

連載企画—音響学の温故知新—

# 境界要素法による音場の数値解析と 低騒音設計への適用\*

田中俊光 (神奈川大学工学研究所客員教授)\*\*

43.20.Rz; 43.50.Gf

## 1. はじめに

筆者は 1973 年春に神戸製鋼所に入社して以来、2007 年成蹊大学理工学部へ転じ、2013 年に同大学を定年退職後の現在に至るまで、一貫して音響に関わる仕事に携われる幸運に恵まれて来た。

「幸運」と申し上げるのは、音そのものや音楽に幼い頃から興味があり、大学時代には大学管弦楽団の末席を汚すなどして、入社後の職務が騒音を対象とする研究開発ではあったが、仕事というよりは趣味の延長線上として心から楽しんで取り組んで来られたからである。

最初に音の仕事に携わった 44 年前の 1973 年当時は、現在と違って音場数値解析専用の汎用ソフトウェアプログラムはいまだ市販されておらず、自社開発せざるを得ない状況にあった。その頃のことなどを、限られた狭い範囲のささやかな話で恐縮ではあるが、述べさせていただくこととする。

## 2. 境界要素法との出会い

入社して振動音響グループ（現機械研究所振動音響研究室）に配属され、ガスタービンや大型送風機などの消音器の消音設計にしばしば従事していた入社間もない頃、拡張室型と呼ばれる基本的な消音器構造において、何故拡張室の長さが波長の  $1/4$  となる周波数で消音効果が最大となるのかについて、式からは理解できるものの直観的には腑に落ちず悶々としていた時期があった。消音器内部の音圧分布や粒子速度分布を可視化できれば消音原理の理解が進むのではないかとの思いがつのり、音場解析ソフトウェアの開発を研究テーマとして願い出たところ許されたのが、音場数値解析に取り組む端緒となった。

当時は、音場の数値解析の手法として有限要素法（以後 FEM）を適用した研究が盛んであった。音場の離散化方程式の定式化が、それまでは汎関数の停留条件から導かれていたのに対して、汎関数が不明でも定式化できるガラーキン法による離散化方法が発表され、また吸音性の境界条件を有する音場や、吸音材で満たされた音場の解析法の発表などが国内外で続いていた。

しかし、当時の大型電子計算機では、広範囲な周波数帯域の消音性能周波数応答を計算するには、記憶容量においても計算時間においても実規模の大モデルを実用レベルで解くにはほど遠く（当時の大型計算機 IBM3081K で 110 元ほどのフルマトリックス複素連立方程式を倍精度で解くのに 10 秒程度要していた）、誰も今日のような数十万円を超える大規模自由度の計算を伴う音場数値解析の実用化と発展を思い描くことはできていなかったのではないかと思われる。

1970 年代後半には、場の問題を境界の問題に変換し、境界要素の節点間の状態変数については FEM と同様に内挿関数を導入して離散化を行う境界要素法（以後 BEM）が材料力学分野で注目を集めていた。FEM と比較してマトリックスの小型化による計算時間やデータ作成の手間の短縮化が期待されたからで、音響設計への数値シミュレーションの実用化を考えていた筆者には大変魅力的に見えた。加えて音響問題では、音が無限空間へ放射されると見なせる場合も多く、FEM のように放射空間や無限要素の設定といった特別な処理を施すことなく、放射境界面を離散化するだけで放射問題に容易に対応できる点も有利と考えられた。もちろん音場内部も境界の値から容易に求められる。かくして BEM を適用した音場解析ソフトウェアの開発に着手した次第であった。

\* Numerical analysis of sound field by BEM and application to design for noise reduction.

\*\* Toshimitsu Tanaka (Kanagawa University, Yokohama, 221-0802)

### 3. 低騒音設計問題への適用

一定要素を用いた報告 [1-3] はなされていたが、状態変数となる境界要素上の音圧と粒子速度の内挿関数の次数と計算精度との関係の検討や、更なる計算時間の短縮化を狙った領域を分割して計算する試みなど [4] を経て実規模の気圧へ開口した消音器（断面積  $2.1\text{ m} \times 2.1\text{ m}$ 、長さ  $3.4\text{ m}$ ）の消音設計に活用できるようになった。この寸法では消音器の性能解析に広く使われていた 1 次元伝達マトリックス法の適用周波数範囲は  $81\text{ Hz}$  までとなるが、要素の分割粗さからくる上限はあるものの、BEM では更なる高周波数域まで、FEM より短時間で解析が可能になった。

しかし、現場の問題の中には長い配管の途中に大きな消音器が挿入されるという場面もあった。例えば直接還元製鉄プラントにおけるプロセスガス圧送用配管系では、消音器に接続される配管系の長さが  $100\text{ m}$  を優に超えることもあった。このような音響系を全体として BEM により離散化し、大マトリックス的に解くことは当時の大型計算機では困難であった。そこで、消音器問題では出入口の伝達特性を把握できればよいことに注目して、消音器の内部構造を部分系に分割し、BEM によって導いた各部分系のマトリックスを入力側と出力側の状態変数を関係づける伝達型マトリックスに変換して全体系を計算することを考えた [5]。しかもこの方式では 1 次元伝達マトリックスとの接続も可能となるので、長い配管部を 1 次元モデルで扱うことにより、計算時間や計算機容量を大幅に低減して計算することが可能になった [6]。

設計問題で多い吸音性の音場については、音場の境界が吸音面の場合には境界の吸音側の法線方向の比音響インピーダンスの値が、また音場内に吸音領域が存在する場合には吸音材料の特性インピーダンスと伝搬定数の値が分かれば数値解析が可能になる。

比音響インピーダンスの計測には、当時は単一周波数の管内定在波から求める方法が採られていたが、この方法では周波数応答を求めるのに多大な手間を要し、時間がかかりすぎて周波数分解能を十分にとっての音場の数値解析を行うことは実用的には不可能に近かった。このような状況の中、単一周波数の音の代わりに白色雑音を使い、マイ

クロホンを管内で移動させる代わりに 2 個のマイククロホンを使って極めて短時間に比音響インピーダンスを計測する方法 [7] が報告され、これを適用することにより可能となった。また、特性インピーダンスと伝搬定数については、グループの宇津野秀夫氏（現関西大学）が同様の計測システムを用いて開発した Improved two cavity 法 [8] によりごく短時間の計測が可能となった。

このようにして設計問題への適用環境整備が進み、スーパーコンピュータの出現など電子計算機の飛躍的な発展にも支えられ、産業機械、乗用車室内、建機運転室、航空機用防音格納庫、新幹線防音壁、高速道路高架音場、掘削道路音場等々の数多くの騒音低減問題で、設計に有用な知見を得る [9] ができるようになった。

### 4. おわりに

誌面の都合で述べられなかった外部音場における解の一意性問題や薄肉問題、及び他の文献紹介については、例えば文献 [10, 11] を参照いただければと思う。

#### 文 献

- [1] W. A. Bell, W. L. Meyer and B. T. Zinn, "Predicting the acoustics of arbitrarily shaped bodies using an integral approach," *AIAA J.*, **15**, 813-820 (1977).
- [2] T. Terai, "On calculation of sound field around three dimensional objects by integral equation methods," *J. Sound Vib.*, **69**, 71-100 (1980).
- [3] 高田寛太郎, "無限大バフルに取り付けられたピストンコーンの放射インピーダンス," *音響学会誌*, **38**, 71-75 (1982).
- [4] 田中俊光, 藤川 猛, 阿部 亨, 宇津野秀夫, "境界要素法による二次元音場の解析 (消音器モデルへの適用)," *日本機械学会論文集 C 編*, **50**, 848-857 (1984).
- [5] 田中俊光, 藤川 猛, 阿部 亨, 宇津野秀夫, "境界要素法による二次元音場の解析 (伝達マトリックス形解法の提案と消音器モデルへの適用)," *日本機械学会論文集 C 編*, **50**, 2356-2363 (1984).
- [6] 田中俊光, 宇津野秀夫, 増田輝男, 神崎奈津夫, "境界要素法による音場の解析 (三次元音場の伝達マトリックス形解法と大型脈動消音器への適用)," *日本機械学会論文集 C 編*, **53**, 1443-1449 (1987).
- [7] A. F. Seybert and D. F. Ross, "Experimental determination of acoustic properties using two-microphone random-excitation technique," *J. Acoust. Soc. Am.*, **61**, 1362-1370 (1977).
- [8] H. Utsuno, T. Tanaka, T. Fujikawa and A. F. Seybert, "Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, **86**, 637-643 (1989).
- [9] 田中俊光, "音場数値シミュレーションによる静音化とその実現," *シミュレーション*, **32**, 360-363 (2013).
- [10] 田中俊光, "境界要素法を用いた音場の数値解析," *音響学会誌*, **48**, 412-419 (1992).
- [11] 佐久間哲也, "境界要素法による音場の数値解析," *騒音制御*, **31**, 248-254 (2007).