

音響学入門ペディア

Q. 「音響放射力はなぜ発生するのでしょうか。音波 1 周期で正圧・負圧のトータルは 0 なのに、なぜ直流成分が発生するのかわかりません。」

A. 音波は大気圧を中心とした圧力変動ですが、この変動は極めて小さいのがふつうです。すなわち、大気圧という直流成分に、音波という微小な交流成分が重畳していると解釈できます。また、この交流成分の音波をその 1 周期で積分すると 0 になり、音波そのものには直流成分がありません。しかし、これは線形領域の話であって、音波の 2 次の微小量まで含めた非線形音響領域で議論するとなると、微小ですが直流成分が現れます。特に、音波の振幅変動が大きくなると、直流成分の発生が目立ってきます。

さて、固有音響インピーダンスが均質で等温な媒質内のある位置に仮想平面を想定し、その面に垂直に音波が入射していると仮定します。このとき、この面が存在しても音波は乱れや反射が起こることはなく、すべての音波は透過します。よって、面を挟む両領域の音響エネルギー密度に差は生じません。つぎに、音響インピーダンスが異なる 2 種類の媒質が、ある位置の面で接している状態を考えます。この境界へ音波が入射すると、音響インピーダンスの相違に起因して、音波の反射が生じ、境界を境に両領域のエネルギー密度に差が生じます。その結果、境界面の左右から働く圧力の平衡が崩れ、その差に相当する圧力差、すなわち単位面積当たりの力が境界面に働き、幾ばくか境界面が移動します。この移動で力学的な仕事（例えば、ばねの復元力でこの圧力差に抗する場合、ばねの変位に伴う力学的エネルギーの増加に相当）がなされますが、熱力学に基づけば、このときのエネルギーは音響エネルギー密度の差から供給されることとなります。また、エネルギー密度の次元 $[J/m^3]$ は $[N/m^2]=[Pa]$ に書き換えられ、面を挟む媒質内のエネルギー密度の差は、結局は境界面を両方から押す圧力の差になるとも理解できます。このように、均質等温で媒質自体の移動がない音場内に、周囲の媒質と音響インピーダンスが異なる物体が存在して音響エネルギーの流れを遮ると、境界面を通して直流的な一定の圧力が働きます。これを音響放射圧 (acoustic radiation pressure) と言います。音響放射圧の基本的な現象の説明は以上ですが、われわれは、放射圧それ自身よりも放射圧を物体の面上で面の方向（法線）を含めて積分し、その結果得られる実質的な力、すなわち音響放射力 (acoustic radiation force) を測定したり応用したりします。なお、音響エネルギーそのものではなく、それから派生する圧力差を議論の対象としているので、これは非線形音響の分野に含めています。

放射力は波動の持つ共通の性質であり、歴史的に見ると、電磁波の分野で放射力の存在が知られた後に、音波においても存在が確認された経緯があります。17 世紀の初頭に、天文学者の Kepler は、彗星の尾が常に太陽と反対側に伸びるのを見て、太陽光による何らかの圧力（光圧）が原因と推測していました。その後、長い期間にわたって、Newton の光の粒子説に基づき、光圧の説明がなされました。すなわち、光子が壁に衝突する際に運動量

が変化し、壁に圧力が作用するという考えで、直感的に分かりやすいものでした。そして、18世紀にはその放射圧を検出しようと多くの試みがなされました。当時は、今日よりも光圧を大きく見積もっていましたが、それでもその光圧は余りにも微弱であり、当時の測定装置の性能では誤差が大きくて実証するまでには至りませんでした。19世紀に入って、Young や Fresnel らの光の波動説が台頭し、Maxwell は、電磁波が物体に入射すると、その面に圧力が働くという理論報告を行いました(1871)。そして、光の波動説優位な時代になりましたが、もし当時までに光圧が精度よく測定されていたならば、光の粒子説が波動説に大きく立ちはだかつたのではないかとの見方があります。光圧の測定は、20世紀に入って測定誤差を極力小さくする多くの工夫がなされ、Lebedev の実験(1899)、Nichols・Hull の実験(1901)、Poynting・Barlow の実験(1910)へと続き、光量子仮説の時代に移っていくことになったわけです。

音響分野では、20世紀初頭には既に始まっており、Lord Rayleigh が振動弦の現象から気体に対するレイリー放射圧を導き(1902)、また、同じ頃、Lebedev の同僚の Altberg が放射圧測定の基礎実験を行い(1903)、今日までの研究報告は枚挙にいとまがありません。特に主要な研究成果を列挙すると、剛体球に対する King の理論、液滴に対する吉岡・河島の理論、球面波による Embleton の理論、固体弾性球に対する長谷川・吉岡の理論、粘性流体における Doinikov の理論などがあります。

放射圧は、音場の境界条件の相違により、レイリー(Rayleigh)型とランジュバン(Langevin)型の二つに分類され、論じられてきています。レイリー型放射圧は容器内に閉じ込められた音波が容器の内壁に及ぼす時間平均的な力です。一方、ランジュバン型放射圧は開放された空間中に置かれた物体に作用する力です。そして、理論上は、放射圧を誘導する際に現れる積分定数の決定方法でランジュバン型とレイリー型とを区別しています。通常的应用として重要なのはランジュバン型放射圧で、音響インテンシティの絶対測定から始まり、音波浮揚、音響ピンセット、液体レンズ、微粒子の位置制御とバイオメディカルやナノテクノロジーへの応用が考えられています。

放射圧に関する詳細は、「非線形音響—基礎と応用」(コロナ社、近刊)をご覧ください。

鎌倉友男(電気通信大学)