

# 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

## Experimental Research of Electro-Thermal Effect on CFRP Heating for Anti-/De-Icing Systems

知能機械システム工学コース

航空エンジン超音速流研究室 1215038 和田 展忠

### 1. 緒言

航空機は低温環境の中で飛行するため、機体の周囲で着氷が発生する。これは、空気中の過冷却液滴が物体に衝突すると、瞬時に液体から固体に変化し氷が付着すると考えられている。着氷が機体の周囲で発生すると揚力や推力の低下、抗力の増加、計器異常等のトラブルを引き起こすことがある<sup>(1)</sup>。そして、エンジンにおいてはファンブレードやノーズコーンに着氷が発生し、空気流路の狭窄による空力性能の悪化、回転体の重心が偏心することによる振動の発生、肥大化した着氷の剥離による圧縮機側への損傷等を引き起こし、最悪の場合墜落事故の原因となってしまう<sup>(2)(3)</sup>。従って、機体の周囲だけでなくエンジンの防除氷対策が求められている。

最近では、エンジンのファンブレードへの防除氷対策として、表面に撥水加工を施して着氷させない方法<sup>(4)</sup>やスweep翼の開発（ファンブレードを下流側に反らせることにより着氷しにくくする方法）が研究されている<sup>(5)</sup>。しかし、表面撥水加工は耐久性においてまだ技術的課題があり、スweep翼は翼の形状を変形させるため空力性能が低下する恐れがある。従って、エンジンファンに有効な新しい防除氷対策が求められている。

近年のジェットエンジンに使用されるファンブレードに注目すると燃費性能の向上のために CFRP を使用して軽量化を図っている<sup>(6)</sup>。また、CFRP には電流を印加すると発熱する性質がある。そこで、この性質を利用することで、防除氷対策が可能になると考え、本研究では、CFRP の発熱特性による防除氷効果の実験的検証を行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験準備および実験条件

##### 2.1.1 実験準備

CFRP 試験片（東レ、T800#3900-2B）に電極を貼り付けて発熱効果による防除氷の検証を行った。本試験で使用した供試体を図 1 に示す。供試体の作成方法は、電極を取り付ける試験片とアルミテープの部位に導電性接着剤（藤倉化成、D500）を塗り 150°C の恒温槽で 30 分間硬化させ下地を作る。硬化後、その上に電極を貼り付け、先述と同じ条件で再度硬化させる。その後、導線をカバーするようにアルミテープを貼り付け、80°C の恒温槽で 3 時間加熱する。また、アルミテープはファンブレードの前縁と後縁を想定して貼り合せている。最後に、供試体表面の放射率を均一にするため黒色塗料を塗る。

##### 2.1.2 実験条件

実験では、+極と一極の高さの位置を合わせた場合（以下、”対称”と呼ぶ）と一極を+極よりも 80mm 高いところで貼り付けた場合（以下、”オフセット”と呼ぶ）を行った（図 2）。又、各実験では、比較検証を行うため、粒子径、電極位置、電流をパラメータとして CASE を設定し、各 CASE において防氷試験と除氷試験を行った（表 1）。加えて、それぞれの試験では、試験片の LE 側（前縁）と電極付近に熱電

対を取り付けた試験を 1 回、着氷量の計測試験を 2 回行った（表 2）。

図 3 と 4 に実験装置の概略と供試体付近の断面を示す。

実験では、冷凍庫内温度を -13°C とし、気液 2 相混合流体ノズルを使用して液滴を噴霧した。液滴径については先行研究<sup>(7)</sup>と同様の 34.4 μm を使用した。



Fig. 1 Specimen

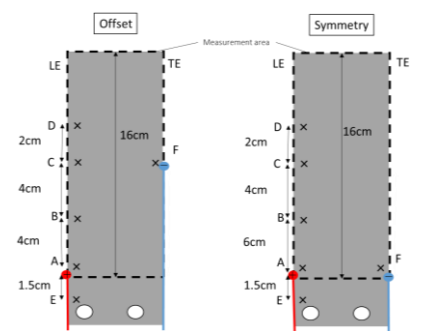


Fig. 2 Electrode position and measurement points of temp.

Table 1 Experimental condition

Particle size [μm]	Electrodes Position	Electrical Current [A]	CASE
34.4	Symmetry +:0mm, -:0mm	6	1
		7	2
		8	3
	Offset +:0mm, -:80mm	6	4
		7	5
		8	6

Table 2 Contents of measurements

		Measuring Objects (Runs)
CASE	Anti-icing	Temperature of Surface at LE side (Run 1)
		Amount of the ice on the specimen (Run 2, 3)
	De-icing	Temperature of Surface at LE side (Run 4)
		Amount of the ice on the specimen (Run 5, 6)

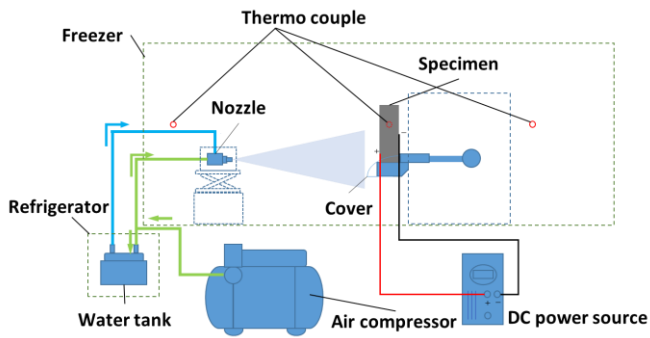


Fig. 3 Schematic test equipment and power supply unit

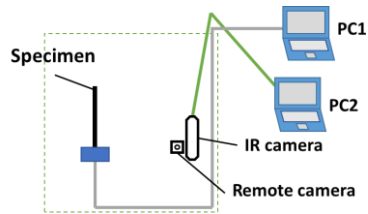


Fig. 4 Cross section near the specimen

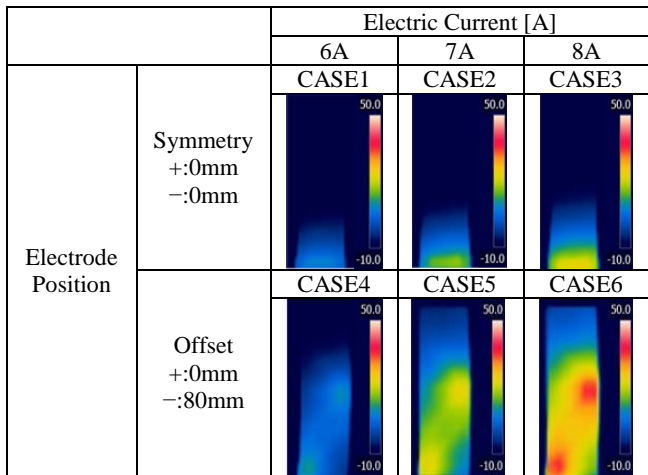


Fig. 5 Thermography

## 2.2 実験計測手順

本試験では、防氷試験と除氷試験がありそれぞれの計測手順が異なる。防氷試験は、試験片に10分間電流を印加後、3分間液滴を噴霧し、途中サーモカメラと熱電対による温度計測を行った。除氷試験は試験片に3分間液滴を噴霧し、その後10分間電流を印加し、サーモカメラと熱電対による温度計測を行った。

着氷量は、着氷後の質量から無着氷時の質量を引いたものとする。熱電対を用いた表面温度計測 (Run1,4) では、図2の×部分に熱電対を、着氷量計測時 (Run2,3,5,6) ではE点のみ熱電対を設置した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 供試体表面温度分布

図5はCASE1~6のRun1の防氷試験における噴霧前(電流印加開始から10分後)の供試体表面をサーモカメラで撮影した画像である。画像から、電流値が上がるにつれて温度が上昇していることが分かる。対称の場合、供試体の下部に発熱が見られるが、供試体の上のほうまで熱は伝わっていなかった。しかし、オフセットの場合電極を中心とした領域と電極間の領域で主に発熱することが分かった。

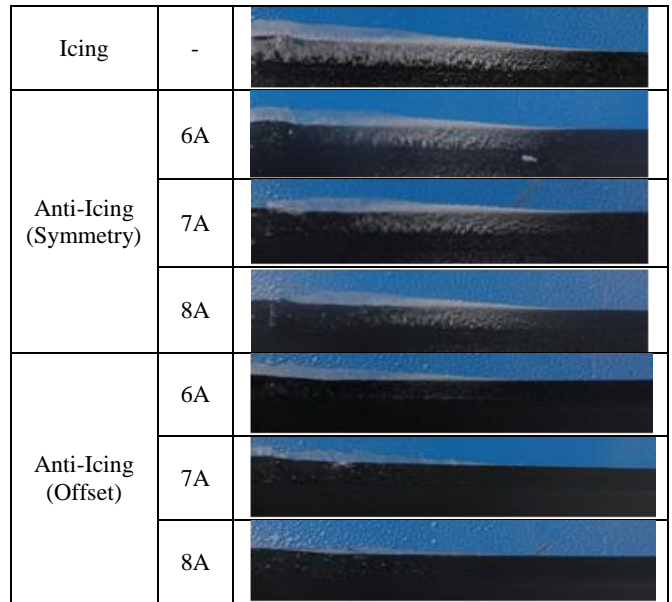


Fig. 6 Photos of glaze ice shape at the leading edge

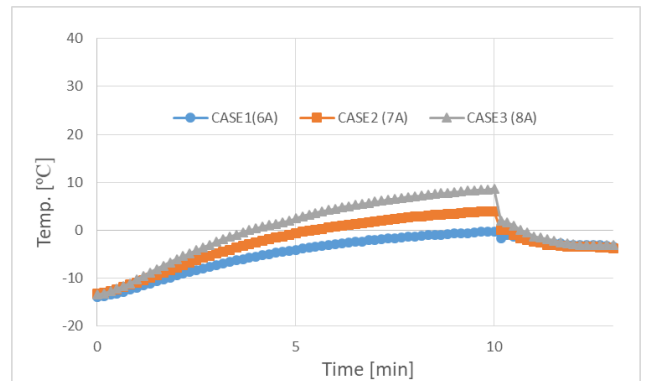


Fig. 7 Temp. of the specimen in anti-icing test (symmetry)

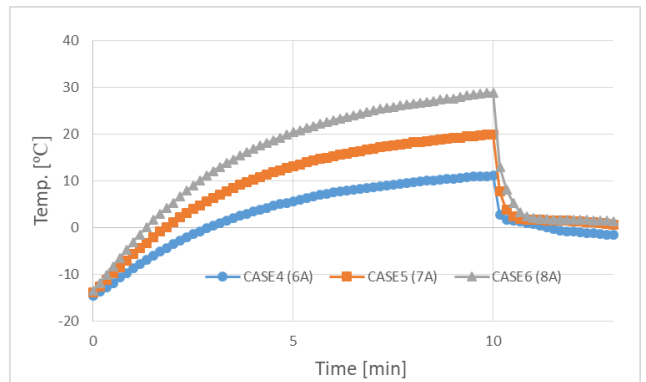


Fig. 8 Temp. of the specimen in anti-icing test (offset)

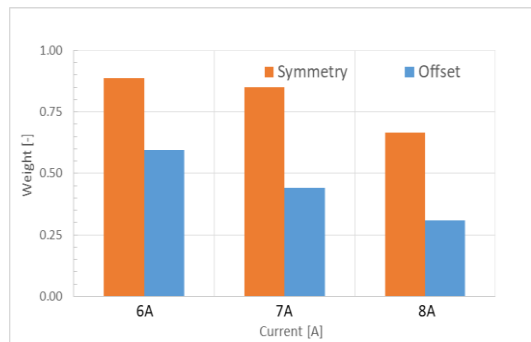


Fig. 9 Comparison of symmetry and offset in anti-icing test

### 3.2 防水試験

図 6 は、供試体の LE 側の + 極付近より上の着氷を撮影したものである。写真の左端に + 極を設置している。一番上の写真は、電流を印加していないときの着氷写真である。防水試験の結果では、電流値が上がるにつれて、防水効果は高くなることが確認できた。またオフセットの場合は、対称の時と比べ着氷量が少なくなったことが分かる。これはオフセットさせることで電極間が対角線上になり長くなったため加熱領域が増え、防水効果が高くなったと考えられる。

CASE1~3 における Run1 の供試体表面温度(熱電対 B 点)を図 7, 同様に CASE4~6 を図 8 に示す。図 7 の場合、加熱領域が狭いため、液滴を噴霧すると(10 分以降) 0°C 以下になった。図 8 では、CASE4 の場合、10 分後に液滴が噴霧されると試験片が急激に冷やされ、噴霧から 1 分も経たないうちに 0°C 以下になり、図 6 の防水(オフセット)6A の写真のように着氷したと考えられる。CASE5, 6 のグラフでは、CASE6 の方が CASE5 と比べ温度が高いにも関わらず、噴霧開始後ほぼ同じ温度になった。これは潜熱によるものと考えられる。もともと、過冷却液滴は液体だが、衝突しても供試体の熱によって固体にならず、また氷になるまでに時間がかかるため常にほぼ一定の温度を保ち続けたと考えられる。この時の熱電対の温度が 0°C よりも少し高い値になっているのは、熱電対の貼り付け箇所が LE 先端から 5mm 後方のため、熱が奪われにくかったと思われる。

CASE1~6(Run2, 3)の結果を整理して x 軸に電流値を y 軸に着氷量とした時のグラフを図 11 示す。これらは、CFRP に電流を印加しないときの着氷量を 1 として、オフセットと対称でどの程度の防水効果があるかを示している。結果より、対称もオフセットも電流値が上昇するにつれて防水効果は高くなった。さらに、対称よりもオフセットの方が、効果が高かったことが確認できた。

以上より、防水対策を行うにあたり電極をオフセットさせた方が効率よく防水できると考えられる。

### 3.3 除氷試験

図 10 に供試体 LE 側の除氷後の画像を示す。一番上の写真は、着氷後の写真である。CASE1~3(対称)の LE 側は除氷することがほぼ不可能だったが、CASE4~6(オフセット)の結果では、CASE4 を除き、ほぼ除氷することができた。これは、オフセットさせた方が温度はより上昇し、加熱領域が供試体上方へ広がるため除氷効果が大きくなったと考えられる。

CASE1~3 における Run4 の供試体表面温度(熱電対 B 点)を図 11, 同様に CASE4~6 を図 12 に示す。図 11 では、電極からの発熱が弱いため 0°C 以上の温度になるまで時間がかかり、ほとんど除氷ができなかった。一方、図 12 の結果では、0°C 付近で一旦安定し、その後また上昇を始めている。これも潜熱による影響で、氷が水に変化するのに時間がかかり 0°C 付近で温度上昇が止まったが、氷が無くなったことで温度上昇を開始したと考えられる。

防水試験と同様に CASE1~6(Run4, 6)を整理した着氷量と電流値の関係を図 13 に示す。結果から、オフセットの方が対称と比べ除氷効果が非常に高いことが確認できた。以上より、防水対策と同様に除氷対策を行うときは、対称よりもオフセットの方がより効果が大きいと考えられる。

## 4. 結言

本研究では、CFRP の発熱特性を利用して防除氷効果を確認することができた。以下に得られた知見を示す。

- 1) 印加電流が同じ場合、電極位置をオフセットさせることで加熱領域が広くなり温度も高くなる。
- 2) 電流値が高くなるほど供試体温度は上がり、温度上昇

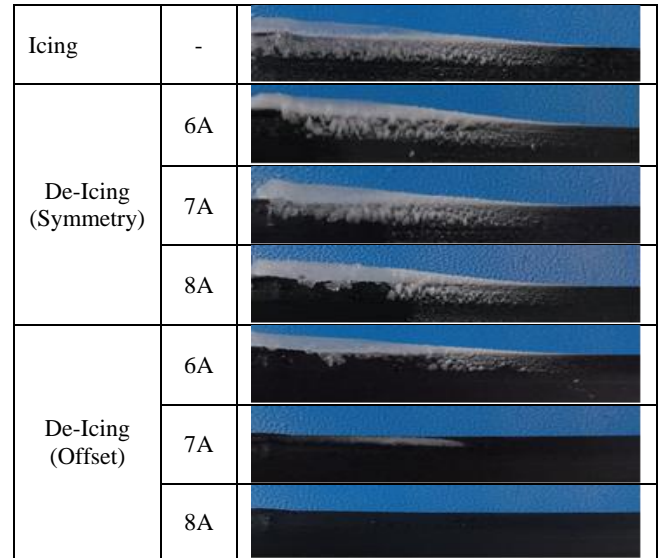


Fig. 10 Photos of glaze ice shape at the leading edge

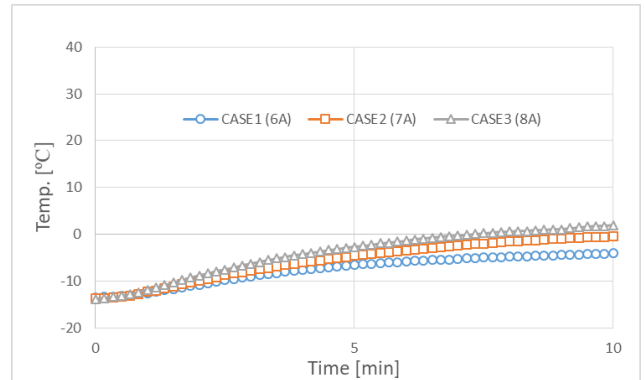


Fig. 11 Temp. of specimen in de-icing test (symmetry)

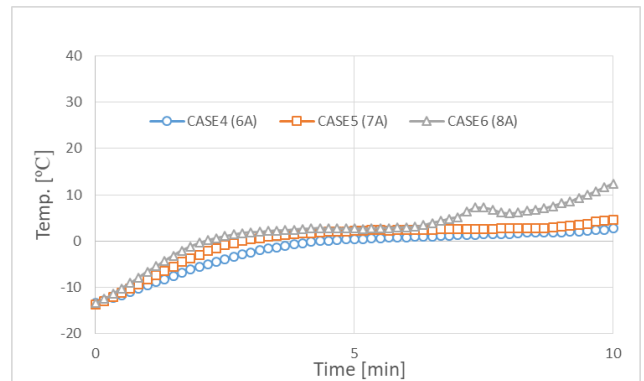


Fig. 12 Temp. of specimen in de-icing test (offset)

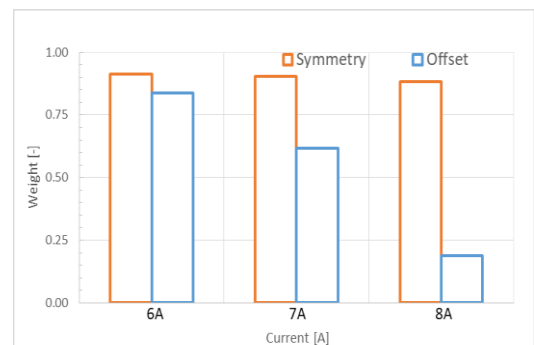


Fig. 13 Comparison of symmetry and offset in de-icing test

も早くなる。

- 3) オフセットの方が対称と比べ防除氷効果は大きい。特に除氷については効果の違いが顕著になった。

#### 文献

- (1) Politovich, M. K., "Aircraft Icing," Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Elsevier Science Ltd., (2003), pp. 68-75.
- (2) Safety Targeted Awareness Report from the ERA Air Safety Group, "Winter Operations – Tailplane and Engine Fan Blade Icing" ERA, V2, (2014), pp. 5.
- (3) Shires, G.L. and Munns, G.E., "The Icing of Compressor Blades and their Protection by Surface Heating," A.R.C. Technical Report, No. 3041, (1955).
- (4) 守田克彰, "機能性分子を用いた着氷防氷コーティング面上の過冷却水滴における静的・動的着氷現象の研究", 博士論文, 東京, No.129575, (2013).
- (5) 和田拓也, 守裕也, 山本誠, 水野拓哉, 賀沢順一, 鈴木正也, "UPACS を用いたファン動翼防氷技術のフェージビリティ調査" 日本機械学会関東支部, 東京, Vol. 208., (2018).
- (6) Mohamed, H., "Trimming of CFRP aircraft components", WJTA-IMCA, Houston, Texas, (2013), pp. 13.
- (7) 橋本幸子, "冷凍環境における液滴噴霧による着氷現象に関する基礎的研究", 高知工科大学修士論文, 2018.