

学位論文題名

共鳴音波を用いた水の蒸発係数の測定

学位論文内容の要旨

蒸発と凝縮は基礎的かつ応用上重要な物理現象であり、このため工学のみならず物理学、化学、気象学等々の分野においても古くから研究対象となってきた。工学分野における蒸発や凝縮の例を挙げるなら、各種流体機械内でのキャビテーション発生、雲の中での航空機翼表面における水蒸気の凝縮、ロケットの液体燃料タンク内での気泡生成、原子炉での蒸気爆発、LNG 輸送における気泡生成等々で、部品の破損や性能の低下等の重大な悪影響を及ぼすことも少なくない。このような理由から今日まで蒸発および凝縮の基礎から応用にわたる研究がなされてきた。

しかしながら、蒸発および凝縮については、次のような極めて単純な問題についても未だに明らかにされていない。液体とその蒸気からなる気液二相系を考える。気液界面は平面で、初期時刻においてこの系は平衡状態にあるとする。ここで液体の温度、蒸気の温度、圧力のいずれか一つを短時間で変化させると、気液界面において蒸発または凝縮が生じる。しかしながら、液体の温度、蒸気の圧力と温度が既知であるとしても、この時に気液界面で生じる蒸発あるいは凝縮の質量流束を流体力学や熱力学に基づいて求めることはできない。その理由は、気液界面で蒸発や凝縮が生じている場合には、気液界面近傍の蒸気は非平衡状態にあり、局所平衡を仮定する流体力学や熱力学が成り立たないためである。

蒸発あるいは凝縮は、通常、Boltzmann 方程式を基礎方程式とする分子気体力学に基づいて解析される。しかしながら、そのためには気液界面で与えられるべき境界条件(気体論境界条件)が必要となり、この境界条件には蒸発係数と凝縮係数という 2 つの未知数が含まれている。蒸発係数と凝縮係数は気液界面における分子の質量流束の比によって分子レベルで厳密に定義される 0 以上 1 以下の値である。気液非平衡状態では両者の値は異なるが、平衡状態では定義上これらの値は等しい。蒸発係数と凝縮係数の測定は一世紀以上にわたり多くの研究者により行われてきており、凝縮係数に関しては水、メタノールなど、いくつかの物質について測定値が報告されているが、蒸発係数に関しては実験により得られた信頼できるデータは未だ存在しない。本論文の目的は共鳴音波を用いた蒸発係数測定法の開発とその測定法を用いて水の蒸発係数を決定することである。

本研究で提示する蒸発係数の測定法は音波の共鳴現象を利用した実験と分子気体力学解析により蒸発係数を決定する方法である。測定に音波を用いることで平衡状態に極めて近い条件で測定が可能となり、気体論境界条件に含まれる 2 つの未知数、蒸発係数、凝縮係数を 1 つ(以下、蒸発係数)とみなすことが可能となる。これは一般に音波によって誘起される圧力、速度、温度等の変化は基準状態における値と比べて極めて小さいためであり、本研究における音源のマッハ数は 0.001 程度であ

る。本測定法では試料液体とその蒸気のみで満たされた平衡状態にある系を実験系とし、蒸気中におかれた音源を連続的に振動させ、蒸気中に音波を放射させる。音源から発振された音波は蒸気中を伝播し気液界面に到達する。このとき気液界面では音波によって生じる圧力変動により弱い蒸発、凝縮が周期的に生じる。さらに音源、気液界面の距離を音波の共鳴条件に設定することで、蒸気中において共鳴が生じ、定在音波の振幅は増大する。共鳴時の振幅増幅率は実験条件に依存し、実験条件を適切に設定することにより、蒸発、凝縮による影響を有意の差として振幅増幅率に取り込むことが可能となる。本測定法では共鳴時の振幅増幅率に注目し、初期状態を平衡状態として、共鳴条件下において蒸気中における音圧を試料液膜下に設置した受信器により測定する。一方実験に対応する線形理論解を用いて蒸発係数を変数として解析を行い、実験結果との比較により蒸発係数を決定する。なお共鳴音波を用いた本測定法は様々な物質に適用可能な方法であるという発展性を有している。

本研究では初期液膜温度を 296,301,306K に設定し、水の蒸発係数の決定を行った。なお蒸発係数は試料液体の温度に依存するが、先行研究の結果から 296K から 306K における蒸発係数の変化はごくわずかと予想されるため、本研究では一定と仮定する。水と水蒸気のみで満たされた、初期状態において平衡状態にある系を実現し、蒸気中における共鳴時に受信器から得られる出力波形を測定する。出力波形に対して周波数解析を行い、駆動周波数成分を取り出し、理論解析結果との比較を行う。比較の結果、上記温度条件における水の蒸発係数はほぼ 1.0 であることが明らかになった。この結果は Ishiyama 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、300K において 0.99 とよく一致する。水の蒸発係数が 1.0 であることは、すなわち、界面から蒸気中に出ていく分子はほぼすべて液体から蒸発する分子で構成され、また逆に蒸気中から界面に入射する分子はほぼすべて液体中に凝縮する状況であることを意味する。本研究で明らかになった水の蒸発係数の値と、すでに得られている凝縮係数の値を用いて気体論境界条件の確立が可能となる。

本論文は全 4 章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。第 1 章は序論であり、研究背景、研究目的について先行研究の結果を交えて述べる。第 2 章では共鳴音波を用いた蒸発係数測定法について述べる。本研究が対象とする問題および実験系を提示し、測定に音波を用いる利点、共鳴現象を利用する利点等、本測定法の新規性、独自性を示す。また実験で使用する実験装置に関して、音源、受信器、真空容器の特性、性能試験の結果と併せて述べる。さらに研究を進める中で明らかになった音源から発生する電磁ノイズに関する問題について説明する。なお第 2 章は以下の 6 節から構成される。音波による蒸発係数測定原理、音波の共鳴現象、実験装置、実験手順、音源から発生する電磁ノイズの影響、実験の再現性、以上の 6 節である。第 3 章では、2 章で述べる蒸発係数測定法を用いて水の蒸発係数を測定した結果、および考察を述べる。なお本章で音源の電磁ノイズ処理法、周囲温度が音源の振動特性に及ぼす影響に関する補正、音源の変位測定の方法とその結果についても併せて提示する。第 4 章は結論であり、本研究により明らかになったこと、今後の展望について、総括を行う。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 川 重 雄

副 査 教 授 杉 山 憲一郎

副 査 教 授 矢 野 猛 (大阪大学大学院

工学研究科)

副 査 准教授 渡 部 正 夫

学 位 論 文 題 名

共鳴音波を用いた水の蒸発係数の測定

気液界面での蒸発あるいは凝縮の速度過程は連続体仮説に基づく流体力学や熱力学では扱うことができず、通常、Boltzmann 方程式を基礎方程式とする分子気体力学に基づいて扱われる。この場合、気液界面で与えるべき気体論境界条件と呼ばれる境界条件が必要であり、これには蒸発係数と凝縮係数という 2 つの未知係数が含まれている。これらの係数は気液界面での蒸気分子の付着と反射および液体分子の離脱にかかわっており、界面での分子の質量流束の比によって分子レベルで厳密に定義される。平衡状態ではこれらの係数の値は等しいが、非平衡状態では異なる。蒸発係数と凝縮係数の測定はさまざまな物質に対して、一世紀以上にわたり多くの研究者により行われてきたが、凝縮係数に関しては水、メタノールなどいくつかの物質について測定値があるものの、蒸発係数に関しては信頼できる実験値はどのような物質についても存在しない。

本研究は蒸気で満たされた管内での音波の共鳴現象と分子気体力学解析を融合させる新しい蒸発係数の測定法を提示し、さらに水の蒸発係数を決定することを目的としてなされたものである。実験方法は以下のとおりである。音波を用いることにより平衡状態に極めて近い条件下で実験を行うことができ、蒸発係数と凝縮係数をほぼ同じもの (以下、蒸発係数) とみなすことが可能となる。これは一般に音波によって誘起される圧力、速度、温度等の変化が基準状態における値と比べて極めて小さいからである。蒸気中の音源を連続的に振動させると、音源から発振された音波は蒸気中を伝播して対向位置の気液界面に到達し、この界面では音波によって生じる圧力変動により弱い蒸発と凝縮が周期的に生じる。この場合、音源、気液界面の距離を音波の共鳴条件に設定すると、蒸気中で音波の共鳴が生じ、定在音波の振幅が増大する。共鳴時の振幅増幅率は実験条件に依存し、実験条件を適切に設定することにより、蒸発と凝縮による影響を有意の物理量として振幅増幅率に取り込むことが可能となる。本実験では共鳴時の振幅増幅率に注目し、初期状態を平衡状態として、共鳴条件下において蒸気中における音圧を試料液膜下に設置した受信器により測定した。一方、実験に対応する Boltzmann 方程式の線形理論解を用いて、蒸発係数を未知量として解析を行い、実験結果との比較により蒸発係数を決定した。本研究で用いた Boltzmann 方程式は多原子分子気体に適用可能な Gaussian-BGK Boltzmann 方程式である。

実験は水-水蒸気系に対して初期液膜温度 296,301,306K について行われた。蒸発係数は水の温

度に依存するが、先行研究の結果から 296K から 306K における蒸発係数の変化はごくわずかと予想されたため、本研究では一定とみなした。各初期温度において平衡状態にある水-水蒸気系を実現し、蒸気中における共鳴時に受信器から得られる出力波形を測定し、この波形に対して周波数解析を行い、駆動周波数成分を取り出して、理論解析結果との比較を行った。その結果、上記温度条件における水の蒸発係数は 1.0 であることが明らかになった。この結果は分子動力学法を用いた数値計算値 0.99(300K) とよく一致している。水の蒸発係数が 1.0 であることは、界面から蒸気中に出ていく分子はほぼすべて液体から蒸発する分子で構成され、また逆に蒸気中から界面に入射する分子はほぼすべて液体中に凝縮する状況であることを意味する。本実験で決定された水の蒸発係数の値と、すでに得られている凝縮係数の値を用いて気体論境界条件の確立が可能となった。

以上を要するに、本研究により、約一世紀にわたって研究されてきた気液界面で与えるべき気体論境界条件中の蒸発係数を測定する方法が確立されるとともに、この方法により水の蒸発係数が 1.0 と決定された。その結果、先行研究で既に決定されている水の凝縮係数を考慮することにより、気体論境界条件が閉じた形で表現され、これを用いて Boltzmann 方程式による蒸発および凝縮の速度過程の正確な解析、さらに Boltzmann 方程式に基づく Navier-Stokes 方程式系に対する気液境界条件の正確な表現が可能となった。これらの成果は、機械工学、航空宇宙工学、原子力工学、物理学、化学、さらには気象学に大きく貢献するものである。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。