

4 導体送電線の動的挙動に関する検討

A Study on Dynamic Behavior of Transmission Line with 4 - Bundled Conductors

清水幹夫*, 佐藤順一**, 武田浩三***, 雪野照寛****

Mikio SHIMIZU, Jun-ichi SATO, Kozo TAKEDA and Teruhiro YUKINO

* 博士 (工学) (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)

*** 旭電機 (株) 技術開発本部 (〒225-0012 神奈川県横浜市青葉区あざみ野南 2-11-16)

**** 関西電力 (株) 総合技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王子 3-11-20)

To characterize the dynamic properties and estimate buffeting behaviors of transmission lines with 4 - bundled conductors, full - scale dynamic tests and measurements of wind response as well as finite element analyses were performed on the Mogami Test Line. In the tests, dynamic modes of the line were stimulated by forced excitations or by suddenly releasing the transmission line from initial displacement. The observed data were compared to the theoretical values obtained by eigenvalue analysis and wind response analysis in which geometrical nonlinearity were taken into account. The natural frequencies and modal damping of the line were obtained, and validity of analytical method were shown by good agreement between analytical results and observed data. Further, applicability of an equivalent single conductor model was investigated.

Key Words: trans mission line, 4 bundled conductors, dynamic test, buffeting analysis, finite element method

キーワード: 送電線, 4 導体, 加振実験, 風応答解析, 有限要素法

1. はじめに

電力需要の増加により, 電気事業においては, 電力輸送力の強化策の一環として多導体送電線の架線, 運用を進めている。ここに多導体とは, 2~8本の複数の素導体を束ねた電線であり, それぞれ2導体(複導体)~8導体と呼ばれている。

こうした多導体送電線については, 振動特性が1本のみの送電線(単導体)のそれと異なり, 強風時のバフエッティング, あるいは着氷雪した場合の自動振動, すなわちギャロッピングなどの異常振動が発生した場合, 深刻な事故停電の原因になり得ることが知られている。このため従来, 特にギャロッピングに関しては, 多導体送電線を対象とした種々の解析的研究が行われてきた^{1), 2), 3)}。しかし, 固有振動数や減衰など, 多導体送電線の基本的な振動特性については, より多くの実験, 観測データの蓄積が必要であり, 風応答に関しては, 観測結果と解析結果との比較例は少ないと思われる。

したがって本検討では, 4導体の実規模試験送電線を対象として, 強制加振実験によりその固有振動数および減衰定数を評価すると共に, 強風時のバフエッティング

の観測結果とシミュレーション結果とを比較し, シミュレーション手法の妥当性を検証した。シミュレーションには, 幾何学的非線形性を考慮した時刻歴の3次元有限要素解析手法を用い, 実験, 観測結果としては, 最上試験線(山形県立川町, 以下, 試験線と称する)⁴⁾で得られたデータを用いた。また, 4導体を等価な単導体とみなした簡易解析モデルを提案し, その妥当性についても検討した。

2. 対象電線とそのモデル化

試験線の一部を図1に示した。検討の対象とする送電線は, 図の1号鉄塔と2号鉄塔との間に架線された1径間1回線である。試験線には, 図に示すとおり各種センサーが配置されており, 気象をはじめ人工加振時および強風作用時の応答観測が可能となっている。

本検討では, 上記送電線をモデル化して固有値解析および風応答解析を実施したが, 解析には文献1), 2)と同様, 幾何学的非線形性を考慮した有限要素法を用いた。対象となる送電線は, トラス, はり, あるいはSaint-Venantのねじり要素を用いて離散化し, その運動方程

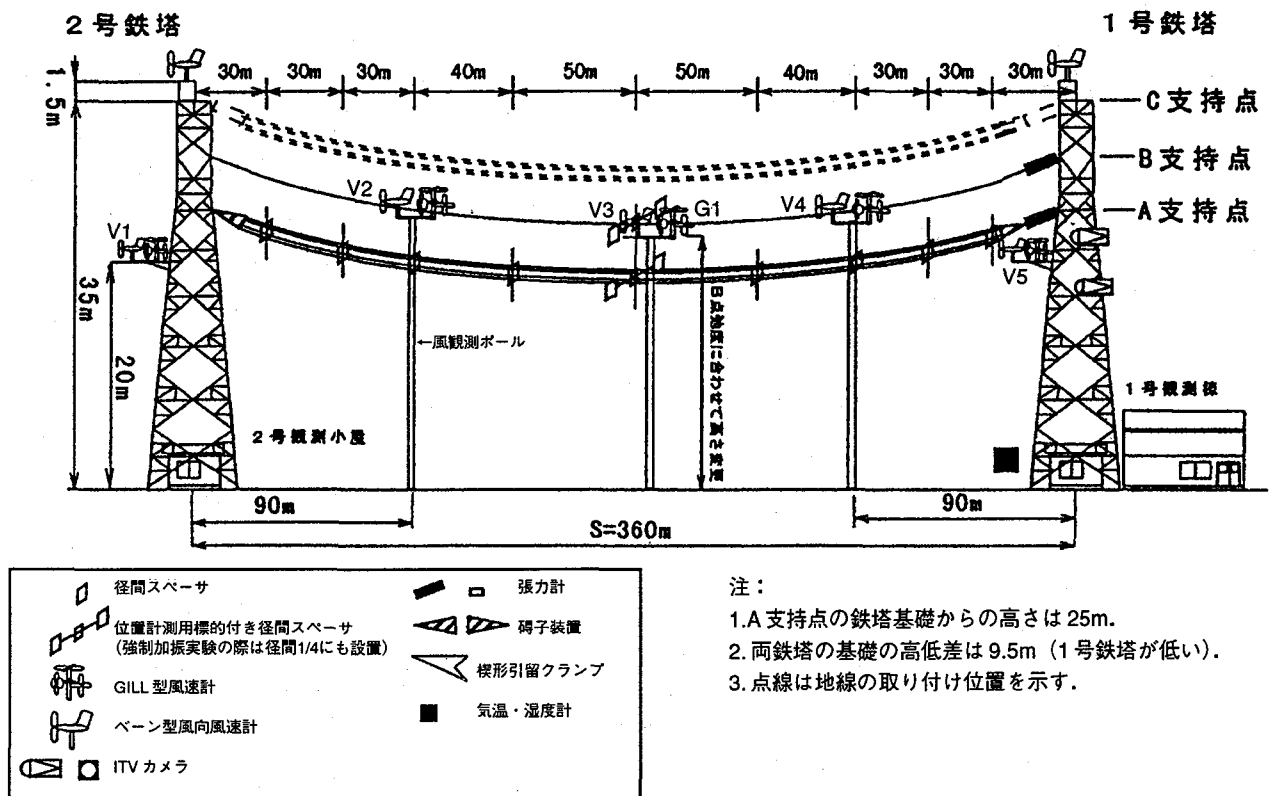


図1 試験線概略図

式は次式のようにマトリックス表示される。

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

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、 $\{u\}$ ：変位ベクトル、 $\{p\}$ ：外力ベクトルであり、 $\dot{}$ は時間微分を表す。解析モデルの見取図を図2に、その諸元を表1に示した。

図2に示すように、解析モデルは4条の電線（素导体）が径間スベサによって束ねられた系であり、電線両端の支持点近傍には、2連の碍子連を含む耐張型の碍子装置を実物と同様に設けた。なお、実際の径間スベサは正方形のフレームとなっているが、解析モデルではX字形に簡略化した。また、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。

3. 強制加振実験と固有値解析結果

対象電線の固有振動数および減衰定数を明らかにするため、試験線において強制加振実験を行った。実験では、ウインチによる水平方向の引張り・引離し後、および鉛直あるいは捻回方向の人力加振後の自由振動を観測し、4次までの固有振動数およびモード減衰定数を求めた。ここに捻回方向とは、電線軸回りに4导体全体が回転する方向を示す。

鉛直および捻回方向の固有振動は、ロープを介した人力加振により比較的容易に励起され、加振後の減衰自由

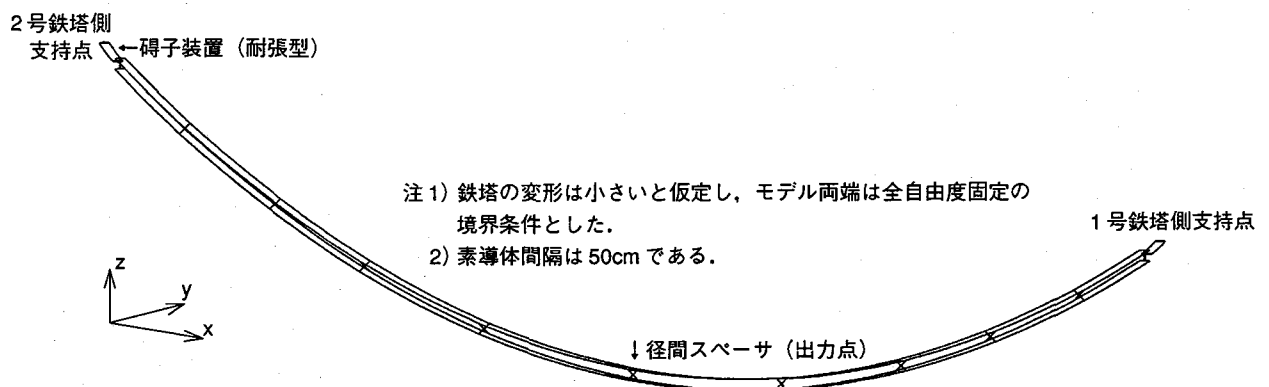


図2 解析モデル見取図

表1 解析モデルの諸元

	電線部(LP-TACSR810)	碍子部	碍子装置金具	径間スペース
径間長 (m)	356	-	-	-
サグ (m)	10.973	-	-	-
1号鉄塔側初期張力 (kgf/条)	4209	-	-	-
ヤング率 (kgf/m ²)	7.230×10 ⁹	7.230×10 ¹² 注1		
ねじり剛性 (kgfm ² /条)	60 注2	380.7注3	1.893×10 ⁷ 注1	
断面積 (m ² /条)	8.929×10 ⁻⁴		6.362×10 ⁻³	
代表径 (m/条)	3.72×10 ⁻²		9.00×10 ⁻²	
密度 (kg/m ³)	3.092×10 ³	0.0 注4		
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/条	5要素/連	1要素/部材	4要素/個

注1) 碍子部、碍子装置金具、径間スペースの伸びおよび曲げ変形は小さいと考えられるため、剛体と仮定した。

2) 電線に対する要素試験結果⁹⁾を参照した。

3) 後述の捻回方向の固有振動数を基に仮定した。

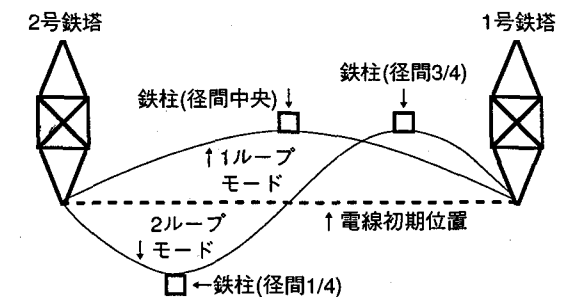
4) 各要素の密度は0とし、実際の碍子装置、径間スペースの重量と整合するよう、節点に集中質量を付加した。

振動を観測することにより、これらの方向の固有振動数およびモード減衰を評価することが可能となる。これに対し、水平方向の固有振動を人力で励起させることは困難であり、強制加振した例は少ないと思われる。したがって本検討では、図3に示すように、径間中央、1/4および3/4の位置に鉄柱を設け、これを支点とした引張り-引離しにより、水平方向に自由振動を与えた。図に示すように、鉄柱には滑車に取り付けられ、電線はワイヤーロープを介してウインチにより引張られる。引離しは破断器により瞬時に行われ、径間中央の鉄柱を支点とすれば1ループの、径間1/4および3/4の位置の鉄柱を支点とすれば2ループのモードが励起される。ここに、ループとはモードの腹の数を示す。振動時の電線変位は、径間中央あるいは径間1/4に位置する径間スペースに取り付けられた標的反射板を、ITVカメラで撮影することによって測定した。

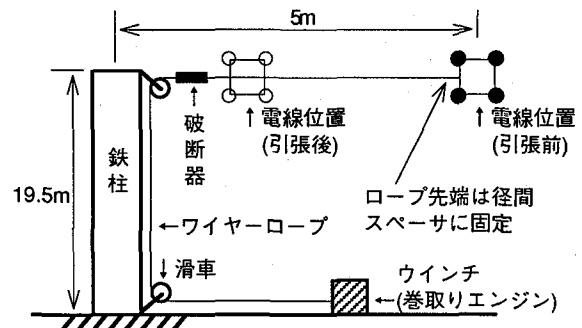
以上の方法で行われた実験ケースの一覧を表2に、実験の結果得られた電線の減衰自由振動波形およびそのパワースペクトル密度分布を1次から4次まで順に図4に示した。加振は各モードに対し3回ずつ行ったが、図にはその中の1回の結果を示した。また、各モードに対し、上記パワースペクトルのピーク振動数より求めた固有振動数と、減衰自由振動波形より求めたモード減衰定数を、固有値解析結果と併せて表3に示した。

モード減衰定数は、各モードの減衰自由振動波形の正のピーク位置を、図4中に示すように指数関数で近似し、その指数をパワースペクトルのピーク位置に対応する円振動数で除することにより求めた。近似の範囲は、水平および鉛直変位については0~90秒、捻回変位については0~60秒とした。

表3には、各モードに対して、それぞれ3回の加振ごとに求めた固有振動数およびモード減衰定数の平均値を示した。また、固有値解析は、自重のみが作用する初期の静的釣合解析の後、サブスペース法を用いて行った。



(a) 試験線平面図



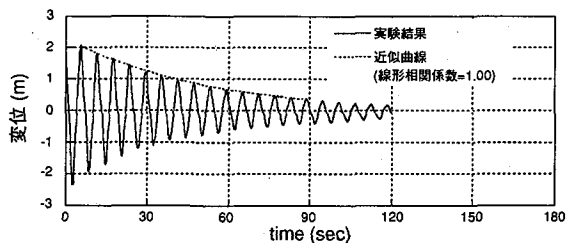
(b) 鉄柱近傍拡大図

図3 水平方向の加振方法

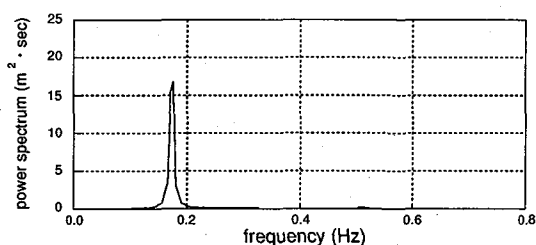
表2 実験ケース一覧

励起させるモード	载荷(加振)位置	加振方法
水平方向1ループ	径間中央	ウインチによる
水平方向2ループ	径間1/4および3/4	引張り-引離し
鉛直方向2ループ	径間1/4	ロープを介した
捻回方向1ループ	径間中央	人力加振

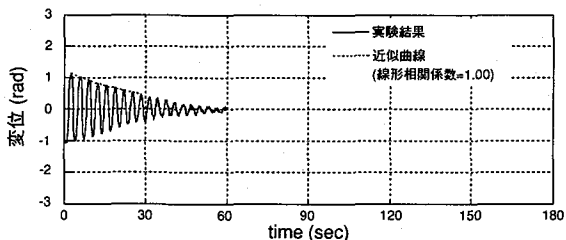
図4より、各波形は、いずれも単一の振動数で振動していることがわかり、このことはパワースペクトルにみられる卓越したピークからも確認できる。したがって、加振実験では目的とするモードが励起されたと考えられる。表3では、水平方向の最低次(1次)に比較して、鉛直方向の最低次(3次)および水平方向2ループ(4次)



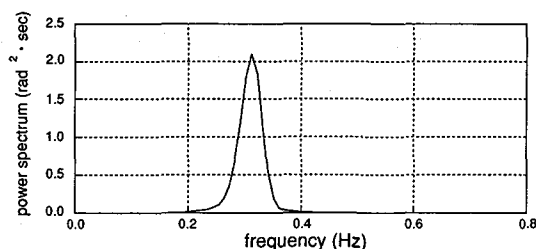
1 次（水平方向 1 ループ）モード自由振動波形



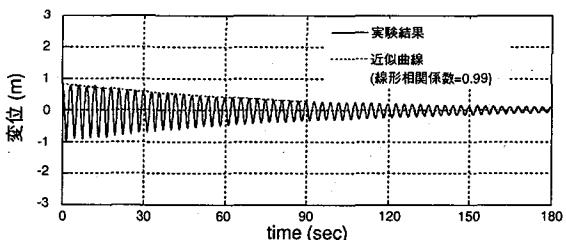
1 次モード変位パワースペクトル



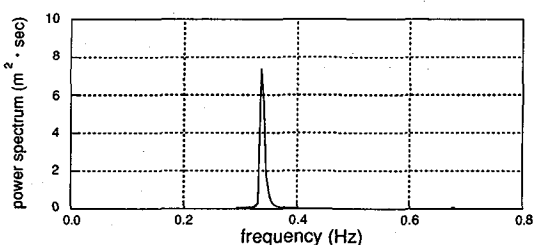
2 次（捻回方向 1 ループ）モード自由振動波形



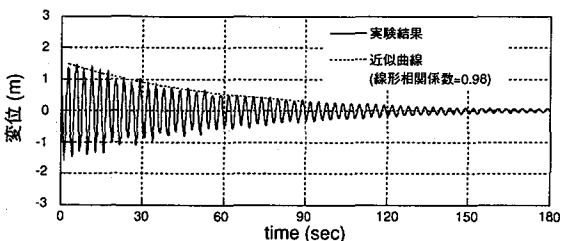
2 次モード変位パワースペクトル



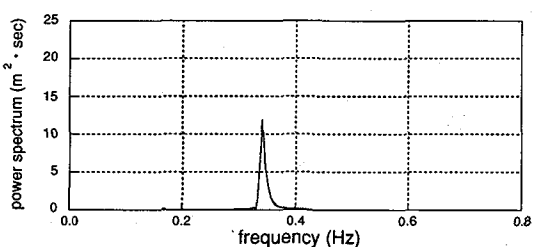
3 次（鉛直方向 2 ループ）モード自由振動波形



3 次モード変位パワースペクトル



4 次（水平方向 2 ループ）モード自由振動波形



4 次モード変位パワースペクトル

図 4 強制加振実験結果

の固有振動数が約 2 倍の値となっている。この傾向は、対象電線のサグおよび支持点高低差が小さいことを考慮すれば、既往の研究で明らかにされたケーブル固有の動特性⁹⁾を示すものといえる。また、固有振動数は実験結果と固有値解析結果との間で概ね一致しており、対象電線のモデル化が妥当であるといえる。なお、3 次と 4 次の固有振動数は近接しており、これらは同一の振動数に複数のモードが存在する、モード遷移領域近傍にあると考えられる^{7), 8)}。

表 3 に示したモード減衰定数については、1 次の水平方向 1 ループモードが最大値を、3 次の鉛直方向 2 ループモードが最小値を示した。また、2 ループの逆対称モードに比較して、1 ループの対称モードの値が大きい結果となった。4 導体は、4 条の送電線が多数のヒンジ

表 3 固有振動数とモード減衰定数

次数	モード形状	固有振動数(Hz)		モード減衰定数(%)*
		実験結果	解析結果	
1	水平方向 1 ループ	0.176	0.1687	2.00
2	捻回方向 1 ループ	0.313	0.3222	1.55
3	鉛直方向 2 ループ	0.340	0.3351	0.53
4	水平方向 2 ループ	0.342	0.3358	1.00

注*) 減衰評価振幅は、自由振動波形の 0～90 秒 (1, 3, 4 次) あるいは 0～30 秒 (2 次) に現れる正のピーク値。

を含む碍子装置および径間スパーサによって束ねられたものであるが、1 条ごとの送電線は、複数の撚られた素線の集合として構成されている。したがって、4 導体の減衰特性には、こうした素線間あるいはヒンジにおける摩擦やすべりが深く関与していると考えられる。

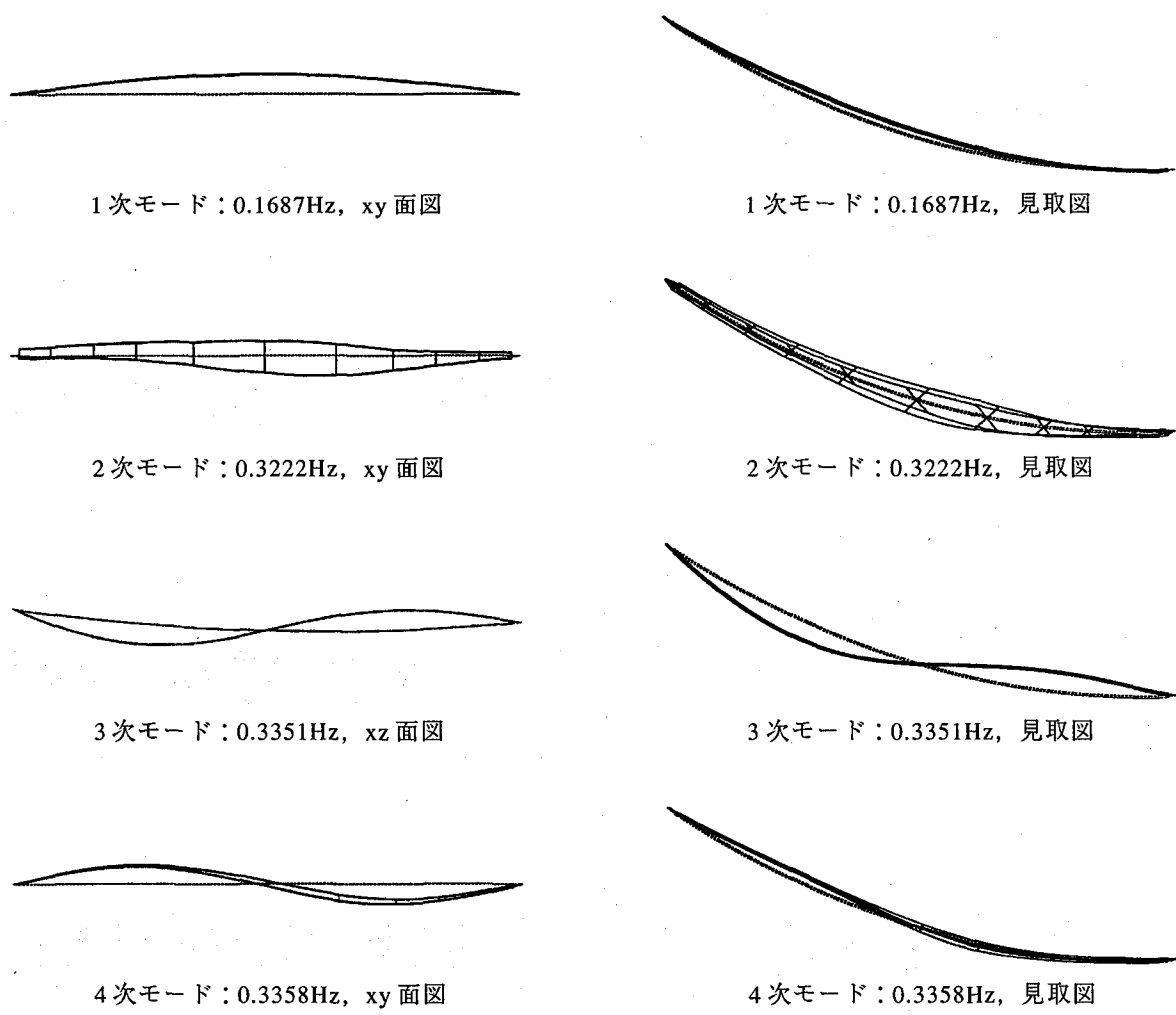


図5 固有値解析結果（点線は初期釣合状態の位置を示す）

図5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が、これらは実験時に励起された振動モードとの間で固有振動数の整合がとれており、このことからモデル化および実験時に励起されたモード形状の妥当性を確認することができる。

4. 風応答解析

試験線では、風向、風速および電線応答の同時観測が可能となっており、風応答解析の入力および結果の比較対象となり得るデータが得られている。本章では、試験線の風速記録に基づく入力の下でバフettingシミュレーションを実施し、結果を試験線の径間中央に設置した標的の変位記録と比較した。

4.1 入力条件

風応答解析を行う際、図2の解析モデルの各節点に作用する風力を入力として与える必要がある。本節ではまず、V1～V5の位置で得られた風速記録に基づき、岩谷の方法⁹⁾を用いて径間全体に分布する風速を発生させる

手順を示した。岩谷の方法によれば、変動風速のパワースペクトルと空間相関を与えることにより、多次元の変動風速を発生させることが可能とされている。なお、風速を風力に変換する方法については次節に示した。

V1～V5で得られた変動風速時刻歴の線路直交方向成分を図6に示した。これらは、1998年10月11日に、電線変位と同時に5分間計測されたデータであり、吹上げは図1中のG1のGill型風速計の記録から、無視できる程小さいことが確認されている。岩谷の方法では、発生させる変動風速のパワースペクトル、ルートコヒーレンスおよびフェイズを振動数の関数で与える必要があるが、本検討では図6の各風速のパワースペクトルをアンサンブル平均し、これを次式、

$$\frac{S(f)}{\sigma^2} = \frac{1}{0.115 \left\{ 1 + \left(\frac{f}{0.065} \right)^2 \right\}^{0.95}} \quad \dots\dots(2)$$

を用いて近似して与えた。ここに、 $S(f)$ ：変動風速のパワースペクトル、 f ：振動数、 σ ：変動風速の標準偏差である。パワースペクトルの観測値および近似値を図7に

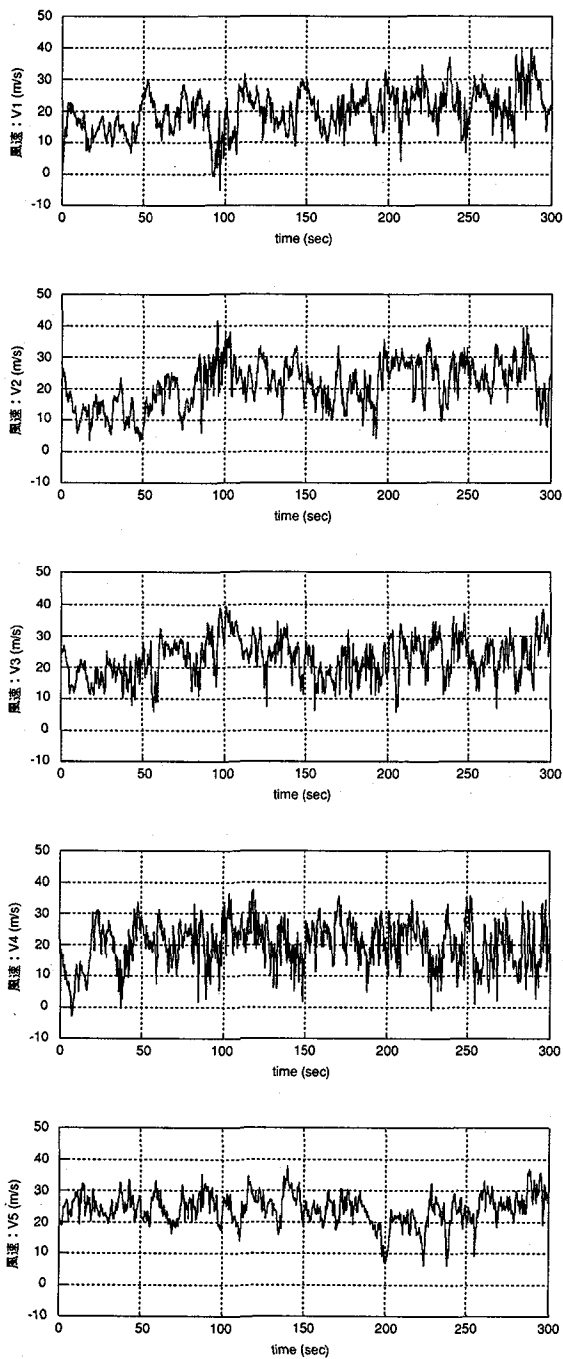


図6 変動風速時刻歴：観測結果

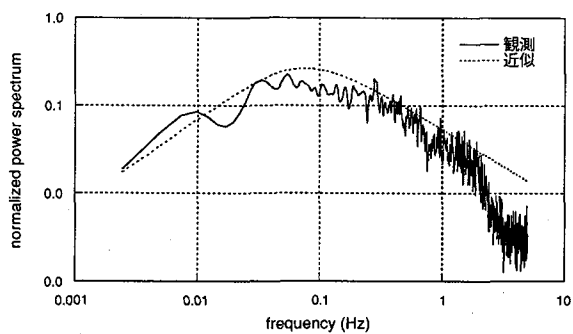


図7 変動風速パワースペクトル

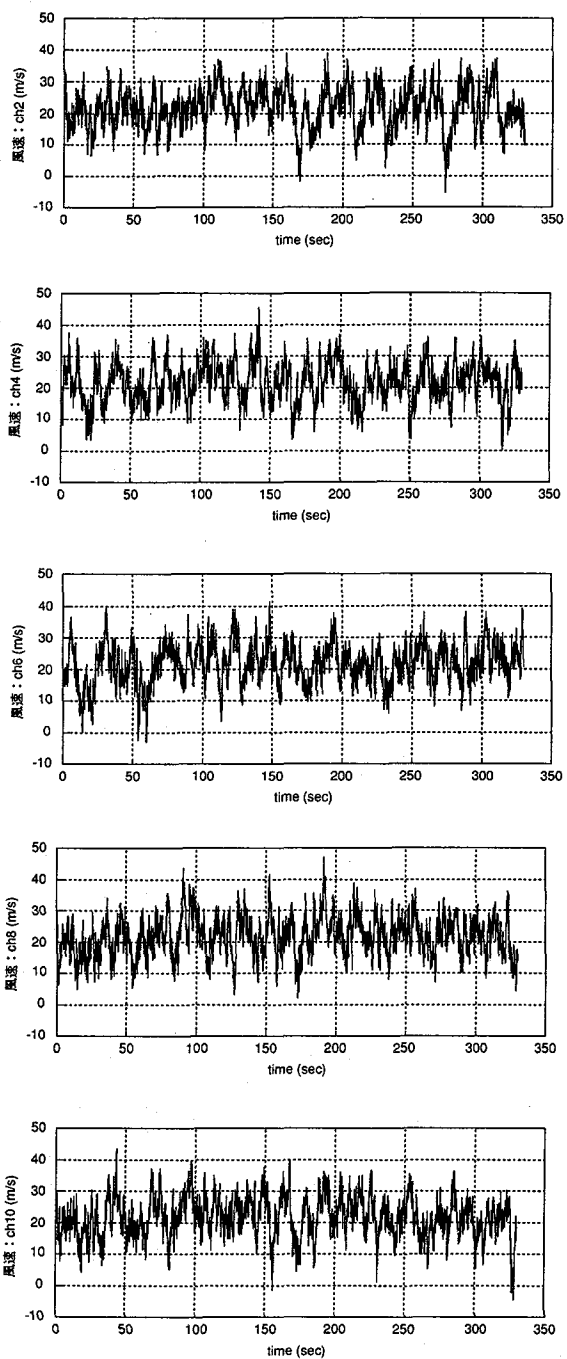


図8 発生させた変動風速時刻歴波形

示した。また、ルートコヒーレンスについては、風向風速計の設置位置の間隔が広く、信頼性の高いデータが得られなかったことから、ディケイファクターを8と仮定した次式¹⁰⁾、

$$\sqrt{Coh(\eta, f)} = \exp(-8f\eta/U) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与え、フェイズは0と仮定した。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、 U ：平均風速である。

風速はch1～ch10の10波形（次元）発生させた。これらのうち、代表としてch2、4、6、8および10の波形

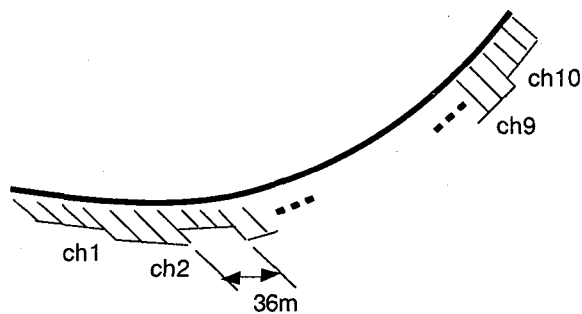


図9 変動風速の分布載荷

を図8に示した。発生させた風速は、図9に示すように、電線に対し直交かつ水平方向から作用するものとし、36m 間隔で ch を変えて分布させた。発生計算は、時間刻み 0.05 秒、自己回帰式の項数を 200、離散フーリエ逆変換の項数を 500 とし、合計 7600 ステップ行った。このうち入力として、初期の 1000 ステップを捨てた 6600 ステップを用いた。白色雑音には正規乱数を発生させた。また、式 (2)、(3) に含まれる平均風速と標準偏差には、V1～V5 の記録をアンサンブル平均した値、

$$U=21.8\text{m/s,}$$

$$\sigma=6.4\text{m/s}$$

を代入した。

4.2 電線の空力特性

本検討の対象とした4導体送電線は、各条の電線表面に溝が設けられた「低風圧型電線」と呼ばれる新種の電線であり、その空気抵抗係数は、電線に作用する風速の増加に応じて減少する。このため、強風時における電線の横振れ量を、標準電線に比較して低減でき、鉄塔に作用する電線張力の線路直交方向成分を抑えられることから、設計に有利とされている。図10に、電線1条の空力特性を示した。図中の実験値は風洞実験（東京大学で実施）で得られた結果であり、風応答解析の際は、これを最小二乗近似して相対風速の関数としたうえで、次式により風速を空気力に変換した。

$$p(t)=\frac{1}{2}\rho_a C_D(v_r)v_r^2 d \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$v_r=v(t)-\dot{u}(t) \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

ここに、 $p(t)$ ：単位長さの電線1条に作用する空気力、 ρ_a ：空気密度、 $C_D(v_r)$ ：図10の抗力係数、 v_r ：相対風速、 d ：電線の代表径、 $v(t)$ ：風速、 $\dot{u}(t)$ ：電線速度である。 $p(t)$ は、増分解析の各ステップごとに、ステップ開始時において与えられる $v(t)$ と、その時点における解析結果 $\dot{u}(t)$ を基に更新され、節点集中荷重に換算後、式(1)の右辺に代入した。なお、実際の4導体では、風下側の2条の電線には風上側の2条の後流が作用するが、本検討では

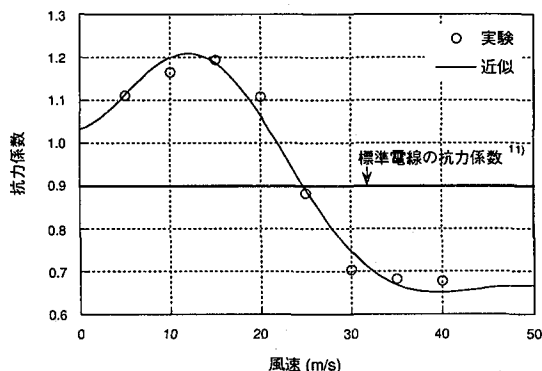


図10 電線1条の空力特性

この影響を考慮するため、風上側、風下側それぞれ2条の電線に作用する空気力の比を、経験値に基づき1:0.8と仮定した。

4.3 その他の解析条件

減衰定数は、横振れ主体の応答解析を行うことを考慮し、表3中の1次と4次のモード減衰定数を用いた Rayleigh 減衰を仮定した。数値積分には Newmark の β 法を採用し、0.05 秒刻みで 6600 ステップの時刻歴応答解析を行った。結果の評価の際には、過渡応答の含まれる初期の 600 ステップは捨てることとした。

また、風応答解析については、前述の固有値解析の場合と同様に、電線の自重のみが作用する静的解析を先ず行い、無風時における初期釣合状態を再現した後、実施した。

4.4 解析および観測結果と考察

解析と観測の結果として、電線の径間中央に位置する径間スパーサ中央の節点あるいは標的の水平変位と横振れ角、および電線支持点近傍の張力の時刻歴を図11に示した。ここに横振れ角とは、図12に示すように、サグを半径として電線の軌跡が描く円弧の中心角をいう。また、図11の各時刻歴に対して求めた最大値、平均値および標準偏差を図13に示した。

解析時に入力した変動風速は、観測された風速の周波数特性を反映しているが、その波形は前述の通り正規乱数を発生させて得ていることから、解析と観測との間で、図11の波形を直接比較することは不可能である。しかし、両波形の平均値、振幅および振動数は、変位、横振れ角、張力共に定性的に概ね一致していることがわかる。このことは、図13に定量的に示されている。

図11、13より、変位および横振れ角は、解析結果が観測結果をわずかに上回っているが、この原因として、解析では張力の平均値が観測時のそれを下回り、系の剛性が低く見積もられたことが考えられる。初期釣合状態における解析モデルの張力は、表1に示した値となっており、架線時における試験線の初期張力と整合が保たれ

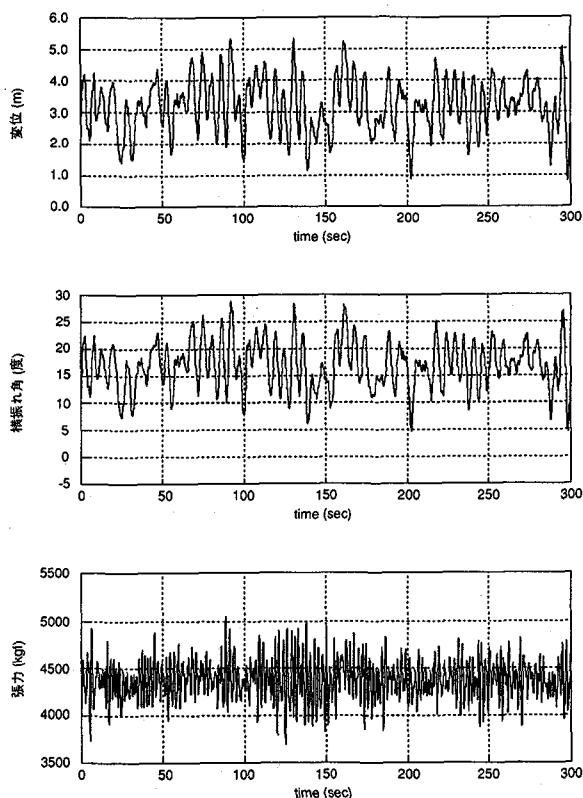


図 11 (a) 解析結果時刻歴

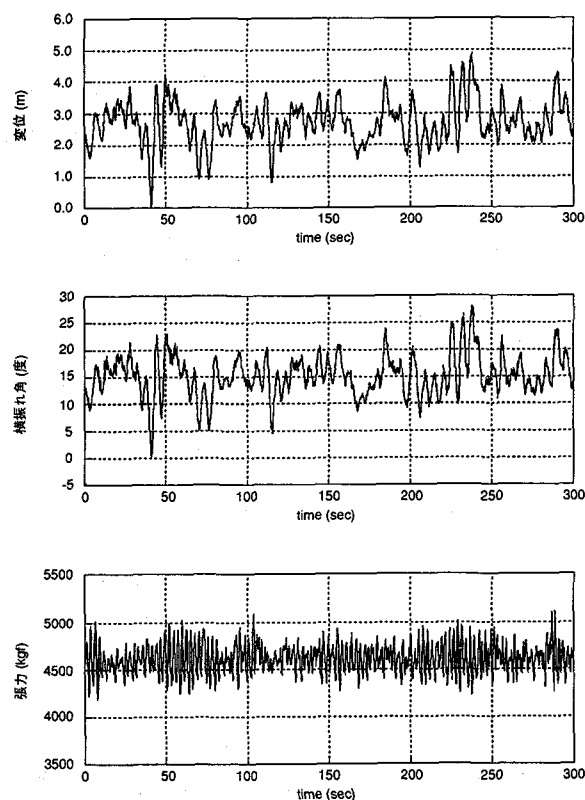


図 11 (b) 観測結果時刻歴

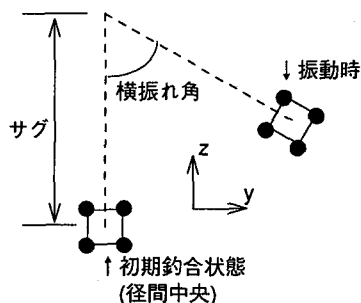


図 12 4 導体送電線断面と横振れ角

ている。しかし、試験線の張力は主に温度変化により数 100kgf 変化する場合があり、本観測はこの場合に相当したといえることができる。

図 11 では、解析、観測共に、変位と横振れ角の波形が互いに類似したものとなっているが、このことから、鉛直変位が小さい、横振れ主体のバフetting振動が再現、観測されたといえることができる。また、張力変動の振動数は、変位のそれに比較して高いことがわかるが、これについては、張力変動を伴う振動モードが、横振れの振動モードに比較してより高次にあることが原因と考えられる。

解析、観測された応答の振動数特性をより詳細に調べるために、図 11 の変位および張力の時刻歴に対して無次元化パワースペクトルを求めた結果を図 14 に示した。

図より、変位には 0.2Hz 弱に、張力には約 0.4Hz 付近

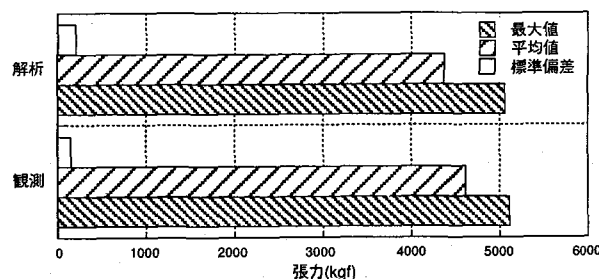
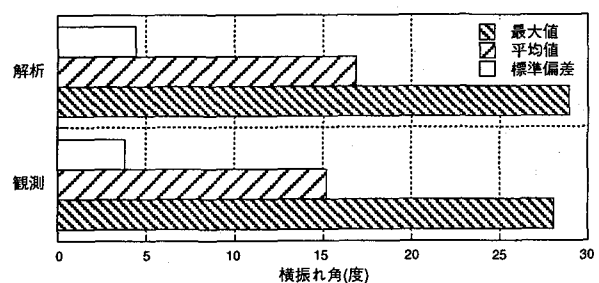
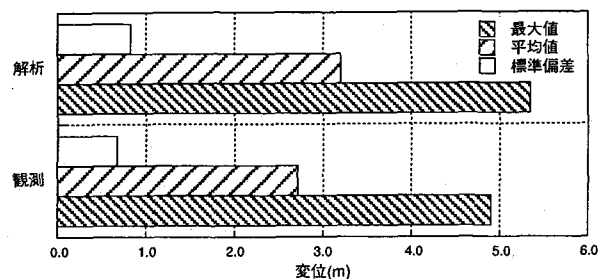


図 13 解析・観測結果統計値

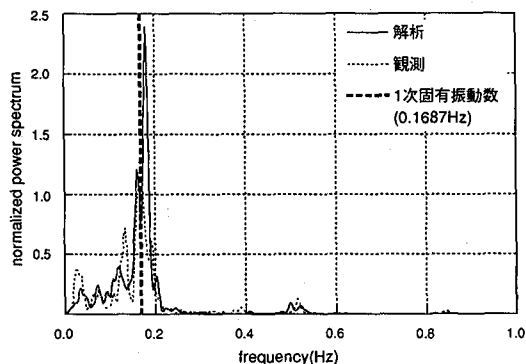


図 14 (a) 変位のパワースペクトル

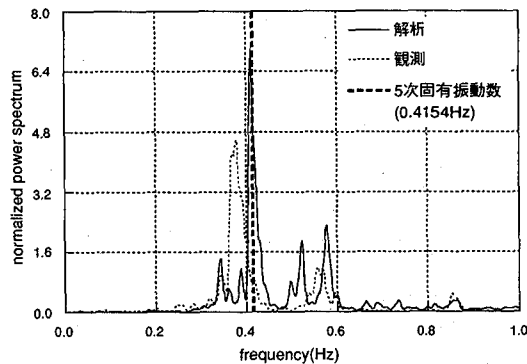


図 14 (b) 張力のパワースペクトル

に顕著なピークがみられる。表 3 の結果から、変位のピークは 1 次モードが励起されたものと考えられる。0.4Hz に近い固有振動数は 4 次までには存在しないが、さらに固有値を求めた結果、図 15 に示すように、5 次に 0.4154Hz の鉛直方向 3 ループモードが存在することが明らかになった。鉛直方向に奇数ループの対称モードが励起された場合、張力変動を伴うことが知られており⁹⁾、図 14 (b) の 0.4Hz 付近のピークは、図 15 のモードに対応すると考えられる。図 14 (a), (b) には、それぞれ 1 次、5 次の固有振動数を併せて示した。なお、各パワースペクトルは、解析と観測の間で、顕著なピークに対応する振動数が概ね一致しているといえる。

以上のことから、本検討で解析、観測された 4 導体送電線の振動は 1 次モードの卓越した横振れ主体のバフettingであり、張力変動は 5 次モードの励起によって生じたことが明らかになった。また、初期張力の大きさの違いによる一部不一致がみられたが、解析結果と観測結果は概ね一致し、4 導体送電線の風応答解析に対する有限要素法の適用性が示された。

したがって次章では、より強風時の電線挙動を、図 2 のモデルおよびこれを簡略化した等価単導体モデルを用いた風応答解析により評価した。

5. 等価単導体モデルと強風時における風応答解析

5.1 解析ケース

本検討で対象とした 4 導体送電線は、図 10 に示すような、高風速領域で空気抵抗が低下する低風圧型電線である。この電線については、現時点において、試験線での観測を中心として風圧低減効果を検証中であるが、抗力係数が標準電線のそれを下回る高風速域の観測データは十分に得られていない。したがって今後、低風圧電線の効果を検証するうえで、強風時の観測データを蓄積すると共に、解析において図 10 の空力特性が反映された結果が得られることを確認しておくことが重要である。

本章では、前章で与えた解析条件のうち、平均風速を増加させた解析を実施し、標準電線を想定した解析結果



図 15 5 次モード：0.4154Hz, xz 面図

と比較した。その際、4 条分の電線の断面積を有する等価単導体モデルを用いた解析を併せて行い、その有効性について検討した。なお、標準電線を想定した解析では、解析モデルは共通とし、式 (4) に含まれる $C_D(v)$ を一定値 0.9 とした。本章で実施した解析ケースの一覧を表 4 に示した。

表 4 解析ケース一覧

風速	解析モデル	空力特性	解析ケース名称*
4 章で発生させた風速の平均風速を 35m/s に変更	図 2	低風圧	低-4
		標準	標-4
	等価単導体	低風圧	低-単
		標準	標-単

* 空力特性 (低風圧 or 標準) - 解析モデル (4 導体 or 単導体) の順で定めた。

5.2 等価単導体モデル

多導体電線を等価単導体に置き換えた解析例として、山口ら³⁾ のギャロッピング解析を挙げることができるが、ここではバフetting解析を目的としており、また、前章に示した通り、横振れ主体の現象を扱うことから、電線軸回りの回転方向の自由度、すなわち捻回方向の振動モードは無視できると考えられる。したがって、離散化には電線 4 条分の断面積を有するトラス要素を用いることとした。表 5 に等価単導体モデルの諸元を、表 6 にその固有値解析結果を示した。等価単導体では、碍子装置の存在は無視し、径間スペースは節点集中質量としたが、水平および鉛直方向の固有振動数は 4 導体モデルのそれと概ね一致しており、4 導体の振動特性を反映したモデル化がなされたといえる。

5.3 解析結果

入力、モデル化および空力特性の変更を除いては、4.3 と同様の解析条件で、表 4 の 4 ケースの解析を実施

表5 等価単導体モデルの諸元

径間長 (m)	356
サグ (m)	10.973
1号鉄塔側初期張力 (kgf) 注1	16836
ヤング率 (kgf/m ²)	7.230×10^9
断面積 (m ²) 注1	35.716×10^{-4}
代表径 (m) 注2	13.392×10^{-2}
密度 (kg/m ³)	3.092×10^3
使用要素	トラス
要素分割数	36要素

注1) 4 導体1条の4倍の値とした。

2) 風上側と風下側の空気力の比を1:0.8としたことによる。

表6 等価単導体の固有値解析結果

次数	モード形状	固有振動数(Hz)
1	水平方向1ループ	0.1674
2	鉛直方向2ループ	0.3320
3	水平方向2ループ	0.3332
4	鉛直方向3ループ	0.4286

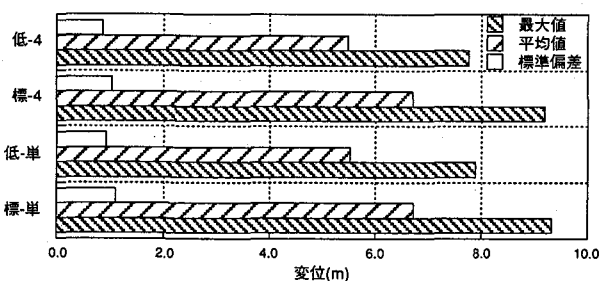


図16 解析結果：変位統計量

した。解析結果としては、径間中央の水平方向変位を出力し、図16にその統計値を示した。

図より、低風圧電線の変位は、最大値、平均値、標準偏差は共に、標準電線の値をそれぞれ下回り、図10の空力特性を反映した解析がなされたことを確認できる。また、等価単導体モデルの結果は、図2のモデルの結果とほぼ一致しており、本検討で用いたモデルの簡略化法は、多導体の風応答解析の際に有効であるということが出来る。なお、等価単導体モデルを用いることにより、計算時間は約1/9に短縮された。

6. あとがき

本検討では、4 導体送電線を対象として、実規模試験線における強制加振実験および風応答観測を行い、その固有振動特性および強風時の挙動の評価を行った。また、幾何学的非線形性を考慮した有限要素法解析モデルを用いた固有値解析およびパフエッティングシミュレーションを実施して、解を実験、観測結果と比較した。その結果、4 導体送電線の固有振動数、モード減衰定数が

明らかになると共に、解と実験、観測結果との良い一致から、有限要素法解析モデルの妥当性および風応答解析法の適用性が確認された。さらに、パフエッティングシミュレーションにおける等価単導体法の有効性、低風圧電線の風圧低減効果を確認した。

今後、試験線における観測結果を蓄積し、碍子装置および径間スペーサが減衰に及ぼす影響をはじめ、多導体送電線の動特性の評価をさらに進めると共に、風応答解析技術の精緻化を図りたい。また、本検討で用いた等価単導体モデルは電線軸回りの回転自由度を無視したが、これを考慮してギャロッピング解析に適用したい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) Yamaguti, H., Xie, X. and Yukino, T., Galloping of overhead transmission lines with bundled multiple - conductors, Wind Engineering into 21st Century, ISBN, 1999, pp. 615-622
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) West, H. H., Geschwinder, L. F., and Suhoski, J. E., "Natural Vibration of Suspension Cables," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.101, No.ST11, Proc. Paper 11712, 1975, pp. 2277-2291
- 8) Henghold, W. M., Russell, J. J., and Morgan, J. D., III, "Free Vibrations of Cable in Three Dimensions," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.103, No.ST5, Proc. Paper 12954, 1977, pp. 1127-1136
- 9) 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
- 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) 電気書院: 送電用支持物設計標準 JEC-127-1979, 1979

(1999年9月17日受付)