

ソーラーセイル周辺のプラズマ挙動と 帯電特性に関する数値シミュレーション

○村中崇信¹, 臼井英之², 篠原育³

¹JAXA 情報・計算工学センター

²神戸大学

³JAXA 宇宙科学研究所



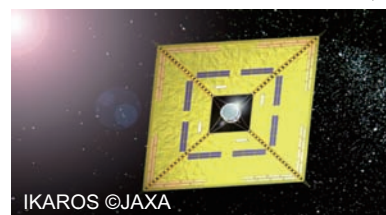
第7回宇宙環境シンポジウム
2010.10.19-20 @東京国際フォーラム



ソーラーセイルとは?

1

- 次世代惑星間航行宇宙機の候補のひとつ
 - 推力として**太陽光圧を使用**: 太陽光圧 $\sim \mu\text{Pa}@1\text{AU}$
 - 従来のスラスタ(電気推進等)と比較して,**使用する推進剤の量が少ない**
- 宇宙機のデザインがとても特徴的
 - **大面積の極薄膜を使用** (Al-coated polyimide)
 - 面積: $10 \times 10 \sim 100 \times 100 (\text{m}^2)$, 厚さ: $\sim 10^{-6} (\text{m})$ (推力: $14 \times 14 \text{m}^2$ 薄膜で 0.5g 重)
- **2010年はソーラーセイル実機打上げの年**
 - IKAROS (JAXA5月打上げ/ ソーラー電力セイル実証機/ 金星軌道)
 - Light Sail-1 (TPS年内打上げ予定/ Ultra-light sail/ 地球周回軌道, 800km)
- 大面積薄膜を有する宇宙機と周辺プラズマの相互作用が特異
 - (後述)



セイル周辺のプラズマ分布と電位構造の概要

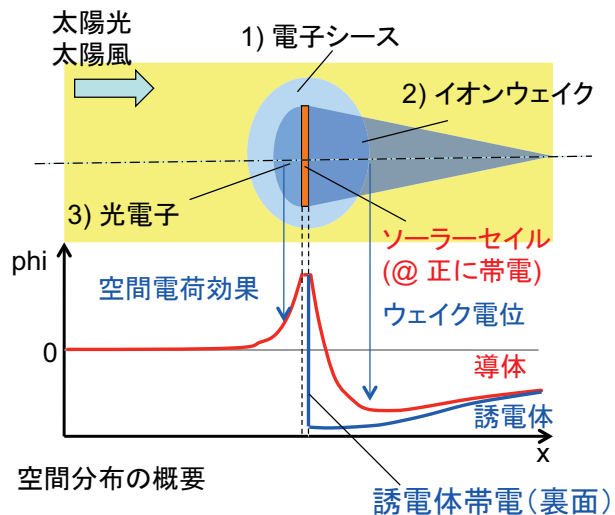
2

太陽風プラズマ

- 1) Debye長 $\sim L_s$ (セイルのスケール長)
 - セイルの静電ポテンシャルはプラズマによって遮蔽されるが、セイルからは十分しみ出している
- 2) $v_{ti} \ll v_d, v_{te} > v_d$ (v_t : 熱速度, v_d : ドリフト速度)
 - セイル下流側にイオンのウェイク領域が形成される

光電子

- 3) セイル上流側の日照面から放出 (日照面は膜面の導体側)
 - 放出面近傍からセイル周辺へと拡散: 光電子の空間電荷効果



荷電粒子の空間分布:

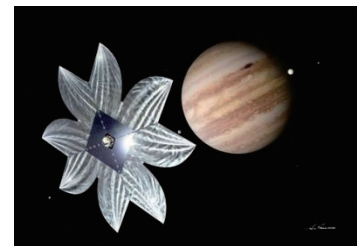
セイル周辺の電位構造を決定→セイル面上の電流収集に影響を及ぼす



セイル周辺のプラズマ挙動と帯電特性を解析する意義

3

- 宇宙機構体電位の見積は、宇宙機搭載電子機器に対して必要不可欠 (安全性評価を含む)
 - ソーラーセイル: 光電子, $V_s \sim +10V$
 - 荷電粒子の空間電荷効果が無視出来ない
- セイル周辺の荷電粒子の分布が特異
 - 上流側の光電子放出, 下流側のイオンウェイク
- 将来はソーラーセイルに電子・電気機器が搭載される計画
 - 上流側導体面 (日照側): 太陽電池, イオンエンジン (スラスト側)
 - 各種計測器: 太陽風計測装置, 光学機器等



- 宇宙機帯電状態と荷電粒子の分布を詳細に見積もる事は、宇宙機のペイロードデザインの基礎研究として必須



本研究の目的

4

将来の惑星間航行へのソーラーセイルの本格利用を視野に入れて、セイルと周辺プラズマとの相互作用の詳細を**完全粒子シミュレーション**により解析する(0.5,1.0,3.0AU環境についてそれぞれ解析)

- **宇宙機帯電状態**
 - 浮動電位,絶縁体の乖離電位(裏面wake側)
 - 電流収集特性
- **荷電粒子の空間分布と電位分布の詳細**
 - 下流側の大規模なイオンウェイク
 - セイル近傍の光電子分布



環境モデル (1/2): 太陽風プラズマ環境モデル

5

- 観測衛星のデータをもとに,プラズマパラメータを簡略化 (Ulysses spacecraft 等)
- 太陽風は完全に**プロトン**と**電子**から構成される
- 両者は同じ単一の密度・温度を持つ
- 磁場の影響は無視した

	0.5AU	1.0AU	3.0AU
plasma density [10^6 m^{-3}]	50	6	0.5
plasma temperature [eV]	40	10	5
drift velocity [km/s]	470		
m_i/m_e (H+)	1836		
Debye length [m]	6.7	9.6	23.5

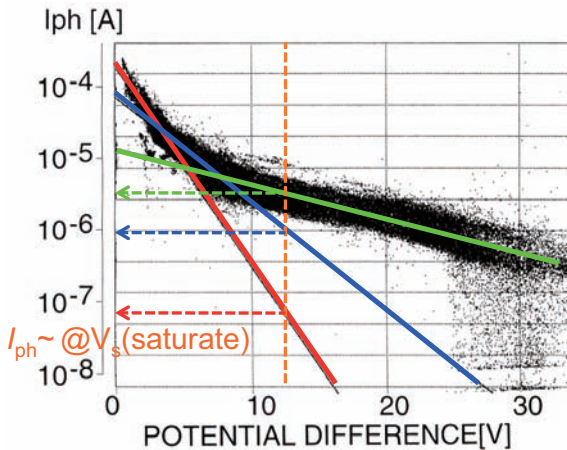


環境モデル (2/2): 光電子スペクトルモデル

6

GEOTAILの観測結果の解析
(地球磁気圏尾部)

光電子エネルギースペクトルが希薄なプラズマ
環境下でのプラズマ観測により見積もられた
($\sim 0.1/\text{cc}$)



$$J(V_s) [\mu\text{A} / \text{m}^2] = 53 \exp\left(\frac{-V_s}{1.6}\right) + 21 \exp\left(\frac{-V_s}{3.0}\right) + 4 \exp\left(\frac{-V_s}{8.9}\right)$$

光電子放出が支配的な環境では, $V_s \gg +1$;

典型的な単一-Maxwell分布によるエネルギー
スペクトルモデル では十分出ない

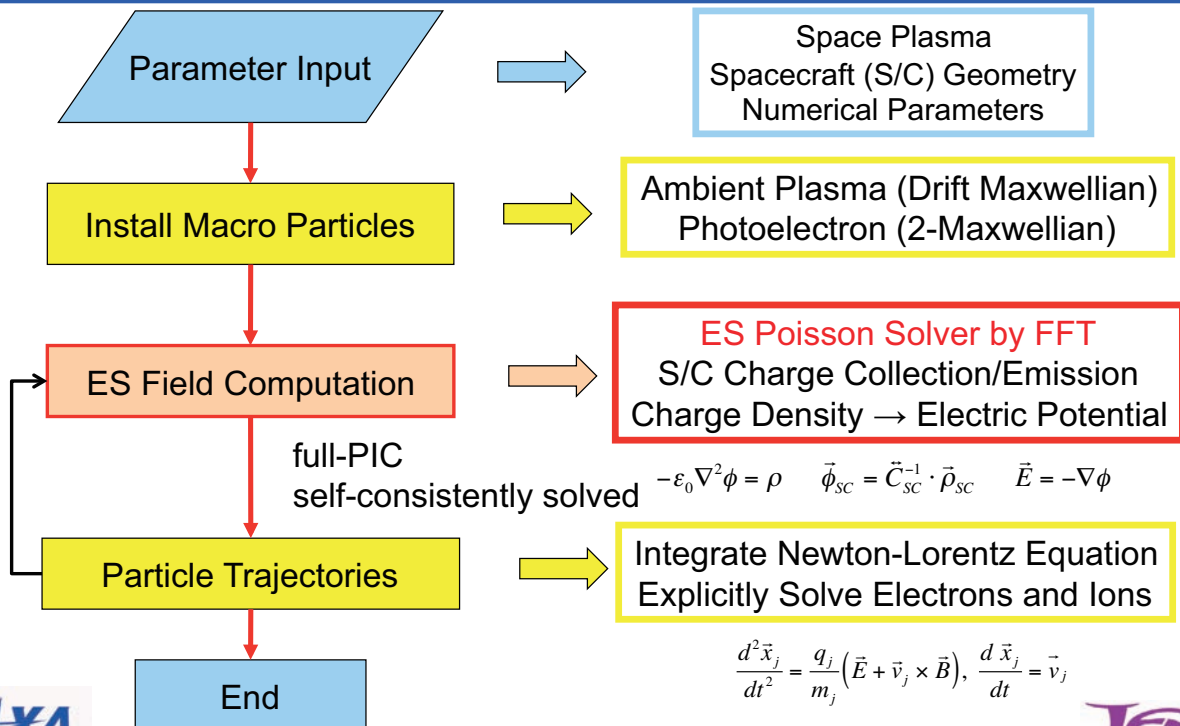
本研究では, 1.5 eV & 5.0 eV 2-Maxwell分布を使用

T. Nakagawa et al., Earth, Planets and Space, vol. 52, pp283-292, 2000.



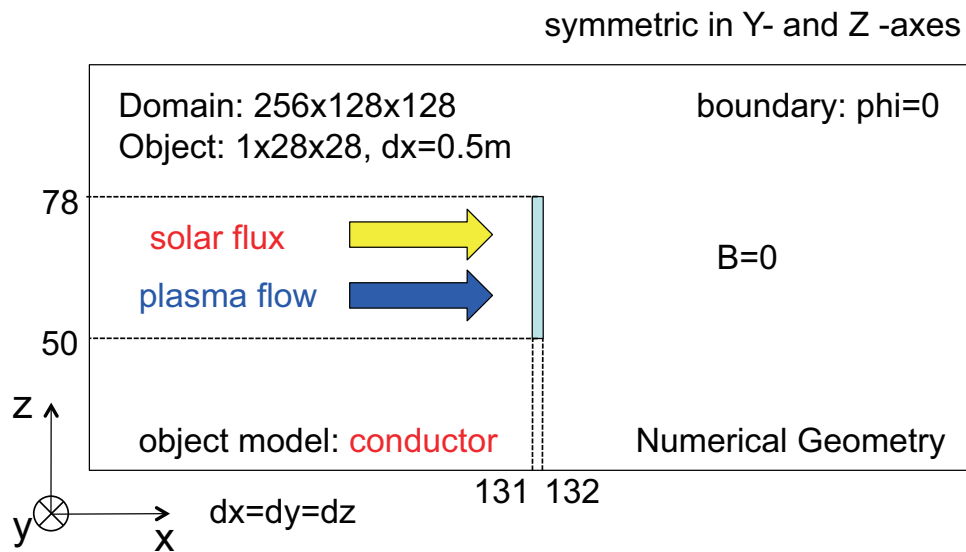
Algorithm of the 3-D ES full-PIC code

7



計算体系概略図

8



MPI parallel computation: Domain decomposition in X-axis



計算パラメータ

9

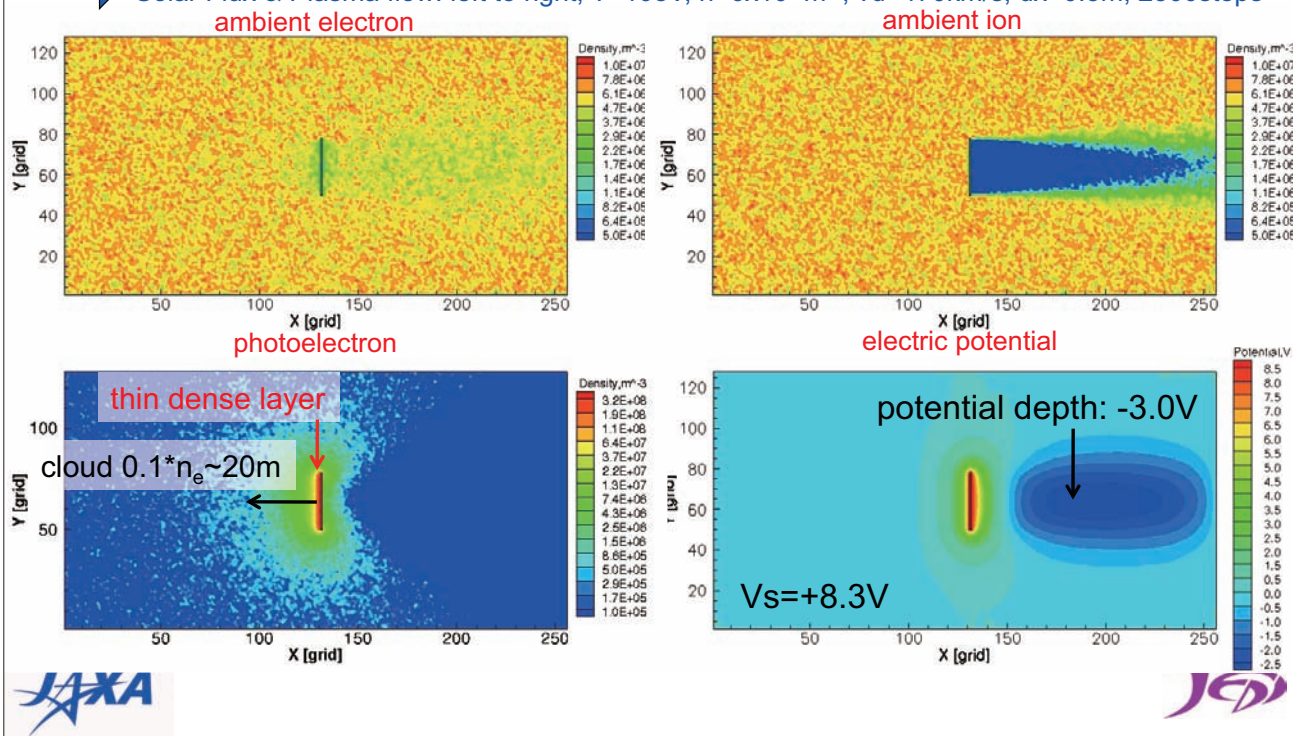
	0.5AU	1.0AU	3.0AU
plasma density [10 ⁶ m ⁻³]	50	6	0.5
plasma temperature [eV]	40	10	5
drift velocity [km/s]	470		
mi/me (H+)	1836		
Debye length [m]	6.7	9.6	23.5
PE current flux [uA/m ²]	160	40	4.4
PE temperature (1) [eV]	1.5		
PE temperature (2) [eV]	5.0		
PE flux ration of PE1:PE2	9:1		
numerical domain [grid]	256*128*128		
object size [grid]	1*28*28		
dx [m]	0.5		
dt [s]	0.5x10 ⁻⁷	1.0x10 ⁻⁷	1.4x10 ⁻⁷



Charged Particle & Potential Profiles@1.0AU

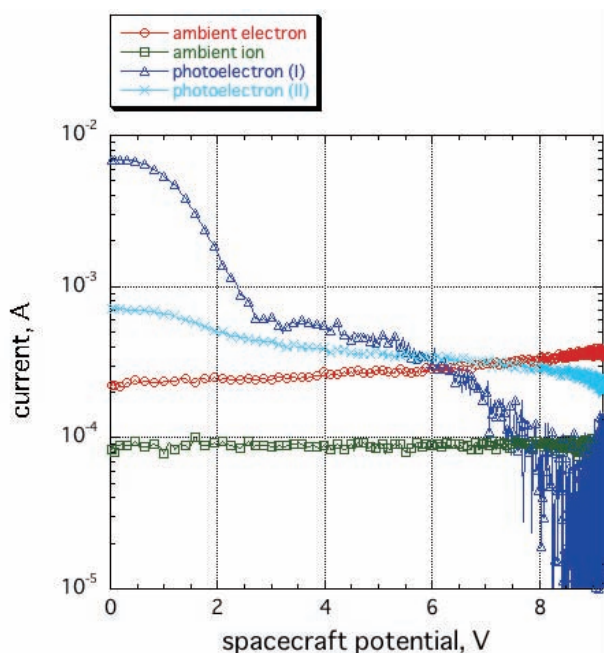
10

➡ Solar Flux & Plasma flow: left to right, $T=10\text{eV}$, $n=6 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, $v_d=470\text{km/s}$, $dx=0.5\text{m}$, 2500steps



Current Collection Analysis: Current-Voltage Characteristics @1.0AU

11



Saturation Value of V_s : $+8.3\text{V}$

Ion Current: \sim constant

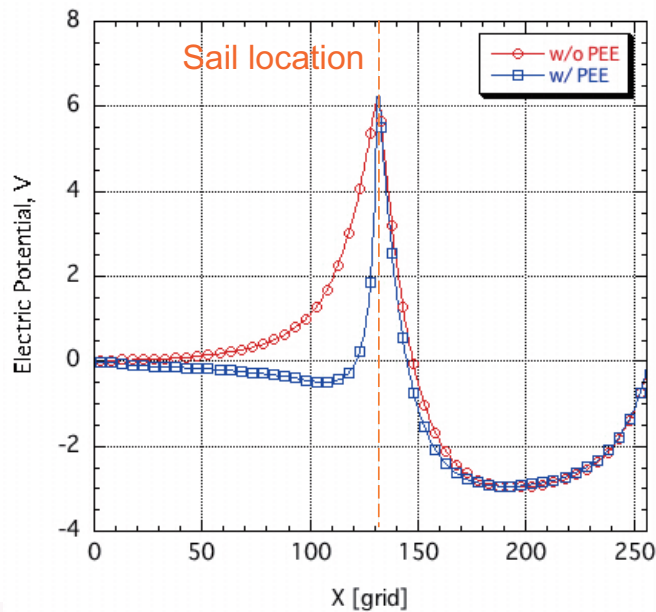
Electron Current: $f_m = 1.7$

Photoelectron Current:
partly follows a simple
exponential decrease

Ram面の電流収集： 光電子放出によるシースの縮小効果

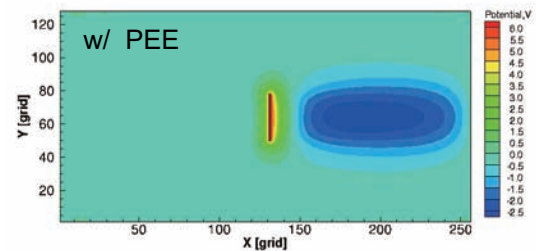
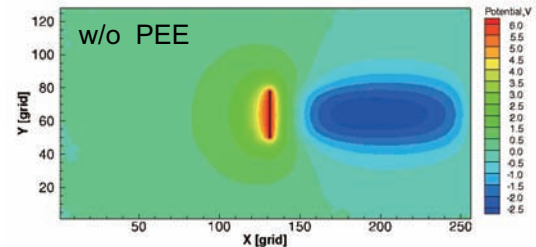
12

1.0AU, 1PEE(1.5eV) case



y=64, z=64 (center, dx=0.5m)

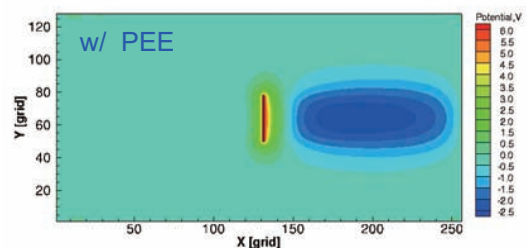
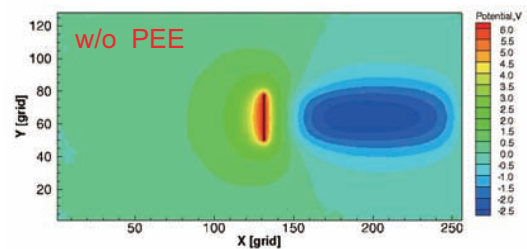
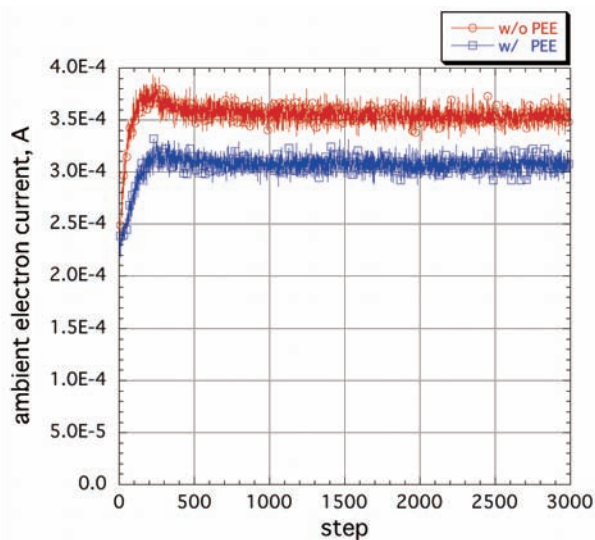
比較計算の結果



Ram面の電流収集： シースの縮小効果による収集電子電流量の減少

13

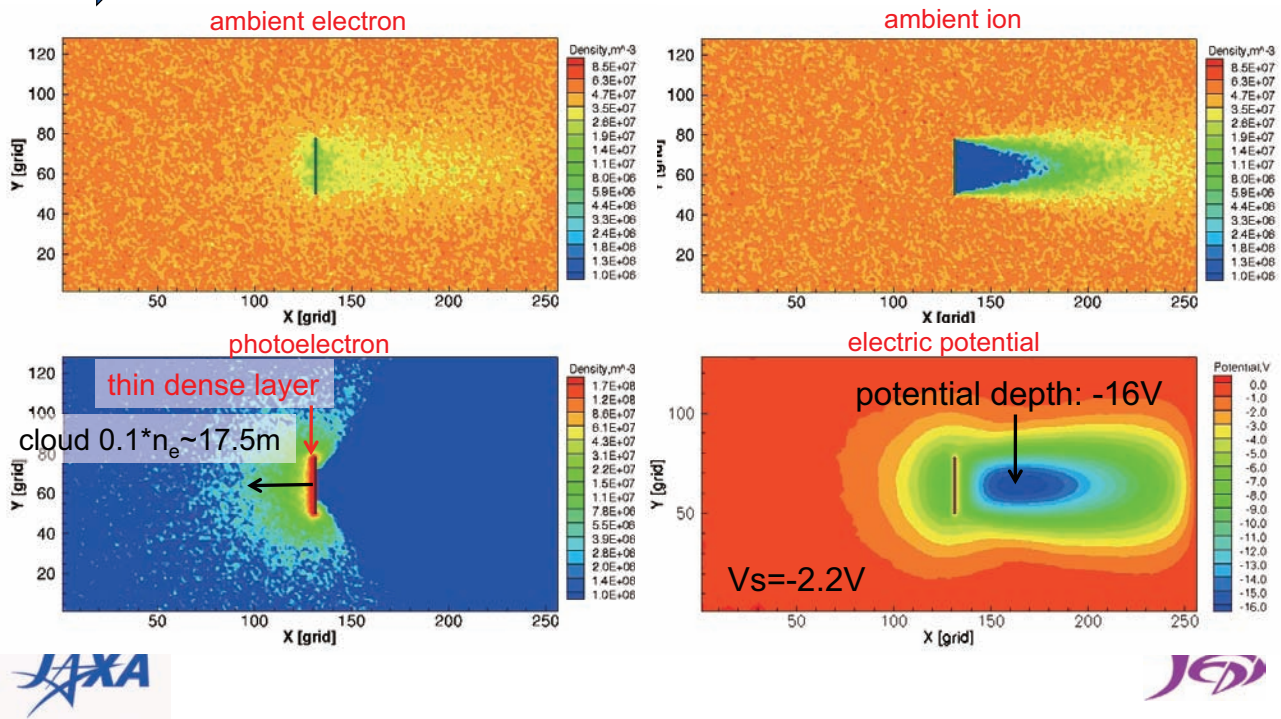
smaller ambient electron current with PEE(17% lower in this case)



Charged Particle & Potential Profiles@0.5AU

14

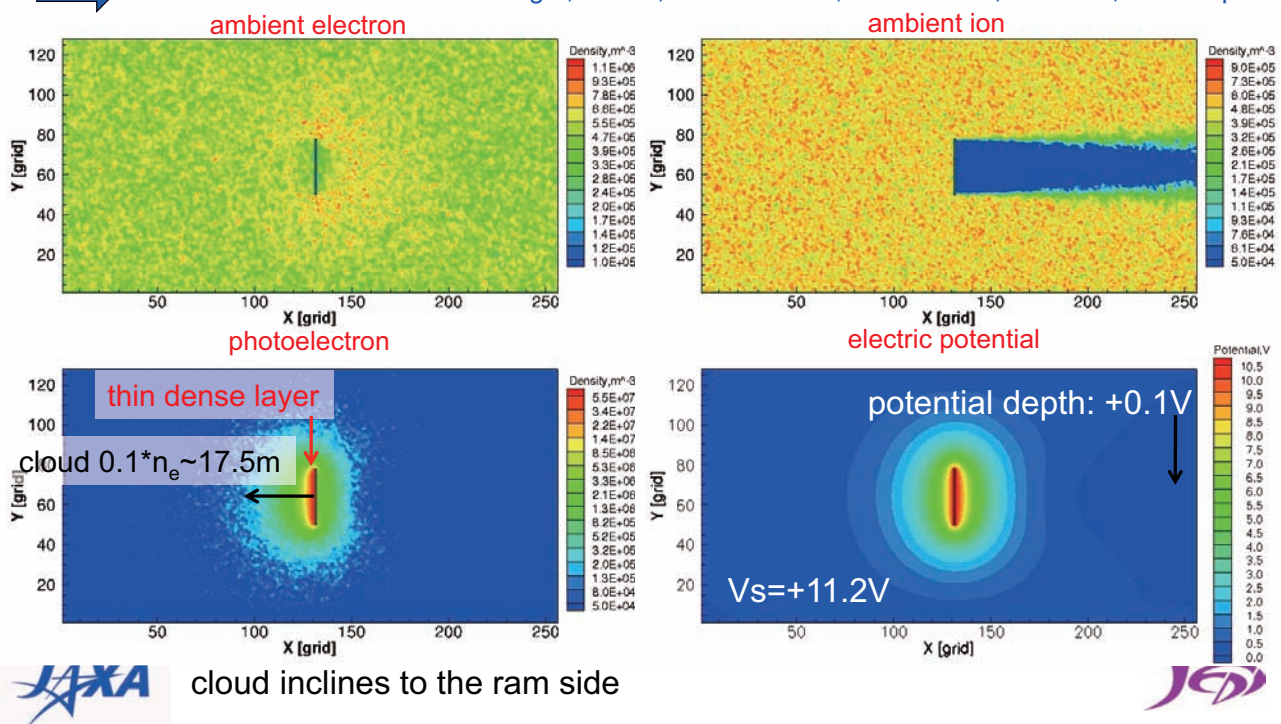
➡ Solar Flux & Plasma flow: left to right, $T=40\text{eV}$, $n=50 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, $v_d=470\text{km/s}$, $dx=0.5\text{m}$, 5000steps



Charged Particle & Potential Profiles@3.0AU

15

➡ Solar Flux & Plasma flow: left to right, $T=5\text{eV}$, $n=0.5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, $v_d=470\text{km/s}$, $dx=0.5\text{m}$, 5000steps



Conclusion Remarks

Parameters Obtained from This Study

16

	Debye length [m]	vd/vti	wake potential [V]	S/C potential [V]	Diff. potential [V]
0.5 AU	6.7 (0.48L)	5.3	-16.0 (-0.4Te)	-2.2 V	--
1.0 AU	9.6 (0.69L)	10.8	-3.0 (-0.3Te)	+8.3 V	-15.8* (MUSCAT)
3.0 AU	23.4 (1.67L)	15.6	+0.1 (+0.02Te)	+11.2V	-11.2* (MUSCAT)

	le magnification: fm	PE dens layer	PE cloud (~0.1*ne)[m]	PE diffusion to the rear
0.5 AU	0.91* (Vs<0)	~1.7x10 ⁸ m ³ in 2.5m	20 (1.42L)	△partly
1.0 AU	1.7	~3.2x10 ⁸ m in 1.5m	17.5 (1.25L)	○
3.0 AU	2.6	~5.5x10 ⁷ m in 2.0m	17.5 (1.25L)	◎



まとめ

17

- 本研究では、惑星間太陽風環境中での、ソーラーセイル帯電状態を数値シミュレーションにより調査した。特にセイル周辺の荷電粒子空間分布の詳細を調査した。本研究結果は、搭載電子・電気機器配置等、将来の惑星間航行に向けたソーラーセイルの設計に貢献するものと考ええる。
- イオンウェイクの発生によって、セイル下流側には負のウェイクポテンシャルが形成される。この絶対値によっては、通常正のセイル浮動電位が負となる場合もあり得る。内惑星側の太陽風環境ではこの可能性を考える必要がある。
- セイル周辺には光電子雲の発生が確認された。放出面反対側の下流側にも拡散するが、その程度はウェイクポテンシャルの大小に影響を受ける。放出面側では、電子シースの縮小をもたらす背景電子電流収集量を低下させる効果がある。
- 裏面の絶縁体の乖離電位飽和値をMUSCATによって計算した。この絶対値は帯放電問題に対して危険な値ではないが、ウェイクポテンシャルと同程度以上であり、光電子の裏面側への拡散を抑制すると考えられる。
- 大規模構造物周辺の電位解析にも繋がる

