

小型地平ホーム上家の風圧力及び部材応答に対する 壁面の開口の影響

石川 大輔* 清水 克将** 鈴木 実*** 野口 雄平***

Effect of Opening on Walls of Small Train Sheds on Wind Pressure and Response of Shed Members

Daisuke ISHIKAWA Katsuyuki SHIMIZU Minoru SUZUKI Yuhei NOGUCHI

It is important to evaluate wind loads on small train sheds constructed on passenger platforms, since they have relatively light mass and both upper and lower surfaces of the roofs are exposed to the wind. In this study, we examined differences in forms, conducting wind tunnel tests and frame analyses using the results of the wind tunnel test for small train sheds, and obtained following findings. Wind loads acting on the sheds and the stress of their members produced by the wind loads are smaller as the openings formed in the back walls of the sheds are larger, but do not depend on the arrangement of the openings.

キーワード：風力係数，旅客上家，風洞実験，骨組解析

1. はじめに

プラットホーム（以下、ホーム）上に設置される旅客上家^{注1}（以下、ホーム上家）は、質量が比較的小さく、屋根の上面下面の両面が風に曝されることから風荷重が設計上支配的となる場合があるため、風荷重算出に用いる外力としての風圧力を適切に設定することは重要である。ホーム上家は、建築基準法の適用対象外ではあるものの、バス停、農業施設等と同様に、柱や梁のみで屋根を支える独立上屋^{注2}と呼ばれる一般建築の形態に類似していることから、必要な設計用風圧力も独立上屋の設定が準用されることが多い。

独立上屋の風圧力に関する初期の研究としては、Gumley¹⁾による風洞実験が挙げられ、これは英国基準²⁾等の基礎データをなしている。また、Letchford & Ginger³⁾⁴⁾は風洞実験により局部風圧や面平均風圧の測定を行い、この結果はオーストラリア・ニュージーランド（AS/NZ）基準⁵⁾の基礎データとなっている。我が国においては、植松等^{例えば6)}が一連の風洞実験を行い、外装材や構造部材に関して、耐風設計用に基準化した風圧力を提案している。この風圧力は日本建築学会が出版した建築物荷重指針⁷⁾（以下、「荷重指針」）に反映され、建築基準法に基づく設計において参照が可能となっている⁸⁾。ホーム上家の耐風設計においてもこの荷重指針に記載の独立上屋の風圧力が参照されることが多い。

以上、独立上屋の風圧力に関する既往の研究は、各種基準類に反映されているが、いずれも壁を持たない構造

が一般的である。一方、全長が10mを下回るような小型のホーム上家には、線路直交方向や軌道反対側の線路平行方向に壁が設けられる場合やその壁面に開口が設けられる場合も多い。そのような場合、壁や開口の設け方によりホーム上家周辺の流れ場が異なり、各種形態の違いが風圧力に影響を与えると予想される。また、風圧力の相違は部材応答へも影響すると想定される。加えて、ホーム上家は、ホーム上に設置されることから、ホームが障害物となって、風が吹き上げられる現象が想定され、ホーム上家の設計用風圧力を設定するに際しては、この点を適切に考慮した条件の下で行った検討に基づくのが望ましい。しかし、ホーム上家における上述の点に関して既往の研究では十分に明らかにされていない。

そこで、本研究では、風洞実験及びその結果を外力とした骨組解析に基づき、小型の地平ホーム上家の形態の違いが風圧力及び部材応答に与える影響を明らかにした。具体的には、風圧力について時間及び各部材面で平均した平均風力係数により明らかにした上で、ホーム上家を構成する部材の応力について平均風力係数に基づく荷重を外力とした骨組弾性解析により明らかにした。

2. 対象構造物及び検討条件

2.1 対象構造物

対象とする構造物は、地平ホーム上に設置される小型の旅客上家とし、屋根は片流れ屋根とした。構造物の概要を図1に示す。旅客上家はホーム端に設置した。これは本実験に先行して基本的な条件のみで実施した風洞試験において、ホーム中央に設置した条件に比べ、ホーム端に設置した条件で、各部材面の風圧力が大きくなる結果が得られており、本実験では、旅客上家にとってより

* 元 構造物技術研究部 建築研究室

** 構造物技術研究部 建築研究室

*** 環境工学研究部 車両空力特性研究室

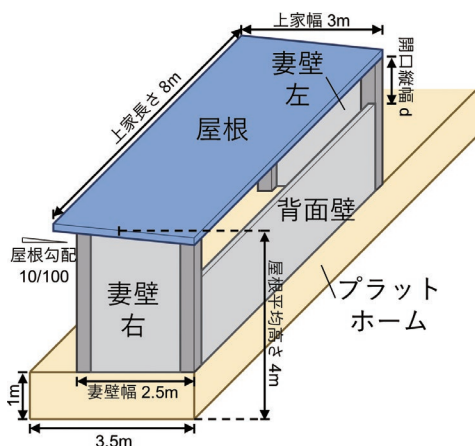
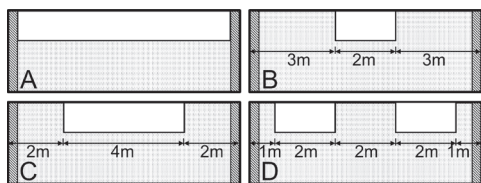


図1 対象構造物の概要

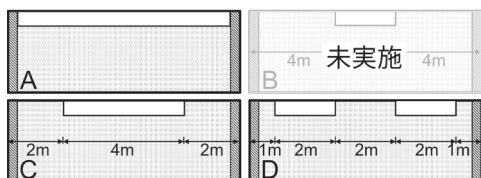
表1 実施した条件

開口縦幅	開口パターン
0m	—
0.5m	A, C, D
1m	A, B, C, D

開口パターンのA~Dの詳細は図2



(a) 開口縦幅 1.0m



(b) 開口縦幅 0.5m

図2 開口パターンの概要

厳しい条件で実施するのが妥当と判断したためである。

また、以下では、線路平行方向の壁を背面壁、線路直交方向の壁を妻壁と呼ぶこととする。

2.2 検討条件

実施した検討条件を表1に、開口パターンの概要を図2(図中の白抜き箇所が開口)に示す。背面壁の開口縦幅 d は0m(開口なし)、0.5m、1.0mの3通り、開口パターンはA~Dの4通りを検討条件とした。ただし、検討は全ての条件の組合せで実施せず、開口縦幅1.0m、開口パターンAの条件を基本ケースとし、基本ケースに対する比較の観点から不要と判断したいくつかの組合せについては省略した。C及びDにおける開口の横幅

は等しく、また、C及びDの開口縦幅を0.5mとした場合、開口縦幅1.0mのBと開口面積が等しくなる。

3. 風洞実験に基づく風圧力の検討

3.1 風洞実験概要

3.1.1 実験気流

実験は、鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞密閉型測定部で実施した。風洞測定部は幅5m、長さ20m、高さ3mである。実験気流は、前述の荷重指針⁷⁾の地表面粗度区分II相当の乱流境界層であり、平均風速のプロファイルを表すべき指数は0.14である。実験風速は動圧測定位置(高さ1.8m)で約30m/s、代表風速は屋根平均高さで約19.7m/s(実スケールで51.6m/s)である。実験風速及び代表風速は、鉄道構造物等設計標準・同解説^{例え9)}に示される設計用風荷重を参考に決定した。実験に用いる寸法の縮尺率は実大スケールに対し1/40とした。レイノルズ数 Re は、模型の平均屋根高さを代表長として、 $Re=1.4 \times 10^5$ である。なお、模型スケールのレイノルズ数 Re は実大スケールに対し1/100であるが、本研究対象であるホーム上家のように角型の形状で構成される物体の場合、1/100程度のレイノルズ数 Re の違いが風圧力に与える影響は小さいため、問題ないものとした。風洞床面からの平均屋根高さ0.105m(模型下の基盤0.005mを含む)における主流方向の乱れ強さ I_u 及び乱れのスケール L_x はそれぞれ $I_u=0.17$ 及び $L_x=0.65m$ (上家長さは模型寸法で0.2m)である。

3.1.2 実験模型

実験は、小型のホーム上家の他に、壁を有さない先行研究¹⁰⁾に準じた独立上屋(以下、先行研究上屋)に対しても実施し、ホーム上家の本実験に先んじて風洞実験方法の妥当性を検証した。図3に先行研究上屋の模型の概要を示す。屋根を構成する①から⑥の位置に、圧力測定孔を両面に設けた二種類の圧力測定パネルを順に配置し、6回の送風によって屋根全域72箇所(上下面の合計144の圧力孔)の圧力測定を行う。なお、圧力パネル以外のパネルは、同一形状で圧力孔の無いダミーパネルである。

図4に本実験で使用した小型のホーム上家模型の一例を示す。屋根は、四隅の柱(幅7.7mm)によって支持され、屋根、背面壁及び妻壁の各種寸法は2.1節に準ずる。上家はホーム端に設置し、ホームの全長は600mm(実物大24m)である。屋根、背面壁及び妻壁の厚さは3.75mmとし、各部材の両面に圧力測定孔が設けられている。圧力測定孔の配置の一例を図5に示す。圧力測定孔の配置は、各部材面上で均等になること、及び屋根から背面壁にかけての計測断面が同一となることに配慮して決定した。圧力測定孔の点数は、屋根及び妻

壁は条件によらず共通で、外面内面合わせてそれぞれ24点、12点である。背面壁の圧力測定孔の点数は、開口パターンによって異なり、パターンAで16点、その他のパターンで24点である。

3.1.3 圧力測定方法

圧力は、屋根、背面壁及び妻壁に設けられた最大計72点の圧力測定孔を用いて、サンプリング周波数2kHzで全点同時計測した。圧力計にはZOC-23B（スキャニバルブ製）を32ch及びMT-SP-8（メロンテクノス製）を6台で48ch、A/D変換器にはNI 9229（ナショナルインスツルメンツ製）を用いた。モデルの圧力測定孔と圧力計とはウレタンチューブ及びレクタングュラコネクタ（RC2/063-8）を用いてモデル下で接続されている。なお、サンプリング数は1回の測定に対して100,000個（=50秒、実大スケール換算で約10分）であり、同一条件で5回測定した。先行研究上屋の実験風向角は、図3に示す90~180deg.の間を30deg.刻みに4条件とした。ホーム上家の実験風向角は、軌道側からの送風を $\theta=90deg.$ 、軌道反対側からの送風を $\theta=-90deg.$ とし、 $\theta=-90deg.\sim90deg.$ の範囲で15deg.間隔を基本とした⁴⁾（図6）。ただし、一部条件では、基本的な複数の条件の結果により比較的風圧力が小さいと判断されたため、 $\theta=-90deg.\sim0deg.$ 及び $\theta=15deg.$ を省略した。

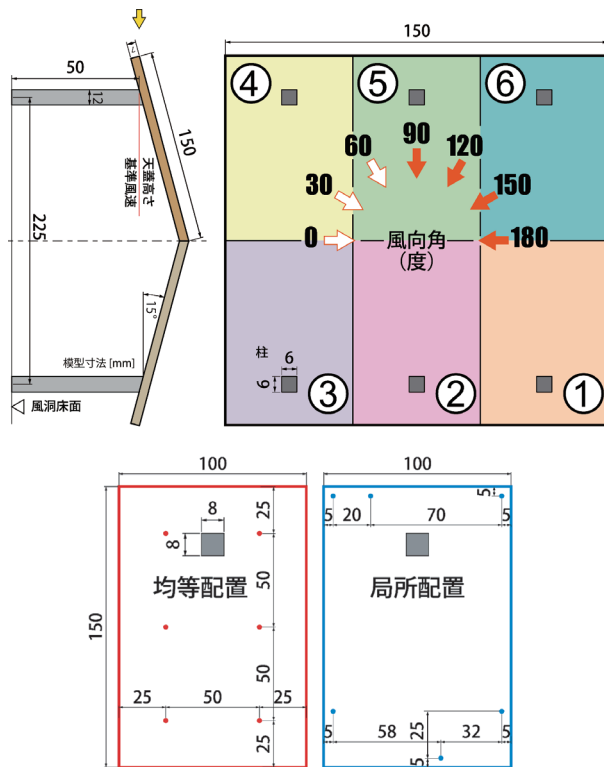


図3 先行研究上屋の模型概略図

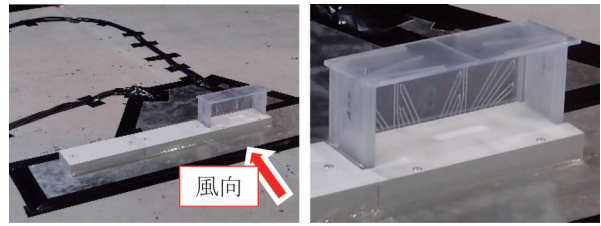


図4 実験模型の一例（パターンB、風向角90deg.）

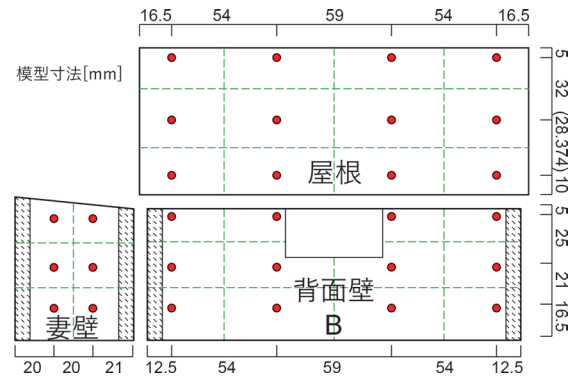


図5 圧力測定孔配置の一例（開口パターンB）

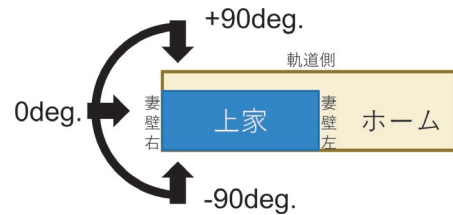


図6 風向角の定義

3.2 検証指標の定義

風圧力は、風力係数に速度圧を乗じたもの⁸⁾であるが、本研究では実験風速が全ケースで同一であることから、設計用風圧力は、下式で定義する平均風力係数 C_f を用いて、屋根、背面壁及び妻壁それぞれについて検討することとした。

$$C_f = \frac{1}{Aq_H} \sum_{k=1}^n (p_{ok} - p_{ik}) a_k \quad (1)$$

ここで、 A は各部材面の面積、 q_H は屋根平均高さにおける速度圧、 P_{ok} は上家外側の圧力測定孔毎の平均風圧、 P_{ik} は上家内側の圧力測定孔毎の平均風圧、 a_k は各圧力測定孔に割り当てる面積、 n は各部材面における内側又は外側の圧力測定孔の点数である。背面壁の面積 A は開口部を除くこととした。 a_k は図5の破線に示すように、隣り合う圧力測定孔同士から等距離に境界が位置するよう定めた。圧力測定孔毎の平均風圧、 P_{ok} 、 P_{ik} は、時間平均した値を各条件でアンサンブル平均することで算出した。

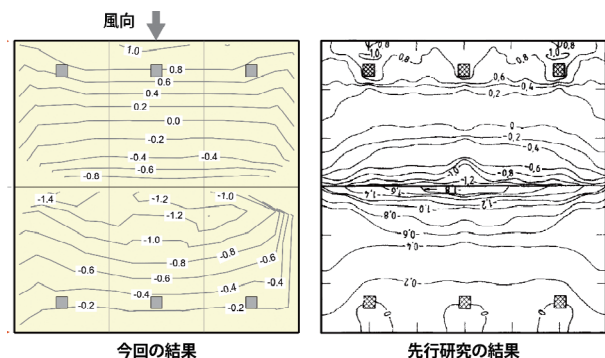


図7 先行研究上屋に対する平均風力係数の比較

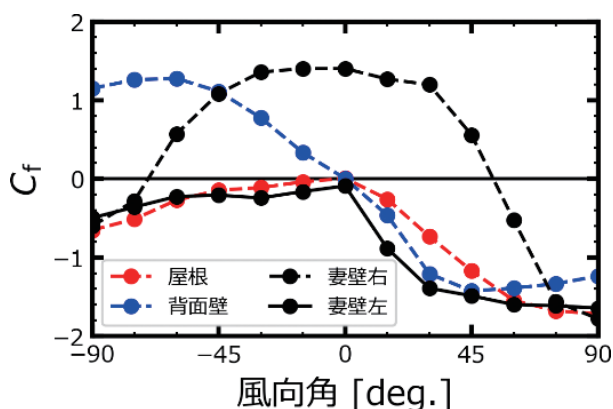


図8 風向角と風力係数 C_f の関係 (基本ケース)

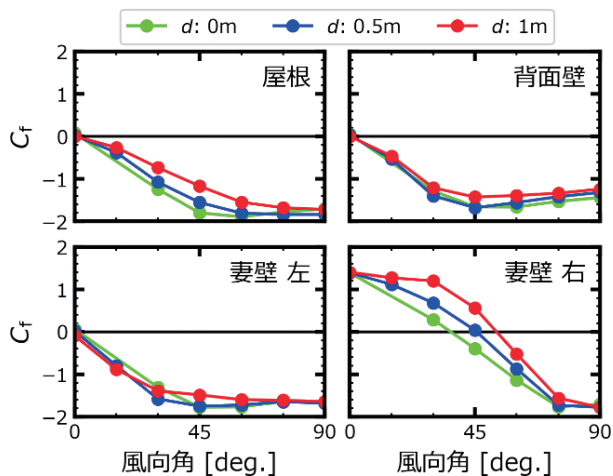


図9 風向角と風力係数 C_f の関係
(開口縦幅 d による比較)

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 先行研究上屋の実験結果

図7に風力係数 C_f の比較例として風向角 90deg. における平均風力係数の分布を示す。先行研究の結果は、上屋模型端部まで多くの圧力孔により詳細に測定しているため細かく比較すると、屋根面上で異なる箇所もあるが、図示していない他の風向角も含めて、分布がほぼ同等であるため、今回の実験は十分な再現性を有していると考え

えられる。

3.3.2 基本ケースにおける風向角と風力係数の関係

基本ケース (開口パターン A, 開口縦幅 1.0m) について、風向角と風力係数 C_f の関係を図8に示す。全体の傾向として、風向角が負の範囲よりも正の範囲で風力係数 C_f の絶対値は大きい傾向にある。風力係数の絶対値の大きい場合で耐風設計上不利になりやすいことから、以下の比較検討では、風向角を正の範囲、すなわち風が軌道側から吹く範囲に限って検討する。

3.3.3 開口縦幅による影響

開口パターン A について、開口縦幅毎の風向角と風力係数 C_f の関係を図9に示す。屋根及び背面壁の風力係数 C_f の絶対値は、一部の風向角で差は小さいものの、概ね開口縦幅が大きいほど小さい傾向にある。一方、妻壁の風力係数 C_f は、左では開口縦幅によらず概ね同程度の値を取るのに対し、右では風向角により絶対値の大小が異なり、風向角 $\theta < 45\text{deg.}$ では開口縦幅が小さいほど小さく、風向角 $\theta > 45\text{deg.}$ では開口縦幅が大きいほど値が小さい傾向にある。ただし、絶対値が最大値を取る風向角 90deg に着目すると、開口縦幅による風力係数 C_f の差は非常に小さい。

次に、開口縦幅 0m と 0.5m, 0.5m と 1.0m との風力係数 C_f の差に着目する。比較的差が顕著である風向角 45deg. における屋根及び背面壁を見ると、0m と 0.5m との差よりも 0.5m と 1.0m の間の差の方が大きい傾向にある。よって、開口縦幅と風力係数 C_f の低減の程度は比例関係にはなく、開口を 0.5m 程度設けるのみでは風圧力の低減が比較的小さいと言える。

以上より、一定以上の開口を設けると、屋根及び背面壁に作用する風圧力を低減できると言える。ただし、縦幅 0.5m 程度ではその効果が見られない点には留意が必要である。

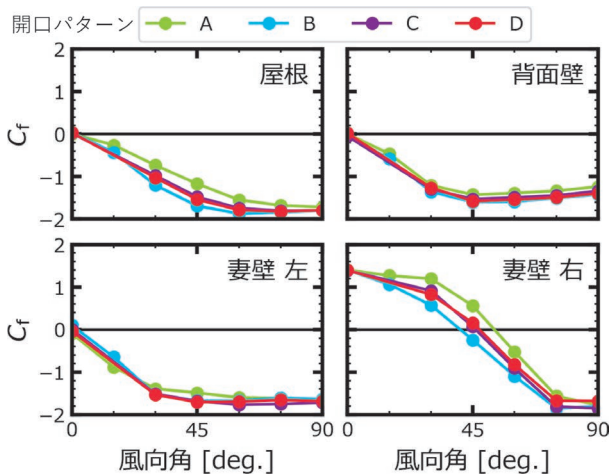
3.3.4 開口パターンによる影響

開口パターン毎の風向角と風力係数 C_f の関係を図10に示す。図10 (a)は開口縦幅を 1.0m で揃えた場合、(b)は開口面積を 2.0m² で揃えた場合の結果を示している。図10 (a)より、風力係数 C_f の絶対値は A で最も小さく、B で最も大きい傾向にある。また、C と D の風力係数 C_f は風向角によらず概ね同程度である。一方、図10 (b)に着目すると、いずれの条件でも、風力係数 C_f は同程度である。

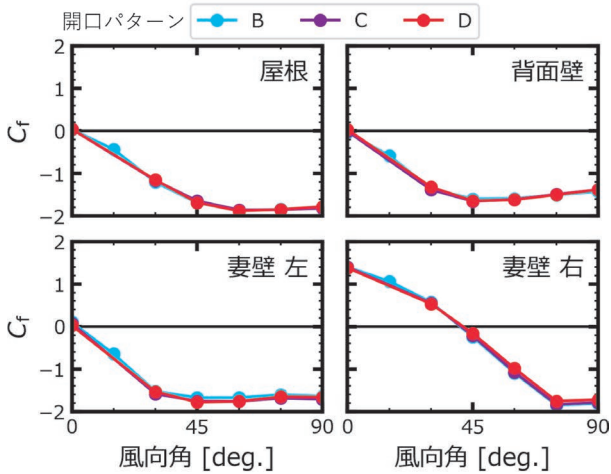
以上より、各部材面に作用する風圧力の大きさは開口面積に依存する傾向にあり、開口の設け方に概ねよらないことが示唆された。

4. 骨組解析に基づく部材応答の検討

前章では、風洞実験により得られた各部材面の平均風



(a) 開口縦幅を 1.0m に揃えた場合



(b) 開口面積を 2.0m² に揃えた場合

図 10 風向角と風力係数 C_f の関係
(開口パターンによる比較)

力係数を指標として、外力としての風圧力を検討し、各部材面毎の傾向を把握した。一方、構造部材への影響を考える場合、部材面毎に作用する風圧力を検討するだけでなく、全部材面に作用する風圧力による影響を総合して検討する必要がある。また、背面壁の開口の違いは、受圧面積の違いとなるため、これらの影響の検討は前章の外力の検討のみでは不十分である。そこで、本章では、前章の風力係数相当の風荷重が各部材面に作用した場合における構造部材の応答を、骨組解析により検討する。

4.1 骨組解析概要

4.1.1 骨組解析モデル

解析は、汎用構造解析ソフト midas iGen を用いて弾性モデルとして行った。図 11 に骨組解析モデルの一例を示す。風荷重は、壁や屋根の仕上材（面材）から、母屋、胴縁等の下地材（線材）を経て、柱、梁等の構造部材に伝達される。実際には面材の面内剛性によって構造

部材が拘束されるが、実設計ではこの拘束による影響を捨象して設計される場合が多い。そこで本検討では、面材の面内剛性が構造部材の応答に影響を与えないように、解析モデルを構造部材による要素（以下、構造躯体要素）と風荷重を受圧する要素（以下、風荷重受圧要素）の2つの要素によって構成することとした。両要素は、風荷重受圧要素の面外方向のみ荷重を伝達する境界条件で剛体連結されている。風荷重受圧要素に外力を入力し、それに対する構造躯体要素の応力を検討する。構造躯体要素の断面寸法は、旅客上家設計でしばしば参照される旧国鉄の標準的な旅客上家のうち、規模の近い片流れ屋根の旅客上家を参考に決定した。構造躯体要素の断面寸法を表 2 に示す。構造躯体要素のブレース以外の部材は曲げ剛性、せん断剛性及び軸剛性を考慮した線材、鉄骨壁面ブレースは軸剛性のみを考慮したトラス材、屋根面ブレースは引張のみ作用するトラス材とし、柱及び間柱の柱脚は露出柱脚を想定し、ピン接合とした。風荷重受圧要素は折板屋根の折版方向及び壁の胴縁方向を想定して 20~30cm 間隔で分割し分割領域毎に構造躯体要素と連結させた。部材の材料は、構造躯体要素、風荷重受圧要素共に SS400 とした。入力荷重は前章に基づき $C_f \times$

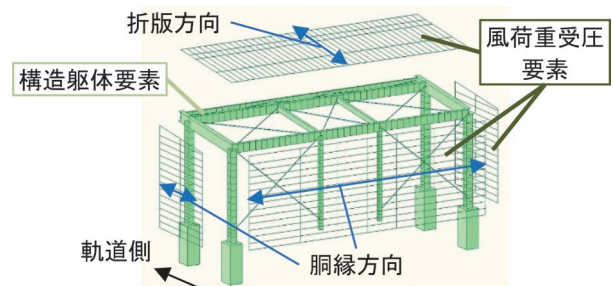


図 11 骨組解析モデルの一例

表 2 構造躯体要素の断面寸法

柱	柱	H - 200×200×8×12
	間柱	H - 100×100×6×8
梁	主梁	H - 300×150×6.5×9
	桁梁	H - 250×125×6×9
	サブビーム	H - 150×75×5×7
	鼻桁	C - 150×50×4.5
ブレース		16φ

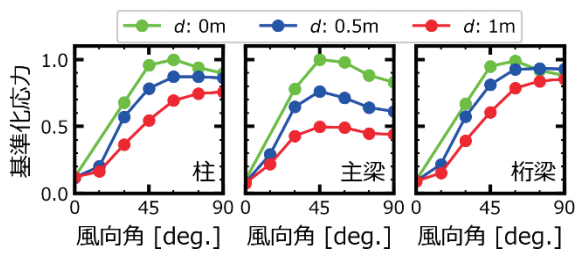
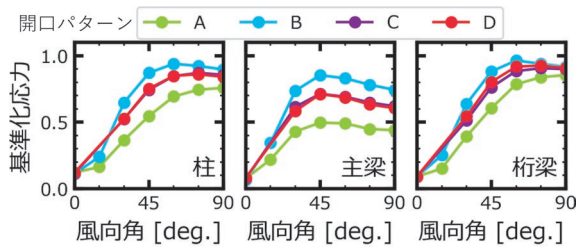
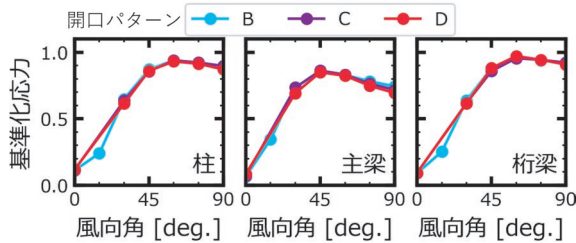


図 12 風向角と基準化応力の関係
(開口縦幅 d による比較)



(a) 開口縦幅を 1.0m に揃えた場合



(b) 開口面積を 2.0m² に揃えた場合

図 13 風向角と基準化応力の関係
(開口パターンによる比較)

1.0N/m² の面荷重とし、風荷重受圧要素に作用させる。

4.1.2 検討指標

検討対象の部材は、柱、主梁及び桁梁とし、各部材の最大応力の絶対値を条件毎に比較検討する。その際、検討に用いる指標は、各部材の応力を全条件の最大値で基準化した応力の絶対値（以下、基準化応力）とした。

4.2 解析結果及び考察

4.2.1 開口縦幅による影響

開口パターン A について、開口縦幅毎の風向角と基準化応力の関係を図 12 に示す。なお、旅客上家は柱 4 部材、主梁及び桁梁各 2 部材から構成されるが、柱同士、主梁同士、桁梁同士で傾向が同様であったため、以下では、柱、主梁及び桁梁毎に基準化応力の最も大きい部材の値を各条件の代表値として示す。図より、概ね全ての風向角で開口縦幅が大きいほど基準化応力は小さい。また、各風向角で、基準化応力の差に着目すると、本検討の部材断面の条件においては、風力係数の差よりも顕著である。特に、開口縦幅 0m と 0.5m との差を見ると、風力係数においては差がほとんど見られなかったのに対し、基準

化応力では開口縦幅 0.5m と 1.0m の差と同程度の風向角も見られる。風力係数が同程度の場合、開口縦幅が大きくなると、その分背面壁の受圧面積が減少し、入力される荷重の総量も減少するが、この影響が全ての部材に対し応力の減少を生じさせたとは見られる。よって、背面壁の風圧力の影響が部材応力に対して大きいと言える。

以上より、開口縦幅を大きくするほど、風圧力と同様に応力も低減でき、かつ、その低減の程度は風力係数で見られた程度よりも顕著に現れると考えられる。

4.2.2 開口パターンによる影響

開口パターン毎の風向角と基準化応力の関係を図 13 に示す。図 13 (a) は開口縦幅を 1.0m で統一した場合、(b) は開口面積を 2.0m² で統一した場合の結果を示している。図 13 (a) より、基準化応力は A で最も小さく、B で最も大きい傾向にある。また、C と D の基準化応力は風向角によらず概ね同程度である。一方、図 13 (b) に着目すると、いずれの条件でも、基準化応力は同程度である。以上の傾向は風圧力に基づく検討と同様だが、基準化応力で傾向が顕著である。風力係数の場合よりも基準化応力の場合で影響が顕著となったのは、4.2.1 項と同様に、開口面積により背面壁の受圧面積が変化した影響と考えられる。

以上より、各部材の応力は、風圧力と同様に開口面積に依存し、開口の設け方に概ねよらないと言える。

5. まとめ

本研究では、地平プラットホーム上に設置された小型のホーム上家を対象に、風洞実験を行い、時間的空間的に平均した風力係数を算出し、その結果を外力とした骨組解析を行った。その結果、ホーム上家の形態の違いが風圧力及び部材応答に与える影響について、旅客上家に作用する風圧力及びそれに対する応答は、背面壁に設けた開口が大きいほど小さく、開口の配置の仕方には依存しないという知見を得られた。今後は、各部材面内の風圧力の分布や偏りを考慮するとともに、内圧、外圧それぞれについて一般建築等との比較等を実施し、より検討を深度化する。

注) 上家および上屋：一面以上の壁がなく屋根の下面が風に晒される、もしくは屋根だけの建物を指す。鉄道の技術基準等では「上家」と表記されてきたが、建築基準法等では「上屋」と表記されてきた。本文では、プラットホーム上の旅客上家など鉄道施設として使用する場合は「上家」、独立上屋など建築基準法の範疇となる建物の場合は「上屋」と表記した。

文 献

- 1) Gumley, S.J., "A parametric study of extreme pressures for the static design of canopy structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics", Vol.16, pp.43-56, 1984.
- 2) British Standards Institution, "Code of basic data for the design of buildings Chapter V. Loading, Part 2. Wind loads", CP3: Chapter V: Part 2, 1972.
- 3) Letchford, C.W. and Ginger, J.D., "Wind loads on planar canopy roofs, Part 1 mean pressure distributions", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 45, pp.25-45, 1992.
- 4) Ginger, J.D. and Letchford, C.W., "Wind loads on planar canopy roofs, Part 2 fluctuating pressure distributions and correlations", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 51, pp. 353-370, 1994.
- 5) Standards Australia, "Australian/New Zealand Standard, Structural design actions, Part 2 : Wind actions", AS/NZS 1170.2, 2002.
- 6) 植松康, 飯泉江梨, セオドル・スタトポラス: 独立上屋の風荷重に関する研究: その2 構造骨組用風力係数, 日本風工学会論文集, 第31巻, 第107号, pp.35-49, 2006
- 7) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善出版, 2015
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所監修: 建築物の構造関係技術基準解説書 2020年版, 全国官報販売協同組合, 2020
- 9) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)——第I編 基本原則/第II編 橋りょう, 2023
- 10) C.W. Letchford, J.D. Ginger, "Wind loads on planar canopy roofs, Part 1 mean pressure distributions", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.45, pp.25-45, 1992.