

# 第 1 章

## 序 論

光学の分野では、肉眼ではよく見えない遠方の物体や微小物体を拡大し観測することが通常よく行われている。実際、これらの目的のために望遠鏡や顕微鏡などが開発された。また、可視光線より波長の長い電波の分野でも、電波望遠鏡が開発され、人工衛星や惑星の観測等に大きな役割を果たしている。これ以外にも、波動を扱う領域では、放射線、X線、赤外線、超音波など非可視領域の電磁波を用いた顕微鏡も実用化されている。しかし、低周波数の波長の長い音響領域に於ては、このような高感度、高機能を持つマイクロフォンは未だ実現されていない。

音声の採集、記録、環境監視等においては、周囲の騒音から目的音源の放射する、広帯域の信号を高感度、高 SNR、かつ忠実に採音することが要求される。特に環境監視では、監視環境の影響を受けずに、遠距離で行なう必要もあり、相当な感度が要求されている。加えて、遠中距離場の場合に於ては、音源までの距離情報は極めて曖昧であるから、その音源位置を何らかの合焦走査により、探索する必要もある。このような要求実現のためには、目的音源から放射する信号を複数マイクロフォンで、同時に受信し、それらを合成する方法が最適と考えられる [1]。そうすることにより、高感度、高 SNR、鋭指向特性、合焦機能があり、かつ忠実採音機能を有するマイクロフォンシステムの開発が可能であると期待できる。

しかし、複数マイクロフォンによる同時受信信号には、波動伝播に伴う遅延時間が含まれており、なんらかの遅延補正を施さないと、そのまま合成すると、当然の事ながら目的音源信号を忠実に採取することができない。それ故、各マイクロフォンの出力に対して、適正な位相揃え処理（同相化処理）を施した後で、それらの出力を合成すれば、高感度のマイクロフォンシステムが得られると考えられる。例えば、M 個マイクロフォン同時受信の場合、各々の出力に相対的遅延時間補正を与え、各スペクトルの位相を揃えた後に全マイクロフォンの出力を合成すれば、システム全体の感度は、マイクロフォン 1 個の場合の感度の M 倍となると予想される。また、狙った音源以外の雑音がランダムで相互に、かつ目的音源とも無関係であると仮定できる場合には、それらの加算処理により雑音は互いに相殺されるので、システムの SNR

はその分だけ高くなると予想される。

以下、本章では、マイクロフォンアレイ利用の従来研究を概観すると共に、その問題点を指摘し、本研究の意義、研究経過と位置付けを明確にした後、本研究の目的を示す。

## 1.1 従来の研究

従来から、望遠マイクロフォンという名のは数社で開発、販売されている。しかし、それらは単一指向性マイクロフォンに音響管をつけて、指向性だけを向上させたものである [2]。そのため、遠方微弱音の受信には不向きと言える。

多数センサ、センサ配列、マイクロフォンアレイなどの名の下で多数センサによる音源推定 [3]、マイクロフォンアレイによる指向性制御 [4]、超指向性マイクロフォン [5]、適応形雑音抑圧マイクロホンアレー (AMNOR) の指向特性 [6]、円弧状あるいは交差円弧状マイクロフォンシステムの感度空間分布に関する理論と実験的検討および実用化検討 [7, 8, 9, 10, 11]、など多くの研究がなされている。しかし、これらの研究は主に狭帯域音源を用いて検討したものであり、感度分布とその制御に関しては、予め音源の中心位置を既知として、その既知の固定音源に対する相対感度の空間分布とそのサイドローブ低減のため、各マイクロフォンの重み係数を調整するものである [4, 5, 7, 8, 9, 10, 11]。すなわち、望遠マイクロフォンシステム等に要求される、絶対感度の向上を図るものではない。

一方、これらの従来研究では、感度分布特性、指向特性などを扱うときに、従来の電波や超音波領域のような単一周波数に近い狭帯域音源だけを扱い、それらの特性を各周波数毎に個別に評価したものであり、音源信号の広帯域性を考慮すると、それは実用的ではない。また、殆どの研究は理論検討にとどまり、複数マイクロフォン素子を使用しているにも拘らず、使用素子特性のバラツキの校正方法をきちんと考慮してはいない。それ故、実際の利用には不向きである。

このような背景下で、我々は複数マイクロフォンを用いたマイクロフォンシステムに着目し、1次元円弧状アレイを用いたマイクロフォンシステムの実現可能性を、その合焦性、感度空間分布、並びに広帯域音源に対する受信波形の RMS 誤差分布の観点から基礎的に検討した [12, 13]。その結果、円弧状アレイの開口方向にはある程度の合焦性を有するが、それと直交する方向には、合焦機能が殆どなく、従って、3次元空間における合焦性が不十分であることが判明した。そこで、球面アレイ型マイクロフォンシステムを提案し、高性能のマイクロフォンシステムの開発へ向けて、理論・数値解析を進める [14, 15] と共に、その結果を踏まえて実験的に計算機援用部分電子走査利用球面アレイ型マイクロフォンシステムを具体的に構築し、実験的検証を検討してきた [16, 17, 18]。

その際、従来の研究の問題点を克服するため、我々は絶対感度の向上を目指すと共に、システムの感度分布特性評価に、新たに周波数平均感度分布の概念を提唱し、帯域波音源について、その分布特性を評価した。また音源信号の広帯域性の観点から、システムの出力特性評価に相対受信 RMS 誤差の利用を提唱し、高精度採音のためのより直観的特性評価の必要性を力説してきた [14, 15].

構築システムの実験評価に要求されるマイクロフォン素子特性のバラツキ校正方法として、簡易校正法の提案と高精度校正法を考案し、その有効性を明らかにした [17, 18]. さらに中遠距離場のみならず、近方場をも含む形で従来の振幅荷重最適決定問題を再定式化すると共に、採音に必要な感度下限下で、SNR を最大化する最適振幅荷重決定法を提案し、理論・数値解析と実験評価結果により、その有効性を実証した [19, 20].

## 1.2 本研究の目的

機能工学系佐々木研究室では、約7年余以前から音響応用計測の一貫として音による水辺野鳥の棲息調査と自動識別の可能性に関する研究を組織的に進めてきた [21, 22]. 野鳥の棲息状況調査で、最も苦心したのは、明確に種別が判別でき、かつ信号対雑音比のよい鳴き声データを採取することであった。というのは、データを採集すべく、息を潜めて野鳥の棲息域に接近しても、早かに察知され、飛散されてしまい、遠くで微かに鳴いており、レベルが低過ぎて採取できない、あるいはせっかく DAT をセットしても、突然発生した周囲の農作業音に埋もれてしまい、採取データが使用に耐えない等のことが度々であった [23].

また、夜間や、木の陰に隠れている野鳥の鳴き声を正確に採取するため、野鳥の居場所を探索することも実際に要求されている。しかし人間の目による目視観察の方法はこの目的のためには不適切と考えられ、鳴き声の情報に基づく探索は実用的であり、その開発が急がれている。これらの要求を満たすためには、広範囲に渡る焦点走査とスーミング機能を有する、高感度、鋭指向特性、高信号対雑音比をもつマイクロフォンシステムの開発が極めて重要である。これが本研究の究極の目的である。

このような開発ができれば、合焦走査による音源位置の探査は、一般的な音源追跡、局所的音源の採取などの目的にも広く応用できる。例えば、以下の応用が考えられる [24].

1. コンサートホール等において、聴衆の醸し出す音響的雰囲気を取しつつ、臨場感をもって対象のオーケストラやバイオリン等の音を、予め天井等にセットしたシステムにより、自由に採取できる。
2. 同様に当システムを天井に設置して置くことにより、工場内運転機器の作業騒音状態の一括モニタリング、ひいては、その検出信号の特性変化より、機器の故障監視までも可

能になる。

3. 交通騒音や市街地騒音のモニタリング等では，道路脇ビル屋上等に設置したマイクロフォンシステムから，その焦点走査とズーム機能により，ビル足下を中心とする，より広域の騒音空間分布までも容易に計測可能になる。
4. 気球や飛行船等から，更に広域の騒音分布，例えば，高速道路の交通騒音を一括モニタリングできるようになり，交通騒音対策へ向けての種々の施策立案とその施策実施後の有効性の検証などにも応用できる。

本研究はこのような研究背景と実際の要求に応じて，計算機援用電子走査球面アレイ型マイクロフォンシステムを提案し，システムの特性を理論・数値解析と実験的に評価し，高性能な計算機援用電子走査球面アレイ型マイクロフォンシステムを開発することを目的とする。具体的開発目標としては，高性能マイクロフォンシステムに要求される，先に述べた高感度，鋭指向特性，高 SNR，高精度，3次元空間における合焦機能を持つ実時間可搬型マイクロフォンシステムを開発することである。

### 1.3 本論文の構成

本研究では，まず球面アレイ型マイクロフォンシステムを提案し，システムの基本特性を理論・数値解析から解明した。その結果に基づき，実験系を設計・構築し，それらの基本特性を実験的に評価した。さらに，システムの振幅補正荷重に対して，最適化を行い，導出した最適荷重を用いて，最適荷重採用システムの基本特性を，基本システムで用いたものと同手法で理論，実験の両面から評価した。システムの相対受信 RMS 誤差の実験評価結果から，構築球面アレイの構成マイクロフォン素子特性の高精度校正の必要性を確認し，高精度実時間デジタルマイクロフォンシステムの実現について考察した。このような内容を具体的に8章に分けて，本論文の中で述べている。

まず第1章の序論ではマイクロフォンシステム開発の必要性を明確した。続いて従来の研究状況について概観した後，問題点を指摘し，本研究の意義と位置付けを明確した。その後で，本研究の目的を述べると共に，本論文の構成を示した。

第2章の球面アレイ型マイクロフォン基本システムでは，球面アレイ型システムを提案し，必要とするシステムの基本特性（感度，SNR，受信 RMS 誤差の空間分布という基本3特性）を理論・数値解析的に明らかにする。ここでは，まず提案システムの感度空間分布特性について，従来の単一周波を用い評価し，また，音源信号の広帯域性の観点から，帯域波に対する感度分布評価の重要性を示し，その理論・数値解析の結果を明らかにする。さらにマイクロフォ

ンに混入した無相関な加法ノイズ等に対するシステム SNR の空間分布特性を明らかにすると共に、相対受信 RMS 誤差特性の評価の必要性を提唱し、その分布を帯域波音源を代表する FM 変調波を用い評価する。以上の基本 3 特性の評価と同時に、球面アレイの開口直径、使用マイクロフォン素子の個数、球面アレイ上マイクロフォンの配置との関係を解明する。

第 3 章の球面アレイ型基本システムの設計と構築では、前章の理論・数値解析の結果に基づき、本マイクロフォンシステムの使用目的に合わせ、システムの仕様を決め、実時間可搬型システムを具体的に設計する。また、仕様に基づき、システム全体と各部分を具体的に設計・構築し、計算機制御のマイクロフォン基本システムの簡易型実験系を実現した結果について述べる。構築システムに関し、使用マイクロフォン素子特性バラツキの校正法については、同一円周上マイクロフォン素子の平均の遅延時間とゲインを用いた簡易校正法を提案し、その校正結果の例を示す。

第 4 章の構築基本システムの実験評価結果では、マイクロフォンシステムの基本特性の実験評価方法を示し、簡易校正法でマイクロフォン素子特性のバラツキの校正を行った構築実験系を使用し、本大学講堂で採取した実験データを用いて、システムの感度空間分布、SNR 空間分布、相対受信 RMS 誤差の空間分布の評価結果を示す。その結果を踏まえて各チャンネルの平均周波数特性までを加味した使用マイクロフォン素子の高精度校正法必要性の一端を示す。

第 5 章の振幅荷重最適化球面アレイ型システムでは、振幅荷重の最適化問題を取り上げ、電子ノイズ等の無相関加法ノイズに対するシステムの SNR 向上度を最大にすることによって、球面伝播に伴う振幅補正用の振幅荷重を最適化する。また、このように最適された荷重を採用したシステムの基本特性を中遠距離場および近距離場において、理論・数値解析を行ない、評価した結果を示す。

第 6 章の最適振幅荷重採用構築システムの実験評価結果では、既に構築の基本システムの実験系に於て、振幅荷重だけを最適振幅荷重に替え、第 4 章で用いた実験評価方法と同じ方法で、試作音響測定室内で実験データを収集し、近方場における最適荷重採用システムの基本特性の実験評価の結果を示す。

第 7 章の高精度電子走査球面アレイ型システム実現へ向けての考察では、基本システムの理論・数値解析および実験評価の結果を踏まえて、DSP 採用のデジタル高精度実時間システムの実現性について一般的に考察した後、システムの高速度型、簡易型、実用型の構成例を示し、その実現の可能性を明らかにする。

第 8 章の結論では、本論文をまとめ、本研究で開発した球面アレイ型マイクロフォンシステムに対して、得られた成果を要約すると共に、今後の同システム開発へ向けて、解決すべき問題点を示す形で結論を述べる。