

秋田大学 正員 色部 誠
 ○秋田大学 正員 薄木 征三

1. まえがき 秋田市新岸地区に建設された高さ150mの東北電力秋田火力発電所1号機用煙突に風速計及び加速度計を設置し、煙突の挙動の測定を行っている。風による風力を入力とし、多質点系構造物としての煙突の応答をスペクトル解析によって表現し、実測値との比較を行った。

2. 多質点系線形構造物の応答スペクトル理論

上記火力発電所用煙突の縮図を図-1(a)に示す。縮尺1/1500。この様な構造は多質点の片持梁として置換されるが、さらに一般的なものとして軸力を負担する図-1(b)の様な平面多質点系構造物も考えてみる。この種の構造物でスペクトル解析の対象となる不規則な外力を受けるものとしては、架設途中のビルの鉄骨(風)、海中に建設されたラダーン構造物(波)などがあろう。

図-1(b)でx軸方向の運動を考えれば振動方程式は

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f \quad (1)$$

ここで m は質量マトリックス、 C は減衰定数マトリックス、 k は剛性マトリックス、 f は外力ベクトルである。 $k(t)$ と周波数応答関数マトリックス、 $H(\omega)$ をそのフーリエ変換としての複素周波数応答関数マトリックスとする。外力 f が定常エルゴード過程に従うとすると入力 f と出力 u の各々の相互相関マトリックス $R_f(\tau)$ と $R_u(\tau)$ との間の関係は次のように表わされる。これは lag である。

$$R_u(\tau) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1) R_f(\tau + \tau_1 - \tau_2) h^T(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (2)$$

相互パワースペクトルマトリックス $S_f(\omega)$ と $S_u(\omega)$ との間の関係は次のようである。

$$S_u(\omega) = H^*(\omega) S_f(\omega) H^T(\omega) \quad (3)$$

$H^*(\omega)$ は $H(\omega)$ の共役マトリックスである。加速度応答相互パワースペクトルマトリックスは

$$S_{\ddot{u}}(\omega) = \omega^4 S_u(\omega) \quad (4)$$

と表わされる。さらに $S_u(\omega)$ を知って部材各点における断面力(又は応力、歪)に関するパワースペクトルを表現できるがこの点については文献(1)を参照されたい。

特に式(1)を modal-Analysis を用いて解く場合は簡単に解かなくて $H(\omega)$ における各行 j 列の要素 $H_{kj}(\omega)$ は

$$H_{kj}(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{\bar{\Phi}_{kr} \Phi_{jr}}{M_r(\omega_r^2 - \omega^2 + i \gamma_r \omega_r \omega)} \quad (5)$$

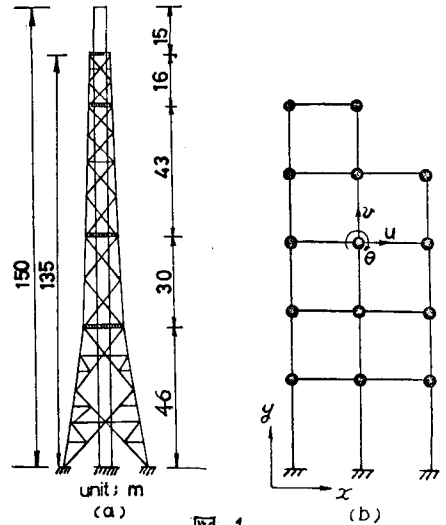


図-1

式(5)と式(3)に代入すれば $S_{u}(w)$ の各行 j 列の要素は次のように表される。

$$S_{u kj}(w) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n S_{frs}(w) \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{\Phi_i^r \Phi_s^k \Phi_i^l \Phi_l^j}{M_i M_l (w_k^2 - w^2 + 2\zeta_k w \omega_{kl})(w_l^2 - w^2 + 2\zeta_l w \omega_{li})} \quad (6)$$

式(4)における加速度応答マトリックスの各行 j 列の要素は

$$S_{\ddot{u} kj}(w) = w^2 S_{u kj}(w) \quad (7)$$

式(5), (6)で Φ_i^k など j 次の固有モードの質点 k における値であり, ζ_j, ω_j は各 j 次の減衰定数, 固有値である。又 $M_r = \sum_{i=1}^n m_i \Phi_i^r$ で m_i は質点 i の質量である。

3. 鉄塔支持型煙突の解析と実測

I) 鉄塔支持型煙突の諸定数 図-1(a)に示す本火力発電所用煙突は筒身をトラスで支持する構造であり, 地表から 25.5 m, 46.0 m, 76.0 m, 100.0 m, 119.0 m, 150 m の 6 か所でヒンジと見なしている構造によって両者が連結され, 筒身の座屈を防止し, 尤の自重の一部をトラスに負担させる構造になっている。

風速計と加速計の位置と制約から煙突を地表 76 m, 135 m に質点を持つ 2 質点系に置換した。煙突の諸定数は以下のようである。

固有値 $\omega_1 = 5.927 / \text{sec}, \omega_2 = 15.241 / \text{sec}$

減衰定数 $\zeta_1 = 0.014 \quad \zeta_2 = 0.036$

モード $\Phi = \begin{bmatrix} 0.09071 & 0.44118 \\ 0.18945 & -0.44300 \end{bmatrix}$

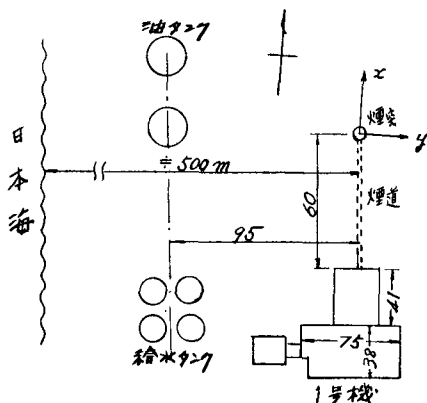


図-2

固有値, モードは 2 質点系として計算された値であり, ζ_1 は実測による。 ζ_2 は $\zeta_2 = \zeta_1 \omega_2 / \omega_1$ より推定した。2 質点の重量は $W_1 = 264.7 \text{ t}, W_2 = 65.5 \text{ t}$ である。

II) 風速及び加速度応答の実測 風速計及び加速度計は地表より 76 m, 135 m の 2 か所に設置され, 互いに直角な x, y 2 方向成分が地上の観測室で同時記録されるようになっている。 x, y 方向と方位の関係及び煙突の周囲の様子を図-2に示す。

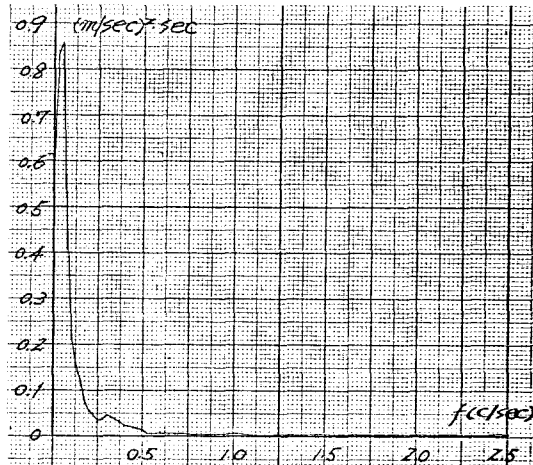
風速計の設置は 1970 年 2 月に始められ 4 月に完了した。海上電機社製 PA-211-1 水平 2 成分超音波風速計であり分解能は $\pm 2 \text{ cm/sec}$ 以上, 精度 $\pm 3\%$ 以上, 測定周波数 $0 \sim 100 \text{ c/sec}$ の性能を持つ。加速度計は明石社製水平 2 成分自動記録型であり東北電力(株)によって設置された。

III) 外乱 f の評価について 外乱 $f(t)$ は V_i を質点 i における平均風速, $v_i(t)$ は V_i からの変動分, A_i, C_{di} を投影面積, 抗力係数とし, $C_{di} = \rho A_i C_{di} / Z$ (ρ は空気密度) とおくと線形近似式 $f(t) = \{ Z C_{d1} V_1 v_1(t), Z C_{d2} V_2 v_2(t), \dots, Z C_{dn} V_n v_n(t) \}$ を用いた。こゝに $A_1 = 541.1 \text{ m}^2, A_2 = 213.1 \text{ m}^2$ である。

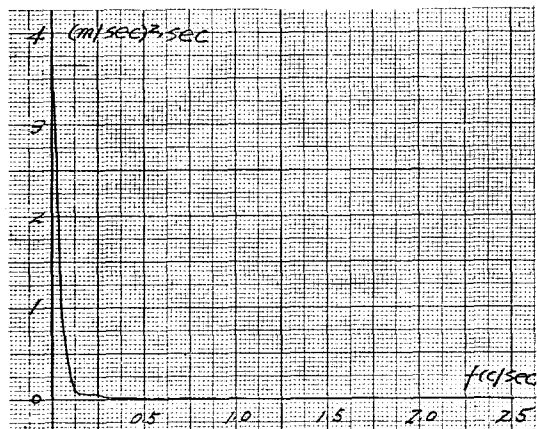
C_{di} は仮定し, 1P7-スベフトルの解析値と実測値から逆算すると $C_{d1} = C_{d2}$ と仮定すると約 2.5 であった。この値は従来提案されてくる実験値とは一致しない。我々の 1/250 全体模型による室内風洞実験の値約 2.5 とも一致している。

4. 実測値の解析結果

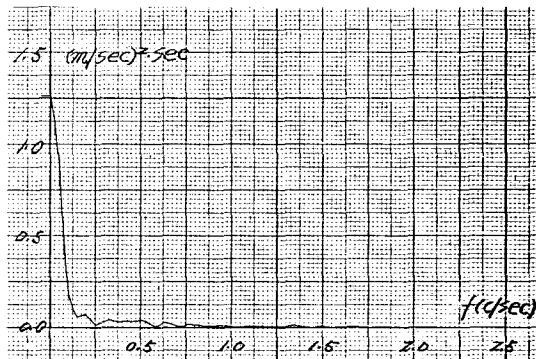
I) 風の1stフーリエスペクトル 標高76mと135mにおける1970年5月2日に測定されたx, y 2成分の1stフーリエスペクトルを図-3(a)~(d)に示す。なお観測時間は3分で0.2秒毎の記録値を読み取り、従って1成分で900個のデータとある。lag τ の最大値はデータ個数の約10%, 即ち20秒とした。従って周波数 f の解析範囲は0~2.5 c/secであり煙突の1次と2次の固有周期を包摂する。



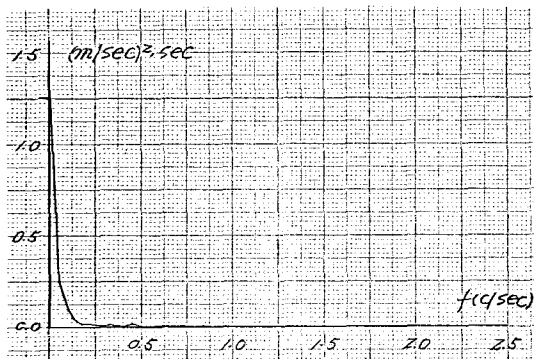
(a) x direction at EL 76 m



(b) y direction at EL 76 m



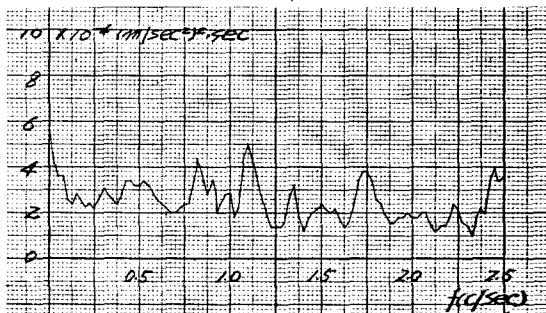
(c) x direction at EL 135 m



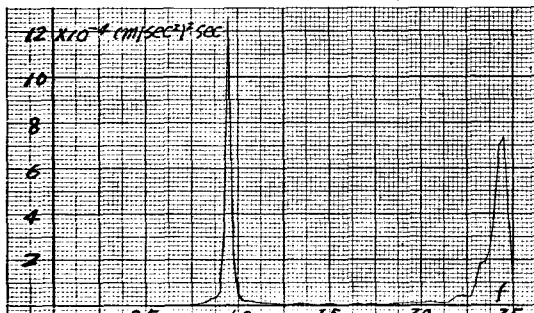
(d) y direction at EL 135 m

図-3 POWER SPECTRUM OF WIND

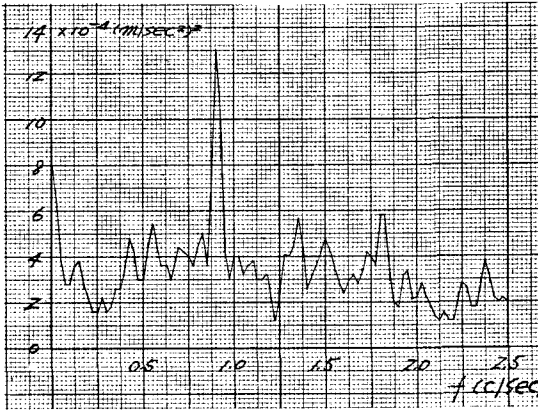
II) 加速度の1stフーリエスペクトル 図-4(a)~(b)に左列は実測値、右列は計算値を示す。



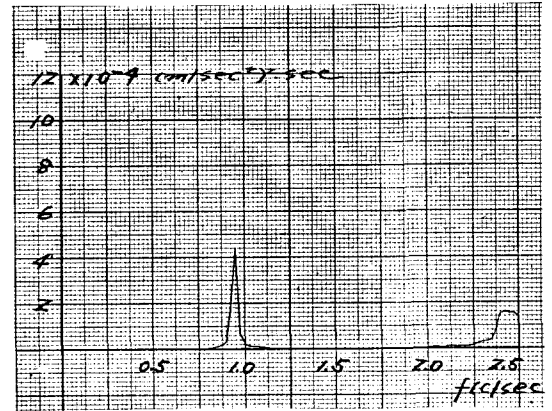
(a) x direction at EL 76 m



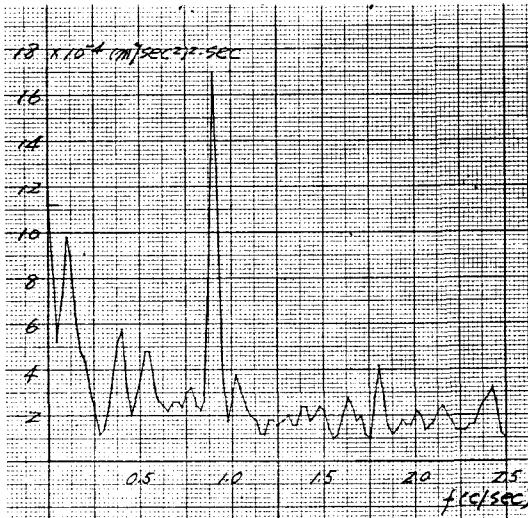
(b) theoretical



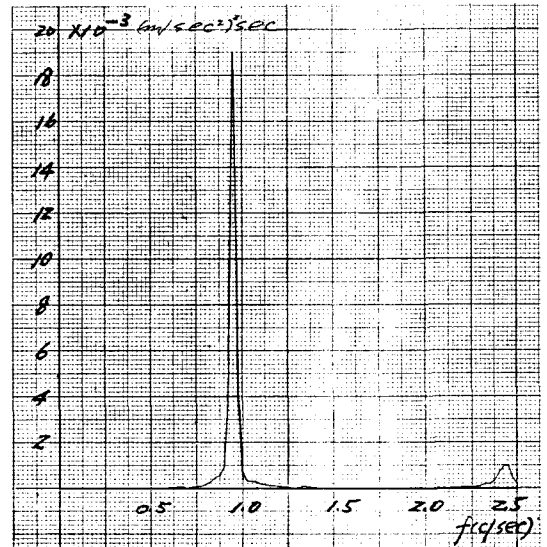
(c) y direction at EL 76m



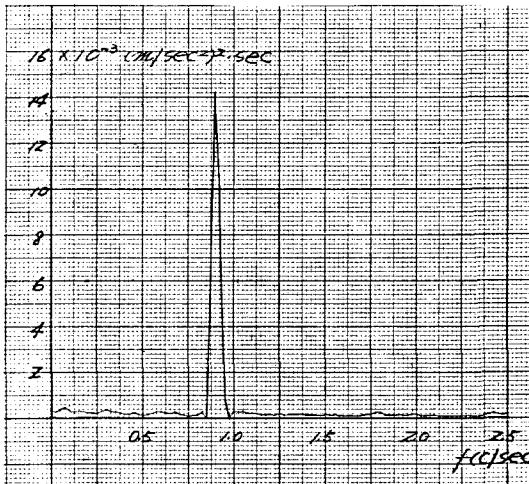
(d) theoretical



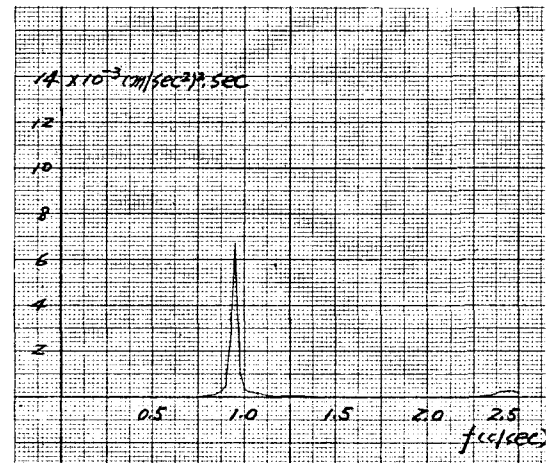
(e) x direction at EL 135m



(f) theoretical



(g) y direction at EL 135m



(h) theoretical

□-4
POWER SPECTROL OF RESPONSE $\ddot{u}$