研究報告

送電ケーブルのフィールド観測とフィールド実験

Field Observation and Field Experiment of Transmission Line Cable

雪野昭寛*¹ 澤田 純*² 長谷祐児*³

Teruhiro YUKINO, Jun SAWADA, Yuji HASE,

武田浩三*⁴

太田吉彦*⁵

藤野陽三*⁶

山口宏樹*⁷

Kozo TAKEDA, Yoshihiko OOTA, Yozo FUJINO, Hiroki YAMAGUCHI

SUMMARY

There are some kinds of cable vibration phenomena occurred on transmission line. Notable vibration of them is called "Galloping".

This vibration causes electrical outages and fatigue damages to these transmission lines, though this phenomena has not been clarified. Therefore, we have been studying and observing these galloping to comprehend the mechanism of this kind of vibration and confirm the effects of anti-galloping devices from 1950's. In 1975, galloping was defined as the low frequency self-excited vibration with large amplitude that is occurred by the lift force that is caused by the ice or snow accreted cable whose shape is non-symmetric cross section under the wind velocity of more than 7m/s (10 minutes average).

Thereafter, many kinds of field observations and experiments have been carried on using the full scale test lines as well as the operating lines.

This paper denotes that these outline before mentioned and the characteristics of galloping phenomena.

Keywords : transmission line, galloping, full scale test line, field observation, field

1. はじめに

架空送電線では、これまでに何度となく、ギャロッピングによる電氣的、機械的の被害を受けてきた。そこで送電ケーブルのギャロッピング現象を解明し、その防止（抑止）対策を確立するために、実現象を十分把握することを目的としてフィールド観測や実験を行っている。本論文ではこれらの概要を述べ、送電線のギ

ャロッピング特性について、フィールドデータからの若干の考察を加える。

2. 歴史と現状

2. 1 ギャロッピング観測の歴史

ギャロッピング現象が国内の送電線ではじめて目視、記録されたのは、昭和 32 年に北海道電力の砂川火力線

*1 関西電力（株）
Kansai Electric Power Co., Inc.

*2 東京電力（株）
Tokyo Electric Power Co., Inc.

*3 中部電力（株）
Chubu Electric Power Co., Inc.

*4 旭電機（株）
Asahi Electric Works, Ltd.

*5 日本カタン（株）
Nippon Katan Co., Ltd.

*6 東京大学大学院工学系研究科 教授
Professor, University of Tokyo

*7 埼玉大学 工学部 教授
Professor, Saitama University

（原稿受理：平成 12 年 7 月 3 日）

での電線動揺である。その後、東北、北陸、関西地方と順次南下しながら同じような現象が確認され、着氷雪した電線に7 m/s以上の風が吹くと、低周期(数秒)で捻回を伴った上下に動く電線の振動現象として認識された⁽¹⁾。これら振動現象の一部はスチール写真や8 mm フィルム、またビデオテープに納められている。

発生箇所は、これまで送電線の巡視員だけが行くところが多く、一般に山岳地の目立つ場所ではない。しかも、その頻度は冬季のまれな気象条件下においてであり、巡視員でさえも、その現象を見るチャンスは少ない。近年、低標高の山地や平野部においても、寒冷前線を伴った低気圧の通過時にまれに発生している。この様に、まれな現象ではあるが、一度発生すると、数分間から1日間に及ぶこともあり、繰り返しの電気的短絡事故や送電線を構成する電線やがいし装置、さらには鉄塔腕金部材への損傷が生じる場合もある。

これらのことから、送電ケーブルは少なくとも鉄塔腕金の垂直間隔に近い大きな上下振幅(数m~10数m)で動いていると予測され、その防止(抑止)対策を確立するためにフィールド観測や実験を行いながら、長年にわたり現象把握や対策効果の確認がなされてきた⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

2. 2 フィールド観測と実験の現状

これらの目的を達成するために、ギャロッピング現象の発生した実送電線において観測が行われたものの、厳しい冬季気象条件下では電源の確保、観測員の住環境等、多くの障害により、なかなか満足なデータを得ることが出来なかった。

そこで、実規模試験線による観測が行われるようになった。試験線においては、人工着氷による観測が主として実施され、これにより、冬季だけでなく、7 m/s以上の風が吹く時期は、いつでも観測が可能となった。人工着氷の断面は、ギャロッピングが発生しやすい種々の形状が考案され、また実線路での着氷雪の形状も採用されている。代表的な試験線として、笠取山試験線、十王試験線、下総試験線、最上試験線がある。

また、振動現象であるギャロッピングにおいては、減衰特性を把握する必要がある、上記の各試験線や実送電線において人力加振による減衰特性の測定実験が行われている。また長径間送電ケーブルのねじれ剛性や起振機加振による減衰特性の測定も山崎試験線において実施されている⁽⁵⁾。

一方、自然着氷下での実規模試験線における観測も実施されている。代表的な試験線は、高石山試験線、

奥日光試験線、竜王試験線、敦賀試験線である。

近年、計測装置の性能が良くなるにつれて、実送電線での観測も行われるようになってきた。

実送電線では特に、現地での気象条件と電線への着氷雪や動的挙動などの情報を同時に入手することが極めて重要である。このため、一般の気象観測用測定器とは異なり、送電線での各種の挙動を解析できるように、線路保守に必要な気象と送電線の挙動などの情報をリアルタイムで処理し、かつ長時間のデータ(6ヶ月)記録と処理を可能とする低廉で小型の無人観測装置が開発されてきた。代表的な装置として、後述するものに『架空送電線情報収集システム』がある⁽¹¹⁾。この装置を用いた電力各社の現地観測箇所数は、平成11年度末で10数カ所を数える。

3. フィールドでの観測・計測項目

3. 1 電線動揺

送電線のギャロッピング抑止対策を考える場合には、その発現限界風速だけではなく、発生時の振幅を予測できることが重要であり、一般には、電線にランプを付けて、その動きをビデオ撮影して軌跡を求めている。

一方、観測に並行して行われてきた解析やシミュレーションによれば、ギャロッピング現象は着氷雪によって非対称断面となった電線の上下振動と捻回振動が相まって、大きく発達する共振現象と定義されている⁽¹⁾。

したがって、ギャロッピング時の、電線の水平・垂直・捻回の動きを周期、モード、振幅をパラメータにして、定量的に整理している。

また、がいし装置や鉄塔腕金等の損傷は、電線の張力変動に伴う疲労被害が原因であることから、ギャロッピングによる電線変動張力の発生頻度も必要となる。

3. 2 着氷雪形状

電線を動かす力は、電線に付着した氷雪の形状により決まってくることから、実送電線の着氷雪形状を把握する必要がある。このため、ギャロッピングが発生した送電線下において、落下着氷雪の採集をはじめ保線所員や観測員による電線の目視や写真撮影が行われてきた。

近年では、小型で高性能のビデオカメラが市販され、電線のスパン方向の着氷雪状況が連続して記録できるようになったものの、厳しい冬季の気象条件下では、雲や雪に視界を遮られることが多い。

これらのフィールド観測については、CIGREのSC-22委員会において、国際的なデータベース化のた

め、観測マニュアルが提案されている⁽⁶⁾。

一方、低温風洞を用いて、人工着雪実験によりその形状を把握することも行われてきている⁽⁷⁾。

3. 3 風

送電線に吹き付ける風は、時間的・空間的に変動している。この変動により、送電線に作用する空気力もまた変動することから、風の観測は重要な項目の一つである。特に、山岳地では複雑な地形の影響があり、試験送電線下に複数の風速計を設置して、乱れの強さ、パワースペクトル密度、径間分布、鉛直分布等、風の特性を示すパラメータが種々求められている⁽⁸⁾。

3. 4 送電線の構造減衰

送電線の構造減衰については、各試験線や実送電線で測定された自由振動波形から減衰定数の同定が行われている。その結果が、電気学会調査専門委員会においてまとめられつつあり、減衰比で、0.5~5%の値が得られている。

4. 代表的なフィールド観測・実験

4. 1 敦賀試験線

敦賀試験線は、関西電力㈱における低インダクタンス送電線の実用化を主目的として1981年(昭和56年)12月に建設され、京都大学 防災研究所、住友電工㈱、㈱フジクラ、日本カタン㈱、日本ガイシ㈱、㈱酒井鉄工所、安治川鉄工㈱の協力のもと、第1期5年間の研究を1986年3月で終了した。この研究により、低インダクタンス送電線路設計に必要な各種データを得ることができ、また送電線に加わる荷重の中で重要な要因である風の諸特性についても貴重なデータが得られている。

当試験線は、琵琶湖の北側、福井県と滋賀県の県境にまたがる標高約600m~800mの東西に走る尾根上にある。北と南は深い谷をともなった険しい斜面で、東と西はさらに高い尾根へと続いている。冬季には、日本海上で発生した過冷却水滴を運ぶ強い季節風が、試験線にほぼ直角に吹き抜け、電線着氷によるギャロッピングが発生し、また冬季雷も多い。このため、山岳地試験線としては、日本でも有数の厳しい気象条件下(氷雪、発雷等)にあることから、1986年4月より風の特性のみならず、山岳地を通過している送電線の設計、保守に関する総合気象情報データの蓄積をはかり、さらに観測内容を充実した第2期の研究を継続し、1989年3月に終了した。

その後、低インダクタンス送電線の最適化をめざし

た大束径多導体(束導体径2.6m、6~8導体)送電線の研究を1989年10月より開始し⁽⁹⁾、1998年3月に終了した。その後、中部電力㈱発案による単導体電線のギャロッピング抑止対策研究が住電朝日㈱の協力のもと1年で終了した。

現在は、高分子がいしの開発研究に伴う実規模試験と、山岳地気象情報のデータ蓄積が行われている。

4. 1. 1 設備概要

試験線は、1回線三角配列の500kV狭えぼし型鋼管鉄塔3基からなり、大束径6-8導体(低風圧低風音電線810mm²、導体間隔1,300mm、束径約2,600mm)2相2径間と、4導体(TACSR810mm²、導体間隔500mm)1相2径間が架線され、また線下には数多くの風速計や気象観測装置が配置されている。(2000年4月現在)

3基の鉄塔下には、各々測定室が設置され各種観測機器が収納されている。2号鉄塔付近には、観測本館があり主として気象関係の観測機器が設置され、有人観測時には宿泊が可能な設備となっている。試験設備の概要をFig.1に、試験線をPhoto.1に示す。

Fig. 1 敦賀試験線の設備概要
Outline of Tsuruga test line

Photo. 1 敦賀試験線 (No.2 鉄塔と観測本館)
Tsuruga test line (No.2 Tower and observation base)

試験線山麓のマキノ町にはマキノ観測基地を建設し、試験線観測システムと保守情報伝送システムの親局、および各システムの中央処理装置を設置している。

試験線の電源は麓のマキノ観測基地から、専用配電線により、3相 550V で供給している。当地では発電が多いことから、ノイズカットトランスや、無停電電源装置を設置している。

山上の試験線と、マキノ観測基地は、約 3 km 離れており、その間は、配電線に添架した光ケーブルでデータを伝送している。また、マキノ観測基地と、尼崎にある関西電力㈱総合技術研究所は、モデムを介して電話回線で結ばれており、リアルタイムで全データが把握できる。

4. 1. 2 観測システム

観測システムは NC 用コンピュータを用いて、主に無人観測を行っている。各種センサの情報は、鉄塔下の測定室に設置された光データ伝送システムにより集約され、麓のマキノ観測基地にて山岳地気象、電線、がいし装置の挙動等としてデータベース化されている。

電線・がいし装置関係の観測項目、点数を Table 1 に、配置の概要を Fig. 2 に示す。試験線各部の挙動やそれらが受ける荷重は風と密接に関係するので、試験

線に沿ってプロペラ型風向風速計をはじめ、鉛直風速計他 26 点もの風速計が配置されている。また吹上角や風の空間的性状を解明するため超音波風速計が新しく追加された。その他、水晶温度計、水晶露点計、保温式転倒樹雨量計、気圧計、超音波式積雪深計が増設された。測定データは±5V ないし 0~5V の電圧として出力されている。又、標高差、地上高差による着氷量の違いを得るため、各鉄塔の上部と中間部に計 6 点の着氷雪サンプラーを設置している。

4. 1. 3 観測結果

敦賀試験線において、平成 9 年 1 月 8 日 16 時 27 分に観測された大振幅振動時の風データと電線動揺の状況を Fig. 3~Fig. 5 に示す。

Fig. 3 は、No.1 より No.3 までの各鉄塔頂部の 3 台と、No.2 鉄塔中間部の 1 台、並びに電線下に配置された支持物上の 12 台を併せた合計 16 台のプロペラ風速計の 10 分間時系列データである。図の下半分が No.1 より No.2 間で、上半分が No.2 より No.3 間の各風速を示す。Fig. 3 より、風は相関性を持ちながらも、場所によりかなり異なることがよくわかる。平均風速は、No.2 鉄塔中間部(CH8)において 10.3m/s、乱れの強さは 0.18 であった。

Table 1 電線・がいし装置関係の観測項目
Observation items of conductors and fittings

項 目	測定方法	点数
がいし連上下振れ角	ポテンショメータ	9
がいし連横振れ角	ポテンショメータ	9
がいし連張力	ロードセル	9
捻回角	ポテンショメータ	3
ジャンパー振れ角	ポテンショメータ	3
素導体変位量	ポテンショメータ	6
スベサ荷重	ロードセル	5
電線運動	ITV	2

Fig. 2 電線・がいし装置センサー配置図
Disposition of sensors for conductors and fittings

Fig. 3 風観測データ ('97.01.08 16:28)
Observed wind velocity data

Fig. 4 電線動揺軌跡図 (径間 1/4 点)
Locus of conductor (1/4 point of span)

この様な風速下において、No.2 と No.3 間に架線された6 導体電線の径間 1/4 点に設置された標的ランプの軌跡を Fig. 4 に示す。径間 1/2 点のランプは、雲により遮られ連続したデータは得られなかった。

電線動揺の動きを標的ランプのビデオ撮影画面より、XY トラッカーを用いて得られた時系列データを Fig. 5 に示す。

Fig. 5 に示された時系列データについて、動揺が大きな鉛直変位を対象に F F T 処理した結果を Fig. 6 に示す。

この図から、鉛直方向では 0.27Hz 付近にエネルギーが集中していることが認められる。この 0.27Hz は Table 2 に示す固有振動特性の鉛直 2 ループの周期にほぼ一致しており、これが自励的な振動と考えられる。

Fig. 5 電線動揺時系列データ
Time history of conductor's displacement

Fig. 6 電線動揺（鉛直成分）のフーリエスペクトル
Fourier spectrum of vertical displacement

Table 2 固有振動特性
Characteristic of natural frequency

振動モード	固有周波数 (H z)	
	計算値	人工加振値
水平 1 ループ	0. 1 4 0	—
水平 2 ループ	0. 2 8 1	—
鉛直 1 ループ	0. 3 8 5	0. 3 2 2
鉛直 2 ループ	0. 2 7 7	0. 3 0 3
捻回 1 ループ	0. 1 8 2	0. 2 0 0

*) 弛度 = 10. 9m (0.5kg/m 着氷時)

鉄塔の振動特性は、No.2 鉄塔において、線路直角方向の 1 次・2 次モードで 1.16Hz・2.99Hz、線路方向で 1.25Hz・3.57Hz である。この時の減衰比は、1 次が 1 ～ 2 %、2 次で 0. 4 % の値が得られている。なお、鉄塔高は 6 1.2m である。

なお、180 秒以降の縮小状況については、風速が低下しているために振幅も減少していると考えられるが、自励的振動と強制的振動の分離等について、今後さらに検討が必要とされる。

また、1998 年度冬季には、プレトリガ方式を導入し、トリガ時から 10 分間遡ったデータが収集されており、ギャロッピング発生前後の状況分析も予定されている。

4. 2 最上試験線

近年は冬季に山岳地だけでなく、平野部で広範囲にギャロッピングが希に発生しているため、既設備を大きく変更することなく、経済的なギャロッピング抑止対策が急務となっている。この抑止対策を行う上では、

- ① 理論解析
- ② 現象把握
- ③ 対策技術開発

等が大きな柱であり、最上試験線での実証試験をもとに進められている。

4. 2. 1 設備概要

最上試験線は、1979 年（昭和 54 年）に、当時計画されていた 100 万 V 送電線のスパーサの開発および強風下に於ける多導体送電線の振動観測を目的として、山形県庄内平野において、最上川が峡谷部より平野に出た付近の峡谷の出口に位置している立川町の標高 160m 地点に、旭電機㈱が 1-2 号鉄塔を建設した。

ここでは、清川だしと呼ばれる、「やまじ風（四国）」、「広戸風（中国）」と共に 3 大悪風と言われる局地風に伴う東または南東よりの強風が試験線とほぼ直角に吹く。清川だしは、オホーツク海高気圧が発達したいわゆる梅雨型気圧配置のとき、または日本海に低気圧が入り太平洋側との気圧差が大きくなった時に発生する。その頻度は特に 6～8 月が高いと言われているが、実際は年間を通じて吹き、1 度吹き始めると数日間続くことが多い。

このことから、年間を通して発生頻度の高い強風を利用して、人工着氷雪を使用したギャロッピングの発生が可能であり、効率の良い抑止対策試験を実施できる。

1994 年（平成 6 年）には、東京電力㈱では旭電機㈱との協力のもとに、ギャロッピング抑止対策の確立を目的として、現象の正確な把握と抑止効果を比較する

ために、無対策とギャロッピング抑止対策品を取付けたケーブルを並行して観測できるように、既設の 1-2 号の風下 20m 地点に 3-4-5 号を並設している⁽¹⁰⁾。

4 号は、懸垂径間のギャロッピング試験が出来るように、耐張・懸垂いずれにも使用できる鉄塔である。

設備概要を Fig. 7 に、試験線全景を Photo. 2 に示す。

1995 年から Fig. 8 に示す三角型人工着雪を用いて、各種の観測、実験を実施している。

Fig. 7 最上試験線の設備概要
Outline of Mogami test line

Photo. 2 最上試験線の全景
Panorama of Mogami test line

Fig. 8 三角型人工着雪
Cross section of delta type artificial snow accreted conductor

4. 2. 2 観測システム

観測方法は、UNIX ワークステーションを中心とした無人観測を基本としている。ギャロッピング観測では、風向風速、振動モード、張力変動および歪量等が主な観測項目である。振動モードを観測するには、画像データが不可欠であり、コンピュータにて確実に画像処理できる画像データを、ギャロッピング発生中に逃さずに収録している。

また、張力変動と歪量は画像との同期が要求される。さらに相間スパーサの実証試験では、測定ケーブルを電線に添線すると、三角型着雪の空力特性に影響を及ぼすことになる。そこで相間スパーサの把持部に AD 変換器と光変換器を設置して、2 本の光ファイバーを三角型着雪の中を通して、直接コンピュータにデータ転送している。

ビデオの画像処理には、画像から直接変換した時系列データをリアルタイムで統計処理して、ギャロッピング時の 10 分間平均風速に対する各種統計量を求めるシステムを開発している。

Fig. 9 に相間スパーサの実証試験概要を、Photo. 3 に有機材相間スパーサと画像処理のための標的を示す。

Fig. 9 相間スパーサ実証試験概要
Out line of interphase spacer demonstration test

Photo. 3 相間スペーサと標的
Interphase spacer and target

4. 2. 3 観測結果

1990 年から 1995 年までに最上試験線で測定された最大風速は瞬間で 48m/s、10 分間平均で 38m/s を記録している(1993 年 9 月 4 日 1 号鉄塔頂部 地上高 35m)。

また、平均的な年の例として Table 3 に 10 分間平均 10m/s 以上の月別日数と時間を示す。1,2,11,12 月の清川だし発生日は少ないが、他の月は平均して 7 日以上発生しており、10m/s 以上の頻度が年間を通じて約 20%に達している(連続して 20 時間以上吹いた日を 1 日とする)。

ギャロッピングが発生している 10 分間平均風速 15-20m/s 域では、乱れの強さは、約 0.15 が得られている。

(1) 無対策のギャロッピング観測

Fig.10 にこれまでに得られた電線動揺の中で最大規模の観測結果を示す。

また、Fig.11 に鉛直方向変位の FFT 処理結果を示す。卓越周波数のうち、Table 4 に示す固有振動特性から、0.18Hz は横振れ振動の周波数であり、0.36Hz は鉛直方向 1 ループ振動(鉛直たわみ 1 次対称モード)の周波数と考えられる。Fig.11 は、鉛直たわみ振動が卓越していることを示しており、これが自励的な振動であると推測される。なお、弛度は、9.0m(無風時)である。

(2) ギャロッピング抑止対策品試験

1995 年から 1999 年までに試験されたギャロッピング抑止対策品を次に示す。

- ・ 偏心重量錐方式
- ・ 4 導体ルーズスペーサ

Table 3 10 分間平均風速 10m/s 以上の年間日数
Annual days of 10 minutes average wind velocity (more than 10m/s) in 1991

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年間
日数	2	3	5	7	7	9	9	10	9	10	4	3	70
時間	50	70	120	170	170	210	210	230	210	230	100	70	1650

Table 4 固有振動特性
Characteristic of natural frequency

振動モード	固有周波数 (Hz)	
	計算値	人工加振値
水平 1 ループ	0.193	0.175
水平 2 ループ	0.384	—
鉛直 1 ループ	0.388	0.377
鉛直 2 ループ	0.383	0.355
捻回 1 ループ	0.333	0.322

Fig. 10 電線リサージュ (径間中央)
Locus of conductor (center of span)

Fig. 11 電線動揺 (鉛直成分) のフーリエスペクトル
Fourier spectrum of vertical displacement

- ・ 単導体有機材相間スペーサ
- ・ 500kV 磁器製相間スペーサ
- ・ 275kV 有機材相間スペーサ
- ・ 500kV 有機材相間スペーサ

ギャロッピング抑止効果の例として、Fig. 12 に 4 導体ルーズスペーサと有機材相間スペーサの 10 分間平

均風速に対する同じ 10 分間での最大張力変動を示す。

ルーズスぺーサは、4 つの電線把持部のうち、2 つの把持部の電線が固定されず回転できる構造になっている。有機材相間スぺーサは、主に機械的荷重を分担する FRP コアと、このコアを保護し、電気的絶縁に必要な表面漏れ距離を得るための外皮シリコン樹脂等からできており、磁器製に比較してはるかに軽量である。

この図より、ギャロッピング抑制効果を無体策と比較すると、風速 25m/s で有機材相間スぺーサは半分以下、ルーズスぺーサは 1/3 程度に抑止していることがわかる。

4. 3 実線路での観測概要

実送電線においても、架空送電線情報収集システムを用いた観測が、電力各社で実施されている。これまでにこのシステムが採用され、観測を実施した地点は Fig. 13 に示すとおりである。これらの観測の主な目的は

- ① 電気的、機械的事故原因の究明。
- ② 新設線路建設前の予備調査（気象調査）。
- ③ 風、着氷雪などのマップ作成。

などが挙げられる⁽¹¹⁾。

4. 3. 1 観測システム

このシステムは鉄塔や観測ポールに取り付けた風速計、ひずみ式センサ（張力計や着氷雪サンブラ）および温度計などのセンサと、電源となる 12V バッテリーおよびデータ処理システムで構成され、6 ヶ月間の無人観測が可能である。このシステムの構成図を Fig. 14 に示す。

4. 3. 2 データ収録

実線路でギャロッピング現象に関するデータを測定するため、がいし装置に挿入した張力計（最大 4ch）により張力変動を感知し、トリガをかけることにより、必要なデータをつぎのように収録している。

(1) 時系列データ（10 分報）

風速データ：10 分間平均風速、平均風向

10 分内最大風速（瞬時値、2 種類の移動平均）と風向

気温データ：10 分平均気温

張力データ：10 分間平均張力、最大張力、
最小張力、10 分内最大張力変動、
張力変動標準偏差

(2) 波形データ

日最大張力変動発生時の張力と風速の波形を 0.1 秒サンプリングで 10 分間、4ch を同時に収録する。

Fig. 12 ギャロッピング抑制効果の比較
Compared effective data of galloping control devices

Fig. 13 観測地点
Observation points

Fig. 14 システム構成図
Observation system configuration

(3) ヒストグラム

平均風速階級別に、次の2次元ヒストグラムを収録する。

- ①30 秒間平均風速—30 秒内最大張力変動(4ch 分)
- ②30 秒間平均風速—30 秒内最大不平均張力変動 (ch1-ch2, ch3-ch4)

Photo. 4 に装置の外観を、Photo. 5 に現地設置状況を示す。

4. 3. 3 観測結果

これまでに得られた観測データと解析結果の代表例を紹介する。

Fig. 15～Fig. 17 は、日本海側の着雪地域に建設された ACSR610mm² 相当の2 導体(径間長 519m、耐張—耐張、弛度 20.0m)で発生したギャロッピング現象の観測結果を示す。このときの主風向は北西であり、平均風速は 15.1m/s と比較的強く、対象径間にはほぼ直角に谷間を吹き上げる風であったことから、約 6 時間継続してギャロッピングが発生した。Fig. 15 に荷重変動の経時変化を示す。

Photo. 4 システム本体の外観
Appearance of main system box

Photo. 5 現地設置状況
Set up observation boxes on tower

Fig. 15 に示す 1 時 30 分に観測された 25 秒間の荷重変動を Fig. 16 に示す。

このデータをもとに、電線の動揺を計算により推定した結果を Fig. 17 に示す。これより、上相が大きく動いているとき、中相はあまり動いていない状況であったと考えられる。

また、Fig. 15 の経時変化を見ると、上相と中相において、同時に大規模の荷重変動は発生していない。

この非同時性はギャロッピングによる相間短絡に対する評価の中で重要な要因となるものである。

一方、同時性はないが、上相、中相とも Fig. 18 に見るような張力変動が鉄塔、がいし装置等の支持物に加わっており、これらの観測データを反映して再現期間内の支持物の疲労検討や、最大荷重の検討をすることが、保守及び新設設計に際して重要である。

Fig. 15 上相と中相の荷重変動の経時変化
Time history of load fluctuation on upper and middle phases

Fig. 16 張力変動時系列データ
Time history of tension fluctuation in upper and middle phase conductors

Fig. 17 電線動揺推定計算結果
Calculation results of conductor's locus

Fig. 18 上相張力変動発生頻度分布
Frequency distribution of tension fluctuation in upper phase conductor

5. 観測に基づくギャロッピング特性の考察

5. 1 フィールド観測から見たギャロッピング特性

これまでに観測された送電ケーブルのギャロッピング現象について、その特徴を整理し、以下のとおりまとめた。

(1) ギャロッピングの発生は、山岳地のみならず、平地部でも観測されている。

(2) 電線への着氷雪形状は種々の形がある。水平方向に発達しているものは、三日月型、卵型、三角型で、電線直径と同じ高さまでのものが多く、えびの尻尾型では最大4~5倍もある。一方、つらら型となって下方に発達しているものも有る。

(3) 発見風速は、これまで言われているように10分間平均風速7m/s以上で発生し、25m/sでの発生も有

る。なお、30m/s以上では発生が抑制され则认为られている⁽¹²⁾。

(4) 単導体から8導体までの送電ケーブルは、いずれもギャロッピングが発生している。その動きは、垂直方向に長い楕円形の軌跡が多く、6, 8導体では水平方向に長い楕円形の軌跡もある。また、捻回を伴った動きをしている。

(5) 振動振幅は径間長にもよるが、数mから10数mであり、上下2~4秒の周期が主である。

(6) 振動モードは、上下1, 2, 3ループ(鉛直たわみ1, 2, 3次)までが多いが、長径間(854m)では推定5ループの場合も有る。

5. 2 フィールド観測の限界と課題

送電ケーブルのギャロッピング現象は、冬季に電線着氷雪があり、風速が7m/s以上になると発生するものの、実際の状況を人が観測する場合、実送電線では平地の余程道路事情の良い所でない限り、現場へ到着した時には振動は止まっている状況が殆どである。情報収集装置の活用では、電源確保の制約で測定項目が限られてしまい、画像データも撮影部分を特定せざるを得ない。試験線では、自動観測により発生条件のトリガをかけてデータ収録を行っているが、その試験線特有のデータであり、雷によりセンサの一部が破損し、限られた項目の数値データと雲や雪に一部遮られた画像データが多く、データ蓄積に数年を要する。これらの制約をクリアするには、膨大な費用が必要となる。

今後は、解析やシミュレーション等により検証項目を絞り込んだ効果的な観測が必要と考えられる。

6. おわりに

ギャロッピング現象のフィールドにおける観測データは、多大な労力と費用をかけて、長年にわたり蓄積されてきたが、その発生時の風向、風速、着氷雪形状、電線動揺軌跡(捻回現象を含む)が全て満足に揃ったデータは、実規模試験線においてさえ数は少ない。

しかしながら、これまでに得られた多くのデータを整理し、各種解析手法との比較検討を行うことにより、現象の把握と、対策方法の確立が十分になされるものと期待される。

謝 辞

本報告は、日本風工学会「風とケーブル構造に関する学術研究会(主査: 藤野陽三)」において、検討を重ねたものであり、貴重なご意見をいただいた委員の皆様

様に感謝いたします。また、本報告をまとめるにあたり、数々の情報をいただいた北海道電力をはじめとする各電力会社、住友電工をはじめとするメーカー各社他、関係者の方々にも感謝いたします。

参考文献

- (1) 電気学会, 「架空送電線のギャロッピング」,
電気学会技術報告(Ⅱ部)第82号, pp1-2, pp7-11,
1979年9月
- (2) 森下他, 「多導体のギャロッピング現象の現地試験と実験結果」, Proc.Int.Conf. Large High Voltage Electro System, Vol.30, No.1, pp22. 04.1-9, 1984
- (3) 佐々木他, 「日本におけるギャロッピング抑制装置の開発とその運転記録」, Proc.Int.Conf. Large High Voltage Electro System, Vol.31, No.1, pp22.07.1-6, 1986
- (4) 吉岡, 「送電線のギャロッピングと対策技術の現状」, 日本風工学会誌 No.65, pp43-49, 1995
- (5) Keutgen et al., "Transmission line torsional Stiffnes, confrontation of field test line and FEM simulation", IEEE, PE-247-PWRD-0-12-1997
- (6) CIGRE SC22:WG11 Task Force on Galloping, "Field Observations of Overhead Line Galloping, Galloping Report Forms", Apr.1994
- (7) YUKINO et al., "Experiment of Snow Accretion and Geometrical analysis of the Shape", IWAIS98, June, 1998
- (8) 堀口他, 「山岳地における風の分布と乱流特性(第2報)」, 京都大学防災研究所年報, 第42号 B-1, Apr.1998
- (9) 雪野他, 「大束径多導体送電線の観測・測定研究(その1)」, 電気学会電力エネルギー部門大会論文集(Ⅱ)Vol.5, No.2, pp669-670, 1994年8月
- (10) 武田, 「最上試験線の紹介」, 日本風工学会誌 No.65, pp51-58, 1995
- (11) 早瀬他, 「架空送電線情報収集システムの開発」, 電気現場技術, VOL.33, No.383, pp65-71, 1994年10月
- (12) 小澤他, 「人口模擬着雪によるギャロッピング観測」, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(Ⅱ), pp610-611, 1994年8月