

OSHW を用いた住環境モニタリングシステム

夏季と冬季における空調機運転モードと室内空気環境・電力消費量の検討

○漆原 健太*¹ 谷 明勲*²
山邊 友一郎*³

キーワード：温度 湿度 電力 センサ モニタリング

1. 序

現在、日本における国内消費電力は生活水準の向上に伴う家電製品の普及によって増加傾向にあり、真夏の冷房により消費電力はピークを迎える。特に 2011 年の東日本大震災の後、原子力発電所の運転停止により、全国で節電が促された。しかし、国内の電力需要を満たすためには、原子力発電の運転再開が不可欠とされ、震災後、安全性の確認後に運転を再開する取り組みが行われた¹⁾。このように電力は我々の生活に不可欠のため、電力利用者が各自で電力消費を抑える取り組みや姿勢が必要である。そこで、本研究では安価でシステム構築やカスタマイズが自由に行えるオープンソースハードウェア(以下 OSHW)の Arduino²⁾と市販のセンサを用いて電力及び、室内空気環境モニタリングシステムを構築し、一般家庭の一室を対象とした実験を行う。本報では、夏季・冬季の実験結果³⁾を比較・考察することで、快適な室内環境を実現し、かつ消費電力削減が可能な赤外線送受信モジュールを用いた赤外線学習リモコンとしての空調制御方法に関する基礎的知見を得ると共に、各センサの赤外線学習リモコンへの応用について検討を行う事を目的とする。

2. 実験概要

2.1 作成機器の仕様と設置箇所

実験対象室は、大阪府寝屋川市の戸建住宅(鉄骨造、築 15 年)の 2 階の一室とした。本研究で使用するモニタリングシステム構築に用いたセンサの仕様⁴⁾を Table 1 に、センサの設置箇所を Figs.1~2 に示す。なお、市販のデータロガー⁵⁾と作成した機器で同時に計測し事前に計測誤差を検討した結果、システムの計測値は平均で温度は約 2.5℃低く、湿度は約 1~3%高く、CO₂濃度は約 50ppm 高い結果となった。計測間隔は、温湿度と CO₂濃度は 1 分、電流センサは 1 秒間隔で計測する。温湿度センサと CO₂センサの水平配置は、Fig.1 に示すように床上から 1m の高さで室内の四隅と中央の 5 か所に設置した。また家庭用エアコン室外機の温度を計測するため室外機に温度センサを 1 箇所、外気の温湿度計測のため、温湿度センサを一箇所、室外機から噴出される温風を受けない箇所に設置した。また、冬季の計測にはサーキュレーターを用いたため、サーキュレーターの設置箇所も図中に示す。

サーキュレーターは実験対象の室の中心の床面より、空調機に向けて送風を行った。また、Fig.2 に示すように、高さ方向の温度差を計測するため、ロフトにつながる梯子に 5 箇所(床上高さ 5cm、70cm、140cm、210cm、250cm)に温度センサを設置した。データの収集方法は、Fig.1 の A01~A06 の位置に設置した温湿度・CO₂のセンサと室外機に設置した温度センサのデータは SD カードに保存し、消費電力は XBee⁶⁾で、高さ方向の温度は、USB ケーブルによるシリアル通信で室内の PC に送信し保存した。

ここで、温湿度、CO₂濃度の値は 5 秒間に 10 回計測した平均値を求めている。電流センサは、空調機の電源コンセントから電流を計測し、西日本の交流周波数が 60Hz なので、その周期である 1/60 秒間に 25 回計測し、その RMS を算出するものとする。さらに、ノイズ処理のため 3 秒間の移動平均を求め、消費電力は電源電圧の実効値である 100V との積である皮相電力を算出した。

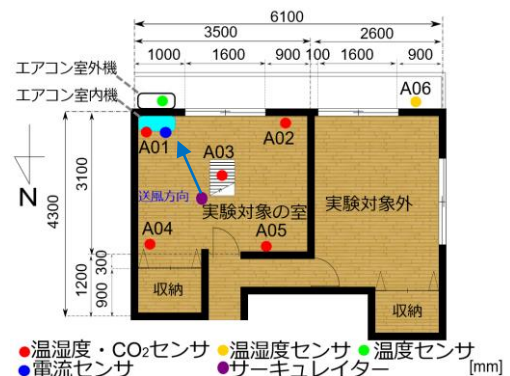


Fig.1 センサ配置(平面図)

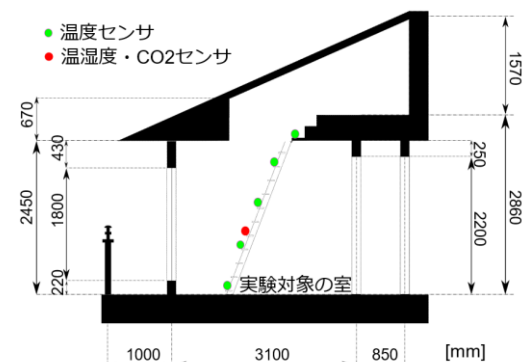


Fig.2 センサ配置(断面図)

Table 1 センサの仕様 4)~7)

	電源電圧	測定範囲	精度	感度	オフセット
温度 センサ	2.7~+10 (V)	-25~+85 (°C)	±3.0 (°C)	+10 (mV/°C)	+600 (mV)
湿度 センサ	4~+5.8 (V)	0~+100 (%RH)	±3.5 (%RH)	+30.7 (mV/%RH)	+958 (mV)
CO ₂ センサ	4.5~+10 (V)	0~2000 (ppm)	±30 (ppm)	+2.0 (mV/ppm)	1000 (mV)
電流 センサ	適応電流	二次巻き線抵抗	公称変流比		
	0.01~80 (Arms)	400±30 (Ω)	1:3000		

2.2 実験方法

実験時間は2時間とする。実験開始前に自然換気を1時間以上行い、空調機は実験開始30秒後に運転を開始する。実験のパラメーターとなる空調機の運転方法は、設定温度・風量の他、夏季の実験では、風向をスイングで運転した実験を、冬季の実験においてはサーキュレーターを設置した実験を行った。なお、実験中は実験対象の室のドアを閉鎖した。実験中の在室人数は1人である。

3. 夏季の実験結果

夏季の実験は、各Caseとも2~3回行った。得られた実験結果の内、ここでは、実験開始時の室内の初期温度や実験時間中の外気温の平均の差が小さい場合の各Caseの空調機の運転方法と空調機で消費された積算電力の実験結果をTable 2に示す。計測は、外気温が安定しやすい9月の13時頃の晴れの日に行った。また、Table 2中の積算電力は、センサで計測した電力の合計値である。

Table 2 夏季実験結果

Case	エアコン運転モード			平均 外気温 [°C]	積算 電力 [Wh]
	設定温度	風量	風向		
CaseS1	28	自動	水平	29	608
CaseS2	27	自動	水平	29	568
CaseS3	28	強風	水平	31	447
CaseS4	27	強風	水平	31	492
CaseS5	28	弱風	水平	28	379
CaseS6	27	弱風	水平	29	529
CaseS7	28	自動	スイング	29	424
CaseS8	27	自動	スイング	31	641
CaseS9	28	強風	スイング	30	466
CaseS10	27	強風	スイング	33	667

3.1 夏季の電力消費計測結果

Fig.3にCaseS2の消費電力の時間変化を示す。空調機の消費電力は運転開始時、室内の温度を設定温度に近づけるため最も高くなる。その後、室内温度が設定温度に近づくにつれて、インバータ制御¹⁰⁾による消費電力を抑えた運転が行われる。設定温度に達した後は、ON・OFF

制御による運転となることが観測された。

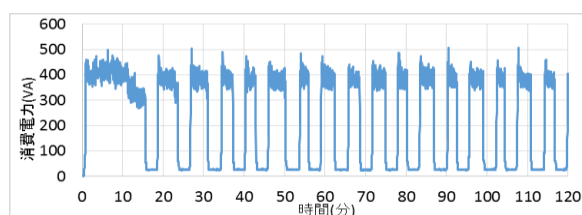


Fig.3 夏季 CaseS2 移動平均消費電力

3.2 夏季の温度計測結果

Figs.4, 5に、CaseS2の床上1mで設置箇所の異なる温度センサの計測結果と、室の中央で高さの異なる温度センサの計測結果を示す。室内温度は、実験開始直後に空調機による冷風により温度が低下し、冷風が直接あたる場所(Fig.1中の室内左下のA04の位置、以下A04)を除く高さ1mのセンサの温度は、運転を開始して15分ほどでほぼ一定の温度となるが、高さ1mでも冷房の風が直接あたるA04では、設定温度以下の温度が計測された。梯子に設置した温度センサは、床上140cmまではほぼ同じ値を示したが、210cm付近から温度が上昇し、最も高い250cmの高さでは、5cmの位置に対して5°C以上高い値が計測された。また、Fig.4からA04以外の温度は約26°Cで安定するが、計測システムの計測値が約2.5°C低いことを考慮すると、室温は概ね設定温度と同じ28°Cに保たれていることがわかる。

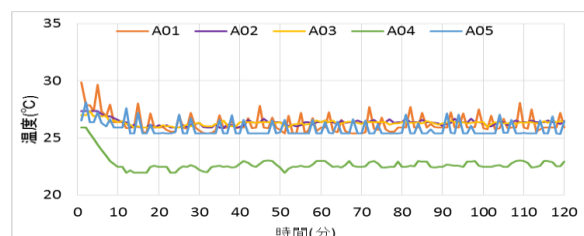


Fig.4 夏季 CaseS2 温度計測結果①

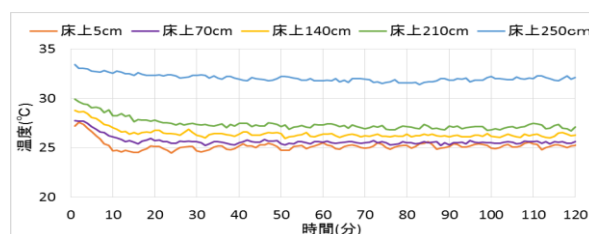


Fig.5 夏季 CaseS2 温度計測結果②

3.3 夏季の湿度計測結果

CaseS2の相対湿度の計測結果をFig.6に示す。室内の湿度は、空調機の運転が最も活発である実験開始時に一時的に低下し、空調機の運転がON・OFF制御に切り替わると上昇と下降を繰り返しながら少しずつ上昇し始め

る結果となった。また、空調機の風が直接当たる A04 のセンサのみ、温度が大きく下がるため、飽和水蒸気量の減少により実験開始直後から湿度が上昇した。

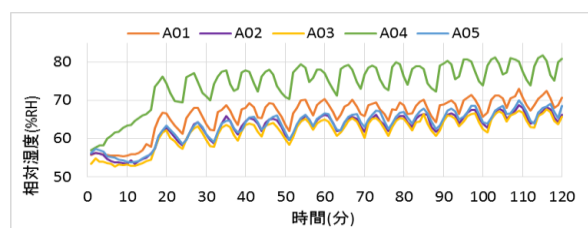


Fig.6 夏季 CaseS2 相対湿度計測結果

3.4 夏季の CO₂ 濃度計測結果

Fig.7 に示す CaseS2 の室内 CO₂ 濃度計測結果から、CO₂ 濃度は、場所によらず室内全体でほぼ均一に上昇した。

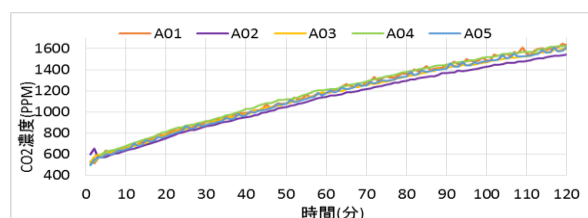


Fig.7 夏季 CaseS2 CO₂ 濃度

4. 冬季の実験結果

冬季の実験も、夏季と同様各 Case とも 2～3 回行った。実験結果の内、ここでは初期温度や外気温度の平均の差が小さい場合の各 Case の空調機の運転方法と空調機で消費された積算電力の実験結果を Table3 に示す。なお、サーキュレーター使用時は、実測値 2 時間分の積算電力 68Wh を空調機の積算電力に加えた値を示す。計測は 1 月～2 月の 17 時頃と 21 時頃の晴れの日に行った。

Table3 冬季実験時の空調機の運転方法

Case	エアコン運転モード			サーキュレーター	平均外気温 [°C]	積算電力 [Wh]
	設定温度 [°C]	風量	風向			
CaseW1	18	自動	真下	なし	6.4	559
CaseW2	20	自動	真下	なし	4.1	633
CaseW3	22	自動	真下	なし	6.0	730
CaseW4	18	強風	真下	なし	7.4	489
CaseW5	20	強風	真下	なし	4.8	796
CaseW6	22	強風	真下	なし	5.8	989
CaseW7	18	自動	真下	あり	4.6	583
CaseW8	20	自動	真下	あり	7.3	614
CaseW9	22	自動	真下	あり	1.5	1344
CaseW10	18	強風	真下	あり	2.1	736
CaseW11	20	強風	真下	あり	4.0	1129
CaseW12	22	強風	真下	あり	2.7	1484

4.1 電力消費計測結果

Fig.8 に冬季実験結果 CaseW3 の消費電力の時間変化を示す。冬季も夏季の結果と同様に、空調機の消費電力は運転開始時、室内の温度を設定温度に近づけるため最も高くなり、室内温度が設定温度に近づいた段階でインバータ制御による運転が行われ、設定温度に達した後は、ON・OFF 制御による運転となることが観測された。

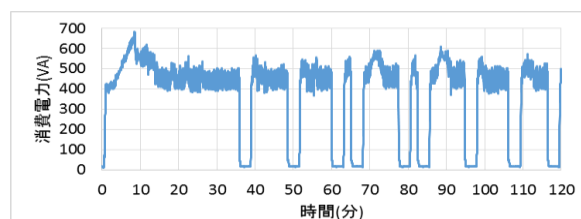


Fig.8 冬季 CaseW3 移動平均消費電力

4.2 冬季の温度計測結果

Figs.9, 10, 11 に、冬季の実験結果の内、CaseW3 の床上 1m で設置箇所の異なる温度センサの計測結果、室の中央で高さの異なる温度センサの計測結果、CasesW3, W9 の床上 5cm の温度センサの計測結果をそれぞれ示す。室内温度は、実験開始直後に空調機の暖房運転で温度が上昇する。また風向を真下に吹き付けているため、エアコン下の温度センサ(Fig.1 中の室内左上の A01 の位置、以下 A01)では温度上昇が他のセンサに比べて大きい。運転開始後 30 分ほどで、A01 以外に設置した温度センサでも、設定温度に近い値が計測された。梯子に設置した温度センサは、床上 140cm より高い地点は運転開始後 30 分ほどでほぼ同じ値となったが、70cm 付近では設定温度への上昇に 1 時間程を要し、最も低い 5cm の高さでは、設定温度より 5°C 以上低い値で一定となった。しかし、Fig.11 に示すように、サーキュレーターを用いた場合は空気が攪拌されるため、床上 5cm の高さの温度も徐々に上昇する結果となった。また、Fig.9 から夏季と同様、A01 以外の温度が約 20°C の値で安定するが、計測システムの計測値が約 2.5°C 低いことを考慮すると、室温は概ね設定温度と同じ 22°C に保たれていることがわかる。

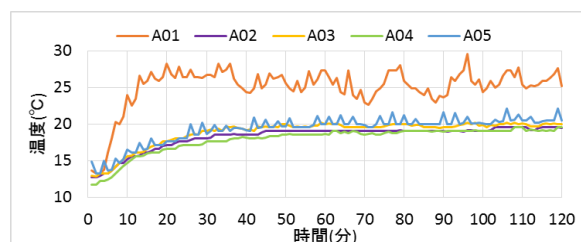


Fig.9 冬季 Case W3 温度計測結果①

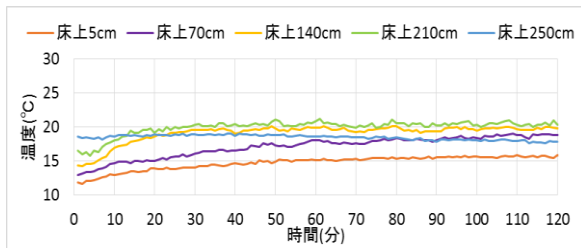


Fig.10 冬季 Case W3 温度計測結果②

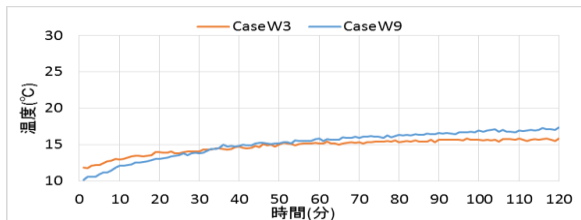


Fig.11 冬季 Cases W3, W9 床上 5cm の温度

4.3 冬季の湿度計測結果

冬季実験結果の内、Case W3 の相対湿度の計測結果を Fig.12 に示す。冬季の室内の湿度は、夏季とは逆に空調機の運転が最も活発である実験開始時に一時的に上昇し、空調機の運転が ON・OFF 制御に切り替わると上昇し始める結果となったが、ON・OFF 制御に合わせて湿度が上昇と下降を繰り返す様子は A01 以外に見られなかった。また、空調機の風が直接当たる A01 のセンサのみ、温度が大きく上がるため、飽和水蒸気量の上昇により実験開始直後も湿度が減少した。

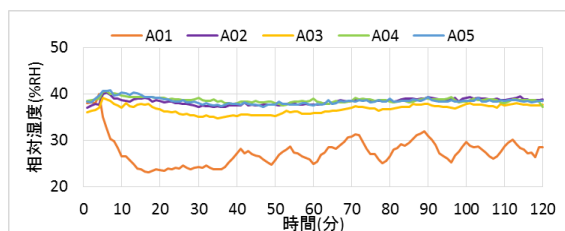


Fig.12 冬季 Case W3 湿度計測結果

4.4 冬季の CO₂ 濃度計測結果

Fig.13 に、冬季実験結果の内、CaseW3 の室内の CO₂ 濃度変化を示す。CO₂ 濃度は、夏季と同様に場所によらず、室内全体でほぼ均一に上昇する結果となった。

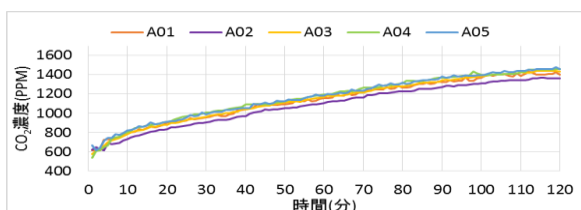


Fig.13 冬季 Case3 CO₂ 濃度計測結果

5. 夏季・冬季の比較考察

5.1 夏季・冬季の温度計測結果に対する考察

夏季の実験では、実験開始時の室内温度は 30℃程度で、空調の設定温度を 27~28℃に設定したため、設定温度と実験開始時の室温の差は 2~3℃である。これに対して冬季の実験では、実験開始時の温度は 15℃前後で、空調を 18~22℃に設定したため、設定温度と実験開始時の室温の差は 3~7℃となり夏季より差が大きい。このため、空調の運転を開始してから、室温が設定温度に到達し安定するまでの時間が夏季の方が早かったと考えられる (Figs.4, 9)。また、夏季と冬季どちらにおいても、空調の送風が直接当たる箇所では、温度が急激に変化したのち、設定温度から 5℃程低い値で夏季は安定し、冬季ではインバータ制御を行っているときは設定温度より 5℃程大きい値で安定し、ON・OFF 制御に運転方法が切り替わると、空調の ON・OFF に合わせて大きく温度が変動する結果となった (Figs.4 の A04, Fig.9 の A01)。

高さ方向の温度差については、夏季は床上 250cm のロフト部に設置したセンサの値が、実験開始時点で 35℃程度と高さの低い位置に比べて非常に高いのに対して、冬季は 20℃程度で高さの低い位置との温度差は夏季より小さかった。しかし、夏季と冬季どちらの場合も、空調の運転が床上 250cm の温度にほとんど影響を与えておらず、夏季では温度はほぼ一定であり、冬季では徐々に温度が低下した。また、床上 5cm~70cm の床面付近の温度は、夏季では、床上 140cm の温度と大きな差は見られないが、冬季では 5℃前後の温度差があり、この温度差を解消するには、サーキュレーター等を用いて室内の空気を攪拌する必要があると考えられる。(Fig.10)

5.2 夏季・冬季の湿度計測結果に対する考察

夏季・冬季ともに温度が大きく変化する実験開始時は、飽和水蒸気量の変化により、相対湿度は大きく変化する。冬季では、温度の変動が激しい A01 の湿度以外は 40%前後で安定しているが、A01 の湿度は 20~30%と空調の送風が直接あたるため乾燥気味であった (Figs.9, 12)。夏季では、空調機が ON・OFF 制御に切り替わった後に湿度が変動するが、これは空調が冷房運転で室内の空気を取り込む際、取り込んだ空気の水蒸気が空調内部で結露し、取り込んだ時より乾燥した状態で室内に戻るためと考えられる。なお、夏季でも湿度は空調運転開始時、上記の理由により低くなるが、室内を閉め切った状態で運転を続けていると、在室者の人体から発生する水蒸気の影響等で少しずつ湿度が高くなってしまい、不快感の原因になると考えられる。(Figs.3, 4, 6)

5.3 夏季・冬季の CO₂ 濃度計測結果に対する考察

夏季・冬季ともに、室内に設置した CO₂ センサの値は、

設置場所によらずほぼ均一に上昇した。これは、空調の送風による風が室内の空気を攪拌しているためと考えられる。また、室内の CO₂ 濃度は実験を開始してから 40 分ほどで衛生管理の基準値である 1000ppm を超える結果となった。さらに、冬季の方が夏季に比べて CO₂ 濃度の上昇が緩やかであるが、これについては、冬季におけるロフト部と実験対象の室の温度差により空気交換が行われた可能性等が考えられ、今後より詳細な検討が必要と考える。(Figs.7, 13)。

5.4 夏季・冬季の電力計測結果に対する考察

電力消費に関しては、夏季・冬季ともに実験開始時に室内の空気を設定温度に近づけるため、大きな電力を消費し、その後設定温度に近づくとインバータ制御を行い、設定温度に達すれば、ON・OFF 制御に切り替わった。しかし、冬季の方が夏季に比べ、空調運転の電力消費の値が大きく、インバータ制御時では、消費電力は夏季が約 400VA であるのに対して、冬季は約 500VA 程度となった。この結果、2 時間の積算電力が夏季に比べて冬季が大きくなる傾向が見られた(Tables2, 3, Figs.3, 8)。これは、前述のように外気との温度差が冬季の方が大きくなり、結果的に、空調の運転が活発になるためと考える。

5.5 室内制御に対する考察

今回の実験より、①夏季における空調機内部の結露、②直接空調の風が当たる場所の急激な温度変化、③室内 CO₂ 濃度が室を密閉すればすぐに 1000ppm を超えてしまうこと、④湿度が冬季は 40%以下、夏季は 70%以上の値になること、⑤冬季の床面と室温の温度差が大きいことが室内環境の問題として挙げられる。空調機の運転では解消できないこれらの問題に対して、Arduino 等の OSHW を用いた赤外線学習リモコンとしての空調制御方法による解決方法としては、1)電流センサの値から空調が運転をしていないと判断できかつ、空調内の湿度が高ければ空調を内部乾燥運転させる、2)空調の空気が直接当たらないよう人感センサと連携して風向を調節させる、3)換気運転が行える空調であれば、湿度が 40~70% 以内かつ CO₂ 濃度が 1000ppm を超えないように換気運転をさせる、4)床面と床上 1m 程度の温度差が生まれないよう強風で運転させるか、サーキュレーターなどの送風装置に気流を発生させるよう命令する等が考えられ、今後、これらの有効性の検証が必要と考える。

5.6 OSHW を用いた温湿度計測システムの赤外線学習リモコンへの応用に関する考察

今回用いた温度センサと湿度センサは、室内の温湿度の変化のモニタリングが可能であり、本報で用いたシステムは赤外線学習リモコンへの応用が可能であると考え

る。今回用いた温度センサは、市販のデータロガーに比べて計測誤差が大きく、前節で示した制御を安定的に行うためには、システムの計測精度の向上が必要と考える。

6. 結

本研究では市販のセンサ及び、OSHW の Arduino を用いて、室内空気環境及び消費電力計測システムを構築し、大阪府寝屋川市の 2015 年 9 月と 2016 年 1~2 月における戸建住宅の一室について空調電力消費と室内空気の変化を計測した。夏季と冬季の実験結果を比較することで、空調機の運転の差や室内環境の空調だけでは解消が難しい、不快感の原因となる室内温熱環境をモニタリングすることで、今後の室内の空調制御及びシステムの構築をどのように行うべきかが確認できた。今後、本研究で得られた知見を基に、Arduino をはじめとしたマイコンボードから空調等に命令を送信し、室内側から最適な冷却効果や暖房効果を得る運転方法を実現する研究を行う予定である。また、夏季の計測は今回 9 月の結果を示したが、空調の使用がピークである 7~8 月の昼間の計測なども併せて行う必要があると考える。

【参考文献】

- 1) 朝日新聞デジタル:『(東日本大震災 5 年: 5) 原発回帰、課題残したまま』(URL: http://digital.asahi.com/articles/DA3S12249833.html?_requesturl=articles/DA3S12249833.html)(平成 28 年 9 月 23 日閲覧)。
- 2) Arduino HP: (URL: <http://www.arduino.cc/>、平成 28 年 6 月 15 日閲覧)
- 3) 漆原健太, 谷明勲, 山邊友一郎: OSHW を用いた住環境モニタリングシステム-空調機運転モードと室温・電力消費量の検討-, 第 38 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、報告、pp265-268, 2015.12.
- 4) 秋月電子通商 HP: 高精度 IC 温度センサ LM61BIZ データシート(URL:<http://akizukidenshi.com/download/LM61biz.pdf>)(平成 28 年 6 月 15 日閲覧)
- 5) SWITCH SCIENCE HP: HIH-4030 湿度センサ データシート(URL:<https://www.switch-science.com/catalog/350/>、平成 27 年 6 月 15 日閲覧)
- 6) 株式会社 U_RD 社 HP: 超小型クランプ式交流電流センサ CTL-10-CLS データシート(URL:<http://www.u-rd.com/products/CTL-10-CLS.html>、平成 28 年 6 月 15 日閲覧)
- 7) SensAir 社 HP: CO₂ センサ CO₂ Engine® K30 製品情報 (URL: http://www.sakakicorporation.co.jp/cgi-bin/dls_v2/dls.cgi?catalog&p103、平成 28 年 6 月 15 日閲覧)
- 8) T&D CORPORATION HP: TR-76Ui 機能と仕様 (URL: http://cdn.tandd.co.jp/jp/product/outline-spec_tr76ui-jpn.pdf、平成 28 年 6 月 15 日閲覧)
- 9) Robert Faludi (原著)小林茂・水原文(訳) XBee で作るワイヤレスネットワーク、オーム社、2011.12.
- 10) 石渡憲治(原著)山田信亮・今野裕二・西原正博(共著): わかりやすい冷凍空調の実務、オーム社、2013.5.

*1 神戸大学大学院工学研究科 大学院生

*2 神戸大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

*3 神戸大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

Monitoring System on Living Environment using OSHW

Relationship between the Operation Mode of an Air Conditioner, Indoor Air Environment, and Electric Power Consumption in Summer and Winter

○Kenta URUSHIHARA*¹ Akinori TANI*²
Yuichiro YAMABE*³

Keywords : Structure, Environment, Planning, Information

Recently, various types of open source hardware (OSHW) have been developed, and many sensors are also available for use in various types of information monitoring systems in the field of architectural engineering. The authors have already examined various types of information monitoring systems related to earthquake responses of buildings using the OSHW. However, it is important that the utilization of monitoring systems of buildings' performance is considered in not only emergencies such as earthquakes but also normal situations.

Therefore, in this study, data on the electric power consumption of an air conditioner, and air parameters such as temperature, humidity, and density of CO₂ in a room, are collected using a monitoring system. Users can comprehend the energy consumption of air conditioners and the air conditions in the room by monitoring the results. It is also considered that reductions in excessive energy usage and comfortable indoor air environments can be achieved based on this data analysis. An air conditioner in a testing room is activated with different operation modes, and data logging is performed. Five data loggers for temperature, humidity, density of CO₂ are located in different parts of the room, and two in outdoors. In addition, five temperature sensors are located at different height positions in the center of the testing room. A current sensor is attached to the power cable of the air conditioner. The operation modes of the air conditioner are changed in each testing case. In this study, the logged data on temperature, humidity and the density of CO₂ are saved as average values over 10 records at an interval of 5 s to a secure digital (SD) card or a notebook-size PC every 1 minute.

In this paper, the energy consumption of air conditioners and the air conditions in the room were measured in summer and winter. Tests in summer were performed last September. Those in winter were performed between January and February in this year. In tests of winter, changes of the results by installing a circulator in the room were also examined.

By comparing obtained data in summer and winter, it is clarified that the OSHW can be utilized for monitoring on electricity consumption and indoor air environments of the room. Furthermore, using the data measured by the OSHW, the fundamental knowledge on control methods of the air-conditioner by an infrared transceiver module with OSHW can be obtained aiming at realizing comfortable indoor air environment and the reduction of electric power consumption of an air conditioner.

*1 Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kobe Univ.

*2 Professor, Graduate School of Engineering, Kobe Univ.

*3 Associate Professor, Graduate School of Engineering, Kobe Univ.