

# 土星衛星エンセラダスの プリューム噴出維持機構に関する研究

新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 2017年 修了

指導教員 関根康人 准教授

47-156108 金城秀征

## 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リュームが、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、エンセラダスのプリュームは、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~ 90 m/s である [3][4]。南極付近の氷地殻には、プリュ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 [5]。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およそ 0.8 m/yr 程度と見積もられる [5]。割れ目の幅は 1 m 以下と考えられるため、定常的にプリュ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リューム噴出維持機構として、割れ目内を上昇する氷粒子が壁と衝突し、水蒸気が凝結した低強度の

氷層を破壊することでこれを自律的に除去する可能性を提案する。水蒸気の凝結によって壁が成長し幅が狭くなると、そこを流れるガス速度も高くなる。プリュ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、衝突実験により氷弾丸の衝突による標的の質量損失率を実験的に明らかにし、その結果をプリューム噴出流体力学モデルに組み込み、プリューム活動の維持機構を定量的に調べた。

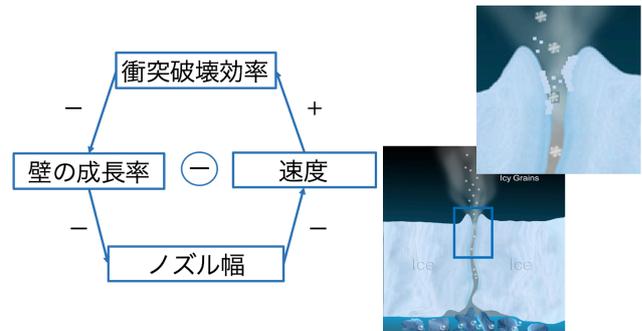


図 1: ノズル内部でのフィードバック効果

## 3 結晶氷と焼結氷層の二層構造標的に対する衝突実験

エンセラダス内部の割れ目の壁には着霜が生じ、低強度で高空隙率の氷層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、

結晶水の上面を高空隙の焼結氷粒子層が覆った2層氷ターゲットを作成し、これに対し結晶水のインパクターを衝突させ、衝突前後でのターゲットの質量損失を測定することで、衝突速度と衝突角度に対する破壊効率を調べた。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  $45^\circ$  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幾何学的に求め、衝突速度と衝突角度に対して以下の式のような規格化を行った。

$$\frac{\Delta M}{M_{im}} = \beta v^2(1 + \tan \theta) - 1$$

図2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。その結果、エンセラダスの割れ目の表面付近の氷粒子の噴出速度 ( $\sim 90$  m/s) 程度の速度を持つ氷粒子であれば、氷弾丸の3倍程度の焼結氷粒子層を破壊することができることがわかった。

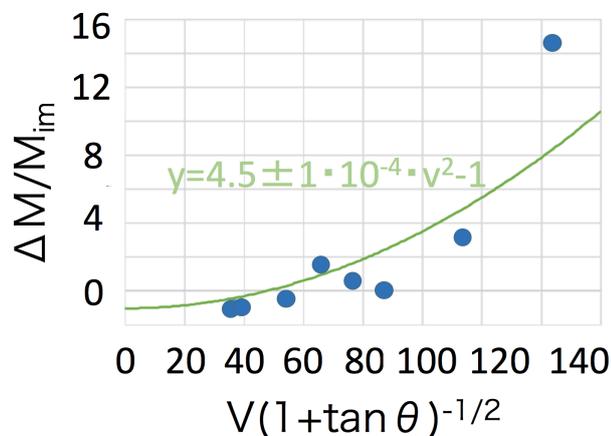


図 2: 質量損失率の速度と角度に対する関係

## 4 プリューム噴出の流体力学モデル

さらに、この実験結果から得られた破壊効率をプリューム噴出流体力学モデル [6] に組み込むことで、割れ目内で壁に凝結する水蒸気と壁の衝突破壊が釣り合い、定常的にプリューム噴

出が維持される条件を調べた。その結果、氷粒子の衝突破壊によって割れ目は表面付近で  $1\sim 2$  m 程度に、噴出速度は  $60\sim 70$  m/s となるとプリュームの噴出が定常的に維持されることがわかった (図3)。ノズル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。プリュ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されることが計算によって示唆された。さらに計算で求められた噴出孔でのプリューム噴出速度はおよそ  $70$  m/s 程度であり、これは近年のプリューム氷粒子の噴出速度  $\sim 90$  km/s [4] に近い値であることから、本研究で構築したプリューム噴出の維持機構は、観測事実とも調和的であると言える。

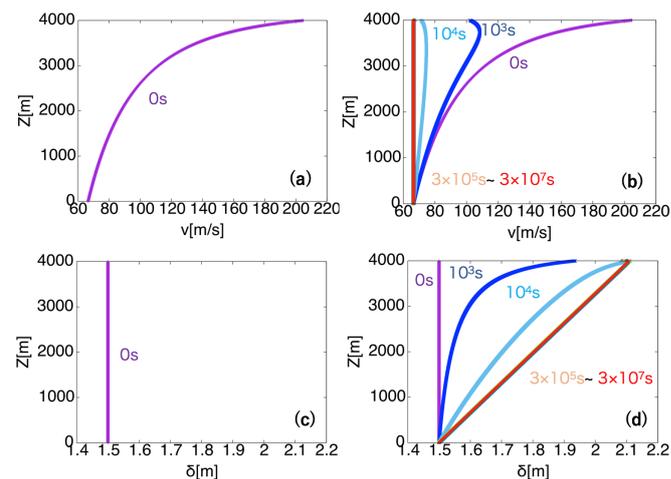


図 3: 破壊の効果を考慮したプリューム噴出流体力学モデルの時間発展解

## 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 Eward. 2011, Icarus 216, 492-506
- [5] Ingersoll and Pankine. 2010, Icarus 206, 594-607
- [6] Nakajima and Ingersoll. 2016, Icarus 272, 309-318