

音響孤立波の発生とその応用

Generation of Acoustic Solitary Waves and Its Applications

杉本 信正 (阪大院 基礎工)

Nobumasa SUGIMOTO (Osaka University)

1. はじめに

空気などの気体中の有限強さの音波（非線形音波）は、伝播と共に普通衝撃波を形成する。強い音では、圧力の高い箇所の伝播速度は低いところに比べて速く、このため波形の突っ立ちが起り、ついには不連続が波形に現れる。この不連続が衝撃波である。衝撃波は古くからよく知られており、今や当然な現象と理解されているものの、「音の壁」をはじめ、厄介な問題を引き起こすことが多い。このため衝撃波の発生を遅らせる研究は数多くあるが、波の伝播のメカニズムの立場から、根本的に発生を抑制しようとする考え方はなかったようである。以下に述べる研究は実際的な問題にそもそも端を発している。列車がトンネルに高速で突入するとトンネル内遠方で衝撃波が発生し、それが出口から放出されるときに破裂音が発生する。これはいわゆる微気圧波問題として知られている。研究のきっかけは、この防止対策として衝撃波の発生を原理的に抑制しようとする試みである。¹⁾

自由空間での衝撃波の発生を防ぐことは不可能である。しかし管の中の伝播となると話は違ってくる。管壁が存在すると管壁摩擦が効いてくるので、波は減衰することが考えられる。しかし、減衰だけでは圧力波が強くなると衝撃波の発生に抗しきれない。そこでアイデアは摩擦による散逸効果に代わって何らかの分散効果が利用できないかという点にある。しかし管の中を伝播する平面波モードの波は分散を示さないので、分散を生じさせる方法として、管を周期構造を持つように改造することを考える。例えば、管に同じ形のヘルムホルツ共鳴器を等間隔で取り付け管を空間的な周期構造をもつように改造する。取り付け方により分散の現れ方が異なるが、共鳴器列を適切に設計すると、衝撃波の発生を抑

制できることが理論的に示されている。²⁾ 特に、散逸効果を小さく抑えることができれば、音響孤立波が伝播することも理論、実験両面から分かっている。^{3,4)} 音の孤立波はこれまで存在しないと考えられてきたので、この発見は関心を集めた。⁵⁾

2. 音響孤立波とは

これは気体の圧縮パルス波である。この波は、音圧が大きいかにも拘わらず、波形を変えることなく定常的に伝播できる。孤立波中の気体は断熱圧縮され、その密度、温度共に上昇するので、音響孤立波は熱を運ぶパルス波でもある。孤立波の高さは共鳴器列の大きさを表すパラメータ $\kappa (\equiv V/Ad)$ により決定される。ここで、 V は各空洞の体積、 A は管の断面積、 d は共鳴器の取り付け軸方向の間隔である。 κ は取り付け間隔当たりの管の体積に対する空洞体積の比であり、1よりは十分小さいものとする。例えば、 $\kappa = 0.2$ とすると、大雑把にいつて波高は平衡状態での圧力に比べて10%程度上昇し、温度も室温から約10°C上昇する。このような波はもはや音波というには余りに強すぎ、気体力学的孤立波と呼んだほうが適切かもしれない。

伝播速度は、音速 a_0 を上限とし（すなわち亜音速であり）、一方、下限 $a_0/(1+\kappa/2)$ が存在する。伝播速度が速くなるにつれ波高も大きくなるが、ピーク圧力は平衡圧 p_0 の $8\gamma\kappa/3(\gamma+1)$ 倍よりは小さい（ γ は比熱比）。波高は伝播速度が下限に近づくにつれ小さくなり、波形はK-dVソリトンに漸近する。孤立波の幅は波高が大きくなるにつれ狭くなるが、ソリトンを除き概ね一定である。その時間半値幅 ω^{-1} は各共鳴器の固有角振動数 ω_0 に比べて $\omega_0/\omega > 2\pi$ である。

3. 音響孤立波の応用

ここでは孤立波を直接利用するというよりは、孤立波が発生するような環境を利用することを考える。共鳴器の固有振動数を圧力波の代表周波数に比べて十分高く設定すると、衝撃波は発生しない。これは音響孤立波が発生する条件でもある。この応用例の一つは、管の中に閉じこめた気体を強制振動させる場合である。両端を固定した気体柱には、両端を圧力の腹とする固有振動が存在する。管の一端をそれに近い周波数で振動させ、変位振幅を大きくすると、衝撃波が出現し両端で反射されながら管の中を往復するようになる。衝撃波の発生は騒音の発生のみならず、気体の平均温度を上昇させる。この管に共鳴器列を取り付けると固有振動数は低下するが、衝撃波は発生しなくなる。大気圧の±30%程度の圧力変動でも、衝撃波が発生しないことが実験で確かめられている。

もう一つの例は、孤立波の伝播に伴う物質輸送現象の利用である。衝撃波は一旦発生すると非線形減衰を受けるので、定常的な輸送能力をもたない。孤立波の場合、波高の最も大きな極限孤立波による、質量、運動量、エネルギーの全輸送量は、 $16\pi\kappa/3(\gamma+1)$ を α と置くと、それぞれ、 $\alpha\rho_0a_0/\omega_0$, $\alpha\rho_0a_0^2/\omega_0$, $\alpha\rho_0a_0/\omega_0$ である。⁶ただし、 ρ_0 は平衡状態での密度である。平衡状態の圧力を上げていくと輸送量は比例して大きくなる。また固有振動数に逆比例して大きくなることにも注意したい。

孤立波でも現実にはしかしながら壁面摩擦などによる線形減衰は避けることはできない。そこで管壁に沿って適当な温度勾配を設けると、熱音響効果によって逆にその全エネルギー流束が増幅できる可能性もある。実現できれば熱から運動へエネルギーの形態を変えることになる。そこで適当なサイクルを構成し、定常的にエネルギーを取り出すことができればまさに原動機に他ならない。詳細については講演に譲る。

4. おわりに

古典的な気体力学においても孤立波の存在が可能であることが分かった。よく知られている浅水孤立波の場合と比べると、水波では

伝播速度は浅水波の速度 \sqrt{gh} (g : 重力加速度, h : 水深) より速い, “超音速” であるのに対して、音波の場合は亜音速であることに注意したい。このため音速より速い衝撃波と遅い孤立波が共存する可能性もある。応用面では、最近注目を浴びている熱音響分野^{7,8)}との関連において今後の展開が期待される。熱音響現象のこれまでの研究では非線形性はさほど大きくなく、衝撃波の発生は問題となっていない。しかし、音圧が大きくなるとその出現は避けては通ることは出来なくなるであろう。

最後に、本講演の内容は先日の日本物理学会第56回年次大会(平成13年3月29日於: 中央大学)での招待講演とほぼ同じものであることをお断りしておく。

参考文献

1. Sugimoto, N. “Emergence of an acoustic shock wave in a tunnel and a concept of shock-free propagation,” Chap. 8 in *Noise and Vibration from High-speed Trains*, (ed. Krylov, V. V.) Thomas Telford Press, in press.
2. Sugimoto, N., “Propagation of nonlinear acoustic waves in a tunnel with an array of Helmholtz resonators,” *J. Fluid Mech.*, 244, 55-78 (1992).
3. Sugimoto, N., “Acoustic solitary waves in a tunnel with an array of Helmholtz resonators,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 99, 1971-1976 (1996).
4. Sugimoto, N., Masuda, M., Ohno, J. & Motoi, D., “Experimental demonstration of generation and propagation of an acoustic solitary wave in an air-filled tube,” *Phys. Rev. Lett.*, 83, 4053-4056 (1999).
5. Hellemans, A., “Conjuring a solitary sound wave,” *Science*, 286, 2062 (1999); “The sound of solitary wave,” *Physical Review Focus*, <http://focus.aps.org/v4/st24.html> (1999).
6. Sugimoto, N., “Mass, momentum, and energy transfer by the propagation of acoustic solitary waves,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 107, 2398-2405 (2000).
7. 富永 昭, “熱音響現象の理解とその応用,” 日本物理学会誌, 55, 326-331 (2000).
8. Garrett, S. L., “Reinventing the engine,” *Nature*, 399, 303 (1999) (訳 “エンジンを再発明する,” 知の創造2, 徳間書店, 193-201 (2000)).