

振動平板と気液界面に挟まれた一次元空間内を伝播する 音波に関する分子気体力学解析

Molecular Gas Dynamics on Propagation of Sound Waves in One-Dimensional Space between Oscillating Plate and Vapor-Liquid Interface

○稲葉 匡司, 北大工, 札幌市北区北 13 条西 8 丁目, inaba@mech-me.eng.hokudai.ac.jp:

矢野 猛, 阪大工, 吹田市山田丘 2-1, yano@mech.eng.osaka-u.ac.jp:

藤川 重雄, 北大工, 札幌市北区北 13 条西 8 丁目, fujikawa@eng.hokudai.ac.jp:

Masashi INABA, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628

Takeru YANO, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita 565-0871

Shigeo FUJIKAWA, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628

The behavior of sound in a finite one-dimensional space between an oscillating plate (sound source) and a vapor-liquid interface is analyzed by applying the asymptotic theory for small Knudsen number. The result shows that the gas region consists of the three regions of the linear isentropic sound region, the thermal boundary layer and the Knudsen layer. From the analytical solution in the time-periodic case, we found that the amplitude of the sound decreases with increase in the evaporation coefficient α at the interface. When the evaporation coefficient is unity, almost 80 percent of sound wave incident on the interface is absorbed there. Near the resonant point, the pressure amplitude of sound source rapidly increases with decrease in α .

1. はじめに

音波によって誘起される凝縮及び蒸発現象は気液界面における音波の反射に影響を与えることが知られている。例えば, Kogan, Nosik⁽¹⁾ は Navier-Stokes 方程式系を支配方程式とし気液界面における音波の反射の問題を調べている。彼らは, 音波の反射率が蒸発係数を含む様々なパラメータや音波の入射角に依存することを示している。

気液界面における凝縮や蒸発は非平衡な現象であり, それらを伴う気体の流れを正確に取り扱うためには Boltzmann 方程式⁽²⁾を用いなければならない。また, 気液界面における気体論境界条件には凝縮係数 α_c と蒸発係数 α_e ⁽³⁾ と呼ばれるパラメータが含まれる。これらのパラメータは気液非平衡状態においては必ずしも等しい値とは限らないが, 気液平衡状態においては等しくなる。

本研究では, 多原子分子気体に拡張された Gaussian-BGK Boltzmann 方程式⁽⁴⁾を出発点とし, 振動平板と気液界面で挟まれた一次元空間内において凝縮や蒸発を伴う音波に関し, 気体論境界条件を用いて解析を行う。解析には, 曾根⁽²⁾による Knudsen 数が小さい場合の漸近理論を適用する。それによって, 未だ知見の得られていない Gaussian-BGK Boltzmann 方程式によって記述される多原子分子気体の非定常な流れを分類し, さまざまな流れの設定のもとで流体力学的方程式系を導出する。その流体力学的方程式系を用い, 気液界面における凝縮や蒸発が音波に及ぼす影響について調べることを本研究の目的とし, まず初めのステップとして線形問題を取り扱う。

2. 問題設定及び解析結果

無限に広い振動平板(以下音源と呼ぶ)と剛体壁で仕切られた一次元空間を考える。この空間内には, 単一の多原子分子気体が満たされており, 剛体壁面上には気体と同種の分子から構成される薄い液相が形成されているとし, 初期に系全体が温度 T_0 , 飽和蒸気密度 ρ_0 の静止平衡状態にあるとする。また, 音源及び剛体壁は初期温度のまま一定とし, 系の空間座標を X_1 , 初期時刻における音源表面から凝縮相表面までの長さを L^* , 凝縮相の厚さを D^* とする。時間 $t = 0$ において音源が振幅 a , 角振動数 Ω で調和振動し始め, 音源の振動に誘起されて音源近傍の

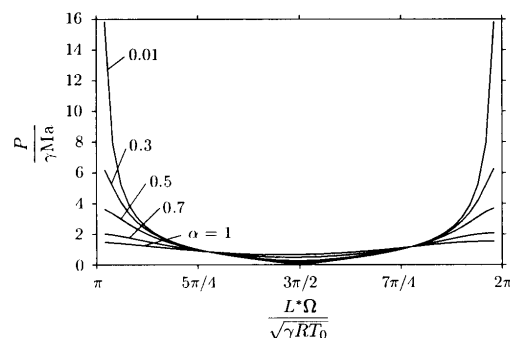


Fig. 1 The nondimensional pressure amplitude at sound source.

蒸気は圧縮・膨張を繰り返す。その変動は時間とともに気体中へ伝わり, やがて気液界面上で反射する。十分な時間が経過することによって, 巨視的変数が周期 $2/\Omega$ で時間的に変動を繰り返す状態が空間内に発達する。

以上の問題設定のもと, 気液界面において蒸発や凝縮を伴う音波に関して, 多原子分子気体に拡張された Gaussian-BGK Boltzmann 方程式を用い解析を行った。図 1 に, さまざまな蒸発係数 α に関する, 音源における音波の圧力 $p_0(1 + P)$ の振幅と無次元化された角振動数 $L^*\Omega/\sqrt{\gamma RT_0}$ との関係図を載せる。ただし, p_0 は初期温度における飽和蒸気圧を表し, 圧力振幅は γMa で規格化してある。また, 時間に関して周期的な解を仮定したため, 共鳴点 $L^*\Omega/\sqrt{\gamma RT_0} = n$ ($n = 1, 2, \dots$) の値は省いてある。ここで, γ は比熱比, R は気体定数, Ma は音源の移動速度の最大振幅 $a\Omega$ と初期温度における音速の $\sqrt{\gamma RT_0}$ との比で定義される Mach 数である。この図より, 共鳴点近傍において α の減少に伴い圧力振幅は急激に増加することがわかった。

参考文献

- (1) Kogan M. N. and Nosik V. I., Fluid Dynamics, 23 (1988), pp. 608–613.
- (2) Sone Y., Molecular Gas Dynamics, Birkhäuser, (2006).
- (3) Ishiyama T., Yano T., Fujikawa S., Phys. Fluids, 16 (2004), pp. 4713–4726.
- (4) Andries P., Tallec P. L., Perlat J.-P. and Perthame B., Eur. J. Mech. B-Fluids, 19 (2000), pp. 813–830.