

第 6 章

最適振幅荷重採用構築システムの実験評価結果

前章では、最適振幅荷重を導出し、それを採用したシステムの基本特性を理論・数値解析により評価した。この章では、同様な最適振幅荷重を採用したシステムの基本特性を実験的に評価した結果を示す。その際、第 3 章で設計・構築した基本システムの振幅荷重 $r_{f,ij}$ の代わりに前章で導出した式 (5.13) の最適荷重を用い、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、基本システムの実験評価と同じく、簡易校正法を用いることにした。また、前章の理論・数値解析の結果により、最適荷重採用システムの実験評価は近方場で行うことにした。実験データの採集は本研究室室内音響測定室で行った。

6.1 実験評価方法

実験評価に際して、データの採取は、基本システムと同じく図 4.1 の実験機器設定に従って行った。また、音響測定室内 (長:3.4m, 幅:3.2m, 高:3m) に置いて、焦点の周りに図 6.1 に示す実験評価用音源位置。即ち焦点とその左右, 前後に, 各 0.25m, 0.5m, 0.75m のところに音源を置き換えては行った。その際、基本システムの実験評価データ採取と同様に、スピーカの前面 0.25m の所に設置した高性能マイクロフォンによる音源信号モニター出力と最適振幅荷重採用システムの出力を同時に記録した。焦点を球面アレイ軸上中心から 0.75m, 1m の所に設定した。

6.2 感度空間分布の評価結果

基本システムの感度空間分布の評価方法と同様な方法で、単一周波数感度分布の評価には、周波数 1kHz, 3kHz, 5kHz の正弦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は、帯域 100Hz~6.0kHz の FM 変調波に対するシステムの出力を用い、高性能マイクロフォンの出力と比較して、感度分布を算出した。

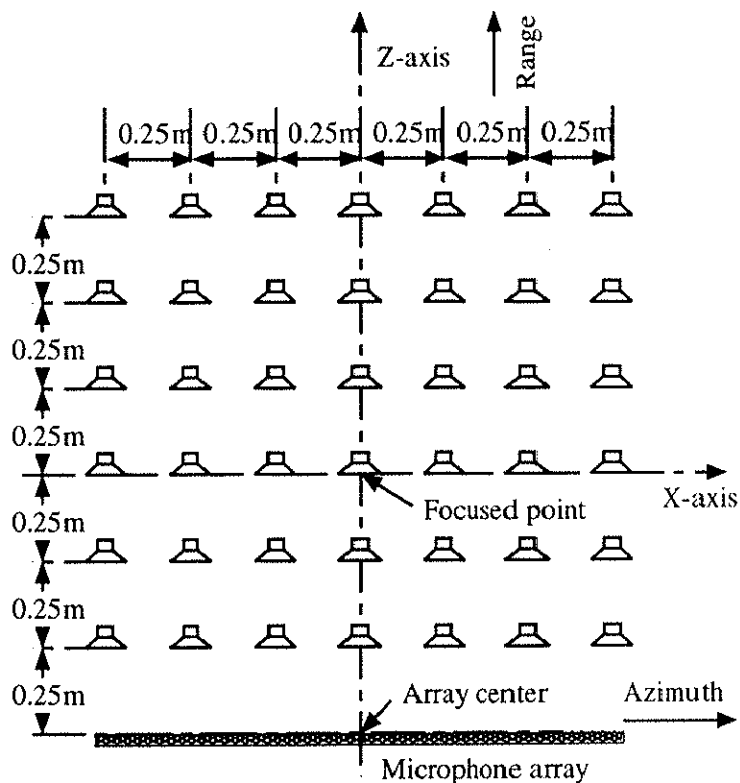


図 6.1: Experimental arrangement of a sound source and microphone system, when a focus point being 0.75m apart from the array center.

6.2.1 単一周波感度分布の評価結果

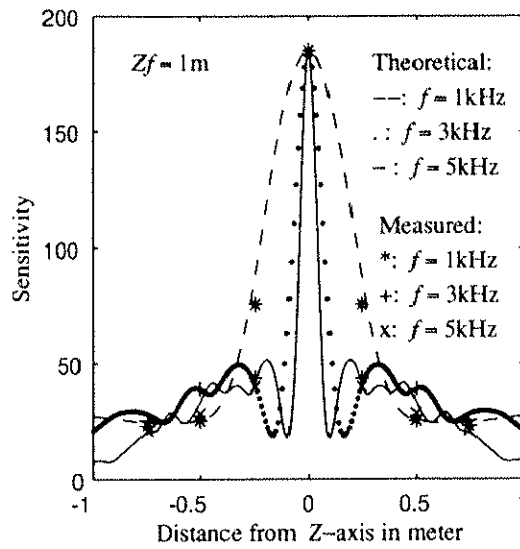
システムの焦点を球面アレイの軸上，アレイ中心から 1m 離れた所に設定した場合，単一周波の正弦波に対する最適荷重採用マイクロフォンシステムの方角方向感度分布の実験評価結果を図 6.2 に示す．同図には，実験値並びに理論・数値解析値も表示してある．破線，点線，実線はそれぞれ周波数 1kHz, 3kHz と 5kHz の正弦波に対するシステムの方角方向感度分布の理論・数値解析結果を表し，*, +, × らのマークは実験値を表す．図 6.2 から，近方場においても単一周波数の正弦波に対するシステムの感度空間分布特性の理論・数値解析値と実験値はよく一致することが分かった．

方角方向における感度分布の実験評価と同様の設定の下で，単一周波数 3kHz の音源に対する最適荷重採用構築マイクロフォンシステムの距離方向感度分布の実験評価結果を図 6.3 に示す．同図では，各点の感度値（理論・数値解析値と実験値共に）は焦点にある音源に対するシステムの感度で正規化され，dB 単位の等高線で表されている．また，実線は理論・数値解析値，破線は実験感度分布の等高線である．等高線の重なり具合から見ると，実験評価値と理論・数値解析値とはほぼ一致していることは明らかである．また，焦点付近に於てマイクロ

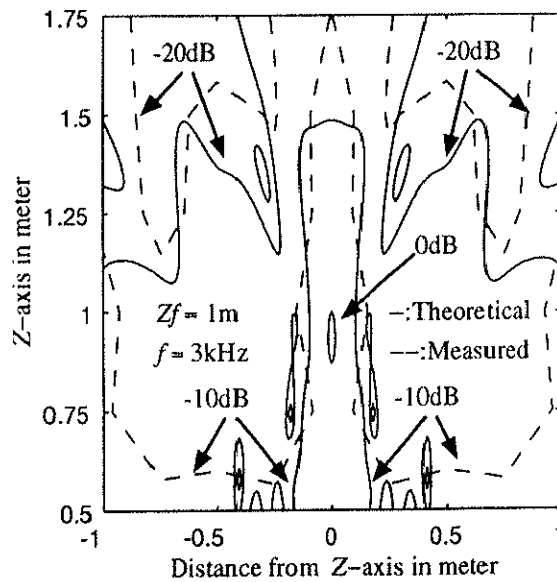
フォンシステムは高い感度を有し、音源が焦点から離れるにつれて、次第に小さくなるなどのことが、方位方向と共に距離方向の結果からも実証された。

システムの焦点をさらに球面アレイの近方、軸上0.75mに設定した場合、単一周波音源に対する方位、距離の両方向における最適荷重採用システムの感度空間分布の実験評価結果を、それぞれ図6.4と図6.5に示す。測定値と理論値の表示法は図6.2と図6.3と同様である。

以上の方位、距離の両方向の実験評価結果から、本最適荷重採用構築球面アレイ型マイクロフォンのシステム感度空間分布の実験値は理論・数値解析値とよく一致していること、並びに近方場に於て理論予測通り、特に優れた合焦性を示すことが分かった。



⊗ 6.2: Experimentally evaluated azimuth sensitivity distributions of the system for sinusoidal signals at the focus point being 1m apart from the array center. The measured values for frequencies 1kHz, 3kHz, and 5kHz are shown by symbols of *, +, and ×, respectively, together with broken, dotted, and solid lines representing the corresponding theoretically expected values, respectively.



⊗ 6.3: Experimentally evaluated range-azimuth sensitivity distributions of the system for a sinusoidal signal of frequency 5kHz, when the focus point being 1m apart from array center. The theoretically expected and measured values normalized by that at the focus point are denoted in decibels, and shown by solid and broken contour lines, respectively.

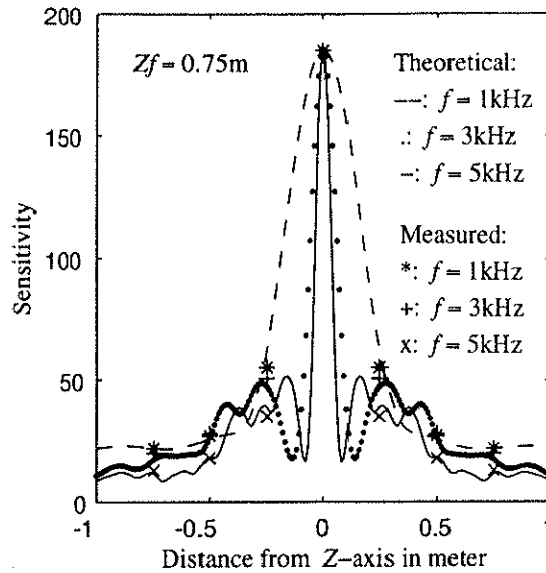


图 6.4: Experimentally evaluated azimuth sensitivity distributions of the system for sinusoidal signals, when the focus point being 0.75m apart from array center. The measured values for frequencies 1kHz, 3kHz, and 5kHz are shown by symbols of *, +, and ×, respectively, together with broken, dotted, and solid lines representing the corresponding theoretically expected values, respectively.

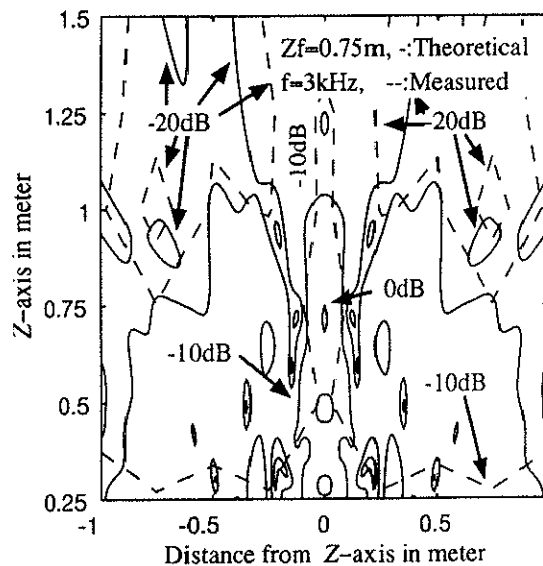


图 6.5: Experimentally evaluated range-azimuth sensitivity distributions of the system for a sinusoidal signal of frequency 5kHz, when the focus point being 0.75m apart from array center. The theoretically expected and measured values normalized by that at the focus point are denoted in decibels, and shown by solid and broken contour lines, respectively.

6.2.2 帯域波感度分布の評価結果

最適荷重採用マイクロフォン系の帯域波音源に対する周波数平均感度空間分布の実験評価法は、単一周波音源の場合に用いた方法と同じものを採用した。

焦点を球面アレイ軸上中心から 0.75m の所に設定した場合、有限な帯域幅 $B_H=2\text{kHz}$ の音源信号に対する、方位方向の周波数平均感度空間分布の実験評価結果を図 6.6 に示す。ここでは、帯域幅一定、音源信号の中心周波数を 2kHz, 3kHz と 4kHz と変えてある。また、周波数平均感度分布の表示の仕方は、単一周波感度分布図 6.4 と同じである。

図 6.4 の単周波 3kHz の音源に対するシステムの感度分布と比べると、帯域幅 2kHz、中心周波数 3kHz の音源信号に対して、方位方向におけるシステムの周波数平均感度分布範囲は、単一周波数の場合より、狭くなっていることが明らかである。それ故、帯域信号に対するシステムの合焦性はよくなっていることが理論、実験の両結果から分かった。また、図 6.6 の結果より理論・数値解析値と実験値とがよく一致することも分かる。

方位方向と同様な焦点設定の下、帯域幅 $B_H=2\text{kHz}$ 、中心周波数 $f_c=3\text{kHz}$ の有限帯域音源に対する距離方向のシステム感度空間分布の実験評価を図 6.7 に示す。表示方法は単一周波数音源に対するシステムの距離方向の感度分布表示法と同じである。図 6.7 から分かるように帯域 [2kHz,4kHz] の音源信号に対して、システムの周波数平均感度分布は、近方場に於て方位方向に比べて距離方向の方がシャープな分解能を有している。これは有限帯域音源信号に対する系の特有な特性である。同図の等高線から見ると、実験評価結果は理論・数値解析結果と良く一致していることも分かった。

単一周波と帯域波に対する最適荷重採用システム感度分布を比べると、帯域波感度分布の方が特に距離方向において、優れた合焦性を有することが分かった。

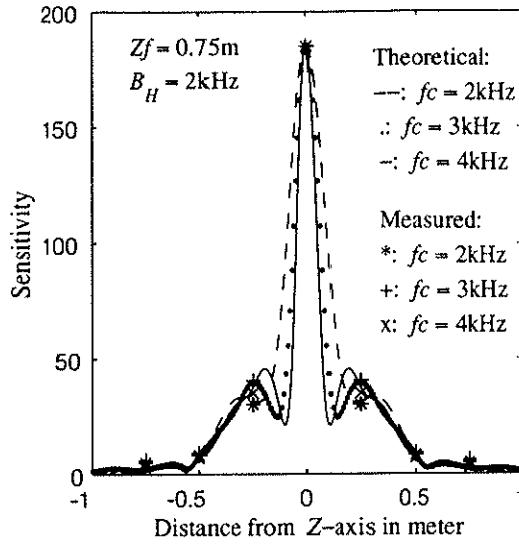


Figure 6.6: Experimentally evaluated frequency averaged azimuth sensitivity distributions of the system for FM signals, when the focus point being 0.75m apart from array center. The measured values for center frequencies 2kHz, 3kHz, and 4kHz are shown by symbols of *, +, and ×, together with broken, dotted, and solid lines representing the corresponding theoretically expected values, respectively.

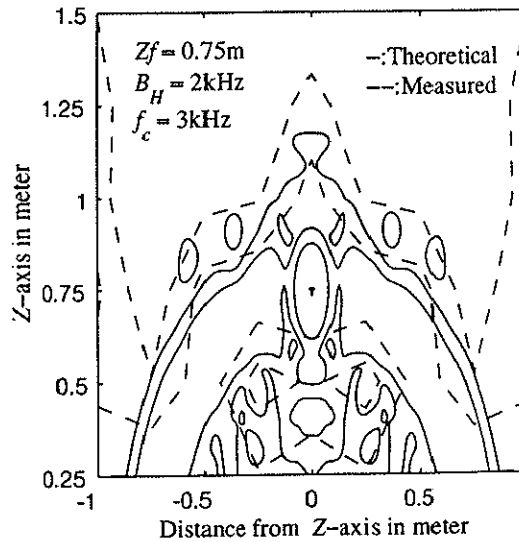


Figure 6.7: Experimentally evaluated frequency averaged range-azimuth sensitivity distributions of the system for an FM signal, when the focus point being 0.75m apart from array center. The theoretically expected and measured values normalized by that at the focus point are denoted in decibels, and shown by solid and broken contour lines, respectively.

6.2.3 空間雑音からの音源分離実験結果

球面アレイ型マイクロフォンシステムでは、その受動合焦機能により、帯域波音源に対する感度空間分布は、優れた空間分解能力をもつことが理論・数値解析、実験の両側面から明らかにされた。この節では、構築実験系を用い、焦点とその近傍に広帯域の空間雑音が存在する場合に、システムの受信出力を近方場で測定し、それらが分離できるかどうかの基礎実験を行った結果を示す。

システムの焦点を軸上アレイ中心から 1m の所に設定し、同振幅のランダム雑音(周波数範囲 5kHz)を焦点とその左右、前後 0.5m の各 5 点に置き、実験系の出力を記録し、その波形を図 6.8 に示す。

本測定結果から分かるように、焦点にある雑音(広帯域)に対しては、高い感度で受信されているが、焦点から 0.5m 離れた同様の雑音に対する受信信号レベルは、焦点上にある雑音のレベルの 1/4 ~ 1/5 に下がっており、広帯域空間雑音が明確に分離できている。

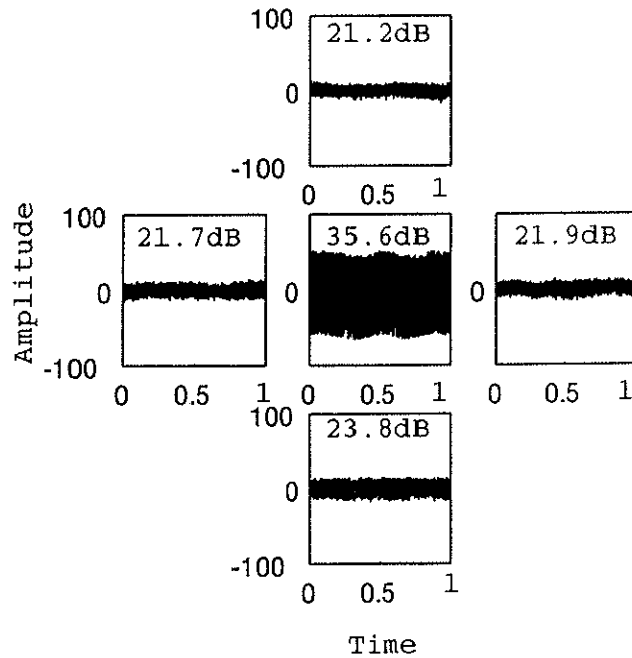


図 6.8: Experimentally measured outputs of the system for random noise signals of frequency bandwidth of about 5.0kHz around the focus point 1m apart from the array center.

6.3 SNR 空間分布の評価結果

最適振幅荷重採用の球面アレイ型マイクロフォンシステムの焦点を球面アレイ軸上中心から 0.75m の所に設定し、100Hz から 6.0kHz までの帯域の FM 変調波音源に対して、図 6.1 に示した焦点周りの所定の測定点において音源信号の有無に応じて記録したシステムの合成出力を測定することにより基本システムの評価で用いたものと同じ方法で加法ノイズに対するシステムの SNR 分布を評価した。その結果を図 6.9 に示す。明らかに、焦点の周りにおいて最適荷重採用マイクロフォンシステムは理論通り、高 SNR を有していることが分かる、特に焦点では理論予測値 45.3dB とほぼ同等の 45.0dB 以上の高 SNR を有することが分かる。

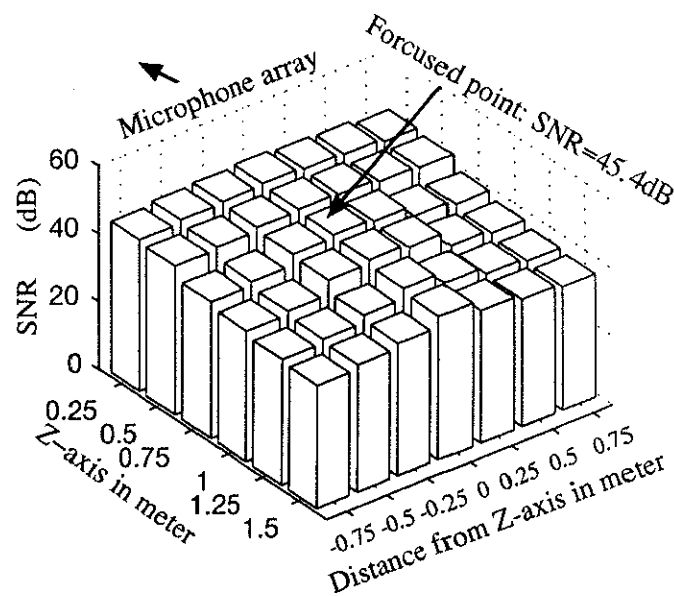


図 6.9: Experimentally evaluated SNR distribution of the system for an FM signal of instantaneous frequency 100Hz to 6.0kHz around the focus point being 0.75m apart from the array center in a plane including the axis.

6.4 相対受信 RMS 誤差空間分布の評価結果

最適振幅荷重採用システムの相対受信 RMS 誤差の空間分布の実験的評価については、第4章の基本システムの同特性の実験評価と同じ方法を用いた。感度分布の設定と同様な焦点設定で、帯域 1.0kHz~2.0kHz, 1.0kHz~3.0kHz, 1.0kHz~4.0kHz, 1.0kHz~5.0kHz の FM 変調波を用いた場合の方位方向におけるシステムの相対受信 RMS 誤差の実験評価結果を図 6.10 に示す。図 6.10 から分かるように、焦点の付近では、相対受信 RMS 誤差の理論・数値解析値と実験値とがよく一致している。しかし音源が焦点から離れていくと、実験値と理論・数値解析値の隔りが多少大きくなってゆくことが分かる。

また、同じ焦点設定で、周波数範囲 1.0kHz から 5.0kHz までの FM 変調波音源信号に対して、距離方向におけるシステムの相対受信 RMS 誤差分布の実験評価結果を図 6.11 に示す。方位方向における相対受信 RMS 誤差の分布と同じ、音源が焦点の近くにある場合、システムの相対受信誤差は理論・数値解析値と良く一致しているが、音源が焦点から離れると、両者の隔りが多少大きくなっている。

図 6.10 と図 6.11 に示したように、近方場では、方位、距離両方向共に、焦点近傍の音源に対する受信 RMS 誤差は小さいが、音源が焦点から離れると受信 RMS 誤差は多少大きくなることが分かった。また理論値より測定値の方がやや大きいことも読み取れる。従って、基本システム実験評価の分析と同様、高精度の校正方法が構築システムに要求されると思われる。

そこで、遠方場で採取した各チャンネルの伝達関数の逆数で各チャンネルの出力に対して、フィルタリングを行い、コンピュータ上で求めた高精度校正法使用のシステムの相対受信 RMS 誤差の結果を図 6.12 と図 6.13 に示す。これを上の簡易校正法使用の結果と比べると、明らかに近方場においてマイクロフォン素子特性バラツキの高精度校正の効果も見られた。

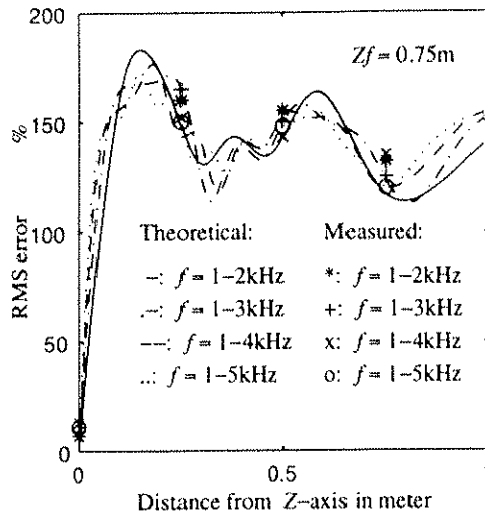


图 6.10: Experimentally evaluated relative azimuth RMS error distributions of the system for received FM signals of instantaneous frequency f , when the focus point being 0.75m apart from the array center. The simple compensation is used, and the measured values for frequencies 1kHz~2kHz, 1kHz~3kHz, 1kHz~4kHz, and 1kHz~5kHz are shown by symbols of *, +, ×, and o respectively, together with solid, broken with a dot, dotted line, and broken representing the corresponding theoretically expected values, respectively.

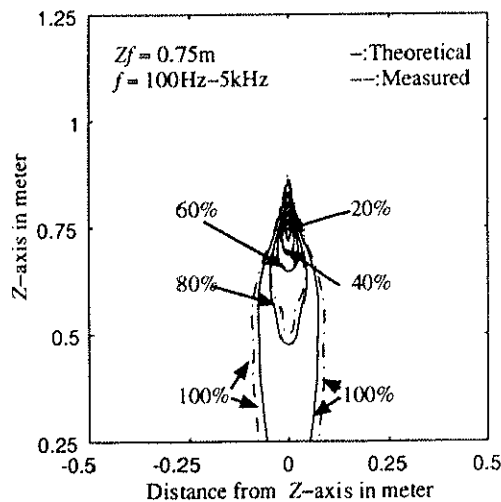
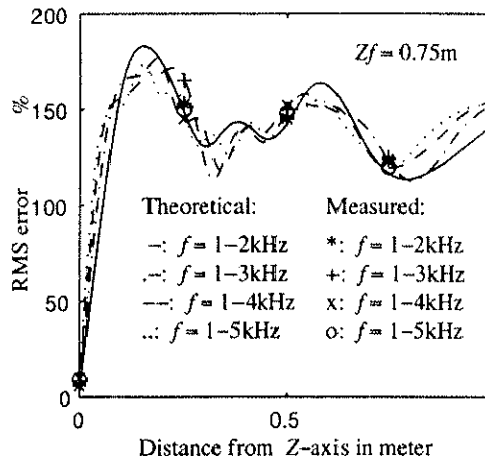
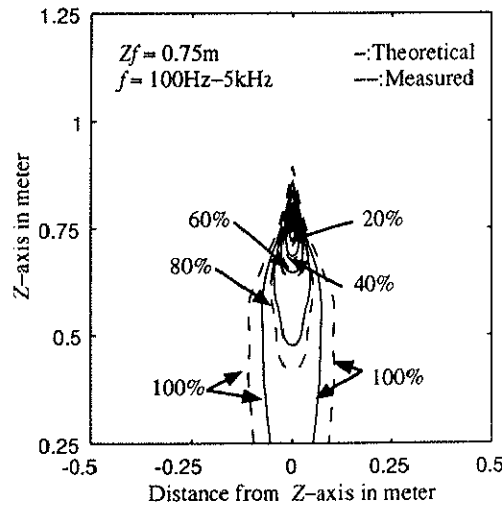


图 6.11: Experimentally evaluated relative range-azimuth RMS error distributions of the system for received an FM signal of instantaneous frequency 100Hz to 5.0kHz, when the focus point being 0.75m apart from the array center. The simple compensation is used, and the theoretically expected and measured values normalized by that at the focus point are denoted in percents, and shown by solid and broken contour lines, respectively.



⊗ 6.12: Experimentally evaluated relative azimuth RMS error distributions of the system for received FM signals of instantaneous frequency f , when the focus point being 0.75m apart from the array center. The full compensation is used, and measured values for frequencies 1kHz~2kHz, 1kHz~3kHz, 1kHz~4kHz, and 1kHz~5kHz are shown by symbols of *, +, ×, and o respectively, together with solid, broken with a dot, dotted line, and broken representing the corresponding theoretically expected values, respectively.



⊗ 6.13: Experimentally evaluated relative range-azimuth RMS error distributions of the system for received an FM signal of instantaneous frequency 100Hz to 5.0kHz, when the focus point being 0.75m apart from the array center, The full compensation is used, and the theoretically expected and measured values normalized by that at the focus point are denoted in percents, and shown by solid and broken contour lines, respectively.

6.5 最適荷重システム実用化へ向けての考察

焦点におけるシステムの最小感度を拘束条件として、SNR 向上度を最大化にする形で、導出した最適荷重採用システムの実験評価結果から、当最適システムが、特に近方場の音源に対して、高感度、高 SNR、焦点近傍では忠実な波形採取能力を有することが分かった。また、前章の理論・数値解析の結果からも既に予測されるように、中遠方場に於ては、最適振幅荷重採用システムが基本システムとほとんど同様な優れた機能を有していることも明らかにされている。これらの結果から、提案振幅荷重の最適化手法で決定した最適振幅荷重は近中遠距離場に渡って有用なものであると判断される。それ故、当マイクロフォンシステムの実用化に際しては、基本システムで発見的に採用した振幅荷重よりもここで用いた最適荷重を採用した方が有利であると結論される。

一方、最適荷重採用システムの相対受信 RMS 誤差の実験値は基本システムより、多少理論値に近い特性を示したが、より高精度の波形採取のためには、最適荷重採用システムに対しても使用マイクロフォンの高精度校正法の使用も必須である。

6.6 本章のまとめ

本章では、前章で導出した最適荷重を既構築実験系に組み込み、最適荷重採用マイクロフォンシステムを構成し、その基本特性を実験的に評価した。マイクロフォンシステムの感度下限を 45.3dB として、基本システムに用いた同様の手法でシステムの感度、SNR、相対受信 RMS 誤差の空間分布を近方場も含めて実験的に評価した。その結果、相対受信 RMS 誤差を除き、感度分布及び SNR 分布の実験評価結果と前章の理論・数値分析結果とがよい一致を示すことが明らかになった。相対受信 RMS 誤差の実験評価に於ては、マイクロフォン素子のバラツキの簡易校正と高精度校正の結果を合わせて示し、その有効性と近方場での特徴を明らかにした。

また、本章では合焦走査により、焦点にある音源を焦点から外れた雑音から分離聴取できることが理論・数値解析より明らかにされていたが、これに対しても基礎的実験による立証結果を得ることができた。