

大阪ドームの風圧特性と内部環境に関する研究 (その1)

——建物に作用する風圧力特性——

川口 彰久 諏訪 好英
本間 義教 伊藤 雅保

A Study on Wind Pressure and Interior Environment for Osaka Dome (Part 1)

——Characteristics of Wind Pressure Acting on Exterior Surface——

Akihisa Kawaguchi Yoshihide Suwa
Yoshinori Honma Masayasu Ito

Abstract

The wind tunnel test and the numerical simulation to evaluate the air-ventilation and the wind loading on Osaka Dome, which will be completed in the spring of 1997, are described in this paper. In the wind tunnel test, the measurement of the wind pressure on the surface of the 1:200 scale model subjected to the site wind condition was carried out. In the numerical simulation, the unique shape of the structure was modeled according to the boundary-fitted-coordinate system. The QUICK method of the third order scheme was employed for the convection term in the N-S equation. The profile of the approaching wind was assumed to be same as the wind tunnel flow. The distribution of the mean wind pressure on the roof surface obtained by the numerical simulation coincides considerably well with the wind tunnel test.

概 要

本件は、1997年春に竣工予定の大阪ドームの耐風設計や換気設計を進めるに当たって実施した風洞実験や数値解析の結果について報告するものである。風洞実験では大阪地域の風特性を再現した風洞内に縮尺1/200の大型模型を設置して、ドーム部とフェスタモール部および外周部に作用する風圧力を計測した。気流解析では、ドーム形状が複雑なので、一般曲線座標系によりモデル化を行った。また、流入する気流の特性は風洞実験に対応させ、移流項に3次精度のQUICK法を適用して非定常解析を行った。調査結果は耐風設計や換気設計に役立てると共に、数値解析手法による平均風圧分布は妥当であるとの評価を得ることができた。

1. はじめに

大阪ドーム(大阪市西区岩崎)は、1997年春の竣工を目指して着々と工事が進められている。この建物は大規模な屋内空間を創造し、スポーツや各種イベントの開催など多目的な用途としての利用を前提に計画された。したがって、建物を構成する構造部材の構造安全性は勿論のこと、快適な居住性の確保も設計上重要な事柄である。それ故に、設計段階において実務部門からの要請を受け、種々の調査研究を進めてきた。

本件(その1)は、ドーム部、モール部、外周壁面部の耐風設計や換気設計を進めるに当たって実施した風洞実験および数値解析の結果について報告するものである。

2. 建物の概要

大阪ドームのアリーナ部はスポーツはもちろんのこと、

コンサートやイベントなどにも対応できるように、天井高可変システムや広大なアリーナ部の人工芝巻取装置など、独創的なシステムを装備したマルチドームである。また、アリーナ周囲にはレストランや各種商業ゾーン(エンターテイメントストリート)・文化提案ゾーン(フェスタモール)など、多彩な機能を有する複合施設を配し、日常的に人々に憩いの場を提供する。

大阪ドームの模型を写真-1、断面図を図-1に示す。建物の規模は、敷地面積34,618 m²、建築面積33,766 m²、延べ床面積156,409 m²、地上9階建て、収用人数55千人である。ドーム部の最高高さは80 m、平均高さ63 m、水平経間約170 mで、構造部材はトラスで構成されている。屋根面はステンレスとポリカーボネイトにより覆われている。

独特な雰囲気醸し出すフェスタモールの最高高さは51 mで、アーチ構造にステンレス仕上げである。

3. 風洞実験

風洞実験は、技術研究所内に設置されている多目的大型風洞を利用して実施した。多目的風洞の性能や特性は文献¹⁾に示すが、大阪ドームを対象として風圧実験を実施するにあたって、特に考慮した事項を以下に記す。

3.1 相似則

物体回りの流れの特性は、レイノルズ数で特徴づけることができる。

(レイノルズ数)

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

ここで、 Re : レイノルズ数

U : 風速 (m/s)

D : 物体の代表寸法 (m)

ν : 動粘性係数 (m²/s)

しかし、実大スケールのレイノルズ数は 10^8 のオーダー、数百分の1の模型を用いた風洞実験は $10^5 \sim 10^6$ であるから、この相似則を満たすことは現実的に困難である。そこで、実大ドーム周辺の気流パターンを相似な状況にする方法として、模型に吹きつける風洞気流そのものに、自然風の地域特性を再現した。

さらに、風の変動特性やそれに伴う動的効果を風洞実験で検証する場合には、時間に関する相似も重要になる。時間に関する相似則としては、無次元周波数(逆数を換算風速という)がある。

(無次元周波数)

$$n^* = \frac{nD}{U} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 n^* : 無次元周波数

n : 周波数 (Hz)

D : 代表寸法 (m)

U : 風速 (m/s)

したがって、模型を縮尺1/200で製作し、風速のスケールを $15/60=1/4$ (設計風速 60 m/s, 実験風速 15 m/s と仮定)に設定すると、時間のスケールは1/50となる。すなわち、実時間10分間は模型時間12秒に換算されることになる。

3.2 気流特性

一般的に、自然風は地表面付近で風速が低く、高さが増すにつれて風速が増す分布を示す。多くの場合、平均風速の鉛直分布は、べき指数分布により近似させる。

(べき指数分布)

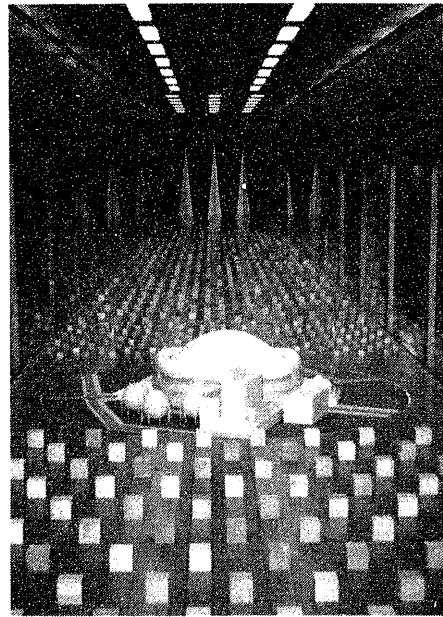
$$U_z = U_{z_0} \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 U_z : 高さ Z における平均風速 (m/s)

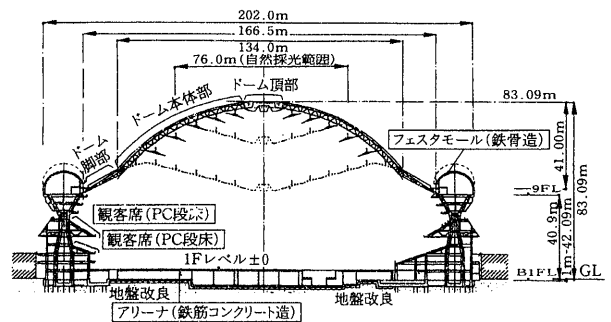
U_{z_0} : 高さ Z_0 における平均風速 (m/s)

α : 風速の変化の度合いを表すべき指数

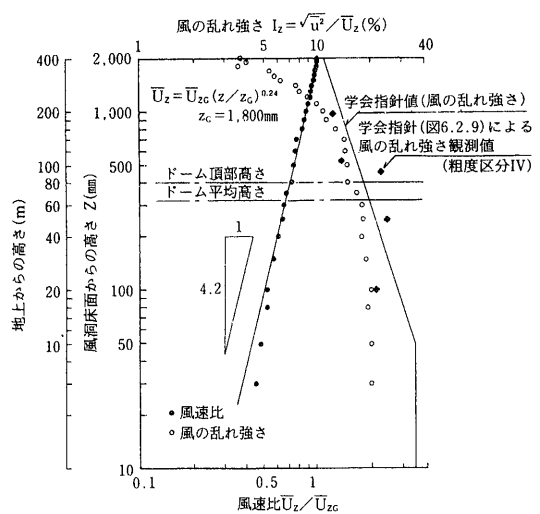
日本建築学会指針²⁾から、建設地点の地表面粗度区分はIVと想定した。これに伴い、風洞気流の平均風速の鉛直方向分布のべき指数が $\alpha=0.27$ となるように、ターン



写真一 風洞内に設置した大阪ドーム模型 (縮尺1/200)



図一 大阪ドーム断面図



図二 風洞気流の鉛直分布

テーブル風上側にスパイヤーとラフネスブロックを写真-1に示すように設置して、図-2に示す鉛直分布を得た。風洞気流の境界層高さは、縮尺1/200に対して実大スケールでは360mに相当する。これは学会指針より低い。ドームの最高高さ80mの4倍以上あり、ドームの周囲を吹く風の流れに対しては十分な境界層高さであると判断できる。乱れ強さは地表面近くにおいて約20%であり、学会指針に示す地表面粗度区分Ⅳの36%と比べると小さいが、ドーム高さ付近では自然風中で観測された乱れ強さのばらつきの範囲内である。

変動風速のパワースペクトルを図-3に示す。Karmanのスペクトル式との比較を示すが、ピーク周波数や高周波数域での減衰傾向など両者は良く合っている。(Karmanのスペクトル)

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4(nL/U)}{\{1 + 70.8(nL/U)^2\}^{5/6}} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $S_u(n)$: 変動風速のパワースペクトル密度 ((m/s)²s)

- n : 周波数 (Hz)
- σ_u : 変動風速の標準偏差 (m/s)
- U : 平均風速 (m/s)
- L : 乱れのスケール (m)
(=100(Z/30)^{0.5})

風洞気流の乱れのスケールは、ターンテーブル中心で計測した変動風速の自己相関関数の積分値から算出した。表-1に学会指針との比較を示す。低層部では風洞気流の乱れのスケールが大きい傾向にあるが、40m以上の高さでは観測例のばらつきの範囲内である。

実験風速は、ドーム頂部(地上80m相当)で15m/sに設定したので、ドームの平均高さ(地上63m相当)では14.2m/sとなった。

3.3 風圧力の計測

風洞模型壁面に作用する風圧力は、模型表面に設けた1mmφの測定孔の圧力をビニールチューブ(長さ1m, 内径1.6mm)を介して圧力変換器(256チャンネル, ZOC23B, ±250mmH₂O, スキャニャーバルブ)に導き、基準点の静圧との差圧から求めている。ただし、圧力変換器で検出する圧力は、ビニールチューブの共鳴現象により、正規の圧力が歪められるので、伝達特性にあわせて周波数領域で補正した。

補正方法は、文献¹⁾に示す。

風圧力の測定点数は、全部で581点である。

- ① ドーム : 217点
- ② モール部 : 180点
- ③ 壁面 : 184点

調査風向は、ホーム～センターラインから2.5°北に振ったラインを風向0°とし、時計回りに15°間隔に345°までの24風向とした。1風向あたりのデータの計測は、サンプリング周波数500Hzで12秒間(実時間10分間相当)とした。

得られた圧力は基準高さの速度圧で無次元化して、風

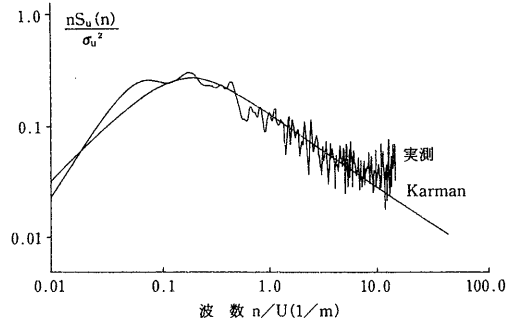


図-3 変動風速のパワースペクトル密度

表-1 乱れのスケールの比較 (単位: m)

高さ	学会指針		風洞気流
	計算式	観測値	
200	258	110-300	200
100	183	110-300	200
40	115	60-170	170
20	82	40-110	160

圧係数とした。(風圧係数)

$$C_{p_i} = P_i / q \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 C_{p_i} : 風圧係数

P_i : 実験で計測した風圧力 (kgf/m²)

q : 模型ドームの平均高さ地上63m相当の速度圧

$$= (1/2) \rho U^2 \quad (\text{kgf/m}^2)$$

ρ : 空気密度 (kgfs²/m⁴)

U : 地上63m相当高の平均風速(m/s)

i : 時系列データを意味する

風圧力の時系列データには、5個ずつの移動平均化操作を施し、評価時間を1/500秒(データ総数6,000個)から1/100秒(実時間0.5秒相当, 同5996個)に変換した。そして、変換した圧力から平均風圧係数、変動風圧係数、最大瞬間風圧係数や最小風圧係数を求めた。

$$\text{平均風圧係数: } C_{p_{ave}} = 1/N \sum C_{p_i} \dots\dots\dots(6)$$

瞬間風圧係数の平均値

$$\text{変動風圧係数: } C_{p_{rms}} = \{1/N \sum (C_{p_i} - C_{p_{ave}})^2\}^{1/2} (7)$$

瞬間風圧係数の標準偏差

$$\text{最大瞬間風圧力係数: } C_{p_{max}} = \max \{C_{p_i}\} \dots\dots(8)$$

瞬間風圧係数の最大値

$$\text{最小瞬間風圧力係数: } C_{p_{min}} = \min \{C_{p_i}\} \dots\dots\dots(9)$$

瞬間風圧係数の最小値

$$\text{瞬間風圧係数: } C_{p_i}$$

評価時間1/100秒の瞬間風圧係数

3.4 風圧分布

風向角 0° の場合におけるドーム部・フェスタモール部の平均風圧係数 (Cp_{ave}) の分布を図-4 に示す。

正圧 (押す力) が作用する部位は、風向に対して水平角度 ±40° 付近までの範囲のフェスタモールの軒先端部と壁面部およびドーム部の風上側の部位であり、これらの部位を除く広い範囲は負圧 (引張る力) が作用している。

大阪ドームはドーム屋根の周囲をフェスタモールが取り囲んでいるので、この存在が圧力分布に種々影響していると予測されるが、学会指針に示されるドーム屋根の外圧係数と比較すると、負圧となった部位の風圧係数は学会指針値より小さくなる傾向が認められる。

3.5 ピークファクター

ピークファクター (g) は、時々刻々変化する信号の変動特性を表す指標の一つであり、変動成分の絶対値の最大瞬間値の標準偏差に対する割合である。一般的に、波形が単周期波形であればピークファクターは $g = \sqrt{2}$ 、ランダム波形であれば $g = 3 \sim 4$ 前後となる。さらに、ピークファクターが大きいということは、衝撃的な風圧力が作用しているということを意味する。

(ピークファクター)

$$g = |Cp_i - Cp_{ave}|_{max} / Cp_{rms} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで、g : ピークファクター

Cp_i : 瞬間風圧係数

Cp_{ave} : 平均風圧係数

Cp_{rms} : 変動風圧係数

図-5 は風向 0° の場合における全ての測定点の平均風圧係数とピークファクターの関係を示す。平均風圧係数が -0.5 以上の測定点ではピークファクターはおおよそ 3 ~ 10 と幅広く分布しているが、平均風圧係数が -0.5 以下では約 3 に収束している。

正規確率過程が成り立つランダム信号波形に対しては、ピークファクターの算定に下式を適用することができる。

(ピークファクターの算定式)

$$g = \sqrt{2 \ln(\nu_r T)} + 0.577 / \sqrt{2 \ln(\nu_r T)} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、g : ピークファクター

ν_r : レベルクロッシング数

T : 評価時間 (= 600秒)

(11)式のレベルクロッシング数は信号の周期性に関する量であり、ピークファクター $g = 3$ のレベルクロッシング数は約 0.1 Hz に相当し、 $g = 4$ では約 3 Hz となる。

3.6 ガストファクター

ガストファクター (G) は、ピークファクターと同様に変動特性を表す指標の一つであり、波形の最大瞬間値の平均値に対する割合である。

(ガストファクター)

$$Gp = |Cp_i|_{max} / Cp_{ave} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで、Gp : ガストファクター

Cp_i : 瞬間風圧係数

Cp_{ave} : 平均風圧係数

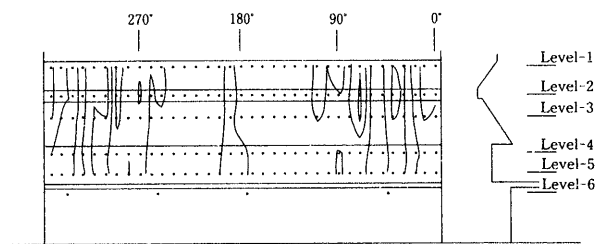
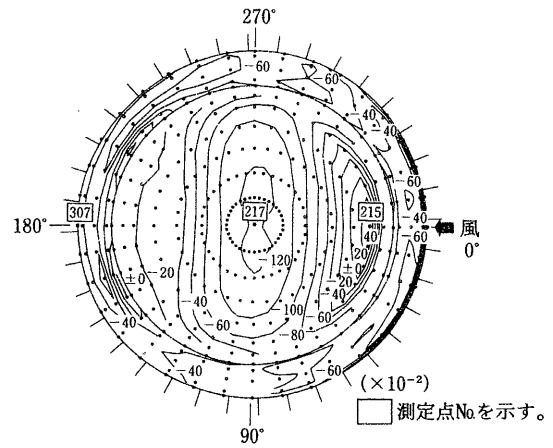


図-4 平均風圧係数 (風向角 0° C)

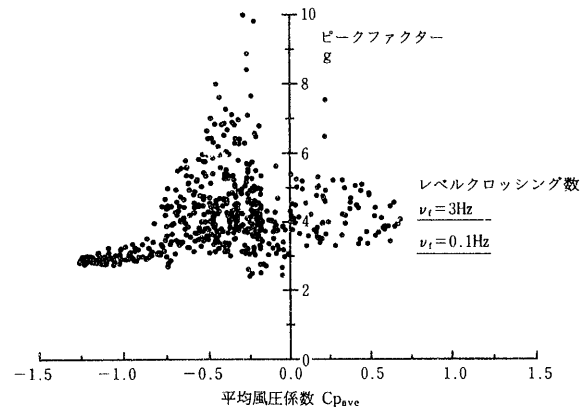


図-5 平均風圧係数とピークファクターの関係

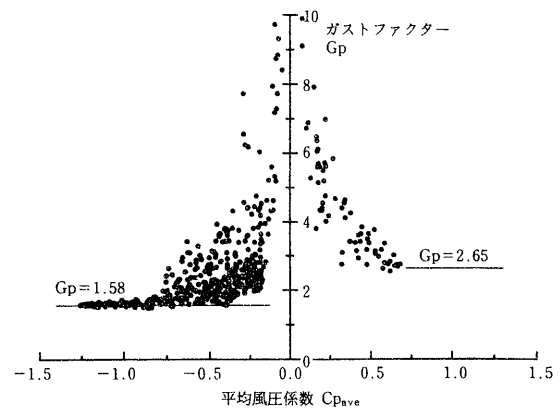


図-6 平均風圧係数とガストファクターの関係

風圧力と風速の関係を準静的に扱うと、構造物に作用する風力は風速の自乗に比例するので、風力のガストファクターは風の主風向成分のガストファクターの自乗に相当する。しかし、風外力の変動が吹き付ける風の変動によるものでなく、他の影響を受けると、ガストファクターは特異な傾向を示す。

いま、風洞気流の主風向の風速のガストファクターを、モデル最高高さの2/3高さにおける乱れ強さから $G_U = 1 + g\sigma_U/U = 1 + 3.5 \times 0.18 = 1.63$ と算定すると、変動風圧力のガストファクターは $G_p = 1.63^2 = 2.65$ となる。

図-6 に風向角 0° の場合の全測定点のガストファクターを示す。正圧側では圧力が高くなると風の変動特性から予測される値に漸近し、負圧側ではさらに小さな値 $G_p = 1.58$ に収束する傾向にある。

ガストファクターの評価時間による変化を調べると、図-7 となる。ドーム部の代表的な測定点 (No.215: 平均風圧係数が正の測定点, No.217: ドーム頂部, No.307: 最小瞬間風圧係数を示した測定点) について示す。評価時間が長くなると緩やかに小さくなる測定点と、短い評価時間では大きな値を示すが、評価時間が長くなると急激に小さくなる測定点がある。急激に小さくなる傾向は瞬間的に高い負圧が作用する測定点で見られる傾向である。

3.7 変動風圧の無次元パワースペクトル密度

前述した測定点の変動風圧係数のパワースペクトル密度を図-8 に示す。図中の横軸は、基準高さ (ドームの平均高さ 63 m の風速 U_H) と代表寸法 (ドームの大きさ $D=200$ m) により換算した無次元周波数 (nD/U_H) である。平均風圧係数が正の測定点 No.215 のパワースペクトル密度は変動風速のそれに類似であるが、最小瞬間風圧係数が最低値を記録した測定点 No.307 では高周波数域に卓越傾向があり、ドーム頂部の測定点 No.217 では低周波数域で卓越している。

耐風設計上の観点から、風外力に対して構造体が共振することがあるか否かを確認すると、ドーム (固有振動数 $n_0 = 1.4$ Hz) とフェスタモール (固有振動数 $n_0 = 2.5$ Hz) の設計風速に対する無次元固有振動数 (n_0^*) は表-2 のようになり、設計風速の範囲内において渦励起振動は発生しないと判断された。

4. 数値解析

風洞実験と並行して、ドーム周辺の気流解析を実施し、風圧力の予測結果の妥当性を検討した。

4.1 解析モデルの作成と解析手法

建築物まわりの風圧特性は、表面近傍での剝離流れの状況に大きく依存する。ここでは複雑形状のドームに対応し、いわゆる O 型グリッドを用いた一般曲線座標系による解析を行った。解析モデル全体の計算格子数は $81 \times 55 \times 63$ 、ドーム表面近傍の境界層内部における最小格子幅は実寸法換算で 18 cm である。

基礎方程式の離散化には、移流項について 3 次精度の

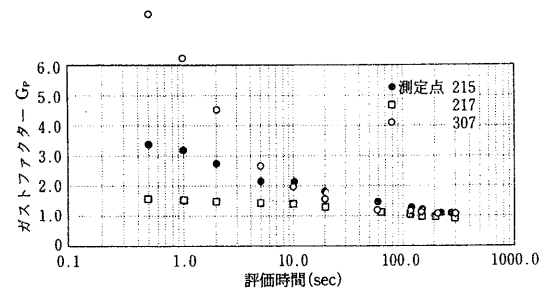


図-7 評価時間とガストファクターの関係

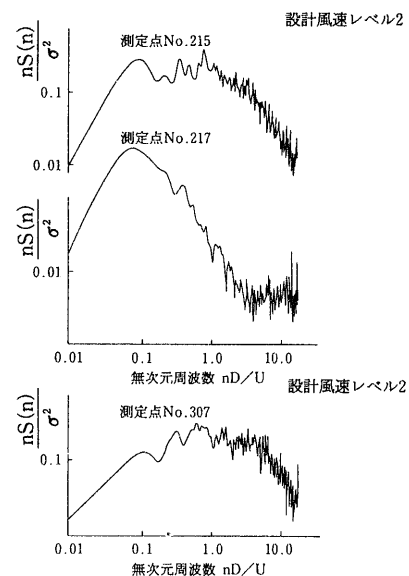


図-8 無次元パワースペクトル密度

表-2 基準風速と無次元固有振動数

風荷重の設定レベル ³⁾		レベル 1	レベル 2
基準風速 U_H	m/s	33.3	38.5
無次元固有振動数	ドーム部	8.41	7.27
	モール部	15.0	13.0

QUICK 法⁴⁾を、時間方向に 2 次精度の Crank-Nicholson 法を適用し、SIMPLE 法⁵⁾で非定常解析を行った。解析領域の流入境界における鉛直方向風速分布には、風洞実験と同様にべき指数 $\alpha = 0.27$ の風速プロファイルを想定し、 $Re = 10^5$ に相当する流れ場を数値解析した。

4.2 平均風圧分布

解析結果の圧力場について時間平均操作を行い、平均風圧係数の分布を求めた。ドーム表面および地表面における風圧係数の分布を図-9 に、大屋根、モール部分における風圧係数について風洞実験と比較した結果を図-10 にそれぞれ示す。数値解析の結果はドーム頂部やフェスタモール部での風圧の極大、極小領域を再現しており、風洞実験の結果と定性的、定量的に良い一致を示した。ドーム構造物の多くは曲面で構成されるため、一般の矩

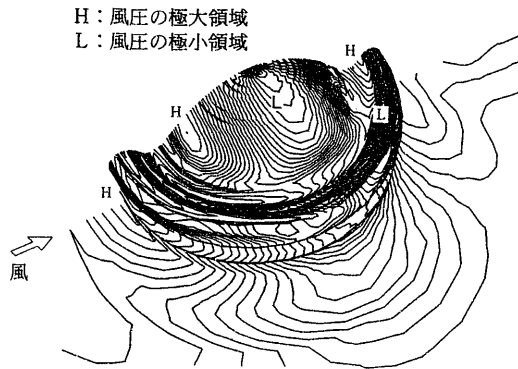
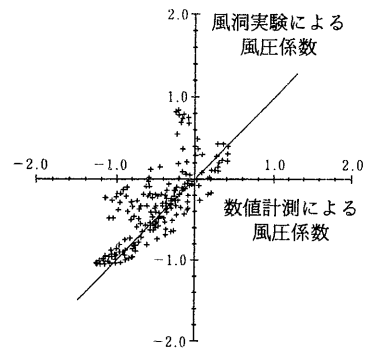
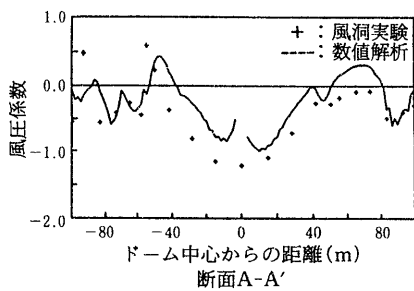


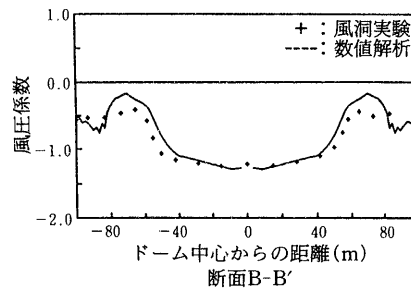
図-9 数値解析による平均風圧係数分布



(1) 全測定点の比較



(2) 風向と平行な中心軸上の測定点の比較



(3) 風向と直交する中心軸上の測定点の比較

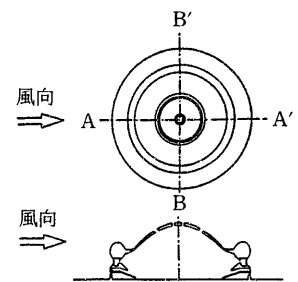


図-10 平均風圧係数に関する風洞実験と数値解析の比較

形構造のビルに比べて角や稜部など特異点の影響が風圧特性に支配的な要因とはなりにくい。本物件のように複雑な形状の場合でも、ドーム構造物に作用する平均風圧の特性は数値解析によって予測が可能なのことがわかった。

5. まとめ

大阪ドームの耐風設計を進めるにあたって実施した、風洞実験と数値解析の結果から、次のような結論を得た。

① ドーム各部位に作用する風圧力の変動特性は、平均風圧力から予測できるような性質のものでなく、部位毎に異なった特性を示すと評価できた。その意味で、風洞実験の結果から耐風設計に有益な情報を得ることができた。特に、変動風圧のスペクトル特性から、ドーム屋根やフェスタモール部が設計風速範囲において、渦励振は発生しないと判断できたことは、非常に重要な点である。

② 数値解析手法による風圧力評価では、複雑な形状をした建物の場合であっても、平均風圧係数についてはある程度妥当な結果を得ることができた。

謝辞

本調査研究は、(株)大阪シティードーム建設部中島富

三郎課長、南嶋兆司課長、花登庄平課長、および日建設計(株)大阪構造設計事務所内田直樹所長、原克巳主管、向野聡彦主管から資料の提供を受けるなど、多大なご協力をいただきました。また、神奈川大学大熊武司教授からは、風洞実験のとりまとめにおいて、貴重な助言をいただきました。ここに記して、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤, 野村, 藤原, 山本, 木梨, 三原: 多目的大型風洞装置について, 大林組技術研究所報 No. 51, p.145~152, (1995)
- 2) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, (1993年改定)
- 3) 高層建築物構造評定委員会: 高層建築物の構造評定用風荷重について, 日本建築センタービルディングレター, p.47~49, (1991)
- 4) Leonard, B. P.: The Quick Algorithm: A Uniformly Third-Order Finite-Difference Method for Highly Convective Flows, Computer Methods in Fluids, Pentech Press, p.159~195, (1980)
- 5) Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, (1980)