



# 帯電解析に対する 材料パラメータの感度解析

大平正道(JAXA)

JAXA: 今泉 充、古賀 清一  
都市大学: 三宅 弘晃、渡邊 力夫、長門 拓、矢部 謙治  
奈良高専: 藤井 治久  
九工大: 豊田 和弘



## 目次



1. はじめに
2. 解析条件
3. 材料パラメータ設定
4. 非受光時解析
5. 受光時解析
6. まとめ





## 1. はじめに



### 帯電解析に用いる物性材料パラメータ

#### 光電流密度

$\alpha_{ph}[10\mu A/m^2]$ : 太陽光を浴びた際の単位面積当たりの放出電流

#### 二次電子放出係数

$S_{emax}[eV]$ : 二次電子放出が最大になる入射電子エネルギー

$S_{dmax}[-]$ : 二次電子放出の最大値

#### 導電率

$Cond[1/\Omega m]$ : 体積抵抗率の逆数

#### 比誘電率

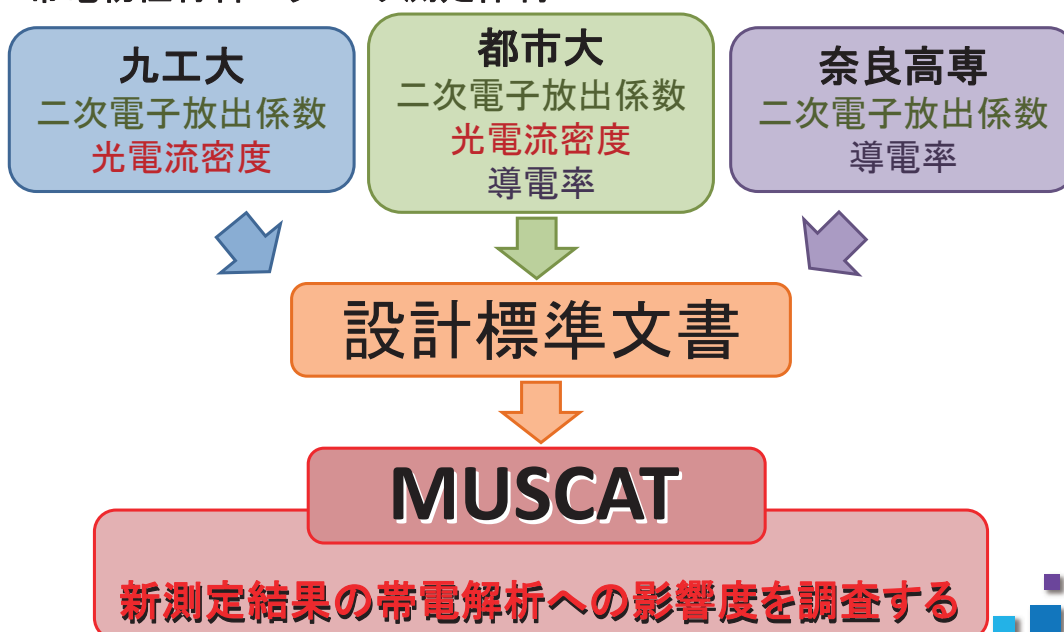
$Epsil[-]$ : 比誘電率



## 1. はじめに

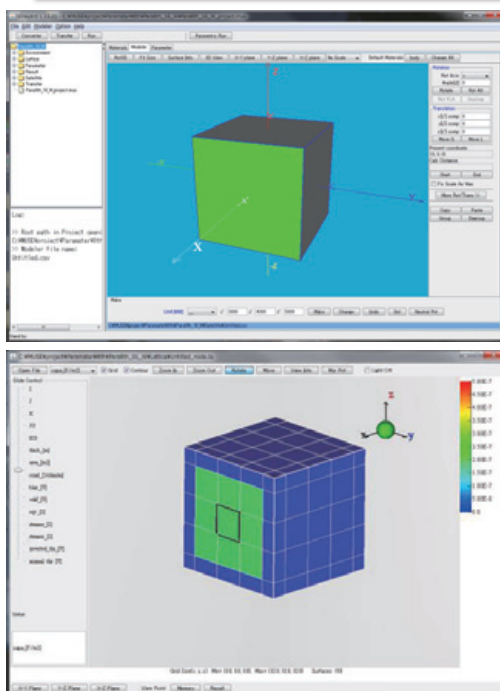


### 帯電物性材料パラメータ測定体制





## 2. 解析条件 = 衛星モデル =



### 衛星モデル

2m × 2m × 2mの直方体

### 表面材料設定

不導体面: 1面(テスト材料)

任意に材料パラメータを変更した不導体設定、受光・非受光でそれぞれ解析

導体面: 5面

BlackKaptonの測定値を基にした導体

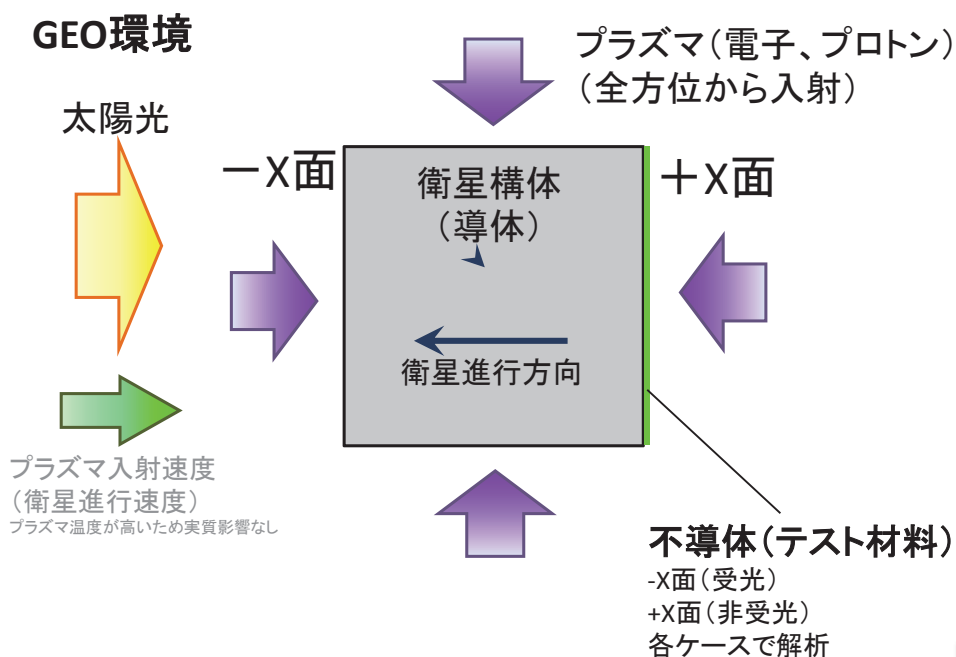
0.5mのCell Sizeで解析した。  
衛星サイズに対してかなり大きい  
が、衛星形状がシンプルであるので問題ない。



5



## 2. 解析条件 = 環境条件 =



6



## 2. 解析条件 = 宇宙環境 =

解析はGEO環境で、MUSCATのParametric Run機能から地方時18時のもっとも発生確率の高い環境を使用した。

☒ GEO ☐ LEO ☐ PEO read Default File Orbit Parameter

< PIC/PT electron >

電子	Number density [m-3]	1250000
	Temperature [eV]	1500

< PT low energy ion >

プロトン	Mass, mi / me	1836
	Number density [m-3]	1000000
	Temperature [eV]	5000

< Secondary electron >

Temperature [eV]	2
------------------	---

< Photo electron >

Temperature [eV]	1.5
------------------	-----

< Secondary electron >

Temperature [eV]	2
------------------	---



## 2. 解析条件 = 計算条件 =

< Magnetic Field Vector >

x [nT] :	0.0
y [nT] :	0.0
z [nT] :	0.0

< Direction of the Sun >

x :	-1
y :	0
z :	0

< Ambient Plasma Velocity >

[km/s] :	3.07
[km/s] :	0.0
[km/s] :	0.0

< CPU, Calculation parameter >

	非受光	受光
CPU number:	1	2
dt [sec]:	1.0E-4	0.001
Total iteration number:	30000	10001
Inject particles:	30	30
Iterations to skip outputting plots:	30000	10000

< Code option >

Is plasma temperature double maxwellian?	<input type="radio"/> Yes	<input checked="" type="radio"/> No
Do you consider photo electron?	<input checked="" type="radio"/> Yes	<input type="radio"/> No
Do you consider secondary electron?	<input checked="" type="radio"/> Yes	<input type="radio"/> No

< Code option >

Do you consider the sheath plasma?	<input type="radio"/> Yes	<input checked="" type="radio"/> No
Do you consider conductive current?	<input checked="" type="radio"/> Yes	<input type="radio"/> No
Do you use RIC(Radiation Induced Conductance)?	<input type="radio"/> Yes	<input checked="" type="radio"/> No
Do you use fast computation?	<input checked="" type="radio"/> Yes	<input type="radio"/> No
Terminate condition: Maximum inverted gradient [V]	1000	
Terminate condition: Maximum normal gradient [V]	5000	

← 受光解析時はNo





### 3. 材料パラメータ設定



材料パラメータは各パラメータに2水準を設定し、それを実験計画法のL16直交表に基づいて全16パターンの組み合わせを作成し、受光・非受光について直交解析した。

受光 非受光	$\alpha_{ph}$ [10 $\mu$ A/m <sup>2</sup> ]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ $\Omega$ ・m]	Epsil [-]
第1水準	0.8	150	1.5	1.0e-18	2.5
第2水準	1.5	200	2	1.0e-14	3.5

### 解析指標

- **乖離電圧の飽和値**: 構体とテスト材料表面の電位差
- **飽和時間**: 乖離電圧が飽和するまでにかかる時間

### 直交解析条件

100step毎の乖離電圧変化量が連続して3回、全体の1%以下になった状態を飽和とみなし、その際の**乖離電圧と時間(飽和時間)**について直交解析を行った。

2パラメータ間の交互作用についても解析した。非受光時には $\alpha_{ph}$ は影響しないことから、分散分析時には $\alpha_{ph}$ と $\alpha_{ph}$ に係る交互作用は誤差として扱った。また現象上及び統計上有意性がない交互作用も誤差として扱った。



9



### 3. 材料パラメータ設定



L16直交表に基づいたパラメータ設定（黒字は第一水準、白字が第二水準）

分類	NAME	aph	Semax	Sdmax	Cond	Epsil
導体	Body	1	300	1.8	-	-
誘電体（疑似材料パラメータ）	No.01	0.8	150	1.5	1e-18	2.5
	No.02	0.8	150	1.5	1e-16	3.5
	No.03	0.8	150	2	1e-18	3.5
	No.04	0.8	150	2	1e-16	2.5
	No.05	0.8	200	1.5	1e-18	3.5
	No.06	0.8	200	1.5	1e-16	2.5
	No.07	0.8	200	2	1e-18	2.5
	No.08	0.8	200	2	1e-16	3.5
	No.09	1.5(0.9)	150	1.5	1e-18	3.5
	No.10	1.5(0.9)	150	1.5	1e-16	2.5
	No.11	1.5(0.9)	150	2	1e-18	2.5
	No.12	1.5(0.9)	150	2	1e-16	3.5
	No.13	1.5(0.9)	200	1.5	1e-18	2.5
	No.14	1.5(0.9)	200	1.5	1e-16	3.5
	No.15	1.5(0.9)	200	2	1e-18	3.5
	No.16	1.5(0.9)	200	2	1e-16	2.5

( )内は受光解析時



10

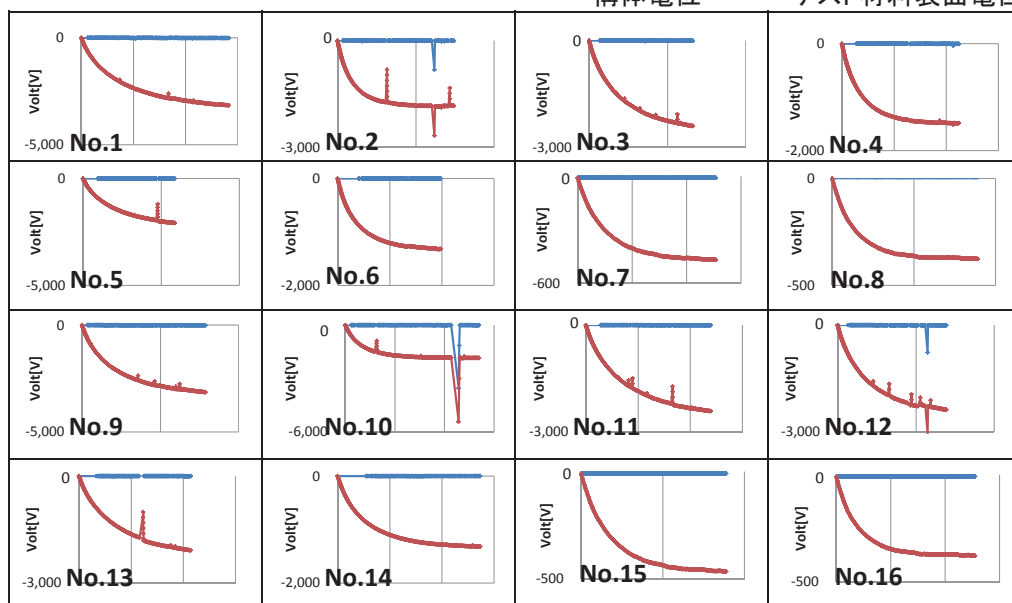
## 4. 非受光時の解析

### 4. 非受光時解析 =シミュレーション結果=



各解析結果の構体電位とテスト材料表面電位のグラフ

— 構体電位 — テスト材料表面電位



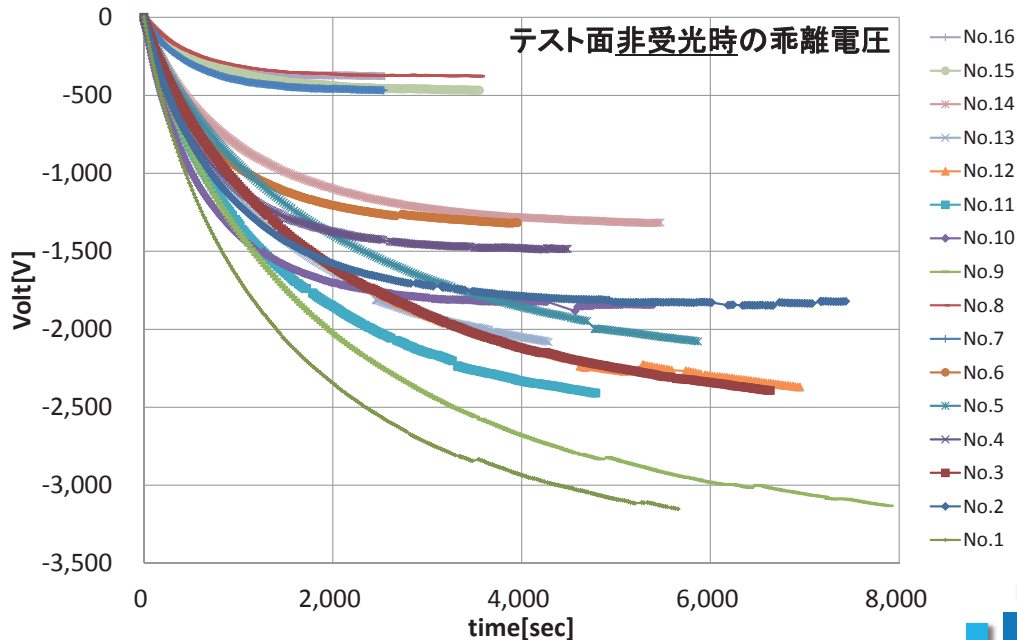
※スパイク状のノイズは、解析時間短縮処理上のノイズ



#### 4. 非受光時解析 = シミュレーション結果 =



不導体面中心と構体電位との乖離電圧を指標として、下記グラフに示す。



13



#### 4. 非受光時解析 = 乖離電圧・直交解析 =



非受光時乖離電圧

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
乖離電圧[V]	-2206	-1546	-1737	-1219	-1538	-1040	-388	-311
	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16
乖離電圧[V]	-2246	-1509	-1725	-1719	-1537	-1039	-382	-311
全平均[V]								-1278

	$\alpha_{ph}$	Semax	Sdmax	Cond	Epsil	Se × Sd	誤差
寄与率[%]	-	54	23	9	0	7	8
水準効果1[V]	-	-460	-304	-191	-36	166	-
水準効果2[V]	-	460	304	191	36	-166	-

今回のモデル環境下における乖離電圧については、二次電子放出関数のパラメータが支配的であり、導電率も一定の効果を持つことが確認された。

14



#### 4. 非受光時解析 = 飽和時間・直交解析 =

非受光時飽和時間

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
飽和時間[sec]	1729	1863	2407	1283	2460	1217	883	987
	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16
飽和時間[sec]	2521	1272	1671	2330	1755	1702	1188	706
全平均[sec]								1623

飽和時間	$\alpha_{ph}$	Semax	Sdmax	Cond	Epsil	Se × Sd	誤差
寄与率[%]	-	21	11	12	29	16	12
水準効果1[sec]	-	261	191	203	-309	-230	-
水準効果2[sec]	-	-261	-191	-203	309	230	-

今回のモデル環境下における飽和時間については、比誘電率の寄与率が最も高いが、全パラメータが解析に影響を及ぼすことが確認された。



#### 4. 非受光時解析 = 直交解析 =

非受光時乖離電圧

非受光	$\alpha_{ph}$ [10 $\mu$ A/m <sup>2</sup> ]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ $\Omega$ ·m]	Epsil [-]		
第1水準	0.8	150	1.5	1.0e-18	2.5	全平均[V]	-1278
第2水準	1.5	200	2	1.0e-14	3.5		

乖離電圧	$\alpha_{ph}$	Semax	Sdmax	Cond	Epsil	Se × Sd	誤差
寄与率[%]	-	54	23	9	0	7	8
水準効果1[V]	-	-460	-304	-191	-36	166	-
水準効果2[V]	-	460	304	191	36	-166	-

	Semax [eV]	Sdmax [-]
水準の差	50	0.5
水準効果差[V]	920[V]	608[V]



Semaxが50[eV]変化することで、帯電電位が920[V]変化する。

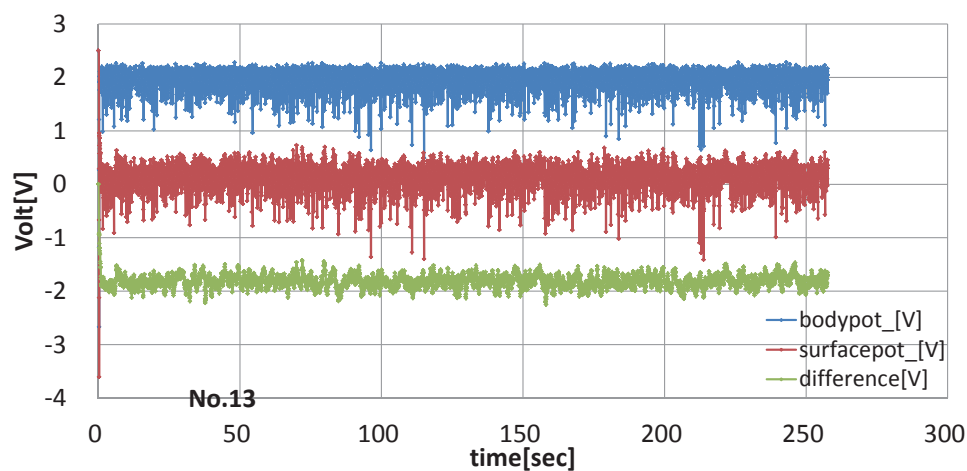
**非常に厳しい条件**







#### 4. 非受光時解析 = 参考・Semax=350[eV]=



非受光	$\alpha^{ph}$ [10 $\mu$ A/m <sup>2</sup> ]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ $\Omega$ ·m]	Epsil [-]
第1水準	4	350	1.5	1.0e-18	1.5

Semaxを350[eV]に設定すると、二次電子放出による帯電緩和能力のため帯電しない。



## 5. 受光時の解析



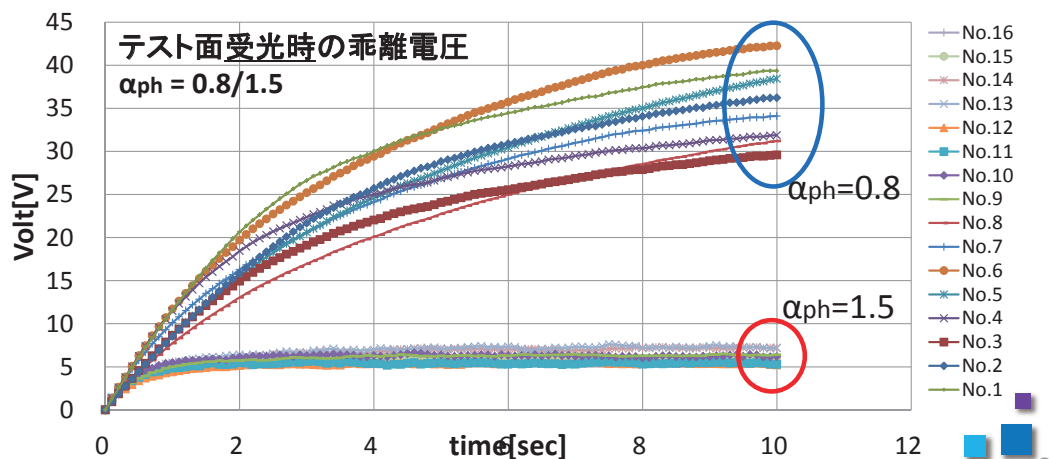


## 5. 受光時解析 =シミュレーション結果=



$\alpha_{ph}=1.5$ では帯電緩和能力が高すぎて、他のパラメータの影響が確認出来なかった。

非受光	$\alpha_{ph}$ [10 $\mu$ A/m <sup>2</sup> ]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ $\Omega$ ·m]	Epsil [-]
第1水準	0.8	150	1.5	1.0e-18	2.5
第2水準	1.5	200	2	1.0e-14	3.5

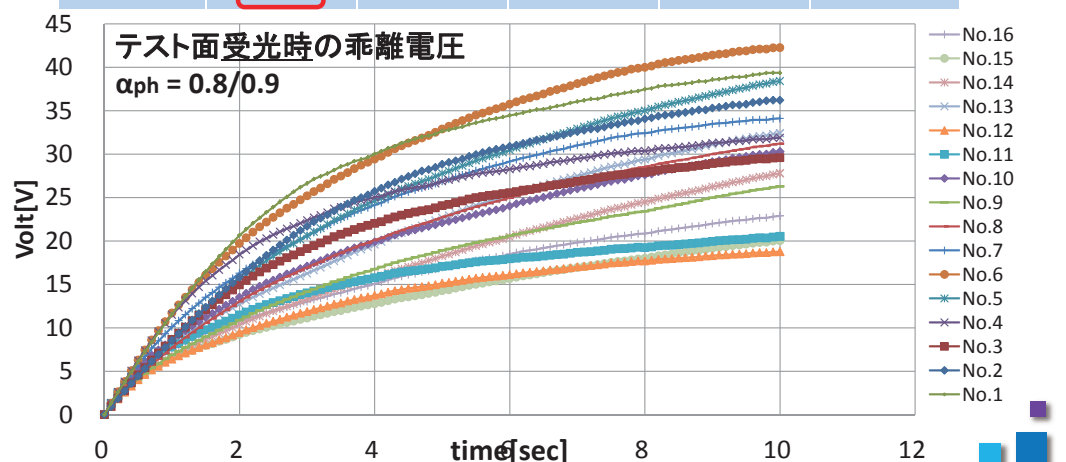


## 5. 受光時解析 =シミュレーション結果=



$\alpha_{ph}$ の第2水準値を0.9に変更して再度解析を行った。

受光	$\alpha_{ph}$ [10 $\mu$ A/m <sup>2</sup> ]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ $\Omega$ ·m]	Epsil [-]
第1水準	0.8	150	1.5	1.0e-18	2.5
第2水準	0.9	200	2	1.0e-14	3.5

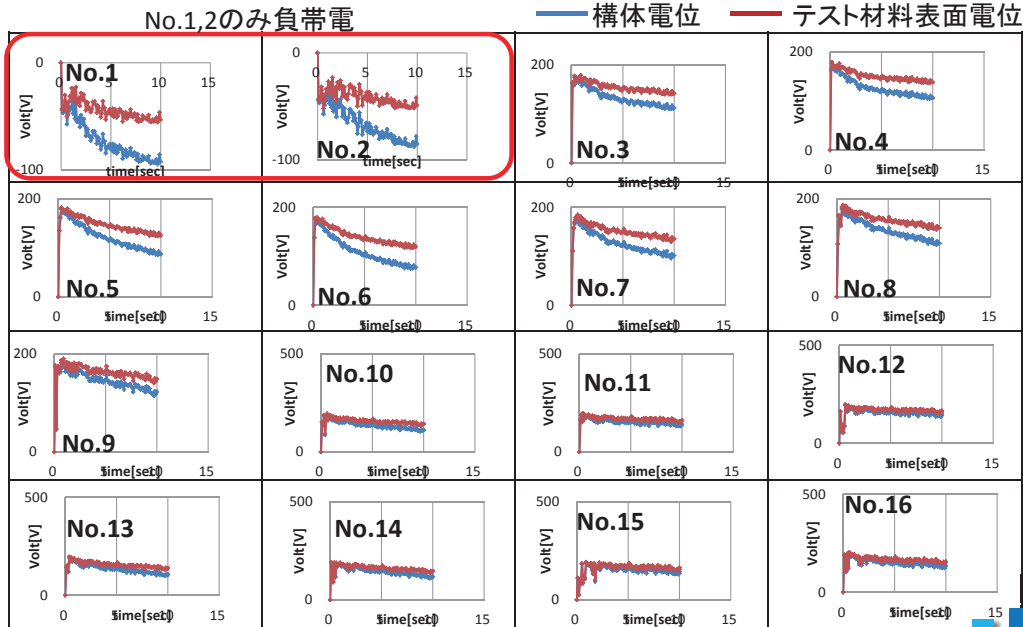




## 5. 受光時解析 = シミュレーション結果 =



各解析結果の構体電位とテスト材料表面電位のグラフ  $\alpha_{ph} = 0.8/0.9$



21



## 5. 受光時解析 = 乖離電圧・直交解析 =



受光時乖離電圧

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
乖離電圧[V]	35.3	32.9	26.7	26.4	36.7	40.1	32.5	31.2
	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16
乖離電圧[V]	26.3	28.8	17.8	17.2	32.4	27.8	20.1	22.9
	全平均[V]							28.4

	$\alpha_{ph}$	Semax	Sdmax	Cond	Epsil	誤差
寄与率[%]	44	10	40	0	3	4
水準効果1[V]	4.3	-2.0	4.1	0.0	1.1	-
水準効果2[V]	-4.3	2.0	-4.1	0.0	-1.1	-

$\alpha_{ph}$ による影響とSdmaxによる影響が支配的である。ただし、 $\alpha_{ph}$ は設定水準の差が  $0.1[10\mu A/m^2]$ であることを考えると、受光面では $\alpha_{ph}$ がほぼ表面電位を支配すると考えられる。ただし実際の宇宙機材料においては、光電流密度の平均は  $1.9[10\mu A/m^2]$ であり  $1.0[10\mu A/m^2]$ を下回る材料がほとんどないことから、実解析上は受光面の帯電は緩和され、平常環境下では帯電進展しないと言える。

また、飽和時間については十分な分散が得られず、直交解析出来なかった。

22



## 6. まとめ



今回の解析条件(GEO平穏時)においては...

- 光電流密度による帯電緩和能力は高く、ほとんどの宇宙機表面材料では受光時に帯電しない。
- 非受光時には、二次電子放出係数が支配的に帯電電位を決定する。
- $S_{\text{emax}}$ 、 $S_{\text{dmax}}$ は帯電電位に対する感度が高い。
- 帯電電位が飽和するまでの時間は、全パラメータがある程度影響する。



- 新しく測定した帯電物性パラメータは帯電解析の結果に大きく影響する。
- 特に2つの二次電子放出係数パラメータについては、今後も高精度の測定が要求される。