

# 3次元プローブによる音響インテンシティ計測

## Sound Intensity Measurement by Using 3-Dimensional Intensity Probe

新田 陽一\*\*

Yoichi NITTA

### 概要

平成21年度に電気情報工学科に導入された音響インテンシティ計測システムについて、その基本原理と、3-way スピーカシステムからの放射音の計測例を交えて紹介する。本システムは既存のシステムを更新したものであるが、プローブが3次元構造になっているのが最大の特徴で、データ収集作業の手間が大幅に軽減された。計測の結果、中域ユニットで4oct.の帯域をカバーしていることや、ホーンユニット独特の強指向性など、対象としたスピーカシステムの特徴が的確に捉えられた。

### 1. まえがき

音は直接見ることはできないが、これを可視化すれば音場の状況が具体的に把握でき、防音対策などに有益な情報を得ることができる。

音場の可視化の代表的な方法としては、音響インテンシティ計測、音響ホログラフィ計測、ビームフォーミングなどがある。音響インテンシティ (Sound Intensity: SI 音の強さ) は単位面積を単位時間あたりに通過する音のエネルギーのことである。音響ホログラフィ (Acoustic Holography: AH) は参照点に対する計測面の複素音圧を測定し、逆伝搬演算を行って音源上や任意の空間の音圧分布を得る。これには、伝搬波のみを利用する遠距離場 AH と、エバネッセント波と呼ばれる非伝搬波も利用する近距離場 AH がある。ビームフォーミングは複数のマイクロホンで得た信号の遅延和演算を行い、特定の方向の音波を選択的に収録するものである。

本稿では、平成21年度に電気情報工学科において更新された3次元音響インテンシティ計測システムについて、基本原理と測定例を交えて紹介する。

### 2. 音響インテンシティの計測原理

#### 2.1 音響インテンシティとは

音響インテンシティは「音の強さ」とも呼ばれ、図 2.1 に示すように、単位面積を単位時間に通過する音のエネルギーを表す物理量(単位:  $W/m^2$ )である<sup>[1]</sup>。

媒質中を伝搬する音波のある地点における圧力を  $p$ ,

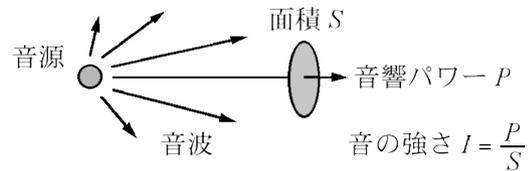


図2.1 音の強さの概念

粒子速度を  $u$  とする。微小時間  $\Delta t$  において媒質粒子は  $u\Delta t$  だけ進行するので、単位面積あたりにおいて、音波がなす仕事  $\Delta W$  は力(圧力)と距離の積として

$$\Delta W = pu\Delta t \quad (2.1)$$

となる。これを時間  $\Delta t$  で割ると、単位面積を単位時間中に通過する音のエネルギー  $E$  となり、次式で与えられる。

$$E = \frac{\Delta W}{\Delta t} = pu \quad (2.2)$$

音圧と粒子速度は位置や時間によって変化するので、適切な(十分な周期を含む)期間  $T$  の時間平均をとり、これを音響インテンシティ  $I$  と定義する。

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T pu dt \quad (2.3)$$

すなわち、音響インテンシティは音場のある地点における音圧と粒子速度の積の時間平均として求めることができる。なお、図 2.1 の例において、単位面積は音の進行方向に対して垂直に考えたので、式 (2.3) は全インテンシティを表す。しかし、音圧はスカラー量であるが、粒

\* 原稿受理 平成22年10月1日

\*\* 電気情報工学科

粒子速度は方向性をもつので、ベクトル量である。これを考慮すると、一般に音響インテンシティもベクトル量となる。音波の進行方向に対して想定した単位面積が垂直でない場合、式(2.3)の値はその一成分を表す。

## 2.2 1次元SIプローブによる計測

音の測定に使われるマイクロホンは、音圧の変化に比例した電圧を発生する音圧マイクロホンと、音圧の微分係数に比例した電圧を発生する音圧傾度マイクロホンに分類される。音圧傾度は媒質の粒子速度に比例するので、後者は速度マイクロホンとも呼ばれる。音圧傾度マイクロホンは近接した複数の地点で音圧を検出し、その差を出力とする構造になっている。したがって、普通は構造が単純な音圧マイクロホンが使われる。

図2.2に示すように、音響インテンシティを測定する場合にも、一般にはペアにした音圧マイクロホンプローブを用いる<sup>[2]</sup>。2つのマイクロホンM<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>がx軸上に間隔Δxで置かれており、ここに斜め方向から音波が入射したとする。それぞれのマイクロホンは音源からの距離が異なるので、検知される音圧p<sub>1</sub>(t)、p<sub>2</sub>(t)の振幅や位相にはわずかな差が生じる。

計測位置を2つのマイクロホンの中間地点とすると、ここにおける音圧p(x,t)は両者で測定される音圧の平均値として、次式で与えられる。

$$p(x,t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \quad (2.4)$$

一方、微小間隔Δxにおいて音波を平面波近似すると、1次元波動方程式における運動方程式

$$\rho \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \quad (2.5)$$

より、粒子速度u(x,t)は次のように導出される。

$$u(x,t) = - \frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} dt \quad (2.6)$$

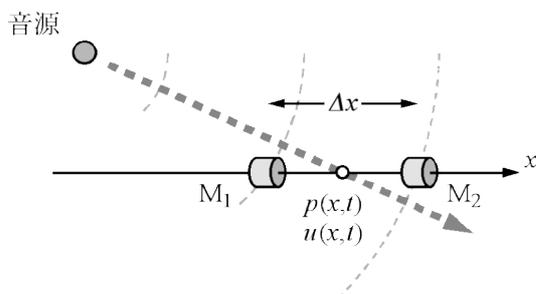


図2.2 ペアマイクロホンによる計測

ここで、ρは媒質の密度である。また、式(2.6)における音圧の位置変化は、間隔Δx離れた地点の音圧差を用いて、次のように考えることができる。

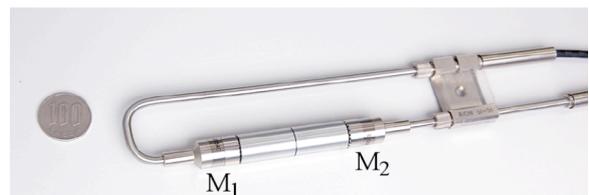
$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = \frac{p_2(t) - p_1(t)}{\Delta x} \quad (2.7)$$

したがって、粒子速度u(x,t)も音圧p<sub>1</sub>(t)、p<sub>2</sub>(t)より算出することができる。

$$u(x,t) = - \frac{1}{\rho \Delta x} \int \{p_2(t) - p_1(t)\} dt \quad (2.8)$$

式(2.3)、(2.4)、(2.8)を適用すると、ペアマイクロホンで計測した音圧より音響インテンシティを算出することができる。ただし、これはペアマイクロホンを設置した1軸(x軸)方向成分のみであるので、3次元測定を行うためには他の2軸(y,z軸)方向も測定しなければならない。図2.3(a)に従来のシステムで使用していたSIプローブを示す。これは原理で述べたものと同じ2マイクロホン方式であるので、測定地点1箇所においてx,y,z軸方向について同様の測定を3回行わなければならない。計測作業が非常に手間のかかるものであった。また、手持ち状態でプローブを設置するので、3軸方向について計測位置を正確に調整することが困難であり、測定精度が十分でなかった。

この問題に対しては、軸回転機構を備えたマイクロホン移動装置や、図2.3(b)のような6マイクロホン方式のプローブが市販されている。しかし、装置自体が非常



(a) 2マイクロホン方式 RION SI-31



(b) 6マイクロホン方式 RION SI-33<sup>[3]</sup>

図2.3 音響インテンシティプローブの例

に高価であったり、多チャンネルの計測システムが必要であるなど、コスト的には負担が大きい。また、測定対象によっては、計測地点の音場に影響を与える場合も考えられる。

### 2.3 3次元SIプローブによる計測

これらの問題を解決するために、小野測器(株)が開発・発売したのが「テトラホン」と呼ばれる3次元プローブである。図2.4にその外観と構成を示す。テトラホンでは、正四面体の頂点の位置に4つの音圧マイクロホンが配置されている。正四面体の重心Gが音響中心であり、ここを原点として、図のように $x, y, z$ 軸座標が定義される。4つのマイクロホンで得られる音圧より、2.2で述べた2マイクロホン方式の原理を応用すれば、音響インテンシティの各軸方向成分が算出できる<sup>[4]</sup>。

まず、音響中心における音圧 $p_0(t)$ は、各マイクロホンで計測した音圧 $p_1(t) \sim p_4(t)$ の平均として与えられる。

$$p_0(t) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p_i(t) \quad (2.9)$$

また、これを用いると、音響中心から各マイクロホン方向への粒子速度は、式(2.8)を適用して

$$u_i(t) = -\frac{1}{\rho \Delta r} \int \{p_i(t) - p_0(t)\} dt \quad (2.10)$$

となる。ここで、 $\Delta r$ は音響中心から各マイクロホンまでの距離である。

一方、正四面体の幾何学的条件を考慮すると、式(2.10)の粒子速度と $x, y, z$ 軸方向の粒子速度成分 $u_x(t), u_y(t), u_z(t)$ の間には、以下の関係がある。ただし、簡単化のために時間変数 $(t)$ の表記は省略している。

$$u_1 = \frac{2\sqrt{2}}{3} u_y + \frac{1}{3} u_z \quad (2.11)$$

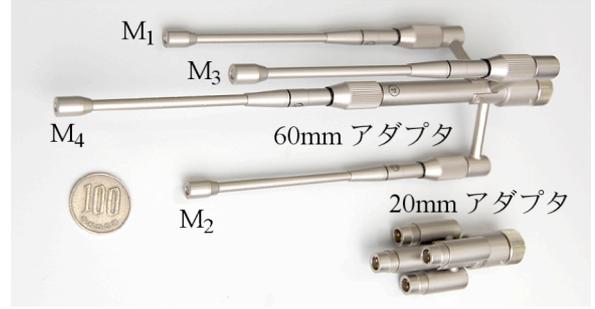
$$u_2 = \frac{\sqrt{2}}{3} u_x - \frac{\sqrt{2}}{3} u_y + \frac{1}{3} u_z \quad (2.12)$$

$$u_3 = -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} u_x - \frac{\sqrt{2}}{3} u_y + \frac{1}{3} u_z \quad (2.13)$$

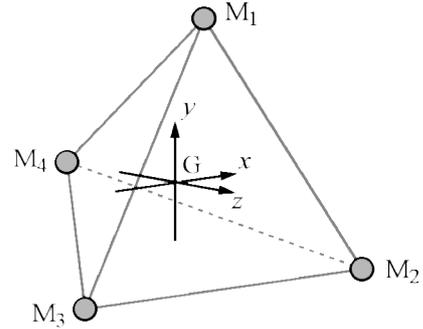
$$u_4 = -u_z \quad (2.14)$$

これより、 $x, y, z$ 軸方向の粒子速度成分を導出すると、

$$u_x = -\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} (u_2 - u_3) \quad (2.15)$$



(a) 外観



(b) 座標軸とマイクロホンの配置

図2.4 3次元SIプローブ 小野測器 MI-6420

$$u_y = -\frac{1}{2\sqrt{2}} (2u_1 - u_2 - u_3) \quad (2.16)$$

$$u_z = -\frac{1}{4} (u_1 + u_2 + u_3 - 3u_4) \quad (2.17)$$

となる。

以上の原理により、3次元SIプローブを使用すると、その向きを変えることなく、1点につき1回の測定で3次元音響インテンシティを計測することができる。

### 2.4 クロススペクトル法

2.2および2.3で述べた計測原理は直説法と呼ばれ、変動音のリアルタイム計測が可能である。しかし、位相の校正ができないため、特性の一致したマイクロホンやアンプなどが必要であり、結果としてシステムが高価なものとなる。そこで、一般にはFFTアナライザを使用し、クロススペクトルによって音響インテンシティを近似的に計測するシステムが普及している。ここでは、その原理を説明する<sup>[5][6][7]</sup>。

式(2.3)より、 $x$ 方向の音響インテンシティ $I(x)$ は、適当な観測期間を $T$ として、次式で表される。

$$I(x) = \frac{1}{T} \int_0^T p(x, t) u(x, t) dt \quad (2.18)$$

ここで、音圧と粒子速度の相互相関関数  $R_{pu}(x, \tau)$  を考えると、

$$R_{pu}(x, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T p(x, t) u(x, t + \tau) dt \quad (2.19)$$

であるから、

$$R_{pu}(x, 0) = \frac{1}{T} \int_0^T p(x, t) u(x, t) dt = I(x) \quad (2.20)$$

となる。すなわち、音響インテンシティは音圧と粒子速度の相互相関関数によって表すことができる。

ところで、相互相関関数のフーリエ変換  $S_{pu}(\omega)$  はクロススペクトルと呼ばれ、時間関数  $p(t)$  と  $u(t)$  についてそれぞれの変換対  $P(\omega), U(\omega)$  との関係を探めると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} S_{pu}(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_{pu}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T p(t) u(t + \tau) dt \right\} e^{-j\omega\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} u(t + \tau) e^{-j\omega(t + \tau)} d\tau \right\} e^{j\omega t} dt \\ &= \frac{1}{T} U(\omega) \left\{ \int_0^T p(t) e^{j\omega t} dt \right\} \end{aligned} \quad (2.21a)$$

上式において、観測期間  $T$  を適当にとれば、 $\{ \}$  内は関数  $p(t)$  のフーリエ変換の位相回転因子  $e^{-j\omega t}$  が逆相のケースと等価になるから、

$$S_{pu}(\omega) = \frac{1}{T} U(\omega) P(-\omega) = \frac{1}{T} U(\omega) P^*(\omega) \quad (2.21b)$$

ここで\*印は複素共役を示す。このように、クロススペクトルは2つの時間関数のフーリエ変換の一方を複素共役とし、その積の平均スペクトル密度として容易に算出できる。

ここで式(2.19)に立ち返り、音響インテンシティを音圧と粒子速度のクロススペクトルで表現してみる。相互相関関数はクロススペクトルをフーリエ逆変換したものであるから、次のように表すことができる。

$$R_{pu}(x, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{pu}(x, \omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.22)$$

式(2.20)によれば、上式において  $\tau=0$  としたものが音

響インテンシティとなるから、その複素表現  $I'(x)$  として、

$$I'(x) = R_{pu}(x, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{pu}(x, \omega) d\omega \quad (2.23)$$

ここで扱っている音響インテンシティが実関数であることを考慮すると、複素表現の実部を取り出して、

$$I(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Re} \{ S_{pu}(x, \omega) \} d\omega \quad (2.24)$$

となり、クロススペクトルの実部によって表すことができる。

最後に、2つのマイクロホンで計測した音圧  $p_1(t), p_2(t)$  と、音圧・粒子速度のクロススペクトル  $S_{pu}(x, \omega)$  の関係を導出する。フーリエ変換は線形変換であるので、観測地点における音圧の変換対  $P(x, \omega)$  は、式(2.4)より、

$$P(x, \omega) = \frac{P_1(x, \omega) + P_2(x, \omega)}{2} \quad (2.25)$$

となり、粒子速度の変換対  $U(x, \omega)$  は、式(2.8)より、

$$U(x, \omega) = -\frac{1}{\rho \Delta x} \frac{P_2(x, \omega) - P_1(x, \omega)}{j\omega} \quad (2.26)$$

となる。式(2.26)の導出にはフーリエ変換の性質

$f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$  ならば

$$\int f(t) dt \Leftrightarrow \frac{1}{j\omega} F(\omega) \quad (2.27)$$

を用いた。

簡単化のために  $(x, \omega)$  の表記を省略して、式(2.25)、(2.26)を式(2.21b)に代入すると、

$$\begin{aligned} S_{pu} &= \frac{j}{2\rho \Delta x \omega} \frac{\{P_2 - P_1\} \{P_1^* + P_2^*\}}{T} \\ &= \frac{j}{2\rho \Delta x \omega} \{S_{12} + S_{22} - S_{11} - S_{21}\} \end{aligned} \quad (2.28)$$

これに、クロススペクトルの性質

$$S_{12} - S_{21} = S_{12} - S_{12}^* = j2 \text{Im} \{ S_{12} \} \quad (2.29)$$

を適用すると、

$$S_{pu} = \frac{1}{2\rho \Delta x \omega} \left[ -2 \text{Im} \{ S_{12} \} + j(S_{22} - S_{11}) \right] \quad (2.30)$$

となる。

これを式(2.24)に代入すると、クロススペクトル法による音響インテンシティの計算式として、次式を得る。

$$I(x) = -\frac{1}{2\rho\Delta x} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\text{Im}\{S_{12}(x, \omega)\}}{\omega} d\omega \quad (2.31)$$

すなわち、2つのマイクロホンで測定した音圧のクロススペクトルの虚部をフーリエ逆変換する。クロススペクトルは音圧のフーリエ変換から求めるので、このとき各マイクロホンの感度や位相特性の違いを容易に補正できる。ただし、この計算式にはいくつかの近似が含まれていることに留意しておく必要がある。なお、実際には積分範囲を限定し、特定の周波数帯域について解析を行うことが多い。更新システムでは、これをトレース処理と呼んでいる。

式(2.31)で計算される音響インテンシティは式(2.30)の実数部を利用したものであるが、これは Active Intensity: AI と呼ばれる。一方、式(2.30)の虚数部を適用した Reactive Intensity: RI も考えられている。AI は音圧と粒子速度が同相である成分を表し、通常の音響インテンシティ計測ではこれを求める。RI は音圧と粒子速度の位相が直交する成分を表す。音場に音源間の干渉や反射が存在すると、AI が回転的になって音の放射が弱くなり、RI 成分が増大する。つまり、音場の状況をより正確に把握する必要がある場合、RI を含めて音圧や粒子速度を測定する。

### 3. 更新システムの概要

図3.1に更新したシステムの構成を示す。このうち、データ収集装置(DS-2000)とパーソナルコンピュータは既設品を使用したもので、これに適合する(株)小野測器製のシステムを選定した。

「テトラホン」と名付けられたマイクロホンプローブ(MI-6420)は、正四面体の頂点に位置する部分に1/4"径のバックエレクトレット・コンデンサ・マイクロホンを4つ備えている。アダプタを交換することで、マイクロホンのギャップ長は60mmもしくは20mmに設定できる。60mmの場合、適用周波数範囲は40Hz~1.2kHz(-1±1dB)、20mmの場合には120Hz~3.6kHz(-1±1dB)、~5kHz(-2±1dB)となっている。

プローブからの信号は専用のマイクロホンアンプ(CF-0610)を介してデータ収集装置に入力する。マイクロホンアンプはデータ収集装置からの校正信号入力と音圧位相校正器(MI-0620)の接続端子を備えており、解析ソフトウェアからプローブの校正が容易に行えるように

なっている。

解析ソフトウェア(DS-0225)は以下のプログラムで構成されており、一連の手順に従って計測が進められる。

#### (1) プローブ校正プログラム

使用するプローブ・マイクロホンの音圧位相特性を測定し、補正データを作成する。

#### (2) 条件設定プログラム

計測面の構成や使用プローブの選択、解析周波数範囲、温度や気圧などの環境条件の設定を行う。計測面は最大10面まで、測定点は1面あたり最大1,000点まで設定できる。

#### (3) データ収録プログラム

設定した条件に従って、データの収録を行う。プ

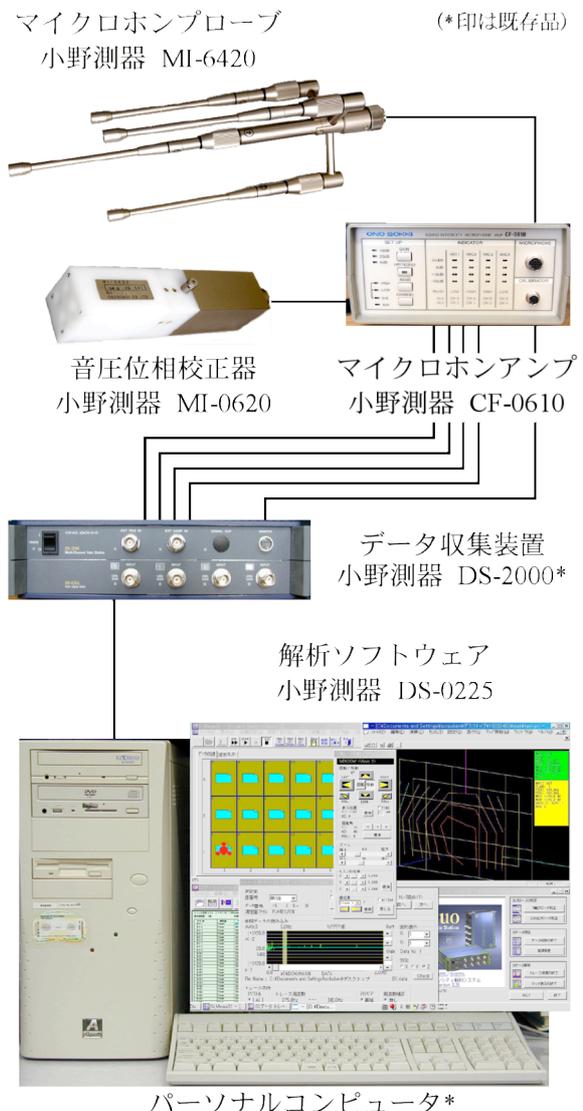


図3.1 3次元音響インテンシティ計測システムの構成

ローブ位置や方向を間違えないよう、画面上にアイコンによるガイドが表示される。

(4) トレース処理プログラム

収録したデータより、周波数範囲を指定して音響インテンシティを計算する。次いで、表示のためのマップデータを作成する。

(5) マップ処理プログラム

計算された音響インテンシティを、コンター図、ベクトル図などで表示する。視点、スケール、色などを調整できる他、背景に測定対象物の写真などを重ね描きすることもできる。

(6) 音源探査プログラム

3次元プローブの特徴を活用し、音の到来方向をほぼリアルタイムに表示する。探査する周波数範囲は10通りまで設定できる。

4. 3-way スピーカの放射音の計測

4.1 計測方法

図4.1に示すように、更新したシステムの計測例として、3-way スピーカからの放射音の測定を行った。表4.1に、用いたスピーカシステム ONKYO D-77FX の仕

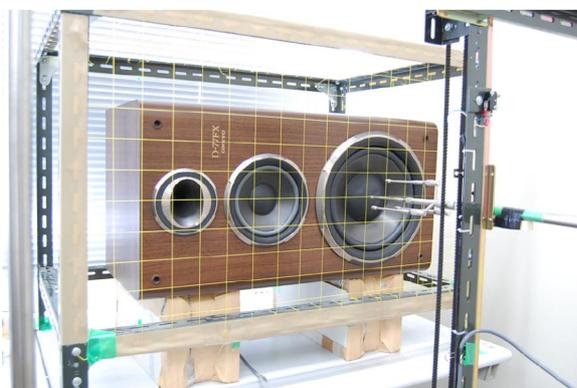


図4.1 3-wayスピーカからの放射音の測定

表4.1 ONKYO D-77FXの仕様

方式	3way 3スピーカ バスレフ式
使用ユニット	低域用：27cm コーン型 中域用：16cm コーン型 高域用：ホーン型
再生周波数帯域	25Hz～32kHz
クロスオーバー周波数	120Hz, 2kHz
外形寸法	360W × 680H × 351D
重量	28kg

様を示す。このモデルの特徴は各ユニットのクロスオーバー周波数（再生担当帯域の切り換え周波数）が120Hzと2kHzであり、中域のスコークユニット1つで4oct. という広い帯域をカバーしていることである。したがって、3-way システムであるが、2-way システムにサブ・ウーファを追加したような設計となっている。メーカーの説明によると、ボーカル表現に照準を合わせ、音声の安定再生を狙ったモデルということである。

今回の実験では、7種類のオクターブ周波数（62.5, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4kHz）の正弦波を同じ振幅で合成した信号をCDに記録し、これを再生したときの音響インテンシティを測定した。これは、特定の周波数に的を絞った計測を行った方が、各ユニットからの放射音の様子がよくわかると考えたからである。また、設定した正弦波の周波数は前述のクロスオーバー周波数をカバーする範囲であり、各ユニットの帯域分担の様子が観測できるものと思われる。以下に、測定の手順とあわせて、得られた結果を紹介する。

4.2 プローブの校正

解析システムを起動すると、図4.2に示す基本画面が現れる。一般には、ここに表示されている項目を上から順次実行する形で計測を進める。

まず、プローブの校正を行う。2章の原理で述べたとおり、音響インテンシティの計測では複数あるマイクロホンの特性が全て揃っていることが重要であるが、実際にはまずあり得ない。そこで、校正器を用いて同一音を同一条件で測定した結果から各マイクロホンの特性を調べ、その違いをキャンセルするための補正特性を算出する。

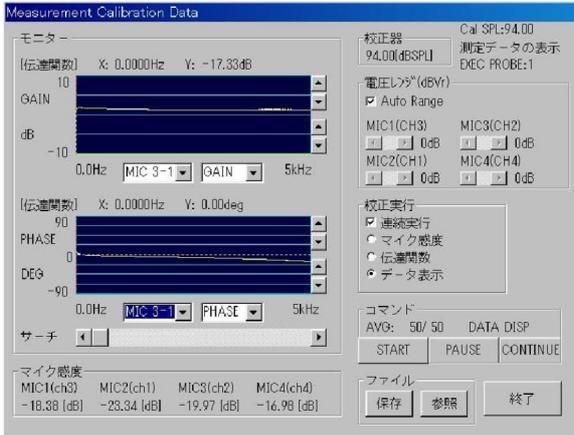
図4.3(a)に示すように、4つのマイクロホンを校正器に装着し、プローブ校正プログラムを実行する。すると、校正器内部の密閉空間に1"径の静電スピーカより0～5kHz（もしくは0～2kHz）、94dB±1dBの校正信号が放射



図4.2 解析アプリケーションの基本画面



(a) 校正器へのプローブの装着



(b) 校正プログラムの実行画面

図4.3 プローブの校正

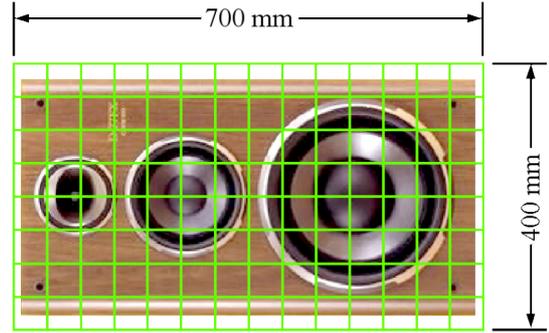
され、各マイクロホンに均等に加わる仕組みになっている。マイクロホン自体の音圧感度特性を10回、4つのマイクロホン間(6とおり)の伝達関数特性を50回程度測定し、平均した結果から補正特性を算出してファイルに保存する。図4.3(b)に校正実行中の画面を示す。

この校正ファイルは次に示すデータ収集の際に読み出して使用する。また、校正は年1回程度、精度を要する場合は計測の都度実行する。

### 4.3 データ収集

次にデータ収集プログラムを実行し、音響インテンシティ解析に必要なクロススペクトルを測定する。ここで必要になるのが計測面の設定である。一般に、音響インテンシティ計測は、測定対象を取り囲むように設定した計測面上での値を求める。今回は、図4.4(a)に示すように、ユニットが取り付けられているバッフル面前方50mmの位置に計測面を1つだけ設定した。計測面の横サイズは700mm、縦サイズは400mmで、これを同図(b)の設定画面に示すように、50mm間隔でメッシュ状に分割した。このメッシュの交点が実際の計測位置となる。すなわち、横15点、縦9点の総計135点においてデータ収集を行う。

もし、既存の2マイクロホン・プローブ・システムを使用したならば、1点についてx,y,z方向の3回の測定を行わなければならないので、総計405回もの測定が必



(a) 測定対象と計測面



(b) 設定画面

図4.4 計測面の設定

要である。この例からも、3次元プローブの使用により、測定の効率を飛躍的に改善できることが容易に理解できるであろう。

収集データの種類にはAI: Active Intensity, SP: Sound Pressure, RI: Reactive Intensity, PV: Particle Velocityの4つがあり、通常はAI(およびSP)を収録する。2.4で述べたように、音場の状況をより正確に把握する必要がある場合、SPを含め、RIやPVの測定を行う。

また、音の放射が多方向にわたる場合には測定対象を取り囲むように6面を考え、それぞれの方向における音の放射状況を見る。これより、対象物から放射される全音響パワーを算出することもできる。この方法はJISに規定された無響室や残響室を使う方法<sup>[8][9]</sup>に比べ、通常の部屋環境で測定できる利点がある。なお、本システムでは最大10面まで計測面を設定できる。

計測面の設定を終えると、図4.5(a)に示すプローブの設定、および同図(b)に示す解析条件の設定を行う。プローブは解析周波数範囲によって60mmか20mmの

いずれかのギャップ長のアダプタを選択する。今回は解析する周波数範囲が広いので、1kHz未満の帯域については60mmのアダプタを、1kHz以上については20mmのアダプタを使用してデータを収集した。また、最初に行ったプローブの補正データはここで選択・適用している。他には、使用するアダプタに適した測定周波数帯域(60mmアダプタ：1kHz、20mmアダプタ：5kHz)、FFTのサンプル長(2,048点)、使用する窓関数(ハンニング)、平均回数もしくは計測時間(10s計測)、環境条件(気温28℃、気圧1,013hPa)などを指定する。気温と気圧は大気密度 $\rho$ の計算に用られる。

データ収集の前準備が完了すると、図4.6(a)に示すデータ収集画面が表示され、実際の測定に移る。設定した計測面の分割メッシュにおいて、収集位置にプローブアイコンが表示されるので、これに従って実際のプローブ位置を移動させていく。また、測定が完了し、データが保存された位置にはフォルダアイコンが表示される。これらのガイダンスによって、多数ある計測位置を間違えないよう、作業を進めることができる。

今回は図4.1に示したように自作のガイドメッシュと手動式のプローブ移動装置を使用した。簡易に行う場合にはガイドメッシュのみ用いて、手持ちでプローブを移動させる。1点につき10秒間のデータ収集を行ったが、全135点の計測を終えるのに要した時間はおよそ40分であった。同規模の計測を行う場合、旧システムではデータ収集だけでも数時間かかっていたので、飛躍的に効率が改善された。

なお、計測データは同図(b)に示すように、AI、SPなど、収集を指示した形式で確認することができる。

#### 4.4 トレース処理

データ収集を終えると、インテンシティマップを描く前処理として、トレース処理を行う。これは、測定データのうち、音響インテンシティを計算・表示させたい周波数帯域を定め、測定点ごとにその計算値を並べるものである。

まず、図4.7(a)に示すように、収集したスペクトルデータをモニタしながら、解析する下限周波数と上限周波数、すなわち周波数帯域を設定する。この1つのトレースにつき、1つのマップが描かれる。今回は、音源信号に含まれる7種類のオクターブ周波数の放射状況を観測するので、これらのスペクトル・ピークを含むように7つのトレースを設定した。ただし、4.3データ収集で述べたように、1kHzを境界にして、マイクロホン・ギャップ長が異なる別々の収録データを用いた。

条件の設定を終えた後、図4.7(b)のように計算を実行

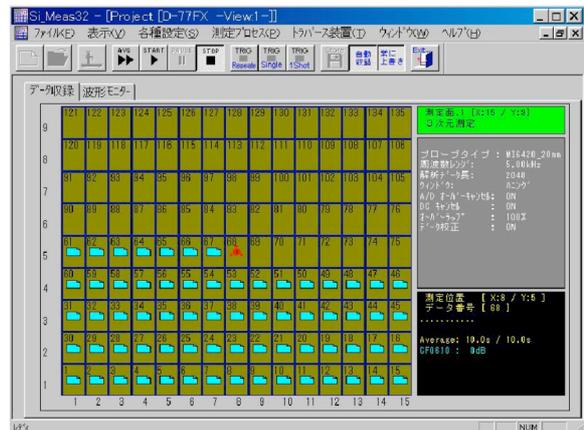


(a) プローブの設定画面

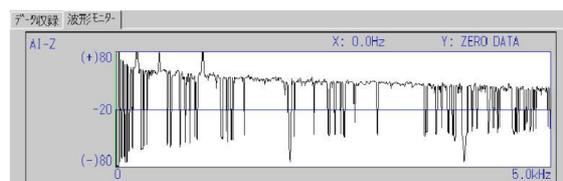


(b) 解析条件の設定画面

図4.5 データ収集におけるその他の設定

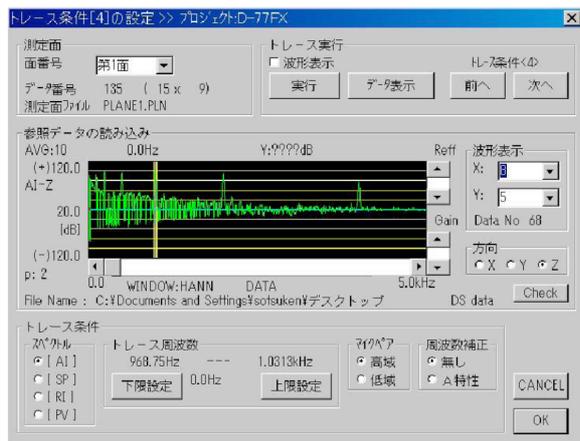


(a) プローブの移動とデータ保存状況

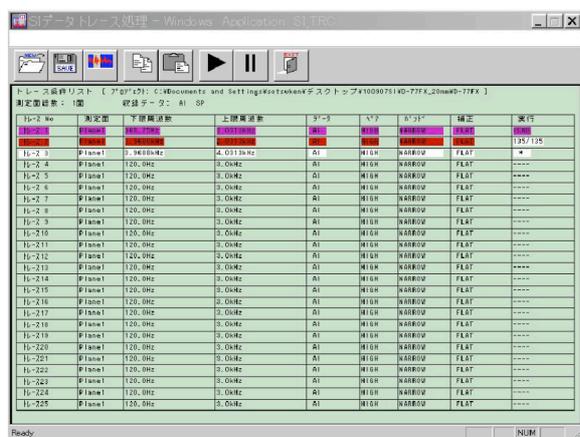


(b) 測定波形のモニタ (z方向AI)

図4.6 データ収集画面



(a) 解析周波数帯域の設定



(b) マップデータの計算

図4.7 トレース処理画面

するとマップデータが作成されるので、これを保存してトレース処理を終了する。

#### 4.5 マップ表示

トレース処理によって作成されたマップデータを様々な形式で表示するのがマップ処理プログラムである。本プログラムで可能な表示形式とその特徴を以下に示す。また、図4.8に1kHzの帯域について計算した音響インテンシティマップの各形式による表示例を示す。いずれの形式もインテンシティ・レベル $IL$ と呼ばれる相対値で表されている。

$$IL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB}) \quad (4.1)$$

ここで、基準値は $I_0 = 10^{-12} (\text{W}/\text{m}^2)$ で、人間が知覚できると言われている最小値である。

##### (1) コンターマップ

地図の等高線のように、等しいレベルの境界を色

分けして表現したもので、値に応じて凹凸を付けた3D表示もある。

##### (2) カラーマップ

レベルの値によって色分けしたもので、類似のマップとして、値に応じて凹凸を付けた3Dバーグラフ表示もある。

##### (3) ベクトルマップ

被測定物から放射されるエネルギーの流れの強さと方向をベクトル(矢印)で表現したもので、音響インテンシティが本来もつ方向性を表現できる形式である。値に応じて矢印の大きさが変化するが、それをさらに色分けしたカラーベクトルマップ表示もある。

##### (4) メッシュマップ

レベルの大きさを網目状のグラフで表現したもので、値に応じて色分けされる。

##### (5) データリスト

マップに描かれるデータを数値リストで表示する。

後ほど実例を示すが、いずれのマップも背景に任意の画像を読み込んで重ね描きすることができる。画像のサイズ等を別途手作業で適切に調整する必要があるが、測定対象の画像と設定した計測面を実際と同じ状態で合成することにより、音源位置の特定などが容易になる。

その他、マップの回転、平行移動、伸縮、色指定などの表示形式の調整機能に加えて、計測点を補間するスムージング機能などがある。

#### 4.6 計測例に対する考察

図4.9に3-wayスピーカからの放射音の音響インテンシティ計測結果を示す。背景にスピーカバツフル面の写真を用いてコンターマップを重ね描きした。これにより、スピーカシステムの各部からどのような音が放射されているかがよくわかる。インテンシティ・レベルは85dBから105dBの範囲で、1dB刻みで表示している。各図の左端にあるインジケータが示すように、青色から赤色になるほどレベルが高くなっている。

まず、(a)63.5Hzの結果をみると、ウーファとスクーカの両ユニットから同程度のレベルの音が放射されていることがわかる。低域クロスオーバー周波数は120Hzであるが、中域BPFのカットオフ特性がさほど急峻でないものと思われ、遮断周波数より1oct.低い信号もスクーカから放射されている様子が伺える。

次に(b)125Hzの結果であるが、ウーファ周辺に極端にレベルが低下する領域が認められる。これは実際にイ

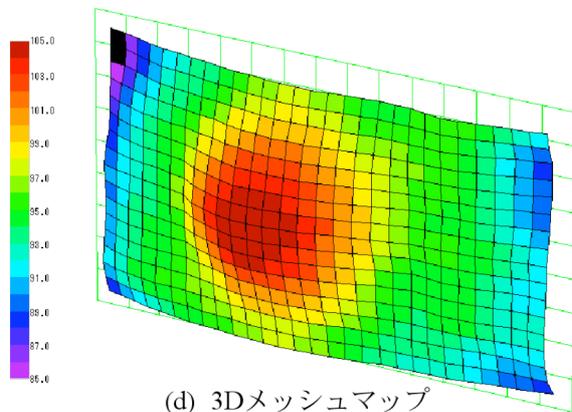
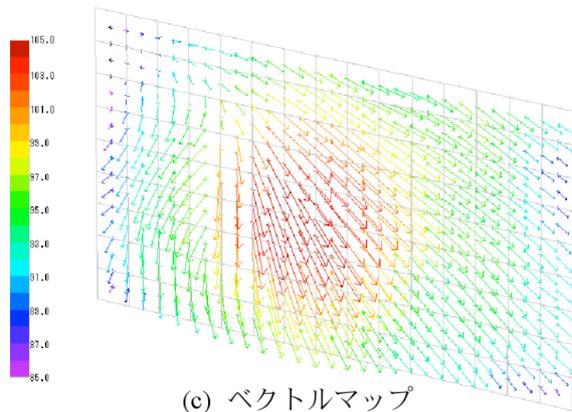
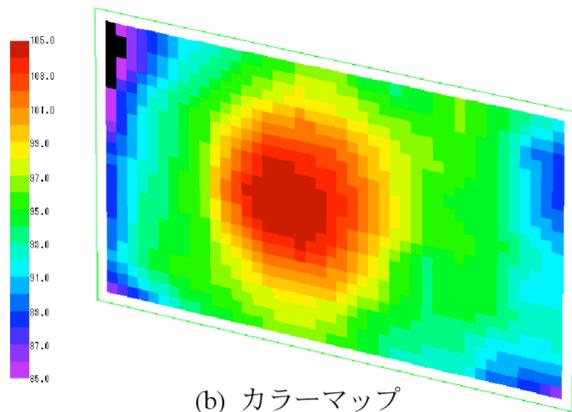
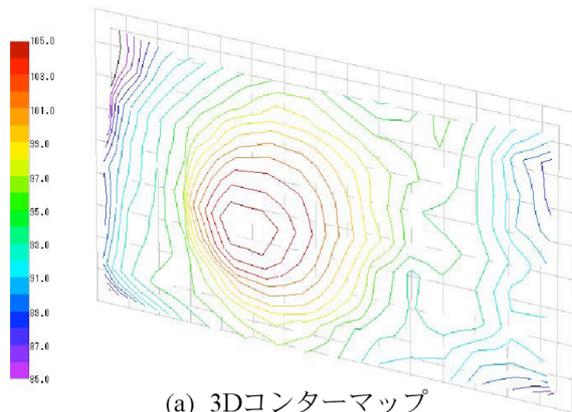


図4.8 各種の形式によるインテンシティマップ

ンテンシティレベルが低下しているわけではなく、コンターマップが $z$ 方向成分のみを表示していることに起因する。つまり、 $x,y$ 方向のレベルが主成分となっているわけである。125Hz という周波数は低域のクロスオーバー周波数にほぼ一致し、中低域の2つのユニットから同程度の音量が放射されていることは間違いない。ちなみに、同じデータをベクトルマップで表示すると同図(h)のようになり、中低域のユニットにおいて放射方向が逆相になっていることがわかる。これはネットワーク回路の位相特性や、ユニット振動板の質量などの機械的パラメータの相違によって生じているのではないかと考えられる。

(c) 250Hz から (e) 1kHz については、スコークが放射音の大半を支配しており、これを中心として同心円状にインテンシティレベルが分布している。

(f) 2kHz は高域のクロスオーバー周波数であり、スコークとツイータの両ユニットから同程度のレベルの音が放射されている。(b)と同様、スコークの周辺にレベルが低下する領域がみられるが、この場合はベクトルマップでも実際にインテンシティレベルが低下しているのが確認された。高域は音の指向性が強いので、放射方向がユニット前方に集中し、中高域のユニットからの放射音が干渉しているのではないかと考えられる。

(g) 4kHz の場合、音の放射はツイータが支配的となる。高域であることに加え、ホーン型の特徴が合わさって、ユニット前面のレベルが急激に上昇しており、非常に強い指向性を示している。

以上、3-way スピーカ ONKYO D-77FX の放射音の音響インテンシティ計測を行った結果、このモデルの特徴である「スコークユニット1つで中域の4oct.をカバー」している様子、および「ホーン・ツイータ特有の強指向性」が確認できた。

## 5. 音源探査機能

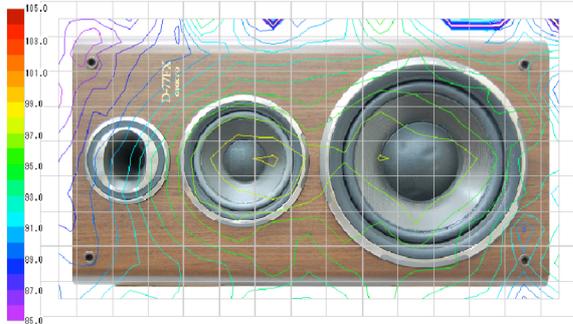
音響インテンシティ計測の原理を適用すると、プローブに対してどの方向から音が入射しているか判別できる。これより、本解析アプリケーションには音の到来方向をマッピングする機能が付加されており、音源探査と呼んでいる。

これを実行するには、まず4.4トレース処理と同様に、解析対象とする周波数帯域を設定する。図5.1(a)がその設定画面で、目的の帯域の下限周波数と上限周波数を指定し、1つのマーカーとする。このマーカーは10まで同時に設定・計測表示できる。プローブの補正や解析条件の設定などは、音響インテンシティの場合にはほぼ準

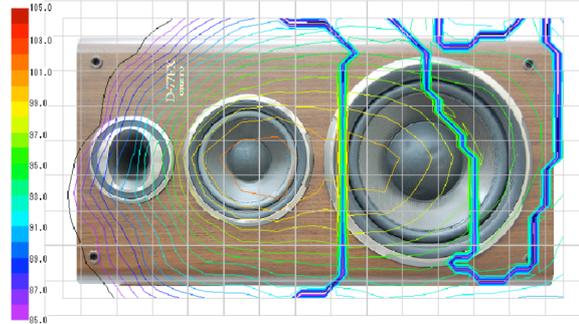
じて実施する。

同図 (b) に音源探査の実行画面を示す。これは、音響インテンシティ計測の場合と同じCD音源、スピーカを用い、スクリーン正面 200mm の位置にプローブを設置し

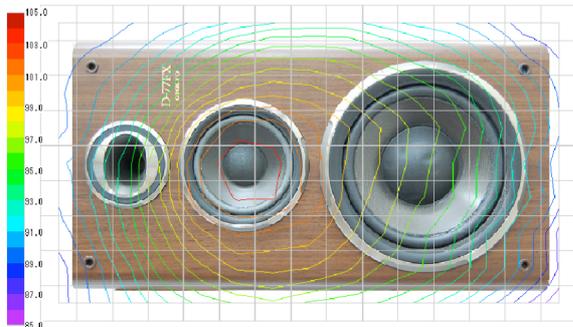
て 1kHz と 4kHz の信号を追跡した結果である。それぞれの音源方向は  $2\pi$  方向を表した座標系に楕円で表示される。楕円の位置が音の到来方向を、そして大きさが音響インテンシティレベルを示している。この時の測定で



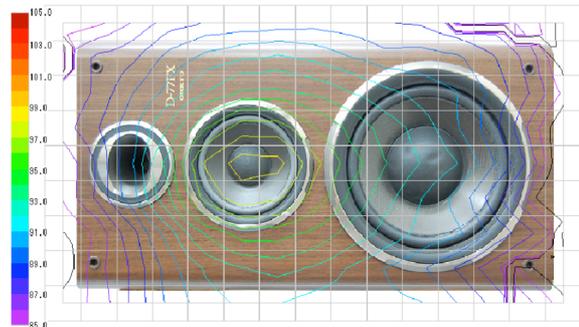
(a) 62.5Hz



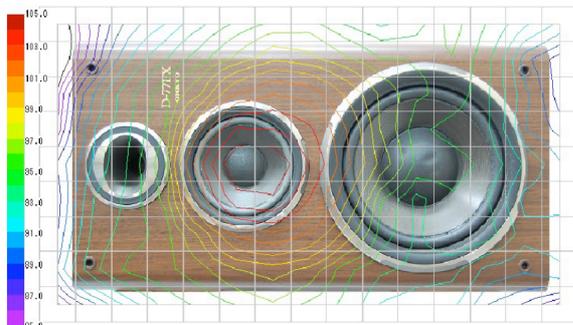
(b) 125 Hz



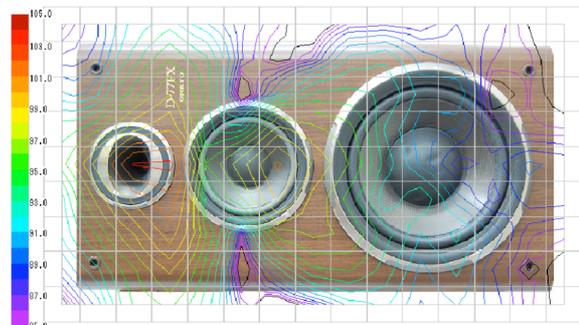
(c) 250Hz



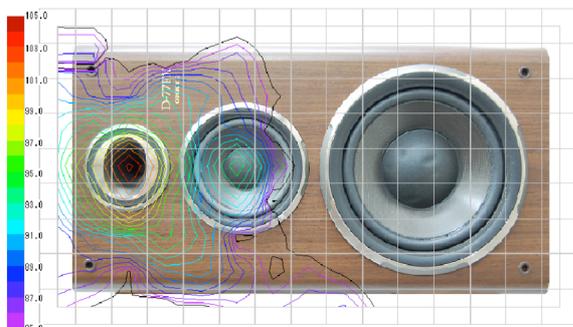
(d) 500 Hz



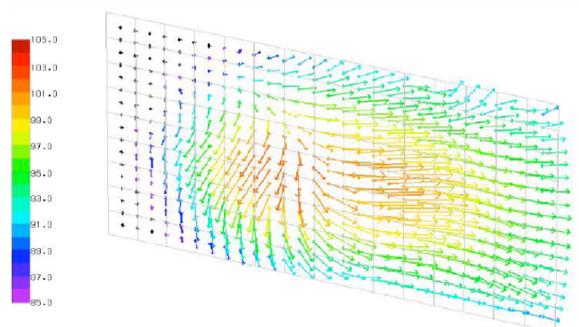
(e) 1kHz



(f) 2 kHz

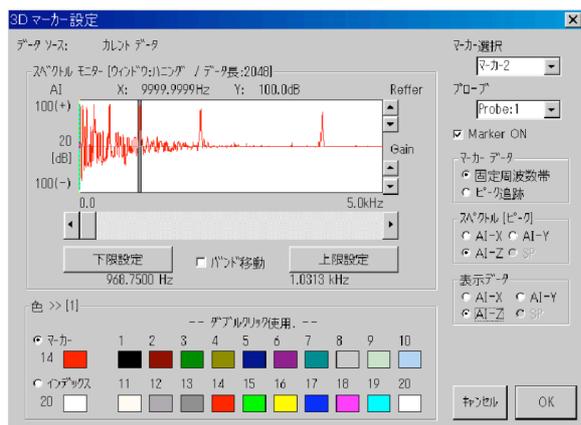


(g) 4 kHz

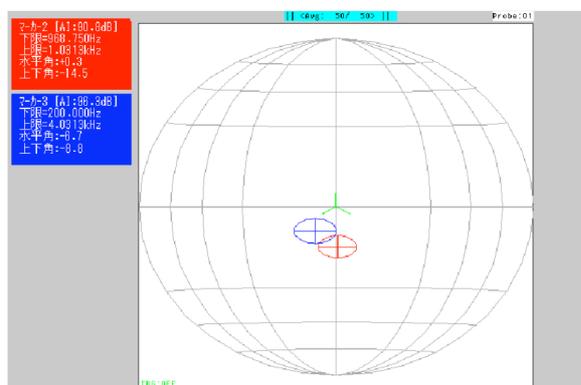


(h) 125 Hz ベクトルマップ

図4.9 3-wayスピーカからの放射音の音響インテンシティマップ



(a) 条件設定



(b) 実行画面

図5.1 音源探査機能

はプローブの校正やシステムの調整が不十分であったため、正面よりやや下方に2つの音源が検出された。

このマーカーの表示は約1秒間隔で更新されるので、目的の音をほぼリアルタイムに追跡することができる。しかし、画面上の表示位置と計測音場を目視した感覚との間にはずれがある。したがって、この機能を使いこなす、騒音源の特定などを行うには慣れが必要だと感じている。

## 6. あとがき

電気情報工学科において更新された音響インテンシティ計測システムにつき、基本原理と3-wayスピーカの放射音の計測例を交えて、その機能を紹介した。新システムは3次元プローブを採用しているので、従来の1次元プローブに比べるとデータ収集の労力が飛躍的に軽減され(原理的には1/3)、音源探査などの新しい機能も備わっている。テスト計測の結果では、中域ユニットで4oct.の帯域をカバーしていること、ホーンユニット独特の強指向性など、対象としたスピーカシステムの特

徴を的確に捉えることができた。

平成18年度には、対象物の振動の様子を可視化するモーダル解析システムが更新されている。今回の音響インテンシティ計測システムとあわせて、対象物の音響・振動特性をより多角的に調べることができるようになった。また、雑音環境下に適する表面音響インテンシティ、無響室を必要としない音響パワーレベル測定など、より発展的な計測に対応することも可能である。

今後は学生実験への利用を進めるとともに、校内外からの技術相談への対応など、活用を一層広げるように努めたい。

## 謝 辞

本設備は平成21年度高専教育充実設備費(補正予算)により導入された。年度末の多忙な時期にもかかわらず、予算獲得から納入に至るまで、諸手続きに奔走していただいた関係各位に心より感謝申し上げます。

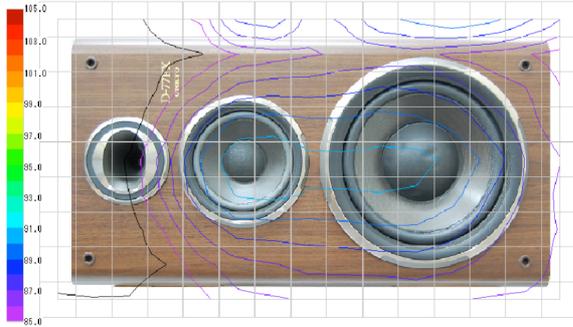
## 文 献

- [1] たとえば 安田仁彦, 機械音響学(コロナ社, 東京, 2004), p.34.
- [2] たとえば 鈴木昭次・西村正治・雉本信哉・御法川学, 機械音響工学(コロナ社, 東京, 2004), p.146.
- [3] リオン(株): 音源探査システムカタログ,(2010).
- [4] H. Suzuki, S. Oguro, M. Anzai and T. Ono, "Performance evaluation of a three-dimensional intensity probe", J. Acoust. Soc. Jpn. (E) **16** (4), 233-238, (1995).
- [5] S. Gade, "Sound Intensity (Theory)", Brüel & Kjaer Technical Review, No.3 - 1982, 32-34.
- [6] J. Y. Chung, "Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch", J. Acoust. Soc. Am. **64** (6), 1613-1616, (1978).
- [7] F. J. Fahy, "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals", J. Acoust. Soc. Am. **62** (4), 1057-1059, (1977).
- [8] JIS Z 8732: 音圧法による騒音源の音響パワーレベルの測定方法～無響室及び半無響室における精密測定方法,(2000).
- [9] JIS Z 8734: 音圧法による騒音源の音響パワーレベルの測定方法～残響室における精密測定方法,(2000).

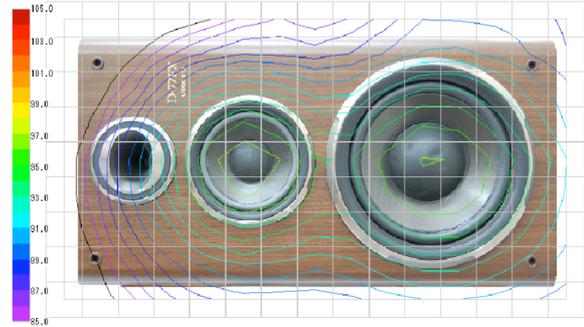
### 付録：3-wayスピーカの放射音の音圧マップ

付図1に音響インテンシティ計測と同時に収録した3-wayスピーカの放射音の音圧(SP)マップを示す。単純に音の大きさを表すスカラー量の音圧の方が、人間

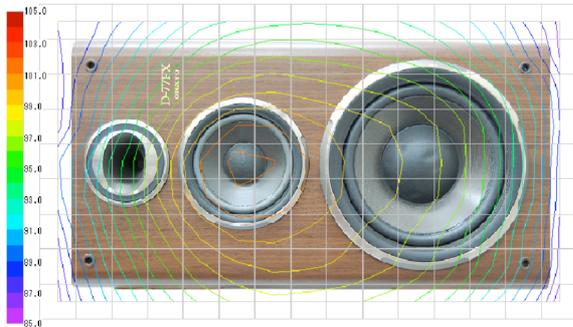
の感覚に合致しており、理解しやすいかも知れない。音響インテンシティと同様に、計測周波数が高くなるにつれて、高域ユニットに放射中心が移っていく様子がわかる。



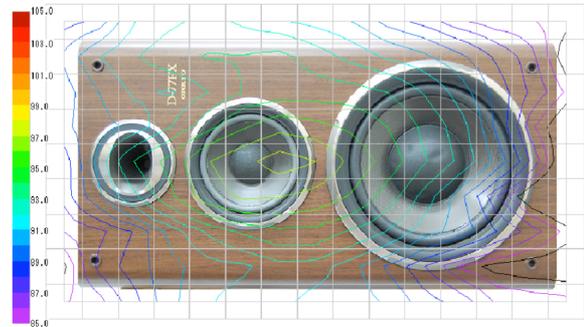
(a) 62.5Hz



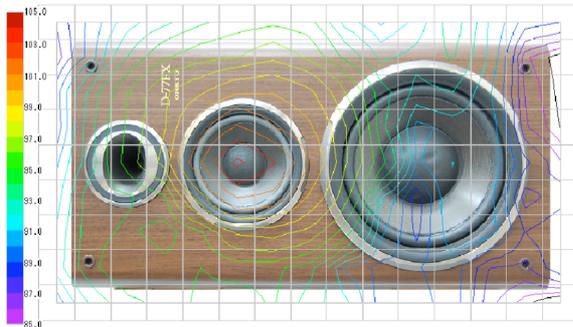
(b) 125Hz



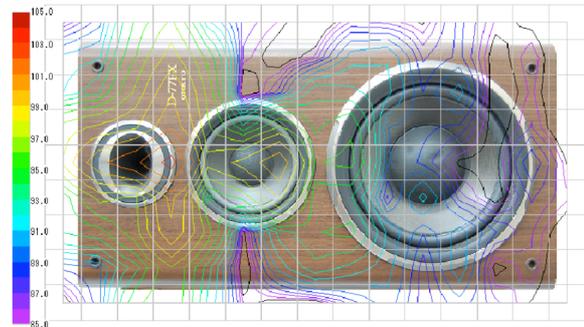
(c) 250Hz



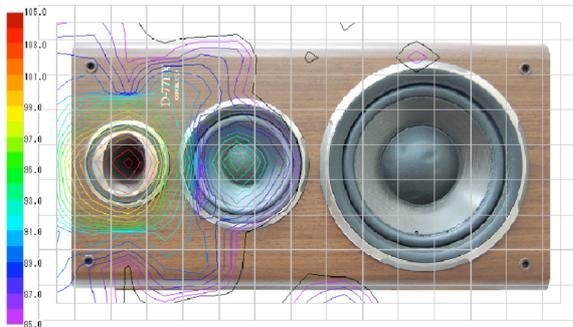
(d) 500Hz



(e) 1kHz



(f) 2kHz



(g) 4kHz

付図1 3-wayスピーカからの放射音の音圧マップ