

## 蒸発・凝縮をともなう共鳴音波に関する弱非線形解析

## Weakly Nonlinear Analysis for Resonant Gas Oscillations with Evaporation and Condensation

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

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

渡部 正夫, 北大工, 札幌市北区北 13 条西 8 丁目, E-mail: masao.watanabe@eng.hokudai.ac.jp

小林 一道, 北大工, 札幌市北区北 13 条西 8 丁目, E-mail: kobakazu@eng.hokudai.ac.jp

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

Masashi Inaba, Div. Mechanical & Space Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628

Takeru Yano, Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita 565-0871

Masao Watanabe, Div. Mechanical & Space Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628

Kazumichi Kobayashi, Div. Mechanical & Space Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628

Shigeo Fujikawa, Div. Mechanical & Space Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628

The behavior of resonant sound waves 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  $Kn \ll M \ll 1$ , where  $M$  is the Mach number,  $Kn$  is the Knudsen number, for the case of small evaporation coefficient  $\alpha$ . As a result, we derive a nonlinear integro-differential equation including  $\alpha$  for determining the profile of sound.

## 1. はじめに

気液界面上で生じる凝縮や蒸発は、気体から液体へ向かう分子と液体から気体中へ飛び出す分子の質量流束の差によって生じることから、本質的に非平衡な現象である。系の代表長さが気体分子の平均自由行程と比べて十分大きく、系のほとんどの領域において局所平衡と見なせる場合でも、蒸発・凝縮が生じている界面近傍は非平衡領域となる。そのため、界面近傍の蒸発・凝縮をともなう気体の流れに局所平衡を前提として成り立つ流体力学を適用することはできない。また、蒸発・凝縮は界面近傍のみにとどまらず、蒸発流れあるいは凝縮流れとなって、界面から十分離れた流体力学で支配される領域にも影響を及ぼす。それゆえ、蒸発・凝縮をともなう気体の流れを正確に知るためには界面近傍の非平衡領域を詳細に調べる必要がある。そのような気体の流れの解析には、速度分布関数を用いて流れを記述する分子気体力学<sup>(1)</sup>が有効である。その気液界面における境界条件の関数形は分子動力学法を用いた研究<sup>(2)</sup>により求められている。その境界条件には蒸発係数  $\alpha_e$  と凝縮係数  $\alpha_c$  と呼ばれる 0 以上 1 以下のパラメータが含まれ、定義からそれらの値は気液平衡状態において等しくなることがわかっている。しかしながら、蒸発係数の実験値については未知であるため、蒸発係数の実験値を求めるための方法を確立する必要がある。

本研究では、多原子分子気体の非平衡、非定常、非線形な流れとして、振動平板と気液界面で挟まれた一次元空間内における凝縮や蒸発をともなう共鳴音波を取り上げ、その振る舞いを調べることを目的し、蒸発係数の実験値を求めるための理論構築を目指す。支配方程式には多原子分子気体に拡張された Gaussian-BGK Boltzmann 方程式<sup>(3)</sup>を用いる。また、音源における境界条件は拡散反射を仮定し、気液界面における境界条件には蒸発係数  $\alpha_e$ 、凝縮係数  $\alpha_c$  とを含む境界条件を用いる。解析には、曾根<sup>(1)</sup>による Knudsen 数が小さい場合の漸近理論（弱非線形理論）を適用する。

## 2. 問題設定及び解析結果

図 1 に示す、無限に広い振動平板（以下音源と呼ぶ）と気液界面で挟ま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で満たされており、剛体壁面上には気体と同種の

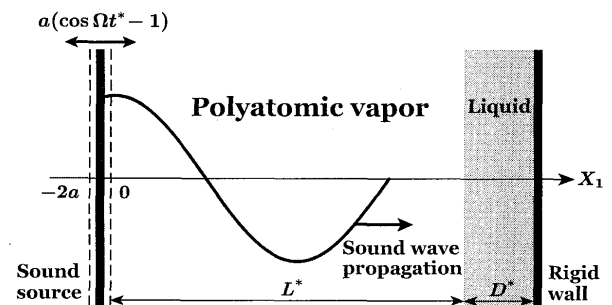


Fig. 1 Schematic of model.

分子から構成される薄い液膜が形成されているとする。系は初期に静止平衡状態であるとする。時間  $t^* = 0$  において音源が振幅  $a$ 、角振動数  $\Omega$  で調和振動し、音波を放射する。十分な時間が経過することによって、定在波が形成される。音源の振動数と系の固有振動数とを一致させることにより、定在波の振幅は増大し、衝撃波が発生する。この問題に対し、音源の振動速度と初期温度における音速の比で定義される音源の Mach 数  $Ma$  と分子の平均自由行程と音波の波長の比で定義される Knudsen 数  $Kn$  との関係をも  $Ma \simeq Kn \ll 1$  とし、音源の Mach 数  $Ma$  は音波の最大速度の Mach 数  $M$  の 2 乗程度と設定した。さらに、 $\alpha = \alpha_e = \alpha_c = O(M)$  とする制限を加え、曾根の弱非線形理論を用いて解析を行った。解析の結果、 $\alpha$  を含む形で共鳴音波の波形を決めるための非線形微積分方程式を導出した。

## 参考文献

- (1) Sone, Y., Molecular Gas Dynamics, Birkhäuser, Boston, (2006).
- (2) Ishiyama, T., Yano, T., Fujikawa, S., "Molecular dynamics study of kinetic boundary condition at an interface between argon vapor and its condensed phase," Phys. Fluids, 16 (2004), pp. 2899-2906.
- (3) Andries, P., Tallec, P. L., Perlat, J.-P. and Perthame, B., "The Gaussian-BGK model of Boltzmann equation with small Prandtl number," Eur. J. Mech. B-Fluids, 19 (2000), pp. 813-830.