# 実大建物模型を用いた通風研究専用風洞実験施設の特性 CHARACTERISTICS OF THE WIND TUNNEL WITH A FULL-SCALE BUILDING MODEL SPECIALLY DESIGNED FOR CROSS VENTILATION RESEARCH

## 澤地孝男\*1 瀬戸裕直\*2 清田誠良\*3 成田健一\*4 石川優美\*5 Takao SAWACHI, Hironao SETO, Nobuyoshi KIYOTA, Ken-ichi NARITA and Yuumi ISHIKAWA

A wind tunnel with a full-scale building model (5.56 m x 5.56 m x 3m) was constructed with particular purposes related to the development of wind-driven ventilation design. The research plan with the facility is briefly described, and the measurement results for the three-dimensional airflow around the building and the wind pressure on its walls and roof are shown for different wind angles between 0° to 75°. The detailed airflow near the surface of the building (in a distance of 5cm) is also shown. The wind pressure distributions for 0° and 45° wind angles are compared with existing results from a wind tunnel with a scale model, and from the field measurement with a full-scale model. These measurement results show the detailed characteristics of the facility, as a basis of the analysis in succeeding different experiments.

Keywords: Cross Ventilation, Wind tunnel, Wind Pressure Coefficient, Full-scale Test 通風、風洞、風圧係数、実大実験

### 1. はじめに

室内環境の質を左右する要因としては様々なものが考えられる が、「通風」の良し悪しは、古くからわが国の建築の環境性能を判 断する重要な要因として認識されてきた。昨今の住宅居住者を対 象とした意識調査の結果からも、「通風」の良いことが最も重要な 性能のひとつであることがうかがえる<sup>1)</sup>。温暖な地域では特に希 求度の高い性能であるにもかかわらず、その定量的な評価に関し ては実用的な方法が残念ながら存在してこなかったと見ることが できる。例えば、最新のわが国の住宅省エネルギー基準 2)におい ては、断熱性、気密性、日射遮蔽性能、日射取得性能、換気性能 に関しては定量的な基準値が定められているものの、通風に関し ては定性的な努力目標が掲げられるに留まっている。

本論文では、通風性能の評価及び設計手法の構築に資するもの として計画建設された実大建物モデルを含む自然通風換気研究専 用の風洞実験施設の特徴を報告するとともに、異なる風向条件に おける実大建物モデル周囲の気流分布及び風圧分布に関する特性 について報告、考察する。

- 2. 研究の背景及び既往研究
- 2-1. 通風関連の既往研究

わが国において、通風に関する研究の歴史は決して短いとは言





風洞の平面及び断面 図1

\*1 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築新技術研究官 工博 National Institute of Land and Infrastructure Management, Dr. Eng \*2 独立行政法人建築研究所 主任研究員 Building Research Institute

- \*3 広島工業大学 教授 工博 Professor, Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng. \*4 日本工業大学 教授 工博 Professor, Nihon Institute of Technology, Dr. Eng.

\*5 独立行政法人建築研究所 重点研究支援協力員 工修 Building Research Institute

えない。石原はその著書<sup>3)</sup>の中で、流量係数(流速係数)に基づ く通風量計算と実際の通風量の関係について模型実験に基づいて 検討し、両者の乖離について検討した。勝田(高司)・後藤<sup>4)</sup>は、 規則的に配置した模型を用いて建築密度(建蔽率)と風圧係数差 の関係を戸建住宅から高層建物について求めた。また、勝田(千 利)・関根<sup>5)</sup>は、通風下の開口の流量係数が大気風速に対する開口 部平均風速の比と風向によって増減するとの考えに基づき、戸建 住宅と集合住宅(ベランダや戸境壁の有無条件を含む)について 実験を行い、流量係数の変化の様相を調べた。実大に近い模型を 自然風中に設置して風圧に関する観測を行った例としては立川<sup>6)</sup> の研究があり、耐風設計への活用を意図した強風時の計測である がペントハウス上に置いた立方体様の構造物に作用する風圧を計 測した。

近年では、赤林・村上ら<sup>7)</sup>が建蔽率や屋根の形状等を変えて独 立住宅に作用する風圧の計測を風洞実験によって行っている。 何・片山ら<sup>80</sup>は、立方体模型において間仕切りがある場合の通風 量の実測を風洞実験において行っている。また、飯野・倉渕ら<sup>90</sup> は本研究で使用する建物モデルに近い形状の模型を使用した風洞 実験を行い、無指向性風速計を用いた模型内部の気流性状や通風 量の計測、数値シミュレーション結果との比較を行っている。 一方、海外においては、Aynsley<sup>10)</sup>は、ダクトの設計等に使用され てきたオリフィス流れ理論(Orifice Flow Theory)を通風に適用す る場合の誤差要因に関して考察している。また、Vickery 6<sup>11)</sup>は 開口の無い建物模型で計測された風圧係数を通風計算に用いるこ とによる誤差の検討、そして風洞実験における通風量実測値と理

2-2. 直方体模型を用いた風洞実験に係わる既往研究

論計算値との比較を行っている。

縮尺模型を用い壁面等に作用する風圧係数を求める目的で行わ れた風洞実験は多数存在する。しかし、最大風圧値のみでなく、 各壁面の全体的な風圧分布や平均値に関して系統的に実験結果が 示されている文献は意外と少ない。Akins ら<sup>12)</sup>は境界層風洞にお いて直方体形状の建物に関する模型実験結果を集計し、アスペク ト比(平面短辺に対する高さの比)が 1~8、縦横比(平面長辺に対 する短辺の比)が 0.25~1の直方体形状建物について、屋根を含む 各面の平均風圧係数を提示している。Castro ら<sup>13)</sup>は、境界層風洞 及び一様流風洞において、立方体模型の風圧分布に関して詳細な 実験を行い、Hoxey ら<sup>14)</sup>は屋外に設置した実大立方体模型を用い て風圧分布及び周辺気流に関する計測結果を基に風洞実験結果と の比較を行っている。また、白橋ら<sup>15)</sup>は立方体模型について、乱 流境界層流中と一様気流中における風圧係数実測値の比較を行っ ている。これらの既往実験結果は、本実験施設でモデル建物周り に形成される気流及び作用風圧の特性を把握する上で参考となる。

3. 実大建物模型を含む風洞実験施設の建設目的と諸元

#### (1) 風洞実験施設の建設目的と計画主旨

実験施設は、風力換気又は通風に係わる建築物及び設備システ ムの性状を対象として定量的な観察データを収集し、最終的には これまでの進捗が決して十分とは言えない性能評価及び性能予測 の技術を開発することを目標とするものである。具体的には、以 下のような研究目的に使用することを想定して計画されている。

- モデル建物周囲の詳細な気流分布、壁面等に作用する風圧の 詳細な分布に関するデータの取得
- 2)風力換気現象、中でも通風現象下における各所(モデル建物 周囲、開口部周囲、建物内部)の気流分布及び風圧分布に関 する基礎的データの取得
- 3) 通風量の予測のためのモデルの検証及び改良
- 4)多様な流体数値計算手法による通風性状、通風量等の予測精 度の比較検証
- 5) 気流性状のレーザーライトシートを用いた可視化
- 6)通風等の環境性能向上に配慮した開口部を含めて、開口部関 連部品の開発及び評価
- 7)通風現象下における新鮮空気配分の不均一性の解析及び不均一性に起因する換気及び温熱環境条件の差異に関する解析
- 8)通風による排熱効果の評価モデルの検証構築を目的とした、 熱伝達率分布の計測を含む熱的解析

これらの使用目的を充足させるために次のような基本的方針の 下で設計がなされた。

- ・実大に近い単純な形状をした単独建物に風圧を付与でき、建物 を回転させることで相対的な風向を変更できるようにすること。
- ・複層条件での空気の浮力による換気現象は別個の実験施設で実 験可能であることから、風洞中の建物は単層(平屋建て)を想 定すること。
- ・建物に作用する風圧は、最も単純な状況、すなわち遮蔽物のない平地に建物が置かれている状況に極力近づけること。しかし、 模型による閉塞率の関係により、建物周囲の風圧や気流が理想的な状況から乖離することはある程度やむを得ないとする。
- ・本実験施設では当面は、単独建物の実験を主とし、隣接建物の 影響や周辺粗度の影響については従来型の風洞における縮尺模 型実験等で対応する。
- ・風洞気流の垂直分布と乱流強度については極力小さくする。
- (2) 風洞の諸元

風洞の断面及び平面を図1に示す。電動機内蔵単段軸流送風機 (直径1,500mm、出力37kW)6機が測定部上部の風路内に置かれ、 その上流には熱要素に関する実験に備えて測定部における気温を 安定させるために冷却コイルが設置され、測定部気温を25℃以下 に維持することを可能にしている。吹き出し気流の分布を極力均 一化し整流するため、アルミニウム製ハニカム(一辺6mmの六角 形穴、厚さ50mm)及び2層のステンレス製の網が収縮部分の上流 に設けられるとともに、吹き出し口にも網が設置されている。ま た、測定部中央には直径8.5mのターンテーブルが設けられ、その 上にモデル建物が建設される。風速の範囲は吹き出し口より4.5m 離れた位置(モデル建物の上流壁面位置に当たる)において概ね 1~5m/sである。

#### (3) モデル建物の諸元

モデル建物は、風洞性能の検証のための一連の実測が終了後に 測定部ターンテーブル上に設置した。1辺が5.56mの正方形平面 で、田の字型に空間を区画する取り外し可能な大小2種類のパネ ル(可視化の自由度を高めるため透明ガラス製)により分割でき るようになっている。鉄骨構造であるが、壁面及び床面は木製で





図 2(1) 測定部における水平面気流分布(モデル建物設置前、風速 3m/s)





図 2(2) 測定部における垂直面 気流分布(モデル建物設置前、風 速 3m/s)

図 3(1) モデル建物予定位置(吹き出し口 より 4.5m)における平均風速分布

図 3(2) モデル建物予定位置(吹き出し口 より 4.5m)における乱流強度分布

あり、実験条件によって開口部の位置や大きさを簡便に変更でき、 また圧力測定孔の追加設置が可能なようになっている。モデル建 物の高さは3.0mであり、床面高さは風洞測定部床面より50cm上 となっており、床下及びターンテーブル下の空間には圧力関係の 測定機器類が収められるようになっている。なお、モデル建物の 屋根兼天井は強化ガラス製であり、風洞測定部の上部(軸流送風 機設置位置の下部空間)に設けられた気流等観察室からの撮影に よるモデル建物内部の可視化が可能となっている。

(4) 気流及び圧力分布等の測定システム

気流速、気流ベクトル、通風量等の計測には主として3次元超 音波風速計カイジョーWA-390 又は DA-600 を使用する。測定時間 間隔は通常は10Hz とし、TEAC 社製 DR-M3 によりデータ収録した。 圧力分布の計測には、壁面等に埋め込まれた内径 1mm の圧力測定 孔を用い、微差圧計 MKS 社製 Baratron Type 220C(測定レンジ: 133Pa)及び変換器 PDR-5B を使用した。データ収録には KEITHLEY 社製 2010MULTIMETER を使用した。また、測定点の切り替えには電 磁式測定孔切り替え装置(SCANIVALVE 社製)を使用した。なお、 差圧測定の基準点は、風洞吹き出し口の上端より 50cm 下の位置に ピトー管を設置し、その静圧孔とした。 4. 風洞の基本性能に関する測定結果

図2(1)に測定部内における水平面気流ベクトルを示すが、高さ 3.5m までは幅 6m 以上の範囲で平行流となっており、下流部の両 側においてのみ左右にベクトルが広がる傾向が見られる。また、 図2(2)には鉛直面気流ベクトルを示すが、中央軸線上から3m外 側においてはほぼ水平の気流が形成されており、下流部において やや上向きの気流となっていることが確認される。図3(1)は吹き 出し口から 4.5m 離れた面(モデル建物が風向に正対した場合の風 上面の位置に相当)における風速分布を示す。吹き出し口高さ中 央で風速がやや高く、床面に最も近いところでやや低い傾向が見 られるものの、平均値の 5%以内に収まっている。水平方向では端 部付近の風速が中央に比べてわずかであるが高めとなる傾向があ る。また、乱流強度を図 3(2)に示すが、2~4m/s の風速条件下で 床上 0.5m 及び 2.0m の位置ではほぼ 5%以下となっているが、建 物の屋根上 0.5m に相当する床上 3.5m においては最大で 20%程 度までの増加が見られる。ただし、風速によって水平分布に差異 が見られることから、高さ 3.5m における乱流強度分布について はその点に留意しつつ参照する必要がある。



1m 及び 3m における水平分布)



5. モデル建物周囲の気流分布及び作用風圧

5-1. 建物設置後における風洞測定部内性状

建物を設置した状態における風洞測定部内部の気流性状を計測 するため、図4に示す測定点を用いた。建物周囲の水平面気流性 状を図7(1)に、垂直面気流分布を図7(2)示す。

風向 0°の場合(図1平面図中の建物の向きを「風向 0°」とし、 上から見て時計回りの回転角度により風向を定義する。以下同 じ。)、建物風上壁面に衝突した気流が壁面端部で剥離し、上方及 び両側に気流速度の増加域を形成する一方で、建物両側壁面の付 近及び建物の後流域においては気流速度が減少している。また、 後流域では明確な風上に向かう気流が建物軸線方向に関して対称 に形成されている。風向 15°の場合、風洞の風下に向かって左手 には外側に向かう強い流れが形成され、右手には建物の壁面に平 行な流れが形成されている。風洞床面から 1m と 3m の高さの流れ を比較すると、建物背後では 1m では風上に逆流する流れが、3m では風下に向かって左に旋回するような流れが形成されている。 風向 30°では、3m 高さにおける左旋回流はより顕著であり、屋根 直上 30cm における気流速についても 0°及び 15°の場合に比べて端

2.0m/s

1.0m/s



図 7(2) モデル建物周囲の気流性状(図 4 に示す Y4 Y6 Y8 断面における 分布であり、陰影はモデル建物の切断面を示す。風速は 3m/s)



図 8 モデル建物壁面に近接した位置(壁面より 5cm)における垂直面気流 分布(図 5 に示す J3 J15 及び K3 K15 断面における分布。風速は 3m/s)

广山19月	
3.0 m/s	
.0111/0	
2.0m/s	····>
1.0m/s	



図9 壁面及び屋根面における風圧係数の分布

大きくなっている。風向 45°の場合は、屋根直上における風下向 きの流れが一層顕著になり、風向 0°や 15°の場合のように屋根風 上部で気流が強く上方に跳ね上げられるようなことはなくなる。 しかし、床上 1m の高さでは建物背後に風上に向かう流れが生じて いる。風向 60°と 75°の条件は、各々30°及び 15°の条件と線対称な 条件であり、測定結果が示す傾向としても対称となっている。な お、風向 45°のような線対称条件では、気流性状に非対称性が現 れているが、同様の結果は Castro ら<sup>13)</sup>も報告しており、滞留点 が風上の建物端部上となり、時々刻々左右に位置を変化させてい ることに起因すると説明している。

図5は建物近傍における気流分布をより詳細に把握するため に設けられた測定点配置を示す。図8は、建物壁面に最も近い測 定点(壁面より 5cm)における垂直面気流分布を示す。風向 0°に おける風上壁面に沿った気流分布は J3 断面として示されている が、下から2段目(高さ1m)よりもやや上の付近に滞留域があり、 それより上部では上方への流れが卓越し、下部では下方への流れ が卓越している。建物の背面(J15 断面)では、全範囲において上 方への流れが卓越している。側面(K3及びK15断面)では風下部分 では上方、風上部分では下方へのいずれも弱い流れが見られる。 風向 15°においては、風上壁面では右側 1/5~1/6 の範囲で右方向 への気流が、左側 5/6~4/5 の範囲で左方向への気流が卓越してい る。背面の壁は上方への流れが全領域で卓越している。風向 30° においては、風上壁面では全域で左方向への流れが卓越し、すべ ての壁面で上方への流れが卓越している。風向 45°においては、 風上壁面は2面(J3及びK3)とも上方への流れが卓越し、上部及び 風下になるにしたがって気流速度は大きくなっている。 5-2. モデル建物に作用する風圧の分布



図10 風向 0°に建物が配置された場合における風洞吹き 出し口直近の動圧及び静圧の分布

建物の壁面及び屋根面の風圧を計測するため、図6に配置を示 す圧力測定孔を用いた。屋根の1/4部分に圧力測定孔が設けられ、 建物の回転によって屋根面全域の測定が行うことができる。

図9に各風向条件における壁面等の風圧係数分布を示す。風向 0°においては、風上壁面の下部(上方向き及び下方向き気流の境界 となる滞留域よりもやや下)の両側にクビレが見られ、風圧の低い 領域が壁面の内部に入ってきている部分がある。最も風圧の高い 領域は滞留域のやや上に楕円上に広がり、最大で1.5程度の風圧



係数となっている。左右の側壁及び屋根面は、-0.4~-0.5 程度の 風圧係数となっている。建物の背面壁は両側及び上部ほど風圧係 数の絶対値が大きいが、-0.1~-0.3 の範囲にある。風向 15°にお いては、風上壁面の右側より 1/5~1/6 中央よりの部分で風圧係数 が最大となり、右側壁面では壁面風上端部における剥離によって -0.9~-1.2 と絶対値の大きな負の風圧係数が計測されている。屋 根面はほぼ全域で-0.5~-0.7 の範囲の風圧係数となっている。風 向 30°においては、風上壁面の風圧係数は 1.3~0.2 の広範囲にわ たり、風下に向かうに従って低下する傾向を示し、隣接する風下 に向かって右側の壁面では風上端部付近を除き極めて絶対値の小 さな風圧係数が観測されている。風向 45°においては、屋根面風 上端部付近において絶対値の極めて大きな負値(-3.7 等)となる 風圧係数が観測され、煙による可視化により円錐状渦発生が確認 された。この点は立川<sup>6</sup>による自然風中における観測結果と共通 している。

建物模型による風洞の閉塞による基準静圧への影響の無視でき る通常の風洞では、風向の変化即ち建物模型の向きの変化によら ず基準静圧は一定であるが、本風洞実験施設ではモデル建物の向 きの変化による風洞の閉塞状況の変化によって基準静圧が変化す る。したがって、ある風向条件におけるモデル建物の場所間での 風圧係数差には基準静圧は関係しないものの、風圧係数に関する 他の風洞における実測結果との比較においては注意が必要である。

また、通常の風洞(境界層風洞等)における直方体建物模型の 風上垂直壁面の風圧係数は1未満となるのに対して、本実験結果 において風圧係数が最大で1.5程度となる理由は以下のように考 えられる。建物の設置による風洞風量の変化は無視できる程度で あるが(建物設置前後の吹き出し面風速分布による確認による)、 建物によってその上流領域の気流分布及び静圧分布は大きく変化 している(図 10)。全圧は比較的安定する傾向にあるが、建物近 傍ほど風速が弱く、静圧が高い傾向が見られる。基準圧を採って いるピトー管位置(高さ4.5m)は建物の上方にはずれた場所であ り、基準風速よりも大きな風速が観測されることから(最大 3.27m/s [風向 0°]、最小 3.14m/s [風向 45°])、建物設置前の基 準風速となっている主流域の代表的な静圧と比較すると低下して いるものと推測される。ピトー管設置位置での風速を 3.3m/s と 仮定すると、全圧一定として静圧の低下分は1.13Pa となり、風圧 係数に換算すると 0.21 となる。また、建物設置による吹き出し口 と建物間の全圧増加が生じているとすれば、その点も要因となっ ていることが考えられる。図 10 によれば建物前面中央付近と吹 き出し口の端では 1.9Pa の全圧差が観測されており、その差を風 圧係数に換算すると 0.35 となる。

図 11 では、本実験施設においてモデル建物に加えることので きる風圧条件と直方体模型を用いた既往実験結果との比較を行っ た。Hoxey ら<sup>14)</sup>は一辺が 6m の立方体模型を開けた土地に設置し(た だし、想定主風向と直角に 18m 及び 13m 離れた場所に各々幅 24m の長方形平面の建物及び直径 6m のタンクが存在する)、模型壁面 等の風圧計測を行っている。基準風速は模型の風上約 20m に立て られたマストに設置された風速計で計測し、典型的な垂直方向の 風速プロファイルとして軒高風速を 1.0 として、3m 及び 1m の高 さで各々0.91 及び 0.73 であると報告している。本研究の実験で は建物壁面の高さの範囲内において風速がほぼ一定であり基準風 速に近似している点で Hoxey らの実験と異なる。Castro ら<sup>13)</sup>は 0.27m×0.90m 断面の測定部を持つ一様流風洞(乱流強度 0.5%以 下)に 6cm の立方体模型を設置し風圧分布を計測し報告している。 同時に 2.7m×9.1m 断面の測定部を持つ境界層風洞に 20cm の立方 体模型を置いて計測した結果との比較を行っている。

風向 0°の場合、建物中央を鉛直面で切った線(L<sub>v</sub>)に沿う風圧 係数を比較すると、一様流風洞での Castro らの結果とは変化の様 子が類似するのに対して、Hoxey らの結果では屋根の上流側辺縁 付近から下流側に向けて風圧の傾きが見られる。水平面で切った 線(L<sub>u</sub>)に沿った風圧係数を比較すると、同様に Castro らの結果 と類似し、Hoxey らの結果は側面壁での流れ方向に風圧係数の傾 きが見られる点で異なる。L<sub>v</sub>線、L<sub>u</sub>線に沿った風圧係数ともに本 実験の結果は正負いずれの場合であっても他の2実験と比べると やや正側の値となっている点は、前述したような本実験の風向 0°条件における基準静圧の特徴に関係するものと考えられる。風 向 45°の場合の L<sub>v</sub>線に沿った風圧係数を比較すると、屋根の前辺 縁での負圧の程度に本実験と他の2実験では差が見られるが、そ の他の領域での傾向は概ね一致している。一方、L<sub>H</sub>線に沿った比 較では前面壁 (L<sub>H</sub>=0~1)では Castro らの結果とほぼ一致するが、 背面壁 (L<sub>H</sub>=1~2)では分布形状はほぼ一致するものの絶対値が異 なる。

本研究で使用する風洞及びモデル建物の組み合わせは、第3章 に記した研究目的及び実験施設設計における基本的方針に拠って、 縮尺模型を用いる一般の風洞における平滑地の単独建物に関する 実験結果とは基本的に異なる周辺気流及び風圧場を形成するもの である。しかしながら、図11に示した2風向条件下での建物に 作用する風圧の比較によれば、屋根や壁の単一面内での分布には 他の風洞実験等との差異が見られるものの、各面での正負圧の分 布及び剥離領域を除いた部分の各面内の風圧分布に関する限り、 一様流風洞及び屋外での実測結果と大きくは異ならない状況を形

成できているものと考えられる。

#### 6. まとめ

本論文では、自然通風換気に係わる研究目的を持って建設され た実際の建物寸法に近いモデル建物(直方体形状、5.56m×5.56m ×3m)を内包する風洞の特性を示した後、モデル建物周囲の詳細 な気流分布及び壁面等の風圧分布に関する実験結果を報告した。

なお、本報における建物モデル周囲の気流性状や作用風圧性状 に関する実測結果を、本実験施設の基本特性として以外に、より 一般的な問題解決の拠り所とする場合には、閉塞率等の実験条件 の特殊性に留意しなければならない。

次報以降においては、モデル建物に開口を設けた場合の実験結 果を用いて、通風現象の微細や通風量に影響を及ぼす要因につい て報告するが、本報での実測結果はそうした実験結果の基本情報 となるものである。

#### 参考文献

都市整備機構による住民へのアンケート調査結果による
 「住宅に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主の判断の基準」中の「7.防暑のための通気経路の確保」、通商産業省、
 建設省告示第二号、1999年3月30日

3) 石原正雄:建築換気設計、朝倉書店、1969年

4)勝田高司、後藤滋:建物周囲条件の換気通風に及ぼす影響、日本建築学会論文報告集、第53号、pp.67-77、1956年6月
5)勝田千利、関根毅:建築物壁面開口部による換気に関する実験的研究、特に開口部の圧力損失係数と風圧係数について、日本建築学会論文報告集、第68号、pp.116-120、1961年6月

6) 立川正夫:自然風中において構造物に作用する風圧力に関す る実験的研究、その4・壁面の風圧測定、日本建築学会論文報告 集、第159号、pp.17-24、1969年5月

7)赤林伸一、村上周三、水谷国男、高倉秀一:周辺に建物群がある独立住宅の風圧分布に関する風洞実験及び換気量予測、住宅の換気・通風に関する実験的研究その1、日本建築学会計画系論

文集、第456号、pp.9-16、1994年2月

8) 何平、片山忠久、林徹夫、堤純一郎:単室モデルの通風量に 関する数値シミュレーションによる基礎的検討、日本建築学会計 画系論文集、第474号、pp.47-56、1995年8月

 9)飯野由香利、倉渕隆、小林信行、嵐口晃宏:風洞実験及びC FDを併用した通風時の開口条件や主風向が異なる場合における
 建物内外の気流性状に関する研究、日本建築学会計画系論文集、

第520号、pp.47-54、1999年6月

10) R.M. Aynsley: A Resistance Approach to Estimating Airflow through Buildings with Large Openings due to Wind, pp.1661-1669, ASHRAE Transactions, 1988

11) B.J. Vickery and C. Karakatsanis: External Wind Pressure Distributions and Induced Internal Ventilation Flow in Low-rise Industrial and Domestic Structures, pp.2198-2213, ASHRAE Transactions, 1987

12) R.E.Akins, J.A.Peterka and J.E.Cermak: Averaged Pressure Coefficients for Rectangular Buildings, pp.369-380, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering, Vol. 1., July 1979

13) I.P.Castro and A.G.Robins: The Flow Around A Surface-mounted Cube In Uniform And Turbulent Streams, pp.307-335, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 79, Part 2, 1977

14) R.P.Hoxey, P.J.Richards and J.L.Short: A 6 m Cube In An Atmospheric Boundary Layer Flow, Part 1. Full-scale And Wind-tunnel Results, 3rd International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2000), University of Birmingham, September 2000

15) 白橋英憲、川端三郎:2 種類の気流中における風洞実験の比較、pp.89-96、構造物の耐風性に関する第2回シンポジウム論文集、1972