

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 戸上 健治

理工学修士 戸上健治 提出の論文は「壁面の触媒性を考慮した再突入飛行体の空力加熱の研究」と題し、本文6章及び付録1項から成っている。

地上と宇宙空間との間で物資や人を輸送する将来型宇宙輸送システムの開発においては、機体の経済性の向上は安全性・信頼性の確保とともに必須の課題である。このような輸送システムに用いられる宇宙飛行体は、地球大気への再突入時に苛酷な空力加熱を受けることが知られており、そのための耐熱構造/熱防御システムを有することが必要である。機体の経済性は、機体の軽量化によるところが大きく、それは機体構造の20%以上を占める耐熱構造/熱防御システムの軽量化に依存する。したがって、空力加熱量の推算精度の向上が必要である。再突入時の空力加熱は飛行体前面に生じる強い衝撃波後方の高温気体からの熱流束によって生じるが、このとき、高温気体中で解離した原子が機体壁面で再結合することによる加熱が無視できない。これは、機体壁面の触媒性に大きく影響されることから、壁面触媒性を正確に推定することが必要とされてきた。しかしながら、壁面触媒性による空力加熱現象には非常に多数のパラメータが存在するので、従来より、どのパラメータが重要な役割を果たしているのかが明確でないきらいがあった。

このような観点から、著者は、壁面での原子の再結合による加熱のメカニズムを明確化し、それを決定づけているパラメータを明らかにするために、数値解析コードを作成し、既存の簡易計算法と衝撃風洞による実験によって検証した上で、それを用いた数値解析によって、壁面触媒性作用と空力加熱量との関係を定量的に評価することとした。

第1章は序論で、本研究の背景を述べ、再突入宇宙飛行体の空力加熱におよぼす壁面触媒性メカニズムの解明の必要性を強調している。その中で、従来の研究動向との関連を述べ、本研究の目的と意義を明確にしている。

第2章では、本研究を行うために作成した熱化学的非平衡ナビエ・ストークス (Navier-Stokes) 数値解析コードの内容について述べている。解析は軸対称/2次元物体まわりの空気を対象とし、5成分化学種および17種の化学反応を考慮に入れている。質量保存、運動量保存、振動エネルギー保存、総エネルギー保存に関する方程式を基礎方程式とし、有限体積法で離散化するとともに、流束ベクトル分離を行って数値計算の安定化を図っている。同時に、定式化に際して用いた熱力学的関係式、輸送係数、触媒性を有する壁面の境界条件について説明し、解析結果の可視化法についても述べている。

第3章では、解析結果の妥当性を検証するために、カリフォルニア工科大学の自由ピストン駆動型高エンタルピー衝撃風洞を用いて行った実験の概要を述べ、代表的な圧力履歴および熱流束結果を示している。

第4章では、本研究での数値解析コードによる衝撃波形状および熱流束に関する計算結果を、従来のカーブフィットデータおよび風洞実験結果と比較することにより、その有効

性を検証している。また、金属製風洞模型の表面の再結合効率を同定したところ、文献値とほぼ等しい値を得ることができた。

第5章では、上記数値解析コードを用いて行った実際の再突入飛行体の空力加熱解析結果について述べ、壁面触媒性が衝撃層内の構造および空力加熱量に与える効果について物理化学的考察を行っている。二酸化珪素 (SiO_2) の触媒性モデルを用い、OREX (軌道再突入実験機) の軌道に合わせた解析から得られたよどみ点の空力加熱量は、フライトデータと数%程度の誤差範囲内で良好に一致し、解析コードの有効性を示した。この際、空力加熱のメカニズムを詳細に検討することにより、対流による熱流束と拡散による熱流束の定量的評価、および個々の再結合反応による加熱の評価等を行った。OREX の飛行環境においては、酸素原子 (O) の再結合による酸素分子 (O_2) の生成時の加熱だけでなく、窒素原子 (N) が再結合して一酸化窒素 (NO) が生じるときの加熱も寄与していることを示した。また、壁面の温度境界条件による加熱についても検討している。

第6章は結論で、上記各章における考察の総括を行い、再突入飛行体の空力加熱におよぼす壁面触媒性の効果について知見をまとめている。

付録Aでは数値解析で用いたヤコビアン行列とそれに伴う種々の行列の詳細について補足している。

以上要するに、本論文は再突入飛行体の空力加熱におよぼす壁面触媒性のメカニズムと効果を、熱化学的非平衡ナビエ・ストークス解析を用いた物理化学的検討によって定量的に明らかにしたものであり、空力加熱量の正確な推定法を示すとともに、耐熱構造/熱防御システムの軽量化、ひいては将来型宇宙輸送システムの経済性向上に示唆を与え、その成果は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。