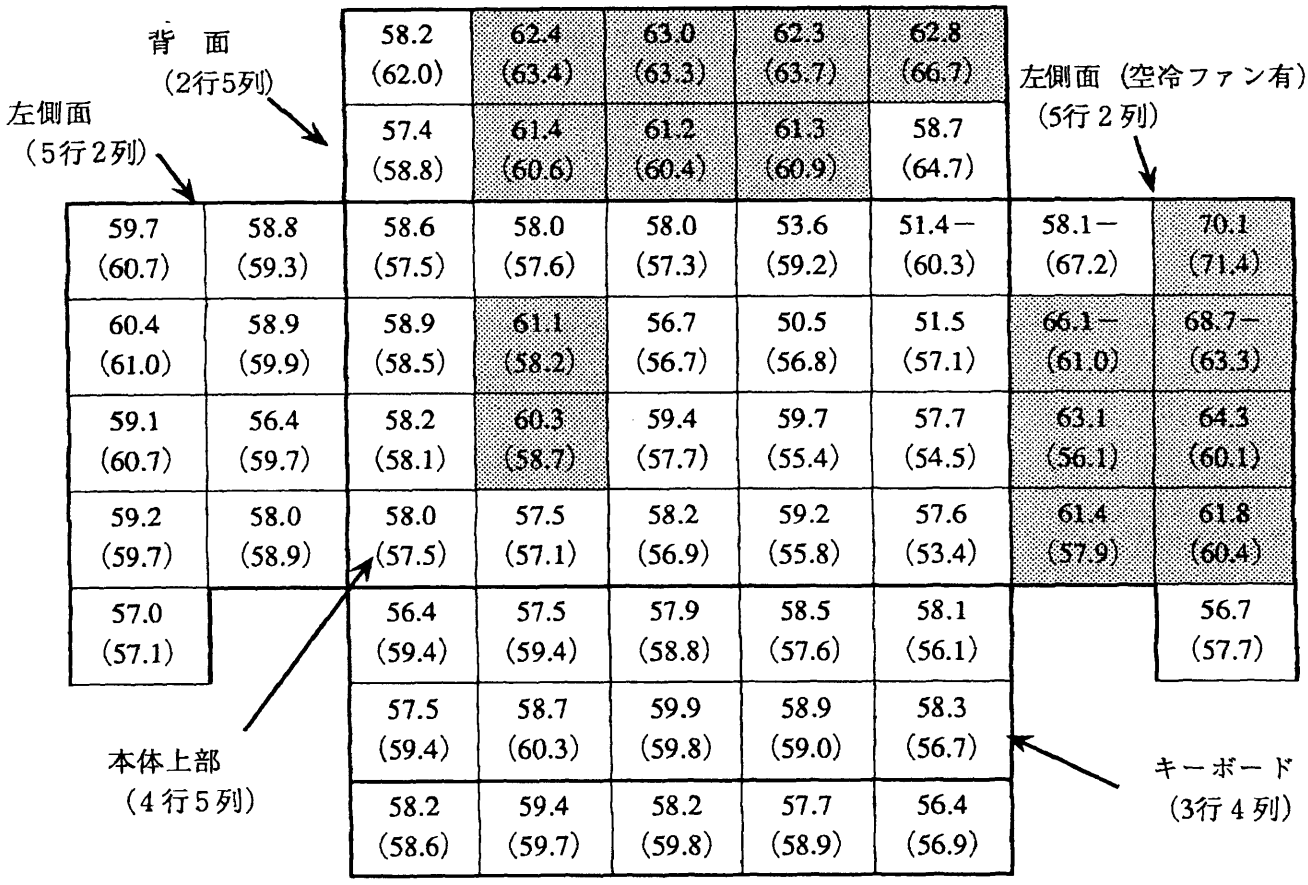


図6．10　バーコードプリンタにおける格子状測定点
（(a)：上面，(b)：右側面（空冷ファン側），(c)：背面）

6．3．2　音響インテンシティおよび音圧分布による音源探査

被験物は，機能上２つの音源（回転ドラムおよび空冷ファン）をもつバーコードプリンタを対象とした（図６．１０）。その寸法は0.51（幅）×0.55（奥行）×0.23（高さ）mである。

最初に，1/3オクターブ分析による音圧スペクトル測定を行った。その結果，250Hzの周波数成分に注目した。音源の近傍（音源表面より約3cm）に１辺10cmの格子状の測定平面を準備し，各測定用格子の中点において250Hz成分の音響インテンシティ（法線成分）および音圧を測定した（B&K社3360型音響インテンシティ分析器）。各測定点に



		58.2 (62.0)	62.4 (63.4)	63.0 (63.3)	62.3 (63.7)	62.8 (66.7)		
		57.4 (58.8)	61.4 (60.6)	61.2 (60.4)	61.3 (60.9)	58.7 (64.7)		
59.7 (60.7)	58.8 (59.3)	58.6 (57.5)	58.0 (57.6)	58.0 (57.3)	53.6 (59.2)	51.4− (60.3)	58.1− (67.2)	70.1 (71.4)
60.4 (61.0)	58.9 (59.9)	58.9 (58.5)	61.1 (58.2)	56.7 (56.7)	50.5 (56.8)	51.5 (57.1)	66.1− (61.0)	68.7− (63.3)
59.1 (60.7)	56.4 (59.7)	58.2 (58.1)	60.3 (58.7)	59.4 (57.7)	59.7 (55.4)	57.7 (54.5)	63.1 (56.1)	64.3 (60.1)
59.2 (59.7)	58.0 (58.9)	58.0 (57.5)	57.5 (57.1)	58.2 (56.9)	59.2 (55.8)	57.6 (53.4)	61.4 (57.9)	61.8 (60.4)
57.0 (57.1)		56.4 (59.4)	57.5 (59.4)	57.9 (58.8)	58.5 (57.6)	58.1 (56.1)		56.7 (57.7)
		57.5 (59.4)	58.7 (60.3)	59.9 (59.8)	58.9 (59.0)	58.3 (56.7)		
		58.2 (58.6)	59.4 (59.7)	58.2 (59.8)	57.7 (58.9)	56.4 (56.9)		

図６．１１　バーコードプリンタにおける音響インテンシティおよび音圧分布図（250Hz成分，格子面積：0.01m^2）
（上段の数字：音響インテンシティレベル，下段の括弧内の数字：音圧レベル）
（ハッチングした領域は音響インテンシティレベルが60dB以上の部分を示す）

おける測定時間は１秒とした。音源本体の側面には空冷用のファンが内蔵されいる。これによって，背面のスリットおよび本体上部の回転ドラムから空気を吸い込み，側面から外へ排出する。よって，ファンの近傍では気流の影響を受けている。また，このファンは５枚のブレードを持ち，毎秒50回転で回転するため，その発生騒音（NZ音）は250Hzであった。

測定結果を図６．１１に示す。この図において各格子の数字は音響インテンシティレベル，括弧内の数字は音圧レベルを示す。この図において本体上部の最大音響インテンシティレベルは60～61dBの数字であり，測定格子の左から２列目の下から２，３行に位置し，周辺の格子点の値に比べて約３dB程度の明確なレベル差が得られている。この位置には回転ドラムが存在し，アルミ板にドラム用の穴が貫通している。これに対して，音圧レベルの場合には周辺とのレベル差は0.6～1dB程度であるため，この位置を同定することは困難である。

こうした音源探査における音圧分布と音響インテンシティ分布の空間分解能の相違は，２マイクロホン音響インテンシティ法がベクトルの方向成分を測定すること（余弦関数の指向性をもつ）に対して，音圧はスカラー（無指向性）であることに依存する。

空冷ファン付き側面における４点の測定結果は，気流の影響を受けて多少不正確である。しかし，ファン位置に近い他の測定点では（上面の格子の右上または背面の右端），音響インテンシティ分布図は音響インテンシティの法線成分を測定しているので音圧に比べて少なくなっている。これはファンの位置から放射されたエネルギーが回り込んでいることを示している。

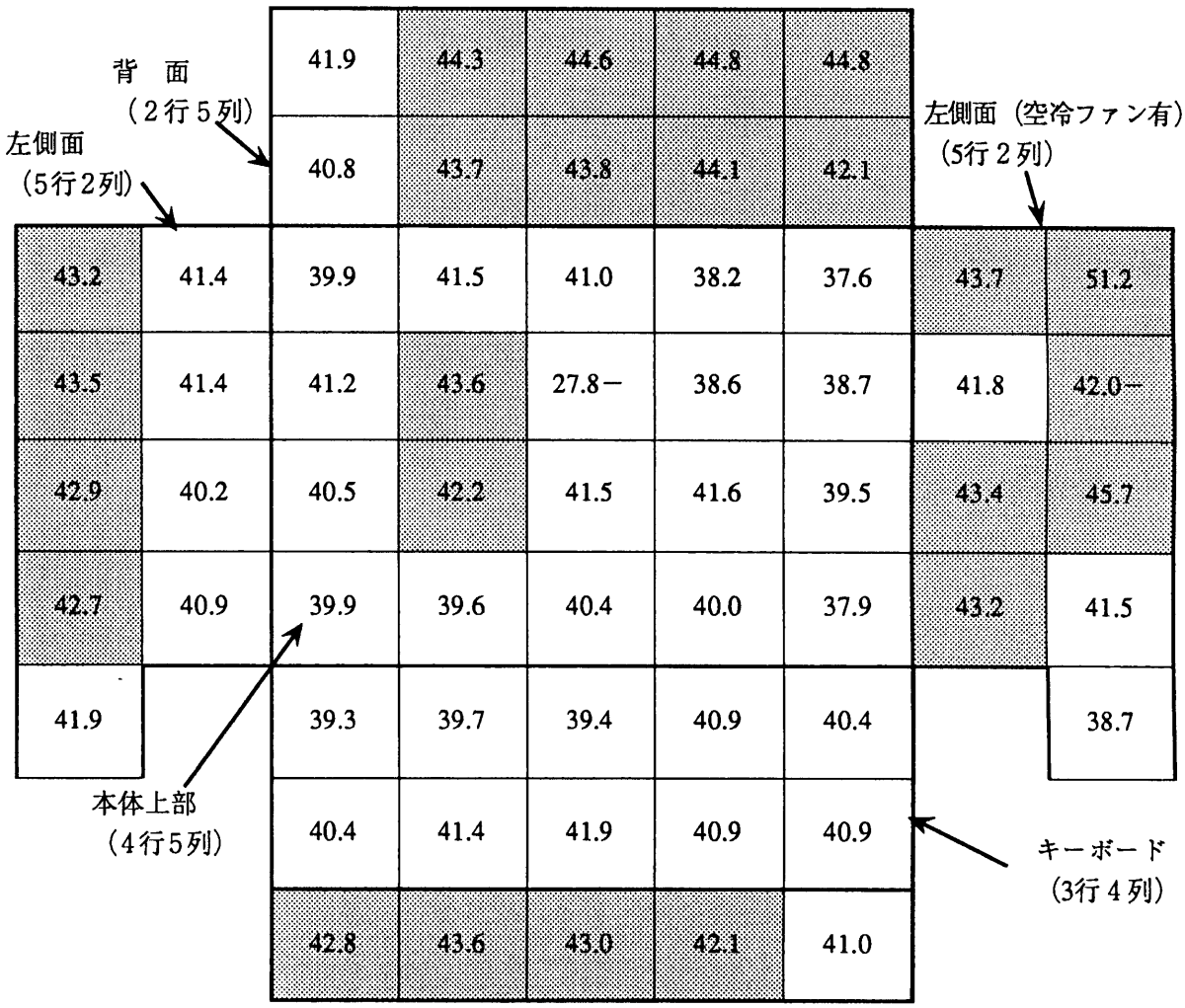


図６．１２　バーコードプリンタにおける音響パワー分布図
（100Hz～10kHz成分のオーバーオール値，格子面積：0.01m^2）
（ハッチングした領域は音響パワーレベルが42dB以上の部分を示す）

６．３．３　音響パワー分布図

さらに，６．３．２における音源探査用の測定格子および同じ機器を利用して，バーコードプリンタの音響パワー分布図を計測した。音響パワーは，音響インテンシティ法による法線成分を1/3オクターブ周波数の100Hz～10kHz成分のオーバーオール値として各格子の中心点で測定し，これに格子面積（0.01m^2）を乗算し，音響パワーレベルで表示した。

得られた音響パワーレベル（PWL）の分布図を図６．１２に示す。この図で－の符号は負の音響パワー（音源側に戻る音響パワー）を表す。この図から音源の上面におけ

る最大値は，図６．１１によって得られた音源発生位置と同じ位置に最大のPWLを示していることがわかる。また同様に，空冷ファンの位置する右側の奥では最大PWL値と負の値が存在している。

この音響パワー分布図の意味とその精度を検討するために，別に2.45m^{2}の測定面（１辺70cmの立方体）とそれに対する20点のポイント測定による総音響パワーと比較する。各構成部位毎の部分PWLと全格子点のPWLデータから全体の総PWLを計算し，さらに20点測定によるPWLに対する寄与率（パワー比，６．２．２の（6.1）式参照）を計算した。その結果を表６．２に示す。この結果から，最も問題となる部位は右側面（ファン付）であることが定量的に示される。しかし，その値が十分な精度であるとは言えない。というのは，このような超近距離音場による測定結果から計算された総音響パワーと音源から70cm程度離れた測定面による総音響パワーの値との間に３dB（50%）程度の偏差が生じているからである。その主たる原因は，測定方法（ポイントまたはスキャン測定），対象面積の考え方および音源の定常性などである。しかし，定量的な音響パワー計測が重要であることは疑う余地はなく，音源に近接した音響パワー評価は音源の持つ特徴に関連した情報をもたらすものである。

超近距離音場における偏差の理由とその対策方法は，気流を伴うファンを音源にもつ事務機器を用いて検討することは得策ではないため，次節の６．４において言及する。

表６．２　バーコードプリンタの音響パワーおよび寄与率

対象音源部位	PWL dB re.1 pW	寄与率 [%]
上　面	53.6	11.5
左側面	51.1	6.5
右側面（ファン付）	54.1	12.9
背　面	53.6	11.5
キーボード面	53.1	10.2
超近距離測定 総音響パワー	60.1	51.3
立法体５面による 総音響パワー	63.0	100

6．3．4　まとめ

ここでは，音響インテンシティ法を実際の事務機器（バーコードプリンタ）に適用し，音響インテンシティがベクトル量であるため，スカラー量である音圧計測に比べて，音源位置の確認（音源探査）に有効であることを示した。また，超近距離音場による音響パワー分布図による評価は音源の位置を確認する音源探査には有効であった。しかし，定量的な音響パワー計測として利用するためには，測定方法と測定領域の面積などをさらに詳細に検討する必要があることが明らかになった。

6．4　超近距離音場の音響パワー計測における実効面積について[62)]

6．4．1　はじめに

超近距離音場による音響パワー分布図は音源の位置を確認する音源探査には有効と見なされる。しかし，問題点として，超近接音場測定による音響パワー計測の結果は，通常の離れた距離から測定した総音響パワーと比較した場合に大きな誤差（50%程度）が見られた。そこで，本節では超近距離測定による音響パワー計測結果を有効利用するために，対象領域における測定方法とその面積に対する補正方法を検討する。

6．4．2. 実効面積の考え方

本研究で用いている超近距離音場測定とは，音響インテンシティ法のセンサー（2マイクロホンによる音響インテンシティプローブ，以下プローブ）が音源の表面に最も近接した状態で測定することを意味する。このような測定は音源探査のためには有効である。しかし，音響パワーを測定するためには，音源周囲の音場は複雑である（近距離音場では音圧と粒子速度の位相が一致しない）ため，決して最適な条件ではない。さらに，測定面積と測定方法の決定を慎重に行うことが必要である。

これは，実際にプローブの音響中心（代表的には2つのマイクロホン間距離の中点）が位置する点または移動する曲線を含む面の面積を用いるべきである。つまり，音源である被測定物の外観寸法をそのまま適用すべきではない。具体的には音源表面からプローブの中点までの距離（例えば31mm）を正確に考慮すべきである。特に，ここで扱う超近距離音場測定において小型の物体（表面積0.1m^{2}程度）の場合には，それを囲う表面積はその2倍にもなる。音源から半径1mの半球面の面積を使用する場合には問題にならない。

実際に超近距離音場において測定する場合に，プローブを正確に配置することは困難である。正確な平均音響インテンシティを測定するためには，特に手動によるスキャン測定を利用する場合，または音源の振動表面が平面でないような場合には，プローブ

を想定通りの仮想閉空間表面上に位置させることは著しく困難である。

そこで，音源の放射音響パワーが音源から測定面までの距離について大きく変化しないことを仮定し，下式に示すように，正確な音響パワーが得られる程度の近距離音場を利用して対象音源の総音響パワー$\hat{P}$を求めておき，超近距離音場で測定された平均インテンシティ $\bar{I}$ を用いて実質的な実効面積S_eを決定する。

$$\hat{P}=\bar{I}\cdot S_e \tag{6.2}$$

$$S_e=\frac{\hat{P}}{\bar{I}} \tag{6.3}$$

$$\bar{I}=\frac{1}{S}\left[\sum_{j}^{n}\Delta S_j\cdot\bar{I}_j\right] \tag{6.4}$$

6．4．3　実験および考察

近距離音場で測定された小面積部位の平均音響インテンシティを測定し，その結果に実効面積を補正することで正確な部分音響パワーが得られることを実験的に確認する。対象音源は，電子ブザーを内蔵する直方体小型音源（PROMイレーサ，240×100×80mm）を用いた。この音源を通常の作業場において約70cmの立方体（総測定面積：2.81m^2）の中空に吊るし，床を除く5面に対して20分割のスキャン測定によって総音響パワーを計測した。この場合，スキャン平均は1領域（0.1405m^2）に対して8秒のリニア平均を使用した。その結果，この音源の総音響パワーレベルは59.0dB（500Hz～10kHzのオーバーオール値）であった。

次に，対象音源を10面に分割し，その測定面は，プローブの中心が音源表面から距離およそ40mm離れた位置とした。スキャン平均は1領域を8秒のリニア平均によって各部位の音響インテンシティレベル$\bar{I}_j$を測定し，(6.4)式による実面積の荷重による平均音響インテンシティ$\bar{I}$を求めた。その結果と超近距離音場で測定した平均音響インテンシティから実効面積S_eを求めて，部分音響パワーを求めた。これらの結果を表6．3に

示す。１０個の部分音響パワーレベルの総計は58.95dBとなり，基準とした総音響パワーに近い値が得られた。よって，これらの実効面積で補正された部分音響パワーは，絶対値として利用することができる。

また，得られた実効面積の値は，実面積に対して表面からプローブの先端までの距離(31mm）を付加した寸法による仮想閉空間の表面積（0.214m^2）とこの距離に10mmを付加した寸法による面積（0.262m^2）の中間の値であり，妥当なものと考えられる。

表６．３　超近距離音場における実効面積による部分音響パワーレベル（PWL）

領域番号	平均ｲﾝﾃﾝｼﾃｨ [dB]	領域実面積 [m^2]	領域実効面積 [m^2]	補正値 *[dB]	PWL [dB]
①	61.93	0.0090	0.02027	-16.93	45.00
②	64.64	0.0090	0.02027	-16.93	47.71
③	62.21	0.0108	0.02432	-16.14	46.07
④	63.99	0.0108	0.02432	-16.14	47.85
⑤	63.15	0.0120	0.02703	-15.68	47.47
⑥	64.22	0.0120	0.02703	-15.68	48.54
⑦	63.71	0.0108	0.02432	-16.14	47.57
⑧	65.00	0.0108	0.02432	-16.14	48.86
⑨	66.58	0.0120	0.02703	-15.68	50.90
⑩	68.88	0.0120	0.02703	-15.68	53.20
総計	-	0.1090	0.2455	-6.10	58.95

*)　$10\log_{10}(S_e/S_0)$, S_0=1m^2

6．4．4　騒音対策における適用

前項の結果から，音源の⑨，⑩の部位（直方体の下部）が最大の音響パワーを示すことが分かった。そこで，この部位に5mm厚のゴム板を貼り付けることで騒音対策を行い，再度その効果を超近距離音場測定によって各部位の部分音響パワーを計測した。その部分音響パワーレベルの結果を展開図とともに，図６．１３に示す（括弧内は騒音対策後の値）。対策後の結果に対する実効面積は表６．３の値を使用した。⑩の部分において8.5dBの減衰が得られた。

総音響パワー（床を除く５面に対して20分割のスキャン測定）としては，騒音対策前・後で59.0dBから53.4dBとなり，6.6dBの減衰量であった。これに対して図６．１３の対策後の値から求めた総音響パワーは52.6dBであった。その偏差0.8dBは実用上問題になる誤差ではない。

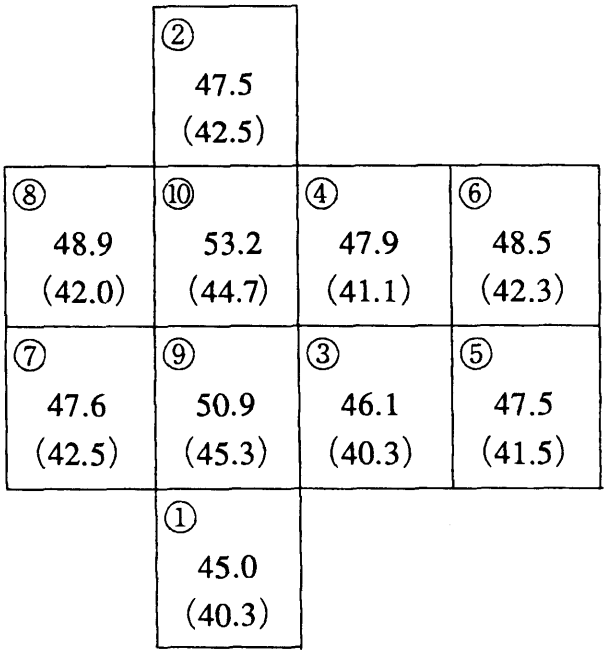


図６．１３　電子ブザーの部分音響パワーレベル
（括弧内は対策後の値）

６．４．５　まとめ

音源表面に極めて近い距離おける音響インテンシティ測定では，その音源を囲う仮想閉空間の表面積は対象音源の実表面の面積と大きく異なるため，音響パワーを定量的に求めることができない。ある程度離れた音場で計測された正当な総音響パワーを利用して，超近距離測定における実効面積を決定する方法を提案し，その効果を検証した。得られた実効面積は，音響インテンシティプローブの先端から音響中心までの距離を考慮した仮想閉空間の面積に相当した。さらに，騒音対策後（音源に対する遮音効果の確認）の音響パワー計測によっても，実効面積の有効性を検証した。

実効面積の導入は，手順が増えるので非効率的方法であるが，非常に音源に接近して測定された（超近距離音場測定による）部分音響パワーを定量的に扱うために有効である。

6．5　まとめ

本章では，音響インテンシティ法による音響パワー評価を中心とした実際の計測事例と効果的な運用方法を述べた。

まず，掃除機を対象として本手法の特徴の１つである測定用仮想閉空間の任意性を利用し，騒音源の各部分の音響パワー計測を試みた。その部分音響パワー計測によるデータ（周波数分析，ランキングおよび寄与率）が騒音対策の指針になることを示した。このような部分音響パワー計測は多少面倒な面もあるが，定量的な騒音対策のためには重要である。

次に，事務器に対して音源探査の例を試みた。音響インテンシティ法を実際の事務機器（バーコードプリンタ）に適用し，音響インテンシティの法線成分が音圧計測に比べて，音源位置の確認（音源探査）に有効であることを示した。また，超近距離音場による音響パワー分布図による評価は音源の位置を確認する音源探査には有効であった。しかし，定量的な音響パワー計測として利用するためには，測定方法と測定領域の面積などを詳細に検討することが必要であった。

そこで，ある程度離れた音場で計測された正確な総音響パワーを利用して，超近距離測定における実効面積を決定する方法を提案し，その効果を検証した。得られた実効面積は，音響インテンシティプローブの先端から音響中心までの距離を考慮した仮想閉空間の面積に相当した。さらに，騒音対策後（音源に対する遮音効果の確認）の音響パワー計測によっても，実効面積の有効性を検証した。

実効面積の導入は，手順が増えるので非効率的方法であるが，非常に音源に接近して測定された（超近距離音場測定による）部分音響パワーを定量的に扱うために有効である。

また，これらの全ての適用事例は，暗騒音の少ない通常の作業環境で音響インテンシティ法による音響パワー計測を行ったものである。

第7章　結　論

7．1　各章のまとめ

第1章では，序論として音圧評価と比較することで音響パワー評価の持つ意味とその重要性を議論し，その普及のためには現場で簡便に利用できる実用的な手法が必要とされていることを述べた。次に，2マイクロホンによる音響インテンシティ測定手法を利用した音響パワー計測（本手法）に関する従来の研究を，音響インテンシティ計測の経緯，本手法の特徴およびその問題点に分けて論じた。音響インテンシティ計測は音圧勾配の2マイクロホンによる近似技術とディジタル信号処理技術によって実用化されたものである。この手法を利用した本手法の特徴は，ガウス空間の表面を測定面として利用するため，任意の音場において音響パワーを計測できることであり，さらにその際に定常外部騒音の影響を除去できることである。現場での実用化のために，測定面に対する平均音響インテンシティの測定方法の選択，外部騒音の除去能力，近距離音場における測定領域の実効面積を問題点として指摘した。

第2章では，まず音響インテンシティ測定の理論および2マイクロホン法音響インテンシティについて簡単に述べた。次にこれを利用した音響インテンシティ法音響パワー計測について次の基礎的事項について実験的に確認した。その主な内容として，本手法による基準音源の現場における測定結果が実用精度のものであったこと，測定空間の大小による影響がないこと，空間平均のための手法であるポイント法とスキャン法の比較，外部騒音の影響を受け難いことなどについて述べた。その結果，特にスキャン測定は現場用としての再現性の良さが特徴的であった。

第3章では，本手法の原理的な特徴である，外部騒音の除去作用について論じた。すなわち，閉空間の内部にエネルギーの吸収要素がなければ，閉空間の一部分に対して外から入り込むエネルギー成分は閉空間内を通過（または反射）し，他の部分から外に出るため，閉空間の表面における法線成分の面積分によって外部の影響を相殺できることを述べ，さらに，この特徴を実際に利用する場合に必要な条件などを検討した。実験

的に確認された内容は，外部騒音の振幅が対象音源に対して相対的に大きくなるほど測定値は不安定になり，結果の再現性は悪くなること，外部騒音に対する仮想閉空間の配置には依存しないこと，連続的な定常信号以外に周期的間歇外部騒音にも適用できることであった。さらに，本計測方法を外部騒音の除去目的に用いるための条件は，外部騒音が定常または周期的間歇音であることであるが，外部騒音の振幅程度によってその影響の程度は変化する。また，その外部騒音の程度は，対象音源が非定常であれば最も近傍の測定面において10dB程度低いことが必要であるが，定常または周期的非定常音であれば最も近傍の測定面において3dB以上の影響を与えないことが明らかとなった。

第4章では，実際の環境下で音源の近傍に置いた吸音材の吸音効果を，音響パワーの減少として評価する方法を提案し，その有用性を実験的に検討した。すなわち，音源近傍に置かれた吸音材に対して，音響インテンシティ法を用いてその吸音効果を音響パワーの減少（吸収音響パワーレベル）として明確に測定できること，さらに得られた吸収音響パワーレベルが主として音源と反射面間の距離および音源の向きに依存して，特徴的な挙動を示すことを実験的に確認した。この実験によって，この吸収音響パワーレベルは音源と吸音材の実際の配置条件での吸音効果を評価する有効な指標となることを示した。さらに，吸収音響パワーレベルを吸音率に換算し垂直入射吸音率と比較することによって，その吸音率が実効的な吸音効果の有用な評価指標となることを示した。

第5章では，音響インテンシティ法が音響透過損失（ＳＴＬ）の測定に利用できることを示した。特に，小型の残響箱とその小開口部を利用することで小面積の試料（試作品または事務機器や家電製品などの小さい表面積の機器）についても，本計測方法は有効であることが確認できた。また，音響インテンシティ法によるＳＴＬ測定は，集合住宅などにおける現場におけるＳＴＬ測定および遮音欠損などの原因の追求にも効果的であることが分かった。これらのＳＴＬ測定についても，特定領域の面積を通過する音響パワー（透過音響インテンシティ）のスキャン測定は有効であった。

第6章では，音響インテンシティ法による音響パワー評価を中心とした実際の計測事例と効果的な運用方法を述べた。まず，掃除機を対象として本手法の特徴の１つであ

る測定用仮想閉空間の任意性を利用して，騒音源の各部分の音響パワー計測を試みた事例を示した。その部分音響パワー計測によるデータ（周波数分析，ランキングおよび寄与率）が騒音対策の指針になることを示した。このような部分音響パワー計測は多少面倒な面もあるが，定量的な騒音対策のためには重要である。次に，事務器に対して音源探査を試みた事例を示した。音響インテンシティ法を実際の事務機器（バーコードプリンタ）に適用し，音響インテンシティの法線成分が音圧計測に比べて，音源位置の確認（音源探査）に有効であることを示した。また，超近距離音場による音響パワー分布図による評価は音源の位置を確認する音源探査には有効であった。しかし，定量的な音響パワー計測として利用するためには，測定方法と測定領域の面積などを詳細に検討することが必要であった。そこで，ある程度離れた音場で計測された正当な総音響パワーを利用して，超近距離測定における実効面積を決定する方法を提案し，その効果を検証した。得られた実効面積は，音響インテンシティプローブの先端から音響中心までの距離を考慮した仮想閉空間の面積に相当した。さらに，騒音対策後（音源に対する遮音効果の確認）の音響パワー計測によっても，実効面積の有効性を検証した。実効面積の導入は，手順が増えるので効率的な方法とは言えないが，非常に音源に接近して測定された（超近距離音場測定による）部分音響パワーを定量的に扱うために有効である。

7．2　本研究の意義

本論文は，音響インテンシティ法音響パワー計測を現場において有効に利用することを主な目的として論じてきた。少なくとも，これまでの音圧計測による音源の情報は不明確であるというもどかしさが存在していた。これに対して，本手法は定常外部騒音の影響を除去できるため，相当に改善されていると言える。その結果，これまで以上の現場測定が可能になるものと考えられる。

音響インテンシティ計測の概念は音圧と粒子速度（音圧の差分近似）の積に基づくものであるが，本質的には電力（パワー）が電圧・電流の積であるという関係に相当する。現在，他のセンサーとの組合せによる物理計測の検討が進められている。これまで

２つの加速度センサーを利用した振動インテンシティ計測，力と速度の積によって得られるメカニカルパワー計測などはその直接的な拡張利用であり，今後の有効利用が期待されている。このような計測方法の技術的背景において，２チャンネル信号処理技術が大きく貢献した。この技術によって位相の情報が追加された。この位相情報はある面で非常に繊細な特性を持っているが，音響インテンシティ計測においては音の方向などの貴重な情報を提供するものである。一方で，ある程度測定精度を犠牲にすることになっても，本手法のスキャン測定のような騒音計のような手軽さを備えた手法は音響パワー評価の普及に貢献するものと言える。

結論として，２マイクロホン音響インテンシティ法による音響パワー評価方法が，特殊な環境に限定される従来手法に代わって，一般的な作業環境において利用できることを実証した。これによって，音源の発生部位毎の定量的な音響パワー評価によって，効果的な騒音対策の実施，および発生騒音のシミュレーションが可能となる。本研究は，現場での簡便な音響パワー計測方法の確立に大きく寄与するものと信じる。

謝　辞

本論文をまとめるにあたり，多くの方々のご指導，ご援助をいただきましたので，ここに厚く御礼申し上げます。

まず，九州芸術工科大学音響設計学科　鈴木俊行教授には，終始懇切なご指導とご鞭撻を賜りました。本論文の内容に関し有益なご討論とご助言を賜りました，九州芸術工科大学音響設計学科　津村尚志教授，藤原恭司教授に深く感謝致します。広い視野から多くの貴重な示唆を頂いた菅谷　汎　前九州芸術工科大学教授に深く感謝いたします。研究活動を暖かく見守って下さった故　北村音一　九州芸術工科大学名誉教授ならびに佐々木　実　九州芸術工科大学名誉教授（現　東和大学教授）に深く感謝いたします。また，研究経過においてご助言および励ましを頂いた子安　勝　千葉工業大学教授に深く感謝いたします。

本研究の機会を与えて下さった松下インターテクノ（株）　冨山善男前社長，岡　哲也社長，加藤　孝常務取締役，石川正臣取締役に深く感謝します。当初の研究活動の機会とご指導を頂きました松貿機器（株）の和田志一元顧問に深く感謝致します。

本研究の遂行に当たり，（財）日本建築総合試験所　十倉　毅参事，和木考男主任研究員および松下インターテクノ（株）　梶岡雅弘副理事，蔵本博光部長，山田英美部長，大門静史郎副参事をはじめとした関係各位のご協力に深く感謝いたします。最後に，九州芸術工科大学前菅谷研究室および鈴木研究室の学生諸君のご理解，ご協力に厚く感謝致します。

参考文献

第１章

1) EU Directive of 14 June 1989 on the Approximation of the Laws of the Member States Relating to Machinery, 89/392/EEC. Official Journal of the European Communities, No. L 183, pp. 9-32, 29.6.1989.

2) "The Environmental Label Introduces Itself," distributed by Umweltsbundesmt -ZAD-, Bismarckplatz 1, D-1000 Berlin 33 (Blue Angel).

3) ISO 131:1979, " Acoustics - Expression of physical and subjective magnitudes of sound or noise in air".

4) IEC 651:1979, "Sound level meters".

5) E. Zwicker, "Meaningful noise measurement and effective noise reduction," NOISE CONTROL ENGINEERING JOURNAL/Nov. Dec. (1987).

6) ISO 532: 1975, "Acoustics - Method for calculating loudness level".

7) ISO 7779:1988, "Acoustics - Measurement of airborne noise emitted by computer and business equipment".

8) DIN 45635 Teil 19:1989, "Measurement of airborne noise emitted by machines; Enveloping surface and reverberation room method; Computer and business equipment".

9) ISO 3745:1977, "Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for broad-band sources in reverberation rooms".

10) ISO 3741:1975 "Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms".

11) JIS Z8732:1986 "無響室または半無響室における音響パワーレベル測定方法".

12) JIS Z8733:1987 "一般の音場における音響パワーレベル測定方法".

13) J. W. S. Rayleigh, " The theory of sound," Dover, New York, (Second Edition) (1945) Vol. 2, p.16.

14) H. F. Olson, " System responsive to the energy flow of sound waves," U. S. Patent No. 1, 892, 644 (1932).

15) 伊藤　毅, 境　久男, "音響ワットメーター," 日本音響学会誌, 7-1 (1951).

16) T. J. Schultz, " Acoustic wattmeter," J. Acoust. Soc. Am. 28, pp.693-699 (1956).

17) 粟屋　潔, 横山　功, 白幡　敦, 伊藤　勝, "精密音流計の研究," 日本音響学会誌, 15-3 (1959).

18) F. J. Fahy, "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals," J. Acoust. Soc. Am. 62, pp.1057-1059(Letter) (1977).

19) J. Y. Chung, "Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch," J. Acoust. Soc. Am. 64, pp.1613-1616 (1978).

20) S. Gade, "Sound Intensity, Part 1 Theory," Technical Review No.3, Bruel & Kjaer Instrument Inc. (1982).

21) S. Gade, "Sound intensity, Part 2 Instrumentation and Applications," Technical Review No.4, Bruel & Kjaer Instrument Inc. (1982).
22) F. J. Fahy, "Sound intensity ," Elsevier Science Publishers LTD. (1990).
23) E. Frederiksen, " Acoustic calibration for intensity measurement systems, " Proc. INTER-NOISE 87 (1987).
24) D. R. Jarvi, "The calibration of sound intensity instruments," Acustica, 80, 103-114, (1994).
25) F. Jacobsen, "Random errors in sound intensity estimation," J. Sound Vib. 128 , 247-257 (1989).
26) 佐藤利和, R. UPTON, "音響インテンシティ測定における音圧残留インテンシティ指数の理論と実際," 日本音響学会講演論文集, 629-632, (1992.3).
27) 佐藤利和, 大門静史朗, 石川正臣, "インテンシティ測定用テープレコーダにおける音圧残留インテンシティ指数の検討," 日本音響学会講演論文集, 371-372, (S63.3).
28) IEC 1043 : 1993, Instrument for the measurement of sound intensity.
29) ISO 9614-1:1993, Acoustics - Determination of sound power levels of noise source using sound intensity - Part 1: Measurement at discrete points.
30) ISO/DIS 9614-2:1994, Acoustics - Determination of sound power levels of noise source using sound intensity - Part 2: Measurement by scanning.

第2章

31) 佐藤利和, 石川正臣, 和田志一, "音響インテンシティによる音響出力測定と騒音対策例," 昭和58年電機関係学会関西支部連合大会(G303).
32) 大門静史朗, 佐藤利和, 石川正臣, 和木孝男, 十倉　毅, "残響室法による音響パワー測定についての考察－残響時間法と置換音源法の比較－," 日本音響学会講演論文集, 419-420, (S62. 3)(1987).
33) 佐藤利和, 石川正臣, 和田志一, "音響インテンシティによる音響出力測定について," 日本音響学会講演論文集, 493-494, (1982.10).
34) S. Gade, K. B. Ginn, O. Roth, M. Broch "Sound power dtermination in highly reactive environments using sound intensity measurements," Proc. INTER-NOISE 83 (1983).
35) E. L. Noe, "The influence of the configuration of sound intensity measurements on the determination of sound power over a range of environmental conditions," Proceedings of the CONGRESS ON ACOUSTIC INTENSITY, CETIM, Senlis, France (1985), 343-348.
36) J. Pope, "Validity of sound power determination using sound intensity measurements," Proc. CONGRESS ON ACOUSTIC INTENSITY, CETIM, Senlis, France, 353-360, (1985).
37) 佐藤利和, 大門静史朗, 石川正臣, "2チャンネルFFT分析器による音響パワー計測の試み," 日本騒音制御工学会講演論文集, 73-76, (1985. 9).

第3章
38) H. Yano, H. Tachibana and M. Koyasu, "Sound power levels of noise sources determined by various kinds of measuring method," Proceedings of the ICA 12, CANADA, (1986).
39) H. Tachibana, H. Yano, "Changes of sound power of reference sound sources influenced by boundary conditions measured by the sound intensity technique," Proc. INTER-NOISE 89 (1989).
40) U. S. Shirahatti, M. J. Crocker,, "Studies on sound power measurements using the sound intensity technique, "Noise Control Engineering Journal, 41(2), 323-330 (1993).
41) 佐藤利和, 石川正臣, 和田志一, "音響インテンシティによる音響出力測定について," 日本音響学会講演論文集, 493-494, (1982.10)
42) 佐藤利和, 鈴木俊行, "インテンシティ法音響パワー計測における外部騒音の影響," 日本音響学会講演論文集, 635-636, (1995.3)
43) 佐藤利和, 鈴木俊行, "インテンシティ法音響パワー計測における非定常音の影響," 日本音響学会講演論文集, 689-690, (1995.9)

第4章
44) 佐藤利和, 鈴木俊行, "音響パワーを用いた吸音材の吸音効果に関する評価方法とその有用性について," 日本音響学会誌, 51-11 (1995).
45) U. S. Shirahatti, M. J. Crocker, "Studies on sound power measurements using the sound intensity technique, "Noise Control Engineering Journal, 41(2), 323-330 (1993).
46) T. Sato, M. Ishikawa, S. Wada and M. Koyasu, "Measurement of sound absorption coefficient in an office using sound intensity," 1221-1224, inter-noise '84
47) ISO 9614-1:1993, Acoustics - Determination of sound power levels of noise source using sound intensity - Part 1: Measurement at discrete points.
48) ISO/DIS 9614-2:1994, Acoustics - Determination of sound power levels of noise source using sound intensity - Part 2: Measurement by scanning.
49) IEC 1043 : 1993, Instrument for the measurement of sound intensity.

第5章
50) T. Sato, T. Suzuki "Simplified determination of sound transmission loss using sound intensity technique and a small reverberation chamber," Noise Control Engineering J., (submitted).
51) A. Cops and M. Minter, "Comparative study between the sound intensity method and the conventional two-room method to calculate sound transmission loss of wall constructions," Noise Control Engineering J., 22(2), 104-11 (1984).
52) M. J. Crocker and Z. Valc, "New techniques to measure the transmission loss of partitions using sound intensity and single-microphone sound pressure measurements," Proc. INTER-NOISE 90, pp. 103-108 (1990).
53) A. Cops, "Progress in building acoustics," Proc. INTER-NOISE 94, pp. 23-42 (1994).

54) J. C. S. Lai and D. Qi, "Sound transmission loss measurements using the sound intensity technique part 1: the effects of reverberation time," Applied Acoustics, 40, pp. 311-324 (1993).
55) 佐藤利和, 大門静史朗, 石川正臣, "音響インテンシティによる小型残響箱での簡易損失測定," 日本騒音制御工学会講演論文集, 185-188, (1986.9)
56) 佐藤利和, 大門静史朗, 石川正臣, 和木孝男, 十倉　毅, "音響インテンシティによる透過損失の簡易測定," 日本騒音制御工学会講演論文集, 233-236, (1987. 9)

第6章

57) Y. Oshino, T, Arai, "Sound intensity in the near field of sources," Proc. of the Symposium on Acoustic Intensity, Tokyo, pp. 46-56 (1987).
58) F. Cervera, F. Belmar, and H. Estelles, "A low cost robot for acoustic intensity measurements," Noise Control Engineering Journal, 42(1), 31-35 (1994).
59) W. Maysenholder, W. Schneider, "Sound bridge localization in buildings by structure-borne sound intensity measeurements," Acustica, 68, 258-262 (1989).
60) 佐藤利和, 石川正臣, 和田志一, "音響インテンシティによる掃除機の吸込・吐出音の寄与," 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 277-280, (1983. 9) (S58.9)
61) 佐藤利和, 石川正臣, 和田志一, "音の強さによる騒音源の探査と分析," 騒音研究会資料, (1982. 10)
62) 佐藤利和, 石川正臣, 和田志一, "音響インテンシティによる部分音響出力の実効面積について," 日本音響学会講演論文集, 477-478, (1983. 3) (S58. 3)