

# 宇宙環境におけるエネルギーハーベスティング

JAXA 中村 徹哉

JAEA 大島 武

大阪府立大 奥田 修一

## 1. はじめに

現状の宇宙機では、太陽電池で発電した電力は電力制御装置に集約され、その後各機器に分配される。そのためハーネスの質量は膨大となり、衛星全体の 1 割弱をも占めている。一方で、宇宙機の健全性を監視するためには、多数のセンサ（例えば温度、歪み、加速度など）が必要となるが、センサ数の増加は更なるハーネスの質量増だけでなく、ワイヤルーティングの煩雑さも増すこととなり問題である。これら問題の有効な改善策として、センサの信号ライン・電力ラインのワイヤレス化があげられる。電力ラインをなくす手段は 1 次電池を用いる、電力の無線伝送を行う、などが考えられる。しかし、一次電池は寿命があり、電力電送はエネルギーロスが大きい。そこで本研究では宇宙環境におけるエネルギーハーベスティング（環境発電）について検討する。

エネルギーハーベスティングとは、従来、見向きもされなかった微弱エネルギー（たとえば、室内光エネルギー、道路や工場などの振動エネルギー、排熱エネルギーなど）に着目し、微弱な電力（マイクロワット～ミリワット程度）として“収穫”することで、センサのように超低消費電力機器を動作させる技術である。無線モジュールを組み合わせることで信号ラインも排除し、完全にワイヤレス化を実現できるうえ、一次電池の交換が不要となる。民生の分野では、第 4 次産業革命と期待されている“モノのインターネット（Internet of Thing : IoT）”を支える技術のひとつとして、エネルギーハーベスティングの研究が行われている。

宇宙環境における環境エネルギーは、太陽光エネルギーが大部分を占めており、既に利用されている（それしか利用されていない）。しかし、当然太陽光が当たる場所でなければ、利用することができない。そこで新たに着目したのが放射線エネルギーである。放射線フラックスは太陽光フラックスに比べると非常に少ないため、これまで全く利用の検討がされてこなかったが、超低消費電力の機器の電力源であれば、利用の可能性がある。また、宇宙環境では多かれ少なかれ、あらゆる場所に放射線は存在するため、利用できるエネルギーが太陽光一択であった従来では考えられなかった技術アイデアの創出が期待される。

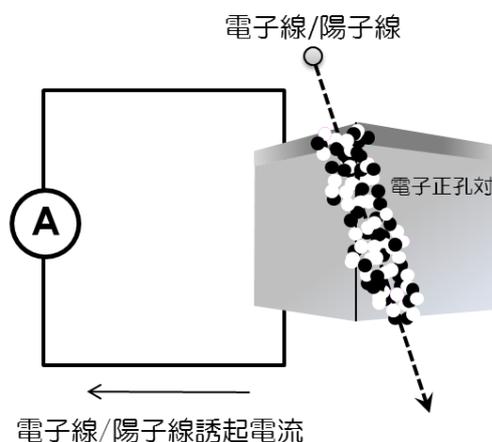


図 1：電子線/陽子線誘起電流測定概念図

放射線エネルギーを電気に変換することは難しいことではない。pn 接合構造の半導体 (=太陽電池) を用いることで放射線を電気に変換することができる。放射線が半導体に入射すると、バンドギャップに応じた電子正孔対が生成される。電子線であれば、経験的に生成される電子正孔対数  $N_{E-H}$  は式(1)で表すことができる[1]。

$$N_{E-H} \approx \frac{N_{\beta} E_{\beta}}{2.8 \times E_g + 0.5} \quad (1)$$

$N_{\beta}$  は電子線フラックス、 $E_{\beta}$  は電子線エネルギー、 $E_g$  は半導体のバンドギャップである。生成された電子正孔対 (キャリア) は内部電界によって分離されることで、起電力を得る。

本研究の目的は、センサのワイヤレス化を実現するだけの電流を放射線から得ることができるか検証することである。そのため、一般的な太陽電池を用いて、静止軌道でどの程度の発生電流が見込めるか概算した。概算に必要なデータ取得のため、電子線および陽子線照射試験を行った。

## 2. 試験方法

発電実験の供試体は、入手性に優れる宇宙用シリコン太陽電池と耐放射線性に優れる CIGS 太陽電池とした。各々の太陽電池のバンドギャップは、 $E_{g-Si}=1.1\text{eV}$ 、 $E_{g-CIGS}=1.25\text{eV}$ 、セル厚さは  $t_{Si}=200\mu\text{m}$ 、 $t_{CIGS} \approx 2\mu\text{m}$  である。放射線の線種は静止軌道においてフラックスの多い陽子と電子とした。陽子線は高崎量子応用研究所のイオン注入装置(100~380keV)、タンデム加速器(1MeV~6MeV)を用い、電子線は大阪府立大学の加速器(60~250keV)、高崎量子応用研究所の加速器(1MeV)を用いた。放射線照射中の短絡電流を計測し、発生電流とした (図1)。なお測定は室温で行った。

## 3. 実験結果

静止軌道における放射線による発生電流を見積もるため、電子線・陽子線誘起電流の電子線・陽子線エネルギー依存性を取得した。図2は電子線誘起電流の電子線エネルギー依存性を示す。電子線のビーム電流は  $100\text{nA/cm}^2$  とした。まずシリコン太陽電池について、250keV まではほぼ線形に電子線エネルギー増加に伴い発生電流が増加したが、1MeV 時は 250keV 時から線形に増加せずわずかに減少した。これは、1MeV 電子線がシリコン太陽電池を透過するためと考えられる。250keV 以下の低エネルギー領域においては、電子線は太陽電池を透過しないため、放射線エネルギーは太陽電池内で吸収される。生成される電子正孔対は式(1)に従うため、発生電流は電子線のエネルギーによって線形に増加する。しかし、250keV 以上の高エネルギー領域においては透過する成分が増えるため、式(1)には従わない。CIGS 太陽電池はシリコン太陽電池のおよそ 100 分の 1 の厚さであり、60keV 電子線から CIGS 太陽電池を透過してしまう。このことから、CIGS 太陽電池については電子線のエネルギーが増加するほど、発生電流が減少する。

図3には陽子線による発生電流の陽子線エネルギー依存性を示す。陽子線のビーム電流は  $100\text{nA/cm}^2$  とした。特に CIGS 太陽電池において、低エネルギー領域で発生電流が急激に減少

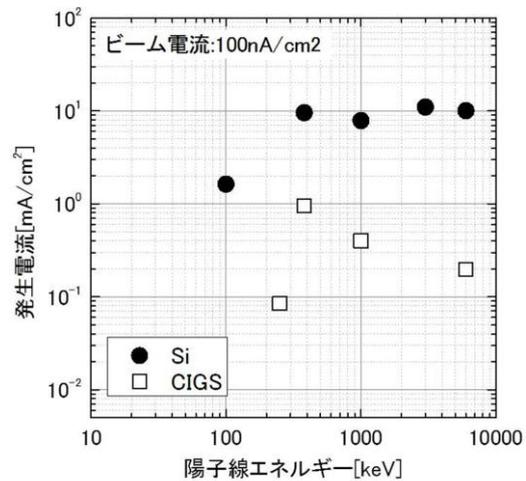
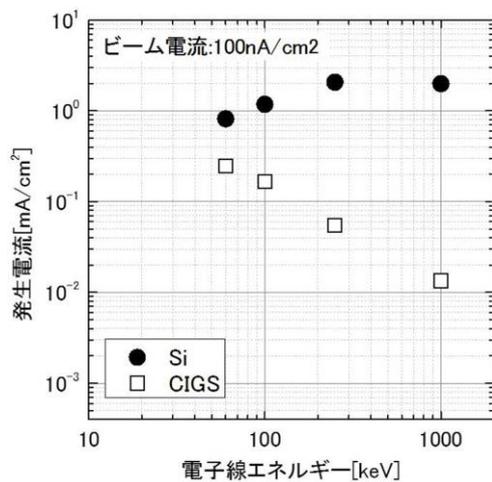


図 2：電子線誘起電流の電子線エネルギー依存性

図 3：陽子線誘起電流の陽子線エネルギー依存性

した（グラフ上には示されていないが 100keV 陽子線による発生電流は観測されなかった）。これは、CIGS 表面の ZnO 層によって低エネルギー陽子線が遮蔽され、発電層まで陽子線が届いていないことが要因と考えられる。

上記結果を用いて、静止軌道における電子線・陽子線誘起電流を概算した。電子線・陽子線誘起電流は式(2)で表すことができる。

$$I_{total} = \int I_e(E) \times \Phi_e(E) dE + \int I_p(E) \times \Phi_p(E) dE \quad (2)$$

$I_e(E)$ ,  $I_p(E)$ はエネルギーEの一電子線・一陽子線で発生する電流、 $\Phi_e(E)$ ,  $\Phi_p(E)$ は静止軌道における電子・陽子線のフラックスを表す。 $\Phi_e(E)$ は IGE2006 モデル[2]を、 $\Phi_p(E)$ は AP-8 モデルを用いた。

まず、図 2, 3 の結果を外挿、更に一電子線・一陽子線あたりの発生電流に換算し、静止軌道の電子線・陽子線のフラックスを各エネルギーについて掛け合わせ、静止軌道における各エネルギーの電子線・陽子線誘起電流を求めた。結果を図 4 に示す。電子線による発生電流は電子線のエネルギーが小さいほど増加する傾向であるが、これは低エネルギー電子線のフラックスが高エネルギー電子線と比較して桁違いに多いことに起因する（例えば、100keV 電子線と比較して 10keV 電子線は 100 倍程度のフラックス）。なお、CIGS 太陽電池については、表面に ZnO 層があるため、20keV 以下の電子線に関しては無視している。一方、陽子線については 40keV 以上のフラックスしかモデル化されておらず、また CIGS 太陽電池では低エネルギー陽子線が発電層に侵入しないため、低エネルギー領域で発生電流は減少した。

図 4 の結果をエネルギーで積分することで、静止軌道上での電子線・陽子線による発生電流を求めた。その結果、シリコン太陽電池では、電子線で  $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、陽子線で  $0.03\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、CIGS 太陽電池では、電子線で  $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、陽子線で  $0.0006\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、それぞれ発生すると得た。いずれ

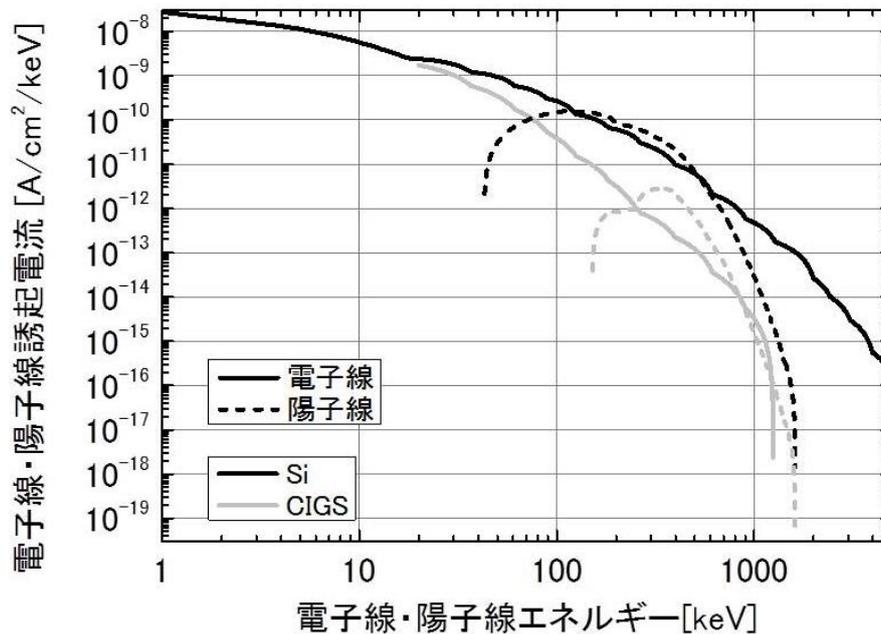


図4：静止軌道における電子線/陽子線誘起電流の電子線・陽子線エネルギー依存性

の太陽電池も 100keV 以下の低エネルギー電子線による発電が支配的である。放射線耐性が弱いシリコン太陽電池はカバーガラスを必須とするが、それでは低エネルギー電子線による発電が見込めず発生電流は激減する。一方、CIGS 太陽電池はカバーガラスが不要であるので、発生電流の低下はない。更に、太陽電池に流れる電流密度が  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  オーダーと微小であるので、ZnO 層の薄膜化が可能であり、低エネルギー電子線による発生電流の増大が期待できる。

現在、購入できるエネルギーハーベスティング用のセンサモジュール（温度センサ、通信モジュールおよび蓄電素子を含む）の最小動作電流は  $1\mu\text{A}$  程度（電圧は 2.1V 以上）であるので、太陽電池のサイズ等を工夫することで、放射線のエネルギーハーベスティングによってセンサモジュールを動作させる可能性があると言える。

#### 4. まとめ

宇宙環境におけるエネルギーハーベスティングの成立性の検討を行った。実験結果より、静止軌道の電子線環境下であれば、放射線発電でセンサモジュールを動作させる可能性を示した。

#### 参考文献

- [1] L. C. Olsen, "Review of Betavoltaic Energy Conversion," Technical Report, N94-11407, 1993.
- [2] A. Sicard-Piet, S. Bourdarie, D. Boscher, R. H. W. Friedel, M. Thomsen, T. KoGa, H. Matsumoto, H. Koshiishi, "A new international geostationary electron model: IGE2006, from 1 keV to 5.2 MeV," Space Weather-the International Journal of Research and Applications, vol. 6, no. 7, 2008.