

氷天体大気圏突入を模擬した極超音速風洞実験でのスポレーション観察 Observation of Spallation Phenomena in Hypersonic Wind Tunnel Experiment Simulating Atmospheric Entry of Icy Object

鈴木 宏二郎^{1*}, 今村 宰², 奥抜 竹雄²
Kojiro Suzuki^{1*}, Osamu Imamura², Takeo Okunuki²

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

航空宇宙工学でロケットや高速航空機の研究開発に用いられている極超音速風洞は、隕石などの大気圏突入天体まわりの気流を模擬し、それによる現象を観察する装置としても有用である(鈴木他, JpGU Meeting 2010, PPS004-10, Imamura et al., AIAA Paper 2010-4512)。ここでは、氷球を用いた実験で観察されたスポレーションについて報告する。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。本風洞では、マッハ数 7.0?7.1 の一様流が直径約 120mm の範囲で最大 60 秒間持続される。供試体は大気圏に突入する氷天体を想定して、直径 15mm のアクリル球または発泡アルミ材製の球を核として作られた初期直径 40mm の氷とした。氷球は断熱材(ベークライト棒)を介して測定部に固定される。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る。

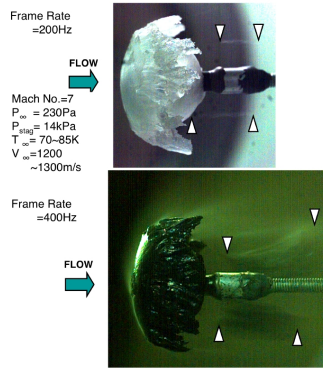
図は上下ともに投入後、約 25 秒間気流に氷をさらした時のスナップショットである。撮影には高速ビデオを用い、上が 200Hz、下が 400Hz のコマスピードである。気流条件は上下ともほぼ等しく、最高気流温度は 800?920K、氷前方のよどみ点における圧力は約 14kPa、加熱率は約 100kW/m² 程度と推算されている。下の場合では、画像を見やすくするために墨汁を質量分率で約 5% 混ぜて着色した氷を使用している。よどみ点領域では空力加熱が厳しいため、氷が溶融および昇華を起こして表面が後退している。このようにして、風洞実験においても溶融殻の形成が模擬されることになる。よどみ点領域で生成された液体の水および水蒸気は下流に流れ、肩の部分での気流急膨張に伴う冷却によって再凝結を起こす。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。上の画像では、霜柱状突起の先端から氷が微小片となって飛び出していくスポレーションが捉えられている。図の三角印は、1 フレームの露光時間(5ms)中のスポレーション粒子の軌跡の始点と終点を示している。この場合、軌跡の長さから射出直後の粒子速度は数 m/s のオーダーであることがわかる。

ビデオ映像から、ここで見られたようなスポレーションは肩部にできる氷柱層が十分発達してから頻繁に発生していることがわかる。このことは、大気圏突入氷天体の飛行中における質量損失原因として、空力加熱による表面での蒸発だけでなく、融解や蒸発した水が肩部で再凝結した氷柱が部分的に破砕して飛散するプロセスも重要であることを示している。粒子軌跡には長さだけでなく、カーブを描くものなど、形状にも多くのバリエーションが観察され、スポレーション粒子の放出速度や氷天体本体の後流への巻き込まれ方は一様ではない。画像観察によると、肩部の氷柱は樹氷状の詳細形状をしており、スポレーション粒子の大きさは、この詳細パターンのスケールとなっている。従って、飛散粒子の直径は、氷塊本体に比べて非常に小さなものとなる。隕石の場合においても、同様なメカニズムで微小スポレーション粒子が後流に放出され、飛散しているものと予想される。

気流中での時間が経過するに従い、肩部の氷柱は成長とスポレーションによる損失を繰り返すが、やがて大規模崩壊を起こす。下の画像は氷柱全体が破壊され飛散した直後のスナップショットである。その際に大量の霧が発生しており、それによる散乱光が見えている。なお、別途撮影した赤外線カメラによる映像から、気流投入から崩壊まで氷表面の温度は相変化の潜熱により、常に約 0 °C 付近に保たれていることがわかった。

以上のような極超音速風洞を用いた模擬実験は、隕石などの大気圏突入天体まわりの高温高速流れとそれに起因する現象を理解する上で有用な情報を与えるものと期待される。

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B) No. 21360413)の支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。



キーワード: 大気圏突入, 氷, アブレーション, スポレーション, 極超音速流, 風洞実験

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