

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360236

研究課題名（和文）

建物内外流管での圧力損失発生メカニズム解析に基づく自然通風量予測に関する研究

研究課題名（英文）

Prediction of Cross-ventilation Rate based on Mechanism Analysis of Pressure Loss Generation in Stream Tube inside/outside building

研究代表者

甲谷 寿史 (KOTANI HISASHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20243173

研究成果の概要（和文）：流管でのエネルギー輸送に基づく合理的な手法として、建物パラメータからパワーロス係数を予測し、パワーバランスに基づいて簡易に通風量を予測する手法を開発した。建物パラメータとしては、室内での流管の拡大と、風下開口での後流性状を示す 2 者を提案した。各段階で実験による CFD 解析の精度検証を行うことで、乱流モデルに関する汎用的な知見も得た。また、実験で 3 次元の流管を同定する新たな測定手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：Simplified prediction model of cross-ventilation rate of buildings was developed according with the prediction of 'power loss coefficient' from building parameters, as reasonable way based on the energy transportation inside the stream tube. Two building parameters were proposed such as expansion of the stream tube inside room and wake characteristics at the leeward openings. Validation of CFD analysis was conducted at each research step and general-use knowledge for turbulence model in CFD was obtained. Identification method of three-dimensional stream tube by experiments was newly developed as well.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：自然換気、通風、流管解析、CFD 解析、風洞実験

1. 研究開始当初の背景

大開口換気＝通風は、室内温熱環境・空気質の改善において省エネルギーの点から有効であるにもかかわらず、換気理論研究の分野では未だ簡易通風量予測法は確立しているとは言い難い。特に実生活では、居住者の窓開放が行われる現状ながらも、定量的な通風量把握が行われないことにより、通風によ

る室内環境改善が可能な立地・季節であっても、適切な開口部設計が行われず、設計段階での簡易な通風量予測が求められる。特に一般的な片廊下式の集合住宅における玄関側とバルコニー側の 2 面は、風上と風下側になる可能性が高く、通風利用に適した住戸形態であり積極的な通風利用が可能と考える。

研究代表者を中心とした研究グループは

これまで同対象の研究を継続して行い、平成16～18年度には科学研究費補助金・若手研究による「建物内外気流の流管解析に基づく集合住宅の通風量予測法に関する研究」を実施した。また、平成15年度には文部科学省在外研究員として在籍して研究に着手したことから、Mats Sandberg（スウェーデン・王立工科大学／イエブレ大学）及び Per Heiselberg（デンマーク・オールボー大学）との共同研究として、建物内外気流の流管解析に基づいた開口部への捕集面積（Catchment Area）の概念を用いた通風量予測研究も行っており、一貫して大開口時の換気現象の解明に取り組んでいる。

本研究に関連する国内外の研究として、村上周三・加藤信介・赤林伸一らによるパワーバランスモデルの提案、及び James Axley による同様のモデルの換気回路網計算ソフト CONTAM への組み込みがあり、これらはその通風量算出精度に優れているが、通風量予測のためには流管を予測する必要があり、簡易予測には不十分である。また、倉渕隆・大場正昭らの LDSM（局所相似モデル）が、近年提案されている通風量予測法として挙げられ、研究代表者らが提案した風圧係数及び壁面近傍風速を入力条件とした簡易予測法と同様手法であり、その成果は共有できる。

これらの背景の中で、研究代表者らは、通風時の流管性状と圧力損失分布の把握を行い、エネルギー損失を考慮した新たな通風量予測法の開発に取り組んできた。

その中で流管の面積変化とエネルギー損失との関係に着目し、得られた結果から実用的な精度での経験式を求める方向で検討を進めてきたが、一部着手した室外流管解析の結果で、室内流管内での圧力損失や建物後流域での流管の分流・合流時の圧力損失性状が建物形状や開口条件によって異なることを合理的に説明できていないことから、「自然通風時には、どこでどの程度エネルギー（圧力）損失が発生し、その原理は何なのか？」に再度立ち返って検討を行った上で、最終的な簡易な通風量予測法を目指す必要性を感じ、本研究の通り「建物内外流管での圧力損失発生メカニズム解析に基づく自然通風量予測に関する研究」を着想するに至ったものである。すなわち、本研究はこれまでの研究代表者の研究成果を発展させながらも、新たな視点に立ってより合理的な通風量予測法を目指す研究として位置づけられる。

2. 研究の目的

前述の背景により、これまで流管の面積変化とエネルギー損失との関係に着目し、得られた結果から実用的な精度での経験式を求める方向で検討を進めてきたが、一部着手した室外流管解析の結果で、室内流管内での圧

力損失や建物後流域での流管の分流・合流時の圧力損失性状が建物形状や開口条件によって異なることを合理的に説明できていないことが問題である。

パワーバランスモデルを用いたエネルギー保存に基づく流管解析をベースとして、「自然通風時には、どこでどの程度エネルギー（圧力）損失が発生し、その原理は何なのか？」に再度立ち返って検討を行う必要がある、室内流管内での圧力損失や建物後流域での流管の分流・合流時の圧力損失性状が建物形状や開口条件によって異なることを説明した上で、エネルギー損失を合理的に説明する建物パラメータを提案する。これを用いた、建物内外流管での圧力損失発生メカニズム解析に基づいた合理的かつ簡易な自然通風量予測法を提案することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) パワーバランスモデルを用いた室外側流管解析

分流・合流を含めた流管の面積・形状変化とエネルギー損失の関係を明らかにするため、既往研究での室内流管解析に基づく流管面積と流管内圧力分布と同様の解析を室外側流管について行い、種々の条件に対して流管のパワーバランスを算出することにより、エネルギー（圧力）損失の発生メカニズムを解明する。

(2) 風洞実験による実験データの蓄積と高精度の CFD 解析

流管解析を行う際に室外側の分流成分の解析精度が未検討であることから、矩形の単室モデル周辺の圧力・風速のデータを風洞実験により測定し、これまでの CFD 解析結果と比較・検討を行う。平均速度成分の測定は、Particle Image Velocimetry (PIV) を用いて行う。全圧・静圧の測定は、全圧管・静圧管を用いる。これらにより、室内外の流管の情報を全て把握でき、測定値単体でも精度の高いエネルギー（圧力）損失のメカニズム解明に取り組むことが可能となる。

既往研究の CFD 解析では、乱流モデルとして Reynolds Stress Model (RSM) を用いた解析を行っていたが、より高次の乱流モデルである Large Eddy Simulation (LES) による高精度の CFD 解析により、これまでの室内外の流管解析結果の妥当性を示す。

(3) パワーロス係数を用いた通風量予測手法の提案とパワーロス係数予測手法

パワーロス係数を用いた通風量予測手法を提案した上で、種々の室・開口形状のモデルに対しての解析結果を整理し、パワーロス及びパワーロス係数の算出を行う。

このパワーロス係数と相関の高い室パラメータを提案し、予測手法の入力値を整備する。

(4) 風洞実験による流管の同定及びパワーロスの測定

CFD 解析でしか同定できていなかった流管を、風洞実験で PIV 測定を用いることで同定する手法を新たに開発する。併せて、実験的にパワーロスを測定することも試みる。

(5) 種々の開口サイズにおけるパワーロス係数予測手法確立への展開

汎用的な予測手法へ展開するため、前後開口が異なる大きさを持つ室を例にして、風洞実験と CFD 解析により、風下側開口部周辺の気流性状の詳細分析を行う。

4. 研究成果

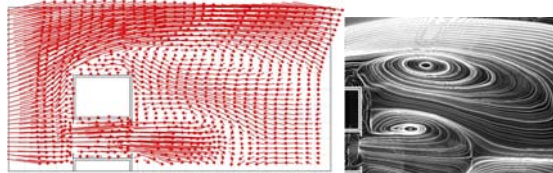
(1) パワーバランスモデルを用いた室外側流管解析

複雑な気流性状となる室外側流管の内縁及び外縁を確定し室外側流管を定義することがキーポイントとなり、流線が流れの主流方向に平行になる位置を流管最外縁として提案した。CFD 解析結果を用いて、実用的にエネルギー損失に関わる範囲としては、室外流管の内側境界面であることを明らかにした。詳細は発表論文参照。

(2) 風洞実験による実験データの蓄積と高精度の CFD 解析

矩形室周辺、特に建物後流のデータを PIV を用いた風洞実験で蓄積した。図 1 に示す通り、複雑な室内外気流を広範囲で測定することに成功し、また図 2 に示す通り、流管性状を実験的に確認した。

並行して、図 3 に示す形状の室について LES を用いた CFD 解析を行い、実験結果と比較した。図 4 に中心軸の全圧、静圧について、各種 CFD モデルと実験結果の比較を例として示す通り、RANS(k-epsilon, RSM) に比して、特に全圧について LES が高精度であることを確認した。詳細は発表論文参照。



左：図 1 建物内外風速ベクトル（風洞実験）
右：図 2 建物後流の流管性状（風洞実験）

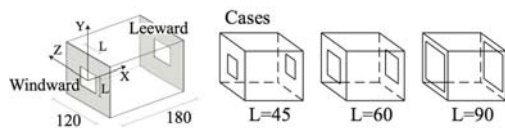


図 3 開口の異なる室モデル

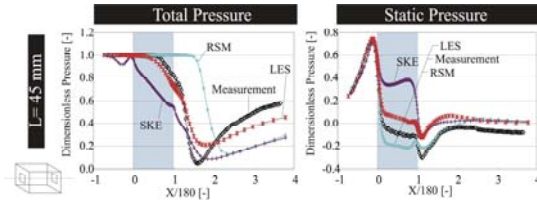


図 4 中心軸の全圧及び静圧分布

(3) パワーロス係数を用いた通風量予測手法の提案とパワーロス係数予測手法

① パワーバランスモデル

図 5 に示す種々の室・開口形状の模型について CFD 解析結果を用いてパワーバランスの検討を行った。図 6 及び 7 に示すパワーバランスモデルでは、流管を図 6 に示す各検査面で複数のコントロールボリューム(以降、CV)に分割し、各 CV 内でのパワーロス(以降、LP)に着目する。流管内を輸送されるパワーに関して、断面 D までは減少を続け、断面 D より風下では周辺気流からのエネルギー供給により流管内のパワーが増加する。なお、断面 D は風下で流管内のパワーが最小となる断面で定義し、流管が最も拡大する断面に概ね等しくなる。よって、断面 A, D 間の LP が最大値(以降、LP_{MAX})となる。風上・風下の断面におけるパワーの差が CV 内での LP である。それぞれの LP に関して、LP_{AB} は室モデルに至るまで、LP_{BC} は室モデル内、LP_{CD} は室モデルから流出後の損失を表し、これらの和が LP_{MAX} である(式(1))。

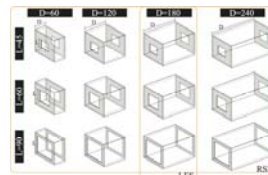


図 5 室モデル

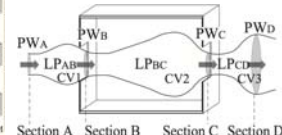


図 6 検査面

$$\begin{aligned}
 LP_{MAX} &= LP_{AB} + LP_{BC} + LP_{CD} \quad (1) & PW_A &= PW_D + LP_{MAX} \quad (8) \\
 LP_{AC} &= LP_{AB} + LP_{BC} \quad (2) & PW_A &= P_{in} Q = (P_{sA} + P_{dA}) Q = P_{dA} Q \quad (9) \\
 LP_{MAX} &= LP_{AC} + LP_{CD} \quad (3) & PW_D &= P_{in} Q \quad (10) \\
 Q_{ref} &= A_{opening} V_{upstream} \quad (4) & P_{dA} Q &= P_{in} Q + LP_{MAX} \quad (11) \\
 PW_{ref} &= P_{in} Q_{ref} \quad (5) & P_{dA} Q &= P_{in} Q + LP_{AC} + LP_{CD} \quad (12) \\
 \xi_{AC} &= \frac{LP_{AC}}{PW_{ref}} \quad (6) & Q_{ref} &: \text{基準流量} & Q &: \text{流入流量} \\
 \xi_{CD} &= \frac{LP_{CD}}{PW_{ref}} \quad (7) & A_{opening} &: \text{開口面積} & P_s &: \text{全圧} \\
 & & V_{upstream} &: \text{アプリーフローの速度} & P_s &: \text{静圧} \\
 & & PW_{ref} &: \text{基準パワー} & P_d &: \text{動圧} \\
 & & \xi &: \text{パワーロス係数} & & \text{下付き文字: 断面}
 \end{aligned}$$

図 7 パワーバランスモデル基礎式

② パワーロス係数算出結果

LP には、流量によるパワーの正味量の影響が大きいため、式(5)に示す基準パワーで無次元化したパワーロス係数を用いる。LP_{AC} と LP_{CD} に関するパワーロス係数をそれぞれ式(6)、式(7)に示す ξ_{AC} 、 ξ_{CD} とし、図 8 に算出結果を示す。 ξ_{AC} について、室奥行きが等しい条件では、開口が小さいほど大きくなる。

開口が小さいほど、室内における開口面積に対する流管断面積の変化が大きいため、室内において流管の形状変化に伴う LP が大きくなると考えられる。開口が等しい条件では、室奥行き $D=180$ までは奥行きが大きいほど ξ_{AC} が大きくなるが、 $D=180, 240$ では $D=240$ のほうが小さいか、同程度となる。これは、室内を通過する距離の増加に伴い室内での LP が増えるものの、奥行きが長いほど室内での流管断面積の相対的な変化が小さくなり⁵⁾、流管の形状変化に伴う LP が減少するためであると考えられる。 ξ_{CD} に関しては主に Wake の影響による損失である。そのため、室前面の壁面積に対して、窓面積が小さいほど、室奥行きが小さいほど LP が大きくなり、これは開口寸法と室奥行きが共に小さいほど顕著である。

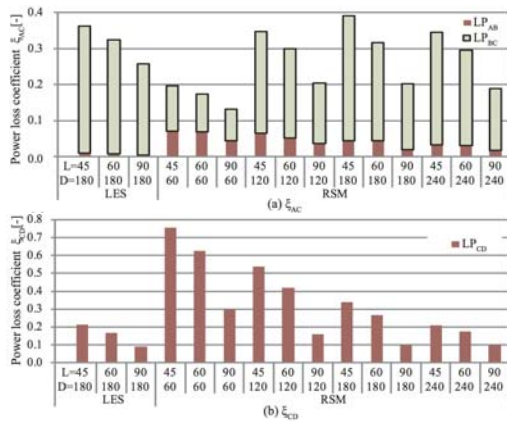


図 8 パワーロス係数

③ パワーロス発生機構

パワーバランス式(8)を用いた流量の予測手法を検討する。 PWA について、 P_{sA} を基準静圧とするため、 P_A はアプローチフローによる速度圧(既知)に等しい。式(9),(10)より、式(8)は式(11)で表される。式(11)より、流量 Q を予測するには LP_{MAX} と PW_{iD} を求める必要がある。 LP_{MAX} に関して、風下開口までのパワーロス LP_{AC} と、流出後のパワーロス LP_{CD} それぞれのパワーロス係数 ξ_{AC} と ξ_{CD} を予測し、式(12)を用いて流量を求める。 LP 予測にあたり、 LP が生じる機構を CFD 解析で得た乱流エネルギー散逸の情報から検討した。室モデル内に関しては流管の縁周辺で LP が大きく、特に流入直後と風下開口近傍で乱流エネルギー散逸が大きい。風下壁面近傍では、風下壁面への衝突気流が渦を形成することによる LP で、流管内から流管外へ多くのパワーが輸送される。室からの流出直後に乱流エネルギー散逸が大きく、これは風下後流と流出気流との衝突による LP である。図 9 にパワーロスの発生機構に関してまとめたイメージ図を示す。

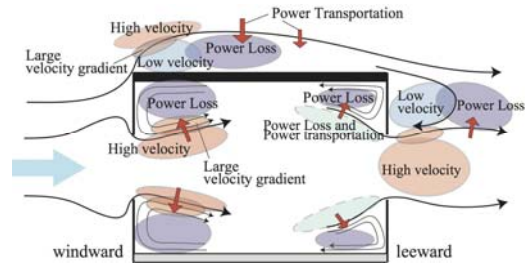


図 9 パワーロスの発生機構

④ パラメータの検討

室内のパワーロス生成機構を踏まえると、 ξ_{AC} には流管の拡大・縮小に関する値をパラメータとして用いることができ、室内における流管外容積が大きいことが流管の拡大や渦の形成を促し、 LP を増加させると考える。そこで、室モデル内で流管が最大限に広がることのできる容積を、風上開口の縁と風下壁面の隅を結んだ直線で囲まれる範囲の容積(以降、最大流管容積 V_{tube})と考え、室モデルの容積から最大流管容積を除く容積(以降、余り容積 V_{mar} (室モデル容積 $\cdot V_{tube}$))を用いることを提案する。さらに、開口寸法 L を代表長さとして、 L^3 で V_{mar} を無次元化した値をパラメータ V_{mar}^* (図式(15))とする。パラメータを図 10 左に示し、パワーロス係数との関係を図 11 上に示す。ここで、内寸と開口寸法に関する基本的な無次元数として、室内開口率 Net Porosity(式(13))、室内奥行き比 Net Aspect Ratio(式(14))とパワーロス係数との関係も共に示す。 V_{mar}^* とパワーロス係数との関係が、条件に関わらず概ね上に凸の曲線となり、 V_{mar}^* を用いて ξ_{AC} を予測できる。

流出後の ξ_{CD} には Wake の影響が大きいいため、Wake の大きさに関する値を用いてパワーロス係数を予測できる。建物の見付面積に対する開口面積の割合 Porosity(式(16))と、見付面積の平方根に対する奥行きの外寸 Aspect Ratio(式(17))を考える。Porosityは建物の yz 断面(図 10 参照)に関する値であり、Aspect Ratioは x 軸方向に関する値である。これら乗じて、3次元で建物形状を表す値とした。これをパラメータ External Ratio(式(18))とする。パラメータを図 10 右に示し、パワーロス係数との関係を図 11 下に示す。External Ratioとパワーロス係数が、条件に関わらず概ね反比例の関係となり、 ξ_{CD} が予測可能である。

この2つのパラメータからパワーロス係数を算出し、式(12)から通風量を予測することが可能となった。

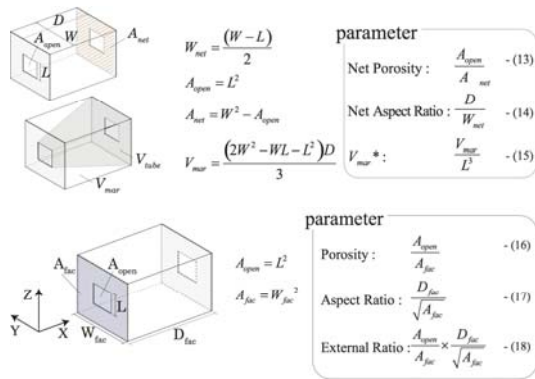


図 10 提案パラメータ

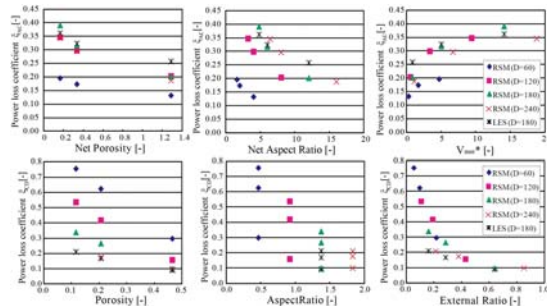


図 11 パワーロス係数

(4) 風洞実験による流管の同定及びパワーロスの測定

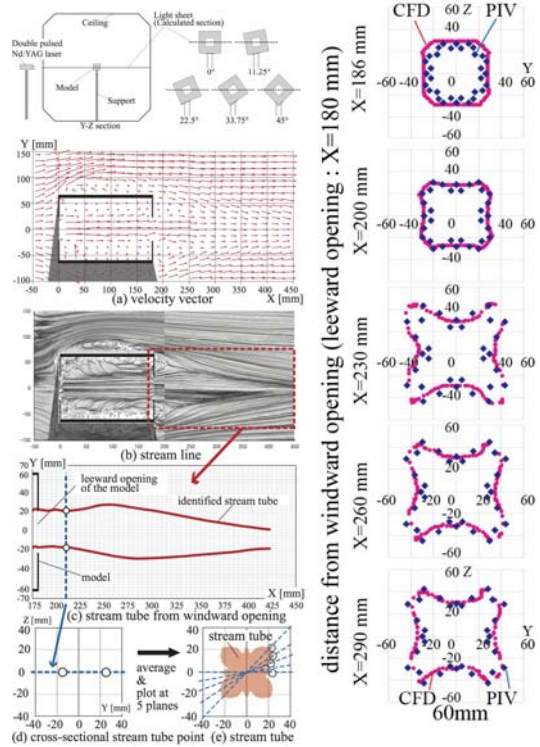
CFD 解析でしか同定できていなかった流管を、PIV 測定を用いた風洞実験で 3 次元の流管を同定する手法を開発した。図 12 に示す通り、PIV の撮影面を固定した上で、模型を回転して複数平面の測定を行った。

ある模型回転角度（例として 0° ）の PIV 測定により X-Y 平面の風速場の情報を得る（図 13a）。次にその平面での流線を描く（図 13b）。風下開口に最も近い流線を目視により探索し、開口からの流管を得る（図 13c）。ある X 断面（図 13c では $X=210\text{mm}$ ）での開口からの流管の外縁部 2 点の座標を読み取り（図 13c のプロット）、Y-Z 断面の情報として 0° のラインに 2 点プロットする（図 13d）。 $0 \sim 45^\circ$ の 5 平面に対して同様の処理を行い、これらをプロットして 1/8 領域の流管が同定される（図 13e）。完全対称と仮定して 1/8 領域の同定値を全領域にあてはめる（図中網掛け部）。

併せて、風洞実験を再現した LES による CFD 解析を行った。図 14 に、開口と平行な断面流管の、主流方向の変化の例を示す。図の下方方向に順に見ることで、風下開口から流出した気流が風下側に進むにつれて形状変化していく。◆が PIV、●が CFD による流管である。後流に向かうに従い、流管は四隅へ拡がり、残りの領域では開口サイズからほとんど変化しないため、結果として×印のような流管形状となる。風下開口からの流出気流は、模型中央部ではなく四隅の後流に巻き込

まれて、四隅で拡大していくことが予想される。図 15 に、各断面で同定した流管断面の主流方向変化を示す。両者はよく一致し、本手法の妥当性が確認できた。

また、開口面での PIV と全圧測定により実験でパワーロスを測定することも試みた。詳細は発表論文参照。



左上：図 12 模型の回転角度、左下：図 13 流管同定手順、右：図 14 主流方向の流管変化

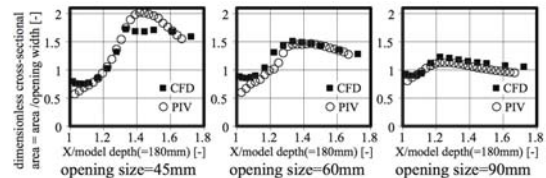


図 15 流管断面面積の変化

(5) 種々の開口サイズにおけるパワー損失係数予測手法確立への展開

今後の展開に向けて、提案した通風量予測手法の汎用性を高めるため、図 16 に示す前後開口の大きさが異なる条件での検討を行った。図 17 に通風量の測定、解析結果を示す通り、同一の開口面積の組み合わせで、風上側と風下側を入れ替えた条件では、風下側面積が風上側よりも大きい条件が、通風量が大きくなることが分かった。この現象を解明するために、PIV を用いた風洞実験により CFD 解析の精度検証を行った上で、風下側開口での流出性状及び室内でのエネルギー損失性状について詳細な検討を行った。詳細は発表論文参照。

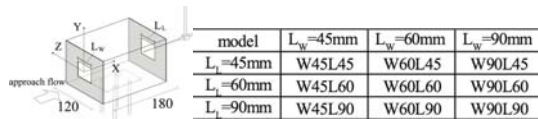


図 16 検討条件

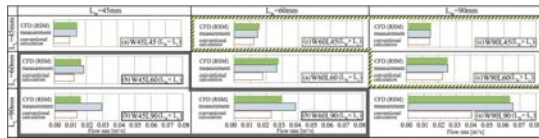


図 17 通風量

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

① 小林知広、甲谷寿史、山中俊夫、相良和伸、桃井良尚、浅井香里、Wind tunnel test and numerical simulation for pressure and velocity field around cross-ventilated building、日本建築学会環境系論文集、査読有、76巻662号、(2011)、609-616、doi:10.3130/aije.76.609

② Tomohiro Kobayashi、Mats Sandberg、Hisashi Kotani、Leif Claesson、Experimental Investigation and CFD Analysis of Cross-Ventilated Flow through Single Room Detached House Model、Building and Environment、査読有、Vol.45、Issue 12、(2010)、2723-2734、doi:10.1016/j.buildenv.2010.06.01

〔学会発表〕(計14件)

① 甲谷寿史、山中俊夫、桃井良尚、相良和伸、有馬雄祐、通風量の簡易予測を目的とした室内外流管解析に関する研究(その19)PIVを用いた流管同定とCFD解析との比較、日本建築学会大会、2012.9.12、名古屋大学

② 上 恭子、甲谷寿史、小林知広、山中俊夫、桃井良尚、相良和伸、通風量の簡易予測を目的とした室内外流管解析に関する研究 その18. パワーロス予測手法の検討、日本建築学会大会、2011.8.25、早稲田大学

③ 甲谷寿史、小林知広、通風時の建物周辺気流を対象とした PIV 解析の精度検証、日本建築学会大会、2011.8.25、早稲田大学

④ Hisashi Kotani、Toshio Yamanaka、Pressure loss coefficient of room considering inflow direction in prediction of cross-ventilation rate through large openings、Roomvent 2011 International Conference、2011.6.21、ノルウェー科学技術大学、ノルウェー

⑤ Hisashi KOTANI、Tomohiro KOBAYASHI、Kaori ASAI、Yasue TANAKA、Yasuhiro

SHIOZAKI、Velocity Measurement Inside and Outside a Cross-Ventilated Building by Means of PIV、AIVC International Conference 2010、2010.10.26、Renaissance Hotel、韓国

〔その他〕

<http://www.arch.eng.osaka-u.ac.jp/~labo4/> に発表論文リストを掲載

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲谷 寿史 (KOTANI HISASHI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：20243173

(2) 研究分担者

桃井 良尚 (MOMOI YOSHIHISA)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40506870
山中 俊夫 (YAMANAKA TOSHIO)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80182575
小林 知広 (KOBAYASHI TOMOHIRO)
立命館大学・理工学部・講師
研究者番号：90580952

(3) 研究協力者

マッツ サンドバーグ (MATS SANDBERG)
イェブレ大学・居住環境センター・教授
天野 成美 (AMANO NARUMI)
大阪大学・大学院生 (2012年度のみ参画)
上 恭子 (KAMI KYOKO)
大阪大学・大学院生 (2011年度まで参画)
有馬 雄祐 (ARIMA YUSUKE)
大阪大学・学部生 (2011年度のみ参画)
浅井 香里 (ASAI KAORI)
大阪大学・学部生 (2010年度のみ参画)