

4 導体送電線の ギャロッピング観測およびシミュレーション

Galloping Observation and Simulation of a 4 - Conductor Bundle Transmission Line

清水幹夫*, 佐藤順一**

Mikio SHIMIZU and Jun-ichi SATO

* 工博 (財) 電力中央研究所 構造部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

** 工修 (株) アーク情報システム 解析第2部 (〒102-0076 東京都千代田区五番町 4-2)

To confirm usefulness of a galloping simulation method, in this study, full scale galloping measurements as well as simulations were performed on the artificial ice accreted 4 - conductor bundle transmission line. Wind velocity, displacement and tension of the line were measured at the same time during galloping in the field. And a few cases of galloping simulations were done as nonlinear dynamic wind response analyses based on FEM in which observed wind velocity is used as an input data and aerodynamic characteristics of artificial ice accreted conductors were taken into account. As a result, observed galloping phenomena were simulated with high accurate and validity of the analytical method was shown. Further, relationships between galloping amplitude and coherence of the wind velocity were also investigated by means of the simulation method.

Key Words: transmission line, galloping, wind response observation, simulation, finite element method

キーワード: 送電線, ギャロッピング, 風応答観測, シミュレーション,
有限要素法

1. はじめに

着氷雪した架空送電線の風による自励振動現象, すなわちギャロッピングについては, 従来より, その発生条件の解明^{1), 2)}, 応答予測法の提案^{3) ~ 5)}, および観測による挙動評価⁶⁾が試みられている。近年では, 特に多導体を対象とし, 種々の数値解析的検討がなされている。ここに多導体とは, 複数の電線を束ねた方式の送電線であり, 2~8導体が存在する(以下では, 多導体を構成する電線を素導体と称し, 特にその本数の単位を条と称する)。山口ら⁷⁾は, 等価単導体に簡略化した4あるいは6導体の有限要素モデルを用い, 平均風速による静的な横振れ状態について複素固有値解析を実施し, ギャロッピングの発生モード, 振動数などの動特性を評価している。また, 筆者らは, 幾何学的非線形性を考慮した有限要素法解析により, 一定風および変動風を入力とした2導体のギャロッピングをシミュレーションすると共に, 相間スペーサの効果について検討している⁸⁾。さらに筆者らは, 4導体を対象とした一様流中のギャロッピングの

シミュレーション結果から, 自励振動の卓越振動数および振動モードが時間変化する場合のあることを明らかにしている⁹⁾。この他, 筆者らと同様, 有限要素法を用いた大変形のギャロッピングシミュレーションの例として, 大熊ら¹⁰⁾による等価単導体モデルに置き換えた4導体の, 一様流および乱流中の応答評価を挙げることができる。

ところで, こうした種々の解析が行われる一方, 実際のギャロッピングの観測結果とシミュレーション結果との直接的な比較例は少ないと思われる。この原因として, 着氷雪の状態が不明確な自然環境下での観測が主に行われてきたこと, 風速と応答の同時観測例が少ないこと等, 観測データの不足が挙げられる。また, 変動風の空間構造の把握を含め, 着氷雪電線に作用する空気力のモデル化については今なお不明な点が多く, シミュレーションの条件設定が困難であったことが考えられる。

しかし, 現状で用いられる空気力モデルと応答解析手法によるシミュレーション結果が, 実現象とどのような関係にあるかを評価, 確認しておくことは, シミュレー

シミュレーション手法の有効性、適用範囲を明確にすると共に、精緻化を行う上で必要不可欠といえることができる。

このため本検討では、形状および空力特性が明らかな人工着雪を取り付けた、4導体の実規模試験線1相1径間を対象とし、ギャロッピング発生時の変動風速、電線変位および支持点張力の同時観測記録を基に、この時の風速を反映した入力条件下で応答シミュレーションを実施し、観測結果との比較を行った。シミュレーションには幾何学的非線形性を考慮した有限要素法を用い、4導体は簡略化することなく素导体スペーサ、碍子金具を含めて極力現実に近い形でモデル化した。モデルの妥当性は、固有値解析結果と強制加振試験により得られた固有振動数との比較により検証した。また、着雪電線の空力特性は、4導体の部分模型に対する風洞実験結果を用いて考慮し、空気力は準定常的に近似した。

さらに本検討では、変動風速の空間相関を変化させた場合のシミュレーションを実施し、風の分布とギャロッピングの振幅との関係を考察した。

2. 観測の概要

検討の対象とした4導体送電線は、実規模試験線である最上試験線¹¹⁾(山形県立川町、以下、試験線と称する)に図-1のように架線されており、電線の周辺には各種センサーが配置され、4導体を構成する4条の素导体それぞれにはプラスチック製の人工着雪が取り付けられている。この人工着雪の断面形状および空力特性については後述する。本検討では、ギャロッピングと判断できる振動が10分間継続して観測された2ケースのデータを

シミュレーションとの比較対象とした。風向、風速の観測データとしては、電線の地上高と等しい高さに位置するベーン型風向風速計V1およびV2で得られた時刻歴を用いた。ただし、上記2ケースのうちの1ケースでは、V1の出力に多くのノイズが混入したため、これに代えてV3の記録を用いた。電線応答の観測データとしては、ITVカメラで撮影された径間中央の振動軌跡および回転角、2号鉄塔側支持点の張力計T1で得られた張力時刻歴を用いることとした。電線の振動軌跡は、径間中央の素导体スペーサD1に取り付けられた2つの標的の midpoint の座標であり、ITVの映像をビデオトラッカーにより数値化した値である。また、これら2つの標的の位置関係から、4導体の捻回角、すなわち径間方向軸回りの回転角を換算した。なお、観測の時間刻みは0.1秒である。

3. シミュレーションの方法

3.1 対象電線のモデル化と固有振動特性

シミュレーションには、筆者らが開発した時間領域の有限要素法解析プログラム(通称CAFSS)を用いた。このプログラムの機能概要は表-1に示すとおりであり、これまでに、前述の文献8)、9)のギャロッピングの解析、および4導体のバフエッティングの解析¹²⁾に用いられた例がある。解析の対象となる構造物の運動方程式は次式で表される。

$$[M]\Delta\{\ddot{u}\} + [C]\Delta\{\dot{u}\} + ([K_L] + [K_C])\Delta\{u\} = \Delta\{p\}$$

.....(1)

ここに、[M]:質量マトリックス、[C]:減衰マトリックス

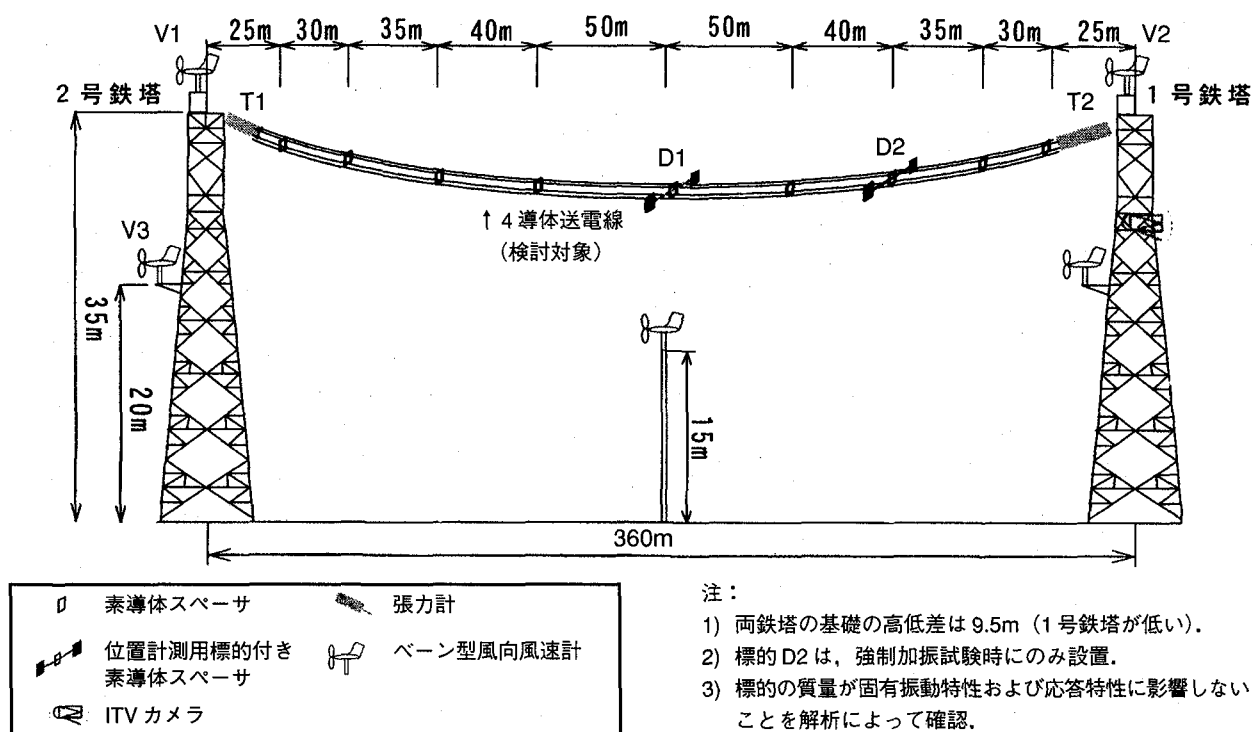


図-1 試験線概略図

表-1 解析プログラム（CAFSS）の機能概要

積分法	直接積分, Newmark- β 法
使用要素	線形トラス要素, Saint-Venantのねじり要素, 線形はり要素(任意方向に回転するヒンジ結合可)
未知量	変位
参照座標系	updated Lagrange系
大変形	要素の幾何学的非線形性を考慮
増分解析法	Newton-Raphson法
構造減衰	Rayleigh減衰

ス, $[K_L]$: 線形剛性マトリックス, $[K_G]$: 幾何学的剛性マトリックス, $\{u\}$: 変位ベクトル, $\{p\}$: 外力ベクトルであり, Δ は増分を, $\dot{}$ は時間微分を表す.

シミュレーションに用いた構造解析モデルを図-2に, その諸元を表-2に示した. 図のように解析モデルは, ACSR410mm² (アルミ部分の断面積が410mm²の鋼心アルミより線) と呼ばれる電線を, 素導体スパーサにより4条束ね, 電線両端の支持点に碍子金具を取り付けた状態を忠実に模擬している. 素導体と電線との接合部, および碍子金具に含まれるヒンジによる可動部は, 要素の材端ピンで模擬し, 碍子金具端部の支持点は, 並進およびねじり方向の自由度を空間に固定する境界条件とした. なお, 以下では, 線路方向, 線路直交方向, 鉛直方向を, それぞれ全体座標系の x , y , z 方向と定義した.

試験線では, 検討対象の電線の固有振動数を把握する

ため, 鉛直および捻回方向の強制加振試験が行われた. 固有振動モードは, 径間中央あるいは1/4に位置する素導体スパーサを, ロープを介して人力加振することにより励起させ, 加振後の卓越振動数を求めて固有振動数とみなした. 試験結果と, 図-2のモデルが無風時の静的釣合状態にある場合の固有値解析結果, およびサグ比が1/8以下の扁平な放物線ケーブルの固有振動数の理論値⁽⁴⁾を表-3に示した. 表では, 対応するモード間で解析, 試験および理論による固有振動数は必ずしも一致していないが, 試験では目的とするモードのみを他のモードと完全に分離して励起させることが困難であり, 誤差が見込まれること, および固有値解析結果は試験結果と理論値との間の値を示していることを考慮すれば, モデル化は妥当と判断できる. 図-3には, 固有値解析によって得られた固有振動モードを示した.

3.2 空気力のモデル化

風を受ける送電線には, 通常, 風の主流方向に抗力が作用するが, 着氷雪がある場合, 抗力に加え風向直交方向, 電線軸回りに, それぞれ揚力, 空力モーメントが作用する. 送電線のギャロッピングは, これら空気力の作用により, 系の空力減衰が負となった場合に発生する自励振動現象ということができ, 横撓みや捻回振動を伴った, 曲げあるいはねじれフラッターに近い現象となる場

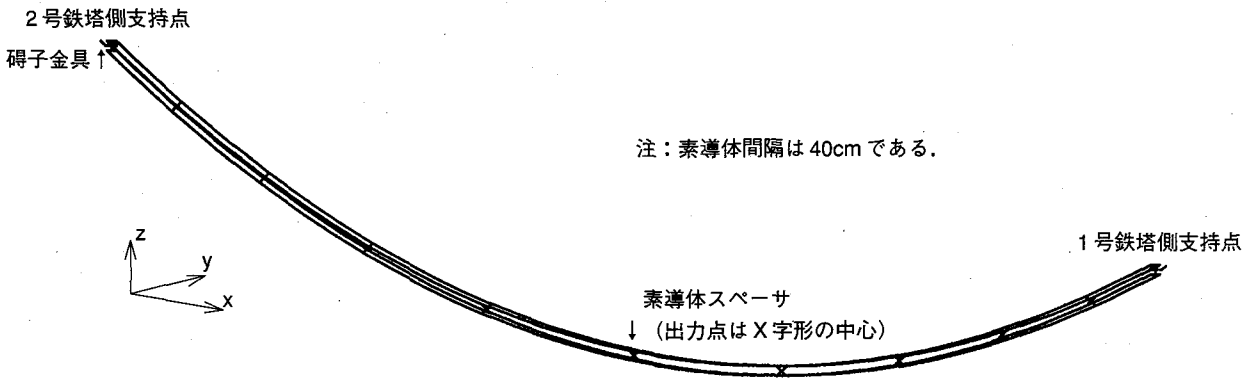


図-2 解析モデルの見取図

表-2 解析モデルの諸元

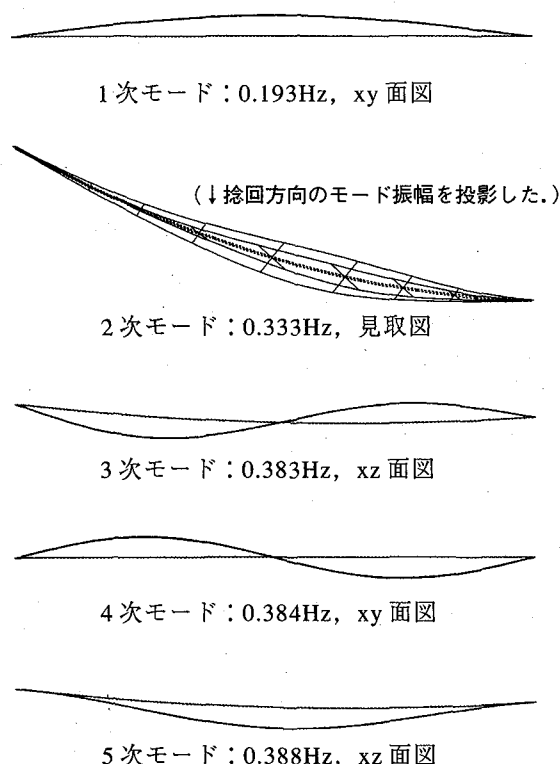
	電線部(ACSR410) ^{注1}	碍子金具(碍子部)	碍子金具(金具部)	素導体スパーサ
径間長 (m)	357	-		
サグ (m)	8.55	-		
初期張力 (N)	T1 : 3.227×10 ⁴ , T2 : 3.213×10 ⁴	-		
ヤング率 (N/m ²)	8.192×10 ¹⁰	2.058×10 ¹¹		
ねじり剛性 (Nm ²)	156.8 ^{注2}	6.295×10 ³	4.886×10 ⁴	
断面積 (m ²)	4.808×10 ⁻⁴	7.069×10 ⁻⁴	1.964×10 ⁻³	
代表径 (m)	2.85×10 ⁻²	0.03	0.05	
密度 (kg/m ³)	3.48×10 ³	0.0 ^{注3}		
使用要素	トラスおよびSaint-Venantのねじり要素		はり要素	
要素分割数	36要素	1要素/部材		4要素/個

注 1) 素導体1条に対する値を示した.
 2) 電線に対する要素試験結果⁽³⁾を参照した.
 3) 各要素の密度は0とし, 実際の碍子金具, 素導体スパーサの重量と整合するよう, 節点に集中質量を付加した.

表-3 固有振動数およびモード形状

次数	固有振動数(Hz)			振動モード注1
	解析	試験	理論値 ¹⁴⁾	
1	0.193	注2	0.195	水平方向1ループ
2	0.333	0.350	注2	捻回方向1ループ注3
3	0.383	0.350	0.390	鉛直方向2ループ
4	0.384	注2	0.390	水平方向2ループ
5	0.388	0.375	0.391	鉛直方向擬似1ループ注4

- 注1) モードの腹の数をループと称する。
 2) 試験データの取得あるいは理論値なし。
 3) 電線軸回りの4導体全体の回転を意味する。
 4) 厳密には3つのループが存在するが、中央の1ループが大きいモードを意味する(図-3参照)。

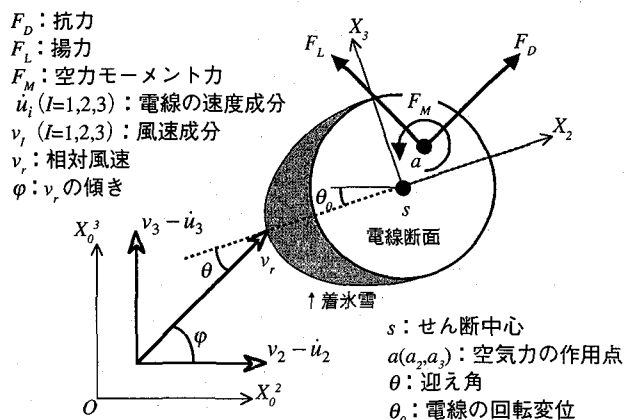


注) 点線は初期釣合状態の電線位置を表す。

図-3 無風時静的平衡状態における固有振動モード

合がある。したがって、着氷雪電線に作用する空気力は、厳密には非定常空気力として評価する必要があると考えられる。実際、木村ら¹⁵⁾は、加振時の4導体部分模型に作用する準定常空気力、特に空力モーメントの適用限界を指摘し、回転変位と無次元回転速度の関数として非定常空気力の定式化を試みている。ただし、現状においては、本検討で対象とした人工着雪電線を含め、着氷雪電線の空力特性に関するデータの多くが準定常空気力に対応する空気力係数として測定されている。このため本検討では、以下のように電線に作用する空気力を準定常的に近似した^{8),9)}。

まず、図-4のように着氷雪電線断面に対して、空間に固定された全体座標系 X_0' ($I=1,2,3$) と、断面に固定された局所座標系 X_i ($I=1,2,3$)、および諸量を定義する。



注) $F_M, \varphi, \theta, \theta_0$ は反時計回りが正。

図-4 着氷雪電線断面と空気力

図では、 X_0^1, X_0^2 方向と紙面に直交する電線軸方向を一致させた。このとき、相対風速 v_r と、相対風速ベクトルと全体座標系の水平 (X_0^2) 方向との間の角 φ は、風速および電線速度の成分を用いてそれぞれ次式で表される。

$$v_r = \sqrt{(v_2 - \dot{u}_2)^2 + (v_3 - \dot{u}_3)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{v_3 - \dot{u}_3}{v_2 - \dot{u}_2} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、図-4中の点線のように、着氷雪頂部とセン断中心を結ぶ基準線を X_2 軸と一致させ、水平方向と基準線との間の角、すなわち着氷雪頂部の回転変位を反時計回りを正として θ_0 と表せば、断面に対する相対風向ベクトルの迎え角 θ は、

$$\theta = \varphi - \theta_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。単位長さ当りの送電線に作用する準定常空気力は、式 (2) の相対風速 v_r と上式 (4) の迎え角 θ を用いて次式で表される。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_a d C_D(\theta) v_r^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_a d C_L(\theta) v_r^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho_a d^2 C_M(\theta) v_r^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 ρ_a : 空気密度、 d : 断面の代表径、 $C_D(\theta)$: 抗力係数、 $C_L(\theta)$: 揚力係数、 $C_M(\theta)$: 空力モーメント係数である。式 (5) ~ (7) に対して次式の座標変換をすれば、全体座標系における空気力ベクトルが得られる。

$$\begin{Bmatrix} F_2 \\ F_3 \\ T_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ -a_3 & a_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_D \\ F_L \\ F_M \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 F_2, F_3 : それぞれ全体座標系における空気力ベクトルの水平、鉛直方向成分、 T_1 : 電線軸回りの空力モーメントである。式 (8) は、単位長さ当りの電線に作

用する空気力を表し、増分解析のステップごとに与えられる時刻歴の風速と時時刻刻算出される電線速度および変位に基づいて更新される。式(8)に対して受風面積を考慮し、離散化された電線モデルの節点集中荷重に換算した後に増分をとれば、増分形の運動方程式の外力増分ベクトル、すなわち式(1)の右辺 $\Delta\{p\}$ が得られる。

なお、木村らによれば、回転変位と無次元回転速度に依存する空気力係数が得られている場合、式(7)を次式、

$$F_M = \frac{1}{2} \rho_a (2d) B C_M (\theta, \dot{\theta}_0 B / v_2) v_r^2 \quad \cdots \cdots (9)$$

に改めることにより、非定常空力モーメントの考慮が可能になると考えられる¹⁵⁾。ここに、 B ：導体中心間隔である。本検討で用いた解析プログラムでは、上式による空気力の換算も可能としている。

4. 解析条件

4.1 空気力係数

検討対象の4導体の空力特性は、実物と断面寸法が等しい図-5の4導体部分模型に対する風洞実験結果として、図-6のとおり得られている。測定は、多点風圧計を用いて素導体ごとに迎え角5度刻みでなされた。これらの値は、迎え角0.1度刻みに補完してデータファイル化した。シミュレーションでは、前述のとおり解析ステップごとに迎え角が算出されるが、これを小数点以下一桁の値に丸め、上記データファイルから対応する迎え角の空気力係数を読み込むこととした。

4.2 風速条件

試験線では、表-4に示す風速時に顕著なギャロッピングが観測されているため、これら2ケースをシミュレーションの対象とした。

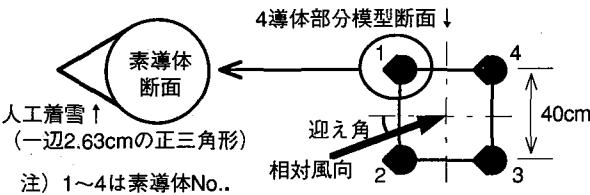


図-5 人工着雪と4導体部分模型の断面

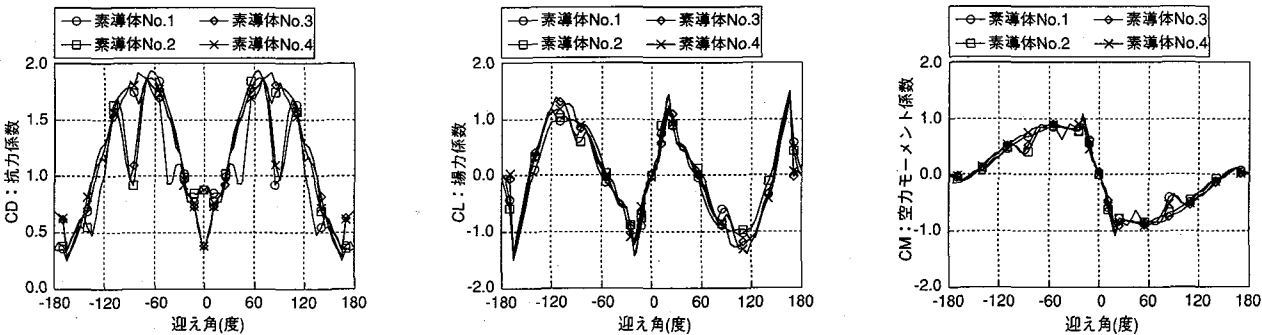


図-6 人工着雪4導体断面の空力特性

表-4 観測された風速の10分間統計量

ケース	使用センサー	観測時の風速(m/s)			平均風向* (度)
		平均値	瞬間最大値	標準偏差	
1	V1	14.1	18.5	1.13	80.8
	V2	13.1	20.6	2.32	82.7
2	V3	16.4	23.3	2.44	84.3
	V2	15.1	23.1	2.79	81.6

注*) 線路方向を0度、線路直交方向を90度と定義した。

シミュレーションでは、電線全体に作用する風速を入力する必要がある。ここでは岩谷の方法¹⁶⁾により、各ケースごとに表-4の値をアンサンブル平均した平均風速と乱れの強さを用い、径間に分布する変動風速を発生させた。発生計算では、時間刻みを0.05秒、評価時間を5分間と定め、変動風速のパワースペクトルを図-7のようにカルマン型スペクトルで近似した。また、ディケイファクターは8、フェイズは0と仮定し¹⁷⁾、ch1～ch10の計10個の波形を発生させた。これらの波形は図-8に示すように、径間を36m間隔で10分割した各領域にch1から順に線路直交方向から作用させた。各ケースの観測風速と、1号鉄塔近傍および径間中央に作用する発生風速とを、それぞれ図-9、10に示した。発生風速の初期の30秒間は、シミュレーションにおいて過渡応答が過大になることを避けるため、0から徐々に増加させた。

なお、ディケイファクターについては、観測時の風の空間構造を再現する上で、径間内の数点における風速記録に基づいて評価した値を用いることが理想的である。しかし、本検討では観測箇所に制限があったため、一般的な強風の性質を考慮し、上記のとおり仮定した。ディケイファクターとギャロッピングとの関係は後述する。

4.3 その他の解析条件

試験線では、径間中央に一時的に設置したGill型風速計による観測結果から、強風時には常に吹上角約5～15度の鉛直上向きの風があることが確認されている。また、図-5の人工着雪については、無風時において図-4中の θ_0 が0度となるように取り付けを行うが、実際には±5度程度の施工上の誤差が含まれる。試験線では、同等の風速時にギャロッピングの発生する場合としない場合とが観測されており、その原因は、上記人工着雪の施工誤差と考えられている。このため、吹上角および初期

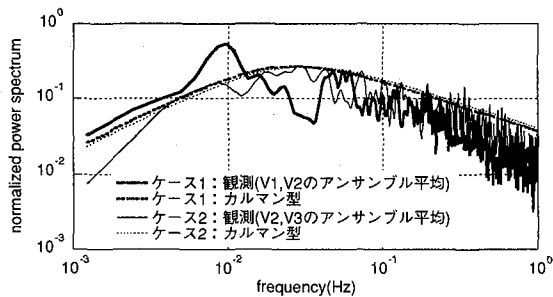


図-7 変動風速のパワースペクトル

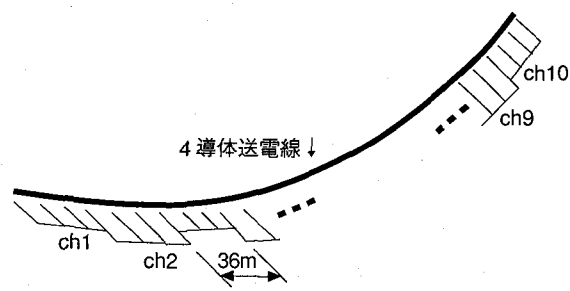
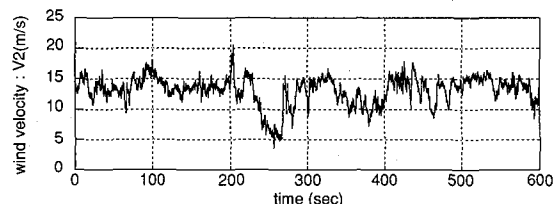
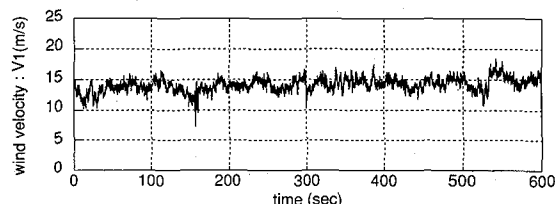


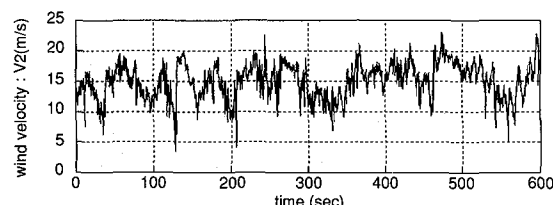
図-8 変動風速の分布载荷



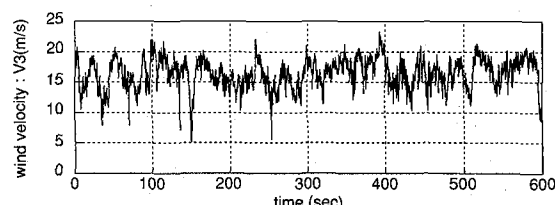
(a) ケース 1: 1号鉄塔側測点 (V2)



(b) ケース 1: 2号鉄塔側測点 (V1)

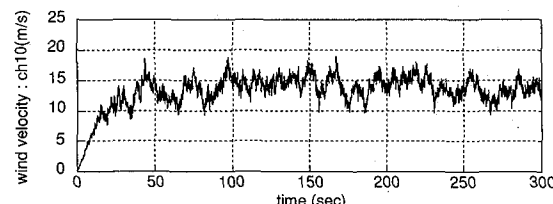


(c) ケース 2: 1号鉄塔側測点 (V2)

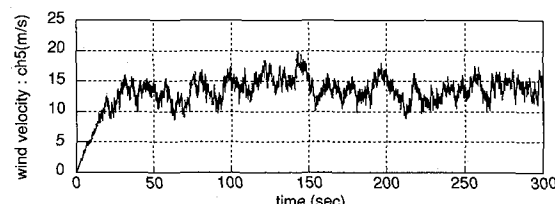


(d) ケース 2: 2号鉄塔側測点 (V3)

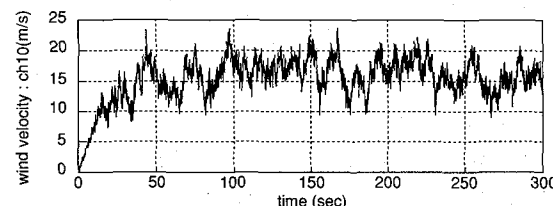
図-9 観測風速



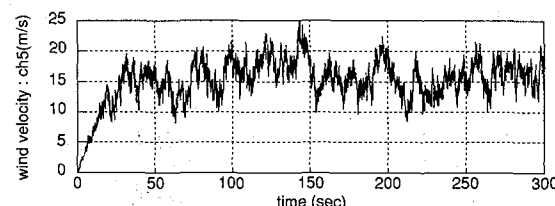
(a) ケース 1: 1号鉄塔近傍



(b) ケース 1: 径間中央



(c) ケース 2: 1号鉄塔近傍



(d) ケース 2: 径間中央

図-10 発生風速

の θ_0 に関して試行計算を行い、吹上角が5度、 θ_0 が-5度の場合に顕著な自励振動の発生することを確認した。その上で、前節で発生させた風速は、すべての素導体に対して同様に、線路直交方向から吹上角5度で作用させ、各素導体の初期の θ_0 は-5度と定めた。

シミュレーションは0.05秒刻みで6000ステップ実施し、構造減衰は強制加振試験結果に基づき、1次と5次のモード減衰定数が5.0%となるRayleigh減衰を仮定した。この値は、一般的な4導体の値(約1~2%)に比較して大きい、理由として、人工着雪と素導体との間の摩擦の影響を想定している。

5. シミュレーション結果と観測結果との比較

図-11, 12にケース1, 2それぞれについて、シミュレーションの結果を観測結果と比較して示した。これらは、径間中央の変位のリサージュ、捻回角の時刻歴および2号鉄塔側支持点の張力変動の時刻歴である。シミュレーション結果の時刻歴は過渡応答の含まれる前半の1000ステップを捨て、評価時間を250秒間として示した。したがって、観測結果の時刻歴については、10分間のうちの前半の250秒間を抽出し、シミュレーション結果と時間軸を合わせて図示した。

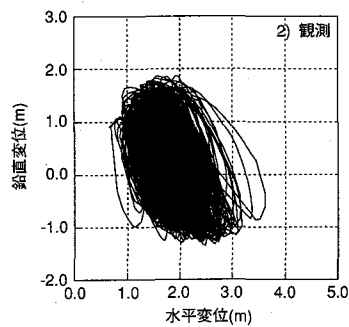
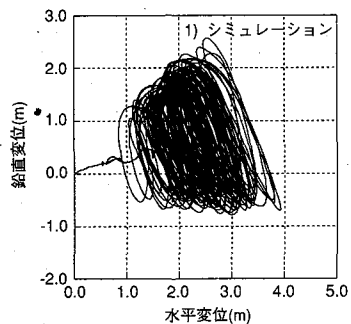


図-11 (a) 径間中央変位リサージュ：ケース 1

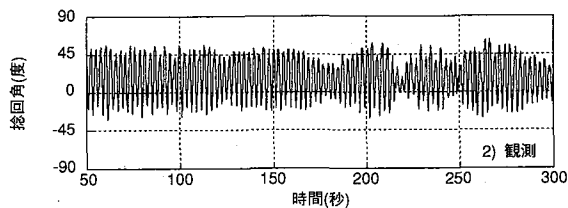
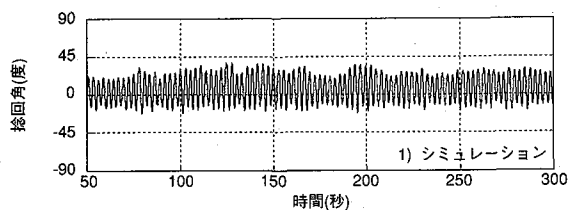


図-11 (b) 径間中央捻回角時刻歴：ケース 1

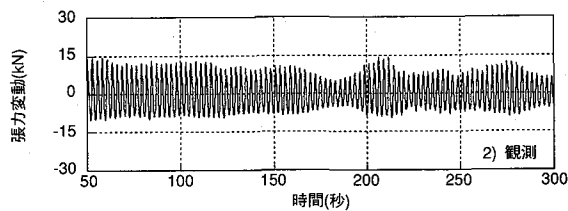
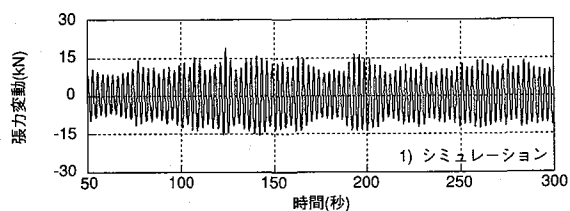


図-11 (c) 2号鉄塔側支持点張力変動時刻歴：ケース 1

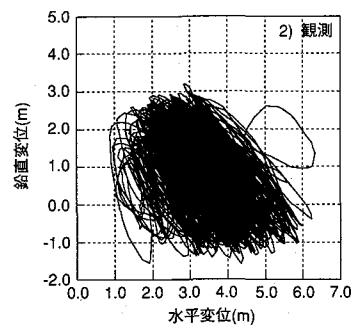
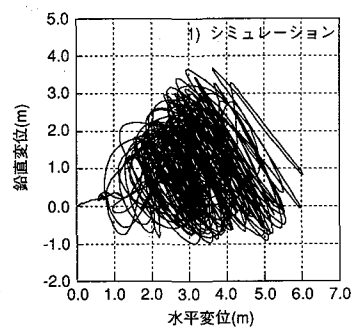


図-12 (a) 径間中央変位リサージュ：ケース 2

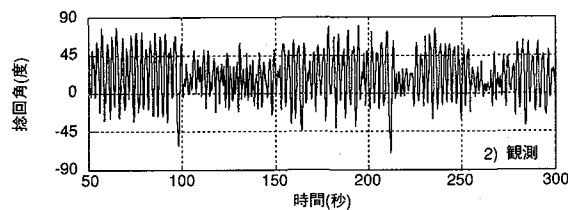
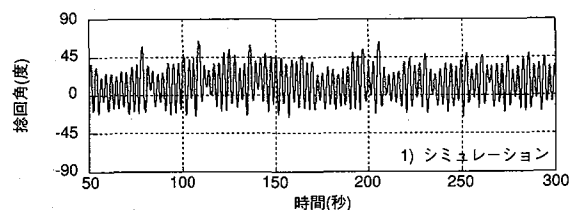


図-12 (b) 径間中央捻回角時刻歴：ケース 2

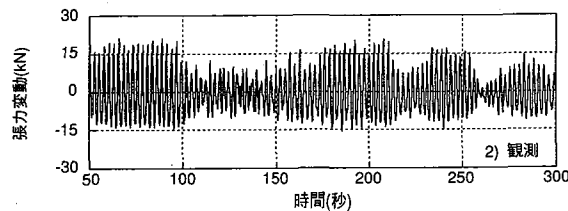
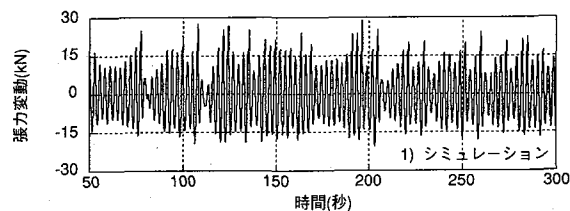


図-12 (c) 2号鉄塔側支持点張力変動時刻歴：ケース 2

ケース1では、図-11 (a) より、電線の動揺範囲はシミュレーション結果が観測結果に比較して鉛直上寄りにあり、鉛直変位の最大値、最小値は、いずれもシミュレーション結果が観測結果を上回っているが、両結果は概ね一致したといえる。両結果が完全に一致しない原因としては、シミュレーションでは径間全体で常に一定値となる吹上角を仮定したことが考えられる。また、解析モデルのサグと張力は、試験線架線時の値を模擬しているが、観測時にはこれが多少変化したことが考えられる。図-11 (b), (c) (および後述する図-12 (b), (c)) の時刻歴については、解析では人工的に発生させた変動風速を用いており、入力の変動は実現象と同期していないことから、シミュレーションと観測との間で波形そのものを直接比較することはできない。しかし、いずれの時刻歴も、ほぼ一定の振動数で定常的に振動が持続する波形となっており、ギャロッピングの発生を示すものといえる。図-11 (b) の捻回角の振幅は、シミュレーション結果が観測結果を下回っているが、この原因として、空力モーメントを準定常空気力として近似したことが考えられる。これまでに、準定常空気力を用いたシミュレーションでは、式 (9) で非定常空気力を換算した場合に比較して、捻回方向の応答が小さく評価されることが確認されている¹⁸⁾。

以上の傾向は、図-12のケース2の結果についても同様に認められる。ただし、ケース1に比較して変動風速の平均値および乱れの強さが大きいことから、電線の動揺範囲は図-12 (a) が図-11 (a) を上回り、図-12 (b), (c) の時刻歴に含まれる乱れは、図-11 (b), (c) のそれよりも大きい結果となっている。

図-13, 14には、ケース1, 2それぞれについて、水平

変位、鉛直変位および捻回角のパワースペクトルを示した。両ケース共に、シミュレーションおよび観測結果のいずれのスペクトルにも、変動風速の主要な周波数帯域を上回る0.4Hz弱付近に顕著なピークがみられる。したがって、観測された現象はギャロッピングと判断でき、これが現実的にシミュレーションされたことがわかる。上記のピークは、表-3および図-3の固有振動数、固有モードとの比較から、5次の鉛直方向擬似1ループの振動と2次の捻回方向1ループの振動、およびこれらの約1/2の固有振動数を持つ1次の水平方向1ループの振動が連成して励起されたモードに対応すると考えられる。実際、径間の1/4、中央、3/4に位置する3節点で出力されたシミュレーション結果の時刻歴に対して、固有直交関数分解¹⁹⁾を適用して最も寄与率の高い振動モードを求めれば⁹⁾、図-15のとおりとなる。図より、各方向で1ループの振動が支配的となったことを確認できる。

なお、図-13, 14より、シミュレーション結果には観測結果にみられる約0.55Hzのピーク、および約0.75Hzの捻回角のピークが現れていないことがわかる。固有値解析により6次以上のモードを求めた結果は表-5のとおりとなり、シミュレーションでは6~8次のモードおよび9, 10次のモードと連成する捻回方向のモードが励起され難かったと考えられる。本検討ではRayleigh減衰を仮定しているため、必然的に高次モードの応答が小さく評価される可能性があるが、上記不一致の原因として、準定常空気力を用いたことから捻回方向の応答が過小となったこと、および解析モデルを作成した時点で、約0.75Hzの捻回方向の固有振動が存在していなかったことが考えられる。

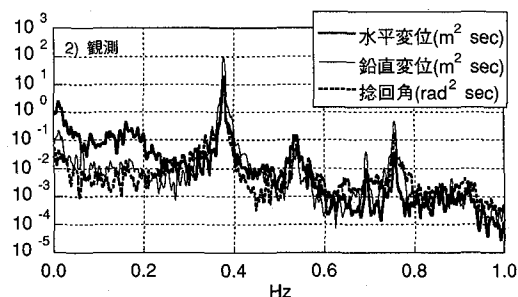
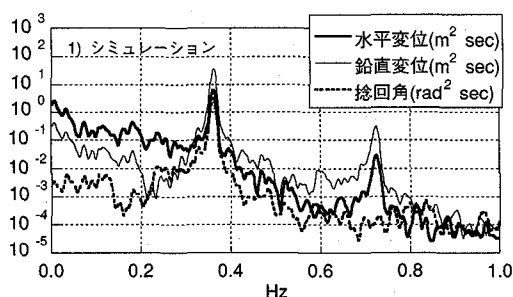


図-13 変位・捻回角のパワースペクトル：ケース1

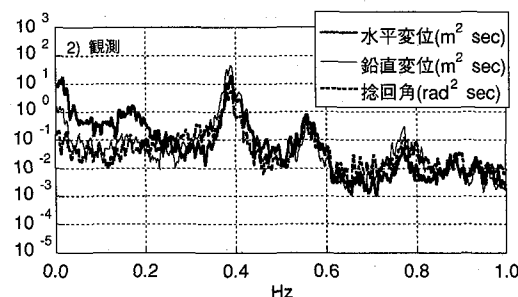
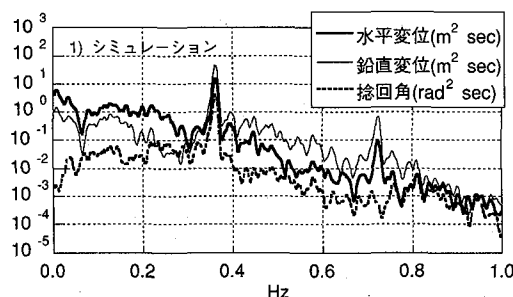
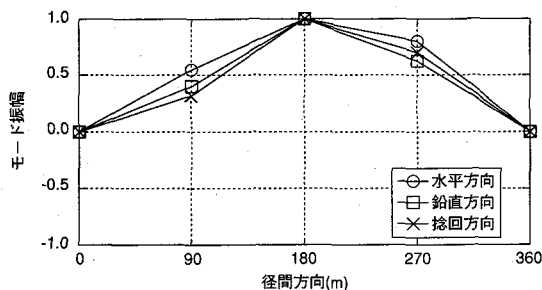
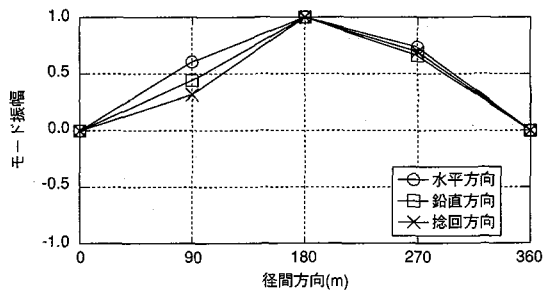


図-14 変位・捻回角のパワースペクトル：ケース2



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-15 ギャロッピング時の最も支配的な振動モード（固有直交関数分解による評価結果）

表-5 固有値解析結果（6次以上）

次数	固有振動数(Hz)	振動モード
6	0.568	捻回方向2ループ
7	0.574	水平方向3ループ
8	0.594	鉛直方向3ループ
9	0.764	鉛直方向4ループ
10	0.764	水平方向4ループ

6. 変動風速の空間分布に関する考察

架空送電線には、外乱として径間全体に分布する風が作用し、実現象の再現を目的とした風応答シミュレーションを行う際には、現実的な変動風速の分布を考慮することが望ましい。しかし、送電線路の径間全体にわたって風の分布が観測、分析された例は少なく、シミュレーションの入力を補完する際には、風の空間構造の一部を仮定する必要があると思われる。このため、変動風速の空間分布とギャロッピングの振幅との関係性を評価しておくことは重要である。

本章では、ディケイファクターを0と24の2通りに変えて岩谷の方法で変動風速を発生させ、これらを入力としたシミュレーションを行い、ギャロッピング時の振幅を比較した。ディケイファクターは、次式に含まれる係

数 k として表される。

$$\sqrt{Coh(\eta, f)} = \exp(-kf\eta/U) \quad \cdots \cdots (10)$$

ここに、 $Coh(\eta, f)$ ：風向と直交して ηm 隔たった2点間のコヒーレンス、 f ：振動数、 U ：平均風速である。 $k=0$ の場合は図-10 (b) の風を径間全体に作用させた。 $k=24$ の場合の発生風速の一部を示せば図-16のとおりとなる。ディケイファクター k を除く解析条件は前章のケース1と同様とした。

シミュレーションの結果として、径間1/4および中央に位置する素導体スパーサの重心における水平、鉛直変位および捻回角の平均値、最大値、標準偏差を、 $k=8$ すなわち前章のケース1の結果と併せて、表-6に比較して示した。

表では、径間1/4および中央のいずれの変位、捻回角についても、 k の値が大きい程、標準偏差が小さいことがわかる。また、径間中央の捻回角の最大値は $k=24$ が $k=8$ の場合を僅かに上回るが、その他の出力点、自由度の最大値は、 k の値が大きい程、小さい結果となっている。平均値については、 k の違いによる有為な差はないといえることができる。

したがって、本検討のシミュレーションの条件では、径間に分布する変動風速の空間相関が高い場合、ギャ

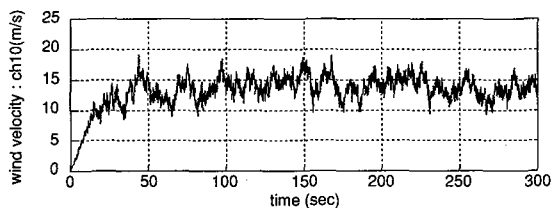


図-16 (a) $k=24$ 発生風速：1号鉄塔近傍

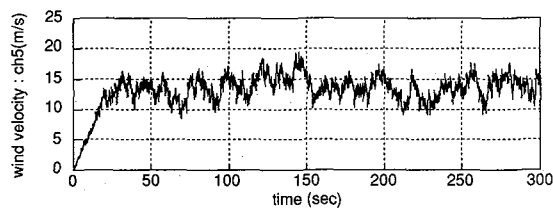


図-16 (b) $k=24$ 発生風速：径間中央

表-6 ディケイファクター k とギャロッピング振幅との関係（ $k=8$ は前章のケース1、評価時間250秒。）

k	径間1/4									径間1/2								
	水平変位(m)			鉛直変位(m)			捻回角(度)			水平変位(m)			鉛直変位(m)			捻回角(度)		
	平均	最大	標準偏差	平均	最大	標準偏差	平均	最大	標準偏差	平均	最大	標準偏差	平均	最大	標準偏差	平均	最大	標準偏差
0	1.45	3.65	0.66	0.52	2.01	0.38	10.7	44.1	7.99	2.00	5.57	0.96	0.68	3.05	0.79	6.68	56.6	15.3
8	1.46	2.58	0.50	0.51	1.87	0.35	10.6	32.5	6.87	2.01	3.93	0.71	0.67	2.57	0.77	6.32	37.6	14.4
24	1.45	2.42	0.46	0.50	1.75	0.33	10.5	30.2	6.65	2.00	3.55	0.67	0.66	2.38	0.75	6.22	37.9	14.2

ロッピング振動の乱れが大きくなる傾向にあるということが出来る。また、本検討と同様、1ループの振動が卓越するギャロッピングの最大変位をシミュレーションによって評価する際には、 k の値を小さく見積ることにより、安全側の解が得られると考えられる。

7. まとめ

本検討では、現状のシミュレーション手法の有効性を確認するため、試験線において観測された4導体送電線のギャロッピング事例を対象として、シミュレーション結果と観測結果とを比較した。

本検討で得られた成果を以下にまとめた。

- ① 径間中央における電線の動揺範囲と振動数、および支持点の張力変動のシミュレーション結果は観測結果と概ね一致し、本検討で用いた手法によって現実的にギャロッピングを模擬し得ることを確認した。
- ② 捻回角のシミュレーション結果には、観測結果を下回る傾向がみられ、空気力、特に空力モーメントの準定常的な近似に関する、より詳細な精度検証の必要性が明らかとなった。
- ③ 変動風速の空間相関が高い場合、ギャロッピング時の電線振動の乱れが大きくなることを、シミュレーションによって確認した。

今後、より多く観測事例を蓄積すると共に、シミュレーションとの比較、検証を行い、シミュレーション手法の精緻化を図りたい。また、非定常空気力¹⁵⁾を考慮したギャロッピングのシミュレーションを実施し、本検討の結果と比較したい。

最後に、観測データの活用に関し多大なご支援を頂いた、東京電力(株)電力技術研究所殿および旭電機(株)技術開発本部の武田浩三氏に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Den Hartog, J. P., "Mechanical Vibrations," McGraw-Hill, 1956
- 2) Nigol, O. and G. J. Clarke, "Conductor Galloping and Control Based on Torsional Mechanism," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, N. Y., 1974, pp. 1-9
- 3) 五藤員雄, 小池東一郎: 架空送電線のギャロッピング振動の数値計算法と一防止方法, 電気学会論文誌 B, 97 巻, 7 号, 1977, pp. 23-30
- 4) 大月晃: 架空送電線のギャロッピングに関する研究,

日本機械学会論文集 (C 集), 57 巻, 536 号, 1991, pp. 100-107

- 5) Yu, P., Y. M. Desai, A. H. Shan and N. Popplewell, "Three Degree-of-Freedom Model for Galloping Part I: Formulation," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 119, No. 12, 1992, pp. 2404-2425
- 6) 例えば, Proc. of Int. Seminar on CABLE DYNAMICS, JAWE, Tokyo, 13 Oct. 1997
- 7) 山口宏樹, 謝旭, 雪野昭寛: 多導体送電線のギャロッピング特性に関する考察, 第15回風工学シンポジウム論文集, 1998, pp. 563-568
- 8) 清水幹夫, 守護雅富, 佐藤順一: 送電線のギャロッピングの幾何学的非線形解析, 構造工学論文集, Vol. 44A, 1998, pp. 951-960
- 9) 清水幹夫: 時間-周波数分析によるギャロッピング時における送電線の応答特性評価, 電力中央研究所研究報告, U98058, 1999
- 10) 大熊武司, 他: 風の乱れを考慮した架空送電線のギャロッピング解析, 電気学会論文誌 B, Vol. 118-B, No. 12, 1998, pp. 1386-1397
- 11) 武田浩三: 最上試験線の紹介, 日本風工学会誌, 第65号, 1995, pp. 51-58
- 12) 清水幹夫, 他: 4導体送電線の動的挙動に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 46A, 2000, pp. 491-500
- 13) 架空送電用電線の機械的特性調査専門委員会: 架空送電用電線の機械的特性, 電気学会技術報告, 第471号, 電気学会, 1993
- 14) Irvine, H. M., and Caughey, T. K., "The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable," Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 341, 1974, pp. 299-315
- 15) 木村吉郎, 他: 大振幅加振時に4導体送電線に作用する非定常空気力の特性, 構造工学論文集, Vol. 46A, 2000, pp. 1055-1062
- 16) 岩谷祥美: 任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション, 日本風工学研究会誌, 第11号, 1982, pp. 5-18
- 17) 塩谷正雄: 強風の性質-構造物の耐風設計に関連して-, 開発社, 1992, pp. 51-96
- 18) 井上学, 他: 非定常空気力を考慮した着氷4導体電線の応答予測と実験結果の比較, 土木学会第55会年次学術講演会概要集, I-B37, 2000
- 19) 田村幸雄: 固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ, 日本風工学会誌, 第65号, 1995, pp. 33-41

(2000年9月14日受付)