

# 宇宙機内部帯電に及ぼす荷電粒子環境の検討

藤井 治久（奈良高専）、宮本 尚使（三菱電機）

Investigation on Charged Particles Environment inside Spacecraft Affecting Internal Charging  
Haruhisa Fujii (Nara National College of Technology) and Takashi Miyamoto (Mitsubishi Electric Corporation)

## 1. はじめに

宇宙機外部の宇宙環境には、電子やプロトンの高エネルギー荷電粒子が存在し、これらの荷電粒子は宇宙機構体表皮を貫通し、低エネルギー化して侵入する。特に、高エネルギー電子が宇宙機内部搭載機器の絶縁物や浮遊導体などに電荷蓄積すると、放電の発生が予想される。このような現象は“内部帯電 (Internal Charging)”と呼ばれ<sup>1)</sup>、宇宙機の信頼性を確保する上で極めて大きな課題となっている。しかしながら、外部荷電粒子環境が宇宙機内部でどのような荷電粒子環境になるかということは十分に把握されているとは言い難いのが現状である。そこで、ここでは、宇宙機外部の高エネルギー荷電粒子（電子）が構体表皮を貫通して侵入した場合、どのようなエネルギー分布になるかを、電子の物質透過、阻止能の観点から解析検討し、宇宙機内部に搭載された電気・電子機器の帯電放電防止設計に資することを目的としている。

## 2. 解析の流れ

今回の解析検討は次の手順で行った。

- (1) 高エネルギー荷電粒子（電子）（エネルギー  $E_i$ ）が表皮材料へ入射した場合（図1）の材料中のエネルギー損失を阻止能公式から求める。
- (2) 入射エネルギー  $E_i$  に対する厚さ  $d$  の構体材料を透過するエネルギー  $E_o$  を求める。
- (3) 外部宇宙環境の電子フラックス分布から宇宙機内部電子フラックス分布を検討する。

なお、ここでは構体表皮材料としてアルミニウムを仮定して解析した。

## 3. 荷電粒子に対する阻止能<sup>2)</sup>

物質に入射した荷電粒子（電子）が物質内で原子と衝突しながらどのようにエネルギーを損失していくかは阻止能（stopping power）で評価される。阻止能は、物質と荷電粒子との相互作用を議論する上で

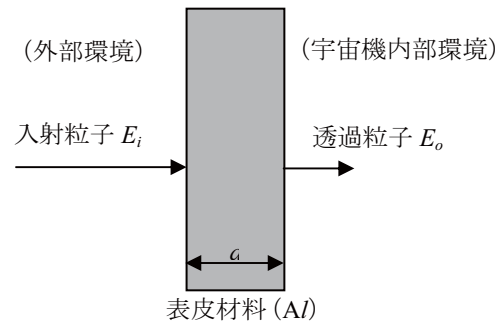


図1 表皮材料への荷電粒子侵入

最も基本的に必要な量で、荷電粒子が単位長さ進む間に失うエネルギーで定義される。

いま、入射粒子が非弾性衝突によって  $T$  と  $T+dT$  との間のエネルギーを失う微分断面積を  $d\sigma$  とすると、エネルギー  $E$  の粒子が  $1\text{cm}$  進行する間に失うエネルギー  $(-dE/dx)$  は、

$$-\frac{dE}{dx} = N \int T d\sigma \equiv S \quad \dots (1)$$

で与えられる。 $-dE/dx$  または  $S$  が阻止能である。ここで、 $N$  は  $1\text{cm}^3$  あたりの原子数である。

高速荷電粒子は物質を構成する原子と弾性衝突および非弾性衝突を繰り返し、その持っていたエネルギーを失う。阻止能は非弾性衝突による阻止能と、弾性衝突による阻止能とに分けることができるが、高速荷電粒子に対して、後者は前者に比べて著しく小さい。したがって、非弾性衝突による阻止能のみを考慮していくが、高速荷電粒子に対してはこれが全阻止能と考えて差し支えない。

阻止能は、Born 近似を用いて Bethe によって検討された<sup>3)</sup>。高速電子に対して、相対論的、量子力学的に導かれた阻止能  $S_e$  の公式は、次のように与えられている。

$$S_e = \frac{2\pi e^4}{m_e v^2} N Z_2 \left[ \ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{\Delta_{pol}}{2} \right] \quad \dots (2)$$

ここで、 $m_e$ : 電子の静止質量 ( $=9.109 \times 10^{-31} \text{kg} = 9.109 \times 10^{-28} \text{g}$ )、 $e$ : 電気素量 ( $=1.602 \times 10^{-19} \text{C} = 4.8 \times 10^{-10} \text{esu}$ )、 $v$ : 電子の速度、 $Z_2$ : ターゲット原子の原子番号、 $I$ : 平均励起エネルギー、である。また、 $E$  を電子のエネルギー、 $c$  を光速 ( $=2.998 \times 10^8 \text{m/s} = 2.998 \times 10^{10} \text{cm/s}$ ) とすると、

$$E = m_e c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) \quad \dots (3)$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

である。 $\Delta_{pol}$  は、密度効果に対する補正項で、相対論的領域で特に効いてくる項である。(2) 式において、標的となる物質の種類に依存する量は、 $Z_2$  と  $I$  である。 $I$  が理論的に計算されているのは、水素、ヘリウムなどごく限られた原子であるが、Sternheimer によって、次の半実験式が与えられている<sup>4)</sup>。

$$I = 9.73 Z_2 + 58.8 Z_2^{-0.19} \quad [\text{eV}], \quad Z_2 \geq 13 \quad \dots (4)$$

#### 4. 阻止能の検討

ここでは、前述したように、衛星構体材料を等価な  $Al$  に換算して、 $Al$  中の阻止能を検討する。なお、前節で述べた阻止能公式は、基本的に cgs 単位系が用いられている。

まず、 $Al$  の物性値から各パラメータを求めておく。 $Al$  は質量数 26.98[g/mol]、Avogadro 数  $N_A = 6.02 \times 10^{23}/\text{mol}$ 、密度 ( $\rho$ ) 2.69g/cm<sup>3</sup> から、

$$N = 6.02 \times 10^{23} [\text{mol}] \times \frac{2.69 [\text{g/cm}^3]}{26.98 [\text{g/mol}]} \\ = 6.00 \times 10^{22} [\text{cm}^3]$$

また、 $Al$  は原子番号  $Z_2=13$  なので、平均励起エネルギー  $I$  は、(4) 式より、

$$I = 162.61 [\text{eV}]$$

となる。

ところで、用いた阻止能公式 (2) の妥当性を検証するために、ここでは  $Al$  中の電子飛程を考慮した。図 2 に、 $Al$  中の電子 ( $\beta$  線) の最大飛程とエネルギーの関係を示す。実験式は、次の式から求めている<sup>5)</sup>。

$$R \cdot \rho = 412 E^n \quad [\text{mg/cm}^2] \quad \dots (5) \\ n = 1.265 - 0.0954 \cdot \ln E$$

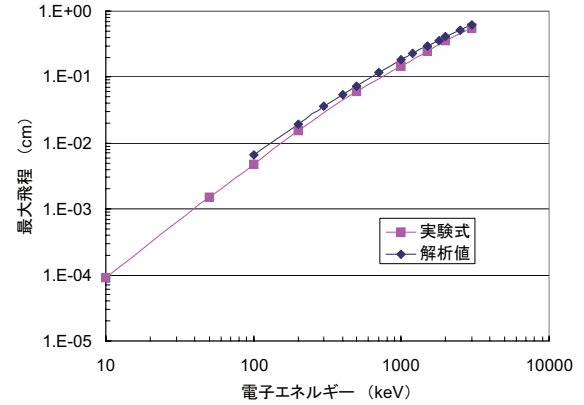


図 2  $Al$  に対する電子の最大飛程  
(実験式は(5)式による。解析値は今回の解析による)

但し、 $R$ : 最大飛程、 $\rho$ : 密度、 $E$ : MeV で表した電子のエネルギー ( $0.01 < E \leq 3 \text{MeV}$ ) である。

阻止能公式 (2) 式による解析結果を図 3 に示す。なお、解析にあたっては、

$$S_e = -\frac{dE}{dx} = -\frac{\Delta E}{\Delta x} \quad \dots (6)$$

とし、 $\Delta x = 1 \times 10^{-3} \text{cm}$  ( $=10 \mu\text{m}$ ) として解析を行った。なお、補正項  $\Delta_{pol}$  は無視して解析した。図 3 (a) は  $0.1 \sim 1 \text{MeV}$  の電子エネルギーの場合、また、同図 (b) は  $1 \sim 3 \text{MeV}$  の場合である。これらから求めた最大飛程 (電子エネルギーが 0 になる距離) を図 2 にプロットしている。ほぼ実験式の最大飛程と同じになることがわかる。ただ、若干の差異はあるが、これは (2) 式における密度効果の補正項  $\Delta_{pol}$  を無視しているためと考えられる。

#### 5. 透過エネルギーの解析

図 3 より、電子入射表面からある深さのところまで電子のエネルギーがどのように低下するかを求めることができる。これが、ある厚さ  $d$  の  $Al$  板を透過したときの透過エネルギー  $E_o$  で、入射エネルギー  $E_i$  との関係  $d$  のパラメータとして示すと、図 4 のようになる。ところで、実際の衛星の表皮は  $Al$  換算で  $0.3 \text{mm}$  程度と考えられているので、 $d=0.3 \text{mm}$  の場合のみを取り出しプロットすると、図 5 のようになる。この場合の特性を多項式近似すると、式は図中に示したように、

$$E_o = 0.0216 E_i^5 - 0.1930 E_i^4 + 0.6566 E_i^3 \\ - 1.0638 E_i^2 + 1.8162 E_i - 0.3678 \quad \dots (7)$$

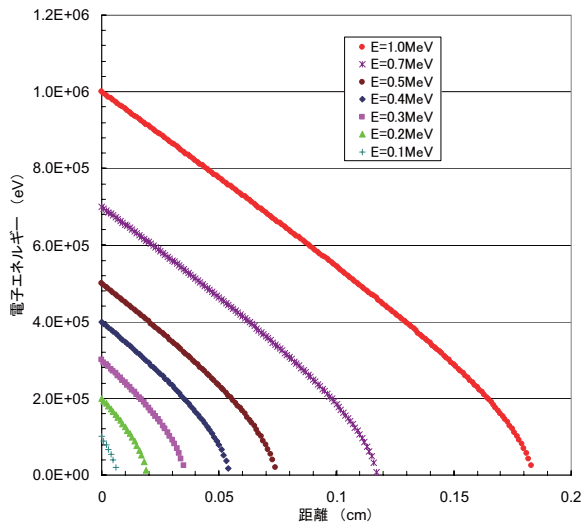
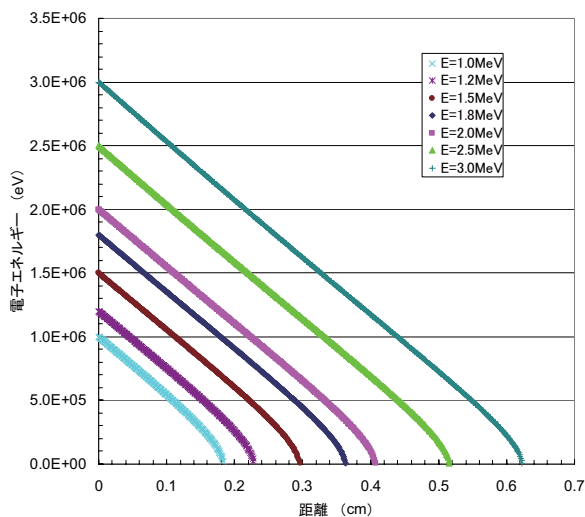
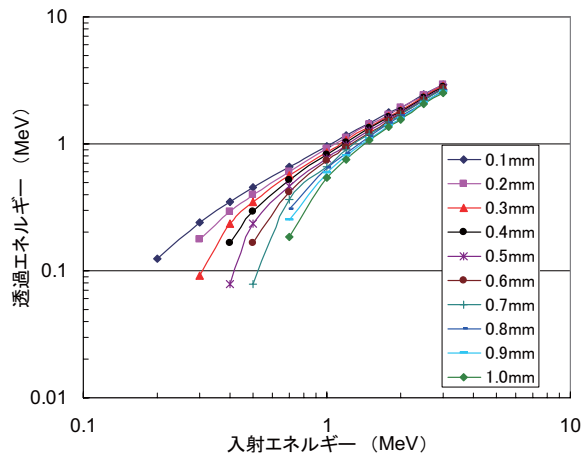
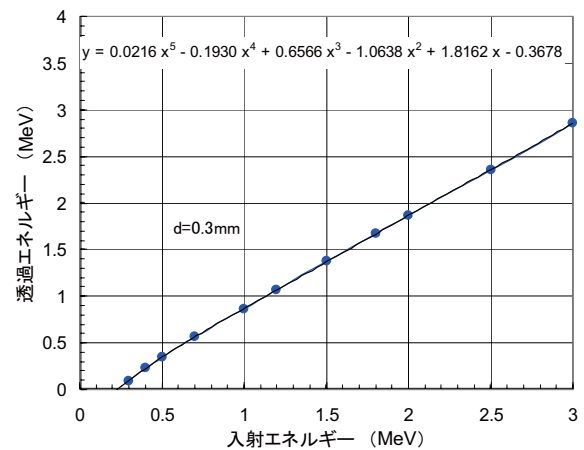
(a)  $0.1\text{MeV} \leq E \leq 1\text{MeV}$ (b)  $1\text{MeV} \leq E \leq 3\text{MeV}$ 

図3 阻止能公式による Al 内電子エネルギー変化の解析結果

となる。この図から、 $E_i=230\text{keV}$  以下の電子は遮蔽され、透過しないことがわかる。

**6. 外部宇宙環境電子分布から内部電子分布の検討**  
前節に示したように、 $d=0.3\text{mm}$  の Al 板を透過する電子のエネルギーが求まったので、次に実際の宇宙環境に存在する電子が宇宙機内部に侵入した場合、どのようなエネルギー分布になるかを検討する。

外部宇宙環境電子分布としては文献<sup>1)</sup>に示された GEO フラックスの Worst Case を用い、図6に「外部環境分布」として示した。この外部環境電子が  $0.3\text{mm}$  厚 Al 板を透過できるのは  $230\text{keV}$  よりも大きなエネルギーの電子で、(7) 式によって低エネルギー化する

図4 厚さ  $d$  のアルミ板に対する電子の入射エネルギーと透過エネルギーの関係図5  $d=0.3\text{mm}$  Al 板の場合の電子の入射エネルギーと透過エネルギーの関係

ると考えて解析した。その結果は図6の「内部環境分布」のようになり、 $230\text{keV}$  電子が  $10\text{keV}$  程度に低エネルギー化されることがわかる。但し、 $1\text{MeV}$  を超えるエネルギーの電子はほとんどエネルギーの低下が認められない。

## 7. まとめ

宇宙機外部の宇宙環境に存在する高エネルギー電子が宇宙機構体表皮を貫通して内部に侵入した場合、内部の電子分布がどのように変化するかを、材料に対する電子の阻止能公式を用いて解析した。

その結果、次のような結論が得られた。

- (1) 量子力学的相対論的な阻止能公式を用いるとほぼ満足できる物質 (Al) 中のエネルギー損失特性が得られることがわかった。
- (2) しかしながら、精度よくエネルギー損失を求めるためには補正項を考慮する必要がある、

特に、低エネルギー化した電子のエネルギー損失を十分に解析する必要がある。

- (3) 宇宙機構体表皮を 0.3mm 厚の Al に換算して、外部環境の電子は 230keV 以上のものが内部に侵入することになり、10keV 程度の低エネルギー電子も存在することが明らかになった。

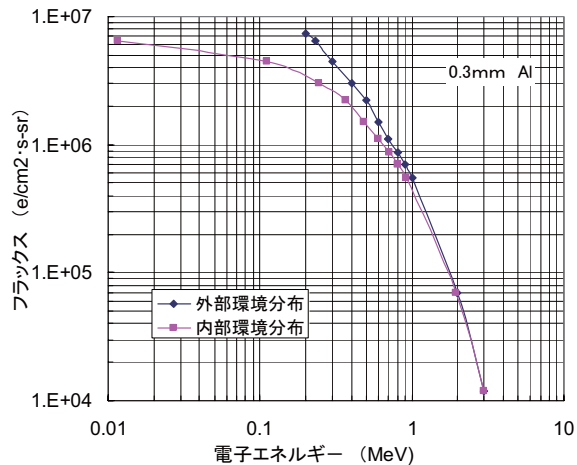


図6 GEO Worst Case 外部環境電子分布<sup>1)</sup>と 0.3mm 厚 Al で覆われた宇宙機構体内部の電子分布

### 参考文献

- 1) “Avoiding Problems Caused by Spacecraft On-orbit Internal Charging Effects”, NASA-HDBK-4002 (1999)
- 2) 伊藤憲昭、「放射線物性 I」、第 7 章、(森北出版) (1981)
- 3) H. Bethe and J. Ashkin : Experimental Physics, Vol.1, p.166 (1953)
- 4) R. M. Sternheimer : Phys. Rev., Vol.93, p.247 (1966)
- 5) L. Katz and A. S. Penfold : Rev. Mod. Phys., Vol.24, p.28 (1952)