

氏 名	田 口 智 清
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2354 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 航 空 宇 宙 工 学 専 攻
学位論文題目	Kinetic-Theory Study of Vapor Flows in the Presence of a Noncondensable Gas (非凝縮性気体の存在下における蒸気流の気体分子運動論に基づく研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 青 木 一 生 教 授 斧 高 一 教 授 川 原 琢 治

論 文 内 容 の 要 旨

境界面で蒸発・凝縮を伴う蒸気の流れは、様々な工学分野で重要な役割を果たしている。この流れは、境界の近傍で蒸気が非平衡状態になっているため、圧力の高低にかかわらず通常の流体力学で記述することができず、気体分子運動論（ボルツマン方程式）による取り扱いが必要となる。本論文は、蒸気の流れのなかにごく微量の蒸発・凝縮を行わない別種の気体（非凝縮性気体）が含まれている場合について、気体分子運動論をもとに、強い蒸発・凝縮を伴う常圧蒸気の定常流を記述する新しい流体力学を構築した研究の成果をまとめたもので、序文と四つの章および結論より成っている。

序文では、まず微量の非凝縮性気体を含む蒸気流に対する流体力学構築の必要性を手短に述べた後、以下の各章で取り扱う内容を要約している。

第 1 章では、任意形状の境界まわりの定常な蒸気流を考え、流れの中に微量の非凝縮性気体が混入しており、かつ蒸気の代表的な平均自由行程と系の代表長の比で定義されるクヌーセン数が小さい場合を調べている。まず問題と仮定を述べた後、二成分混合気体に対するボルツマン方程式を用いて問題を定式化し、さらに無次元変数を導入して問題を特徴付けるパラメータを明らかにしている。次に、非凝縮性気体の平均濃度がクヌーセン数と同程度に小さい場合について、ボルツマン方程式の系統的漸近解析を行い、これによってクヌーセン数がゼロに近づく連続流極限（常圧蒸気に対応する極限；なお、この極限では非凝縮性気体の平均濃度は無限小になる）での蒸気と非凝縮性気体の挙動を解明した。すなわち、(i) 非凝縮性気体は、凝縮が起こっている境界面近傍の無限に薄い層内に閉じ込められ、その他の領域は蒸気のみの流れとなる；(ii) 蒸気の流れは、圧縮性気体に対するオイラーの方程式に従う；(iii) 蒸発が起こっている境界面でのオイラー方程式の境界条件は、平面凝縮相から半無限領域へ蒸発する蒸気流の問題を解析することによって得られる；(iv) 凝縮が起こっている境界面でのオイラー方程式の境界条件は、非凝縮性気体の存在の下で半無限領域から平面凝縮相へ凝縮する蒸気流の問題を解析することによって得られる。さらに、既に得られている(iii)の境界条件および以下の第 2、3 章で求めた(iv)の境界条件をまとめて示している。これにより、連続流極限においては、平均濃度が無限小であるような微量の非凝縮性気体が、蒸気流に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

第 2 章、第 3 章では、上述の(iv)の半無限領域における凝縮の問題、すなわち、無限遠方から蒸気が平面凝縮相に吹き付けてそこで凝縮しており、界面近傍に非凝縮性気体が吹き寄せられている状況を考えている。このとき、無限上流の蒸気の圧力、温度、流速、平面凝縮相の温度、その温度に対応する蒸気の飽和蒸気圧、および非凝縮性気体含有量の間に特定の関係が存在し、それが実質的に上述のオイラー方程式に対する境界条件を与える。この関係を、(a) 蒸気分子と非凝縮性気体分子の力学的性質が同じである；(b) ボルツマン方程式のかわりに GSB モデルと呼ばれるモデル方程式を用いる、という制限のもとで、解析的処理と詳細な数値計算を行うことにより、数値的に構築している。この関係は、蒸気の凝縮速度が音速より小さいか大きいかにによって、根本的に異なった形をとる。第 2 章ではそれが音速より小さい場合を、第 3 章では音速に等しいか大きい場合をそれぞれ取り扱っている。この研究により、上記制限のもとで、凝縮が起こっている境界面でのオ

イラー方程式に対する正しい境界条件が数値的に構築された。平均濃度無限小の非凝縮性気体は、この境界条件を通して、大域的な蒸気の流れに影響を及ぼす。

第4章は、それまでの章で構築した平均濃度無限小の非凝縮性気体を含む蒸気に対する新しい流体力学の応用に当てられている。これをもとに三種類の問題を実際に数値解析し、無限小量の非凝縮性気体が混入しているか否かで蒸気の気体の流れが根本的に異なること、また無限小量の大きさによっても流れが大きく影響されることを具体的に示した。

結論では、各章の結果を要約するとともに、今後の研究課題について簡単に触れている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、境界面で蒸発・凝縮を伴う常圧の蒸気流の挙動を、流れの中にごく微量の非凝縮性気体が含まれる場合について、気体分子運動論に基づく系統的漸近解析と精密な数値解析によって明らかにしたもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. 任意形状の境界まわりの定常蒸気流に対して、蒸気分子の平均自由行程が小さい極限である連続流極限（常圧の蒸気流に対応する極限）を考え、微量の非凝縮性気体が流れの中に含まれるときの蒸気流の振舞を、ボルツマン方程式の系統的漸近解析によって明らかにした。すなわち、(i) 微量の非凝縮性気体は、凝縮が起こっている界面近傍に集中し、その他の領域には存在しない。(ii) 蒸気の振舞は、圧縮性流体に対するオイラーの方程式に従う。(iii) オイラー方程式に対する界面上の境界条件は、蒸発が起こっている界面については、半無限領域における純粋蒸気の問題を解析することによって得られ、凝縮が起こっている界面については、非凝縮性気体存在下での半無限領域における蒸気の凝縮の問題を解析することによって得られる。(iv) 微量（理論的には無限小量）の非凝縮性気体は、凝縮が起こっている界面におけるオイラー方程式の境界条件を通して、蒸気の大域的流れに大きな影響を与える。
2. 上記1. (iii) の半無限領域における凝縮の問題を取り上げ、ボルツマン方程式のモデル方程式を精密に数値解析することにより、遠方の蒸気流のパラメータ、界面のパラメータ、および非凝縮性気体含有量の間の関係を数値的に構築した。その結果、上記1における凝縮が起こっている界面でのオイラー方程式の境界条件が具体的に求まった。これと既に得られている蒸発界面における境界条件をあわせて、蒸気流に対する新しい流体力学を構築した。
3. 上記1および2で導いた新しい流体力学をもとに、いくつかの具体的流れを実際に数値解析し、無限小量の非凝縮性気体が混入することによって、蒸気の流れの様子が大きく変わることを具体的に示した。

以上のように、本論文は、気体分子運動論をもとに、微量の非凝縮性気体を含む蒸気流に対する新しい流体力学を構築するとともに、非凝縮性気体が蒸気流に及ぼす影響を明らかにしたもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年1月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。