

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25年 6月 19日現在

機関番号：11302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560581

 研究課題名（和文） 住宅における最適な空調制御のための滞在行動計測法開発と
環境調整行動の教育的誘導

 研究課題名（英文） Development of Measurement Method on Staying Behavior for
Optimum Control of Home HVAC System and
Educational Induction of Proper Operation for Environment

研究代表者

菅原 正則（SUGAWARA MASANORI）

宮城教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：60300513

研究成果の概要（和文）： 住宅内で居住者が滞在する部屋とその時間帯（いわゆる滞在行動）が計測され、その蓄積データに基づいて予測できるようになれば、快適性を損なわずに無駄なく空調運転することができます。そこで、環境計測値から滞在行動を推定する方法の開発を行い、空調制御への応用を試みました。その一方で、居住者の滞在行動が合理的で規則性が増すことを目指して、住環境教育プログラムを提案しました。

研究成果の概要（英文）： In order to control home HVAC system without wasting and being discomfort, it is important to measure and to predict staying behavior, i.e., the rooms and time of the people's stay in the house. Therefore, we developed the methods of predicting staying behavior from environmental measurement values, and tried to apply it to HVAC system. Also, we proposed the educational program of home environment to make the staying behavior be reasonable and more periodic.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築環境・設備

 キーワード：環境調整行動、 在室行動、 住環境教育、 モニタリング、 空気環境、
熱環境、 模型実験

1. 研究開始当初の背景

住宅内における滞在行動の把握は、環境調整やエネルギー利用計画の方針を検討する根拠として重要と考えられる。特に、今後の普及が見込まれる無暖房住宅では、壁体における熱損失が極端に少なく、熱負荷のほとん

どが換気によるものとなる。したがって、冬季でも室温が過上昇することや、その一方でせっかく「無暖房住宅」の仕様でありながら補助暖房が必要になることを避けるためには、蓄熱材の適正な配置や、滞在行動を考慮した室換気や室間における空気移流の効率

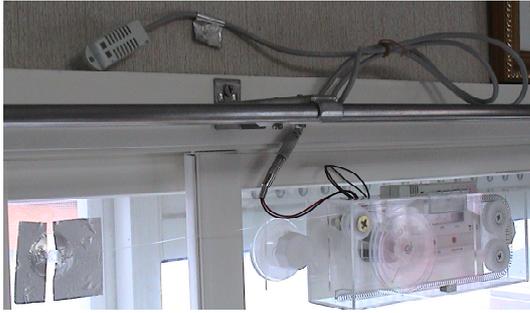


写真1 窓開巾計の取り付け状況

的管理のための要素技術を整備しなければならぬ。室内環境計測値から自動的に滞在行動が推定できれば、空調効率の向上が期待できる。また、滞在行動と窓開閉行為・空調照明設備運転の経時変化から、教育プログラムの客観評価ができる。

研究代表者らはこれまで、新たな住環境教育プログラムを提案・実施するとともに、その効果検証用データとして居住者の主な生活空間となる室の窓開巾や空調運転、滞在人数といった「環境調整行動」を計測・推測する方法を提案してきた。窓開巾については、窓開巾計（写真1）を利用することにより、建具等を傷つけることなく、また生活行為を妨害せず、長期間計測することが可能となった。しかし居住者の滞在行動については、必要以上にプライバシーを侵害せず簡易に計測する有効な方法を未だ見いだせていない。

従来の住まい方調査では、主に日誌への記録が多用されてきたが、客観性が必ずしも保証されず、また長期になると記録者の負担になるという短所があった。そこで研究代表者が住宅の1室ごとの室内環境計測値（人の在・不在、CO₂濃度、気温、相対湿度）および気象庁データを統計処理することによりその室の滞在人数を推定してみたところ、室内における活動強度の日変化が確認でき、また人数の特定に至るための課題が明らかになった。

2. 研究の目的

居住者の滞在行動および環境調整行動を把握するための自動計測において、プライバシーを極力侵害しないように温湿度やCO₂濃度など環境計測値から推定する方法を開発する。そしてこの技術を、研究代表者がこれまで取り組んできたモニタリング手法に応用し、また一方で、環境調整行動を誘発するための住環境教育プログラムを提案する。また、熱的に高性能な住宅を想定し、滞在行動を考慮した空調制御法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 滞在行動推定方法の開発

住宅内の各室における滞在人数の経時変

化を、プライバシーを極力侵害しないように、室内環境計測値を主としたデータから推定する方法を開発する。各室の換気量および熱・湿気負荷計算を組み合わせることにより推定精度の向上を図る。

(2) 環境調整行動に着目した住環境教育プログラムの提案

住宅内の光・熱・空気に関する環境調整行動へ働きかける教育プログラムを提案し、その学習教材を整備する。

(3) 滞在行動の空調制御への応用

住宅内における滞在行動を分析し、その経時変化から、冷暖房換気設備の制御を最適化する方法を提案する。またその際の空調効率を評価する。

4. 研究成果

(1) 滞在行動推定方法の開発

① 住宅内における滞在人数推定法の提案

室内ガス濃度の非定常変化式や人体からのCO₂および水蒸気発生量を求める式などを用いて、

計測データの事前処理 → 換気量の推定

→ 室内の総代謝量および放湿量の特定

→ 滞在人数の推定

という手順による方法を確立した。

実験結果から得られた正答率は図1のようになった。1人在室の場合の正答率は高かったが、それは、在室と分かっている場合、室内の総代謝量や水蒸気発生量の推定値がどれほど小さく求められたとしても、推定人数を1人と判断する特別な要因があるからである。在室が2人および3人の場合は、正答数が2～5個であった。

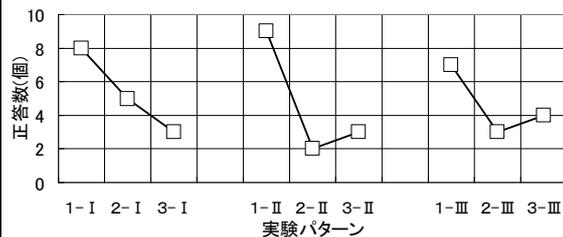


図1 実験パターン別正答数

② 滞在人数推定における誤差

室内滞在人数推定法で得られるのは、1人、2人、3人...といったごく少数の正の整数値である。しかしこれは多くの測定値に基づいており、また、推定過程においても回帰式を多用しているので、それぞれで生じる誤差の積み重ねによって正しい推定人数に到達しにくくなると考えられる。そこで滞在人数推

定の誤差に影響を与えると思われる項目（誤差関連項目）の許容範囲について、複数の標準条件に対する検討を行った。

誤差関連項目ごとに、許容範囲の較差の平均値に対して推定人数が正解になる場合の標準条件からのずれの範囲を、表1に示す。温度は屋外、室内ともに $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 以内、室内の湿度は $\pm 0.2\%$ 以内、室内の CO_2 濃度は $\pm 11.9\text{ppm}$ 以内であり、極めて小さいと言える。誤差関連項目のうち、8項目（①～④、⑥、⑧、⑩、⑪）は測定値であり、推定人数の正解率を上げるためには高精度の測定が求められることが分かる。「⑦比例定数 β 」、「⑨比例定数 γ 」は実験を基にして人数推定の計算過程において算出した数値であるが、推定精度が上がるように増減させることは可能である。ただしその調整方法は今後の課題とする。

表1 推定人数が正解になる場合の標準条件からのずれ

	標準条件からのずれ
① 気温（屋外） $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 以内
② 相対湿度（屋外） $[\%]$	$\pm 3.5\%$ 以内
③ CO_2 濃度（屋外） $[\text{ppm}]$	$\pm 60.4\text{ppm}$ 以内
④ 気温 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 以内
⑤ 室換気量 $[\text{m}^3/\text{s}]$	$\pm 0.001553\text{m}^3/\text{s}$ 以内
⑥ はじめの CO_2 濃度 $[\text{ppm}]$	$\pm 12.9\text{ppm}$ 以内
⑦ 比例定数 β $[\text{g}/\text{s}]$	$\pm 0.002089\text{g}/\text{s}$ 以内
⑧ 10分後の室内相対湿度 $[\%]$	$\pm 0.2\%$ 以内
⑨ 比例定数 γ $[-]$	± 0.113207 以内
⑩ はじめの室内相対湿度 $[\%]$	$\pm 0.3\%$ 以内
⑪ 10分後の CO_2 濃度 $[\text{ppm}]$	$\pm 11.9\text{ppm}$ 以内

(2)環境調整行動に着目した住環境教育プログラムの提案

①明るく強い建物デザインを考える教育プログラムに用いる紙模型の特性

教育プログラムに用いる紙模型の開口部形状を多様に変化させ、模型内部の明るさについて実験的に検討した。その結果、開口部が1枚では、位置が中央下の場合に昼光率が最も大きく、開口位置が中央の場合にはその面積が同じであっても分割数が増えると昼光率が減少した。

一方、紙模型の強さについて数値計算により検討したところ、開口部1枚では、横方向の位置に関わらず、上位置のときの最大せん断応力（この値が大きいくほど模型は弱い）が極端に大きくなり、明るさ（昼光率）と同じ傾向を示した。開口部の分割に対する最大せん断応力においては、横方向の分割で単調減少、縦方向では単調増加し、格子状分割では8分割のときに最も小さい値となったが、それは、上からの分布荷重を直接受ける梁の太さが、強さの決定要因になっているためと考えられる。

②明るく強い建物デザインを考える教育プログラムへの食材利用

建物模型の素材として利用してきた紙は、強度が高く薄いために座屈を起しやすく、面で支えることができないためコンクリート壁が変形したときのような「割れる」現象を再現できなかった。そこで、紙に替わる「割れる」性質を持った材料として、煎餅やクッキーのような食材の利用を考案した。

壁部品には、(a)扱いやすく模型毎の差異が少なく作れる。(b)食べやすく材料費も高くない。という条件から、クッキー生地を採用した。また、接着材料に必要な条件を、(a)扱いやすく粘着性がある。(b)壁部品との食べ合わせが良い。(c)固まるまでの時間が数分である。(d)一般に流通している身近な食材である。としたところ、いくつかの候補が挙げられたが、製作・使用方法を検討した結果、ヌガーを採用した。



写真2 载荷試験により崩壊した模型

模型の力学特性には、実際の建築構造設計のように、部材の応力が弾性範囲を超えた後も耐力を維持する粘り強さ（じん性）を有することや、最大荷重が大きいくことが望まれる。そこで、载荷試験を行い、その結果（写真2）から食材の配合量や模型寸法を決定した。

(3)滞在行動の空調制御への応用

①滞在行動の規則性を利用した在不在予測

仙台市内の集合住宅において計測された在不在データを用いて、滞在行動の規則性を見出し、数分～数時間後の在不在予測を試みた。手順を下欄に示す。

- 1) 前5日間の同時刻とその前後の時間帯（以下、参照時間帯）の在不在データについて在室と不在の回数を比べ、それらが同数が在室の方が多ければ「在室」、そうでなければ「不在」とし、在不在パターンを作成する。
- 2) 何分後の在不在を予測するか（以下、予測時間）に応じて、現在から予測する時刻への在・不在の遷移の種類に次の名称を付ける。
遷移パターン 1 [在室⇒在室] 2 [在室⇒不在]
3 [不在⇒不在] 4 [不在⇒在室]
- 3) 前5日間について、参照時間帯に含まれる遷移パターン1～4の出現回数を求める。
- 4) 例えば予測時間が15分の場合、予測する時刻の15分前に在室なら遷移パターン1と2を比較し

て出現回数の多い方に従う。ただし、出現回数
が等しい時は、予測する時刻の在不在パター
ンに従う。一方、15分前が不在なら遷移パター
ン3と4を比較して、以下同様に処理する。

これを実行する際の適切な参照時間幅は、
在室率が25%から75%へ増加（または75%
から25%へ減少）するのに要する時間（以下、
在不在入替時間）によって異なる。そこで、
実測データから得られた結果も踏まえると、
参照時間幅は前後0分～30分で充分であ
ると考えられる。

②住宅における在不在予測を導入した予熱暖房

居住者の滞在行動が予測・把握できれば、
居住者の在室スケジュールに応じた予熱暖
房により熱負荷低減効果が期待できる。そ
こで、予熱時間を3時間として在不在予測を15
分後～195分後まで15分間隔で行い、暖房
の設定温度を図2に示すフローによって決
定する方法を提案した。在不在予測は15分
ごとに見直し、「現在」が不在の場合は、予
測時間がより短い不在予測結果を優先し
て、最も近い在室予測と現在との時間差から
設定温度を決定する。

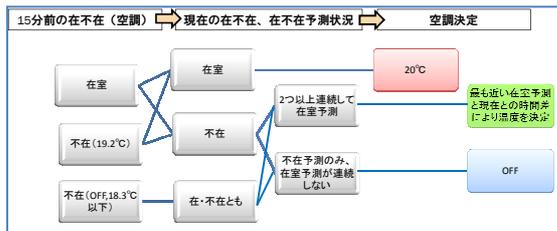


図2 空調温度の決定方法

③在不在予測を導入した予熱暖房の熱負荷特性

建築熱環境・エネルギーシミュレーション
プログラムEESLISMを用いて、仙台市内に
ある集合住宅(3LDK 3人家族)を対象に
熱負荷計算を行った。暖房スケジュールは、
居間と寝室に対して、24時間暖房、部分間
欠暖房、そしてこれらの中間的な役割を果
たす不在予測導入の予熱暖房(正解率100%
、参照時間幅前後0分、同前後30分)とし
た。

寝室の睡眠時をOFF(睡眠時間は在室し
ていても20℃とせず、朝の活動時間にむ
けた予熱運転のみ行う)としたときの、冬
季の3日間における総熱負荷[kWh]、最大
瞬時熱負荷[W]、快適時間率[%]の値を
図3に示す。総熱負荷が最大なのは24時
間暖房の場合で、28.1kWhであった。こ
れに対して、在不在予測を導入した予熱
暖房である参照時間幅前後0分、同前後
30分は、それと比べて低く、25～26%
の低減効果があった。最大瞬時負荷は
部分間欠暖房のおよそ半分に抑えるこ
とができており、予熱暖房の効果が表
れていると言える。快適時間率は87～
92%と高くなっ

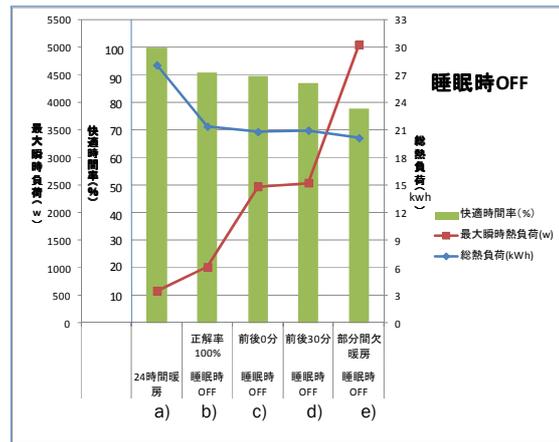


図3 総熱負荷と最大瞬時熱負荷、快適時間率(冬季3日間、睡眠時OFF)

ていることから、快適性を損なうことなく熱
負荷の総量を低減できたと言える。

在不在予測の正解率は、居住者の在室行動
における規則性の影響を受けて変動するも
のであるが、本研究で用いた実測データに
ついては、十分な効果が得られたと考えら
れる。

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 12件)

- 菅原正則、在室行動の規則性を利用した予
測空調制御法における15分後予測に関す
る検討、日本建築学会大会(東海)学術講
演梗概集、査読無、D-2環境工学II、2012、
pp. 549-550
- 菅原正則、大平英倫子、在室行動の規則性
を利用した予測空調制御の提案、日本建築
学会東北支部研究報告集、査読無、第75
号、計画系、2012、pp. 229-232
- 菅原正則、靱山愛、居住者からのCO₂およ
び水蒸気発生を利用した在室人数推定に
おける誤差の許容範囲、日本建築学会東北
支部研究報告集、査読無、第75号、計画
系、2012、pp. 247-250
- 源城かほり、松本真一、長谷川兼一、菅原
正則、東北地域における学生単独世帯の住
まい方とエネルギー消費の実態、日本建築
学会環境系論文集、査読有、No. 671、2012、
pp. 11-18
- 菅原正則、赤外線サーモグラフィと写真測
量ソフトを用いた暖房設備の熱放射特性
計測法の提案、日本建築学会大会(関東)
学術講演梗概集、査読無、D-2環境工学II、
2011、pp. 369-370
- 菅原正則、大場ひとみ、赤外線サーモグラ
フィによる大型暖房設備の熱放射特性計
測、日本建築学会東北支部研究報告集、査
読無、第74号、計画系、2011、pp. 25-28

- ⑦田中恵莉、菅原正則、在室スケジュールに応じた予熱暖房による熱負荷低減効果の検討、日本建築学会東北支部研究報告集、査読無、第74号、計画系、2011、pp. 49-52
- ⑧菅原正則、永瀬香理、明るく強い建物デザインを考える教育プログラムに用いる紙模型の強度特性、日本建築学会東北支部研究報告集、査読無、第74号、計画系、2011、pp. 243-246
- ⑨藤川光利、吉野博、高木理恵、奥山博康、林基哉、菅原正則、居住者の呼気を用いた多数室換気量測定法に関する実験的研究、日本建築学会環境系論文集、査読有、No. 652、2010、pp. 499-508
- ⑩菅原正則、サーモカメラを用いた放射型暖房器具の放熱特性評価、日本建築学会大会（北陸）学術講演梗概集、査読無、D-2環境工学Ⅱ、2010、pp. 285-286
- ⑪菅原正則、齋藤美穂、明るく強い建物デザインを考える教育プログラムに用いる紙模型の基本特性、日本エネルギー環境教育学会第5回全国大会論文集、査読無、2010、pp. 213-214
- ⑫菅原正則、菅野さやか、居住者からのCO₂および水蒸気発生を利用した室内滞在人数推定法の誤差要因、日本建築学会東北支部研究報告集、査読無、第73号、計画系、2010、pp. 107-110

[学会発表] (計 9件)

- ①菅原正則、在室行動の規則性を利用した予測空調制御における15分後予測に関する検討、日本建築学会大会（東海）、2012年9月12日、名古屋大学
- ②菅原正則、在室行動の規則性を利用した予測空調制御の提案、日本建築学会東北支部研究報告会、2012年6月17日、八戸工業大学
- ③菅原正則、居住者からのCO₂および水蒸気発生を利用した在室人数推定における誤差の許容範囲、日本建築学会東北支部研究報告会、2012年6月17日、八戸工業大学
- ④菅原正則、赤外線サーモグラフィと写真測量ソフトを用いた暖房設備の熱放射特性計測法の提案、日本建築学会大会（関東）、2011年8月23日、早稲田大学
- ⑤菅原正則、赤外線サーモグラフィによる大型暖房設備の熱放射特性計測、日本建築学会東北支部研究報告会、2011年6月25日、大学コンソーシアムあきたカレッジプラザ
- ⑥菅原正則、明るく強い建物デザインを考える教育プログラムに用いる紙模型の強度特性、日本建築学会東北支部研究報告会、2011年6月26日、大学コンソーシアムあきたカレッジプラザ
- ⑦菅原正則、サーモカメラを用いた放射型暖

房器具の放熱特性評価、日本建築学会大会（北陸）、2010年9月9日、富山大学

- ⑧菅原正則、明るく強い建物デザインを考える教育プログラムに用いる紙模型の基本特性、日本エネルギー環境教育学会第5回全国大会、2010年8月1日、長崎大学
- ⑨菅原正則、居住者からのCO₂および水蒸気発生を利用した室内滞在人数推定法の誤差要因、日本建築学会東北支部研究報告会、2010年6月20日、東北芸術工科大学

[図書] (計 1件)

- ①日本建築学会・編（共著19名）、彰国社、設計のための建築環境学 みつける・つくるバイオクライマティックデザイン、2011、pp. 42-43 および 45

[その他]

- ①菅原正則、伝統的な暖房設備の「あたたかさ」を再発見する試み、住まいと環境 東北フォーラム、H&E Letter、vol.29、2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅原 正則 (SUGAWARA MASANORI)
宮城教育大学・教育学部・准教授
研究者番号：60300513

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし