

DEN-CHU-KEN

# TOPICS

2018 1 January

VOL.24

Central Research Institute of Electric Power Industry

## 送電設備を雪害から守るための技術開発

1. 送電設備の雪害を防止・低減するために
2. 電線への着雪量および重着雪の抑制対策効果の評価
3. 着雪電線のギャロッピング予測技術と抑制対策
4. 塩雪害の予測技術と抑制対策

## 送電設備を雪害から守るための技術開発

# 1.送電設備の雪害を防止・低減するために

送電設備は人間の体に例えると大動脈に相当し、配電設備は毛細血管に相当します。これらの機能が停止すると大規模停電が発生し、日常生活や企業活動に大きな影響を及ぼします。このような停電を引き起こす原因の一つとして自然災害があり、送配電設備への着雪や着氷によって世界各国で大規模停電が発生しています(右表)。日本では、2005年12月に日本海側に豪雪が来襲し、雪害による送電設備の損傷・機能不全によって広域にわたる停電が発生しました。

このような社会的影響が大きな送電設備の雪害事故を防止・抑制するため、電力中央研究所では2007年7月から「送電設備の雪害に関する研究」に取り組んでいます。この研究では、低頻度で発生する送電設備の風雪害の調査記録やデータを収集し、電気事業全体で一元的に管理するシステムを構築しました。また、風雪害事故のメカニズムをより詳細に解明し、その成果を予測評価技術の開発や対策技術の構築に反映しました。本TOPICSでは、最近の主な研究成果や取り組みについて紹介します。

地球工学研究所  
研究参事  
江口 譲



企画グループ  
上席  
西原 崇



近年、各国で発生した風雪害による  
主な大規模停電

年月	国(場所)	社会への影響
2005年 11月	ドイツ (西部Münster市)	風氷雪により送電鉄塔50基が損壊し、最大6日間の停電が発生し、25万人に影響した。
2005年 12月	日本 (福井県、富山県、新潟県)	送電設備への雪害により135万戸で最長41時間の停電が発生した。
2008年 12月	アメリカ (北東部)	着氷性の強風により送配電設備が損壊し、125万戸で停電が発生した。
2011年 10月	アメリカ (北東部)	風雪により送配電設備が損壊し、300万人以上に停電による影響が発生した。
2013年 2月	アメリカ (北東部)	風雪により送配電設備が損壊し、65万戸で停電が発生した。
2013年 3月	北アイルランド (Belfast)	風雪により高電圧送電網が停止し、20万戸で停電が発生した。
2015年 3月	日本 (長野県・北東中部)	電線に雪が付着し、強風下で電線が大きく振動することにより短絡が発生し、38万戸で停電が発生した。

2005年12月から2006年2月にかけて発生した大雪は気象庁によって「平成18年豪雪」と命名されましたが、豪雪の命名は「昭和38年1月豪雪」以来2度目となるもので、非常に稀な豪雪であったことがわかります。この豪雪により、2000人以上の方が死傷し、4700棟以上の家屋が損壊したと報告されています。送電設備の一部もこの豪雪の影響を受けて損壊・機能不全となり、2005年12月13日から17日にかけて北陸地方の一部で約5万4千kW(最長41時間)の停電が発生しました。また、2005年12月22日には新潟県下越地域で約60万kW(最長31時間)、近畿地方の一部で約70万kW(最長40分)の停電が発生しました。

この大規模停電事故について、国の諮問機関傘下の有識者会議で発生原因を調査した結果、①重着雪(電線等に多量の雪が付着する現象)、②ギャロッピング(氷雪が付着した電線が風を受けて鉛直方向に大きく振動する現象)、③塩雪害(絶縁体で

ある「がいに」に塩分を含む雪が付着することにより、絶縁機能が低下する現象)の3つの現象が事故原因として確認されました。また、その後の雪害対策や研究のあり方についても提言がなされました。

当研究所ではこの提言に応えるかたちで、雪害に関する10年間の研究を2007年より開始しました。前半5年間で得られた研究結果については、以前のTOPICS<sup>1)</sup>で紹介しました。本TOPICSでは、新たに建設した釧路試験線(図1-1)での観測結果などを含めた後半5年間の研究成果について、重着雪・ギャロッピング・塩雪害の3つの現象ごとに各章で紹介します。これらの成果については、送電設備の雪害に対する合理的な設計・対策への活用が期待されており、規格等への反映や実用性の向上を目指して現在も研究を継続しています。

<参考文献>

1) 電力中央研究所: DEN-CHU-KEN TOPICS, VOL.5, 2011年1月.



主要設備

- 鉄塔3基
- ↑ 4 導体×2相
- ↓ 単 導体×5相
- ↓ 観測用がいにし



↓ 降雪量測定装置



図1-1 釧路試験線の全景と主要設備



## 送電設備を雪害から守るための技術開発

## 2. 電線への着雪量および重着雪の抑

送電線へ多量の雪が付着する現象は「重着雪現象」と呼ばれ、電線の断線や鉄塔部材の損傷・損壊の原因となる場合があります。このような重着雪による設備被害を低減・防止するためには、電線への想定着雪量を設定して鉄塔の耐力を正確に評価するとともに、必要に応じて着雪量を低減させるための効果的な対策を取ることが求められます。

わが国における架空送電線路の総延長は8万キロメートルを超え、膨大な数の送電設備が設置・運用されています。このため、想定着雪量の設定や対策品の選定・設置の際には、雪質や着雪形態が各地域の気候や地形によって変化すること(地域性)を考慮する必要があります。このような地域性を考慮した着雪量評価法や着雪対策を開発するために、当研究所では2008年度冬季以来、電力各社の協力の下で観測を開始し、各種評価に必要な気象・着雪量・画像の観測データを蓄積してきました。

本章では、送電線着雪の発生・発達機構の解明、想定着雪量・鉄塔荷重の評価技術、重着雪に対する抑制対策品の効果に係わる研究を紹介します。

地球工学研究所  
上席研究員  
杉本 聡一郎



地球工学研究所  
上席研究員  
石川 智己



注:識別器具底部を黄色線で加筆した

夜間に乾いた雪が送電線に冠雪した際に電線がねじれる状況  
(超高感度カメラによる撮影画像)



# 制対策効果の評価

## 2.1 電線着雪の発生・発達形態

### (1) 気象条件に応じた発生・発達形態の違い

送電線に雪が筒状になるまで着雪する過程には、電線の側面から付着する場合と前ページの写真のように電線の上部に載る場合の2つの形態（以下、着雪タイプと呼ぶ）が見られます。しかし、その発生条件や地域性は必ずしも明確ではありませんでした。

当研究所が取得した観測結果を分析したところ、着雪タイプは風の強さに依存し、それに応じて着雪形状の時間的な変化が異なることがわかりました(図2-1)<sup>1,2)</sup>。また、雪質も重要な要因であり、乾いた雪や氷粒状の降水粒子は強風下で着雪しないことや、気温と相対湿度から雨・雪の違いや雪の湿り度合を判別できることがわかりました。さらに、沿岸部と内陸部とでは判別式が異なる等の地域性があることも見出しました<sup>1)</sup>。

以上の知見を合わせて、気象データを用いて一義的に着雪タイプを区分する方法を提案しました<sup>1)</sup>。その提案手法は、気象データをもとに着雪量の評価する方法の高度化や着雪タイプに応じた雪害対策の有効性の分析に活用されています。

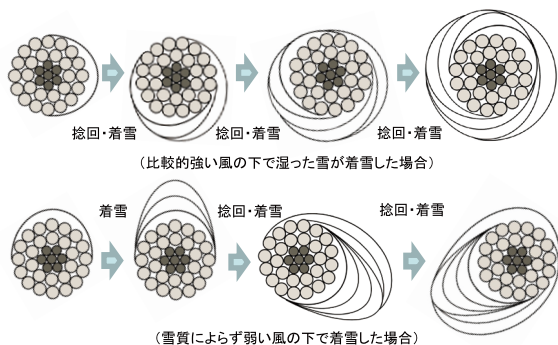


図2-1 電線断面方向から見た着雪形状の変化に関する模式図

### (2) 電線着雪量の評価技術

着雪量を定量的に評価するための方法として、着雪に係わる物理・力学現象を詳細にモデル化する方法と簡易的に評価する方法があります。前者の方法として、当研究所では電線着雪・落雪解析コードSNOVAL<sup>3)</sup>を開発しました。このコードでは、電線の捻回(ねじれ)現象や着雪体の融解現象を再現することができ、3次元的な着雪形状や落雪のタイミングを計算することができます。例えば、電線種類・径間長等が着雪・落雪形態に及ぼす影響を把握するのに、本コードの活用が有効です。

一方、後者として、詳細な物理・力学現象を考慮せずに、常に筒状の着雪体形状を仮定する筒雪モデルの高度化を行いました。また、着雪タイプの判別手法を活用して着雪率(降雪粒子が付着する割合)や着雪密度の推定式を新たに提案し、観測降雪量も補正することにより、既往の筒雪モデルと比べて精度向上が図られました(図2-2)。広域の送電網における想定着雪量の設定やリアルタイム着雪予測等へ本手法を適用することが検討されています。

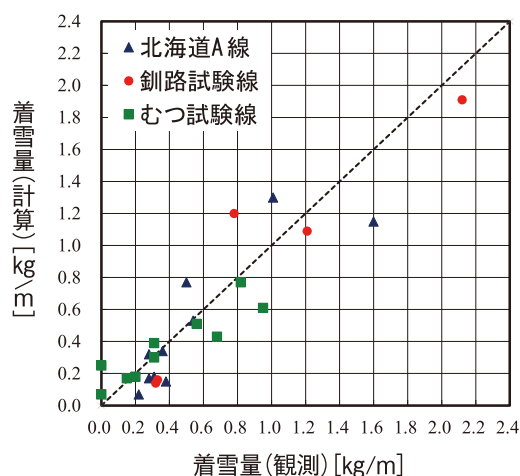


図2-2 着雪量の簡易評価手法の評価結果例(中風・強風下の湿型着雪事例)<sup>2)</sup>

## 2.2 耐雪設計の検討に活用できる評価ツール

### (1) 想定着雪量の評価

学会規格<sup>4,5)</sup>では、50年程度に1度発生する着雪規模(50年再現期間の着雪量)を想定して鉄塔等支持物への着雪の影響を評価することが定められています。しかし、着雪観測記録の蓄積や未観測地点に対する着雪量評価技術の信頼性が十分でないため、実績を踏まえて経験的に着雪量を設定することも許容されています。

そこで、最大着雪量の再現期待値を合理的に評価するための基本的な手順を構築しました<sup>2)</sup>。この方法では、先ず長年の気象データと着雪量の簡易評価手法をもとに着雪量を長期にわたり計算します。次に、計算結果を最もよく表現する確率分布を見出して、各再現期間に対する着雪量を推定しました(図2-3)。現在は、よりきめ細かな想定着雪量の地域分布を把握するために、長期的かつ面的な気象データの作成に取り組んでいます。

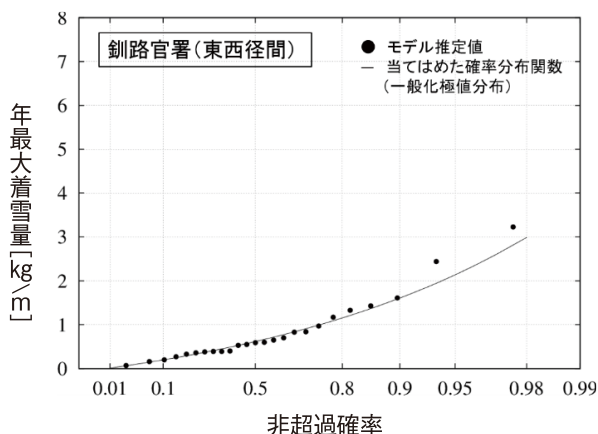


図2-3 気象官署データを用いた想定着雪量の評価事例<sup>2)</sup>、<sup>注1)</sup>

注1) 非超過確率とは、ある設定値に対してより小さな規模の事象が発生する確率を指し、非超過確率0.98に対する値が年最大着雪量の50年再現期間となる

### (2) 鉄塔各部材に発生する荷重の簡易評価

電線着雪時には、雪による重量や風荷重の増加、電線軸方向での着雪量の偏りによる不均一張力やねじり力が、鉄塔を構成する各部材に発生する軸力(部材断面の軸方向に作用する荷重)に影響を与えます。そのため、新設鉄塔の設計や既設鉄塔の安全性評価を行う際にこれらの影響を把握することが重要です。

このニーズに応えるべく、当研究所で開発した既往の風荷重評価ツールTC-LOAD<sup>注2)</sup>に、着雪に係わる荷重を等価静的風荷重<sup>注3)</sup>として扱うための着雪影響評価機能を追加しました。詳細な動的応答解析結果との比較を通じて、各部材に発生する軸力を高精度に評価できることが確認されています<sup>1)</sup>。本ツールには、着雪量評価手法も組み込まれており、気象データをもとに部材に発生する軸力の時々刻々の変化を計算できます(図2-4)。また、想定着雪量や着雪パターンに応じた仮想的な評価も行うことができます。GUI(グラフィカルユーザインターフェース)を介して鉄塔の構造データを簡単に作成することができ、実用性の高いツールとして電力各社で使用されています。

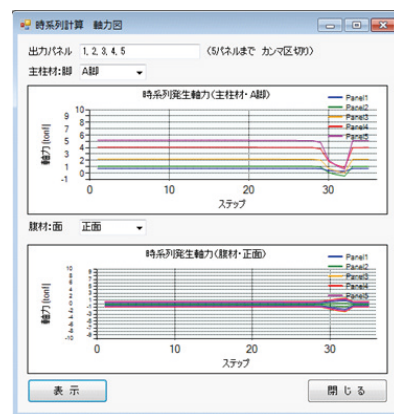


図2-4 TC-LOADによる発生軸力の時間変化に関する評価例<sup>2)</sup>(上:主柱材,下:腹材)

注2) 風荷重によって鉄塔の部材断面で発生する荷重を簡便に計算するツール  
注3) 風の時間・空間変動が構造物全体に及ぼす影響と、構造物の共振の影響を表す係数を導入し、時刻毎に変化しない静的な荷重として合理的に換算したもの

## 2.3 重着雪現象を抑制するための対策品の効果評価

電線への着雪量を低減させるために、国内外においてさまざまな対策方法が提案されていますが、わが国では、主に難着雪リング、カウンタウェイト、相間スペーサを送電線に設置する方法がとられています(各対策品は図2-6、第3章の図3-2に掲載)。これら対策品の効果については、定性的な効果発現機構については把握されているものの、定量的な着雪量低減率を把握するためのフィールド観測データは非常に少ない状況でした。

そこで、当研究所では電力各社の協力の下で蓄積されたデータを分析し、着雪タイプ別に効果を評価しました。難着雪リングは乾型着雪時には顕著な効果は示さないものの<sup>2)</sup>、湿型着雪において風が強いほど効果を発揮することが認められました(図2-5)。その他のカウンタウェイトや相間スペーサといった電線捻回を抑制する対策は、いずれの着雪タイプに対しても風速に依らず有効であることが確認されました<sup>2)</sup>。難着雪リングによる対策が風速に依ることは、風が強いほど電線の撚りに沿った着雪体の動きが促進され、着雪体が分断されやすいことと関連すると考えられます(図2-6)。現在、模擬電線を用いた観測データを蓄積し、検証を継続しています。このように、画像データや電線捻回角の測定結果等、対策効果の発現機構を説明する根拠となるデータも充実してきました。

各対策品は、着雪タイプ、すなわち気象条件や雪質に応じてその効果が異なるとともに、相間距離が狭い等の設備条件によっては、強風条件下で電線動揺に対する対応を考慮する必要があります。これらを踏まえ、対策品の選定フローを提案しました<sup>2)</sup>。このフローをもとに地域別に有効な対策品の選定を行うことができます。また、対策品による効果を勘案して想

定着雪量がより適切に設定されれば、設計の合理化にもつながることが見込まれます。

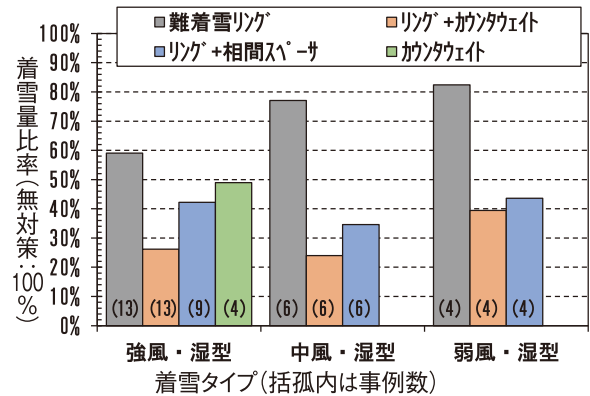


図2-5 着雪タイプ・対策品別の着雪量比率<sup>2)</sup>  
(むつ試験線のACSR160mm<sup>2</sup>電線で観測されたデータをもとに分析した結果。データ提供:東北電力(株))

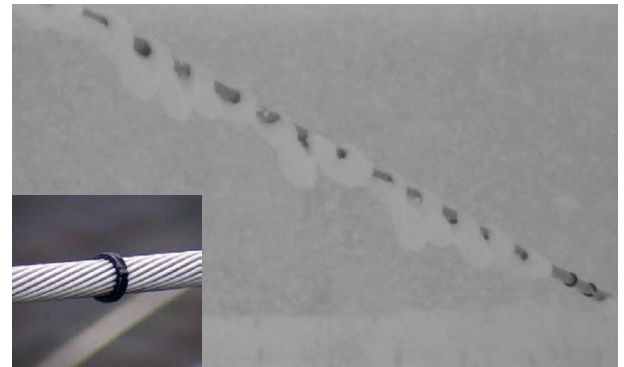


図2-6 難着雪リング付近での着雪体の分断<sup>2)</sup>

### <参考文献>

- 1) 西原崇,他:送電設備の雪害に関する研究—2007~2011年度成果—。電力中央研究所報告N19, 2013。
- 2) 清水幹夫,他:「送電設備の雪害に関する研究」10ヵ年研究成果(その1) —重着雪とギャロッピングの評価手法と対策—。電力中央研究所報告N16010, 2017。
- 3) 上之和人,他:融解過程を考慮した電線着雪・落雪モデルの開発。電力中央研究所報告N15001, 2015。
- 4) 電気学会電気規格調査会:電気規格調査会テクニカルレポートJEC-127 送電用支持物設計標準。電気書院, 1980。
- 5) 電気学会電気規格調査会:電気規格調査会テクニカルレポートJEC-TR-00007-2015 送電用鉄塔設計標準。電気学会, 2016。



## 送電設備を雪害から守るための技術開発

## 3.着雪電線のギャロッピング予測技術

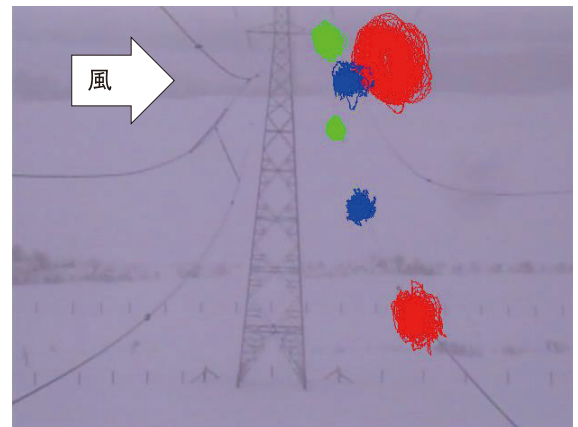
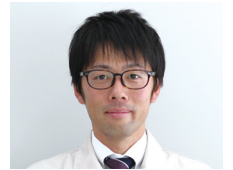
送電線は鉄塔と比較して剛性が非常に小さく、大きく変形する特性をもっています。さらに、送電線路が建設される平地や山岳地では、強風や着氷雪などの過酷な自然環境条件により、電線に大振幅の振動現象が生じる場合があります。この振動現象によって電線同士の接触による短絡（ショート）や線路の構成部材の損傷などが発生すると、電力の供給支障に繋がる恐れがあります。

電線の振動現象には、台風や季節風などの強風による強制的な横方向の電線振動（バフェッティング）、電線に氷雪が付着した後に着氷雪が一度に脱落し電線が跳ね上がる現象（スリートジャンプ）、氷雪が付着した電線に作用する空気力の特性により、電線が主に上下方向に振動する現象（ギャロッピング）があります。本章では、電力供給への影響が大きいギャロッピング現象について、その発現メカニズムを概説するとともに、数値シミュレーション手法の開発、振幅評価・設計法の提案、および観測による対策の効果検証と選定など、当研究所の取り組みについて紹介します。

地球工学研究所  
上席研究員  
清水 幹夫



地球工学研究所  
主任研究員  
松宮 央登



単導体線路



多導体線路

観測されたギャロッピング現象  
(色の付いた線はギャロッピング発生時に  
電線が移動した軌跡を表している)

# と抑制対策

## 3.1 現象の発生メカニズムと抑制対策

### (1)現象の発生メカニズム

着氷雪した送電線にみられる、上下の揺れを伴う大振幅の振動現象は、慣例的にギャロッピングと称されます。空気力学的なギャロッピング現象とは、復元力を有するバネなどに支持された物体が、流れを受けて自励的に流れと直角方向に振動を起こす空力不安定振動と定義されています。

水平方向の風の中を図3-1(a)のように着氷雪した電線が上下方向に速度 $\zeta$ で運動している場合、風の作用方向すなわち迎角 $\theta$ と上下方向に発生する揚力 $F$ も変化します。つまり、電線の速度 $\zeta$ が $\Delta\zeta$ だけ変化したとすると迎角 $\theta$ は逆向きに $\Delta\theta$ だけ変化し、図3-1(b)のように揚力 $F$ が $\Delta F$ だけ変化します。 $\Delta F/\Delta\theta < 0$ の条件が成立する場合は $\Delta F/\Delta\zeta > 0$ となり、速度の増減に応じて揚力も増減するため、ブランコで背中を押されるように電線の運動エネルギーや振幅が大きくなります。このような物体の空力特性に関する条件( $\Delta F/\Delta\theta < 0$ )はDen-Hartogの不安定条件<sup>1)</sup>と呼ばれており、ギャロッピング現象の発生を評価する際の重要な判断基準となります。

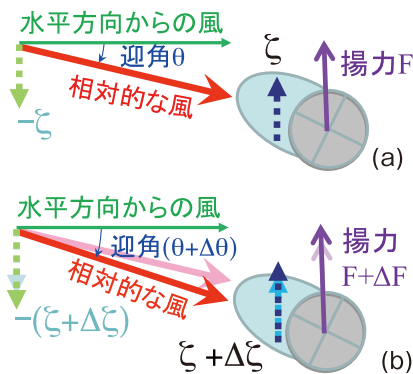


図3-1 着雪電線の上下運動速度 $\zeta$ と作用する風の迎角 $\theta$ (反時計回りが正)との関係

### (2)着雪対策とギャロッピング対策

電力各社では、雪害対策として着雪そのものを低減するために、難着雪リング(第2章図2-6参照)を一定間隔で取付けて着雪体を分断する方法が最も広く用いられています。また、電線の重心を中心から移動させるカウンタウェイト(図3-2(a))や多導体電線の間隔を保つスペーサによって架渉線のねじれを抑制する効果があることが知られています。難着雪リングとカウンタウェイトを組み合わせる方法も有効な対策と認識されています。

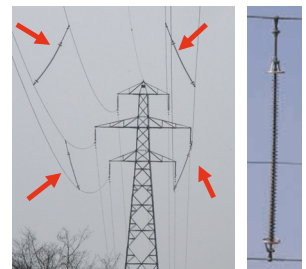
一方、ギャロッピング現象の対策では、各相の間隔を拡大した設計を行うことや、各相の間隔を保つための相間スペーサ(図3-2(b))が採用されています。また、多導体電線の間隔を保つスペーサの取付け部をある程度回転できるようにしたルーズスペーサ(図3-2(c))も有効であることが知られています。前述の着雪対策品は、ギャロッピングに対して悪影響を与える場合があり、両現象の予測と抑制効果を評価して適切な対策を選定する必要があります。



(a) カウンタウェイト



(c) ルーズスペーサ



(b) 相間スペーサ

図3-2 電線の雪害対策品

### 3.2 着氷雪電線の振動評価手法

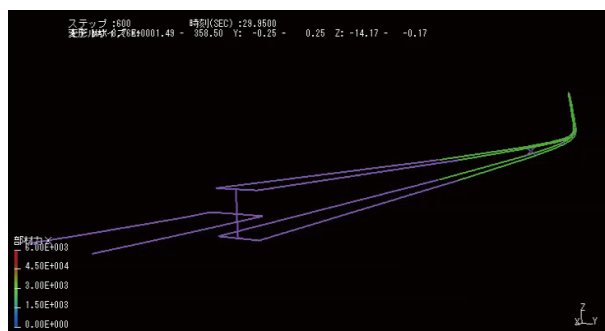
前節のギャロッピング発生機構の説明は、着雪電線が上下方向のみ微小に振動する場合を対象としたものですが、実際の着雪電線は、上下方向に加えて横方向にも大きく振動し、さらに電線の軸回りのねじれ振動も伴う複雑な挙動となることが観測されています。このため当研究所では、ギャロッピングの評価手法として、シミュレーション解析コードCAFSSを開発するとともに、比較的簡易な振幅評価法の構築に取り組んでいます。

CAFSSは、3次元解析プログラムコードであり、電線の大きな変位を考慮することができます。解析を行うに当たっては、まず図3-3のように解析対象となる送電線路の電線やそれに付属する対策品や着雪体などを数値的にモデル化します。次に、この送電線路の数値モデルに対して、風を外力として与えて電線などの動きを数値的に解析し、ギャロッピング現象をコンピュータ上に再現します。このCAFSSの計算結果に基づき、実際のギャロッピング事故の原因究明や施工前の対策デバイスの効果検証などを行うことができます。

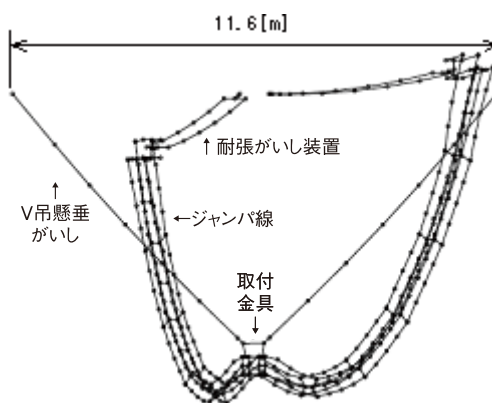
一方、送電線の耐ギャロッピング設計には比較的簡易な手法を用いて、ギャロッピング発生の可能性やギャロッピングの想定振幅を予測し、対策の必要性の判断や鉄塔設計を行う必要があります。この手法として、「松林理論」<sup>2)</sup>と呼ばれる耐ギャロッピング設計評価法が用いられています。この理論では、各地の気象特性や地形影響による気流特性、架線形態等の構造的特徴を複合的に考慮して、各径間の設備耐用年数内の最大ギャロッピング応答振幅を算出することができます。ただし、山岳着氷地域を想定した経験的な手法であるため、湿型着雪が想定される平地への

適用が難しいとされてきました。

このため当研究所では、「松林理論」の適用が難しい平地での湿型着雪下のギャロッピング評価にも適用可能な新たな評価手法を提案しました<sup>3)</sup>。この新手法では、最新知見による湿型着雪条件をもとに、着雪下の線路直交風速発生頻度を用いて、線路走向別に設備耐用年数内のギャロッピング最大応答振幅や相間短絡発生確率を推定することができます。この新手法によって、「松林理論」での評価が難しい地域に対しても適切にギャロッピング応答振幅を評価できます。



(a) 4導体単経間の送電線での例



(b) V吊懸垂がいしでの例

図3-3 CAFSS解析モデルの例



### 3.3 ギャロッピングの抑制対策

電線の雪害対策において、2章で述べた重着雪を防ぐことに加えて、ギャロッピングによる被害を低減することも重要です。ギャロッピング現象は、着氷雪量が比較的少なくても、着氷雪した電線の断面形状や風の特徴（風速、風向、吹上角など）によっては発生する場合があります。地域の気象特性や送電線の特徴を考慮して、ギャロッピングの発生や大振幅振動への成長を抑制することが必要です。

抑制対策としては、単導体送電線では相間スペーサ（図3-2(b))を、多導体送電線ではルーズスペーサ（図3-2(c))を用いるのが一般的ですが、実証データが限られており、その効果において未解明な部分も残されています。そこで、当研究所では釧路での実規模送電線における長期観測データなどにより、これらの対策効果を定量的に評価しました<sup>4)</sup>。例えば、実際の単導体送電線における観測結果（図3-4）により、相間スペーサは、カウンタウェイトを設置した場合に比べて振幅が抑制されていることが確認されました。また、実規模の4導体試験線における観測結果（図3-5）により、ルーズスペーサは、全て導体を固定した標準スペーサを設置した場合に比べて、振幅が抑制されていることが確認されました。

以上のような研究成果に基づき、対象線路の設備の特徴やその地域の気象条件を考慮した適切な対策品の使用方法を提案しました<sup>4)</sup>。

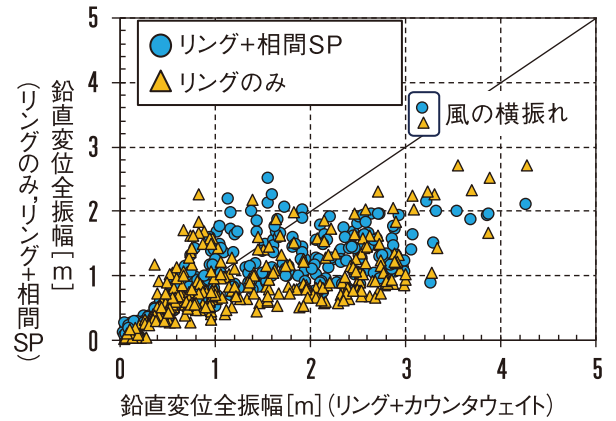


図3-4 単導体線路での対策によるギャロッピング振幅の比較<sup>4)</sup>  
(SP:スペーサ)

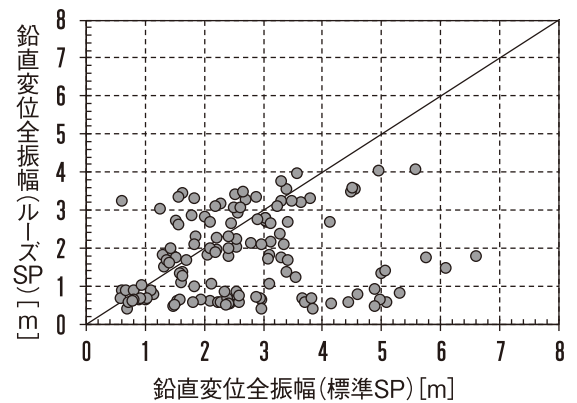


図3-5 4導体線路での対策によるギャロッピング振幅の比較<sup>4)</sup>  
(SP:スペーサ)

<参考文献>

- 1) J.P. Den Hartog, Mechanical Vibrations, McGraw-Hill, 1956.
- 2) 菊池彬, 他: 架空送電線の耐ギャロッピング設計について (装柱設計), 住友電気, 第135号, pp. 113-123, 1989.
- 3) 西原崇, 他: 耐ギャロッピング設計手法の開発 (その2) - 平地に適した設備供用年数内応答振幅極値推定法の提案 -, 電力中央研究所研究報告N16009, 2017.
- 4) 清水幹夫, 他: 「送電設備の雪害に関する研究」10ヵ年研究成果 (その1) - 重着雪とギャロッピングの評価手法と対策 -, 電力中央研究所報告N16010, 2017.

送電設備を雪害から守るための技術開発

# 4. 塩雪害の予測技術と抑制対策

2005年12月の新潟県下越地域における雪害(新潟下越雪害)では、海塩を含む多量の湿った雪が、強風により送電線のがいしに吹き付けられ、付着したことで、がいしの絶縁性能が低下し、電気事故に至る現象(フラッシュオーバーと呼ばれる)も発生しました。このようながいしの塩雪害については、その発生事例が非常に稀であるため、発生メカニズムの解明や対策技術の開発は十分に進められておらず、塩雪害が発生する気象・地形条件の推定、ならびにがいしの着雪特性・着雪がいしの耐電圧特性の解明が重要な課題となっていました。

そこで当研究所では、この塩雪害について、降雪・がいし着雪のフィールド観測、実験室での着雪・課電試験、ならびに気象・海塩輸送の数値解析を行い、塩雪害の発生に関連する気象条件・地形条件の解明やがいしの着雪特性・着雪がいしの耐電圧特性の解明に取り組んできました。本章では、これらの取り組みについて紹介します。

電力技術研究所  
上席研究員  
本間 宏也



地球工学研究所  
主任研究員  
木原 直人



電力技術研究所  
主任研究員  
屋地 康平



環境科学研究所  
主任研究員  
大原 信



推定される塩雪害の発生メカニズム  
[第1章参考文献1)に基づき作成]

## 4.1 塩雪害が発生する気象・地形条件の解明

2005年12月に発生した新潟下越雪害では、海岸線から30km程度内陸に入った地域で塩雪害が発生した点が特徴的でした(前ページの図)。そのため、海塩を多く含む降雪が内陸部において生じるメカニズムの解明を中心に、数値解析とフィールド観測から以下の(1)～(3)について検討を行いました。

### (1)2005年新潟下越雪害時における気象条件

気象と大気中の海塩濃度を数値的に解析することにより、塩雪害が発生した2005年12月22日の気象条件、および新潟県下越地域への海塩の輸送過程を分析しました。その結果、塩雪害発生時には、日本海から新潟県下越地域に向かって帯状の降水帯が東西に伸びており、日本海上の強風域でまき上げられた多量の高濃度の海塩が、その降水帯によって降雪に含まれる形で内陸域まで輸送されたことが明らかになりました(図4-1)。また、塩雪害が発生した地域では、さらに着雪適温(気温0～2℃が目安)の条件で強風を伴っていたため、がいしへの着雪が発達しやすく、さらに、着雪が圧密されやすい気象条件であったことがわかりました。このような厳しい気象条件によって、内陸部でがいし上に海塩を多量に含む圧密着雪が発達したと推測されました。

### (2)現地観測による海塩粒子輸送特性の把握

新潟県下越地域において、沿岸域～内陸域(塩雪害発生地点の近傍含む)にわたる7地点で、降雪および大気中の海塩濃度を計測する現地観測を実施しました。2008年～2016年の冬季観測で得られた降雪データから、新潟県下越地

域においては降水の導電率と海塩濃度との相関が高いことが示されました。このことは、送電事故の原因となるがいしの絶縁性能の低下を引き起こす着雪の導電率の上昇が、海塩の付着に起因することを意味しています。また、海塩濃度が高く、しかも、降雪量が多い日の気象条件を調べた結果、主として西からの強風が生じていることがわかりました。このように多量の降雪と高濃度の海塩が重畳した時のデータを分析した結果、大気中を飛来する海塩量よりも、降雪に含まれる海塩量の方が著しく大きいことがわかりました(図4-2)。このことから、塩雪害発生時にがいしに付着した海塩が降雪に含まれていた海塩であることが示唆されました。

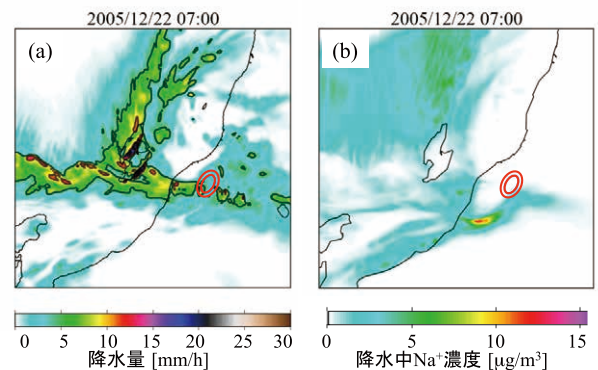


図4-1 新潟下越雪害時における降水量(a)と降水中Na<sup>+</sup>濃度(b)の分布の数値解析結果<sup>1)</sup>

五泉市上空(図中の赤色○)を東西に伸びる降水帯と、その降水帯のやや南側において多量の降水中海塩が新潟平野を通して内陸まで輸送されている過程が示されている。



### (3) 塩雪害の発生可能性に関する指標の提案

がいしへの圧密着雪を伴う塩雪害の発生可能性を表す指標として、風向、風速、気温、降水量、および、海岸からの距離で規定される指標  $P_{salt\_snow}$  を提案しました。新潟県内11地点の気象庁アメダスにおける過去37年間のデータをもとに、提案した指標の値を計算した結果、塩雪害発生地点近傍に位置する観測点において新潟下越

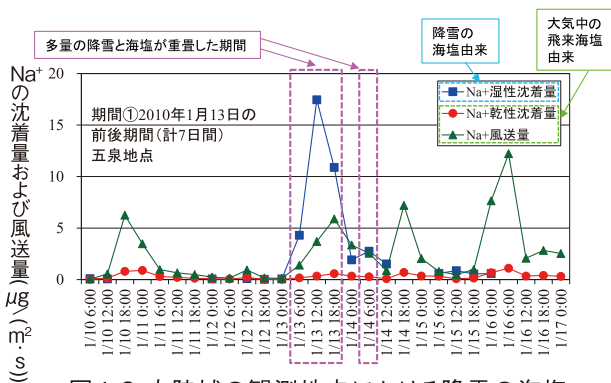


図4-2 内陸域の観測地点における降雪の海塩由来と大気中飛来海塩由来のNa<sup>+</sup>沈着量<sup>1)</sup>

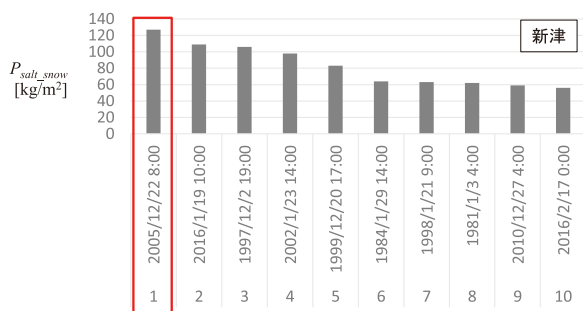


図4-3 提案した指標  $P_{salt\_snow}$  による評価例(新津アメダス(塩雪害発生地点近傍))<sup>1)</sup>

※新潟下越雪害時に塩雪害が発生した日時(赤枠で囲んだ期間)に数値が最も高い。

雪害時に評価期間中で最大となることが示され(図4-3)、提案した指標が、圧密着雪を伴う塩雪害の発生の予測に有効であることが確認されました。

## 4.2 がいしの着雪特性および着雪がいしの絶縁特性の解明

がいしは、電線とその支持物を電氣的に絶縁する上で不可欠なものです。清浄ながいしは、非常に高い絶縁性能を持っていますが、前節で述べた導電率の高い湿った雪ががいしに大量に付着した事例では、がいしの絶縁性能が低下してフラッシュオーバーによる送電事故に至りました。この塩雪害の発生メカニズムの解明と対策検討のためには、雪の導電率が高くなる原因に加えて、がいしへの着雪がどのように発達するか、また、着雪したがいしの絶縁性能がどのように低下するかについて、詳細に調べる必要があります。

### (1) がいしの着雪特性の解明

がいし着雪の発達過程を明らかにするため、インターネット回線を利用して、自然環境下で着雪の連続観測を実施しました(図4-4)。その結果、笠の直径が小さく笠間隔が狭い長幹がいしにおいて、がいしの笠と笠の間が着雪により橋絡(電氣的に導通)し絶縁性能が低下しやすい傾向が認められました。この傾向は、室内着雪実験においても同様に見られたことから、長幹がいしに代わり、笠の直径と笠間隔が大きい懸垂がいしを用いることが、塩雪害対策に有用であることが確認されました。加えて、近年国内で適用が始まっているポリマーがいし(外被材料としてシリコンゴムを用いたもの)についても、製品設計時に笠形状を工夫することによって、懸垂がいしと同

等の優れた耐着雪特性を示しうることが分かりました。

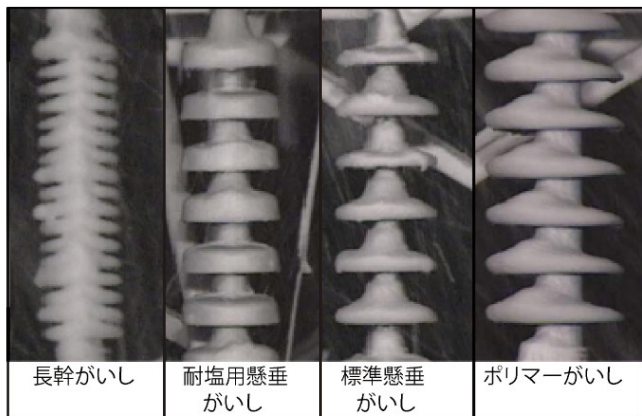
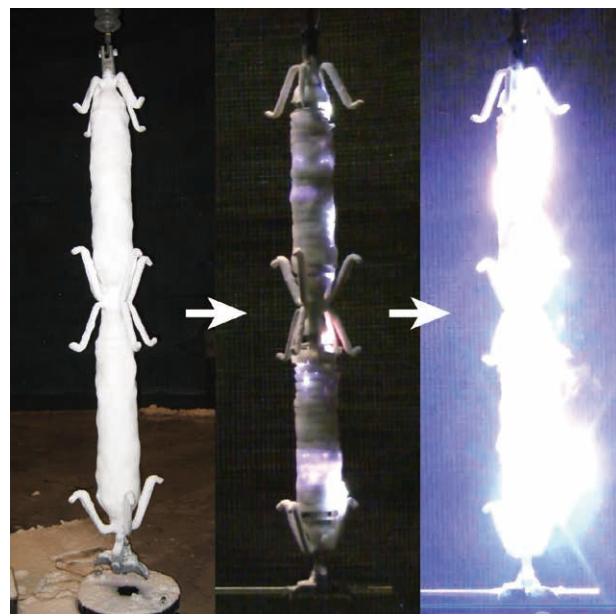


図4-4 各種がいしの着雪様相(釧路試験線にて観測)<sup>1)</sup>

厳しい暴風雪環境下において、懸垂がいしとポリマーがいしは優れた耐着雪特性を示した。

## (2)着雪がいしの絶縁特性の解明

着雪がいしの絶縁特性を明らかにするためには、着雪がいしに高電圧を印加し、放電発生様相、ならびにフラッシュオーバーする条件を調べる必要があります。そこで、当研究所では、人工雪を用いた着雪フラッシュオーバー試験手法を開発し、スウェーデンのSTRI社が所有する大規模な環境試験ホール(直径18m、高さ23m、 $-20^{\circ}\text{C}$ までの低温試験が可能)を用いて、実規模の154kV級がいしに対するフラッシュオーバー試験を行いました(図4-5)。2005年塩雪害発生時と同等の過酷な着雪状況を想定した試験の結果、懸垂がいしのフラッシュオーバー電圧は、長幹がいしに比べて高く、懸垂がいしを用いることが塩雪害の防止対策として有効であることが確認されました(図4-6)。また、ポリマーがいしも、懸垂がいしと同等の特性を有することが分かりました。



試験前のがいし着雪 がいし着雪の空隙部分で 左記局部アーク放電が  
(広域停電の際の 局部アーク放電に伴う 伸展して送電事故  
過酷な状況を模擬) 発光が見られる (フラッシュオーバー)に至る

図4-5 大規模な環境試験ホールでの送電用がいし(154kV級)の着雪時フラッシュオーバー様相<sup>1)</sup>

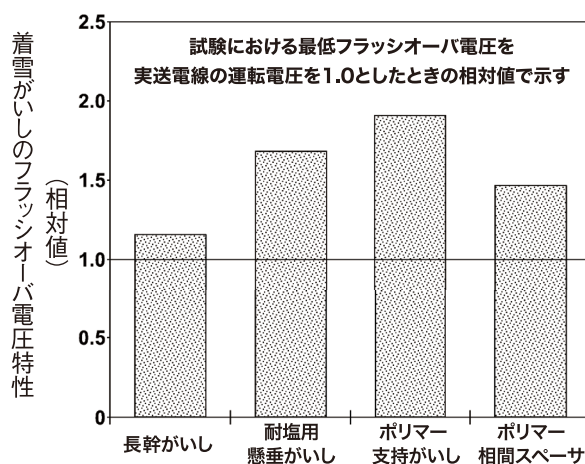


図4-6 人工雪を用いた着雪フラッシュオーバー試験結果(雪の導電率 $800\ \mu\text{S}/\text{cm}$ )<sup>1)</sup>

<参考文献>

1) 本間宏也, 他:「送電設備の雪害に関する研究」10ヵ年研究成果(その2)ーがいし塩雪害の評価手法と対策ー電力中央研究所報告H16004, 2017.

DEN-CHU-KEN  
TOPICS

発行：一般財団法人 電力中央研究所 広報グループ

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1（大手町ビル7階）

TEL：03-3201-6601 FAX：03-3287-2863

<http://criepi.denken.or.jp/>