HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	土星プラズマディスクにおけるダストープラズマ相互作用
Author(s)	堺, 正太朗; 渡部, 重十; 諸岡, 倫子 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 75, 133-144
Issue Date	2012-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.75.133
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49076
Type	departmental bulletin paper
File Information	75-P133-144.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 75, March 2012, pp. 133－144

土星プラズマディスクにおけるダストープラズマ相互作用

堺　正太朗・渡部　重十
北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻
諸岡　倫子・Madeleine HOLMBERG・Jan-Erik WAHLUND
Swedish Institute of Space Physics, Uppsala

(2012年1月10日受理)

Dust-plasma interaction through the magnetosphere-ionosphere coupling in the Saturn's inner magnetosphere

Shotaro SAKAI, Shigeto WATANABE
Department of Cosmosciences, Hokkaido University
Michiko W. MOROOKA, Madeleine HOLMBERG and Jan-Erik WAHLUND
Swedish Institute of Space Physics, Uppsala

(Received January 10, 2012)

We statistically investigated the ion bulk speeds in the equatorial region of the Saturn's inner magnetosphere using the Langmuir Probe (LP) onboard the Cassini spacecraft. The LP observations showed that the ion speeds are about 60% of the ideal co-rotation speed at $5\,R_S$ and the ions have between co-rotation and Keplerian speed. Beyond $7\,R_S$ the ion speeds are spread to be a larger speed and become close to the ideal co-rotation speed. It is suggested that the sub-micron sized negatively charged E ring dust contributes to the plasma dynamics in the plasma disk. We also calculated the ion speeds using the three components MHD equations, which include the interaction with dusts to investigate the effect of the ion-dust coulomb collision and the massloadings, and the magnetosphere-ionosphere coupling. Our model shows that the ion speeds can be significantly reduced by the magnetospheric electric fields generated by the collisions between ions and dusts. It is also indicated that the coulomb and/or direct collisions between ions and dusts can be effective around Enceladus.

Ⅰ. は　じ　め　に

土星磁気圏中のプラズマは，土星の自転速度が速いために共回転運動すると考えられてきた(Blanc et al., 2005)．しかし，プラズマはマスローディングによって共回転速度から遅れること

が報告されている（Hill, 1979；Saur et al., 2004）．探査機ボイジャーや土星探査機カッシーニに搭載された粒子観測器による過去の観測では，プラズマ速度は 5 R_S（1 R_S = 60,268 km）より内側では共回転運動し，それより外側では徐々に速度が遅くなり，7 R_S では共回転速度の 70−80% 程度まで遅くなることが明らかになった（Bridge et al., 1981, 1982；Richardson, 1986, 1998；Wilson et al., 2008, 2009）．

カッシーニ・ラングミュアプローブ（LP）を用いた近年の観測ではイオン速度が E リング領域でケプラー速度近くまで遅くなることが示された（Wahlund et al., 2009）．土星 E リングは，7 R_S より内側では負に帯電した小さな（ミクロンもしくはナノメータサイズ）ダスト粒子から構成されており，荷電ダストが土星プラズマディスクに電磁気的に影響を与えていると考えられている（Horanyi et al., 2004；Kempf et al., 2008）．また E リングダストの主な供給源である衛星エンセラダス付近では，電子密度がイオン密度に比べて極端に減少し，イオン速度がケプラー速度になることが報告された（Morooka et al., 2011）．また，カッシーニ・プラズマスペクトロメター（CAPS）での観測はイオン速度が共回転速度の 50−60% 程度になることを明らかにした（Thomsen et al., 2010）．

本論文では，LP によって観測された土星内部磁気圏赤道領域のイオン速度の統計的な解析と，多流体 MHD 方程式を用いたイオン速度のモデリングの結果について報告する．

Ⅱ．カッシーニ・ラングミュアプローブによるイオン観測

我々は土星内部磁気圏のイオン速度を得るために LP のデータを用いた．LP はプローブに正もしくは負の電圧をかけることでプラズマをプローブに集め，その時に流れる電流からプラズマ数密度や温度，速度を測定する．イオンの数密度や速度はプローブに負の電圧をかけることで得られる．プローブ電流は Orbital Motion Limited（OML）理論で表現され，

$$I_i \approx -A_{LP} n_i q_i \sqrt{\frac{k_B T_i}{2\pi m_i} + \frac{v_i^2}{16}} \left(1 - \frac{q_i (U_1 + U_{bias})}{\frac{m_i v_i^2}{2} + k_B T_i} \right)$$

と書くことができる．A_{LP} はプローブの面積，U_{bias} は用いたバイアス電圧，U_1 はフローティングポテンシャル，n_i はイオン数密度，v_i はイオン速度，T_i はイオン温度である．探査機の速度が十分大きいとすると $k_B T_i \ll 1/2 m_i v_i^2$ とすることができる．k_B はボルツマン定数である．方程式を書き換えると，

$$I_i \approx -A_{LP} n_i q_i \frac{|v_i|}{4} \left(1 - \frac{q_i (U_1 + U_{bias})}{\frac{m_i v_i^2}{2}} \right)$$

となる．観測されたイオン電流は $I_i \approx a - bU_1 - bU_{bias}$ と書け a と b はそれぞれ，

$$a = -A_{LP} n_i q_i \frac{|v_i|}{4}$$

$$b = \frac{aq_i}{m_i v_i^2/2}$$

となる．イオン速度は a/b から求めることができる．

$$a/b \propto v_i^2$$

イオン質量は，土星内部磁気圏ではプロトンと水グループイオンが支配的なので 18 amu を用いた（Young et al., 2005; Sittler et al., 2005）．イオン速度は経度方向のみに動くと仮定すると，得られるイオン速度は，

$$v_\phi = v_{i\phi} + v_{sc\phi}$$

と書ける．v_ϕ はイオンの経度方向速度，$v_{i\phi}$ は観測されたイオン速度，$v_{sc\phi}$ は探査機の経度方向速度である．

2005 年 2 月から 2008 年 10 月までのカッシーニが赤道領域（± 1 R_S）にいた時のデータを用いた．Fig. 1 はカッシーニの軌道を示している．x 正方向は太陽方向，y 正方向は夕暮れ向きである．LP は全 MLT に渡って観測しており，統計的な解析を行うのに十分なデータが存在している．

Fig. 2 は LP で観測したイオン速度を示している．横軸は土星からの距離（R_S），縦軸が速度（km/s）である．4 R_S より内側でのイオン速度は共回転速度付近である．しかし，4 R_S 付近ではイオン速度はケプラー速度付近まで減少し，また 4 R_S より外側では共回転速度よりも遅い速度を示している．その速度は共回転速度の 50−60% 程度で，Wahlund et al.（2009）で提案されたように，E リング荷電ダストがイオン速度を遅らせている可能性を示唆している．また，4 R_S 付近ではケプラー速度よりも遅いイオンが観測されている．この現象はエンセラダスに関係したイオンが原因と考えられている（Shafiq et al., 2011）．イオン速度は 7 R_S より外側では散乱し，増加している．こ

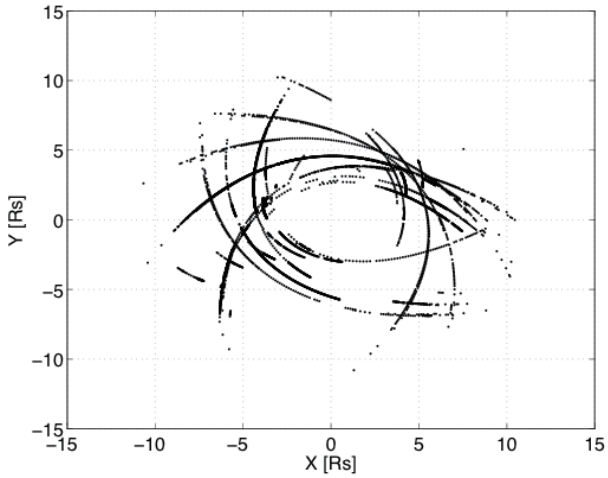

Fig. 1. Cassini trajectories in the equatorial region of Saturn. The positive direction of x axis is toward the Sun, and the positive direction of y axis is toward the dusk.

の領域ではダストの表面ポテンシャルが負から正に変わる領域（Kempf et al., 2006）で，イオン速度を増大させていると考えられている．

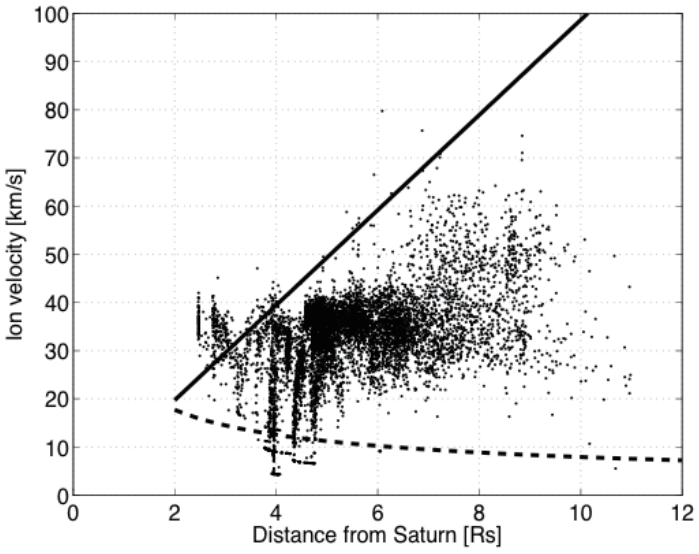

Fig. 2. Azmutial ion speed from RPWS/LP. Solid line is ideal co-rotation, dashed line is Keplerian speed, points are the observed ion speed.

LP で観測されたイオン速度は CAPS を用いたイオン速度よりも遅い結果であった（Wilson et al., 2008; Thomsen et al., 2010）．Wilson et al.（2008）は 5 から 10 R_S の間でイオン速度は共回転速度の約 80% になることを示した．また Thomsen et al.（2010）による結果は，イオン速度は共回転速度の 50 から 80% 程度であった．我々の観測したイオン速度は共回転速度の 50 から 60% で Wilson et al.（2008）と Thomsen et al.（2010）の結果よりも小さいものとなった．LP は数 eV 程度の粒子を観測することが可能なのに対し，CAPS は数百 eV の粒子を観測することが可能であることから，LP と CAPS で観測できるイオンのエネルギー帯が異なることが原因と考えられる．

Ⅲ．イオンモデリング

1．MHD 方程式

LP で観測されたイオンの共回転遅延の原因を理解するために，2 流体（イオン，ダスト）の MHD 方程式を用いてイオン速度の計算を行った．運動方程式は，

$$\frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t}+(\mathbf{v}_k\cdot\nabla)\mathbf{v}_k=\frac{q}{m_k}(\mathbf{E}+\mathbf{v}_k\times\mathbf{B})-\frac{1}{\rho_k}\nabla p_k+\mathbf{g}+\sum_l \mathbf{P}_{kl}+\mathbf{M}_k$$

となる．ここで k はイオン，ダスト，電子の各成分を表している．$\mathbf{v}_k$ は速度，m_k は質量，q は電荷量（e はイオンと電子の電荷量，q_d はダストの電荷量），$\mathbf{E}$ は電場ベクトル，$\mathbf{B}$ は磁場ベクトル，$\mathbf{P}_{kl}$ は衝突による運動量利得ベクトル，ρ_k は $m_k n_k$ である．運動量利得ベクトルは，

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

である．ここで v_{kl} は衝突周波数である．$\mathbf{M}_{kl}$ はマスローディングの項で，

$$\mathbf{M}_{kl} = -\frac{S_k}{n_k}(\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_n)$$

となる．S_k はプロダクションレートである．仮定として，ダストのマスローディングは他の項と比べて無視できるぐらい小さいので 0 とした．また電子は共回転運動すると仮定した．

衝突周波数は，

$$v_{id} = n_d\left\{4\pi\left[\frac{q_d e}{4\pi\varepsilon_0 m_i(|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_d|^2 + v_{thi}^2)}\right]^2 + \pi r_d^2\right\}\sqrt{|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_d|^2 + v_{thi}^2}$$

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

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

$$v_{in} = 2.6\times 10^{-15}(n_n + n_i)A^{-1/2}$$

$$v_{en} = 5.4\times 10^{-10} n_n T_e^{1/2}$$

$$v_{dn} = n_n \pi r_n^2 \sqrt{|\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_n|^2 + v_{thd}^2}$$

$$v_{kl} = \frac{m_l k_l}{m_k k_k} v_{lk}$$

となる．ここで r_d はダスト半径，ϕ_s はダストの表面ポテンシャル，v_{thi} はイオン熱速度，v_{the} は電子熱速度，v_{thd} はダスト熱速度，n_n は中性ガス数密度である．v_{ed} は Khrapak et al.（2004）のモデルを用いた．ダスティプラズマのデバイ長 λ_D は，

$$\lambda_D = \frac{\lambda_{Di}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_{Di}}{\lambda_{De}}\right)^2}}$$

で与えられる．$\lambda_{Di} = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_i / n_i e^2}$ 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．

イオンのプロダクションレート S_i は，

$$S_i = n_n \int_0^\infty \sigma_i F d\lambda$$

と書ける．ここで ϕ_i は散乱断面積，F は光子密度，λ は波長である．合計電離周波数は，

$$\int_0^\infty \sigma_i F d\lambda = 1.184\times 10^{-8}$$

である．これは地球の値（太陽極大）を基にして土星の値に変換している（Schunk and Nagy,

2000)．

電離圏－磁気圏結合を考慮し磁気圏電場を求めた．電場 **E** は，

$$\Sigma_i(\mathbf{E}_{cor}-\mathbf{E}) = \mathbf{j}dz$$

ここで Σ_i は電離圏ペダーセン伝導度，$\mathbf{E}_{cor}$ は共回転電場，d_z はダスト層の厚さ，**j** は磁気圏ペダーセン電流で，

$$\mathbf{j} = en_i\mathbf{v}_i - en_e\mathbf{v}_e - q_d n_d \mathbf{v}_d$$

と与えられる．

2. パラメター

Fig. 3 に示すように電子密度とイオン密度，ダスト密度を与えた．Fig. 3 は横軸に土星からの距離（R_S），縦軸に密度を表しており，実線が電子密度，破線がダスト密度，点線が中性ガス密度である．R_S が増加すると密度が減少する形で与えている（Fig. 3a, Without peak case）．2 R_S で密度が最大となり，電子密度は $6\times10^7 m^{-3}$（Persoon et al., 2009），ダスト密度は $6\times10^4 m^{-3}$，中性ガス密度は $6.5\times10^8 m^{-3}$（Smith et al., 2010）と与えた（Fig. 3a）．別ケースとして，エンセラダスプリュームを考慮してエンセラダス周辺に密度のピークを持たせるような形で与えた（Fig. 3b, With peak case）．ピーク値は，電子密度は $1\times10^{10} m^{-3}$（Morooka et al., 2011），ダスト密度は $6\times10^6 m^{-3}$（Shafiq et al., 2011），中性ガス密度は $1\times10^{11} m^{-3}$（Smith et al., 2010）である．イオン密度は電子密度とダスト密度で表すことができ，

$$n_i = n_e + \frac{q_d}{e} n_d$$

と書ける．

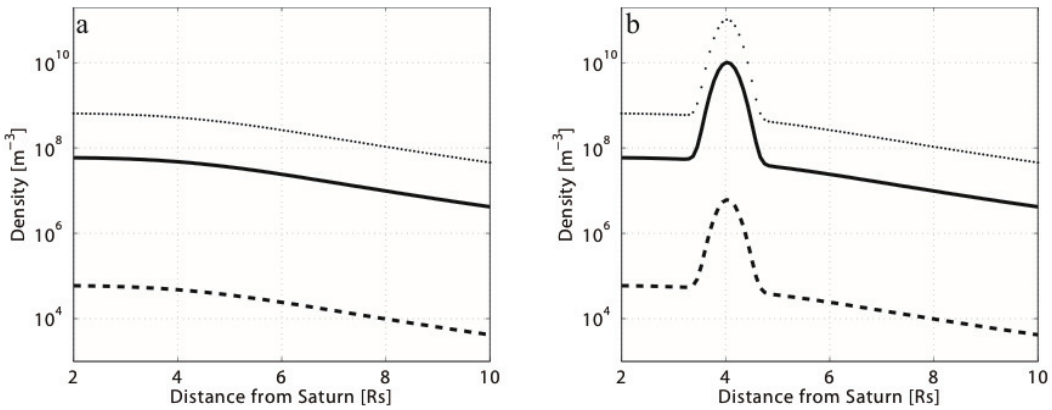

Fig. 3. Density profile as parameters. Solid line is electron density, Dashed line is dust density, and dotted line is neutral density. (a) case Without peak. (b) case With peak around 4 R_S.

ダスト層の厚さ dz もまたフリーパラメターとした．dz ＝ 1，3，5 R_S の 3 ケースでイオン速度の計算を行った（Table 1）．ダストの半径は $r_d = 10^{-7}$ m，ダストの電荷量は $q_d = \alpha 4\pi\varepsilon_0 r_d \phi_s$ C，α はイオン質量の関数で，水グループの場合は約 3.66 である．温度は全て 1 eV，ダストポテンシャルを 1 V，イオンと中性ガスの質量は 18 amu，ダストの質量は $m_d = 4\pi\rho r_d^3/3$ kg とした．ダストのバルク密度は水氷で構成されているとすると $\rho = 10^3$kg/m^3 となる．

Table 1. Paremeters for modeling. We use a density distribution and a thickness of dust distribution as parameters.

	Density	Thickness of dust distribution, dz
Case 1	Without peak	1 R_S
Case 2	Without peak	3 R_S
Case 3	Without peak	5 R_S
Case 4	With peak	1 R_S
Case 5	With peak	3 R_S
Case 6	With peak	5 R_S

3. 結　果

LP での観測ではイオン速度は共回転速度よりも小さくなり，コールドイオンの多くが負に帯電したダストと相互作用していることを示唆している．

そこでクーロン散乱やマスローディング，磁気圏電場がイオン速度にどのように影響を与えているかについて調べた．Fig. 4 は横軸を土星からの距離（R_S），縦軸を上から速度，電流，周波数に取っている．一番上のパネルは速度に関する結果である．赤線は共回転速度，青線はケプラー速度，橙線は dz が 1 R_S のとき，黄線は dz が 3 R_S のとき，緑線は dz が 5 R_S の時である．真ん中のパネルは電流に関する結果で，線の色は上のパネルと同様である．下のパネルは周波数に関する結果で，赤線はイオンサイクロトロン周波数である．その他の線はイオン－ダスト衝突周波数を表しており，色は上と真ん中のパネルと同様である．Fig. 4a は密度が土星からの距離が増加すると減少する場合（Fig. 3a），Fig. 4b はエンセラダス周辺に密度がピークを持つ場合（Fig. 3b）を示している．

全てのケースにおいて，イオン速度は 4 R_S より内側では共回転運動するという計算結果となった．しかし，イオン速度は 4 R_S 周辺から遅れ始め，6 R_S では共回転速度の 65−90%，10 R_S では 50−70% となった（Fig. 4a 上）．合計電流は 4 R_S より内側ではほとんど 0 A だが，4 R_S より外側では $10^{-5} - 10^{-4}$ A となった（Fig. 4a 中）．磁気圏内に電流が流れると磁気圏電場は共回転電場より小さくなる．そのためイオン速度は共回転速度から遅れる．磁気圏電場はまた dz に依存するので dz が大きいほどイオン速度が遅くなる．Fig. 4a において，6 R_S では緑線（dz ＝ 5 R_S）は橙線（dz ＝ R_S）の約 80% である．電流に関しては，4 R_S より外側では緑線は橙線よりも大きい値

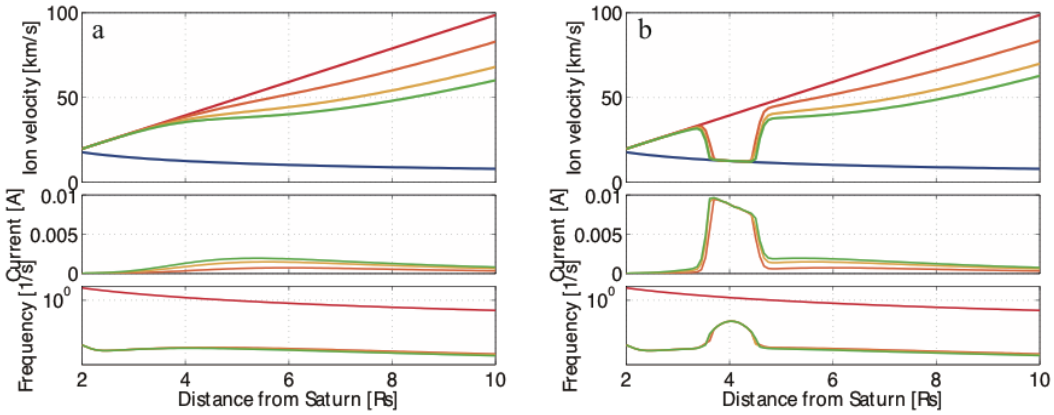

Fig. 4. Results of modelings. (a) and (b) are the same as Figure3. (top) Ion velocity profile. Red line is the ideal co-rotation speed, blue line is a Keplerian speed, orange line is the ion velocities calculated when a thickness of dust distribution, *dz*, is R_S, yellow line is ones when *dz* is 3 R_S, and green line is ones when *dz* is 5 R_S. (middle) A total current profile. Orange line is the current calculated when *dz* is R_S, yellow line is one when *dz* is 3 R_S, and green line is one when *dz* is 5 R_S. (bottom) Ion-dust collision frequency profile. Red line is an ion cyclotron frequency, orange line is an ion-dust collision frequency calculated when *dz* is R_S, yellow line is one when *dz* is 3 R_S, and green line is one when *dz* is 5 R_S.

を示している．イオンとダスト間の衝突については，イオン－ダスト衝突周波数がイオンサイクロトロン周波数に比べて十分小さいので，直接的にはイオンに影響を与えない（Fig. 4a 下）．

エンセラダス周辺に密度のピークを持つケースでは，4 R_S 周辺を除いては Without peak ケースと同様である（Fig. 4b 上）．しかし，4 R_S 周辺ではイオン速度はケプラー速度となり，電流も最大で 10^{-2} A と Without peak ケースの時より電流値が非常に大きくなった（Fig. 4b 中）．磁気圏電場が共回転電場よりもかなり小さくなり，イオン速度が非常に小さくなった．

これらの結果は，イオンはダスト層の厚さが厚い時，磁気圏－電離圏結合を通じてダストと相互作用し，その速度が共回転速度から遅れることを示している．

Ⅳ．議　　論

LP によるイオン速度の統計的な解析と，2 流体 MHD 方程式を用いたイオン速度モデリングを行った．LP によるプラズマディスク中の観測からは，イオン速度は 7 R_S より内側で共回転速度の 50−60%，7 R_S より外側ではダストポテンシャルが負から正に変わる領域で，イオンがダストの捕捉から逃れられるため，イオン速度は散乱・増加した．モデリングからはイオン速度はイオン－ダスト衝突やマスローディングによって共回転速度から遅れており，イオン－ダスト衝突が土星内部磁気圏でプラズマダイナミクスにおいて重要な役割を果たしていることを示した．

モデリングと観測が一致するためには，ダスト層の厚さ *dz* が大きい時である（Fig. 5 の黄線，緑線）．イオン速度は磁気圏電場に強く依存する．磁気圏電場は磁気圏内の衝突やマスローディ

ングによって生成されるペダーセン電流で決められる．磁気圏内のペダーセン電流が磁力線に沿って流れ，電離圏のダイナモ電場を小さくする．電場が小さくなることで，イオン速度は共回転速度から遅れ始める．ペダーセン電流の大きさは dz に依存し，dz が大きいほど磁気圏内により電流は流れ，イオン速度を遅らせる．dz が大きい時，モデルは LP による観測と一致するが，dz が小さい時は観測とは一致しない（Fig. 5 橙線）．土星内部磁気圏では dz は 3 R_S 以上必要である．また，dz が小さくても，ダスト密度が大きければ同様の結果となる．

Morooka et al.（2011）ではイオン速度は，密度が増大するエンセラダス付近でケプラー速度に近付くと報告された．我々の結果もまた，イオン速度は 4 R_S 周辺でケプラー速度となった．エンセラダス周辺では，イオン密度とダスト密度がエンセラダスプリュームによって大きい．この条件の下では，密度に比例する電流は，他の領域と比べて卓越する．特にダスト密度が約 10^6 m^{-3} を超えると，イオン速度はケプラー速度に近付く．

Wahlund et al.（2009）では，土星内部磁気圏には共回転速度付近の速度を持つプラズマとケプラー速度付近の速度を持つ 2 種類のプラズマが存在すると提案した．数 10 eV 以上のイオンはダストの影響を受けることなく共回転運動する．また数 eV 程度のイオンはダストの影響を受けて共回転速度から落ちる．LP は数 eV 程度のイオンを観測することができ，共回転速度の 50% 程度のイオン速度を観測した．一方で，CAPS は数百 eV のイオンを観測することができ，共回転速度の 50－80% のイオン速度を観測した（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 種類の速度パターンを持つイオンが存在していることを示唆している．

共回転遅延問題はこれまでにも議論されてきた（Hill, 1979; Saur et al., 2004）．彼らのモデ

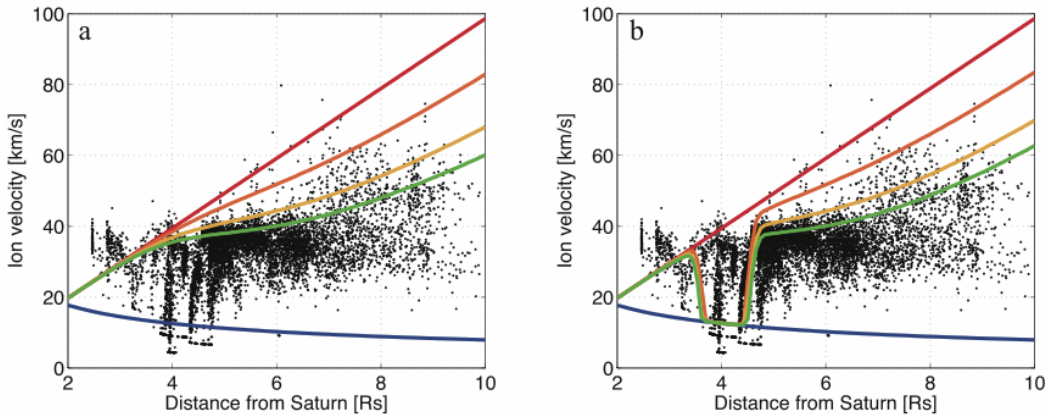

Fig. 5. Comparisons between the modelings and the RPWS/LP observations. (a) and (b) are the same as Figure 3 and 4. Ion velocities are superposed on the LP observations. Black dots are observation points, red line is the ideal co-rotation speed, blue line is a Keplerian speed, orange line is the ion velocities calculated when a thickness of dust distribution, dz, is R_S, yellow line is ones when dz is 3 R_S, and green line is ones when dz is 5 R_S.

ルでは共回転遅延は特に内部磁気圏の外側で影響があるとされてきた．Saur et al.（2004）は半径方向の質量輸送と磁気圏伝導度が内部磁気圏の外側（$>12\,R_S$）で共回転速度に影響を与えていると主張している．また，彼らは$5\,R_S$より内側ではイオンは共回転速度を持っているとも述べている．我々の結果も$4\,R_S$より内側では共回転速度を示しており，Saur et al.（2004）の結果に一致している．

土星の磁気軸と自転軸のずれが僅かであるにも関わらず，土星磁気圏プラズマの自転に伴う変動が観測されている．この僅かなずれがEリングとプラズマディスクにずれを生じさせ，ダストとプラズマが相互作用する領域としない領域を生み出している可能性がある．このことは，イオンやダストの各種パラメターに経度方向に依存していることを示唆している．

V．ま と め

LPデータからイオン速度の統計的解析を行った．低エネルギーのイオン速度は土星内部磁気圏で共回転速度の50－60% を持つことを明らかにした．この現象を理解するために，イオン，ダストの2流体MHD方程式からイオン速度を計算した．その結果，イオン速度は観測と同様に共回転速度から遅れた．イオン速度は，イオン－ダスト衝突によって生じる磁気圏電場によって共回転速度から遅くなる．

ダスト－プラズマ相互作用は磁気圏－電離圏結合を介して生じる．磁力線に沿った電流が土星電離圏のダイナモ電場を弱くしている．また，ダスト層の厚さが大きい時，またはダスト層の厚さが小さくてもダスト密度が大きければダスト－プラズマ相互作用が顕著になる．

謝辞　Cassini RPWS/LPはThe Swedish National Space Board（SNSB）の支援を受けています．

文　献

Blanc, M. F., R. Kallenbach and N. V. Erkaev (2005), Solar system magnetospheres, *Space Sci. Rev.* **116**, 227-298, doi:10.1007/s11214-005-1958-y.

Bridge, H. S., J. W. Belcher, A. J. Lazarus, S. Olbert, J. D. Sullivan, F. Bagenal, P. R. Gazis, R. E. Hartle, K. W. Ogilvie, J. D. Scudder, E. C. Sittler, A. Eviatar, G. L. Siscoe, C. K. Goertz and V. M. Vasyliunas (1981), Plasma observations near Saturn-Initial results from Voyager 1, Science, **212**, 217-224, doi:10.1126/science. 212. 4491. 217.

Bridge, H. S., F. Bagenal, J. W. Belcher, A. J. Lazarus, R. L. McNutt, J. D. Sullivan, P. R. Gazis, R. E. Hartle, K. W. Ogilvie, J. D. Scudder, E. C. Sittler, A. Eviatar, G. L. Siscoe, C. K. Goertz and V. M. Vasyliunas (1982), Plasma observations near Saturn-Initial results from Voyager 2, *Science*, **215**, 563-570, doi:10. 1126/science. 215. 4532. 563.

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-Wehrlin, P. Galopeau, A. Meyer, R. Boström, G. Gustafsson, J. -E. Wahlund, L. Åhlen, 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.

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

Horányi, M., T. W. Hartquist, O. Havnes, D. A. Mendis and G. E. Morfill (2004), Dusty plasma effects in Saturn's magnetosphere, *Rev. Geophys.*, **42**, RG4002, doi:10.1029/2004RG000151.

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.

Morooka, M. W., J. -E. Wahlund, A. I. Eriksson, W. M. Farrell, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, A. M. Persoon, M. Shafiq, M. André and M. K. G. Holmberg (2011), Dusty plasma in the vicinity of Enceladus, *J. Geophys. Res.*, 116, A12221, doi:10.1029/2011JA017038.

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.

Richardson, J. D. (1986), Thermal ions at Saturn: Plasma parameters and implications, *J. Geophys. Res.*, **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.

Saur, J., B. H. Mauk, A. Kaßner and F. M. Neubauer (2004), A model for the azimuthal plasma velocity in Saturn's magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **109**, A05217, doi:10.1029/2003JA010207.

Schunk, R. W. and A. F. Nagy (2000), *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*, Cambridge University Press, The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom.

Shafiq, M., J. -E. Wahlund, M. W. Morooka, W. S. Kurth and W. M. Farrell (2011), Characteristics of the dust-plasma interaction near Enceladus' SouthPole, *Planet. Space. Sci.*, **59**, 17-25, doi:10.1016/j.pss.2010.10.006.

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.

Smith, H. T., R. E. Johnson, M. E. Perry, D. G. Mitchell, R. L. McNutt and D. T. Young (2010), Enceladus plume variability and the neutral gas densities in Saturn's magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **115**, A10252, doi:10.1029/2009JA015184.

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.

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.

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

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.