#### 火星勉強会

#### Coates and Jones, Plasma environment of Jupiter family comets, Planet. Space Sci., 57, 1175-1191, 2009.

#### 担当:原田 裕己@京大

### 要旨

- 彗星からの中性粒子が電離し、pick upされること
  から始まる彗星太陽風相互作用のまとめ
- Ion pickupによって運動量とエネルギーが太陽風から彗星イオンに与えられ、さらにプラズマ波動を通じてピッチ角、エネルギー散乱するプロセス
- 彗星太陽風相互作用の種々の境界や領域の特徴
- Rosetta  $\exists \forall \vartheta \exists \land \land \land$



- I. Introduction
- 2. The cometary plasma environment
- 3. Ion pickup process
- 4. Pitch angle scattering
- 5. Particle acceleration
- 6. Wave generation
- 7. Non-gyrotropic distributions

- 8. Boundaries and regions in the solar wind interaction
- 9. Heliocentric distance dependence: the Rosetta mission
- 10. Simulations
- II. Remote observations
- 12. Ion pickup in other contexts
- 13. Outstanding problems
- 14. Conclusions

#### I. Introduction

#### 彗星と太陽風の相互作用

- 彗星核は「非磁化」「小さい(~1-10 km)」
- 太陽に近づくと凍っていた核の表面温度が 上昇、昇華した中性気体(主に水蒸気)が 核の後方の領域を満たす。
- Gas production rateによって彗星大気(coma)
  構造が形成されるかどうかが決まる。
- これらの中性粒子が太陽光または荷電交換
  によって電離、太陽風と相互作用
- Mass loadingにより太陽風を減速
- イオンはpick upされ、磁場は大規模にdrape
- ▶ Plasma tail (ion tail)を形成 ~ 10^6 km



#### 木星族の彗星

- 軌道の特徴によって分類  $T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[ (1 e^2) \frac{a}{a_J} \right]^{1/2} \cos(i)$
- 本星族:3>T<sub>1</sub>>2(木星の影響を受ける軌道)
- ハレー族: T」< 2
- 木星族の彗星は典型的にはproduction rate低め
- これまで探査機のターゲットとなった6つの彗星 (Tempel I, Borrelly, Giacobini-Zinner, Grigg-Skjellerup, Wild 2, Halley)の内、Halley彗星以外の5つは木星族



#### production rateと大きさ

- 探査機によって電離環境を調べることができた彗星は4つ
  (production rateは探査機接近時)
- Grigg-Skjellerup (~7.5x10^27 /s)
- Giacobini-Zinner (~4x10^28 /s)
- Borrelly (~3.5×10^28 /s)
- Halley (~6.9x10^29 /s)
- 扱う彗星のbow shockの大きさ
  は天王星や海王星と同じくらい



3AUよりも遠方での 彗星太陽風相互作用

- 彗星核は冷たく気体放出なし
- 小惑星や月と同様の太陽風相互作用
- 彗星核のサイズが太陽風イオンの ジャイロ半径よりも大きければ、後 方にwake形成、電子が夜側に入り込 みポテンシャル構造形成
- 太陽風磁場は核が絶縁体なら即座に 拡散して素通り



# 2. The cometary plasma environment

#### 彗星プラズマ環境の色々

- 彗星核が太陽に近づくと、核表面から昇華して中性気体(主に水)を放出
- \_ 熱速度~ | km/s > 脱出速度~ m/s
- 核のgas production rate Qは太陽からの距離に依存
- 太陽光による光電離または太陽風との荷電交換によって電離
- 気体が球状に広がるとして、電離して中性気体が減少する効果を含めると

$$Q = \frac{Q_0}{r^2} \exp\left(\frac{-r}{v_e t}\right)$$

- Plasma tailは太陽と逆方向に伸びる。
- CMEなどの太陽風擾乱によりplasma tailも擾乱(disconnection event)



- 彗星からの中性粒子が電離
- 太陽風によりpick up
- 重イオン(主に水系イオン)がmass loadingにより太
  陽風を減速 → gas production rateの推定も
- 磁場は彗星の周りをdrape
- Bow shock, contact surfaceなどの様々な境界が形成
- lon pickup (運動論的プロセス) が重要!

## 3. Ion pickup process

#### Pick upされたイオンの軌道

- 太陽風を完全電離、高電気伝導度プラ ズマと仮定
- ▶ 磁場はプラズマに凍結
- 彗星からの中性粒子が光電離または荷 電交換により電離し、太陽風の対流電 場 *E*(=-*v<sub>sw</sub> × B*)を感じ始める。
- イオンは電場方向に加速され磁場の周りを旋回し、cycloid状の軌道を運動
  (教科書的なExBドリフト)
- 探査機系での最大速度は 2v<sub>sw</sub> sin α
- 最大エネルギーは  $2mv_{sw}^2 \sin^2 \alpha$



#### 速 度 空間 での pickup ion

- 速度空間ではcycloidの軌道はring状
- Ring分布は不安定なのでプラズマ波 動を励起
- まずはピッチ角散乱して球殻(shell)状
- 次にエネルギー散乱して厚みのある
  球殻状に
- 最終的にはMaxwell分布に
- 太陽風のエネルギーがpickupされた ionと波に与えられる。



#### **Pickup ion**の速度分布の



- Halley 彗星付近の水系イオン速
  度分布の観測
- 彗星から遠方ではring-like

- Bow shock上流でshell-likeに
- Bow shock下流でshellが厚く
- Pickupプロトンでも同様の観測

[Neugebauer et al., 1989]





ピッチ角分布



Halley

Grigg-Skjellerupでは、Bow shock 直前までring-like

### 4. Pitch angle scattering

#### ピッチ角散乱のプロセス

- ピッチ角散乱によってringからshellへ
- 実際は単純なshellではなく、bispherical shellに近い。
- SWB系でB方向±VAに中心を持つ2つ のshell
- 上流および下流に伝わる波に対応
- 新たに電離したイオンがfree energy源 になって波を生成する(粒子が波にエ ネルギーを与える)ので、BDの軌道 をピッチ角散乱し、bispherical分布に
- この分布はバルク速度をもつ。



イオンのバルク速度と

#### bispherical bulk velocityの比較

- 遠方ではバルク速度はring speedに近い(あまりピッチ角散乱していない)。
- 彗星に近づくとバルク速度はbispherical bulk velocityに近づく。



波の共鳴条件

- Shell上のそれぞれの部分の粒子は共鳴条件によって異なる波数をもつ波を励起
- 観測された波のスペクトルをよく説明(詳しくは参考文献を...)



20

#### 5. Particle acceleration

エネルギー拡散の

メカニズム (I)

- Shell分布も不安定で波を生成
- 粒子はcounter-streamingな波によっ て散乱され確率的に加速または減 速:Fermi II
- 減速された太陽風での断熱効果に よるプラズマ加熱も
- Fermi Iもあるが、加速のみ(粒子 がshockの上流と下流で散乱され、 何度も波面を横切って加速)
- 最終的には**Maxwell**分布に



#### Fermi I



#### Fermi II

"lons collide with randomly moving magnetic clouds."



[Terasawa and Scholer, 1989]

**Fig. 2.** Illustration of particle diffusion in velocity space. When the waves are counterstreaming with phase velocities  $+V_A$  and  $-V_A$ , particle motion is no longer constrained on circles (dashed curves). The solid curve shows an example of the orbit of a stochastic particle.





一次元速度分布

- 加速と減速を両方含む→Fermi II
- Bow shock下流で大きく加速
- 上流でも高エネルギー粒子が存在、Fermi Ⅱだけでは不十分



# 6. Wave generation

### 波動の生成と速度拡散

- 彗星からのイオンによって作られ、散乱を引き起こすのは Alfven波
- 元々太陽風中に発生する波はほとんどが下流向きに伝わる一方、pickup ionによって生成される波は大部分が上流向き
- Counter-streaming (Fermi IIの原因)
- 速度拡散係数は

 $D_{\nu\nu} \propto \frac{I_{+}I_{-}}{I_{+}+I_{-}}$  For  $I_{-} \ll I_{+}, \quad D_{\nu\nu} \propto I_{-}.$ 

上流向きの波が強い場合は下流向きの波が加速の量を決める。

## Pickup ion と 波の 関係



#### 7. Non-gyrotropic distributions

GSのような小さな彗星(cycloid の1周よりも小さな空間スケー ルで変化有)では、nongyrotropicなイオン速度分布を 観測することができる。





Fig. 9. Three-dimensional water group ion distribution in the SWB frame at 42,000 km fom the nucleus (inbound). Projections of the ring and simple shell are shown in each view as is the ion injection point (star).

[Futaana et al., 2003]

SWB

#### 8. Boundaries and regions in the solar wind interaction

## 彗星付近の境界

- 予言されていた境界
- Bow shock
- Contact surface
- 探査機によって発見された境界
- Mystery boundary
- Cometopause
- Magnetic pileup boundary
- Ion pileup boundary など

#### Table 1

Summary of observed boundary crossings within cometary comae.



Comet	GZ	¢		Halley	$\Rightarrow$	GS	Borrelly
Spacecraft	ICE	V1	V2	Suisei	Giotto	Giotto	DS1
Bow shock	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Mystery boundary	?	?	?	?	Y	Y	?
Cometopause			Y				Y
Magnetic pileup boundary	-	Ν	Ν	-	Y	Y	-
Discontinuities X, X', Y, Z	-	-	-	-	Y	-	-
Ion pileup boundary	-	Y	Y	-	Y	?	-
Cavity boundary	-	-	_	-	Y	-	-

 $1.5 \times 10^{6}$   $1.0 \times 10^{6}$   $5.0 \times 10^{5}$  0  $-5.0 \times 10^{5}$   $-1.0 \times 10^{6}$   $-1.5 \times 10^{6}$ Xhse (km)

Fig. 3. X-Y (Halley centred solar ecliptic frame) projection of the Giotto trajectory, a model (solid line) from /26/ and a mass loading model (dashed line) from /30/. Sh directions are shown both inbound and outbound from the single ion calculations (S), r determination (M), paraboloid model (P) and coplanarity method (C - outbound only).

#### Giotto - Grigg-Skjellerup

The Giotto encounter with Grigg-Skjellerup (GS), with a gas production rate about 1% that 10% that of Giacobini-Zinner, was not expected to show any sharp shock features in the was because the size of the interaction region was expected to be comparable with the h ion gyroradius. Surprisingly, relatively sharp features were found /34, 35, 36/. In the may electron data the jump was particularly sharp on the outbound pass. The inbound results ar like a bow wave but nevertheless quite strong flow deflections are seen. Both of the feat to the predicted bow shock socation in the coma /37/. It is interesting to note that two interplanetary magnetic field may be particularly important in the interpretation of the restrength and the fact that during the encounter the angle to the solar wind flow was close work is underway on the GS results. Cavity  $10^5$ 

#### Summary of experimental results -2×10<sup>5</sup>

A brief summary of the results from the space missions is given in Table<sup>1</sup>. In Figure 4 v paraboloid models for the ICE, Giotto-Halley and Giotto-GS encounters on the same plot group ion gyroradius shown for comparison. Clearly at GZ and GS gyroradius effects are important [Neubauer et al., 1986]

Sheath

正力 <u>TABLE</u> 1. Summary of cometary bow shock results from spacecraft encounters

Mission	Comet	Inbound	Outbound	Comments
ICE	GZ		$\perp$ (wave?)	Intermittent; much turbulence;
				scale compared to interaction
Vega 1	Halley	T	1	Most pronounced in wave data.
Vega 2	Halley		-	Diffuse structure.
Suisei	Halley	-	?	Sharp; no B data;
				Vega upstream saw sw effect.
Giotto	Halley	$\bot$	H	Inbound width 4x10 <sup>4</sup> km;
				Some sw disturbances?
				Outbound width <u>1.2x10<sup>5</sup> km;</u>
				mass loading in shock important.
Giotto	GS	$\perp$ (wave?)	$\bot$	Outbound very sharp;
				inbound a wave?

#### THEORY AND SIMULATION

[Coates, 1995]

Bow shock

Bc

- 全ての探査機接近
  に観測
- 特徴がIMFの方向に
- 彗星起源イオンが圧力
  を決定
- 下流では様々なイオン

種の温度増加

Five different approaches have been applied to the cometary bow shock problem. We now d

# Mystery boundary

- Bow shockとcontact surfaceの間の 'cometosheath'の領域に水系イオンの エネルギー分布がはっきりと分かれ る境界
- 位置はHalley彗星核から約500,000 km
- 熱い電子の高密度領域の境界

- 太陽風の密度と速度の領域の境界
- 続いて冷たいイオンが急激に増加
- 磁場には特に影響なし
- 成因は不明



#### Cometopause

- Halley彗星核から160,000 kmに化学組成の明確な境界
- プロトン密度急減、水系イオン密度急増

10000

- イオン速度も変化
- 荷電交換が重要になる領域へ
- Giottoのデータでは強い不連続なし



### Magnetic pileup boundary (MPB)

- 45,000 km
- 磁場の不連続(tangential discontinuity)
- 電子の減速、減少、垂直圧力減
  少
- 荷電交換率増加
- プロトン密度減少
- 磁場がcontact surfaceの周りを強くdrape



#### Discontinuities X, X', Y and Z

- MPBとIPBの間にさらに3つの境界
- X:彗星イオンが荷電交換により 徐々に減少、プロトン密度の急減
- X': 右のJPAのデータではここでプ ロトン密度減少、水系イオン密度 減少開始
- Y:イオン温度減少
- Z:彗星イオンの核からの外向き
  の流れと停滞プラズマの境界



# Ion pileup boundary (IPB)

• ~10,000 km

・磁場の最大値

• Count rate分布が変化

• H3O+がdominantに

[Balsiger et al., 1986]





Giottoが観測したのみ





Fig. 4 FIS spectrogram near the time of closest approach, showing the flux of ions detected at the edge of the magnetic cavity and the impact plasma detected 45 s before closest approach. The white spaces are caused by telemetry synchronization loss. A real data gap between 00:11 and 00:12 UT has been closed up in the plot; hence the nonlinear timescale.

[Johnstone et al., 1986]

# Borrelly彗星

- Deep Space Iが2171 kmを通過
- プラズマの空間分布が彗星に対し て非対称
- プラズマのsourceの非対称な性質 を反映?
  - Pickup ionのジャイロ半径効果では ないか? Pickup ion trajectory Linteraction/Pickup B<sub>sw</sub> Solar wind proton Follow frajectory Solar wind proton Follow frajectory Solar wind proton Follow frajectory Follow



[Young et al., 2004]

### 9. Heliocentric distance dependence: the Rosetta mission

#### 彗星太陽風相互作用の距離依存

- Gas production rate Qが太陽からの
  距離に強く依存し、彗星太陽風相
  互作用とion pickupプロセスが変化
- 太陽から遠方(>2 AU)ではQが低
  く彗星核表面が太陽風と直接相互
  作用
- Wakeの形成、表面帯電、ダストの 運動
- 太陽の近く(< 2 AU)では彗星太 陽風相互作用が発達し、cavityと bow shockが形成



### Rosettaミッション

- 彗星を周回!着陸機も!
- 彗星太陽風相互作用の距離依 存の解明
- 相互作用の初期段階から観測
- ターゲットは典型的な木星族 彗星Churyumov-Gerasimenko
- 2004/3/2に打上、2014年に到 着予定





#### 10. Simulations

#### MHD

- Bow shockなどの大規模な構造に適しており、mass loadingは平均分子量を内側境界で増加させて再現
- Hybrid
- イオンを粒子として扱い、電磁場との相互作用をみる。
- Gas production rateの変化や、彗星イ オンのピッチ角、エネルギー散乱な どを扱える。
- Pileup boundaryの再現も

- Multi-fluid
- 太陽風イオン、彗星イオン、電子に
  流体種を分ける。
- 組成の境界としてcometopauseを再現
- Test particle
- 与えられた電磁場中でのpickup ionの 運動を調べる。
- 粒子から流体への影響は考慮できないが、ジャイロ半径効果をみることができる。

#### II. Remote observations

- Plasma tailは太陽風のプローブ
- Biermannによるtailの観測が太陽風の発見に
- Plasma tailがちぎれるdisconnection eventは太
  陽風の不連続の存在を示唆
- 組成も地上からの観測で
- 彗星からのX線放射を観測

# 12. Ion pickup in other contexts

- Ion pickupは太陽系プラズマではよく見られる
  現象
- 水星、金星、月、火星、イオや木星の衛星、
  タイタンや土星の衛星、冥王星、惑星間物
  質、星間物質、人工衛星からの放出物質など
- 金星や火星の大気散逸においてion pickupは重要なプロセス

#### 13. Outstanding problems

- 彗星太陽風相互作用:誘導磁気 圏の形成、彗星イオンpick up、 プラズマ波動、粒子加速、nongyrotropy、様々な境界
- 粒子加速機構におけるFermilの 重要性は?
- Inner shockはどうなっているか?
- 種々の境界の永続性、形成メカ ニズムは?

- Plasma tailの形成メカニズムは?
- Mystery regionの熱い電子はX線 放射を引き起こすか?
- 電離圏の特徴は?
- 光化学相互作用やnegative ionの
  形成は?
- リコネクションの役割は?

#### **14.** Conclusions

- Ion pickupは太陽風と様々な天体の相互作用において重要
- Pickup ionは圧力の主な成分に
- 彗星はPickupのプロセスを調べるのによい環境
  - I. Non-gyrotropic ring
  - 2. Gyrotropic ring
  - 3. Bispherical shell
  - 4. Maxellian
- Giottoによるpickup ionの三次元速度分布関数の観測でかなり進展
- Rossetaに期待、特にinner comaとnear tail region