

## いくつかの同定手法を組み合わせた鉄塔：送電線連 成系の空力減衰特性の分析

藤村，真弓

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

森本，康幸

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

九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/19097>

---

出版情報：都市・建築学研究. 12, pp.77-82, 2007-07-15. 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：

# いくつかの同定手法を組み合わせた 鉄塔—送電線連成系の空力減衰特性の分析

## Aerodynamic Damping Properties of Transmission Tower Estimated by Combining Several Identification Methods

藤村真弓\*, 前田潤滋\*\*, 森本康幸\*\*, 石田伸幸\*\*

Mayumi FUJIMURA, Junji MAEDA, Yasuyuki MORIMOTO and Nobuyuki ISHIDA

Based on full-scale measurement data, we report on several aerodynamic damping properties of two transmission towers under strong winds. The component of every vibration mode of the tower was extracted from a measured time history, and the wind-speed dependency of the aerodynamic damping of every mode of the tower was clarified. Moreover, using 3-dimensional nonlinear analysis, we discuss in detail the effects of the changing deformation shape of a transmission conductor resulting from an increase in wind speed on the development of the aerodynamic damping of a coupled tower-and-conductors system.

**Keywords:** Aerodynamic damping, 3D motion of a coupled tower-and-conductors system, Normal decomposition method, Multi-degrees-of-freedom RD technique

空力減衰, 鉄塔—送電線連成系の3次元挙動,  
 正規分解法, 多自由度RD法

### 1. はじめに

送電鉄塔はそれ自身の構造減衰が小さいために、ガスト応答時に空力減衰の影響を強く受ける<sup>1)5)</sup>。筆者グループは、実測データおよび理論解析に基づいて、鉄塔—送電線連成系の空力減衰の風速依存性を指摘し、強風下においては送電線ケーブルからの幾何学的非線形剛性に加えて、送電線部からの付加空力減衰の影響が鉄塔本体の振動にきわめて大きく作用することなどを報告している<sup>2)5)</sup>。

本研究は、風速の増大に伴う送電線部の3次元変形状の変化を新たに着目しながら、いくつかの波形分解法や減衰推定手法を組み合わせた実測データの分析を行って、より高精度に鉄塔—送電線系の減衰特性を明らかにしようとするものである。

### 2. 強風応答観測の概要

本論では、強風応答観測を実施した2つの送電鉄塔での観測データを取り扱う。観測鉄塔 Tower A は高さが214.5mの500kV懸垂型送電鉄塔である。Tower Aでの観測に用いた風速計と加速度計の位置を図1-(a)に示す<sup>6)</sup>。観測鉄塔 Tower B は高さ70mの500kV耐張型送電鉄塔で、

観測で用いた計測器の位置を図1-(b)に示す<sup>7)</sup>。本報告では、いずれも観測データの中から風向が線路直交方向となるデータを対象とした。

### 3. 実測データを用いた送電鉄塔の空力減衰の推定

#### 3.1 鉄塔卓越振動モード成分の抽出

本論文では、正規分解法(NDM)<sup>5,8,9,10)</sup>を用いて鉄塔卓越振動モード成分を抽出した。この手法は固有モードの正規直交性を利用したもので、適切な応答データを用いれば複数の近接した周波数成分が含まれていても、個々の周波数成分への分解精度は非常に高い。正規分解法の基本理論を下記に示す。

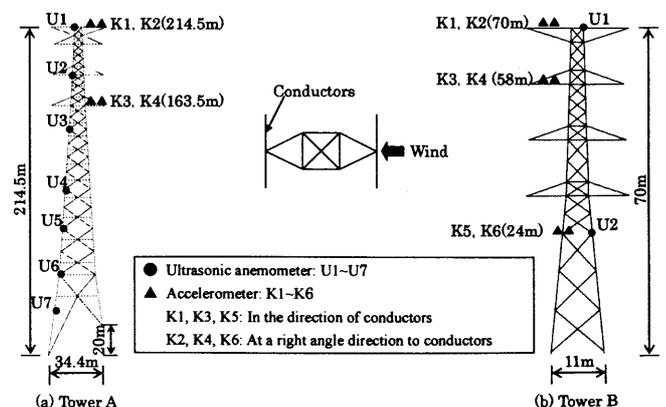


図1 観測鉄塔と計測センサー位置

\* 都市共生デザイン専攻 博士後期課程  
 \*\* 都市・建築学部門

多自由度系構造物の運動方程式を次式で表す。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = p(t) \quad (1)$$

ここに、 $x(t)$ 、 $M$ 、 $C$ 、 $K$  及び  $p(t)$  は、それぞれ変動変位ベクトル、質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックス及び外力の変動ベクトルである。減衰マトリックス  $C$  が固有モードベクトルに対して正規直交性を持つとすると、変位ベクトル  $x(t)$  は、固有モードマトリックス  $\Phi$  と一般化変位ベクトル  $q(t)$  を用いて次のように表される。

$$x(t) = \Phi q(t) = [\phi_1 \phi_2 \cdots \phi_n][q_1 q_2 \cdots q_n]^T \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入し、左から  $\Phi^T$  を掛けると、式(1)は次のように書き改めることができる。

$$M^* \ddot{q}(t) + C^* \dot{q}(t) + K^* x(t) = p^*(t) \quad (3)$$

ここで、 $M^*$ 、 $C^*$ 、 $K^*$  および  $p^*(t)$  はそれぞれ一般化質量、減衰、剛性マトリックス及び変動外力の一般化ベクトルである。

例えば、式(1)の復元力項に着目すると、

$$Kx(t) = K\Phi q(t) \quad (4)$$

式(4)の両辺に  $\Phi^T$  を左から掛けると、次式を得ることができる。

$$\Phi^T Kx(t) = \Phi^T K\Phi q(t) = K^* q(t) \quad (5)$$

したがって、一般化変位、つまり  $i$  次の振動モード成分  $q_i(t)$  は、実測変位波形  $x(t)$  から式(6)より導くことができる。

$$q(t) = K^{*-1} \Phi^T Kx(t) \quad (6)$$

図2に、台風通過時に TowerA で観測した加速度データから抽出した鉄塔卓越振動モード成分を示す。図からわかるように、1次および2次モードともに精度よく抽出できていることがわかるが、1次モード周波数付近に複数のピークが混在していることがわかる。これらのピークは送電線卓越振動モードに対応し<sup>1)</sup>、鉄塔本体の1次モードのみを抽出できていない。これは正規分解の過程に使用できる測定データが鉄塔モードのみに関するものしかなく、送電線部の振動モードを式(2)に考慮できていないことに起因する。

### 3.2 送電鉄塔の空力減衰定数の推定

抽出した振動モード成分から、鉄塔卓越1次および2次モードの減衰定数を Random Decrement 法(RD)を用いて推定した<sup>11)</sup>。しかしながら、送電鉄塔の振動成分は送電線の変動張力の影響を受け、送電鉄塔で観測した応答データに周波数が近接した振動モード成分が複数含まれることがある(図2)。上述のように、送電線モードの計測データが欠落している場合には、別途数学的手法に基づく波形分解が必要である。本論では、多自由度 RD 法(MDOF-RD)<sup>12)</sup>を各振動モード成分の減衰定数を推定するのに使用する。また、応答データから推定した減衰定数は構造減衰定数を含むので、算定した減衰定数から、微風時での人力加振試験で取得した構造減衰定数(TowerA : 1次 0.30%, 2次 0.49%<sup>[4]</sup>, TowerB : 1次 0.86%)を差し引いたものを空力減衰定数と定義した。

図3と4に、強風時に観測された線路直交方向の加速度データから推定した TowerA および TowerB の空力減衰定数を示す。両図には、比較のため RD 法や FFT を用いて推定した値も付記した。図3中の解析値は、鉄塔-送

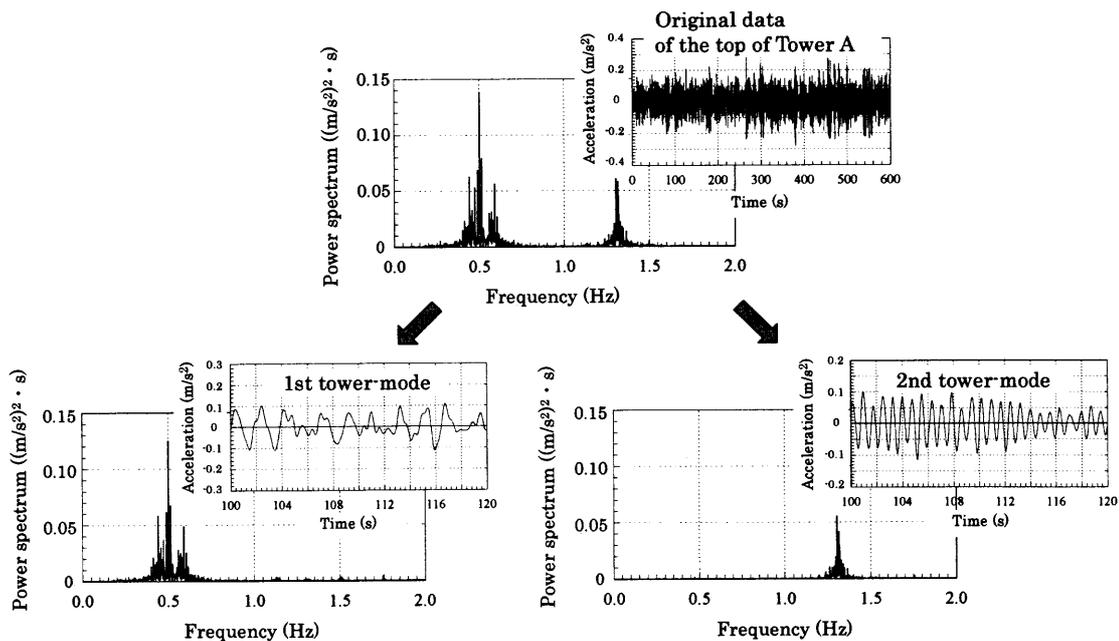


図2 鉄塔卓越振動モードの抽出例(TowerA)

電線連成系モデル(図 5-(a))の鉄塔卓越振動モードの空力減衰定数であるが、詳しくは次節で述べる。これまでの報告<sup>3)5)</sup>で指摘しているように、1次および2次モードの空力減衰定数は風速依存性を持ち、1次モードの方が2次モードに比べて空力減衰定数が大きく、またその風速依存性も大きいことがわかる。

さらに、1次モードの推定結果を見ると、多自由度 RD 法による推定結果に比べて、RD 法による推定値はばらつきが大きく、また高めに推定されている。このことは、吉田<sup>12)</sup>が指摘しているように、複数の振動モード成分を含む波形に RD 法を単純に適用すると、単一の減衰波形が得られないために減衰定数を高めに評価してしまうからである。また、2次モードの推定結果を見ると、FFT よりも正規分解法を用いて抽出した波形から推定した減衰定数の方がばらつきが小さいことがわかる。

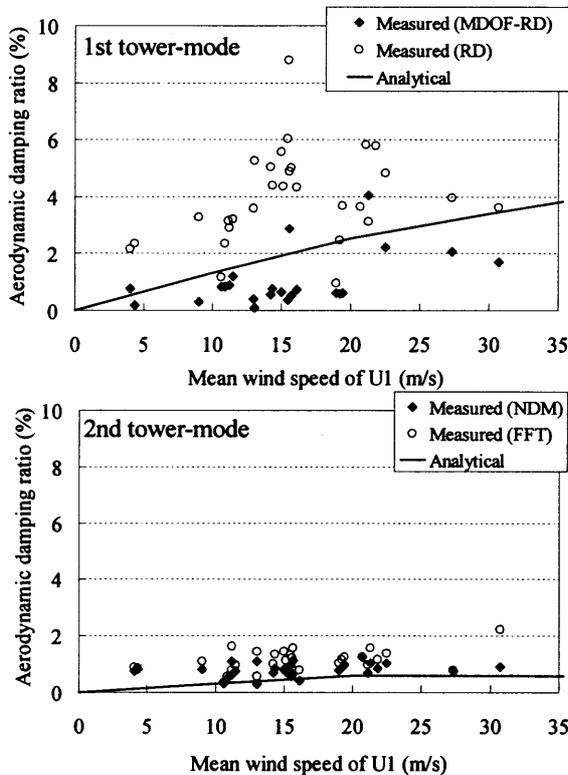


図3 空力減衰定数の推定値(TowerA)

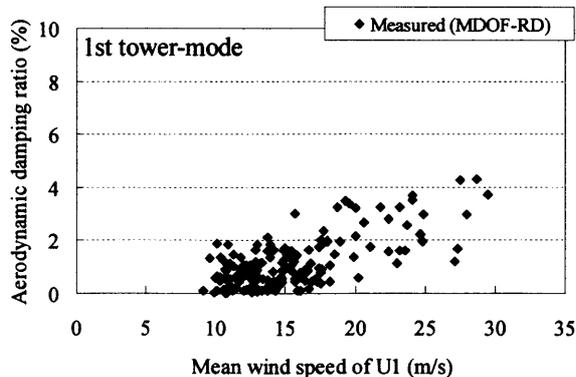


図4 空力減衰定数の推定値(TowerB)

#### 4. 3次元解析モデルの空力減衰特性

##### 4.1 鉄塔—送電線連成系モデルの概要

送電鉄塔 Tower A を、図 5-(a)に示すように、両側に接続する送電線と懸垂碍子を含めてモデル化した<sup>5)</sup>。ただし鉄塔部の質点は線路方向と線路直交方向の2自由度を、送電線部はそれらに鉛直方向を加えた3自由度を持つとした。剛節トラス部材での FEM 解析を経て、鉄塔部を11質点にモデル化し、送電線部の自重および平均風圧力に対する静的釣合位置を混合法<sup>13)</sup>による非線形解析を経て算定した。そして、静的釣合位置での送電線部の剛性マトリックスと鉄塔部の剛性マトリックスを、釣合形状や境界条件などを考慮して収斂計算させながら、連成系モデルの全体剛性マトリックスを作成した<sup>14,15)</sup>。

連成系モデルを作成するために、図 5-(a)に示すような、適切な数での送電線の要素分割を行った。図 6 は Tower A の U1 平均風速が 40m/s のときの連成系モデルの鉄塔卓越1次モードの固有周波数および空力減衰定数に与える送電線部の分割数の影響を示したもので、図中の  $\alpha$  は送電線分割数  $n_d$  に対する送電線振動モード形状の腹の数  $n_m$  に対する比である。図からわかるように、送電線分割数は、固有周波数に比べて空力減衰定数の方により強く影響することがわかる。これは、各振動モードの空力減衰定数が固有モードベクトル  $\phi$  から算定されるので、振動モード形状をより正確に捉えるためにより多くの分割数を必要とするからである。以下では、図 6 に示す結果を参考にして、Tower A の送電線を  $\alpha$  が 10 以上となるように分割した。

また、連成系モデルの各質点位置での平均風速をべき指数 1/8 のべき乗則で設定し(図 5-(b))、風向を線路直交方向とした。

##### 4.2 固有モード別空力減衰定数の定義

強風下で応答する構造物の減衰マトリックス  $C$  は次式のように表される。

$$C = C_s + a \tag{7}$$

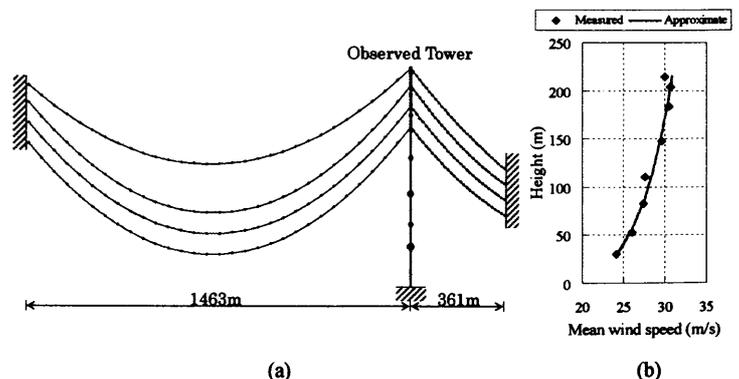


図5 鉄塔—送電線連成系モデル(a)と平均風速分布(b)

ここに、 $C_i$  は構造減衰マトリックス、 $a$  は対角要素が  $a_{ii} = \rho D_i A_i U_i$  である空力減衰マトリックスである。ここに、 $\rho$ 、 $D_i$ 、 $A_i$  及び  $U_i$  は、それぞれ空気密度、風力係数、面積および平均風速である。空力減衰を含む減衰マトリックス  $C$  は、ほぼ正規直交性を有するので、固有モード別空力減衰定数を、固有モードベクトルと一般化マトリックスを用いて次のように定義することができる<sup>16)</sup>。

$$h_i = \frac{C_i^*}{2\sqrt{K_i^* M_i^*}} \quad (8)$$

$$C_i^* = \phi_i^T C \phi_i$$

なお、空力減衰の特性に着目するため、式(8)より求まる減衰定数から、Caugheyの方法<sup>17)</sup>を用いてすべての固有モードに設定した同じ構造減衰定数(1%)を差し引いた値を空力減衰定数の解析値とした。

### 4.3 空力減衰の解析的検討

図7に  $U_1$ (図1-(a))平均風速ごとの固有周波数に対する固有モード別空力減衰定数を示す。図中では、鉄塔卓越振動モードと送電線卓越振動モードを各固有モードの視認により区別した。

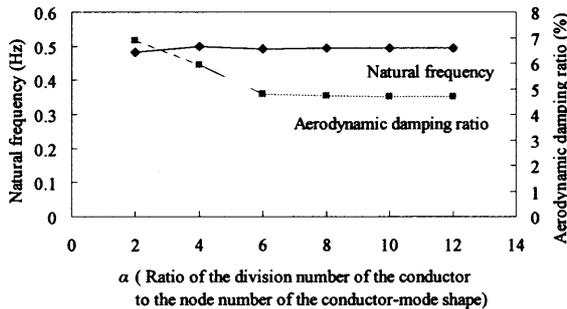


図6 送電線分割数に対する鉄塔卓越振動モードの固有振動モード特性の変化

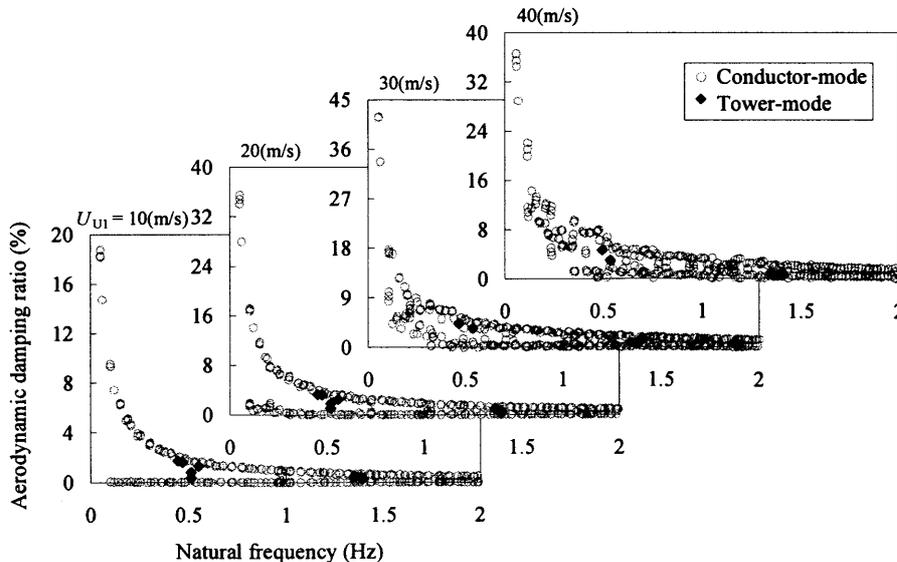


図7  $U_1$  平均風速ごとの固有周波数に対する固有モード別空力減衰定数の変化

図7は、風速の増加とともにすべての固有モードの空力減衰定数は増加するが、 $U_1$  平均風速が 40m/s 付近で一旦減少するなど単調な変化を示さず、これまでの結果<sup>9)</sup>と同じ傾向を示す。このことを、連成系モデルの鉄塔頂部での線路直交方向加振時に、鉄塔頂部線路直交方向変位の周波数応答ゲインが最大となる周波数に対応する鉄塔卓越振動モードの空力減衰定数で示したのが図8である。また、図7では、小さな空力減衰定数を示す送電線面内モードとより大きな減衰を持つ面外モードに対応する2つの領域に空力減衰定数が明確に分離される低風速

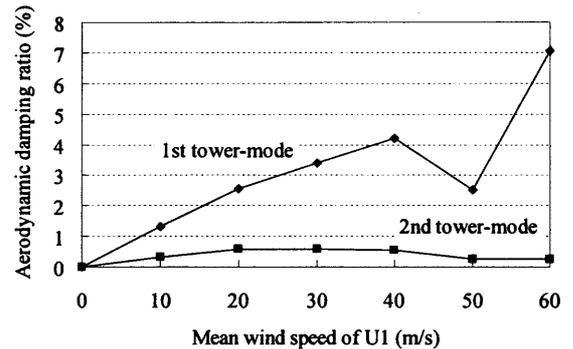
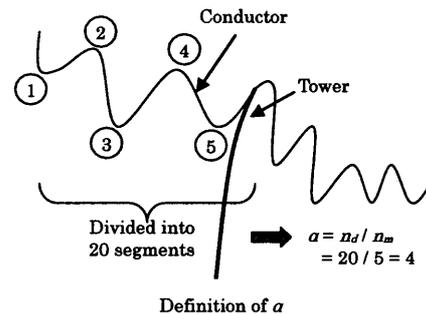


図8 鉄塔卓越振動モードの空力減衰定数の変化



域に対して、U1 平均風速が 30m/s 以上の高風速域では、その両者の区別が不鮮明になることがわかる。高風速域のこのような特徴は風向方向の変形成分のみ注目した報告<sup>3,4)</sup>では見られなかった特徴である。これらの理由の一つに、風速の増大に伴う送電線面の風向に対する傾きの変化が送電線面内モードの空力減衰定数の成長に影響することが挙げられる。さらに、風速の増大に伴って送電線部の曲線面の平面性が崩れることや、送電線部剛性の幾何学的非線形性による急激な増大などの影響も少なくないと考えられる。

また、低次モードほど空力減衰定数は大きく、鉄塔卓越モードの空力減衰定数が送電線卓越モードに比べ小さくなるなどは、これまでの報告<sup>3-5)</sup>や各モードの一般化剛性が高次モードほど急激に増大することに符合する。さらに鉄塔部のモード形状を目視で確認したところ、図 7 に見られるように、鉄塔単独の場合の変形モードに類似する鉄塔振動モードが複数存在する。

上述のような手法に基づいた計算モデルは、図 3 に示すように、実測結果によく対応し、強風下における鉄塔-送電線連成系空力減衰定数を推定するのに適切なモデルであると言える。

## 5. まとめ

実送電鉄塔を用いた強風応答観測の新たな分析と鉄塔-送電線連成系モデルを用いた数値解析から、送電鉄塔の空力減衰特性について以下の所見が得られた。

- (1) 送電鉄塔の空力減衰定数は強い風速依存性を示し、低次モードほど空力減衰定数が大きく、その風速依存性も大きい。
- (2) 正規分解法や多自由度 RD 法は、送電鉄塔などのように近接した固有周波数成分を持つ構造物の減衰定数を正確に推定するのに有効である。
- (3) 鉄塔-送電線連成系モデルには、送電線面内モードと面外モードに対応する空力減衰力の 2 つのパターンが存在し、連成系モデルの空力減衰定数は風速の増大に対して必ずしも単調な比例関係にない。
- (4) 本報告で用いた鉄塔-送電線連成系モデルは強風下における空力減衰定数を推定するのに適切である。

## 謝辞

東京工芸大学吉田昭仁博士より多自由度 RD 法の実施について貴重な助言を頂きました。また本研究は、九州電力(株)との平成 18 年度共同研究「鉄塔耐風性能に及ぼす部材振動の影響とその長期的影響評価に関する研究」の支援を受けました。ここに記してお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Okamura, T, et al.: Wind Response Analysis of Transmission Tower in Mountainous Area, 5th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Kyoto, pp.197-200, 2000.10.
- 2) Maeda, J., et al.: Aerodynamic Damping of a High-voltage Transmission Tower, 11th International Conference on Wind Engineering, Preprint-Vol., pp.1811-1818, 2003.6.
- 3) Maeda, J., et al.: Aerodynamic damping properties of a high-voltage transmission tower, Proc. 5th International Symposium on Cable Dynamics, pp.255-262, 2003.9.
- 4) 前田潤滋, 他: 超高压送電線-鉄塔連成系の空力減衰, 第 54 回理論応用力学講演会, pp.415-416, 2005.1.
- 5) 藤村真弓, 他: 3 次元モードを考慮した鉄塔-送電線連成系の空力減衰特性, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.411-416, 2006.11.
- 6) Maeda, J., et al.: Wind response behavior of a power transmission tower using new displacement measurement, Proc. 10th International Conference on Wind Engineering, pp.481-486, 1999.6.
- 7) 海老原修二, 他: 強風時における送電鉄塔の構面外振動の特性について(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), B-1, pp.151-152, 2004.8.
- 8) 前田潤滋, 他: 多自由度系構造物の時刻歴応答波形のモード別波形抽出法について(その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), B-1, pp.165-168, 2001.9.
- 9) 池田健一郎, 他: 正規分解法による強風時振動データの固有モード別波形抽出について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), B-1, 2002.8.
- 10) 藤村真弓, 他: 風応答データのモード別波形分解法に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), B-1, pp.189-190, 2006.9.
- 11) 田村幸雄, 他: RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 454 号, pp.29-38, 1993.12.
- 12) 吉田昭仁: 構造物の高精度な風応答推定に関する研究, 東京工芸大学学位論文, 2006.3.
- 13) 真柄栄毅, 他: 混合法によるケーブルネットの解析(その 2), 日本建築学会論文報告集, 第 220 号, pp.35-45, 1974.6.
- 14) Ozono, S., Maeda, J. and Makino, M., Study on the coupling system of transmission lines and towers, J. Structural and Construction Engineering, Trans. of AIJ, Vol. 353, pp.48-61, 1985.12.
- 15) Ozono, S. and Maeda, J., In-plane dynamics interaction between a tower and conductors at lower frequencies,

Engineering Structures, Vol. 14, pp.210-216, 1992.12.

- 16) 林田英俊, 他 : 塔状構造物の空力減衰特性に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1223-1224, 1982.10.
- 17) Caughey, T.K., Classical Normal Modes in Damped Linear Dynamic Systems, J. Appl. Mech., pp.583-588, 1965.9

(受理 : 平成 19 年 6 月 7 日)