

第 2 章

球面アレイ型マイクロフォン基本システム

波動応用計測に於て、高感度受信には複数個センサを使うことが電波分野等ではよく知られ、電波望遠鏡による宇宙電波のキャッチ、微弱信号のレーダー受信などに使われている。序論で述べたように、電波分野と同様、音響分野でも複数マイクロフォンの同時受信も既に注目されてきた。しかし、音響分野は電波分野と違い、相対的に広帯域波が多い。しかも、音源が割合近くにある場合が多く、音波の伝播は球面的である。点音源から放射される球面波を適切に採取する方法としては、球面状に配置した多数マイクロフォンで同時受信する事が適切であると考えられる。このように、音波の球面伝播特性から、マイクロフォンの配置を球面状にすることで、システムに対称性を持たせると同時に、必要となる振幅補正、遅延補正量の範囲も相対的に小さくできる。これにより、システムの具体的構築に際しては、これらの制御量の設定精度を向上できると期待できる。

我々は先に 1 次元センサアレイを用いた望遠マイクロフォン系を提案し、円弧状アレイ型マイクロフォンシステムの高感度、鋭指向特性、合焦機能を示し、これにより望遠マイクロフォン系が実現可能であることを明らかにした。しかし、1 次元アレイでは、アレイの開口方向と直交する方向には、分解能、合焦性を持っていないことも判明した [12, 13]。そこで、球面アレイ型マイクロフォンシステムを提案した [14, 15]。以下、本章ではこれについて議論する。

2.1 3 次元受動合焦原理と波動の球面伝播

マイクロフォンシステムにカメラのような合焦機能を持たせることで、周囲雑音から目的音源を分離できると考えられる。これを実現するため、多数マイクロフォンを球面上に配置し、それらの受信信号に対して、音波の球面伝播に伴う時間遅れを適切な遅延時間で補正することによる同相化の後、合成してシステムの出力とする。この構成では、狙った点だけに焦点を絞り、そこにある音源信号を正確に採取できる球面アレイ型マイクロフォンシステムを提案した。狙った音源が周囲雑音に埋められていても、また、3 次元空間のどこにあっても、このような合焦機能のあるマイクロフォンシステムを用いて、焦点の 3 次元空間走査により、音源信号を

高感度で受信，周囲雑音から分離できることは本研究で開発とするマイクロフォンシステムの特長である．これは波動の球面伝播原理を利用した，いわゆる受動合焦機能，あるいは空間フィルタリング機能である．以下，その原理について述べる．

2.1.1 3次元受動合焦原理

球面アレイ型マイクロフォンシステムの基本構成を図 2.1 に示す．

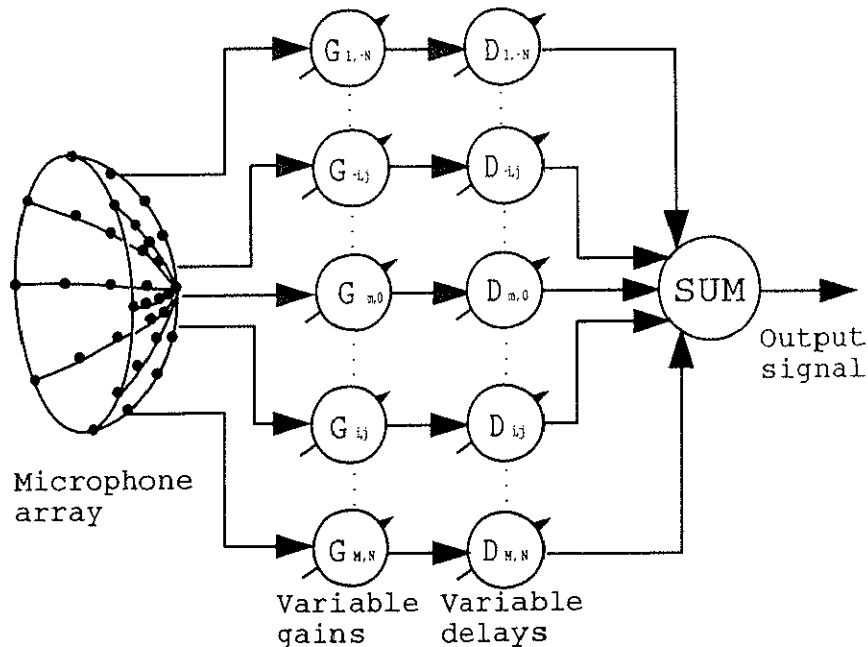


図 2.1: Fundamental construction of the microphone system with a spherical array.

このシステムでは，予め目的音源位置を想定して，その位置にシステムの焦点を合わせるように可変のゲイン素子 G_{ij} と遅延素子 D_{ij} で各マイクロフォン出力に振幅補正と遅延補正を加える．このように振幅補正，遅延補正された各マイクロフォン出力信号を加算し，システム出力とする．その際，焦点，各マイクロフォン間の距離の情報を用いて，球面伝播に伴う振幅減衰を補償する形で可変ゲイン G_{ij} を，また各マイクロフォンの受信信号を同相化するように遅延時間 D_{ij} をそれぞれ決定する．その結果，球面状に $(2MN + 1)$ 個マイクロフォンを配置した場合，焦点にある音源に対しては，システムの絶対感度は 1 個の場合の $(2MN + 1)$ となり，システム出力信号は，目的音源信号の振幅を $(2MN + 1)$ 倍した信号となる．また，各マイクロフォンに加わる独立なランダムノイズは相殺するように加算されるが，一方音源信号はそのまま加算されるので，その分だけ，つまり $(2MN + 1)$ 倍に SNR が向上される．従って，マイクロフォンシステムでは，焦点を目的音源に設定するというこ

音源を分離でき、しかも可変のゲイン素子と遅延素子の使用により焦点を動的に走査し、音源を探査することができる

しかし、可変のゲイン素子 G_{ij} のゲインと可変の遅延素子 D_{ij} の遅延量を 3 次元空間での任意の焦点設定に対して、電子回路で実現し、焦点を空間的に走査することは必ずしも簡便な方策ではないと考えられる。そこで、実現可能性の観点から、焦点を球面アレイの中心軸上に設定すると限定し、焦点の全空間に渡る走査は球面状アレイの機械的な回転と首振りとあわせて、実現することとする。このような限定では、システムの制御と構成はかなり簡単になると考えられる。

2.1.2 波動の球面伝播

近方と遠方場音源を含めて考える場合、点音源から放射する音波は球面的に伝播してくるという考えが一般的である。このような考えでは、音源信号の振幅は伝播距離の増加に連れ、反比例関係で減少し、時間的には伝播距離分だけ遅れることが良く知られている。ここで、一般的に音源放射信号 $s(t)$ をフーリエ表現すると、

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) \exp(j2\pi ft) df \quad (2.1)$$

となる。この信号を距離 r だけ離れた無指向性マイクロフォンで検出すると、その検出信号は

$$x(t) = \frac{1}{r} s\left(t - \frac{r}{c}\right) \quad (2.2)$$

と書くことができる。ただし、 c は音速である。さらにこれを音源のフーリエ表現式で表現すると、次式となる。

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) \frac{1}{r} \exp\left(-j2\pi f \frac{r}{c}\right) \exp(j2\pi ft) df \quad (2.3)$$

即ち、音源の周波数 f のスペクトル成分 $S(f)$ が距離 r だけ伝播すると、受信信号 $x(t)$ のフーリエスペクトル $X(f)$ は

$$X(f) = S(f) \frac{1}{r} \exp\left(-j2\pi f \frac{r}{c}\right) \quad (2.4)$$

の形となる。つまり、球面伝播の仮定では、距離 r の伝播に伴って、音源信号の振幅が $1/r$ 倍になり、位相が $2\pi fr/c$ で遅れる。これは単一周波に近い波動を扱う、従来の電波などの領域における指向特性評価の基準式である [1]。

2.2 システム基本特性の理論・数値解析結果

マイクロフォン素子の球面状配置については、いろんな配置方案が考えられる。システムの簡単性、対称性、実現性、可搬性等を考慮し、提案システムには図 2.2 に示す球面アレイ配

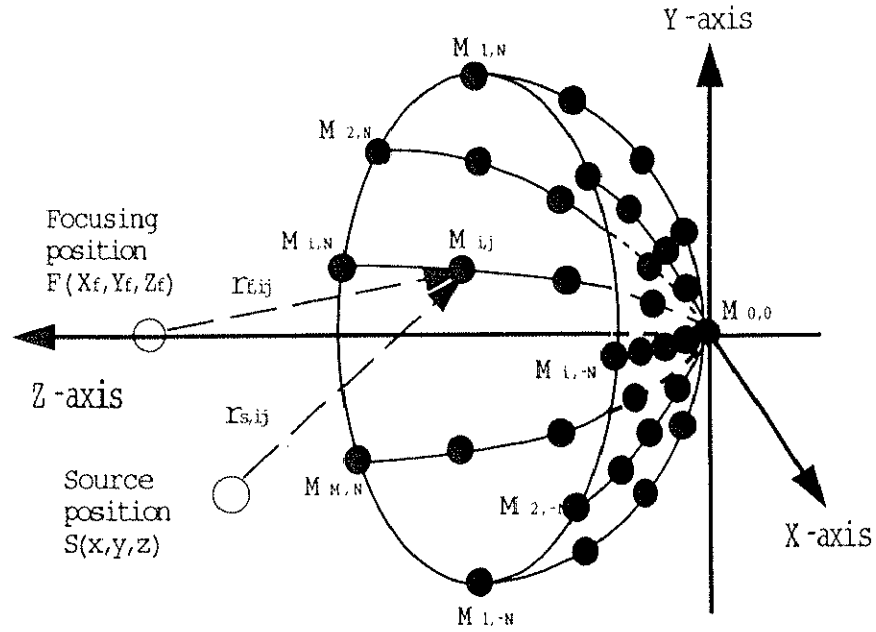


図 2.2: Arrangement of the microphone, sound source, and focusing point of the microphone system.

置を採用する．ここでは，焦点走査範囲の中心を中心とし，直交座標系 (X, Y, Z) の原点を通る，曲率半径 R_0 の円弧状に所定の球面開口直径に渡って，等間隔かつ原点に対称に原点を除く $2N$ 個のマイクロフォンを配置する．このような 1 次元円弧状アレイを Z 軸に関して，回転する方向に等角度で M 本を配置，また，原点にマイクロフォン 1 個を配置して，球面アレイを構成する．このような構成に於て，システム基本特性を検討する際，記述上便宜のため，同図 2.2 に示した座標系と音源，焦点，マイクロフォンの座標を使用する．

ここでは，一般的に音源の座標を $S(x, y, z)$ ，焦点の座標を $F(x_f, y_f, z_f)$ ，マイクロフォンの座標を $M_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ （但し i は 1 から M まで， j は $-N$ から N まで，マイクロフォンの総数は $(2MN+1)$ となる）とする．マイクロフォン M_{ij} ，音源間の距離を $r_{s,ij}$ で，また，マイクロフォン M_{ij} ，焦点間の距離を $r_{f,ij}$ で表す．

前節の波動球面伝播式 (2.1) より，位置 $S(x, y, z)$ にある音源に対して，距離 $r_{s,ij}$ だけ離れた球面状配置の無指向性マイクロフォン M_{ij} ， $1 \leq i \leq M$ ， $-N \leq j \leq N$ での検出信号は，波動の球面伝播下では，式 (2.5) となる．

$$x_{ij}(t) = \frac{1}{r_{s,ij}} s \left(t - \frac{r_{s,ij}}{c} \right) \quad (2.5)$$

システムの焦点にある音源信号に対して，球面上の各マイクロフォン出力には，最大遅延時間を有するものが存在する．このマイクロフォンの出力時刻をシステム出力時刻とし，これより

遅延時間が短いものには時間遅延 $D_{ij} = (r_{fmax} - r_{f,ij})/c$ を与えれば、焦点にある音源に対しては、球面上の各マイクロフォン出力の位相を合わせることができる。また波動の伝播に伴う振幅減衰を補償するため、時間遅延を与える前に各マイクロフォン出力を、焦点と各マイクロフォン間の距離分の大きさのゲイン $G_{ij} = r_{f,ij}$ で増幅し、振幅減衰補償を行う場合、球面アレイ型マイクロフォンシステムの合成出力 $x_o(t)$ は、式 (2.5) より次式となる。

$$x_o(t) = \sum_{i,j} \frac{r_{f,ij}}{r_{s,ij}} s \left(t - \frac{r_{s,ij} - r_{f,ij} + r_{fmax}}{c} \right) \quad (2.6)$$

ここで、音源信号 $s(t)$ のスペクトル式 (2.1) を、上式に代入すると、システム出力は次式で表せる。

$$x_o(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} df S(f) \exp \left(j2\pi f \left(t - \frac{r_{fmax}}{c} \right) \right) \sum_{i,j} \frac{r_{f,ij}}{r_{s,ij}} \exp \left(-j2\pi f \frac{r_{s,ij} - r_{f,ij}}{c} \right) \quad (2.7)$$

上式はフーリエスペクトル $S(f)$ を持つ音源信号の複素振幅が2重和で表される合焦操作により、焦点にある音源に対して、同相で荷重和され、時間的に r_{fmax}/c だけ遅れて、出力されることを示している。これは従来の波動を扱う分野における指向特性、や感度分布特性を評価するための基本式である。以下、式 (2.7) に従って、単一周波および帯域波に対するシステムの感度分布特性、SNR 分布特性、相対受信 RMS 誤差分布特性というシステムの基本3特性を理論・数値解析的に検討する。

2.2.1 感度空間分布

従来の研究では、マイクロフォンシステムの感度分布を議論した際、単一周波数あるいはそれに近い狭帯域音源を用い、電波分野で用いた方法で議論してきた [7, 8, 9, 10, 11]。しかし、電波分野と違い、音響信号は広帯域性であり、これを考慮にいった広帯域信号に対するシステムの感度分布を議論する必要もある。ここでは、球面アレイ型マイクロフォンシステムについて、従来使ってきた単一周波に対する感度分布と提案する帯域波に対する、いわゆる周波数平均感度分布を式 (2.7) に従って評価する。

(1) 単一周波感度分布

システムの合成出力式 (2.7) において、振幅1、単一周波数 f_0 の正弦波信号を音源信号とすれば、 $S(f) = \delta(f - f_0)$ とおくことにより、球面アレイ型マイクロフォンシステムの出力は、式 (2.8) となる。

$$x_o(t) = \exp \left(j2\pi f_0 \left(t - \frac{r_{fmax}}{c} \right) \right) \sum_{i,j} \frac{r_{f,ij}}{r_{s,ij}} \exp \left(-j2\pi f_0 \frac{r_{s,ij} - r_{f,ij}}{c} \right) \quad (2.8)$$

従って、音源座標 $S(x, y, z)$ にある単一周波数 f_0 の音源波に対するシステム感度を、 $x_o(t)$ の絶対値を取り、式 (2.9) で定義する。

$$A_p(x, y, z; f_0) = \left| \sum_{i,j} \frac{r_{f,i,j}}{r_{s,i,j}} \exp \left(-j2\pi f_0 \frac{r_{s,i,j} - r_{f,i,j}}{c} \right) \right| \quad (2.9)$$

式 (2.9) に示されているように、目的音源がシステムの焦点にある場合、各マイクロフォンと音源および焦点との距離は同一なので、明らかにシステムの感度は使用マイクロフォンの総個数倍 $(2MN + 1)$ となる。音源が焦点から離れると、各マイクロフォンと音源、焦点間の距離が異なるため、周波数 f_0 の単周波音源に対して、システムの感度も音源の位置により空間的に異なる。また、周波数が異なる単周波音源に対して、焦点を除いて、システムの感度分布も空間的に異なる。ここでは具体的な計算例を用いて、球面アレイ型マイクロフォンシステムの感度分布を検証する。

図 2.2 に示した球面アレイにおいて、曲率半径 R_0 を 20m とする、開口直径 1.472m の半球面上に、 $M = 4$ 、 $N = 23$ 、合計 $(2MN + 1) = 185$ 個のマイクロフォンを角度方向に 45 度間隔で 4 円弧、各円弧上に等間隔 $\Delta d = 3.2\text{cm}$ で 46 個、球面アレイ中心にマイクロフォン 1 個を配置し、焦点を球面軸上 $Z_f = 20\text{m}$ に設定した場合、音源が X-Y 平面と平行する $Z = Z_f$ 平面内にある場合のシステムの方位方向感度分布の計算結果の一例を図 2.3 に示す。また単一周波音源が X-Z 平面内にある場合のシステムの距離方向感度分布の計算結果の一例を図 2.4 に示す。前にも触れたように、球面状アレイを用いているため、X-Y 平面と平行する方向（方位方向）における球面アレイ型マイクロフォンシステムの合成出力の感度分布には対称性があるので、Z 軸から離れる距離という 1 変数の関数となっている。また、焦点を球面アレイの軸上にあるという前定では、球面アレイの中心から Z 軸に沿う方向（距離方向）におけるシステムの感度分布にも対称性があるので、Z 軸から離れる距離と球面中心軸に沿う方向の距離という 2 変数の関数となっている。従って、方位方向の感度分布と距離方向の感度分布（X-Z 平面内の感度分布で代表）という 2 組の感度分布によって、球面アレイ型マイクロフォンシステムの感度空間分布が表される。これは球面状マイクロフォン配置を用いたシステムの本質的な特徴であり、空間的な合焦性を有することを示すものである。

図 2.3 では、音源信号の周波数をパラメータとして、方位方向の感度分布を実目盛で表している。図 2.4 では周波数 ($f = 5\text{kHz}$) の音源信号に対して距離方向における感度分布を、焦点におけるシステム感度 $(2MN + 1)$ で規格化した上、デシベル単位の等高線で表し、広い範囲の感度分布をまとめて表示できるようにしてある。図 2.3 と図 2.4 に示したように、方位、距離の両方向ともに、焦点にある音源に対してシステムの感度が高く、焦点外にある音源に対してシステムの感度は明らかに小さくなっている。また、図 2.3 から、音源信号の周波数が高いほど、システムの指向特性は狭くなること、図 2.4 から、音源が球面アレイに近いほど、シ

システムの感度が高くなることが分かる。これは式(2.9)からも分かるように、焦点を設定すると、システムの感度は音源と各マイクロフォンの距離 $r_{s,j}$ に反比例する振幅係数で、荷重平均されていることに起因する。これはその振幅特性に関する限り、目的音源に比べて、目的音源よりマイクロフォンシステムに近い音源（あるいは雑音）の方が大きな重みで検出されるという難点が球面アレイ型マイクロフォンシステムにもあることを意味している。これらの感度分布結果は従来の遠方場線形アレイの結果とも符合している。

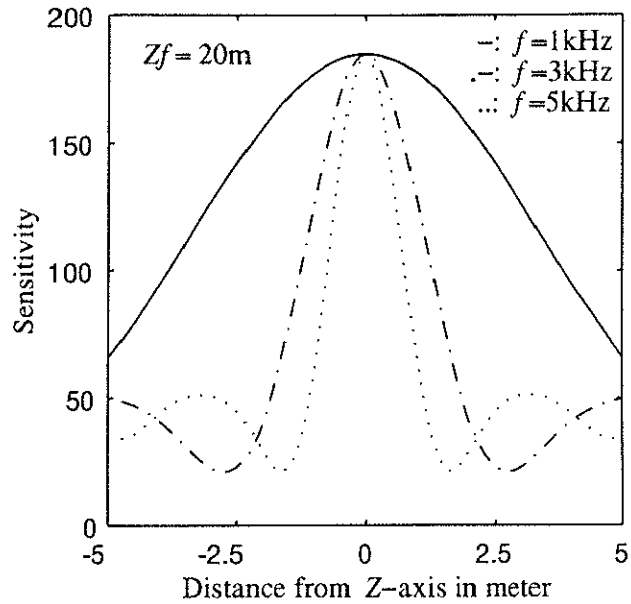


图 2.3: Numerically evaluated azimuth sensitivity distributions of the system for sinusoidal signals, when the focus point being 20m apart from the array center. The frequency f is changed as 1kHz, 3kHz and 5kHz.

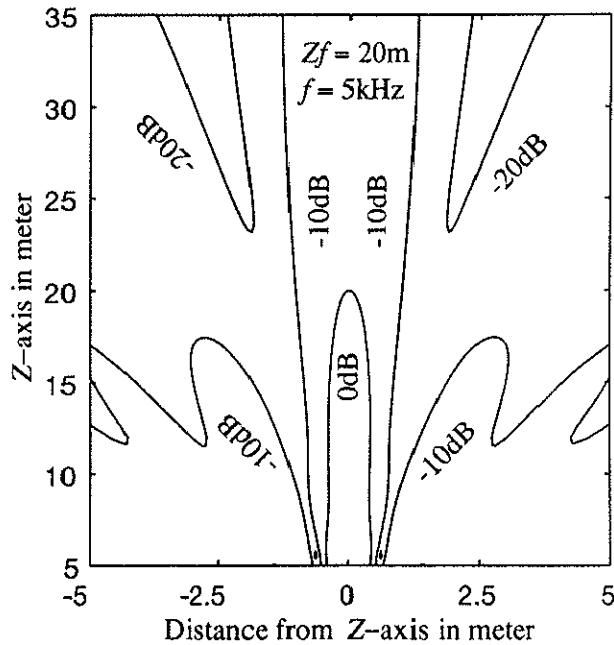


图 2.4: Numerically evaluated range-azimuth sensitivity distribution of the system for a sinusoidal signal, when the focus point being 20m apart from the array center. The frequency f is 5kHz, and the sensitivity values normalized by that at the focus point are denoted in decibel.

(2) 帯域波感度分布

前節でシステムの感度分布を検討した際、単一周波数の正弦波音源を用いた。しかし、実際の計測では音源信号が単一周波あるいはそれに近い場合は稀であり、有限帯域幅を有することが多い。それ故、式(2.9)の右辺の絶対値記号を除去した形で、単一周波数に対するシステムの複素感度を定義すれば、これにより帯域波に対する感度（以下、周波数平均感度と称する）を合成できる。すなわち、このような複素感度に音源信号のフーリエスペクトル $S(f)$ を乗じた後、周波数 f についてその帯域にわたって積分し、その結果を該当帯域にわたる $|S(f)|$ の積分値で正規化すれば、帯域波に対する周波数平均感度を定義できる。この意味では、先に定義した単一周波音源に対する感度は基本的なものである。このような周波数平均感度が実際の意味を持つのは、該当帯域内で $S(f)$ がほぼ一様な特性を持つ場合であり、この前提が満たされなくなるに従い、その実際的価値は減少する。何故ならば、音源信号のフーリエスペクトル $S(f)$ の形状は一般に未知なためである。

以下、音源信号のフーリエスペクトルがある帯域 $B_H = [f_l, f_h]$ にわたって、ほぼ一様な場合における球面アレイ型マイクロフォンシステムの周波数平均感度空間分布について議論する。中心周波数 f_c 、帯域幅 B_H の帯域音源信号に対する周波数平均感度の定義については、式(2.8)の2重和を、その帯域幅にわたって周波数に関して、積分、平均化することにより、帯域幅 $B_H = f_h - f_l$ におけるシステムの周波数平均感度を定義し、式(2.10)で与える。

$$A_p(x, y, z; B_H, f_c) = \left| \sum_{i,j} \frac{r_{f,ij}}{r_{s,ij}} \frac{1}{B_H} \int_{f_l}^{f_h} \exp\left(-j2\pi f \frac{r_{s,ij} - r_{f,ij}}{c}\right) df \right| \quad (2.10)$$

式(2.10)において、 $\alpha = (r_{s,ij} - r_{f,ij})/c$ とおくと、

$$\frac{1}{B_H} \int_{f_l}^{f_h} \exp(j2\pi f \alpha) df = \exp(j\pi f_c \alpha) \frac{\sin(\pi B_H \alpha)}{(\pi B_H \alpha)} \quad (2.11)$$

より、システムの周波数平均感度は、式(2.12)と変形できる。

$$A_p(x, y, z; B_H, f_c) = \left| \sum_{i,j} \frac{r_{f,ij}}{r_{s,ij}} \frac{\sin(\pi B_H \alpha)}{(\pi B_H \alpha)} \exp(-j2\pi f_c \alpha) \right| \quad (2.12)$$

式(2.9)の単一周波音源に対するシステムの感度特性と比較すると、等価的に中心周波数 f_c に対応する位相の合焦特性に加えて、 $\sin(\pi B_H \alpha)/(\pi B_H \alpha)$ 関数で決まる振幅補正係数が乗じられた形になっている。この振幅係数は、 $\alpha = (r_{s,ij} - r_{f,ij})/c$ が0から離れるにしたがい、 B_H に逆比例して急速に減少し、システムの合焦特性が強調される。従って、帯域幅 B_H の増加と共に、方位と距離両方向におけるシステムの合焦性が急速に向上するものと考えられる。

ここで、単一周波感度分布と同じ計算パラメータで、方位方向におけるシステムの周波数平均感度の分布について、帯域幅を $B_H=2\text{kHz}$ に一定し、中心周波数を 2kHz 、 3kHz 、 4kHz

と変えて計算した結果を図 2.5 に示す。図 2.5 に示した中心周波数 1kHz の場合の合焦特性は、前節の図 2.3 に示した単一周波感度分布に比べると、極端に狭くなり、感度の周波数平均による合焦特性の向上が、低周波数域で特に顕著であることが分かる。

方位方向の感度分布と同様な計算パラメータで、中心周波数を 3kHz、帯域幅を 2kHz とした場合の距離方向におけるシステムの周波数平均感度分布の計算結果を図 2.6 に示す。明らかに距離方向の感度分布特性では、球面アレイの軸上の焦点位置 $Z_f=20\text{m}$ に焦点が絞られており、前節の図 2.4 に示した単一周波音源に対するシステムの距離方向における感度分布の結果より、更に極端に合焦性能が向上している。

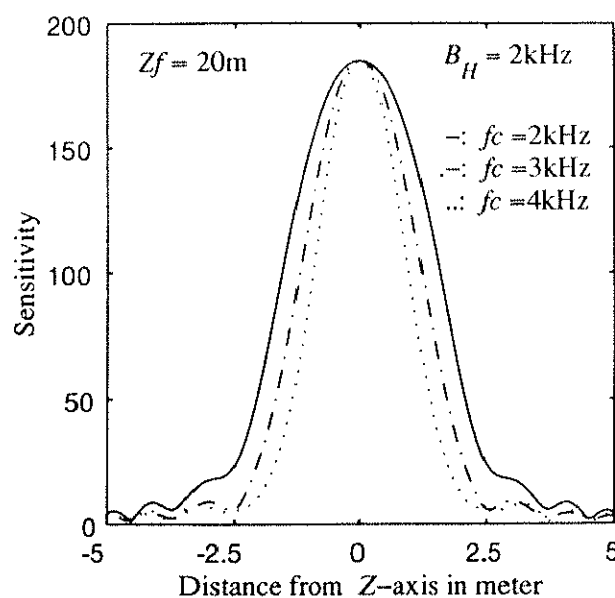
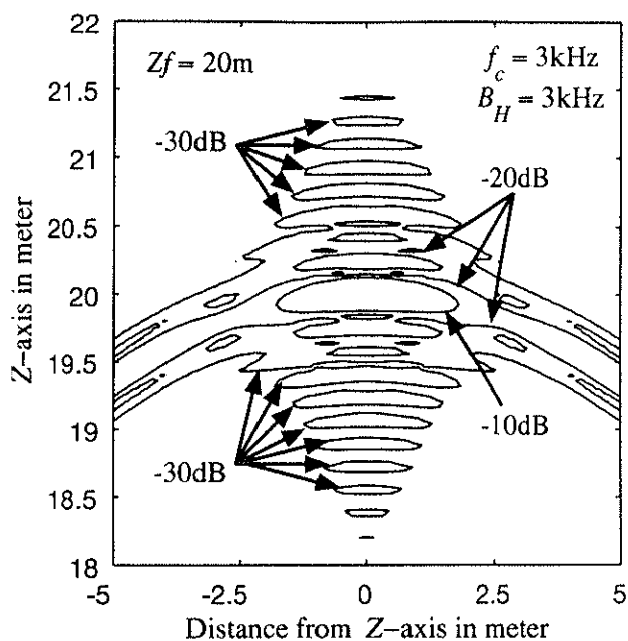


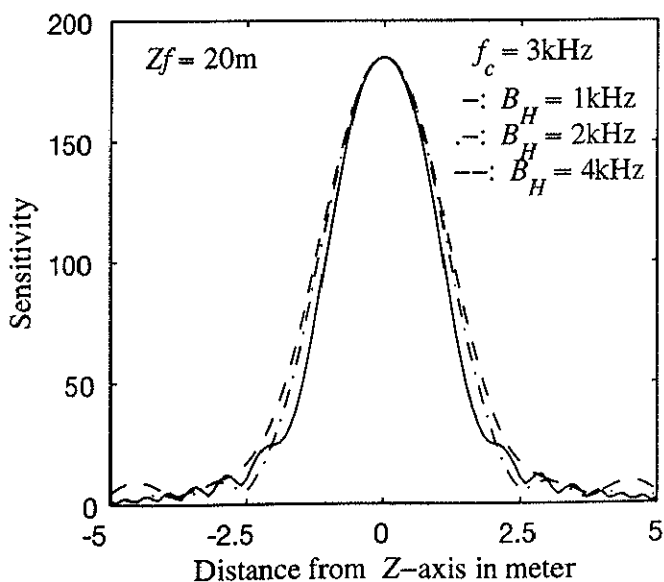
図 2.5: Numerically evaluated frequency averaged azimuth sensitivity distributions of the system for FM signals of center frequency f_c and finite bandwidth B_H , when the focus point being 20m apart from array center. The center frequency f_c is changed as 2kHz, 3kHz and 4kHz.

また、中心周波数を 3kHz とし、帯域幅を 1kHz、2kHz、4kHz と変えて、方位方向におけるシステムの周波数平均感度分布の計算結果を図 2.7 に示す。図 2.7 に示した結果より、方位方向におけるシステムの周波数平均感度分布は周波数帯域の幅に関係なく、ほぼ中心周波数 f_c だけによって決まることが分かる。

これらの結果より、音源信号のフーリエスペクトルがある帯域にわたって平坦な場合には、球面アレイ型マイクロフォンシステムの合成出力の周波数平均感度は、方位方向と距離方向ともに、鋭い合焦特性を有することが分かった。特に距離方向の合焦性の向上は単一周波に対するシステムの感度分布の合焦性より顕著なことが結論される。



⊠ 2.6: Numerically evaluated frequency averaged range-azimuth sensitivity distribution of the system for an FM signal of center frequency $f_c=3\text{kHz}$ and finite bandwidth $B_H=2\text{kHz}$, when the focus point being 20m apart from array center. The values normalized by that at the focus point are denoted in decibel.



⊠ 2.7: Numerically evaluated frequency averaged azimuth sensitivity distributions of the system for FM signals of center frequency f_c and finite bandwidth B_H , when the focus point being 20m apart from array center. The bandwidth B_H is changed as 1kHz, 2kHz and 4kHz.

2.2.2 SNR 空間分布

前節で示したように、球面状アレイを用いたマイクロフォンシステムは、3次元空間では良合焦性を持っていることが分かった。一方、合焦機能により、加法ノイズに対するマイクロフォンシステム SNR の空間分布特性を究明する必要がある。この節では空間依存性でない電子ノイズ等の無相関加法ノイズに対する提案システム SNR の空間分布特性を理論的に検討する。

ここで、マイクロフォンに混入する加法ノイズは、平均値0の定常ノイズであり、音源信号とは無相関で、しかも各マイクロフォンの検出ノイズとも互いに無相関と仮定する。ノイズの存在の下で、球面状に配列されたマイクロフォン M_{ij} での検出信号は、式(2.5)より式(2.13)と書ける。

$$x_{ij}(t) = \frac{1}{r_{s,ij}} s \left(t - \frac{r_{s,ij}}{c} \right) + n_{ij}(t) \quad (2.13)$$

図2.1に示すように、各マイクロフォンに混入したノイズ $n_{ij}(t)$ は、信号と同様に増幅と遅延を受けるので、マイクロフォンシステムの出力は、式(2.13)より式(2.14)となる。

$$x_o(t) = \sum_{i,j} \left(\frac{r_{f,ij}}{r_{s,ij}} s \left(t - \frac{r_{s,ij} - r_{f,ij} + r_{fmax}}{c} \right) + r_{f,ij} n \left(t - \frac{r_{fmax} - r_{f,ij}}{c} \right) \right) \quad (2.14)$$

また、システムの合焦出力信号の平均パワーは、定義により、式(2.14)から、次式のように求められる。

$$P_o = \langle x_o^2(t) \rangle = \sum_{i,j} \sum_{k,l} \frac{r_{f,ij} r_{f,kl}}{r_{s,ij} r_{s,kl}} R_s(\tau) + \sum_{i,j} r_{f,ij}^2 P_n \quad (2.15)$$

ここで、 $\tau = (r_{s,kl} - r_{s,ij} + r_{f,ij} - r_{f,kl})/c$ 、 $R_s(\tau)$ は音源信号 $s(t)$ の自己相関関数、 P_n は検出ノイズの平均パワーである。音源信号が焦点近傍にある場合には、 $r_{f,ij} \simeq r_{s,ij}$ 、 $r_{f,kl} \simeq r_{s,kl}$ となり、マイクロフォンシステムの合焦出力信号の平均パワーは、式(2.16)のように近似できる(焦点では等号が成立)。

$$P_o \simeq (2MN + 1)^2 P_s + (2MN + 1) \langle r_{f,ij}^2 \rangle P_n \quad (2.16)$$

ここで、 $\langle r_{f,ij}^2 \rangle$ は、焦点、各マイクロフォン M_{ij} 間距離の自乗平均値であり、式(2.17)のように定義される。また、 P_s は、音源信号の平均パワーである。

$$\langle r_{f,ij}^2 \rangle = \frac{1}{(2MN + 1)} \sum_{i,j} r_{f,ij}^2 \quad (2.17)$$

式(2.15)より、合焦機能によるシステム出力の SNR_o は、式(2.18)で近似できる。

$$SNR_o \simeq \frac{\sum_{i,j} \sum_{k,l} \frac{r_{f,ij} r_{f,kl}}{r_{s,ij} r_{s,kl}} R_s(\tau)}{(2MN + 1) \langle r_{f,ij}^2 \rangle P_n} \quad (2.18)$$

音源および焦点と，球面アレイ中心間の距離に比べて，球面アレイ開口が十分小さい場合，音源，球面アレイ中心間の距離を r_{s,M_0} ，焦点，球面アレイ中心間の距離を r_{f,M_0} とすると，合焦出力の SNR_o は，簡単に式 (2.19) のように近似できる，

$$\text{SNR}_o \simeq \frac{\left(\sum_{i,j} \frac{r_{f,M_0}}{r_{s,M_0}}\right)^2 P_s}{(2MN+1) \langle r_{f,ij}^2 \rangle P_n} \quad (2.19)$$

特に音源が焦点にある場合，合焦出力の SNR_o は，式 (2.20) のように単純化される，

$$\text{SNR}_o = \frac{(2MN+1) P_s}{\langle r_{f,ij}^2 \rangle P_n} \quad (2.20)$$

一方，合焦操作を施さない場合，即ちマイクロフォンシステムにゲイン調整，遅延操作を施さない場合には，複数マイクロフォンで検出した信号の平均 SNR_m は，式 (2.21) となる，

$$\text{SNR}_m = \frac{1}{(2MN+1)} \sum_{i,j} \frac{1}{r_{s,ij}^2} \frac{P_s}{P_n} = \langle r_{s,ij}^{-2} \rangle \frac{P_s}{P_n} \quad (2.21)$$

ここで， $\langle r_{s,m}^{-2} \rangle$ は，式 (2.17) と同様に定義される音源，各マイクロフォン M_{ij} 間距離の 2 乗の逆数の平均値である．それ故，合焦操作実施時の SNR 向上度は， SNR_o と SNR_m の比で与えられる．式 (2.19) と式 (2.21) より，合焦システム SNR 向上度は，式 (2.22) のようになる，

$$\eta \equiv \frac{\text{SNR}_o}{\text{SNR}_m} = \frac{\left(\sum_{i,j} \frac{r_{f,M_0}}{r_{s,M_0}}\right)^2}{(2MN+1) \langle r_{f,ij}^2 \rangle \langle r_{s,ij}^{-2} \rangle} \quad (2.22)$$

上式では，特に音源が焦点の近傍にある場合には，合焦機能によるシステム SNR 向上度は，式 (2.23) となる．大体，マイクロフォンの総個数倍だけ SNR が改善される，

$$\eta \simeq \frac{(2MN+1)}{\langle r_{f,ij}^2 \rangle \langle r_{s,ij}^{-2} \rangle} \simeq (2MN+1) \quad (2.23)$$

以上検討の結果から，システムに合焦機能を持たせることにより，マイクロフォンに混入した電子ノイズ等の無相関加法ノイズに対して，システムの SNR が，大体使用マイクロフォンの個数倍に改善されることが分かった．これにより提案球面アレイ型マイクロフォンシステムは，高感度，良合焦性と共に，高 SNR 特性を持つと予想される．

2.2.3 相対受信 RMS 誤差空間分布

球面アレイ型マイクロフォンシステムの感度空間分布特性検討の際、単一周波数の正弦波信号に対する単一周波感度分布特性、あるいは帯域波に対する周波数平均感度分布特性を議論してきた。しかし、一般に有限帯域音源信号であってもそのスペクトルの大きさは一様ではない。それ故、マイクロフォンシステムである限り、この種の波形の忠実な採音の評価が不可欠であり、波形誤差の観点からより直接評価する方法が必要である。

単一周波を例にとれば、目的音源がシステムの焦点にある場合、各マイクロフォンの受信出力信号は同相となるので、マイクロフォンシステムの合成出力波形には歪みがなく、忠実に音源信号を受信できる。しかし音源が焦点から離れると、各マイクロフォンの出力信号の位相が異なるので、マイクロフォンシステムの合成出力波形には歪みが出てくる。同様に帯域波音源信号についても、同じ現象が起きる。すなわち音源が焦点外にある場合、周波数成分の異なる音波が各マイクロフォンに到達する時間が異なるので、各マイクロフォン出力の位相も異なり、それらをそのまま合成して、マイクロフォンシステムの出力とすると、音源信号の原波形とは異なった信号波形となってしまう。

受信波形誤差を評価するため、ここでは、相対受信 RMS 誤差の評価基準を提案し、感度分布特性、SNR 特性と並びにシステムの基本特性の評価値として用いる。広帯域音源信号として、式(2.24)で与えられる音声域をカバーできる簡単な形の FM 変調波を用い、システム合成出力波形の受信 RMS 誤差を評価する [13]。

$$s(t) = \sin \left(2\pi f_0 t + \frac{\Delta f}{b} \sin(2\pi b t) \right) \quad (2.24)$$

式(2.24)において、 $f_0=5\text{kHz}$ 、 $\Delta f=4.9\text{kHz}$ 、 $b=100$ 、 $0 \leq t \leq T_0=0.005$ 秒とすると、音声領域の周波数範囲(100Hz~9.9kHz)をカバーする信号が得られる。この広帯域音源信号に対して、マイクロフォンシステム合成出力は、式(2.25)で表せる。

$$x_o(t) = \sum_{i,j} \frac{r_{f,ij}}{r_{s,ij}} \sin \left(2\pi f_0 t' + \frac{\Delta f}{b} \sin(2\pi b t') \right) \quad (2.25)$$

$$t' = t - \frac{r_{s,ij} - r_{f,ij} + r_{fmax}}{c}$$

ここで、システムの焦点を球面アレイの軸上 $Z_f=20\text{m}$ に設定した場合、幾つの音源位置にある帯域波を代表する FM 変調信号を受信、合成する際、計算機シミュレーションにより求めたシステムの受信波形の例を図 2.8 に示す。図 2.8 から、音源が焦点にある限り、システムの合成出力波形(図 2.8 の左上)は振幅だけが使用マイクロフォンの個数倍に大きくなり、歪みのない音源信号が復元されている。しかし、焦点外にある音源に対しては、合成出力波形(図 2.8 の左上を除く)はかなり乱れていることが分かる。すなわち焦点にある音源に対しては、球面ア

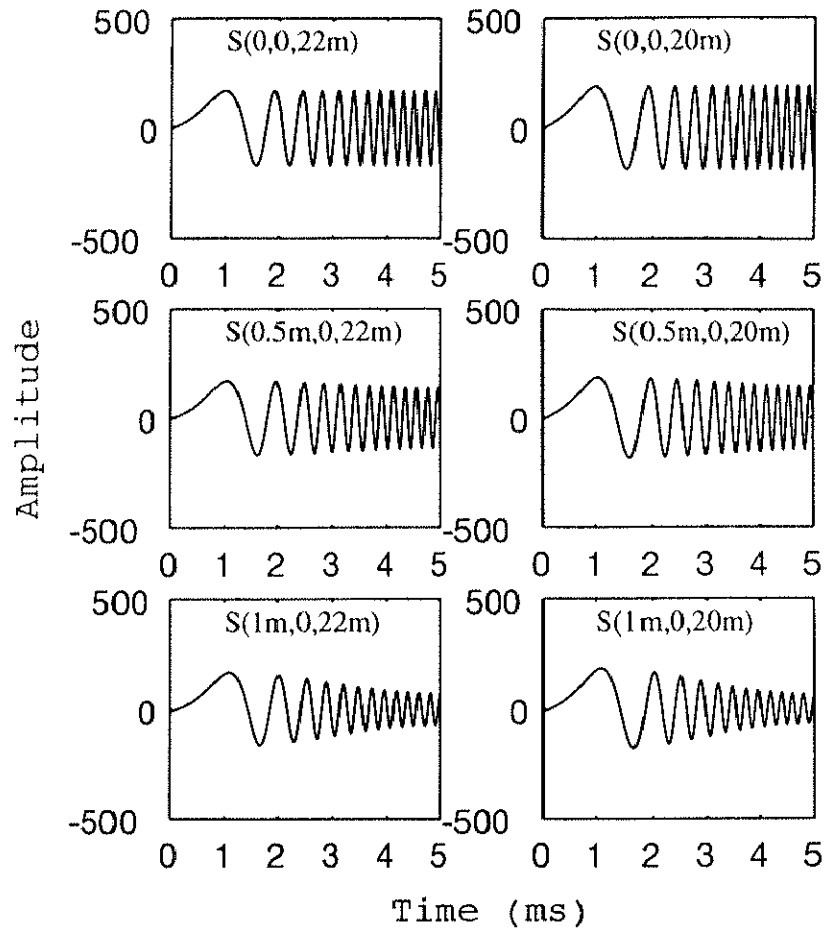


図 2.8: Received signal waveforms when the source signal is an FM of instantaneous frequency 100Hz to 5.0kHz, where the focus point at 20m apart from the array center.

レイ型マイクロフォンシステムにより忠実に音源信号を採取できるが、音源が焦点から離れると、忠実に受信できなくなり、システムの出には受信波形誤差が生ずる。

図 2.8では、視覚的にシステムの受信波形を示したが、具体的にどのぐらいの受信波形誤差があるか並びにその分布を、数値的に評価する必要がある。そのため、次に相対受信 RMS 誤差を定義し、その空間分布を数値的に評価する。感度分布を検討した際に示したように、システム合成出力の振幅は音源信号自身の振幅と使用マイクロフォンの個数に応じて変わる。従って式 (2.25) に示した合成出力 $x_o(t)$ と目的音源信号 $s(t)$ の波形誤差を比較するには、音源信号の振幅を合成出力の振幅に合わせなければならない。ここで、その係数を合成出力信号の RMS 値と音源信号の RMS 値の比 A で与える。このように振幅調整後の音源信号の RMS 値を参照値 RMS_{ref} として式 (2.26) で与える。

$$RMS_{ref} = \left\{ \int_0^{T_0} (As(t))^2 dt / T_0 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.26)$$

また、合成出力と振幅調整後の音源信号の差の RMS 値を、合成出力 RMS 誤差の RMS_{abs} とし、式 (2.27) に示す。

$$RMS_{abs} = \left\{ \int_0^{T_0} (A_s(t) - x_o(t))^2 dt / T_0 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

参照音源信号の RMS_{ref} に対する合成出力の RMS 誤差 RMS_{abs} の比で、相対受信 RMS 波形誤差の評価指標を、

$$RMS = RMS_{abs} / RMS_{ref} \quad (2.28)$$

と定義する。

感度空間分布計算と同じパラメータ設定で、システムの焦点を球面アレイ軸上、アレイの中心 20m に設定した場合、周波数範囲 (1kHz~5kHz) の FM 変調波音源が、X-Y 平面と平行する平面 $Z=20m$ 内にある音源に対して、方位方向におけるシステムの相対受信 RMS 誤差空間分布計算結果を、図 2.9 に示す。球面状マイクロフォン配置では、感度分布と同じく、システムには対称性があり、相対受信 RMS 誤差の分布も球面アレイ軸に関して、対称な特性となり、軸から離れる距離という 1 変数で評価できる。図中、周波数範囲をパラメータとして変え、対応するシステムの相対受信 RMS 誤差を表示している。

図 2.9 から分かるように、一定の相対受信 RMS 誤差範囲内では、広帯域音源の帯域幅が狭いほど、球面アレイ軸からの距離が大きくなり、その分だけマイクロフォンシステムが忠実に受信できる空間範囲が広がる。

また、同音源が X-Z 平面内にある場合の相対受信 RMS 誤差パーセント値分布の等高線表示結果 (距離方向) を、図 2.10 に示す。明らかに焦点の周りでは相対受信 RMS 誤差は小さいが、音源が焦点から離れるに従い、次第に大きくなる。

方位方向の相対受信 RMS 誤差分布図 2.9 と距離方向相対受信 RMS 誤差分布図 2.10 から分かるように、3 次元空間では、焦点の周りにおいて、システムの相対受信 RMS 誤差が小さいが、音源が焦点から離れるにつれて、相対受信 RMS 誤差が大きくなる。これは図 2.8 に示したように、合成出力波形の振幅の不整合による振幅乱れと、各周波数成分に対する位相の不均一性によるものが複雑な形で含まれていて、この意味では、相対受信 RMS 波形誤差でマイクロフォンシステムの受信特性を評価することは指向特性、感度分布特性の評価より、より直接的に評価できる。マイクロフォンシステムの受信 RMS 誤差範囲を明白にできれば、その実現可能性と使用の可能性が明確にできる。

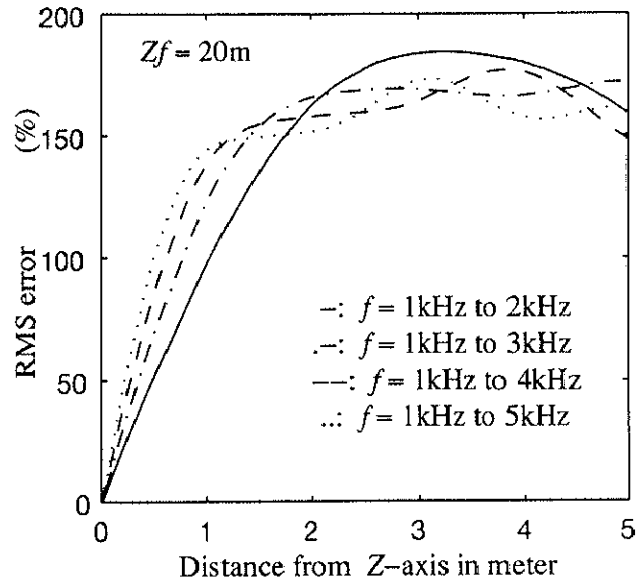


图 2.9: Numerically evaluated azimuth relative RMS error distributions of the system for received an FM signals of instantaneous frequency in finite bands, when the focus point being 20m apart from the array center.

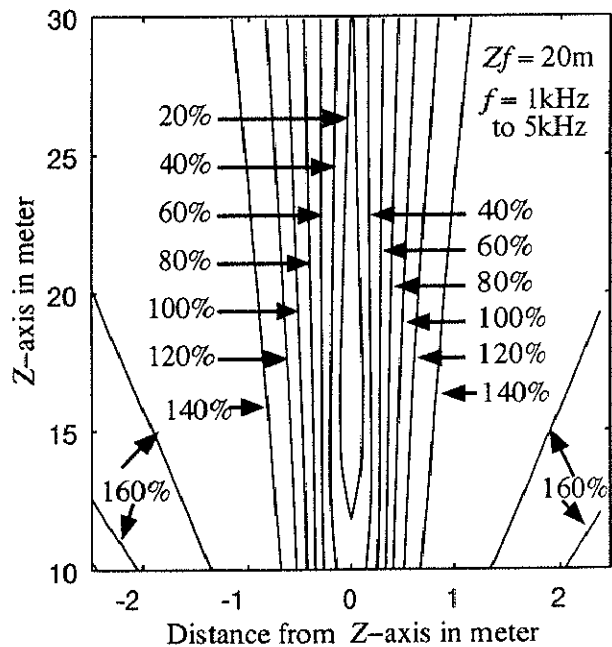


图 2.10: Numerically evaluated range-azimuth relative RMS error distribution of the system for received an FM signal of instantaneous frequency in finite bands, when the focus point being 20m apart from the array center. The measured values are represented in percent by contour lines.

2.3 球面アレイ型システムの基本特性に関する考察

マイクロフォンの球面状配置を用い、システムの合焦走査を球面状アレイの機械的回転と首振り、それに加えて球面アレイ軸上電子走査により実現する構成に於ては、システムの基本特性に対称性があり、球面アレイ軸から離れる方位方向と軸に沿う距離方向の分布だけで、システムの基本3特性を全空間に渡って評価できる。

システムの感度分布特性の評価については、従来の狭帯域波の評価だけでは、不十分であり、実際の音響信号採取では、帯域波に対する周波数平均感度分布評価の重要性を指摘し、その評価の方法を明らかにした。理論・数値解析の結果、球面アレイ型マイクロフォンシステムの感度分布には、良好な合焦特性があり、焦点近傍の感度が高く、焦点から離れると、感度が次第に小さくなる。特に帯域波に対するシステムの周波数平均感度分布では、帯域幅と共に距離方向における焦点が鋭く絞られ、合焦性能が極端に向上された。

システムのSNR分布特性については、システムに合焦機能を持たせることにより、無相関加法ノイズに対するSNR空間分布は、おおよそ使用マイクロフォンの個数倍に改善されたことも理論・数値解析的に解明した。従って、この種のノイズ混入下では、目的信号をより分離し易く、加法ノイズに対しても、高SNR特性を有していることが明白になった。

マイクロフォンシステムの特性格評価に於て、従来の研究では、殆んどの場合、感度分布、加えて、SNR分布だけに止まっていた。しかし、音源信号を忠実に採取するには、採取した信号波形と目的音源信号間の波形誤差を評価することがより直接的であり、また不可欠でもある。それ故、我々は相対受信RMS誤差の評価指標を提案し、その評価方法を示した。この方法を用いてシステムの相対受信RMS誤差を評価した結果、焦点では、目的音源を忠実に採取でき、焦点の近傍においても、所定の誤差範囲で、音源信号を採取できることが判明した。

以上のような感度分布特性、SNR分布特性、相対受信RMS誤差特性という基本3特性で、マイクロフォンシステムを評価することがより高精度で、かつ実用的評価であると考えられる。

2.4 本章のまとめ

本章では、波動の球面伝播原理を利用し、球面アレイ型マイクロフォンシステムを提案し、3次元空間での受動合焦原理を明らかにした。また、システムの特性格については、理論・数値解析的に遠方場を例として、感度(単一周波数感度、周波数平均感度)、SNR、相対受信RMS誤差の空間分布を検討し、その結果を示した。その際、単一周波数音源、帯域波音源に対するマイクロフォンシステムの単一周波数感度分布特性ならびに周波数平均感度分布特性を明らかにすると共に、加法的電子ノイズ等の無相関ノイズに対するシステムのSNR分布特性を理論・数値解析的に明らかにした。これらの理論解析と数値解析の結果から、提案した球面ア

レイ型マイクロフォンシステムは高感度性、3次元空間における良合焦性、高SNR性を有することが分かった。さらに広帯域信号に対するマイクロフォンシステムの受信特性を波形誤差の観点から評価することの重要性を指摘し、広帯域音源を代表するFM変調音源を用いて相対受信RMS誤差分布特性を定量的に評価した。その結果より、想定した焦点の近傍において与えられた誤差の範囲内で、目的音源信号を採取できる見込みが分かった。

これらの理論・数値解析結果から、提案球面アレイ型マイクロフォンシステムを用い、実際の音源信号を採取する場合、システムの焦点走査により、マイクロフォンに混入した加法ノイズに対して高SNRで目的音源を採取することの可能性が明らかになった。本章の理論・数値解析の結果を踏まえて、次章では計算機援用の電子走査マイクロフォンシステムの実験系を設計・構築する。