

令和元年6月13日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21576

研究課題名(和文) 音波共鳴管実験に基づく混合状態の蒸発係数測定法の開発と実験式の確立

研究課題名(英文) Development of mixed state evaporation coefficient measurement method based on acoustic resonance tube experiment and establishment of experimental formula

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・講師

研究者番号：80619867

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本課題の目的は研究代表者が開発した共鳴音波を用いた蒸発係数測定法を基盤として、混合状態に対応した蒸発係数測定法の開発、および蒸発係数を容易かつ高精度に求める実験式を構築することである。

試料蒸気生成用タンク、液膜形成用圧力タンクを導入したことで非凝縮性気体等の影響を排除し、高精度に混合状態を実現することが可能となった。実験装置改良後に水を対象として蒸発係数を測定したところ、改良前と同様、300K付近で約1.0となることが確認された。

蒸発係数を求める実験式の確立については、振動子から発生する電磁ノイズの影響により確立には至らなかったが、実現に向けて電磁ノイズの影響低減に取り組んでいる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実際の現象を考えた場合、単一の試料物質のみから構成される系より、複数の物質が混合した系(混合状態)の方が、数多く存在する。一方、現状ではこのような混合状態に対応した蒸発係数測定法は存在せず、混合状態が蒸発係数にどのような影響を及ぼすのか、明らかとなっていない。また蒸発係数を決定するための実験式が構築されれば、実験をすることなく蒸発係数を求めることが可能となる。蒸発係数を正確に決定することは、単に現象の解析にとどまらず、熱交換器、薄膜形成など、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する。加えて異常気象、地球温暖化など気象分野に対しても、より正確な現象の予測が可能となる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to develop the measurement method for evaporation coefficient corresponding to the mixed state based on the method using the resonant sound wave and construct the experimental formula to easily and accurately determine the evaporation coefficient.

The introduction of the sample vapor tank and the sample liquid film tank eliminated the influence of non-condensable gas. And this introduction possible to realize the mixed state with high accuracy. After the experimental equipment was improved, the evaporation coefficient was measured for water, and it was confirmed that it was about 1.0 at around 300 K as before the improvement. The experimental formula for determining the evaporation coefficient has not been established due to the influence of the electromagnetic noise generated from the sound source, but we continue to work on the reduction of the influence of the electromagnetic noise for realization.

研究分野：分子流体力学

キーワード：蒸発 凝縮 蒸発係数 相変化 凝縮係数 共鳴音波 分子気体力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 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。しかしながら、いくつかの問題については今なお、未解決のまま残されており、本研究で取り上げる蒸発係数もそうした未解決の問題の一つである。

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）が存在する。このようなばらつきが発生した理由として、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が挙げられる。蒸発、凝縮係数を正確に測定するためには、系が非平衡状態に達した状態から平衡状態に至るまでの極めて短時間の間（遷移時間内）に測定を行う必要があるが、従来の測定法では満足されておらず、また蒸発、凝縮による微小な温度変化を正確に測定することは極めて困難である。

研究代表者は、これまで蒸発係数測定法の開発に従事し、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。

一般に音波によって生じる圧力、温度、速度の変化は基準状態に対して微小であるため、音波を用いることで気液平衡状態に極めて近い条件を実現することが可能となる。気液平衡状態では蒸発係数、凝縮係数は定義より等しくなるため、2 つの未知数を 1 つとみなすことが可能となり、凝縮係数の影響を含まずに蒸発係数を決定することが出来る。また、音波によって生じる圧力変化は微小であるが、圧力は温度、速度などの物理量と比較して微小変化でも高精度に測定することが可能であるため、蒸発係数の決定に圧力変化を用いることで、蒸発係数を高い精度で決定することが可能となる。更に高周波の音波（超音波）を利用することで遷移時間内に測定を行うことが出来る。研究代表者が開発した共鳴音波を用いた蒸発係数測定法は上記の特徴を有する測定法であり、本課題は、この共鳴音波を用いた蒸発係数測定法を基盤としてなされるものである。

研究代表者は開発した共鳴音波を用いた蒸発係数測定法を用いて、これまでに水の蒸発係数が温度 300K 付近ではほぼ 1.0 であることを明らかにした。この結果は石山らによりなされた分子動力学法を用いた数値計算の結果（0.99, 300K）と一致する。しかしながら、現在の測定法は単一の試料物質で満たされた条件においてのみ有効な測定法であり、空気等、試料物質以外の気体が混合した状態（混合気体条件）には適用できない。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、研究代表者が開発した共鳴音波を用いた蒸発係数測定法を基盤として、混合状態（混合気体）に対応した蒸発係数測定法の開発、および蒸発係数を容易かつ高精度に求める実験式を構築することである。

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

本研究では音波の共鳴現象を利用した蒸発係数測定法を基盤として、混合状態に対応した蒸発係数測定法を開発する。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) 混合気体に対応した実験装置の設計、製作と実験方法の改良、および理論の構築

混合状態での測定を実現するためには、試料蒸気とその他の気体の混合比を任意に変化させることが必要となる。そこで既存の測定装置に新たに油拡散ポンプ、圧力計、試料液体、試料蒸気生成用真空容器を導入する（図 1 参照）。圧力計を追加することで、試料蒸気、混合気体の分圧を測定し、混合比を求めることができる。更に、油拡散ポンプ、試料液体、試料蒸気生成用真空容器を導入することで、実験開始前の実験系（真空容器）の真空度を向上させることができる。実験系を十分排気した後、試料蒸気生成用真空容器により、試料蒸気、試料液体を実験系に導入する。

混合気体に対応する理論解の導出に取り組む。現在、単原子分子の場合については混合気体

に対応したモデル方程式が構築されているが、多原子分子に対応したものは存在しない。一方、本測定法では実験により測定した圧力値から蒸発係数を求める、理論解が必要となるため、多原子分子に対応する理論解の導出に取り組む。

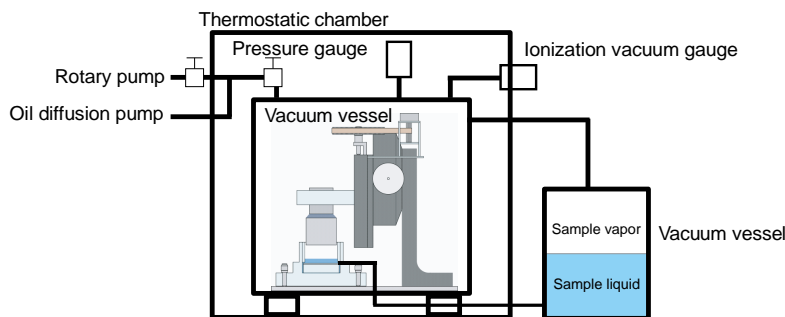


図1 改良後の実験装置概略図

(2) 蒸発係数を高精度に決定できる実験式の構築

実験において取得した蒸発係数の測定結果から実験式を構築するために、実験条件を同一に設定し、液膜の有無のみ変更した状態で実験を行う。この2種類の実験により、蒸発、凝縮による効果のみを抽出することが可能となる。液膜なし（固体壁）条件の結果を基準として、液膜あり条件の結果を整理し、横軸、液膜温度、縦軸、蒸発、凝縮による音圧変化、のグラフを作成する。過去の研究から蒸発係数は液膜温度に依存することが報告されているため、先に得られた液膜温度、音圧変化のグラフに対して適切な関数でフィッティングを行い、初めに水、メタノールなど、幾つかの物質に対応する実験式を構築する。最終的には物質毎の実験式を比較し、試料の違いによる効果をパラメータとして、あらゆる物質の蒸発係数を高精度に求めることが出来る実験式を構築する。

4. 研究成果

(1) 混合気体に対応した実験装置の設計、製作と実験方法の改良

混合状態での測定を可能にするために、試料蒸気生成用の蒸気タンク、圧力計、および真空ポンプを導入した。導入した蒸気生成用タンク、および試料液膜用圧力タンクを図2、および図3にそれぞれ示す。従来は、実験系内に試料液膜を生成した状態で排気を行っていたため、試料物質の蒸気圧以下まで圧力を下げることが難しく、十分な排気が行えない状況であった。試料液膜、蒸気生成用の圧力タンクを導入したことにより、実験系内に液膜を形成せずに排気を行うことが可能となり、これにより十分な排気を実施することが可能となった。排気を実施した後、液膜、蒸気生成タンクから試料液体、および試料蒸気を実験系内に導入し、実験を行う。また混合状態での測定に関しても、蒸気導入時に試料蒸気の分圧、混合させる別種の気体、例えば空気分圧、を圧力計により測定することで、従来と比較し、高精度に混合状態を実現することが可能となった。

2年目は、初年度に改良した実験系を用いて、単一物質（試料物質には水を用いた）の蒸発係数測定に取り組んだ。これは、混合状態のもとで実験を行うためには、試料蒸気、および別の物質、それぞれの分圧を正確に制御することが必要であり、単一物質による測定を通して、試料蒸気分圧を測定、制御できることを確認するためである。単一物質における測定結果を、実験系改良前に取得した実験結果と比較し、精度向上の確認を行った。なお、単一物質に対する実験の過程で、実験系の排気前に試料液膜を実験系に形成した場合と排気終了後に試料蒸気、試料液膜を実験系に導入、形成した場合とで、音波を蒸気、および試料液膜に発振した場合の挙動、結果が異なることから、この原因の特定、解消に取り組む必要が生じた。

3年目も2年目に引き続き、単一物質（水）で実験系を満たした状態での実験を実施した。昨年度の取り組みでも単一物質（水）を対象として実験を行ったが、実験で使用しているパラトロン圧力計の挙動が不自然であり、その原因の分析と対策を行ったため、予定していたデータの取得が達成されなかったためである。本課題で混合状態における蒸発係数測定は単一物質の測定結果と混合状態における測定結果を比較し、測定条件を元に適切な関数でフィッティングすることにより導出される。したがって、試料物質、非凝縮性気体等のその他の物質、それぞれの分圧を正確に測定、制御する必要があり、単一物質（水）のみで満たされた条件で高精度に測定できる環境の確立が必要となる。今年度の取り組みの結果、本課題で取り組んだ、試料蒸気容器、試料液体容器の導入後も、水の蒸発係数は約1.0との結果が得られた（図4参照）。図中の赤丸が実験装置改良後に取得した蒸発係数の値を示す。



図2 試料蒸気生成用タンク



図3 試料液膜用圧力タンク

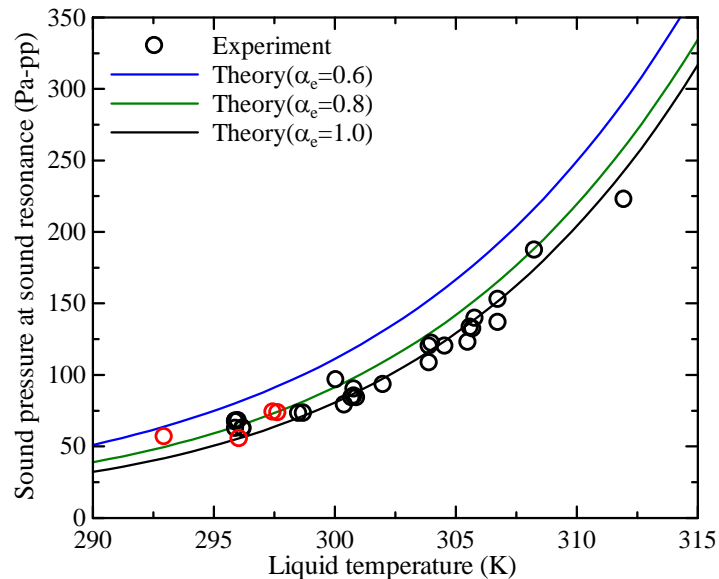


図4 実験装置改良前後の蒸発係数比較

(2) 混合気体に対応した理論解の導出, および蒸発係数を高精度に決定できる実験式の構築
 音波共鳴管実験による結果にもとづき、混合状態における蒸発係数測定のために、混合気体、特に多原子分子に対応した理論解の導出に取り組んだが、実験装置の改良とその後の検証実験に時間を要したため、理論解の導出には至らなかった。

次に蒸発係数を高精度に決定するための実験式の構築に関して述べる。実験式を構築する方法として、実験条件を同一に設定し、液膜の有無のみ変更した状態で実験を行い、蒸発、凝縮による効果のみを抽出することを予定していた。しかしながら、実験データを得る過程で音源から発生する電磁ノイズの影響が液膜を形成した場合、液膜がない場合で異なり、ノイズの影響を除去することができないために、2条件による結果を比較し、実験式を構築する手法は困難となった。現在も音源から発生する電磁ノイズを何らかの方法で除去できないか検討を進めており、ノイズ信号のみを単独で収集する、あるいは逆に音波信号のみを収集する方法等について検討中である。加えて、現在は線形理論解を用いて実験値と理論解の比較を行い、蒸発係数を決定しているが、線形理論解をより実験条件に近づけるべく、計算機等を用いた直接計算等も検討している。蒸発係数を決定する実験式を構築するためには実験精度の向上と併せて、理論解の向上も必要と考えており、その両面から目的達成に向けた取り組みを進めている。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計4件)

Nakamura, S., Yano, T., Determination of the Evaporation Coefficient of Water Based on Molecular Gas Dynamics, *31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, 2018年7月25日, Glasgow (UK).

Nakamura, S., Yano, T., Determination of the Evaporation Coefficient of Water by Sound Resonance Experiment, *JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9)*, 2017年10月29日, 沖縄.

Nakamura, S., Yano, T., Behavior of Sound Waves at the Vapor-liquid Interface Accompanied with Evaporation and Condensation, *International Conference on Theoretical and Computational Acoustics (ICTCA2017)*, 2017年7月31日, Vienna (Austria).

Nakamura, S., Yano, T., Measurements of the Evaporation Coefficient of Water Based on Sound Resonance Experiment, *Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics 2017*, 2017年6月22日, 札幌.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。