

# CFRP製模擬燃料タンク における帯電液体の電荷挙動

熊田 亜紀子<sup>\*,1</sup>, 後藤 隼紀<sup>\*</sup>, 中俣 浩樹<sup>\*</sup>, 日高 邦彦<sup>\*</sup>  
津端 裕之<sup>\*\*</sup>, 川島 愛<sup>\*\*</sup>, 西 孝裕樹<sup>\*\*</sup>

(2013年9月10日受付; 2014年1月7日受理)

## Electrostatic-Charge Behavior of Liquid in Mock Fuel Tank Made of CFRP

Akiko KUMADA<sup>\*,1</sup>, Junki GOTO<sup>\*</sup>, Hiroki NAKAMATA<sup>\*</sup>, Kunihiko HIDAKA<sup>\*</sup>,  
Hiroyuki TSUBATA<sup>\*\*</sup>, Ai KAWASHIMA<sup>\*\*</sup> and Takayuki NISHI<sup>\*\*</sup>

(Received September 10, 2013; Accepted January 7, 2014)

In recent years, carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP) is widely used in various fields such as aircraft structures since it has high mechanical strength and lightweight characteristics. Although the aircraft fuel tank would be made from CFRP, the insulating coat on inner walls of the tank is still necessary to prevent electrolytic corrosions. However, the static electricity problem resides because of the special conductive characteristics of CFRP. To perform a rational design of a CFRP fuel tank, it is necessary to establish a method to check how high voltage is generated in the aircraft fuel tank. In this research, we grasp behavior of electric charge in mock liquid fuel in tanks by measuring the surface voltage on inner wall. In addition, the movement of charge is analyzed by the method of finite differences and the simulated results are compared with the measured results.

### 1. はじめに

近年, 航空機の軽量化及び整備コスト低減を目的として, 航空機構造へのCFRP (carbon-fiber reinforced plastic) の適用が進められている。しかしながら, CFRPは金属とは異なる電気特性を有し, 燃料タンクとなる主翼等の設計では, 雷撃対策や静電気対策などにおいて, 実験を繰り返すことで設計検証を進めていく部分が多い。そこで本研究では, 航空機燃料タンク内部の静電気の振舞いを解析できるようにすることで, 静電気対策における設計の効率化を狙いとしている。

航空機燃料タンクの帯電現象については, 燃料給油時に帯電した燃料がタンクに流入することが古くから知られており<sup>1,2)</sup>, 一方, 燃料タンク内壁には, 電蝕を防ぐための絶縁塗料が薄く塗布される。故に, CFRP製の燃料

タンクの場合, 表面の導電率が金属に比較して低いため, 静電気が逃げずに溜まりやすい傾向となり, 静電気放電が燃料の爆発を引き起こす可能性が懸念される。このような静電気放電の危険性を鑑み, 一部の構造に金属材を用いるなど, さまざまな対策が検討・実施されている<sup>3,4)</sup>。

このような燃料タンク内の静電気を除去する方法として, 燃料タンク内壁に接地露出箇所を設けた場合を想定し, タンク内壁の導電率や, 接地露出箇所の形状が静電気の除去に与える影響を, 差分法による解析及び, 燃料模擬液体 (シリコンオイル) を用いた実験を通じて検証したので報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 模擬燃料タンク

図1に実験概略図を示す。模擬燃料タンクに, 帯電液体を入れ, 壁面の電位分布がどのように変化するか表面電位計で測定し, 帯電電荷の緩和過程を把握する。

図2, 3に実験に用いた, 燃料タンクを模擬した容器の概略とその外観写真を示す。外形は200 mm×200 mm×100 mmである。容器躯体は体積抵抗率の高い絶縁物である3 mm厚GFRP (glass-fiber reinforced plastic) で作成し, 容器内側はプライマーを厚み約30 µmで塗布してある。電荷緩和部を模擬して, 一部分は躯体をCFRPもしくはアルミニウムで作成した。この電荷緩和部は所定の幅, プライマーを塗布していない。電荷緩和部のサイ

キーワード: 炭素繊維強化プラスチック, 流動帯電, 燃料タンク

\* 東京大学

(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, Dept of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo

\*\* 富士重工業

(〒320-8564 栃木県宇都宮市陽南1-1-11)

Fuji Heavy Industries Ltd., 1-1-11, Yonan, Utsunomiya-shi, Tochigi 320-8564

<sup>1</sup> kumada@hvg.t.u-tokyo.ac.jp

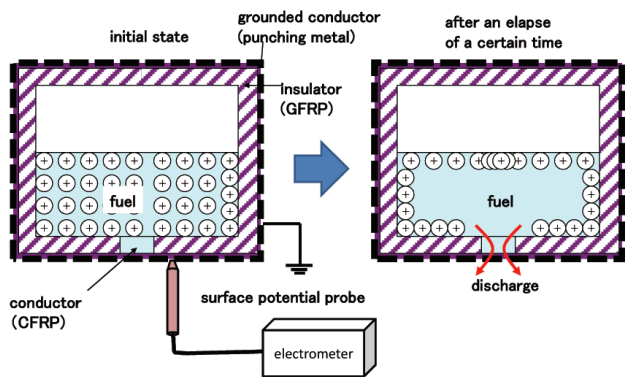


図1 電荷緩和過程測定実験概念図

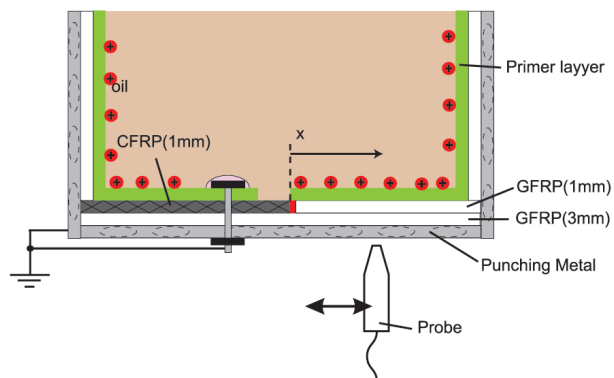


図2 容器の構造

ズ、材質、プライマーの材質を変化させた表1に示す4種の容器を用意した。容器の外側はパンチングメタルで覆い接地した。電荷緩和部はチタン製ファスナーを介してパンチングメタルと導通している。なお、容器内側のチタン製ファスナー頭部は、シリコン系樹脂でシールを施してある。

パンチングメタルに所望の開口部を設け、静電容量型表面電位計を近づけ、開口部より漏れ出る電気力線を捕捉することで容器内壁表面電位を測定する。測定箇所は電荷緩和部端を原点とした時に、 $x = 10, 30, 50, 70$  mmの4位置とした。なお表面電位計出力は、内壁に金属箔電極を張り、既知の電位を印加した時の実験値によりあらかじめ校正している。

2.2 模擬燃料試料

発火の危険性がある航空機燃料に代わり、導電率、移動度、粘性が航空機燃料に近い液体試料を「模擬試料」として使用することとした。移動度は、データとして不明な点が多いので、粘性と導電率が近ければ移動度も近いと仮定し、入手性のしやすさを考慮して東レ・ダウコーニング社のシリコンオイル SH 200 FLUID 2 CS<sup>4)</sup>を使用した。表2に、模擬試料物性を、航空機燃料試料の物性と比較して示す。

シリコンオイルは、空中の水分を吸湿し、導電率が

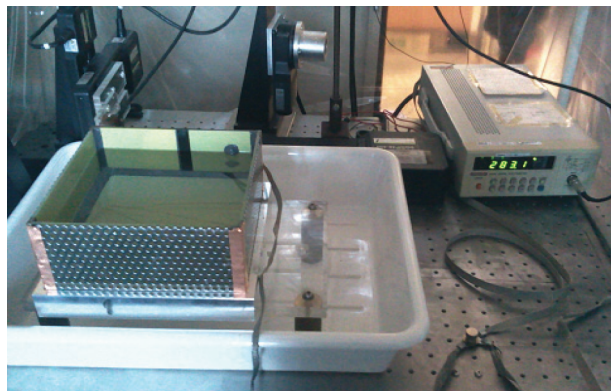


図3 容器の外観

表1 容器の種類

ケース番号	電荷緩和部素材	電荷緩和部幅	プライマー
No.1	CFRP	15mm	A
No.2	CFRP	15mm	B
No.3	アルミニウム	15mm	A
No.4	CFRP	30mm	A

プライマーAの表面抵抗率は  $0.9 \sim 1.3 \times 10^{10} \Omega$  (空气中、実測値)  
 プライマーBの表面抵抗率は  $5 \sim 7 \times 10^{12} \Omega$  (空气中、実測値)

表2 模擬試料の物性

	航空機燃料	SH200Fluid 2CS <sup>5)</sup>
導電率	$1.5 \sim 2.2 \text{ pS/m}^1)$	$0.1 \text{ pS/m}^5)$ $10 \text{ pS/m}^*$ 実測
比誘電率	$2.1^1)$	$2.44 @100\text{-}1\text{MHz}^5)$
動粘性	$2\text{cSt}^{6-8)}$	$2\text{cSt}^5)$

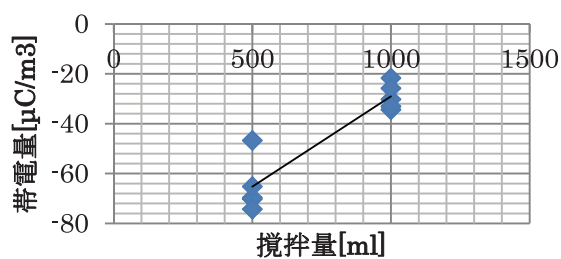


図4 攪拌による帯電

大きく増加することが知られている。そこで、最終的に実験使用した模擬試料の導電率を測定したところ、体積導電率はカタログ値より100倍増加し、 $10 \text{ pS/m}$ であった。

2.3 試料の帯電方法

模擬試料はガラス製ミキサーの内部にPTFEテープを張り付け絶縁しその内部で攪拌することで帯電させることとした。PTFEはシリコンオイルと仕事関数をより離すことで帯電量を少しでも多くするようにしたものである。

図4に、ガラス製大容量ミキサーを用いて、500 ml 及び 1000 ml をそれぞれ4分間攪拌した場合の帯電電荷密度測定結果を示す。帯電電荷量は攪拌後の液体試料を10 ml ポリプロピレン製シリンジで抽出し、ファラデーカップ(アドバンテスト製 TF8031)へと注ぐことで測定した。

攪拌後の模擬試料は負に帯電している。帯電量の文献値には、測定時に使用するホース材料の種類や環境の違いにより、かなりのばらつきがあるが、航空機燃料給油時に起こりうる帯電量は、極性は正に、その密度は数 $10^1$ ~数百 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ ほどと報告されている。極性は逆だが、航空機燃料供給時に起こりうる帯電量に匹敵する電荷密度で帯電できることがわかった。

1000 ml を攪拌した場合、電荷密度は500 ml の半分以下になるため、以降の実験では3台のミキサーでそれぞれ500 ml を攪拌し、さらに同量の無攪拌の試料と混合させたものを用いた。なお、電荷緩和過程測定実験に用いる液体量は2500 ml である。

### 3. 差分法を用いた帯電電荷過渡解析手法

解析においては、図5に示すように単純化した燃料タンク内に、帯電した燃料を投入した場合の電荷分布の過渡変化を二次元場の差分法で解析する。準静的な過程ということで、流体の対流は無視し、電荷及び帯電燃料の運動を支配する方程式は、(1)式に示す電荷保存の式と(2)式に示すポアソン方程式であるとし、これらを連立させて解くことにした。

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \nabla \cdot (D\nabla\rho_i + \mu E\rho_i) = 0 \quad (1)$$

ただし $\rho_i$ :(イオン)電荷密度,  $D$ :拡散係数  
 $\mu$ :移動度,  $E$ :電界

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho_i}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (2)$$

$\epsilon_r$ :媒質の比誘電率,  $\epsilon_0$ :真空の誘電率

計算においては、200 mm × 200 mm の領域を、40 × 40 分割し差分化した。最外殻(図中パンチングメタル層)はポアソン方程式において $V = 0$ というディリクレ条件を与え、その一つ内側はGFRP容器層とし、さらにその1つ内側の層を容器内壁に接した層としている。プライマーを塗布した部位に相当する図5中オレンジ色の領域(移流境界層)は、壁に水平には表面導電により電荷は動けるが、外向きには物理的な壁により動けないことを模擬し、外向き移流を制限している。すなわち、このモデルでは、プライマー層塗布領域に隣接する液体領域に空間電荷として電荷が滞留していくことになる。またプライマーを塗布しない部位に相当する赤色の領域(電

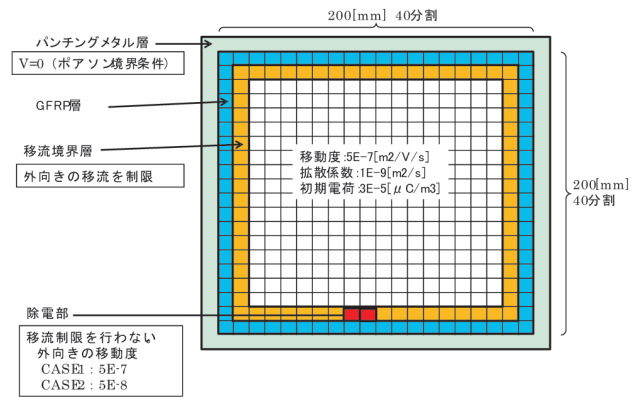


図5 解析時の計算条件

表3 解析時の条件

	液体移動度 [m²/(Vs)]	初期電荷密度 [μC/m³]	電荷緩和部移動度 [m²/(Vs)]	周囲境界層移動度 [m²/(Vs)]	電荷緩和部幅 [mm]
Case1-a	$5 \times 10^{-7}$	30	$5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$	15
Case1-b	$5 \times 10^{-7}$	300	$5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$	15
Case1-c	$5 \times 10^{-8}$	30	$5 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-8}$	15
Case1-d	$5 \times 10^{-6}$	3	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	15
Case2	$5 \times 10^{-7}$	30	$5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-8}$	15
Case3	$5 \times 10^{-7}$	30	$5 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-7}$	15
Case4	$5 \times 10^{-7}$	30	$5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$	30

荷緩和部)においては、移流制限を行わないこととした。図5中の白色で示した部位は、帯電電荷が、ポアソン方程式と連続の式に従って移動する領域である。

方程式を解くにあたり、燃料の拡散係数は調査した限りでは不明であったので、液体の拡散係数の一般的な値<sup>9)</sup>より、 $D = 10^{-9}$  [m²/s]とした。計算時のパラメータは液体の初期電荷密度、液体の物性(誘電率、移動度)、電荷緩和材の材質(体積抵抗率)、容器内壁の誘電率(プライマーの比誘電率は2~3であるため、計算においては液体と同じ2.44、GFRPの比誘電率は4とした)及び表面抵抗率である。電荷緩和材の体積抵抗率については、電荷緩和部の移動度を変化させることで、容器内壁の表面抵抗率については、移流境界層における移動度を変化させることで等価的に評価することとする。表3に解析時の条件をまとめて示す。Case 1~4は、表1に示した実験条件のNo.1~4各容器に対応する。

## 4. 実験結果

### 4.1 初期電荷量及び移動度の影響

実験は表1に示した各容器に対し、複数回行った。図6, 7に結果の一例として、No.1容器使用時の $x = 30$  mmにおける表面電位経時変化測定結果を示す。図6は帯電

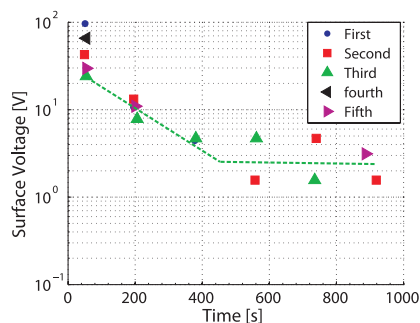


図6 No.1 容器長時間変化測定結果

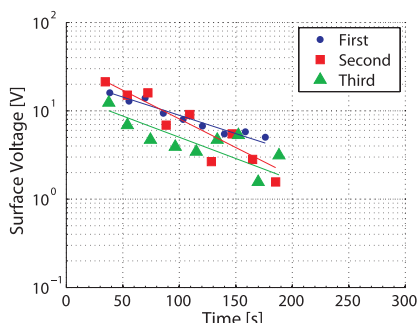


図7 No.1 容器短時間変化測定結果

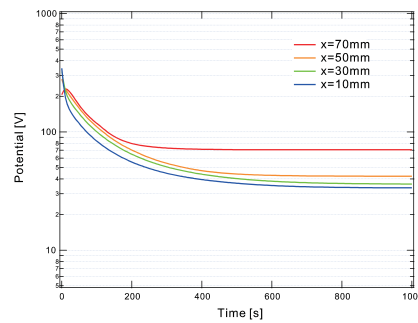


図8 Case1-a 解析結果

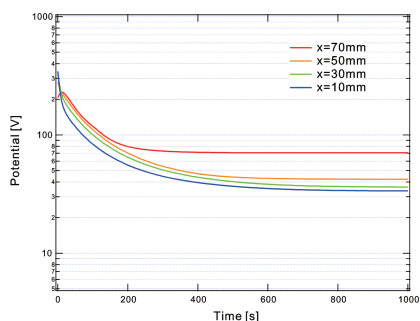


図9 Case1-b 解析結果

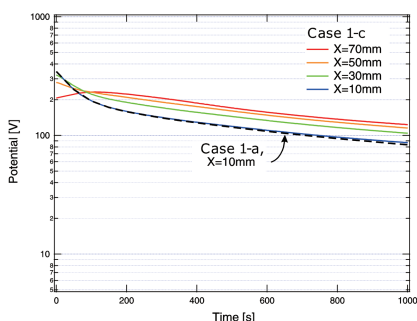


図10 Case1-c 解析結果

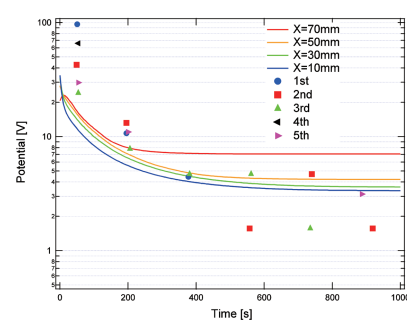


図11 Case1-d 解析結果

液体を容器に入れてから後 1,000 秒後までの長時間電位変化, 図7は 200 秒までの短時間電位変化である。

いずれのケースにおいても, 表面電位は当初指数関数的に減少し, 500 秒経過後にはほぼ一定値に収束している。また, 初期値は, 10-100V と広範囲にばらついた結果となっている。攪拌後ミキサーから実験容器に試料を移すのに要する時間差, 移す際の流動帯電, ミキサー内壁への電荷の残留(付着)によりばらつきが生じたものと考えられる。他の測定個所についても同様の傾向を示した。

No.1 容器(標準容器)を用いたときの表面電位分布計時変化の計算結果を, 初期電荷密度と, 液体部分の移動度をパラメータに計算を行った。ミキサー攪拌時間から, 初期帯電電荷量は  $30 \mu\text{C}/\text{m}^2$  程度と予想されたので, 解析条件 Case 1-a を基準に, Case 1-b が電荷量を 10 倍にした場合, Case 1-c が移動度を 1/10 倍にした場合にそれぞれ相当する。図8に, 標準状態である Case 1-a の計算結果を示す。図6, 7の測定結果と比較すると, 数 100 秒のオーダーで指数関数的に減衰し, 以後一定値に落ち着く点はよく合致している。また,  $x = 70 \text{ mm}$  の結果だけが若干収束値が大きい,  $x = 10 \sim 50 \text{ mm}$  の結果の差はわずかであることがわかる。 $x = 70 \text{ mm}$  の値が大きいのは, 角 ( $x = 100 \text{ mm}$ ) が移流計算の特異点となっているため, その影響を受けたと考えられる。

図8に示した計算結果は, 初期値が実験値に比べて1

ケタ以上大きくなってしまっている。そこで, 初期電荷量が特性に及ぼす影響を議論するため, 初期電荷量を 10 倍の  $300 \mu\text{C}/\text{m}^3$  として計算を行った。結果を図9に, 10 倍する前の特性と比較して示す。初期電荷量を 10 倍とすると, 初期電位も 10 倍になる一方で, 減衰時定数は 1/10 倍になることがわかる。これは計算モデルにおいて, 液体部分の導電電流密度  $j$  は, (3) 式のように電荷密度  $\rho$  にその場の電界  $E$  と移動度  $\mu$  を乗算した値として扱うため, 電荷密度  $\rho$  が 10 倍になると, 液体の導電率  $\sigma$  も 10 倍となるためである。

$$j = \sigma E = \rho \mu E \quad (3)$$

そこで, 標準状態から移動度を 1/10 とし, 初期電荷量は変化させずに  $30 \mu\text{C}/\text{m}^3$  のままとして計算した結果を図10に実線で示す。図中には,  $x = 10 \text{ mm}$  における No.1 容器(標準容器)の計算結果を, 横軸を 10 倍にして表示した結果を比較のためグレーの点線で示している。青の実線で表した計算結果と合致しており, 移動度を 1/10 にすると, 時定数は 10 倍になることが見て取れる。

初期電荷密度を Case 1-a の解析条件の 1/10 の  $3 \mu\text{C}/\text{m}^3$ , 移動度を 10 倍の  $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Vs})$  とした条件 (Case 1-d) で解析した結果を図11に示す。図中には, 図6に示した  $x = 30 \text{ mm}$  における測定結果も比較のため併記している。緑△印で示した 3 回目の実験結果は, 初期電荷量が解析条件である  $3 \mu\text{C}/\text{m}^3$  に近かったと思われ, 計算値と測定値は傾向, 値ともによく一致している。

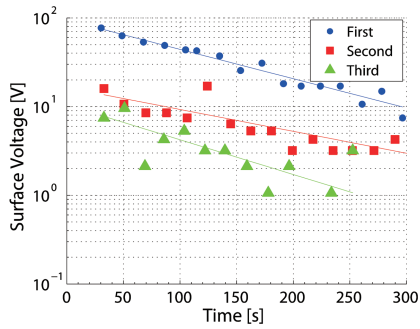


図12 No.2 容器電荷緩和特性測定結果

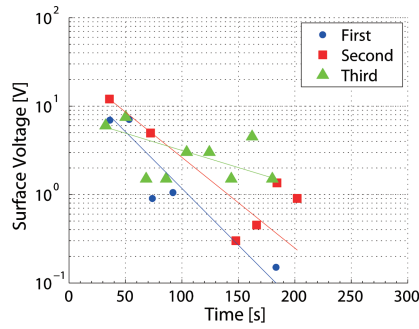


図13 短時間変化測定結果

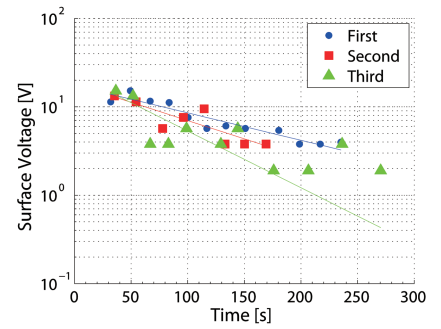
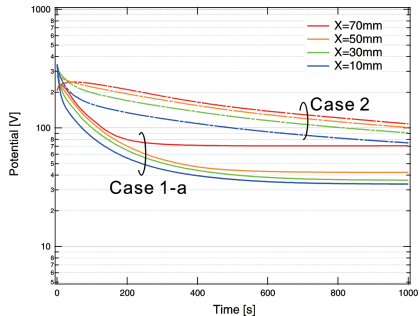
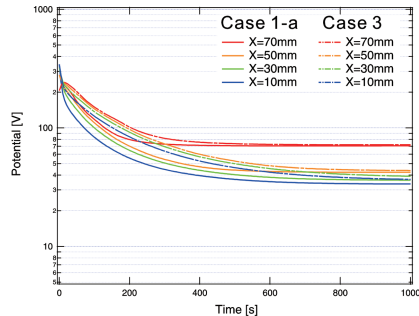
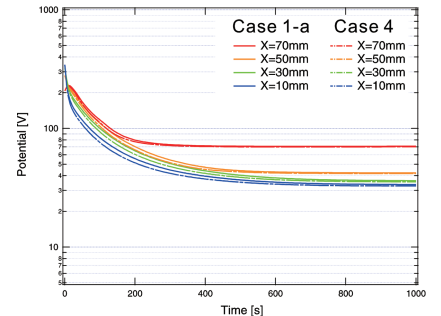


図14 Case1-a 解析結果

図15 Case2 解析結果  
(プライマー表面抵抗率の影響)図16 Case3 解析結果  
(電荷緩和部抵抗率の影響)図17 Case4 解析結果  
(電荷緩和部の大きさの影響)

以上より、実験時における初期電荷量は容器からの移し替えに要する時間中にも減衰(攪拌容器壁面へと移動・付着)するため、攪拌帯電実験から期待していた値の1/10の $3 \mu\text{C}/\text{m}^3$ 程度のオーダであったと推定される。攪拌帯電実験においては、PP製のシリンジで抽出時の流動帯電が重畳していた可能性も高い。また、実験に使用したシリコンオイルの移動度は $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Vs})$ 程度であったと推定される。

#### 4.2 プライマー抵抗率の影響

プライマー表面抵抗率が、電荷緩和特性に及ぼす影響の検証実験を行った。No.2 容器は、プライマーとして、表面抵抗率が二桁大きいプライマーBを塗布したものである。図12はNo.2 容器を用いた場合の $x = 30 \text{ mm}$ における短時間電荷緩和特性測定結果である。図7に示した、プライマーAの測定結果と比較すると、初期電荷量の値が比較的近いNo.1 使用時のFirstの実験結果と、No.2 使用時のSecondの実験結果の減衰時定数はそれぞれ、113秒及び157秒であった。つまり、表面抵抗率を2ケタ大きくすることにより、減衰時定数が1.4倍程度に増加している。

差分法による解析においては、周囲境界層の移動度を調整することで、プライマー表面抵抗率を考慮することとした。プライマーの抵抗率が上昇したことに対応させるべく、周囲境界層の移動度を1/10とした場合(表3

におけるCase 2)の計算結果を図15に示す。Case 2はCase 1-aと比較して、初期値、収束値は変化しないが、減衰時定数がほぼ10倍に増加した。実験結果と比較すると、減衰時定数の測定結果は解析結果ほどプライマーの表面抵抗率による影響を受けていない。プライマー抵抗率の模擬方法も含めて、解析モデルのさらなる精緻化が必要といえる。

#### 4.3 電荷緩和部抵抗率の影響

電荷緩和部の導電性が電荷緩和特性に及ぼす影響をNo.3の容器による実験により検証する。No.3の容器は、電荷緩和部として、CFRPに比較してより導電性のよいアルミニウムを使用したものである。

図13に $x = 30 \text{ mm}$ における短時間電荷緩和特性測定結果を示す。図7に示した、CFRP製電荷緩和部を有する容器による結果と比較する。初期電荷量の値が比較的近いNo.1 使用時のFirstの減衰時定数と、No.3 使用時のSecondの減衰時定数はそれぞれ、113秒及び58秒であった。つまり、電荷緩和部としてより導電性のよい材質を用いることで、減衰時定数が半分程度と、より短い時間で電荷緩和が進行している。

差分法による解析においては、電荷緩和部に相当する領域の移動度で、電荷緩和部分の体積導電率を等价的に模擬している。電荷緩和部の導電率が低下した場合として、電荷緩和部の移動度を1/10とした場合(Case 3)の

計算結果を図 16 に示す。Case 3 は Case 1-a と比較して、初期値、収束値は変化しないが、減衰時定数が 1.5 倍程度となっている。

電荷緩和部としてアルミニウムを使用した場合、CFRP よりも導電性が高く、時定数としては短くなる。測定結果も、時定数は半分程度となっており、定性的には解析結果は測定結果を説明できているといえよう。

#### 4.4 電荷緩和部の大きさの影響

電荷緩和部のサイズが電荷緩和特性に及ぼす影響を測定した。測定にはプライマーを塗布せず溶液に直接接する電荷緩和部を、No.1 の容器の 2 倍とした No. 4 容器を用いた。図 14 に  $x = 30 \text{ mm}$  における短時間電荷緩和特性測定結果を示す。図 7 に示した No.1 使用時の結果と比較をすると、初期電荷量の値が比較的近い No.1 使用時の First と、No.4 使用時の First の減衰時定数はそれぞれ、113 秒及び 104 秒であった。つまり、電荷緩和部の大きさを 2 倍にしても、減衰特性にはほとんど変化がないことが分かる。

差分法による解析においては、Case 4 が、No.4 容器使用時の結果に相当する。計算結果を図 17 に示す。Case 4 は Case 1-a と比較して減衰特性にほとんど変化は現れない。

実験、解析ともに電荷緩和部のサイズが電荷緩和特性に及ぼす影響は小さいという結果が得られた。プライマーの導電性が低い一方で、液体の導電性が高いため、液体中の電荷は壁面に移動し、壁面上に堆積しその後数百秒の時間オーダーでは変化しないと考えられる。

#### 5. おわりに

内部に絶縁塗料を塗布した燃料タンクに帯電した液体を封入したときの電荷密度分布の経時変化を差分法により二次元場において解析するとともに、燃料模擬液体(シリコンオイル)を用いた実験によるタンク内壁の表面電位測定結果との比較を行った。得られた結果は以下の通りである。

- ・内壁電位は、指数関数的に減衰した後、一定値に収束する。
- ・減衰時定数は、初期電荷量及び物質の移動度の影響を受ける。すなわち初期電荷量が 10 倍になれば減衰時定数は 10 倍に、移動度が 10 倍になれば減衰時定数は

1/10 倍になる。

- ・プライマー導電率を高くすると、減衰時定数が短くなる。
- ・電荷緩和部の表面積の影響は計算した範囲においては小さい。

本実験で採用した攪拌による模擬液体試料の荷電は、荷電量の正確な制御が難しかった。今後は、荷電手法の改良、もしくは初期電荷量の正確な把握を行い、より詳細な現象を測定していく予定である。また解析に関しては、表面抵抗率の定量的な取扱を組み込むなどモデルの精緻化をはかりたい。

#### 謝辞

本研究は、経済産業省の委託事業「航空機用先進システム基盤技術開発(耐雷・帯電特性解析技術開発)」にて実施しているものである。

#### 参考文献

- 1) James E. Johnson: Investigation of Electrostatic Charge in Hose Lines. INTERIM REPORT, TFLRF No. 384 (2006)
- 2) J.E. Leonard: Generation of Electrostatic Charge in Fuel Handling Systems. NRL REPORT, 8484 (1981)
- 3) 三菱重工業: 炭素繊維強化プラスチック構造体及び燃料タンク. 特開 2012-187808, 2012 年 10 月 4 日
- 4) The Boeing Company: Application of insulating coating. 米国公開特許 US20080308678A1, Dec. 18 (2008)
- 5) 東レ・ダウコーニング社: SH200 オイル [http://www.dowcorning.co.jp/ja\\_JP/content/japan/japanproducts/W1F001\\_SH200oil.pdf](http://www.dowcorning.co.jp/ja_JP/content/japan/japanproducts/W1F001_SH200oil.pdf)
- 6) Clifford A. Moses, COMPARATIVE EVALUATION OF SEMI-SYNTHETIC JET FUELS FINAL REPORT (2008)
- 7) Environment Canada, Emergencies Science and Technology Division [http://www.etc-cte.ec.gc.ca/databases/Oilproperties/pdf/WEB\\_Jet\\_A-Jet\\_A-1.pdf](http://www.etc-cte.ec.gc.ca/databases/Oilproperties/pdf/WEB_Jet_A-Jet_A-1.pdf)
- 8) ExxonMobil Aviation "World Jet Fuel Specifications with Avgas Supplement 2005 Edition" <http://www.exxonmobil.com/AviationGlobal/Files/WorldJetFuelSpecifications2005.pdf>
- 9) 理科年表 平成 24 年, 丸善出版 (2011)