

修士論文

カッシーニ・ラングミュアプローブによる
土星内部磁気圏のイオン速度観測とモデリング
Cassini RPWS/LP observation of ion
velocity and modeling of Saturn's inner
magnetosphere

堺 正太郎

Shotaro SAKAI

北海道大学大学院 理学院 宇宙理学専攻
惑星宇宙グループ

Planetary and Space Group, Department of CosmoSciences,
Graduate School of Science, Hokkaido University

2011 年 2 月 28 日

要旨

本論文では土星内部磁気圏プラズマディスク中のイオン速度について扱っている。まず本研究では、土星探査機 Cassini に搭載されている Langmuir Probe (LP) を用いて内部磁気圏赤道面のイオンスピードについて調査した。LP 観測から、 $4 R_S$ 付近ではイオンスピードは共回転速度の約 50% で、土星から離れるにつれてスピードが増加する傾向を示した。また $7 R_S$ より外側ではイオンスピードが増大し、共回転速度に近づいた。これは負に帯電した E リング中のサブマイクロメートルサイズのダストがプラズマディスク中のプラズマダイナミクスに影響を与えていることを示唆している。本研究ではイオンスピードの SKR 経度依存性についても LP を用いて調査を行った。経度 0° 付近ではスピードが小さく、 $\pm 180^\circ$ に向かってスピードが徐々に大きくなる傾向を示した。また $\pm 180^\circ$ 付近ではスピードが散乱されていた。これまでの多くの観測から、磁気軸と自転軸の傾きがほとんどないのにも関わらず、土星磁気圏プラズマの経度方向の変動が示された。本研究からもイオンやダストの経度方向依存性の存在を示唆する結果となった。また本研究ではイオンスピードのローカルタイム (LT) 依存性についても LP を用いて調査を行った。 $7 R_S$ より内側ではイオンスピード LT 依存性は見られなかった。一方で $7 R_S$ より外側では、イオンスピードが夜側の方が昼側よりもやや大きいことが明らかになった。

本研究では、ダストがイオンスピードにどのように影響を与えるか見るために、3 流体 MHD 方程式を用いたイオン速度の計算を行った。まずはイオンとダストの衝突がどの程度であればイオンに影響するのかを調査した。その結果、イオンがダストに影響されるために必要なイオン-ダスト衝突周波数はイオンサイクロトロン周波数の約半分、観測に合うためには少なくともイオンサイクロトロン周波数の約 2 倍必要であることが明らかになった。次に本研究ではイオンとダストがクーロン衝突をすると考え、イオン-ダスト衝突周波数をクーロン散乱の形で与え計算を行った。しかしイオン-ダストのクーロン衝突はほとんど生じておらず、イオンは共回転速度となった。そこで電離圏-磁気圏結合を考え、磁気圏内に生じる電場を計算した。その結果、ダスト密度が高く、ダスト層が厚い時、ダスト-プラズマ相互作用が顕著に生じ、イオン速度は共回転速度から遅れた。ダスト層の厚さ dd [m] が $10^7 < dd < 10^8$ の時、観測とよく一致した。

目次

1	導入	1
1.1	土星	1
1.2	リングと衛星	2
1.3	土星磁気圏	3
1.3.1	磁場構造	3
1.3.2	プラズマ分布	4
1.3.3	ダスト分布	7
1.3.4	中性ガス分布	7
1.4	本研究の目的	9
2	これまでの土星探査	10
2.1	Pioneer 11	10
2.2	Voyager 1, 2	11
2.3	Cassini-Huygens	13
3	イオン観測	18
3.1	Langmuir Probe	18

3.2	データ解析	20
3.2.1	土星からの距離とイオン速度との関係	21
3.2.2	イオン速度の経度依存性	30
3.2.3	ローカルタイムとイオン速度との関係	36
4	イオンモデリング	44
4.1	MHD 方程式	44
4.2	衝突周波数	45
4.3	パラメータスタディ	46
4.3.1	衝突周波数	46
4.3.2	クーロン衝突	52
4.3.3	電離圏-磁気圏結合	54
5	考察	59
6	まとめ	62
	謝辞	63
	参考文献	64

1 導入

1.1 土星

土星は太陽から 9.5 AU の場所に位置しており, 太陽系の第 6 惑星である. 基本的な物理データは, 赤道半径 60268 km ($= 1 R_S$), 質量 5.68×10^{26} kg, 密度 0.69 g cm^{-3} , 赤道重力 10.44 m s^{-2} , 公転周期 29.46 年, 自転周期 0.436 日である. また自転軸と磁気軸の傾きが 1° 未満と非常に小さい. 土星の磁気モーメントの大きさは $4.7 \times 10^{28} \text{ gauss cm}^3$ と地球の約 600 倍である. 土星内部では, 小さな岩石と氷からなる核が存在し, その周りを金属水素が覆っていると考えられている. この金属水素が土星の巨大な磁場を作り出している. 金属水素の外側には大気が存在し, 主に水素から構成されている.

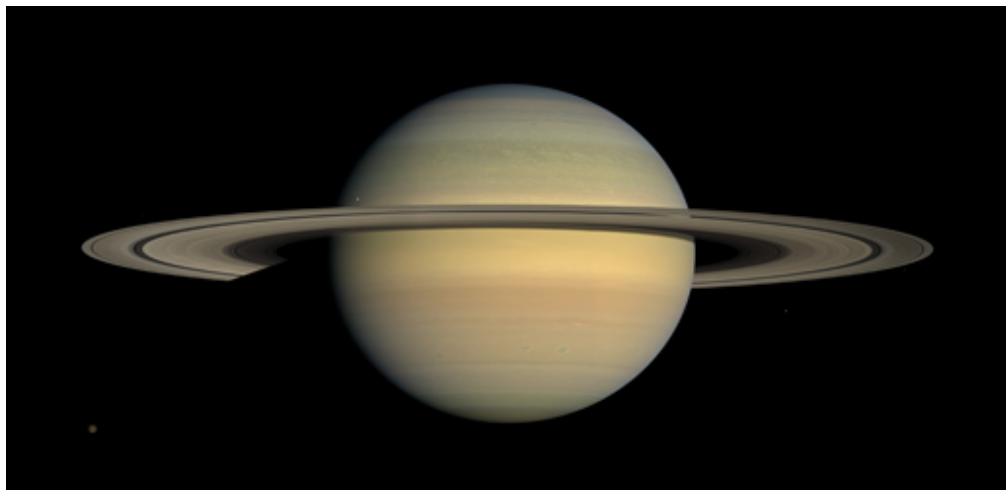


図 1 土星 [NASA/JPL]

1.2 リングと衛星

土星には非常に美しいリングがあることで有名である。リングは 1610 年にガリレオによって初めて発見されて以来現在に至るまで数多く発見されてきた。リングは内側から D リング, C リング, B リング, A リング, F リング, G リング, E リングとなっており, 発見された順に A から順番に付けられている。リングは直径ナノメートルサイズから数メートルサイズ程度の主に氷や岩石から構成されている。表 1 は, 各リングや間隙の大きさを示している。中でも E リング領域は $3\text{--}8 R_S$ と広く土星内部磁気圏を覆っており, 磁気圏ダイナミクスに大きな役割を担っていると考えられている (1.3 節参照)。

表 1 土星リングの大きさ。 $^a 1R_S = 60,330 \text{ km}$, [Stone and Owen, 1984]

Feature	Distance from Saturn Center (R_S) ^a
D Ring inner edge	1.11
C Ring inner edge	1.23
Maxwell Gap	1.45
B Ring inner edge	1.53
B Ring outer edge	1.95
Huygens Gap	1.95
Cassini Division	1.99
A Ring inner edge	2.02
Encke Gap	2.21
Keeler Gap	2.26
A Ring outer edge	2.27
F Ring center	2.33
G Ring center	2.8
E Ring inner edge	3
E Ring outer edge	8

土星の衛星の数は地球と比べると非常に多く、現在までのところ 60 個以上発見されている。表 2 は主な土星衛星の半径と軌道長半径を示している。Enceladus ではその南極から大量のプルームが吹き出ていることが発見された [Porco *et al.*, 2006]。このプルームが E リング粒子の供給源の 1 つとして考えられている。Rhea からは酸素と二酸化炭素の薄い大気が発見され [Teolis *et al.*, 2010], Titan からはメタンやエタンのような有機物からなる海が発見されており [Lunine *et al.*, 1983; Lunine, 1993, 1994; Dermott and Sagan, 1995; Sagan and Dermott, 1982; Brown *et al.*, 2008], 土星系での生命の発見が大いに期待されている。

表 2 主な土星衛星の大きさと軌道長半径 [de Pater and Lissauer, 2001]

Satellite	Radius(km)	Semimajor axis of the orbit(10^3 km)
Mimas	198.8 ± 0.6	185.52 ($\sim 3.08 R_S$)
Enceladus	249.1 ± 0.3	238.02 ($\sim 3.95 R_S$)
Tethys	529.9 ± 1.5	294.66 ($\sim 4.89 R_S$)
Dione	560 ± 5	377.71 ($\sim 6.27 R_S$)
Rhea	764 ± 4	527.04 ($\sim 8.74 R_S$)
Titan	2575 ± 2	1221.85 ($\sim 20.27 R_S$)
Iapetus	718 ± 8	3561.3 ($\sim 59.09 R_S$)

1.3 土星磁気圏

1.3.1 磁場構造

土星は自転軸にほぼ沿った ($< 1^\circ$) 軸を持つ、ダイポールで近似できる磁場を持っている。赤道磁場の大きさは $B_S \sim 2 \times 10^{-5}$ T で地球の赤道磁場 ($B_E \sim 3 \times 10^{-5}$ T) と非常に似た値を持っている。一方で木星の赤道磁場 ($B_J \sim 4 \times 10^{-4}$ T) と比較すると 1 桁ほど小さい。図 2 は Voyager による磁気圏の観測までで理解された土星磁気圏の描像である。温度の低い領域が青、温度の高い領域が赤、中間が紫で示されている。衛星は M が Mimas, E が Enceladus, T が Tethys, D が Dione, R が Rhea である。衛星の位置の他に、E リ

ング (灰色の長方形の領域) や中性水素雲 (円状の白点の領域) が示されている。一方で 図 3 は Cassini Prime Mission によって新しく発見された事柄が含まれている。詳しくは 2.3 節で述べる。

1.3.2 プラズマ分布

土星内部磁気圏はディスク状の、濃くて冷たいプラズマから構成されている。このプラズマは、土星近傍に存在する衛星やリングを起源としており [Moncuquet *et al.*, 2005; Persoon *et al.*, 2005; Wahlund *et al.*, 2005; Sittler *et al.*, 2006; Gustafsson and Wahlund, 2010] 土星磁気圏を広く満たしている。中でも、衛星 Enceladus はその南極から大量の水を噴出していることが Cassini によって確認されており [Porco *et al.*, 2006; Waite *et al.*, 2006], 土星磁気圏プラズマの主要な起源の一つとして考えられている。図 4 は Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS) によって観測された Enceladus 南極プリュームの成分である。横軸が分子量、縦軸が検出された分子の数を示している。分子量 18 近辺が他の成分と比べて 10 倍程度多い。このことから Enceladus プリュームの成分の 90% 以上は H_2O だと考えられている。

Enceladus から放出された H_2O は電荷交換反応や太陽 UV などによって電離し、プラズマとなる。現在までの研究ではこのプラズマが土星内部磁気圏ダイナミクスを支配していると考えられている。そのため、土星内部磁気圏でのプラズマはほとんどプロトンと水グループイオン (OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+) から構成されている [Young *et al.*, 2004; Sittler *et al.*, 2005]。図 5 は土星内部磁気圏におけるプラズマ密度分布が計算されている [Sittler *et al.*, 2005]。横軸は時間及び土星からの距離、縦軸は密度である。赤線はプロトン密度、青線は水グループイオン密度、黒線は合計のプラズマの密度である。Enceladus 周辺 ($\sim 4 R_S$) では水グループイオン密度がプロトン密度に比べて 1 桁程度大きい値を示している。一方土星から離れた領域でも水グループイオン密度とプロトン密度がほぼ同じ値を示していることから、内部磁気圏全体に水グループイオンが存在していることが理解できる。

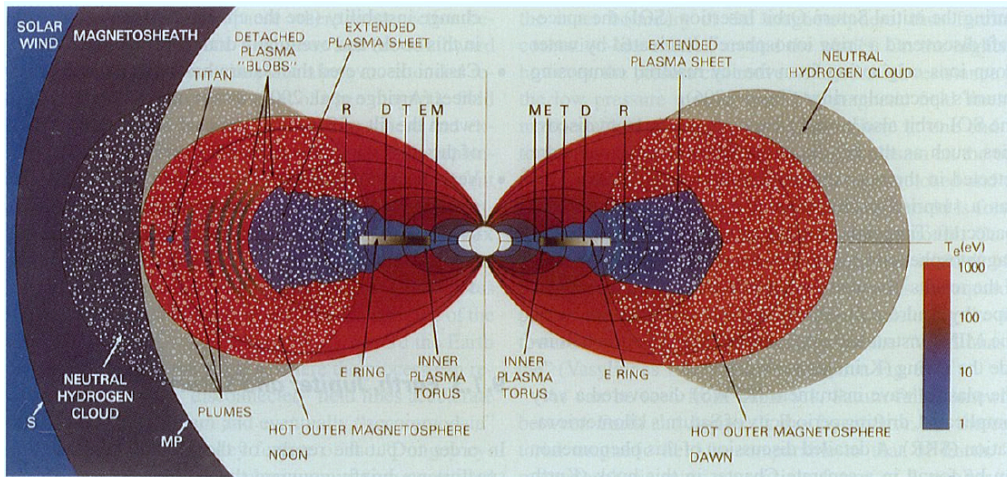


図 2 Voyager 観測までの土星磁気圏の描像 [Sittler et al., 1983]

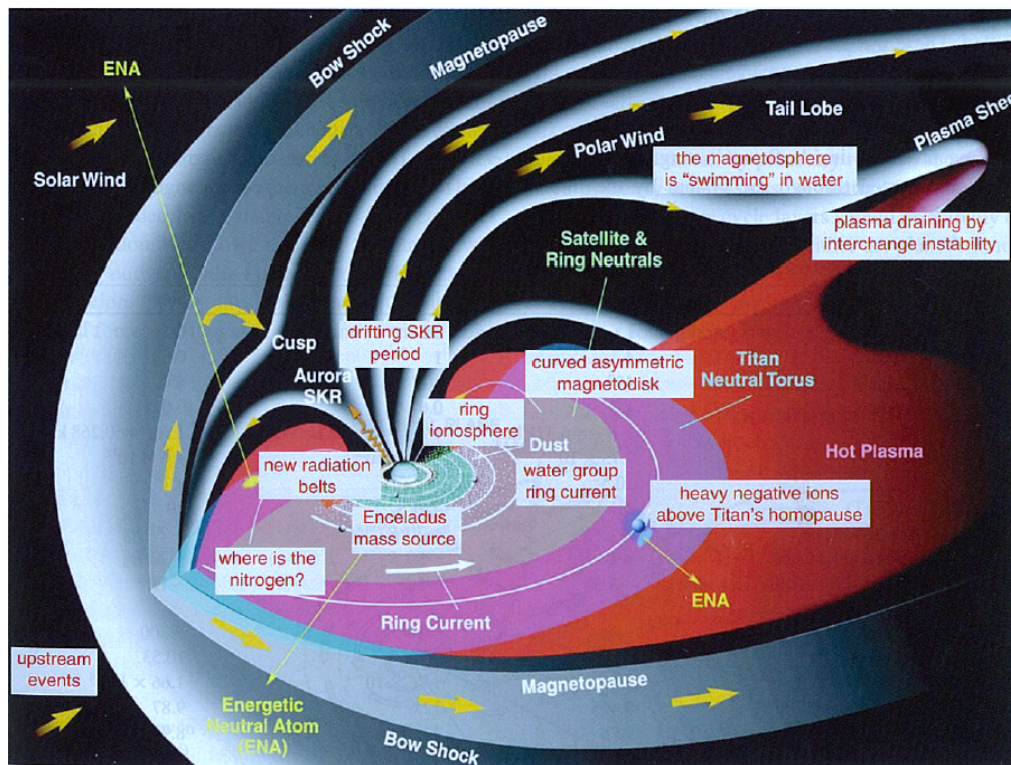
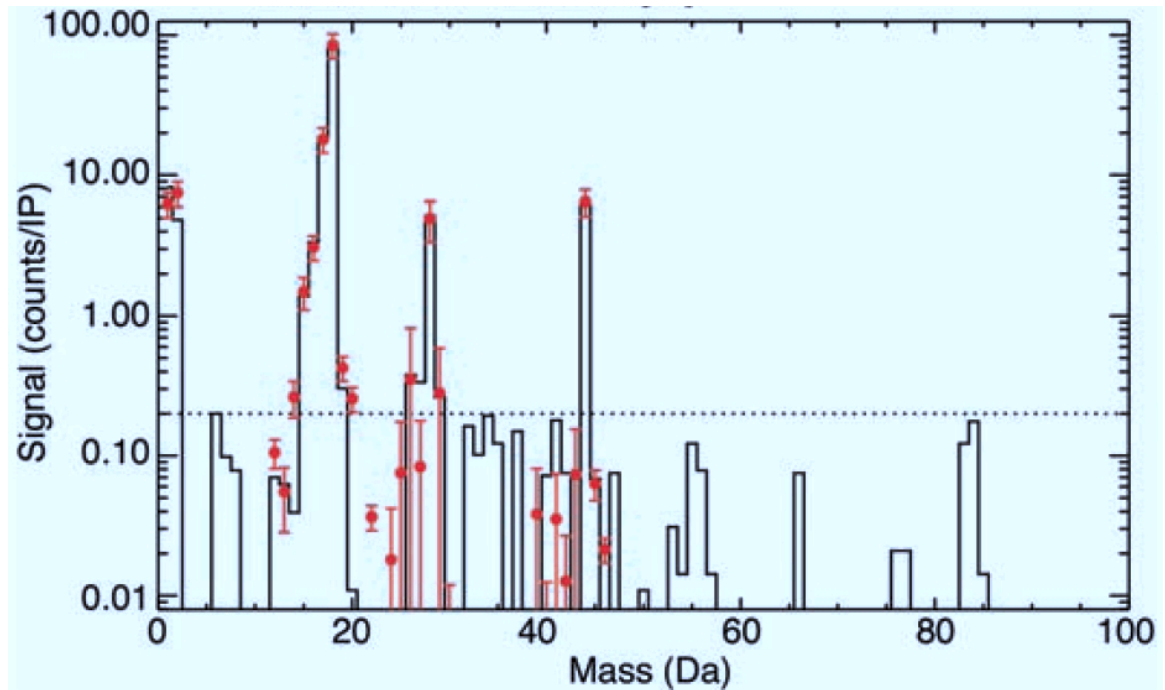
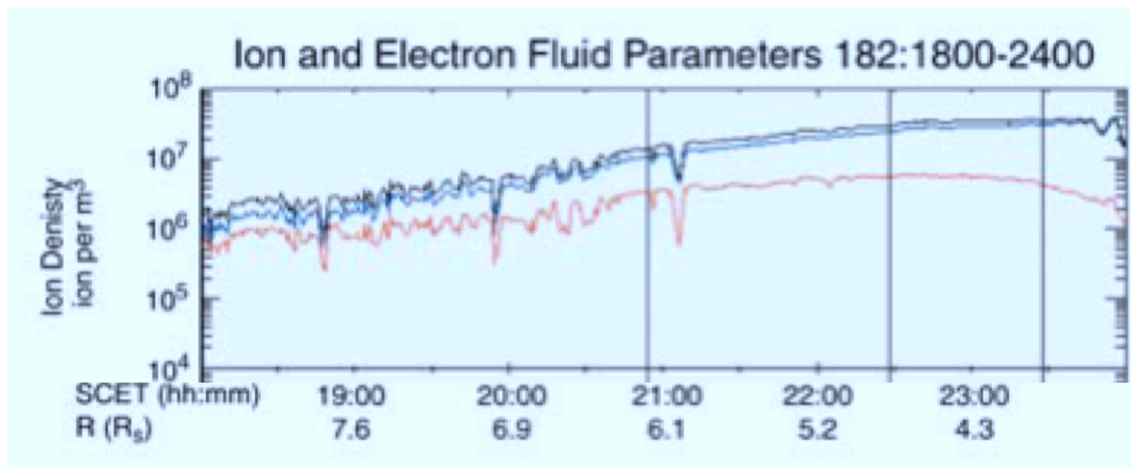


図 3 Cassini 観測以降の土星磁気圏の描像 [Gombosi et al., 2009; background figure courtesy of the MIMI team]

図4 Enceladus プリュームの成分 [Waite *et al.*, 2006]図5 土星内部磁気圏プラズマ密度分布 [Sittler *et al.*, 2005]

1.3.3 ダスト分布

土星 E リング周辺にはサブミクロンサイズのダスト粒子が大量に存在していることが報告されている。Kempf *et al.* [2008] では E リングには小さいダスト粒子 (ナノ, マイクロメートルサイズ) が存在していてそれらは負に帯電していると報告した。Cassini cosmic dust analyser (CDA) による観測では, 多くのダスト組成が水氷であることを明らかにした [Hillier *et al.*, 2007]。また Cassini Radio and Plasma Wave Science (RPWS) では数ミクロン程度のダストを観測し, 衝突率からダスト密度 (10^4 m^{-3}) を推定した [Kurth *et al.*, 2006]。またこれまでにモデル計算も行われている。Horányi *et al.* [2008] はその E リング周辺のダスト密度のモデル計算を行った。彼らはサイズ毎のダスト密度を求めており, $0.1 < r_\mu < 0.5$ では最大密度 7 m^{-3} , $0.5 < r_\mu < 1$ では 1.2 m^{-3} , $1 < r_\mu < 3$ では 0.3 m^{-3} と計算した。ここで r_μ はダスト半径で μm 単位で表している。一方, Yaroshenko *et al.* [2009] では, 100 nm 程度のサイズのダストは背景リング領域では 10^4 m^{-3} 以下, ダストが増大している領域では 10^5 m^{-3} 程度ダストが存在していると報告した。彼らは Enceladus 近辺の電子密度の減少からもっとサブミクロンサイズのダストが存在していると提案している。

1.3.4 中性ガス分布

土星磁気圏には中性ガスも存在している。H や H_2O またこれらの解離による生成物が磁気圏内を支配している (表 3)。Hubble Space Telescope (HST) では, OH 雲が観測されている [Shemansky and Hall, 1992; Shemansky *et al.*, 1993]。また, Cassini Ultraviolet Imaging Spectrograph (UVIS) は OI 群の空間非対称を示した [Melin *et al.*, 2009]。H の分布は赤道面上で惑星中心から観測限界である $45 R_S$ 以上まで広がっており, 赤道面からも $10 R_S$ 以上広がっている。

また, Enceladus プリュームによる H_2O の磁気圏への供給率はモデルから $\sim 1 \times 10^{28}$ molecules/s であることが明らかになった。[Jurac and Richardson, 2005; Hansen *et al.*, 2006; Burger *et al.*, 2007; Sittler *et al.*, 2008]。しかしながら, Enceladus 以外の供給源もまた活発である (表 4)。Cassini UVIS は HI の初期的な供給源は土星の太陽に照らさ

表 3 土星磁気圏の中性ガス成分 [Mauk et al., 2009]. **Shemansky et al.[2004, 2009], Melin et al.[2009]

Species	Density (cm^{-3}) 3–4 R_S	Total system population	Loss rate (s^{-1})
OI	500	3×10^{34}	$\sim 10^{29}$
OH	700	$\sim 4 \times 10^{34}$	$\sim 10^{29}$
HI	450	2×10^{35}	3×10^{30}
H ₂ O	$\sim 200^{**}$	–	–
NI	minor	–	–

れた領域の大気の上で物理化学的な解離反応によって生成される [Shemansky et al., 2009]. その密度はリング領域で 10^4 cm^{-3} , Titan 軌道上では $50\text{--}150 \text{ cm}^{-3}$ 程度存在する [Shemansky and Hall, 1992; Shemansky et al., 2009].

表 4 土星磁気圏の中性ガス供給源 [Mauk et al., 2009]

Source	Species	Rate (10^{28} s^{-1})	Reference
Enceladus & other icy bodies	H ₂ O	1.0	<i>Jurac et al., 2002</i>
			<i>Hansen et al., 2006</i>
			<i>Burger et al., 2007</i>
Main rings	O ₂	0.2	<i>Johnson et al., 2006</i>
Tenuous rings	H ₂	0.4	<i>Waite et al., 2006</i>
Enceladus	C, N	0.2	<i>Smith et al., 2008</i>
			<i>Yelle et al., 2008</i>
			<i>Strobel, 2008</i>
Titan	CH ₄	0.3	<i>Cui et al., 2008</i>
Titan	H ₂	1.0	<i>Cui et al., 2008</i>
Saturn	H	300	<i>Shemansky et al., 2009</i>

1.4 本研究の目的

1.2, 1.3 節で述べたように, 土星内部磁気圏には Enceladus のような衛星起源のダストが E リングとなり地球では考えられないくらい磁気圏内にダストが多く含まれている. *Wahlund et al.* [2005, 2009] でも報告されているようにそのダストがプラズマに少なからず影響を与えていると考えられている. そこで本研究では, 土星 E リング内におけるダスト-プラズマ相互作用を解明することを目的とした. 本研究の大きな特色は, 磁気圏内でダストを扱う点である. *Persoon et al.* [2005, 2006, 2009] では, 土星半径方向, 緯度方向 2 次元でのプラズマ密度モデルを提案している (電子密度からイオン密度を求める手法). しかしこのモデルでは, ダストの効果は一切考慮されずにイオン密度を導出している. 電子密度に関しては観測値とほぼ一致しているが, イオン密度についてはダストが存在していない分, 過小評価していると考えられる.

本研究は, Cassini プロジェクト (NASA, ESA) の 1 つであり, Cassini プロジェクトの目標の 1 つに土星磁気圏の構造を明らかにすることが含まれている. 土星内部磁気圏の構造を明らかにすることで, 土星磁気圏全体の構造を解明する足掛かりとなる. このような意味からも, 本研究は土星研究において非常に重要な位置づけにあると言える. また本研究ではダスト-プラズマ相互作用の解明を目指している. ダスト-プラズマ相互作用は, 太陽系形成時のディスクで起こっている可能性がある. 更に恒星形成時に生じるディスクにおいても同様に起こっている可能性があり, 上記を解明することにより太陽系形成のみならず恒星形成に対しても更に一歩進んだ理解へとつながる研究である.

2 これまでの土星探査

これまで以下 4 つの探査機が土星に向かっている。

1. Pioneer 11
2. Voyager 1
3. Voyager 2
4. Cassini-Huygens

本章ではこれまでの土星探査について紹介する。

2.1 Pioneer 11

Pioneer 11 は 1973 年 4 月 5 日に Cape Canaveral より打ち上げられた。その質量は 259 kg で大きさは 2.9 m であった。12 の観測機器を搭載しており以下の通りである。

- Imaging Photopolarimeter
- Magnetometer
- Infrared Radiometer
- Plasma Analyzer
- Ultraviolet Photometer
- Charged-particle Composition Instrument
- Cosmic-ray Telescope
- Geiger Tube Telescopes
- Asteroid/Meteoroid Detector
- Jovian Trapped-radiation Detector
- Meteoroid Detector
- Fluxgate Magnetometer

1974年12月3日に木星をフライバイし、1979年9月1日に土星のフライバイを行った。

Pioneer 11はPioneer 10の姉妹衛星として土星をフライバイした最初の人工探査機である。またPioneer 11は木星の極領域の撮像も初めて行った。バウショックを通過した際に、木星磁気圏界面が太陽風の影響によって変化していることを明らかにした。その後Pioneer 11は1979年8月31日に土星バウショックの観測を行った。この観測によって、土星には磁場が存在しているという確固たる証拠を示した。

Pioneer 11はAリングの外側に狭いリングを発見し、それをFリングと名付けた。また、直径200 kmの新しい衛星も発見した。さらにPioneer 11は惑星の全体の温度が -180°C であることを捉え、その写真は木星の大気よりも特徴のないのっぺりとした大気であることを示した。そのデータ解析によって惑星は主に流体の水素から構成されていると提案された。

土星を離れた後Pioneer 11はPioneer 10とは反対の銀河中心のある射手座方向へ向かった。そして1990年2月23日に海王星軌道を通過した。1995年9月30日に日常的な運用を終わらせた。そして1995年11月24日に地球側でデータを受け取った後にPioneer 11との交信が途絶えた。これはPioneer 11の位置が地球と交信できるアンテナの視野を超えたためである。

2.2 Voyager 1, 2

Voyager 1は1977年9月5日にCape Canaveralより打ち上げられた。一方Voyager 2は1977年8月20日に同じくCape Canaveralより打ち上げられた。Voyager 1と2はVoyager 2の方が早く打ち上げられた。その質量は共に2080 kgである。観測機器も1と2で全く同じものが搭載されている。

- Imaging System
- Ultraviolet Spectrometer
- Infrared Spectrometer
- Planetary Radio Astronomy Experiment
- Photopolarimeter

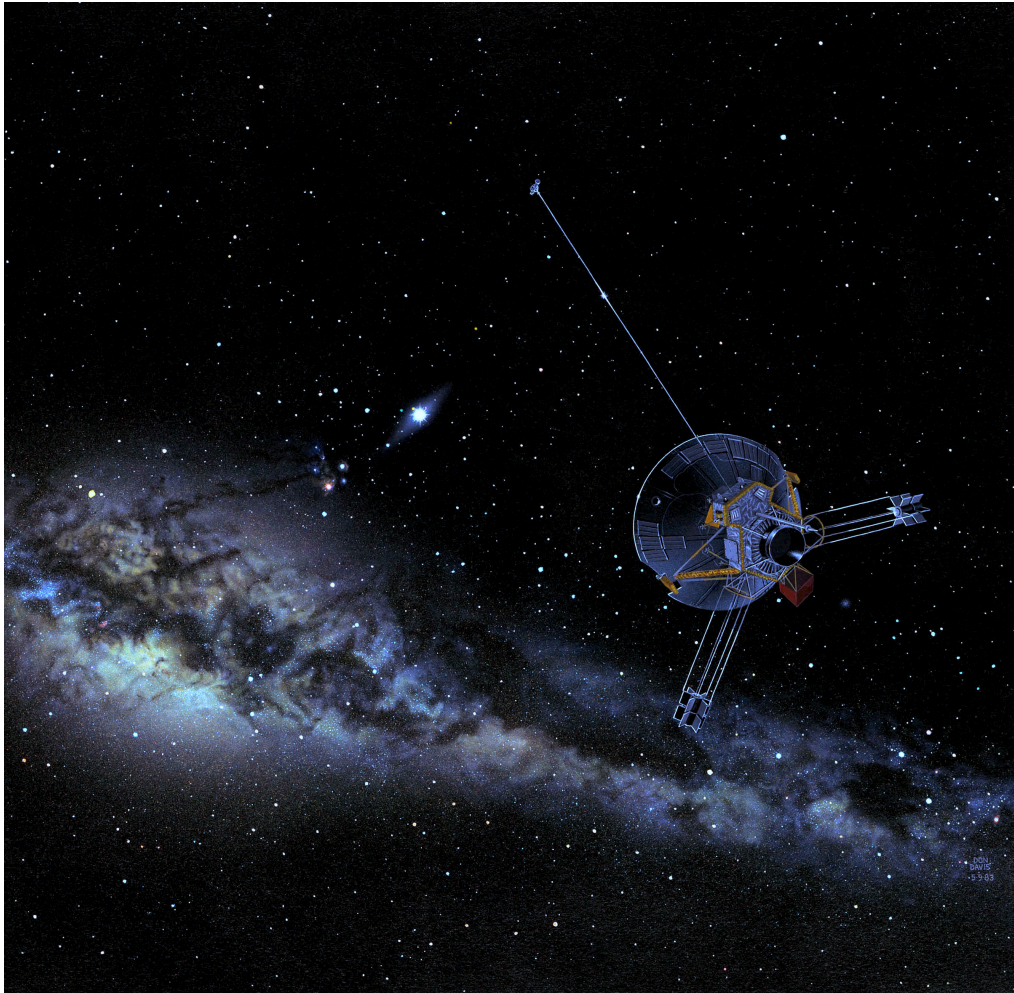


図 6 Pioneer 11 [NASA]

- Magnetometers
- Plasma Particles Experiment
- Low-energy Charged-particles Experiment
- Plasma Waves Experiment
- Cosmic-ray Telescope

Voyager 1 も 2 も土星のフライバイを行い、多くの発見をもたらした。Voyager 1 は Prometheus, Pandora, Atlas の 3 つの衛星を発見した。G リングも Voyager 1 によって発見された。フライバイの間に Titan, Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea の撮像を行った。このデータから、これらのすべては氷衛星であることが明らかになった。Titan の画像には表面が見えないくらい分厚い大気存在を示した。またその組成は 90% が窒素であることを見出した。表面の圧力は 1.6 気圧、温度が -180° であることも明らかにした。最接近の際には土星の高層大気の 7% がヘリウムで残りほとんどが水素であることを見出した。

Voyager 2 は衛星 Iapetus の撮像を行った。リングスポークや間隙、F リングや羊飼い衛星のより詳細な画像も撮像された。Voyager 2 のデータによって A リングは恐らく 300 m の厚さしかないだろうと提案された。また、Hyperion, Enceladus, Tethys, Phoebe の撮像も行われた。

2.3 Cassini-Huygens

Cassini は 1997 年 10 月 15 日に Cape Canaveral より打ち上げられた。その重さは 2,125 kg である。Cassini に搭載されている機器は大きく、光学的リモートセンシング、磁場・粒子・波動観測、マイクロ波リモートセンシングの 3 つから構成されている。これらの機器を更に細かく分けると以下の通りである。

- 光学的リモートセンシング
 - Composite Infrared Spectrometer (CIRS)
 - Imaging Science Subsystem (ISS)
 - Ultraviolet Imaging Spectrograph (UVIS)

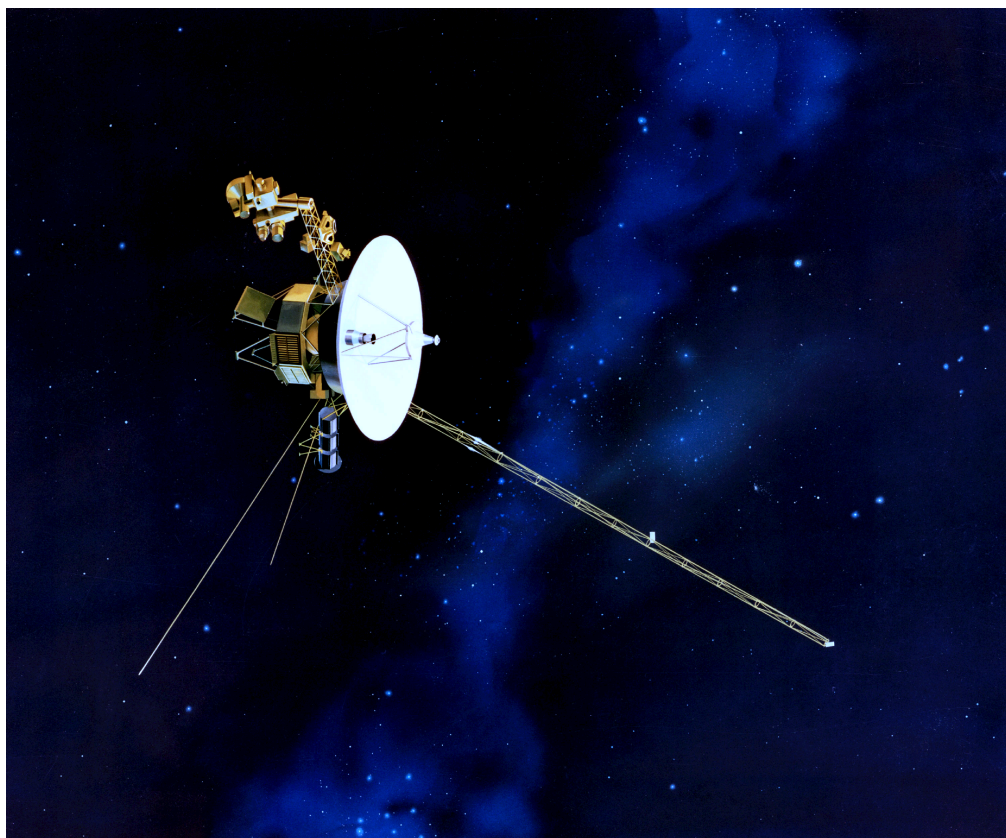


図 7 Voyager [NASA]

- Visible and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS)
- 電磁場・粒子・波動観測
 - Cassini Plasma Spectrometer (CAPS)
 - Cosmic Dust Analyzer (CDA)
 - Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS)
 - Magnetometer (MAG)
 - Magnetospheric Imaging Instrument (MIMI)
 - Radio and Plasma Wave Science (RPWS)
- マイクロ波リモートセンシング
 - Radar
 - Radio Science (RSS)

Cassini は 2000 年 12 月 30 日に木星をフライバイし、2004 年 7 月 1 日に土星軌道投入され、世界初となる人工土星周回衛星となった。Cassini の磁気圏探査によって多くの発見がもたらされた。そのいくつかは 図 3 に示されている。

- 土星接近中に Cassini は 100 keV/charge 程度のバウショックの磁気圏イオンアップストリームを検出した [Krimigis *et al.*, 2009]。これは Cassini が磁氣的に磁気圏と結合している時に検出された。
- 軌道投入中に、Cassini は土星リングを構成している氷物質を起源とする水グループイオンに支配されたリング電離圏を発見した [Tokar *et al.*, 2006]。
- 軌道投入中に窒素イオンがわずかではあるが磁気圏中で検出された [Smith *et al.*, 2005]。これは驚くべき発見で、Cassini 到着以前では Titan が磁気圏の窒素イオンの主な起源だと考えられていた。この結果のまとめは André *et al.* [2008] を参照すること。
- MIMI によって D リングの内側に新しい放射線帯が存在していることが明らかになった [Krimigis *et al.*, 2005]。
- RPWS によって、Saturn kilometric radiation (SKR) の周期がとても複雑で変化していることが明らかになった [Gurnett *et al.*, 2005, 2007; Kurth *et al.*, 2007, 2008; Zarka *et al.*, 2007]
- 土星のリングカレントは加速された水グループのイオンから構成されていることが発見された [Sittler *et al.*, 2005, 2006, 2007; Sergis *et al.*, 2007; Young *et al.*,

2005].

- 土星はお椀型の電流シートを持っていることが明らかになった [Arridge *et al.*, 2008a, 2008b]. これは土星自転軸の傾きと土星軌道での太陽風の間相互作用による。
- とても重い負の荷電粒子が Titan で発見された [Waite *et al.*, 2007; Coates *et al.*, 2007]. これは非常に驚くべき発見で、解釈は未だ議論中である。

Huygens は Cassini に搭載されて Titan まで運ばれ、2005 年 1 月 14 日に Titan へと切り離された。その重さは 318 kg である。搭載機器は以下の通りである。

- Aerosol Collector and Pyrolyser
- Descent Imager and Spectral Radiometer
- Doppler Wind Experiment
- Gas Chromograph and Mass Spectrometer (GCMS)
- Huygens Atmospheric Structure Instrument
- Surface Science Package

Huygens の目的は、Titan の大気密度や圧力、温度などの高度依存性、大気組成、大気中にある有機物やエアロゾルの成因、Titan の大気と気象の関係、特に雲や雷、大気大循環などを調査することである。また、表面の物質組成や地形についての調査も目的の 1 つである。

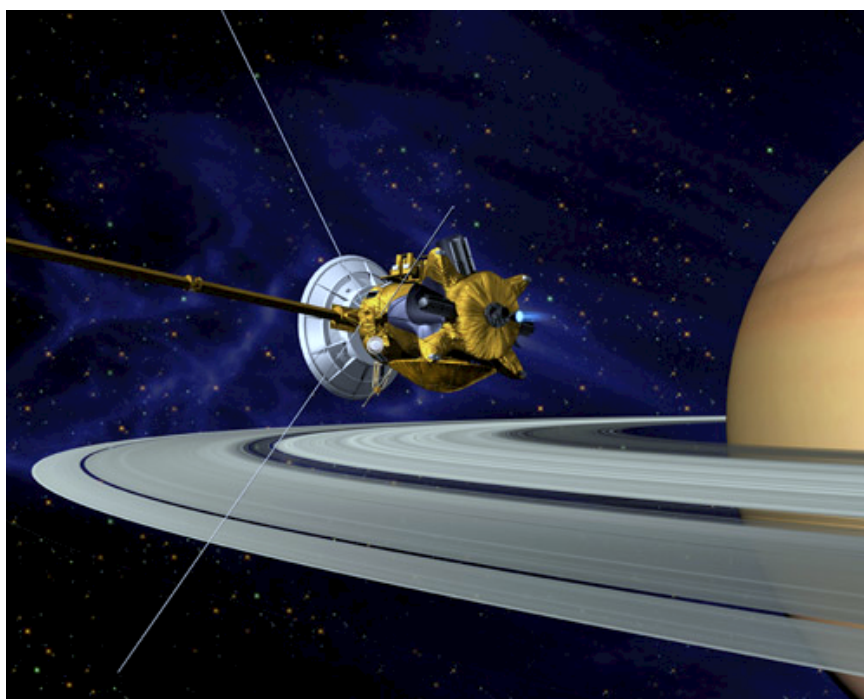


図 8 Cassini [NASA]

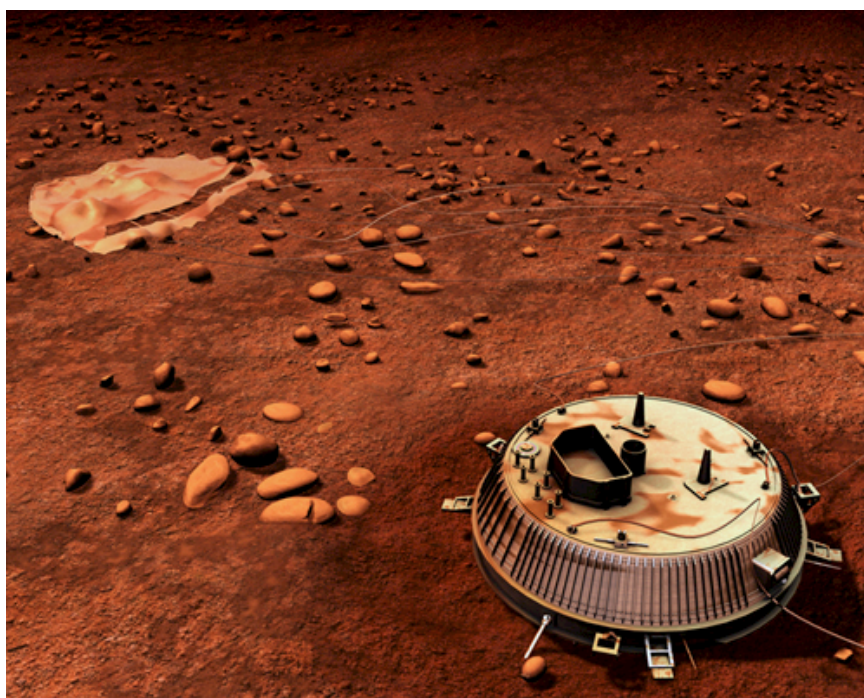


図 9 Huygens [NASA]

3 Cassini RPWS/LP によるイオン観測

本研究では, RPWS Langmuir Probe(LP) のデータ解析を行った. RPWS は土星近傍の電波放射, プラズマ波動, 熱的プラズマやダストを測定するための機器である [Gurnett *et al.*, 2004]. 直交する 3 つの電場アンテナを用いて 1 Hz から 16 MHz 帯の電場を測定することができる. サーチコイル磁場アンテナでは 1 Hz から 12 kHz 帯での磁場を測定することができる. また LP は電子の密度や温度を主に測定することができる. 図 10 は RPWS が搭載されている場所を示している.

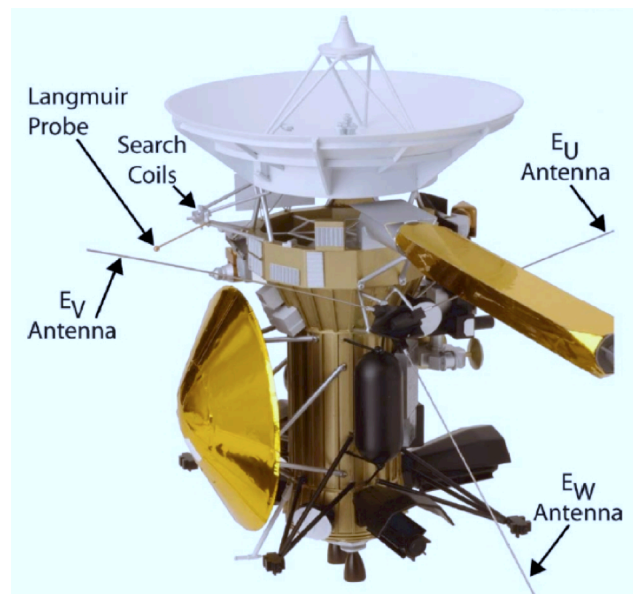


図 10 Cassini RPWS investigation [Gurnett *et al.*, 2004]

3.1 Langmuir Probe

LP では、-32 から 32 V の電圧を 512 ステップでプローブに加え、プローブにかかる電流を測定することで、その電流傾向から背景プラズマの電子密度、イオン密度、電子温度、

イオン速度を導出する事が出来る。本研究では、プローブにマイナス電圧を付加して得られたイオン電流データを使用し、イオン速度を導出を行った。図 11 は実際の LP の写真である。

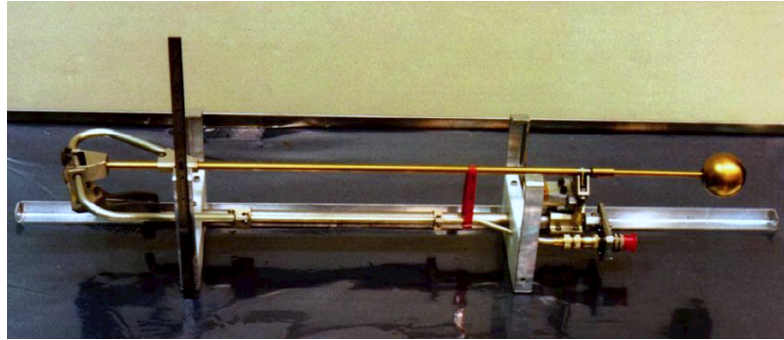


図 11 Cassini RPWS/LP [Gurnett et al., 2004]

イオン電流 I_i は以下のように書ける。

$$I_i = I_{i0}(1 - \chi_i) \quad (3.1)$$

ここでランダム電流 I_{i0} は,

$$I_{i0} = A_{LP} n_i q_i \sqrt{\frac{v_i^2}{16} + \frac{k_B T_i}{2\pi m_i}} \quad (3.2)$$

そして,

$$\chi_i = \frac{2e(U_{bias} + U_{SC})}{m_i v_i^2 + k_B T_i} \quad (3.3)$$

である。ここで、 A_{LP} はプローブの表面積、 n_i はイオン数密度、 q_i はイオンの電荷量、 e は電気素量、 m_i はイオン質量、 v_i はイオン速度、 T_i はイオン温度、 U_{bias} はプローブのバイアスポテンシャル、 U_{SC} はフローティングポテンシャル、 k_B はボルツマン定数である。今回は Cassini の速度が十分大きいので $k_B T \ll 1/2 m_i v_i^2$ が成り立つので、

$$I_{i0} \approx A_{LP} n_i q_i \frac{|v_i|}{4} \quad (3.4)$$

$$\chi_i \approx \frac{2e(U_{bias} + U_{SC})}{m_i v_i^2} \quad (3.5)$$

と近似することができる。以上より電流は、

$$I_i \approx A_{LP} n_i q_i \frac{|v_i|}{4} - A_{LP} n_i q_i \frac{1}{2} \frac{e}{m_i |v_i|} (U_{bias} + U_{SC}) \quad (3.6)$$

となり、イオンスピードを求めることができる。

イオン種は、水グループとした。土星内部磁気圏はエンセラダスの南極プルームにより、大量の水が放出されており [Porco et al., 2006; Waite et al., 2006], それが内部磁気圏の大部分を満たしているためである。

3.2 データ解析

本研究では、2005年2月から2008年10月まで (Rev003–087) の約3年分 (経度依存性についてはデータの都合上 Rev054 までのみを使用) の赤道面上 ($\pm 1 R_S$) での Cassini データを用いた。図12は今回用いたデータ取得時の赤道面での Cassini 軌道を表している。 x は太陽方向, y は夕暮れ方向である。

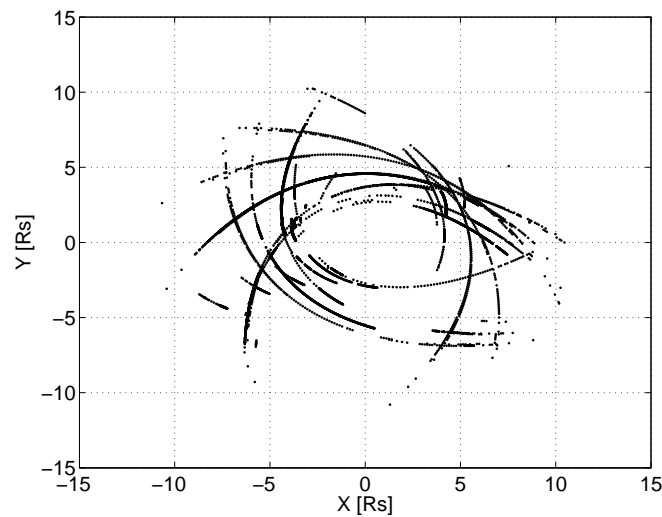


図12 Cassini の軌道 (Rev003–087)

3.2.1 土星からの距離とイオン速度との関係

3.2.1.1 パス毎の解析

過去の LP の観測から E リング領域ではイオンスピードはケプラー速度に近いスピードを持っていることが示された [Wahlund *et al.*, 2005, 2009]. しかしながら Wahlund *et al.* [2005, 2009] では, 限られたパスでしか解析が行われておらず, 他のパスでも同様の結果が得られるのかは分かっていなかった. そこで本研究では, 残りのパスのイオンスピード解析を行った. 図 13 から 図 33 は各パスにおける土星からの距離とイオンスピードの関係を示している. 今回は Rev003 から Rev087 までの解析を行ったがその中から内部磁気圏全体 ($2 - 10 R_S$) に渡ってデータが取得できている 21 パス (Rev003, 004, 005, 006, 015, 016, 017, 018, 019, 020, 021, 022, 023, 024, 025, 047, 048, 049, 050, 051, 052) 分の解析結果を図に示した. 実線は共回転速度, 波線はケプラー速度, 黒点は観測点を表している. 灰色の点については 3.2.1.2 節で詳しく述べる.

21 パス全てにおいて共通して得られた結果は, イオンは共回転速度とケプラー速度の間のスピードを持っていることである. これは Wahlund *et al.*, [2005, 2009] と同様な結果である. また, 多くのパスで見られたのは土星からの距離が増加するとイオンスピードも比例的に増加することである. このトレンドが顕著に見られるのが 図 16, 図 17, 図 21, 図 26, 図 31, 図 32 である. これらのパスで共通していることは各パスでの観測点が多いことである. 一方でパスによっては土星からの距離が増加しても速度が増加しないようなものも存在した. これらのパスでは距離と共に増加するトレンドが見られた観測点に比べて多くない. 観測点が少ないためにイオン全体をきちんと観測できていない可能性がある. また $7 R_S$ より外側では, イオンスピードが散乱している結果も得られた. 図 15, 図 21, 図 24, 図 25, 図 30, 図 32 で顕著に見られる. これについては 3.2.1.2 節で詳細を述べる.

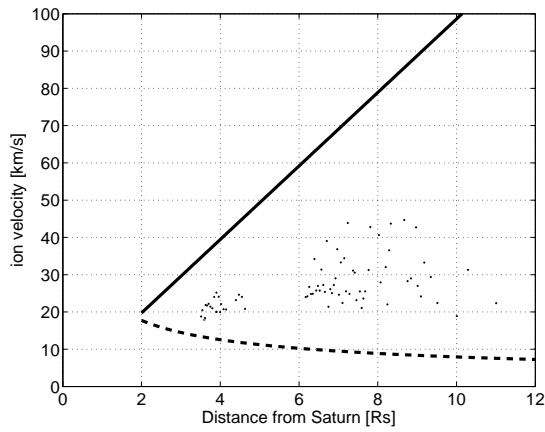


図 13 Rev003 におけるイオンスピード

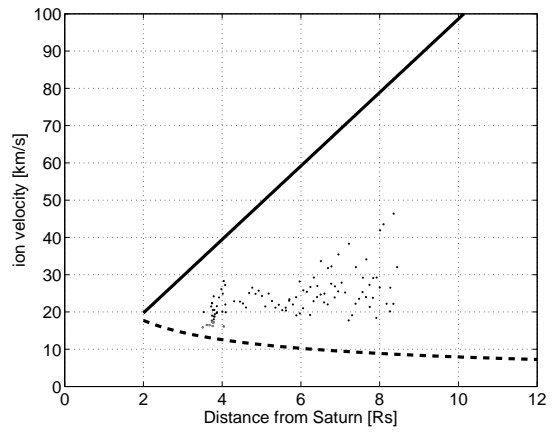


図 14 Rev004 におけるイオンスピード

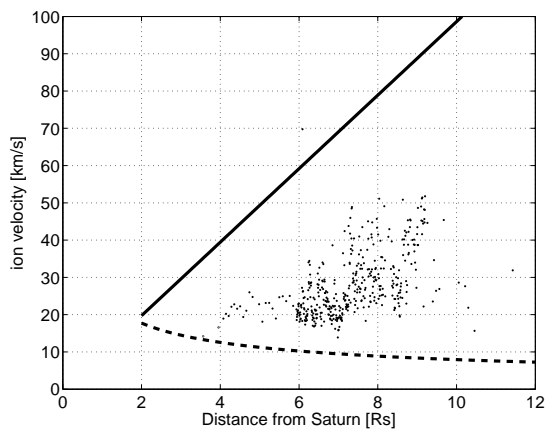


図 15 Rev005 におけるイオンスピード

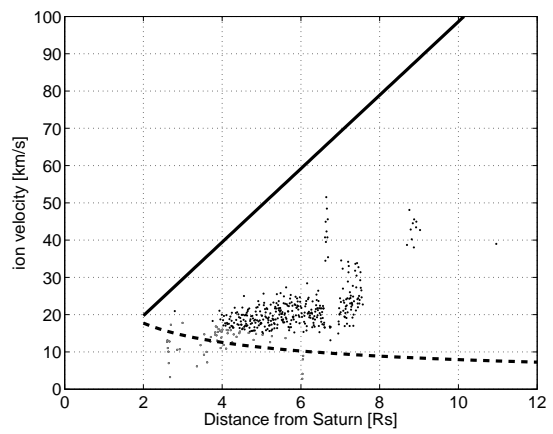


図 16 Rev006 におけるイオンスピード

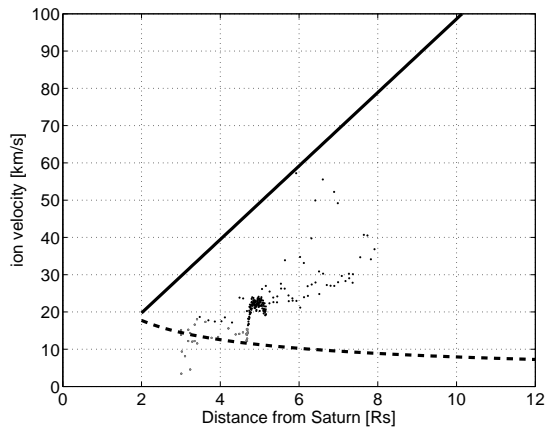


図 17 Rev015 におけるイオンスピード

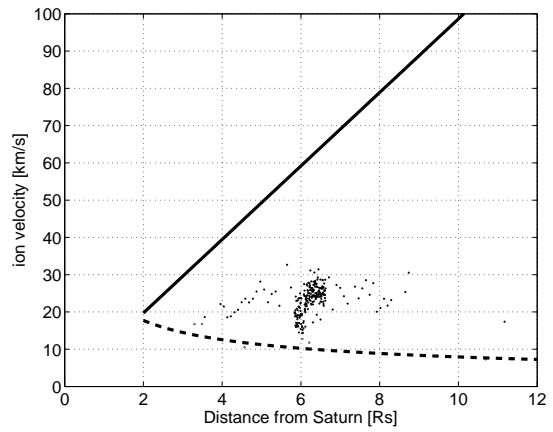


図 18 Rev016 におけるイオンスピード

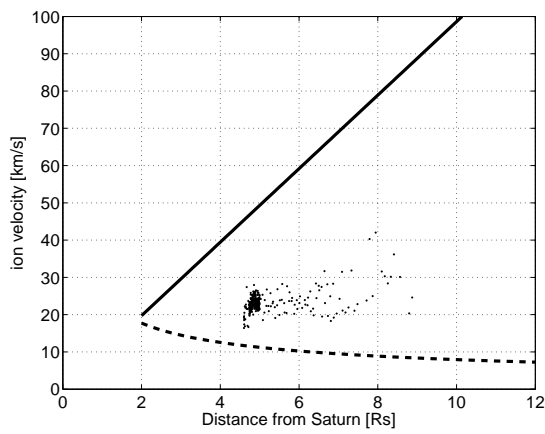


図 19 Rev017 におけるイオンスピード

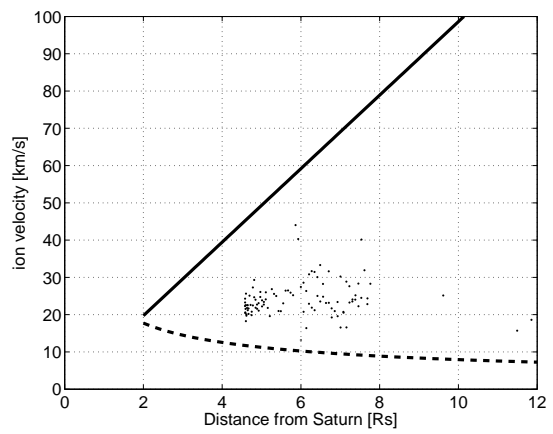


図 20 Rev018 におけるイオンスピード

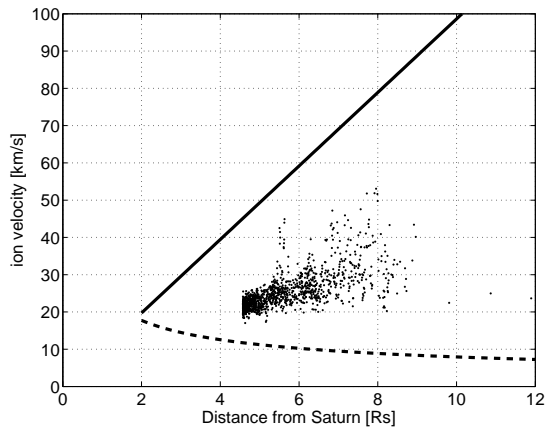


図 21 Rev019 におけるイオンスピード

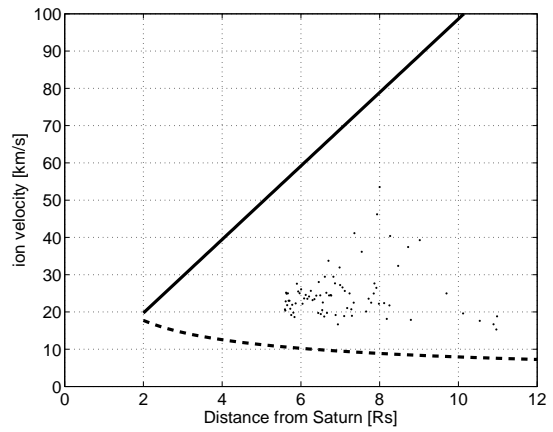


図 22 Rev020 におけるイオンスピード

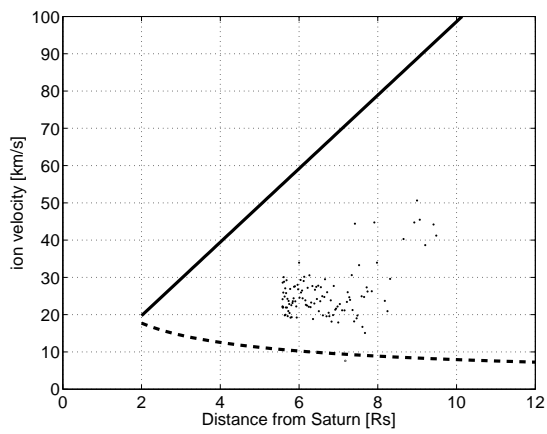


図 23 Rev021 におけるイオンスピード

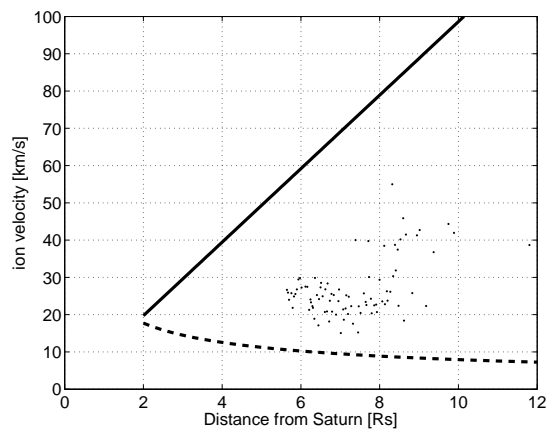


図 24 Rev022 におけるイオンスピード

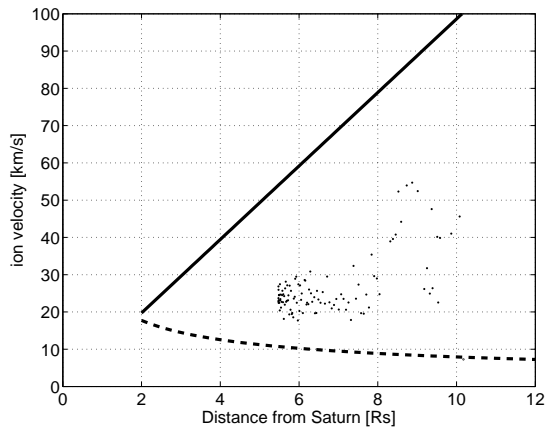


図 25 Rev023 におけるイオンスピード

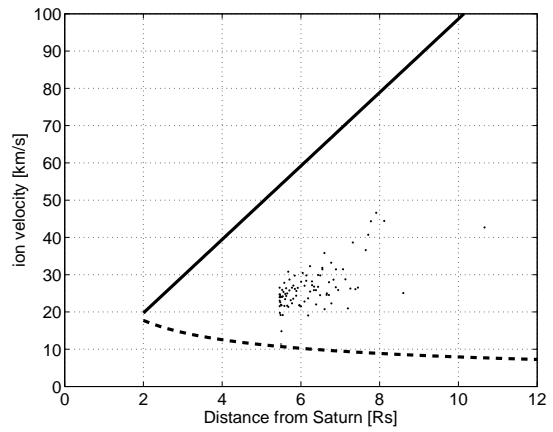


図 26 Rev024 におけるイオンスピード

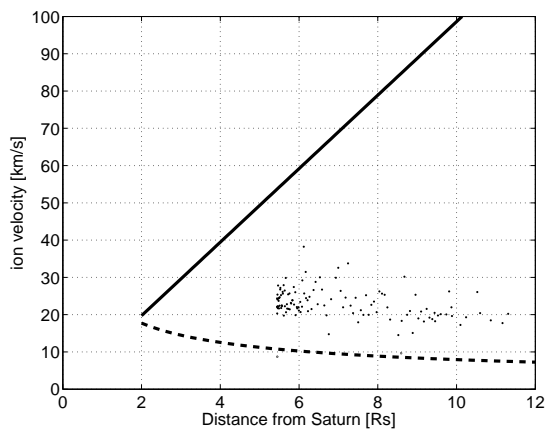


図 27 Rev025 におけるイオンスピード

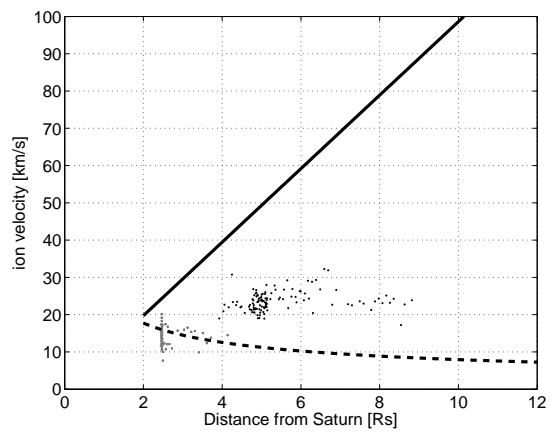


図 28 Rev047 におけるイオンスピード

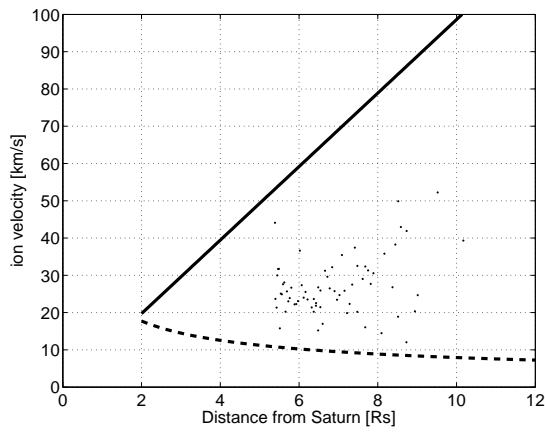


図 29 Rev048 におけるイオンスピード

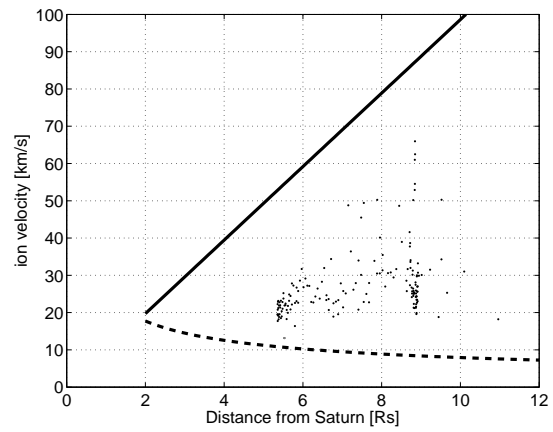


図 30 Rev049 におけるイオンスピード

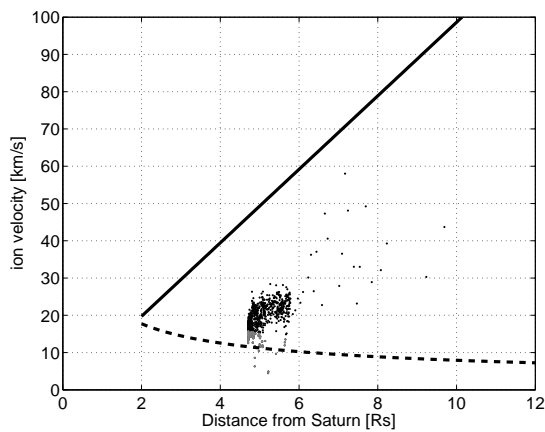


図 31 Rev050 におけるイオンスピード

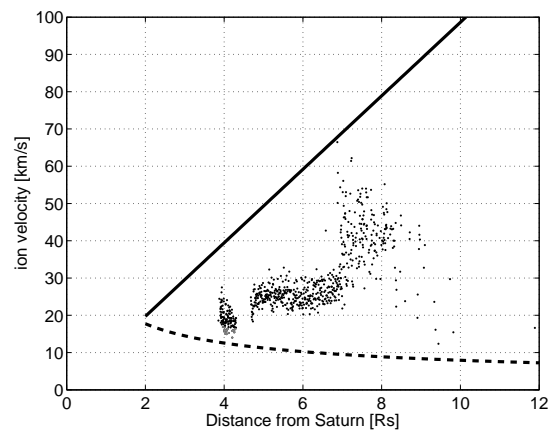


図 32 Rev051 におけるイオンスピード

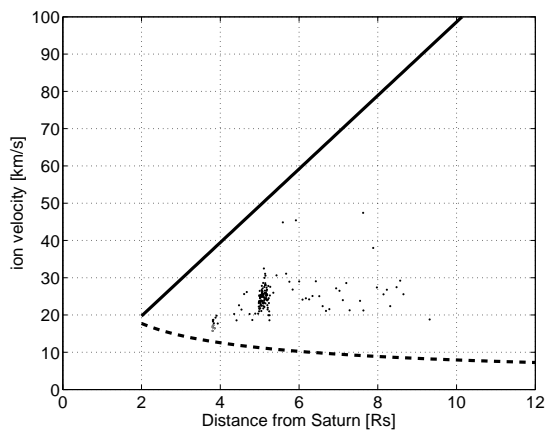


図 33 Rev052 におけるイオンスピード

3.2.1.2 統計的解析

LP は 3.2.1.1 節で挙げた通り、十分長い期間、全 MLT にわたるデータをカバーしているため、統計的な解析を行うのに十分なデータを取得している。そのため本研究ではイオンスピードの統計的な解析も併せて行った。図 34 は土星からの距離とイオンスピードの関係の統計的解析結果である。実線は共回転速度、波線はケプラー速度、黒点は観測点を表している。解析結果は土星からの距離に比例したイオンスピードのトレンドが得られた。イオンスピードは $7 R_S$ より内側では土星から離れるにつれてイオンスピードが増加している。しかしながらそのスピードは共回転速度よりも非常に遅く、約 50% であった。Wahlund *et al.* [2009] は、E リング中の荷電ダストがイオンスピードを遅らせていると提案した。一方で、 $7 R_S$ より外側ではイオンスピードは散乱し、増加し始めている。 $7 R_S$ 周辺ではダストポテンシャルが負から正へと変化する領域である [Kempf *et al.*, 2006]。そのため、ダストポテンシャルから逃れられたイオンが加速し、速度が増加する。

図 34 において、ケプラー速度よりも遅いスピードを持つイオンも観測されている。これはイオンが共回転方向だけでなく磁力線方向の速度も持っている可能性を表している。磁力線方向に動いているイオンが観測されるために、ケプラー速度より遅いスピードを持つイオンが観測されている [Morooka *et al.*, 2010]。図 34 の灰色の点は観測されたイオンスピードが Cassini の速度よりも遅いデータを表している。これらのデータは共回転運動しないイオン速度に主に影響している。

図 35 は Cassini の速度を考慮したイオンスピードの観測結果である。これはイオン速度は全て経度方向と仮定して、

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_{obs} + \mathbf{v}_{sc} \quad (3.7)$$

から求めた。ここで、 \mathbf{v}_i は求めるイオン速度、 \mathbf{v}_{obs} は観測値、 \mathbf{v}_{sc} は Cassini の速度である。横軸、縦軸、線種、点は図 34 と同じである。結果はイオン速度は共回転速度よりも遅くなった。全体的に速度が少し増加している。また、土星からの距離に比例してイオン速度も増加する傾向も見られる。しかし、Cassini の速度を考慮する前ほどはっきりとした傾向は見られなくなった。一方で $7 R_S$ より外側で見られる散乱は図 35 でも見られる。また、 $4 R_S$ より内側ではイオンはほぼ共回転速度を示した。 $3 R_S$ 程度では共回転速度を

超える観測点も存在するがこれに関してはもう少しきっちり解析する必要がある。

本研究で観測されたイオンスピードは CAPS による観測を行った *Wilson et al.* [2008] や *Thomsen et al.* [2010] の結果よりも遅いものだった。Wilson の結果は $5 R_S$ から $10 R_S$ で共回転速度の約 80% であった。Thomsen の結果は共回転速度の 50 から 80% 程度であった。一方で本研究では Wilson の結果の 50–60%, Thomsen の結果の 15–20% 程度遅いイオンスピードを得た。これは、LP と CAPS では観測できるエネルギーレンジが違っており、LP は数 eV 程度、CAPS は数百 eV の粒子を観測できることに起因していると考えられる。

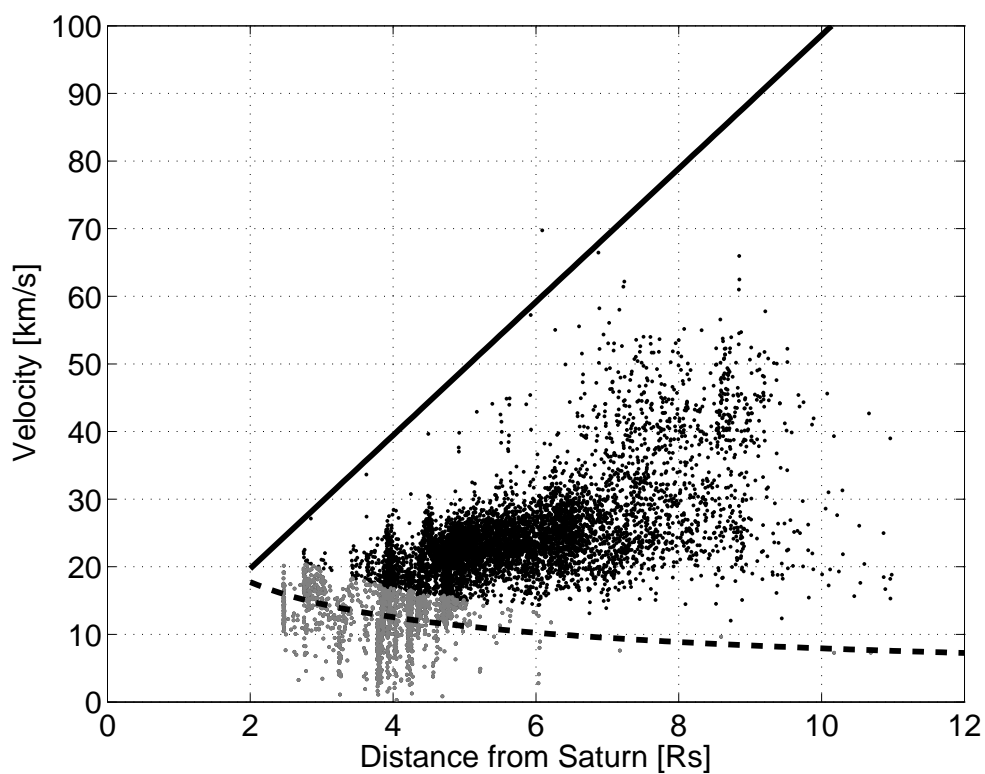


図 34 LP によるイオン速度観測

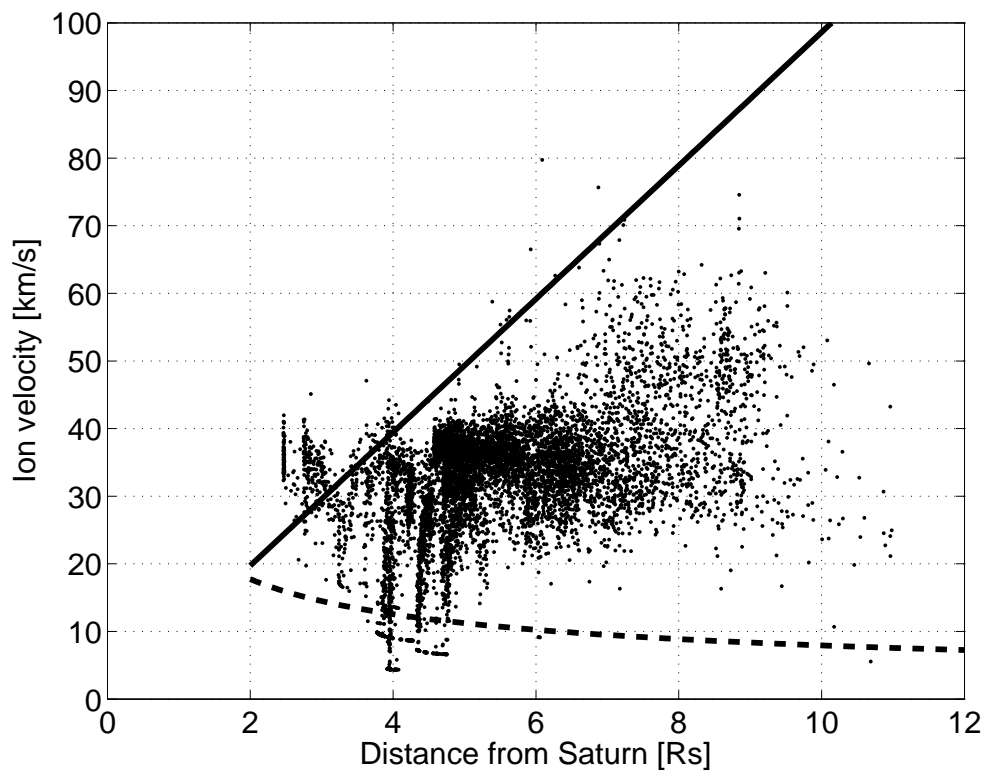


図 35 Cassini の速度を考慮したイオン速度

3.2.2 イオン速度の経度依存性

次に本研究では、イオン速度の経度依存性について解析を行った。土星の自転周期は土星から放たれる電波 (SKR, Saturn kilometric radiation) の回転周期から決められている。Voyager 搭載の Planetary Radio Astronomy Experiment によって観測された土星の自転周期は 10 時間 39 分 24 ± 7 秒である [Desch and Kaiser, 1981]。土星の経度系 (SLS) は固定された SKR の周期に基づいて決められている。しかし実際は、SKR の周期が変動しており、SLS 自体にずれが生じている。そのずれを修正したのが Kurth et al. [2007, 2008] である。本研究で用いた SKR 経度は Kurth et al. [2007] に基づいている。

Gurnett et al. [2007] では Enceladus 周辺の $3-5 R_S$ で電子密度が SKR 経度に依存していることを明らかにした。経度 320° 付近で電子密度の最大値、経度 150° 付近で最小値となった。また、土星は自転軸と磁気軸のずれが 1° 未満と非常に小さい。しかしこのずれが土星内部磁気圏のプラズマダイナミクスにおいて非常に重要な役割を果たしていると考えられている [Wahlund et al., 2010]。土星内部磁気圏内のプラズマディスクは磁気赤道面に沿う形で存在している。一方ダストが多く含まれる E リングは地理赤道面上に存在している。自転軸と磁気軸にずれが存在しているがためにプラズマディスクと E リングが重なる領域と重ならない領域が存在することになる。つまり、内部磁気圏内のプラズマダイナミクスを考える上では経度方向の依存性を考えることが非常に重要なのである。

3.2.2.1 パス毎の解析

今回は全経度に渡ってデータが取得できているパスを選んでデータ解析を行った。使用したパスは、Rev003, 004, 005, 015, 017, 018, 019, 021, 023, 024, 025, 048, 049, 050, 051 の計 15 パス分である。図 36 から 図 50 はイオンスピードと経度との関係を示した図である。横軸が経度、縦軸がイオンスピード、黒点が観測点を表している。観測点の少ないパスでは、特徴的な傾向は見られなかった。一方で観測点の比較的多い Rev019 (図 42), 051 (図 50) では以下のような傾向が見られた。経度 0° ではイオンスピードが遅くなり、 $\pm 180^\circ$ 付近で増加する傾向が見られた。しかし、比較的観測点の多い Rev50 (図 49) では

上で述べたような傾向は見られなかった。

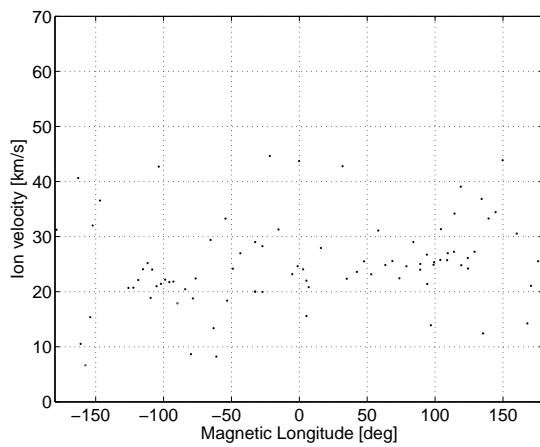


図 36 Rev003 における SKR 経度とイオン速度との関係

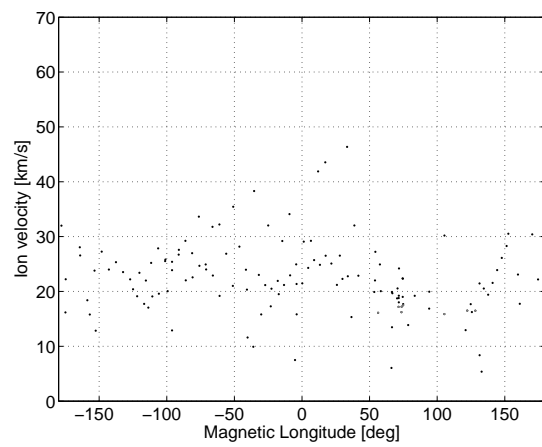


図 37 Rev004 における SKR 経度とイオン速度との関係

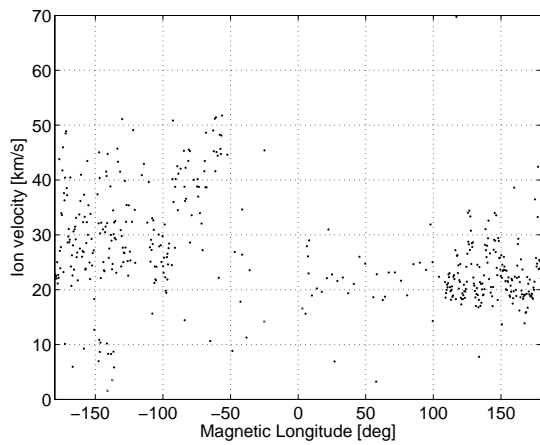


図 38 Rev005 における SKR 経度とイオン速度との関係

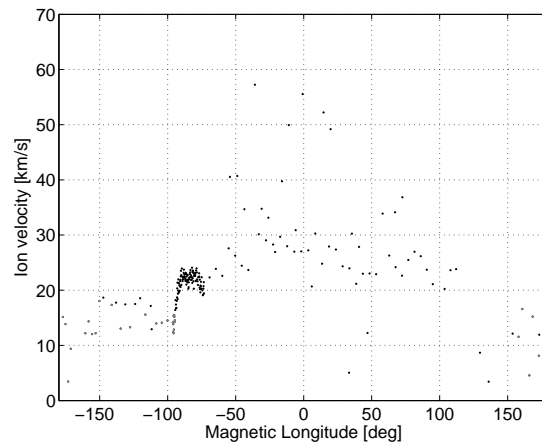


図 39 Rev015 における SKR 経度とイオン速度との関係

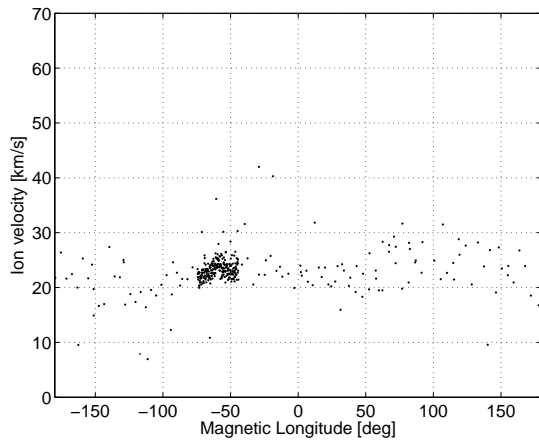


図 40 Rev017 における SKR 経度とイオン速度との関係

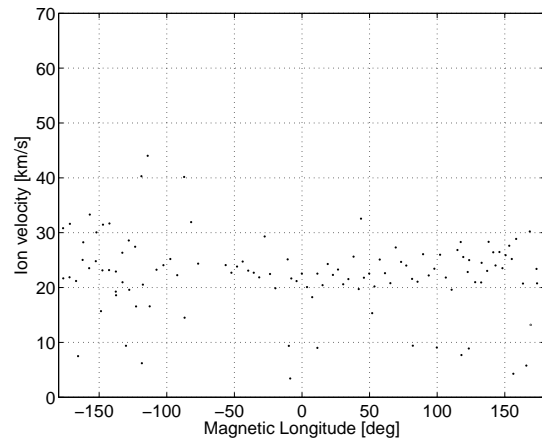


図 41 Rev018 における SKR 経度とイオン速度の関係

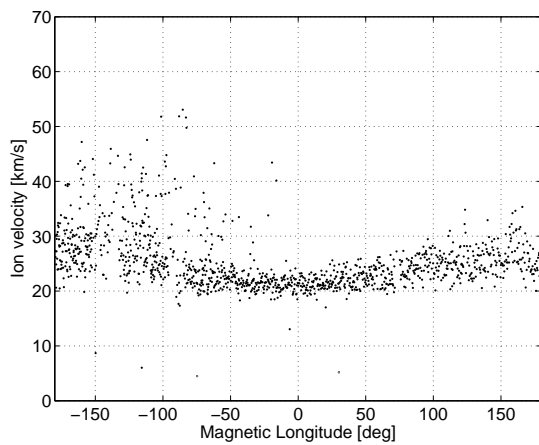


図 42 Rev019 における SKR 経度とイオン速度との関係

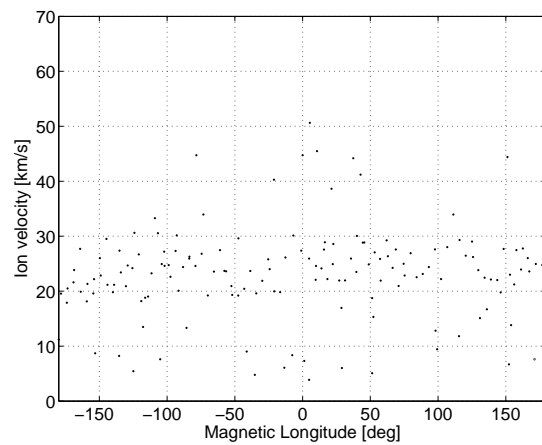


図 43 Rev021 における SKR 経度とイオン速度の関係

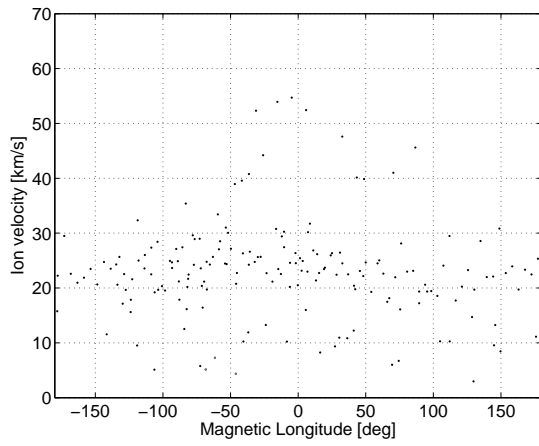


図 44 Rev023 における SKR 経度とイオン速度との関係

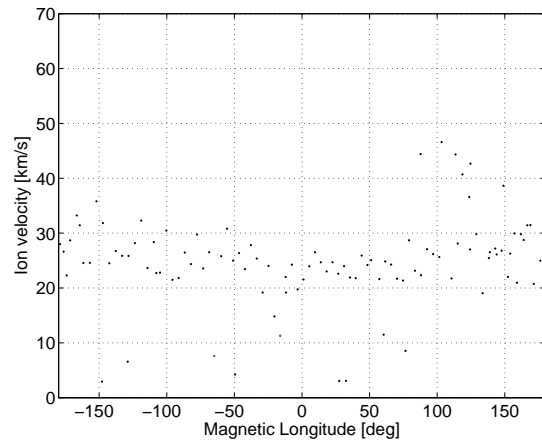


図 45 Rev024 における SKR 経度とイオン速度との関係

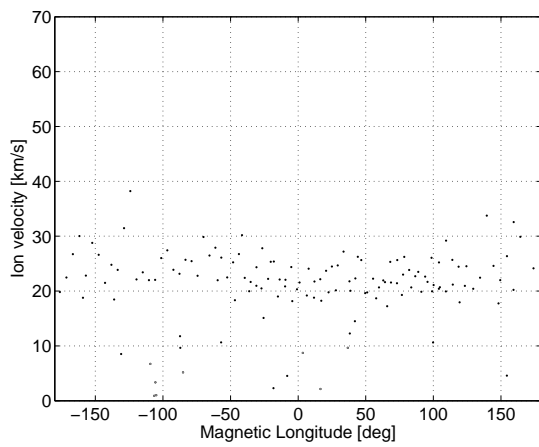


図 46 Rev025 における SKR 経度とイオン速度との関係

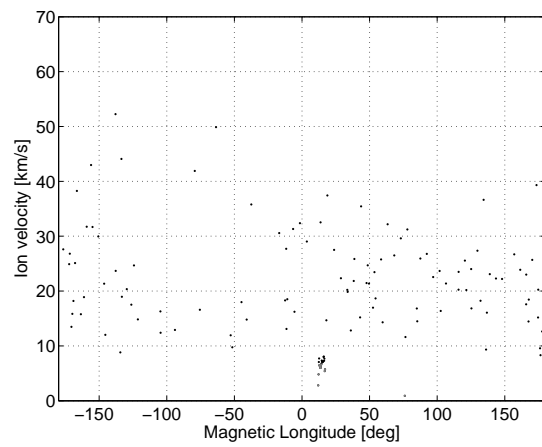


図 47 Rev048 における SKR 経度とイオン速度との関係

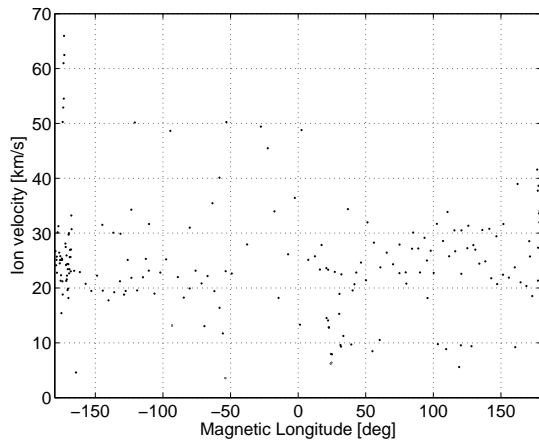


図 48 Rev049 における SKR 経度とイオン速度との関係

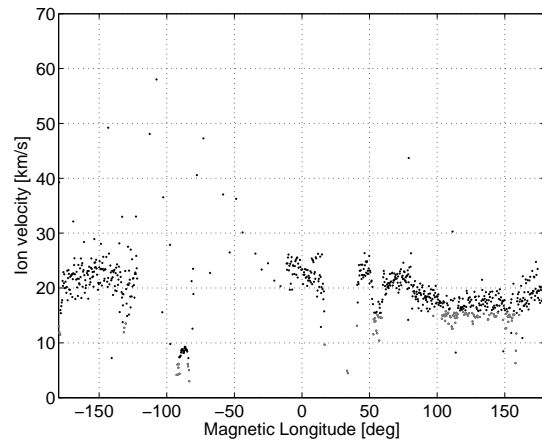


図 49 Rev050 における SKR 経度とイオン速度との関係

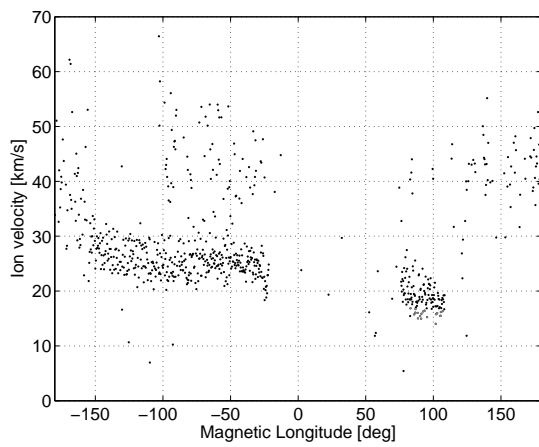


図 50 Rev051 における SKR 経度とイオン速度との関係

3.2.2.2 統計的解析

本研究では更にイオンスピードの経度依存性における統計的な解析も行った。図 51 は経度とイオンスピードの統計的解析の結果である。横軸は経度、縦軸はイオンスピード、黒点は観測点である。灰色点は Cassini の速度よりも遅いデータを示している。傾向としては Rev019 や 051 で見られた 0° 付近でイオンスピードが遅くなり、 $\pm 180^\circ$ に向かってスピードが増加する結果となった。また、 30 km/s 以上では非常に観測点が散乱している。これは、3.2.1.2 節で述べたように $7 R_S$ 付近でダストポテンシャルが負から正へと変化するの、その結果が反映されている。そこで、 $7 R_S$ 以下のみのデータを用いて解析を行った結果が図 52 である。 30 km/s 以上の散乱していた点がかかなり少なくなった。一方で $\pm 180^\circ$ 付近では依然スピードは大きい傾向を示している。

以上、本解析から結論付けられることは経度 0° 付近ではイオンスピードは遅く、 $\pm 180^\circ$ 付近に向かって徐々に速度が増加していくということである。このことから考えられることは、 0° 付近ではイオンがダストにトラップされている、つまりプラズマディスクと E リングが重なっている領域であり、 $\pm 180^\circ$ に向かってプラズマディスクと E リングが重なっている状態から徐々にあ互いが離れていくということである。

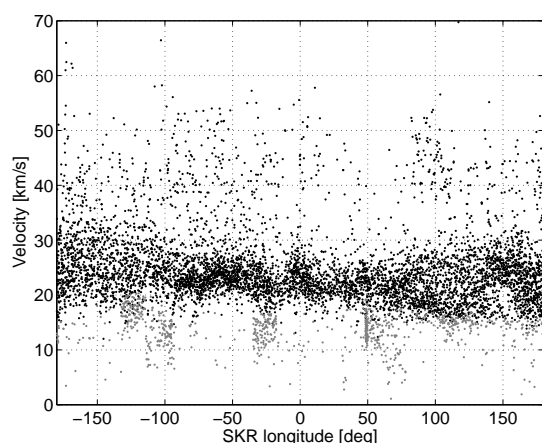
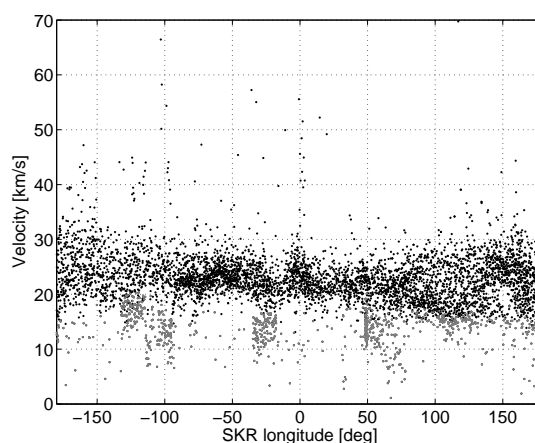


図 51 SKR 経度とイオンスピードとの関係

図 52 $7 R_S$ 以下における SKR 経度とイオンスピードとの関係

3.2.3 ローカルタイムとイオン速度との関係

3.2.3.1 パス毎の解析

さらに本研究では、イオンスピードのローカルタイム (LT) 依存性についての解析を行った。まずは各パスにおける LT とイオンスピードとの関係性について解析した。使用したパスは 3.2.1.1 節と同様の 21 パス (Rev003, 004, 005, 006, 015, 016, 017, 018, 019, 020, 021, 022, 023, 024, 025, 047, 048, 049, 050, 051, 052) である。図 53 から 図 73 は各パスにおける LT とイオンスピードの関係性を示している。横軸は x (太陽) 方向, 縦軸は y (夕暮れ) 方向である。カラーマップは Cassini の軌道上におけるイオンのスピードを表している。青はスピードの小さい点で, 赤に向かってスピードが大きくなっている。結果は, 土星からの距離が近い領域ではスピードは小さく, 距離が離れるにつれてスピードが徐々に上がることを示した。これは 3.2.1 節の土星からの距離が大きくなるにつれてスピードが大きくなるという結果に一致している。しかしパス毎の解析では, イオンスピードの LT 依存しているかどうかを判断することはできなかった。そこで, これまでと同様に統計的な解析を行った。

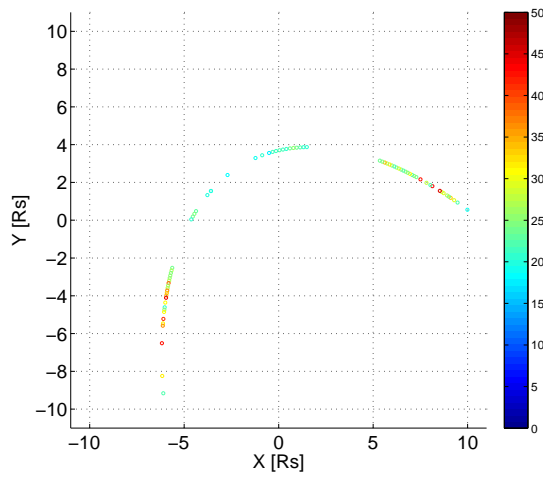


図 53 Rev003 における LT とイオンスピードとの関係

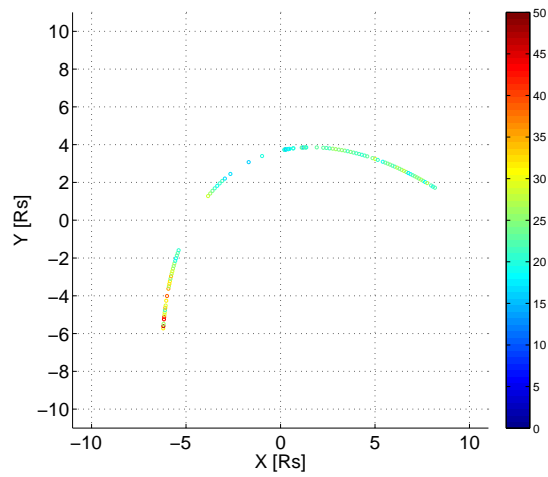


図 54 Rev004 における LT とイオンスピードとの関係

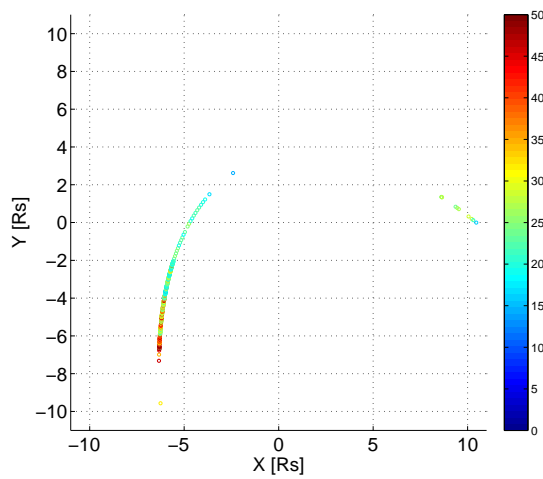


図 55 Rev005 における LT とイオンスピードとの関係

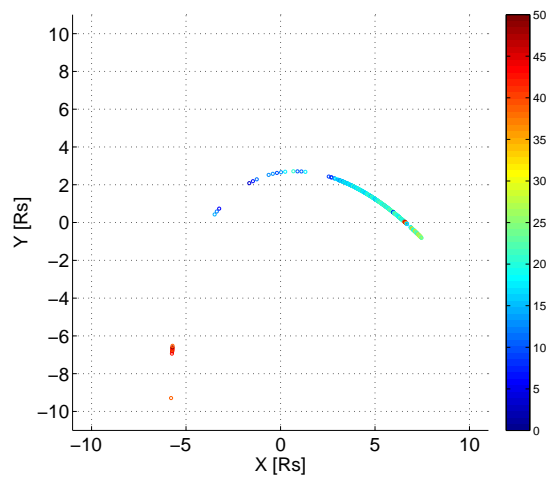


図 56 Rev006 における LT とイオンスピードとの関係

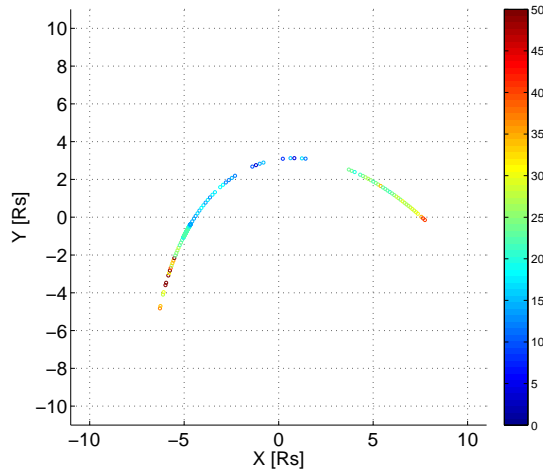


図 57 Rev015 における LT とイオンスピードとの関係

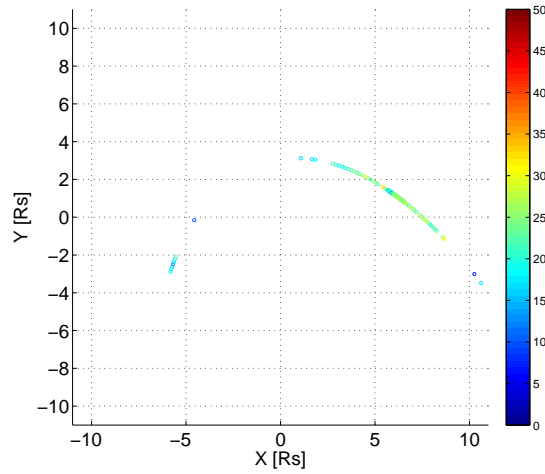


図 58 Rev016 における LT とイオンスピードとの関係

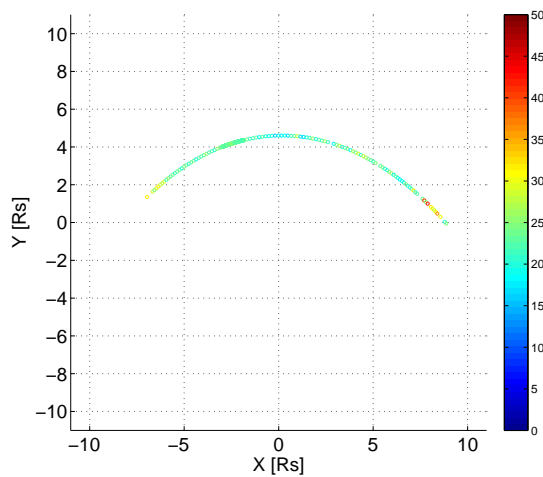


図 59 Rev017 における LT とイオンスピードとの関係

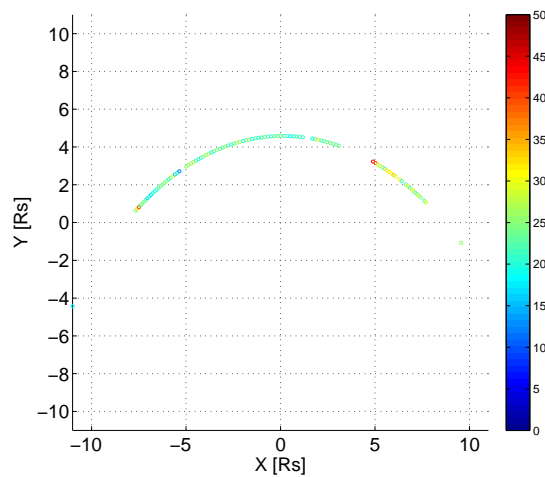


図 60 Rev018 における LT とイオンスピードとの関係

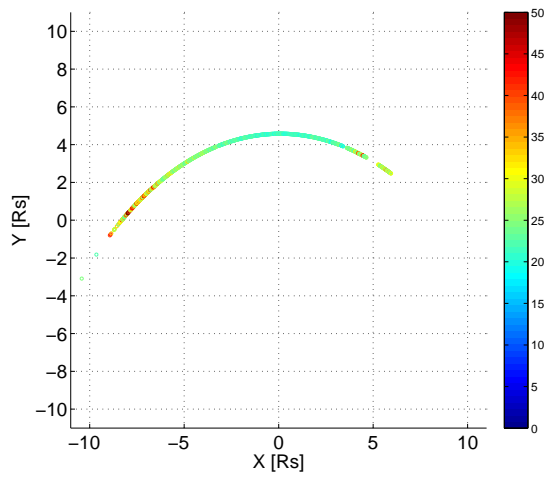


図 61 Rev019 における LT とイオンスピードとの関係

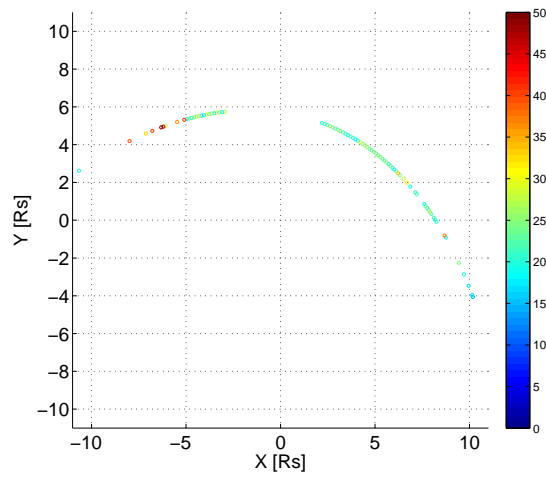


図 62 Rev020 における LT とイオンスピードとの関係

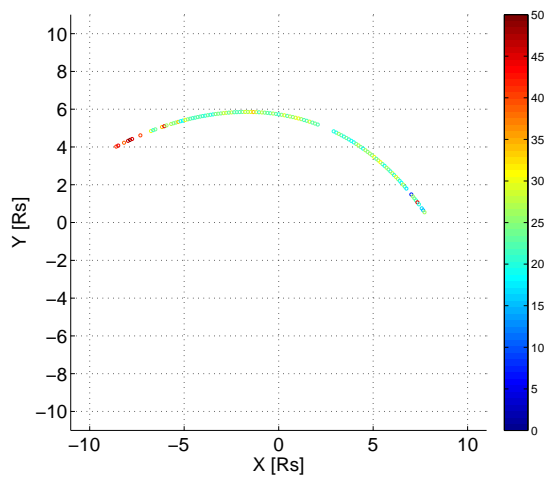


図 63 Rev021 における LT とイオンスピードとの関係

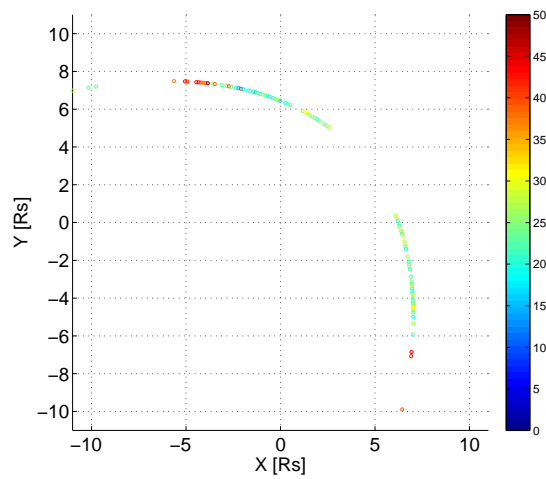


図 64 Rev022 における LT とイオンスピードとの関係

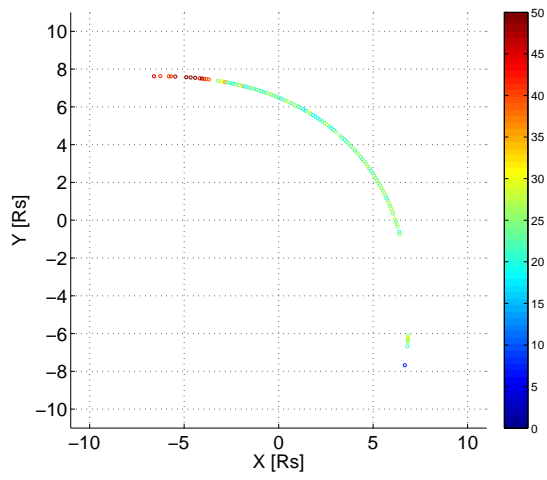


図 65 Rev023 における LT とイオンスピードとの関係

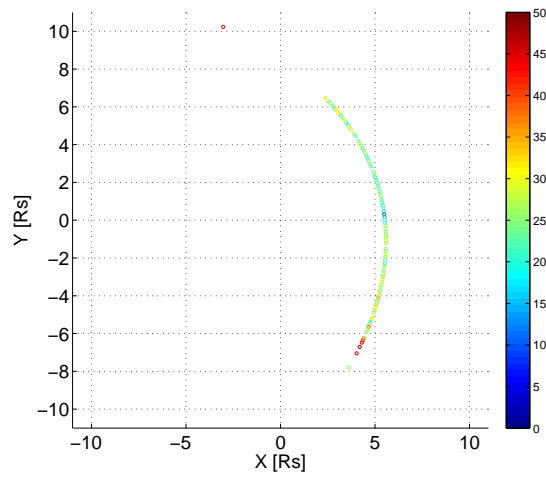


図 66 Rev024 における LT とイオンスピードとの関係

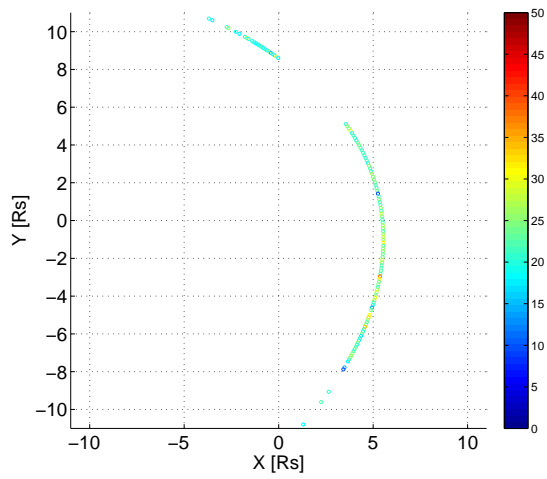


図 67 Rev025 における LT とイオンスピードとの関係

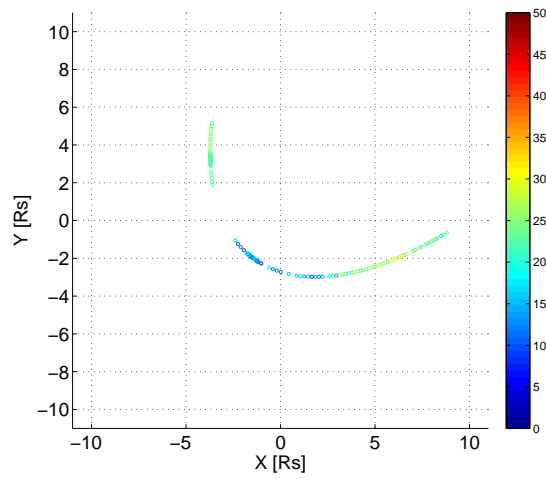


図 68 Rev047 における LT とイオンスピードとの関係

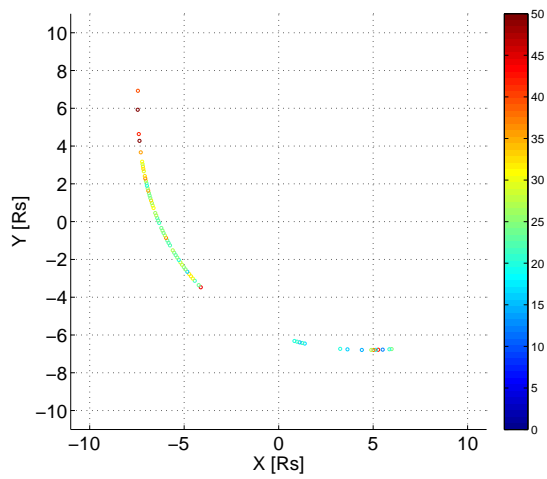


図 69 Rev048 における LT とイオンスピードとの関係

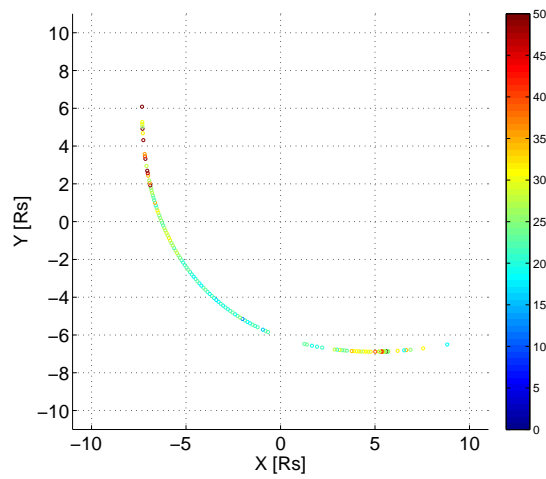


図 70 Rev049 における LT とイオンスピードとの関係

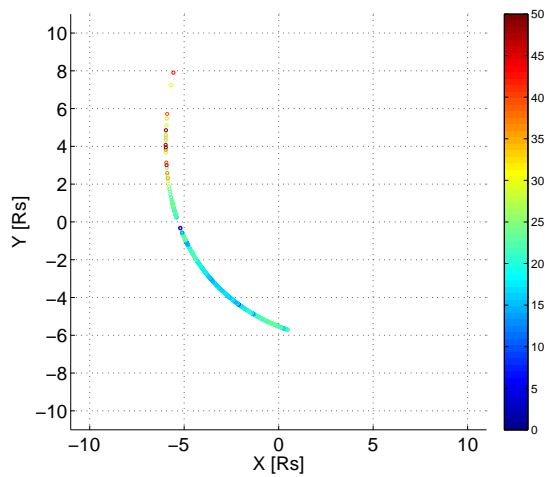


図 71 Rev050 における LT とイオンスピードとの関係

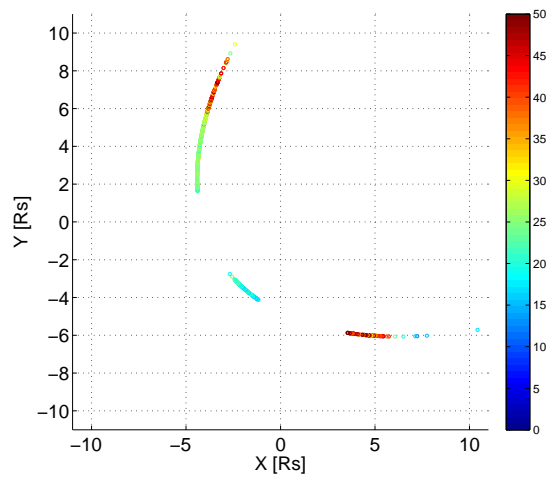


図 72 Rev051 における LT とイオンスピードとの関係

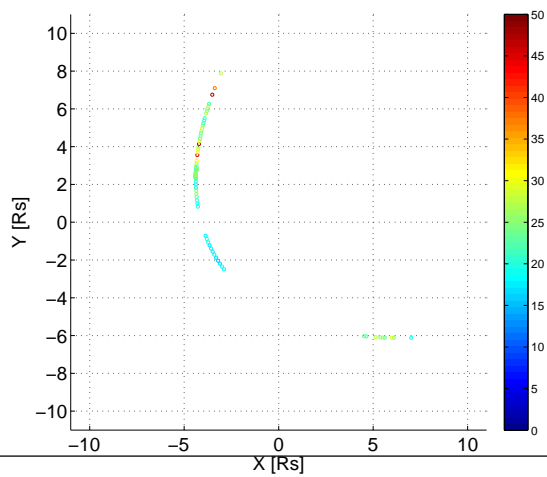


図 73 Rev052 における LT とイオンスピードとの関係

3.2.3.2 統計的解析

イオンスピードの LT 依存性を見るための統計的な解析を行った。図 74 は LT とイオンスピードとの関係の結果である。横軸は x (太陽) 方向, 縦軸は y (夕暮れ) 方向である。土星はちょうど中心に位置している。Cassini の軌道に沿って観測点がプロットされている。青から赤にかけてイオンスピードが大きくなっていく。3.2.3.1 節で述べたように土星からの距離が大きくなるにつれてスピードがどんどん大きくなっている。パス毎での解析ではあまり LT との関係について特徴的な現象は見られなかったが, 統計的に見ると昼夜での非対称が見られた。特に夜側の領域でスピードが大きくなっている。この領域は $7 R_S$ より外側でダストポテンシャルが負から正へと変化するので, スピードが増加していると考えられる。図 75 は $7 R_S$ より内側での LT とイオンスピードの関係, 図 76 は $7 R_S$ より外側での LT とイオンスピードの関係である。図 75 ではイオンスピードの LT 依存性は見られなかった。一方で図 76 では全体的にスピードが大きい中でも特に夜側のスピードが昼側に比べて多少大きくなっている。このことから昼側よりも夜側でのダストポテンシャルの変化が卓越している可能性がある。夜側でのダストポテンシャルの変化が大きいことをきちんと確かめるには今後更なるパスのデータ解析が必要であろう。本研究からは, イオンスピードの LT 依存性が存在している可能性を示唆できた。

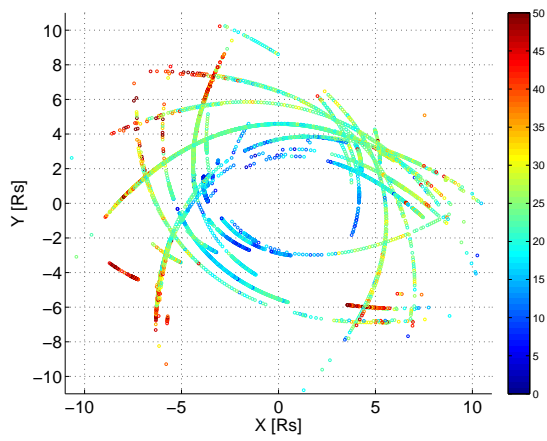


図 74 LT とイオン速度との関係

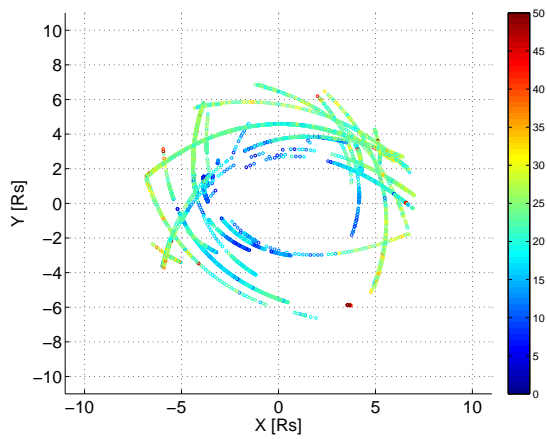


図 75 $7 R_S$ より内側での LT とイオン速度の関係

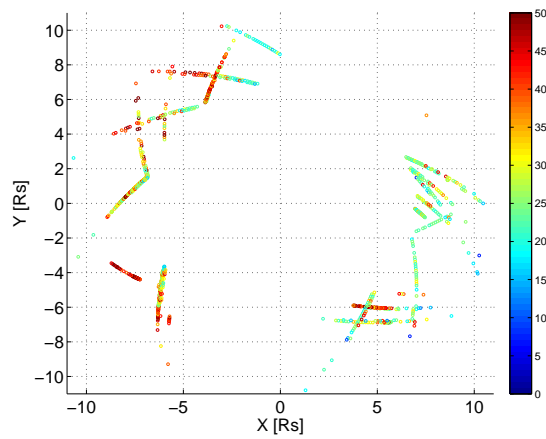


図 76 $7 R_S$ より外側での LT とイオン速度の関係

4 イオンモデリング

4.1 MHD 方程式

次に観測結果を説明するためにイオンモデリングを行った。モデルは、イオン、電子、ダストの3流体電磁流体力学方程式から構成される。土星内部磁気圏である $2 R_S$ から $10 R_S$ の赤道面上をプラズマとダストの衝突を考慮して1次元で方程式を解いた。方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} + (\mathbf{v}_i \cdot \nabla) \mathbf{v}_i = \frac{e}{m_i} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\rho_i} \nabla p_i + \mathbf{g} + (\mathbf{P}_{id} + \mathbf{P}_{ie} + \mathbf{P}_{in}) + \mathbf{M}_i \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_d}{\partial t} + (\mathbf{v}_d \cdot \nabla) \mathbf{v}_d = -\frac{q_d}{m_d} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_d \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\rho_d} \nabla p_d + \mathbf{g} + (\mathbf{P}_{di} + \mathbf{P}_{de} + \mathbf{P}_{dn}) \quad (4.9)$$

$$0 = -\frac{e}{m_e} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_d \times \mathbf{B}) + (\mathbf{P}_{ei} + \mathbf{P}_{ed} + \mathbf{P}_{en}) \quad (4.10)$$

ここで、添え字 i, d, e はそれぞれイオン、ダスト、電子を表す。 \mathbf{v}_k は速度、 m_k は質量、 q_d はダストの電荷量、 \mathbf{E} は電場ベクトル、 \mathbf{B} は土星磁場ベクトル、 ρ_k は質量密度、 \mathbf{P}_{kl} は運動量利得ベクトル、 \mathbf{M} はマスローディングベクトルを表す。電場は共回転電場を与えているので、

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v}_{cor} \times \mathbf{B} \quad (4.11)$$

となる。 \mathbf{v}_{cor} は共回転速度である。また運動量利得については、衝突周波数と速度から求めることができ、

$$\mathbf{P}_{kl} = -\nu_{kl} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_l) \quad (4.12)$$

と記述できる。マスローディングの項は、

$$\mathbf{M}_i = -\frac{S_i}{n_i} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_n), \quad (4.13)$$

と書け、 S_i はイオン生成率である。

4.2 衝突周波数

本計算では、衝突周波数を以下のように与えた.

$$\nu_{ei} = \left(34 + 4.18 \ln \frac{T_e^3}{n_e \times 10^{-6}} \right) n_e \times 10^{-6} T_e^{-3/2} \quad (4.14)$$

$$\nu_{ed} = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3} n_d v_{the} r_d^2 \left(\frac{e\phi_s}{k_B T_e} \right)^2 2 \ln \frac{2k_B T_e}{e\phi_s r_d} \lambda_D \quad (4.15)$$

$$\nu_{in} = (2.6 \times 10^{-9}) (n_n + n_i) A^{-1/2} \times 10^{-6} \quad (4.16)$$

$$\nu_{en} = (5.4 \times 10^{-10}) n_n T_e^{1/2} \times 10^{-6} \quad (4.17)$$

$$\nu_{dn} = \delta \frac{8\sqrt{2\pi}}{3} \frac{m_n}{m_d} r_d^2 n_n v_{thn} \quad (4.18)$$

$$\nu_{kl} = \frac{m_l n_l}{m_k n_k} \nu_{lk} \quad (4.19)$$

本論文では、 ν_{ed}, ν_{dn} は *Khrapak et al.* [2004] を参照した. ここで、 r_d はダスト半径、 ϕ_s はダストポテンシャル、 v_{thi} はイオン熱速度、 v_{the} は電子の熱速度、 v_{thn} は中性ガスの熱速度、 n_n は中性ガス密度、 A は中性ガスとイオンの平均分子量 ($A = 18$) である. また、 λ_D はデバイ長を用いて表され、

$$\begin{aligned} \lambda_D &= \frac{\lambda_{Di}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_{Di}}{\lambda_{De}} \right)^2}} \\ &= \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_B T_i}{n_i e^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{n_e T_i}{n_i T_e}}} \end{aligned} \quad (4.20)$$

となる. ここで、 $\lambda_{Di} = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_i / n_i e^2}$ はイオンのデバイ長、 $\lambda_{De} = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_e / n_e e^2}$ は電子のデバイ長である. 数値ファクター δ は粒子表面の中性ガス散乱の効果に依存する. 今は完全な吸収、放射を考えているため、 $\delta = 1$ を与えた.

本研究ではパラメータとして、電子密度、ダスト密度、ダスト半径、ダストの電荷量、ダストポテンシャル、温度を与えた.

4.3 パラメータスタディ

4.3.1 衝突周波数

まずイオン-ダスト衝突周波数がイオン速度にどのように影響するかを見るために、イオン-ダスト衝突周波数をフリーパラメータとして与えた。衝突周波数がイオンサイクロトロン周波数よりも大きくなるとイオンはサイクロトロン運動できなくなり、磁場の凍結が破られイオン速度が遅くなる。そこで衝突周波数はサイクロトロン周波数と同じ L^{-3} ($L = r/R_S$) に比例する形で与えた。今回は $50L^{-3}$, $100L^{-3}$, $150L^{-3}$, $200L^{-3}$, $250L^{-3}$ の 5 通りで計算を行った (表 5)。 $\omega_i \sim 100L^{-3}$ である (ω_i はイオンサイクロトロン周波数)。ダスト密度は 10^6 m^{-3} , ダストポテンシャルは 6 V, 温度は 0.1 eV を用いた。ダスト密度, ポテンシャルはそれぞれ *Yaroshenko et al.* [2009], *Wahlund et al.* [2009] に合う値を用いている。温度は *Wahlund et al.* [2009], *Shafiq et al.* [2011] では 1 eV 程度であったが, 新しく電離したイオン温度は中性ガスの温度に近い値を持つと考え, 1桁小さい 0.1 eV を用いた。また温度はイオン, ダスト, 電子, 中性ガス全てで同じ温度を用いた。図 77, 図 79, 図 81, 図 83, 図 85 は各衝突周波数でのイオンとダストの速度を表している。電子密度は *Persoon et al.* [2009] を参照した。

$$n_e = \left[5.0 \left(\frac{r}{R_S} \right)^{-4.3} + 0.16 \left(\frac{r}{R_S} \right)^{-3.2} \right] \times 10^{10} \quad [\text{m}^{-3}] \quad (4.21)$$

また, チャージニュートラルリティからイオン密度は以下のようにになる。

$$n_i = n_e + \frac{q_d}{e} n_d \quad (4.22)$$

ダスト半径は $r_d = 10^{-7} \text{ m}$, ダストの電荷量は $q_d = 4\pi\epsilon_0 r_d \phi_s \text{ C}$, ダストポテンシャルは $\phi_s = 6 \text{ V}$ とした。赤線は共回転速度, 緑線はケプラー速度, 水破線はイオンの半径方向速度, 水線はイオンの経度方向速度, 青線はイオン速度の絶対値, 橙破線はダストの半径方向速度, 橙線はダストの経度方向速度である。また, 図 78, 図 80, 図 82, 図 84, 図 86 はそれぞれの時のイオンサイクロトロン周波数とイオン-ダスト衝突周波数の関係を示している。赤線がイオンサイクロトロン周波数, 青線がイオン-ダスト衝突周波数である。

まず $\nu_{id} = 50L^{-3}$ についてである。イオン速度は共回転速度の 90% 程度で (図 77 の青線), ほとんど共回転速度に近い運動をしている。4 R_S で 37 km/s, 7 R_S で 63 km/s 程

表 5 イオン-ダスト衝突周波数

衝突周波数 [1/s]
$50L^{-3}$
$100L^{-3}$
$150L^{-3}$
$200L^{-3}$
$250L^{-3}$

度である。一方でダストはほとんどケプラー運動している (図 77 の橙線)。イオン-ダスト衝突周波数はイオンサイクロトロン周波数の約 50% で、 $4 R_S$ で約 0.70, $7 R_S$ で約 0.15 を示した (図 78 の青線)。このことから、衝突周波数がサイクロトロン周波数に完全に一致しなくてもイオンはダストの影響をわずかながら受けている。一方でダストはほとんどイオンの影響を受けていない。

次は $\nu_{id} = 100L^{-3}$ の時である。イオン速度は共回転の約 75% の速度を持っている (図 79 の青線)。 $4 R_S$ で約 30 km/s, $7 R_S$ で 52 km/s 程度である。この時のイオン-ダスト衝突周波数はイオンサイクロトロン周波数とほぼ同じ値の $4 R_S$ で 1.50, $7 R_S$ で 0.30 である (図 80 の青線)。イオンはダストの影響が強くなったことを示した。一方でダスト速度はケプラー運動しており (図 79 の橙線)、ダストはイオンのからの影響はほとんど受けていないことがわかる。

次は $\nu_{id} = 150L^{-3}$ の時である。イオン速度は共回転速度の 55 から 60% で (図 81 の青線), $4 R_S$ で 27 km/s, $7 R_S$ で 42 km/s を示した。イオン-ダスト衝突周波数はイオンサイクロトロン周波数の約 1.3 倍で (図 82 の青線), $4 R_S$ で 2.30, $7 R_S$ で 0.45 であり、更に衝突周波数が大きくなった。よってイオンのダストからの影響が更に大きくなり、イオン速度が共回転速度の約 55% となった。一方でダストはほとんどケプラー運動している (図 81 の橙線)。

次は $\nu_{id} = 200L^{-3}$ の時である。イオン速度は共回転速度の 50 から 55% となった (図 83 の青線)。 $4 R_S$ で 23 km/s, $7 R_S$ で 35 km/s 程度を示した。この時のイオン-ダスト衝突周波数はイオンサイクロトロン周波数の約 2 倍で (図 84 の青線), $4 R_S$ で約 3.0, $7 R_S$

R_S で約 0.50 となった. イオン速度がかなり共回転速度から遅れ, LP によるイオン観測のイオンスピードに近い値を示した (図 34).

最後は $\nu_{id} = 250L^{-3}$ の時である. イオン速度は共回転速度の 45 から 50% 程度となり (図 85), $4 R_S$ で約 20 km/s, $7 R_S$ で約 30 km/s を示した. イオン-ダスト衝突周波数はイオンサイクロトロン周波数の約 2.2 倍で $4 R_S$ で 4.0, $7 R_S$ で 0.7 を示した (図 86 の青線). 計算されたイオン速度は LP による観測に非常によく一致している.

全てに共通していることはダストはほとんどケプラー運動しているということである. ダストはほとんどイオンには影響されずケプラー運動し続けるという結果が得られた. これは *Khrapak et al.* [2004] とも同様な結果を示している.

次節では, イオンとダストがクーロン衝突する場合を考え, 衝突周波数を与えることにする.

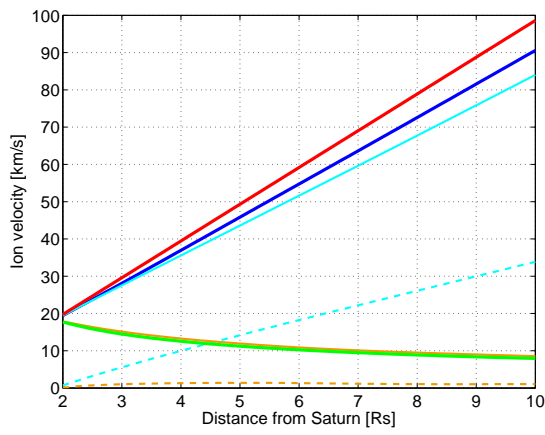


図 77 $\nu_{id} = 50L^{-3}$ の時のイオン速度とダスト速度

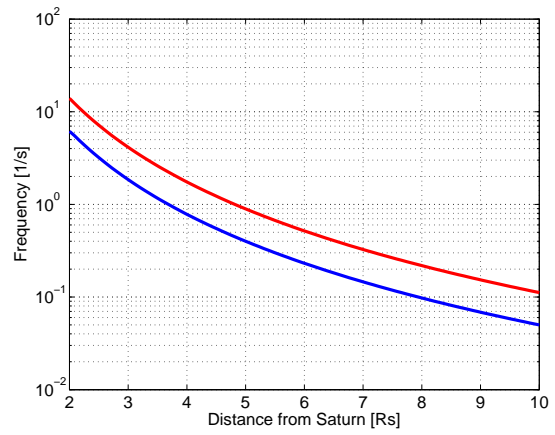


図 78 イオンサイクロトロン周波数とイオン-ダスト衝突周波数

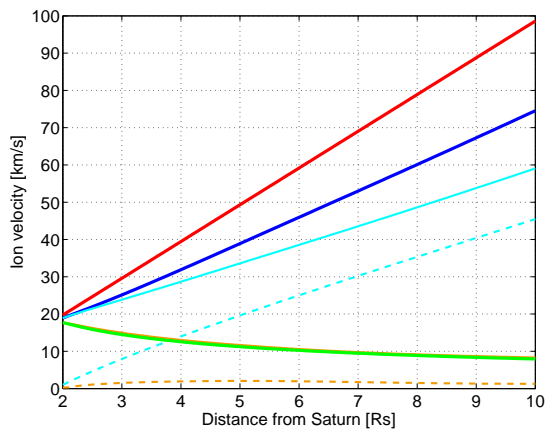


図 79 $\nu_{id} = 100L^{-3}$ の時のイオン速度とダスト速度

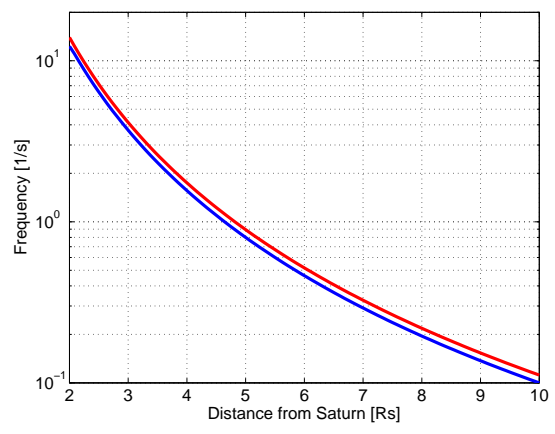


図 80 イオンサイクロトロン周波数とイオン-ダスト衝突周波数

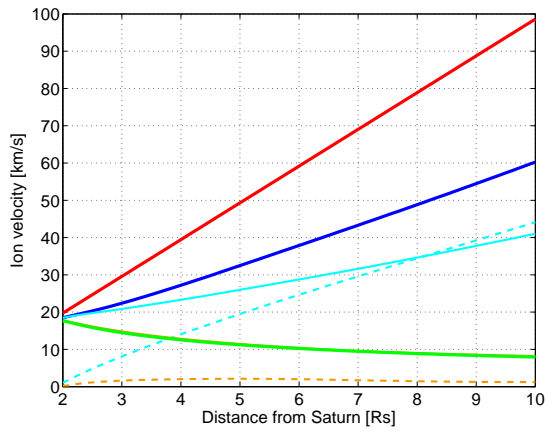


図 81 $\nu_{id} = 150L^{-3}$ の時のイオン速度とダスト速度

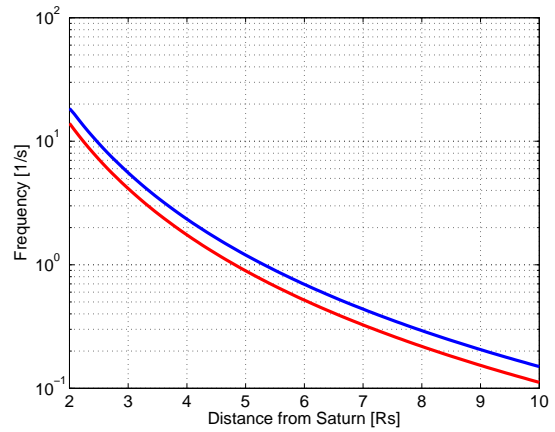


図 82 イオンサイクロロン周波数とイオン-ダスト衝突周波数

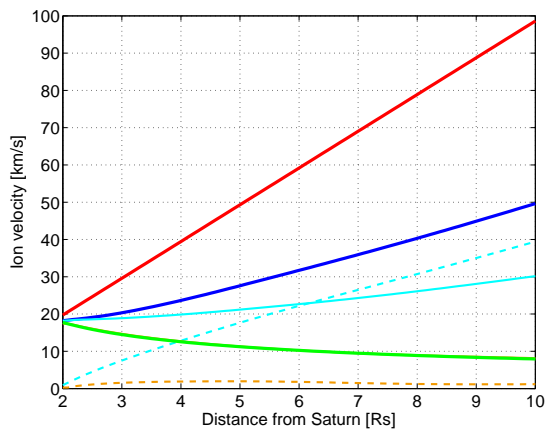


図 83 $\nu_{id} = 200L^{-3}$ の時のイオン速度とダスト速度

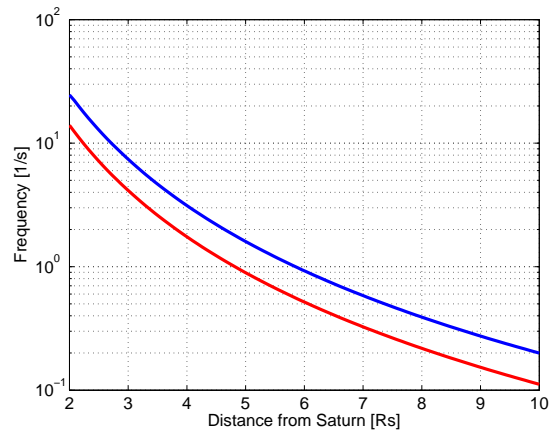


図 84 イオンサイクロロン周波数とイオン-ダスト衝突周波数

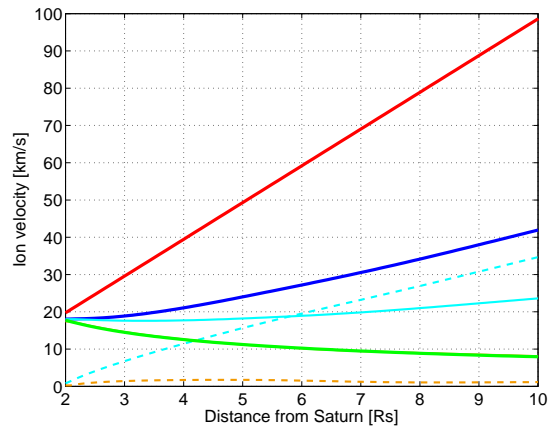


図 85 $\nu_{id} = 250L^{-3}$ の時のイオン速度とダスト速度

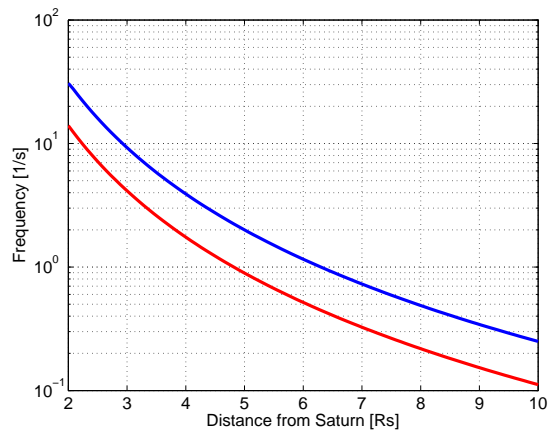


図 86 イオンサイクロロン周波数とイオン-ダスト衝突周波数

4.3.2 クーロン衝突

本研究では、イオンとダストがクーロン衝突をする場合を考えてイオン速度のモデリングを行った。イオンとダストのクーロン衝突による衝突周波数は、

$$\nu_{id} = 4\pi n_d \left(\frac{q_d e}{4\pi\epsilon_0 m_i (|v_i - v_d|^2 + v_{thi}^2)} \right)^2 \sqrt{|v_i - v_d|^2 + v_{thi}^2} + n_d \pi r_d^2 \sqrt{|v_i - v_d|^2 + v_{thi}^2} \quad (4.23)$$

と与えた。イオン密度 [m^{-3}] は

$$n_i = \begin{cases} 6.0 \times 10^7 & (R_S < 5) \\ \left[5.0 \left(\frac{r}{R_S} \right)^{-4.3} + 0.16 \left(\frac{r}{R_S} \right)^{-3.2} \right] \times 10^{10} & (R_S > 5) \end{cases} \quad (4.24)$$

と与えた。すると電子密度 [m^{-3}] は、

$$n_e = n_i - \frac{q_d}{e} n_d \quad (4.25)$$

となり、電子密度を 0 以上に保つためにダスト密度に制約を与えることができる。今回は 2 通りのダスト密度で計算を行った。ダスト密度はイオン密度の 10^{-3} 倍である、

$$n_d = \begin{cases} 6.0 \times 10^4 & (R_S < 5) \\ \left[5.0 \left(\frac{r}{R_S} \right)^{-4.3} + 0.16 \left(\frac{r}{R_S} \right)^{-3.2} \right] \times 10^7 & (R_S > 5) \end{cases} \quad (4.26)$$

と、領域内にイオンとダストのみが存在する場合、 $n_d = (e/q_d)n_i$ を仮定して計算を行った。ダストポテンシャルは 1 V、温度は 1 eV を用いた。温度はイオン、電子、ダスト、中性ガスで等温とした。また、ダスト半径は 100 nm を用いた。また速度の初期値として、イオンは中性ガスが太陽 UV などによって電離したと考え、ケプラー速度を与えた。

図 87 と 図 88 はその結果である。横軸が土星からの距離 [R_S]、縦軸が速度 [km/s] である。赤線は共回転速度、緑線はケプラー速度、水破線はイオンの半径方向速度、水線はイオンの経度方向速度、青線はイオン速度の絶対値、橙破線はダストの半径方向速度、橙線はダストの経度方向速度である。結果はダスト密度がイオン密度の 10^{-3} 倍の時も、領域内にイオンとダスト密度しか存在しない場合も共にイオン速度は共回転速度となった。ダスト

速度はケプラー速度である。図 87 と 図 88 それぞれの下図は土星からの距離に対する周波数を示している。横軸は土星からの距離 [R_S], 縦軸は周波数 [$1/s$] である。赤線がイオンサイクロトロン周波数, 青線がイオン-ダスト衝突周波数となっている。どちらもイオンサイクロトロン周波数よりイオン-ダスト衝突周波数の方が 2 桁程度小さい。そのためイオンは共回転運動している。そこで, 次は電離圏-磁気圏結合を考えて磁気圏電場がどのように与えられるか考える。

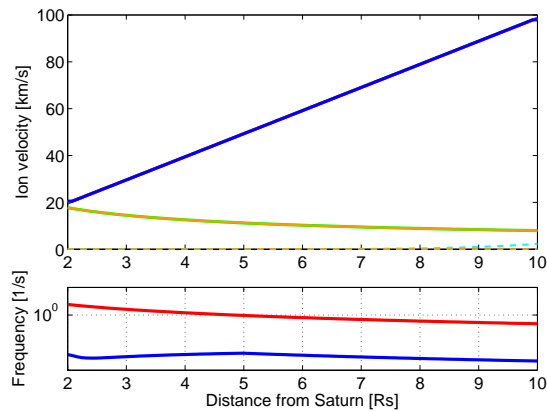


図 87 ダスト密度が式 (4.26) で与えられる時の R_S と速度との関係

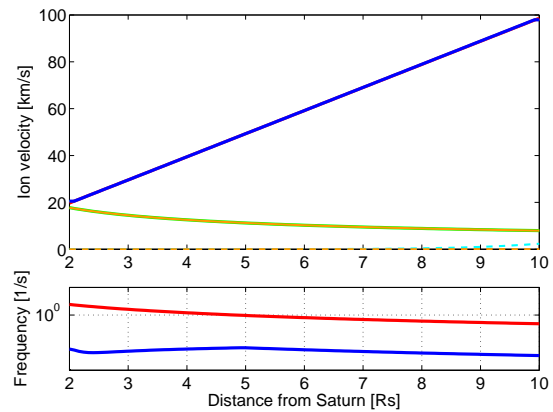


図 88 領域内にイオンとダストのみが存在する場合の R_S と速度との関係

4.3.3 電離圏-磁気圏結合

これまで磁気圏内に生じる電場は電離圏で生成され磁気圏へと投影される共回転電場のみと考えていた。今回は磁気圏内に生じる電場を考える。磁気圏内電場はダストが担うと考え、ケプラー速度による電場 (\mathbf{E}_{kep}) を与えた。磁気圏内のダストが基本的にはケプラー運動すると考え、このように与えた。これら 2 つの電場から磁気圏内に存在する電場を記述するために、電離圏-磁気圏結合を考える。図 89 は電離圏-磁気圏結合を表している。電離圏と磁気圏は磁力線を介してお互いが繋がる。その時、電離圏と磁気圏とを結ぶ回路を考え、そこを流れる電流や伝導度から生成される電場を考える。電場は、

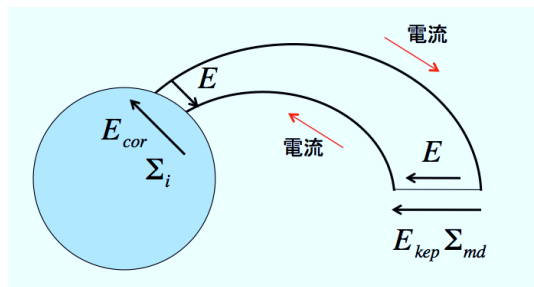


図 89 電離圏-磁気圏結合

$$\mathbf{E} = \frac{\Sigma_i \mathbf{E}_{cor} - \Sigma_{md} \mathbf{E}_{kep}}{\Sigma_i + \Sigma_{md}} \quad (4.27)$$

となる。ここで Σ_i は電離圏伝導度、 Σ_{md} は磁気圏のダストが担う伝導度である。電離圏伝導度は $\Sigma_i = 1$ を与えた [Cowley et al., 2004]。また磁気圏のダストが担う伝導度は、

$$\Sigma_{md} = \frac{\nu_{di} + \nu_{de} + \nu_{dn}}{(\nu_{di} + \nu_{de} + \nu_{dn})^2 + \omega_d^2} \frac{n_d q_d^2}{m_d} \times 10 dd \quad (4.28)$$

と与えた。dd はダスト層の厚さである。ダスト層の厚さをフリーパラメーターとして与えた。本研究ではダスト層の厚さを $dd = 10^6, 10^7, 10^8, 10^9, 10^{10}$ m の 5 通りで計算を行った。ダスト密度は式 (4.26) を用いた。また温度は 1 eV、ダストポテンシャルは 1 V で計算を行った。

図 90 から 図 94 はその結果である。それぞれの上側は土星からの距離に対する速度、下側は土星からの距離に対する周波数である。まず上側に着目して欲しい。横軸は土星から

の距離, 縦軸は速度である. 赤線は共回転速度, 緑線はケプラー速度, 水破線はイオンの半径方向速度, 水線はイオンの経度方向速度, 青線はイオン速度の絶対値, 橙破線はダストの半径方向速度, 橙線はダストの経度方向速度である. まず, $dd = 10^6$ m の時はイオンはほとんど共回転運動している (図 90 上). $dd = 10^7$ m の時はイオン速度は $4 R_S$ 以下ではほぼ共回転運動しているが, その後徐々に共回転速度から遅れる (図 91 上). そして $5 R_S$ より外側では土星からの距離が大きくなると共にイオン速度は増加する. イオン速度は共回転速度の約 80% である. $dd = 10^8$ m の時は $3 R_S$ までは共回転運動しているが, 徐々に共回転速度から遅れ始め, $5 R_S$ より外側では土星からの距離が大きくなると共にイオン速度は増加する (図 92 上). $dd = 10^9, 10^{10}$ m ではほとんどイオン速度はケプラー速度となる (図 93 上, 図 94 上). 全体の傾向として, ダスト密度が一定である $5 R_S$ より内側で, 共回転速度から遅れ始める. これはダストサイクロトロン周波数が土星からの距離の 3 乗に比例して小さくなるので, ダストが担う電気伝導度が大きくなる. ダストが担う電気伝導度が大きくなることで電場は共回転電場から小さくなり, イオン速度が遅れ始める. $5 R_S$ より外側ではダスト密度が土星からの距離に応じて減少する領域では, 今度はダストが担う電気伝導度が小さくなる. これはダスト密度が減少していることに依存している. そのため, ダスト密度が距離に応じて減少する $5 R_S$ より外側では, イオン速度が距離に応じて増加するようになる.

一方で, このパラメーターではイオンとダストの衝突はほとんど効いていない. 図 90 から図 94 の下側はイオンサイクロトロン周波数とイオン-ダスト衝突周波数の関係を示している. 横軸は土星からの距離, 縦軸は周波数, 赤線がイオンサイクロトロン周波数, 青線がイオン-ダスト衝突周波数である. 今回与えたパラメーター全ての場合でイオンサイクロトロン周波数よりもイオン-ダスト衝突周波数の方が小さくなった. つまり, この結果からクーロン衝突による影響はほとんどないということである.

以上より電離圏-磁気圏結合を考えることで, ダスト-プラズマ相互作用を記述することができた. ダストが担うケプラー電場が非常に重要で, イオン速度に大きく影響した. また, ダスト層が厚いほどダスト-プラズマ相互作用がより強くなるということが分かった. 一方で本パラメーターでは, クーロン衝突はほとんどイオンに影響を与えないという結果となった.

次に, ダスト層の厚さを 10^8 m と固定して, ダスト密度をフリーパラメーターとして与えた. ダスト密度は極端な場合を考え, 領域内にイオンとダストのみが存在する場合と, 領域内

にイオンと電子のみが存在する場合を考えた。ダストの最大密度は、

$$n_{dmax} = \begin{cases} 2.4 \times 10^5 & (R_S < 5) \\ 4.0 \left[5.0 \left(\frac{r}{R_S} \right)^{-4.3} + 0.16 \left(\frac{r}{R_S} \right)^{-3.2} \right] \times 10^7 & (R_S > 5) \end{cases} \quad (4.29)$$

である。また温度とダストポテンシャルは先ほどと同様にそれぞれ 1 eV, 1 V を与えた。

図 95 から 図 97 はその結果である。上側は土星からの距離に対する速度、下側は土星からの距離に対する周波数である。図の見方は 図 90 から 図 94 と同様である。まず領域内にイオンと電子のみが存在する ($n_d \sim 0$) 場合、イオン速度は共回転速度である (図 95)。これは電場を担うダストが存在しないことで、共回転電場しか磁気圏内に現れないためである。次に電子とダストが混在する場合である。パラメータとして 図 92 と同じものを与えている。ダストが存在することにより、ダストが担う磁気圏伝導度が大きくなり、電場が共回転電場よりも小さくなる (図 96)。領域内にイオンとダストのみが存在する ($n_e \sim 0$) 場合、イオンは共回転速度の 30 % 程度となる (図 97)。

以上より、ダスト密度もダスト-プラズマ相互作用を決めるための重要なパラメータであることが分かった。ダスト密度が大きい時、イオン速度はより共回転速度から遅れ、ダスト密度が小さい時はイオンは共回転運動する。

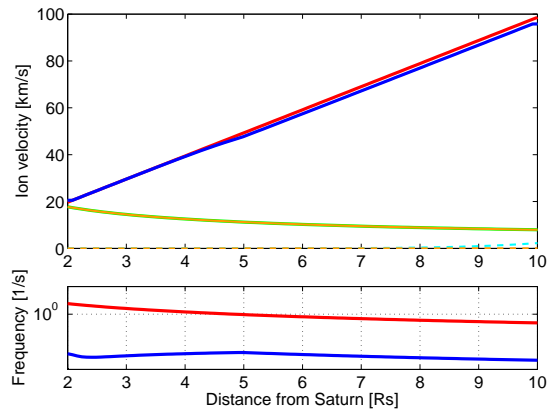


図 90 $T = 1 \text{ eV}$, $\phi_s = 1 \text{ V}$, $dd = 10^6 \text{ m}$

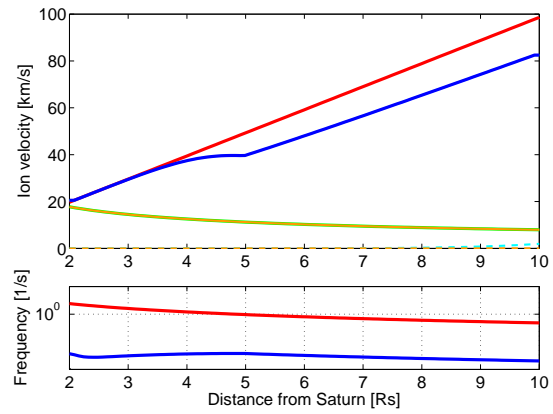


図 91 $T = 1 \text{ eV}$, $\phi_s = 1 \text{ V}$, $dd = 10^7 \text{ m}$

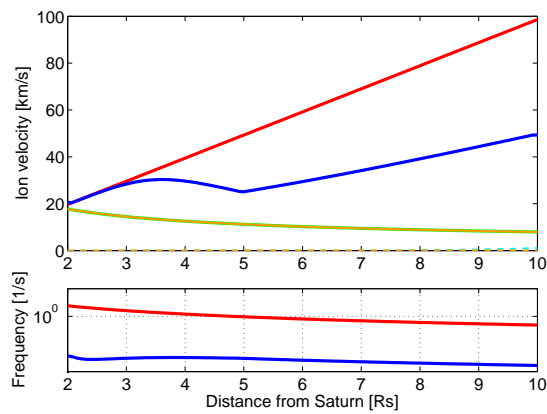


図 92 $T = 1 \text{ eV}$, $\phi_s = 1 \text{ V}$, $dd = 10^8 \text{ m}$

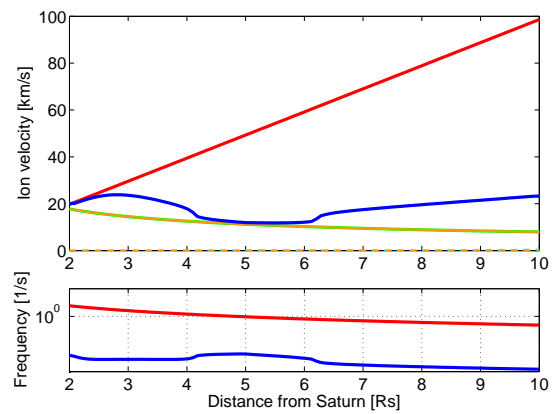


図 93 $T = 1 \text{ eV}$, $\phi_s = 1 \text{ V}$, $dd = 10^9 \text{ m}$

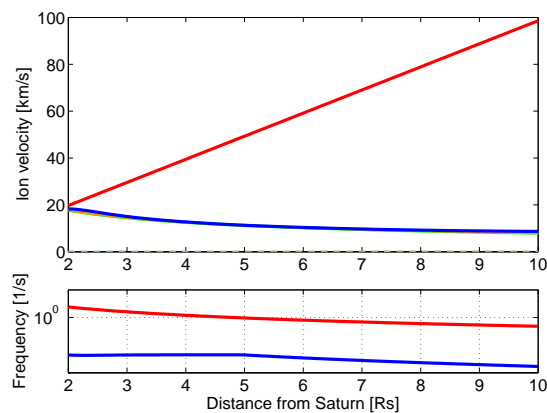


図 94 $T = 1 \text{ eV}$, $\phi_s = 1 \text{ V}$, $dd = 10^{10} \text{ m}$

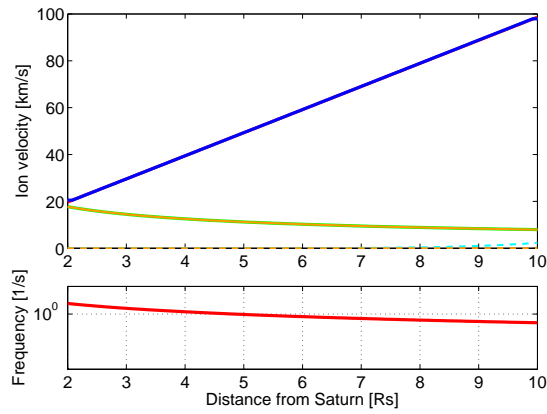


図 95 イオンと電子のみが領域内に存在

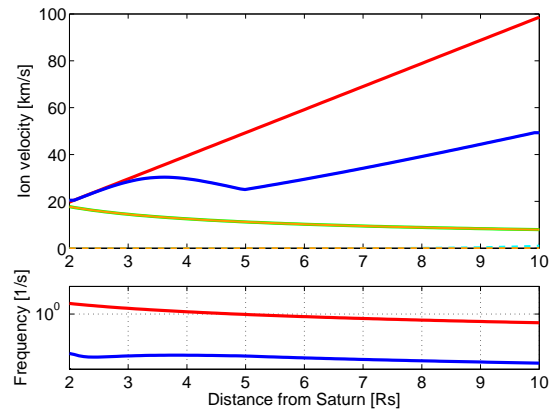


図 96 電子とダストが領域内に混在

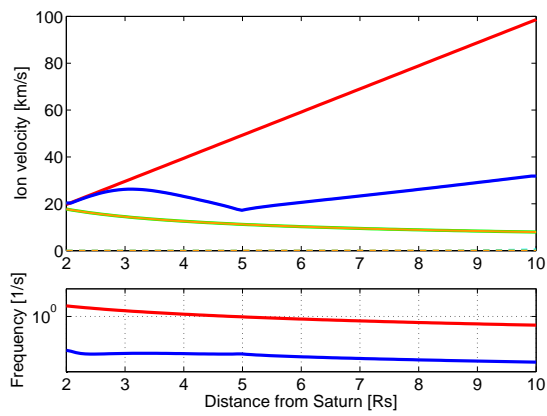


図 97 イオンとダストのみが領域内に存在

5 考察

本論文では 3 章で LP でのイオンスピード観測, 4 章でイオン, ダスト, 電子の 3 成分 MHD 方程式を用いてイオン速度のモデリングを行った. 観測から, プラズマディスク中のイオンスピードは $7 R_S$ より内側では共回転速度の約半分, $7 R_S$ より外側ではスピードは散乱し増加するという結果が得られた. またモデリングからはダスト密度が高くダスト層が厚い場合, 磁気圏電場が共回転電場よりも弱くなり, イオン速度は共回転速度とケプラー速度の間となった.

LP 観測からは, イオンは共回転速度とケプラー速度の約半分の速度を持つことが示された. またモデリングからも, 高ダスト密度, ダスト層が厚い場合に観測と同様な共回転速度とケプラー速度の中間の値が得られた. *Saur et al.* [2004] では *Hill* [1979] のモデルを用いて土星磁気圏の共回転遅延を明らかにした. 彼らは共回転遅延の原因として半径方向への質量輸送, イオンと中性ガスとの衝突, イオンピックアップを挙げた. 彼らのモデルでは $5 R_S$ より外側では共回転遅延が生じていた. しかし, 本研究や *Wahlund et al.* [2005, 2009] では $5 R_S$ より内側でも共回転遅延が起こっていることが確認された. この現象を説明するために今回, イオンとダストの相互作用を考えた結果, $5 R_S$ より内側での共回転遅延を説明することができた. では, どのような条件の時に観測値とモデリングの結果が一致するのかについて考察を行う. 図 98 は観測データとモデリングの結果を併せてプロットしたものである. モデリングで与えたパラメータはイオン密度は式 (4.24), ダスト密度は式 (4.26), 温度は 1 eV , ダストポテンシャルは 1 V , ダスト半径は 100 nm であった. 横軸は土星からの距離 [R_S], 縦軸はイオン速度 [km/s] を表している. 赤線は共回転速度, 緑線がケプラー速度である. 桃線, 水線, 青線はモデリングの結果である. 桃線はダスト層の厚さが 10^7 m の時, 水線はダスト層の厚さが 10^8 m の時, 青線がダスト層の厚さが 10^9 m の時である. 黒点が観測点である. 本研究からはダスト層の厚さ $dd \text{ [m]}$ が $10^7 < dd < 10^8$ 程度の時, モデリングは観測によく合うという結果が得られた. これはちょうど土星の半径から直径程度の長さである. 一般的に E リングの厚さは $\sim 10^7 \text{ m}$ 程度とされているので, 今回の結果はそれと一致している. 一方で, 本研究からは今回与えたパラメータではイオンとダストのクーロン衝突はあまり影響しない. クーロン衝突が影響するためにはダスト密度を大きくする (イオン密度を大きくする) ことが一番効果的で

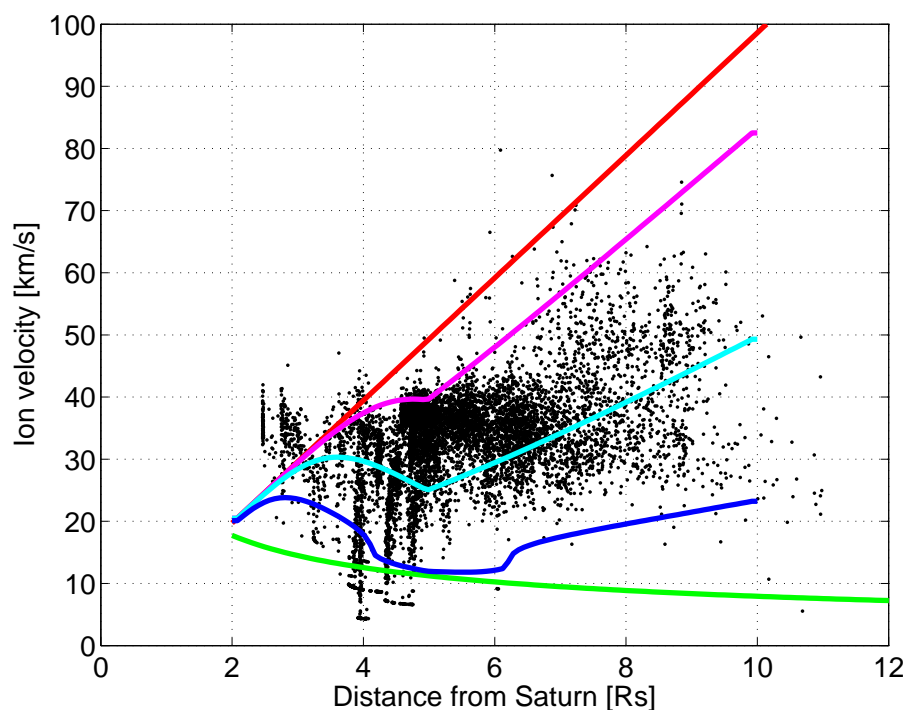


図 98 観測データとモデリングの結果を重ねあわせた図

ある。しかし、今回はイオン密度を与えてしまったためにダスト密度に制約ができ、クーロン衝突が効果を表し始めるダスト密度まで、密度を大きくすることが出来なかった。ただ、今回与えたダスト密度は 10^4 – 10^5 m^{-3} 程度で *Yaroshenko et al.* [2009], *Shafiq et al.* [2011] で推定されているダスト密度と同程度の値を用いている。それ故、決してアンダーエスティメイトではないと考えている。

Wahlund et al. [2009] では土星内部磁気圏には 2 種のイオンが存在すると提案した。1 つは内部磁気圏を共回転速度で運動しているイオン、もう 1 つはケプラー速度近辺で運動しているイオンである。ホットなイオン ($\gg 10$ – 50 eV) はダストに捕捉されることなく共回転し続け、一方コールドなイオン (数 eV) はダストの影響を受け共回転速度から遅れる。数 eV 程度の粒子を測定することが可能な LP 観測から、本研究では共回転速度の 50% 以下であるイオンスピードが得られた。一方で、数百 eV の粒子を観測できる CAPS の観測からはイオンスピードは共回転速度の 50–80% 程度であった [*Wilson et al.*, 2008, 2009; *Thomsen et al.*, 2010]。これらの結果は、*Wahlund et al.* [2009] が提案したように土星内部磁気圏には 2 種類のイオンが存在していることを示している。

これまでの多くの観測では、磁気軸と自転軸の傾きがほとんどないのにも関わらず、土星磁気圏プラズマの自転方向の変動が示された。本研究でも、LP による観測からイオンスピードの SKR 経度依存性が存在している可能性を示した。E リングに対してプラズマディスクが少し傾いていることによってイオンとダストが混在する領域、一方でイオンとダストが混在しない領域が存在していると考えられている。これはイオンとダストの各パラメータの経度方向依存性が明らかに存在していることを示している。パラメータの経度方向依存性は自転方向の変動を見出すためには非常に重要となってくるだろう。

6 まとめ

本研究では、LP のデータを用いてイオンスピードの解析を行った。Cassini RPWS/LP (Rev003-087) からの低エネルギーイオンスピードの観測結果は、プラズマディスク中のイオンスピードは $7 R_S$ より内側では共回転速度の約 50% で、 $7 R_S$ より外側ではイオンスピードは散乱し始め、増加した。また、SKR 経度とイオンスピードとの関係は経度 0° ではスピードが遅く、 $\pm 180^\circ$ に向かって徐々に増加、散乱する傾向を示し、経度方向の依存性を示唆した。更にイオンスピードの LT 依存性については、 $7 R_S$ より内側では顕著には見られなかった。一方 $7 R_S$ より外側では夜側の方が昼側に比べてややスピードが大きいという結果が得られ、夜側でのダストポテンシャルの変化が昼側に比べて卓越している可能性を示唆した。しかしきちんと確かめるには更なるパスのデータ解析を擦る必要があるだろう。

また本研究ではイオンとダストの衝突の関係を見るために、イオン、ダスト、電子からなる 3 流体 MHD 方程式を用いてイオンとダストの速度を計算した。まず衝突周波数をパラメーターとして与えた結果、観測に一致するためには少なくともイオンサイクロトロン周波数の約 2 倍のイオン-ダスト衝突周波数が必要であることが分かった。次にイオンとダストがクーロン衝突すると考え、衝突周波数を与えて計算を行った。計算結果はクーロン衝突はあまり生じず、イオンはあまりダストの影響を受けなかった。そこで、磁気圏-電離圏結合を考え、磁気圏に生じる電場を考えた。その結果、イオン速度は共回転速度から遅れた。共回転遅延に重要なパラメーターはダスト密度、ダスト層の厚さが重要であることが分かり、ダスト密度が高く、ダスト層が厚い時、ダスト-プラズマ相互作用が顕著になることが分かった。ダスト層の厚さ dd [m] が $10^7 < dd < 10^8$ の時、観測によく一致した。

今後の研究課題として、これまでの観測からプラズマの経度方向依存性が報告されている。それ故、各パラメーターの経度方向依存性を考慮していかなければならないと考えている。そのためには更に LP のデータ解析を始め、その他の Cassini チームと協力して研究を進めていきたい。またモデリングについても、まずは磁気圏電場を考慮して、どの程度イオンダイナミクスに影響するのかを解明していきたい。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々にお世話になりました。

指導教員である北海道大学渡部重十教授には、本研究を始めるきっかけを作ってくださいました。また私に海外での研究活動や学会発表など修士の間に非常に貴重な経験をさせてくださいました。更に、数値計算をするにあたっての計算方法やパラメータの決定方法、バグ取りなど、細かい部分まで丁寧にご指導を頂きました。またゼミ等での渡部教授のお言葉は、私自身の刺激となり、本研究を進める上での励みとなりました。

Swedish Institute of Space Physics の諸岡倫子博士には Cassini RPWS/LP データの扱い方から解析まで丁寧にご指導を頂きました。また私が研究で行き詰まったりした際には Skype を通じて何度もミーティングをして頂き、的確なアドバイスを頂きました。

Swedish Institute of Space Physics の Jan-Erik Wahlund 教授には研究を進めるにあたって、研究方針など非常に貴重なご意見を頂きました。また、研究に行き詰まっている時にはアドバイスも頂きました。

北海道大学高橋幸弘教授には、ゼミなどを通じて研究方法、研究方針など貴重なご意見を頂きました。

最後に、惑星宇宙グループの皆様には様々な助言や激励のお言葉を頂きました。特に同期には、皆さんが研究に勤しむ姿を見て、自分も頑張ろうと常に励みにしていました。本当に世話になりました。

本研究を進めるにあたり、Swedish Institute of Space Physics, Uppsala の Cassini RPWS/LP データを使わせて頂きました。また、本論文の書式には地球流体電脳倶楽部のスタイルファイルである電脳スタイル TEX マクロ (<http://www.gfd-dennou.org/arch/cc-env/TeXmacro/dennou/dennousty6/DOC/>) を用いています。

この場をお借りして、厚く御礼申し上げます。

参考文献

André, N., M. Blanc, S. Maurice, P. Schippers, E. Pallier, T. I. Gombosi, K. C. Hansen, D. T. Young, F. J. Crary, S. Bolton, E. C. Sittler, H. T. Smith, R. E. Johnson, R. A. Baragiola, A. J. Coates, A. M. Rymer, M. K. Dougherty, N. Achilleos, C. S. Arridge, S. M. Krimigis, D. G. Mitchell, N. Krupp, D. C. Hamilton, I. Dandouras, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, P. Louarn, R. Srama, S. Kempf, H. J. Waite, L. W. Esposito, and J. T. Clarke, 2008, Identification of Saturn's magnetospheric regions and associated plasma processes: Synopsis of Cassini observations during orbit insertion, *Rev. Geophys.*, **46**, RG4008, doi:10.1029/2007RG000238.

Arridge, C. S., C. T. Russell, K. K. Khurana, N. Achilleos, S. W. H. Cowley, M. K. Dougherty, D. J. Southwood, and E. J. Bunce, 2008a, Saturn's magnetodisc current sheet, *J. Geophys. Res.*, **113**, A04214, doi:10.1029/2007JA012540.

Arridge, C. S., K. K. Khurana, C. T. Russell, D. J. Southwood, N. Achilleos, M. K. Dougherty, A. J. Coates, and H. K. Leinweber, 2008b, Warping of Saturn's magnetospheric and magnetotail current sheets, *J. Geophys. Res.*, **113**, A08217, doi:10.1029/2007JA012963.

Brown, R. H., L. A. Soderblom, J. M. Soderblom, R. N. Clark, R. Jaumann, J. W. Barnes, C. Sotin, B. Buratti, K. H. Baines, and P. D. Nicholson, 2008, The identification of liquid ethane in Titan's Ontario Lacus, *Nature*, **454**, 607–610, doi:10.1038/nature07100.

Burger, M. H., E. C. Sittler Jr., R. E. Johnson, H. T. Smith, O. J. Tucker, and V. I. Shematovich, 2007, Understanding the escape of water from Enceladus, *J. Geophys. Res.*, **112**, A06219, doi:10.1029/2006JA012086.

Coates, A. J., F. J. Crary, D. T. Young, K. Szego, C. S. Arridge, Z. Bebesi, E. C. Sittler Jr., R. E. Hartle, and T. W. Hill, 2007, Ionospheric electrons in

Titan's tail: Plasma structure during the Cassini T9 encounter, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L24S05, doi:10.1029/2007GL030919.

Cowee, M. M., N. Omidi, C. T. Russel, X. Blanco-Cano, and R. L. Tokar, 2009, Determining ion production rates near Saturn's extended neutral cloud from ion cyclotron wave amplitudes, *J. Geophys. Res.*, **114**, A04219, doi:10.1029/2008JA013664.

Cowley, S. W. H., E. J. Bunce, and J. M. O'Rourke, 2004, A simple quantitative model of plasma flows and currents in Saturn's polar ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **109**, A05212, doi:10.1029/2003JA010375.

Cui, J., R. V. Yelle, and K. Volk, 2008, Distribution and escape of molecular hydrogen in Titan's thermosphere and exosphere, *J. Geophys. Res.*, **113**, E10004, doi:10.1029/2007JE003032.

de Pater, I., and J. J. Lissauer, 2001, *Planetary Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Dermott, S. F., and C. Sagan, 1995, Tidal effects of disconnected hydrocarbon seas on Titan., *Nature*, **374**, 238–240, doi:10.1038/374238a0.

Desch, M. D., and M. L. Kaiser, 1981, Voyager measurement of the rotation period of Saturn's magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 253–256, doi:10.1029/GL008i003p00253.

Gombosi, T. I., T. P. Armstrong, C. S. Arridge, K. Khurana, S. M. Krimigis, N. Krupp, A. M. Persoon, and M. F. Thomsen, 2009, Saturn's Magnetospheric Configuration, in *Saturn from Cassini-Huygens*, edited by M. K. Dougherty, L. W. Esposito, and S. M. Krimigis, pp. 203–255, Springer Science+Business Media B. V., Dordrecht, Netherlands.

Gustafsson, G., and J. -E. Wahlund, 2010, Electron temperatures in Saturn's

plasma disc, *Planet. Space Sci.*, **58**, 1018–1025, doi:10.1016/j.pss.2010.03.007.

Gurnett, D. A., W. S. Kurth, D. L. Kirchner, G. B. Hospodarsky, T. F. Averkamp, P. Zarka, A. Lecacheux, R. Manning, A. Roux, P. Canu, N. Cornilleau-Wehrin, P. Galopeau, A. Meyer, R. Bostrom, G. Gustafsson, J. -E. Wahlund, L. Ahlen, H. O. Rucker, H. P. Ladreiter, W. Macher, L. J. C. Woolliscroft, H. Alleyne, M. L. Kaiser, M. D. Desch, W. M. Farrell, C. C. Harvey, P. Louarn, P. J. Kellogg, K. Goetz, and A. Pedersen, 2004, The Cassini radio and plasma wave investigation *Space Sci. Rev.*, **114**, 395–463, doi:10.1007/s11214-004-1434-0.

Gurnett, D. A., W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, A. M. Persoon, T. F. Averkamp, B. Cecconi, A. Lecacheux, P. Zarka, P. Canu, N. Cornilleau-Wehrin, P. Galopeau, A. Roux, C. Harvey, P. Louarn, R. Bostrom, G. Gustafsson, J. -E. Wahlund, M. D. Desch, W. M. Farrell, M. L. Kaiser, K. Goetz, P. J. Kellogg, G. Fischer, H. -P. Ladreiter, H. Rucker, H. Alleyne, and A. Pedersen, 2005, Radio and plasma wave observations at Saturn from Cassini's approach and first orbit, *Science*, **307**, 1255–1259, doi:10.1126/science.1105356.

Gurnett, D. A., A. M. Persoon, W. S. Kurth, J. B. Groene, T. F. Averkamp, M. K. Dougherty, and D. J. Southwood, 2007, The variable rotation period of the inner region of Saturn's plasma disk, *Science*, **316**, 442–445, doi:10.1126/science.1138562.

Hansen, C. J., L. Esposito, A. I. F. Stewart, J. Colwell, A. Hendrix, W. Pryor, D. Shemansky, R. West, 2006, Enceladus' Water Vapor Plume, *Science*, **311**, 1422–1425, doi:10.1126/science.1121254.

Hill, T. W., 1979, Inertial limit on corotation, *J. Geophys. Res.*, **84**, 6554–6558, doi:10.1029/JA084iA11p06554.

Hillier, J. K., S. F. Green, N. McBride, J. P. Schwanethal, F. Postberg, R. Srama, S. Kempf, G. Moragas-Klostermeyer, J. A. M. McDonnell, and E. Grün,

2007, The composition of Saturn's E ring. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **377**, 1588–1596, doi:10.1111/j.1365-2966.2007.11710.x.

Horányi, M., A. Juhász, and G. E. Morfill, 2008, Large-scale structure of Saturn's E-ring, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L04203, doi:10.1029/2007GL032726.

Johnson, R. E., J. G. Luhmann, R. L. Tokar, M. Bouhram, J. J. Berthelier, E. C. Sittler, J. F. Cooper, T. W. Hill, H. T. Smith, M. Michael, M. Liu, F. J. Crary, and D. T. Young, 2006, Production, ionization and redistribution of O₂ in Saturn's ring atmosphere, *Icarus*, **180**, 393–402, doi:10.1016/j.icarus.2005.08.021.

Jurac, S., and J. D. Richardson, 2005, A self-consistent model of plasma and neutrals at Saturn: Neutral cloud morphology, *J. Geophys. Res.*, **110**, A09220, doi:10.1029/2004JA010635.

Jurac, S., M. A. McGrath, R. E. Johnson, J. D. Richardson, V. M. Vasyliunas, and A. Eviatar, 2002, Saturn: Search for a missing water source, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2172, doi:10.1029/2002GL015855.

Kempf, S., U. Beckmann, R. Srama, M. Horányi, S. Auer, and E. Grün, 2006, The electrostatic potential of E ring particles, *Planet. Space Sci.*, **54**, 999–1006, doi:10.1016/j.pss.2006.05.012.

Kempf, S., U. Beckmann, G. Moragas-Klostermeyer, F. Postberg, R. Srama, T. Economou, J. Schmidt, F. Spahn, and E. Grün, 2008, The E ring in the vicinity of Enceladus. I. Spatial distribution and properties of the ring particles, *Icarus*, **193**, 420–437, doi:10.1016/j.icarus.2007.06.027.

Khrapak, S. A., A. V. Ivlev, and G. E. Morfill, 2004, Momentum transfer in complex plasmas, *Phys. Rev.*, **70**, 056405, doi:10.1103/PhysRevE.70.056405.

Krimigis, S. M., D. G. Mitchell, D. C. Hamilton, N. Krupp, S. Livi, E. C. Roelof,

J. Dandouras, T. P. Armstrong, B. H. Mauk, C. Paranicas, P. C. Brandt, S. Bolton, A. F. Cheng, T. Choo, G. Gloeckler, J. Hayes, K. C. Hsieh, W. -H. Ip, S. Jaskulek, E. P. Keath, E. Kirsch, M. Kusterer, A. Lagg, L. J. Lanzerotti, D. LaVallee, J. Manweiler, R. W. McEntire, W. Rasmuss, J. Saur, F. S. Turner, D. J. Williams, and J. Woch, 2005, Dynamics of Saturn's magnetosphere from MIMI during Cassini's orbital insertion, *Science*, **307**, 1270–1273, doi:10.1126/science.1105978.

Krimigis, S. M., N. Sergis, K. Dialynas, D. G. Mitchell, D. C. Hamilton, N. Krupp, M. Dougherty, and E. T. Sarris, 2009, Analysis of a sequence of energetic ion and magnetic field events upstream from the Saturnian magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, **57**, 1785–1794, doi:10.1016/j.pss.2009.02.013.

Kurth., W. S., A. Lecacheux, T. F. Averkamp, J. B. Groene, and D. A. Gurnett, 2007, A Saturnian longitude system based on a variable kilometric radiation period, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L02201, doi:10.1029/2006GL028336.

Kurth, W. S., T. F. Averkamp, D. A. Gurnett, J. B. Groene, and A. Lecacheux, 2008, An update to a Saturnian longitude system based on kilometric radio emissions, *J. Geophys. Res.*, **113**, A05222, doi:10.1029/2007JA012861.

Lunine, J. I., 1993, Does Titan have an ocean — a review of current understanding of Titan's surface., *Rev. Geophys.*, **31**, 133–149, doi:10.1029/92RG02794.

Lunine, J. I., 1994, Does Titan have oceans?, *Am. Sci.*, **82**, 134–143.

Lunine, J. I., D. J. Stevenson, and Y. L. Yung, 1983, Ethane ocean on Titan. *Science*, **222**, 1229–1230, doi:10.1126/science.222.4629.1229.

Mauk, B. H., D. C. Hamilton, T. W. Hill, G. B. Hospodrsky, R. E. Johnson, C. Paranicas, E. Roussos, C. T. Russell, D. E. Shemansky, E. C. Sittler Jr, and R. M. Thorne, 2009, Fundamental plasma processes in Saturn's magnetosphere, in *Saturn from Cassini-Huygens*, edited by M. K. Dougherty, L. W. Esposito,

and S. M. Krimigis, pp. 203–255, Springer Science+Business Media B. V., Dordrecht, Netherlands.

Melin, H., D. E. Shemansky, X. Liu, 2009, The distribution of atomic hydrogen and oxygen in the magnetosphere of Saturn, *Planet. Space Sci.*, **57**, 1743–1753, doi:10.1016/j.pss.2009.04.014.

Moncuquet, M., A. Lecacheux, N. Meyer-Vernet, B. Cecconi, and W. S. Kurth, 2005, Quasi thermal noise spectroscopy in the inner magnetosphere of Saturn with Cassini/RPWS: Electron temperatures and density, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20S02, doi:10.1029/2005GL022508.

Morooka, M. W., J. -E. Wahlund, M. Shafiq, W. M. Farrell, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, A. M. Persoon, M. André, A. I. Eriksson, and M. Holmberg, 2010, Dusty plasma in the vicinity of Enceladus, *Planet. Space Sci.*, submitted.

Persoon, A. M., D. A. Gurnett, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, J. B. Groene, P. Canu, and M. K. Dougherty, 2005, Equatorial electron density measurements in Saturn's inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23105, doi:10.1029/2005GL024294.

Persoon, A. M., D. A. Gurnett, W. S. Kurth, and J. B. Groene, 2006, A simple scale height model of the electron density in Saturn's plasma disk, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18106, doi:10.1029/2006GL027090.

Persoon, A. M., D. A., Gurnett, O. Santolik, W. S. Kurth, J. B. Faden, J. B. Groene, G. R. Lewis, A. J. Coates, R. J. Wilson, R. L. Tokar, J. -E. Wahlund, and M. Moncuquet, 2009, A diffusive equilibrium model for the plasma density in Saturn's magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **114**, A04211, doi:10.1029/2008JA013912.

Porco, C. C., P. Helfenstein, P. C. Thomas, A. P. Ingersoll, J. Wisdom, R. West, G. Neukum, T. Denk, R. Wagner, T. Roatsch, S. Kieffer, E. Turtle,

- A. McEwen, T. V. Johnson, J. Rathbun, J. Veverka, D. Wilson, J. Perry, J. Spitale, A. Brahic, J. A. Burns, A. D. DelGenio, L. Dones, C. D. Murray, S. Squyres, 2006, Cassini observes the active south pole of Enceladus, *Science*, **311**, 1393–1401, doi:10.1126/science.1123013.
- Richardson, J. D., 1986, Thermal Ions at Saturn: Plasma Parameters and Implications, *J. Geophys. Rev.*, **91**, 1381–1389, doi:10.1029/JA091iA02p01381.
- Richardson, J. D., 1998 Thermal Plasma and Neutral Gas in Saturn's Magnetosphere, *Rev. Geophys.*, **36**, 501–524, doi:10.1029/98RG01691.
- Sagan, C., and S. F. Dermott, 1982, The tide in the seas of Titan., *Nature*, **300**, 731–733, doi:10.1038/300731a0.
- Saur, J., B. H. Mauk, A. Käbner, and F. M. Neubauer, 2004, A model for the azimuthal plasma velocity in Saturn's magnetosphere, *J. Geophys. Rev.*, **109**, A05217, doi:10.1029/2003JA010207.
- Sergis, N., S. M. Krimigis, D. G. Mitchell, D. C. Hamilton, N. Krupp, B. M. Mauk, E. C. Roelof, and M. Dougherty, 2007, Ring current at Saturn: Energetic particle pressure in Saturn's equatorial magnetosphere measured with Cassini/MIMI, *Geophys. Res. Lett.*, **114**, L09102, doi:10.1029/2006GL029223.
- Shafiq, M., J. -E. Wahlund, M. W. Morooka, W. S. Kurth, and W. M. Farrell, 2011, Characteristics of the dust-plasma interaction near Enceladus' South Pole, *Planet. Space. Sci.*, **59**, 17–25, doi:10.1016/j.pss.2010.10.006.
- Shemasky, D. E., and D. T. Hall, 1992, The distribution of atomic hydrogen in the magnetosphere of Saturn, *J. Geophys. Rev.*, **97**, 4143–4161, doi:10.1029/91JA02805.
- Shemansky, D. E., P. Matheson, D. T. Hall, H. -Y. Hu, and T. M. Tripp, 1993, Detection of the hydroxyl radical in the Saturn magnetosphere, *Nature*, **363**,

329–331, doi:10.1038/363329a0.

Shemansky, D. E., Cassini UVIS Team, 2004, Cassini UVIS Observatory Phase spectral imaging of the Saturn system, paper presented at 35th COSPAR Scientific Assembly, COSPAR, Paris.

Shemansky, D. E., X. Liu, H. Melin, 2009, The Saturn hydrogen plume, *Planet. Space Sci.*, **57**, 1659–1670, doi:10.1016/j.pss.2009.04.014.

Sittler, E. C., K. W. Ogilvie and J. D. Scudder, 1983, Survey of low energy plasma electrons in Saturn's magnetosphere: Voyagers 1 and 2, *J. Geophys. Res.*, **88**, 8847–8870, doi:10.1029/JA088iA11p08847.

Sittler, E. C., Jr., M. Thomsen, D. Chornay, M. D. Shappirio, D. Simpson, R. E. Johnson, H. T. Smith, A. J. Coates, A. M. Rymer, F. Crary, D. J. McComas, D. T. Young, D. Reisenfeld, M. Dougherty, and N. André, 2005, Preliminary results on Saturn's inner plasmasphere as observed by Cassini: Comparison with Voyager, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14S07, doi:10.1029/2005GL022653.

Sittler, E. C., Jr., M. Thomsen, R. E. Johnson, R. E. Hartle, M. Burger, D. Chornay, M. D. Shappirio, D. Simpson, H. T. Smith, A. J. Coates, A. M. Rymer, D. J. McComas, D. T. Young, D. Reisenfeld, M. Dougherty, N. André, 2006, Cassini observations of Saturn's inner plasmasphere: Saturn orbit insertion results, *Planet. Space Sci.*, **54**, 1197–1210, doi:10.1016/j.pss.2006.05.038.

Sittler, E. C., Jr., M. Thomsen, R. E. Johnson, R. E. Hartle, M. Burger, D. Chornay, M. D. Shappirio, D. Simpson, H. T. Smith, A. J. Coates, A. M. Rymer, D. J. McComas, D. T. Young, D. Reisenfeld, M. Dougherty, N. André, 2007, Erratum to “Cassini observations of Saturn's inner plasmasphere: Saturn orbit insertion results”, *Planet. Space Sci.*, **55**, 2218–2220, doi:10.1016/j.pss.2006.11.022.

Sittler, E. C., Jr., N. André, M. Blanc, M. Burger, R. E. Johnson, A. Coates, A.

Rymer, D. Reisenfeld, M. F. Thomsen, A. Persoon, M. Dougherty, H. T. Smith, R. A. Baragiola, R. E. Hartle, D. Chornay, M. D. Shappirio, D. Simpson, D. J. McComas, and D. T. Young, 2008, Ion and neutral sources and sinks within Saturn's inner magnetosphere: Cassini results, *Planet. Space Sci.*, **56**, 3–18, doi:10.1016/j.pss.2007.06.006.

Smith, H. T., M. Shappirio, E. C. Sittler, D. Reisenfeld, R. E. Johnson, R. A. Baragiola, F. J. Crary, D. J. McComas, and D. T. Young, 2005, Discovery of nitrogen in Saturn's inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14S03, doi:10.1029/2005GL022654.

Smith, H. T., M. Shappirio, R. E. Johnson, D. Reisenfeld, E. C. Sittler, F. J. Crary, D. J. McComas, and D. T. Young, 2008, Enceladus: A potential source of ammonia products and molecular nitrogen for Saturn's magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **113**, A11206, doi:10.1029/2008JA013352.

Stone, E. C., and T. C. Owen, 1984, The Saturn system, in *SATURN*, edited by T. Gehrels, and M. S. Matthews, pp. 3–23, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.

Strobel, D. F., 2008, Titan's hydrodynamically escaping atmosphere, *Icarus*, **193**, 588–594, doi:10.1016/j.icarus.2009.03.007.

Teolis, B. D., G. H. Jones, P. F. Miles, R. L. Tokar, B. A. Magee, J. H. Waite, E. Roussos, D. T. Young, F. J. Crary, A. J. Coates, R. E. Johnson, W. -L. Tseng, and R. A. Baragiola, 2010, Cassini Finds an Oxygen—Carbon Dioxide Atmosphere at Saturn's Icy Moon Rhea, *Science*, doi:10.1126/science.1198366.

Thomsen, M. F., D. B. Reisenfeld, D. M. Delapp, R. L. Tokar, D. T. Young, F. J. Crary, E. C. Sittler, M. A. McGraw, and J. D. Williams, 2010, Survey of ion plasma parameters in Saturn's magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **115**, A10220, doi:10.1029/2010JA015267.

Tokar, R. L., R. E. Johnson, T. W. Hill, D. H. Pontius, W. S. Kurth, F. J. Crary, D. T. Young, M. F. Thomsen, D. B. Reisenfeld, A. J. Coates, G. R. Lewis, E. C. Sittler, and D. A. Gurnett, 2006, The interaction of the atmosphere of Enceladus with Saturn's plasma, *Science*, **311**, 1409–1412, doi:10.1126/science.1121061.

Wahlund, J.-E., R. Böstrom, G. Gustafsson, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, T. Averkamp, G. B. Hospodarsky, A. M. Persoon, P. Canu, A. Pedersen, M. D. Desch, A. I. Eriksson, R. Gill, M. W. Morooka, and M. André, 2005, The inner magnetosphere of Saturn: Cassini RPWS cold plasma results from the first encounter, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20S09, doi:10.1029/2005GL022699.

Wahlund, J.-E., M. André, A. I. E. Eriksson, M. Lundberg, M. W. Morooka, M. Shafiq, T. F. Averkamp, D. A. Gurnett, G. B. Hospodarsky, W. S. Kurth, K. S. Jacobsen, A. Pedersen, W. Farrell, S. Ratynskaia, and N. Piskunov, 2009, Detection of dusty plasma near the E-ring of Saturn, *Planet. Space Sci.*, **57**, 1795–1806, doi:10.1016/j.pss.2009.03.011.

Wahlund, J. -E., M. W. Morooka, M. Holmberg, W. M. Farrell, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, A. M. Persoon, S. Sakai, M. Shafiq, and S. Watanabe, 2010, Dust-plasma interaction in the Saturn plasma disc & Enceladus' plume, paper presented European Planetary Science Congress, Rome, Italy.

Waite, J. H., Jr., M. R. Combi, W. -H. Ip, T. E. Cravens, R. L. McNutt Jr., W. Kasprzak, R. Yelle, J. Luhmann, H. Niemann, D. Gell, B. Magee, G. Fletcher, J. Lunine, and W. -L. Tseng, 2006, Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer: Enceladus Plume Composition and Structure, *Science*, **311**, 1409–1412, doi:10.1126/science.1121290.

Waite, J. H., Jr., D. T. Young, T. E. Cravens, A. J. Coates, F. J. Crary, B. Magee, J. Westlake, 2007, The process of tholin formation in Titan's upper atmosphere, *Science*, **316**, 870–875, doi:10.1126/science.1139727.

Wilson, R. J., R. L. Toker, M. G. Henderson, T. W. Hill, M. F. Thomsen, and D. H. Pontius Jr., 2008, Cassini plasma spectrometer thermal ion measurements in Saturn's inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **113**, A12218, doi:10.1029/2008JA013486.

Wilson, R. J., R. L. Toker, and M. G. Henderson, 2009, Thermal ion flow in Saturn's inner magnetosphere measured by the Cassini plasma spectrometer: A signature of the Enceladus torus? *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L23104, doi:10.1029/2009GL040225.

Yaroshenko, V. V., S. Ratynskaia, J. Olson, N. Brenning, J. -E. Wahlund, M. Morooka, W. S. Kurth, D. A. Gurnett, and G. E. Morfill, 2009, Characteristics of charged dust inferred from the Cassini RPWS measurements in the vicinity of Enceladus, *Planet. Space Sci.*, **57**, 1807–1812, doi:10.1016/j.pss.2009.03.002.

Yelle, R. V., J. Cui, and I. C. F. Müller - Wodarg, 2008, Methane escape from Titan's atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **113**, E10003, doi:10.1029/2007JE003031.

Young, D. T., J. -J. Berthelier, M. Blanc, J. L. Burch, S. Bolton, A. J. Coates, F. J. Crary, R. Goldstein, M. Grande, T. W. Hill, R. E. Johnson, R. A. Baragiola, V. Kelha, D. J. McComas, K. Mursula, E. C. Sittler, K. R. Svenes, K. Szegö, P. Tanskanen, M. F. Thomsen, S. Bakshi, B. L. Barraclough, Z. Bebesi, D. Delapp, M. W. Dunlop, J. T. Gosling, J. D. Furman, L. K. Gilbert, D. Glenn, C. Holmlund, J. -M. Illiano, G. R. Lewis, D. R. Linder, S. Maurice, H. J. McAndrews, B. T. Narheim, E. Pallier, D. Reisenfeld, A. M. Rymer, H. T. Smith, R. L. Tokar, J. Vilppola, and C. Zinsmeyer, 2005, Composition and dynamics of plasma in Saturn's magnetosphere, *Science*, **307**, 1262–1266, doi:10.1126/science.1106151.

Zarka, P., L. Lamy, B. Cecconi, R. Prangé and H. O. Rucker, 2007, Modulation of Saturn's radio clock by solar wind speed, *Nature*, **450**, 265–267, doi:10.1038/nature06237.

NASA,
<http://www.nasa.gov/>

NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Cassini
Equinox Mission,
<http://saturn.jpl.nasa.gov/>