

日本の換気研究の歴史と現代における研究事例の紹介 A Review of Academic Research on Building Ventilation in Japan and an Example of Current Work

小林 知広
Tomohiro Kobayashi

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.

キーワード: 換気 (Ventilation)、通風 (Cross-Ventilation)、室内空気質 (Indoor Air Quality)、
空気流動 (Air Movement)、自然換気 (Natural Ventilation)

1. はじめに: 本稿の主旨

本研究会では換気分野の基礎研究の発展に着目するテーマを頂いた。我が国では古来より風通しが重視されて研究の歴史も長く、諸外国と比較しても学術・実務の両面で高水準と言える。そのような分野を筆者がレビューするのは力不足ではあるが、過日別学会のシンポジウムで換気研究を俯瞰する主旨で講演の機会を頂いた際に文献レビューを行った経緯があり¹⁾、この機にそこでは記すことのできなかつた情報も加えて本研究会で紹介したい。その上で自身の研究の一部を紹介し、学術研究の発展の歴史の中でどのような位置づけを担うのか、また今後当該分野でどのような視点が求められるか等を考えるための一助としたい。なお、レビューは総目録的に関連論文を網羅するのではなく発展の流れを理解する目的で適宜文献を引用しており、また機械的な換気設備研究よりも主に衛生学を起源とする建築換気研究に着目して執筆した点をご容赦頂きたい。

2. 日本の換気研究の始まりから基本体系の成熟まで

2.1 日本の換気研究の衛生学的な生い立ち

日本の換気研究は衛生学としての「造家衛生」・「建築衛生」がその原点と言える。例えば衛生学者としての森林太郎は陸軍衛生教程²⁾で、人体由来の「腐氣」が有害で、指標としてCO₂でその室内限度の目安を600～700ppmとしている。また、造家学会の講演³⁾では特に太陽光と新鮮外気の適切な取り入れが重要性和強調し、関連法が未整備の明治期において、将来的には法律により建物内の衛生環境を確保する必要があると警鐘を鳴らしている。

換気に焦点を絞った本格的な研究も明治期に見られ、筆者の知る限り最も古いものとして薬学者の田原良純^{4,6)}や衛生学者の坪井二郎^{7,9)}が大日本私立衛生会雑誌で換気量測定の報告をしている。明治17(1884)年、田原は換気通風は研究はおろか、その必要性や経験的な方法論すら浸透していない点を問題視した上で⁴⁾、東京府下の小学校で減衰法によるト

レーサーガス実験を行い、Seidel 式により換気量推定を行なっている⁹⁾。そこで基準としての室内CO₂濃度1,000 ppmを満たすための必要換気量と比べて圧倒的に不足していると示している。併せて、CO₂はそれ自体が当該濃度で有害ではなく、あくまで主な発生源が人体である際の基準として1,000 ppmの提唱であるとその本質を示している。余談ながら結言では換気により健康を保全することで「無限ノ活動力ヲ振起シ富國強兵ノ大体ヲ建ツルニ至ラン」との記載があり、時代背景により掲げられる目的は異なるものの、測定や実験の本質が130年以上経過した現代と変わらない点も興味深い。坪井も明治19(1886)年の「日本家屋換気論⁷⁾」でCO₂を用いたトレーサーガス減衰法による換気量測定を15回にわたり実施している。比較的詳しく記された坪井の報告からは実験手法に明るかったと推察されるが、当時所属した帝國大学医科大学衛生学教室教授の緒方正規がドイツでPettenkoferに師事した経歴を有したことが影響したと思われる。なお、この4年後に坪井自身も留学して同氏に師事しており、日本の本格的な換気研究は緒方や森、坪井らを先駆としてドイツの衛生学を我が国に導入したことがその一つの起源と言える。

その後明治時代に換気に焦点を当てた実験研究は筆者の知る限りは多くはないが、建築分野では例えば日本土木会社の田中豊輔¹⁰⁾が小学校を取り上げ、当時外観が重視され「造家物理」が軽んじられていることを問題視して田原⁴⁾同様学校換気的重要性を述べて実務の立場から換気筒の計画法を紹介している。また、薬学系の雑誌においても病室を対象とした換気量測定¹¹⁾が見られ、坪井の報告⁹⁾にも見られるように病室換気は当時から重視されている。その後大正に入ってから6年(1917年)には暖房冷蔵協会が設立し、10年後の昭和2年には衛生工業協会と改称し、会誌「暖房冷蔵協会誌」と「衛生工業協会誌」を発刊している。今年100周年を迎えた当学会の前身である。他にも同時期に雑誌「国民衛生」が発刊され、そこで換気通風研究が多く見られ始める¹²⁻²⁰⁾。

雑誌「國民衛生」は坪井が創設に携わり初代醫科大學長を務めた京都帝國大学の衛生学教室から大正12年に戸田正三を中心に創刊された学術誌であり、明治期から進んで風圧による換気量や室内風速算定の試みも見られるようになった。この時期には空気質に着目した換気研究だけでなく温冷感への寄与も含めた気流評価のための研究も見られ、換気分野の発展において担った役割は大きい。なお、大正9年に設立した同大建築学科の藤井厚二の博士論文が同誌に掲載されていることもよく知られており、住宅建築の改善に関する内容を広く扱っているが、その中で夏季の夜間換気の推奨や窓や扉のみならず意図的に換気口を設ける必要性も述べ、実験住宅による検証を行なっている²¹⁾。また、大正期の柳町政之助の建築設備分野の書籍²²⁾を見ると必要換気量の計算法も示されており、田原³⁾が論文中で訴えた必要換気量確保の概念がこの時期には実務の設計でも広められている。併せて各種室用途毎の換気回数の目安も示されており、設備設計としての換気の考え方もこの時期にはその骨子が形成されている。

2.2 昭和期の発展から計画原論としてのまとめ

昭和に入って5年、建築学会から各種パンフレットが出版される中で關藤國助が「換気と涼房²³⁾」を著している。ここでは用途ごとの必要換気量や米国の換気基準にも言及した上で、Willis Carrierによる空調設計の考え方も紹介されており、建築の機械設備的な観点からの空調換気設計パンフレットとも言えるが、この段階では学会として体系的に換気研究の知見をまとめた位置付けではない。その後昭和11年の3月には建築学会が論文集（黄表紙）を創刊し、計画原論の分野で換気研究もより多く見られるようになった。これ以降、医学的な衛生学のみならず建築工学分野の中で一般に建築衛生の概念が定着した上での学術研究の成果が見られ始める。

例えば、大阪市の技師という立場の建築家であった伊藤正文²⁴⁻²⁸⁾は学校建築や工場などの実建物を対象として実測及び実験を行なって研究論文として発表しており、換気研究が時代に求められて実学として発展した側面も実感できる。また、名古屋高等工業学校の佐藤鑑は、水槽を使用した通風気流解明等の基礎研究²⁹⁻³⁰⁾を発表しており、公衆衛生院（厚生科学研究所）在籍時には高熱工場をはじめとする換気通風問題に関する研究³¹⁻³⁶⁾を多く発表している。佐藤は東京帝國大學建築科卒の経歴を有しており、建築工学の中で戦前から戦後の計画原論における空気分野の学術研究を牽引している。なお、公衆衛生院は関東大震災に関する米国財団からの復興援助を契機に昭和13年に設立されたが、佐藤は昭和14年から26年までここに在籍し、書籍として「建築環境学³⁷⁾」を著している。また、医学系の衛生学者であ

る同院労働衛生部の石川知福も幅広く室内環境を取り扱った著書「環境衛生学³⁸⁾」の中で空気質と換気量の考え方も示しており、両氏が在籍した頃には建築衛生が衛生学の一分野として確立しており³⁹⁾、同院の当該研究分野の発展への寄与も大きい。

前述の通り、昭和に入って戦前・戦時下の頃から建築工学分野においても本格的な換気研究が見られ始めて戦後も継続的な基礎研究が見られており、換気研究は医学的な衛生学分野から建築分野の研究者によって多くなされるようになった。例えば東京工業大学においては勝田（千）⁴⁰⁾が風力換気の観点から建物群の隣棟間距離と通風性状の関係を明らかにする風洞実験を実施している。平山・塘ら⁴¹⁻⁴³⁾は國民衛生に掲載された野村¹²⁾の研究を引用して温度差換気的重要性に着目し、実験室実験により傾向を詳細に明らかにして理論的考察を与えている。また、勝田（高）らも東京帝國大の第二工学部において密度差による自然換気の実験室実験⁴⁴⁾や通風気流性状を明らかにするための風洞実験⁴⁵⁻⁴⁶⁾に取り組んだ上でオリフィス式による一般的な自然換気量算定式についての検討も行なっている⁴⁷⁾。このように、この時期には自然換気について実測ベースのみならず比較的緻密な実験室実験が見られるようになっており、工学全体の発展と各研究機関の施設の充実が背景にあったことも窺い知れる。なお、勝田（高）らは第二工学部が生産技術研究所に移行した後にも自然換気計算のための流量係数や市街地における風圧係数整備⁴⁸⁻⁴⁹⁾など基礎資料の充実に向けた検討を行う一方で、戦後に増えたコンクリート造集合住宅の換気実験⁵⁰⁾や戦前から行われてきた学校教室の換気実験⁵¹⁾を行い、実学に応用するための一般化を目指した基礎研究を継続的に行なっている。この勝田（高）の第二工学部時代からの換気研究が後に生産技術研究所が空気分野において多くの業績を生んでいることにも繋がっていると言える。

上記の通り昭和10年代初期から建築工学の中で計画原論の一部として換気研究が活発に見られ始め、昭和20年代後半頃からは計画原論としての体系がまとめられた書籍も比較的多く見られ始める。時期が早いものとしては前述の伊藤の「建築保健工学⁵²⁾」が昭和13年に出版されており、建築学と衛生学の相互関係を明らかにすべく名付けている。佐藤も前述の「建築環境学³⁷⁾」や「住居衛生学⁵³⁾」として原論一般の知見をまとめている。早稲田大学の木村幸一郎も三木韶とともに「建築計画原論⁵⁴⁾」を著しており、建築学会も組織としてその体系をまとめている⁵⁵⁻⁵⁶⁾。このように、この時期には建築設計のための原論を広く扱った教科書的な書籍⁵⁷⁻⁵⁹⁾が多く見られ始め、学問としての計画原論の基盤が出来上がった。これらの書籍における換気分野の記述の典型は、ま

ず Lavoisier や Pettenkofer らに言及して換気学説の変遷を紹介した上で必要換気量の考え方を示し、その上で流体力学に基づく計算理論を掲載しており、衛生学的な学問の生い立ちを考えるとこのような構成を取ることは自然に思われる。また、室内 CO₂ 濃度基準 1,000 ppm については、佐藤³⁷⁾はその書籍の中で「汚染の総合的判断の指標であって真の意味の生理的忍限度ではあり得ないため、換気計画にあっては常に念頭に置くべき」と述べている。木村⁵⁴⁾も CO₂ 濃度はあくまで指標であり、「他に空気の新鮮度を表示する適当なものがないため、今日もなお CO₂ が用いられている」と 1949 年出版の書籍で述べている。その後 70 年近く経過した現在でも変わることなく同基準値が用いられていることになるが、室内 CO₂ 濃度基準については、外気濃度の上昇と省エネルギーのための適切な換気量設定が求められる現代においては再考すべき項目であり、当学会の委員会でも改めて検討が行われており⁶⁰⁾、当該分野の研究の本質は変わっていないということも実感することができる。

2.3 戦後の換気研究の進展とその成熟

前述の通り、戦後昭和 20 年代後半から日本建築学会が組織的に計画原論としてその体系をまとめる活動を行っており、昭和 27 年に同学会建築設計々画規準委員会（委員長 渡辺要）が立ち上がった。ここでは研究成果を資料として広く設計者に提供して研究と実務計画の溝を埋めるべく新たにパンフレットを発刊しており、第 3（空気）分科会（主査 佐藤鑑）からは昭和 32 年に「3. 室内気候設計⁶¹⁾」が出版された。当該パンフレットでは換気をはじめ空気に関する諸問題における研究者と設計者の橋渡しを目的としたが、課題が多岐にわたることから設計時の各論としての Q&A をまとめる形式にとどめており、設計に有用な資料が提供されてはいるが、体系的な空気環境の設計法の確立にはまだ至っていない。

昭和 20 年代後半頃からの計画原論の取りまとめと並行して、換気設計に関わる種々の理論や資料を体系的に整備する目的の研究也多岐にわたって見られ始める。発展の歴史を俯瞰すると、この時期は換気研究の中でも「研究・設計のためのパーツの整備が始められた時期」と筆者は捉えている。例えば、前述の東京大学生産技術研究所の勝田（高）・後藤らのその後の研究では、隙間換気の p-Q 特性整備⁶²⁾や換気筒の諸性能の提示⁶³⁾、換気計画のための市街地建物群の風圧係数資料整備⁶⁴⁾、さらには換気設備設計の観点からの給排気器具性能の実験による検証と理論の提案⁶⁵⁻⁶⁶⁾を行なっている。また、前述の藤井厚二に教わり同氏の勧めで戦時中に満州医学校衛生学教室に在勤した前田敏男は昭和 25 年に京都大学の助教授として着任し、以降自然換気や室内気流に関わ

る研究も行なっている⁶⁷⁻⁷⁰⁾。塘⁷¹⁻⁷²⁾は基礎研究として通風量を開口率で説明するための実験ならびに理論提案を行っており、勝田（千）・関根ら⁷³⁻⁷⁹⁾も換気筒や屋根モニター、一般開口及び隙間に関して実験による換気特性の解明や換気理論の研究を行っている。京都工芸繊維大の石原正雄も同時期に室内通風気流解明⁸⁰⁻⁸¹⁾やベンチレーター・越屋根等の自然換気装置の換気特性⁸²⁻⁸⁵⁾を解明するための実験を精力的に行なっている。さらにこの時期には当時水路網や坑道の通気網等に利用されていた計算法⁸⁶⁻⁸⁸⁾を建築に適用した多数室の換気計算の解法に関して、前田ら⁸⁹⁻⁹³⁾、石原⁹⁴⁾らの報告が見られ、換気計算理論に関してもさらなるステップアップが見られた。

昭和 35 年には日本建築学会大会において前述の空気分科会で主査佐藤、幹事勝田（高）・前田を中心に「換気計算法」を主題とした研究協議会が開催されている⁹⁵⁾。当該協議会では計算理論と種々の換気特性を中心に一般的な換気計算法の確立を目指して空気関係の研究者が発表しており、その議論も踏まえて新たに換気分野の設計パンフレットを発刊する計画も記されている。これを受け、その 5 年後となる昭和 40 年には「18 換気設計⁹⁶⁾」が発刊されており、Q&A にとどめた昭和 32 年のものからわずか 8 年で一般的な換気設計法としてのまとまりを見せた。このように、この頃には各種換気装置の特性や風圧データの充実が見らる。後年佐藤⁹⁷⁾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言え、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、現在の空気環境の教科書的内容はこの頃にほぼ完成しているようにも思われる。さらに、石原は昭和 44 年に「建築換気設計⁹⁸⁾」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。

3. 近年の各論としての換気研究の発展と高度化

3.1 基本体系成熟後の換気研究の高度化

昭和 40 年代以降は換気量測定等の手法に焦点を当てた研究⁹⁹⁻¹⁰⁴⁾も見られ、手法の提案や改善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、関根ら¹⁰⁵⁾や野村、村上、勝田（高）ら¹⁰⁶⁻¹⁰⁷⁾をはじめ継続的に行われている¹⁰⁸⁻¹⁰⁹⁾。また、石油危機発生以降、昭和 50 年代には省エネルギーをキーワードとした通風研究¹¹⁰⁾が見られ始める点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できる。自然換気・通風研究は昭和 60 年代に入って 1990 年代以降も継続して行われおり¹¹¹⁻¹¹⁴⁾、この時代には口頭報告も含めて多くの自然換気研究がなされ、そのレビューは日本建築学会空気シンポジウムでの吉野¹¹⁵⁾のレビューにも詳しい。また、この頃から特に住宅を対

象として、自然換気だけではなく住宅の気密性能や換気設備性能も含めた総合的な換気性能評価研究も見られるようになっており、この時代は、これまでの世代によって築かれた換気研究の体系を駆使することで、より定量的かつ詳細に換気性状を明らかにする研究が非常に多く行われるようになった¹¹⁶⁻¹²⁴⁾。また、前田⁸⁹⁾・石原⁹⁴⁾の時代に本格的に導入されはじめた多数室換気計算についてもこの時代で継続した検討が見られる¹²⁵⁻¹²⁷⁾。筆者が振り返る限り、この昭和 50 年代から 1990 年頃までは体系に基づく換気研究の高度化が始まった時代と解釈している。

3.2 数値計算技術の導入と発展

前掲の体系を駆使した換気研究の高度化が行われ始めた昭和 50 年頃には各種換気通風研究の継続と並行して、東京大学の野村、松尾、貝塚、坂本ら¹²⁸⁻¹³⁰⁾を先駆とした室内気流の数値計算への本格的な取り組みが見られた。ここでは Launder・Spalding¹³¹⁻¹³²⁾と同様に 2 方程式モデルを用いた数値計算が行われ、特に室内三次元乱流を解析した点が意義深い。数値計算でありかつ乱流のモデリングを含む以上は計算精度が問題となるためその向上の必要性は高く、直後から精度検証や計算手法等の各種検討研究¹³³⁻¹³⁴⁾が見られるが、分野の発展を俯瞰するとこれ以降 CFD が室内気流及び換気問題を考えるための現実的かつ新たな研究手法として用いられるようになったと言える。また、1980 年代後半からは基礎研究に限らず実学的な換気研究用途¹³⁵⁻¹³⁷⁾でも利用が見られはじめ、これ以降事例研究での CFD 利用例は枚挙に暇がない。このように、CFD の発展はより詳細な性状が得られるために一層高度な検討を可能にし、2000 年代以降は商用コードの発達もあって実務での利用も一般的な時代となった。

3.3 換気効率分野の発展

換気効率分野に目を向けると、古くは昭和 20 年代に佐藤^{36, 39)}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」として評価も行っているが、昭和 50 年代後半に Sandberg¹³⁸⁻¹⁴⁰⁾によって Age (空気齢) の概念が提唱されて以降、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。これが日本で室内気流の三次元乱流解析が行われるようになった時期と重なり、村上・加藤は CFD を前提とする新たな換気効率指標として SVE1 ~ SVE3¹⁴¹⁻¹⁴²⁾を提唱している。また、追って小林・加藤・村上が SVE4 ~ SVE6¹⁴³⁾を提唱し、温熱環境形成の指標である CRI¹⁴⁴⁾の提案にも繋がっている。現代において実務の換気設計や設備設計に用いる CFD での空気齢 (SVE3) 評価¹⁴⁵⁻¹⁴⁶⁾も一般に珍しくなくなったことも、これらの研究の成果と言える。CFD を用いた換気効率指標としては、その後伊藤・加藤・村上¹⁴⁷⁻¹⁴⁹⁾が Particle Tracing を用いて

Visitation Frequency を定義した上で Purging Flow Rate の評価を行っており、近年では Lim・伊藤ら¹⁵⁰⁻¹⁵²⁾により Net Escape Velocity が提案されている。また、換気効率評価は上記の数値計算に限ったものではなく、特に空気齢はトレーサガス法により求められることから 1990 年代中頃からは住宅を中心に空気齢評価を行う換気研究が比較的多く見られる¹⁵³⁻¹⁵⁵⁾。

3.4 非住宅建築も含めた自然換気研究の発展

換気分野では換気効率の評価を含めて 1990 年代後半頃までは住宅を扱う研究が比較的多く、実学的としての住宅換気研究は当然それ以降も継続的に行われているが¹⁵⁶⁻¹⁶²⁾、2000 年代前半からはオフィス等の非住宅建築を扱う研究例も多くなり、空気齢を評価した例も少なくない¹⁶³⁻¹⁶⁶⁾。また、この時期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¹⁶⁷⁻¹⁷⁷⁾が多く見られるようになった。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多く行われている¹⁷⁸⁻¹⁸⁴⁾。非住宅対象の自然換気設計手法は現在でも体系を成したとは言いが、検討すべき課題や手法などの実務的・学術的知見の蓄積と取りまとめが目下行われており¹⁴⁵⁾、国外へ向けた情報発信も行われている¹⁸⁵⁾。少し話は逸れるが、熱的快適性分野では英国 BRS の Charles 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 らにより進められてきた Adaptive Model¹⁸⁶⁻¹⁸⁷⁾の概念は現在 ASHRAE Standard 55¹⁸⁸⁾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、自然換気研究の中で当該モデルを扱う研究の例¹⁸⁹⁻¹⁹⁰⁾が今後増えてさらに進展する可能性も期待される。

3.5 自然換気通風現象の解明と通風モデリング

我が国では大正期の雑誌国民衛生の時代から通風気流の評価が行われ、その歴史もあって通風気流の解明や通風モデルの研究も多い。通風気流の換気量はオリフィス式に基づく手法では誤差が大きくなるが¹⁹¹⁾、その予測については石原⁹⁸⁾が干渉係数としての整理の概念を示し、甲谷・山中¹⁹²⁾は当該係数を流入風向でも整備し、風向予測を含めた風量予測手法を提案している。また、加藤ら¹⁹³⁻¹⁹⁴⁾はオリフィス式に基づく換気量予測はあくまで開口通過前後で速度圧が無視できる場合に適用可能なため、通風時は NS 方程式に基づく流管内エネルギー損失を予測すべきとして実現象に基づくパワーバランスモデルの概念を示している。当該予測モデルは論理的ではあるがエネルギー損失の解明と整備が必要であり、そのため筆者ら¹⁹⁵⁾も CFD により流管解析を行いデータ整備を行なっている。また、倉渕ら¹⁹⁶⁻¹⁹⁷⁾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、概念提示にとどまらずその後も継続的に必要な知見と資料整備を行って一連の研究として継続されている¹⁹⁸⁻²⁰²⁾。上記とは別問題として、微小な風圧係数差での通風も一般的な換気量予測手法が存在しないため問題となる。その主なメカニズムは気流の乱れであり、脈動と混合の2種²⁰³⁻²⁰⁵⁾と言われている。乱れによる換気量予測については、単一開口を対象として山中・檜崎ら²⁰⁶⁻²⁰⁷⁾や河野・加藤ら²⁰⁸⁾の研究が見られる。複数開口で風圧係数差が微小な場合も密集市街地ではあり得るがいまだ知見は不足しており、近年筆者らが基礎研究として検討に着手している²⁰⁹⁾。

3.5 通風現象の解明や通風性能評価の基礎的研究

自然換気・通風は居住者が行う行為としては比較的容易かつ単純であり古来より日本で用いられるものの、流体力学的な現象としては極めて複雑であるため現象の理解のためには高度な研究を必要とし、風洞実験やCFDを駆使して詳細を解明するための検討が近年までも継続的に行われている²¹⁰⁻²¹⁸⁾。その他の通風に関連する基礎的な研究としては通風性能の評価指標検討も挙げられ、例えば赤林ら²¹⁹⁻²²⁰⁾は通風デグリーアワーの提案を行なった上で、換気回数のグレード毎に有効窓面積率マップを作成するなど、有用な技術資料を提供している。また、自然換気通風を促進するパッシブな建築的工夫についてもこれまで研究が行われており、古くは十代田²²¹⁾、佐藤³⁰⁾、その後石原⁸²⁻⁸³⁾がベンチレーターやモニター、越屋根の風力換気性能を示し、近年では鳴海ら²²²⁾や筆者ら²²³⁻²²⁵⁾が越屋根の評価を行なっている。また、他にもソーラーチムニー²²⁶⁻²²⁸⁾や換気塔²²⁹⁻²³⁰⁾の換気性能評価の研究が行われており、自然換気設計時の参考資料となり得る研究が続けられている。

3.6 換気研究の歴史を振り返って

これまでに記した通り、我が国の換気研究は明治期にドイツに学んだ衛生学を起源として本格的に始まったという捉え方ができ、その後大正期にも主には衛生学の中で扱われるが建築学での取り組みも増えてきた。昭和10年頃からは本格的に建築学の中で計画原論の一部として研究が行われ、戦後の組織的な研究も活発になり昭和40年代中頃には概ね基本体系が出来上がったと言え、この段階で一区切りした感がある。しかしその後研究設備や測定技術、さらにはCFDなどの計算技術の発達があり、研究の方法論が発展したことで換気研究にさらなる幅と高度化をもたらしている。これには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と言える。

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が、ここまで示した通りそれ以降も測定・計算の技術や評価の方法論が大いに発展したことで、研究が飛躍的に高度化していると考える。筆者が発展を振り返った限り、一定の成熟を見せた当該分野で行われてきた研究には、その位置づけや意義として例えば以下のような分類が考えられる。

- ・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課題の抽出
- ・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

今後もこれらの研究は換気分野においても必要性が高いと考えるが、研究の幅の広がりや高度化が飛躍的に進んだことで、各論としては大いに進展を遂げているもの、空気分野内でも研究が細分化している一面もあるように思われる。例えば建築計画原論の基礎体系が成熟する前段階では、原論関係者は空氣に限らず幅広い分野を研究で扱ったが、現在は一般に空氣関係の中でも空氣質や建築換気、屋外氣流といった分野でそれぞれ高い専門性をもって高度な研究を行なっている。筆者もその一分野としての換気研究を主な専門として研究に取り組むことが多く、換気分野としての課題や今後の発展の必要性も大いに感じるところではある。一方で、例えば自然換気問題を考えるときでも感覚的に内外の境界条件を変動を無視した時間平均的な風圧係数で考えてしまうことが多く、「それに起因する誤差はある程度仕方がない」と無意識にとらえてしまい、慣例的な考えに縛られていることにあらためて気づくことがある。このように、今から約50年前までに完成した換気研究の体系の中でも「技術的にやむなく採用された項目」もあると思われ、その意味では炭酸ガス1000ppm問題もその一例である。今後の換気研究の新たな展開としての可能性の一つとして、例えば空気分野でも屋外氣流から建築換気、そして室内空氣質の分野がさらに密接に繋がり合うことで、現在「とらわれる必要のない常識」から脱却して新たな研究の展開を見せる可能性もあるのではないかと。

ここまで日本の換気研究の歴史を振り返ってレビューを行なったが、それを踏まえて次章では現代で行われる換気研究の一例を示す。ここでは筆者が中高層オフィスの自然換気設計のための学術的知見整備を目的に行なっている研究の一部を紹介したい。

4. 現代における筆者の換気研究の一例：中高層オフィ
スビルの自然換気設計のための研究

4.1 中高層オフィスの自然換気設計の課題

近年非住宅建築の自然換気導入例が増えており、特に事務所建築での取り組みが多い。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、ハンドブック¹⁴⁵⁾も発刊されているが、換気設計法として確立されたとは言い難く、いまだ前例や設計者の感覚に頼らざるを得ない点も多い。また、ビッグプロジェクトでは設計段階で種々の詳細検討もあり得るが、中規模建物では検討期間の確保が難しく導入を断念せざるを得ない可能性もあると考える。そこで筆者は特に中規模建物を想定してまずは自然換気設計の重要パラメータとして開口面積を変更した換気量計算により資料整備を目的とした基礎検討を行っており、ここではその研究紹介を行う。また、建物全体の換気量算定では換気回路網計算を行うことが多く、その際風圧係数が境界条件として必要となる。これについても実務的には時間的制約から正確な値の取得が困難で文献値等で「大まかな値」を与えることが多いが、そのことが換気量算定結果に及ぼす影響に関する知見も不足しているため、その検証を行なった例も紹介する。

4.2 中高層ビルの自然換気開口面積に関する検討

検討対象は地上11階建の実在事務所ビルを参考に、図1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、重力風力併用型の自然換気とした。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²³¹⁾を参照されたい。換気回路網モデルの概要を図2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。

ここではNetsを用いた熱・換気回路網計算¹²⁵⁾で定常計算を行うが、外気温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「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い、それぞれ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3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。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で、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で固定すると、 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っていることがわかる。

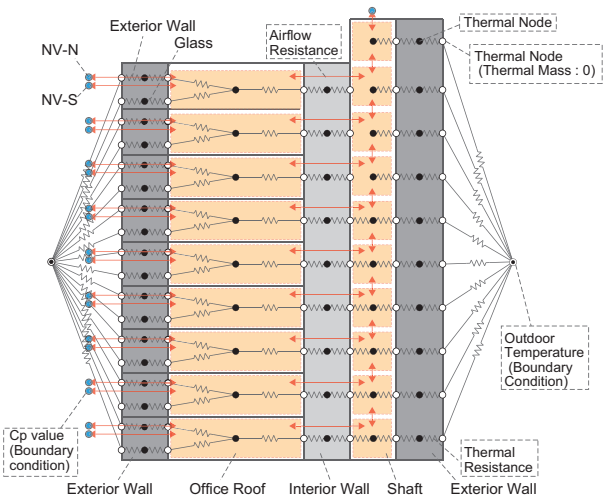
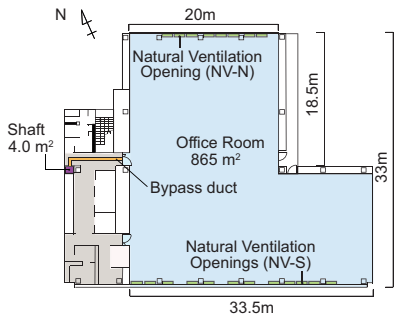


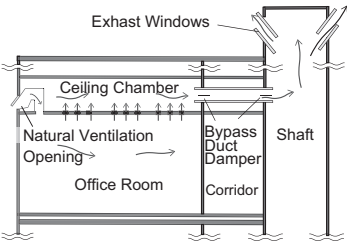
図2 作成した熱・換気回路網モデル

表1 換気回路網計算の計算条件

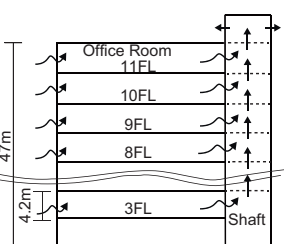
$\alpha A_{path} / A_f$	$\alpha A_{opening} / A_f$			
	1 / 1000	1 / 500	1 / 200	1 / 100
1 / 2000			○	
1 / 1000	○	○	○	○
1 / 500			○	
1 / 250			○	



(1) 基準階平面図



(2) 基準階断面図



(3) 建物断面図

図1 自然換気口面積検討で解析対象とした建物の概要

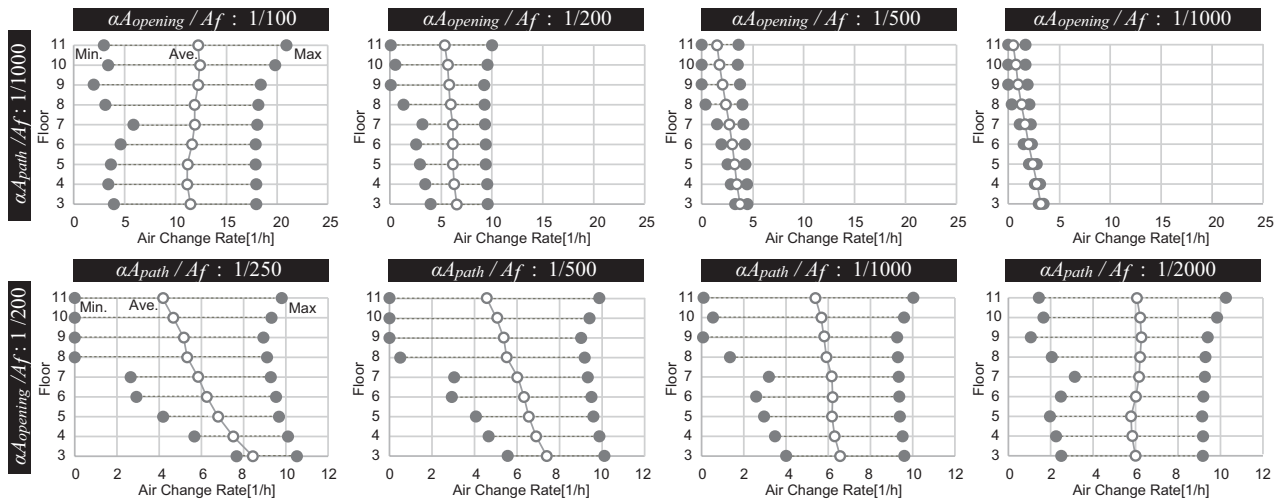


図3 換気回路網計算の結果：各フロアにおける16風向での回路網計算の平均値及び最大・最小値

例えば自然換気の目的を空気質確保と仮定し、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]¹⁴⁵⁾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より好ましい。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、パスは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でも比較的均一な分布となった。

4.3 中高層ビルの自然換気計算用風圧係数の検討

換気回路網計算で与える風圧係数が自然換気量算定結果に与える影響を検討する。対象は地上10階建て重力換気主体のシャフト型自然換気オフィス（図4）とした。これをその周辺建物も含め直径360mの範囲で縮尺1/300で作成した風洞実験を行い、16風向で風圧係数を得た（実街区条件）。実際の設計時にはこのように風洞実験の実施が困難で風圧係数を文献値等で代替することも考え得ることから、そのような汎用データを想定して角柱を配置した風洞実験も行い、その風圧係数も取得した（モデル街区条件）。

それぞれの風洞実験の模型配置を図5に示す。なお、モデル街区条件ではシャフト出口を想定して測定対象建物のみペントハウスを設け、壁面2面に加えてペントハウス4面の風圧も取得している。本検討についても詳細は筆者らの報告²³²⁾を参照されたい。

図6に両街区条件で得られた16風向の風圧係数分布のうち、風向NWとSEの結果を抜粋して示す。ここで実街区条件は各階3点の平均値を掲載している。自然換気口が風上となる風向NWでは周辺建物の違いの影響が大きく、上層部で風圧係数が異なる。一方換気口が風下側となる風向SEでは値に多少の差はあるが分布性状は大きくは変わっていないことがわかる。しかし、焦点となるべきはこのような風圧係数の違いが換気量算定結果に影響である。そこで、

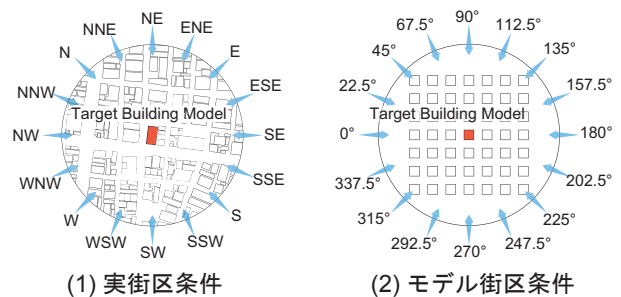


図5 実街区及びモデル街区条件での風洞実験

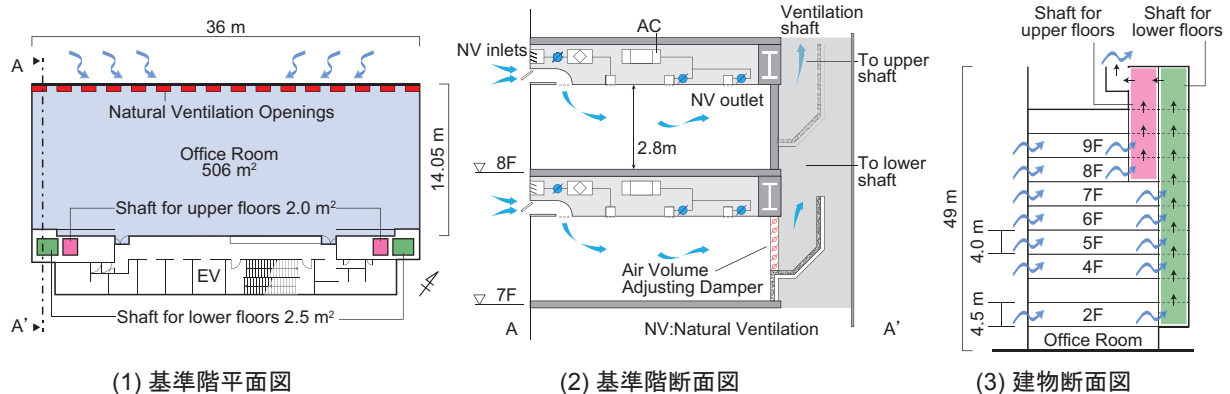


図4 風圧係数検討で解析対象とした建物の概要

当該建物を対象に換気回路網モデルを作成し、前項と同様に 16 風向で定常計算を行なった。図 7 に風向 NW、SE 及び無風条件の結果を抜粋して示す。また、当該建物の中間期就業時間帯の風向発生頻度で重み付けた平均換気量もあわせて示す。この結果、特に周辺の建物の影響が大きな自然換気口が風上の条件においては上層部で換気量の算定誤差が大きいものの、換気口が風下となる条件では概ね精度良く予測され、さらには発生頻度重み付け平均の換気量も大きな差異が見られない。このことから、設計時に期間平均値の算定や概算を行うための換気回路網計算ではモデル街区条件のような汎用的な風圧係数のデータベースを用いて差し支えないと言える。しかし、ここでは重力主体のシャフト型システムが対

象であるため風圧係数の影響がそもそも小さく、風力主体の場合も含めた他のシステムを対象とした検討とさらなる知見の蓄積が今後必要と言える。

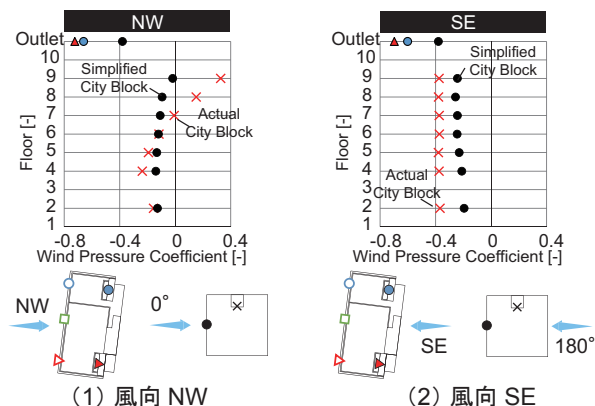


図 6 実街区とモデル街区で得られた風圧係数の比較

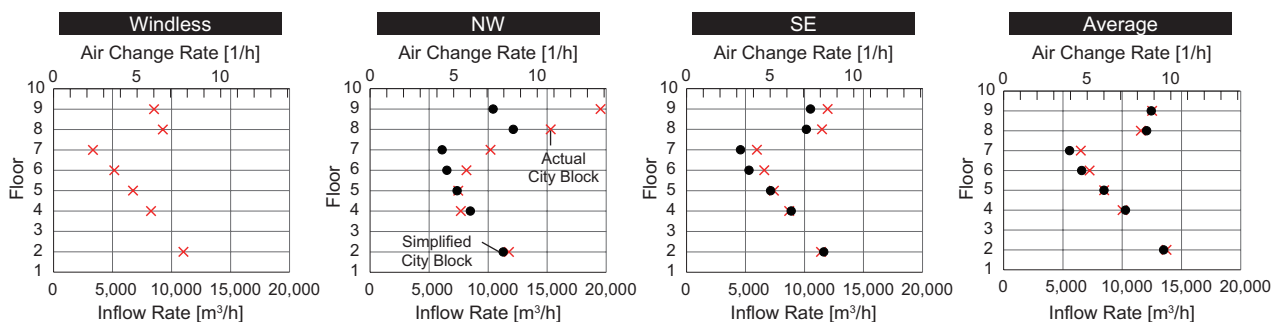


図 7 実街区条件とモデル街区条件の風圧係数を使用した換気回路網計算結果

参考文献

- 小林知広：「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」2016 年日本建築学会 第 25 回 空気シンポジウム「複眼的視点で換気を捉える - 都市・建築の換気から人体の呼吸まで -」, pp.25-36, 2016
- 森林太郎：「陸軍衛生教程」, 陸軍々醫學校, 1889.3
- 森林太郎：「造家衛生の要旨」建築雑誌, 第 7 輯 76 號, pp.115-122, 1893
- 田原良純：「東京府下小學校空氣試驗說」, 大日本私立衛生會雑誌, 第 12 號, pp.8-15, 1884
- 田原良純：「東京府下小學校空氣試驗說 (前號ノ續キ)」, 大日本私立衛生會雑誌, 第 14 號, pp.2-12, 1884
- 田原良純：「東京府下小學校空氣試驗說 (前號ノ續キ)」, 大日本私立衛生會雑誌, 第 16 號, pp.1-14, 1884
- 坪井次郎：「日本家屋換氣論」, 大日本私立衛生會雑誌, 第 41 號, pp.61-75, 1886
- 坪井次郎：「換氣實驗」, 建築雑誌, 第 4 輯, 第 39 號, pp.41-42, 1890
- 坪井次郎：「日本作り病室換氣量」建築雑誌, 第 4 輯, 第 45 號, pp.146-147, 1890
- 田中豊輔：「小學校換氣法の一斑」, 建築雑誌, 第 6 輯, 第 66 號, pp.157-169, 1892
- 澤野基徳：「仙臺衛戍病院病室ノ保温及換氣量比較調査」, 藥學雑誌, 第 193 號, pp.221-236, 1898
- 野村仁：「家屋ノ自然換氣ニ及ボス氣流ノ影響ニ就テ」, 第一篇～第四篇」, 國民衛生, 第 1 卷, 第 5, 9, 11 號, 1924
- 野村仁：「家屋ノ自然換氣ニ及ボス擴散現象之研究」, 第一篇～第三篇」, 國民衛生, 第 1 卷, 第 6, 7, 8 號, 1924
- 野村仁：「擴散量、擴散率並ニ所謂假換氣量ノ一般的算出法」, 國民衛生, 第 1 卷, 第 9 號, 1924
- 大谷佐重郎訳, R.Fluegge 著：「小住宅の換氣法に關する研究」, 國民衛生, 第 2 卷, 第 4 號, pp.12-34, 1924
- 大谷佐重郎：「和洋折衷ノ自然換氣並ニ排氣口ノ影響ニ就テ」, 國民衛生, 第 3 卷, 第 9 號, pp.54-75, 1926
- 大谷佐重郎：「日本家屋ノ自然換氣ニ關スル總合的研究」, 國民衛生, 第 5 卷, 第 11 號, 第 6 卷, 第 2, 5 號, 1928-1929
- 森田公平：「空氣中炭酸瓦斯ノ新定量法」, 國民衛生, 第 1 卷, 第 6 號, 1924
- 吉田房雄, 二宮忠清：「換氣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 卷, 第 6 號, 1929
- 大井好成：「室内外ノ温差ニ基ク自然換氣量ノ測定 - 第一篇～第二篇」, 國民衛生, 第 3 卷, 第 9 號, pp.1-20, 第 4 卷, 第 1 號, pp.83-97, 1926
- 藤井厚二：「我國住宅建築ノ改善ニ關スル研究 (承前)」, 國民衛生, 第 4 卷, 第 4 號, pp.137-148, 1926
- 柳町政之助：「暖房と換氣 - 後編」, 大日本工業學會, 1921.5
- 關藤國助：「換氣と涼房」, 建築學會パンフレット 第 3 輯 第 7 號, 建築學會, 1930
- 伊藤正文：「換氣筒を有する鐵筋コンクリート造教室の自然換氣量に就て」, 建築學會論文集 第 3 號, 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 號, 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 號, 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 號, pp.24-30, 1938
- 伊藤正文, 梶原三郎：「工場の換氣機構に關する模型實驗」, 建築學會論文集 第 17 號, 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 號, pp.241-250, 1937
- 佐藤鑑：「在来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験」, 建築學會論文集 第 13 號, pp.360-369, 1939
- 佐藤鑑：「五棟連續堀型屋根工場建築の風に依る自然換氣輪道」, 建築雑誌 第 657 號, pp.275-281, 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 號, pp.85-93, 1941
- 佐藤鑑：「隱蔽式排氣口の遮光及び通氣試験」, 建築學會論文集 第 25 號, pp.66-72, 1942
- 佐藤鑑：「熱對流による通氣現象の研究 (第 1 報) ～ (第 4 報)」, 建築學會論文集 第 26, 27, 29, 31 號, 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 號, pp.27-31, 1947

- 36)佐藤鑑：「通気経路による換気効果の研究(第2部)」，日本建築學會論文集 第32～35号，pp.31-35, 1947
- 37)佐藤鑑：「建築環境学」，紀元社，1948
- 38)石川知福：「環境衛生学」，吐鳳堂，1942
- 39)古屋芳雄 編：「公衆衛生学」第2輯，第1編 環境衛生学(石川知福)，第2編 建築衛生学(佐藤鑑)，日本臨牀社，1948
- 40)勝田千利：「通風に關する實驗的研究」，建築學會論文集 第5号，pp.261-270, 1937
- 41)平山嵩，塘一郎：「室内外温度差に基く自然換気量(第1報)」，建築學會論文集 第28号，pp.51-57, 1943
- 42)平山嵩，塘一郎：「吸排氣孔の位置及び大いさが自然換気に及ぼす影響」，建築學會論文集 第28号，pp.58-62, 1943
- 43)平山嵩，塘一郎：「室内外の温度差に基く自然換気量(第2報)」，建築學會論文集 第29号，pp.105-111, pp.1943
- 44)勝田高司：「自然換気に關する實驗的研究(第1報告)(第2報)」，建築學會論文集 第28, 31号，1943-1944
- 45)渡邊要，勝田高司：「南方住居の平面型と水平氣流」，建築學會論文集 第31号，pp.145-153, 1944
- 46)渡邊要，勝田高司：「南方住居の斷面型と通風経路(第2部)」，日本建築學會論文集 第32～35号，pp.43-46, 1947
- 47)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
- 48)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
- 49)勝田高司，後藤滋：「市街地における風圧係数に關する模型實驗(1)」，日本建築学会研究報告 第26号，pp.1-4, 1954
- 50)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關する研究」，日本建築學會論文集 第47号，pp.75-84, 1953
- 51)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：風洞實驗」，日本建築學會研究報告 第24号，pp. 287-288, 1953
- 52)伊藤正文：「建築保健工学」，工業圖書株式會社，1938
- 53)佐藤鑑：「住居衛生学」，續文堂出版，1957
- 54)木村幸一郎，三木韶：「建築計畫原論」，共立出版，1949
- 55)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：「建築学大系 8 - 音・光・熱・空氣・色」，彰国社，1955
- 56)平山嵩，小木曾定彰，渡邊要，佐藤鑑，斎藤平蔵：「建築学大系 22 - 室内環境計画」，彰国社，1957
- 57)平山嵩：「建築設計理論」，科學政策協會，1948
- 58)渡邊要：「建築計画原論」，丸善，1951
- 59)船越義房編：「建築士技術全書 2 計画原論・設備」，彰国社，1952
- 60)委員会成果報告書「室内空氣質のための必要換気量」空氣調和・衛生工学会 換気設備委員会・室内空氣質小委員会，2016
- 61)日本建築学会建築設計々画規準委員会 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
- 62)勝田高司，後藤滋，寺沢達二：「スチール・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
- 63)勝田高司，後藤滋：「換気筒による自然換気ことに建物内外の壓力差について」，日本建築学会研究報告 第18号，pp. 219-220, 1952
- 64)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
- 65)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
- 66)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
- 67)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
- 68)前田敏男：「重力換気の研究 その1：環状筒について」，日本建築學會研究報告 第15号，pp.175-178, 1951
- 69)前田敏男，松浦邦男：「換気筒の實驗」，日本建築學會研究報告 第19号，pp.271-274, 1952
- 70)前田敏男，前川純一：「室内暖房氣流に關する實驗」，日本建築學會研究報告 第17号，pp.410-413, 1952
- 71)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
- 72)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
- 73)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
- 74)勝田千利，関根毅，清原陽：「換気筒計算法と換気筒の實驗」，日本建築学会論文報告集 第66号，pp.117-120, 1960
- 75)勝田千利，関根毅：「換気筒計算法と換気筒の實驗(その2)」，日本建築学会論文報告集 第67号，pp.83-89, 1961
- 76)勝田千利，関根毅：「屋根モニターによる換気に關する實驗的研究」，日本建築学会論文報告集 第68号，121-127, 1961
- 77)勝田千利，関根毅：「建築物壁面開口部による換気に關する實驗的研究(その1)：特に開口部の壓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，116-120, 1961
- 78)勝田千利，関根毅：「壁面開口部による換気に關する實驗的研究(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
- 79)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
- 80)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
- 81)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
- 82)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
- 83)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
- 84)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
- 85)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
- 86)Hardy Cross：「Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors」，University of Illinois Bulletin, No.22, Bulletin No. 286, 1936.
- 87)平松良雄：「坑内通風の理論と計算」pp.147-214, 第8章 通気網の計算，丸善，1953
- 88)新津靖，倉橋明次：「管路網の電氣的近似解法」，日本機械学会論文集，22卷，117号，pp.353-359, 1956
- 89)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 pp.57-60, 1961
- 90)前田敏男，松本衛，成瀬哲生：「室が一列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
- 91)前田敏男，石黒一郎，中村泰人：「5階建独身アパートの換気計算 - 単一開口化による単室化の例題」，日本建築学会研究報告 第57号，近畿支部 pp.69-72, 1961
- 92)前田敏男，石黒一郎：「田字平面のアパートの換気の計算」，日本建築学会研究報告 第57号，近畿支部 pp.73-76, 1961
- 93)前田敏男，松本衛：「床下・屋根裏を有する教室の換気と温度の計算」，日本建築学会研究報告 第57号，近畿支部 pp.77-80, 1961
- 94)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
- 95)佐藤鑑：「主題・室内換気計算について」建築雑誌，第75巻，第892号，pp.688-689, 1960
- 96)日本建築学会環境工学委員会 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，1965
- 97)佐藤鑑：「空氣と建築環境 - 環境工学の体系における「空氣」の位置付け」，建築雑誌，No. 96, 1981
- 98)石原正雄：「建築換気設計」，朝倉書店，1969
- 99)石原正雄，西岡利晃：「ヘリウムガスによる換気量測定に關する研究」，大会學術講演梗概集，計画系，pp.103-104, 1968
- 100)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」，大会學術講演梗概集，計画系，pp.35-36, 1970
- 101)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實驗」，日本建築学会北海道支部研究発表會報告，pp.35-38, 1971
- 102)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
- 103)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・基礎實驗」，大会學術講演梗概集，計画系，pp.307-308, 1972
- 104)佐々木隆，荒谷登：「多室空間の換気経路測定法に關する研究」，日本建築学会論文報告集，第333号，pp.84-91, 1983
- 105)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關する研究」，日本建築学会論文報告集号外，學術講演要旨集，p.525, 1967

- 106) 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
- 107) 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
- 108) 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
- 109) 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
- 110) 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的実験及び考察」, 日本建築学会学術講演梗概集, 計画系, pp.857-858, 1975
- 111) 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, 計画系, pp.243-244, 1977
- 112) 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
- 113) 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, 455-456, 1983
- 114) 清田誠良, 関根毅:「建築物周囲空間の静圧分布に関する実験的研究」, 日本建築学会計画系論文集, 第 350 号, pp.1-7, 1985
- 115) 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, pp.1-2, 1990
- 116) 吉野博, 勝田高司, 村上周三:「各戸型貫通ダクト方式の換気性能に関する実験的研究 - 集合住宅における換気設備に関する研究 第1報 -」, 日本建築学会論文報告集, 第 306 号, pp.81-91, 1981
- 117) 吉野博, 村上周三:「センターコア型戸における換気設備の現状に関する調査 - 集合住宅における換気設備に関する研究 第2報 -」, 日本建築学会論文報告集, 第 309 号, pp.127-136, 1981
- 118) 田中俊彦, 村上周三, 吉野博:「浴室換気量に関する実物実験 - 集合住宅における換気設備に関する研究 第3報 -」, 日本建築学会論文報告集, 第 314 号, pp.121-130, 1982
- 119) 村上周三, 吉野博:「住宅の気密性能に関する調査研究」, 日本建築学会論文報告集, 第 325 号, pp.104-115, 1983
- 120) 吉野博, 長友宗重, 松本博, 内海康雄, 山本頼房:「木造戸建住宅を対象とした自然換気量の予測法に関する検証実験 - 間仕切扉を解放して炭質とした場合」, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 412 号, pp.19029, 1990
- 121) 吉野博, 長友宗重, 小林仁:「気密住宅における集中換気システムの空気齢による性能測定」, 日本建築学会計画系論文集, 第 464 号, pp.57-64, 1994
- 122) 赤林伸一, 村上周三, 水谷国男ら:「周辺に建物群のある独立住宅の風圧分布に関する風洞実験および換気量予測 - 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
- 123) 赤林伸一, 水谷国男, 高倉秀一ら:「気候特性に対応した住宅の断熱・気密性能に関する検討 - 住宅の換気・通風に関する実験的研究 その2」日本建築学会計画系論文集, 第 464 号, pp.47-56, 1994
- 124) 高倉秀一, 赤林伸一, 須山喜美ら:「日本における漏気量・漏気負荷の地域特性に関する検討 - 住宅の換気・通風に関する実験的研究 その3」日本建築学会計画系論文集, 第 479 号, pp.35-40, 1996
- 125) 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
- 126) 石田健一, 鎌田元康, 千田善孝ら:「建物の気密性を用いた換気量の簡易計算法」, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 438 号, pp.23-31, 1992
- 127) 新田勝通:「換気回路網における理論解の多様性に関する研究」, 日本建築学会計画系論文集, 第 480 号, pp.31-38, 1996
- 128) 野村豪, 松尾陽, 貝塚正光, 坂本雄三, 遠藤清尊:「室内空気分布の数値解法に関する研究 1 - MAC 法による 3 次元数値解析 -」, 日本建築学会論文報告集, 第 231 号, pp.73-79, 1975
- 129) 野村豪, 松尾陽, 貝塚正光, 坂本雄三, 遠藤清尊:「室内空気分布の数値解法に関する研究・2・3 次元流れの可視化実験 -」, 日本建築学会論文報告集, 第 238 号, pp.59-67, 1975
- 130) 野村豪, 松尾陽, 貝塚正光, 坂本雄三, 遠藤清尊:「室内空気分布の数値解法に関する研究・3・2 方程式モデルによる乱流の 3 次元解析 -」, 日本建築学会論文報告集, 第 238 号, pp.59-67, 1975
- 131) B. E. Launder and D. B. Spalding:「Mathematical Models of Turbulence」, Academic Press, 1972.
- 132) B. E. Launder and D.B. Spalding:「The numerical computation of turbulent flows」, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, pp.269-289, 1974
- 133) 野村豪, 松尾陽, 貝塚正光ら:「乱流の数値解析と風洞実験 - 建物周辺の気流分布と汚染物拡散」, 日本建築学会論文報告集, 第 252 号, pp.57-63, 1977
- 134) 野村豪, 松尾陽, 加藤信介:「MAC 法の空間差分感覚に関する考察 - 数値解析手法を用いる室内空気分布予測法に関する研究 その1」, 日本建築学会論文報告集, 第 292 号, pp.61-72, 1980
- 134) 野村豪, 松尾陽, 加藤信介ら:「3 次元乱流数値解析と模型実験 - 数値解析手法を用いる室内空気分布予測法に関する研究 その2」, 日本建築学会論文報告集, 第 298 号, pp.69-80, 1980
- 135) 村上周三, 加藤信介, 須山喜美:「コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究 第1報 - 第5報」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.37, 40, 44, 49, 1988-1992
- 136) 村上周三, 加藤信介, 永野紳一郎, 田中幸彦:「天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームに関する研究 第2報 - 数値シミュレーションによる流れ場・拡散場の検討」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.43, 1990
- 137) 村上周三, 吉野博, 水谷国男ら:「集合住宅の共用排気ダクト設計方法に関する研究 - 合流損失に関する模型実験およびダクト内圧力分布に科する数値解析」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.42, pp.37-47, 1990
- 138) Mats Sandberg:「What is ventilation efficiency?」, *Building and Environment*, Vol. 16, pp.123-135, 1981
- 139) 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
- 140) David Etheridge and Mats Sandberg:「Building Ventilation - Theory and Measurement」, Wiley, 1996
- 141) 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
- 142) Shinsuke Kato, Shuzo Murakami:「New ventilation efficiency scales based on simulations」, *ASHRAE Transactions*, Vol.94, No.2, pp.309-330, 1988.
- 143) 小林光, 加藤信介, 村上周三:「不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成寄与率評価指標に関する研究 第1報 -CFD に基づく局所領域の換気効率指標の開発」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.69, pp.39-47, 1998
- 144) 加藤信介, 小林光, 村上周三:「不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成寄与率評価指標に関する研究 第2報 -CFD に基づく局所領域の温熱環境形成寄与率評価指標の開発」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.68, pp.29-36, 1998
- 145) 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」, p.101, 技報堂出版, 2013
- 146) 空気調和・衛生工学会編:「はじめての環境・設備設計シミュレーション CFD ガイドブック」p.40, オーム社, 2017
- 147) 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
- 148) 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
- 149) S. Kato, K. Ito, S. Murakami:「Analysis of visitation frequency through particle tracing method based on LES and model experiment」, *Indoor Air*, Vol.13, pp.182-193, 2003
- 150) 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
- 151) 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

- 152) Juyeon Chung, Eunsu Lim, Mats Sandberg, Kazuhide Ito「Returning and net escape probabilities of contaminant at a local point in indoor environment」, *Building and Environment*, Vol.125, pp.67-76, 2017
- 153) 坂口淳, 赤林伸一:「集中換気システムを設置した木造独立住宅の換気効率に関する実測調査 - 住宅の換気システムに関する研究 その1」, 日本建築学会計画系論文集, 第488号, pp.35-42, 1996
- 154) 赤林伸一, 坂口淳:「漏入空気の影響を考慮した換気効率指標の算出方法 - 住宅の換気システムに関する研究 その2」, 日本建築学会計画系論文集, 第512号, pp.33-37, 1998
- 155) 吉野博, 小林仁, 早瀬訓ら:「試験家屋を用いた換気システムの空気齢による性能評価」, 日本建築学会計画系論文集, 第502号, pp.37-42, 1997
- 156) 倉渕隆, 嵐口晃宏, 今野雅ら:「風圧力発生頻度に基づく常時換気システムの整備された集合住宅の換気量充足度評価に関する研究 第1報 - センターコア型超高層集合住宅に対する検討」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.83, pp.53-63, 2001
- 157) 鳥海吉弘, 倉渕隆, 嵐口晃宏ら:「風圧力発生頻度に基づく常時換気システムの整備された集合住宅の換気量充足度評価に関する研究 第2報 - 片廊下型高層集合住宅に対する検討」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.91, pp.11-19, 2003
- 158) 倉渕隆, 鳥海吉弘, 平野剛ら:「地域性・建物気密性能を考慮した各種換気システムの性能評価に関する研究 第1報 - 第IV地域(東京) 戸建住宅を対象とした各種換気システムの比較検討」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.117, pp.1-10, 2006
- 159) 倉渕隆, 嵐口晃宏, 鳥海吉弘ら:「住宅用全熱交換換気ユニットの有効換気量率測定法に関する研究 第1報 - 有効換気量率に及ぼす影響要素」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.107, pp.21-27, 2006
- 160) 倉渕隆, 嵐口晃宏, 鳥海吉弘ら:「住宅用全熱交換換気ユニットの有効換気量率測定法に関する研究 第2報 - 各種ユニットへの測定法の適用と換気回路網モデル」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.121, pp.1-7, 2007
- 161) 吉野博, 劉京, 李重勲ら:「換気実験棟の概要, ならびに実験と計算による基礎的検討 - 住宅用ハイブリッド換気システムの性能評価に関する研究 その1」, 日本建築学会環境系論文集, 第566号, pp.57-64, 2003
- 162) 吉野博, 尹星勲, 李重勲ら:「2階機械給排気方式及び床下給気方式についての実験と数値計算 - 住宅用ハイブリッド換気システムの性能評価に関する研究 その2」, 日本建築学会環境系論文集, 第591号, pp.45-52, 2005
- 163) 桑原亮一, 赤林伸一, 水谷国男ら:「事務室における空調方式と換気効率に関する検討 - 建物の空調・換気効率に関する研究 その1」, 日本建築学会計画系論文集, 第517号, pp.29-36, 1999
- 164) 赤林伸一, 桑原亮一, 水谷国男ら:「アトリウム空間を対象とした空調方式と換気効率に関する検討 - 建物の空調・換気効率に関する研究 その2」, 日本建築学会計画系論文集, 第532号, pp.45-50, 2000
- 165) 赤林伸一, 坂口淳, 村上周三ら:「オフィスビルを対象とした換気効率に関する実測調査 - ソフィスビルを対象とした換気効率に関する研究 その1」, 日本建築学会計画系論文集, 第516号, pp.39-46, 1999
- 166) 樋渡潔, 赤林伸一, 森川泰成ら:「換気タワーを用いた高効率換気システムに関する研究 その1 オフィス空間を対象とした実大実験による空気齢を用いた評価」, 日本建築学会計画系論文集, 第542号, pp.49-56, 2001
- 167) 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
- 168) 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
- 169) 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
- 170) 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
- 171) 宋斗三, 加藤信介, 村上周三ら:「自然通風併用型放射冷房システムに関する研究 - 第1報 放射パネル冷房方式と床吹出し冷房方式の比較」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.87, pp.61-68, 2002
- 172) 宋斗三, 加藤信介:「自然通風併用型放射冷房システムに関する研究 - 第2報 高温・多湿気候下での適用可能性の検討」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.93, pp.77-85, 2004
- 173) 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
- 174) 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
- 175) Lim Eunsu, 相良和伸, 山中俊夫ら:「自然換気併用空調を有するオフィス室内における温熱・空気環境形成メカニズム」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.141, pp.19-28, 2008
- 176) 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
- 177) 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
- 178) 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
- 179) 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
- 180) 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
- 181) 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
- 182) 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
- 183) 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
- 184) 山本佳嗣, 村上周三, 石野久彌ら:「温度差を利用した自然換気及びハイブリッド空調の省エネ効果に関する研究 第1報 - 必要自然換気開口面積の1次予測法の提案とシミュレーション解析による影響評価」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.233, 2016
- 185) Editor Architectural Institute of Japan, Translator Hisashi Kotani:「Natural Ventilation Design Handbook for Architects and Building Engineers」, Gihodoshuppan, 2016 (E-book)
- 186) Fergus Nicol, Michael Humphreys, Susan Roaf:「Adaptive Thermal Comfort - Principles and Practice」, Routledge, 2012.
- 187) Michael Humphreys, Fergus Nicol, Susan Roaf:「Adaptive Thermal Comfort - Foundations and Analysis」, Routledge, 2016.
- 188) ANSI/ASHRAE Standard 55-2013:「Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy」, ASHRAE, 2013
- 189) 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
- 190) 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
- 191) Tomohiro Kobayashi, Kazunobu Sagara, Toshio Yamanaka, et al.:「Stream Tube based Analysis of Problems in Prediction of Cross-Ventilation Rate」, *The International Journal of Ventilation*, Vol.7, No.4, pp.321-334, 2009.
- 192) 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
- 193) 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
- 194) Shuzo Murakami, Shinsuke Kato, Shin-ichi 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

- 195) Tomohiro Kobayashi, Kazunobu Sagara, Toshio Yamanaka et al. : 「Power transportation inside stream tube of cross-ventilated simple shaped model and pitched roof house」, *Building and Environment*, Vol. 44, Issue 7, pp.1440-1451, 2009.7
- 196) 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
- 197) 倉渕隆, 大場正昭, 遠藤智行ら : 「局所相似モデルの概念と風洞実験による検証 - 通風時の換気量予測法に関する研究 (第1報)」, 日本建築学会環境系論文集, 第607号, pp.37-41, 2006
- 198) 大場正昭, 倉渕隆, 後藤伴延ら : 「流入開口部における局所相似モデルの適用性に関する検討 - 通風時の換気量予測法に関する研究 (第2報)」, 日本建築学会環境系論文集, 第617号, pp.25-30, 2007
- 199) 野中俊宏, 倉渕隆, 大場正昭 : 「密集市街地における建物表面風圧分布及び自然通風量に関する風洞実験 - 密集市街地における効果的な通風利用を目的とした開口部配置計画手法に関する研究 (第1報)」, 日本建築学会環境系論文集, 第642号, pp.951-956, 2009
- 200) 遠藤智行, 倉渕隆, 赤嶺嘉彦ら : 「流入開口部通気特性評価法の開発及び通気特性データベースの構築」, 日本建築学会環境系論文集, 第646号, pp.1315-1320, 2009
- 201) 後藤伴延, 大場正昭, 倉渕隆ら : 「流出開口部への局所相似モデルの適用に関する検討 - 通風時の換気量予測法に関する研究 (第3報)」, 日本建築学会環境系論文集, 第674号, pp.259-266, 2012
- 202) 塚本健二, 大場正昭, 倉渕隆ら : 「多数室換気に局所相似モデルを適用した場合の通風量予測の精度検証 - 通風時の換気量予測法に関する研究 (第4報)」, 日本建築学会環境系論文集, 第684号, pp.157-163, 2013
- 203) Fariborz Haghighat, Jiwoo Rao, and Paul Fazio : The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates - A Modeling Approach, *Building and Environment*, Vol.26, No2, pp.95-109, 1991
- 204) Fariborz Haghighat, Henrik Brohus, and Jiwoo Rao : Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review, *Building and Environment*, Vol.35, pp.377-385, 2000
- 205) 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
- 206) 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
- 207) 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
- 208) 河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生 : 「欧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
- 209) 小林知広, 梅宮典子, 藤田拓也ら : 「複数の開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その8) (その9)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.753-760 (選抜梗概), 2017
- 210) Hisashi Kotani, Ryuji Satoh, Toshio Yamanaka : 「Natural ventilation of light well in high-rise apartment building」, *Energy and Buildings*, Vol.35, Issue 4, pp.427-434, 2003
- 211) 飯野由香利, 倉渕隆, 小林信行ら : 「風洞実験およびCFD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
- 212) 倉渕隆, 大場正昭, 岩渕拓志ら : 「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)」, 日本建築学会計画系論文集, 第561号, pp.47-52, 2002
- 213) 倉渕隆, 大場正昭, 遠藤智行 : 「様々な風向角度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2報)」, 日本建築学会環境系論文集, 第591号, pp.7-13, 2005
- 214) 樋山恭助, 加藤信介, 高橋岳生ら : 「開口面積比及び開口位置関係が通風時気流性状に与える影響の分析」, 日本建築学会環境系論文集, 第596号, pp.21-27, 2005
- 215) Tomohiro Kobayashi, Kazunobu Sagara, Toshio Yamanaka et al. : 「Wind Driven Flow through Openings - Analysis of the Stream Tube」, *The International Journal of Ventilation*, Vol. 4, Number 4, pp.323-336, 2006
- 216) 小林知広, 相良和伸, 山中俊夫ら : 「通風時の建物周辺気流に関する風洞実験及びCFD解析精度の検証」, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第638号, pp.481-488, 2009
- 217) 高野康夫, 赤林伸一, 富永禎秀ら : 「単純住宅モデルを対象とした変動気流場における室内外通風性状の解析 -LES(Large-Eddy Simulation)による住宅の自然換気・通風性状に関する研究 その1」, 日本建築学会環境系論文集, 第80巻, 第716号, pp.925-934, 2015
- 218) 有波祐貴, 赤林伸一, 富永禎秀ら : 「風速変動を考慮した自然換気・通風性能評価手法の提案 -LES(Large-Eddy Simulation)による住宅の自然換気・通風性状に関する研究 その2」, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻, 第725号, pp.589-597, 2016
- 219) 赤林伸一, 坂口淳, 細野淳美ら : 「室内気流分布を考慮した通風性能評価に関する研究 - 室内通風デグラワーを用いた戸建住宅の通風性能評価」, 日本建築学会環境系論文集, 第73巻, 第633号, pp.1261-1266, 2008
- 220) 有波祐貴, 赤林伸一, 大嶋拓也ら : 「有効換気回数及び有効窓面積率による住宅の通風性能評価に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集, 第78巻, 第685号, pp.277-284, 2013
- 221) 十代田三郎 : 「ルーフ・ベンチレーター」の性能に就て」, 衛生工業協会誌, 第10巻, 第5号, pp.311-324, 1936
- 222) 鳴海大典, 羽原宏美, 下田吉之ら : 「越屋根による建物の室内採環境制御効果に関する研究」, 日本建築学会技術報告集, 第13巻, 第26号, pp.617-622, 2007
- 223) 小林知広, 山中俊夫, 甲谷寿史ら : 「勾配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
- 224) 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
- 225) 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
- 226) Zoltan Adam, Toshio Yamanaka, Hisashi Kotani : 「Simulation study on solar assisted ventilation systems, -Unsteady-state simulation of a detached building with solar chimney using weather data」, 日本建築学会環境系論文集, 第577号, pp.19-26, 2004
- 227) 鍋島佑基, 宋城基 : 「模型実験とCFDシミュレーションによるソーラーチムニーの最適な形状に関する検討」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.156, pp.11-18, 2010
- 228) 宋城基 : 「模型実験によるソーラーチムニーとチムニーシャフトの接続状態による自然換気性能の検討」, 日本建築学会環境系論文集, 第79巻, 第697号, pp.255-260, 2014
- 229) 水谷国男, ニノ宮裕樹, 木村洋 : 「風向追従型風力換気装置の換気性能に関する研究 その2 中型風向追従型風力換気装置の換気性能に関する風洞実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学II), pp.579-580, 2015
- 230) 滝澤正玄, 倉渕隆, 鳴海大典ら : 「壁対面経路に対する換気塔利用の有効性に関する評価」, 密集市街地における換気塔を利用した通風・換気促進に関する研究 第1報」, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第731号, pp.43-50, 2017
- 231) 小林知広, 甲谷寿史, 梅宮典子, 落合奈津子 : 「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) 風洞実験と換気回路網計算に基づく自然換気量評価」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第4巻, pp.209-212, 2016
- 232) 川分芳子, 小林知広, 梅宮典子, 落合奈津子 : 「中高層オフィスビルを対象とした自然換気量予測手法に関する研究 (その2) シャフト型自然換気ビルにおける風圧係数の入力方法の影響」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第4巻, pp.37-40, 2017