

JAXA 大気球による標準太陽電池の較正実験計画

Scheme for Calibration of Primary Standard Solar Cells using JAXA's High Altitude Balloon Flights

今泉 充¹, 梯 友哉¹, 久木田明夫¹, 豊田裕之², Raymond Hoheisel³, Justin Lerenzen³

1. 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門, 2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所,
3. 米国海軍研究所

Abstract

JAXA では、近年の宇宙機の大電力要求に対応すべく、単位質量あたり、および単位体積あたりの発電量が大きくなる高効率薄膜 3 接合太陽電池を開発した。この太陽電池の変換効率は従来の宇宙用太陽電池を凌駕する 30~31%を誇るが、その測定・評価値の正確性を担保するために必要な、疑似太陽光光源の較正・調整に使用する 1 次標準太陽電池が得られておらず、現状の 3 接合太陽電池のそれを使用して測定した値である。この新開発薄膜 3 接合太陽電池の 1 次標準太陽電池をはじめとする、各種 1 次標準太陽電池の作製を国内で可能にすべく、JAXA の大気球を使用した較正実験を計画している。さらに、この実験の中で、残留大気の光吸収による AM0 光に対する較正值誤差の定量的かつ実証的な検討も行う予定である。

1. はじめに

近年、宇宙機における電力需要は高まりつつある。ロケットで運ばれる宇宙機では、その搭載容量が限られるため、より高効率すなわち単位面積当たりの出力が高い太陽電池が求められる。加えて、小さな機体に可及的多くのミッション機器を搭載するためには、バス系の機器の体積および質量は小さい方が好ましい。このような背景から、太陽電池パネルの軽量化と高出力化が求められている。この要求に応えるべく、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 研究開発部門とシャープ (株) は協同し、従来のパネルに相当する軽量・フレキシブルの高効率薄膜 3 接合太陽電池セルアレイシートを開発した¹⁾。

この実現に最も鍵となる技術は、太陽電池の軽量化と高効率化の同時実現であった。この軽量太陽電池パネルへの応用を目的に、2015 年度に 30% 以上の変換効率 (AM0 光, 非集光) を有する高効率薄膜 3 接合太陽電池を開発した²⁾。この太陽電池は、従来の 3 接合太陽電池の Ge ボトムセルを InGaAs に代えた InGaP/GaAs/InGaAs 積層構造を有する。

高効率薄膜 3 接合太陽電池はその名の通り薄膜構造であり、その薄さ (約 30 μm) ゆえセル単体での取扱いは極めて難しい。そこで、このセルを予め一定枚数アレイ接続し、その表・裏面側を膜状被覆物質でラミネートした「セルアレイシート形状」で実用・提供することとし、同時に開発を

行った。図 1 にその外観を示す。なお、これらの総厚は 0.3 mm 程度で曲げに対応し、曲率半径 5 cm 以下の柔軟性を有している。

2. 高効率薄膜 3 接合太陽電池の出力特性

高効率薄膜 3 接合太陽電池は、静止軌道での適用を考慮し耐放射線性を重視した型 (Type-A) と、周回低軌道あるいは短期ミッションを考慮し初期出力を重視した型 (Type-B) の 2 種類を開発した¹⁾。これらの出力を表す光照射下電流-電圧 (LIV) 特性の一例を図 2(a)に示す。典型的な変換効率は Type-A セルが 30%, Type-B セルが 31%である。なお、セル 1 枚の質量は約 330 mg であり既存の InGaP/GaAs/Ge 構造 3 接合太陽電池 (厚さ約 150

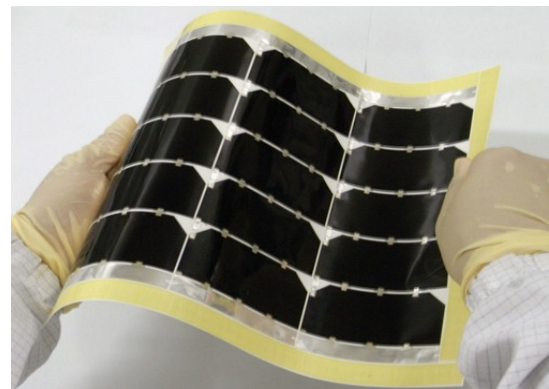


図 1 薄膜 3 接合太陽電池セルアレイシートの外観

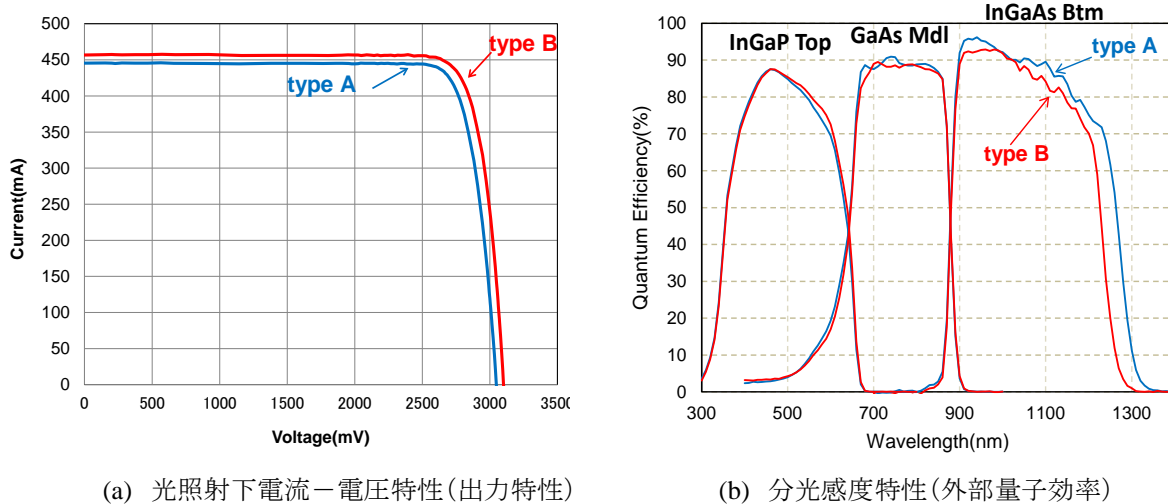


図2 AM0 模擬太陽光照射下での高効率薄膜3接合太陽電池の典型的特性。

μm) の約 15% 程度，面積は 27.4 cm² と既存の 3 接合太陽電池と同等である。

3. 太陽電池の出力特性測定

太陽電池が発生させる電力は，疑似太陽光を照射しながらその電流－電圧特性を測定することで求められる。図 2(a)は，その例である。この電流－電圧曲線上の各点における電流値と電圧値を乗じて電力値を導出し，その最高の値（最大電力という）を照射光強度（単位：W）で除することで変換効率を得る。この測定において，当然ながら照射光強度は使用される環境における太陽光強度と等しくなければならない。宇宙用の場合は，AM0 と称される，大気圏外における太陽光スペクトル，すなわち大気成分による減衰や吸収のないスペクトルおよび強度の疑似太陽光が必要となる。

測定に用いる疑似太陽光光源のスペクトルおよび強度を調整・較正し，AM0 に近似させるには，1 次標準太陽電池と呼ばれる較正用太陽電池が必要である。これは，実際の AM0 太陽光を入射した際の出力（典型的には電流値）を計測し，その値を較正值として値付けした太陽電池である。しかし，本当の AM0 すなわち宇宙空間で計測してその太陽電池を地上で回収するのは極めて困難であるため，実際には疑似 AM0，つまり大気のほとんどない高空にて計測し，それを地上回収したものを用いている。この際，若干の大気の影響を受けた太陽光での測定値となるため，補正計算により AM0 での値に修正を施す。

疑似太陽光には，キセノン放電管を光源に用い

るのが一般的である。これは，その発光の分光放射スペクトルが太陽光に比較的に近いからである。これに UV，IR，色温度などのフィルタを加えて所望（宇宙用太陽電池の場合は AM0）のスペクトルに近づける。放電光源であるため，そのスペクトルには多くの輝線が含まれる（図 3 参照）。単一接合太陽電池の場合は，その受光感度領域の積分強度が AM0 に等しければ等価の出力が得られるため，問題にはならなかった。ところが，太陽電池が多接合化されると，その構成太陽電池各々の出力が AM0 光のときと同じでなければ多接合太陽電池としての正確な出力値は得られない。このため現在では，キセノン放電管（短波長側）とハロゲン電球（長波長側）の 2 種を光源とした疑似太陽光がよく用いられる。

このような複数光源の疑似太陽光の強度を調整するには，各構成サブセルの出力を AM0 光の場合に一致させなければならない。図 2(b)は，高効率薄膜 3 接合太陽電池の 3 種（InGaP，GaAs，InGaAs）の構成太陽電池の分光感度特性を示している。それぞれの感度領域の光の積分強度が AM0 に値に合致することが，3 接合太陽電池の正確な出力の測定に必要となる。従って，この太陽電池の測定に用いる疑似太陽光光源の出力とスペクトルを調整するには，これら 3 種の別々の単一接合太陽電池の 1 次標準太陽電池が必要となる。図 3 は，現在用いられている InGaP/GaAs/Ge 構造 3 接合太陽電池の 1 次標準太陽電池を用いて調整した 2 光源疑似太陽光装置の分光放射スペクトル（青線）である。比較のため，キセノン 1 光源疑似太陽光装

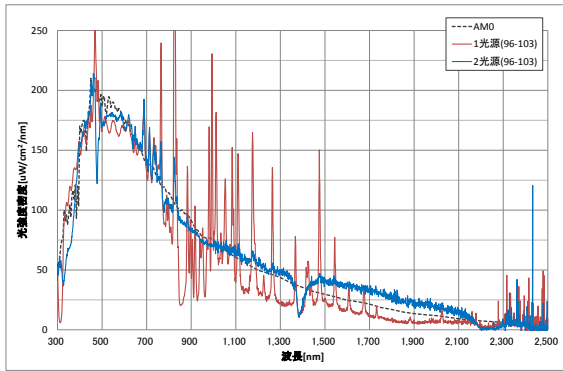


図 3 疑似太陽光の分光放射スペクトルと AMO スペクトルの比較.



図 4 米国海軍研究所が開発中の姿勢制御付帯小型太陽電池高空測定装置.

置の分光放射スペクトル (赤線) および AMO スペクトル (黒点線) を同時に示す.

3. 1次標準太陽電池の較正 (値付け) 法

1次標準太陽電池の較正 (値付け) 法としては、これまでには JPL の高空 (25km 程度) バルーン法, NASA の高高度航空機 (20km 程度) 法, CNES による高空 (25km 程度) バルーン法が存在し, その選択により較正の機会もほぼ十分であった.ところが 2000 年代に入り, JPL が資金難を理由に撤退.ほぼ同時に CNES が装置老朽化を理由に中断,その後資金難による更新作業の遅延が生じてフライトが不可能となった.さらに NASA も比較的 low altitude の誤差 (次節参照) 解消のため, 航空機の高

度向上のための新調を開始し, 太陽電池の較正が全くできない期間が続いた. この時期と JAXA における高効率薄膜 3 接合太陽電池の開発の時期が重なって, 正確な出力測定に欠かせない構成太陽電池の 1 次標準太陽電池が作製できず, いまだに従来の 3 接合太陽電池の 1 次標準太陽電池 (InGaP と GaAs のみ) で代用している.

今年に入り, CNES の新規測定装置による試験フライトが予定され, NASA も試験フライトおよび試験較正実験が進められてはいるものの, JAXA が自前でかつ頻度高く太陽電池の較正作業が実施できる体制を構築する必要性は変わらない状況である.

我々は, 米国海軍研究所が開発中の姿勢制御付

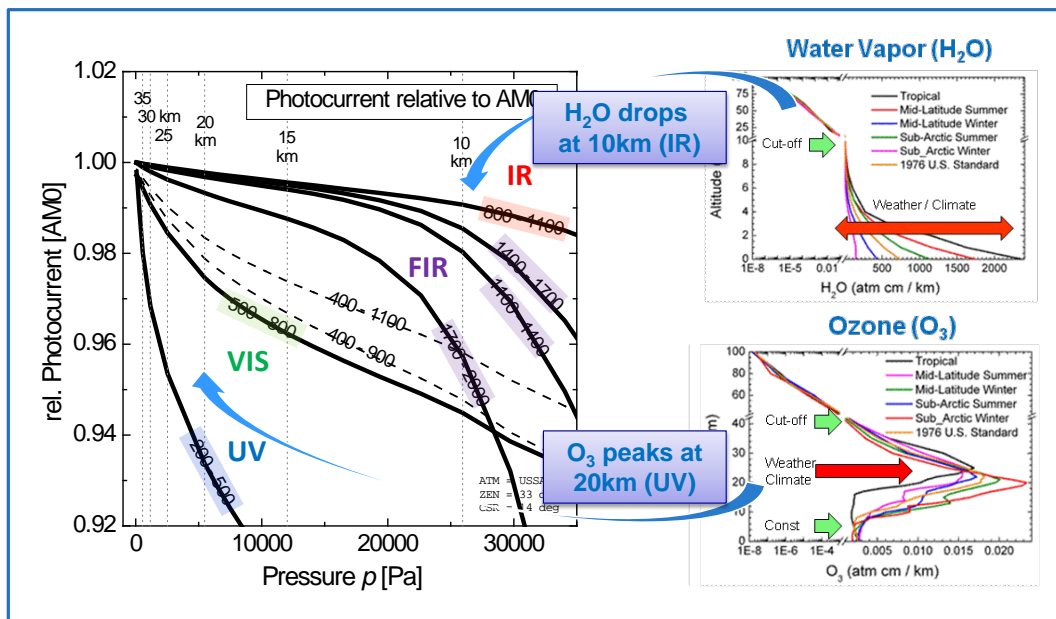


図 5 太陽電池の高空較正における残留大気起因の誤差の影響.

帯小型太陽電池高空測定装置（図 4）を導入し、JAXA 大気球を用いての太陽電池較正法確立に向けての試験を計画中である。この際、海上回収に対応するための防水装置の開発が、重要な課題の一つとなっている。

4. 較正值誤差の低減

現在、太陽電池の高空較正において最も重要な課題は、残留大気の影響の補正計算における、真の値すなわち AM0 での値に対する誤差の発生である。図 5 左は、AM0（大気なし）での太陽電池の光発生電流値を 1 と規格化した際の、主な補正要因である水蒸気とオゾンによる太陽光吸収が及ぼす影響（減少率）を紫外（UV）、可視（VIS）、近々赤外（IR）、および近赤外（FIR）領域に分けて見積もった値を示すグラフである。これより、最も影響が大きいのは UV 領域への残留オゾンの影響で、その減少を 1%程度とするには 35km 以上の高空にて計測をする必要がある。これは、3 接合太陽電池の構成サブセルで最も表面側にあり、紫外～黄色領域に感度を有する InGaP 太陽電池の較正、値付けにとって重要なことである。

我々は、35km 以上の高空に到達可能な JAXA バルーンを用い、異なる高度での太陽電池出力の測定を行うことで、図 5 に示す光発生電流の減少、誤差のモデルの妥当性を検証を行う計画である。またその結果は、現在 1 次標準太陽電池の較正法の国際規格化に関する議論に供し、規格に反映させる予定である。

5. まとめ

JAXA は高効率薄膜 3 接合薄膜太陽電池を開発した。この出力をより高精度（AM0 での真値に近い）で測定するためには、疑似太陽光強度および分光放射スペクトルの調整用の 1 次標準太陽電池の入手が急務である。しかし、これまでの較正法がいずれも技術、装置更新で休止ないし試験中で実施が困難な状況である。このため、JAXA が自力較正できる能力・体制の確立を図る必要がある。その早期確立に向け、JAXA バルーンを用いた試験を計画している。また、高高度バルーンにより大気の影響の実験的検証を行う予定である。

参考文献

- 1) H. Yamaguchi, R. Ijichi, Y. Suzuki, S. Ooka, K. Shimada, N. Takahashi, H. Washio, K.

Nakamura, T. Takamoto, M. Imaizumi, T. Sumita, K. Shimazaki, T. Nakamura, T. Ohshima, Development of Space Solar Sheet with Inverted Triple Development of Space Solar Sheet with Inverted Triple Development of Space Solar Sheet with Inverted Triple-Junction Cells, Proc. 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, 2015.

- 2) T. Sumita, T. Nakamura, M. Imaizumi, S.-i. Sato, H. Abe, T. Ohshima, Development of Inverted Metamorphic Triple-Junction Solar Cell at JAXA for Space Use, 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Kyoto, 2014.