風向正面の場合の通風気流に関する予測精度検証と流管分析

LES と風洞実験による建物通風気流構造の解明に関する研究 (第1報)

VERIFICATION AND STREAMTUBE ANALYSIS OF SIMULATED RESULT OF AIRFLOW
OF A CROSS-VENTILATED BUILDING FOR NORMAL WIND ANGLE CASE

Analysis of airflow of cross-ventilated buildings based on LES and wind tunnel experiment (Part 1)

倉 渕 隆*, 大 場 正 昭**, 岩 渕 拓 志***, 島 田 朋 裕****

Takashi KURABUCHI, Masaaki OHBA, Takuji IWABUCHI
and Tomohiro SHIMADA

Airflow structure of a cross-ventilated model building for normal wind angle case was analyzed using Large Eddy Simulation. Simulated results were in close agreement with experimental observations in view point of flow rate, distribution of velocity vector and turbulence kinetic energy and wind pressure coefficients. Simulated results were analyzed, and it was elucidated that the downfall of the inflow specific to cross-ventilation is strongly affected by pressure gradient due to recirculation on the lower portion on the windward surface of the building. Further analysis was then made to identify shape of streamtube passing through windward opening. Spatial change of static, dynamic and total pressure along the identified streamtube indicated that strong acceleration and deceleration of the airflow does not exert significant change in total pressure at the upstream side of the opening, although energy is exchanged between static and dynamic pressure. This means that flow energy of the streamtube is virtually conserved at the upstream side of the opening, while energy loss occurs after passing through the opening due to the production of turbulence kinetic energy.

Keywords : Cross-Ventilation, Large Eddy Simulation, Wind Tunnel Experiment, Streamtube Analysis

通風, ラージ・エディ・シミュレーション, 風洞実験, 流管解析

1. はじめに

我が国では蒸暑期における温熱環境の改善手法として通風の有効利用には関心が高く, 建築環境工学の分野でも通風に関する研究は古くから行われている¹⁾。1960年代までの成果としては, 勝田による平均通風率の提案²⁾, 石原³⁾による干渉係数や通風時の室内気流分布のモデル化, 勝田・関根⁴⁾による有風時の開口部圧力損失係数に関する研究などが挙げられる。その後, しばらく通風に関する研究にはブランクがみられるが, 1973年のオイルショック以後, 省エネルギーの面から再び通風の有効利用に関心が高まり, 清家・小玉ら⁵⁾, 片山ら⁶⁾, 清田・関根⁷⁾, 村上・加藤・赤林ら⁸⁻¹⁰⁾による実験的研究が成果を上げており, 最近では, 澤地ら¹¹⁾による大型風洞施設による実大建物モデルを用いた検討が注目されている。通風は建物内外気流が相互に干渉を及ぼす複雑乱流現象であるため実験的検討は必須といえる。しかし, その本質である静圧・動圧間のエネルギーのやりとりや全圧の不可逆的な損失などの要因, メカニズムについて解明するためには開口部近傍の静圧・動圧の空間分布の把握が重要であるものの, その実験的評価は極めて困難であり, 研究進展の障害となっている。

この問題に対処するため, 近年急速な発展を遂げた CFD 技術を用用することが考えられ, 堤・片山ら¹²⁾, 倉渕・鎌田¹³⁾, 飯野・

倉渕・小林・嵐口¹⁴⁾は $k-\epsilon$ モデルを用いた検討を行い実験と対比している。また, 富永・村上・加藤・持田¹⁵⁾は LES を用いた検討を行い, 実験と極めて対応のよいことを示している。これらの研究成果より, $k-\epsilon$ モデルはその改良版を含めて, 換気量などの工学的予測に利用する場合には問題は少ないが, モデル本来の欠点である乱流法線応力の近似精度の問題が, 通風のように加減速が重要な流れ場に適用すると強調され, 乱流構造そのものの再現精度は十分満足いくものとはならないことが分かってきている。そのため, 実験と併用して通風時の乱流構造を解明するに足る乱流モデルは, 応力方程式系のモデルを別にすれば, 現状では少なくとも LES における Smagorinsky モデルを選択する必要があると考えられる。

以上の観点から本研究では通風が行われる建物モデルに対し, 既に実施した風洞模型実験¹⁶⁾に対応した LES 計算を行った。風洞実験にて測定した通風量, 主要断面における建物内外風速ベクトル分布, 風圧係数の分布について実験と計算を対比し, LES 計算が十分な精度で実現象をシミュレートしていることを確認した。しかる後に, 通風に特有の流入気流の下降要因, 開口部を通過する流管の形状, 流管中における圧力変化と損失など実験的評価の困難な各項目について LES 計算結果を分析することによって解明することを試みた。

* 東京理科大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)
** 東京工芸大学工学部建築学科 教授・工博
*** 元東京理科大学 大学院生・修士(工学)
**** 東京理科大学 大学院生

Assoc. Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.
Prof., Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.
Graduate Student, Tokyo University of Science, M. Eng.
Graduate Student, Tokyo University of Science

2. 計算概要

LES による数値シミュレーションを実施する場合、流入境界条件となる風洞アプローチフローの再現が問題となる。この点に関し、現状ではチャンネル乱流の数値シミュレーションを別途実施し、ストックデータを風洞実験に適合するように加工して用いる手法が一般に用いられている¹⁷⁾。本報でも既往研究を踏襲し、事前に実施したドライバー計算によるストックデータから流入条件を作成した。以下に LES の計算における設定条件の概要を示す。

2.1 SGS モデルと壁面境界条件

本報では最も適用実績が多く基礎的な Smagorinsky モデルを用いることにしたが、計算定数に関しドライバー計算では、チャンネル乱流で一般に使用される Smagorinsky 定数 $C_s=0.1$ を、本計算では $C_s=0.13$ とした。また、本計算に用いる平滑面用の壁面境界条件としては、以下に示すカルマン三層モデルを数値近似し、陰関数を陽的に処理可能な関数形に変更した近似式(1)～(3)を用いた¹⁸⁾。

$$(u_* / u_p)^2 = 1 / \text{Re}_h \quad \text{Re}_h < 25 \quad (1)$$

$$(u_* / u_p)^2 = 1.829 / (\ln \text{Re}_h)^{3.270} \quad 25 \leq \text{Re}_h < 420 \quad (2)$$

$$(u_* / u_p)^2 = 0.1464 / (\ln \text{Re}_h)^{1.866} \quad 420 \leq \text{Re}_h \quad (3)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度、 u_p : 壁に隣接するセルの瞬時スカラー風速、 Re_h : u_p とその定義点の壁からの距離 h に基づく Re 数、である。

粗面を想定するドライバー計算では、面の粗度 k_s とカルマン係数 κ を与え、以下の式によって摩擦応力を求めた。

$$u_p / u_* = 1 / \kappa \ln(h / k_s) \quad (4)$$

なお、ドライバー計算、本計算共壁近傍に位置するグリッドフィルタに次式に示す van Driest 型の壁減衰関数 f_μ ¹⁹⁾ を乗じている。

$$f_\mu = 1 - \exp(-h^+ / 25) \quad (5)$$

ここに、 h^+ : 壁座標 (瞬時の摩擦速度、壁からの距離 h による) である。

2.2 定風量型周期境界条件

LES におけるチャンネル乱流の計算では、壁面以外の境界には周期境界条件の適用が一般的である。しかし、主流方向に一定の圧力差を仮定して周期境界条件を適用すると、計算される風量が意図した値になるとは限らないこと、風量が時間的に変動することなど、実用上の問題がある。そこで、今回は主流方向の風量を常に想定値に固定することが可能な定風量型境界条件を開発し、適用した。簡単のため二次元問題とし、主流方向空間分割 δx 、主流と直交方向空間分割 δy 、主流方向分割数 L 、陽解法時間分割 δt 、スタガード配置とすると、境界面における $n+1$ 時点の風速は形式的には次式のように表すことができる。

$$u_{B,j}^{n+1} = u_{B,j}^n + \delta t / \delta x (p'_{L,j} + \Delta p' - p'_{1,j}) \quad (6)$$

ここに、 $u_{B,j}^n$: 境界面風速 ($\alpha=*$: n 時点の圧力、運動量フラックスを用いて求めた暫定値、 $\alpha=n+1$: 更新値)、 $p'_{1,j}$: 圧力の修正量、 $\Delta p'$: 周期境界における圧力差の修正量である。

式(6)に基づいて圧力修正量に関するポワソン式を作成し、マト

リクス表示すると周期境界条件を処理するために必要な 2 バンドに加えて、未知数 $\Delta p'$ に関わる係数を収容するため列ベクトルが 1 つ増える。未知数の増加に対応して風量を設定するための次式が追加される。

$$Q = \sum_j [u_{B,j} + \delta t / \delta x (p'_{L,j} + \Delta p' - p'_{1,j})] \delta y \quad (7)$$

ここに、 Q : 設定風量である。

この方法を適用することにより設定風量は常に一定となるが、周期境界における圧力差の時間変動は許容することになる。なお、この方法を用いてもマトリクスの対称性は保持される。また、主流と直角方向に周期境界条件を適用する場合は圧力差を 0 とおいて、風量をなりゆきとする従来の周期境界条件を用いた。

2.3 スキームとソルバー

空間微分には中心差分、時間微分には Adams-Bashforth スキームを用いた。ソルバーとしては CG 法を適用したが、前処理として対角項のみに fill-in の影響を考慮した修正不完全コレスキー分解を行った。なお、周期境界の圧力差修正量に関わる係数は、 p' の式に fill-in を生じることなく、この部分のコレスキー分解は近似なしに行うことが可能である。

2.4 ドライバー計算

床面を粗度のある壁面とし、天井面を鏡面、主流方向(風量規定)、スパン方向(圧力一致)を周期境界条件でつないだ。計算における主流方向中央断面にてスパン方向 y 、鉛直方向 z の瞬時風速データをストックし、ストックデータが本計算のメッシュシステムに適應するように直線補間を行い、 z 方向において平均速度分布が風洞実験と概ね一致するように補正を行った。補正前の流入風速 U のプロフィール、乱流エネルギー k 、補正後の U のプロフィールを図 1 に示すが、 k 値はやや実験より低くなった。なお、以下では建物高さ、建物高さにおけるアプローチフロー風速で計算結果を無次元表示する。

図1 流入平均風速と乱流エネルギー

2.5 本計算

計算対象空間は $13.0 \times 8.00 \times 6.66$ の空間を $100 \times 94 \times 61$ のメッシュ分割を施したものとした。また対象建物として $2.0 \times 2.0 \times 1.0$ の単純形状建物を想定し、開口なしのもの、上流面と下流面に開口を有するもの(開口部サイズ: 0.4×0.2 、開口部厚さ方向 2 メッシュ)の計 2 タイプの計算を行った。図 2 に一例として開口ありのパターンのメッシュレイアウトを示す。流入条件は先のドライバー計算により作成したものとし、流出条件は瞬時断面平均風速を用いたオイラー型境界条件とした。風洞装置を想定し天井、床、側面を壁

面とし、壁面は平滑面を想定した。本計算は予備計算により解が概ね定常到達後に、20万ステップの本計算を実施し、計算結果を統計処理して実験と比較した。なお、LESにおける乱流エネルギー k の計算結果についてはグリッドスケール成分に加えてサブグリッドスケール成分 k_{SGS} を以下の式で評価して加えている。

$$k_{SGS} = \nu_{SGS}^2 / (C_k \Delta)^2, C_k = 0.094 \quad (8)$$

ここに、 ν_{SGS} : SGS の渦動粘性係数、 Δ : グリッドフィルター幅、

C_k : $\nu_{SGS} = C_k \cdot k_{SGS}^{1/2} \cdot \Delta$ とおいた場合のモデル定数である。

3. 計算結果と実験結果の比較

3.1 通風量の比較

表1に通風量の比較を示す。LESは良好に実験を再現している。なお、先行して実施した $k-\varepsilon$ モデルによる計算²⁰⁾でも、通風量に関しては同程度の精度の結果が得られている。

表1 通風量の比較 (無次元値)

風洞実験	LES
0.043	0.041

図2 メッシュレイアウト

図5 開口なしの風洞実験(上)とLES(下)の乱流エネルギー

図3 開口なしの風洞実験(上)とLES(下)風速ベクトル図

図4 開口ありの風洞実験(上)とLES(下)風速ベクトル図

図6 開口ありの風洞実験(上)とLES(下)の乱流エネルギー

図7 中心軸における鉛直断面風圧係数 (上: 開口なし 下: 開口あり)

3.2 風速ベクトルの比較

図3, 4に開口なし, ありの場合における対称面の時間平均風速ベクトルの比較を示す。これによると周辺気流の特徴である建物上流側の渦, 屋根面での剥離, 後流の様相などが的確に再現されている。また, 開口ありの場合における室内流入後の気流の著しい下降は岩本ら²¹⁾と同様に再現されており, 良好な対応を示している。この点に関しては, $k-\varepsilon$ モデルより予測精度は格段に向上したと判断できる。

3.3 乱流エネルギーの比較

図5, 6に開口なし, ありの場合における乱流エネルギーの比較を示す。乱流エネルギーに関しては, 建物前面下部や屋根面前縁がピークとなり, そのオーダーも概ね一致している。建物内部に注目すると, 上流側開口部の風下側で乱流エネルギーが比較的大きい値をとり, 斜め下方に流入する主流に沿って拡散している。後流域については, 屋根面下流側での乱流エネルギーのレベルがやや高い点は相違するものの全般的に分布性状はよく再現しているとみられる。

3.4 風圧係数の比較

図7に開口なしの場合、ありの場合の建物外周壁風圧係数に関する比較を示す。建物前面における風圧係数は、実験に比べて多少大きいものの、 $k-\varepsilon$ モデルで特徴的な極端な過大評価は見られず、特に開口ありの場合、なしの場合に比べて開口部上部で風圧係数がわずかに増加する点を含めて、実験を比較的良好に再現している。また、風下面では開口ありの場合、なしの場合に比べて開口部上部の負圧がかなり増加する傾向が見られるが、この点についてもよく対応しており、屋根面についても概ね一致していると判断できる。

4. 計算結果の分析

前節の結果より、LESによる計算結果は既往実験による風速ベクトル、風圧力、乱流エネルギーについて、 $k-\varepsilon$ モデルよりも格段によく対応することが判明した。従って、実験の評価が困難な量に関しても、今回の計算結果はかなりの精度で実状を反映していると期待することができる。そこで、以下では通風で特徴的な三項目についての分析を試みた。

4.1 流入気流下降の要因

今回検討している通風気流の特徴として、流入気流の著しい下降が挙げられる。この原因を解明するために、開口部中心を通る中心軸に沿って、力の収支を求めることを試みた。まず、時間平均した鉛直方向速度成分の運動方程式は、次のように表される。

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial U_j W}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\overline{u_j W} - \nu \left(\frac{\partial W}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial z} \right) \right] \quad (9)$$

粘性と想定空間の対称性からスパン方向微分を無視すれば、以下のよう簡略化して表すことができる。

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial UW}{\partial x} - \frac{\partial \overline{uw}}{\partial x} - \frac{\partial W^2}{\partial z} - \frac{\partial w^2}{\partial z} \quad (10)$$

ここに、 U_j : x_j 方向の平均風速、 W : 上向きを正とする鉛直方向平均風速、 x_j : デカルト座標、 U : 主流方向平均風速、 u : 主流方向瞬時風速、 x : 主流方向座標、 z : 鉛直方向座標、 u_j : x_j 方向瞬時風速、 w : 鉛直方向瞬時風速、 P : 平均圧力、 ν : 動粘性係数、 ρ : 密度である。

図8に検討した開口部中心軸とその周辺の平均気流場、図9に鉛直方向平均速度（上向きを正）及び、式(10)における各項の大きさを具体的に評価した値を示す。なお、式(10)の右辺の合計は概ね0となることを確認しており、計算解の振動を除去するため軸方向に計算結果を平滑化している。まずアプローチ気流は、開口部位置-1.2地点付近で循環流端部に達し、循環の外周に沿って建物に接近する。この領域は主流方向速度がほぼ一定で鉛直速度が正から負に変化するため、式(10)の右辺第二項は正となる。開口部に十分接近すると W は負値を維持した状態で主流方向に加速が生じ、同じく正値をとるため、図9に示すようにこれらの領域で第二項は大きな正の値をとる。また循環域では進行方向への $\overline{uw}$ の増加による右辺第三項の正の寄与も無視できない。流れを下降させる要因は、これらの作用を相殺する式(10)中の負成分と考えられるが、図9より-1.2付近から開口部近くまで、式(9)右辺第一項の圧力項が対抗していることが分かる。その後開口部に十分接近すると圧力項も正へと転じ、

図8 開口部中心軸とその周辺の平均気流場

図9 鉛直方向成分の風速と成分項毎の比較

図10 流管の様相

唯一負値となるのは第四項の W 成分による運動量輸送となるが、これには開口部より上部に位置するよみ点で分岐した下降流による運動量輸送の影響が大きいと考えられる。このように流入気流下降の要因の一部には、建物前面下部の循環流による圧力勾配があり、流入前の最終段階では下向き運動量輸送が重要となることが分かった。

$k-\epsilon$ モデルでは、風向正面の場合における通風気流の下降が十分再現されないことが問題となっていたが、上記分析より建物前面下部の循環流が正しく再現されないことが一因であると推定された。

4.2 開口部を通過する流管の形状変化

全圧損失のメカニズムを解明することを目的として、風上側開口部を通過する流管形状の同定を試みた。計算は開口部を 100×100 に分割してマーカーを飛ばし、各計算メッシュを通過するたびにその地点での風量、流断面積等を計算する方法を用いた。風量は連続条件式を考慮して、各セル表面での法線方向風速成分の大きさは一定として計算し、その他の量については直線補間を用いた。なお、各流断面における風量差は 8% 以内に収まった。開口部上流側では計算領域の流入境界まで遡ることが可能であったが、室内側では流管がねじれて十分下流までの追跡は不可能となった。図 10 に計算した流管の平面、立面、透視図を示す。流管は当初、開口部よりやや小さい流断面積を維持して開口部方向に直進するが、建物前面下部での循環流に押し上げられて上昇しつつ、スパン方向に引き伸ばされ、その後の下降に伴う減速によって急速に流断面積を増し、開口部に十分接近すると再び加速して縮小し、開口部に流入する。なお、流管は開口部に到達以前に風上壁面に接することはない。室内に流入後は急速に流断面積を増やして減速しつつ下降する。図 11 に流管の断面積と風向角度の関係を示す。これによると流管の面積が開口部直前で急激に増加することや、開口部直前において風向が下向き約 40 度に達していることが分かる。このように、開口部を通過する流れは、減速、加速、減速が短い区間で生じる複雑な流れにより形成されていることが分かった。

4.3 平均流のエネルギー変化

粘性の影響を無視した平均流のエネルギー輸送方程式は以下のようになる。

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [U_j (K + P)] = - \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \overline{u_i u_j}) + \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

ここに、 K : 平均流の運動エネルギーである。

これを流管に適用すると、流管の断面間での全圧差は検討区間の流管表面における仕事と流管内部の乱れの生産に対応することが分かる。まず、図 12 に開口部中心軸に沿った静圧、動圧、全圧の変化を示す。全圧が開口部上流側で大きく変化しているのは、気流の軌道を見逃しているためと判断された。そこで、流管に沿って流管内部の流量による重み付け平均で表した結果を図 13 に示す。アプローチフローは開口部に到達するまで、加減速による静圧、動圧間のエネルギー変化が生じるが、全圧変化は非常に小さい。流管が開口部に達すると、まず大きな静圧低下が生じ、開口部通過後に動圧と静圧の低下が同時に生じている。この開口通過直後に生じる全圧損失について検討するため、図 14 に乱流エネルギーの生産項の空間分布を示す (SGS 成分の寄与は無視)。開口部下流側、特に開口角部を中心として乱流エネルギー生産が大きくなっており、全圧の

図 11 流管の断面積と風向角

図 12 中心軸における圧力分布

図 13 流管における圧力分布

図 14 乱流エネルギー生産項 P_k

低下傾向と対応していると判断される。全圧の大きな低下はこのように通風気流が室内に流入した直後に生じるため、室内を進行して下流側の壁面に達する時点では流入時点での全圧は室圧基準で大部分失われ、再び大きな乱流エネルギーを生産する余力は残されていない。なお、全圧損失は動圧損失の 1.6 倍となった。

5. まとめ

風向正面の場合における通風時建物内外気流構造解明のために、模型の大きさが同一で開口なしとありの場合の計算を行い、実験との比較検討に基づき考察した結果、次の知見を得た。

- (1) LES の計算結果は通風量、風速ベクトル、乱流エネルギー、風圧係数等の統計量に関して風洞実験結果とよくに対応し、 $k-\epsilon$ モデルに対し、大きな改善がみられた。

この結果を踏まえて開口ありの場合の計算結果を分析し、通風時に特徴的な要因について検討を行った結果、次のような知見を得た。

- (2) 風向正面の場合に特徴的な流入気流の下降は、開口部に接近する前半では建物前面下部に形成される循環流による圧力勾配、後半では平均流の運動量輸送の影響によることがわかった。 $k-\epsilon$ モデルを用いた場合に、気流の下降が十分に再現されないのは、循環流の形成が不十分であることが原因と考えられ、この点に関するモデルの改善が必要と判断された。
- (3) 開口部を通過する気流のエネルギー変化を分析するために流管形状を同定した。その結果、開口部付近の短い区間での加減速の影響により、この区間の流管形状に大きな変化が生じていることが明らかとなった。
- (4) しかし、開口部到達以前の流管変形に伴う動圧、静圧間のエネルギーのやりとりは全圧に顕著な変化を与えない。従って、風向正面の場合の全圧損失は、気流が開口に到達以後に生じるものであり、これは、乱流エネルギー生産項の空間分布とも対応する結果となった。

本論文に関する既発表文献

- 1) 岩渕拓志, 倉渕 隆, 嵐口晃宏, 大場正昭: LES における非対称チャンネル乱流に基づくアブローチフローの再現に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.241-244, 1998 年
- 2) 小橋史彦, 倉渕 隆, 大場正昭, 嵐口晃宏, 岩渕拓志: 通風時の建物内外気流構造解明のための数値シミュレーションに関する研究 (2) LES (S モデル) による解析と計算結果の詳細解析, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.221-224, 1999 年
- 3) 岩渕拓志, 倉渕 隆, 嵐口晃宏, 大場正昭: 通風時建物内外気流の構造解明を目的とした LES シミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術論文集, pp.1185-1188, 1999 年
- 4) 岩渕拓志, 倉渕 隆, 大場正昭, 嵐口晃弘, 小橋史彦: 通風時建物内外気流構造解明のための数値シミュレーションに関する研究 (4) LES (S モデル) による計算結果と風洞模型実験の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp.703-704, 2000 年
- 5) 倉渕 隆, 大場正昭, 嵐口晃弘, 岩渕拓志, 小橋史彦: 通風時建物内外気流構造解明のための数値シミュレーションに関する研究 (4) 計算結果に基づく通風時の乱流構造の解明, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp.705-706, 2000 年
- 6) Kurabuchi T., Ohba M., Arashiguchi A., and Iwabuchi T.: Numerical Study of Airflow Structure of a Cross-Ventilated Model Building. Air Distribution in Rooms: Ventilation for Health and Sustainable Buildings. ROOMVENT 2000 Vol.1, 313-318, ELSEVIER, 2000

参考文献

- 1) 日本建築学会環境工学委員会空気環境運営委員会: 通風量算出のモデリング, 空気環境運営委員会第 1 回空気シンポジウム, 1990 年
- 2) 勝田高司: 自然換気に関する実験的研究, 東京大学生産技術研究所報告, 第 1 巻, 第 2 号, 1950 年
- 3) 石原正雄: 建築換気設計, 朝倉書店, 1969 年
- 4) 勝田千利, 関根 毅: 建物壁面開口部による換気に関する実験的研究 その 1, 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.1-9, 1961 年
- 5) 清家 清, 小玉祐一郎, 高田典夫: 室内空間形態の通風性状に及ぼす影響について, 模型実験による風速分布と通風量の測定 (1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.243-244, 1977 年
- 6) 片山忠久, 石井昭夫, 西田 勝, 堤純一郎他: 通風に関する模型実験法の研究 (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.375-378, 1985 年
- 7) 清田誠良, 関根 毅: 模型壁面の夏期後部圧力損失に関する実験的研究, 日本建築学会環境工学論文集, 第 6 号, pp.77-83, 1984 年
- 8) 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窓の通風効果を中心として, 日本建築学会論文報告集, No.372, pp.10-20, 1987 年
- 9) 赤林伸一, 村上周三, 加藤信介他: 住宅の換気・通風に関する研究 その 6, 7, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.629-632, 1989 年
- 10) 赤林伸一, 村上周三, 加藤信介他: 住宅の換気・通風に関する研究 その 8-10, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.547-552, 1990 年
- 11) 澤地孝男, 瀬戸裕直, 清田誠良, 成田健一, 阿部優美: 住宅の通風設計および性能評価に関する研究 その 1~3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp.525-530, 1999 年
- 12) 片山忠久, 堤純一郎, 林 徹夫, 吉永久雄, 渡辺哲也: 通風時における室内気流分布の数値シミュレーション (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.483-486, 1989 年
- 13) 倉渕 隆, 鎌田元康: Multi-Mesh 法を用いた通風時建物内外気流の同時解析, 日本建築学会計画系論文報告集, No.426, pp.1-11, 1991 年
- 14) 飯野由香利, 倉渕 隆, 小林信行, 嵐口晃宏: 風洞実験および CFD を併用した通風時の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, No.520, pp.47-54, 1999 年
- 15) 富永禎秀, 村上周三, 加藤信介, 持田 灯: 通風時の建物内外気流の Large Eddy Simulation 速度・圧力場に関する風洞実験との比較とエネルギー損失過程の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.497-498, 1991 年
- 16) 大場正昭, 倉渕 隆, 入江謙治: 通風開口部の流入気流と圧力損失に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, 2002 年 (投稿中)
- 17) 大岡龍三, 持田 灯, 村上周三, 林 吉彦: 風洞実験及び LES, DSM との比較による ASM の精度・問題点の検討 ASM による立方体周辺の非等方乱流場の数値解析, 日本建築学会計画系論文集, No.495, pp.61-68, 1997 年
- 18) 倉渕 隆, 鎌田元康: 非等温室内空気分布数値予測法の壁面境界条件に関する研究 一垂直加熱平板自然対流に関する検討一, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.565-568, 1988 年
- 19) 持田 灯, 村上周三, 富永禎秀, 小林 光: Smagorinsky SGS モデルにおける標準型と Dynamic 型の比較 Dynamic LES による 2 次元角柱まわりの乱流渦放出流れ解析 (第 1 報), 日本建築学会計画系論文集, No.479, pp.41-48, 1996 年
- 20) 鈴木求紀, 倉渕 隆, 大場正昭, 嵐口晃弘, 岩渕拓志: 通風時建物内外気流構造解明のための数値シミュレーションに関する研究 (3) 標準 $k-\epsilon$ モデル, 改良モデルの比較検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp.701-702, 2000 年
- 21) 中越淳郎, 岩本静男, 今野 雅: 通風室内の気流性状の数値解析, LES と $k-\epsilon$ モデルの比較, 空気調和・衛生工学会講演論文集, pp.681-684, 1998 年

(2002年 2月10日原稿受理, 2002年 8月23日採用決定)