

通風における室内気流分布の形成要因に関する考察

—実大建物模型を含む風洞実験施設を用いた通風に関する研究—

INTERPRETATION OF THE MECHANISMS FORMING THE AIRFLOW
DISTRIBUTION IN CROSS-VENTILATED ROOMS—Study on the cross ventilation by using the wind tunnel facility
containing a full-scale building model—

澤地 孝男*1, 成田 健一*2, 清田 誠良*3, 西澤 繁毅*4, 瀬戸 裕直*5

Takao SAWACHI, Ken-ichi NARITA, Nobuyoshi KIYOTA,
Shigeki NISHIZAWA and Hironao SETO

For a building model with rectangular plan and a pair of openings in diagonal positions, three-dimensional indoor airflow was measured at 980 points for every 15 degree wind angles between 0° and 165°. On the basis of the measurement result, the characteristics of the indoor airflow was analyzed. Rough overview on the main stream region tends to make the observer misunderstand that such main stream region was connecting smoothly without any striking at obstacles between inlet and outlet openings. However, air stream basically goes straight, strikes against obstacles on its direction, rebounds and changes own direction as a result. This process is repeated until the main stream finds the outlet opening.

When the main stream strikes the obstacles like walls at a large angle, so called "escape flow" is formed in either above and below the main stream. The escape flow escapes from the area where the main stream strikes the obstacles. When the main stream strikes the obstacle at a small angle, it goes along the obstacle due to the Coanda effect. If there is enough space beside the main stream region, the circular flow can be formed beside the main stream.

The existence of the main stream and the circular flow contributes to determine the distribution of thermal environment in cross-ventilated indoor space. It is necessary to collect continuously the information on the airflow in the space with different layouts of openings and any partitions.

Keywords : Cross Ventilation, Wind Tunnel Experiment, Thermal Environment

通風、風洞実験、温熱環境

1. はじめに

通風は、風力を駆動力として、流入出口となる複数の開口部を設けることによって短時間に多量の換気を行うことを意味する。それにより室温の調節や居住者の体表面からの放熱を促し、温熱快適性を向上させることができる。また、多量の換気によって、機械力による強制換気では対処しにくい、一時的に生じる多量の汚染物質の排出や希釈のために有用でもある。騒音や粉塵の増加といった、通風にとっては障害となる要因が少ない状況であっても、近年では住宅のみならず事務所等の業務用建築においても自然通風換気の適用事例が少なくない。特に関東以西のような温暖な地域では、断熱と比肩し得るほど、実務者や生活者の中には通風を重要視する傾向も存在する。一方で、建築設計における通風計画手法の客観性、定量性は、断熱のような「閉じる」技術に比較して不十分な状況にあることから、通風技術の今後の発展のためにもさらなる確固とした科学的知見の蓄積が必要とされ

ている。通風下の空間では部分的な高風速の存在等、気流分布の偏りの生じることは周知の事実ではあるが、そうした分布の形成要因を考究するための詳細な観察データや仮説の提示はこれまで決して十分であったとは言えない。

2. 研究目的及び既往研究

既報¹⁾では通風研究用に建設された専用の風洞実験施設の特徴を示し、実大建物模型周囲の気流場及び壁面等の風圧係数に関する実験結果について論じた。

本論文では、建物模型に二開口を設けた条件下での通風性状のうち、建物内部各点における平均気流ベクトル測定結果に基づいて、通風気流の持っている特性を解析し、考察を加える。

通風の排熱及び躯体冷却効果²⁾や人体放熱の促進効果に関して探究するに当たっては、通風空間における気流分布に関してより確固とした知見が必要である。なぜなら、気流速度の大きな場

*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

*2 日本工業大学 教授・工博

*3 広島工業大学 教授・工博

*4 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部
研究官・博士(工学)

*5 独立行政法人建築研究所環境研究グループ 主任研究員

Research Coordinator for Advanced Building Technology, National Inst. for Land and Infrastructure Management, MLIT, Dr. Eng.

Prof., Nihon Inst. of Technology, Dr. Eng.

Prof., Hiroshima Inst. of Technology, Dr. Eng.

Researcher, Dept. of Building, National Inst. for Land and Infrastructure Management, MLIT, Ph. D.

Senior Researcher, Dept. of Environmental Eng., Building Research Institute

所では躯体冷却効果と人体放熱の促進効果のいずれも顕著となるが、小さな場所ではそれら効果は限られたものになるからである。

従来、通風空間における気流分布に関する実験結果は、詳細度の点で限定的なものしか存在していない。例えば、テキサス工学実験研究所による模型による可視化実験結果³⁾がVictor OlgyayによるDesign with Climate⁴⁾や建築設計資料集成等の設計資料集^{5) 6)}に掲載されてきた。わが国でも、小玉ら⁷⁾、山下ら⁸⁾、金ら⁹⁾、カロ¹⁰⁾らは、模型による可視化又は風速測定を試みているものの、従来の可視化では煙の拡散する乱流域における気流性状は把握しにくく、また、狭い縮尺模型内部では立体的で定量的な観察データを得ることが難しかった。一方、村上ら¹¹⁾、西田ら¹²⁾によって実大の建物内部における計測が行われてきたが、変動する外部風向風速と室内気流分布との関係の把握が容易でないことや測定点数の限界のため、気流分布の一部が観察できたに留まっている。本論文においては、このような従来の観察における課題を補うため、一定の外部風条件下において通風空間における気流分布を詳細に測定し、その結果に基づいて室内気流の分布や形状の形成要因について考察する。

3. 実験手法

3-1. 風洞及び建物模型の諸元

風洞の概要を図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

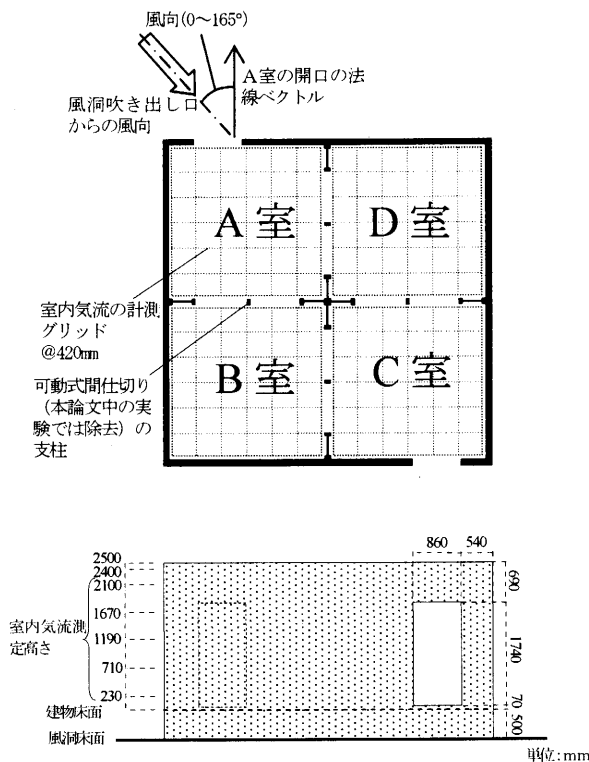


図2 風洞内部ターンテーブル上に置かれた建物模型の平面図及び立面図

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。なお、本報における実験では風洞の風速を3m/sに固定し、風洞測定部は等温条件とした。

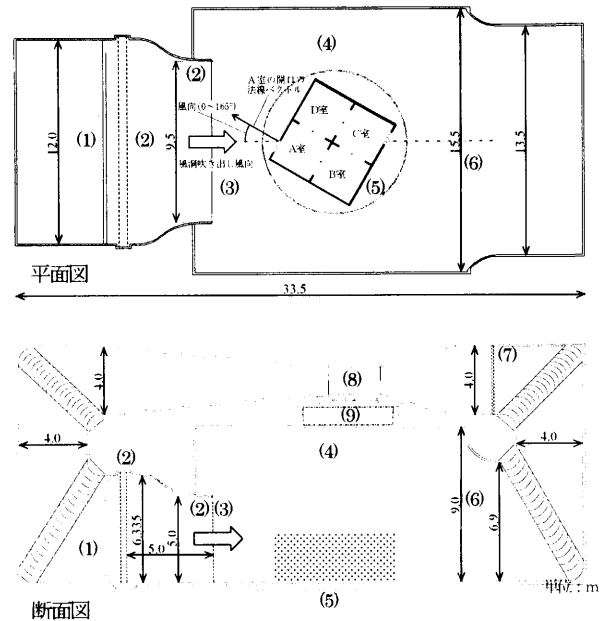


図1 風洞の平面図及び断面図

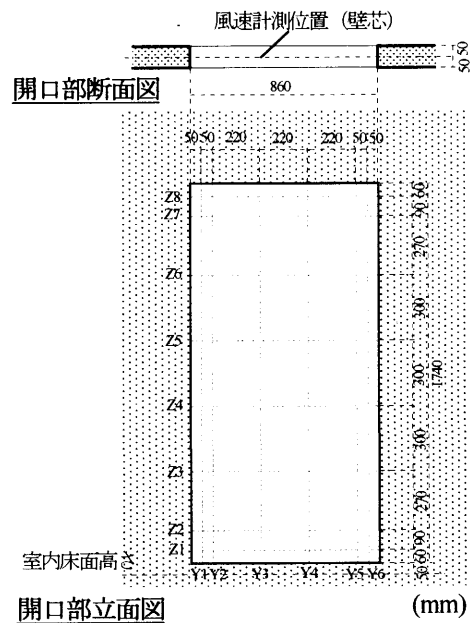
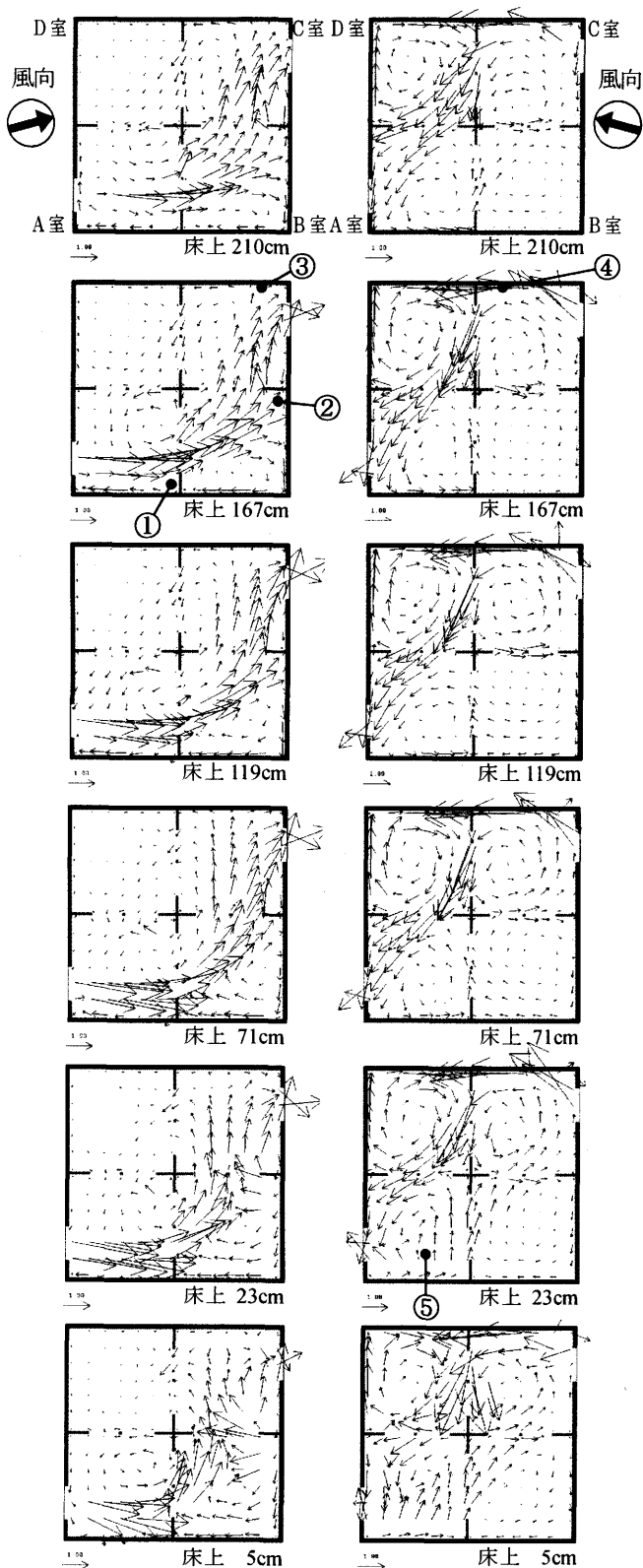


図3 開口部内における3次元超音波風速計による測定点（水平6列、垂直8段）

建物模型の平面及び立面図を図2に示す。模型は、一辺が5.56mの正方形平面であり、可動式間仕切りを装着することで田の字型に4分割可能（A室～D室）であるが、本論文の



(1) 風向15° (2) 風向165°

図4 風向15°及び165°の条件における、建物内部の気流ベクトル（上から床上210cm、167cm、119cm、71cm、23cm、5cm）

実験では可動部分はすべて取り外してある。ただし、A室～D室の4室の間には間仕切りを装着するための短い袖壁（45cm幅）及び細い支柱があり、室間の開口は幅1.8m、高さ2.2mであった。室内の天井高は2.4m（気積69.0m³）であり、床は風洞測定部の床面より50cm高くなっている。この建物模型は特定の建物プランを想定してモデル化したものではなく、通風に係る基本的な観察を行うために複数室に分割可能な最も単純な建物形状として定めたものである。本実験における開口はA室とC室の各々に、掃きだし窓を部分的に開放した形状を想定し、幅86cm高さ174cmの開口（壁厚10cm）を図2の立面図に示すように設置した。その結果、床面積に対する開口面積の比率は10%、開口を有する壁面の面積に対する開口面積の比率（porosity）は9%である。建物模型をその中心を軸として回転することにより風向を相対的に変化させることが可能であり、その場合の風向は図2の平面図に示すように上方から見て時計回りの回転角で定義した。実験は風向0°～165°の15°毎の12風向について行った。

3-2. 計測手法

気流計測には3次元超音波風速計 KAIJO WA-390 又は DA-600 を使用した。

室内においては、図2平面図に示す各室49点の格子点毎に5段（23cm、71cm、119cm、167cm、210cm）に風速計を固定したポールを移動して気流計測を行った。それら5段に加えて床付近（高さ5cm）の計測も別途行った。開口部内においては図3に示す48点で気流計測を行った。また、建物近傍に関しては壁面から5cm、46.3cm、92.6cm離れた位置において、風洞床面から5段（50cm、100cm、150cm、200cm、300cm）に風速計を固定したポールを移動して気流計測を行った。

風速計からの電圧出力は、TEAC社製DR-M3により10Hzで3分間記録した。

4. 実験結果

4-1. 水平面気流ベクトル（高度別比較）

12風向のうち、風向15°及び風向165°の2条件について、床上5cmから210cmまでの6高度の気流ベクトル図を図4(1)及び図4(2)に示す。風向15°は、建物内への流入気流の開口面に対する角度が垂直に最も近い風向条件であり、逆に風向165°は、流入気流が顕著に開口面に対して斜めに生じている風向条件である。また、いずれの風向条件ともに通風量が比較的大きく、主流域が明確な条件である。

風向15°では、A室開口から流入しC室開口から流出する。床上71cm、119cm又は167cmのベクトル図から見ると、B室を經由して、流入開口から流出開口に到る、周辺よりも風速の大きい領域（以下では「主流域」と呼ぶ）を見出すことができる。一方、床上5cm、23cm、210cm（即ち主流域の上方又は下方に当たる部分）のベクトル図を見ると、主流域とは異なる様子が見られ、①等の部分では袖壁に、②等では袖壁及びB室の壁に、③等ではC室の壁に衝突し、撥ね返る流れが存在することを示している。

また、風向15°における流入気流の角度は、他の風向条件と比べて最も開口面に垂直に近い条件であるが（流入気流の角度は後出の図5において確認することができる）、それでもやや右斜めに向けて流入すること

から、主流域の一部はA室B室間にある袖壁に衝突し、やや左斜めに向きを変えて進み、B室の外壁内面及びB室C室間の袖壁に衝突している。それによりさらに左に向きを変えて進み、流出開口に到達するか又はC室の外壁内面に衝突してC室の中央に戻るか又はD室の方へ流入している。

風向 165° では、C室開口から流入しA室開口から流出する。床上 71cm、119cm 又は 167cm のベクトル図から見ると、D室を經由して、流出箇所に向かう主流域が存在する。流入開口のあるC室の気流を見ると、壁に衝突して後に壁に沿って流れるコアンダ効果と考えられる現象が存在する(④等の部分)。一方、床上 5cm、23cm、210cm のベクトル図を見ると、主流域とは異なる向きの流れが見られる。C室開口から右斜めに向けて流入後、外壁内面に沿って流れた後にC室D室間の袖壁に衝突し反撥した気流、さらにその気流が中央支柱に衝突し反撥した気流は、床面付近で顕著になっている。また、A室に入った気流が流出開口の左に逸れて外壁内面に衝突し反撥した気流も床上 5cm 及び 23cm のベクトル図に表れている(⑤等の部分)。また、風向 165° では、D室において特に明確な時計回りの循環流が見られる。C室においても床上 71cm 又は 119cm のベクトル図からは反時計回りの循環流が見られるが、床上 5cm 又は 23cm のベクトル図からはA室の外壁内面に衝突し反撥した気流がB室を經由してC室に入ろうとし、C室内の気流とぶつかる様子が見られる。

4-2. 建物内部及び近傍における水平面気流ベクトル

建物内部のほぼ中央高さにおける水平面気流ベクトルを、ほぼ同じ高さにおける建物近傍における水平面気流ベクトルとともに図5に示す。風向 0° ~60° 及び風向 90° の条件では、A室から主に流入し、C室から主に流出している。風向 75° 及び風向 105° ~165° の条件では逆にC室から主に流入し、A室から主に流出している。

流入角度は、1) 開口の上流の建物に接近する気流の方向、2) 開口周囲の外壁面に沿った気流、3) 斜め流入する場合の開口辺縁部(本実験では厚み 10cm)に衝突し反撥した気流、4) 開口近くの建物内部の壁面等の障害物の存在、5) 開口に向かう室内側の循環流、の各要因の影響によって決まるのではないかと考えられる。

一方、流出角度は、1) 開口の上流の主流域の方向、2) 開口近くの外壁内表面に沿った流れ、3) 開口辺縁部に衝突し反撥した気流、

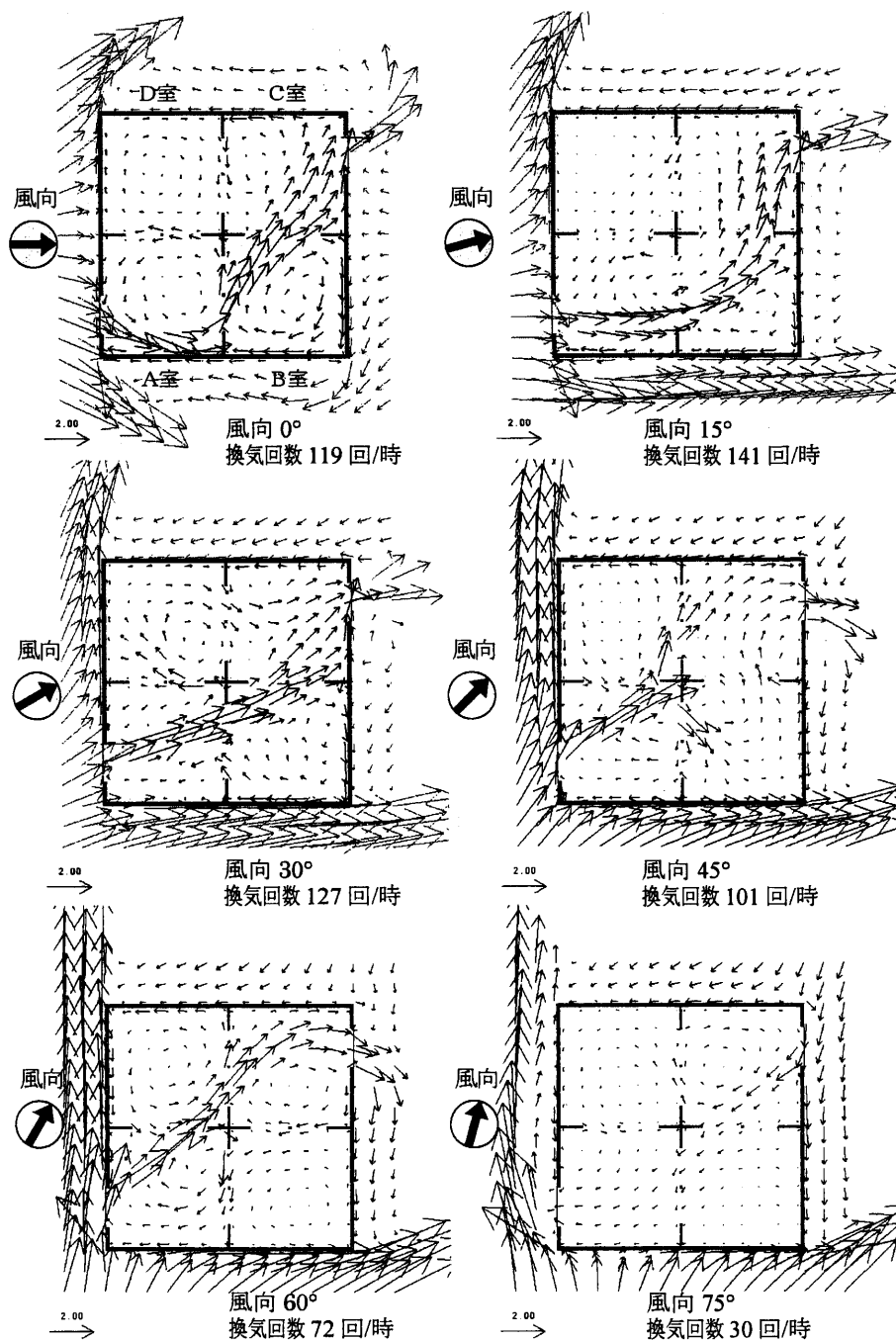


図5 (1) 建物内部中央高さにおける水平面気流ベクトル (0°~75°)
(室配置は各風向とも左下から反時計回りにA室、B室、C室、D室)

4) 開口近くの外部気流、によって影響を受けるものと考えられる。ただし、流出開口は建物の後流域の内部にあることが多いと予想され、外部気流の速度はあまり大きくはなく、影響も限られたものと考えられる。

ベクトル図をいずれの風向も同一スケールで作成した場合、風向 90° や風向 75° のように通風量が他の風向条件と比較して小さい場合には、主流域の存在を見過ごす危険性がある。そのような場合については、スケールを変更してベクトルを拡大表示することにより、明確な主流域が確認可能となることがあり得る(図中、風向 90° については、倍スケールのベクトルを記した)。

風向 105° から 165° はいずれの条件でも、流入後にコアンダ

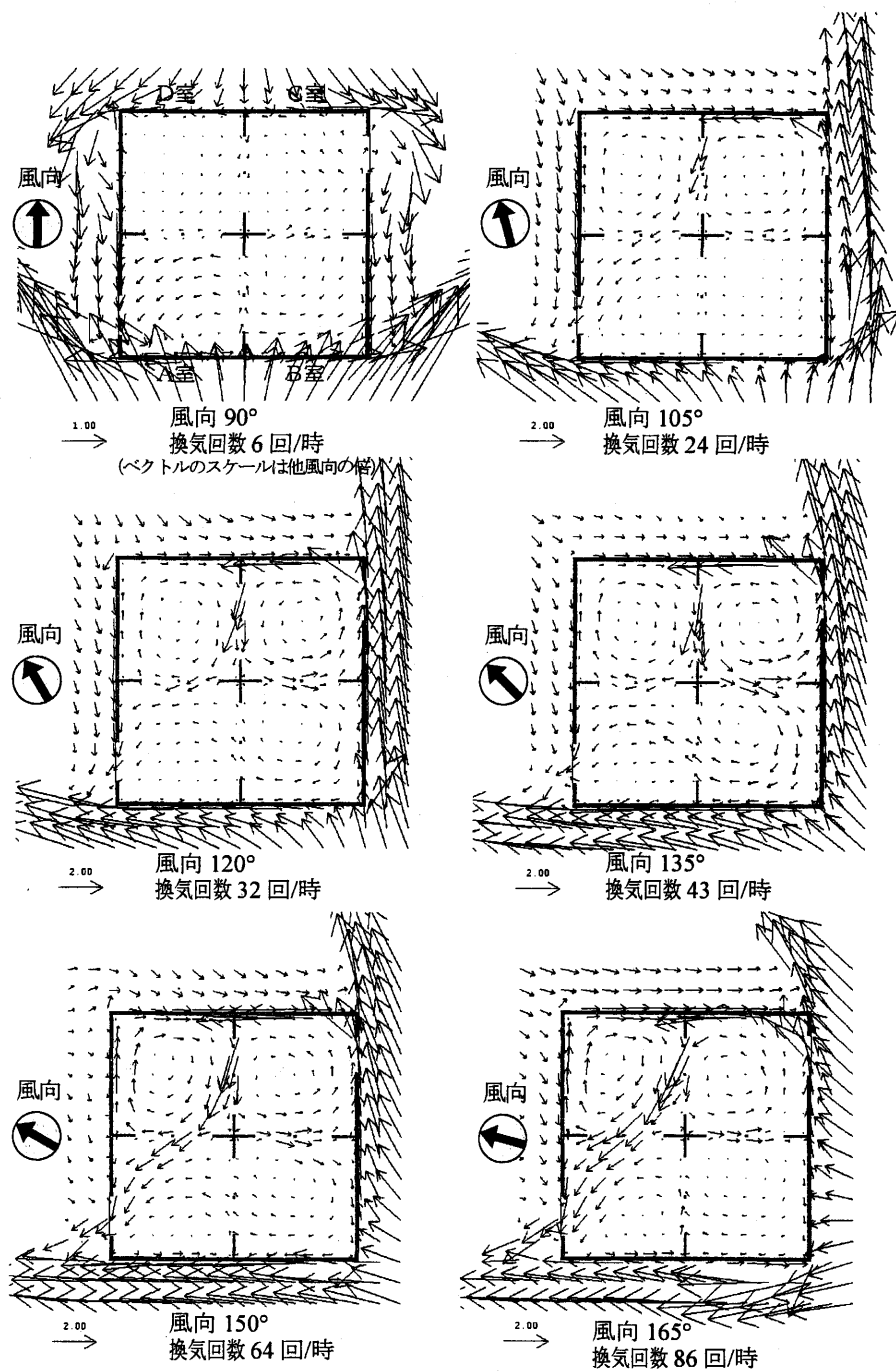


図5(2) 建物内部中央高さにおける水平面気流ベクトル (90°~165°)
(室配置は各風向とも左下から反時計回りにA室、B室、C室、D室)

効果によってC室外壁内面に沿った流れが、C室D室間の袖壁に衝突反撥し建物中央支柱に向かい、そこで衝突し左右に分かれて流出開口に向かって流れており、流れの様子が似ている。B室、C室、D室において循環流が生じているが、風速は室中央で低く、壁面近くで高くなる傾向がある。

4-3. 鉛直方向の平均風速分布及び室間の比較

室内における高さ方向の気流の差異を見るため、室毎高さ毎の平均風速(49点分)の平均値を図6に示す。床上210cm(最上段)においてはやや平均風速が低い傾向があるが、床上23cmから167cmについては、高さによる平均風速の違いは顕著ではない。また、4室の平均風速を比較すると、a) 1室のみ平均風速が小さ

いパターン(15° 165°)、b) 1室のみ平均風速が大きいパターン(45°、75°、135°)、c) 4室の平均風速がまちまちであるパターン(105°)に分かれる。a)は風向0°、15°、30°、60°、165°のように、主流域が通過しない部屋が存在する場合であり、b)は風向45°、75°、120°、135°のように流入室において主流域が支柱等に衝突することで両側の部屋に分かれる場合であり、c)は90°、105°、150°のように流入室において主流域が支柱等に衝突した後、片方の部屋に偏って分流する場合であると言える。

4-4. 各点平均風速の頻度分布

通風には室内風速を大きくして居住者の冷涼感を増す目的が含まれる。図4や図5のような空間的な気流分布下において、建物内部における気流速度の大きさはどのように分布するのだろうか。図7は、各風向条件下での建物内部980点(床上23cmから210cmの範囲とする)の平均風速(3次元成分を瞬時に合成した値の測定時間内の平均値)及び標準偏差によって規準化された、各室245点の平均風速の頻度分布を示すものである。

風向15°では、最も主流域の明確で図6に示したように平均風速も最大である流入直後の部屋(A室)の分布の最大頻度の階級はB室C室よりもむしろ小さい。しかし、頻度は大きくないものの規準化風速が1.5~4の範囲においてもピークを持っており、それが主流域内の測定点に対応している。特にB室は0.5~0.6m/sが最頻値となっており、A室では高風速域の範囲が限られるのに対してB室ではA室よりも広い範囲で中程度の風速が得られている。風向165°におけるC室とD室の関係も類似している。風向45°でも、流入室であるA室は、最頻値の風速が最も小さいが、最も高風速の部分にピークを持っている。B室及びC室の最頻値風速はA室よりも明らかに大きい。

風向75°では、風向45°と同じく流入室(C室)の平均風速が他の3室よりも大きく、かつ最頻値風速も他の部屋よりも明らかに大きくなっている。このことは、風向75°や90°のように通風量が小さい場合には、風上室でしか涼感に寄与するような風速が得られない可能性を示唆している。風向135°における傾向は、45°と75°における傾向の中間にある。

風向75°では、風向45°と同じく流入室(C室)の平均風速が他の3室よりも大きく、かつ最頻値風速も他の部屋よりも明らかに大きくなっている。このことは、風向75°や90°のように通風量が小さい場合には、風上室でしか涼感に寄与するような風速が得られない可能性を示唆している。風向135°における傾向は、45°と75°における傾向の中間にある。

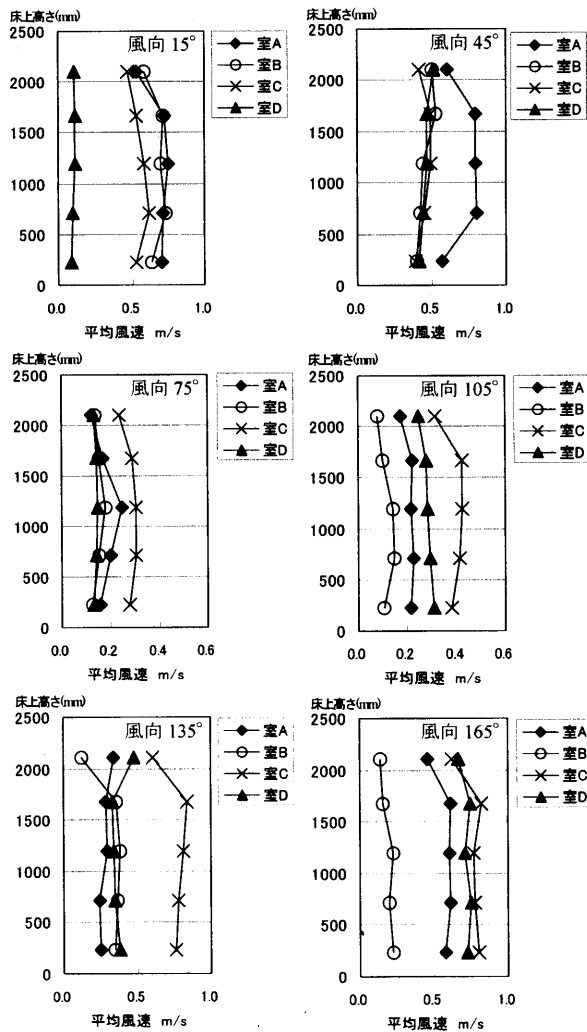


図6 室毎に見た床上高さ別の平均風速

5. 考察

実際における通風現象は、外部風の風向風速の変化や乱れが大きいこと等に由来して、本論文における実験結果のみからでは、その性質全体を捉えることはできない。とは言っても、建物内部の通風気流構造に関する観察を、実際の建物において行うことは、今後も試みる必要があるがその複雑さゆえに把握し切れない情報が生じることは避け難い(屋外や室内に多数の3次元風速計を設置して同時計測しなければ本実験と同程度に詳細な情報は取得できない)。また、流体数値計算による通風気流構造の解析についても有力な手段になり得るが、同時に継続的な精度の検証が不可欠であると言え、本実験結果はむしろその点においても活用できるものである。

図4及び図5に示された建物内部の気流ベクトル分布を詳細に見ると、流入開口で縮流された気流は、障害物がなければ基本的に直進する。壁面や袖壁(実際の建物では家具やカーテン等も加わる)に衝突することで、撥ね返り(反撥)向きを変える。衝突角度が大きい場合には、行き場のなくなった気流は主流域の上方(天井付近)や下方(床付近)において、衝突域から逸れるように主流域とはかなり異なる向きに流れることがある(以下「逸流」と称す)。逸流の存在によって、部屋の中央高さ付近では連

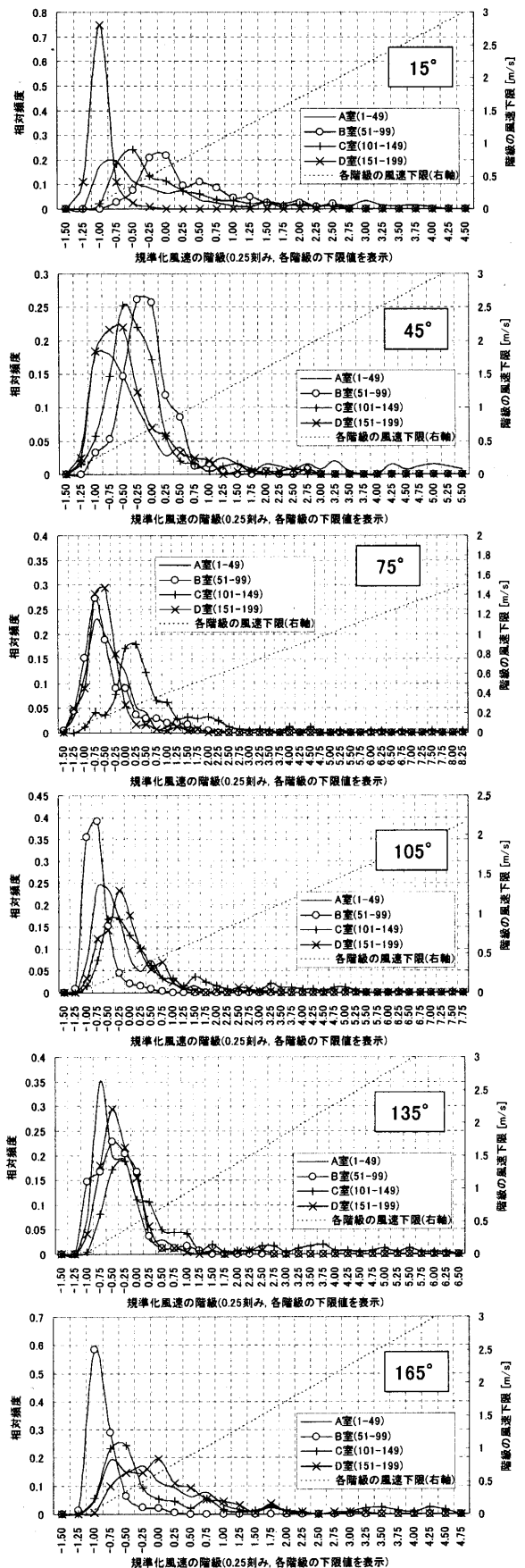


図7 各室毎の測定点平均風速(全室の平均風速及び標準偏差を用いて標準化された値)に関する頻度分布(風向15°~165°)

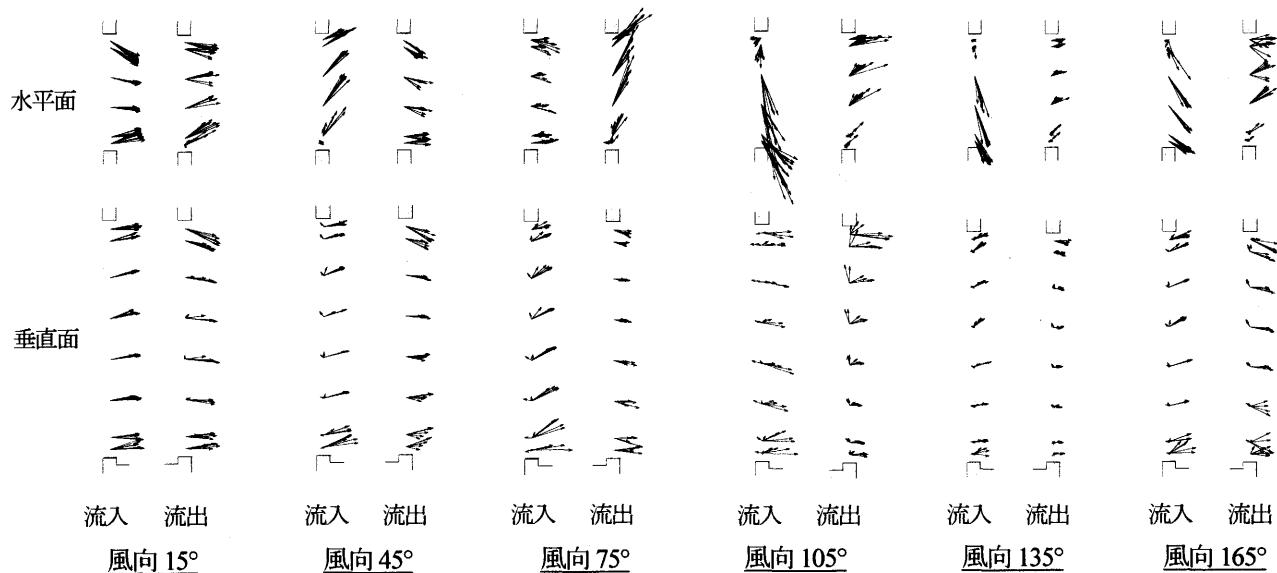


図8 風向条件毎(風向15°~165°)に見た流入開口及び流出開口内部における水平面及び垂直面気流ベクトル(水平面ベクトルについては、垂直方向8点におけるベクトルを重ねて表示し、垂直面ベクトルについては水平方向6点におけるベクトルを重ねて表示した)

続的に向きを変えて流出開口に向かう主流域が出現しているとも考えることができる。壁面への衝突角が小さい場合には、コアンダ効果によって壁際に沿って流れる。

4-2 においては、開口に入る気流の角度の決定要因として5つを挙げた。本実験条件のように周囲に風を遮る物がなく風が自由に接近できる場合であっても、開口に垂直に流入気流が生じる場合は限られている。従って、流入開口に正対する居室の場所であっても大きな気流速が得られるとは限らず、むしろ開口のある方向とは異なる横や背面からの気流が卓越するようなことも十分にあり得る。例えば風向60°や105°~165°の場合がそうである。

4-3 では、風速の高さ方向及び水平位置による違いを見た。図8は図6に示した風向条件における開口面内の気流ベクトルである。水平面ベクトルについては、垂直方向8点におけるベクトルを重ねて表示し、垂直面ベクトルについては水平方向6点におけるベクトルを重ねて表示した。水平面及び垂直面、流入開口及び流出開口のいずれについても通過時に縮流が形成されていることが確認できる。また、垂直面ベクトルについては、流入時はやや上向きとなっているが、この点は本実験においては近傍気流が上向きに流れていることに寄るものと考えられる^注。一方、流出時は逆にやや下向きとなっているが、部屋上部で開口部に向かった気流が開口部上部で滞留していることに因るものと考えられる。このように、流入開口においてやや上向きの縮流となっているものの、図6のように内部における上下分布はさほど大きくはない。

4-4 では風速の頻度分布を見た。風向15°の場合、流入室A室における主流は明確であるが、風速の頻度分布を見ると、より下流のB室及びC室と比較して最多頻度の風速が最も小さい。風向45°の場合も、同様である。流入室は他の室に比して大きな風速を観測する、即ち最も明確な主流域が存在する傾向にあるが、壁面や支持柱等に大きな角度で衝突することなく主流が通過する

場合にこのようなことが生じる。こうした場合、流入室であっても主流域からはずれた場所に位置する居住者は高風速を享受できないことがあり得る。一方、風向135°や120°の場合には、流入室(C室)において主流域が袖壁に衝突し、その影響で室内に明確な循環流が形成されており、流入室における頻度分布は全体的に高風速側に移動している。風向165°及び150°では、袖壁に衝突した主流域はC室に留まる部分よりもD室に進む部分のほうが多く、C室において風向135°や120°と比較すると明確な循環流を形成せず、そのことが風速頻度分布における最多頻度風速を低風速側に留まらせている。

実験施設では異なる開口形状や間取りにおける実験が可能ではあるが、本実験においては建物及び開口の形状は固定されており、もとより上述の考察によって通風気流の重要な性質が網羅されたわけではなく、今後も種々の条件下での追加実験が不可欠である。

6. まとめ

正方形平面对角位置に二開口を有する建物内部の通風気流について、風向0°~165°の12条件における3次元の平均気流に関する実験結果を得、その形成要因に関する分析を行って以下の結論を得た。

- 1) 主流域の通過経路のみを概観すれば、気流は流入開口と流出開口を結ぶように形成されると錯覚されがちであるが、むしろ気流は基本的に直進する性質を持ち、壁等の障害物に衝突・反撥することによって方向転換しながら、流出開口まで動き続けると解釈すべきと考えられる。
- 2) 主流域は、壁面等に大きな(より垂直に近い)角度で衝突する場合には、主流域の室内の上部又は下部において衝突域から流出する逸流が形成され、主流域自体は衝突域の手前でスムーズに向きを変えるかのように見える。一方、主流域が壁面等に小さな角度で衝突する場合にはコアンダ効果によって壁面に沿って流れる傾向が見られる。
- 3) 主流域の傍らに十分な空間のある場合には、循環流が形成されることがある。主流域が壁付近に偏って形成される場合、室内の中央付近の

気流速を増加させる循環流の存在が、温熱環境の分布に及ぼす影響は小さくないと考えられる。

- 4) 本実験においては建物及び開口の形状は固定されており、もとより上述の考察によって通風気流の重要な性質が網羅されたわけではなく、観察結果の普遍性についても十分な確認がとれているわけではない。したがって、今後も異なる開口位置や間仕切り壁の存在下における気流分布等について、継続的に知見を収集する必要がある。

謝辞

実験実施に当たっては、元(独)建築研究所重点研究支援協力員石川優美氏の協力を得たことをここに記し謝意を表す。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究A「自然風を活用した建築環境調整技術の再興」(平成14-17年度、課題番号14205086)によるものである。

注

参考文献1)の図8に壁面から5cmの垂直面におけるモデル建物周囲の気流ベクトルを示されている。

参考文献

- 1) 澤地孝男、瀬戸裕直、清田誠良、成田健一、石川優美：実大建物模型を用いた通風研究専用実験施設の特性、日本建築学会環境系論文集、第598号、pp.37-44、2005.12
- 2) 成田健一、森岡勲、澤地孝男、瀬戸裕直、石川優美、清田誠良：実大建物風洞による通風時の室内表面熱伝達率分布の測定、日本建築学会技術報告集、第22号、pp.259-262、2005.12

- 3) McCutchan, G. and Gaudill, W. W.: An Experiment in Architectural Education Through Research, Texas Engineering Experiment Station, Research Report 32, 1952
- 4) Victor Olgyay: Design with Climate, Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, Princeton University Press, 1963
- 5) 建築設計資料集成・環境、日本建築学会編、丸善、1978
- 6) 小玉祐一郎、絵内正道、加藤義夫、武政孝治、梅干野晃、松成和夫、矢野和之：自然エネルギー利用のためのパッシブ設計手法事典、彰国社、1982
- 7) 小玉祐一郎、高田典夫：室内空間形態の通風性状におよぼす影響について(3)連続する空間の通風量計算法についての考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.229-230、1978.9
- 8) 山下浩、西岡利晃、斉藤隆雄：煙風洞による建物の通風の研究 その1 実験概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.347-348、1982.10
- 9) 金永徳、村上周三、加藤信介、赤林伸一、水谷国男、富永禎秀：通風量算出モデルに関する基礎的研究 その2 室内外の流れ場・圧力場に関する実験的検討、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.49-52、1990
- 10) エスペランサ・カロ、竹下輝和、堤純一郎：スリット型戸建住宅の熱環境特性と1/50 デザイン標準モデルの風洞実験、日本建築学会計画系論文集、第480号、pp.105-112、1996.2
- 11) 村上周三、小林信行、加藤信介、赤林伸一：住宅の自然通風に関する実験的研究(その1)実測と風洞模型実験による天窗の通風効果を中心として、日本建築学会計画系論文集、pp.10-20、1987.2
- 12) 西田勝、片山忠久、石井昭夫、堤純一郎、石井米二郎：風洞模型実験による通風の駆動力と室内気流分布の再現性に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第375号、pp.1-9、1987.5

(2006年6月2日原稿受理、2006年9月27日採用決定)