

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289207

研究課題名(和文) ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築

研究課題名(英文) Development of Air-conditioning System and Its Control System that Considers Human Factor

研究代表者

近本 智行 (CHIKAMOTO, TOMOYUKI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：60388113

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：制御の中心に人間を置くことで、「空間を対象とした環境制御」から「人間の環境制御」へと、より対象の焦点を絞った制御を検討した。さらに省エネルギーな空調の運用を継続・定着させるため、個人の人体レベルの生理反応や心理状態に応じた自然な運用を行うことを目指した。例えば、人体の熱的適応能力であるアダプティブ性能や、人体の余剰熱を取り去る工夫により、不快感による作業効率の低下などを招かないことが可能となり、冷やしすぎ、暖めすぎによる自律神経への影響も防ぐ。本研究では、快適・省エネを両立する次世代型空調システムの吹出口、制御方法を開発すると共に、実際の空調システムに応用しながら幅広く開発を実施した。

研究成果の概要(英文)：The control that focused on "Man's climate control", not on "Climate control intended for the space" was examined by considering man at the center of the control. In addition, it aimed to do natural operation according to the physiological response and the psychological condition at an individual human body, and energy conservation is achieved by establishment of continuous air-conditioning operation. For instance, it becomes possible not to cause the decrease in the work efficiency by the unpleasantness etc. by the device that considers an adaptive performance or removes the surplus heat of the human body. And it does not affect the human autonomic system by warming or cooling not too much. In the present study, development was widely executed while developing air supply unit and control techniques of the next generation type air-conditioning system that united the comfort and conservation of energy, and applying it to an actual air-conditioning system.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：建築設備 人体の温冷感 ヒューマンファクター 空調設備 省エネルギー 快適性 生産効率 気流
解析

1. 研究開始当初の背景

従来の室内環境制御においては空調機器の単体制御が行われており、機器を中心とした技術開発が行われてきた。一方、人の快適性や生産効率を度外視した、必要以上の省エネ・節電が強いられていることも多い。このため機器のみの技術開発に限界が見えてきた中、人体の生理現象や心理反応などのヒューマンファクターを重視した制御の可能性が着目されている。

節電や省エネを目的として、Cool Biz(28冷房)が推奨されている。そもそも28設定は、裸体状態の温熱感の上限設定温度として定められた経緯があり、単純に指標として用いる場合には快適性や作業効率低下や健康への悪影響を招く問題を有している。

一方、各個人の温冷感の要求水準は異なり、また、室設定温度の更なる緩和も要求され、もはや一律での設定温度緩和は限界を示し、各個人の状態に適した空調制御を行うことが今後の鍵となる。

快適性向上を目的として、これまでにPMV制御などの温冷感指標に基づいた制御方法が提案されているが、これらは定常状態での統計的な温冷感指標に基づく。すなわち、各個人間で異なり、また時々刻々変化する個人の温冷感を対象とした制御にはつながっていない。更に、人の周辺環境をセンシングするセンサーは、室のレイアウト変更に伴って撤去されることも多い。

これらのことから、今後求められる省エネ性と快適性を両立することのできるシステム開発のためには、各個人のヒューマンファクターを解析した上で、局所的な空調制御や、あるいは個人レベルの異なる要求に対応させることができる空調制御が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では制御の中心に人間を置くことで、「空間を対象とした環境制御」から「人間の環境制御」へと、より制御対象の焦点を絞る。さらに省エネルギーな空調の運用を継続・定着させるためには、個人の人体レベルの生理反応や心理状態に応じた自然な運用を行うことが大切である。例えば、人体の熱的適応能力であるアダプティブ性能や、人体の余剰熱を取り去る工夫により、不快感による作業効率の低下などを招かないことが可能となり、冷やしすぎ、暖めすぎによる自律神経への影響も防ぐ。本研究では、室内の快適性を維持・向上させつつ、省エネを実現する次世代型空調システム制御の実現を目指すものである。

具体的には個人の温冷感を把握する技術としてアダプティブをベースにしたヒューマンファクターの解析とそのモデルへの組み込みを行う。同時に、建物への実装につながる技術開発としてパルス気流制御技術の開発をベースにした空調システムの検討とその制御方法の研究を実施するものである。

3. 研究の方法

本研究では以下の5点のテーマで研究を実施した。

(1)ヒューマンファクターの解析

アダプティブモデルでは月平均外気温より、直近の日の外気温が室内中立温度へ大きく影響することが知られていたが、一日の外気温変化に対しての影響は確認されていなかった。人は一日の外気温変化を日常生活で感じている。本研究では、短期の時間スケールでの快適温度修正の振れ幅、それぞれの情報の重み付けなどを明らかにする。

短期の時間スケールに対するヒューマンファクター検討

空調の部分負荷効率改善のため、空調設定温度を厳密に固定せず、ある一定幅で制御することが有効である。時間周期として10~30分の環境振動を与えた場合の人体の生理量変化を計測し、その心理量変化を解析する。

パルス変化に対するヒューマンファクター検討

空気砲からの渦輪をパルスのように人体にあって、パルス幅を制御することで、人体への冷却量を自由に制御することができる。制御ロジック構築のためにも、パルス変化に対するヒューマンファクターを確認する。

(2)ヒューマンファクターの人体モデルへの組み込み

皮膚の濡れ率を考慮した温冷感修正モデルを、田辺らが開発した人体65分割モデルへ組み込むことで、人体熱モデルと快適温度への導出を可能とするモデルを作成。

(3)BEMS利用の温冷感申告に対する空調のフィードバック

温冷感申告に基づく空調制御システムの開発として、実際の建物におけるBEMSと居住者による申告及びその空調へのフィードバックに対する満足度調査から、最適なフィードバック制御を検討。

(4)小型センサーの活用検討

安価なMEMSセンサーを活用し、室内の温度分布をセンシングし、温熱環境の緩和が可能な人・場所を確認しながら時々刻々変動する各個人の快適性を評価しながら最適制御する方法を検討。

(5)個人差に対応した空調システムの検討

空調の「室温緩和」と「少量の投入熱量で、不快感を解消するパルス気流」を融合した新しい空調システムの提案と制御アルゴリズムを検討。局所気流送出機構として、空気砲の原理を用いた渦輪状の気流を対象に向かい発射する「パルス気流の送出」を用いる。空気砲から発射される渦輪は直進性が高く、通常の吹出に比べ少ない風量でも対象への十分な給気が期待される。

模型実験による流速測定、到達流量及び熱搬送能力に関するデータの蓄積

本研究では模型装置により各種条件下での進行速度、到達流量、熱搬送能力についてデータベースを作成する。実験で用いる模型

は空気砲の原理を利用しピストン駆動により渦輪を送出する。主に送出流量と送出孔直径を変化させることで各条件が渦輪の生成条件に与える影響を検証する。

PIVによる進行速度の測定

渦輪気流は渦を巻きながら進行するため、進行方向と異なるベクトルを持つ流れを内包している。このためPIVによる面的な流速分布を測定する。

トレーサガスによる到達流量の測定

送出装置内にトレーサガスを充填しサンプリングボックスに向かって送る。サンプリングボックス内のトレーサガス濃度を測定し到達したガス量と充填したガス量の差から、到達流量を算出する。

パルス気流発生制御の検討

渦輪を連続的にパルス発生させる機構の開発を行う。

パルス気流（タスク空調）とエナジーバンド制御（アンビエント空調）を統合したシステム検討

室温の揺らぎをベースにタスク空調で局所的に人体への冷却量を補てんする制御ロジックを検討。

4. 研究成果

(1) ヒューマンファクターの解析

外気温が高い時間帯では室内環境に対する期待が緩和され、快適感を損なわずに設定温度そのものを緩和することが可能である。短期の時間スケール変化を与えた被験者実験により短時間の温度変化に対する人体の知覚と反応を確認し、より短い時間変化に対して人が中立温度（快適だと思える温度）を変化している状況を確認した（図1）。

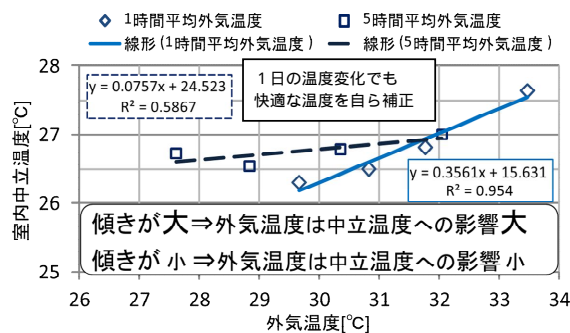


図1 外気温度変化に対する中立温度の補正
また外気温度情報や外気を体験させることによる影響も確認した（図2）。

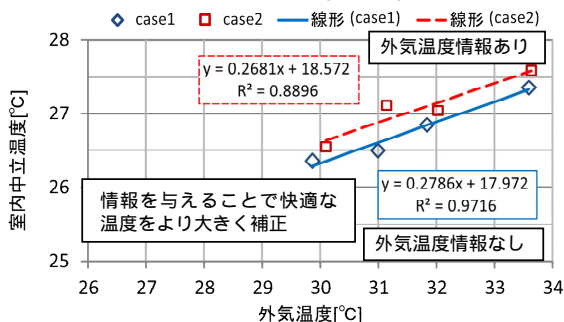


図2 外気温度情報に対する中立温度の補正

更に非定常な室温変化に対して被験者が感じる体感温度変化を確認した（図3）。

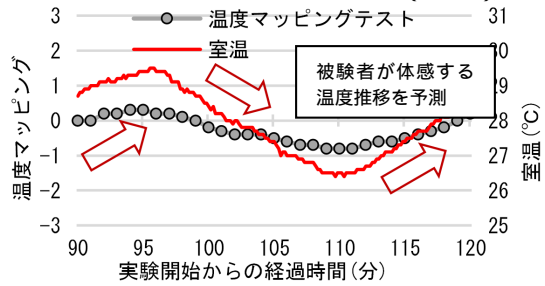


図3 外気温度情報に対する中立温度の補正

(2) ヒューマンファクターの人体モデルへの組み込み

人体局所に気流をあてたパーソナル空調により被験者実験、人体熱モデル解析を行い、局所冷却の影響が快適性及び人体生理に与える影響に関して調査した。人体の生理量変化を人体モデルと被験者実験の双方により検証することで、皮膚の濡れ率の変化をモニターすることで快適だと感じるまでの時間が明らかになり、実空調に応用可能な快適温度を導出するモデルを検討した（表1、図4）。

表1 検討ケース

Case	気流性状	執務室温度 [°C]	吹出温度 [°C]	気流を当てる部位
1-1	拡散性	28	22	首(1.0m/s)
2-1	指向性			
2-2		首(1.0m/s)		
2-3		首(1.0m/s)		

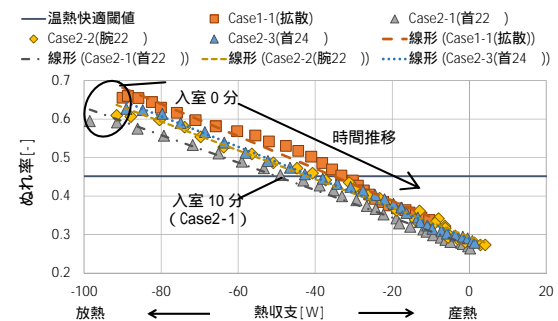


図4 解析によるぬれ率と熱収支の関係

(3) BEMS 利用の温冷感申告に対する空調のフィードバック

ヒューマンファクターを組み込んだ制御ロジックの開発を進め、1日の設定温度の時間変動を与えた実証実験を行った（図5、6）。

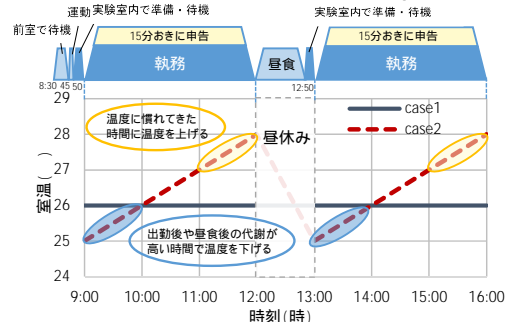


図5 室温変化を与える実験のケース

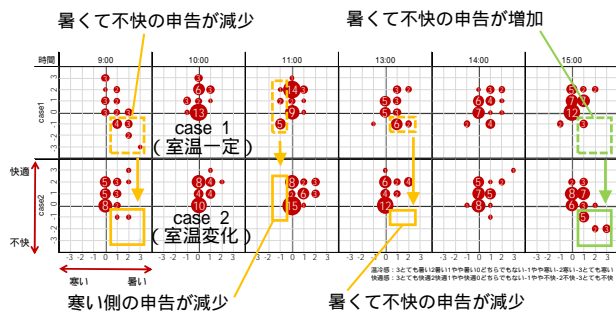


図6 時間毎の温冷感・快適感の分布

(4)小型センサーの活用検討

室内の複数箇所のセンシング情報を基に、室内温度分布を予測するモデルを作成し、その精度検証を実施した(図7)。ターゲットとなる制御対象ポイントを目標温度に最適な吹出温度を算出し、この温度を境界条件にCFDを再計算したところ、誤差は概ね0.5度未満だった。これは人体温冷感モデルの境界条件として利用することにつながる。

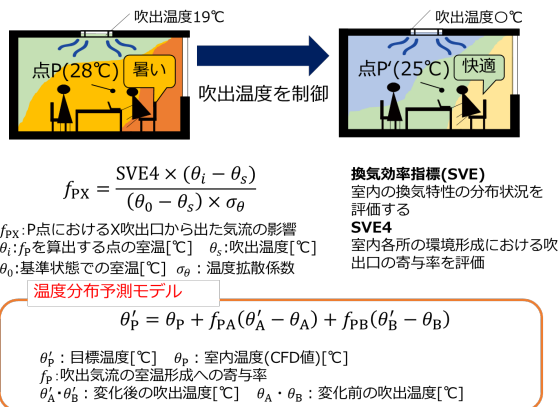


図7 温度分布の予測モデル概要 (特定のポイントPの温度を目標の温度にするためにAとBの空調吹出温度を最適化する)

(5)個人差に対応した空調システムの検討

渦輪をパルス的に人体にあて、パルス幅による人体への冷却量制御を検討した(図8)。空調吹出口に装着できる渦輪送出ユニット(図9)による検証と共に、より遠方へ送出可能な大型の送出装置を作成し性状を解析した(図10)。PIV解析により渦輪の進行速度と回転速度を明らかにし、渦輪の構造解析につなげた(図11)。解析はモックアップによる実験と共にLES(Large Eddy Simulation)による非定常CFDを実施した(図12)。

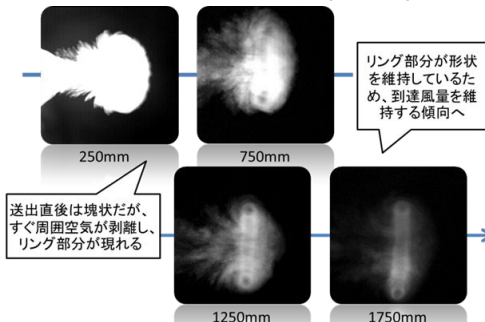


図8 高速度カメラによる渦輪の性状解析

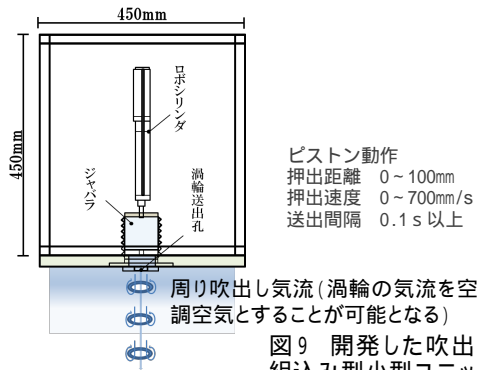


図9 開発した吹出口組込み型小型ユニット

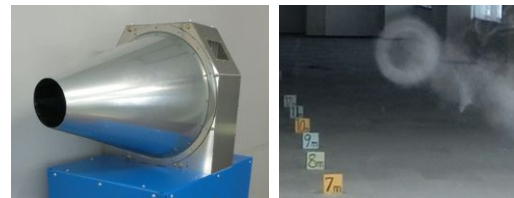


図10 開発した遠距離到達型大型ユニット

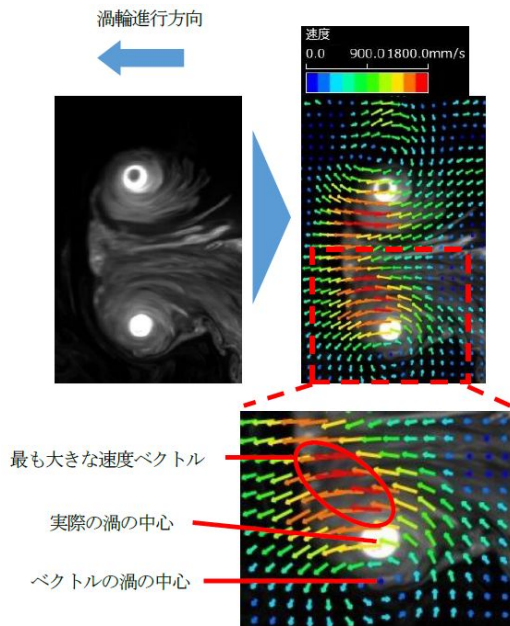


図11 PIVによる渦輪の解析(進行に伴い渦の中心とベクトルの中心にずれが生じ、回転速度がわかる)

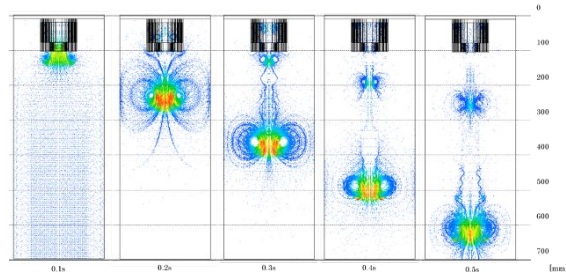


図12 LESによる渦輪の性状解析

また、局所冷却の影響に関し、実際の操縦席空調を対象として座席の局所空調及び座面冷却空調の検討を行い、実用化を図った。更に、タスクアンドアンビエント一体型空調吹出口を作成し(図13)被験者実験及び実オフィスにおける実測を行い空調システ

ムの実用化を図った(表2)。温冷感と快適感に関しては、CASE A に比べ CASE B の方が涼しく快適な申告が多くなっている。男女による違いを見てみると、温冷感では CASE A よりも CASE B の方がやや涼しい~寒い申告が減少しているのに対し、快適感に関しては CASE A で見られた、どちらでもない~不快の申告が、CASE B では見られなくなり、男性と同じ一律の室内温度では寒く不快に感じる女性でも、室内温度を上げ、タスク気流で個人の温冷感に適應する手法をとることで、女性の不快申告が減少し、全体の快適感、許容度の向上に繋がることがわかった(図14)。



図13 タスク吹出口

表2 実験ケース

	一次空気風量 [CMH]	空調設定温度 [°C]	吹出温度差 Δt[K]	タスク気流操作権	給気方向
CASE A	200CMH	26°C	10K	無	後方給気
CASE B		28°C	12K	有	

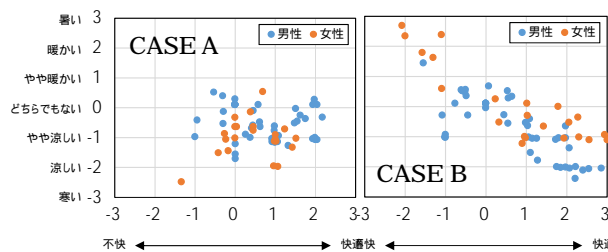


図14 温冷感と快適感の関係

以上により、個人の人体レベルの生理反応や心理状態を解析し、その結果に応じた自然な運用を行う空調設備・吹出しユニットの開発・実用化を図ってきた。

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 7件)

芹川真緒、佐藤誠、長井達夫、秋元孝之：住宅のエネルギー消費量と健康性の評価に関する研究 熱負荷シミュレーションを使用した戸建住宅の高断熱・高气密化に関する検討 その1、日本建築学会環境系論文集、査読有、733巻 pp.227-235、2017年3月、DOI:10.3130/aije.82.227

近本智行：大学での省エネ・環境負荷削減活動 照明・空調エネルギー削減、環境教育につながる取組みに関して、日本の科学者、査読無、Vol.51 No.5 通巻 580号、pp.238-241、2016年5月

李明香、尾崎明仁、近本智行：人体温熱感を指標とした温水床暖房の室内環境解析、日

本建築学会環境系論文集、査読有、第81巻 第719号、pp.65-71、2016年1月、DOI:10.3130/aije.81.65

Lee, M., Ozaki, A., Kuma, Y.: Numerical Simulation on Hygrothermal Environment of whole Buildings Taking into Account Complete HAM Features, Transaction Series on Engineering Sciences and Technologies, Transaction on Control and Mechanical Systems, 査読有、Vol.3, No. 1, pp. 52-58, 2014年

Lee, M., Ozaki, A., Maeda, M.: Development of Energy-Efficient Houses Equipped with Central Duct Space-Conditioning System and Solar Collector, Transaction Series on Engineering Sciences and Technologies, Transaction on Control and Mechanical Systems, 査読有、Vol.3, No. 2, pp. 71-75, 2014年

柳井崇、秋元孝之：汎用性に配慮したタスク空調システムの設計概要と基本性能の検証、日本建築学会環境系論文集、査読有、第79巻第700号、pp.525-534、2014年6月

柳井崇、秋元孝之：実オフィスにおけるタスク空調システムの性能評価、日本建築学会環境系論文集、査読有、第79巻 第699号、pp.419-428、2014年5月

[学会発表](計 51件)

前川尚輝、近本智行、李明香、北村邦彦、松永淳、江藤美緒：空調用の長距離空気砲・カノン (Kanon) の開発・実証(第2報) 渦輪の PIV 解析と風速測定による気流特性検証、平成28年度空気調和・衛生工学会大会、鹿児島大学(鹿児島) 2016年9月15日

近本智行・李明香・前川尚輝：ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築(その2) 渦輪を用いたパルス気流送出装置による吹出気流の特性検証実験(オーガナイズドセッション) 日本建築学会2016年度大会、福岡大学(福岡) 2016年8月25日

龜山大介・近本智行・李明香：ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築(その3) 室温変動制御が人間の知覚・心理・皮膚温度に及ぼす影響の検証(オーガナイズドセッション) 日本建築学会2016年度大会、福岡大学(福岡) 2016年8月25日

李明香・近本智行・織田浩平：トラクタの車室環境改善に向けた実大実験及び人体モデルによる検証(その1) 研究概要及び実測による車室環境把握と外皮性能が車室と人体に及ぼす影響の解析、日本建築学会2016年度大会、福岡大学(福岡) 2016年8月24日

織田浩平・近本智行・李明香：トラクタの

車室環境改善に向けた実大実験及び人体モデルによる検証(その2)局部冷却が人体に及ぼす影響の解析、日本建築学会 2016 年度大会、福岡大学(福岡)、2016 年 8 月 24 日

江藤美緒・北村邦彦・松永淳・近本智行・李明香・前川尚輝:空調用の長距離空気砲カノン・Kanon の開発(その1)送り出し機構および絞り形状、日本建築学会 2016 年度大会、福岡大学(福岡)、2016 年 8 月 24 日

M. Lee, T. Chikamoto, A. Ozaki, S. Okamoto, and M. Kozaki: The Effects of the Physiological Response of the Human Body and the Human Sensation by using the Directional or the Diffusible Airflow of the Personal Air-conditioning System, IBPSA Asia Conference, Jeju (Korea), 2016 年 11 月 28 日

小崎麻莉菜、近本智行、李明香、林英人、熊田瑤子、岡本茂:個別分散型エアコンを用いたパーソナル空調の検討(その10)実建物での夏期及び冬期における温熱環境・温冷感・省エネルギー性能の評価、平成 27 年度空気調和・衛生工学会大会、大阪大学(大阪)、2015 年 9 月 18 日

中嶋俊介、近本智行、岡克己、李明香、太田涼平:小規模業務ビルにおける省エネ・BCP 対策(第7報)在室検知センサを用いた照明・空調制御の有効性の検証、平成 27 年度空気調和・衛生工学会大会、大阪大学(大阪)、2015 年 9 月 18 日

李明香、近本智行、岡克己、中嶋俊介、太田涼平:小規模業務ビルにおける省エネ・BCP 対策(第9報)アンケートによるクーリングルームの快適温度・においの影響調査、平成 27 年度空気調和・衛生工学会大会、大阪大学(大阪)、2015 年 9 月 18 日

近本智行、李明香、太田涼平、秋元孝之、橋本哲:ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築(その1)研究概要及び渦輪を用いた連続送特性、日本建築学会 2015 年度大会、東海大学(神奈川)、2015 年 9 月 4 日

藤田理緒・近本智行:人体周辺の CO2 濃度と知的生産性に関する研究(その1)人体呼吸から吸気へのショートサーキットによる CO2 残留濃度に関する実験、日本建築学会 2014 年度大会、神戸大学(兵庫)、2014 年 9 月 14 日

近本智行・小林知広・太田涼平・伊藤紘一:夏期における外気温度変化が熱的快適性へ及ぼす影響に関する研究(その4)暑熱時期及び暑熱緩和時期の検証、日本建築学会 2014 年度大会、神戸大学(兵庫)、2014 年 9 月 13 日

小崎麻莉菜・近本智行・太田涼平・古賀修・熊田瑤子・岡本茂・横川彩香:個別分散型エアコンを用いたパーソナル空調の検討

(その7)指向性・拡散性切換可能な実吹出口の検証及び実空間を対象とした CFD、平成 26 年度空気調和・衛生工学会大会、秋田大学(秋田)、2014 年 9 月 5 日

R.OTA, T.CHIKAMOTO, T.KOBAYASHI, K.ITO: Verification of the Influence of Outdoor Air Temperature Change in Summer on Thermal Comfort (Part5) Experimental Result in Hot and Hot Moderation Environment, 平成 26 年度空気調和・衛生工学会大会(International Session), 秋田大学(秋田), 2014 年 9 月 3 日

〔図書〕(計 3 件)

近本智行:特集/ZEB 化に欠かせない空調負荷低減技術「躯体蓄熱による環境負荷低減」、空気調和・衛生工学、空気調和・衛生工学会、pp.345-352、2016 年 5 月号

近本智行:ヒューマンファクターによる暑熱感緩和とパーソナル空調制御・立命館大学、建築設備と配管工事、日本工業出版、pp.32-39、2016 年 6 月号

近本智行:クーリングルームとヒューマンファクター、建築設備士 47(11)、建築設備技術者協会、pp.20-24、2015 年 11 月号

〔その他〕

立命館大学 建築環境・設備研究室
<http://www.ritsumei.ac.jp/se/rv/chikamoto/homepage/web.html>

芝浦工業大学 秋元孝之研究室
<https://www.kk.shibaura-it.ac.jp/akimotolab/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近本 智行 (CHIKAMOTO, Tomoyuki)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 60388113

(2) 研究分担者

李明香 (LEE, Myonghyang)
九州大学・人間環境学研究院・助教
研究者番号: 00734766

秋元 孝之 (AKIMOTO, Takashi)
芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号: 30318894

(3) 連携研究者: なし

(4) 研究協力者

橋本 哲 (HASHIMOTO, Satoshi)
ダイキン工業・テクノロジー・イノベーションセンター推進室・担当課長