

副

土木研究所資料

関門橋長期観測データ解析報告書(その4)

昭和53年3月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

序

昭和48年秋に完成した、本州と九州を結ぶ関門橋には強風および地震に対する本橋の応答を調べるための長期観測システムが取り付けられているが、観測記録の解析は建設省土木研究所が受託業務として担当することとなり、昭和49年度に作業が開始された。

本年度は新たに収録されたデータを用いて関門海峡における風の特徴および関門橋の応答特性を解析するとともに、風の実測データから応答の特性を推定し応答の実測データから得られた特性と比較するという解析も行なっている。

昭和53年3月

構造研究室	室長	成田	信之
	研究員	横山	功一
	研究員	佐藤	弘史
	室員	湯沢	聡

目 次

1. ま え が き	1
2. 昭和 5 2 年度収録分のデータ解析	2
2.1 収録したデータ	2
2.2 風 の 特 性	2
2.3 補剛桁の応答の特性	2
3. 補剛桁の鉛直たわみおよびねじれ応答の推定	3
3.1 計算条件	3
3.2 計算結果	3
3.3 考 察	3
4. ま と め	4
参考文献	4
APPENDIX 吊橋のガスト応答計算（たわみおよびねじれ成分）	5
図 表	13

1 ま え が き

中小橋梁にとって従荷重にすぎない風荷重も、長大吊橋および長大斜張橋では設計に及ぼす比重を高め、風荷重により一部の部材が決定されたり、風による空力不安定振動現象が設計案の可否を決定したりする。そのため関門橋についても設計の当初から設計風速調査および風洞模型実験が実施され、関門橋架橋地点での風の特性および設計案の耐風安定性が検討され、最終的に実施計画案として耐風安定性の良好な設計案が得られた。

本橋の竣工以前にも、若戸大橋、尾道大橋その他多くの長大橋が設計されていたが、海峡を横断し中央径間長500mを越す長大吊橋は関門橋のみであり、したがって長大橋としての実橋の挙動を観測し、行なった耐風設計の妥当性を確認することは重要なことであると考えられた。また得られたデータは将来の長大橋の耐風設計のためにも貴重な資料となるであろうと考えられた。

以上のような考えに従って長期観測システムに関門橋に設置され、観測が開始された。観測システムに関しては既に詳細な紹介がなされており、⁽¹⁾その後システムに大幅な変更はないので、ここでは図-1、2、表-1～3にその資料を掲げるのみにとどめる。

当研究室は関門橋長期観測データの解析を昭和49年度に開始したが前年度までの解析内容を以下にまとめる。

昭和49年度⁽¹⁾は自然風の特性（風速分布、風向分布、パワースペクトル、乱れ強さ、ガストファクターなど）、補剛桁応答の特性（平均値、標準偏差、パワースペクトルなど）、平均風速と応答との関係、補剛桁水平方向振動変位に関する計算値との比較などについて調査を行なった。

昭和50年度⁽²⁾は自然風の特性（傾斜角、パワースペクトル、空間相関など）、補剛桁水平不規則振動に関する計算値との比較およびパラメータの影響などについて調査を行なった。

昭和51年度⁽³⁾は台風時のデータについて、自然風の特性（風の時刻変化、ガストファクター、乱れ強さ、パワースペクトル、傾斜角、風の分布、コヒーレンシーなど）、補剛桁応答の特性（平均値、標準偏差、パワースペクトル、平均風速と応答の関係）などについて調査を行なった。

本年度は新たに収録されたデータを用いて、自然風の特性および補剛桁応答の特性を調査するとともに、昨年度得られた強風時のデータを用いて風速のパワースペクトルを求め、これを入力としてねじれ応答および鉛直たわみ応答のパワースペクトルを推定し、実測値のそれと比較する、という解析も行なった。

2 昭和52年度収録分のデータ解析

2.1 収録したデータ

昭和52年4月から現在までに得られたデータを表-4にまとめた。今回は $\phi 4.4$ を除いては一応磁気テープにデータが記録されていたが、読み取れるデータ数が当研究室で標準としている2,000個(時間にして400秒)に満たないものが圧倒的に多いというトラブルが生じた。この原因については現在検討中である。

2.2 風の特性

本年度は台風のような強風記録は得られていない。風向風速の測定値に対し、平均値・標準偏差・乱れ率・最大値・最小値の諸量を計算したものを表-5にまとめた。なお上述したようにデータ数の少ないものが多かったので、これらの計算はデータ数が1,000個(時間にして200秒)以上のものについてすべて行なった。

2.3 補剛桁の応答の特性

加速度応答および変位応答の測定値に対し、平均値・標準偏差・乱れ率・最大値・最小値の諸量を計算したものを表-6にまとめた。なお表-6の時刻は表-5に対応させてある。

追加および補足

2.3 補剛桁の応答特性

～に対応させてある。表-6は解析プログラムからの出力をそのまま掲載したものであるが、加速度に関する平均値および変位に関する諸量の値は常識的な値と異なる場合が少なくない。したがってこれらのデータを取扱う場合は充分な注意が必要である。

表-5 風の測定結果

風速の単位は m/s ，風向の単位は度であり北を0度としている。

表-6 応答の測定結果

鉛直たわみ，水平たわみの加速度の単位は gal ，ねじれの加速度の単位は rad/s^2 ，変位の単位は cm である。

3 補剛桁の鉛直たわみおよびねじれ応答の推定

3.1 計算条件

この計算は変動風速のパワースペクトルから補剛桁の鉛直たわみおよびねじれ応答のパワースペクトルを推定するものである。詳細についてはAPPENDIX を参照されたい。計算条件を表-7 および図-3に示す。なお応答の計算位置としては中央スパンの1/2点を取ったため、対称モードのみを考慮した。また実測データとしては昨年度の台風時のデータ、すなわち昭和51年9月13日3時40分のもを用い、この風速および応答の統計量を表-5および表-6にあわせて示した。

3.2 計算結果

変動風速鉛直成分のパワースペクトルを、実測値とPanofsky & McCormick の式のものとあわせて図-4に示す。また中央スパン1/2地点での実測した鉛直たわみおよびねじれ応答のパワースペクトルを図-5に示す。このパワースペクトルは同地点に設置された2台のサーボ型加速度計からの出力を加算あるいは減算して、たわみ加速度およびねじれ加速度のパワースペクトルを計算し、これを周波数の4乗で除すことにより求まる。

また計算により推定した応答のパワースペクトルを図-6～図-11に示す。表-7の計算条件に示したように、今回の計算は入力のパワースペクトルおよび空力アドミッタンスを違えた6ケースについて行なった。

3.3 考 察

たわみおよびねじれのスペクトルについてパワーの大きな1次および2次モードの固有振動数付近のピーク値を表-8に示す。表-8あるいは図-5～図-11から次のことが読み取れる。

- 1) 鉛直たわみパワースペクトル推定値のピークは実測値のそれよりも小さい。
- 2) ねじれパワースペクトル推定値のピークは実測値のそれより大きい。
- 3) 空力アドミッタンスとしてDavenport の考えを用いた場合は、他の場合に比べピーク値が小さい。
- 4) 実測値の変動風速パワースペクトルを入力した方がPanofsky & McCormick の式によるものを入力して得られるピーク値より大きい。

1), 2)に示した実測値との差の原因としては、非常空空気力として平板構造物に作用するTheodorsen 空気を関門橋のようなトラス補剛桁に適用したこと、空間相関関数の λ および構造減衰定数を一般に用いられている値に固定したことなどが考えられる。

4 ま と め

本年度の調査内容をまとめる。

- 1) 本年度収録新たに収録されたデータから、風速および応答に関する基本的な統計量を表にまとめた。1回の観測により記録されるデータ数が少ないものが多かったので、詳細な解析は省略した。なおこの原因については現在調査中である。
- 2) 昨年度得られた強風時のデータを用いて、変動風速のパワースペクトルから鉛直たわみおよびねじれ応答パワースペクトルを求める計算を行なった。実測によるパワースペクトルと計算によるそれとの大きさには差があるが、これは計算に用いるパラメータ（非定常空気力など）の設定値が不適当なためと思われる。

今後の課題としては上述の2)に関連して、推定計算の精度を向上すること、中央径間1/4点での推定計算および低風速領域での推定計算も行なうことなどがあり、これらを通じて変動風速と応答との間のシステムを正確に評価および把握してみたい。またそのためにも今後ともデータの蓄積に努力しなければならないであろう。

最後に、貴重なデータを提供された日本道路公団関係各位に深く謝意を表わす。特に、下関管理事務所の豊田副所長、山川補修課長、同課鶴氏および徳丸氏には長期観測システムの調整、強風データの収録など特別の尽力をいただいた。記して感謝の意を表わす。

参 考 文 献

1. 建設省土木研究所構造研究室；関門橋長期観測データ解析報告書（その1），土木研究所資料№1015，昭和50年3月
2. 建設省土木研究所構造研究室；関門橋長期観測データ解析報告書（その2），土木研究所資料№1128，昭和51年3月
3. 建設省土木研究所構造研究室；関門橋長期観測データ解析報告書（その3），土木研究所資料№1214，昭和52年3月

APPENDIX 吊橋のガスト応答計算（たわみおよびねじれ成分）

本計算は橋軸直角方向および鉛直方向の変動風速のパワースペクトルを入力とし、吊橋の鉛直方向のたわみおよびねじれ変位のパワースペクトルを出力とするものであり、京都大学昭和50年度の報告書⁽¹⁾を参考にしている。

1 記 号

A : 空力アドミックス	添 字
B : 橋梁の幅員	D : 抗 力
C : 空気力係数	f_0 : 自励成分
c : 減衰定数	h : たわみ
I : 極慣性モーメント（単位長さ当り）	I : 虚数部
i : 虚数単位, $\sqrt{-1}$	L : 揚力成分
J : ジョイントアクセブタンス	M : 空力モーメント成分
L : 揚 力	m : 横 型
ℓ : スパン長	p : 原 型
M : 空力モーメント	R : 実数成分
m : 質量（単位長さ当り）	r : モードの次数
q : 一般座標	s : モードの次数
$\widetilde{R}$: 空間相関関数	se : 強制成分
S : スペクトル密度関数	t : モードの次数
t : 時間座標	u : 風速橋軸直角方向成分
V : 橋軸直角方向風速	w : 風速鉛直方向成分
x : 橋軸方向座標	
α : 迎 角	α : ねじれ
η : たわみ変位	η : たわみ
μ : 補正係数	φ : ねじれ
ρ : 空気密度	$\cdot$: 時間に関する微分 ($= \frac{d}{dt}$)
φ : ねじれ変位	$\wedge$: フーリエ変換
ω : 周波数座標	$-$: 平均

2 変位パワースペクトルと空気力パワースペクトルの関係

3 次元構造物のたわみおよびねじれの Lagrange の運動方程式は次のように表示される。

$$\ddot{q}_{\eta r}(t) + 2\zeta_{\eta r}\omega_{\eta r}\dot{q}_{\eta r}(t) + \omega_{\eta r}^2 q_{\eta r}(t) = \frac{Q_{\eta r}(x, t)}{M_r} \quad (2.1)$$

$$\ddot{q}_{\varphi r}(t) + 2\zeta_{\varphi r}\omega_{\varphi r}\dot{q}_{\varphi r}(t) + \omega_{\varphi r}^2 q_{\varphi r}(t) = \frac{Q_{\varphi r}(x, t)}{I_r} \quad (2.2)$$

ここに、たわみおよびねじれ変位は次のように仮定する。

$$\eta(x, t) = \sum_r q_{\eta r}(t) \cdot \phi_{\eta r}(x), \quad \varphi(x, t) = \sum_r q_{\varphi r}(t) \cdot \phi_{\varphi r}(x) \quad (2.3 a, b)$$

また、ここに

$$M_r = \int_0^L m \phi_{\eta r}^2(x) dx, \quad I_r = \int_0^L I \phi_{\varphi r}^2(x) dx$$

$$\zeta_{\eta r} = \frac{1}{2\omega_{\eta r} \cdot M_r} \int_0^L c_{\eta} \phi_{\eta r}^2(x) dx, \quad \zeta_{\varphi r} = \frac{1}{2\omega_{\varphi r} \cdot I_r} \int_0^L c_{\varphi} \phi_{\varphi r}^2(x) dx$$

$$Q_{\eta r} = \int_0^L \phi_{\eta r}(x) L(x, t) dx, \quad Q_{\varphi r} = \int_0^L \phi_{\varphi r}(x) M(x, t) dx \quad (2.4 a \sim f)$$

である。

(2.1) ~ (2.3) 式をフーリエ変換によって周波数領域で表現すると次のようになる。

$$[(i\omega)^2 + 2\zeta_{\eta r}\omega_{\eta r}(i\omega) + \omega_{\eta r}^2] \hat{q}_{\eta r}(\omega) = \frac{\hat{Q}_{\eta r}(x, \omega)}{M_r} \quad (2.5)$$

$$[(i\omega)^2 + 2\zeta_{\varphi r}\omega_{\varphi r}(i\omega) + \omega_{\varphi r}^2] \hat{q}_{\varphi r}(\omega) = \frac{\hat{Q}_{\varphi r}(x, \omega)}{I_r} \quad (2.6)$$

$$\hat{\eta}(x, \omega) = \sum_r \hat{q}_{\eta r}(\omega) \phi_{\eta r}(x), \quad \hat{\varphi}(x, \omega) = \sum_r \hat{q}_{\varphi r}(\omega) \phi_{\varphi r}(x) \quad (2.7 a, b)$$

ここに

$$\hat{Q}_{\eta r}(x, \omega) = \int_0^L \phi_{\eta r}(x) \hat{L}(x, \omega) dx, \quad \hat{Q}_{\varphi r}(x, \omega) = \int_0^L \phi_{\varphi r}(x) \hat{M}(x, \omega) dx \quad (2.8 a, b)$$

である。

空気力に関しては構造物自身の振動による自励的なものと、風の変動成分による強制的なものとの重ね合せであると仮定する。すなわち

$$\hat{L}(x, \omega) = \hat{L}_{se}(x, \omega) + L_{fo}(x, \omega), \quad \hat{M}(x, \omega) = \hat{M}_{se}(x, \omega) + \hat{M}_{fo}(x, \omega) \quad (2.9 \text{ a, b})$$

また自励的な成分は次式で表現されると仮定する。

$$\begin{aligned} \hat{L}_{se}(x, \omega) &= \frac{1}{(\frac{B_p}{B_m}) \eta_m} \sum_s \left\{ \hat{L}_\eta^* \left(\frac{V_p}{\omega B_p} \right) \cdot \hat{q}_{\eta s}(\omega) \cdot \phi_{\eta s}(x) \right\} \\ &\quad + \frac{1}{\phi_m s} \sum_s \left\{ \hat{L}_\phi^* \left(\frac{V_p}{\omega B_p} \right) \cdot \hat{q}_{\phi s}(\omega) \cdot \phi_{\phi s}(x) \right\} \\ \hat{M}_{se}(x, \omega) &= \frac{1}{(\frac{B_p}{B_m}) \eta_m} \sum_s \left\{ \hat{M}_\eta^* \left(\frac{V_p}{\omega B_p} \right) \cdot \hat{q}_{\eta s}(\omega) \cdot \phi_{\eta s}(x) \right\} \\ &\quad + \frac{1}{\phi_m s} \sum_s \left\{ \hat{M}_\phi^* \left(\frac{V_p}{\omega B_p} \right) \cdot \hat{q}_{\phi s}(\omega) \cdot \phi_{\phi s}(x) \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.10 \text{ a, b})$$

上式のもつ意味は、自励的な空気力は構造物の固有振動数に近い成分だけが、その振幅および非定常空気力係数に比例して働く、ということである。強制振動法により求まる非定常空気力および非定常空気力係数と上式の $\hat{L}_\eta^*$, $\hat{L}_\phi^*$, $\hat{M}_\eta^*$, $\hat{M}_\phi^*$ との関係の 1 例を示せば次のとおりである。

$$\begin{aligned} \hat{L}_\eta^* \left(\frac{V}{\omega_0 B} \right) &= \int \hat{L}_\eta \left(\frac{V}{\omega B} \right) \delta \left(\frac{V}{\omega B} - \frac{V}{\omega_0 B} \right) d \left(\frac{V}{\omega B} \right) \\ \hat{L}_\eta \left(\frac{V}{\omega B} \right) &= \frac{1}{2} \rho V^2 B \times \frac{1}{2} \left(C_{Lh}^R \left(\frac{V}{\omega B} \right) + i C_{Lh}^I \left(\frac{V}{\omega B} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.11 \text{ a, b})$$

ただし $\hat{L}_\eta$ は加振変位 η を

$$\eta = \eta_0 \cos \omega t \quad (2.12)$$

としたときに得られる空気力をフーリエ変換したものである。

強制的な成分は次のように仮定する。

$$\hat{L}_{fo}(x, \omega) = \sum_r \hat{L}_{fo \cdot r}(\omega) \phi_{\eta r}(x), \quad \hat{M}_{fo}(x, \omega) = \sum_r \hat{M}_{fo \cdot r}(\omega) \phi_{\phi r}(x) \quad (2.13 \text{ a, b})$$

(2.9) ~ (2.10) 式を周波数領域での Lagrange の方程式に代入すると、次式のようになる。

$$[(i\omega)^2 + 2\zeta_{\eta r} \omega \eta_r (i\omega) + \omega \eta_r^2 - C_{Lhr}] \hat{q}_{\eta r}(\omega) - C'_{L\alpha r} (\sum_s B_{rs} \hat{q}_{\varphi s}(\omega)) = \hat{L}'_{f_0 \cdot r}$$

$$[(i\omega)^2 + 2\zeta_{\varphi r} \omega \varphi_r (i\omega) + \omega \varphi_r^2 - C_{Mar}] \hat{q}_{\varphi r}(\omega) - C'_{Mhr} (\sum_s B_{sr} \hat{q}_{\eta s}(\omega)) = \hat{M}'_{f_0 \cdot r}$$

(2.14 a, b)

ここに

$$C_{Lhr} = \frac{1}{(\frac{B_p}{B_m}) \eta_m \cdot M_r} \hat{L}_{\eta}^* (\frac{V_p}{\omega B_p}) \int_0^{\ell} \phi_{\eta r}^2(x) dx, \quad C'_{L\alpha r} = \frac{1}{\varphi_m \cdot M_r} \hat{L}_{\varphi}^* (\frac{V_p}{\omega B_p}),$$

$$B_{rs} = \int_0^{\ell} \phi_{\eta r} \phi_{\varphi s} dx, \quad \hat{L}'_{f_0 \cdot r} = \hat{L}_{f_0 \cdot r}(\omega) \frac{\int_0^{\ell} \phi_{\eta r}^2 dx}{M_r},$$

$$\hat{M}'_{f_0 \cdot r} = \hat{M}_{f_0 \cdot r}(\omega) \frac{\int_0^{\ell} \phi_{\varphi r}^2 dx}{I_r}$$

$$C_{Mar} = \frac{1}{\varphi_m I_r} \hat{M}_{\varphi}^* (\frac{V_p}{\omega B_p}) \int_0^{\ell} \phi_{\varphi r}^2(x) dx, \quad C'_{Mhr} = \frac{1}{(\frac{B_p}{B_m}) \cdot \eta_m I_r} \hat{M}_{\eta}^* (\frac{V_p}{\omega B_p})$$

(2.15 a ~ g)

ここでモードに次の仮定をおいた

$$\int_0^{\ell} \phi_{\eta r} \phi_{\eta s} dx = \begin{cases} r \neq s : 0 \\ r = s : \text{not } 0 \end{cases} \quad \int_0^{\ell} \phi_{\varphi r} \phi_{\varphi s} dx = \begin{cases} r \neq s : 0 \\ r = s : \text{not } 0 \end{cases}$$

(2.15 h, i)

(2.14) 式をマトリクス表示にすると次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} \hat{L}'_{f_0 \cdot 1} \\ \hat{L}'_{f_0 \cdot 2} \\ \vdots \\ \hat{L}'_{f_0 \cdot n} \\ \hat{M}'_{f_0 \cdot 1} \\ \hat{M}'_{f_0 \cdot 2} \\ \vdots \\ \hat{M}'_{f_0 \cdot m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & & & \bar{B}_{11} & \bar{B}_{12} & \cdots & \bar{B}_{1m} \\ & \bar{A}_2 & 0 & \bar{B}_{21} & \bar{B}_{22} & \cdots & \bar{B}_{2m} \\ & & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & & & \bar{A}_n & \bar{B}_{n1} & \bar{B}_{n2} & \cdots & \bar{B}_{nm} \\ \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \cdots & \bar{C}_{1n} & \bar{D}_1 & & & \\ \bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} & \cdots & \bar{C}_{2n} & & \bar{D}_2 & 0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & 0 & \ddots & \\ \bar{C}_{m1} & \bar{C}_{m2} & \cdots & \bar{C}_{mn} & & & & \bar{D}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{q}_{\eta 1} \\ \hat{q}_{\eta 2} \\ \vdots \\ \hat{q}_{\eta n} \\ \hat{q}_{\varphi 1} \\ \hat{q}_{\varphi 2} \\ \vdots \\ \hat{q}_{\varphi m} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ここに

$$\begin{aligned}\bar{A}_r &= (i\omega)^2 + 2\zeta_{\eta r} \omega_{\eta r}(i\omega) + \omega_{\eta r}^2 - C_{Lhr}, \quad \bar{B}_{rs} = -C'_{Lar} B_{rs} \\ \bar{C}_{rs} &= -C'_{Mhr} B_{sr}, \quad \bar{D}_r = (i\omega)^2 + 2\zeta_{\varphi r} \omega_{\varphi r}(i\omega) + \omega_{\varphi r}^2 - C_{Mar}\end{aligned}\quad (2.17 \text{ a} \sim \text{d})$$

(2.16) 式の逆マトリクスを求め、パワースペクトル表示にすると次式のようなになる。

$$\begin{bmatrix} \widehat{q_{\eta 1}} \\ \widehat{q_{\eta 2}} \\ \vdots \\ \widehat{q_{\eta n}} \\ \widehat{q_{\varphi 1}} \\ \widehat{q_{\varphi 2}} \\ \vdots \\ \widehat{q_{\varphi m}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{\eta 11} & \cdots & H_{\eta 1n} & H_{\varphi 11} & \cdots & H_{\varphi 1m} \\ & \ddots & & & \ddots & \\ & & H_{\eta nn} & H_{\varphi n1} & \cdots & H_{\varphi nm} \\ \theta_{\eta 11} & \cdots & \theta_{\eta 1n} & \theta_{\varphi 11} & \cdots & \theta_{\varphi 1m} \\ & \ddots & & & \ddots & \\ & & \theta_{\eta mn} & \theta_{\varphi m1} & \cdots & \theta_{\varphi mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{L'_{f0 \cdot 1}} \\ \widehat{L'_{f0 \cdot 2}} \\ \vdots \\ \widehat{L'_{f0 \cdot n}} \\ \widehat{M'_{f0 \cdot 1}} \\ \widehat{M'_{f0 \cdot 2}} \\ \vdots \\ \widehat{M'_{f0 \cdot m}} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned}S_{p\eta r} &= \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n (H_{\eta rs} H_{\eta rt}^* S_{L_t L_s}) + \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n (H_{\eta rs} H_{\varphi rt}^* S_{L_s M_t} + H_{\eta rs} H_{\varphi rt}^* S_{M_t L_s}) \\ &\quad + \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^m (H_{\varphi rs} H_{\varphi rt}^* S_{M_t M_s})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}S_{qpr} &= \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n (\theta_{\eta rs} \theta_{\eta rt}^* S_{L_t L_s}) + \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^m (\theta_{\eta rs} \theta_{\varphi rt}^* S_{L_s M_t} \\ &\quad + \theta_{\eta rs} \theta_{\varphi rt}^* S_{M_t L_s}) + \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^m (\theta_{\varphi rs} \theta_{\varphi rt}^* S_{M_t M_s})\end{aligned}$$

(2.19 a, b)

3 強制空気力パワースペクトルと変動風速パワースペクトルの関係

橋梁の桁の前縁に作用するモーメントを無視すると、ピッチングモーメントと揚力は近似的に

$$\hat{L}_{f_0}(x, \omega) = \hat{M}_{f_0}(x, \omega) \times \mu \times B \quad (3.1)$$

の関係にある。これより

$$S_L(x, x', \omega) = \mu^2 B^2 S_M(x, x', \omega) \quad (3.2)$$

の関係が導かれる。(2.13)式でモードの直交性を考慮すれば

$$\hat{L}_{f_0 \cdot r}(\omega) = \frac{\int_0^L \hat{L}_{f_0}(x, \omega) \cdot \phi_{\eta r}(x) dx}{\int_0^L \phi_{\eta r}^2(x) dx}, \quad \hat{M}_{f_0 \cdot r}(\omega) = \frac{\int_0^L \hat{M}_{f_0}(x, \omega) \phi_{\varphi r}(x) dx}{\int_0^L \phi_{\varphi r}^2(x) dx} \quad (3.3 \text{ a, b})$$

となり、スペクトル表示にすると

$$S_{Lr}(\omega) = \frac{\int_0^L \int_0^L S_L(x, x', \omega) \phi_{\eta r}(x) \phi_{\eta r}(x') dx dx'}{\left\{ \int_0^L \phi_{\eta r}^2(x) dx \right\}^2} \quad (3.4 \text{ a, b})$$

$$S_{Mr}(\omega) = \frac{\int_0^L \int_0^L S_M(x, x', \omega) \phi_{\varphi r}(x) \phi_{\varphi r}(x') dx dx'}{\left\{ \int_0^L \phi_{\varphi r}^2(x) dx \right\}^2}$$

となる。2地点xおよびx'に作用する荷重のクロススペクトルは

$$S_L(x, x', \omega) = S_{L0}(\omega) \tilde{R}(x, x', \omega) \quad (3.5)$$

の関係があり、荷重の空間相関関数は風速変動の空間相関関数と等しいので、これを用いることができる。 $S_M(x, x', \omega)$ および $S_{LM}(x, x', \omega)$ についても同様の取扱いをすると、(2.19)式中のパワースペクトルは次のように表示される。

$$\begin{aligned} S_{L_t L_s}(\omega) &= J_{L_t L_s}(\omega) \cdot S_{L0}(\omega), \quad S_{L_s M_t}(\omega) = J_{L_s M_t}(\omega) \cdot S_{L0}(\omega) \\ S_{M_t L_s}(\omega) &= J_{M_t L_s}(\omega) \cdot S_{L0}(\omega), \quad S_{M_t M_s}(\omega) = J_{M_t M_s}(\omega) \cdot S_{L0}(\omega) \end{aligned} \quad \} (3.5 \text{ a, b})$$

ここに

$$\begin{aligned}
 J_{LtLS}(\omega) &= \frac{\int_0^L \int_0^L \widetilde{R}(x, x', \omega) \phi_{\eta t}(x) \phi_{\eta s}(x') dx dx'}{\left\{ \int_0^L \phi_{\eta t}^2(x) dx \right\} \left\{ \int_0^L \phi_{\eta s}^2(x) dx \right\}} \\
 J_{LSMt}(\omega) &= \frac{\mu B \int_0^L \int_0^L \widetilde{R}(x, x', \omega) \phi_{\eta s}(x) \phi_{\phi t}(x') dx dx'}{\left\{ \int_0^L \phi_{\eta s}^2(x) dx \right\} \left\{ \int_0^L \phi_{\phi t}^2(x) dx \right\}} \\
 J_{MtLS}(\omega) &= \frac{\mu B \int_0^L \int_0^L \widetilde{R}(x, x', \omega) \phi_{\phi t}(x) \phi_{\eta s}(x') dx dx'}{\left\{ \int_0^L \phi_{\phi t}^2(x) dx \right\} \left\{ \int_0^L \phi_{\eta s}^2(x) dx \right\}} \\
 J_{MtMs}(\omega) &= \frac{\mu^2 B^2 \int_0^L \int_0^L \widetilde{R}(x, x', \omega) \phi_{\phi t}(x) \phi_{\phi s}(x') dx dx'}{\left\{ \int_0^L \phi_{\phi t}^2(x) dx \right\} \left\{ \int_0^L \phi_{\phi s}^2(x) dx \right\}}
 \end{aligned} \tag{3.6 a \sim d}$$

である。

揚力のパワースペクトル $S_{L_0}(\omega)$ と変動風速のパワースペクトル $S_{uu}(\omega)$, $S_{uv}(\omega)$, $S_{vn}(\omega)$, $S_{vv}(\omega)$ には準定常理論⁽²⁾においては

$$\begin{aligned}
 S_{L_0}(\omega) &= \left| \frac{2\bar{L}A_u(\omega)}{\bar{V}} \right|^2 S_{uu}(\omega) + \frac{2\bar{L}A_u(\omega)}{\bar{V}} \frac{d\bar{L}}{d\alpha} \frac{A_v(\omega)}{\bar{V}} (S_{uv}(\omega) + S_{vu}(\omega)) \\
 &\quad + \left| \frac{d\bar{L}}{d\alpha} \frac{A_v(\omega)}{\bar{V}} \right|^2 S_{vv}(\omega)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

また京都大学の研究⁽³⁾においては

$$S_{L_0}(\omega) = \left\{ \pi \rho B \bar{V} \Psi \left(\frac{B\omega}{2\bar{V}} \right) \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \cdot \frac{1}{2\pi} \right\}^2 S_{vv}(\omega) \tag{3.8}$$

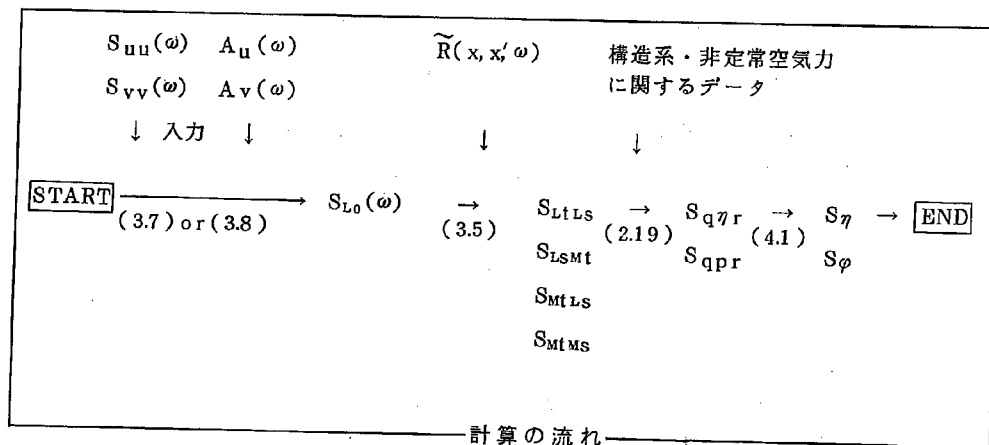
なる関係がある。

4 変位パワースペクトルと変動風速パワースペクトルの関係

(2.7) 式より一般座標 $\hat{q}_{\eta r}$ および $\hat{q}_{\phi r}$ と変位 $\hat{\eta}$ および $\hat{\phi}$ はパワースペクトルで次の関係にある。

$$S_{\eta}(x, \omega) = \sum_r (\phi_{\eta r}^2(x) \cdot S_{q\eta r}(\omega)), \quad S_{\phi}(x, \omega) = \sum_r (\phi_{\phi r}^2(x) \cdot S_{q\phi r}(\omega)) \quad (4.1 \text{ a, b})$$

今まで述べてきた過程を図にまとめると次のようになる。



参考文献

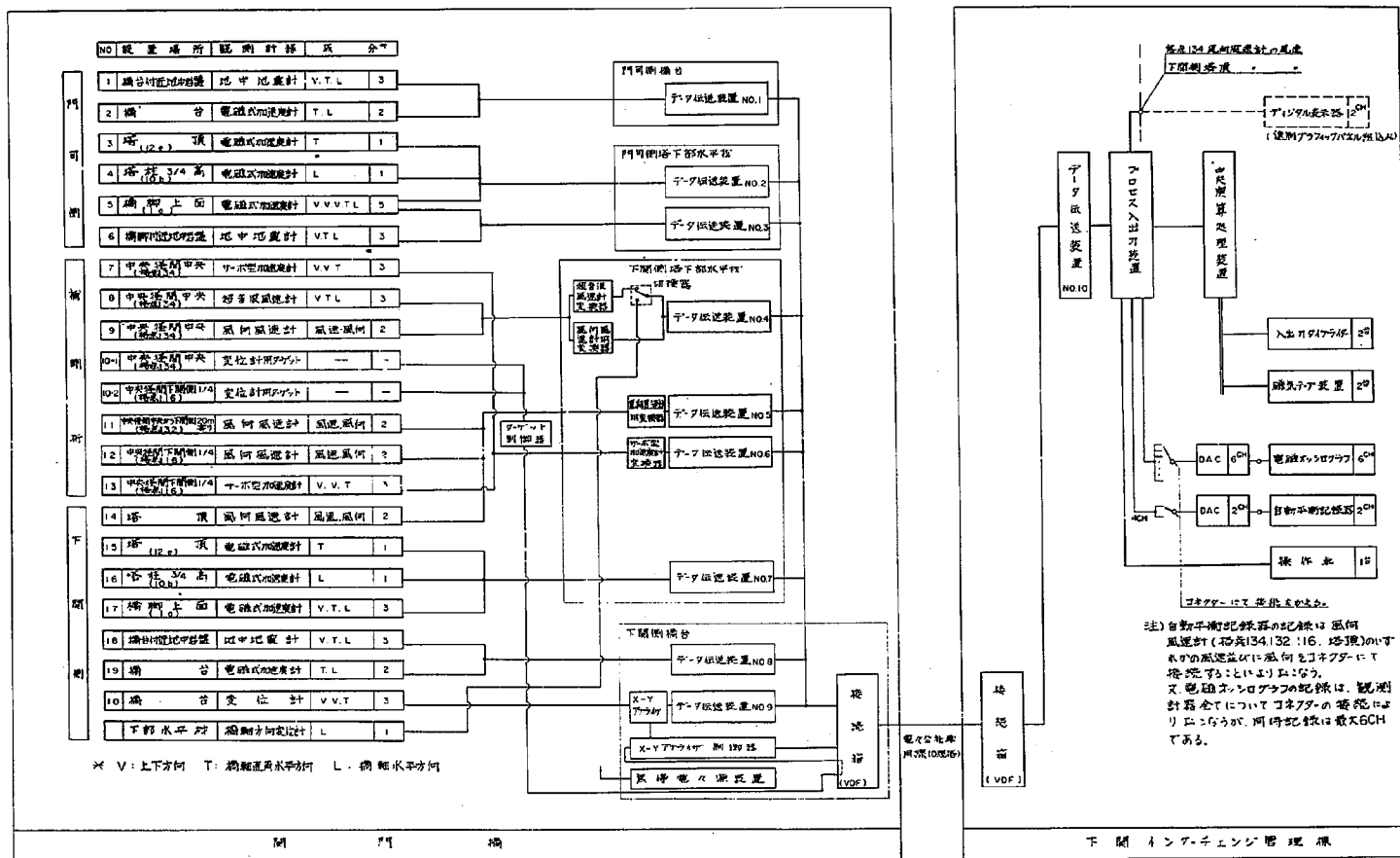
1. 阪神高速道路公団, 財団法人防災研究協会; 斜張橋断面のパフエッティング振動に関する研究調査, 大阪港周辺における自然強風の耐風工学特性に関する研究調査, 昭和50年度報告書, 昭和51年3月
2. 土木学会, 本州四国連絡橋耐風研究小委員会; 本州四国連絡橋の耐風実験橋に関する調査研究報告書(その1), 昭和52年3月
3. 小西・白石他; 長大つり橋に関する動的耐風設計法の研究, 昭和47年度研究成果報告書, 昭和48年3月

表一 1 観測項目, 観測計器, 観測範囲等

観測項目	測定場所	最大測定範囲	観測計器	数量	成分数		毎秒当り A/D変換 サンプリング 回数
					1台 当り	合計	
加 速 度	岩 盤	±500Gal	地 中 地 震 計	3台	3	9	100
	橋 台	±500Gal	電 磁 式 加 速 度 計	4台	1	4	50
	橋 脚	±500Gal		8台	1	8	
	塔	±500Gal		4台	1	4	
	補剛桁	±200Gal	サ ー ボ 型 加 速 度 計	6台	1	6	25
変 位	補剛桁	水平±2m 上下±2m	変 位 計 1) ターゲット 2) ターゲット制御器 3) X-Yアナライザ 4) X-Yアナライザ 制御器	1式	3	3	25
		橋軸方向±25cm	橋軸方向変位計測装置 ¹⁾	1式	1	1	25
風向・風速	補剛桁上	水平風速 60m/sec	超 音 波 風 速 計	1式	3	3	25
		上下風速 10m/sec					
		水平風速 60m/sec	風 向 風 速 計	3	2 (風向 風速)	6	25
		風 向 540°					
	下関側 塔 頂	水平風速 60m/sec	風 向 風 速 計	1	2	2	25
		風 向 540°					

注1) 橋軸方向変位計測装置は超音波風速計3成分のいずれか1成分と切換えて観測される。

表一2 觀測機器配置圖

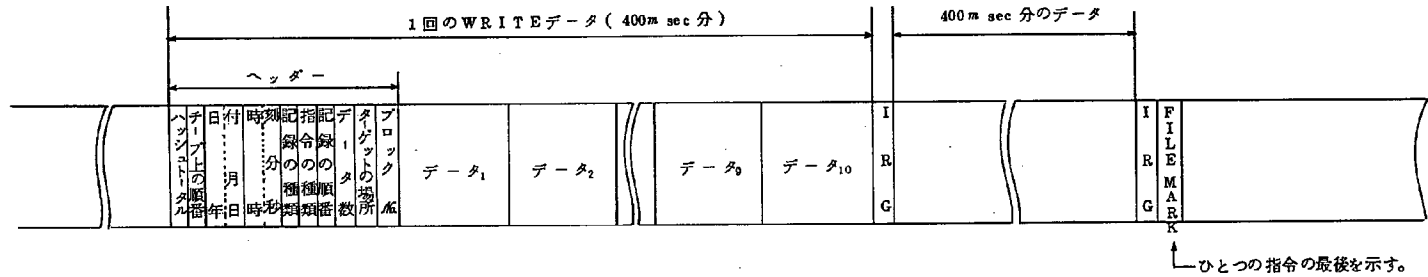


表一 3 . 1 強風指令に記録するデータ (40 m sec 分)

セ ン サ	セ ン サ 設 置 場 所	セ ン サ の 種 類	成 分	CH NO	強 風 指 令 開 始	風 速 の デ ジ タ ル 表 示
電磁式加速度計	門司側塔頂	M	T	1		
		"	"	2		
	門司側塔柱 $\frac{3}{4}$ 高	M	L	3		
		"	"	4		
	下関側塔頂	M	T	5		
		"	"	6		
サ ー ボ 型 加 速 度 計	補剛桁 中央径間中央	M	T	7		
		"	"	8		
		"	"	9		
	中央径間 下関側 $\frac{1}{4}$	S	V	10		
		"	"	11		
		"	T	12		
風向風速計	補剛桁 中央径間中央	S	V	13		
		"	"	14		
	中央径間 下関寄 $\frac{1}{4}$	"	T	15		
		"	"	16		
	下関側塔頂	W	S	17	○	○
		"	D	18		
	中央径間中央 下関寄 20 m	W	S	19	○	
		"	D	20		
超音波風速計	補剛桁 中央径間中央	W	S	21	○	○
		"	D	22		
	下関側橋台	U	V	23		
		"	T	24		
変位計	下関側橋台	"	L	25		
		D	V	26		
		"	"	27		
		"	T	28		

成分 L ; 橋軸方向成分
T ; " 直角方向成分
V ; 上下方向成分
S ; 風 速
D ; 風 向

表一 3 . 2 磁気テープの内容



0	ハッシュコード
1	テープ上の順番
2	年
3	月
4	日
5	時
6	分
7	秒
8	
9	
10	
11	

- 記録の種類
- 1 自動記録
 - 2 手動記録
 - 4 点検記録

- 指令の種類
- 0 点検
 - 1 地震指令
 - 2 強風指令

- ターゲットの場所
- 0 無点灯
 - 1 測定用ターゲット
 - 2 検定用ターゲット
 - 3 両ターゲット

- ブロック番号
- 0 点検なし
 - 1 制御ブロック番号1が点検中
 - 2 " 番号2 "
 - 3 " 番号3 "
 - 4 " 番号4 "

入力データ型式

0	5	6	7	8	15
同期みだれ	P	A	R	A	データ
	R	A	N	G	
	I	T	I	E	

表一4 関門橋長期観測磁気テープ

№	日	時	備 考
43	52- 4-18	17:48:11	読み取り不能
44	52- 8-24	5:56:07	
45	52- 9-10	4:50:20	
46	52-10-19	10:04:20	
47	52-11-18	22:07:38	
48	52-12-17	07:34:48	読み取り不能

表-5 風の測定結果

/6 ①

日 時		中央径間 1/2		1/2より20 m下関より		中央径間 1/4		下関側塔頂		中央径間 1/2			
		風 速	風 向	風 速	風 向	風 速	風 向	風 速	風 向	鉛直方向	横軸 直角 方向	橋軸方向	傾 斜 角
52 -4-18	17:48:11	14.9	243.3	19.5	260.3	20.2	251.2	24.8	249.4	0.05	13.8	-15.0	
		2.9	13.1	2.9	9.5	2.7	7.0	3.4	4.4	1.8	3.1	3.9	
		0.20	0.05	0.15	0.04	0.13	0.03	0.09	0.02	37.1	0.22	-0.26	
		20.9	304.9	25.6	296.5	26.6	283.8	29.9	266.8	0.6	20.5	-2.1	
		4.2	139.4	7.3	222.4	12.2	226.6	17.9	232.9	-5.1	-3.1	-23.3	
52 -4-18	18:05:00	13.6	240.7	17.7	259.0	18.8	250.1	24.3	248.6	0.01	13.4	-13.5	
		2.7	13.9	3.0	9.9	2.5	7.1	2.7	5.0	1.9	3.0	3.4	
		0.2	0.06	0.17	0.04	0.13	0.03	0.11	0.02	270.6	0.22	-0.25	
		19.5	279.5	23.8	302.8	25.6	275.3	30.1	266.8	66.3	23.8	-1.6	
		6.8	23.3	9.6	218.1	12.9	228.7	11.1	209.7	-1.6	3.1	-21.4	
52 -4-18	18:13:38	13.8	241.7	18.0	258.1	19.3	248.5	23.8	248.5	0.07	13.5	-13.3	
		2.4	10.4	2.4	10.2	2.5	7.1	3.3	5.6	1.7	2.8	3.5	
		0.17	0.04	0.13	0.04	0.13	0.03	0.14	0.02	26.2	0.21	-0.26	
		20.7	275.3	24.2	285.9	25.6	281.7	30.6	273.2	4.7	20.9	-2.6	
		8.0	180.0	13.2	226.6	11.5	228.7	13.9	226.6	-5.8	1.2	-23.8	
52 -4-18	18:31:14	13.2	241.5	17.2	260.7	18.5	252.9	23.5	250.7	-0.01	12.5	-13.6	
		2.4	19.0	2.8	9.6	3.0	8.4	2.6	5.5	1.7	2.6	3.3	
		0.18	0.08	0.16	0.04	0.16	0.03	0.11	0.02	-130.1	0.21	-0.24	
		21.6	294.4	24.5	321.9	25.9	281.7	29.9	268.9	6.3	20.5	-3.1	
		4.7	29.6	6.8	226.6	10.6	228.7	14.8	226.6	-7.6	-1.2	-26.1	
52 -4-18	18:58:06	13.5	235.8	17.9	259.2	18.8	250.6	23.9	248.5	0.1	13.4	-13.6	
		2.3	29.1	2.5	8.4	2.4	7.4	2.4	6.1	1.7	2.4	3.1	
		0.17	0.12	0.14	0.03	0.13	0.03	0.10	0.02	13.5	0.18	-0.23	
		22.1	300.7	28.5	304.9	24.7	275.3	28.9	279.5	8.2	22.4	-3.1	
		17.8	19.1	12.0	230.8	13.4	224.5	13.4	205.4	-5.6	1.6	-24.7	

風の測定結果

表②

日 時		中央径間 1/2		1/2より20m下関より		中央径間 1/4		下関側塔頂		中央径間 1/2			
		風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	鉛直方向	橋軸 直角 方向	橋軸方向	傾斜角
52- 4-18	19:42:28	12.7	240.8	16.6	258.9	18.5	251.1	24.0	250.5	-0.11	12.6	12.6	
		3.3	144	3.4	10.0	2.9	7.5	1.9	4.5	1.6	3.3	3.5	
		0.26	0.06	0.21	0.04	0.16	0.03	0.08	0.02	-14.2	0.26	-0.28	
		19.8	279.5	23.8	294.4	24.0	285.9	27.5	268.9	6.0	20.5	-0.7	
		4.2	80.5	6.8	230.8	10.6	228.7	16.0	232.9	-5.0	-0.2	-20.9	
52- 9-10	09:17:58	13.4	455.5	15.0	90.9	16.4	83.4	18.6	81.6				
		1.8	9.3	2.0	8.2	1.9	7.5	1.3	7.2				
		0.14	0.02	0.13	0.09	0.12	0.09	0.07	0.09				
		17.2	518.9	19.1	141.9	21.2	118.6	21.6	120.7				
		6.4	410.8	8.9	69.9	10.8	63.5	14.6	63.5				
52- 9-10	10:23:03	15.2	464.0	16.6	99.7	17.6	95.4	19.4	95.8				
		2.5	14.7	2.6	10.6	2.4	7.4	1.9	6.0				
		0.16	0.03	0.16	0.11	0.14	0.08	0.10	0.06				
		20.2	537.9	22.4	163.1	23.3	129.2	24.2	114.4				
		7.1	12.7	8.7	61.4	11.5	69.9	12.9	76.2				
52- 9-10	10:30:36	15.3	464.1	16.7	99.5	16.6	92.5	19.1	91.5				
		2.1	9.9	2.3	9.7	3.0	9.4	2.4	8.1				
		0.14	0.02	0.14	0.10	0.18	0.10	0.12	0.09				
		20.7	514.6	22.8	144.0	21.6	129.2	23.8	112.2				
		8.0	436.2	8.0	74.1	8.2	69.9	12.9	65.6				
52- 9-10	10:36:10	15.5	462.9	17.2	98.9	19.0	93.9	20.6	94.6				
		2.7	10.5	2.7	9.3	2.8	6.6	1.9	6.9				
		0.17	0.02	0.16	0.09	0.15	0.07	0.09	0.07				
		22.4	508.2	23.8	135.5	25.2	116.5	26.1	120.7				
		7.1	419.3	8.7	67.8	11.8	76.2	11.8	72.0				

風の測定結果

16 ③

日	時	中央径間 1/2		1/2より20m下関より		中央径間 1/4		下関側塔頂		中央径間 1/2			
		風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	鉛直方向	橋軸 直角 方向	橋軸方向	傾斜角
52-9-10	10:55:07	15.0	464.4	16.7	80.0	18.6	94.0	20.1	94.6				
		2.9	12.6	3.1	12.9	2.5	8.8	1.8	6.4				
		0.19	0.03	0.19	0.13	0.13	0.09	0.09	0.07				
		24.2	527.3	26.6	192.7	23.3	129.2	24.9	124.9				
		5.4	425.7	7.1	55.1	8.7	72.0	14.8	76.2				
52-9-10	11:06:22	14.8	464.2	16.4	99.6	17.6	92.7	19.6	93.1				
		2.5	9.6	2.6	9.0	2.4	6.8	2.0	6.7				
		0.17	0.02	0.16	0.09	0.14	0.07	0.10	0.07				
		20.7	512.5	23.1	139.8	24.0	131.3	24.9	120.7				
		7.1	434.1	9.2	72.0	10.8	65.6	14.6	76.2				
52-10-19	10:13:15	10.4	413.8	11.2	427.0	8.9	384.8	13.9	34.2	0.7	-13.3	1.8	
		0.9	5.6	1.2	6.9	1.1	10.0	1.5	6.8	1.2	1.1	1.1	
		0.09	0.01	0.11	0.02	0.12	0.03	0.11	0.20	1.70	-0.08	0.59	
		12.7	429.9	14.6	453.2	11.5	417.2	17.9	61.4	3.8	-10.6	4.5	
		8.0	391.8	8.7	398.1	8.9	355.8	9.7	16.9	-2.5	-16.7	2.1	
52-11-19	0:19:22	11.7	274.1	12.8	285.4	12.4	264.3	18.1	255.6	-0.4	5.9	-12.1	
		2.2	9.3	2.1	9.7	2.0	8.3	1.6	4.5	1.0	2.0	2.6	
		0.19	0.03	0.16	0.03	0.16	0.03	0.09	0.02	-2.50	0.34	-0.22	
		16.5	311.3	17.4	330.4	17.4	290.1	21.9	275.3	4.0	10.6	-3.1	
		5.4	224.5	6.8	213.9	6.8	230.8	12.9	226.6	-3.4	-1.6	-17.2	
52-11-19	0:46:01	12.2	273.8	14.0	285.1	14.4	265.4	19.1	256.5	-0.3	6.2	-12.6	
		2.4	10.9	2.6	11.2	2.1	8.9	2.2	5.9	1.1	2.1	3.0	
		0.19	0.04	0.19	0.04	0.14	0.03	0.11	0.02	-4.10	0.33	-0.24	
		16.7	309.2	18.8	330.4	18.6	300.7	23.1	277.4	3.1	12.5	-1.2	
		4.0	207.5	6.8	228.8	5.2	201.2	12.2	237.2	-4.4	-3.1	-20.9	

風の測定結果

16 ④

日 時		中央径間 1/2		1/2より20m下関より		中央径間 1/4		下関側塔頂		中央径間 1/2			
		風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	鉛直方向	橋軸直角方向	橋軸方向	傾斜角
52-11-19	01:04:51	13.2	273.9	14.7	284.6	14.3	264.4	18.9	255.8	-0.5	7.1	-13.6	
		2.0	8.9	2.1	8.3	2.3	6.5	1.6	4.5	1.1	1.9	2.5	
		0.15	0.03	0.14	0.03	0.16	0.02	0.08	0.02	-2.10	0.26	-0.19	
		17.4	324.0	19.1	319.8	20.2	290.1	22.1	277.4	4.0	12.9	-4.0	
		7.3	237.2	9.2	252.0	8.5	243.5	13.9	243.5	-5.5	-3.1	-19.1	
52-11-19	08:41:27	13.1	281.5	14.5	293.4	13.6	272.2	18.3	260.5	-0.6	5.7	-14.3	
		2.1	8.2	2.4	7.9	2.4	8.4	1.9	5.2	1.1	1.8	2.6	
		0.16	-0.03	0.16	0.03	0.17	0.03	0.10	0.02	-1.7	0.31	-0.18	
		17.4	307.1	18.8	317.7	18.6	300.7	22.1	277.4	3.5	12.0	-8.2	
		8.0	249.9	8.7	256.2	8.0	239.3	12.2	239.3	-4.1	-0.7	-20.0	
52-11-19	11:16:16	14.2	278.8	15.7	290.2	14.6	268.7	19.1	260.7	-0.7	7.1	-15.1	
		1.3	6.7	1.6	6.6	2.7	5.6	1.8	5.0	0.9	1.5	1.7	
		0.09	0.02	0.10	0.02	0.18	0.02	0.10	0.02	-1.2	0.21	-0.11	
		17.2	298.6	18.6	309.2	19.8	298.6	22.1	279.5	3.1	11.5	-10.1	
		10.8	247.8	12.0	260.5	9.2	247.8	12.5	245.7	-4.4	2.1	-19.5	
52-11-19	11:33:34	12.8	275.4	14.5	287.2	14.9	263.5	18.7	256.6	-0.4	6.7	-13.2	
		2.7	9.4	2.9	11.8	2.2	7.3	1.6	4.8	1.2	2.4	3.2	
		0.21	0.03	0.20	0.04	0.15	0.03	0.08	0.02	-3.3	0.35	-0.24	
		17.9	307.1	19.1	357.9	18.6	290.1	21.6	275.3	4.5	15.7	-2.5	
		4.9	224.5	4.9	222.4	7.3	243.5	12.0	239.3	-4.2	-3.1	-19.1	
52-11-19	11:50:46	13.0	269.4	14.3	279.7	15.6	258.3	19.2	251.8	-0.5	7.9	-12.5	
		1.6	8.6	1.8	8.5	1.9	6.5	1.5	3.67	1.3	1.9	2.2	
		0.12	0.03	0.13	0.03	0.12	-0.03	0.08	0.01	-2.6	0.24	-0.18	
		17.2	300.7	18.6	302.8	20.0	290.1	22.5	262.6	3.9	14.8	-4.5	
		8.9	230.8	9.9	254.1	10.6	241.4	14.1	237.2	-8.4	2.6	-18.6	

風の測定結果

№ ⑤

日 時		中央径間 1/2		1/2より20m下関より		中央径間 1/4		下関側塔頂		中央径間 1/2			
		風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	鉛直方向	橋軸 直角 方向	橋軸方向	傾斜角
52-11-19	12:04:41	12.4	272.7	13.8	283.8	14.5	264.5	19.1	257.5	-0.5	6.9	-12.5	
		1.9	9.8	2.0	10.3	1.8	6.5	2.7	5.1	1.2	1.8	2.7	
		0.15	0.04	0.15	0.04	0.12	0.02	0.14	0.02	-2.3	0.27	-0.21	
		16.0	313.4	18.4	319.8	18.8	288.0	23.3	283.8	4.0	12.5	-2.6	
		6.6	241.4	7.1	235.1	9.6	241.4	11.3	241.4	-4.9	-0.7	-18.1	
52-11-19	12:14:44	14.5	279.9	15.9	291.1	14.2	269.6	18.9	261.6	-0.7	7.1	-15.4	
		1.6	7.5	2.0	7.9	2.4	7.3	2.0	5.6	1.1	2.0	1.8	
		0.11	0.03	0.13	0.03	0.17	0.03	0.10	0.02	-1.59	0.28	-0.11	
		17.9	309.2	20.5	332.5	20.0	296.5	23.5	279.5	3.3	12.9	-9.6	
		10.6	249.9	9.6	256.2	6.8	239.3	13.4	239.3	-7.6	-1.6	-20.9	
52-11-19	12:33:54	14.0	261.4	15.2	272.5	14.9	254.9	18.5	249.4	0.2	10.0	-11.9	
		2.2	8.7	2.6	9.3	2.3	7.4	2.3	5.1	1.3	2.2	2.9	
		0.15	0.03	0.17	0.03	0.15	0.03	0.13	0.02	7.7	0.22	-0.24	
		19.3	290.1	20.9	307.1	20.0	281.7	23.1	264.7	4.8	14.8	-2.1	
		9.2	230.8	9.9	243.5	9.9	224.5	13.6	228.7	-4.7	1.2	-18.6	
52-11-19	12:41:05	14.3	279.4	15.7	291.1	15.4	268.1	18.9	260.1	-0.5	6.9	-15.3	
		1.6	8.2	2.1	8.5	2.0	6.3	2.6	6.0	1.1	1.8	2.2	
		0.11	0.03	0.14	0.03	0.13	0.02	0.14	0.02	-2.1	0.26	-0.15	
		18.1	309.2	20.0	324.0	20.2	298.6	24.7	281.7	4.9	13.4	-8.7	
		10.1	254.1	7.5	245.7	9.4	247.8	12.2	245.7	-6.2	0.2	-20.9	
51-9-13	3:40	26.8	425.5	27.5	434.3	29.9	423.4	32.4	427.8	3.6	-21.9	19.3	8.1
		2.6	4.9	2.5	4.9	2.5	5.2	2.5	5.0	1.7	2.7	2.4	3.4
		0.10	0.01	0.09	0.01	0.08	0.01	0.08	0.01	0.46	-0.12	0.13	0.42
		32.5	438.4	34.1	451.1	36.5	440.5	38.8	444.7	9.0	-13.9	26.1	19.5
		20.0	408.7	21.7	419.3	23.1	404.5	25.7	410.8	-2.9	-29.4	11.5	-4.5

表-6 応答の測定結果

No. 1

時刻			中央径間 1/2 加速度			中央径間 1/4 加速度			中央径間 1/2 変位		
			鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛直 1	鉛直 2	水平 1
52- 4-18	17:48:11	1	0.0	5.3	0.2	9.3		0.2	28.3	19.4	-1.0
		2	4.0	1.4	0.0	2.9		0.0	3.9	5.6	5.2
		3	129.8	0.3	0.0	0.3		0.0	0.1	0.3	-5.2
		4	14.7	8.8	0.2	18.6		0.2	51.0	148.2	5.5
		5	-10.8	1.0	0.2	-1.0		0.2	16.5	7.1	-135.7
52- 4-18	18: 5: 0	1	0.1	5.2	0.2	9.3		0.2	23.5	19.0	-5.2
		2	3.1	1.7	0.0	2.9		0.0	25.0	20.7	20.4
		3	29.6	0.3	0.0	0.3		0.0	1.1	1.1	-3.9
		4	8.8	10.8	0.2	18.6		0.2	112.2	182.8	7.1
		5	-8.8	-1.0	0.2	-1.0		0.2	-176.5	-176.5	-131.0
52- 4-18	18:13:38	1	0.2	5.3	0.2	9.2		0.2	19.1	29.4	2.5
		2	3.5	1.3	0.0	3.0		0.0	34.4	42.4	16.2
		3	17.3	0.3	0.0	0.3		0.0	1.8	1.4	6.4
		4	10.8	8.8	0.2	18.6		0.2	38.4	200.0	66.7
		5	-10.8	1.0	0.2	-1.0		0.2	-116.9	8.6	-16.5
52- 4-18	18:31:14	1	0.2	5.3	0.2	9.2		0.2	31.1	22.7	-2.8
		2	3.6	1.3	0.0	2.9		0.0	13.7	16.2	19.7
		3	20.6	0.3	0.0	0.3		0.0	0.4	0.7	-7.0
		4	10.8	8.8	0.2	18.6		0.2	112.2	121.6	7.1
		5	-10.8	1.0	0.2	-1.0		0.2	21.2	-10.2	-123.1
52- 4-18	18:58: 6	1	-0.0	5.0	0.2	9.1		0.2	33.9	25.4	4.2
		2	4.6	1.4	0.0	2.9		0.0	22.4	23.4	24.4
		3	-217.7	0.3	0.0	0.3		0.0	0.7	0.9	5.7
		4	10.8	8.8	0.2	16.7		0.2	149.8	148.2	132.6
		5	-12.7	1.0	0.2	1.0		0.2	19.6	2.4	-8.6
52- 4-18	19:42:28	1	-0.1	5.0	0.2	9.0		0.2	27.9	21.4	2.2
		2	4.6	1.5	0.0	3.2		0.0	17.7	23.9	7.2
		3	-47.6	0.3	0.0	0.4		0.0	0.6	1.1	3.3
		4	10.8	8.8	0.2	18.6		0.2	80.8	185.9	30.6
		5	-10.8	1.0	0.2	1.0		0.2	-173.3	-178.0	-7.1

1: Mean

2: σ 3: σ/M

4: Max

5: Min

応答の測定結果

№ 2

日 時			中央径間 1/2 加速度			中央径間 1/4 加速度			中央径間 1/2 変位		
			鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛直 1	鉛直 2	水平 1
52- 9-10	9:17:58	1	-2.3	-1.5	0.2	-1.5		0.2	2.8		
		2	1.6	1.0	0.0	1.7		0.0	4.9		
		3	-0.7	-0.6	0.0	-1.1		0.0	1.8		
		4	1.0	1.0	0.2	4.9		0.2	121.6		
		5	-6.9	-4.9	0.2	-6.9		0.2	-3.9		
52- 9-10	10:23: 3	1	-2.2	-1.7	0.2	-1.4		0.2	1.0		
		2	2.1	1.1	0.0	2.2		0.0	1.4		
		3	-0.9	-0.6	0.0	-1.6		0.0	1.4		
		4	4.9	1.0	0.2	6.9		0.2	5.5		
		5	-8.8	-4.9	0.2	-8.8		0.2	-29.0		
52- 9-10	10:30:58	1	-2.2	-1.5	0.2	-1.4		0.2	0.8	-0.8	0.8
		2	1.6	0.9	0.0	1.6		0.0	0.0	0.0	0.0
		3	-0.7	-0.6	0.0	-1.2		0.0	0.0	0.0	0.0
		4	2.9	1.0	0.2	2.9		0.2	0.8	-0.8	0.8
		5	-6.9	-4.9	0.2	-6.9		0.2	0.8	-0.8	0.8
52- 9-10	10:36:10	1	-2.2	-1.7	0.2	-1.4		0.2	0.8	-0.8	0.8
		2	2.6	1.0	0.0	2.3		0.0	0.0	0.0	0.0
		3	-1.2	-0.6	0.0	-1.6		0.0	0.0	0.0	0.0
		4	4.9	1.0	0.2	6.9		0.2	0.8	-0.8	0.8
		5	-10.8	-4.9	0.2	-8.8		0.2	0.8	-0.8	0.8
52- 9-10	10:55: 7	1	-2.2	-1.6	0.2	-1.4		0.2	0.8	-0.8	0.8
		2	2.1	1.0	0.0	1.8		0.0	0.0	0.0	0.0
		3	-1.0	-0.6	0.0	-1.3		0.0	0.0	0.0	0.0
		4	4.9	1.0	0.2	4.9		0.0	0.8	-0.8	0.8
		5	-8.8	-4.9	0.2	-6.9		0.2	0.8	-0.8	0.8
52- 9-10	11: 6:22	1	-2.2	-1.6	0.2	-1.4		0.2	0.8	-0.8	0.8
		2	2.4	1.1	0.0	2.2		0.0	0.0	0.0	0.0
		3	-1.1	-0.7	0.0	-1.6		0.0	0.0	0.0	0.0
		4	4.9	1.0	0.2	4.9		0.2	0.8	-0.8	0.8
		5	-12.7	-4.9	0.2	-8.8		0.2	0.8	-0.8	0.8

1: Mean

2: σ

3: σ/M

4: Max

5: Min

応答の測定結果

表 3

日 時			中央径間 1/2 加速度			中央径間 1/4 加速度			中央径間 1/2 変位		
			鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛直 1	鉛直 2	水平 1
52-10-19	10:13:15	1	-4.9		0.2	-1.5		0.2			
		2	2.0		0.0	1.7		0.0			
		3	-0.4		0.0	-1.1		0.0			
		4	1.0		0.2	6.9		0.2			
		5	-14.7		0.2	-8.8		0.2			
52-11-19	0:19:22	1	-4.4	-4.0	0.2	-2.4		0.2	-38.2	-49.7	182.0
		2	1.6	1.0	0.0	1.4		0.0	7.6	7.4	53.0
		3	-0.4	-0.2	0.0	-0.6		0.0	-0.2	-0.1	0.3
		4	1.0	-1.0	0.2	2.9		0.2	181.0	158.0	200.0
		5	-10.8	-4.9	0.2	-8.8		0.2	-4.0	-52.5	-94.9
52-11-19	0:46: 1	1	-4.5	-4.0	0.2	-2.5		0.2	-9.9	-17.5	142.0
		2	1.9	1.0	0.0	1.8		0.0	6.3	7.4	8.2
		3	-0.4	-0.3	0.0	-0.7		0.0	-0.6	-0.4	0.1
		4	1.0	-2.9	0.2	2.9		0.2	156.0	140.0	150.0
		5	-10.8	-6.9	0.2	-10.8		0.2	-14.9	-19.6	-22.7
52-11-19	1: 4:51	1	-4.4	-3.9	0.2	-2.6		0.2	70.7	53.1	0.7
		2	1.7	1.0	0.0	1.7		0.0	3.4	6.8	35.9
		3	-0.4	-0.3	0.0	-0.7		0.0	0.0	0.1	49.6
		4	1.0	-1.0	0.2	2.9		0.2	153.0	137.0	129.0
		5	-8.8	-6.9	0.2	-8.8		0.2	33.7	-162.0	-133.0
52-11-19	8:41:27	1	-5.4	-3.7	0.2	-3.6		0.2	130.0	115.0	84.8
		2	1.2	1.0	0.0	1.1		0.0	3.7	2.0	4.5
		3	-0.2	-0.3	0.0	-0.3		0.0	0.0	0.0	-0.1
		4	-1.0	-1.0	0.2	-1.0		0.2	133.0	117.0	19.6
		5	-8.8	-6.9	0.2	-6.9		0.2	18.0	79.2	-147.0
52-11-19	11:16:16	1	-5.6	-3.8	0.2	-3.7		0.2	169.0	157.0	-82.0
		2	1.4	1.0	0.0	1.4		0.0	8.1	5.7	3.5
		3	-0.2	-0.3	0.0	-0.4		0.0	0.0	0.0	0.0
		4	-1.0	-1.0	0.2	1.0		0.2	170.0	161.0	-0.8
		5	-10.8	-6.9	0.2	-8.8		0.2	-83.9	-7.1	-85.5

1: Mean

2: σ

3: σ/M

4: Max

5: Min

応答の測定結果

表 4

日 時		中央径間 1/2 加速度			中央径間 1/4 加速度			中央径間 1/2 変位		
		鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛直 1	鉛直 2	水平 1
52-11-19	11:33:34	1	-5.7	-3.9	0.2	-3.6	0.2	34.2	21.1	-112.0
		2	1.2	1.0	0.0	1.6	0.0	7.6	6.4	6.9
		3	-0.2	-0.3	0.0	-0.4	0.0	0.2	0.3	-0.1
		4	-1.0	-1.0	0.2	1.0	0.2	178.0	161.0	38.4
		5	-8.8	-8.8	0.2	-8.8	0.2	32.2	19.6	-115.0
52-11-19	11:50:46	1	-5.8	-4.0	0.2	-3.6	0.2	168.0	153.0	-31.2
		2	1.5	1.0	0.0	1.5	0.0	14.5	14.4	5.6
		3	-0.3	-0.3	0.0	-0.4	0.0	0.1	0.1	-0.2
		4	-1.0	-1.0	0.2	1.0	0.2	169.0	156.0	114.0
		5	-10.8	-6.9	0.2	-8.8	0.2	-165.0	-170.0	-35.3
52-11-19	12: 4:41	1	-5.8	-3.8	0.2	-3.5	0.2	184.0	165.0	-183.0
		2	1.7	1.0	0.0	1.6	0.0	5.6	8.6	6.2
		3	-0.3	-0.3	0.0	-0.4	0.0	0.0	0.1	-0.0
		4	-1.0	-1.0	0.2	2.9	0.2	186.0	169.0	-0.8
		5	-10.8	-6.9	0.2	-8.8	0.2	33.7	-80.8	-195.0
52-11-19	12:14:44	1	-5.8	-3.7	0.2	-3.5	0.2	179.0	163.0	-148.0
		2	1.8	1.0	0.0	1.3	0.0	5.6	7.3	5.5
		3	0.3	-0.3	0.0	-0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
		4	1.0	1.0	0.2	1.0	0.2	180.0	169.0	29.0
		5	-10.8	-6.9	0.2	-8.8	0.2	58.8	-68.2	-184.0
52-11-19	12:33:54	1	-5.7	-3.9	0.2	-3.5	0.2	68.4	54.0	-93.4
		2	2.3	1.2	0.0	2.1	0.0	3.2	3.9	9.0
		3	-0.4	-0.3	0.0	-0.6	0.0	0.0	0.1	-0.1
		4	1.0	1.0	0.2	4.9	0.2	93.3	74.5	104.0
		5	-12.7	-6.9	0.2	-10.8	0.2	-29.0	-63.5	-96.5
52-11-19	12:41: 5	1	-5.4	-3.7	0.2	-3.5	0.2	14	184.0	77.0
		2	1.5	1.0	0.0	1.3	0.0	38.4	9.0	103.0
		3	-0.3	-0.3	0.0	-0.4	0.0	27.4	0.0	1.3
		4	-1.0	-1.0	0.2	1.0	0.2	120.0	191.0	200.0
		5	-10.8	-6.9	0.2	-8.8	0.2	-126.0	-126.0	-186.0

1 : Mean

2 : σ

3 : σ/M

4 : Max

5 : Min

応答の測定結果

表 5

日 時			中央径間 1/2 加速度			中央径間 1/4 加速度			中央径間 1/2 変位		
			鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛 直 たわみ	水 平 たわみ	ねじれ	鉛直 1	鉛直 2	水平 1
51- 9-13	3:40	1	3.5	0.0	0.2	7.2		0.2	7.2	-0.3	50.3
		2	7.5	2.9	0.0	5.8		0.0	4.4	4.5	7.0
		3	2.2	85.5	0.0	0.8		0.0	0.6	-13.2	0.1
		4	32.4	8.8	0.2	26.5		0.2	21.2	13.3	71.4
		5	-20.6	-10.8	0.2	-12.8		0.2	-7.1	-14.9	32.2
		1									
		2									
		3									
		4									
		5									
		1									
		2									
		3									
		4									
		5									
		1									
		2									
		3									
		4									
		5									

1 : Mean

2 : σ

3 : σ/M

4 : Max

5 : Min

表一 7 計 算 条 件

変動風速

パワースペクトル

変動風速と揚力の
関係

鉛直成分のみを用いる。

Case 1 ~ 3 Panofsky & Mc Cormick の式

Case 4 ~ 6 実測値

Case 1 & Case 4 準定常理論

$$S_{L_0}(\omega) = \left\{ \frac{1}{2} \rho \bar{V} B \frac{d\bar{C}_L(\bar{\alpha})}{d\bar{\alpha}} \right\}^2 S_{VV}(\omega)$$

Case 2 & Case 5 京都大学の研究

$$S_{L_0}(\omega) = \left\{ \frac{1}{2} \rho \bar{V} B \psi \left(\frac{B\omega}{2\bar{V}} \right) \left(\frac{d\bar{C}_L(\bar{\alpha})}{d\bar{\alpha}} + C_D(\bar{\alpha}) \right) \right\}^2 S_{VV}(\omega)$$

ここに

$$\psi(k) = \frac{1}{1 + 2\pi k}$$

Case 3 & Case 6 準定常理論 (Davenport)

$$S_{L_0}(\omega) = \left\{ \frac{1}{2} \rho \bar{V} B \frac{d\bar{C}_L(\bar{\alpha})}{d\bar{\alpha}} \right\}^2 C \left(\frac{\omega B}{2\pi \bar{V}} \right) S_{VV}(\omega)$$

ここに

$$C(\xi) = \frac{2B^2}{(7\xi)^2} \left\{ 7\xi - 1 + e^{-7\xi} \right\}$$

空間相関関数構造
系に関するデータ

$$\tilde{R}(x, x', \omega) = \exp \left(- \frac{\lambda \omega |x - x'|}{2\pi \bar{V}} \right), \quad \lambda = 7$$

固有円振動数

	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次
たわみ対称モード	1.259	1.754	2.691	3.613	6.398
ねじれ対称モード	2.413	4.810			

構造減衰定数

すべてのモードで 0.005

モ ド

図 - 3 参照

非定常空気力

Theodorsen 空気力

表-8 応答パワースペクトルのピーク値

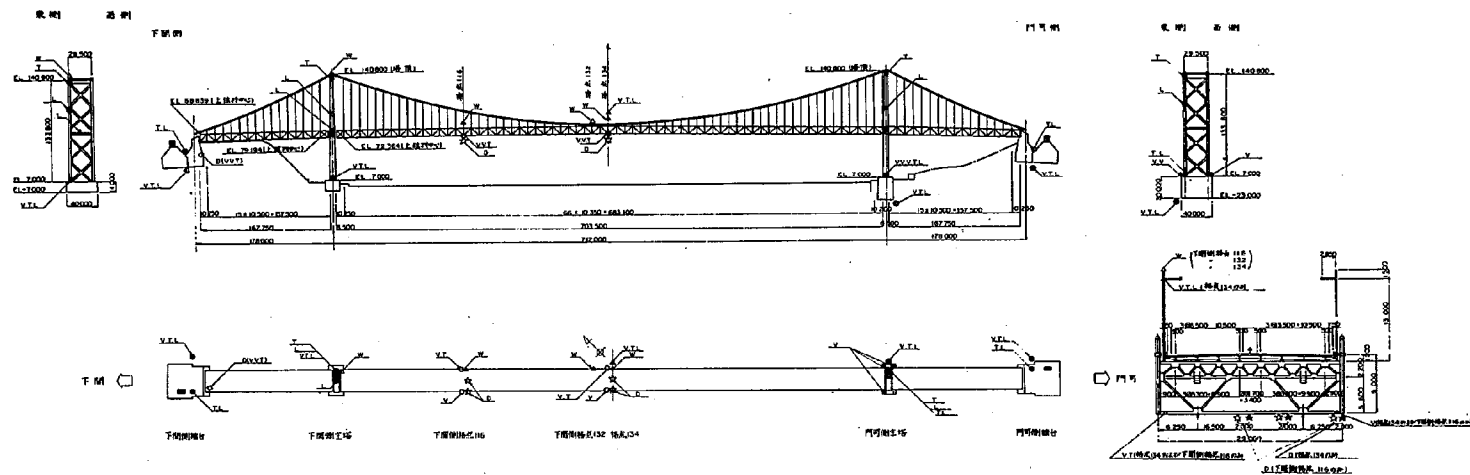
	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	実 測 値
鉛直たわみ 対称1次 ($m^2 \cdot S$)	1.331×10^{-3}	2.771×10^{-3}	7.830×10^{-4}	2.361×10^{-3}	4.903×10^{-3}	1.388×10^{-3}	2.013×10^{-2}
鉛直たわみ 対称1次 ($m^2 \cdot S$)	5.210×10^{-5}	6.268×10^{-5}	2.610×10^{-5}	1.477×10^{-5}	7.972×10^{-4}	3.322×10^{-4}	4.298×10^{-4}
ねじれ 対称1次 ($rad^2 \cdot S$)	2.317×10^{-9}	1.601×10^{-6}	9.614×10^{-7}	3.329×10^{-6}	2.301×10^{-6}	1.382×10^{-6}	9.150×10^{-7}
ねじれ 対称1次 ($rad^2 \cdot S$)	4.216×10^{-8}	7.533×10^{-9}	1.011×10^{-8}	1.124×10^{-7}	2.005×10^{-8}	2.694×10^{-8}	2.538×10^{-9}

表-9 閘門橋の固有振動数

振動モード	対称性	次数	固有振動数 (Hz)		
			理論値	測定値 ¹⁾	測定値 ²⁾
水平たわみ振動	対称	1	0.102	0.100	0.090
		2	0.418	0.390	0.385
		3	0.639	0.625	—
		4	0.796	0.750	0.745
	逆対称	1	0.331	0.291	—
		2	0.430	0.475	—
		3	0.725	0.720	—
鉛直たわみ振動	対称	1	0.200	0.212	0.210
		2	0.270	0.298	0.290
		3	0.429	—	—
		4	0.528	0.570	0.565
		5	0.914	0.918	0.916
	逆対称	1	0.152	0.180	0.160
		2	0.375	—	—
		3	0.705	0.740	0.735
振れ	対称	1	0.384	0.387	0.385
		2	0.766	0.717	0.720
	逆対称	1	0.492	0.472	0.470

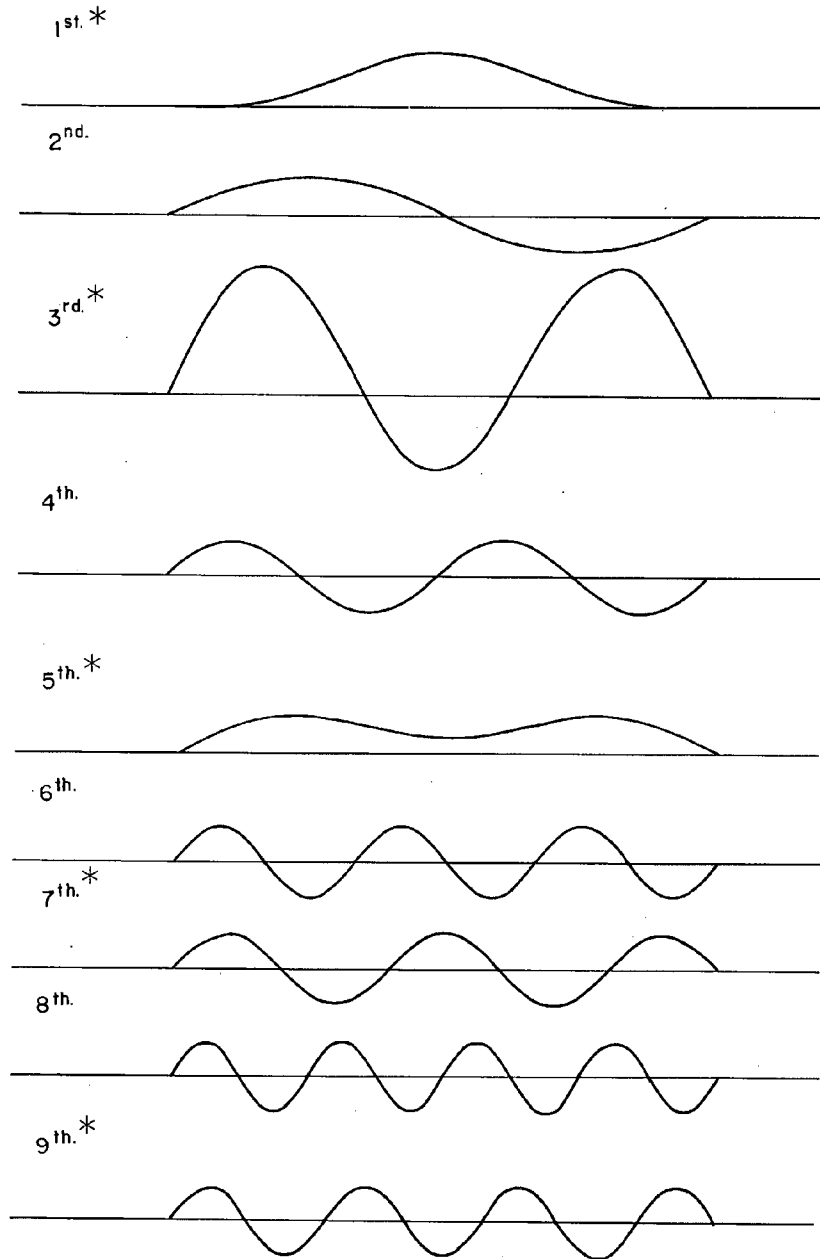
1) 1974.11.21 4:05

2) 1976.9.13 4:00



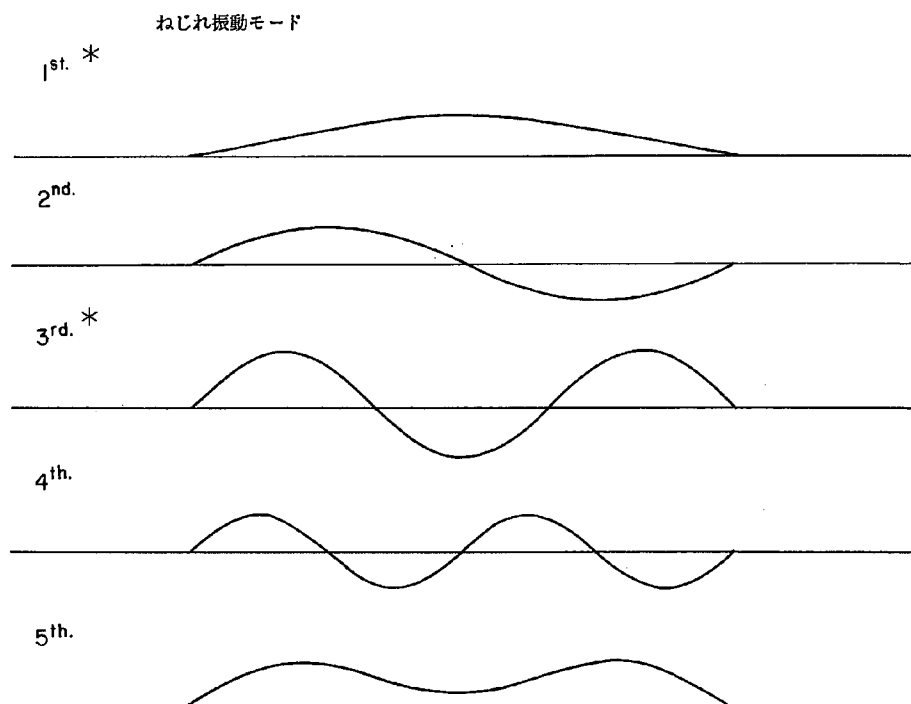
図一2 観測機器配置図

たわみ振動モード



図一 3 (1) 閘門橋の振動モード (たわみ)

*印のみ計算に使用



図一3(2) 閘門橋の振動モード (ねじれ)

*印のみ計算に使用

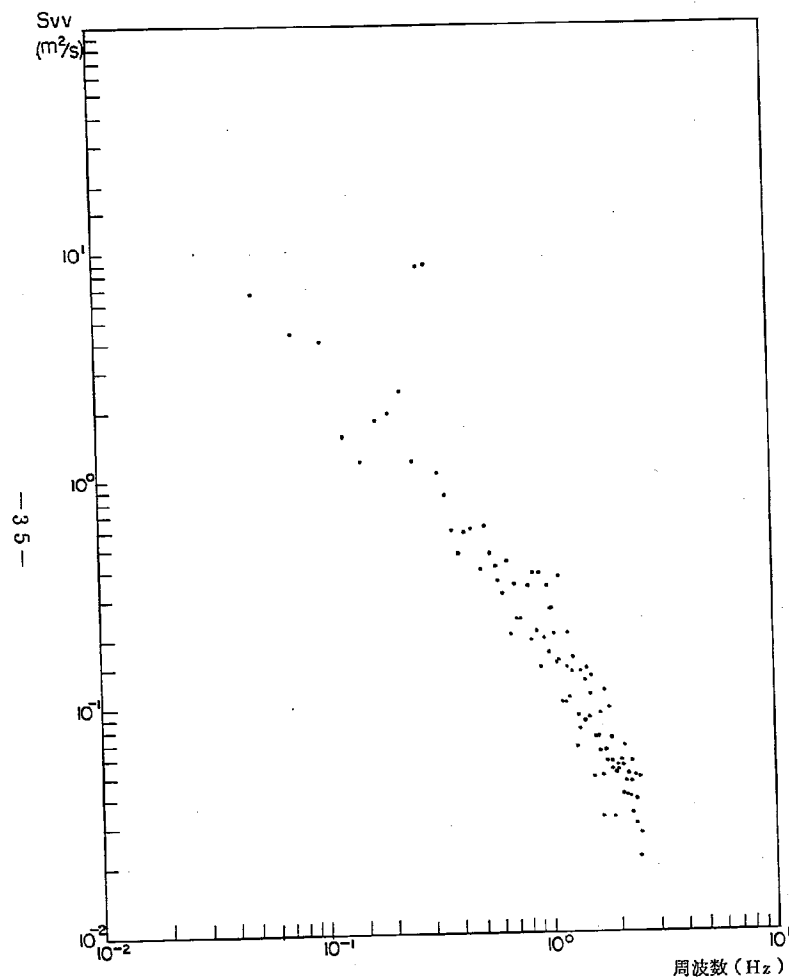


図-4 (1) 変動風速パワースペクトル・鉛直成分・実測値

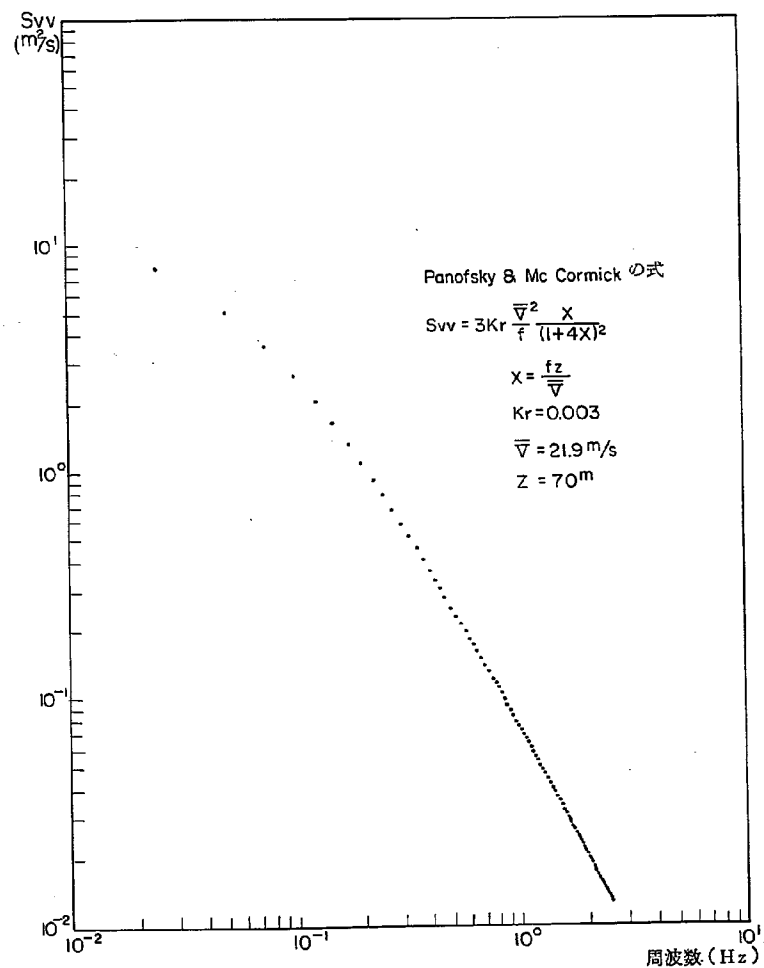
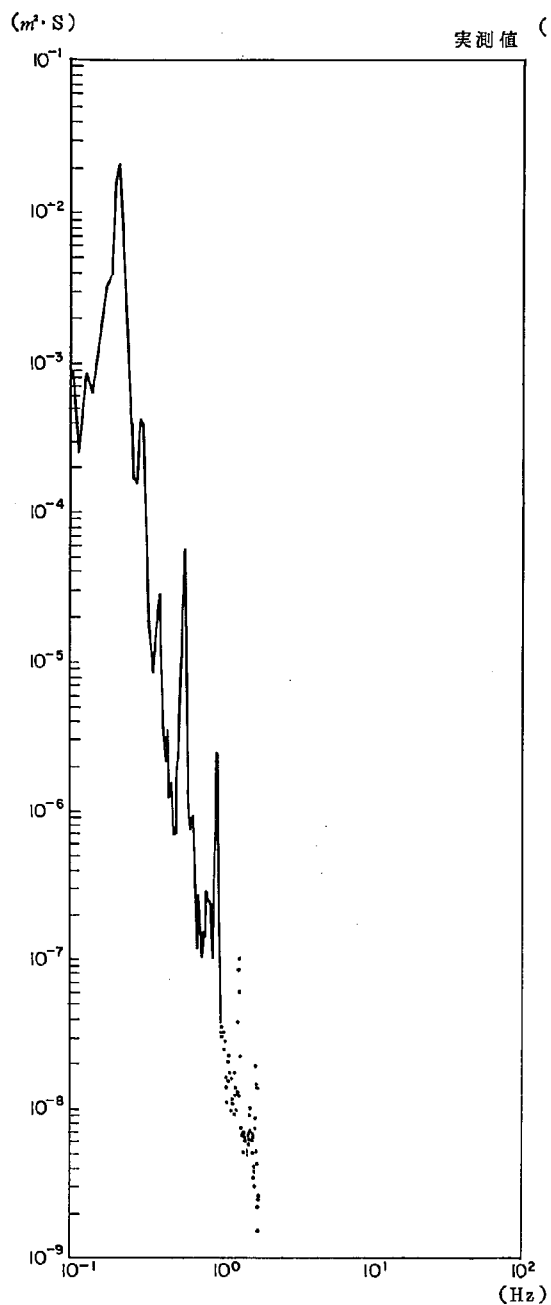
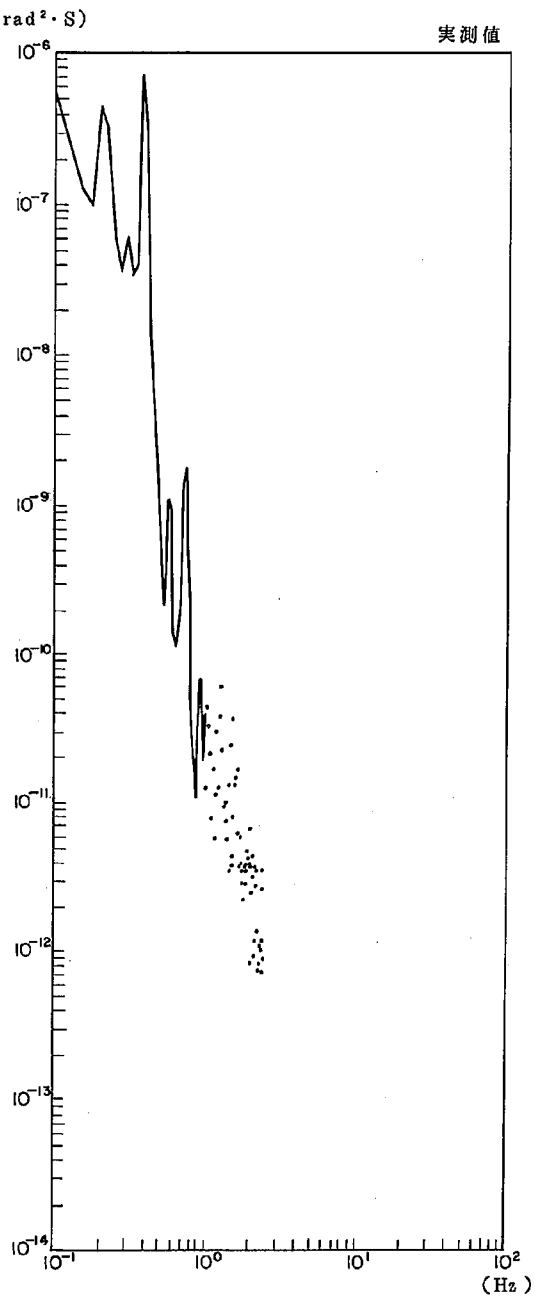


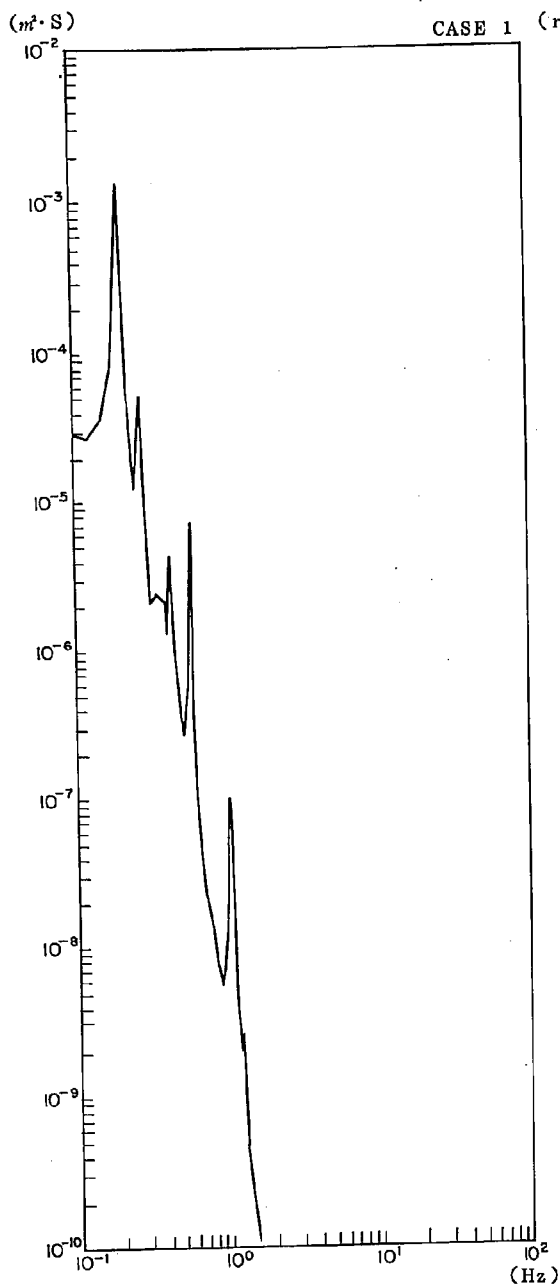
図-4 (2) 変動風速パワースペクトル・鉛直成分・理論値



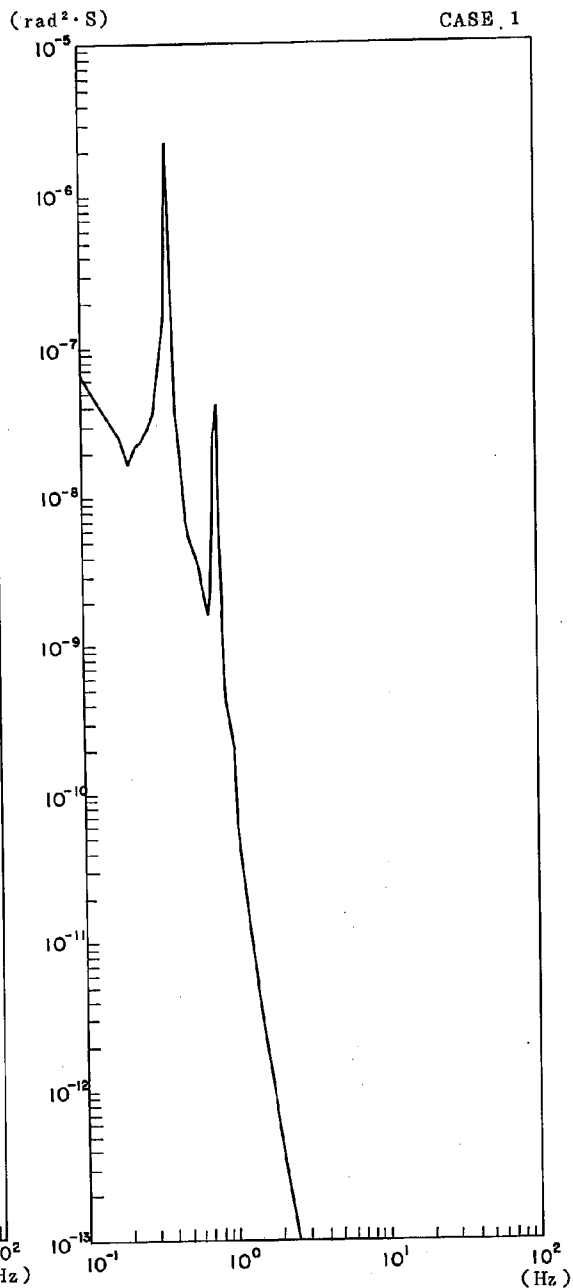
図一5(1) 鉛直パワースペクトル



図一5(2) ねじれパワースペクトル



図一6(1) 鉛直たわみパワースペクトル



図一6(2) ねじれパワースペクトル

($m^2 \cdot S$)

CASE 2 ($rad^2 \cdot S$)

CASE 2

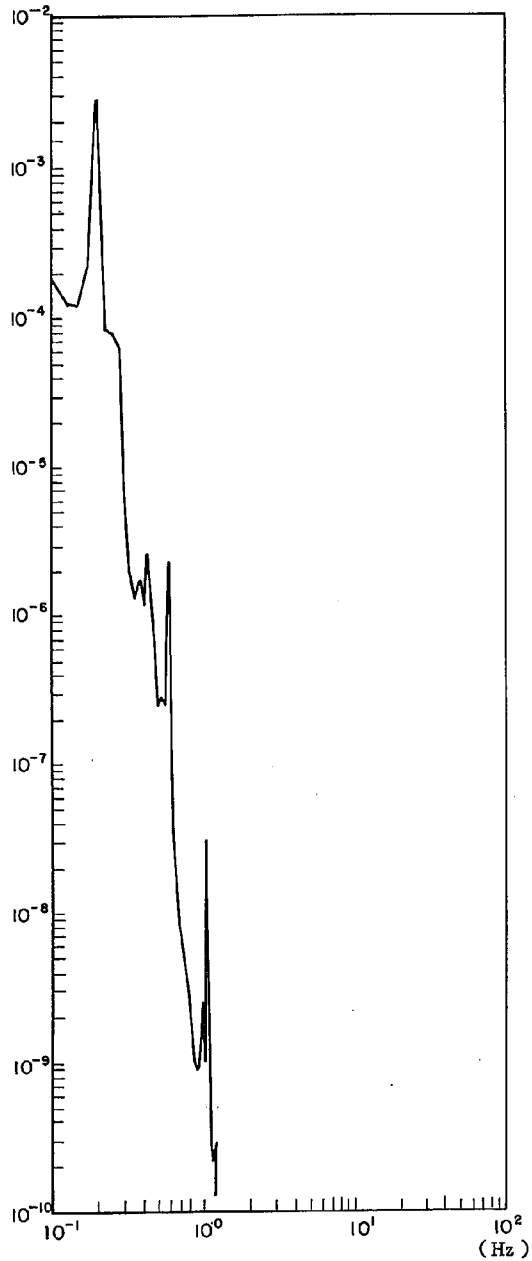


図-7(1) 鉛直パワースペクトル

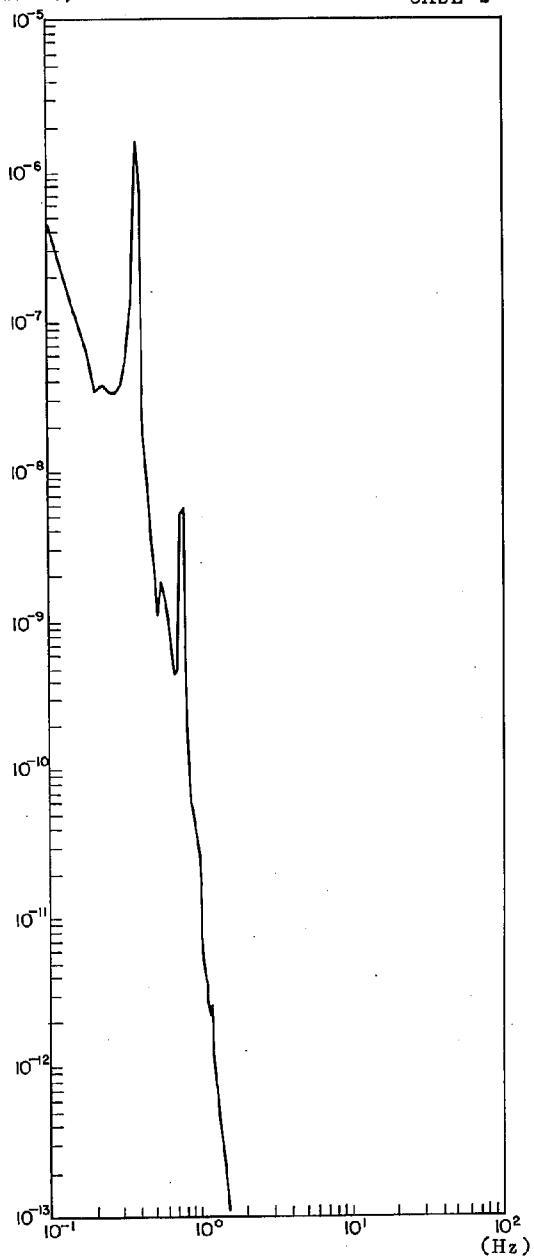


図-7(2) ねじれパワースペクトル

CASE 3 ($\text{rad}^2 \cdot \text{s}$)

CASE 3

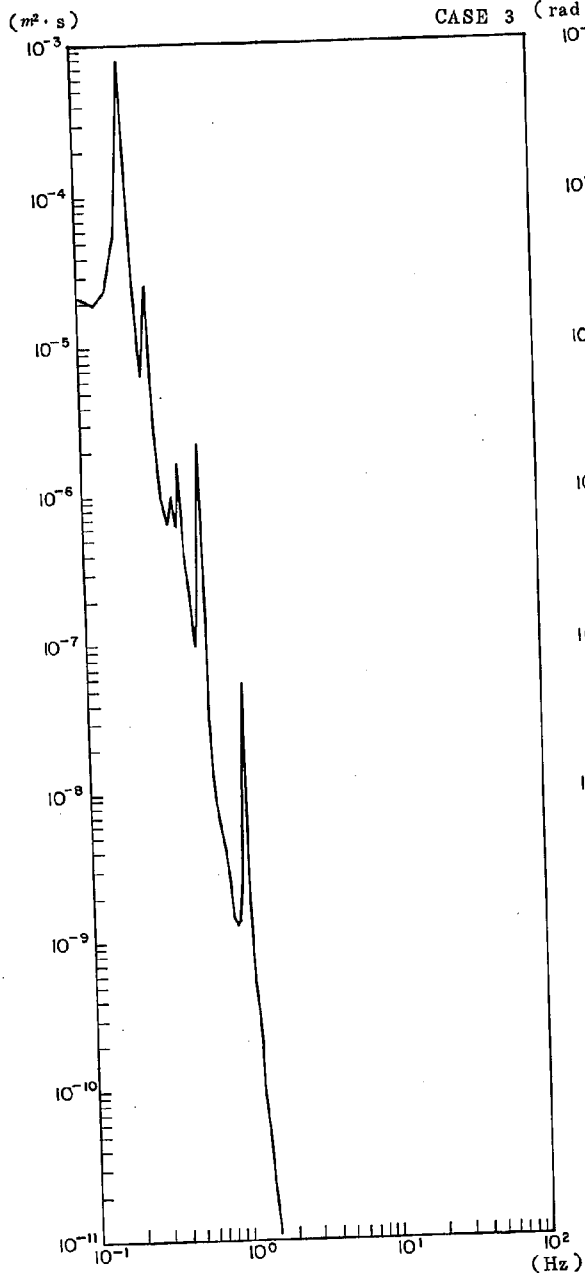


図-8(1) 鉛直たわみパワースペクトル

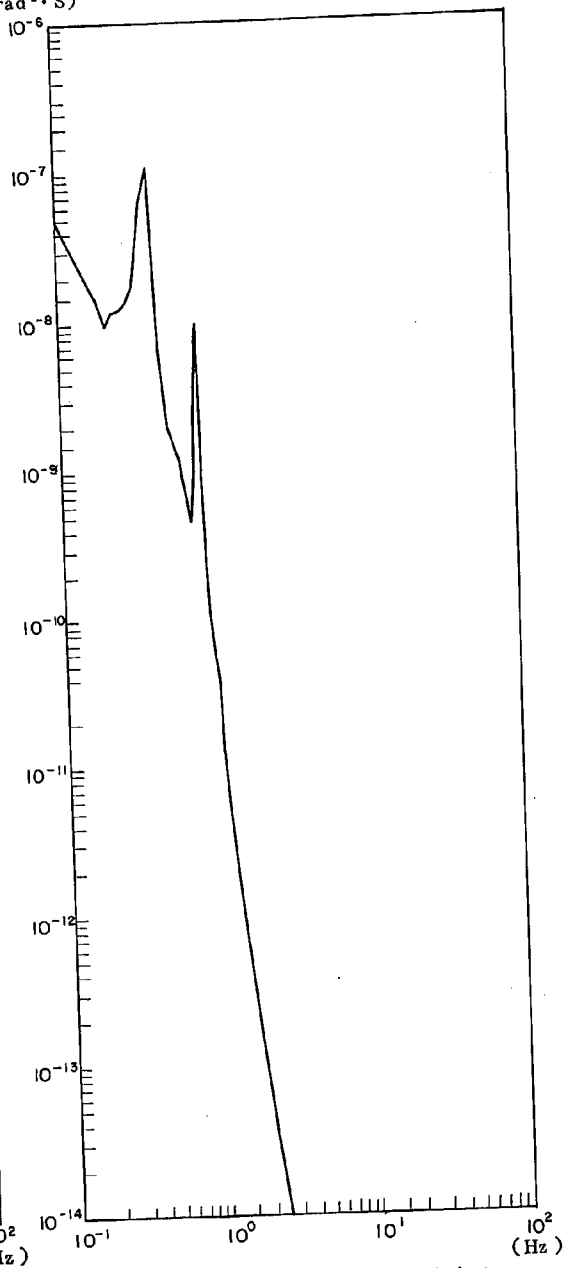


図-8(2) ねじれパワースペクトル

($m^2 \cdot S$)

CASE 4 ($rad^2 \cdot S$)

CASE 4

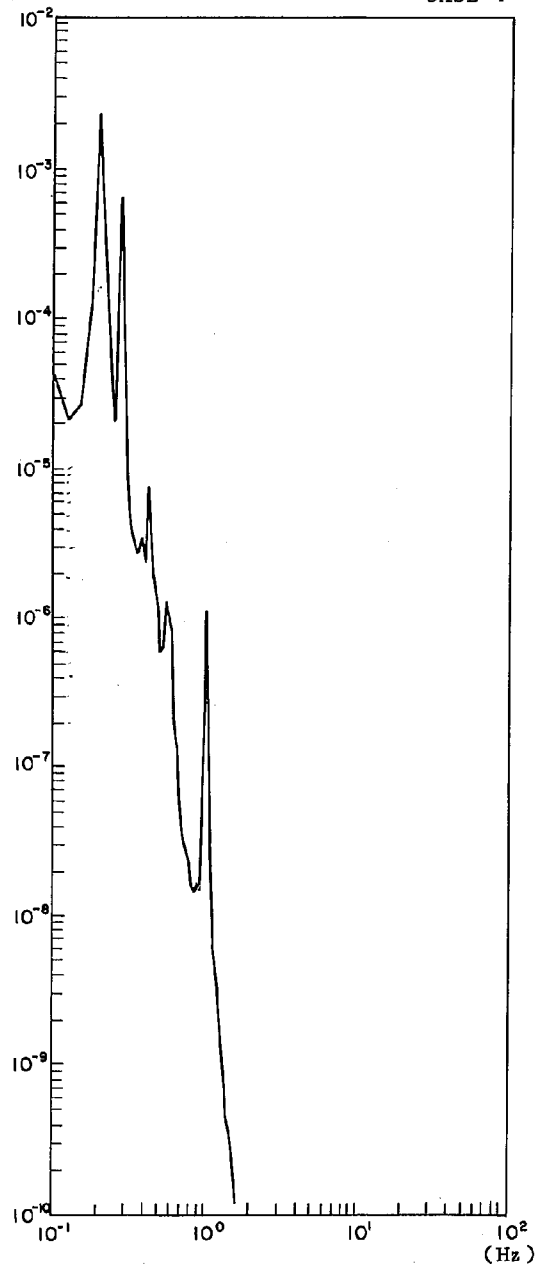


図-9(1) 鉛直たわみパワースペクトル

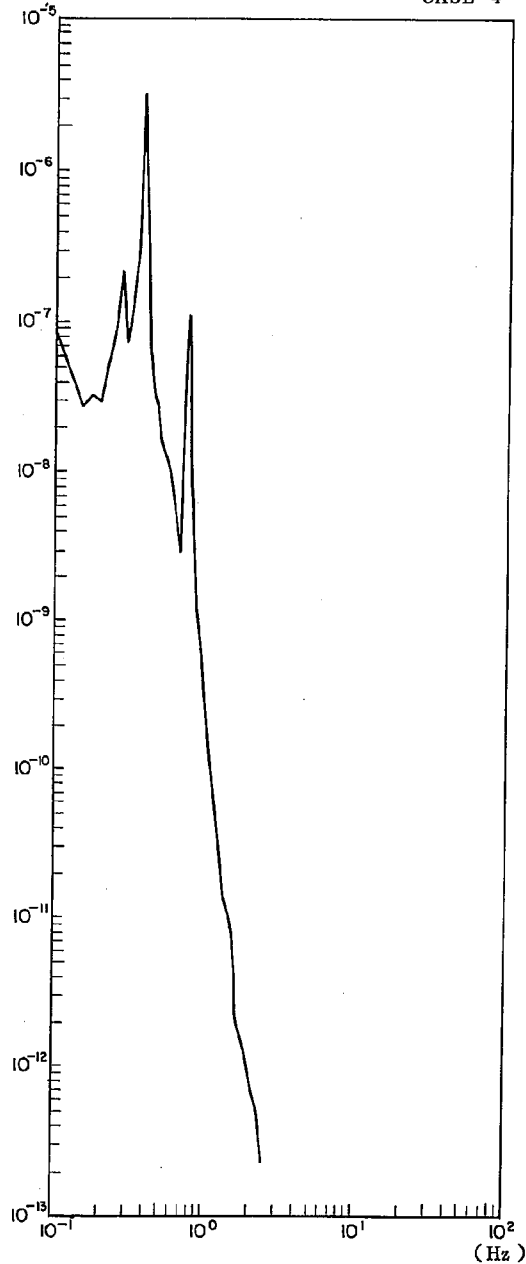
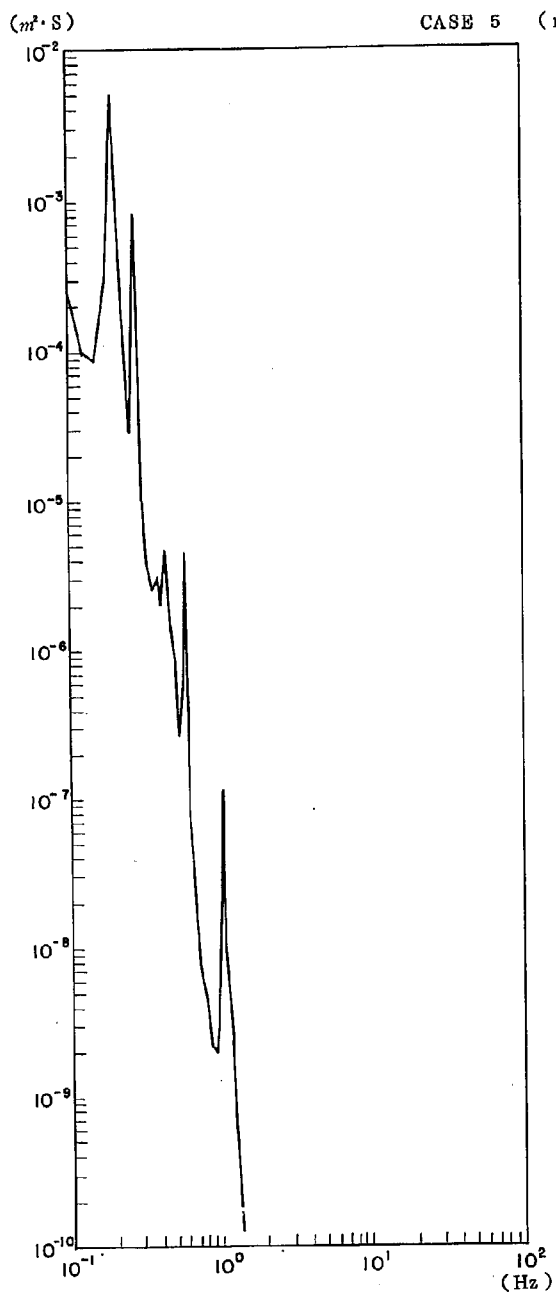
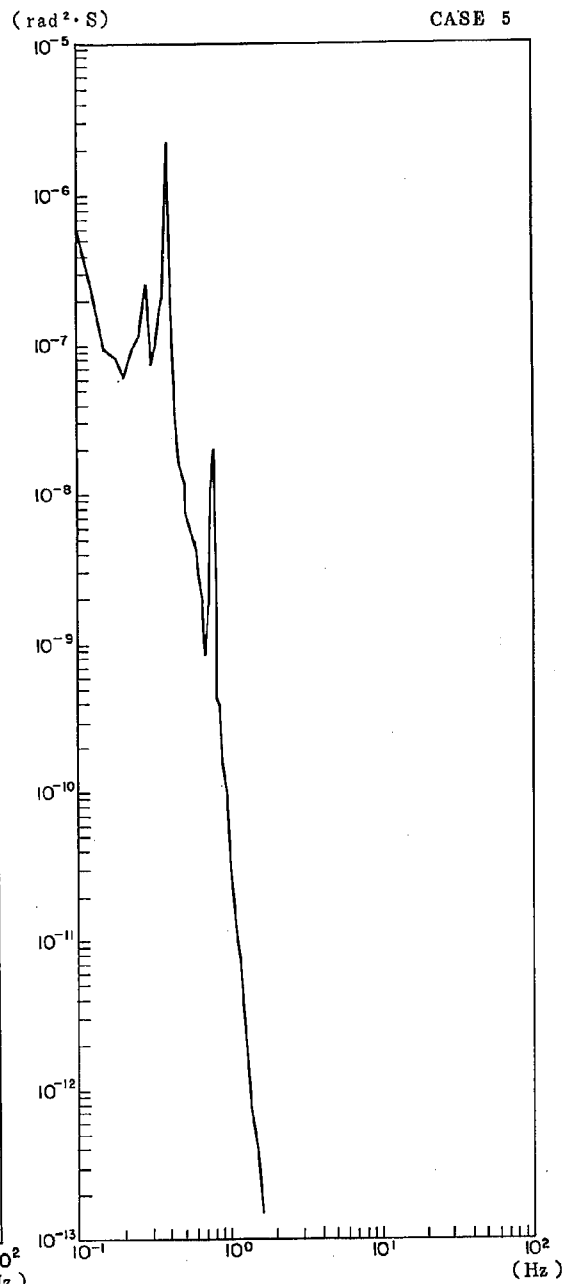


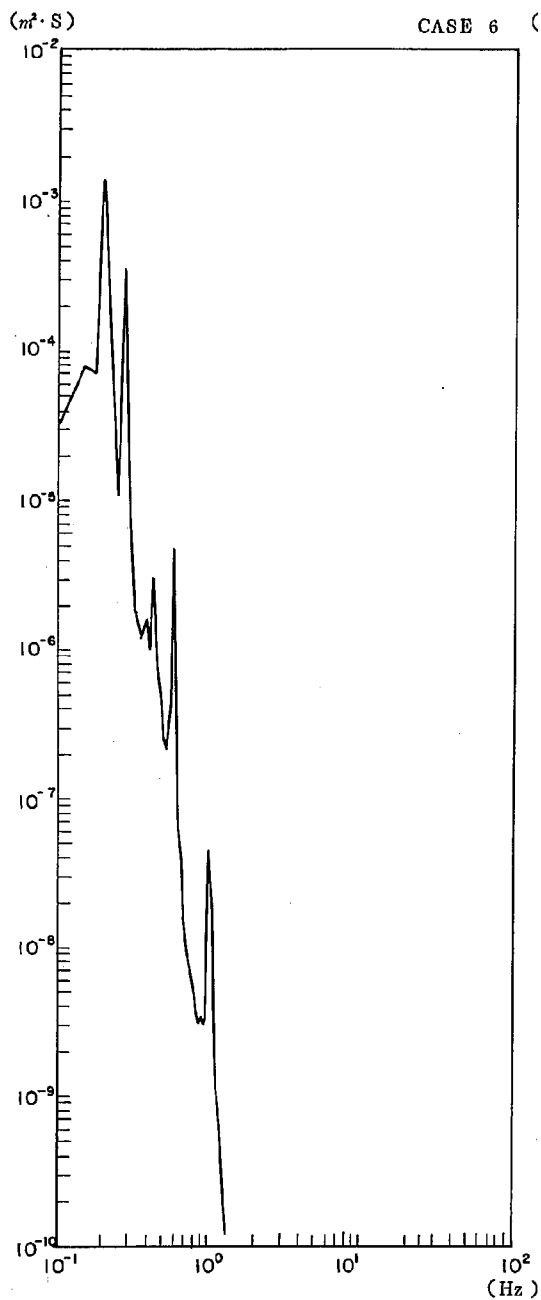
図-9(2) ねじれパワースペクトル



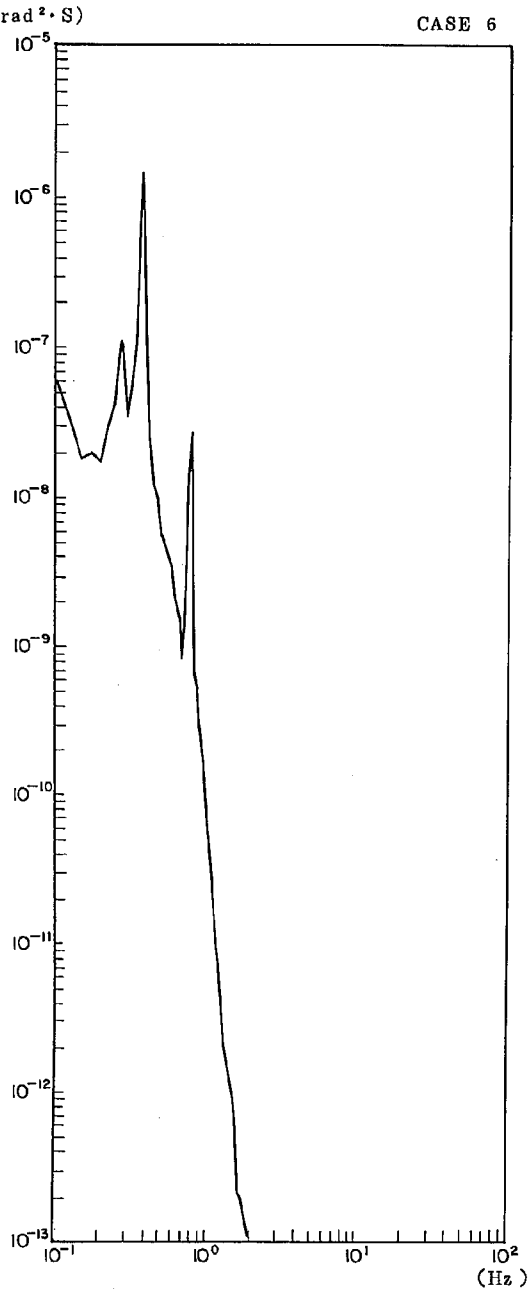
図一 10(1) 鉛直パワースペクトル



図一 10(2) ねじれパワースペクトル



図一 11(1) 鉛直パワースペクトル



図一 11(2) ねじれパワースペクトル