

送電線のギャロッピングの幾何学的非線形解析

A GEOMETRIC NONLINEAR ANALYSIS OF TRANSMISSION LINES' GALLOPING

清水幹夫*, 守護雅富**, 佐藤順一***

Mikio SHIMIZU, Masatomi SHUGO and Jyun-ichi SATO

* 工修 助電力中央研究所 構造部 (〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646)

** 工修 北海道電力(株) 総合研究所 電力グループ (〒067-0033 江別市対雁2-1)

*** 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)

In this paper, a numerical analysis method based on finite element method for transmission lines' galloping simulation was proposed and its performance was demonstrated by testing some numerical examples. Quasi-steady aerodynamic forces acting on ice-coated conductors were employed and cables' geometrical nonlinearity were taken into account in the method. A few cases of galloping simulation were performed on double conductor transmission lines which took place in Hokkaido Electric Power Company's supply area, giving standard wind velocity as well as simulated wind fluctuation as an input and aerodynamic characteristics of mock ice-coated conductor's cross section. Further, effect of line-to-line spacers on two-phase double conductors' galloping was investigated by using the method.

Key Words : galloping, transmission line, line-to-line spacer, geometrical nonlinearity, FEM

1. はじめに

強風をはじめ降雨, 降雪, 及び温度変化など, 過酷な自然条件下に置かれる架空送電線には, 低温期に雪あるいは氷が付着することがある。こうした着氷雪のある送電線は, 断面形状が円形でなくなり, 翼のような空力特性を有するため, 風により大振幅の自励振動を生ずる場合のあることが知られている。今日, この振動現象は, 慣例的に送電線のギャロッピングと称されている¹⁾。送電線のギャロッピングは, 混触による短絡事故, 及びスペーサ, 碍子など周辺設備の疲労破壊の原因となり, 今なお多数の事故事例が報告されている。したがって, 現在, ギャロッピングの発生条件の解明, 振幅予測, 対策法の提案が急務となっており, 風洞実験を含めた着氷電線の空力特性の評価^{2), 3)}, 複素固有値解析による発生風速及びモードの評価⁴⁾などが実施されている。

本検討は, ギャロッピング振動のシミュレーション, 及び数値実験による対策法の検証を実施する上で必要な解析手法を提案し, 試算によりその有効性を示したものである。ここでは, これまでに筆者らが実施した, 配電線あるいは送電線-鉄塔連成系の3次元時刻歴応答解析^{5), 6)}に用いた手法を拡張し, 着氷雪のある送電線断面に作用する空気力を準定常的に換算し, 送電線の幾何学的非線形性を考慮したギャロッピングシミュレーションを試みた。試算では, 北海道電力において用いられている, 典型的な2導体送電線1回線1径間を対象とし

て, 既往の風洞実験により得られた模擬着氷電線の空力特性を考慮し, 一定風速及び人工的に発生させた変動風速を入力した上で, ギャロッピングをシミュレートした。本検討では, さらに, 試算に用いた2導体送電線を3相とし, 相間スペーサを設けた場合のシミュレーションを実施し, ギャロッピング時における送電線及び相間スペーサの応答を評価した。相間スペーサは, 現在最も有効なギャロッピング対策工の一つと考えられ, その基幹系送電線路への設置が検討されているが, 設置の効果及び最適な設置位置などに関しては, 未だ解明の余地がある。図-1に相間スペーサの略図を示した。

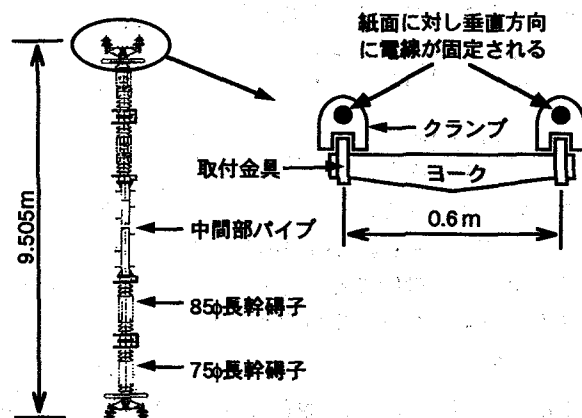


図-1 相間スペーサ

2. 解析手法の概要

2.1 運動方程式

送電線などの架渉線ケーブルは可撓性に富み、その剛性は張力に依存することから、ギャロッピング振動を解析する上で、送電線の幾何学的非線形性を考慮することが必要と考えられる。本検討では、対象構造系のモデル化には文献6) に示したFEM解析手法を採用し、送電線は、軸回りの回転自由度を有するトラス要素で、相間スーサは、はり要素を用いてそれぞれ離散化した。また、相間スーサと送電線とを連結するクランプ部は、図-2に示すようなヒンジとなっており、相間スーサに発生する軸力及び曲げモーメントを精度良く評価するためには、この部分の忠実なモデル化が必要である。本検討では、クランプの離散化については、任意の回転方向の自由度をピン結合とすることのできる、はり要素の解析機能を用いた。離散化された対象構造系の運動方程式は次式で表される。

$$[M]\{\Delta\ddot{u}\} + [C]\{\Delta\dot{u}\} + ([K_L] + [K_G])\{\Delta u\} = \{\Delta p\} \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ ：質量マトリックス、 $[C]$ ：減衰マトリックス、 $[K_L]$ ：線形剛性マトリックス、 $[K_G]$ ：幾何学的剛性マトリックス、 $\{\Delta u\}$ ：変位増分ベクトル、 $\{\Delta p\}$ ：外力増分ベクトルであり、 $\{\dot{\cdot}\}$ は時間微分を表す。左辺の各マトリックスは、離散化されたトラス、あるいは、はりの要素マトリックスを全体座標系に変換し、全要素に対して和をとることにより得られる。なお、幾何学的非線形解析の際に生ずる不平衡力については、復元力項の弾性成分のみから評価した上で、Newton-Raphson法を用いて0に収束させる処理をした⁵⁾。解析手法の特徴を表-1に示した。

2.2 空気力の定式化

本節には、式(1)の右辺の算定法を示す。今、着氷電線の断面を考え、図-3に示すように断面に固定された局所座標系 $x_i (i=1,2,3)$ 、空間に固定された全体座標系 $X_i (i=1,2,3)$ 及び諸量を定義する。ここでは、紙面に対する直交方向を電線軸(x_1)方向とする。相対風速 v_r 、相対風速ベクトルと全体座標系の水平(X_2)方向との間の角 φ は、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-3中の点線のように断面に対して基準線を固定し、 X_2 方向と基準線との間の角、すなわち着氷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、

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

と表される。したがって、単位長さ当たりの送電線に作用する空気力を準定常的に近似すれば、相対風速と迎え

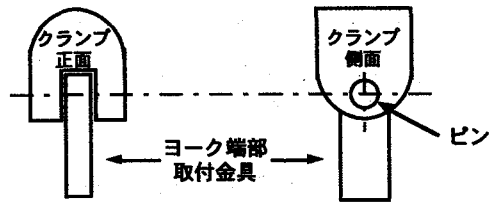


図-2 クランプ部拡大図

表-1 解析手法の特徴

解法	直接積分, Newmark-β法	
使用要素	線形トラス要素(軸回りの回転自由度の考慮可)	
	線形はり要素(任意方向の材端ピン結合可)	
定式化	基本的未知量	変位法
	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	
空気力	風速の時刻歴を準定常的に節点集中荷重に換算	
構造減衰	Rayleigh減衰及び任意のモード減衰の考慮可	

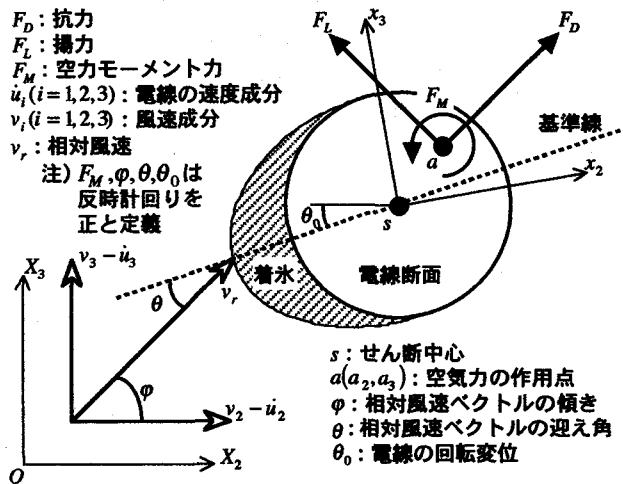


図-3 着氷送電線断面

角を用いて次式で表すことができる。

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

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

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

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)は次式により、全体座標系における外力ベクトルの要素に変換される。

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

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 ：送電線軸回りの空力

モーメント力である。式 (8) は単位長さ当たりの送電線に作用する空気力を表すが、これに対して送電線の受風面積を考慮し、離散化された送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、式 (1) 右辺の外力増分ベクトルの要素が得られる。

3. 試計算：ギャロッピングのシミュレーション解析

本章には、既往の風洞実験により得られた模擬着氷電線の空力特性を考慮し、1 径間の 2 導体送電線 1 相 1 回線のギャロッピングをシミュレートした結果を示した。入力には、径間全体に一樣に分布する一定風速と、人工的に発生させた変動風速とを用いた。また、同一の電線モデルに対して無着氷時、すなわち抗力のみが作用した場合の解析結果を、比較のために示した。

3.1 解析モデルとその固有振動特性

解析モデルの側面図、平面図をそれぞれ図-4 (a), (b) に、諸元を表-2 に示した。解析では、線路方向、線路直交方向、及び鉛直方向を、それぞれ x, y, 及び z 方向と定義した。図に示すように、2 導体送電線は素导体スペースによって連結された 2 条の並列する送電線によって構成されている。素导体スペースは、水平面内の回転が自由なピン結合により送電線に取り付けられているため、モデル化の際にはこれを考慮した。また、2 条の送電線の両端は完全固定の境界条件とした。

解析モデルの振動特性を明らかにするため、重力を作用させる初期の静的釣合解析の後、固有値解析を行った。送電線の剛性は張力に依存するため、送電線の固有振動特性は張力変動を伴う振動に応じて変化するが、ギャロッピング時に励起されるモードを予測する上で、初期釣合状態における固有振動特性を評価しておくことは必要と考えられる。解析の結果得られた固有振動数を表-3 に、固有モードを図-5 に示した。表では、モードの腹の数をループと称している。また、ねじれモードとは、2 条の送電線の鉛直方向モードが互いに逆位相で現れるモードを示す。なお、ここでは、変動風速の主要な周波数帯域を考慮し、1Hz 以下の固有振動数及びモードに着目した。固有値解析にはサブスペース法を用いた。

3.2 解析モデルの空力特性

解析において、着氷電線の空力特性は式 (5) ~ (7) に含まれる空気抵抗係数、すなわち抗力係数、揚力係数、及び空力モーメント係数によって考慮される。本検討では、解析モデルの空力特性を図-6 に示す空気抵抗係数によって与えた。図の値は、プラスチック製の模擬着氷の取り付けられた送電線に対する風洞実験の結果得られたものである⁷⁾。当模擬着氷は、ギャロッピングの発生が確認された実送電線の着氷形状に基づいて作成されたものである。模擬着氷電線断面の形状を図-6 中に併せて示した。北海道電力では、当模擬着氷の取り付けによ

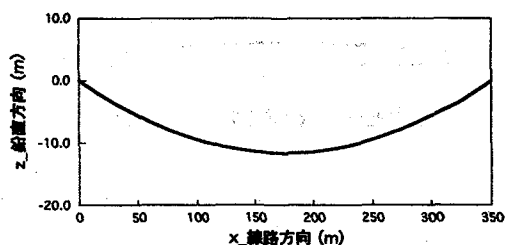


図-4 (a) 解析モデル xz 面図

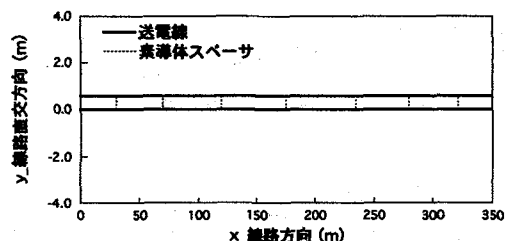


図-4 (b) 解析モデル xy 面図

表-2 解析モデルの諸元

	送電線 (ACSR330)	素导体スペース
使用要素	トラス, 回転自由度考慮*	はり, 一部材端ピン使用
要素分割	1条当たり30要素	1本当たり1要素
ヤング率	$8.19 \times 10^{10} \text{N/m}^2$	$2.11 \times 10^{11} \text{N/m}^2$
ポアソン比	0.3	0.3
断面積	$3.80 \times 10^{-4} \text{m}^2$	$7.07 \times 10^{-4} \text{m}^2$
密度	$4.10 \times 10^3 \text{kg/m}^3$	$7.86 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
架線状況	径間長350m, サグ比3%, 初期張力 $2.00 \times 10^4 \text{N}$	

*注) 断面の極慣性モーメントには実験値 $3.6 \times 10^{-9} \text{m}^4$ を用いた。

表-3 解析モデルの固有振動特性 (振動数の単位: Hz)

次数	振動数	モード形状	次数	振動数	モード形状
1	0.162	水平方向1ループ	8	0.570	鉛直方向3ループ
2	0.321	鉛直方向2ループ	9	0.576	ねじれ3ループ
3	0.323	水平方向2ループ	10	0.640	鉛直方向4ループ
4	0.330	ねじれ2ループ	11	0.641	水平方向4ループ
5	0.424	鉛直疑似1ループ	12	0.655	ねじれ4ループ
6	0.432	ねじれ疑似1ループ	13	0.794	水平方向5ループ
7	0.482	水平方向3ループ	14	0.820	ねじれ5ループ

り、平均風速 10m/s 程度で試験送電線にギャロッピングの発生したことが確認されている。なお、次式、

$$\frac{\partial C_L(\theta)}{\partial \theta} + C_D(\theta) < 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表される Den Hartog によるギャロッピングの発生条件⁸⁾ は、図-6 では $-22^\circ \leq \theta \leq -36^\circ$, $-155^\circ \leq \theta \leq -164^\circ$, $22^\circ \leq \theta \leq 36^\circ$, 及び $155^\circ \leq \theta \leq 164^\circ$ の範囲で満足される。

解析では、図-6 の空気抵抗係数を多項式によって近似し、迎え角の関数として与え、解析ステップ毎に、ステップ開始時の相対風速及び迎え角を用いて空気力を換算した。また、解析では 2 条の電線全体に同様の方向、形状の着氷があるものと仮定した。

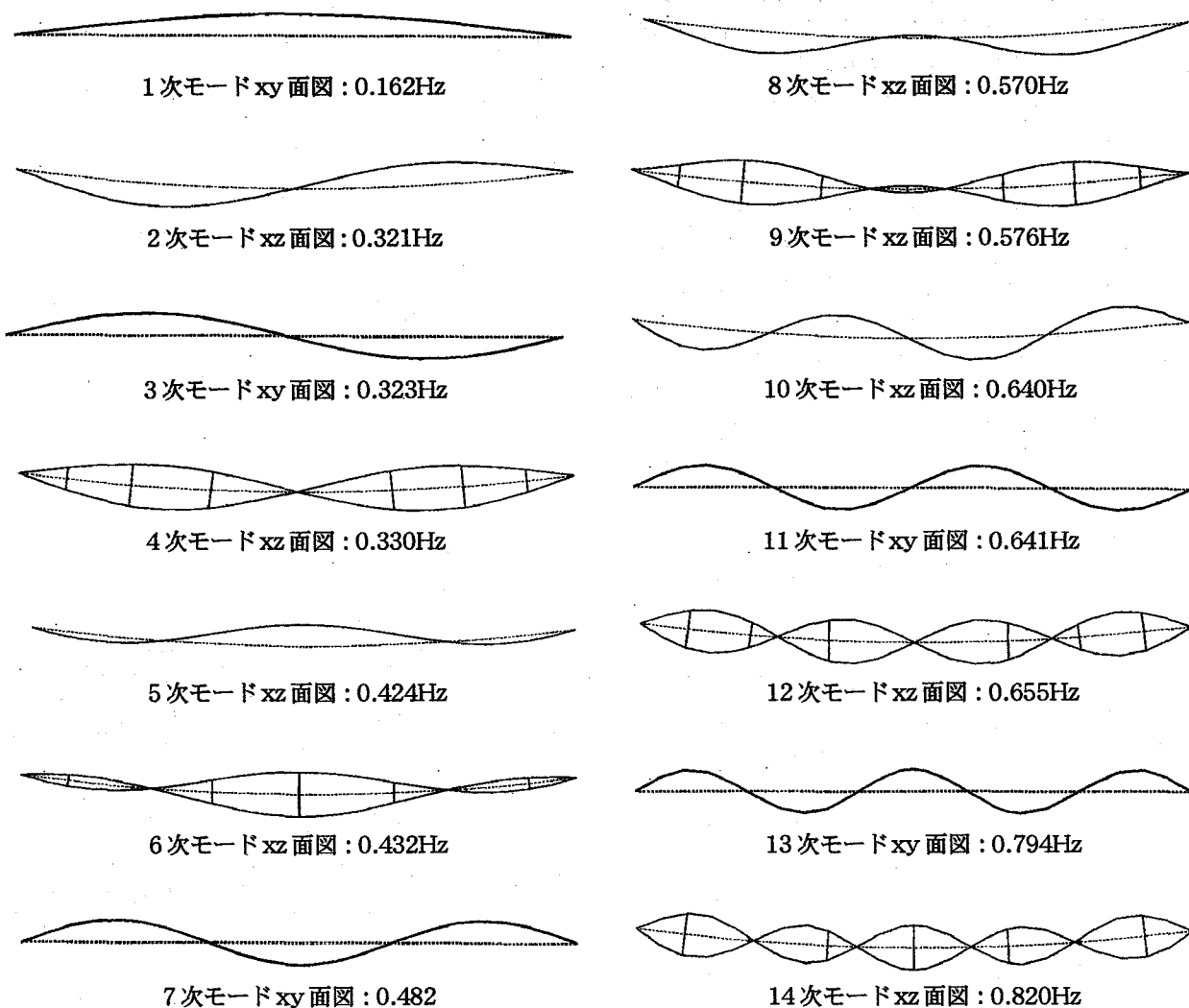


図-5 モード図 (図中の点線は初期釣合状態の位置を示す)

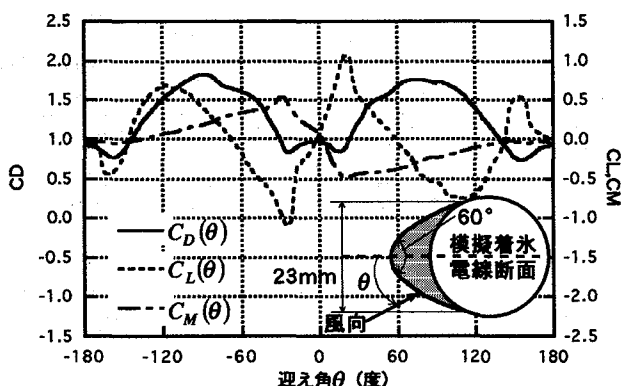


図-6 解析モデルの空力特性

3.3 入力条件

解析時の入力として、径間全体に一様に分布し、y方向に作用する10m/sの一定風速、及び岩谷の方法⁹⁾を用いて発生された変動風速を与えた。一定風速は、ギャロッピングの発生条件を満足する理想的な条件として与えた。これに対し、変動風速は、より現実的な条件下におけるギャロッピングの模擬を目的として与えた。

岩谷の方法の適用に際して必要な変動風速のパワースペクトル、ルートコヒーレンス、及びフェイズは、それぞれ次式を用いて仮定した^{10), 11)}。

$$\frac{S(f)}{\sigma^2} = \frac{0.238 \frac{L}{v_0}}{\left\{ 1 + \left(f \frac{L}{v_0} \right)^2 \right\}^{5/6}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\sqrt{\text{Coh}(\eta, f)} = \exp(-8f\eta/v_0) \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\Phi(\eta, f) = 0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 $S(f)$: 変動風速のパワースペクトル、 f : 周波数、 σ : 乱れの絶対強さ、 $L = \sqrt{3/2}z/0.006z^{0.58}$ 、 v_0 : 平均風速、 $\sqrt{\text{Coh}(\eta, f)}$: 風向と直交して水平方向に η m隔たった2点間のルートコヒーレンス、 $\Phi(\eta, f)$: 同じくフェイズであり、 $v_0=10\text{m/s}$ 、 $\sigma=2\text{m/s}$ 、 $z=40\text{m}$ とした。

変動風速の主流方向はy方向とし、図-7に示すように、径間全体に分布し、35m間隔で変化するチャンネル1 (ch1) ~ 10の10波形を発生させた。これらの風速は、端部より線路方向に35 mまでの範囲にch1、

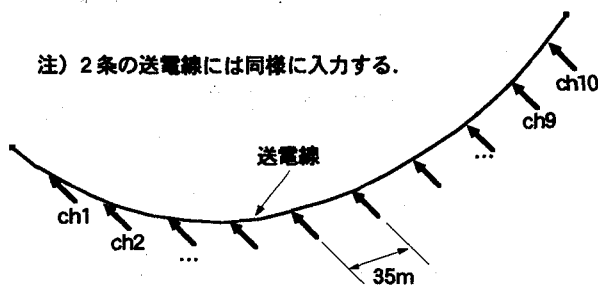


図-7 変動風速の分布

35m から 70m までの範囲に ch2, 以下同様に ch10 まで順に, 2 条の送電線に対して同様に作用させた. 発生された波形の中, ch1 の時刻歴を図-8 (a) に, そのパワースペクトルを式 (10) の計算値と比較して図-8 (b) に示した.

3.4 その他の解析条件

シミュレーション計算は, 重力のみが作用する初期の釣合状態を求める静的解析の後, 0.05 秒刻みで 6000 ステップ行った. 構造減衰は, モード減衰定数が 0.162Hz で 0.8%, 0.321Hz で 1.2% となる Rayleigh 減衰を仮定した. また, 試行計算の結果から, 図-3 の X_2 方向を y 方向, すなわち線路直交方向に一致させた場合の着氷頂部の初期回転角, すなわち初期の釣合状態における θ_0 の値を, 2 条共に -30 度とした.

3.5 解析結果と考察

(1) 一定風速入力時の応答

シミュレーションの結果として, 2 条の送電線の中, 風上側の 1 条を対象として, 径間の 1/4 及び 1/2 に位置する節点の水平及び鉛直方向変位の時刻歴を図-9 (a) ~ (d) に, これら節点の yz 面内の軌跡を図-10 (a), (b) に示した. また, 2 条の送電線の相対変位から求めた 2 導体全体の線路方向軸回りの回転角, すなわちねじれ変位の時刻歴を図-11 (a), (b) に示した. シミュレートされた振動は時刻約 180 秒で定常状態, すなわちリミットサイクルに達しているとみられるため, 時刻歴は時刻 180 秒までを示した. さらに, 上記節点変位及び回転角に対してパワースペクトルを求めた結果を図-12 (a), (b) に示した.

図-9 より, 一定風速の下で鉛直方向の変位振幅は増加し, 外力を受ける水平方向の変位振幅を上回る値に達した後, リミットサイクルに至っていることがわかる. 図-9 (d) に示した径間 1/2 節点の鉛直変位の振幅は, 解析開始後徐々に増加するが, 時刻 90 秒以降わずかに減少し, リミットサイクルに至っている. これに対し, 図-9 (b) の径間 1/4 節点の鉛直変位振幅は, 時刻約 80 秒以降の増加が顕著であり, 約 120 秒でリミットサイクルに至っている. これらのことから, シミュレーションでは, 解析開始後, 径間 1/2 付近の鉛直変位振幅が卓越

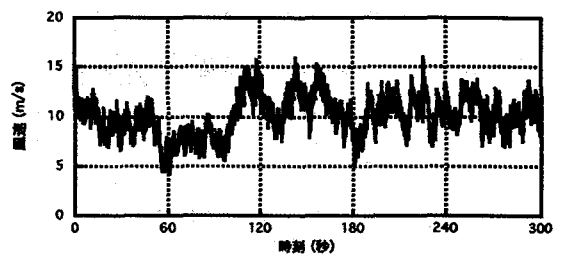


図-8 (a) 変動風速の時刻歴 : ch1

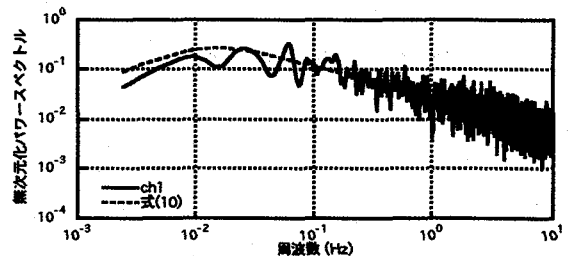


図-8 (b) 変動風速のパワースペクトル : ch1

する振動モードが励起された後, 径間 1/4 付近の鉛直変位振幅が卓越する振動モードが励起されたと考えられる. 実際, 図-12 (a), (b) の径間 1/4, 径間 1/2 の鉛直変位のパワースペクトルには, それぞれ 0.3Hz, 0.4Hz 付近に顕著なピークがみられ, これらは図-5, 表-3 に示した 2 次の鉛直 2 ループ, 5 次の鉛直疑似 1 ループの固有振動数に概ね一致している. また, 2 導体の回転運動については, 図-11 (a), (b) より, 鉛直変位と同様, 振幅が増加した後リミットサイクルに至ることが認められ, 図-12 (a), (b) には, それぞれ図-5, 表-3 の 4 次, 6 次のねじれモードに対応する 0.3Hz, 0.4Hz 付近にピークが存在している.

以上のことより, 本解析では, 2 導体送電線が鉛直方向及びねじれ方向に 2 ループ, 及び疑似 1 ループで自励振動するギャロッピングがシミュレートされたといえる. ここでは, 2 ループのモードは, 疑似 1 ループのモードに続いて励起される結果となった. なお, 図-9 (a), (c) にみられる過渡応答後の水平方向の振動は, 横振れ状態にある電線の鉛直方向の振動に伴って生じたものと考えられる. このことは図-10 (a), (b) の電線軌跡, 及び図-12 (a), (b) で水平, 鉛直両方向変位の卓越周波数が一致していることから確認できる.

(2) 変動風速入力時の応答

図-13 ~ 図-16 に, 前項の一定風速入力の場合と同様, 風上側 1 条の電線の変位時刻歴, yz 面内の軌跡, 回転角の時刻歴, 及び変位と回転角のパワースペクトルを示した. 前項と同様, 時刻歴は鉛直方向変位がリミットサイクルに至る 180 秒までを示した.

鉛直方向には, 図-13 (b), (d) に示すように, 定常的な自励振動が発生している. 水平方向には, 図-13 (a), (c) に示すように, 風速の変動による強制振動, す

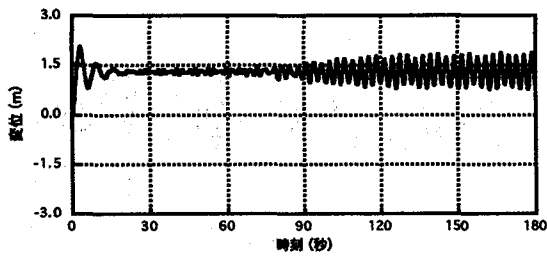


図-9 (a) 径間 1/4 節点水平変位：一定風速入力

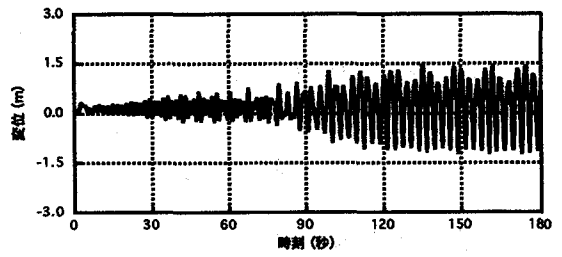


図-9 (b) 径間 1/4 節点鉛直変位：一定風速入力

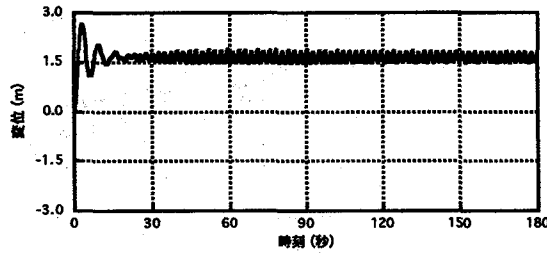


図-9 (c) 径間 1/2 節点水平変位：一定風速入力

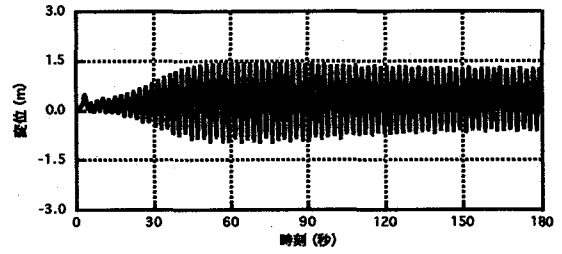


図-9 (d) 径間 1/2 節点鉛直変位：一定風速入力

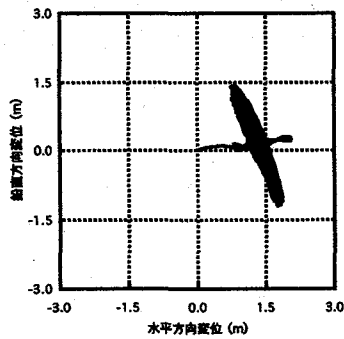


図-10 (a) 径間 1/4 yz 面内軌跡：一定風速入力

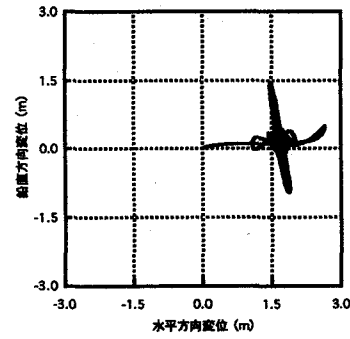


図-10 (b) 径間 1/2 yz 面内軌跡：一定風速入力

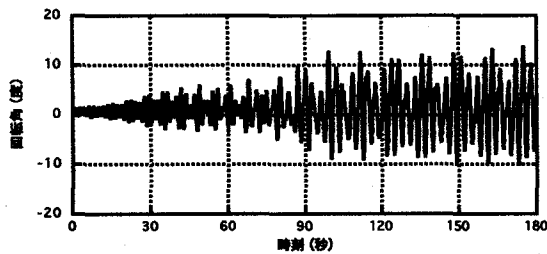


図-11 (a) 径間 1/4 回転角：一定風速入力

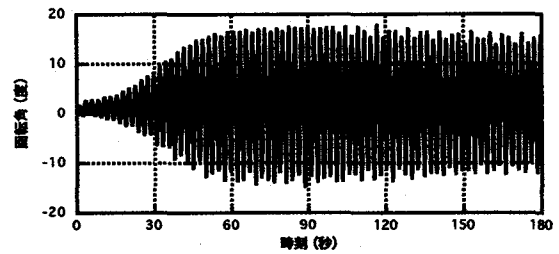


図-11 (b) 径間 1/2 回転角：一定風速入力

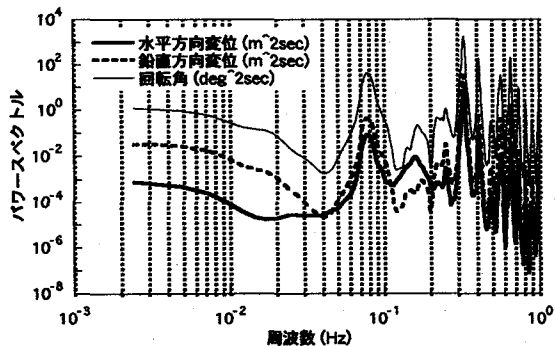


図-12 (a) 径間 1/4 パワースペクトル：一定風速入力

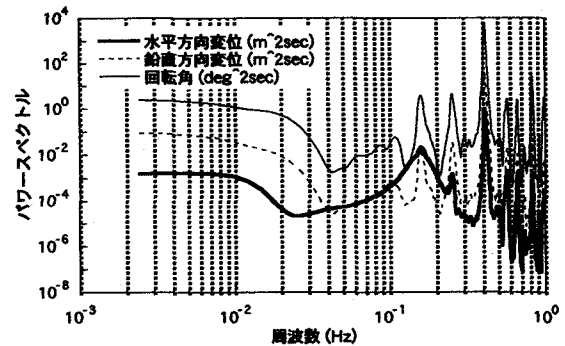


図-12 (b) 径間 1/2 パワースペクトル：一定風速入力

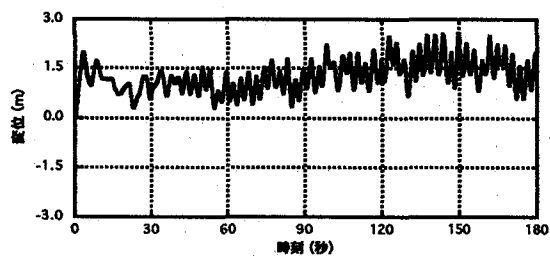


図-13 (a) 径間1/4節点水平変位：変動風速入力

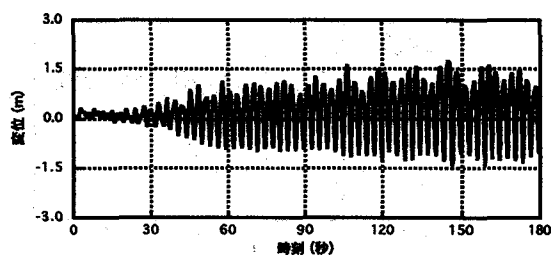


図-13 (b) 径間1/4節点鉛直変位：変動風速入力

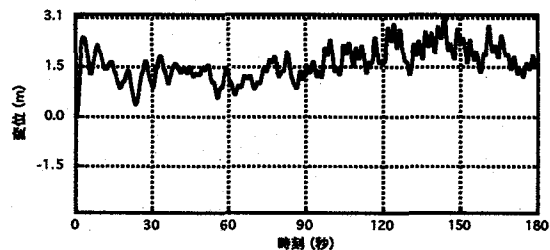


図-13 (c) 径間1/2節点水平変位：変動風速入力

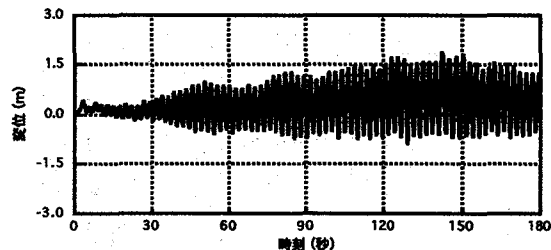


図-13 (d) 径間1/2節点鉛直変位：変動風速入力

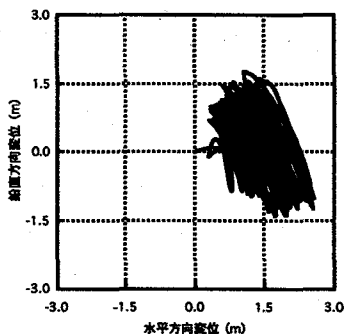


図-14 (a) 径間1/4yz面内軌跡：変動風速入力

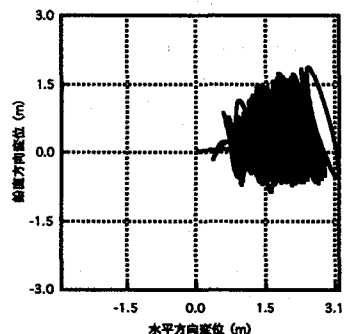


図-14 (b) 径間1/2yz面内軌跡：変動風速入力

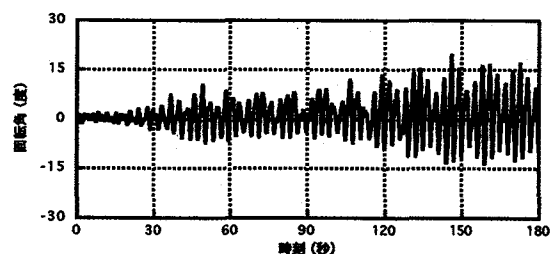


図-15 (a) 径間1/4回転角：変動風速入力

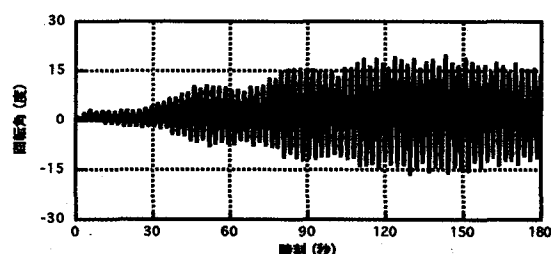


図-15 (b) 径間1/2回転角：変動風速入力

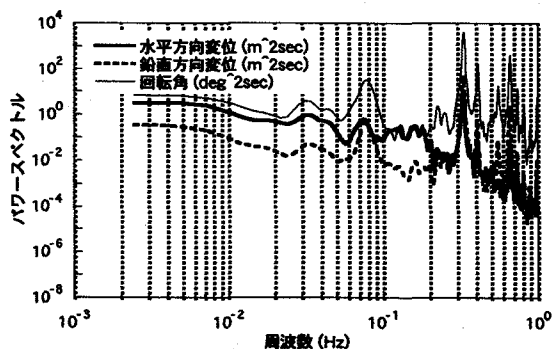


図-16 (a) 径間1/4パワースペクトル：変動風速入力

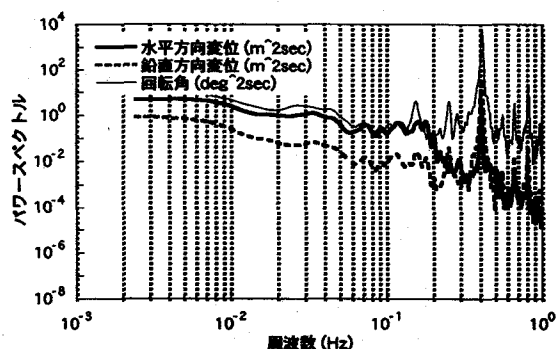


図-16 (b) 径間1/2パワースペクトル：変動風速入力

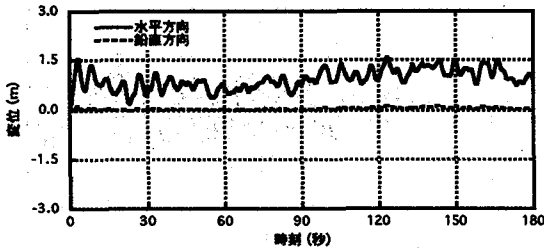


図-17 (a) 径間 1/4 節点変位時刻歴：無着氷

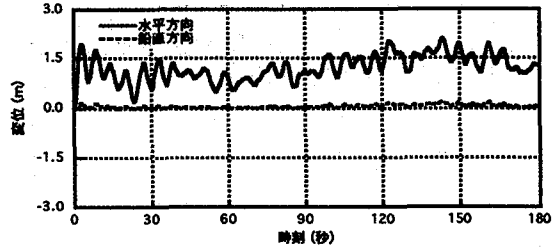


図-17 (b) 径間 1/2 節点変位時刻歴：無着氷

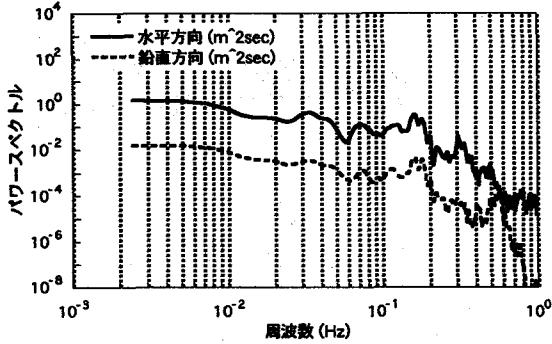


図-18 (a) 径間 1/4 節点変位パワースペクトル：無着氷

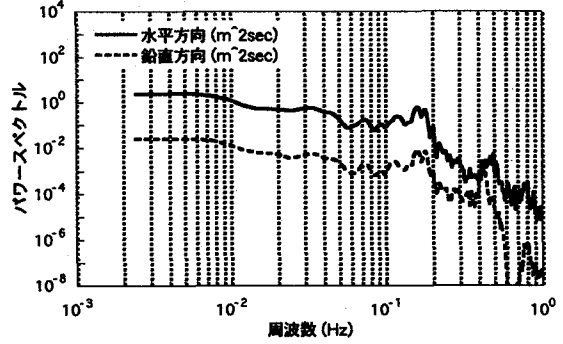


図-18 (b) 径間 1/2 節点変位パワースペクトル：無着氷

なわちパフティングに加え、鉛直方向の振動に伴う定常的な振動がみられる。図-14 (a), (b) の径間 1/4, 径間 1/2 における yz 面内の軌跡には、こうした水平、鉛直両方向の変位が現れている。図-16 (a), (b) の、これら変位のパワースペクトルには、前項の結果と同様、鉛直 2ループ及び鉛直疑似 1ループの固有振動数に対応したピークが存在する。また、線路軸回りの回転方向には、鉛直変位と同様、図-15 (a), (b) が示すように、ねじれ振動が発生しており、図-16 では、その卓越振動数は水平及び鉛直変位と同様、径間 1/4 では約 0.3Hz、径間 1/2 では約 0.4Hz となっている。

以上のように本解析では、水平方向には風速変動によるパフティングがみられるが、鉛直方向及びねじれ方向には 2ループ、疑似 1ループのギャロッピングの発生が確認された。なお、比較のため、同様の変動風速入力の下で、無着氷、すなわち電線を丸断面と考え、 $C_D=1$ (一定)、 $C_L=C_M=0$ と仮定した場合の解析を行った。その結果、径間 1/4、径間 1/2 に位置する節点は、図-17 (a), (b) に示すように、入力のある水平方向にのみパフティング振動し、そのパワースペクトルは、図-18 (a), (b) に示すとおり、固有振動数に対応する顕著なピークのない形となった。このことから、前述の着氷を考慮した解析により、無着氷電線のパフティングと異なる、ギャロッピングをシミュレートし得たことを確認できる。

4. 相間スパーサ付き送電線のギャロッピング

本章では、前章で対象とした 2 導体送電線を 3 相とし、相間スパーサを設けた場合のギャロッピングシミュ

レーションを行った。ここでは、相間スパーサの取り付け位置をパラメトリックに変え、解析の結果得られる電線の最大変位及び張力、相間距離の最小値、相間スパーサに発生する最大軸力及び曲げモーメントを評価した。

4.1 解析モデルと解析条件

図-19 に解析モデルの側面図を示した。このモデルは、前章で用いた 2 導体送電線を、鉛直面内に 3 相並べたものであり、上相と中相、中相と下相の間に各 1 本ずつ、図-1 の相間スパーサを設けた。相間スパーサのモデルの諸元を表-4 に示した。相間スパーサの取り付け位置は、現行の施工法に基づき、図-19 の L1, L2 をそれぞれ径間長の 10/23, 3/23 とした他、前章の結果を考慮し、表-5 に示すように、鉛直 2ループ、鉛直疑似 1ループの固有モードの節あるいは腹として、合計 7 ケースの解析を行った。

解析時の入力は、前章で用いた変動風速とし、上中下 3 相、各 2 条の送電線全てに対し、y 方向より同様に作

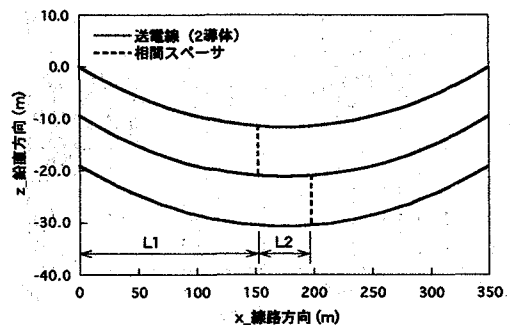


図-19 相間スパーサ付き 3 相解析モデル側面図

表-4 相間スペーサの諸元

	75φ碼子	85φ碼子	中間部 パイプ	ヨーク	クランプ
使用要素	はり、クランプのみ一部材端ピン使用				
要素分割	1部材あたり1要素			3要素	
ヤング率 $\times 10^{11} \text{N/m}^2$	0.735		2.11	0.702	
ポアソン比	0.23		0.30	0.35	
断面積 $\times 10^{-3} \text{m}^2$	4.42	5.68	0.989	1.96	
密度 $\times 10^3 \text{kg/m}^3$	4.18	4.29	7.59	5.94	17.9
要素数 /スペーサ1本	中間部パイプ1要素, クランプ4要素, 75φ碼子, 85φ碼子, ヨーク各2要素.				

表-5 相間スペーサ取り付け位置と解析ケース

ケース No.	相間スペーサ 取り付け位置	取り付け位置の名称 (図はモデル側面. 点線はモード を表す.)
1	L1=径間長 $\times 10/23$ L2=径間長 $\times 3/23$	
2	2a, 2c	
3	2a, 2d	
4	2b, 2d	
5	3a, 3c	
6	3a, 3d	
7	3b, 3d	

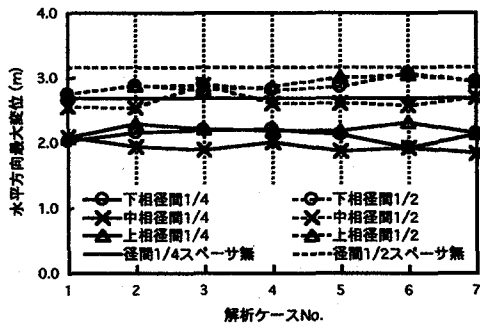


図-20 (a) 水平方向最大変位

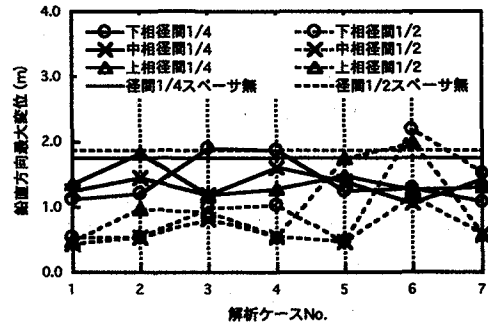


図-20 (b) 鉛直方向最大変位

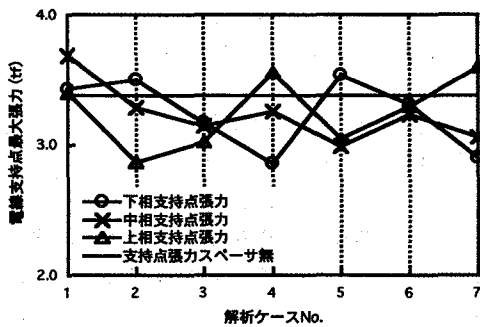


図-20 (c) 電線支持点最大張力

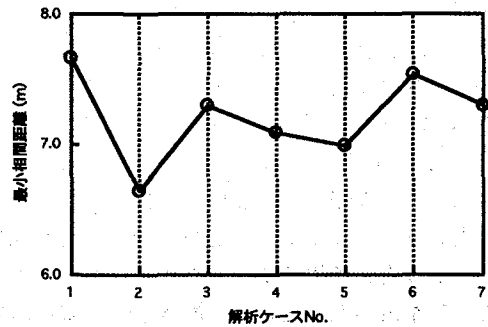


図-20 (d) 最小相間距離

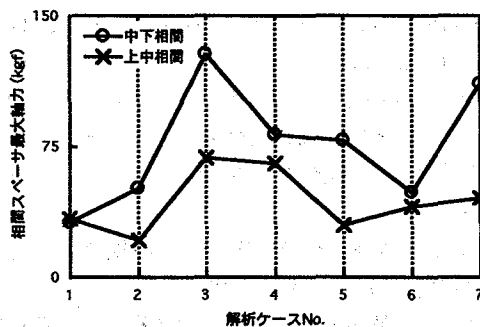


図-20 (e) 相間スペーサ最大軸力

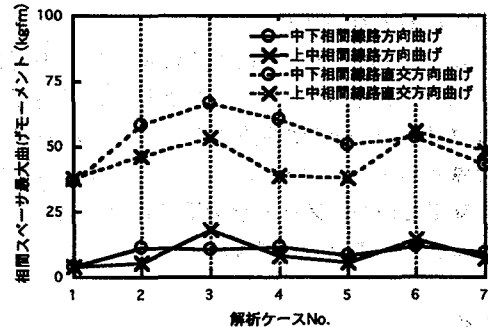


図-20 (f) 相間スペーサ最大曲げモーメント

用させた。計算は0.05秒刻みで6000ステップ行い、全ての送電線に対する着水、減衰その他の解析条件は前章と同様とした。

4.2 解析結果と考察

図-20 (a), (b) に各相の風上側送電線の径間1/4及び1/2に位置する節点変位の最大値を示した。図中には相間スペーサのない場合、すなわち図-13に示した変位の最大値を併せて示した。図-20 (a) より、水平変位の最大値は、径間1/4、径間1/2共にケース間の有為な差はなく、相間スペーサのない場合の最大変位を下回っていることがわかる。図-20 (b) の鉛直方向の最大変位は、ケース1及び7のみ、全相の電線の値が、スペーサのない場合の値を下回る結果となった。

図-20 (c) の電線支持点張力の最大値は、ケース3及び6の値がスペーサのない場合の値を下回り、その他のケースでは、上中下いずれかの相の値がスペーサのない場合の値をわずかに上回る結果となった。

図-20 (d) には最小相間距離、すなわち上相と中相、及び中相と下相との節点間距離の最小値を示した。図より、ケース1の値が最も大きく、他のケースの取り付け位置に比較して、現行施工法の実取り付け位置が、相間距離を確保する上で最適であるといえることができる。

相間スペーサに発生する最大軸力は、図-20 (e) のとおり、中下相間ではケース1が、上中相間ではケース2が最も小さな値を示す結果となった。

図-20 (f) には、相間スペーサに発生する線路方向の曲げモーメント、及び線路直交方向の曲げモーメントの最大値を示した。全ケースの線路方向の曲げモーメントの最大値は、線路直交方向のそれを下回っている。これについては、相間スペーサと電線とを連結するクランプが、図-1、図-2に示すようなピンによってヨーク先端に取り付けられているため、電線から相間スペーサに線路方向の曲げモーメント力が伝達されないことが原因と考えられる。また、各相の支持点高低差がなく、外力がy方向にのみ作用したことから、線路方向の電線振動が小さなものとなったことも一因と考えられる。各方向の曲げモーメントの最大値は、中下及び上中相間のスペーサのいずれについても、ケース1が他のケースと比較して最も小さな値となっている。

以上により、相間スペーサによる電線変位の抑制効果が確認された。また、ギャロッピング時における相間距離の確保、相間スペーサに発生する軸力及び曲げモーメントを考慮する上で、ケース1~7の中、ケース1すなわち現行施工法の相間スペーサの実取り付け位置が最も理想的であるといえることができる。

5. まとめ

本検討では、幾何学的非線形性を考慮した有限要素法の適用により、着水送電線のギャロッピングをシミュ

レートし得ることを示した。また、当手法により、相間スペーサを取り付けた送電線の応答評価が可能であることを示した。

本検討で示した手法は、様々な架線条件を有する送電線路のギャロッピング時における応答評価、及びギャロッピング対策の解析的検証に適用され得るものと期待できる。なお、本検討では典型的な設備形態の送電線を対象とし、仮定した風速に基づく準定常的空気力を入力した。今後、実験、観測結果との比較により手法の精緻化を図ると共に、より現実的な入力、及び種々の架線条件を与えた上でギャロッピングの応答評価を実施する。

謝辞

本検討の実施にあたり多大なご助力を頂いた、北海道電力(株)総合研究所電力グループの麻生照雄氏に深甚なる感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 中村泰治：ギャロッピングと渦励振，日本機械学会論文集(C集)，61巻，585号，1995，pp.1757-1762
- 2) 木村吉郎，田中伸英，藤野陽三，雪野昭寛：着氷4導体送電線の2次元モデルの風洞実験と解析，第14回風工学シンポジウム講演概要集，1996，pp.395-400
- 3) 木村吉郎，田中伸英，藤野陽三，雪野昭寛：着氷4導体送電線に作用する空気力の定式化に関する一検討，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，1997，pp.74-75
- 4) 山口宏樹，謝旭，雪野昭寛：多導体送電線のギャロッピング解析と2, 3の考察，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，1997，pp.146-147
- 5) 清水幹夫，岸野佑次，藤井啓一，佐藤順一：強風時における配電線の混触に関する検討，構造工学論文集，Vol.43A，1997，pp.919-928
- 6) 清水幹夫，佐藤順一：送電鉄塔-架渉線連成系のスリートジャンプの解析，構造工学論文集，Vol.43B，1997，pp.403-413
- 7) 山岡勝，五藤員雄，前沢昌司，樋口紀雄：送配電線のギャロッピング対策に関する研究，北海道電力株式会社技術研究所研究報告，第252号，1978
- 8) Den Hartog, J. P.: Mechanical Vibrations, McGraw-Hill, 1956
- 9) 岩谷祥美：与えられたパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元風速変動のシミュレーションとその精度の検討，日本風工学会誌，第36号，1988，pp.11-26
- 10) 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
- 11) 岡内功・伊藤学・宮田利雄：耐風構造，丸善株式会社，1977，pp.101-224

(1997年9月26日受付)