

変動圧力測定システムにおける動的応答性能とその補正方法について

上 田 宏

§ 1. はじめに

構造物の外壁に作用する風圧力は、時間的、かつ空間的に変動する非定常圧力である。この種の圧力を測定する方法には、直接外壁に風圧計を取り付けて測定する方法や、外壁に設けた圧力測定孔から圧力を導圧管で圧力計に導いて測定する方法等がある。特に風洞実験や多点の圧力測定は、後者の導圧管方式が用いられる。この導圧管方式で変動風圧力を測定する場合には、導圧管の影響を考慮する必要がある。一端が開放され、他端が閉鎖されているか、または空気槽になっている導圧管では、ヘルムホルツ共鳴効果¹⁾²⁾ やオルガンパイプ共鳴効果³⁾⁴⁾ によって変動圧力の増幅現象が生じる⁵⁾⁶⁾。また、導圧管を長くしたときには管の抵抗が増加し、変動量の減衰を生じさせる⁷⁾⁸⁾。したがって、このような現象を考慮すると高周波数域の変動圧測定が不可能となる。そこで筆者は、このような問題を解決するために、導圧管の圧力伝達特性を理論的、かつ実験的に考察し、この結果を踏まえて導圧管の影響を補正することを試みた。本報告は、この検討結果をまとめたものである。

§ 2. H. Bergh & H. Tijdeman の圧力伝達理論

H. Bergh & H. Tijdeman (1965) は⁹⁾、流体力学の基礎方程式に基づいて、図-1 に示すように、N個の管およびN個の容積から構成された連続導圧管の圧力伝達関数を導いた。この理論は、入力を Sinusoidal な微小圧力変動と仮定して導かれたものである。

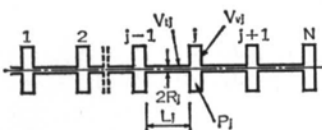


図-1 N管, N容積の連続導圧管

この理論式は、

$$\frac{P_j}{P_{j-1}} = \left[\cosh \langle \phi_j \cdot L_j \rangle + n_j \frac{V_{vj}}{V_{tj}} \left(\sigma_j + \frac{1}{K_j} \right) \cdot \phi_j \cdot L_j \cdot \sinh \langle \phi_j \cdot L_j \rangle + \frac{V_{tj+1} \cdot \phi_{j+1} \cdot L_j \cdot J_0 \langle \alpha_j \rangle \cdot J_2 \langle \alpha_{j+1} \rangle}{V_{tj} \cdot \phi_j \cdot L_{j+1} \cdot J_0 \langle \alpha_{j+1} \rangle \cdot J_2 \langle \alpha_j \rangle} \cdot \frac{\sinh \langle \phi_j \cdot L_j \rangle}{\sinh \langle \phi_{j+1} \cdot L_{j+1} \rangle} \left\{ \cosh \langle \phi_{j+1} \cdot L_{j+1} \rangle - \frac{P_{j+1}}{P_j} \right\}^{-1} \right]^{-1} \quad \dots(1)$$

ただし、

$$\phi_j = \frac{\nu}{a_0} \cdot \sqrt{\frac{J_0 \langle \alpha_j \rangle}{J_2 \langle \alpha_j \rangle}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{n_j}} \quad \dots(2)$$

$$\alpha_j = i \cdot \sqrt{i} \cdot R_j \sqrt{\frac{\rho_s \cdot \nu}{\mu}} \quad \dots(3)$$

$$n_j = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{J_2 \langle \alpha_j \sqrt{P_r} \rangle}{J_0 \langle \alpha_j \sqrt{P_r} \rangle} \right]^{-1} \quad \dots(4)$$

ここに、

- $j, j+1$: 空気槽または管の番号
- L_j : 第 j 番目の管の長さ (m)
- $2R_j$: 第 j 番目の管の内径 (m)
- J_n : n 次 Bessel 関数
- V_{vj} : 第 j 番目の空気槽の容積 (m³)
- V_{tj} : 第 j 番目の管の容積 (m³)
- i : $\sqrt{-1}$
- α_j : 第 j 番目の管の shear wave number
- μ : 流体粘性 (kg/sec·m)
- γ : 定圧定積比熱比
- P_r : Prandtl 数
- ν : 円振動数 (radian/sec)
- ρ_s : 気体の平均密度 (kg/m³)
- a_0 : 音速 (m/sec)
- K_j : 第 j 番目の空気槽の Polytropic 定数
- σ_j : 第 j 番目の空気槽の容積増加係数
- P_j : 第 j 番目の空気槽の圧力変動 (kg/m²)
- P_s : 基準静圧 (kg/m²)

で表わされる。

導圧管方式の圧力測定システムに、この理論を適用する場合に注意しなければならないことは、この理論を導くときに用いた3つの仮定である。すなわち、(1)圧力の周期的変動が非常に小さいこと、(2)管の内径がその長さに比べて十分に小さいこと、(3)管内の流れが層流であること等である。特に、短い導圧管を測定システムに用いるときには、管入口付近の軸方向流速を一定とみなすことができなくなるため、(2)の仮定には注意しなければならない¹⁰⁾。

§ 3. 3種類の圧力測定システムのモデル化

ここでは、先に述べた H. Bergh & H. Tijdeman の圧力伝達理論を、風洞実験などに多く用いられる3種類の圧力測定システムに適用するために、各システムのモデル化を行なう。

3.1 第1の圧力測定システムのモデル化

第1の圧力測定システムとは、圧力変換器と単一内径の導圧管を組み合わせたシステムである。

式(1)を適用するために、このシステムを1管・1容積の連続導圧管としてモデル化する(図-2)。

このモデルの圧力伝達関数は、式(1)において $j=1$ とすると、

$$\frac{P_1}{P_0} = \left[\cosh\langle\phi_1 \cdot L_1\rangle + n_1 \frac{V_{e1}}{V_{i1}} \left(\alpha_1 + \frac{1}{K_1} \right) \cdot \phi_1 \cdot L_1 \cdot \sinh\langle\phi_1 \cdot L_1\rangle \right]^{-1} \quad \dots\dots(5)$$

ただし、

$$\phi_1 = \frac{\nu}{a_0} \sqrt{\frac{J_0\langle\alpha_1\rangle}{J_2\langle\alpha_1\rangle}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{n_1}} \quad \dots\dots(6)$$

$$\alpha_1 = i \cdot \sqrt{i} \cdot R_1 \cdot \sqrt{\frac{\rho_s \cdot \nu}{\mu}} \quad \dots\dots(7)$$

$$n_1 = \left[1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{J_2\langle\alpha_1 \cdot \sqrt{Pr}\rangle}{J_0\langle\alpha_1 \cdot \sqrt{Pr}\rangle} \right]^{-1} \quad \dots\dots(8)$$

と表わされる。

3.2 第2の圧力測定システムのモデル化

第2の圧力測定システムとは、圧力変換器と内径の異なる3種類の導圧管を組み合わせた圧力測定システムである。

このシステムは、3管・1容積の連続導圧管としてモデル化する(図-3)。このモデルの圧力伝達関数は式(1)より、

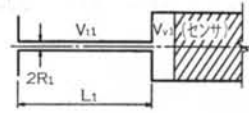


図-2 モデル化した第1の圧力測定システム

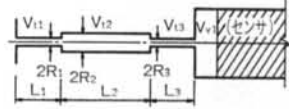


図-3 モデル化した第2の圧力測定システム

$j=1$: (第1管の圧力伝達関数)

$$\frac{P_1}{P_0} = \left[\cosh\langle\phi_1 \cdot L_1\rangle + \frac{V_{i2} \cdot \phi_2 \cdot L_1 \cdot J_0\langle\alpha_1\rangle \cdot J_2\langle\alpha_2\rangle \cdot \sinh\langle\phi_1 \cdot L_1\rangle}{V_{i1} \cdot \phi_1 \cdot L_2 \cdot J_0\langle\alpha_1\rangle \cdot J_2\langle\alpha_1\rangle \cdot \sinh\langle\phi_2 \cdot L_2\rangle} \cdot \left\{ \cosh\langle\phi_2 \cdot L_2\rangle - \frac{P_2}{P_1} \right\}^{-1} \right]^{-1} \quad \dots\dots(9)$$

$j=2$: (第2管の圧力伝達関数)

$$\frac{P_2}{P_1} = \left[\cosh\langle\phi_2 \cdot L_2\rangle + \frac{V_{i3} \cdot \phi_3 \cdot L_2 \cdot J_0\langle\alpha_2\rangle \cdot J_2\langle\alpha_3\rangle \cdot \sinh\langle\phi_2 \cdot L_2\rangle}{V_{i2} \cdot \phi_2 \cdot L_3 \cdot J_0\langle\alpha_3\rangle \cdot J_2\langle\alpha_2\rangle \cdot \sinh\langle\phi_3 \cdot L_3\rangle} \cdot \left\{ \cosh\langle\phi_3 \cdot L_3\rangle - \frac{P_3}{P_2} \right\}^{-1} \right]^{-1} \quad \dots\dots(10)$$

$j=3$: (第3管・第1容積の圧力伝達関数)

$$\frac{P_3}{P_2} = \left[\cosh\langle\phi_3 \cdot L_3\rangle + n_3 \frac{V_{e3}}{V_{i3}} \left(\alpha_3 + \frac{1}{K_3} \right) \cdot \phi_3 \cdot L_3 \cdot \sinh\langle\phi_3 \cdot L_3\rangle \right]^{-1} \quad \dots\dots(11)$$

式(9), 式(10), 式(11)より、

$$\frac{P_3}{P_0} = \frac{P_1}{P_0} \times \frac{P_2}{P_1} \times \frac{P_3}{P_2} \quad \dots\dots(12)$$

ただし、 ϕ_1 , α_1 , n_1 は式(6), 式(7), 式(8)で、

$$\phi_2 = \frac{\nu}{a_0} \cdot \sqrt{\frac{J_0\langle\alpha_2\rangle}{J_2\langle\alpha_2\rangle}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{n_2}} \quad \dots\dots(13)$$

$$\phi_3 = \frac{\nu}{a_0} \cdot \sqrt{\frac{J_0\langle\alpha_3\rangle}{J_2\langle\alpha_3\rangle}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{n_3}} \quad \dots\dots(14)$$

$$\alpha_2 = i \cdot \sqrt{i} \cdot R_2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_s \cdot \nu}{\mu}} \quad \dots\dots(15)$$

$$\alpha_3 = i \cdot \sqrt{i} \cdot R_3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_s \cdot \nu}{\mu}} \quad \dots\dots(16)$$

$$n_2 = \left[1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{J_2\langle\alpha_2 \cdot \sqrt{Pr}\rangle}{J_0\langle\alpha_2 \cdot \sqrt{Pr}\rangle} \right]^{-1} \quad \dots\dots(17)$$

$$n_3 = \left[1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{J_2\langle\alpha_3 \cdot \sqrt{Pr}\rangle}{J_0\langle\alpha_3 \cdot \sqrt{Pr}\rangle} \right]^{-1} \quad \dots\dots(18)$$

で表わされる。

3.3 第3の圧力測定システムのモデル化

第3の圧力測定システムとは¹¹⁾¹²⁾、圧力変換器と各測定点の圧力を自動的に切り換える装置（多点圧力切り換え装置）、それに内径の異なる3種類の導圧管を組み合わせた圧力測定システムである。

スキャナ内部の導圧管は、図-4に示すような複雑な構造であるが、近似的に内径の均一な導圧管とみなした。

したがって、この第3の圧力測定システムは4管・1容積の連続導圧管としてモデル化を行なった(図-5)。

このようなモデルに対する圧力伝達関数は、式(1)より

$j=1$: 第1管の圧力伝達関数は式(9)で表わされる。

$j=2$: 第2管の圧力伝達関数は式(10)で表わされる。

$j=3$: (第3管の圧力伝達関数)

$$\frac{P_3}{P_2} = \left[\cosh\langle\phi_3 \cdot L_3\rangle + \frac{V_{i4} \cdot \phi_4 \cdot L_3 \cdot J_0\langle\alpha_3\rangle \cdot J_2\langle\alpha_4\rangle}{V_{i3} \cdot \phi_3 \cdot L_4 \cdot J_0\langle\alpha_4\rangle \cdot J_2\langle\alpha_3\rangle} \cdot \frac{\sinh\langle\phi_3 \cdot L_3\rangle}{\sinh\langle\phi_4 \cdot L_4\rangle} \right] \cdot \left\{ \cosh\langle\phi_3 \cdot L_3\rangle - \frac{P_4}{P_3} \right\}^{-1} \quad \dots\dots(19)$$

$j=4$: (第4管、第1容積の圧力伝達関数)

$$\frac{P_4}{P_3} = \left[\cosh\langle\phi_4 \cdot L_4\rangle + n_4 \cdot \frac{V_{e4}}{V_{i4}} \left(\sigma_4 + \frac{1}{K_4} \right) \cdot \phi_4 \cdot L_4 \cdot \sinh\langle\phi_4 \cdot L_4\rangle \right]^{-1} \quad \dots\dots(20)$$

式(9)、式(10)、式(19)、式(20)より、

$$\frac{P_4}{P_0} = \frac{P_1}{P_0} \times \frac{P_2}{P_1} \times \frac{P_3}{P_2} \times \frac{P_4}{P_3} \quad \dots\dots(21)$$

ここに、 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 は式(6)、式(13)、式(14)で、 α_1 、 α_2 、 α_3 は、式(7)、式(15)、式(16)で、 n_1 、 n_2 、 n_3 は式(8)、式(17)、式(18)で、 ϕ_4 、 α_4 、 n_4 は次の式で、それぞれ表わされる。

$$\phi_4 = \frac{\nu}{a_0} \cdot \sqrt{\frac{J_0\langle\alpha_4\rangle}{J_2\langle\alpha_4\rangle}} \cdot \sqrt{\frac{\nu}{n_4}} \quad \dots\dots(22)$$

$$\alpha_4 = i \cdot \sqrt{i} \cdot R_4 \cdot \sqrt{\frac{\rho_s \cdot \nu}{\mu}} \quad \dots\dots(23)$$

§ 4. 実験

4.1 ホワイトノイズ型脈動圧力発生装置の試作

導圧管の圧力伝達性を実験的に検討するために、ホワイトノイズ圧力発生装置を試作した。

一般に脈動圧力を発生させる方法としては、遮断板で噴流を遮断して脈動圧力を発生させる噴流法、スピーカとカプラーを組み合わせて音響学的に脈動圧力を発生させるカプラー法、流れの中で円柱を回転させて円柱表面

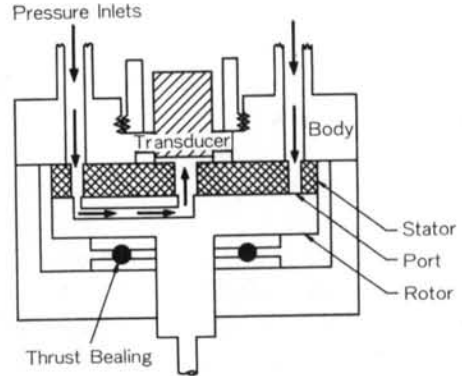


図-4 スキャナの内部構造

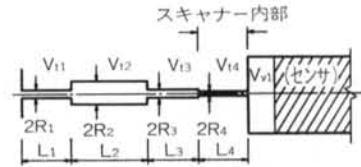


図-5 モデル化した第3の圧力測定システム

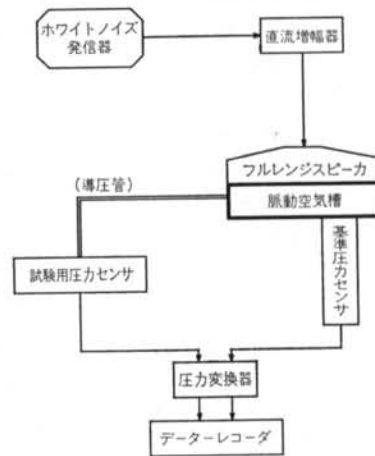


図-6 脈動圧力試験の流れ図

に生じる圧力を脈動圧力として利用する回転円柱法、流れの中におかれた物体後流に発生する周期的な渦によって生じる脈動圧力を利用するカルマン渦法、ピストンにより脈動圧力を発生させるピストン法等がある³⁾。この種の方法で発生させられた脈動圧力は、すべて単一周波数の脈動圧である。よって、これらの方法で広範囲な周波数領域に対する導圧管の圧力伝達特性を実験する場合には能率が悪い。そこで筆者は、ホワイトノイズ型脈動圧力を用いることにした。この方法は、一度に広帯域の安定した脈動圧力を得ることができる。

今回の実験で用いた装置は、ホワイトノイズ発信器とスピーカを組み合わせたものである。このホワイトノイズ

ズ型脈動圧力発生装置は、ホワイトノイズ発信器より出力される電圧を直流増幅器で増幅させてスピーカに入力して、ホワイトノイズ圧力を発生させるような仕組みになっている(図-6)。

4.2 圧力伝達特性の測定

4.2.1 測定方法

今回の測定で用いた圧力計は、ゲージ方式の差圧型圧力計(Druck社製)、圧力容量: 0.5 Psi, 測定側の空気槽容積: $6.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$, 基準圧力側の空気槽容積: $1.64 \times 10^{-1} \text{ cm}^3$ である。受感部分であるダイヤフラムの1次固有振動数 f_0 は、仕様によると 1750 Hz である。

測定は、同種類の圧力計2台を用いた。1台は基準圧力センサとして、ダイヤフラムを直接脈動圧力発生装置の空気槽に取り付けた。他の1台は、試験用としてダイヤフラムを保護するためのキャップを取り付けて用いた。実験した周波数範囲は 0~200 Hz である。

第1の測定システムに関する実験は、試験用圧力センサにアダプタ(図-7)を取り付けて行なった。

第2の測定システムに関する実験は、第1の測定システムに導圧管を取り付けて行なった。この導圧管は、内径の異なる2種類の管より構成されている。第1管は、内径 0.1 cm, 長さ 2.5 cm のステンレス製である。第2管は内径 0.16 cm のナイロン製で、長さを 10 cm, 30 cm, 80 cm, 100 cm, 150 cm とした。

第3の測定システムに関する実験は、多点圧力切り換え装置であるスキューバルブ(Model 48 J)に導圧管を取り付けて行なった。この導圧管は第2の測定システムの実験に用いた管と同じ構成になっているが、スキューバルブに取り付けてある導圧管のために、第2管の最小長さを 15 cm とした。スキューバルブの中には試験用圧力センサが組み込まれており、スキューバルブを中継して導圧管に接続されている(図-5)。

4.2.2 データ処理方法

基準圧力計と試験圧力計の出力は、データレコーダに同時記録された後、計算機によって統計的処理が行われた。

各圧力計の出力は、サンプリング間隔 $dt=0.0025$ (秒)、サンプリング個数 $N=1024$ 個で、同時に A/D 変換された。この離散化時系列データを、

$x_A(\kappa dt)$ ……基準圧力計の出力

$x_B(\kappa dt)$ ……試験圧力計の出力

とする。ここに、 $\kappa=0, 1, 2, \dots, 1023$ 。次に、入力を $x_A(\kappa dt)$, 出力を $x_B(\kappa dt)$ として、1入力1出力系の周波数応答関数を計算し、ゲイン要素と位相要素を求めた。

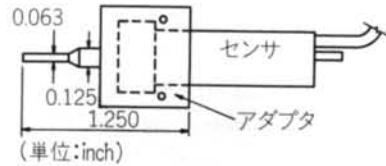


図-7 アダプタの構造

1入力1出力の周波数応答関数⁽¹³⁾の推定値 $H(f)$ は、

$$H(f) = \frac{G_{AB}(f)}{G_A(f)} = \frac{C_{AB}(f) + jQ_{AB}(f)}{G_A(f)} \quad \dots\dots(24)$$

であり、ゲイン要素の推定値 $|H(f)|$ と位相要素の推定値 $\tilde{\phi}(f)$ は、

$$|H(f)| = \frac{|G_{AB}(f)|}{G_A(f)} = \frac{[C_{AB}(f)^2 + Q_{AB}(f)^2]^{1/2}}{G_A(f)} \quad (25)$$

$$\tilde{\phi}(f) = \tilde{\theta}_{AB}(f) = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{AB}(f)}{C_{AB}(f)} \right) \quad \dots\dots(26)$$

で表わされる。

ここに、

$G_A(f)$: 入力 $x_A(\kappa dt)$ のパワースペクトルの推定値

$G_{AB}(f)$: 入力 $x_A(\kappa dt)$ と出力 $x_B(\kappa dt)$ の相互スペクトル密度関数の推定値

$C_{AB}(f)$: 同相スペクトル密度関数の推定値

$Q_{AB}(f)$: 直交スペクトル密度関数の推定値

$\tilde{\theta}_{AB}(f)$: $G_{AB}(f)$ に含まれる位相角度

今回の解析は、高速フーリエ変換法を用いた。また、推定スペクトルの変異係数を小さくするために $m=32$ 回の統計平均を行なった。したがって、変異係数 $C.V. = \sqrt{m}$ は、スペクトル計算の誤差理論⁽¹⁴⁾から 0.18 となる。

§ 5. 実験結果と理論計算結果との比較

ここでは、実験と理論計算から得られた各圧力測定システムの圧力伝達要素の比較を行なう。この計算では、1気圧、20℃の乾燥空気を仮定して定圧定積比熱比 $\gamma=1.4$, 空気平均密度 $\rho_0=1.2(\text{kg/m}^3)$, Prandtl 数 $Pr=0.73$, Polytronic 定数 $K=1.4$ (断熱変化) とした。

また、空気槽は変形しないものと仮定し、容積増加係数 $\sigma_1=0$ で計算を行なった。

図-8には、第1の測定システムに対するゲイン要素と位相要素の実験値ならびに計算値が示されている。同図より、実験値と計算値には相違が見られる。第2の測定システムに対する実験値と計算値が図-9~図-11に示されている。これらの比較結果から、実験値と計算値は管の長さが短くなるほど相違が大きくなるということが分かった。図-12~図-14には第3の測定システムに

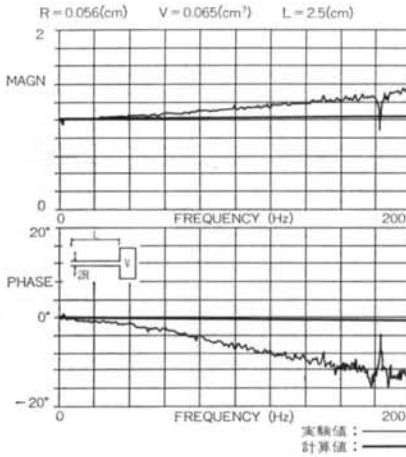


図-8 第1の圧力測定システムの伝達要素
($L=2.5$ cm, $L/2 R_1=22$)

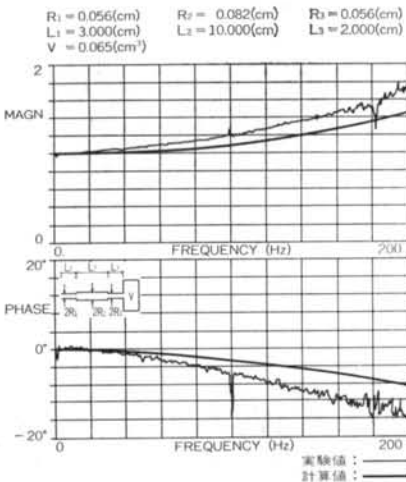


図-9 第2の圧力測定システムの伝達要素
($L=15$ cm, $L/2 R_2=91$)

対する実験値ならびに計算値が示される。このシステムの場合も、管が短いほど実験値と計算値との相違が大きくなっている。このような実験値と計算値の相違は、管の中の流れの不安定現象によって生じたものと考えられる。すなわち、管の長さが短い場合には管内の流れが不安定になり、軸方向の流速を一定とみなすことができなくなるためである。H. Schlichling¹⁵⁾によれば、このような不安定な流れの生じる範囲 (inlet length) は、管の内径の150~300倍以下であるとされている。今回の実験によれば、この inlet length は約200倍以下と考えられる。この結果は H. Schlichling の値にほぼ等しい。

以上の結果から、Bergh & Tijdeman の圧力伝達理論は導圧管の長さが最大内径の約200倍以上の圧力測定システムに対して適用可能であるということが明らかに

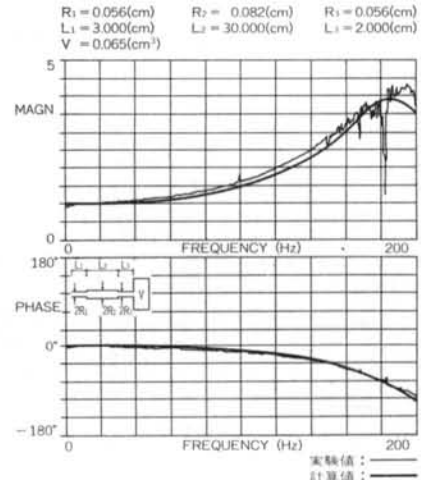


図-10 第2の圧力測定システムの伝達要素
($L=35$ cm, $L/2 R_2=213$)

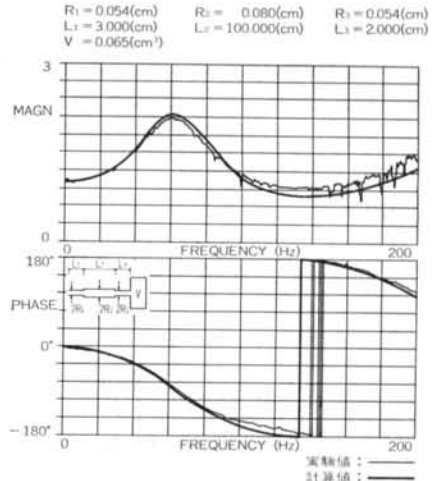


図-11 第2の圧力測定システムの伝達要素
($L=105$ cm, $L/2 R_2=640$)

なった。

§ 6. 導圧管の影響の補正

ここでは、前述の圧力測定システムによって測定された圧力データを、Bergh & Tijdeman の圧力伝達理論と高速フーリエ変換ならびに逆高速フーリエ変換を応用して導圧管の影響を補正することを試みる。

6.1 補正方法

まず、測定した圧力データの A/D 変換を行ない、離散化時系列データ $x(\kappa \Delta t)$ を得る。ただし、 $\kappa=0, 1, 2,$

$R_1 = 0.053(\text{cm})$ $R_2 = 0.080(\text{cm})$ $R_3 = 0.053(\text{cm})$ $R_4 = 0.036(\text{cm})$
 $L_1 = 3.000(\text{cm})$ $L_2 = 15.000(\text{cm})$ $L_3 = 5.500(\text{cm})$ $L_4 = 3.500(\text{cm})$
 $V = 0.065(\text{cm}^3)$

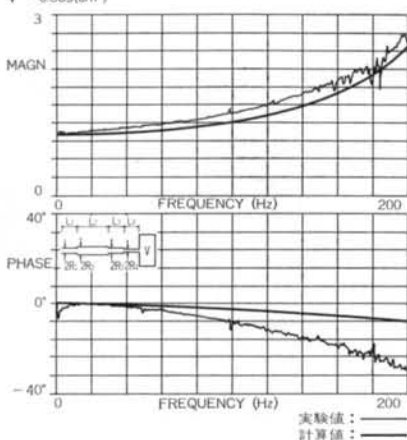


図-12 第3の圧力測定システムの伝達要素
 $(L=27 \text{ cm}, L/2 R_2=165)$

$R_1 = 0.053(\text{cm})$ $R_2 = 0.080(\text{cm})$ $R_3 = 0.053(\text{cm})$ $R_4 = 0.036(\text{cm})$
 $L_1 = 3.000(\text{cm})$ $L_2 = 30.000(\text{cm})$ $L_3 = 5.500(\text{cm})$ $L_4 = 3.500(\text{cm})$
 $V = 0.065(\text{cm}^3)$

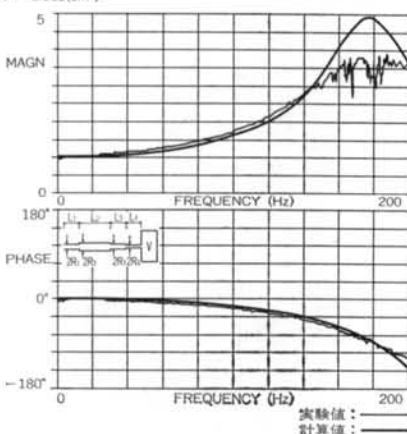


図-13 第3の圧力測定システムの伝達要素
 $(L=42 \text{ cm}, L/2 R_2=256)$

$\dots, N-1, N$ はサンプリング個数, Δt はサンプリング間隔である。次に, この時系列データの高速フーリエ変換¹⁴⁾を行なう。

$$X(k) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i\Delta t) \cdot \exp\left[-i \cdot 2\pi \frac{k \cdot i}{N}\right] \cdot \Delta t \quad \dots\dots 27$$

ただし, $k=0, 1, 2, \dots, N/2-1$ とする。式27の実数部を $X_r(k)$, 虚数部を $X_i(k)$ とすればゲイン要素 $|H_P(k)|$ と位相要素 $\phi_P(k)$ は,

$$|H_P(k)| = \sqrt{X_r^2(k) + X_i^2(k)} \quad \dots\dots 28$$

$$\phi_P(k) = \tan^{-1}[X_i(k)/X_r(k)] \quad \dots\dots 29$$

となる。Bergh & Tijdeman の圧力伝達理論から計算したゲイン要素 $|H_T(k)|$ と位相要素 $\phi_T(k)$ によって, 式28, 式29を補正する。

$R_1 = 0.047(\text{cm})$ $R_2 = 0.075(\text{cm})$ $R_3 = 0.047(\text{cm})$ $R_4 = 0.036(\text{cm})$
 $L_1 = 3.000(\text{cm})$ $L_2 = 102.000(\text{cm})$ $L_3 = 5.500(\text{cm})$ $L_4 = 3.500(\text{cm})$
 $V = 0.065(\text{cm}^3)$

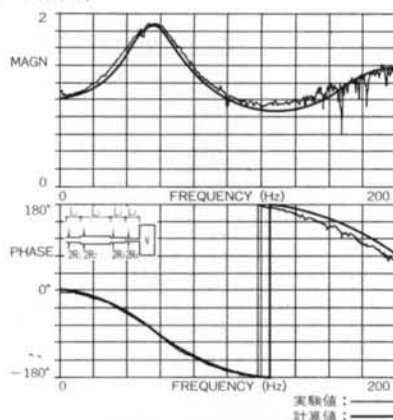


図-14 第3の圧力測定システムの伝達要素
 $(L=114 \text{ cm}, L/2 R_2=695)$

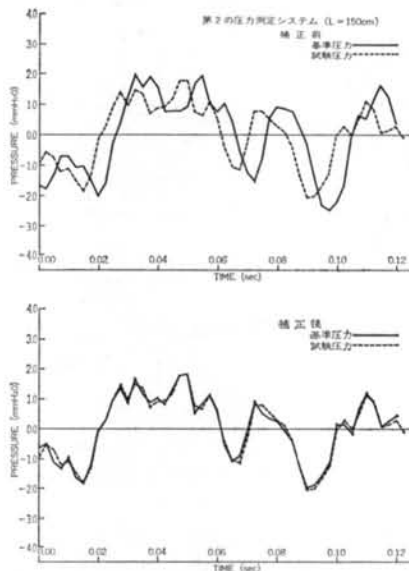


図-15 補正前と補正後の圧力波形(第2の圧力測定システム)

$$|H_C(k)| = |H_P(k)| / |H_T(k)| \quad \dots\dots 30$$

$$\phi_C(k) = \phi_P(k) - \phi_T(k) \quad \dots\dots 31$$

ここに,

$|H_C(k)|$: 補正されたゲイン要素

$\phi_C(k)$: 補正された位相要素

これより, 補正された複素フーリエ成分は,

$$X'_r(k) = |H_C(k)| \cdot \cos \phi_C(k) \quad \dots\dots 32$$

$$X'_i(k) = |H_C(k)| \cdot \sin \phi_C(k) \quad \dots\dots 33$$

から,

$$X'(k) = X'_r(k) + iX'_i(k) \quad \dots\dots 34$$

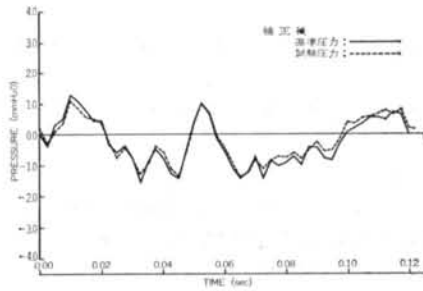
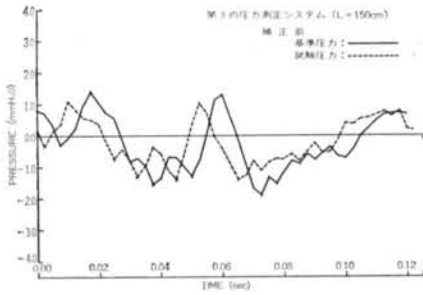


図-16 補正前と補正後の圧力波形(第3の圧力測定システム)

となる。したがって、導圧管の影響を補正した圧力の離散化時系列データは式(34)の逆高速フーリエ変換により、

$$x'(\kappa \cdot \Delta t) = \sum_{k=0}^{N/2-1} X'(k) \cdot \exp\left[i \cdot 2\pi \frac{k \cdot \kappa}{N} \cdot \frac{2}{N \cdot \Delta t}\right] \quad \dots(35)$$

として表わされる。

6.2 補正結果

第2の測定システムと第3の測定システムに対する補正前と補正後の圧力波形の一例を図-15と図-16に示す。補正した周波数範囲は、0~200 Hzである。

定量的な補正効果は、各圧力変動の分散値に基づいて計算される分散比によって検討した。基準変動圧力と、導圧管の影響を補正する前と補正した後の試験変動圧力との分散比は、

$$\varepsilon_A = (\sigma_A^2 - \sigma_R^2) / \sigma_R^2 \quad \dots(36)$$

$$\varepsilon_B = (\sigma_B^2 - \sigma_R^2) / \sigma_R^2 \quad \dots(37)$$

ここに、

$\varepsilon_A, \varepsilon_B$: 補正前と補正後の分散比

σ_A, σ_B : 補正前と補正後の分散値

σ_R : 基準変動圧力の分散値

第2と第3の測定システムに対する補正前後の分散比と導圧管の長さとの関係を図-17と図-18に示す。ただし、第1の測定システムに対する補正効果の検討は、理論の適用範囲外でもあり省略した。この検討結果から導圧管の影響の補正効果は、図-17と図-18より導圧管が長いほど期待できるものと推察される、しかし、その長

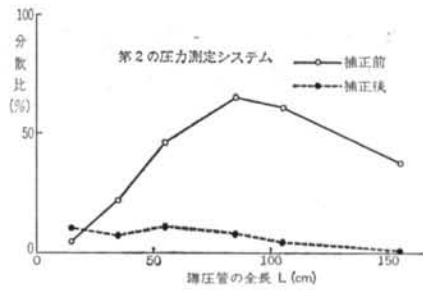


図-17 導圧管全長と分散比との関係(第2の圧力測定システム)

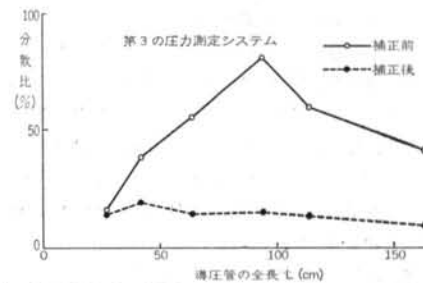


図-18 導圧管全長と分散比との関係(第3の圧力測定システム)

さにも物理的な限界があると思われる。今後、この点については検討する予定である。

§ 7. まとめ

構造物の外壁に作用する変動風圧力を、導圧管を用いた圧力測定システムで測定する場合には、導圧管の影響を考慮する必要がある。そこで筆者は、この種の測定に用いられる導圧管の圧力伝達特性を考察し、この結果を踏まえて、変動風圧力を測定する場合に障害となる導圧管の影響を補正することを試みた。これらの結果をまとめると以下ようになる。

1) Bergh & Tijdeman の圧力伝達理論は、管の長さが最大内径の約200倍以上の導圧管に対して適用可能である。

2) 圧力伝達理論と、高速フーリエ変換ならびに逆高速フーリエ変換を応用して導圧管の影響を補正すれば、第2の圧力測定システムでは管(内径0.16 cm)の全長が30 cm以上、また第3の圧力測定システムでは25 cm以上の導圧管に対して補正効果が期待できる。

3) 補正後の分散比は、管の長さが長くなるほど小さくなる傾向がある。

謝辞 本研究にあたり、H. Bergh & H. Tijdeman の論文を紹介していただいた航空宇宙技術研究所非定常空

気力学研究室長 柳沢三憲氏と東京大学工学部航空学科
助手 大屋昭男氏に謝意を表します。また、本報告をま
とめるに当り有益な助言をしていただいた力学研究部の

藤井邦雄主任研究員, 横田治彦氏, 塩谷清人氏に謝意を
表します。

<参考文献>

- 1) 桂, 守光: “変動風圧力変換器プローブにおける Helmholtz の共鳴現象について” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和47年10月) pp. 389~390
- 2) 大熊, 金谷: “高層建築物の風による振り振動に関する研究 (その3: 角柱側面に作用する変動風圧の性状)” 日本建築学会論文報告集 第269号 (昭和53年7月) p. 95
- 3) 谷, 小橋, 佐藤: “流体力学実験法” 岩波書店 (1977) pp. 156~161
- 4) H. P. A. H. Irwin, K. P. Cooper & R. Girard: “Correction of Distortion Effects on Causeds by Tubing Systems in Measurements of Fluctuating Pressures” J. of Industrial Aerodynamics, Vol.5 (1979) pp. 93~107
- 5) 前川道治郎: “指圧計の取付管に依る自由振動” 機械学会論文集 第2巻, 第6号 (1936) pp. 106~112
- 6) 立川正夫: “自然風中において構造物に作用する風圧力に関する実験的研究 (その1: 実験方法)” 日本建築学会論文報告集 第150号 (昭和43年8月) pp. 25~27
- 7) 曾我, 小野: “圧力測定の時差遅れにおよぼす圧力孔の影響” 航空宇宙技術研究所資料, NAL TW-238 (1972)
- 8) D. Surry & T. Stathopoulos: “An Experimental Approach to the Economical Measurement of Statially-Averaged Wind Loads” J. of Industrial Aerodynamics, Vol.2 (1977/1978) pp. 385~397
- 9) H. Bergh & H. Tijdeman: “Theoretical and Experimental Results of the Dynamic Response of Pressure Measuring Systems” National Aero and Astronautical Research Institute, Amsterdam, Report NLR-TRF 328(1965)
- 10) S. Uchida: “The Pulsating Viscous Flow Superposed on the Steady Laminar Motion of Incompressible Fluid in a Circular Pipe” ZAMP, 7 (1956) pp. 403~422
- 11) 菊地, 柳沢: “非定常圧力測定のための管の周波数応答について” 昭和53年度非定常空気力学懇談会講演資料
- 12) N. J. Cook: “Adapting the DISA51F32 Low Pressure Transducer for Use in Pressure Scanning Switches” Apparatus and Techniques (1974)
- 13) J. S. Bendat & A. G. Piersol (得丸英勝訳): “ランダムデータの統計的処理” 培風館 (昭和52年9月)
- 14) 日野幹雄: “スペクトル解析” 朝倉書店 (昭和52年10月) pp. 154~177
- 15) H. Schlichting: “Boundary-Layer Theory” McGraw-Hill (1968) pp. 560~561