

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 新城 淳史

修士（工学）新城淳史 提出の論文は「Research on Surface Melting Instability due to Aerodynamic Heating（空力加熱下の熔融物体表面の流体力学的不安定に関する研究）」と題し、本文6章および付録1項から成っている。

宇宙輸送システムは宇宙活動の重要なインフラストラクチャであるが、その要素技術として、高速高温流中での過酷な空力加熱を防御する熱防御系の構築が必須である。従来、有力な熱防御系はアブレーション冷却系によるものであり、世界の宇宙計画の多くはこのシステムによって支えられてきた。アブレーション冷却系は、飛行体表面物質の熔融や昇華による潜熱を有効に利用して飛行体内部に流入する加熱量を低減させるものであるが、このような高速高温気流中では、飛行体表面の熔融によって特有のパターンが生成することが観察されていた。宇宙空間から再突入したと見られるテクタイト（tektite）の同心円状の熔融パターン（リングウェーブ）や、くさびや円錐形状物体表面に生じるクロスハッチングがその代表的な例である。これらの現象は、Kelvin-Helmholtz 不安定と関連づけて、密度の異なる場での界面不安定性によるものと説明されてきた。しかしながら、古典的な水-空気系のような単純な場合とは異なり、高温でかつ材料特性の関係する複雑な場に対する説明としては不十分である。また、初期には線形理論による解析のみが可能であったため、現象の把握が十分でなかったきらいがある。

このような観点から、著者は、近年発達した著しい数値流体力学（CFD）を用いることによって、この現象のメカニズムを解明することを試みることにした。このような問題では、外部の気流と気流中に置かれた物体との干渉を扱わねばならないため、従来のように、気流側だけの取り扱いでは現象を把握できない。著者は、多相の状態が共存する場を包括的に扱うことのできる CIP-CUP（Constrained Interpolation Profile、あるいは Cubic Interpolation Propagation – Combined Unified Procedure）法をこの解析に適用することにより、二次元円柱および三次元くさび物体表面の熔融パターンを再現し、熱流体力学的不安定性のメカニズムの解明に成功した。このことは、実際のアブレーション物質の熔融パターンの定量的説明を可能にし、将来型宇宙輸送システムの熱防御系の設計に有用な示唆を与えることができる。

第1章は序論で、テクタイトのリングウェーブやくさび・円錐状物体のクロスハッチングの現象の観察と過去の実験等から、この熔融現象を説明し、本論文の目的と意義を明確にしている。

第2章では、高速気流中にアルミニウムを材質とする物体を置き、気流と金属アルミニウムを同時に CIP-CUP 法で解くという設定のもとに、流体に対しては質量、運動量、エネルギーの保存を記述する支配方程式を構成し、アルミニウムの状態方程式は半経験式から与えた。また、アルミニウムは粘弾塑性体としてその構成方程式を構築した。アルミニウムは熔融するが気化はせず、気流と熔融アルミニウムは混合しないというモデル化を行っている。

第3章では、計算手法の説明を行っている。特に、固体・液体・気体の状態を同時に解く CIP-CUP 法を主体に構築した計算コードについて述べ、物体近傍の境界層の解像度を確保するために用いた物体適合移動格子について説明している。

第4章では、本論文で用いた計算モデルの妥当性を、衝撃波問題、相変化を伴う伝熱問題、重力場での静定問題、固体内波動伝播問題、界面追跡問題の5種の計算を行うことによって検証している。

第5章では、まず、直径 1 cm の二次元円柱まわりのマッハ数 4.3 の流れについて、数値解析によって物体外部の流れ場、物体形状変化および物体表面熱流束を得るとともに、物体表面において熔融物質が形成する波の増幅率を線形理論を応用して予測した。熔融物質の波の増幅率は気流による摩擦力、圧力変動および物体材質粘性をパラメータとしてあらわされ、気流による摩擦力および圧力変動が大きいほど、また物体材質粘性が小さい程大きくなる。同様に、波の波長は物体粘性と空気摩擦力の比に依存する。このことから、実際に顕著な表面熔融パターンが観察される領域（よどみ点から 30-80 度の領域）で波の増幅率が大きくなることが説明される。さらに CFD では非線形の方程式系を解いているため、これらの結果を利用し、非線形領域の現象も予測し得る。

次に、半頂角 30 度のくさび物体表面に起こるクロスハッチングの現象が、二次元物体と同じ気流条件のもとでの計算によって生じることを示した。この際、そのような現象が生じるためには初期の擾乱（表面粗さ）が影響しており、擾乱が打ち消し合う領域および重畳する領域が存在することがクロスハッチングのパターンを形成することが示された。

第6章は結論で、上記各章における考察の総括を行い、熔融表面における波面の形成が著者の提案する線形理論による増幅率と波長で説明できることを示しており、実際の再突入物体の熔融パターンの現象の説明が可能であることを示唆している。

付録ではアルミニウムの二次元円柱をプラズマジェット気流に置いた時の実験結果を示し、定性的に解析結果と一致することを述べ、数値解析の妥当性を強調している。

以上要するに、本論文は固体・液体・気体の領域を同時に解析することのできる CIP-CUP 法を用いた数値解析によって、高速高温気流中の飛行体表面に生成する同心円状の波（リングウェーブ）や三次元のクロスハッチングパターンの形成メカニズムを解明したものであり、流体力学に新しい知見をもたらすと同時に、アブレーション法を用いる宇宙輸送システムの熱防御系の設計に重要な指針を与えるもので、航空宇宙工学に貢献するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。