複数の室内機がある執務室における夏期・冬期実測結果

在室者の調整行動を利用した省エネ空調制御システムに関する研究(その2)

MEASUREMENT RESULT IN CASE OF AN OFFICE WITH MULTIPLE INDOOR UNITS
IN SUMMER AND WINTER SEASONS

An energy saving air-conditioning control system that's senses the adjustment behavior of occupants (Part 2)

荻野 司*, 須永修通**, 増井周平***, 酒井浩介****

Tsukasa OGINO, Nobuyuki SUNAGA, Shuhei MASUI
and Kosuke SAKAI

Authors are developing an Active Energy-saving Control System for Air-Conditioning (AECS-AC) with a unique air-conditioning control method that senses the occupants' on/off operation onto the air-conditioning. The goal of this concept is to make the system able to understand the occupants thermal comfort request by feedback of the adjustment behaviour of occupants, without collecting the details of the conditions of the occupants, such as their attributes, thermal sensation, comfort sensation and psychological condition. This paper describes the AECS-AC method utilizing adjustment behaviour of occupants based on summer and winter season data of an office space in a medium sized building.

Keywords: Energy saving, HVAC control, BEMS, Thermal sensation, Office buildings, Environmental comfort

省エネ, 空調制御, BEMS, 温熱感覚, オフィスビル, 快適環境

1. はじめに

エネルギーの節約と地球温暖化ガスの低減は、世界的な提言である。日本では、東日本大震災以降、この対策は急務となっており、建築設備においては、高効率機器への設備改修の促進やBEMS (Building Energy Management System) による既設設備機器の効率的な運用が推奨されている¹⁾。特に、BEMSによって室内環境を適正化することで、無駄な設備機器の運用が削減可能で、効果的な省エネが実現できると期待されている。

しかし、既存のBEMSは、設備機器の管理・運用に重点をおいており、効率的な運用や在室者の個々のワークスタイルや快適性を考慮した運用には至っていない。

一方、在室者の着衣量を調整し、設定温度の緩和によって省エネを図る「クールビズ」、「ウォームビズ」が推奨されているが、空調の温度設定のやり方によっては、職場環境の悪化、業務効率の低下も指摘されている²⁾。

そこで、省エネを図りながら個々の温熱的な要望（以下、温熱要望と記す）を満足させる空調システムとして、パーソナル空調方式が期待されているが、新築建物を中心に適用には制限がある。外部環境を考慮した空調制御方式として、室内の放射温度を外気温、天気予報、建築構造情報から推定し、この推定PMV (Predicted Mean Vote) になるように空調稼働制御する方式も提案³⁾されているが、同

一空間における執務室内の不均一性への対応が難しく⁴⁾、在室者の温熱要望への対応も課題である。村上ら⁵⁾は、在室者の温熱要望申告をパーソナルコンピュータに取り入れ、在室者全体の特性に適應する空調制御方式を考案し、業務形態、性別など様々な特性を有する在室者に対応する制御ロジックを検討しているが、定量的な省エネ性能の検証や総合的な制御方式の提案には至っていない。

この課題について、筆者らは、在室者の空調ON/OFFによる調整行動から、室内の温熱環境を把握し、その結果を空調制御に反映させることで、在室者の温熱要望に沿った「アクティブ省エネ空調制御システム」について検討している。既報⁶⁾では、夏期において中規模テナントビル内のオフィスに導入し、その中の会議室で行った実測と在室者へのアンケート結果より、在室者の空調ON操作から在室者のその時点での室内環境に対する温熱要望を捉えられることを示した。また、捉えた温熱要望を反映した空調制御を行うことで、異なる温熱環境を持つ会議室毎に、在室者の温熱要望に沿った省エネ制御が実現でき、快適な温熱環境に向けた制御の可能性も示した。しかしながら、検討した空間は、常時使用されていない会議室を対象としており、また、各会議室に室内機が一台のみ設置された限られた条件であった。

そこで本論文では、既報で提案したアクティブ省エネ空調制御システムを常時使用されている複数の室内機がある執務室に適用し、

本論文は、既発表論文(7)(8)(9)(10)で発表した内容に基づいて加筆・修正したものである。

* 合同会社ゼロワン研究所 博士(工学)

** 首都大学東京都市環境科学研究科建築学域 教授・博士(工学)

*** アラップ・ジャパン・リミテッド 修士(工学)
(当時首都大学東京博士前期課程学生)

**** 合同会社ゼロワン研究所 学士(工学)

ZeroOne Laboratory, LLC., Dr.Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng.
Ove Arup & Partners Japan Ltd., M.Eng.

ZeroOne Laboratory, LLC., B.Eng.

夏期、及び冬期において、温熱環境変化や制御性能について検討を行った。特に、在室者の居場所による調整行動に着目し、パーソナル空調的な制御の可能性についても検討を行ったので報告する。

2. アクティブ省エネ空調制御システム

2.1 本実証実験で使用したシステム構成

Fig.1 は、本実証実験で使用したBEMS⁶⁾ のシステム構成図を示す。電力計測装置、温湿度計、人感センサなどのセンサ系と照明、空調室内機、室外機などの制御系とに分かれており、設備機器は個別制御が可能である。本実証実験では、このBEMSを用いてアクティブ省エネ空調制御（Active Energy-saving Control for Air-Conditioning：以降、AEC-AC）を行った。

2.2 在室者の調整行動を利用したアクティブ省エネ空調制御

従来の室内温度制御では、専ら人（管理者及び在室者）による空調運用が一般的である。一方、外気温や日射などの影響を避けるために過剰な運用になることや、日々の業務状態の違い、個人の温冷感の違いから、在室者の要求と運用がマッチしていないことも多く、快適性の維持と省エネの両立を図るのは難しい。そこで筆者らは、在室者の総合評価としての空調への要求（温熱要望）を定量的に把握する方法として、在室者の手動による空調操作に着目した。Fig.2 に概念図を示す。在室者による空調操作は、温熱環境を適正に調整する行動として捉えることができ、その時点での室内環境の満足・不満足境界点と考えることができる。AEC-ACは、この調整行動を空調制御に利用することで、在室者の温熱要望に沿い、かつ省エネとなる空調制御を目指している。

本実証実験では、在室者が容易に空調を操作できるように、壁スイッチだけでなくパソコンやタブレットによっても ON/OFF 操作が可能になった。なお、本空調設備は、空調室内機の発停制御がリレーにより容易に実施可能であったので、空調制御は設定温度変更ではなく発停制御によって実施した。具体的な動作は、温度設定を夏期 26℃、冬期 22℃と固定し、異なる稼働削減量の空調稼働モード（以降、モード）を設定した。モード毎に空調室内機の ON/OFF 制御を記述したテンプレートを用意した。Fig.2 上段に示すように、初期状態のテンプレートで制御を開始するが、その後、調整行動である空調 ON/OFF の時間当たりの回数がモード選定時にフィードバックされ、新たに最適なテンプレートが選択される。手動による空調 ON（または OFF）操作回数から、手動操作が多い場合には快適側へ、少ない場合には省エネ側になるテンプレートが選定される。

3. 夏期実証結果

3.1 実証実験方法

都内Nビルにおいて、2013年7月8日より2013年9月30日（以降、2013年夏）に複数の室内機がある執務室で実証実験を行った。建物概要はTable 1の通りである。対象フロアの平面図に室内機とロスナイ換気装置^{注1)}の換気口位置、執務室内に設置した空気温湿度計^{注2)}/放射温度計^{注3)}の設置位置をFig.3に示す。計測間隔は5分とした。また、空調制御用発停リレーのON/OFF状態情報も同様に計測した^{注4)}。なお、ロスナイ換気装置は、2台を業務時間中のみ運転している^{注5)}。また、空調のデマンド制御は行っていない。座席は、各

Fig. 1 The BEMS overview⁶⁾ used in the Active Energy-saving Control System for Air-Conditioning

Fig. 2 Concept of Active Energy-saving Control for Air-Conditioning

Table 1 Summary of the building

Location	Tokyo, JAPAN			
Use	Office Building			
Dimension	10 Floors, Underground 1F			
Total floor space	8,664.09 m ²			
Ceil Height	2.5m (Std. Floor)			
Occupied Area	486.7m ²			
Office Area	321.2 m ²			
Meeting Room Area	165.5 m ²			
Type of Air-Conditioning System	Multiple Air-Conditioning System (Ceiling cassette type)			
Number of occupants	2010: 50 (Male:39,Female:11)			
	2013: 45 (Male:39,Female:6)			
Air-Conditioning Unit Spec. (Cooling)				
Area	Unit	Cooling Capacity	Power Consumption	COP
Office	Outdoor: 1 set (2 units)	90.0kW	27.67kW	3.25
	Indoor: 13 units	-	0.80kW	-
Meeting	Outdoor: 1 set (2 units)	54.0kW	16.40kW	3.41
	Indoor: 7 units	-	0.50kW	-

Fig. 3 Position of indoor air-cooling unit and measurement points

列とも隣が空席になるように2名から3名で配置している。

執務室の南西側はビルが隣接しているため、一部を除いて直達日射はほとんど侵入しない。また執務室のブラインドは、部分的に下ろした状態で運用されていた。

次に、今回行った空調制御方法を述べる。Fig.3に示すように執務室内の室内機：9台と常時ドアが開放されていたRoomZの室内機1台を制御対象とした。既存ビルへの新たな工事が少なく制御が簡便に行えるように、室内機を2系統のグループとし、2系統の室内機のON/OFF制御にて、空調の稼働削減を段階的に実施できるようにした。2系統の室内機のグルーピングは、室内機が同時に停止することによって、無風状態をできるだけ避けるように、隣接する室内機が交互に停止するような千鳥状とした。また、室内機の風量は固定でスイングモードによる運転とした。執務室内の室内機9台は、A系統：5台、B系統：4台で、隣接するRoomZのPE7は、PE6がB系統なのでA系統とし、A系統は合計6台となった。

Fig.4には、室内機の稼働削減率が40%時（モード4）のテンプレートで制御されている、A系統の室内機PE3とB系統の室内機PE4のON/OFFの様子を示す。ON:15分、OFF:10分の25分を周期的に自動制御する。手動によるON操作が行われた場合には、次の自動OFFが手動OFF操作が行われるまでON状態が継続する。他のA系統、B系統の室内機も系統毎に同時にON/OFFが繰り返される。なお、A系統とB系統が同時に停止する時間が短くなるように、周期の起点はずらしている。このように各系統を間欠運転させることで、室内機の稼働削減率が段階的になるように室内機のON/OFFテンプレートを作成し、Table 2に示すような7つの運転モードを設定した。なお、手動操作は、室内機毎に個別に操作が可能で、各室内機は、壁スイッチによる操作に加えて、パソコンやタブレットから専用WEB画面にてON/OFFの状態確認や制御も可能で、個々の手動ON/OFF操作を個別に集計している。

本実証実験では、実験初日（7月8日）は、モード4で空調制御を開始した。翌日からは、午前零時に、前日の各室内機の状態情報から自動制御期間内の空調 ON 総回数を算出し、1台1時間当たりの回数を求めた。この回数が1回/h・台未満（0～74回/日）^{注6)}の場合には1段階分省エネモードのテンプレートへ、1～2回/h・台（75～150回/日）は同じテンプレートを維持し、2回/h・台を超える（151回/日以上）場合には1段階分稼働モードのテンプレートへ変更した。この閾値は、各モードのON/OFFテンプレートが20分前後の周期で制御をしていることから、1時間あたり2回を超えた手動操作が生じれば、稼働側へ制御する必要がある、逆に1時間あたり1回未満であれば省エネ余地があると考えて設定した。

この閾値では、手動操作が1～2回/h・台に安定するような制御となる。この省エネ側閾値から稼働側閾値の間がAEC-ACの目標制御区間となるが、省エネ側、稼働側両方の閾値を小さくすると快適性に、両方の閾値を大きくすると省エネに重点をおいた制御となる。

また、本実証実験では、モード変更の間隔を一日とした。日中の在室者数の変動、気象の日変動については、センシングできる機器を具備していないことから制御に利用していない。なお、前日が休日の場合には、直前のAEC-AC実施日の結果に基づいて制御を行った。平日の業務時間外、休日は20分毎に室内機を全停止する制御を行った。

Fig. 4 Operating condition of the air conditioning by AEC-AC

Table 2 On/Off control template for Air-conditioning(Summer)

	Driving Mode	Cycle [min]	ON/OFF time [min]	Reduction Rate	Indoor Machine Pattern	Operation interval of the indoor unit											
						0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
No running side Running side	1	15	ON:5 OFF:10	67%	A	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
					B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	2	25	ON:10 OFF:15	60%	A	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
					B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	3	10	ON:5 OFF:5	50%	A	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
					B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	4	25	ON:15 OFF:10	40%	A	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
					B	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
Running side	5	15	ON:10 OFF:5	33%	A	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
					B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
Running side	6	20	ON:15 OFF:5	25%	A	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
					B	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
Running side	7	25	ON:20 OFF:5	20%	A	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
					B	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON

3.2 温熱環境と空調稼働モード変動結果

3.2.1 室内温熱環境の経時変化

Fig.5に30℃を超える夏日であった8月19日から21日にかけての執務室内のペリメータ側室温 T_b 、 T_e 、中央付近室温 T_c とグローブ温度 T_g を示す。8月19日は、夏休み明け最初の業務日である。空調時の室温は概ね28℃程度で制御されているが、測定点によって2～3℃の違いがあり、窓に近く南西側コーナの T_e が高く、次いで中央付近 T_c 、廊下側 T_b という順で低くなる傾向があり、温熱環境が不均一となっている。 T_e の変動が大きく、グローブ温度も高いのは窓・外壁からの放射の影響と考えられる。19日の空調 ON 回数が、2.6回/h・台(195回/日)を超えていたので、モード1(削減率67%)による制御では、十分な冷房が行えておらず、在室者による空調 ON 行動により温熱環境の改善が図られていたことが分かる。翌日は、稼働側のモード2(60%)に変更され、前日に比べ各測定点の温度は1～2℃低下している。空調 ON 回数も約1.2回/h・台(93回/日)で前日より減少したので、比較的快速な環境であったと推察される。

3.2.2 日変動とモードの切り替え

Fig.6に7月のAEC-AC時のモードの推移、室内気温（業務時間中のみの平均）、PMV（業務時間中のみの平均）と外気温（東京）を示す。PMVは、執務室の代表値として、温度、湿度＝計測値：測定点 T_c (執務室中央付近)、放射温度＝グローブ温度より算出：測定点 T_g (執務室中央付近)、着衣量：0.6clo、活動量：1.1MET、気流：0.1m/sとした。なお、AEC-ACが実施されていない日は、空欄としている。Fig.7には、執務室エリアの一日あたりの空調 ON 総回数を示す。室温は、外気温の変化によらず26～28℃で維持されていた。また、PMVは0.9近辺の日もあるが、0.6～0.8の範囲内であった。在室者へのアンケートはとっていないが、自動運転と調整行動

Fig. 5 Thermal environment of office (19th-21th. Aug. 2013)

によって室内の温熱環境は、やや暖かい範囲で維持されていたと考えられる。

空調制御のモードは、AEC-AC 開始初日 (7 月 8 日) は、在室者の調整行動が少なく 1 回/h・台未満であったので、削減側へ 1 段階移行しモード 3 (50%) となったが、11 日に手動操作が増え、再びモード 4 となった。16 日、17 日は、手動操作が少なくモード 1 へ順次移行し、18 日以降はモード 1 が継続した。7 月上旬には記録的な猛暑によりモード 3、4 で稼働していたが、中旬以降は比較的真涼しい外気温を反映して、稼働削減率が大きいモードで制御されたと考えられる。このように、AEC-AC は行きすぎた省エネの場合には、在室者による調整行動に基づき室内の温熱環境を改善させるように、翌日のモードを稼働側 (快適側) へ移行する。また、調整行動が少ない場合には、翌日のモードを削減側 (省エネ側) へ移行させて、過剰な空調運転を削減する。

3.2.3 場所による調整行動の差異

Fig.8 に 7 月の手動による ON 操作の 1 時間当たりの回数を、室内機毎に示す。手動操作は、インテリア側(IN)に比べてペリメータ側(PE)の方が多く、また西側よりも東側の方が多い。本空調制御では、ペリメータ側とインテリア側において同じモードで間欠運転を実施していたので、外気の影響を受けやすいペリメータ側の調整行動が多くなったと考えられる。Fig.9 には、Fig.5 に示した 8 月 19 ~21 日の各室内機の空調 ON 回数を示す。19 日は IN3 と PE1 から PE5 で空調 ON 回数が多い。またモード 2 に切り替わった翌 20 日は全体的に空調 ON 回数が減少しており、温熱環境が改善したと推察されるが、IN3 は依然空調 ON 回数が多く、IN3 周辺の在室者は温熱環境に不満を感じている。しかしながら、21 日はモード 2 のままになっている。これは、翌日の運転モード決定が全室内機の空調 ON 回数の総和によって判断し、すべての室内機を同じモードで運転しているためである。つまり、空調 ON 回数が多く温熱要望の高いエリアはその調整行動を翌日の制御に反映しにくく、逆に温熱要望が低いエリアは過剰に空調されると考えられる。

従って、執務室内の調整行動の総和によって室内機を制御するのではなく、室内機毎にその室内機への空調 ON 回数によってモードを調整すれば、在席場所を反映した空調制御が可能であると考えられる。

3.3 消費電力削減結果

Fig. 6 Thermal environment and Driving mode of office (Jul. 2013)

Fig. 7 Daily total count of switching ON (Jul. 2013)

Fig. 8 Hourly ON count of every indoor unit (Jul. 2013)

Fig. 9 Daily ON count of every indoor unit (19-21th. Aug. 2013)

Table 3 に 28℃設定で空調を連続稼働させていた 2010 年と 26℃設定の AEC-AC で制御した 2013 年との消費電力の比較を示す。2010 年は個々の空調機の消費電力は測定していなかったが、計測していた全空調消費電力と各室内機の稼働時間から各室内機、室外機の電力量を推定した^{注7)}。推定された各電力量から求めた全空調電力量は 11,945kWh で、実測による 12,402kWh と約 4%の誤差となり、この推定は妥当なものと考えられる。この結果から、執務室エリアは、2010 年比で 46%の電力が削減されている。なお、外気温を 2010 年と比較すると、2013 年（東京）は、7 月で 0.7℃、8 月は 0.4℃低く、9 月は 0.1℃高かった。外気温が消費電力量へ与える影響は、参考文献 6) に示す外気温（東京）と室外機の消費電力量の関係より 180.1kWh/月・℃^{注8)}となり、2010 年と比較した 3 カ月間の削減電力量 3,778kWh に比べて十分に小さい。また、業務日数はともに 7 月から 9 月まで 58 日と同じで、在籍人員は 10%減少していたが執務室、会議室という用途なので、極端な使用状態の変化は無いと考えられる。

この削減の主な要因としては、以下が考えられる。

業務時間内

Table 3 で示したように、室内機の稼働時間が2010年比で2,954時間減少しており、室内機の電力削減に加えて、室外機への負荷も減り、室外機の電力が削減できたと推定できる。2010年は、28℃の設定温度で連続運転をしていたが、在室者が設定温度を変更する場合もあり、室内が過剰に冷房されていたことが考えられる。一方、2013 年は、在室者に空調の発停を許していたが、AEC-ACによって随時制御していたので、2010年のような過剰な空調運転が削減できたと考えられる。

業務時間外

業務時間外は、AEC-ACによって20分周期にて室内機を自動停止する運用を行っており、積極的に空調を停止した。従って、消し忘れや無駄な稼働を無くした効果がでていると考えられる。本実証実験で使用したビル用マルチパッケージ型空調システムは、室内機の停止数に応じて室外機への負荷が減るので消費電力は減少するが、室内機の停止数に比例して消費電力は減少しない。また、消し忘れによって一台でも室内機が稼働していると室外機が運転をするので、無駄な電力が消費される。業務時間外での消費電力削減には、全室内機を停止する時間を多くすることが効果的である。そこで、室外機 1 につながる室内機13台の全停止時時間を、2010年夏と2013年夏と比較してみると、Table 4に示すように、2013年夏の方が228時間増加しており、執務室の室内機を積極的に自動制御によって停止したことによって、室外機の電力削減ができたことが分かる。但し、室外機 1 には、RoomX,RoomYおよび会議室であるRoomCともつながっているが、この3部屋は人が常時いる空間でなく、特に業務時間外は、BEMSによって常に空調を停止する自動制御を行っていた。

4. 冬期実証実験結果

4.1 実証実験方法

前章と同じ執務室にて、2013 年 12 月 1 日より 2014 年 2 月 28 日（以降、2013 年冬）に冬季の実証実験を実施した。また、冬期においては、2 月 24～28 日に、在室者に対して、着衣量、温熱感、快適感、気流に関して Fig.10 に示す質問項目により、10 時半、14 時、

Table 3 Power reduction result (Jul.-Sep. 2013 vs Jul.-Sep. 2010)

		Jul.-Sep.2013	Jul.-Sep.2010	
Control method		Active air-conditioning control	Temperature-constant control (28℃)	
Division		Mesured	Mesured/Estimate	Reduction rate
office area	Indoor unit working time(h)	3420	6374	46%
	Indoor unit(kWh)	256	476	
	Outdoor unit(kWh)	4118	7676	
	Power consumption(kWh)	4374	8152	46%
Meeting area	Indoor unit working time(h)	1476	3866	62%
	Power consumption(kWh)	1448	3793	62%
Total	Air-conditioning electric	5822	12402	53%

*The estimate value of each electric consumption is estimated from indoor unit working time of 2010 based on air-conditioning electric consumption per indoor unit working time of 2013.

Table 4 The suspension time of all indoor unit (July.-Sep.)

		Jul.-Sep.2013	Jul.-Sep.2010	
Control method		Active air-conditioning control (26℃)	Temp. constant control (28℃)	
		Indoor unit (h)	Indoor unit (h)	Incremental suspension time (h)
Office room area (Outdoor unit 1)	Total indoor unit operating time	3420	6374	
	All indoor unit suspension time			
	Business hour*	25	32	-7
		Others	1107	228

*10:00-12:00,13:00-18:00 (Except for the holiday)

Fig. 10 Questionnaire item

Table 5 On/Off control template for Air-conditioning(winter)

	Driving Mode	Cycle [min]	ON/OFF time [min]	Reduction Rate	Indoor Machine Pattern	Operation interval of the indoor unit											
						0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
						A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
No running side ↑	1	20	ON:0 OFF:20	100%	A B	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	2	25	ON:5 OFF:20	80%	A B	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	3	20	ON:5 OFF:15	75%	A B	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	4	15	ON:5 OFF:10	67%	A B	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
	5	25	ON:10 OFF:15	60%	A B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	6	10	ON:5 OFF:5	50%	A B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	7	25	ON:15 OFF:10	40%	A B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	8	15	ON:10 OFF:5	33%	A B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	9	20	ON:15 OFF:5	25%	A B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	10	25	ON:20 OFF:5	20%	A B	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF

18 時に回答する形式でアンケート調査も行った。冬季の空調制御方法は、夏期と同じように各室内機を千鳥状の配置になるよう A 系統と B 系統の 2 系統に分け、各系統を個々に制御した。しかし、実証実験を開始する前月（2013 年 11 月）は、殆ど暖房を必要としない日もあったため、夏期の 7 モードに加えてより削減量が多い 3 モードを加えて、10 の運転モードを設定した（Table 5）。空調の設定温度は 22℃とした。

Fig. 11 Thermal environment of office (17th-19th Feb. 2014)

稼働モードを変更する閾値は、夏期と異なる設定となった。^{注9)}
 実験当初(12月1日～1月13日)は、省エネ側モード移行1.2回/h・台(90回/日)未満、稼働側モード移行2.4回/h・台(180回/日)以上とした。この閾値では手動ON操作回数が減少しなかったため、1月14日以降は、各閾値を快適側に向けて半減させ、省エネ側モード移行の閾値を0.6回/h・台(45回/日未満)、同モード維持を0.6～1.2回/h・台(45回/日～89回/日)、稼働側モード移行の閾値を1.2回/h・台(90回/日)以上とした。

4.2 温熱環境と空調稼働モード変動結果

4.2.1 室内温熱環境の経時変化

Fig.11に、2月17日(月)から19日(水)にかけての室温Ta, Tc, Teとグローブ温度Tgを示す。17日は、休日明けでかつ残雪も残る状況で、モード3(削減率75%)で空調が運転されて、室温は概ね23～25°C程度で制御されていた。一方、測定点によっては、2°C程度のばらつきがあり、温熱環境が不均一となっていることが分かる。個々の測定点では、1°C程度で室温が変動しており、各室内機が間欠運転によって発停を繰り返している影響であると考えられる。ペリメータ側(南西側の窓付近)Teでは、執務室中央付近Tcと比較して室温が約2°C程度低い。この日の空調ON回数は約1.5回/h・台(111回/日)なので、モード3(削減率75%)による制御では、十分な暖房が行えておらず、人の調整行動により温熱環境の改善が図られていたことが分かる。翌日のモードは稼働側のモード4(削減率67%)に変更された。翌18日は、外気温が約4°C低下したが、モード4による運転で概ね前日と同程度の室温で維持されている。ただし、空調ON回数は約1.4回/h・台(103回/日)なので、翌日のモードはさらに稼働側のモード5(削減率60%)へと変更された。

このようにAEC-ACでは、行きすぎた省エネの場合には、在室者による調整行動により室内の温熱環境をその時点で改善し、翌日以降の自動制御による稼働削減量を減らし快適側へ移行する。

4.2.2 日変動とモードの切り替え

Fig.12に2月のAEC-ACのモードの推移、室内気温(業務時間中のみの平均)、PMV(一日平均)と外気温(東京)を示す。PMVは、執務室の代表値として、温度、湿度=計測値:測定点Tc(執務室中央付近)、放射温度=グローブ温度より算出:測定点Tg(執務室中央付近)、着衣量:0.92clo(在席者のアンケート結果から求めた平

Fig. 12 Thermal environment and Driving mode in office (Feb. 2014)

Fig. 13 Daily ON/OFF action count (Feb. 2014)

均値)、活動量:1.1MET、気流:0.1m/sとして計算した。Fig.13には、執務室エリアの一日あたりの空調ON総回数、空調OFF総回数を示す。

室温は外気温の変化によらず22～24°Cで維持されていた。2月上旬は、最も省エネ側のモード1で制御され、降雪のあった13日から手動ON操作が多く、17～19日にかけて、より稼働側のモード5へと推移している。この間のPMVは-0.1～0.3の範囲内で、自動運転と調整行動によって室内の温熱環境は快適範囲で維持されていたと考えられる。一方、24日以降は、モード4で維持されたままで、手動OFF操作が増加している。「暑い」と感じる在室者が増加しており、空調が過剰であった可能性が考えられる。しかし、空調ON回数が削減側閾値を下回らないので、モード移行せず、空調ON回数と空調OFF回数が拮抗するに至っている。この結果は、4.2.3で述べるが、場所による違いによって、在室者の調整行動が異なった結果であると考えられる。

以上、AEC-AC は外気の影響による比較的緩やかな温熱環境の変化には追従しており、室温も 22～24℃で、比較的快適な温熱環境が実現できていると推察される。一方、在室者の相反する調整行動が生じており、室内の位置を考慮し、個々の温熱要望に沿った制御が課題であることが分かった。

4.2.3 場所による調整行動の差異

Fig.14、Fig.15 は、2 月の空調 ON 回数と空調 OFF 回数をそれぞれ室内機毎に示す。空調 ON 回数は、南西面が窓に囲まれているエリアの室内機 PE1,PE2,PE3 の空調 ON 回数が、空調 OFF 回数は、南東側の室内機 PE5,PE6 が突出して多かった。手動による調整行動に差異が生じるのは、本空調制御が、場所によらず同じモードで間欠運転をしたことにより、外界の影響を受けやすいペリメータ側で手動 ON/OFF 操作が多くなったためと考えられる。さらに、同じ室内機においても、手動 ON 操作と手動 OFF 操作が生じていることから、温熱環境の日変化や、室内機付近の在席者の属性、温冷感、快適感、心理状態の違いなどが、調整行動に反映されていると推察される。

Fig.16 は、2 月 17～19 日の各室内機のパワ ON 回数を示す。2 月 17 日、18 日は、空調 ON 総回数が稼働側閾値を超え、翌日のモードを稼働側に変更したが、個別にみると室内機 PE1～PE3 だけを稼働側へモード変更すれば良く、逆に他の室内機は稼働削減側へモード変更すべきであることが分かる。

以上の結果から、より在室者の要望に対して最適な空調制御を行うには、執務室内の調整行動の総和によって全ての室内機を制御するのではなく、室内機毎にその室内機への調整行動（手動による空調の ON/OFF 操作）によってモードを調整し、在席場所を反映した空調制御を行う必要があると考えられる。

4.3 消費電力削減結果

Table 6 より、執務室エリアでは、AEC-AC で運用した 2013 年冬の執務室エリアの室内機のパワ稼働時間は、2010 年冬が 1877 時間に対して、1766 時間で、消費電力としては、2010 年冬比で 6%削減されたと推定される^{注10)}。一日の室内機一台あたりの平均稼働時間を算出すると、2010 年冬は 2.62 時間/台・日、2013 年冬は、2.38 時間/台・日であった。冬期では、室内を加温する事務機、PC（パソコン）などの IT 機器が執務室内に多くあることや、一定空間に人が多く居る事、またウォームビズの拡がりによって着衣での温度調節が個々にされていることから、2010 年冬の時点で既に十分に削減されていたと考えられる。

一方、4.2.2 で示したように 2 月の後半では、在室者の調整行動が相反することにより、過剰な空調運転がなされていたことも稼働時間に反映されている。従って、室内機の個別制御による空調運転を実施することで、さらなる省エネ化を図ることが可能であると考えられる。

4.4 アンケート結果

2 月 24～28 日の期間にて、執務室内環境に関するアンケートを在室者に対して行った。回答数は、29 名、回収率は 55%。なお、外出、会議等で不在の場合は集計数から除外している。Fig.17 に日時別温冷感申告結果を、Fig.18 に日時別快適感申告結果を示す。24～28 日の温冷感の申告結果では、60～80%が「どちらでもない」となっており、在室者にとっては、温冷感として概ね中立な空調制御が

Fig. 14 Hourly ON count of every indoor units (Feb.2014)

Fig. 15 Daily OFF count of every indoor units (Feb.2014)

Fig. 16 Daily ON Count of every indoor units (17-19th.Feb.2-14)

Table 6 Power reduction result (Dec.-Feb. 2014 vs Dec.-Feb. 2011)

		Dec.-Feb.2014	Dec.-Feb.2011	Reduction rate
Control method		Active air-conditioning control	Temperature-constant control (22℃)	
Division		Mesured	Mesured/Estimate	
office area	Indoor unit working time(h)	1766	1877	—
	Indoor unit(kWh)	124	132	
	Outdoor unit(kWh)	3238	3442	
	Power consumption(kWh)	3362	3573	6%
Meeting aria	Indoor unit working time(h)	123	1575	—
	Power consumption(kWh)	275	1596	83%
Total	Air-conditioning electric power consumption(kWh)	3637	5169	30%

*The estimate value of each electric consumption is estimated from indoor unit working time of 2011(Dec.-Feb.2011) based on air-conditioning electric consumption per indoor unit working time of 2014(Dec.-Feb.2014).

実現できていると考えられる。Fig.18 に示した快適感の結果では 28 日を除くと「快適」「やや快適」が約 50%、「どちらでもない」を加えると 80～90%前後で、AEC-AC よって、在室者が不快でない温熱環境を維持できていたと考えられる。しかし、28 日は、「かなり不快」「不快」が 10%前後もあり、「やや不快」も加えると 20%以上の在室者が不快であると申告している。在室者の ON/OFF 操作が拮抗した結果、モードを適切に変更できず、過剰な空調によって上記のような申告結果となったと考えられる。この結果からも、空調機を個別に制御することが必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、既存の中小規模建物にも導入可能な簡易な計測装置と制御装置により、在室者の調整行動を捉えて空調制御にフィードバックすることによって、省エネで室内環境の悪化を低減可能なアクティブ省エネ空調制御システムについて検討している。本報では、執務室における本システムによる夏期と冬期における実証実験結果を示した。以下に、得られた主な知見を示す。

夏期の結果より

- 1) 複数の室内機が設置されている執務室に対して、室内機を千鳥状に2系統に分け、設定温度26℃として、アクティブ省エネ空調制御を実施した結果、空調稼働モードが安定すると、一日の平均室温が、外気温によらず26～28℃で維持された。執務室中央付近のPMVは、着衣量：0.6clo、活動量：1.1MET、気流：0.1m/sと想定した場合、0.6～0.9となった。また、空調発停によるセンサの温度変動は、1～1.5℃で、執務室内での場所による室温のバラツキは、約2～3℃であった。
- 2) 多数の室内機がある執務室においても、在室者の調整行動をフィードバックするアクティブ省エネ空調制御が、緩やかな外気温の影響による温熱環境変化に追従していることが確認された。
- 3) 空調ON回数が、室内の場所によって異なっていることや、同じペリメータ側、インテリア側であっても違いがあることから、空調に対する調整行動から在室者の室内環境におけるその時点での温熱要望を捉えられることが分かった。
- 4) 在室者の手動による空調ON回数をフィードバックするアクティブ省エネ空調制御によって、過剰な空調運転を削減するとともに、無駄な空調運転も抑制できることが確認できた。
- 5) 一方、在室者の位置によって調整行動が異なることから、室内機毎に空調稼働モードを調整する必要があることが分かった。

冬期の結果より

- 1) 複数の室内機が設置されている執務室に対して、室内機を千鳥状に2系統に分け、設定温度22℃として、アクティブ空調制御を実施した結果、空調稼働モードが安定すると、一日の平均室温が、外気温によらず22℃～25℃で維持された。2月下旬を除けば、執務室中央付近のPMVは、気流を0.1m/sと想定した場合、-0.5～0.3となった。また、空調発停によるセンサの温度変動は1℃程度で、執務室内での場所による室温のバラツキは、約2℃であった。
- 2) アンケート結果では、60～80%が「どちらでもない」となっており、在室者にとっては、温冷感として概ね中立な空調制御が実現できていると考えられる。また、快適感としては、「快適」「やや快適」が約50%、「どちらでもない」を加えると80～90%前後であった。
- 3) 夏期と同様に、室内機毎の空調ON回数の結果から、室内機毎に空調稼働モードを調整すれば、在席者の属性、温冷感、快適感、心理状態まで含めた温熱要望に従った、パーソナルな空調が提供できる可能性が示された。

一方、在席者の座席位置や温冷感の違いによって、調整行動に違いが生じ、相反する調整行動が生じることで、適切にモード変更できず過剰な空調運転がなされる場合もあることから、夏期と同様に

Fig. 17 Result of Thermal sensation votes

Fig. 18 Result of Thermal comfort votes

在室者の室内の位置や個々の温熱要望を考慮した制御が課題であることが分かった。

以上のように、室内機が複数ある執務室にアクティブ省エネ空調制御システムを導入した際の温熱環境と在室者の調整行動に着目して解析を行った。その結果、外気温の変化に追従して運転モードが変化し、その温熱環境に応じた空調制御が実現できる可能性が示された。さらに、室内機を個別に制御することでパーソナルな空調実現への可能性も示された。

また、今後の課題として、在席者の場所による温熱要望の違いや、温熱環境の日変動、休日明けへの対応が必要であることが明らかになった。

謝辞

この研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構省エネルギー革新技術開発事業（電力需給緊急対策）（「中小規模ビルでも容易に導入できるリアルタイムの節電目標を達成可能なフィードバック型電力需要制御システムの研究開発」）の研究助成を受けて実施した。ここに記し、関係者に謝意を示す。

参考文献

- 1) 内閣官房：革新的エネルギー・環境戦略、
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120914/20120914_1.pdf, pp. 8-10（参照 2016. 3. 10）
- 2) 羽田正冲, 西原直枝, 中村駿介, 内田智志, 田辺新一：夏季室温緩和設定オフィスにおける温熱環境実測および執務者アンケート調査による知的生産性に関する評価, 日本建築学会環境系論文集, NO. 637, pp389-pp396, 2009. 3
- 3) 木下朋行：IT時代の計測・制御技術の動向(2)PMV制御による室内環境最適化制御, 空気調和・衛生工学, 80(3), pp. 213～220, 2006
- 4) 空気調和・衛生学便覧(第14版)：空気調和・衛生工学会編, pp. 332～339, 2010

- 5) 村上昌史、原田昌幸、久野覚、寺野真明：居住者の温熱要望申告を利用した空調制御方式に関する研究，日本建築学会環境系論文集，No. 626，pp. 535～542，2008. 4
- 6) 荻野司、酒井浩介、志田智、須永修通：在室者の調整行動を利用した省エネ空調制御システムに関する研究，日本建築学会環境系論文集，Vol. 79，No. 704，pp. 871～881，2014. 10
- 7) 荻野司、酒井浩介、須永修通、増井周平：在室者の調整行動を利用したアクティブ省エネ空調制御システムの研究 その1. 夏期におけるアクティブ省エネ空調制御の追従性と消費電力削減結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp. 1283～1284，2014. 9
- 8) 増井周平、須永修通、荻野司、酒井浩介：在室者の調整行動を利用したアクティブ省エネ空調制御システムの研究 その2. 夏期における室内温熱環境と制御方法の評価 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp. 1285～1286，2014. 9
- 9) 増井周平、須永修通、荻野司：在室者の調整行動を利用したアクティブ省エネ空調制御システムの研究（その3）：冬期における室内温熱環境の実測とアンケート調査，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，150 pp. 93～96，2014. 9
- 10) 荻野司、酒井浩介、増井周平、須永修通：在室者の調整行動を利用したアクティブ省エネ空調制御システムの研究 その3. 冬期におけるアクティブ省エネ空調制御の追従性と消費電力削減結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp. 1305～1306，2015. 9

注

- 注1) ロスナイ換気装置は、熱交換方式：空気対空気透過式全熱（顕熱＋潜熱）交換方式、風量：500m³/h、温度交換効率：74%、エンタルピー交換効率：62.5%[冷房]、65%[暖房]、消費電力：201Wである。
- 注2) 温湿度計は無線式で、測定範囲：-10℃～+60℃、測定精度：定精度度℃（+10℃～+35℃）、±0.5%RH（25℃、60%RHにて）、分解能：0.1℃。センサ部の設置位置は、Ta,Td：床面より1100mm、キャビネット（金属製）より水平方向に40mm、Tb,Te：床面より1100mm、柱壁（合板）より水平方向に40mm、Tc：床面より1100mm、衝立（合板）より水平方向に40mm。
- 注3) グローブ球の直径は、7.5cm 注1)の無線センサを使用。設置位置は、床面より1100mm、衝立（合板）より水平方向に40mm
- 注4) 調整行動を捉えるには空調の操作状態を取得する必要があるが、5分間隔で空調発停リレーの状態を監視することにより代替し、別途制御装置を付加していない。
- 注5) 執務室内のロスナイ換気装置は、二酸化炭素濃度が1000ppmを超えないように業務時間中は2台稼働していた。
- 注6) 手動操作を計測する対象室内機は、使用頻度が少ない隣接するRoomX（休憩室）、RoomY（作業室）を除いて、執務室内9台と常時ドアが開放されているRoomZの室内機を加えた10台とし、この10台の一日の空調ON/OFF総回数と一日の業務時間7.5時間（昼休憩1時間）から、室内機一台の1時間あたりの手動操作回数：回/h・台を求めた。つまり、業務時間内（7.5h）の各室内機の手動操作回数の合計を、対象室内機数（夏期は10台）で除算して、1時間あたりの手動操作回数を求めている。従って、夏期の閾値：1.0回/h・台を超えると、総手動回数が75回/日を超えることとなる。
- 注7) 2013年（7月～9月）の実測結果より、各エリアの室内機稼働1時間あたりの室内機電力量、室外機電力量、空調電力量を求め、2010年の各エリアの室内機稼働時間から2010年の各電力量を推定した。なお執務室エリアと会議室エリアでは、室内機、室外機の仕様が異なるので、エリア毎に算出した。なお、各エリアの室内機稼働時間は、執務室エリア（室外機1）：室内機13台分の稼働時間、会議室エリア（室外機2）：室内機7台分の稼働時間。
- 注8) 外気温の変化における執務室エリア室外機の消費電力変化量は、参考文献(6)より、6.0371kWh/℃であったので、一か月を30日として180.1kWh/月・℃とした。
- 注9) 冬期は、夏期と同じ閾値にすると、設定を誤り省エネ側の閾値を1.2回/h・台、稼働側の閾値を2.4回/h・台として設定した。
- 注10) 室外機1（執務室エリア）の電力量から、室内機一台の時間当たり電力量を求めると3362kWh/1766h=1.9kWh/台・hとなり、2010年の室内機稼働時間1877時間より、室外機1の消費電力を3573kWhと推定した。なお、室外機2（会議室エリア）の推定消費電力は、2013年冬の室内機の運転時間が少ないことから、室内機一台の時間当たり室外機電力量から算出せずに、空調総電力量から室外機1の推定消費電力の差分とした。

MEASUREMENT RESULT IN CASE OF AN OFFICE WITH MULTIPLE INDOOR UNITS IN SUMMER AND WINTER SEASONS

An energy saving air-conditioning control system that's senses the adjustment behavior of occupants (Part 2)

Tsukasa OGINO *, *Nobuyuki SUNAGA* **, *Shuhei MASUI* ***
and Kosuke SAKAI ****

* ZeroOne Laboratory, LLC., Dr.Eng.

** Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng.

*** Ove Arup & Partners Japan Ltd., M.Eng.

**** ZeroOne Laboratory, LLC., B.Eng.

The Active Energy-saving Control System for Air-Conditioning (hereafter called "AECS-AC") was introduced to an office room where there were multiple indoor air-conditioning units and the results of verification experiments conducted in summer and winter with a focus on the thermal environment and the temperature adjustment actions of the people in the room were analysed. This system reduces deterioration of room conditioning by sensing when the occupants switch the air conditioning on and off. Ultimately, the system should satisfy the thermal comfort requests of occupants by feedback of their adjustment behaviour, rather than by collecting the occupants' attributes, thermal and comfort sensations, and psychological conditions.

The main results are as follows.

- 1) In summer (Jul.-Sep.), AECS-AC was conducted at a pre-set temperature of 26°C in an office room with multiple indoor units, which were alternately grouped into two. After the air conditioning mode was stabilized, the mean room temperature was maintained at 26-28° C irrespective of the outdoor temperature. The temperature variation at the sensor positions due to the start-stop operations of the indoor units was 1-1.5°C and the room temperature variation across the office room was about 2-3°C.
- 2) In winter (Dec.-Feb.), AECS-AC was conducted at a pre-set temperature of 22°C in an office room with multiple indoor units, which were alternately grouped into two. After the air conditioning mode was stabilized, the mean room temperature was maintained at 22-25° C irrespective of the outdoor temperature. The temperature variation at the sensor positions due to the start-stop operations of the indoor units was 1°C and the room temperature variation across the office room was about 2°C.
- 3) In the air-conditioning control according to the number of occupant' s switching-on/off actions, the AECS-AC followed the change in the thermal environment caused by the influence of the outdoor temperature.
- 4) The number of manual switching-on/off actions varied from place to place in the room and differed between the perimeter side and the interior side. The occupant' s preference on the thermal environment could be deduced from their air conditioner adjustment actions.
- 5) According to the questionnaire results in winter, almost neutral air-conditioning control could be realized for the occupants based on their answers that 60-80% were neither hot nor cold. Regarding comfort evaluation, about 50% of answers of "comfortable" and "slightly comfortable" were accounted, and it went up to about 80-90% if including the answers of "neither of them."

The above results show that the AEC-AC based on the number of people's air conditioning adjustment actions realized air-conditioning control appropriately to the thermal environment of an office room with multiple air conditioners.

Furthermore, the possibility of personal-like air-conditioning realization was shown by controlling an indoor unit individually.

(2016 年 4 月 6 日原稿受理, 2016 年 8 月 5 日採用決定)