膜構造研究論文集 第33号, 13-19, 2019年
Research Paper on Membrane Structures, No.33, 13-19, 2019

# 片持ち形式のスタジアム屋根の風荷重予測に関する基礎的研究

瀧 澤 峰 義 *1
岡 田 章 *2
宮 里 直 也 *2
廣 石 秀 造 *3
森 下 諒 *4

梗　　概

スタジアムの片持ち屋根架構は、軽量性や採光確保の観点から、仕上材に膜材料が用いられることが多く，設計上は一般に風荷重が支配的となる。また、スタジアムのような特殊な形状では、風洞実験により風荷重分布等の評価が行われており、この点に着目した研究は数多く報告されている[1][2]。一方で、風洞実験において、スタジアムの断面に幅を持たせた2次元簡易縮尺模型の形状やフィールドを挟む風上・風下側の建物相互の影響に関しては、報告事例が少なく、基本構造計画用に有用なデータは未だ整備されていない。以上を踏まえ、本報では、片持ち屋根を有するスタジアムを対象として、模型形状と風上側の建物の有無が風力特性に及ぼす影響を把握すると共に、構造計画時に利用可能な風荷重データの蓄積を目的として、風洞実験およびCFD解析による検討を行う。

## 1.概　説

スタジアムの片持ち屋根架構(図1)は、広い面積を覆うため、また軽量性や採光確保の観点から一般に仕上げ材として膜材料を採用することが多く、地震荷重より風荷重が支配的となる。しかし、スタジアムのような特殊な形状は、現行法規での風荷重の評価が難しく、一般に3次元曲面を有する縮尺模型を用いた、風洞実験により風荷重分布等が評価されている。海外においてはMelbourne,W.H.ら[1]やX.Sun.ら[2]によって片持ち屋根架構の風洞実験が行われている。また吉野ら[3]や伊藤ら[4]は風洞模型の簡略化や風荷重の簡易評価手法の確立の観点から、スタジアムの断面に幅を持たせた2次元簡易縮尺模型を対象とした研究結果を報告している。当該論文では、構造計画上、安全側の評価に繋がる、との考えに立脚し、模型側方への風の流れを無視し、模型中央で上下方向のみに流れる2次元気流を模擬するために模型側面に板を設置する方法を採用している。これに対して、模型側面に板を設置しない場合には、模型側方への風の流れの影響が無視できるほど模型の横幅を十分に長くする必要があるが、この必要長さについて検討した事例は少ない。また、既報[3][4]ではスタジアムの一部を取り出した模型を対象としているが、競技場全周に観客席及び屋根が配置されている場合には、フィールドをはさむ風上側と風下側の建物相互の影響についても検討する必要があると考えられる。しかし、この影響についても研究報告は少なく、これまで十分な知見が得られていない。

(a) エコパスタジアム

(b)Mercedes-Benz Arena

図1 スタジアム事例

一方、近年ではコンピュータの処理能力の向上に伴い、様々な分野でCFD解析が活用され、大スパン屋根におけるCFD解析による研究も報告されている[5][6]。建築の耐風設計においても、2015年の建築物荷重指針[7]の改訂により「数値流体計算を用いた風荷重評価」の項目が追加されるなど、新たな風荷重評価手法として期待されている。一般にCFD解析は、乱流モデルを用いた場合、LESとRANSの2種類の解析手法に大別される。建築物荷重指針[7]では、解析精度が高いLESが推奨され、これまで多くの研究が報告されている。しかし、LESは解析負荷が非常に高く、高い処理能力のコンピュータが必要となる。一方でRANSは、LESに比べ再現できる風の

*1 (株)横河システム建築・修士(工学)
*2 日本大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)
*3 日本大学短期大学部建築・生活デザイン学科 准教授・博士 (工学)
*4 日本大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生

流れの現象が制限され、特に耐風設計の観点では剥離や対流の正確な再現が難しく、得られる解析結果と風洞実験の結果では差が生じることが報告されている[8]。しかし、解析負荷はLESより大きく抑えられる。

以上の諸点を踏まえ、本報では、膜材料を用いた片持ち屋根の風荷重データの蓄積を目的として、平板状の屋根モデルの簡易縮尺模型を用いた風洞実験を行った。実験では片持ち屋根を有するスタジアムを対象にして、既報では検討されていない屋根架構の横幅、及び風上側の建物の存在が風力特性に与える影響を把握した。続いて、解析負荷の小さいRANSを用いたCFD解析を行い、風洞実験とCFD解析値を比較することにより、基本設計段階におけるRANSを用いた数値流体解析の有用性について検討を行った。

## ２．風洞実験及びCFD解析の概要

### 2-1. 風洞実験概要

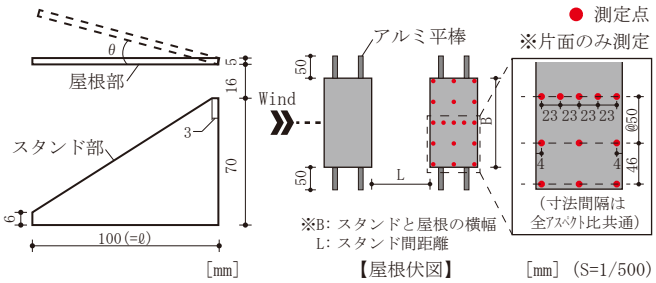
風洞実験モデル概要を図2、表1に示す。実験は、縮尺1/500のアクリル製剛模型を使用した。模型はスタンド部と屋根部から構成され、屋根部は門型の支持部材（アルミ平棒）で支持されている。また、基礎的データ蓄積を主目的としているため、屋根面上の膜形状の凹凸を無視した平板状の屋根モデルを採用した。風圧は圧力センサーにより、屋根上面と下面それぞれについて個々に測定した。屋根片面に測定孔を設け、測定しない屋根片面側から導圧チューブを支持部材へと沿わせ、気流に影響が生じないよう測定用機材に繋いでいる。測定点の配置（例：アスペクト比2）を図2(b)に示す。測定点はアスペクト比の変更に伴い、風向に対して中央5点を基準にして、中央から左右方向50mmずつ離れた計6点を追加した。なお、屋根端部においては端あきを4mm設けた位置に配置した。

実験条件を表2に示す。実験は、風路断面1,200mm（幅）×900mm（高さ）のエッフェル型風洞装置で行った。気流は一様流（軒高基準風速10m/s）とし、気流スケールは10/34、時間スケールは17/2,500とした。相似則の関係からサンプリング周波数は1,666Hz、計測時間は6秒間とし、計5回測定したデータをアンサンブル平均により評価した。なお、得られるデータは実時間で約15分相当となる。

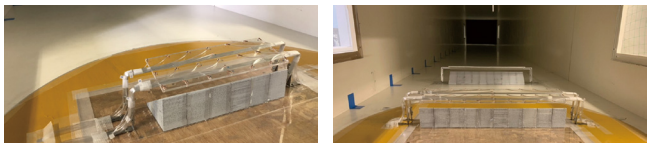
### 2-2. CFD解析概要

図3にCFD解析概要を示す。解析は汎用解析プログラム（ADINA-CFD ver.9.4.4）を使用した。解析モデルは計算領域をX×Y×Z＝1,200mm×900mm×3,000mmとし、内部に風洞模型をモデル化することで、風洞実験と同条件とした。ただし、解析では屋根の支持部材、及び導圧チューブ等は省略している。また、格子形状は四角形平面により構成される構造格子とした。格子解像度は遠方から構造物表面に向けて細かくなるように変化させた。

数値解析条件を表3に示す。乱流モデルは標準k-εモ




(a) モデル断面寸法　(b) モデル詳細（例：アスペクト比 2）



(c) 片側モデルの実験状況写真　(d) 両側モデルの実験状況写真

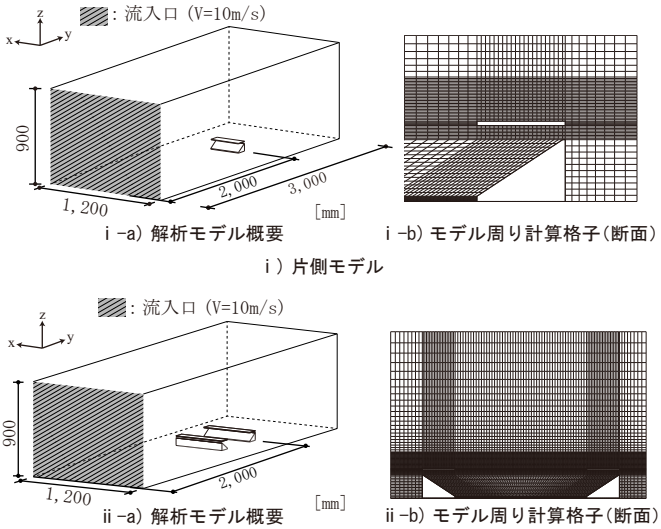
図2　風洞実験及び解析におけるモデル概要

表1 実験ケース一覧

| | 片側モデル | 両側モデル |
|---|---|---|
| 屋根角度 θ | 0 度、7.5 度、15 度 | |
| アスペクト比 (B/ℓ) | 1, 2, 3, 4, 5 (B=100～500mm) | 5 (B=500mm) |
| スタンド間距離 L | | 100～1000mm@100mm 間隔(10 ケース) |
| 風向 | 0 度, 180 度*(*アスペクト比 5 のみ) | |

表2　実験条件

| | |
|---|---|
| 風洞装置 | エッフェル型風洞 (1.2m×0.9m) |
| 気流（軒高基準風速） | 一様流 (V=10m/s) |
| 風向 | 0 度, 180 度*(*アスペクト比 5 のみ) |
| 模型サイズ（模型スケール） | 100mm×91mm (S=1/500) |
| 気流スケール・時間スケール | 10/34・17/2,500 |
| サンプリング周波数・時間 | 1,666Hz・6 秒（計5回計測） |




i -a) 解析モデル概要　i -b) モデル周り計算格子(断面)

i ) 片側モデル

ii -a) 解析モデル概要　ii -b) モデル周り計算格子(断面)

ii ) 両側モデル

図3　CFD解析概要

表3　数値解析条件

| | |
|---|---|
| 乱流モデル | 標準 k-ε モデル |
| 離散化手法 | 有限体積法 |
| 計算アルゴリズム | PISO 法 |
| 離散化精度 | 2 次精度中心差分 |
| サンプリング周波数・時間 | 10Hz・6 秒 |
| y軸方向最小格子幅（総節点数） | 5mm（最大約 150 万） |

デルを用い、離散化手法は有限体積法、計算アルゴリズムはPISO法、離散化精度は2次精度中心差分とした。また、サンプリング周波数は10Hzとし、サンプリング時間は風洞実験と同様の6秒間とした。

### 2-3. 各種係数の定義

本報で取り扱う記号及び座標系の定義を図4に示す。平均風圧係数$C_p$を上面及び下面をそれぞれ$C_{pe}$、$C_{pi}$と称す。平均風圧係数$C_p$は各点の屋根面風圧力Pの平均値を、軒高の平均風速から算出した速度圧$q_H$により除した値であり、式(1)で表せる。符号は屋根面を押す方向を正、引く方向を負とする。

$$C_p=\frac{\overline{P}}{q_H} \qquad (1)$$

また、平均風力係数$C_R$は上面平均風圧係数$C_{pe}$から下面平均風圧係数$C_{pi}$を減じた値であり、式(2)で表せる。符号は屋根を下向きに押す方向を正とする。

$$C_R=C_{pe}-C_{pi} \qquad (2)$$

各点の平均風圧係数$C_p$、及び平均風力係数$C_R$にそれぞれ負担幅bを乗じた値を合計し、屋根の跳ね出し長さℓで除した値（屋根全面の平均値）をそれぞれ全面平均風圧係数${}_{all}C_p$（上面：${}_{all}C_{pe}$, 下面：${}_{all}C_{pi}$）、全面平均風力係数${}_{all}C_R$と称し、式(3)、(4)で表す。符号は屋根を下向きに押す方向を正とする。

$${}_{all}C_p=\frac{\Sigma C_p \times b}{\ell} \qquad (3)$$

$${}_{all}C_R=\frac{\Sigma C_R \times b}{\ell} \qquad (4)$$

### 2-4. 鉛直方向風速分布

実験及びCFD解析における鉛直方向風速分布を図5に示す。実験風速はピトー管を用いて計測した。実験とCFD解析は共に試験体を設置しない状態での結果であるが、風速分布に若干の差が生じている。実験では屋根の高さHを基準とすると、上側では風速が若干大きく、下側では小さい傾向が得られた。このため、次章以降では、この風速分布の差異による影響が含まれていると考えられる。

## 3. 片側モデル（屋根角度あり）を対象とした検討

### 3-1. 風洞実験及びCFD解析の概要

2-1節の風洞実験概要及び実験条件下において、スタジアムの一部を取り出した片側モデル（図3-i）を対象として検討を行った。

対象モデルは、既報[4][5]を参考に、①屋根角度（0, 7.5, 15度）を3ケース、②2次元性の検討を目的に、屋根架構の横幅及び屋根跳ね出し長さの比（アスペクト比）を1～5とした5ケース、③スタンド正面から吹く風の風向を0度とした時の風向0度と180度の2ケース（風向180度はアスペクト比5のみ検討）とし、これら①～③を組み合わせた計18ケースについて検討を行った。

CFD解析については（概要及び条件は2-2節参照）、検討ケースを上記風洞実験と同条件（18ケース）とした。

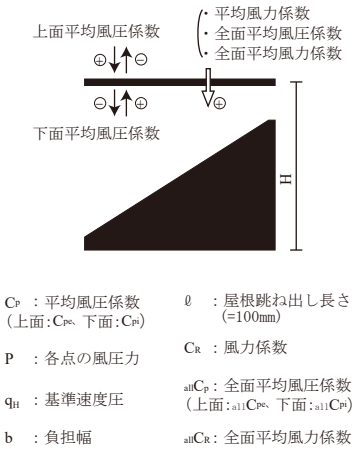



図4　各種係数の定義

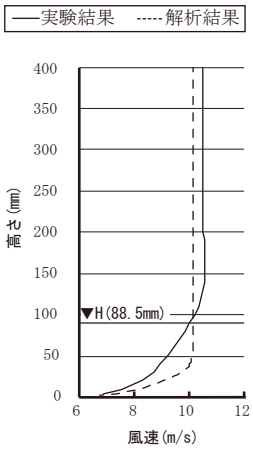



図5　鉛直方向風速分布

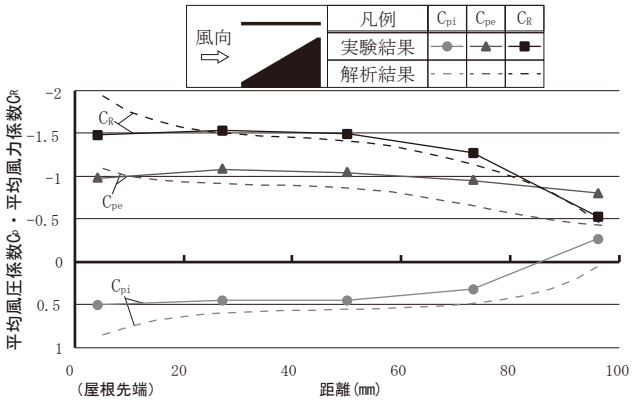



図6　平均風圧係数$C_p$・平均風力係$C_R$数分布（片側モデル：ｱｽﾍﾟｸﾄ比5, θ=0）

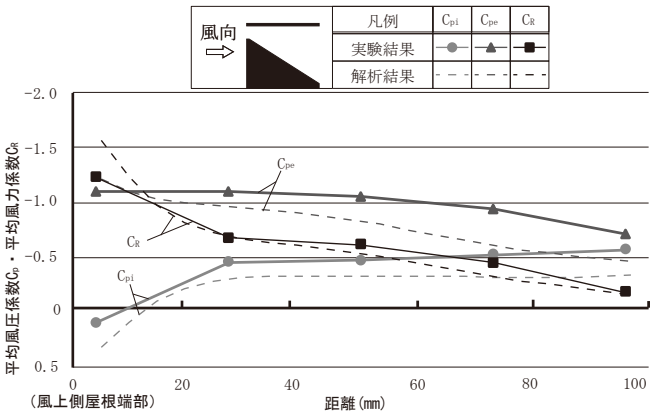



図7　平均風圧係数$C_p$・平均風力係数$C_R$分布（アスペクト比5、θ=0、風向180度）

### 3-2. 風向0度の結果

アスペクト比5、屋根角度0度における屋根中央部の結果を図6に示す。実験及び解析共に、平均風圧係数Cpは屋根下面では正圧が卓越し、上面では負圧が卓越する結果となった。これは、下面ではスタンドの傾斜により気流が押し上げられ、上面では屋根先端における風

のはく離現象を生じたことが要因と考えられる。また、実験と解析結果を比較すると、下面では解析値が実験値より大きな値を示し、上面では解析値が実験値より小さい値を示した。これは前節で述べた鉛直方向風速分布の差異が原因だと考えられる。しかし、解析値は実験結果と概ね一致する傾向を示すことが把握された。そのため、大略の風力特性把握としてはRANSの有用性が示唆された。

### 3-3. 風向180度の結果

アスペクト比5、屋根角度0度、風向180度における平均風力係数$C_R$分布を図7に示す。実験及び解析共に，屋根下面では風上側屋根端部で正圧となり、下面全体としては負圧が卓越する結果となった。また、上面では全面で負圧が卓越する結果となった。この要因として、下面では屋根及びスタンド間より流入した風が競技場内に流れる際に、屋根面を引き下げる力が働き、上面では風のはく離現象が生じたことが考えられる。

### 3-4. アスペクト比の影響

屋根角度0度、風向0度における各アスペクト比の平均風力係数$C_R$分布を図8に示す。実験結果よりアスペクト比が大きくなるに伴い、平均風力係数$C_R$が増加し、アスペクト比がおおよそ3以上で値が一定となる傾向が把握された。これはアスペクト比が小さいモデルでは、模型側方に流れる風の影響が大きく、アスペクト比3以上でこの影響が無視できる程度になると推察される。このため、本モデルではアスペクト比が3以上の場合、モデル中央において2次元的な気流が模擬可能であると考える。これはCFD解析値でも同様の傾向を示しており、RANSでも実験結果を概ね再現可能なことが把握された。

### 3-5. 屋根角度の影響

風向0度におけるアスペクト比及び屋根角度の違いによる全面平均風圧係数$_{all}C_p$の結果を図9に示す。全てのアスペクト比で屋根角度が大きくなるにつれ、全面平均風圧係数$_{all}C_p$（負値）が増加することが把握された。特に、アスペクト比が小さいほどその差が顕著に現れ、アスペクト比1の実験結果では、屋根角度0度に対して、7.5度は1.48倍、15度は1.80倍となった。また、下全面平均風圧係数$_{all}C_{pi}$と上全面平均風圧係数$_{all}C_{pe}$では、各屋根角度で実験値と解析値に最大で約1.27倍の差が生じているが、3-1節で述べた鉛直方向風速分布の差異が要因だと考えられる。しかし、大略の風力特性把握の観点からみれば傾向は十分捉えており、RANSの有用性が確認できた。

一方で、アスペクト比5、風向180度のモデルでは、屋根角度が大きくなるにつれ、下面では負圧が若干大きくなり、上面では負圧が大きく低減される傾向が把握された。ここで、CFD解析により得られた風向180度の風向分布図を図10に示す。図10より屋根角度0度では屋根の上面で大きなはく離現象が生じているのに対し、

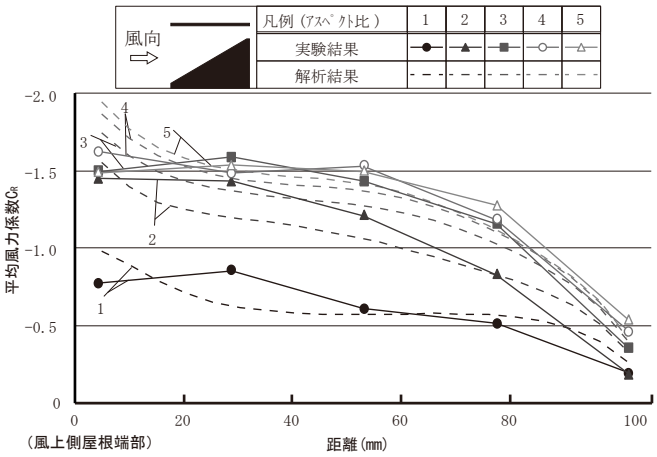



図8　各アスペクト比・平均風力係数$C_R$分布（$\theta$=0、風向0度）

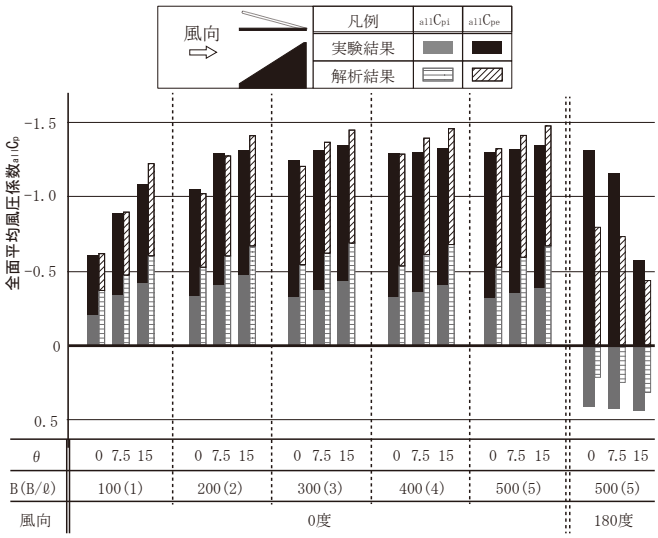
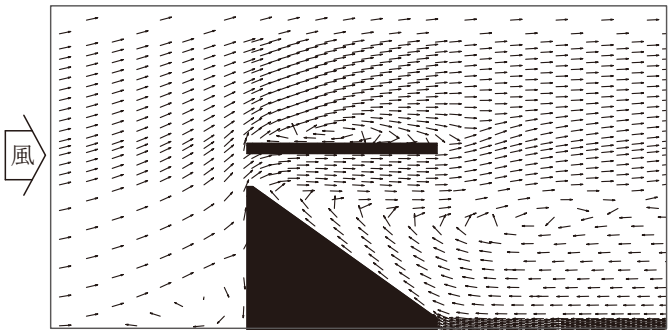
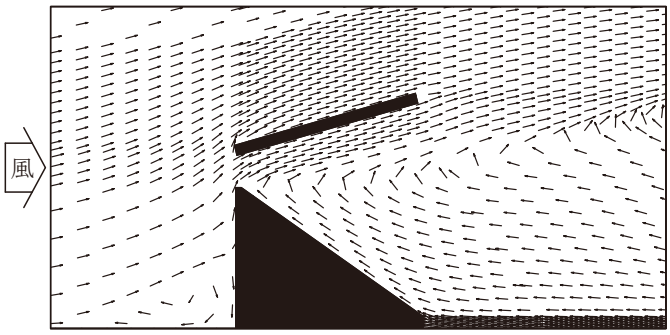



図9 全面平均風圧係数$_{all}C_p$（風向0度）

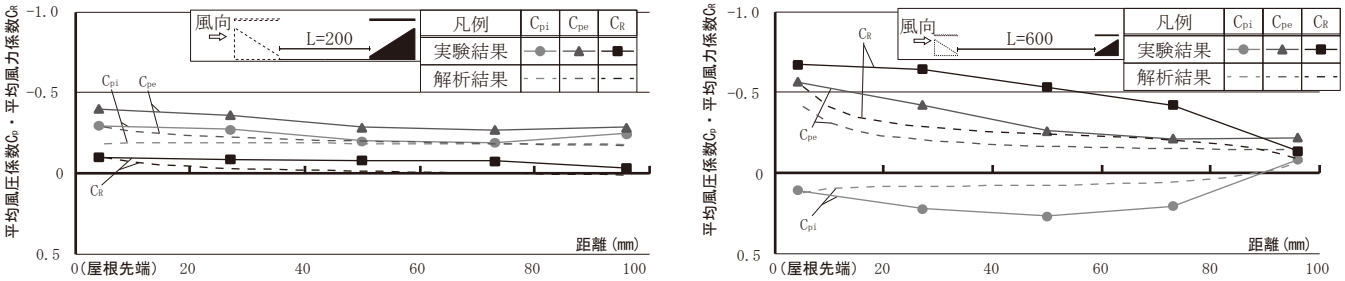



ｉ）屋根角度0度




ⅱ）屋根角度15度

図10　CFD解析による風向分布図（風向180度）




i）スタンド間距離 L=200　　ii）スタンド間距離 L=600

図11　平均風圧係数$C_p$・平均風力係数$C_R$分布（両側モデル, 風下側, 屋根角度0度）

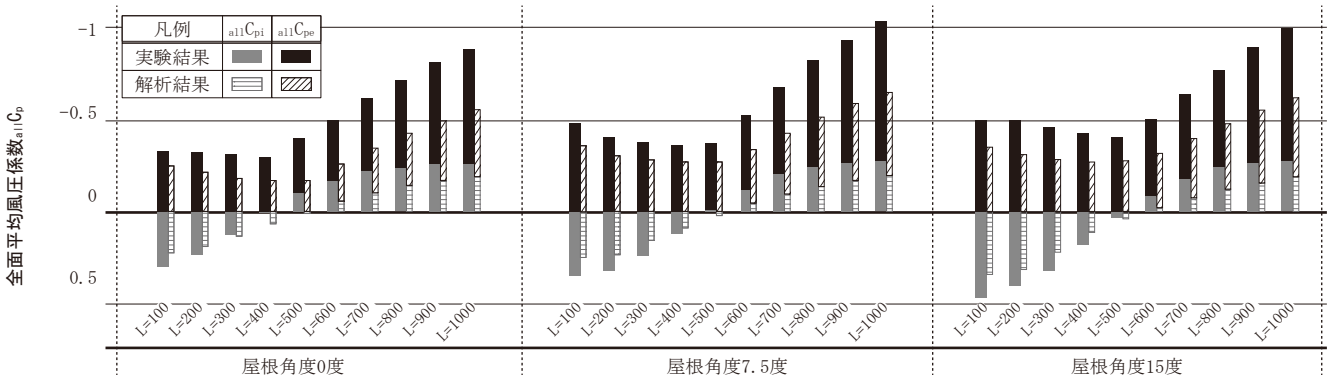



図12　全面平均風圧係数$_{all}C_p$（両側モデル, 風下側）

屋根角度15度では、はく離現象がほとんど生じていない現象が示されている。これは、屋根角度を大きくすることで屋根面が風の流れに沿う状態となり、結果として風圧力が大きく低減したと考えられる。

## 4. 両側モデルを対象とした検討

### 4-1. 風洞実験及びCFD解析概要

風上側及び風下側に模型を設置した両側モデル（図3-ii）を対象として検討を行った。風洞実験概要及び実験条件は2-1節の通りとする。

両側モデルは、アスペクト比を5として、①屋根角度を3ケース（0, 7.5, 15度）と、②スタンド間距離Lを100mmから100mmピッチで1000mmまで変化させた10ケースを組み合わせた、計30ケースを対象とした。また、両側モデルでは風上側または風下側の一方をダミー模型とし、風圧力の測定はそれぞれ別個に行った。なお、本報では風下側屋根の風力特性についてのみ報告する。

CFD解析概要及び解析条件は2-2節と同様とし、実験と同じ30ケースについて検討を行った。

### 4-2. 風上側屋根の影響

風下側屋根のスタンド間距離L=200,600mm、屋根角度0度の結果を図11に示す。両側モデルの風下側では、「片側モデル」の風向0度（図6）と比較して平均風圧係数$C_p$が屋根面全体で大幅に減少する結果が得られた。これは風上側の建物によって風の流れが妨げられ、風速が低下したことが原因と考えられる。また、スタンド間距離L=200mmのモデルでは上下面共に負圧が卓越し、片側モデルとは異なる平均風圧係数$C_p$分布が得られた。以上のことから風上側の建物の影響によって風力特性が大きく変化する性状が把握された。

一方で、スタンド間距離L=600mmのモデルでは、下面は正圧が、上面は負圧がそれぞれ卓越したことから、スタンド間距離を十分に取ることで片側モデル（図6）の性状に類似するものと考えられる。

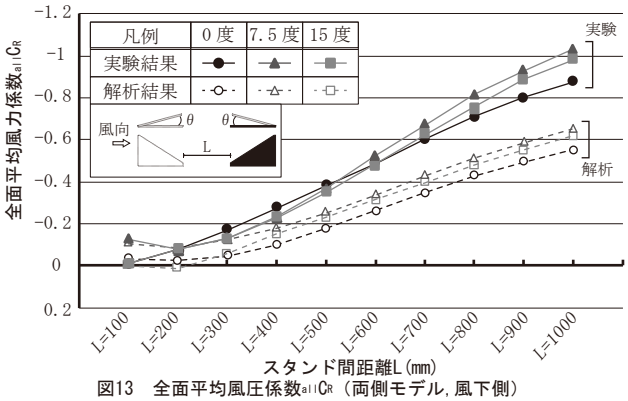



図13　全面平均風圧係数$_{all}C_R$（両側モデル, 風下側）

### 4-3. スタンド間距離の影響

両側モデルにおける風下側屋根の全面平均風圧係数$_{all}C_p$の各種結果を図12に示す。実験結果から全ての屋根角度において、屋根下面はスタンド間距離が短い場合に負圧となり、スタンド間距離を長くすることで正圧に転じる傾向が把握された。また、屋根上面及び下面共にスタンド間距離がL=400mm及びL=500mm付近で全面平均風圧係数$_{all}C_p$が最小となり、それ以外では全面平均風圧係数$_{all}C_p$が増加する傾向を示した。実スケールを考慮すると、一般的な陸上競技場のフィールドでも長辺方向は約180mあり、L=400～500mm（実寸法：200m～250m）は比較的大規模なスタジアムに相当する。しかし、スタンド及び屋根とスタンド間距離の比の関係を考慮して、適切なスタンド間距離を設定することで、風下側の風圧力を低減できる可能性が示唆された。

また、解析値は実験結果と傾向は概ね一致している

ものの、片側モデルと比べて全体的に実験値を大きく下回る結果となった。これは風速分布の差異の他、SAモデルなど乱流モデルの違いや格子解像度がスタンド間の風の流れ場に影響したことが原因と考えられ、今後、解析精度の向上が必要と考えられる。

### 4-4. 屋根角度の影響

両側モデルにおける全面平均風力係数$_{all}C_R$を図13に示す。平均風力係数$C_R$は、上面平均風圧係数$C_{pe}$と下面平均風圧係数$C_{pi}$の純粋な差より算出していることから、前節とは異なり、スタンド間距離L=100mmが最も小さい結果となった。本実験では屋根面の上面と下面を別々に測定し、評価していることから、屋根が受ける風の影響をより正しく評価するためには、上下面同時測定を行い、はく離に伴う気流の乱れによる動的な影響を評価する必要があると考えられる。

また、実験結果と解析結果では屋根角度の違いによる大小関係に差異が見られた。これについては前述のように風速分布、乱流モデルなどを含めた詳細な検討が必要である。

## ５．まとめ

本報では、膜材料を用いた片持ち屋根架構を有するスタジアムを対象として、既報の研究ではほとんど触れられていなかった屋根架構の横幅と、風上側に配置した建物が風力特性に与える影響について把握するために、簡易模型を用いた風洞実験を実施した。また、RANSを用いたCFD解析を合わせて行った。本報で得られた知見を以下に示す。

・風上側建物と風下側建物との距離が近い場合、風力特性が大きく変化するが、十分に距離を取ることで片側モデルの性状に類似することが把握された。
・風洞実験とCFD解析値の比較を行い、実験値と解析値に差が生じるものの、概ねその傾向を捉えられる。
・RANSを用いたCFD解析により、大略の風力特性の把握の可能性が示唆された。

今後、風上側建物のスタンド屋根の形状変化に伴う影響の把握、鉛直方向風速分布を正確に反映した数値解析による検討、RANSにおける乱流モデルの検討、LESモデルとの比較などを行う予定である。

## 参考文献


[1] Melbourne,W.H. & J.C.K.Cheng : Reducing the wind loading on large cantilevered roofs, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 28, pp. 401-410, 1988.

[2] X.Sun, Y.Gao, Y.Wu : Aeroelstic wind tunnel tests on an open-type one-way tensioned membrane structure, IASS 2018 Boston Symposium, Dynamic response of metal spatial structures, pp.1-8, 2018.7

[3] 吉野誠一，他：片持式スタンドルーフの空力特性に関する基礎的研究－風荷重低減方法の提案－，構造工学論文集，Vol.54B，pp.319-324，2008.3

[4] 伊藤拓朗，他：片持ち式スタンド屋根の風圧力低減に関する実験的研究その 1～その 3，日本建築学会大会学術講演会（仙台），構造Ｉ，pp.121-126，2018.7

[5] T.Li, Q.Yang, T.Ishihara : Unsteady aerodynamic characteristics of long-span roofs under forced excitation, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.181, pp.46-60, 2018.10

[6] Y.Takadate and Y.Uematsu : Steady and unsteady aerodynamic forces on a long-span membrane structure, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.193, 103946, 2019.10

[7] 建築物荷重指針・同解説 2015，日本建築学会，pp.367-370，2015.3

[8] 佐藤恵治，小山毅，桑村仁：2 次元平板に作用する流体力の算定における RANS モデルの適用数値流体解析による流体力の研究その１，日本建築学会関東支部研究報告集，pp. 457-460，2014. 2

# BASIC STUDY ON WIND LOAD PREDICTION OF CANTILEVERED STADIUM ROOF

TAKIZAWA Mineyoshi[*1]
OKADA Akira[*2]
MIYASATO Naoya[*2]
HIROISHI Shuzo[*3]
MORISHITA Ryo[*4]

## SYNOPSIS

As for the structural design of the stadium cantilever roof structures the wind load is more dominant than the seismic load. For special shapes such as stadiums, wind load distribution is generally evaluated by wind tunnel tests using a scale model. The following theme for the structural planning of cantilevered stadium roofs have not yet been shown accurate results, that is, a simplified wind tunnel tests method, an influence on the building wind load on the windward, and the effectiveness of CFD analysis methods. In this paper, these themes are analyzed by each wind tunnel tests and CFD analyses.

*1 M.Eng Yokogawa System Architecture
*2 Dr.Eng.Prof.at Nihon University.Dept.of Architecture
*3 Dr.Eng.Assoc.Prof.at Nihon University.Dept.of Architecture
*4 Graduate Student.Nihon University.