

ナイロン - ナイロン高速度衝突におけるジェッティング

発表者：海老名良祐

電気通信大学大学院 情報理工学研究所 情報・通信工学専攻 柳澤研究室

平成 24 年 11 月 20 日

1 背景・目的

平板同士がある角度をもって衝突する際には、ジェッティングと呼ばれる噴出現象が生じることが知られている。また、球体の平板への衝突についても、その接触面においては平板同士の衝突と近似できるとされている。すなわち、宇宙空間で起こる微惑星の原始惑星への衝突においても、このジェッティング現象は生じるはずである。ジェッティングは噴出物の質量は非常に小さいが、高温、高速度で放出されるため、惑星の大気の起源や進化などになんらかの影響を与える可能性がある。平板同士を衝突させる実験によるジェッティングについては広く研究されているが、球体と平板の衝突におけるジェッティングについてはあまり研究されていない。我々は球体と平板における高速度衝突実験を行った。そこで生じるジェッティング雲を高速度カメラで観測して、ジェッティング速度を測定し、それについて考察を行った。

2 ジェッティング

ジェッティングとは、平板同士がある角度をもって衝突する時に生じる現象である。図 1 に平面同士の斜め衝突のモデルを示す [1]。本研究ではこの平板同士の衝突を球体と平板の衝突に適応する。図 2 に球体が平板に衝突する際のモデルを示す。球体と平板の接点において、平板同士の衝突と近似できると考える。接点において球の接線を引き、その角度の二等分線方向にジェッティングが生じるものとして考える。実際には球体が静止している平板に衝突するため、二等分線よりも下にずれた角度 η でジェッティングは放出される。図 1 は交点 P を固定した系である。平板内の材質は v_0 の速度で衝撃波前面に移動する。衝撃波通過後の速度は U となる。このモデルにおいて、質量保存則、運動量保存則及びナイロンの状態方程式 [2] を用いることで、衝撃波通過後の粒子速度 U の v_0 に垂直な成分 v 、及び平行な成分 u が求まる。平板同士が作る角度 θ の最大許容値 θ_{crit} はこの二つの成分の成す角の最大値である。 θ が $\theta > \theta_{crit}$ となるとき、方程式は解をもたず、ジェッティングが生じるとされている。今回の衝突速

度はすべて約 7km/s であるため、ジェッティング速度の理論値 V_t は約 23[km/s]、角度 η は約 10° となった。

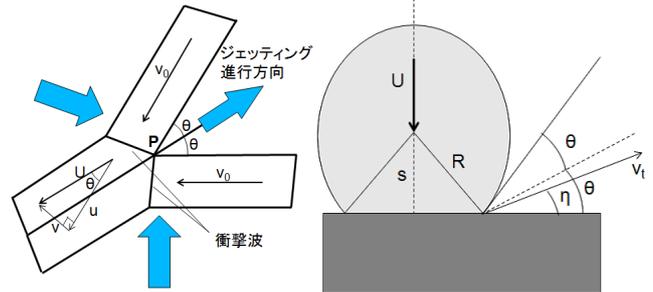


図 1: 平板同士の斜め衝突。図 2: 球体と平板の衝突。

3 実験方法

実験は二段式軽ガス銃、高速度カメラを用いてジェッティング雲の観測を行った。二段式軽ガス銃から打ち出す弾丸の速度は約 7[km/s] である。使用した弾丸は直径 7[mm]、重さ 0.22[g] のナイロン 66 製のもので、ターゲットには膜厚 0.09 ~ 0.8mm のナイロン 66 製のシート及びナイロンブロックを使用した。実験は 0.6 ~ 200[Pa] の真空中で行われた。衝突直後の光をフォトダイオードが検出し、高速度カメラが毎秒 100 万コマの速度で撮影する。

4 結果と考察

4.1 ジェッティング初速度・質量

得られた画像毎のジェッティング雲の半径を測定し、その時間変化のグラフをジェッティング雲が速度の二乗に比例して減速するモデルによる近似曲線とフィッティングを行う。図 3 に衝突点 O から広がるジェッティング雲の様子を示す。

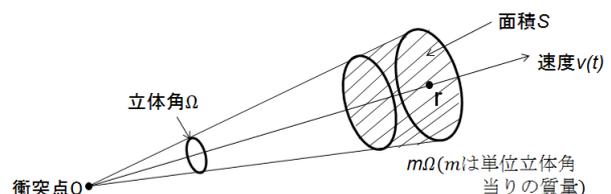


図 3: ジェッティング雲の速度減速モデル。

このモデルからジェットング雲が速度の二乗比例して減速する際の運動方程式を以下に定義する．

$$\begin{aligned} (m\Omega) \frac{dv(t)}{dt} &= -\frac{C}{2} \rho v^2(t) S(t) \\ S(t) &= r^2(t) \Omega \\ \frac{dr(t)}{dt} &= v(t) \end{aligned}$$

(C : 抵抗係数, ρ : 残存大気密度)

この式から以下の微分方程式を導く．

$$\begin{cases} \frac{dv(t)}{dt} = -\alpha v^2(t) r^2(t) \\ \frac{dr(t)}{dt} = v(t) \end{cases} \quad \left(\alpha = \frac{C\rho}{2m} \right)$$

初期条件 $t = 0, v(0) = v_0, r(0) = 0$

この方程式を α, v_0 を任意に変化させながら、そのそれぞれについてルンゲクッタ法を用いて解き、 $v(t), r(t)$ の時間変化を求める．得られた $r(t)$ の近似曲線と実験結果を最小二乗法によって比較し、もっとも実験結果に近くなった時の α, v_0 を求める．こうして、ジェットング雲の初速度 v_0 及びジェットング雲の質量 m が求まる．

4.2 ジェットング速度と残存大気圧

図4に、求めたジェットング速度 v_0 を理論値 v_t で割った”規格化ジェットング速度 v_0/v_t ”と平均自由行程の関係を示す．

図4より、ジェットング速度 v_0 は平均自由行程が5[mm]以上の時では理論値の約7割の値となり、0.5[mm]以下では約5割となり、その間の範囲では比例しているように見られる．平均自由行程は残存大気圧の関数であるので、これよりジェットング雲は残存大気圧の影響を受けている可能性が考えられる．

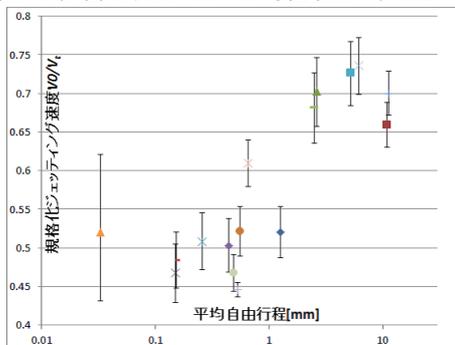


図4: 規格化ジェットング速度 v_0/v_t と平均自由行程の関係．エラーは α の値を 0.8~1.2 倍にしたときの規格化ジェットング速度を示している．

4.3 ジェットング質量と残存大気圧

図5にジェットング雲の質量と残存大気圧の関係を示す．残存大気圧が大きくなるほど、質量が大きくなっていることがわかる．こちらも残存大気圧の影響を受けている可能性が考えられる．

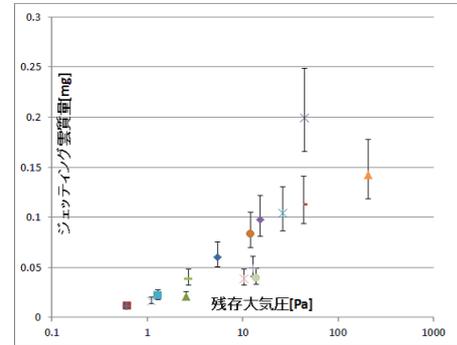


図5: ジェットング雲の質量と残存大気圧の関係．エラーは α の値を 0.8~1.2 倍にしたときのジェットング雲の質量を示している．

4.4 考察

ジェットング雲の初速度及び質量がなぜ残存大気圧に依存する仮説として、図6に飛翔体前面に衝撃波が発生するモデルを考えた．

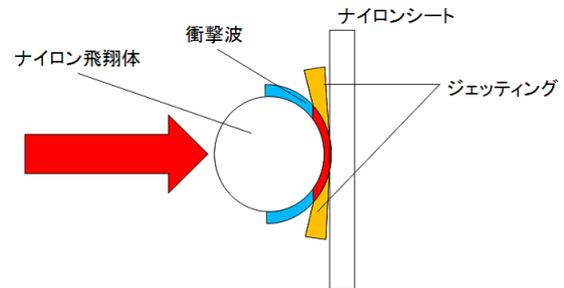


図6: 衝撃波発生モデル．飛翔体がターゲットに衝突する前に飛翔体前面に衝撃波が発生すると仮定する．

このモデルのように、飛翔体前面に発生した衝撃波によって、発生したジェットング雲が膨張するのを妨害されるためにジェットングの初速度が減少するのかもしれない．また、質量も同様にして、衝撃波の影響が考えられる．

参考文献

- [1] Vickery, A. M, The Theory of Jetting: Application to the Origin of Tektites, *Icarus*, **105**, 441-453, 1993.
- [2] Marsh, S. P. (Ed.), *LASL Shock Hugoniot Data*, 588 pp., Univ. of Calif. Press, Berkeley, 1980.