

総合大学における実効あるエネルギー 管理システムに関する研究

ー運用実態調査に基づいた個別分散空調機的设计・運用管理の合理化検討ー

岡 本 泰 英^{*1} 赤 司 泰 義^{*2}
迫 田 一 昭^{*1} 柳 原 隆 司^{*3}
野 城 智 也^{*4}

大学キャンパスにおけるエネルギー消費の大部分は空調関連分野であり、省エネルギー化に向けて重点的に管理しなければならない。空調方式の中でも個別分散空調機は近年採用が増えているが、その運用実態は明らかにされておらず、設計・運用において合理的な検討を行うことができていない。以前、東京大学で個別分散空調機の運用実態調査を行ったところ、設備容量が過大であり、かつ低負荷率の運転が効率低下を引き起こしている実態が明らかとなった。そこで、過大容量を是正するために独自の容量選定基準を定めて改修を行った建物に対して実測調査を行い、機器選定の考え方とより省エネ化を図るための運用について検討したので報告する。

キーワード：調査・実測・大学・個別分散空調機

はじめに

地球温暖化対策が喫緊の課題となっている今日では、低炭素社会の実現に向けた取り組みが重要であり、エネルギーの有効活用はあらゆる利用分野において共通の目標となっている。大学キャンパスは、教育・研究を目的とした講義室・研究室・実験室などのスペースを中心としながら、事務用施設や病院施設、宿泊施設、運動施設など多種多様な利用用途が存在し、さながら小さな都市の縮図とも言える。一方で、大学キャンパスは古い施設が多く、利用者は入れ替わりも多くかつ独立性が高いことから体系立てた省エネ化の取組は進んでいなかった。そこで、まずは大学施設の中でも多くの台数が導入されていて省エネ効果が高いと考えられる個別分散空調機について省エネ化方策の検討を行う。個別分散空調機は、これまで運用実態があまり明らかにされていないが、ある個別分散空調システムに対する本

学の既往調査では実負荷に対して過大な設備容量のために非効率な運転になっていることが確認されている¹⁾。

本報では、大学施設における個別分散空調機の運用実態についてより多くの実測データを収集・分析し、個別分散空調機的设计・運用管理の合理化について検討を行った。本論文で得られた知見は本学のような大学施設のみならず、一般的な施設における個別分散空調機を導入する場合の設計・運用管理の合理化にも資するものとする。

表-1 個別分散空調機導入状況（主要5キャンパス）

	タイプ	容量[kW]		台数[台]	
		室外機	室内機	室外機	室内機
本郷	マルチ	18 094	16 776	675	2 473
	ペア	32 748	32 693	4 153	4 246
駒場Ⅰ	マルチ	14 611	12 913	370	1 769
	ペア	3 379	3 357	481	522
駒場Ⅱ	マルチ	18 909	17 368	515	2 343
	ペア	2 703	2 431	308	337
白金台	マルチ	2 932	2 079	85	228
	ペア	3 861	3 968	504	519
柏	マルチ	10 054	8 796	305	864
	ペア	2 300	2 426	201	299
合計	マルチ	64 600	57 930	1 950	7 677
	ペア	45 001	44 874	5 647	5 923

*1 東京大学サステイナブルキャンパスプロジェクト 正会員
*2 東京大学大学院工学研究科 SHASE 技術フェロー
*3 東京電機大学 SHASE 技術フェロー
*4 東京大学生産技術研究所

1. 大学施設における個別分散空調機の導入調査

東京大学全体の延床面積 85%以上、消費エネルギー95%以上を占める主要 5 キャンパス（本郷，駒場 I，駒場 II，白金台，柏）における個別分散空調機の導入状況を表-1，図-1 に示す。1877 年に設立された東京大学は、1900 年以降で大規模な施設整備が 3 度発生している。最初は、関東大震災（1923 年）からの復興整備、2 度目は 1955 年以降の大学院・研究所等の新設に伴う施設整備、そして 3 度目が 1990 年以降に研究センターなどの新設に伴う大規模な施設整備を実施している。3 度目の施設整備とほぼ時を同じくして設置台数を増やしたのが個別分散空調機である。現在ではペア・マルチタイプ合わせて室外機 7 500 台以上（冷房能力で約 110MW）、室内機 13 600 台と従来採用していた中央熱源方式の 2 倍以上の設備容量となっており、大学全体のエネルギー消費に占める割合も高くなっている。そこで省エネ化に向けた検討を行うため、個別分散空調機の中でも大半を占めるマルチタイプについて大規模改修に合わせて計測環境を整備してきた。主な計測項目として、室外機は運転モード（冷/暖）・運転時間・能力・消費電力、冷媒温度（凝縮温度・蒸発温度）・デフロスト状態等、室内機は各室内機毎に運転モード（冷/暖）・運転時間・サーモ ON 時間・設定温度・吸込温度・リモコンサーモ温度等としており、データ間隔は 1 時間（室外機は 1 分間隔、室内機は 5 分間隔で計測されたデータを集計して作成）としている。以降では、理系施設 A,B に対して 2013 年 7 月～2014 年 6 月までの一年間の実測データを分析した結果を報告する。

2. 機器容量選定における設計合理化手法の検討

2.1 機器選定方法

本学においては、個別分散空調機の過大容量防止策としてベンチマーク基準を定め、室内機能力原単位（冷房能力）を非実験系 200W/m²以下、実験系 250W/m²以下、内部発熱が大きい設備を有する場合は個別検討（旧基準）としていた。しかし旧基準による改修データを分析した結果、既設容量に対して 25%程度の容量削減を行ったにも拘わらず、依然として非実験系では過大容量の部屋が多く、室利用時間により最大発生負荷の傾向に違いがみられた²⁾。そこで、非実験系の用途を細分化し、長時間在室する事務室・研究室系は 100～150W/m²以下、短時間利用の講義室系は 150～200W/m²以下とすることで改善を図った（新基準）。

今回分析を行った建物では全ての空調を個別分散空調機で行っており、新設時（2000 年頃）にインシヤルコスト削減と設置スペース最小化するためほとんどの部屋でマルチタイプが採用された。また、部屋ごとに異なる冷暖房需要に対応可能な冷暖同時型（同一システムで冷房利用と暖房利用が同時に可能）がほぼすべての部屋で採用されていた。

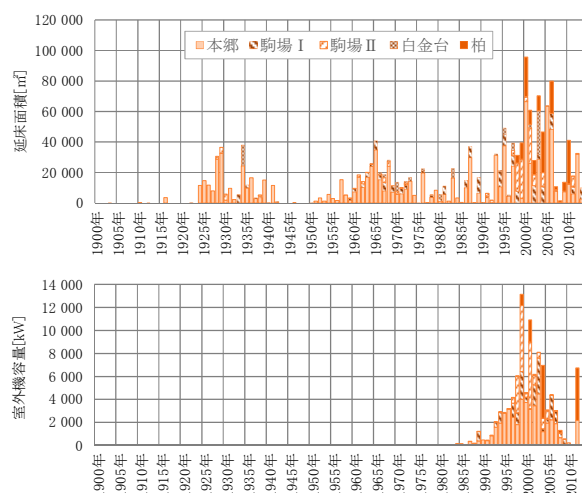


図-1 新設建物（上）と個別分散空調機（下）の年度別推移

表-2 理系施設 A,B における改修前後の容量比較（冷房基準）

施設 A	改修前		改修後	
	室外機	室内機	室外機	室内機
EHP (マルチ) [kW]	3 473	3 244	1 368	1 257
EHP (ペア) [kW]	364	190	1 328	1 338
合計 [kW]	3 837	3 434	2 696	2 594

施設 B	改修前		改修後	
	室外機	室内機	室外機	室内機
EHP (マルチ) [kW]	1 910	1 461	805	747
EHP (ペア) [kW]			336	320
GHP [kW]	1 162	1 059	706	655
合計 [kW]	3 071	2 521	1 847	1 722

改修前のヒアリング調査では同一システムで冷暖房負荷が混在する場合に空調の効が悪くなるといった苦情が多かったことから、既存の採用機器・システムにはこだわらず熱負荷要求を満足できる機器選定を新基準に基づいて実施した。改修時（2012 年）における機器容量選定結果を表-2 に示す。当該建物では、マルチタイプの系統見直しに併せて室外機置き場が確保できる場合はマルチタイプより高効率なペアタイプへの変更を優先した。その結果、理系施設 A の機器容量は冷房基準で室外機 30%削減・室内機 24%削減、室内機能力原単位は 256→193W/m²に削減、理系施設 B の機器容量は室外機 40%削減・室内機 32%削減、室内機能力原単位は 267→183W/m²に削減した。

2.2 効率向上に向けた室外機容量選定の効果

図-2 に理系施設 A と B の全 84 系統における年間の運転時間（冷房・暖房・冷暖同時合計）の降順ソートと全負荷相当運転時間（負の値）、表-3 に主な室用途別（実験室，研究室，講義室，事務室）の能力原単位と全負荷相当運転時間を示す。年間運転時間が 4 000 時間を超える系統が 19 系統あるが、全負荷相当運転時間で 2 000 時間を超える系統が 3 系統と低負荷で長時間稼働している状況がわかる。全負荷相当運転時間を用途別でみると、実験室が冷暖合計

で1 000 時間程度、研究室が800 時間弱、講義室は200 時間弱、事務室は300 時間弱で、いずれの用途も室内機能力原単位が大きいと、相対的に小さな値となっている。

運転負荷率別の発生頻度と冷暖房能力、運転負荷率別のCOP 比 (=実績 COP ÷ 定格 COP) について図-3 に示す。個別分散空調機は、運転負荷率が低過ぎると ON-OFF 運転(設備仕様や運用により異なるが概ね 20%未満の領域)となり運転効率の低下が懸念される。そのため、本学では室用途毎にベンチマーク基準(室内機能力原単位の上限值)を設定しているが、年間を通じた運転実態としては ON-OFF 運転領域の割合が冷房・暖房ともに 50~60%程度と依然多い状態であり、負荷率が100%近くになることもほとんど無いことから容量的には十分と判断できる。一方、熱源機の運転能力を見ると冷暖房ともに 20%~50%の領域で最も多く製造されており、特に冷房時では COP の高い領域と一致しているため、運用上適切な状態であると考えられる。

冷房時では低負荷率域では実績 COP が高く、高負荷率域では実績 COP が低下している。一方、暖房時では、10%未満を除いた負荷率域で能力曲線を大幅に下回っており、デフロストによる影響があると考えられる。能力曲線から想定された容量最適化による削減効果が冷房時 15.8%、暖房時 12.4%に対して冷房時 0.8%、暖房時 4.4%であった。効果が少なかった要因としては、低負荷時に能力曲線ほどの低下がみられなかったこと(冷暖とも)、高負荷時に効率が低下していること(特に冷房)が挙げられる。

図-4 に大学施設における代表的な用途(実験室、研究室、講義室、事務室)の月別冷暖房能力変動を示す。各室には全熱交換機が設置されているが調湿装置は有していない。ここでは熱源機の冷暖房能力が室内処理熱量(熱負荷)とほぼ等しいと評価する。実験室は対象用途の中で最も熱負荷が多く、年間冷房負荷が発生している。これはスパコン施設が設置されている影響と考えられる。設置される実験機器により異なる熱負荷傾向が考えられるため、更なる調査でデータの蓄積を図っていききたい。それ以外の用途では、一般的な大学施設としての負荷形態を代表していると考えられるが、いずれも暖房負荷が多い傾向である。

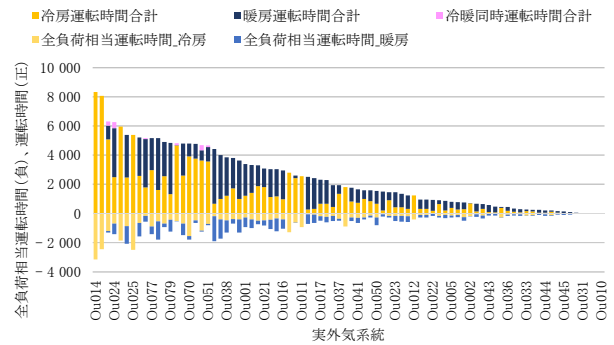


図-2 理系施設 A, B における年間運転時間降順ソート

表-3 用途毎の熱源機年間運転時間

		実験室	研究室	講義室	事務室
サンプル数 n		23	22	8	12
対象面積[m ²]		2 355	3 428	922	1 261
冷房	室内機定格能力[kW]	525	450	197	210
	能力原単位[W/m ²]	223	131	214	167
	運転時間[h/年]	2 416	1 091	174	202
	全負荷相当運転時間[h/年]	725	351	89	101
暖房	室内機定格能力[kW]	589	512	222	237
	能力原単位[W/m ²]	250	149	240	188
	運転時間[h/年]	1 501	1 631	205	416
	全負荷相当運転時間[h/年]	290	522	90	170

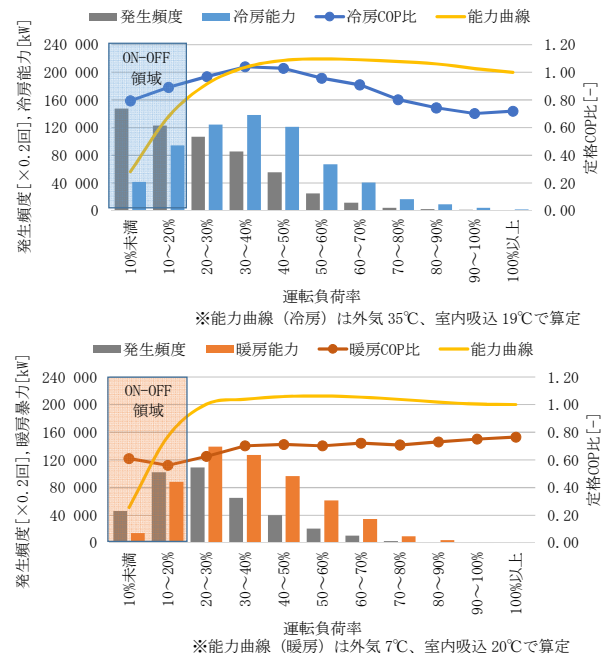


図-3 運転負荷率別製造熱量と COP (上:冷房 下:暖房)

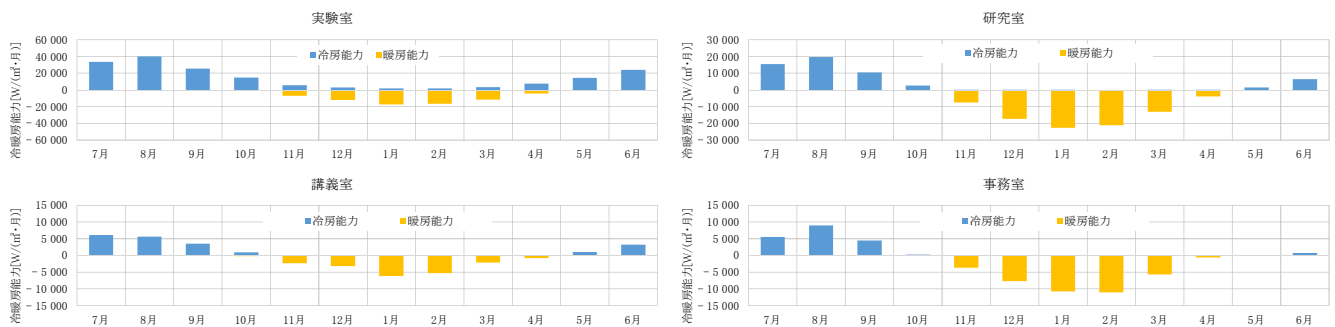


図-4 月別冷暖房能力変動

2.3 室内環境形成からみた室内機容量の妥当性

ここではリモコン温度を室内温度代表温度とみなし、室内の温熱環境が適正な状態であったか検証していく。図-5に用途別のリモコン温度と設定温度の温度差について冷暖房期間ごとのサーモ ON 時間との関係、表-4に計測期間平均値を示す。計測を行った個別分散空調機はリモコン温度の値を参考に温度制御を行っており、リモコン温度と設定温度の差が正のとき冷房時は冷却不足(暖房時は加熱十分)、負のとき冷房時は冷却十分(暖房時は加熱不足)と判断していることになる。冷房では設定温度との差が±1℃である運転時間割合が実験室 80%, 研究室 91%, 講義室 88%, 事務室 91%と概ね設定温度を満足できているのに対して、暖房では実験室 56%, 研究室 52%, 講義室 46%, 事務室 43%と設定温度の満足度が低かった。一般に個別分散空調機は室内空気を循環させて顕熱処理を行うものであり、室内機が天井付近に設置されることが多いため天井付近の空気を吸い込んで熱処理した空気を室内に吹出している。冷房時は吹出空気の比重が大きいいため居住域まで自然と下りてくるが、暖房時には吹出空気の比重が軽く天井付近に留まりやすいため、室内機サーモ制御の場合にサーモオフの状態になりやすく、また冷媒との熱交換が促進されずに低負荷運転となってしまう。そのため、暖房時には制御サーモの適正化やサーキュレータの設置を検討した方がよい。

次に室内機運転の代表例として、研究室用途の系統における運転データを図-6, 7, 表-5に示す。同一系統に室内機が10台あり、IU-01のみ4.5kW(冷房能力)で、残りはすべて2.8kW(同)である。IU-02と03, IU-05と07, IU-08と10は一部屋に2台ずつ設置されておりいずれの部屋も北向き(中庭向き)である。IU-01, 04, 06, 09は南向きの配置で、IU-01はラウンジ室で廊下との間仕切りが無い開放空間となっている。

冷暖房を通じて稼働時間が多い部屋と少ない部屋が混在

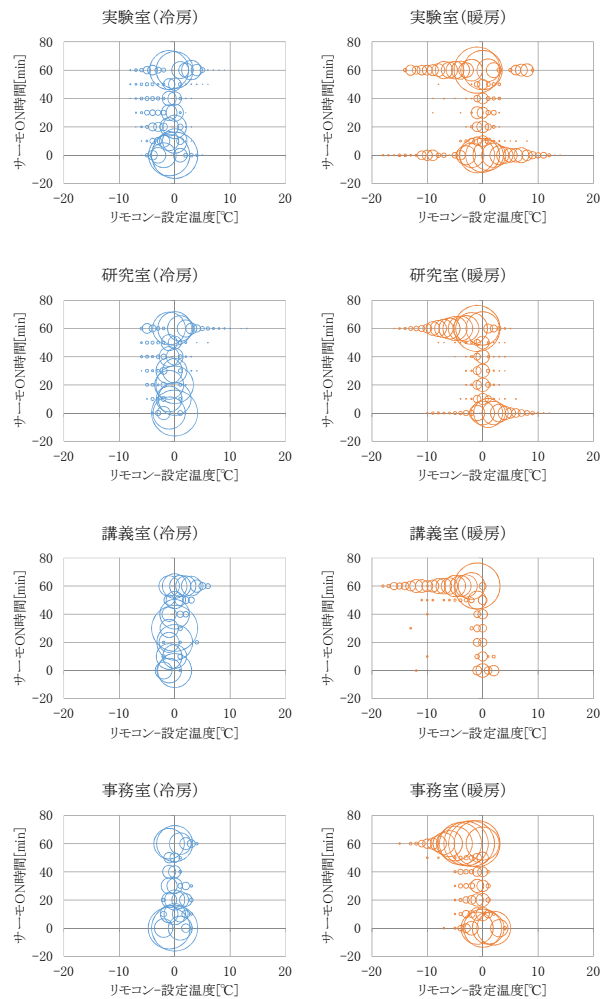


図-5 設定温度とリモコン温度の温度差
(円の大きさは発生頻度を表す)

表-4 設定温度とリモコン温度の期間平均値

	冷房時			暖房時		
	設定[℃]	リモコン[℃]	差[℃]	設定[℃]	リモコン[℃]	差[℃]
実験室	24.9	24.3	-0.6	23.2	21.5	-1.7
研究室	27.0	26.9	-0.1	24.4	23.0	-1.4
講義室	26.6	26.7	0.1	25.7	22.3	-3.4
事務室	28.1	28.0	-0.1	22.8	20.9	-1.9

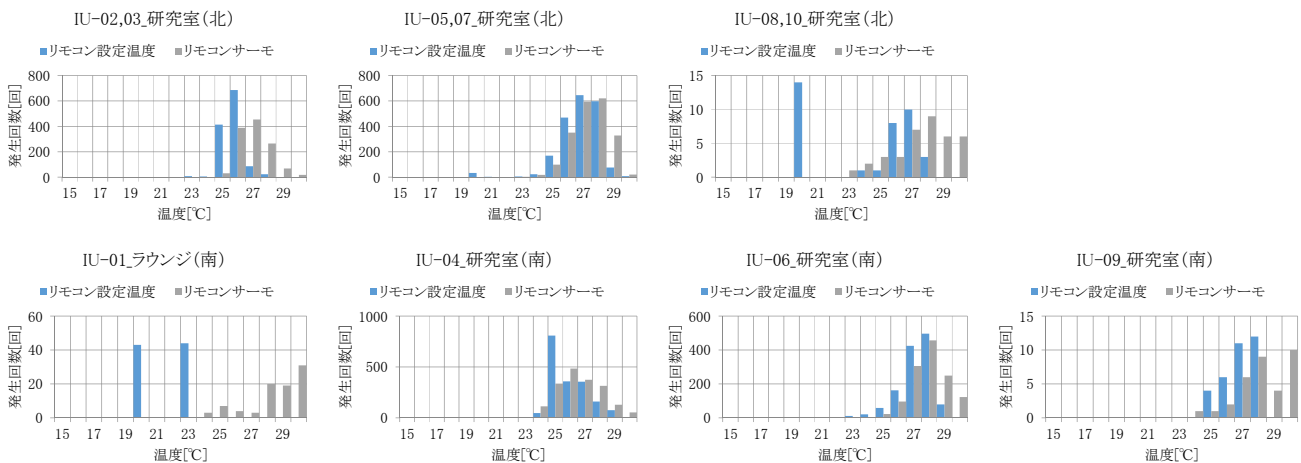


図-6 研究室用途の系統における冷房期間の設定温度とリモコンサーモ(室内温度)の発生回数

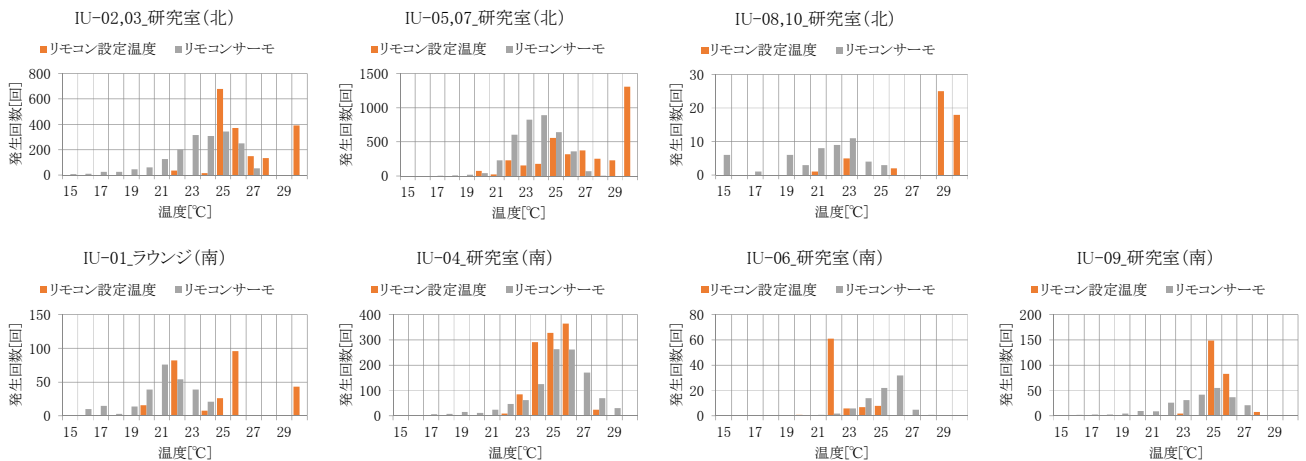


図-7 研究室用途の系統における暖房期間の設定温度とリモコンサーモ（室内温度）の発生回数

しており、室外機の運転負荷率は冷房時最大 84%、平均 24%、暖房時最大 72%、平均 34%であった。冷暖房ともに稼働時間が少ない部屋では、急な冷却や加熱要望のため極端な設定値（冷房時 20°Cや暖房時 30°C）がとられており、設定値と室温とが乖離しているように見えるが、どの部屋も概ね快適域にあることがわかる。南向きと北向きの居室では暖房時の設定温度に差が見られ、北向き（26.9°C）が平均で約 2°C 高めの設定となっていた。

表-5 各部屋の運転時間と冷房能力原単位

	IU-01	IU-02,03	IU-04	IU-05,07	IU-06	IU-08,10	IU-09
	ラウンジ(南)	研究室(北)	研究室(南)	研究室(北)	研究室(南)	研究室(北)	研究室(南)
冷房運転時間[h]	87	1227	1803	2035	1256	37	33
暖房運転時間[h]	271	1773	1107	3701	83	51	246
冷房能力原単位[W/m ²]	225	112	117	112	117	112	117

3. 運用時の省エネ制御に関する効果検証

3.1 制御パラメータ変更による省エネ制御の効果

図-8 に通常運転と省エネモード運転の冷凍サイクルを示す。冷房運転において蒸発温度を高く設定すると、冷房効果のエンタルピー差が増加するとともに、圧縮機動力のエンタルピー差が減少するため相対的に COP（＝冷房効果のエンタルピー差÷圧縮機動力のエンタルピー差）が向上することになる。個別分散空調機の中でもマルチ方式では、吹出温度や除湿性能を維持するため蒸発/凝縮温度を一定に保つ制御が行われており、この蒸発/凝縮温度を適切に設定することができれば部分負荷時における COP の向上を図ることが可能となる。

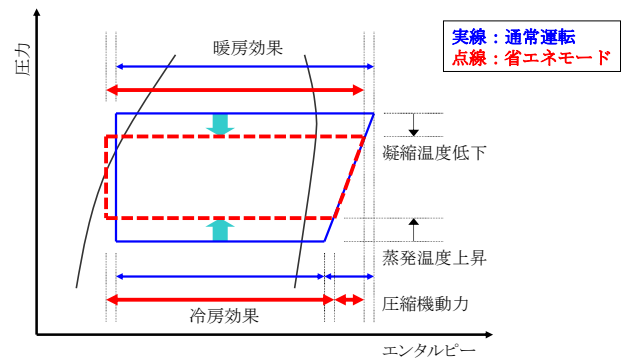


図-8 冷凍サイクルでみる省エネ制御の効果

冷房時の蒸発温度変更による省エネ効果について図-9 に示す。この計測期間では省エネ制御により蒸発温度が 1°C 上昇（6→7°C）したが、ON-OFF 運転（負荷率 15%以下）となった低負荷率では省エネ効果は確認できなかった。連続運転領域では COP が 6%程度向上していたが、負荷率が上昇するにつれてその差は無くなっていった。同様に暖房期においても凝縮温度を下げることで COP の向上が確認されたが、ON-OFF 運転では差が見られず、連続運転領域において凝縮温度 1°C 低減により COP が 4%向上していた³⁾。

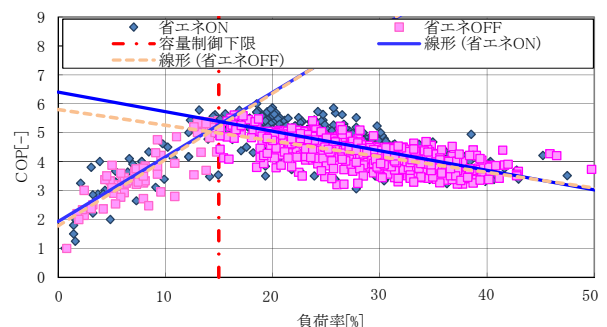


図-9 省エネ制御による効果（冷房時）

3.2 間欠運転による省エネ効果の確認

室内温熱環境が満足された時間帯において室内機の運転

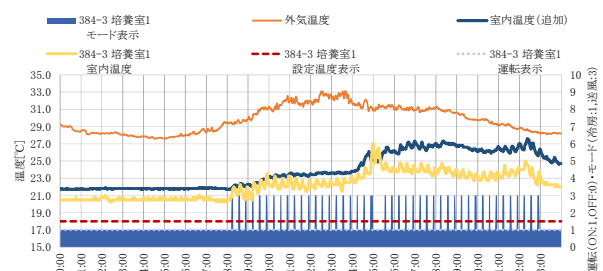


図-10 間欠運転による制御例

を冷房時は送風、暖房時は停止にする事でどの程度の省エネ効果があるか確認を行った。制御対象は実験室・研究室で、予めアンケートで確認した許容温度にある場合に、冷房17分→送風3分→冷房17分→送風3分（暖房時は送風ではなく停止）という具合に間欠運転を行った。対象室の機器ではリモコン温度が取れていなかったため、室内温度は室内機吸込温度で代用し、許容範囲から外れた場合は自動的に連続運転に切り替わる制御とした。間欠運転制御の様子を図-10に、2014年8月～2015年1月までの期間における省エネ効果について表-6に示す。消費電力の計測は1分間隔で行っており、省エネ制御なしの時間帯と制御ありの時間帯の時間あたり消費電力量の差に制御ありの運転時間を掛けたものを削減量として算出している。多くの実験室は年間冷房であり23～25℃の温度条件を要求していたことと研究室は稼働時間が短かったことから、削減効果は2%程度と大きな効果は得られなかったものの、室内環境を満足しつつ省エネ運用を行うことができた。

4. まとめ

個別分散空調機の機器容量適正化に向けてベンチマークによる選定を行い、改修後の室外機・室内機の運転状況を分析した結果を以下にまとめる。

- 1) 機器容量適正化により室外機の低負荷率運転の発生を少なくする事ができ、実運転効率から算出した改善効果は冷房0.8%、暖房4.4%と想定よりは少なかったが効率的な運転を増やすことができた
- 2) 冷房時の室内環境は概ね満足できたが、暖房時に室内温度と設定温度との間に乖離が見られた。原因は特定できなかったが、運転時の機器容量に余裕があることから能力不足が原因ではないと考えられる
- 3) 暖房時の温熱環境改善に向けて増容量化する前に、居住域付近への制御サーモ設置やサーキュレータによる気流循環の向上を図ることが効果的と考えられる

また、運用時における省エネ対策として蒸発温度/凝縮温度の設定変更と間欠運転について効果検証を行い、以下のことが確認された。

- 1) 温度設定変更は、室外機の効率向上と引き替えに能力を低下させることになる
 - 2) 冷房時の蒸発温度上昇は省エネ効果が見込めるが除湿能力の低下をまねくことから、湿度環境についても留意する必要がある
 - 3) 間欠運転は、居住域に近いリモコンサーモもしくは制御用のサーモを別途設置することが好ましい
 - 4) 停止時の室温変動に応じた停止時間の延長や、設定温度の緩和により更なる省エネ効果が期待される
- 個別分散空調機の運用適正化に向けて最も重要なことは

表-6 間欠運転による省エネ効果

		消費電力 [kW・h]	運転時間 [h]	時間あたり 消費電力量 [kW・h/h]	差分	削減量 [kW・h]
2014年 8月	制御あり	20 657	273	75.6	1.06	291
	制御なし	14 538	190	76.7		
2014年 9月	制御あり	11 805	205	57.5	0.17	35
	制御なし	13 766	239	57.7		
2014年 10月	制御あり	8 746	178	49.2	0.71	126
	制御なし	14 235	285	49.9		
2014年 11月	制御あり	2 983	78	38.4	2.72	211
	制御なし	15 222	370	41.1		
2014年 12月	制御あり	1 978	75	26.4	3.00	224
	制御なし	11 410	388	29.4		
2015年 1月	制御あり	1 750	70	24.9	2.01	141
	制御なし	10 563	393	26.9		

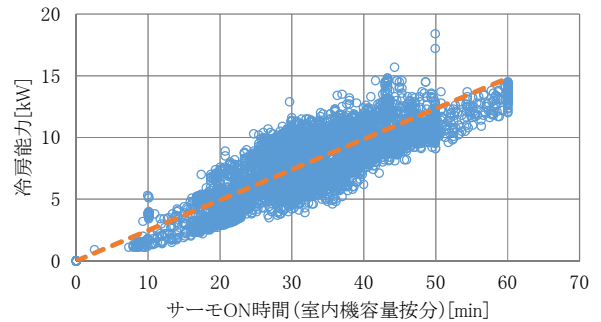


図-11 室内機サーモ ON 時間と冷房能力の関係

機器容量を適正化する事であり、インシヤルコストだけでなくランニングコストの低減にもつながる。本学では実測データに基づいたベンチマーク基準を定めることで機器容量の適正化について一定の成果をあげることができたが、改修前に運用実態が把握できればより効果的な改修が可能となる。そのために重要な要素として室内機サーモ ON 時間の把握が挙げられる。図-11 に示すように実測データからは室内機サーモ ON 時間と室外機能力には高い相関がある。サーモ ON 時間が把握できれば容易に各室内機の稼働状況と室外機の製造熱量から推測する事が可能となる。サーモ ON 時間データの収集は比較的新しく設置された室内機であれば確認する事が可能なため、個別分散空調機における改修時における容量選定の合理化が図れると期待される。

謝 辞

本報で使用したデータ収集にご協力頂いたダイキン工業(株)殿に深く謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 河野他：大学施設における環境負荷低減手法に関する研究 その5 個別分散空調機の調査結果分析と更新手法の提案，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 927～930 (2010.9)
- 2) 岡本他：大学施設における環境負荷低減手法に関する研究 その11 個別分散熱源に関する更新効果の検証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 1871～1874 (2012.9)
- 3) 柳原他：大学施設における環境負荷低減手法に関する研究 その12 個別分散熱源における省エネ運転モードの効果検証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 1875～1878 (2012.9)

(平成 27.5.21 原稿受付)

Study on Effective Energy Management System in the University

Rationalization Examination of Design, Operational Management of Multi-split Air-conditioning System based on Operational Fact-finding

by Yasuhide OKAMOTO ^{*1}, Yasunori AKASHI ^{*2}, Kazuaki SAKODA ^{*1},
Ryuji YANAGIHARA ^{*3} and Tomonari YASHIRO ^{*4}

Key Words: Survey, Measurement, University, Multi-split

Synopsis : Most of the energy in the university campus is consumed by air-conditioning units and therefore it must be managed for saving energy. In recent years, adoption of the multi-split air-conditioning system has increased, but the actual situation of its operation has not been clarified and hence, rational examination cannot be conducted reading its design and use. After performing operative fact-finding of the air-conditioning system at Tokyo University, the actual situation

that capacity was excessive and driving of the low load factor caused an efficiency drop became clear. Therefore, an actual survey of buildings subjected to modification was conducted by defining their own capacity selection criterion in order to correct the excessive capacity. The examined operations were reported in order to achieve more energy saving and realize the concept of equipment selection.

(Received May 21, 2015)

*1 TSCP Office, The Univ. of Tokyo, Member

*2 Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo, Fellow Engineer

*3 Sch. of Sci. & Tech. for Future Life, Tokyo Denki Univ., Fellow Engineer

*4 Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo