

連載企画—音響学の温故知新—

流体騒音研究 40 年*

秋下 貞夫 (立命館大学理工学部)**

「流体騒音」とは、低マッハ数の流れから生じる音の研究分野であり、一般には Aerodynamic sound と呼ばれて、流体力学の一分野を指す。筆者の尊敬するこの分野の大家 M.S. Howe (Boston University) の大著は 'Acoustics on Fluid-structure Interactions' とのタイトルを持つ。また、この分野を 'Aero-acoustics' と呼ぶことがある。これらはこの分野が音響学の一分野であることを示している。筆者は 1970 年代初期にメーカーの研究所においてこの分野の研究に手を染めて、中断期間を含めて 40 年間もこの分野の研究に携わってきた。この間の思い出を綴ってみたい。

Aerodynamic sound の研究は、1952 年に出版された有名な論文、M.J. Lighthill, "On sound generated aerodynamically, part 1; general theory," *Proc. R. Soc. Lond.*, A211 (1952) から始まったと言って過言でない。Lighthill は Cambridge University で Lucas Professor と呼ばれるポストを勤めた超有名な流体力学者であり、第二次世界大戦後に始まった英国製ジェット旅客機 'Commet' の騒音問題解決を目指して始めた研究の最初の成果がこの論文と伝え聞く。実際には第二次世界大戦中にソ連では L. Gutin がプロペラ推進機が発する音の研究論文を出版しており、この論文は明らかに aerodynamic sound 研究の嚆矢をなす。Lighthill の論文の新しさは、音波の伝播を支配する波動方程式では省略する、加速度の一部を表す非線形の輸送項を省略せず、波動方程式の非斉次項として保持し、これを音源項として表したことにある。言うまでもなく、音の発生と伝播は流体の支配方程式で記述できる。実際に近年発達した流れの数値シミュレーションを用いて、

できるだけ離散化差分の誤差を抑えるように高次差分を用いた計算を行えば、流れの現象の一部として音波の発生を捉えられることを示す論文が発表されている。これを敷衍すれば流体騒音の研究はすべて流れの数値シミュレーションを適用して済むことになる。ここでこの数値計算の精度を精査してみよう。音波のパワーは一般に機械的なパワーに比べて極めて微弱であることはよく知られている。例えば、空調機の騒音を支配するファンの音のパワーはファンの送風パワーの 10 のマイナス 6 乗程度である。すなわち、これは流れ場の速度を 10 のマイナス 3 乗程度の精度で計算することを要求する。上に挙げた流れの数値シミュレーションを用いて流れの現象から音波の発生を捉えた例は円柱後流から発生するエオリア音の場合であり、2 次元の流れを扱っている。しかし実際に産業界で扱う機器の流体现象は多くの場合、3 次元の流れに基づいており、乱流を扱う場合が一般的である。そのような流れで複雑な境界条件の下で流速分布を 10 のマイナス 3 乗程度の精度で計算することは、大形の計算機を持ってしても困難を極めることは音響学会の研究者諸氏にも容易に納得できるであろう。そこで流体騒音の研究では、第一に音源のモデル化が最大の関心となる。筆者はこの分野の研究をファン騒音の研究から始めた。翼の回転によって生じる翼の周りの流れから音源となる流れを数学的に表現することが重要な課題である。1960 年代から、1970 年代にかけて、このような立場から、流体力学の有力ジャーナル、*Journal of Fluid Mechanics*, *AIAA Journal* などではこのような論文が多く掲載された。流体騒音の研究者にとっては、音の発生と伝播を表す方程式をどのように構成するかが第一の課題であった。この事情は音響学の有力な教科書、Morse/Ingard, 'Theoretical Acoustics' を見ればある程度推測できよう。流体騒音の研究者にとっては、音響学は

* Forty-years in aero-acoustics.

** Sadao Akishita (Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu, 525-8577)
e-mail: akishita@se.ritsumei.ac.jp

流体騒音の一分野に過ぎず、固体の振動から発生する正弦波音波も流体騒音の手法によって容易に扱えると自負していたように見える。

Aerodynamic sound の研究の主流は上に述べた Lighthill がこの分野を創始した動機、及び唯一の国際会議 Conference of Aeroacoustics の開催が欧米の航空宇宙産業によって支えられることを見れば一目瞭然である。有力な航空産業のない我が国では、筆者の例に見られるように民生並びに産業機器の流体騒音に依拠しなければならなかった。この場合の流れは現在の日本で最も社会的に大きな流体騒音の代表例である新幹線列車の騒音の例を見ても分かるように、マッハ数 0.3 程度を超えない流れから生じる。そこでは流れを非圧縮の流れで扱った上で、その流れの中から音源となる項を数学的に表現しなければならない。その意味で敢えて、Aerodynamic sound と呼ばず Hydrodynamic sound と呼ぶ。

このような日本の流体騒音の研究は、1960 年代に東大の当時の付設研究所の一つ航空研究所から始まった。筆者も民間のメーカーの研究所においてこの研究を始めるにあたって、当時のこの分野の数少ない研究者であった当時の航空研究所小竹進先生 (故人)、梶昭次郎先生 (現帝京大学工学部) に指導を乞うてきた。騒音の研究者は今も昔も泥臭い研究環境に置かれざるを得ない。筆者の経験でもメーカーの研究所に持ち込まれる研究課題は常に短期間での解決を迫られ、しかも製品における成果を挙げるよう要求される。多くの場合深い現象の理解に基づく基礎的な研究手法よりも、マニュアルやハンドブックに基づく即戦的な手法が尊重される。研究者は基本的に同種の現象を少しだけバリエーションを付けた研究手法に繰り返し訴えることを要求される。そこでは若い研究者は、同じ研究手法の適用に飽きて挙げ句にこの分野の研究者

たることに失望するケースが多い。実際には即戦的な手法を駆使しながらも基礎研究をもこなす力量が要求されるにもかかわらず、力量の確立を諦めてしまうように見える。

このような分野にあって、小竹、梶両先生は基礎研究に軸足を置いた深い洞察に基づく研究で常に筆者のみならず、数少ないこの分野の日本の研究者をリードし続けられた。上に挙げた M.S. Howe 先生と同じく、筆者にとっての数少ない流体騒音研究の恩師である。今になって筆者も若い研究者にこれらの先生のような影響を与えることを志しているが言うは易くて実現は困難である。

さて近年、筆者は、多孔性固体表面による流体騒音源の低減と、流体騒音の発生と伝播に影響を与えるグリーン関数の表現に関心を寄せている。流体騒音の音源を Lighthill が導いたレイノルズ応力で表すよりもその中の渦度を持つ流体部分に特定する「渦音理論」が有効であり、これに固体の影響を表す適当なグリーン関数を取り入れることに努力を集中している。最近になって、このグリーン関数には音響学で古くから研究されてきた「回折理論 (Wiener-Hopf 手法)」を応用できることを知った。すなわち、筆者にとっては音響学は回折理論を通してこれから勉強しなければならない分野に見えるのである。古くから確立されているように見える音響学にも流体騒音研究にとっては学ばなければならない先進的な手法が埋蔵されていると思直している。

秋下 貞夫

1961 年 3 月京都大学工学部航空工学科卒。工学博士。1964 年プリンス自動車工業(株)を経て三菱電機入社。1988 年 3 月まで同社中央研究所にて流体技術並びに宇宙機器の研究に従事。1988 年 4 月立命館大学理工学部機械工学科教授に就任、2009 年 3 月定年退職し、現在に至る。