

# 高真空中における高分子材料の 帯電・放電現象

小松原 実



高真空中における高分子材料の  
帯電・放電現象

Charging and Discharge Phenomena  
of Polymer Materials in High  
Vacuum

小松原 実

## 目 次

第1章 緒言	1
1.1 はじめに	1
1.2 人工衛星の帯電放電現象に関する研究の経緯	3
1.2.1 人工衛星と宇宙環境	3
1.2.2 宇宙環境における観測	5
1.2.3 帯電放電現象の地上における模擬実験	7
1.2.4 帯電現象のメカニズム	10
1.2.5 放電現象のメカニズム	11
1.2.6 人工衛星の帯電防止技術	14
1.3 本論文の構成	16
文献 [第1章]	18
第2章 帯電のパラメータ	22
2.1 はじめに	22
2.2 実験装置及び実験方法	23
2.2.1 真空容器	23
2.2.2 排気系	24
2.2.3 電子線照射装置	24
2.2.4 実験試料	26
2.2.5 表面電位測定方法	27
2.2.6 電子線照射による表面電位分布	28
2.3 表面電位計算モデル	28
2.4 表面電位に関する検討	30
2.5 まとめ	35
文献 [第2章]	37
第3章 放電開始条件	39
3.1 はじめに	39
3.2 実験装置および実験方法	40



3.2.1 試料	40
3.2.2 放電電極	40
3.2.3 実験方法	41
3.3 結果と考察	47
3.4 まとめ	49
文献 [第3章]	51
<b>第4章 真空中での帯電放電に伴うガス放出現象</b>	<b>52</b>
4.1 はじめに	52
4.2 実験装置および実験方法	53
4.2.1 試料および真空容器	53
4.2.2 測定装置	55
4.3 結果および考察	57
4.3.1 電子線照射時の圧力変化	57
4.3.2 放電発生時の圧力変化	62
4.3.3 放電時のガス質量分析	69
4.4 有機絶縁材料の劣化診断法への応用	70
4.5 まとめ	74
文献 [第4章]	76
<b>第5章 放電光の検討</b>	<b>78</b>
5.1 はじめに	78
5.2 実験方法および試料	78
5.2.1 試料	78
5.2.2 真空容器および電子ビーム照射装置	79
5.2.3 放電光分光測定装置	79
5.2.4 実験方法	80
5.3 結果および考察	82
5.3.1 放電光に対する水素原子の影響	82
5.3.2 放電光スペクトル測定結果	84
5.3.3 放電路の温度の検討	86
5.3.4 放電光波形の検討	86
5.3.5 放電光の波長成分の時間変化	90

5.4 まとめ	97
文献 [第5章]	99
<b>第6章 人工衛星構造材の帯電特性</b>	<b>100</b>
6.1 はじめに	100
6.2 実験装置および試料	101
6.3 実験結果	102
6.3.1 FRP 試料の帯電特性測定結果	102
6.3.2 CFRP の帯電特性測定結果	102
6.3.3 10nmGe 蒸着 FRP 試料の帯電特性測定結果	106
6.3.4 50nmGe 蒸着 FRP 試料の帯電特性測定結果	109
6.3.5 ガラス板上の Ge 蒸着 FRP の帯電特性	111
6.4 考察	111
6.4.1 帯電機構に関する考察	111
6.4.2 蒸着膜厚に関する考察	115
6.4.3 複合材料の帯電機構の検討	116
6.4.4 宇宙環境における帯電の検討	118
6.5 まとめ	121
文献 [第6章]	123
<b>第7章 結言</b>	<b>124</b>
7.1 帯電特性に関する評価	124
7.2 高分子フィルムの沿面放電開始条件に 関する評価	124
7.3 ガス放出現象に関する評価	125
7.4 放電光に関する評価	126
7.5 人工衛星構造材の帯電特性に関する評価	127
7.6 放電機構に関する評価	128
7.7 まとめ	129
文献 [第7章]	132
<b>謝辞</b>	<b>133</b>
<b>本研究に関連した発表論文</b>	<b>134</b>

## 第1章 緒言

### 1.1 はじめに

高分子材料は、その絶縁性をはじめとして、軽量、耐腐食性等の性質から、多くの分野において必要不可欠なものとなっている。また、その用途も屋内屋外を問わずあらゆる環境下で使用されているが、これまでに高分子材料が利用されてきた環境の中で、まだ十分には研究が進んでいない代表的なものの一つは宇宙環境であろう。

人類が宇宙に実際にその手を伸ばしていくために作り出した手段が人工衛星である。1957年、旧ソ連がスプートニクを打ち上げて以来、人類は宇宙時代に突入したといえることができる。そして今日、宇宙開発は急速な進歩を遂げつつある。その主役である人工衛星も、これまでに4000個近い数が打ち上げられているといわれている。通信衛星、偵察衛星、気象衛星、放送衛星、資源衛星等の実用衛星および、天文観測、惑星探査等の科学衛星の2つが両輪となって多くの種類が利用されるに至っており、我々の生活に深く関与するようになってきた。

一方、アメリカ合衆国のスペースシャトル、旧ソ連のミールのような宇宙ステーション等の宇宙インフラストラクチャの出現により、宇宙環境を利用した医学、生物学、材料工学等の分野における各種の構想、実験等も考案され、国際的な協力の下に実行されている。さらに、現代においてもっとも華々しい進歩を遂げている情報通信分野を支える基盤技術としての衛星の果たす役割への期待もきわめて大きなものがある。現在、すでに衛星通信は実用化されているが、今後、さらに本格的な衛星時代に入っていくものと考えられ、それに伴って人工衛星の高信頼度化、長寿命化がこれまでもまして重要な課題となっている。

人工衛星の信頼性あるいは寿命に影響を及ぼす要素として、高真空、プラズマの存在、放射線の照射といった特性をもつ宇宙環境下に置かれるという点が挙げられる。人工衛星の表面には、熱真空から内部の機器等を保護するために熱制御材料が使用される。この熱制御材料には通常、fluoroethylenepropylene (FEP)、polyimide (PI)、polyethyleneterephthalate (PET) 等の高分子フィルムの片面に銀、アルミニウム等の金属蒸着を施したものが使用され、宇宙環境に露出した状態で表面に取り付けられる(図1.1)。

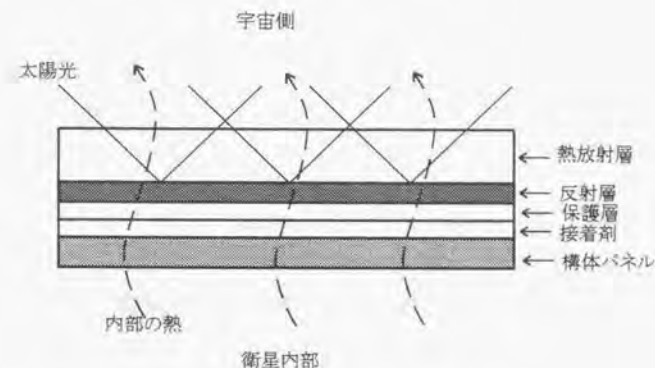


図1.1 熱制御材料の構造<sup>(1)</sup>

この熱制御材料が、宇宙環境における荷電粒子の照射を受けることにより、帯電、放電、劣化を起こすことが知られている。地球磁気圏や電離圏の擾乱を一般にサブストームと呼ぶが<sup>(2)</sup>、特に静止軌道等の高高度においては、太陽表面でのフレアの発生による地球磁気圏のサブストームが生じると高エネルギーの荷電粒子が磁気圏内に侵入する。それらの粒子は人工衛星表面に入射し、表面材料の帯電、さらには放電を引き起こす。人工衛星が地球の影の部分にあるときは、光電子放出による電位の緩和が生じないために、人工衛星自体が負に大きく帯電する。また、太陽光を受けている場合は人工衛星の日照側は日陰側に比べて帯電電位は小さく、局所的な電位差が人工衛星表面上で発生することになる。

宇宙空間という高真空環境下で、このような荷電粒子の照射による帯電放電現象により、放射線エネルギー spektrometers の測定誤差の発生、表面材料からのガス放出による分子が太陽電池パネル等に付着することによる太陽電池セルの効率低下や熱制御材料の熱制御性能の低下、放電による電流パルスによる搭載機器の障害、熱制御材料の蒸着面の剥離、太陽電池セルのクラックの発生等の問題が発生する場合がある<sup>(3)(4)</sup>。こういった様々な障害が生じる可能性があるため、高真空環境における高分子材料の帯電放電現象のメカニズムを解明し、その制御を行なうことは今後の宇宙開発の進展にとってきわめて重要な意味を持つものである。



なお、人工衛星の熱制御材料には、各種のものが使用される。前述の透明または半透明のフィルムに太陽光を反射する金属を蒸着した銀蒸着 FEP、アルミ蒸着 FEP、アルミ蒸着 PET など、衛星外部からの太陽光を反射し、内部の熱は外部へ放射する働きを持たせたものの他、熔融石英に銀やアルミを蒸着した Optical Solar Reflector(OSR)は、さらに反射と熱放出の効率が低い。放熱フィルムと断熱ネットを交互に何層にも重ねた多層断熱材 Multi Layer Insulator(MLI)も熱制御に用いられる。また、ゲルマニウム蒸着膜の熱制御性を利用したゲルマニウム蒸着 FRP を使用したサンシールドパネルが JCSAT などに用いられている<sup>(5)</sup>。

## 1.2 人工衛星の帯電放電現象に関する研究の経緯

### 1.2.1 人工衛星と宇宙環境

地球磁気圏の構造は、磁場の構造のちがいににより2つの領域に分けられる。一つは閉じた磁力線から成る内部磁気圏で、他方は高緯度に根ざす開いた磁力線から成る外部磁気圏である<sup>(6)</sup>。

内部磁気圏はさらに2つの領域に分けらる。地球に近い部分の領域はプラズマ圏と呼ばれ、 $0.1 \sim 100 \text{ eV}$  程度の低いエネルギーを持つプラズマが、 $10^8 \sim 10^{10} / \text{m}^3$  の密度で存在している。このプラズマ圏の境界面(プラズマ圏界面)は、静止軌道( $6.6 R_E$ ,  $R_E$ =地球半径)付近の位置に達するが、サブストーム時などには  $3 R_E$  程度にまで収縮する場合がある。地球から遠い部分は  $10^2 \sim 10^4 \text{ eV}$  のエネルギーを持つ環状電流粒子領域である。

外部磁気圏は太陽とは反対の方向に長く伸び、磁気圏尾部を形成する。内部磁気圏と外部磁気圏の境界の、昼側の部分はカスプと呼ばれ、ここでは  $10^2$  から  $10^3 \text{ eV}$  のエネルギーをもつプラズマが存在する。また夜側の部分はプラズマシートと呼ばれ、南北両尾葉から粒子が集められて、 $0.1 \sim 3.0 \times 10^6 / \text{m}^3$  程度の密度となっており、エネルギーも  $10^3 \sim 10^4 \text{ eV}$  と高くなっている。また、磁気圏界面のすぐ内側では太陽風粒子の侵入がしばしば観測される。特に、太陽風磁場が南向きの場合には、地球前方で太陽風磁場と地球磁場が合併することがあり、その場合には粒子がカスプ領域から侵入する。また、太陽風磁場は太陽風とともに尾部に流され、地球後方で北側と南側の太陽風磁場の再結合が起こり、外側の部分の磁力線は後方へ去り、内側の部分の磁力線は地球に向かって収縮する。このときプラズマが高エネルギーをもって地球周辺に侵入してくる。この場合、高エネルギーの電子が、地球の真夜中から明け方にかけての領域に入ってくることになる。人工衛星がこの領域にはいると、太陽光の照射を受けない影の部分では、光電子放

出効果がないために人工衛星全体が帯電し、日照を受けている場合には、人工衛星の日照側と日陰側とで電位差が発生する<sup>(7)</sup>。

また、特に高エネルギーの電子(数百 keV 以上)が衝突した場合には人工衛星筐体で遮蔽する事ができず、内部のケーブル、プリント基板等の絶縁物に帯電を発生させる。内部では光電子放出による帯電の抑制は行われなため、これらの絶縁物内部に高電界が作られ<sup>(1)</sup>、絶縁物の絶縁破壊強度を超えると放電が発生し、電子回路の素子に障害が発生する場合がある。

Pike と Bunn が DSCS II 衛星の異常が発生したときの衛星の位置を調べたところ、図 1.2 に示すように、真夜中から夜明けの領域に集中しており、さらに、およそ 90% がサブストーム発生時に起こっていることがわかった<sup>(8)</sup>。

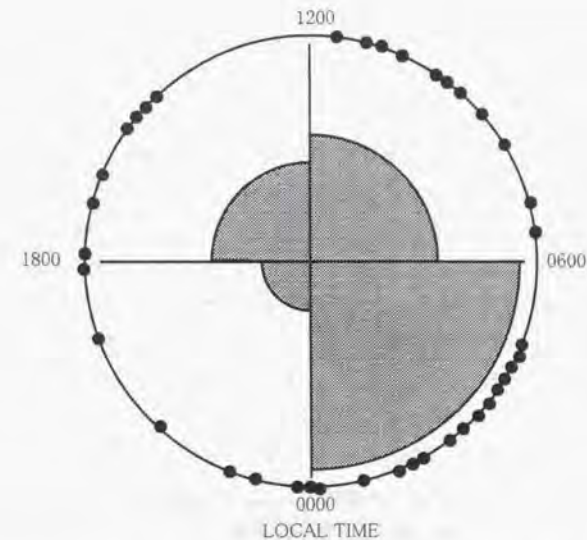


図1.2 DSCS IIの軌道上における異常現象発生位置<sup>(8)</sup>

このように実際に人工衛星においてサブストーム発生時に、人工衛星が地球の影に位置する場合に異常が発生しやすいことから、人工衛星の帯電放電現象が人工衛星の動作

に影響を与えていることを示唆している。

### 1.2.2 宇宙環境における観測

宇宙環境で人工衛星が帯電する現象が本格的に調べられたのは ATS-5<sup>(9)(10)</sup>が最初である。ATS-5 は、1969 年 8 月に静止軌道上に打ち上げられ、帯電電位、電子およびプロトンのエネルギースペクトル等が測定された。サブストーム時に地球の影に入り、太陽が食になった時には、人工衛星上での電位差が約 10000V に達し、一方、太陽光線を受けている状態では、約 200V となったことが観測された。ATS-5 には、プラズマ検出器が搭載され、電子およびプロトンのエネルギースペクトルが測定された。このときの測定結果から、サブストーム発生時に、地球の影に入った約 1 時間のあいだ、約 4200eV 以下の低エネルギーのプロトンの入射が突然消滅する現象が観測された。これは、高エネルギー(数 10keV 程度)の電子により衛星が約-4200V に帯電した結果、衛星近辺のプロトンは、衛星に入射する際には、すべて約 4200eV 以上に加速されて検出器に入ってくることになり、これ以下のエネルギーのプロトンが検出されなくなったものと推定された。

その後、1979 年に打ち上げられた SCATHA 衛星は、宇宙環境における帯電放電現象の観測を目的としており、各種の粒子測定器や衛星電位モニタが搭載され、種々の人工衛星表面材料上において、電荷の蓄積とアーク放電が発生したことが観測された<sup>(11)</sup>。人工衛星表面と内部の電位差は影の部分では-1000V を越えるような負の高電位になり、-8000V に達した場合もあった。一方、太陽光が照射されている状態では、正の数 V となった。また、550 日間の観測期間中、77 回の自然放電を観測した。このうち、人工衛星内部での放電が 27 回あったが、これらは日中部分で観測され、サブストーム時の高エネルギー電子の照射による内部帯電に起因するものと考えられた。

Gains らは<sup>(13)</sup>、磁気嵐時に SCATHA により観測された 1MeV を越える高エネルギー電子線の照射を受けた場合の、人工衛星のアルミニウム遮蔽、内部への電子の侵入と帯電について検討を行い、短時間の高エネルギー電子線により、内部に電荷の蓄積が生じ、これによって、放電が生じうるが、その頻度は低く、ミッション期間全体にわたる通常の電子線照射に対して考慮された遮蔽ならば、突発的な短時間の高エネルギー電子線による障害はあまり発生しない可能性が強いことを示した。

Reagan らは<sup>(12)</sup>、同じく SCATHA の観測データの、高エネルギー電子の照射を受けた状態における、電子線照射による polyimide フィルムの導電率の変化等を計算し、内部

電界を求めた結果、 $2 \times 10^7$  V/m を得た。アルミニウムによる遮蔽内の同軸ケーブル内部の電位についても計算を行っている。この結果、高エネルギーの電子線照射を受けた状態での同軸ケーブル内の電界は、数百 kV/cm になると推定している。この電界は、絶縁破壊には至らない電界であり、人工衛星内で測定された電気的パルスは、内部電界が、入射電子の状態の変化等により、急激に変化することにより生じているものとされた。

Gussenhoven らは<sup>(14)</sup>、SCATHA 衛星による測定の中で、ワーストケースである 1979 年 4 月 24 日の帯電について、磁場モニタ、高速スキャン粒子モニタ、電界測定器等の搭載測定機器によるデータを用いて解析している。荷電粒子のエネルギー分布と帯電の関係を検討した結果、静止軌道上の人工衛星には数百 keV にいたるエネルギーの粒子が入射していることが測定されたが、その中で、特に 2keV 以下のエネルギーの電子は 2 次電子放出のために帯電を抑制する作用を持つことが示されており、人工衛星を設計する際に、このような帯電抑制効果を考慮することが有用であろうと述べられている。

日本においても 1987 年に打ち上げられた技術試験衛星 ETS-V 型に帯電電位モニタが搭載され、宇宙空間での熱制御材料の帯電電位が計測された<sup>(15)</sup>。測定結果の一例を図 1.3 に示す。

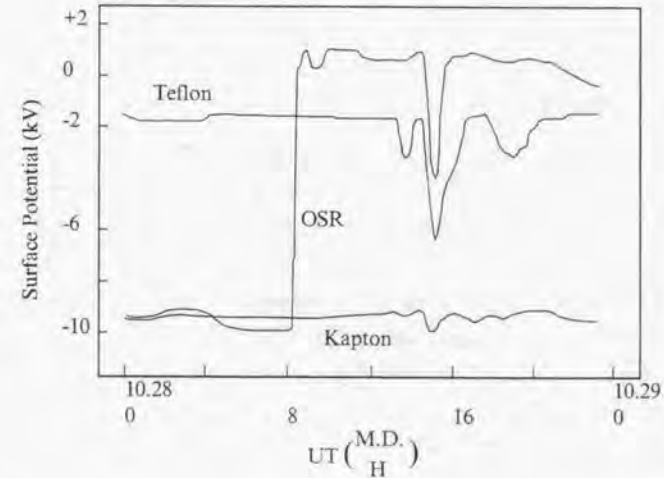


図 1.3 ETS-V における帯電電位観測例<sup>(15)</sup>



FEP, polyimide および、溶融石英に銀を蒸着した Optical Solar Reflector (OSR) の帯電電位の変化が測定されているが、日照状態にある時に、一時的に帯電電位が負に大きくなっている。これは帯電電位モニタが太陽電池パネルなどの影になって、光電子放出が行われなくなったためと考えられている。

宇宙環境で実際の人工衛星を使用する帯電放電現象の観測は、きわめて高いコストを必要とし、簡単に行うことはできない。そこで、真空容器を使用して宇宙環境を模擬し、電子ビームを試料に照射する模擬実験が行われている。

FEP, polyimide, PET などの人工衛星表面材料として用いられる高分子フィルムを、宇宙環境を模擬した真空容器中に設置し、加速した電子線を照射するという方法で、高分子フィルムの帯電現象、表面で発生する放電現象、高分子フィルムの劣化等に関して、Balmain と Dubois<sup>(16)</sup>、Gossland と Balmain<sup>(17)</sup>、Balmain ら<sup>(18)</sup>、Balmain と Hirt<sup>(19)</sup>、西本ら<sup>(21)</sup>、Levy と Sarraill<sup>(22)</sup>、による報告がなされている。また、このような実験装置を使用して Bogorad らは<sup>(23)</sup>放電時のガス放出に関して実験を行った。Treadway らは<sup>(24)</sup>人工衛星の構造を模したモデルを真空容器中に設置して帯電電位に関する実験、検討を行った。さらに、Frederickson と Chesley は<sup>(25)</sup>スペースシャトルに使用されるタイルに対して真空容器中での電子線照射実験を行ない、帯電放電現象に関する報告を行なっている。

### 1.2.3 帯電放電現象の地上における模擬実験

宇宙環境で実際の人工衛星を使用する帯電放電現象の観測は、きわめて高いコストを必要とし、簡単に行うことはできない。そこで、真空容器を使用して宇宙環境を模擬し、電子ビームを試料に照射する模擬実験が行われている。

Balmain と Dubois は<sup>(16)</sup>、FEP, PET, polyimide のフィルムに対して電子線照射を行い、放電発生時の、放電ピーク電流、パルス継続時間、放出される電荷等に関して測定を行い、それらと試料表面積との関係を求めている。その結果、3つの試料は、おおむね同一の傾向を示しているが、その中で polyimide が、放電時のエネルギーが小さい傾向を持つことが示された。

Gossland と Balmain は<sup>(17)</sup>、FEP フィルムを2つの領域に分割し、その間のギャップに銅、PET、ニッケルの網を挟んだ場合について、放電時のアークが2つの領域で、つながって伸展するかどうかを測定し、挟まれた障害物の沿面放電に対する効果を検討し

た。銅の障壁は放電の進展に対する抑止効果が最も大きい。PET フィルムとニッケル網では PET の障壁が効果大きいという結果を示している。これは、ニッケル網は電子を通過させることができるが、PET フィルムは電子を通さず、さらにそれ自体が電子線照射により帯電して、電子線の軌道に影響を与え、放電領域への電子線照射密度が減少するためであると推測している。

Balmain らは<sup>(18)</sup>、電子線照射された FEP および PET フィルム上での沿面放電アークの速度を測定し、FEP では約  $7 \times 10^5$  m/s、PET では約  $1 \times 10^6$  m/s であることを示した。さらに、試料の厚さが変化した場合、平均速度ではあまり変化はみられないが、薄い試料の場合、速度のばらつきが大きくなることが報告されている。

実際の人工衛星と同一形状のモデルを使用した表面帯電電位評価のための模擬実験が、Staskus と Roche によって行われている<sup>(20)</sup>。実験は直径 4.6m、長さ 18.3m の真空容器を用いて行われ、その中で、SCATHA 衛星の 2/3 スケールモデルを用いて電子線照射を行っている。電子線照射による放電は、2.5keV 程度の比較的低いエネルギーの電子線でも発生しており、電子線のエネルギーや、電流密度を増すとそれにつれて放電の発生頻度も増加している。

Balmain と Hirt<sup>(19)</sup>は、静止軌道における電子がもつエネルギーのスペクトルは、MeV の領域まで存在するにもかかわらず、通常行われている模擬実験では、電子線のエネルギーが 15~25keV 程度であることに着目した。そして 25keV、 $10 \text{ nA/cm}^2$  の低エネルギー電子線と、ストロンチウム 90 がβ崩壊をする際に生じる 2MeV 程度までの連続スペクトルを持つ高エネルギー電子(電流密度  $5 \text{ pA/cm}^2$ )の両者を照射した場合の、FEP, polyimide, PET の3種類の試料の帯電放電に関する実験を行っている。これによれば、放電時に背面電極を通過する電流のピーク値、背面電極を通過する電荷量、試料押さえ枠を通過する電流のピーク値、放電時に押さえ枠を通過する電荷量のいずれに関しても、FEP のみ高エネルギーと低エネルギーの混合電子線照射の場合の方が小さくなっており、他の2つの試料は逆に大きくなるという結果となっている。さらに、放電が発生する間隔についても、FEP では混合電子線の方が短くなるが、他の2試料では長くなっている。放電電流等が FEP では小さくなるのも、放電発生間隔が短くなるために電荷の蓄積が少なくなるためと考えられる。これらの結果から、高エネルギー電子線は試料によってかなり異なる影響をもたらすものと考えられる。なお、この報告での高エネルギー電子線の割合は、実際の静止軌道におけるそれよりもかなり高いものである。

Treadway らは<sup>(24)</sup>、人工衛星の構造を模したモデルを使用して、アンテナを模擬した



網状の円盤部分、太陽電池パネルを模擬したパネル等を取り付け、各部分の帯電状態を測定し、計算モデルとの比較検討を行っている。

Frederickson と Chesley は<sup>(23)</sup>、スペースシャトルに使用されるタイルに対して、0.75MeV までのエネルギーの電子線照射を  $10^{-10}\text{A/cm}^2$  の電流密度で行い、帯電電位の変化や、放電にともなう発生するパルスの有無等を測定した。その結果、タイル内の放電による小さなパルスが測定されており、1MeV を越える電子が  $10^{-12}\text{A/cm}^2$  以上の電流密度で照射されれば、実際にシャトル上で大きな放電が生じうることを推測している。

Coakley らは<sup>(26)</sup>、高エネルギーの電子線照射による人工衛星の内部帯電に起因する電磁界パルス (EMP) の発生について検討した。そのために Combined Release and Radiation Satellite (CRRES) に搭載される Internal Discharge Monitoring (IDM) 実験装置に対して、飛行前の準備実験として真空装置中での 2.5MeV 電子線照射を行い、CRRES の実験に使用される試料の放電を測定した。用いられた試料はケーブル 4 種類と、FEP, fiberglass-epoxy, polyimide, PET, アルミナの平板試料 12 種類であった。実験に使用された電子線が  $4.5\text{pA/cm}^2$  という低い電流密度の照射においても、放電が観測されている。もっとも放電頻度および放電規模が大きかったのは、90mil(2.3mm) の TEFLON であった。ほとんどの放電は帯電電荷によるエネルギーの 1% 以内しか放出していない。この実験によって、これらの試料を実際に CRRES に搭載して放電が発生することの検証が行われた。

Levy と Sarraill は<sup>(22)</sup>、試料が固定される試料台が、従来一般に行われている地上における模擬実験では接地されたものがほとんどであることに注目し、人工衛星の構造を模擬したバイアスをかけた試料台を用いた電子線照射実験を行っている。この実験においては、試料表面から空中へ電子が放出されるブローオフ電流測定用の電極の下に試料を設置し、ブローオフを 85% 以上測定できるものとしている。誘電体試料から空間への放電である "Dielectric-to-Space" 放電では、ブローオフは、誘電体表面がほぼ帯電電位かあるいは正になるまで続いている。さらに正になった後、イオンブローオフが発生する事が観測されており、誘電体表面からのイオンと電子の放出により、放電領域が進展していくという Stettner の放電進展モデル<sup>(27)</sup>により、説明されうのではないかと報告している。

西本らは<sup>(21)</sup>、真空容器を用いた電子線照射実験により、FEP フィルムの帯電電位、試料表面から試料中を通過して試料台へと流れるバルク電流、真空度の変化等を測定し、照射電流密度や照射エネルギーと放電頻度の関係を検討した。また、熱制御材料として

の FEP フィルムの反射率スペクトルや、電子線照射を受けた試料の光学的な劣化の程度を報告し、さらに放電発生時に真空度の大きな変化が発生することを述べている。

放電時のガス放出に関して、Bogorad らは<sup>(23)</sup>、Optical Solar Reflector および太陽電池アレーに対して真空装置中での電子線照射を行い、放電頻度と放出されるガスの量との関係を測定した。その結果、放電頻度とガスの量には密接な関係があることが示されたが、ガス放出が放電開始を引き起こすことに関係しているのか、それとも放電がガス放出を増加させているのかは不明であると述べている。

#### 1.2.4 帯電現象のメカニズム

Rosen は、ATS-5 の観測データから、サブストーム時の電子およびプロトンの電流密度等を調べ、電子電流は平均  $0.5\text{nA/cm}^2$  の電流密度であるのに対して、プロトン電流は  $7\text{pA/cm}^2$  程度であることを報告している<sup>(28)</sup>。このように宇宙空間においては、人工衛星表面に入射するプラズマ束では、電子電流が支配的である。人工衛星の帯電における、電流のバランスは次の(1.1)式により表される<sup>(12)</sup>。

$$I_e = I_{pe} + I_{je} + I_{he} + I_f \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

ここで、 $I_e$ : 照射される電子およびプロトンの電流、 $I_{pe}$ : 光電子放出電流、 $I_{je}$ : 2 次電子放出電流、 $I_{he}$ : 後方散乱電子電流、 $I_f$ : 人工衛星表面に到達する正味の電流である。

さらに、人工衛星表面材料の静電容量と帯電電位を考慮すると、

$$C \frac{dV}{dt} = J_0 - J_{RS} - J_{SE} - J_{CON} \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

ここで、 $t$ : 電子線照射時間、 $V$ : 表面電位、 $C$ : 照射を受ける部分の静電容量、 $J_0$ : 照射電流密度、 $J_{RS}$ : 後方散乱電子電流、 $J_{SE}$ : 二次電子電流、 $J_{CON}$ : 材料内の導電電流である<sup>(29)</sup>。(1.2)式から明らかに、二次電子放出率および後方散乱率は帯電電位の検討において重要な要素となる。Gross らは<sup>(30)</sup>2 次電子放出率の最大値  $\delta_m$  を、単一エネルギーの電子線照射のもとで、表面電位の変化を計ることによって計算する方法を提唱し、FEP, PET, polyimide などの高分子材料に対して、実際に  $\delta_m$  を求めている。

大規模な人工衛星帯電の計算モデルとしては、人工衛星の形状や宇宙空間のプラズマのエネルギー分布等を考慮した人工衛星帯電解析プログラムである NASA Charging Analyzer Program (NASCAP) を挙げるができる<sup>(31)(32)</sup>。Mandell らは<sup>(33)</sup>、高さ、底面の対辺距離ともに 1m の八角柱の人工衛星モデルを用いて、複数の電子ビームによる電子線照射実験を行い、各面の帯電電位を測定して、計算モデルによる結果との比較を行い、実験結果との一致を報告している。

### 1.2.5 放電現象のメカニズム

Gossland らは<sup>(34)</sup>, PET フィルム試料の光学的特性の方向と放電痕の方向との関係や, PET 試料に対して *n*-プロピルアミンを溶剤としてエッチングを行ない, 試料の分子の方向性が表面に明確に現れるようにした後に電子線照射を行なった場合の, 放電痕の進展方向とエッチングにより表面に形成された微細構造との関係について検討した。PET フィルムは, その製造過程で 2 方向に延伸されるが, これによって試料に光が入射した場合に複屈折が零になる方向が 2 方向に生じる。放電痕の発生方向は, この光学的な方向に強く関連していた。また, エッチングにより形成された微細な溝の形成された方向に対しては, 主放電痕は平行に発生し, 枝分かれした放電痕は溝を横切る方向に発生する傾向があることを示し, 放電痕の発生方向が試料のマクロ構造に関係しているものとしている。

Balmain と Dubois は, FEP, polyimide, PET フィルムを使用して電子線照射による帯電, 放電実験を行い, 放電電流のピーク値, パルス幅, 放出電荷量, 試料台に接続された負荷抵抗により消費された放出エネルギーの測定を行った<sup>(16)</sup>。さらに, 表面の観察から, 試料面には放電により, 溝およびトンネル状の放電痕が形成されており, 溝状の放電痕は直線的で, 枝分かれが見られるのに対して, トンネル状の方は, 不規則な形状であることが報告されている。そして, 放電メカニズムとして, 試料表面の直下に高密度に蓄積された電荷によって絶縁破壊が生じ, 試料が放電によりイオン化されて図1.4に示したような導電性を持つイオンのトンネルを形成することを主張している。

Stettner らは, 帯電した試料表面から空中へ電子が放出されるブローオフに注目し, 3つのブローオフモデルを考えた。それぞれについて放出電荷等を数値計算し, 試料の表面積と放電規模との関係をあらわす scaling law<sup>(16)</sup>との整合性を検討した<sup>(35)</sup>。ブローオフモデルとしては, 誘電体試料表面全体から電子が放出されるモデル, 試料端部からのみ電子が放出されるモデル, 試料周辺を押さええている導電体部分と試料との接点から放電が発生して試料中央部に放電が進展していくときの, 移動してゆく放電領域から電子が放出されるモデルが提案された。この3つのモデルの中では, 表面の導電性と放出時の電子の速度が無いものと仮定した場合には, 端部からのみ放出されるモデルが, ある程度大きな表面の導電性を仮定した場合には表面全体からの放出モデルが, 電子の初速を仮定した場合には移動領域からの放出モデルがそれぞれ妥当であるとの結果となっている。

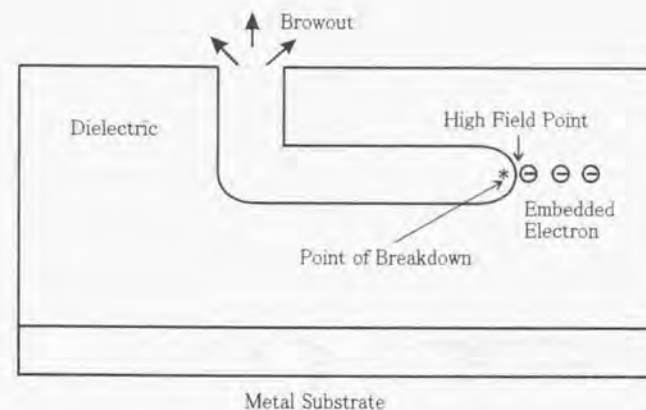


図1.4 放電による導電性のトンネルの形成<sup>(16)</sup>

その後, Stettner と Duerksen は, 導電性を持つトンネルが試料に生じた場合, 電荷を試料の下の接地面に流すことによって発生する熱量や, 放電が広がる大きさについて検討している<sup>(36)</sup>。このモデルでは, 放電の進展する範囲が, 実際の放電におけるものより狭い範囲にとどまっている。

さらに Stettner と Dewald は, 図1.5に示した, 放電が進展する時のモデル<sup>(27)</sup>を提案している。このモデルは, 放電が発生した後, 放電領域の端部における電界により, 誘電体表面近くのイオンが加速され, 表面に衝突する際にさらにイオンを2次的に放出させるとともに, 表面の電子にエネルギーを与え, これにより放電が進展するというものである。このモデルによる放電進展と実験結果とを比較すると, 比較的大きな放電に関しては, このモデルにより説明することが可能であるとされている。

人工衛星表面からの2次電子放出に関して, Laframboise は, 宇宙環境における磁界により, 電子が螺旋運動をする点に注目した。人工衛星表面から放出された電子は, 磁力線の周りを螺旋運動をしながら離れていくが, このときの螺旋運動の半径は, 人工衛星の大きさに対して小さいために, 一度放出された電子が再び人工衛星表面に衝突する



ことがあり、それによって電子の放出される割合が抑制されることが示されている。

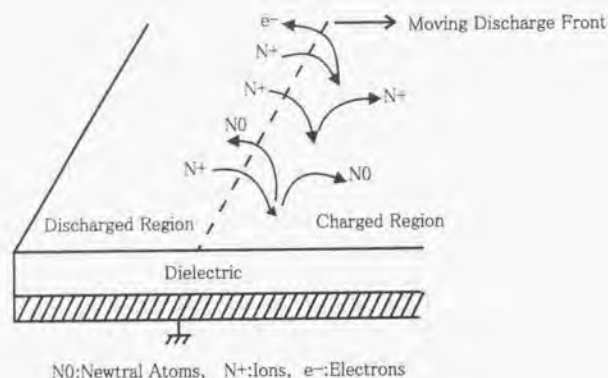


図1.5 Stettnerの放電進展モデル<sup>(27)</sup>

Gossman と Balmain は<sup>(38)</sup>、帯電したフィルムに 20keV の電子線と、低エネルギー (約 100V) のリチウムイオンビームを、電流密度比で 5~20% の強さで同時に照射した場合の放電発生頻度と放電強度を調べた。その結果、イオンビームを同時に照射した場合には、放電頻度および放電強度の双方ともに低下する傾向が見られているが、その現象の機構に関する検討は行われていない。

試料の厚さと放電との関係に関して Balmain らは<sup>(39)</sup>、PET, FEP, polyimide に関して、12.5~125  $\mu\text{m}$  の厚さの試料に対して 20keV, 25nA/cm<sup>2</sup> の電子線照射を行い、放電電流のピーク値、放電エネルギー、放電持続時間について測定を行っている。測定結果の中で、放電ピーク電流値と放電により試料台に流れた電流により放出されたエネルギーは、50  $\mu\text{m}$  の試料で最大になる傾向が見られた。この原因として、50  $\mu\text{m}$  より薄い試料では、放電が試料を貫通するパンチスルー放電が発生しやすいために、電荷の蓄積が大きくならないうちに放電が発生してしまうためと考えられる。パンチスルーが発生しない場合は、薄いほど(1.3)式の関係により帯電した電荷のエネルギーが大きくなる。したがって、パンチスルーが発生しなくなる厚さである 50  $\mu\text{m}$  付近で放電エネルギー、

放出電荷量ともに最大になる。

$$E = \frac{\epsilon AV^2}{2d} \dots\dots\dots (1.3)$$

#### 1.2.6 人工衛星の帯電防止技術

人工衛星の帯電放電現象により生じる可能性のある影響についてまとめたものを、図 1.6 に示す。

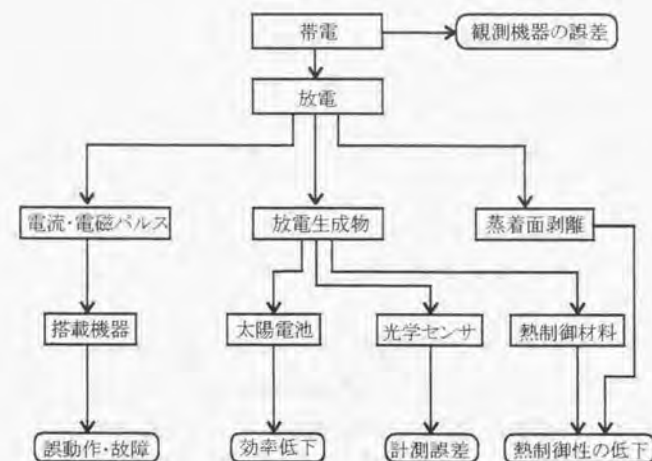


図1.6 帯電放電現象による影響<sup>(40)</sup>

このように、種々の影響を人工衛星に及ぼす可能性が示唆されているため、人工衛星の帯電を制御する方法についていくつかの検討が行われている。これらの帯電制御技術は、受動的帯電制御と能動的帯電制御に分類することができる。受動的帯電制御とは、人工衛星表面材料として導電性の材料を使用したり、導電性コーティングを用いるものである。この方法は比較的低コストで行うことが可能であるが、人工衛星の部位による

電位差が生じる局所帯電を防ぐことはできるが、人工衛星全体が帯電する絶対帯電を防止できない。一方、能動的帯電制御とは、人工衛星を帯電させる宇宙空間からの電流を打ち消すように人工衛星から宇宙空間に荷電粒子を放出するものである。

SCATHA 衛星では、電子ビームを空間に放出する実験が行われた<sup>(41)</sup>。SCATHA には、電子ビーム発生装置が搭載されており、50~3000eV のエネルギーの電子を 0.001~13mA の電流で放出することができる。この装置を用いた実験の結果から、電子ビームを放出することにより、人工衛星を正に帯電させたり、負に帯電した状態から帯電を取り除くことが可能であることが示された。さらに放出される電子ビームのエネルギーは人工衛星の帯電電位には殆ど影響せず、電流値が大きく影響していることが示された。また、このような電子ビーム放出を行う場合には電流値に注意が必要で、大電流で行った場合には、人工衛星に戻ってくる電子により、自然環境下よりも強い帯電、放電が発生する可能性があることが指摘されている。

Lai は<sup>(42)</sup>、同じく SCATHA のデータを検討し、電子ビームを放出した場合の、人工衛星の形状と人工衛星の周囲のプラズマ環境との関係を示し、人工衛星から突き出したブームから放出される光電子が、人工衛星本体に戻って帯電に影響する multi-body interaction の可能性を示した。さらに、放出した電子ビームが戻ってくる現象について、より詳しい検討を行っている。その中で、電子ビームとともに低エネルギーの正イオンを放出することが提案されている。これは放出した正イオンが、帯電した人工衛星の負電位に引かれて戻り、表面に衝突する際に 2 次電子を発生させ、結局より多くの負電荷を空間に放出することができるというものである。

表面材料の導電性を上昇させて帯電放電を防ぐ研究では、Fellas が、6.35  $\mu\text{m}$  の薄い polyimide フィルムの内側に、接地した導電性の金属蒸着膜を挟み、さらにその内側に熱制御材料としての機械的強度を持たせるために 51  $\mu\text{m}$  厚の polyimide フィルムを挟むことによる方法を提案し、帯電特性に関して電子線照射による測定を行っている<sup>(43)</sup>。薄いフィルムを外側に使用することにより、電子線照射および帯電により発生する高電界による導電性の上昇によって外側フィルムから垂直方向の漏れ電流が増加し、接地された蒸着膜層に電荷が流れ、帯電抑制に効果があることを報告している。その機構は、Ohmic な導電のほかに電子線照射による 2 次電子の生成と、高電界による 2 次電子の移動がもたらすものであるとしている。25  $\mu\text{m}$  と 76  $\mu\text{m}$  の polyimide でアルミニウム膜を挟んだ試料との比較では、5keV、0.46nA/cm<sup>2</sup> の電子線照射による到達帯電電位は厚い試料で約 4.8kV に対して、薄い polyimide を使用した試料では 1.5kV となり、きわめ

て薄いフィルムの場合には、電子線照射および高電界による導電性の上昇の効果による帯電抑制効果が高くなっていることが示されている。

Nikolaizig らは炭素繊維入りの太陽電池用構造材を用いた電子線照射実験を行い、その帯電・放電特性に関して検討している<sup>(44)</sup>。この実験で用いられたのは、炭素繊維を含んだエポキシ樹脂板でアルミニウムのハニカム構造材を挟んだものである。さらに熱電対が試料に取り付けられており、試料温度と帯電の関係を調べている。この報告によれば、照射エネルギー 15keV、電流密度 1nA/cm<sup>2</sup> での表面電位は、場所によりかなりばらつくが、-400V~-100V 程度となっている。また、10keV~25keV のいずれの照射エネルギーにおいても、照射電流密度を 1nA/cm<sup>2</sup> から 10nA/cm<sup>2</sup> に増加させると帯電電位は明らかに上昇する傾向を示す。一方、同じ電流密度において、照射エネルギーが上昇すると、帯電電位は逆にわずかに低下する場合があるとしている。この機構については、照射エネルギーが高くなると、試料中へ電子線が進入する距離が長くなり、導電性が上昇するためではないかと推測している。また、温度を試料中央部で-34℃程度に冷却して行った場合には帯電電位が上昇している。この電位の変化は、冷却により試料の導電率が低下し、試料内部を流れるバルク電流が減少するためであると報告している。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、高分子材料の帯電放電現象に関する様々な面からの研究を行うことによって、今後の高真空環境下での高分子材料の評価、あるいは開発に資することを目的とするもので、7章から構成されている。

第2章では、高真空環境下での高分子材料の帯電モデルを考え、いくつかの高分子材料に対して電子線照射を行った場合の帯電電位の変化を 1 次元帯電モデルを用いて計算した。さらにその計算結果に関して、宇宙環境を模擬した高真空環境下での高分子フィルムへの電子線照射による帯電実験結果との比較を行い、その妥当性を検討した。

第3章では、高分子フィルム上に電極を設置して、電子線照射を継続する、あるいは停止する等の異なった条件下で電極間電圧を上昇させていった場合の放電開始電圧を測定し、その結果から放電開始機構における電子線照射による放電開始電圧への影響や、真空環境下での電子線あるいは放電発生によるコンディショニングの影響と、その機構に関する検討を行った。

第4章では、高分子材料に電子線を照射した場合、また、材料上で放電が発生した場合の、試料表面から放出されるガスの質量分析を行い、その結果から、電子線照射あるいは



は放電の発生により、試料表面で生じている現象に関する検討を行った。また、真空環境下での電子線照射を応用した屋外用高分子絶縁材料の劣化診断方法を提案し、検討を行った。

第5章では、放電発生初期から放電終了に至る期間での、放電光スペクトルの変化を測定し、放電の各段階におけるいくつかの波長成分の放電光量に占める割合を求めることにより、放電のどの段階で、どのような分子が関連しているかを求め、放電の開始および進展の機構や放電形態と放電光スペクトルの関係について検討した。

第6章では、宇宙環境における高分子材料の実際の利用形態に基づいて、炭素繊維を含む高分子材料、ゲルマニウム蒸着を施した人工衛星用高分子材料に電子線照射を行ない、帯電特性を測定した結果を述べた。さらに、2次電子放出による帯電電位の制御の機構に関する検討を行い、宇宙環境における電子線エネルギーが連続スペクトルを持つ場合において、どのように帯電が進行するかを予測した。

第7章では、第2章から第6章までの帯電放電現象に関する研究結果に対して、その工学的な意義を総括した。

## 文献 [第1章]

- (1) 園田克己, 佐藤文彦 : 「人工衛星材料の特性」, 静電気学会誌, Vol. 13, p.189 (1989)
- (2) 齊藤 尚生 : 「オーロラ・彗星・磁気嵐」, 共立出版 (1988)
- (3) R. Grard, K. Knott and A. Pedersen : "Spacecraft Charging Effects", Space Sci. Rev., Vol. 34, p. 289
- (4) 山田弘善, 松田純夫 : 「電子機器に対する宇宙環境」, 電子通信学会誌, Vol.66, p.254 (1983)
- (5) 永井 裕 : 「人工衛星」, 電気書院 (1991)
- (6) 前田 担 : 「太陽惑星環境の物理学」, 共立出版 (1982)
- (7) S. M. L. Prokopenko and J. G. Laframboise, "High-Voltage Differential Charging of Geostationary Spacecraft", J. Geophysical Research, Vol. 85, p.4125 (1980)
- (8) A. Rosen : "Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-23, p. 1726 (1976)
- (9) S. E. Deforest : "Spacecraft Charging at Synchronous Orbit", J. Geophys. Res., Vol. 77, p. 651 (1972)
- (10) W. Lennartsson and C. R. Chappell, "Relationship between Warm Plasma Spacecraft-Charging by Magnetospheric Plasmas", edited by A. Rosen, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 47: AIAA, New York 1976, pp. 89-101
- (11) K. G. Balmain : "Surface Arc Discharges on Spacecraft Dielectrics", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. EI-21, p.427 (1986)
- (12) J. B. Reagan, R. E. Meyerott, E. E. Gaines, R. W. Nightingale, P. C. Filbert and W. L. Imho : "Space Charging Current and Their Effects on Spacecraft Systems", IEEE Trans. Electric Insul., Vol. EI-18, p.354 (1983)
- (13) E. E. Gains, R. W. Nightingale, W. L. Imhof and J. B. Reagan : "Enhances Radiation Doses to High-Altitude Spacecraft during June 1980", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-28, p.4502 (1981)

- (14) M. S. Gessenhoven and E. G. Mullen, "Geosynchronous Environment for Severe Spacecraft Charging", *J. Spacecraft and Rockets*, Vol. 20, No.1, p.26 (1983)
- (15) 藤井治久, 園田克己, 西本博信 : 「宇宙環境における帯電放電現象および材料劣化」, 電学論 A, Vol. 113, p. 609 (平成 5)
- (16) K. G. Balmain and G. R. Dubois : "Surface Discharges on TEFLON, MYLAR and KAPTON", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-26, p.5146 (1979)
- (17) M. Gossland and K. G. Balmain : "Barriers to Flashover Discharge Arcs on TEFLON", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-29, p.1618 (1982)
- (18) K. G. Balmain, M. Gossland and R. D. Reeves : "Optical Measurement of the Velocity of Dielectric Surface Arcs", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-29, p.1615 (1982)
- (19) K. G. Balmain and W. Hirt : "Dielectric Surface Discharges: Effects of Combined Low-Energy and High-Energy", *IEEE Trans. Electric Insul.*, Vol. EI-18, p.498 (1983)
- (20) J. V. Staskus and J. C. Roche : "Testing of a Spacecraft Model in a Combined Environment Simulator", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-28, p.4509 (1981)
- (21) 西本博信, 藤井治久, 渋谷義一, 笠井鯉太郎, 阿部俊雄 「電子線照射による人工衛星表面材料の帯電と放電」, 絶縁材料研究会試料, EIM-86-134 (1986)
- (22) L. Levy and D. Sarraill : "Scaling Laws for Discharges on Floating Supports", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-34, p.1606 (1987)
- (23) A. Bogorad, C. Bowen, J. Loman, R. Bouknight, J. Armenti and T. Lloyd : "Relation between Electrostatic Discharge Rate and Outgassing Rate", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-36, p.2021 (1989)
- (24) M. J. Treadway, A. J. Woods, T. M. Flanagan, R. E. Leadon, R. Grismore, R. Denson and E. P. Wenaas : "Experimental Verification of an ECEMP Spacecraft Discharge Coupling Model", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-27, p.1776 (1980)
- (25) A. R. Frederickson and Allen L. Chesley : "Charging/Discharging of

- Space Shuttle Tile Material under Irradiation", *IEEE Trans Nuclear Sci.*, Vol. NS-30, p.4296 (1983)
- (26) P. G. Coakley, M. J. Treadaway and P. A. Robinson, Jr. : "Low Flux Laboratory Test of the Internal Discharge Monitor (IDM) Experiment Intended for CRRES", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-32, p.4066 (1986)
- (27) R. Stettner and A. B. Dewald : "A Surface Discharge Model for Spacecraft Dielectrics", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-32, p.4079 (1985)
- (28) A. Rosen : "Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-23, p.1762 (1976)
- (29) R. C. Hazelton, E. J. Yadlowsky, R. J. Churchill and L. W. Parker : "Effect of Material Parameters on the Charging Characteristics of Irradiated Dielectrics", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-28, p.4541 (1981)
- (30) B. Gross, H. von Seggern and A. Berraisoul : "Surface Charging of Dielectrics by Secondary Emission and the Determination of Emission Yield", *IEEE Trans. Electric Insul.*, Vol. EI-22, p. 23 (1987)
- (31) N. J. Stevens : "Modelling of Environmentally Induced Discharges in Geosynchronous Satellites", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-27, p. 1792 (1980)
- (32) M. J. Mandell and I. Katz : "Potentials in a Plasma over a Biased Pinhole", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-30, p. 4307 (1983)
- (33) M. J. Mandell, I. Katz and D. E. Parks : "NASCAP Simulation of Laboratory Spacecraft Charging Tests using Multiple Electron Guns", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-28, p. 4568 (1981)
- (34) M. Gossland, K. G. Balmain and M. J. Treadway : "Surface Flashover Arc Orientation on MYLAR Film", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-28, p. 4535 (1981)
- (35) R. Stettner, R. Marks and J. Dancz : "Physical Modeling of Spacecraft Discharge Processes and Associated Electron Blowoff", *IEEE Trans.*



Nuclear Sci., Vol. NS-27, p. 1780 (1980)

- (36) R. Stettner and Gary Duerksen : "The Discharge of Spacecraft Dielectrics and the Theory of Lichtenberg Figure Formation", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-31, p. 1375 (1984)
- (37) J. G. Laframboise : "Calculation of Escape Currents of Electrons Emitted from Negatively Charged Spacecraft Surfaces in a Magnetic Field", J. Geophysical Res. Vol. 93, p. 1933 (1988)
- (38) M. Gossland and K. G. Balmain : "Incident Ion Effects on Polymer Surface Discharges", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-30, p. 4302 (1983)
- (39) K. G. Balmain, A. Battagin and G. R. Dubois : "Thickness Scaling for Arc Discharges on Electron-Beam-Charged Dielectrics", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-32, p. 4073 (1985)
- (40) 山田弘善, 笠井鯉太郎, 藤井治久 : 「人工衛星と帯電現象」, 電気学会雑誌, Vol.104, p.487 (1984)
- (41) M. S. Gussenhoven, E. G. Mullen and D. A. Hardy : "Artificial Charging of Spacecraft due to Electron Beam Emission", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-34, p. 1614 (1987)
- (42) S. T. Lai : "An Overview of Electron and Ion Beam Effects in Charging and Discharging of Spacecraft", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-36, p. 2027 (1989)
- (43) C. N. Fellas : "An Arc-Free Thermal Blanket for Spacecraft Use", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-27, p. 1801 (1980)
- (44) N. K. Nikolaizig, K. H. Groh and H. W. Loeb : "Electrostatic Discharge Testing on A Carbon Fibre Solar Panel Structure", Proc. 4th Europ. Symp. 'Photovoltaic Generators in Space', Cannes, p. 115 (1984)

## 第2章 帯電のパラメータ

### 2.1 はじめに

宇宙空間において, 人工衛星は太陽風や地球磁気圏のプラズマ活動による電子線やイオン流にさらされる<sup>(1)</sup>。1969年に打ち上げられたATS5においては, 太陽の食の期間に10000V以上の電位に帯電したことが観測された<sup>(2)</sup>。このように人工衛星表面の熱制御材料として使用されるFEPやPETなどの高分子フィルムは宇宙環境下で帯電しやすいために, 人工衛星筐体の金属部分等に対して電位差が生じたり, 人工衛星全体が帯電したりすることがある。

人工衛星表面の帯電現象に関して, 技術試験衛星V型(ETS-V)に搭載された帯電電位モニターにより衛星表面材料の帯電電位が計測され, 衛星外部のパネルに取り付けられた127  $\mu$ m厚のFEPとpolyimideの帯電電位に差異が見られたことが藤井らにより報告されており<sup>(3)</sup>, 人工衛星の帯電制御を行う上では材料の物性値等のパラメータと帯電との関係を検討する必要があることは明らかである。

本章では, 宇宙環境を模擬した高真空容器を用いて, 高分子試料に電子線照射を行うことによる高分子フィルムの帯電実験を行ない, その帯電特性を測定した。また, 材料の誘電率, 抵抗率に加えて, 2次電子放出特性を考慮に入れた1次元シミュレーションモデルを用いた計算を行ない, 帯電特性を実験結果と比較, 検討した。

人工衛星表面材料の帯電特性のシミュレーションによる評価方法として, たとえば, NASCAPを用いて人工衛星の複雑な筐体形状に応じた3次元帯電電位分布を得る研究が行なわれている<sup>(4)</sup>。NASCAPは形状の他, 周囲の宇宙環境, たとえば電子線や電磁界等の方向などを設定し, 帯電シミュレーションを行なう大規模なコードである。これに対して表面材料そのものの帯電特性を知りたい場合, 本研究で用いたような真空装置に試料を入れ, 電子線照射による帯電電位測定を行なっているのが現状である。このような場合には人工衛星の形状等を考慮する必要はないため, 1次元のシミュレーションで材料評価を行なうことができれば効率的である。そこで本研究では, 比較的単純な1次元モデルを用いたシミュレーションを行ない, いくつかの高分子材料が電子線照射を受けた場合の帯電電位の時間変化や, 試料を異なる条件に置いた場合, 例えば接地された金属試料台に置いた場合とガラス板のような絶縁物をはさんで置いた場合の表面電位の変化, 最終的な到達電位の値などについてシミュレーションを行うとともに, 高真空容器を用

いた帯電実験結果との比較検討を行なった。

## 2.2 実験装置及び実験方法

高分子フィルムの帯電電位測定に使用した装置全体の概略を図2.1に示す。さらに、各部分の詳細について、以下に述べる。

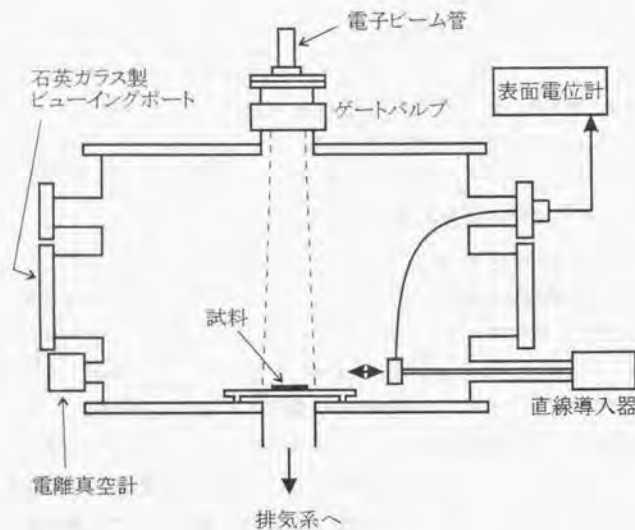


図2.1実験装置概略

### 2.2.1 真空容器

実験には、直径 40cm、高さ 47cm のステンレス鋼製の真空容器を用いた。実験作業を考慮して、150mm  $\phi$ 、70mm  $\phi$ 、34mm  $\phi$  の各大きさのフランジ、150mm  $\phi$  および 100mm  $\phi$  の石英ガラスを使用したビューイングポートが設けられている。これにより、試料の観察、写真撮影、放電光の観測、試料台に流れる電流等の測定を行うことができる。真空容器の上部中央には電子銃を取り付けるためのフランジを設け、その下部には電子銃を空気にさらすことなく真空容器内の試料の取り替え作業等が行えるようゲートバル

ブを取り付けた。

容器内部の真空度は実験時には約  $1.3 \times 10^{-4}$  Pa に減圧した。容器上部のフランジに取り付けられた電子銃には -20kV までの負電圧をかけた。これにより電子銃からの電子線を加速し、真空容器底部に接地された状態で置かれたアルミニウム製の試料台上の高分子フィルム試料に電子線を照射した。

静止軌道付近の真空度は  $10^{-15}$  Pa 程度であるが、地上においてこのような高真空を達成することは困難であるため、模擬実験は本研究の真空度と同レベル以下で行われることが多い<sup>(4)(5)(6)</sup>。帯電電圧測定における真空度  $1.3 \times 10^{-4}$  Pa において、窒素ガス分子の平均自由行程を求めると、約 50m となる。従って、真空容器内における電子線の経路の長さである数十 cm 程度の距離においては、分子同士の衝突はほとんどなく、したがって、電子と分子との衝突による電子の散乱は、無視しうる程度のものであるものとみなした。これにより、電子線は真空容器内に存在する残留ガス分子によって散乱されることなく試料鉛直方向から試料面に到達し、また、ガス分子による空間電荷の発生は無視しうるものとした。

### 2.2.2 排気系

前述の真空度を達成するために、排気系はロータリーポンプおよび高真空用ターボ分子ポンプの 2 段構成とした。これにより真空容器は  $2 \times 10^{-5}$  Pa 程度の到達真空度を持つ。

本研究では、真空容器内の残留ガスに油成分のような高分子ガスがなるべく含まれないようにターボ分子ポンプが使用された。この排気系の構成は、高真空用のポンプとしては油拡散ポンプに比べて油の分子が吸気側真空容器に拡散しない点で優れたものとされる。

### 2.2.3 電子線照射装置

宇宙空間での人工衛星の帯電の主な原因となるサブストーム時には、入射電子のエネルギーが数 keV ~ 30keV 程度、電流密度が  $0.1 \text{ nA/cm}^2$  ~ 数  $\text{nA/cm}^2$  程度の範囲となりうる。この条件の電子線を定常的に発生させるために、電子銃として超大型テレビジョンの画素に使用される電子管を使用した。この電子管は図2.3のような構造をしており、各電極に加える電圧を調整することにより、照射電流密度、照射面積を変化させた。また、電子線エネルギーは、電子管電源系全体に負の電位をかけることによって決定した。照射電流密度  $0.1 \text{ nA/cm}^2$ 、照射エネルギー 15keV での、照射電流密度分布の測定例を図2.2



に、使用した電子管用電源の各電極への電圧範囲を表2.1に、構成図を図2.4に示す。

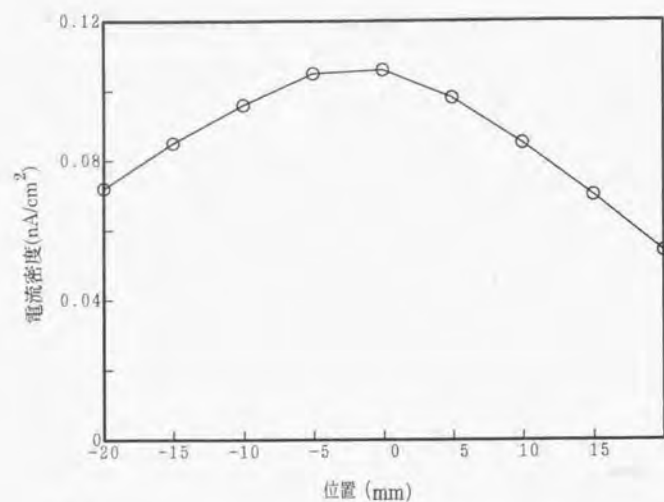


図2.2 電子線の照射電流密度分布

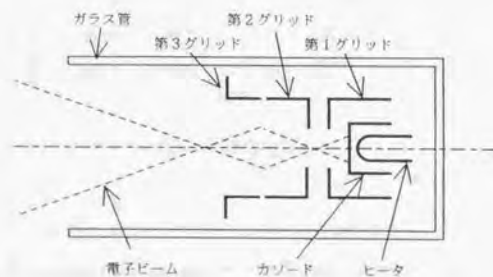


図2.3 電子管基本構造

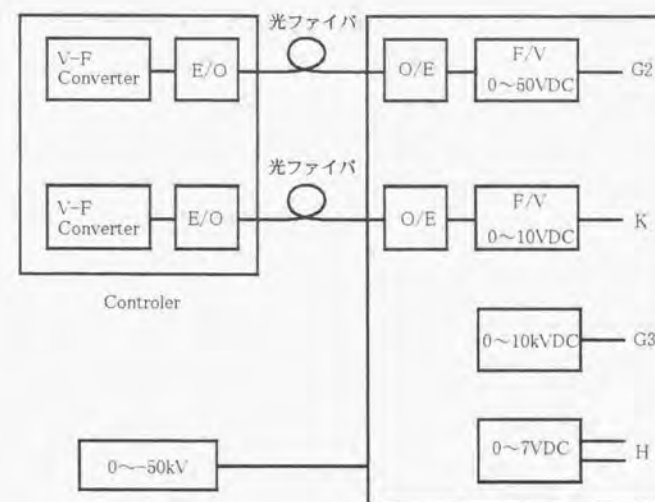


図2.4 電子管用電源装置構成図

表2.1 電子管各電極への電圧可変範囲

ヒータ	2.5~3.5V
カソード	0~+10V
第2グリッド	0~50V
第3グリッド	0~10kV

#### 2.2.4 実験試料

実験に用いた試料は大きさ 40x20mm, 厚さ 127  $\mu$ m の FEP フィルム試料である。

FEP の物性値は、抵抗率が  $3 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ 、比誘電率が  $3.5^{(6)}$  である。

## 2.2.5 表面電位測定方法

表面電位測定には、Trek 社製の非接触表面電位計(MODEL341)を用いた。測定用プローブは、直線導入器により試料表面上、約 2mm の位置を水平に移動させた。測定は非接触で行なわれるために、表面電位の位置分解能は低くなる。プローブを試料に接近させることにより分解能は改善されるが、直線導入器動作時のプローブ部分の揺れにより、プローブが試料に接触する可能性があるため、上記の間隔を持たせて設置した。

本実験でのプローブ位置での表面電位計の位置分解能を検討するために、FEP 試料の片面にアルミニウム蒸着を行ない、蒸着面を 2mm の間隔をあけて 500V と 0V の領域に分割した試料を蒸着面を上にして試料台上に設置し、これに対してプローブを水平に移動し、分割境界付近の電位分布を測定した結果を図2.5に示す。

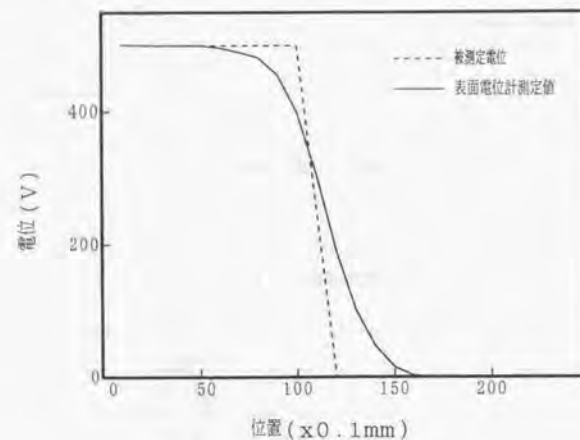


図2.5 表面電位測定結果

この結果から、試料端部から約 2.2mm 以上離れた領域の測定結果に関しては、試料台の電位の影響による誤差は 10 パーセント以内とみなせる。また、表面電位の変化は端部以外では比較的なだらかに変化しており、プローブが非接触であることによる測定誤差

はわずかである。

## 2.2.6 電子線照射による表面電位分布

127  $\mu\text{m}$  の FEP に電子線照射を  $5$  および  $15\text{keV}$ 、 $30\text{nA/cm}^2$  の条件で 10 分間行なった後、試料中央部を通る直線上で電位計プローブを移動させ、表面電位を測定した結果を図2.6に示す。試料端部に近い領域では測定電位が低下するが、これは接地された試料抑え枠の影響を電位計プローブが受けているためである。試料中央部付近では、ほぼ均一な電位分布となっている。

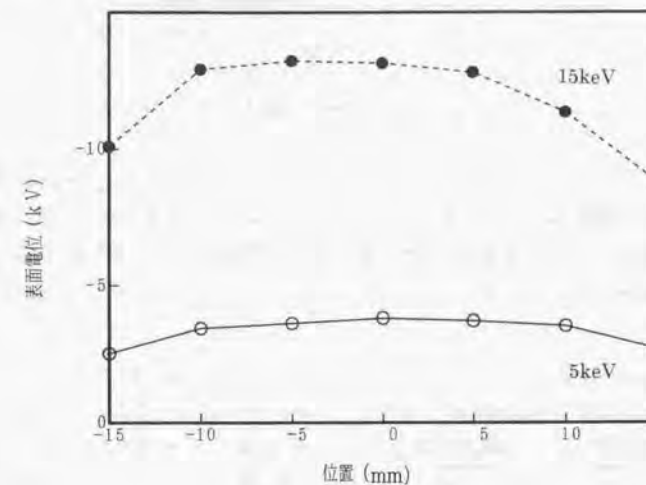


図2.6 表面電位の分布

## 2.3 表面電位計算モデル

表面帯電電位変化のシミュレーションのために、図2.7のような一次元モデル<sup>(5)</sup>を用いる。試料表面の照射電流密度を  $J$  とし、2 次電子放出  $J_S$  および後方散乱  $J_B$  を考慮すると、

$$J = J_S + J_B + C \cdot \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R} \quad (2.1)$$

(  $V_s$ : 試料表面電位,  $C$ : 単位面積あたりの試料の静電容量,  $R$ : 単位面積あたりの試料のバルク抵抗 )



により電荷の入射と放出のバランスが表わせる。

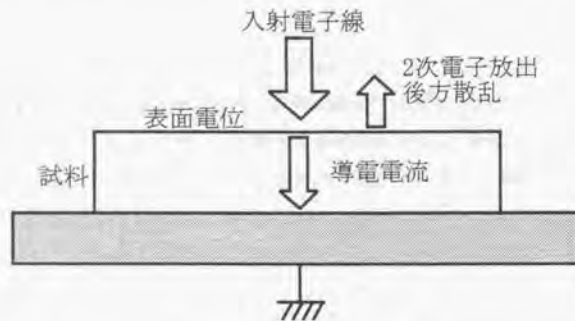


図2.7 帯電の1次元モデル

このモデルをもとに、試料表面電位と照射される電子のエネルギーとの関係を考慮し、表面電位と照射電流密度との関係を次のように考える。試料表面電位が0Vである時の電子の試料表面到達時の速度を $v_0$ 、電流密度を $J_0$ 、加速電圧を $V_B$ 、試料表面到達時の電子の速度を $v_s$ とすると、

$$eV_B = \frac{1}{2}mv_0^2, \quad e(V_B - V_s) = \frac{1}{2}mv_s^2 \quad (2.2)$$

( $e$ : 電子の電荷)

であるから、 $v_0$ 、 $v_s$ はそれぞれ、

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eV_B}{m}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{2e(V_B - V_s)}{m}} \quad (2.3)$$

と表され、試料の表面電位が $V_s$ になったときの試料表面での電流密度 $J$ は、

$$J = J_0 \cdot \frac{v_s}{v_0} = J_0 \sqrt{1 - \frac{V_s}{V_B}} \quad (2.4)$$

となり、2次電子放出と後方散乱を考慮した実質的な入射電流密度 $J_I$ は

$$\begin{aligned} J_I &= J_0 \frac{v_s}{v_0} (1 - K_S - K_B) \\ &= J_0 \sqrt{1 - \frac{V_s}{V_B}} \cdot (1 - K_S - K_B) \end{aligned} \quad (2.5)$$

( $K_S$ : 2次電子放出係数,  $K_B$ : 電子後方散乱係数)

となる。また、(2.1)式を書き直すと

$$J_I = J - J_S - J_B = C \cdot \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R} \quad (2.6)$$

であるから(2.2)、(2.3)式より以下の微分方程式が得られる。

$$J_0(1 - K_S - K_B) \sqrt{1 - \frac{V_s}{V_B}} = C \cdot \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R} \quad (2.7)$$

さらに、

$$K_S = A \times E^{-0.72}, \quad K_B = B \times E^{-0.2} \quad (2.8)$$

( $A$ : FEPでは1.47,  $B$ : FEPでは0.1,  $E$ : 試料に入射する際の入射電子のエネルギーをkeV単位で表わしたもの)

を用いて、表面電位の時間変化を求めることができる<sup>(6)</sup>。

このモデルにおいては、試料面と平行な方向への電流は考慮していない。人工衛星表面材料が電子線等の照射を受けた場合の導電度の上昇に関して、Passenheimらは、 $1\text{ nA/cm}^2$ 以下の電流密度においては、導電度の変化はごくわずかであり、電子が侵入する深さ(飛程)は、 $10\text{ keV}$ のエネルギーの電子で、 $2\text{ }\mu\text{m}$ 程度であると報告している<sup>(7)</sup>。Reaganらは、軌道上の人工衛星が受ける線量率(dose rate)によるpolyimideの導電率の変化を検討しているが、人工衛星表面材料が電子線照射を受けた場合に、導電率の上昇する層の厚さは非常に薄いことから、水平方向の電流はわずかであることを報告している<sup>(8)</sup>。

また、今回使用した試料の厚さ $127\text{ }\mu\text{m}$ に対して、飛程が $2\text{ }\mu\text{m}$ 程度と小さいことから、静電容量の計算には試料厚さをそのまま使用しても問題ない。厚さが薄い試料に高いエネルギーで照射を行った場合の帯電電位を計算する場合には、飛程を考慮した補正を計算に使用する試料厚さの値に対して行うことにより、誤差を少なくすることができる。

## 2.4 表面電位に関する検討

$10\text{ keV}$ ,  $0.1\text{ nA/cm}^2$ の電子線を、大きさ $40 \times 20\text{ mm}$ 、厚さ $127\text{ }\mu\text{m}$ のFEPフィルム試料に照射し、表面中央部の電位の時間変化を表面電位計により測定した。また、前述のモデルを用いて、この条件のもとで1次元シミュレーションを行なった。計算に使用した物性値は、FEPの抵抗率が $3 \times 10^{15}\text{ }\Omega\text{ m}$ 、比誘電率が $3.5$ <sup>(6)</sup>である。また、実際の人工衛星においては、表面材料と人工衛星の金属匡体との間に、接着剤などの絶縁物や隙間が存在する場合もあるものと考え、試料を直接接地試料台上に置いた場合と、厚さ

0.8mm のガラス板(抵抗率  $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ , 比誘電率  $5.0^{(10)}$ )を試料と試料台の間に挟んだ場合の、帯電電位の測定およびモデルによる計算も行った。それぞれの結果を図2.8および図2.9に示す。

計算値と測定値は、試料を直接試料台上に置いた場合およびガラス板を挟んだ場合のそれぞれにおいて比較的良い一致を示しており、シミュレーション結果は、実際の試料表面の帯電の様相を示しているものと考えられる。

ガラス板をはさんだ場合の表面電位(絶対値, 以下同様)の上昇は、試料台に密着して置いた場合に比べてはるかに早くなっていることがわかり、試料と試料台との間にすき間が存在する場合にも、同様に電位上昇が早くなるものと考えられる。ガラス板を挟んだ場合および直接試料台に設置した場合の双方とも、最終的な帯電電位は約 8kV となっている。

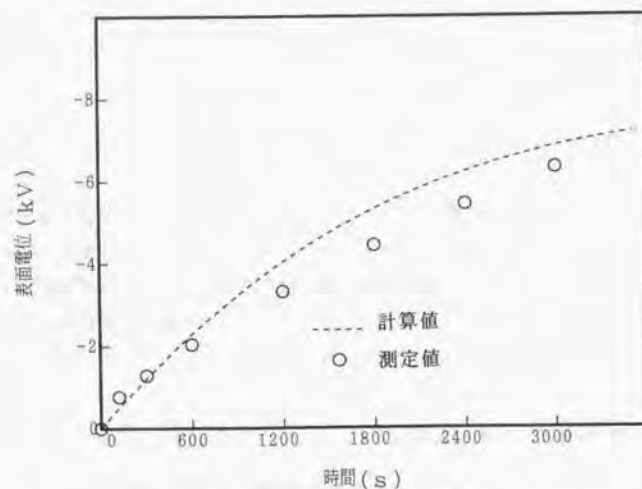


図2.8 試料表面帯電電位の時間変化

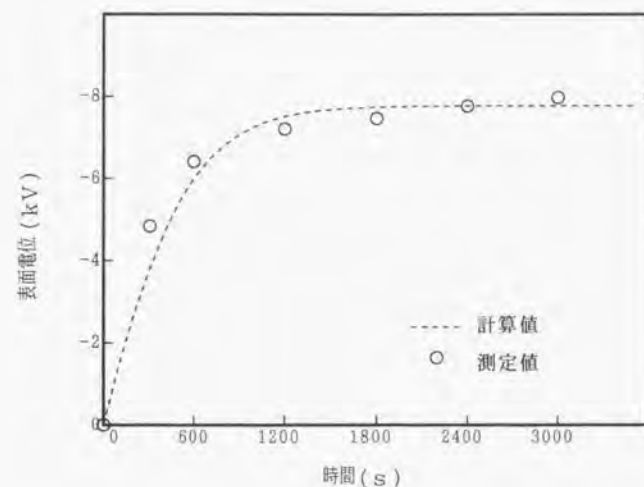


図2.9 ガラス板をはさんだ場合の表面電位の時間変化

電子線照射による帯電現象の2次元モデルシミュレーションを行なった例としては、Reeves と Balmain<sup>(6)</sup>や、Goldstein ら<sup>(11)</sup>による報告があり、それらの結果における試料中央部分における最終到達電位は、本研究の結果とほぼ一致する。FEP 以外の試料では、たとえば、厚さ  $25 \mu\text{m}$  の polyethyleneterephthalate (PET) フィルムについて、藤井ら<sup>(12)</sup>が電子線照射による帯電電位の変化を測定している。藤井らによる実験では、試料の厚さが薄く、さらに照射エネルギーが  $20\text{keV}$  と大きいため、飛程( $4.1 \mu\text{m}^{(12)}$ )が、試料厚さに対して無視できないものと考えられるので、試料厚さが飛程の大きさだけ薄くなっているものとして計算を行った。藤井らの PET フィルムの測定結果と、1次元モデルによる計算結果を図2.10に示す。計算に用いた PET の物性値は、抵抗率  $3.5 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ , 比誘電率  $3.4^{(13)}$ であり、(2.8)式の A の値は  $1.3^{(14)}$ , B の値は、密度、構成原子の質量が類似の高分子材料の場合は、ほぼ等しい値になると考えられることから<sup>(15)</sup>, FEP や polyimide などと同じ 0.1 を使用した。



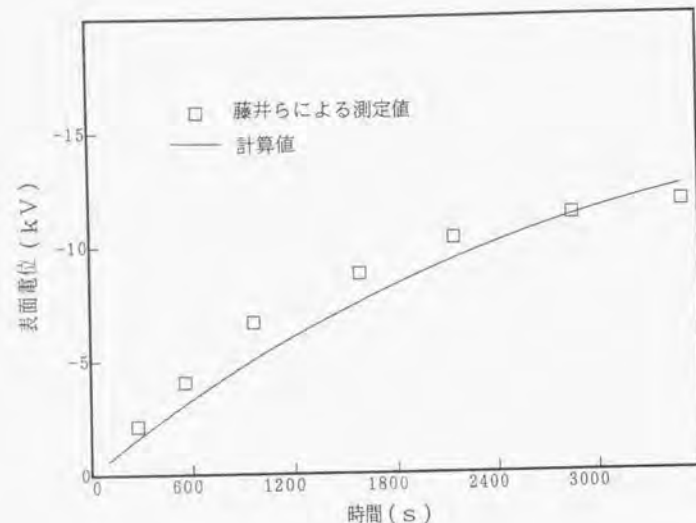


図2.10 PET フィルムの表面帯電電位の時間変化

到達電位に関して検討を行うために、照射電流密度を変化させた場合の、 $127\ \mu\text{m}$  の厚さの 2 種類の試料中央部の表面電位の時間変化を計算した。結果を表2.2に示す。FEP は到達電位が $-7.9\text{kV}$ であるのに対して、PET では FEP よりも導電率が大きいにも関わらず、 $-8.3\text{kV}$  が到達電位となっている。

(2.8)式より、各試料の  $K_S + K_B$  が 1 になるのは、FEP では約  $8.1\text{kV}$ 、PET では約  $8.4\text{kV}$  の時である。これらの値は、表2.2の結果とも良く一致しており、到達電位の値に関しては、今回の実験条件においては 2 次電子放出と後方散乱が深く関与していることがわかる。

到達電位を制御するための方法として、導電性コーティングを用いたり、炭素繊維を試料中に入れることにより抵抗率を調整し、受動的帯電制御を行う手法が使われている<sup>(16)</sup>。この場合の試料の抵抗率と到達電位の関係について検討を行うために、FEP あるいは PET と同じ誘電率および  $K_S + K_B$  の値を持ち、抵抗率が異なる試料(それぞれ、仮想 FEP、仮想 PET とする)を仮定し、到達電位がどのように変化するかをシミュレートした。

表2.2 照射電流密度と到達電位

電流密度 ( $\text{nA}/\text{cm}^2$ )	到達電位(kV)	
	FEP	PET
0.5	-7.9	-6.1
1	-7.9	-7.2
5	-7.9	-8.1
10	-7.9	-8.2
15	-7.9	-8.3

照射電子線エネルギー $10\text{keV}$ 、電流密度  $1.0\text{nA}/\text{cm}^2$  において、抵抗率が  $10^8\ \Omega\text{m}$  から  $10^{17}\ \Omega\text{m}$  まで変化した場合の到達電位の値を計算した結果を図2.11に示す。

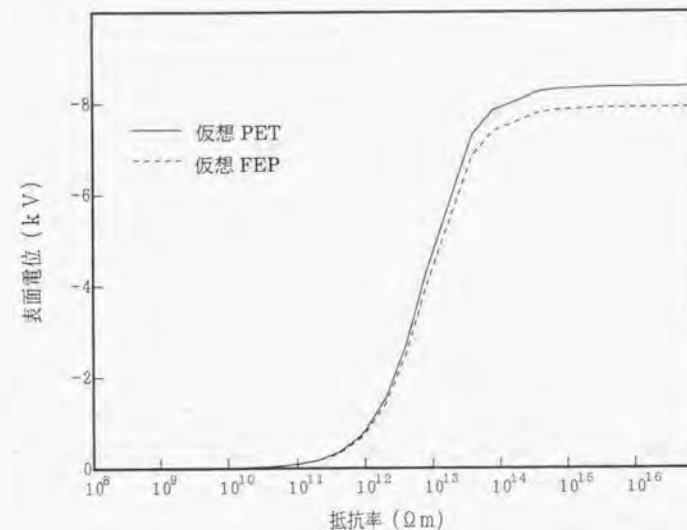


図2.11 抵抗率に対する到達電位の計算結果

この結果から、FEP や PET と同程度の  $K_S+K_B$  を持つ試料では、 $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$  程度以上の抵抗率では帯電電位はほとんど変化がなく、それ以下では急速に低下することがわかる。また、この抵抗率以上の場合には、 $K_S+K_B$  が到達電位の値に対して支配的となるために、今回使用した  $127 \mu\text{m}$  以上の厚さの試料においては、照射電流密度が増加してもほとんど影響がないことになる。

Bogorad らは、静止衛星軌道付近では、サブストーム時のワーストケースの場合、 $25\text{keV}$ ,  $3\text{nA}/\text{cm}^2$  程度の電子線照射があるものとしており<sup>(8)</sup>、本研究における電子の飛程は、実際の宇宙環境でのサブストーム時の飛程と大差ないものとみなせる。従って、今回使用した試料と同程度、あるいはそれ以上の厚さの人工衛星表面材料を用いる時、その抵抗率を下げることで帯電現象を抑制しようとする場合は、帯電電位の値に影響がなくなる  $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$  程度より低い抵抗率を目安にすることが可能であろう。

## 2.5 まとめ

本章では、人工衛星表面材料として使用される高分子フィルムが、宇宙環境下で電子線照射を受けた場合の帯電特性を検討するために、宇宙環境を模擬した真空装置を用いて、FEP フィルムに対して、試料を直接接地された試料台上においた場合、試料と試料台の間にガラス板をはさんだ場合のそれぞれについて電子線照射を行ない、それらの帯電特性を測定した。人工衛星表面材料は必ずしも金属基板上で使用されるとは限らないが、これまでに報告された実験結果は接地された金属板上でのものしかなかった。本章では、従来報告がなされていない絶縁基板上に高分子フィルムを置いた場合の帯電特性をも測定した。また、材料の帯電特性は、従来より真空容器内での電子線照射実験により求めるという方法が取られているが、数値モデルにより容易に計算する方法を具体的に示した。

ガラス板をはさんだ場合には、直接試料台に置いた場合に比べて帯電電位は急速に上昇する。しかし、最終的な帯電電位はいずれの場合でもほぼ同一の値となった。さらに、試料表面における電子線照射による入射電流や、表面電荷の蓄積、2次電子放出と後方散乱による電荷の放出、試料内部を流れる電流などによる電流のバランスを考慮した1次元モデルに基づいた計算を行ない、FEP フィルムと、PET フィルムについて表面電位の時間変化を計算により求めた。

その結果、FEP フィルムの場合では、ガラス板をはさんだ場合および直接試料台上に置いた場合の双方について、1次元モデルによる計算値と実験による測定値は、帯電電位

の上昇速度および最終到達電位の値のいずれに関しても良い一致を示した。これにより、本章で試みた1次元モデルによる帯電特性評価が人工衛星表面材料としての高分子材料の帯電特性を検討する上で有効であることが示された。従来、表面材料の帯電特性の評価には真空容器中での電子線照射による帯電電位を実際に測定する方法が行われているが、本章の結果から、真空装置等がない場合においても容易に1次元モデルにより材料の帯電特性評価を行なうことができることが明らかになり、これは今後の人工衛星表面材料の開発にとって、有益な特性評価手法となる。

最終到達電位に関しては、導電率が低い高分子材料の場合には、試料内部を流れる導電電流の影響は小さいものであり、2次電子放出および後方散乱が強く影響することが示された。さらに、このような材料の場合には、2次電子放出係数と後方散乱係数の和が1になる時の照射エネルギーの値が、最終到達電位の値の決定において支配的となることが1次元モデルからも示された。

実際の宇宙環境における電子線照射電流密度を考慮すると、本章で用いた試料の厚さである  $127 \mu\text{m}$  以上の厚さの高分子表面材料において、 $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$  程度以上の抵抗率の場合には、最終到達電位の値に対する影響は、2次電子放出および後方散乱の大きさが支配的であり、試料の内部を流れる導電電流の影響は、ほぼ無関係になることが示された。したがって、表面材料の抵抗率を下げることで人工衛星表面の帯電現象を抑制しようとする場合は、試料の厚さが本章で用いたものと同程度の場合には、 $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$  程度より低い抵抗率を実現することにより可能であることが示唆された。このような帯電制御のための試料のパラメータを具体的に示した例は従来報告されておらず、本手法は今後の人工衛星表面材料の開発の効率化の一助となるものである。さらに、試料厚さが異なる場合においても、1次元モデルによる計算によって帯電抑制を行うことができる抵抗率を計算することが可能であり、人工衛星表面材料の使用における帯電制御の問題に対して、有用なデータを提供できるものと考えられる。



## 文献 [第2章]

- (1) M. S. Gussenhoven and E. G. Mullen: "Geosynchronous Environment for Severe Spacecraft Charging", *Journal of Spacecrafts and Rockets*, Vol.20, 26 (1983)
- (2) Sharman E. Deforest: "Space Charging at Synchronous Orbit", *Journal of Geophysical Research*, Vol.77, 651, (1972)
- (3) 藤井治久・阿部俊雄・西本博信:「技術試験衛星V型における宇宙帯電の観測」, 高電圧研究会資料 HV-94-52 (平6)
- (4) J. V. Stascus and J. C. Roche: "Testing of a Spacecraft Model in a Combined Environment Simulator", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-28, 4509 (1981)
- (5) R. C. Hazelton et al.: "Effect of Material Parameters on The Charging Characteristics of Irradiated Dielectrics", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, NS - 28, 4541 (1981)
- (6) R. D. Reeves and K. G. Balmain: "Two-Dimensional Electron Beam Charging Model for Polymer Films", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-28, 4547 (1981)
- (7) B. C. Passenheim et al.: "Electrical Conductivity and Discharge in Spacecraft Thermal Control Dielectrics", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-29, 1594 (1982)
- (8) J. B. Reagan et al.: "Space Charging Currents and Their Effects on Spacecraft Systems", *IEEE Trans. Electric Insul.*, Vol. EI-18, 354 (1983)
- (9) S. A. T.Long et al.: "Electron-Radiation Effects on The AC and DC Electrical Properties and Unpaired Electron Densities of Three Aerospace Polymers", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-33, 1390 (1986)
- (10) 電気学会編, "電気工学ポケットブック", オーム社(平2)
- (11) B. Goldstein, R. Stettner and R. Marks: "Potential of an Insulating Disk Irradiated by an Electron Beam", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-30, 4316 (1983)
- (12) 藤井治久, 渋谷義一, 阿部俊雄, 大村勝敏:「電子線照射による人工衛星表面材料の帯電と放電(II)」, 電気学会絶縁研究会資料, EIM87-149 (1987)
- (13) J. I. Kroschwitz 編, "高分子大辞典", 丸善株式会社(平成6)
- (14) E. A. Burke: "Secondary Emission from Polymers", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-27, 1760 (1980)
- (15) 物理学辞典編集委員会 編, "物理学辞典", 培風館 (1986)
- (16) 藤井治久, 西本博信:「人工衛星の帯電・放電現象」, 静電気学会誌, 13, 172 (平元)
- (17) A. Bogorad et al.: "Relation Between Electrostatic Discharge Rate and Outgassing Rate", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-36, 2021 (1989)
- (18) 小松原実・石井勝・津村英志:「真空中での帯電放電に伴うガス放出現象および発光現象の検討」, 電学論A, 114, 528 (平6)
- (19) M. Gollor and K. Rogalla: "HV Design of Vacuum-insulated Power Supplies for Space Applications", *IEEE Trans. Electric Insulation*, Vol. EI-28, 667 (1993)
- (20) R. Stettner and A. B. Dewald: "A Surface Discharge Model for Spacecraft Dielectrics", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, Vol. NS-32, 4079 (1985)

### 第3章 放電開始条件

#### 3.1 はじめに

宇宙環境における荷電粒子の照射を受けた人工衛星表面材料上で放電が発生すると、人工衛星の機能に対して重大な障害が発生する危険性があるために、宇宙環境における人工衛星表面材料上での放電を制御することが人工衛星の高信頼度化、長寿命化にとって重要である。このような放電制御のためには、放電開始条件のパラメータを把握することが必要となる。

宇宙環境下での人工衛星表面上において、表面材料である高分子フィルムが荷電粒子の照射を受けて、その表面が帯電した場合に放電にいたる際の条件に関しては、Fujii らが、25  $\mu\text{m}$  と 127  $\mu\text{m}$  の FEP フィルムに対して電子線照射を行った場合の表面電位と放電発生の時間間隔を測定しているが<sup>(1)</sup>、その結果から表面電位の上昇がほぼ飽和状態になってから放電が開始するまでの時間に比較的ばらつきが大きいことがわかる。このことから、高分子フィルムに対して電子線照射を行った場合に、表面で発生する放電の開始に関するパラメータは各放電ごとに大きくばらつく可能性があり、その検討が困難となることが予想される。また、人工衛星表面上における放電は、人工衛星筐体の金属部分が電極となり、放電を引き起こす場合もありうるものと考えられる。そこで本章では接地された試料台上に試料を置き、さらに試料表面上に金属電極を設置して電極間に直流電圧をかけ、放電が発生する時の印加電圧を測定した。

真空中での放電現象には、試料表面に吸着している水分子等のガス分子や、高分子絶縁体から放出される構成物質の分子などが影響することが考えられ、その場合の放電開始機構は、表面吸着分子がイオン化し、電界によって移動していく過程でさらに他の分子に衝突し、相手分子をイオン化していくイオンカスケードメカニズム<sup>(2)</sup>によるものと考えられている。Schefer らは<sup>(3)</sup>、真空ギャップ間における微小放電の発生と水分子の圧力との関連を、 $\text{H}_2\text{O}$  蒸気圧を変化させて実験した結果から検討している。その中で、実験前に電極を加熱した場合には放電開始電圧が上昇する結果が得られており、表面の吸着物質が放電開始条件に影響していることを示した。また、Gossland らは<sup>(4)</sup>、電子線と正のイオン粒子を同時に照射した場合の放電発生間隔を測定し、イオンにより放電発生頻度が低下することを報告した。正のイオンを電子ビームと同時に照射することで、電子の負電荷が中和されることから、放電発生頻度の低下は予測されるが、この実験結果

を放電機構の解明に結び付けるにはいたっていない。

このように真空環境下における試料表面からのガス分子やイオン等の放出は、電子線照射の有無により大きく変化すると考えられる。そこで放電開始条件に対する試料への電子線照射の影響を検討するために、電子線照射と電極間電圧の上昇の操作をいくつかの組み合わせで行い、それぞれの場合の放電開始電圧の変化を測定した。その組み合わせ方法は、次の3種類である。

- 電極間電圧を上昇させていく前後に、電子線照射を行わない
- 電圧上昇前に電子線照射を行ない、試料表面を帯電させた後、電子線照射を停止して電圧上昇
- 電子線照射を継続したまま電極間電圧を上昇させる

本章では、これらの条件で電子線の照射エネルギーを変化させて実験を行い、その結果から真空環境下における高分子フィルム上での放電発生のパラメータを検討した。

#### 3.2 実験装置および実験方法

##### 3.2.1 試料

試料には、127  $\mu\text{m}$  の FEP フィルムを2枚重ねて254  $\mu\text{m}$  としたものを使用した。これは、貫通放電を防ぎ、沿面放電のみを測定対象とするためである。電極を用いない場合、127  $\mu\text{m}$  の FEP 試料において電子線照射エネルギーが20keV 付近の場合には、発生する放電の形態は、ほとんどが試料表面上に放電光が広がる様子が見られる沿面放電である。しかし、この条件のもとでも、試料上に明るいスポット状の放電光が見られる貫通放電が発生する場合がある。また、その際、沿面放電を伴う場合もある。試料表面上に電極を設置した場合には、物理的な力が試料にかかり、変形等の影響により貫通放電が発生しやすくなる可能性がある。貫通放電および沿面放電が同時に発生している場合には、それぞれの放電の機構を分離して検討する必要が生じ、困難が発生することが予想される。そのような事態を避けるために対象を絞り、沿面放電のみが確実に発生するように127  $\mu\text{m}$  の試料を2枚重ねて使用することとした。

なお、実験後に試料表面を観察した結果、貫通破壊は生じていないことが確認された。

##### 3.2.2 放電電極

放電開始条件を検討するために、試料上に3mmの間の電極を設置し、直流電圧をかけて電極間で放電が発生する電圧を測定した。電極間隔の決定は、20keVの電子線照



射を行なった場合に、電極間電圧が直流電源装置の最大出力電圧である 30kV 以内に放電が生じるように決定した。放電開始電圧測定に使用した電極の概略を図3.1に示す。電極は真鍮製で、高電圧側は傾角 45 度に加工されている。電極表面は、アルミナ粉末の入った研磨剤により鏡面仕上げを行った。

### 3.2.3 実験方法

試料は、真空容器中のアルミニウム製試料台上に置き、真空容器内を約  $1.3 \times 10^{-4}$  Pa の真空度にした後、実験を開始した。試料表面に設置した図3.1の構成の電極の高電圧側に負極性電圧を印加して 10kV/min の速度で電圧を上昇させ、沿面放電が発生したときの電極間電圧を測定した。

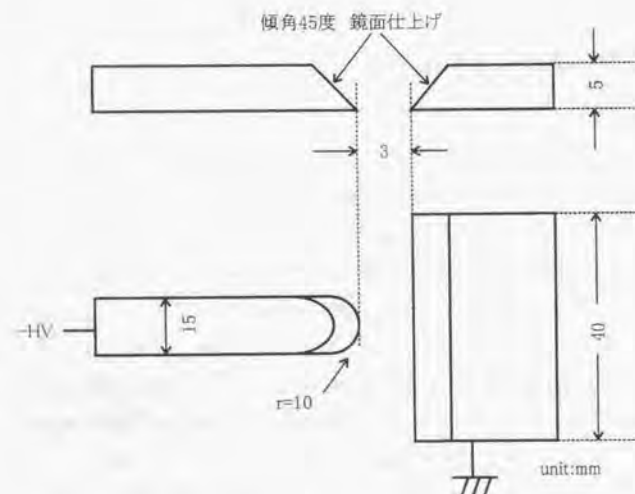


図3.1 放電開始電圧測定用電極

放電発生を検出は、真空度が急激に変化した場合に放電が発生したものと解釈することにより行った。なお、真空度の測定は、真空容器側壁に取り付けた質量分析装置の真空度測定機能(質量分析装置の四重極への高周波電圧印可を停止し、ガス分子の質量による分離を行わずに測定する)を用いて行い、あらかじめ放電発生時には確実に急激な真空

度変化が生じていることを目視による放電光の観察で確認した。このとき質量分析装置から常時発生している信号音の音程が変化するように設定しており、電極間に放電が発生した場合の真空度変化を十分な感度で検出できる。この時の真空度測定感度は、電極間の放電が発生したときには完全にスケールオーバーするように調整しており、電極間放電の検出時には約 5 秒以上にわたり、信号音の音程が変化しつづき、真空度変化をあらわす操作パネル上の表示も上限位置を約 2 秒間以上維持した後、徐々に平常値に戻るようになっている。部分放電等の微小な放電が発生した場合にも、音程及び操作パネル上の表示は変化を示すが、この場合には上限まで振り切れることはなく上限の 1 割程度の値が 1 秒以内の時間、続く程度であるので、電極間放電との違いが明瞭に区別できる。実験においては、部分放電は無視してそのまま電極間電圧の上昇を続け、電極間の放電が発生した場合のみ測定対象とした。

また、放電開始電圧と電子線照射との関係を検討するために、先に述べたように、以下の[a]~[c]のような 3 種類の電子線照射パターンを用いて電子線照射を同時に行なった場合についても測定を行なった。

- [a] 電子線の照射は停止したまま、昇圧と放電を繰り返し測定。
- [b] 電子線照射を続けたまま昇圧を行なう。
- [c] 電子線照射を 2 分間行なった後、照射を停止し、昇圧する。放電が生じたら、再び照射を 2 分間行ない、昇圧を繰り返す。

この実験においては、電極の電圧の影響により、試料への照射電流密度には偏りが生じるものと考えられる。これに関して、電極電圧上昇の速さ(10kV/min)と、5keV で  $30 \text{ nA/cm}^2$ 、20keV で  $30 \text{ nA/cm}^2$  のそれぞれの照射条件における試料の帯電電位の時間変化を 2 章で述べた 1 次元帯電モデルにより計算し、結果を比較したものを、図3.2に示す。5keV の場合約 15 秒、20keV の場合約 30 秒で、帯電電位はそれぞれ約 3kV、約 18kV に飽和する。電極電圧上昇の速さと帯電による表面電位上昇の速さをくらべると、電子線照射密度( $30 \text{ nA/cm}^2$ )が高いために表面電位上昇の方が速い(最終到達電位の 90%の電位に帯電するのに要する時間は、5keV 照射時は約 4 秒、20keV 照射時は約 10 秒)。よって、負電極近傍においても、放電開始電圧に電極電圧が上昇するまでに、帯電電位はほぼ最終到達電位に達しているものと考えられる。一方、接地電極近傍は、通常、照射電流密度が大きくなるが、これは、より早く帯電電位が上昇することを意味する。結局、電極

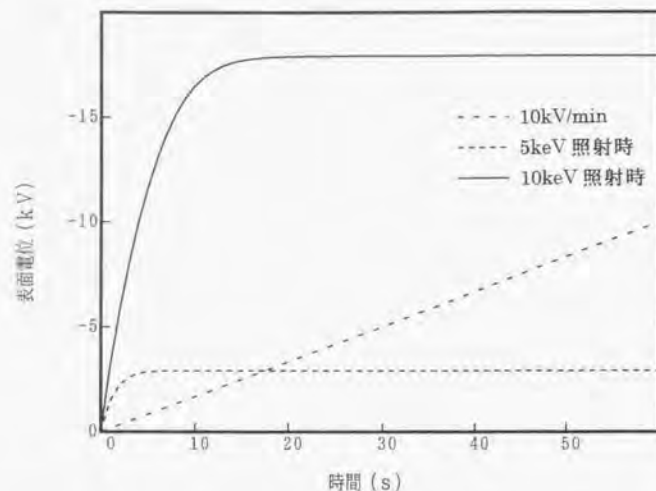


図3.2 5keV電子線照射時の帯電電位上昇速度の計算結果と電極間電圧上昇速度の比較

間の試料面の帯電状況は、電極に近い部分を除いてどの場所も放電開始時には、ほぼ均一な最終到達電位に達しているものと考えられる。

電極に近い領域の試料表面においては、試料表面電位から電極電位へと連続的に電位が変化していることになる。廣らによれば<sup>(5)</sup>、電子線照射により誘起される導電率(放射線誘起導電率) $g$ は

$$g = g_0 D^{\Delta} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

$$D = J_b V_b / (R \rho)$$

ここで、FEP に対しては  $g_0 = 1.7 \times 10^{-16}$ 、 $\Delta = 0.7$ 、 $J_b$ : 照射電流密度、 $V_b$ : 電子の加速電圧( $= E/e$ ,  $e$ : 電子の電荷量)、 $R$ : 電子の入射最大深さ、 $\rho$ : 物質の密度

であらわされる。電子の入射最大深さ  $R$  に関しては、3MeV 以下のエネルギー範囲では、 $R\rho = 412E^n \text{ [mg/cm}^2\text{]}$   $\dots \dots \dots (3.2)$   
 $n = 1.265 - 0.0954 \log E$

ここで、 $R$ : 侵入した電子の速度が零となる深さ(cm)、 $\rho$ : 物質の密度(mg/cm<sup>3</sup>)、 $E$ : 電子のエネルギー(MeV)の近似式がなりたつ<sup>(6)</sup>。(3.1)式と(3.2)式を用いて、FEP において 20keV、30nA/cm<sup>2</sup> の

電子線照射を行なった場合の放射線誘起導電率を求めると  $1.31 \times 10^{-10} \text{ Sm}^{-1}$  となり、FEP の本来の導電率  $3.3 \times 10^{-16} \text{ Sm}^{-1}$  に比較して大きな値となる。このような抵抗率となるのは電子が進入する領域であり、この領域の厚さは(3.2)式より、20keV の電子線照射時で  $3.1 \mu\text{m}$  となる。廣らは厚さ  $127 \mu\text{m}$ 、半径  $25\text{mm}$  の FEP の帯電電位分布の 2 次元シミュレーションを、照射エネルギー 30keV、照射電流密度  $0.68 \text{ nA/cm}^2$ 、試料中心から距離  $r(\text{mm})$  での照射電流密度  $J_b(r)$  を

$$J_b(r) = J_b \exp(-r^2 / 2\sigma^2) \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

ここに、 $J_b$ : 試料中心軸上の照射電流密度、 $\sigma$ : 25 のガウス分布と仮定して行ない、試料端面断面は電極と完全に接合しているものとして、図3.3のような結果を示した<sup>(5)</sup>。

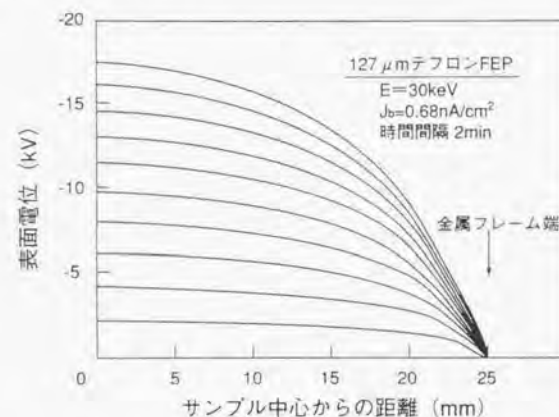


図3.3 廣らによる表面電位分布シミュレーション結果<sup>(5)</sup>

廣らのシミュレーション条件では本章での実験条件と比較して、電流密度が小さく、電流密度分布はガウス分布を仮定しており、試料端面断面が電極に接合している、といった違いがあるため、シミュレーション結果をそのまま適用することは妥当ではないが、本章の実験においても接地電極付近の試料表面電位分布には傾きが生じているものと考えられる。このとき、電位傾度が大きければ接地電極と試料表面との間で沿面放電が発生する可能性があるが、後述の実験結果では電極間電圧を上昇していくことにより放電が発生していることから、接地電極と試料表面との間での沿面放電により放電が閉



始することはなく、負電圧電極側での放電により開始しているものと考えられる。

放電を繰り返した場合の試料表面の劣化が放電開始条件に及ぼす影響についても検討しておく必要がある。放電規模や放電形態の変化と、放電時に試料表面から放出されるガス分子の量は密接に関連するので、真空容器内に置いた厚さ  $127\ \mu\text{m}$  の FEP フィルムに電子線照射を行い、放電時に放出されるガスによる真空容器内の圧力変化を真空容器に取り付けた質量分析器により測定した。その結果では、沿面放電が発生する  $127\ \mu\text{m}$  FEP フィルムでは、放電を 40 回繰り返した場合にも、放電 1 回あたりの放出ガスの量には特に顕著な変化は見られない。 $127\ \mu\text{m}$  FEP フィルムの放電回数と放出ガスの関係を測定した結果を図 3.4 に示す。この結果から  $127\ \mu\text{m}$  FEP フィルムでは、放電規模等に対する放電回数の影響はほとんどないことがわかる。

今回の実験における試料の場合は、電子線照射により発生する放電の形態は  $127\ \mu\text{m}$  厚 FEP と同じく沿面放電であり、したがって放電を繰り返した場合の、試料表面の劣化による放電様相の大きな変化はないものと考えられる。

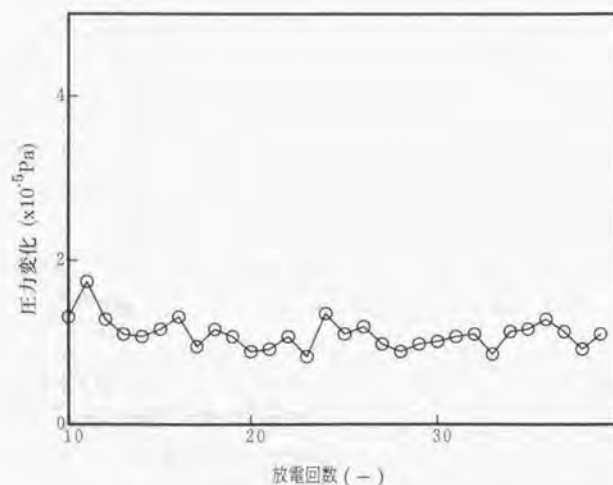


図 3.4  $127\ \mu\text{m}$  FEP の放電回数による放出ガス量の変化

次に、電子線を照射しない場合の放電開始電圧を、FEP 試料を取り替えて 3 回にわた

り測定した結果を図 3.5 に示す。電子線照射がない場合の放電開始電圧の上昇は、試料表面に付着しているガス分子等が放電により飛ばされ、それにより徐々に放電が発生しにくくなるコンディショニング効果によるものと考えられる。実験を行なった 20 回までの放電の間、ほぼ単調に増加していく傾向を示しているため、少なくとも放電回数 20 回程度では、コンディショニング効果が継続しているものと考えられる。

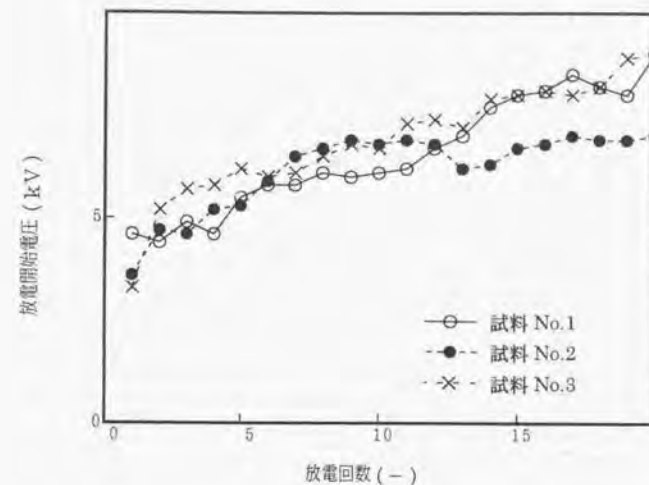


図 3.5 電子線を照射しない場合の FEP の放電開始電圧の放電回数による変化。

電子線照射の影響を検討するための放電開始電圧の測定は、次のように放電回数 1 回から 40 回までの間を 7 つの区間に分け、それぞれの部分に [a] ~ [c] のパターンを組み合わせさせて電子線照射を行なって、放電開始電圧を放電回数 40 回まで測定した。これを 4 回行ない、それぞれの放電回数での放電開始電圧の平均値を求めた。

放電 1 回 ~ 10 回まで [a]

11 回 ~ 15 回まで [b] (照射条件  $5\text{keV}$ ,  $30\text{nA}/\text{cm}^2$ )

16 回 ~ 20 回まで [c] (照射条件  $5\text{keV}$ ,  $30\text{nA}/\text{cm}^2$ )

- 2 1回～2 5回まで[a]  
 2 6回～3 0回まで[b](照射条件 20keV, 30nA/cm<sup>2</sup>)  
 3 1回～3 5回まで[c](照射条件 20keV, 30nA/cm<sup>2</sup>)  
 3 6回～4 0回まで[a]

### 3.3 結果と考察

上記の条件で放電開始電圧を測定した結果を図3.6に示す。

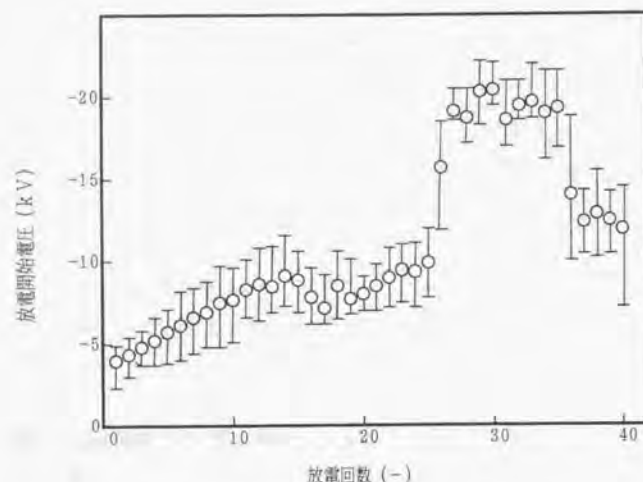


図3.6 放電開始電圧の測定結果

電子線照射を行わずに電極間電圧のみを上昇させた場合の、放電 1 回～10 回までは放電回数の増加に伴って放電開始電圧も上昇している。次に 5keV の電子線を照射しながら電極間電圧を上昇させた 11 回～15 回の場合には、放電回数の増加に伴う放電開始電圧の上昇が抑えられる傾向を示している。16 回から 20 回の、5keV 照射後、照射を停止してから電極間電圧を上昇させた場合には、ほぼ同じ程度の放電開始電圧を保つか、または、やや電圧が低下する傾向が見られる。20 回～25 回は、1 回～10 回とほぼ同様に

放電開始電圧は単調に上昇している。さらに 20keV 照射を行ないつつ電圧上昇を行なった 26 回～30 回、20keV 2 分間照射後に照射停止してから電圧上昇を行なった 31 回～35 回では特に明白な差はなく、放電開始電圧は 20keV をやや下回る値で推移している。照射を行なわない 36 回～40 回では、放電開始電圧は急激に低下し、12keV 付近の値となっている。

電極を用いない(試料押え枠のみの)電子線照射の場合、照射エネルギーが上昇すると、電極近傍の試料表面の電界が大きくなり、沿面放電が開始するようになる(ただし、本章の試料厚さで 20keV 程度の照射エネルギーでは、容易に放電は生じない)。これに対して本章の実験結果では、電極間放電開始電圧は、試料表面電位に伴い上昇していることから、電極を用いた放電の場合には押え枠のみの場合とは異なる機構により放電が発生していることになる。20keV 照射を行なった場合に放電開始電圧が大きく上昇しているのは、試料表面の帯電電位の絶対値が大きく上昇し、電極の電位が試料表面の電位を上回らないと放電が発生しなくなったためと考えられる。

一般に、真空中での沿面放電開始電圧は、試料表面に付着した塵、あるいはガス等が放電を繰り返すことにより除去されていくコンディショニング効果により、放電回数の増加に伴い上昇していく。これは図3.6の 1 回～10 回あるいは 21 回～25 回に相当するものと考えられる。しかし、パターン [b], [c] において、放電回数が増加しても、それに伴う放電開始電圧の上昇がほとんどみられない。電子線のエネルギーが、照射を行わない場合の放電開始電圧よりも低い場合(図3.6の 11 回～15 回、16 回～20 回)、照射を続けながら放電が発生させた場合および照射を停止してから放電が発生させた場合のいずれにおいても、放電開始電圧は放電回数が増加しても上昇しない傾向を見せている。真空中で高分子フィルムが電子線照射を受けた場合に、高分子フィルム表面からは試料構成分子や H<sub>2</sub>O 分子を主とする吸着分子が放出されるが<sup>(18)</sup>、上記の結果は、電子線照射中に発生するこれらのガス分子は放電開始電圧にはほとんど影響していないことを示していることになる。また、試料に電子線が照射されることによる劣化に関しては、電子線照射後も変色等の目視により確認できる変化は生じていない。放電の発生による放電痕が確認されるだけである。したがって、本章の実験における放電開始電圧の変化には、電子線照射による試料表面の帯電が関与しているものとみなすことが可能である。電子線照射によって材料表面に電子が蓄積した状態の試料では、吸着ガスや試料構成分子なども帯電し、イオン化した帯電粒子の形で放出されやすくなることにより、電子なだれが容易に発生し<sup>(19)</sup>、放電開始電圧が低くなる可能性がある。Bogorad らは、放電発生頻度



と放電時に発生するガスの量との間の関係を測定し、ガスの量と放電開始条件との間に関連性がある可能性を報告している<sup>(17)</sup>。

また、Stettner と Dewald は、人工衛星表面材料上の沿面放電における放電進展機構において、表面から放出される電子が重要な役割をなすモデルを提案している<sup>(20)</sup>。この放電進展モデルによれば、試料表面が帯電している場合には、放電が発生した領域と帯電している領域との境界で大きな電界が発生し、この電界によって表面付近のイオンが加速され、試料から電子をたたき出すことにより放電が進展する。このような機構により、試料表面が帯電している場合には、放電が容易に発生するようになり、コンディショニング効果を打ち消す形で放電開始電圧の上昇が抑えられているものと考えられることでもきよう。

以上の結果から、電子線照射を受けない場合の放電開始電圧に対して照射エネルギーが小さい場合の電子線照射は、放電開始電圧を上昇させる効果はなく、逆に放電開始電圧の放電回数増加に伴う上昇を抑制する効果があり、一方、照射エネルギーが大きい場合には、その照射エネルギーによる帯電電圧付近の値にまで放電開始電圧が上昇することが示された。

### 3.4 まとめ

本章では、人工衛星表面材料として使用される高分子フィルムの放電開始条件に関する検討を行うために、真空容器内において、高分子フィルム上に電極を設置し、電極間の電圧を上昇させていった場合の放電開始電圧を測定した。その際、高分子フィルムに対して電子線照射を行いながら電極間電圧を上昇させた場合と、電子線照射により試料表面に帯電を生じさせた後は電子線を停止し、その後、電極間電圧の上昇を開始した場合のそれぞれの方法で実験を行い、放電開始電圧を測定した。

その結果から、試料に対する電子線照射を行わずに電極間電圧を上昇させた場合には、コンディショニング効果によるものと考えられる放電開始電圧の上昇が見られたが、電子線照射をおこなって試料に帯電させ、その後、電極間電圧を上昇させた場合には放電開始電圧の明確な上昇は見られなかった。電子線照射中であれば、試料表面からは吸着分子や試料構成分子が放出されるが、電子線照射を電極間電圧上昇開始前にのみ行なうことによって試料に帯電させた状態で、電子線照射なしで電極間電圧上昇を行った場合でも放電開始電圧の上昇が抑制される現象が見られたことから、電子線照射による試料表面の帯電がコンディショニング効果を打ち消すような形で作用し、放電開始電圧の

上昇を抑制する現象につながっているものと考えられる。

また、試料を電子線照射により帯電させた場合の帯電電位と放電開始電圧の関係は、電極間電圧が少なくとも表面電位を越えなければ放電は生じないことが明らかになり、帯電電位が高い場合には、放電開始電圧が大きく影響を受けることになることがわかった。

以上の結果から、宇宙環境等の電子線照射を受ける真空環境下においての高分子フィルム上での放電開始条件は、従来の電子線照射が存在しない場合の絶縁体表面のコンディショニング効果だけでは説明することはできず、試料に対する電子線の照射と、それによる試料表面の帯電等の影響を考慮する必要があるものと考えられる。

これまで、試料への電子線照射の有無による放電開始条件への影響や、その機構についての報告はなされておらず、荷電粒子の照射を受ける宇宙環境下での放電現象を検討する上で、参考データとすることが可能であろう。

## 文献 [第3章]

- (1) H. Fujii, T. Abe and H. Nishimoto: "Electrostatic Charging and Arc Discharge on Satellite Dielectrics Simulated by Electron Beam", Proc. ALAA Space Systems Technology Conference, San Diego, p. 156 (1986)
- (2) H. P. S. Powell and P. A. Chatterton: "Pre-Breakdown Conduction between Vacuum Insulated Electrodes", Vacuum, Vol. 20, p. 454 (1970)
- (3) P. V. Schefer and P. A. Chatterton, "Microdischarges and Microdischarge Simulation in Uniform-Field High-Voltage Vacuum Gaps", IEEE Trans. Electrical Insul. Vol. EI-11, p. 12 (1976)
- (4) M. Gossland and K. G. Balmain: "Incident Ion Effects on Polymer Surface Discharge", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-30, p. 4302 (1983)
- (5) 廣三壽, 辻孝誠, 藤井治久:「宇宙用熱制御テフロンフィルムの電子ビーム照射による放電現象とその解析」, 電学論 A, Vol.117, p. 1157 (1997)
- (6) 日本学術振興会第 132 委員会編,「電子・イオンビームハンドブック」, 日刊工業新聞社 (昭和 48)
- (7) R. Stettner and A. B. Dewald: "A Surface Discharge Model for Spacecraft Dielectrics", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-32, p.4079 (1985)
- (8) A. Bogorad et al.: "Relation Between Electrostatic Discharge Rate and Outgassing Rate", *ibid.*, Vol. NS-36, p. 2021 (1989)
- (9) 小松原実, 石井勝, 津村英志:「真空中での帯電放電に伴うガス放出現象および発光現象の検討」, 電学論 A, Vol.114, p. 528 (1997)
- (10) M. Gollor and K. Rogalla: "HV Design of Vacuum-insulated Power Supplies for Space Applications", IEEE Trans. Electric Insulation, Vol. EI-28, p. 667 (1993)
- (11) R. Stettner and A. B. Dewald: "A Surface Discharge Model for Spacecraft Dielectrics", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-32, p. 4079 (1985)

## 第4章 真空中での帯電放電に伴うガス放出現象

### 4.1 はじめに

宇宙環境下での人工衛星表面材料上における帯電放電現象の制御のためには, 帯電および放電の機構解明が必要不可欠である。真空中における高分子フィルム上での帯電放電現象の機構に重要な関連性を持つと考えられる現象の一つが, 高分子材料表面からのガス分子の放出現象であろう。宇宙環境における人工衛星に高エネルギー荷電粒子が衝突することにより, 試料表面に付着した物質の分子や, 試料自体の分子が切断あるいは分解されて外部に放出されるのは, そのような例のひとつである。また, 放電発生時にも, 放電のエネルギーにより試料および付着物質の分子が放出される。これに関して, Bouquet らは, ポリエステル製の熱制御材料に対して電子線を照射し, 試料の質量の減少量を計測している<sup>(1)</sup>。

これらの放出ガス分子の種類や量などのパラメータは, 放電や帯電の形態によって異なることが考えられる。特に放電の開始段階において絶縁物表面に吸着したガス分子が放電開始機構に関係している可能性は強い<sup>(2)</sup>。また, 放電形態によって放出されるガス分子に何らかの差異が生じる場合には, そのようなガス分子の分析を行うことによって高分子フィルム上での放電現象の特性を示す情報を得ることができるはずである。

Levy らは<sup>(3)</sup>, 2 つの 125  $\mu\text{m}$  の FEP フィルムを 50mm 程度まで離して設置して 25keV の電子線を照射し, 片方の試料上で放電が発生した場合に, 他方の試料にも放電が発生するか, 発生した場合にどの程度の時間差が生じるか, 放電で発生するガスによる圧力上昇はどの程度であるか, といった事項に関して測定を行なった。その報告の中で, ガスの発生が真空中での放電開始に何らかの役割を果たしているのか, あるいはガスの発生は放電開始機構には無関係で, 放電の結果として発生するにすぎないのかを検討しているが, この点については実験結果からは明白な結論は得られないとしている。

放出ガス分子が存在することによって, 帯電および放電現象に対して何らかの影響を及ぼす可能性は十分にある。特に宇宙環境においては, 本来は超高真空環境であるにもかかわらず, このような放出ガス分子により真空度が相対的には大きく変化し, 純粋な超高真空環境下とは異なる帯電放電現象をもたらしている可能性がある。

電子線照射時および放電発生時に生じるガス分子は, 材料表面で発生する帯電放電現象の機構に深く関連しており, 放電時に発生する放電光や放出ガスについて検討するこ



とにより、放電機構の解明を進めることができるものと考えられる。そこで本章では、高真空容器と電子線照射装置を用いて宇宙環境を模擬し、人工衛星の熱制御材料に用いられる高分子フィルムを試料として、電子線照射および放電現象に伴う放出ガスに関する測定を行ない、さらに、それらの結果に基づき放電機構についての検討を行なった。

## 4.2 実験装置および実験方法

### 4.2.1 試料および真空容器

試料として、厚さ  $25\ \mu\text{m}$  と  $127\ \mu\text{m}$  の FEP 及び PET のフィルムを用いた。試料は超音波洗浄器を使用してエタノール中で 10 分間の洗浄を行い、表面に付着した油などを除去し、デシケータ中で 1 時間以上保存乾燥後、図 4.1 に示したアルミニウム製の試料台に固定し真空容器中に設置した。なお、図 4.2 に示したように試料押さえ枠は、FEP 製のスパーサをはさんだ状態で試料の固定に用いた。その理由は、直接試料を押さえた場合には放電が発生し難くなる現象が見られたためである。

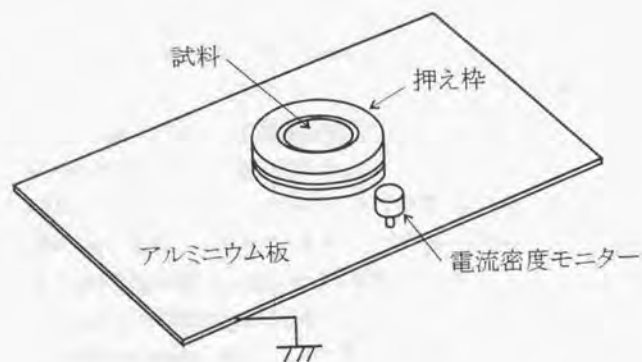


図 4.1 試料台

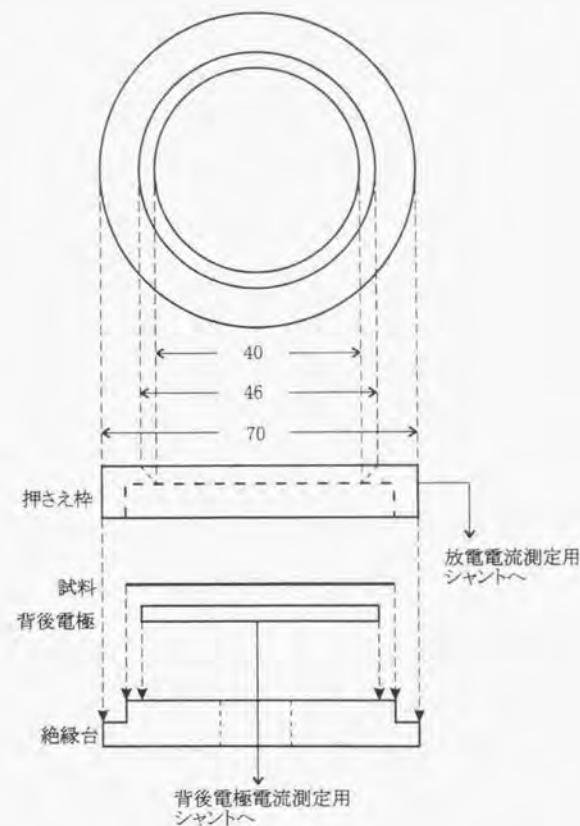


図 4.2 試料押さえ枠の構造

電子線の照射を受ける試料面は直径 40mm の円形領域である。試料押さえ枠と背面電極は放電時の電流を測定できるように、0.1  $\Omega$  のシャントを介して接地した。

電子線の照射エネルギーは 20keV とし、試料面上での照射電流密度は約 15nA/cm<sup>2</sup> となるように調整をして実験を行った。なお、FEP および PET いずれの試料が電子線照射された場合においても、20keV の電子線を照射した場合には、厚さ 25  $\mu$ m のフィルムでは主に試料を貫通するパンチスルー放電が発生し、127  $\mu$ m では主に沿面放電が発生する。用いた各試料の分子構造を図4.3に示す。

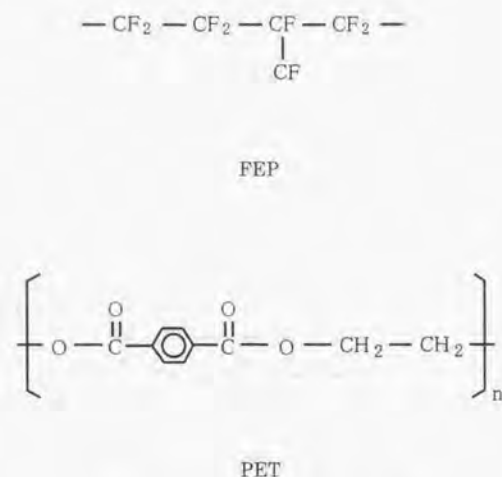


図4.3 FEP および PET の分子構造

#### 4.2.2 測定装置

容器内部の圧力は壁面に取り付けられた電離真空計によって測定し、さらにその出力はコンピュータにより記録した。ガス質量スペクトルは、同じく真空容器壁面に取り付けられた質量分析器の測定ヘッドによって測定し、この出力も別のコンピュータにより記録した。

実験開始時の真空容器内部のガス質量スペクトルを図4.4に示す。水分子（質量数 18）が非常に大きくなっているが、これは水分子が真空容器壁面に吸着されやすいため、真空容器中の残留ガス質量スペクトルとしては一般的なものである<sup>(4)</sup>。

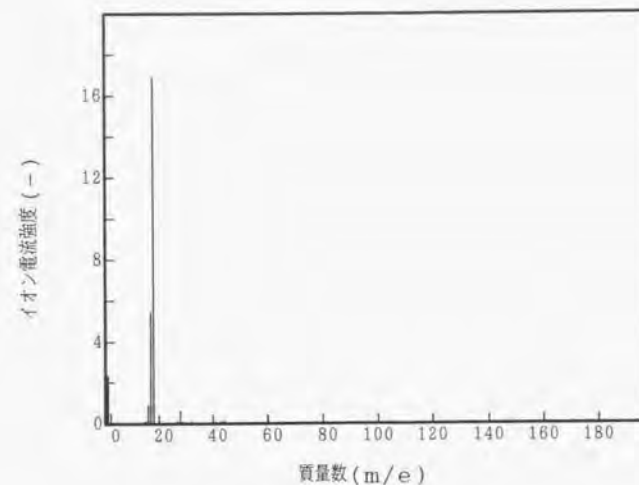


図4.4 真空容器内ガス質量スペクトル

実験装置全体の構成の概略を図4.5に示す。



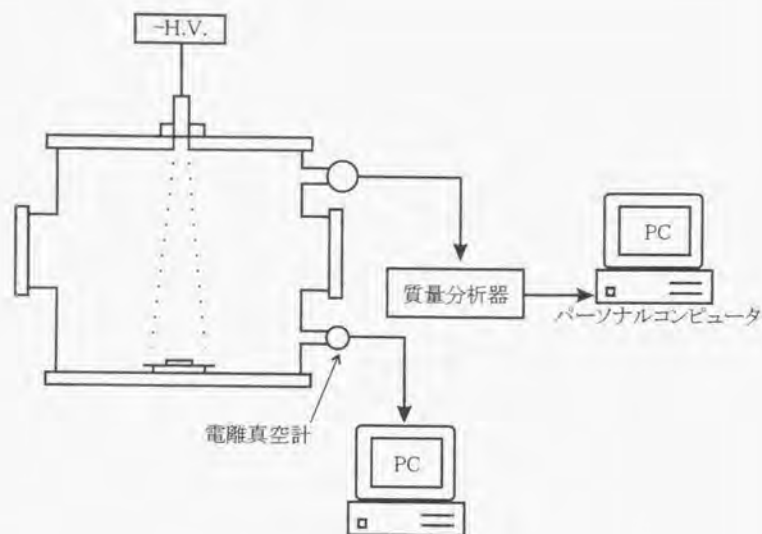


図4.5 実験装置構成

### 4.3 結果および考察

#### 4.3.1 電子線照射時の圧力変化

各試料に  $20\text{keV}$ ,  $15\text{nA/cm}^2$  の電子ビームを照射した時の真空容器内の圧力変化は、試料の種類及び厚さに対して、特に関連性はなく、約  $3 \times 10^{-6}\text{Pa}$  増加した。使用したターボ分子ポンプの排気速度は、 $310\text{ L/s}$  であり、これらの値から電子線照射時のガス放出量を以下の(4.1)式から求めると、実験を行なった真空度( $1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$ )において、 $7.2\text{ L/s}$  となる。

$$Q = \frac{PV}{13 \times 10^{-4}} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに、 $Q$ : 圧力  $1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$  での 1 秒間あたりのガス放出量( $\text{L/s}$ )、 $P$ : 真空容器内圧力変化( $\text{Pa}$ )、 $V$ : 真空ポンプ排気速度( $\text{L/s}$ )

なお、照射電流密度が変化した場合の真空度変化量については、表4.1のようになり、

$0.1\text{nA/cm}^2$  以上の電流密度においては、真空度変化の照射電流密度依存性は小さいことがわかる。

表4.1 真空度変化の照射電流密度依存性

照射電流密度( $\text{nA/cm}^2$ )	真空度変化量( $\text{Pa}$ )
0.1	$2.8 \times 10^{-6}$
1	$3.0 \times 10^{-6}$
100	$4.3 \times 10^{-6}$

さらに電子線照射時のガス放出量を、気体の状態方程式により試料表面からの放出分子モル数に換算すると、 $3.7 \times 10^{-10}\text{ mol/s}$  となり、電子線照射により放出されたガス分子がすべて試料からのものであると仮定すると、試料表面  $1\text{cm}^2$  あたり毎秒  $2.2 \times 10^{14}$  個の分子が放出されていることになる。ただし、本章での実験においては、電子線は試料の大きさよりも広い範囲に照射されているために、試料押え枠、試料台、さらに試料台周囲の容器底面からも照射によるガス分子の放出が生じていることが考えられるので、試料台等の金属部分からのガス放出量が占める割合についても検討しておく必要がある。金属のガス放出量は、たとえば銅とアルミニウムに関しては図4.6のようになり、真空中に 1 時間程度置くことでガス放出速度は定常状態に近づく。また、本研究において真空容器内の水分子の吸着量が多いことは、残留ガス分子スペクトル中に占める水分子の割合が非常に多いことから示唆されており、この水分子が電子線照射により放出されているものと考えられる。ただし、図4.7に示したように、ベーキング処理を行わないときのガス放出速度は有機材料が大きく、試料からも多くのガス放出が行なわれているものと考えられる。

本研究におけるガス放出量について具体的に検討するために、図4.6および図4.7から Cu(素材)と FEP のガス放出速度をプロットし直したものを図4.8に示す。真空中に 600 分間置かれた後の FEP と Cu のガス放出速度には、電子線照射を行わない場合には、図4.8から約 100 倍の差があることがわかる。電子線照射時にもこの比率が変わらないものと仮定する。電子線照射の範囲は、蛍光塗料を塗ったアルミニウム板を真空容器内に設置して観察した結果、および、照射電流密度センサーを直線導入器により移動させて照射電流密度を測定した結果から、試料直径の 3 倍程度までの広がりであり、しかも、試料の外側では電流密度は急激に減少している。ガス放出速度比では 100 倍程度 FEP 試

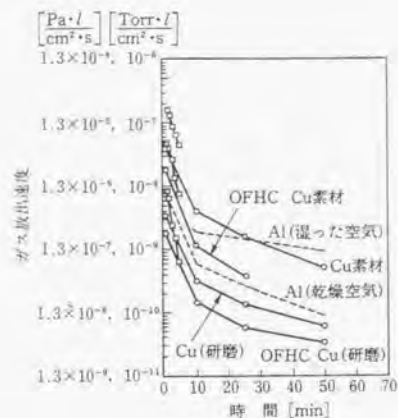


図4.6 Cu と Al のガス放出量<sup>(5)</sup>

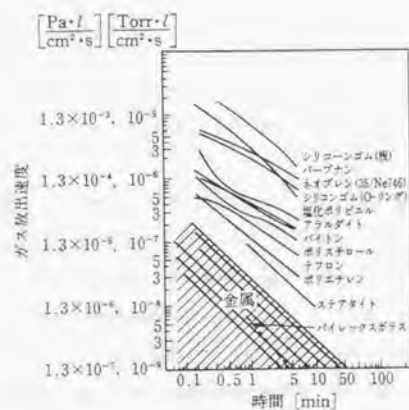


図4.7 有機物と金属のガス放出量<sup>(5)</sup>

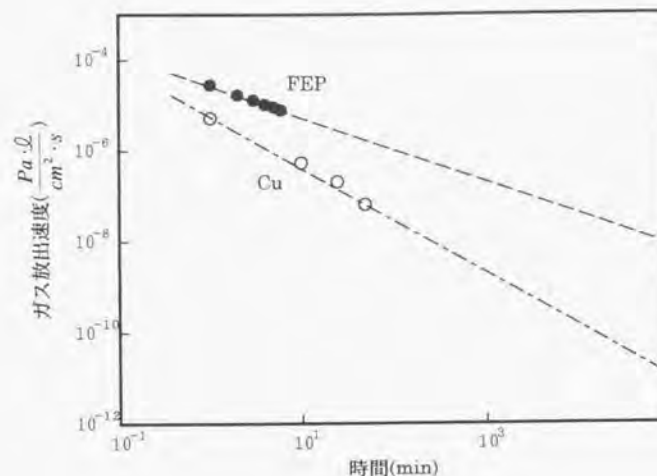


図4.8 Cu と FEP のガス放出速度

料の方が大きいものに対して、電子線照射を受ける金属部分の面積は 9 倍程度と見積もられ、しかも電子線照射密度は試料部分よりも小さい。したがって、試料表面からのガス放出のみを考慮し、電子線照射を受ける試料台や試料台周辺の真空容器壁面からの放出は無視するものとした。

電子線照射時のガス放出が試料表面からのみ行われたものと仮定した場合、電子線照射時のガス放出速度は、 $0.745 \times 10^{-4} \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$  である。図4.8において電子線照射が行なわれていない場合の値と比べて、100 倍程度の差があることになる。人工衛星が宇宙空間において  $10^5 \text{ min}$  経過後を考えた場合、電子線照射の有無によるガス放出速度の比率が、600min 経過時と同じであると仮定すると、電子線非照射では、 $8.2 \times 10^{-9} \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$  であるが、電子線照射時には  $2.3 \times 10^{-6} \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$  となる。このように、電子線照射を受けた高分子材料表面からは非照射時に比べて多くのガス放出が生じていることになる。人工衛星の軌道上の宇宙空間においても、磁気圏サブストーム時のピークでは数  $\text{nA/cm}^2$  の電



流密度に達することがあることから<sup>(6)(7)</sup>、サブストーム時には、電子線照射を受けることにより人工衛星表面材料から連続的に放出されるガスは、表面近傍では周囲の真空度と比較した場合かなりの密度に達することになる。実際の人工衛星においても、特に電子線照射を受けた場合には、周囲の真空度と比較してきわめて多量のガス放出が生じているものと推定される。本研究における真空度は宇宙空間の真空度に対しては、はるかに低真空であるが、電子線照射時には大きく変化する程度には高真空であることから、人工衛星上での帯電、放電現象のシミュレーションに用いることが可能であると判断した。

このようなガス分子が人工衛星表面近傍に存在することにより、人工衛星表面での放電の開始および進展に影響を与える可能性がある。この点に関しては、Bogorad らは<sup>(8)</sup>、試料からのガス放出量と、試料表面での放電現象の発生頻度および放電規模とのあいだに、密接な関係があることを示し、さらに、人工衛星用の材料として、ガス放出の少ないものを用いたり、地上において、あらかじめ加熱して、ガス放出を抑える等の試みも行なっている。また、試料から放出されるガスは吸着分子のみではなく、電子線照射によって高分子材料の試料が分解されることによって発生する場合や<sup>(9)</sup>、人工衛星の可動部分の潤滑剤が蒸発、付着し、ガスの発生源となる場合もある<sup>(10)</sup>。

このような電子線照射によるガス放出について検討するために、FEP を真空容器中に置き、15keV、30nA/cm<sup>2</sup> で電子線を照射した場合の容器内のガス分子の増加を、質量数 100 までの分子量について測定したところ、図4.9のようになった。この図では、微小なピークも判別しやすいように、縦軸を指数目盛りとしてある。試料構成分子のフラグメントの発生を示すピーク(CF=31, CF<sub>2</sub>=50, CF<sub>3</sub>=69, C<sub>2</sub>F<sub>3</sub>=81, C<sub>3</sub>F<sub>3</sub>=93, C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>=100)が生じていることから、電子線照射を受けた場合には材料の分解によるガス放出が認められる。その他、O<sub>2</sub>=31, CO<sub>2</sub>=44, N<sub>2</sub>=28 といった空気中の分子のピークも検出されている。なお、水分子をあらわす質量数 18 のピークについては、その増加量が他の質量数に比べて極めて大きく、同時に測定することはできなかったため図には記されていないが、吸着している水分子はガス放出量に大きく影響している。

なお、固体表面に気体分子が吸着する場合、その物理的な吸着力は、主に気体の種類(吸着質)によって決まり、固体の種類(吸着媒)による影響は比較的小さいことから<sup>(11)</sup>、高分子材料においても、その表面にはガス分子の吸着が生じているものと考えられる。また、各種の高分子材料および金属を真空中に置いた場合のガス放出量を測定した結果<sup>(5)</sup>によれば、FEP を含む高分子材料の方が金属材料よりもガス放出量が多く、従って FEP

においてもガス分子の吸着が生じているものと考えられる。ガス分子が H<sub>2</sub>O のように永久双極子モーメントを持つ場合には吸着が生じやすくなるため、通常の空気中では特に水分子が固体表面へ著しく吸着する。これは、上で述べた電子線照射時のガス分子増加量の質量分析結果で水分子が圧倒的に多いことから示されている。

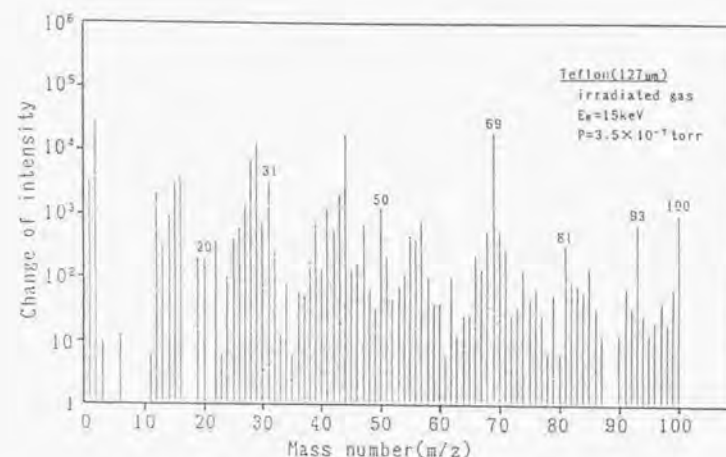


図4.9 FEP の電子線照射時放出ガス分子スペクトル

#### 4.3.2 放電発生時の圧力変化

放電時における真空容器内の圧力変化は、試料表面から放電により放出されたガス分子によってもたらされるので、この圧力変化の値によって、放電により試料が分解、放出される程度を知ることができるはずである。そこで真空容器内部の、放電発生前と放電発生時の圧力変化のピーク値を電離真空計により測定した。なお、放電回数の少ない段階では試料表面の吸着物質等の影響が大きいためと考えられる。その影響を軽減するために放電 10 回目以後 20 回の放電について、FEP を使用した場合を図4.10(a)に、PET を使用した場合を図4.10(b)に示す。いずれの試料の場合も、厚さ 25  $\mu$ m においてばらつきが大きく、圧力変化も大きな値となっている。電離真空計の応答速度は、放電現象の進展速度と比べた場合、非常に遅いが、真空装置の排気速度等が同一の条件下で、各試料の放出ガス量の差異を検討するために利用することは可能である。図4.10(a)および

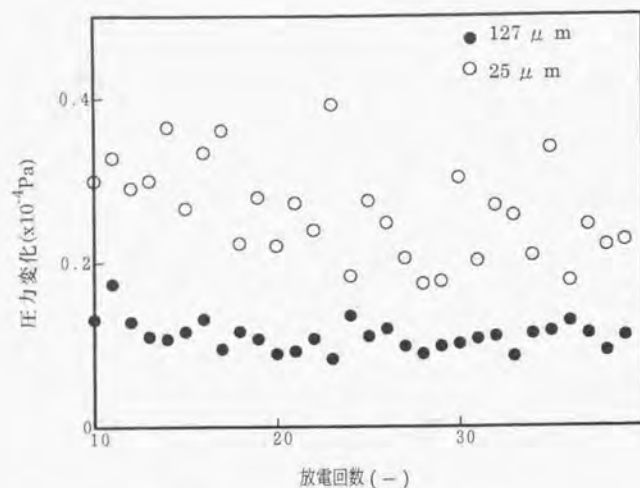


図4.10 (a) 放電発生時の圧力変化 (FEP)

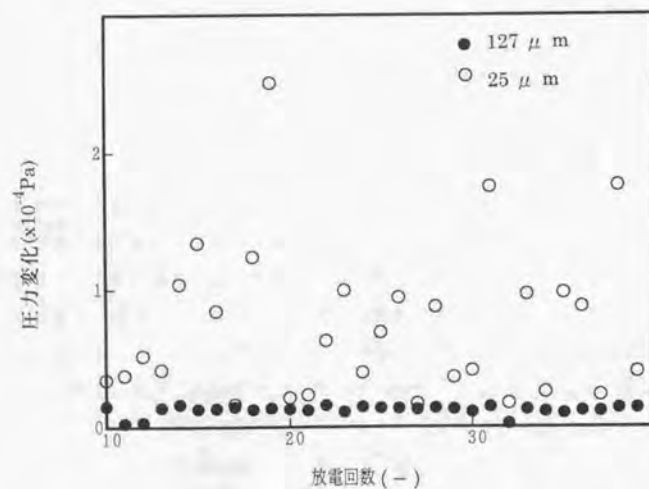


図4.10 (b) 放電発生時の圧力変化 (PET)

(b)の各試料の圧力変化の平均を求めた結果を表4.2に示す。各試料とも厚さ  $127 \mu\text{m}$  のものは、放電形態は沿面放電であり、 $25 \mu\text{m}$  では試料の電子線照射面と裏面とを貫通するバンチスルー放電となる。

表4.2 放電発生時の圧力変化平均値

	FEP	PET
$25 \mu\text{m}$	$2.4 \times 10^{-5}$	$6.8 \times 10^{-5}$
$127 \mu\text{m}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$

単位:Pa

表4.2より、FEP および PET の、いずれの試料でも厚さ  $25 \mu\text{m}$  の場合に圧力変化が大きい。このことから沿面放電の場合に比べて、バンチスルーが生じた場合に放出ガスが多量に発生するものと考えられる。放電の形態を調べるために、各試料の放電の静止写真を撮影し、輪郭の鮮鋭化処理<sup>(12)</sup>を行なった。その結果の例を写真4.1～写真4.4に示す。



写真4.1 試料表面上の放電光静止写真 (FEP,  $127 \mu\text{m}$ )



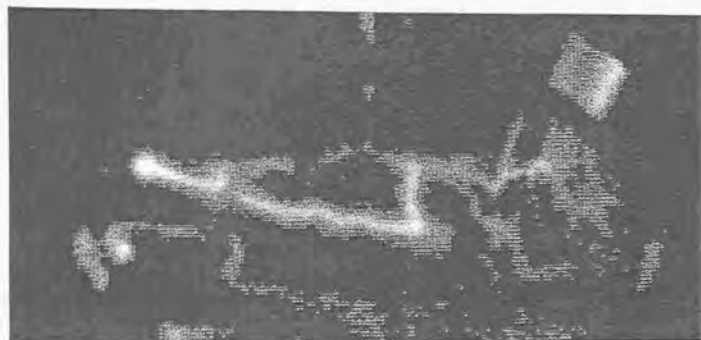


写真4.2 試料表面上の放電光静止写真 (FEP, 25  $\mu$  m)

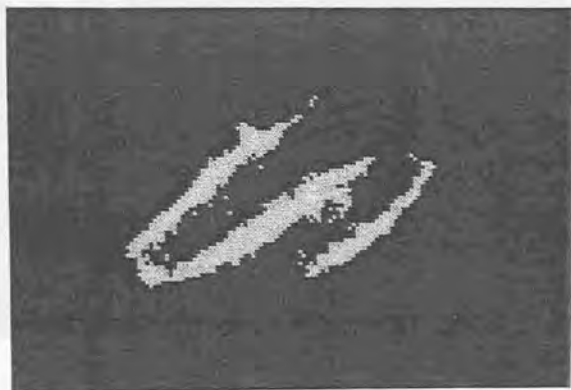


写真4.3 試料表面上の放電光静止写真(PET, 127  $\mu$  m)

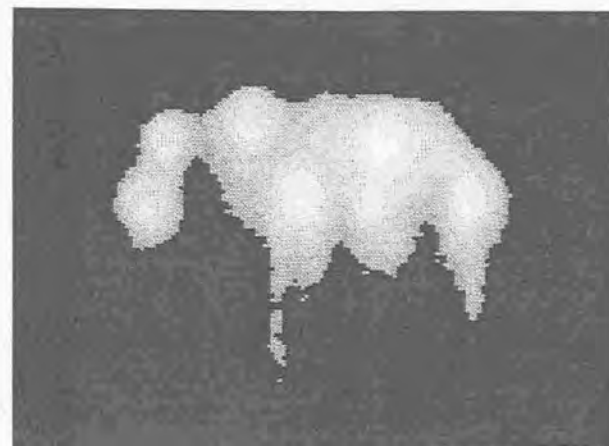


写真4.4 試料表面上の放電光静止写真(PET, 25  $\mu$  m)

写真4.1では、放電光が試料表面に樹枝状に広がる様子が見られる。写真4.2では、数箇所領域において、放電光の集中が見られる。この位置には貫通孔が形成されており、貫通孔部分において強い発光が発生していることがわかる。また、写真4.1と比較して樹枝状の放電の広がりが少なく、限られた領域で放電路が形成されている。写真4.3では貫通孔は形成されていないが、放電路の広がりは少ない。写真4.4では貫通孔が形成され、発光はこの部分に集中しており、放電路の広がりは殆ど認められない。このようにパンチスルー放電時には、放電のエネルギーが貫通孔付近および限られた放電路に集中することによって試料の分解に伴うガスが強く発生し、放出ガスが沿面放電の場合よりも多く生じると考えることができる。

さらに、第5章で述べる放電光強度測定装置を使用して、各試料上で発生した放電光強度の時間変化を測定した結果の例を図4.11～図4.14に示す。

厚さ 25  $\mu$  m の試料上での放電光強度の変化を示した図4.11、図4.13は、放電開始時のピークが鋭く立ち上がっているのに対して、127  $\mu$  m の試料の場合の図4.12、図4.14は、ピークが複数に分れており、放電が時間的にも分散していることがわかる。放電により生じる真空容器内の圧力変化は、厚さ 25  $\mu$  m の試料の方が大きいことから、放電により試料から発生するガスの量は、時間的、空間的に広がった放電が複数回発生

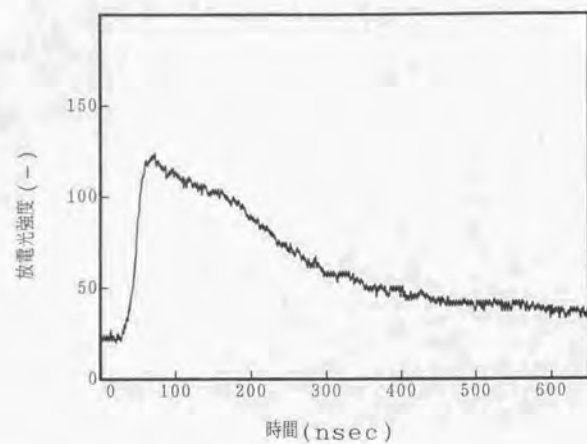


図4.11 放電光強度の時間変化(25  $\mu$  mFEP)

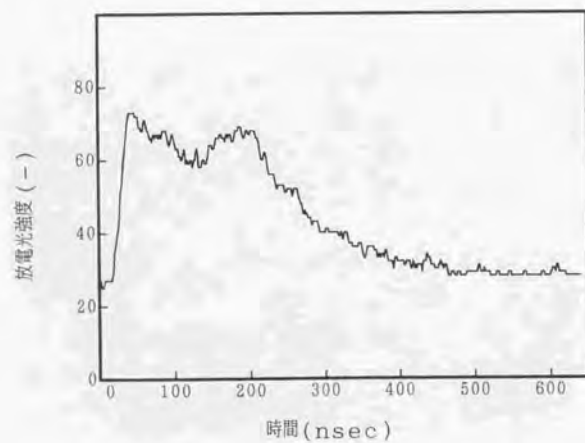


図4.12 放電光強度の時間変化(127  $\mu$  mFEP)

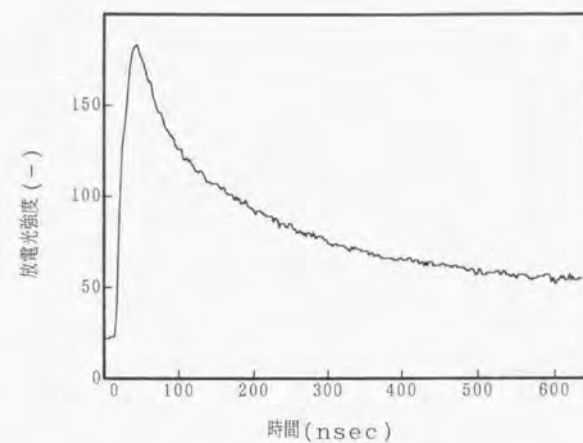


図4.13 放電光強度の時間変化 (25  $\mu$  mPET)

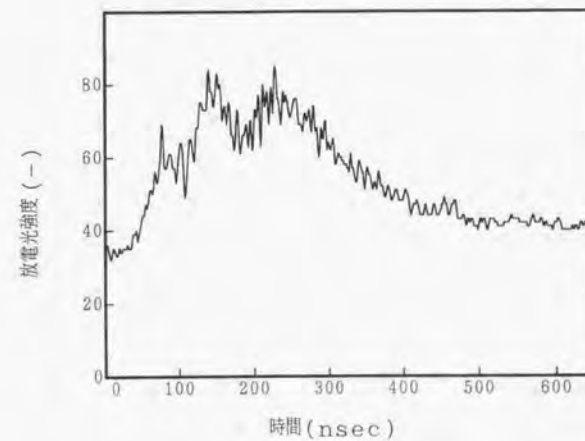


図4.14 放電光強度の時間変化 (127  $\mu$  mPET)



する場合よりも、短時間の間に狭い範囲に集中した放電、すなわちエネルギー密度の最大値が大きいと考えられる放電が1回発生する場合の方が大きいことが、この放電光波形からも示された。

#### 4.3.3 放電時のガス質量分析

放電時における真空容器内ガス分子の質量分析を、放電によって発生する可能性があると考えられる各試料の構成分子フラグメントに相当する  $C_mF_n$ ,  $C_mH_n$ , さらに化学反応により生じる可能性のある  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ , および試料表面に吸着しやすく、試料表面での放電に影響を与える可能性が大きいと考えられる  $H_2O$  に着目して行った。それらのなかで質量数 18( $H_2O$ ), 28( $CO$ ,  $C_2H_4$ )および 44( $CO_2$ )のガスについて、質量分析器のセンサに検出されるイオン電流値の放電前の値と放電発生時のピーク値との差を、放電規模による放出量の変化を補正するために電離真空計によって測定された圧力変化量を用いて、圧力変化が  $1.0 \times 10^{-6} Pa$  の場合に規格化したものを表4.3に示す。

測定対象とした質量数 44 程度までの、あまり質量数が大きくない範囲では、イオン電流値は放出されたガス中の当該質量数分子の変化量にほぼ比例する値となる。表中の+記号は当該質量数のガスの増加を、-記号は減少をあらわしている。

表4.3 放電時の質量分析器イオン電流変化量の比較

	質量数		
	18	28	44
FEP 25 $\mu m$	-2.0	+1.4	+0.9
FEP 127 $\mu m$	+0.1	+1.9	+1.2
PET 25 $\mu m$	-1.8	+9.3	+2.8
PET 127 $\mu m$	-1.9	+5.2	+3.1

単位:  $\times 10^{-9} A$

いずれの試料の場合でも、炭化水素系のフラグメントが放電時に発生していることがわかる。PET および FEP で共通に測定した、質量数 28( $CO$ ,  $C_2H_4$ )や 44( $CO_2$ )では、PET の方が増加量が多く、FEP に比べ、放電による分解が激しいことがわかる。

水分子に関しては、厚さ 25 及び 127  $\mu m$  の PET と、25  $\mu m$  の FEP では放電後に

減少し、127  $\mu m$  の FEP では殆ど変化が見られなかった。この 127  $\mu m$  厚同士の2種類の試料の場合、放電の形態はいずれも沿面放電であるが、127  $\mu m$  PET では 127  $\mu m$  FEP よりも放電光が限られた領域から集中して発生し、しかも光量は大きい<sup>(13)</sup>。したがって、パンチスルーや PET 上での沿面放電のような、エネルギー密度の最大値が大きな放電と、真空容器内の  $H_2O$  分子の減少に関連がある可能性がある。

$H_2O$  減少の機構としては、放電によって H と O に分解された後、水素ガスや酸素ガスとなる場合の他、放電によって発生した炭化水素系のフラグメントとの結合が考えられる。特に試料の分子構造中には水素原子が存在しない FEP の場合においても、放電時に  $C_mH_n$  の増加が見られることから、表面に吸着された  $C_mH_n$  以外に、試料表面近傍の水分子の分解によっても水素原子が供給されているのであろう。

放電を繰り返した各試料の表面を観察すると、試料表面の放電による損傷は PET の方が FEP に比較して明らかに大きい。この点から、PET の放電が限られた部分に集中する傾向がある理由として、PET においては試料構成分子のフラグメントに由来するガスが FEP と比較して大量に放出される傾向があるが、このような放出ガスが放電回路の導電度を高め、放電エネルギーの限られた部分への集中をもたらすという機構の存在が考えられる。

#### 4.4 有機絶縁材料の劣化診断法への応用

電子線照射によって高分子材料からはガス放出がおこなわれるが、この現象を利用して地上で使用される高分子絶縁材料、特に屋外で使用され、しかも劣化によりその機能に問題の発生しやすいと考えられる疎水性高分子絶縁材料の特性評価に応用することで、新たな高分子絶縁材料評価方法の可能性を検討した。

屋外で使用される碍子やブッシング等の絶縁物の表面が塩や塵によって汚損し湿潤条件下で導電性の膜が形成されるとフラッシュオーバを発生し、絶縁物の損傷等の障害を引き起こす原因となる。海浜地区等では特に塩分を含んだ汚損が激しいために重要な問題になっている。このような汚損面におけるフラッシュオーバの機構は絶縁物表面に形成される塩水等の導電性の膜と密接に関連していることが知られている<sup>(14)</sup>。これに対して有機絶縁材料を使用して絶縁物に濡れにくい性質を持った表面、すなわち疎水性表面を作り、濡れによる導電性の膜が形成されるのを防ぐ方法がノンセラミック碍子で利用されている。この有機絶縁材料の疎水性は、材料の種類によって異なり、また紫外線の照射や各種のガス等の劣化要因の影響により変化する。

このように疎水性を向上させる目的で使用されるようになっている有機絶縁材料であるが、その特性の評価法は未だ合意されていないのが現状であり、試験法としては実際に屋外において長期にわたって課電しながらフラッシュオーバーの生じる頻度を記録したり、表面の状態を観察するといった方法や<sup>(16)</sup>、ウェザオメータ等により加速劣化した試料に対して同様の試験を行なうといった方法が一般的である<sup>(17)</sup>。紫外線照射を受けた高分子材料は、分子鎖の切断や酸化などの変化が生じていることが予想される。試料に生じたこのような変化を検出するために、真空容器中で試料に電子線を照射することによって発生する各種のガス分子の質量の分布を質量分析器によって測定した。

使用した試料は実際にノンセラミック碍子の材料として使用されている silicon rubber (SR) および ethylenepropylenedimonomer (EPDM)、また比較のために polymethylmetacrylate (PMMA)で、50x50mm に切断したものを使用した。各試料は紫外線照射に先立ち、エタノール中で超音波洗浄を 10 分間行ない表面に付着した油脂や離型剤などを取り除いた。

試料に対して加速劣化を行なうために 400W 低圧水銀ランプを用い、試料から 15cm の距離で照射を行なった。この水銀ランプのスペクトルを図4.15に示す。

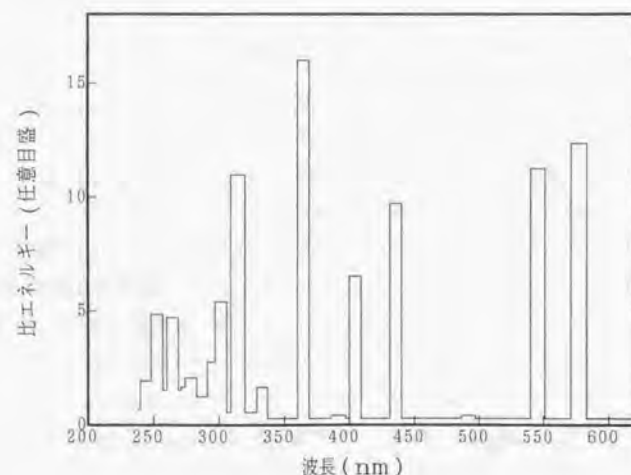


図4.15 水銀ランプパワースペクトル

照射強度については中心波長 365nm の紫外線照度計によって測定し、 $2.2\text{mW/cm}^2$  を得た。実験は、真空容器中を約  $1.33 \times 10^{-5}\text{Pa}$  の真空度に保ちつつ、5keV の電子線を  $17\text{nA/cm}^2$  の密度で照射し、電子線照射前および照射開始後 10 分経過時の真空容器中のガス分子の質量数の分布を測定した。

真空容器中には水分子が残留しており、その中の酸素原子と、劣化により結合の弱くなった試料内の原子が電子線照射により酸化等の反応を起こすことが考えられる。そこで電子線を照射した場合の真空容器中の二酸化炭素の変化に注目し、各試料について紫外線照射時間と二酸化炭素放出量の変化量との関係を測定した。結果を図4.16に示す。

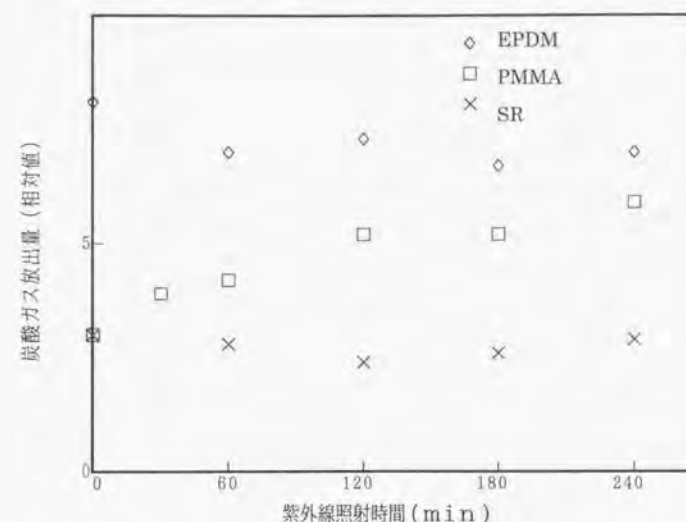


図4.16 試料への紫外線照射時間と電子線照射のもとでの二酸化炭素放出量の関係

PMMA においては紫外線照射時間の増加に伴い、二酸化炭素の放出量が増加しているのに対して、SR では 4 時間までの紫外線照射に対して二酸化炭素の放出量には有意な変化は見られない。さらに試料無しの状態での変化量との差も小さく、電子ビームを照射しても炭素を含むフラグメントがあまり放出されないことがわかる。これは紫外線照射に対する接触角および表面自由エネルギーの値の変化の傾向と良く一致しており、SR が紫外線照射に対してあまり変化しないことを示しているものと考えられる。

EPDM に関しては、紫外線照射時間に対する二酸化炭素放出量の変化の割合は少ない。



しかし電子ビーム照射による二酸化炭素放出量は他の試料に対して大きい。これは本来 EPDM 自体が電子ビームによってフラグメントを生成しやすいことを示しているものと考えられる。また EPDM の放出ガスの質量スペクトルを測定したところ、質量数 77、78 および 119 にビーム照射により減少を示すピークがある。77 および 78 はフェニル基を示すものであり、119 はフェニルアセトンを示すピークである。これらのピークが電子ビームの照射により減少するということは、EPDM からこれらの成分が定常的に放出され、電子ビームによって分解されているものと考えられる。

PMMA の場合は、試料分子が紫外線照射の影響を受けてカルボニル基等の極性基に変化し、さらに電子線の照射によって二酸化炭素ガスとなって放出されているものと考えられる。試料中のカルボニル基の量の変化について赤外吸収分光分析により解析を行なった結果を図4.17に示す。

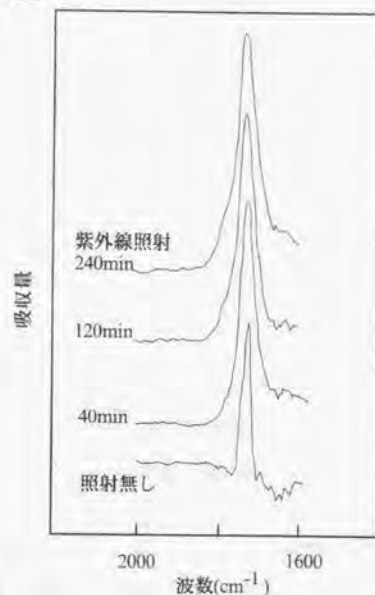


図4.17 PMMA の赤外吸収スペクトル測定結果

PMMA の場合、構造式は図4.18で示される。この構造式から明らかなように、PMMA は本来その構造中にカルボニル基を持っており、酸化によって新たにカルボニル基が増

加しても、本来存在するカルボニル基による吸収ピークに隠れてしまうことが考えられる。しかしながら、上記の構造中に新たなカルボニル基が生成するならば、結合様式が異なるはずであるから、PMMA 本来のカルボニル基による吸収ピークとは少し異なる位置に新たな吸収ピークが生成してもおかしくはない。

紫外線照射前の試料では、カルボニル基の量を示す  $1700\text{cm}^{-1}$  付近の吸収ピークは細い形をしており、紫外線照射 20 分、40 分後も、ピークの細さについては殆ど変化は見られない。しかし紫外線照射 120 分後の試料では、ピークの下部が広がっており、更に紫外線照射 240 分後の場合は波長の短い方（図の左方向）の下部に膨らみが見られ、結合様式の異なるカルボニル基が生成している可能性を示唆している。SR および EPDM については、紫外線照射 20 時間後までの試料に関して測定を行なったが、 $1700\text{cm}^{-1}$  付近の吸収ピークの変化は検出できなかった。したがって少なくとも酸化によるカルボニル基の生成は起こっていないことがわかる。

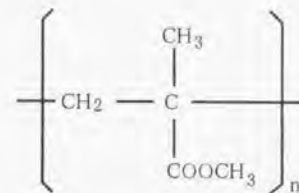


図4.18 PMMA の分子構造

このように電子ビーム照射により放出されるガスの質量スペクトル分析によって、PMMA の場合には強く劣化した試料についても、劣化の程度を測定することが可能であることがわかり、有機絶縁材料の課電によらない劣化評価方法として応用できる可能性が示された。

#### 4.5 まとめ

本章では、宇宙環境を模擬した真空容器中での、人工衛星表面材料に対する電子線照射による帯電放電現象に伴うガス放出現象に関して検討を行なうために、電子線照射時ならびに放電発生時の真空容器内のガス分子の質量分析、放電静止写真および放電光強

度の時間変化の測定を行なった。

質量分析の結果、電子線照射を受けた状態で、試料表面からのガス放出がかなり認められた。これは、人工衛星軌道における宇宙環境では、相対的に多量のガス放出量であると考えられ、放電現象に関与している可能性のあることがわかった。

放電光が試料上の一部の領域に集中する傾向を持つ PET の場合には、試料表面の放電による損傷が FEP に比較して大きいことから、試料から放出されたガスが、放電路の導電度を高め、放電が限られた部分へ集中するという機構が考えられる。

放電時に放出されるガス分子の分析結果をもとに、FEP と PET を比較した場合、PET の方が一酸化炭素や炭化水素ガスの放出が多く、FEP フィルムに比べて、放電により、その構成分子が分解、放出されやすいことが示された。この点は材料選定の際に考慮する必要がある。

さらに  $127 \mu\text{mFEP}$  以外の試料では、放電後に容器中の  $\text{H}_2\text{O}$  ガスが減少した。試料によって放電の形態に差があることから、放電形態と  $\text{H}_2\text{O}$  の分解の間に関連性が存在することが示された。 $\text{H}_2\text{O}$  は吸着しやすいことから、人工衛星軌道上でもなお表面に残留している可能性があり、人工衛星表面材料における放電形態の検討においては、本来高真空の宇宙環境下であっても、このような吸着分子に関して考慮する必要があることが示された。

放電時に放出されるガスについて従来行なわれた報告は、その放出量と放電頻度との関係について検討したものがほとんどであった。本章では、放電時に放出されるガス分子のスペクトルを分析し、特定の分子量のガスの増減から放電機構等について検討するという従来にない角度からの考察を試みた。また、真空容器中での電子線照射を応用しての、屋外用有機絶縁材料の劣化評価法として電子線照射時のガス分析を行なう方法を新たに提案し、その方法を実際に利用できる可能性を示した。

## 文献 [第4章]

- (1) F. L. Bouquet and C. R. Maag : "Ground Radiation Tests and Flight Atomic Oxygen Tests of ITO Protective Coatings for Galileo Spacecraft", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-33, p. 1408 (1986)
- (2) H. C. Miller : "Surface Flashover of Insulators", IEEE Trans. Electric Insul., Vol. EI-24, p. 765 (1989)
- (3) L. Levy, R. Reulet, J. M. Siguier and D. Sarraill : "Discharges Triggered on and by Electron Bombarded Dielectrics", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-38, p. 1635 (1991)
- (4) 熊谷, 富永 編: 真空の物理と応用 (昭45) 裳華房
- (5) 麻蒔立男: 薄膜作成の基礎 (平 8) 日刊工業新聞社
- (6) A. Rosen, "Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-23, p. 1762 (1976)
- (7) A. Bogorad et. al, "Electrostatic Discharge Induced Thermo-Optical Degradation of Optical Solar Reflectors", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-38, p. 1608 (1991)
- (8) A. Bogorad et. al, "Relation between Electrostatic Discharge Rate and Outgassing Rate", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-36, p. 2021 (1989)
- (9) H. G. Steffens, "Radiation Effects on Electrical Insulating", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 4, p. 30 (1988)
- (10) 山田弘善, 松田純夫: 「電子機器に対する宇宙環境」, 電子通信学会誌, Vol. 66, No.3, p.254 (昭 58)
- (11) 山科俊郎, 広畑裕子: 真空工学 (平 3) 共立出版
- (12) 長谷川, 他: 画像処理の基本技法 (昭 61) 技術評論社
- (13) 小松原, 石井, 津村: 「電子線照射された高分子フィルム上の沿面放電現象の観察」, 電気学会論文誌 A, Vol. 112, p. 401 (平 4)
- (14) K. Naito, K. Morita, Y. Hasegawa and T. Imaoka : "Improvement of the dc Voltage Insulation Efficiency of Suspension Insulators under Contaminated Conditions", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.



El-23, p. 1025 (1988)

- (15) G. R. Homan and C. Lee, U.S. Patent 4177322 (1979)
- (16) R. van der Huir and H. C. Karner: "Evaluation of Polymeric Insulating Materials for HV Outdoor Application", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, 30.02 (1989)
- (17) Elbadri M. Sherif and Antonios E. Vlastos: "Influence of Ageing on The Electrical Properties of Composite Insulators", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, 51.01 (1988)

## 第5章 放電光の検討

### 5.1 はじめに

真空環境下で高分子フィルムに対して電子線を照射した場合に発生する放電現象に伴い、試料押さえ枠や試料背後電極には電流が流れるとともに、放電光が発生する。フィルム上での放電の形態は、電子線の照射エネルギー、試料の種類や厚さなどによって異なり、たとえば 20keV の電子線を照射した場合に、25  $\mu\text{m}$  の FEP フィルムでは貫通放電が発生し、127  $\mu\text{m}$  では沿面放電が発生する<sup>(1)</sup>。このとき測定される放電電流波形や、目視される放電光の形態も異なることから、放電光を測定することにより放電機構に関する知見が得られる可能性が考えられる。

放電時に発生する放電光に関しては、Balmain ら<sup>(2)</sup>による、FEP および PET フィルム上での沿面放電の進展速度の測定や、Balmain と Dubois<sup>(3)</sup>による FEP, polyimide, PET の放電時に試料押さえ枠に発生する電流のピーク値、継続時間、放出される電荷等の測定結果が報告されている。放電時に発生する放電光には、発光に関与する各種のラジカルからの特定のスペクトルの光を含んでいることが考えられる<sup>(4)(5)</sup>。このような放電時の発光スペクトル特性から放電機構に関する知見を得ることを目的として、本章では人工衛星の熱制御材料として使われている高分子フィルムを試料として、試料表面の放電光強度の時間変化、放電光スペクトル、放電電流等に関して測定を行った。さらに、これらの結果にもとづき、真空環境下での高分子フィルム表面における放電機構について検討を行なった。

### 5.2 実験方法および試料

#### 5.2.1 試料

試料として、衛星の熱制御材料として用いられている FEP および、PET のフィルム（厚さ 127  $\mu\text{m}$ ）を使用した。各試料は、あらかじめエタノール中で 10 分間の超音波洗浄を行い、表面に付着している油等を除去し、デシケータ中に 1 時間以上保存し乾燥後、試料台に固定し真空容器中に設置した。

電子線が照射される面は、直径 40mm の円形である。本章の実験では、試料表面に沿面放電を発生させる必要がある。予備実験において、試料をアルミニウム製押さえ枠で直接固定した場合には、放電発生頻度が著しく低下し、放電間隔が数十分におよぶ場合

もみられたため、沿面放電が生じ易くなるように、試料と試料押さえ枠との間を 1mm 厚の polymethylmethacrylate (PMMA) 製スペーサで絶縁した。これにより平均して 30 秒から 1 分程度の時間間隔で試料表面での放電が発生するようになった。

試料押さえ枠は、第4章で用いたものと同じアルミニウム製の円形のものを用いた。試料表面での放電発生時に流れる電流を測定するために、試料押さえ枠は 0.1  $\Omega$  のシャントを介して接地した。試料背面の電極についても 0.1  $\Omega$  の電流シャントにより接地し、放電に伴って電極に流れる誘導電流を測定した。電流測定系のステップ応答の立ち上がり時間は 8ns である。

### 5.2.2 真空容器および電子ビーム照射装置

真空容器内は、約  $1.3 \times 10^{-4}$  Pa の真空度にした後、実験を行なった。

電子ビームのエネルギーは 21keV に保ち、接地された試料台全面に対して照射した。本章の実験における試料面の電子ビームの電流密度は約  $30 \text{ nA/cm}^2$  である。

### 5.2.3 放電光分光測定装置

試料表面からの放電光は真空容器側面に作られたビューイングポートの石英ガラスを通して、石英ガラス製のバンドルファイバ (200  $\mu\text{m}$   $\phi$  x 200 本、長さ 30cm) の端面に受光した。ファイバは 100 本ずつに分割し、一方は分光器の受光窓へ接続し、他方は光電子増倍管受光部へ接続した。バンドルファイバを通じて分光器に受光した放電光から指定された波長の光のみを取り出し、分光器に取り付けられた光電子増倍管により、その強度を測定した。以後これをモノクローム光と呼ぶ。分割された、もう一方のバンドルファイバからの放電光は、分光することなく別の光電子増倍管に直接受光した。以後こちらをリファレンス光と呼ぶ。

光電子増倍管は図5.1の分光感度特性を持つ浜松ホトニクス製光電子増倍管 (R928) に、600V の電圧を印加して使用した。各々の光電子増倍管からの信号出力は 2 チャンネル 6 ビットのデジタイザによって、サンプルレート 1.2GHz で同時に記録した。これにより、特定の波長の光が放電光の中に占める割合の時間変化を放電初期から放電終了までの期間にわたり求めることが可能となる。

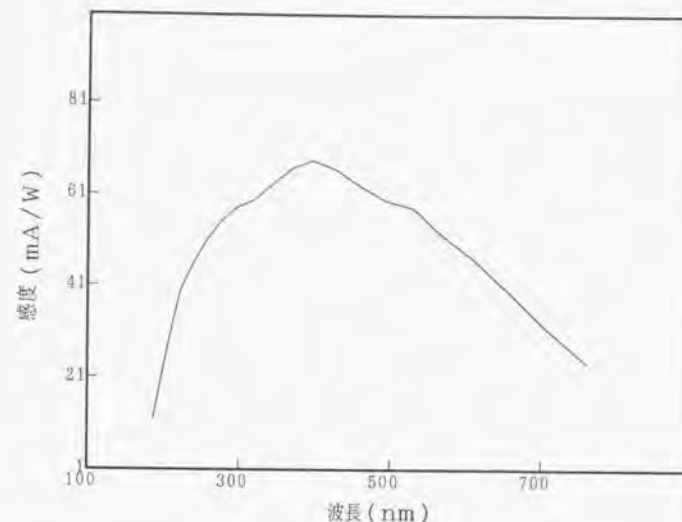


図5.1 光電子増倍管の感度特性

### 5.2.4 実験方法

試料に電子線を照射すると試料表面に負電荷が蓄積して電位が上昇し、電子線のエネルギーが十分に高ければ、試料の貫通破壊または沿面放電が生じて蓄積電荷が放電するが、本章の実験条件では主に沿面放電が生じる。このとき押さえ枠と背面電極に急峻なパルス電流が流れる。電子線の照射を続けられ、30 秒から 2 分程度の間隔で放電が繰り返し発生する。

前述の方法で得た放電光のリファレンス光および波長 300nm から 700nm の範囲のモノクローム光の強度は、コンピュータを介して一回の放電毎にそれぞれの波形をデジタル記録した。分光器は一度に一つの波長しか測定できないので、1 波長につき数回測定し、別の波長に移るといった操作をくりかえした。

使用した光電子増倍管および分光器は、それぞれ図5.1および図5.2に示すように波長によって感度が異なる。そのままでは異なる波長における光量の大きさの比較ができないために、モノクローム光波形は測定した波長によって感度の補正を行なった。光ファイバは石英ガラス製であり、使用した波長の範囲では均一な特性を持っており、光ファイ



管内を放電光が通過する際の感度補正は不要である。

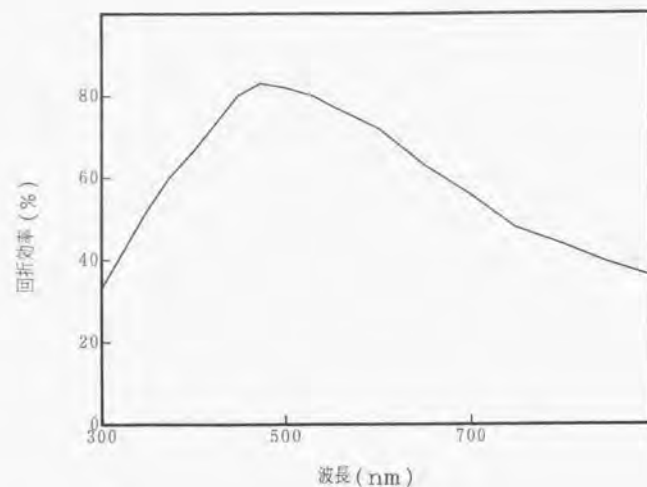


図5.2 分光器の感度特性

放電の規模には幾分かのはらつきがあり、それに伴って放電光の光量にも放電毎に変動が生じる。これを補正し、各波長の光がリファレンス光の中に占める割合を正確に求めるために、リファレンス光およびモノクローム光のそれぞれの放電光波形を放電の開始から終了まで積分して、各波長光量の積分値をリファレンス光積分値で正規化した。この処理により、放電規模の大小に関わらず目的の波長の光が放電光中に占める割合を求めることができた。また、真空容器内部の気体分子の質量分布を質量分析器によって測定した。実験装置の構成を図5.3に示す。

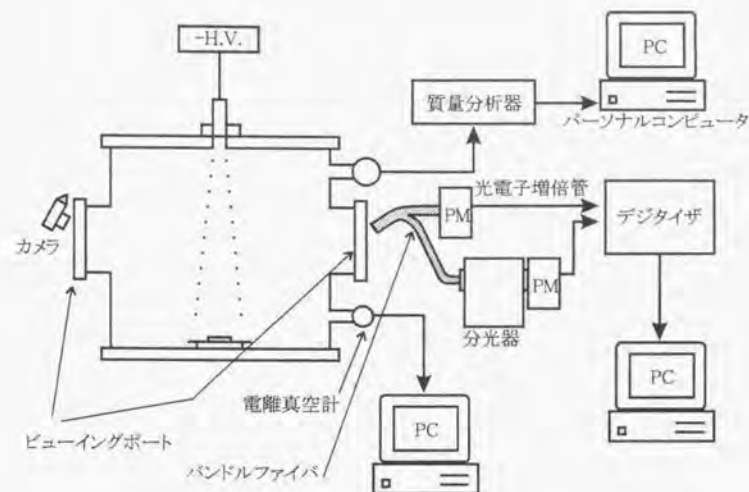


図5.3 装置の構成

## 5.3 結果および考察

### 5.3.1 放電光に対する水素原子の影響

実験開始前の真空容器内気体分子の質量分布測定の結果は、第4章の図4.4に示したものと同様である。水素原子と水が非常に大きな割合を占めていることを示している。水は真空容器壁面に吸着しやすく、水素ガスは分子量が小さく排気されにくいために残留ガス中の大きな割合を占めている。

放電時に発生する放電光は、発光に関与する各種のラジカル等からの発光により構成されている。放電自体は、第4章に示した各試料の放電光波形(リファレンス光)の測定例に示されたように、数百 ns 程度の時間で発光を終了する。

図5.4に FEP 及び PET 試料の、放電回数に伴うリファレンス光の積分値の変化を示す。放電1回目以後、数回は放電光量が徐々に低下していく傾向を示しているが、その後は、ほぼ安定している。これは試料表面に吸着していた水やその他の分子が、放電を繰り返すにつれて減少し、それにともなって放電光量が減少、安定化するためである可能性がある。

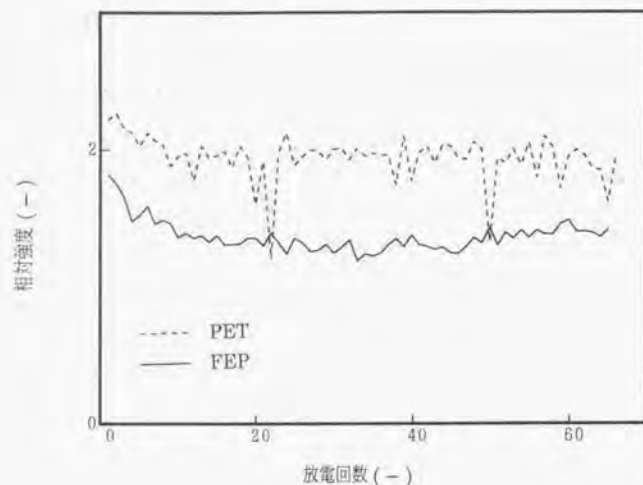


図5.4 リファレンス光積分値の放電回数に伴う変化

吸着分子のうち、最も大きな割合を占めていると考えられるのは水分子である。上に述べた放電開始直後の放電光量の変化の原因が表面吸着分子によるものであるのか、あるいは放電により試料自体が劣化するためであるのかを検討するために、水素原子の発光スペクトルである波長 656nm ( $H_{\alpha}$ ) の光量の放電回数に伴う変化を測定した。結果を図5.5に示す。

波長 656nm ( $H_{\alpha}$ ) の光量はリファレンス光と比較して、より顕著に最初の 10 回程度の放電の間に減少しており、さらにいずれの試料においても同様の傾向を示している。FEP においては、その構造式中には水素原子を含まないにもかかわらず、水素原子を含む PET と同様に、 $H_{\alpha}$  線の光量が大きく変化していることから、この放電開始直後の光量の変化は、放電による試料の劣化による影響ではなく、むしろ表面吸着物質の減少によるものであると考えられる。なお、この結果から放電光の分光測定は放電光量が安定すると考えられる放電回数 20 回経過以後に行なうこととした。

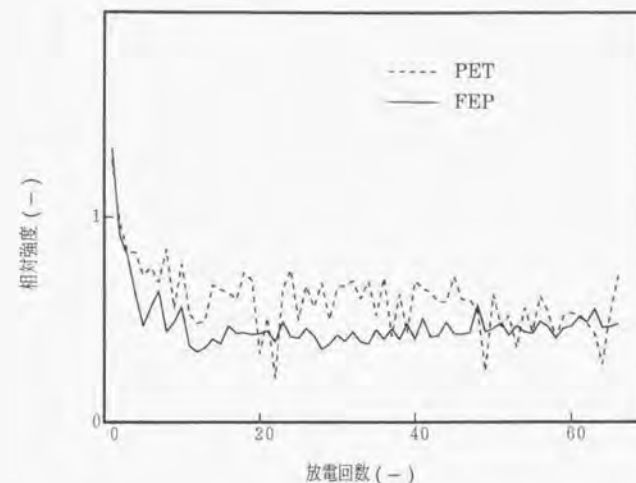


図5.5  $H_{\alpha}$  線 (656nm) 積分値の放電回数に伴う変化

### 5.3.2 放電光スペクトル測定結果

前述の方法で放電発生毎に同時に測定され、デジタル記録されたリファレンス光波形とモノクローム光波形に関して、光量の積分値をそれぞれ計算し、モノクローム光のリファレンス光に対する積分値の比を計算した。これを各波長において 4~5 回の放電について行ない、その平均値を求めた。FEP および PET の放電光の分光分析結果をそれぞれ図5.6、図5.7に示す。

FEP の場合は波長 390, 430, 470, 510, 550 から 560, 656nm 付近にはっきりとしたピークが見られる。また 310nm にわずかにピークと思われる部分が存在する。一方、PET の場合、これらのピークの他に、およそ 350 から 400nm に幅の広いピークが存在する。また 310nm にはピークは検出されていない。

390nm, 430nm および 470nm は CH 基, 510nm は  $C_2$  基のピークであると考えられる<sup>(6)(7)</sup>。FEP の場合にわずかに検出された 310nm のピークは OH 基のピークと考えられる<sup>(7)</sup>。第4章において図 4.3に示したように、OH 基は FEP の分子中には存在しない。



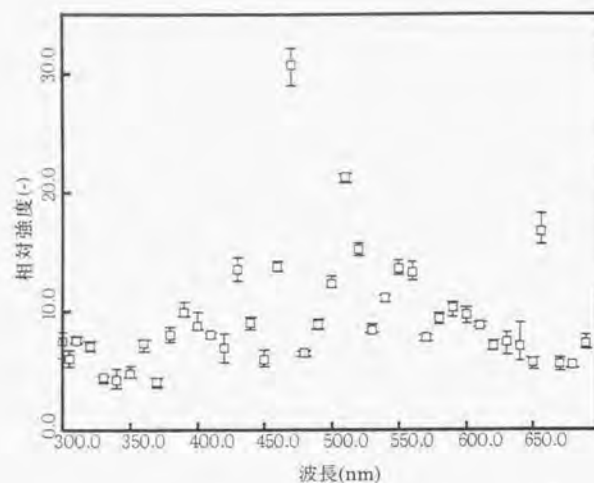


図5.6 FEPの放電光分光分析結果

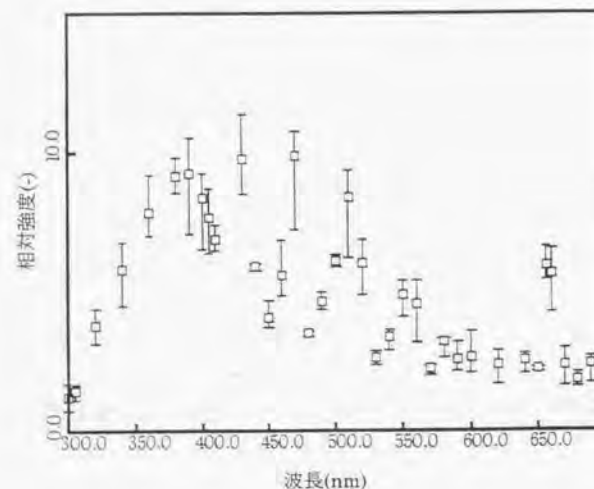


図5.7 PETの放電光分光分析結果

従って試料表面の吸着物質および真空容器中の水分子に由来するものである。FEP でわずかにピークが見られるのに対して、PET の場合には、このピークが現われていない。OH 基が試料構成分子中に存在しない FEP の場合でも観察されていることから、PET でも当然 310nm の発光は生じているはずであるが、測定結果には表れていない。その理由としては、PET の場合には約 350nm から 400nm に存在する幅の広いピークの端部に埋もれていることが考えられる。

$N_2$  のスペクトルに関しては、580nm 付近にはピークは観察されず、また、 $N^+$  のスペクトルについても、たとえば 570nm 付近にもほとんどピークは観察されず、中性原子の N についても、410nm 付近では特にピークはなく、窒素ガスは発光には特に関与はしていない。

### 5.3.3 放電路の温度の検討

一般に、CN 基はその生成に高エネルギーを必要とする（例えば、大気中でのカーボンアークでは、約 4000 K で生成する<sup>(8)</sup>）。大気中とは条件の異なる真空中においても、放電路内における単位体積および単位時間当たりのエネルギーの大きさに差があれば、CN 基の生成量に差が生じることが考えられる。

PET において特徴的な波長 370 から 400nm の幅の広いピークは、この CN 基のピークと思われる。炭素原子は FEP および PET の双方に存在し、窒素原子は真空容器中に気体として存在する。従っていずれの試料の場合でも CN 基のピークが検出されてもよいはずであるが、それにもかかわらず、PET のみにこのピークが現われている。このことから PET において、放電路内における単位体積および単位時間当たりのエネルギーが、より高い状態が生じているものと考えられる。リファレンス光量を 2 つの試料と比較すると、明らかに PET の方が大きかった。

### 5.3.4 放電光波形の検討

試料として厚さ 127  $\mu m$  の PET を使用した場合に、背面電極で測定された放電発生時の電流波形を、同時に測定された放電光波形（リファレンス光）とともに図5.8に例として示す。放電光波形が電流波形に対して 20ns 程度遅れているのは、光電子増倍管における電子走行時間による遅れである。両者の波形は対応しており、本章における実験条件下で放電現象を放電光によって検討することは妥当であると判断できる。

厚さ 127  $\mu m$  の FEP および PET について、リファレンス光および波長 656nm の光

( $H_{\alpha}$ ) の放電光量の時間変化 (放電光波形) の例を図5.9, 図5.10に示す。いずれの試料も、放電光波形は 2 つのピークを持っており、その時間間隔は、FEP フィルムで約 100ns, PET フィルムで約 50ns となっている。また、FEP の場合には、最初のピークは幅の狭いものであり、PET の場合には 2 つのピークは概ね同じ大きさを持っている。放電光波形には、このように放電の開始直後に第 1 のピークが現われ、その後第 2 のピーク (Peak No.2) が現れることが多い。特に FEP の場合に頻繁に見られる。いずれの試料の場合も、電子ビーム照射開始後、数回ないし十数回の放電を経た後に頻繁に見られるようになる。このような 2 つのピークが生じる機構として、電子線照射により試料表面の電位が上昇し、前駆的な放電 (peak No.1 に相当) が発生し、この放電によって電離した分子によって次の放電 (peak No.2) が生じるという機構が考えられる。

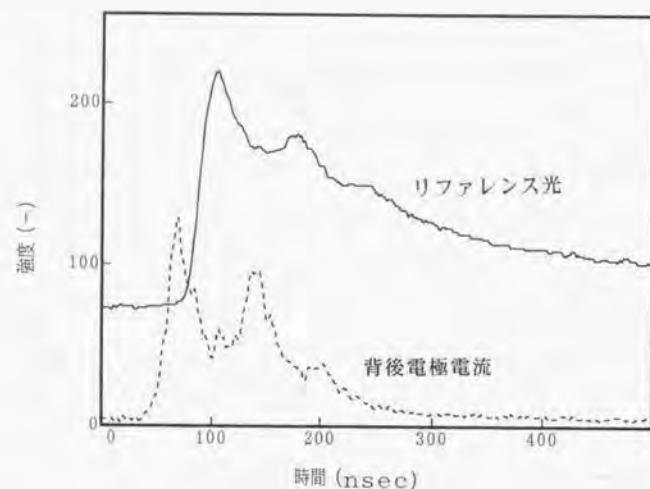


図5.8 PET における背面電極電流波形とリファレンス光波形

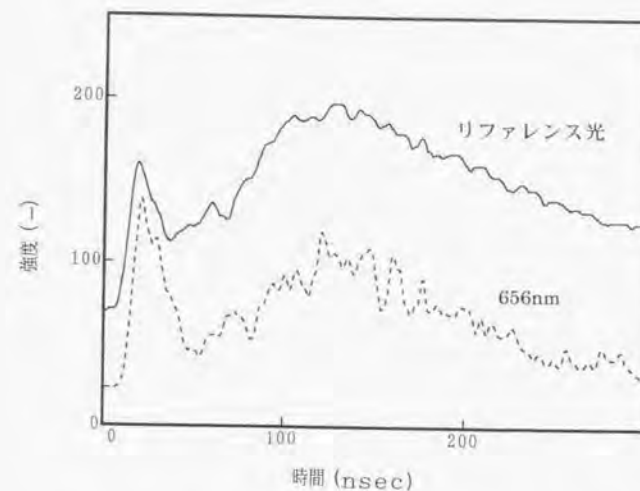


図5.9 FEP におけるリファレンス光及び  $H_{\alpha}$  の時間に伴う変化

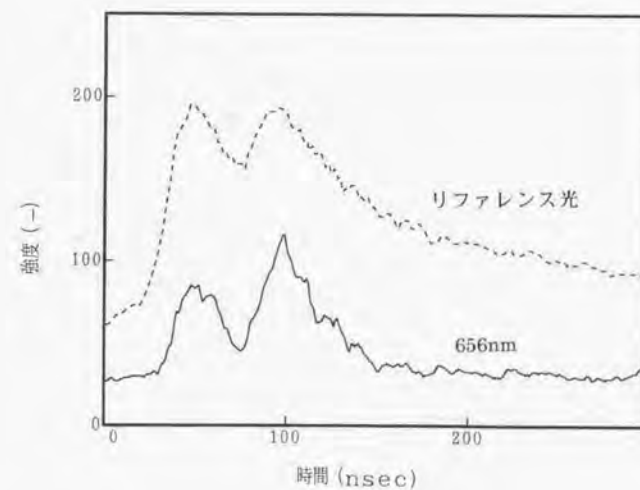


図5.10 PET におけるリファレンス光及び  $H_{\alpha}$  の時間に伴う変化



PETの場合、リファレンス光において図5.10に示した peak No.2は、peak No.1と比較して減少しているのに対して、 $H_{\alpha}$ 線は、むしろ peak No.2 が大きくなっている。PETにおいては、この傾向は頻繁に見られるものであるが、FEPの場合には、ほとんど見られない。この理由として、以下のことが考えられる。

水素は真空容器中には、水分子等の形で存在している。また PET 中には構成元素として存在するが、FEP 中には存在しない。図5.10の Peak No.1 で発生した放電によって、試料の PET 表面から放出された水素が 100ns 付近の Peak No.2 で発光するために、Peak No.2 において  $H_{\alpha}$  線の発光が強まっている可能性がある。しかし、放電光そのものは、リファレンス光波形から分かるように、No.1 のピークのほうが強い。従って、2つの試料のいずれについても数百 ns の間に複数の放電が生じているが、PET においては、それらの放電によって試料が分解されて構成元素の一つである水素が放出され、そのために No.2 のピークにおいて  $H_{\alpha}$  線の強度が増している可能性がある。

2つの試料の分解されやすさに関して検討するために、電離真空計を用いて放電前後での真空容器内の圧力変化を測定した。その結果、FEP では  $9.0 \times 10^{-6}$  Pa, PET では  $3.3 \times 10^{-5}$  Pa であった。この点から PET の方が FEP よりも放電によって分解、放出される分子が多いことがわかる。従って図5.10の Peak No.1 において試料から分解、放出された水素が、Peak No.2 での発光に寄与するために、PET において、 $H_{\alpha}$  線の波形の Peak No.2 が Peak No.1 よりも大きくなるという現象が容易に生じうるものと考えられる。

FEP に関しては、 $H_{\alpha}$  線強度において、放電開始時ピークの相対的な大きさは、リファレンス光波形の場合と比較して、かなり大きい。先に述べたように、FEP において  $H_{\alpha}$  線の発生源となっている水素は、表面に吸着した分子中もしくは真空容器中に存在する気体分子中のものである。この放電開始時ピークは、放電を繰り返しても現われる（逆に実験開始直後の放電では見られない）ことから、試料付近の空間に存在する残留気体分子中の水素が、かなり大きな影響を及ぼしていると考えられる。したがって、この放電開始時の放電光は、試料表面および試料面にごく近い空間で発生している可能性がある。

一方、PET の場合には、放電開始時ピーク（図5.10の Peak No.1）ではむしろ  $H_{\alpha}$  線光量は小さい。これは PET は構成原子として水素を含んでいるために、Peak No.2 では、Peak No.1 で放出された水素に新たに試料から分解された水素が加わるためであると考えられる。

このように、放電時には水分子に由来する水素原子が関与している。4.3.1で述べたように電子線照射時に放出される水分子のガスは、非照射時の容器内の水分子のガスに比べて非常に多く、電子線照射中の試料表面近傍の水分子のほとんどが電子線照射により試料表面から放出されたものであることを示している。したがって、放電に関与した水分子は、大部分が試料吸着ガス、あるいは試料内からの放出ガスと考えられ、真空容器内に残留している水分子の割合は極めて小さいものとみなせる。

### 5.3.5 放電光の波長成分の時間変化

放電時に発生する放電光中に占める波長 656nm ( $H_{\alpha}$ ) および、470nm (CH 基)<sup>(7)(8)</sup>の発光強度の相対的な割合の時間変化を求めた。結果を図5.11～図5.18に示す。横軸は放電開始後の経過時間、縦軸は任意目盛である。波長 656nm に関しては、127  $\mu$ m 厚の FEP のみが異なる傾向を示している。他の試料はいずれも 20～50ns の間にピークを示し、100～150ns までに急速に減少する。それに対して 127  $\mu$ m 厚の FEP のみが、はっきりとした時間変化を示していない。

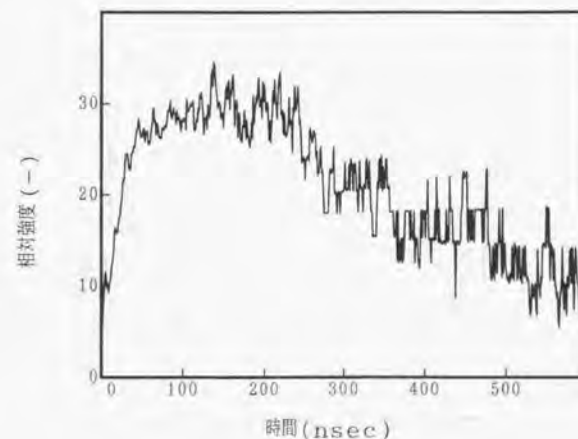


図5.11 放電光中の波長成分の時間変化 (FEP, 25  $\mu$ m, 470nm)

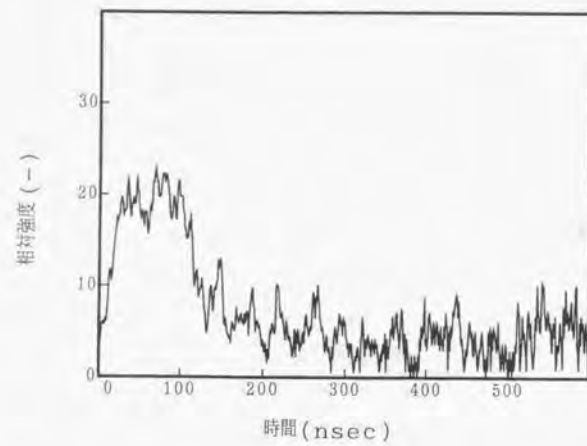


図5.12 放電光中の波長成分の時間変化 (FEP, 25  $\mu$  m, 656nm)

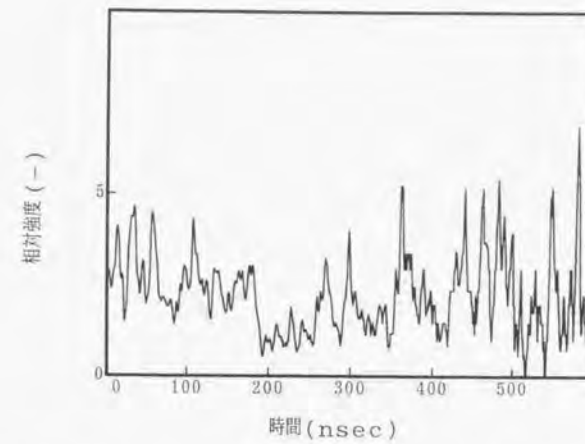


図5.14 放電光中の波長成分の時間変化 (FEP, 127  $\mu$  m, 656nm)

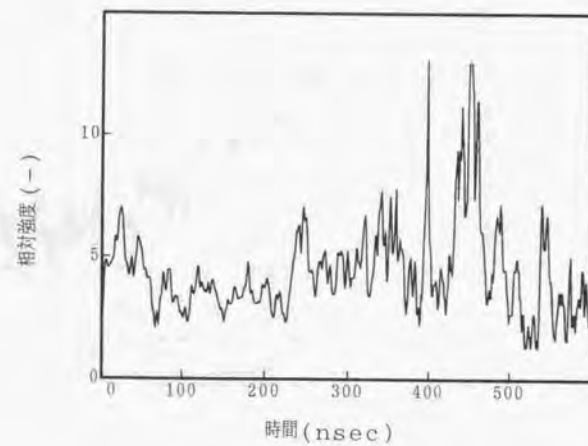


図5.13 放電光中の波長成分の時間変化 (FEP, 127  $\mu$  m, 470nm)

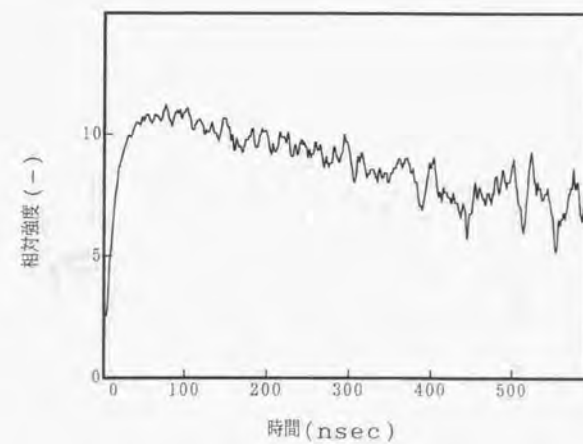


図5.15 放電光中の波長成分の時間変化 (PET, 25  $\mu$  m, 470nm)



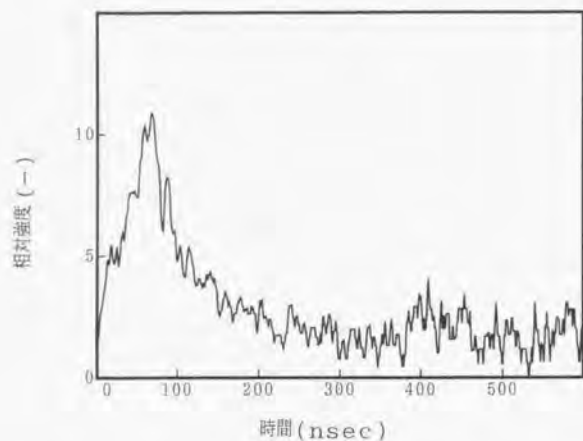


図5.16 放電光中の波長成分の時間変化 (PET, 25  $\mu$  m, 656nm)

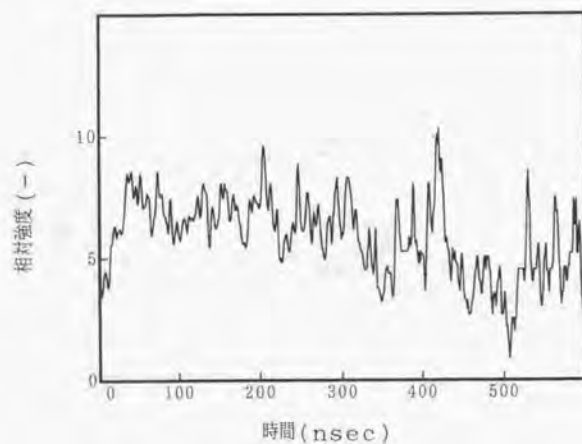


図5.17 放電光中の波長成分の時間変化 (PET, 127  $\mu$  m, 470nm)

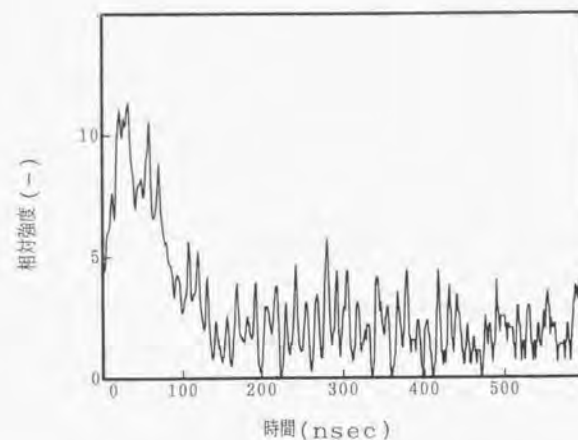


図5.18 放電光中の波長成分の時間変化 (PET, 127  $\mu$  m, 656nm)

波長 470nm に関しては、127  $\mu$  m 厚 FEP 以外の試料では、放電開始後約 100ns までは、やや光量の比率が増加し、その後緩やかに減少しており、放電の初期において急激に変化する 656nm の場合との相違がみられる。また 127  $\mu$  m 厚 FEP については、656nm と同様に、はっきりした時間変化は見られない。

127  $\mu$  m 厚 FEP 以外の 3 種類の試料については、656nm と 470nm の各波形の違いから、放電伸展初期（放電開始から 50ns 程度までの期間）には水素原子が相対的に強く関与していると考えられる。また、25  $\mu$  m 厚の試料の場合には、分子構造中に水素原子を含まない FEP と、水素原子を含んでいる PET の両方について同様の傾向が見られる。これは、放電伸展時に試料表面近傍の水素を含む物質（主に水分子）が分解され、それにより発生した水素原子が発光に関与しているが、それらの水素原子による発光への関与は、100ns~150ns 程度の時間で減少していくのであろう。宇宙空間における水素原子の密度は、例えば高度 1000km で  $1\text{cm}^3$  あたりで  $10^5 \sim 10^7$  程度とされ<sup>(9)</sup>、それ自体はわずかであるが、人工衛星自体から放出されるガスに含まれる量は、無視できないものと

考えられる<sup>(10)</sup>。

一方、試料のフラグメントである CH ラジカルのような炭化水素系のラジカルは放電による試料の分解により発生するが、放電光中に占める CH ラジカルからの発光の割合の時間変化を示す図5.11、図5.13、図5.15、図5.17からわかるように、放電の伸展時に発光に強く関与するといった傾向は見られず、放電終了までその比率はそれほど変化していない。したがって放電継続中、フラグメントの放出と、その発光は、放電光強度（リファレンス光強度）にほぼ比例した大きさを推移している。

127  $\mu$  m 厚 FEP では、他の試料と異なり、各波長の放電光強度の相対的な比率の時間変化がほとんど見られず、放電の形態の相違に関連があるものと考えられる。放電の静止写真の検討から明らかになったように、127  $\mu$  m 厚 FEP における放電は、各試料の中では最も放電のエネルギーの密度が低いために試料表面近傍の水分子の分解があまり生じていないものと推測される。試料厚さが同じであっても、実験終了後の試料表面の状態を比較すると、PET では無数の細かい線状の放電痕跡が肉眼で観察されたのに対して、FEP ではほとんど見られないことから、PET は放電により損傷しやすいことがわかる。試料の分解により発生したガス分子は電離して放電路の導電度を上昇させ、放電路の温度を高くしている可能性がある。

放電全体を通じて、試料に帯電していた電荷が中和される単位面積当たりの電荷量を、放電前後の電位差と試料の静電容量から計算し、さらに放電前の帯電電位が-19kV、放電後の残留電位が-1kV とした場合の単位面積当たりの静電エネルギーを求めた結果を表5.1に示す。

表5.1 放電時の中和電荷量

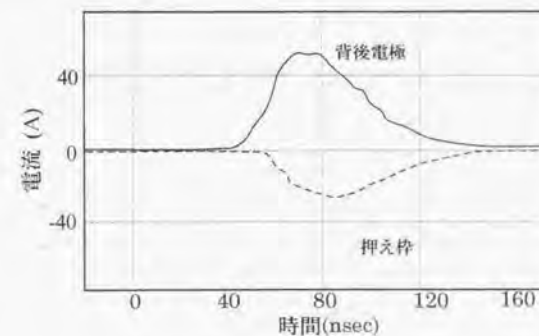
		FEP	PET
25 $\mu$ m	電荷量	1.2 $\mu$ C/cm <sup>2</sup>	2.1 $\mu$ C/cm <sup>2</sup>
	エネルギー	0.011J/cm <sup>2</sup>	0.020J/cm <sup>2</sup>
127 $\mu$ m	電荷量	0.25 $\mu$ C/cm <sup>2</sup>	0.41 $\mu$ C/cm <sup>2</sup>
	エネルギー	0.0023J/cm <sup>2</sup>	0.0037J/cm <sup>2</sup>

これらの値は、ブローオフによるものも含めた中和電荷量となる。FEP と PET では PET が中和電荷量が多く、また、試料の厚さが薄い方が中和電荷量が多い。したがって、中和電荷量が放電規模を表わすものと考え、PET でより大きな放電のエネルギーが

発生し、また、薄い試料でより大きなエネルギーが発生する。このように、放電の規模および放電の形態の双方が、PET や薄い試料において放電路により大きなエネルギーが集中することを示唆している。

なお、放電時にブローオフが同時に生じていた場合には、電荷の一部は空中へ放出されることになり、このブローオフに対しては試料押え棒には電流は流れないが、背後電極電流としては検出される。従って、試料表面から放出される全電荷量は、背後電極に流れる電荷量としてあらわされる。試料押え棒を流れる電流と、背後電極を流れる電流を比較したところ、図5.19および図5.20に示したように、いずれの場合も背後電極電流と試料押え棒電流の形状および大きさの比率(約 2:1)はほぼ同じであるが、25  $\mu$  m の場合に、背後電極電流と試料押え棒電流の波形には時間差が見られ、背後電極電流が早くピークに達する傾向がある。

大きさの比率から、ブローオフとして空中に放出される電荷量は、沿面放電の電荷量に匹敵する大きさを持っていることがわかる。25  $\mu$  m FEP でのパンチスルー放電の場合には、放電初期すなわちパンチスルー発生時にそれに伴うブローオフ電流も多く発生し、その後、試料表面上を沿面放電が進展していることを示している。沿面放電のみ発生する 127  $\mu$  m FEP では、背後電極電流と試料押え棒電流の波形の時間差は特に見られない

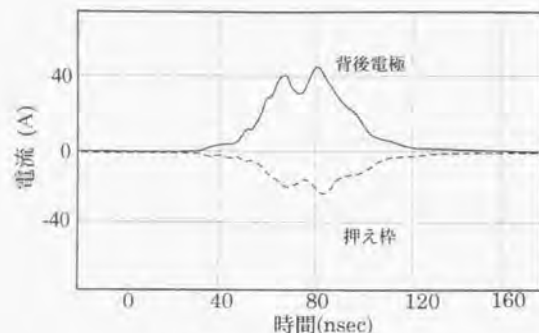


上側:背後電極電流シャント電圧

下側:押え棒電流シャント電圧

図5.19 放電電流波形の比較(25  $\mu$  m FEP, 20keV, 0.1nA/cm<sup>2</sup>)





上側:背後電極電流シャント電圧

下側:押え枠電流シャント電圧

図5.20 放電電流波形の比較(127  $\mu$  mFEP, 20keV, 0.1nA/cm<sup>2</sup>)

ことから、沿面放電の進展に伴ってブローオフも同時に発生していることがわかる。

ブローオフにより放出される電荷量は、放電全体で放出される電荷量のうち半分程度のかかなり大きな割合を占めるが、試料表面上での放電に伴うものであり、ブローオフのみが単独で発生はしていないことから、ここまでの放電形態と発光の議論の結果には特に影響は及ぼさないものと考えられる。

#### 5.4 まとめ

人工衛星表面材料として使用される FEP および PET フィルムに対して、宇宙環境を模擬した真空容器中において電子ビーム照射を行った。それにより生ずる沿面放電現象に関して、発光強度の時間変化の測定や分光測定を行い、放電機構に関して検討を加えた。

リファレンス光および H $\alpha$  光の時間変化を比較した場合に、二つの発光のピークが見られたが、この 2 番目のピークの高さが FEP と PET では異なり、水素原子を含む PET では 2 番目のピークが大きくなることから、放電開始初期の発光には水素原子が関与していることが示唆された。

波長 300nm~700nm の範囲では、CN 基、C<sub>2</sub> 基および水素原子のものと考えられるピークが測定された。これにより、試料表面付近の水分子と、試料の構成分子が、放電

により分解され、発光していることが推定された。さらに、放電開始からの経過時間による、各ピークの放電光のリファレンス光に対する強度比の変化を測定した結果、表面吸着および、試料近傍のガスに由来するものと考えられる水素原子のピークは、やはり放電初期において強く発光しており、ここでも水素原子が放電初期に強く関与することが示された。

さらに CN 基のものと考えられるピーク、放電路の広がり、放電光量等を検討する事によって、PET において放電路の温度が、より高温になっている可能性があることが示された。放電全体のエネルギーも、PET において、また、より薄い試料において大きいことから、放電形態および放電規模の双方がこのような試料においての放電路の高いエネルギーを示唆している。

本章では、放電持続時間が数百 ns しかない放電現象の発光のスペクトルをバンドルファイバ、2つの分光器、デジタイザ、パーソナルコンピュータなどを用いた実験装置により得た。これまで、表面材料上での放電光のスペクトルは報告されておらず、今回このようなデータからどのような物質が放電に関与しているかの知見を新たに得ることができた。さらに、放電光中に占める特定の波長の強度の時間変化を知ることにも可能となり、ごく短い発光時間内にどのような現象が進行しているかを知る上で重要なデータを提供できた。

従来より、放電による人工衛星への影響を問題とする場合に、放電規模のみにについて検討することが多いが、材料の劣化や電磁界パルスの発生等を考慮すると、放電全体の規模だけではなく、放電エネルギー密度の最大値の程度にも注意する必要があるものと考えられる。そのためには、本章で示されたような、放電形態や表面材料の材質の検討が必要であろう。

## 文献 [第5章]

- (1) M. Ishii, E. Tsumura and Y. Hojo : "Discharge Characteristics of Polymer Films Irradiated by Electron Beam", Proc. 6th International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, 13.29 (1989)
- (2) K. G. Balmain, M. Gossland and R. D. Reeves : "Optical Measurement of The Velocity of Dielectric Surface Arcs", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-29, p.1615 (1982)
- (3) K. G. Balmain and G. R. Dubois : "Surface Discharge on TEFLON, MYLAR and KAPTON", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-26, Vol. 6, p. 5146 (1979)
- (4) A. J. Grimley and J. C. Stephenson : "Evidence for Sequential Reaction in The  $\text{CO}_2$  Laser Induced Multiphoton Dissociation of Acetic Anhydride and Acetic Acid", J. Chem. Phys., Vol. 74, p. 447 (1981)
- (5) I. Tokue, A. Hiraya and K. Shobatake, : "Vacuum Ultraviolet Absorption Spectra of Thiirane and Thietane", J. Chem. Phys. Vol. 91, p. 2808 (1989)
- (6) 日本化学会編: 新実験化学講座, Vol. 10, p. 212 (昭51) 丸善
- (7) 中原・朽津・幸田 編: 反応追跡のための分光測定 (昭59) 学会出版センター
- (8) 吉永, 他編: 応用分光学ハンドブック (昭48) 朝倉書店
- (9) 園田, 佐藤: 『人工衛星用材料の特性』, 静電気学会誌, Vol. 13, p. 189 (平元)
- (10) M. F. Rose, "Electrical Insulation and Dielectrics in The Space Environment", IEEE Trans. Electric Insulation, Vol. EI-22, p. 555 (1987)

## 第6章 人工衛星構造材の帯電特性

### 6.1 はじめに

人工衛星の構造材料には、軽量であることと高強度であることが同時に要求される。電子線等の荷電粒子の照射を受ける宇宙環境においては、このような人工衛星の外側に使用される材料が、宇宙環境における荷電粒子等の照射を受けた場合の帯電・放電現象は、人工衛星の信頼性に強い影響を及ぼしうることは、第1章で述べた通りである。このような構造材料としての用途に、エポキシ樹脂に炭素繊維を加えて材料の強度を上げた CFRP が用いられる場合がある。その帯電特性の評価に関しては、Nikolaizig ら<sup>(1)</sup>により、炭素繊維を含むシートとアルミニウムのハネカム構造物の複合材料を用いた太陽電池支持パネルについて、電子線照射による帯電特性の測定が行なわれている。この測定結果では、たとえば 15keV の照射エネルギーに対して、帯電電位は -200~-400V 程度で、小さな帯電にとどまる傾向があることが報告されている。

また、人工衛星にはアンテナなどを支持する材料として、電磁波の透過性を要求される高分子材料が用いられる場合がある。このような用途向けの材料としては、ガラス繊維とエポキシ樹脂の複合材料である FRP が利用される。しかし、FRP は絶縁性が高いために、宇宙環境下におけるプラズマ活動に起因する電子線照射を受けた場合に、その表面が帯電する場合がある。また、帯電電位が上昇すれば、放電を引き起こす場合もあるものと考えられるが、微弱な電磁波を扱うようなアンテナ周辺において、放電による強い電磁波が発生すると、人工衛星の機能に重大な影響を及ぼす可能性もある。

人工衛星は、宇宙空間では強い太陽光線を受けることから、人工衛星内部の温度が上昇しすぎないように、また、地球の日陰の部分に入った場合には温度が急激に下がるようなことがないように、人工衛星外部に用いられる構造材用途の FRP 表面にゲルマニウム(Ge)を蒸着し、材料表面の赤外線放射特性を調整する工夫がなされている。Fellas ら<sup>(2)</sup>は、人工衛星用の OSR(Optical Solar Reflector, 溶融石英ガラスに銀を蒸着したもの)の帯電放電現象への対策として、光を透過させる導電性の膜を OSR 上に作るために酸化インジウムを蒸着し、この試料に 20keV の電子線を照射したときに発生する放電電流のピーク値や放電間隔を測定し、このような導電性コーティングを施した場合には 20keV よりも低い程度の低エネルギー電子線に対しては、放電抑制効果があることを報告している。しかし、FRP のような高分子材料に金属蒸着膜が形成されたものに対して、電子



線照射が行われた場合の帯電現象に関する報告は、ほとんど行われていないのが現状である。

本章では、これらの CFRP, FRP および Ge 蒸着 FRP 試料に対して真空容器中において電子線照射を行い、その測定結果に基づき、各試料の帯電特性とその機構に関して検討を行った。

## 6.2 実験装置および試料

実験は真空中で接地したアルミニウム製試料台上に置いた試料に対して電子線照射を行い、一定時間毎に照射を停止してその表面電位を非接触で測定した。このために用いた真空容器は、前章までに使用したものと同一のステンレス鋼製容器で、上部に取り付けられた電子銃から、試料台に電子線を照射した。試料の表面電位は、非接触の表面電位計のプローブを試料表面上、約 2mm の位置に移動させて測定した。

CFRP 試料としては、網状の厚さ約 0.5mm、大きさ 5cm x 5cm のものを用いた。試料の写真を、写真6.1に示す。

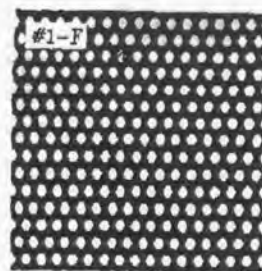


写真6.1 CFRP 試料

また、Ge 蒸着 FRP 試料として、厚さ 1mm、大きさ 5cm x 5cm の FRP 板に、厚さ 10nm および 50nm で Ge 蒸着を行ったもの、および蒸着を行っていない FRP 板を使用した。この Ge 蒸着 FRP は、火星探査衛星「PLANET-B」に使用される予定の熱制御材料で、高利得アンテナのレドームに用いられることになっている。

Ge 蒸着試料の端部は蒸着後に切断しており、Ge は端部断面には蒸着していないので、

表面から端部を通じて流れる電流はきわめて小さい。これは、後述のように、表面の帯電電位の緩和がきわめて遅いことから確認された。したがって、試料表面に帯電した電荷は、主に試料内部を通り、接地された試料台へ流れることになる。また、Ge の導電率は  $2.1\text{S/m}$  であり、厚さ 10nm の Ge 蒸着 FRP の場合、 $1\text{cm}^2$  あたりの静電容量は、エポキシ樹脂の比誘電率を 4.0 として<sup>(3)</sup>、 $3.5 \times 10^{-12}\text{F}$ 、表面抵抗率は  $48\text{M}\Omega$  となり、この場合の時定数は  $1.7 \times 10^{-4}\text{sec}$  である。Ge 表面に電位の不均一が発生した場合、おおむねこのオーダーの時定数を持つと考えられるので、短時間のうちに均一化されることになる。

## 6.3 実験結果

### 6.3.1 FRP 試料の帯電特性測定結果

Ge 蒸着を行っていない FRP 試料に対して電子線照射をおこなった場合の表面電位の変化は、電流密度  $2\text{nA/cm}^2$  において、照射エネルギー 1~5keV で表6.1のようになった。表6.1より、照射エネルギーが 1.5keV 以上では、表面電位はほぼ照射エネルギーと同じ割合で増加していることがわかる。また、照射 60 秒の時点でほぼ電位の絶対値の上昇は飽和している。飽和時の表面電位と照射エネルギーとの差は、ほぼ 1300~1400V となっている。

表6.1 FRP 試料の帯電特性測定結果

照射エネルギー (keV)	1.0	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0
照射 30 秒	+2	-8	-117	-650	-1120	-1620	-3568
照射 60 秒	+5	-7	-116	-651	-1138	-1632	-3586

単位:V

### 6.3.2 CFRP の帯電特性測定結果

CFRP 試料に対して、照射エネルギーを 5keV および 10keV とし、電流密度を  $1\text{nA/cm}^2$  とした場合の試料表面電位の時間変化を、それぞれ図6.1および図6.2に示す。両者を比較すると、照射エネルギーの値に 5keV の差があっても、到達表面電位の値は、

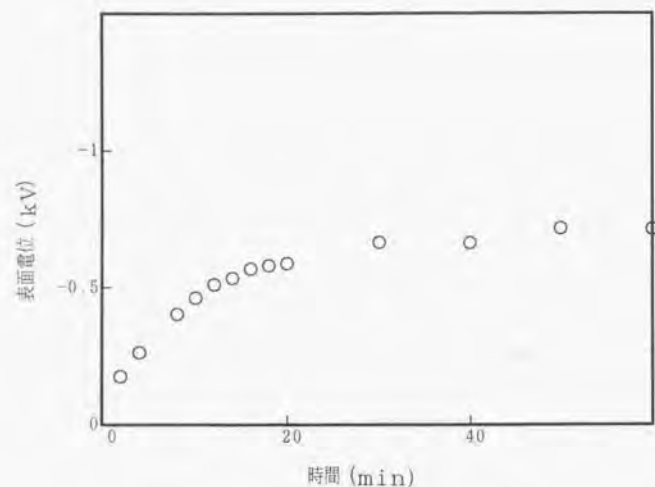


図6.1 5keV照射時のCFRP表面電位変化

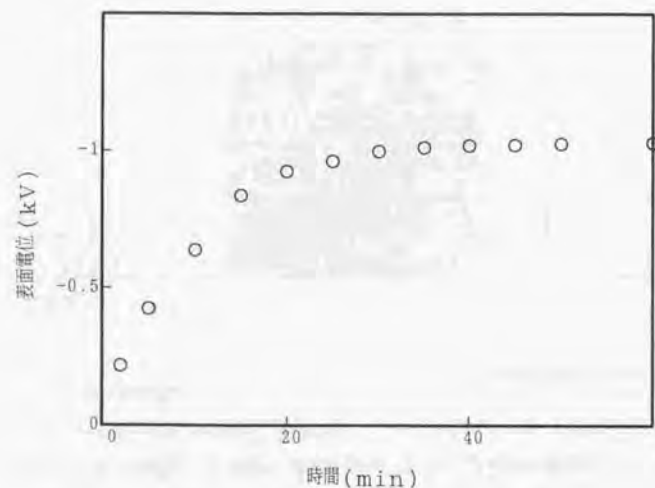


図6.2 10keV照射時のCFRP表面電位変化

数百 V しか差がなく、また、到達電位の値自体が 700V~1200V 程度の低いものとなっている。FEP や PET の場合には、照射エネルギーと帯電電位との差は、約 2kV 程度の値であったことと比較すると、CFRP の帯電特性は、単一の高分子材料とは大きく異なっているといえる。

試料の導電率が大きな試料の場合には、試料中を表面から背面の接地された電極へと流れる導電電流が大きいために、通常、電子線照射停止後の表面電位の緩和速度が早い。しかし、電子線照射停止後の電位の変化を測定した図6.3では、表面電位の緩和速度は、たとえば FEP などと比較して CFRP 試料は特に早いとはいえない。また、電位変化に対する照射電流密度依存性が小さいことと合わせ、CFRP が低い帯電電位となる原因は、導電電流によるものではないものと判断される。

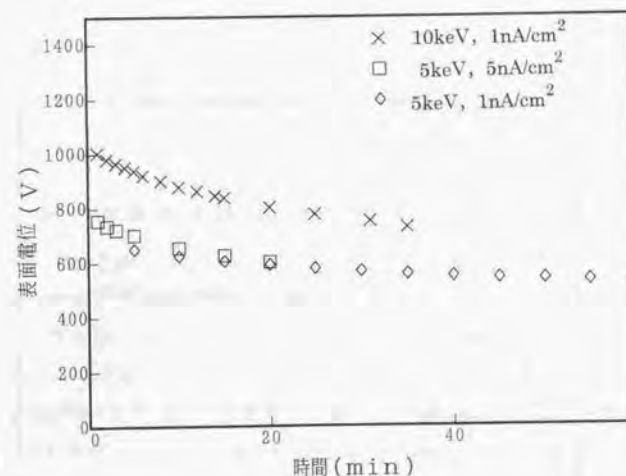


図6.3 CFRP 試料の表面電位の緩和

さらに、照射エネルギー5keV、電流密度 5nA/cm<sup>2</sup>での表面電位の変化を図6.4に示す。電流密度を 5 倍にした場合でも、到達電位は 800V 程度で、電流密度 1nA/cm<sup>2</sup>の場合と



同程度となっている。

電子線照射による帯電電位の値は、2 次電子放出と試料内部を流れる導電電流によって決まるが、どちらが支配的となるかは試料により異なる。導電率が高い試料の場合には、照射電流密度が大きければ、それに対応して帯電電位の値も大きいものとなるが、CFRP 試料では照射電流密度が帯電電位に及ぼす影響は小さいものとなっている。これは、到達電位に影響を及ぼす要素の主たる部分が 2 次電子放出によるものであり、導電電流が及ぼす影響は小さいことを示し、帯電電位の緩和速度の測定結果から判断されたことと一致する。これらの結果から、CFRP は炭素繊維が含まれる高分子材料であるが、必ずしも導電率は大きくはなく、本研究で使用した CFRP の場合には 2 次電子放出が帯電電位の値の決定に支配的であることが示された。さらに、CFRP 試料では、試料の導電率は比較的低く、試料表面から試料内部を通して背面の金属筐体部分に流れる電流は小さいが、同じく導電率の低い FEP などの単一の高分子材料と比較して、電子線照射を受けた場合に人工衛星の金属筐体部分との表面電位差の上昇を低く押さえられることが明らかにになった。

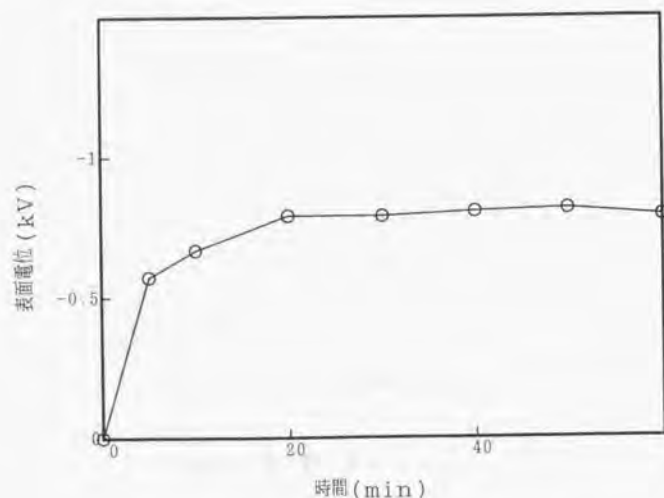


図6.4 5keV, 5nA/cm<sup>2</sup>でのCFRP表面電位変化

Nikolaizig ら<sup>(1)</sup>による、炭素繊維を含むシートとアルミニウムのハネガム構造物の複合材料を用いた太陽電池支持パネルについての帯電特性測定結果では、15keV の照射エネルギーに対して、帯電電位は-200~-400V 程度で、やはり小さな帯電にとどまる傾向があることが報告されているが、その機構として、炭素繊維部分が接地されたアルミニウム部分につながっているために、導電電流により帯電が抑制されているのではないかと推測している。この点を検討するために、CFRP 試料を厚さ 1mm のガラス板上に置き、完全に絶縁した状態で電子線照射を行なった。その結果、2 および 5keV, 1nA/cm<sup>2</sup> で 10 分間照射した場合の帯電電位は表6.2のようになり、これらの値は、試料をアルミニウム試料台上に置いた場合と同程度のものとなっている。したがって、CFRP の場合、少なくとも導電電流による帯電電位への影響はほとんどないことがわかる。したがって、このような帯電特性は 2 次電子放出によるものであると考えられる。

表6.2 CFRP をガラス板上に置いた場合の帯電電位

2keV	-552V
5keV	-753V

(電子線照射電流密度, 1nA/cm<sup>2</sup>)

### 6.3.3 10nmGe 蒸着 FRP 試料の帯電特性測定結果

Ge10nm 蒸着 FRP に対して、照射エネルギー5keV、電流密度 1.0nA/cm<sup>2</sup>での電子線照射による表面電位の時間変化を図6.5に示す。高分子フィルムの単一試料では、照射エネルギーと帯電電位の値の差は1kV 程度であったのに対して、約3kVの差が生じている。

Ge10nm 蒸着 FRP に対して、電流密度 1.0nA/cm<sup>2</sup>で、照射エネルギーを変化させた場合の、電子線照射 60 秒後の表面電位の測定結果を図6.6に示す。Ge 蒸着 FRP の場合には、電子線照射エネルギーが 2.4keV までは、表面電位はほぼ 0V のままであることがわかる。Ge 蒸着なしの FRP の場合と比べて、電子線照射エネルギーが約 1keV 高くなるまでは、表面の帯電が発生しないことになる。なお、Ge 蒸着 FRP に-1015Vの帯電を生じさせた後、電子線照射を停止して電位の変化を測定した結果、3 分経過時で-999V、5 分経過時で-990Vであり、電位の緩和は小さい。

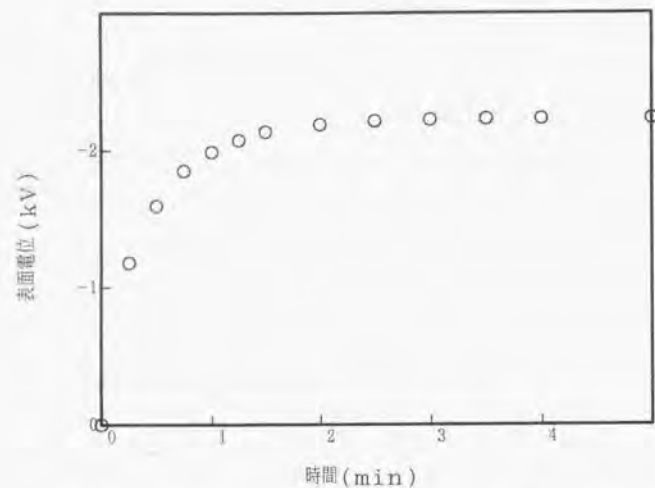


図6.5 Ge10nm 蒸着 FRP に対する 5keV, 電流密度  $1.0\text{nA}/\text{cm}^2$  での電子線照射による表面電位の時間変化

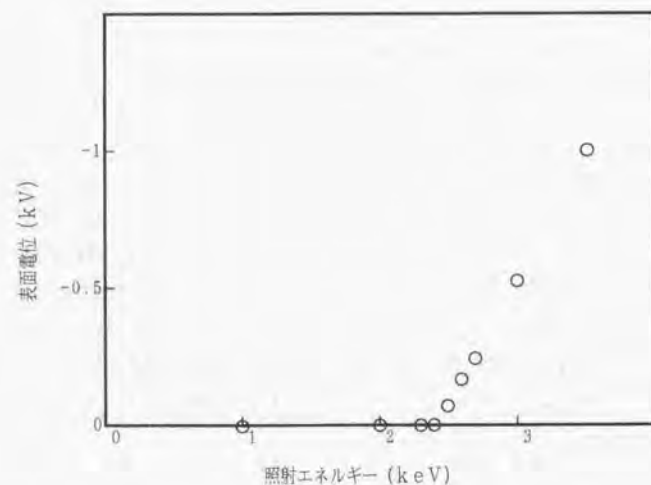


図6.6. Ge10nm 蒸着 FRP の電子線照射 60 秒後の表面電位の変化

次に、試料表面が $-1.0\text{kV}$ に帯電した状態で、 $2\text{keV}$ ,  $0.1\text{nA}/\text{cm}^2$ および、 $0.3\text{nA}/\text{cm}^2$ の電子線照射をおこなった場合の表面電位の時間変化を図6.7に示す。 $0.1\text{nA}/\text{cm}^2$ の場合で6分前後、 $0.3\text{nA}/\text{cm}^2$ の場合では2分以内に、表面の帯電はほぼなくなっている。また、この現象は、電子線の電流密度に依存しており、電流密度が大きいほど急速に帯電が緩和されている。そして、緩和後の電位はわずかに正になっている。

さらに、表面電位を $-1\text{kV}$ に帯電させた Ge 蒸着 FRP 試料に対して、電流密度  $1\text{nA}/\text{cm}^2$ においていくつかのエネルギーの電子線照射を1分間おこなった場合の、表面電位の緩和の程度を測定した結果を表6.3に示す。照射エネルギーが  $2.4\text{keV}$  までは、いずれのエネルギーにおいても、表面電位はわずかに正の電位を示すが、照射エネルギーが  $2.5\text{keV}$  以上では、帯電電位は負の値となり、その絶対値は照射エネルギーの増加に伴い上昇しはじめることが分かる。

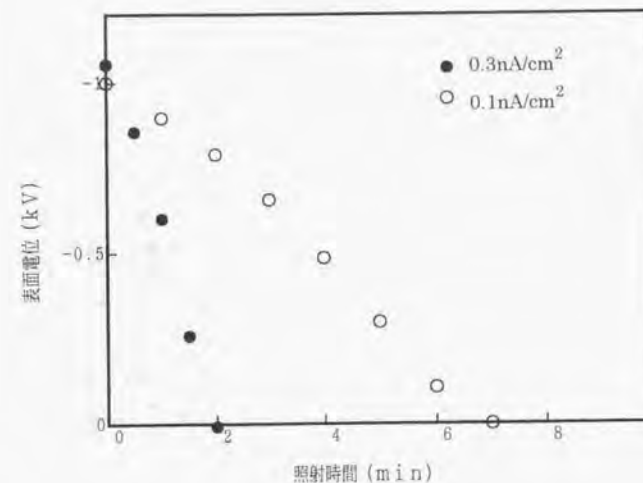


図6.7  $-1\text{kV}$ に帯電した試料に  $2\text{keV}$ の電子線を照射した場合の表面電位の変化



表6.3 照射エネルギーと表面電位の緩和

照射エネルギー (keV)	表面電位 (V)
1.5	+11
1.7	+8
2.0	+10
2.4	+20
2.5	-90
2.7	-243
3.0	-610
3.5	-1094

## 6.3.4 50nmGe 蒸着 FRP 試料の帯電特性測定結果

蒸着膜厚と帯電特性の関係を検討するために、Ge 蒸着膜厚 50nm の試料を用いて同様の実験を行った。電子線照射電流密度  $1\text{ nA/cm}^2$  で 1 分間照射を行った場合の表面電位を表6.4に示す。

表6.4 照射エネルギーと表面電位 (Ge 50nm)

照射エネルギー (keV)	表面電位 (V)
1.5	+14
2.0	+12
2.5	+12
2.4	+1
3.0	-12
3.2	-39
3.5	-143
4.0	-435

照射エネルギーが 2.4keV までは、表面電位はわずかに正か、ほぼ零電位になっている。

これは、Ge10nm 蒸着 FRP の場合と同様である。しかし、3keV 以上の照射エネルギーに対して、帯電電位は Ge10nm 蒸着 FRP の場合よりもかなり低い値となっている。これは、Ge 蒸着膜の存在が表面電位の上昇を抑制する効果があり、10~50nm 程度の厚さの範囲においては、蒸着膜が厚いほどその効果が大きいことを示している。

また、表面を約-1kV に帯電させた試料に対して、2keV、 $0.1\text{ nA/cm}^2$  の電子線照射を行った場合の表面電位の時間変化を測定した結果を図6.8に示す。図6.7と比較すると、非常に短時間で表面電位が緩和され、4 分程度の電子線照射でほぼ 0V になっている。したがって、あらかじめ帯電した Ge 蒸着 FRP に 2keV 程度の電子線が照射された場合の表面電位の緩和の速度は、10~50nm の蒸着膜厚の範囲においては、50nm の場合に、より効果が大きいことがわかる。

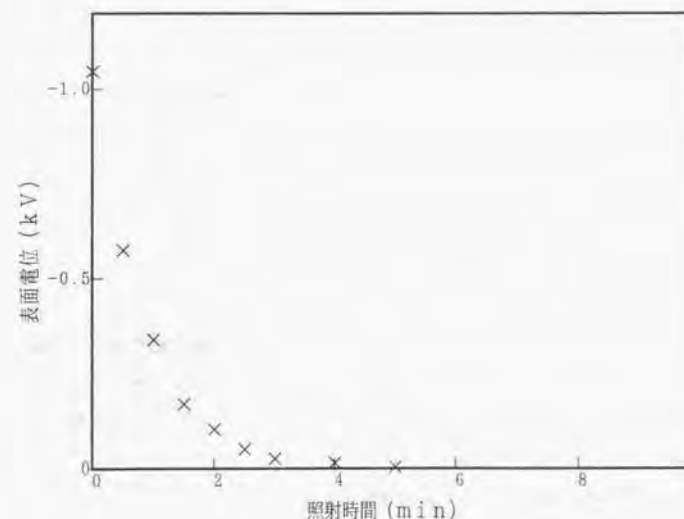


図6.8 帯電させた試料への 2keV の電子線照射時の表面電位の変化(Ge50nm)

### 6.3.5 ガラス板上の Ge 蒸着 FRP の帯電特性

絶縁材料は電子線照射により導電率が変化する場合があるが、Ge 蒸着 FRP の帯電特性が、このような導電率変化が FRP 基板部分に生じ、導電電流が流れるためであるかどうかを検討するために、50nmGe 蒸着 FRP 試料を厚さ 1mm のガラス板上に置き、 $1\text{ nA/cm}^2$  の電流密度で電子線照射を行なった場合の帯電電位の変化を測定した。結果を表6.5に示す。

表6.5 ガラス板上に設置した 50nmGe 蒸着 FRP の帯電電位変化

	2keV	5keV
1 分	8V	-1059V
2 分	13V	-1066V
3 分	14V	-1068V
5 分	15V	-1070V

FRP の下にガラス板がはさんである場合にも、はさんでいない場合とほぼ同様の帯電特性となっており、FRP 中を試料台へ流れる導電電流が帯電特性に及ぼす影響はないものと考えられる。

## 6.4 考察

### 6.4.1 帯電機構に関する考察

一般に、物質に電子線を照射した場合に放出される 2 次放出電子のエネルギー分布は図6.9のような形になる<sup>(5)</sup>。金属あるいは高分子材料表面に電子線照射をおこなった場合には、2 次電子放出が関係するために、帯電電位の飽和時の値は照射エネルギーに対して、絶対値で数 kV 低い電位になる。このときの差は、2 次電子の入射電子に対する収量(yield)が 1 になる時の電子線エネルギーと関係する。FEP などの単一高分子材料については 2 次電子放出特性から求めた帯電電位と測定値は比較的良好に一致する<sup>(4)</sup>。

今回使用した試料表面の Ge について yield が 1 になる時のエネルギーを求めるために、次のような規格化 2 次電子放出比曲線<sup>(6)</sup>(図6.10)を用いる。これは、yield が  $\delta$  となる時の入射エネルギーを  $E_0$  とし、yield が最大値  $\delta_m$  となる時の入射エネルギーを  $E_m$  とした場合の  $\delta/\delta_m$  と  $E_0/E_m$  の関係をプロットしたものである。

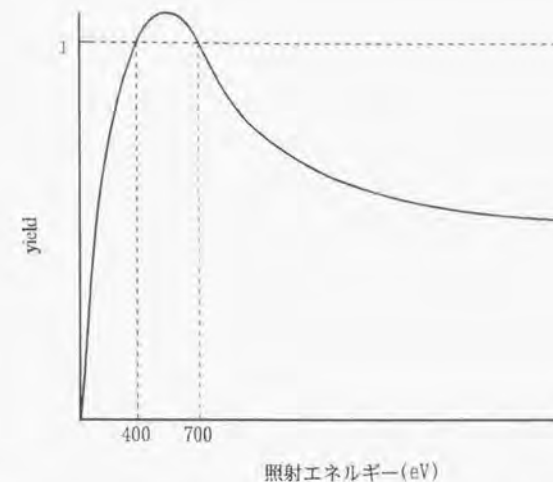


図6.9 2 次電子放出現象における yield と電子のエネルギーの関係

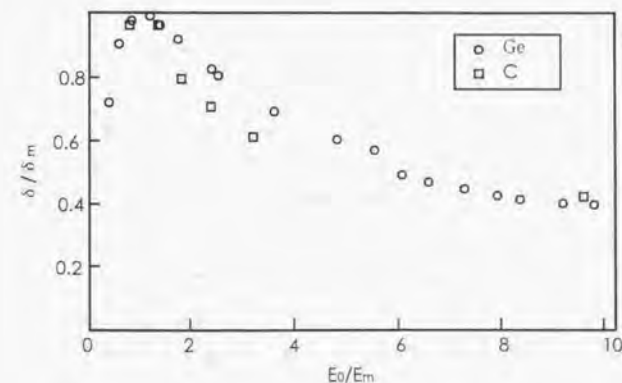


図6.10 規格化 2 次電子放出曲線



Geでは、yieldが1~1.2の最大値をとる時の照射エネルギー $E_m$ は300~500Vであり<sup>(5)</sup>、さらに、 $E_m$ を400eV、その場合のyieldの値を1.1と仮定した場合に、yieldが1になる時の入射エネルギーを求めると約700eVとなる。この700eVという値が照射エネルギーと表面電位の差になるものとした場合に予測される表面電位と比較して、測定された表面電位は実験で使用したどの照射エネルギーにおいても、絶対値で低い値となっている。

電子が物質に照射された場合のエネルギー損失は、主として物質の構成原子の外殻電子を励起、電離する過程で生じる<sup>(6)</sup>。電子の実用飛程は、物質層による電子の吸収曲線の最大傾斜部から外挿し、電子強度が零となるような物質層の厚さから求められるが、3MeV以下のエネルギー範囲では、

$$R\rho = 412E^n \text{ [mg/cm}^2\text{]} \dots\dots\dots (6.1)$$

$$n = 1.265 - 0.0954 \log E$$

ここで、 $R$ : 侵入した電子の速度が零となる深さ(cm)、 $\rho$ : 物質の密度(mg/cm<sup>3</sup>)、

$E$ : 電子のエネルギー(MeV)

の近似式がなりたつ<sup>(6)</sup>。

電子のエネルギーが低い範囲(<3MeV)での電子の飛程の近似値を与える(6.1)式により、Ge、シリコン、アルミニウムおよび比重が0.9程度であるエポキシ樹脂について、飛程を求めると図6.11のようになり、2.5keVの照射エネルギーで飛程は約13nmとなり、厚さ10nmのGe蒸着膜は透過するが、50nmの蒸着膜は透過しないことがわかる。電子がGe蒸着膜を透過する10nm厚および透過しない50nm厚のいずれの試料においてもGeのyieldが1をこえる時の電子のエネルギーから予測される帯電電位よりも低い値が電子線照射実験により測定されている。

さらに、試料表面の帯電電位によって、どの程度のエネルギーの電子線照射が行われれば帯電を緩和することができるのかを調べるために、5keV程度までの電子線を照射し、あらかじめ-470Vから-2580Vまでの電位に帯電させた試料に電流密度1nA/cm<sup>2</sup>の電子線を照射し、照射エネルギーを100eVから上昇させていった場合に、電位の緩和が始まった時点の照射エネルギーを測定した結果を図6.12に示す。

この結果から、-2500V程度までの帯電をしたGe10nm蒸着FRP試料に対してどの程度のエネルギーの電子線を照射すれば、電位の緩和ができるかの目安を得ることができる。ただし、2.3keV以上のエネルギーで緩和が始まる場合には、照射を続けても電位は0Vまでは緩和されない。

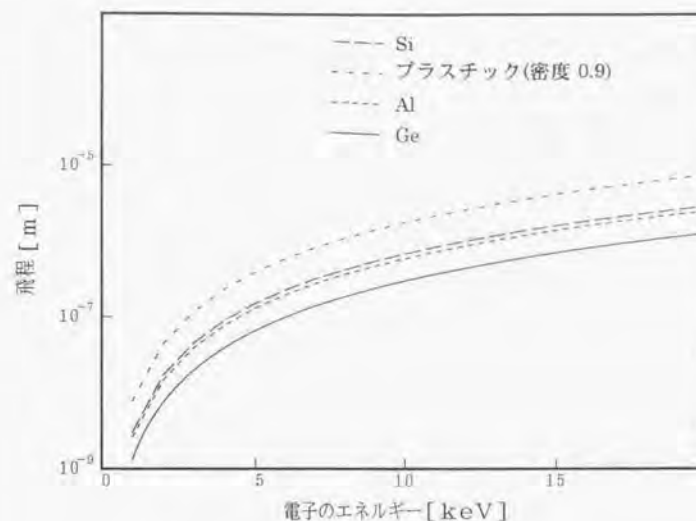


図6.11 各種の試料における電子の飛程

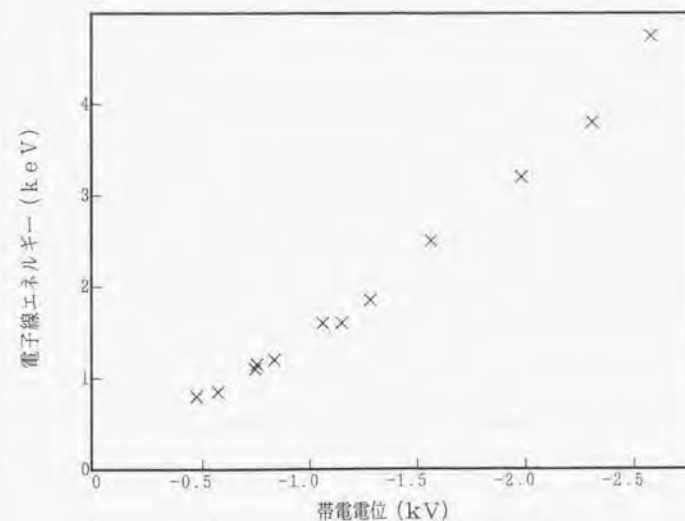


図6.12 表面電位緩和開始時の電子線エネルギー

#### 6.4.2 蒸着膜厚に関する考察

蒸着膜厚が 50nm の場合、照射エネルギーが 2.4keV までは、表面電位がわずかに正か、ほぼ零電位になっている。これは、Ge10nm の場合と同様である。しかし、3keV 以上の照射エネルギーに対して、帯電電位は Ge10nm の場合よりもかなり低い値となっている。これは、Ge 蒸着膜が表面電位の上昇を抑制する効果があり、10~50nm 程度の厚さの範囲においては蒸着膜が厚いほどその効果が大きいことを示している。

電子線であらかじめ帯電させた試料に 2keV 程度の電子線を照射した場合の帯電の除去効果も、Ge10nmFRP の場合と比較して、同一照射条件においては短時間で現れており、帯電電位の抑制および帯電の除去効果の Ge 蒸着膜厚依存性があることが示された。

Ge50nm 蒸着 FRP においては、(6.1)式から電子のエネルギーが 4.45keV を超えると Ge 蒸着膜を電子が透過することになる。電子線エネルギーを 1.5keV から 5keV までの範囲で、電流密度  $1\text{ nA/cm}^2$  で電子線照射した場合の 5 分後の表面電位を測定した図 6.13 では、3keV 付近から徐々に帯電電位が上昇していく。

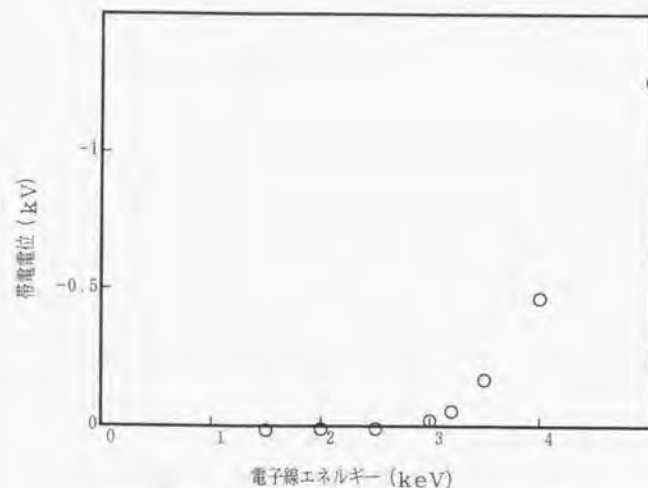


図 6.13 電子線照射 5 分後の Ge50nm 蒸着 FRP の帯電電位

この測定結果から、電子が Ge 蒸着膜内にとどまっていると考えられる範囲においては、帯電電位の上昇は小さいが、電位は 0V 付近にはとどまらず、照射エネルギーにより上昇することがわかる。しかし、その値は高分子フィルムや FRP のみの材料に比べれば小さい。Ge10nm 厚の試料の場合には、電子が透過しない範囲では表面電位は、ほぼ 0V であったのに対して、50nm では透過しない範囲でもある程度の帯電を示していることになる。

#### 6.4.3 複合材料の帯電機構の検討

従来、金属蒸着膜を持つ高分子材料や、炭素繊維強化プラスチックのような複合材料に関して、単体の材料との帯電機構の違いは検討されていない。しかし、本章の実験結果からこのような複合材料では電子線照射を受けた際の帯電特性が、単体の材料に比べて大きく異なることが明らかになった。

一般に、酸化物の 2 次電子放出率は一般に単体のそれよりも大きく、表 6.6 のようにその差はかなり大きい。Ge の場合、一般に表面に安定な酸化膜は形成されにくい<sup>(7)(8)</sup>、空气中に Ge を放置した場合には、表面の光沢が若干変化することから Ge 蒸着膜の表面に酸化膜が存在している可能性がある。

表 6.6 単体と酸化物の Yield の最大値  $\delta_m$  の比較<sup>(9)(10)</sup>

Be	0.51	BeO	3.47
Al	0.79	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10
Mg	0.67	MgO	4.50
Be	0.51	BeO	3.47
Si	0.73	SiO <sub>2</sub>	3.90

$\delta_m$  の大きな酸化膜が存在すれば、図 6.9 の yield と電子のエネルギーの関係において、曲線の形状が上方に拡大された形となり、yield が 1 となる際のエネルギーの値が大きくなる。酸化膜はごく薄いものと考えられるので、照射電子の一部は透過してしまい 2 次電子放出への寄与の割合は小さくとなると考えられるが、Ge 蒸着膜全体として照射エネルギー 3keV 程度のときに yield が 1 となっていれば、実験結果のような帯電特性となる。

数十 nm 程度の厚さの蒸着膜を作成する場合、蒸着膜の厚さにより均一性に変化が生



じる。写真6.2のように 8nm 程度では白い基板部分上に、島状に蒸着金属の核が形成された状態(island stage)となる。蒸着膜厚さ 10~15nm では、島がつながって海峡を残す状態(channel stage)であり、15~20nm で海峡が穴に縮まった状態(hole stage)を経て、それ以上の厚さでは一様な連続状態となる<sup>(5)</sup>。

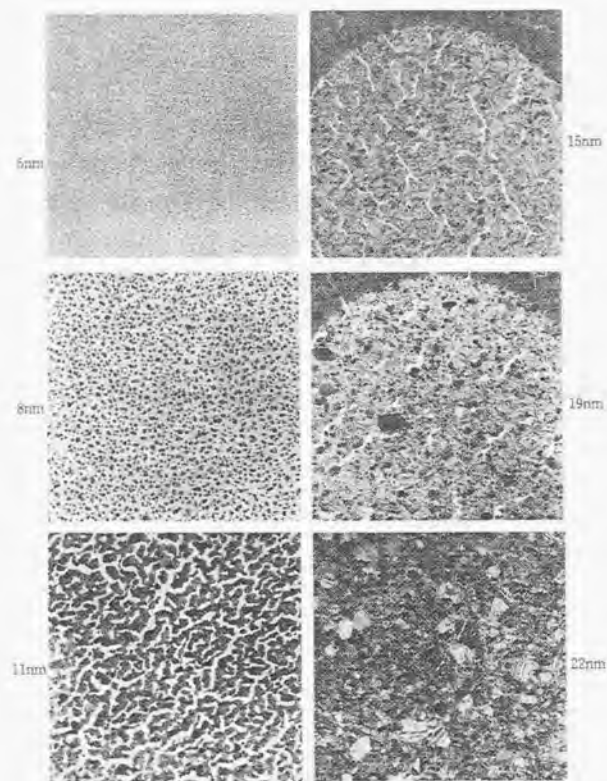


写真6.2 蒸着膜の厚さと、均一性<sup>(5)</sup>

10nmGe 蒸着 FRP の場合には channel stage となっていることが考えられ、基板が露出している部分では、電子線は直接高分子材料基板に到達し、これを帯電させることにな

る。その結果、微視的に試料表面の帯電電位の大きな部分が生じ、表面全体を平均した電位が Ge 蒸着膜の部分よりも絶対値で上昇するという機構が存在するものとすれば(図 6.14)、50nmGe 蒸着 FRP よりも 10nm 蒸着 FRP の方が帯電電位の絶対値が大きくなるという実験結果をもたらしている可能性がある。

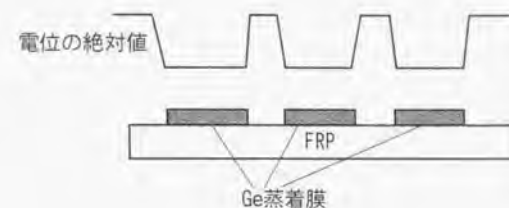


図6.14 10nmGe 蒸着 FRP の帯電機構のモデル

#### 6.4.4 宇宙環境における帯電の検討

実際の宇宙環境における電子線エネルギーのスペクトルの一例として、ATS-5 が地球の影に入ったときの測定結果<sup>(11)</sup>を図6.15に示す。スペクトルは連続であり、低エネルギー電子の割合が非常に多い。本研究に使用したような帯電特性を持つ試料に対して、連続スペクトルのエネルギーを持つ電子線が照射された場合、材料の表面電位が低い間は、低エネルギーから高エネルギーにいたるすべての電子が入射する。通常の高分子材料では、電子線照射により表面電位が上昇するにつれて高エネルギーの電子のみが入射するようになる。しかし、Ge 蒸着 FRP の場合には 2 次電子の影響で帯電電位の上昇が抑制され、表面電位が常に低く保たれる可能性が考えられる。

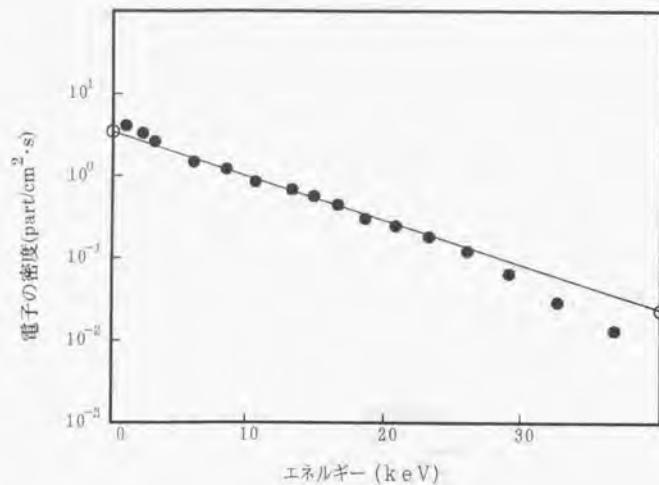


図6.15 軌道上での電子エネルギーと密度の関係<sup>(1)</sup>

このような宇宙環境における帯電電位の変化について検討するために、あらかじめ 1keV に帯電させた Ge10nm 蒸着 FRP に、照射エネルギーが 1.5 および 1.7keV の電子線を照射した場合の表面電位の変化を図6.16に示す。表面電位が高い初期は電位の降下は遅いが、表面電位が低下して照射エネルギーとの差がおよそ 800V 付近の値を越えると急速に電位が低下し、200~400V/min で減少する。また、図6.7から、照射電流密度と電位低下の速さは比例しているとみなせる。したがって、電流密度が  $1.0\text{ nA/cm}^2$  である場合の表面電位の低下速度は、3kV/min 程度と予想される。一方、同じ試料に 5keV、 $1.0\text{ nA/cm}^2$  の電子線を照射した場合の表面電位は、照射開始直後の 15 秒間で約 1kV 上昇していることが図6.5から読み取れることから、4keV/min 程度とみなせる。1.5keV と 5keV で同じ電流密度の電子線が同時に照射された場合の試料の表面電位の変化に対して、5keV 電子線による電位上昇への寄与と、1.5keV 電子線による電位低下への寄与の比率は 4 対 3 となる。

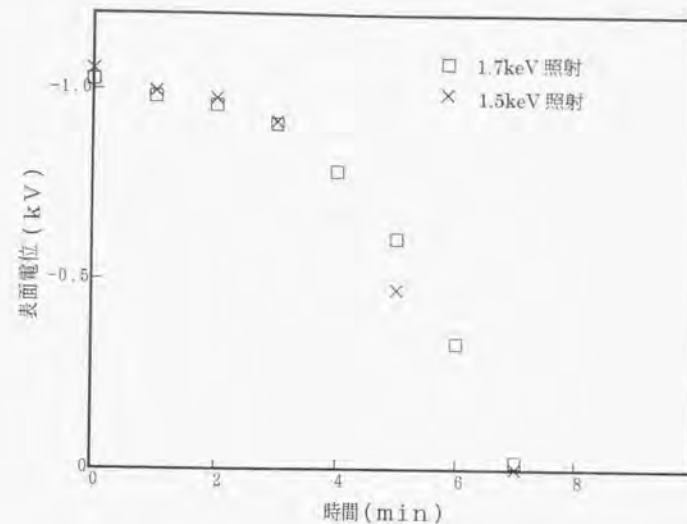


図6.16 1.5keV および 1.7keV、 $0.1\text{ nA/cm}^2$  の電子線照射時の Ge10nm 蒸着 FRP の表面電位変化

実際の宇宙環境では、図6.15のように低エネルギー電子の占める割合が大きく、図中の直線によれば、0eV の電子の密度を 1 とした場合、エネルギーが  $x\text{ keV}$  の電子の密度  $y$  は、 $y = 10^{-0.061x}$  ..... (6.2) となる。

このような電子線が入射したときの、Ge10nm 蒸着 FRP の帯電状況を推定するために、次のような条件を仮定する。表面電位の上昇は、照射される電子線エネルギーが 2.5keV を越える場合に生じるものとし、これ以下のエネルギーの電子はすべて表面電位を抑制する効果を持ち、これ以上のエネルギーの電子は、表面電位を上昇させる効果を持つものとする。また、表面電位が 0V 付近では電位上昇速度は電子線のエネルギーには関係せず、また、同一の電流密度では帯電抑制と電位上昇への寄与はそれぞれ 3 対 4 で一定であるものと仮定する。

以上の仮定の下で、電子線のエネルギーが 0eV から 40keV の範囲で図6.15のスペクトルで照射されたものとして、(6.2)式を使い、帯電電位上昇と抑制の比率を計算すると、1 対 0.32 となる。したがって宇宙環境下で電子線が照射された場合の試料表面の電位上昇



速度は、帯電初期においては帯電抑制効果のない FRP のみの試料に比べて 7 割程度遅くなることが予想される。また、表面電位がある程度上昇した後も、表面電位とのエネルギーの差が 2.5keV 以内の電子が常に存在するので、電位上昇の速度はやはり遅くなるものと考えられる。

## 6.5 まとめ

本章では、人工衛星の外部に使用される構造材の帯電制御を考慮した CFRP の帯電特性を、真空容器中での電子線照射によるシミュレーションにより測定した。その結果、CFRP は FEP 等の高分子材料に比べ、帯電電位が低い値となることが示された。また、照射電流密度を変化させた場合の最終到達電位の変化や、帯電電位の緩和速度の測定などにより、CFRP は炭素繊維が含まれてはいるが、導電率はさほど高くなく、2 次電子放出の効果による帯電電位抑制が大きいと考えられる結果が得られた。

さらに人工衛星の構造材として熱制御性を向上させるために Ge を表面に蒸着した Ge 蒸着 FRP に対する宇宙環境下での帯電を検討するために電子線照射実験を行い、その帯電特性を測定した。その結果、Ge 蒸着を行った場合には FRP のみの場合に比較して表面電位の絶対値が低くなり、帯電しにくくなることが明らかになった。

また、帯電した状態の Ge 蒸着試料に対して 2keV 程度の電子線照射を行うと、急速に帯電が緩和されることがわかった。蒸着膜厚と帯電特性および帯電の緩和特性には関連があり、蒸着膜厚が 10 および 50nm の場合では、厚いほうがより顕著な効果が観察された。これらの結果は、電子線の飛程の計算結果から電子が Ge 蒸着層内にとどまっている 50nmGe 蒸着 FRP においても、Ge 単体の材料で予想される帯電特性とは異なるものとなっている。このような Ge 蒸着 FRP の帯電特性は、 $\delta_m$  の大きな酸化膜の存在によるものである可能性がある。

実際の宇宙環境で発生しうる電子線のスペクトルを考慮して、いくつかの仮定のもとに表面電位の上昇と抑制に関する検討を行った結果、本研究で用いた試料の場合、電位の上昇が帯電初期で 3 割程度遅くなり、その後も上昇の速度は遅くなるという予測結果が得られた。

また、従来の研究では、単一の材料の帯電特性を検討する場合がほとんどであり、それ以外には CFRP を対象として、その導電性による帯電制御を考察するものが見られるのみで、複合構造材料の帯電特性を 2 次電子放出を中心に検討した例はこれまでなかった。本章で用いた Ge 蒸着 FRP や CFRP のような材料の帯電特性は、2 次電子放出特性

の差によって、FEP などの単一の高分子材料や、蒸着を行っていない FRP 等とは明白に異なっていた。従来、このような複合材料の帯電特性は考慮されていなかったが、今後の人工衛星表面材料の帯電制御に利用できる可能性が示された。

## 文献 [第6章]

- (1) N. K. Nikolaizig, K. H. Groh and H. W. Loeb: "Electrostatic Discharge Testing on A Carbon Fibre Solar Panel Structure", Proc. 4th Europ. Symp. 'Photovoltaic Generators in Space', Cannes, p. 115 (1984)
- (2) C. N. Fellas and S. Richardson: "Internal Charging of Indium Oxide Coated Mirrors", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-28, p. 4523 (1981)
- (3) 電気学会編, "電気工学ポケットブック", オーム社(平2)
- (4) 小松原, 石井, 津村, 北條: "電子線照射された人工衛星表面材料上での帯電と放電のパラメータ", 電学論 A, Vol. 116-A, No. 7, p. 592 (1996)
- (5) 応用物理学会編, "応用物理データブック", 丸善(平成6)
- (6) 日本学術振興会第 132 委員会編, "電子・イオンビームハンドブック", 日刊工業新聞社 (昭和48)
- (7) 志村史夫, "ここが知りたい半導体", 講談社 (1994)
- (8) 化学定数表編集委員会編, "常用化学定数表", 廣川書店, (1993)
- (9) K. Kanaya and H. Kawakatsu: "Secondary Electron Emission due to Primary and Backscattered Electrons", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 5, P. 1727 (1972)
- (10) K. Kanaya, S. Ono and F. Ishigaki: "Secondary Electron Emission from Insulators", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 11, P. 2425 (1978)
- (11) Sherman E. Deforest: "Spacecraft Charging at Synchronous Orbit", J. Geographical Research, Vol. 77, No.4, p. 651 (1972)

## 第7章 結言

本章では, 人工衛星がさらされる環境と人工衛星の帯電放電現象について, ここまでの各章で述べた帯電放電現象に関する研究がどのような工学的意義を持つのかをまとめておく。

### 7.1 帯電特性に関する評価

人工衛星における帯電放電現象の研究は, 近年の情報通信分野における人工衛星の利用をはじめとした宇宙開発において, 人工衛星の信頼性を高めるために必要不可欠である。人工衛星の熱制御材料である高分子フィルムの帯電特性を評価するため, 真空容器中での電子線照射実験により電子線照射電流密度および電子線エネルギーと帯電電位変化の関係を測定した。このシミュレーション実験により, 人工衛星が宇宙環境において太陽風等による電子線照射を受けた場合に表面材料の帯電電位の変化を予測することができる。宇宙環境下での実験はきわめて高いコストを要するが, このような実験装置により, 新しい表面材料の開発等に対してその帯電特性を容易に検討することができる。例えば, 人工衛星表面材料の導電率の調整により帯電電位を制御しようとする場合には, 厚さ  $127 \mu\text{m}$  の試料の場合,  $10^{11} \Omega\text{m}$  程度より低い抵抗率が必要という, 目安となる具体的な数値例を示した。

さらに, 帯電特性と試料のバルク抵抗, 2 次電子放出, 誘電率等を考慮し, 1 次元モデルによる帯電電位変化を計算した。これにより電子線照射電流密度, 照射エネルギー, 2 次電子放出係数, 試料抵抗率, 誘電率といったパラメータにより表面帯電電位の変化を計算により容易にシミュレートすることが可能であることを示した。このシミュレーションにおいては, 特に帯電電位の時間変化を知ることでもできるため, 電子線照射に関する電流密度およびエネルギーというパラメータに対して, 電位上昇速度と最終到達電位を知ることができる。宇宙環境でサブストーム開始後の時間経過と帯電電位の変化, 通常の状態では太陽光線が照射されなくなった場合の経過時間と帯電電位の変化といった各種の状況による表面材料の帯電電位変化を予測することにつながり, 最適な表面材料の特性を検討するために有益な情報をもたらすことができるものと考えられる。

### 7.2 高分子フィルムの沿面放電開始条件に関する評価



人工衛星表面材料上での帯電がすすむと、放電にいたる場合がある。放電発生による障害は人工衛星搭載機器に深刻な障害を与えることがあるために、人工衛星表面材料上での放電に対する対策は、人工衛星の安定動作、長寿命化のために重要な課題である。放電発生のパラメータに関しては、宇宙環境における電子線等の照射を考慮する必要があるものと考えられる。第3章で行った電子線照射の放電現象への影響の検討、および照射エネルギーと放電開始電圧の測定から得られた結果は、真空中での電子線照射による帯電に伴う放電開始の機構解明につながるものと考えられる。また、通常の真空環境下での放電開始条件には、コンディショニング効果の影響が大きい、電子線照射による高分子フィルムの帯電にともなう放電の場合には電子線照射の影響が大きく、電子線照射エネルギーが5keVの場合には、放電開始電圧が8kV程度で推移するのに対して、照射エネルギーが20keVの場合には、放電開始電圧も20kV程度に急激に上昇することが明らかになった。この点から人工衛星表面材料の放電への対策を検討する場合に、電子線照射の影響を考慮する必要があるものと考えられ、人工衛星表面材料が電子線照射を受けつつある場合に、より効果的な放電防止のための対策を講じるためのデータを提供できた。

### 7.3 ガス放出現象に関する評価

人工衛星の軌道上における真空度は、本来はきわめて高真空であるが、人工衛星自体に吸着しているガス分子等が放出されることにより、人工衛星の周囲に定常的にガス放出を行う。さらに表面材料への太陽風等に由来する電子等の荷電粒子の照射により、試料表面の吸着分子が放出されたり、あるいは、そのような荷電粒子の照射により表面材料が帯電することによって引き起こされる放電によるガス放出により、周囲にはガス分子が多くなっている可能性があり、これにより、人工衛星表面近傍の真空度が低下し、表面材料上での放電現象が影響を受けることが考えられる。

第4章では電子線照射時の試料表面からの放出ガスに関する測定を行った。これにより、人工衛星周囲の環境の真空度に対して、人工衛星表面近傍では、周囲に比較してかなりの密度のガス分子が存在するものと推定された。また、放電発生時のガス分子の増減を測定したところ、CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>をあらわす質量数28、44のガスは放電発生後に増加しているが、H<sub>2</sub>Oをあらわす質量数18のガスは、PETおよび薄いFEP試料においてのみ放電直後に減少することが判明した。この結果から、放電に関

与する分子と放電形態との関係を推定することができた。

さらに放電光の分光分析からもガス分子からの発光が検出されており、表面材料上での放電開始および放電進展においてはガス分子が関与していることが明らかとなり、人工衛星表面材料上での放電機構の検討には、本来は高真空である宇宙環境下であっても、吸着分子および試料構成分子に由来するガス分子の影響を考慮に入れる必要性があることが示された。また、表面材料の材質等を検討することにより、ガス吸着や、電子線照射を受けた場合や放電が発生した場合の試料構成分子の分解、放出の制御が行なえ、それが放電を制御することにつながる可能性があることがわかった。人工衛星表面材料に関しては、従来、ガス放出に関わる特性が放電現象との関連において検討されるということはほとんどなかったが、今後、表面材料の材質を検討していくうえで、ガス放出特性をも考慮することの必要性が示された。

### 7.4 放電光に関する評価

人工衛星表面材料上における放電に伴って発生する放電光は、放電に関する情報を含んでいるものと考えられる。しかし、放電光はごく短い時間の発光であるために、その測定、分析は困難を伴うが、バンドルファイバ、分光器、光電子増倍管、2チャンネルデジタイザ、パーソナルコンピュータ等を用いた放電光測定装置の製作により、放電光波形、波長別の波形、放電中の各波長の強度比の時間変化など多方面からの測定、検討が可能となった。

放電光スペクトル分析において、水素原子からの656nmの波長の発光波形の測定結果を検討した結果、FEPとPETに差異が見られ、試料厚さによっても異なる傾向が現れた。この波長の強度は、PETの2種類の厚さおよびFEPの25μm試料では放電開始から20~50nsの間にピークを示し、その後急激に減少する。この結果は、試料構成分子により放電形態が異なることを示しているものと考えられる。また、フラグメントを示す波長470nmの発光は特にPETの25μm厚の試料で急激なピークを放電初期に示す。これは、放電エネルギー密度の最大値が高いことを意味し、表面に与える損傷が大きくなることが予想される。放電のエネルギー集中を防ぐことができるような放電形態をとる試料を検討する上で、これらは重要なデータとなる。このような放電形態と試料の種類の関係については、第5章で使用したFEPとPETの2つの試料においては、FEPの方が放電エネルギー密度の最大値が相対的に小さいこと



が示された。

放電のエネルギーの値は、25  $\mu\text{m}$  厚 FEP では  $0.011\text{J}/\text{cm}^2$  であるのに対して、25  $\mu\text{m}$  厚 PET では  $0.020\text{J}/\text{cm}^2$  となっており、エネルギーの値自体も PET の方が大きく、前述の放電光スペクトル分析の結果とあわせて PET において試料の分解等が生じ易いことが裏付けられた。

放電エネルギー密度の最大値の大きさは、表面材料の劣化や人工衛星搭載機器への障害の発生とも関連しているものと考えられることから、放電が発生した場合に、どのような放電形態であれば障害の発生が小さいのか、そのためには、どのような材料が適当であるのか、といった事項を検討することが、人工衛星のさらなる高信頼度化のために必要であることが示された。

## 7.5 人工衛星構造材の帯電特性に関する評価

人工衛星の構造材料として FRP などの複合材料が使用される場合がある。このような材料には、炭素繊維を用いた CFRP や、熱制御性を持たせるために表面にゲルマニウム(Ge)蒸着を行ったものが使用されることがある。このような複合材料の帯電特性に関する報告は、従来ほとんどなされていないにもかかわらず、実際の人工衛星への使用のために帯電特性データの必要性が高い。第6章では、人工衛星構造材料として製造された CFRP および Ge 蒸着 FRP に対する帯電特性の測定結果を得ることができた。通常の単一の高分子フィルムでは、第2章で検討したような方法により、試料の抵抗率、誘電率、2 次電子放出率により、帯電電位の時間変化を 1 次元モデルにより計算することができ、実験結果とも良い一致が見られたが、複合材料の場合には、たとえば Ge 蒸着 FRP では表面層の Ge 単体の 2 次電子放出から予想される帯電特性とは異なる測定結果が得られた。

CFRP の場合、5keV で電子線照射した場合の到達電位は 700V 程度であり、しかも CFRP をガラス板上に置いた場合も 750V 程度と低い値を示し、導電電流の影響ではなく 2 次電子放出現象により電位が低く押さえられていることを示した。従来、CFRP の帯電に関しては、その導電性による帯電抑制という観点から実験、検討を行なったものしかなかったが、第6章では CFRP においても 2 次電子放出が帯電特性に重要な役割を果たしていること示した。

FRP の場合は、Ge 蒸着が行なわれている場合には、電子線照射エネルギーと表面

電位との差が 2.5kV 程度になり、通常 1kV 程度である高分子フィルム単体の場合に比べて大きな差が出た。このような帯電特性も、やはり 2 次電子放出が関係していることを示した。複合材料の帯電電圧が単一材料の高分子フィルムよりも明らかに低いことから、人工衛星表面材料として複合材料を使用することを検討するためのデータとなりうるであろう。

さらに、宇宙環境下での電子線エネルギースペクトルをもとに、Ge 蒸着 FRP と蒸着していない FRP の電位上昇速度を推定した。その結果、Ge 蒸着 FRP は、7 割程度、電位上昇速度が遅くなるという結果を示すことができ、複合材料の場合には帯電特性の検討において単一材料の場合とは異なる見地からの検討が必要であることが示された。

Ge 蒸着 FRP、Al 蒸着 FEP や CFRP における帯電特性は、単一の高分子材料あるいは Ge や Al において予測されるものとは大きく異なるものであった。金属蒸着膜には、表面に薄い酸化膜が形成されている可能性があるが、酸化物は単体に比べて高い yield を示すことから、電子の飛程に対して、ごく薄い酸化膜であっても 2 次電子放出に寄与し、その結果として複合材料の帯電が抑制されるような機構が提案され、高分子材料表面への金属蒸着を帯電制御の観点から用いることへの検討を行なう価値があるものと考えられる。これは人工衛星の帯電現象の対策の新しい方法ともなり得よう。さらに、帯電した試料に対して電子線照射を行った場合、電子線のエネルギーによつては表面電位をほとんど完全に緩和してしまえる場合があることが明らかになったが、この現象は人工衛星表面材料の帯電制御への応用が考えられる。

## 7.6 放電機構に関する評価

第6章までの結果にもとづき、第1章において紹介した放電のモデルに関する評価を述べる。

放電進展の機構として、例えば Balmain および Dubois によるトンネルを形成して、その中を放電が進展するというものがある<sup>(1)</sup>。第4章で行った放電時の真空容器内のガス分析の結果から、FEP 中には存在しない OH 基の量に変化が見られたが、試料内部で放電が進展する場合には、このような変化は生じないものと考えられ、試料表面に吸着した水分子が直接、放電にさらされているはずであるから、トンネル内部で放電が進展するとは考えにくい。ただし、Gossland らの報告<sup>(2)</sup>にある試料フィルム製



造時のフィルム伸展方向と放電の進展方向が関連していることを考えると、完全に表面のみで放電が発生しているのではなく、本研究で用いた 20keV 程度の照射エネルギーの電子線は飛程が数  $\mu\text{m}$  であることから、試料表面にごく近い層に電荷が蓄積しこの部分で放電が進展していると考えられる。この場合には表面からの距離が小さいために、トンネルが形成されることはなく、トンネル上部が放電により放出されて、放電後の試料表面の観察結果において見られた溝状の放電痕が残っているものと考えられる。

Stettner らによる放電進展時のモデル<sup>(3)</sup>は、放電した領域と未放電の領域との間の電界によりイオンが放出、加速され表面に衝突する際にさらにイオンを 2 次的に放出するというものである。第3章において測定された電子線照射を行わない場合の放電開始電圧は、放電回数に伴って上昇しており、真空環境下での高分子フィルム上の沿面放電においてもコンディショニング効果が存在しており、したがって放電の開始および進展が、試料表面の吸着分子の影響を受けることが示された。したがって、表面イオンにより放電が進展していくとした Stettner らのモデルは、実験結果と矛盾しないものとなっていることが検証された。

Balmain らにより放電電流や放電エネルギーの大きさと試料厚さとの関係の実験結果が報告されている<sup>(4)</sup>。放電全体の規模としては、電荷の蓄積時間が長く、かつ試料が薄いほど大きくなる。したがって、放電間隔が長い沿面放電が発生する限界の薄さである 50  $\mu\text{m}$  で最も放電全体のエネルギーは大きくなっている。しかし、第4章および第5章の結果から、熱や光の時間的および位置的な放電の広がりを考慮した放電エネルギー密度のピーク値は、むしろパンチスルー放電の方が大きい場合があり、また、発生ガスの量も多い。さらに、厚さだけではなく試料の種類によっても、放電のエネルギー密度のピーク値の度合いが異なっていた。材料の劣化や電磁界パルスの発生等を考慮すると、人工衛星への影響は放電全体の規模だけではなく、放電エネルギー密度のピーク値の大きさにも注意する必要がある、放電形態や表面材料の材質の検討が必要であろう。

## 7.7 まとめ

本論文の各章では、高分子材料の帯電、放電現象に関連して、高真空環境の代表例の一つである宇宙環境を模擬した真空装置を用いて帯電・放電現象に関する実験を行な

い、種々のパラメータの測定を試みた。これにより、目的とするパラメータ等のみならず、真空環境下での実験において目的とする現象を再現するための諸条件や、そのために必要となる実験装置類を作成する手法等に関する知見をも得ることができた。

さらに数値モデル等を用いることにより、複雑な装置を用いる模擬実験を実際に行うことなく帯電放電現象に関するデータを収集する手法に関する検証を行うことができた。これにより今後の人工衛星等で使用される各種の材料評価手法開発への寄与ができたものと考えられる。また、宇宙環境を模擬するために使用した高真空容器と電子線照射装置で構成された実験装置を利用して、高分子絶縁材料の劣化特性試験に用いることができ、高分子材料評価試験手法として新たな可能性を示すことができた。本論文により得られた成果は、各章毎に以下のように挙げるができる。

第2章では、高真空容器を用いることにより宇宙環境を模擬し、人工衛星表面材料として用いられる高分子フィルムの、帯電電位の変化や到達電位を求めた。一方で、電子線照射による帯電の 1 次元モデルによる帯電電位変化のシミュレーションの計算結果と実験結果の良好一致を見た。さらに帯電電位の値には 2 次電子放出が強く関与していることを示し、人工衛星表面材料の開発における帯電電位制御のためのパラメータを明らかにできた。

第3章においては、従来はコンディショニング効果のみが考慮されていた真空中における高分子フィルム上での放電開始条件が、試料に対して照射される電子線の有無により影響を受けることを明らかにした。さらに、この結果から、表面の帯電による放電開始電位の抑制効果がコンディショニング効果を打ち消すような形で存在することを示した。電極を用いた放電開始条件には、試料に対する電子線の照射と、それによる試料表面の帯電等が影響することがわかり、人工衛星表面材料上での放電を制御するためには、表面の帯電状況と照射される電子線等の影響を考慮に入れての検討が必要であるとの知見を得た。

第4章においては、電子線照射時に試料表面から放出される分子モル数を測定したところ、 $3.7 \times 10^{-10} \text{ mol/s}$  という値となり、試料表面  $1 \text{ cm}^2$  あたり毎秒  $2.2 \times 10^{14}$  個の分子が放出されているとのデータを得た。これにより、従来、超高真空であるとして扱われてきた人工衛星周囲の空間において、放射線にさらされる人工衛星表面近傍には相対的にかなりの密度のガス分子が存在する可能性を具体的に明らかにした。放電発生時に放出されるガスの量は、パンチスルー放電が発生する試料の場合に多くなっており、放電エネルギーが放電貫通孔付近に集中していることにより、試料が強く分解

することがわかった。放出されるガス分子は、試料構成分子および試料表面に吸着している水分子に由来することが示された。また、放電形態によっては、 $H_2O$  ガス分子が減少することから、放電形態と試料近傍の水分子の増減との関連性があることがわかった。さらに、電子線照射により試料から発生するガスの測定を利用した高分子絶縁材料の荷電によらない劣化を検出する方法を検討し、試料によっては、二酸化炭素放出量を測定することにより劣化の程度の測定ができることがわかった。

第5章においては、放電光を分光分析するための装置を製作し、発光スペクトルやリファレンス光とモノクローム光の比率の時間変化を測定して得た知見について記述した。CN 基の発光波長の存在から PET においてより高温の状態が発生している可能性があるとの知見が得られ、試料の種類により放電のエネルギー集中の程度が異なっていることが分かった。放電光の波形から、放電には 2 つのピークが存在する場合があることが判明し、その成因に関する機構を考察した。これにより、第4章で得られた水分子と放電形態との関連性と合わせて、人工衛星表面材料上での放電機構解明には、材料表面近傍に存在する水分子をはじめとするガス分子を考慮しなくてはならないことを示した。

第6章においては、熱制御性の向上のために Ge 蒸着を行った FRP や、CFRP といった人工衛星構造材が電子線照射を受けた場合の帯電電位の変化を測定し、それらが FEP フィルムのような単一材料の場合とは異なる特性を示すことを明らかにした。これらの複合材料では、帯電電位の上昇は、単一材料と比較して明らかに遅く、さらに低エネルギーの電子線照射により帯電が除去される現象が見られた。Ge 蒸着 FRP では、Ge 蒸着膜厚と帯電抑制との間に関連があることが分かり、複合材料を人工衛星構造材として用いる場合の帯電電位に関しては、単体の材料とは異なる場合があることに留意する必要があることを示した。

このように、本論文では人工衛星表面材料として従来より用いられている高分子フィルム、CFRP、FRP およびその表面に金属蒸着を行なった試料が、真空中で電子線照射を受けた場合に生じる帯電、放電においてどのような機構がはたしているのかを帯電電位、放出ガス、放電光等を新たに考案した手法を含む各種の方法で測定することにより検討し、多くの新たな知見を得ることができた。それらは、今後の宇宙環境下で用いられる各種材料の開発においても有用と考える。

## 文献 [第7章]

- (1) K. G. Balmain and G. R. Dubois : "Surface Discharges on TEFLON, MYLAR and KAPTON", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-26, p.5146 (1979)
- (2) M. Gossland, K. G. Balmain and M. J. Treadway : "Surface Flashover Arc Orientation on MYLAR Film", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-28, p. 4535 (1981)
- (3) R. Stettner and A. B. Dewald : "A Surface Discharge Model for Spacecraft Dielectrics", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-32, p.4079 (1985)
- (4) K. G. Balmain A. Battagin and G. R. Dubois : "Thickness Scaling for Arc Discharges on Electron-Beam-Charged Dielectrics", IEEE Trans. Nuclear Sci., Vol. NS-32, p. 4073 (1985)



## 謝辞

本研究の方向づけから、遂行、取り纏めに至る過程のすべてにわたり、東京大学教授 石井勝博士には懇切な御指導ならびに御鞭撻をいただきました。また、実験、討論にも貴重な時間を割いていただき、さらに、研究器材等を使用する機会を与えていただきました。これらの多大な御援助を賜りましたことを深く感謝いたします。

本論文を取り纏めるにあたり、種々の御助言をいただきました東京大学教授 桂井誠博士、小田哲治博士、日高邦彦博士、文部省宇宙科学研究所教授 高野忠博士に感謝の意を表します。

本研究の実験装置の製作、実験の遂行に関して、東京大学助手 北條準一博士には、さまざまな御助言、御援助をいただきました。

元 東京大学大学院生 津村英志氏には、装置製作、実験遂行、数値モデルに関する討論等で多くの御協力をいただきました。

元 東京大学大学院生 大谷淳一氏には、真空装置および電子ビーム照射装置の設計、製作に携わっていただきました。

三菱電機(株) 藤井治久博士には、実験に不可欠な部品等の提供をいただき、また、貴重な御助言をいただきました。

東京大学生産技術研究所 試作工場の方々には、実験装置部品の精密加工等で御助力をいただきました。

これら各位の多大なる御指導、御鞭撻、御援助、御協力に対し、厚くお礼を申し上げます。

## 本研究に関連した発表論文

### 1. 学会誌論文

- (1) 小松原 実, 石井 勝: 「屋外用高分子材料表面の評価法の検討」, 電気学会論文誌 A, vol. 111-A, No. 2, pp. 97-104 (1991)
- (2) 小松原 実, 石井 勝: 「電子線照射された高分子フィルム上での沿面放電現象の観察」, 電気学会論文誌 A, vol. 112, No. 5, pp. 401-407 (1992)
- (3) 小松原 実, 石井 勝, 津村 英志: 「真空中での帯電放電に伴うガス放出現象および発光現象の検討」, 電気学会論文誌 A, Vol. 114-A, No. 7/8, pp. 528-534 (1994)
- (4) 小松原 実, 石井 勝, 津村 英志, 北條 豊: 「電子線照射された人工衛星表面上での帯電と放電のパラメータ」, 電気学会論文誌 A, Vol. 116-A, No. 7, pp. 592-598 (1996)
- (5) 小松原 実, 石井 勝: 「人工衛星構造材料の電子線照射に伴う帯電特性」, 電気学会論文誌 A Vol. 118-A, pp. 135-141 (1998)

### 2. 国際会議

- (1) Masaru Ishii and Minoru Komatsubara: "Hydrophobicity of Organic Insulating Materials", CEIDP 1988 Annual Report, Ottawa, 3-6 (1988)
- (2) Minoru Komatsubara and Masaru Ishii: "Spectroscopic Observation on Surface Discharge on Polymer Films Irradiated by Electron Beam", 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, 92.02 (1991)

