

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2012

課題番号：24656125

研究課題名（和文） 新しい相変化型熱音響自励振動の基礎研究

研究課題名（英文） Basic research of thermoacoustic gas oscillation induced by phase changes at a vapor-liquid interface

研究代表者

矢野 猛 (YANO TAKERU)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60200557

研究成果の概要（和文）：これまでの熱音響エンジンや熱音響冷凍機は、音響管の管壁上の振動境界層（せん断流れ）とその外側の等エントロピー的音響場からなる系の自励振動（線形不安定現象）を理論的な基礎とする。本研究において、これと異なる全く新しい相変化型の熱音響自励振動の理論を構築し、その応用装置の開発の基礎となり得る理論的および数値的研究を行った。その成果の概要は以下のとおりである：(1) 気体分子運動論に基づく数値解析を含む理論解析を行い、水と水蒸気からなる気液 2 相系に音響振動が生じた場合の気液界面での周期的な蒸発・凝縮を精密に扱うことができる理論構築を行った。(2) 気液 2 相系の静止状態に対する線形安定性解析を実行し、その安定性の特徴を明らかにした。(3) 熱音響デバイスとしての作動するための条件について検討した。

研究成果の概要（英文）：The theoretical foundation of conventional thermoacoustic devices are the linear instability induced thermoacoustic boundary layer on the side wall of resonance tube. In the present study, we explore a possibility of new type of thermoacoustic oscillation. The results may be summarized as follows: (1) The construction of general theory which is capable of describing the cyclic phase change (evaporation and condensation) at the interface. The theory is based on the kinetic theory of gases. (2) The stability analysis of the phase-change-induced thermoacoustic oscillations. (3) The consideration of realization of new devices based on the phase-change-induced thermoacoustic oscillations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：熱音響、非平衡相変化、気体分子運動論、蒸発・凝縮、混相流、エネルギー変換

1. 研究開始当初の背景

(1) 熱音響デバイス

熱音響自励振動は、流体力学的な原理によって熱エネルギーと力学的エネルギーの相互変換を実現することができるため、内燃機関をもたないエンジン（発電機などへ利用）や低温熱源を必要としない冷凍機などを可能とする。基礎となる理論は 1960 年代後半に Rott によって与えられ、1980 年代以降は

Swift、Yazaki、Sugimoto らによって応用を目指した研究が展開されてきた。しかしながら、今日、その応用研究の開発現状は、かならずしも良好ではない。背景として、大規模な需要が存在しないという市場経済原理も無視できないが、学術的には、せん断流れに不可避免的に現れる局所乱流状態が、効率のかつ安定な稼働条件の特定を妨げ、装置としての信頼性と完全性を損なっていることが最

も大きな理由である。

(2) 蒸発・凝縮流れ

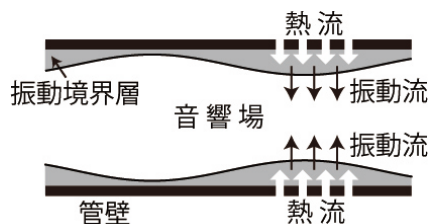
流体工学において、古くからそして今もなお扱われている液体と蒸気の2相の問題は、本質的に非平衡である。実際、蒸発・凝縮は気液平衡の熱力学条件が破れて初めて発生する。しかしながら、現代でもなお、応用を含めた多くの研究が、その非平衡性を重視せず、ゆっくりと変化しながら時々刻々に気液平衡を実現しつつ現象が進行することを仮定している(冷却水の問題など)。最近、申請者のグループは、蒸発・凝縮流れの非平衡性を取り入れた基礎理論を、応用に適用しやすい形式にまとめ上げた(Fujikawa, Yano and Watanabe, Springer, 2011)。これによって、今後、キャビテーションのような非平衡性が支配的な蒸発・凝縮現象の理解が深まってゆくだろう。しかしながら、新しい基礎理論をまとめ上げたならば、それを既存の問題に適用するだけではなく、その基礎理論があつてこそ見出される新しい応用へ展開すべきである。非平衡蒸発・凝縮流れを積極的に活用する新しい応用を目指す研究は未だ存在しない。

(3) 着想

蒸発・凝縮は気液2相系の熱力学的状態を支配するだけでなく、必ず流れを誘起する。申請者らは、非線形音響学に取り組む(平成19年度採択基盤研究(B)など)一方で、非平衡な蒸発・凝縮に関する理論研究(平成23年度採択基盤研究(A)など)を継続し、音響振動と連動する振動的な蒸発・凝縮流れの存在に注目してきた。熱音響自励振動を励起するためには、音響場へのエネルギー供給が必要である。旧来の熱音響デバイスでは、壁面の振動境界層がこの役割を担うが、原理的に局所的乱流遷移を除去することができない。エネルギー供給の役割を振動的な蒸発・凝縮流れに託すことによって、乱流遷移の問題から解放される。

2. 研究の目的

図に示すように、既存の熱音響デバイスにおいては、管内の音響場と連動する管壁上の振動境界層が、管壁をとおして外界と熱の授受を行い、その結果膨張・収縮して、境界に垂直な方向の弱い振動流を生じさせて、音響場に運動エネルギーを供給する。



振動境界層は壁面に対する接線方向の速

度成分を主成分とするため、現実の装置内に局所的乱流状態を誘導する原因となる。

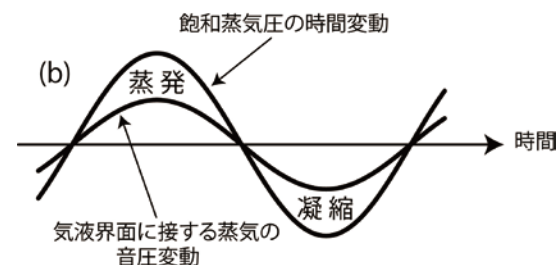
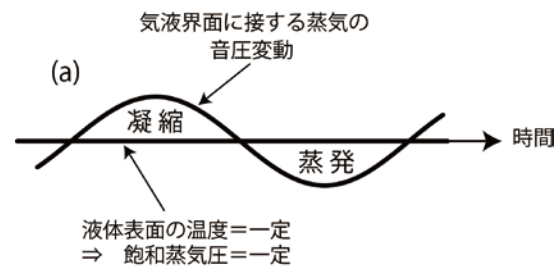
音響場に運動エネルギーを供給する役割を、振動境界層(せん断流れ)ではなく、相変化による蒸発・凝縮流れに担わせる。その原理を以下に要約する：

液体とその蒸気の気液界面を考える。そこでの非平衡な蒸発・凝縮は、基礎理論によると

$$\begin{aligned} & \text{(飽和蒸気圧)} - \text{(気体の圧力)} \\ & = F(A, B) \times \text{(界面を通過する蒸気速度)} \dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{(液体の温度)} - \text{(気体の温度)} \\ & = G(A, B) \times \text{(界面を通過する蒸気速度)} \dots (2) \end{aligned}$$

に従う。ここで、右辺のAは蒸気分子間相互作用で決まる定数、Bは蒸気分子と液体分子との分子間相互作用で決まる定数、F(A, B)とG(A, B)は、ともにAとBの正值関数で、その関数形は個々の問題に依存しない。蒸気速度が正のときが蒸発に、負のときが凝縮に対応する。もし液体の温度が時間によらず一定ならば飽和蒸気圧も時間によらず一定となるので、式(1)より、気体の圧力が上昇したときに凝縮が生じ、気体の圧力が下降したときに蒸発が生じる(下図(a)参照)。しかし実際は、液体温度は周囲からの熱流と液体内の熱伝導によって時間的に変動し、飽和蒸気圧も時間的に変動する。もし、下図(b)のように、(飽和蒸気圧の変動振幅) > (気体の圧力の変動振幅)であれば、蒸発と凝縮が生じる位相は、図(a)の場合と逆転する。



したがって、図(b)の状況が実現されれば、音響場の圧力が上昇したときに蒸発流が音響場へ仕事をなし、音響場の圧力が下降したときに凝縮流が液面に仕事をなす。高圧時の

仕事は低圧時の仕事を上回るから、音響場に継続的にエネルギーが供給される。

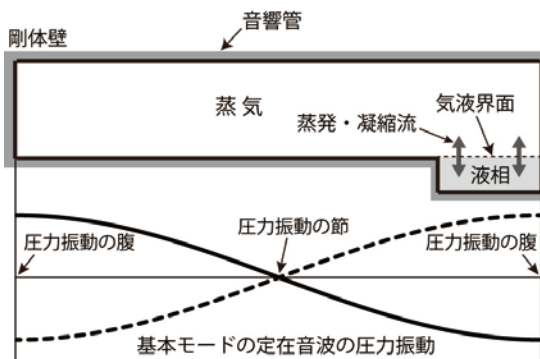
3. 研究の方法

(1) 研究方法の概要

- ① 定在波型音響場の周囲の剛体壁の一部に気液界面を設置し、「蒸発・凝縮流れと音響場からなる系の不安定現象」すなわち「相変化型熱音響自励振動」に対する理論解析を行う。
- ② 蒸発と凝縮をともなう流れに対する多原子分子・混合気体の Boltzmann 方程式の理論解析を行い、蒸発・凝縮流れの境界条件に含まれる $F(A, B)$ と $G(A, B)$ 、および A と B を明らかにする。
- ③ 上記 1 と 2 の理論解析結果に基づいて、音響場の幾何形状、蒸気と液相に使用する物質、系を取り囲む周囲壁の伝熱効果などについて最適化を行う。

(2) 問題の定式化

下図のように剛体壁で囲まれた音響管を考える。蒸気中に基本モード(半波長)の定在音波を仮定すると、管の両端は圧力振動の腹であり、かつ、速度振動の節である。よって、管端近傍に液相を配置すると、気液界面に接する蒸気の圧力は音波とともに周期的に振動し、蒸気の流れはほぼゼロとなる状況を設定できる。このとき、気液界面で生じる周期的な蒸発・凝縮流れを考える。



(3) 理論解析

上のモデルの理論解析を行う。線形問題として定式化すれば、音響管の内部は波動方程式に従うことになる。気液界面で蒸発・凝縮が生じれば、これにともなう潜熱の授受が生じて、気液界面近傍の蒸気側と液体側の双方に薄い温度境界層が現れる。音響場とふたつの温度境界層と液相内部の温度場を連立して同時に解かねばならない。この問題の解析解の構成は、面倒ではあっても(下の壁面の境界条件が剛体壁と気液界面で切り替わるため)、不可能ではない。得られる解析解をもとに、以下の課題に取り組んだ。

- ① 蒸気と液相からなる系の、定在波モード

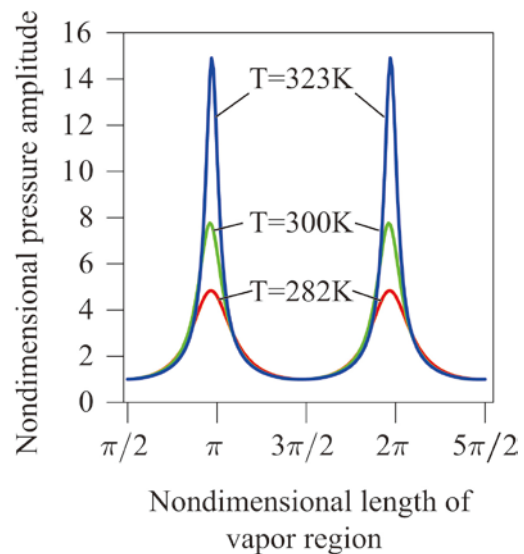
の音響的擾乱に対する線形安定性解析を行う。

- ② 管の長さや幅、液相領域の長さや深さ、扱う分子種の物性定数などが気液界面に生じる蒸発・凝縮流に与える影響を明らかにする。
- ③ 気液界面における蒸発・凝縮流れが満たすべき条件式(1)(2)に含まれる関数、 $F(A, B)$ と $G(A, B)$ 、および A と B を調べる。これらは分子間相互作用の関数であるので、個々の問題には依存せず、分子種を選択によって決まる。第1段階の結果をもとに、相変化型熱音響自励振動が誘起されやすい分子種を指定して、多原子分子気体の Boltzmann 方程式の1次元境界値問題を解き、 $F(A, B)$ と $G(A, B)$ を決定する。また、不凝縮性気体の混入の効果調べるために、混合気体の Boltzmann 方程式の1次元境界値問題を同様に解いて、その場合の $F(A, B)$ と $G(A, B)$ の振る舞いを明らかにする。[参考：T. Yano, Fluid Dyn. Res., Vol. 40, pp. 474-484 (2008)]

4. 研究成果

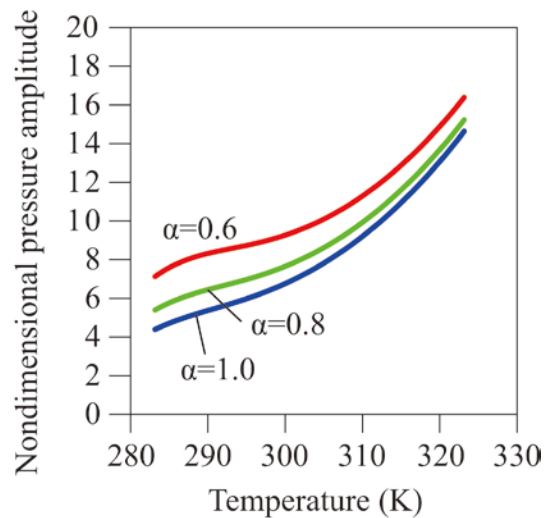
研究成果の概要は以下のとおりである：(1) 気体分子運動論に基づく数値解析を含む理論解析を行い、水と水蒸気からなる気液2相系に音響振動が生じた場合の気液界面での周期的な蒸発・凝縮を精密に扱うことができる理論構築を行った。(2) 気液2相系の静止状態に対する線形安定性解析を実行し、その安定性の特徴を明らかにした。(3) 熱音響デバイスとしての作動するための条件について検討した。

得られた理論をもとに、共鳴条件を含む音響振動の振幅を蒸気領域の長さの関数として図示したものが下図である。



音響エネルギーを吸収する粘性と熱伝導性は近似の範囲内で無視されているが、界面における相変化によって、厳密な線形理論の共鳴条件においても音響振動の振幅は有限にとどまる。図中に示された温度は、基準となる静止気液平衡状態の温度である。

下図は、研究目的の欄で示した式(1)の F 関数に含まれる蒸発係数 α の値を変化させた場合の、音響振動の振幅の基準温度依存性を示す。蒸発係数 α の値がゼロに近づけば、相変化をともしない通常の音響共鳴振動に近づく。なお、理論解析の結果、式(2)の G 関数には蒸発係数 α は含まれないことが確認されている。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計1件)

Takeru Yano

“Acoustic waves accompanied with phase change at vapor-liquid interface”

Inter Noise 2012, 2012年08月19日~2012年08月22日, New York, USA

[図書] (計0件)

[産業財産権]

なし

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

矢野 猛 (YANO TAKERU)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60200557

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

中村 篤人 (NAKAMURA SHIGETO)

奈良工業高等専門学校・電子制御工学科・助教

研究者番号：80619867