

ラチス構造物に取り付けた付加振動体の強風下での 制振性能に関する基礎的研究

山中, 宗徳
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻修士課程

山戸, 秀晃
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻修士課程

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

<https://doi.org/10.15017/19132>

出版情報：都市・建築学研究. 16, pp.75-80, 2009-07-15. 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：

ラチス構造物に取り付けた付加振動体の強風下での制振性能に関する基礎的研究

Basic Study on Damping Performance of an Additional Vibrator Installed to Lattice Structures under Strong Winds

山中宗徳*, 山戸秀晃*, 藤村真弓**, 前田潤滋***

Munenori YAMANAKA, Hideaki YAMATO, Mayumi FUJIMURA
and Junji MAEDA

It is well known that the passive type damper like a Tuned Mass Damper (TMD) is useful for the vibration control of a tall structure under strong winds. In general a damper device is not exposed to wind. However installation of an additional vibrator to a lattice structure like a transmission tower requires the information of damping performance of the vibrator subjected to gusty winds. The paper reports the damping performance of the additional vibrator under several conditions of the structural and gust property. Our parametric studies indicate that the performance of vibration control under gusty winds is adjustable by the optimized frequency ratio and damping ratio of the additional vibrator too. And it was found that the performance is affected by both the vibrator's size and the wind property.

keywords : *Gust response of a lattice structure, Damping system, Optimized natural frequency ratio, Optimized damping factor,*

ラチス構造物のガスト応答, 制振システム, 最適固有周波数比, 最適減衰定数

1. はじめに

同調質量減衰器(TMD)に代表されるパッシブ制御法は、減衰器を付加振動体として構造物に取り付け、固有周波数や減衰量を調整することによって、構造物本体の振動エネルギーを散逸させる制振方法として、強風下における構造物の渦励振など風直角方向振動やガスト応答の制振対策に多用されている¹⁾。図1は、鋼製高煙突の渦励振対策として装着されたTMDの例である²⁾。

長期間風雨に曝される環境にある送電鉄塔では、塔体自体の振動だけでなく電線や吊架装置の振動が鉄塔構成各部分材の振動発生の誘因となり、それらの振動特性や部分材間の振動伝播に関する検証がなされている^{3), 4)}。送電鉄塔の各部分材の振動制御を実施するためには、そのスパースなラチス構造の施工やメンテナンスの特徴からTMDによるパッシブ制御が適していると考えられるが、TMDを構成する付加振動体そのものが強風下に曝されることの影響や風方向風力の強い不規則変動性に対するパッシブ制御効果などはほとんど検証されていない。

本論はその端緒として、強風下での構造物に設置した付加振動体の質量比や固有周波数比、および付加振動体の受風面積が及ぼす制振効果への影響についてパラメトリック

スタディを実施し、制振効果に対するそれぞれの最適な条件を検討する。

2. 調和外力を受ける構造物の付加振動体による制振理論 2.1 変位応答倍率

図2の連成2質点モデルの各質点の運動方程式は次式で表される。

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = P e^{i 2 \pi n_p t} \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (2)$$

ここに、 m , c , k , P , n_p はそれぞれ質量、減衰係数、バネ定数、外力振幅、外力周波数で、添え字番号を質点番号とし、質点番号1を構造物本体に、番号2を付加振動体に対応させている。

式(1)と(2)の解を $x_1 = X_1 e^{i(2\pi n_p t - \varphi_1)}$, $x_2 = X_2 e^{i(2\pi n_p t - \varphi_2)}$ と仮定

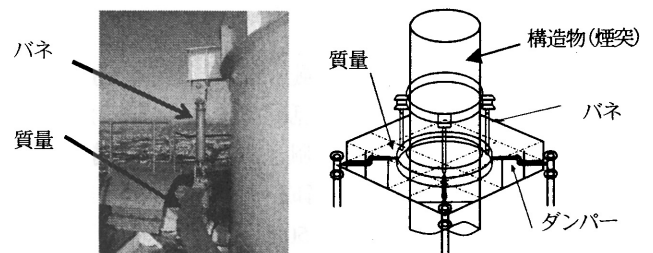


図1 TMD装置の設置例²⁾

* 都市共生デザイン専攻 修士課程
** 都市共生デザイン専攻 博士後期課程
*** 都市・建築学部門

すると構造物本体（質点1）の変位応答倍率はよく知られている次式のように表すことができる⁹⁾。

$$\frac{X_1}{X_{st}} = \sqrt{\frac{(f^2 - g^2)^2 + 4h_2^2 f^2 g^2}{\alpha}} \quad (3)$$

ここで、式中の記号はそれぞれ次のように定義している。

$$X_{st} = P/k_1 \quad (\text{静的外力 } P \text{ に対する質点 } 1 \text{ の静的変位})$$

$$j=1, 2 \quad (\text{質点番号})$$

$$\mu = m_1/m_2 \quad (\text{質量比})$$

$$\omega_j = \sqrt{k_j/m_j} \quad (\text{質点 } j \text{ の固有円振動数})$$

$$n_j = \omega_j/2\pi \quad (\text{質点 } j \text{ の固有周波数})$$

$$h_j = c_j/(2\omega_j m_j) \quad (\text{質点 } j \text{ の減衰定数})$$

$$f = n_2/n_1 \quad (\text{質点 } 1 \text{ と } 2 \text{ の固有周波数比})$$

$$g = n_p/n_1 \quad (\text{質点 } 1 \text{ に対する外力周波数比})$$

$$\alpha = [(1 - g^2)(f^2 - g^2) - (\mu f + 4h_1 h_2) f g^2]^2 + 4\{(h_2 + h_1 f) f - [h_1 + (1 + \mu) h_2 f] g^2\}^2 g^2$$

2.2 付加振動体の最適周波数比と最適減衰定数

式(3)を用いて、構造物（質点1）の減衰定数を $h_1=0$ 、付加振動体と構造物の固有周波数比を $f=1.0$ 、質量比を $\mu=0.05$ とした場合の付加振動体（質点2）のいくつかの減衰定数 h_2 に対する構造物の変位応答倍率 (X_1/X_{st}) を外力周波数比 g に対して示したのが図3⁹⁾である。

構造物の振動抑制として付加振動体を取り付ける場合の留意点は、その制振効果が外力周波数の広い範囲で有効に機能することである。付加振動体の減衰定数 h_2 に無関係な図3中の定点PとQでの応答倍率が相等しく、かつこの2点近傍で極大値となるように固有周波数比 f と減衰定数 h_2 を定めれば、構造物の振動振幅を幅広い周波数範囲で抑制できる。このような条件を満たす最適周波数比 \hat{f} と最適減衰定数 \hat{h}_2 は次式⁷⁾となり、これらの値は質量比 μ で決まる。

$$\hat{f} = 1/(1 + \mu) \quad (4)$$

$$\hat{h}_2 = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (5)$$

式(4)と(5)に $\mu=0.05$ を代入したときの最適値 \hat{f} と \hat{h}_2 を式(3)に代入すると変位応答倍率は図3の太実線⁹⁾のようになり、外力の広い周波数範囲に対して構造物の振動を抑制できることが分かる。

3. 変動風力を受ける付加振動体付き構造物の応答シミュレーションの概要

3.1 変動風力

以下では、外力を風方向の風速変動に因る変動風力とするために、平均風速を 40m/s、乱れのスケールを 100m、乱れの強さを 0.2 に設定し、変動風速のスペクトル構造をカルマン型として、変動風力を構成する変動風速を継続時間 1000 秒、サンプリング周波数 50Hz で自己回帰モデル⁸⁾により生成した。図4の生成風速のパワースペクトルとカルマン型パワースペクトルの理論値は良く一致し、生成風速

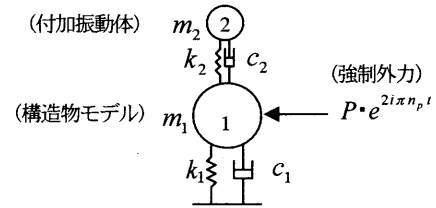


図2 連成2質点モデル

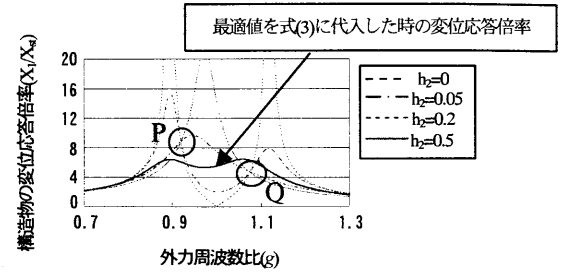


図3 外力周波数比と変位応答倍率の関係⁹⁾

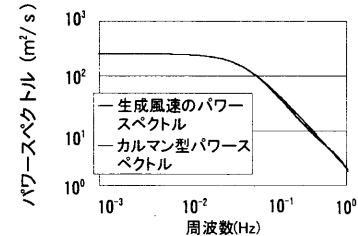


図4 生成風速及びカルマン型のパワースペクトルの比較

波形が目標のカルマン型乱流構造を有することを確認できる。以下では生成した変動風速 $u(t)$ と $\rho C_d A \bar{U}$ （それぞれ空気密度 $\rho=1.22\text{kg/m}^3$ 、風力係数 C_d 、受風面積 A 、平均風速 \bar{U} ）の積で表される変動風力を外力とする。本論では、この変動風力が構造物のみに作用する場合と、付加振動体にも同じ変動風力が作用する場合を検討する。

3.2 構造物及び付加振動体

構造物として高さ 50m 程度の標準的な送電鉄塔を図5の質点1のようにモデル化し、表1の値を設定した。付加振動体は図5の質点2のようにモデル化し、質量比、固有周波数比、付加振動体の減衰定数、付加振動体の受風面積をパラメータとして表2に示す。表2には、それぞれの質量比で決まる最適固有周波数比 \hat{f} と最適減衰定数 \hat{h}_2 とは別に、0.05~2の固有周波数比と0~0.5の減衰定数の場合を検討するように設定している。ただし、付加振動体の風力係数 C_{d2} を本体（質点1）と同じ1.3とした。

3.3 応答計算

Newmark β 法 ($\beta=1/4$, 時間間隔 0.02sec) を用いて質点モデルの逐次応答計算を行い、全解析時間 1000 秒のうち定常状態と見なせる 400 秒から 1000 秒までの 10 分間の応答波形を用いて、各設定パラメータでの構造物の応答変位とそのパワースペクトル及び標準偏差を比較検討した。なお、パワースペクトルは AR 法¹⁰⁾により算出した。

4. 変動風力を受ける構造物の付加振動体による制振効果
 4.1 固有周波数比, 付加振動体の減衰定数および変動風力の影響

4.1.1 応答変位振幅

付加振動体を取り付けていない構造物単体の応答変位波形とパワースペクトルを図6に示し, 質量比 $\mu=0.01$ の付加振動体を取り付けた連成2質点モデルの構造物本体の応答変位波形とパワースペクトルをそれぞれの設定パラメータに対して図7と図8に示す。ただし図7は変動風力が構造物本体のみに, 一方図8は受風面積 $A_2=9m^2$ の付加振動体にも作用した場合の応答波形とパワースペクトルである。なお, 図7と図8は, 固有周波数比には $f=0.5$ の場合(図7(a)と図8(a))と, 質量比 $\mu=0.01$ のときの最適固有周波数比(0.99)(図7(b)と(c)および図8(b)と(c))を, また減衰定数には $h_2=0.01$ (図7(b)と図8(b))と質量比 $\mu=0.01$ のときの最適減衰定数(0.06)(図7(a)と(c)および図8(a)と(c))を組み合わせた結果を示している。

付加振動体に変動風力が作用しない図7を図6と比較すると, $f=0.5$ で $h_2=0.06$ の場合(図7(a))では, 付加振動体を構造物に設置しても制振効果はほとんど見られないことがわかる。最適固有周波数比の $f=0.99$ で $h_2=0.01$ の場合(図7(b))には応答振幅に若干の制振効果が見られるが, 質量比に対する最適固有周波数比と最適減衰定数を適用した図7(c)が最も制振効果が高い。すなわち図4に示すような広い帯域で低周波数成分を含む変動風力の場合にも質量比で決定される最適な固有周波数比と最適減衰定数の適用が最も有効である。

付加振動体にも変動風力が作用する図8においても図7と同様の傾向が見られ, 周期外力に対する最適固有周波数比と最適減衰定数を適用させた図8(c)で最も制振効果が得

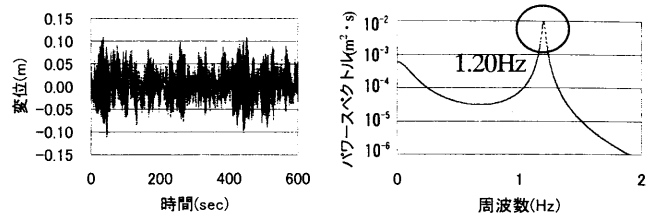
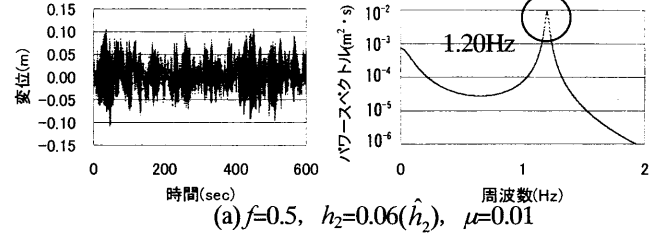
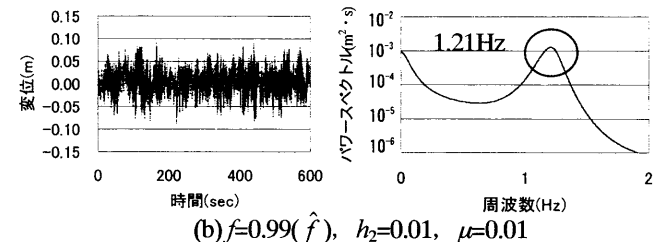


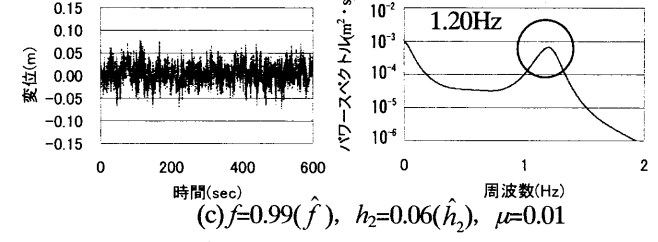
図6 構造物単体の応答変位とパワースペクトル



(a) $f=0.5, h_2=0.06(\hat{h}_2), \mu=0.01$

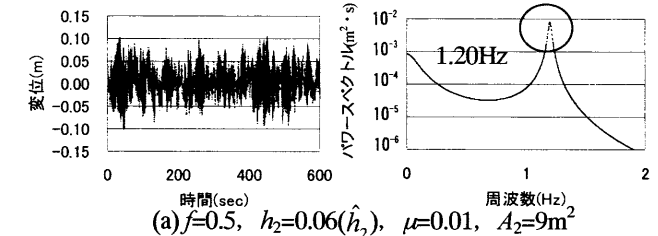


(b) $f=0.99(\hat{f}), h_2=0.01, \mu=0.01$

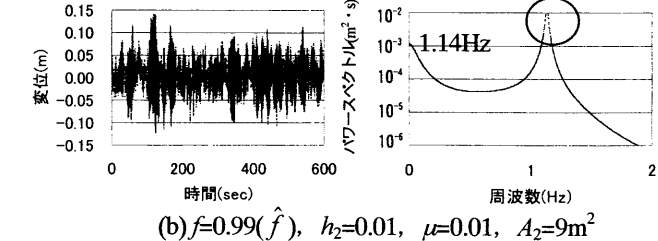


(c) $f=0.99(\hat{f}), h_2=0.06(\hat{h}_2), \mu=0.01$

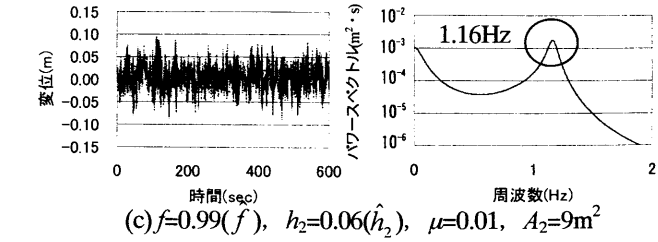
図7 構造物の応答変位とパワースペクトルの比較 (構造物のみ変動風力が作用する場合)



(a) $f=0.5, h_2=0.06(\hat{h}_2), \mu=0.01, A_2=9m^2$



(b) $f=0.99(\hat{f}), h_2=0.01, \mu=0.01, A_2=9m^2$



(c) $f=0.99(\hat{f}), h_2=0.06(\hat{h}_2), \mu=0.01, A_2=9m^2$

図8 構造物の応答変位とパワースペクトルの比較 (付加振動体にも変動風力が作用する場合)

表1 構造物の諸元

質量 m_1 (kg)	53.6×10^3
減衰定数 h_1	0.01
固有周波数 n_1 (Hz)	1.2
風力係数 C_{d1}	1.3
受風面積 A_1 (m^2)	89

表2 計算パラメータ

固有周波数比 f	0.05, 0.1, 0.5, 1, 2, \hat{f}
付加振動体の減衰定数 h_2	0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, \hat{h}_2
質量比 μ	0.1, 0.01, 0.001
付加振動体の受風面積 A_2 (m^2)	0, 3, 9, 15, 30

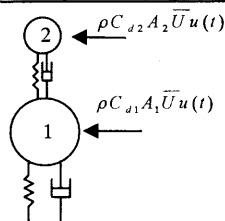


図5 連成2質点モデル (変動風力が作用する場合)

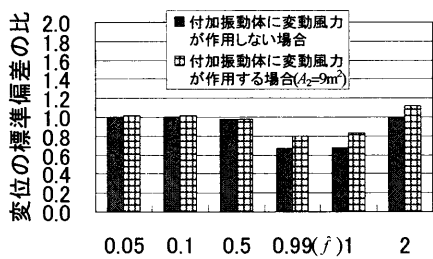
られている。しかしながら、図 8(b)は図 8(a)よりむしろ振幅は増大し、付加振動体に風力を作用させない図 7 の傾向とは一致しない。また同じ最適周波数比と最適減衰定数を適用している図 7(c)と図 8(c)では、付加振動体に風力が作用する図 8(c)の場合の方が制振効果が若干小さく、付加振動体に作用する変動風力の影響が現れている。

図 9(a)と(b)は、付加振動体を取り付けた各 2 質点モデルでの構造物本体(質点 1)の応答変位の標準偏差を付加振動体のないモデル(1 質点モデル)の応答変位の標準偏差で除したものを、固有周波数比と付加振動体の減衰定数で示したもので、付加振動体が受風するかどうかで比較している。ただし、固有周波数比の影響を示した図 9(a)では、付加振動体の減衰定数を最適減衰定数に設定している。また付加振動体の減衰定数の影響を示した図 9(b)では、固有周波数比を最適固有周波数比としている。いずれの場合においても質量比で決まる最適固有周波数比 \hat{f} と最適減衰定数 \hat{h}_2 の時が最も制振効果が高い。図 9(a)に示すように、固有周波数比が最適周波数比より小さい場合には制振効果が得られないが、付加振動体の受風面積が構造物の 10%程度であれば、付加振動体に変動風力が作用しても、一定の制振効果を得られると言える。

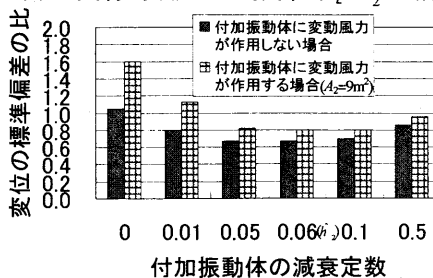
4.1.2 応答変位のパワースペクトル

付加振動体に風力が作用しない場合の図 7(a)のパワースペクトルのピーク周波数は構造物単体の場合の図 6 のパワースペクトルとほとんど変わらないが、固有周波数比あるいは減衰定数に最適値を適用することで、スペクトルピークの尖り度が変化することがわかる。最も尖り度が小さいのは最適固有周波数比と最適減衰定数を適用させた図 7(c)である。

付加振動体に風力が作用する場合の図 8 のパワースペク



(a) 固有周波数比の影響 ($h_2 = \hat{h}_2$ の場合)



(b) 付加振動体の減衰定数の影響 ($f = \hat{f}$ の場合)

図 9 応答変位の標準偏差の比較

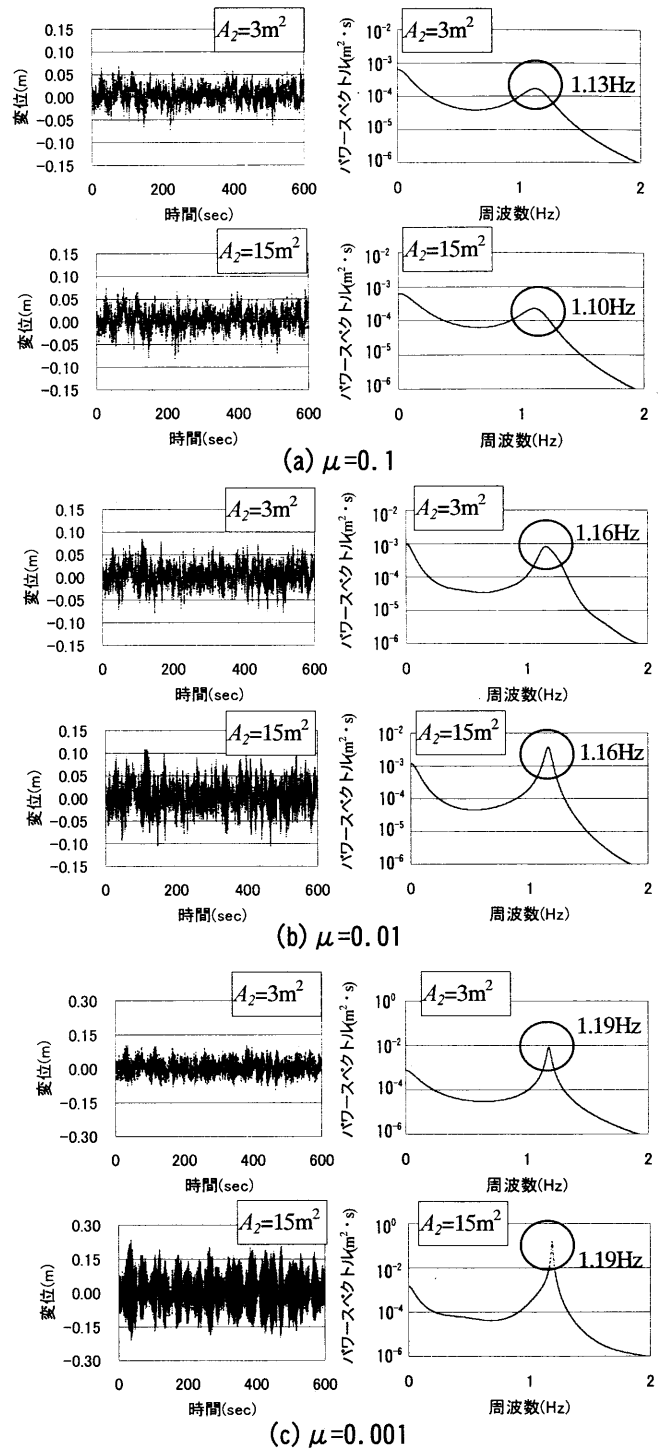


図 10 受風面積の違いによる構造物の応答変位とパワースペクトルの比較 ($f = \hat{f}$, $h_2 = \hat{h}_2$ の場合)

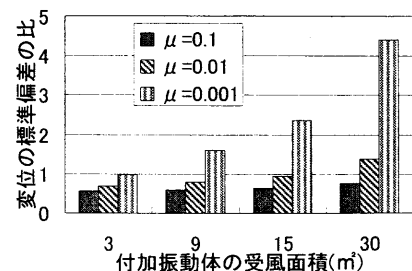


図 11 応答変位の標準偏差に及ぼす付加振動体の受風面積及び質量の影響 ($f = \hat{f}$, $h_2 = \hat{h}_2$ の場合)

トルについても同様に最適固有周波数比と最適減衰定数を適用させた図 8(c)が最もスペクトルピークが小さい。ただし、図 8 の場合には、スペクトルのピーク周波数が固有振動数比や減衰定数の設定によって変化するのが特徴的である。

4.2 質量比, 付加振動体の受風面積の影響

本節では、変動風力を受ける、最適固有周波数比 \hat{f} と最適減衰定数 \hat{h}_2 を有する付加振動体モデルに及ぼす、質量比 μ と付加振動体の受風面積 A_2 の影響を検討する。

4.2.1 応答変位振幅

付加振動体の受風面積が $A_2=3\text{m}^2$ と 15m^2 の場合で、質量比 $\mu=0.1, 0.01$ 及び 0.001 のそれぞれの構造物の応答変位波形とパワースペクトルをそれぞれ図 10(a)と(b)および(c)に示す。ただし図 10(c)の応答波形とパワースペクトルの縦軸は他の波形の縦軸と異なる。図 10(a)の質量比 $\mu=0.1$ の場合では、付加振動体の受風面積に関わらず図 6 の構造物単体の場合に比べて応答変位の振幅が小さく、制振効果が高い。図 10(b)や(c)のように、質量比が大きくなるにつれて制振効果は減少し、受風面積が大きい方ほど制振効果が失われていく傾向が見える。

この傾向は、各モデルの応答変位の標準偏差を受風面積で示した図 11 で明確である。ただし、同図縦軸は図 9 と同じく各モデルと単体モデルの標準偏差との比である。図 11 を見ると $A_2=3\text{m}^2$ の時はいずれの質量比においても構造物単体の場合と比べて標準偏差が小さく、特に $\mu=0.1$ の場合は単体モデルの振動振幅の約半分に抑えられている。付加振動体の受風面積 A_2 が大きくなるにつれて制振効果は失われ、逆に質量比 $\mu=0.001$ で $A_2=15\text{m}^2$ や 30m^2 の場合では単体モデルの 2 倍もしくは 4 倍にも増幅する。

図 12 は前述の図 3 を、質量比 μ をパラメータとして表した変位応答倍率曲線である。ただし、このときの構造物の減衰定数は $h_1=0.01$ としている。図 12 より、外力周波数比が $g=1$ の時、すなわち外力の周波数が構造物の固有周波数と一致する場合には、質量比 μ が大きいほど応答倍率は小さく、理論上は重い付加振動体の方が制振効果は高いが、受風面積が大きくなれば制振効果を失うことになり、強風時での制振効果を高めるには、この両者の効果を考慮しなければならない。

4.2.2 応答変位のパワースペクトル

図 10 に示すパワースペクトルでは、制振効果の減少とともにスペクトルピークの尖り度が鋭くなり、特定の周波数成分が卓越していく様子がわかる。

5. 構造物の振動特性が与える制振効果への影響

前述の表 1 に示した仕様は、塔高 50m 程度の送電鉄塔を想定したものであるが、本節では、同じ風速条件で構造物の諸元を変えた場合の影響を検討する。表 3 は塔高 200m 程度の高鉄塔を想定した諸元であるが、以後、表 1 と表 3 の

構造物をそれぞれ model 1 と model 2 と呼ぶ。風速条件は表 1 と同じとする。

model 1 と model 2 の単体モデルの応答波形とパワースペクトルを図 13 に、付加振動体を設置した 2 質点モデルの応答波形とパワースペクトルを図 14 に示す。図 13 の応答波形を比較すると model 2 の方が振幅が大きい。これは model 2 の固有周波数が model 1 より低いため、一般に低い周波数域のパワーが大きい変動風力のパワーが構造物に入力しやすく、また構造物の減衰が小さいためである。図 14 においては、いずれも質量比に対する最適固有周波数比と最適減衰定数を付加振動体に与えている。質量比 $\mu=0.1$ で付加振動体の受風面積 $A_2=3\text{m}^2$ のときの図 14(a)が最も制振効果が得られ、質量比 0.001 で付加振動体の受風面積 $A_2=30\text{m}^2$ のときの図 14(b)は逆に振幅が増幅した。

図 13 および図 14 の model 1 と model 2 の構造物の応答変位のパワースペクトルを見ると、卓越周波数におけるパワー値は model 2 の方が大きく、応答波形の傾向を反映している。また、図 15 に示す構造物単体の応答変位の標準偏差に対する付加振動体を有する構造物のそれぞれの値を比較すると、質量比 $\mu=0.1, A_2=3\text{m}^2$ の場合では model 1 の制振効果が約 40%であるのに対し model 2 では約 70%の制振効果が得られている。 $\mu=0.001, A_2=30\text{m}^2$ の場合、model 1 では構造物単体の場合と比較して構造物の振動が約 4 倍となるのに対し、model 2 の構造物の振動は構造物単体の約 1.5 倍になった。すなわち、構造物の振動特性は風力変動の周波数特性に関連しながら、付加振動体による制振効果に強く影響を与えると言える。

6. まとめ

送電鉄塔にパッシブ型制振器の設置を想定し、構造物の付加振動体の強風下での制振効果に及ぼす質量比や固有周波数比および付加振動体の受風面積の影響を調べ、以下の所見を得た。

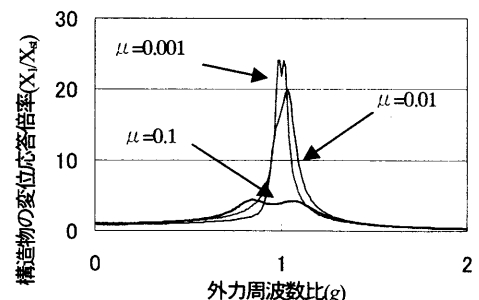


図 12 質量比と変位応答倍率の関係 ($f=\hat{f}, h_2=\hat{h}_2$ の場合)

表 3 構造物の諸元

質量 $m_1(\text{kg})$	500×10^3
減衰定数 h_1	0.003
固有周波数 $n_1(\text{Hz})$	0.5
風力係数 C_{d1}	1.0
受風面積 $A_1(\text{m}^2)$	300

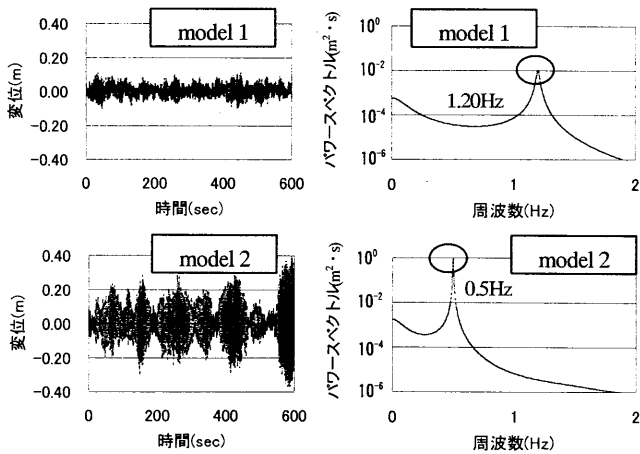
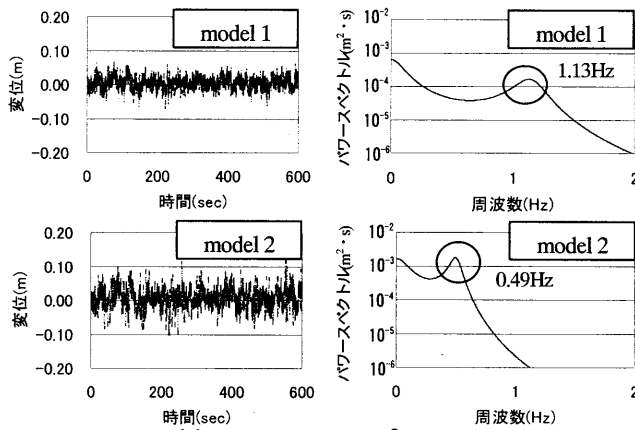
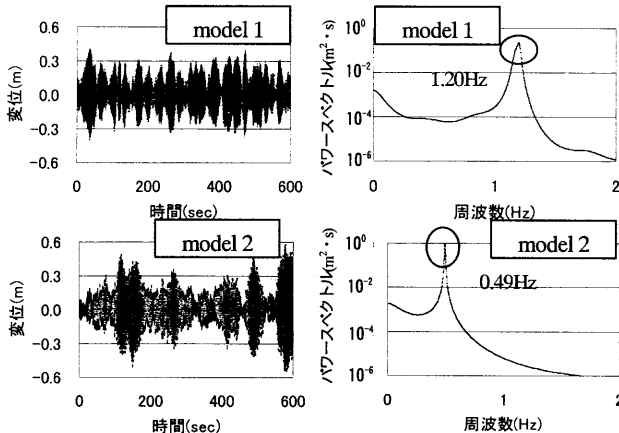


図13 構造物単体の応答変位とパワースペクトルの比較



(a) $\mu=0.1, A_2=3\text{m}^2$ の場合



(b) $\mu=0.001, A_2=30\text{m}^2$ の場合

図14 構造物の応答変位の比較 ($f=\hat{f}, h_2=\hat{h}_2$ の場合)

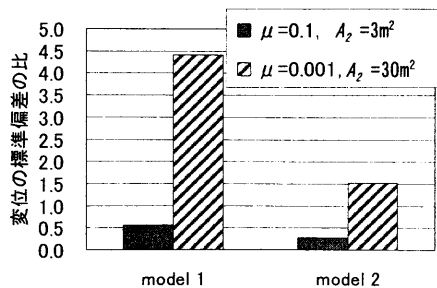


図15 応答変位の標準偏差に及ぼす構造物の振動特性の影響 ($f=\hat{f}, h_2=\hat{h}_2$ の場合)

- (1) 周期外力に対する一般論から導かれる付加振動体の最適固有周波数比と最適減衰定数は強い不規則変動を示す風外力に対しても有効である。
- (2) 強風下においても、付加振動体の質量比は大きいほど構造物の振動抑制効果が高い。
- (3) 付加振動体の質量が小さく受風面積が大きい場合、構造物の振動が増幅する場合があるが、最適値を持つ付加振動体の受風面積が構造物の10%程度であれば、付加振動体に変動風力が作用しても、有効な制振効果を得られる。
- (4) 付加振動体の制振効果は、風速変動の周波数特性に関連しながら構造物の振動特性の影響を受ける。

参考文献

- 1) 平井潤：ハイブリッドマスダンパーシステムを用いた複数モード連成建物の風応答制御に関する実用的研究，九州大学大学院人間環境学府博士論文，2003。
- 2) Susuki, T., Hanada, N., Homma, S. and Maeda, J. : Wind-induced Vibration Control of a 200m-high Tower-supported Steel Stack, Journal of Wind and Structures, Vol. 9, No. 5, pp.345-356, 2006.9.
- 3) 藤村真弓, 森本康幸, 石田伸幸, 前田潤滋：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, 2006.12.
- 4) 本田誠, 山戸秀晃, 前田潤滋, 石田伸幸, 藤村真弓, 網代義文：送電線吊架ジャンパ装置と塔体との動的相互作用についての一考察—電線路直角方向振動に着目して—，第20回風工学シンポジウム論文集，pp.259-264, 2008.12.
- 5) 武田寿一：構造物の免震・防振・制振，技報堂出版，p.171, 1988.
- 6) 藤田勝久：振動工学，森北出版株式会社，pp.108-111, 2005.
- 7) 山口宏樹：構造振動・制御，共立出版株式会社，p.143, 1996.
- 8) 赤池浩次, 中川東一郎：統計的解析と制御，サイエンス社，pp.50-61, 1972.
- 9) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，p.152, pp.213-216, 1977.
- 10) 前田潤滋, 牧野稔：変動風速のスペクトル計算法について—自己回帰法の利点と問題点—，日本建築学会論文報告集，第300号，pp.19-29, 1982.2.

(受理：平成21年6月4日)