

放送用アンテナタワーの風振動性状

吉川 優・浅見 豊・井上 哲士朗*¹・篠崎 洋三*¹・藤山 淳司*¹

Keywords: antenna tower, wind induced vibration, wind tunnel test, vortex excitation

アンテナタワー, 風振動, 風洞実験, 渦励振

1. はじめに

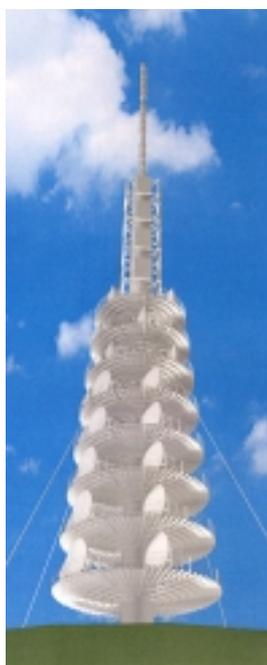


図-1 タワー外観
Exterior

放送用または通信用タワーに作用する風外力は架構形状による影響が大きく、特に架構上にアンテナが数多く設置される場合にはその設置状況に依存する。本研究は、図-2に示すような60mの下部構造および30mのTVアンテナ（以下ゲイン塔）で構成される高さ90mのTV放送用アンテナタワーを対象として風洞実験を実施し、タワーに作用する風荷重を整理するとともに風振動性状を評価することを目的とする。

風振動を調べるにあたり、自然風の乱れによる風向方向の振動と、構造物後流の周期的な渦発生による風直角方向の振動とに分けて検討する。風向方向振動は、空力実験からタワー各部の設計用風力係数を整理し、応答解析により求める。風直角方向振動は、空力振動実験およびゲイン塔部分モデルに対する全弾性模型実験から応答を直接計測し、その性状を把握する。なお、本検討では風振動時におけるアンテナの機能維持という観点から、各応答について頂部回転角を評価する。

2. 風向方向振動

2.1 評価方法

風向方向振動は、空力実験（注1）から外力を得て応答解析により評価する。本アンテナタワーは1次モードおよび

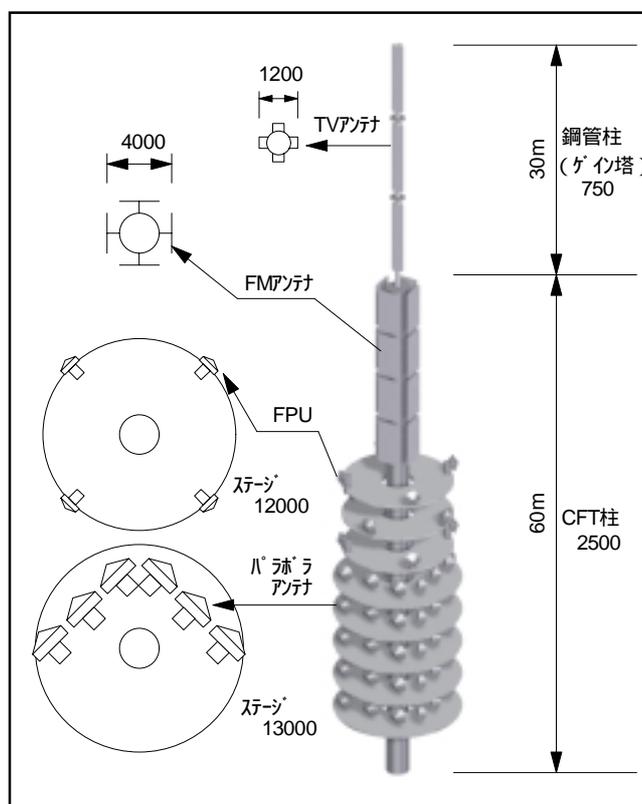
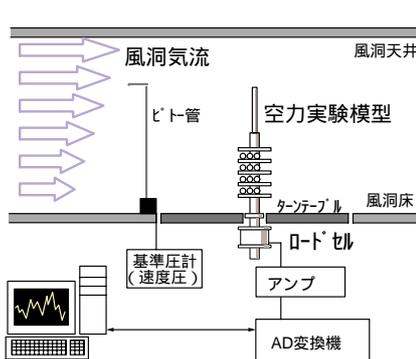


図-2 アンテナタワー概要
Contents of the tower



注1 空力実験は、構造物に作用する風力を検出する実験法である。模型基部（風洞床下）にロードセルを設置し、風洞気流中の模型全体に作用する力を計測する。実験結果は風力係数として整理し、応答解析に用いる。

* 1 設計本部 構造（井上Gr.）

放送用アンテナタワーの風振動性状

び2次モードにおいて、地上60m以上のゲイン塔部分が大きく振られる振動特性を有する。これらの影響を考慮するためには、風力の高さ方向分布を得て各振動モードに対応した風力を定める必要があるが、空力実験では模型全体に作用する風力しか評価できない。そこで実験模型の各部（アンテナ、ステージ等）を着脱可能なものとし、それらの搭載条件を変えながら各模型状態で実験を行うことによって、実験結果の差分から各部分ごとに作用する風力を得ることができる。これにより風力の高さ方向分布が推定でき、高次モードまでの応答評価が可能となる。

2.2 空力実験

2.2.1 実験条件

空力実験模型はアンテナやステージ等が着脱可能となるよう製作し、構成要素の最も少ないケースから、ひとつづつ付加していき全て搭載したケースまで、計7ケースの模型状態を設定する（ゲイン塔のみのケースについては、模型規模を考慮して縮尺率の異なる模型を別途用意する）。各ケースの外観を図-3に示す。タワー全体モデル（case_a～f）は模型縮尺1/250、ゲイン塔のみの部分モデル（case_g）は1/100とする。実験条件を表-1に、実験風向を図-4に示す。実験気流は、case_a～fは地表面粗度区分2の勾配流を模擬し、ゲイン塔のみの部分モデルについては一様流とした。実験状況を写真-1～4に示す。

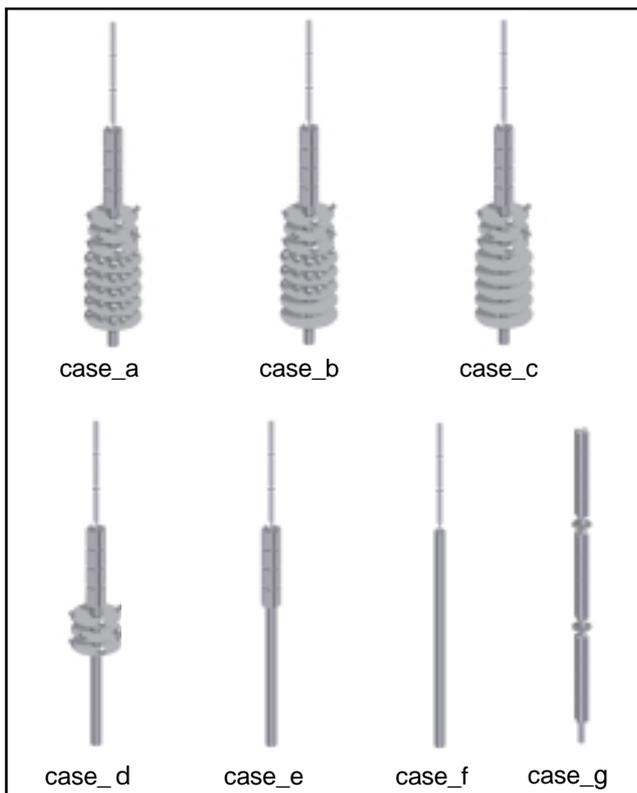


図-3 実験ケース
Exterior of test cases

表-1 実験ケース（ : 模型各部の設置状況を示す）
Test cases

実験ケース	a	b	c	d	e	f	g
ゲイン塔							
CFT柱							
FMアンテナ							
FPU&77-ジ'3段							
パラボラステージ							
パラボラアンテナ上3段							
パラボラアンテナ下2段							
実験気流	勾配流（粗度区分2）						一様流
実験風向	0～180		0～90			0～45	
模型縮尺	1/250						1/100

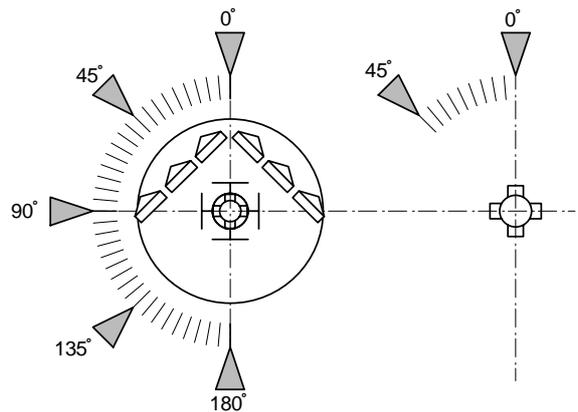


図-4 実験風向
Test direction of the wind

2.2.2 実験結果

（模型全体に作用する風力の測定結果）

各実験ケースにおいて模型全体に作用する風力（風向方向の水平力および転倒モーメント）の平均値を測定し、式(1)(2)により風力係数、転倒モーメント係数として整理する。

$$Cd = \frac{F}{\{q_H \cdot B \cdot H\}} \quad \dots (1)$$

$$Cm = \frac{M}{\{q_H \cdot B \cdot H^2\}} \quad \dots (2)$$

ここで、

Cd : 風力係数

Cm : 転倒モーメント係数

F : 風向方向に作用する水平力の平均値

M : 風向方向に作用する転倒モーメントの平均値

q_H : 頂部高さにおける速度圧

B : 代表幅 ・ case_a～f : 10mm（実大換算2.5m）

・ case_g : 12mm（実大換算1.2m）

H : 代表高さ ・ case_a～f : 360mm（実大換算90m）

・ case_g : 300mm（実大換算30m）

case_a～fの風力係数および転倒モーメント係数の風向による変化を図-5および図-6に、case_gの風力係数の風向による変化を図-7に示す。

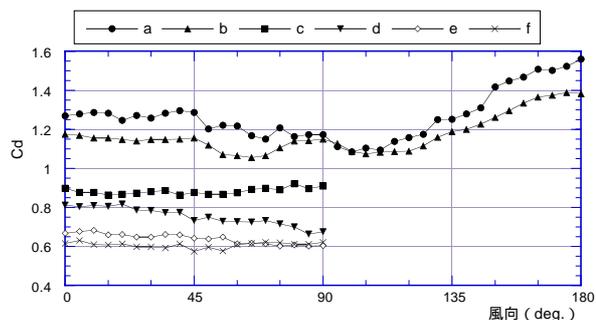


図-5 風力係数の風向による変化 (case_a ~ f)
Drag coefficient

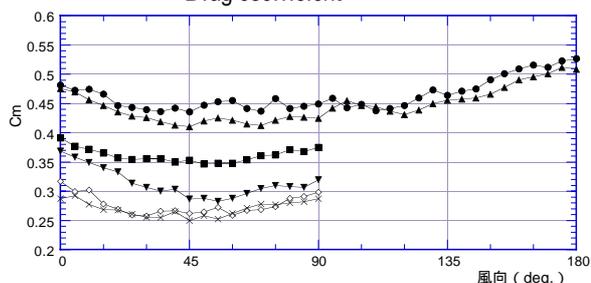


図-6 転倒モーメント係数の風向による変化 (case_a ~ f)
Over turning moment coefficient

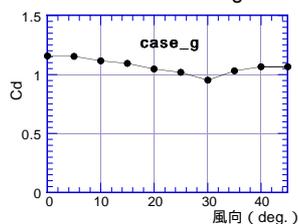


図-7 風力係数の風向による変化 (case_g)
Drag coefficient

2.2.3 風力の高さ方向分布の設定

実験結果に基づいて、アンテナタワー各部に関する風力係数を設定する。実験結果および平面形状の対称性を考慮し、case_aおよびcase_bについては風向180°、その他のケースについては風向0°を対象風向とする。まずcase_gの実験結果からゲイン塔における風力係数が決まる。case_fはゲイン塔+CFT柱のモデルであり、ゲイン塔の風力係数が既知であるため、case_fの風力係数および転倒モーメント係数が実験値と合うようにCFT柱部分の風力係数を設定する。同様にして、case_e d c b aの順に各部分ごとの風力係数を定めてゆくことにより、風力の高さ方向分布が得られる。この時、各部の見付面積は風向方向に正対する面への投影面積とする。各部の部分風力係数、代表幅および見付面積の充実率を表-2に示す。

表-2 風力係数分布
Distribution of drag coefficient

部位	風力係数	見付幅	充実率
ゲイン塔	1.16	1.2	1
FMアンテナ	1.05	2.5	1
FPU&ステージ	1.04	12	0.45
パラボラ (ステージのみ)	0.80	13	0.39
パラボラ (ステージ & パラボラアンテナ)	1.40	13	0.82
基部	0.79	2.5	1

2.3 応答解析

2.3.1 応答解析手法

応答解析により風向方向の風振動を求める。図-8および表-3に示す1次モード~3次モードを対象とし、次数毎にスペクトルモーダル法による統計的応答解析法を実施する(補足)。平均風力分布は実験結果に基づいて設定した値を用い、変動風力はパフェッティング理論¹⁾に基づき展開する。この時、風上面と風下面の変動風力は無相関とし、且つ空間相関に基づく低減効果については高さ方向のみモデル化し、平面方向は構造物の形状を考慮して完全相関とする。

応答は回転角で評価する。各次の最大回転角は式(3)より得るものとする。

$$\hat{\theta}_j = \bar{\theta}_j + \sigma_{\theta_j} \cdot g_{f_j} \quad \dots (3)$$

ここで、 j 次回転角の平均値、標準偏差、ピークファクターをそれぞれ $\bar{\theta}_j$ 、 σ_{θ_j} 、 g_{f_j} とする。

1次モード~3次モードの重ね合わせについては式(4)(5)(6)(7)の通りとする。

$$\hat{\theta}_{total} = \bar{\theta}_{total} + \sigma_{\theta_{total}} \cdot g_{f_{total}} \quad \dots (4)$$

$$\bar{\theta}_{total} = \sum_j \bar{\theta}_j \quad \dots (5)$$

$$\sigma_{\theta_{total}} = \sqrt{\sum_j \sigma_{\theta_j}^2} \quad \dots (6)$$

$$g_{f_{total}} = \frac{1}{n_j} \sum_j g_{f_j} \quad \dots (7)$$

j : モード次数

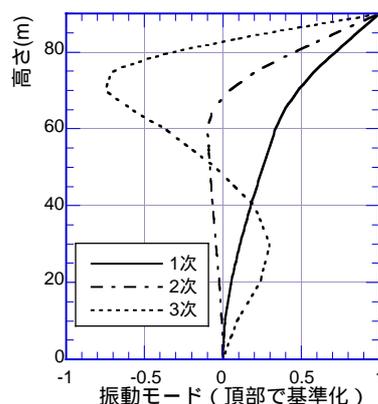


図-8 振動モード
Vibration modes

表-3 振動特性

Characteristics of vibration

	固有振動数 (Hz)	一般化質量 (ton)
1次	0.345	35.889
2次	0.649	9.017
3次	2.174	52.021

2.3.2 応答解析結果

前項の手法に基づき応答解析を実施した。減衰定数の設定には既往の調査結果²⁾を参考とし、0.5%～3%（全次数一定）の範囲を対象として応答を算定する。解析結果は最大頂部回転角の風速による変化として示す。各モード別の応答解析結果を図-9～11に示す。同図より、1次モードの寄与が大きいが分かる。

1次～3次モードの応答を重ね合わせた結果を図-12に示す。頂部風速30m/sにおいて、減衰が1%以上であれば頂部回転角の最大値が1°以内であることが確認できる。

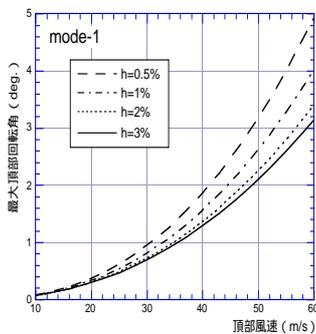


図-9 応答解析結果
(1次モード)
Maximum response rotation (first mode)

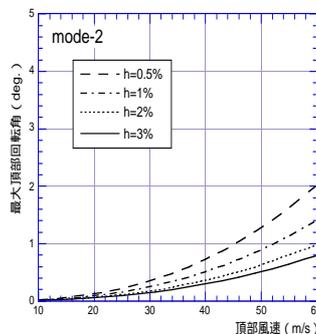


図-10 応答解析結果
(2次モード)
Maximum response rotation (second mode)

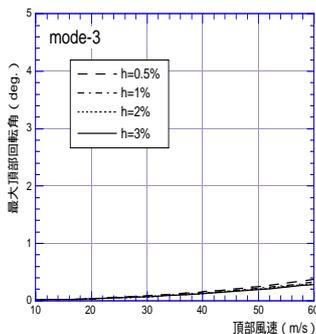


図-11 応答解析結果
(3次モード)
Maximum response rotation (third mode)

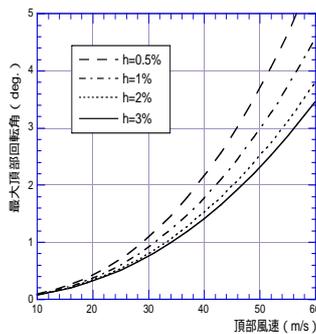


図-12 応答解析結果
(1次～3次モード重ね合せ)
Maximum response rotation

3. 風直角方向振動

3.1 評価手法

構造物後流の渦発生による風直角方向の振動は、渦励振（渦発生に伴う周期的外力と構造物の固有振動との共振現象）等が発生する可能性を考慮し、空力振動実験より求めるものとする。空力振動実験は、質量・バネを有する振動模型を用いて、気流中の模型の応答を直接検出する実験である。ここでは以下の2種類の空力振動実験を実施する。

3.1.1 2自由度空力振動実験

アンテナタワーをCFT柱部分とゲイン塔部分の2質点系としてモデル化し、2自由度の振動模型を用いた空力振動実験を実施する。アンテナタワー全体の2次モードまでを対象として風直角方向振動を求める。

3.1.2 ゲイン塔全弾性模型実験

ゲイン塔のみに着目し、模型全体を弾性体とした空力振動実験である。ゲイン塔部分は見付幅が小さく、また長さ30mに渡って平面形状がほぼ均一であることから、当該部分に対して渦励振発生の可能性が大きいと予想される。ただし、ゲイン塔単体の1次モードに関する渦励振は低風速時に越えてしまい、影響が小さいことが既往の知見より推察されるため、本実験では2次モード（ゲイン塔単体に関する2次モード）を対象に渦励振発生の有無を調べる。

3.2 2自由度空力振動実験

3.2.1 実験概要

模型縮尺は1/125とする。実験模型は下部構造（CFT柱部）およびゲイン塔をそれぞれアルミ製剛模型とし（アンテナ等の付属物はアクリル製またはバルサ製）、それぞれ模型縮尺に応じた質量を付加する。各部の基部には板バネを設置し、1方向2自由度系の模型とする。その際、板バネの振動方向は風直角方向のみとする。

図-13に示すように、レーザー変位計を2台用いてゲイン塔およびCFT柱頂部の時刻歴変位を計測する。実験気流は一様流とし、風向は図-14に示すように45°ピッチの5風向とする。自由振動時の減衰定数は1.8%であった。実験の縮尺諸元を表-4に示す。実験状況を写真-5に示す。

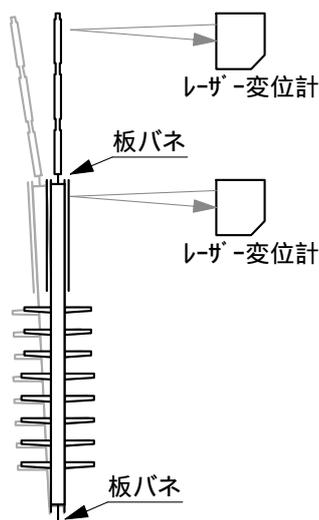


図-13 2自由度振動実験概要
Aerodynamic vibration test
for double degree of freedom system

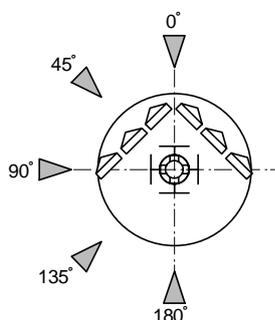


図-14 実験風向
Test direction of the wind

表-4 縮尺諸元
Scaling factor

長さ比	8.00×10^{-3}
重量比	5.12×10^{-7}
風速比	2.50×10^{-1}
時間比	3.20×10^{-2}

3.2.2 実験結果

図-15にゲイン塔部分における回転角（最大値）の風速による変化を示す。ばらつきはあるものの全風向ともに風速増加に伴って概ね単調増加するが、頂部風速50m/s時に回転角 0.15° 以下と風向方向振動に比べて小さい。

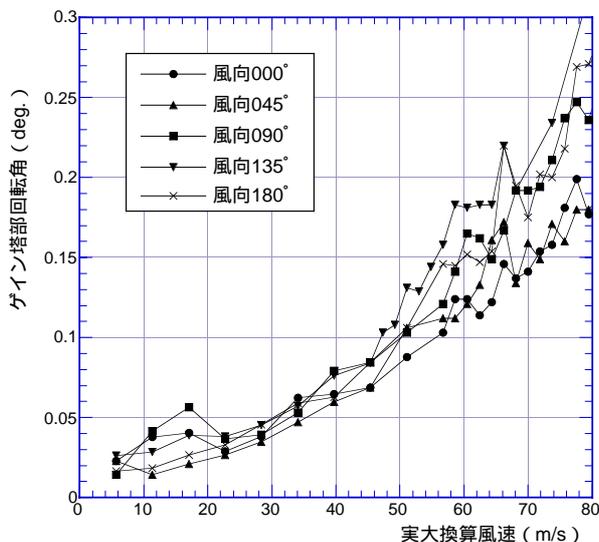


図-15 2自由度振動実験結果
Maximum response rotation

3.3 ゲイン塔全弾性模型実験

3.3.1 実験概要

ゲイン塔部に着目し、当該部位の2次モードに関する風直角方向振動について検討する。高さ方向に断面が均一である金属シャフトを用いて全弾性模型による空力振動実験を実施する。模型概要を図-16に示す。重量、剛性、加工性を考慮しシャフトは銅製とし、模型縮尺は1/50とする。弾性体は銅製シャフトのみとし、付属物であるアンテナは力を伝えるのみで剛性・重量に寄与しないものとして軟質スポンジを用いる。基部は固定とし、頂部および1/3高さの位置に小型加速度計を設置して風直角方向の応答加速度を計測する。実験の縮尺諸元を表-5に示す。

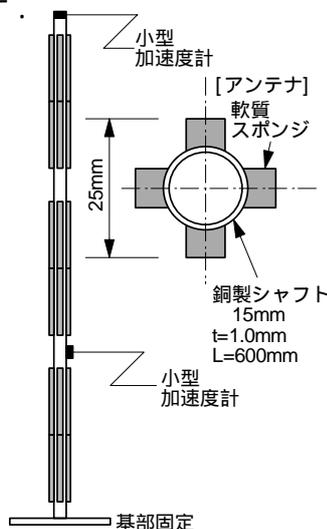


図-16 全弾性模型実験概要
Full elastic model

表-5 縮尺諸元
Scaling factor

長さ比	2.00×10^{-2}
重量比	8.00×10^{-6}
風速比	9.57×10^{-1}
時間比	2.10×10^{-2}

3.3.2 自由振動試験

全弾性模型の自由振動特性を把握するため、自由振動試験を実施する。無風時に模型頂部を金属棒で叩き、自由振動過程を計測する。自由振動のパワースペクトルを図-17に示す。28Hzに1次モードが、175Hzに2次モードが現れている。130Hz～200Hzのバンドパスフィルターを施した後の自由振動波形から対象とする2次モードの減衰定数を算出したところ0.12%であった。

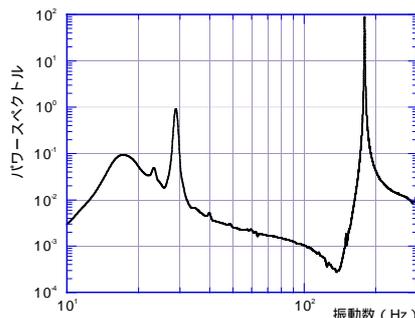


図-17 自由振動のパワースペクトル
Power spectrum density of free vibration

3.3.3 気流中振動実験結果

実験気流は一樣流とし、実験風速を0m/sから約24m/sまで変化させて振動時の応答加速度を計測する。図-18は模型の最大応答加速度（頂部）と風速との関係を示したものである。実験ケースは、銅製シャフトのみの場合と、軟質スポンジ製のアンテナを設置した場合の2通りとし（写真-6, 7）、アンテナを設置したモデルは0°および45°の2風向について実施する。同図より、次の2点において2次モードの渦励振が観察された。

[渦励振 1]：銅シャフトのみ、実験風速12.9m/s

[渦励振 2]：銅シャフト+アンテナ、実験風速23.4m/s、風向45°
銅製シャフト+アンテナのモデルにおいて風向0°の場合は渦励振は発生しなかった。自由振動試験による2次の固有振動数および共振風速からストローハル数を算出したところ、銅製シャフトのみの場合でSt=0.20、銅製シャフト+アンテナ（風向45°）の場合でSt=0.17となった。また[渦励振 2]における時刻歴波形の一部を図-19に示す。実線が頂部の加速度波形、破線が中間部の加速度波形である。2次モードの共振波形であるため、両波形は逆位相で振動していることが分かる。

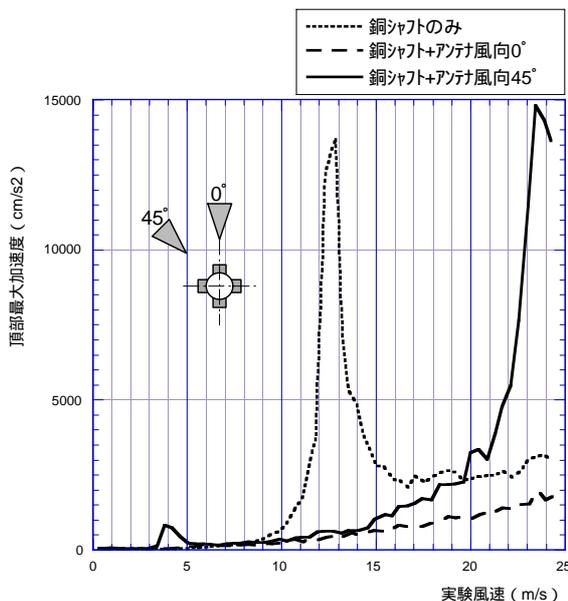


図-18 全弾性模型による実験結果
Maximum response acceleration

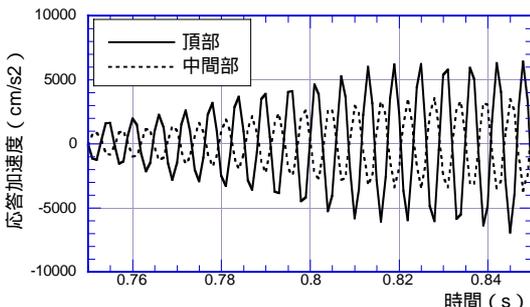


図-19 共振時の加速度波形
Acceleration waveforms

3.3.4 共振時風力係数

実験で計測された2次の渦励振について、共振時風力係数を求める。最大応答加速度と模型質量およびモード形状から模型に作用する等価風力分布を求め、発振風速時の速度圧および模型寸法より共振時風力係数の分布を求める。

$$Cr(z) = \frac{F(z)}{q_H \cdot B \cdot dz} = \frac{\{\rho \cdot dz \cdot \ddot{x}(z)\}}{q_H \cdot B \cdot dz}$$

ここに、

$Cr(z)$ ：高さ z における共振時風力係数

$F(z)$ ：高さ z における風力

q_H ：共振風速時の速度圧

B ：代表幅 ・銅シャフトのみ：15mm

・銅シャフト+アンテナ（風向45°）：22.6mm

ρ ：銅シャフトの線密度

$\ddot{x}(z)$ ：高さ z における最大応答加速度

上式より求めた共振時風力係数分布を図-20に示す。

3.3.5 共振時回転角

実験で得られた応答加速度より共振状態における回転角を求める。ゲイン塔各部における回転角の最大値を図-21に示す。回転角はゲイン塔頂部において最大となり、実大換算風速24m/s時に約0.06°であった。

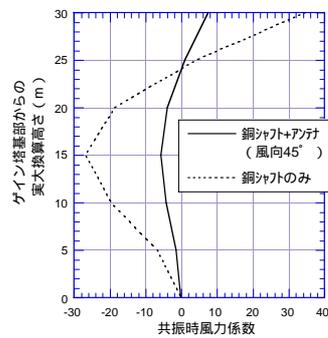


図-20 共振時風力係数分布
Wind force coefficient at resonance

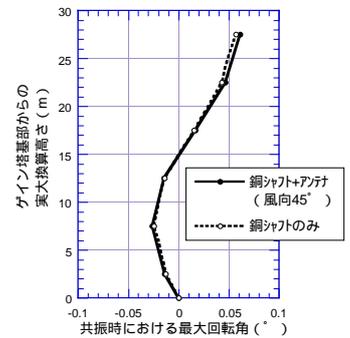


図-21 共振時における最大回転角
Maximum response rotation at resonance

4. まとめ

空力実験から本アンテナタワーに関する風向方向の風力係数分布を整理し、応答解析により風向方向振動を算定した。また、2自由度空力振動実験およびゲイン塔全弾性模型実験を実施し、風直角方向振動を計測した。

ゲイン塔頂部回転角の最大値で各応答を比較すると、頂部風速30m/s時に風向方向振動は約1°（減衰1%）、風直角方向振動は約0.05°であった。ただし、風速24m/s時にゲイン塔部において2次の渦励振が発生し（風向45°）、その際の頂部回転角は約0.06°であった。本アンテナタワーの風振動性状として、風向方向振動が卓越していることを確認した。



写真-1 空力実験模型 (case_a)
Model for aerodynamic force balance test

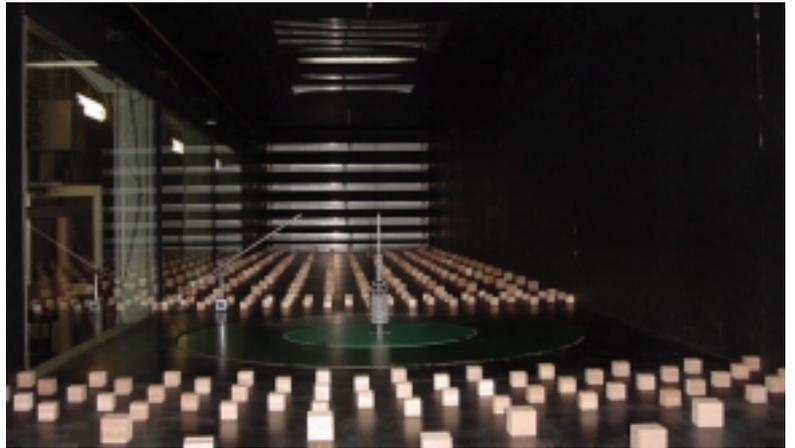


写真-2 風洞内観
Interior of wind tunnel



写真-3 パラボラステージ
Stage of parabola antenna



写真-4 空力実験模型 (case_g)
Model for aerodynamic force balance test

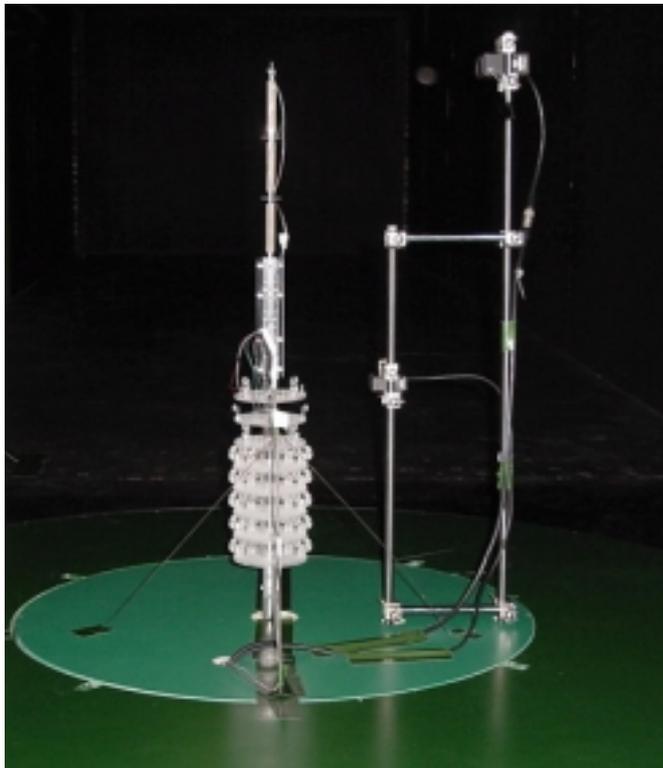


写真-5 空力振動実験模型
Model for aerodynamic vibration test



写真-6 ゲイン塔全弾性模型
(アンテナ有)
Full elastic model
with antenna



写真-7 ゲイン塔全弾性模型
(銅製シャフトのみ)
Full elastic model
without antenna

(補足)

スペクトルモーダル法は、風応答解析において一般的に用いられている統計的応答解析法である。

一般化変位の平均値： $\bar{x}_{Gj} = \bar{F}_{Gj} / K_{Gj}$

一般化変位の標準偏差： $\sigma_{xj}^2 = \int_0^\infty S_{xj}(n) dn$

一般化変位の最大値： $\hat{x}_{Gj} = \bar{x}_{Gj} + g_f \sigma_{xj}$

ここで、

\bar{F}_{Gj} : j 次モードの一般化風力の平均値
(平均風力係数より算定)

K_{Gj} : j 次モードの一般化剛性

$$K_{Gj} = (2\pi n_j)^2 M_{Gj}$$

M_{Gj} : j 次モードの一般化質量

$$M_{Gj} = \int_0^H m(z) \mu_j(z)^2 dz$$

$m(z)$: 質量の高さ分布

$\mu_j(z)$: j 次モード

$S_{xj}(n)$: j 次モードの一般化変位のパワースペクトル

$$S_{xj}(n) = |\chi_{Gj}^2(n)| \cdot S_{Fj}(n)$$

$|\chi_{Gj}^2(n)|$: j 次メカニカルアドミタンス

$$|\chi_{Gj}^2(n)| = \frac{1}{K_{Gj}^2} \frac{1}{\left\{ 1 - \left(\frac{n}{n_j} \right)^2 \right\}^2 - 4h_j^2 \left(\frac{n}{n_j} \right)^2}$$

n_j : j 次固有振動数

h_j : j 次減衰定数

$S_{Fj}(n)$: j 次モードの一般化風力のパワースペクトル
(パフエティング理論に基づき展開)

$$\begin{aligned} S_F(n) &= \int_0^H \int_0^H \int_{-B/2}^{B/2} \int_{-B/2}^{B/2} \rho^2 \cdot U(z_1) \cdot U(z_2) \\ &\quad \cdot C_D(z_1) \cdot C_D(z_2) \cdot R_u(n, y_1, y_2, z_1, z_2) \\ &\quad \cdot \sqrt{S_u(n, y_1, z_1) \cdot S_u(n, y_2, z_2)} \\ &\quad \cdot \mu(z_1) \cdot \mu(z_2) dy_1 dy_2 dz_1 dz_2 \\ &= (2q_H I_H B)^2 \frac{S'_u(n)}{n} \int_0^H \int_0^H C_D(z_1) \cdot C_D(z_2) \\ &\quad \cdot R_u(n, z_1, z_2) \cdot \left(\frac{z_1}{H} \right)^{\alpha-0.05} \left(\frac{z_2}{H} \right)^{\alpha-0.05} \\ &\quad \cdot \mu(z_1) \cdot \mu(z_2) dz_1 dz_2 \end{aligned}$$

$R_u(n, z_1, z_2)$: 変動風速のコヒーレンス

$$R_u(n, z_1, z_2) = \exp \left\{ -8 \frac{n|z_1 - z_2|}{U_H} \right\}$$

$S'_u(n)$: 変動風速の無次元パワースペクトル

$$S'_u(n) = \frac{4 \left(\frac{nL_H}{U_H} \right)}{\left\{ 1 + 70.8 \left(\frac{nL_H}{U_H} \right)^2 \right\}^{5/6}}$$

g_f : ピークファクター

$$g_f = \sqrt{2 \ln v_f T} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln v_f T}}$$

v_f : レベルクロッシング数

(単位時間に平均値を横切る回数)

$$v_f = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{\sigma_x}{\sigma_x} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty n^2 S_{xj}(n) dn}{\int_0^\infty S_{xj}(n) dn}}$$

以上より得られる一般化変位にモード $\mu_j(z)$ を乗じることにより、各高さの変位を得ることができる。

また、回転角の応答 θ_j , σ_{θ_j} は、

$$\frac{\mu_j(z_1) - \mu_j(z_2)}{z_1 - z_2}$$

を \bar{x}_{Gj} , σ_{xj} に乗じて求めることができる。

参考文献

- 1) 大熊武司, 神田順, 田村幸雄
: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, pp.136-143, 1996.
- 2) 日本建築学会
: 建築物の減衰, 丸善株式会社, pp.262-265, 2000.