

EL イメージングによる太陽電池セルの劣化評価

豊田裕之, 田中孝治, 佐々木進, 田島道夫 (ISAS/JAXA)

1 はじめに

近年宇宙機において、帯電・放電現象による障害が深刻化しつつある。図 1 に示すとおり、衛星障害の 3 分の 1 以上が太陽電池において発生し、全障害の半数以上が帯電・放電現象に起因するという報告もある。

すなわち、太陽電池パネルにおける帯電・放電現象の特性を理解し、これを制御もしくは抑制する手法を確立することは、太陽発電衛星などの将来ミッションの基盤技術となるだけでなく、現時点での衛星障害を抑制するために非常に重要である。

しかし放電現象は微少な領域で高速かつ確率的に進展するために観測が難しく、太陽電池セルの放電から劣化に至るメカニズムは、完全には解明されていない。

そこで筆者らは放電により劣化した太陽電池セルの評

価方法として Electroluminescence (EL) イメージングに注目し、電気的特性との関連を調査した。その結果をここに報告する。

2 実験方法

2.1 試験用太陽電池クーボンパネル

宇宙用単結晶 Si 太陽電池セルを用いて、試験用クーボンパネルを作製した。このセルは、1993 年に打ち上げられた宇宙科学研究所の科学衛星「あすか」のもので、寸法は 4×2 cm、厚さは Si 基板部分が $50 \mu\text{m}$ 、カバーガラスが $100 \mu\text{m}$ である。

クーボンパネルの外観を図 2 に示す。アルミニウム板をポリイミドフィルムで覆って絶縁したものを基板とし、その上にシリコン系接着剤 RTV-S691 を用いて太陽電池セルを固定した。アレイは 5 直列 \times 3 並列の構成で、セル間隔は約 0.5 mm である。インターコネクタと裏面電極はスポット溶接で接続し、列毎にリード線を引き出している。

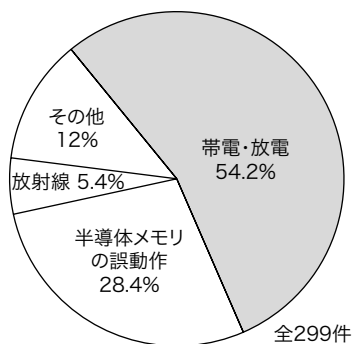
整理の都合上、図 2 (b) に示すように、太陽電池セルおよびバスバーに番号を振った。

2.2 放電実験時回路構成

放電実験に使用した回路構成を図 3 に示す。チャンバー内には光源がなく太陽電池が電力を発生できないため、安定化電源 V_g によりダイオードの順方向に電流を流し発電を模擬している。 V_g の値は $0 \sim 500$ V の範囲で変化させ、電流値は I_{sc} 程度の 320 mA 以下となるよう制限した。また列間に抵抗を挿入し、2 列目、1 列目、3 列目の順に均等に電位差が生じるようにした。例えば $V_g = 500$ V の時は、1 列目と 2 列目の電位差は 250 V、2 列目と 3 列目の電位差は 500 V となる。

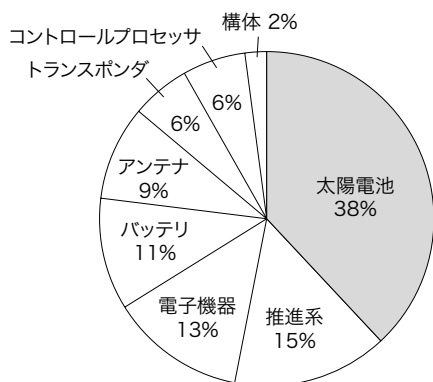
電流波形の測定は、各列の前後計 4 カ所で、電流プローブを用いて行った (図 3 中、CP1 ~ 4)。

この回路では安定化電源の負側を接地しており、回路全体が周辺プラズマに対して正電位となる。現実には負電位となる場合が多いが、本報告では太陽電池セルの劣化特性の評価に焦点をあて、負電位での放電特性に関しては別の機会に報告したい。



(a) 宇宙環境による衛星障害原因

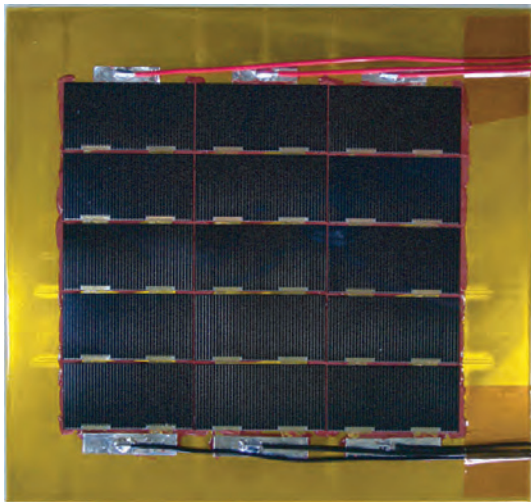
(1973~1997 年, Koons ら調べ [1])



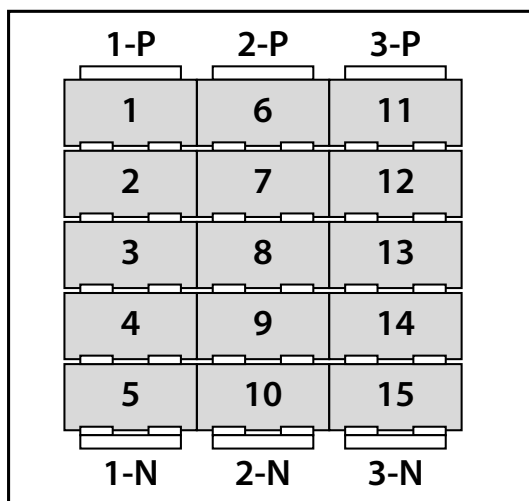
(b) 衛星障害の発生部位

(1998~2004 年, Frost & Sullivan 社調べ)

図 1 宇宙環境による衛星障害原因の統計情報



(a) 外観写真



(b) セルおよびバスバーの番号

図2 試験用太陽電池クーポンパネル

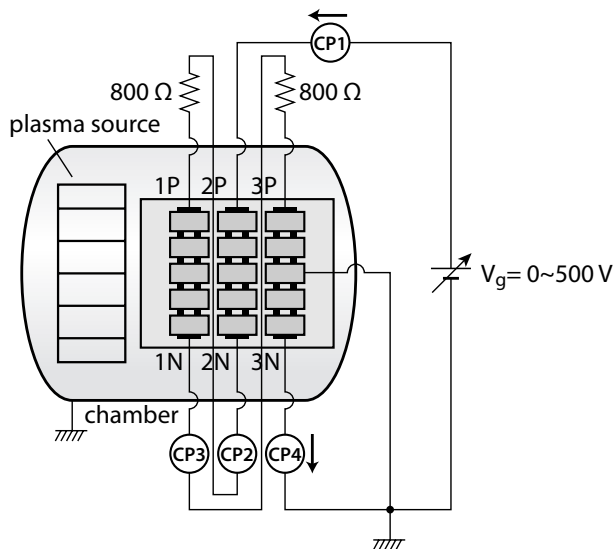


図3 放電実験の回路構成

2.3 チャンバーおよびプラズマ環境

放電実験は、直径約 1.5 m、長さ約 2 m の円筒形チャンバー内で行った。あらかじめチャンバーを 10^{-4} Pa 程度まで排気し、その後 Ar ガスを導入、プラズマ源を点火した。測定時の真空度は約 4×10^{-2} Pa、プラズマ環境は、電子温度 7 eV、電子密度 $4.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ であった。

3 実験結果

3.1 放電特性

安定化電源の出力電圧 V_g を 0 V から徐々に上昇させてゆくと、400 V 以上でコロナ放電が発生、さらに 450 V 以上でアーク放電およびインターコネクタにおける大量の電荷収集が発生した。

放電の発光の様子を図 4 に示す。 $V_g = 400$ V 程度で、図 4 (a) のようにクーポンパネルを覆うコロナ放電が発生した。その状態で電圧を維持すると、図 4 (b) のようにインターコネクタやバスバーに輝点が現れる。その後図 4 (c) のようなアーク放電の発生や、図 4 (d) のような大量の電荷を収集するモードへの移行が起こった。

アーク放電発生時の放電電流波形を図 5 に示す。この時の $V_g = 430$ V、放電電流値は 0.8 ~ 0.9 A、持続時間は 40 μs 程度であった。

図 4 (d) のモードでの収集電流の値は、電流プローブの測定レンジを上回ってしまったために取得することができなかった。測定レンジは 20 A であったので、これ以上の値ということになる。

$V_g = 450 \sim 500$ V で十数回のアーク放電が発生した後に、2 列目の順方向電圧が大きく低下したため、実験を終了した。この間、放電の大部分は、2 列目で発生した。

3.2 外観の変化

放電により損傷した太陽電池クーポンパネルの外観を図 6 (a) に示す。バスバー 2-P, 2-N, 3-N、ならびに 2 列目のインターコネクタ 2 カ所に損傷が見られる。

いずれも近傍のカバーガラスに曇りが発生しているが、これはインターコネクタ材料が放電により蒸発し、その後ガラス表面に付着したものである。

損傷したインターコネクタ周辺の拡大写真を図 6 (b), (c) に示す。図 6 (b) では、インターコネクタ右端に変色が見られる。

図 6 (c) のインターコネクタは損傷の程度が大きく、さらに拡大した写真図 6 (d) ではカバーガラスの破損が確認できる。太陽電池セルを基板から剥がしたところ、図 6 (e) のようにインターコネクタ背面のポリイミドフィルムが損傷していた。

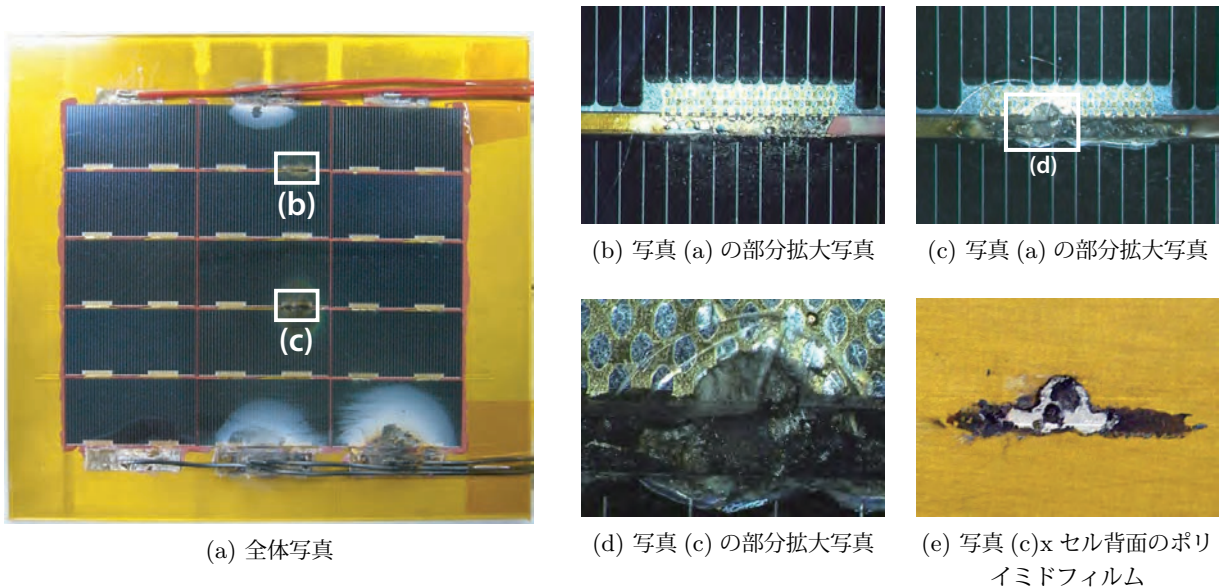


図6 放電により損傷した太陽電池クーポンパネルの外観

3.3 VI 特性

放電実験後、各太陽電池セルの VI 特性を測定したところ、太陽電池セル No. 8, 9, 10 に変化が現れていた。

セル No. 8 は pn 間がほぼ短絡状態で、VI 特性を測定することができなかった。

セル No. 9, 10 については、損傷前後の VI 特性を図 7 に、解放電圧 V_{oc} 、短絡電流 I_{sc} 、曲線因子 FF を表 1 に示す。いずれも AM 0 の疑似太陽光源で測定したものである。

セル No. 9, 10 とも、FF が大きく低下するとともに、VI カーブが右肩下がりになっている。これは太陽電池セル内部の並列抵抗成分の減少を示唆している。

表 1 解放電圧 V_{oc} 、短絡電流 I_{sc} 、曲線因子 FF (AM 0)

セル No.	損傷前		
	V_{oc} [mV]	I_{sc} [mA]	FF
9	611.0	315.4	0.765
10	610.4	314.7	0.768
セル No.	損傷後		
	V_{oc} [mV]	I_{sc} [mA]	FF
9	604.2	311.7	0.594
10	534.2	299.3	0.280

3.4 EL イメージング

放電による損傷前後で Electroluminescence (EL) イメージング画像を撮影し、比較を行った。これは太陽電池セルに電流を流し、その発光を CCD カメラで撮影するものである。本実験で使用した太陽電池セルの EL 発光スペクトルを図 8 に示す。波長 1130 nm 付近にピークを持つ発光特性となっている。

損傷前後の太陽電池クーポンパネルの EL イメージを

図 9 に示す。測定時の電流値は I_{sc} 程度の 300 mA、露光時間は 3 秒である。なお実際にはパネル全体の画像を同時に撮影したわけではなく、セル毎に撮影した画像を並べたものである。

損傷前後の EL イメージを比較すると、VI 特性に劣化の見られた太陽電池セル No. 8, 9, 10 に変化が現れていることがわかる。セル No. 8 は、前述の通り p, n 電極間が短絡状態になってしまったため、セル内部に電流を流すことができず、EL の発光を得ることができなかった。セル No. 9, 10 には、セルエッジからグリッド電極に沿って伸びる、暗い領域が現れている。

4 考察

4.1 クラックセルとの比較

太陽電池セル No. 14 には、太陽電池セルをクーポンパネルにアセンブリした時点からクラックが入っていた。そこでセル No. 14 と放電により損傷したセル No. 10 の EL イメージの比較を行った。図 10 にその結果を示す。

クラックセル (図 10 (a)) では、インターコネクタ付近に生じたクラック部分で集電電極が切断され、それよりも上方向に一定の幅で黒い領域が伸びていることがわかる。これは、n 側電極であるインターコネクタから流入した電子が切断部分より先には進むことができず、発光に寄与するキャリアの注入が行われないためと考えられる。

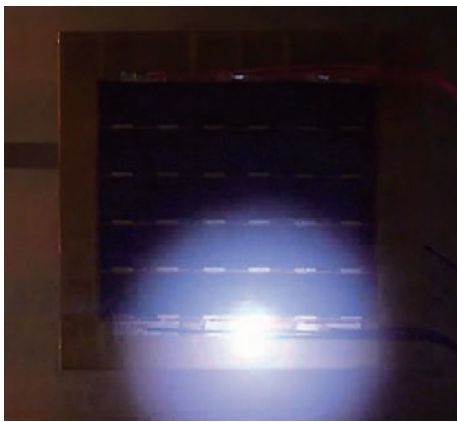
これに対して放電により損傷したセル (図 10 (b)) では、黒い領域がセル上端部から下方向に向かい刷毛で掃いたような形状に伸びている。これは溶けたインターコネクタ材料などによりセル上端部で pn 間が短絡され、その部分で非発光性のキャリアの再結合が起こっている



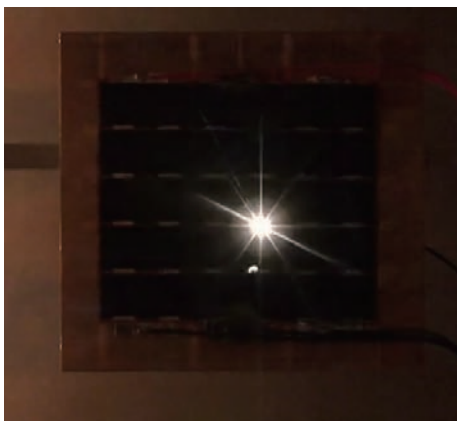
(a) コロナ放電



(b) インターコネクタ上の輝点



(c) アーク放電



(d) 持続放電

図4 放電の発光の様子

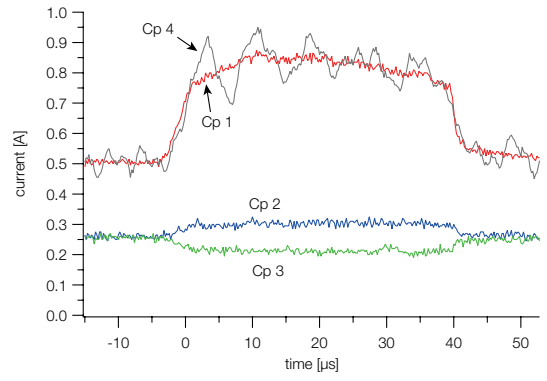
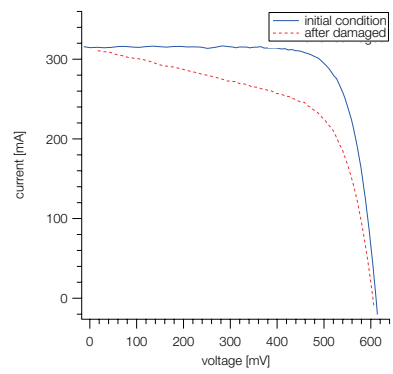
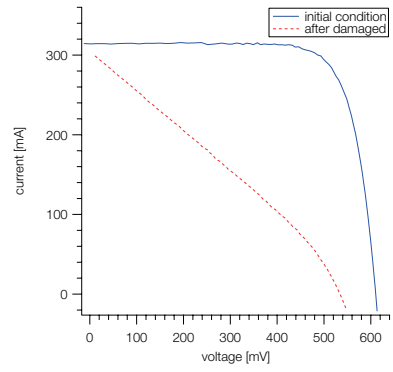


図5 発電電圧 430 V 時のアーク放電電流波形



(a) No. 9



(b) No. 10

図7 損傷した太陽電池セルの VI 特性

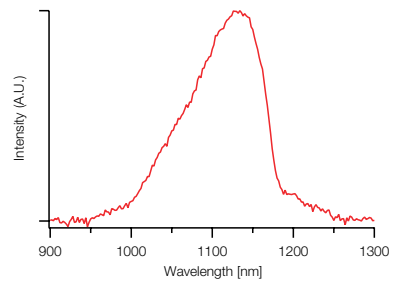
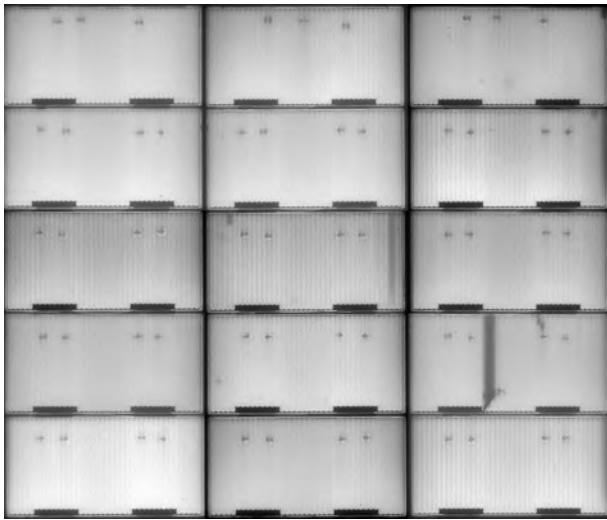
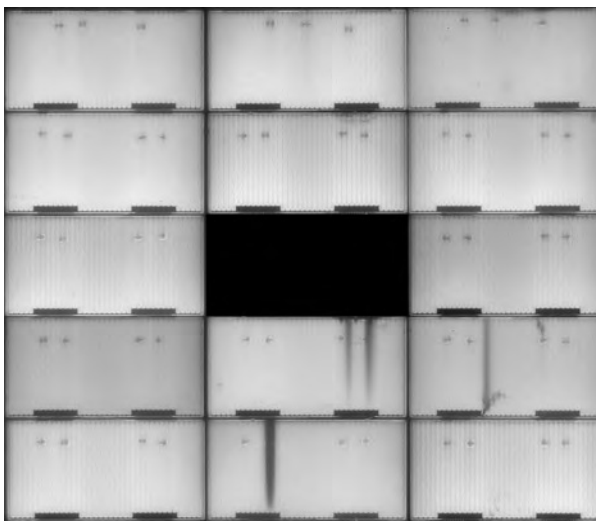


図8 太陽電池セルからの EL 発光スペクトル



(a) 損傷前



(b) 損傷後

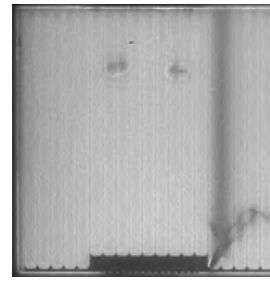
図9 太陽電池クーポンパネルの EL イメージ

ものと考えられる。短絡部分から遠ざかるほど発光強度が増すのは、セルの面内方向に抵抗成分が存在するため、短絡部分から遠ざかるほど、そこに流れ込むキャリアが減少するためであろう。また暗い領域が集電電極に沿って伸びているのは、その方向には面内の抵抗値が小さいため、より多くのキャリアが短絡部分に流れ込むためと考えられる。

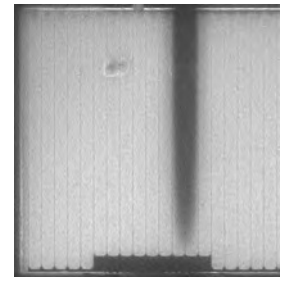
4.2 並列抵抗値による変化

既に述べたように、損傷した太陽電池セルの EL イメージに現れた黒い領域は、セル端部における pn 間の短絡が原因と考えられる。これを検証し、短絡抵抗の値と EL イメージ、VI 特性の関係を調べるため、簡単な実験を行った。

図 11 に示すように、裏面電極から引き出した導線と表面の集電電極を可変抵抗で接続し、抵抗値を変えながら EL イメージおよび VI 特性を取得した。これにより、pn 間がある抵抗値を持って短絡された状態が再現される。



(a) クラック (セル No. 14)



(b) 放電による損傷 (セル No. 10)

図 10 クラックと放電による損傷の EL イメージへの影響

抵抗値による EL イメージの変化を図 12 に示す。セル端部近くで集電電極に抵抗を接続しているが、その部分から下に向かって黒い領域が発生していることがわかる。この様子は、図 10 (b) の放電により損傷した太陽電池セルの EL イメージと酷似している。

pn 間に接続した抵抗値が大きいと、抵抗を通じて非発光性再結合をするキャリアは少なく、黒い領域は薄く小さい。抵抗値が太陽電池セルのシャント抵抗に比べて十分に小さくなると、抵抗を通じて非発光性再結合をする

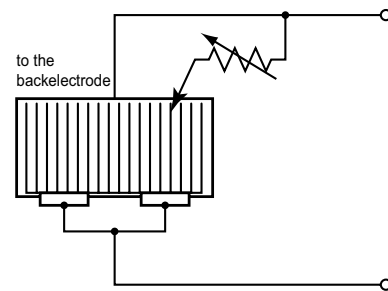
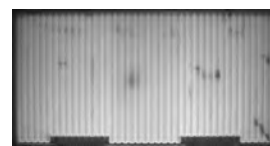


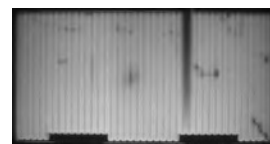
図 11 pn 間に接続した抵抗による電流リークの模擬



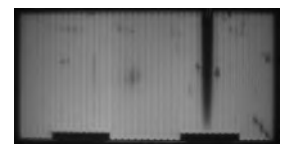
(a) 初期状態



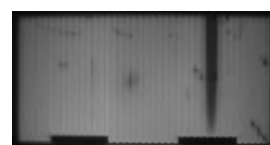
(b) 30.7 Ω



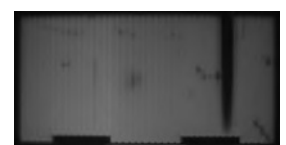
(c) 10.3 Ω



(d) 2.1 Ω



(e) 1.2 Ω



(f) 0.4 Ω

図 12 pn 間に接続した抵抗値による EL イメージの変化

キャリアが増加し、黒い領域は濃く大きくなる。それと同時に、セルの他の部分で発光性再結合をするキャリアは減少するので、発光している部分の明るさは暗くなる。

同様に、pn 間に接続した抵抗値を変化させながら測定した VI 特性を図 13 に示す。図 7 に示した VI 特性とは異なる測定系を使用し簡易的に測定を行ったため、図 7 との定量的な比較はできないが、抵抗値による特性変化を知ることができる。すなわち、pn 間に接続した抵抗の値が小さくなるにつれて、VI 特性は右肩下がりに変化してゆく。これは図 7 に現れる損傷による変化と同様の傾向である。

以上の実験から、太陽電池セルの pn 間が十分に小さい抵抗値で接続されると、図 7 や図 10 の放電による損傷と類似した特性変化を生じることが確認された。

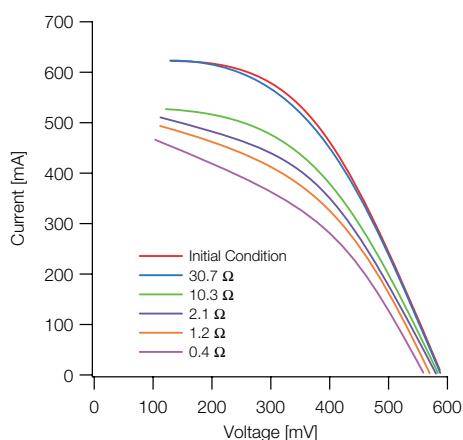


図 13 pn 間に接続した抵抗値による VI 特性の変化

5 おわりに

宇宙用単結晶 Si 太陽電池セルを使用してクーポンパネルを製作し、プラズマ中の放電により損傷させる実験を行った。そして太陽電池セルに生じた劣化を、EL イメージおよび VI 特性により評価した。

その結果、以下の事項が明らかとなった。

- プラズマ環境中で最高 500 V の電圧を太陽電池アレイに印加したところ、一部のインターコネクタにおいて捕集電流が数十 A に達し、インターコネクタの溶解などの損傷が発生した。
- インターコネクタが損傷した太陽電池セルの VI 特性には、シャント抵抗成分の低下を示唆する変化が表れた。
- VI 特性に変化の見られた太陽電池セルの EL イメージには、pn 間の短絡が原因と思われる黒い領域が現れた。
- VI 特性と EL イメージに現れた変化はよく対応しており、EL イメージングが太陽電池セルの損傷を評

価する方法として有効であることが示された。

参考文献

- [1] H. C. Koons, et al.: “The Impact of the Space Environment on Space Systems”, Proc. of Sixth Spacecraft Charging Technology Conference (2000)
- [2] 田島道夫, 藁品正敏, 久松正, 鈴木皓夫: “シリコン太陽電池のルミネッセンス評価”, 1991 年春季 第 38 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, Vol. 2, No. 29aSX12, p. 648 (1991).
- [3] M. Tajima, M. Warashina, T. Hisamatsu and A. Suzuki: “Characterization of Radiation Damages in Silicon Solar Cells by Photoluminescence Technique”, Proc. 18th Internat. Symp. Space Technology and Science, pp. 2595 – 2599 (1992)
- [4] 豊田裕之, 田中孝治, 佐々木進, 田島道夫: “プラズマ環境における太陽電池セルの放電による劣化”, 第 50 回宇宙科学技術連合講演会, pp. 1979–1984 (2007)