

論文の内容の要旨

論文題目 壁面の触媒性を考慮に入れた再突入飛行体の空力加熱解析の研究

氏名 戸上 健 治

近年の HOPE-X や再使用型ロケット(RLV)の開発において、機体の経済性の向上、つまりペイロードの増加は設計に課せられた至上の命題であり、そのために機体の軽量化に対する要求が非常に厳しくなっている。HOPE-X の例では構造重量の 20%以上を耐熱構造/TPS を占めており、この部分の軽量化は機体全体の軽量化に大きく寄与できる。そのためには空力加熱量の推算精度の向上が必要である。一方、再突入時の空力加熱においては、衝撃層内で一度解離した原子が壁面で再結合することによる空力加熱の上昇は無視できない上、TPS 表面に施されている耐酸化コーティングには、この原子の再結合を促進するいわゆる触媒効果があることが知られている。従って、この壁面の触媒性を定量的に評価し、空力加熱解析に組み込むことは、解析精度の向上、ひいては TPS/耐熱構造の軽量化には必須のものである。そこで、従来から TPS の耐酸化コーティングに使用されることの多い、SiO₂ の壁面触媒性のモデルはいくつか提案されており、我が国でも SiO₂ モデルが提案され、OREX の空力加熱量を計算で再現することに成功している。ところが、壁面の触媒性による空力加熱量が全体に与える影響が大きいと言うことは、逆に考えれば、壁面の触媒性による空力加熱量を低減できれば、TPS/耐熱構造の設計に余裕が生まれ、その分機体の経済性、安全性向上に寄与できる。ところが、空力加熱現象には非常に多数のパラメータが関係しており、それらのうちどのパラメータが重要な役割を果たしているかについては、過去の研究では、明確な議論がなされていないのが現状である。そこで、本研究では空力加熱、特に壁面での原子の再結合によって発生する加熱(空力加熱の拡散項)のメカニズムを明確化し、原子の再結合による加熱量を決定づけているパラメータを明らかにすることを目的として、数値解析コードの作成、その検証、作成したツールによる壁面触媒作用と空力加熱の関係を定量的に評価することを行った。

まず始めに熱化学非平衡 Navier-Stokes 解析コードの作成を行った。対象形状は軸対称/2次元とし、Park の 2 温度モデルを用いた。対象とする流体は空気、N₂、O₂、NO、N、O の 5 成分、3 種類の解離反応、2 種類の交換反応を考慮し、のべ 17 種類の化学反応を考慮にいった。基礎方程式は質量保存、運動量保存、振動エネルギー保存、総エネルギー保存の 4 種の方程式を定式化した。その方程式は有限体積法で離散化され、さらに計算の安定化のために流束ベクトル分離を行って TVD 化を図った。陰的に離散化された方程式は Gauss-Seidel 法で数値的に解いた。

作成した解析コードの検証のために、まず始めに NASA で用いられている化学平衡計算のカーブフィットデータとの比較を行った。その次に米国 Graduate Aeronautical Laboratory, California Institute of Technology に設置されている T5 自由ピストン型衝撃風洞で得られた、衝撃波形状、空力加熱データとの比較を行った。その結果、解析コードによる結果とカーブフィットデータ、風洞試験から得られたデータとは良好に一致し、作成した解析コードが再突入時などの超高速の流れ場を再現できていることを確認した。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、

約 0.02 となり、文献から得られた値とほぼ等しい値を得ることができた。さらに、黒滝の SiO₂ のモデルを解析コードと組み合わせ、OREX (図 1 参照) の軌道に合わせた解析を行い、淀み点の空力加熱量の比較を行った。その結果、解析コードによる結果とフライトデータとは数%程度の誤差で良好に一致し、作成した解析コードが再突入時の空力加熱量を正しく再現できることを確認した (図 2 参照)。

次に空力加熱のメカニズムに関する解析を行った。OREX の空力加熱のうち、空力加熱の拡散項を更にブレイクダウンして、各成分に分解した。すなわち、

$$O: \dot{q}_O = -\rho_w c_O (h_O^0 + C_p T_w) \sqrt{\frac{kT_w}{2\pi m_O}} (\gamma_{OO} + \gamma_{ON})$$

$$N: \dot{q}_N = -\rho_w c_N (h_N^0 + C_p T_w) \sqrt{\frac{kT_w}{2\pi m_N}} (\gamma_{NN} + \gamma_{NO})$$

である。本式から空力加熱を決める要素は、密度、濃度、壁面温度⁸、再結合効率の4種の状態量であることが判る。図 3 に OREX の軌道条件での拡散項の履歴を示す。高度が高い条件では、 \dot{q}_N が \dot{q}_O を上回るものの、高度が低下するにつれ、 \dot{q}_O が増加し、一方 \dot{q}_N はほぼ一定値から減少に転じ、最終的には殆ど 0 まで減少している。また、図 4 に淀み点に吸着した原子の割合を示し、図 5 に淀み点の再結合効率の時間履歴を示す。

まず、 \dot{q}_O について分析を行った結果、密度は4倍に増加、濃度は約 40%減少、壁面温度による変化は 40%上昇、再結合効率同じオーダを推移している。したがって、 \dot{q}_O の単調増加は、高度低下による密度の上昇が原因であることが判った。今回計算した条件では、機速(淀み点エンタルピ)が十分に大きいため、速度が低下した状態でも酸素原子は機体周りに比較的多く存在するため、機速低下に伴う酸素原子濃度の減少は比較的少なかった。ただし、図 4 から、 γ_{OO} は 10^{-2} のオーダで推移しているのに対し、 γ_{ON} は大きく減少している。その理由は淀み点エンタルピの減少により N 原子の量が急激に減少することにより、壁面に吸着している N 原子の数が減少しているからである。従って、O が O に衝突して O₂ が生成する再結合による熱量が殆どを占めており、O が壁面上の N に衝突して NO に再結合して発生する熱量は極めて少ないと考えられる。

次に \dot{q}_N であるが、ほぼ一定値から、減少に転じ、最終的には殆ど 0 となる。密度の効果は酸素の場合と同様で 4 倍の増加、壁面温度による変化は単調に 40%増加した。一方、N 原子濃度は単調に減少し、時系列的に 50%、20%と減少した後、最終的に高度 60km の条件ではほぼ 0 まで減少している。次に再結合効率の効きを評価する。 γ_{NN} は図 3 から判る通り、計算の当初から値としては小さい上、さらに 10^{-5} から 10^{-11} へと大きく減少をしている。 γ_{NO} は、 10^{-3} から 10^{-2} の高めの値で推移しているため、この両者の和は、 γ_{NO} が支配をしており、結局、 $(\gamma_{NO} + \gamma_{NN})$ としては、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 程度の値をとり、大きくは変化しない。以上から、最終的に \dot{q}_N は窒素原子の減少がその推移を決定づけていることが判る。逆に言えば、速度が速い(淀み点エンタルピが高い)条件では、N 原子も O 原子同様、壁面近傍に比較的多く存在するため、その N 原子が壁面に多量に吸着している O 原子と再結合して NO となることで、熱量を発生させていることがわかった。つまり、壁面近傍での N 原子の消費は N₂ への再結合ではなく、NO への再結合であることが判明した。よって、従来再結合が起こりにくいとされていた NO の再結合は OREX の軌道の場合、高度 68km 以上では無視

できない量であり、その後急激に減少し、高度 60km 以下では殆ど無視できることが判った。

また、壁面触媒性が空力加熱量に及ぼす影響としては、上記の拡散項が支配的であるが、対流項への影響も定量的に評価を行った。SiO₂ を想定した有限触媒壁と完全触媒壁の結果を比較すると、OREX で高度 76km の場合、対流項トータルで 203kW/m² から 233kW/m² 加熱量が増加した。これは、壁面の触媒性によって衝撃層、特に境界層内の温度分布が変化していることを示唆している。事実、有限触媒壁の場合と完全触媒壁の場合の温度境界層を比較するとその両者には有意差が認められた。

最後に温度境界条件の妥当性について論ずる。フライト前の解析においては壁面温度は未知であるため、放射平衡の仮定の上で壁面温度を決定することが多い。しかし、OREX のフライトで実測した壁面温度と放射平衡の仮定をおいた壁面温度は大きく異なっているため、壁面での再結合のメカニズムが変化する可能性があるからである。そこで、壁面放射率を変化させて、壁面温度を 1570K~1940K の範囲で変化させたところ、淀み点の空力加熱量としては 1%未満の変化しかなく、その変化は無視できる結果となった。ただし、壁面温度が 1900K を超えると、気相中の O 原子は N 原子と再結合する割合が増加し、気相中の N 原子は N 原子と再結合する割合が増加し、気相中の O 原子と N 原子が果たす役割が変化することが判った。従って、空力加熱量の観点からは放射平衡の仮定でも問題ないと考えられるが、物理現象を正しく捉えているとは言えないことが判った。

以上から、再突入時の機体周りの N 原子と O 原子の空力加熱に対して果たす役割を明確にできたと考えられる。つまり、機体の速度が速く、淀み点エンタルピが高い状態では、N 原子が相当量機体の周りに存在し、その N 原子は壁面に吸着している O 原子と再結合して NO を生成して発熱することがわかった。その限界は OREX の場合は機速約 6000m/s 以上(高度約 60km 以上)である。また、再突入軌道のほぼ全域で O 原子は解離しており、壁面に吸着している O 原子と再結合して O₂ を生成しており、拡散項の大部分を占める熱量を発生させていることがわかった。

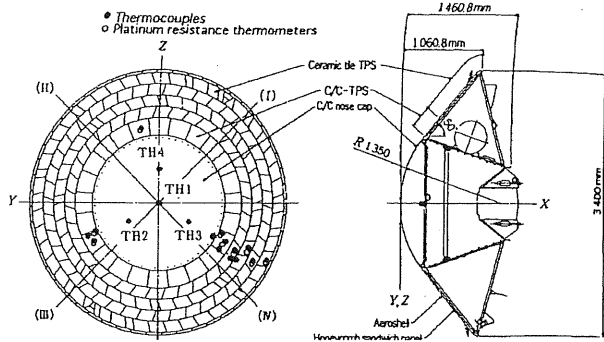


図 1. OREX の概要

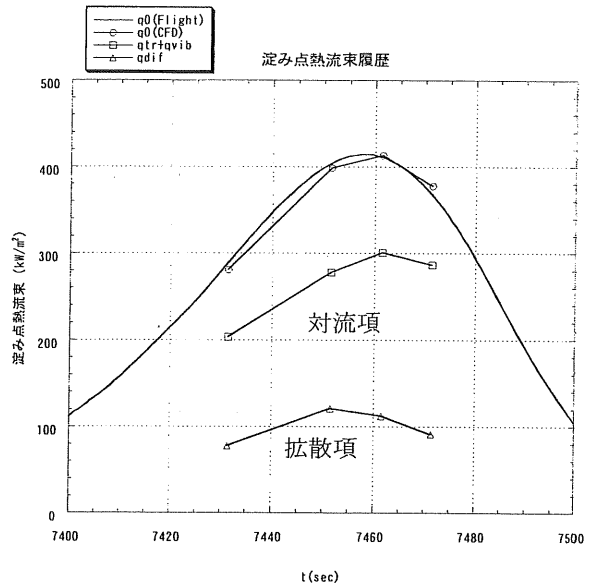


図 2. 熱流束時刻歴

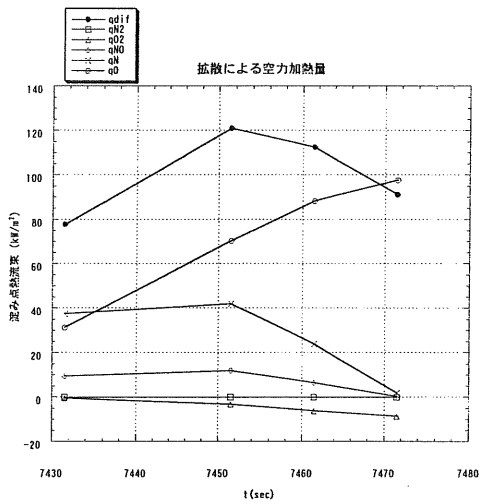


図 3. 拡散項の内訳

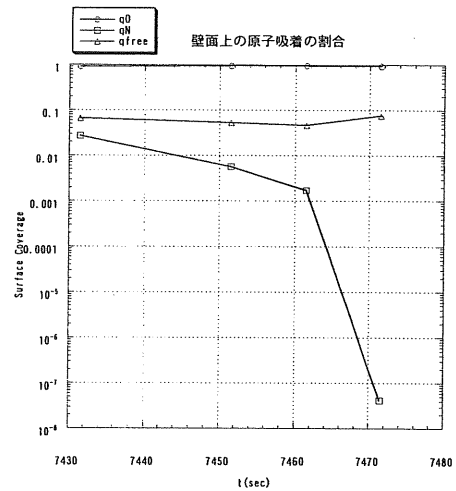


図 4. 淀み点に吸着している原子の割合の履歴

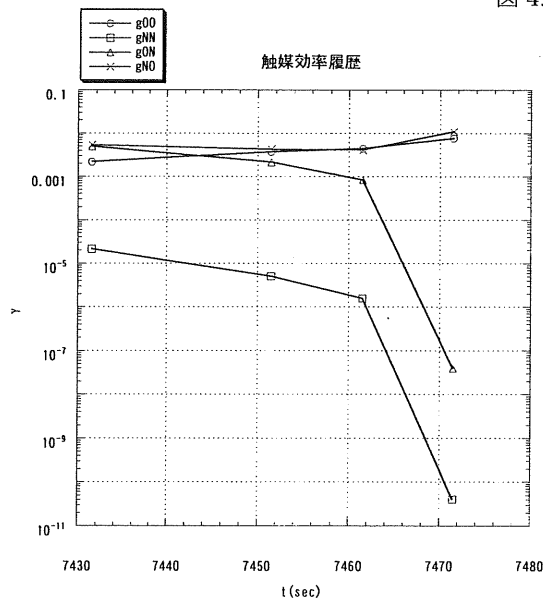


図 5. 淀み点の再結合効率履歴