

球形屋根を有する円筒形空気膜構造の必要内圧制御に関する研究

その3 大型空気膜モデルによる必要内圧の実測

丸田榮藏^{*1} 河端昌也^{*2}

山本 学^{*3} 揖斐 剛^{*4}

本研究は、球形屋根をもつ円筒形空気膜ドームについて高さ約 30m に及ぶ実大の縮尺 1/10 を想定したウレタン製の大型モデルを作成し、自然風中における空気膜構造の変形に対する原形回復ならびに座屈回避のための必要内圧について推定したものである。実験は、モーションキャプチャーを用い 3 次元変位ベクトルを求めた。膜体内圧による膜膨張と風圧力作用時の影響により生じる計測上のゼロ点のズレに関し、風速変動と変位変動ベクトルの逐次相関を考慮した Off-set の手法を設定することによって実変位を特定した。測定は、2.39~4.35m/s の風の中で膜体内圧を 9.1Pa~27.8Pa の間で小刻みに変化させ、10 分間平均相当の 27 回の Data-set を収録した。結果は、最大変位が予想される最低の膜体内圧 9.1Pa に対し作成した風方向の実変形図を求め、既往の風洞実験との変形比較において近似な状況を得た。この成果を基に、原形回復に関しては Off-set の手法をもって基準風速の異なる 3 ケースの必要内圧 P_0 について推定し、また座屈回避に関しては膜体風下下部に位置する変位変動の 3σ を基本にした実質の最小ピーク率 $\bar{K}_0$ の導入によって評価した 1 ケースに対し必要内圧 P_{0b} の推定が可能となった。取得した必要内圧は、初報で展開してきた剛体の薄膜構造を基本とした簡易算定法との比較において良好な近似が示された。このことから本論文における必要内圧に関する簡易推定法は、実用性として十分妥当な手法であると確認できた。

1. はじめに

本論は、初報^[6]およびその 2^[7]で行った必要内圧に関する簡易算定提案と疑似大型風洞流中で行った縮小球形ドーム模型による実験との比較検討に引き続き、同じ空気膜模型を用いて屋外での観測を行うことによって、さらに自然風中と疑似風洞との特性に関する差異を調べるとともに、簡易算定法に関する妥当性を検証することを目的としている。

2. 計測方法

2.1 試験体の設置状況

屋外測定は、Photo. 1 および Photo. 2 に示されるように、岩手県奥州市に建設された切妻の独立上屋をもつ荷捌きテント内で行われた。試験体ならびに基準風速計の設置位置の詳細は、Fig.1 に示す通り論文その 2^[7] の大型送風装置の実験で用いたものを使用している。なお、床盤は地上から 35 cm 浮かせ周囲縁の先端は出来る限り流れのはく離が生じないような形状に成形した。

また、風速計は北西と南を最頻とする現地の風配図を参考にするとともに、試験体に影響を与えない位置を選定した。なお、風速計の高さは、試験体の基準高さ（ここでは、床盤の高さを加算）とした。



Photo.1 屋外実験状況

2.2 計測装置

基準点に設置した風速計は、2 次元超音波風速計 (Gill 社) により変動計測を行い、合わせて逐次の風速状況は簡易風速計のクリモマスターによりモニターした。また、試験体を膨張させるためのブローアによって加圧された初期内圧および風速発生時に変動する内圧の計測は、U 字管マンオメータによりモニター管理するとともに微差圧計によって計測した。さ

^{*1} WIND & PHYSICS LLC, CEO 工博

^{*2} 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 教授、博士 (工学)

^{*3} 鹿島建設株式会社技術研究所 上席研究員、博士 (工学)

^{*4} 大嘉産業株式会社 開発部 部長

らに、試験体各部の変位は、試験体内部に設置した 12 台のモーションキャプチャー（アキュイティ社製）により、膜面に張り付けたマーカーの変動を計測した。これらの同時変動記録は、別棟の管理棟に設置した PC に収録した。

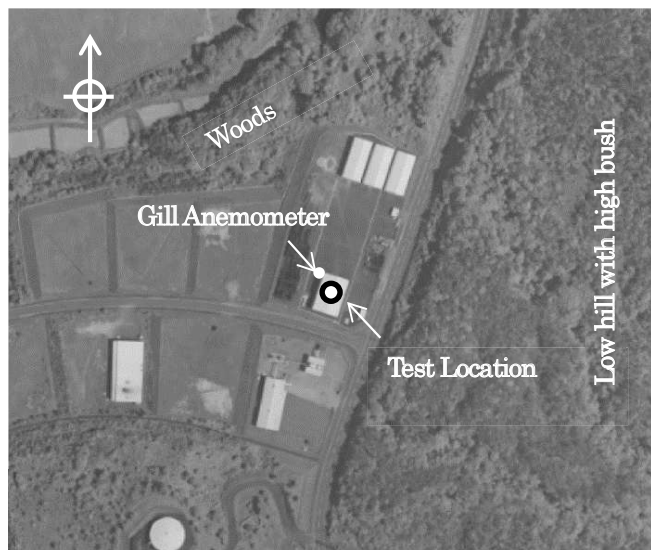


Photo.2 計測地点の周辺状況

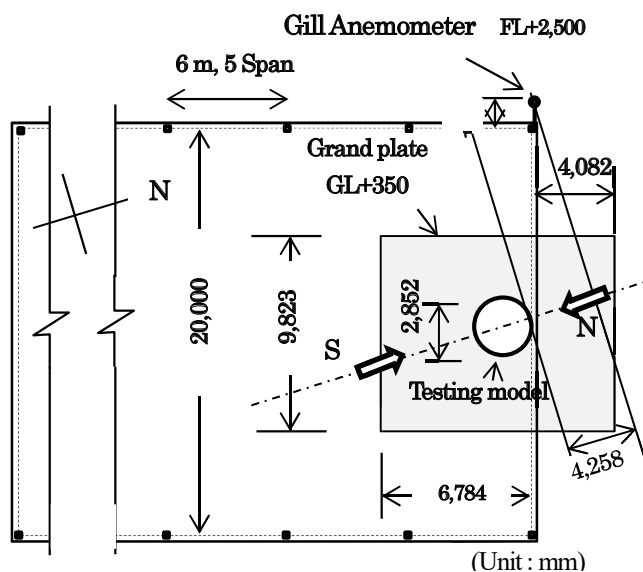


Fig.1 試験体および風速計の設置詳細

2.3 膜体内圧の制御方法

膜体内圧 P_{i0} の制御は、Photo.3 に示されるように送風機からホースを通じて空気膜ドーム模型内に注入する空気量を手動バルブによって流量調整した。膜体内圧は、 $P_{i0}=45\text{Pa}$ と 28.3Pa から 9.1Pa に 5Pa ピッチを目途で変化させた。風圧力作用時の膜体内圧の読み取りは、2 点の圧力測定孔から誘引したそれぞれの圧力を U 字管マンオメータで目視観測すると同時に圧力変換機に備えられたモニターにて平均値として読み取った。なお、変動する内圧は、圧力変換機から分岐した出力を Data Logger (HIOKI LR8431 10ms) に出力し、各膜体内圧に対して 270 秒間のデータを収録した。

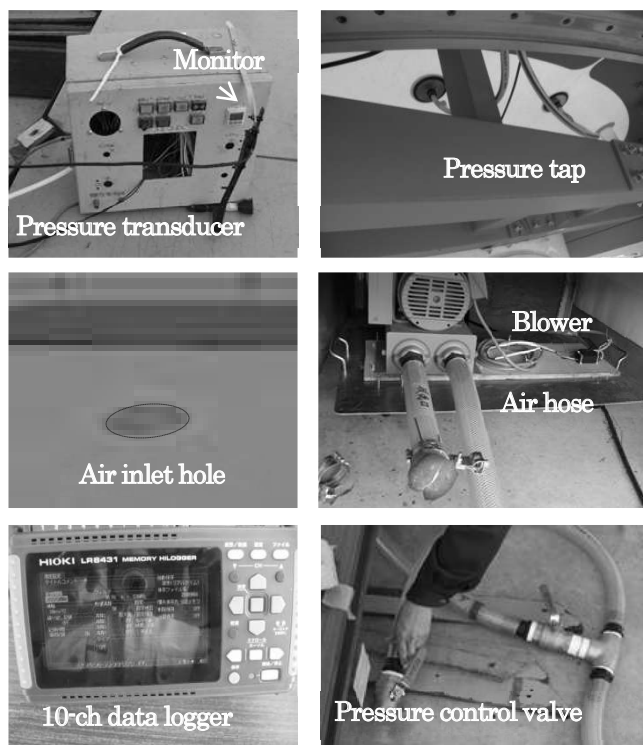


Photo.3 計測装置

2.4 膜面の変位計測方法

本研究においては、既往の風洞実験による研究等に見られる空気膜構造の崩壊をもたらすような不安定大変形ではなく、安全設計の範囲における強風によって生じる風上淀み域の変形と風下下部に生じる座屈現象を対象としている。従って、膜面変位の計測は、元の形状に回復できる内圧の制御内で発生する変動を扱っている。

Fig.2 は、膜面に取り付けた直径 4mm、質量 0.03g のマーカーをターゲットとしてモーションキャプチャーにより 3 成分の変動変位を計測しており、ここでは 436 個あるターゲットから検討項目の目的に合わせて測定点を限定し、それらの変動変位として、それぞれ必要に応じて解析した。

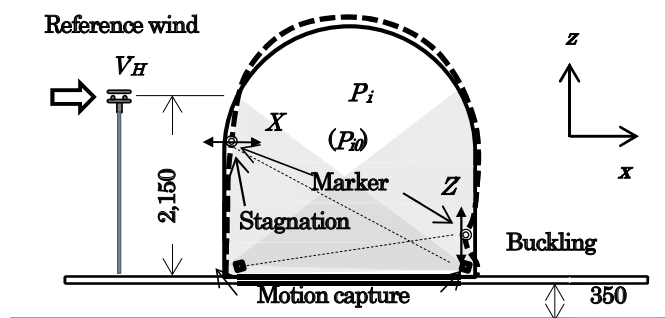


Fig.2 測定方法

2.5 適用した相似則

本計測空気膜モデルは、直径と高さがともに 30.52m、円筒部高さ 15.26mの実大空気膜ドームを想定し、ウレタンフィルムを用いて縮小寸法で製作したものである。実大と縮小の両ドームに関するそれぞれの諸元ならびにスケール比については Table 1 に示されている。一方、実施した野外実験で測定される風速や変形の現象は、実現象に対して風速と時間に関する相似性を考慮に検討されねばならない。

風速に関する相似率は、弾性体に基づいた参考文献⁹⁾ による相似率を引用し、Table 1 に示したスケール比を代入すると、(1)式のように $V_p/V_m=3.84$ で与えられる。

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{E_p t_p D_m}{E_m t_m D_p}} = \sqrt{\frac{15.16 \times 10.41}{10.7}} = 3.84 \quad (1)$$

$$\frac{P_{ip}}{P_{im}} = \frac{\frac{1}{2} \rho V_p^2 \cdot C_{pi}}{\frac{1}{2} \rho V_m^2 \cdot C_{pi}} = \left(\frac{V_p}{V_m}\right)^2 = 14.75 \quad (2)$$

$$\frac{T_p}{T_m} = \frac{D_p/D_m}{U_p/U_m} = \frac{10.7}{3.84} = 2.786 \quad (3)$$

また、圧力ならびに時間に関する相似率は、それぞれ $P_p/P_m=14.75$ と $T_p/T_m=2.786$ となる。今回の計測における 1run については 270 秒の記録時間とした。上述の相似率に基づく、この時間は実時間換算で 10 分間より長めの約 12.5 分 (752 秒) 相当と見做される。

Table 1 空気膜の想定実大ドームと縮小モデルに関する諸元とスケール比

	Prototype	Model	Scale ratio
Height H_T (m)	30.52	2.852	H_T/H_m 10.7
Diameter D (m)	30.52	2.852	D_p/D_m 10.7
Thickness t (mm)	1.04	0.099	t_p/t_m 10.41
Yang Modulus E (MPa)	750.8	50	E_p/E_m 15.16
Mass m (kg/m ³)	1.25	0.116	m_p/m_m 10.77

3. 実測地点における自然風の特徴

計測できた基準点の風記録は、ほぼ真北からの風である。この北風向に関しては、Photo.1 と Photo.2 から分かるように風上には北約 130m 先には低木の森があり、また北北東約 80m 先には高さ 6m 程度の 3 棟の倉庫があるが、試験体との間は比較的開けた環境にあると見なされた。

Fig.3 は、サンプル時間 0.25sec のサンプル数 1081 の計 270 秒間を収録とした風速および風向データであり、それぞれ平

均風速は 3.4m/s、風向はほぼ真北を表している。なお、試験体が風向を北とする風に正対したとき、基準風速点との距離は Fig.1 に示されるように 4.258m となっている。

観測した風速記録の変動特性について解析を試みた結果、(4)式による乱れの強さは、 $I_t = 0.336$ 、(6) 式の Taylor の仮説に基づいた主流方向の乱れのスケールは、 $L_x = 15.3m$ (相似率換算で 163m)、そして (7) 式により解析したパワースペクトル $S_v(n)$ は、Karman 型に近似した特性を示した。

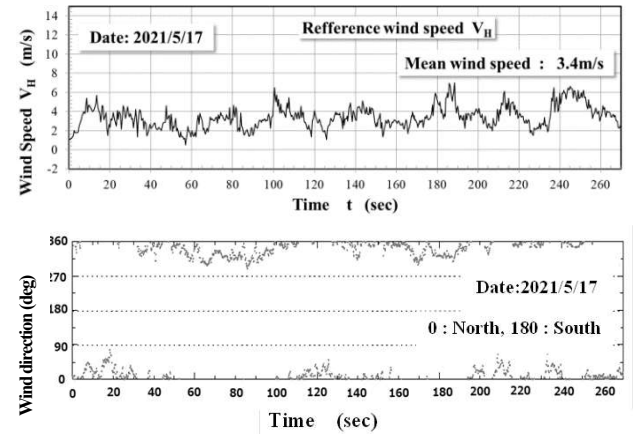


Fig 3 基準点における風速と風向記録

$$I_t = \frac{\sqrt{\sigma_v^2}}{\bar{V}_H} = \frac{1}{\bar{V}_H} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [V_H(t) - \bar{V}_H]^2 dt} \quad (4)$$

$$C_v(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T V_H(t) V_H(t + \tau) d\tau / \sigma_v^2 \quad (5)$$

$$L_x = \bar{V}_H \cdot \bar{\tau} = \bar{V}_H \cdot \int_0^\infty C_v(\tau) d\tau \quad (6)$$

$$\frac{n \cdot S_v(n)}{\sigma_v^2} = 4 \int_0^\infty C_v(\tau) \cos 2\pi n \tau \cdot d\tau \quad (7)$$

ここに、 σ_v は変動風速の標準偏差、 n は周波数、 t は時刻、 τ はラグ時間、そして $\bar{V}_H$ は基準風速の平均値である。

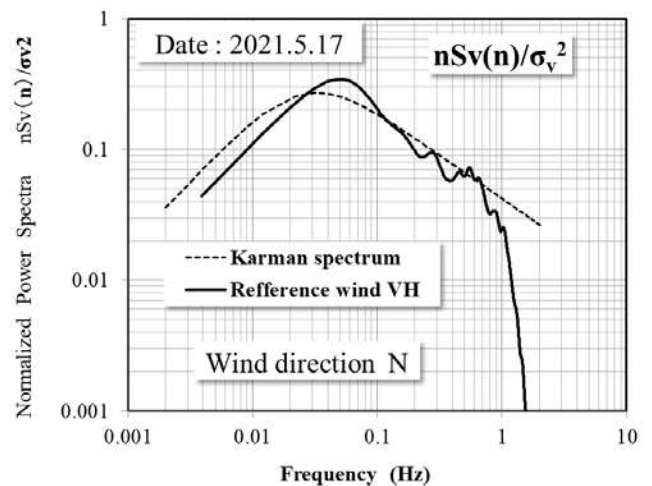


Fig. 4 パワースペクトル

4. 変位と内圧の変動特性

Fig.5は、前節に既述した風の中で実施されたもので、膜体内圧を45Paで膨張させた空気膜球形ドームモデルの地盤面から高さ850mmにおける風上水平変位 δx と風下の鉛直変位 δz 、および内圧 P_i の変動波形を示している。なお、変位に関してはモーションキャプチャーの座標記録を座標変換して求めている。

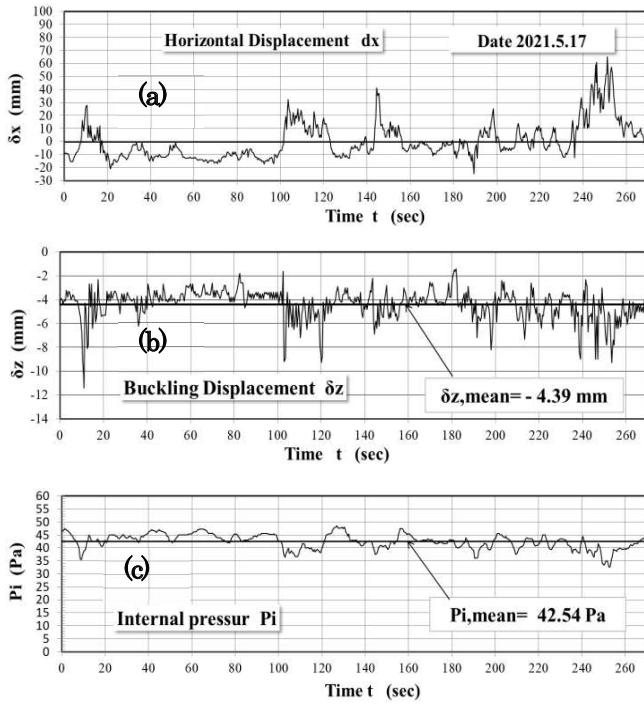


Fig.5 空気膜ドームの高さ850mmにおける風上・風下膜面変位変動および内圧変動

以上の計測記録を基に、Lag数 $m=300$ として(8)式の自己相関係数 $C_{xx}(\tau)$ と(9)式の相互相関係数 $C_{vX}(\tau)$ により変動特性と入射風との相関性について解析しFig.6に示した。なお、合わせて基準風速 V_H に関する自己相関係数 $C_{vv}(\tau)$ 分布も表示し、比較している。

$$C_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) \cdot X(t+\tau) dt / \sigma_x^2 \quad (8)$$

$$C_{vX}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T V_H(t) X(t+\tau) dt / \sigma_v \sigma_x \quad (9)$$

ここに、 X は、変位ならびに内圧の代表表示である。

4.1 自己相関関数について

これら自己相関分布の形は、相異なる特徴を示している。すなわち、風上膜面の水平変位についてはLag Time (τ)が20秒までは基準風と類似し周期性が消滅していること、風下膜面の鉛直変位については細かい周期性を帯びながら減衰している、そして内圧については比較的基準風速の変動に近似していることが分かる。

4.2 相互相関関数について

解析結果は、水平変位、鉛直変位、および内圧に関して求め、それぞれFig.7に表示した。3者の入射風との相関係数の最大値は、風上膜面の水平変位0.6、内圧0.56と比較的高いが、風下膜面の鉛直変位に関しては0.38と低く他の変動要素を含んだ相関分布を示している。一方、3者に共通する性質としては、最大相関のピークに関するTime Lagが2secである。これは、空気膜ドームの受ける入射風の影響が2秒の遅れをもって発生することを示していると考えられる。

4.3 パワースペクトル

入射風によって受ける空気膜ドームの周波数特性についてパワースペクトルを解析し、Fig.8のように基準点風速、風上膜面変位、風下膜面変位および内圧について同時に表示し比較検討した。なお、図の縦軸はノーマライズ表示とした。図から、風上膜面水平変位と内圧のスペクトルピーク周波数はほぼ同じ程度でかつ高周波数域でのエネルギー散逸が入射風に比べて大きいことを示している。それに対し、風下膜面鉛直変位に関してはエネルギーの蓄積が高周波数側に大きくシフトしていることを表している。これは、入射風よりも空気膜体が受ける圧力変動および膜変形振動によってもたらされるものと推察される。

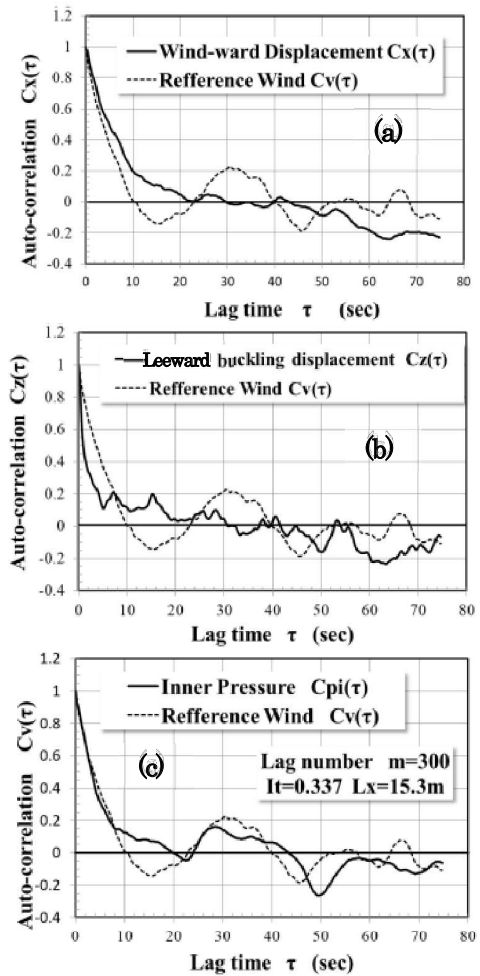


Fig.6 変位および内圧の自己相関係数分布

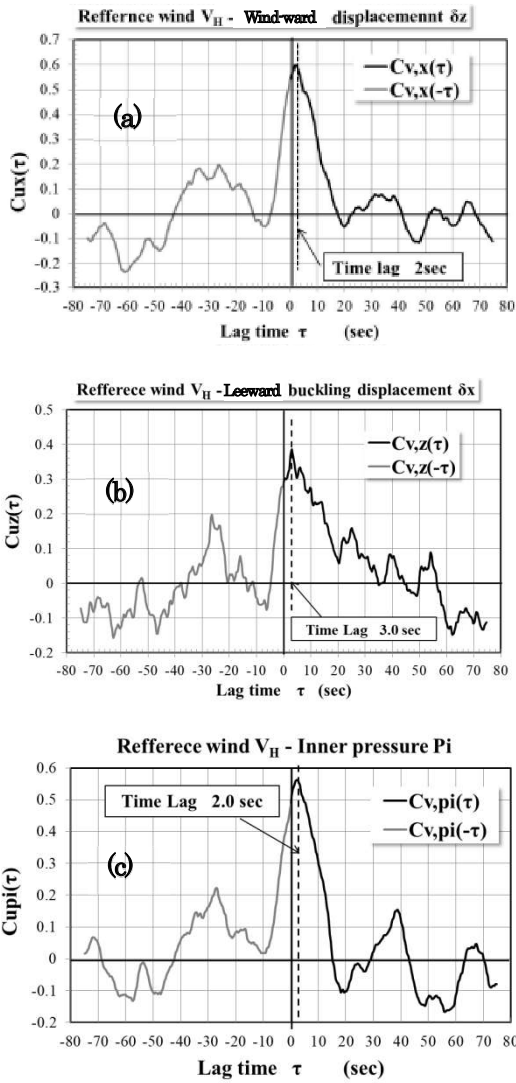


Fig.7 変位-内圧の風速に対する相互相関係数分布

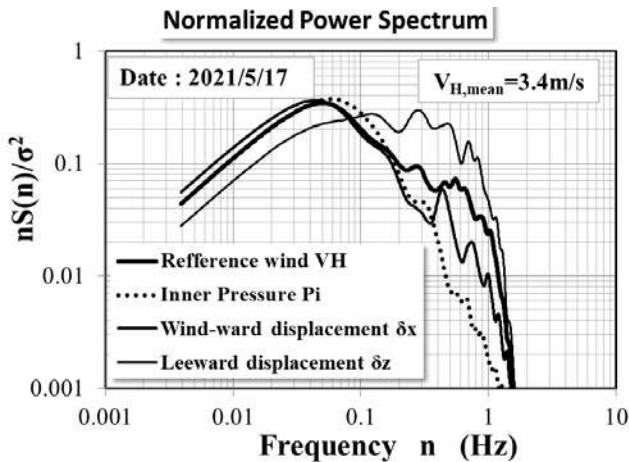


Fig.8 風速、内圧、変位の各変動に関するパワースペクトル

5. 空気膜ドームモデルの変形状

風による空気膜ドームの変形状に関する研究は、本郷⁴⁾、最上⁵⁾、B.G. Newman^[10]等による風洞実験が知見されるが、

それらは入射風速と膜体内圧の変化に対して写真撮影によって試みたものである。それに対し、本研究では、想定した実大空気膜ドームに対して縮尺約 1/10 の巨大模型を用いた屋外実験であり、かつ自然風中における風速変動、ドーム内圧変動と膜面の変位変動の同時計測を行ったものである。

ここでは、前節の計測と異なり膜体内圧 P_0 を 27 回の収録の内、風に対して最も変形が大きくなる 9.1Pa の内圧における膜体全体の変形状について検討した。

5.1 収録データの整理方法

データの収録に関しては、用意した計測機器の収録仕様がそれぞれ異なっていたことから、サンプリング周波数が風速に対して 4Hz、内圧に対して 50Hz、モーションキャプチャーに対して 60Hz と相違していた。そのため、各収録データの時間軸に対して統一する意味で、全て評価時間を $\Delta t = 0.25\text{sec}$ に対応するべく移動平均をかけ 270 秒間の 1,080 個の時刻歴データに置換した。

5.2 代表レベルにおける変位について

風力による空気膜ドームの変形状に対する検討は、Fig.9 に示す 5 段階の代表 Level とその円周を 30 分割した測定点に対し、水平方向の変形では(10)式によりモーションキャプチャーの X - Y 座標変動データから平均ベクトル R を求め、水平変形では基点 R_0 (半径) そして鉛直方向に対しては基点 Z_0 (各レベル高さ) との差分表示によって Table 2 のように表した。

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (10)$$

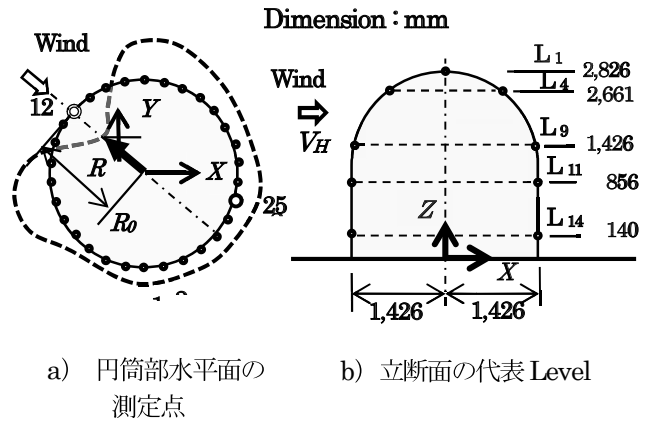


Fig.9 変位計測点と代表 Level

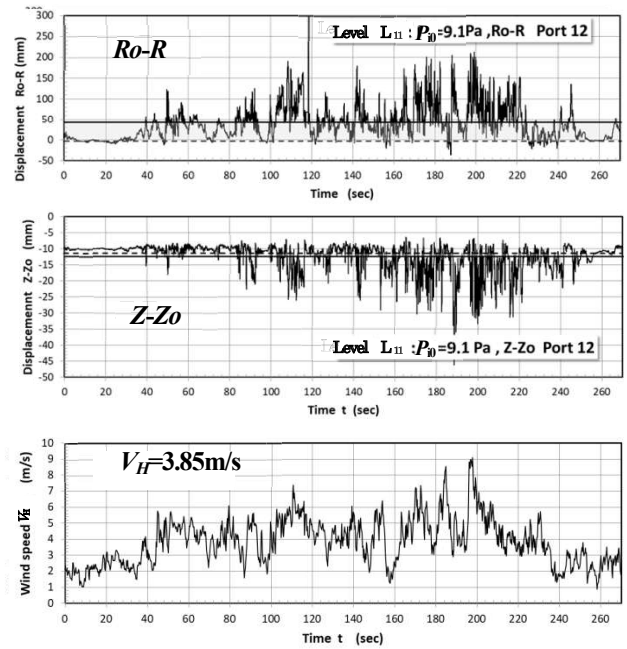
Table 2 の結果では、全般に水平方向の膜変形は風上では内側に押され、風下では外側に押し広げられ、そして鉛直方向の膜変形は風上では下方に押し下げられ風下では引き上げられる状況を表している。この膜の鉛直方向の変形状は、力学的に考察される剛体モデルのそれとは全く逆の動きをしているように診られる。

Table 2 代表的な切断レベルにおける差分
 $R-R_0$ および $Z-Z_0$ 分布

Level	Horizontal		Vertical	
L ₁	R ₀ =0		Z ₀ =2,852	
	R-R ₀ =10.8		Z-Z ₀ =6.89	
L ₄	Port 12	Port 25	Port 12	Port 125
	R ₀ =713		Z ₀ =2,661	
	R ₀ -R=2.26	R-R ₀ =-9.58	Z-Z ₀ =-10.3	Z-Z ₀ =1.27
L ₉	R ₀ =1,426		Z ₀ =1,426	
	R ₀ =40.9	R-R ₀ =7.57	Z-Z ₀ =-21.9	Z-Z ₀ =7.0
L ₁₁	R ₀ =1,426		Z ₀ =858	
	R ₀ -R=38.29	R-R ₀ =19.57	Z-Z ₀ =12.20	Z-Z ₀ =8.62
L ₁₄	R ₀ =1,426		Z ₀ =140	
	R ₀ -R=16.9	R-R ₀ =17.56	Z-Z ₀ =-6.81	Z-Z ₀ =11.75

一方、Fig.10 では、膜体内圧が 9.1Pa のレベル L₁₁ における風上側 Port 12 の変動変位の時刻歴と同時刻の風速記録を比較している。データを表している。この図から、無風時で無いにも拘らず $R-R_0=0$ ならびに $Z-Z_0=10\text{mm}$ のシフトが生じている。

これは、膜体内圧が加えられた際の膨張の他、風速発生時のモーショキャプチャーの初期キャリブレーションの初期設定に対して起こるズレ誤差などが含まれているかもしれない。いずれにしても、無風時のゼロ設定、いわゆる Off-set によって修正される必要がある。



Date : 2021/6/9

Fig.10 変位の時刻歴波形と同時刻の風速波形

5.3 変位計測における Off-set の設定

前節で検討してきた膜体内圧の加圧時に起こる膨張等のズレを除外した実変位 δx と δz を求めるために Off-set を水平変位および鉛直変位に対して下式のように設定した。

$$\delta_x = -R + R_0 - R_{infl.} \quad R < R_0 \quad (11)$$

$$\delta_x = R - R_0 - R_{infl.} \quad R \geq R_0 \quad (12)$$

$$\delta_z = Z - Z_0 - Z_{infl.} \quad (13)$$

ここに、 $R_{infl.}$ と $Z_{infl.}$ は Fig.11 に示すように、それぞれ風速 $V=0$ 時の位置であり、水平方向と鉛直方向に対する Off-set として定義している。なお、Fig.11 では、 $R-R_0 > 0$ の状況は、円の内側に向かって変位しており、逆は外側に向かって変位していることを意味している。同様に、 $Z-Z_0 > 0$ であれば上側に、 $Z-Z_0 < 0$ であれば下側に変位している状態となる。

Fig.12 は、Table 2 の Level L₁₁ の Port 12 に対する Off-set ($R_{infl.}$ と $Z_{infl.}$) を推定した一例である。

図は、Fig.10 にある風速変動と差分 ($R-R_0$ と $Z-Z_0$) 変動の瞬間値同士の逐次相関図を表している。

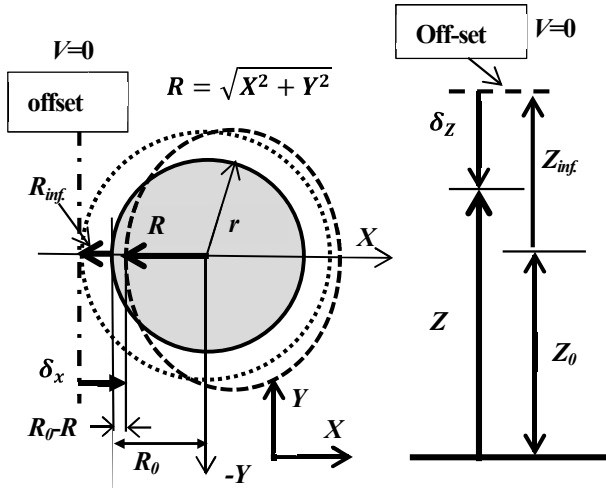


Fig.11 Off-set の定義

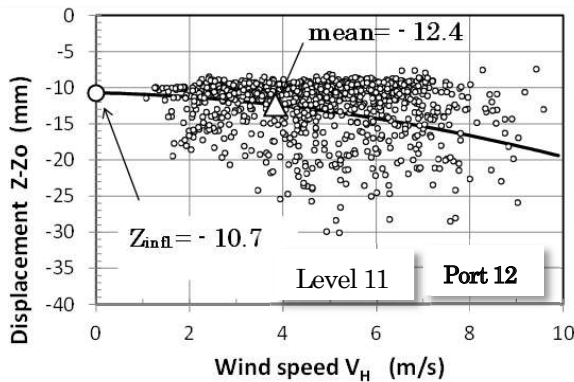
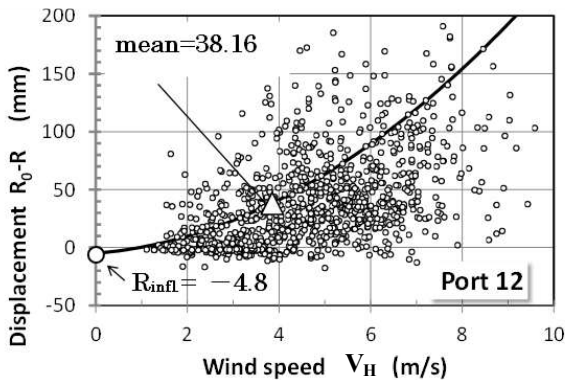


Fig.12 Off-set (R_{inf} or Z_{inf}) の設定

なお、この逐次相関図は、Fig.7 の風速と変位の相互相関で示された Lag Time を考慮し、差分の時刻を 2 秒遅らせてプロットした。

Off-set は、バラツキの影響を考慮して記録データの平均風速 $V_H=3.85\text{m/s}$ と平均変位の交点 (図中の三角印) を通る 2 次の近似曲線を求め、その曲線式の風速ゼロ時の差分値を Off-set とした。

5.4 実変位を考慮した空気膜ドーム変形

これまでの Off-set に関する検討を基に、自然風中におけ

る空気膜ドームモデルの実変位による変形を求めた。解析は、風速 $V_H=3.85\text{m/s}$ の膜体内圧 $P_0=9.1\text{Pa}$ 時の観測記録について行い、Table2 の代表レベルで得られた最大変形が想定される風上の Port 12 と風下の Port 25。を選び立断面として膜体の変形を推定した。

Table 3 Off-set を考慮した実変位 δx と δz (単位 mm)

Z_0	2,852mm (L_1)		Initial internal pressure	
Off-set	Tip		$P_0 = 9.1\text{Pa}$	
R_{infl}	3.3		Mean wind speed	
δx	7.5		$V_H = 3.85\text{ m/s}$	
Z_{infl}	4.82			
δz	2.07			
Z_0	2,661mm (L_4)		1,426mm (L_9)	
Off-set	Windward	Leeward	Windward	Leeward
R_{infl}	2.35	-8.1	-0.35	5.54
δx	-0.092	-1.48	41.13	2.03
Z_{infl}	-7.42	0.13	-13.41	6.06
δz	-2.84	1.14	-8.49	0.93
Z_0	856mm (L_{11})		142mm (L_{14})	
Off-set	Windward	Leeward	Windward	Leeward
R_{infl}	-4.8	17.96	3.8	17.5
δx	43.01	1.45	13.1	0.06
Z_{infl}	-10.7	7.9	-6.61	11.3
δz	-1.67	0.61	-0.06	0.40

Table.3 に、代表点での Off-set (R_{inf} と Z_{inf}) ならびに実変位 (δx と δz) を示した。さらに、それらの結果を基に、Fig.13 の破線で与えられる変形図を推定し、最上図の風洞実験による変形と比較した。図は、寸法を誇張して描いているが、最上図の模型形状が 3/4 円球とは異なるものの、かなりの類似を示した。

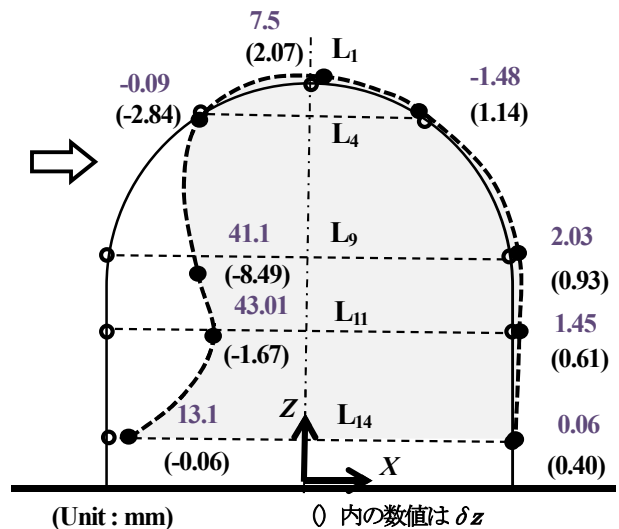
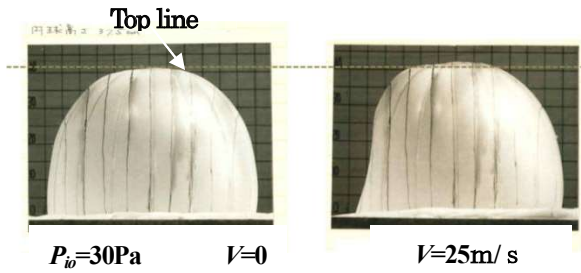


Fig.13 実変位を考慮した変形



Photo, 4 風洞実験による変形形²⁾

6 必要内圧の推定と簡易算定法の検証

計測は、28.3Pa から 9.1Pa まで膜体内圧を変化させ 27 回分のデータが収録できた。Fig.14 は膜体内圧 P_{i0} を変化させたときの基準風速 V_H と内圧 P_i の記録の関係を表している。観測を通しての基準点における平均風速は、最高 4.35m/s (Full scale で 16.7m/s) を最高に期待に反しそれ以上の強風時の計測は叶わなかった。また、送風機の膜体内圧 P_{i0} に対して計測された膜内圧 P_i は、膜体内圧と同程度に推移していた。

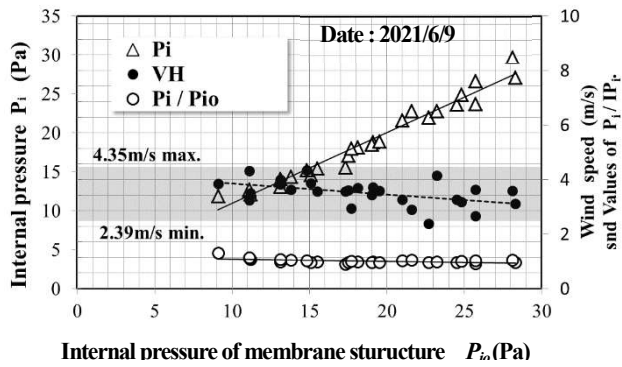


Fig. 14 収録記録

6.1 原形回復のための必要内圧の推定

以上の計測した 27 回の記録から、レベル L₁₁ に限定し、2m/s 台、3m/s 台、4m/s 台の 3 グループの風速範囲において、異なる膜体内圧 P_{i0} に対する Data-set を抽出し、その後 5.3 節の設定方法に準じて水平方向の最大発生位置の実変位 δx を求め、Table 4～Table 6 に示した。なお、表中の Off-set(R_{infl})は、前節と同様の方法で全ての Data-set に対して行っている。

Table 4 風速 2m/s 台の Data-set

P_{i0} (Pa)	17.7	21.6	22.7	25.7
Port	12	13	15	12
V_H (m/s)	2.94	2.9	2.39	2.67
R_o-R (mm)	3.265	2.0	-7.52	-12.78
R_{infl} (mm)	-11.14	-7.33	-13.3	-21.17
δx (mm)	14.41	9.33	-5.78	-8.38

Table 5 風速 3m/s 台の Data-set

P_{i0} (Pa)	9.1	15.1	19.5	24.7	28.3
Port	12	14	15	13	15
V_H (m/s)	3.85	3.86	3.6	3.26	3.13
R_o-R (mm)	41.9	29.2	10.0	-3.38	-5.11
R_{infl} (mm)	-6.0	-4.35	-9.23	-19.4	-19.0
δx (mm)	47.0	33.5	19.3	-16.0	-13.9

Table 6 風速 4m/s 台の Data-set

P_{i0} (Pa)	11.1	13.1	14.8	23.2
Port	12	13	15	12
V_H (m/s)	4.32	3.99	4.35	4.15
R_o-R (mm)	49.8	30.09	1.36	10.26
R_{infl} (mm)	-0.05	-4.0	-26.0	-4.49
δx (mm)	49.9	34.1	27.4	14.78

次いで、風速範囲毎に膜体内圧 P_{i0} と水平変位 δx の関係を Fig.15～Fig.17 のように求めた。

なお、これらの図には、変位 δx の他に対応する測定時の基準点の平均風速もプロットしている。

図から原形回復のための必要内圧 P_0 に関する推定は、水平変位 $\delta x=0$ とするための内圧であることから、得た変位データに対する近似線と交差する位置での内圧に置き換えた。また、それに対応する風速は、同じく風速のプロット値の近似線の交差する風速と仮定した。

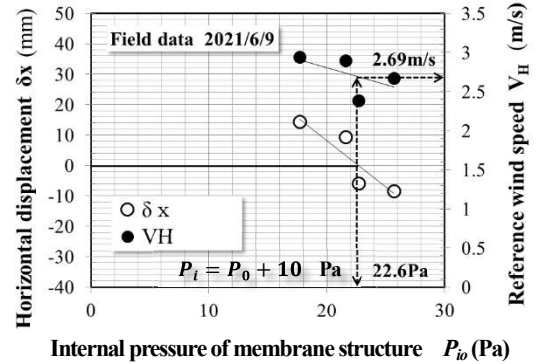


Fig. 15 風速 2m/s 台の推定される必要内圧

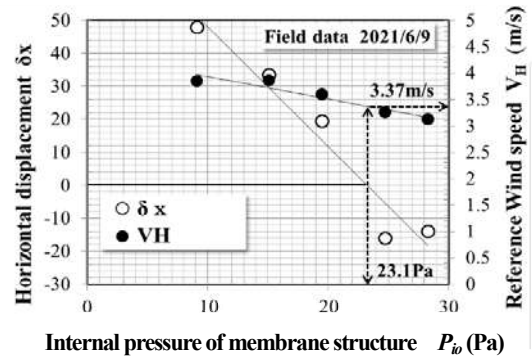


Fig. 16 風速 3m/s 台の推定される必要内圧

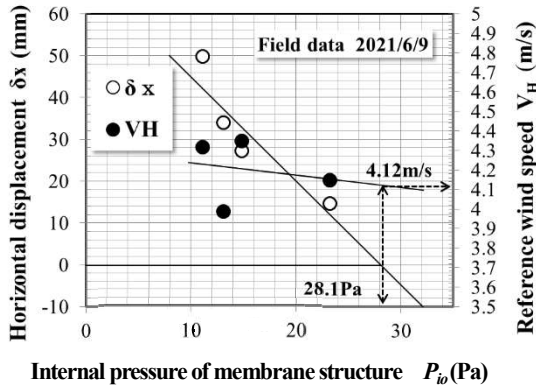


Fig. 17 風速4m/s 台の推定される必要内圧

以上の結果から得られた全て3段階の風速範囲に対する風速 V_H と P_0 に関する内圧 P_i は、Table 7 にまとめて示した。

Table 7 必要内圧の推定結果

Range	2m/s	3m/s	4m/s
P_i (Pa)	22.6	23.1	28.1
V_H (m/s)	2.69	3.37	4.12

6.2 座屈回避のための必要内圧

空気膜ドームの風下膜面の下部に予想される座屈は、論文その27の実大型送風機の実験において、目視ではあるが明らかに下方に振動していた。しかし、Fig.13の実平均変位を考慮した変形図からは座屈現象の発現は認められなかった。そこで、目視で観察できた下方の振動に対し、ドーム背後のL14のPort 25の位置に照準を定め、変位変動から座屈の評価とその回避に必要な内圧について検討した。

Fig.18は、基準風速 V_H が同程度でかつ膜体内圧が幅広く離れた $P_{i0}=9.1\text{Pa}$ 、 19.5Pa 、 24.7Pa の3setを選んだ。そして、合わせて、同図に平均値 $\bar{Z}$ と最小ピーク値 $\check{Z}$ を抽出した。なお、ピーク値の評価時間は0.25secであり、時刻歴データは予め移動平均によってスムージングしている。

Fig.18の変動波形を比較すると、9.1Paでは他の19.5Paと24.7Paのものとは比べ下振れのピーク値が激しく、24.7Paでは無視できるほど小さい。これは、風速約3.5m/sでは9.1Paから24.7Paの間で座屈を無視できる膜体内圧、まさに座屈を起こさせない必用内圧 P_{0b} の存在を意味している。

推定方法は、座屈回避状態のピーク変位を判別するため、Fig.18においてピークの大きさを表す(14)式の差分 $(Z - \bar{Z})$ の平均値 $(\bar{Z})$ に対する比率をData-set群に共通する尺度としてピーク率 K を導入した。そして、座屈の判別は、基本形の初期内圧 $P_{0b}=10\text{Pa}$ (ここでは最も接近している $P_{0b}=9.1\text{Pa}$ を用いている) において、(16)式のPeak-factor理論に基づいた変動分 $g_K \sigma_K$ が基本値となることに着目している。すなわち、風速 V_H において、(16)式にある $g_K \sigma_K$ を統計的極値 $3\sigma_K$ に置き換えて得られる(17)式の基本最小ピーク率 $\check{K}_0$

になるまで内圧を増加させたときの内圧を、座屈回避のための必要な内圧 P_{0b} として定義した。

$$K(t) = (Z - \bar{Z}) / \bar{Z} \quad (14)$$

なお、 $P_{i0}=9.1\text{Pa}$ の観測データの標準偏差 σ_K は、(15)式で定義している。

$$\sigma_K = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K(t) - \bar{K})^2 dt} \quad (15)$$

$$\check{K} = \bar{K} + g_K \sigma_K \quad (16)$$

$$\check{K}_0 = \bar{K} + 3\sigma_K \quad (17)$$

ここに、 $\bar{K}$ はピーク率の平均値を、 g_K はピークファクタを、そして T は平均時間 (270sec) を表している。

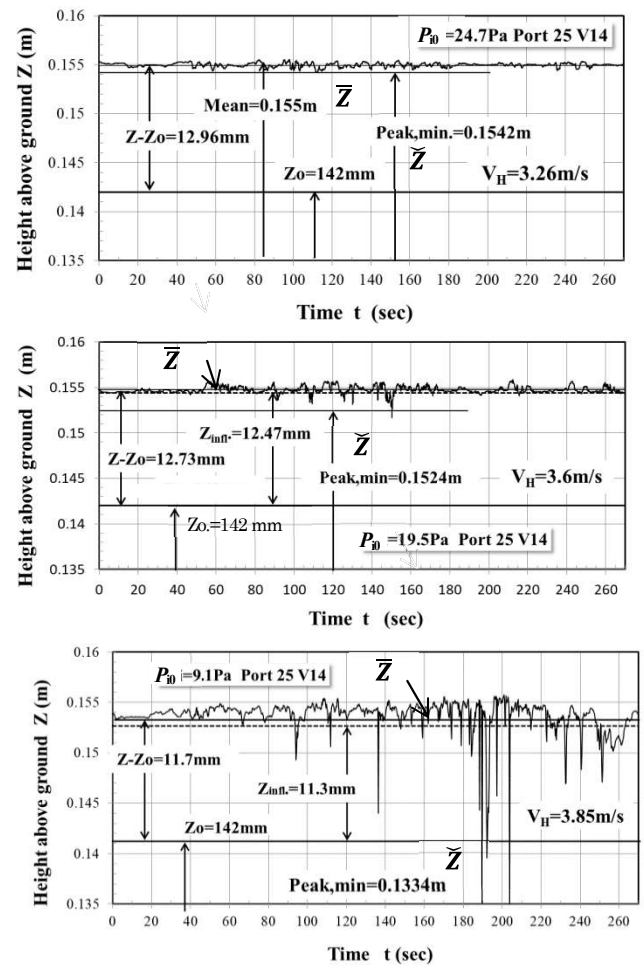


Fig.18 3種の膜体内圧に対する風下膜下部における変位変動

見方を変えると、この基本最小ピーク率 $\check{K}_0$ は、 $P_{i0}=9.1\text{Pa}$ のピーク率 K に対して得られる Fig.19 の頻度分布図からも判断されるように、基点 ($K=0\%$) から負側への変化量 $3\sigma_K + \bar{K}$ に対応するピーク率として見る事ができる。

以上の背景を基に、(15)式における標準偏差 σ_K の結果は $\sigma_K = 1.06\%$ と算定された。そして、Fig.19の頻度分布図から明らかなようにピーク率に対する変動の $3\sigma_K$ は負側に相当することから $3\sigma_K = -3.18\%$ 、 $\bar{K} = 0.96\%$ となり、結果とし

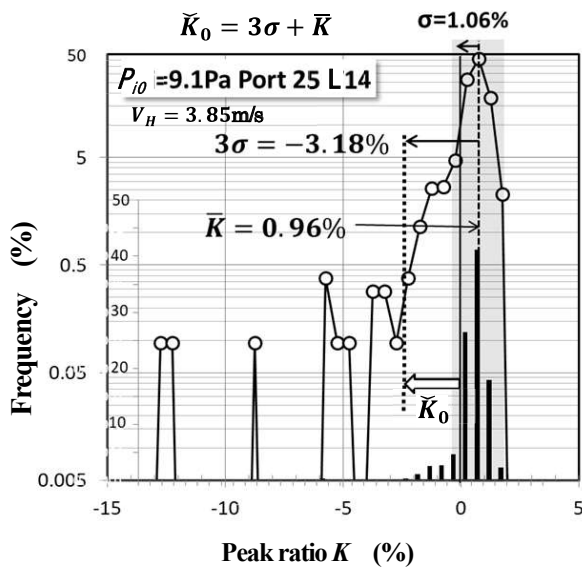


Fig.19 ヒック率 K の発生頻度分布

て (17) 式から基本最小ピーク率 $\bar{K}_0 = -2.22\%$ を得た。
この結果を踏まえ、内圧変化に対する最小ピーク率 $\bar{K}$ の関係を Fig.20 のように表し、基本最小ピーク率 $\bar{K}_0$ に対応する内圧が座屈を抑えるための必要内圧 P_{ob} に関する内圧 $P=17.3\text{Pa}$ とした。Fig.20 には、合わせて Off-set を考慮し

Table 8 膜体内圧 P_{i0} に対する平均値 $\bar{Z}$ 、最小ピーク値 $\bar{Z}$ 、ピーク率 $\bar{K}$ および最小ピーク変位 δ_z

P_{i0} (Pa)	9.1	19.5	24.7
$\bar{Z}$ (m)	0.1537	0.1545	0.1550
$\bar{Z}$ (m)	0.1334	0.1524	0.1542
$\bar{K}$ (%)	-13.208	-1.3401	-0.4969
δ_z (mm)	-1.980	-0.221	-0.063
V_H (m/s)	3.85	3.6	3.26

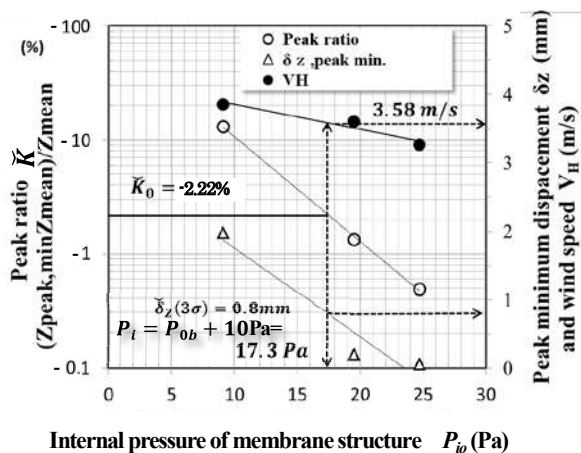


Fig.20 基本最小ピーク率 $\bar{K}_0$ と対応する座屈を抑えるための必要内圧

た最小ピーク変位 δ_z および対応する観測時の平均基準風速をプロットしている。図から見られるように、最小ピーク変位は高々 -0.8mm であり、目視ではほとんど静止状態として捉えられる値である。また、風速に関しては、3種の観測値の近似曲線から、この必要内圧評価に対応する風速は $V_H=3.58\text{m/s}$ とした。

6.3 簡易算定法との比較検証

最終的に、初報^[6]で報告した原形回復のための必要内圧 P_0 および座屈回避のための必要内圧 P_{ob} に関する簡易算定法の妥当性について検証を試みた。Fig.21 は、実測で得られた Table 7 の必要内圧 P_0 に関する推定値 (□印の3データ) と簡易算定式 (実線) との比較を、そして Table 8 の膜体背面の座屈を回避するための必要内圧 P_{ob} に関する推定値 (◎印の1データ) と簡易推定式 (点線) との比較を表している。なお、図中のその他のプロットデータは、既に論文その2^[7]の大型送風装置による実験において比較したものである。

自然風中では無風時を特定できないという困難な計測において、適正に Off-set を設定することによって膜面の実変位を評価することができた。Fig.21 に示すように、実測において原形を回復するための必要内圧 P_0 および座屈を回避するための内圧 P_{ob} に関し、荒っぽい方法ではあるが推定へと導くことができ、簡易算定法との比較が可能となった。結果として、両者は比較的良好な一致にあることから、本論で展開してきた剛体の薄膜構造を基本とした必要内圧の推定法は実用的に十分有効な手法と確認できた。

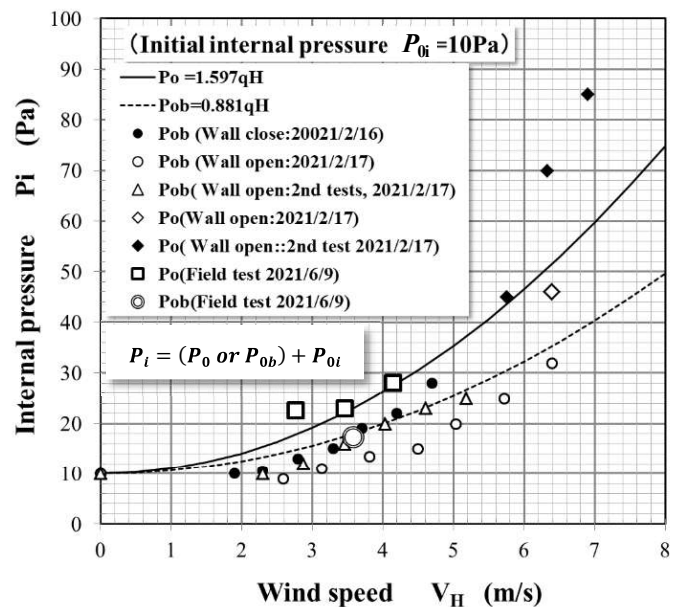


Fig.21 必要内圧に関する簡易算定法と実測推定データの比較

5. 結論

風速発生時のモーションキャプチャーによる空気膜ドームに対する3次元変位計測において、収録した座標データから

得た変位ベクトルは、内圧設定による膨張や風外力による変形が加わり、Off-set としてのゼロ設定が困難である。本研究では、Off-set を設定する手段として、風速変動と変位ベクトル変動の逐次相関図を作成し、平均基準風速と平均変位ベクトルの交差する点を通る 2 次の平均近似曲線が風速ゼロ時の変位を Off-set とすることによって各 Data-set に対するゼロ変位を決めることができた。

従って、試験体の静止位置からの実質的な変位を明らかにすることが可能となり、原形回復ならびに座屈回避のための必要内圧を評価することができた。

結論として、以下にまとめることができる。

- 1) 本実測における相似性に関連しては、高さと同径が約 30 m とした空気膜ドームを想定し、約 10 分の 1 の模型に対し弾性体に基づいた相似則から、相似率として風速スケール $V_p/V_m=3.84$ 、時間スケール $T_p/T_m=2.786$ そして圧力スケール $P_p/P_m=14.75$ を設定し、270 秒間 (実質 12 分相当) のデータ計測を行った。
- 2) 基準点風速の特性として、変動風速の乱れの強さ (0.34)、自己相関関数から乱れのスケール (実質 163m) を算出し、パワースペクトルについては Karman 型に近似しているなど、一般的な市街地風と見做す入射風と判断できた。
- 3) 基準風速と変位・内圧の相互相関関数の解析から相互の Lag time が 2sec となることを見出し、また個々のパワースペクトル解析から風上膜面水平変位と内圧の高周波数域でのエネルギー散逸が入射風に比べて大きいこと、それに反し、風下膜面鉛直変位に関してはエネルギーの蓄積が高周波数側に大きくシフトしており入射風よりも空気膜体が受ける圧力変動および膜変形振動を強く受けているものと推察された。
- 4) Off-set を設定できたことによって、実変位を考慮した変形図の作成を求めることができ、これまでの既往の風洞実験と極めて類似した結果を示すことができた。
- 5) 膜体内圧を 27 通りに変化させて収録した Data-set を基に、類似した風速の Data-set 群から Off-set の考えによりゼロ変位を求め、Data-set 群の膜体内圧と実変位の線形近似線と交差する内圧から原形回復のための必要内圧 P_0 の推定ができた。
- 6) 風下膜の下部に発生する座屈現象は、平均的な変位ではなく突発的に発生する下向きのピーク変位であることが判明した。この突発的ピーク変形を極小にするための内圧が座屈を回避させるための必要内圧とし、初期内圧 $P_0=10\text{Pa}$ に近い膜体内圧 $P_0=9.1\text{Pa}$ の変動記録を基に

共通尺度とするピーク率 K を設定し、その変動に対する $3\sigma_K$ に対する増分とする基本最小ピーク率 $\bar{K}_0 = 3\sigma_K + \bar{K} = -2.22\%$ に、Data-set 群の最小ピーク率 $\bar{K}$ の近似曲線と交差する内圧から座屈を回避するための必要内圧 P_0 の推定が出来た。

- 7) 本実測により推定された原形回復のための必要内圧 P_0 および座屈回避のための必要内圧 P_0 と簡易算定法との比較検証の結果、比較的良好な近似にあることが示された。初報で展開してきた剛体の薄膜構造を基本とした必要内圧の推定法は実用的に十分有効な手法と確認できた。

謝辞

本論をまとめるにあたり、空気膜ドーム模型の製作から屋外観測におけるデータ取得および整理において、大嘉産業の関係者各位、鹿島建設技術研究所の関係者各位ならびに横浜国立大学河端研究室の学生各位に多大なるご支援を戴いたことに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 本郷剛、藤野昇：「空気膜構造物の風圧力に関する実験的研究」東北大学 卒業論文 昭和 43 年度
- 2) 最上公彦：「空気膜構造物の風圧力に関する二三の実験的研究」東北大学大学院工学研究科 修論 昭和 44 年 2 月 15 日
- 3) B.G. Newman, U. Ganguli : Flow over Spherical inflated buildings”, Journal of W.E.I.A., 17 pp.305-327 (1984)
- 4) 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」一角丸長方形の平面を持つ最小曲面形状に対する風洞実験一、膜構造研究論文集 2011、No.25、2012.3
- 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」一境界層乱流中における柔模型を用いた風洞実験一、膜構造研究論文集 2012、No.26、2013.3
- 6) 丸田榮藏、河端昌也、掛斐剛：「球形屋根を有する円筒形空気膜構造の必要内圧制御に関する研究—その 1 簡易算定式の誘導」膜構造ジャーナル 2024
- 7) 丸田榮藏、河端昌也、山本学、掛斐剛：「球形屋根を有する円筒形空気膜構造の必要内圧制御に関する研究—その 2 大型疑似風洞装置による必要内圧の測定」膜構造ジャーナル 2024

Research on the Required Internal Pressure Control of Cylinder- shaped

Pneumatic Membrane Structures with Spherical Roofs

Part 3 : Full Scale Test of Required Internal Pressure Using a Large Pneumatic Model

Eizo Maruta ^{*1}
Masaya Kawabata ^{*2}
Manabu Yamamoto ^{*3}
Takeshi Ibi ^{*4}

Summary

This study involved creating a large polyurethane model, scaled at 1/10 of a full-scale cylindrical pneumatic membrane dome with a spherical roof reaching a height of approximately 30 meters. The study aimed to estimate the required internal pressure to restore the original shape and avoid buckling of the pneumatic membrane structure under natural wind conditions. The experiments utilized motion capture to determine three-dimensional displacement vectors. By establishing an offset method that considers the sequential correlation between wind speed fluctuations and displacement vector variations, the actual displacement was identified, accounting for measurement zero-point shifts due to membrane expansion from initial internal pressure and wind speed effects. Measurements were taken with internal pressures of membrane structure varying incrementally from 9.1 Pa to 27.8 Pa in winds of 2.39 to 4.35 m/s, collecting 27 data sets equivalent to 10-minute averages. The results included obtaining the actual deformation diagrams in the wind direction at the lowest internal pressure of 9.1 Pa, where maximum displacement was expected, and comparing these deformations with previous wind tunnel experiments, yielding similar conditions. Based on these results, the offset method was used to estimate the required internal pressures P_0 for three cases with different reference wind speeds for shape restoration. For buckling avoidance, the study could be estimated the required internal pressure P_{0b} for one case by introducing the substantial minimum peak rate $\dot{K}_0$, based on the 3σ displacement variations located on the leeward side of the membrane. The obtained required internal pressures showed good approximation when compared to the simplified calculation method based on the rigid thin membrane structure discussed in Part 1 of this paper. Thus, the simplified estimation method for the required internal pressure presented in this paper was confirmed to be a sufficiently practical approach.

^{*1} CEO,WIND & PHYSICS,LLC, Dr. Eng.

^{*2} Professor, Institute of Urban Innovation, Yokohama National University, Dr. Eng.

^{*3} Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

^{*4} General manager, Development Div. DAIKA Industrial Co. Ltd..