

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686065

研究課題名(和文)シーリングファンの簡易設計手法に関する研究

研究課題名(英文)Simplified Design Method of Air-conditioning using Ceiling Fan in Room

研究代表者

桃井 良尚(Momoi, Yoshihisa)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40506870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人工気候室において夏季の被験者実験を行い、気流曝露下での皮膚温及び心理量の時間変化を測定した。サーマルマネキン実験により対流熱伝達率を測定し、人体モデルを用いて気流曝露時の温冷感予測を行った。また、実際の執務室において、冷暖房時の温度・気流分布、消費電力測定を行い、在室者アンケートにより主観評価を得た。さらに、等温場において室容積とシーリングファンの回転数を変化させたCFD解析を行い、非等温場においてエアコンとシーリングファンの位置関係が気流・温度分布に与える影響について検討を行った。最終的には、得られた消費電力及びSET\*低減効果から、シーリングファンの選定チャートを作成した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the measurement of the skin temperature and the subjective evaluation were conducted under a ceiling fan in the climate chamber in the summer. Convective heat transfer coefficient was measured by a thermal mannequin experiment and the thermal sensation was predicted. The temperature and velocity distribution and the electricity consumption were measured and the subjectivity evaluation of the occupants was conducted by the questionnaires in an actual office. Then, CFD simulations in nonisothermal and isothermal condition were performed. The influence of the room volume and the rotational speed of the ceiling fan on the indoor airflow and temperature distribution was investigated in the isothermal condition. The influence of the arrangement of the air conditioner and the ceiling fans was investigated in the cooling and heating condition. Finally, a selection chart of a ceiling fan was gained from the reduction effect of the electricity consumption and SET\*.

研究分野：建築環境工学

キーワード：シーリングファン オフィス エアコン 省エネルギー 気流感 温冷感 快適感 CFD

1. 研究開始当初の背景

一般的な気流吹き出し空調に対して、シーリングファン(以降、CF と記す)をはじめとする気流制御デバイスを組み合わせた空調方式では、吹出し風量の低減(ファン動力の削減)、大温度差空調に有利(ポンプ動力の削減、ダクト・配管サイズの縮小によるコスト削減)、気流感による冷暖房設定温度の緩和(空調エネルギーの削減)、空調立ち上がり時間の短縮などのメリットが考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、従来の空調システムに加えて空調室内において CF を併用することにより、省エネルギー性の向上と気流による熱的快適性の確保を目指すものであり、CF を導入した際に形成される室内温度・気流分布を詳細に把握した上で、CF の気流制御効果に対して定量的に評価する手法及び CF の簡易設計手法を確立することを目的としている。また、その効果を評価するために CFD 解析とエネルギーシミュレーションを連成させた解析手法の検討についても行う。

3. 研究の方法

(1) 夏季のシーリングファン気流曝露時における気流・温熱環境の主観評価(関連学会発表⑯⑰⑱)

人工環境気候室(図1)において、夏季を想定した被験者実験を行い、CF 気流に長時間曝露された際の皮膚温及び心理量・生理量の時間変化について測定を行った。

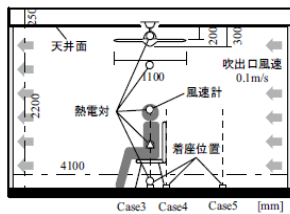


図1 実験室概要

(2) サーマルマネキンによる人体各部位対流熱伝達率の測定および65MNモデルによるSET\*予測(関連学会発表)

(1)と同じ人工環境気候室において、被験者実験で測定した皮膚温データを入力条件としてサーマルマネキン実験を行い、対流熱伝達率を測定し、人体モデルを用いてSET\*によるCF気流曝露時の温冷感予測を行った。

(3) 夏期及び冬期の実オフィス空間における温冷感及び快適感の主観評価(関連学会発表)

CFを設置した実際の執務室において、夏期冷房時及び冬期暖房時の室内温度・気流分布、ACとCFの消費電力及び在室者アンケートにより主観評価を得た。気流感や温冷感等に関して毎日、アンケートを各座席に配布し回答を得た。毎日にACの設定温度及びCF

の回転数を変化させ、夏期は計4条件(AC26 /CF停止, AC28 /CF停止・ソフト(71rpm)・弱(117rpm))とし、冬期は計7条件(AC20 /CF停止・弱・中, AC22 /CF停止・弱・中, AC24 /CF停止)とした。CFの気流方向は、夏期は「下向き」、冬期は「上向き」で固定した。AC風量は、夏期は「強」とし、風向は「スイング運転」、冬期は「中」または「弱」とし、風向は「下向き」とした。

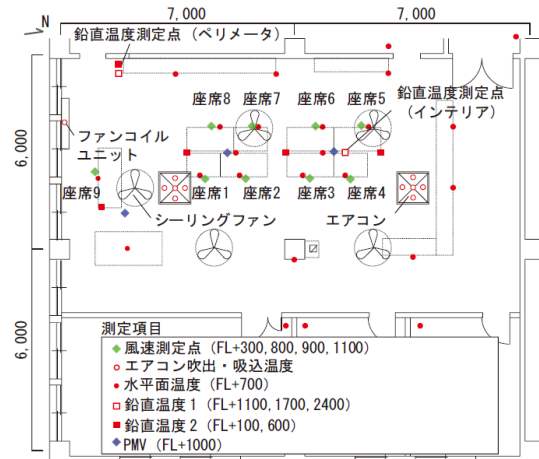


図2 執務室概要(夏期実測時)

(4) CFD解析による非空調時のシーリングファンによる室内空気の攪拌効果予測(関連学会発表)

CF周辺の気流場について、基本的な性状を把握するため、室容積とCFの回転数(風量)を変化させた時の等温場でのCFD解析を行った。また、予備検討として、解析空間に対してCFが1台のみが存在する時の解析と、周辺にCFが存在する時(図3)の解析とを比較し、1台空間で解析することの妥当性について検討した。CFD解析に入力するCF気流データは既往の測定値に基づくCF気流モデルを用いた。

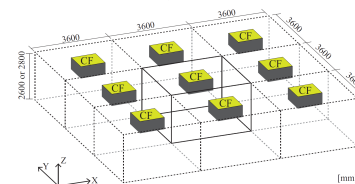


図3 解析空間(全体空間)

(5) CFD解析による冷暖房時のシーリングファンによる室内空気の攪拌効果予測(関連学会発表)

非等温場においても検討を行った。図4に解析空間を示す。12.8m x 12.8m x 2.6mのインテリア空間を想定し、空間の天井面中央に4方向天井カセット形エアコンの吹出口を設けた。また、エアコンから3.2mの距離に2台または4台のCFを設置した。設置位置はエアコン吸込口に対し0°または45°とした。乱流モデルには、標準k-εモデルを用いて、流れ場と温度場の解析を行った。吹出風量は810m³/hとした。室内設定温度22を想定し、吹出温度は32.1とした。

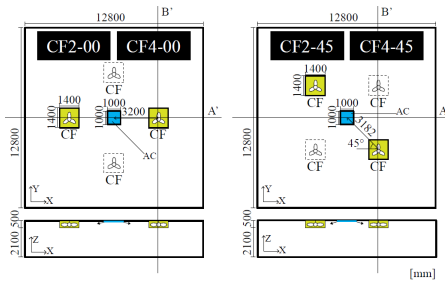


図4 解析空間

(6) エネルギーシミュレーションとCFDとの連成解析に関する研究 (関連学会発表 18②②)

エネルギーシミュレーションとCFD解析の連成計算手法(図5)について、図6に示す解析空間においてメッシュサイズや温度境界条件の検討を行い、室内の温度分布がエネルギー収支に与える影響を検討した。

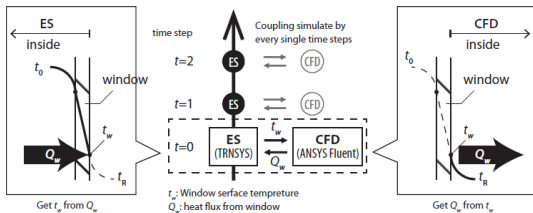


図5 ESとCFDの連成計算の概要図

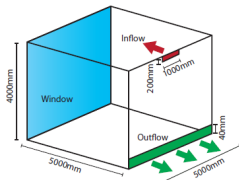


図6 解析対象空間

4. 研究成果

(1) 夏季のシーリングファン気流曝露時における気流・温熱環境の主観評価

各条件における全被験者の定常時の皮膚温の平均を図7に示す。CF停止条件(case1,2)に比べてCF直下(Case3)では頭部・下腿部で、Case4では頭部・腕部・大腿部で皮膚温が低下した。図8に温冷感における被験者全員の全身と部位の相関関係を示す。気流を受ける頭などの上半身の部位は強い相関関係が見受けられた。図9に、26・CF停止条件(Case1)を基準として各条件における評価値の差を算出した結果を示す。CFを使用することで、約2の室温上昇を補う効果が得られた。

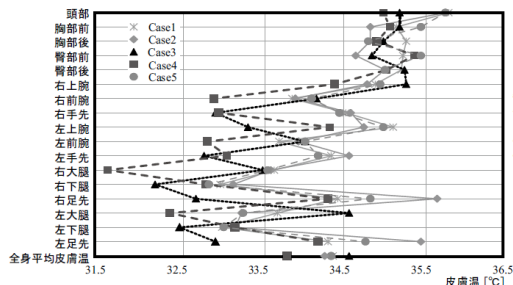


図7 CF気流曝露時の被験者平均皮膚温

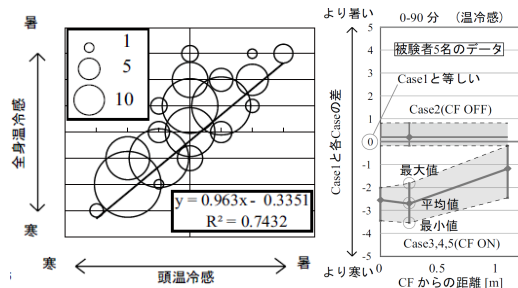


図8 全身温冷感と頭部温冷感の相関

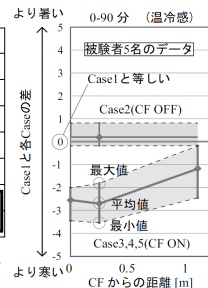


図9 温冷感低下効果

(2) サーマルマネキンによる人体各部位対流熱伝達率の測定および65MNモデルによるSET\*予測

図10に全身・各部位対流熱伝達率を示す。風速と対流熱伝達率には強い相関が見られた。胸部・腰部前では、他の部位より対流熱伝達率の値が大きい。これを65MNに適用し、皮膚温及び65MNSET\*を算出した。検討した条件では、被験者の皮膚温測定結果と概ね一致し、2nodeSET\*に近い値になった(図11)。さらに、着衣量が変化した時のSET\*の予測値も算出し、設計資料に資するデータを得た。

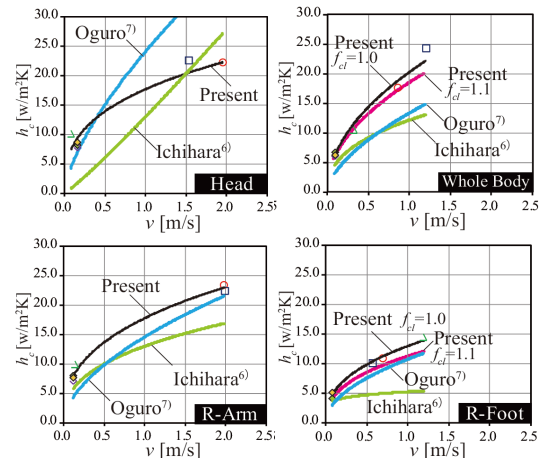


図10 全身及び各部位対流熱伝達率

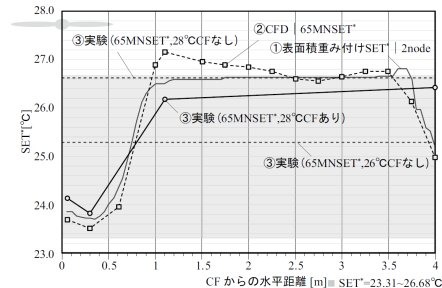


図11 実験及びCFDから算出したSET\*

(3) 夏期及び冬期の実オフィス空間における温冷感及び快適感の主観評価

・夏期実測

図12に、各測定高さの1分間平均スカラー風速を各条件・各座席ごとに単純平均した結果を示す。図13に、気流感・気流快適感・

全身温冷感に関するアンケートの結果を示す。CFを用いることで、AC26 設定ほどではないものの AC28 設定に比べて、温冷感の低下が見られた。また、CF を回すと、少なからずその気流を不快に感じる人が一部いることも分かった。図 14 に、各条件ごとに各座席での温度と風速をプロットした図を示す。主観評価と同様の傾向が見られる。また、図 15 に、横軸に空調時間帯日積算消費電力を、縦軸に座席ごとの SET\* (代表風速:全身平均風速)をプロットした。26 /CF 停止条件では、SET\* は低いものの、消費電力も大きくなる傾向が見て取れる。

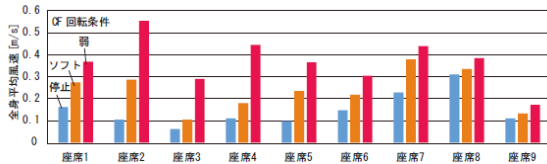


図 12 各座席での全身平均風速

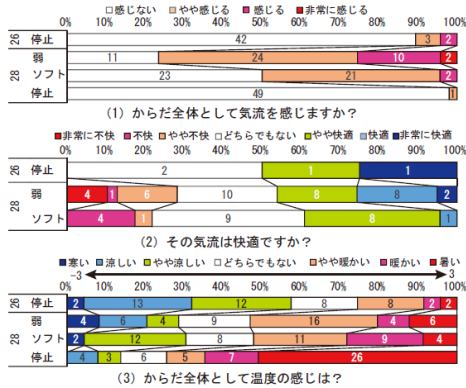


図 13 気流感, 気流快適感, 全身温冷感

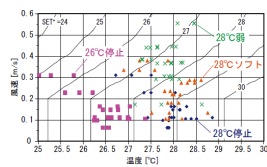


図 14 各座席での温度, 風速, SET\*

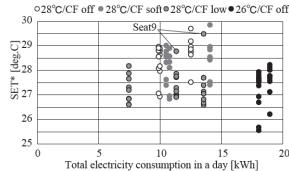


図 15 SET\*と消費電力の関係

・冬期実測

図 16 に、インテリア部分における、足元高さ (FL+100) を基準とした 20・22 での鉛直温度分布を示す。ここで、エアコンがオンオフ運転していたことから、各条件に関し、エアコン稼働時間帯と停止時間帯それぞれの温度の平均値をグラフに表した。グラフから、20・22 どちらも CF を稼働することによって、上下温度分布が解消される傾向にあることがわかる。

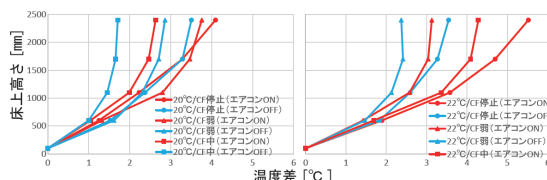


図 16 各条件における上下温度分布

(4) CFD 解析による非空調時のシーリングファンによる室内空気の攪拌効果予測

解析結果の一例として、天井高が 2.6m と 3.0mの結果(解析空間は 3.6m(W)×3.6m(D), 回転数 160prm)を図 17 に示す。天井高が変わると居住域での最大風速が 0.1m/s 前後変化するが、平均風速はほぼ等しいという結果が得られた。しかし、巻き込み風量に応じて風速分布や上下風量にも若干の差異が生じる場合があるため、解析空間の壁面(境界面)での上昇気流に着眼する必要があるという結論を得た。

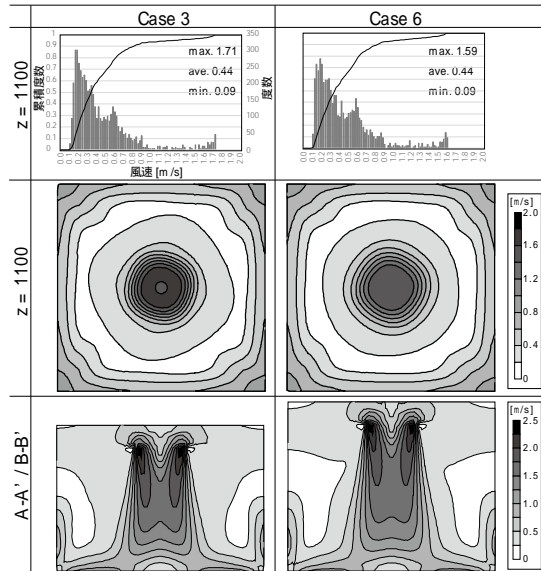


図 17 非空調時の CF 周辺の CFD 解析 (Case3:CH=2.6m, Case6:CH=3.0m)

(5) CFD 解析による冷暖房時のシーリングファンによる室内空気の攪拌効果予測

図 18 に解析結果の一例として、暖房時における CF なし条件と CF4 台/45 度配置条件の温度分布を示す。また、図 19 に全条件の平均鉛直温度分布を示す。CF なし条件では、大きな上下温度分布が生じているのに対し、CF を運転した条件では、上下温度差が小さい。最も上下温度差が小さい条件は CF4 台/45 度配置条件である。CF2 台よりも CF4 台条件の方が上下温度分布が解消される。

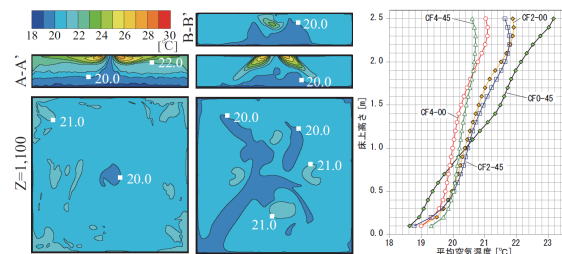


図 18 暖房時の CFD 解析結果 図 19 鉛直温度分布 (左:CF なし,右:CF4 台/45 度配置)

(6) エネルギーシミュレーションと CFD との連成解析に関する研究

解析結果の一例として、図 20~22 に、それぞれ、鉛直断面の温度分布, 風速ベクトル,

窓面の表面温度と熱流束を示す。室内温度分布が生じる条件では、1質点系モデルと比べ、流入熱負荷と室内温度分布が変化し、連成解析の有効性が確かめられた。

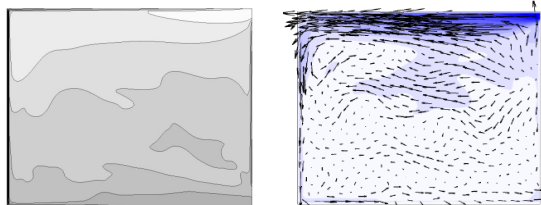


図 20 鉛直温度分布 図 21 風速ベクトル

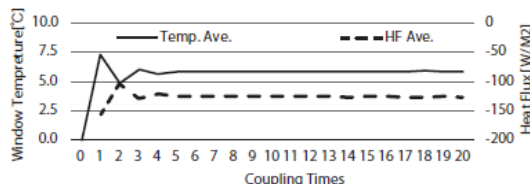


図 22 窓面表面温度及び熱流束

最終的には、上記の結果から得られた消費エネルギー及び SET\*の低減効果を踏まえ、図 23 に示す CF の選定チャートを作成した。

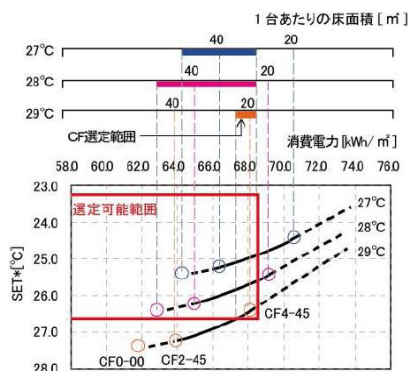
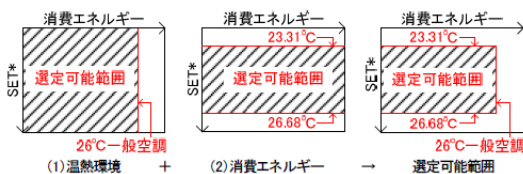


図 23 CF の選定チャート

### 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 0 件)

[学会発表](計 22 件)

花川拓, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, シーリングファンの簡易空調設計に関する研究(その 1) CFD によるシーリングファン周辺気流特性に関する予備検討, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.296-299, 2015.3, 大阪

Yoshihisa Momoi, Kazunobu Sagara, Toshio Yamanaka, Hisashi Kotani, EFFECTS OF CEILING FAN ON VELOCITY AND

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN OFFICE ROOM, ROOMVENT 2014, In CD-ROM, pp.590-597, 2014.10, São Paulo

花川拓, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 古賀修, 一谷匡陞, シーリングファンを用いたオフィス空間内の熱環境調整手法に関する研究(その 9) 冬期執務室の室内鉛直温度分布と主観評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.759-760, 2014.9, 神戸

桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 花川拓, 古賀修, 一谷匡陞, シーリングファンを用いたオフィス空間内の熱環境調整手法に関する研究(その 8) 夏期執務室の温熱環境と主観評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.757-758, 2014.9, 神戸

花川拓, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 古賀修, 一谷匡陞, シーリングファンを用いたオフィス空間内の熱環境調整に関する研究(その 10) 冬期執務室の風速・温度測定結果と主観評価, 平成 26 年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 第 6 巻, pp.185-188, 2014.9, 秋田

桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 古賀修, 一谷匡陞, 高山真, 笠原万起子, CFDSimulation of Velocity and Temperature Distribution using Ceiling Fan for Summer in Office Room, 平成 26 年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 第 6 巻, pp.1-4, 2014.9, 秋田

花川拓, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 古賀修, 一谷匡陞, シーリングファンを用いたオフィス空間内の熱環境調整手法に関する研究(その 6) 夏期執務室の温度・風速分布及び主観評価, 日本建築学会近畿支部研究報告集 第 54 号 環境系, pp.225-228, 2014.6, 大阪

森下悟史, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 空調シミュレーションと CFD との連成解析に関する研究(その 3) 窓面温度と貫流熱流束の交換による連成解析, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.369-372, 2014.3, 大阪

花川拓, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 森下悟史, 古賀修, 一谷匡陞, 高山真, 笠原万起子, シーリングファンを用いたオフィス空間内の熱環境調整に関する研究(その 9) 夏期執務室における主観評価と SET\*, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.361-364, 2014.3, 大阪

笠原万起子, 高山真, 古賀修, 一谷匡陞, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 森下悟史, 花川拓, シーリングファンを用いたオフィス空間内の熱環境調整に関する研究(その 8) 夏期執務室の室

内温度分布及び座席での風向風速分布，  
空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究  
発表会論文集，pp.353-356，2014.3，大  
阪

森下悟史，桃井良尚，相良和伸，山中俊  
夫，甲谷寿史，空調シミュレーションと  
CFD との連成解析に関する研究（その 2）  
メッシュサイズと温度境界条件が窓面熱  
流束と室内温度分布に及ぼす影響，平成  
25 年度空気調和・衛生工学会学術講演会  
講演論文集，第 5 巻，pp.201-204，2013.9，  
長野

笠原万起子，高山眞，古賀修，一谷匡陞，  
桃井良尚，相良和伸，山中俊夫，甲谷寿  
史，森井祐介，シーリングファンを用い  
たオフィス空間内の熱環境調整に関する  
研究（その 7）気流感による空調設計及  
び評価，平成 25 年度空気調和・衛生工学  
学会学術講演会講演論文集，第 6 巻，  
pp.49-52，2013.9，長野

森井祐介，桃井良尚，相良和伸，山中俊  
夫，甲谷寿史，古賀修，一谷匡陞，高山  
眞，笠原万起子，シーリングファンを用  
いたオフィス空間内の熱環境調整に関す  
る研究（その 6）対流熱伝達率測定値に基  
づく CFD 解析による SET\* の算出，平成 25  
年度空気調和・衛生工学会学術講演会講  
演論文集，第 6 巻，pp.45-48，2013.9，  
長野

桃井良尚，相良和伸，山中俊夫，甲谷寿  
史，森井祐介，古賀修，一谷匡陞，高山  
眞，笠原万起子，シーリングファンを用  
いたオフィス空間内の熱環境調整に関す  
る研究（その 5）CFD 解析による暖房時の  
室内空気の攪拌効果予測，平成 25 年度  
空気調和・衛生工学会学術講演会講演論  
文集，第 6 巻，pp.41-44，2013.9，長野  
桃井良尚，相良和伸，山中俊夫，甲谷寿  
史，森井祐介，古賀修，一谷匡陞，宮本  
征一，シーリングファンを用いたオフィ  
ス空間内の熱環境調整手法に関する研究  
（その 6）サーマルマネキンによる人体  
各部位の対流熱伝達率測定に基づく  
65MNSSET\* の算出，日本建築学会大会学術  
講演梗概集 D-2，pp.709-710，2013.9，  
札幌

森井祐介，桃井良尚，相良和伸，山中俊  
夫，甲谷寿史，古賀修，一谷匡陞，シー  
リングファンを用いたオフィス空間内の  
熱環境調整手法に関する研究（その 5）  
夏季のシーリングファン気流曝露時に着  
座位置が温冷感に及ぼす影響，日本建築  
学会大会学術講演梗概集 D-2，  
pp.707-708，2013.9，札幌

森下悟史，桃井良尚，相良和伸，山中俊  
夫，甲谷寿史，エネルギーシミュレーシ  
ョンと CFD との連成解析に関する研究  
（その 2）メッシュサイズと温度境界条  
件が窓面熱流束と室内温度分布に及ぼす  
影響，日本建築学会大会学術講演梗概集

D-2，pp.573-574，2013.9，札幌  
森下悟史，桃井良尚，相良和伸，山中俊  
夫，甲谷寿史，エネルギーシミュレーシ  
ョンと CFD との連成解析に関する研究  
（その 1）CFD 計算回数とメッシュサイ  
ズが窓面熱流束と室内温度分布に及ぼす  
影響，日本建築学会近畿支部研究報告集  
第 53 号，環境系，pp.313-316，2013.6，  
大阪

森井祐介，桃井良尚，相良和伸，山中俊  
夫，甲谷寿史，古賀修，一谷匡陞，シー  
リングファンを用いたオフィス空間内の  
熱環境調整手法に関する研究（その 4）  
夏季のシーリングファン気流曝露時に  
おける着座位置が温冷感・快適感に及ぼす  
影響，日本建築学会近畿支部研究報告集  
第 53 号，環境系，pp.309-312，2013.6，  
大阪

山口麻有，桃井良尚，相良和伸，山中俊  
夫，甲谷寿史，森井祐介，古賀修，一谷  
匡陞，高山眞，笠原万起子，宮本征一，  
シーリングファンを用いたオフィス空間  
内の熱環境調整に関する研究（その 4）  
サーマルマネキンによる人体各部位対流  
熱伝達率の測定および 65MN への適用，空  
気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発  
表会論文集，pp.81-84，2013.3，大阪

②① 森井祐介，桃井良尚，相良和伸，山中俊  
夫，甲谷寿史，山口麻有，古賀修，一谷  
匡陞，高山眞，笠原万起子，シーリング  
ファンを用いたオフィス空間内の熱環境  
調整に関する研究（その 3）夏季のシー  
リングファン気流曝露時に着座位置が  
気流・温熱環境の主観評価に及ぼす影  
響，空気調和・衛生工学会近畿支部学  
術研究発表会論文集，pp.77-80，2013.3，  
大阪

②② 森下悟史，桃井良尚，相良和伸，山中俊  
夫，甲谷寿史，空調シミュレーションと  
CFD との連成解析に関する研究（その 1）  
連成手法に関する基礎的検討，空気調  
和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会  
論文集，pp.21-24，2013.3，大阪

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

桃井 良尚 (MOMOI YOSHIHISA)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：40506870

### (2) 連携研究者

山中 俊夫 (YAMANAKA TOSHIO)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：80182575

相良 和伸 (KAZUNOBU SAGARA)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：30109285

甲谷 寿史 (HISASHI KOTANI)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：20243173