

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23360260

研究課題名(和文) 非定常CFDと日射・人体解析モデルの融合による不均一温熱環境シミュレータの開発

研究課題名(英文) A development of non-uniform radiant thermal environment simulator by the fusion of non-steady CFD, sunlight and human body analysis model

研究代表者

酒井 孝司 (SAKAI, KOJI)

明治大学・理工学部・教授

研究者番号：40274691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、『非定常CFDと日射・人体解析モデルの融合による不均一温熱環境シミュレータの開発』を目指し、CFD解析技術を核として、自然対流現象の解析精度検証用データベースの整備、CFDと連成可能な数値人体モデルの開発、日射・放射解析手法の開発を順次行い、CFD解析と日射・人体解析モデルの融合を試みた。また、本研究で構築した連成モデルを用いて、実際の不均一放射環境を対象に、温熱環境の実測とCFD解析を行い、本研究で開発したモデルが、実用計算において、十分な解析精度を有することを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed at "A development of non-uniform radiant thermal environment simulator by the fusion of non-steady CFD, sunlight and human body analysis model". For the purpose, we developed an unsteady database of natural convective field for validation of CFD models, a numerical human body model for CFD simulation and tried to fusion solar radiation simulation. The measurement of the actual non-uniform thermal environment was analyzed by using the simulation model that we built in this study. It was confirmed that the model that we developed in this study had enough analysis precision in a practical use calculation in design stage.

研究分野：温熱環境解析

キーワード：建築環境・設備 省エネルギー CFD 日射 長波長放射 数値人体 快適性 非定常

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題の顕在化に伴い、環境負荷低減が極めて重要な課題となっている。環境省地球環境局による 2008 年度の温室効果ガス排出量によると、民生家庭部門における CO₂ 排出量の割合は、全体の 3 割程度となり、1990 年比で 38.8%増となっている。この部門の CO₂ 排出は、事務所建築・住宅等の建築分野における利用エネルギーに起因しており、2008 年に改正された省エネルギー法や、2010 年から実施されたカーボンマイナス東京プロジェクトでは、建築におけるエネルギー使用量に関する性能規定を設けており、今後の建築設計においては、室内の快適性を確保しつつ、自然エネルギー利用や省エネルギー化、省資源化等の建築環境負荷を低減することが必要不可欠となっている。

近年のガラスを多用した事務所ビルのペリメータでは、冬季日中でも日射侵入による冷房負荷が発生することが知られており、年間を通じた日射遮蔽対策を講じることが必要となっている。また、建築の窓面からの日射熱取得は、冷房負荷に対して大きな割合を占めており、適正な窓面積の確保や、窓面での日射遮蔽は最も有効な省エネルギー手法の一つといえよう。一方で、窓面を透過した日射が居住者に入射する場合、居住者が不均一な温熱環境に暴露されることになり、熱的快適性確保の観点から、設計時の冷房負荷を超えた水準で、快適性の改善が要求されることとなる。

日射入射のある温熱環境を解析するためには、空調の制御、混合損失や外気温、日射入射状況を考慮した非定常解析を行う必要がある。伝熱・換気計算を主軸としたマクロモデルは、躯体への日射侵入を評価しているが、日射を受ける居住者の快適性を考慮した総合的な熱負荷を同定する例は少ない。数値流体解析(CFD)を主軸としたマイクロモデルでは、定常状態を対象とし、日射の影響を簡略化して取り扱う場合が多い。マイクロモデルによる時変動解析は、計算量が莫大であるため実用的な方法ではないが、マイクロモデルでの詳細解析の知見をもとにマクロモデルの妥当性を向上することは十分可能と思われる。

2. 研究の目的

前述のように、日射が入射する居住空間における環境負荷低減、健康・快適性の確保は火急の課題であり、この問題に対処するためには、複雑な現象に対応可能な非定常気流・温熱環境解析手法の開発が急務である。そこで、本研究では、日射入射や長波長放射が卓越する居住空間を対象に、数値流体力学と熱放射解析および数値人体モデルの連成手法を構築し、研究・設計者間の情報共有を意識した『非定常 CFD と日射・人体解析モデルの融合による不均一温熱環境シミュレータの開発』を行う。

3. 研究の方法

本研究では、『非定常 CFD と日射・人体解析モデルの融合による不均一温熱環境シミュレータの開発』を目指し、CFD 解析技術を核として、CFD と連成可能な数値人体モデル、日射・放射解析手法の開発を順次行い、非定常 CFD と日射・人体解析モデルの融合を試みる。また、解析法開発と並行して、恒温室内の模型実験室にサーマルマネキンを設置し、CFD 解析検証用の実験を行い、データベース化する。また、開発したシミュレータを用いて、オフィスビルのペリメータ空間や、住宅の居室、アーケード等の半屋外空間等の不均一放射環境を評価し、問題点の把握と解決策の効果検証を行う。

4. 研究成果

(1) 床暖房室内の風速測定と CFD 解析

省エネルギーと温熱環境向上の観点から、大空間や事務所ビル等では放射空調などの採用が進む方向にあり、室内の流れに対する自然対流の占める割合が大きくなっている。そこで、本研究組織で継続的にデータを蓄積している実大床暖房室模型を用いて、PIV を用いた詳細な風速測定を行い、これまでに例が少ない、実大建築空間を想定した自然対流場に対する CFD の精度検証用風速データを収集した。また、計算負荷が小さく実用的な RANS 乱流モデルの評価・改良を行うためことを目的に、Large Eddy Simulation(LES)を用いて速度・乱流統計量を算出した。得られた結果を以下にまとめる。

自然対流場が卓越する領域を対象に、継続的に研究を行い、実測・解析結果から、温度、風速、乱流統計量のデータベースを整備した。PIV では、解析アルゴリズムと検査領域サイズに関する検証から、再帰的相関法が直接相互相関法に比べて風速が大きくなることを確認した。また、検査領域が大きいケースほど、床面近傍の風速が大きくなる傾向を確認

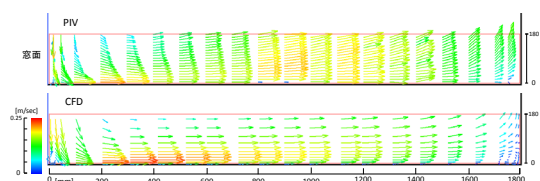


図1 床暖房面付近の自然対流分布

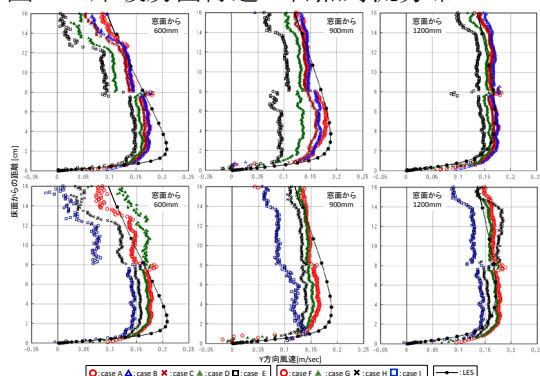


図2 床近傍代表点の風速比較

した。CFD 解析では、床面近傍における風速分布、温度分布、熱収支がデータベースと概ね一致することを確認した。

(2) 椅子が人体に与える影響の CFD 解析

通常、室内では、椅子に座って作業することが多いが、椅子の条件を考慮した温熱環境の評価は明らかになっていない。そこで、材質や形状の異なる椅子を使用し、サーマルマネキンと被験者実験により部位別の総合熱伝達率を求め、椅子の影響が大きい腰部、大腿部に対しては、詳細な総合熱伝達率分布を明らかにする実験を行った。その際、サーマルマネキンでは、椅子との接触面が正確に評価できないため、新たな模擬臀部を製作し、椅子の熱性能・接触部温度の再現を試みた。更に、着座時人体への椅子の影響を評価するため、椅子を 3D モデル化し、CFD 解析を行った。実験と CFD 解析により、着座時の人体への椅子の影響を正確に評価し、詳細な着座時人体・椅子周りの熱性能を明らかにする事を目的とした。得られた結果を以下にまとめる。

椅子の影響のある腰部、大腿部の総合熱伝達率を明らかにした。また模擬臀部を使い、椅子の大腿部と腰部での熱コンダクタンスを算出した。また、椅子の熱抵抗値を求め、65MN モデルで椅子毎の放熱量を明らかにした。CFD 解析を行い、実験値との比較を行った。椅子と人体の、表面温度、熱抵抗値、放射熱伝達率と対流熱伝達率を詳細に明らかにした。人体とマネキンの放熱量の違いにより CFD 解析と実験値には、結果に多少の差異はあったものの概ね同等の傾向を確認した。

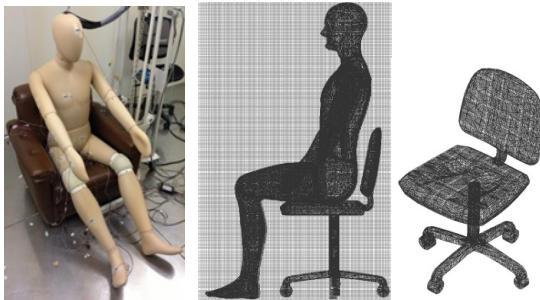


図3 サーマルマネキンと CFD モデル



図4 表面温度分布の解析結果

(3) 日射と数値人体モデルの連成解析

日射が透過する室内のペリメータゾーンや、アーケード・開放型膜屋根等の半屋外空間では、日射や長波長放射の影響により、不均一な温熱環境が生じていることが多い。これらの空間における人体周辺の温熱環境を評価する手法として、被験者やサーマルマネキンを利用した実験や、サーマルマネキンを CFD 上で再現した数値サーマルマネキンをを用いた解析が行われている。数値サーマルマネキンでは、多様な日射遮蔽手法を採用した空間を想定することが可能で、実験に比べて詳細な熱放射性状の把握が期待できる。そこで、数値サーマルマネキンの精度を確認するため、既往実験との比較を行った。また、日射が入射する室内における人体周辺の温熱環境の基礎的検討を行った。

数値サーマルマネキンをを用いた不均一な温熱環境評価を行うため、まず解析精度の確認として、実験用サーマルマネキンをを用いた実験を再現した CFD 解析を行った。数値人体モデルには、Fanger モデルを用いた。数値人体における各部の表面温度、対流・放射熱流は、頭髪部・左手部を除き、既往の実験結果と概ね整合することを確認した。また、不均一な温熱環境評価の第一段階として、日射が入射する室内を対象に基礎的な検討を行った。日射の有無とガラスの光学的特性値を変えた解析を行った結果、概ね妥当な結果が得られた。

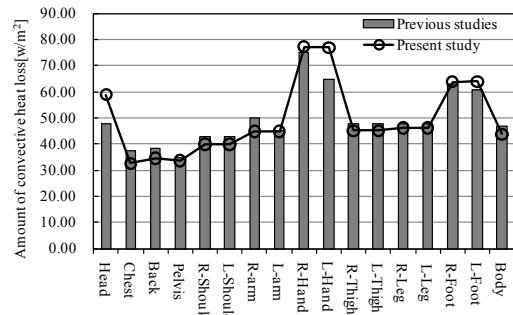


図5 数値人体モデルの精度検証結果

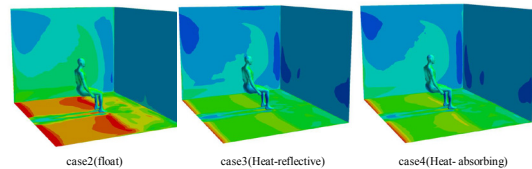


図6 日射解析と数値人体モデルの連成

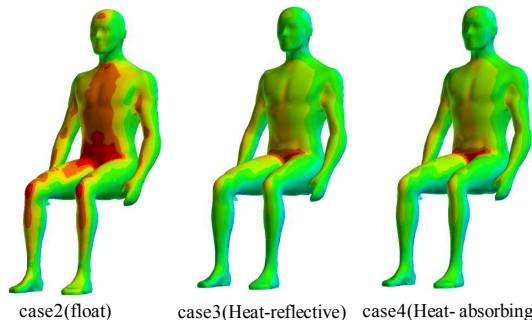


図7 日射透過時の数値人体表面温度

(4) 不均一温熱環境の実測と CFD 解析

数値人体モデルを用いる際、人体外部の対流・放射・伝導・日射解析と人体内部の生理反応を連成して解析する必要がある。従来から広く用いられている人体生理モデルとして PMV や 2node-model があるが、これらは人間を一つの円筒のように扱っており、均一な環境にさらされた時の快適性を評価するには適しているが、不均一な温熱環境の評価には適していない。そこで、本研究では汎用性の高い温熱環境把握ツールを開発することを目的とし、不均一な温熱環境を評価が可能な人体生理モデルを構築し、日射解析・CFD 解析との連成を試みた。また、日射環境における高精度な連成解析手法を確立するため、実測と比較・検証を行った。数値人体モデルでは、既往研究を参考に 65MN モデルを部位毎の評価から表面要素毎に熱収支を解析するモデルに拡張した。その際、人体形状モデル各部位において、それぞれの表面積に対する体積変化率や、面積率に応じた物理量・生理量の配分を考慮している。得られた結果を以下にまとめる。

数値人体モデルの周辺メッシュにトリム型を用いたメッシュシステムの解析精度を確認するため、既往実験と比較し、十分な解析精度を確認した。また、日射環境下における連成解析手法の有用性を確認するため、実測結果と比較を行った。その結果、連成解析を行うことで、予測精度が向上することを確認した。また、拡張 65MN モデルを用いることで、人体の表面要素毎の熱収支量の詳細を把握することが可能となった。

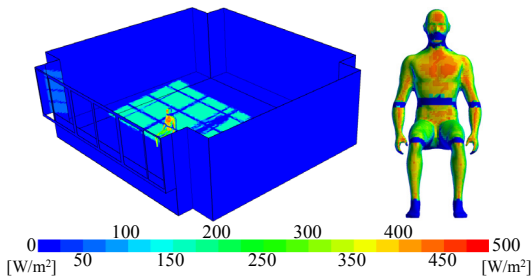


図 8 透過日射解析結果

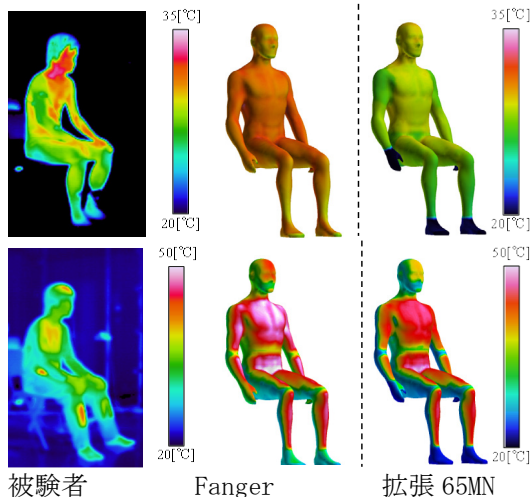


図 9 表面温度の比較

(5) 日射遮蔽物が温熱環境に及ぼす影響

オフィスにおけるペリメータゾーンでは、日射による不均一放射環境が生じ、人体に不快な影響を与える。既往の研究により、ブラインドを用いることで人体への影響は減少するが、室内上部の温度が上昇し、室内上下温度に差異が生じることが確認された。そこで、実測によりブラインド近傍の温度分布を詳細に測定し、スラットの角度が室内温熱環境に及ぼす影響について検討を行った。また、実験結果との比較により、CFD 解析の有用性の検討を行った。得られた結果を以下に示す。

実験では、スラットの向きによって熱漏出の状況に差異があることが確認された。また、実測により得られたデータをもとに CFD 解析を行い、実験結果と比較を行った結果、中空層では実測と同様に熱だまりが生じることを確認した。また、中空層上部からブラインドの隙間を通じて、室内上部に微小な気流が発生することにより、熱が移動することを確認した。上下温度プロファイルでは、ブラインド近傍の測定点の結果では、概ね実測値と同じ傾向が得られた。

(6) まとめ

本研究では、『非定常 CFD と日射・人体解析モデルの融合による不均一温熱環境シミュレータの開発』を目指し、CFD 解析技術を核として、自然対流現象の解析精度検証用データベースの整備、CFD と連成可能な数値人体モデルの開発、日射・放射解析手法の開発を順次行い、CFD 解析と日射・人体解析モデルの融合を試みた。また、本研究で構築した連成モデルを用いて、実際の不均一放射環境を対象に、温熱環境の実測と CFD 解析を行い、

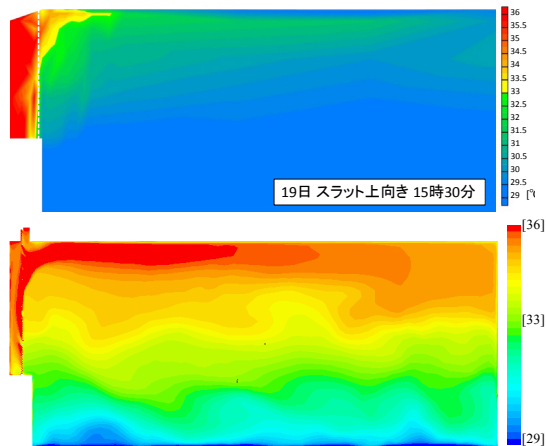


図 10 室内温度分布(上：実測,下：CFD)

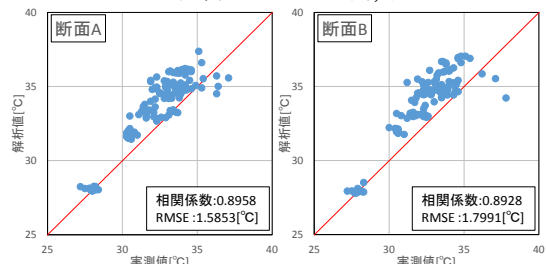


図 11 実測と CFD 解析値の相関

本研究で開発したモデルが、実用計算において、十分な解析精度を有することを確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ①小野 浩己, 酒井 孝司, 加治屋 亮一: 床暖房室内の自然対流場におけるCFDの精度検証(第2報)LESによる乱流統計量データベースの作成, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 213, 2014. 12, pp. 9-17
- ②小野 浩己, 酒井 孝司, 加治屋 亮一: Dynamic LES を用いた弱い自然対流流れ場の数値計算, 各種 LES モデルの精度検証と格子依存性の検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 189, 2012. 12, pp. 29-38
- ③小野 浩己, 酒井 孝司, 加治屋 亮一, 青木 亮一: 床暖房室内の自然対流流れにおけるCFDの精度検証, 第1報, 実大模型を用いた温度測定, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 178, 2012. 1, pp. 21-27

[学会発表] (計10件)

- ①北澤 賢, 永田明寛: 椅子が臀部及び大腿部に与える熱的影響に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 2015. 9, 東海大学
- ②N. Saito, K. Sakai, R. Kajiya, H. Ono: Evaluation of Thermal Environment around the Blind on Non-Uniform Radiant Fields, A CFD Simulation of Heat Transfer Distribution near the Blinds, Proc. of Building Simulation 2015, pp. 857-862(in USB), Dec. 7-9, 2015. 12, Hyderabad, India.
- ③S. Okazaki, K. Sakai, H. Ono, R. Kajiya: A Measurement of Velocity Fields in a Floor Heating Room for Validation of CFD, The 24th IIR Int. Congress of Refrigeration, ICR2015, S1-Th-P, paper-No. 659, Aug. 16-22, 2015, Yokohama, Japan
- ④N. Saito, K. Sakai, H. Ono: A Evaluation of Thermal Environment on Non-Uniform Radiant Fields, The 24th IIR Int. Congress of Refrigeration, ICR2015, E1-Th-P, paper-No. 357, Aug. 16-22, 2015, Yokohama, Japan
- ⑤Y. Yamane, T. Ito, K. Sakai, H. Ono: Evaluation of the Thermal Environment Around the Human Body in a Solar Radiation Environment, Study of Coupled Analysis of CFD and Thermoregulation Models, Proc. of Building Simulation 2013, pp. 1984-1989, Aug. 26, 2013, Chambery, France
- ⑥H. Ono, K. Sakai, T. Kurabuchi: Validation of Accuracy of CFD for Natural Convection Flow in Floor Heating Room, Proc. IAQVEC 2013, June. 17, 2013, PID: 0829(in USB), Prague, Czech Republic
- ⑦T. Ito, K. Sakai, H. Ono: Evaluation of

Thermal Environment around Human Body on Non-uniform Radiant Fields, Proc. of Healthy Buildings 2012, P-ID: 4G.9(in USB), 2012. 7. 10, Brisbane, Australia

- ⑧R. Kajiya, K. Hiruta, K. Sakai, H. Ono, T. Sudo: Thermal Environment Prediction Using CFD with a Virtual Mannequin Model and Experiment with Subject in a Floor Heating Room, Proc. of Building Simulation 2011, Page No. 1670(CD-ROM), 2011. 11., Sydney, Australia
- ⑨H. Ono, K. Sakai: Validation of Reynolds Averaged Model and Large Eddy Simulation in Actual Floor Heating Room, Proc. of Building Simulation 2011, Page No. 1149(CD-ROM), 2011. 11., Sydney, Australia
- ⑩K. Sakai, T. Ito, H. Ono, R. Kajiya, T. Sudo: Fundamental Numerical Analysis of Insolation of the Human Body, Proc. Building Simulation 2011, Page No. 1266(CD-ROM), 2011. 11., Sydney, Australia

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 孝司 (SAKAI, Koji)
明治大学理工学部・教授
研究者番号: 40274691

(2) 研究分担者

倉渕 隆 (KURABUCHI, Takashi)
東京理科大学・工学部・教授
研究者番号: 70178094
岩本 静男 (IWAMOTO, Shizuo)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号: 20213316
永田 明寛 (NAGATA, Akihiro)
首都大学東京・都市環境科学研究科・教授
研究者番号: 60228020
加治屋 亮一 (KAJIYA, Ryouichi)
明治大学・理工学部・教授(2015. 3. 退職)
研究者番号: 60062014
遠藤 智行 (ENDO, Tomoyuki)
関東学院大学・建築・環境学部・准教授
研究者番号: 90385534
大嶋 拓也 (OSHIMA, Takuya)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 40332647
赤嶺 嘉彦 (AKAMINE, Yoshihiko)
国土技術政策総合研究所・住宅研究部・主任研究官
研究者番号: 40447420

(3) 連携研究者

小野 浩己 (ONO, Hiroki)
電力中央研究所・主任研究員
研究者番号: 70586247