

特集「室内環境設計のためのCFDシミュレーション」

伊藤一秀*

九州大学 総合理工学研究院 〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1

Introduction to Special Issue on Computational Fluid Dynamics
Simulation for Indoor Environmental Design

Kazuhide ITO*

Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, 6-1, Kasuga-Koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

要 旨

2019年末に中国武漢で発生が確認された新型コロナウイルスによる感染症(COVID-19)は世界的に感染拡大し、2020年3月にはWHOにてパンデミックであるとの認識が示され、2020年8月時点においても新規感染者数の増加が続く状態にある。COVID-19の感染経路は完全に解明されているわけでは無いが、仮に、空気中に呼出されたウィルスを含むエアロゾル粒子による経気道曝露の場合には、室内流れ場予測に伴う感染制御法が一定の重要性を持つ。室内流れ場が完全混合状態にあり、室内を代表する濃度を1点で決定できることは非常に稀であり、一般には非常に不均一性が強く、明確な濃度分布が形成される。また、汚染物質発生が定常であることも稀であり、咳に伴うウィルス発生などは、非常に非定常性の強い現象である。これは室内熱負荷の偏在に伴う不均一な温度分布の問題とも同根である。これらの不均一分布を予測し、室内空気・熱環境設計の高精度化に貢献する方策として、近年、計算流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)の設計実務への適用事例が急増している。本特集「室内環境設計のためのCFDシミュレーション」は、斯界を代表する研究者の方々にCFD技術の室内環境設計への適用に関する技術開発動向、最新研究事例などを平易かつ詳細に説明頂いたものである。本特集を纏めるにあたり、多忙中にも関わらず執筆を快諾頂いた方々に厚くお礼申し上げます。

Abstract

The outbreak of COVID-19, an infectious disease caused by a new type of coronavirus that was confirmed in Wuhan, China, at the end of 2019, has spread globally and was recognized as a pandemic by the WHO in March 2020, and as of August 2020, the number of new infections continued to rise. Although the pathways are not completely elucidated, in the case of airborne transmission and inhalation exposure to aerosol particles containing SARS-CoV-2 viruses, infection control procedure based on airflow prediction are of some importance. The indoor airflow and contaminant dispersion are generally highly heterogeneous and form distinct non-uniform distributions. It is rare for a pollutant generation to be constant, and emission of aerosol particles containing viruses, such as those associated with coughing and/or sneezing, are highly transient phenomena. In recent years, the application of computational fluid dynamics (CFD) to the design of indoor air/ thermal environments is rapidly increasing as a means of predicting these heterogeneous distributions and contributing to upgrading in the design of indoor air/ thermal environments. In this special issue of "CFD Simulation for Indoor Environmental Design," leading scholars in this field gave explanations the trend of technological development and the latest research issues on the application of CFD techniques to indoor environmental design. I would like to express my sincere thanks to those who kindly agreed to write this special issue.

Key words: 計算流体力学(Computational Fluid Dynamics), 室内環境(Indoor Environment), 室内環境設計(Indoor Environmental Design), シミュレーション(Simulation), 感染制御(Infection Control), 換気設計(Ventilation Design)

1. 緒言

簡易的な換気設計や熱負荷計算では、室内の流れ場、温度場、汚染物質濃度場などが完全混合を仮定した質点系でモデル化される。室内流れ場が強非線

形方程式のナビエ・ストークス式で記述されることを前提とすれば、室内流れ場を代表的な1点の情報だけに集約することは非常に大胆な仮定とも云えるが、簡易な計算で設計の全体像を把握する目的では

*Corresponding author (責任著者) E-mail: ito@kyudai.jp, Tel: 092-583-7628

十分な情報となろう。一方、室内に形成される流れ場の不均一性を積極的に利用して、温度分布や汚染物質濃度分布の不均一性を予測し、居住者が存在し使用する局所空間のみを制御対象とする高度な設計が求められる場合もある。快適性や省エネルギー性能を極限まで追求する設計の場合には、これら不均一分布の正確な把握は重要な設計条件となる。

計算流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)は室内環境中に形成される流れ場や温度場、汚染物質濃度場の分布を正確に予測することが可能な、ほぼ唯一の工学手法であり、近年の計算機能力の向上と汎用ソフトウェアの改良に伴い、環境設計の実務に急速に普及している。

2019年末に中国武漢で発生が確認された新型コロナウイルスによる感染症(COVID-19)は世界的に感染拡大し、2020年3月にはWHOにてパンデミックであるとの認識が示され、本稿執筆時点の2020年8月時点においても新規感染者数の増加が続く状態にある。COVID-19の感染経路は完全に解明されているわけでは無いが、仮に、空気中に呼出されたウィルスを含むエアロゾル粒子による経気道曝露の場合には、室内流れ場予測に伴う感染制御法が一定の重要性を持つ。前述のとおり、室内流れ場が完全混合状態にあり、室内を代表する濃度を1点で決定できることは非常に稀であり、一般には非常に不均一性が強く、明確な濃度分布が形成される。また、汚染物質発生が定常であることも稀であり、咳に伴うウィルス発生などは、非常に非定常性の強い現象である。ウィルス拡散と感染伝播の予測や感染制御を目的とした換気設計を行うためには室内に形成される不均一分布の予測が必須であり、この場合もCFD解析の適用が求められることになる。

このような背景のもと、室内環境研究や室内環境設計の実務に携わる方々への情報提供を目的として、本特集「室内環境設計のためのCFDシミュレーション」を企画することとなった。本特集は、斯界を代表する研究者の方々にCFD技術の室内環境設計への適用に関する技術開発動向、最新研究事例などを平易かつ詳細に説明頂いたものである。

東京大学名誉教授である加藤信介先生には、「感染症対策も視野に入れたCFD活用室内換気設計」と題して、室内の換気設計の基礎からウィルス等の汚染物質輸送メカニズムを平易に解説頂いた上で、局所換気設計を中心にCFD活用の有効性や活用事例を

解説頂いている。

続いて、明治大学教授である酒井孝司先生には、「建築環境・設備分野におけるCFD技術の研究動向」と題して、室内環境解析に初めてCFD技術が適用された1950年代から現代に至るまでのCFD技術の変遷を説明頂いた上で、流体解析の専門家ではない技術者が汎用CFDコードを利用する場合の問題点や予測精度に影響を与える境界条件などに関して非常に丁寧かつ詳細に解説頂いている。

北九州市立大学教授である白石靖幸先生には、「CFD、空調システム、モデル予測制御を連成させた室内環境解析」と題して、室内CFD解析技術と空調システムシミュレーションの連成解析の概要と、現代制御手法の一つであるモデル予測制御(MPC)を適用した連成解析手法とその適用事例を解説頂いている。大規模な統合化が現在の主流であり、白石先生の研究はその最先端事例でもある。

九州大学准教授である池谷直樹先生には、「室内気流場に対する都市キャンपी流れの影響」と題して、CFD解析の適用例として重要な換気通風量予測の観点で、複雑な建物周辺気流が換気通風と室内気流場に与える影響を理論的に説明頂いた上で、都市建物群内に存在する建物の換気量推定には建物周辺気流場の時空間変動の把握が非常に重要な要素となることをかみ砕いて説明頂いている。CFDソフトが汎用化し、誰でも使用できるようになっているからこそ、基礎的な理解が重要であることを強調するため、池谷先生に執筆頂いた。

福井大学講師である桃井良尚先生には、「空調吹出気流のCFDモデリング手法とその適用事例」と題して、室内流れ場形成に支配的な影響を与える吹出口・吹出気流の境界条件設定法に関して、特に、複雑形状を有する吹出口からの空調吹出気流を工学的に十分な精度で再現するためのモデル化手法に関して説明頂いている。

2. CFD解析は設計に必要十分な予測精度の解を提供できるか

さて、CFD技術の室内環境設計への適用の詳細は各先生方の解説記事を参照頂くこととして、本稿では特集の導入として「CFD解析は室内環境設計に必要十分な精度の解を提供できるか」との問いに関して考察してみたいと思う。

室内環境設計は「サイエンス」の側面よりは、「工

学」的応用の側面が強い。すなわち、工学的応用としての室内環境設計では、制御の対象となる各種物理現象を必要十分な精度でモデル化し(もしくは簡略化し)、実務に必要なとされる時間的な制約の下で一定の解を提供することが求められる。

計算流体力学CFDとは、流体の運動に関するナビエ・ストークス式を微分方程式の数値解法を駆使して解くことで、流れを可視化・観察する数値シミュレーション手法である。コルモゴロフのマイクロスケールと呼ばれる乱流の最小渦の大きさまで細かく解像することで(すなわち非常に細かい計算格子を適用することで)、ナビエ・ストークス式等の基礎方程式をモデル化せずにそのまま解き、流れに含まれる全ての大きさの渦を再現する直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation: DNS)を用いれば、流れの本質であるエネルギーカスケードと熱散逸を高い精度で予測することが可能であり、流体现象を「サイエンス」に近い領域で議論することも可能である。しかし、室内環境設計レベルで必要となる情報は平均風速とその分布といった一次量であり、乱流統計量は重視されないことが多い。この場合は、計算負荷を下げ、必要十分な精度の解を求めるために適切なモデル化を行う必要がある、この点では適用に際して工学的な知識が要求される。CFDは、流体现象の純粋な解明を志向したサイエンス的な側面から、工学的な応用まで広範な目的に応じて適切に使い分ける必要があり、特に後者の場合には解析対象とする現象に対応したモデル化が求められるため、その適用範囲や精度に関して配慮が必要となる。

近年、CFD解析を対象とした汎用ソフトウェアが市場に広く流通するようになり、設計実務への適用事例も急増している。過半は専門の技術者が適切に使用しているように推察されるが、一部、ゲームソフト感覚での適用例もあり、その解析結果が設計条件の決定に使用されていることに一抹の不安を覚えることもある。この現状に危惧する専門家は少なくないようで、国内外でCFD汎用ソフトウェアの使用を前提とした初学者のためのCFDガイドブックが作成されている。例えば、欧州の換気・空気調和関連の学会であるREHVAでは、ガイドブックシリーズのNo.10として「Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design」を2007年に発刊しており、その和訳版が空気調和・衛生工学会より2011年に発刊されている¹²⁾。このガイドブックは支配方程式から数値解

法の基礎、換気設計への適用事例まで豊富なコンテンツが収められているが、全体は100頁程度とコンパクトに整理されている。一部のコンテンツは多少情報が古くなっていることは否めないが、CFDソフトを初めて使用する際には、是非、一読すべきガイドブックとなっている。

2017年には空気調和・衛生工学会の委員会成果として取りまとめられた「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」が出版されている。この書籍は実務者がCFDソフトを適正に使用するために必要な情報を一冊に纏めることを目標として作成されたもので、流体解析の基礎から設計実務への適用事例まで豊富な事例が紹介されている。加えて、CFDソフトを使用した際の予測精度を確認するための各種方法、ベンチマークテスト事例も紹介されている³⁾。

また、「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」に関連した内容の一部は英訳されて、オープンアクセスジャーナルにて公開されている⁴⁾。

3. 最後に

CFD解析技術は既に成熟した工学技術となっており、適切に使用すれば室内環境設計の高度化に貢献する良質の情報を提供することが可能である。この技術が汎化するためにはソフト使用者側の知識レベルに依存しない数値解析条件・境界条件設定法の確立が重要課題であるが、この点での発展も目覚ましい。この特集が室内環境設計の高度化や実務者のCFD解析利用のモチベーション向上に多少なりとも貢献できれば、と期待している。

最後となりましたが、本特集を纏めるにあたり、多忙中にも関わらず執筆を快諾頂き、素晴らしい原稿をお寄せ頂いた先生方に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 1) Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, REHVA Guidebook No.10 Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design, P. V. Nielsen (ed), F. Allard, H. B. Awbi, L. Davidson, A. Schälén, 2007
- 2) 空気調和・衛生工学会 (訳) 換気設計のための数値流体力学CFD, 2011
- 3) 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 ISBN978-4-274-22153-8, 2017
- 4) Kazuhide Ito, Kiao Inthavong, Takashi Kurabuchi, Toshikatsu Ueda, Tomoyuki Endo, Toshiaki Omori, Hiroki Ono, Shinsuke Kato, Koji Sakai, Yoshihide Suwa, Hiroshi Matsumoto, Hajime Yoshino, Weirong Zhang, Jiyuan Tu : CFD Benchmark Tests for Indoor Environmental Problems: Part 1 Isothermal/non-isothermal flow in 2D and 3D room model, *International Journal of Architectural Engineering Technology*, 2015, 2(1), 01-22 (DOI:10.15377/2409-9821.2015.02.01.1)
- 5) Kazuhide Ito, Kiao Inthavong, Takashi Kurabuchi, Toshikatsu Ueda, Tomoyuki Endo, Toshiaki Omori, Hiroki Ono, Shinsuke Kato, Koji Sakai, Yoshihide Suwa, Hiroshi Matsumoto, Hajime Yoshino, Weirong Zhang, Jiyuan Tu : CFD Benchmark Tests for Indoor Environmental Problems: Part 2 Cross-ventilation airflows and floor heating systems, *International Journal of Architectural Engineering Technology*, 2015,2(1), 23-49 (DOI:10.15377/2409-9821.2015.02.01.2)
- 6) Kazuhide Ito, Kiao Inthavong, Takashi Kurabuchi, Toshikatsu Ueda, Tomoyuki Endo, Toshiaki Omori, Hiroki Ono, Shinsuke Kato, Koji Sakai, Yoshihide Suwa, Hiroshi Matsumoto, Hajime Yoshino, Weirong Zhang, Jiyuan Tu : CFD Benchmark Tests for Indoor Environmental Problems: Part 3 Numerical thermal manikins, *International Journal of Architectural Engineering Technology*, 2015, 2(1), 50-75 (DOI:10.15377/2409-9821.2015.02.01.3)
- 7) Kazuhide Ito, Kiao Inthavong, Takashi Kurabuchi, Toshikatsu Ueda, Tomoyuki Endo, Toshiaki Omori, Hiroki Ono, Shinsuke Kato, Koji Sakai, Yoshihide Suwa, Hiroshi Matsumoto, Hajime Yoshino, Weirong Zhang, Jiyuan Tu : CFD Benchmark Tests for Indoor Environmental Problems: Part 4 Air-conditioning airflows, Residential kitchen airflows and Fire-induced flow, *International Journal of Architectural Engineering Technology*, 2015, 2(1), 76-102 (DOI:10.15377/2409-9821.2015.02.01.4)