

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：54601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04202

研究課題名（和文）音波共鳴管実験と分子気体力学に基づく非平衡状態下での蒸発係数測定法の開発

研究課題名（英文）Development of a Measurement Method for Evaporation Coefficient under Non-equilibrium Conditions based on Acoustic Resonance Tube Experiment and Molecular Gas Dynamics

研究代表者

中村 篤人（Nakamura, Shigeto）

奈良工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：80619867

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本課題は共鳴音波による蒸発係数測定法を基盤として、非平衡状態に対応した測定法への拡張を目的とする。蒸発係数は分子気体力学の境界条件に含まれる未知パラメータであり、蒸発係数が正確に決定されることで熱交換器など工学分野への直接的な貢献や異常気象、環境問題に対する間接的な貢献が期待される。

これまでの実験手法において様々生じていた誤差を低減するために、実験装置の改良と同時に共鳴管内の音場の精密測定に取り組んだ。ただし測定方法が当初予定から変更になったこと、圧力センサの調達に時間を要したことなどから、研究の進捗が著しく遅れ、本課題の目的であった非平衡状態下における蒸発係数測定は達成できなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で取り組む、蒸発係数の測定は古くから様々な研究者らによって試みられているが、正確な測定結果はこれまで得られていない。研究代表者らによって開発された共鳴音波を用いた蒸発係数測定法においても、測定結果において同一の液膜温度に対して、蒸発係数にばらつきが見られることが確認されており、この誤差は実験系の非平衡に起因していると考えられる。蒸発係数が正確に決定されれば、蒸発、凝縮が関わる技術において、より効率的な制御が可能となり、加えて異常気象、地球温暖化などに対しても、より正確な現象の予測が可能となる。このように本研究成果による効果は極めて広範囲にわたるものであり、また普遍的なものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to extend the measurement method based on resonant acoustic waves to accommodate non-equilibrium conditions. The evaporation coefficient is an unknown parameter within the boundary conditions of molecular gas dynamics, and precise determination of the evaporation coefficient can directly contribute to engineering fields such as heat exchangers, as well as indirectly contribute to addressing abnormal weather phenomena and environmental issues.

In order to reduce the various errors that have occurred in previous experimental methods, we focused on improving the experimental apparatus and precisely measuring the acoustic field within the resonance tube. However, due to changes in the measurement method and delays in procuring pressure sensors, the progress of the research has significantly lagged behind, and the objective of measuring the evaporation coefficient under non-equilibrium conditions, which was the aim of this project, could not be achieved.

研究分野：分子気体力学

キーワード：蒸発係数 凝縮係数 相変化 音波 共鳴

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

蒸発、凝縮現象は基礎的かつ工学的にも重要な物理現象であり、古くから多くの研究者によって研究がなされてきた。例えば、液体とその飽和蒸気のみで満たされた空間において、液体と蒸気の界面（気液界面）では、液体、蒸気の温度、蒸気の圧力に応じて、蒸発、または凝縮が生じる。蒸発、凝縮により気液界面を通して質量、運動量、エネルギーが交換されるが、これらの量を正確に求めるには分子気体力学の境界条件（気体論境界条件）に含まれ、界面での分子の付着確率を支配する、未知パラメータ、蒸発係数（凝縮係数）の値を求めなければならない。

蒸発、凝縮係数の決定を目指した研究は古くから行われているが、測定結果ごとに非常に大きなばらつき（最大 1000 倍）が存在した。これは測定方法に、蒸発、凝縮による液体の温度変化を用いていることなどが理由である。そこで研究代表者は、音波の共鳴現象を利用した蒸発係数測定法を開発した。蒸発係数測定に音波を用いることで従来の測定法で問題となる要因を解消することが可能となる。また音波の共鳴現象を利用した本測定法は、蒸発、凝縮によって生じる音波の圧力変化から蒸発係数を決定する手法であり、従来提案されてきた方法とは全く異なる独自の手法である。更に現時点で蒸発係数を正確に決定できる唯一の方法である。蒸発、凝縮現象が関わる問題は現在においても、幅広い分野にわたり数多く存在するが、蒸発、凝縮現象を取り扱う際に必要不可欠なパラメータ、蒸発係数には、現状、誤差、曖昧さを含んだ値が使われており、本研究課題に対する関心ならびに、本研究の意義は国内、国外共に極めて高い。本測定法を用いて水の蒸発係数を測定した結果を図 1 に示す。結果から 300K 付近において水の蒸発係数は 1.0 程度であることが明らかとなった。

一方で、図 1 に示す通り、共鳴音波を利用した蒸発係数測定法においても、同一の液膜温度に対して蒸発係数の値にばらつきが生じることを確認している。これは実験系が非平衡状態になっていることに起因したものと考えられるが、現状ではこのような非平衡状態に対応した蒸発係数測定法は存在せず、また平衡状態からのずれが、蒸発係数にどのような影響を及ぼすのかも明らかとなっていない。

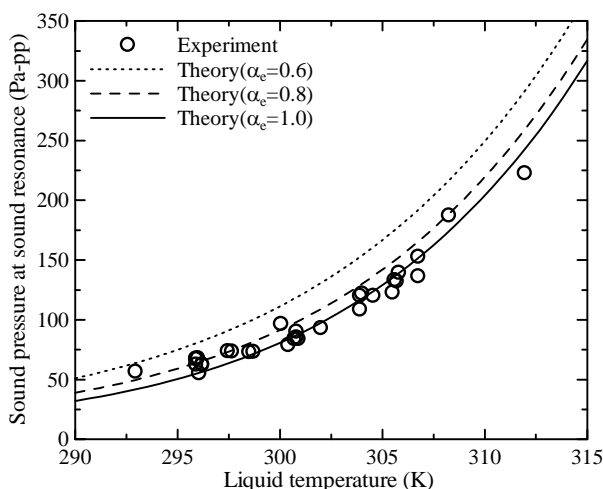


図 1 水の蒸発係数

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者が提案した共鳴音波を用いた蒸発係数測定法を基盤として、非平衡状態に対応した蒸発係数測定法へと拡張することである。拡張した蒸発係数測定法を用いて、平衡状態からのずれが蒸発係数に及ぼす影響を、共鳴音波を用いた実験と分子気体力学に基づく理論により明らかにし、非平衡状態下における蒸発係数を正確に決定することを目指す。

蒸発係数は分子気体力学の境界条件、気体論境界条件に含まれる未知パラメータであり、蒸発係数を求めることで、気体と液体の界面において、どれだけの質量、運動量、エネルギーが交換されるのか、正確に求めることが可能となる。従って蒸発係数が決定されることで、熱交換器、薄膜形成、キャピテーションなど、工学分野への直接的な貢献はもちろん、異常気象、環境問題など、本研究による成果は幅広い分野に応用可能である。

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者が開発した音波の共鳴現象を用いた蒸発係数測定法を基盤として、非平衡状態下での蒸発係数測定法の開発に取り組む。測定法の開発にあたり、以下の課題に重点的に取り組む。

(1) 共鳴音波管内の音場の精密測定

図 2 は共鳴音波管内（実験系）の音源、試料液膜、受信器の位置関係を示した概略図である。図には描かれていないが、実験系は周囲を音源、受信器と同程度の内径を有する円管（共鳴音波

管)で囲っている。従来の手法では、液膜下に設置した受信器 (PVDF) により蒸気中に形成される定在波の音圧を測定し、これを分子気体力学による線形理論解と組み合わせることで蒸発係数を決定する手法を採用していた。しかしながら、音源に使用しているボルト締めランジュバン型振動子は周囲温度、周囲圧力状態により振動状態が変化するために現在の液膜下での音圧測定的手法では蒸気中に形成された音場の状態を正確に把握することができず、したがって平面音波、平衡状態の実現、などを仮定して導出した線形理論解と組み合わせることに対する妥当性が保証されない状態となっている。そこで本研究課題では、まず始めに複数のニードル型のマイクロホンを用いて、共鳴管内の音場を精密に測定することとした。本方法では、ニードル型マイクロホンという、圧力感知部が細いマイクロホンを複数用いて、これを蒸気中の複数箇所に共鳴管外側から差し込むように設置し、各点における音圧の測定結果から共鳴管内に形成される音場を精密に測定することを目指す。

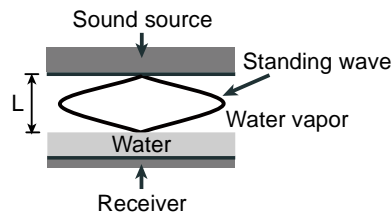


図2 実験系の概略図

(2) 分子気体力学に基づく理論解の構築

従来の蒸発係数測定法では、分子気体力学に基づき、蒸発・凝縮の影響を加味した、線形理論解を用いているが、前述の通り、平面音波の形成、平衡状態の実現など、様々な仮定がある。一方で、実験においてこれらの仮定が満足されていることは一定程度の確認にとどまっており、実験条件との乖離が生じている可能性が存在する。そこで、理論面を見直し、弱非平衡状態、非平面波条件に対応可能な理論解を導出する。具体的には Boltzmann 方程式 (ES-BGK モデル) を数値解析により直接計算し、実験装置を模擬した計算領域内の音場を求める。数値解析を行うことにより、実験装置内の温度の不均一性、装置内の音波が平面波ではない場合、音源周囲の隙間の影響等を考慮することができ、理論解を実験条件に近づけることができる。

(3) 非平衡状態下における蒸発係数測定

(1) (2) に示す内容を実施した上で本研究課題の目的である非平衡状態下における蒸発係数測定に取り組む。図3に示す、実験システムを用いて蒸発係数の測定に取り組む。実験装置は真空容器内に格納されており、真空容器は実験系の温度を一定にするために恒温器内に設置されている。また、脱気した試料液体を生成するための試料液体容器と試料蒸気容器がそれぞれ設置されている。実験装置内を十分に排気した後、試料液体、試料蒸気を実験装置内に導入し、試料液膜を形成する。空間を試料液体の飽和蒸気

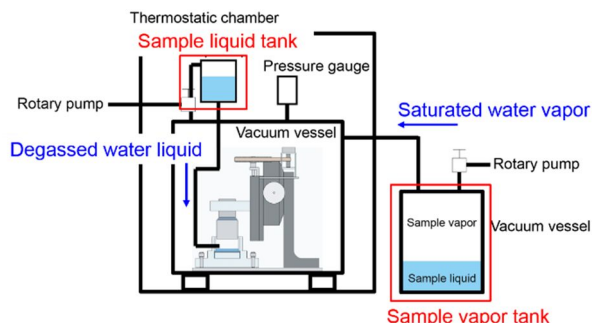


図3 実験システム

(例えば水と水蒸気)で満たした実験系を生成する。次に蒸気中にランジュバン型振動子(音源)を設置し、振動面と液面を平行に設定する。また音源、液面間距離は音波の半波長に設定し、液膜下に受信器を設置する。振動子を一定周期、一定振幅で連続的に振動させると蒸気中に定在波が形成され、蒸気中における共鳴現象により、定在波の振幅は大幅に増大する。このとき気液界面では音波による弱い圧力変化により、蒸発、凝縮が生じる。実験では、蒸発、凝縮発生時の共鳴管内の音圧を液膜下に設置した受信器により測定する。次に実験系と同条件で数値計算を行い、実験結果と数値計算の結果を比較し、蒸発係数を決定する。

4. 研究成果

(1) 共鳴音波管内の音場の精密測定

1年目は実験装置として使用している音波共鳴管内の音場の精密測定に取り組んだ。音波共鳴管は音源、受信器と同程度の内径を有する円管により構成されている。これまで圧力センサやレーザ変位計を用いて、共鳴管内の音場測定を試みてきたが、これらによる測定は蒸発係数測定と同時に行うことができず、また、音源の振動状態は周囲温度、周囲圧力状態により変化することが判明したことから、改めて共鳴管内の音場を精密に測定する必要性が生じた。共鳴管内の音場測定には当初、複数のニードル型マイクロホンによる測定を予定していたが、マイクロホンが試料蒸気にさらされることによるマイクロホンへの影響等、予定していた方法への懸念が生じたことから、試料液膜を形成した状態で音源を駆動させ、共鳴管内に定在波を形成し、圧力計を用いて複数位置での音圧を測定する方法へ変更することとした。この測定方法の変更に伴い、既存の実験装置の改良が必要となったことから、改良方法の検討に取り組み、実験装置の改良については一定の目途が得られた。

2年目も前年度に引き続き、音波共鳴管内の音場の精密測定に取り組んだ。前年度の検討により、マイクロホンを用いた方法から圧力計による方法に変更することとなり、これに伴い実験装置の改良が必要となったことから、初めに改良に取り組んだ。図4に改良後の実験系の概略図を示す。理論解と組み合わせる際に共鳴管内の音場を精密に把握しておく必要があることから、従来受信器として使用していたPVDFをPCB圧力計に変更し、圧力計位置(液膜表面と圧力計感知面との距離)を変更することで、各位置における音圧が測定可能となる。なお新型コロナウイルス感染症の感染拡大の影響を受けて、圧力計の調達に時間を要したこともあり、音場の精密測定は遅れることとなった。

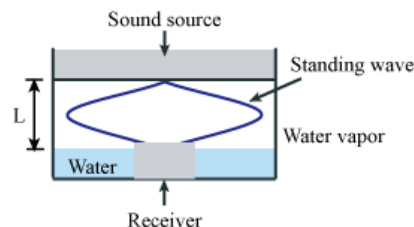


図4 改良後の実験系

3年目も引き続き、音波共鳴管内の音場の精密測定に取り組んだ。実験装置の改良については前年度までの取り組みにより一定の目処が得られ、音場の精密測定も圧力計の位置を制御し、いくつかの条件において測定を行ったが、取得したデータを整理してみたところ、圧力計と音源の位置関係を正確に把握すること、液膜の厚みを正確に制御することが難しく、圧力計の出力値がどのような条件に対応する値なのか、の把握が困難であることが判明した。図3に示した通り、実験系の排気後に試料液体を実験系に投入する手順を採用しているが、この際実験系に導入される試料液体の投入量を正確に測定するとともに、圧力計の位置を事前に把握するための対策が追加が必要であることが明らかとなった。

(2) 分子気体力学に基づく理論解の構築

2年目から実験に対応する理論解の構築に取り組んだ。現在の測定法では分子気体力学に基づき、蒸発、凝縮の影響を加味した線形理論解を用いているが、平面音波の形成、平衡状態の実現、など、様々な仮定があることから、実験条件との乖離が生じている。そこで蒸発係数の精度改善を目的として理論面の見直しに取り組んだ。Boltzmann方程式を数値解析手法により直接計算するために、解析用のコンピュータを導入し、解析を行うための準備作業を行った。解析を行うための準備作業については一通り終了しているが、新型コロナウイルス感染症の影響を受け、研究打ち合わせも予定通り実施できなかったこともあり、理論解の構築については作業が遅れることとなり、期間内の構築、並びに実験結果と組み合わせることによる、非平衡状態下における蒸発係数測定については実現に至らなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------