

架空送電用低風圧型電線（低風圧電線・低風音風圧電線）の開発

Development of Drag Reduced Conductor for Overhead Transmission Lines

菊池 直志*

Naoshi Kikuchi

松崎 豊*²

Yutaka Matsuzaki

伴瀬 秀夫*²

Hideo Banse

金子 隆雄*²

Takao Kaneko

雪野 昭寛*³

Teruhiro Yukino

石田 博孝*⁴

Hiroataka Ishida

概 要 架空送電線路において電線の風圧荷重は鉄塔の強度設計に大きく影響する要因であり、低風圧化がはかれれば建設費のコストダウンや送電線路の信頼性向上につながる。このため筆者らは電線の低風圧化の研究に取り組み、電線表面に溝を設ける構造の低風圧電線、溝と突起素線を設けた低風音低風圧電線を考案し、電線回りの流れの可視化による低風圧化メカニズムの解明、風洞による抗力係数測定と実規模試験線での強風時フィールド観測、電線基本特性と付属品の検討など一連の試験を行って低風圧型電線を完成した。

1. はじめに

架空送電線における支持物の強度設計は、台風による風荷重に大きく影響を受ける。支持物は、主に台風時の電線や支持物自身が受ける風圧荷重（設計風速 40 m/s）などに耐えるように設計されているが、台風通過に伴って強い局地風の吹く地形に位置する場合は、風圧荷重を増加させる検討が行われており¹⁾、建設費が増加する傾向にある。なかでも電線が受ける風圧荷重の占める割合は 50～70%と大きいので、電線の風圧荷重を低減させることができれば支持物への風荷重が低減され、信頼度を低下させずにコストダウンが期待できる。

このため筆者等は、円柱の抗力係数低下風速が表面の粗さにより低風速化すること²⁾やゴルフボールが表面のディンプルの存在により遠くに飛ぶこと³⁾等の知見から、電線表面形状に工夫を凝らすことにより送電線設計風速域での電線抗力係数低減を図ることが可能と考え、電線表面に溝を設けた低風圧型電線（低風圧電線 810 mm²: LP 810、低風音低風圧電線 810 mm²: LNP 810）を考案した。そして実寸法による風速 80 m/s までの風洞実験⁴⁾、水流動装置による風圧荷重低減メカニズムの解明^{5), 6)}、更に実規模によるフィールド試験⁷⁾を行い、低風圧型電線の空力特性を検証した。

本報では、低風圧電線及び低風音化も図った低風音低風圧電線の空力特性にくわえて電線基本特性試験、付属品の検討結果を報告する。

2. 低風圧型電線の構造

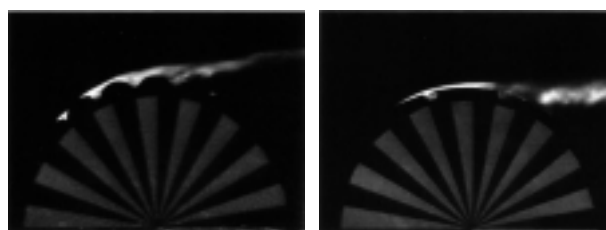
表 1 に本文で報告する 810 mm² サイズの低風圧型電線の諸元及び断面図を普通電線と比較して示す。低風圧 810 mm² は最外層を平滑素線とし、円周上に等間隔で 12 本の溝を設けてある。低風音低風圧 810 mm² は同様に平滑な最外層素線に 12 本の溝と 4 方向の突起を設けた構造となっている。表 1 に示す低風圧型電線は普通電線と電流容量をほぼ同等にするように設計されているため、等価外径は普通電線に比べてやや小さくなっている。

3. 低風圧化のメカニズム

風圧低減のメカニズムを解明するため、電力中央研究所の水流動装置を用いた流れの可視化と抗力測定、並びに風洞装置による油膜試験を行い、低風圧電線及び低風音低風圧電線の表面流れ状況を観察した。

(1) 低風圧電線

水流動試験により可視化した電線回りの流れ状況を図 1 に示す。普通電線の場合は風速によらず上流側よどみ点から下流側



(a) 普通電線の剥離点

(b) 低風圧電線の剥離点

図 1 電線回りの流れ状況

Flow visualization of conductor surface

* 送電エンジニアリング事業部 技術部

*² 裸線事業部 技術部

*³ 関西電力（株）総合技術研究所電力技術研究所

*⁴ 関西電力（株）購買室 国際調達 G

へ100°近傍の凸部ではく離する（図1（a））のに対し、低風圧電線の場合は抗力係数低減状態では流れのはく離点が下流側（約120°）へ移行している（図1（b））ことが確認された。これは70°付近の窪み部で発生する自由せん断層の自励的な振動（キャビティーン現象）に起因するはく離点の後方への移動で、電線背面での後流領域が小さくなり抗力が低減することになる。また、電線を回転させ流れに対して相対的に溝位置を変化させても同様の現象が現れており、本形状の電線では溝位置の影響はないことを確認した。

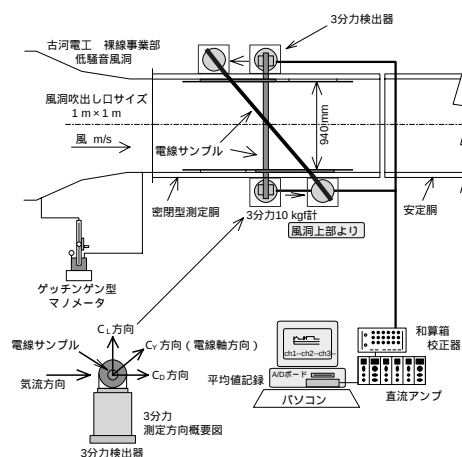


図2 古河電工風洞の測定装置概要
Test fixture of wind tunnel

（2）低風音低風圧電線

水流動試験で可視化すると突起部に起因する渦発生により、主流が電線に近づき抗力が低下している。また、溝部では、 $Re = 7.6 \times 10^4$ （風速30 m/s）を越える領域において、複数の振動モードが重畳したキャビティーン現象によりはく離点が後方移動するとともに、後方で発生した全体的な乱れにより主流が電線に付着し抗力は低下している。

また、実電線を使った油膜試験により、突起部と溝部が電線軸方向に交互にあるため、突起部による強制的な流れのはく離と溝部によるはく離点後方移動とが電線軸に沿って交互に存在している状況を把握した。

これらの結果より、低風圧電線・低風音低風圧電線の風圧低減メカニズムが説明できた。

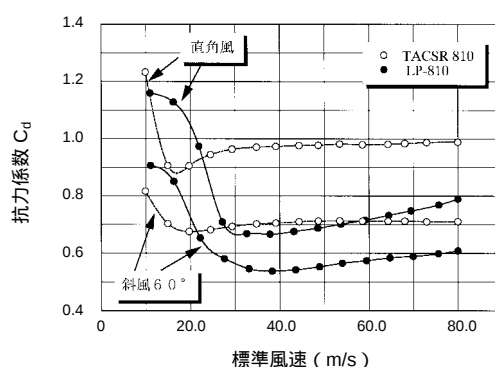


図3 低風圧電線の風速-抗力係数特性（直角，斜風）
Drag coefficient of LP810 and TACSR810

表1 低風圧型電線（低風圧電線，低風音低風圧電線）諸元
Characteristics of two kinds of drag reduced conductor (LP810, LNP810)

項目	単位	仕 様		
		普通電線 TACSR810mm ²	低風圧電線 LP-TACSR810mm ²	低風音低風圧電線 LNP-TACSR810mm ²
断面形状				
引張荷重	kN { kgf }	180.9 { 18,450 }	184.1 { 18,770 }	187.2 { 19,090 }
外径	mm	38.4	37.2	凸部: 38.8 凹部: 37.2 等価径: 37.9
計算断面積	mm ²	814.5 (TAL部)	836.6 (TAL部)	858.3 (TAL部)
	mm ²	56.29 (ST部)	56.29 (ST部)	56.29 (ST部)
	mm ²	870.8 (合計)	892.9 (合計)	914.6 (合計)
計算質量	kg/km	2,700	2,761	2,821
電気抵抗	Ω/km	0.0363	0.0353	0.0344
弾性係数	Gpa { kgf/mm ² }	71.1 { 7,250 }	70.9 { 7,230 }	70.6 { 7,200 }
線膨張係数	/	20.8×10^{-6}	20.9×10^{-6}	20.9×10^{-6}
電流容量	A	1,998 (連続:150 /60 Hz)	2,003 (連続:150 /60 Hz)	2,041 (連続:150 /60 Hz)
		2,007 (連続:150 /50 Hz)	2,011 (連続:150 /50 Hz)	2,050 (連続:150 /50 Hz)

4. 低風圧型電線の諸特性

4.1 抗力係数

4.1.1 風洞設備

風洞試験は、東京大学先端科学技術研究センター・NRC Canada・古河電工の3機の風洞を使い実施した。

東京大学先端科学技術研究センターのφ3 m ゲッチングン型風洞は、研究初期における最適形状の調査、選定された試作低風圧電線の多導体配置空力特性の試験を実施した。カナダのオタワにあるNRCの2×3 m ゲッチングン型密閉型風洞は、単導体（斜風時を含む）時の80 m/sまでの空力特性試験を実施し

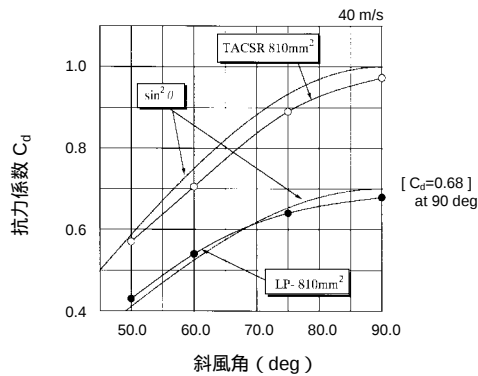


図4 低風圧電線の斜風角特性（風速40 m/s）
Effect of wind incident angle (LP810, 40 m/s)

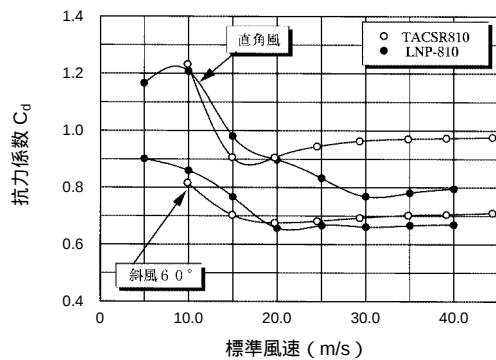


図5 低風音低風圧電線の風速-抗力係数特性（直角，斜風）
Drag coefficient of LNP810

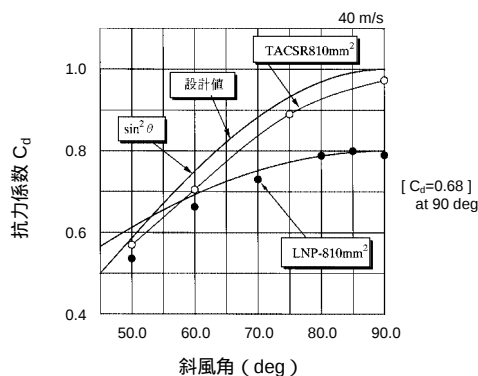


図6 低風音低風圧電線の斜風角特性
Effect of wind incident angle (LNP810, 40 m/s)

た。古河電工の1×1 m エッフェル型風洞は、降雨時、乱流、電線エージング、表面汚れ等の条件を含めた総合的な空力係数測定を実施した。図2に古河の風洞試験設備の概要を示す。この風洞は測定胴が密閉型とオープン型に変更可能であり、試験目的により使い分けられる。

なお、各風洞間で測定胴・測定条件の違いによる抗力特性の比較を行ったが、3つの風洞において十分な精度で一致していることを確認している。

4.1.2 乾燥時抗力係数

(1) 低風圧電線

図3に低風圧電線の風速-抗力係数の関係を直角風，斜風60°の2ケースについて示す。低風圧電線は風速25 m/sを超えたあたりから60 m/sの高風速域まで抗力係数が普通電線に比べて約30%低下している。

図4には斜風角と抗力係数の関係を示す。低風圧電線の抗力係数は普通電線と同様に斜風角に対してほぼ $\sin^2 \theta$ で低下しており、従来と同じ手法で斜風時の設計が可能である。

(2) 低風音低風圧電線

図5に低風音低風圧電線の風速-抗力係数を示す。風速27 m/sから40 m/sまで抗力係数が普通電線に比べて約20%低下している。図6には斜風角と抗力係数の関係を示すが、本電線の場合は突起素線の影響により斜風角と抗力係数のカーブは普通電線の傾向とは異なるものの、斜風60°においても普通電線に比べてやや小さい。

4.1.3 降雨時の抗力係数

電線表面に付着する水滴の存在により低風圧型電線の抗力係数は変化する。設計で用いる強風下での降水量の想定のため、1994年～1999年9月までの全国アメダス地点を対象に10分間雨量と10分間平均風速の関係を調べた。図7は10分間雨量を1 mm 間隔で区切り、10分間雨量に対応する10分間平均風速の全国での最大値を抽出したものである。図より設計風速40 m/s以上のときの最大雨量は12 mmで、強い雨と強風の重畳はない傾向にあるが、余裕を見て設計用の最大10分間雨量を15 mmとして低風圧電線及び低風音低風圧電線の降雨時抗力係数を測定した。

(1) 低風圧電線

図8に風速40 m/s時の降雨量と低風圧電線の抗力係数を示す。図より抗力係数は電線表面に水滴が滞留することにより降雨量に伴い増加する傾向にある。10分間雨量15 mmでは抗力係数0.75である。

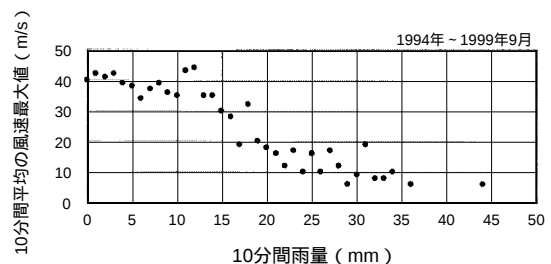


図7 10分間雨量と10分間平均風速の最大値（アメダス）
10 min. rain fall vs. maximum value of 10 min. wind velocity

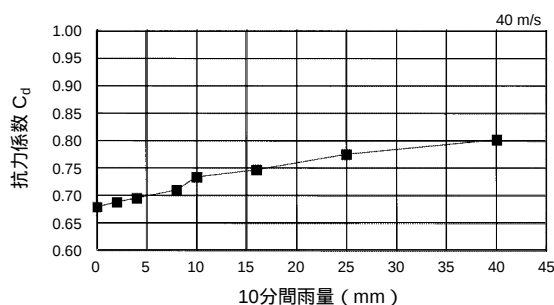


図8 雨量と抗力係数の関係（低風圧電線）
Effects of rain fall on drag coefficient (LP810)

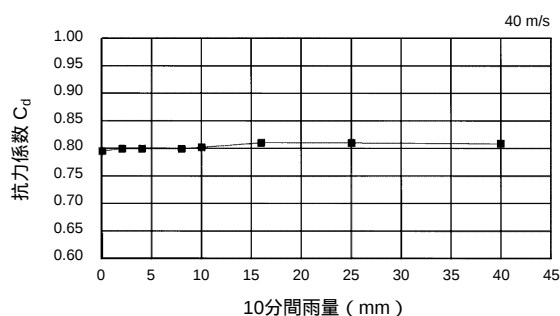


図9 雨量と抗力係数の関係（低風圧電線）
Effects of rain fall on drag coefficient (LNP810)

表2 設計用抗力係数
Drag coefficient used for design

電線	設計用抗力係数
低風圧電線	直角風： 0.8 60°斜風：0.6（ $0.8 \times \sin^2 60^\circ$ ）
低風音低風圧電線	直角風： 0.85 60°斜風：0.67（ $0.85 \times \sin^2 60^\circ \times 1.05$ ） （1.05は斜風時の補正係数）

（2）低風音低風圧電線

図9には低風音低風圧電線の降雨量と抗力係数を示す。図より雨量の増加に伴う抗力係数の変化は飽和傾向が認められる。これは、乾燥時に突起素線が低風圧効果を弱めているものの、降雨時には突起素線が電線表面に沿う水滴の流れを分断して突起素線近傍に滞留させ、水滴の存在の影響を小さくしている。10分間雨量が15 mmの抗力係数は0.81で乾燥時より2%程度の増加にとどまっている。

4.1.4 設計用抗力係数の設定例

乾燥時、降雨時の直角風、斜風の抗力係数測定結果から、経済性と安全性を考慮して設計に用いる抗力係数を決定した。例として関西電力（株）の設計値を表2に示す。

5. フィールド試験

フィールドにおいて低風圧型電線の低風圧効果を検証するため、台風接近頻度が高い宮古島に設置した実規模試験線（宮古島試験線）に1998年度から普通電線と低風圧型電線を架線し、台風通過に伴う強風時の電線横振れ角を比較した。

5.1 宮古島試験線の概要

本試験線は宮古島の海岸から約150 mの地点に鉄塔3基2径



図10 宮古島試験線
View of Miyakojima test line

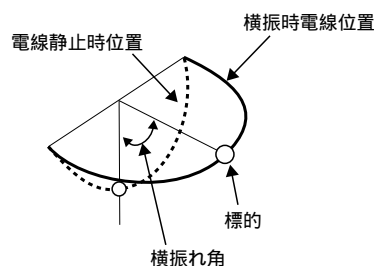


図11 横振れ角の概念図
Sketch of swing motion angle

間からなる。試験線周りの地形は線路方向にやや丘陵部があるものの、線路に直角方向の風に対しては左右ともに平坦で低風圧電線の観測に支障をきたすような障害物はない。鉄塔高さは約25 m、観測している電線は最低点で地上14.2 mである（図10）。

本試験線において電線横振れ角観測は№1～2の径間長100 mの径間で実施した。電線弛度は5 mとし、普通電線、低風圧型電線を平行に並べ、がいし装置なしで架線した。

一般に送電線の静的横振れ角度は電線の質量と風圧荷重により決まるとされており、以下の式による。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{W_m}{W_c}$$

ここで θ ：電線の横振れ角

W_m ：電線風圧荷重（ $= 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_d \cdot D \cdot L$ ）[kg/m]

ρ ：空気密度（ $\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ ）， V ：風速（m/sec）

C_d ：抗力係数， D ：電線外径（m）

L ：電線単位長（1 m）

W_c ：電線質量（kg/m）

一方、観測された横振れ角は図11に示すように、強風時にVTRに録画された映像を画像処理により径間中央の電線に取り付けられた標的の変位を求め、その変位から静止時に対する電線の横振れ角を幾何学的に算出したものである。風速は径間中央のコンクリート柱上（16 m高）に設置した3成分超音波風速計とペーン型風速計により0.05秒ごとにA/D変換してパソコンに記録し、電線横振れ記録のVTRは設定された風速値以上でトリガをかけ、記録を開始するようにした。

5.2 観測結果

図12には1998年台風10号において測定された風速と各電線横振れ角の時系列データ（10分間）の一例を示すが、電線横振れ角は風速変動によく追従していることが読み取れる。

図13は台風10号通過時に得られたいくつかの10分間時系列データの平均値を風速と横振れ角でプロットしたものである。図中には普通電線の抗力係数を1、低風圧電線の抗力係数を風洞実験の抗力係数カーブとして、それぞれの横振れ角を計算した曲線も示した。図より普通電線（TACSR 810）の横振れ角プロット点は計算の曲線によく一致している。一方低風圧電線（LP 810）のプロットは、30 m/s 付近では計算の曲線によく一致しているが風速が低い領域でカーブを下まわる。これは自然風の中に置かれた低風圧電線においては、乱れの影響により遷移風速が風洞実験で得られる場合より低風速側に移行したものと考えられる。

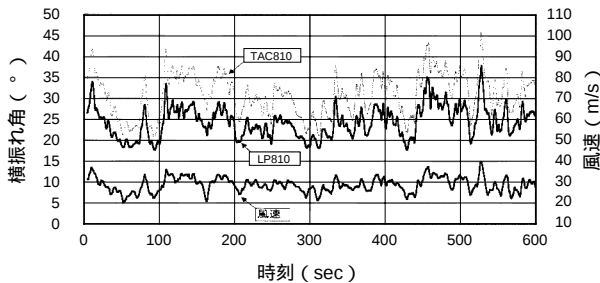


図12 時系列データ
Wind velocity and conductor swing motion angle

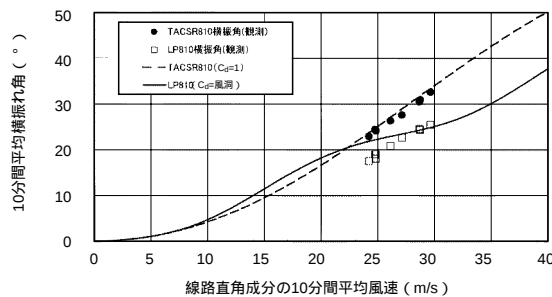


図13 低風圧電線の横振れ角観測結果（10分間平均）
Wind velocity vs. swing motion angle (LP810, average time: 10 min.)

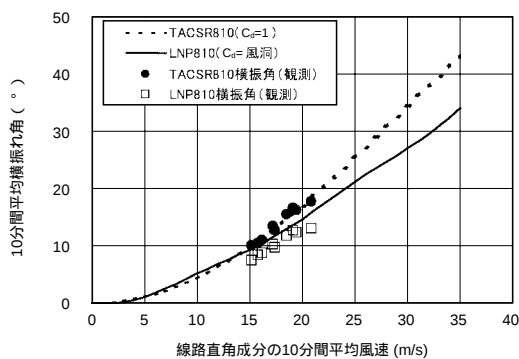


図14 低風音低風圧電線の横振れ角観測結果（10分間平均）
Wind velocity vs. swing motion angle (LNP810, average time: 10 min.)

図14は1999年台風18号で得られた普通電線と低風音低風圧電線の10分間平均風速と横振れ角のプロットを示す。10分間平均風速が15～21 m/sの範囲ではあるが、低風音低風圧電線は風洞実験の抗力係数から計算された横振れ角の曲線に良く一致している。

つぎに、低風圧電線の風に対する横振れ応答特性を調べるため、本試験線に架線された電線の横振れ周期が約4秒であることから、評価時間を4秒とした風速 - 横振れ角の関係を次のように求めた。風速と画像処理された横振れ角の時系列データ（サンプリング周波数は20 Hz）を4秒間隔で区切り80個のデータを平均化処理することにより、10分間で150個の4秒平均データを得、これらのデータを風速1 m/sごとに区切り、1 m/s区間内のデータの平均値を求めて風速と横振れ角をプロットした。図15、16に処理結果を示す。

両図に示すように4秒平均風速15～40 m/sの範囲で風洞実験から求めた抗力係数を基に計算された曲線とほぼ一致しており、低風圧型電線は台風条件下のフィールド試験線においても風洞実験で測定された抗力係数と一致することが検証できた。

6. 電線基本特性試験

低風圧電線・低風音低風圧電線の電線基本特性試験をおこなった。試験項目と試験結果を表3に示す。低風圧型電線は金車通過試験後でも最外層素線間の溝形状に変化ないことが確認された。図17には金車通過試験後の低風音低風圧電線表面の写真を示す。また低風音低風圧電線は突起素線の高さが低いため、

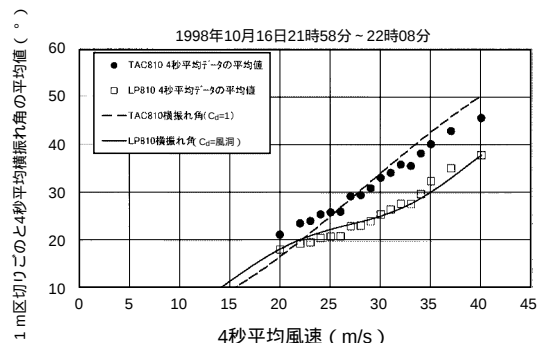


図15 低風圧電線横振れ角風応答解析結果
Wind velocity vs. swing motion angle (LP810, average time: 4 sec.)

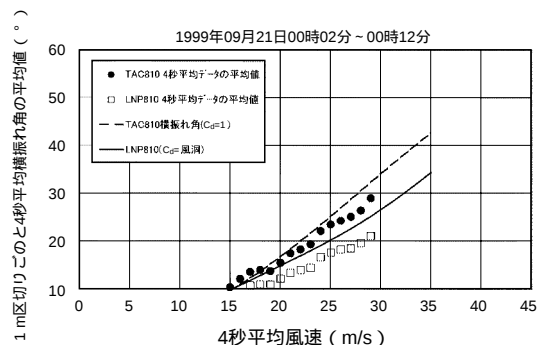


図16 低風音低風圧電線横振れ角風応答解析結果
Wind velocity vs. swing motion angle (LNP810, average time: 4 sec.)

表3 電線基本特性試験結果
Basic characteristics of two kinds of drag reduced conductor

試験項目	低風圧電線 LP 810 mm ²	低風音低風圧電線 LNP 810 mm ²
弾性係数 線膨張係数	設計値と実験値で大差ないので、設計値を使用可能	同左
クリープ	普通電線と有意差なし。	同左
振動疲労特性	10 ⁷ 回での疲労限度力は普通電線と同等	同左
難着雪特性	電線の撚りに沿って雪が滑り発達するので、普通電線と同様に難着雪リング対策が可能	同左
金車通過特性	φ600 mmウレタン金車使用、張力29.4 kNおよび39.2 kNの2ケース、抱角60度において20回の通過で異常なし	同左
カムアロング特性	電線直径に合わせたカムアロング楔を用いれば問題なし	ACSR 810 mm ² 用標準カムアロング楔を適用可能



図17 金車通過後の低風音低風圧電線
Surface of LNP810 after pulling test

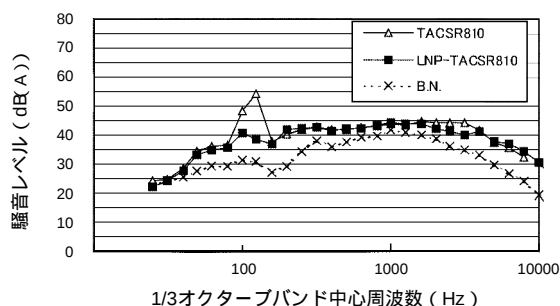


図18 低風音低風圧電線の風騒音特性（20 m/s 単導体）
Comparison of wind noise with conventional conductors

従来のACSR 810 mm²用のカムアロングくさびが適用できることが大きな利点である。

7. 環境特性試験

低風圧電線は最外層が平滑素線であるので風騒音特性が普通電線に比べて劣る。このため騒音問題が懸念される地域を通過する送電線に適用することを考慮し、風騒音低減を狙って開発

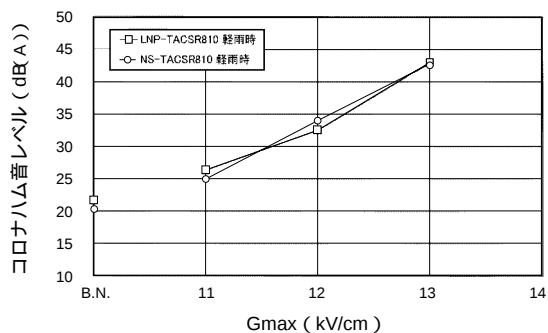


図19 低風音低風圧電線4導体コロナハム音測定結果
Hum noise of LNP810

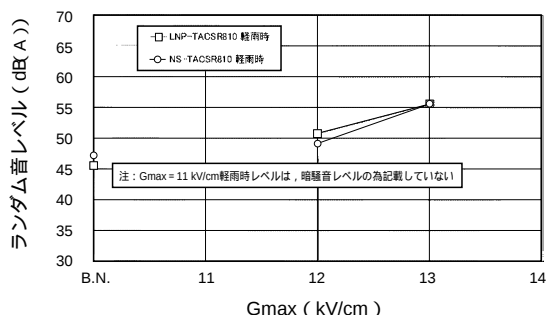


図20 低風音低風圧電線4導体ランダム音測定結果
Corona noise of LNP810

されたのが低風音低風圧電線である。

低風音低風圧電線の環境特性として、風音特性、コロナ騒音特性を調査した。図18に風音試験の風音スペクトルを示すが、低風音低風圧電線は普通電線に比べて卓越風騒音レベルが10 dB(A)以上低減している。

図19、20は8 m × 8 m大型コロナケージでのコロナハム音及びランダム音の試験結果を示す。図は低風音低風圧810 mm²電線を500 kV送電線に4導体として適用することを想定し、従来使われている低風音型電線と等価軽雨時のコロナ騒音レベルを比較したものである。

図より低騒音型電線とほぼ同等な騒音レベルであり、低風音低風圧電線のコロナ特性は実用上問題ないと言える。

8. 付属品特性

低風圧型電線の付属品として、多導体用径間スペーサ及びジャンパスペーサ、懸垂クランプ、引留クランプを対象に検討を行った。各付属品における試験結果を表4に示す。低風圧電線及び低風音低風圧電線は電線断面が円形ないしは突起素線高さが低く円形に近い形状であるため、スペーサクランプにカラーなどの特殊な構造が不要で、普通電線用クランプの穴直径を電線径に合わせるのみで適用できる。また圧縮型引留クランプ及び楔型引留クランプも同様にカラー類を使わずに、普通電線と同じ方法で把持できる。このように低風圧型電線は付属品に特別な構造を必要としないことが確認されたことから、普通電線に比較して工世上コスト的に有利である。

表4 付属品試験結果
Test result of accessories

付属品名	低風圧電線 LP 810 mm ²	低風音低風圧電線 LNP 810 mm ²
径間スペーサ (ボルトレス型)	電線直径に合わせた設計で問題なし	突起素線を含めた直径で設計をすればカラー不要
ジャンパススペーサ (ボルト締め型)	(T)ACSR 810mm ² 用が適用可	(T)ACSR 810 mm ² 用が適用可
懸垂クランプ アーマロッド	(T)ACSR 810 mm ² 用が適用可	(T)ACSR 810 mm ² 用が適用可
圧縮型引留クランプ	電線直径に合わせた設計で問題なし	突起素線を含めた直径に合わせて設計をすればカラー不要
楔型引留クランプ	電線直径に合わせた設計で問題なし	突起素線を含めた直径で設計をすればカラー不要

- 6) 江口,西原:「低風圧電線の基礎研究-詳細可視化と風荷重低減化メカニズムの理論化-」,電力中央研究所報告, U97515 (平10-3)
7) 平塚他:「低風圧電線のフィールド試験結果 (第2報)」,平成11年電気学会全国大会, No.1623

9. おわりに

電線風圧荷重を低減できる低風圧電線,電線風圧荷重低減及び風騒音低減の両方の機能を持った低風音低風圧電線を開発し,各種試験により実用性を検証した。

低風圧型電線は,新設線に採用することにより建設費コストダウンに,また既設線の張替えでは送電線の風荷重に対する信頼性向上に寄与することができる。また最大使用張力を同じにして既設線を張り替えれば,常時張力の増加による振動疲労特性低下を考慮する必要はあるが,常時弛度を小さく架線できるので低弛度増容量化を図ることが可能であるなど,多くの利点を持った電線であり,今後広く使われることを期待する次第である。

謝辞

低風圧型電線の開発にあたり,空力特性の研究に御指導,助言を頂いた京都大学(故)光田寧名誉教授,松本勝教授,東京大学 藤野陽三教授,東京工芸大学 田村幸雄教授,日本大学 岩谷祥美教授,電力中央研究所 中村秀治研究参事及び江口主任研究員,フィールド試験で御協力頂いた沖縄電力(株),付属品の研究に御協力頂いた旭電機(株)をはじめ関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本電気協会 電気技術基準調査委員会編: 架空送電規定 (JEAC 6001-1993)
- 2) ACHENBACH.E.HEINECKE: On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds number 6×10^3 to 5×10^6 , J. Fluid Mech, vol.109(1981)
- 3) 木村他:「表面に円弧状の溝がある円柱まわりの流れ」,可視化情報 Vol.10, Suppl. No.1(1990-7)
- 4) 石窪他:「架空送電線の低風圧化に関する検討(その3)」,平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.494
- 5) 江口, 西原:「低風圧電線の基礎研究-水流動試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明-」,電力中央研究所報告, U96516 (平9-3)