

# 通電層選択による CFRP 電熱防氷の効率化

## Efficient Anti-icing Methodology Based on Electro-Thermal Effect of CFRP Heating by Selective Current Path Layer

航空宇宙工学コース

航空エンジン超音速流研究室 1245042 西山 和希

### 1. 緒言

航空機では、着氷により空力性能の低下、計器異常などを引き起こす恐れがあり、その対策として各部で着氷を防ぐ「防氷」と氷を取り除く「除氷」が行われている<sup>(1)</sup>。着氷現象は、雨や霧など空気中の液滴が過冷却状態で物体に衝突した際に氷層を形成する現象であり、航空機においては機首や主翼、エンジン部が着氷量の多い箇所である。

ジェットエンジンにおいては、ノーズコーンやファンブレード、圧縮機前段部等のエンジン入口付近で着氷が発生しやすい。その影響として、空気流路の狭窄や空力性能の低下、回転体の重心が偏心することによる振動の発生、成長した氷が離脱した後方の圧縮機等に衝突することによる機械的破損等がある。

現在行われているジェットエンジンの防除氷対策として、エンジンカウルを防氷する電熱ヒータ<sup>(2)</sup>や、圧縮機後段部の高温空気を抽気し(ブリードエア)<sup>(3)</sup>防除氷を行う方法などがある。しかし、ファンブレードは回転する要素であることに加え、構造上薄い形状であるため、上記防氷対策は取りにくく行われていない。

ジェットエンジンのファンブレードの防除氷対策としては、スweep翼形状による防氷技術<sup>(4)</sup>や、防氷コーティング技術<sup>(5)</sup>の研究などが行われている。しかし、これらの研究はエネルギー投入を行わない受動的な技術で防氷に特化している。そのため、それらの技術に加えてエネルギー投入を行う能動的な防氷と除氷を行うことができる技術も必要である。

本研究では、ジェットエンジンのファンブレードに炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の利用が近年進められている点に着目した。CFRPは軽量かつ高強度を特徴として持つ積層構造の材料であり、炭素繊維を多く含んでいる事から、電流を流すと発熱する特性がある。著者ら<sup>(6)</sup>は、この特性を利用し、CFRPファンブレードの前縁から後縁にかけて電流を印加する、新しい防除氷システムの検討を行ってきた。

このシステムの利点として、防氷と除氷のどちらにも利用可能であること、現行のファン形状を維持しつつ、複雑な加工を必要としないこと、ブリードエア<sup>(3)</sup>のようなエンジン内部に対して配管を巡らせるなど複雑な構造でないこと、CFRPは線膨張係数が小さく、加熱膨張による形状変化等の空力的な悪影響が小さいことなどが挙げられる。

先行研究<sup>(6)</sup>では、着氷量が多い前縁を集中的に加熱できる通電手法を模索した。電気抵抗率の高い導電性接着剤を使用すると共に、炭素繊維方向の異なる複数層の内、前縁側の導通炭素繊維層が着氷評価領域にて密になる様に選択し、効率よく温度上昇を行うことができるレイアウトを検討した。それらの手法を用いて、CFRP試験片に電流を印加した状態で低温環境にて液滴を噴霧する防氷試験を行い、本システムの防氷効果を確認した。

航空機における電熱防除氷システムとして、消費電力の削減は課題である。本研究では、CFRP電熱防氷の省電力化を目的として、CFRPの炭素繊維層を限定し通電することで、着氷量集中箇所の高温度による防氷効果改善を実現できる手法を模索した。また導電性接着剤の抵抗値を変更するために塗布厚を変更し、防氷効果を確認する試験を行った。

### 2. 試験装置及び試験方法

#### 2.1 試験装置

本研究では、防氷効果を実験により確認するため、図1に示す着氷風洞を用いた。着氷風洞の仕様を表1に示す。この着氷風洞は冷凍機<sup>(1)</sup>により室内温度を下げた後、ブローア<sup>(2)</sup>を稼働させ通風することで、寒冷気流を模擬した風洞試験が可能である。着氷風洞には、噴霧洞<sup>(3)</sup>から噴霧された液滴が寒冷気流によって過冷却状態となり、縮流洞<sup>(4)</sup>通過後にテストセクション<sup>(5)</sup>に設置された試験供試体に衝突することで着氷が発生する。噴霧ノズルは図2のように噴霧洞中央に縦一列に3個配置されている。使用した噴霧ノズル(いけうち、充円錐ノズル CBIMJ2001)は、液圧と空気圧を調整することで噴霧流量と液滴径を変えることができる気液二相流体ノズルである。

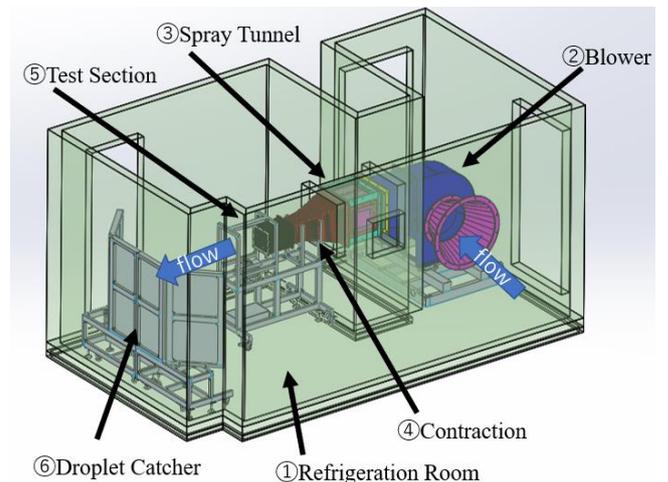


Fig.1 Icing wind tunnel

Table 1 Specification of icing wind tunnel

Maximum Airflow Speed [m/s]	50
Temperature [°C]	-30 ~ -5
Freezing Room [mm <sup>3</sup> ]	2500 × 4500 × 2400
Spray Tunnel [mm <sup>2</sup> ]	400 × 400
Air Outlet [mm <sup>2</sup> ]	200 × 200

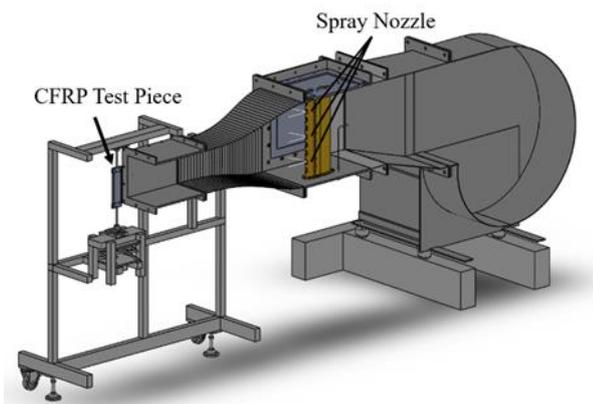


Fig.2 Spray nozzle position

## 2.2 試験供試体

本試験で使用した CFRP 試験片を図 3 に示す。CFRP は東レ製 T800S/3900-2B を 24ply 積層したものであり、炭素繊維を含むプリプレグ層の構成としては、 $[0^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 90^\circ]_s$  である。CFRP 試験片はコード長 58.6 mm、スパン長 187 mm、厚さ 4.56 mm であり、前縁 (LE) と後縁 (TE) はナイフエッジに加工されている。プリプレグ厚さは 0.19 mm で、導電性接着剤を塗布する前後縁の斜面部では 1mm 幅である。

防水試験は CFRP 試験片の前後縁間で電流を印加し、試験供試体を発熱させることで防水を行う。試験供試体は図 4 に示すように、着水部である前縁の高温化のため前後縁に異なる導電性接着剤を用いた。これは先行研究<sup>(5)</sup>と同様の組み合わせを用いており、前縁には FA-705BN (藤倉化成) を、後縁には XA-910 (藤倉化成) を塗布した後、銅箔を取り付けた構成とした。使用した導電性接着剤の電気抵抗率 (単位長さ当たりの抵抗値) の仕様を表 2 に示す。

図 5 に示すように、先行研究では CFRP への通电のために、通電幅 30mm (スパン方向幅) に対してエッジ付近の斜面全体に導電性接着剤を塗布していた。しかし、その通电手法ではプリプレグ層は炭素繊維方向と通电方向が一致している  $90^\circ$  方向の 6 層である。そこで本試験では、その 6 層から防水に寄与する層のみを通电させ、防水能力の改善を目指した。

そのため通电させる層にのみ導電性接着剤を塗布し、非导电部はポリイミド製テープ (寺岡製作所, 650S-36-20X20) で絶縁した。なお、選択した通电層レイアウトは 3 種類を用意し、Type A は積層中央の 2 層を、Type B は表面に近い層 2 層を、Type C は積層中央 2 層に加え片面のみ表面に最も近い層を通电するレイアウトとした。

また、前後縁における導電性接着剤の塗布厚を変更した。図 6~図 8 に、防水試験前に調査した CFRP 試験片への塗布厚変更における発熱温度および供試体抵抗値の傾向を示す。

まず、前後縁の導電性接着剤に FA-705BN を用いて、塗布厚みを変更した試験供試体を製作し、塗布厚みと発熱の影響について調査した。図 6、図 7 に無風条件で試験供試体に電力を供給した際の発熱の様子と抵抗値を示す。導電性接着剤の塗布厚上昇に伴い試験供試体の抵抗値が減少し、塗布位置である前後縁の温度が低下する事が分かった。先行研究<sup>(6)</sup>から、導電性接着剤の接触抵抗が前後縁の高温発熱に寄与している事が分かっているが、厚みを増加させることでその影響が小さくなったと考える。

次に、前縁には FA-705BN を、後縁には XA-910 の導電性接着剤を塗布し、後縁の塗布厚を前縁より増加させた試験供試体を製作し発熱を確認した。図 8 に、通風条件で試験供試体に電力を供給したときの発熱の様子を示す。前縁温度が後縁より高温となり、後縁における導電性接着剤の塗布厚みを上昇させることで発熱温度を抑制できる事が分かった。防

氷試験においても着水部ではない後縁側の過度な発熱を抑えることは重要であるため、これらの特性を利用し、先行研究では前後縁とも塗布厚 150 $\mu$ m であったが、本試験では前縁を 150 $\mu$ m、後縁を 400 $\mu$ m とした。

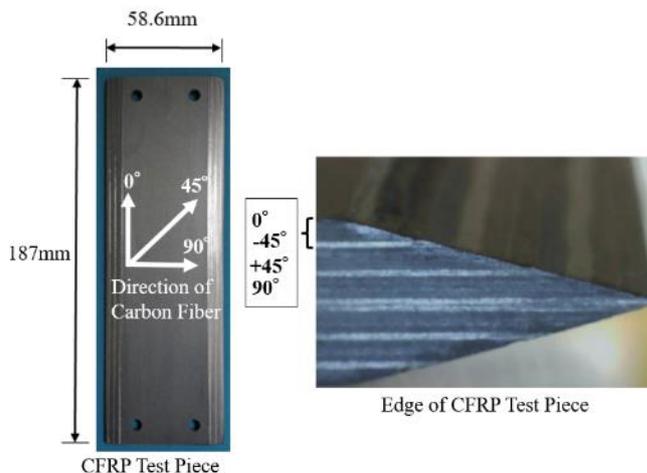


Fig.3 CFRP test piece

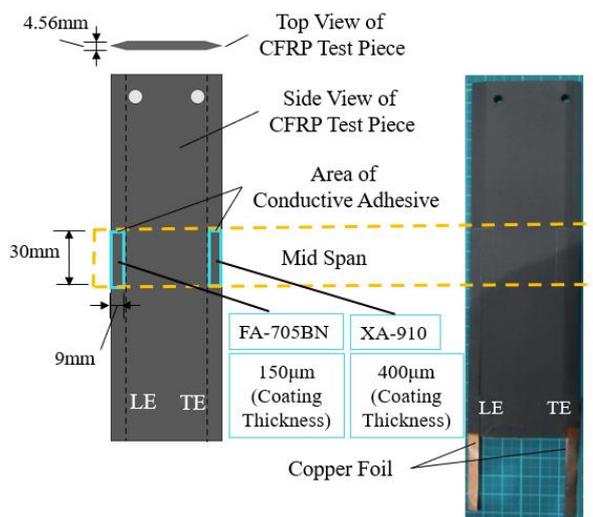


Fig.4 Overview and appearance of CFRP test piece

Table 2 Electrical resistivity of conductive adhesives

Conductive Materials	Range of Electrical Resistivity [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]
FA-705BN	$3 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-4}$
XA-910	$8 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$

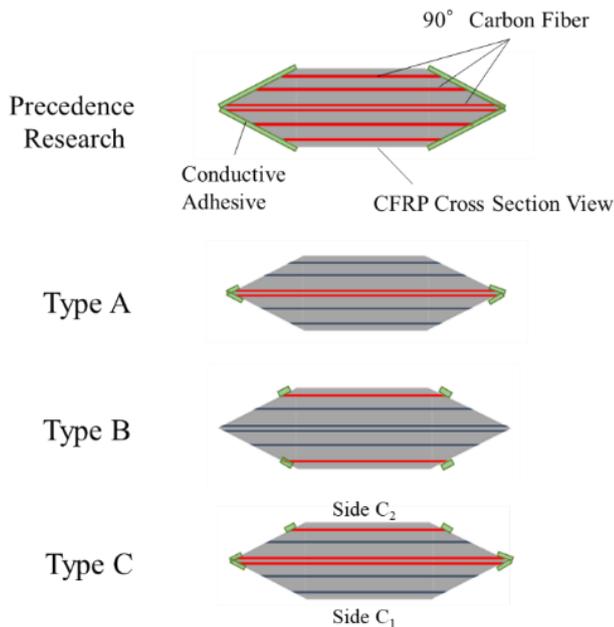


Fig.5 Variations of current path layer

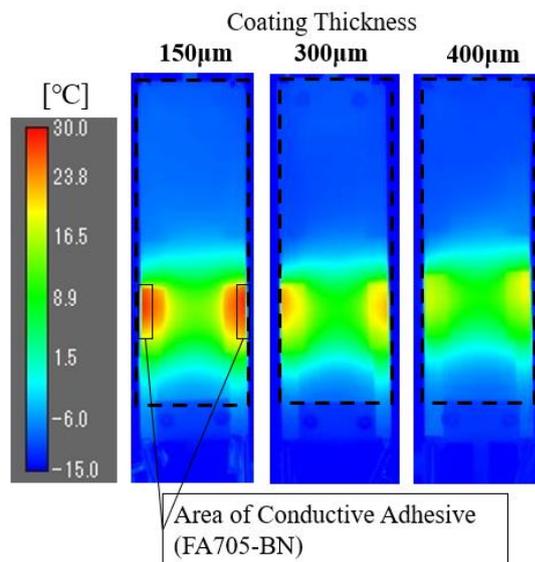


Fig.6 CFRP heating by different coating thickness with 10W in windless settings (thermal image)

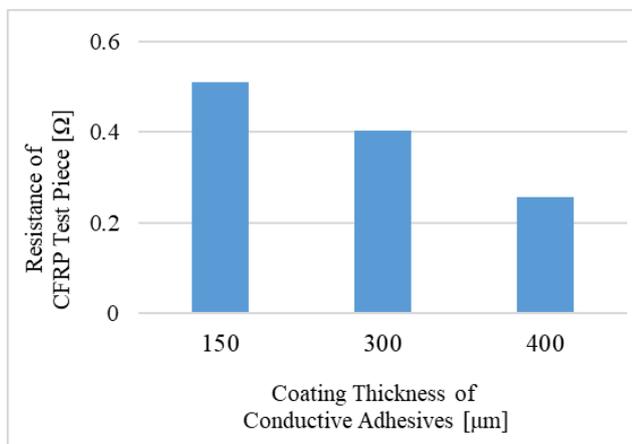


Fig.7 Resistance of CFRP test piece by different coating thickness with 10W in windless settings

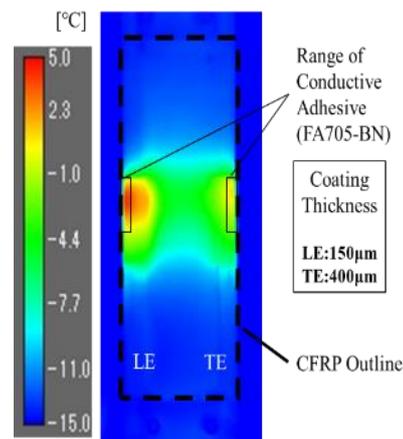


Fig.8 CFRP heating with 10W in 20m/s velocity settings (thermal image)

### 2.3 試験条件

表3に試験条件を示す. 主流の速度はその変化による傾向を調査するため, 20, 40 m/s の2種類を設け, 気流温度 $-10^{\circ}\text{C}$ とした. 液滴径は $15\ \mu\text{m}$ とし, 噴霧流量は流速と液滴径によらず $60\ \text{ml}/\text{min}$ とした. また, プリヒート時間は試験供試体の発熱温度が静定する1.5分とし, 噴霧時間を2分とした.

Table 3 Test conditions

Airflow Speed [m/s]	20	40
Input Power [W]	0, 10, 15, 20, 30, 40	0, 20, 25, 30, 40, 50
Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$-10$	
Droplet Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	15	
Droplet Flow Rate [ml/min]	60	
Pre-heat Time [min]	1.5	
Spray Time [min]	2	

### 2.4 試験方法

寒冷気流中のCFRP試験供試体に電流を印加した状態で液滴を噴霧し, 防水効果を確認する防水試験を行った. 以下では, 試験方法について述べる.

気流が $-10^{\circ}\text{C}$ の時, 試験供試体を1.5分間加熱するプリヒートを実施する. 試験供試体の表面温度は, テストセクション横に設置したサーモカメラ (FLIR製, T630S) を用いて計測した. 試験供試体を加熱するため電流を印加し, その時の電圧を計測し, 電力値を求めた. 投入電力の上限値は, CFRPのマトリックスとして使用されているエポキシ樹脂のガラス転移温度に対して余裕を持たせ, 試験供試体の表面最大温度が $70^{\circ}\text{C}$ 程度となる条件と定めた. 投入電力の下限値は, 防水効果が10%程度となるまでとした. 電力0W条件は, プリヒートおよび電流印加を行わない条件における着氷時のものである.

プリヒートの後, 電流を印加したまま噴霧を開始した. 噴霧終了後に氷が付着した供試体を撮影し, 画像処理ソフト「ImageJ」を用いて供試体の正面と側面に着氷した面積を算出した. 防水効果の評価には, 式(1)により定義される防水効果 $e$  [%]を用いた.

$$e = \left(1 - \frac{A_{\text{anti-ice}}}{A_{\text{ice}}}\right) \times 100 \quad (1)$$

ここで,  $A_{\text{anti-ice}}$  [ $\text{mm}^2$ ]は防水試験後の正面と側面の着氷面積の平均値,  $A_{\text{ice}}$  [ $\text{mm}^2$ ]は非通電時 (電力0W条件) の正面と側面の着氷面積の平均値である.  $A_{\text{anti-ice}}$  および  $A_{\text{ice}}$  の画像解析範囲は図4に示す供試体の通電範囲と一致させ, ミッドスパン位置の30mm幅とした.

### 3 試験結果および考察

### 3. 1 プリヒート時の温度分布

図 9, 図 10 に, 電力 9W 条件でのプリヒート開始から 1.5 分後の供試体の発熱の様子とミッドスパン位置の温度分布を示す. 全ての供試体がほぼ評価領域全域において先行研究<sup>(9)</sup>より高い温度となった. 特に前後縁付近の温度が上昇しており, これは導電性接着剤の塗布幅が先行研究の試験供試体より小さいことから, 導電性接着剤の抵抗値上昇による高温化が寄与していると考えられる.

前後縁の先端付近の層を通电した Type A はよどみ点付近の加熱により対流の影響を抑えられ, 前後縁先端部の温度が高く, Type B は試験供試体表面に近い層を通电したためミッドコード部の温度が高温となった. C<sub>1</sub> 側と C<sub>2</sub> 側の比較では, 試験供試体表面に近い層も通电している C<sub>2</sub> 側の温度が全体的に高温となり, その温度差は発熱温度の高い導電性接着剤を塗布した前後縁においてより大きくなった. これは 2 層分の発熱が合算されたためと考えられる.

また, 着氷部である前縁において最も高い温度を示したのは Type C の C<sub>2</sub> 側であった. これは, 図 5 に示すように, 通电層数の増加に伴い導電性接着剤の塗布位置が増えたことが要因であると考えられる.

防水効率化のためには着氷部である前縁の積極的な加熱が必要となるが, ミッドコード部との温度差が大きくなりすぎるとランバック着氷が発生してしまうため, 两部分において着氷が発生しない温度分布バランスを模索することが重要であると考えられる. ランバック着氷は過冷却液滴が物体に衝突した際に, 衝突した液滴が瞬時に凍結せず, 物体表面や氷の上を流れながら凍結していく着氷のことである.

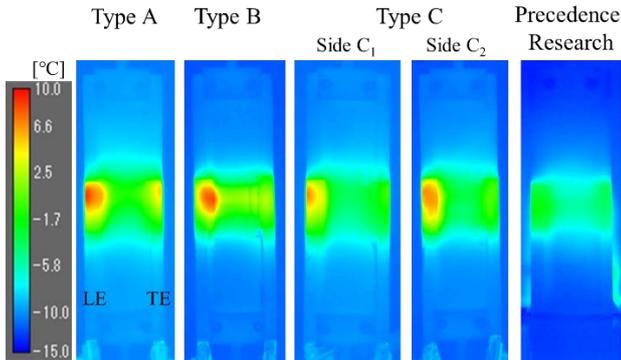


Fig.9 CFRP heating with 15W during pre-heat in 20m/s velocity settings (thermal image)

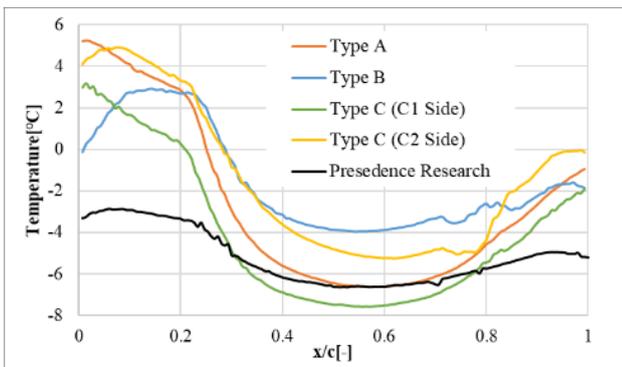


Fig.10 CFRP heating with 9W during pre-heat in 20m/s velocity settings (midspan)

### 3. 2 着氷形状

図 11, 図 12 に, 先行研究を含む防水試験時の着氷形状の一例を示す. 着氷形状から, 層選択条件によって着氷形状が異なることが分かった. Type A はよどみ点付近の発熱温

度が高いことから, 先行研究を含む他の試験供試体より前縁先端部の着氷が少なくなった. Type B はミッドコード部の温度が他の供試体より高いことから, ミッドコード部に付着するランバック着氷が他の試験供試体より少なくなった. 一方, Type C は C<sub>1</sub> 側と C<sub>2</sub> 側で異なる着氷形状を示した. どちらも前縁先端部の着氷量は少ないが, C<sub>1</sub> 側はミッドコード部の温度が最も低いことから, 他の試験供試体よりランバック着氷の量が多くなった. C<sub>2</sub> 側は表面に近い層も通电しているため, C<sub>1</sub> 側よりランバック着氷の量が少ない.

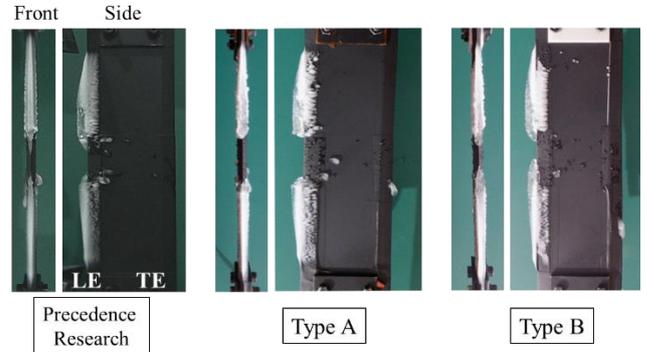


Fig.11 Picture of anti-icing test when input power is changed (20m/s, 20W)

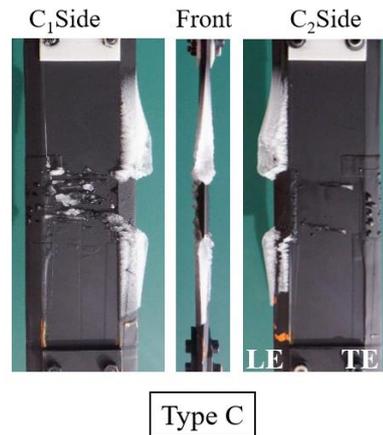


Fig.12 Picture of anti-icing test when input power is changed (40m/s, 30W)

### 3. 3 防水効果

図 13, 図 14 に, それぞれの供試体の電力条件における防水効果を示す. 全ての試験供試体はほとんどの条件で先行研究の防水効果を上回る結果となり, 中でも通电層数が同じ Type A と Type B では A の方が高い防水効果を示した. また Type C は, C<sub>1</sub> 側において比較的多いランバック着氷が見られたものの, ほとんどの条件で最も高い防水効果を示した. このことから, 防水効果の改善には, ミッドコード部より前縁先端部を積極加熱することが重要であることが分かる.

表 4 に, 各供試体の防水に必要な投入電力を示す. 本結果は, 防水効果 90% 時の投入電力と, 通电領域の面積から求めた単位面積あたりの投入電力である.

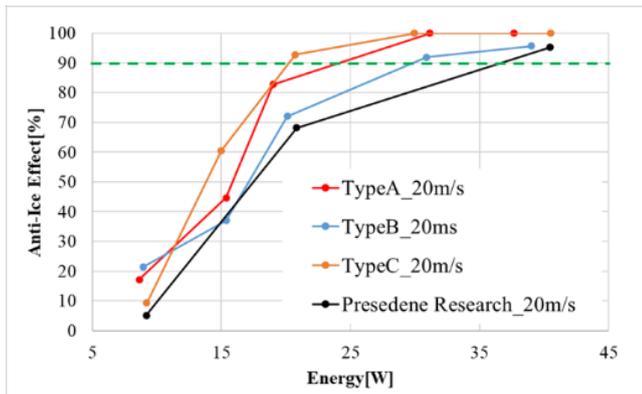


Fig.13 Comparison of input power and anti-icing effect of heating area (20m/s)

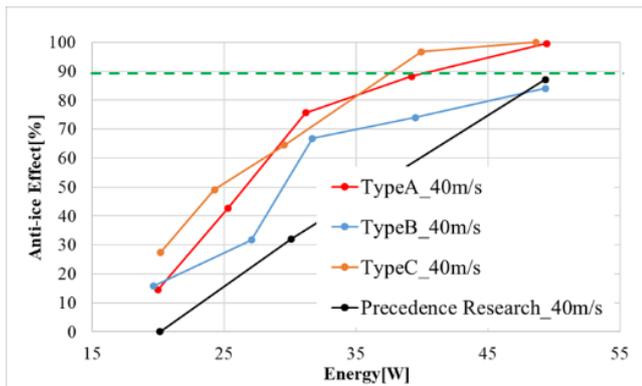


Fig.14 Comparison of input power and anti-icing effect of heating area (40m/s)

Table 4 Required power for 90% anti-Icing effect

		Precedence Research	Type A	Type B	Type C
20m/s	Energy[W]	38	23	30	20
	Energy[kW/m <sup>2</sup> ]	10.73	6.5	8.47	5.65
40m/s	Energy[W]	50	43	50	38
	Energy[kW/m <sup>2</sup> ]	14.12	12.14	14.12	10.73

#### 4 結言

本研究では防氷に必要な消費電力の省電力化を目的とし、通電手法の検討と得られる効果について防氷試験を行い調査した。

得られた知見は以下の通りである。

- CFRP の通電層数を減らすことで、ミッドコード部の温度が上昇した。一方で、通電層数が増えると防氷に寄与する導電性接着剤の塗布位置が増え、前後縁の温度が上昇した。防氷には前縁の積極的な加熱もミッドコード部の加熱も重要であり、効果的な温度バランスを模索することが重要である。
- 中央層を通電させると対流の影響を強く受けるよどみ点付近を集中的に加熱することができ、表面に近い層を通電させるとミッドコード部の表面温度を上昇させることができた。また CFRP 試験片の先端中央から非対称的に層を通電すると表裏面において片側を集中的に加熱でき、片面に防氷を集中できた。
- 導電性接着剤の塗布厚を増加させることで導電性接着剤の抵抗値および発熱温度が低下し、また後縁の塗布厚を上昇させることで、後縁温度の低温化を実現した。
- 先行研究より防氷効果が改善したことに伴い、防氷に必要な消費電力の削減を実現できた。

な消費電力の削減を実現できた。

以上の知見により得られた電力削減量について、実用されている防除氷装置との比較による評価を行う必要がある。そのために、本研究と限りなく近い条件における電熱を用いたシステムの調査および評価方法の模索を行うことが課題として残った。また今後の試験の方向性として、より実現に近い条件で試験を行うために、回転要素を加えた試験を行う。

#### 謝辞

本試験結果は宇宙航空研究開発機構が所有する着氷風洞を利用することにより得られたものである。また受諾指導学生として受け入れて下さった同所の水野拓哉様、鈴木正也様、谷和夫様をはじめ職員の皆様には、多くの知識や示唆を頂戴し、厚く御礼申し上げます。

指導教官である野崎理教授、荻野要介講師には、本研究や論文製作において多くの御助言・御指導を頂いた上、受託指導学生として宇宙航空研究開発機構で研究活動を行うという非常に貴重な機会を与您にいただきました事を心より感謝申し上げます。

#### 文献

- BAE SYSTEMS, Think Ice! Icing Awareness for BAE Systems Regional Aircraft Operators, 2014
- ROOLS ROYCE, The Jet Engine, [online], [https://www.academia.edu/28664431/Rolls\\_Royce\\_-\\_The\\_Jet\\_Engine](https://www.academia.edu/28664431/Rolls_Royce_-_The_Jet_Engine), (参照日 2022 年 2 月 7 日)
- Tomoya Yagi, Koji Fukudome, Makoto Yamamoto, Takuya Mizuno, Junichi Kazawa, Masaya Suzuki, Numerical Investigation of Passive Anti-Icing Technology using Sweep for Fan Rotor Blade, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2019.
- GE Reports, Breaking the Ice: GE Global Research Scientists Achieve New Anti-Icing Breakthrough With Nanotechnology, [online], <https://www.ge.com/news/reports/breaking-the-ice-ge-global-research-scientists>, (参照日 2022 年 2 月 7 日).
- 岩間輝佳, “着氷風洞を用いた CFRP 電熱防除氷システムの加熱手法の検討”, 高知工科大学修士論文, 2021.
- 有賀寛純, “着氷風洞を用いた CFRP 電熱防除氷に関する実験的研究”, 高知工科大学修士論文, 2020.