A Study of Heating Method for Anti-/ De- Icing Systems Based on Electro- Thermal CFRP Heating Using Icing Wind Tunnel

1. 緒言

航空機は低温環境を飛行するため着氷が発生する.航空機 への着氷は,推力や揚力の低下や計器異常などの恐れがあり, 着氷を防ぐための防氷,着氷した氷を取り除くための除氷が 行われている<sup>(1)</sup>.

また、ジェットエンジンへの着氷は、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、離脱した氷による下流要素の損傷などの原因となる.ジ ェットエンジンではスピナーやエンジンカウル、ファンブレ ードなど、主にエンジンの入口付近で着氷が発生しやすい. 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、電 熱ヒータや圧縮機後段の高温空気を送るブリードエア<sup>(2)</sup>な どがある.しかし、ファンブレードは形状が薄く、強度要求 も厳しいため、ブリードエアの配管や電熱ヒータを取り付け ることが難しく、防除氷対策が行われていない.

エンジンファンの防除氷対策としては、スイープ翼形状に よる防氷技術<sup>(3)</sup>や、GE 社による防氷コーティング技術<sup>(4)</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あり、防氷に特化しているた め、能動的に防氷と除氷を行える技術も必要である.

-方, ターボファンエンジンのファンブレードには, 炭素 繊維強化プラスチック(CFRP)が利用されている. CFRP は 炭素を多く含むため、電流を流すと発熱する特性がある.先 行研究(5)では、この発熱特性に着目し、CFRP に電流を印加 することによる抵抗加熱を利用した新しい防除氷システム を提案した.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、CFRP に電極を取り付けるだけ で複雑な加工や構造を必要としないこと, CFRP の線膨張係 数が小さいため,加熱膨張によるファンブレードの形状変化 を抑えられ、空力面において優位である事などが挙げられる. このシステムの効果を確認するために、着氷風洞を用いて、 寒冷気流中で発熱させた CFRP 試験片に過冷却液滴を噴霧す ることで、着氷を防ぐ能力を調べる防氷試験が行われ、CFRP 電熱防氷の特性の調査が行われた<sup>(6)</sup>. CFRP 電熱防氷の可能 性が示されたが, 強制対流による温度低下の小さい後縁にお いて,前縁より温度が高くなってしまうため,不必要な電力 の消費やCFRPの機械的特性を損なわないための投入電力の 制限などの課題が明らかになった.また,先行研究(のではス パン方向に対して 90°方向の繊維のみを利用していたため, 防氷可能な範囲が限られていた.

本研究では、先行研究の課題を解決するために、前縁を積 極的に加熱することによる防氷効果の向上を目的として実 験を行った.また、複数の繊維方向を利用するレイアウトで の防氷試験も行った. 航空宇宙工学コース

航空エンジン超音速流研究室 1235098 岩間 輝佳

### 2. 試験装置及び試験方法

本研究では、冷凍室内に液滴の噴霧を行うことができる風 洞を設置した着氷風洞を用いて、平板状の CFRP 試験供試体 に対し過冷却液滴を噴霧することで着氷させた.以下では、 試験装置や試験方法ついて詳しく述べる.

### 2.1 試験装置

試験には、図1に示す①から⑦で構成される着氷風洞を用 いた.仕様を表1に示す.着氷風洞は、冷凍機により室内温 度を下げることで寒冷気流中での風洞試験が可能となる.噴 霧洞(④)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、吹き出し口直後にあるテストセクション(⑥)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.使 用した噴霧ノズルはいけうち製の充円錐ノズル CBIMJ2001 で、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となっており、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.



rig. rienig which tunner

Table 1 Specification of icing wind tunnel

Maximum Airflow Speed [m/s]	50
Temperature [°C]	-30 ~ -5
Refrigeration Room [mm <sup>3</sup> ]	$2500\ \times 4500\times 2400$
Spray Tunnel [mm <sup>2</sup> ]	400  imes 400
Air outlet [mm <sup>2</sup> ]	$200 \times 200$



Fig. 2 Spray nozzle position

### 2.2 試験供試体

本研究で使用した CFRP は東レ製 T800S/3900-2B であり, プリプレグ厚さは 0.19 mm で, [0/-45/+45/90]3s の 4 方向(疑 似等方性)で 24 層に積層したものである.実験に用いた 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,前縁と後縁はナイフエッジに加工されてい る.

試験供試体は図 3 に示すように、前縁には導電性接着剤 FA-705BN(藤倉化成,電気抵抗率 6×10<sup>4</sup>[Ω・cm])を,後縁 には導電性接着剤 XA-910 (藤倉化成, 電気抵抗率 4×10<sup>-4</sup>[Ω・ cm])を塗布した後,銅箔を取り付けた構成とした.先行研究 ⑥では、前縁と後縁に同じ導電性塗料を使用していたが、本 研究では,異なる導電性接着剤を使用することで,図4のよ うに前縁を積極的に加熱できるようにした.また、図5に示 すように、導電性接着剤をスパン方向に前縁 30 mm と後縁 30 mm で塗布した Case1, 前縁 60 mm と後縁 100 mm で塗布 した Case2 の試験供試体を作製した. Case1 は 90°方向の繊 維しか発熱に利用されないが、Case2の試験供試体は図6に 示すように, 導電性接着剤の塗布位置を変更することで, ±45°方向の繊維を利用できることが分かったため、図5の右 のように±45°方向の繊維を利用するレイアウトとし発熱範 囲の拡大を狙った. さらに、後縁より前縁で導電性接着剤の 塗布面積を小さくし、電流密度を高くすることで効率的な温 度上昇を狙った。

試験は CFRP の前後縁に対して電流を印加し, 試験供試体 を発熱させることで防氷を行う.



Fig. 3 CFRP test piece



Fig.6 Thermograph of CFRP heating (Offset)

### 2.3 試験条件

主流の速度は 20,40 m/s,気流温度-10 ℃ とした.また, 液滴径は 15 µm と 29 µm を採用した.噴霧流量は,流速と液 滴径によらず 60 ml/min で噴霧時間 2 分とした.表 2 に試験 条件を示す.

Table 2Test conditions					
Airflow Speed [m/s]	20		40		
Temperature [°C]	-10				
Droplet Diameter [µm]	15	29	15	29	
Droplet Flow Rate [ml/min]	60				
Spray Time [min]	2				

## 2.4 試験方法

CFRP 試験供試体に電流を印加することによる防氷効果を 確認するために,電流を印加しない着氷試験と印加する防氷 試験を行った.以下では,着氷試験と防氷試験の試験方法に ついて述べる.

## 2.4.1 着氷試験

着氷試験では、図3で示した試験供試体をテストセクショ ンに設置し、気流温度が-10℃で静定したことを確認後、噴 霧を開始した.気流温度は噴霧洞内に設置した熱電対を用い て計測し、着氷の様子は監視カメラ(Panasonic, DG-SC385) をテストセクション横に設置し録画した.噴霧終了後に側面 と正面の着氷画像を撮影した後、氷の付着した試験供試体の 重量を計測し、予め計測しておいた着氷試験前の試験供試体 重量との差を着氷重量とした.

## 2.4.2 防氷試験

防氷試験では、防氷能力を確認するため、電流を印加しな がら噴霧を行った.着氷試験と同様に気流温度が-10℃に静 定後、電流を印加して試験供試体表面温度が定常となるまで 1分半の加熱を行った.その後、電流を印加したまま噴霧を 開始した.試験供試体表面温度はサーモカメラ(FLIR 製, T630S)をテストセクション横に設置し計測した.着氷試験 と同様に噴霧終了後、防氷時の着氷重量を求めた.

印加する電流の上限値は、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点に対して余裕を 持たせ、試験供試体の表面最大温度が 70 ℃ 程度となる条件 と定めた.印加電流の下限値は、防氷効果が 10%程度となる ところまでとした.

防氷効果の評価には,式(1)により定義される防氷効果 e [%]を用いた.

$$e = \left(1 - \frac{m_{anti-ice}}{m_{ice}}\right) \times 100 \tag{1}$$

ここで *manti-ice* [g]は防氷試験の着氷重量, *mice* [g]は着氷試験の着氷重量である.また,画像解析ソフト ImageJ を用いて着氷面積による評価も同様に行った.

#### 3. 結果と考察

加熱を行わなかった場合の各条件における側面、正面から 見た着氷の様子を図7に示す.液滴径と流速の違いで比較す ると、液滴径を大きくした場合は氷の透明度が高くなり、流 速を高くした場合はスパン中央部に着氷が寄る傾向が見ら れた.

図8のBaseは前後縁に先行研究<sup>60</sup>と同じ導電性塗料D-500 (藤倉化成,電気抵抗率 $8\times10^5$ [ $\Omega \cdot cm$ ])を使用した時の結 果であり,前縁で温度低下が見られることから気流の影響を 受けていることが分かる.次に,Caselを見ると-10°C,40 m/sでも,前縁の温度を高くすることができている.Case2で は,前縁に電気抵抗率の高い導電性接着剤を使用した事と前 縁の電流密度を高くした事により,前縁で温度上昇が大きく なった.図8の発熱状態時の着氷結果を図9に示す.前縁を 積極的に加熱したCase1では加熱範囲で防氷ができたが, Base とCase2では前縁への着氷が残った.



Fig. 7 Side and front image of icing tests without applying current



Fig. 8 Thermograph of CFRP heating about 50W (40m/s)



Fig.9 Side and front image of anti-icing test with current (40m/s, 15µm)

図10に示すように、先行研究の防氷試験結果をBaseとして、Case1と比較するとすべての条件で防氷効果が高くなっていることが分かる.特に気流の影響の大きい40m/sで防氷 効果の差が大きくなった.これは、Case1で前縁側を積極的に加熱したことによる効果が大きく出たためであると考えられる.

次に,図11に示すように Case1 と Case2 を比較すると,加熱範囲を広くしたため必要な電力は大きくなったが,投入 電力を大きくしていくと加熱範囲が広いため最終的には Case1より Case2 で防氷効果が高くなった.









着氷重量による評価では,加熱領域以外の着氷を含んでし まうため,防氷効果を過小評価してしまっている.そこで, 加熱範囲(電流が流れる領域)に対しての着氷面積で評価す ることにした. 面積の算出には画像解析ソフト ImageJ を用 いて、図 12 のように橙色の枠で示された範囲の着氷面積を 求めた.着氷面積による防氷効果は、側面と正面の着氷面積 を考慮するためそれぞれの面積を足して2で割ったものを, 式(1)の着氷重量と置き換えて計算した. 図 13 と図 14 は着氷 面積で防氷効果を評価した結果である.このように加熱範囲 に対する着氷面積で評価した場合は、最大投入電力のとき Casel では、すべての条件で防氷効果を 90%以上にすること ができた. Base と比較すると,特に 20W~30W で防氷効果の 差が大きくなった.これは、前縁への着氷を防げるかどうか で着氷面積が大きく変わるためであると考えられる.また, 図 14 のように投入電力を加熱面積で割り単位面積当たりの 投入電力にした場合, 0.75W/cm<sup>2</sup> 以上の範囲において Case1 より Case2 で防氷効果が高くなる傾向にある事が分かった.





Fig.14 Comparison of input power and anti-icing effect of heating area (Case1 and Case2)

# 4. 結言

本研究では,前縁を積極的に加熱することによる防氷効果 の向上を目的として実験を行った.また,±45°方向の繊維を 利用することによる発熱範囲の拡大と前縁の電流密度を高 くすることによる効率的な温度上昇を狙ったレイアウトで の防氷試験も行い、その傾向を調査した. 得られた知見は以下の通りである.

- 前縁に電気抵抗率の高い導電性接着剤を使用すること 1) により、前縁の温度を後縁より高くすることができた.
- 2) 前縁を積極的に加熱することで,前後縁に同じ導電性塗 料を用いた先行研究より, すべての条件で防氷効果を高 くすることができた.
- 単位面積当たりの投入電力で評価すると、0.75 W/cm<sup>2</sup>以 3) 上の範囲において,加熱範囲を広げたレイアウトで防氷 効果が高くなる傾向が見られた.

#### 文献

- (1) BAE SYSTEMS, Think Ice! Icing Awareness for BAE Systems Regional Aircraft Operators, 2014.
- ROOLS ROYCE, The Jet Engine, [online], https://www. (2)academia.edu/28664431/Rolls Royce - The Jet Engine, (参照日 2020 年 1 月 28 日).
- Tomoya Yagi, Koji Fukudome, Makoto Yamamoto, Takuya (3) 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.
- (4) GE Reports, Breaking the Ice: GE Global Research Sci entists Achieve New Anti-Icing Breakthrough With Nan otechnology, [online], https://www.ge.com/news/reports/br eaking-the-ice-ge-global-research-scientists, (参照日 2021 年1月28日).
- (5) 和田展忠,"防除氷のための CFRP への電流印加による 発熱効果の実験的研究",高知工科大学修士論文,2019.
- (6) 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.