

## 1. 研究目的

膜構造物において設計用風圧係数の基準値等は半球形や円筒形に限定されている。また、設計用風圧係数は一様流下での風洞実験で求められたものが多く、本研究で対象としている楕円平面形のドーム形状に関する境界層乱流下での風圧分布及び風圧特性についての研究例は少ない。

そのため本研究ではライズ比の異なる楕円平面を持つ空気膜構造物を模擬した風圧模型を用いて風洞実験を行い、外圧係数及び外圧特性について調べ、既往の研究<sup>1)</sup>との比較及び設計用風圧係数の提案を試みた。



Photo.1 境界層風洞と実験状況

## 2. 風洞実験方法

風洞実験による外圧計測は、日本大学生産工学部所有のエッフェル型境界層風洞を用い、下式によって定義される外圧係数  $C_{pe}$  (平均値・正負の peak 値・rms 値) を求めた。

$$C_{pe} = P_e / q_H \quad \text{----- (1)}$$

$$q_H = \frac{1}{2} \rho V_H^2$$

ここに、 $H$ : ドーム頂部の高さ、 $q_H$ : 高さ  $H$  の速度圧、 $V_H$ : 高さ  $H$  の風速、 $\rho$ : 空気密度である。

それぞれの外圧係数は、実時間にして平均値は 10 分間相当、peak 値は 1 秒間相当の評価時間を想定し、縮尺率 1/250 に対応する時間 scale によって平均化している。また、計測結果は、すべて 5 波平均としている。

## 2.1 実験気流

Fig.1 に示される風洞気流は、縮尺 1/250 の地表面粗度区分IV<sup>2)</sup>に見合った自然風を再現したものであり、丸田の方法<sup>3)</sup>を用い風洞風上部にボルテッ

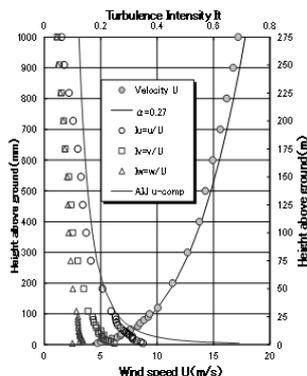


Fig.1 風速と乱れの強さの鉛直分布

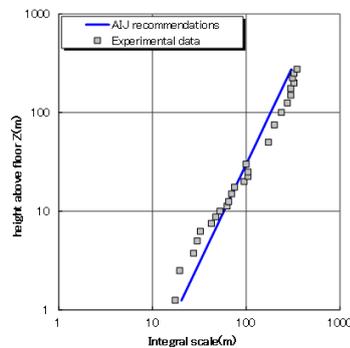


Fig.2 乱れのスケール

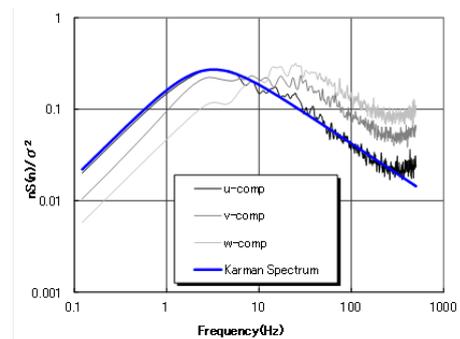


Fig.3 変動風速のパワースペクトル

クスジェネレータ、バリヤー、ラフネスブロックを配置し (Photo.1)、風速と乱れの強さの 3 成分に対する鉛直分布を示し、合わせて Fig.2 に乱れのスケールの鉛直分布、Fig.3 に高さ 4cm (実寸で 10m) での  $u, v, w$  成分の変動風速パワースペクトルを示した。いずれの結果に対しても日本建築学会荷重指針<sup>2)</sup>の指針値と比較し縮尺率 1/250 の再現性が確認されている。

## 2.2 実験風速および風向

本実験は、対象とする建築物が曲面をもつドームであることから Reynolds 数の影響、すなわち風速の依存性について検討した。風速は、風洞床上 4cm において 2.5、3、4、6、8m/s に変化させた。実験風向は  $0^\circ \sim 90^\circ$  を  $22.5^\circ$  ピッチで実験を行った。

## 2.3 データ整理

データのサンプルは、地表面粗度区分IV ( $\alpha = 0.27$ ) に対する地上 10m 相当の基本風速  $V_0 =$

The proposal of a wind pressure contour which intersects perpendicularly with the central line of a pneumatic structure  
- Elliptical plane -

Yuuki KATOH and Eizo MARUTA

40m/s から算定される設計風速は 27.8m/s について、実験風速との間で決まる風速 Scale と幾何学 Scale から時限的に決まる時間 Scale に従い、サンプリング間隔 1msec を決定した。

### 2.3 実験模型

実験模型は、表面積が最小曲面積となる石鹸膜の形状を参考にし、Fig.4 に示すような形状でライズ H=3cm、6cm、10cm（実寸では、 $L_x=75m$ 、 $L_y=50m$ 、ライズが H=7.5m、15m、25m）の3種類とし、それぞれ 193 点の測定孔を設けている。

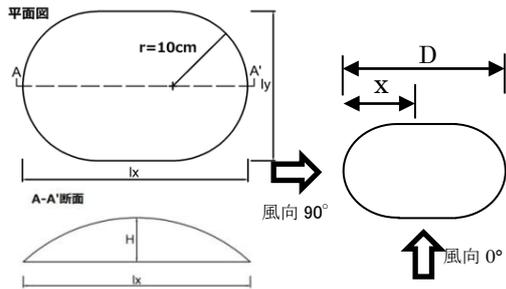


Fig.4 実験模型平面図及び断面図

## 3. 実験結果

### 3.1 風速依存性の検討

外圧係数に対する風速依存性について Fig.5 および Fig.6 にそれぞれ風向 0° と 90° における風向方向の模型中心線上の平均風圧係数を示し、ライズ変化ごとに比較検討を行った。

結果は、模型頂部や背面部にてわずかな差異が認められるものの、風速変化による依存性に大きく影響することはなかった。このことは、実験気流の乱れが零に近い一様流とは相違し、もともと強い乱れを伴う境界層乱流であることを考えると曲面といえども乱流剥離の状況にあり剥離流線の流形に与える影響が小さいものと推察される。

### 3.2 風圧係数分布の性状

Fig.7~Fig.9 には実験風速 8m/s の平均風圧係数分布を示す。なお、図の左側は風向 0° を右側は 90° の平均風圧係数分布である。

模型の精度および風向設定の微妙な不一致の関係から風圧係数分布に多少のゆがみや非対称性が見られるものの、風圧分布の等圧線を見るとドーム頂部を最大値とした風直交方向にほぼ平行な横縞の分布を呈していることがわかる。本報告には紙面の都合上記載していないが、最大・最小の Peak 風圧係数分布に関しても同様の結果を示している。

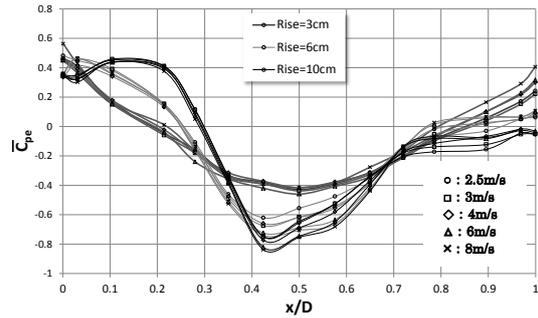


Fig.5 風向 0°\_風方向中心線上風圧係数

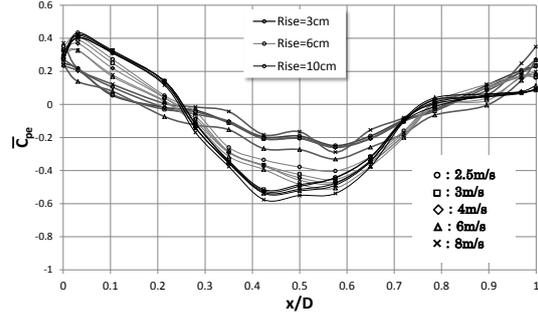
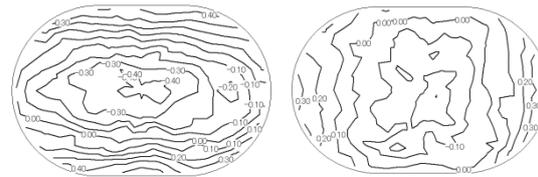
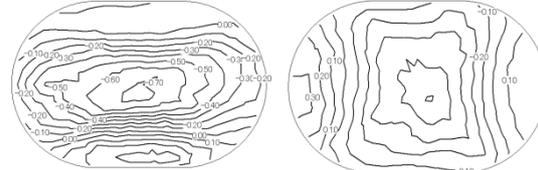


Fig.6 風向 90°\_風方向中心線上風圧係数



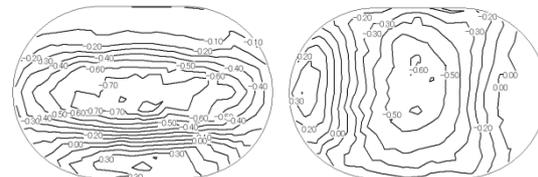
Max=0.56 Min=-0.48 Max=0.41 Min=-0.30

Fig.7 H=3cm\_0°,90°\_平均風圧係数分布



Max=0.50 Min=-0.74 Max=0.33 Min=-0.51

Fig.8 H=6cm\_0°,90°\_平均風圧係数分布



Max=0.44 Min=-0.85 Max=0.40 Min=-0.62

Fig.9 H=10cm\_0°,90°\_平均風圧係数分布

### 3.3 楕円ドームの外圧係数提案と検討

前述されたように風圧係数分布が左右対称・中心線を最大としたドーム形状の建築物に対するほぼ横縞な分布であることから、設計用風圧係数については、N.J.Cook 4) の球形ドームの場合と

同じ手法により Fig.10 に示すような  $s/S$ 、 $H/D$  を変数とした位置の風圧係数分布を  $x$  軸と  $y$  軸をそれぞれ  $s/S$ 、 $H/D$  に対応させプロットすることによって表した。

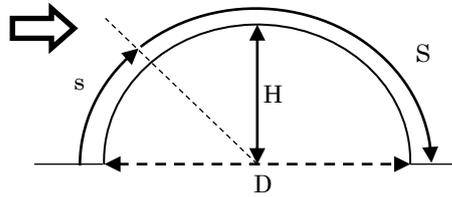


Fig.10  $s/S$ 、 $H/D$  の決定方法

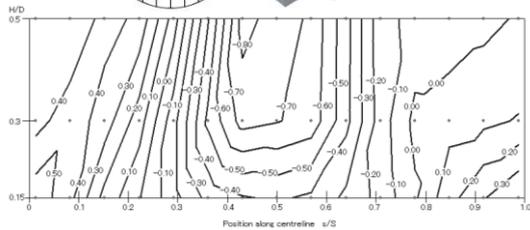
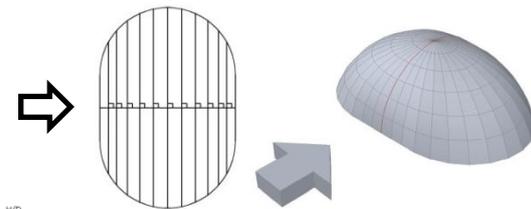


Fig.11  $0^\circ$ \_平均風圧係数分布

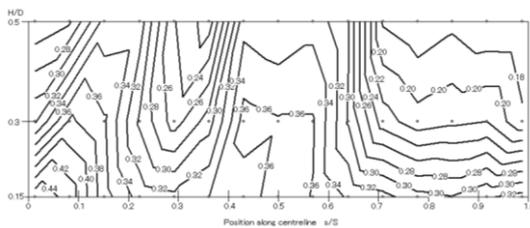


Fig.12  $0^\circ$ \_変動風圧係数分布

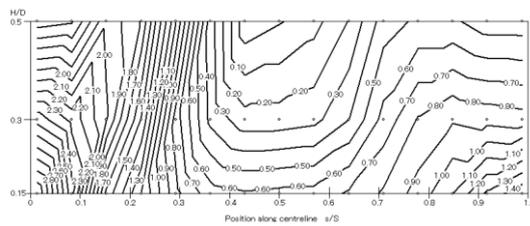


Fig.13  $0^\circ$ \_最大風圧係数分布

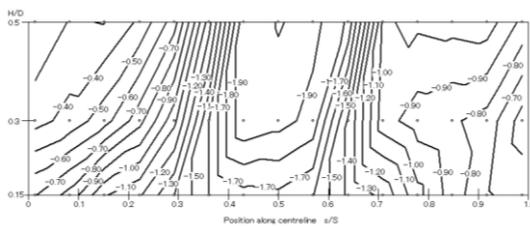


Fig.14  $0^\circ$ \_最小風圧係数分布

なお、 $s$ 、 $S$ 、 $H$ 、 $D$  はそれぞれ曲率半径に対する測定孔までの弧の長さ、曲率半径に対する円弧長さ、模型ライズ、風方向模型長さである。

Fig.11~18 に  $0^\circ$  と  $90^\circ$  の平均・変動・最大・最小の Peak 風圧係数分布を示す。Peak 風圧係数分布は平均風圧係数分布とほぼ同様の形状を示している。

風圧性状は風上部及び風下部に大きな範囲で正の圧力分布が見られた。また、半球形に比べ風向によって風方向や風直交方向の模型長さが長いことから模型両側や頂部からの剥離による渦現象の差異などを今後検討する必要がある。

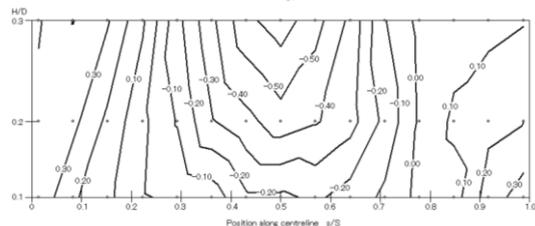
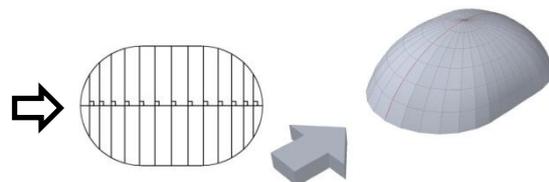


Fig.15  $90^\circ$ \_平均風圧係数分布

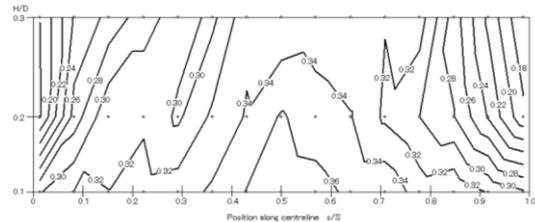


Fig.16  $f=90^\circ$ \_変動風圧係数分布

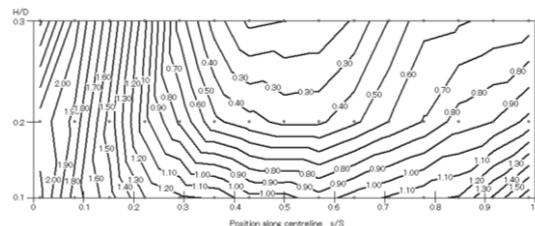


Fig.17  $90^\circ$ \_最大風圧係数分布

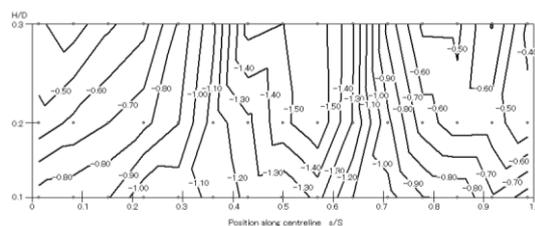


Fig.18  $90^\circ$ \_最小風圧係数分布

### 3.4 変動風圧のパワースペクトル

模型に作用する風圧の変動特性を調べるため、模型中心線上背面部の測定孔ごとの比較と風上の測定孔と速度圧のパワースペクトルの比較を行った。

x 軸を周波数 Hz、y 軸を  $nSn/\sigma^2$  とした無次元パワースペクトルを求め比較した。Fig.19 と Fig.20 に H=10cm 模型の風向  $0^\circ$  と  $90^\circ$ 、かつ実験風速 8m/s での変動風圧のパワースペクトルを示す。

各パワースペクトルを比較すると模型背面部では頂部付近とそれ以外の箇所ではピーク値が大きく異なる。また風上部では速度圧のパワースペクトルとピーク値に差異があるがほぼ同様の形であった。

変動風圧のパワースペクトルは風上部では明確なカルマン渦現象による卓越した周波数は確認できなかった。このことは、すなわち 3.1 節で記述した乱流剥離の状態にあり、変動風圧は入射気流と剥離流等による複雑な変動の性状になっているものと推察された。今後は、一様流下での風圧実験を行いその特性を調べることでこれらの性状の裏付けのための検討が必要であると考えられる。

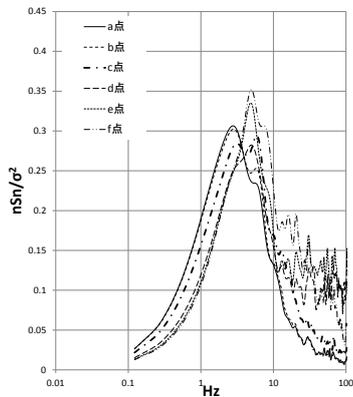


Fig.19  $0^\circ$ 背面部変動風圧のパワースペクトル

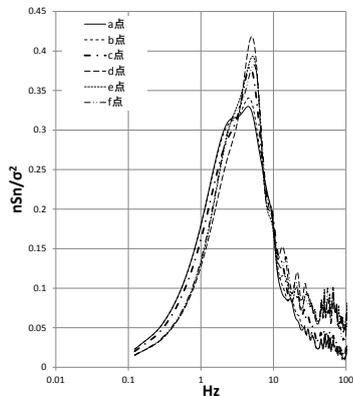


Fig.20  $90^\circ$ 背面部変動風圧のパワースペクトル

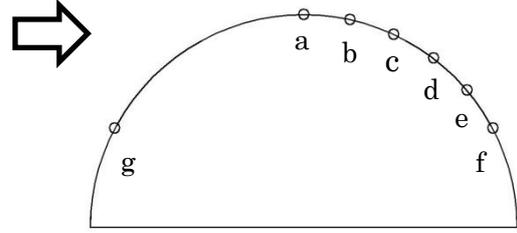


Fig.21 変動風圧のパワースペクトル測定孔

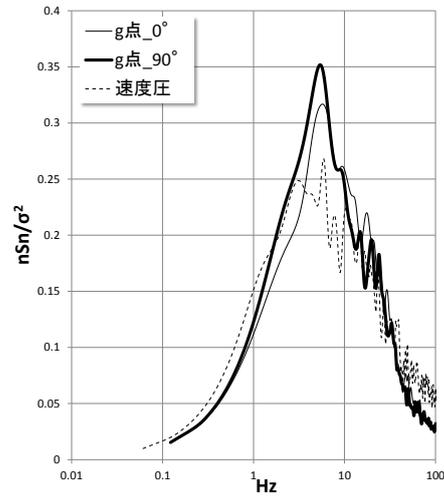


Fig.22  $0^\circ$ 風上及び風速のパワースペクトル

## 4. まとめ

風圧係数分布が風方向中心線を最大とする横楕円な分布であることからライズ比を考慮した風方向中心上の設計用外圧係数コンター分布を提案することができた。

本実験は剛体模型を用いた外圧性状について検討しているが、今後、さらに膜体の変形時における風圧変動特性について検討し、膜破壊に至る安全性について検証を試みる予定である。

## 5. 参考文献

- 1) E.MARUTA・K.FUJII・T.HONGO, Design Value Suggestions for Wind Pressure on Basic Dome Shapes, Journal of Wind Engineering, October 1988
- 2) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 1993年, P343
- 3) 丸田榮藏・亀井勇, 建築物周辺気流に関する風洞実験方法(第III報 大気乱流境界層のSimulation) 日本大学生産工学部報告 A, 昭和 56年
- 4) NJCook, The designer's guide to wind loading of building structures Part2, Building Research Establishment, 1990, P416, 417