

境界層乱流中における空気膜ドームの風圧特性に関する研究

- その2 変形時における外圧および内圧の性状

日大生産工(院) ○加藤 優輝 日大生産工 丸田 榮藏

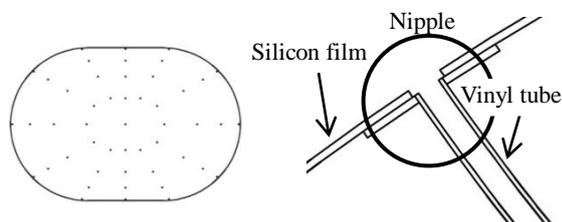
1. はじめに

空気膜構造はその構造形式から風外力の作用により膜体に変形が生じ、変形前と変形後では風圧性状が変化する。そのため、変形を考慮した風荷重を適切に設定することが必要である。このような風圧実験は、これまで川村^{1,2)}等による柔模型を用いた研究がある。また、黒木³⁾は大変形を考慮した剛模型による風圧実験を行い、膜体変形時には風圧分布が変化するため、変形を考慮した風洞実験を行う必要があること述べている。このような背景から、その2ではライズの異なる柔模型を用いて風圧実験を行い、ライズの差異や膜体変形に対する外圧、および内圧性状について検討を行っている。

2. 実験方法

2.1 実験模型

実験模型はその¹⁴⁾と同様薄膜シリコン模型に改良を加え、図1に示す49点の風圧測定孔を配置した風圧模型を作製した(写真1)。図2の風圧測定孔はシリコンを用いて作成したニップルと導圧チューブ($\Phi=1.0$ [mm])によって膜体変形を拘束しないよう設置している。また、柔模型の初期内圧はその1と同様の内圧とし計測を行っている。以前に行った実験⁹⁾ではライズ比 $H/D=0.5$ の柔模型は内圧の損失が大きく、変形を考慮した変動風圧の計測精度が不十分であった。そのため、今回の実験では模型に修理を行い、内圧の損失がほぼなく計測に影響することはないものとなっている。 $H/D=0.3$ 、 0.15 の模型は新たに作成したものであり、内圧の損失はほぼないことが確認でき、実験時間内での計測に影響はないと判断された。



a) 測定孔配置図

b) 測定孔概要

図1 風圧測定孔配置図および測定孔概要

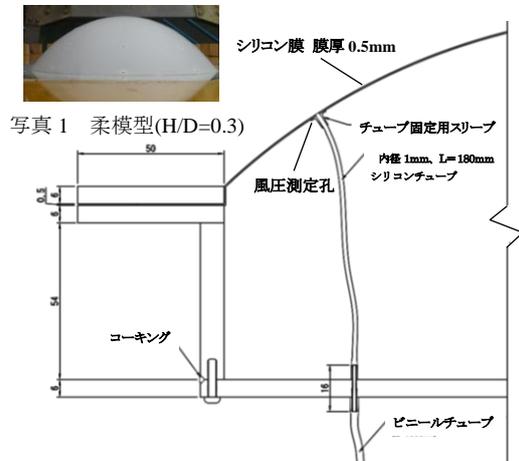


図2 柔模型構成図

2.2 使用風洞及び計測方法

使用風洞、実験気流、外圧および内圧の計測はその¹⁴⁾と同様である。実験風速は表1に示す通りであり、膜体変形の小さい段階から大変形へ至るまでの風圧性状の検討やその1で得られた限界風速 V_s 時の風圧性状の検討を考慮し決定している。計測はデータ数16384個、時間刻み1msecとして行い、実験データは計測時の導圧チューブによる変動圧の歪みをあらかじめ計測した図3の伝達関数を用いてFFT、IFFT法により取り除いた。相似則は、(1)式に示す根本⁶⁾の乱流相似則から時間スケールを適用し、1秒評価時間に適応した移動平均⁷⁾をかけたものとしている。得られた実験データから(2)~(5)の定義より平均・変動・最大・最小風圧係数を求めた。

表1 実験風速

対象模型	実験風速(H=40mm) [m/s]
Flexible Model (H/D=0.5, 0.3, 0.15)	5,6,7,8,9,10,11,12,13, V_s
Deformation Solid Model (H/D=0.5)	2.5,3,4,6,8

$$\frac{T_{model}}{T_{full}} = \left(\frac{1}{250}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Study on Characteristics of Wind Pressure on Pneumatic Structures
in Turbulent Boundary Layer

- Part 2 Property of External Pressure and Internal Pressure under Deformation -

Yuuki, KATOH and Eizo, MARUTA

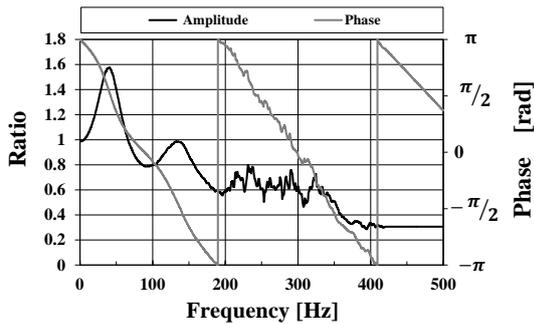


図3 伝達関数

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{P}_e}{q_H} \quad (2) \quad C_p' = \frac{\sigma_P}{q_H} \quad (3)$$

$$\hat{C}_p = \frac{\hat{P}_e}{q_H} \quad (4) \quad \check{C}_p = \frac{\check{P}_e}{q_H} \quad (5)$$

ここに、 \bar{C}_p 、 C_p' 、 \hat{C}_p 、 \check{C}_p はそれぞれ平均、変動、最大、最小風圧係数、 \bar{P}_e 、 \hat{P}_e 、 \check{P}_e はそれぞれ模型風圧測定孔に作用する平均、最大、最小風圧力[N/m²]、 σ_P は風圧力の標準偏差、 q_H は模型頂部相当の速度圧[N/m²]である。

3. 境界層乱流中の模型に作用する風圧性状

図4、5に柔模型においてV=8m/s時の平均風圧係数、変動風圧係数分布を示す。平均風圧係数分布は模型頂部付近での負圧分布が非常に強い値を示している。風圧係数分布が縞模様であるといった傾向は剛体模型による実験⁵⁾で得られた実験結果に類似している。変動風圧係数は剛体模型同様ライズが低くなると小さくなる傾向を示し、風向0°では約0.40~0.45と高い値を示している。これは、大きな風圧変動が生じていることが推察でき、膜体変形のみならず、膜体の振動が風圧変動に影響していると考えられる。

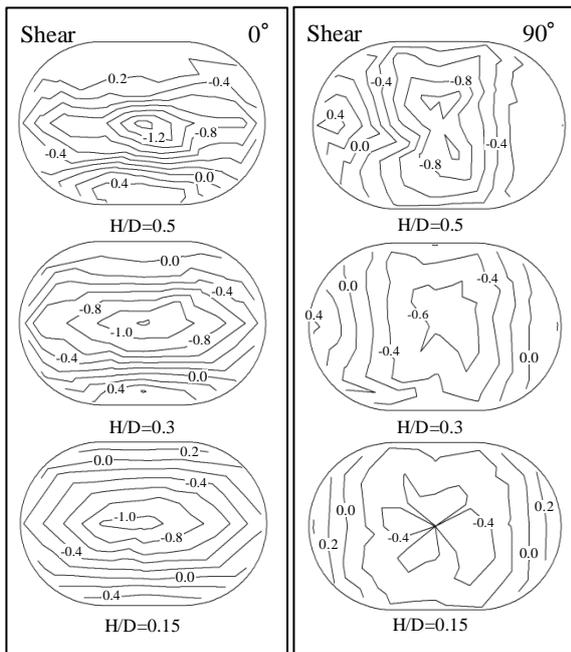


図4 平均風圧係数分布

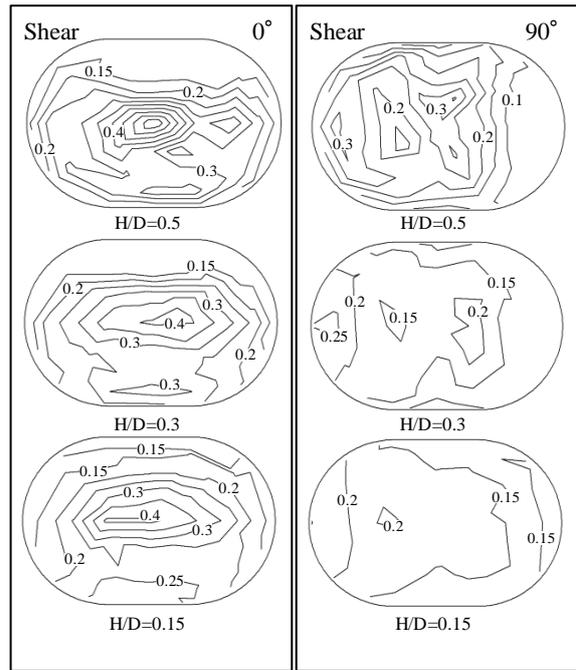


図5 変動風圧係数分布

4. 剛体模型と柔模型の比較

次に剛体模型と柔模型の風圧性状の比較を行った。図6に示したs/Sに対する風方向模型中心線上の風圧係数を図7に示す。風圧性状の傾向は柔模型の頂部付近の平均、変動、最小風圧係数が剛体模型に比べ非常に大きい値を示していることが確認できる。また、最大風圧係数は風上部で柔模型が大きい値を示している。また、模型背面部では模型による差異が小さい。

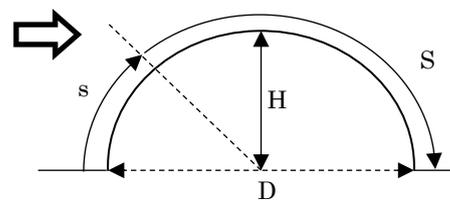


図6 s/Sの決定方法

5. ライズの差異による検討

次に模型ライズによる風圧性状の差異についての検討を行った。図8に各模型の限界風速Vs時におけるs/Sに対する風圧係数を示す。結果は、剛体模型の性状と同様にライズが低くなるにつれて風圧係数は低くなる傾向を示している。風上の淀み域では風圧係数のライズによる差異は小さいが、頂部付近ではH/D=0.5の \check{C}_p が他のライズに比べ約-4.0と大きな値を示している。また、風下の後流域ではH/D=0.15の \check{C}_p が約1.0と他のライズの場合より大きな値を示している。

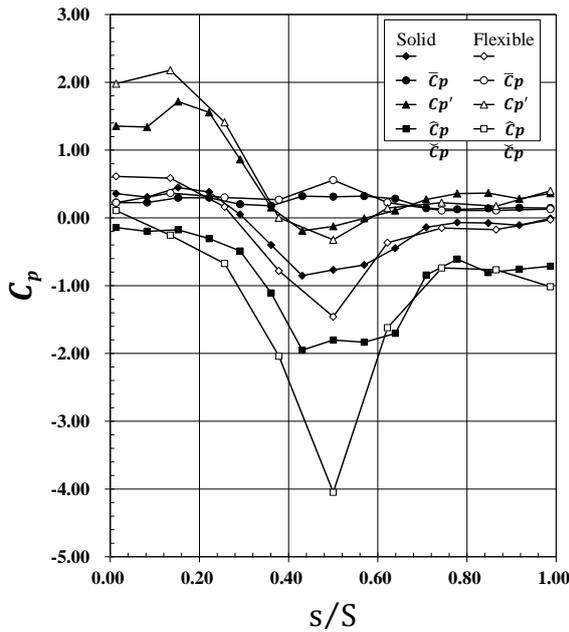


図7 s/S に対する剛体模型と柔模型の比較
(H/D=0.5、V=8m/s、風向0°)

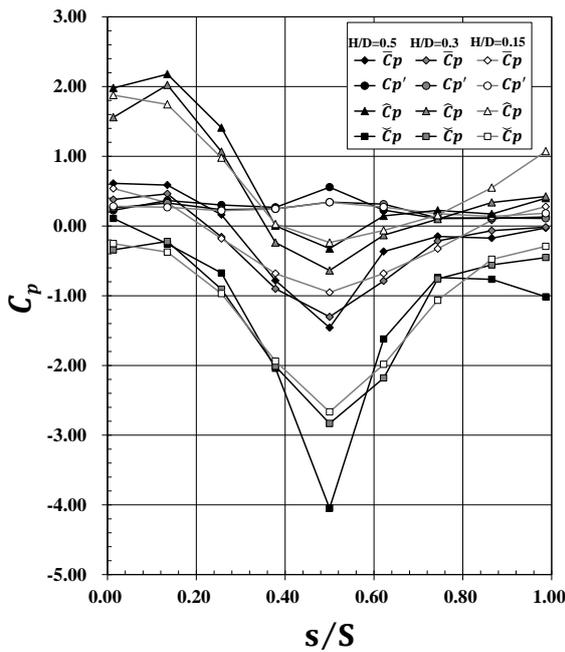


図8 s/S に対するライズ比による比較
(V=Vs、風向0°)

6. 風速変化による風圧性状への影響

乱流境界層中で行われる剛体模型の風圧実験では、風圧係数は風速に依存せずほぼ一定値を取ることが示されている⁵⁾。しかしながら、柔模型は風速変化により膜体に変形し、風圧係数が変化する。このことから、本項では膜体の変形状態の変化によって生じる風圧性状について検討した。

検討は限界風速 V_s 以下での小さな変形、限界風速 V_s 時の変形、限界風速 V_s を超える大変形の3種類を対象とし、 s/S に対する風圧係数を比

較した。図9に例として $H/D=0.5$ 風向0°の結果を示す。風速変化による風圧性状への影響は特に最小風圧係数で大きいものとなっている。風上の淀み域と風下の後流域では風速変形による風圧係数への影響は小さく、変動成分も模型頂部以外は大きく変わらない。

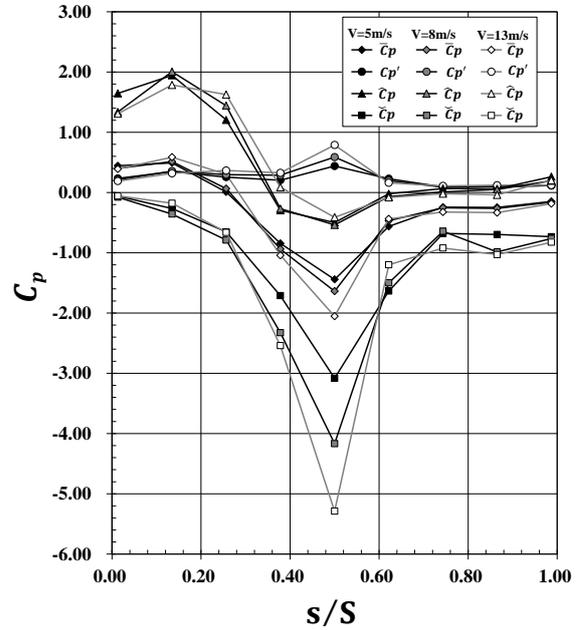


図9 s/S に対する風速変化による比較
(H/D=0.5、風向0°)

5. 変動風圧のパワースペクトル性状

変動風圧のパワースペクトルは模型表面の代表的な領域(淀み域A、剥離域B、後流域C)を評価箇所とし、剛体模型 $V=8m/s$ 、柔模型 $V=V_s$ 、柔模型 $V=13m/s$ の(6)式で定義される無次元振動数に対するパワースペクトルを比較している。図10に変動風圧のパワースペクトルを示す。結果から柔模型はスペクトルのエネルギーピークが高周波域で生じている。これは膜体の振動が風圧変動に影響していると推察される。淀み域では剛体模型で確認された2Hz付近のスイッチングによる卓越振動数や6Hz付近での馬蹄形渦⁴⁾は明確に表れていない。これは膜体変形により風圧変動のパワーが非常に大きく、現象が表れにくいと考えられる。剥離域では柔模型は剛体模型に比べ高い振動数で大きなエネルギーを有していることが確認できる。後流域では高い振動数のスペクトルの性状や前章から、膜体は細かく小さな振動を繰り返していると推察される。これらのことから周波数の面から見て、柔模型と剛体模型とでは現象が大きく異なることが確認できる。

$$n_r = \frac{n}{\bar{V} \cdot B} \quad (6)$$

ここに、 n_r は無次元振動数、 n は振動数[Hz]、 \bar{V} は平均風速[m/s]、 B は代表長さ[m]である。

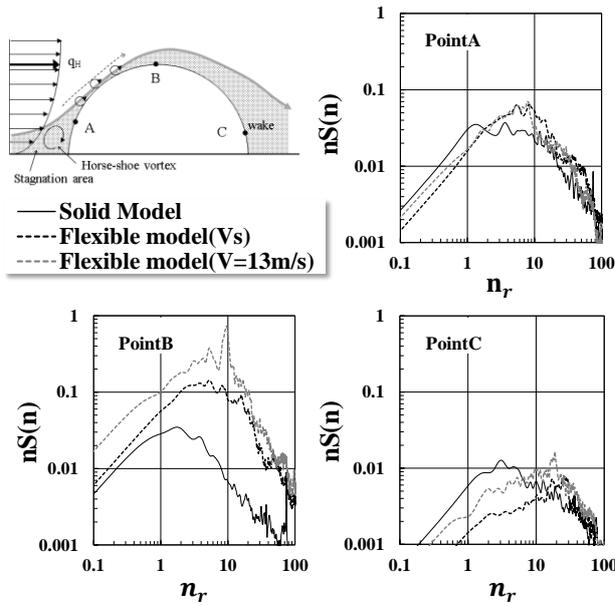


図 10 変動風圧のパワースペクトル ($H/D=0.5$)

6. 内圧変動の自己相関関数

内圧変動の自己相関関数は限界風速以下での小さな変形、限界風速 V_s 時の変形、限界風速を超える大変形の 3 種類を対象とした。図 11 に各ライズの自己相関関数分布を示す。図から変形が大きくなるほど内圧は周期性を持つことが確認できる。 $H/D=0.5$ 、 $V=13\text{m/s}$ では約 0.04sec の周期が見られる。これは無次元振動数に換算すると約 9.6 であり前章の剥離域の卓越無次元振動数に一致する。また、ライズが低くなるとより強い周期性が見られる。

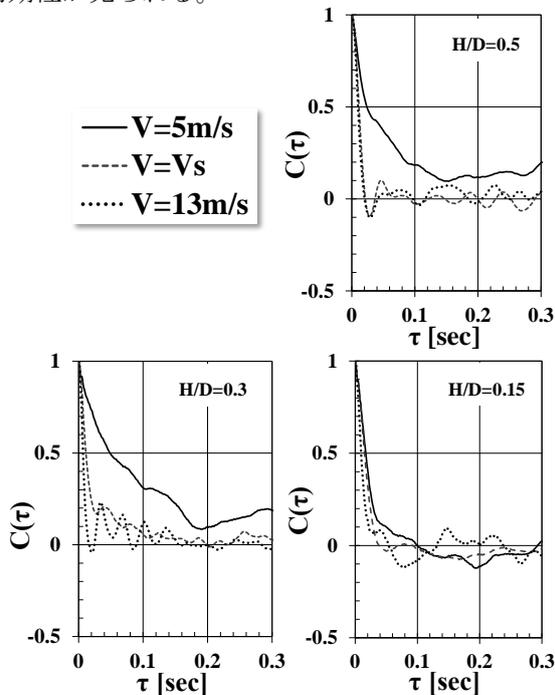


図 11 内圧の自己相関関数

7. まとめ

柔模型と変形あり剛体模型の風圧分布は類似した傾向を示しているが、頂部負圧や変動成分が大きく異なる。

柔模型においてもライズの変化による傾向は風圧係数の値は異なるものの全体的に類似している。

変動風圧のパワースペクトルは剛体模型に比べ高振動数で高いエネルギーを示している。

内圧の自己相関関数は高風速になるにつれ、周期性を示す。

「参考文献」

- 1) 川村純夫、木本英爾、中井重行、田代伸一郎、中村公昭、空気膜構造の風圧性状に関する実験的研究—その 5 柔模型と剛模型との比較—、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和 59 年 10 月
- 2) 川村純夫、木本英爾、中井重行、田代伸一郎、半円筒形ドームに加わる風圧力と変位の基礎性状—ドームの剛性による影響—、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和 62 年 10 月
- 3) 黒木雅代、黒木二三夫、大変形を考慮した膜構造物の適正な風荷重評価について、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003 年 9 月
- 4) 加藤優輝、丸田榮藏、境界層乱流下中における空気膜ドームの風圧特性に関する研究—その 1 強風時の構造安定に必要な内圧制御—、日本大学生産工学部学術講演会、2012
- 5) 加藤優輝、丸田榮藏、「空気膜構造の作用風圧と構造強度に必要な内圧制御に関する基礎的研究」、膜構造研究論文集、2011 年 12 月
- 6) 根本茂、自然風を対象とした風洞模型実験の相似則、航空学会誌、第 11 巻、第 116 号、pp.272~278、1963
- 7) E.Maruta, 「Wind tunnel tests of the wind pressure on a detached-house at a large geometric scale」, Proceedings of International Conference in Roomvent, Coimbra, 2004, Sept.