

球形ドームに作用する風圧特性と屋内気流性状に関する研究

A Study on Wind Pressures and Indoor Airflow for Dome Structures

野田 博 HIROSHI NODA

長谷川 功 KO HASEGAWA

プラント事業部 寒川 慎也 SHINYA SANGAWA

作田美知子 MICHIKO SAKUTA

模型表面に粗度を取り付けることにより風洞実験時の見かけ上のレイノルズ数を高くして球形ドーム構造物の風圧特性を検討した。この風洞実験結果を通気口流入条件に用い直径 82m の球形ドーム構造物内部の気流性状を数値流体計算により検討した。風洞実験の結果、表面粗度により風圧分布が異なった。数値流体計算による球形ドーム構造物内部の気流性状検討では、中央部では風速は低い、壁面近傍や底面近傍においてはある程度風速が認められ、換気性能が十分であることが確認された。

キーワード：球形ドーム構造物、風圧特性、風洞実験、レイノルズ数、表面粗度、室内換気特性、数値流体計算、空気齢

In order to confirm the wind pressure distribution of dome structures, a series of wind tunnel experiments, which employed the raised quasi-Reynolds number by attaching roughness onto the model surface, were conducted. Following these experiments, the indoor airflows within dome structures were confirmed using Computational Fluid Dynamics (CFD), applying experimental results to the inflow conditions of vent holes. The following points were clarified from the results. The pressure distributions are different according to presence or absence of surface roughness. Reynolds number significantly influences the experimental results of the surface-pressures. The velocity of airflow at the center of the dome is comparatively low, but the arrangements of vents are sufficient for ventilation of the entire inside air mass.

Key Words: Dome structure, Pressure, Wind tunnel experiment, Reynolds number, Surface roughness, Indoor airflow, Computational Fluid Dynamics, Life time of air

1. はじめに

球形ドームに作用する風圧力はこれまで多くの風洞実験により考察されている^{1),2)}。しかし、球形ドームのような曲面を有する構造物ではレイノルズ数(流体の慣性力と粘性力の比)によって作用する風圧分布特性が異なり、通常の建物を対象とした風洞実験では実スケールに比べ1~3オーダー小さなレイノルズ数で実験しているため、風洞実験では実スケール現象を再現しているとは言い難い。本報では対象とする球形ドーム屋根を持つ円筒構造物の実験模型の表面に粗度を付けることにより実物と模型でのレイノルズ数の不一致を緩和させて壁面ならびに屋根面の風圧実験を行った。この実験結果を用いて球形ドーム構造物の通気口境界条件を定め数値流体計

算(Computational Fluid Dynamics, 以下CFDという)により球形ドーム構造物内部の換気性状を検討した。ここでは風洞実験結果と換気性状の検討結果について報告する。

2. 対象とした球形ドーム構造物

対象とした構造物は直径82m、軒高24.5mの円筒形構造物にライズ比0.18(h/L:h,Lは図-1参照)の球形ドーム屋根を取り付けた構造物である。内部空気の循環を行うための通気口はドーム屋根頂部と幅約0.4mの軒下全周にガラリ状に設けられている。対象とした球形ドーム構造物の形状を図-1に示す。

3. 風洞実験概要

(1) 実験方法

風洞実験は当社技術研究所所有の吹き出し式境界層風洞装置で実施した。実験気流は日本建築学会編「建築物荷重指針・同解説」(93年改訂版)³⁾の地表面粗度区分IIを想定したべき指数 $\alpha=0.15$ の境界層乱流を用いた。実験に用いた模型は、対象とする球形ドーム構造物を縮尺1/200で再現した。風圧測定点はドーム屋根面に61点、軒下面に20点、壁面に52点設けた。これらの測定点は屋根面、軒下面、壁面の一部に配置し実験模型を回転させることにより対象構造物全体の風圧分布を測定した。

(2) レイノルズ数効果の緩和方法

対象としている球形ドーム構造物のような曲面を有する構造物の場合、以下に示すレイノルズ数により作用する風圧特性が異なる。

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1)$$

ここで、 Re :レイノルズ数、 U :代表風速 [m/s]、 D :代表幅 [m]、 ν :流体の動粘性係数 [m²/s]

対象としている球形ドーム構造物の換気性状を検討する場合の実スケールと模型スケールのレイノルズ数は以下に示すとおり、1オーダー異なる。ここで、代表幅はタンク直径、代表風速は実スケールの場合換気量計算時の有効風速(0.5m/s)、模型スケールでは屋根頂部高さにおける実験風速(14m/s)を用いた。

実スケールのレイノルズ数

$$[Re]_{Full} = \left[\frac{U \cdot D}{\nu} \right]_{Full} = \frac{0.5 \times 82}{1.5 \times 10^{-5}} = 2.7 \times 10^6 \quad (2)$$

表-1 表面粗度に用いたメッシュ

材質	ポリエチレン
間隔	4.31mm
線径	0.77mm
開孔率	67%
メッシュ	5/inch

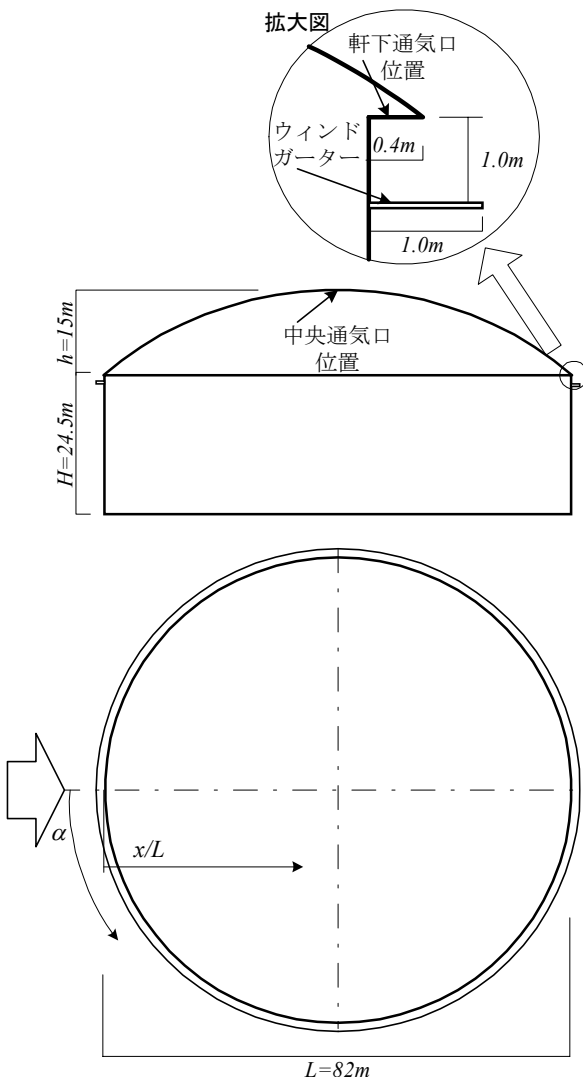


図-1 対象とする球形ドーム構造物

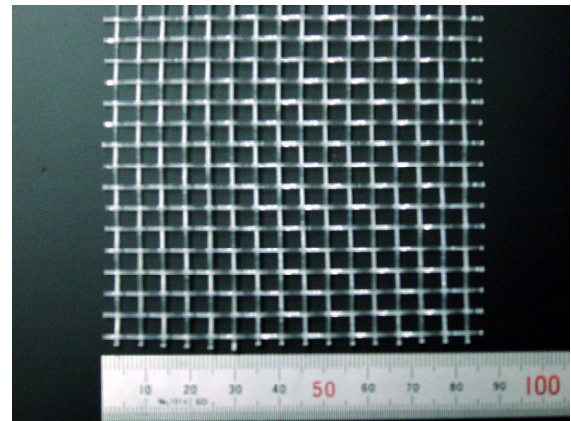


写真-1 表面粗度に用いたメッシュ

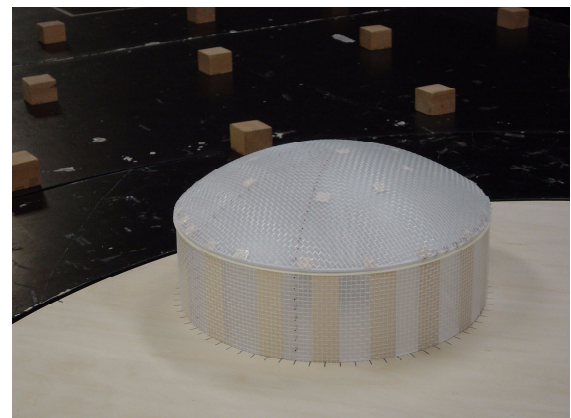


写真-2 実験模型

模型スケールのレイノルズ数

$$[Re]_{Model} = \left[\frac{U \cdot D}{\nu} \right]_{Model} = \frac{14 \times 82 / 200}{1.5 \times 10^{-5}} = 3.8 \times 10^5 \quad (3)$$

実スケールによる現象を模型スケールで再現するためには、このレイノルズ数を一致させるか、あるいは何らかの方法でレイノルズ数不一致の緩和を行う必要がある。本報では、Brust⁴⁾や丸川ら⁵⁾が円柱の実験で実施したように模型表面に粗度(以下、表面粗度という)をつけてレイノルズ数不一致の緩和を行った。模型の表面粗度には写真-1、表-1に示すポリエチレン製メッシュを用いた。Brust⁴⁾や丸川ら⁵⁾によれば、表面粗度の大きさや密度によってその効果は異なる。本実験では、粗度の平均密度が10~30%のときに境界層が発達しやすいという大熊ら⁶⁾の実験結果を参照し、閉塞率 33%(開孔率 67%)で、比較的線径の大きなビニールメッシュを表面粗度として用いた。表面粗度を取付けた実験模型を写

真-2に示す。

(3) 屋根面ならびに軒下面の風圧係数分布

a) 風速依存性

模型の表面粗度での屋根面中央断面の平均風圧係数分布を図-2に示す。風速は屋根頂部高さで8m/sから16m/sまで2m/s間隔で変化させた。表面粗度がない場合、屋根面の平均風圧係数は風速を変化させてもほとんど変化しない。一方、模型表面に粗度がある場合には風速により平均風圧係数分布の差異が認められ、風上側では風速による差異は小さいが負圧のピーク(x/L=0.45)以降風下側では差異が大きい。ただし、風速12m/s以上になると平均風圧係数分布は風速による差異はなくなり風速依存性がなくなる。

b) 表面粗度の効果

[屋根面の風圧係数分布]

表面粗度による効果を確認するため、表面粗度がある

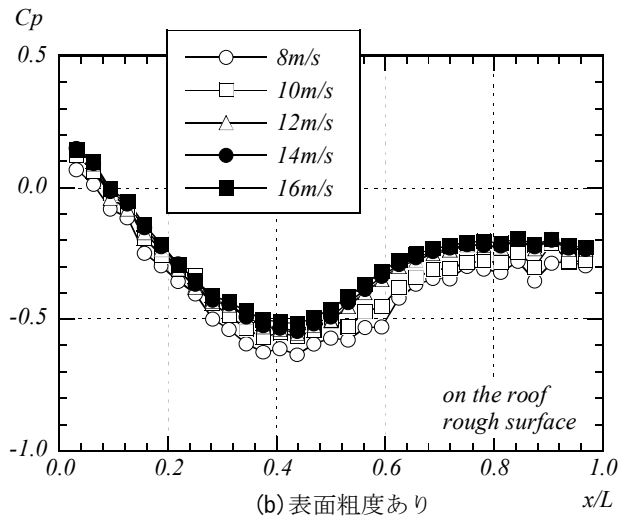
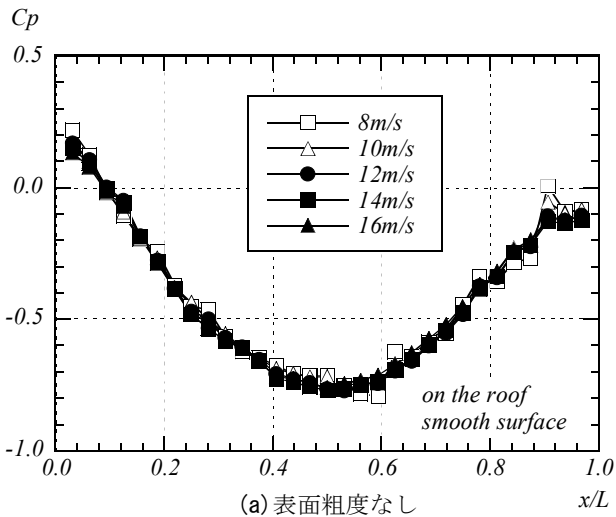


図-2 屋根面中央部における平均風圧係数の風速依存性

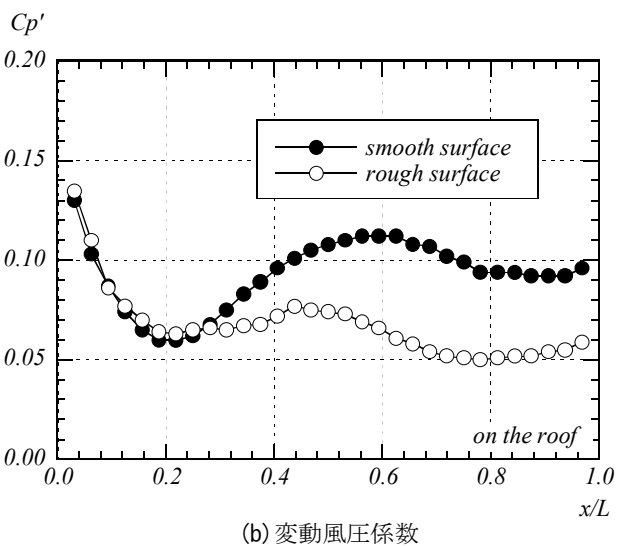
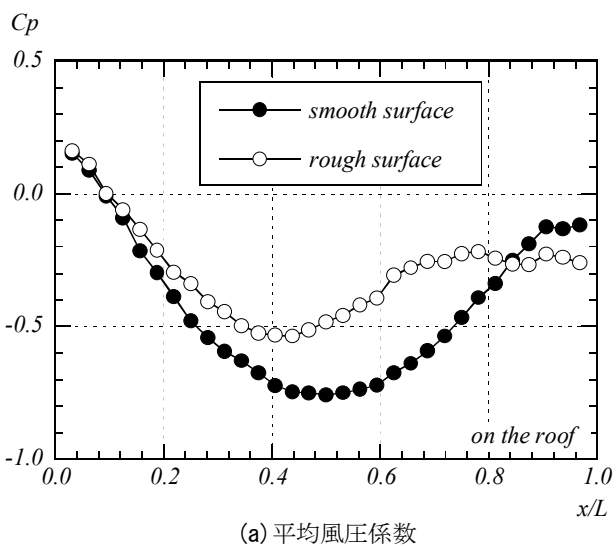


図-3 表面粗度の有無による屋根面風圧係数の差異

場合とない場合の屋根面中央断面の平均風圧係数分布、変動風圧係数分布を図-3に示す。また屋根面全体の平均風圧係数コンターを図-4に、変動風圧係数コンターを図-5にそれぞれ示す。風速は表面粗度ありの場合に風速依存性がなくなる14m/s(屋根頂部高さ)である。

屋根面の風圧係数分布は平均風圧係数、変動風圧係数とも表面粗度によりその分布形状が大きく異なる。平均風圧係数ならびに変動風圧係数ともに風上側($x/L < 0.1 \sim 0.2$)では差異はほとんどない。しかし、表面粗度がない場合には平均風圧係数は屋根中央部付近で負圧のピークを持つが表面粗度をつけることにより負圧のピークは風上側に移動し、かつ負圧のピークの値も小さくなる。変動風圧係数も $x/L=0.2$ 以降風下側では表面粗度による差異が現れ、 $x/L < 0.2$ の値は表面粗度をつけることにより小さくなっている。また表面粗度がない場合には風下側端部付近で局部的に大きな値となるが、表面粗度がある場合には局部的に大きな値はない。

表面粗度をつけることにより平均風圧係数と変動風圧係数のピークが風上側に移動しピーク値が減少した原因として、表面粗度の影響により風上端部からの剥離流の再付着が促進されたことと考えられ、この現象はレイノルズ数が高くなった場合の現象と類似している。すなわち、表面粗度を取り付けることにより見かけ上レイノルズ数が高くなっていることが認められた。

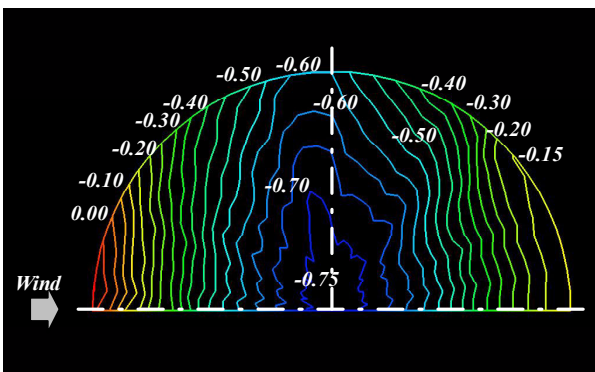
[軒下面の風圧係数分布]

表面粗度無有での軒下面の平均風圧係数分布と変動風圧係数分布を図-6に示す。図中には軒下面から0.01H下がった壁面の風圧係数も付記する。軒下面の平均風圧係数、変動風圧係数は屋根面の性状と若干異なり、表面粗度をつけることにより全周にわたって変化する。ただし、平均風圧係数の負圧のピークが風上側に移動することや風下側の変動風圧係数が減少するといった性状は屋根面と同じである。軒下面から0.01H下がった壁面の平均風圧係数ならびに変動風圧係数はいずれも軒下面のそれらと概ね同じ値となっており、軒下面から0.01H下がった壁面付近では軒下と同じ圧力場になっていることが分かる。

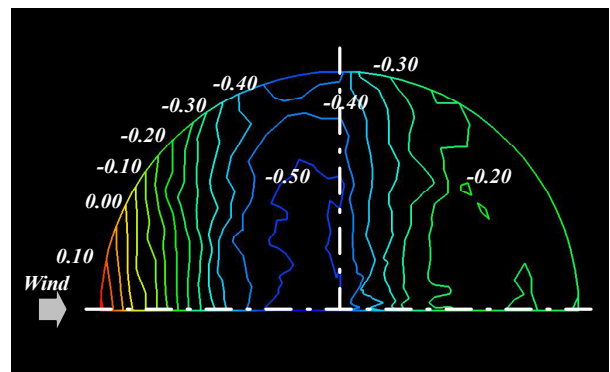
[壁面の風圧係数分布]

表面粗度の有無による壁面の平均風圧係数分布と変動風圧係数分布を図-7に示す。壁面上部(0.1H)と壁面中央部(0.5H)では平均風圧係数ならびに変動風圧係数ともに概ね同じ性状となっている。ただし、表面粗度の有無に係わらず図-6に示す軒下面や壁面頂部付近(0.01H)での風圧分布とは異なっている。

表面粗度の有無では壁面の平均風圧係数、変動風圧係数ともに分布形状が異なる。平均風圧係数分布は表面粗度をつけることにより屋根面同様負圧のピークが風上側に移動しかつピーク値も小さくなる。ただし、後流側で

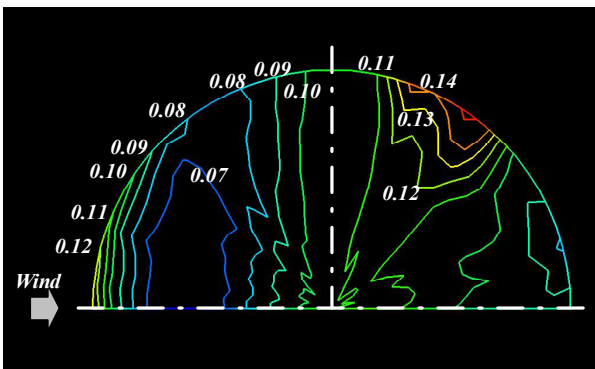


(a) 表面粗度なし

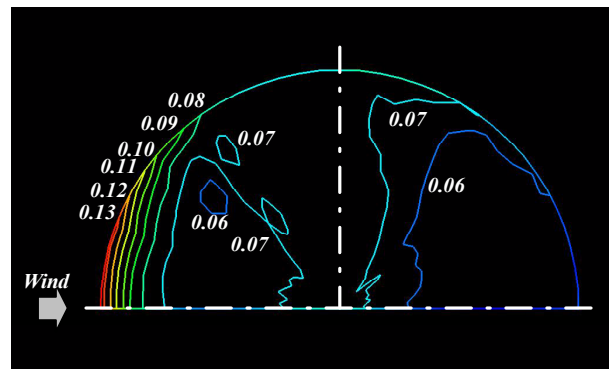


(b) 表面粗度あり

図-4 屋根面の平均風圧係数コンタ(表面粗度の有無による差異)



(a) 表面粗度なし



(b) 表面粗度あり

図-5 屋根面の変動風圧係数コンタ(表面粗度の有無による差異)

負圧が一定となる場所 (表面粗度なしの場合 $\alpha < 135^\circ$, 表面粗度ありの場合 $\alpha < 110^\circ$) での値は表面粗度ありの場合の方が大きい負圧となる。

表面粗度がない場合の変動風圧係数は $\alpha = 120^\circ$ 付近でピークを持ちこのピークは屋根面にも現れているが (図-5(a) 風下側端部付近の局所的な大きな値) , 表面粗度がある場合にはそのピークがなくなる。

(4) 実験結果のまとめ

表面粗度なしに比べ表面粗度ありの場合、屋根面ならびに壁面の再付着点が風上側に移動する。この場合平均風圧係数分布のピーク負圧は小さくなるが、風下側の負圧が一定となる部位では逆に大きくなる。2次元円柱の場合、レイノルズ数が超臨界域 ($3.8 \times 10^5 < Re < 8 \times 10^6$) から極超臨界域 ($Re > 8 \times 10^6$) へ遷移すると流れの剥離点が風上側に移動し、かつ後流側の負圧が大きくなる⁷⁾。本実験で表面粗度により見かけ上レイノルズ数を大きくし

た現象と類似している。ただし、この現象は2次元円柱の場合であり、本報で対象としている円形ドーム構造物にそのまま当てはめられるものではなく、本実験で実スケールの現象を正確に再現しているかどうかは明確でない。しかしながら、表面粗度ありの場合見かけ上レイノルズ数が大きくなっていること、表面粗度ありの場合のほうが軒下面の平均風圧係数分布の変化が小さく、換気性状を検討する場合に不利であることから、換気性状を検討するときの換気口境界条件設定には表面粗度ありの実験データを用いることとした。

4. CFDによる球形ドーム構造物屋内の気流性状

(1) 計算方法

本報では、市販の数値流体計算ソフト「Stream V5.0」(ソフトウェアクレイドル)を用いて球形ドーム構造物

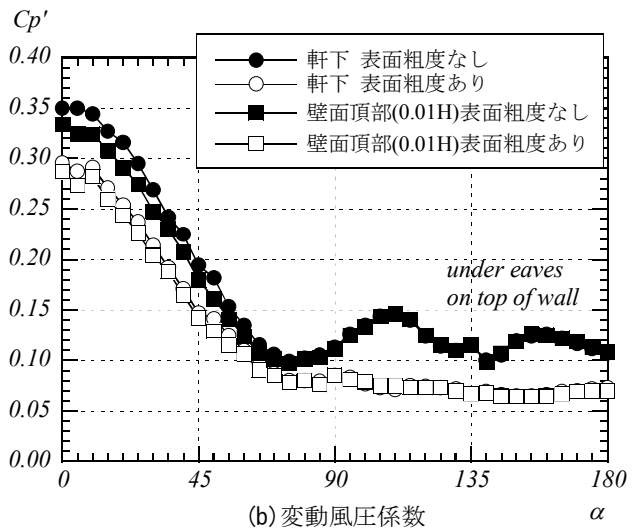
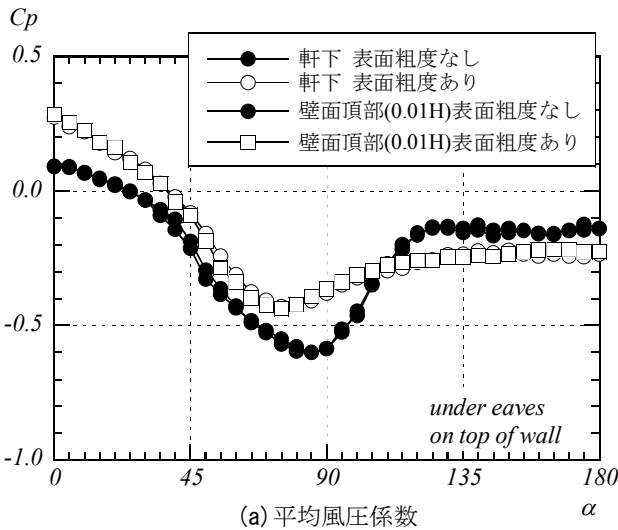


図-6 表面粗度の有無による軒下面風圧係数の差異

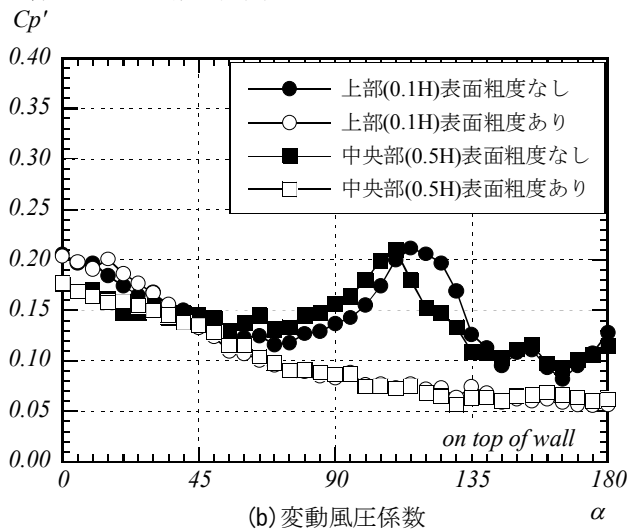
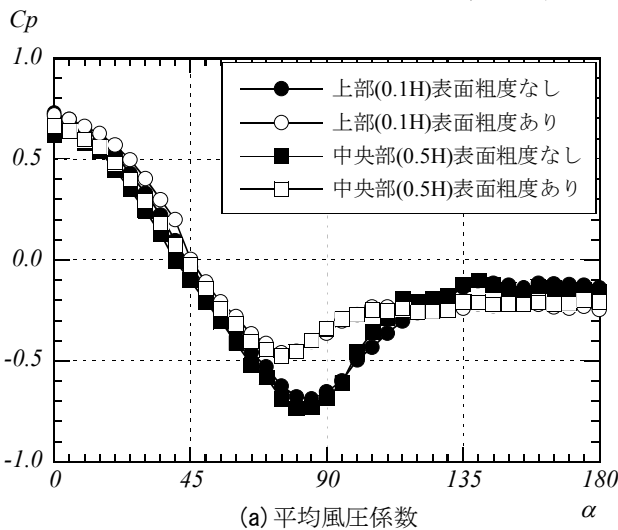


図-7 表面粗度の有無による壁面風圧係数の差異

内部の気流計算を行った。乱流モデルは Kato-Launder の修正 k-ε モデルを用い、計算結果が時間平均流れ場となる定常解析とした。計算方法概要を表-2に、計算メッシュ状況を図-8にそれぞれ示す。

各通気口の流入流出境界条件は、風洞実験結果に基づ

表-2 計算条件

空間差分	移流項 3次風上(QUICK) その他 2次中心
圧力修正法	MICCG法
乱流モデル	改良k-εモデル(Kato&Launder)
計算領域	$x \times y \times z = 82m \times 82m \times 40m$
計算格子数	$Nx \times Ny \times Nz = 82 \times 82 \times 55$
最小格子幅	$dx=1m, dy=1m, dz=0.5m$
計算初期条件	$u=0, v=0, w=0, p=0,$ $k=10^{-10}, e=10^{-10}$

表-3 各通気口に設定した流入流出風速

角度	0	5	10	15	20	25	30	35	40
風速	0.35	0.34	0.33	0.32	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23
角度	45	50	55	60	65	70	75	80	85
風速	0.19	0.13	-0.06	-0.14	-0.19	-0.21	-0.22	-0.22	-0.21
角度	90	95	100	105	110	115	120	125	130
風速	-0.19	-0.17	-0.15	-0.15	-0.13	-0.12	-0.10	-0.08	-0.05
角度	135	140	145	150	155	160	165	170	175
風速	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.04	-0.06	-0.04	-0.06	-0.06
角度	180								
風速	-0.04	屋根頂部通気口:-0.252m/s 風速単位 :m/s							

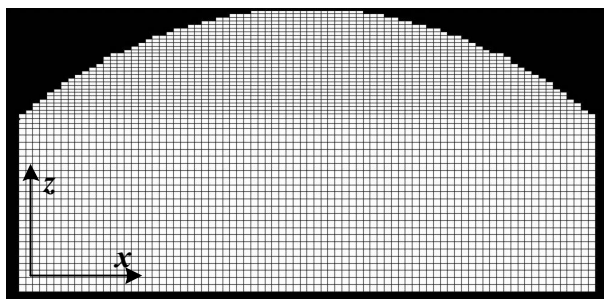
づき設定した。すなわち、各通気口面積、通気量ならびに流量係数から式(4)により求めた各通気口の風速を設定した。ここで、内圧係数 $C_{p_{in}}$ は流入量と流出量が等しいという仮定から -0.23 と設定した。各通気口に設定した流入流出風速を表-3に示す。

$$U_i = Q_i / (\alpha A_i) \tag{4}$$

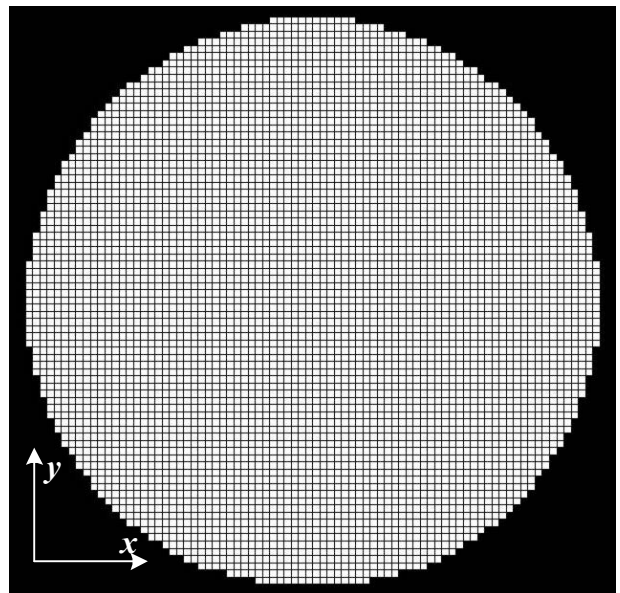
$$Q_i = 4\alpha A_i \sqrt{|C_{p_i} - C_{p_{in}}|} q_{st} \times 3600 \tag{5}$$

U_i : 通気口 i の風速 (正の値を流入, 負の値を流出とする), Q_i : 通気口 i の通気量, α : 流量係数 (=0.7), A_i : 通気口 i の面積, C_{p_i} : 通気口 i の平均風圧係数, $C_{p_{in}}$: 内圧係数, q_{st} : 有効風速時 (0.5m/s) の速度圧

屋根頂部の通気口に設定した流出風速の風向は鉛直方向向上向きとし、軒下面通気口における流入流出風速の風向は、水平方向(x-y面)については各部位から中央部

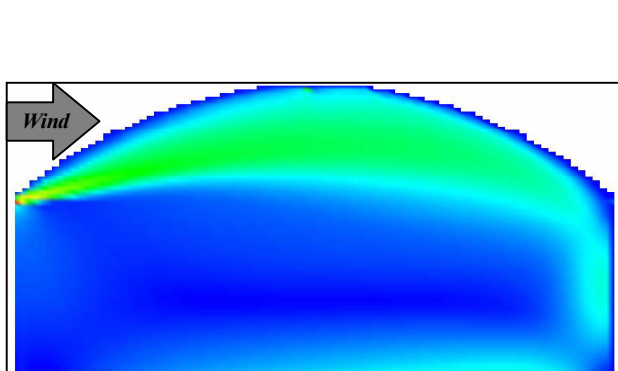


(a) x-z 中央断面

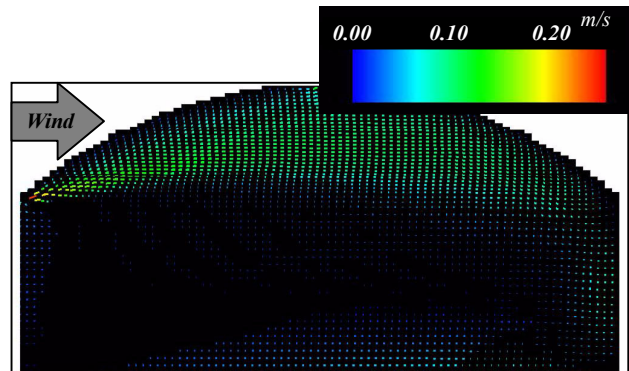


(b) x-y 断面

図-8 計算格子の状況



(a) 風速コンター



(b) 風速ベクトル

図-9 x-z断面の平均風速分布

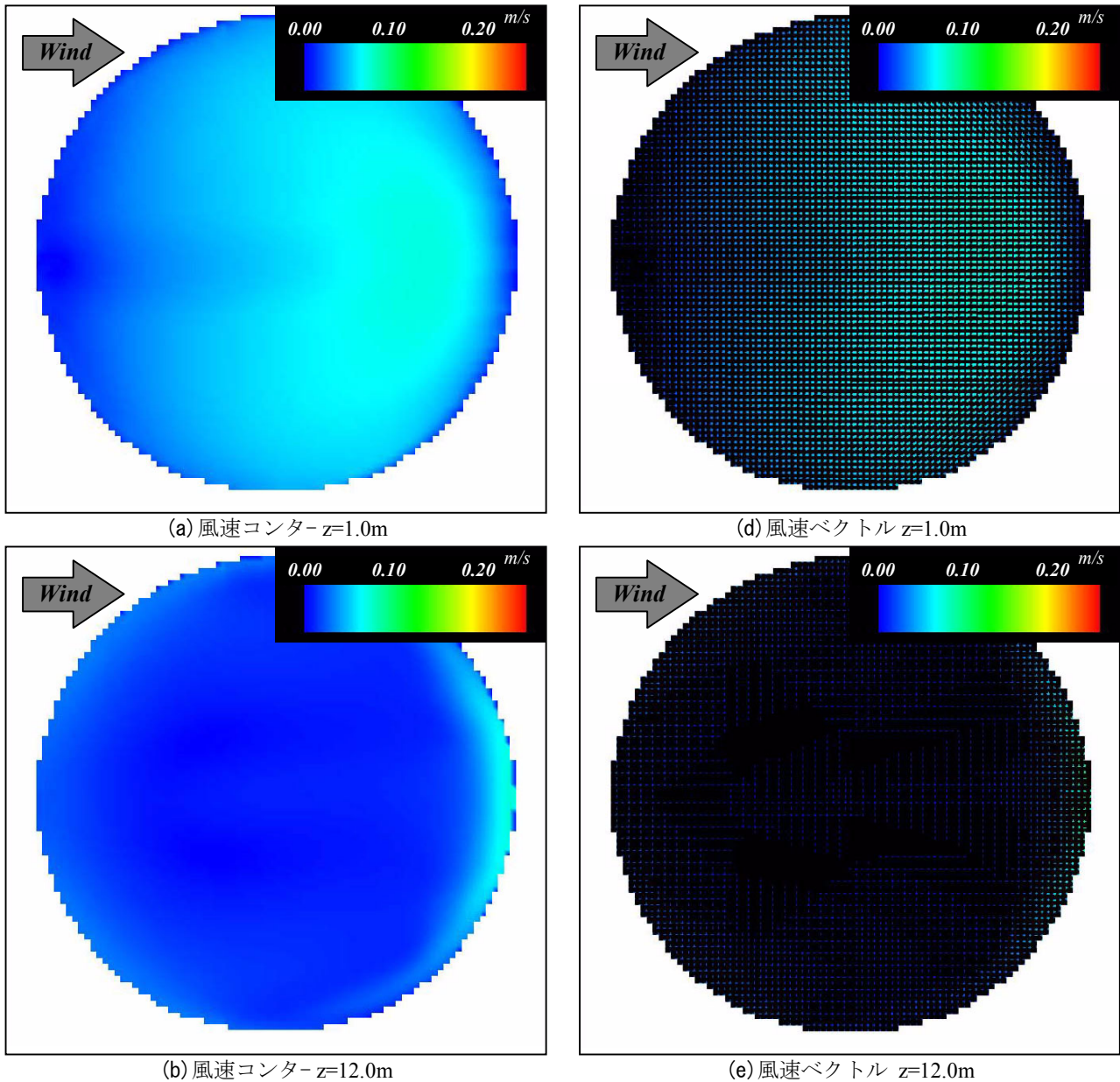


図-10 各高さにおけるx-y断面の平均風速分布

へ、鉛直方向(x-z面)についてはドーム屋根に沿うように屋根最下部の勾配(39°)とした。

(2) 計算結果

a) 平均風速分布

$x-z$ 断面中央部の平均風速分布を図-9に $z=1\text{m}$, 12m (球形ドーム構造物中央高さ), 24m (球形ドーム構造物軒高)における $x-y$ 断面の平均風速分布を図-10にそれぞれ示す。これらの図から次のことが言える。風上側特別通気口から流入した外部空気は屋根を沿うようにして上空に流れる。その後風下側球形ドーム構造物壁面まで到達し、壁面を沿って底面に移動する。さらに底面では上部とは逆向きすなわち風上への流れが生じている。このように球形ドーム構造物内の気流は中央部付近では

風速が弱くなるが上部あるいは壁面近傍は比較的風速が高く球形ドーム構造物内部全体的な流れが存在している。

b) 空気齢

球形ドーム構造物内の空気齢⁸⁾を図-11に示す。空気齢とは吸気口から新鮮空気が各部位に到達する平均時間を示し、数値が小さいほど新鮮空気の到達時間が短く、その部位で発生した物質は早く拡散することを表す。図-11に示す通り中央部では空気齢は大きいですが、壁面あるいは底面は比較的小さく球形ドーム構造物内部では中央部より壁面や底面近傍での拡散が大きい。また、空気齢が最も大きなところでも約22時間となり、24時間以内には球形ドーム構造物内部全体に新鮮空気が到達することが確認できる。

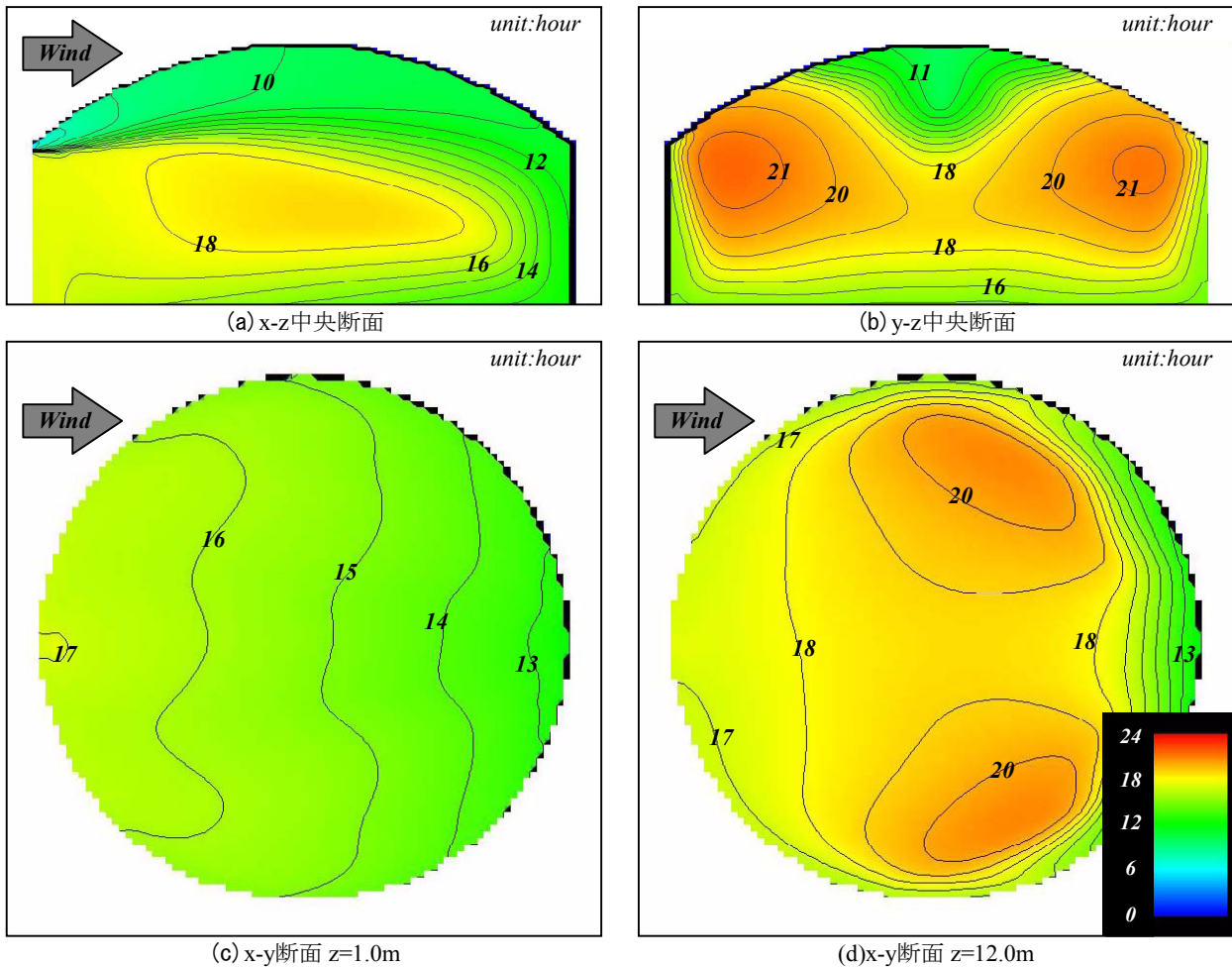


図-11 球形ドーム構造物内部の空気齢

5. おわりに

本報では、模型表面に粗度を取り付けることにより風洞実験時の見かけ上のレイノルズ数を高くして球形ドーム構造物の風圧特性を検討した。実験の結果、表面粗度を付けて見かけ上レイノルズ数を高くすると表面粗度がない場合とは異なる風圧分布となった。またこの風洞実験結果を通気口境界条件に用いた直径82mの球形ドーム構造物内部の気流性状を数値流体計算により検討した。検討の結果、球形ドーム構造物内部の気流性状は、内部中央部は風速は弱い、壁面近傍や底面近傍においてはある程度風速が認められる。また空気齢を計算した結果、球形ドーム構造物内部では最も遅い部位においても新鮮空気が24時間以内に到達することが確認された。

参考文献

1) 本郷剛, 鈴木雅靖, 土谷学: 球形屋根に作用する風圧力に関する実験的研究—その1. 平均風圧に及ぼす気流勾配および乱れ強さの影響—, 日本風工学会

誌, No.62, pp.23-33, 1995.7

- 2) 野口満美, 植松康: 球形ドームに作用する変動風圧の統計的特性に関する研究, 日本建築学科大会学術講演梗概集, B-1, 構造 I, pp.93-94, 2004
- 3) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, 1993年
- 4) Buresti, G: The effects of surface roughness on the flow regime around circular cylinders, J of Wind End. And Ind. Aerodyn, Vol. 8, pp.105-114, 1981
- 5) 丸川比佐夫, 田村幸雄, 眞田早敏, 中村修: 大型RC煙突に作用する揚力と振動応答, 日本風工学会第19号, pp.37-52, 1984.4
- 6) 大熊武司, 丸川比佐夫, 宮下康一: 市街地を対象とした乱流境界層の風洞実験による基礎的研究風工学シンポジウム, pp.61-66, 1986.12
- 7) 岡内功, 伊藤学, 宮田利雄: 耐風構造, 丸善
- 8) 空気調和・衛生工学会編: 室内換気効率の現場測定法・同解説, HASS115, 2002