

Discharge phenomenon of high voltage cable in space environment

Haruka Yamanouchi, Kazuhiro Toyoda,

Mengu Cho (Kyusyu Institute of Technology), Takehiro Miyakawa (JAXA)

Abstract

In space solar power system(SSPS), produced electric powers are sent by on high voltage from solar cells to power transformation parts. The power cables are exposed to harsh space environment because there are on spacecraft's body. Therefore the cables are required enough isolation performance on these bad conditions in order to send power continuously. However, by repetition bias on high voltage (15kV), electrical breakdown phenomenon is observed on the cables. In addition, there are many creeping discharges on the cable when sample was made open-ended form.

These phenomena lead up to operation stop of the system. Then, this research indicates the result of examination about the cause and the process of breakdown by changing conditions. Especially, in this time, we evaluate about influence¹of external capacitor and relevance of first discharge.

宇宙環境における高電圧ケーブルの放電現象

山之内遥, 豊田和弘, 趙孟佑(九州工業大学), 宮川雄大(JAXA)

1.はじめに

近年、人工衛星の大型化・多機能化に伴い高電圧化が進んでいる。また宇宙空間を利用したエネルギー問題の解決策として注目されている宇宙太陽光発電システム(SSPS)においても発電電力を低損失に送る為に高電圧技術が不可欠である。よって高電圧技術は今後非常に重要になる。実際に 1GW のシステムでは 10kV 程度の電力で送電する必要がある^[1]。バス型 SSPS では太陽電池で発電した電力は衛星構体 (GND) 上の電力ケーブルを通して送電部に送られる。したがって電力ケーブルは高電圧下と過酷な宇宙環境下にさらされても十分な絶縁性能が求められる。しかし実際に宇宙環境を模擬した試験では高電圧印加を繰り返すことで絶縁破壊が観測されている。その為ケーブルの絶縁性能評価を目的として宇宙用電線 SPEC55 をバージンサンプルとして宇宙空間を模擬してケーブルの絶縁性能と高電圧の関係について研究を行っている。これまでの研究から GND 上におかれた単芯のケーブルに高電圧を印加すると GND に向かって電界が生じこの電界がある閾値を超えると GND 部分から電子がケーブル表面に向かって放出され放電が起こることが分かっている (ON 時の初期放電)^[2]。また高電圧印加を止める際にも印加時にケーブル表面に帯電した電子が除電される為放電が起こる事がわかっている (OFF 時の初期放電)。こうした高電圧 ON/OFF を繰り返すと最終的にケーブルが絶縁破壊することが観測されているので本研究ではこのような絶縁破壊のメカニズムの解明とその対策提案を目標に研究を行っている。今回は電力ケーブルの浮遊容量を模擬した C_{ext} の値を変えることでケーブルへの電圧印加速度と絶縁破壊までの回数に関係性があるか調べた為その結果を述べる。

2.実験装置および解析手法

衛星構体上に配線される電力ケーブルを銅テープ上に電力ケーブル (SPEC55) をおき、ポリイミドテープで固定し再現した (図 1)。宇宙環境を模擬する真空チャンバー内に本サンプルをセッティングし、高電圧をシャントを模擬した高電圧リレーにより印加した。このリレーにより高電圧 ON/OFF を制御した。

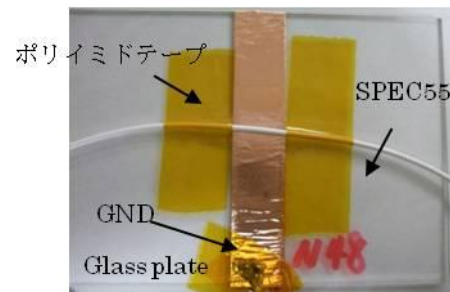


図 1 サンプル構成

図 2 の放電耐久試験システムにおいて電力ケーブルの浮遊容量を模擬した C_{ext} の値を変えることでケーブルへの電圧印加速度と絶縁破壊までの回数に関係性があるか調べた。

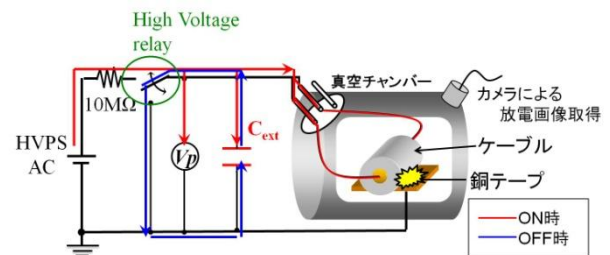


図 2 放電耐久試験システム

3. 電圧印加速度の影響評価

外部コンデンサ C_{ex} の電位変化と同様にケーブルの電位も変化する為、コンデンサ容量を変えることでケーブルの電位変化速度を変え、絶縁破壊までの回数に影響があるのか調べた。これまでの研究から $C_{ext} = 5nF, V_{bias} = 15kV$ で高電圧の ON/OFF (各 10 秒)

を繰り返すと、約 120 回で絶縁破壊が見られた。よって今回は同様の試験を $C_{ext} = 1\text{nF}$, $V_{bias} = 15\text{kV}$ という条件で行い影響を評価した。

コンデンサ容量を変えた時の電圧変化を図 3, 4 に示す。容量を変えた時の大きな違いは ON 時の電圧の立ち上がり速度と、OFF 時の電圧立下り速度である。

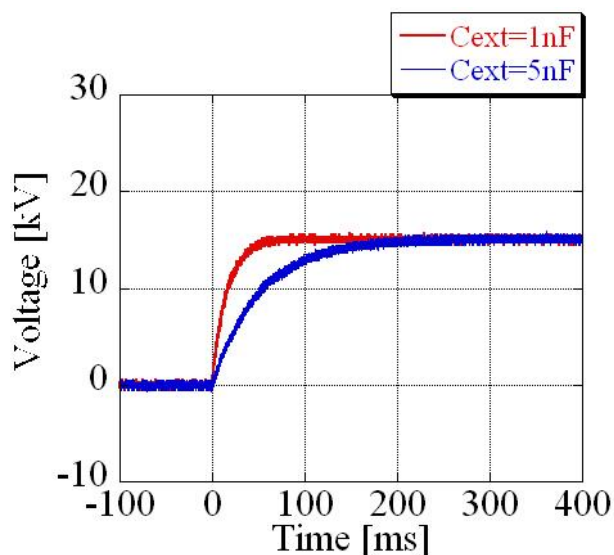


図 3 高電圧印加 ON 時

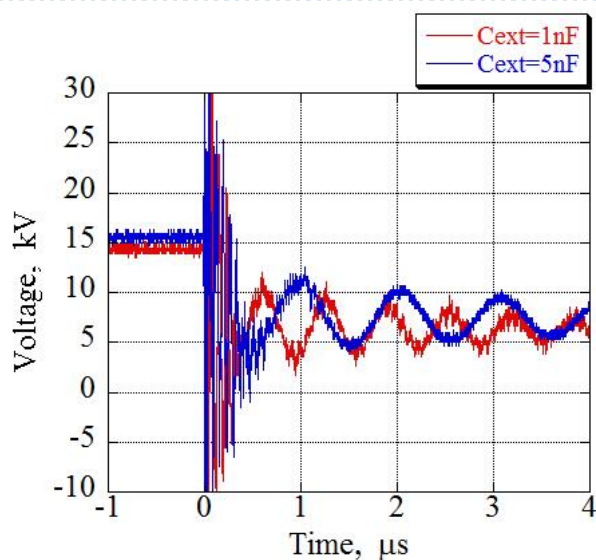
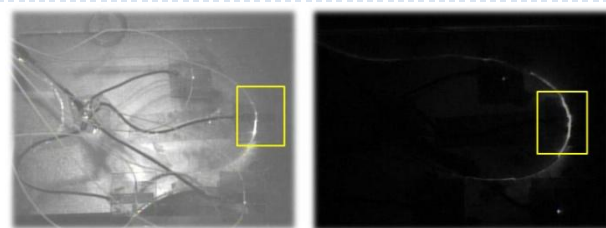


図 4 高電圧 OFF 時

図 5 に高電圧を繰り返し ON/OFF した際にサンプル上で見られた沿面放電の様子を示す。黄色の枠が図 1 のような試験サンプルがセッティングされている場所を表している。図 5 (b)が実際に沿面放電をカメ

ラで撮影したもので、この沿面放電は OFF 時にケーブル被膜に帯電していた電子が接しているアクリル面やケーブルに沿って GND に抜けた時に生じていると考えられる。



(a) サンプルの配置 (b) 沿面放電の位置

図 5 高電圧 OFF 時の沿面放電

コンデンサ容量を変えて試験した結果を表 1 に示す。4 つのサンプルに $C_{ext} = 1\text{nF}$ で繰り返し ON/OFF を行って絶縁破壊までの回数の平均を求めたところ約 90 回となった(sample61 は除く)。

表 1 コンデンサ容量による影響評価

容量 C_{ext}	印加 電圧	Sample No.	絶縁破壊 までの回数	放電波形取得 の割合		沿面 放電
				ON	OFF	
1nF	15kV	60	105	40% (32)	60% (50)	32回
		61	711	10% (58)	90% (529)	15回
		70	76	53% (77)	47% (75)	70回
		71	93	53% (89)	47% (85)	92回
5nF	15kV	平均	120	—	—	—

表 1 の放電波形取得の割合とは ON/OFF 時にそれぞれ放電が起きた時に取得される放電波形が全波形数に対してどの程度かを表したものである。() 内の数値は実際に取得した波形数である。つまり絶縁破壊までの回数が最も少なかった sample70 では ON 時と OFF 時に取得された波形は等しく ON 時に被膜を帯電させた電子がきちんと OFF 時に除電されていることが確認できたことになる。一方絶縁破壊までの回数が最も多かった sample61 では ON 時にケーブ

ル被膜の帯電がされておらずほとんど放電が起きなかったことが表からわかる。

また表 1 の沿面放電とは図 5 のような放電が絶縁破壊するまでにサンプル上で観測された回数を表している。この沿面放電の回数と ON/OFF 時の波形数を比較するとほぼ ON 時の波形数と沿面放電の発生数が同じであることが分かる。試験サンプル数が少ないため、まだこのことに規則性があるとは断定できないが、今後の課題としてこの関係性をより深く調べる必要があると考える。

その他にも表 1 の sample70 と sample71 を比較することでサンプルによる個体差を考察することができる。この二つのサンプルは ON/OFF 時の波形取得数が等しく ON/OFF 時の放電頻度もほぼ同程度である。つまりほとんど同じような放電が起こっているにも関わらず絶縁破壊までの回数が約 20 回違うということは、これがサンプル自体の個体差であると考えられる。個体差となる要素としては電力ケーブル製造時の微小なボイドの混入や試験サンプルを作製する際の埃やテープ間の微小なボイド、固定位置のわずかな違いなどが挙げられる。

以上の結果からコンデンサ容量の影響を評価すると個体差約 20 回を考慮すると $C_{ext} = 1nF$ での約 90 回と $C_{ext} = 5nF$ での約 120 回では絶縁破壊までの回数にあまり差があるとは言えず、影響はほとんどないと考えられる。むしろ ON 時のケーブル被膜の帯電頻度が絶縁破壊までの回数に影響を及ぼしていると考えられる。

4, ON 時の初期放電原理

ON 時のケーブル被膜の原理について述べると以下のような現象により起こる。図を用いて説明した物を図 6～8 に示す。

- ① 高電圧 V_{High} 印加開始
- ② 芯線電位 V & 電界強度(EF)が上昇
- ③ 電界放出となる EF 閾値 をこえる(約 10kV)

- ④ 電界放出により GND から電子がケーブル被膜へと放出される
- ⑤ ケーブル被膜に電子付着(被膜部のコンデンサの充電)
- ⑥ GND から電子が放出されたことにより電位が下がるので再度充電が始まる
- ⑦ $V = V_{high}$ になるまで充電される

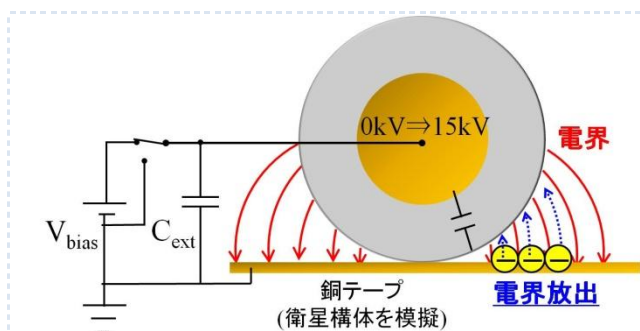


図 6 ④の状況

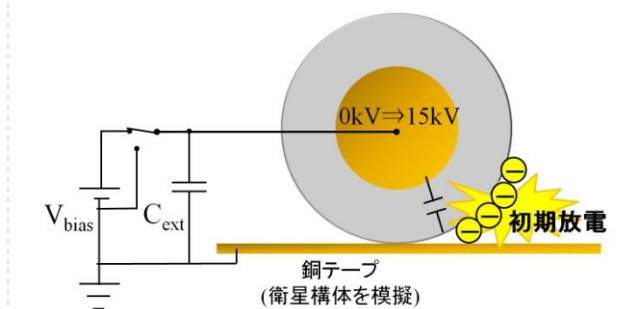


図 7 ⑤の状況

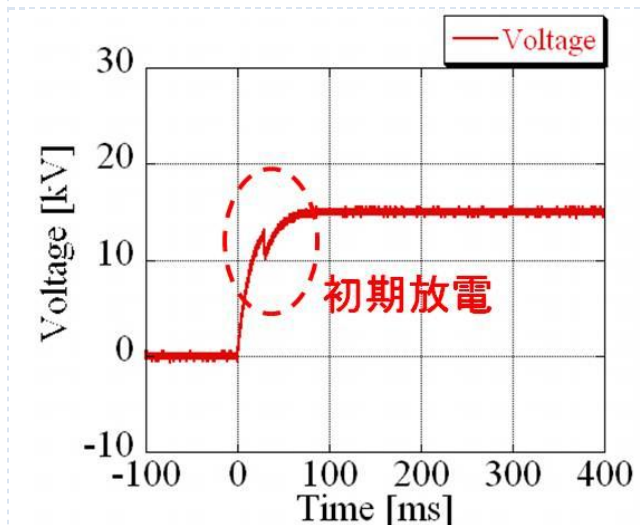


図 8 電圧波形で見た⑥の状況

放電原理より ON 時のケーブル被膜の帯電頻度が絶縁破壊までの回数に影響を及ぼしているとする最も関係性が強いのは⑤のケーブル被膜への帯電量となる。よってどの程度の電流が流れたのか ON 時の電流波形を取得および解析を行いその規模を確認する必要がある。

5. まとめ

電力ケーブルへの電圧印加速度と絶縁破壊までの回数の間に関係性はほとんど見られなかった。しかし ON 時の初期放電の有無は OFF 時での沿面放電につながり絶縁破壊へ影響を及ぼしている可能性があることがわかった。

6. 今後の課題

高電圧印加時のケーブル被膜表面の帯電量を ON 時の放電電流波形から解析し、その帯電量と OFF 時に抜けた電荷量を比較することで電荷の移動によるケーブルの劣化を調べる必要がある。加えて、これまでの実験では宇宙用電線 SPEC55 を用いているが、本ケーブルは高電圧用に製作されたものではないため、今後は SSPS を踏まえた実験を行うために民生品で耐宇宙環境性を考慮した高電圧用のケーブルを用いた実験を行う予定である。

7. 参考文献

- [1] 趙孟佑、細田聡史、香川英史：SSPS 実現に向けた高電圧バス技術に関する課題、第 49 回宇宙科学技術連合講演会講演集、日本航空宇宙学会、pp.243-248、2005.
- [2] 貞包 悠佑、豊田 和弘(九州工業大学)：“SSPS 用高電圧ケーブルの宇宙環境における絶縁性評価”