

総 説

風力発電機用の雷保護システムの開発

Development of Anti-Lightning System for Wind Turbine

上野 敏之*

2018年度から2020年度にかけて実施した県単テーマ「放電プラズマ焼結法によるエネルギー産業へ向けた新製品の開発」において、開発パートナーである安来市の株式会社守谷刃物研究所とともに、風力発電機向けの雷対策製品の開発に成功した。開発にあたって風力発電機（風車）の雷被害について分析を行い、風車に従来から設置されている雷対策であるレセプタ（受雷部）の耐久性不足と、レセプタでの落雷捕捉失敗が風車破損の大きな要因であることを見出した。そこで、放電プラズマ焼結法により開発を行ってきた金属系複合素材の知見を活かし、大電流への耐久性に優れた素材の探索を行い、これを応用することで優れた雷対策製品を開発することができた。

1. はじめに

風力発電は化石燃料に依存しない再生可能エネルギーのひとつであり、低炭素化社会の実現に大きく寄与するものと期待される。全世界で見ると、総発電量に対する風力発電のシェアは4%以上となっており、今後ますます重要な電源となると見込まれている。しかしながら、国内での風力発電の導入率は0.8%に過ぎず¹⁾ 諸外国に大きく立ち遅れている。この原因には諸外国に比較して風車設置に適した平地が少ないこと、そして落雷をはじめとする事故による破損リスクが挙げられる²⁾。

とりわけ、落雷による被害については国内の風車事故原因で2割以上を占めるなど、大きな問題となっている³⁾。落雷による風車の破損は、飛散する破片による周辺の器物や人への被害といった直接的なリスクに加え、修理費用の負担、長期の停止による逸失利益といった事業性へのリスク要因となっており、風力発電事業の採算性を大きく損ねている。

落雷の風車へのリスクは、風力発電が普及し始めた90年代より認識されており、初期の段階で風車ブレードにレセプタを設け、これをダウンコンダクタと呼ばれる導線を通じてアースするシステム（図1）が採用されている⁴⁾。しかし、このシステムであっても落雷による破損は完全には防げておらず、これは国内に限ったことではない。その理由はいくつかあり、風車の雷保護に関する国際規格である2010年のIEC 61400-24 Ed.1.0が定められるまでは、風車耐雷システムの設計を製造各社が独自に行っており、風

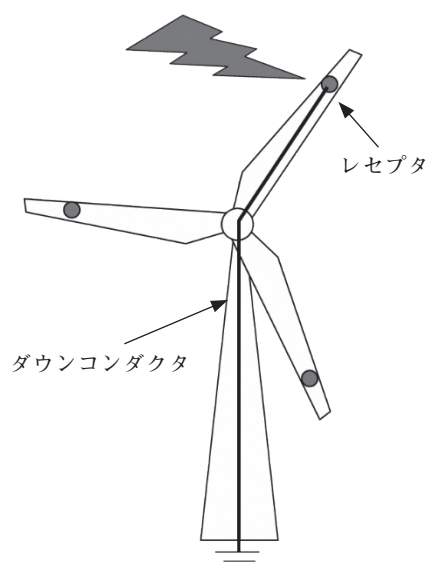


図1 代表的な風車の雷対策システム

車によっては耐雷性に劣る機種があったことも一因である。このことに加え、日本国内においては「冬季雷」と呼ばれる世界的にも珍しい高エネルギーの落雷が、冬の日本海側（風況が良く、風車立地の好適地でもある）で多発する（図2）ことが落雷による風車破損事故を大きくする要因となっている^{5,6)}。冬季雷は通常の雷の数十から数百倍のエネルギーを有しており、冬季雷を考慮しない国際的な基準で設計された風車雷保護システムでは負担が大きくなり、落雷を直接受けるレセプタが溶損するなどの事故を誘発する。

さらに、通常の雷に無い冬季雷の特徴として、上空が正極性となる正極雷であることが多い点も挙げられる。正極

*企画調整スタッフ（兼 無機材料技術科）

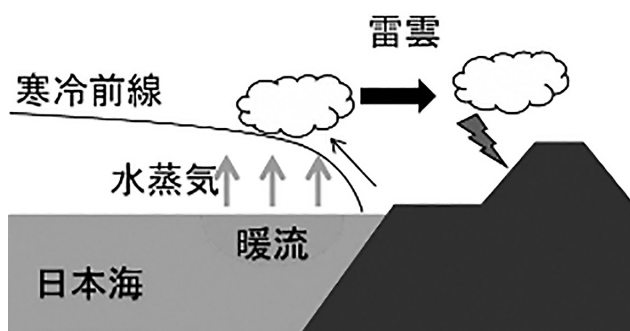


図2 冬季雷の発生メカニズム (寒冷前線の場合)

雷は沿面放電を生じやすく¹⁾、レセプタ外に落雷する機会が多いとされている。特に、レセプタ外の落雷により、雷電流が風車ブレードを貫通し、電流がレセプタを介さずに直接ダウンコンダクタに入ると、風車ブレード内の密閉空間で放電が生じることとなりブレードの折損のような重大事故に発展しやすくなる (図3)。

このような風車の雷事故については経済産業省が公開する風力発電所事事故事例⁷⁾のほか、電気学会に設けられた「風力発電設備の耐雷健全性維持技術と法規制・規格調査専門委員会」に著者が委員として参加し、情報収集を行った⁸⁾。

そして、風車の雷被害の様相を調査したうえで、雷電流への耐性を高めたレセプタの開発と、レセプタ外への落雷による被害を低減させるデバイスの開発の2点について検討を進めた。

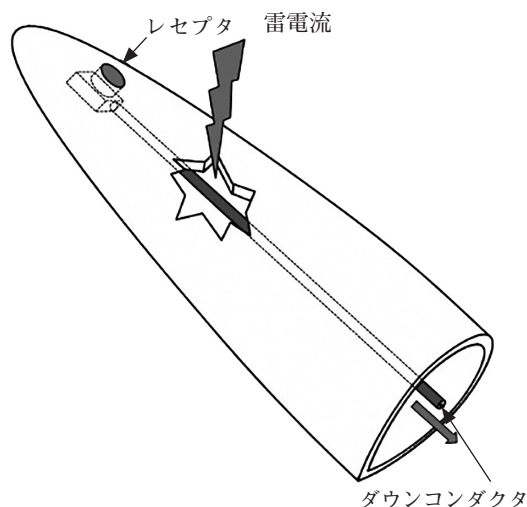


図3 レセプタ外への落雷による風車ブレードの破損様相

2. 耐雷性向上レセプタ「らいじん君」

2.1 らいじん君開発の経緯

著者は、新産業創出プロジェクト (2003～2013年) の一環であった熱制御システム開発プロジェクトにて、金属と黒鉛を放電プラズマ焼結法により複合材料とした高熱伝導材 (株守谷刃物研究所にて事業化、製品名 STC) を開発した。この素材は、銀、銅といった高い熱伝導率の金属に対して1.5倍以上となる熱伝導率を達成した⁹⁾。この特性に着目した松江工業高等専門学校の箕田教授が、落雷時の熱を高熱伝導体で拡散し、受雷部の温度上昇を抑えて耐溶損性を向上させるコンセプトを提案したことでレセプタの開発が始まった。

2.2 風力発電機のレセプタ

これまでに述べたように、ほとんどの風車のブレードにはレセプタが設置されており、雷電流をアースする構造となっている。レセプタの素材は導電性の銅やステンレスなどであり、FRP (ガラスファイバ強化プラスチック) 製のブレード表面に露出するように取り付けられている。サイズや形状は一般的なディスクレセプタで直径30～40mm、高さ30～50mmの円柱状の小片であることが多い。落雷が生じた場合、通常の雷であってもレセプタ表面は多少溶融する程度であるが、冬季雷のような高エネルギー雷が落雷するとレセプタ脱落のような大きな事故に発展することが明らかとなっている。一般的に行われている対策の一例としては、ブレード端部の300～400mmをアルミブロックにしたチップレセプタと呼ばれるものがある (図4)。アルミニウムは銅やステンレスより融点が高いが、前述のディスクレセプタより大幅に体積を増加させており、多少溶融しても長期間機能が維持できるようになっている。しか

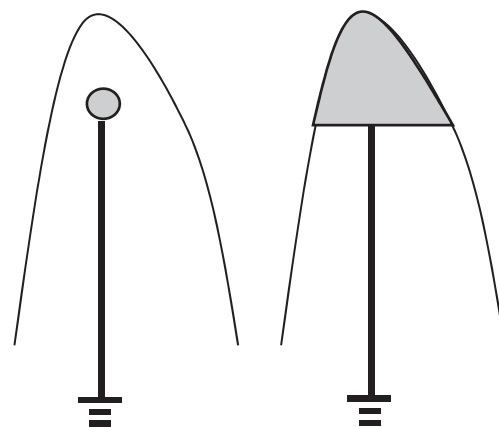


図4 風車レセプタの種類
左：ディスクレセプタ、右：チップレセプタ

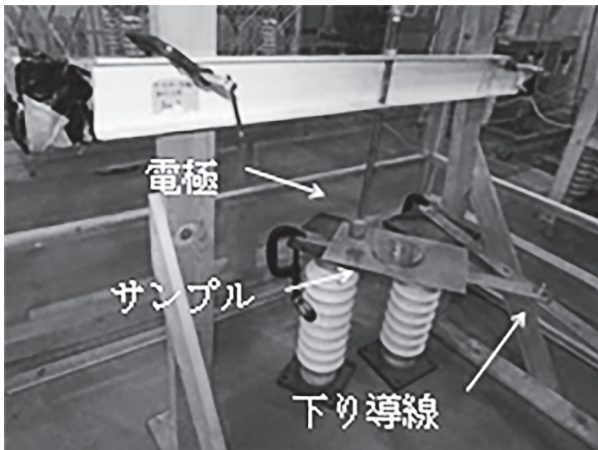


図5 直撃雷インパルス試験の様子

し、操業開始後にチップレセプタへ改造することは困難であり、ディスクレセプタが装着された風車への雷対策として採用することは難しい。

本研究では、既設のディスクレセプタと置き換えられる程度のサイズにて複数回の高エネルギーの雷撃に耐久し得ること目標とした。そのために素材に高熱伝導材を応用し、大きな改造が不要な形状での開発を行った。本論では高熱伝導材の大電流への耐久性を述べ、その知見を活かした新レセプタ「らいじん君」の構造について紹介する。

2.3 高熱伝導材による大電流耐久性の実験方法

試作レセプタには $600\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 以上の高熱伝導を示す銅-黒鉛複合材料を用いた。比較材として無酸素銅製 (JIS 合金番号 C1020, 熱伝導率 $391\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) も準備した。試料を直撃雷インパルス電流試験に供し、試作したレセプタの直撃雷による溶融状態の観察を行った。

直撃雷インパルス電流試験は、現実の雷を模擬した 150kV (印加毎に変動するが約 $150 \pm 1\text{kA}$, $90 \pm 10\text{C}$) を試料に印加し、形状等のダメージを評価した。模擬雷の生成には電流サージ発生器 (音羽電機工業, IGC-200K24u-350-110q, JIS Z 9290-1 に準拠) を用いた (図5)。日本国内に生じる雷の98%は、今回用いた $150\text{kA}-90\text{C}$ の模擬雷以下の電荷量である¹⁰⁾。

模擬雷撃を与えた試作レセプタは受雷部を切断、研磨して走査電子顕微鏡により断面を観察した。

また、試作レセプタの大電流印加による温度上昇を評価するため、放電時の表面温度を熱画像装置にて測定した。この試験には上記の直撃雷インパルス電流装置では入力が高電圧であり、熱画像装置では温度上昇を測定できないため、出力の低い 20kV の電源装置を用いた。

2.4 結果および考察

150kV に達する直撃雷インパルス試験を行ったところ、高熱伝導材を用いた試作レセプタはほとんど溶融しな

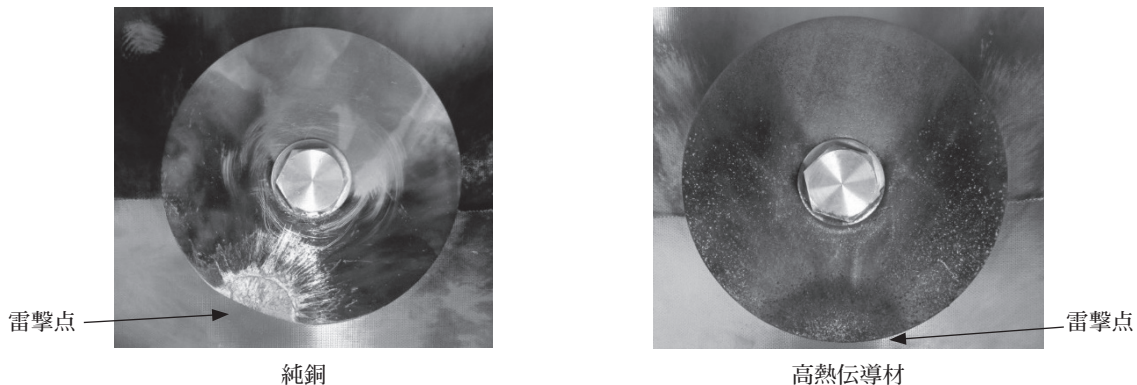


図6 直撃雷インパルス試験による試作レセプタの外観の変化

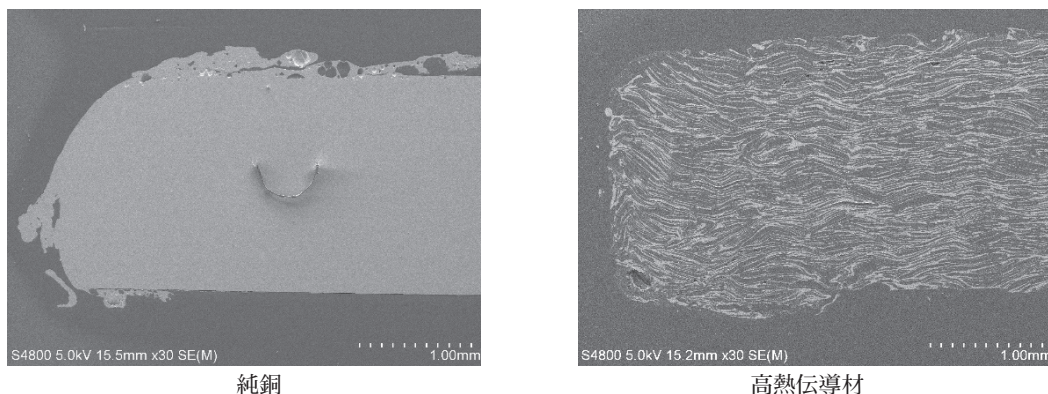


図7 直撃雷インパルス試験による試作レセプタの雷撃点

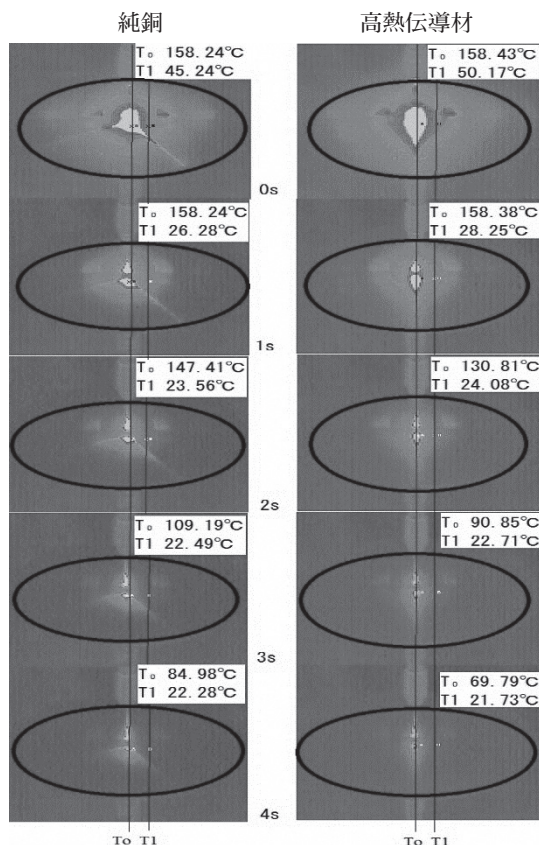
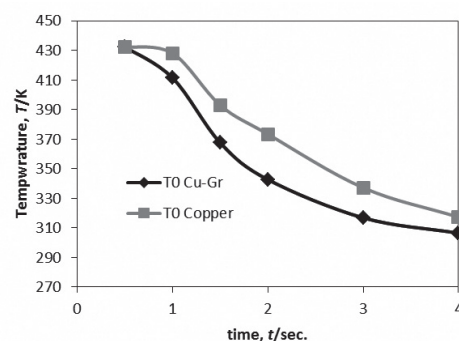
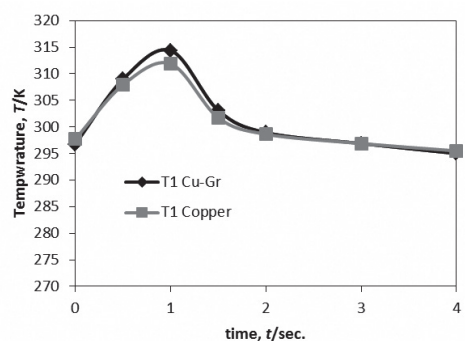


図8 20kV 高電圧試験を行った際の試作レセプタ表面温度の時間変化



中心 (T0: 電流印加点)



中心より10mm離れた点 (T1)

図9 20kV 高電圧試験を行った際の試作レセプタ中心 (T0) および 10mm離れた位置 (T1) の温度変化

かった。これに対して純銅製のレセプタは大きく熔融していた(図6)。それぞれの試料の落雷部分の断面を図7に示す。純銅は大電流の印加により大きな範囲で熔融していることが観察された。一方、高熱伝導材は落雷部であっても元の断面形状を維持しており、ほとんど熔融していないことが観察された。

図8に20kVの電源を用いた熱画像を示す。純銅と比較して、高熱伝導材は高温部がやや広く拡散した。そこで熱画像より通電中心部の温度T0と約10mm離れたT1の温度の時間変化を図9に示す。中心部T0の温度は高熱伝導材の方が従来材より短時間で冷却された。一方、10mm離れたT1では高熱伝導材の方が大きく温度上昇しており、高熱伝導材を用いることで、落雷部の生じる熱を拡散し、落雷部での温度上昇を短時間に抑えていることが明らかとなった。このことにより、高熱伝導材は落雷点の熔融を抑制していると考えられる。

以上より、高熱伝導材は従来材に対して落雷時の耐溶損性に優れており、この素材をレセプタに応用することで耐久性に優れたレセプタが開発できるものと期待される。

2.5 らいじん君の構造

以上より、新レセプタの主要な構造材として高熱伝導材を用いることで、高エネルギー落雷の大電流に対する耐久性を付与できることが示された。

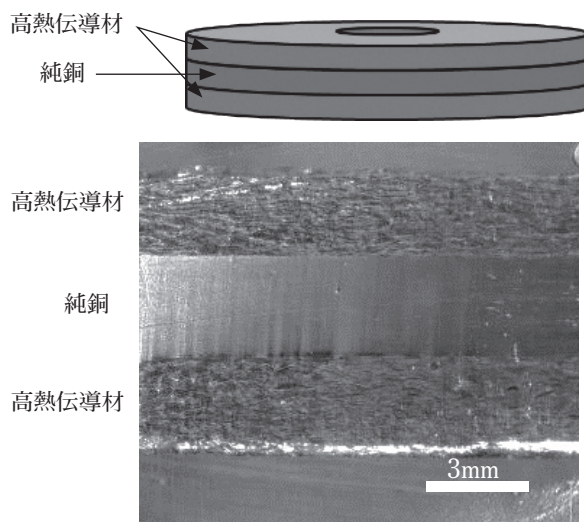


図10 三層構造としたらいじん君レセプタの模式(上)と断面(下)

実際の落雷事故事例を見ると、レセプタをブレードに固定するネジ部分において溶断しているものも認められた。これらの取り付けネジ部はM10程度であり導電断面積が小さくなっていることから、ボトルネックとなる部分に電流が集中し、大きなジュール熱が発生するためと考えられた。そこで製品としてのらいじん君にはM14の大径ボルト

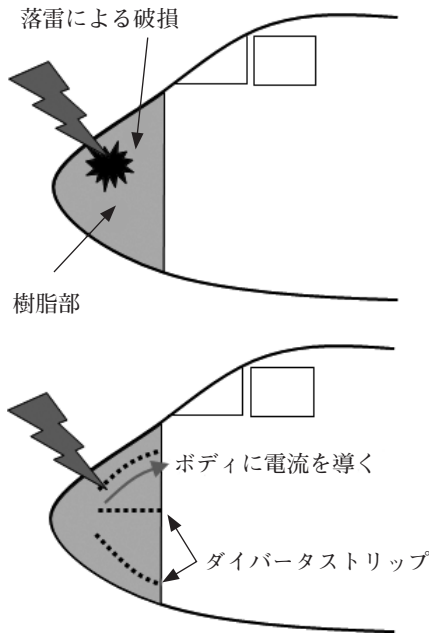


図 11 航空機におけるダイバーストリップによる雷対策

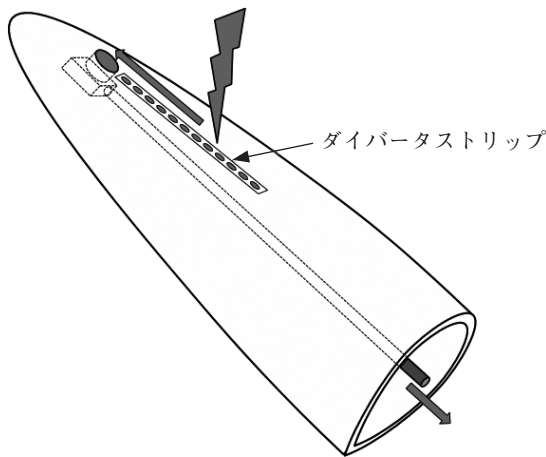


図 12 風車用ダイバーストリップによるブレードの雷保護

(ゆるみ止め機構付き)を添付して取り付けることとした。さらに落雷時には機械的な衝撃(ブレードとレセプタの隙間の雨滴が気化膨張するなど)が加わる場合もあることが明らかとなった。高熱伝導材は銅と黒鉛の複合材であり、純金属と比して延性に乏しく、衝撃により破損する可能性が指摘された。そこで円盤状レセプタの中心に延性に富む純銅を挿入し、3層構造とした(図10)。

このような構造とした製品らいじん君は実証実験で高い耐久性を示している。実証実験の風車は、冬季雷地域である秋田県の日本海沿岸に設置されており、従来のレセプタでは溶損により年に1~2回の交換が必要であった。このレセプタをらいじん君(高熱伝導材のみの単層構造品)に換装したところ5年以上無交換で耐久している。

3. ダイバーストリップ

3.1 風車用ダイバーストリップ

風車のブレードは絶縁性のFRPを主構造材としているが、雷は非常に高い電圧によって空中を絶縁破壊しながら進行する現象であり、FRPであっても電流が流れてしまう。そして絶縁性部分への落雷はむしろ被害が大きくなる。この対策は航空機においては以前より為されている。現代の旅客機の主構造材はジュラルミンなどの導電性に優れた材料であり、飛行中に落雷があってもほとんど被害は無い。しかし先端部はレーダーや通信装置の電波を通す必要性からFRPなどの絶縁性のレドームとなっていることが多く、この部分に落雷すると大きな破損の危険がある。そこで、レドーム表面に導電性の小片を整列させたテープ状のデバイス「ダイバーストリップ」を貼り付け、レドームへの落雷の電流を導電性のボディまで導くことで落雷被害の抑制が図られている(図11)。

しかしながら、風車にダイバーストリップを応用する場合、耐久性が問題となる。航空機の場合、フライト毎に整備、交換が可能であるため、使用されるダイバーストリップは少なくとも1回の落雷に耐久出来れば十分であるが、風車ブレードの場合、近接しての整備は年に1~2回程度であるため、1年程度の耐久性が必要となる。航空機用のダイバーストリップの金属チップは銅などであり、直径3mm、厚さ0.2mm程の小円盤であるため、通常の落雷であっても一撃でチップの大部分が蒸発してしまう。

以上より、風車のレセプタ外への落雷被害抑制にダイバーストリップは有効なデバイスと考えられるが、航空機用のものでは耐久性が不足している。そこで、風車向けに十分な耐久性(少なくとも1年以上の機能維持)を有する風車用ダイバーストリップを開発する(図12)。

風車用ダイバーストリップの開発にあたり、金属チップには大電流への耐久性が求められる。らいじん君レセプタの開発の際には高熱伝導材を応用することで、落雷時の熱を拡散させ過熱を抑制することとしたが、ダイバーストリップの金属チップは小さく、熱を拡散させてもチップ内で熱が飽和してしまい過熱を防止できないことが懸念された。そこで、高融点金属を用いた方法を考案した。当初は放電プラズマ焼結法を用いた安価な銅と高融点金属粉末の複合化によるチップを検討していたが^{11,12)}、複合化コストのデメリットを考慮し、単一の高融点モリブデンでチップを構成することとした。

3.2 実験方法

モリブデンの耐溶損性を評価するため、アルミニウム、銅、モリブデンの薄板素材(10×1.5×50mm)に1mmの空間ギャップを設けた模擬ダイバーストリップを試作し、これに大電流パルス印加することでダメージを評価した(図13)。模擬ダイバーストリップは、二枚の金属薄

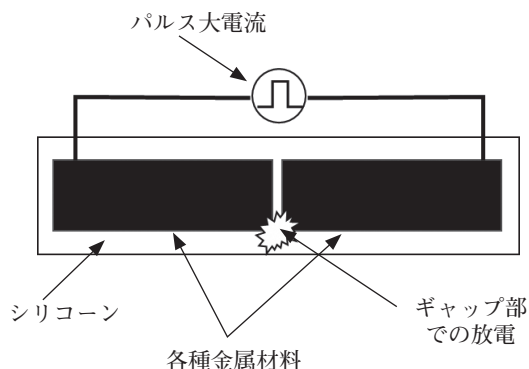


図13 模擬ダイバータストリップへの大電流印加によるギャップ部での放電試験の模式図

板の10×1.5面を突き合わせて設置し、全幅20mmとなるよう金属薄板周囲を変性シリコーン剤で埋めて作製した。上面となる10×50mm面は露出している。レセプタ評価の際には通常の波形の雷を模したもの（JIS Z 9290-1）であったが、ダイバータストリップ開発にあたっては中部大学の協力の下、より高い電荷量を与え、長時間維持する冬季雷の波形である波頭長80μs、波尾長7000μs（波形80/7000μsと表現される）を模した模擬雷試験を行った。

電荷量180Cのパルス大電流を各サンプルに通電し、通電後の金属チップの状態を観察した。

3.3 結果と考察

図14に模擬雷試験後の各サンプルの画像を示す。アルミニウムはギャップ部から30mm近くが消失し、大電流放電による溶損が非常に激しかった。航空用ダイバータストリップに多用されている純銅も同様で、ギャップ部周辺15mmが溶損により消失した。これに対し、モリブデンは良好で、溶融痕は認められるものの、ギャップは0.8mm増加程度に抑えられており、高エネルギーの冬季雷の複数回落雷にも機能の維持が可能と期待できる。

今回試験を行ったモリブデンについても、多少の溶損は認められるため、寿命を考慮した幅、厚さを設定し、複数回落雷でも金属が残存するよう設計する必要があると考えられる。

3.4 風車用ダイバータストリップ「雷伝」

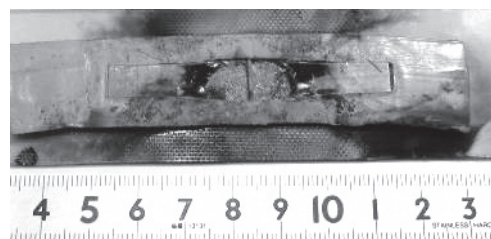
以上の結果を基に、風車用ダイバータストリップとして金属チップにはモリブデンを用い、チップサイズ10×1.5×10mm（航空機用のチップの100倍程度の体積）とすることとした。チップの長さについては10mmとすることでストリップ全体に柔軟性を付与し、曲面の多い風車ブレード表面においても、ストリップ自体も平面上で湾曲させて配置できるようにした（図15）。この製品を雷伝と名付けた。

チップを固定する樹脂については、耐久性を考慮してシリコーンを選択した。シリコーンと金属の接着性については、共同開発先である（株）朝日ラバーの技術により高強度を実現した。

アルミニウム



銅



モリブデン

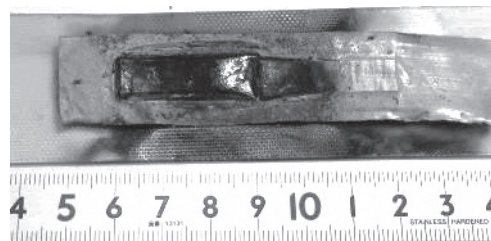


図14 模擬ダイバータストリップへの大電流印加によるギャップ部での放電試験によるダメージ

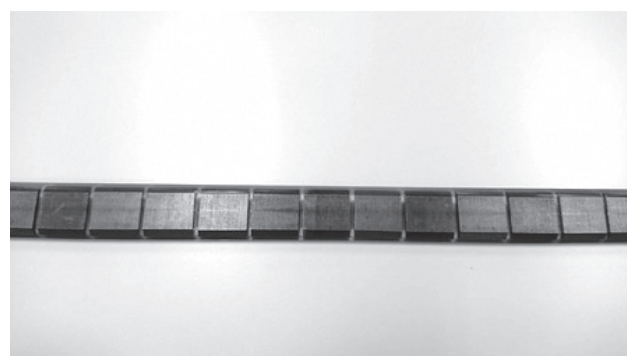


図15 風車用ダイバータストリップ雷伝試作品

ダイバータストリップについては現在も開発を進めているが、上記のような構成のプロトタイプは完成しており、事業化を進めている。株式会社刃物研究所が提案した雷伝開発テーマは、2020年度の国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の課題設定型産業技術開発費助成事業に採択され、同社と（株）朝日ラバー、中部大学、松江工業高等専門学校そして産業技術センターの開発グループで事業化に向けた開発を進めている。

4. おわりに

風力発電は低炭素化社会の実現に寄与する重要な電源のひとつであるが、その事業リスクとして雷被害は無視できないものである。本研究はその対策デバイスとして高耐久レセプタ（商品名：らいじん君）と風車用ダイバーストリップ（商品名：雷伝）の開発、製品化に寄与することができた。特に落雷によるレセプタの溶損について、ダメージ低減可能な素材を放電プラズマ焼結法で作製できたことが大きな成果であった。

素材開発については一定の成果を得たが、今後は製品として風車ブレードという特殊な環境において高速粒子との衝突による摩耗であるエロージョンへの耐久性についても検証する必要がある。また、今後は陸上の風車設置好適地が減少しているため、洋上風車の設置が進むと考えられるが、洋上においては海水、潮風による耐食性についても陸上以上に注意を払う必要がある。産業技術センターはこれらの耐久性の評価について今後も続け、事業化を支援する。

文 献

- 1) 特定非営利活動法人環境エネルギー政策研究所：【速報】国内の2019年度の自然エネルギーの割合と導入状況, <https://www.isep.or.jp/archives/library/12745>, 2020年7月20日。
- 2) 横山茂, 関岡昇三. 風力発電設備の雷害対策の動向. 日本電気学会論文誌B. 2009, vol.129, no.5, p.572-575.
- 3) 安田陽. 電気学会およびIEC/JISにおける風力発電システム雷保護の動向. 日本風力エネルギー学会誌. 2019, vol.43, no.3, p.360-363.
- 4) 横山茂. 風車ブレードの雷害問題. 日本電気学会論文誌B. 2004, vol.124, no.2, p.177-180.
- 5) 高田吉治. 技術連載その30 雷. 日本風力エネルギー学会誌. 2012, vol.36, no.3, p.446-453.
- 6) 高田吉治. 技術連載その31 雷. 日本風力エネルギー学会誌. 2012, vol.36, no.4, p.614-621.
- 7) 経済産業省:新エネルギー発電設備事故対応・構造強度ワーキンググループ, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/index.html, 2013年～2021年。
- 8) 風力発電設備の耐雷健全性維持技術と法規制・規格調査専門委員会. 風力発電設備の耐雷健全性維持と稼働率向上のための最新技術の動向 電気学会技術報告第1551号. 2020, 第1版, 電気学会, p.4-9.
- 9) 上野敏之, 吉岡尚志, 箕田充志. 銅-黒鉛複合材料を用いた風力発電用耐雷レセプタの開発. 粉体及び粉末冶金. 2016, vol.63, no.5 p.269-276.
- 10) 箕田 充志, 上野 敏之, 朝比奈 秀一, 仲佐 太助, 守谷 吉弘. 高性能風力発電用レセプタの開発. 電気学会論文誌B. 2020, vol.140, no.8, p.656-657.
- 11) 上野敏之, 朝比奈秀一, 金坂俊二, 守谷吉弘, 渡辺延由, 山本和男, 尾立志弘. 風車用新型ダイバーストリップの試作. 電気学会研究会資料 高電圧研究会. 2020, HV-20-18, p.89-93.
- 12) 上野敏之, 朝比奈秀一, 仲佐太助, 守谷吉弘, 渡辺延由, 山本和男, 尾立志弘. 風車用銅-モリブデン複合材料を用いた風車用ダイバーストリップの試作. 電気学会研究会資料 高電圧研究会. 2019, HV-19-28, p.151-155.