

我が国における建物の自然換気及び通風に関する研究の130年の歴史

130 YEAR HISTORY OF BUILDING NATURAL VENTILATION RESEARCH IN JAPAN - A NARRATIVE REVIEW

小林 知広*¹

Tomohiro KOBAYASHI

This article gives a brief history of building natural ventilation research over 130 years in Japan based on the author's perspective, aiming to provide a background for researchers in this field. The scientific research on ventilation was first seen in the 1880s and it had been studied mainly in the field of public health research until the 1920s. Many works came to be seen in the architectural engineering afterward, and it is nowadays regarded as a mature research field. The article concludes with an interpretation of the meanings and importance of the research works conducted in such a well-developed field.

Keywords: *Building Ventilation, Natural Ventilation, Cross-Ventilation, Indoor Air Quality*

建物換気, 自然換気, 通風, 室内空気質

1. はじめに: 本論文の主旨と目的

我が国の建築では古来より風通しが重視され、自然換気や通風に関わる日本の技術は諸外国と比較しても高水準と言える。学術研究についても我が国の換気分野は比較的長い歴史を有しており、当初は建物の気密性能の概念は希薄であった一方で、自然換気や通風については当学会論文集においても研究発表が戦前から多く見られる。特に戦後は学会としての組織的な活動により換気設計法等に関する知見を体系的にまとめてきた歴史的経緯がある。日本の換気研究は必要に応じて海外からの知見を導入して進化してきた面もあるが、建築工学における一分野として長きに渡り取り組まれ、国内の社会的背景や問題に対応する形で発展した歴史も有している。この点は我が国の特色の一つとも考えられ、このために建築計画とも密接に関わる自然換気や通風の研究は欧米諸国と比べても精力的に進められてきた。現在、我が国の換気研究は既に一定の成熟を見せた研究分野との認識を持たれることが少なくない¹⁾。当該分野の研究の発展に関して明治期や大正期にまで遡って紹介している文献はこれまでも複数見られるが²⁻⁴⁾、近年までの換気研究の歴史経緯を体系的にまとめた研究はあまり多くは見られない。このため、既に膨大な研究がなされてはいるものの、俯瞰的視野からの整理に欠けている面がある。したがって、現代においても残されている課題や今後新たに取り組むべき問題を見つけることが容易ではなく、当該分野の研究者の間で問題意識の共有も十分に図られているとは言い難い。そこで、本論文ではそのような比較的長い歴史を有する換気研究分野のうちの自然換気に関する研究に主眼を置き、その生い立ちを振り返る文献調査研究を行い、当該分野の発展の経緯を整理する。それにより、発展の過程で問題が認識されながらも放置されている問

題や今後新たに取り組むべき課題を明らかにすることを目的とする。これにより当該分野の研究者が分野全体を俯瞰して今後求められる研究の方針を考えるための一助となると考える。

2. 近代日本における換気研究の始まりから基本体系の成熟まで

2.1 我が国の本格的な換気研究はいつ始まったのか

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の一つと言える。例えば、衛生学者としての森林太郎は「陸軍衛生教程⁵⁾」において人体由来の「腐気」が有害であり指標としてCO₂でその室内上限度の目安を600～700 ppmと記している。また、当学会の前身である造家学会の講演⁶⁾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、法整備がなされていない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学術研究も明治期に見られ始めており、筆者の知る限り最も古いものとして、薬学者の田原良純⁷⁾や衛生学者の坪井次郎⁸⁾が大日本私立衛生会雑誌で換気量測定結果を報告している。田原⁷⁾は明治17年、換気通風分野は当時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、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。そこで基準としての室内CO₂濃度1,000 ppmを満たすためには換気量が圧倒的に不足していると示している。併せて、CO₂はそれ自身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の1,000 ppmの提唱であると述べ、その本質を正しく記している。なお、結言では換気により健康を保全することで「無限ノ活動カラ振起シ富國強兵ノ大

*¹ 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Division of Global Arch., Grad. School of Eng., Osaka Univ., Dr.Eng.

体ヲ建ツルニ至ラン」と述べられており、時代背景により掲げられる目的は異なるものの、実験内容や研究の本質が130年以上経過した現代と全く変わらない点も見て取ることができる。

坪井⁸⁾も明治19年の「日本家屋換気論」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かっていると推察されるが、当時所属した帝國大学醫科大學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、坪井自身もこの4年後に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、そして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。

2.2 大正期までの衛生学としての研究と建築学における取り組み

その他に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あまり多くはないが、建築分野では例えば日本土木会社の田中豊輔⁹⁾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⁷⁾同様学校換気的重要性を述べ、実務の立場から換気筒の計画法を紹介している。大正時代に入って6年の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。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¹⁰⁻¹⁴⁾。

雑誌「国民衛生」は、前述の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、明治期からは一歩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に招聘された藤井厚二の博士論文も同誌に掲載されており、住宅建築の改善に関する内容を広く扱っている。藤井は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¹⁵⁾。建築設備分野に目を向けると、例えば柳町政之助が大正11年に著した書籍¹⁶⁾でも必要換気量の計算法が明記されており、田原⁷⁾や坪井⁸⁾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まり定着していることがわかる。併せて室用途毎の換気回数を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。

2.3 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¹⁷⁾が「換気と涼房」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している。このため、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換気研究の知見を体系的にまとめた位置付けの出版物とは言い難い。その後昭和11年の3月には建築学会が論文集を創刊し、計画原論分野で換気研究が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、学術研究の成果が多く見られ始める。

例えば、大阪市の技師で建築家であった伊藤正文¹⁸⁻²²⁾は学校建築等の実建物を対象に実測及び実験を行って研究論文を発表しており、換気研究が時代に求められて実学として発展した面を実感することができる。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²³⁻²⁴⁾を発表し、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を発表している²⁵⁻²⁶⁾。佐藤は東京帝國大學建築科卒の経歴を有し、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國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年まで在籍し、書籍として「建築環境學²⁷⁾」を著した。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「環境衛生學²⁸⁾」で空気質と換気量の考え方も示している。両氏が在籍した頃には建築衛生は衛生学の一分野として確立しており²⁹⁾、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に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）³⁰⁾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³¹⁾は国民衛生に掲載された野村¹⁰⁾の研究を引用して温度差換気的重要性に着目し、実験室実験で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³²⁾や通風気流性状を明らかにするための風洞実験³³⁻³⁴⁾に取り組み、オフィス式による一般的な自然換気量算定式の検討も行なっている³⁵⁾。この時期には自然換気について現場実測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たが、我が国の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。勝田（高）らは第二工学部が生産技術研究所に移行した後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など基礎資料の充実に向けた検討を行っている。その一方で、戦後に増えたコンクリート造集合住宅の換気実験³⁶⁾や学校教室の換気実験も行い、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。

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行われ始めたが、昭和20年代後半からは計画原論としての体系がまとめられた書籍も多く見られ始める。時期が早いものとしては伊藤の「建築保健工学³⁷⁾」が昭和13年に出版されている。佐藤も前述の「建築環境學²⁷⁾」や「住居衛生学³⁸⁾」として原論一般の知見をまとめている。木村幸一郎も三木韶とともに「建築計畫原論³⁹⁾」を著しており、「建築学大系⁴⁰⁻⁴¹⁾」も組織的にまとめられた。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⁴²⁻⁴³⁾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には自然に思われる。また、室内CO₂濃度基準1,000 ppmについて、佐藤²⁷⁾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、換気計画にあつては常に念頭に置くべき」と述べている。木村³⁹⁾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年近くが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。しかし、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るため、近年でもまさに国内で議論が交わされており⁴⁰⁾、当該分野の研究の本質は変わっていないことも実感することができる。

2.4 戦後の換気研究の進展とその成熟

戦後の昭和20年代後半からは、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⁴⁵⁾」が出版された。当該パンフレットは、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いる。そのため、このパンフレットでは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。

発展の歴史を俯瞰すると、この時期は換気研究の歴史の中でも「研究・設計のためのパーツの整備が始められた時期」のように思われる。例えば、前述の勝田(高)らのその後の研究では、隙間換気のp-Q特性整備⁴⁶⁾や換気計画のための市街地建物群の風圧係数資料の整備⁴⁷⁾、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なども行われている。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や大陸科学院建築研究室に在勤した前田敏男は、昭和25年に助教として京都大学に着任し、以降自然換気や室内気流に関わる研究も行なっている⁴⁸⁻⁴⁹⁾。塘⁵⁰⁾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なっている。勝田(千)・関根ら⁵¹⁻⁵⁴⁾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。京都工芸繊維大学の石原正雄も同時期に室内通風気流解明⁵⁵⁾やベンチレーター、越屋根等の自然換気装置の換気特性⁵⁶⁻⁵⁸⁾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⁵⁹⁻⁶⁰⁾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⁶¹⁾、石原⁶²⁾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ている。

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⁶³⁾。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⁶⁴⁾」が発刊されており、Q&Aにとどめられた昭和32年のパンフレット⁴⁵⁾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。後年佐藤⁶⁵⁾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の内容はこの頃にほぼ完成したと思われる。さらに、石原は昭和44年に「建築換気設計⁶⁶⁾」を著して換気に関する知見をまとめている。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. 現代の各論としての換気研究の発展

3.1 住宅の換気性能に関する研究

前述の昭和40年代以降は換気量測定法や換気計算の手法に焦点を当てた研究も行われ、その後は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⁶⁷⁻⁷³⁾。自然換気に関する研究も、野村・村上・勝田(高)ら⁷³⁻⁷⁵⁾をはじめ継続的に行われている。そのような背景の中、石油危機が発生して昭和50年代には省エネルギーをキーワードとした通風研究⁷⁶⁾が見られ始め、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行われてきたことがわかる。また、この時期から建物の気密化が急速に進んだことから、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の研究も見られるようになった。中でも、住宅については気密性能に関する本格的な調査研究⁷⁷⁾や換気設備に着目した研究⁷⁸⁾が精力的に行われるようになった。以降の住宅を対象とした換気研究では、自然換気量のみでの評価に止まらず気密性能と換気設備が密接に関わることを深く認識した上で実際の住宅での定量的な評価が多く行われている⁷⁹⁻⁸⁸⁾。この点、昭和40年代から進歩して研究の手法や取り扱う範囲が広がったことで、より現実的な応用研究が可能になったことがわかる。昭和初期からの通風研究に詳しい吉野⁸⁹⁾のレビューからも、昭和50年代中頃以降は住宅を対象とした自然換気研究が増加して活発に研究が行われていることがわかる。住宅の自然換気及び通風に関連する研究は近年でも精力的に行われており、通風性能の評価指標及び資料の検討も行われている。例えば赤林ら⁹⁰⁻⁹¹⁾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しており、住宅の通風を対象とした有用な技術資料を提供している。

3.2 数値流体力学の導入と発展

体系を駆使した換気研究が行われ始めた昭和50年頃には、様々な換気通風研究が行われる一方で、東京大学では野村・松尾・貝塚・坂本ら⁹²⁾による室内気流を対象とした数値流体力学(CFD)への本格的な取り組みが見られた。ここではLaunder・Spalding⁹³⁻⁹⁴⁾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。乱流のモデリングを含む数値計算である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⁹⁵⁻⁹⁶⁾が見られる。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でも利用が見られはじめ⁹⁷⁻⁹⁸⁾、以降事例研究でのCFD利用例は枚挙に暇がない。CFDではより詳細な性状が得られるため、その発展は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現代では実務での利用も一般的な時代となっている⁹⁹⁾。

3.3 換気効率指標の提案とその発展

換気効率指標に関する研究に目を向けると、古くは昭和20年代に佐藤^{26, 29)}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Sandberg¹⁰⁰⁻¹⁰²⁾がAge(空気齢)の概念が提唱して以降、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、これが前述の室内三次元乱流解析が行われるようになった時期と重なっている。そのような背景の中、村上・加藤によるCFD利用を前提とした新たな換気効率指標としてのSVE1～SVE3¹⁰³⁻¹⁰⁴⁾の提案が見られた。さらに小林・加藤・村上はSVE4～SVE6¹⁰⁵⁾も提唱し、これが温熱環境形成の指標であるCRI¹⁰⁶⁾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^{99, 107)}が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、その後も伊藤・加藤・村上¹⁰⁸⁻¹⁰⁹⁾がVisitation Frequencyを定義した上でLocal Purging Flow Rateの評価を行っており、近年ではLim・伊藤・Sandbergら¹¹⁰⁻¹¹²⁾によりNet Escape Velocityが提案されている。

3.4 非住宅建築物を対象とした自然換気研究の発展

前述の通り、昭和50年代頃からは住宅を対象に実用的な換気研究が精力的に行われたが、2000年代前半頃からはオフィス等の非住宅建築物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¹¹³⁻¹¹⁴⁾。この時期からは大規模非住宅建築物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¹¹⁵⁻¹²²⁾が多く見られようになった。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¹²³⁻¹²⁸⁾。高層の非住宅建築物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¹⁰⁷⁾、国外へ向けた情報発信も行われている¹²⁹⁾。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 Model¹³⁰⁻¹³¹⁾の概念は現在ASHRAE Standard 55¹³²⁾に組み込まれている。当該モデルは住宅/非住宅を問わず換気設計の立場から応用の可能性があり、自然換気に関する研究の中で当該モデルを扱う研究の例¹³³⁾が今後増えてさらに進展する可能性も期待される。

3.5 通風量の予測モデルと通風気流の詳細解析

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てきた歴史もあり、通風気流の解明や通風モデルの研究も多い。通風時の自然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¹³⁴⁾、その予測については石原⁶⁶⁾が干渉係数としての整理の概念を示し、甲谷・山中¹³⁵⁾は当該係数を流入風向でも整備し、風向予測を含めた自然換気量予測手法を提案している。加藤ら¹³⁶⁻¹³⁷⁾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、通風時には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¹³⁸⁾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、倉瀬ら¹³⁹⁻¹⁴⁰⁾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の整備を行い、一連の研究として継続している¹⁴¹⁻¹⁴⁴⁾。なお、通風モデルに関する研究は甲谷のレビューにも詳しい¹⁴⁵⁾。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自然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¹⁴⁶⁻¹⁴⁸⁾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ら¹⁴⁹⁾や河野・加藤ら¹⁵⁰⁾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等では起こり得るが、その換気量予測手法についてはいまだ知見が不足しており、換気計算理論としては欠落した箇所と言え、基礎研究として取り組むべき課題が残っている。

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複雑である。そのため、現象の理解のためには高度な研究を必要とし、通風量予測モデルの研究と並行して風洞実験やCFDを駆使して詳細を解明するための検討が継続的に行われている¹⁵¹⁻¹⁶⁰⁾。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、古くは佐藤²⁴⁾、その後石原⁵⁶⁻⁵⁸⁾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たが、近年では鳴海ら¹⁶¹⁾や筆者ら¹⁶²⁻¹⁶⁴⁾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¹⁶⁵⁻¹⁶⁷⁾や換気塔¹⁶⁸⁾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。

4. まとめ：換気研究の歴史を振り返り、整理した上での今後の課題

我が国の自然換気に関する研究は明治期の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、その後建築学での取り組みが見られ始めた。昭和10年頃からは建築学の中で計画原論の一部として本格的に研究が行われ、戦後には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。その後も測定・計算技術や評価の方法論が発展したことで、研究は飛躍的に高度化したと言える。一定の成熟を見せた当該分野で行われてきた研究の位置づけや意義には、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既存の手法の向上など、研究における評価の質を向上させるための研究
- ・各種規準・指針整備のための基礎的検討
- ・設計への応用など実学を意図した技術資料の整備と充実
- ・設計上の新たな工夫と事例研究としての知見の蓄積
- ・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
- ・隣接する学問分野の知見や技術を導入・応用する研究

このように長い歴史の中で様々な面での研究の発展が見られる中、本論文で整理を行うことであらためて確認した当該分野の具体的な課題点を、歴史の中での認識とともに以下にまとめて示す。

- ・CO₂濃度1000ppmはPettenkoferを起源として約160年の長きに渡り慣例的に用いられている。我が国の文献では130年以上前より対象は人体由来と明記され⁷⁾、70年ほど前も他に適当な指標がないた

めと指摘されている³⁹⁾。近年 pure CO₂ の影響に着目する研究が世界的には見られるものの、日本では継続して同基準を法的に用いている。この点は現在再び議論の必要性が広く認識され始めている段階であり⁴⁴⁾、当該分野に残されている大きな課題の一つと言える。

・換気効率評価は昭和 20 年代から概念としては提唱され^{26, 29)}、同 50 年代の空気齢¹⁰⁰⁻¹⁰²⁾ で認識が広まり、数値計算利用を前提とすることで多くの有益な指標が提案された^{103-106, 108-112)}。しかしながら現時点で実学レベルで広く定着している指標は空気齢まで^{99, 107)} と言え、それ以外の換気効率指標の実務レベルでの有効性を示す継続的な検討の研究は今後大きな可能性を有すると思われる。

・換気設計分野では、高層非住宅建築物の自然換気設計のニーズが高まり、導入例・研究例が増えて知見が蓄積されているが¹⁰⁷⁾、設計法は確立されておらず分野として欠落している。換気設計パンフレット^{45, 64)} がまとめられた際に存在し得なかったニーズであることも理由の一つと考えられ、現代の研究者が体系的にまとめる必要のある課題と言える。また、自然換気特有の快適性を考慮した自然換気設計法も今後大いに可能性を秘めていると考えられる。

・多数室換気計算法は昭和 30 年代のめざましい進歩が見られて以降、オフィスを式と風圧係数に基づいて回路網モデルを解く手法が一般的となり、実学への応用でも気象データと風圧係数は時間平均値を入力する手法が常識的である。しかし外部風変動を無視した換気回路網計算は当時の技術的な「落とし所」であり、LES による大規模解析が屋外分野で一般に行われる現在、換気研究においてさらに精密な計算を目指した研究の実施も当該分野の課題と言える。

・換気力学においては、風圧を用いて通気量を予測する考え方は大正時代から示されており¹⁰⁾、現在でもオフィス式が換気回路網計算等の基礎式として用いられる。しかし、この式もモデルに過ぎず、より実現に近い予測手法の提案はなされてはいるが^{135, 136, 139)}、広く一般に用いられることのできる換気量の簡易予測式は完成されたとは言えないため、確立に向けた取り組みの学術的意義が大きい。

当該分野では約 50 年前までに完成した換気研究の体系を駆使して研究を進めることが多い。上記のような課題が残されているのは、体系の中でも「当時技術的にやむなく採用された落とし所」のような手法を踏襲していることも一つの要因とも考えられる。つまり、本論文であげられなかったものも含めて「囚われる必要のない常識」や「やむなく用いてきた慣例的手法」は当該分野に多く存在していると考えられ、今後それらから脱却して新たな研究の展開へと進むことができる可能性は大きいと考える。当該分野の研究者がそのような課題をさらに発見するためには、現在用いられている種々の手法が提案されて常識化した経緯を把握することは重要との考えから、本研究がその一助となることを願い、これを論文の結びとしたい。

なお、本論文の内容は国内研究発表会^{169, 170)}にて既に発表している。

参考文献

- 1) Ito, K. : Breakthrough of Ventilation Research in Architectural Environmental Engineering Field, *Proc. of the 25th AIJ Air Symposium*, pp.1-2, 2016.8 (In Japanese)
- 2) Subcommittee on technological history of environmental eng. (Chapter 2 by Sekine, T.): *Kankyokougaku gijutushi syouiinkai houkoku* (Report of subcommittee on technological history of environmental eng.), *J. Archi. Build. Science*, Vol.99, No.1227, pp.44-45, 1984.11 (In Japanese)

環境工学技術史小委員会 (第 2 章, 関根孝): 環境工学技術史小委員会報告, 建築雑誌, Vol. 99, No.1227, pp.44-45, 1984.11

- 3) Horikoshi, T., Horikoshi, H. : The theory and design of bioclimatic architecture developed by Koji Fujii, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.386, pp.38-42, 1988.4 (In Japanese)
- 堀越哲夫, 堀越英嗣: 藤井厚二の体感温度を考慮した建築気候設計の理論と住宅デザイン, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 386 号, pp.38-42, 1988.4
- 4) Edited by SHASE (Chapter 2.1, Komine, H.): *Kuukichouwa eiseisetsubi gijutsushi* (History of HVAC and sanitary technology), pp.13-21, Maruzen, 1991 (In Japanese)
- 空気調和・衛生工学会編 (2.1, 小峯裕己): 空気調和・衛生設備技術史, pp.13-21, 丸善, 1991.
- 5) Mori, R. : Rikugun eisei kyoutei (A hygiene course of the army), The army surgeon school, 1889 (In Japanese)
- 森林太郎: 陸軍衛生教程, 陸軍々醫學校, 1889
- 6) Mori, R. : Zoukaeiseino youshi (A summary of building hygiene), *J. Archi. Build. Science*, Vol.7, No.76, pp.115-122, 1893.4 (In Japanese)
- 森林太郎: 造家衛生の要旨, 建築雑誌, 第 7 輯, 76 號, pp.115-122, 1893.4
- 7) Tahara, Y. : Tokyofuka shougakkou kuukishikensetsu (Aerial experiment in a primary school in Tokyo), *Dainihon Shiritsu Eiseikai Zasshi*, Vol. 16, pp.1-14, 1884.9 (In Japanese)
- 田原良純: 東京府下小学校空気試験説, 大日本私立衛生會雑誌, 第 16 號, pp.1-14, 1884.9
- 8) Tsuboi, J. : Nihonkaoku kankiron (Ventilation in Japanese buildings), *Dainihon Shiritsu Eiseikai Zasshi*, Vol. 41, pp.61-75, 1886.10 (In Japanese)
- 坪井次郎: 日本家屋換気論, 大日本私立衛生會雑誌, 第 41 號, pp.61-75, 1886.10
- 9) Tanaka, H. : Shougakkou kankihou no ippan (An example of Ventilation Strategies of Elementary School), *J. Archi. Build. Science*, Vol.6, No.66, pp.157-169, 1892.6 (In Japanese)
- 田中豊輔: 小学校換気法の一斑, 建築雑誌, 第 6 輯, 第 66 號, pp.157-169, 1892.6
- 10) Nomura, H. : Kaokuno shizenkankini oyobosu kiriyuno eikyouni tsuite (Effect of airflow on natural ventilation), *The National Hygiene*, Vol.1, No.5, pp.1-13, 1924.1 (In Japanese)
- 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, 國民衛生, 第 1 卷, 第 5 號, pp.1-13, 1924.1
- 11) Nomura, H. : Kaokuno shizenkankini oyobosu kakusangensyouno kenkyu (Effect of diffusion on natural ventilation), *The National Hygiene*, Vol.1, No.6, pp.21-29, 1924.2 (In Japanese)
- 野村仁: 家屋ノ自然換氣ニ及ボス擴散現象ノ研究 第一篇, 國民衛生, 第 1 卷, 第 6 號, pp.21-29, 1924.2
- 12) Otani, S. : Nihonkaokuno shizenkankini kansuru sougouteki kenkyu (Natural ventilation in Japanese buildings), *The National Hygiene*, Vol.5, No.11, pp.1-13, 1928.11 (In Japanese)
- 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, pp.1-13, 1928.11
- 13) Morita, K. : Kuukichu Tansangasuno Shinteiryouchou (A new technique for CO₂ measurement), *The National Hygiene*, Vol.1, No.6, pp.1-9, 1924.2 (In Japanese)
- 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, pp.1-9, 1924.2
- 14) Ooi, Y. : Shitsunaigaino onsani motodoku shizenkankiryouno sokutei (Natural ventilation rate caused by indoor/outdoor temperature difference), *The National Hygiene*, Vol.3, No.9, pp.1-20, 1926.5
- 大井好成: 室内外ノ温差ニ基ク自然換氣量ノ測定, 國民衛生, 第 3 卷, 第 9 號, pp.1-20, 1926.5
- 15) Fujii, K. : Wagakunino Juutakukenchikuno Kaizeni Kansuru Kenkyu (On the improvement of Residential Buildings in Japan), *The National Hygiene*, Vol.4, No.4, pp.137-148, 1926.12 (In Japanese)
- 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, 1926.12
- 16) Yanagimachi, S. : Danbou to kanki (Heating and ventilation), *Dainihonkougyoukai*, 1921 (In Japanese)
- 柳町政之助: 煖房と換氣 - 後編, 大日本工業學會, 1921
- 17) Sekito, K. : Kanki to ryoubou (Ventilation and cooling), *AIJ Pamphlets*, Vol.3, No.7, 1930 (In Japanese)
- 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
- 18) Ito, M. : Efficiency of the Ventilating Duct in School-room constructed with Reinforced Concrete, *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.3, pp.58-65, 1936.10 (In Japanese)
- 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氣量に就て, 建築學會論文集, 第 3 號, pp.58-65, 1936.10
- 19) Ito, M. : Model Studies of Aeration in the School-room, *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.3, pp.66-75, 1936.10 (In Japanese)
- 伊藤正文: 教室内氣流の模型實驗, 建築學會論文集, 第 3 號, pp.66-75, 1936.10
- 20) Ito, M. : The Amount of Dust Variously settled under the School-room Aeration System,

- Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.9, pp.261-270, 1938.4 (In Japanese)
伊藤正文：教室内の積塵量と通気機構に依るその分布変化：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, 1938.4
- 21) Ito, M. : Model Studies of Hopper Aeration system, *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.11, pp.24-30, 1938.11 (In Japanese)
伊藤正文：Hopper 通気徑路に関する實驗的吟味：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, 1938.11
- 22) Ito, M., Kaziwara, S. : A Model Study for the Aeration Systems of Industrial Building, *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.17, pp.94-102, 1940.4 (In Japanese)
伊藤正文，梶原三郎：工場の換気機構に関する模型實驗，建築學會論文集 第17號，pp.94-102, 1940.4
- 23) Sato, A. : On the Air Circuit through Two Openings on the Same Side for Wind Direction, *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.5, pp.241-251, 1937.3 (In Japanese)
佐藤鑑：風向に對し同一側の二開口部による換気輪道に就て，建築學會論文集 第5號，pp.241-250, 1937.3
- 24) Sato, A. : Comparative Experiments of the Common Monitor with the Screen Monitor, *Trans. of the Institute of Japanese Architects*, No.13, pp.360-269, 1939.4 (In Japanese)
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気の比較試驗，建築學會論文集 第13號，pp.360-369, 1939.4
- 25) Sato, A. : A Study on the Amount of Air Naturally Exhausted by Industrial Buildings, *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.21, pp.85-93, 1941.4 (In Japanese)
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, 1941.4
- 26) Sato, A. : Ventilation Effects due to Various Types of Air Circuits (Section 2), *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.32-35, pp.31-35, 1947.6 (In Japanese)
佐藤鑑：通気徑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號，pp.31-35, 1947.6
- 27) Sato, A. : Kenchikukankyougaku (Built Environment), Kigensya, 1948 (In Japanese)
佐藤鑑：建築環境學，紀元社，1948
- 28) Ishikawa, T. : Kankyouseigaku (Environmental Hygiene), Tohodo, 1942 (In Japanese)
石川知福：環境衛生學，吐鳳堂，1942
- 29) Edited by Koya, Y. : Koushuueiseigaku (Public Health), Vol.2, Nippon-Rinsho, 1948 (In Japanese)
古屋芳雄編：公衆衛生學，第2輯，日本臨牀社，1948
- 30) Katsuta, C. : Experimental Study on the Natural Ventilation by Wind, *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.5, pp.261-270, 1937.3 (In Japanese)
勝田千利：通風に関する實驗的研究，建築學會論文集，第5號，pp.261-270, 1937.3
- 31) Hirayama, T. and Tomo, I. : Quantities fo Natural Ventilation due to Temperature Difference Between Inside and Outside of a Room (Report 1), *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.28, pp.51-57, 1943.2 (In Japanese)
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號，pp.51-57, 1943.2
- 32) Shoda, T. : An Experimental Study on the Natural Ventilation of a Small Room (1st Report), *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No.28, pp.63-69, 1943.2 (In Japanese)
勝田高司：自然換氣に関する實驗的研究（第1報告），建築學會論文集，第28號，pp.63-69, 1943.2
- 33) Watanabe, K., Shoda T. : On the Horizontal Air Current in Typical Southern Houses, *Transactions of the Institute of Japanese Architects*, No. 31, pp.145-153, 1944.4 (In Japanese)
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號，pp.145-153, 1944.4
- 34) Watanabe, K., Shoda, T. : State of Air Flow Through Tropical Houses of Different Sections (Section 2), *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.32-35, pp.43-46, 1947.6 (In Japanese)
渡邊要，勝田高司：南方住居の斷面型と通風徑路（第2部），日本建築學會論文集 第32～35號，pp.43-46, 1947.6
- 35) Shoda, T. : On The Calculation of National Ventilation, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.38, pp.100-102, 1949.4 (In Japanese)
勝田高司：自然換氣量算定式について，日本建築學會論文集 第38號，pp.100-102, 1949.4
- 36) Shoda, T., Fujii, S. and Konno, K. : Experimental Study on Theoretically Derived Formula for Natural Ventilation, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.47, pp.75-84, 1953.12 (In Japanese)
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號，pp.75-84, 1953.12
- 37) Ito, M. : Kenchiku hoken kougaku (Building Health Engineering), Kougyoutosyo Kabushikigaisya, 1938 (In Japanese)
伊藤正文：建築保健工學，工業圖書株式會社，1938
- 38) Sato, A. Juukyo eiseigaku (Residential Hygiene), Sekibundo, 1957 (In Japanese)
佐藤鑑：住居衛生學，續文堂出版，1957
- 39) Kimura, K. Miki, A : Kenchiku keikaku Genron (Science of Architectural Planning), Kyoritsu Shuppan, 1949 (In Japanese)
木村幸一郎，三木韶：建築計畫原論，共立出版，1949
- 40) Nimura, T., Ogiso, S., Kojima, T. et al. : Kenchikugaku taikei 8 (A series on architectural Engineering 8), Shokokusha, 1955 (In Japanese)
二村忠元，小木曾定彰，小島武男，ほか3名：建築学大系 8, 彰国社，1955
- 41) Hirayama, T., Ogiso, S., Watanabe, K., et al. : Kenchikugaku taikei 22 (A series on Architectural Engineering 22), Shokokusha, 1957 (In Japanese)
平山嵩，小木曾定彰，渡邊要，ほか2名：建築学大系 22, 彰国社，1957
- 42) Hirayama, T. : Kenchikusekkei riron (Architectural Design Theory), Kagaku seisaku kyokai, 1948 (In Japanese)
平山嵩：建築設計理論，科學政策協會，1948
- 43) Watanabe, K. : Kenchiku keikaku genron (Science of Architectural Planning), Maruzen, 1951 (In Japanese)
渡邊要：建築計畫原論，丸善，1951
- 44) Yamanaka, T. : History and Future of Indoor CO₂ Standard, *Proc. of the 24th AIJ Air Symposium*, pp.17-20, 2015.9 (In Japanese)
山中俊夫：二酸化炭素濃度の基準のあり方，2015年日本建築学会 第24回 空気のシンポジウム，pp.17-20, 2015.9
- 45) Edited by AIJ Architectural Design Planning Standard Committee : *AIJ Design Planning Pamphlets*, No.3, AIJ, 1957 (In Japanese)
日本建築学会建築設計々面規準委員會編：日本建築学会設計計画パンフレット3，日本建築学会，1957
- 46) Shoda, T., Goto, S., Terasawa T. : The Amout of Ventilation through Craks Around Steel Sashes, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.57, pp.205-208, 1957.7 (In Japanese)
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氣量，日本建築学会論文報告集 第57号，pp.205-208, 1957.7
- 47) Shoda, T., Goto, S. : Effects of Exposure on Ventilation of Buildings, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.53, pp.80-87, 1956.7 (In Japanese)
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, 1956.7
- 48) Maeda, T. : Juuryokukankino Kenkyu 1- Kanjoutou nituite (on the buoyancy induced ventilation, A loop of duct), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of AIJ*, No.15, pp.175-178, 1951.11 (In Japanese)
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號，pp.175-178, 1951.11
- 49) Maeda, T. and Maekawa, J. : Shitsunaidanboukiryuni kansuru jikken (Experiment on indoor airflow of heating), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of AIJ*, No.17, pp.410-413, 1952.3 (In Japanese)
前田敏男，前川純一：室内暖房氣流に関する實驗，日本建築學會研究報告 第17號，pp.410-413, 1952.3
- 50) Tomo, I. : Kaikouritsuno Kaikoutsufuuryouni oyobosu eikyouni tuite (Effect of porosity on cross-ventilation rate), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of AIJ*, No.24, pp.299-300, 1953.10 (In Japanese)
塘一郎：開口率の開口通風量に及ぼす影響について，日本建築學會研究報告 第24號，pp.299-300, 1953.10
- 51) Katsuta, C. and Sekine, T. : An Experimental Study of the Influence of a Highstoried Building upon the Dranght Force in the neighbourhood of the Ventilator or Chimney, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 57, pp.193-196, 1957.7 (In Japanese)
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氣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, 1957.7
- 52) Katsuta, C., Sekine, T. : The Calculatin Method and the Experimental Study for Ventilator 2, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 67, pp.83-89, 1961.2 (In Japanese)
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, 1961.2
- 53) Katsuta, C., Sekine, T. : Experimental Study on Ventilation by the Roof Monitor, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 68, pp.121-127, 1961.6 (In Japanese)
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, 121-127, 1961.6
- 54) Katsuta, C., Sekine T. : Experimental Study on Ventilation by the Opening of Wall Surface, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 68, pp.116-120, 1961.6 (In Japanese)
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), 日本建築学会論文報告集, 第 68 号, 116-120, 1961.6
- 55) Ishihara, M. : Air Distribution in Rooms by Natural Wind, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 54, pp.489-492, 1956.9 (In Japanese)
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, 1956.9
- 56) Ishihara, M., Awazu S. : Performance Testing of Roof Ventilators, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 60, pp.137-140, 1958.10 (In Japanese)
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, 1958.10
- 57) Ishihara, M. : Ventilation Characteristics of the Monitor Roof, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 65, pp.66-72, 1960.6 (In Japanese)
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, 1960.6
- 58) Ishihara, M. : Basic Performance of Nature Ventilators, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 69, pp.121-124, 1961.10 (In Japanese)
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, 1961.10
- 59) Cross, H. : Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors, *University of Illinois Bulletin*, No.22, Bulletin No. 286, 1936.
- 60) Hiramatsu, Y. : Kounaisuukino rironto keisan (Underground Mine Ventilation - Theory and Calculation), Maruzen, 1953 (In Japanese)
平松良雄: 坑内通風の理論と計算, 丸善, 1953
- 61) Maeda, T. : Tasuushitsuno kankikeisanhou (Flow Rate Estimation Method for Multiple rooms), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of AIJ*, No.57, Kinki branch, pp.57-60, 1961.4 (In Japanese)
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, 1961.4
- 62) Ishihara, M. : Cross-hou no ouyouniyoru tasuushitsuno kankikeisan (Flow Rate Estimation for Multiple Rooms by Cross Method), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of AIJ*, No.57, Kinki branch, pp.61-64, 1961.4 (In Japanese)
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
- 63) Sato, A. : Shitsunai kankikeisanitsuite (on the Calculation for Indoor Ventilation), *J. Archi. Build. Science*, Vol.75, No.892, pp.688-689, 1960.12 (In Japanese)
佐藤謙: 室内換気計算について, 建築雑誌, 第 75 卷, 第 892 号, pp.688-689, 1960.12
- 64) Edited by AIJ Architectural Environmental Engineering Committee : *AIJ Design Planning Pamphlets*, No.18, Shokokusha, 1965 (In Japanese)
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, 彰国社, 1965
- 65) Sato, A. : Kuukito kenchikukankyou (Air and Built Environment), *J. Archi. Build. Science*, Vol.96, No.1185, pp.3-5, 1981.10 (In Japanese)
佐藤謙: 空気と建築環境, 建築雑誌, Vol. 96, No.1185, 1981.10
- 66) Ishihara, M. : Kenchikukankisekkei (Building Ventilation Design), Asakura Shoten, 1969 (In Japanese)
石原正雄: 建築換気設計, 朝倉書店, 1969
- 67) Ishihara, M., Nishioka, T. : Helium gas niyoru kankiryosokuteini kansuru kenkyu (Flow Rate Measurement by Helium Gas), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, Planning, pp.103-104, 1968.10 (In Japanese)
石原正雄, 西岡利児: ヘリウムガスによる換気量測定に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp.103-104, 1968.10
- 68) Iyoda, A., Honma, H. : CO₂ renzokuhasseiniyoru kankiryosokuteihou nituite (Measurement of ventilation Rate by CO₂ constant emission), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, Planning, pp.35-36, 1970.9 (In Japanese)
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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp.35-36, 1970.9
- 69) Sasaki, T., Aratani, N. : A measuring method of ventilation-routes and quantities in the multi-room building, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 333, pp.84-91, 1983.11 (In Japanese)
佐々木隆, 荒谷登: 多室空間の換気経路測定法に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 333 号, pp.84-91, 1983.11
- 70) Hayakawa, S. : Kankikeisan program to sonotekiyourei (Calculation program for ventilation and its application), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, Planning, pp.155-156, 1973.10 (In Japanese)
早川真: 換気計算プログラムとその適用例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp.155-156, 1973.10
- 71) Okuyama, H. : Theoretical study on the thermal network model in buildings, Doctorate thesis in Waseda University, 1987.12 (In Japanese)
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, 1987.12
- 72) Ishida, K., Kamata, M. Chida, Y. et al. : A simplified calculation method of the house infiltration rates with the building air tightness, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.438, pp.23-31, 1992.8 (In Japanese)
石田健一, 鎌田元康, 千田善孝, ほか 2 名: 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, 1992.8
- 73) Nitta, K., : Study on the variety of theoretical solutions of ventilation network, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.480, pp.31-38, 1996.2 (In Japanese)
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, 1996.2
- 74) Nomura, T., Muramoto, I. et al. : Study on the Ventilation in School Rooms, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, p.531, 1967.10 (In Japanese)
野村豪, 村本至, ほか 2 名: 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, 1967.10
- 75) Murakami, S., Shoda, T. et al. : Fuuryokukankinikansuru Kenkyu 1 (on the wind-induced ventilation Part 1), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of AIJ*, Planning, pp.201-208, 1969.11 (In Japanese)
村上周三, 勝田高司, ほか 2 名: 風力換気に関する研究 その 1, 日本建築学会学術研究発表会梗概集, 計画系, pp.201-208, 1969.11
- 76) Chatani, M., Kodama Y., Takada, N. : Kenchikukeikakuniokeru Ecologicalnagijutsu nokenkyu (Ecological technique in architectural engineering), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, Planning, pp.857-858, 1975.10 (In Japanese)
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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp.857-858, 1975.10
- 77) Murakami, S. Yoshino, H. : Investigation of air-tightness of houses, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.325, pp.104-115, 1983.3 (In Japanese)
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, 1983.3
- 78) Yoshino, H., Shoda, T., Murakami, S. : Study on ventilating equipment in multi-family housing part 1, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.306, pp.81-91, 1981.8 (In Japanese)
吉野博, 勝田高司, 村上周三: 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, 1981.8
- 79) Akabayashi, S. Murakami, S., Kato, S. et al. : Experimental Study on Natural Ventilation of Dwellings Part 1, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, Planning, pp.455-456, 1983.9 (In Japanese)
赤林伸一, 村上周三, 加藤信介, ほか 2 名: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, 455-456, 1983.9
- 80) Yoshino, H., Nagatomo, S., Matsumoto, H. et al. : Verification of calculation methods of air infiltration for a detached wooden house : In the case of a single-room model, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.412, pp.19-29, 1990.6 (In Japanese)
吉野博, 長友宗重, 松本博, ほか 2 名: 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 - 間仕切扉を開放して単室とした場合, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 412 号, pp.19-29, 1990.6
- 81) Akabayashi, S., Murakami, S. et al. : Experimental study on natural ventilation of detached House Part 1, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.456, pp.9-16, 1994.2 (In Japanese)
赤林伸一, 村上周三, ほか 2 名: 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, 1994.2
- 82) Akabayashi, S., Mizutani, K. et al. : Experimental study on natural ventilation of detached House Part 2, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.464, pp.47-56, 1994.10 (In Japanese)
赤林伸一, 水谷国男, ほか3名: 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, 1994.10
- 83) Sakaguchi, J., Akabayashi, S. : Study on ventilation system of house Part 1, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.488, pp.35-42, 1996.10 (In Japanese)
坂口淳, 赤林伸一: 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, 1996.10
- 84) Akabayashi, S., Sakaguchi, J. : Study on ventilation system of house Part 2, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.512, pp.33-37, 1998.10 (In Japanese)
赤林伸一, 坂口淳: 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, 1998.10
- 85) Yoshino, H., Kobayashi, H. et al. : Evaluation of ventilation system performance by age of air using a test house, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.502, pp.37-42, 1997.12 (In Japanese)
吉野博, 小林仁, ほか2名: 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, 1997.12
- 86) Kurabuchi, T., Arashiguchi, A., Imano, M. et al. : Evaluation of Fulfilled Level of Ventilation Rate Requirement on Constantly Ventilated Apartment Houses Based on Frequency of Wind Pressure Acting on External Wall of Building Part 1, *Trans. of SHASE*, No.83, pp.53-63, 2001.10 (In Japanese)
倉淵隆, 嵐口晃宏, 今野雅, ほか3名: 風圧力発生頻度に基づく常時換気システムの設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, 空気調和・衛生工学会論文集, No.83, pp.53-63, 2001.10
- 87) Yoshino, H., Liu, J. et al. : Study on the performance evaluation of hybrid ventilation system for a detached house Part 1, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.566, pp.57-64, 2003.4 (In Japanese)
吉野博, 劉京, ほか2名: 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, 2003.4
- 88) Kurabuchi, T., Toriumi, Y. et al. : Study on the Performance Evaluation of Various Ventilation Systems in Consideration of Outdoor Environment of Building and Building Air-tightness Part 1, *Trans. of SHASE*, No.117, pp.1-10, 2006.12 (In Japanese)
倉淵隆, 鳥海吉弘, ほか4名: 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, 空気調和・衛生工学会論文集, No.117, pp.1-10, 2006.12
- 89) Yoshino, H. : Syushisetsumei (Purpose of the Symposium), *Proc. of the 1st AIJ Air Symposium*, pp.1-2, 1990.11 (In Japanese)
吉野博: 第1回 空気シンポジウム 趣旨説明, 日本建築学会第1回空気シンポジウム, pp.1-2, 1990.11
- 90) Akabayashi, S., Sakaguchi, J., et al. : Evaluation of cross ventilation performance of the detached house with cross ventilation degree hours of inside area, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.73, No.633, pp.1261-1266, 2008.11 (In Japanese)
赤林伸一, 坂口淳, ほか3名: 室内気流分布を考慮した通風性能評価に関する研究 -室内通風デグリーア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, 2008.11
- 91) Arinami, Y., Akabayashi, S., Oshima, T., Sakaguchi, J. : Study on the evaluation of cross ventilation performance of detached house by effective air change rate and effective opening area of windows ratio, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.78, No.685, pp.277-284, 2013.3 (In Japanese)
有波裕貴, 赤林伸一, 大嶋拓也, 坂口淳: 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, 2013.3
- 92) Nomura, T., Matsuo, Y., Kaizuka, M., Sakamoto, Y., Endo, K. : Numerical study of room air distribution 3, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.238, pp.59-67, 1975.12 (In Japanese)
野村豪, 松尾陽, 貝塚正光, 坂本雄三, 遠藤清導: 室内空気分布の数値解法に関する研究・3, 日本建築学会論文報告集, 第238号, pp.59-67, 1975.12
- 93) Launder, B. E. and Spalding, D. B. : *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, 1972.
- 94) Launder, B. E. and Spalding, D. B.: The numerical computation of turbulent flows, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 3, pp.269-289, 1974
- 95) Nomura, T., Matsuo, Y. et al. : Numerical solution and wind tunnel experiment of turbulent flow : on air distribution and gas diffusion around a building, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.252, pp.57-63, 1977.2 (In Japanese)
野村豪, 松尾陽, ほか5名: 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, 1977.2
- 96) Nomura, T., Matsuo, Y., Kato, S. : Study on Prediction Method of Room Air Distribution Using Numerical Analysis 1, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No.292, pp.61-72, 1980.6 (In Japanese)
野村豪, 松尾陽, 加藤信介: 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, 1980.6
- 97) Murakami, S., Kato, S., et al. : Study on Air Velocity Distribution in Conventional Flow Type Clean Room Part 1, *Trans. of SHASE*, No.37, pp.37-48, 1988.6 (In Japanese)
村上周三, 加藤信介, ほか1名: 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, 空気調和・衛生工学会論文集, No.37, pp.37-48, 1988.6
- 98) Murakami, S., Yoshino, H., et al. : Ventilating Performance of Vertical Exhaust Duct in a Multi-story House : Model Experiment and Computer Simulation for Pressure Distribution through the Exhaust Duct, *Trans. of SHASE*, No.42, pp.37-47, 1990.2 (In Japanese)
村上周三, 吉野博, ほか3名: 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, 1990.2
- 99) Edited by SHASE, *Guidebook of Computational Fluid Dynamics*, Ohmsha, 2017 (In Japanese)
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, オーム社, 2017
- 100) Sandberg, M. : What is ventilation efficiency?, *Building and Environment*, Vol. 16, Issue.2, pp.123-135, 1981
- 101) Sandberg, M. and Sjöberg, M. : The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, *Building and Environment*, Vol. 18, Issue 4, pp.181-197, 1983
- 102) Etheridge, D. and Sandberg, M. : *Building Ventilation - Theory and Measurement*, Wiley, 1996
- 103) Murakami, S., Kato, S. : New Scales for Ventilation Efficiency and Calculation Method by Means of 3-Dimensional Numerical Simulation for Turbulent Flow : Study on Evaluation of Ventilation Efficiency in Room, *Trans. of SHASE*, No.32, pp.91-102, 1986.10 (In Japanese)
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, pp.91-102, 1986.10
- 104) Kato S., Murakami S. : New ventilation efficiency scales based on simulations, *ASHRAE Transactions*, Vol. 94, No. 2, pp. 309-330, 1988
- 105) Kobayashi, H., Kato, S., Murakami, S. : Scales for Evaluating Ventilation Efficiency as Affected by Supply and Exhaust Openings Based on Spatial Distribution of Contaminant by Means of Numerical Simulation, *Trans. of SHASE*, No.68, pp.29-36, 1998.1 (In Japanese)
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・温熱環境形成効率評価指標に関する研究 第1報, 空気調和・衛生工学会論文集, No.68, pp.29-36, 1998.1
- 106) Kato, S., Kobayashi, H., Murakami, S. : Scales for Assessing Contribution of Heat Sources and Sinks to Temperature Distributions in Room by Means of Numerical Simulation, *Trans. of SHASE*, No.69, pp.39-47, 1998.4 (In Japanese)
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・温熱環境形成効率評価指標に関する研究 第2報, 空気調和・衛生工学会論文集, No.69, pp.39-47, 1998.4
- 107) Edited by AIJ, *Natural Ventilation Design Handbook*, Gihodoshuppan, 2013 (In Japanese)
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, 2013
- 108) Ito, K., Kato, S., Murakami, S. : Study of visitation frequency and purging flow rate based on averaged contaminant distribution : Study on evaluation of ventilation effectiveness of occupied space in room, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.529, pp.31-37, 2000.3 (In Japanese)
- 109) Kato, S., Ito, K., Murakami, S. : Analysis of visitation frequency through particle tracing method based on LES and model experiment, *Indoor Air*, Vol.13, pp.182-193, 2003
- 110) Lim, E., Ito, K., Sandberg, M. : 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
- 111) Lim, E., Ito, K., Sandberg, M. : 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
- 112) Chung, J., Lim, E., Sandberg, M., Ito, K. : Returning and net escape probabilities of contaminant at a local point in indoor environment, *Building and Environment*, Vol.125, pp.67-76, 2017
- 113) Kuwahara, R., Akabayashi, S. et al. : Air conditioning systems and ventilation efficiency in buildings Part 1, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.517, pp.29-36, 1999.3 (In Japanese)
桑原亮一, 赤林伸一, ほか2名: 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, 1999.3
- 114) Akabayashi, S., Sakaguchi, J. et al. : Study on air exchange effectiveness in office Part 1, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.516, pp.39-46, 1999.2 (In Japanese)
赤林伸一, 坂口淳, ほか5名: オ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, 1999.2
- 115) Chikamoto, T., Murakami, S., Kato, S. et al. : Study on Hybrid Air Conditioning System using Natural Ventilation in Office Space (Part 1), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, D2, pp.597-598, 1997.9 (In Japanese)
近本晋行, 村上周三, 加藤信介, ほか3名: 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), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp.597-598, 1997.9
- 116) Togari, S. : Energy conservation effect of passive convective cooling in office buildings, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, D2, pp.583-584, 1999.9 (In Japanese)
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, 1999.9
- 117) Cho, S. W., Kimura, K. : Study on the performance prediction of solar chimney in natural ventilation system for a school building, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.537, pp.37-42, 2000.11 (In Japanese)
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, 2000.11
- 118) Hosoi, A., Narita, S., Sunaga, N. : Measurement survey on natural ventilation Part 1, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.564, pp.25-31, 2003.2 (In Japanese)
細井昭憲, 成田衛昭, 須永修通: 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, 2003.2
- 119) Mizuide, K., Ishino, H., Kohri, K. et al. : A study on performance evaluation and control method design about a hybrid airconditioning system with a combination of natural ventilation and ceiling fans, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.604, pp.69-76, 2006.6 (In Japanese)
水出喜太郎, 石野久彌, 郡公子, ほか4名: 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, 2006.6
- 120) Lim, E., Sagara, K., Yamanaka, T. et al. : Mechanism of Structure of Indoor Airflow and Thermal Environment in Office Room with Task-Ambient Air-Conditioning and Natural Ventilation, *Trans. of SHASE*, No.141, pp.19-28, 2008.12 (In Japanese)
- 121) Yasunaga, R., Ashiya, T., Shiraishi, Y. et al. : Hybrid air-conditioning system using natural ventilation in an office building with flow control inlets and outlets (Part 1), *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.77, No.678, pp.681-688, 2012.8 (In Japanese)
安永龍一, 芦谷友美, 白石靖幸, ほか2名: 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, 2012.8
- 122) Sakaguchi, T., Yamanaka, T., Kotani, H. et al. : Thermal environment in a school building with natural ventilation chimney using staircase in winter, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.79, No.703, pp.763-770, 2014.9 (In Japanese)
- 123) Yamamoto, Y., Kuboki, M. et al. : Investigation on management of natural ventilation system, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.619, pp.9-16, 2007.9 (In Japanese)
山本佳嗣, 久保木真俊, ほか2名: 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, 2007.9
- 124) Kim, J., Kawaguchi, T., Tanabe, S. : The behavioral characteristic of office workers use of natural ventilation window, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.74, No.643, pp.1075-1082, 2009.9 (In Japanese)
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, 2009.9
- 125) Lim, E., Yamanaka, T. et al. : Temperature and contaminant concentration distribution and energy saving inside an office room with hybrid air-conditioningsystem with wind-forced ventilation, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.75, No.648, pp.171-178, 2010.2 (In Japanese)
- 126) Miura, K., Takemasa, Y., Yoshida, H. : Evaluation of thermal load reduction and effect to indoor environment by hybrid ventilation system, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.76, No.660, pp.159-168, 2011.2 (In Japanese)
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, 2011.2
- 127) Shoji, K., Kuwahara, M. et al. : Indoor air quality and energy conservation effect of natural ventilation on office building, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.77, No.679, pp.729-735, 2012.9 (In Japanese)
庄司研, 桑原三香, ほか5名: 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, 2012.9
- 128) Yamamoto, Y., Tanabe, S. : The criteria of outdoor conditions for operating natural ventilation openings, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.81, No.722, pp.375-384, 2016.4 (In Japanese)
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, 2016.4
- 129) Edited by AIJ, Translated by Kotani, H. : Natural Ventilation Design Handbook for Architects and Building Engineers, Gihodoshuppan, 2016 (E-book)
- 130) Nicol, F., Humphreys, M., Roaf, S. : Adaptive Thermal Comfort - Principles and Practice, Routledge, 2012
- 131) Humphreys, M., Nicol, F., Roaf, S. : Adaptive Thermal Comfort - Foundations and Analysis, Routledge, 2016
- 132) ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 2013
- 133) Toe, D.H.C., Kubota, T. : Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-884 database, *Frontiers of Architectural Research*, Vol.2, pp.278-291, 2013
- 134) Kobayashi, T., Sagara, K., Yamanaka, T. et al. : Stream Tube based Analysis of Problems in Prediction of Cross-Ventilation Rate, *Int. J. Vent.*, Vol.7, No.4, pp.321-334, 2009
- 135) Kotani, H., Yamanaka, T. : Prediction of inflow direction at large lpening of cross ventilated apartment building, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.609, pp.39-45, 2006.11
- 136) Kato, S. : Flow Network Model based on Power Balance as Applied to Cross-Ventilation, *Int. J. Vent.*, Vol.2, No.4, pp.395-408, 2004.3
- 137) Murakami, S., Kato, S., Akabayashi, S. et al. : Wind Tunnel Test on Velocity-Pressure Field of Cross-Ventilation with Open Windows, *ASHRAE Trans.*, Vol.97, Part1, pp.525-538, 1991
- 138) Kobayashi, T., Sagara, K., Yamanaka, T. 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
- 139) Kurabuchi, T., Ohba, M., Endo, T. et al. : Local Dynamic Similarity Model of Cross-Ventilation Part1 - Theoretical Framework, *Int. J. Vent.*, Vol.2 No.4, pp.371-382, 2004.3
- 140) Kurabuchi, T., Ohba, M., Endo, T., Akamine, Y. : Prediction accuracy of flow rate of cross-ventilated buildings (Part 1), *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.607, pp.37-41, 2006.9 (In Japanese)
倉淵隆, 大場正昭, 遠藤智行, 赤嶺嘉彦: 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, 2006.9
- 141) Ohba, M., Kurabuchi, T., Goto, T. et al. : Prediction accuracy of flow rate of cross-ventilated buildings (Part 2), *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.617, pp.25-30, 2007.7 (In Japanese)
大場正昭, 倉淵隆, 後藤伴延, ほか3名: 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, 2007.7
- 142) Nonaka, T., Kurabuchi, T., Ohba, M. et al. : Study on proper design method of locating windows aiming at utilization of cross-ventilation in densely populated residential area (Part 1), *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.74, No.642, pp.951-956, 2009.8 (In Japanese)

- 野中俊宏, 倉淵隆, 大場正昭, ほか3名: 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74巻, 第642号, pp.951-956, 2009.8
- 143) Endo, T., Kurabuchi, T., Akamine, Y.: Development of the test procedure and the database of cross-ventilation characteristic of various opening, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.74, No.646, pp.1315-1320, 2009.12 (In Japanese)
- 倉淵隆, 大場正昭, 赤嶺嘉彦, ほか2名: 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74巻, 第646号, pp.1315-1320, 2009.12
- 144) Goto, T., Ohba, M., Kurabuchi, T. et al.: Prediction accuracy of flow rate of cross-ventilated buildings (Part 2), *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.77, No.674, pp.259-266, 2012.4 (In Japanese)
- 後藤伴延, 大場正昭, 倉淵隆, ほか4名: 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77巻, 第674号, pp.259-266, 2012.4
- 145) Kotani, H.: A Review of Cross Ventilation Modelling Research, *Wind Engineers, JAWE*, Vol.30, No.4 (No.105), 2005.10 (In Japanese)
- 146) Haghighat, F., Rao, J., Fazio, P.: The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates - A Modeling Approach, *Building and Environment*, Vol.26, No.2, pp.95-109, 1991
- 147) Haghighat, F., Brohus, H., Rao, J.: Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review, *Building and Environment*, Vol.35, pp.377-385, 2000
- 148) Narasaki, M., Yamanaka, T., Higuchi, M.: Design Method of Wind-forced Ventilation including Effect of Turbulence of Wind on Ventilation Part 1, *Trans. of SHASE*, No.39, pp.25-34, 1989.2, (In Japanese)
- 楠崎正也, 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, No.39, pp.25-34, 1989.2
- 149) Yamanaka, T., Kotani, H., Iwamoto, K., Kato, M.: Natural, Wind-Forced Ventilation caused by Turbulence in a Room with a Single Opening, *Int. J. Vent.*, Vol.5, No.1, pp.179-187, 2006
- 150) Kono, R., Kato, S., Ooka, R., Takahashi, T.: The study on characteristics of ventilation with single-sided opening Part 3, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.73, No.626, pp.437-443, 2008.4 (In Japanese)
- 151) Kotani, H., Satoh, R., Yamanaka, T.: Natural ventilation of light well in high-rise apartment building, *Energy and Buildings*, Vol.35, Issue 4, pp.427-434, 2003
- 152) Iino, Y., Kurabuchi, T. et al.: Study on air flow characteristics of cross-ventilation in and around building for various conditions of openings and different angle of approaching wind using wind tunnel experiment and CFD simulation, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.52-, pp.47-54, 1999.6 (In Japanese)
- 飯野由香利, 倉淵隆, ほか2名: 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, 1999.6
- 153) Kurabuchi, T., Ohba, M. et al.: Analysis of airflow of cross-ventilated buildings based on LES and wind tunnel experiment (Part 1), *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*, No.561, pp.47-52, 2002.11 (In Japanese)
- 倉淵隆, 大場正昭, ほか2名: 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, 2002.11
- 154) Kurabuchi, T., Ohba, M., Endo, T.: Analysis of airflow of cross-ventilated buildings based on LES and wind tunnel experiment (Part 2), *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.591, pp.7-13, 2005.5 (In Japanese)
- 倉淵隆, 大場正昭, 遠藤智行: 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, 2005.5
- 155) Hiya, K., Kato, S., Takahashi, T., Kono, R.: Study on effect of opening area ratio and relative opening location on air flow characteristics in cross-ventilation models, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.596, pp.21-27, 2005.10 (In Japanese)
- 樋山恭助, 加藤信介, 高橋岳生, 河野良坪: 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, 2005.10
- 156) Kobayashi, T., Sagara, K., Yamanaka, T. et al.: Wind Driven Flow through Openings - Analysis of the Stream Tube, *Int. J. Vent.*, Vol. 4, Number 4, pp.323-336, 2006.3
- 157) Kobayashi, T., Sagara, K., Yamanaka, T., Kotani, H. et al.: Experimental investigation and accuracy study of CFD analysis for flow field around cross-ventilated building, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.74, No.638, pp.481-488, 2009.4 (In Japanese)
- 158) Takano, Y., Akabayashi, S., Tominaga, Y. et al.: Study on naturally cross-ventilated house using large-eddy simulation (LES) part 1, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.80, No.716, pp.925-934, 2015.10 (In Japanese)
- 高野康夫, 赤林伸一, 富永禎秀, ほか3名: 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, 2015.10
- 159) Kotani, H., Kobayashi, T.: Accuracy verification of processing methodology in particle image velocimetry for flow around building, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.80, No.715, pp.741-749, 2015.9
- 160) Arinami, Y., Akabayashi, S., Tominaga, Y. et al.: Study on naturally cross-ventilated house using large-eddy simulation (LES) part 2, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.81, No.725, pp.589-597, 2016.7 (In Japanese)
- 有波裕貴, 赤林伸一, 富永禎秀, ほか3名: 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, 2016.7
- 161) Narumi, D., Habara, H. et al.: Effect of the monitor roof on the indoor thermal environment and property of natural ventilation in the room, *AIJ Journal of Technology and Design*, Vol.13, No.26, pp.617-622, 2007.12 (In Japanese)
- 鳴海大典, 羽原宏美, ほか3名: 越屋根による建物の室内熱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, 2007.12
- 162) Kobayashi, T., Yamanaka, T., Kotani, H. et al.: Ventilation performance of monitor roof provided for a pitched-roof detached house, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.75, No.653, pp.595-601, 2010.7 (In Japanese)
- 163) Kobayashi T., Chikamoto T., Osada K.: 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, 2013.5
- 164) Kobayashi, T., Chikamoto, T., Umemiya, N., Osada, K.: Estimation of natural ventilation flow rate for a pitched-roof detached house provided with monitor roof, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.81, No.719, pp.83-91, 2016.1 (In Japanese)
- 165) Adam, Z., Yamanaka, T., Kotani, H.: Simulation study on solar assisted ventilation systems, -Unsteady-state simulation of a detached building with solar chimney using weather data, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.577, pp.19-26, 2004.3
- 166) Nabeshima, Y., Song, S.: Study on the Best Form of Solar Chimney by Model Experiment and CFD Simulation, *Trans. of SHASE*, No.156, pp.11-18, 2010.3 (In Japanese)
- 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, 2010.3
- 167) Song, S.: Study on the natural ventilation performance by the connection conditions of the solar chimney and chimney shaft using the model experiment, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.79, No.697, pp.255-260, 2014.3 (In Japanese)
- 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, 2014.3
- 168) Takizawa, M., Kurabuchi, T., Narumi, D. et al.: Study on draft and ventilation promotion using a ventilation tower in dense urban areas Part 1, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.82, No.731, pp.43-50, 2017.1 (In Japanese)
- 滝澤正玄, 倉淵隆, 鳴海大典, ほか2名: 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, 2017.1
- 169) Kobayashi, T.: Researches on Ventilation Mechanics and Airflow Analysis for Natural and Cross Ventilation of Buildings, *Proc. of the 25th AIJ Air Symposium*, pp.25-36, 2016.8 (In Japanese)
- 170) Kobayashi, T.: A review of Academic Research on Building Ventilation in Japan and an Example of Current Work, *Proc. of the Research Conference of Environ. Eng. Society of SHASE Kinki Chapter*, No.331, pp.13-24, 2017.12 (In Japanese)