

物性の温度依存性を考慮した音場について

黄 海鷹

鎌倉 友男

電気通信大学 電子工学科

1 はじめに

粘性流体中に音波を放射すると、音波の波動エネルギー（音響エネルギー）の一部は媒質を動かす駆動力になり、また、一部は粘性損失で熱を発生させ媒質の温度を上げる。前者の駆動力は音波ビーム内で媒質の移動を引き起こして流れを発生させる。この流れ現象は音響流として知られている。一方、後者の温度上昇は音波ビームの伝搬方向を曲げる。すなわち、伝搬媒質の音速や音波吸収は温度に依存して変化することから、音波ビーム内の温度が上昇することでビームの波面が曲がることになる。もし、温度の上昇とともに音速が速くなればビームは外側に曲がるだろうし、反対に温度の上昇とともに音速が遅くなれば、ビームは内側に回り込むであろう。そして、音場の特性を音波の放射自身で変化させることになる。このような音波自らが音場を変化させることを自己作用 (self-action) という。

また、音響流はふつう音波の伝搬方向に発生するので音速が増し、したがって音波ビームは広がることになる。このような音波ビームの広がり現象も自己作用に分類されるが、熱作用よりもビームの特性に与える影響が小さいと思われ、今回は音響流による自己作用については除外する。

音波の自己作用の研究については Bakhvalov や Rudenko らが精力的に進めてきている [1],[2]。彼らは音波の非線形性による高調波発生の効果をも含め、KZK の式に音速の温度依存性と流れ依存性を含め、音場と温度、そして音場を記述する基本方程式を紹介している。これらの式は非線形であり、解析的に解くことは容易ではない。また、彼らはいくつかの実験を踏まえて自己作用の発生を観測しているが、音場の理論解が得がたいということで、実験結果に対する詳細な

理論的検討を行っていない。

本報告では、音速や吸収係数の温度依存性のみを考慮した音場を、音速や吸収係数が空間的に不均一であるとの前提で放物近似した波動方程式で示す。これを流れ場、温度場の理論式とともに解析して、音速や吸収係数の温度依存性のみを考慮した非定常状態の音場、流れ場と温度場について理論的検討を行う。理論的に取り扱いやすいということから、音場は音軸の周りで回転対称とし、音源をガウス平面音源とする。

2 音場

音場については、円形平面音源で音速や音波吸収が温度の空間分布に依存していることを考慮した波動方程式 [1]

$$\frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \tau \partial \sigma} = \frac{1}{4} \nabla_{\perp}^2 \bar{p} + \mu(\sigma, \xi) \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \tau^2} + \alpha(\sigma, \xi) R_d \frac{\partial^3 \bar{p}}{\partial \tau^3} \quad (1)$$

を数値的に解くことによって求める。ここで μ は

$$\mu = \frac{(ka)^2}{4} \left(1 - \frac{c_0^2}{c^2(\sigma, \xi)} \right) \quad (2)$$

である [3]。(1) 式は、次の変数で無次元化している。

$$\sigma = \frac{z}{R_d}, \quad \xi = \frac{r}{a}, \quad \bar{p} = \frac{p}{p_0}, \quad \tau = \omega t' \quad (3)$$

ここで、 p は音圧、 p_0 は音源面での音圧振幅、 R_d はレイリー長 $ka^2/2$ ($k = \omega/c_0$, ω 音波の角周波数)、 a は円形開口音源の半径である。また、温度が空間分布することで、音速 c と音波吸収 α は位置の関数としている。

(1) 式と文献 [4] の 1～5 式に記述されている、音波照射されたときの流れ場と温度場の理論式を用いて、音波放射に伴う媒質の熱自己作用について検討する。

3 数値解析

粘性媒質に音波を放射すると温度上昇と音響流が生じる。それに伴い、音速や吸収係数が空間的に変化することで、音場も空間的に変化する。その音場の変化により温度場、流れ場も変化することになる。

数値計算のモデル音源は、周波数 f が 2.5MHz, p_0 が 500kPa, a が 1cm の平面型ガウス振動子とする。この音源を半径 5cm, 長さ 25cm の円筒状の水槽に音波ビームが垂直になるように配置する。温度の初期値は 20°C に設定し、媒質は 100cSt のシリコンオイルとした。そして、(1) 式と文献 [4] の 1～5 式を差分法を用いて解いた。温度の空間分布から時間の刻みに応じたステップごとに音速や吸収係数を求め、そして音場を求め、さらに温度場と流れ場の計算を行う。

Fig.1 は、実験から得られた音速と吸収係数の温度依存性を示す近似曲線である。音速と吸収係数の温度係数は負である。20°C 付近で、音速の変化率は $-1.8 \times 10^{-2}/^{\circ}\text{C}$, 吸収係数の変化率は $-1.7 \times 10^{-2}/^{\circ}\text{C}$ である。

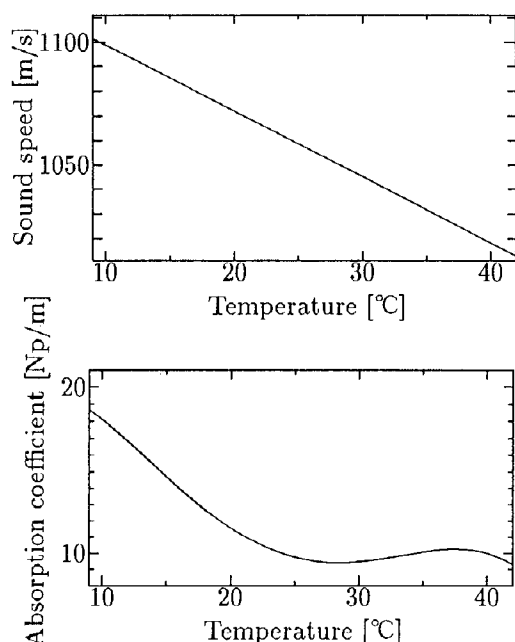


Fig.1 Sound speed and absorption coefficient in 100cSt silicone oil.

Fig.2 は、音速と吸収係数の温度依存性を考慮したときと、していないときの音軸上の音圧および温度上昇の分布である。ここで、音波を放射したときからの時間をパラメータにとっている。音圧は音速と吸収係数の温度依存性を両方考慮したときが最も大きく、音

源から離れるほど熱自己作用が大きくはたらく。また、音速もしくは吸収係数のみの温度依存性を考慮したときも、考慮していないときと比べて音圧が大きくなっている。

これは、音波を放射すると音軸の温度が上昇し、シリコンオイルのように音速の温度係数が負であると、そこでの音速が周囲よりも遅くなり、音波ビームは伝搬とともに蓄積的音軸に向かって回り込み、音軸上の音圧は上昇すると考えられる。これによって、音圧は伝搬距離につれて熱自己作用がないときより大きくなる。また、吸収係数の温度係数が負であるので、音軸では周辺より吸収係数が小さくなる。したがって、音軸での音圧の減衰は少なくなる。そのため、吸収係数の温度依存性を考慮しないときより音圧は上昇する。また音速の場合蓄積効果があるため伝搬距離につれ、吸収係数の場合より音圧が高くなる。

温度上昇も音圧のときと同様に、両者を考慮したときの温度上昇が最も大きい。また、吸収係数のみを考慮したときの全体の温度上昇は、音速のみ考慮したときより大きい。局所的に特に遠距離場で逆の場合もある。

Fig.3 に、音速と吸収係数の温度依存性を考慮したときと、していないときの音軸上の音圧と温度上昇の立ち上がり特性を示す。音圧は温度依存性を考慮したときには伝搬距離が大きいほど定常状態に達するのに時間がかかる。

温度上昇は、音速と吸収係数の温度依存性をともに考慮したときが、定常状態に速く達する。

Fig.4 は音速と吸収係数の温度依存性を考慮したときと、していないときの音軸上の流速分布である。ここで、音波を放射したときからの時間をパラメータにとっている。流速は音速と吸収係数の温度依存性を両方考慮したときが最も大きく、音源から離れるほど熱自己作用が大きくはたらく。また、媒質の粘性が大きいため音波の減衰が激しく、音源近傍での音圧が流れ場に与える影響が大きい。音源近傍では吸収係数のみを考慮したときの音圧の方が音速のみ考慮したときより大きいため、吸収係数のみを考慮したときの全体の流速は、音速のみ考慮したときより大きい。また、流れ場の変化によって温度場が変化し、さらに音場が変わるが、時間が経つと相互作用ですべての場が定常状態になる。これは熱自己作用を考慮していないときより

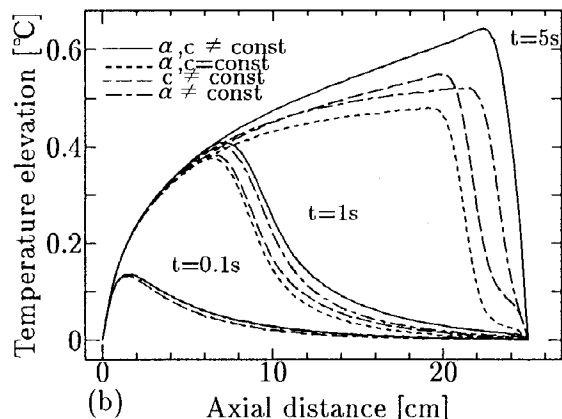
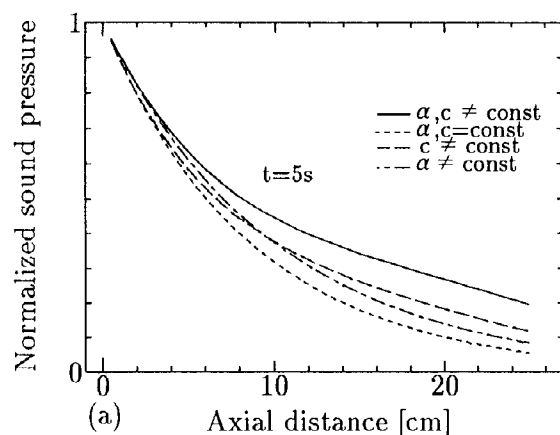


Fig.2 Sound pressure (a) and temperature elevation (b) on the acoustic axis.

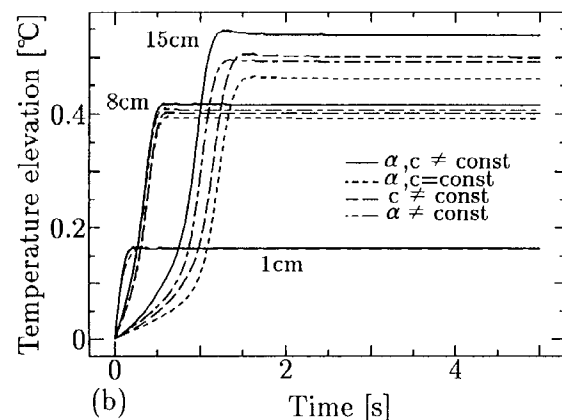
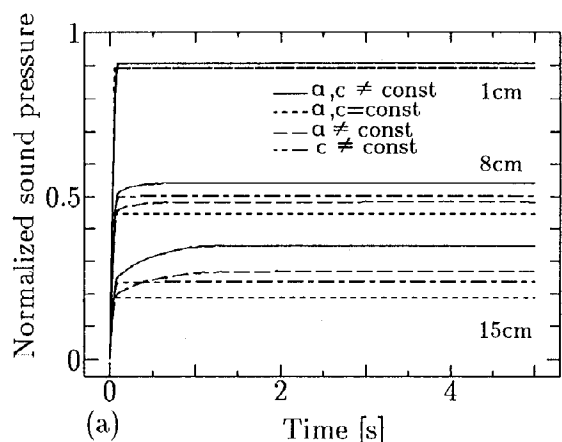


Fig.3 Build-up of sound pressure (a) and temperature elevation (b) on the acoustic axis.

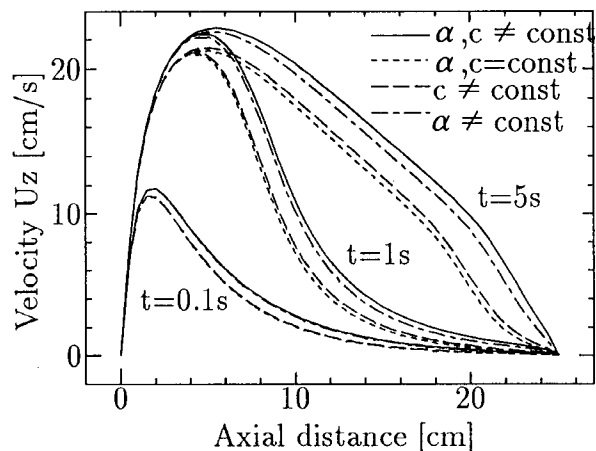


Fig.4 Axial Velocity U_z profiles on the acoustic axis.

も音場が定常状態に達するのに時間が必要であることを意味する。

4 あとがき

音源面の音圧がガウス分布している円形開口平面音源からの音波を対象に、音速や吸収係数が温度依存性をもつとした熱自己作用の非定常状態の音場、温度場及び流れ場への影響について理論的検討を行った。その結果、熱自己作用は音圧を上昇させる方向に働き、その効果の大きさも本数値計算の範囲内で無視できないことが分かった。また、音速と吸収係数の両方の温度依存性を考慮したとき、個別に考慮したときより音圧、温度及び流速の増加が大きくなることも示された。しかし、媒質によって音速や吸収係数の温度係数が違うので、必ずそうなるとは限らない。今後は、音波の自己作用の効果、さらには音響流による流れ場と温度場への影響などを実証する予定である。

参考文献

- [1] N. S. Bakhvalov, Ya. M. Zhileikin, and E. A. Zabolotskaya, *Nonlinear Theory of Sound Beams*, (AIP, New York, 1987). Chap.7.
- [2] O.V.Rudenko and O.A.Sapozhnikov, "Thermal Self-Focusing of Sound Beams," in *Nonlinear Acoustics* edited by K.A.Naugol'nykh and L.A.Ostrovsky, (AIP, New York, 1994), pp.104-137.
- [3] 黄 海鷹, 鎌倉 友男, 熊本 芳朗, "集束音波ビームの自己作用について" 信学技報, US97-23 (1997-06).
- [4] 黄 海鷹, 鎌倉友男, 熊本芳朗, "集束ビームのない流れ場と温度場," 信学技報, US96-3 (1996-04).