九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

人力起振機による送電線・鉄塔連成系の振動試験

本村，禎浩
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻博士後期課程

前田，潤滋
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

石田，伸幸
日本鉄塔工業株式会社

森，智治
九州電力株式会社

他

https://doi.org/10.15017/19062

出版情報：都市・建築学研究. 8, pp.69-78, 2005-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第8号，2005年7月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.8, pp. 69 ~ 78, July. 2005

人力起振機による送電線・鉄塔連成系の振動試験

Coupled Vibration Test of a Transmission Tower using a Manpower Exciter

本村禎浩*，前田潤滋**，石田伸幸***，森　智治****，海老原修二***，森本康幸**
Sadahiro MOTOMURA*, Junji MAEDA**, Nobuyuki ISIDA***,
Tomoharu MORI****, Shuji EBIHARA*** and Yasuyuki MORIMOTO**

This paper describes unique ideas and devices to accurately measure cable tension of ultra high voltage transmission line. The authors developed a manpower exciter named "YUSURU," which is characterized by light-weight, non-power, and application of bicycle mechanism. In a vibration test, the exciter was used to swing a transmission tower. A sensitive tension meter with the special specification was also employed to measure the cable tension. Based on the data obtained in the test, a numerical analysis was made into the dynamic properties of the transmission tower and line. It was revealed that the Nonlinear analysis result was nearly coincided with the vibration test result.

Keywords : *Transmission tower, Manpower exciter, Vibration of coupling mode, Tension of transmission line, Nonlinear analysis*
送電鉄塔，人力起振機，連成振動，電線張力，非線形解析

1．はじめに

九州における送電用鉄塔の設計にあたっては，台風時の風荷重で設計荷重が決まることが多く，強風時の送電線の挙動は，送電用鉄塔の耐力に大きく影響を与える．強風時の送電線の挙動は，非常に複雑であり，送電線－鉄塔連成系の振動特性を高精度に把握するには，実規模の振動試験が欠かせない．送電線や鉄塔の振動試験では，電動起振機の使用[例えば1)~3)]があるものの，通常数人が鉄塔に登り，体を揺すって行う人力加振による場合[4)5)]が多い．しかしながら加振力の大きさや加振周波数の精度および安定した振幅での継続加振などに大きな難点があり，加振後の自由振動データのみの取得に止まることが多い．電動機に頼らず，周波数安定性やある程度の加振力を有しながら可搬性の高い小型起振機は多くの面で利点が考えられるが，実用的に開発された例は見当たらない．

筆者は，送電線－鉄塔連成系の構造特性や振動特性の検証を行うことを目的に，自転車機構を利用した軽量小型の無電源反転同期型（アンバランスマス型[6)]）起振機「YUSURU」を開発し，実送電鉄塔の振動試験を行った．

一方，既往の送電線－鉄塔連成系の解析[7)8)]では，幾何学的非線形性を考慮して算定した静的釣合位置からの変動分に対しては線形と見なし，モード解析や周波数応答解析を行ってきたが，より精密な検証を行うためには，変動変位に対する非線形性の影響を検討する必要がある．

本報告では，人力起振機「YUSURU」の特徴を紹介し，これを用いた実規模送電鉄塔の振動試験から送電線張力の動特性試験結果を報告するとともに，非線形性を考慮した送電線－鉄塔連成系モデルの調和外力に対する時刻歴応答の比較検証を行い，電線部の幾何学的非線形性の影響について考察する．

2．試験設備

2.1 人力起振機「YUSURU」

起振機「YUSURU」には自転車ペダル駆動方式を持つ反転同期型[6)]起振機で，24段階のギヤ比を調整により加振周波数を 6Hzまで調整し，偏心ウエイトを取り替

*　都市共生デザイン専攻博士後期課程
**　都市・建築学部門
***　日本鉄塔工業株式会社
****　九州電力株式会社

えることで最大加振力約2kNを発生できる．

「YUSURU」は総重量で150～200kgであるが，最大20数kgの部品に分割でき，人力での可搬性を有し，これを送電鉄塔上部に設置することで鉄塔本体と送電線を加振する．「YUSURU」の外観を写真１に，加振力と回転周波数の仕様曲線を図１に示す．図中のW1は質量1.6kg，W2は2.6kg，W3は4.6kg，W4は10.6kg，W5は42.2kgのウエイト装着時の加振力である．

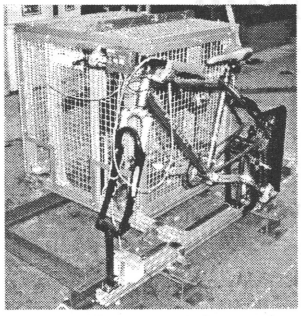


写真１「YUSURU」

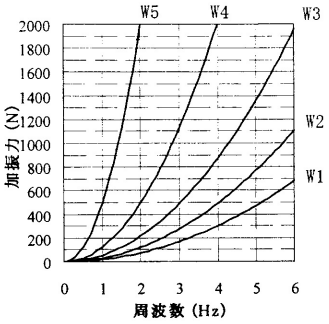


図１ 加振性能曲線

2.2 試験鉄塔と送電線路の形態

加振試験を実施した鉄塔は220kV仕様の山形鋼鉄塔で，塔高は35.1m（標高271m）である．両径間の隣接鉄塔（以下，若番と老番）とは試験鉄塔を挟んで水平角度約3°でほぼ南北に並んでいる．隣接鉄塔との距離は647mと501mで，塔高は34.0mと30.8mで，送電線はそれぞれ12/647と27/501の鉛直勾配を持つ．3基の鉄塔とも電線の懸架方式は耐張型で，電線はACSR410単導体，地線はGSW90を用いた．また無風時の電線張力は約26kN，地線張力は約12kNである．図２に試験鉄塔および隣接鉄塔（老番，若番）のモデル図を，また写真２に試験鉄塔を示す．

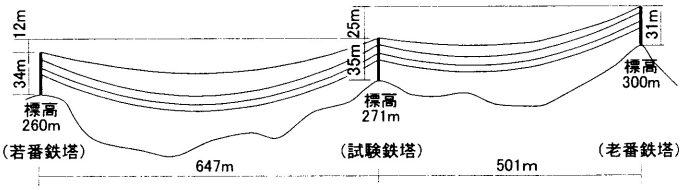


図２ 鉄塔電線モデル図

2.3 計測装置

送電線張力の変動分を計測するために，半導体ゲージを利用した高感度張力計を鉄塔の腕金と碍子装置の間に取り付けて計測した．ただし半導体ゲージは温度により零点シフトが生じるため，歪みゲージと半導体ゲージとで同時に歪みを計測し補正した．また加速度計を鉄塔の上部，中間部，下部位置の主柱材へ，線路方向及び線路直角方向に計6個取り付けて，塔体の振動を計測した．取り付けた各計測センサーの試験鉄塔上の位置を図３に示す．写真３は高感度電線張力計の取り付け状況である．なお，今回は一定周期の加振を主目的とし，鉄塔への加振力そのものの計測はしていないが，地上試験では仕様通りの起振力を確認している．

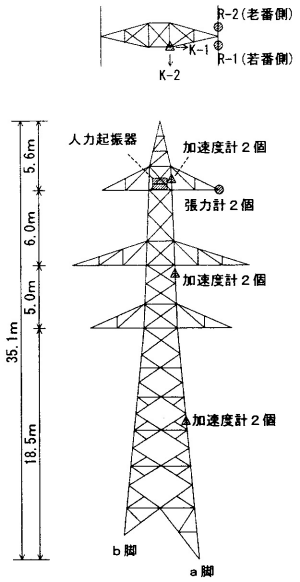


図３ センサー取り付け位置

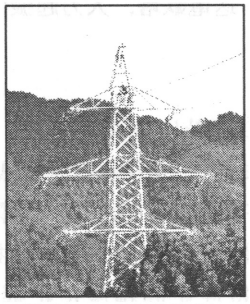


写真２ 試験鉄塔

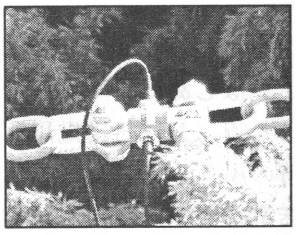


写真３ 高感度電線張力計の取り付け状況

3．送電線－鉄塔連成系モデルの振動特性

3.1 解析概要

本報告では自重に対する静的釣合位置を求めるのに，節点変位と部材軸力を未知数とする混合法[9) 10)]を用い，釣合位置からの動的応答計算にはNewmark β 法[11)]を用いて，応答変位と軸力を算出する．

任意の外力を受ける多自由度系の増分運動方程式は次式で表される．

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{x}}+\mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{x}}+\mathbf{K}e\Delta\mathbf{x}=\Delta\mathbf{F} \qquad (1)$$

ここに$\mathbf{M}$は質量マトリックス，$\mathbf{C}$は減衰マトリックス，$\mathbf{K}e$は非線形剛性マトリックス，$\Delta\mathbf{F}$は増分外力ベクトル，$\Delta\mathbf{x}$は増分変位ベクトルである．電線要素の要素剛性マトリックスは以下のように，弾性剛性マトリックスと幾何剛性マトリックスから構成される．

$$\mathbf{k}=\frac{EA}{L}\begin{bmatrix}\mathbf{N}_E & -\mathbf{N}_E\\ -\mathbf{N}_E & \mathbf{N}_E\end{bmatrix}+\frac{P}{L}\begin{bmatrix}\mathbf{N}_G & -\mathbf{N}_G\\ -\mathbf{N}_G & \mathbf{N}_G\end{bmatrix} \qquad (2)$$

ここで$\mathbf{N}_E$, $\mathbf{N}_G$は次のようになる.

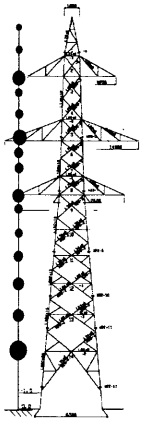
$$\mathbf{N}_E=\begin{bmatrix}l^2 & lm & ln\\ lm & m^2 & mn\\ ln & mn & n^2\end{bmatrix} \qquad \mathbf{N}_G=\begin{bmatrix}1-l^2 & -lm & -ln\\ -lm & 1-m^2 & -mn\\ -ln & -mn & 1-n^2\end{bmatrix}$$

E : 電線要素の弾性係数 L : 電線要素の部材長
A : 電線要素の断面積 P : 電線要素の軸力
$l\ m\ n$: 部材の方向余弦

電線部の剛性マトリックスはその幾何学的非線形性を考慮し，時刻歴毎に逐次計算したものを用いる．以下，これを釣合位置での剛性を一定として用いて動的計算を行った「線形応答」と比較するために「非線形応答」と呼ぶ.

3.2 鉄塔部単体モデルの解析

鉄塔部材をはり要素でモデル化し電線質量を腕金部に付加した鉄塔単体モデルの固有値解析を行ったところ，鉄塔単体での線路方向1次固有周波数として4.3Hzを得た．鉄塔モデルの諸元を図4に示す.



番号	高さ(m)	質量(kg)
1	35.1	59.6
2	32.6	173.1
3	29.5	1047.2
4	28.5	410.1
5	26.5	417.1
6	23.5	1708.4
7	22.7	465.0
8	21.1	492.9
9	18.5	1503.7
10	17.5	611.4
11	15.2	742.1
12	12.8	907.7
13	10.2	1014.7
14	7.3	1212.9
15	3.8	2117.5

図 4　鉄塔質点モデルと諸元

3.3 連成系モデルの固有値解析

試験を行った送電線の塔体部を15質点に，各電線と地線をそれぞれ30分割し，送電線－鉄塔連成系をモデル化した．電線はACSR410，地線はGSW90を用いた．塔体部質点モデルは塔体部単体モデルで得られた撓み性行列と質量を用い，送電線部は自重による撓み形状を鉄塔部剛性との連成を考慮しながら混合法で求め，この位置での剛性行列を同定した[7]．なお若番側と老番側の隣接鉄塔の電線支持方式は耐張であり，試験鉄塔とは十分な径間長があるものとして，電線支持を近似的にピン支持とした.

この連成系モデルの固有値解析を行い，さらに加振時の応答性を検討するため，構造減衰をすべての振動モードで１%に設定し，起振機加振点における周波数応答倍率を求めた．線路直角方向加振時の加振点線路直角方向変位の周波数応答倍率を図5に，線路方向加振時の加振点線路方向変位の周波数応答倍率を図6に示す.

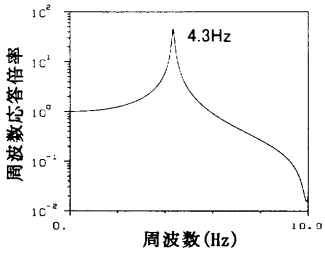


図 5　周波数応答倍率
(線路直角方向)

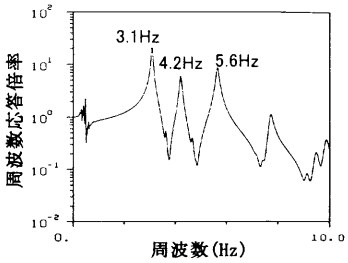


図 6　周波数応答倍率
(線路方向)

図5の線路直角方向の周波数応答倍率では，鉄塔部単体モデルの固有周波数と等しい4.3Hzで１つのピークが見られる．この周波数に対応するモード図を図7に示す．モード図の上図は正面図を下図は平面図を示す．このモードは塔体部の線路直交方向成分のみが卓越しており，これを塔体部線路直角方向１次モードと呼ぶ.

図6の線路方向の周波数応答倍率では，３つの顕著なピークが見られる．それぞれのピークに対応するモード図を周波数の小さい順に図8，9，10に示す．線路方向加振時の電線の応答は線路方向成分が支配的であるため，モード図はその成分のみ描画している．点線は静的釣合位置を，実線は変位モードのベクトル成分を示すが，成分の正負を判断するため右向正の線路方向成分を上向正の上下方向に描画している．よって点線と実線の交点は成分が0の位置である．図中網掛け部分は成分が負となる領域を示す．図8は全ての位置でベクトル成分の符号が同じである．これを連成系線路方向１次モードと呼ぶ.

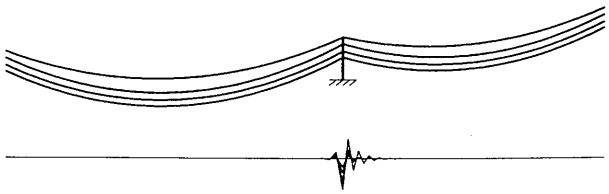


図 7　塔体部線路直角方向１次モード(4.3Hz)
(上：正面図，下：平面図)

図9は若番側電線の鉄塔部寄りの位置を境にベクトル成分の符号が逆転している．これを連成系線路方向２次モードと呼ぶ．この周波数は鉄塔部単体モデルの固有周波数とほぼ等しい．図10は若番側電線と老番側電線のそれぞれ鉄塔部寄りの位置を境に成分の符号が逆転している．これを連成系線路方向３次モードと呼ぶ．

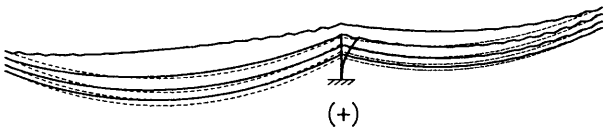


図８　連成系線路方向１次モード(3.1Hz)

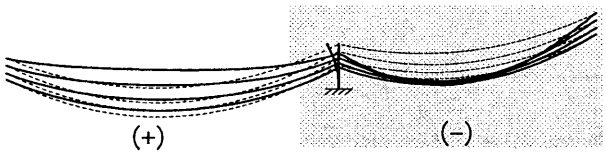


図９　連成系線路方向２次モード(4.2Hz)

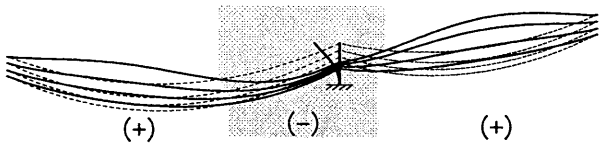


図 10　連成系線路方向３次モード(5.6Hz)

４．振動試験結果

以下では，3節の解析に対応させて，塔体部線路直角方向1次モードと連成系線路方向の1次モード，２次モード，３次モードに対応するそれぞれの固有周波数で加振した結果を紹介する．調和加振時の分析には加振中の定常的な区間から30秒間抽出した振動波形を用いた．また加振中の共振現象は「YUSURU」の回転メータと駆動者の体感とを併用しながら確認した．なお，以下の文中の加振力は回転周波数に対するスペック値である．

4.1　塔体部線路直角方向1次モード

ここでは，塔体部線路直角方向1次モードの固有周波数 4.3Hzで線路直角方向に加振した．このときの起振力は約1000Nで，応答加速度の平均片振幅は約5m/s^{2}である．図11～13に，それぞれ塔上部線路直角方向加速度(K-1)，若番側電線張力(R-1)の変動成分，老番側電線張力(R-2)の変動成分の波形をそれぞれ示す．電線張力の片振幅はそれぞれ約0.4kN ～1.0kNと約0.4kNになった．図7のモード図より，塔体部の変動に伴って若番側と老番側の電線支持点が変位し，軸力が発生したものと思われる．

図14と15に，図11～13に対応するパワースペクトルを示す．いずれも塔体１次の固有周波数4.3Hzで最も高いピークが見られるが，電線張力にはその整数倍の周波数においてもピークが見られる．電線張力のこのような周波数特性は試験線での検証として文献[1]で言及されているが，電線部の高次固有振動として報告されている．

塔体部各点の線路直角方向加速度間のココヒーレンスを図16に示す．図16より加振周波数では塔上部と塔中間部と塔下部は正の高い相関を持ち，塔体部は1次モードで変動していることが分かる．

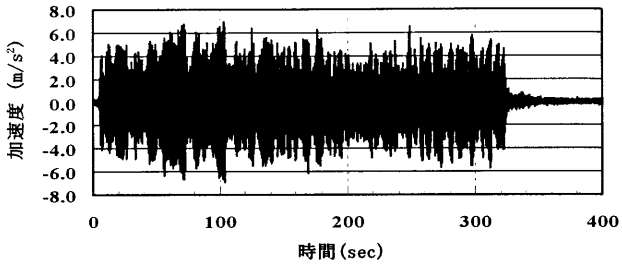


図 11　加振時塔上部線路直角方向加速度(K-1)
(線路直角方向１次モード加振)

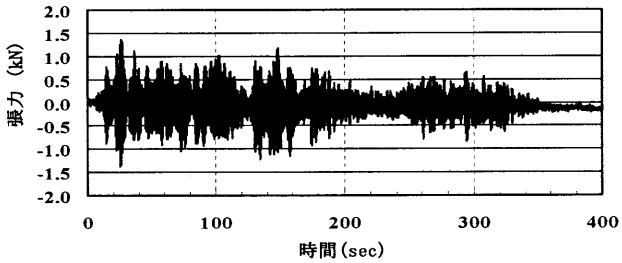


図 12　加振時若番側電線張力(R-1)の変動成分
(線路直角方向１次モード加振)

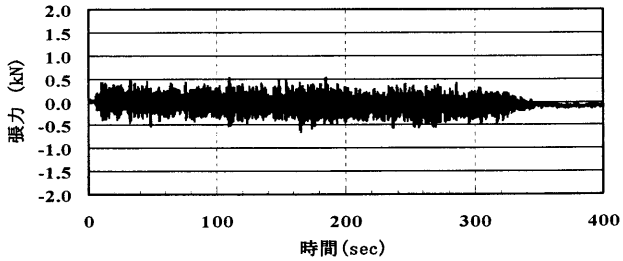


図 13　加振時老番側電線張力(R-2)の変動成分
(線路直角方向１次モード加振)

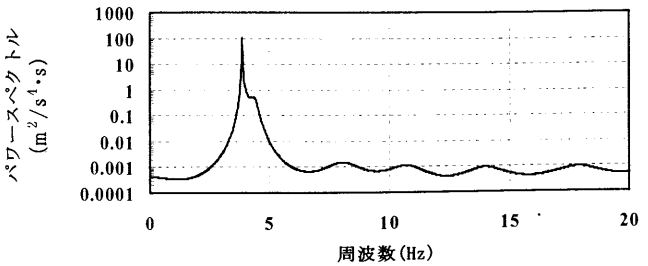


図 14　加振時塔上部線路直角方向加速度(K-1)のパワースペクトル
(線路直角方向１次モード加振)

塔上部線路方向加速度と電線張力のココヒーレンスを示す図17によれば，塔体と電線張力は加振周波数以外にも高い相関が見られる．

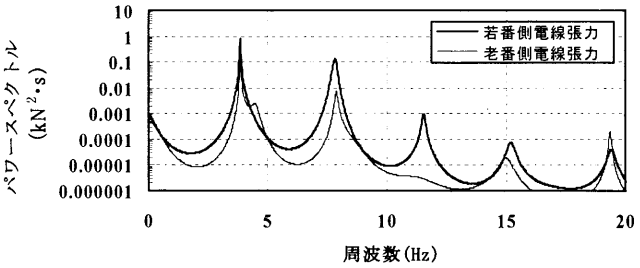


図 15　加振時若番側と老番側電線張力の変動成分のパワースペクトル
（線路直角方向１次モード加振）

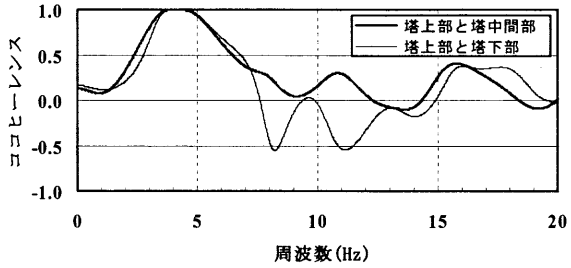


図 16　塔体部各点の線路直角方向加速度間のココヒーレンス
（線路直角方向１次モード加振）

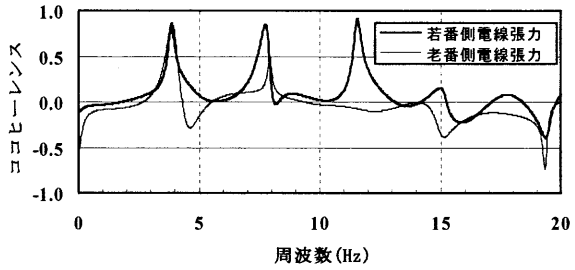


図 17　塔上部の線路方向加速度と電線張力間のココヒーレンス
（線路直角方向１次モード加振）

4.2 連成系線路方向１次モード

ここでは，図8のように塔体部と若番側電線と老番側電線とが，共に線路方向に同位相で振動し卓越するモードの固有周波数3.1Hzで線路方向に加振した場合の線路方向応答成分に着目する．このときの起振力を「YUSURU」の仕様から約500Nとしたため，塔体加速度の平均片振幅は約0.4m/s²と前節に比べて小さくなった．図18～20に，塔上部の線路方向の加速度(K-2)，若番側電線張力(R-1)，老番側電線張力(R-2)の各振動波形を示す．このとき，若番側電線張力は片振幅約0.3kN，老番側電線張力は片振幅約0.1kNになった．

図21と22に，図18～20に対応するパワースペクトルを示す．これらの図では，いずれも加振周波数と同じ3.1Hzで顕著なピークが見える．老番側電線張力で僅かに倍周波数でのピークが見られるが，そのパワーレベルは非常に小さい．塔体部各点の線路方向加速度間のココヒーレンスを図23に示す．図23より加振周波数で塔上部と塔中間部と塔下部は正の高い相関を持ち，塔体部は1次モードで変動していることが分かる．次節以降の線路方向加振においても，塔体各部のココヒーレンスの検証から，塔体各部の振動が同位相であることを確認した．

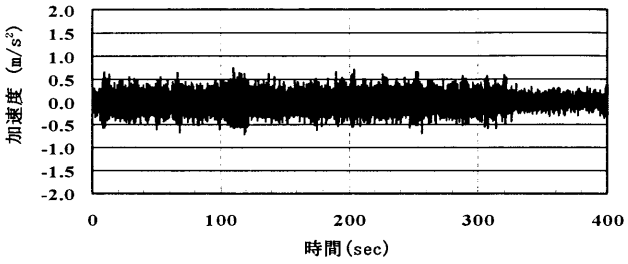


図 18　加振時塔上部線路方向加速度(K-2)
（線路方向１次モード加振）

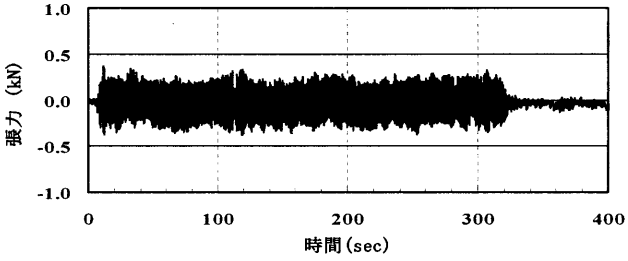


図 19　加振時若番側電線張力(R-1)の変動成分
（線路方向１次モード加振）

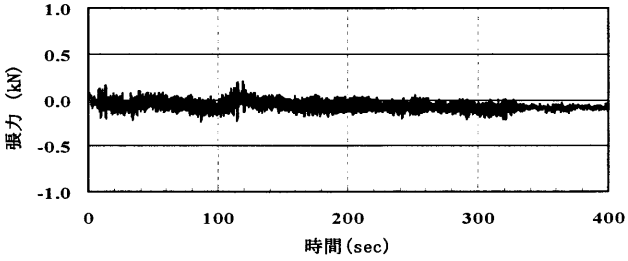


図 20　加振時老番側電線張力(R-2)の変動成分
（線路方向１次モード加振）

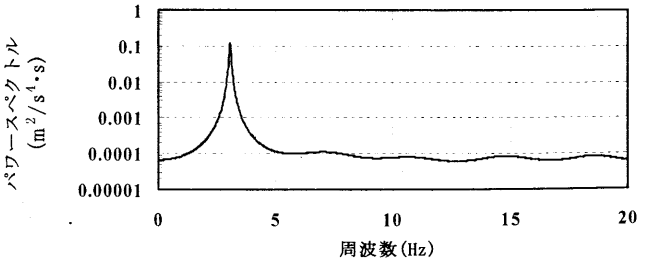


図 21　加振時塔上部線路方向加速度(K-2)のパワースペクトル
（線路方向１次モード加振）

塔上部線路方向加速度と若番側と老番側の電線張力のココヒーレンスを示す図24によれば，加振周波数以外には高い相関は見られない．

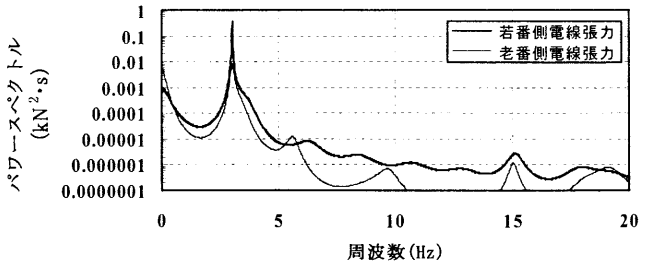


図 22　加振時若番側と老番側電線張力の変動成分のパワースペクトル
（線路方向１次モード加振）

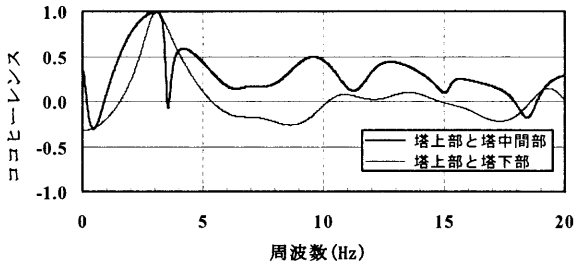


図 23　塔体部各点の線路方向加速度間のココヒーレンス
（線路方向１次モード加振）

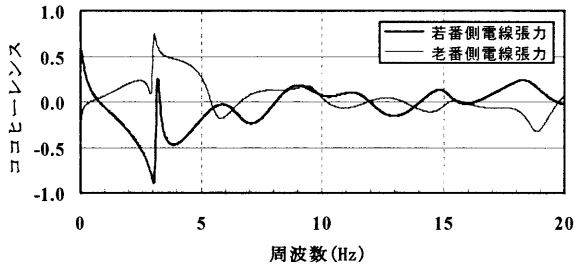


図 24　塔上部線路方向加速度と電線張力間のココヒーレンス
（線路方向１次モード加振）

4.3 連成系線路方向２次モード

ここでは，図9のように若番側電線の鉄塔部寄りの位置を境に，若番側部分と老番側部分とが線路方向に逆位相で振動し卓越するモードの固有周波数4.2Hzで加振した．このときの起振力は約950Nである．加振周波数，起振力共に4.1節の鉄塔部線路直交方向1次の加振とほぼ同じであるが，応答加速度の平均片振幅は約0.7m/s²となり，4.1節のケースよりも1/7倍程度小さい．これは電線の支持方式が，塔体に張力が直接伝わる耐張型であり，電線の剛性や重量の塔上部変位に及ぼす影響が線路直角方向加振よりも大きいためと思われる．

図25～27に，それぞれ塔上部線路方向加速度(K-2)，若番側電線張力(R-1)の変動成分，老番側電線張力(R-2)の変動成分の波形を示す．電線張力の片振幅は若番側で約0.5kN，老番側で約0.1kNとなった．このようなほぼ定振幅の振動状態は「YUSURU」の安定した加振性能を示すものである．

若番側電線張力変動が老番側よりも大きいのは，図9のように固有ベクトルの線路方向成分の符号が逆転する位置が若番側電線の塔体部側にあり，そこで電線の緊張と弛緩が繰り返されるためと思われる．従来の実基鉄塔の動的な検討では，線路直角方向及び線路方向において，塔体部が卓越するモードの変位や応力に着目することが多かったが，同時にそのモードに付随する若番側電線と老番側電線の不均衡となる変位や軸力にも注目する必要があることを示唆している．

図25～27の波形からほぼ定常状態と見なせる波形のパワースペクトルを図28と29に示す．塔上部加速度，若番側電線張力，老番側電線張力のいずれも，加振周波数4.2Hzで単一のピークを示している．塔上部線路方向加速度と若番側と老番側の電線張力のココヒーレンスを示す図30によれば，加振周波数以外には高い相関は見られない．

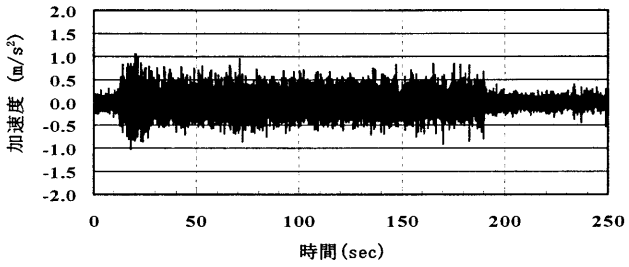


図 25　加振時塔上部線路方向加速度(K-2)
（線路方向２次モード加振）

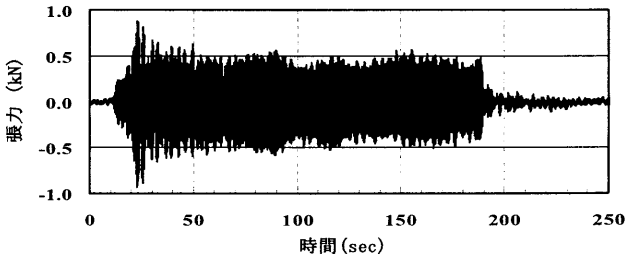


図 26　加振時若番側電線張力(R-1)の変動成分
（線路方向２次モード加振）

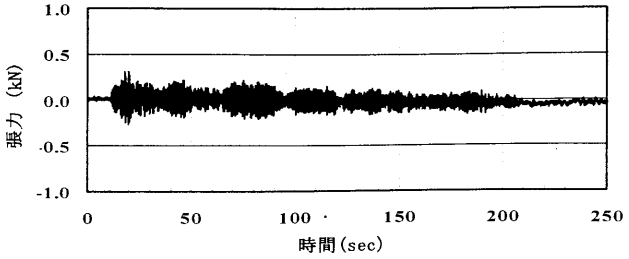


図 27　加振時老番側電線張力(R-2)の変動成分
（線路方向２次モード加振）

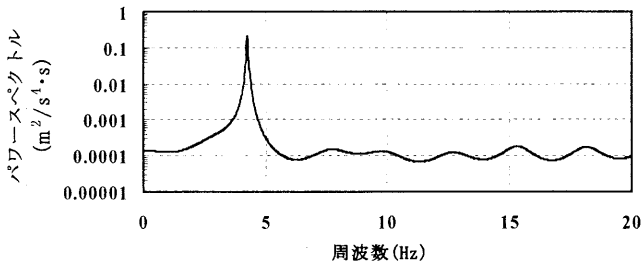


図28　加振時塔上部線路方向加速度(K-2)のパワースペクトル
(線路方向２次モード加振)

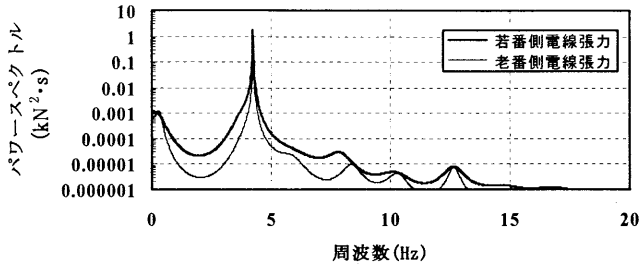


図29　加振時若番側と老番側電線張力の変動成分のパワースペクトル
(線路方向２次モード加振)

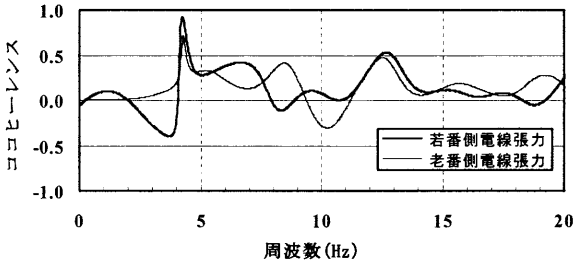


図 30　塔上部線路方向加速度と電線張力間のココヒーレンス
(線路方向２次モード加振)

4.4 連成系線路方向３次モード

ここでは，図10のように，若番側電線の鉄塔部寄りの位置と，老番側電線の鉄塔部寄りの位置とを境に，若番側部分と塔体部付近とが逆位相で，若番側部分と老番側部分とが同位相で線路方向に振動し卓越するモードの固有周波数5.6Hzで加振した．

このときの起振力は約1700Nで，塔上部加速度の平均片振幅は約1.9m/s²である．図31～33に塔上部の線路方向加速度(K-2)，若番側電線張力(R-1)，老番側電線張力(R-2)の各振動波形を示す．このとき，若番側電線は片振幅約0.2kN，老番側電線張力は片振幅約0.8kNとなった．老番側電線張力変動が若番側よりも大きいのは，図9のように固有ベクトルの線路方向成分の符号が逆転する位置が，若番側電線よりも老番側電線の位置の方が塔体側に近く，電線の緊張と弛緩の影響が大きいためと思われる．

図34と35に，図31～33に対応するパワースペクトルを示す．塔上部加速度では加振周波数に加えて，他の加振ケースでは見られなかった加振周波数の3倍と5倍でも高いピークが見られた．また電線張力でも加振周波数の奇数倍でピークが見られた．またレベルは小さいものの，若番側張力では偶数倍のピークも見られる．

塔上部線路方向加速度と，若番側，老番側電線張力のココヒーレンスを図36に示す．若番側，老番側共に加振周波数で高い負の相関を示しているが，パワースペクトルと対応する加振周波数の3倍と5倍の周波数では，若番側電線では高い負の相関，老番側電線では高い正の相関となっている．

この加振ケースでは，塔体加速度，若番側電線，老番側電線全てにおいて，強制振動時に加振周波数の奇数倍の周波数成分が表れたが，次節に示すように変位と力の変動成分を線形関係とする通常の解法では，この現象を再現することはできなかった．

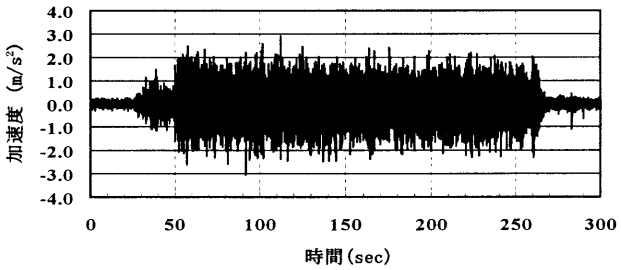


図 31　加振時塔上部線路方向加速度(K-2)
(線路方向３次モード加振)

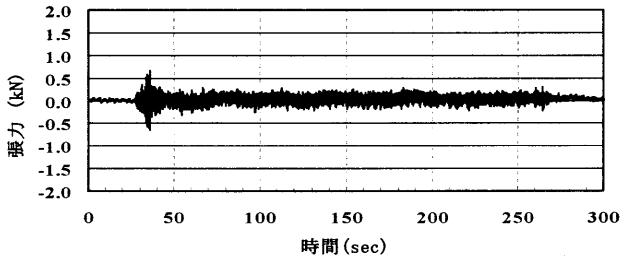


図 32　加振時若番側電線張力(R-1)の変動成分
(線路方向３次モード加振)

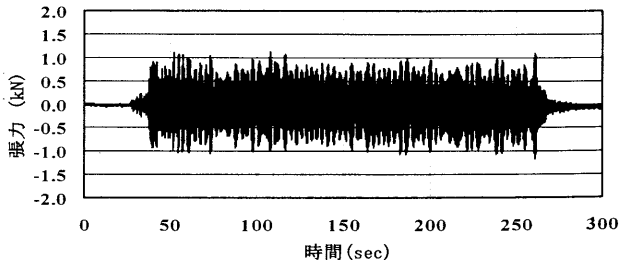


図 33　加振時老番側電線張力(R-2)の変動成分
(線路方向３次モード加振)

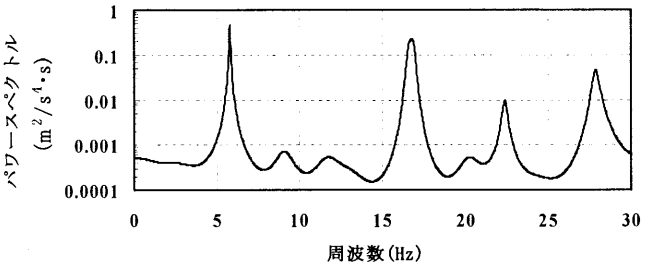


図34　加振時塔上部線路方向加速度(K-2)のパワースペクトル
(線路方向３次モード加振)

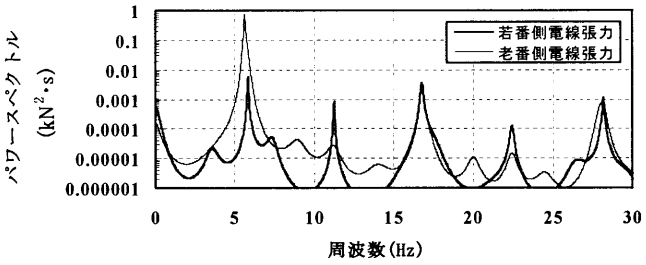


図35　加振時若番側と老番側電線張力の変動成分のパワースペクトル
(線路方向３次モード加振)

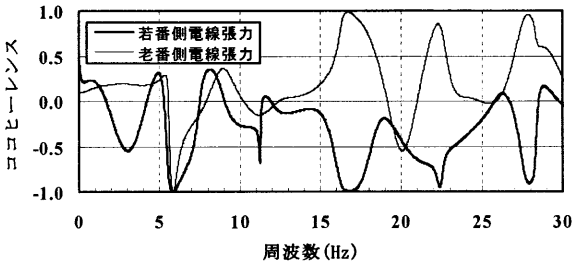


図36　塔上部線路方向加速度と若番側張力間のココヒーレンス
(線路方向３次モード加振)

５．時刻歴応答解析

以下では連成系モデルの鉄塔頂部にサイン波外力を加え加振した場合の時刻歴応答計算結果を示す．時間ステップ間隔は0.01秒とし，βは1/4とし，加振振幅は1kNとした．加振周波数は線路直角方向では鉄塔線路直角方向1次モードの4.3Hzとし，線路方向に関しては3つの線路方向のモード周波数で加振を行う．各応答波形は「線形応答」と「非線形応答」の違いをみるために，「線形応答」の最大値で応答値を基準化した．

5.1 鉄塔線路直角方向1次モード　4.3Hz加振

鉄塔頂部を線路直角方向1次モードで線路直角方向に加振した場合の，鉄塔頂部線路直角方向の加速度波形比を図37に，また若番側送電線端部と老番側送電線端部張力波形比を図38,39にそれぞれ示す．加速度波形は線形応答とほぼ同じで，若干のずれは見られるが張力波形も大きな差はない．しかしながらパワースペクトルに着目すると，張力波形では図41と42に見られる加振周波数4.3Hzの2倍の8.6Hzにピークが見られる．このことは加振試験に対応した結果である．

5.2　連成系線路方向1次モード 3.1Hz加振

線路方向に3.1Hzで加振した場合では，図43～45のように非線形応答の場合，線形応答に比べて加速度，張力ともに小さくなることがわかる．また図46～48のようにパワースペクトルで見ると線路直角方向の加振で見られた加振周波数の倍の周波数にピークが見られる現象はみられない．

5.3　連成系線路方向2次モード 4.2Hz加振

線路方向に周波数4.2Hzで加振した場合では，図49～51に見られるように，連成系線路方向1次モード加振時と同様に加速度，張力ともに振幅が小さく抑えられていることがわかる．また図52，54のように，これらのパワースペクトルでは，微少ではあるが，加振周波数の2倍にピークが見られる．

5.4　連成系3線路方向3次モード 5.6Hz加振

線路方向に連成系線路方向3次モードで加振した場合図55～60のように加速度波形と軸力波形ともに，非線形応答と線形応答との差は見られなかった．

６．まとめ

無電源人力起振機「YUSURU」を用いた送電線－鉄塔連成系の振動試験を行った．本報告では，加振力と加振周波数を長時間保持でき，可搬性に優れた「YUSURU」の高い安定性能を生かし，これまで測定が難しいとされた実基鉄塔での送電線張力と塔体振動の関係を解明するデータ取得が可能であることを示した．その中で，塔体に設置した加速度計と共に，高感度電線張力計を用いた同時計測は，固有値解析や周波数応答関数等の線形解析では得られない電線の固有の振動特性や塔体との複雑な連成挙動の一端を示すことができた．また，連成系としての振動モードでの加振では，強制振動時の電線張力応答に加振周波数の整数倍のスペクトルピークが表れる等の結果を得た．更に解析では，振動試験を行った実機送電鉄塔の電線部との連成系モデルを，幾何学的非線形性を考慮した動的非線形応答計算から電線部の幾何学的非線形性の影響を検討した．その結果，変動変位の振幅において，線路方向加振時で「非線形応答」の振幅が「線形応答」の振幅の半分程度になる場合があるなど，顕著な差が見られる場合があった．

また，応答変位のパワースペクトルにおいて，「非線形応答」では「線形応答」に見られない加振周波の倍の周波数においてピークが見られるなど，実測の結果に対応する結果が得られた．今後，このような連成系特有の現象を数値解析で再現するためには，動的解析にも電線の幾何学的非線形性を考慮することが必要と思われる．

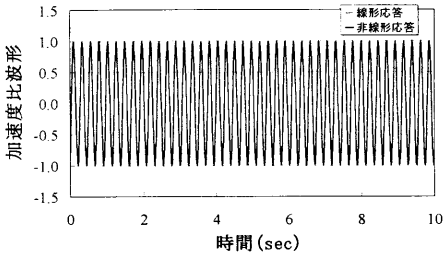


図 37 鉄塔頂部加速度波形
(線路直角方向 1 次モード加振)

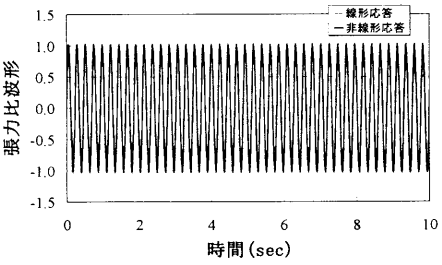


図 38 若番側送電線張力波形
(線路直角方向 1 次モード加振)

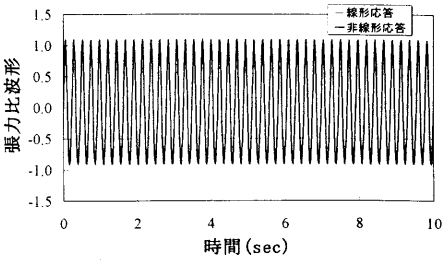


図 39 老番側送電線張力波形
(線路直角方向 1 次モード加振)

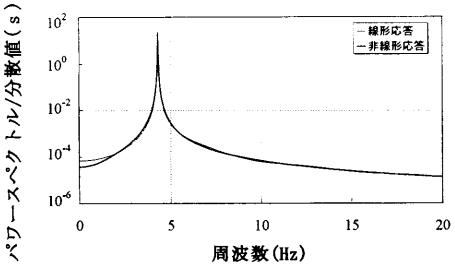


図 40 鉄塔頂部加速度のパワースペクトル
(線路直角方向 1 次モード加振)

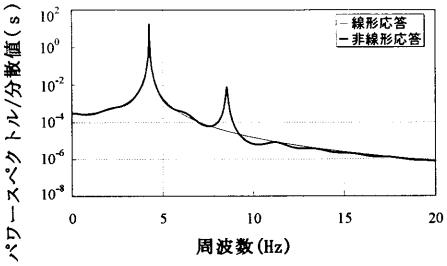


図 41 若番側張力のパワースペクトル
(線路直角方向 1 次モード加振)

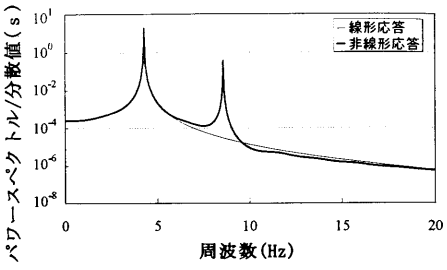


図 42 老番側張力のパワースペクトル
(線路直角方向 1 次モード加振)

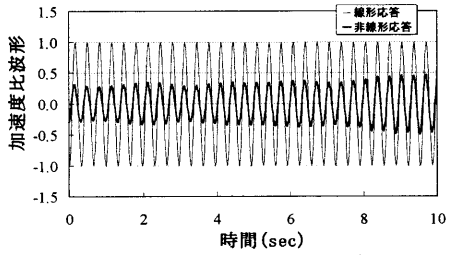


図 43 鉄塔頂部加速度波形
(線路方向 1 次モード加振)

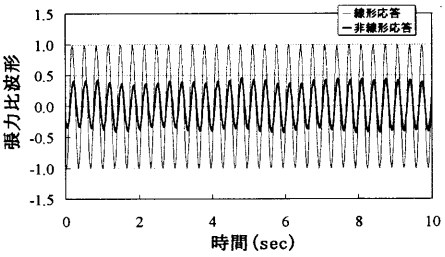


図 44 若番側送電線張力波形
(線路方向 1 次モード加振)

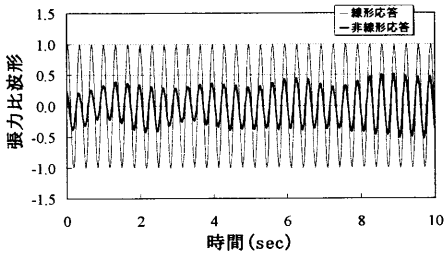


図 45 老番側送電線張力波形
(線路方向 1 次モード加振)

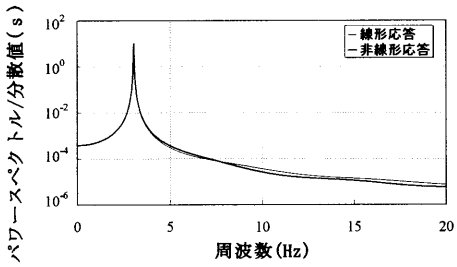


図 46 鉄塔頂部加速度のパワースペクトル
(線路方向 1 次モード加振)

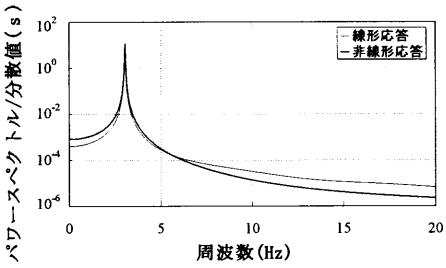


図 47 若番側張力のパワースペクトル
(線路方向 1 次モード加振)

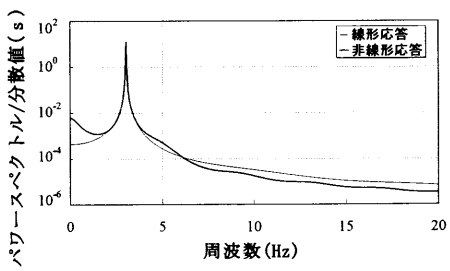


図 48 老番側張力のパワースペクトル
(線路方向 1 次モード加振)

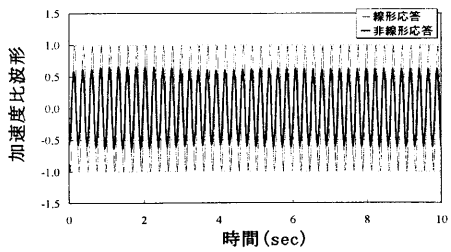


図 49 鉄塔頂部加速度波形
(線路方向 2 次モード加振)

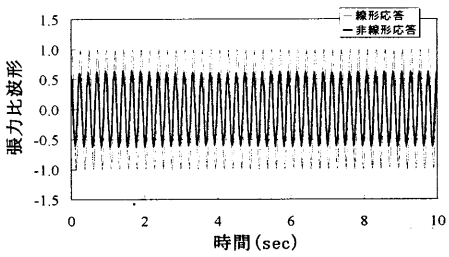


図 50 若番側送電線張力波形
(線路方向 2 次モード加振)

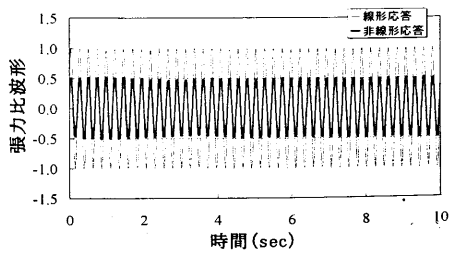


図 51 老番側送電線張力波形
(線路方向 2 次モード加振)

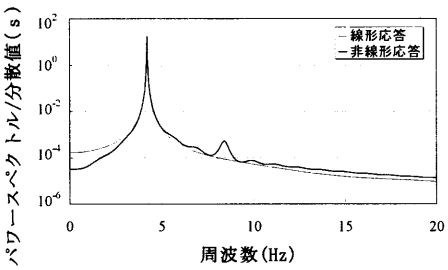


図 52 鉄塔頂部加速度のパワースペクトル
(線路方向２次モード加振)

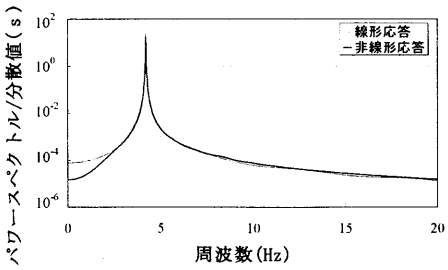


図 53 若番側張力のパワースペクトル
(線路方向２次モード加振)

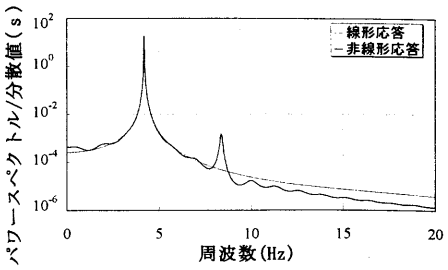


図 54 老番側張力のパワースペクトル
(線路方向２次モード加振)

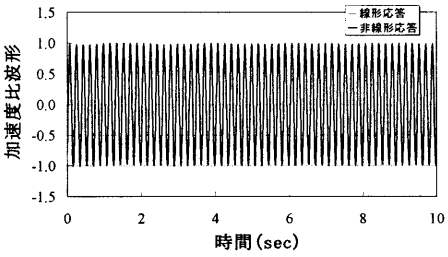


図 55 鉄塔頂部加速度波形
(線路方向３次モード加振)

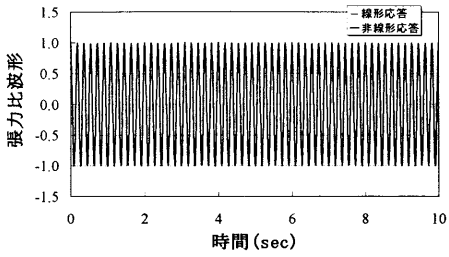


図 56 若番側送電線張力波形
(線路方向３次モード加振)

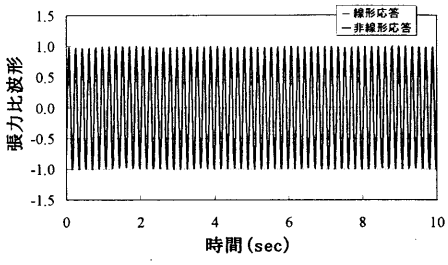


図 57 老番側送電線張力波形
(線路方向３次モード加振)

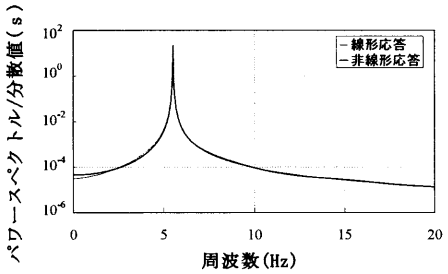


図 58 鉄塔頂部加速度のパワースペクトル
(線路方向３次モード加振)

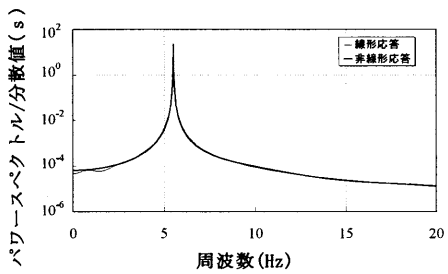


図 59 若番側張力のパワースペクトル
(線路方向３次モード加振)

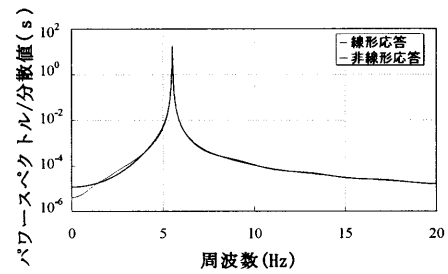


図 60 老番側張力のパワースペクトル
(線路方向３次モード加振)

参考文献

1) 岩間貴行，広木光雄，他：地震時における電線・がいし系の振動特性と鉄塔連成系の振動特性に関する研究，鉄塔No. 53，pp. 39-61，1982.
2) 川島裕治, 松永稔, 他：送電用山形鋼鉄塔の強風時応答特性(その1) 小型起振機による振動特性試験, 日本風工学会誌, 79号, pp. 115-116, 1999.
3) 白濱美香，岩本亜理，他：既設66kV送電鉄塔の耐風性能に関する研究-振動試験実施報告, 日本建築学会大会梗概集（北海道），B-1分冊，pp. 149-150, 2004.
4) 前田潤滋，今村義人，他：直接変位計測法による超高鉄塔の強風時応答特性の検証，第15回風工学シンポジウム論文集（東京），pp. 251-256，1998. 12
5) 局地風対策研究推進委員会風応答特性分科会：平成９年度成果報告書，電力中央研究所，1998.
6) 小坪清真：土木振動学，第４章，森北出版，1973.
7) 小園茂平，前田潤滋，牧野稔，他：多スパン鉄塔-送電線系の動的応答特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第353号, pp. 48-61, 1985.
8) 前田潤滋，今村義人，森本康幸，他3：直接変位計測による超高鉄塔の強風時応答特性の検証，第15回風工学シンポジウム論文集，pp. 251-256，1998.
9) 真柄栄毅他：混合法によるケーブルネットの解析（その1）不安定架構の性質及びリンク機構の解析 日本建築学会論文報告集，第218号，pp. 37-48, 1974. 4.
10) 真柄栄毅他：混合法によるケーブルネットの解析（その2） 幾何学的非線形問題の厳密解，日本建築学学会論文報告集, 第220号, pp. 35-45, 1974. 6.
11) 河島祐男：動的応答解析，コンピュータによる構造工学講座，培風館，pp. 38-58，1972.

(受理：平成17年6月9日)