特集

架空送電線の風騒音対策

Countermeasures for Wind Noise from Overhead Transmission Line

窪川 弘^{*1} 伊本杉男^{*2} 仰木一郎^{*3} 北嶋知樹^{*4} 田辺一夫^{*5}

Hiroshi KUBOKAWA, Sugio IMOTO, Ichirou OGI, Tomoki KITASHIMA, Kazuo TANABE

1. はじめに

架空送電線は自然環境下に晒されているため、風によるギャロッピング振動や微風振動など動的な空気力学現象に対する振動対策が行われてきた。

一方、架空送電設備の超高圧化、大容量化と市街地への接近に伴い、強風時に送電設備から発生する風騒音が線路環境面から重要な課題となってきた。

電線から発生する風騒音は 100Hz 前後のジェット騒音に似た低周波騒音であり、既設送電線からの風騒音対策として電線の周りにつる巻き状にアルミ線を巻きつけるスパイラルロッド対策が開発された。¹⁾

その後、新設線路の風音対策用として電線形状自体に突起を有する低風音電線が開発された。²⁾

更に、送電電圧の高い 1,000 kV 送電線路用として、風騒音対策と降雨雪時の電氣的なコロナ騒音を協調して低減する低騒音電線が実用化された。³⁾

送電線路からは電線風騒音以外にも、がいし風音⁴⁾や鉄塔風音⁵⁾も発生し、これらの対策も実施された。

本稿では、架空送電線の風騒音対策技術全般に関して、新技術も含めて紹介を行う。

2. 電線風音

2.1 研究の経緯

送電線路の風騒音が認識され始めたのは、昭和 47 年頃であり、送電容量の増大に伴う送電線路の多導体化の時期に符合している。

当時は送電線路から発生するジェット機騒音のような「ゴー」という騒音発生源が送電線か鉄塔か分からないため、現地での観測からスタートした。

騒音の発生源特定のため、複数のマイクロホンを設置して、各マイクロホンに到達する騒音の時間差を解析して送電線が騒音源であることが確認された。¹⁾

*1 株式会社ジェイ・パワーシステムズ 架空送電線事業部 開発部長

General Manager, R&D Dept. Overhead Transmission Line Division, J-Power Systems

*2 関西電力株式会社 電力システム技術センター 送電グループ 課長

Manager, Transmission Line Group, Power System Engineering Center, THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC.

*3 中部電力株式会社 流通本部 工務部 送電グループ スタッフ課長

Manager, Transmission Line Section Electrical Engineering Department, Chubu Electric Power CO., INC

*4 東京電力株式会社 工務部送変電建設センタ 既設特殊設計評価グループ 副長

Deputy Manager, Design Evaluation Group for Existing Transmission Towers Transmission & Substations Construction Center Power System Engineering Department, Tokyo Electric Power Company

*5 財団法人電力中央研究所 狛江研究所 電気絶縁部 上席研究員

Senior Research Engineer Director, Electrical Insulation Department, KOMAE Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

図1.騒音源特定のための現地観測

現地観測から電線が騒音源であると確認されたため、風騒音対策を目的に低騒音風洞が建設され、風向風速や電線サイズ、導体数などをパラメータとした電線風騒音の定量的な解析が実施された。¹⁾

風洞実験でのメカニズム検討などに基づき、スパイラルロッド径や巻き付けピッチの最適化による電線風騒音対策技術が確立された。

2.2 電線風騒音の特徴

電線から発生する風音としては、配電線の「ヒュー」という音が聞き慣れており、冬の風物詩となっている。

電線風音は電線外径によって音色が変化し、超高压の架空送電線の場合には電線外径が 20~50mm と太くなるため、「ゴー」という 50~250Hz のジェット機に似た低周波側に卓越を有する音色となる。

低周波音に関しては感じ方に個人差が多いものの、周囲の暗騒音レベルが低い場合には、普段聞き慣れないこともあり、多少耳障りと感じる場合がある。

超高压送電線は大型化し地上高が高く、電線も多導体化し本数が多いため、地上で風が弱くても上空は強風が作用し、地形や暗騒音により 1,000m 離れても認識される場合がある。

低騒音風洞での電線風音の発生周波数を測定した例が次図であり¹⁾、風速の増加に伴い周波数と発生レベルの増加傾向が認められる。

図2. 架空送電線から発生する風音の周波数分析 (ACSR410mm² (外径 28.5mm) ×4 導体の場合)

2.3 電線風音発生メカニズム

電線から発生する風音の騒音レベル(以下「風音レベル」と呼ぶ)は流体要因により単導体と多導体の場合で発生レベルが大きく異なる。

2.3.1 単導体の場合

電線の周りの流れを円柱でモデル化したものが下図である。円柱表面には粘性の大きな境界層流れがあり、流れが後流側に進む際に境界層内の圧力上昇で円柱から流れが剥離し、後方に渦を形成する。

電線風音は後流側の渦の影響を受けた電線表面流れの剥離に伴う変動揚力 F_L と変動抗力 F_D に起因する流体騒音であり⁶⁾、エオルス音と呼ばれる。円柱の場合変動抗力成分は小さく、圧力変動は主として電線上下の剥離点付近で発生し、音響双極子と見なされる。

円柱で発生する渦に関する流体力学的な解析⁷⁾によると、渦の位相は円柱の長手方向にある相関長さを持っている。層流的な流れの場合、相関距離が長く、変動揚力が大きくなることで音響強度が増大する。

風音レベルを低減するには、揚力変動成分を小さくするか、電線表面に突起などの粗度を形成して相関距離を短くする必要がある。

図3. 円柱周りの流れのモデル化

2.3.2 多導体の場合

電線が単導体の場合には、圧力変動が、電線上下付近に存在するため、音響双極子型の音源となる。

一方、多導体の場合には、上流側の渦の影響で電線にあたる風が変動し、双極子の軸が時間的場所的に変動する。また、多導体の場合には、上流側電線と後流側電線の渦が干渉し、電線表面での圧力変動が増幅され、風音レベルが増大する傾向が認められる。⁸⁾

図4. 単導体と多導体の電線表面の音源形状

導体配列による電線風音レベルを比較したものが下図であり、垂直配列の場合が単導体の2倍(3 dB)であるのに対して、水平配列は導体間隔が素導体径の6倍程度で20倍(13 dB)、400mm 間隔の場合には4倍(6dB)程度になる。⁹⁾

図5. 導体配列による電線風音への影響

2.4 電線風音の特性

2.4.1 風向風速特性

電線風音は風が電線に直角に作用するとき最大のレベルとなり、斜風になるにしたがって風音レベルも小さくなる傾向がある。

一方、風音レベルは Phillips⁷⁾ の検討から風速の6乗で増加することが理論的に導かれており、実験でもこの傾向が確認されている。

風向 θ 、風速 V とすると風音レベルは $10\log(V\sin\theta)^6 = 60\log(V\sin\theta)$ に比例して増加する。¹⁾

図6. 風向風速と風音レベルの関係

2.4.2 伝搬特性

電線風音は電線の剥離点近傍から上下方向に伝搬の指向性を有しており、受音点との距離 r 、なす角度を ϕ とすると $10\log(\cos\phi/r)$ の関係で減衰することが風洞やフィールド観測で確認されている。⁹⁾

風音伝搬特性は送電線の風下側、風上側で有意差がないことが風洞やフィールド観測で確認されている。

図7. 電線風音の指向性

図8. 風音の伝搬特性

2.5 電線風音予測技術

電線風音の影響範囲予測手法が開発され、対策必要箇所の選定やルート選定に反映されている。

2.5.1 風洞実験

電線から発生する風音レベル予測のため、電線サイズ、導体本数、導体配列をパラメータとして、電線種類別に発生レベルが求められている。

電線種類別の発生レベルは下図の方法で低騒音風洞を用いて測定され、1/3 オクターブ分析器を用いて、風音の実態が解析されている。

図9. 風洞実験による電線風音レベルの測定

2.5.2 環境を配慮した線路設計

風洞実験等により電線風音予測式が求められており、電線サイズ、導体数、電線地上高、風向風速等が分かれば影響範囲の予測が可能である。³⁾

送電線路に基準高さで10m/sの風速が作用した場合の風音影響範囲を計算した例が図10であり、過去の多数の現地観測で予測と実測の一致が確認されている。

風速 $V=10\text{m/s}$

図 10. 電線風音影響範囲の予測計算例

3. 電線風音対策技術

3.1 スパイラルロッド対策

3.1.1 標準対策方法

電線風音は 1972 年（昭和 47 年）頃から送電線の多導体化などに伴い発生し始めた。低騒音風洞を用いた検討により下図のような、境界層流れを乱流化して、揚力変動や長手方向の均一な 2 次元流れを抑制するスパイラルロッド対角 2 条巻き対策が実用化された。¹⁾

図 11. スパイラルロッド風音対策

（標準対策： 対角 2 条巻き対策）

3.1.2 超高压線路向け対策方法

超高压線路で電線表面電位傾度 G_{max} が 12kV/cm を越えるような箇所にスパイラルロッド対角 2 条巻き対策を実施すると、降雨時のコロナハム音レベルが上昇するため、水滴部分の電界を緩和する目的で密着 2 条巻き対策、対角密着 2 条巻きが実用化された。

図 12. 超高压線路向けスパイラルロッド対策

3.2 低風音電線

3.2.1 開発背景

送電線の多導体化に伴い風音レベルが上昇し、スパイラルロッドによる風音対策の必要性が増加したが、設計面や施工面での課題も出てきた。

設計面ではスパイラルロッド巻付けによる自重、風

圧荷重の増加、施工面では導体数の増加による巻付け作業員の確保、コストが問題となった。

このような背景のもと、電線自体に風音やコロナ騒音を低減機能を有した新規電線への開発ニーズが高くなった。風音予測精度も向上し、対策箇所の選択も可能となったため、低風音電線の開発が着手された。

3.2.2 電線形状の検討

電線風音は電線表面に突起を形成して、境界層流れを乱流化することで、揚力変動を抑制して、風音レベルの低減が可能である。

境界層の薄い円柱をベースにして、2 導体モデルに着いて、突起の高さと開き角をパラメータとして風音低減特性が検討された。

風音の低減量で評価すると、下図から最適な突起高さは 2.5mm 、突起部開き角は 45° 程度となる。²⁾

図 13. 突起部の形状と風音レベル低減量の関係（ $\phi 38$ 円柱モデル、水平 2 導体配置の場合）

3.2.3 風音特性

表面を平滑にして境界層を薄くして突起を形成することで、従来のスパイラルロッドの外径の $1/3$ 程度で同様な風音低減効果を得る事が出来た。

低風音電線 NS-TACSR810 は 1987 年（昭和 62 年）に初めて 500kV 送電線に適用された。

低風音電線の風音低減効果は下図²⁾のように、従来のスパイラルロッド対策と同等の効果が確認された。

図 14. 低風音電線 NS-TACSR810 mm^2 の風音特性

3.2.4 各種低風音電線

低風音電線はスパイラルロッド対策のような重量、風圧の増加がなく、鉄塔強度アップが不要のため、コストダウン効果があり新設線路での採用が増えている。

ACSR410～ACSR1160 mm²の低風音電線形状を示す。

図 15. 電力線用低風音電線の形状⁸⁾

3.2.5 低風音架空地線

避雷用の架空地線は1条であり、多導体電線のような後流渦の影響を受けないため、難着雪特性を優先する構造として突起高さは1.5mmが採用された。⁸⁾

図 16. 低風音架空地線の形状

3.3 1,000 kV 線路用風音対策³⁾

3.3.1 開発背景

1,000 kV 送電線は将来の電力需要増加への対応のため、電源の広域開発、大電力を少ないルートで安定供給するために建設が進められた。

送電線はコロナ協調面から8導体が採用され、スパイラルロッド密着2条対角巻き対策の場合、標準の600m径間では2.5mのスパイラルロッドが5万本程度必要になる。電線架線後から運転開始前の短期間に集中施工するには、施工力の確保が極めて難しい状況にあるため、低騒音電線のニーズが高まった。

3.3.2 形状検討

1,000 kV 送電線は表面電位傾度が高くなるため、突起部の水切れ性改善を目的に、突起部を模擬して、溝幅、溝深さの最適化検討が行われた。

試験から溝幅、溝の素線数、溝深さをパラメータに、水滴10個の落下時間で特性を評価した。

試験結果から次図の溝深さ1.7mm、突起部開き角45°の低騒音電線 LN-ACSR960mm²が試作された。

諸元		LN-ACSR 960mm ²
より線構造図		
より線	アルミ線	4.8～6.26mm径×44本
構成	鋼線	3.2mm径×7本
計算断面積(アルミ)		961.5mm ²
電線等価外径		40.3mm
電線重量		3.108kg/m
引張強度		20.440kN
電流容量	連続(90℃)	1.338A
	短時間(120℃)	1.820A

図 17. 低騒音電線 LN-ACSR960 mm²の諸元

3.3.3 風音特性

大型低騒音風洞を用いて LN-ACSR960mm²×8 導体の風音特性を風速 20m/s で評価した。

標準 ACSR810mm²×8 導体と比較し、スパイラルロッド対策と同等の 10dB 程度の風音低減効果が確認された。

図 18. LN-ACSR960mm²の風音スペクトル³⁾

3.3.4 コロナ特性

LN-ACSR960mm²×8 導体の等価軽雨時ハム音レベルが電力中央研究所コロナケージで測定された。

LN-ACSR960 mm²×8 導体の等価軽雨時コロナハム音レベルは従来 ACSR810 mm²×8 導体と同等程度であることが確認された。^{3) 10)}

図 19. コロナ騒音測定用コロナケージ¹⁰⁾

図 20. コロナハム音特性 (等価軽雨時)

3.3.5 空力特性

LN-ACSR960mm²×8 導体の空気抵抗係数は設計風速 40m/s で ACSR810mm²×8 導体と同等以下である。

従来のスパイラルロード対策よりも 15%以上風圧の低減することが明らかになった。³⁾

図 21. LN-ACSR960mm²×8 導体の空気抵抗係数

3.3.6 着雪特性

自然降雪を用いた人工着雪風洞実験により低騒音電線の着雪特性を評価した。

電線は径間長の振れ剛性を模擬したトルクで回転可能なバネを設置しており、次の結果が得られた。

- 1) LN-ACSR960mm² は平滑部で着雪が円周方向に滑り、突起部で分割されて脱落する傾向が認められる。
- 2) LN-ACSR960mm² は多導体として使用する限り、捻り剛性により筒雪になる前に脱落するため、ACSR810mm² と有意差が認められない。

3.3.7 付属品

低騒音電線は突起部を有しているため異型断面となるが、付属品に関しては若干の改良で標準品の適用が可能であり、施工工具も既存品の活用が出来るように工夫が行われた。

表 1. 付属品及び工具の適用

項 目	適 用 状 況
引留クランプ	810標準品外径をφ72mmへ4mm拡大
クランプ圧縮	本体は既存品、ダイスは3mm偏平型
カムアロング	本体は5号標準、くさびは溝付構造
金 車	φ600mm標準ウレタン品で問題なし
延 線 車	既存品で十分使用可能

4. 最近の対策電線品開発例

4.1 丸素線型低騒音電線

4.1.1 開発の考え方

超高圧の多導体架空送電線路新設の際は、環境を配慮した低騒音電線が線路設計時に取り上げられている。

1,000kV 線路用として開発された突起部に溝部を有する低騒音 LN-ACSR は多種類の圧縮成形素線を組合わせているため、コストアップとなっている。

そこで、最外層の突起部と平滑部をすべて丸素線の組合わせで構成した電線の特性評価を実施した。¹¹⁾

(a) 従来型 LN 電線 (b) 丸素線型 RLN 電線

図 22. 丸素線型 RLN 電線と従来型 LN 電線の比較

4.1.2 風音特性

丸素線型 RLN810mm²×4 導体 (導体間隔 500mm) の風音特性に関して、低騒音風洞により、風向風速をパラメータとして実験が行われた。

RLN 電線は直角、斜風ともに特定の風速でスペクトルの卓越は認めらず、従来型 LN 電線と概略同等性能と評価される。風速 20m/s、直角風の例を示す。¹¹⁾

図 23. RLN-ACSR810mm²の風音特性

4.1.3 コロナ特性

RLN810mm²の等価軽雨時コロナハム音特性は従来型 LN 電線と同等程度の性能であることが確認された。

図 24. RLN-ACSR810 mm²の等価軽雨時コロナハム音特性¹¹⁾

4.2 低風圧低風音電線

送電線の風圧荷重低減と風騒音の低減効果を併せ持つ、楕円断面を一定ピッチで捻回した電線が開発されている。風音低減効果はスパイラルロッド対策と同等の効果が確認されている。

着雪が長手方向に不均一付着し、揚力のキャンセル効果によりギャロッピング抑止効果が期待される。

図 25. 低風圧低風音捻回楕円型電線

5. がいいし風音

5.1 がいいし風音の特徴

がいいし風音は強風地区のがいいし装置から発生し、「ポー」あるいは「ピー」という汽笛やサイレンのような音が断続的に聞こえるのが特徴である。

がいいし風音はがいいし種類により異なるが、個数が 4～6 個以上で発生し、周波数は 400～800Hz 程度、共鳴風速は次図のように飛び飛びとなっている。

図 26. がいいし風音の発生風速の特徴

5.2 がいいし風音の発生メカニズム

がいいし風音の発生メカニズムはがいいしひだ部で発生するキャビティ・トーン振動と呼ばれる流体音に起因すると考えられ、がいいし笠間の共鳴周波数と一致すると、隣接するがいいし笠間で共鳴が増幅されて最終的に大きな風音になると推定されている。⁴⁾

図 27. がいいし風音発生メカニズム (推定)

5.3 がいいし風音対策技術

がいいし風音対策方法としては、

- 1) がいいし連結部ボールソケット部にゴムキャップを装着し、がいいし同士の音響的結合を低減する方法。
- 2) 長連ががいいしの場合には、最外ひだの内側に波型シリコンシートを貼付け、渦振動を抑止する方法。
- 3) がいいしひだ部の高さを変えて、キャビティ・トーンの発生を抑止する方法。

等が開発されている。⁴⁾

図 28. がいし風音防止キャップ取付状況

図 29. がいしひだ部への波型シリコン設置状況

6. 鉄塔風音

6.1 鉄塔風音の特徴

送電線の超高圧化に伴う鉄塔の大型化や市街地との接近化等により、強風発生地区でかつ暗騒音が低い場所では鉄塔風音の発生する場合がある。

現地で観測した風音のスペクトル例によると広い周波数帯域にレベルの上昇が認められる。⁵⁾

図 30. 鉄塔から発生する風音スペクトル測定例

6.2 鉄塔鋼管共鳴音

鋼管鉄塔の場合、鋼管部材の端部が開放されていると、気柱共鳴により風音の発生する場合がある。

管端をステンレス板、ゴム栓などを用いて塞ぐことにより共鳴音を防止することが可能である。

鋼管共鳴音の風音スペクトル例を示す。

図 31. 鋼管共鳴音スペクトル例

7. おわりに

架空送電線の建設においては、環境に配慮した線路設計が重要な位置付けとなっており、本稿では強風時に発生する電線風騒音対策を中心に、その取組み例を紹介した。

地球環境に優しい技術や製品が求められる傾向は今後益々強くなると思われ、これまでに開発されてきた風騒音低減技術の応用展開が求められている。

参考文献

- 1) 山崎他、「架空送電線と風音」、電気評論 1975.12
- 2) 関屋他、「低風音・低 AN 電線の開発」、日立電線 No.6, 1986-12
- 3) 赤木他、「電線から発生する風音及びコロナ騒音対策技術」、CIGRE-SC22 仙台、1997
- 4) 池田他、「高強度耐塩用がいし連から発生する風騒音の低減技術」、電気学会論文誌 Vol.123-B, 平 15
- 5) 長谷他、「鉄塔風音の発生メカニズムに関する研究」、CIGRE-SC22
- 6) N Curle, "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound", Proc. Roy. Soc. London, 1952
- 7) OM Phillips, "The intensity of Aeolian tones" J Fluid Mech. 1, p. 607-624, 1956
- 8) 山本他、「送電線の風騒音・コト騒音対策技術」、電線・ケーブル研究会、電気学会、1994
- 9) 送電線用新種電線専門委員会、「送電用新種電線」、電気共同研究第 43 巻第 3 号、1988
- 10) Tanabe K, "Experimental Study on the Prediction of Hum Noise from Conductor Bundles for UHV Transmission Lines", Electrical Engineering in Japan, Vol.125, No.1, 1998
- 11) 北嶋他、「500kV 送電線用丸素線型低騒音電線の開発」、電気学会全国大会、2001