

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：54601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860069

研究課題名(和文) 音波共鳴管実験に基づく蒸発係数決定のための実験式の確立

研究課題名(英文) Establishment of an experimental formula for determining evaporation coefficient based on resonant sound experiment

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・助教

研究者番号：80619867

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では音波共鳴実験により蒸発係数を決定し、更に実験結果にもとづき、蒸発係数を求める実験式を構築することを目指した。始めに試料物質として水を用いて、295K～315Kの各温度条件における蒸発係数の測定に取り組んだ。その結果、いずれの温度条件においても蒸発係数は約1.0となることが明らかとなった。さらに水の蒸発係数の温度依存性については確認できなかった。蒸発係数を求める実験式の確立については、測定毎に生じる結果のばらつきにより確立には至らなかったが、誤差要因を検討した結果、音源であるランジュバン型振動子の温度依存性により、周囲温度に応じて振幅が変化していることが要因として指摘された。

研究成果の概要(英文)：This research project has been performed to determine the evaporation coefficient by sound resonant experiment and construct an experimental formula for determining evaporation coefficient. The results can be summarized as follows: (1) Determination of evaporation coefficient of water by sound resonant experiment between 295 K and 315 K, (2) Measurement of temperature dependence of evaporation coefficient, (3) Consideration of measurement error caused by temperature dependence of the sound source.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：蒸発 蒸発係数 相変化 凝縮係数 共鳴音波 分子気体力学

1. 研究開始当初の背景

蒸発、凝縮現象は基礎的かつ重要な物理現象の一つであり、私たちの生活の中でもしばしば目にする、身近な現象である。たとえば自然分野においては地球規模で生じる水循環が挙げられる。水循環とは海や川から蒸発した水蒸気が上空で冷やされ凝縮し、微小な液滴となって雲を形成する。やがて液滴は成長し、雨となって再び地上に戻るというサイクルのことである。他方、工学分野においても混相流、キャピテーションなどで見られ、熱交換器や薄膜形成に応用されている。ここで、水と水蒸気が気体と液体の界面、気液界面を挟んで接している状態を考える。初期時刻において系は平衡状態、すなわち至る所で温度、圧力が等しく、時間に依らず一定にあるとする。仮に液体の温度、蒸気の温度、圧力を短時間で変化させると、界面において蒸発、あるいは凝縮が生じる。しかしながらこのとき単位時間、単位面積あたりに生じる蒸発量、あるいは凝縮量を求めることは現時点で出来ない。蒸発、凝縮量は分子気体力学の支配方程式であるボルツマン方程式に気液界面における境界条件、気体論境界条件を課すことで求めることが出来るが、気体論境界条件には蒸発係数、凝縮係数という未知パラメータが含まれる。蒸発係数、凝縮係数については古くから多くの研究が行われてきたが、その多くは蒸発によって生じる温度低下から係数を求めるという方法である。通常蒸発によって生じる界面近傍の液体の温度を高精度に測定することは困難であり、その結果、結果毎に非常に大きなばらつきが生じている。研究代表者は、共鳴音波を用いて蒸発、凝縮を誘起し、蒸発、凝縮によって生じる音圧の振幅変化から蒸発係数を決定するという新しい測定法を提案し、水の蒸発係数が 300K 付近において約 1.0 となることを明らかにした。共鳴音波を用いる本測定法の利点として、高精度かつ平衡状態に極めて近い状態で測定が可能、という2点が挙げられる。一般に圧力振幅の測定は、温度測定と比較して、精密な測定が可能である。また、音波によって誘起される圧力、速度、温度などの変化は基準状態と比較すると微小であり、従って初期状態を平衡状態とすれば、測定時は極めて弱い非平衡状態が実現される。気体論境界条件に含まれる、2つの未知数、蒸発係数と凝縮係数はその定義より、平衡状態において等しくなることから、平衡状態にきわめて近い状態であれば、2つの未知数を1つとみなすことが可能となる。更に、理論解析の結果、共鳴条件においてのみ、蒸発係数の変化が音波の有意な振幅変化として得られることが確認されており、音波の共鳴現象を利用することで、蒸発係数を高精度に測定することが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では水を試料として、音波共鳴管を

用いた実験と分子気体力学に基づく理論解から平衡状態近傍における蒸発係数(凝縮係数)を決定するとともに、測定結果を基に蒸発係数を求める実験式を構築することを目的とする。加えて、蒸発係数の温度依存性の有無について明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 音波共鳴管を用いた実験と分子気体力学に基づく理論解析による蒸発係数の決定

本研究では研究代表者が提案した音波共鳴管実験による蒸発係数決定法を基に、蒸発係数決定に取り組む。同決定法では、試料物質とその飽和蒸気(例えば水と水蒸気のみ)で満たされた初期時刻において平衡状態にある実験系を考える。蒸気中に振動面が液面と平行になるように音源を設置し、音源、液面間距離を音波の半波長に設定する。また音波の圧力振幅を測定するための受信器は水液膜下に設置されている。なお音場の周囲は音源の直径と同程度の内径を持つアクリル樹脂製円筒容器で覆われている。この状態で音源を一定周波数、一定振幅で連続的に振動させると、蒸気中を音波が伝播し、数周期後に蒸気中に定在波が形成される。またこのとき、蒸気中の共鳴による影響により、定在波の振幅は大幅に増大する。一方、液面においては音波によって生じる圧力変化によって弱い蒸発、凝縮が周期的に生じる。このときの蒸気中の定在波の振幅、音圧を液膜下に設置した受信器により測定する。また実験に対応させて求めた、分子気体力学に基づく線形理論解から共鳴時の蒸発係数と音圧の関係が得られる。この理論解と実験により測定した共鳴時音圧を比較することで水の蒸発係数が決定される。図1に示すのは、実験系の概略図であり、図2に示すのは実験装置の概略図である。実験装置は音源(ボルト締めランジュバン型振動子)、受信器(PVDF)、液膜ホルダ、によって構成される。音源は微動ステージ、および粗動ステージに接続されており、同ステージにより、音源、液面間の距離を任意に制御することが可能となっている。また、複数の熱電対により液膜温度、音源温度、蒸気温度の測定を行う。温度および実験装置が格納された真空容器内の圧力値はデータロガーにより実験中、定期的を取得される。本研究では、蒸発係数決定と併せて、広範な温度条件(295K~315K)により測定を行うことで、蒸発係数の温度依存性の有無についても確認を行う。

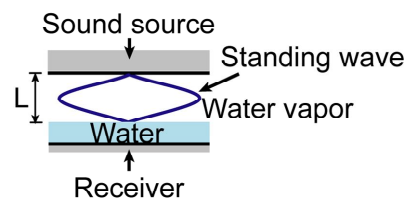


図1 実験系の概略

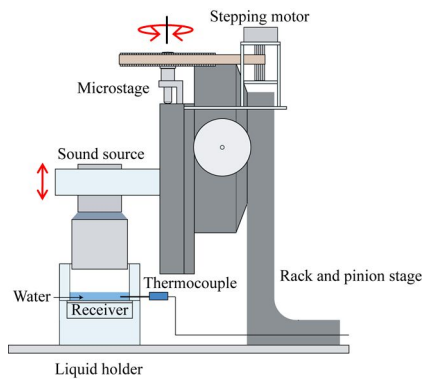


図2 実験装置

(2) 蒸発係数を求める実験式の構築

蒸発係数の結果を用いて実験式を構築するために、温度、圧力などの実験条件を同一に設定し、試料液膜を形成した場合と形成しない場合で新たに実験を行う。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、蒸発、凝縮は生じない、蒸気空間は試料蒸気で満たす)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。過去他研究者による報告から、蒸発係数は液膜温度に依存する、温度依存性を有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、試料物質(例えば、水、メタノールなど複数物質)に対応する実験式を構築する。更に得られた複数の試料物質に対する実験式を比較し、試料の違いによる効果をパラメータとして、あらゆる物質に対応した蒸発係数を求める実験式を構築する。なお、実験式を構築する上で、実験の精度、再現性を向上させ、測定毎のばらつきを低減させることが必要となる。そのため実験式の構築と併せて、実験装置の改良、実験方法の改善にも取り組む。

4. 研究成果

(1) 音波共鳴管を用いた実験と分子気体力学に基づく理論解析による蒸発係数の決定

本研究では試料物質として水を用いて、音波共鳴管実験に基づき、蒸発係数の決定に取り組んだ。蒸発係数の温度依存性を確認するために、これまでより広範な温度条件、295K~315Kにおいて測定を行った。過去の数値解析による研究から蒸発係数の温度依存性が報告されているが、実験により確認された事例は見当たらない。なお、実験に際しては、新たに導入したデータロガーを用いて、液膜温度、蒸気温度、音源温度、および真空容器内圧力の経時変化を詳細に記録した。

次に実験手順について述べる。はじめに、受信器を液膜ホルダ内に設置し、音源、受信器振動面が平行になるように音源の角度を調節する。本実験では共鳴時の出力により2面が平行であるか判断する。すなわち、共鳴

時の出力が最大になる角度の時、音源、受信器は平行であるとみなす。角度調節後は、受信器振動面上に水液膜を形成する。使用するのは純水であり、形成する液膜厚さは6.5mm程度である。液膜形成にあたり、音源、水液膜表面が平行になるように実験系の角度を水平に調節する。その後、音源の位置を音源、液面間距離Lが音波の1波長を超える距離になるように微動ステージにより設定する。音源位置の設定後、ロータリーポンプを用いて真空容器内の排気を行う。真空容器内の排気を行うことで、試料物質以外の不純物を除去し、初期状態として、水と飽和水蒸気のみで満たされた平衡状態を実現する。排気終了後、容器内圧力が液膜温度に対応する水の飽和蒸気圧に到達し、ほぼ定常な状態になった後、測定を開始する。音源を一定電圧、一定周波数で連続的に駆動させ、その際に受信器から得られる出力波形を記録する。出力波形を記録後、音源の駆動を停止し、ステッピングモータにより微動ステージを制御し、音源位置を変化させる。音源位置の変更後、再び音源を駆動させ、以下受信器出力波形の記録、音源位置の変更を繰り返す。最終的に音源、液面間距離Lが音波の半波長以下に到達後、測定を終了する。このように1回の測定で、1波長から半波長まで音源、液面間距離Lを変化させて測定を行うのは、受信器からの出力増大が蒸気中における共鳴に起因するものかどうかは、2点以上の共鳴点で測定を行い、共鳴点間の距離と音波の波長との関係を確認して、始めて明らかになるためである。測定終了後、各位置で記録した受信器出力波形から平均振幅を求め、受信器の検定試験の結果を用いて電圧値から圧力値に換算する。一方、分子気体力学に基づく線形理論解から、蒸発係数を変化させた時の、各距離における音波の圧力振幅を求め、実験結果と比較することで蒸発係数を決定する。

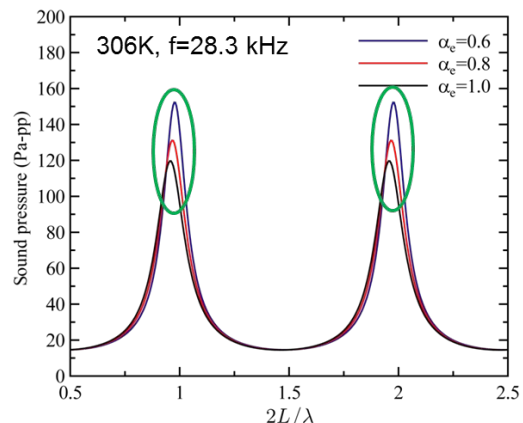


図3 各距離における音圧(理論解)

図3に示したのは、温度306K、音源の駆動周波数 $f=28.3$ kHzにおいて、距離Lを半波長から1波長まで変化させた時に、各距離における音圧振幅が蒸発係数に対してどのように変化するのか、線形理論解から求めたものである。横軸は距離Lを音波の半波長で

除した無次元距離を表しており、横軸の1, 2がそれぞれ半波長, 1波長に対応する。図より、横軸1, 2付近において共鳴が発生し、圧力振幅が増大していることが確認できる。更に、共鳴条件においてのみ、蒸発係数の影響が、測定可能な圧力振幅の変化となって現れることがわかる。

図4は実験から得られた半波長共鳴時の音圧振幅と同条件における理論値を比較したものである。図の横軸は液膜温度を示し、縦軸は半波長共鳴時の音圧に対応する。また図中の赤丸は実験結果を示し、一点鎖線、破線、実線はそれぞれ、蒸発係数0.6, 0.8, 1.0における理論値を示す。図から分かる通り、いずれの液膜温度においても、赤丸で示した実験結果と実線で示した蒸発係数1.0の場合の理論値が良く一致していることがわかる。このことから水の蒸発係数は温度295K~315K付近において、約1.0となることが明らかとなった。また蒸発係数の温度依存性については、今回の温度範囲では確認されなかった。

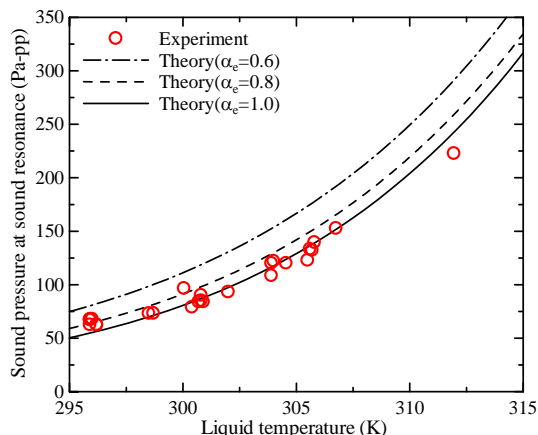


図4 水の蒸発係数

(2) 蒸発係数を求める実験式の構築

音波共鳴管実験による結果にもとづき、蒸発係数を求める実験式の構築に取り組んだ。しかしながら、図4から分かる通り、同じ温度条件においても、実験毎のばらつきが見られる。そのため、ばらつきが存在する現状では、高精度に蒸発係数を求める実験式の構築は困難と判断し、ばらつき要因の検討、並びに低減に取り組んだ。

検討を行った結果、ばらつき要因として次の2点が挙げられる。1点目は音源を駆動することで生じる音源の発熱である。音源、液面間距離 l を1波長から半波長まで変化させ測定を行っていく際、各位置における音源の駆動時間は数秒程度と短時間であるが、1回の測定でおおよそ100点前後のデータを取得するため、実験開始時と実験終了時では音源の温度が最大2K程度上昇し、実験系へ影響をおよぼすことが予想される。そこで、測定点を半分程度に減らし、音源の発熱を低減させることとした。2点目として、音源駆動時の変位が温度条件に依存する、温度依存性が

影響すると予想される。図5は液膜を形成せず、空気で満たした状態で周囲温度のみ変化させ、音源を駆動させた際に受信器から出力された電圧を示したものである。温度依存性を持たないのであれば、いずれの温度においても同様の出力電圧を示すはずであるが、図から分かる通り、周囲温度が上昇するに従い、出力が低下する傾向が確認された。従って、蒸発係数を求める実験式を構築するためには、音源の温度依存性が実験結果に及ぼす影響を定量的に評価することが求められる。音源の変位振幅を各温度において測定することで評価を行い、実験式の構築に取り組む。

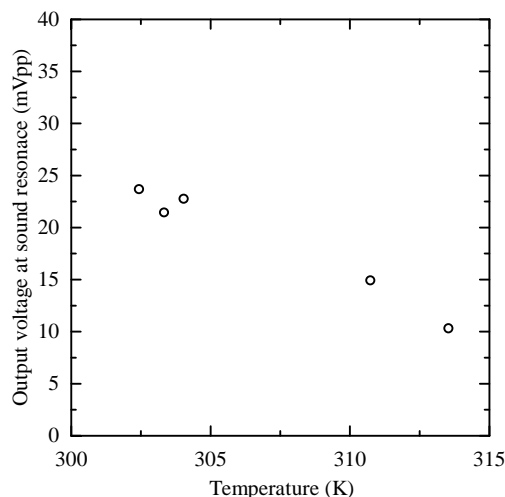


図5 音源の温度依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計3件)

Nakamura, S., Yano, T., Measurements of the Evaporation Coefficient of Water Based on Molecular Gas Dynamics, 29th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, 2014年7月, Xi'an (China). 採択済み

Nakamura, S., Yano, T., Measurements of the Evaporation Coefficient of Water Using Sound Resonance, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, 2013年6月20日, Lisbon (Portugal).

中村篤人, 音波共鳴法を用いた蒸発係数決定, 東京大学工学系研究科 流体工学研究室講演会, 2013年6月28日, 東京大学.(招待講演)

6. 研究組織

(1) 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・助教

研究者番号: 80619867