

令和元年6月19日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06623

研究課題名(和文) 建物の熱・換気性能現場測定法の研究

研究課題名(英文) Field Measurement Method for Building Thermal and Ventilation Performance

研究代表者

奥山 博康 (OKUYAMA, Hiroyasu)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：70393543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：住宅等の実態の熱と換気のパフォーマンスは熱損失係数や換気量等で評価されるが、これらの実態把握は経年変化や施工不良等もあるので重要である。しかし外気温や日射量の変化と建物自体の熱容量の影響と多数室の状況により現場測定は簡単ではない。そこで連立常微分方程式を回帰式とした最小二乗法により測定の信頼性評価も含めたシステム同定理論を展開している。そして各室に間欠的な正弦波の電熱発熱や炭酸ガス供給をPC制御で与える装置と、室温やガス濃度の時系列の応答を測定記録する装置、およびシステム同定計算プログラムSPIDSも試作した。最終年度には集合住宅の住戸において動作確認実験を行い妥当な結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な拡散系を一般的な連立常微分方程式モデルにする熱回路網モデルに基づき最小二乗法によるシステム同定理論を考案して、実態の住宅の熱・換気性能評価を行う現場測定システムも試作して動作確認実験も行った。これにより省エネで健康的で快適な住宅の普及に資する。

研究成果の概要(英文)：Methods for on-site measurement of building thermal performance system parameters such as coefficient of heat loss and infiltration rate are very important. On-site measurements are exposed to changing meteorological conditions and these parameters should generally be estimated in a multi-zone model such as inter-zone flow rates. In this regard, a simultaneous ordinary differential equation model is converted into regression equation and system parameters estimation theory including reliability evaluation has been developed on the basis of least squares. We have improved a system parameter identification theory and uncertainty analysis method using least squares. A prototype measurement systems for both thermal and ventilation performance have been developed and were tested for the operational confirmation in an apartment house. The system can be applied to 10 rooms at maximum and two PCs are used for wireless control of the devices. The experiment results showed appropriate results.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：多数室換気測定法 多数室熱性能測定法 熱回路網 システム同定理論 最小二乗法 移動平均 低周波濾波 トレーサ・ガス

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 建物の熱性能の現場測定法

建物の熱損失係数等の性能は、施工や経年劣化により設計とは異なる場合もあるので、実際の熱性能を現場測定する技術が必要になる。また実態の建物は多数室系と見なさなければならず、さらに変動する外気温と日射量と躯体熱容量等の影響により、これらの熱性能推定は難しい。

(2) 建物の換気性能の現場測定法

第三種換気が行われる場合に外気の侵入は成り行きなので、抵抗の大きな経路にある室は換気不足になる可能性がある。従って室間の空気流動を把握できる多数室換気測定法が必要である。しかし現状のトレーサ・ガスを用いた換気測定法は主に単室用であり、多数室用に一定濃度法等が実用されているが室間の風量把握は難しい。

2. 研究の目的

研究代表者により1984年に、多数室系の一般的な拡散系のシステム同定理論[1]が公開され、第一世代の多数室換気測定システムはスウェーデン国立建築研究所(当時)での1988年の検証実験を行い[2]、さらに改良した第二世代の測定システムによる実住宅での測定なども行った[3]。そして2012年には改良理論[4]を公開している。一般的な拡散系としては、熱の拡散系とトレーサ・ガスの拡散系の二つがあげられる。2016年頃には単室用に特化した測定値分析の表計算ソフトを研究開発[5]していたが、2018年度には2012年の多数室理論[4]をさらに改良した理論を組み込んだ表計算ソフトSPIDS (System Parameter Identification Spreadsheet) を開発している。

(1) 多数室建物の熱性能の現場測定法の研究課題

換気測定に比べて熱性能測定は理論的な問題が多い。熱性能測定では躯体の熱容量は室空気の熱容量に含ませて相当熱容量として推定しなければならない。このために低周波濾波と呼ぶ数時間の移動平均を全ての測定値に施すことが有効であることが分かっているが、最適な移動平均期間は検討を要する。また励振としての電熱発熱は間欠的な正弦波形の励振が良いことが分かってきたが、最適周期は研究課題である。また実際に測定システムを試作して実用性の検討も行う必要がある。

(2) 多数室建物の換気性能の現場測定法の研究課題

換気測定の装置系については、第一世代も第二世代もガス供給と室空気の吸引で、長いチューブを要し、実用上も精度上も問題があった。そこでチューブ類を減らして改良し、測定や制御も有線ではなく無線を利用する第三世代の測定装置システムを試作する。

3. 研究の方法

多数室の室温変化は熱回路網の連立常微分方程式モデルで表される。システム同定される係数は、一般化熱コンダクタンス c_{ij} [W/K]、相当熱容量 m_{ij} [kJ/K]と日射熱取得係数等の r_{ij} [m^2]である。ここに r_{ij} は発熱源 g_j から節点 i への入力係数を表す。システム同定理論[4]のFORTRANプログラムSPIDは表計算プログラムSPIDSの中から実行する様に組み込まれている。低周波濾波と測定不確かさ推定は表計算側で行われる。また推定係数の時間変化も追える移動一括同定[6]は任意の時間間隔で行える。また決定係数を求め、さらに得られた常微分方程式の残差を利用して、其々の係数の不確かさ標準偏差 σ_c 、 σ_m 、 σ_r を求め、測定前提の不適合率 β [4]も計算する。

(1) 多数室建物の熱性能の現場測定システム

本装置システムの概要図は図1-1に示す。最大10室に対応し、各室に約1kWの電熱ヒータ(a)と電力センサ(b)と温・湿度測定器(c)を置く。これらの制御と測定は箱(d)と(e)を介し無線(f)でPC(g)制御する。外気温(h)と水平面全日射量(i)の測定も行う。電熱発熱は正弦波形の谷から谷までを断続的に繰り返す。室間と内外温度差および時間変化も大きくなる様に、合計消費電力は許容値を超えない様に発熱を行う。なお攪拌ファン(j)は常時使用した。図1-2に電熱発熱制御装置、図1-3に電熱発熱制御・測定のパソコン、図1-4に温・湿度と炭酸ガス濃度センサーを示す。計算機による模擬の実験[4]

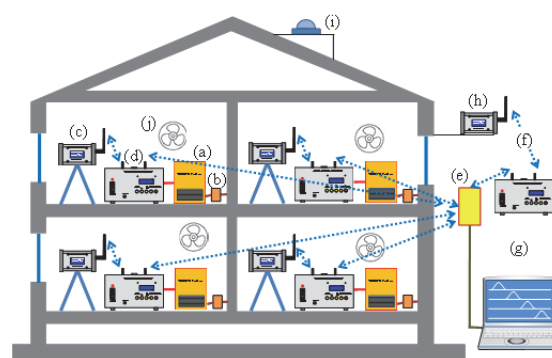


図1-1 多数室熱性能現場測定システム

から、発熱周期は4日が、低周波濾波の移動平均期間は8時間が最適としている。また測定不確かさ平滑化の移動平均期間は、測定時間間隔が1分として、偶数の測定点になる9分を最適としている。

(2) 多数室建物の換気性能の現場測定システム

本測定システムを図2-1に示す。炭酸ガスはボンベ(a)から、図2-2の質量流量制御器と電磁弁切り替え装置の箱(b)を経由して、各室に供給される。全10室を5室ずつの二系統に分けたので、チューブ(c)は前世代の測定システムに比べて比較的短くてすむ。各室に図1-4の小型の濃度計(d)を置き、PC(e)に直結した図2-3の無線機(f)により、箱(b)を経由した無線(g)で、ガス流量制御・測定と濃度測定等を行う。こうして長いチューブとケーブルの煩わしさは極力低減した。なお各室のガス攪拌ファン(h)は、今回は常時稼働した。励振のガス供給は初期の矩形波ではなく断続的な正弦波形になった。熱回路網の様な比較的粗い空間的離散化モデルは、高周波励振には適切な応答は得られ難いが、低周波励振へは適切に応答するので移動平均を施すことは有効である。ただし換気測定では低周波濾波は殆ど必要ない。またシステム同定を行う表計算プログラムSPIDSは、2012年の理論[4]に、測定不確かさ標準偏差も推定する機能[6]を加えた。

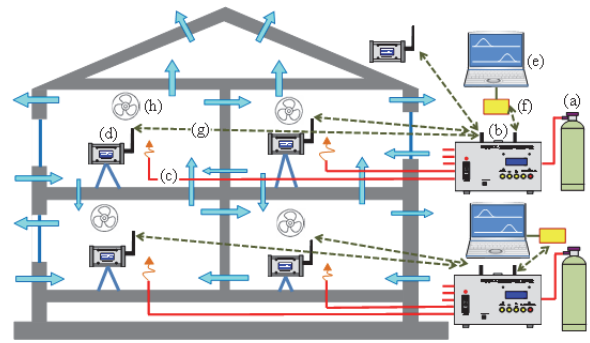


図 2-1 多数室換気測定システム

前述した多数室建物の熱・換気性能現場測定システムを横浜市某集合住宅で試した。上下左右の隣住戸の温度状況は計れなかったため、測定システムの正常動作とシステム同定計算プログラムの妥当性を確認する実験となった。

(3) 多数室建物の熱性能の現場測定システムの実験と結果

熱性能測定では、機械換気は全て停止して測定した。本同定モデルは、図1-5の様に、外気を含め全7ゾーンとして測定した。リビングは2台の発熱装置を同時に使用し、トイレのドアは開放して廊下と一体化した。発熱周期は2日(48時間)にして、2018年11月14日18:10から18日18:10まで測定した。リビングでの電熱発熱量と室温の変化を図1-6に示す。



図 1-2 電熱発熱制御装置



図 1-3 電熱発熱制御・測定のパソコン



図 1-4 温・湿度と炭酸ガス濃度センサー

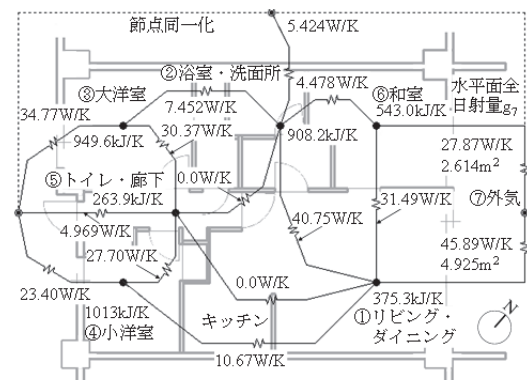


図 1-5 測定の3LDK床面積約66m²の住戸と同定結果

システム同定で得られた表1-1～1-3の相当熱容量，熱コンダクタンスと日射取得係数により熱回路網モデルを作り，予測計算プログラムNETS[7]で室温計算を行い，測定された室温変化と比較した結果，図1-7の様に，最初の十数時間程は実測値を下回る現象が全ての室で見られた．隣住戸の室温の測定は実際には難しいので，隔壁の内表面の測定値が利用できるか等は今後の検討課題である．

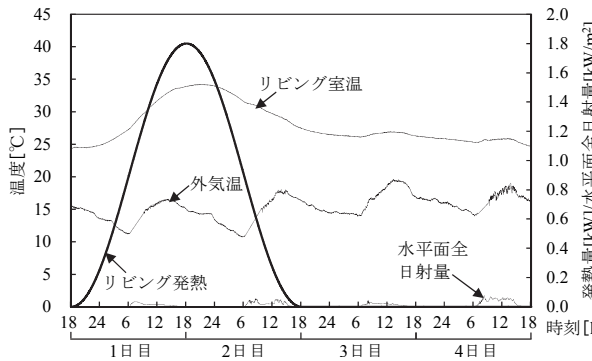


図 1-6 発熱量と室温の変化(リビング)

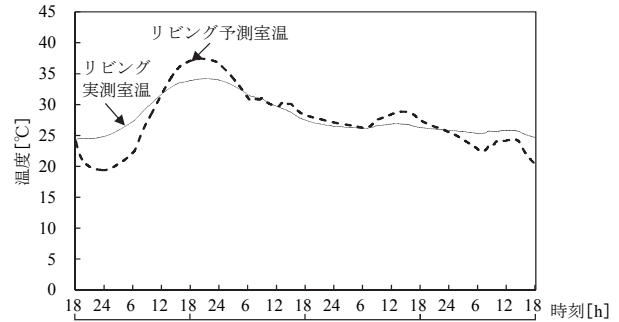


図 1-7 実測と予測室温比較(リビング)

表 1-1 相当熱容量 m [kJ/K]の同定結果

$m(1,1)$	$m(2,2)$	$m(3,3)$
375.3	908.2	949.6
$m(4,4)$	$m(5,5)$	$m(6,6)$
1013	263.9	543.0

表 1-2 熱コンダクタンス c [W/K]の同定結果

$c(1,2)$	$c(1,4)$	$c(1,5)$	$c(1,6)$	$c(1,7)$
40.75	10.67	0.0	31.49	45.89
$c(2,3)$	$c(2,5)$	$c(2,6)$	$c(2,7)$	$c(3,5)$
7.452	0.0	4.478	5.424	30.37
$c(3,7)$	$c(4,5)$	$c(4,7)$	$c(5,7)$	$c(6,7)$
34.77	27.70	23.40	4.969	27.87

表 1-3 日射取得係数 r [m²]の同定結果と信頼性評価

$r(1,7)$	$r(6,7)$	β	COD
4.925	2.614	1.460	0.957

(4) 多数室建物の換気性能の現場測定システムの実験と結果

同じ集合住宅で本測定システムを試した．浴室・洗面所とトイレから排気の第三種換気状態である．図2-4に示す様に室数は7で，和室（節点番号(1)），大洋室(2)，リビング(3)，小洋室(4)，玄関廊下



図 2-2 炭酸ガスボンベとガス流量制御装置

(5)，トイレ(6)，洗面所と浴室(7)とした．ガス供給の正弦波形の谷から谷までは各室が同じ15分とし，ピーク流量は室の大きさと想定 of 機械換気量に応じて2L/minから12L/minと変えた．測定値は，室濃度，外気濃度，ガス供給流量等である．測定期間は，2019年4月22日の11:30から16:45まで，動作確認なので短めに215分間行った．もし長期間にわたり測定を続けられれば，各室へのガス供給が一回ずつの一周105分を一括移動平均期間として，換気量の移動平均的な変化もとらえることができる[6]と考えられる．

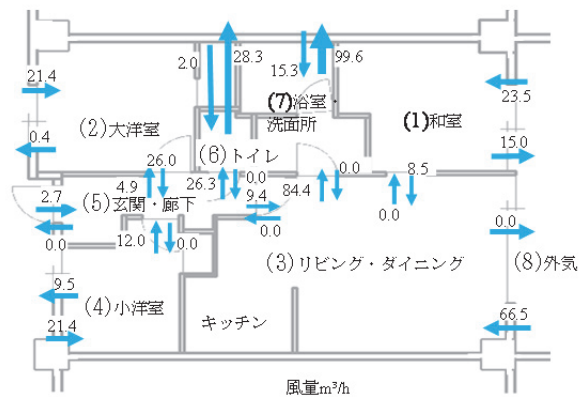


図 2-4 室間風量のシステム同定結果

表 2-1 上段・同定容積/下段・幾何的容積(m³)

容積(m ³)	$m_{1,1}$	$m_{2,2}$	$m_{3,3}$
同定値	13.94	14.98	44.81
幾何的容積	20.22	24.13	47.53
$m_{4,4}$	$m_{5,5}$	$m_{6,6}$	$m_{7,7}$
13.91	8.52	2.71	7.36
17.98	8.84	5.17	14.4

本システム同定理論[4]では、熱回路網モデルから始まって、ガス流動も含めた一般的な拡散系のシステム・パラメータを同様な記号で表している。室を節点番号で表してj室からi室への風量を $c_{i,j}$ とし、逆方向は $c_{j,i}$ とする。またj室の有効混合容積を $m_{j,j}$ と表す。最小二乗法により2種のシステム・パラメータ推定を行い、決定係数CODも求める。さらに得られた常微分方程式での残差を利用して、其々のパラメータの不確かさを標準偏差 σ_c 、 σ_m を求め、同定前提の不適合率 β [4]も計算する。

各室のガス供給流量と濃度と外気濃度の変化を図2-5に示す。これらの測定データをSPIDSに与えて得られた室間の風量は図2-4に、推定された有効混合容積は表2-1に示す。全室での換気回数は1.1、このうち機械排気は0.92回毎時と設計風量に近い。なお総床面積は66m²、平均天井高さ2.1m、そして屋内容積は138m³とした。この場合にCODは0.926で、 β は0.958となった。

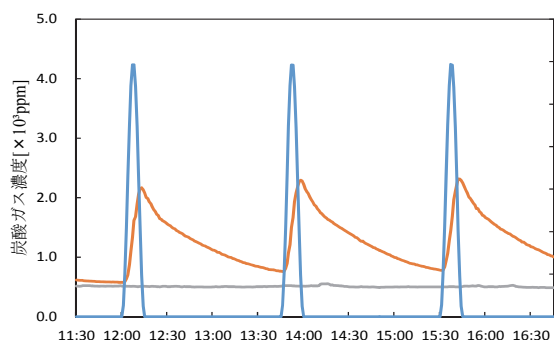


図 2-5 ガス供給量と濃度変化 (リビング)

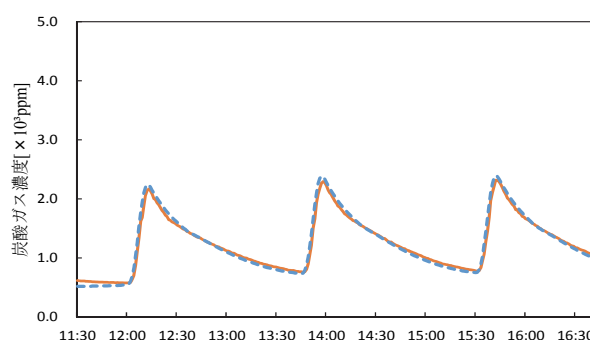


図 2-6 実測と予測濃度比較 (リビング)

推定された有効容積と風量を用いてNETSの換気とガス流動回路網モデルを作り、濃度変化の予測計算を行い、測定濃度変化と比較したところ図2-6の様に良好な一致が見られた。当初のシステム同定モデルは、水回り室からの排気は存在しても、外気侵入は無い構造としたところ、小洋室と廊下の間、あるいは和室とリビングの間の風量が0になる現象が見られたので、外気侵入もあり得る一般的な構造にしたところ、本報の同定結果になった。水回り室の天井裏にはダクトの漏れや短絡が無いとは言えない。また当住戸は4階なので外風圧の影響もあり、各室が平均的には負圧で、外気侵入が起こるとしても、外気への漏出が起こる場合もあり得る。なお実用上は濃度測定範囲の制約等があるので、励振のフィードバック制御機能も必要と考えられる。

4. 研究成果

本研究において第三世代の多数室建物の熱・換気性能の現場測定システムが試作でき、集合住宅の一住戸での動作確認実験を行うことができた。そして試作装置とソフトの正常動作の確認はできた。第一世代と第二世代の測定システムは多数室換気測定機能だけで熱性能測定機能は無かった。本第三世代の測定システムは、測定データ分析を行うシステム同定計算プログラムSPIDSは同じものを適用できる。トレーサ・ガス供給装置と電熱発熱装置は別の装置であるが、各室のガス濃度、温度、湿度を測定し無線送信する箱は小型で各室に1個設置する。多数室換気測定においてガスを供給する長いチューブも二系統に分けたことで短くなり実用性が向上した。なお残る研究・開発課題は次の様である。

- ・ 戸建住宅での実験が必要である。また可能なら環境実験室内の実験住宅での測定が望ましい。
- ・ 最適の励振の大きさと周期および他室の励振との時間的な関係を探る必要がある。
- ・ 温度や濃度が適切な範囲に入る様に自動制御か遠隔操作の機能が必要である。
- ・ 提案している信頼性評価指標 β の検証は計算機実験と実測定でさらに必要である。
- ・ 集合住宅に関しては隣戸との境界壁内表面温度を測るなど何らかの方法を考案する必要がある。
- ・ 同定パラメータは既知と未知扱いが任意にできるので試す必要がある。
- ・ 隙間風換気量の時間変化を把握する移動一括最小二乗法[6]も実験する必要がある。

以上

<引用文献>

- [1] 奥山博康, 一般拡散システムの回路網による状態方程式とそのシステムパラメーターの同定理論, 日本建築学会論文報告集, Vol.344, 1984年10月, pp103-115
- [2] Hiroyasu Okuyama, System Identification Theory of the Thermal Network Model and an Application for Multi-chamber Airflow Measurement, Building and Environment, Vol.25, No.4, 1990, pp349-363
- [3] Hiroyasu Okuyama, Recent Progress on the Multi-Chamber Airflow Measurement System, 1992 International

Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness ISRACVE, 22-24 July 1992, Tokyo , pp351-356.

- [4] Hiroyasu Okuyama et al. System parameter identification theory and uncertainty analysis methods for multi-zone building heat transfer and infiltration, *Building and Environment*, Vol54, 2012, pp39-52.
- [5] 奥山博康, 吉浦, 中島, 住宅の伝熱と換気と気密性の現場測定法の理論と実験, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, E-9,2016年, pp113-116
- [6] 奥山博康, 吉浦, 移動一括最小二乗法による換気量の時間変化の測定法, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 41409, 2017, pp875-876
- [7] Atsumasa Yoshiura, Hiroyasu Okuyama, et al. Calculation Examples Using the NETS Simulation Program as a General-Purpose Network Model for Heat, Air, and Gas Movement in Buildings, *Proceedings of BSO 2018: 4th Building Simulation and Optimization Conference*, Cambridge, UK: 11-12 September 2018, pp124-131

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1件)

- ① Atsumasa Yoshiura, Hiroyasu Okuyama, et al. Calculation Examples Using the NETS Simulation Program as a General-Purpose Network Model for Heat, Air, and Gas Movement in Buildings, *Proceedings of BSO 2018: 4th Building Simulation and Optimization Conference*, Cambridge, UK: 11-12 September 2018, pp124-131 (査読有)

[学会発表] (計 8件)

- ① 奥山博康, 吉浦温雅, 建物の相当隙間面積の指数則モデルと二次式モデルの比較検討, *日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)*, 41053, 2018年9月, pp105-106
- ② 井出大輝, 奥山博康, 吉浦温雅, 住宅の熱性能現場測定における測定不確かさ標準偏差の推定のための最適移動平均期間, *日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)*, 41312, 2018年9月, pp649-650
- ③ 奥山博康, 吉浦温雅, 移動一括最小二乗法による換気量の時間変化の測定法, *日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)*, 2017年8月, 41409, pp875-876
- ④ 吉浦温雅, 奥山博康, 気密性の相当隙間面積と測定の信頼性の評価方法の再考, *日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)*, 選抜梗概, 41349, 2017年8月, pp749-752
- ⑤ 吉浦温雅, 奥山博康, 建物の気密性測定法における相当隙間面積と測定の信頼性の評価方法の再考, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(高知)*, 第4巻, 2017年9月, pp77-80
- ⑥ 奥山博康, 吉浦温雅, 気密性能の測定不確かさ標準偏差推定法と基礎式の再検討, *日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)*, 2016年8月, 41395, pp833-834
- ⑦ 奥山博康, 吉浦温雅, 中島 航, 住宅の伝熱と換気と気密性の現場測定法の理論と実験, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 第5巻, 2016年9月(鹿児島), pp113-116
- ⑧ 吉浦温雅, 奥山博康, 渡辺 慎, 蒸発冷却利用の環境親和型クラディングのための基礎実験, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 第10巻, 2016年9月(鹿児島), pp37-40

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。