長期実測に基づいた温暖地域における戸建住宅の24時間全館空調システムの実験検証

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF 24-HOURS CENTRAL AIR-CONDITIONING SYSTEM OF A DETACHED HOUSE IN WARM REGION BASED ON LONG-TERM MEASUREMENT

崔 軍 ——— *1 市川尚紀 ——— *2

Jun CUI ——— *1 Takanori ICHIKAWA — *2

キーワード:
戸建住宅, 24時間全館空調, 温暖地域, 電力消費量, 電気料金

Keywords:
Detached house, 24 hours central air-conditioning system, Warm region, Electric power consumption, Electricity rate

In Japan, except for the part of the cold regions, it is common for the air-conditioning to be used only in the room where residents are there. Thus, large temperature difference is likely to occur between the rooms. The temperature difference has been pointed out as one of the causes of the heat shock. It is effective to use the 24-hours central air-conditioning system in order to eliminate the temperature difference. Therefore, in this paper, we analyze electricity rate and power consumption of 24-hours central air-conditioning system in warm region on the basis of long-term measurement for a detached house.

1. はじめに

近年、古い住宅ほど室内環境が劣化し免疫力が低下するなど疾患を引き起こす危険性が高くなる可能性があることが指摘されている¹⁾。日本では、北海道など一部の寒冷地域を除いて住宅の冷暖房は居住者が常時に居る部屋を対象に間欠運転とするのが一般的であるため、部屋間に大きな温度差が生じやすい。過大な部屋間の温度差はヒートショックの一因とも言われている。2011年にヒートショックに関連した死亡者数は約17,000人で、うち14,000人が高齢者であると報告されている²⁾。

部屋間の過大な温度差を解消するために建物の断熱性能と気密性能を高めた上でさらに24時間全館空調システムを導入することが有効であると考えられている。しかしながら、24時間全館空調システムはランニングコストが高いと懸念され、温暖地域では戸建住宅への導入例が少ないのが実情である。そこで、本報では、中国地方にある戸建住宅を対象に長期実測を行うことによって、取り入れられた種々の省エネ手法の有効性を検証しながら、戸建住宅に24時間全館空調システムを導入する際の室内温熱環境、冷暖房電力消費量および電気料金について実証実験を行い、その結果について報告する。

2. 建物とシステム概要

2.1 建物概要

実測対象建物は広島県福山市にある木造2階建ての住宅である(図1)。延床面積は81.01m²である。建物仕様を表1に、その平面図を図2に示す。本建物は、ランニングコスト軽減策の一つとして、外壁の室内側に105mmのセルロース、室外側に25mmの発泡スチロールによる2重断熱を、窓に樹脂サッシの3重ガラス(熱貫流率:1.27W/(m²·

K))を採用し、高い断熱性能を有する。また、建物の相当すきま面積(C値、専門業者による実測値)は1.27cm²/m²で、気密性も高い。

2.2 システム概要

24時間全館空調システムの系統図は図3に示す通りであ

図1 実測建物の外観

表1 建物仕様

部位	構成 (室内側から)	厚さ mm	部位	構成 (室内側から)	厚さ mm
外壁	バルブ混入珪酸カルシウム板	9.5	屋根	バルブ混入珪酸カルシウム板	9.5
	セルロース	105		発泡スチロール	50
	不織布	1		構造合板	9.5
	空気層	30		ルーフィング	1
	発泡スチロール	25		素焼き瓦	10
3重断熱窓	モルタル	2	床	テラコッタタイル(DK)	19
	Low-E ガラス	3		フローリング(居間)	19
	アルゴンガス	8		コンクリートベタ基礎	150
	ガラス	4		コンクリートブロック	100
	アルゴンガス	8		発泡スチロール	25
	Low-E ガラス	3		防水シート	0.1

る。本システムは、D社の業務用空調機1台(電源電圧は単相200V、定格能力は、冷房5.6kW、暖房6.3kW、定格COPは、冷房3.48、暖房3.77)を使用し24時間全館空調を行う。

空調機の冷暖房効率を向上させるため、建物の北側にある外気ボックスから導入された外気を建物下の埋設ダクト(図3、4)に通し、土壌との熱交換を行わせた後、室外機ボックスへ送る。その際、専用

本稿は日本建築学会中国支部研究発表会(米子、2015.3)で発表した内容に新たな解析を加え、加筆修正したものである。

¹⁾ 近畿大学工学部建築学科 教授・博士(工学)
(〒739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺1番)
²⁾ 近畿大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)

¹⁾ Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kindai Univ., Dr. Eng.

²⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kindai Univ., Ph. D.

(a) 1階平面図

(b) 2階平面図

図2 建物平面図および測定点の配置

ファンを使用せず室外機のファンを利用する。

建物の24時間換気システムから排熱を回収するため、室内からの排気も室外機ボックスに送る。24時間換気システムは、室外機稼働しているときは室外機のファンを利用して第3種換気を行うが、室外機が停止したときのみ24時間換気ファンを稼働させる。両者の換気量が必ずしも一致しているとは限らない。給気は、外気ボックスから埋設ダクト(φ150mm)を通して室内機吸込口まで取り入れられるが、給気ファンを使用しない(図3)。

室内機は1階の階段下に設置されている。室内機で処理された空気はダクトを通して各部屋に送られる。2階への給気は縦ダクトを通して壁吹出口(床上2.6m)から洋室Aと洋室Bに送られるが、1階の各部屋への給気は、床下の蓄熱用ブロック(400個、図5)を通してから吹出される。ブロックのサイズは、390×190×H100mm、空気接触面積は約0.184m²/個である。1階は、居間が床吹出方式を採用しているが、他の部屋は床上1.1mの壁吹出口を採用している。リターン空気は1階のクロゼット扉の換気スリットを通して室内機へ戻る。

2.3 建物の使い方とシステムの運転方法

建物は、実測期間中にモデルハウスとして展示され、基本的に12時～17時までの間にスタッフ1名が常駐し来客の対応をしている。

空調機は24時間連続運転とする。その温度設定は、季節や時間帯によって異なり表2に示す通りである。室温が設定温度に達すると、室外機は停止するものの、室内機は停止せずに送風状態になる。室内機の送風量は、年間一定で3段階の中間(強)と固定される。

本建物は、電化住宅のため安価な夜間電力(料金:ファミリータイムプランI、深夜料金:10.02円/kWh)を利用している。システムの経済性を向上させるため、深夜(23時～8時)では空調機の設定温度を昼よりも高め(22℃、10月～4月)または低め(25℃、5月～9月)にして、建物下に設置されたコンクリートブロックによる蓄熱運転

図3 24時間全館空調システム系統図

図4 埋設ダクト

図5 蓄熱用ブロック

表2 空調機の温度・風量設定

	8時～19時	19時～23時	23時～8時
5月～9月	27℃	26℃	25℃
10月～4月	20℃	20℃	22℃

※室内機の送風量は、3段階の中間(強)と固定されている。

表3 測定項目(温度・湿度・グローブ温度)

	番号	測定場所・測定項目	測定高さ[m]
1階	①	居間・床吹出温湿度	床上0.0
	②	居間・室内温湿度	床上1.1
	③	居間・グローブ温度	床上1.1
	④	室内機・吸込温湿度	—
	⑤	DK・室内温湿度	床上1.1
外気ボックス 室外機ボックス 吹抜	⑥	外気ボックス内・温湿度	—
	⑦	室外機吸込口・温湿度	—
	⑧	吹抜上部・温湿度	天井下0.6
2階	⑨	洋室B・壁吹出温湿度	床上2.6
	⑩	洋室B・室内温湿度	床上1.1
	⑪	洋室B・グローブ温度	床上1.1

※センサーの設置位置は図2に示されている。

を行う。深夜の蓄熱運転時間帯でも室温を設定値に保つ必要があるため、通常の空調時間帯と同様に吹出口から各部屋へ送風する。

3. 実測方法

実測は、2013年11月24日から2014年12月16日までの約1年間にわたり行った。温度、湿度およびグローブ温度の測定位置を図2に、それらの詳細を表3に示す。測定時間間隔は30分である。空調機の室外機と室内機の電力消費量及びその電気料金をP社のHEMSシステムで計測した。24時間換気システムや照明、冷蔵庫、IHクッキングヒーターなどの消費電力は計測していない。

4. 実測結果および考察

4.1 冬期(2013年12月1日～2014年3月31日)について

4.1.1 外界気象条件

今回は、外界気象データを測定せず気象庁(広島県福山市)のデータを用いた。図6、7は、2013年12月1日～2014年3月31日の福山市の外気温と日照時間の度数分布を示すものである。本文でいう度数とは、実測期間に対し、温度や日照時間などがある数値範囲内に入る回数のことを意味する。実測結果を図化する際、度数(分又は

図6 外気温の度数分布（冬期）

図7 1日の日照時間の度数分布（冬期）

図8 1階居間の室温度数分布（冬期）

図9 2階洋室Bの室温度数分布（冬期）

図10 1階居間のPMV度数分布（冬期）

図11 2階洋室BのPMV度数分布（冬期）

図12 暖房吹出温度と室温（2014/3/3～2014/3/10）

図13 グローブ温度、室外機吸込温度および外気温度（2014/3/3～2014/3/10）

日）を実測期間の長さ（分又は日）で割って百分率で示している。図6から、冬期では外気温が概ね0～10℃の間を推移し、その度数が全体の約72%を占めることがわかる。また、1日の日照時間は、4時間以上の日が全体の約61%を占めているが、1時間以下の日が約19%ある（図7）。

4.1.2 室内温熱環境

1階居間と2階東側の洋室Bの室温およびPMV度数分布を図8～図11に示す。PMVは、風速を0.1m/s、着衣量1.0clo、代謝量1.1metとして、測定した空気温湿度とグローブ温度から算出されたものである。図8と図9から、1階居間と2階洋室Bでは、室温が18℃以上の度数は、それぞれ冬期測定期間の93%と75%に達し、室温が16℃を下回る時間帯はほとんどないことがわかる。PMVは、-0.5を下回

る時間帯が全体の約90%を占めているが、-1.0を下回る（PPDが25%を超える）時間帯は、全体の15%（1階）～42%（2階）にとどまった（図10、11）。ヒートショックの一因とも言われる部屋間の温度差（ここでは、温度差が最も大きい台所と洋室Bの差）は、最大で約3℃（平均で約1℃）以内に抑えられている（図12）。居間や寝室と廊下・トイレとの温度差は、測定機器の制約により計測しなかった。

上記の結果より、実測対象建物の室内温熱環境は、概ね良好で、1階に比べて2階の方はやや寒い結果となった。これは、1階各部屋の吹出口の設置位置が2階のそれより低く、温風が居住域に到達しやすいからである。また、1階居間のグローブ温度が2階洋室Bに比べて約1℃高くなっていること（図13）から、蓄熱ブロックを出た温風が床下チャンパーに送られてから室内に吹出される方式（図3）を採用

することにより一定の床暖房効果を得たことも一因と推測できる。

4.1.3 埋設ダクトと排熱回収による室外機への給気加熱効果

本システムは、空調機の冷暖房効率を向上させるため、外気を建物下の埋設ダクトを通してから室外機に給気する仕組みとなっている。図 13 は比較的寒い 1 週間の測定結果を示したものである。図 13 から、室外機の吸込み温度が外気温度より 5~7℃高くなっていることがわかる。これは、室外機の吸込み空気が建物下の埋設ダクトを通り、地中熱や 24 時間換気システムからの排熱により暖められたからである。よって、地中熱利用と排熱回収を取り入れた本システムは、空調機の暖房効率の向上に寄与できると考えられる。

4.1.4 コンクリートブロックの蓄熱効果

1 階居間の床吹出口と 2 階洋室 B の壁吹出口からの吹出温度を図 12 に示す。暖房運転時に 2 階の壁吹出温度が 1 階の床吹出温度より高いが、室外機停止時（室内機による送風状態）では 2 階の壁吹出温度は急激に低下し 1 階の床吹出温度より低くなることが読み取れる。これは、2 階洋室 B への送風は蓄熱ブロックを通さずに縦ダクトを経て直接に 2 階へ送られるのに対し、居間への送風は、まず蓄熱ブロックの中を通して、そこで一部蓄熱してから室内へ吹出され、また、室外機が停止し室内機が送風状態になったとき蓄熱ブロックで暖められた空気が床吹出口から室内に吹出されるからである。よって、蓄熱ブロックを設置することにより一定の蓄熱効果を得たと考えられる。また、図 12 は暖房停止時間帯に 2 階の吹出温度の低下が部屋間の温度差の拡大と一定の関連性があると示唆しているため、2 階への給気も 1 階と同様に蓄熱ブロックを通過させてから室内へ送風するように改善されれば部屋間の温度差がさらに小さくなると思われる。

コンクリートブロックの蓄熱効果を定量的に評価するため、2014 年 12 月 4 日～11 日に室内機の投入熱量に対するブロックの蓄熱量の割合について測定した。しかしながら、今回の測定では、床下の熱ロスやダクトなどの蓄熱量を推定することが困難なため、ブロックのみによる蓄熱量の抽出ができなかった。ここでは、次のようにブロックの蓄熱率 η を近似的に定義する。

$$\eta = Q_{\text{蓄熱+熱ロス}} / Q_{IN} \quad (1)$$

ここに、 Q_{IN} ：室内機の投入熱量、kW

$Q_{\text{蓄熱+熱ロス}}$ ：ブロックなどの蓄熱量と熱ロスの合計、kW

室内機の投入熱量 Q_{IN} [kW] は式(2)で算出する（図 14）。

$$Q_{IN} = c_p \rho \left(\frac{V_{SA1} + V_{RA}}{2} \right) (t_{SA} - t_{RA}) / 3600 \quad (2)$$

ここに、 c_p ：空気比熱、1.005 kJ/(kg・K) ρ ：空気密度、1.2 kg/m³

V_{SA} ：室内機送風量、m³/h V_{RA} ：室内機還気量、m³/h

t_{SA} ：室内機送風温度、℃ t_{RA} ：室内機還気温度、℃

$Q_{\text{蓄熱+熱ロス}}$ は式(3)で計算される。

$$Q_{\text{蓄熱+熱ロス}} = [c_p \rho V_{SA1} (t_{SA} - t_{SA1}) + c_p \rho V_{SA2} (t_{SA} - t_{SA2}) + c_p \rho V_{SA3} (t_{SA} - t_{SA3}) + \dots] / 3600 \quad (3)$$

ここに、 V_{SA1} 、 V_{SA2} 、 V_{SA3} ……：各吹出口から室内への送風量、m³/h

t_{SA1} 、 t_{SA2} 、 t_{SA3} ……：各吹出口の吹出温度、℃

各吹出口と吸込口の風量測定結果を表 4 に示す。室内機の送風量は 3 段階の中間（強）に固定されているため、吹出・吸込風速は 1 回のみの測定、吹出・吸込温度は 30 分間隔の連続測定とした。風速測定において、吹出口に厚紙で作った長さ約 20cm のダクトを掛け、吹出口から約 10cm の断面での平均風速を測定した。1 階と 2 階の各吹

表 4 風量測定結果

設置場所		風量 [m ³ /h]
室内機	吹出口	352.9
	吸込口	338.1
1 階	床吹出口（東）	25.7
	床吹出口（南）	25.7
	CL 床吹出口	23.0
	トイレ壁吹出口	21.1
	浴室壁吹出口	9.4
	DK 壁吹出口	23.6
2 階	洋室 A 壁吹出口	48.5
	洋室 B 壁吹出口	72.5
1 階と 2 階の風量合計		265.8

図 14 ダクト系統図

図 15 暖房時の蓄熱率

出口から室内への吹出風量の合計（265.8 m³/h）が、室内機の送風量（352.9 m³/h）より約 25%、室内機の還気量（338.1 m³/h）より約 21% 少ない。これは、測定誤差やダクト空気漏れによるものと考えられる。

暖房運転時間帯における室内機の投入熱量に対する蓄熱率は、測定日によって多少の差が見られるものの、平均して約 42% となっている（図 15）。本システムでは、蓄熱ブロックの下に 25mm の発泡スチロールを敷いているが、その側面を断熱していないため、本文で求めた蓄熱率は、床下などでの熱ロスを含み、室内機送風量と各吹出口送風量のアンバランスの影響も受けている。

4.1.5 電力消費量と電気料金

冬期 4 ヶ月（2013 年 12 月～2014 年 3 月）の暖房電力消費量と電気料金を図 16～19 に示す。電力消費量と電気料金は概ね最低気温の変化に追従している。電力消費量は、12 月に 730.9 kWh（23.6 kWh/日）、1 月に 786.1 kWh（25.4 kWh/日）、2 月に 723.8 kWh（25.9 kWh/日）、3 月に 605.4 kWh（19.5 kWh/日）となっている。電気料金は、12 月に 10,841 円（350 円/日）、1 月に 11,568 円（373 円/日）、2 月に 10,741 円（384 円/日）、3 月に 8,223 円（265 円/日）となっている。

上記の結果より、本システムでは、24 時間全館空調（暖房）のための電力消費量は約 712 kWh/月（24 kWh/日）、電気料金は約 10,343 円/月（345 円/日）となることからわかる。

4.2 夏期（2014 年 6 月 1 日～2014 年 9 月 30 日）について

4.2.1 外界気象条件

2014 年 6 月 1 日～2014 年 9 月 30 日の外気温度と日照時間の度数分布を図 20、21 に示す。夏期では外気温度が 30℃以上となる時間帯は測定期間の約 8%を占めている。1 日の日照時間は、4 時間以上の日が全体の約 57%、1 時間以下の日が約 26%となっている。

4.2.2 室内温熱環境

期間中の室温と PMV の度数分布を図 22～25 に示す。夏期の PMV は風速 0.1 m/s、着衣量 0.4 clo、代謝量 1.1 met として算出した。期間中の室温は、概ね 22℃～28℃（最高温度は、居間が 27.2℃、洋室 B が

図 16 電力消費量と電気料金 (2013/12)

図 17 電力消費量と電気料金 (2014/1)

図 18 電力消費量と電気料金 (2014/2)

図 19 電力消費量と電気料金 (2014/3)

図 20 外気温の度数分布 (夏期)

図 21 1日の日照時間の度数分布 (夏期)

図 22 1階居間の室温度数分布 (夏期)

図 23 2階洋室Bの室温度数分布 (夏期)

図 24 1階居間のPMV度数分布 (夏期)

29.1℃)に維持されている(図22、23)。PMVが0.5を上回る時間帯は、夏期実測期間に対し、1階が0%、2階が13%にとどまる(図24、25)。PMVが-0.5を下回る時間帯は、1階が34%、2階が24%となっている。また、部屋間(洋室Bと台所)の温度差は最大で約3℃(平均で約1.0℃)以内に抑えられている(図26)。

上記の結果より、夏期の室内温熱環境は概ね良好であることがわかる。2階に比べて1階の方がやや涼しくなっているのは、1階各部屋の吹出口の設置位置が2階に比べ低く冷風が居住域に到達しやすいからである。また、1階居間のグローブ温度が2階洋室Bに比べ約2℃低いこと(図27)から、1階居間に床吹出方式を採用することで一定の床冷房効果があったと推測できる。

4.2.3 埋設ダクトによる室外機への給気冷却効果

図27は比較的暑い1週間の測定結果である。図27から、外気温の高い日(例えば7/25)でも、冷房運転の開始時刻が正午以降となっていることがわかる。これは、夜間の蓄熱運転効果と建物の断熱・気密性の高さによるものと考えられる。外気温の高い日に空調機が稼働する場合(7/25、7/26、7/30の正午以降)、室外機の吸込み温度が外気温より1~3℃低くなっていることから、埋設ダクトによる室外機への給気が冷房効率の向上に寄与したと推測できる。しかし、夕方になると外気温が低下していき、特に深夜(7/28、7/29)になると、室外機への給気温度が外気温を上回る時間帯がある。これは、室外機の発熱による影響が考えられるが、埋設ダクトおよびその周りの土壌が空気より熱容量が大きく外気温が低下してもそれまでに暖められた埋設ダクトの温度がすぐには下がらないことも一因と推測

できる。

4.2.4 コンクリートブロックの蓄熱効果

図26は吹出温度と室温を示したものである。冷房運転時に2階の吹出温

度が1階の床吹出温度より低いが、冷房停止時(室内機による送風状態)では2階の吹出温度が1階より高くなることを読み取れる。これは、室内機から1階床吹出口へ送った冷風が室内へ吹き出される前に蓄熱ブロックの中を通り、そこで蓄熱され、また、室内機が送風状態になった場合は、風がブロックで冷やされるからである。よって、夏期も冬期と同様に蓄熱ブロックの設置により一定の蓄熱効果が得られたと考えられる。

4.2.5 電力消費量と電気料金

夏期4ヶ月(2014年6月~2014年9月)の冷房電力消費量と電気料金を図28~31に示す。電気消費量は、6月に89.7kWh(3.0kWh/日)、7月に257.0kWh(8.3kWh/日)、8月に321.0kWh(10.4kWh/日)、9月に180.5kWh(6.0kWh/日)となっている。電気料金は、6月に1,750円(58円/日)、7月に5,306円(171円/日)、8月に4,259円(137円/日)、9月に2,637円(88円/日)となっている。

上記の結果より、本システムでは、24時間全館空調(冷房)のための電力消費量は約212kWh/月(7kWh/日)、電気料金は約3,488円/

図 25 2階洋室BのPMV度数分布 (夏期)

図 26 冷房吹出温度と室温 (2014/7/24~2014/7/31)

図 27 グローブ温度、室外機吸込温度および外気温度 (2014/7/24~2014/7/31)

図 28 電力消費量と電気料金 (2014/6)

図 29 電力消費量と電気料金 (2014/7)

図 30 電力消費量と電気料金 (2014/8)

図 31 電力消費量と電気料金 (2014/9)

図 32 年間電力消費量と電気料金

月 (116 円/日) となることわかる。

4.3 年間電力消費量と電気料金

空調機の月毎の電力消費量と電気料金 (2013/12~2014/11) は図 32 に示す通りである。電力消費量と電気料金の最小値は 5 月に、最大値は 1 月に現れる。また冬期は、夏期に比べ電力消費量と電気料金が約 3 倍になることわかる。今回の実測では、空調機の冷暖房年間電力消費量は 4,638 kWh、電気料金は 69,175 円となった。

5. おわりに

本報では、温暖地域における戸建住宅の 24 時間全館空調システムについて 1 年間にわたり長期実測を行い、以下の知見を得た。

電気料金は 69,175 円となった。

3) 建物下にある蓄熱ブロックは、暖房時の蓄熱率が約 42%であった。

4) 室外機への給気のために設置した埋設ダクトは、冬期では暖房効率の向上に効果があるが、夏期ではその効果が冬期に比べて小さい。

参考文献

- 1) 羽山広文、釜澤由紀、斉藤雅也、坂倉恵美子、菊田弘輝、村上智彦：住環境の変化が身体へ与える影響の実態把握 その 1 全国の疾患発生と住宅の建築時期・構造解析、日本建築学会北海道支部研究報告集、No.84、pp.539-542、2011.7
- 2) 地方独立行政法人 東京都健康長寿医療センター：冬場の住居内の温度管理と健康について、プレス発表資料、p.1、2013.12

[2015 年 5 月 11 日原稿受理 2015 年 11 月 2 日採用決定]