

機関番号：32682
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2010
 課題番号：19360264
 研究課題名（和文） 非定常気流・温熱環境解析手法を用いたバーチャルハウス
 シミュレータの開発
 研究課題名（英文） Development of virtual house simulator By using unsteady state
 CFD and thermal environment Simulation method
 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

研究成果の概要（和文）：本研究では、複雑な事象を総合的に評価する必要がある住宅の温熱環境を対象に、非定常気流・温熱環境解析手法を用いたバーチャルハウスシミュレータの開発を行った。異なる暖房方式を採用した居室の定常・非定常温熱環境の実測を行い、検証用データベースを作成した。実測を対象に各種解析モデルを用いて解析を行い、実測と比較して精度を検討した結果、本研究で開発したシミュレータが住宅の温熱環境評価として実用的な精度を有することを示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, virtual house simulator using unsteady air flow and thermal environment analysis method was developed for thermal environment of the housing which must synthetically evaluate the complicated phenomenon. Steady and unsteady thermal environment in the living space which adopted different heating system was measured, and the database for the verification was made. As a result that by using analytical model for the observation variously, it carried out the analysis, and that it examined the accuracy in comparison with the observation, it was shown that the simulator developed in this study has the practical accuracy as a thermal environment evaluation of the housing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
総計	15,600,000	4,680,000	20,280,000

研究分野：温熱環境解析

科研費の分科・細目：建築学 ・ 建築環境・設備

キーワード：温熱環境予測，省エネルギー，数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題の顕在化に伴い、建物の環境負荷低減が極めて重要な課題となっている。また、COP3で採択された京都議定書が2005年2月に発効され、建築関連分野においては、

自然エネルギーの有効活用や省エネルギーに配慮し、二酸化炭素排出量を可能な限り低減することが急務となっている。環境省地球環境局による2004年度の温室効果ガス排出量速報値によると、民生家庭部門における

CO2 排出量割合は、1990 年比で 30.0%増となっている。2002 年に発表された地球温暖化大綱では、2012 年までに、民生部門で 1990 年と同レベルまで排出量を低減することが目標として掲げられており、民生分野では、短期的(京都議定書対応)で現在の 3 割程度、中長期的(2013 年以降)で 5 割以上の削減が必要になると思われる。従って、省エネルギーの観点から、民生分野、特に住宅に対応したより詳細な環境・設備設計手法の整備が急務となっている。

住宅の温熱環境を評価する場合、暖冷房方式による快適性の相違や、冬期の夜間暖房停止時における表面温度低下が身体に及ぼす影響、高齢者の血管系疾病発症比率と密接な関係がある住宅内温度偏差分布の詳細把握が必要である。このような環境を把握するためには、外界気象変化や、エアコンの吹出気流の時変動や暖冷房の ON/OFF 制御、多数室間の熱・空気移動、カーテンの有無、什器の配置、在室スケジュール等の様々な問題に対して適切な条件を設定しなければならない。従って、快適性と健康維持双方の観点から住宅内の温熱環境を評価するためには、外界気象や暖冷房負荷の時変動を非定常的に取り扱い、人体への伝熱、長短波放射および気流変動の影響等を的確に把握する手法を構築することが急務である。

室内環境要素を定量的に算定する手法として、伝熱・換気計算を主軸としたマクロモデルと、数値流体解析(CFD)を主軸としたマイクロモデルがある。マクロモデルは比較的簡単に室温や換気量を求められ、時変動やパターン変化にもある程度の対応が可能であるが、諸量の空間分布は把握できない。一方、マイクロモデルは室内外気流の挙動を詳細に把握するには効果的であるが、計算時間が多大であるため時変動解析が困難であるとされてきた。しかし、最近の CFD 解析コード、特に商用の汎用コードの進歩は目覚しく、壁体伝熱、長短波放射、対流を全て連成し、実際の建物や人体形状のような複雑形態の再現が可能となってきている。但し、マイクロモデルを利用して精度の高い解を得るためには、乱流モデル、解法、領域分割法等に関する数値流体力学的な知識が必須であり、伝熱・放射・対流解析を行うためには、解析パラメータの調整等に関する経験が重要となる。更に、住宅の温熱環境のような複雑な現象や形態が絡んだ問題を解明するためには、個人レベルでの対応には限界があるため、複雑形態および解析手法をライブラリ化し、環境・設備設計者が情報を共有することが望ましい。

2. 研究の目的

前述のように、住宅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と住宅への応用が急務である。また、複雑な現象が絡んだ問題に対処するためには、環境・設備の研究者と設計者が情報を共有するシステムの構築が必要不可欠である。そこで本研究では、複雑な事象を総合的に評価する必要がある住宅の温熱環境を対象に、研究・設計者間の情報共有を意識した『非定常気流・温熱環境解析手法を用いたバーチャルハウスシミュレータの開発』を行う。

3. 研究の方法

複合暖房室内における定常・非定常温熱環境解析手法の確立を目的とし、実測と解析の比較検討および解析手法の開発を行う。

手法開発およびシミュレータの有用性検討には、東京ガス研究所人工気象室内の実大実験住戸と明治大学簡易恒温室において、実大モデルを用いた実測を行い、結果をデータベース化する。研究を迅速に進めるための基盤となるプラットフォーム・コードとして、CDAJ 社の STAR-CD を用いる。本コードは、壁体伝熱、長短波放射、対流を全て連成し、実際の建物や人体形状のような複雑形態の再現が可能である。本研究では、プラットフォーム・コードを用いて温熱環境解析を行い、実測と比較して解析精度の検証を行う。また、乱流モデルが解析精度に及ぼす影響について、精査することにより、高精度な解が得られる解析条件を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 暖房室内の温熱環境解析精度の検証

床暖房・エアコンを採用した定常状態の暖房室内における CFD の解析精度について検討を行った。得られた成果を以下に示す。

①壁面温度において、床暖房は流入外気の影響によって、給気口下部で差異を生じたが、その他のポイントではよく一致していることが確認できた。エアコンは、吹出噴流の気流性状差異により、床面温度に誤差を生じたが、その他の壁面に関しては概ね実測結果と一致していた。

②空気温度において、床暖房は解析結果と実測結果がよく一致していることが確認できた。エアコンは、吹出噴流の差異に伴って、高さの低い位置にて、実測結果に対してやや大きな差異を生じたが、高さの高い点においては、実測結果と一致し、解析精度を確認できた。

③上下温度分布において、床暖房は実測による上下温度分布の傾向をよく捉えていた。エアコンにおいては、機器直近の上下温度分布傾向に誤差を生じたが、概ね実測の傾向を再現していることが確認できた。

④熱バランスでは、床暖房におけるCFDの投入熱量が実測投入熱量と概ね一致し、熱収支の再現性を確認できた。エアコンにおいては実測投入熱量とCFDの投入熱量で5~10%程度の差異を生じた。両者の投入熱量を比較する上では、実測値と解析値の誤差を小さくすることが必須事項であると考えられるため、CFDの境界条件設定法の再検討や実測投入熱量の詳細測定等を次節以降で検討する。また、床暖房室内とエアコン暖房室内では室内の対流熱伝達特性が異なり、壁面通過熱流量の分布傾向に差を生じた。

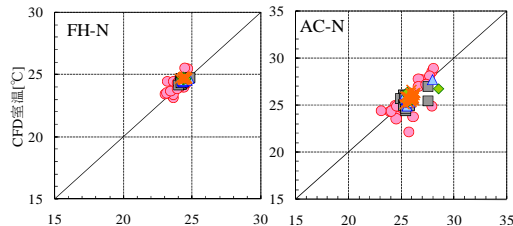


図1 実測との相関(床暖房, エアコン)

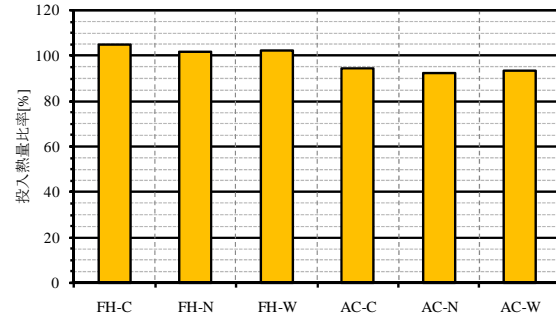


図2 投入熱量の予測精度(実測/CFD)

(2)暖房室内の温熱快適性の詳細把握

CFD解析による居室の快適性予測手法の確立を目的に、4種の給気口を用いた場合の実測との比較による再現性の検討と、CFDを主軸とした室内快適性の詳細検討を行った。その結果、解析結果はよい一致がみられ、室内の温度差が小さい温熱環境を確認できた。

解析結果を用いて、壁表面温度や空気温度分布および室内の温熱快適性分布を可視化し、コールドドラフトや給気口からの冷気侵入等により不快となる場所を明示した。また、室全体の熱的快適性分布を解析する方法を開発し、給気口の種類が室内の快適性分布に影響を持つことを示した。

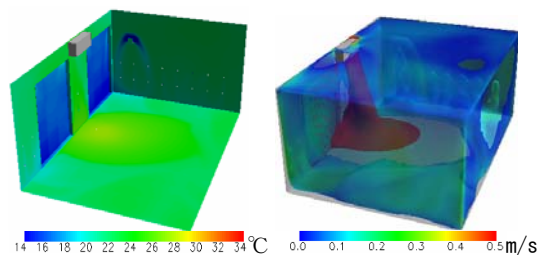


図3 エアコン暖房時の壁面温度と空気温度

(3)シミュレータによる暖房解析の精度検証

CFDを室内温熱環境解析に適用した際の乱流モデルの選択による予測精度の変化について検討を行った。検討には、強制対流型暖房の代表であるエアコンと、輻射型暖房の代表である床暖房の両方を有する居室を用い、空気温度・壁面温度の実測結果と、同等の条件を与えたCFDの結果を比較した。結果、空気温度に関して以下の知見を得た。

①エアコン暖房時の実測結果からは、強制対流型暖房の特徴である温度成層がみられ、LES, RANSともにその特徴を概ね再現した。しかし、エアコンからの吹出し噴流の影響を受ける場所においては、RANSでは噴流の拡散を過大に評価し、予測精度が低下した。LESではRANSに比べて噴流の拡散が抑えられ、概ね実測結果を再現した。この傾向は平均室温度の高いケース、すなわち室内の温度差が高くなるとより顕著となった。また、平均室温度が変わると噴流の到達距離、拡散性状などが変化し、それに伴い室内の温度分布にも変化が生じた。

②床暖房時はほぼ上下の空気温度に差がなく、エアコン暖房時には明確に現れなかった給気口や窓面からのコールドドラフトの影響を確認できた。LES, RANSともに室内の温度分布は概ね再現したが、給気口からの冷気流の到達地点についてはLES, RANSとも実測結果とは差異がみられた。RANSでは、給気口や窓面からの冷気の侵入による床面付近の温度低下を過大評価する傾向にあった。

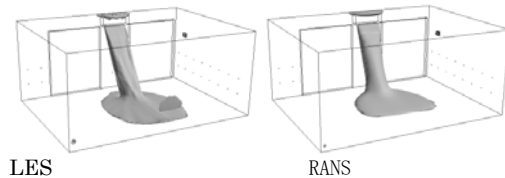


図4 風速0.5m/sの等値面

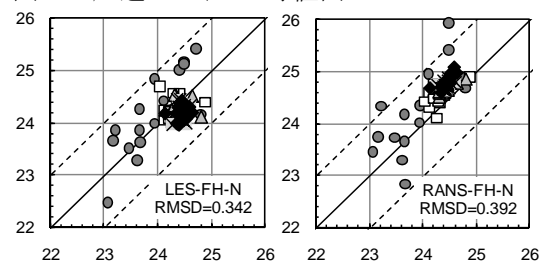


図5 実測とCFDの相関(床暖房)

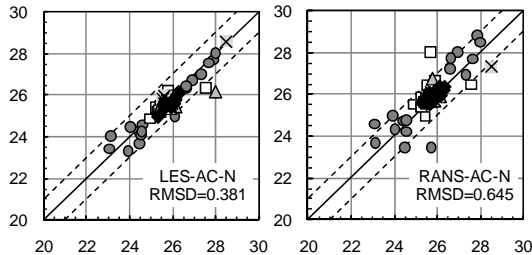


図6 実測とCFDの相関(エアコン)

また、床暖房時ではエアコン暖房時と異なり、室平均温度の変化に伴う室内温度分布の変化がほとんど見られなかった。

③空調設備等の設計時に必要となる、室全体のおおまかな温度分布性状や、平均室温を把握するという観点でいえば、RANS, LESとも実測結果との差異が概ね $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下であり十分な精度を持っているといえる。しかし、エアコンからの噴流の到達距離など、局所的な温熱環境の検討をする際には、RANSでは不十分であった。LESではRANSに比べて大幅に再現精度が改善されたが、給気口からの冷気流など、一部に課題を残した。

以上より、RANS乱流モデルは暖房時室内の温熱環境予測に、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度の誤差を許容するならば十分な精度を持っていることが示された。ただし、エアコンからの吹出し噴流の到達距離やその影響を高精度で把握する必要がある場合はLES乱流モデルの使用が望ましい。

(4) 弱い自然対流流れ場におけるCFDの対流熱伝達予測精度の検証

Tianらの2次元自然対流場を対象に、各種 $k-\epsilon$ モデルとLESを用いてCFD解析を行い、自然対流熱伝達性状に関する予測精度の検証を行った。得られた結果を以下に示す。

①標準 $k-\epsilon$ モデルでは、壁面第1meshが粘性底層となった場合に、乱流エネルギーやNu数の分布に実験との不一致がみられ、局所的な対流熱伝達量の解析精度が悪化することを確認した。

②低Re型のMKCとWS, NRは、ほぼ同一の結果となり、加熱壁面における自然対流では、概ね実験と対応する結果が得られた。床面近傍では乱流エネルギーを過小評価し、乱れの層流化に伴う不一致が生ずることを確認した。このことから、低Re型 $k-\epsilon$ では、乱れが非常に小さい領域での対流熱伝達量の予測精度に問題があることを示した。

③LESでは、meshが粗いケースで、熱収支誤差が大きい結果となった。 \cdot SGSモデルにダンピング関数を導入し、細meshを施した場合、概ね実験と対応する結果が得られることがわかった。また、低Re型 $k-\epsilon$ で問題となった乱れが小さい領域においても、対流熱伝達量の予測精度を有することがわかった。

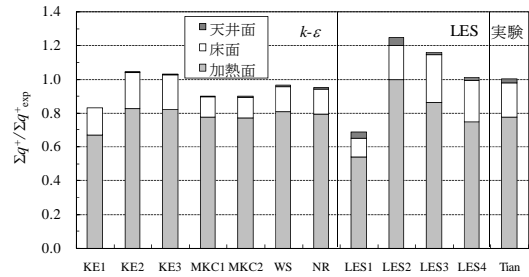


図7 対流熱伝達量の比較(実験値基準)

(5) 床暖房室内における非定常自然対流現象の実測とCFD解析

環境設備設計からの非定常CFD解析方法の確立への要望に応えることを目的とし、自然対流場非定常現象の検証用のデータベース作成を行った。自然対流場非定常現象の検証用データベースを作成し、定常・非定常現象を対象に、実験と解析結果を比較して解析精度について検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

①本研究で構築した壁体内熱伝導・長波長放射・対流連成解析モデル(case1)は、概ね 1°C 以内で、定常実験を再現可能であることを確認した。

②熱橋のモデル化の程度が計算結果に及ぼす影響について検討した結果、壁体部材を忠実にモデル化し、3次元熱伝導を同時に解くCase1が、一般的な定常CFD解析モデルであるCase2,3より実測に近い値を示すことを確認した。また、熱橋が壁面近傍の空気温度分布に影響を及ぼすことを確認した。

③非定常状態において、境界条件に発熱パネルの表面温度変動を与えた解析では、概ね実測値と一致する温度変動が得られたため、本研究で構築した非定常解析モデルが概ね妥当であることを確認した。床近傍に関しては、実験との差異が起きため、他の乱流モデルを用いた解析を行い、原因を解明する予定である。

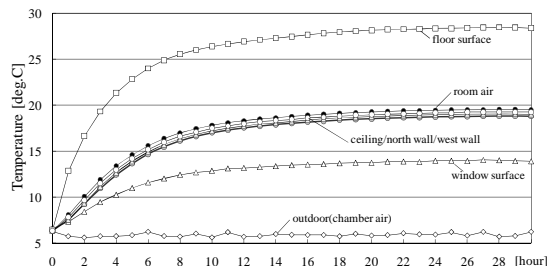


図8 床暖房データベース(非定常)

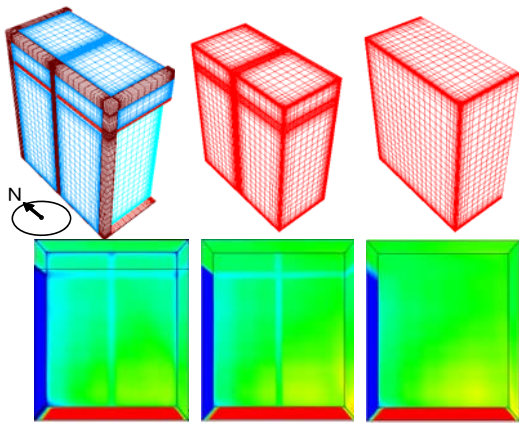


図9 熱橋のモデル化と壁面温度分布

(6) 数値サーマルマネキンを用いた床暖房室内の快適性評価

暖房室内における熱的快適性評価手法の確立を目的に、数値サーマルマネキンを用いたCFD解析と被験者実験の比較、および不均一放射環境によって人体が受ける影響についてCFD上で検討を行った。その結果、概ね対表面温度や空気温度・壁面温度の傾向を捉えることが確認され、快適性評価法の確立においてCFDの効果・可能性が示唆された。しかし、体表面温度及び人体放散熱量差異に基づく周囲環境温度に実測とCFDで差異を生じ、実測における温度分布等の詳細把握のためには、測定点数の追加や、解析における境界条件設定法及び人体制御方法の再検討等が必要であるものと考えられる。窓サイズの違いによる解析の比較でも、概ね対表面温度や空気温度・壁面温度の傾向を捉えることができた。今後は、より詳細に傾向を把握するため、PMVが厳密に0に近くなる境界条件を求め、比較・検討していく。また、解析結果と実験結果との比較も並行して行い、CFD解析によってより正確に室内環境を再現できるような境界条件を検討していく必要がある。

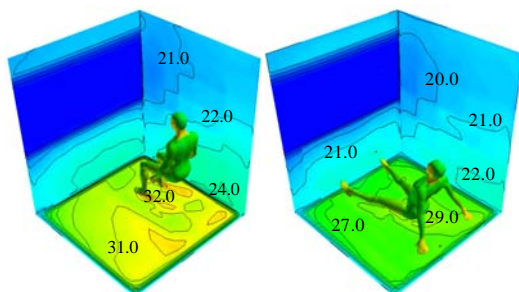


図10 壁面温度分布(椅子座, 投げ足)

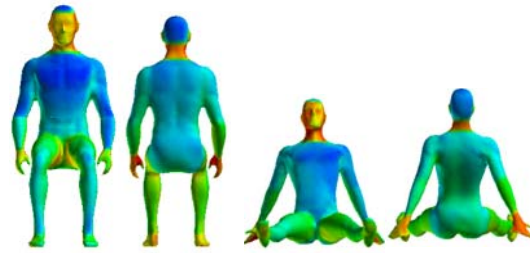


図11 人体表面の温度分布(椅子座, 投げ足)

(7) まとめ

以上の検討より、本研究で作成した検証用データベースと各種解析モデルによる解析結果を比較して精度を検討した結果、本研究で開発したシミュレータが住宅の温熱環境評価として実用的な精度を有することを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計13件)

- ① 倉淵隆, 清水裕幸, 蛭田厚大, 岩本静男, 加治屋亮一, 酒井孝司, 飯野由香利, 小笠原岳, 遠藤智行, 長井達夫: 換気負荷のある居室での床暖房時や温風暖房時における温熱・気流環境と温熱環境評価および室内投入熱量の空間分布, 日本建築学会環境系論文集, 第76巻, 第661号, pp. 317, 2011. 3, 査読有
- ② 小野浩己, 酒井孝司: 暖房時の居室を対象としたCFDの精度検証, 床暖房・エアコンディショナ使用時の室内におけるLES, RANSの比較, 明治大学科学技術研究所紀要, 第49冊, No. 1, pp. 1-7, 2011. 3, 査読有
- ③ 蛭田厚大, 酒井孝司, 加治屋亮一, 倉淵隆, 岩本静男, 小野浩己: 異なる暖房方式の快適性能予測手法に関する研究, 第1報—CFDによる暖房室内の温熱環境解析と実測実験の比較, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 162, pp. 1-8, 2010. 9, 査読有
- ④ 酒井孝司, 小野浩己, 加治屋亮一, 久保隆太郎, 岩本静男: 弱い自然対流流れ場におけるCFDの対流熱伝達予測精度の検証, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 148, pp. 25-33, 2009. 7, 査読有
- ⑤ K. Sakai, H. Ono, R. Kajiyama, R. Kubo, S. Iwamoto: Prediction accuracy evaluation of CFD in natural convection field, Proc. of 11th International Conference on Air Distribution in Rooms, RoomVent2009, S0224: pp. 1344-1351, 2009. 5, 査読有
- ⑥ H. Ono, K. Sakai, R. Kajiyama, T. Kurabuchi, S. Iwamoto, R. Kubo: Analyses of housing

thermal environment by mainly using CFD, Proc. of 11th International Conference on Air Distribution in Rooms, SO115:pp.1255-1260, 2009.5, 査読有

- ⑦ K.Hiruta, R.Kajiya, K.Sakai, T.Kurabuchi, S.Iwamoto, R.Kubo : Evaluation of thermal comfort in heating room by CFD simulation, Proc. of 11th International Conference on Air Distribution in Rooms, RoomVent2009, SO230:pp.950-957, 2009.5, 査読有

[学会発表] (計 20 件)

- ① 青木亮一, 酒井孝司, 小野浩己, 加治屋亮一: 床暖房室内における非定常自然対流現象の把握 (その 2), 定常時における床面極近傍の温度測定実験と CFD の比較, 日本建築学会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.647-648, 2010.9.9 富山大学
- ② 小野浩己, 酒井孝司, 加治屋亮一, 岩本静男, 久保隆太郎: 自然対流熱伝達現象の数値計算における Dynamic LES の有用性, 日本建築学会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.625-626, 2010.9.9 富山大学
- ③ 加治屋亮一, 蛭田厚大, 酒井孝司, 小室誠: 数値サーマルマネキンを用いた床暖房室内の快適性に関する研究, その 2 窓の大きさの違いによる検討, 日本建築学会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.309-310, 2010.9.9 富山大学
- ④ 小野浩己, 小笠原岳, 酒井孝司, 倉渕隆, 岩本静男, 加治屋亮一: 暖房時の室内壁面における対流熱伝達率の測定 (第 1 報), 床暖房時の床面における測定, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.737-740, 2010.9.1 山口大
- ⑤ 青木亮一, 酒井孝司, 小野浩己, 加治屋亮一: 床暖房室内における非定常自然対流現象の把握 (第 2 報), 床面近傍の温度測定実験と CFD の比較, 空気調和・衛生工学会, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.733-736, 2010.9.1 山口大
- ⑥ 小野浩己, 酒井孝司, 倉渕隆, 岩本静男, 加治屋亮一, 久保隆太郎: CFD を主軸とした住宅の温熱環境解析に関する研究, 強制対流暖房室内の $k-\epsilon$ ・LES 解析, 日本建築学会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.1177-1178, 2008.9.20 広島大学

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

坂本 雄三 (SAKAMOTO YUZO)
東京大学・工学研究科・教授
研究者番号: 30114490
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・准教授
研究者番号: 60228020
加治屋 亮一 (KAJIYA RYOICHI)
明治大学・理工学部・准教授
研究者番号: 60062014
遠藤 智行 (ENDO TOMOYUKI)
関東学院大学・工学部・准教授
研究者番号: 90385534
今野 雅 (IMANO MASASHI)
東京大学・工学研究科・助教
研究者番号: 10312977
大嶋 拓也 (OOSHIMA TAKUYA)
新潟大学・自然科学系・助教
研究者番号: 40332647
赤嶺 嘉彦 (AKAMINE YOSHIHIKO)
東京大学・工学研究科・特任助教
研究者番号: 40447420
小野 浩己 (ONO HIROKI)
明治大学・理工学部・助手
研究者番号: 70586247