

極超音速風洞を用いた氷天体大気圏突入の模擬実験

Experimental study on atmospheric entry simulation of icy object using hypersonic wind tunnel

鈴木 宏二郎^{1*}, 今村 宰²

Kojiro Suzuki^{1*}, Imamura Osamu²

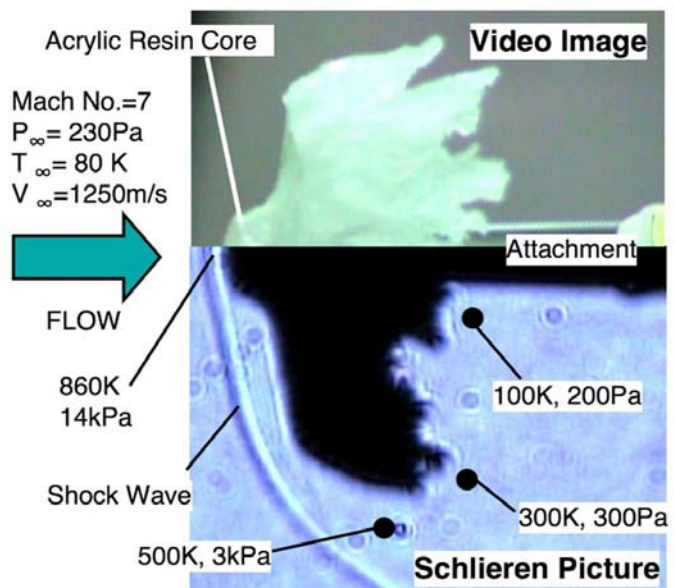
¹東大新領域 先端エネルギー工学専攻, ²東大工学系 航空宇宙工学専攻

¹Dept. Advanced Energy, GSFS, Univ. Tokyo, ²Dept. Aero and Astronautics, Univ. Tokyo

大気圏は地表から宇宙に向かって開かれた窓であり、天体の大気圏突入は惑星大気の形成や生命の誕生に大きな影響を及ぼしたものと考えられる。航空宇宙工学では、宇宙輸送系に関連して大気圏突入時の空力加熱や熱防御系などの研究が進められており、その実験や解析手法は惑星科学の分野においても有用であろう。本研究では、彗星の核などの氷天体の大気圏突入に着目し、それを模擬する極超音速風洞実験を試みた。さらに、航空宇宙工学における風洞実験や数値流体力学(CFD)を惑星科学へと有効に展開する可能性についても議論する。

実験は東京大学大学院新領域創成科学研究科が所有する極超音速高エンタルピー風洞(http://daedalus.k.u-tokyo.ac.jp/wt/wt_index.htm)で行われた。風洞のノズル

出口直径は200mmであり、マッハ数7.0-7.1の一樣流が直径約120mmの範囲で得られている。気流の全圧 P_0 は最大950kPa、全温 T_0 は最大約1000K、持続時間は最大60秒である。供試体は直径15mmの亚克力球を核として作られた初期直径40mmの氷であり、断熱材(バークライト棒)を介して測定部に設置される。供試体は気流スタート前に流路の外へ退避しており、気流が安定した後に射出投入されて40秒間、気流中に保持される。図に $T_0=820-900K$ 、 $P_0=950kPa$ の気流中に40秒置かれた氷塊の様子を示す。図の上半分はビデオ画像であり、下半分はシュリーレン法による衝撃波流れの可視化画像である。図中の局所温度及び圧力の値は、Navier-Stokes方程式の数値解析によって得られた推算値である。初期形状におけるよどみ点圧力は約14kPa、よどみ点加熱率は約 $130kW/m^2$ と推算され、これは半径100mの天体が高度60kmの地球大気を速度8km/sで飛行した際の値にほぼ相当する。よどみ点領域で亚克力製のコアが露出しており、厳しい空力加熱に伴うアブレーションにより、氷が大きく損耗しているのがわかる。アブレーションで生成された水と水蒸気は氷塊の後半部まで運ばれて、そこで再凝結を起こす。再凝結による霜柱状の氷は重なり合いながら半径方向に生長し、帽子のつばのような形状を作っている。氷の最大直径は初期の約1.5倍になっており、球から扁平な形状へと変化したこともあって、空気抵抗は約3倍に増加したと予想される(CFD解析による)。相変化による損耗に加え、ビデオ画像か



らは霜柱状の氷の先端が氷のままちぎれて微小な氷粒となって下流に運ばれる機械的損耗も観察された。空気抵抗の増加とアブレーションによる重量減は、大気圏突入中に弾道係数が減少していくことを意味し、その突入軌道や地表到達確率等に大きな影響を及ぼす。なお、実験ではコアの材質、形状、氷の質（空隙率）などの影響も調べられている。

この風洞で得られる最高温度は1000Kであり、大気圏に突入する氷天体まわりにおける高温化学反応を調べるためには数値解析が必要となる。たとえば、HAYABUSAのサンプルリターンカプセルのアブレーション熱防御系を解析するために開発された化学非平衡粘性衝撃層(VSL)解析コード(Suzuki, ISAS Rep. SP-17, 2003)は、空気とアブレーション生成物の化学反応を考慮するためC-H-O-Nの26化学種の組成が計算されており、CO₂とN₂の原始大気に氷天体表面からH₂Oアブレーションが噴き出している状況に適用できる。この26化学種モデルには、生命前駆物質として重要な化学種の一つであるHCNが含まれており、氷天体の表面近傍でHCNが生成される計算結果例が得られている。

このように、大気圏突入飛行体の研究開発に用いられている風洞などの実験装置やアブレーション数値解析コードは、惑星大気の形成や生命前駆物質の化学的進化過程を検討する上でも重要な示唆をもたらす研究ツールとなる。惑星科学への航空宇宙工学の応用は、知識や情報の交流を促進し、理学と工学の双方にとって有益であろう。

キーワード:大気圏突入,氷,アブレーション,極超音速流,風洞実験

Keywords: atmospheric entry, ice, ablation, hypersonic flow, wind tunnel experiment