

層構造氷物質への斜め衝突実験 -エンセラダス・プルーム噴出維持機構への応用

金城秀征¹, 関根康人¹, 荒川政彦², 岡本千里²

¹東京大学, ²神戸大学

1 はじめに

土星の氷衛星エンセラダスでは内部に液体の水が存在し、これに由来する水蒸気と氷粒子からなるプルームが、氷地殻内をノズル状の割れ目を通して噴出していることが示唆されている [1][2]。探査機カッシーニの観測によれば、エンセラダスのプルームは、少なくとも観測期間中 (2005 年から 2016 年まで) はほぼ定常的に噴出し続けており、その噴出速度はガスが 300 ~ 500 m/s、固体氷粒子が 100 ~ 200 m/s である [2]。南極付近の氷地殻には、プルームの噴出する割れ目に沿って高い熱流量が観測されており [3]、これらは水蒸気ガスが氷地殻の壁へ凝結することによる潜熱の解放に由来すると考えられている [4]。一方、このような水蒸気の凝縮によって、割れ目自体がふさがれて閉じてしまう可能性が考えられる。噴出する水蒸気量と割れ目付近の熱流量から、水蒸気の凝結により割れ目が閉じる速さはおよそ 0.8 m/yr 程度と見積もられる [4]。割れ目の幅は 1 m 以下と考えられるため、定常的にプルームが噴出するためには、凝結した氷が除去されノズル状の割れ目が維持される何らかの機構が存在しているはずである。

2 研究目的

本研究では、エンセラダスにおけるプルーム噴出維持機構として、噴出する氷粒子が割れ目の氷地殻の壁と衝突し、凝結した氷を破壊することで除去する可能性を提案する。割れ目の

壁が成長して幅が狭くなると、そこを流れるガス速度も高くなる。プルーム中の氷微粒子もこれによって加速され、壁と高い速度で衝突するようになる。このようにノズルが狭まると粒子が高速で衝突できるようになり、破壊効率が高くなることで自己調節的に活動を維持する可能性がある。本研究では、氷粒子と氷や霜との衝突実験により、破壊効率を実験的に明らかにし、そして、その結果をプルーム噴出の流体力学モデル [5] に組み込み、プルーム活動の維持機構を明らかにすることを目指す。

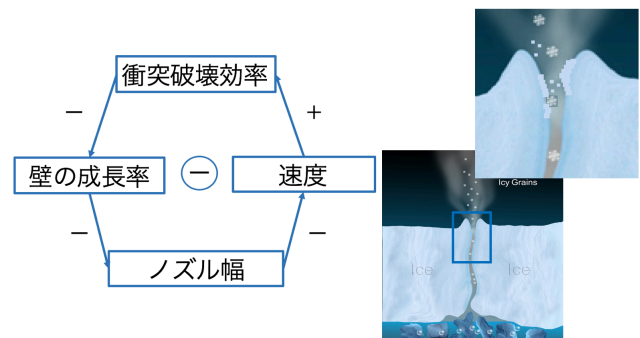


図 1: ノズル内部でのフィードバック効果

3 実験手法

実験には神戸大学荒川研究室の低温室 (-15 °C) と軽ガス銃を用いて行った。エンセラダス内部の割れ目の壁には着霜が生じ、空隙率の高い氷が壁面に付着していることが考えられる。そのため、本研究では、結晶氷の上面を高空隙の水粒子層が覆った 2 層水ターゲットを、幅 90 mm、高さ 80 mm 程度の長方形型の容器に氷と霜を敷き詰め作成した。氷粒子は液体窒素中

に霧吹きのような器具を用いて水を噴射する手法で作製し、4～15時間、-15℃で焼結させた。霜層の厚さ d は 10 mm, 30 mm, 60 mm と変化させ、それぞれターゲットを作成し用意した。インパクトには直径 10 mm, 高さ 7.5 mm 程度の円筒型の結晶氷を用い、衝突速度を 50 ～ 200 m/s, 衝突角度 $90^\circ \sim 30^\circ$ で衝突実験を行い、衝突前後でのターゲットの質量差を測定することで、衝突速度と衝突角度に対する破壊効率の依存性を調べた。

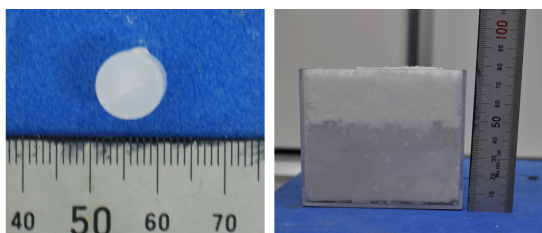


図 2: インパクトとターゲット

4 実験結果と考察

衝突実験後の試料の観察の結果、高密度層では衝突によって天頂角 45° の円錐状の領域が破壊され、その中の鉛直上向き部分がイジェクタとして放出されていることがわかった。この円錐状の領域を図 3 のように幾何学的に求め、衝突角度に対して以下の式のような規格化を行った。

$$\frac{\Delta M}{M_{im}} = Av^2 \frac{1}{\tan\theta} \left(\frac{1}{\tan\theta} + \frac{1}{\tan\phi} \right)$$

図 4 は上記の式に基づき、衝突後のターゲットの質量損失と衝突速度・角度の関係を示した図である。この結果は、エンセラダスの割れ目の表面付近の水粒子の噴出速度 (100 m/s ～ 200 m/s) 程度の速度を持つ水粒子であれば、水粒子の 3～10 倍の質量の壁に凝縮した氷を破壊することを示唆している。

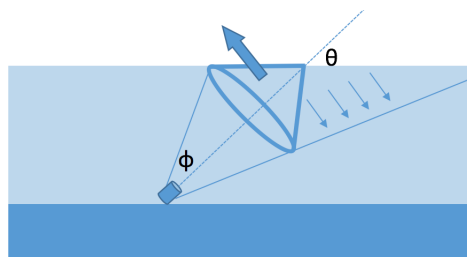


図 3: 破壊される領域の模式図

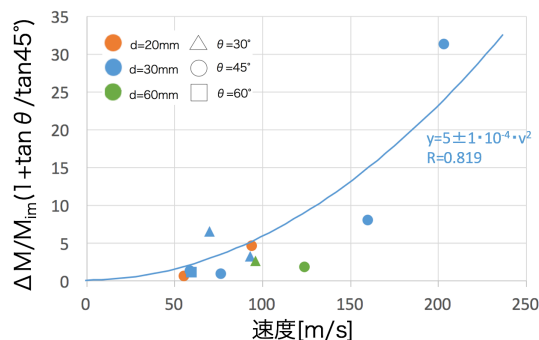


図 4: 質量損失率の速度・角度依存性

5 まとめと今後の展望

本研究では、エンセラダスのプリューム噴出の維持機構を明らかにするため、割れ目の氷地殻へ凝縮する氷への固体氷粒子の衝突を模擬した衝突実験を行った。その結果、高空隙率層の破壊と質量損失は、破壊領域を考慮した単純な幾何関係に基づく規格化式で表せることが示唆された。上記の式に基づくと、速度 100 m/s を超えれば衝突粒子の 3 倍以上の質量が破壊されることが示唆される。今後は、得られた破壊効率をプリューム噴出の流体力学モデル [5] に組み込み、プリューム噴出の自己維持機構が働くかを数値的に求めることが重要となる。

参考文献

- [1] Postberg, F. et al., 2009, Nature 459, 1098.
- [2] Schmidt, J. et al., 2008, Nature 451, 685.
- [3] Spencer, J.R. et al., 2006, Science 311, 1401
- [4] Ingersoll and Pankine. 2010, Icarus 206, 594-607
- [5] Nakajima and Ingersoll. 2016, Icarus 272, 309-318