

風洞実験における建物壁面の変動圧力測定方法に関する研究

——特に応答特性の較正方法を中心として——

Study on Measurement of Fluctuating Pressure in Wind Tunnel Test

村上周三*・加藤信介*・森山修治*

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Shuji MORIYAMA

1. 序

風洞模型実験で風圧を測定する際、模型壁面の圧力測定孔と圧力変換器の間を導圧管で結ぶ方法がしばしば用いられる。しかしこの方法は、変動圧力特性の測定をする場合、導圧管等での粘性摩擦による減衰や Organ pipe 共鳴および Helmholtz 共鳴の増幅等による歪みが問題となる。^{1),2),3),4)} これに対し導圧管系統における変動圧力の歪みを評価し、これを補正する試みがある。^{4),5)} 本研究では導圧管等の圧力測定系統の周波数応答特性を測定する装置を作成し、⁶⁾ さらに導圧管長さ、内径および導圧管途中に設置する共鳴防止用 restrictor⁷⁾ 等が圧力測定系統に及ぼす影響を考察したのでこれを報告する。

2. 較正装置

本研究に用いた較正装置の概略図を図-1に示す。ここ

記号

- $X(t)$: 圧力変換器 A の出力
- $Y(t)$: 圧力変換器 B の出力
- $\bar{Y}(f)$: $Y(t)$ のフーリエ変換
- \bar{S}_{xx} : $X(t)$ のパワースペクトル
- \bar{S}_{yy} : $Y(t)$ のパワースペクトル
- \bar{S}_{xy} : $X(t), Y(t)$ のクロススペクトル
- $\bar{H}(f)$: 周波数応答関数
- $|\bar{H}(f)|$: 周波数応答関数の GAIN
- $\phi(f)$: 周波数応答関数の PHASE
- $h(\tau)$: インパルス応答関数 ($\bar{H}(f)$ の逆フーリエ変換)
- γ^2_{xy} : コヒーレンシー
- $h'(\tau)$: $1/\bar{H}(f)$ を逆フーリエ変換したもの (補正用重み関数)
- $X'(t)$: $Y_1(t)$ を周波数軸上で補正した値
- $X''(t)$: $Y_1(t)$ を時間軸上で補正した値
- f : 周波数
- τ : 時間遅れ
- t : 時間変数
- i : $\sqrt{-1}$

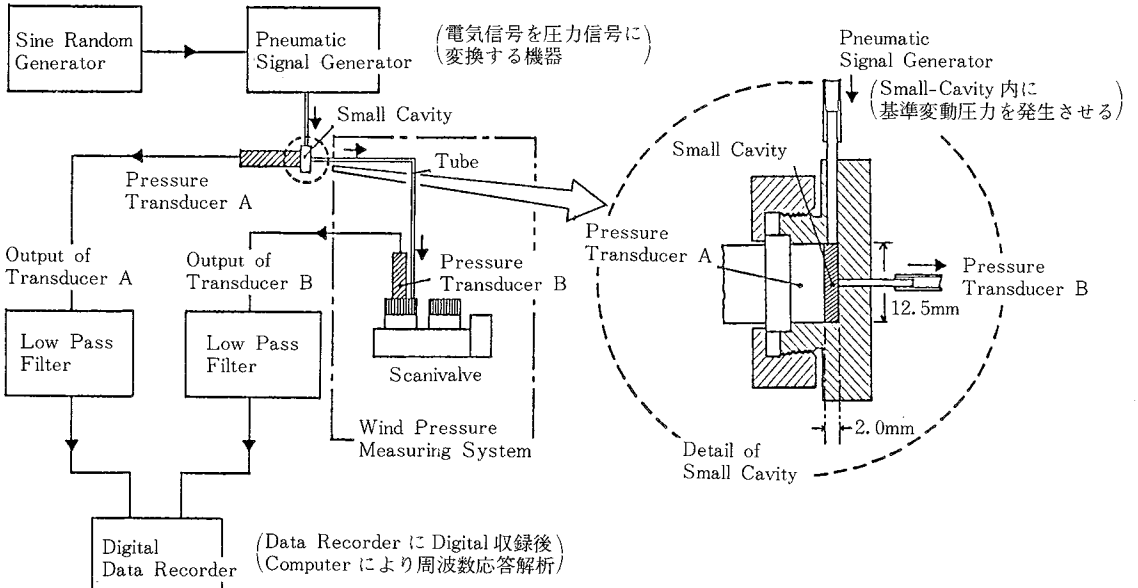


図-1 風圧測定系統の周波数応答性能較正システム

注) restrictor: 共鳴による圧力変動の増幅を防止するため、導圧管途中の断面積を部分的に細くしたもの。

* 東京大学生産技術研究所付属計測技術開発センター

で周波数特性を検討すべき圧力測定系統は、Small-Cavity に接続された導圧管から導圧管スキャナー (Scanivalve 社 48D3GM-1270) を介して、圧力変換器 B (SETRA 237 full scale 70 mmAq, DC~5 kHz までフラットな周波数特性が保証される) までである (図-1 中の一点鎖線内)。基準となる変動圧力は 1~500 Hz にわたるランダム (White Noise) な圧力変動で図-1 中の Small-Cavity 内に Pneumatic Signal Generator によって作られる。この基準変動圧力は圧力変換器 A (圧力変換器 B に同じ) により直接測定される。

3. 測 定

3-1 実 験 種 類

①導圧管長さ ②導圧管内径 ③ restrictor の有無
④導圧管のまがりの4つを実験条件として表-1 に示す 17 タイプの実験を行う。

3-2 解 析 方 法

本研究では通常の建物に働く風圧力の風洞実験で対象とされる主として DC~200 Hz の周波数応答関数を解析する。周波数応答関数の推定には Blackman-Tukey 法を用い、sampling 周波数 1 kHz、データ数 4096 個、等価 Band 幅 0.5 Hz でウィンドウ処理する。周波数応答関数は入力と出力の振幅の比である GAIN とその位相差である PHASE を用いて次式のように表される。

$$\hat{H}(f) = |\hat{H}(f)| \exp[-i\phi(f)] \quad (1)$$

導圧管を用いる測定では GAIN はフラットなほど良く、PHASE も零もしくは変化がある場合には、なるべくその変化が一定な方がよいとされる。⁴⁾

4. 測 定 結 果

4-1 導圧管内径の影響

図-2、図-3 に導圧管内径を変化させた場合の GAIN および PHASE を示す。内径を変化させても GAIN に際立った差は見られない。PHASE についても同様である。restrictor の有無に関しては、100 Hz 前後で restrictor 有の GAIN が約 0.8 であるのに対して restrictor 無のものは約 1.5 と高く、restrictor の共鳴防止効果をはっきり現れている。参考として低層建物の風圧係数に関する国際共同研究で使用された AYLESBURY 巡回模型用 restrictor 付導圧管⁷⁾の結果も図-2、図-3 に示す。この導圧管に含まれる restrictor は我々が試作したものより GAIN, PHASE ともやや良い結果を示している。

4-2 導圧管長さの影響

restrictor 無の場合の GAIN の変化を図-4 に示す。導圧管長さが短いほど共鳴が高周波に生じ、共鳴による

表-1 実 験 種 類

実験No.	導圧管長さ [cm]	導圧管内径 [mm]	restrictor	備考
1	42	1.0	有	導圧管内径の変化
2	42	1.0	無	
3	42	1.2	有	
4	42	1.5	有	
5	15	1.0	無	導圧管長さの変化
6	20	1.0	無	
7	30	1.0	無	
8	50	1.0	有	
9	50	1.0	無	
10	70	1.0	有	
11	70	1.0	無	
12	100	1.0	有	
13	100	1.0	無	直径8mmのコイル状に巻く 直径28mmのコイル状に巻く
14	42	1.0	有	
15	42	1.0	無	
16	42	1.0	有	
17	42	1.0	無	

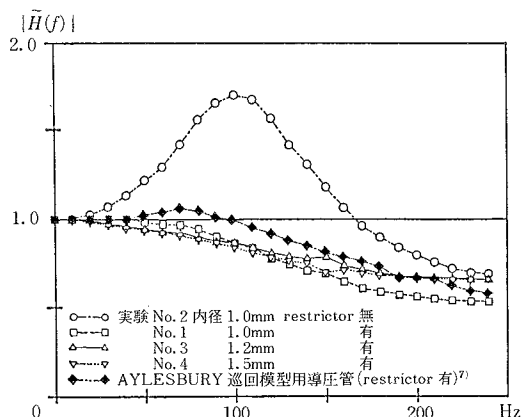


図-2 導圧管内径を変化させた場合の GAIN の変化

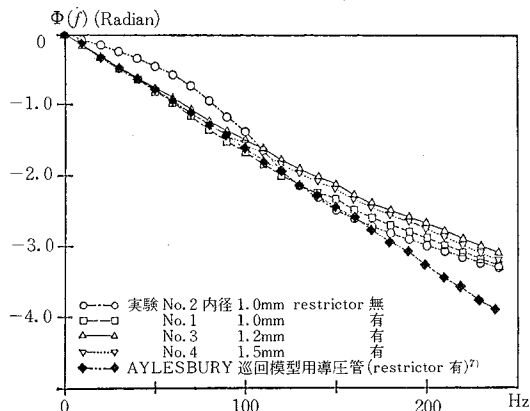


図-3 導圧管内径を変化させた場合の PHASE の変化

研究速報
 増幅も大きくなることわかる。なお、図は割愛するが PHASE の変化も一定ではなく、導圧管長さによる影響を受けている。restrictor 有の場合の GAIN を図-5 に示す。GAIN に図-4 のような増幅は見られないが、導圧管長さを長くするほど減衰の始まる周波数が低い方へ移動する。

4-3 導圧管をコイル状に巻いた場合の影響

図-6 はコイル状に巻いた導圧管とまっすぐなままの導圧管の GAIN を比較している。restrictor 付き導圧管の場合 GAIN に差は見られない。restrictor 無の場合、コイル状の径を小さくするほど共鳴効果をやや抑える傾向にある。

5. 補正

導圧管等の周波数特性が明らかになれば、これにより変動圧力測定値を補正することができる。図-7 は補正の手順を示す。

5-1 インパルス応答関数

図-8 に実験 No. 2 の圧力測定システムのインパルス応答関数を例として示す。インパルス応答関数 $h(\tau)$ は $\tau=2\text{ms}$ で最大値を示す。また、 $\tau < 0$ の領域では $h(\tau) = 0$ となっており、周波数応答関数の推定は物理的因果関係を満たしている。

5-2 補正

図-7, ①~③の結果を用いて、補正に関する Case Study を行う。圧力変換器 B の出力 $Y_1(t)$ を周波数応答関数を利用して補正を行い、基準となる圧力変換器 A の出力 $X_1(t)$ と比較する。ここで $X_1(t), Y_1(t)$ は周波数応答関数の推定に用いたデータとは異なる。

補正は、 $Y_1(t)$ をフーリエ変換して周波数応答関数 $\tilde{H}(f)$ で除し、さらに逆フーリエ変換することで補正信号 $X'(t)$ が求まる(図-7⑥, ⑦)。なお補正は、フーリエ変換を利用せず図-7⑧, ⑨に示すように、コンボリューション演算を用いて時系列データの直接補正も可能である($X''(t)$)。

5-5 基準信号と補正信号の比較

基準データ $X_1(t)$ と風圧測定システムにより歪められたデータ $Y_1(t)$ および補正されたデータ $X'(t), X''(t)$ を図-9 に示す。正しい信号 $X_1(t)$ と補正された信号 $X'(t), X''(t)$ の三者は判別不可能なほど一致している。また補正がなされていない信号 $Y_1(t)$ はこれらと大きく隔たっている。

6. 結論

導圧管を含む圧力測定システムについて、種々の導圧管を用いてその周波数特性を検討し以下の結果を得た。

- 1) 今回の実験の範囲内では、導圧管長さの変化は周

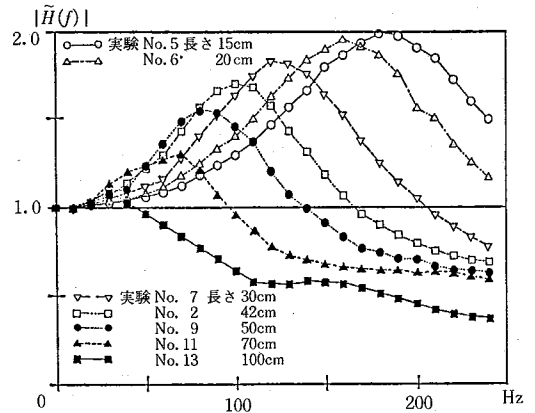


図-4 導圧管長さを変化させた場合の GAIN の変化 (restrictor 無)

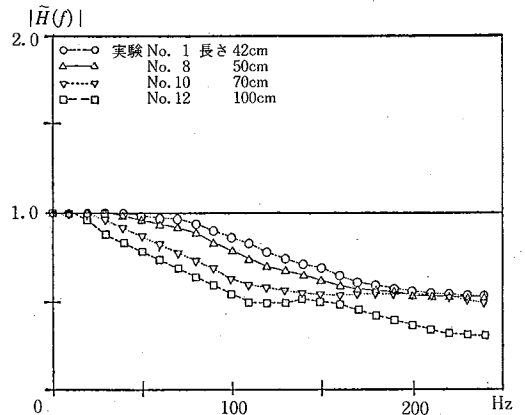


図-5 導圧管長さを変化させた場合の GAIN の変化 (restrictor 有)

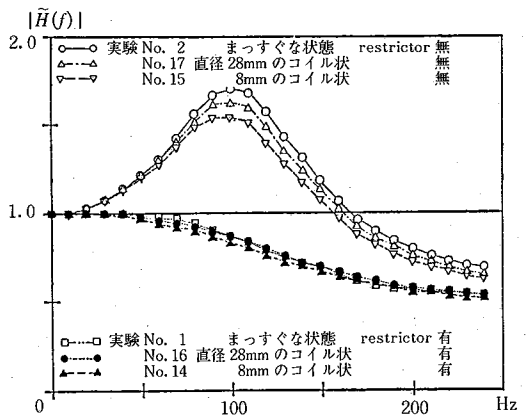


図-6 導圧管をコイル状に巻いた場合の GAIN の変化

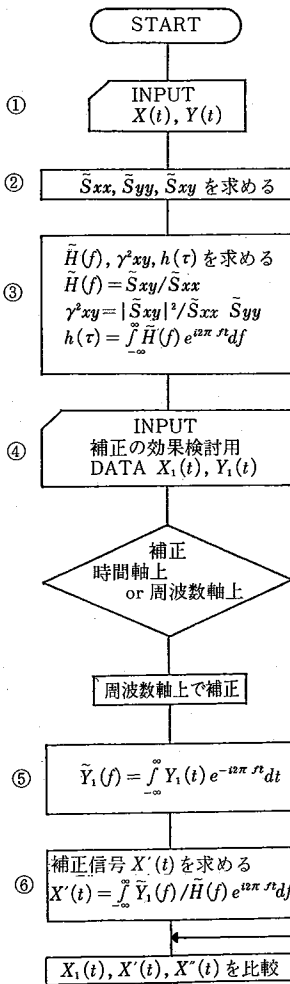


図-7 圧力測定システムの歪みの補正に関するフローチャート

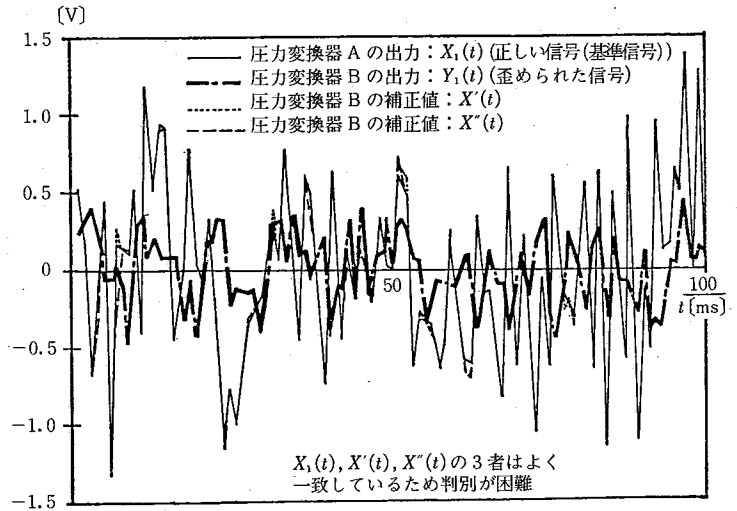


図-9 基準信号と歪められた信号, 補正信号の比較

波数応答特性に大きな影響を与える。また、導圧管内径が周波数応答特性に与える影響は少ない。

- 2) restrictor 付き導圧管の場合、コイル状に巻いても周波数応答特性は変化しない。
- 3) 風洞模型実験において多点の風圧変動をスキャナ一と1つの圧力変換器を用いて測定する場合、長さが一定で restrictor 付きの導圧管を用いて測定することが望ましい。(1984年11月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 谷 一郎ほか「流体力学実験法」岩波書店 1977
- 2) J. D. Holmes: "Technique and Modeling Criteria for the Measurement of External and Internal Pressures", Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications Edited by Timothy A. Reinhold, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1982
- 3) 桂 順治ほか「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 1972.10
- 4) Irwin: "Correction of Distortion Effects Caused by Tubing System in Measurements of Fluctuating Pressures", Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics, Vol. 5 1979 66 P93-107
- 5) 藤井邦雄ほか「高層建築物に作用する風圧力の性状について」第7回風工学シンポジウム論文集, 1982
- 6) 村上周三ほか「風洞模型実験における変動圧力測定法に関する研究—導圧管を用いる変動圧力システムの周波数応答特性を中心として」第8回風工学シンポジウム論文集, 1984
- 7) 村上周三ほか「低層建物壁面風圧に関する Aylesbury 国際共同研究実験—」生産研究, 第35巻, 第10号(1983-10)

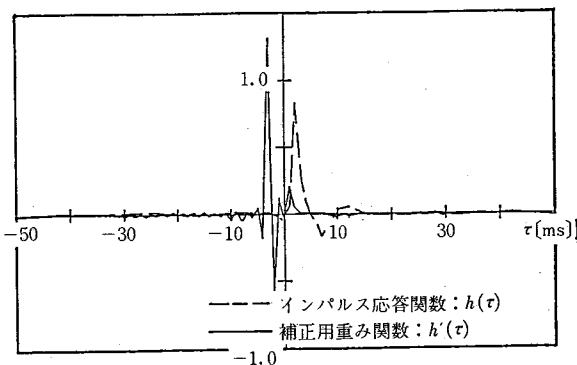


図-8 インパルス応答関数 $h(\tau)$ と補正用の重み関数 $h'(\tau)$