

500kV低インダクタンス送電線の開発

Development of 500kV Low-Inductance Overhead Transmission Line 8 Bundled Conductors

阪部貞夫* Sadao Sakabe

下嶋清志** Kiyoshi Shimojima

近年、電力システムの拡大に対して、従来にまして長距離大容量送電が必要となってきた。500kV送電技術の一つとして送電線自身の低インダクタンス化を目的とした410mm² ACSR8導体送電線の開発に着目した。

本送電線は、現行の4導体送電線に比べて相径が約1,600mmと非常に大きくなるため、実用化に当たっては機械的諸問題の解決が必要となり、十王試験線に実規模架線を行なった。

3箇年にわたる試験により、設計に必要な装柱、強度、環境などの条件を明らかにすることができた。本稿では、ギャロッピング時の張力変動、スペーサ荷重及び電線風音について述べる。

1 緒言

近年、電力システムの拡大に対して、電源地点を多数確保することはますます困難となっており、発電所の遠隔化、大容量化は避けられず、そのため、大電力をより長距離に安定して送電する必要が生じてきている。

長距離送電線の送電容量の概略値は、送受電端電圧相差角法によって知ることができ、送電容量を増大するためには、調相設備による電圧の改善、線路インダクタンスの低減などの対策がある。

関西電力株式会社では、500kVを対象として送電線自体のインダクタンスの低減を図り、開閉所の立地条件、直列コンデンサ補償容量などの条件を緩和することに着目した。

インダクタンスの低減は、等価線間距離の縮小、束導体の等価半径の増大、素导体数の増加などによって図ることができる。そこで経済性、作業性などを勘案し、次のような低インダクタンス送電線¹⁾を計画した。

(1) 大束径8導体の採用

ACSR(鋼心アルミより線)410mm²、正8角形配置、素导体間隔60cm

(2) 相間距離の縮小

2回線▽配列、CHAT形鉄塔

このような低インダクタンス送電線の実用化に当たっては、**図1**に示すような諸問題の解決が必要であり、このため関西電力株式会社と日立電線株式会社では、実規模試験線を建設し昭和52年から3箇年にわたる実証試験を行ってきた。

本稿では、試験線の概要、人工着氷下でのギャロッピング時の張力変動、スペーサ荷重及び電線風音特性について述べる。

2 試験設備

2.1 十王試験線

試験線は日立市の北方約7kmの国有林内に位置しており、標高350m前後の広い丘陵地帯のほぼ中央部にある。試験線には季節風が吹き抜け、電線の風による動的挙動の観測には好都合の場所である。

試験線は鉄塔3基から成り巨長は993mである。最大使用張力4,000kgで410mm² ACSR8導体2相と4導体(素导体間隔40cm)

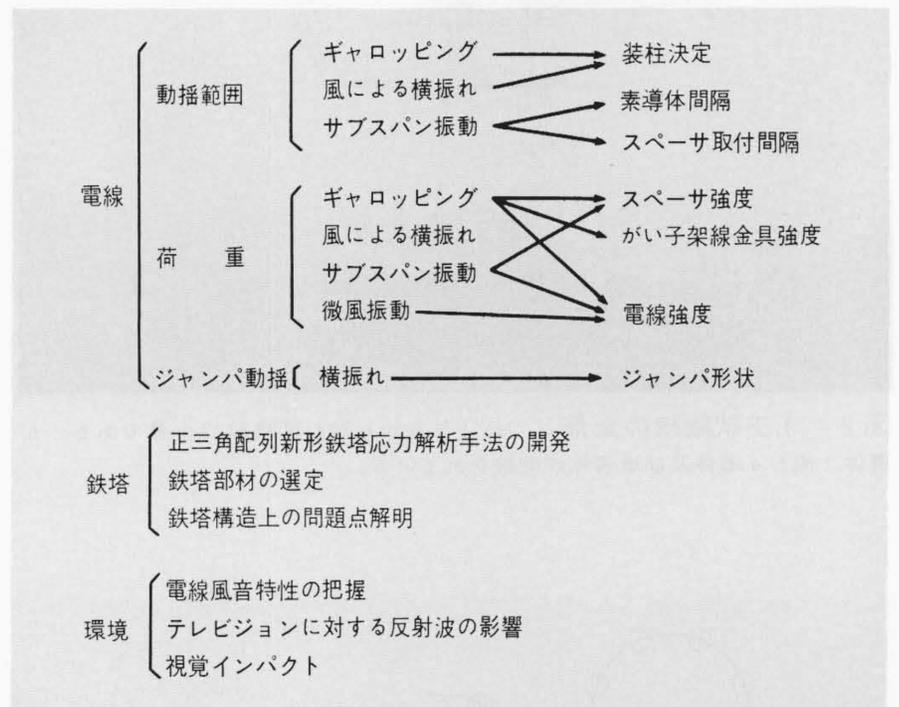


図1 低インダクタンス送電線開発のための諸問題 大束径多導体となるため、ギャロッピング、横振れ、鉄塔強度などの問題のほかに風音などの環境問題の解決が必要である。

及び単導体の各1相を架線することにより、電線挙動に及ぼす素导体数、相径の影響などについて総合的な検討を行なった。**図2**は試験線の全景を示したものである。

2.2 計測システム

図1に示す諸問題を検討するために、種々の観測機器を試験線に取り付けた(**図3**)。観測機器は、入力エネルギーを検討するための気象観測機器と風による応答を検討するための検出機器とに分けられる。例えば、径間に作用する風の構造をできるだけ正確に把握するため、No.2鉄塔には4台の風速計が取り付けられており、また、ギャロッピング、横振れなどの大振幅の電線運動に対しては、径間中央部に標的ランプを取り付けテレビジョンカメラによって観測を行なった。

解析システムには長期間にわたって観測を行ない、統計処理を行なうシステムと、ギャロッピングなどの比較的短期間

* 関西電力株式会社総合技術研究所 ** 日立電線株式会社金属研究所

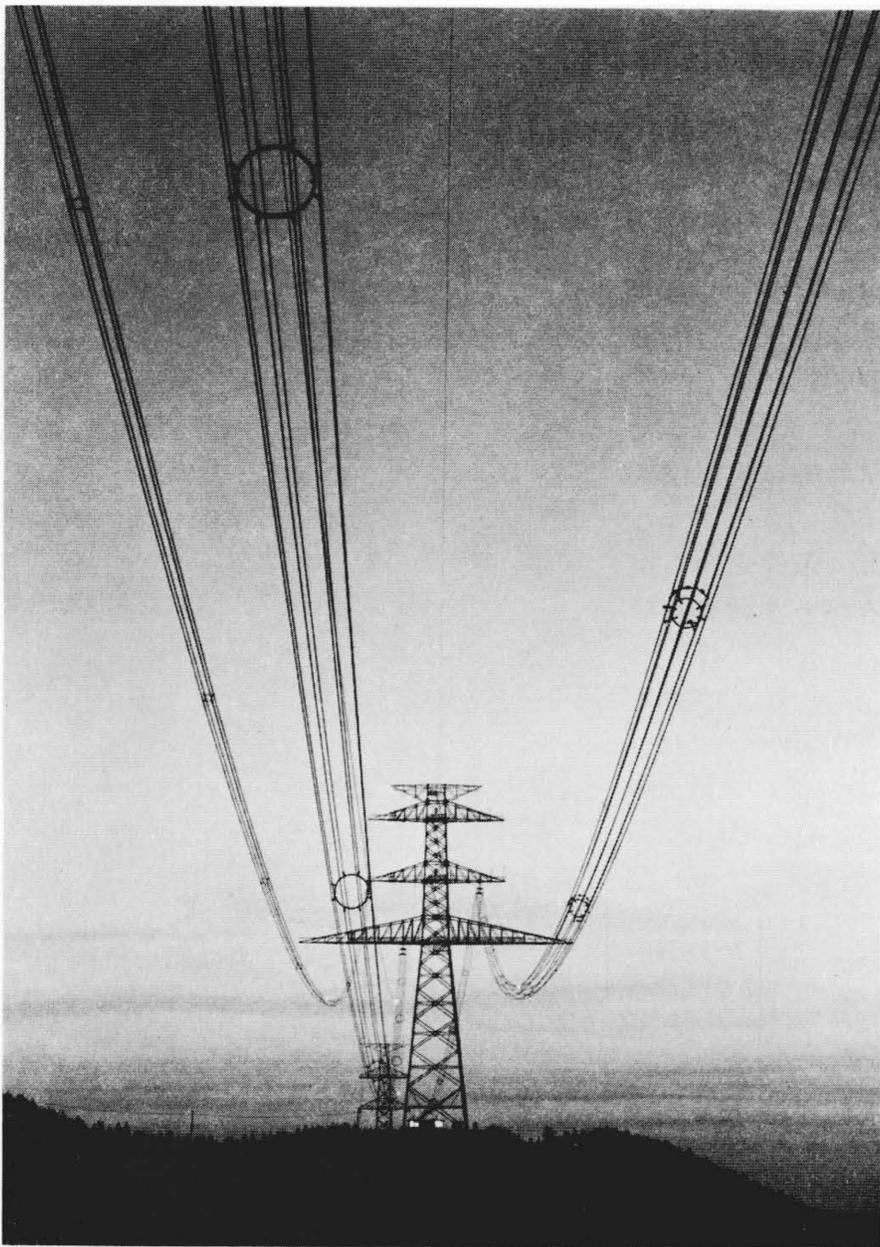


図2 十王試験線の全景 No. 1 鉄塔から望む試験線の全景である。8 導体 2 相と 4 導体及び単導体が架線されている。

でのダイナミック現象の処理を行なうシステムが必要である。従来、小規模の野外観測では、主に入力によるデータの収集、解析が行われてきたが、本観測では常時100チャンネルにも及ぶ現象の収集、解析を短期間で行なう必要がある。そこで、データの精度向上と省力化及び迅速化を目的としてコンピュータを導入し、逐次、統計処理を行なうとともに、ダイナミック現象の処理に対してもあらかじめプログラムした処理方法によって、無人で解析処理ができるようにした。また、波形解析などの複雑な解析に対しては、データレコーダ及びビデオテープレコーダに記録されたテープを再生し、別のコンピュータシステムを用いてオフライン処理を行なった。

図4は計測システムをブロック線図で示したものであるが、自然現象下での電線の挙動を把握するには、自動化設備だけでは不十分であるため、電線の動きを直視し判断しながらデータをとる有人観測を基本とした。

3 風

試験線での2箇年の平均風速の発生頻度を図5に示した。構造物の装柱あるいは強度設計に当たっては、その地点で設計風速を超える風速が、毎年どの程度の確率で発生する可能性があるか知る必要がある。長期間の平均風速の頻度分布を数式で表わす研究は数多く行なわれているが、ここではワイブル分布によって頻度分布の推定を行なった。

総度数を1とした場合、 \bar{V} の風速が現われる確立密度関数 $f(\bar{V})$ は、次の(1)式で表わされる。

$$f(\bar{V}) = \frac{k}{c} \left(\frac{\bar{V}}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{\bar{V}}{c}\right)^k\right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここに c : 尺度係数

k : 形状係数

図5には(1)式を適用した曲線を示してあるが、平均風速発生

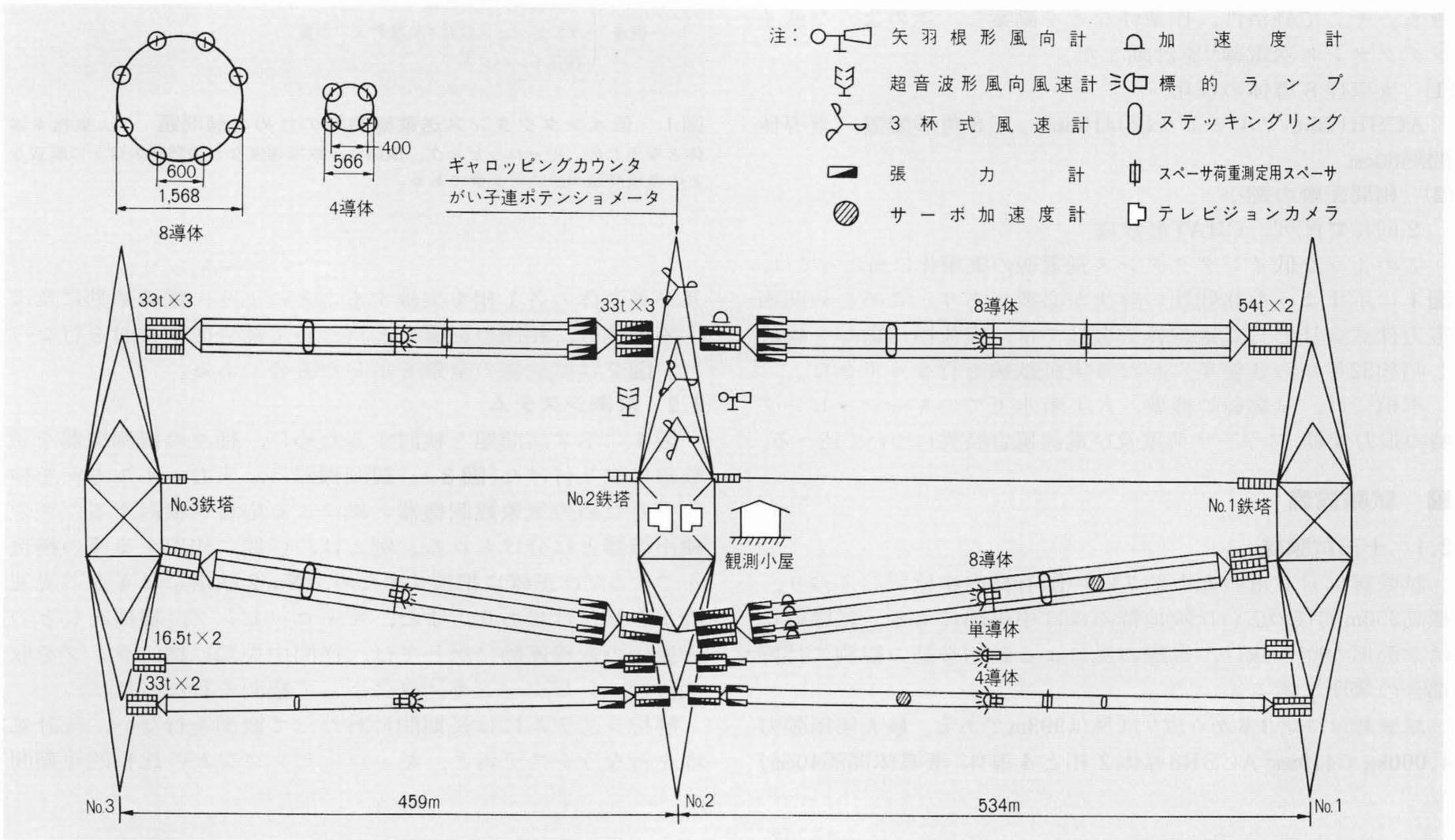


図3 観測装置設置概要図 試験線には、動的現象検討のために防水処理された多数の観測機器が設置されている。

頻度を正確に表現できることが確認できた。

このほか設計に必要な変動風の統計的性質としては、パワースペクトル、空間相関、乱れのスケール、乱れの強さ、突風率などがあり、地表面粗度の変化に影響される。Davenport²⁾は、風速変動のスペクトル密度を理論的に求め、標準偏差 σ_V を次の(2)式で与えている。

$$\sigma_V = \sqrt{6 K \cdot \bar{V}} \dots \dots \dots (2)$$

ここに K ：地表面抵抗係数

図6に、十王試験線の地表面抵抗係数を統計的に処理したものを示す。標準偏差は、平均風速が大きくなるに従って小さくなる傾向があり、平均値 \bar{K} は風速に対してほぼ一定の値となっている。総平均 $\bar{K} = 0.0032$ の実測値は、Davenportの分類上からは平原に属する値である。

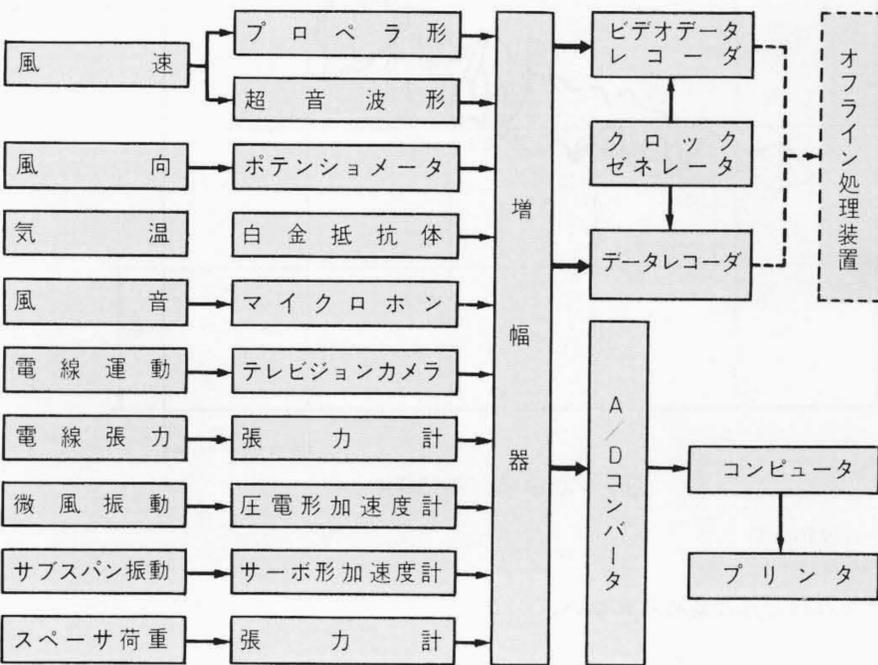


図4 計測システムのブロック線図 各現象に対して、延べ100チャンネルにも及ぶ計測をNo.2鉄塔側に設置したコンピュータにより統計処理を行なった。

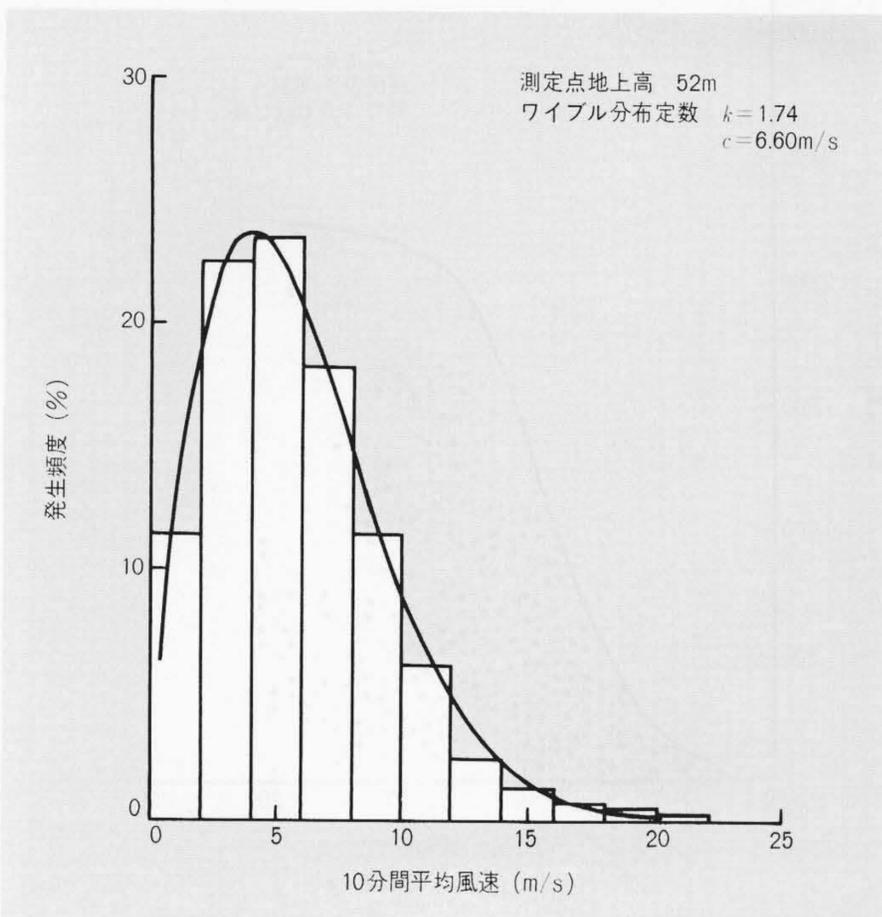


図5 平均風速発生頻度分布 ワイブル分布によって、よく表現できることが分かる。

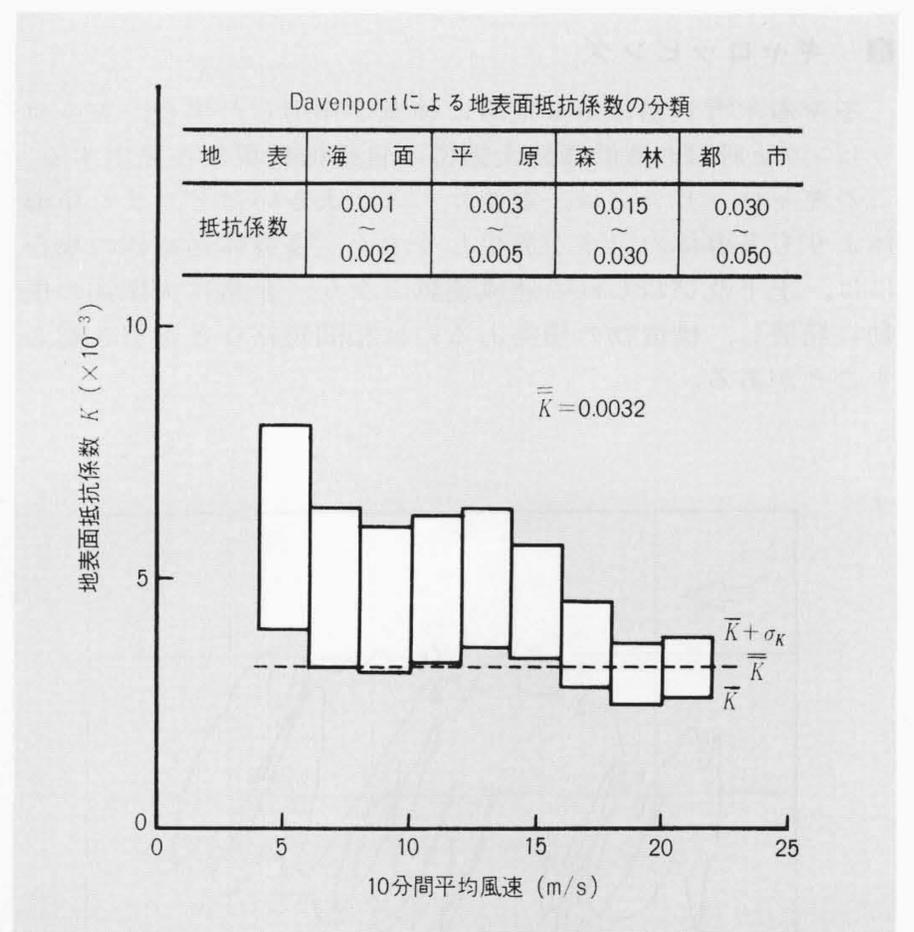


図6 地表面抵抗係数 試験線の地表面抵抗係数の平均は0.0032であつて、Davenportの分類からは平原に属する値である。

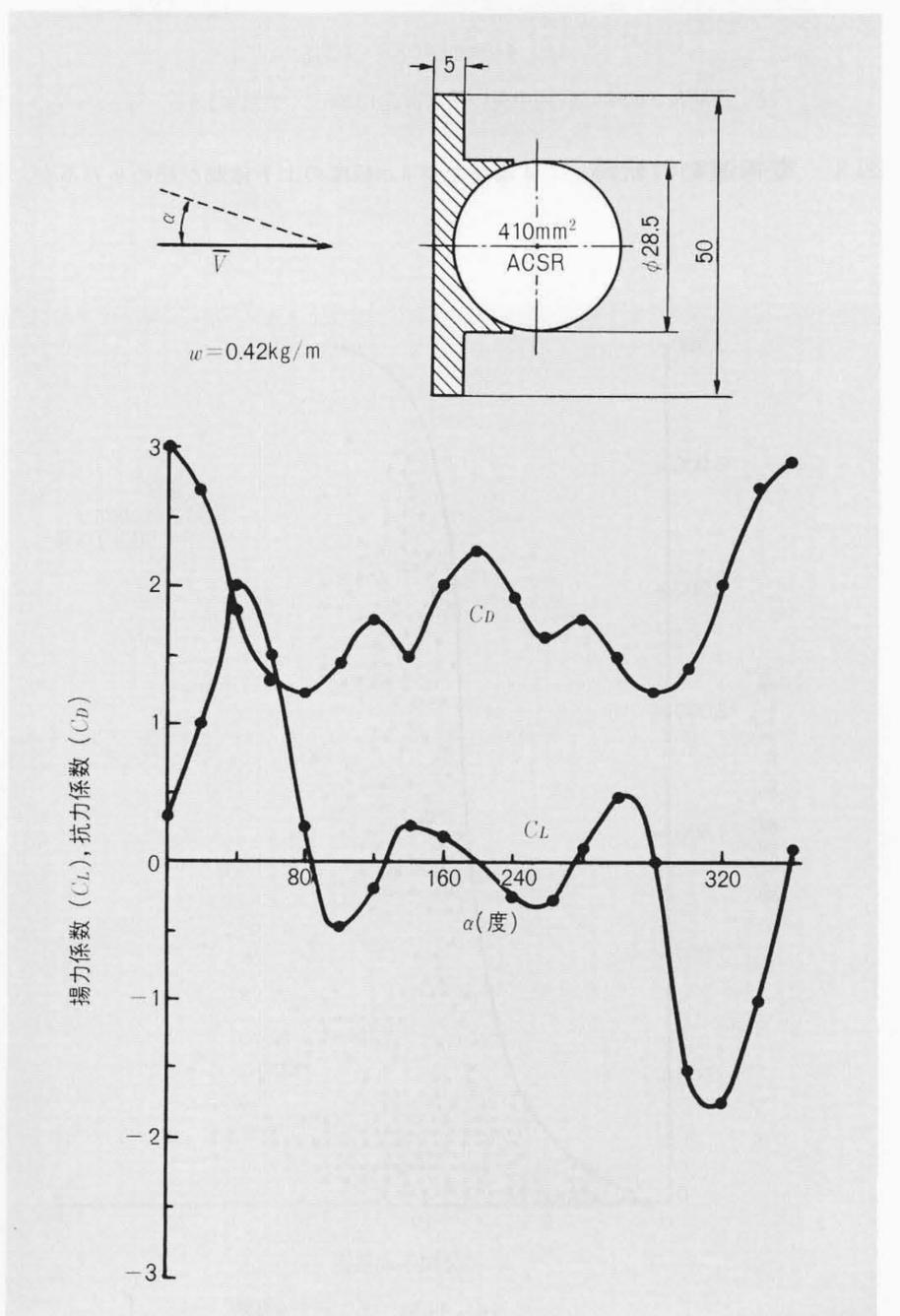


図7 D型断面人工着氷の形状と流体特性 ギャロッピングを発生させるために径間一様に人工着氷を取り付けた。迎え角 α によって C_L は大きく変化する。

4 ギャロッピング

冬季着氷状態にある電線に強風が作用した場合、ギャロッピングと呼ばれる低周波大振幅の自励振動現象が発生する。このギャロッピングは、電線サイズが大きいほど、また単導体よりも多導体のほうが発生しやすく、多導体送電線の場合には、上下及びねじれの連成運動となり、非常に大振幅の振動に発展し、構造物の損傷あるいは相间短絡などを引き起こすことがある。

8導体のギャロッピング特性を効率良く検討するために、試験線の全径間にわたって、図7に示すような流体特性をもつD形断面人工着氷を取り付けた。

図8は、標的ランプの運動を最明点検出方式により電気信号に変換し、とらえた4導体及び8導体の運動軌跡の一例である。8導体ではほとんど横振れ運動であるが、4導体では横振れ運動をしながら3~4m程度の上下振動を行っており、比較的短時間での運動軌跡の包絡線は、上下に長軸をもつ長円となっている。また、観測中に発生したギャロッピング波

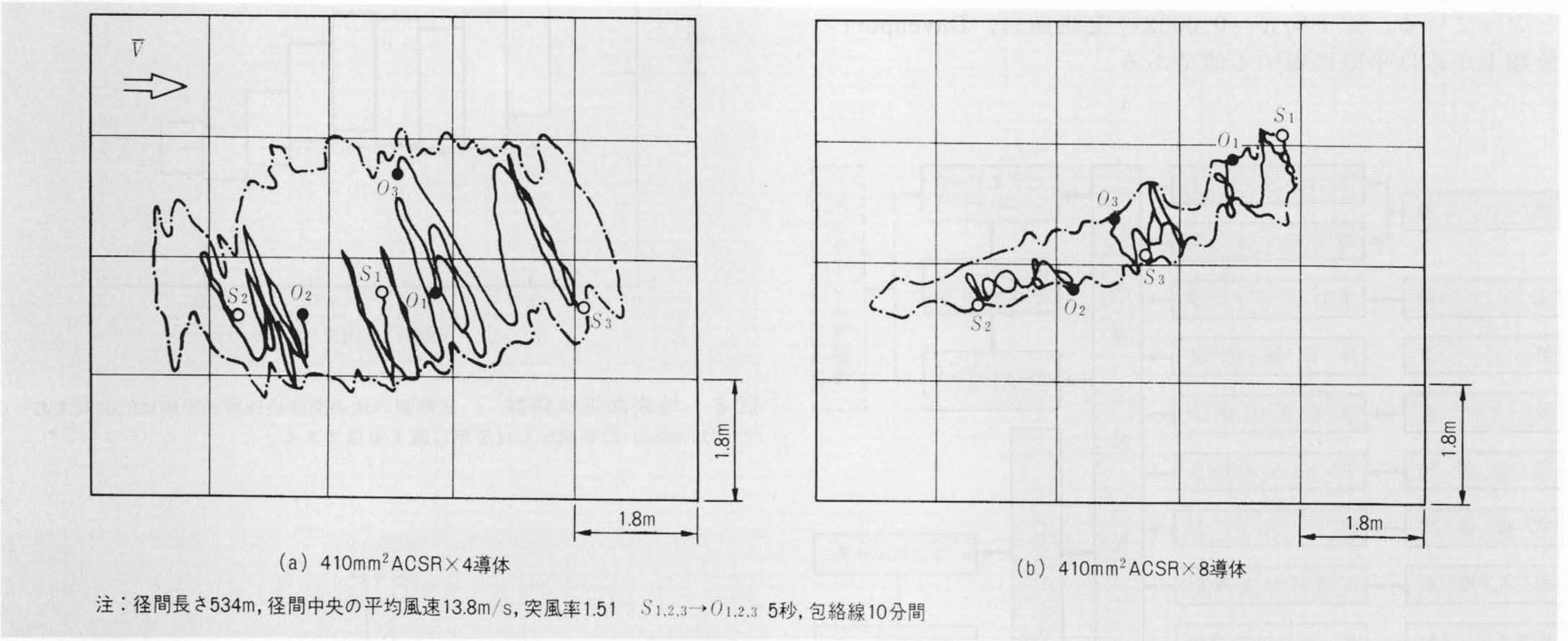


図8 電線運動の軌跡 4導体では4m程度の上下運動が認められるが、8導体ではほとんど認められない。

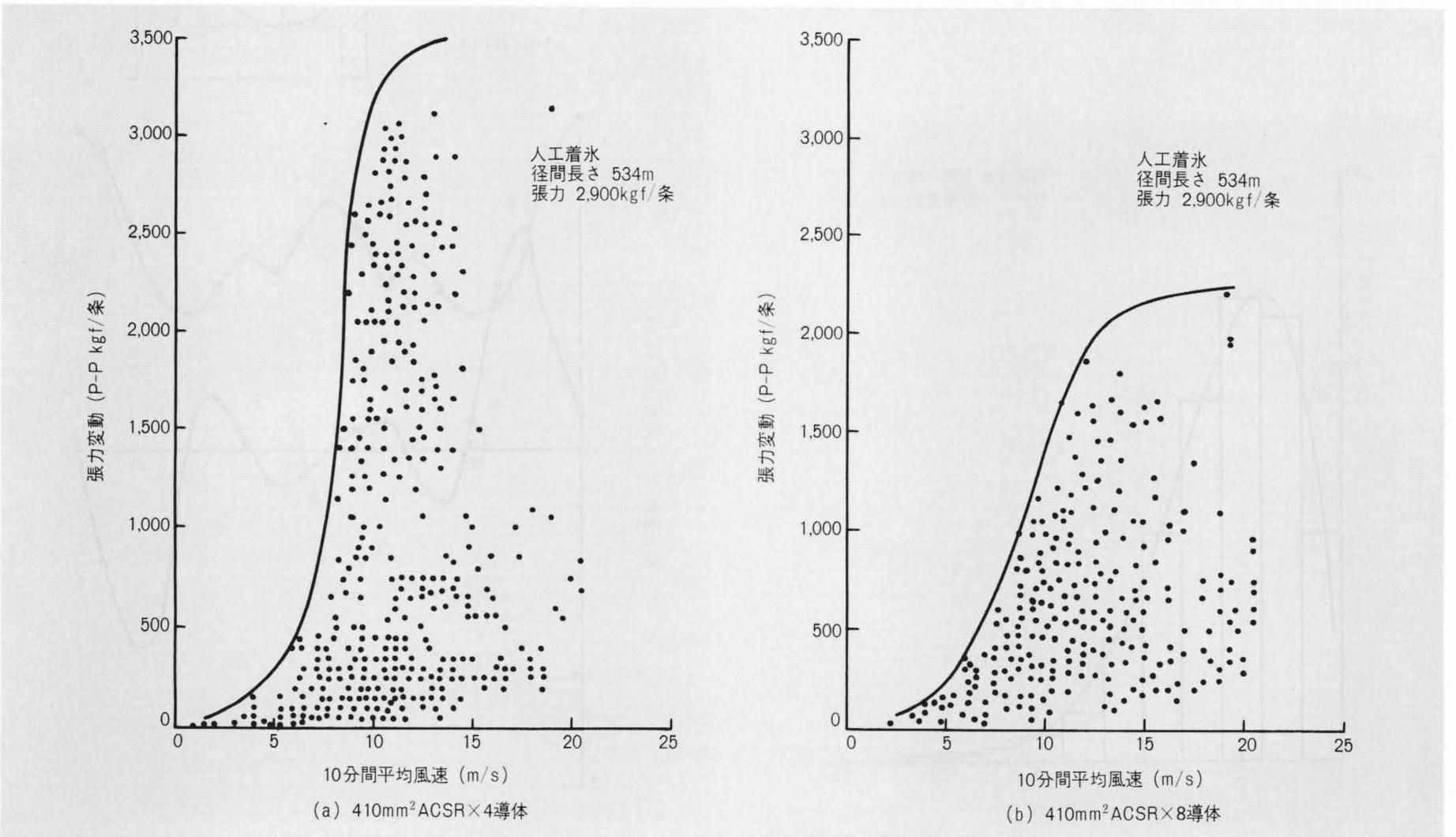


図9 張力変動と風速との関係 ギャロッピング時に発生する張力変動は、4導体では3,500kgfもの張力変動が発生しているが、8導体では2,200kgf程度であって安定している。

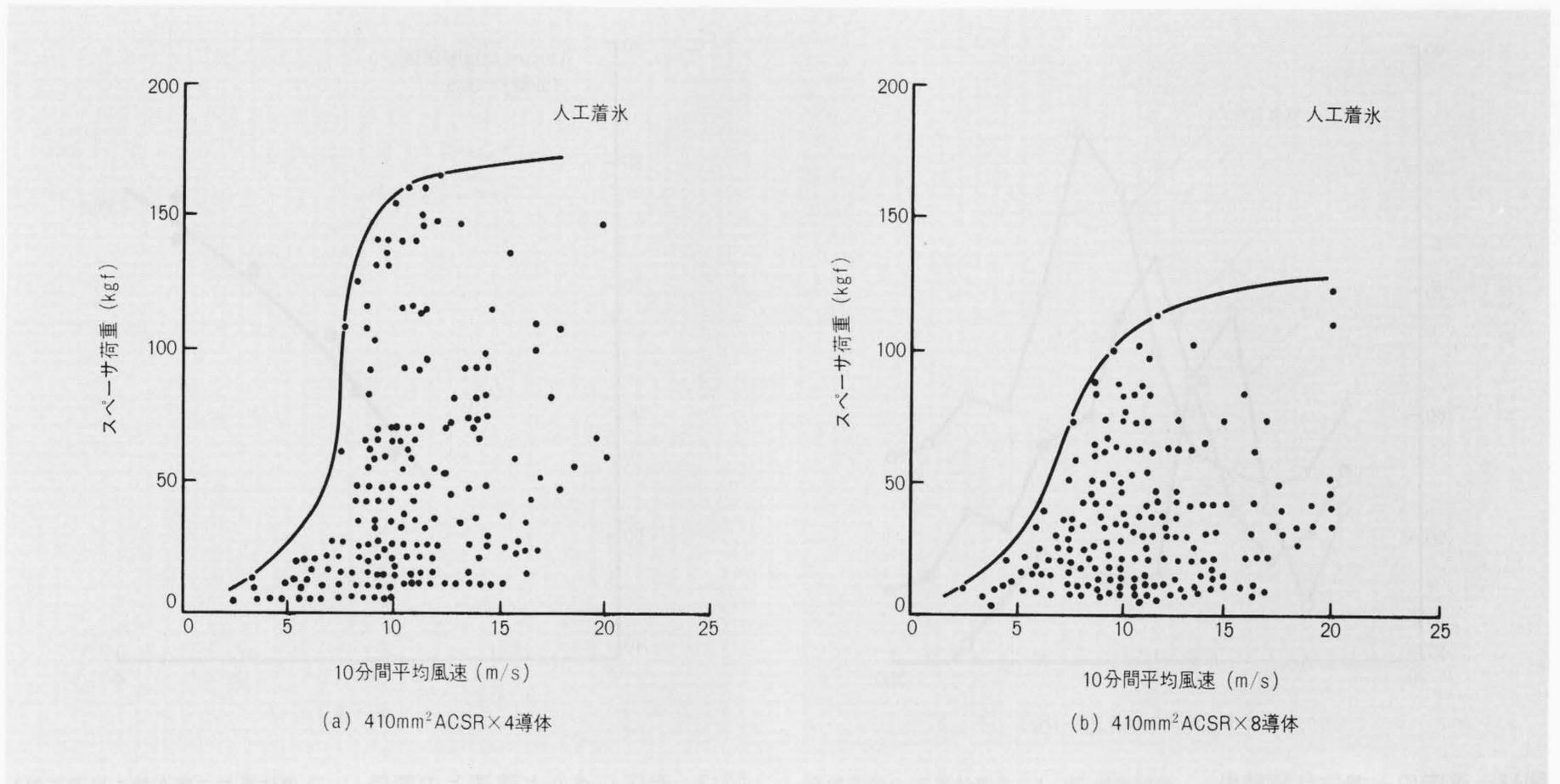


図10 スペーサ荷重と風速との関係 ギャロッピング発生時に4導体では約170kgf、8導体では120kgf程度の荷重がスペーサに加わる。

形のスペクトル解析結果では、2～3ループモードの振動であった。

図9は、4導体及び8導体について風速と張力変動との関係を示したもので、曲線はその包絡線である。4導体では8m/s付近で急激な張力の増加が認められ、激しいギャロッピングが発生して、3,500kgf条ではほぼ飽和する傾向にある。この傾向は、過去の観測結果³⁾とほぼ同じである。

一方、8導体については張力変動の増加は4導体のそれよりも穏やかで、2,200kgf条程度で飽和する傾向にあり、目視観測からは上下及びねじれの連成運動は認められなかった。

本観測では20m/s以上の強風時でのギャロッピングの結果は得られなかったが、8導体に対しては更に強風になれば連成運動の発生することが推定される。このことに関しては、今後風洞実験などによって検討を加えなければならないが、観測されたような風速領域で現行の4導体送電線と比較すれば、低インダクタンス送電線は大束径であることから安定していると言える。

5 スペーサ荷重

多導体送電線では短絡電磁力のほかに、上流側電線の後流効果によるサブスパン振動により、また、上述のギャロッピングによってスペーサには機械的な繰返し荷重が作用する。したがって、8導体スペーサに加わる荷重条件を十分把握し、強度的、機能的及び経済的に満足するスペーサ設計、配列を行なう必要がある。

図10は、スペーサに加わる荷重の実測結果を示したもので、ギャロッピング時の張力変動と同じ傾向の結果が得られた。サブスパン振動時は40kgf程度の荷重であったが、ギャロッピング発生時には4導体では170kgf、8導体では120kgf程度の荷重値が観測された。

今後、更に疲労強度などについて検討を加えなければならないが、8導体スペーサ設計のための荷重値としては、4導体よりも過酷にする必要はないと推定される。

図11は、試験線に用いた第1次試作の2分割形8導体スペーサの外観を示したもので、重量は約70kgであるが、第2次以降の試作では、観測結果を踏まえて軽量の実用的なスペーサを開発することができた。

スペーサについてはその配列が大きな問題であり、短絡時の電線運動の計算結果からは4導体送電線よりも3～4割程度、最大スペーサ間隔を広げることが可能であり、試験線では90mを採用したが、今後は大束径特有の捻回復元特性を考慮に入れた配列の検討が必要である。

6 電線風音

我が国は比較的厳しい気象状況下に送電線が架設されており、主として10m/s以上の強風時には飛行機の飛来するような音が発生する場合⁴⁾がある。

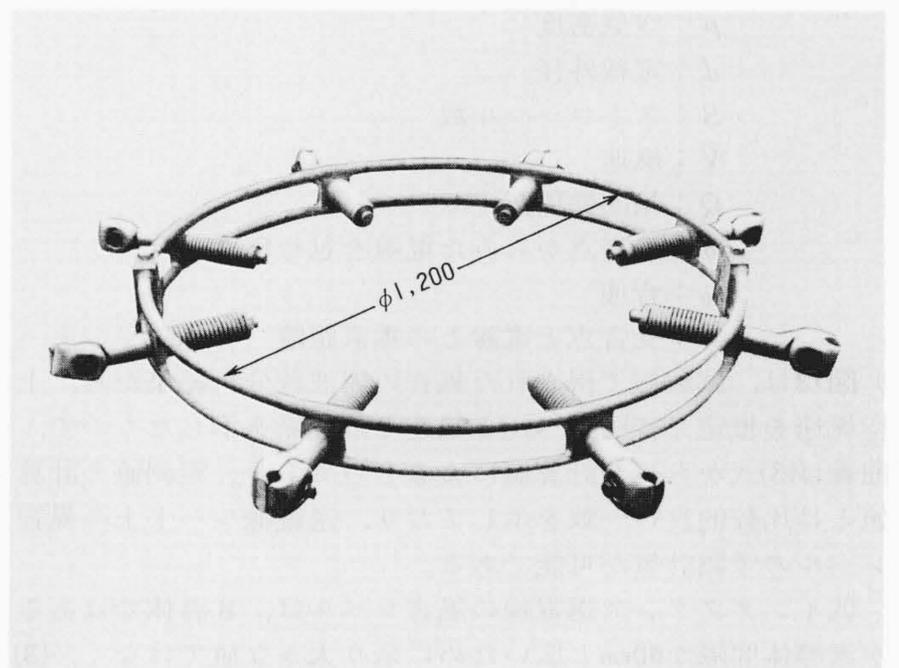


図11 第1次試作8導体用スペーサ 低インダクタンス送電線は約1,600mmと大束径であるため、作業性を考え2分割形とした。重量は約70kgである。

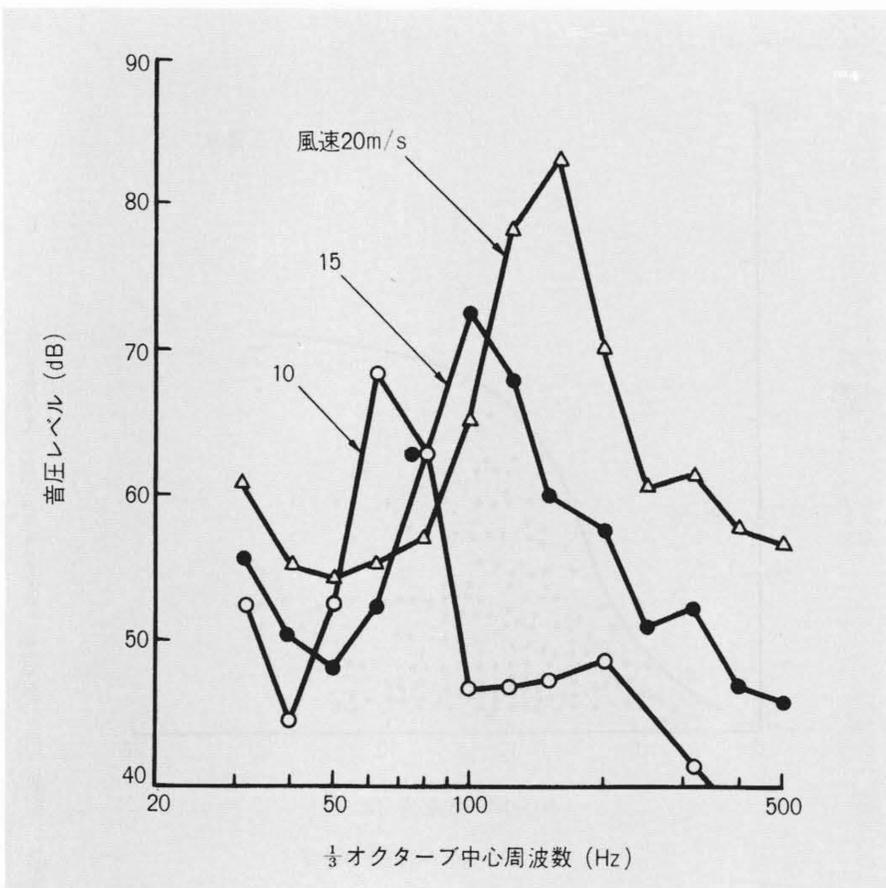


図12 風音の周波数分析結果 低騒音風洞による8導体風音の周波数分析結果であり、顕著な卓越周波数が認められる。

電線風音は圧力騒音であって、純粋に流体力学的要因によって発生するもので、多導体配列では上流側電線の後流の影響によって、風音レベルの増加のあることが明らかとなっている⁵⁾。

図12は、低騒音風洞による8導体送電線の風音のスペクトルを、風速をパラメータとして示したものである。各風速についてストローハル数で代表される卓越周波数が存在しており、音圧レベルは風速の増加につれて大きくなっている。

風音は電線表面からの流れのはく離と密接な関係があり、音の強さ $I(r)$ は、圧縮性流体の微小振動振幅から求めると、次のように近似することができる。

$$I(r) = \frac{\alpha \cdot \rho \cdot d \cdot S^4 \cdot \bar{V}^6 \cdot Q \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{2 a_0^3 r} \dots \dots \dots (3)$$

- ここに α : 導体サイズ, 導体数, 導体配列によって定まる定数(8導体では51.1)
- ρ : 空気密度
- d : 電線外径
- S : ストローハル数
- \bar{V} : 風速
- Q : 指向性係数
- θ : 受音点からみた電線を包む角度
- a_0 : 音速
- r : 受音点と電線との垂直距離

図13は、試験線で得られた風音の周波数分析結果から、上空風速を推定し音圧レベルと風速との関係を示したもので、曲線は(3)式から得た計算値によるものである。実測値と計算値とは比較的良い一致を示しており、送電線ルート上の風音レベルの予測計算が可能である。

低インダクタンス送電線の風音レベルは、8導体ではあるが素導体間隔が60cmと広いために余り大きな値ではなく、(3)式による予測計算では、現行の4導体送電線よりも約2 dB大きいだけである。

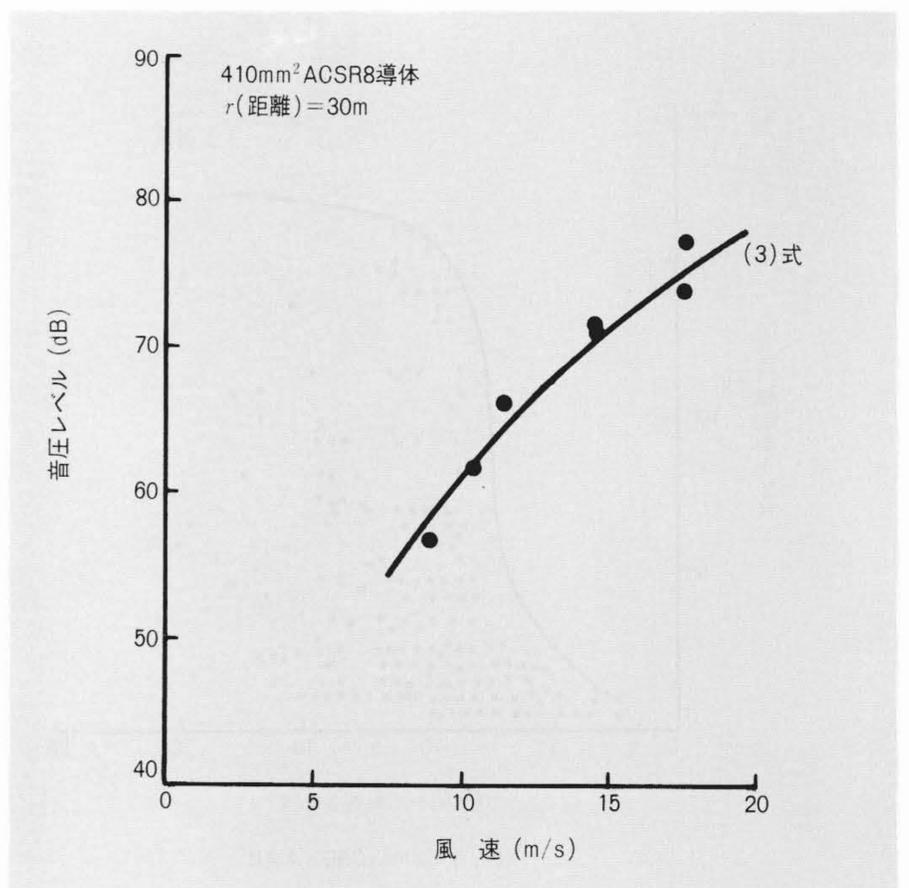


図13 音圧レベルと風速との関係 8導体風音の実測値を風速に対して整理したもので、計算値とよく一致しており風速の6乗に比例したレベルとなっている。

7 結 言

低インダクタンス送電線の実用化に当たって、3箇年にわたる十王試験線での実規模試験結果について述べたが、その結果を要約すると以下に述べるとおりである。

- (1) 野外試験での多現象のデータ収集システム、及び解析システムを開発することができ、これによって多大な省力化及び迅速化を図ることができた。
- (2) 8導体のギャロッピングの規模は、4導体のその約1/2であって比較的安定している。
- (3) スペースに加わる荷重は、4導体のその約1/3であり、強度設計上は有利である。
- (4) 多導体化特有の風音レベルの増加は認められず、環境上有利である。

これらの実験結果を踏まえて、今後更に残された機械的問題の解決を行ない、早期実用化を図るとともに、電力需要の増加に伴い、ますます大束径多導体化してくるであろうと思われる送電線設計の検討を続けていく考えである。

終わりに、本研究を遂行するに当たって、関係各位から種種の御指導、御協力をいただいた。ここに厚く謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 阪部, 外: 低インダクタンス基礎研究, 電気学会全国大会, No.1286(昭52-4)
- 2) A. G. Davenport: The Response of Slender Line-Like Structures to a Gusty Wind, Inst. Civ. Engrs. 20, 389(1962)
- 3) 例えば, K. Anjo et al.: An Experimental Study of Bundle Conductor Galloping on the Kasadori-Yama Test Line for Bulk Power Transmission, SIGRE SC 22-04(1974)
- 4) 下嶋, 外: 風により架空送電線から発生する騒音, 機械学会講演論文集, No.750, 16, 93~96(昭50-8)
- 5) 山崎, 外: 架空送電線と風音, 電気評論, 2, 1~8(昭51-2)