

自然換気・通風を対象とした換気力学及び空気流動研究の事例

Researches on Ventilation Mechanics and Airflow Analysis for Natural and Cross Ventilation of Buildings

小林 知広¹⁾
Tomohiro Kobayashi

1) 大阪市立大学 大学院工学研究科, 講師, 博士 (工学) (kobayashi@arch.eng.osaka-cu.ac.jp)
Graduate School of Eng., Osaka City University, Lecturer, Dr., Eng.

本稿では建物・室内スケールの換気研究のレビューを行い、その発展を簡単に振り返った上で換気計算に関する筆者の研究を紹介する。具体的には通風時の風力換気予測式の精度、風圧係数差が小さな場合の乱れによる換気量、越屋根の換気量計算、中高層建物の自然換気量計算の4項目を掲載するが、換気研究の歴史の中で自身の研究がどのような意義を持つのか、そしてその位置づけなどを再考しながら紹介したい。

1. はじめに：本稿の趣旨

本シンポジウムは様々なスケールでの換気が題材ではあるが、換気研究を俯瞰して当該分野の研究者が今後の展開を考えるための動機付けとなるような議論を行うことが趣旨と解釈する。本稿の主な内容は事例として建物・室内スケールを対象とした筆者の換気計算の研究紹介だが、シンポジウムの趣旨を考えるにあたり、まずは周辺の文献を手に取りこれまでの室内換気研究の発展を振り返ることから始めてみたい。そのため、ベテラン研究者にとっては本章は今さらと思われる内容も多く含むと思われるが、筆者が未熟なためにまず当該分野の発展の中で自身の研究の意義や位置付けを再確認する必要があるとの認識で執筆した点についてご容赦頂きたい。

2. 日本の換気研究の発展の様子を振り返る

日本の換気研究は坪井次郎¹⁻³⁾や森林太郎⁴⁾ら为先駆とした造家衛生・建築衛生において本格的な学術研究が行われ、衛生学として取り組まれて⁵⁻¹⁰⁾知見が蓄えられた¹¹⁻¹³⁾。これが建築学における建築計画原論^{14, 15)}で進展し、昭和30年代には概ね体系を成したように思われる¹⁶⁻²⁰⁾。その過程で「建築環境」という言葉も見られるようになった²¹⁾が、この頃の書籍では「空気環境」という言葉は見られず、換気分野は室内気候等の項目の一部として取り上げられている。換気に関する記載の典型は、LavoisierやPettenkoferに言及してCO₂ 容限度や必要換気量等に関する換気学説とその変遷に触れ、次に種々の汚染物質の有害性や測定法について述べる形式である。大正期の設備分野の書籍²²⁾の換気に関する項目もCO₂ 容限度への言及が見られる。衛生学な学問の生い立ちを考えると、換気の項目でまず目的である空気質に言及し、次に流体力学を基礎とする換気理論や換気方式、空気流動等について記載する構成をと

るのは自然に思える。本稿のテーマは後者の建物スケールでの換気計算であり、この分野に注目して、以下もう少し文献を追いかけてみたい。

前述の昭和30年代の書籍では換気理論の基礎、建物の風圧分布や室内気流性状に関する資料、換気経路と換気効率の概念等が示されており、建築学における換気力学・空気流動研究の方向性と基盤はこの頃には既に出来上がっている。これは当然それまでに積み重ねられた研究の成果であり、ここには挙げきれないが例えば代表的なものとして伊藤²³⁾⁻²⁷⁾、佐藤²⁸⁾⁻³⁴⁾、平山・塘ら³⁵⁾⁻³⁹⁾、渡邊・勝田(高)ら⁴⁰⁾⁻⁴⁷⁾の研究がある。これらは基礎研究を多く含むとともに、住宅・学校・工場等の実際の用途を想定した評価も多く見られ、換気研究が実学として時代に求められながら進展してきたことも改めて実感する。また、建築用途を問わず自然換気研究が多く見られるのも日本の研究の特徴とも思われる。

昭和30年代中頃の換気研究では、当時水路網や坑道の通気網に利用されていた計算法^{48, 49)}を建築に適用した多数室の換気計算の解法に関して、前田⁵⁰⁾⁻⁵¹⁾、石原⁵²⁾らの報告が見られ、換気計算理論にさらなるステップアップが見られた。それとともに、この頃までには勝田(千)・関根ら⁵³⁻⁶⁰⁾、前田ら⁶¹⁾⁻⁶⁵⁾、勝田(高)・後藤⁶⁶⁻⁶⁹⁾ら、石原⁷⁰⁻⁷⁵⁾によっても活発な研究が行われ、この時期には各種換気装置の換気特性や、風圧係数データの充実も見られる。佐藤⁷⁶⁾が評したように換気理論はこの時期めざましく進展したと思われ、それまで理論も技術資料も不十分であったために複雑な問題への対応が難しかった状況からの脱却が見られた。同時に、現在の建築空気環境の教科書的内容はこの頃にはほぼ完成しているようにも思われる。また、石原は昭和40年代中頃に「建

築換気設計」⁷⁷⁾を著してそれまでの換気に関する知見をまとめており、この段階で換気研究は一定の成熟を見せたと筆者は解釈している。

昭和40年代頃以降は換気量測定等の手法に焦点を当てた研究⁷⁸⁻⁸²⁾も見られ、手法の提案や向上を目的に研究が行われることも多くなった。自然換気・通風に関する研究も一時的に数が減りはするが継続的に行われており⁸³⁻⁹⁰⁾、これまでに築かれた換気研究の体系を駆逐することで、より定量的かつ詳細に換気性状が明らかにされるようになった。また、石油危機発生以降、省エネルギーをキーワードとして通風研究が活発に行われているのも、当然ではあるが社会問題に対応する形で時代に求められて研究が発展してきたことを実感する。なお、この時期以降の自然換気・通風研究は例えば吉野⁹¹⁾や甲谷⁹²⁾のレビューに詳しいためここでの引用は省略するが、現在までも継続的かつ活発に研究が行われている。

昭和50年代以降の自然換気・通風研究の対象は当初住宅が多かったが、西暦2000年前後からは大規模非住宅建築でも自然換気の導入が見られ始め、実建物で評価した研究例⁹³⁻¹⁰⁰⁾が多く見られる。その一方で一般的な知見を得るための取り組みも現在まで継続的に行われている¹⁰¹⁻¹⁰⁶⁾。非住宅の自然換気設計手法は現在でも体系を成したとは言い難いが、検討すべき項目やその手法などの実務的・学術的知見の蓄積と情報発信が行われている¹⁰⁷⁾。少し話は変わるが、熱的快適性分野では英国BRSのWebbが終戦直後にシンガポールで実施した調査に端を発し、その後Humphreys, Nicolら^{108, 109)}により進められてきたAdaptive Modelの概念は現在ASHRAE Standard 55¹¹⁰⁾に組み込まれている。当該モデルは主に居住者自身による制御が可能なFree Runningな状態を対象にしており、住宅/非住宅を問わず近年の日本の換気設計の立場から見ても応用の可能性があり、自然換気研究として当該モデルを扱う研究の例^{111, 112)}が今後増えてさらに進展する可能性もある。

換気効率の研究に目を向けると、古くは例えば昭和20年代に佐藤^{34, 11)}が通気量に対する汚染物排出に有効に働いた換気量の比率を「換気効率」とした評価も行っているが、昭和50年代後半にAge(空気齢)の概念¹¹³⁻¹¹⁵⁾が導入されて以降、より定量的な換気効率評価や室内の詳細な分布にも関心が持たれるようになった。また、以降の数値流体力学の理論と技術の発展によってさらに詳細な気流性状の解明や換気効率評価が可能となり、数値計算を用いた算出を前提とした換気効率指標も提案された^{116, 117)}。換気効率の評価に関する研究はその後も知見の蓄積

が見られ¹¹⁸⁻¹¹⁹⁾、近年Lim・伊藤ら¹²⁰⁻¹²²⁾によりNet Escape Velocityの提案が見られたのも記憶に新しい。このように直近20-30年程の間では、測定技術やCFDなどの計算技術の発達が換気研究にさらなる幅をもたらしており、機械工学での流体力学など工学の基幹分野の基礎研究を建築の換気分野に持ち込むことによって換気研究が新展開を見せた面もある。

前述の通り、昭和40年代頃には換気研究は概ね成熟している。しかし、言うまでもなくそれ以降も基礎研究か応用研究かを問わず当該分野で重要な研究が数多く実施されており、換気研究は進展してきた。発展の歴史を振り返ると、その成熟した学問をさらに進展させてきた研究には、例えば以下のような目的や意義があるように思える。

- ・現象の詳細な解明、学術的な欠落箇所の穴埋めなどの基礎研究
- ・新たな予測モデルや評価指標の提案・精度向上のための基礎研究と、それを用いた評価
- ・新たな実験手法の開発や手法の向上など、研究や評価のレベルを向上させるための研究
- ・設計への応用を可能にする技術資料の整備と充実、各種規準の整備のための基礎的検討
- ・実在システムの定量的評価と問題点の抽出
- ・その時々々の社会問題の解決を目指した学術的検討
- ・隣接する学問分野からの知見を導入する研究

次章以降では、成熟した学問分野で行われる研究の意義を筆者なりに考えながら、筆者の自然換気・通風に関する研究の一部を紹介したい。

3. 予測モデルの意味と実現象との違いを理解する

～風力換気量予測手法の意味と問題点

3.1 背景

ここではまず、基礎研究として従来予測手法の持つ意味と問題点を明らかにすることを意図した筆者の研究を紹介したい。一般に風力換気量・通風量を予測する際にはベルヌーイの原理に基づいたオリフィス式が用いられるが、これは開口の前後で速度圧が無視できて全圧が静圧と等しくなるとの前提の下に、静圧差を駆動力するものである。そして開口近傍の静圧を「開口がない模型の壁面静圧」(=風圧)で代替する手法と言える。この手法は簡便であり実用上もとても良く使われるが、比較的大きな開口で通風が行われる際には室への流入直前や室からの流出直後であっても速度圧は残るため、風圧係数で予測される差圧は実現象で生じる圧力差とは異なると言える。また、オリフィス式で用いる開口の有効開口面積についても一般にはチャンバー法で求められ

る流量係数を用いて直列結合するが、これもまた実現象と等しいとは言い難い。加藤・村上・赤林ら^{123, 124)}はこの問題に対して Navier-Stokes 方程式から導かれる総運動エネルギーの保存則に基づいて流管内で実際に輸送されるパワーとその損失で本来の現象を説明し、損失項の厳密な数式表現を行った。石原⁷⁷⁾は複数の開口に干渉係数を導入して総合抵抗係数を評価する手法を提案し、甲谷・山中¹²⁵⁾は流入風向と総合抵抗係数の関係式を用いた収束計算により通風量を求める手法を提案した。倉淵・大場ら^{126, 127)}は通風時に流入風向によって流量係数が変化する問題を開口部の局所的な力学特性の相似性を表す無次元室内圧によって整備する局所相似モデルを提案している。このように、通風時には従来のオフィス式に基づいて有効開口面積を直列結合する手法は精度が悪化することは一般に良く知られている。

3.2 通風現象と一般的な風力換気量予測手法

一般的な通風量予測手法の問題点を明らかにし、予測法の物理的意味を理解することを目的に、**図 1**に示す対面開口を有する矩形の室モデルを用いた。開口寸法 L は風上・風下開口で共通として $L=45, 60, 90 \text{ mm}$ の 3 条件を設定した。通常風量を予測する際は両開口部の風圧係数と各開口の流量係数から算出する有効開口面積を合成値を用いる。前者は開口が無い模型の壁面静圧であり、後者はチャンバー法等で求める。ここで、チャンバー法は**図 2**に示すように開口に対して十分大きなチャンバーを介して強制排気した際の開口前後の静圧差と風量から各開口の流量係数 ζ を求める。室全体の有効開口面積の結合値を $C_D A_{Opening}$ として風量は (1) 式で求められる。

$$Q = C_D A_{Opening} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_W - P_L)} \quad (1)$$

ここで P_W と P_L はそれぞれ風上と風下の風圧であり、**図 2**の手法に基づけば、前後の開口のサイズが等しいときには、 $A_{Opening}$ を 1 つの開口面積として、

$$C_{D-\zeta} = \frac{1}{\sqrt{\zeta_{in} + \zeta_{out}}} \quad (2)$$

となる。この手法は**図 2**で想定するように開口通過

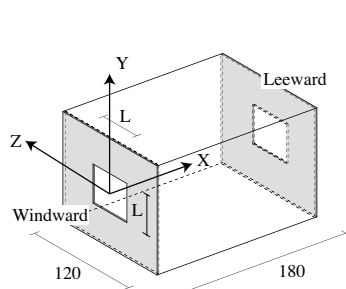


図 1 室モデル

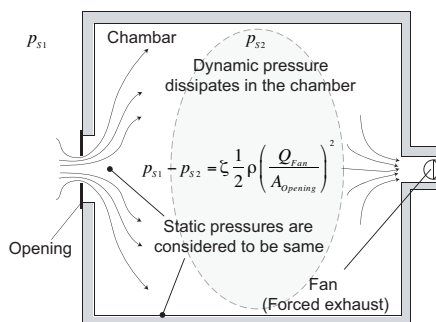


図 2 チャンバー法 (1 開口)

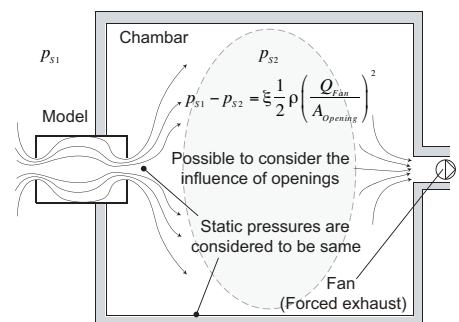


図 3 チャンバー法 (室全体)

後に完全に完全に気流が速度圧を失う前提であり、室内で比較的大きな風速が残存する通風時には両開口の「干渉」を考慮できないため適切ではなくなる。そこで**図 3**に示すように、室全体の模型をチャンバーに設置して圧力損失を測定する改善手法も考え得る。チャンバー内外の静圧をそれぞれ p_{S1}, p_{S2} として、ここではこの手法で求めた室全体の流量係数を (3) 式で定義する。

$$C_{D-\zeta} = \frac{Q}{A_{Opening} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{S1} - p_{S2})}} = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad (3)$$

一方通風現象では本来**図 4**に示すような流管が考えられ、**図 3**のチャンバー法の意味としては**図 4**の Section 2 から Section 5 までの静圧低下を測定して流量係数を算出することに近いと考える。そして両断面の静圧は風圧係数により予測することで風量を予測することになる。実際の通風現象では風下の建物後流側には屋外の気流が存在しているため、室内を通過した流管には外部からのエネルギーの供給があるが、チャンバー法では**図 3**の干渉を考慮する手法であっても室からの流出後は静穏な気流場を想定しているため、やはり現実とは異なる想定と言える。そこで**図 4**の通風時の流管内静圧と**図 3**のチャンバー法での流管内静圧を CFD により算出することで、チャンバー法と通風の現象の違いを明らかにするとともに結果的に生じる風量の算出誤差についての検討結果を紹介する。

3.3 CFD 解析に基づく流管解析と流量係数算出

図 2の手法は開口間の干渉を考慮できないことは自明であり、ここでは**図 3**の手法と通風現象を比較し、チャンバー法自体の問題点を明らかにする。

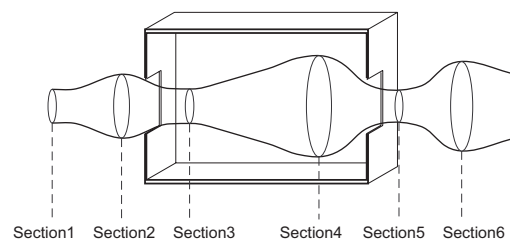


図 4 通風時の流管形状と流管断面

ここでは既往の研究で行われた実験¹²⁸⁾を想定し、**図5**に示すようなチャンバー法を考えてCFD解析を行う。なお、C1～C9はチャンバー内静圧 p_{S2} の測定点でありほぼ同様であった。開口寸法を前述の3条件として、通風時とチャンバー法において室内を通過する流管内平均静圧を比較する。**図6**はチャンバー解析時のCFD解析領域で、これと室モデルを一樣流にさらした際のCFDと比較する。なお、CFDの乱流モデルには応力方程式モデルを用いている。**図7**に両解析（開口寸法はL=90mm）における流管形状、**図8**にそれぞれの流管内静圧の変化を示す。

図8の通風時は、流出直後に流管断面積が最小となる位置より風下で流管拡大による静圧上昇が見られる。一方チャンバー法では静穏な气流場に噴流的に流出するため、流管は拡大するが静圧の上昇が見られない。このことからチャンバー法は流出後静圧が最も低くなるSection 5の静圧(p_5)を想定していることに近いと考えるのが妥当だが、開口が大きくなるほどチャンバー法と通風現象でこの断面の静

圧の差が大きくなる。つまりチャンバー法では抵抗を過大評価することになる。ここで通風時の流管内圧力に基づく流量係数を(4)式のように定義する。

$$C_{D-CV} = \frac{Q}{A_{Opening} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - p_5)}} \quad (4)$$

P_1 はSection 1の全圧、 p_5 はSection 5の静圧である。**図9**に(2)～(4)式で求められた室全体の流量係数を示す。最も開口が大きい条件では、(2)式による従来の直列結合の流量係数は実現象に基づく(4)式の60%、(3)式の改善したチャンバー法では85%程度となり、通風量を過小評価する可能性がある。しかし風量はこの流量係数に駆動力となる圧力差の平方根を乗じることで得られるため、両者を考慮する必要がある。**図10**に開口の風圧係数差と流管解析から得られた風上全圧-風下静圧の圧力差を示す。L=45, 60mmの2条件では風圧係数差は流管内の圧力差を良く予測していることになるが、L=90mmの極端に開口が大きい条件では風下側の流管内静圧は風圧係数とは差が見られることがわかる。

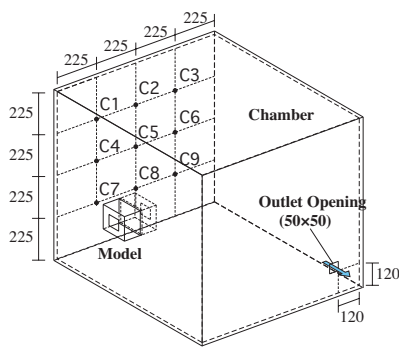


図5 チャンバー法の解析概要

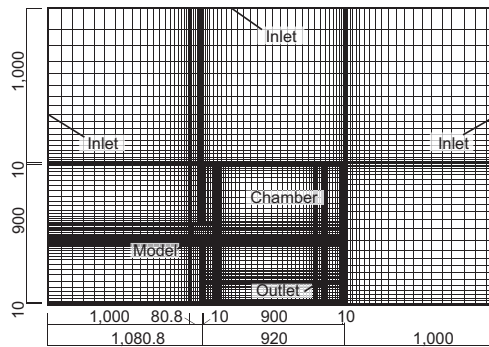


図6 チャンバー法の解析領域

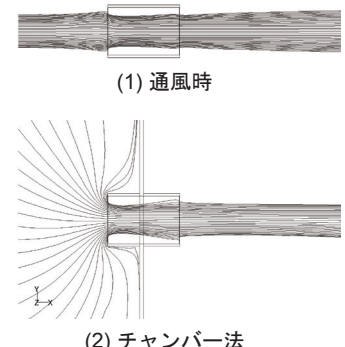
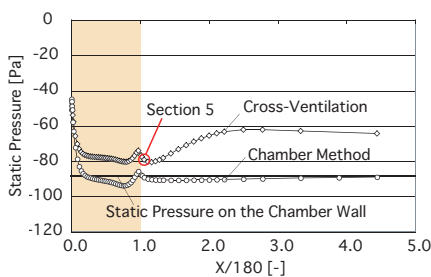
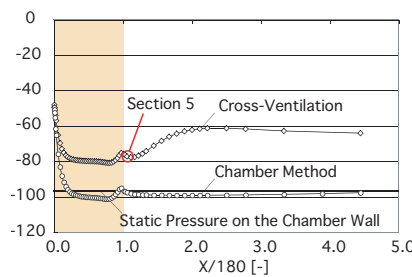


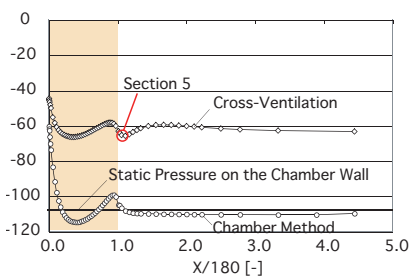
図7 室を通る流管形状



(1) L=45 mm (開口率:11.6%)



(2) L=60 mm (開口率:20.7%)



(3) L=90 mm (開口率:46.5%)

図8 通風時及びチャンバー法で室内を通過する流管内の平均静圧（編掛け部は室内、基準静圧は風上全圧）

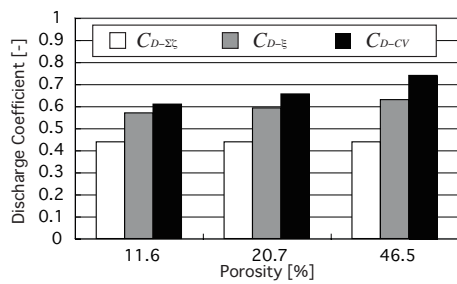


図9 各種流量係数

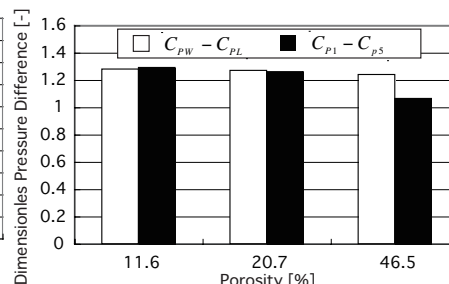
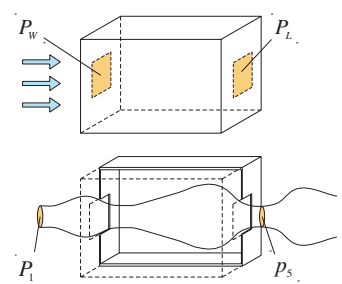


図10 流管内圧力及び風圧係数に基づく圧力差



3.4 通風時の風量予測手法の誤差

前節の結果を用いて算定した通風量の結果を図11に示す。Case 1は従来手法で、Case2は干渉を考慮したチャンバー法で算出した流量係数に風圧係数を用いたものである。Case 3は風量の真値である。この結果、干渉を考慮しないCase 1は風量を30～40%過小に評価し、Case2では真値から5～10%程度の過小評価に止まっている。このように、室内の気流の干渉を考慮せずに抵抗を結合する予測手法では大開口時には誤差が大きくなるが、Case2のように考慮することでその誤差は大幅に小さくなり、チャンバー法が静穏な気流場に吹き出すことの問題は実現象と異なるとは言え、実用的な風量予測精度を考えると影響は大きくないと言える。

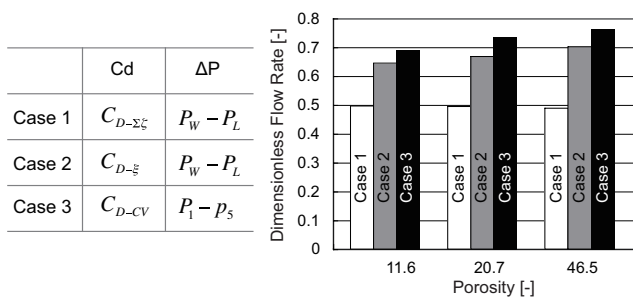


図11 各手法による通風量計算の結果

4. 計算法の適用範囲と学術的な欠落箇所を考える

～乱れによる換気効果の評価

4.1 問題点

前章で通風時の予測手法の精度と物理的意味を検証したオリフィス式に風圧係数を用いた換気量予測手法は、前述の通り物理的には厳密に通風現象を再現するわけではないが、実用的には風力換気計算によく用いられ建築の換気設計においては適用範囲は広いと考える。この手法では風圧係数は風向ごとに風洞実験から得られた時間平均値を用いるのが一般的であるが、例えば建物が密集した地域等では対面開口であっても風圧係数差が小さいことも少なくない。この場合、等温を仮定すると当然換気量はほぼ0と算定されることになり、求める精度にもよるが、計算の目的を果たせないことがあると言える。

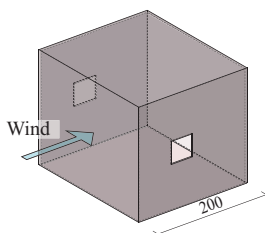


図12 検討対象模型

近年では省エネ評価等を目的として換気回路網計算を用いて長期間の換気計算が行われることも少なくないが、例えば気象データを用いて1時間ごとに換気計算を行うとしても風圧係数差が0の風向では「窓を開けていてもその1時間の間は換気量がずっと0となる」というのは感覚的にもおかしく、これは乱れの要素が入っていないことに起因する。換気研究は成熟した学問分野であると言えるが、その一方で「複数の開口間で風圧係数が微小であるという」現実にもよく発生し得る単純な換気現象における換気量を予測する術も確立されていないとも言え、換気研究を実学として考えた場合でも学術的に欠落した箇所は存在すると考える。

乱れによる換気のみかメカニズムは脈動と混合の2種の現象^{129, 130)}とされているが、その評価という意味ではこれまでも単一開口を対象として行われた研究については比較的多く知見も蓄積されている¹³¹⁻¹³⁴⁾。しかし上記のように「複数開口で風圧係数差が微小な状況」は現実によくあり得るにも関わらず検討例が少ないことから、現代においても基礎研究として意義があると考えて評価を行っている。

4.2 解析及び評価方法

複数開口で風圧係数差が小さな状況での換気量評価を目的として、縮小模型による風洞実験を模擬したCFD解析を行った。解析対象は図12に示す対面開口を有する室モデルとし、これに横風がアプローチする状況を想定してSmagorinskyモデルを用いたLESによる解析を行った。解析領域としては図13に示すような幅1,000 mm、高さ1,000 mm、長さ3,200 mmの流路を設定しており、アプローチフローは別途風洞実験で取得した1/5ベキ乗則に基づくプロファイルとした。計算はまず標準k-εモデル(SKE)で解析した結果を初期条件とし、計算時間間隔を1/2,000 [s]、計算開始後の2,000 time step (=1.0 [s])をSKEからLESへの移行期間とみなして結果を破棄し、その後の19 [s]を本計算とした。流入境界は図13の境界層流に変動風を与えた。なお、Smagorinsky定数は0.1とした。

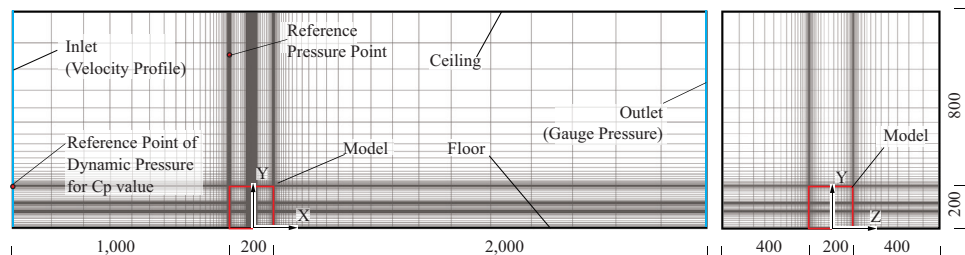


図13 計算対象領域と計算格子レイアウト

4.3 解析条件及び評価方法

図 13 に示した解析領域に開口を有しない室モデルを設置して格子サイズの検証を行った事前検証の結果に基づき、風圧係数差が異なる 6 条件の対面開口配置を設定した (図 14)。換気量の評価は 2 種の手法を用いる。一方は室内で汚染物を想定した粒子を発生させ (図 15)、発生量と室内平均個数濃度の時間応答から算出する手法とした。

$$C_r(t) = \frac{q_p}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad [-] \quad (5)$$

濃度応答の結果に最もよく合致するような換気回数 n を (5) 式に基づき最小二乗法で同定し、それに室容積を乗じることで求めて Purging Flow Rate (PFR) とする。もう一方は濃度は用いず、両開口から流入出する瞬時の風量を全タイムステップでそれぞれ算出して時間平均した通気量とし、ここではこれを PFR と区別して AFR (Airflow Rate) と表記する。

4.4 風圧係数差と換気量の関係

全 6 条件で得られた風圧係数差と PFR・AFR の関係を、従来のオリフィス式で得られた結果とともに図 16 に示す。全条件で AFR が PFR より大きな換気量を示しているが、これは AFR が全流入出空気量を示しているのに対して、PFR は室内に再帰する粒子を含む気流を有効な換気量と見なさないために生

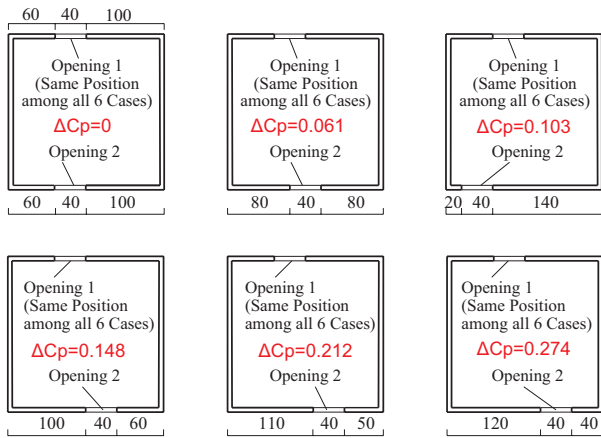


図 14 解析条件 (開口 1 の位置変更)

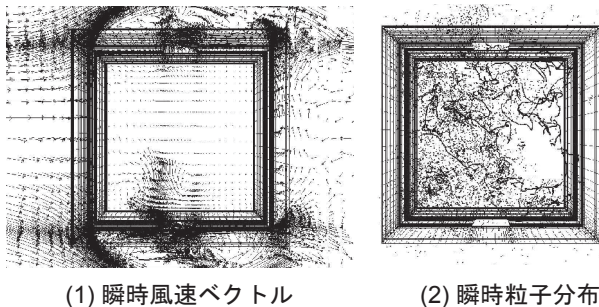


図 15 $t=0.5$ s (1,000 ステップ) 時の瞬時風速と粒子分布

じる違いと言える。一方オリフィス式は流入出する空気量を評価するため、換気量予測手法として比較すべき対象は PFR ではなく AFR と考えられる。

AFR とオリフィス式の結果を比較すると、風圧係数差が概ね 0.1 を下回った場合に換気量が大きく異なっており、この領域では時間平均的な風圧係数差ではなく、開口部付近の乱れが主たる換気駆動力になると言える。もちろんこれらの換気量は開口部付近の乱れの性状に依存するためより体系的な検討が必要だが、定性的には風圧係数差が概ね 0.1 を下回るような条件ではオリフィス式に基づく換気量算定手法は著しく精度が低下すると示された。

前述の通り風圧係数差が小さい状況での窓開放は現実的に頻繁に生じ得る現象であり、そのような単純かつ日常的な現象でも我々は簡易な予測手法を確立しきっていない。この例ではトレーサガス法や LES を行わずとも換気量が予測できる手法を今後提案することには実用的にも学術的にも意義があると考える。ここで示したトピックは一例に過ぎないが、このように換気研究の欠落した部分は依然として存在し、それを埋める研究は今後も必要と考える。

5. 既往研究の成果と適用範囲を拡張する

～越屋根の換気量計算の研究を通して

5.1 研究の目的と意義

各種換気装置の換気特性・換気性能の研究は多く行われおり、その代表的な例にはモニターやベンチレーターなどがある。古くは佐藤²⁹⁾や渡邊・勝田(高)ら⁴²⁾が水槽や風洞で気流性状を定性的に明らかにし、昭和 30 年代中頃には換気計算上の抵抗の評価方法について石原⁷²⁻⁷⁴⁾、勝田(千)・関根⁵⁵⁻⁵⁷⁾らが報告を行っている。しかしこれらは主に工場建築を対象にしている研究が多く、住宅を扱ったものは少ない。前述の通り石油危機以降省エネルギーを目的として住宅の通風研究も増えてきたことから、現代においても住宅の自然換気に用いることを前提とした換気計算研究の意義があると考え、越屋根を対象とした換気計算資料の整備を行った。

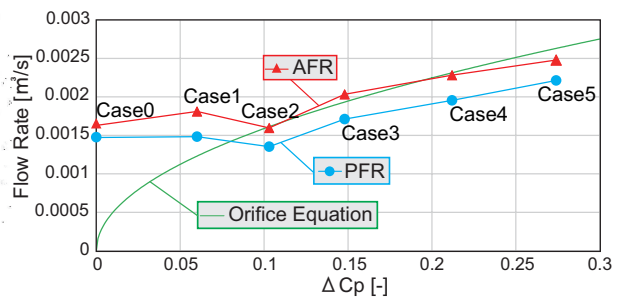


図 16 風圧係数差と換気量の関係

余談ながら、昭和35年度に「室内換気計算」をテーマとした大会研究協議会¹³⁵⁾では石原が越屋根・ベンチレータの計算手法を示している。この協議会報告では「実用上広く使用されているにも関わらず、それまで幼稚的な性能把握に止まっていたものを数歩前進させたが、なお若干疑義がある」と今後の発展を期待する講評が見られる。しかしその後の歴史の中では特筆すべき発展が見られたわけではなく、先人の成果を引き継いで資料を整備しながら手法の適用範囲を広げることには意義があると考えられる。

5.2 越屋根を用いた換気計算手法

図17に示すように、有風時に越屋根の基部から気流が流出する際、流出直後の静圧=開口が無いときの開口面静圧ならば、ベルヌーイの原理に基づき(6)式のように越屋根近傍の風圧を表現できる。

$$p_i - \zeta_{mo} \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 = C_{mo} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (6)$$

ここで p_i は均一と仮定した室内圧、 v は基部平均風速 ($=Q/A_{mo}$)、 V は風圧係数の基準とする外部風速で、ここでは基部高さの外部風速とする。 A_{mo} は基部面積で越屋根直下における屋根の開口面積を表す。 C_{mo} は越屋根全体の風圧係数 (以降、基部の風圧係数と称する)、 ζ_{mo} は越屋根の抵抗係数で、これらは通常定数とは限らず外部風速や風向、風量によって変化し得る。このため換気計算時の取り扱いが煩雑となり換気特性が必要となる。石原⁷³⁾が示した越屋根の換気特性は縦軸を室内圧 p_i 、横軸を風量 Q とした p - Q 特性であり、(6)式が越屋根の換気特性を直接表すこととなる。ここでは風圧係数 C_{mo} を風量 0 における値で定数と仮定し、 ζ_{mo} のみが Q (また

は v) と V によって変化して p_i が定まるものとして扱う。図17の側窓が1箇所の場合で考えると、側窓前後での圧力損失に基づき室内圧は(7)式で表される。

$$C_w \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 - \zeta_w \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 = p_i \quad (7)$$

C_w , ζ_w は側窓の風圧係数と抵抗係数で v' は開口面平均風速 ($=Q/A_w$) である。外部風速 V ごとに(6)式の p - Q 特性が予め与えられているとすると、両式を p_i と Q について解くことで容易に換気量が求まる。

越屋根の換気特性の整備には、越屋根以外には開口がない模型をファンにより様々な風量で強制的に給排気を行い室内圧と風量を測定する。これにより p - Q 特性が得られ、風量 0 における室内圧から C_{mo} が求まる。この曲線を風向や越屋根形状ごとに作成することで越屋根を用いた換気設計が可能となる。

5.3 越屋根の換気特性の取得とその無次元化

(6)式で表現した越屋根の換気特性を取得するための図18に示す風洞実験を行った。周辺建物を配置せずに図19, 20に示す模型を境界層流にさらし、ファンにより強制的に給排気を行うことで室内圧と風量の関係を取得する。図21に風向 0° で外部風速を変更した場合の p - Q 特性を示す。横軸の越屋根基部風速は排気側を正として表現している。この結果から、特に給気側の条件において、同じ室内圧でも外部風速によって換気量が大きく異なることがわかる。ここで、(6)式の両辺を外部風速による速度圧で除すると以下の式が得られる。

$$p_i / \frac{1}{2} \rho V^2 - \zeta_{mo} \left(\frac{v}{V} \right)^2 = C_{mo} \quad (8)$$

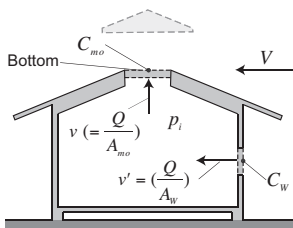


図17 越屋根の風力換気

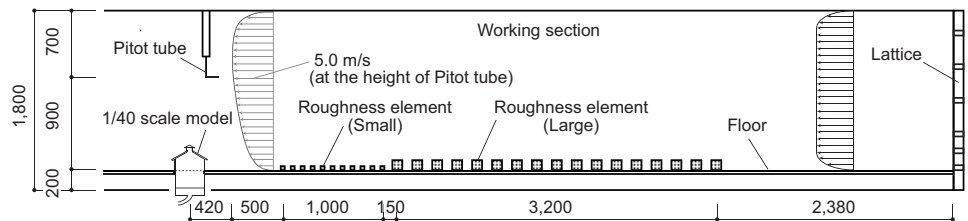


図18 越屋根の換気特性を取得するための風洞実験

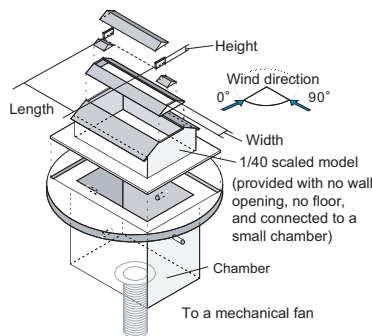


図19 越屋根を有する単室模型

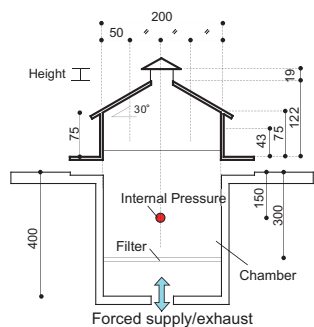


図20 模型断面図

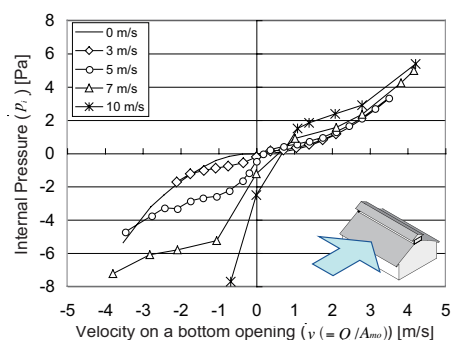


図21 得られた p - Q 特性 (風向 0°)

これに従い図 21 で示した p-Q 特性の横軸と縦軸の関係性を $p_i/(1/2)\rho V^2$ (以降、無次元室内圧) と v/V (以降、無次元基部風速) の 2 つの関数として表現しなおすと、図 22 に示す無次元の p-Q 特性が得られ、外部風速によらず概ね 1 本の曲線で表現できることが示された。つまり、越屋根の換気特性を表現する上では外部風速はパラメータではなく、形状や風向ごとに整備すれば良いということになる。本研究ではこれを換気特性と称する。なお、図 22 の換気特性では y 切片が基部の風圧係数 C_{mo} を示す。図 23 に基部高さの外部風速を 5.0 m/s と固定して各風向で得られた換気特性を示す。前述の通り外部風速はパラメータではないが、風向が変わると越屋根内部及び周辺の気流場が変わることから越屋根全体の抵抗が変化し、妻側から気流がアプローチする風向 (67.5°、90°) においては抵抗が小さくなる。

5.4 密集市街地を想定した換気特性の整備

現代において越屋根を住宅の換気促進装置として用いることを想定すると、換気計算資料としての換気特性は単体での性能ではなく周辺建物が存在する状況でも整備されることが望ましい。そこで、図 24 に示すように周辺建物を設置した状況で特性曲線を整備した。なお、前節では桁行方向の全面に越屋根を設置したが、本実験では長さを短くしている。実験パラメータは外部風向 3 条件と隣棟間距離の 4 条件とした。図 25 に風向ごとに隣棟間距離を変更して得られた換気特性を示すが、現実的な範囲の中では隣棟間距離の違いは見られず、隣棟の有無と風向のみで換気特性を使い分ければ良いと言える。

なお、筆者らはこれらの検討に加えて隣棟の高さを変更した場合や越屋根内部に遮風壁を設置した場合の換気特性も整備した上で、現実的な間取りを想定して換気特性を用いた換気計算も行っているが、詳細は筆者の既発表論文¹³⁶⁻¹³⁸を参照されたい。

6. いまの時代に特に必要と考える知見の提供 ～高層非住宅建築の自然換気研究

6.1 研究の背景と意義

前述の通り、近年非住宅建築においても自然換気が導入例が増えており、特に事務所建築における取り組みが多く見られる。現在では導入例が増えて設計・運用面の知見もある程度蓄えられ、当学会からも 2013 年にハンドブック¹⁰⁷が発刊されたが、中高層建物の自然換気設計法は確立されたとは言い難く、設計時には種々の検討や確認を行うとは言え、過去の事例や設計者の感覚に頼らざるを得ない点も多いと考えられる。また、超高層のビッグプロジェクトであれば対象建物について設計段階で様々な検討が行われることも多いが、中規模建物の場合では十分な検討期間が確保できずに自然換気設計を断念せざるを得ない場合もあると考える。このため、特に中規模建物を想定して自然換気設計における重要なパラメータを変更した換気量計算を行い、最終的には自然換気設計に用いられる技術資料を提供することを目的とした基礎検討に着手した。本研究は風洞実験により風圧係数を取得して換気回路網計算を行うため、換気研究の体系を駆使して行う研究の典型と言えるが、現代における建築の設計に必要な知見の不足を補う意義は大きいと考える。

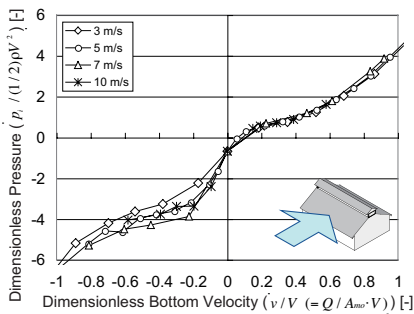


図 22 無次元化した p-Q 特性 (風向 0°)

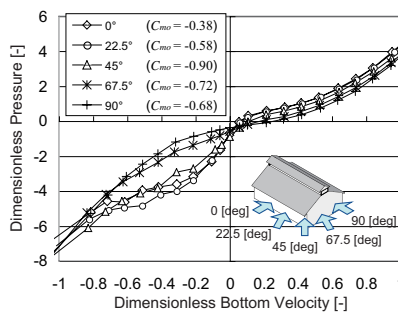


図 23 風向ごとの換気特性

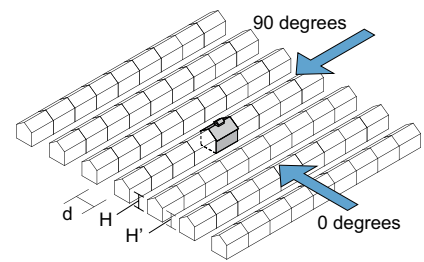
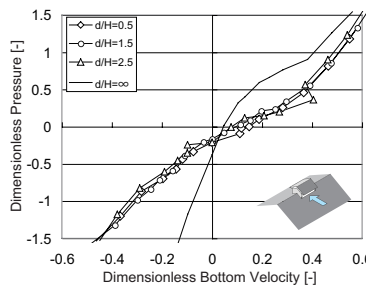
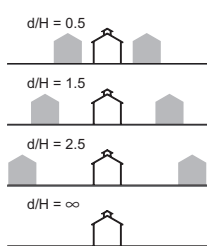
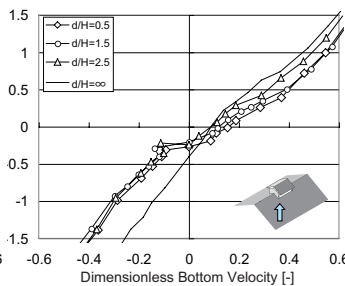


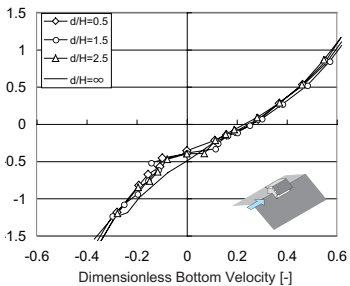
図 24 周辺建物を配置した実験



(1) 風向 0°



(2) 風向 45°



(3) 風向 90°

図 25 周辺建物を配置して隣棟間距離を変更した際の換気特性

6.2 検討対象と換気回路網モデル

対象は地上 11 階建の実在事務所ビルを参考に、**図 26** のように作成した。南北面に自然換気口が設置されてシャフトに接続される計画とし、通風及びシャフト型を併用した自然換気である。ここでは南北面の自然換気口面積は等しいと仮定し、まずは回路網計算の境界条件となる風圧係数を取得する風洞実験を行った。実験模型 (1/400) には自然換気口が設置された各階の南北面それぞれに 3 点ずつ風圧係数の測定点を設けた。周辺建物はフルスケールで直径 480m の範囲で再現した。得られた風圧係数分布はここでは省略するが、詳細や実建物の回路網計算は筆者の報告¹³⁹⁾を参照にされたい。換気回路網モデルの概要を**図 27** に示す。南北面の換気口はそれぞれ 1 つの流路として表現し、風圧係数には当該フロアの南北各面 3 点の平均値をそれぞれ与えた。

6.3 自然換気設計条件を変更した回路網計算

ここでは Nets を用いた熱・換気回路網計算¹⁴⁰⁾で定常計算を行うが、外気温は 20℃、風速は拡張アメダス標準年気象データの中間期就業時間帯の平均値を採用した。本研究では主たる自然換気設計条件が自然換気量に及ぼす影響についての知見を得るため「1フロアの自然換気口の有効開口面積合計 ($\alpha A_{opening}$)」と「執務室 - シャフト間の換気経路の有効開口面積の結合値 (αA_{path})」の 2 項目を変更して計算を行う。この 2 パラメータは基準階執務室床面積 (A_f) に対する比率に基づき変更することとし、**表 1** に示す全 7 条件で 16 風向の計算を行った。**図 28** に各条件において 16 風向で得られたフロア別執務室有効換気回数の平均値と最大・最小値を示す。

効開口面積の結合値 (αA_{path})」の 2 項目を変更して計算を行う。この 2 パラメータは基準階執務室床面積 (A_f) に対する比率に基づき変更することとし、**表 1** に示す全 7 条件で 16 風向の計算を行った。**図 28** に各条件において 16 風向で得られたフロア別執務室有効換気回数の平均値と最大・最小値を示す。

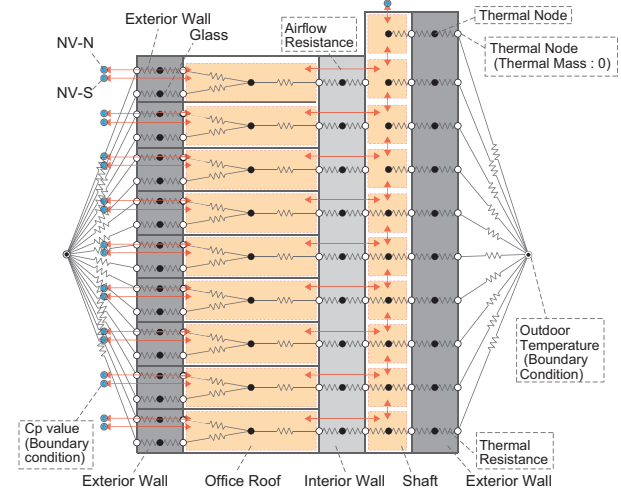


図 27 作成した熱・換気回路網モデル

表 1 換気回路網計算の計算条件

$\alpha A_{path} / A_f$	$\alpha A_{opening} / A_f$			
	1 / 1000	1 / 500	1 / 200	1 / 100
1 / 2000			○	
1 / 1000	○	○	○	○
1 / 500			○	
1 / 250			○	

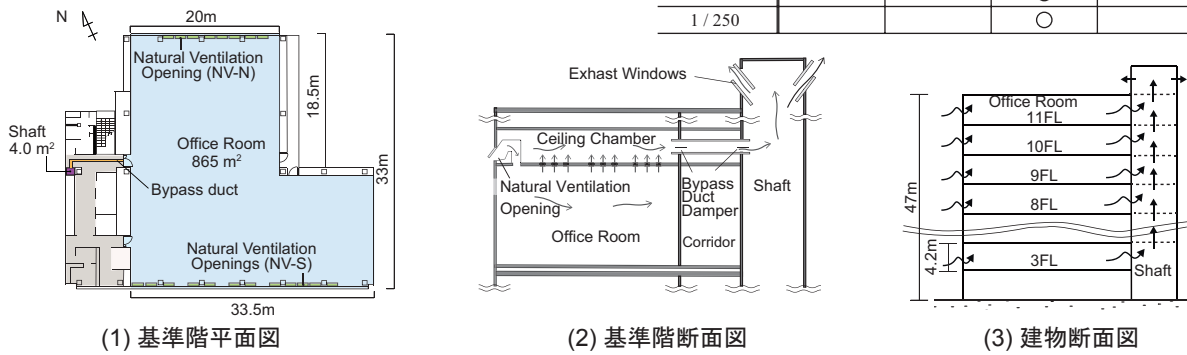


図 26 解析対象とした自然換気建物の概要

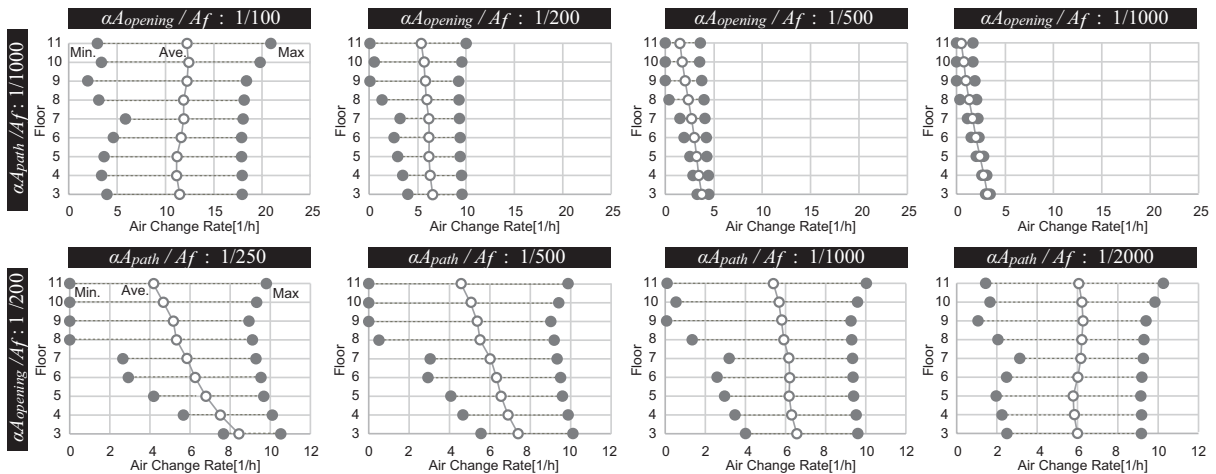


図 28 換気回路網計算の結果：各フロアにおける 16 風向での回路網計算の平均値及び最大・最小値

上層階で最小値が0となる条件があるのはシャフトから執務室への逆流が生じる風向があるため、これを有効な換気量とみなしていないことによる。 αA_{path} を床面積の1/1000で固定した場合、 $\alpha A_{opening}$ の大小で換気回数が大きく変化するが、フロア間のばらつきは比較的小さい。 $\alpha A_{opening}$ を床面積の1/200で固定した場合、 αA_{path} の大小で換気量のオーダーは変わらないがフロア間でのばらつきが大きくなる。

計算の結果、自然換気の目的を空気質の確保とする場合、機械換気基準の必要換気量に基づく換気回数目標値を2.5 [1/h]¹⁰⁷⁾として前述の結果を考慮すると、 $\alpha A_{opening}$ については床面積の1/500程度以上が好ましいと言える。仮に自然換気口の流量係数を0.4 [-]とすると、自然換気口の面積 $A_{opening}$ は床面積の1/200程度以上ということになる。一方目的を中間期の温熱環境向上や冷房負荷低減とする場合はこれ以上の自然換気口面積の確保が好ましい。また、パスの有効開口面積である αA_{path} を大きくとりすぎるとフロア間の換気量が大きく異なるためある程度面積を絞ることが有効と言え、本研究では床面積の1/1000、1/2000でも適切な換気量の分布となった。

7. おわりに

本稿では粗くではあるが換気研究のレビューを行い、日本の研究の発展を振り返った上で筆者の換気計算に関する研究の一部を紹介した。換気研究は既に成熟した学問と言うことができるであろうし、現在では大変幅広い検討が行われて高精度で詳細を明らかにする研究が見られる。この意味で換気研究が開始した当初からは大いに進展したということに疑いの余地はない。一方で、例えば文献¹⁾で130年前にも関わらずCO₂によるトレーサーガス法で換気量を推定した研究等を見ると、今の時代も研究者の関心の対象や研究内容が大きく変わっていないように思える点もある。例えば4章で示した乱れの換気量同定も佐藤³⁴⁾が70年近く前に行った研究と扱う現象は似ているし、5章で示した越屋根の換気計算は前述の通り石原⁷³⁾の研究の拡張である。6章の中高層ビルの自然換気では対象は現代特有だが、前田⁵⁰⁾や石原⁵²⁾に見られる多数室換気計算の適用である。この点、筆者は「換気研究が進展していない」のではなく、「目的や内容の本質は変わらない」と感じ、現在行われる研究にも意義を感じる。近年よく「新たな研究分野やテーマの開拓」という趣旨の言葉を耳にし、特に若手研究者は考えさせられることも多い。当然これは重要との認識を筆者も持つが、「これまでに誰もやってない新たなテーマの開拓」だけを重要と考えて盲目的に研究を行うのではなく、換気研究の意義や目的の本質を忘れずに精進したい。

参考文献

- 坪井次郎:「日本家屋換気論」,大日本私立衛生會雑誌,第41号,pp.61-75,1886
- 坪井次郎:「換気実験」,建築雑誌,第4輯,第39号,pp.41-42,1890
- 坪井次郎:「日本作り病室換気量」,建築雑誌,第4輯,第45号,pp.146-147,1890
- 森林太郎:「造家衛生の要旨」,建築雑誌,第7輯76号,pp.115-122,1893
- 野村仁:「家屋ノ自然換気ニ及ボス氣流ノ影響ニ就テ」,第一篇~第四篇」,國民衛生,第1巻,第5,9,11号,1924
- 野村仁:「家屋ノ自然換気ニ及ボス擴散現象之研究」,第一篇~第三篇」,國民衛生,第1巻,第6,7,8号,1924
- 野村仁:「擴散量、擴散率並ニ所謂假換気量ノ一般算出法」,國民衛生,第1巻,第9号,1924
- 大谷佐重郎:「日本家屋ノ自然換気ニ關スル總合的研究」,第一篇~第三篇」,國民衛生,第5巻,第11号,第6巻,第2,5号,1928-1929
- 森田公平:「空氣中炭酸瓦斯ノ新定量法」,國民衛生,第1巻,第6号,1924
- 吉田房雄,二宮忠清:「換気測定時ニ於ケル氣中炭酸瓦斯定量方法ニ關する知見」,國民衛生,第6巻,第6号,1929
- 古屋芳雄編:「公衆衛生學」第2輯,第1編 環境衛生學(石川知福),第2編 建築衛生學(佐藤鑑),日本臨牀社,1948.7
- 石川知福:「環境衛生學」,吐鳳堂,1942.3
- 佐藤鑑:「住居衛生學」,續文堂出版,1957.3
- 木村幸一郎,三木詔:「建築計畫原論」,共立出版,1949.11
- 平山嵩:「建築設計理論」,科學政策協會,1948.3
- 二村忠元,小木曾定彰,小島武男,前田敏夫,勝田高司,日置隆一:「建築学体系8-音・光・熱・空氣・色」,彰国社,1955.7
- 平山嵩,小木曾定彰,渡辺要,佐藤鑑,斎藤平蔵:「建築学体系22-室内環境計画」,彰国社,1957.3
- 日本建築学会建築設計々画規準委員會編:「日本建築学会設計計画パンフレット3室内氣候設計」,日本建築学会,1957.10
- 日本建築学会環境工学委員會編:「日本建築学会設計計画パンフレット18換気設計」,彰国社,第1版1957.10(1981第10刷)
- 渡辺要:「建築計畫原論III」,丸善,1965.4
- 佐藤鑑:「建築環境學」,紀元社,1948.10
- 柳町政之助:「暖房と換気-後編」(第八版),大日本工業學會,1937.3(初版1921.5)
- 伊藤正文:「換気筒を有する鐵筋コンクリート造教室の自然換気量に就て」,建築學會論文集第3号,pp.58-65,1936
- 伊藤正文:「教室內氣流の模型實驗」,建築學會論文集第3号,pp.66-75,1936
- 伊藤正文:「教室内の積塵量と通氣機構に依るその分布變化:小學校計畫に於ける保健的建築施設の研究」,建築學會論文集第9号,pp.261-270,1938
- 伊藤正文:「Hopper通氣徑路に關する實驗的吟味:小學校計畫に於ける保健的建築施設の研究」,建築學會論文集第11号,pp.24-30,1938
- 伊藤正文,梶原三郎:「工場の換気機構に關する模型實驗」,建築學會論文集第17号,pp.94-102,1940
- 佐藤鑑:「風向に對し同一側の二開口部による換氣輪道に就て」,建築學會論文集第5号,pp.241-250,1937
- 佐藤鑑:「在來モニターと遮光併用モニターとの風力による自然換氣の比較試驗」,建築學會論文集第13号,pp.360-369,1939
- 佐藤鑑:「工場の自然排氣量に就ての考察」,建築學會論文集第21号,pp.85-93,1941
- 佐藤鑑:「隱蔽式排氣口の遮光及び通氣試驗」,建築學會論文集第25号,pp.66-72,1942
- 佐藤鑑:「熱對流による通氣現象の研究(第1報告)~(第4報告)」,建築學會論文集第26,27,29,31号,1942-1944
- 佐藤鑑:「内外温度差による通氣の研究(第2部)」,日本建築學會論文集第32~35号,pp.27-31,1947
- 佐藤鑑:「通氣徑路による換氣効果の研究(第2部)」,日本建築學會論文集第32~35号,pp.31-35,1947
- 平山嵩,塘一郎:「室内外温度差に基く自然換氣量(第1報)」,建築學會論文集第28号,pp.51-57,1943
- 平山嵩,塘一郎:「吸排氣孔の位置及び大きさ自然換氣に及ぼす影響」,建築學會論文集第28号,pp.58-62,1943

- 37) 平山嵩, 塘一郎:「室内外の温度差に基づく自然換気量(第2報)」, 建築學會論文集 第29号, pp.105-111, 1943
- 38) 塘一郎:「開口率の開口通風量に及ぼす影響について: 第一報 二次元流の場合」, 日本建築學會研究報告 第24号, pp.299-300, 1953
- 39) 塘一郎:「開口率の開口通風量に及ぼす影響について: 第二報 三次元流の場合」, 日本建築學會研究報告 第29号, pp.43-44, 1953
- 40) 勝田高司:「自然換気に関する実験的研究(第1報告)(第2報)」, 建築學會論文集 第28, 31号, 1943-1944
- 41) 渡邊要, 勝田高司:「南方住居の平面型と水平気流」, 建築學會論文集 第31号, pp.145-153, 1944
- 42) 渡邊要, 勝田高司:「南方住居の断面型と通風経路(第2部)」, 日本建築學會論文集 第32~35号, pp.43-46, 1947
- 43) 勝田高司:「自然換気量算定式について」, 日本建築學會論文集 第38号, pp.100-102, 1949
- 44) 勝田高司, 勝野邦夫:「窓及び隙間の流出係数」, 日本建築學會研究報告 第7号, pp.235-238, 1950
- 45) 勝田高司, 後藤滋, 斎藤平蔵, 沢辺 雅二:「教室の窓と通風について II: 風洞実験」, 日本建築學會研究報告 第24号, pp.287-288, 1953
- 46) 勝田高司, 藤井正一, 今野啓一:「コンクリート造アパートの換気に関する研究」, 日本建築學會論文集 第47号, pp.75-84, 1953
- 47) 勝田高司, 後藤滋:「市街地における風圧係数に関する模型実験(1)」, 日本建築学会研究報告 第26号, pp.1-4, 1954
- 48) Hardy Cross:「Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors」, *University of Illinois Bulletin*, No.22, Bulletin No. 286, 1936.
- 49) 平松良雄:「坑内通気の理論と計算」 pp.147-214, 第8章 通気網の計算, 丸善, 1953
- 50) 前田敏男:「多数室の換気計算法」, 日本建築学会研究報告 第57号, 近畿支部 57-60, 1961.4
- 51) 前田敏男, 松本衛, 成瀬哲生:「室が一行に並んだ住宅の換気計算」, 日本建築学会研究報告 第57号, 近畿支部 pp.65-68, 1961.4
- 52) 石原正雄:「クロス法の応用による多数室の換気計算」, 日本建築学会研究報告 第57号, 近畿支部 pp.61-64, 1961.4
- 53) 勝田千利:「通風に関する実験的研究」, 建築學會論文集 第5号, pp.261-270, 1937
- 54) 勝田千利, 関根毅:「高層建築物の存在が周囲家屋の煙突或は換気筒の通気力に与える影響について」, 日本建築学会論文報告集 第57号, pp.193-196, 1957
- 55) 勝田千利, 関根毅, 清原陽:「換気筒計算法と換気筒の実験」, 日本建築学会論文報告集 第66号, pp.117-120, 1960
- 56) 勝田千利, 関根毅:「換気筒計算法と換気筒の実験(その2)」, 日本建築学会論文報告集 第67号, pp.83-89, 1961
- 57) 勝田千利, 関根毅:「屋根モニターによる換気に関する実験的研究」, 日本建築学会論文報告集 第68号, pp.121-127, 1961
- 58) 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(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.116-120, 1961
- 59) 勝田千利, 関根毅:「壁面開口部による換気に関する実験的研究(その2): 遮風換気孔の換気特性について」, 日本建築学会論文報告集 第69号, pp.113-116, 1961
- 60) 勝田千利, 関根毅:「鋸屋根工場の換気特性とその改善方法: 特に独立せる工場の場合」, 日本建築学会論文報告集 第72号, pp.33-38, 1962
- 61) 前田敏男:「重力換気の研究(其の1): 筒について」, 日本建築學會研究報告 第11号, pp.177-180, 1951
- 62) 前田敏男, 前川純一:「上下分布を考慮した室温変動について: 其の二 自然換気の場合」, 日本建築學會研究報告 第19号, pp.255-258, 1952
- 63) 前田敏男, 前川純一:「上下分布を考慮した室温変動について: 其の三 強制換気の場合」, 日本建築學會研究報告 第19号, pp.259-262, 1952
- 64) 前田敏男, 前川純一:「室内暖房気流に関する実験」, 日本建築學會研究報告 第17号, pp.410-413, 1952
- 65) 前田敏男, 松浦邦男:「換気筒の実験」, 日本建築學會研究報告 第19号, pp.271-274, 1952
- 66) 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.80-87, 1956
- 67) 勝田高司, 後藤滋, 寺沢達二:「スティール・サッシのすきまによる換気量」, 日本建築学会論文報告集 第57号, pp.205-208, 1957
- 68) 勝田高司, 後藤滋, 寺沢達二:「輪形吹出吸込口について」, 日本建築学会論文報告集 第66号, pp.129-132, 1960
- 69) 勝田高司, 後藤滋, 寺沢達二, 小山義翁:「輪形スリットを有するフードについて」, 日本建築学会論文報告集 第66号, pp.141-144, 1960
- 70) 石原正雄:「通風による室内風速・風向分布について」, 日本建築学会論文報告集 第54号, pp.489-492, 1956
- 71) 石原正雄:「自然風による模型室の風速分布」, 日本建築学会論文報告集 第57号, pp.181-184, 1957
- 72) 石原正雄, 栗津伸一:「ルーフ・ベンチレーターの性能」, 日本建築学会論文報告集 第60号, pp.137-140, 1958
- 73) 石原正雄:「越屋根の換気性能」, 日本建築学会論文報告集 第65号, pp.66-72, 1960
- 74) 石原正雄:「ベンチレーターの性能」, 日本建築学会論文報告集 第67号, pp.90-96, 1961
- 75) 石原正雄:「自然換気装置の基本的特性」, 日本建築学会論文報告集 第69号, pp.121-124, 1961
- 76) 佐藤鑑:「空気と建築環境 - 環境工学の体系における「空気」の位置付け」, 建築雑誌, No. 96, 1981
- 77) 石原正雄:「建築換気設計」, 朝倉書店, 1969
- 78) 石原正雄, 西岡利晃:「ヘリウムガスによる換気量測定に関する研究」, 大会学術講演梗概集, 計画系, pp.103-104, 1968
- 79) 伊与田温, 本間宏:「CO₂連続発生による換気量測定法について」, 大会学術講演梗概集, 計画系, pp.35-36, 1970
- 80) 鬼頭弘一, 黒沢紀彦, 洪悦郎, 荒谷登:「仮設上屋の換気量算定: 炭酸ガスによる換気測定実験」, 日本建築学会北海道支部研究発表会報告, pp.35-38, 1971
- 81) 檜崎正也, 松井清史:「Tracer-gas法による多数室の換気量測定法(1): ガス濃度定常時における検討」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境工学, pp.69-72, 1972
- 82) 荒谷登, 斎藤純司:「2種ガス: 炭酸ガス・プロパンガス連続発生による多数室建物の換気量測定法について: その1・基礎実験」, 大会学術講演梗概集, 計画系, pp.307-308, 1972
- 83) 関根毅, 海野健一:「壁面風圧変動が壁面開口部による換気に及ぼす影響に関する研究」, 日本建築学会論文報告集号外, 学術講演要旨集, p.525, 1967
- 84) 野村豪, 村本至, 村上周三ら:「小中学校教室の通風について: 模型実験による通風量測定」, 日本建築学会論文報告集, 号外, 学術講演要旨集, p.531, 1967
- 85) 村上周三, 勝田高司, 永野博之ら:「風力換気に関する研究: その1, その2」, 学術研究発表会梗概集, 計画系, pp.201-208, 1969
- 86) 早川真:「換気計算プログラムとその適用例」, 大会学術講演梗概集, 計画系, pp.155-156, 1973
- 87) 浅野賢二, 原口茂毅:「住宅の換気性状 その2: 実測と計算」, 大会学術講演梗概集, 計画系, pp.235-236, 1974
- 88) 茶谷正洋, 小玉祐一郎, 高田典夫:「建築計画におけるエコロジカルな技術の研究: 2・高密度住居の室内空間形態と通風に関する予備の実験及び考察」, 日本建築学会学術講演梗概集, 計画系, pp.857-858, 1975
- 89) 加藤信介, 村上周三, 出口清孝:「住宅の通風に関する実験的研究: 特に天窗通風の効果を中心として」, 日本建築学会関東支部 57年度研究報告集, 計画系, pp.57-60, 1982
- 90) 赤林伸一, 村上周三, 加藤信介ら:「住宅の通風に関する実験的研究: その1・実大の住宅モデルにおける測定」, 日本建築学会学術講演梗概集, 計画系, pp.455-456, 1983
- 91) 吉野博:「第1回 空気シンポジウム」趣旨説明, 日本建築学会環境工学委員会 空気環境運営委員会, 1990.11
- 92) 甲谷寿史:「通風モデルのレビュー」, 日本風工学会誌, 第30巻, 第4号, pp.425-432, 2005
- 93) 近本智行, 村上周三, 加藤信介ら:「冷房時のオフィス空間における自然換気併用ハイブリッド空調方式に関する研究:(その1)」, 学術講演梗概集, D2, pp.597-598, 1997
- 94) 戸河里敏:「オフィスビルを対象とした自然換気利用について」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.583-584, 1999
- 95) 近本智行, 伊香賀俊治, 中村准二ら:「ボイドを有する高層大学校舎における自然換気ハイブリッド空調システムに関する研究:(その1)」, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1, pp.77-80, 2000

- 96) 趙晟佑, 木村建一:「校舎建築の自然換気システムにおけるソーラーチムニーの性能予測に関する研究」, 日本建築学会計画系論文集, 第 537 号, pp.37-42, 2000
- 97) 細井昭憲, 成田樹昭, 須永修通:「風圧力と浮力が同時に作用する建物における通風特性: 自然通風に関する実測研究 その 1」, 日本建築学会計画系論文集, 第 564 号, pp.25-31, 2003
- 98) 水出喜太郎, 石野久彌, 郡公子ら:「自然換気・シーリングファンを併用した空調換気システムの制御手法と性能評価に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集, 第 604 号, pp.69-76, 2006
- 99) 安永龍一, 芦谷友美, 白石靖幸ら:「流量制御機能を有する給排気口を設置したオフィスビルにおける自然換気及び空調システムの併用手法に関する研究 (第一報)」, 日本建築学会環境系論文集, 第 77 巻, 第 678 号, pp.681-688, 2012
- 100) 坂口武司, 山中俊夫, 甲谷寿史:「温暖地に建つ学校建築における階段室型自然換気チムニーが冬期の屋内熱環境に及ぼす影響」, 日本建築学会環境系論文集, 第 79 巻, 第 703 号, pp.763-770, 2014
- 101) 山本佳嗣, 久保木真俊, 鈴木宏昌, 田辺新一:「自然換気システムの運用実態に関する調査」, 日本建築学会環境系論文集, 第 619 号, pp.9-16, 2007
- 102) 金政秀, 川口知真, 田辺新一:「執務者による自然換気窓の開閉行為に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集 第 74 巻, 第 643 号, pp.1075-1082, 2009
- 103) Lim Eunsu, 山中俊夫, 相良和伸ら:「風力換気併用ハイブリッド空調を導入したオフィス室内における温度・汚染物質濃度分布及び省エネルギー性」, 日本建築学会環境系論文集, 第 75 巻, 第 648 号, pp.171-178, 2010
- 104) 三浦克弘, 武政祐一, 吉田治典:「自然換気併用空調システムがもたらす空調負荷削減効果と室内環境に与える影響の評価」, 日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻, 第 660 号, pp.159-168, 2011
- 105) 庄司研, 桑原三香, 大黒雅之ら:「事務所ビルにおける自然換気時の室内空気質環境および省エネルギー性に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集, 第 77 巻, 第 679 号, pp.729-735, 2012
- 106) 山本佳嗣, 田辺新一:「自然換気システムの換気口開放条件に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集 第 81 巻, 第 722 号, pp.375-384, 2016
- 107) 日本建築学会 編:「実務者のための自然換気設計ハンドブック」, 技報堂出版
- 108) Fergus Nicol, Michael Humphreys, Susan Roaf:「Adaptive Thermal Comfort - Principles and Practice」, Routledge, 2012.
- 109) Michael Humphreys, Fergus Nicol, Susan Roaf:「Adaptive Thermal Comfort - Foundations and Analysis」, Routledge, 2016.
- 110) ANSI/ASHRAE Standard 55-2013:「Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy」, ASHRAE, 2013
- 111) 久保田徹, Toe Doris Hooi Chye:「An Adaptive Thermal Comfort Equation for Naturally Ventilated Buildings in Hot-Humid Climates」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.423-426, 2014
- 112) 野村美香, 樋山恭助, 佐藤慶直:「室内温熱環境を目的関数とした換気方式設計手法の提案」, 日本建築学会中国支部研究報告集, pp.397-400, 2015
- 113) Mats Sandberg:「What is ventilation efficiency?」, *Building and Environment*, Vol. 16, pp.123-135, 1981
- 114) Mats Sandberg and Mats Sjöberg:「The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms」, *Building and Environment*, Vol. 18, Issue 4, pp.181-197, 1983
- 115) David Etheridge and Mats Sandberg:「Building Ventilation - Theory and Measurement」, Wiley, 1996
- 116) 村上周三, 加藤信介:「新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法 - 換気効率の評価モデルに関する研究 -」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.32, 1986.10
- 117) Shinsuke Kato, Shuzo Murakami:「New ventilation efficiency scales based on simulations」, *ASHRAE Transactions*, Vol.94, No.2, pp.309-330, 1988.
- 118) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三:「平均拡散場解析による Visitation Frequency, Purging Flow Rate の解析 - 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究」, 日本建築学会計画系論文集, No.529, pp.31-37, 2000.3
- 119) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三:「Particle Tracing による Visitation Frequency Purging Flow Rate の基礎的解析 - 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究」, 日本建築学会計画系論文集, No.534, pp.41-48, 2000.8
- 120) Eunsu Lim, 伊藤一秀:「換気効率指標 Net Escape Velocity を用いた不均一濃度場の形成構造解明に関する研究」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.181, pp.33-40, 2012.4
- 121) Eunsu Lim, Kazuhide Ito, Mats Sandberg:「New Ventilation Index for evaluating imperfect mixing condition- Analysis of Net Escape Velocity based on RANS Approach」, *Building and Environment*, Vol.61, pp. 45-56, 2013
- 122) Eunsu Lim, Kazuhide Ito, Mats Sandberg:「Performance evaluation of contaminant removal and air quality control for local ventilation systems using the ventilation index Net Escape Velocity」, *Building and Environment*, Vol.79, pp78-89, 2014
- 123) Shinsuke Kato:「Flow Network Model based on Power Balance as Applied to Cross-Ventilation」, *The International Journal of Ventilation*, Volume 2, Number 4, pp.395-408, 2004
- 124) Shuzo Murakami, Shinsuke Kato, Shinichi Akabayashi et al.:「Wind Tunnel Test on Velocity-Pressure Field of Cross-Ventilation with Open Windows」, *ASHRAE Transactions*, Volume 97, Part1, pp.525-538, 1991
- 125) 甲谷寿史, 山中俊夫:「Prediction of Inflow Direction at Large Opening of Cross Ventilated Apartment Building」, 日本建築学会環境系論文集 第 609 号, pp.39-45, 2006
- 126) 倉淵隆, 大場正昭:「風洞実験と LES を併用した通風時の乱流構造解明に関する研究 (3)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.645-646, 2001
- 127) Kurabuchi T., Ohba M., Endo T. et al.:「Local Dynamic Similarity Model of Cross-Ventilation Part1 - Theoretical Framework」, *The International Journal of Ventilation*, Volume 2 Number 4, pp.371-382, 2004
- 128) 古川準, 山中俊夫, 甲谷寿史:「直列配置された複数開口を持つ建物における通風量算定法に関する基礎研究 (その 2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.551-552, 2000
- 129) Fariborz Haghighat, Jiwu Rao, and Paul Fazio:「The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates - A Modeling Approach」, *Building and Environment*, Vol.26, No.2, pp.95-109, 1991
- 130) Fariborz Haghighat, Henrik Brohus, and Jiwu Rao:「Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review」, *Building and Environment*, Vol.35, pp.377-385, 2000
- 131) 檜崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明:「風の乱れを考慮した換気設計法に関する研究 第 1 報」, 空気調和・衛生工学会論文集, pp.25-34, 1989
- 132) 山中俊夫, 檜崎正也, 佐藤隆二ら:「単一開口を持つ室の風力換気に関する研究 - 開口に沿う気流により形成される混合層に基づく換気現象 -」, 日本建築学会計画系論文集, 第 517 号, pp.37-43, 1999
- 133) Toshio Yamanaka, Hisashi Kotani et al.:「Natural, Wind-Forced Ventilation caused by Turbulence in a Room with a Single Opening」, *The International Journal of Ventilation*, Volume 5, Number 1, pp.179-187, 2006
- 134) 河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生:「吹風時における片側開口居室の換気量予測 片壁面上のみに開口を有する居室の換気性状に関する研究 (その 3)」, 日本建築学会環境系論文集, 第 73 巻, 第 626 号, pp.437-443, 2008
- 135) 佐藤鑑:「主題・室内換気計算について」(研究協議会報告), 建築雑誌, 第 75 集, 892 号, pp.688-689, 1960
- 136) 小林知広, 山中俊夫, 甲谷寿史ら:「勾配屋根屋根を有する独立住宅に設置された越屋根の換気特性」, 日本建築学会環境系論文集, 第 75 巻, 第 653 号, pp.595-601, 2010
- 137) Tomohiro Kobayashi, Tomoyuki Chikamoto, Keishi Osada:「Evaluation of Ventilation Performance of Monitor Roof in Residential Area based on Simplified Estimation and CFD Analysis」, *Building and Environment*, Vol. 63, pp.20-30, 2013
- 138) 小林知広, 近本智行, 梅宮典子ら:「勾配屋根を有する独立住宅に設置された越屋根の自然換気量算定」, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 719 号, 2016
- 139) 小林知広, 甲谷寿史, 梅宮典子ら:「中高層オフィスビルを対象とした風力・重力併用型自然換気設計手法に関する研究 (その 2)」, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 投稿済, 2016
- 140) 奥山博康:「建築物の熱回路網モデルに関する理論的研究」, 早稲田大学博士号学位請求論文, 1987