

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

丸田榮藏*1
河端昌也*2
揖斐 剛*3

本論では、球形ドーム屋根を有する円筒型空気膜構造の風外力に対する構造安全を目途とした必要内圧制御ならびに膜体に生じる軸方向の最大張力に関する簡易算定法を提案している。必要内圧は、薄膜球形ドーム殻を想定した静力学に基づいて、膜体重量や初期張力に対する初期の内圧に加えて、風外力による膜体の引張や圧縮などの変形を回復させるための内圧や風下膜下部の座屈（皺）限界を基本にした張力の釣合いから導出している。算定では、風圧力に関しては日本建築学会荷重指針の球形屋根の外圧係数、円筒部に対しては既往の風洞実験による外圧分布を引用し、ドーム屋根のライズ比と円筒の高さ幅比の変化による影響について検討している。

1. はじめに

空気膜構造の歴史は長くこれまで数多くの建築物が残されてきた。空気膜構造は無柱の大空間を構築することができ、しかも軽量ということから地震外力には比較的無縁という意味では最良の構造形式と言える。また、多様な形態を創造できることでは魅力的な建築形式でもある。しかしながら、木質構造、コンクリート構造、鉄骨構造などの他の構造形式の設計において構築されてきた荷重設定と構造計画に比べて空気膜構造は極めて難解であり、かつ増大する外力に対して形状安定を保持するための制御^[1]が要求される。

従来、建設されてきた空気膜構造物では、半球あるいは1/4球を両端にもつ半円筒など単純な形状を除いては風洞実験による個別対応によって設計荷重と構造安定のための必要内圧を設定してきた。しかも、風速に対する安全限界を見極めるための内圧設定に関する物差しが確立されておらず、経験的な知見に頼ることを余儀なくされてきた。

一方、将来的には空気膜構造物の発展を踏まえ、耐風設計としての指針を得るためにも構造安全に係わる内圧制御の系統的研究が必要であると考え、入射風の変動、渦形成などの空気力学的な変動によって、すなわち、空気膜構造全体が大きく煽りを受ける大変形や面外および面内の局所的な変動変位がもたらす膜材の揉み洗い現象による皺の発生などの膜材劣化の問題が課題となる。これらの問題を回避するには、適正な内圧制御が必要となる。

本報では、一般的な球形ドーム屋根をもつ円筒形を対象とし、任意のライズ比および円筒高さの空気膜建築物を取り扱い、原形回復ならびに座屈回避に必要な内圧に着目した簡易算定法について検討した。なお、ここでいう原形回復とは風圧力によって風上側に発生した凹みを凸状態に戻すこととし

ている。また座屈とは風下下部のしわ発生を総称している。

2. 既往の研究

空気膜構造の安定内圧を決める理論的検討は、Bird (1956)^[6]によって纏められた Radome に関するマニュアルがあり、風圧力による抗力、揚力、および転倒モーメントがもたらす膜応力と必要内圧に対し、過度のたわみを抑えるには速度圧 q に対し 1.0 倍以上の内圧とする指針を示している。風洞実験的には、本郷・藤野^[1] (1968)、最上^[2] (1969) は、直径 $D=50$ cm に対するライズ比 f/D が 0.25, 0.5, 0.75 に変化する球形ドームの空気膜模型を用いて、構造的に安定と推定される変形状態における内圧と速度圧の関係に関する 3 種の実験を行い、安定な変形状態を保持するための内圧はライズ比増大とともに頂部相当の速度圧に対し 0.36~1.4 倍となることを示し、膜体安定性のために必要な内圧は上記ライズ比に対してそれぞれ $0.5q$, $1.0q$, $1.5q$ が妥当とした。

また Newman et al.^[10] は、ライズ比 f/D を 0.25, 0.37, 0.5 の半径 r とする薄膜空気膜ドーム模型を用いた境界層風洞実験において、ドームの頂部速度圧に対する必要内圧はそれぞれ $0.44q$, $0.55q$, $0.65q$ で、そして最大張力は、それぞれ $0.34rq$, $0.33rq$, $0.42rq$ で与えられることを示した。

一方、日本建築センターのニューマチック構造設計基準^[9] (1970 版) においては、球形および円筒形の空気膜構造に対して構造強度に必要な内圧ならびに膜面に発生する応力度などの指針を示している。

3. 簡易推定式の誘導

自然風中に置かれた球形屋根膜構造に作用する風圧力によって生じる変形を相殺させるという行為は、すなわち無風時

*1 WIND & PHYSICS LLC CEO, 工学博士

*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 大嘉産業株式会社 開発部 部長

の原形状態に回復させるために必要な内圧を求めることである。

本章では、風速に対する原形回復に必要な内圧の関係式を誘導するため、膜体を剛体の薄膜球形構造と仮定し、外力に対する膜張力の釣合いを基にして理論を展開している。なお、この展開の前提にはドーム部と円筒部の変形における連続性の前提、すなわちライズ比 f/D が 0.5 を下回る空気膜の変形に対してドームと円筒の接合部の長さを変化させないという仮定に基づいている。

一般に、風外力に対抗するための内圧 $P_{i,0}$ および $P_{i,b}$ と膜体円筒部に生じる最大軸方向張力⁵⁾ N_{max} は、(1) ~ (3) 式によって与えられる。

$$P_{i,0} = P_0 + P_{0i} \quad (1)$$

$$P_{i,b} = P_{0b} + P_{0i} \quad (2)$$

$$N_{max} = \sigma_{z,max} \cdot t = r \left(\alpha q_H + \frac{P_i}{2} \right) \quad (3)$$

ここに、 P_0 , P_{0b} , P_{0i} は、それぞれ原形回復のための必要内圧、座屈回避のための必要内圧、初期内圧であり、 $\sigma_{z,max} \cdot t$ は円筒部の高さ方向の軸方向最大膜張力で、 t , r はそれぞれ膜厚、円筒の半径である。さらに、 q_H は基準高さ H での速度圧で α は形状によって異なる外力影響係数である。

3.1 初期内圧について

大気中に置かれた空気膜ドームを膨らませるためには、ドーム膜の自重 W を支えるために空気を注入し、膜が張力状態になるまで内部の圧力を増大させ、自重による変形に対抗させる必要がある。一方、空気膜を微小に膨張させることによって初期張力を高め、Fig.1 に示すように、ほんの僅かな外力変動に対しては初期形状を安定的に保持させておく必要がある。

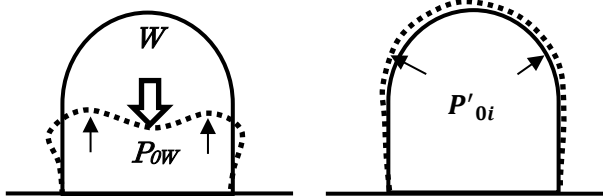


Fig.1 自重に対する必要内圧と微小膨張のための追加圧力

ここでは、これら自重 W による必要内圧 P_{0w} と微小膨張を作り出すための必要内圧 P'_{0i} を合わせて初期内圧 P_{0i} として (4) 式によって定義する。

$$P_{0i} = P_{0w} + P'_{0i} \quad (4)$$

上式の膜重量に対する必要内圧 P_{0w} は、膜構造の単位体積あたりの質量 m 、膜厚 t 、半径 r 、全表面積 A として床面積 A_f を変数とする (5) 式で求められる。

$$P_{0w} = \frac{W}{A_f} = \frac{mAtg}{\pi r^2} \quad (5)$$

また、ドーム部の微小膨張に必要な内圧は、Fig.2 に示すよ

うに、膨張時の応力と内圧の釣り合いより (6) 式で定義される。

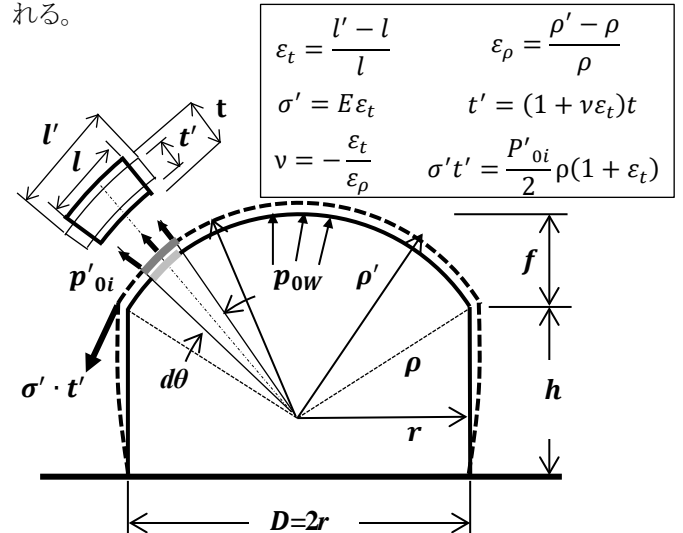


Fig.2 任意ライズにおける内圧

$$P'_{0i} = \frac{2t(1+\nu\epsilon_t)}{\rho(1+\epsilon_t)} \cdot E \cdot \epsilon_t \quad (6)$$

ここに、 ϵ_t は微小膨張時のひずみ、 t は膜厚、 ν はポアソン比、 E はヤング係数とし、 ρ は Fig.2 において幾何学的に導かれる (7) 式によって表される曲率半径としている。

$$\rho = \left(\frac{f}{D} \right) r \left\{ 1 + \frac{1}{4(f/D)^2} \right\} \quad r \geq f \gg 0 \quad (7)$$

一方、微小膨張を作り出すための必要内圧 P'_{0i} は先験的に決まらない不確定な圧力であることから、微小膨張のための必要内圧 P'_{0i} を設定する上で、微小ひずみ ϵ_t を初期張力導入としての大きさを決める必要がある。

微小ひずみ ϵ_t は、(6) 式により空気膜に対するヤング係数、ポアソン比、寸法などの物理的諸元と必要内圧 P'_{0i} を既知とすれば 2 次方程式を解くことにより求めることができる。また、内圧 P'_{0i} は、(4) 式において初期内圧 P_{0i} と膜重量の内圧 P_{0w} を既知として与えるための試験によって求められる。初期内圧 P_{0i} の試験では、Photo.1 の空気膜模型にファンによる空気を注入しながら外部からの触診により初期張力状態として適当な張り具合に相当する 10Pa を設定した。なお、この初期内圧 P_{0i} は次報以降においても共通して用いている。

次いで、Photo.2 の円形加圧試験装置を用いて Fig.3 の応力ひずみ図と Table1 に示す膜材料のヤング係数 E 、降伏応力度 σ_y を得た。なお、本装置は円形治具に取り付けた膜を空気圧で膨らませ、変形後の形状を球面と仮定することで 2 軸引張 (張力比 1:1) に対する応力ひずみ関係を求めるものである。

以上の結果を基に、必要な内圧 P'_{0i} は、(4) 式に従い上記の設定した初期内圧 10Pa から Table2 のように膜重量に対する必要内圧 P_{0w} を差し引くことによって確定した。さらに、 $P'_{0i}=5.24\text{Pa}$ とすると微小膨張させたときのひずみ ϵ_t が (6) 式により、 $\epsilon_t=0.000747$ として求められることから、対応する応力 σ' は、(8) 式により Table3 に示される値を採った。

$$\sigma' = E \varepsilon_t \quad (8)$$

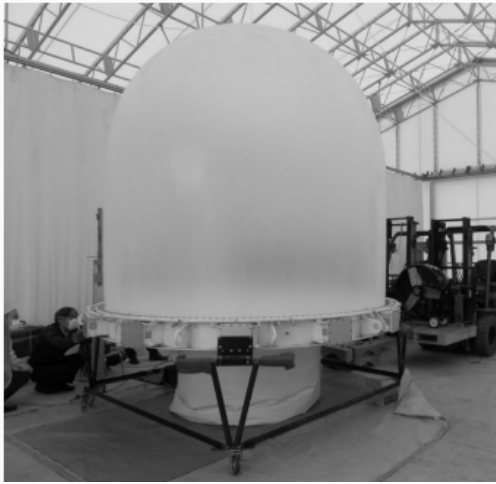


Photo.1 初期内圧 10Pa 時の状況

Table 1 試験体の諸元

半径 r	軒高 h	膜厚 t
1.426 m	1.426 m	0.1 mm
膜重量 W^*	床面積 A_f	
3.245 kg	6.39 m ²	
ヤング係数 E	降伏応力度 σ_y	
50MPa	4.1MPa	

*継ぎ目の付加重量 1.39 N を含む



Photo.2 円形加圧試験装置

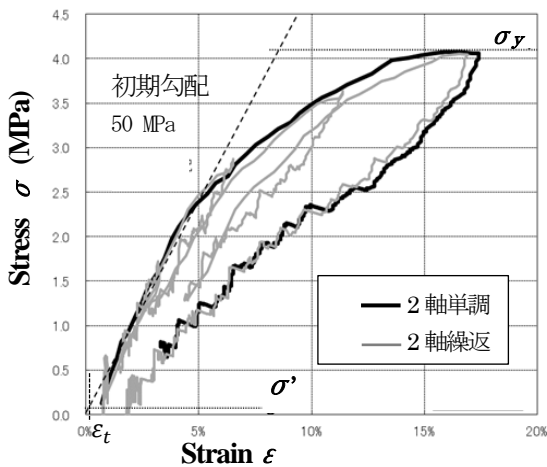


Fig. 3 応力-ひずみ曲線

Table 2 初期内圧が 10Pa 時の内圧構成

自重に対する必要内圧 P_{0w}	微小膨張の必要内圧 P'_{0i}
4.76Pa	5.24Pa

Table 3 微小ひずみと応力

ε_t	ν	σ'
0.000747	0.5	0.0375 MPa

最終的に、本空気膜モデルの膜材の膜材料試験により得られた降伏応力度 σ_y に対し、微小膨張時の応力度 σ' は 1/109 となることが示された。このことは、微小ひずみに対する (6) 式の関係を用いることによって、微小膨張に対する必要内圧 P'_{0i} を導出する際の目安として (9) 式の微小ひずみ ε_t を導入できるものとした。

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma'}{E} = \frac{\sigma_y}{109E} \quad (9)$$

3.2 原形回復のための必要内圧について

風外力によって生じる球形ドーム膜の変形を無風時状態に戻すための内圧を、原形回復に必要な内圧 P_0 とする。 P_0 は Fig.4 で表される膜の膨張および収縮に働く鉛直方向および水平方向の風力 F_R と F_H に起因する内圧 P_{0V} と P_{0H} の和とし、(10)式のように定義した。

$$P_0 = P_{0V} + P_{0H} \quad (10)$$

そして、これらの両内圧は、それぞれの風圧力に関し鉛直方向に対してはドーム屋根に生じる上向き風力 F_{LR} を (11) 式のように、また水平方向に関し風方向に対して $F_{DR}+F_{DC}$ と風直交方向の水平風力 F_{LC} を (12) 式 (式導出の基本的考え方は 4.3 節、Fig.11 を参照) のように求めることとした。

$$P_{0V} = \frac{F_{LR}}{A_f} \quad (11)$$

$$P_{0H} = \frac{F_{DR}+F_{DC}+2F_{LC}}{A} \quad (12)$$

ここに、 A_f は床面積、 A は膜体の全表面積とし、添え字 R と C はそれぞれ屋根部と円筒部を表している。なお、ここで用いられる風圧力 F_{DR} 、 F_{LR} 、 F_{DC} および F_{LC} の符号は、風外力によるドームの膨張と収縮を扱っていることから風圧の発生方向と定義する。すなわち、風圧の作用が建物に向かう場合を正としてその逆を負とする。また、屋根の F_{LR} の水平風直交方向成分は、本論文の展開では風直交方向に区分する領域評価とした日本建築学会荷重指針^[7]の風圧係数の取り扱いに準じているため除外した形となっている。

3.3 円筒の風下膜が座屈しないための必要内圧

風によって円筒部風下膜の下部が座屈しないためには、

Fig.5 に示されるように、座屈を回避させるに必要な内圧 P_{0b} によって発生する張力 $\sigma_t \cdot t$ が、風圧力によって生じる転倒モーメント M が及ぼす張力 $\sigma_M \cdot t$ 以上であればよい。すなわち、(13) 式を満たすことになる。

$$\sigma_t \cdot t \geq \sigma_M \cdot t \quad (13)$$

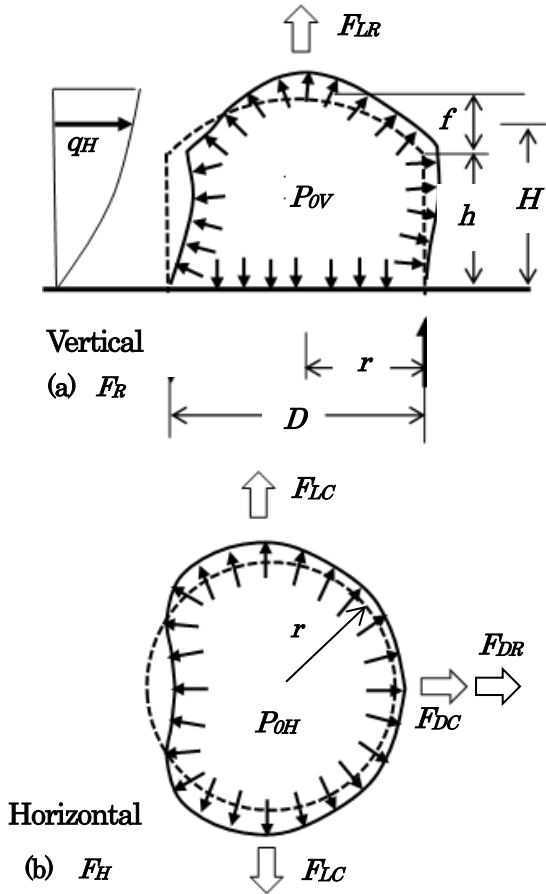


Fig.4 作用風力と必要内圧の関係

一般に、空気膜ドームに内圧 P_{0b} を加えた場合、円筒部軸方向の張力は、(14)式で表される。

$$\sigma_t \cdot t = \frac{P_{0b}\rho}{2} \quad (14)$$

一方、曲げモーメント M によって発生する単位長さ当たりの最大の張力 $\sigma_M \cdot t$ は、円筒部の円周に沿った張力の分布を Fig.6 で表される線形変化の分布と仮定することによって導かれる(15) 式の関係から、(16) 式を得る。

$$M = 2 \int_0^\pi \sigma_M \cdot t \cos \beta \cdot r \cos \beta \cdot r d\beta = 2r^2 \sigma_M t \int_0^\pi \frac{1 + \cos 2\beta}{2} d\beta = \pi \sigma_M \cdot t \cdot r^2 \quad (15)$$

$$\sigma_M \cdot t = \frac{M}{\pi r^2} = \frac{M}{A_f} \quad (16)$$

以上の展開から、座屈を避けるに必要な内圧 P_{0b} は、(17) 式となる。

$$P_{0b} \geq \frac{2M}{\pi r^2} \quad (17)$$

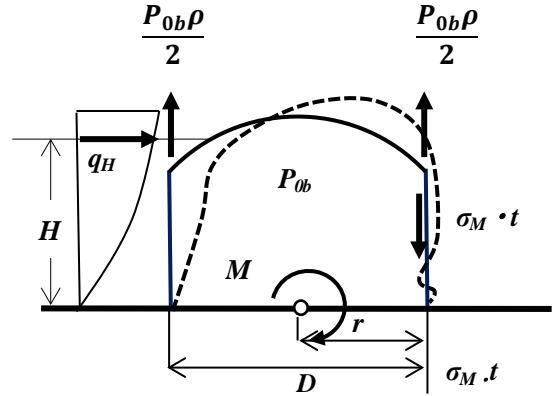


Fig.5 モーメントとの釣合い

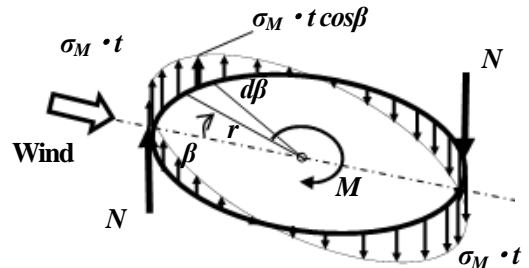


Fig.6 発生予想張力とモーメントの釣合い

3.4 作用風圧による円筒部軸方向の最大張力について

円筒部を軸方向（高さ方向）に変形させる張力は、Fig.7 に示されるように、外力項（揚力 F_{LR} と転倒モーメント M ）による $\sigma_L \cdot t$ と $\sigma_M \cdot t$ とし、内圧項（必要内圧 P_0 と初期内圧 P_{0i} ）による $\sigma_i \cdot t$ であり、そして図からも分かるように最大張力は、円筒部の風上最先端で発生する。

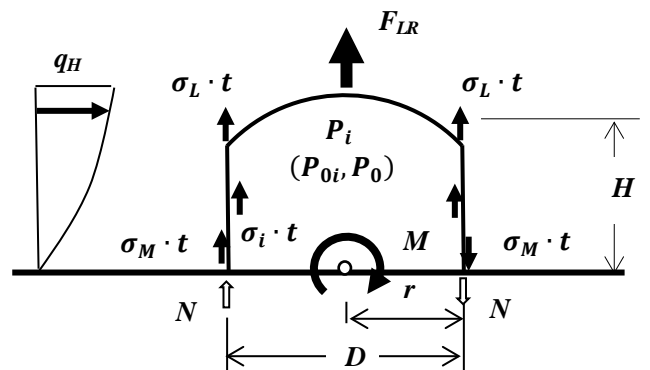


Fig.7 作用風圧による膜張力の発生要素

以上を考慮すると、円筒部に生じる単位長さ当たりの最大張力 $\sigma_{z,max} \cdot t$ は、(18) 式によって表すことができる。

$$\begin{aligned} \sigma_{z,max} \cdot t &= (\sigma_L \cdot t + \sigma_M \cdot t) + \sigma_i \cdot t \\ &= \left(\frac{F_{LR}}{2\pi r} + \frac{M}{\pi r^2} \right) + \frac{P_i \cdot r}{2} = r \left(\frac{F_{LR}}{2A_f} + \frac{M}{rA_f} \right) + \frac{P_i \cdot r}{2} \\ &= r \left(\alpha q_H + \frac{P_0}{2} + \frac{P_{0i}}{2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

ここに、外力項における q_H は基準速度圧であり、係数 α は、(19)式で表される。

$$\alpha = \frac{1}{q_H \cdot A_f} \cdot \left(\frac{F_{LR}}{2} + \frac{M}{r} \right) \quad (19)$$

4. 既存の風圧係数データを用いた算定法の提案

4.1 任意ライズの球形ドームの風圧力

風洞実験で得られる風圧係数分布から膜体表面に作用している3次元ベクトルを、Fig.4 に示されるような方向成分の風力に積分評価することは極めて難儀なことである。このため、本論では、日本建築学会荷重指針⁷⁾に掲げられる球形ドームの領域区分方法に準じた風圧力評価を試みている。また、同指針では、球形ドーム屋根についてのみ指針を示し円筒部に対しては触れていない。

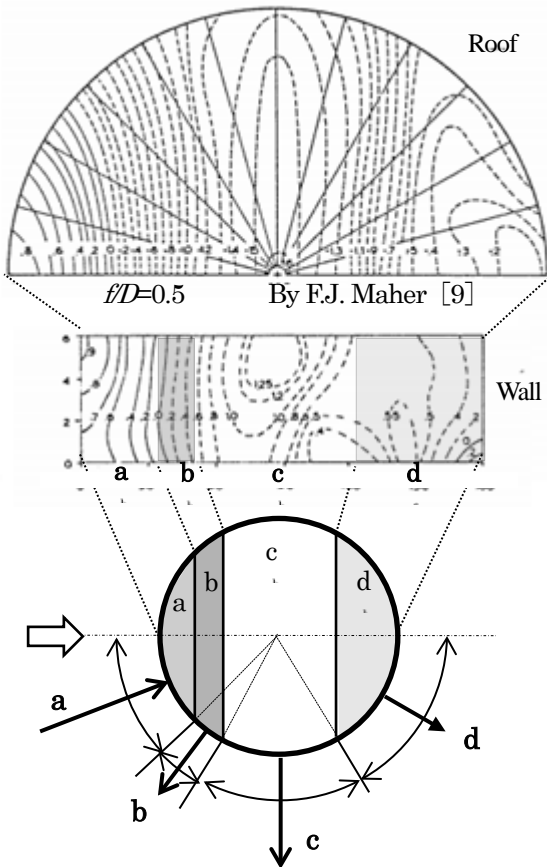


Fig.8 既往の風洞実験による円筒部外圧係数分布と平均領域

従って、下部の円筒に関しては、Fig.9 のように建築学会荷重指針の屋根区分に準じ、既往の風洞実験^{8),9)} (例えば

Fig.8)の風圧分布から Table 4 のように a から d の領域に対応する面平均値を求め、Table 5 のように設定した。

Table 4 円筒部の外圧係数分布の領域平均 (風洞実験値)

領域	T.Hongo ^[8]		F.J.Maher ^[9]
	q_T	q_H	補正なし
	$f/D=0.2, h/D=1.0$		$f/D=0.5, h/D=0.5$
a	0.591	0.501	0.430
b	-0.219	-0.186	-0.525
c	-0.509	-0.432	-0.903
d	-0.142	-0.121	-0.452

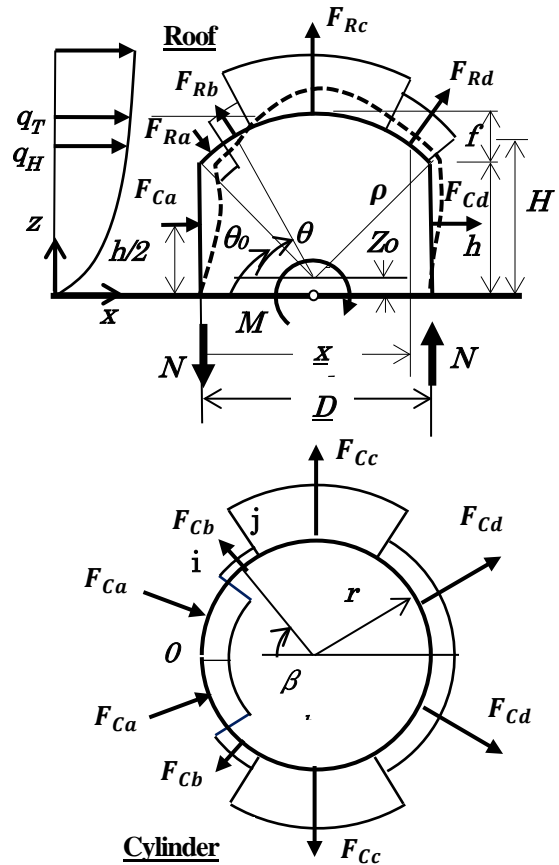


Fig.9 風圧力の領域区分

Table 5 円筒の各部平均外圧係数の提案値

円筒部	$f/D=0.0\sim 0.2$	$f/D=0.5$
C _a 部	0.5	0.43
C _b 部	-0.19	-0.53
C _c 部	-0.43	-0.90
C _d 部	-0.12	-0.45

($h/D \leq 1.0$ は同じと仮定)

以上の領域に基づいた屋根部(R)と円筒部(C)の抗力(D)・揚力(L)方向成分の風力 F_{DR} 、 F_{LR} 、 F_{DC} 、 F_{LC} およびモーメント M は、以下の (20) ~ (25) 式で表される。

$$F_{DR} = \sum_{n=a}^d F_{Rn} \cos \theta_n = \sum_{n=a}^d C_{peRn} A_{SRn} q_H \cos \theta_n \quad (20)$$

$$F_{LR} = \sum_{n=a}^d F_{Rn} \sin \theta_n = \sum_{n=a}^d C_{peRn} A_{SRn} q_H \sin \theta_n \quad (21)$$

$$F_{DC} = 2 \sum_{n=a}^d F_{Cn} \cos \beta_n = 2 \sum_{n=a}^d C_{peCn} A_{SCn} q_H \cos \beta_n \quad (22)$$

$$F_{LC} = \sum_{n=a}^d F_{Cn} \sin \beta_n = \sum_{n=a}^d C_{peCn} A_{SCn} q_H \sin \beta_n \quad (23)$$

$$M = \sum_{n=a}^d (\rho \sin \theta_n + Z_0) F_{Rn} \cos \theta_n + \sum_{n=a}^d \rho \cos \theta_n F_{Rn} \sin \theta_n + \left(\frac{h}{2}\right) (2F_{Ca} \cos \beta_a + 2F_{Cb} \cos \beta_b + F_{Cc} \cos \beta_c + 2F_{Cd} \cos \beta_d) \quad (24)$$

$$Z_0 = h - \rho \sin \theta_0 \quad (25)$$

ここに、 C_{peRn} および C_{peCn} は、それぞれ屋根部および円筒部の領域 ($n=a \sim d$) の平均外圧係数であり、また、 A_{SRn} と A_{SCn} は、それぞれ領域 n の屋根部と円筒部における表面積であり、(26) 式および(27)式で与えられる。

1) 球形屋根に関しては、

$$A_{SRn} = 2\rho^2 \int_{\theta_i}^{\theta_j} \cos \theta \cos^{-1} \left(\frac{\rho-f}{\rho \cos \theta} \right) d\theta \quad (26)$$

2) 円筒に関しては、

$$A_{SCn} = \frac{(\beta_j - \beta_i)}{\pi} \cdot r \cdot h \quad (27)$$

ここに、 f と ρ は屋根のライズと曲率半径、 r は円筒部の半径、 h は同高さであり、 i と j は、各領域の始端と終端で、 $i=0 \sim 4$ 、 $j=i+1$ と定める。また、ドーム屋根部ならびに円筒部の領域 $a \sim d$ の範囲を与える角度 θ_n と β_n は、(28) ~ (31) 式で与えられる。

$$\theta_n \text{ (rad)} = (\theta_i + \theta_{i+1})/2 \quad (28)$$

$$\theta_i = \cos^{-1} \left[\frac{\rho-x}{\rho} \right] \quad (29)$$

$$\beta_n \text{ (rad)} = (\beta_i + \beta_{i+1})/2 \quad (30)$$

$$\beta_i = \cos^{-1} \left[1 - \frac{x}{r} \right] \quad (31)$$

ここに、 $i=0 \sim 4$ で $x=0 \sim D$ とする。

4.2. 抗力係数および揚力係数の算定

風圧力に関する簡易算定法を推進する指標として、ライズ比 f/D と円筒部の高さ幅比 h/D を変化させ、(32) ~ (34) 式で定義した抗力係数 C_D 、揚力係数 C_{LR} および水平揚力係数 C_{LC} について算定し、Fig.10 に示した。

$$C_D = \frac{F_D}{A_P q_H} = \frac{F_{D,R} + F_{D,C}}{A_P q_H} \quad (32)$$

$$C_L = \frac{F_L}{A_f q_H} = \frac{F_{L,R}}{A_f q_H} = \frac{F_{L,R}}{\pi r^2 q_H} \quad (33)$$

$$C_{LC} = \frac{F_{LC}}{A_P q_H} \quad (34)$$

ここに、 A_P は球形ドームの見附面積、 A_f は床面積である。

なお、風力係数は表面風圧の積分で求めることが一般的である^[11]として、本論でも 4.1 節に示した風力評価は、基本的には同じ手法に基づくものである。

Fig.10 には、Maher による半球ドーム^[11] と本郷・吉田の円筒^[12]の結果も合わせて比較している。図の結果は、Maher の実験では基準速度圧はドーム頂部であり、条件は異なることから、 $C_D=0.237$ (◎印) と $C_L=-0.563$ (□印) とは大きく乖離している。また本郷・吉田の実験^[12]は、一様流でかつ $f/D=0$ であることから抗力係数に関しては大きく相違しているが、揚力係数では比較的近似している。このことから、比較対象の相違や精度に対し議論の余地はあるものの、風圧分布を区分に分割する風力算定方法として有効なもの判断した。

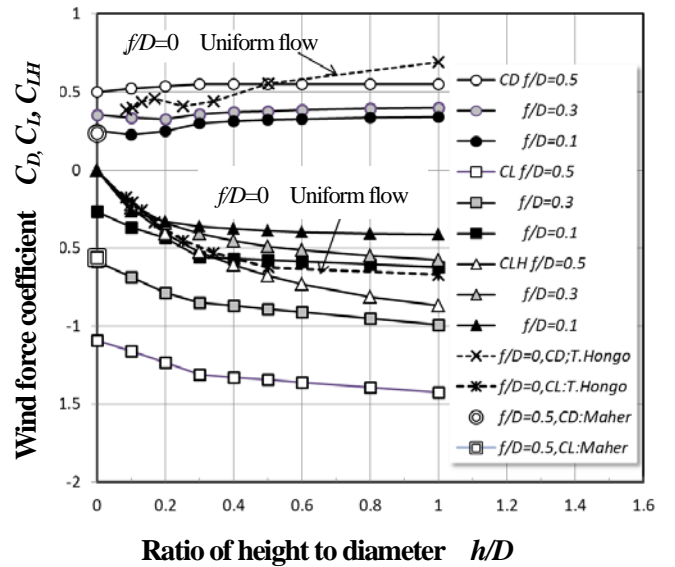


Fig.10 膜体の形状変化に対する風力係数試算

4.3. 必要内圧の算定

4.3.1 原形回復のための必要内圧

原形回復のための必要内圧 P_0 は、第 3.2 節で示した (10) ~ (12) 式に、第 4.1 節で設定した領域の風力を用いることにより、ライズ比 f/D と円筒部の高さ幅比 h/D の変化に対し算定したものを Fig.12 に示す。なお、抗力による必要内圧に関しては、Fig.11 を考慮し、内圧の膨張を考えると正圧を与える前面の風力と負圧を与える背面の風力とは異符号とした。

解析の結果は、 f/D および h/D の変化に対する必要内圧の図に、本郷・藤野の風洞実験^[4]ならびに日本建築センター基準^[5]の $h/D=0$ に対する値を示し比較している。

なお、これらの値は、基準速度圧をドーム屋根頂部としているため、下式により 1.18 倍を乗じ補正している。

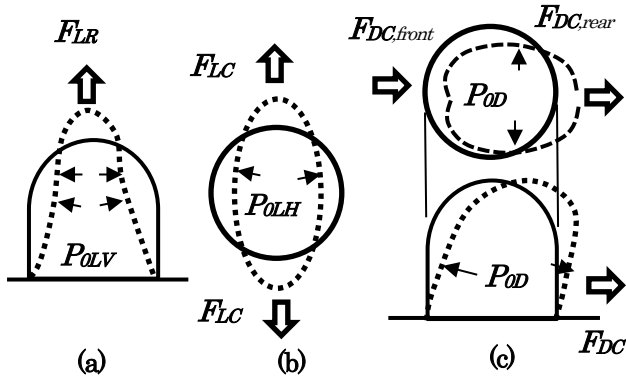


Fig.11 風力に対する復元回復に必要な内圧

$$q_T = \frac{V_T^2}{V_H^2} = \left(\frac{H_T}{H}\right)^{2 \times n} q_H ; n = \frac{1}{8} \quad (35)$$

ここに、 H_T はドーム頂部高さ、 H は基準高さ、そして n は風速の鉛直分布係数である。

図から、本郷・藤野の風洞実験結果とは比較的類似しているものの、建築センター規準(×印)は80%ほどの低い値を示した。この違いについては、本論では原形に回復されることを主眼としているが、規準値はある程度の変形を許す構造安全性を目途として設定されたことによるものと推察される。

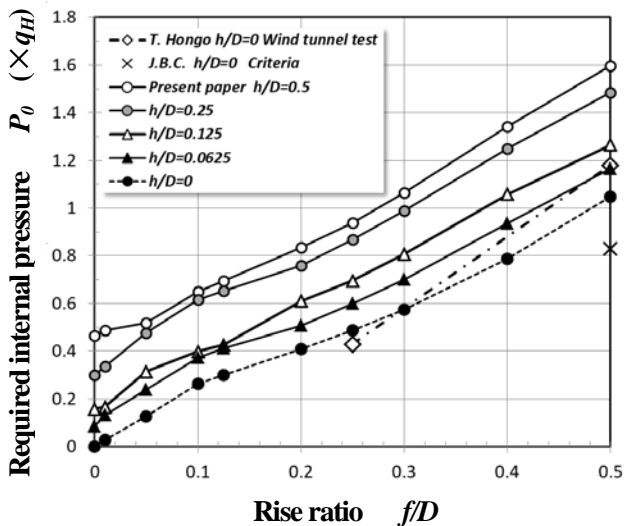


Fig.12 原形回復のための必要内圧

4.3.2 座屈を回避するための必要内圧

ある風速以上で、膜体背面の下部において座屈すると想定し座屈回避のための必要内圧 P_{ob} は、第 4.3 節の (12) 式と第 5.1 節の (20) 式を用い、ライズ比 f/D と円筒部の高さ幅比 h/D の変化に対し算定し、Fig.13 に示した。

図では、 P_{ob} が負となる形状もあるが、これは座屈が発生しないことを意味する。

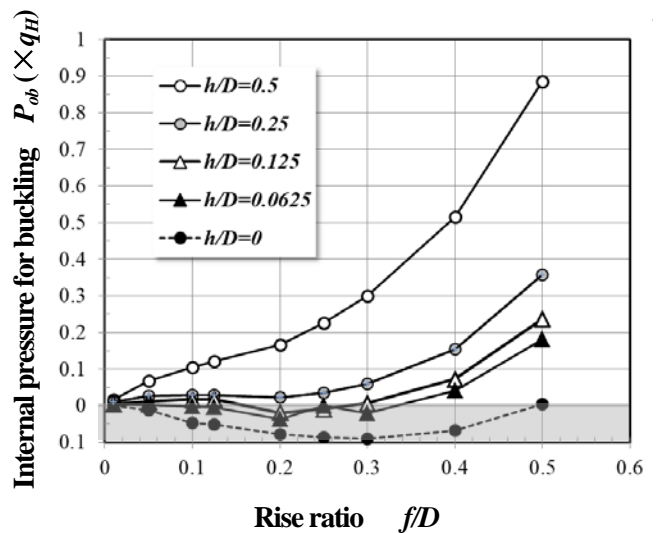


Fig.13 座屈限界に関する必要内圧

4.4 最大張力の算定

空気膜ドーム膜の最大張力は、第 3.4 節に示した (18) 式で与えられ、球形ドーム等の設計用として(19)式の外力影響係数 α について推奨値が提案されている。本論では、第 4.1 節の (21) 式 と (24) 式によって外力影響係数を、球形ドーム屋根のライズ比 f/D と円筒部の高さ幅比 h/D を変数の変化に対して算定し Fig.14 に示した。図には、B.G. Newman らの提案¹⁰と比較している。なお、Newman らの提案にある基準速度圧はドーム屋根頂部としていることから、第 4.2 節と同様(35)式による補正を行っている。なお、ここでは、 $n=1/4$ を用い、補正值 1.41 を乗じて図にプロットした。

結果は、ライズ比 $f/D=0.25$ を除き良好な対応にあると推察された。

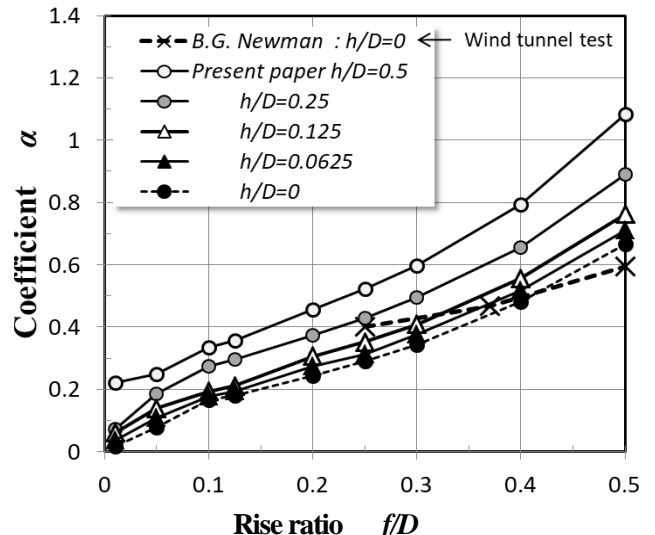


Fig.14 最大張力に関する外力影響係数の特性

5. 結論

風圧領域区分に準じた風力評価に基づく簡易算定法を提案し、ドーム屋根ライズ比ならびに円筒部の高さ幅比の変化に

対して必要内圧ならびに最大張力に関する特性を示した。

本算定法は、円筒部を持たない球形ドームに限定した既往の風洞実験値や関係規準値との比較に対しては比較的良好な傾向を示すことができた。続報では、本報で示した簡易算定法の妥当性について疑似風洞による実験や実測等との比較により検証を行っている。

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3月
- 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士論文、昭和44年2月
- 3) 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積形態に対する風洞実験一、膜構造研究論文集2011, No.25, 2012.3
- 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
- 5) ニューマチック構造設計基準・同解説（昭和45年度版）、(財)日本建築センター、空気膜構造協会、1970
- 6) W.W. Bird; Design Manual for Spherical Air Supported Radomes, Report No. UB-909-D-2, Cornel Aeronautical Laboratory, INC, 1956
- 7) 建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、2015
- 8) 本郷剛：球形屋根に作用する風圧力に関する実験的研究、東北大学博士学位論文、1995.1
- 9) F.J. Maher: WIND LOADS ON DOME-CYLINDER AND DOME-CONE SHAPES, ASCE, PP.79-95, 1966,
- 10) B.G. Newman, U. Ganguli, S. C. Shrivastava: Flow over Spherical inflated buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 17-3, pp.305-327, 1984
- 11) F.J. Maher: WIND LOAD ON BASIC DOME SHAPES, Journal of the STRUCTURAL DIVISION, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, June, PP. 219-228, 1965.6,
- 12) 本郷剛、吉田正邦：円形陸屋根に作用する風圧力に関する風洞実験、風工学シンポジウム、pp.158-166, 1984.12

Research on the Required Internal Pressure Control of Cylinder- shaped Pneumatic Structures with Spherical Roofs

Part 1 Derivation of the Simplified Calculation Formula

Eizo Maruta* 1
Masaya Kawabata *2
Takeshi Ibi * 3

Summary

In this study, a simplified calculation method is proposed for controlling the required internal pressure and determining the maximum tensile force in the axial direction of a cylindrical air membrane structure with a spherical dome roof, with the aim of ensuring structural safety against wind loads. The required internal pressure is derived from the equilibrium of tension based on the basic tension of internal pressure to restore deformations such as expansion and contraction of the membrane due to external wind forces, in addition to the initial internal pressure against the membrane weight and initial tension based on statics assumptions for a thin-film spherical dome shell, and the buckling limit of the lower membrane under wind pressure. Regarding the calculation, the external pressure coefficients for spherical roof structures are based on Recommendation for Load on Buildings of the Architectural Institute of Japan, and for the cylindrical part, external pressure distributions based on previous wind tunnel experiments are referenced. Additionally, the influence of variations in the rise ratio of the dome roof and the height-to-width ratio of the cylinder is considered.

*1 CEO, WIND & PHYSICS, LLC, Dr. Eng.

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

*3 General manager, Development Div. DAIKA Industrial Co. Ltd.