

住宅の伝熱と換気性能を灯油暖房器と固形燃料を用いてシステム同定する方法の実験

正会員 ○奥山 博康^{*1} 正会員 吉浦温雅^{*2}

熱回路網	ガス回路網	システム同定
二重移動平均	熱損失係数	換気量測定

はじめに

実態の建物外皮の熱貫流性能等の現場測定は、変動する気象条件と躯体の熱容量や換気の影響もあり難しい。筆者は最小二乗法を基礎にした熱回路網のシステム同定理論^[1]を展開し、測定システムも何世代か試作してきた。しかし熱性能測定に電熱ヒーター利用では加熱力不足になりがちで、換気測定に炭酸ガスのポンプを用いれば、装置類も複雑になる。そこで燃焼を利用すれば、発熱だけでなく炭酸ガスも換気測定に利用できる^[2]。本論の前半では単室の小屋での灯油暖房器利用の熱性能測定の実験を述べ、後半では間欠的に固形アルコールを燃焼して換気量の変化を測定した実験について述べる。

1.1 灯油暖房器利用の伝熱・換気測定実験の小屋の概要

本実験は図 1.1 と 1.2 に示す神奈川大学構内のプレファブ小屋で行った。建物は幅 3.79m×奥行 2.15m×高さ 2.10m の容積は 17m³ である。小屋の東面には幅 1.82m×高さ 0.877m で 1.60m² の窓がある。

1.2 熱性能測定の実験装置と方法

灯油暖房器は自然対流方式の最大 2.5kW の RB-250 である。重量を電子秤 GF-30KBM で計測記録した。過度な炭酸ガス濃度上昇を避けるために、温度差換気を期待し、小屋の引違い窓を幅約 5cm で 2カ所開けた。また温度とガス濃度を攪拌ファンで一様にした。室と外気の温度と CO₂ 濃度の節点番号は各々 1 と 2 とする。室温の 3 測定点は A, B, C, 外気温の 3 測定点は D, E, F, 測定間隔は 1 分とした。各 3 個使用したのは故障等の判断と平均化のためである。また小屋の屋根に水平面全日射計を設置した。12月10日12時00分から測定を始め、2時間経過後の14時から4時間燃焼し、16時間停止、さらに6時間燃焼し、8時間停止した。後日の検討により、発熱開始と終了後に低周波濾波の8時間の移動平均以上の停止期間が必要と分かり、図 1.3 等に示す様に、測定開始前に初期状態を 14 時間、測定終了後に最終状態を 16 時間追加し、全 66 時間の分析期間に延長した。図 1.3 の重量減少から流率 g/s を求めると、がたつきが大きいので、30 分の移動平均を施してから 1 分間隔の変化量を求め、秒単位に変換した。暖房器メーカーの資料^[3]から、発熱量は 1 g/s あたり 43.06 kW となる。また炭酸ガス発生量は 1kW あたり 3.994×10E-5 m³/s として、図 1.4 の発熱と炭酸ガス発生の時間変化を計算した。発熱と炭酸ガス発生の両者の励振は燃料消費量に比例するので相似形となる。もし燃焼予定時間内に給

油する場合は安全のため消火する必要があるので、単なる移動平均の平滑化では問題があると思われる。

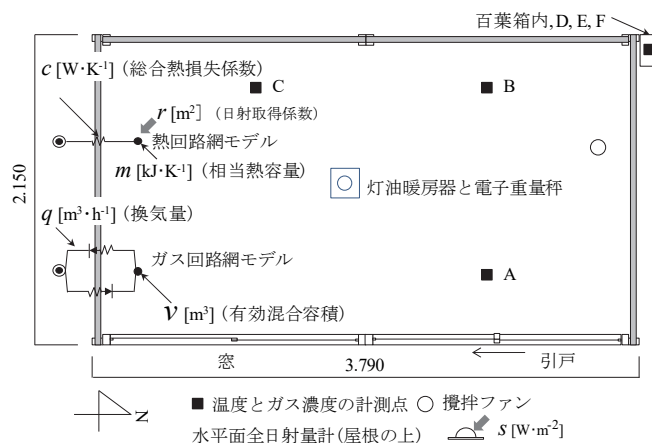


図 1.1 測定対象小屋の平面図と機器配置と同定モデル

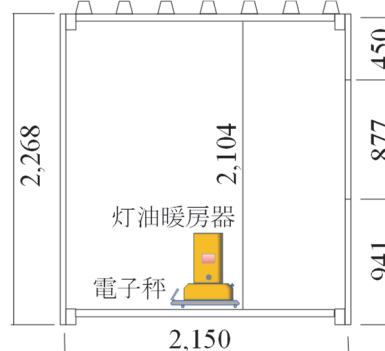


図 1.2 測定対象小屋の断面図

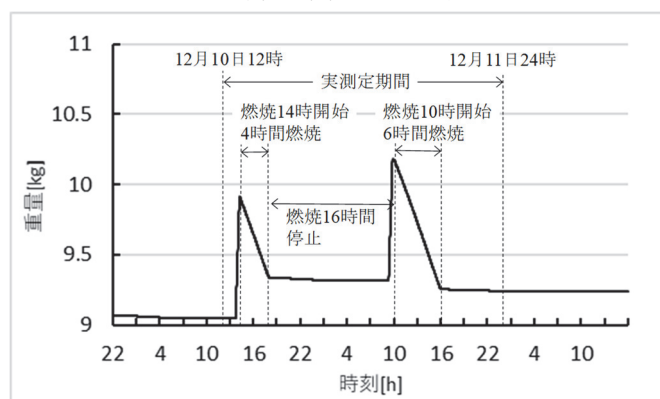


図 1.3 灯油暖房器の重量減少

水平面全日射量は図 1.5 に示す。小屋は複数の校舎の狭間のドライエリアにあり直達日射が当たる時間は短い。屋内外で其々 3 点の炭酸ガス濃度測定値の平均値の時間変化を図 1.6 に示す。また屋内外で其々 3 点の温度測定値の平均値の時間変化を図 1.7 に示す。

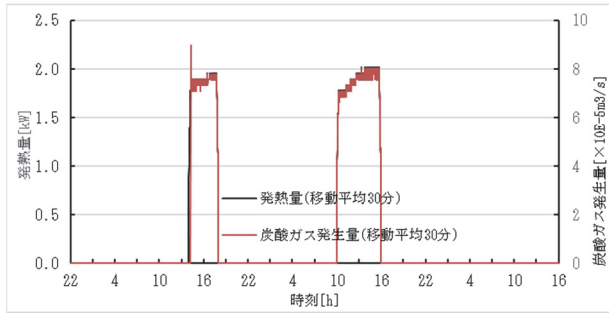


図 1.4 発熱量と炭酸ガス発生量の変化

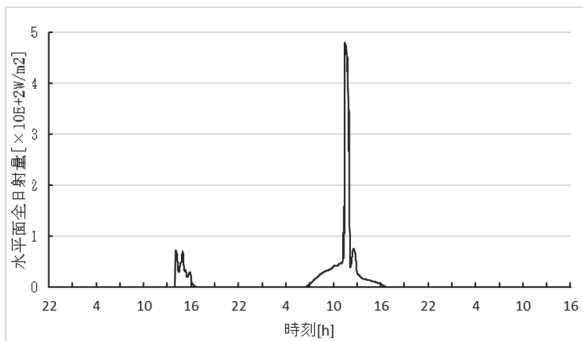


図 1.5 水平面全日射量の変化

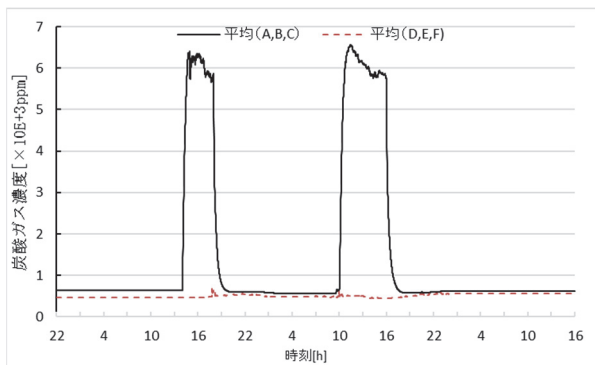


図 1.6 室内外の炭酸ガス濃度変化

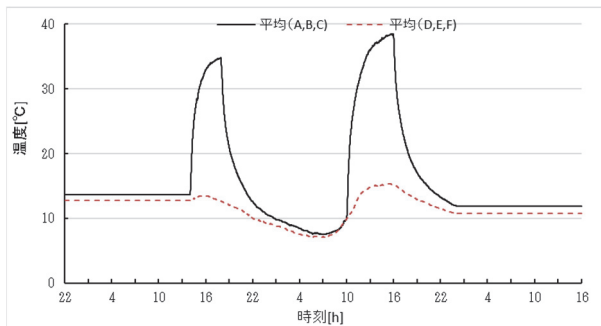


図 1.7 室内外の温度変化

1.3 システム同定計算 SPIDS による結果

ガス回路網用の SPIDS-G に図 1.4 と 1.6 の測定結果を与えてシステム同定した。この低周波濾波の移動平均は 3 分とした。表 1.1 に換気量と有効混合容積を示す。 $q(1,2)$ は外気から小屋内への換気風量を表わす。信頼性評価指標は表 1.2 に示す。常時開けた窓を通して温度差や風圧の変

化があるので前提の不適合率 β を大きくしたと思われる。換気回数は期間平均で約 2.6 (1/h) となった。なお $q(1,2)$ と $q(2,1)$ は風量収支で等しい平均風量を次の SPIDS-H に与える。図 1.4, 1.5, 1.7 の測定結果を熱回路網用の SPIDS-H に与え、全ての測定値に 8 時間の移動平均の低周波濾波を二重に施し、表 1.3 に示す相当熱容量 $m_{i,j}$ と日射熱取得係数 $r_{i,j}$ 等の係数を同定した。また伝熱モデルの節点 i と j 間の一般化熱コンダクタンス $c_{i,j}$ から、換気のを差し引いた外皮貫流の $u_{i,j}=u_{j,i}$ と COD と β を表 1.4 に示す。外皮熱貫流 $u_{i,j}$ と日射取得係数 $r_{i,j}$ は既往の研究^[4]の値に近くなった。なお前述した様に同定期間の開始に発熱の開始が重なると悪影響が見られたので、測定期間の前後に初期温度と最終温度状況を一定値で追加して処理した。

表 1.1 換気量 q と容積 v のシステム同定結果

$q(1,2)$ [m ³ /h]	$q(2,1)$ [m ³ /h]	v [m ³]
45.3	45.0	6.50

表 1.2 決定係数 COD と同定前提の不適合率

決定係数 COD	同定前提の不適合率 β
0.967	2.72

表 1.3 日射熱取得係数 r と相当熱容量 m

$r(1,2)$ [m ²]	$m(1,1)$ [kJ/K]
0	301.9

表 1.4 外皮熱貫流コンダクタンス $u_{i,j}$ と COD と β

$u(1,2)$ [W/K]	$u(2,1)$ [W/K]	COD	β
54.05	53.98	0.979	3.51

1.4 外皮熱貫流係数の同定結果の考察

既報^[4]の外皮熱貫流係数同定では、比較的に長い周期の 5 日の正弦波加熱で、隙間風が約 0.056(1/h) を含む総合熱貫流コンダクタンスの値は 54.9[W/K] が得られていた。

この結果は移動平均が 8 時間で、不適合率 β は 1.034 の最小値の場合であった、その場合も日射取得係数は 0 であった。日当たりが悪い状況では、他の不確かさの影響もあるので、非負最小二乗法により 0 になったと考えられる。

本実験は各種機器の動作確認が主目的だったので、発熱時間も 4 時間と 6 時間と短くし、良いシステム同定結果は期待していなかった。しかし小屋の壁は比較的に熱容量が小さいことや二重移動平均等により、実質的な測定期間が約 1 日半と短い期間でも良い結果になったと考えられる。

また灯油暖房器による間欠的で矩形的な熱とガスの励振でも、両拡散系の同時的なシステム同定が、複雑な装置も制御を用いずに行えることが確認できた。ただし実建物では必要になるとと思われる給油時の発熱停止の悪影響は調べられなかった。またシステム同定の励振の開始の前と終了の後には自然室温状態の期間が低周波濾波の移動平均期間以上は必要なことも分かった。

2.1 固形アルコールの間欠的燃焼による換気量変動測定

ガスボンベやマスフローコントローラ等の複雑で高価な装置は用いずに換気測定を行うため、図 2.1 の固形アルコール燃焼の炭酸ガス発生装置 (480 × 210 × 80mm) を 2019 年度に試作した。着火予定時間をタイマーにセットして、ユーティリティライターにより固形燃料に着火する。この装置を 6 個用意して、約 20 分の燃焼を含む 2 時間周期を 6 回繰り返して、12 時間にわたるガス濃度変化を測定し、2 時間の移動一括同定^{[5],[6]}を 4 分間隔で移動して行くことで換気量変動をとらえる実験を行った。

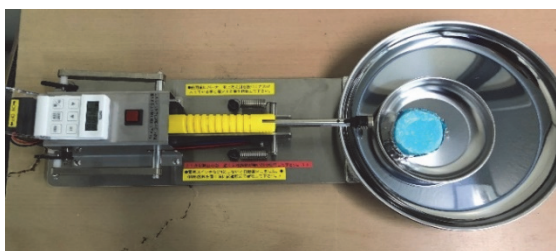


図 2.1 固形アルコール燃料の炭酸ガス発生装置

2.2 換気量変化と間欠的な固形アルコール燃焼

前節の 1.1 で述べた実験用プレファブ小屋に、特注の給・排気換気装置を設置し、図 2.2 の様に階段状の一周期 6 時間の換気量変化を 2 周期繰り返した。換気風量は一周期内で、0 m³/h、5 m³/h、10 m³/h、15 m³/h、10 m³/h、5 m³/h、0 m³/h の 7 段階に変化させた。各段階の時間は 6 h / 7 = 360 min / 7 = 51.43 min とした。実際の給排気風量は、図 2.3 の超音波流量計で測定した。

一方、固形アルコール燃焼の時間と、後述する決め方による減衰期間を含めた 2 時間周期を 6 回繰り返して、測定時間は 12 時間とした。炭酸ガス発生量の変化は島崎^[7]の実験で得られているが、実際の状況を想定し、燃料総質量から推算できる総発生量が矩形波的に一定速度で発生するとした。燃焼の化学式から、メタノール 1 mol (32g) で炭酸ガス 1 mol が発生するので、固形メタノール 25 g からの炭酸ガス量は、1 mol が 22.4 L として、(25 g / 32 g) × 0.0224 m³ = 0.0175 m³ 発生する。燃焼時間が 20 分とすれば、発生速度は 0.0175 m³ / 1200 s = 1.46 E-5 m³/s とする。

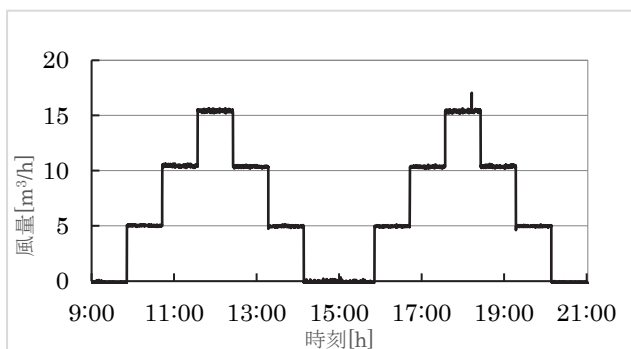


図 2.2 超音波流量計による給・排気換気量の測定結果



図 2.3 超音波流量計

測定時間間隔を 1 分として、炭酸ガス発生量と室内外の炭酸ガス濃度の変化を図 2.4 に示す。これらの炭酸ガス発生量と室内外の炭酸ガス濃度の変化をシステム同定の表計算プログラム SPIDS-G に与えて、4 分ピッチで進行する 2 時間の移動一括最小二乗法で処理することで、換気量と有効混合容積の変化は、移動平均的な意味で捉えられると考える。なお低周波濾波の移動平均は、換気測定 of ガス移動系のシステム同定では、従来から施さないか、あるいは数分間の移動平均を施していたが、本実験では 3 分とした。

ここに低周波濾波の移動平均の目的は、伝熱系のシステム同定では、建物躯体の熱容量の影響を室の相当熱容量に含ませるために 8 時間と長いものに対して、ガス移動系では測定不確かさによるばらつきを平滑化することが目的になるので 3 分と短くする。

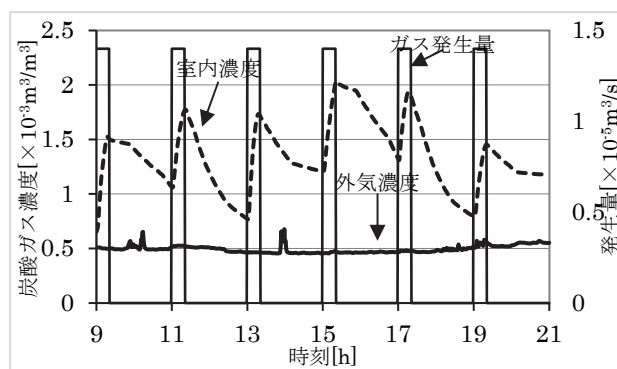


図 2.4 炭酸ガス発生量と室内外の濃度の変化

2.3 移動一括最小二乗法の結果と考察

図 2.5 に、システム同定の表計算プログラム SPIDS-G による換気量の時間変化の計算結果を、図 2.2 の機械給排気量の変化と重ねて比較して示す。移動一括同定期間の長さは 2 時間とした。移動の最初の一括同定期間である 9 時から 11 時の期間から算出される同定結果は 10 時の同定結果とするので、同定結果の変化曲線は、全測定期間に対して、最初の 1 時間と最後の 1 時間分短くなる。図 2.5 の両風量の比較から、実際の換気量の変化が、2 時間で平均化されて捉えられていると思われる。機械換気量の変化

に比べてシステム同定された換気量が少し大きくなっているのは、隙間風による影響も加わっていることも一因として考えられる。

なお決定係数は移動一括同定期間の移動ピッチの4分毎に算出される。これは変動するが、平均的に0.8程度となった。一方、システム同定の前提の不適合率 β は、平均すると8程度と大きくなった。最小二乗法で同定される係数は一定であるべきという前提に対して、実際は変化しており不適合であることを検出している。

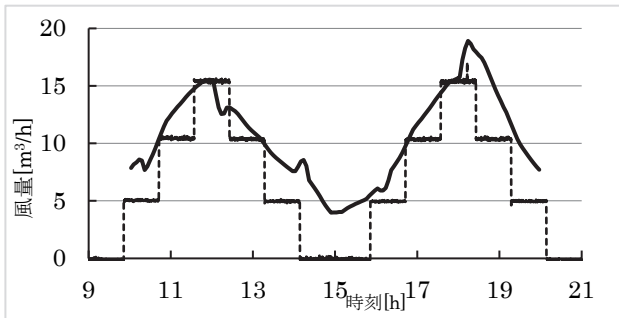


図 2.5 直接測定風量と同定風量の変化の比較

有効混合容積の同定結果を図 2.6 に示す。小屋の空間の幾何的容積は 17m^3 で、瞬時的な一様混合は起こりにくいし、物品等の体積も考慮すれば妥当と思われる。なお本容積の定義は、ガス濃度変化の常微分方程式を回帰式とした場合に、濃度変化をよく説明できる容積と言えらる。しかし図 2.5 と図 2.6 を比較すると、換気量が減少して濃度の一様性が高まり、有効混合容積も大きくなる傾向もとらえている様であるから、文字通り一様な濃度の容積も同定していると考えられる。

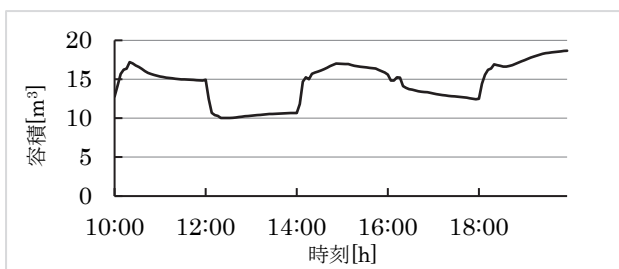


図 2.6 同定された有効混合容積の変化

3 伝熱系とガス移動系の相違点と共通性

伝熱系のシステム同定には比較的に長期間で数日間の測定を要するが、ガス移動系では比較的に短期間の数時間ですむ。これはシステム同定モデルの構造と実現象の違いが、前者は大きく、後者は小さいことも関係する。壁体の熱貫流率等は定常状態で定義される係数で、壁の熱容量は室の相当熱容量に含める必要があるため、長周期の励振を与え、全ての測定値に二重移動平均を施し、ゆっくり滑らかな変化にする必要がある。

換気量の時間変化を測定する方法の研究において、ガ

ス供給の励振は間断なく与える方法も試みたが^[6]、良い結果は得られなかったため、励振停止期間が必要であることが分かっている。一方、換気回数測定でガス濃度減衰法について、最適減衰期間を求める式^[8]も導いていた。そこで励振停止期間の決定方法として用いている。ガス移動系では、最適減衰期間を T_G [h]、換気量を Q [m^3/h]、有効混合容積を V [m^3] として(1)の関係式が得られている。伝熱系では、壁の熱貫流率 K [$\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}^2$]、面積 A [m^2] で $K\cdot A$ [W/K]、相当熱容量は M [J/K] とすれば、(1)式にならない、次の(2)式から停止期間 T_H [h] が計算できる。

$$(Q/V)\cdot T_G = 1.25 \quad (1)$$

$$(3600\cdot K\cdot A/M)\cdot T_H = 1.25 \quad (2)$$

何れも同定すべき未知数の係数を必要とするので、およそ予想される値から決定しておくことになる。また壁の熱容量は厚みの半分程度と室空気を算入する。

おわりに

これまで試作してきた多数室の伝熱と換気の測定システムに比べて、比較的に簡便な測定方法を考案し、まず単室小屋で実験することで実用の可能性を確認できた。なおコンクリート躯体等で熱容量の大きな建物での適用を想定し、既往の研究^[1]では木造系の模擬測定モデルの節点の熱容量を 2.5 倍にしても妥当な結果を得ていた。しかし集合住宅等では、上下の階間の床スラブは厚いので、システム同定精度への悪影響が問題になると思われる。

【謝辞】

本論の実験は、2021 年度の卒研として、前半の実験は持山勇志、後半は鈴木陽也により行われました。また前半の SPIDS による計算とグラフ化で日本工業検査の益子智久に協力頂きました。

【参考文献】

- [1] H.Okuyama, Y.Onishi, System parameter identification theory and uncertainty analysis methods for multi-zone building heat transfer and infiltration, *Building and Environment*, pp39-52, 54, (2012)
- [2] 奥山, 益子, 吉浦, 多数室建物の伝熱と換気の測定のためのシステム同定法, 日本建築学会, 第 50 回熱シンポジウム, 33-40, 2021 年 10 月
- [3] 日本 AIC 株式会社(アラジン)品質保証部提供, 灯油燃焼の基本式, 暖房出力計算, 出典: 日本ガス石油機器工業会, 2020 年 1 月 31 日受領
- [4] 奥山, 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, 空衛学会大会学術講演論文集, 113-116, vol5, 2016 年 9 月
- [5] H.Okuyama, Recent Progress on the Multi-Chamber Airflow Measurement System, 1992 International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, 351-356, July, 1992, Tokyo
- [6] 奥山, 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, 875-876, 2017 年 8 月
- [7] 吉浦, 奥山, 固形アルコール燃焼による炭酸ガス発生を利用した換気量と有効混合容積の簡易測定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1353-1354, 2020 年 9 月
- [8] H.Okuyama, Y.Onishi. Uncertainty analysis and optimum concentration decay term for air exchange rate measurements: Estimation methods for effective volume and infiltration rate, *Building and Environment*, Elsevier, pp182-192, 49 (2012)

*1 神奈川大学・非常勤講師・工博

*2 神奈川大学・特別助教・博士 (工学)

*1 Part-time lecturer, Dr. Eng., Kanagawa University

*2 Assistant Professor, Dr. Eng., Kanagawa University