

妻面開放型骨組膜構造建築物の外装材用ピーク風力係数に関する研究

高館 祐貴^{*1}
植松 康^{*2}
ガヴァンスキ江梨^{*3}

梗 概

スポーツ施設や仮設構造物としてしばしば建設される妻面開放型骨組膜構造建築物を対象として、外装材用ピーク風力係数に関する検討を行った。風洞実験では2種類の気流を用い、閉鎖型、両面開放型、片面開放型の3種類の妻面開放状態について風圧測定を行った。得られた風圧の時刻歴データから全風向中における正・負それぞれの最大ピーク風力係数(閉鎖型ではピーク外圧係数)を得た。また、I型極値分布に基づき任意の非超過確率に対するピーク風力係数の評価を可能にするために、10回の測定結果を用いて、極値分布における2つのパラメータを定めた。さらに、各妻面開放状態に対して、閉鎖型のピーク外圧係数と組み合わせることでピーク風力係数分布を簡便に推定できるような内圧係数を提案した。

1. はじめに

近年、スポーツ施設やイベント用の仮設構造物あるいは工事現場の仮囲いなどとして図1のような妻面開放型骨組膜構造建築物がしばしば建設されている。一般に、このような建築物は軽量で剛性が低いため、設計時には風荷重が支配的となることが多い。また、閉鎖型建築物とは異なり、妻面の開放状態や風向によって内圧(建物内側の風圧)分布が大きく変化する。したがって、壁面および屋根面の表面と裏面に作用する風圧の差として与えられる風力は複雑な性状を示す。

建設省告示第1454号および第1458号(以下、「告示1454号」、「告示1458号」と呼ぶ)あるいは日本建築学会の「建築物荷重指針・同解説」¹⁾(以下、「荷重指針」と呼ぶ)では、切妻屋根を有する建築物(閉鎖型)に対する構造骨組用外圧係数、外装材用ピーク外圧係数が規定されている。それに加えて、告示1454号および1458号では一面開放型に対する内圧係数が規定されている。そのため、一面開放型については、外圧係数と組み合わせることで建築物に作用する風力係数を推定することが可能である。しかし、告示の規定は風上あるいは風下面のみ開放された場合に対する構造骨組用内圧係数および外装材用ピーク内圧係数

を一定値として与えているだけである。開放型建築物は閉鎖型とは異なり、風向によって内圧の時間的・空間的な分布が大きく変化するため、内圧分布を風上あるいは風下開放の条件に絞って一定値で与えることは必ずしも適切とは言えない。また、両面開放型に関しては室内側にも流れが生じるため、内圧分布が閉鎖型や一面開放型とは大きく異なるが、告示や荷重指針などにおいて、その設計用風荷重は規定されていない。切妻屋根を有する妻面開放型建築物の風荷重を合理的に評価するためには、妻面の様々な開放状態(両面開放型や片面開放型など)に応じて適切に風力係数分布を設定する必要がある。

これまで、開放型建築物における外装材用ピーク風力係数は風洞実験によって得られた風圧の時刻歴データから全風向中の最大・最小ピーク風力係数を求めることで直接的に評価を行ってきた²⁾が、本論文では2種類の手法によってピーク風力係数を評価する。1つ目は、I型極値分布(Gumbel分布)を用いた確率論的手法である。ピーク風力係数の評価に必要な極値分布の2つのパラメータを風洞実験の結果に基づき推定することで、任意の非超過確率に対するピーク風力係数の推定が可能となる。2つ目は、風洞実験あるいは荷重指針等で与えられた閉鎖型建築物のピーク外圧係数と適当に設定された内圧係数を組み合わせることでピーク風力係数を推定する手法である。本研究で対象とするような構造物においては、外圧係数と比較し、内圧係数は屋根形状の影響を受けにくいと考えられる³⁾。そこで、既往のピーク外圧係数と組み合わせるべき内圧係数を提案することで、様々な屋根形状に対するピーク風力係数の推定を可能にする。また、本研究では乱れの強さの異なる2種類の気流による風洞実験を行ったため、乱れの強さが風力係数分布に及ぼす影響についても考察する。



図1 妻面開放型骨組膜構造建築物

*1 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 大学院生
*2 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授
*3 京都大学防災研究所 研究員

2. 風洞実験

風洞実験は国立研究開発法人建築研究所所有の回流型境界層風洞で行った。測定部断面は幅 3.0m×高さ 2.5m×長さ 25m, ターンテーブルの直径は2.0mである。実験気流は荷重指針に示される地表面粗度区分Ⅱ(田畑や住宅が散在する地域)と地表面粗度区分Ⅳ(大都市など高層建物が多い地域)に相当する境界層乱流である。なお、これ以降、地表面粗度区分Ⅱに相当する気流を「気流Ⅱ」、地表面粗度区分Ⅳに相当する気流を「気流Ⅳ」と呼ぶ。これらの気流における平均風速および乱れの

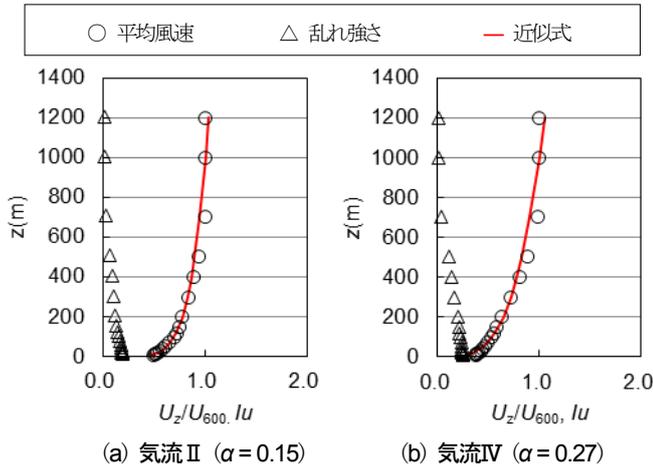


図 2 平均風速と乱れの強さのプロファイル

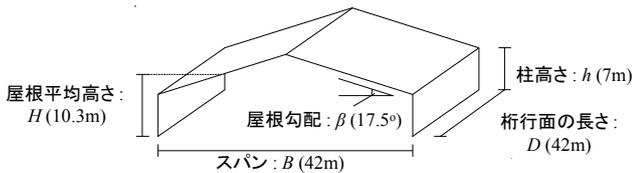


図 3 実スケールでの構造物の大きさ

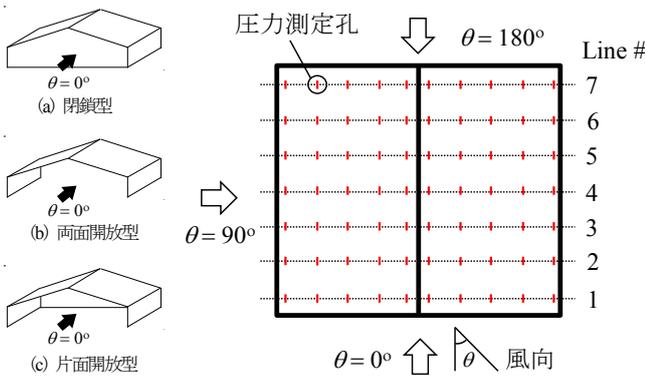


図 4 妻面の開放状態

図 5 圧力測定孔位置(模型伏図)

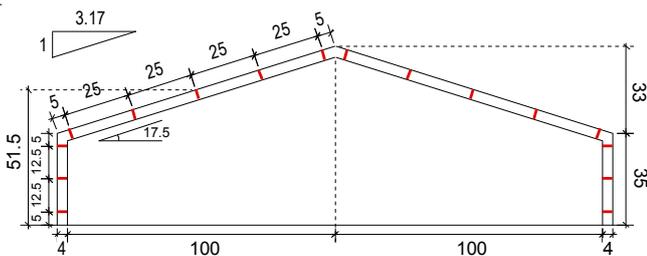


図 6 風洞模型の断面図

強さのプロファイルを図 2 に示す。本研究では、これまでわが国で建設された妻面開放型骨組膜構造建築物を調査することで、その代表的な形状を図 3 のように設定した。実験模型はその代表的な形状に対して幾何学的縮尺率 1/200 で作製した剛模型であり、妻面の開放状態は図 4 に示すような 3 種類とした。模型の圧力測定点は、図 5 に示すように、1 つの測定ラインにつき表裏で 16 点ずつ(合計 32 点)、7 ラインで 224 点配置した。図 6 に模型の断面図を示す。模型の屋根平均高さ H は 51.5mm であり、べき指数 α 、屋根平均高さにおける平均風速 U_H 、乱れの強さ I_{uh} は、気流Ⅱでそれぞれ 0.15, 7.7 m/s, 15.6 %, 気流Ⅳでそれぞれ 0.27, 5.3m/s, 22.4 % である。測定風向は妻面に正対する風向を $\theta = 0^\circ$ とし、模型形状の対称性を考慮して、閉鎖型および両面開放型では $0^\circ \sim 90^\circ$ 、片面開放型では $0^\circ \sim 180^\circ$ とし、 5° ピッチで変化させた。なお、片面開放型の場合は、図 4(c) に示すように風上側妻面が開放されている風向を $\theta = 0^\circ$ とした。

本研究では基本風速を 36 m/s とする。基本風速とは荷重指針において、地表面粗度区分Ⅱの場合の開けた平坦地の地上 10 m における 10 分間平均風速の再現期間 100 年に対する値として定められており、36 m/s は離島や一部の地域を除き、ほぼ日本全土を包括する風速である。この基本風速に対して、実スケールにおける屋根平均高さでの風速を求めると、気流Ⅱで約 36 m/s、気流Ⅳでは約 21 m/s となる。風洞実験における測定時間は模型と気流の縮尺率から時間の縮尺率を求めることで設定した。時間の縮尺率は気流Ⅱでは約 1/43、気流Ⅳでは約 1/50 であり、我が国の平均風速の評価時間が 10 分であることから、荷重評価を行うときは、気流Ⅱでは 14 秒、気流Ⅳでは 12 秒における値が対象となる。なお、これらの測定時間を 1 回の測定とし、風圧(風力)データの統計値は 10 回の測定結果のアンサンブル平均を用いて評価する。なお、測定におけるサンプリング周波数は 1000Hz である。

各圧力測定孔は銅パイプおよびビニールチューブ(長さ約 1m)を介して圧力測定器に接続されている。チュービングによる圧力の歪みはチュービングシステムの伝達関数を用い、周波数領域で補正を行った。測定された風圧は屋根平均高さでの速度圧 q_H で基準化することで風圧係数 C_p として表す。なお、風圧係数は面を押し方向を正とし、建物の外側に作用する風圧については外圧係数 C_{pe} 、建物の内側に作用する風圧については内圧係数 C_{pi} として定義し、外圧係数と内圧係数の差 $(C_{pe} - C_{pi})$ は風力係数 C_f で定義する。風圧係数は面を押し方向を正としているため、風力係数の符号は外圧係数の符号と一致する。本研究では、閉鎖型における内圧係数を 0 と仮定し、外圧係数のみで評価を行う。すなわち、閉鎖型については外圧係数を風力係数として表すものとする。

3. 実験結果

3.1. 平均風力係数分布

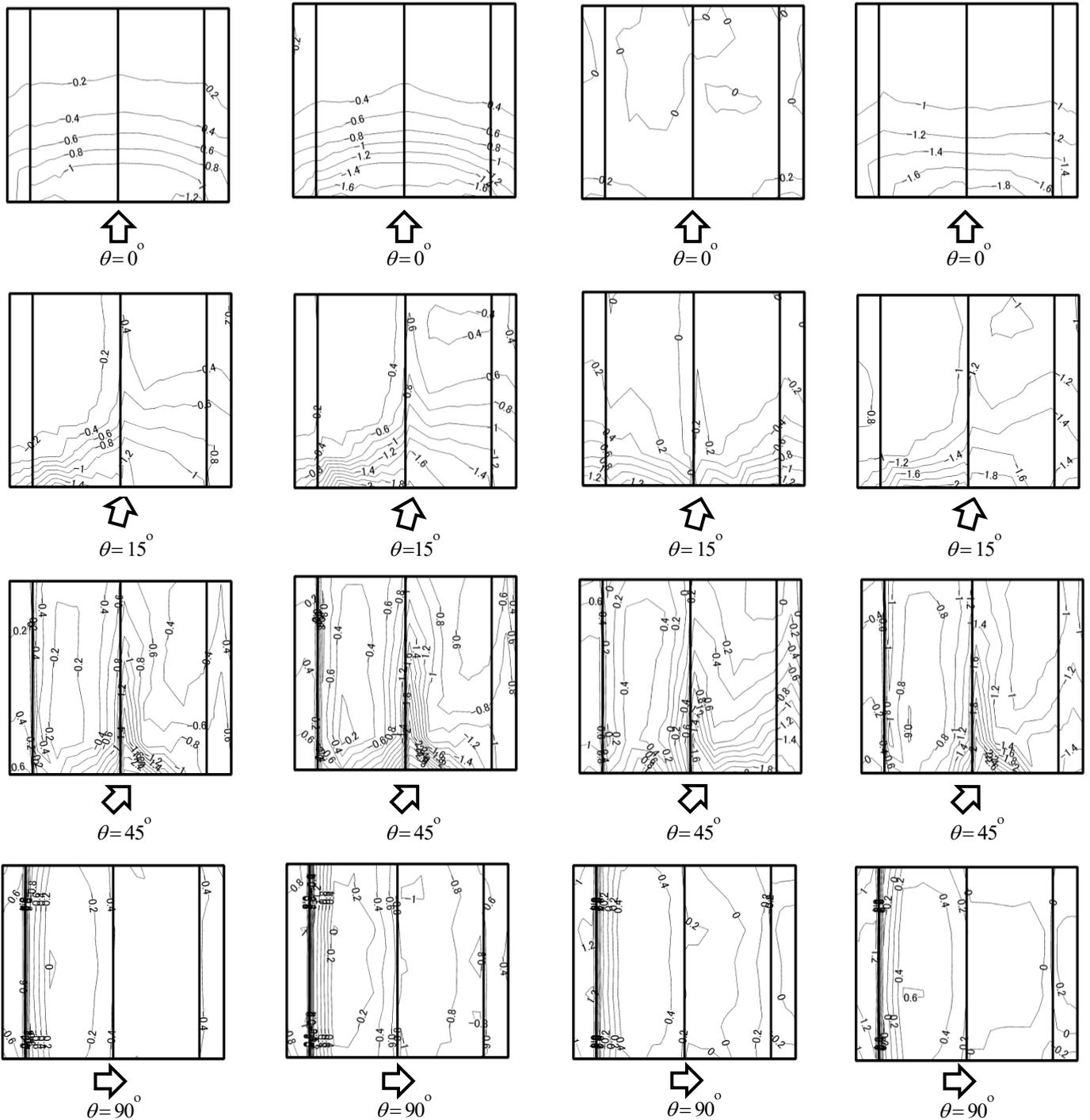
各開放状態における壁面および屋根面に作用する風圧の基本的な特性を把握するため、風洞実験により得られた各測定点での風力係数を時間平均した平均風力係数分布を図 7 に示す。なお、これらの図は壁面と屋根面を展開して表している。風洞実験では 5° ピッチ毎に風圧測定を行ったが、ここでは代表的な風

向として4種類の風向($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)の結果について示している。また、本研究では2種類の気流(気流IIと気流IV)を用いた実験を行ったため、比較として、閉鎖型については2種類の気流の結果を示している。なお、片面開放型の風力係数分布は、図の上側が閉鎖妻面、下側が開放妻面を表す。

まず、 $\theta = 0^\circ$ の結果に着目する。両面開放型では、全体にわたって、その値がほぼ0であることが分かる。これは妻面が開放されたことにより、風が内部(模型の室内側)にも流れるようになり、外圧と内圧が互いに打ち消しあうように作用したためである。一方、片面開放型では風下妻面が閉鎖されているため、内圧が上

昇して正となり、内圧が負の外圧と同じ向きに作用するため、平均風力係数の大きさは閉鎖型と比較して大きくなっている。告示1454号では、風上開放の場合における内圧係数を0.6と規定しているが、気流IIの閉鎖型の平均外圧係数と片面開放型の平均風力係数を比較する(差をとって考えると、告示の値は実験値とほぼ等しい値となっていることが分かる。

次に、 $\theta = 90^\circ$ の場合に着目する。閉鎖型については、風上壁面に正圧が作用し、その他の面には負圧が作用している。これは、荷重指針で規定されている閉鎖型の外圧係数と類似した分布形状となっている。両面開放型と片面開放型に関しては、そ



(a) 閉鎖型(気流II)

(b) 閉鎖型(気流IV)

(c) 両面開放型(気流II)

(d) 片面開放型(気流II)

図7 平均風力係数分布

の分布形状は閉鎖型とは異なるものの、互いに類似していることが分かる。特に、風下壁面の風力係数分布に着目すると、閉鎖型とは異なり、0 あるいは正の値を示している。また、風下屋根面における負の風力も低減されている。これらの結果によると、桁行面に正対する風向では妻面開放の効果によって室内側で負の内圧が作用するためと考えられる。

斜めからの風向($\theta = 15^\circ, 45^\circ$)に着目すると、いずれの開放状態においても、風下屋根面の風上端部で大きな負の風力が生じている。風上妻面から離れた領域における風力係数に着目すると、両面開放型では風力係数の大きさが小さく、 $\theta = 15^\circ$ の場合にはほぼ 0 となっている。一方、片面開放型では模型の内部に流れが滞留して内圧が正となるため、風上端部だけでなく全体的に大きな負の風力が生じている。

最後に気流の乱れ強さの影響に着目する。閉鎖型の 2 種類の分布(図 7(a), (b))を見ると、いずれも分布形状は類似しているものの、気流の乱れ強さが大きい気流Ⅳの方が気流Ⅱに比べて風力係数の絶対値が大きく、特に、風上側の領域でその影響が大きいことが分かる。この傾向は、既往の陸屋根に関する研究⁴⁾でも確認されている。したがって、建築物に作用する風力を考える場合、正負それぞれに対して接近流の乱れ強さの影響を考慮する必要があると考えられる。

以上のことから、妻面の開放状態によって平均風力係数分布は大きく異なるため、妻面の開放状態に応じた風力係数の評価が必要であると考えられる。また、斜めからの風が建築物に作用するときに、大きな負の風力が発生することが明らかとなった。

3.2. 全風向中の最大・最小ピーク風力係数

風洞実験より得られた風圧係数の時刻歴データを用いて各妻面開放状態における風力係数のピーク値を求めた。図 8～図 11 に正・負のピーク風力係数分布を示す。これらの図は、全風向中の最大あるいは最小ピーク値をそれぞれ正のピーク値、負のピーク値として表しており、閉鎖型および両面開放型については $0^\circ \sim 90^\circ$ 、片面開放型については $0^\circ \sim 180^\circ$ のデータを用い、模型の対称性を利用して $0^\circ \sim 360^\circ$ に対するピーク値として表したものである。ただし、描画ソフトの都合上、図によってはコンター図が必ずしも対称とはなっていない。

ピーク風力係数を評価するにあたり、建築物の外装材の荷重負担面積を荷重指針に基づき 1m^2 と想定し、平均化時間を TVL 法⁵⁾に基づいて算出した。TVL 法での時間と代表長さの関係式は次の式(1)で表される。

$$T_c = \frac{kL}{U} \quad (1)$$

ここで、 T_c は平均化時間、 k はディケイファクター、 L は代表長さ、 U は実スケールでの設計風速(36m/s と仮定)を表す。ディケイファクターは一般に建物形状や部位によって様々な値を取るが、ここでは $k = 6 \sim 8$ とした⁶⁾。この場合、平均化時間がおよそ 0.2 秒となることから、本研究ではこの平均化時間を用いることで風力係数のピーク値を評価した。

図 8 および図 9 に 2 種類の気流を用いて得られた閉鎖型のピーク風力係数を示す。正のピーク風力係数に着目すると、いずれの気流においても、壁面で大きなピーク風力が作用してい

ることが分かる。これは、平均風力係数分布からも明らかのように、桁行面にほぼ正対する風向で大きな正の風力が作用するためである。一方、屋根面での正のピーク風力係数はそれほど大きくない。これは、本実験模型のように屋根勾配が比較的小さい場合、屋根面に作用する正圧が小さくなるためである。すなわち、正のピーク風力は桁行面にほぼ正対する風向で生じるが、切妻屋根を有する構造物では軒部(壁面と屋根面の境界)で流れが剥離するため、平均的には屋根面に負圧が作用し、瞬間的な正圧がそれほど大きくならないためである。一方、負のピーク風力係数に着目すると、屋根面および壁面の端部で大きな負のピーク風力が作用しているが、中央部ではその値が低減されていることが分かる。負のピーク風力係数は正のピーク風力係

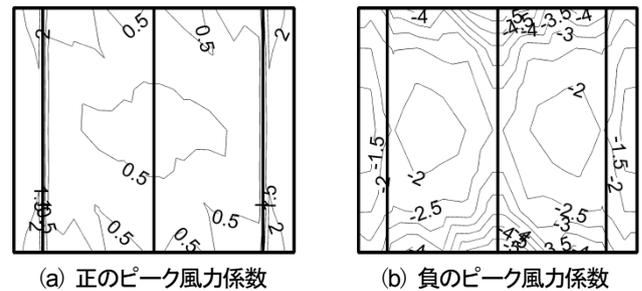


図 8 閉鎖型(気流Ⅱ)

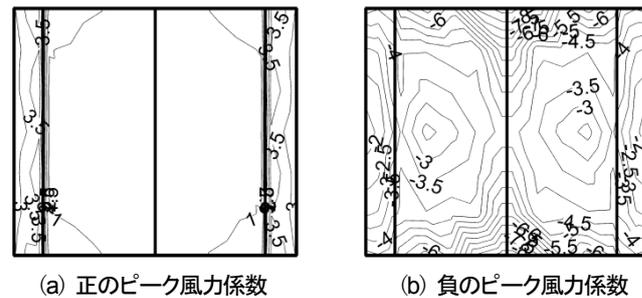


図 9 閉鎖型(気流Ⅳ)

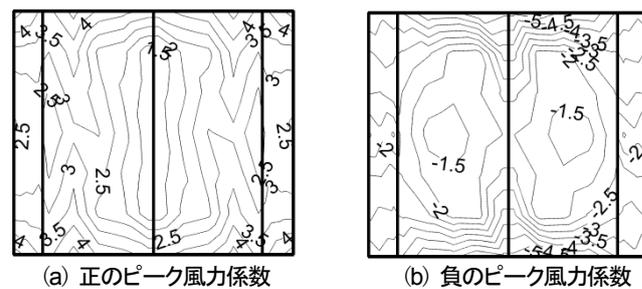


図 10 両面開放型(気流Ⅱ)

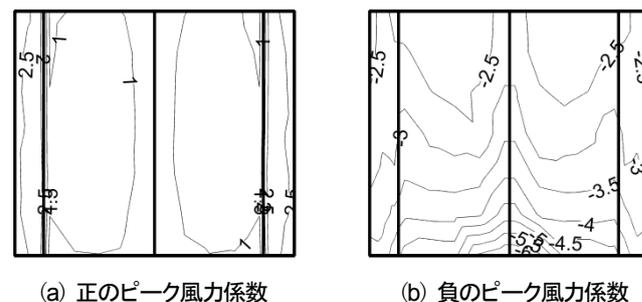


図 11 片面開放型(気流Ⅱ)

数とは異なり、領域によってピーク風力係数の大きさが異なることから、その大きさと分布性状に十分に注意する必要がある。気流の乱れ強さの変化に着目すると、正・負いずれのピーク風力係数においても乱れ強さが大きくなるほどピーク風力係数の大きさが大きくなっていることが分かる。正のピーク風力係数は、接近流の乱れの影響を受けるもの^りとされ、負のピーク風力係数は、前節の検討により、乱れ強さが大きくなることで流れの剥離の影響が大きくなることから、気流の乱れの強さを適切に考慮することもピーク風力係数分布を考える上で重要となる。

次に、両面開放型の結果に着目する。図 10 には気流 II の結果が示されている。正のピーク風力係数に着目すると、壁面だけでなく屋根面でもその値は大きく、分布性状も閉鎖型とは大きく異なっている。これは、両妻面が開放されたことによる内圧の影響によるものである。負のピーク風力係数に着目すると、壁面については、閉鎖型に対して全体的にその絶対値が大きい。これは、負のピーク外圧に対して同一方向に作用する正の内圧が作用するためである。屋根面においては、端部でその絶対値が大きくなっているものの、中央部ではそれほど大きくはない。つまり、両面開放型では壁面および屋根面端部での負のピーク風力係数は大きくなるが、一方で、妻面開放の効果によってピーク風力が低減される領域があることも示している。

最後に片面開放型の結果に着目する。正のピーク風力係数は分布形状が閉鎖型と類似しているが、それらの値は同じ気流における閉鎖型のもの^りと比べて大きい。これは、一方の妻面が開放されているため、内圧が大きく変動し、正の外圧に対して瞬間的に大きな負の内圧が作用したためと考えられる。負のピーク風力係数に着目すると、その大きさは開放妻面付近において非常に大きく、他の開放状態に対する結果と比較してもその値は大きいことが分かる。これは、風上妻面のみが開放されているため、模型内部で空気が滞留し、内圧が上昇する影響で負のピーク風力係数の大きさが大きくなったためである。一方、閉鎖妻面の端部に近い領域に関しては、閉鎖型の結果と比較してその大きさは小さい。告示 1458 号では、風下開放($\theta \sim 180^\circ$)の場合におけるピーク内圧係数を -1.2 と規定しているが、図 11(b)における閉鎖妻面付近の負のピーク風力係数は $130^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$ の範囲で得られた。告示とは風向が異なるため、両者を直接比較することはできないが、図 8 および図 11 の結果によると、風下妻面を開放することによるピーク風力係数の低減効果が示されている。

3.3. 荷重指針における規定との比較(閉鎖型)

荷重指針では切妻屋根を有する閉鎖型建築物に対する外装材用ピーク外圧係数が規定されている。ここでは、荷重指針で示されているピーク外圧係数と本風洞実験より得られたピーク外圧係数(閉鎖型のピーク風力係数)を比較する。

まず、正のピーク外圧係数に着目する。荷重指針においては、壁面における正のピーク外圧係数が高さ方向の分布係数と高さ方向の乱れの強さによって定められている。そのため、壁面の正のピーク外圧係数は高さ方向に変化し、気流 II では $2.1 \sim 2.4$ 、気流 IV では風速の鉛直分布を示すパラメータが一定になることから 2.7 の一定値となる。一方、屋根面については構造骨組用

外圧係数の正の値と基準高さ(ここでは屋根平均高さ)における乱れの強さによって定められている。屋根面における正のピーク外圧係数は、気流 II では 0.10 、気流 IV では 0.13 となる。壁面の正のピーク外圧係数(図 8(a)、図 9(a))に関しては、いずれの気流であっても、荷重指針の規定値の方が大きく、指針値は安全側に評価されている。一方、屋根面における正のピーク外圧係数(図 8(b)、図 9(b))に関しては、どちらの分布も荷重指針の規定値よりも大きく、指針値はやや危険側の設定となっている。

次に、負のピーク外圧係数に着目する。荷重指針では、壁面および屋根面をいくつかの領域に分け、それぞれの領域に対してピーク外圧係数を与えている。図 12 に荷重指針における負のピーク外圧係数の領域分けを示す。なお、閉鎖型は対称形であるため、ここでは全体の $1/4$ の領域について示している。各領域に対して、荷重指針より得られる負のピーク外圧係数を表 1 に、風洞実験で得られたピーク外圧係数を表 2(気流 II)および表 3(気流 IV)に示す。これらの値は各領域に配置されている圧力測定孔から得られた最小のピーク風力係数の値を示している。これらの結果によると、気流 II では実験値に対して指針値がほぼ安全側に評価しているが、気流 IV では全体的に指針値を実験値が上回る結果となった。これは、荷重指針で定められているピーク風力係数が概ね地表面粗度区分 III に相当する気流に基づき設定されたものであるため、気流の乱れ強さが小さい気流 II では安全側、気流の乱れが大きい気流 IV では危険側に評

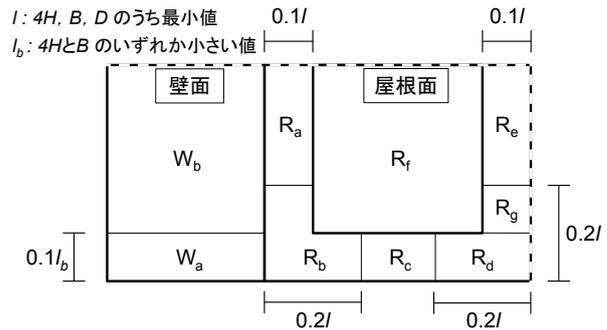


図 12 荷重指針における負のピーク外圧係数の領域分け

表 1 荷重指針における負のピーク外圧係数

W _a				W _b		
-4.2				-2.4		
R _a	R _b	R _c	R _d	R _e	R _f	R _g
-3.6	-5.1	-4.3	-6.6	-4.1	-2.5	-6.3

表 2 気流 II における負のピーク外圧係数

W _a				W _b		
-3.1				-2.4		
R _a	R _b	R _c	R _d	R _e	R _f	R _g
-2.5	-4.3	-3.5	-5.5	-3.0	-2.7	-3.9

表 3 気流 IV における負のピーク外圧係数

W _a				W _b		
-4.7				-3.9		
R _a	R _b	R _c	R _d	R _e	R _f	R _g
-4.1	-6.7	-5.8	-8.8	-5.0	-4.3	-6.3

価されたものと考えられる。

以上のことより、荷重指針では屋根面における正のピーク外圧係数と気流IVの負のピーク外圧係数が全体的に過小評価されているということが明らかとなった。負のピーク外圧係数は流れの剥離が明確であり、正のピーク外圧係数と比較して気流の乱れによる影響が小さいと考えられることが多いものの、ピーク外圧係数が乱れ強さの大小によって変化することから、実際の設計では、気流の乱れ強さに応じたピーク外圧係数を用いる必要があると考えられる。

4. 極値分布を用いたピーク風力係数分布の評価

4.1. I型極値分布(Gumbel 分布)

本研究ではピーク風力係数の大きさを統計的に処理し、確率的なモデルとして扱うことで外装材用ピーク風力係数の評価を行う。最大・最小ピーク風力の発生が独立であるとし、それらの確率分布(非超過確率)を次の式(2)で表されるI型極値分布(グンベル分布)を用いて評価することができると仮定する⁸⁾。

$$F_X(x) = \exp[-\exp\{-a(x-U)\}] \quad (2)$$

ここで、 x は風力係数を表す。 U は位置パラメータであり、分布の最頻値を表す。また、 a は尺度パラメータであり、分布のばらつきを表す。式(2)は2重指数分布であるため、式(3)のように2度対数を取ると $\ln(-\ln(F_X))$ と x は線形関係となる。

$$\ln(-\ln(F_X)) = -a(x-U) \quad (3)$$

本研究では風洞実験より得られた10回の測定結果を用いて2つのパラメータを推定し、I型極値分布に基づいたピーク風力係数の評価を行う。 a と U の推定には様々な手法があるが、ここでは一般的に用いられる以下の2つの手法について検討した。

①モーメント法(グンベルの積率法)

10回の測定より得られた10個のピーク値の平均値を μ_x 、標準偏差を σ_x とすると、次の式(4)、(5)を用いてパラメータ a と U を推定することができる。

$$a = \frac{1.282}{\sigma_x} \quad (4)$$

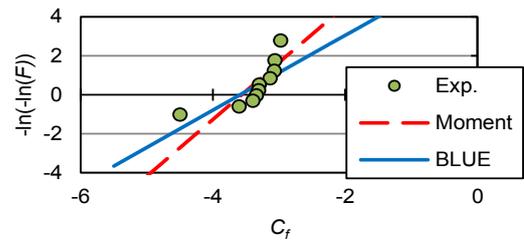
$$U = \mu_x - \frac{0.577}{\sigma_x} \quad (5)$$

この手法は計算が容易であり、データ数が大きい場合には高い精度の推定が可能である。

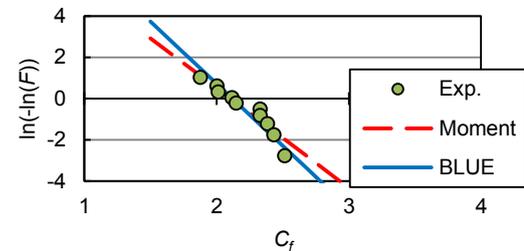
②BLUE(Best Linier Unbiased Estimator:最良線形不偏推定量)

BLUEはLieblein⁹⁾により提案された手法である。これは、少ないデータでは極値分布が歪むことから、得られた極値データを重みづけして評価することで少ないデータ数でも極値分布のパラメータを高い精度で推定できる手法である。

以上の2つの手法を用いることで極値分布のパラメータ a 、 U を推定した。図13にこれらの方法で推定された極値分布と風洞実験の時刻歴データより直接得られた結果の比較を示す。なお、図13は両面開放型のある測定点での結果を示している。横軸はピーク風力係数を表しており、縦軸は $\ln(-\ln(F_X))$ である。ピーク値の正負に応じて極値分布の傾きの正負が異なるため、ここでは縦軸を対応させて表している。また、実験値の非超過確



(a) 正のピーク風力係数



(b) 負のピーク風力係数分布

図13 極値分布の推定例(実験値と推定値)

表4 プロットングポジション公式の η

Blom 公式	$\eta=0.375$	Cunnane 公式	$\eta=0.4$
Hazen 公式	$\eta=0.5$	Gringorten 公式	$\eta=0.44$

率は次の式(6)を用いて計算した。

$$F_i = \frac{N+1-i-\eta}{N+1-2\eta} \quad (6)$$

ここで、 N はデータ数(ここでは $N=10$)、 i はデータを絶対値の大きい順に並べたときの順位、 F_i は i 番目の値に対応する非超過確率を表す。 η は表4に示されるようなプロットングポジション公式におけるパラメータである。式(6)からも明らかのように、 F_i は η の値によって変化する。しかし、表4に示す η のうち、どの値を用いて評価すべきかという明確な基準はない。既往の研究^{10), 11)}によると、指数分布やI型極値分布に対してはGringorten公式がよく適合することから、本研究では $\eta=0.44$ を用いた。

この結果によると、モーメント法では得られた10個という限られたデータを用いて2つのパラメータを推定するため、ピーク値の絶対値が大きい範囲については実験値に対して必ずしも適切な推定値が得られてはいない。一方、BLUEによる結果は極値を重みづけして評価しているため、ピーク風力係数の大きさが特に大きい範囲については、その大きさを適切に評価していると言える。実際の設計では、ピーク風力係数の絶対値が大きい範囲が重要となるため、本研究ではI型極値分布の2つのパラメータ a 、 U を推定するにあたり、BLUEを用いることとした。

4.2. 2つのパラメータ a 、 U の設定

I型極値分布の2つのパラメータを適切に推定することができれば、任意の非超過確率に対する風力係数を設定することが可能となる。まず、式(3)の x をピーク風力係数 \hat{C}_f に置き換えて変形することで式(7)を得る。

$$\hat{C}_f = U - \frac{1}{a} \ln(-\ln(F_{C_f})) \quad (7)$$

極値分布を用いたピーク風力係数の評価としてはCook and Mayneの手法⁸⁾がしばしば用いられるが、この手法では式(7)に

において $F_G=0.78$ としたものである。

式(7)からも明らかなように、ピーク風力係数は基準となる位置パラメータ U とその傾き $1/a$ を用いることによって評価することができる。ここで、図 14～図 16 に気流Ⅱの結果から推定された位置パラメータ U の分布を示す。この結果によると、図 8、図 10、図 11 に示されている同じ条件下での正・負のピーク風力係数分布と非常に類似していることが分かる。これは、図 8、図 10、図 11 の正・負のピーク風力係数が 10 個の風洞実験の値のアンサンブル平均を用いて評価しており、その値が非超過確率 50% の値や最頻値に概ね対応しているためである。つまり、極値分布における U は全風向中の最大あるいは最小のピーク風力係数分布をそのまま用いて評価することが可能である。したがって、2 つの極値パラメータ a 、 U のうち、尺度パラメータ a を適切に与えることができれば、任意の非超過確率に対するピーク風力係数を I 型極値分布を用いて評価することが可能となる。

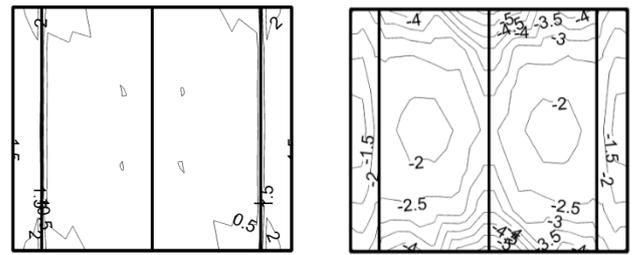
表 5 に、図 12 に示した領域に対して設定した両面開放型の尺度パラメータ a の値(範囲)を示す。なお、ここでは気流Ⅱの負のピーク風力係数の結果を示している。この結果から分かるように、尺度パラメータ a の値は各圧力測定点および風向によって大きく変化する。したがって、 a について全領域に適用可能な一意の値を定めることはやや困難である。しかし、 a の値を設定するにあたり、領域毎に異なる値を設定するのは実用上煩雑である。そこで、本研究では壁面および屋根面について、最も厳しいピーク風力係数を与える領域の最小の a を用いることとした。すなわち、負のピーク風力係数については、壁面では W_a 部、屋根面では R_d 部での最小の a を用いて評価することとした。一方、正のピーク風力係数については、両面開放型を除き、壁面および屋根面のピーク風力係数がほぼ一定であることから、壁面あるいは屋根面における全領域を対象として a を定めた。両面開放型に関しては、領域によってピーク風力係数の大きさが大きく異なるため、負のピーク風力係数と同様、最も厳しい値を与える領域での a を用いた。その結果を表 6、表 7 に示す。ほとんどの場合、閉鎖型と片面開放型に比べて、両面開放型の a の値は小さくなっている。また、気流の乱れが大きいほど a の値は小さくなっている。これによると、ピーク風力係数の絶対値が大きい領域ほど a の値は小さくなっていると考えられる。すなわち、 a の値が小さいほど大きなピーク値を取り得ると言える。

わが国においては、外装材用ピーク風力係数は一般に極値のアンサンブル平均で評価されるため、非超過確率 50% の値が用いられていることにほぼ相当する。しかし、今回提案した尺度パラメータ a を用いることで任意の非超過確率(例えば、Cook and Mayne の手法など)に応じた風力係数を設定することが可能となる。

5. 内外圧の風圧係数の組み合わせによる風力係数の評価

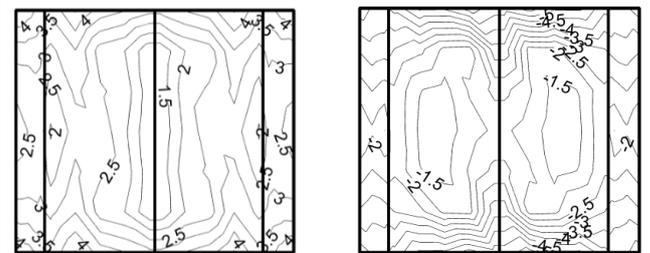
5.1. ピーク外圧係数とピーク内圧係数の組み合わせ

本研究で対象としている妻面開放型の建築物は閉鎖型建築物とは異なり、風向によって内圧(室内側の風圧)分布が大きく変化する。しかし、内圧分布は外圧分布に比べて建物形状(屋根形状など)の影響を受けにくいと考えられる³⁾。したがって、既往の研究によって与えられている様々な屋根形状に対するピーク



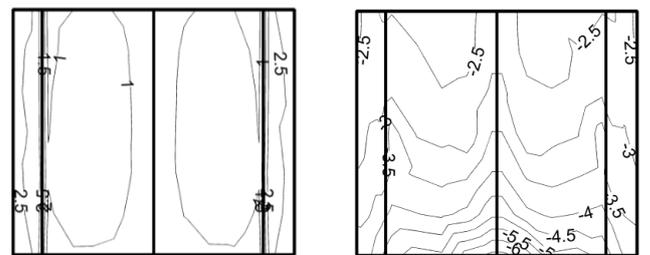
(a) 正のピーク風力係数 (b) 負のピーク風力係数

図 14 閉鎖型における U の分布(気流Ⅱ)



(a) 正のピーク風力係数 (b) 負のピーク風力係数

図 15 両面開放型における U の分布(気流Ⅱ)



(a) 正のピーク風力係数 (b) 負のピーク風力係数

図 16 片面開放型における U の分布(気流Ⅱ)

表 5 尺度パラメータ a の分布(両面開放型, 気流Ⅱ, 負のピーク風力係数)

W_a			W_b			
1.4 ~ 4.3			2.6 ~ 12.7			
R_a	R_b	R_c	R_d	R_e	R_f	R_g
2.5 ~ 3.8	3.1 ~ 10.0	1.9	1.6 ~ 3.8	6.9 ~ 12.9	3.5 ~ 15.0	3.9

表 6 a の提案値(気流Ⅱ)

	閉鎖型		両面開放型		片面開放型	
	正	負	正	負	正	負
壁面	4.8	3.3	2.5	1.4	4.9	2.1
屋根面	8.7	2.6	2.6	1.6	7.7	2.4

表 7 a の提案値(気流Ⅳ)

	閉鎖型		両面開放型		片面開放型	
	正	負	正	負	正	負
壁面	2.0	1.7	1.1	1.4	1.6	1.0
屋根面	3.0	1.6	0.9	0.7	3.1	0.7

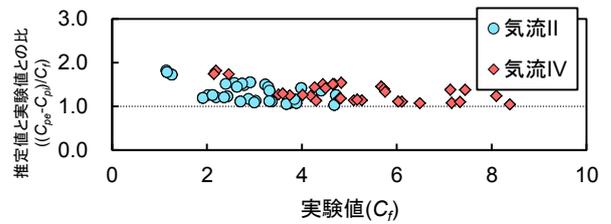
外圧係数分布に対して適切な内圧係数分布を与えることができれば、他の屋根形状についてもピーク風力係数分布を推定することが可能となる。そこで本節では、ピーク風力係数を適切に評価できる外圧係数と内圧係数の組み合わせに着目し、組み合わせるべき内圧係数を定める。なお、閉鎖型については、荷重指針に変動風圧の効果を表す係数が規定されているので、ここでは両面開放型および片面開放型について扱う。

まず、ピーク風力係数を推定するにあたり、外圧係数と内圧係数のそれぞれのピーク値に着目する。妻面に近い領域では、内圧と外圧が比較的高い相関を持っているため、外圧と内圧のピーク値がほぼ同時に発生し、その差がピーク風力係数をもたらすと考えられる。そこで、ピーク風力係数をピーク外圧係数とピーク内圧係数の差によって評価した。すなわち、正のピーク風力係数を正のピーク外圧係数と負のピーク内圧係数の差として、同様に、負のピーク風力係数を負のピーク外圧係数と正のピーク内圧係数の差として計算した。各圧力測定点について推定した値(推定値)とピーク風力係数を直接評価した値(実験値)を比較した結果を図 17、図 18 に示す。これらのデータは 2 種類の気流を用いて得られた結果を各圧力測定点における最大・最小ピーク風力係数をもたらす風向に対して評価した結果である。なお、図の横軸は実験値、縦軸は推定値と実験値の比を表す。

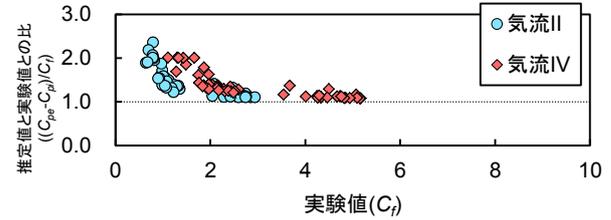
ピーク外圧係数とピーク内圧係数の差によって推定されるピーク風力係数は、当然のことではあるが、全ての測定点において実際のピーク値よりも安全側に評価されている。ピーク風力係数の絶対値が大きい領域では、ピーク値同士の組み合わせによって推定される値が実験値にほぼ等しくなっている。したがって、設計上重要となるピーク風力係数の大きい範囲については、ピーク外圧係数とピーク内圧係数の組み合わせによって概ね妥当にピーク風力係数を評価することが可能である。一方、ピーク風力係数の絶対値がそれほど大きくない範囲については、ピーク外圧係数とピーク内圧係数の組み合わせでは風力係数の大きさを過大評価する。これは、屋根面および壁面の端部から離れた領域における外圧と内圧の相関が低くなるためである。つまり、内外圧のピーク値同士の組み合わせでは必ずしもピーク風力係数を適切に評価することはできない。ピーク風力係数の絶対値が小さい範囲においても適切にピーク風力係数を推定するための内圧係数を定める必要がある。

5.2. ピーク風力係数を再現するための必要内圧係数

前節に示したように、ピーク風力係数を外圧係数と内圧係数のピーク値同士の組み合わせで評価すると、一般にピーク風力係数を過大評価するが、これはピーク外圧係数に組み合わせた内圧係数が大きすぎるためである。実際には、外圧と内圧のピーク値が同時に発生するわけではない。ピーク外圧係数と組み合わせてピーク風力係数を推定するために必要とされる内圧係数は、屋根面および壁面の中央部の領域(図 12 の W_b 部や R_f 部)では、特に、負のピーク風力係数の場合において、それほど大きくない。すなわち、全風向中の最大あるいは最小ピーク内圧係数を用いると、端部や隅角部から離れた領域では風力係数の絶対値が非常に大きくなる。そこで、閉鎖型のピーク外圧係数と両面開放型あるいは片面開放型におけるピーク風力係

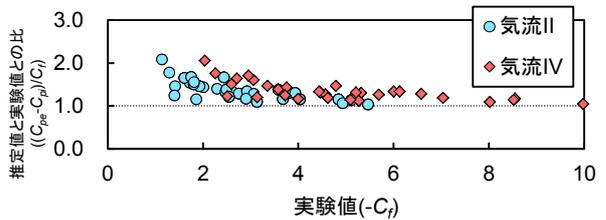


(a) 両面開放型

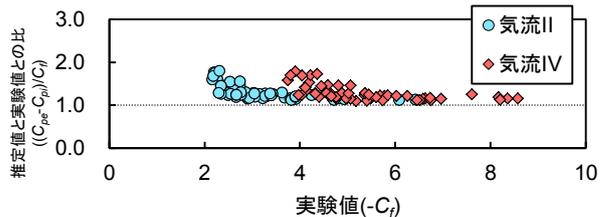


(b) 片面開放型

図 17 正のピーク風力係数の推定値



(a) 両面開放型

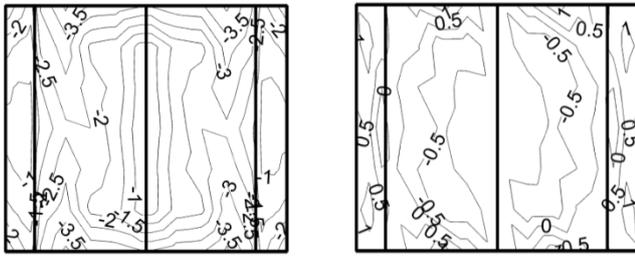


(b) 片面開放型

図 18 負のピーク風力係数の推定値

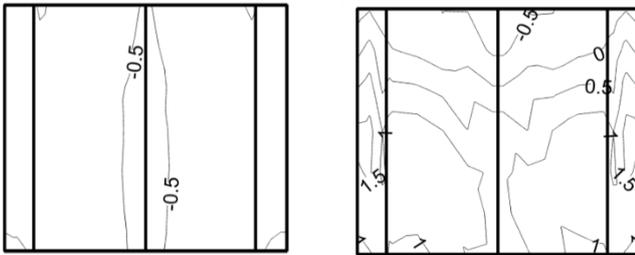
数の差を用いることで、閉鎖型のピーク外圧係数を用いてピーク風力係数を得るために必要な内圧係数(以下、「必要内圧係数」と呼ぶ)を求め、組み合わせるべき内圧係数を明らかにする。

各開放状態における必要内圧係数分布を図 19、図 20 に示す。なお、これ以降、正のピーク風力係数に対する必要内圧係数を「正の必要内圧係数」、負のピーク風力係数に対する必要内圧係数を「負の必要内圧係数」と呼ぶ。両面開放型に着目すると、正・負いずれの必要内圧係数の値は各領域で大きく異なる。特に、正の必要内圧係数は端部や隅角部でその絶対値が大きくなる。注目する領域によって値が大きく異なるため、それぞれの領域に対して適切に内圧係数を与える必要がある。一方、負の必要内圧係数は、正だけでなく負の値を示す領域もある。片面開放型に着目すると、正の必要内圧係数は全体に渡ってほぼ一様に分布していることが分かる。一方、負の必要内圧係数は、特に屋根面において、開放妻面に近い領域ほど、その絶対値が大きくなっている。壁面については、端部ではなく、やや中央部に近い領域で必要内圧係数が最大となっている。さらに、壁面と屋根面のいずれにおいても閉鎖妻面に近い領域では 0 あるいは負となっているため、両面開放型と同様、閉鎖型に対してピーク風力係数が低減される部分があることが分かる。



(a) 正のピーク風力係数 (b) 負のピーク風力係数

図 19 必要内圧係数分布(両面開放型, 気流Ⅱ)



(a) 正のピーク風力係数 (b) 負のピーク風力係数

図 20 必要内圧係数分布(片面開放型, 気流Ⅱ)

5.3. 内圧係数の提案

前節において、必要内圧係数は領域によって様々な値を取り得ることが明らかとなった。本節では、既往の実験等で得られたピーク外圧係数を用いて、開放型建築物のピーク風力係数を推定するための必要内圧係数を荷重指針で示される領域分けに基づき設定する。ただし、両面開放型の正の必要内圧係数は領域によってその大きさが大きく異なるため、両面開放型に限り、正・負いずれの必要内圧係数についても荷重指針の負のピーク外圧係数の領域分けに対応するように与えた。なお、対象とする建築物の対称性を考慮し、両面開放型は図 12、片面開放型は図 21 の領域分けを用いて設定した。

表 8～表 11 に提案する必要内圧係数の値を示す。これらの値は、各領域(壁面: $W_a \sim W_c$ 部, 屋根面: $R_a \sim R_k$ 部)における圧力測定点のうち、正の必要内圧係数については最大値、負の必要内圧係数については最小値を用いて評価したものである。こうして得られた必要内圧係数を用いて、閉鎖型のピーク外圧係数から両面開放型あるいは片面開放型におけるピーク風力係数を推定した。その結果を図 22、図 23 に示す。図の横軸は風洞実験から得られた各開放状態におけるピーク風力係数、縦軸は今回提案した必要内圧係数を用いて推定したピーク風力係数を表す。なお、ここでは 2 種類の気流による結果を示している。この結果によると、推定値は各領域における必要内圧係数の最大あるいは最小値を用いているため、当然のことながら、実験値に対して安全側の評価を与えている。また、これらのグラフには推定値と実験値との比を示すために、傾き 1 および 1.3 の値を点線で示しているが、どの条件においても概ねその範囲に収まっていることが分かる。特に、設計上重要となるピーク値の絶対値が大きい範囲については推定値と実験値との差は小さい。各開放状態における結果を見ると、片面開放型における正のピーク風力係数については、両者はよく一致している。これは、図

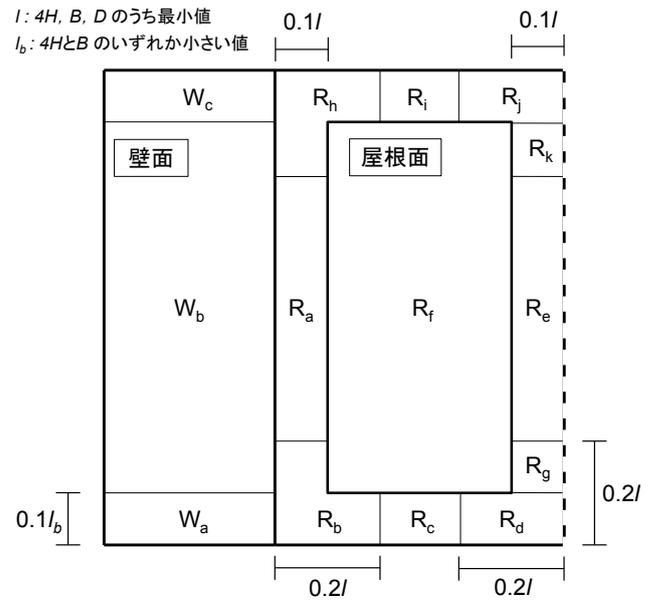


図 21 片面開放型における必要内圧係数の領域分け

表 8 正の必要内圧係数(両面開放型, 気流Ⅱ)

W_a				W_b		
-3.1				-1.7		
R_a	R_b	R_c	R_d	R_e	R_f	R_g
-2.0	-4.1	-3.4	-3.3	-0.7	-3.2	-0.8

表 9 負の必要内圧係数(両面開放型, 気流Ⅱ)

W_a				W_b		
1.0				1.1		
R_a	R_b	R_c	R_d	R_e	R_f	R_g
0.3	0.7	1.3	0.3	-0.4	0.1	-0.2

表 10 正の必要内圧係数(片面開放型, 気流Ⅱ)

W_a			W_b			W_c
-0.5			-1.0			-0.7
R_a	R_b	R_c	R_d	R_e	R_f	R_g
-0.7	-0.7	-0.5	-0.6	-0.4	-0.9	-0.3
R_h		R_i		R_j		R_k
-0.8		-0.9		-0.8		-0.4

表 11 負の必要内圧係数(片面開放型, 気流Ⅱ)

W_a			W_b			W_c
1.2			1.7			0
R_a	R_b	R_c	R_d	R_e	R_f	R_g
1.3	1.4	1.3	1.0	0.9	1.4	0.9
R_h		R_i		R_j		R_k
0		-0.5		-0.5		-0.6

20(a)からも明らかのように、必要内圧係数分布がほぼ一樣に分布するためである。

以上に述べたように、本研究で設定した内圧係数を用いることで、各領域におけるピーク風力係数を概ね妥当に推定するこ

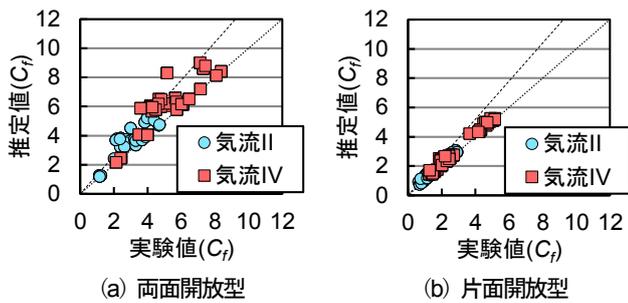


図 22 正のピーク風力係数の推定値と実験値

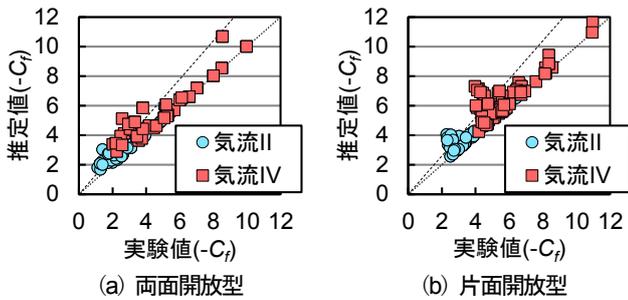


図 23 負のピーク風力係数の推定値と実験値

とができる。特に、ピーク値の絶対値が大きい領域については、推定精度が高いと言える。内圧係数分布は屋根形状にはあまり依存しないと考えられることから、今回提案した必要内圧係数分布を用いれば、他の屋根形状についても既往の実験等で得られたピーク外圧係数と組み合わせることで簡便にピーク風力係数を推定することが可能となる。

6. まとめ

妻面開放型骨組膜構造建築物を対象に、風洞実験より得られた風圧の時刻歴データを用いることで外装材用ピーク風力係数について検討および推定手法の提案を行った。まず、風洞実験の時刻歴データを時間平均することで各開放状態に対する平均風力係数分布を求め、その特徴や基本的な風力分布特性を明らかにした。次に、外圧係数と内圧係数の差によって得られる風力係数のピーク値をアンサンブル平均することによって正・負のピーク風力係数分布を求めた。閉鎖型建築物に関しては荷重指針に定められている外装材用ピーク風圧係数と比較することで乱れ強さの変化と荷重指針の規定について考察した。

次に、I 型極値分布を用いることで任意の非超過確率に対するピーク風力係数を推定するための手法を提案した。極値分布の2つのパラメータはBLUEを用いて推定した。そして、得られた2つのパラメータにおいて、位置パラメータ U はピーク風力係数分布を直接用いて評価することができることを示した。尺度パラメータ a については、屋根面および壁面における正・負のピーク風力係数が最も厳しくなる領域に基づき設定した。これらの値を用いることで、任意の非超過確率に対するピーク風力係数を推定することが可能となる。

最後に、ピーク外圧係数とピーク内圧係数の組み合わせに着目した。風洞実験から得られる風力係数のピーク値の絶対値が大きい領域については、外圧係数と内圧係数のピーク値の差によって与えられる風力係数を用いることでピーク風力係数を適

切に評価できることが分かった。しかし、領域によってはピーク風力係数を過大評価するため、閉鎖型のピーク外圧係数と両面開放型あるいは片面開放型に対するピーク風力係数の差によって、ピーク風力係数を得るために必要な内圧係数(必要内圧係数)を求めた。そして、荷重指針における負のピーク外圧係数の領域分けに準じて、各領域において必要内圧係数を設定した。この必要内圧係数を用いてピーク風力係数の評価を行うと、ピーク値同士を組み合わせた場合よりも高い精度でピーク風力係数を推定できることが明らかとなった。内圧係数分布は屋根形状には依存しないと考えられるため、本研究で提案した必要内圧係数は他の屋根形状を有する開放型建築物にも適用することが可能と考えられる。

本研究で得られた外装材用ピーク風力係数は骨組膜構造を対象として検討を行ったが、提案したピーク風力係数の推定手法並びに必要な内圧係数などは膜構造のみならず、同様な形状を持つ開放型建築物についても適用することが可能である。本論文では限られた形状の模型を用いた結果に基づいて外装材用ピーク風力係数について考察した。今後は、本論文で示した方法の一般性を検討するため、様々な屋根勾配を有する建物について一連の数値流体解析を実施する予定である。

謝辞

本研究の一部は一般社団法人日本鉄鋼連盟の2015年度「鋼構造研究・教育助成事業」の助成による。また、風洞実験においては国土技術政策総合研究所の奥田泰雄氏に多大なご協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説, 2015.
- 2) 高舘祐貴, 植松康, ガヴァンスキ江梨:妻面開放型骨組膜構造建築物の構造骨組用風力係数並びに外装材用ピーク風力係数, 膜構造論文集 No.28, pp. 1 - 8, 2014.
- 3) 中村修, 奥田泰雄, 植松康:設計者のための風力係数の充実, 日本風工学会誌, Vol. 36, No. 4, pp. 337 - 342, 2011.
- 4) 上田宏, 田村幸雄, 藤井邦雄:陸屋根の平均風圧性状に対する気流の乱れの影響(陸屋根の風圧性状に関する研究その1), 日本建築学会構造系論文集, No. 425, pp.91 - 99, 1991.
- 5) T. V. Lawson: Wind Effects on Buildings Vol.1, Applied Science Publishers LTD., Basking, 1980.
- 6) 染川大輔, 西村宏昭, 谷口徹郎, 谷池義人: ペントハウスのある陸屋根の設計用ピーク風圧係数, GBRC 33(4), pp. 24 - 30, 2008.
- 7) 植松康, 飯泉江梨, セオドルスタポラス: 独立上屋の風荷重に関する研究, その1 外装材用ピーク風力係数, 日本風工学会論文集, Vol. 30, No. 4, pp. 91 - 102, 2005.
- 8) N. J. Cook. Calibration of the quasi-static and peak-factor approaches to the assessment of wind loads against the method of Cook and Mayne, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10 315 - 341, 1982.

- 9) J. Lieblein: Efficient methods of extreme-value methodology, report NBSIR 74 – 602, National Bureau of Standards, Washington, 1974.
- 10) 菊地原英和: 風速の再現期間計算法の比較考察 二重指数分布の当てはめにおける問題点, 天気, 18(1), pp. 21 – 34, 1971
- 11) Cunnane. C.: Unbiased plotting position -A review-, J.Hydrol., No.37, pp 205 – 222, 1978.

Peak wind force coefficients for designing the cladding of open-type framed membrane structures

Yuki Takadate ^{*1)}

Yasushi Uematsu ^{*2)}

Eri Gavanski ^{*3)}

SYNOPSIS

Peak wind force coefficients for designing the cladding of open-type framed membrane structures are proposed on the basis of a wind tunnel experiment. Three types of gable-end configurations, that is, open type, partially enclosed type and enclosed type, are tested in the present study. First, the peak wind force coefficients are specified based on the distributions of the most critical maximum and minimum peak wind force coefficients irrespective of wind direction. Then, using the Type I extreme value distribution, the wind force coefficients for cladding are estimated. Using this distribution, it is possible to estimate the peak wind force coefficients for any value of non-exceedance probability. Furthermore, the combination of the external and internal peak wind pressure coefficients for estimating the peak wind force coefficients is discussed. Peak wind force coefficients in the edge region can be estimated reasonably by combination the peak external and internal wind pressure coefficients. However, such a combination generally overestimates the design wind force coefficients in the other regions, where the peak wind force coefficients are relatively small in magnitude. Then, the internal wind pressure coefficients are estimated by the difference between the peak external wind pressure coefficients for enclosed type and the peak wind forces coefficients for open type or partially enclosed type. Based on the results, we proposed internal pressure coefficients to be combined with the peak external pressure coefficients on enclosed buildings for estimating the peak wind force coefficients on open type and partially enclosed type buildings. The proposed internal wind pressure coefficients reasonably provide the wind force coefficients for the open type and partially enclosed type. Provided that the internal pressure coefficient is minutely affected by the roof configuration the proposed internal pressure coefficients can be used for estimating the peak wind force coefficients on open type buildings with various roof configurations.

*1) Graduate Student, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University

*2) Professor, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University

*3) Researcher, Division of Wind Resistant Structures, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University