

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360256
 研究課題名（和文） 多様な暖冷房方式と通風利用による快適性と省エネ性の統合的評価手法に関する研究
 研究課題名（英文） Study on Integrated Assessment of Comfort and Energy Saving by Using Various Heating and Cooling Systems and Cross-Ventilation
 研究代表者
 坂本 雄三（SAKAMOTO YUZO）
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号：30114490

研究成果の概要（和文）：「建物」と暖冷房「機器」の両者を踏まえ、快適性と省エネ性を統合的に評価する手法（以下、統合的評価手法と記す）を検討し、提案するに至った。検討にあたって、各種暖冷房方式による温熱環境の差異や実働効率などの機器の稼働状況などの実態を実験・実測により把握し、そのデータを整備した。また、通風による冷房負荷削減効果を予測する上で不可欠となる、建物に作用する風圧力に関するデータベースを風洞実験により整備した。なお、統合的評価手法については、今後も検討・改良を加えていく所存である。

研究成果の概要（英文）：An integrated assessment method of comfort and energy saving were investigated, and proposed in this study. This method is based on both sides of “Building specifications” and “HVAC systems”. In this investigation of the method, thermal environment by various HVAC systems and actual efficiency of equipments were arranged by experiments and actual survey. Moreover, the data base of wind pressure coefficients of buildings was maintained by the wind tunnel experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2008 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2009 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境と設備

キーワード：建築環境・設備、省エネルギー、暖冷房、通風、モデル化

1. 研究開始当初の背景

住宅における省エネの更なる推進が急務となる中、2次エネルギー消費の3分の1程度を占める暖冷房の省エネは特に重要である。現状は、暖冷房の単独使用を前提として、

建築サイド（断熱・気密の向上）・機器サイド（定格効率の向上）で別々に対策が行われている。しかしながら、機器の実稼働効率は、建物負荷に大きく左右される点、暖冷房の方式により実現する温熱環境（快適性）に差異

がある点など、現状のように、建築と機器を別々に対策するだけでは、更なる省エネ化には限界がある。

2. 研究の目的

上記のように、建築サイドと機器サイドを別々に検討するのではなく、住宅における更なる省エネ化のため、「1. 建物負荷と機器容量のバランス」、「2. 暖冷房方式の多様化」、「3. 通風利用による冷房負荷低減」の3つに着目し、それらを統合的に評価する手法の構築を目指した。

なお、本研究では、我が国の関東以南の比較的温暖な地域において省エネが期待されるヒートポンプを熱源とする暖冷房機器を検討対象とした。

3. 研究の方法

本研究は、(1) 実測、(2) 実験、(3) 計算の3つの手法を駆使して実施した。研究成果の統合的評価手法は、計算に基づくものであるが、その際の計算条件に関するデータや結果の検証用のデータを実測、実験によって把握・整理した。それぞれの手法の概要を以下に記す。

(1) 実測

次世代省エネ基準を満たし、間仕切りのない開放的なプランの実住宅を対象とした実測を行った。この住宅には、ヒートポンプを熱源とする水蓄熱式床暖房・①短期実測と②長期実測を行い、温熱環境や機器の実稼動効率などの実態の把握を行った。また、結果の一部を後述するシミュレーション結果の検証データとして活用した。

①短期実測

新築物件を居住者に引き渡す直前（冬期）と夏期に2週間程度の短期間に建物外皮性能（断熱気密性）・通風換気性状・室内温熱環境・暖冷房機器消費エネルギーと効率などを実測し、実態の把握を行った。

②長期実測

実際に人が住んでいる状態で長期間の室内温熱環境・暖冷房機器の使用状況（処理熱量）と消費エネルギーなどを実測し、実態の把握を行った。なお、機器の設定温度等を居住者にアドバイスし、快適性を担保した省エネ運転に関する検討を実施した。

(2) 実験

実験は、主に暖冷房機器を対象とした①人工環境室実験と、通風を対象とした②風洞実

験の2通り実施した。

①人工環境室実験

本研究機関所有の温湿度を任意に設定可能な人工環境室内に7畳程度の居室を模擬した暖房ブースを設置。そのブースを対象として、対流式・放射式・床暖房などの各種暖冷房方式の温熱環境形成能力（設定温度に達するまでの時間・温度分布・気流分布など）、および、熱負荷とエネルギー消費を把握した。

②風洞実験

本研究機関所有の乱流境界層風洞を用いて、住宅地を想定した実験を行い、周辺建物の形状や配置に応じた、風圧係数や通風時の気流性状を把握するとともに、実測物件の通風時の気流性状や、後述するシミュレーション検討用のデータ整備を行った。

(3) 計算

計算は、年間または期間を通したエネルギー消費量を評価する①マクロ・シミュレーションと、ある瞬間ではあるが、対象とする室の温度や気流の分布を加味して快適性を評価する②ミクロ・シミュレーションの2通りを実施した。また、それらの結果を受け、快適性と省エネ性を統合的に評価する手法を検討した。なお、エネルギー消費量を算出するための機器の部分負荷効率の一部は、本研究開始前に実施した実験や実測の結果、および、他機関による既往研究成果を用いた。

①マクロ・シミュレーション

本研究では、年間または期間を通した建物のエネルギー消費量や温度状況を把握するための計算をマクロ・シミュレーションと呼ぶこととした。具体的には、熱換気回路網計算により、熱負荷と温度状況を把握し、熱負荷と機器の効率特性データからエネルギー消費量を算出した。

シミュレーションソフトは、通風による換気量と熱負荷を連成して計算することが可能である汎用ソフト TRNSYS-COMIS (Wisconsin 大学) と、SimHeat(建築環境ソリューションズ)を使用した。

②ミクロ・シミュレーション

各種暖冷房方式や通風利用時に問題となる温度や気流の不均質などについて、マクロ・シミュレーションから抽出した代表日時の境界条件に対して、数値流体解析（以下CFD: Computational Fluid Dynamics と記す）を行った。この快適性の評価を行うシミュレーションをミクロ・シミュレーションと呼ぶこととした。

4. 研究成果

(1) 各種暖房方式による温熱環境の把握

人工環境室実験に設置した暖房ブース（図1）において、エアコン・床暖房・壁掛パネル（表1）によって形成される温熱環境を詳細に計測し、比較した。平均室温の変化を示した図2のように、それぞれの機器において、24時間ずつ、設定温度を変化させて計測を行った。主な知見は以下の通り。

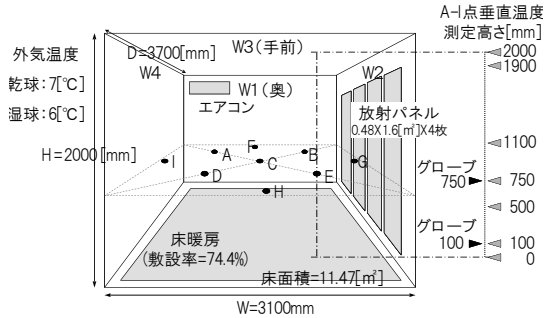


図1 実験室の概要

表1 暖房機器の種類と設定温度

暖房機器種類	熱源	定格能力	設定温度* (送水温度)
エアコン	HP	2.5kW	16, 20, 24°C
床暖房	温水 HP	6.0kW	30, 40, 50°C
壁掛パネル	温水 HP	6.3kW	30, 40, 50°C

*24時間ずつ設定

各機器の室温の立ち上がりは、図2のように、空気を暖めるエアコンが最も早く、放射式その他2つは非常に遅い（各機器の暖房能力による差はあるが、定性的な傾向として）。

一方で、壁掛パネルは、空気温度だけでなく、周壁を放射により暖める効果があることを定量的に把握した（図3）。

上下の温度分布は、図4のように、壁掛パネルが大きくなる傾向があることが確認された。これは、壁掛パネルは周囲への放射熱伝達だけでなく、パネル面と空気温度の差によって生じる自然対流による熱伝達を無視し得ないことを意味する。

そこで、壁掛パネルの使い方による放射と対流成分の割合を詳細に把握した。結果の一例と示す図5は、パネルが1枚（送水温度50°C）、2枚（送水温度40°C）、4枚（送水温度30°C）の場合である。各ケースの送水温度が異なるが、これは、室温が概ね同じになるように設定したためである。このように、放射成分は、55~65%となることが定量的に明らかとなった。

この実験では、温度101点、周壁（天井・床を含む）の熱流63点など、詳細なデータが得られており、各種方式による温熱環境の定性的な傾向の把握だけでなく、CFDにおける境界条件の設定や解析精度の検証のための貴重なデータが蓄積された。

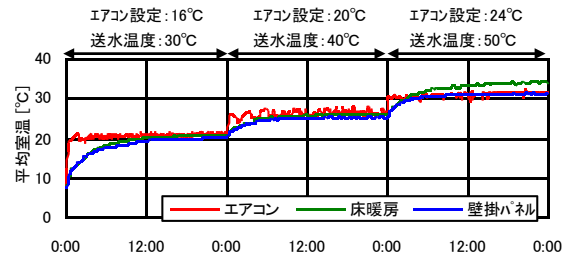


図2 平均室温の時系列データ

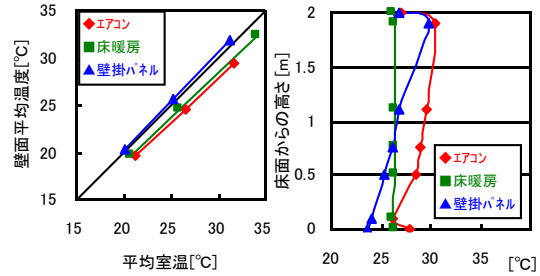


図3 室温と壁面温度 図4 垂直温度分布

そこで、壁掛パネルの使い方による放射と対流成分の割合を詳細に把握した。結果の一例と示す図5は、パネルが1枚（送水温度50°C）、2枚（送水温度40°C）、4枚（送水温度30°C）の場合である。各ケースの送水温度が異なるが、これは、室温が概ね同じになるように設定したためである。このように、放射成分は、55~65%となることが定量的に明らかとなった。

この実験では、温度101点、周壁（天井・床を含む）の熱流63点など、詳細なデータが得られており、各種方式による温熱環境の定性的な傾向の把握だけでなく、CFDにおける境界条件の設定や解析精度の検証のための貴重なデータが蓄積された。

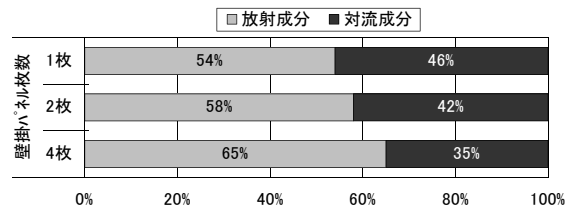


図5 壁掛パネルの放射・対流成分の割合

(2) 実住宅の空調時の温度状況と機器稼働状況の実態把握

実測対象の住宅は、図6に示すように、冷温水HPを熱源とする放射パネル、温水HP熱源の水蓄熱式床暖房（深夜電力利用）が設けられている。図7に示すように、機器の使い方による温熱環境やエネルギー消費量を長期にわたり計測するとともに、実際の住宅での暖房方式による温度状況の差異などのデータを取得した。図8に温熱環境の例として、パネルと床暖房使用時の垂直温度分布を示す。上記実験結果と同様、パネルは上下の

温度差が大きくなることわかる。

また、金田一ら^{参考1)}の提案する予測式から算出した温水HPのCOPと実測結果を比較したところ、図9のように概ね一致していた。したがって、シミュレーションにおいては、その予測式からHP効率を求め、機器のエネルギー消費量を算出することとした。

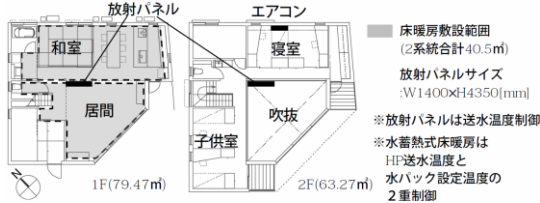


図6 実測対象住宅の概要

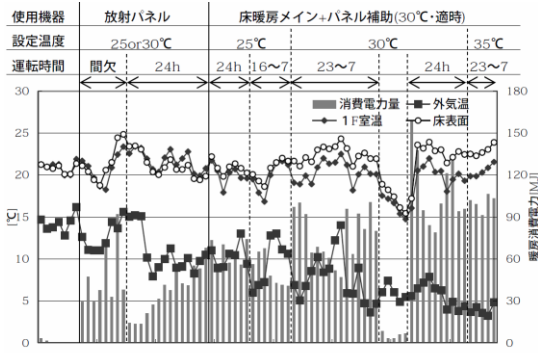


図7 2008年度冬期の日平均データ

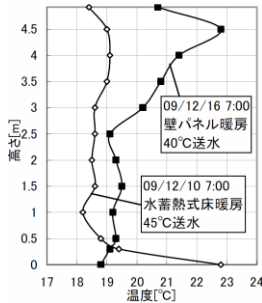


図8 垂直温度分布

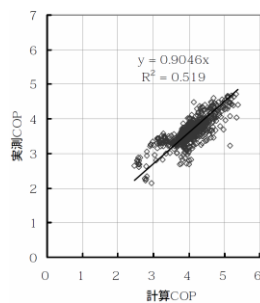


図9 機器のCOP

【参考文献】1)金田一他：温水ヒートポンプ床暖房システムの適用可能性に関する研究、空気調和衛生工学会大会 2008 2)田中他：住宅用ヒートポンプ式暖冷房機器のエネルギー消費量に関する研究、日本建築学会大会 2007

(3) 機器の使い方による消費エネルギーと温度状況の整理 (マクロ・シミュレーション)

実測住宅を対象としたマクロ・シミュレーションを実施。概要を表2、3に示す。本検討では、図10に示すように、機器の使い方による消費エネルギーと温度状況の整理を行った。その際、新たに不快時間率 (=延べ不快時間数/延べ在室時間数) という指標を設け、快適性のある程度担保した上での最適な機器の使い方を検討した。

結果、図11に示すように、機器の組み合わせ、設定温度によって省エネが実現し得ることを定量的に示した。

表2 シミュレーション概要

使用ソフト	AE-Sim/Heat
気象データ	拡張アメダス2000年標準データ「横浜」
暖房期間	11/6~4/25
建物モデル	実測対象住宅 を下図のように5室に近似して計算

床暖房は「リビング(+吹抜)」「和室+DK」にHP1台ずつ
放射パネルはHP1台
エアコンは「リビング+和室+DK」「寝室」「子供室」にHP1台ずつ
で算出した

表3 機器の設定概要

	設定温度[°C]	使用したHP
水蓄熱式床暖房	30、35、40、45	6.0[kW]×2台
温水式床暖房	25、30、35、40	6.0[kW]×2台
放射暖房パネル	30、35、40、45	6.0[kW]×1台
エアコン	18、20、22	2.5[kW]×3台

※床暖房、放射暖房パネル → 床、間仕切壁内部の面温度を設定

エアコン → 制御する室温を設定

・消費エネルギー算出方法

熱負荷を処理熱量とし、既往研究で示されたCOP予測式によって算出

・暖房運転スケジュール

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	合計[h]	
S																										3
M																										8
L																										15
XL																										24

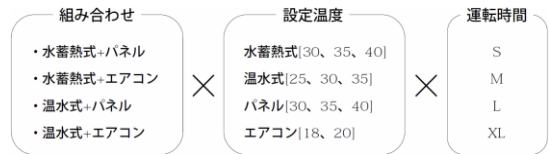


図10 検討ケース

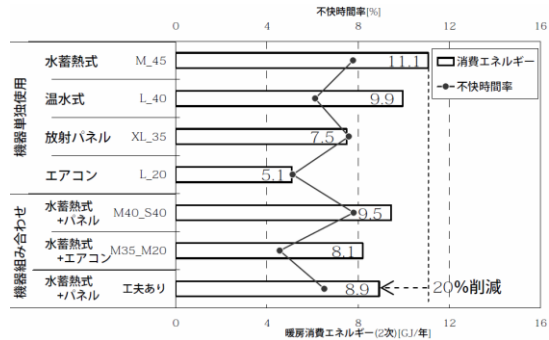


図11 機器の使い方によるエネ消費の比較

(4) ミクロ・シミュレーションによる室内温熱環境の評価手法の提案

居室内の温熱快適性を評価するためには、温度や気流分布の考慮が必要であり、CFD解析は有用な手段である。本研究では、その境界条件に、熱回路網計算の結果を利用する手法を検討した。図12に示すように、熱回路網計算(マクロ・シミュレーション)により、消費エネルギーを、CFDにより快適性を評価することが可能となる。本検討では、解析結果の精度検証の上、各壁面表面温度を境界条件に用いることとした。

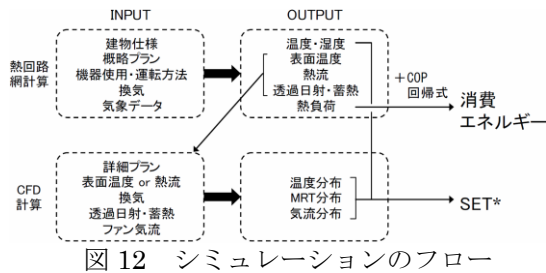


図12 シミュレーションのフロー

CFDと実測の比較を図13に示す。絶対値は精度向上の課題が残ったものの、温度分布等の定性的な傾向は把握することが可能と判断し、機器の種類や使い方による、室内の温熱環境の解析を行った。結果の一例として、壁パネルによる暖房時の結果を図14に示す。このように、温度や気流分布を把握し、快適性を評価する手法を構築した。

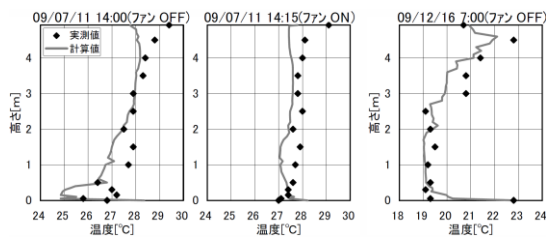


図13 計算結果と実測値の比較

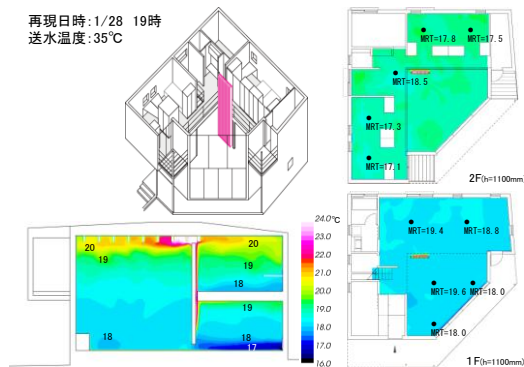


図14 壁パネル暖房使用時の計算結果

(5) 快適性と省エネ性の統合的な評価手法の構築

マクロ・シミュレーションとマイクロ・シミュレーションの結果を用いて、快適性と省エネ性の統合的な評価手法を検討し、ケーススタディを実施した。ケーススタディの検討ケースを表4に示す。ここでは、快適性の指標として、各室のSET*のばらつきを用いた。なお、SET*の算出は表5による。図15に示すように、SET*のばらつきが小さく、かつ、エネルギー消費量の小さい機器（および、その使い方）が良いという判断ができるようになる。

指標については、今後も検討を重ね、実態との整合性や、簡易化を進める必要がある。

表4 計算ケース

	機器	設定温度	運転時間	処理熱量 [MJ/月]	備考
case 1	床暖房	45°C送水	23:00-7:00	5827	
case 2	床暖房 壁パネル補助	40°C送水 35°C送水	23:00-7:00 起床在宅時	5944	
case 3	床暖房 壁パネル補助*	40°C送水 28°C送水	23:00-7:00 起床在宅時	5549	*寝室、子供室
case 4	床暖房 エアコン補助*	40°C送水 室温20°C	23:00-7:00 起床在宅時	5575	*寝室、子供室
case 5	壁パネル	35°C送水	24時間	4828	
case 6	壁パネル	43°C送水	16:00-7:00	4774	
case 7	壁パネル(分散)*	32°C送水	24時間	4752	*リビング・ダイニング、和室、寝室、子供室
case 8	エアコン(3台)*	室温20°C	16:00-7:00	3626	*ダイニング、寝室、子供室
case 9	エアコン(4台)*	室温20°C	16:00-7:00	3805	*リビング、ダイニング、寝室、子供室

※起床在宅時 = 5:00-7:00, 18:00-23:00
※太字caseは既往研究により提示された各種房時の不快時間率条件を満足する運転パターン

表5 SET*算出条件

温度[°C]	CFD計算値
MRT[°C]	CFD計算値
湿度[kg/kgDA]	熱回路網計算値
風速[m/s]	CFD計算値
着衣量[clo]	0.8(冬期) / 0.25(夏期)
代謝量[met]	1.0(安静時)

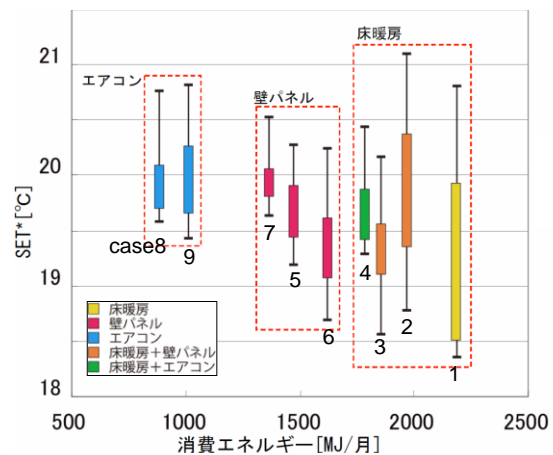


図15 ケーススタディ結果

(6) 通風による冷房負荷算定の建物風圧係数のデータベースの構築

通風による冷房負荷算定には、建物に作用する風圧係数のデータが不可欠である。そのためデータベースの構築を行った。

データベースの構築にあたり、まず、実態の把握として、世田谷区と杉並区の住宅地の街区密度の調査を行った。街区密度は街区全体の面積に対する街区内の建物の建築面積の合計の比をグロス建蔽率として評価した。世田谷区の調査結果を図16に示す。両区ともに平均のグロス建蔽率は33%、標準偏差は5%であった。

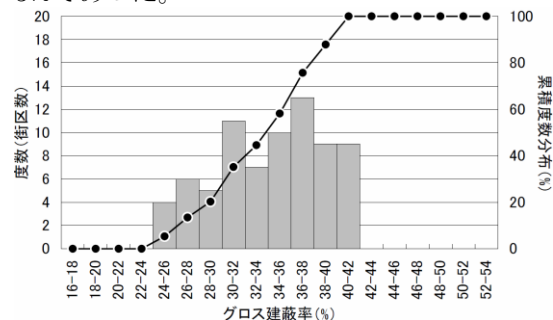


図16 世田谷区の街区調査結果

この結果にもとづき、図 17 のように街区を想定し、グロス建蔽率を 5% ずつ 23~45% 変化させ、各種形状の建物の風圧係数（風向：16 方位）を測定し、データベースを構築した。図 18 に、建物形状の一例を示す。

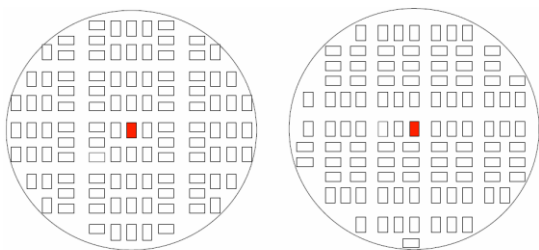


図 17 実験での街区状況
(中央に測定対象建物を配置)

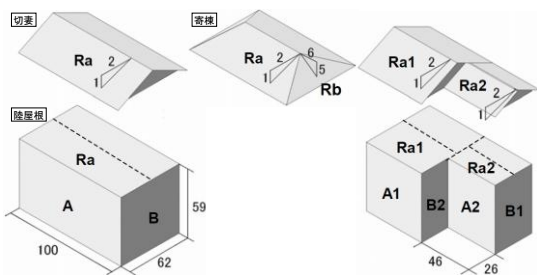


図 18 測定対象建物の例

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)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 高瀬幸造、赤嶺嘉彦、前真之、熱回路網計算と CFD を用いた実住宅内での多様な空調方式の評価手法に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2010 年 9 月発表予定、山口大学
- ② 高瀬幸造、赤嶺嘉彦、河野良坪、前真之、各種暖冷房機器による室内温熱環境の CFD 解析、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 1219-1222、2009 年 9 月 6 日、崇城大学
- ③ 舘景士郎、前真之、赤嶺嘉彦、高瀬幸造、省エネ性と温熱環境に配慮した暖冷房機器の評価に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 1223-1226、2009 年 9 月 6 日、崇城大学
- ④ 赤嶺嘉彦、前真之、星野秀明、谷口景一郎、西村彩子、坂本雄三、住宅における通風の設計手法に関する研究 その 4~その 6、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 765-770、2008 年 9 月 19 日、広島大学
- ⑤ 李ミンウエン、舘景士郎、高瀬幸造、赤嶺嘉彦、前真之、坂本雄三、エアコンと壁かけ放射パネルによる冷房時の温熱環境と快適性・省エネ性に関する研究

その 1・その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1331-1334、2008 年 9 月 20 日、広島大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 雄三 (SAKAMOTO YUZO)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：30114490

(2) 研究分担者

前 真之 (MAE MASAYUKI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：90391599

赤嶺 嘉彦 (AKAMINE YOSHIHIKO)
東京大学・大学院工学系研究科・特任助教
研究者番号：40447420