

第8回宇宙環境シンポジウム

東京国際展示場102会議室

2011年10月19日

表面帯電計測技術

奈良工業高等専門学校 電気工学科
藤井 治久



講演内容

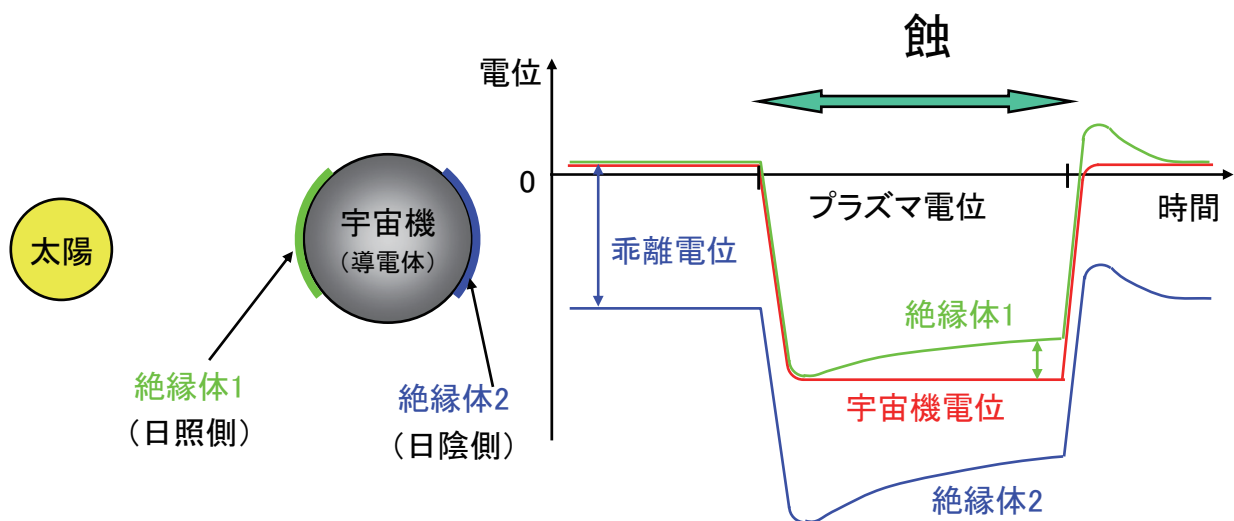
- 宇宙機の帯電
- 帯電の計測とは？
- 宇宙機絶対帯電の計測
- 表面帯電の計測
 - 宇宙機表面の帯電計測
 - 表面材料の帯電計測
 - 内部帯電の計測
- おわりに

宇宙機の帯電(定義)

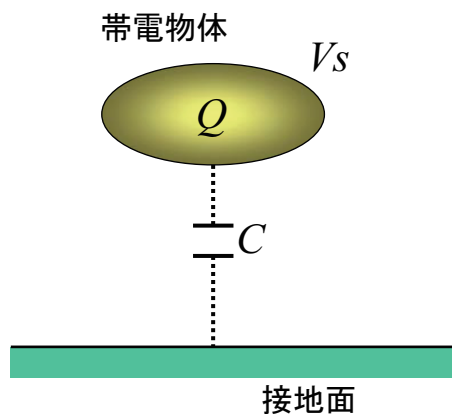
- 宇宙機の絶対帯電(absolute charging)
 - ⇕ 乖離電位 differential charging
 - 表面材料の帯電(surface charging)
 - 内部帯電(internal charging)
 - 材料内部の帯電(bulk charging)
- 表面帯電
(本講演の範囲)

宇宙機帯電モデル

- 表面材料の帯電と絶対帯電



帯電の計測とは？



$$Q = C \cdot V_s$$

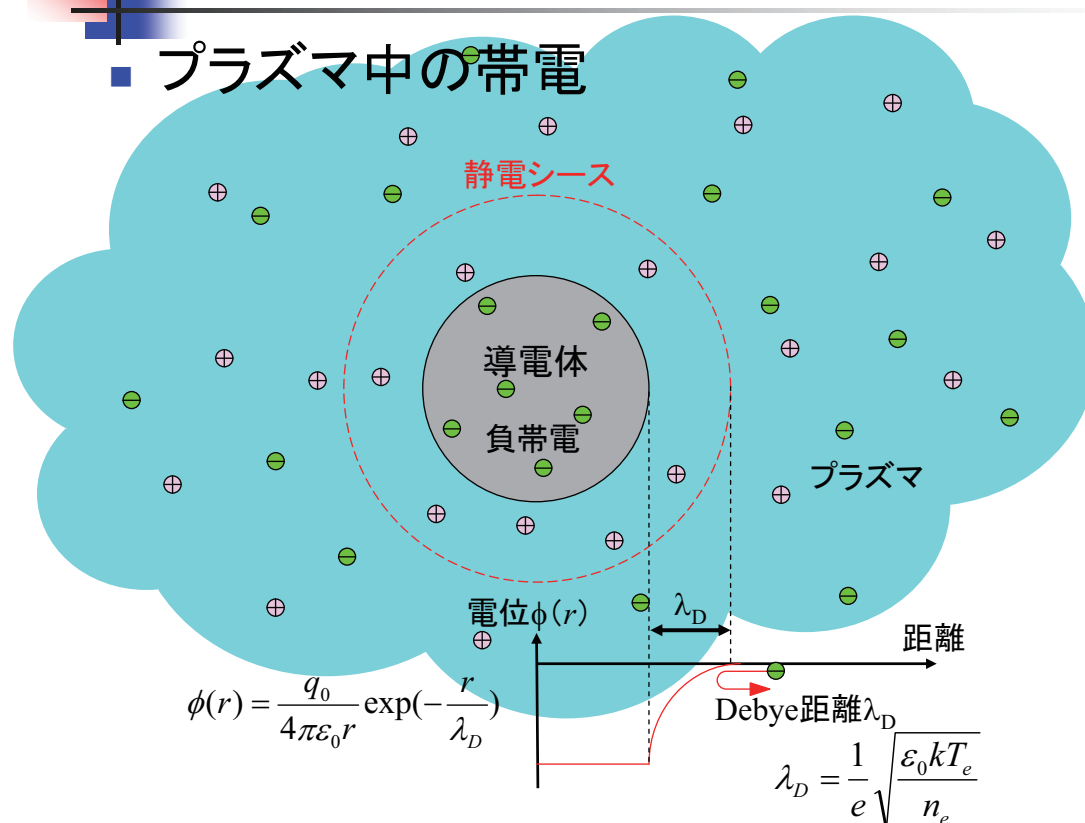
Q :電荷量 [C]

V_s :電位(電圧) [V]

C :静電容量 [F]

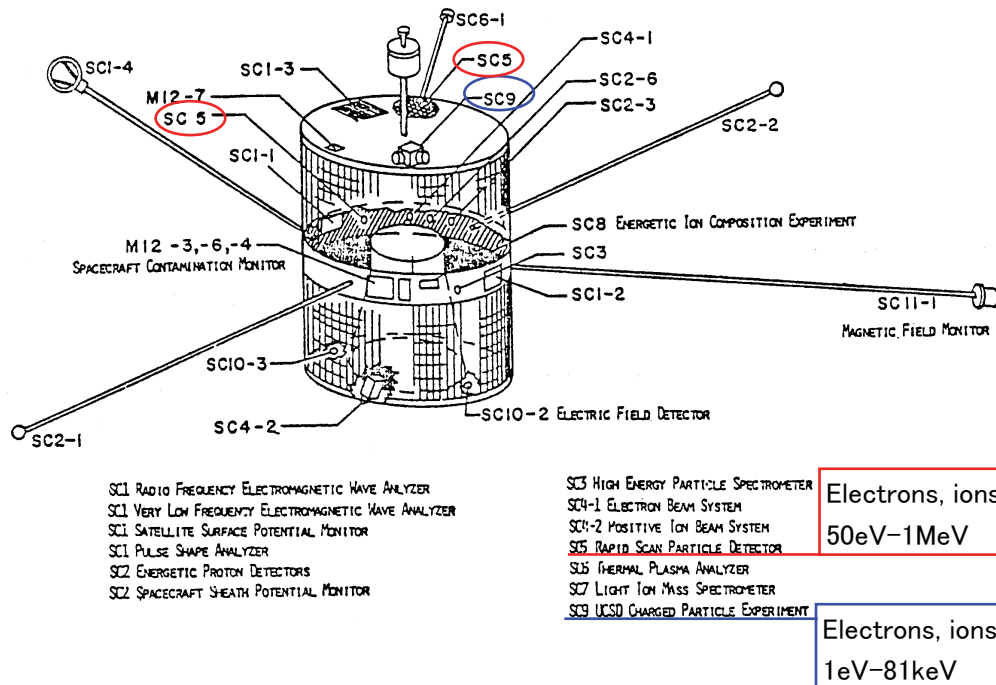
絶対帯電の計測

■ プラズマ中の帯電



宇宙機絶対帯電の計測

SCATHA衛星



宇宙機の絶対帯電計測

荷電粒子のエネルギー スペクトル計測

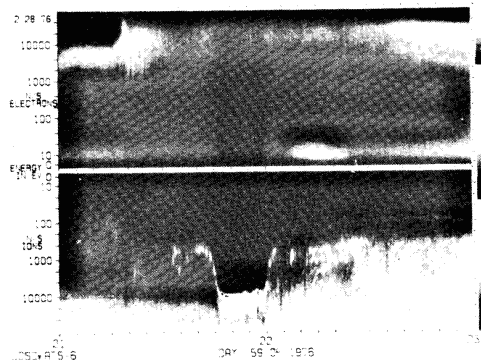


Fig. 21a Spectrogram of ATS-6 count rates as a function of time and energy for day 59, 1976. The spacecraft potential is -10,000 V at 2200 UT.

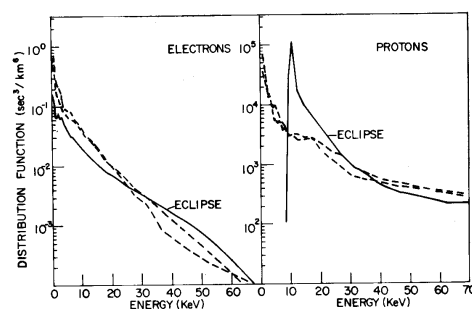
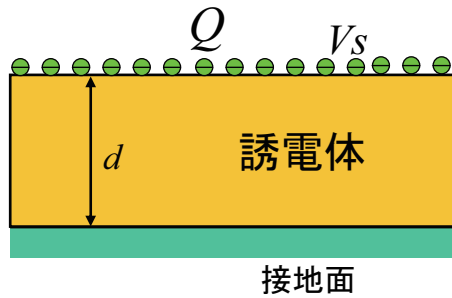


Fig. 21b Electron and ion distribution functions vs energy for day 59, 1976. (Dashed lines represent the spectra before and after eclipse; solid lines represent eclipse spectra.)

表面帯電の計測



接地面

$$Q = C \cdot V_s$$

Q :電荷量 [C]

V_s :電位(電圧) [V]

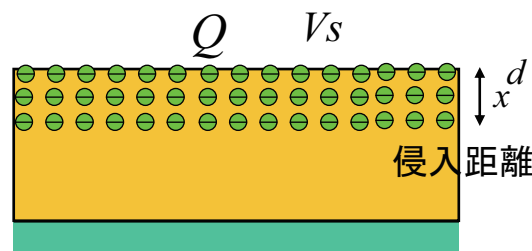
C :静電容量 [F]

$$C = \epsilon S / d$$

ϵ :誘電率

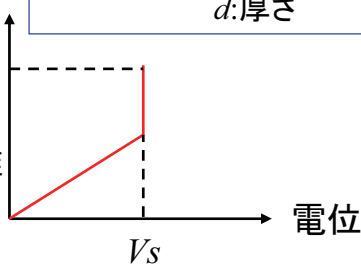
S :面積

d :厚さ



接地面

荷電粒子場での帯電

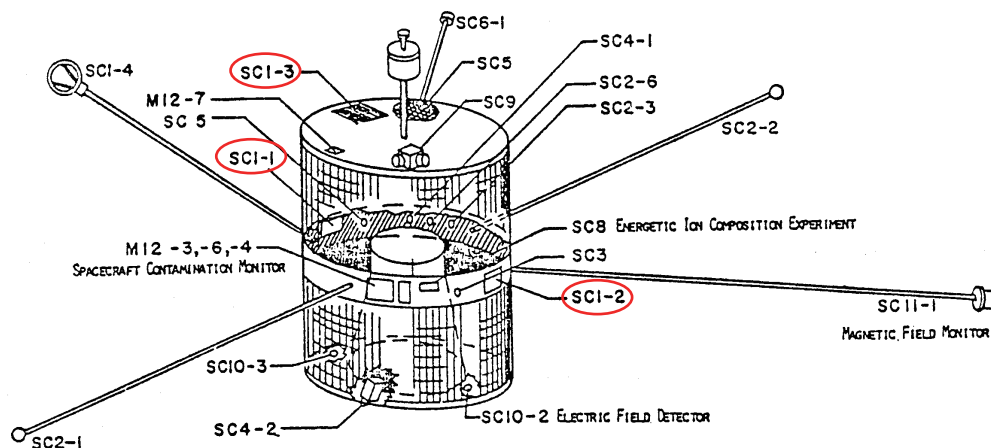


見かけのC

$$C = \frac{\epsilon S}{d - x}$$

宇宙機表面帯電の計測

SCATHA衛星



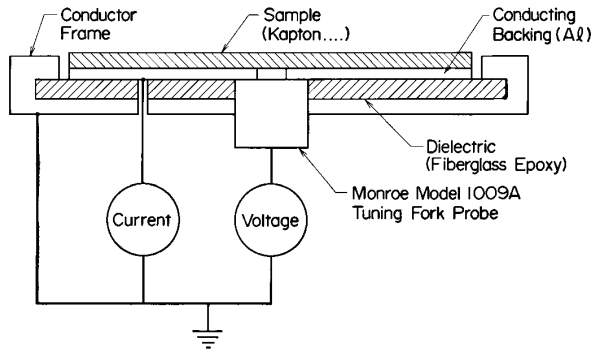
SC1 RADIO FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVE ANALYZER
SC1 VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVE ANALYZER
SC1 SATELLITE SURFACE POTENTIAL MONITOR
SC1 PULSE SHAPE ANALYZER
SC2 ENERGETIC PROTON DETECTORS
SC2 SPACECRAFT SHEATH POTENTIAL MONITOR

SSPM

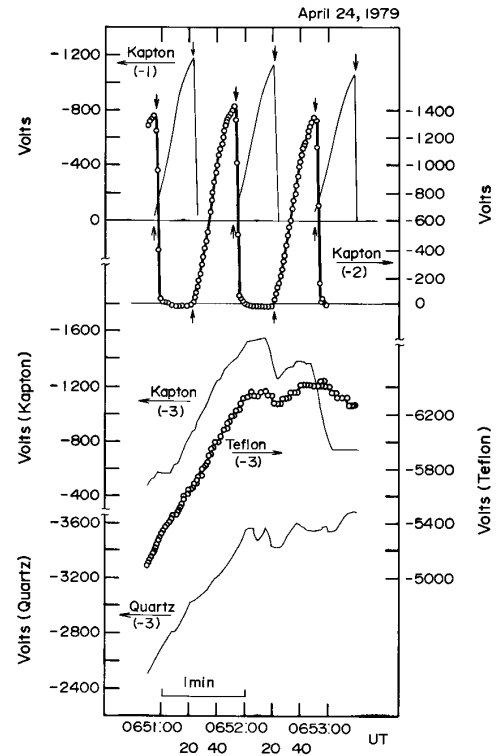
SC3 HIGH ENERGY PARTICLE SPECTROMETER
SC4-1 ELECTRON BEAM SYSTEM
SC4-2 POSITIVE ION BEAM SYSTEM
SC5 RAPID SCAN PARTICLE DETECTOR
SC6 THERMAL PLASMA ANALYZER
SC7 LIGHT ION MASS SPECTROMETER
SC9 UCSD CHARGED PARTICLE EXPERIMENT

宇宙機表面帯電の計測

■ SCATHA衛星 SSPM(Satellite Surface Potential Monitor)



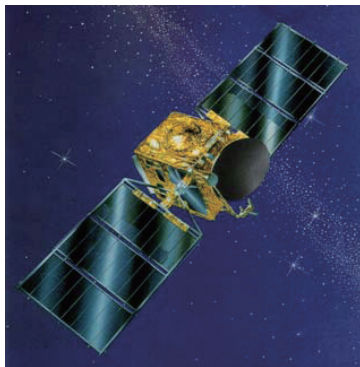
概略構成図



帯電観測例

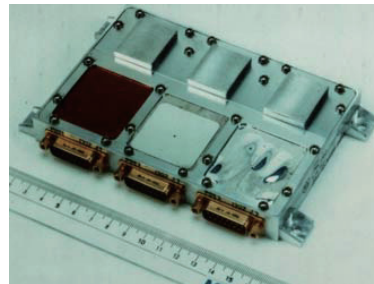
宇宙機表面帯電の計測

■ POM(Potential Monitor)

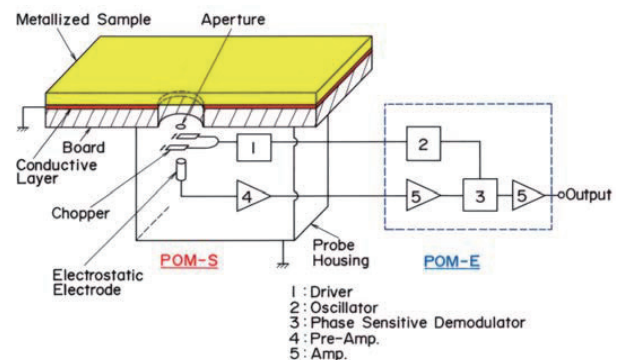


技術試験衛星V(ETS-V)

(1987年打上)



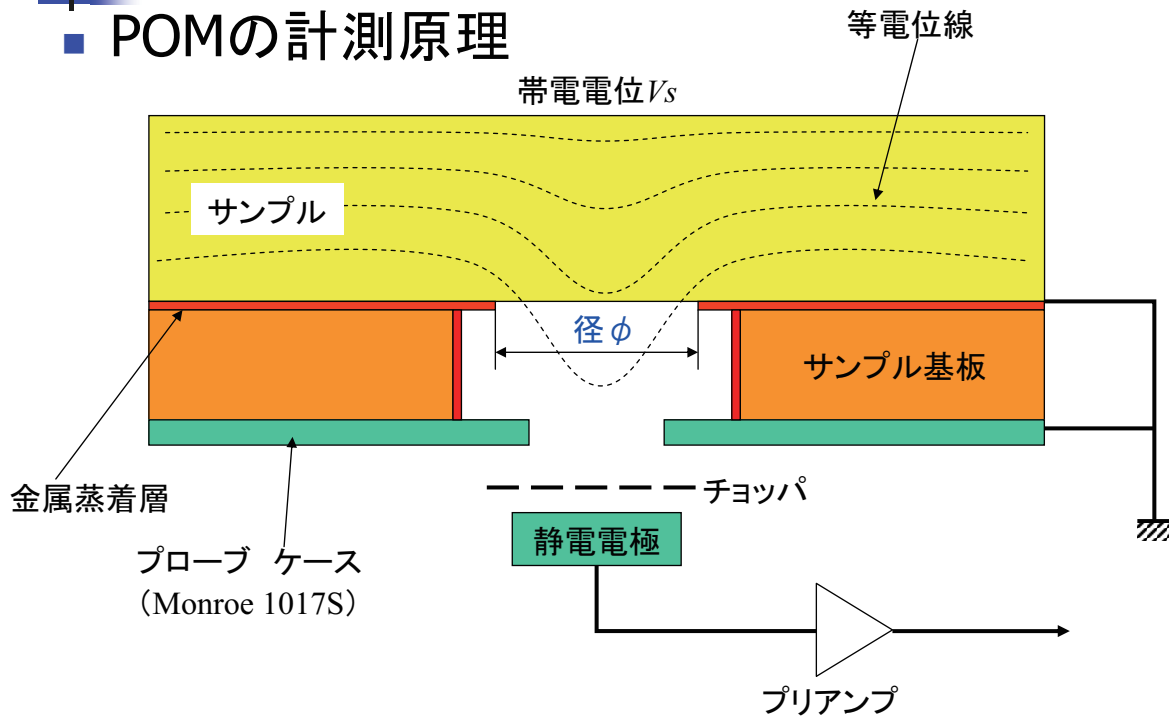
POM外観



帯電モニタ(POM)の構成

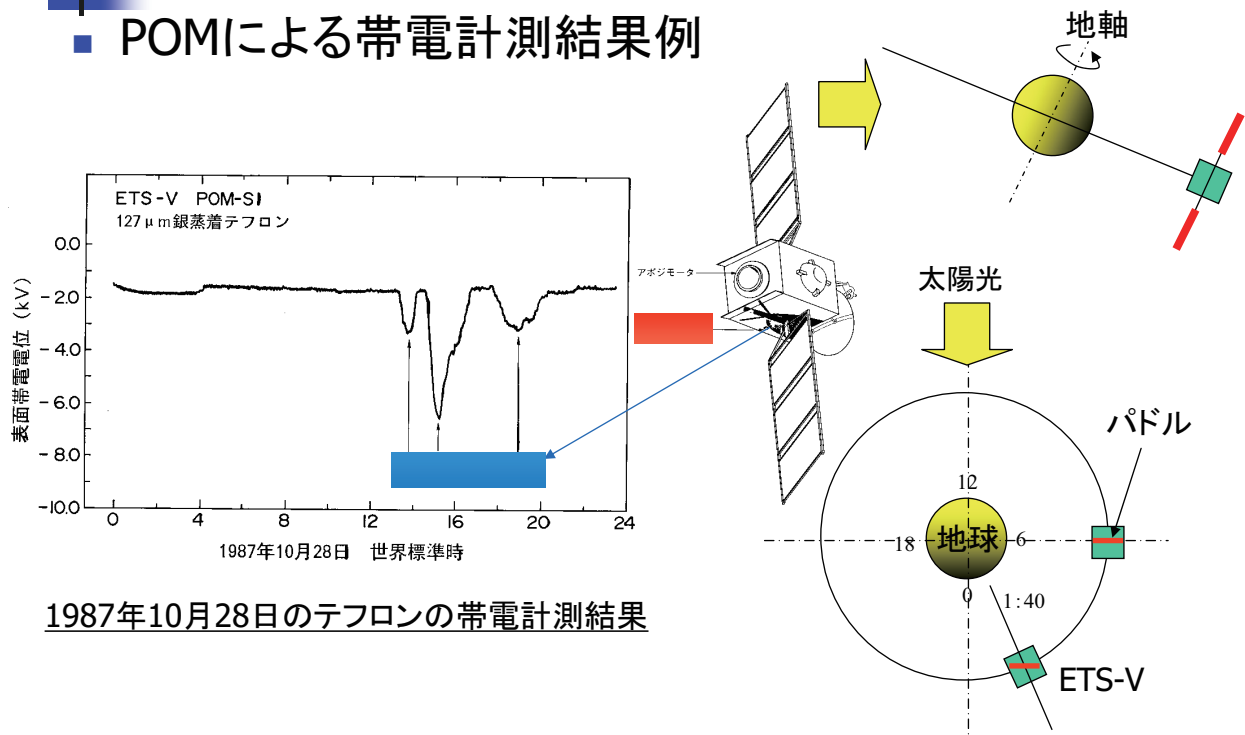
宇宙機表面帯電の計測

POMの計測原理



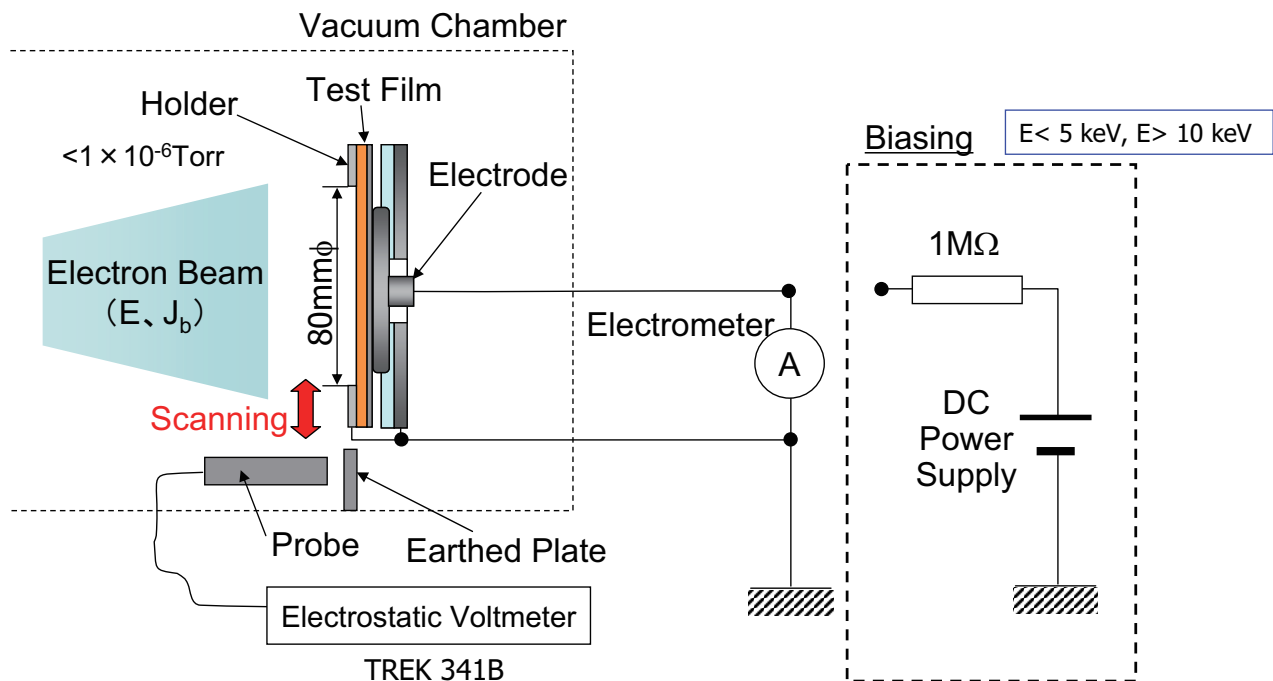
宇宙機表面帯電の計測

POMによる帯電計測結果例



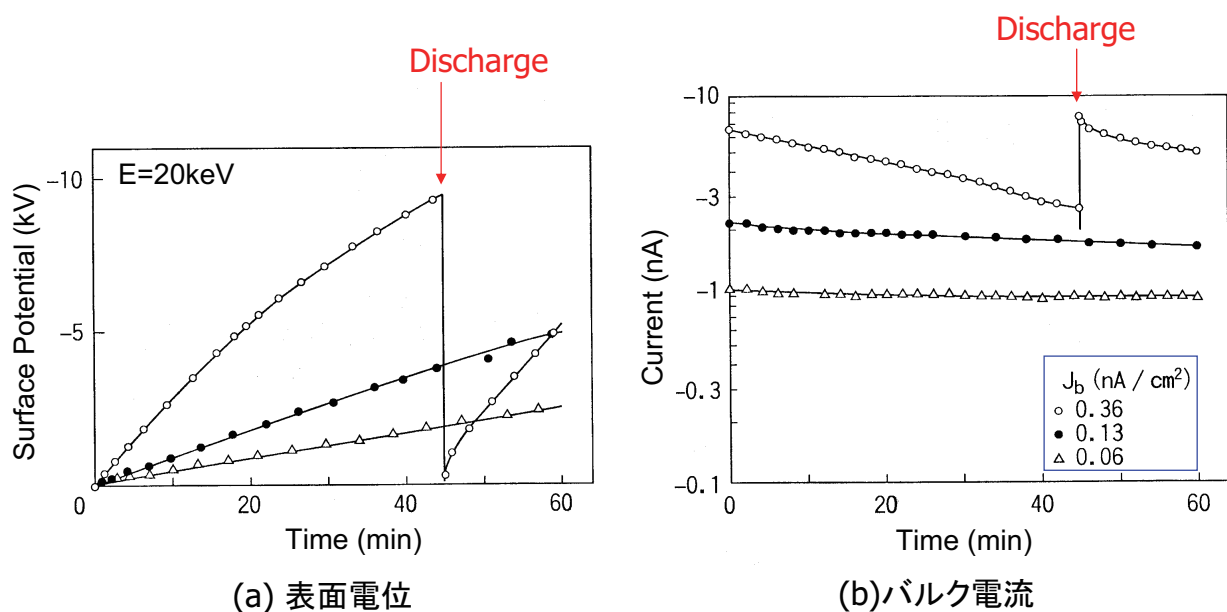
表面材料の帯電計測

■ 電子ビーム照射による帯電計測実験



表面材料の帯電計測

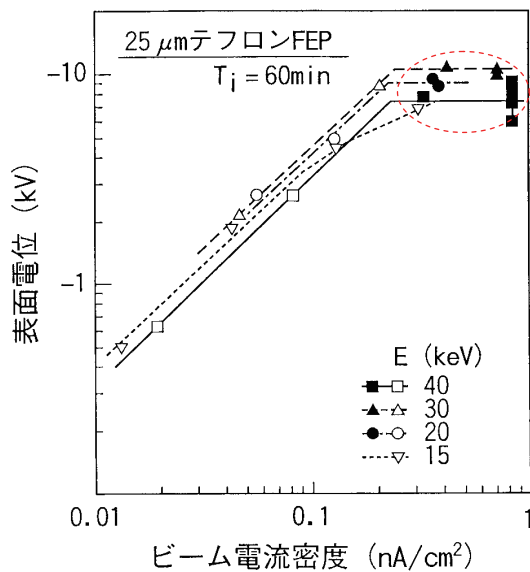
■ 25μm Teflon FEP



E = 20 keVで照射した場合の帯電特性

表面材料の帯電計測

■ 25μm Teflon FEP

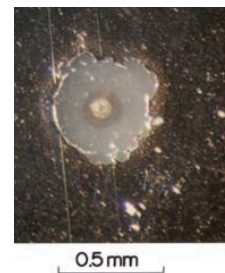


表面電位のビーム電流密度依存性特性

表面電位

$$V_s \propto J_b^n$$

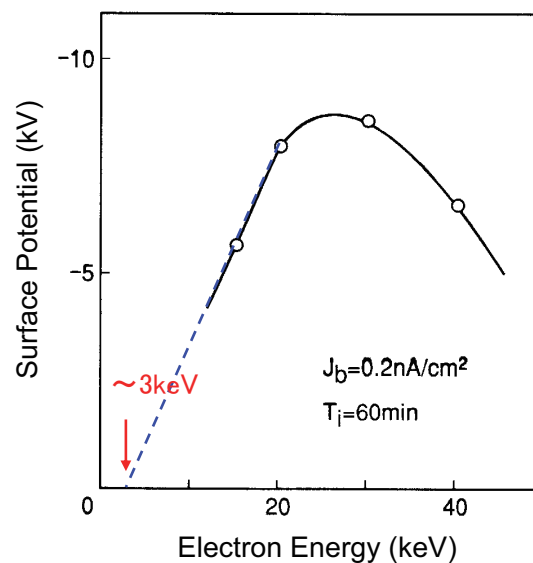
$$n \cong 1$$



放電痕跡

表面材料の帯電計測

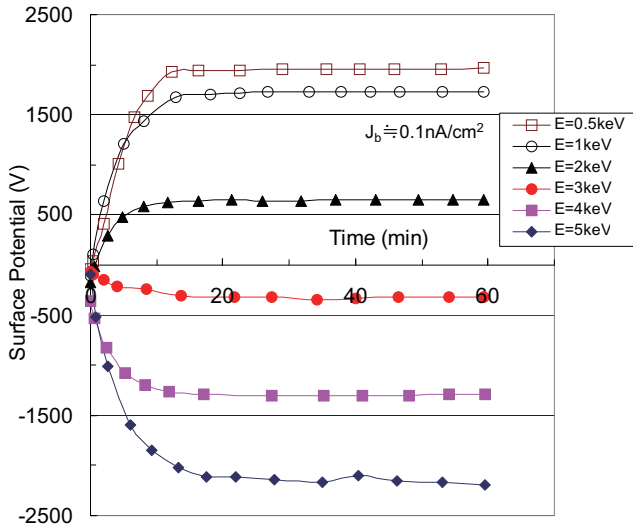
■ 25μm Teflon FEP



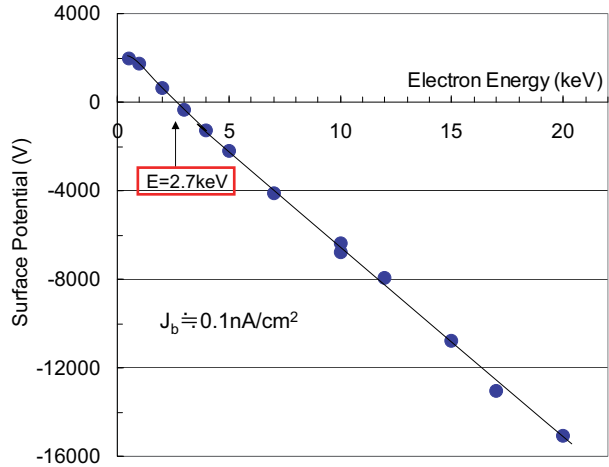
表面電位の電子エネルギー依存性

表面材料の帯電計測

■ 127 μ m Teflon FEP



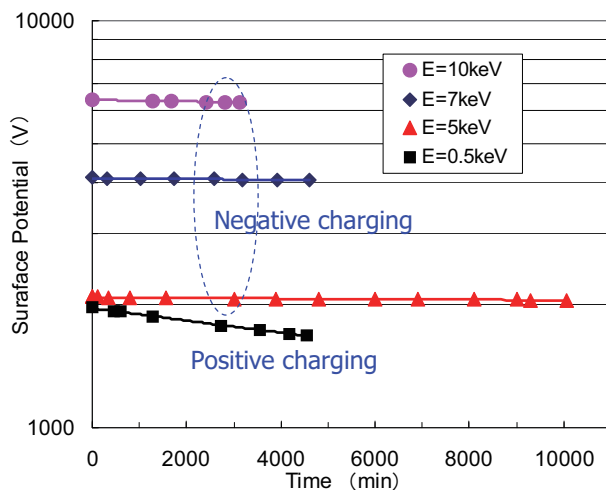
表面電位の時間依存性
($J_b = 0.1 \text{ nA/cm}^2$)



表面電位の電子エネルギー依存性
($J_b = 0.1 \text{ nA/cm}^2$, 60 minutes)

表面材料の帯電計測

■ 127 μ m Teflon FEP



電子ビーム照射後の電位減衰特性の例

絶縁物の電位 V_s の減衰

$$V_s = V_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\tau = \varepsilon \cdot \rho = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \rho$$

V_{s0} : initial surface potential

t : time

τ : time constant of decay

ε : permittivity

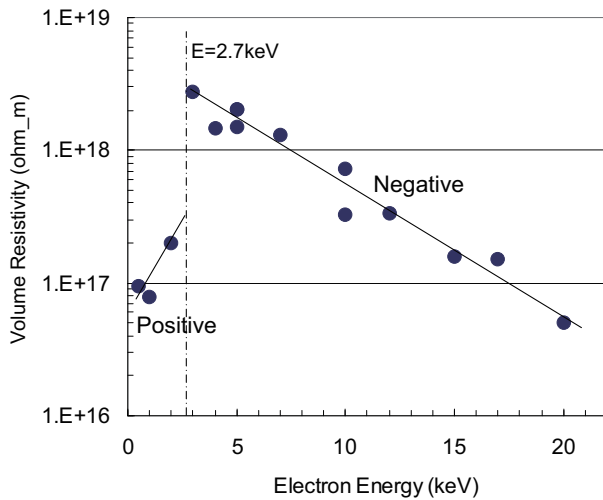
ρ : volume resistivity

ε_0 : permittivity in vacuum ($=8.9 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

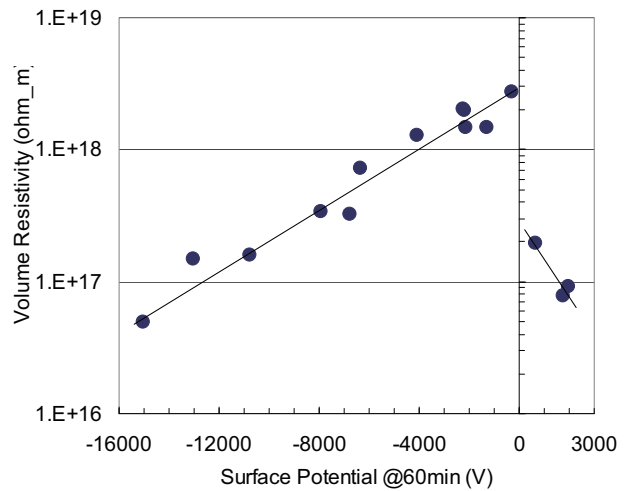
ε_r : dielectric constant ($=2.1$ in Teflon FEP)

表面材料の帯電計測

■ 127 μ m Teflon FEP



(a)電子エネルギー依存性

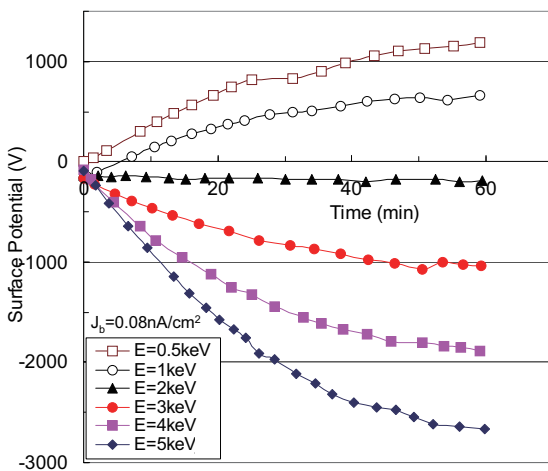


(b)初期表面電位依存性

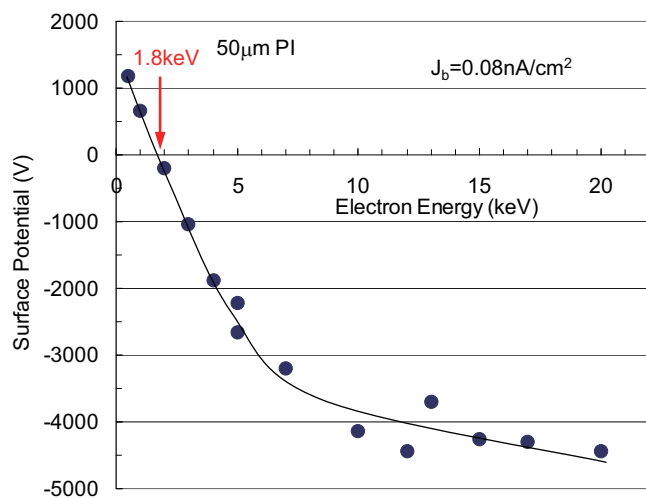
電位減衰特性から得られた体積抵抗率

表面材料の帯電計測

■ 50 μ m Kapton



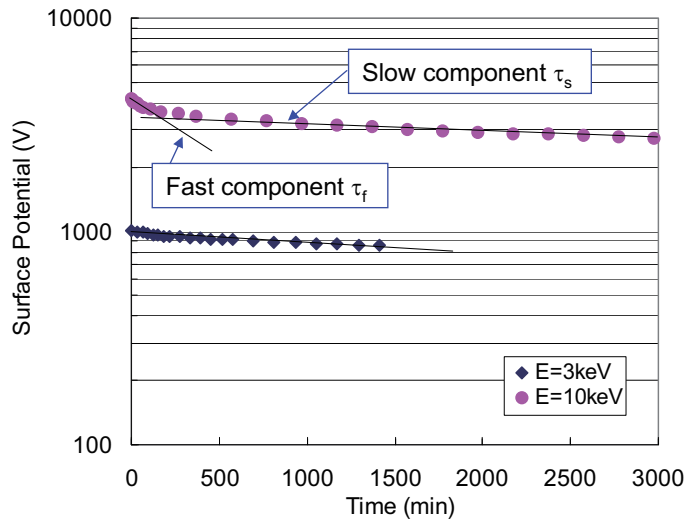
E=5keV以下での電子ビーム照射による帯電電位—時間特性



$J_b = 0.08\text{nA/cm}^2$ で60分間照射した場合の帯電電位の照射エネルギー依存性

表面材料の帯電計測

■ 50μm Kapton



$$V_s = V_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

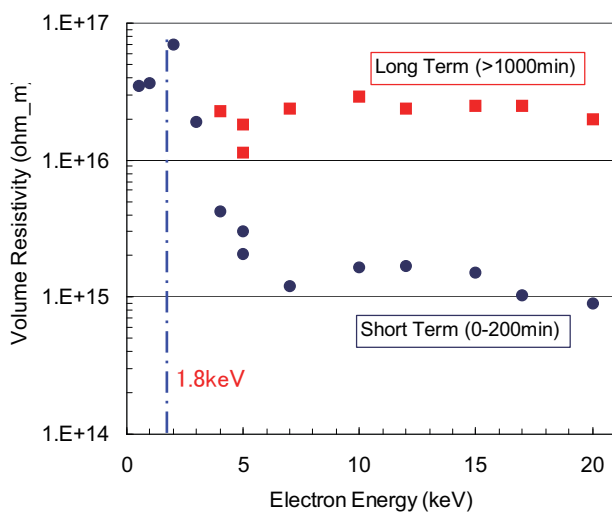
$$\tau = \varepsilon \cdot \rho = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \rho$$

ε_r : 比誘電率(=3.5)

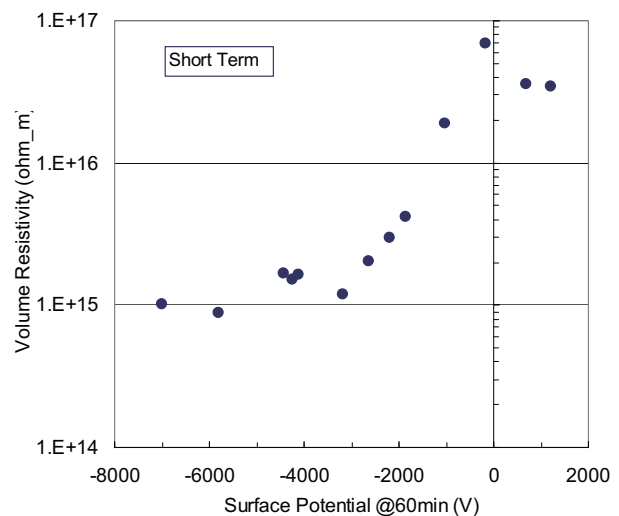
電子ビーム照射後の帯電電位減衰特性の例

表面材料の帯電計測

■ 50μm Kapton



(a)照射エネルギー依存性



(b)表面電位依存性

帯電電位減衰特性から得られた体積抵抗率

表面材料の帯電計測

- 宇宙機表面
 - 熱制御材料 (Kapton、Teflon FEP、Mylar、OSR)
 - 太陽電池カバーガラス
 - ペイント
- 宇宙機内部
 - ケーブル、プリント基板、浮遊導体、...
 - 放電計測も重要

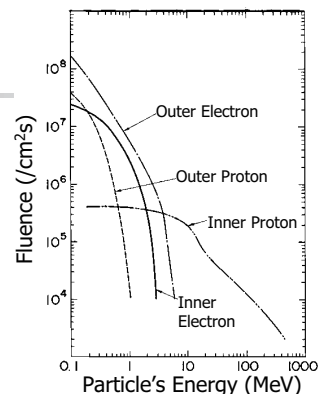
内部帯電

- 表面帯電(surface charging)
 - プラズマ
 - 表面材料への電荷蓄積
- 内部帯電(internal charging)
 - 高エネルギー荷電粒子
 - 主に、電子
 - 衛星本体表皮を貫通し内部搭載機器へ電荷蓄積

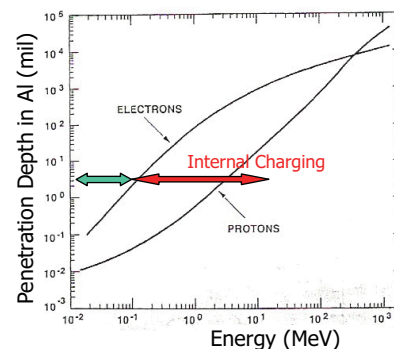


放電の発生

内部帯電によるESDが発生すると、搭載電子機器に大きな影響を与える。

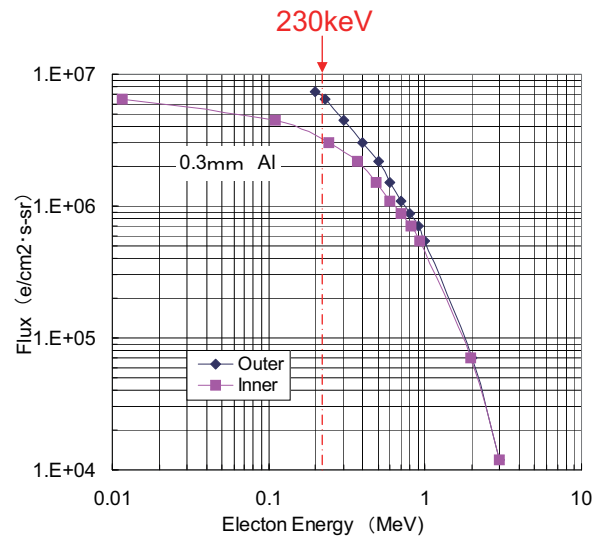


高エネルギー荷電粒子



荷電粒子のA/内飛程

内部帯電



宇宙機内部の電子エネルギー分布解析結果

等価アルミニウム厚さ: 0.3 mm

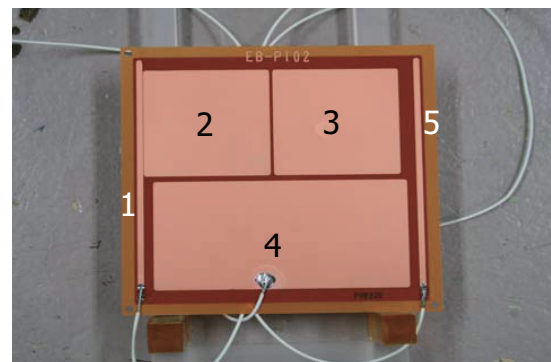
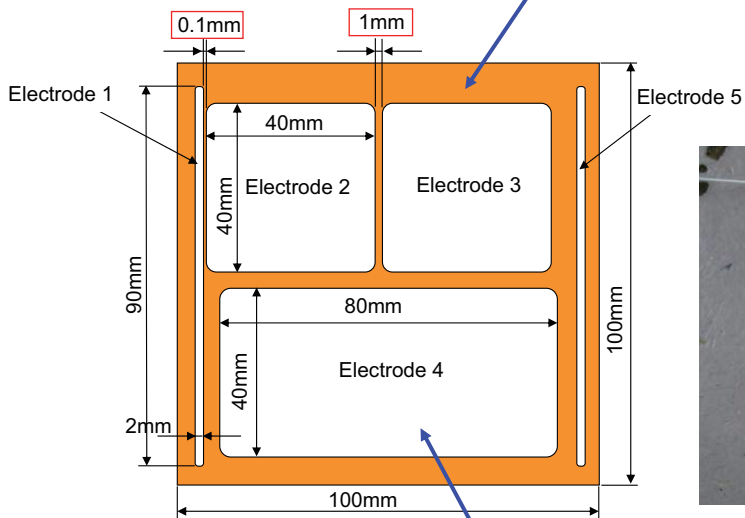
外部電子分布: NASA Worst-Case Environment
(NASA-HDBK-4002)

内部帯電の計測

■ 浮遊電極基板

ガラス繊維強化ポリイミド基板 (100x100mm²)
(0.1mm^t, 1.0mm^t)

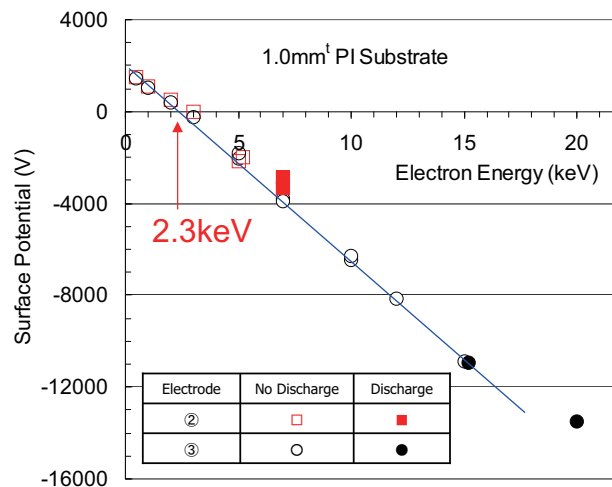
裏面: 銅メッキ電極 (90mm[□]) (接地)



試料基板の写真

内部帯電の計測

■ 浮遊電極基板(1.0mm^t)



電子ビーム照射時の浮遊電極表面電位の時間特性

まとめ

- 簡易な宇宙機絶対帯電の計測技術の開発
- 地上帯電試験技術の開発
 - 宇宙環境を模擬した電子ビーム照射条件の適正化
 - 複合エネルギー電子ビーム照射帯電技術開発
 - 電子/イオン(プロトン)複合照射帯電技術の開発
- 物性パラメータの取得と妥当性検討
 - 衛星帯電解析ソフトへの適用