

プラズマアクチュエータを用いた防雪・融雪技術開発研究

Development Study on anti-snow/snow melting techniques using Plasma Actuator

松田 寿* 千葉隆弘** 矢神雅規*** 田島悠介*

Hisashi MATSUDA, Takahiro CHIBA, Masaki YAGAMI and Yusuke TAJIMA

The plasma actuation effect on the flow around two kinds of renewable energy systems was studied experimentally using wind tunnel facilities. First, flow around a photovoltaic module at the attack angle of 15 degrees was investigated using a low-speed wind tunnel facility. The plasma electrode, made by the Kapton tape and thin copper tape, was set just at the leading edge of the corner of the PV module. The actuator was operated in pulsed modulation mode of the non-dimensional frequency of $St=Uf/L=1.0$ conditions. Where U is the main flow velocity and L is the height of the PV module and f is the pulsed frequency, respectively. The smoke visualization test indicates that vortex flow in the separation region was affected by the plasma actuation. Second, the weatherability of the practical plasma actuator electrode, produced by Asahi-rubber Inc., was studied using the natural snow wind facility at the Hokkaido University of science. NACA0015 test blade of the chord length of 300mm and span width of 790mm was manufactured using a 3D-printer. The angle of the attack of the blade was fixed at 15 degrees. PIV measurements were conducted on various plasma actuation conditions using natural snowflakes as a tracer. It became clear some snowflake jumped on the suction side of the blade and flow away. The trace of the snowflake is not completely coincident with the airflow. Snow deposit tests were also carried out. It became clear that snow deposition was started from the trading edge of the blade and after reaching the leading edge of the blade, it spread over the whole suction region of the blade. Under snowfall conditions, the actual plasma electrode has suffered no damage and operated stably.

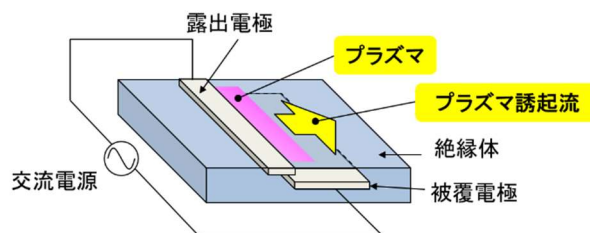
1. はじめに

地球温暖化対策, エネルギーセキュリティの観点から再生可能エネルギーの活用が急務となっている。北海道では12月~2月の厳冬期に電力需要のピークがあるが, 着雪による風車翼の損失増加に伴う発電量低下, 凍結氷の飛散による車両や付属施設の被害, 太陽電池モジュール表面への積雪による発電障害の発生など, 再生可能エネルギー普及促進の妨げになる課題を多く抱えている。より安心安全な発電システムの提供のためには, こうした寒冷地における再生可能エネルギーに及ぼす着雪や凍結の影響を低減した発電システムを提供する必要がある⁽¹⁾。

近年, プラズマアクチュエータから発生する熱源を工学的に利用しようという研究が進められている⁽²⁾。プラズマアクチュエータは, 絶縁体を挟んで

非平衡に配置した2枚の薄い電極から構成されるデバイスである(図1参照。以下, PAと称する)。

PAは誘電体を高圧電極で挟んだ薄い膜状構造をもつデバイスであり, 稼動部を持たない流体制御技術である。薄膜構造であることは大幅な改造無しに既存機への適用が容易である利点をもたらす。また万が一故障したとしても薄膜が張り付いた状態になるだけであり, 故障の影響が最小限に抑えられるという優位を持つ。



* 北海道科学大学 工学部 機械工学科
** 北海道科学大学 工学部 建築学科
*** 北海道科学大学 工学部 電気電子工学科

図 1. プラズマアクチュエータ概要図

これまで PA による剥離流れの制御については多くの研究報告がなされている^(3,4)。本研究では PA による気流制御と発熱現象を組み合わせた防氷・除氷(防雪・融雪)システムの開発を目標とする。

2019 年度は PV モジュールへの適用を想定した風洞実験を実施した。また(株)朝日ラバー殿との共同研究の一環として 2 次元風車翼モデルを対象とした実用 PA 電極⁽⁵⁾の耐候試験を本学の自然雪風洞を用いて実施したので報告する。

2. 太陽光モジュールの風洞試験

2-1. PV モジュールの設置条件

冬季の北海道地域は北西風から西風が卓越することが知られている。一方、PVモジュールは太陽光を効果的に得るため南向きに設置されることが多い。札幌の場合、設置角 35° が太陽光を受けるには最適の角度である。したがって、札幌におけるPVモジュールは 35° の迎角を持った平板翼のような状況になる。そこで小型のPVモジュールにPAを設置して、PVモジュール周りの流れをPAによって制御できないか低速風洞を用いて検討した。

2-2. 試験装置

風洞には $400\text{mm}\times 400\text{mm}$ の吹き出し口を持つ回流風洞(風量: $240\text{m}^3/\text{min}$, 最大風速: 25m/s , 荏原製作所製)を用いた。試験に用いたPVモジュールは幅 285mm , 高さ 180mm , 厚さ 20mm である。予備試験の結果、設置角度 35° では剥離流れを制御することは困難であったため、迎角 15° 条件で試験を実施した。プラズマ電極は銅テープ(スリーエム製、幅 5mm , 厚さ $35\mu\text{m}$)とカプトンテープ(寺岡製作所製、幅 15mm , 厚さ $50\mu\text{m}$)によって製作し、露出電極端がPVモジュールの上端になるように配置した。図2に風洞試験の様子を示す。



図 2. 風洞試験の様子

2-3. 試験結果

試験風速は煙可視化で効果を確認することを想定して $U=3\text{m/s}$ ($Re=UL/v \approx 3.6 \times 10^4$)とした。剥離流れ制御に良好とされる無次元周波数 $St=fL/U=1.0$ 条件(パルス変調周波数 $f=17.8\text{Hz}$, Duty比=10%)でプラズマ電極を 20kHz の両極性パルス電圧(7kVpp)で印加した。高電圧プローブ(Tektronix 6015A)と電流モニタ(Pearson model2878)を用いてプラズマ電極の発振状況をモニターした。図3にパルス変調とDuty率の説明図を示す。可視化にはスモークジェネレータ(PS LASE Z400)と高速カメラ(加藤光研, K7-USB)を使用し、光源には 1W のレーザーポインタ(Green laser pointer)を用いて、光学ミラー(THORLABS CCM5-P01/M)およびシリンドリカルレンズ(THORLABS LK1684L1-A)でシート状に照射した。図4(a,b)にプラズマOFF時のPVモジュール周り流れの様子とプラズマON時の流れの様子を示す。

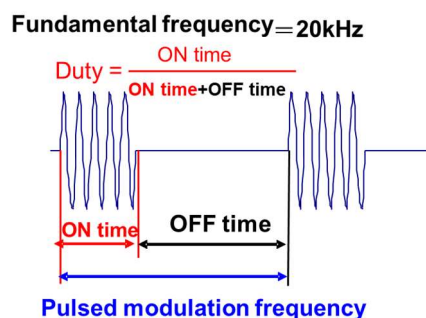


図 3. パルス変調と Duty 率の説明図

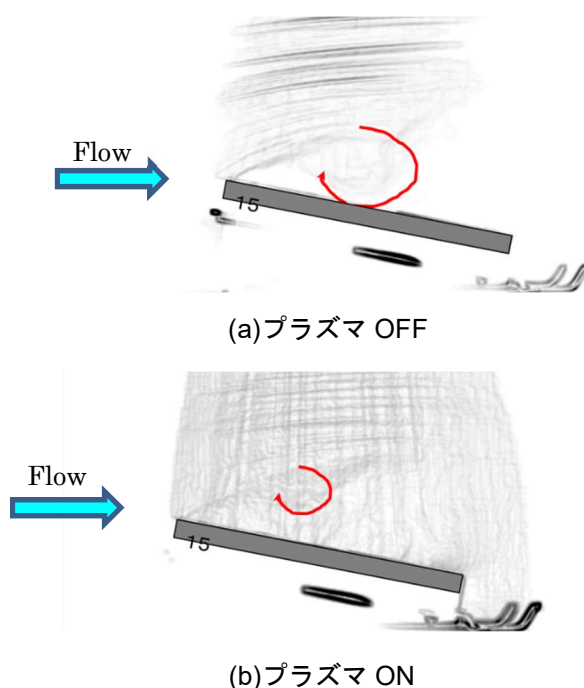


図 4. PV モジュール周り流れの様子

図は高速カメラで計測した煙可視化画像をWindows Movie Makerに取り込みエッジング処理したものである。PVモジュール前縁から流れが大きく剥離するが、プラズマOFFの場合(図a)は剥離域全体を覆うような大きな渦流れが観測された。これに対しプラズマONの場合は剥離剪断層に沿って集中した渦流れが観測され、この結果、PVモジュール表面の逆流は弱まるようであった。翼周り流れのPIV試験においては、PAIによって渦が周期的に生成され剥離剪断層に沿って増速域が形成されることが報告されているが、今回の可視化結果もこれに整合する現象と考えることができる。

2-4. 次年度予定

次年度はPAIによる剥離流れの制御がPVモジュールの堆雪に及ぼす影響およびPAIによる融雪技術の可能性について調べていく予定である。

3. 2次元風車翼の自然雪風洞試験

3-1. 試験装置

次に(株)朝日ラバー殿との共同研究の一環として実施した実用PA電極の耐候試験結果について報告する。

試験には北海道科学大学が所有する自然雪風洞施設を使用した。本風洞では実機条件相当のスケールで冬季の自然降雪を利用した風洞実験が可能となっている。最大風量は1000m³/min、最大静圧0.26kPaである。風洞試験部は高さ1m、幅1mであり、最大風速18m/sである。風洞施設の外観を図5に示す。

試験翼型はNACA0015翼とした。試験翼の製作にあたっては製作コストや納期および今後の改造の容易を考慮して、近年普及が進んできた樹脂を素材とする熱溶解積層型3Dプリンター(Ender-3Pro)を用いた。コード長Lは300mmとしスパン長は翼のアスペクト比および風洞スパンを考慮して800mm程度とした。翼前縁には実翼プラズマ電極を段差無く埋め込めるよう電極厚さ分だけ彫り込んだ設計とした。試験に用いたプラズマ電極は全体厚さが約1.1mm、誘電体としてシリコーンゴム、電極としてチタン薄膜が用いられた構成である。3DプリンターのスライサーソフトにはCreality slicer 1.2.3を用いた。材料にはAlunar社製のPLA素材(黒色)ならびにCreality製のPLA素材(黒色)を用いた。後者の方が製作時

のトラブルも少なく製作状況が良好であった。積層ピッチは0.2mm、隔壁厚さは1.2mmとし充填率20%でPLA素材を積層印刷した。3Dプリンターを使った積層状況を図6に示す。1度の3Dプリンター印刷製作時間を考慮して翼スパン長は100mmおよび150mmで製作を行うこととしたが印刷トラブルによってスパン長50mm程度になったものもあった。最終的に8つに分断された翼を接着固定してトータル790mmの大型翼を製作した。接着にはアクリサンデー(アクリサンデー社)を用いた。試験翼の翼組み合わせ状況を図7に示す。



図 5. 自然雪風洞試験装置

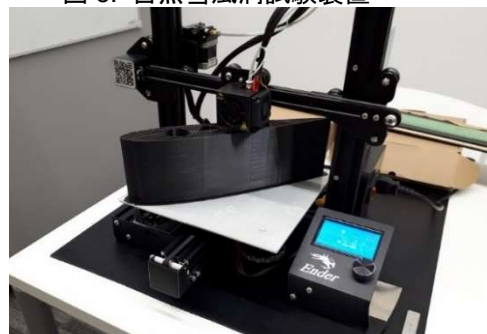


図 6. 3D プリンターを用いた試験翼の製作状況



図 7. 試験翼の組み合わせ状況

現在詳細を検討中である。

なお試験翼表面には積層ピッチに伴う若干の段差が生じていたが、サンドペーパーや電動サンダーを用いて試験に支障がないよう平滑化を施してある。試験翼にはプラズマ両電極のオーバーラップ部分が翼前縁に合致するように装着した。またプラズマ電極との接合部はシリコン接着剤で覆い防水を施した。

こうして組み立てた試験翼をSUS製の風洞架台に組み込んで風洞試験に用いた。風洞架台にはアジャスターが備えてあり風洞架台を風洞床に確実に固定できる構造となっている。また試験翼の迎角を5度置きに固定できるようになっている。図8に試験翼を組み込んだ風洞架台を示す。

3-2. PIV試験

一般に風車運転時には着雪現象は発生せず、風車停止時に風車ナセルや翼周りに着雪することが多いと言われている。そこで試験風速は $U=5\text{m/s}$ を基準とし、 $U=3\text{m/s}$ および 7.5m/s でも計測を行った。これらの風速は風車が停止している場合、あるいはカットイン風速前でモータリングしているときの風車ブレードの相対速度相当である。流れの可視化用のトレーサーには降雪直後の自然雪を使用した。雪採取の様子を図9に、雪投入部の様子を図10に、試験時の雪投入の様子を図11に示す。投入部には硬質プラスチックの回転ブラシが備えられており一定回転数で運転することにより降雪量を調整することが可能となっている。なお降雪直後でも気温によって雪の性状は変化する。このため風洞室温を -5 度程度に下げ、ここに採取した雪をしばらく放置することで雪の湿度をさげ、乾き雪の状態にしてトレーサーとして使用した。

試験部での降雪状況を図12に、レーザーシート光を使用したPIV（画像粒子流速計）計測の様態を図13に示す。可視化用のカメラにはVision Research Inc.社製のPhantom V1212を用いた。レーザーシートの作成にはカトウ光研株式会社製の光ファイバーケーブル方式のものを用いた。試験時には4W程度で照射しPIV計測を行った。解析ソフトにはFlow Expert2D2Cを用いた。

雪片をトレーサーとするPIV試験においては、翼周りの気流流れと雪片の移動状況が必ずしも一致しないことが分かった。また雪片が翼前縁で飛び跳ねる跳躍現象を確認した。PIV解析結果については



図 8. 試験翼と風洞架台



図 9. 自然雪の採取状況



図 10. 自然雪の取り込み口



図 11. 雪の投入状況



図 13. 試験部における PIV 計測状況

3-3. 積雪試験

乾き雪では翼周りの堆雪が認められなかったので、次に湿り雪を使った積雪試験を試みた。最低気温 -2°C の気温条件で降った新雪を採取して試験に使用した。雪の状態は雪玉をつくるのにちょうどよいほどの湿り具合であった。

図14はプラズマOFFの時の積雪状況を降雪開始から30秒毎に示したものである。撮影はGoPro HERO7 Black CHDHX-701-FWを風洞内に設置して行った。雪は湿り雪を54リットルの盥に詰め、この盥2杯分を3分間で使い切る程度に降らせた。従って本試験は加速堆雪試験に相当する。風洞上部に設けられた雪の投入口は風洞中央に位置しているので翼の両端側には降雪はない。

図13を見ると、降雪開始30秒後には電極前縁が雪に覆われていることがわかる。また翼前縁のほかに翼前縁で跳ねとんだ雪片や剥離渦に巻き込まれた雪片が翼の後縁側から堆雪していく様子が見て取れる。60秒後の写真を見ると翼前縁の付着雪も徐々に増えていくが、翼後縁に堆雪した雪が前縁側へとその範囲を広めていく様子が見て取れる。90秒後には翼後縁から堆雪してきた雪が前縁に達し、その後

は120秒後、150秒後と翼背面全域にわたって堆雪量が増えていくことが確認できる。翼周りの堆雪は、前縁を起点にして生じるのではなく、翼後縁の堆雪を起点に生じることを初めて確認した。

続いてプラズマON時の積雪試験の結果について述べる。図14は風速3m/s下において基本周波数50kHz、8kVppの両極性パルス電圧、無次元周波数 $St=fL/U=1$ に相当するパルス変調周波数=10Hz、Duty率1%で印加した場合の堆雪の様態を示したものである。雪はプラズマOFF時と同様に、54リットルの盥2杯に詰めた湿り雪を3分間で使い切る程度に降らせた。

プラズマONの場合(図15)にも、降雪開始直後から電極前縁が雪に覆われ始めるが、翼面の堆雪は翼前縁が起点となるのではなく、翼後縁側からの堆雪が前縁側へと広まってきて、それが前縁に達したのちに、翼背面全域にわたって広がっていくことが分かった。

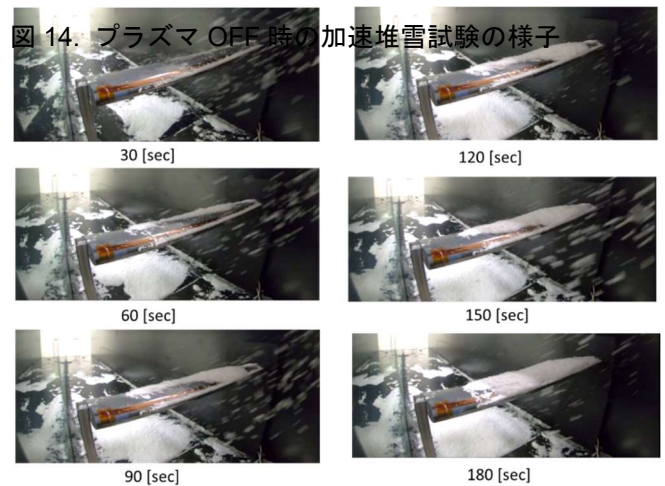
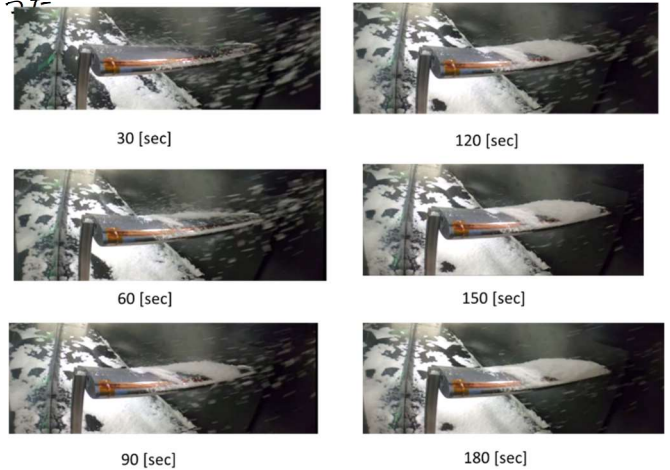


図 14. プラズマ OFF 時の加速堆雪試験の様子

図 15. プラズマ ON 時の加速堆雪試験の様子

試験後の堆雪の様子をプラズマOFFとONで比較してみると、プラズマOFFの方が、若干最大堆雪高さが大きいようにも思われるが、翼面に対する降雪分布とも関連してくることであり、今後、降雪条件の一樣化を図れるよう検討していく。同一試験を繰り返し実施して、統計的処理するのが現実的かもしれない。

3-4. まとめ

自然雪風洞にコード長300mmのNACA0015翼モデルを設置し、乾き雪をトレーサーとしたPIV試験ならびに湿り雪をつかった積雪試験を行った。

乾き雪の場合は、翼背側で雪が飛び跳ねながら流れて行く跳躍現象が生じていることがわかった。また雪片の動きは気流の流れと必ずしも一致するものではないことも確認された。PIV解析について今後も検討を進めていく。

湿り雪をつかった積雪試験では、流れの淀み点に相当するプラズマ電極周りに雪が積もっていくが、翼前縁のほかに翼前縁で跳ねとんだ雪片や剥離渦に巻き込まれた雪片が翼の後縁側から堆雪していき、この堆雪がやがて翼前縁に達し、翼面全域に広がっていくことを確認した。翼周りの堆雪は、前縁を起点にして生じるのではなく、翼後縁の堆雪を起点に生じることが明らかになった。

PIV試験、積雪試験とプラズマ電極には雪片が激しく衝突を繰り返したがプラズマ電極に損傷は見られず、降雪時においても安定した放電が行われることを確認した。雪による放電現象の阻害は認められなかった。

3-5. 次年度予定

次年度は翼周りの雪片挙動に及ぼすPA効果を詳細に調べていく予定である。

謝辞

PVモジュールの風洞試験においては北海道科学大学工学部機械工学科 4 年生の忍翔太郎君の協力を得た。また自然雪風洞試験においては(株)朝日ラバーの佐藤英昭氏、北海道科学大学工学部機械工学科 3 年生の高橋俊暉君、柴田周君、田中佑君、伊豫部剣植君の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 白石悟, 平元理峰, 矢神雅規, 細川和彦, 積雪寒冷地における風力発電および太陽光発電の信頼性向上と自立分散型システムの構築に関する研究, 第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, pp.451-454, (2015),
- (2) Broecke, J.V., De-icing using ns-DBD plasma actuators, Master Thesis of Delft University of Technology, (2016)
- (3) 松田寿, 内田竜朗, 田中元史, 大友文雄, 志村尚彦, 大迫俊樹, プラズマ気流制御 2 次元風車翼周り流れの位相同期 PIV 計測, 日本ガスタービン学会誌, Vol.4, No.6, pp.535-540, (2014)
- (4) 久保徳嗣, Sagar BHANDARI, 田中元史, 野々村拓, 川端浩和, DBD プラズマアクチュエータによる NACA0015 翼の失速特性制御の試み, 第 41 回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, pp.95-98, (2019)
- (5) 武山昌史, 渡辺延由, 佐藤英昭, 田中元史, 久保徳嗣, 川端浩和, 尾立志弘, 300kW フィールド風車と地上屋外暴露試験設備で検証した全天候型プラズマアクチュエータの施工性と耐候性, 第 41 回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, pp.91-94, (2019)