

大学施設の実空調負荷特性分析に基づく省エネ対策効果

創造理工学専攻 環境都市コース 6164110024-1 日下部 祥
(指導教員 近本智行)

1. はじめに

温室効果ガス排出量の増加傾向が大きい民生部門において、建物のエネルギー消費特性の把握と消費特性に合わせた対策の重要性が高まっている。実際の建物に省エネ対策を講じる際には、個々の建物での消費特性の把握が重要である。大学施設においては様々な用途の建物が混在し、それぞれが大学特有の消費特性を有するため把握が難しい。消費特性に合わせた改修や運用を行うことによる省エネ効果は大きく、大学施設には省エネ余地が残されている。大学施設への省エネ対策事例は多く報告されており、例を挙げるとTSCPによる研究¹⁾は、実態を把握したうえで省エネ対策で大きな効果を出している。この例のように各大学は実態把握や設備更新等の種々の取り組みを行っている。ただし大学施設における建物用途毎のエネルギー消費量の整理は十分ではなく、省エネ対策の選択も手探りな状態であることが多い。加えて、空調によるエネルギー消費量はひと際大きいにも関わらず時刻別の空調負荷を用いた詳細な分析は十分ではない。

立命館大学においても、建物のエネルギー消費量調査・対策効果試算・空調用熱源機の効率分析・建物用途毎の空調負荷特性分析・各種熱源方式のLCC検証²⁻⁶⁾等を行ってきた。しかし、実建物における空調負荷の内訳や、省エネ対策による空調負荷低減効果は明らかにされていない。そこで本研究では、大学施設を対象とし、7用途の建物の実空調負荷を定量化することで各用途の消費特性を示した後、特に消費量の大きい食堂棟の空調負荷内訳を定量化し、消費特性に合わせたハード面への対策効果を定量化することを目的とする。

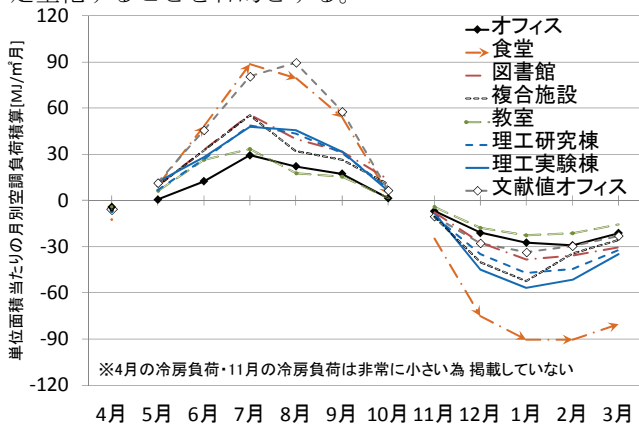


図1 空調負荷積算値の月推移

2. 分析手法

分析対象は、滋賀県草津市に立地する立命館大学BKCに設置されている、同一ガス吸収式中央熱源から冷温水を供給される10建物(表1)とし、分析には建物毎・時刻別に計測した2011年度1年間のBEMSデータ^{注1)}を使用する。対象熱源を含め全て1993年竣工で、熱源機の更新はこれまで行われていない。原単位の算出においては空調面積^{注2)}当たりの負荷原単位の分析に加え、延床面積当たりの負荷原単位の分析を行う。特に食堂棟では実空調負荷を基に、実建物の性能・2011年度の電灯盤の消費電力・全天日射量データ^{注3)}等をもとに6種類の負荷に分割し、加えて省エネ対策の効果を試算する。

3. 原単位・全負荷相当運転時間算出結果

3.1 空調面積^{注2)}当たりの空調負荷原単位分析結果

(1) 年積算負荷原単位 (表2)

用途毎の冷房と暖房の数値は同等程度であり、用途間の差は大きい。なお東日本大震災後の節電対策は、ガス熱源であるこの熱源系統に関しては特に行われていない。

(2) 最大負荷記録日 (表2)

おおよそキャンパスの利用・外気温度状況に応じる。暖房時は蓄熱負荷が大きい正月休み明けの空調立ち上がり時に、研究・実験棟は普段使用頻度が低い部屋も稼働する卒業時期にピーク値を記録した。

表1 分析対象建物の概要

用途名	建物名	空調面積 注2) [m ²]	延床面積 [m ²]	レタブル比 注5) [%]	熱源仮想定格容量 ^{注8)}	
					冷房[kW]	暖房[kW]
オフィス	コアステーション	2603	6898	38	333	311
食堂	ユニオンスクエア	4351	6677	65	745	698
図書館	メディアセンター	3548	5922	60	639	598
複合施設 ^{注4)}	プリズムハウス	5506	9503	58	1011	947
教室	フォレストハウス	3737	5056	74	585	548
理工研究棟	ウエストウイング	8440	12206	69	1064	996
	イーストウイング	8206	12206	67	958	897
理工実験棟	エクセル1	4685	5973	78	585	548
	エクセル2	4081	5248	78	639	598
	エクセル3	4543	5652	80	665	623

表2 空調面積^{注2)}当たりの空調負荷原単位

項目	冷房		暖房	
	年負荷原単位		最大負荷原単位	
	[kWh/m ² 年]	[W/m ²]	[日]	[日]
用途名				
オフィス	82	81	119	7/14
食堂	122	159	142	7/28
図書館	86	67	110	7/4
複合施設	81	81	135	7/15
教室	38	32	81	7/13
理工研究棟	68	72	57	7/14
理工実験棟	61	71	42	7/14

表3 冷暖房期間

種別	冷房期間	暖房期間
大学規程	6/15 - 9/30	11/24 - 3/26
実運用 ^{注6)}	4/15 - 11/11	4/1 - 4/15, 11/11 - 3/31

3.2 延床面積当たりの空調負荷原単位分析結果

(1) 年積算負荷原単位 (表4)

文献値(以下、文献オフィス)も掲載する。冷房時、オフィスの原単位は文献オフィスの約3割であり、その他の用途にも共通して文献オフィスよりも小さい。暖房時、オフィスの原単位は文献オフィスの約8割であり、教室も文献オフィスを下回った。その他の用途は、文献オフィスに対して約2.9倍の食堂を筆頭に、文献オフィスよりも大きい。冷暖房時に共通して食堂が突出した値を示している要因は、厨房と空調室が繋がっている・ガラス面積比率が大きい・利用者数・出入口の開放回数が多い・空調室が大空間であり1階と2階(食堂は2階建)の空調室が階段で繋がっていること等が考えられる。文献オフィスとは異なり全ての用途で暖房負荷が冷房負荷と同等程度に大きい要因は、冬期の外気温度の低さなどの地域性・冷房期の外気条件が最も厳しい8月が長期休暇であること・実運用期間(表3)に示すように一般のオフィスとは異なり冬季に冷房は行われていないこと等が挙げられる。

(2) 最大負荷原単位 (表4)

文献値(以下、文献オフィス・文献食堂)も掲載する。冷房時、オフィスの原単位は文献オフィスの約4割であり、食堂は文献食堂の約7割である。その他の用途も文献オフィスより小さい。暖房時、オフィスの原単位は文献オフィスの約9割であり、食堂は文献食堂の約1.4倍であった。食堂・複合施設・教室では文献オフィスを上回り、研究・実験棟では下回った。なお、最大負荷記録日は表2と同様である。

(3) 全負荷相当運転時間^{注7)} (表4)

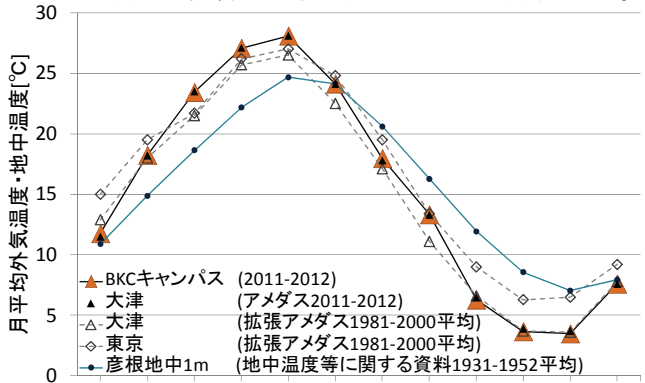
算出には表1の熱源仮想定格容量^{注8)}を用いた。冷房時、オフィスの値は文献オフィスの約4割であり、食堂は文献食堂の約9割であった。その他の用途も文献オフィスより小さい。暖房時、オフィスの値は文献オフィスの約7割であり、食堂は文献食堂の約2.5倍であった。その他の用途も文献オフィスより小さい。また、年間の最大負荷で算出した値を併記した。

表4 延床面積当たりの負荷原単位分析結果・全負荷相当運転時間と月毎の負荷比率

用途名	冷房		暖房		冷房											暖房									
	冷房	暖房	冷房	暖房	冷房合計											暖房合計									
	年負荷原単位	最大負荷原単位	上段: 冷房期間に占める月毎の負荷比率 [%]											上段: 暖房期間に占める月毎の負荷比率 [%]											
	[kWh/m ² 年]	[W/m ²]	下段: 全負荷相当運転時間 [h]											下段: 全負荷相当運転時間 [h]											
					熱源仮想定格容量で算出											熱源仮想定格容量で算出									
オフィス	23	31	45	49	518	100%	0%	1%	15%	11	35%	26%	21%	2%	0%	617	100%	4%	6%	19%	25%	12	27%	19%	
食堂	80	104	92	127	864	100%	0%	4%	17%	11	31%	28%	19%	1%	0%	809	100%	3%	7%	20%	12	24%	24%	22%	
図書館	51	40	66	73	780	100%	0%	5%	18%	11	30%	22%	17%	8%	1%	547	100%	4%	5%	19%	12	26%	24%	21%	
複合施設	47	47	78	100	605	100%	0%	1%	25	85	144	84	69	28	8	469	100%	3%	6%	24%	12	31%	20%	15%	
教室	31	24	60	67	463	100%	0%	6%	26%	11	33%	17%	15%	1%	0%	351	100%	5%	5%	21%	12	26%	25%	18%	
理工研究棟	46	49	39	51	1196	100%	0%	4%	16%	11	29%	26%	18%	5%	1%	951	100%	4%	6%	20%	12	27%	25%	18%	
理工実験棟	48	56	34	38	1436	100%	0%	7%	16%	11	28%	26%	18%	4%	1%	1479	100%	3%	4%	22%	12	28%	25%	17%	
文献値 オフィス	81 ⁷⁾	36 ⁷⁾	105 ⁷⁾	58 ⁷⁾	800 ⁸⁾	—	0 ⁷⁾	4 ⁷⁾	16 ⁷⁾	11	31 ⁷⁾	20 ⁷⁾	2 ⁷⁾	0 ⁷⁾	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
文献値 食堂	—	—	128 ⁸⁾	93 ⁸⁾	800 ⁸⁾	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(4) 空調負荷積算値の月推移 (図1. 表4)

図1に空調負荷積算値の月推移を示す。冷房を正・暖房を負値とした。表4には月毎の負荷比率を示す。冷房時、全用途で7月にピークを記録した。暖房時、オフィスと食堂では2月にピークを記録し、他の用途では1月に記録した。図2に2011年度のアメダス大津とBKCキャンパス実測外気温度平均値^{注9)}・大津と東京^{注10)}の標準年外気温度平均値⁹⁾・彦根の地中温度¹⁰⁾を示す。外気温変動は、2011年度のBKCキャンパスは標準年東京に比べ、夏期はより暑く冬期はより寒い。同様に標準年大津と比較すると夏期はより暑く、冬期は概ね同値である。一般的に建築物の空調負荷は、図1の文献値オフィス^{注11)}の変動に見られるように、外気温度のピークである8月・1月にピーク値を記録する。本学は8月・9月と2月・3月が長期休暇であり、建物利用者は定期試験の直前期である7月と1月に非常に多くなる。これらの複合要因により、冷房時は8月ではなく7月にピーク負荷を記録し、暖房時は外気温度条件通りに1月に記録する。しかし、食堂では2月の負荷も1月と同程度である。1月と比較して、食堂や物販店舗の開店時間は少ないが空調範囲が大空間で有るために、利用人数が少ないことによる小さな人体発熱により、暖房負荷も大きくなった可能性が有る。厨房の換気による室内側の負圧によっての外気侵入が負荷の大半を占めていると推測される。



4月 5月 6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月 1月 2月 3月
図2 BKC・東京・大津外気温度・彦根地中温度推移

(5) 食堂の月毎時刻別平均原単位 (図3)

平日^{注12)}の原単位を時刻毎の平均値として月毎にまとめた。冷暖房の負荷が混在している4月・11月はこの分析から除外し、部分負荷時の間欠運転時間等も含めて除外せず算出した。冷暖房それぞれで見ると、負荷の変動は各月で似ており、暖房負荷は部分負荷月であってもピーク負荷月との差が小さい。

4. 食堂棟の負荷内訳

(1) 冷房時の負荷内訳手法

表5に示す6つの負荷に分類する。6つの負荷の合計値が実空調負荷となるように1時間毎に計算した。

①_2 内部発熱負荷(機器)

食堂の厨房には主に電気式調理器具が用いられている。動力の年間ピーク値(260[kW])とIHレンジの全熱負荷原単位¹¹⁾(263[W/kW])の積に、図4に示す電灯の稼働率を乗じた。稼働率は電灯使用量の年間ピーク値を100[%]とした。

①_3 内部発熱負荷(照明)

現状設置されているインバータ式蛍光灯の定格電力消費量と発熱量換算係数¹²⁾1.13の積に稼働率を乗じた。

② 日射熱負荷

8方位の窓面積と全天日射量データ^{注3)}を用いて(式1)で算出した。現状ガラス窓は全て単層であり、底は無縁遠に長いものとして再現した。日射反射フィルムを全窓面に使用しており、遮蔽係数は0.66を用いた。東・南東・南面には常緑樹が植わっており、ガラス面の25[%]を覆っているとして、直達日射成分に75[%]をかけて再現した。各方位の様々な材質を含めた壁体合計面積と、そのうちに占めるガラス面積比率を表6に示す。

表5 負荷内訳の種類

記号	負荷種類	略称
①_1	内部発熱負荷(人体)	内部(人体)
①_2	内部発熱負荷(機器)	内部(機器)
①_3	内部発熱負荷(照明)	内部(照明)
②	日射熱負荷	日射
③	貫流熱負荷	貫流
④	外気処理負荷	外気処理

表6 ガラス面積比率

方位	壁面合計面積 [m ²]	ガラス面比率 [%]
東	354	35.0
西	168	3.3
南	175	5.6
北	337	31.7
北東	151	20.8
北西	779	11.4
南東	822	15.8
南西	319	3.5

$$q_G = (I_{GD}S_G + I_{GS})S_C \cdot A_G \dots \text{式1}$$

q_G : ガラス窓透過日射負荷 [W]
 I_{GD} : 直達日射成分 [W/m²]
 S_G : ガラス面日照面積率 [%]
 S_C : 遮蔽係数 [-]

I_{GD} : 直達日射成分 [W/m²]
 I_{GS} : 天空日射成分 [W/m²]
 A_G : サッシを除いたガラス窓面積 [m²]

表7 部材熱貫流率と面積

名称	熱貫流率 K[W/m ² ·K]	面積 [m ²]
壁面	0.95	1954
単層ガラス6mm	6.23	81
単層ガラス5mm	6.27	314
単層ガラス3mm	6.35	112
アルミサッシ3mm	6.47	135
屋根面	0.69	3206
床面	0.42	3339

q_n : 通過熱負荷 [W] K : 熱貫流率 [W/m²·K] θ_o : 屋外温度 [°C]
 q_g : 通過熱負荷 [W] A : 面積 [m²] θ_i : 屋内温度 [°C]
 S_f : 1階床面積 [m²] θ_g : 地中1mの温度 [°C]

表8 室内温度(θ_i)/湿度

	温度 [°C]	湿度 [%]
冷房期	26	50
暖房期	22	40

$$q_n = K \cdot A(\theta_o - \theta_i) \dots \text{式2}$$

$$q_g = K \cdot S_f(\theta_g - \theta_i) \dots \text{式3}$$

③ 貫流熱負荷

壁面・ガラス面・アルミサッシ面・天井面は(式2)を、1階の床面は(式3)を用いて図2に示した彦根の地中温度を用いて算出した。熱貫流率と面積を表7に、今回計算で使用した室内温湿度を表8に示す。

①_1 内部発熱負荷(人体)&④外気処理負荷

実空調負荷 - {①_2内部(機器) + ①_3内部(照明) + ②日射 + ③貫流}の余りを、①_1内部(人体)と④外気処理で分割した。1人当たりの内部(人体)負荷を110[W/人](顕熱50・潜熱60)とし、外気負荷を室内外全熱差[W/m³]×20[m³/人]として負荷の割合で1時間毎に割り振った。

(2) 暖房時の負荷内訳手法

①_1 内部発熱負荷(人体)は、冷房時に算出した内部(人体)と平均原単位[W/m²]が同等となるようにピーク負荷を決定(10.0[W/m²])し、稼働率を乗じて算出した。①_2内部(機器)、①_3内部(照明)、②日射、③貫流は冷房時と同様の手法で算出した。また、④外気処理は、④外気処理 = 実空調負荷 - {①_1内部(人) + ①_2内部(機器) + ①_3内部(照明) + ②日射 + ③貫流}として算出した。冷房時は外気処理を過不足なく行う前提で算出しているが、暖房時はそうではない。冷暖のピーク月の算出結果を図7・8に示し、年間実空調負荷積算に対する負荷内訳の割合を表8に示す。暖房期の外気・貫流負荷が大きいこ

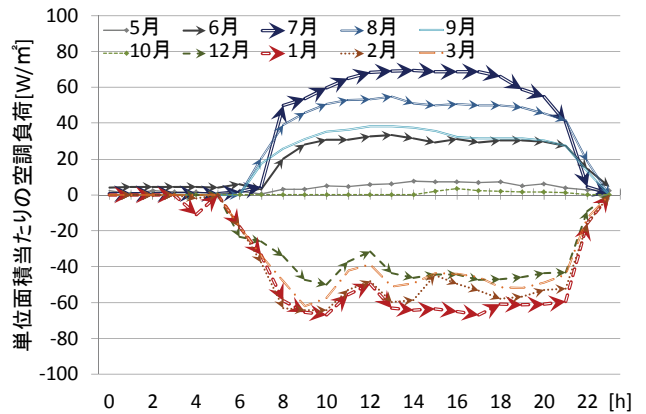


図3 食堂 月毎時刻別平均原単位(平日^{注12)}のみ)

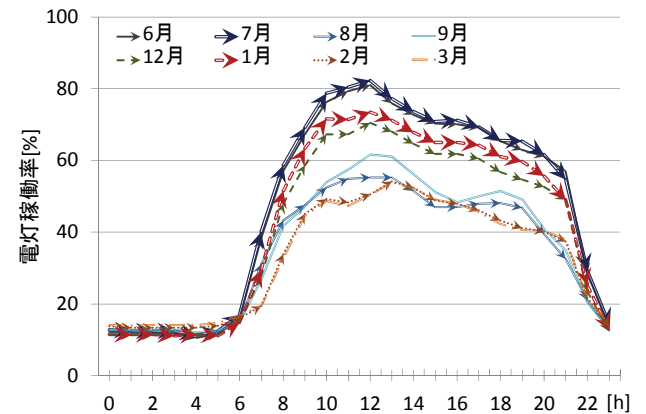


図4 食堂月毎時刻別平均電灯稼働率(平日^{注12)}のみ)

とが分かる。また、食堂の実空調時間は冷房期2652[h]・暖房期2244[h]と同程度であるため、内部負荷と日射負荷は年間の積算で見ると小さな割合となった。

5. 対策効果とまとめ

表9に対策項目と対策効果算出手法を示し、表10に削減効果割合を示す。効果が高いのは外気処理負荷であり、続いて貫流負荷であった。外気処理負荷にはCO₂濃度センサーや全熱交換機の導入、厨房の稼働が少ない時間帯に排気量を減らし室内負圧による冷気の侵入を防ぐ等の対策が考えられる。貫流負荷には窓面への対策の方が効果的である。内部負荷への対策は冷暖房時期の双方で効果を打ち消してしまうために、効果が薄い。落葉樹による日射負荷への対策は一定の効果は有るが、大きな効果は得にくい。冷房期の外気負荷は過不足なく行われている前提で算出したので対策効果は算出していない。

本研究では、大学施設の7用途の建物の実空調負荷を定量化した。また、食堂棟の空調負荷内訳手法を提示し、定量化した。そして、対策効果の大きな負荷項目を明らかにすることができた。今後は、建物管理者の運用や建物利用者の運用による空調の無駄遣い分の定量化や、改善による省エネ効果にも着目したい。

表8 対策前-年間積算負荷に対する負荷内訳

[%]	外気処理	貫流	内部	日射	合計
冷房期	10.2	3.7	19.0	10.2	43
暖房期	46.3	31.8	-14.4	-6.9	57
年間合計	56.5	35.6	4.6	3.3	100

表10 対策後-年間積算負荷に対する削減効果割合

[%]	外気処理 換気量	貫流 腰壁断熱 Low-ε窓	内部 LED	日射 落葉	合計
冷房期	0.2減	0.8減	1.5減	0.1減	2.6減
暖房期	28.1減	1.3減	4.1減	1.2増	32.4減
年間合計	28.1減	1.6減	4.9減	0.3減	35.0減

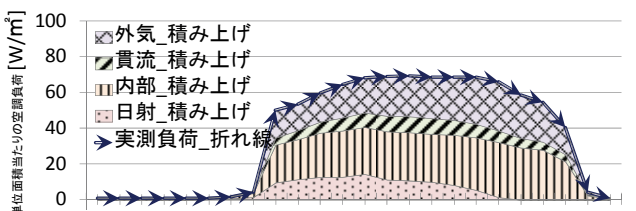


図7 食堂 冷房ピーク負荷月の負荷内訳(7月平日^{注12)}平均)

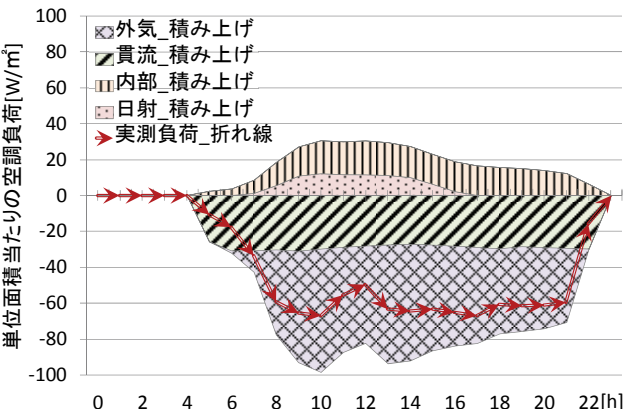


図8 食堂 暖房ピーク負荷月の負荷内訳(1月平日^{注12)}平均)

表9 対策項目と現状からの変更点

対策項目	影響する負荷の種類	対策効果算出手法	面積・密度
換気量適正化	外気処理	暖房期のみ試算: 在籍人数×稼働率×[座席数(1400)×120[%]] 20[m³/人・h]の外気を処理すると仮定	-
腰壁の高断熱化 (真空断熱材導入)	貫流	腰壁のK値0.095→0.11[W/㎡・K]	壁面積の20[%]の 391[m²]
窓のLow-εガラス化	貫流	熱貫流率約6.3→3.3[W/㎡・K] 日射遮蔽係数0.66[-]→変更しない	はめ殺し窓以外の窓 395[m²]
LED照明化	内部	ピーク発熱量5.8→3.6[W/㎡] 発熱量換算係数1.13→1.01[-]	変更なし
落葉樹の植樹 (東・南東・南各面1Fのみ)	日射	緑化率:冷房25→50 暖房25→0[%] 直達日射成分に(1.0-緑化率)を乗じる	2倍

参考文献

- 河野他:国立大学施設における環境負荷低減手法に関する研究 日本建築学会環境系論文集,第76巻,第666号,p.727-734,2011.8
- 近本智行:CO₂削減目標設定のための現状調査と対策効果試算 日本建築学会大会学術講演梗概集,p.1111-1112,2009.8
- 栄・近本他:大学キャンパスにおける建物用途毎のエネルギー消費特性分析 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,p.2411-2414,2010.9
- 日下部・近本他:大学キャンパスにおけるガス吸収式冷温水機の部分負荷効率分析 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,p.549-552,2011.9
- 日下部・近本他:理系キャンパスを対象とした建物用途・季節毎の空調負荷原単位特性分析 第29回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文要旨集,p.40,2013.1
- 小林・近本他:空調シミュレーションによる各種熱源方式のエネルギー・LCCの検証 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,p.1475-1478,2012.9
- 空気調和衛生工学会:都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価,p.137 事務所,1994.6
- 空気調和衛生工学会:空気調和衛生工学便覧第13版応用編,p.111 事務所 飲食店舗
- 日本建築学会:拡張アメダス気象データ1981-2000
- 地中温度等に関する資料 象資料第3号,1982
- 村川他:業務用電化厨房機器の発生熱負荷と適正排気量に関する研究 空気調和・衛生工学会大会論文集 NO.95,p.1-13,2004.10
- 許他:LED照明の発熱量に関する実測研究 日本建築学会環境系論文集,p.1159-1160,2010.9

注釈

- 冷温水温度は各建物出入口・冷温水流量は各建物出口で計測。温度計はPt センサ。流量計は電磁流量計。温度は各時刻(0分~59分)の平均値。流量は積算値を1時間毎に計測。冷温水の建物出入口温度差と流量を乗じて熱量を算出。測定箇所は各建物の機械室内の配管であるため熱源機から各建物までの熱損失分は今回の分析結果には含まれない。
- 空調室の総面積。個別分散型空調機がオフィス棟(933㎡)・理工研究棟2棟(ウエスト:1498㎡,イースト:1571㎡)・理工実験棟1棟(エクセル2:630㎡)の計4棟には設置されておりこれらの空調室も含めた面積。個別空調の空調室負荷は測定できていないため表3表4の原単位算出に当たっては同建物のガス吸収式空調面積の負荷と同じ面積当たりの負荷を与えている。
- BKCキャンパス内のテクノコンプレクス屋上に設置された測定器(英弘精機製のMS-62)で測定した2011年度の実測値。直散分離には宇田川の式を用いた。
- オフィス・教室・PCルーム・ホールを併設。
- オフィス棟は地下非空調室(熱源室:1670㎡)を持つ。図書館棟は地下非空調室(書庫:1020㎡)を持つ。
- 申請により規程期間外も冷暖房可能であり規程期間よりも長い。
- 文献値(参考文献8)の算出方法の詳細は不明。
- 対象中央熱源定格容量(7234[kW])を建物毎空調機定格流量合計の割合で各建物に割振った仮定の定格値。
- BKCクリエーションコア屋上で計測
- 掲載している文献値の算出方法は定かではないが主に東京の建物を対象に算出されたと予想されるため掲載。
- 表4の文献値オフィス年負荷原単位に文献値オフィス月毎の負荷比率を乗じて算出。
- 祝日を含めた月から金曜のこと。本学では長期休暇を除き基本的に祝日は通常通り授業日である。負荷が全く無い1/1(月)から1/4(木)は平日のみの分析からは除外している。

謝辞

データ集計にあたり立命館大学管財課の森岡氏・安原氏、立命館大学の峯元准教授、並びに株式会社アレフネットの松下氏・藤村氏には大変お世話になりました。ここに謝意を表させていただきます。