

捻回楕円電線およびスパイラルロッド巻き付け電線の着氷雪特性

大浦 久到、守護 雅富、岡本 誠（北海道電力）、菅原 宣義（北見工大）

1. まえがき

北海道電力内の送電線の振動抑止対策として、最も使用されているものは相間スパーサであるが、これは電線間に絶縁棒を挿入し機械的に電線同士の接触を防止するものである。電線の振動は、電線に着氷雪が付着し、強風が発生した場合に作用する空気力によって発生することは知られている。近年、電線風圧の低減、あるいは電線の風騒音を低減することを主目的として、中部電力(株)と日立電線(株)が電線断面が楕円型の捻回楕円電線を開発する⁽¹⁾ととともに、東北電力(株)と日立電線(株)が普通電線に巻き付けるスパイラルロッドを開発した。これらの電線は着氷雪の初期の段階で、電線に一樣な着雪を形成させないことが期待でき、このため大きな電線振動を引き起こさない空気力特性を有している可能性があり、その振動抑制効果が認められれば、相間スパーサ以外の有力な対策となり得る。

筆者らは、最終的には電線着氷雪時の空気力係数を求め、数値計算により電線振動の挙動評価を行うが、そのために電線へ着氷雪が付着した場合の形状を知る必要があることに加え、北海道で特に課題となる着雪に対する評価を行うために、今回、これら 2 種類の電線サンプルの着氷雪形状、難着雪効果、着雪量の把握に関する基礎的実験をおこなった。以下にその結果を報告する。

2. 着氷雪実験の目的

(1) 捻回楕円電線およびスパイラルロッド巻き付け電線の着氷雪形状と落雪効果

図-1 に示す 610 S Q 相当の捻回楕円電線、スパイラルロッド巻き付け電線（160 S Q 相当含む）について、以下の項目を確認する。

- ・着氷雪の付き方・特徴
- ・着雪の落雪過程・難着雪効果

(2) 電線サイズおよび電線種類による着雪量

- ・610 S Q 普通電線と 610 S Q 相当の捻回楕円電線の着雪量比較

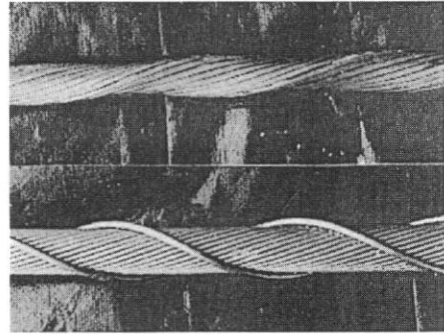


図-1 供試電線（上：捻回楕円電線、
下：スパイラルロッド巻き付け電線）

3. 人工着氷雪実験

着雪実験は北海道電力(株)総合研究所内恒温恒湿実験室、着氷実験は北見工大内恒温恒湿実験室で実施した。

(1) 実験条件

着雪実験の実験条件は、室温 2℃前後、風速は使用雪が電線サンプルに適切に付着する風速に調整しおよそ 5 m/s。一方、着氷実験の条件は、室温 -7℃前後、風速は 10m/s。なお、両実験とも電線サンプルは回転を考慮していない。

(2) 実験要領

表-1 に着雪実験の 3 ケースの要領を示した。また、着氷実験については、電線サンプルについて、着氷の発達過程を正面および横から観察した。

表-1 実験要領

ケース	実験要領
1	着雪厚さ 2cm 程度の厚さになった時点で形状を確認し、自然温度上昇での落雪過程を観察する
2	いずれかの電線サンプルが落雪する限界着雪厚さを確認する
3	着雪厚さ 2~3cm 程度の厚さになった時点で所定長さ 20 cm 当たりの着雪重量を確認する

* 1：着雪は積雪をふるいにかけてながら水スプレーを併用して形成。

* 2：着氷は風洞装置内で上下可動ノズルからの模擬過冷却水滴により形成。

* 3：着雪実験では、含水率（遠心分離）、着雪密度測定。

4. 実験結果

(1) 着雪形状

図-2～3 に着雪状況の一例を示す。着雪の色が若干灰色に近くなっているが、これは着雪性状が高い含水率のためである（測定値にムラがあるが35～40%）。これらの着雪状況から、捻回楕円電線とスパイラルロッド巻き付けについて、以下の特徴がみられた。

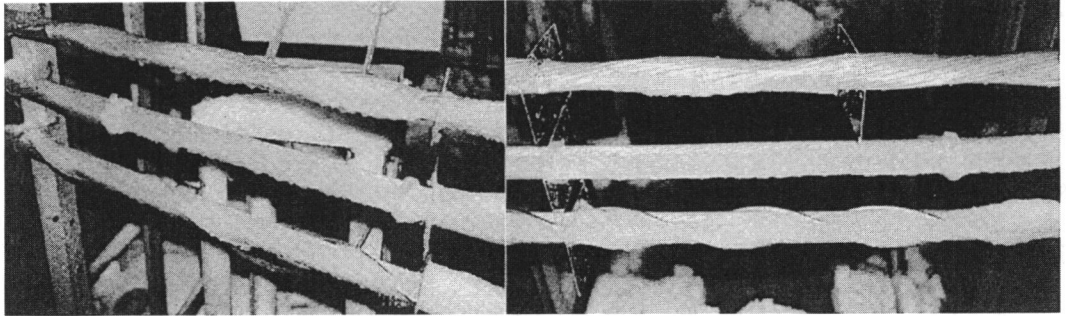


図-2 着雪状況その1

左(上:捻回楕円, 中:ACSR, 下:スパイラルロッド巻き1条) 右(上:捻回楕円, 中:ACSR, 下:スパイラルロッド巻き2条)

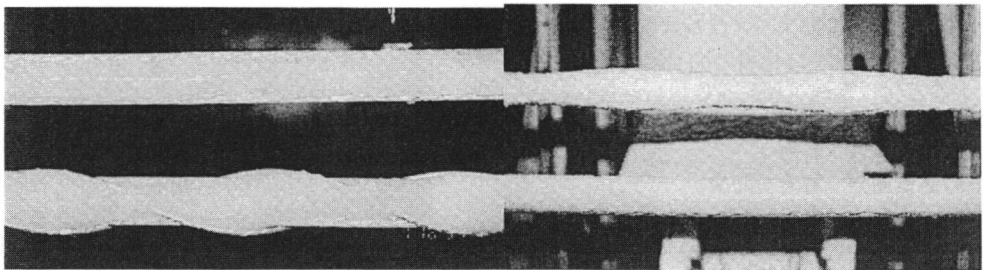


図-3 着雪状況その2

左(図-3 右の下部2線を正面から撮影) 右(上:捻回楕円, 下:ACSR)

・ 図-2 からわかるとおり、捻回楕円電線の着雪先端は捻回ピッチに対応したうねりがあらわれる。正面からみると楕円断面の長軸が水平になるポイントがうねりの最低点近くに相当している。また、図-3 から受風面積が広いポイントで着雪量が多く、楕円断面の長軸が水平となり、受風面積の小さいポイントでは着雪量が少なくなることがわかる。

・ スパイラルロッド巻き付け電線は、風上正面からみてロッド間の着雪が多くなり、斜めに走っているロッド部分の着雪量は少ない、図-3 は正面からみた状況であるが、その状況を確認できる。

(2) 着氷形状

捻回楕円電線（610SQ 相当）およびスパイラルロッド巻き付け電線（160SQ）の着氷状況を図-4、図-5 に示す。

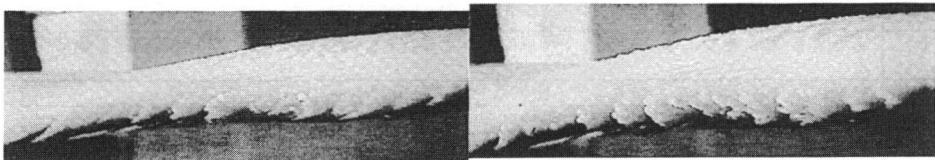


図-4 捻回楕円電線の着氷状況

(左: 実験開始30分後、右: 実験開始50分後)

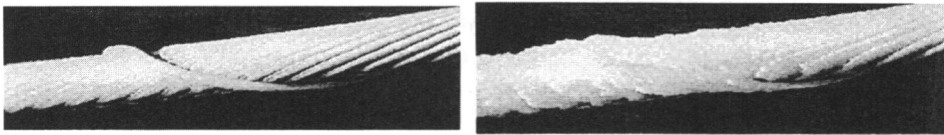


図-5 スパイラルロッド巻き付け電線の着氷状況 (左:実験開始30分後、右:実験開始50分後)

これらの着氷状況のうち、特にスパイラルロッド巻き付け電線に興味ある現象がみられた。着氷は、風を受ける方向に発達するが、スパイラルロッド付近では正面からの風が電線の上面でほぼ90度に変化することを確認した。風速が大きくなれば、状況は変わることも考えられるが、この微妙な電線表面での風向変化は、電線振動に何らかの影響を与えるものと考えられる。

(3) 落雪過程

着雪実験後、着雪の自然融解を観察した結果、

- ・ 捻回楕円電線の着雪は、ACSR 線よりも早く落下する傾向が認められた。
- ・ スパイラルロッドは、ロッド間で着雪が保持されるため、ACSR 線、捻回楕円電線よりも温度上昇により落雪に至る時間が長くなる傾向が認められた。

(4) 限界着雪厚さ

10%以内の着雪厚さ差異において、捻回楕円電線の落雪は他の電線よりも早く、含水率が30%以上の比較的高い場合において、6cm程度の着雪厚さが限界着雪量となる結果が得られた。

(5) 着雪重量

- ・ 着雪厚さ2cm程度では、捻回楕円電線の着雪量がACSR 線に比較して2~5%少なくなる。(図-6)

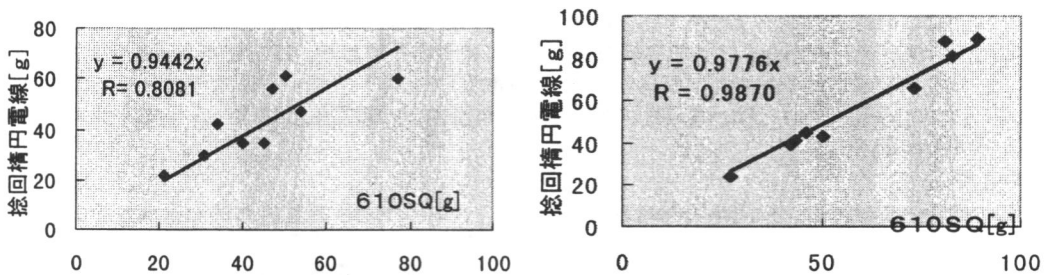


図-6 ACSR と捻回楕円電線の重量相関分析 (左:捻回楕円電線の断面長軸が水平、右:長軸が垂直)

5. 考察

(1) 着雪形状と落雪過程

図-7 に捻回楕円電線と ACSR の着雪断面形状の一例を示すが、捻回楕円電線は、断面の楕円軸が交互に変化しているため、受風面積の違いにより着雪形状が異なっていることを確認できる。



図-7 着雪断面形状の一例 (左:ACSR、右×2:捻回楕円電線)

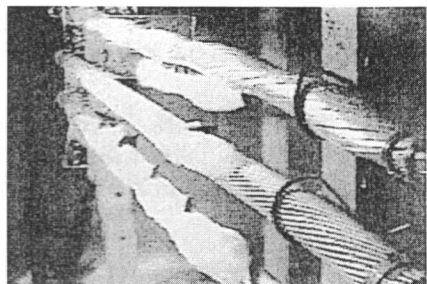


図-8 着氷雪の落下(上:捻回楕円電線)

(2) 捻回楕円電線の難着雪効果の理論的検証

図-8 に捻回楕円電線の断面長軸が垂直となる箇所が一早く落雪した状況を示すが、これについて、着雪形状が電線の一断面形状に同一で、かつ着雪総量も同一条件の着雪の剥離モーメントから考察する。着雪による着雪重心を作用力とする着雪の剥離モーメント M_d は、ACSR 線の場合、次式で求めることができる。⁽²⁾

$$M_d = \left[(L/2) + (\pi/8) \cdot d \right] \cdot d \cdot \rho \cdot L \quad (\text{式1})$$

ここで、 L ：着雪厚さ、 d ：電線外径、 ρ ：着雪比重

また、捻回楕円電線の一断面における着雪の剥離モーメント M_b (短軸が垂直となる断面)、 M_a (長軸が垂直となる断面) は、ACSR 電線の場合と同様に求めると次式が得られる。

$$M_b = \left[(L/2) + (\pi/8) \cdot a \right] \cdot b \cdot \rho \cdot L \quad (\text{式2})$$

$$M_a = \left[(L/2) + (\pi/8) \cdot b \right] \cdot a \cdot \rho \cdot L \quad (\text{式3})$$

ここで、 a ：断面楕円の長軸長 3.767cm b ：断面楕円の短軸長 2.683cm

捻回楕円電線が ACSR 線よりも落雪が早いとすれば、

$$M_d < (M_a + M_b) / 2 \quad (\text{式4})$$

ここで、捻回楕円電線は算術平均を代表値と仮定した。

限界着雪量の実験において、捻回楕円電線の着雪厚さがおよそ 6cm で、楕円断面の長軸が垂直の箇所でもっとも早く落雪したことから、 $L=6\text{cm}$ として計算すれば、次のようになる。

$$M_d : M_b : M_a = 1 : 0.810 : 1.026$$

$M_a > M_d$ となっており、捻回楕円電線の楕円断面の長軸が垂直の箇所で落雪が早くなることが推察できる。さらに M_a が 1 を越える場合の L の値を、式1および式3から求める。

$$\left[(L/2) + (\pi/8) \cdot d \right] \cdot d = \left[(L/2) + (\pi/8) \cdot b \right] \cdot a$$

上式に実際の数値を入れて、 L を求めると次の値が得られる。 $L \div 3.62\text{cm}$

これは $L > 3.62\text{cm}$ の着雪厚さがあれば、捻回楕円電線の方が早く落雪することを意味している。この数値は、着雪の性状 (氷か湿雪か) などにより異なるものと考えられるが、着雪事故につながりやすい湿雪を主体に考える場合は、着雪実験の条件もこれに対応しており、ほぼ妥当な値と考えられる。

また、捻回楕円電線は素線断面が矩形 (セグメント電線) であり、表面も平滑な素線となっており、含水率の高い重着雪については、最外層に形成される垂直面での着雪偏心は脱落を早める効果があるものと考えられる。

6. あとがき

今回の着氷雪実験では、捻回楕円電線およびスパイラルロッド巻き電線における着氷雪形状、落雪プロセス、着雪量 (捻回楕円電線について) について、基礎的なデータを得ることができた。

着雪実験は、比較的含水率の高い条件で行われているが、実際の電線着雪の条件としては妥当なものと考えている。しかしながら、実際の着雪事故のケースでは、湿雪が付着後、気温の低下とともに着雪表面が冷却硬化し、場合によっては氷化することが多い。このようなケースについては、人工着雪実験での再現は困難であるが、着雪が開始する初期の段階での特性として、捻回楕円電線が ACSR 電線よりも早く落雪する可能性が高いことは、ある任意の着雪条件時としても、もっとも懸念する筒雪への発達を抑止するための最小限の必要条件でもある。その意味で、今回得られた捻回楕円電線の基礎的特性は、筆者らの仮説を裏付けるものと考えている。

なお、今回の検討にあたり、試料をご提供いただいた中部電力(株)殿、東北電力(株)殿、日立電線(株)殿、また有益なご助言を賜った北海道大学の若濱五郎名誉教授に深く謝意を表します。

[参考資料]

(1) 齊藤、長谷、窪川、岩間：「捻回楕円電線の低風圧特性」，平成 10 年電気学会全国大会

(2) 前沢、五藤ほか：「送配電線の難着氷雪化に関する研究」 (中間報告 2) -送配電線の難着氷雪化技術の問題点とその解決方法について-，北海道電力(株)技術研究所，昭和 52 年 8 月