

# 音響解析について

森厚夫

## 1. はじめに

音響解析とは、音響的な外力(音圧, 粒子速度拘束等)に起因する, 評価自由度に於ける音響的なパラメータ(音圧, 粒子速度, 音響インテンシティ等)を, 数値計算により求める手法と定義される. しかし, 実際の使われ方として構造解析との連成が必須である事が多く, 殆どの商用ソフトウェアは構造解析ソフトウェアとの連成が可能となっている.

音響解析法には, 条件によって複数の方法論が存在する. 図. 1 に, 周波数帯域毎に適した音響解析の手法を示す.

- 低周波数帯域に適した解析手法
  - ①境界要素法 (Boundary Element Method)
  - ②有限要素法 (Finite Element Method)
- 高周波数帯域に適した解析手法
  - ③統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis)
  - ④音線法 (Ray Tracing Methods)

図.1 周波数帯域毎の音響解析手法

低周波数帯域に適した手法として挙げた①, ②は, 厳密解を計算する手法であり, 高周波数帯域に適した③, ④は近似解である. 高周波数帯域に於いて厳密解を求める事は可能であるが, 計算負荷が高くなるため, 現実的ではないとされている. 厳密解を求める解析法では, 解析対象の物性情報を量子化するためのメッシュ分割が必要となり, そのメッシュの一辺(図.2 中の  $d$ )は媒質を伝達する波動の一波長の  $1/6$  以下と推奨されているため, 周波数が高くなればなるほどメッシュの数(計算に用いる要素数)が増加する事となり, 結果として計算時間が増加する事となる. 計算時間に拘らないならば, 高周波数帯域で厳密解を求める事は可能である. 尚, ここでは簡単のために四角形のメッシュ形状を示したが, メッシュ形状には目的に応じて様々な形状が存在する.

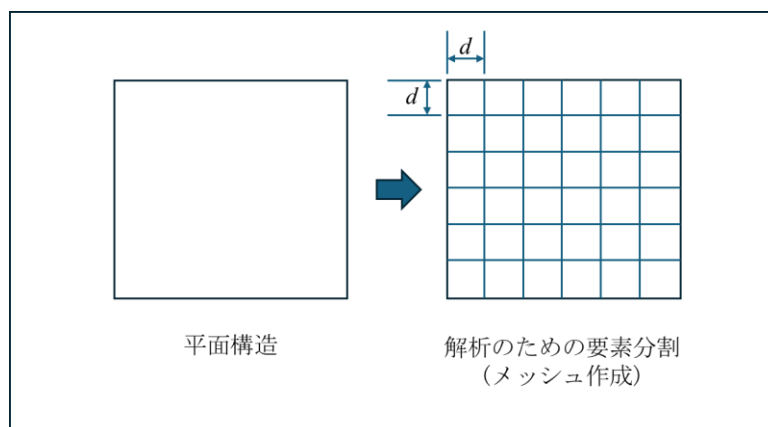


図.2 メッシュ作成

## 2. 各手法についての説明

### 2・1 境界要素法(Boundary Element Method, BEM)

音響境界要素法は、音源から自由空間に対する音響放射を計算するのに適している手法である。図.3に、音響境界要素法による、簡単な解析例を示す。無限空間に存在する点音源から音響

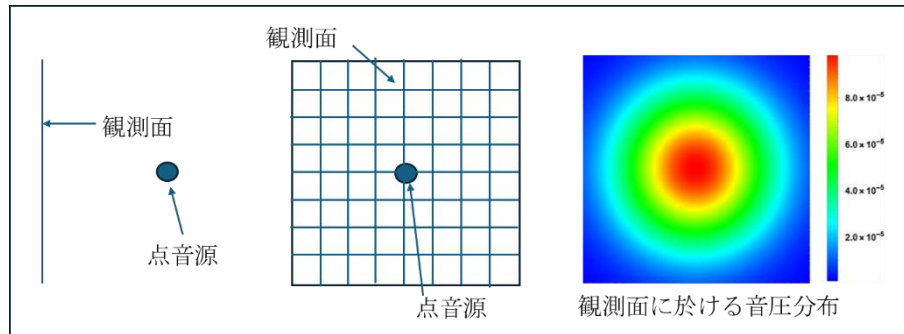


図.3 音響境界要素法

パワーが放射されているだけの音場であり、観測面には構造が存在せず、空間に音響センサが存在している状態である。音圧分布のコンター図は、観測面の要素毎に表示される音圧をスムージングして表示したものである。境界要素法は音場の全体を離散化して計算する有限要素法(Finite Element Method)とは異なり、音場の境界値問題を、境界表面を離散化する事により解くものである。従って2次元の境界面だけに要素分割(メッシュ分割)を行えば良く、節点数、解析の自由度を、有限要素法に比して大幅に減少させる事が出来る。よって、境界要素法は、自由空間への音響放射問題においては、モデル作成を容易に行う事が可能である。

詳細はここでは避けるが、境界要素法は境界積分方程式を使用し、境界の離散化のみで近似解を得る事が出来るが、離散化により得られる係数行列が密となるため、有限要素法と比してモデル作成の手間は小さいが、計算時間は大きくなる傾向にある。

### 2・2 有限要素法(Finite Element Method, FEM)

音響有限要素法は、閉空間の音響解析に適している。図.4はスピーカーのモデルデータの内部空間の音響有限要素法により、音響モードを求めたものである。必要な周波数帯域の音響モードの重ね合わせのデータに対し、音響的な外力を入力する事により、解析空間内の音圧を計算する事が出来る。

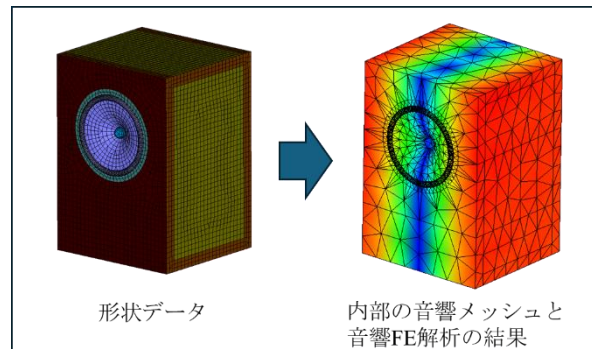


図.4 音響有限要素法

音響有限要素法は、下記の手順で行われる。

- (1) 音響波動方程式を離散的に解くため、まず要素分割(メッシュ作成)を行う。
- (2) 音響波動方程式を解く事により音場を求める。
- (3) 境界条件(音響インピーダンス)の設定
- (4) 応答解析の実行

解析空間を全て要素分割しなければならないため、境界要素法に比して、モデル化にはより手間を要する事となる。

### 2・3 構造有限要素法，音響有限要素法と音響境界要素法の連成解析 (Coupled Analysis of Structural Finite Element Analysis, Acoustic Finite Element Analysis and Acoustic Boundary Element Analysis)

機械構造物からの音響放射を予測する際、多用されると考えられる、構造 FEM-音響 FEM-音響 BEM の解析例を紹介する。スピーカの構造モデルの中に空間があり、スピーカコーンに加わる構造加振力が構造(構造 FE モデル)と内部空間(音響 FE モデル)を加振し、その連成により算出される構造の振動に起因する外部への音響放射を音響 BEM により計算し、外部の観測面における音圧分布を計算するモデルである。

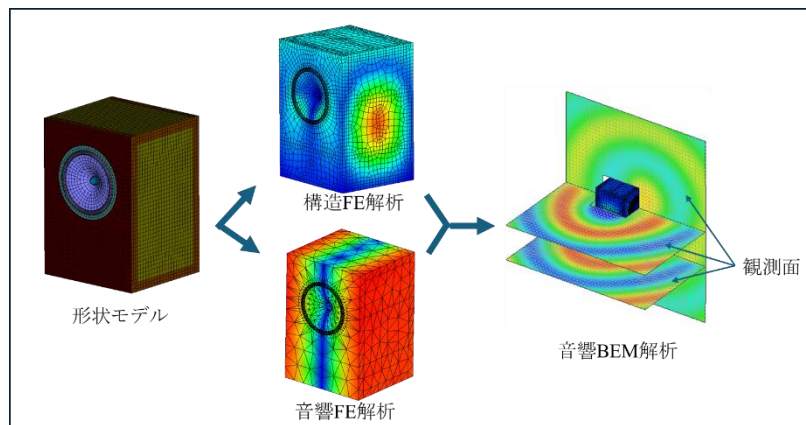


図.5 構造有限要素法，音響有限要素法と音響境界要素法の連成解析

### 2・4 統計的エネルギー解析法(Statistical Energy Analysis, SEA)

統計的エネルギー解析は高周波数帯域に適した解析法と言われるが、厳密に区切りとなる周波数が存在する訳ではなく、判断基準の一つとして、音響(または振動)モードの密度がある。SEA は、等ピッチの狭帯域の周波数分解能で計算を行う FEM,BEM とは異なり、1/3 オクターブバンド、または 1/1 オクターブバンドの分解能で解析を行うが、1/3 オクターブバンド内に音響(振動)モードが 5 個以上あれば、当該周波数以上で、そのモデルで行う SEA の精度は問題無い、という定説がある。この定説に対しては諸説があり、現在でも議論が行われている。SEA については”モード解析と統計的エネルギー解析”に概略を記しているのを参照されたい。

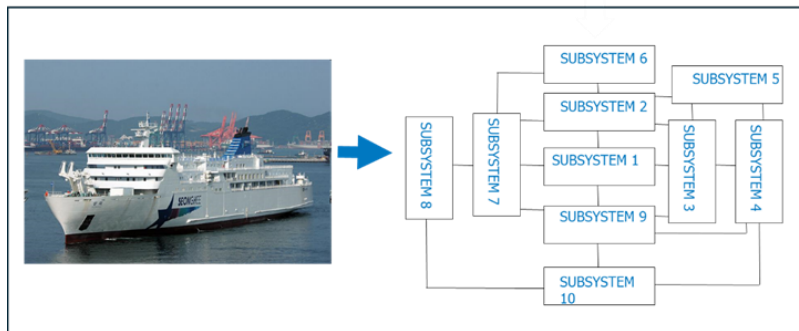


図.6 SEA のサブシステム分割例

音響エネルギーが同程度と判断出来る空間を一つのサブシステムと定義し、他のサブシステムとの音響パワーの相関関係を CLF(Coupling Loss Factor)、サブシステム内で散逸する音響パワーを ILF(Internal Loss Factor)で決定する事により、SEA モデルが作成される。SEA モデルの所望のサブシステムに音響加振力を定義すれば、各サブシステムに入力される音響パワー、音響エネルギーを計算する事が出来る。

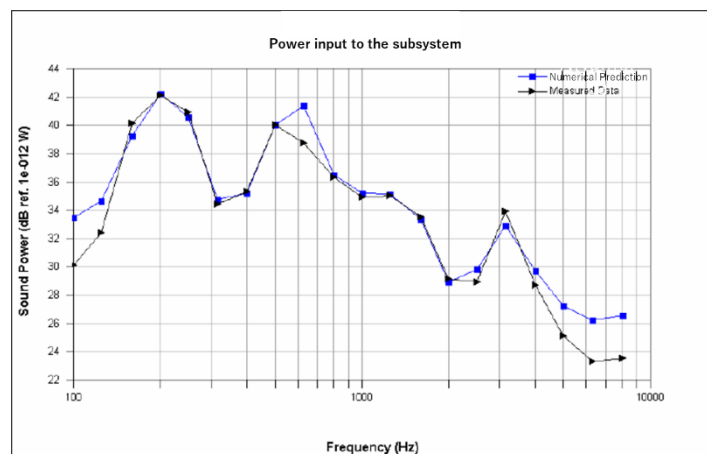


図.7 サブシステムに入力される音響パワー

### 3. まとめ

低周波数帯域、高周波数帯それぞれに適した、代表的な解析手法について、概略の説明を記した。ここに挙げたものが、数値解析の全ての手法ではなく、既存の手法の問題点を補う事を目的とした新しい手法が加わっており、それらは主に計算時間の短縮が目的となっている。

近年の使われ方として、音響解析ソフトウェアだけで使われる事は少なく、構造解析ソフトウェアと連成して使われる事が多く、ソフトウェアによっては、強連成(振動→騒音と、騒音→振動の双方向の連成が計算可能)が不可能で、弱連成(振動→騒音 or 騒音→振動のどちらかの連成のみ計算可能)のみ可能である場合があるので、注意が必要である。

読者アンケートへのご協力よろしくお願いいたします。

<https://forms.cloud.microsoft/r/TMs4XqTPdZ>