

第 4 章

構築基本システムの実験評価結果

球面アレイ型マイクロフォンシステムの基本特性を実験的に評価するため、前章では、実際の使用目的と実用化へ向けてのシステム構築の観点から、理論・数値解析の結果に基づき、評価用の実験系を具体的に設計・構築した。本章では、本構築基本システムを用いて球面アレイ型マイクロフォンシステムの感度、SNR、相対受信 RMS 誤差の各空間分布特性を実験的に評価した結果を示す。その際、実時間性の観点から各チャンネルマイクロフォン素子特性バラツキ校正には、簡易校正法を用いることにした。また、構築システムの特性評価の段階であるため、雑音と反射が少ない本学講堂内で、基礎実験を行った。

4.1 実験評価方法

前章で構築した球面アレイ型マイクロフォンシステムに対する実験的評価は、本学講堂(長:30m, 幅:24m; 高:12m)でデータを採取し、コンピュータ上で評価実験を行う。データの採集は、図 4.1 に示す実験機器設定状況図に従って行う。その際、構築マイクロフォンシステムを舞台上にセットし、その前方(座席側)において走査焦点の周りに小型スピーカを設置し、これから所定の正弦波あるいは FM 変調波信号を放射して、スピーカの前面から 1m の所に設置の高性能マイクロフォン 1 個で受信し、音源放射信号を間接的にモニターしつつ、システム出力と併せて DAT に同時記録する。

前記のように、球面アレイ型マイクロフォンシステムの構成では、電子的な焦点走査を球面アレイの軸上で行うため、当システムには球面アレイの中心軸に対して対称性がある。従って、システムの感度、SNR、相対受信 RMS 誤差の空間分布の評価は簡単に、球面アレイ軸に沿う距離方向と球面アレイ軸から離れる方位方向だけで行えばよい。そのための焦点の周りにおけるシステム基本特性の空間分布の実験評価点を図 4.2 に示す。これは焦点を 20m に設定した場合の一例である。

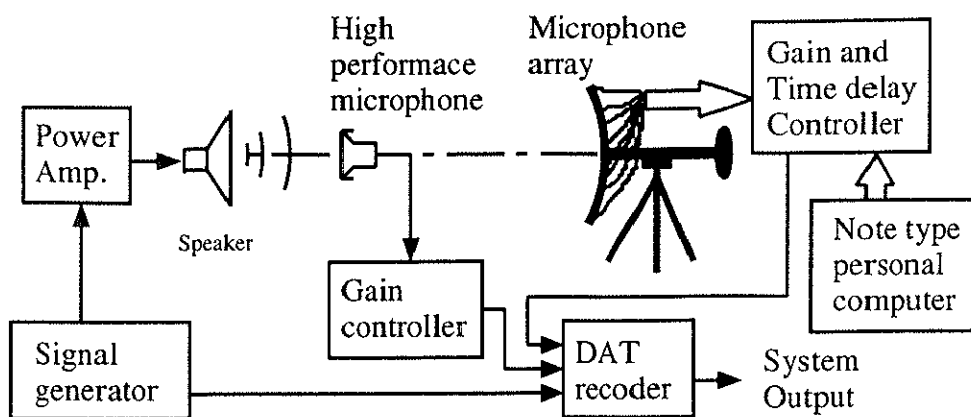


図 4.1: An experimental setup used for evaluation of the constructed microphone system with a spherical array.

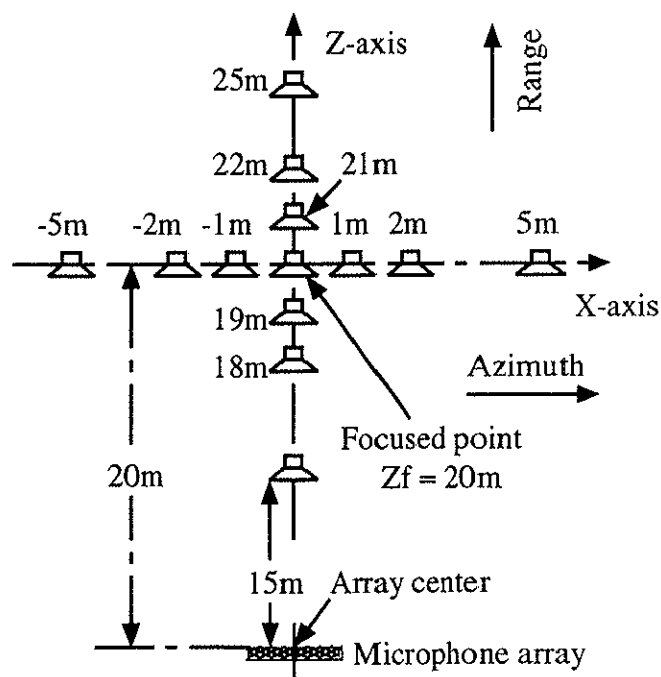


図 4.2: Experimental arrangement of a sound source and the constructed microphone system, when a focus point being 20m apart from the array center.

コンピュータ制御の下でシステムの焦点をそれぞれアレイ軸上10m, 20m, 30mに設定し、スピーカの位置を焦点とその左右, 前後に各1m, 2m, 5mのところに置き換えては、実験を行う。システムの単一周波感度および周波数平均感度, SNR, 相対受信RMS誤差の空間分布特性を評価するため、音源信号として、周波数1kHz, 3kHzと5kHzの正弦波, 周波数範囲

100Hz~6.0kHzのFM変調波を用いる。各音源位置に於て音源信号モニター用高性能マイクロフォンによる参照検出信号と実験系出力のデータでシステムの基本3特性を評価する。

無相関な加法ノイズに対するシステムSNRの空間分布を評価するため、上述の各音源位置について、スピーカから音源信号を発生した時としない時のパワーの比によって実験用構築システムのSNRの空間分布を測定する。

4.2 実験評価結果

大学講堂で採取したデータをコンピュータに転送し、各焦点周りの音源位置で記録した単一周波音源、帯域波音源に対する基礎実験系の出力を、高性能マイクロフォン出力と比較して、方位方向、距離方向におけるシステムの感度(単一周波数感度、帯域波感度)分布特性、並びに両方向におけるシステムの相対受信RMS誤差分布特性を数値的に計算・評価した結果を以下に示す。また、各音源位置に対し記録した無音源の場合のシステム実験系出力とFM変調波に対するシステム実験系出力の平均パワーをそれぞれ計算し、その比でマイクロフォン素子に混入加法ノイズに対するシステムのSNR空間分布の評価結果とした。

4.2.1 感度空間分布の評価結果

球面アレイ型マイクロフォンシステムの理論・数値解析で示したように、システムの感度分布は、単一周波数に対する従来の評価方法だけでは不十分であり、帯域波に対する周波数平均感度分布の評価も行う。そのため、単一周波数1kHz、3kHz、5kHzの正弦波音源に対するシステムの出力を単一周波数感度分布の評価に、FM変調波音源に対するシステムの出力を周波数平均感度分布の評価にそれぞれに用いる。方位方向では、感度を実目盛で、距離方向では、そのデシベル値を等高線でそれぞれを表示する。

(1) 単一周波感度分布の評価結果

システムの焦点を球面アレイの軸上アレイ中心から20mのところを設定した場合の、周波数1kHz、3kHz、5kHzをもつ単一周波音源に対する構築マイクロフォンシステムの方位方向感度分布の実験評価結果を図4.3に示す。同図で、実験値と同時に理論計算値も表示され、実線、点破線、点線は理論計算値を、*、+、と×は実測値を示し、それぞれ周波数1kHz、3kHzと5kHzの正弦波音源に対するシステムの感度分布を表す。図4.3から分かるように、単一周波数の正弦波に対して、システムの感度空間分布は理論計算値と実験値がよく一致している。この結果より単一周波数音源に対しては、各チャンネルのマイクロフォン特性バラツキは方位方向感度分布にはあまり影響を及ぼさないことを意味している。

同様な焦点設定で，単一周波 5kHz の音源に対する構築マイクロフォンシステムの出力を記録した各音源位置の感度を焦点にある音源の場合の感度で規格化し，dB 単位の等高線表示した距離方向の感度空間分布を図 4.4 に示す．ここでは，等高線表示のため，焦点の左右，上下における 1m，2m，5m の各音源格子位置で採取したデータを使い，左右と上下の各交差点のシステム感度を求めた後，メッシュ点を増やし補間，外挿して，等高線を描いた．明らかに焦点付近ではシステムの感度が高く，音源が球面アレイの中心から遠く離れていくと，その感度は次第に減少してゆく．また音源が球面アレイ軸から，遠く離れていくとシステムの感度も減少してゆく，合焦機能が現れる．図 4.4 に示した距離方向の感度分布特性を第 2 章で得られた理論計算結果図 2.4 と比べて見ると，両者がよく似ていることも分かる．

システムの焦点を 10m に設定した場合，単一周波音源に対するシステムの方角方向と距離方向における感度空間分布の実験評価結果を，それぞれ図 4.5 と図 4.6 に示す．ただし，表示の仕方は図 4.3 と図 4.4 と同じである．図 4.3 と図 4.5 の結果と比較して，方角方向感度の分解能は約 3.9degree/m 係数で波長及び焦点とアレイ間の距離に線形に関係していることが読み取れる．この事実は従来の狭帯域波動を用いた音響映像系の方角分解能の評価結果とよく符合している [1]．また，図 4.4 と図 4.6 を比較して見た結果からは，距離方向の感度分解能は殆んど距離に依存しないことが分かる．この最後の点は，球面の開口直径に比べて十分に遠方場で焦点を走査しており，近似的に平面で受動合焦しているのと等価であるため，奥行き方向分解能が欠除しているものと解釈される [1]．

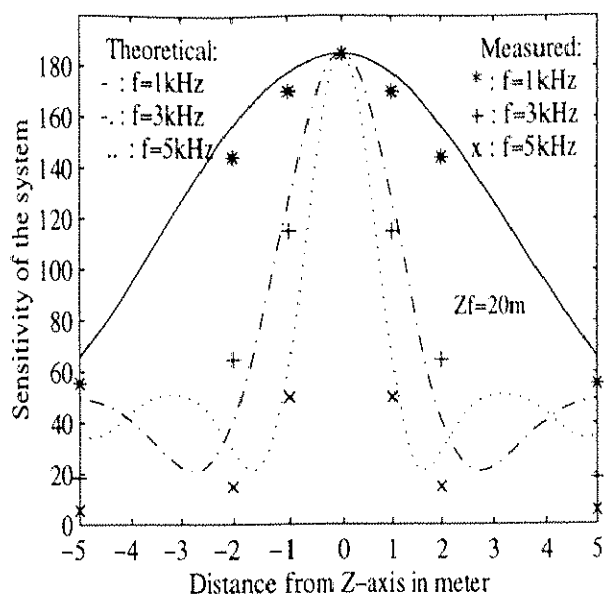


Figure 4.3: Experimentally evaluated azimuth sensitivity distributions of the system for sinusoidal signals, when the focus point being 20m apart from the array center. The measured values for frequencies 1kHz, 3kHz, and 5kHz are shown by symbols of *, +, and ×, respectively, together with solid, broken with a dot, and dotted lines representing the corresponding theoretically expected values, respectively.

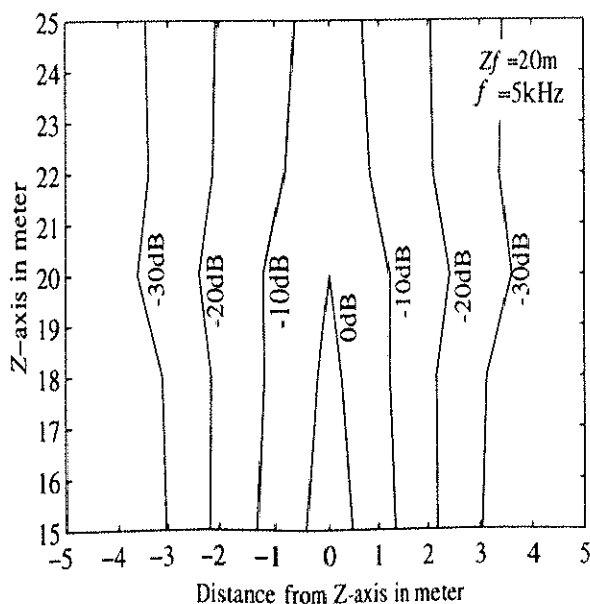
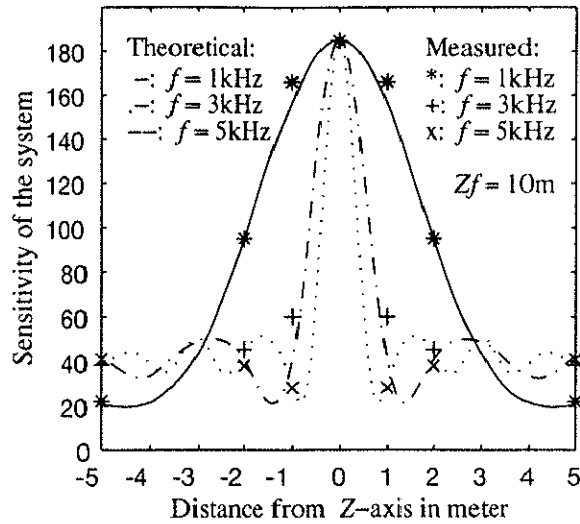
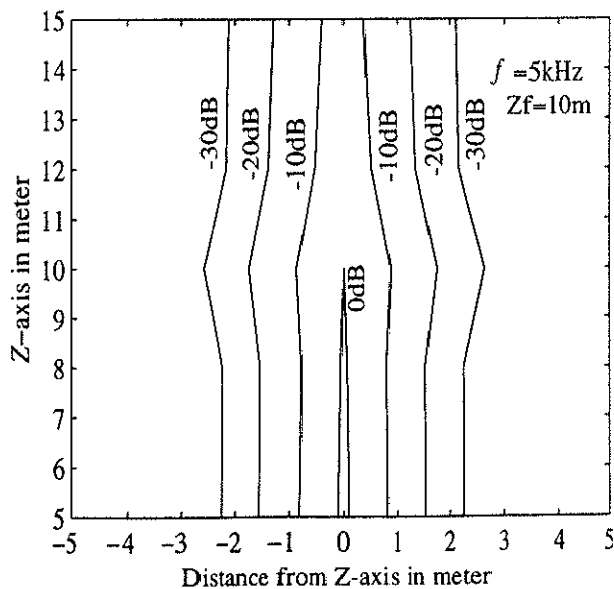


Figure 4.4: Experimentally evaluated range-azimuth sensitivity distribution of the system for a sinusoidal signal, when the focus point being 20m apart from the array center. The measured values normalized by that at the focus point are denoted in decibel.



⊠ 4.5: Experimentally evaluated azimuth sensitivity distributions of the system for sinusoidal signals at the focus point being 10m apart from the array center. The measured values for frequencies 1kHz, 3kHz, and 5kHz are shown by symbols of *, +, and ×, respectively, together with solid, broken with a dot, and dotted lines representing the corresponding theoretically expected values, respectively.



⊠ 4.6: Experimentally evaluated range-azimuth sensitivity distribution of the system for a sinusoidal signal, when the focus point being 10m apart from the array center. The measured values normalized by that at the focus point are denoted in decibel.

(2) 帯域波感度分布の評価結果

帯域波音源に対する構築球面アレイ型マイクロフォンシステムの感度空間分布の実験的評価結果を単一周波音源の場合と同じ焦点設定 (20m) でまず示す。有限な帯域幅 $B_H=2\text{kHz}$ の音源信号に対して、システム方位方向の周波数平均感度空間分布の測定結果を図 4.7 に示す。表示の仕方は図 4.3 と同じである。ただし、信号の中心周波数を 2kHz, 3kHz と 4kHz と変えてある。理論計算値と実験値を比べて見ると、両者がよく一致していることが分かる。また、横軸のスケールが異なるため、読み取りづらいが、図 4.3 の単一周波 3kHz の音源に対するシステムの感度分布と比べると、中心周波数 3kHz, 帯域幅 2kHz の音源信号に対しては、方位方向における周波数平均感度分布は単一周波数の場合より、狭くなっている。それ故、帯域波に対するシステムの指向特性は単一周波の場合に比較してより鋭くなることが実証された。

同一焦点設定で、中心周波数 $f_c=3\text{kHz}$, 帯域幅 $B_H=2\text{kHz}$ の有限帯域音源に対して、距離方向におけるシステムの周波数平均感度空間分布の実験評価結果を図 4.8 に示す。感度分布の表示は単一周波数に対するシステムの距離方向における感度分布の表示と同じく、焦点にある音源に対するシステムの感度で規格し、dB 単位の等高線で表示している。図 4.8 から分かるように帯域幅 [2kHz,4kHz] の音源信号に対して、周波数平均感度分布は方位方向より、距離方向にシャープな分解能を有している。加えて、単一周波音源に対する距離方向の感度分布図 4.4 よりも、シャープな分解能を有している。特に低周波域では、単一周波の場合より方位方向、距離方向の両合焦特性が優れていることが分かる。これはすでに理論・数値解析で述べたように有限帯域音源信号に対する当システムの特有な特性である。尚、この実験評価結果も理論計算値と極めて良く一致していることをあえて付け加えておく。

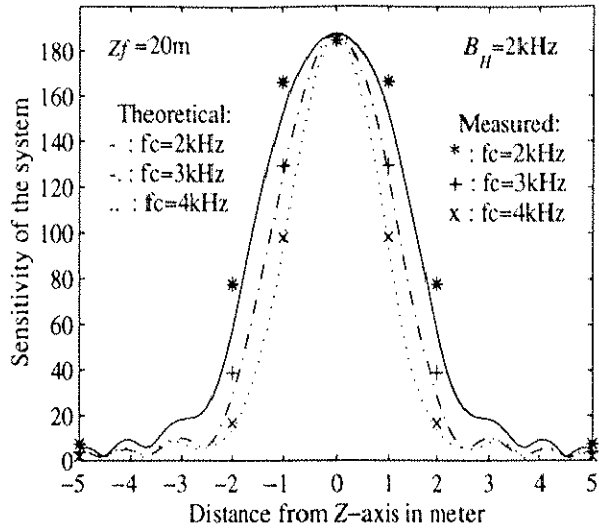


Figure 4.7: Experimentally evaluated frequency averaged azimuth sensitivity distributions of the system for FM signals of finite bandwidth B_H around the center frequency f_c , when the focus point being 20m apart from the array center. The measured values for frequencies 2kHz, 3kHz, and 4kHz are shown by symbols of *, +, and \times , respectively, together with solid, broken with a dot, and dotted lines representing the corresponding theoretically expected values, respectively.

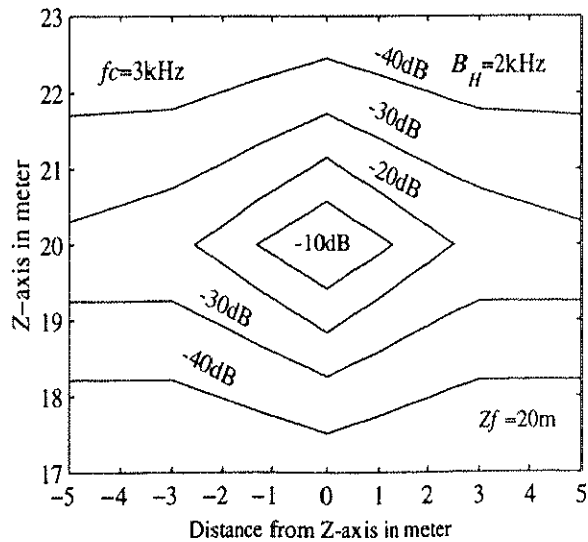


Figure 4.8: Experimentally evaluated frequency averaged range-azimuth sensitivity distribution of the system for an FM signal of finite bandwidth B_H around the center frequency f_c , when the focus point being 20m apart from the array center. The measured values normalized by that at the focus point are denoted in decibel.

4.2.2 SNR 空間分布の評価結果

システムの焦点を球面アレイ軸上に20mのところを設定した場合、図4.2に示した音源位置における構築システムのSNR空間分布特性の実験評価結果を図4.9に示す。ただし、ここで示したSNR値とは、瞬時周波数が100Hzから6.0kHzまで変化するFM波音源を用い、各音源位置に対してシステムの出力が、音源信号の有無に応じて与えるパワーの比を求めたものである。すなわち、第2章の理論・数値解析で示したマイクロフォン素子に混入した加法ノイズに対するシステムのSNRの空間分布である。図4.9に示されているように、システムのSNRの測定値は理論計算値と非常に一致しており、またシステムは高SNR特性を有し、特に焦点では、43.8dBという値になっている。これは設計値より僅か1.2dB低いだけであり、ほぼ理論・設計値通りの結果が得られている。

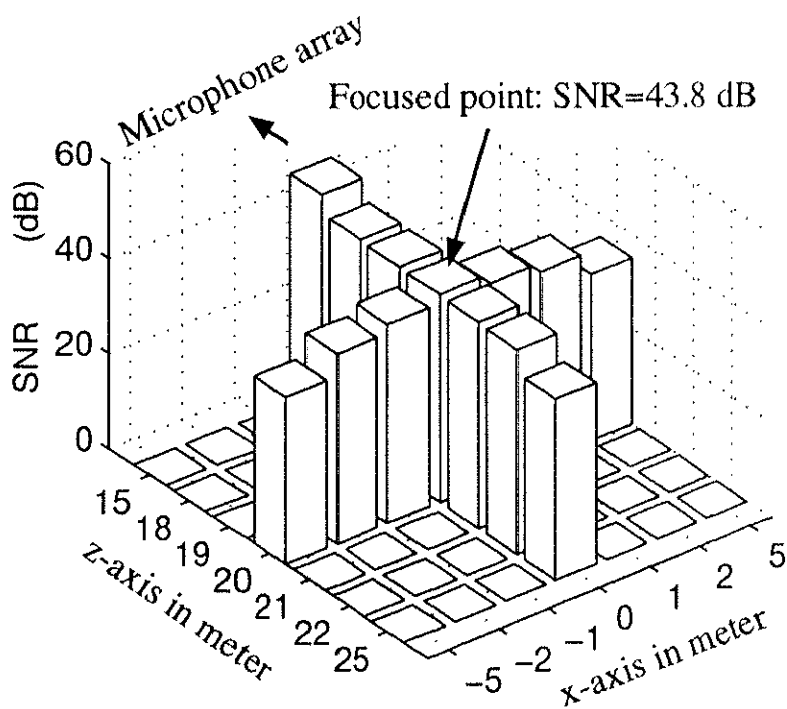


図 4.9: Experimentally evaluated SNR distribution of the system for an FM signal of instantaneous frequency 100Hz to 6.0kHz around the focus point being 20m apart from the array center in a X-Z plane.

4.2.3 相対受信 RMS 誤差空間分布の評価結果

球面アレイ型マイクロフォンシステムでは、合焦機能を持たせることにより、焦点にある音源に対して、各マイクロフォン素子の出力位相が揃えているため、それらの合成出力は音源信号が忠実に反映されたものとなる。しかし音源が焦点から離れると、帯域音波の各周波数成分の波が各マイクロフォンに到達する時間が異なり、各マイクロフォン素子の出力信号位相が異なるため、それらの合成出力波形に歪みが出てくる。すなわち、本来の音源信号の波形と異なる信号波形を採取することになる。従って、この種の影響を厳密に評価するためには、相対受信 RMS 誤差を実測する必要がある。

構築マイクロフォンシステムの相対受信 RMS 誤差の実験的評価の前に、ここでは、実験で採取した受信信号そのものの表示例を示す。図 4.2 に図示した音源位置上の FM 波音源に対するマイクロフォンシステムの受信信号の波形例を図 4.10 に示す。

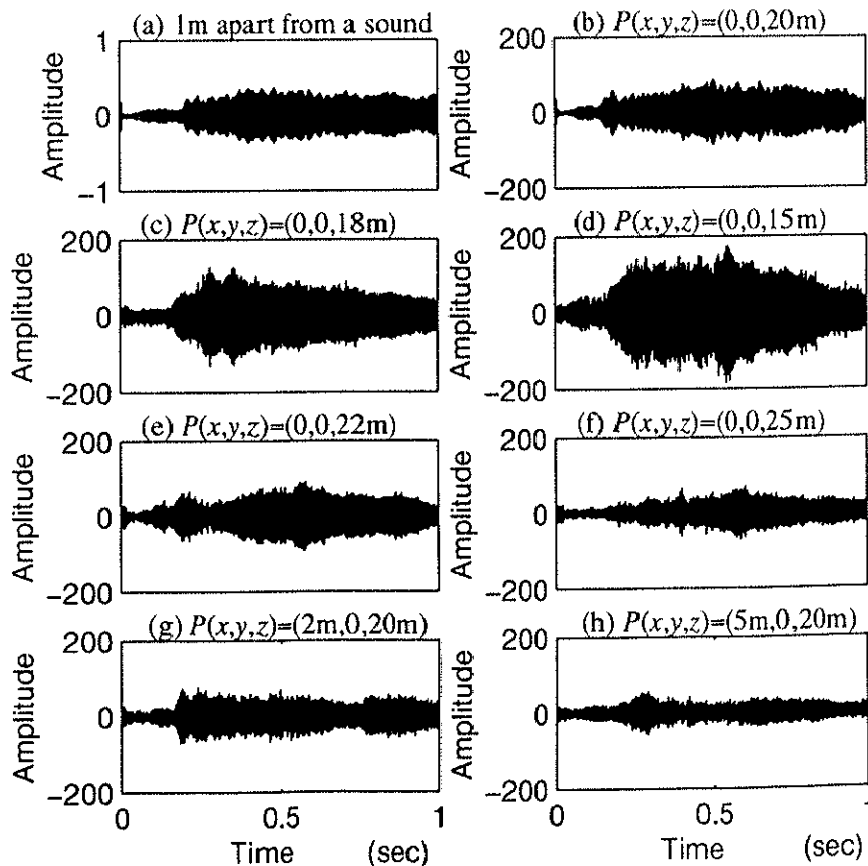


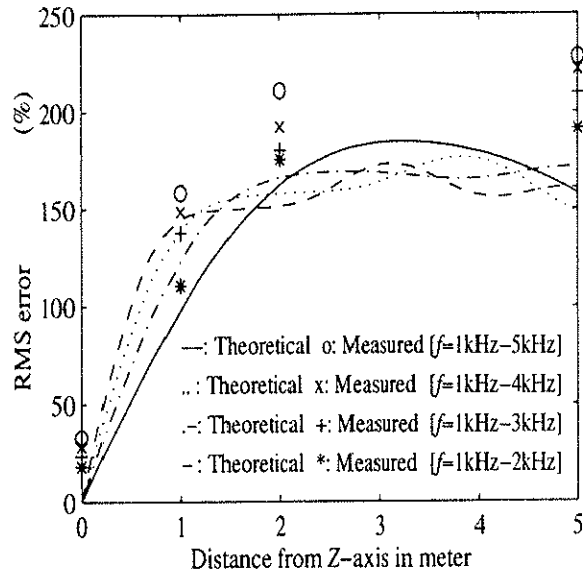
図 4.10: Received waveforms of an FM signal by the microphone system, when the focus point being 20m apart from the array center.

図 4.10の (a) は音源から 1m 離れた場所に設置した高性能マイクロフォンによる受信信号波形であり、(b), (c), (d), (e) と (f) はそれぞれ焦点、球面アレイ軸上において焦点からアレイ方向 2m 地点、同 5m 地点、同軸上焦点からアレイ反対方向 2m 地点、同 5m 地点にある音源に対する、システムの受信波形である。(g) と (h) はそれぞれ焦点から左右方向 2m と 5m 離れた場所にある音源に対する受信波形である。これらの受信波形から分かるように、音源が焦点にある場合、システムの受信信号は高性能マイクロフォンの受信信号とよく似ている。これに対して、音源が焦点から離れるにつれて、システムの受信信号振幅だけでなく、波形も乱れてゆくことが分かる。この傾向は理論予測とよく一致している。

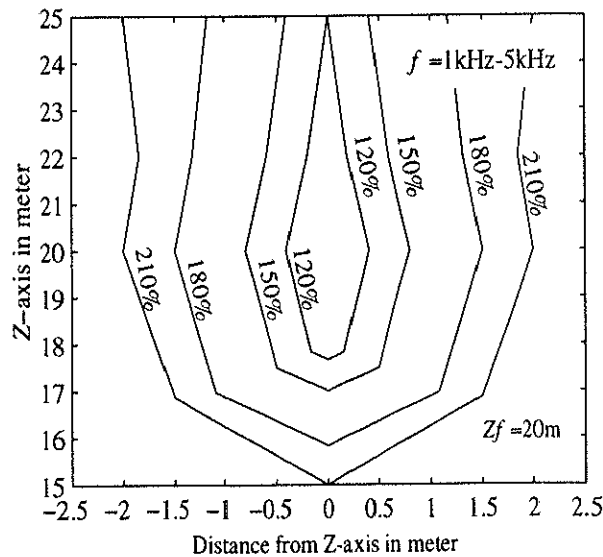
システムの受信誤差を実験的に評価するため、第 2 章で示した相対受信 RMS 誤差の評価方法を用い、図 4.2の各音源位置で記録したシステムの出力データと音源から 1m 離れたところに設置された高性能マイクロフォンの出力データの間で、式(2.26, 2.27, 2.28)に基づいて、受信 RMS 誤差を算出し、評価した。

システムの焦点を球面アレイ軸上 20m に設定し、広帯域の FM 変調波信号の周波数範囲を 1.0kHz~2.0kHz, 1.0kHz~3.0kHz, 1.0kHz~4.0kHz, 1.0kHz~5.0kHz と変えた時のシステムの方角方向における相対受信 RMS 誤差の空間分布の実験評価結果を図 4.11に示す。同図で、理論計算値を各周波数帯域幅に対してそれぞれ実線、点破線、点線、破線で表示してある。図 4.11から分かるように、焦点付近では、相対受信 RMS 誤差の理論計算値と実験値はよく一致している。しかし、音源が焦点から離れていくと、実験値と理論計算値とが大きく掛け離れており、特に相対 RMS 誤差が 150% を越える領域では、当誤差による評価が実用上の意味をなさなくなっていると考えられる。

また、同一焦点設定では、音源信号として周波数が 1.0kHz から 5.0kHz まで変わる FM 変調波を用いた場合の距離方向におけるシステム相対受信 RMS 誤差空間分布の実験評価結果を図 4.12に示す。方角方向の相対受信 RMS 誤差の分布と同じく、音源が焦点の近くにある場合、システムの相対受信 RMS 誤差の計測値は理論値と良く一致している。しかし、音源が焦点から離れると、奥行き方向に関してもシステムの相対受信 RMS 誤差が次第に大きくなっている。音源位置が焦点から離れた場合の受信波形誤差の増大は恐らく使用マイクロフォン素子の簡易校正方法の不十分性に基づくものと推察される。というのは、球面アレイマイクロフォンの各チャンネルには固有の位相ずれが残っており、合成信号には、これが反映されたため、相対受信 RMS 誤差が大きくなったと考えられる。この結果は、用いたマイクロフォンの周波数特性(ゲインと遅延の両特性)に関する高精度補正(高精度校正法)の必要性を暗示している。



⊠ 4.11: Experimentally evaluated azimuth relative RMS error distributions of the system for FM signals with simple compensation, when the focus point being 20m apart from the array center. The measured values for frequencies 1kHz~2kHz, 1kHz~3kHz, 1kHz~4kHz, and 1kHz~5kHz are shown by symbols of *, +, x, and o respectively, together with solid, broken with a dot, dotted line, and broken representing the corresponding theoretically expected values, respectively.



⊠ 4.12: Experimentally evaluated range-azimuth relative RMS error distribution of the system for an FM signal with simple compensation, when the focus point being 20m apart from the array center. The measured values are represented in percent by contour lines.

そこで、同じ実験条件で、構築マイクロフォンシステムの各チャンネルに校正を行わず、その出力をそれぞれ記録し、第3章に示した高精度校正法を用いてコンピュータ上で、チャンネル毎に参照信号に対する8個のマイクロフォンでの検出信号個々の周波数伝達関数を一旦推定し、その平均特性の所要帯域での逆特性を求め、これにより、記録した各チャンネルの出力に対してフィルタリングを行う。このようにして高精度校正を行った各チャンネルの出力に対して、焦点の位置に応じて、さらに振幅補正と遅延時間補正を行い、各チャンネルの出力を合成し、システムの出力とする。その結果を図4.13と図4.14に示す。図4.13と図4.14はそれぞれ方位方向と距離方向における相対受信 RMS 誤差の空間分布であり、表示の方法は図4.11と図4.12と同じである。

高精度校正法を用いた結果を簡易校正法の結果と比べて見ると、焦点近傍でのシステムの相対受信 RMS 誤差がより小さくなり、かつ方位、距離の両方向共に、理論値と実験値がよく一致している。しかし、この種の校正法は、試作アナログ実験系では実時間で実現することは困難である。そのため、これについては第7章で改めて考察を加える。

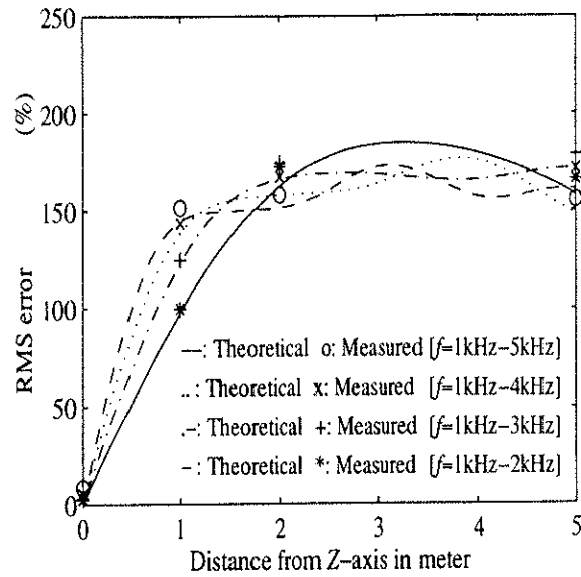


图 4.13: Experimentally evaluated azimuth relative RMS error distributions of the system for FM signals with full compensation, when the focus point being 20m apart from the array center. The measured values for frequencies 1kHz~2kHz, 1kHz~3kHz, 1kHz~4kHz, and 1kHz~5kHz are shown by symbols of *, +, x, and o respectively, together with solid, broken with a dot, dotted line, and broken representing the corresponding theoretically expected values, respectively.

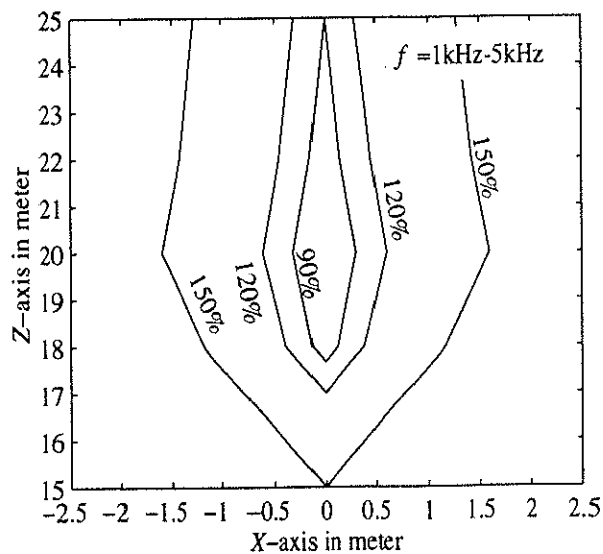


图 4.14: Experimentally evaluated range-azimuth relative RMS error distribution of the system for an FM signal with full compensation, when the focus point being 20m apart from the array center. The measured values are represented in percent by contour lines.

4.3 実用的システム構築へ向けての考察

前章で構築した球面アレイ型マイクロフォンシステムの実験系を用いて、第2章で議論したシステムの基本特性を実験的に評価した。その結果、感度、SNRの空間分布は理論・数値解析の結果とよく一致していることが分かった。従って、第3章で検討したシステムの設計・構築方法はシステム基本性能の実験評価のための実験系の設計・構築法として考案したものであるが、実用システムの構築に向けても、十分に有効な方法であることが実験的にも確認された。

しかし、相対受信 RMS 誤差の実験値は、各チャンネルマイクロフォン素子特性のバラツキ校正に簡易校正法を用いているため、焦点の近傍では理論値と実験値がよく一致しているものの、音源が焦点から離れると、それらの隔りが大きくなり、高精度校正法の必要性が観察された。そこで、高精度校正法を試験的に試み、簡易校正法に比べて当手法が忠実な波形採取には有効かつ不可欠であるが、実時間性と処理の複雑さに問題点があることを指摘し、これについては章を設けて、改めて考察することにした。

3次元空間における球面アレイ型マイクロフォンシステムの焦点走査にアレイフレームの水平回転と首振りによる2次元空間の走査に加え、球面アレイ軸上の電子走査の併用方法によって、システムには対称性が生じ、システムの設計・構築、ひいては構築システムの実験評価が極めて簡単化され、実用化へ向けても、相当有意義であることが立証された。また、振幅補正、遅延時間補正回路の構成にはデジタルポテンショメータ、オペアンプ、BBD素子、多段CRクロック発生器の利用により、一部の特性を除き、可搬型実時間システムが一応構築できたと考えている。

4.4 本章のまとめ

本章では、構築システムの基本特性について、本学講堂にてデータを採取し、実験的に評価した。点状音源として小型スピーカを用い、スピーカからの放射信号をモニターするため、その前面から1m離れた所に設置した高性能マイクロフォンによる受信信号によってこれを代用し、システム特性評価の参照信号として使用した。システムの基本特性を評価するため、音源信号として、単一周波信号と帯域波のFM変調波を用い、システムの対称性から、音源位置は焦点周りの左右、前後1m、2mと5m点と選定し、各測定点における音源に対して、理論・数値解析に用いた方法で、システムの基本特性を評価した。

合焦機能を持たせることにより、構築システムは高感度、鋭指向性を呈することを感度空間分布の実験評価により立証した。また、方位方向分解能は約3.9degree/m係数で波長及び焦点とアレイ間の距離に線形関係していること、距離方向感度分解能は距離に依存しないこと、

帯域波に対するシステムの感度分布は単一周波の場合より、シャープな分解能を有し、しかも距離方向の合焦特性が優れていることが実験評価結果から分かった。

SNR 空間分布の実験評価では、マイクロフォンに混入した加法ノイズに対するシステム SNR の空間分布だけを評価した。その結果、システム SNR の実験値は理論計算値と非常に一致し、特に焦点では、43.8dB と設計値より僅か 1.2dB 低いだけという良好な結果が得られた。

相対受信 RMS 誤差の実験評価では、マイクロフォン素子特性のバラツキ簡易校正法を採用し評価した結果から、焦点の周りにおいては RMS 誤差実験値が理論値とよく一致しているが、焦点から離れると、実験値と理論値の隔りが次第に大きくなっていることが分かった。高精度校正法を基礎的に試みた結果、両者の間でよい一致性が見られ、高精度校正法の必要性が観察された。