

省エネルギーかつ快適性と知的生産性を保持可能にする空調方法に関する研究

空調オフ時の検討

横江 彩*

Research into methods for reducing air-conditioning energy consumption while
maintaining thermal comfort and workspace productivity
-Investigation effects after turning off air-conditioning-

Aya YOKOE

(Received March 2, 2016)

Experiments were carried out where subjects, after performing light exercise, stayed in rooms under two separate conditions with different air temperatures. Results showed subjects didn't report thermal discomfort in the 28°C setting and maintained a comfortable mean skin temperature above 34°C. The time subjects maintained thermal comfort after turning off the air-conditioning system was investigated, and results demonstrated that after ten minutes mean skin temperatures rise and thermal discomfort is experienced. In consideration of reducing energy consumption, turning off the air-conditioning system ten minutes before the end of class is recommended. It was found that doing so saves 30% on energy compared to continuous operation.

keywords: Thermal comfort, Energy consumption, Workspace productivity

はじめに

中部大学は春日井市の中で最大のエネルギー使用事業所であり、最大の CO₂ 排出事業者であるが、大学自体を一つのモデル都市として、将来に向かって持続可能なエコキャンパスを目指す一方で、大学本来の使命である教育、研究、社会貢献など大学が担う役割はますます重要となり、多様な活動の場として、教員の研究環境や学生の学習環境(知的生産性)

を向上させる取り組みが必要不可欠である。

中部大学のエコキャンパスとしての取り組みとして、電力量の需要と供給バランスを自動制御し、さらに電力使用を見える化、することで約 15%の省エネを実現している。更に、ピークカット対策として節電ナビゲーションにより自主的節電行動を支援している。自主的節電行動では、実験機器や空調、照明の停止を順位づけして消すことになるが、そのガ

イドライン的なものではなく、各担当に任されているのが現状である。

本研究では、キャンパス全体の省エネを図りつつも、教員、学生が快適に研究、学習ができる室内環境を構築するために、ピークカット時の節電ガイドラインを作成することを最終目標としている。

本論文では、(1)外気温と空調設定温度、空調停止時間と快適性および知的生産性の関係、(2)得られた結果から省エネルギー性の検討、について報告する。

1. 実験の概要

図1に示す中部大学8号館環境実験室にて被験者実験を行った。被験者は表1に示す青年男女8名であった。実験条件は①26℃一定、②28℃一定、③28℃で空調をオフする（空調オフ条件、とする）、の3条件とした。被験者は実験についての説明を受けた後、エルゴメーターにて34℃の屋外設定の室内にて約2.0metの軽い運動を10分間したのち、3種類の実験条件に60~90分間滞在した。実験中は皮膚温（上腕部、胸部、大腿部、下腿部）を測定し^{注1}、実験室滞在時には数独^{注2}を解き、10~15分毎にアンケートに答えさせた。数独は、9マス×9マスのブロックの数字が記入済の箇所以外について、どのブロックにも1~9までの数字が入るようにマスを埋めていくパズルである。1問につき、50~55ブロックほどの穴埋めがあり、本報告では1つの穴埋めを1問としている。実験終了時に疲労度についてもアンケートに答えさせた。スケジュールを図2に示す。アンケートの項目は『快適感』、『温冷感』、『作業環境の満足感』、『作業のし易さ』等の10項目とした。

物理量として、被験者近傍の室内上下温度分布（床上0.05,0.3,0.6,0.9,1.2,1.5,1.8,2.1,2.4m 図1参照）、屋外室内温湿度、室内気流分布等を測定した。

2. 実験1：温度一定条件における実験

温度一定条件では、被験者は10分間の軽い運動の後、60分間温湿度が一定の実験室に滞在した（図2参照）。

2.1 室内温熱環境（①26℃一定、②28℃一定）

温度は①26℃一定、および②28℃一定、において被験者着座位置である床上1.2mおよび1.5mでは全日とも26.2±0.7℃、27.9±0.7℃であった。全日の上下温度分布を平均した値は図3に示すように居住域では①26℃一定では26~26.5℃、②28℃一定では27.5~28.0℃の範囲であった。気流は床上1.0mの被験者着座位置では0.2m/s以下の静穏気流であった。図4に②28℃一定での結果を示す。室内の相対湿度は①26℃一定で47.6±8.3%、②28℃一定で36.5±1.5%であった。

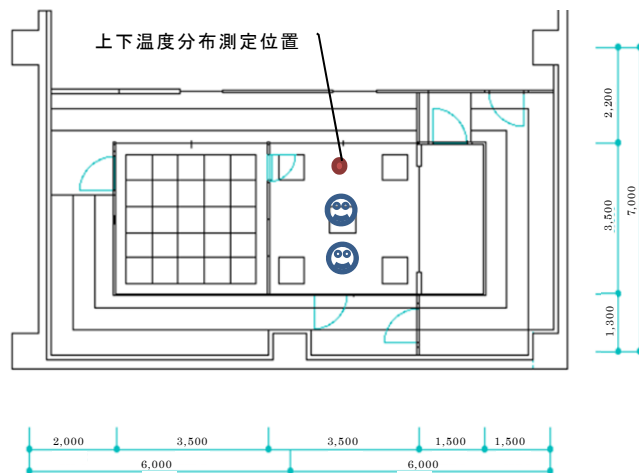


図1 実験室平面図

表1 被験者属性

Gender	Age	Height[cm]	Weight[kg]	Body surface area[m ²] ^{※1}
Male	25.3±2.6	176.3±5.9	73.3±7.5	1.89±0.09
Female	19.8±2.2	159.0±8.1	56.6±7.2	1.57±0.05



- ①Receive an explanation ②Light exercise
- ③Declare the questionnaire every 15minutes
- ④Turn off air-conditioning system
- ⑤Declare the questionnaire every 15minutes

図2 実験スケジュール

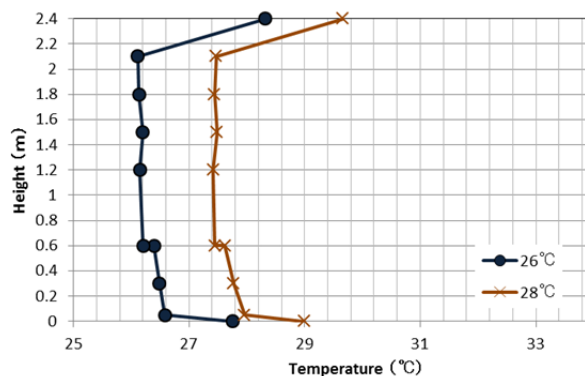


図3 上下温度分布

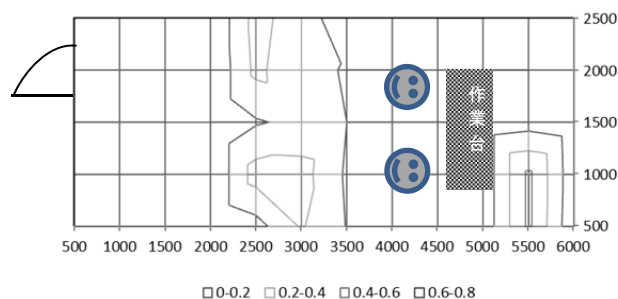


図4 気流分布（28℃一定、床上1.0m）

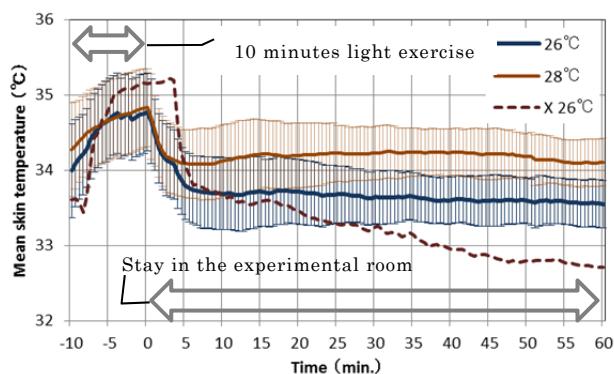


図5 平均皮膚温の経時変化

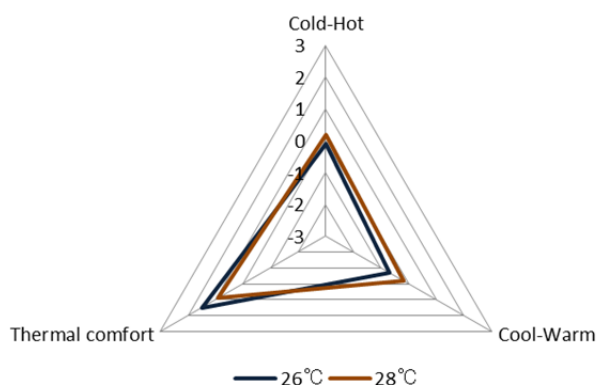


図6 快適感・寒暑感・涼暖感（室滞在 60 分時）

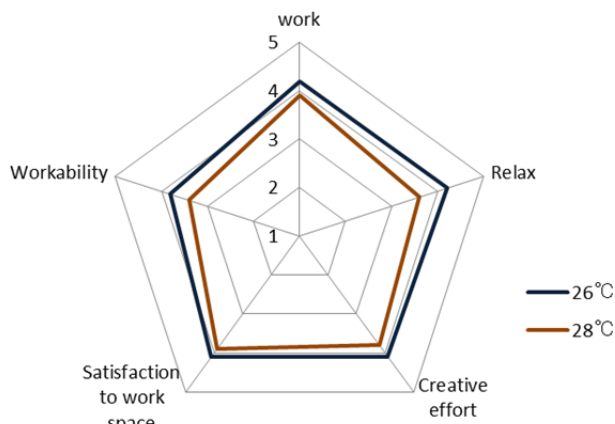


図7 作業環境についての申告（室滞在 60 分時）

2.2 生理反応

皮膚温はRamanathanの4点法²を用いて算出した平均皮膚温を用いて分析をおこなった。図5に示す結果から、①26℃一定では、被験者の一部（代表として被験者 x）は実験室滞在後 50 分を過ぎると平均皮膚温が低下する傾向が見られ、生理的に中立である 34℃³よりも低い温度を示していることが分かる。一方、②28℃一定では、平均皮膚温はほぼ横ばいの傾向を示した。両条件における平均皮膚温は室滞在 60 分時において有意に差が見られた($t(297) = -14.0, p < .05$)。

2.3 心理反応

図6に示す室内滞在時 60 分時の『快適感』の結果から、①26℃一定、および②28℃一定、の両条件において「快適」側の申告であったが、有意差は見られなかった。快適さを裏付けするとされる⁴『涼暖感』の結果からも①26℃一定、②28℃一定ともに「涼しい」側の申告であった。図7に示す『作業環境の満足感』や『作業のし易さ』についても、両条件において、「満足」側、「作業がし易い」側の申告であった。①26℃一定において、より「満足」であり「作業がし易い」と申告したが両条件で有意差はなかった。

2.4 作業性

温度一定条件における数独の正答率は、26℃一定条件では総回答数 972 問中、誤回答は 22 問で正答率は 98%であった。28℃一定条件は総回答数 1548 問中、15 問の誤回答で正答率は 99%であった。両条件で差異は見られなかった。

3. 実験2：空調オフ条件における実験

以上の結果より、28℃設定であっても心理的には「不快」感がなく、生理的には②28℃設定、では平均皮膚温の低下がみられなかったもので、許容できる設定温度であるとし、空調オフ条件の設定温度を28℃にすることとした。

被験者は 10 分間の軽い運動の後、60 分間温湿度が一定の実験室に滞在し、60 分経過後空調をオフにしてから 30 分間そのまま滞在した（図2参照）。

3.1 温湿度

温湿度の結果を図8に示す。空調をオフしてから 7、8 分経過の室滞在 67、68 分時には実験室の温度は被験者着座位置である床上 1.2m で 30℃を超え、室滞在 90 分時には 33℃以上まで上昇した。相対湿度も同様に上昇した。

3.2 生理反応

平均皮膚温の結果を図9に示す。空調オフ後には、実験室室温の上昇に伴い、平均皮膚温も上昇した。室滞在 70 分時には生理的中立温度である 34℃を超え、室滞在 90 分時まで上昇傾向を示した。

3.3 心理反応

心理反応の結果を図10に示す。『快適感』は室滞在 80 分時には「不快」側の申告となった。『涼暖感』は室滞在 70 分時から「暖かい」側を示し、その傾向は時間とともに強まった。一方で、『作業のし易さ』は「どちらでもない」の一定傾向を示し、『作業環境の満足度』では空調オフ後の室滞在 60 分時以降において、やや低下傾向ではあるものの「満足」側であった。

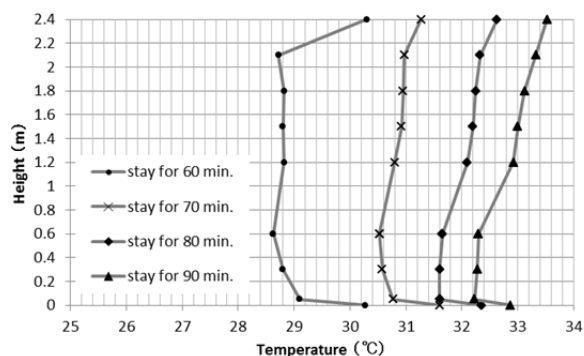


図 8 上下温度分布（空調オフ条件）

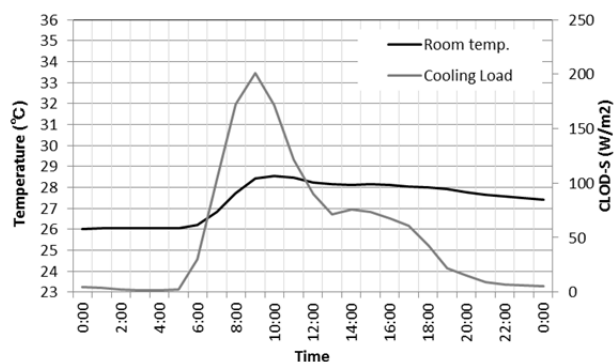


図 11 室温変動と熱負荷（実験室・盛夏日 8/9）

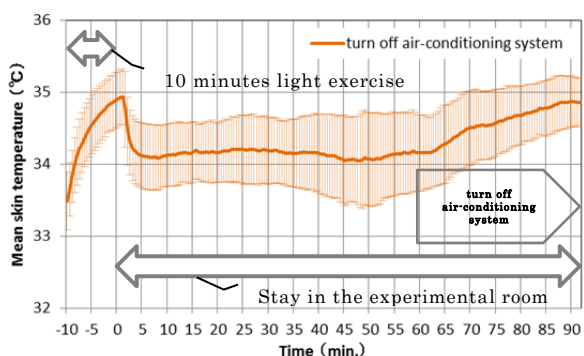


図 9 平均皮膚温の経時変化（空調オフ条件）

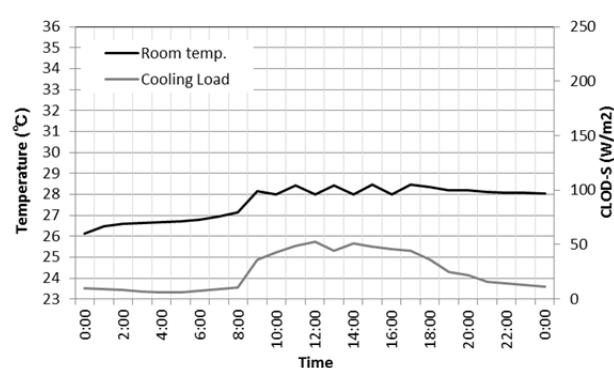


図 12 室温変動と熱負荷（講義室・盛夏日 8/9）

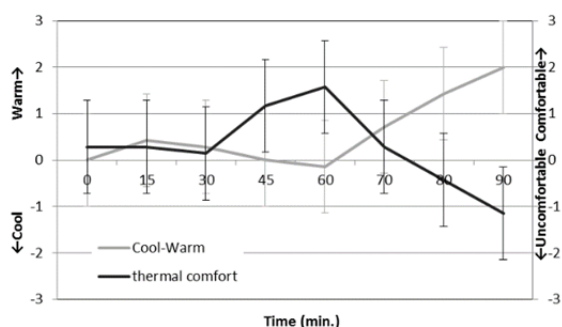


図 10 快適感・涼暖感の経時変化（空調オフ条件）

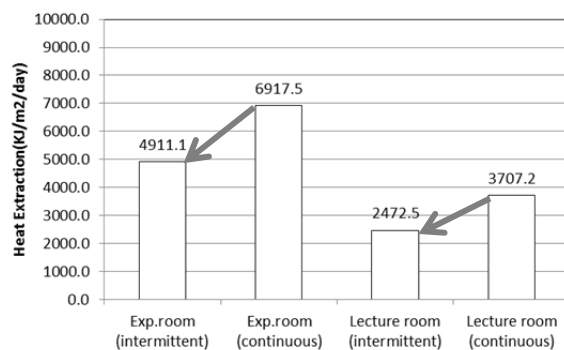


図 13 代表日（盛夏日 8/9）の除去熱量

表 2 熱負荷条件

	実験室	講義室
人員密度	0.2[人/m ²]	0.2[人/m ²]
外気導入量	0[m ³ /h]	0[m ³ /h]
外壁熱貫流率	0.90[W/m ² /K]	0.61[W/m ² /K]
主要構成材料概要	(1)断熱パネル 44mm (2)内装仕上げ材 2mm	(1)磁器質タイル 7mm (2)コンクリート 100mm (3)ウレタン吹付 15mm (4)空気層 65mm (5)GB 12.5mm (6)GB 9.5mm

3.4 作業性

作業性について、数独の正答率は総回答数 1160 問のうち誤回答は 35 問であり正答率は 97%であった。

3.5 まとめ

以上より、中部大学 8 号館の環境実験室で行った被験者実験の結果から、以下のことが分かった。

- ① 生理反応として平均皮膚温度は、室温が 26℃設定において時間経過とともに低下した。空調オフ条件では空調停止による室温上昇に伴い、平均皮膚温も上昇した。
- ② 心理反応は、室温が 28℃設定であっても、快適性や環境への満足度は失わなかった。26℃設定の方がより、快適性などが勝っていた。空調オフ条件では、空調停止後 10 分（通算経過時間 70 分）

までは「不快」側の申告は見られなかった。

- ③ 数独を用いた作業性については、空調温度とは無関係であった。

これらの結果より、今回の実験室を用いた場合には、室温を 28℃設定としても生理・心理的には問題がなく、その後空調をオフする場合、10 分程度までであれば問題がないことが分かった。

4. 省エネルギー性の検討

設定温度 28℃で運転したのち、10 分程度の空調停止であれば問題はないことが分かった。そこで、授業の終わる 10 分前から空調を停止し、休憩時間と併せて 25 分の空調停止を行う場合（間欠運転ケース、とする）に、連続運転する場合（連続運転ケース、とする）と比較してどの程度の省エネルギーとなるかを見た。なお、実験室の熱貫流率は一般的ではないため、一般的な講義室での検討も行った。

4.1 検討方法

間欠運転ケースと連続運転ケースについて、実験室における盛夏日（標準気象データの 8 月 9 日）の熱負荷と室温変動を計算した。各ケースの熱負荷条件を表 2 に示す。連続空調負荷 CL （Cooling load）と室温変動の重み係数 WF は熱負荷計算ソフトにて求めた。その結果を、csv ファイルに出力し、熱平衡式を基に表計算 EXCEL にて 5 分単位の除去熱量 H を求めた。詳細は付に記す。

4.2 結果

図 11、12 に室温の変動および除去熱量の経時変化を示す。図 11 に示す結果より、実験室の熱容量が小さいため、空調のオンオフへの室温の追従が早かった。よって、空調オフに伴い室温はすぐに上昇した。図 13 に示す熱負荷は連続運転時に実験室において $6917\text{J/m}^2/\text{day}$ と多かった。これを間欠運転することで約 3 割減らすことが可能であった。講義室においても連続運転時に $3707\text{J/m}^2/\text{day}$ であったが、間欠運転で約 3 割減らすことが出来た（図 13 参照）。

今回の検討では、顕熱除去熱量のみの考慮となっているが、今後は潜熱も含めて検討し、気流や湿度、グローブ温度といった項目から PMV を求めることを考えている。熱負荷からのみではなく、熱的快適性という概念を含めて検討していく予定である。

5. まとめ

本論文にて以下の結果を得た。

- ① 被験者実験の結果から、設定温度が 28℃であっても生理・心理反応として許容できる範囲であることが分かった。また、28℃設定の室内において空調をオフにすると、10 分程度までは心理

的に「不快」側まで到達しないことが分かった。

- ② ①の結果から、大学の講義室において、授業終了 10 分前から休憩 15 分を含めて計 25 分の空調オフを考慮した間欠運転を行うことで、連続運転を行う場合と比較して約 3 割の省エネルギーが達成可能であった。

謝辞

本論文は、中部大学特別研究費（27ⅡS1RⅡ）の助成を受けて実施した。記して謝意を表します。

注釈

- 1) 皮膚温はサーミスタと高精度温度ロガーを用いて計測した。温度入力分解能は 0.01°C である。
2) 「数独」は株式会社ニコリの登録商標である。

参考文献

- 1) Dubois, D. and Dubois, E. F.: Clinical calorimetry tenth paper a formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. Archives of Internal Medicine, 17(6): 863-871, 1916
2) Ramanathan, N. L.: A new weighting system for mean surface temperature of the human body, J. Appl. physiol. 19(3) 531-533, 1964
3) 中山昭雄 「温熱生理学」
4) Kuno, S., Ohno, H., and Nakahara, N.: A two-dimensional model expressing thermal sensation in transitional conditions: ASHRAE Trans., Vol.93, Part.2, 396-406, 1987

付：5 分単位の非定常の室温と熱負荷計算

本研究では 5 分単位で空調のオンオフし、これによる室温変動と熱負荷を細かく計算している。室温変動と熱負荷計算には NewHASP/ACLD（空気調和衛生工学会の委員会が開発され、JABMEE：建築設備技術者協会より公開されている）を用いるが、主として年間負荷計算用に使われるので計算時間間隔が 1 時間単位である。本研究ではこれを 5 分単位の計算できるように工夫した。以下に計算方法を示す。

付 1. 連続空調負荷（ CL ）

連続空調負荷 CL （Cooling load）の計算は NewHASP/ACLD によった。 CL 自体は緩やかな変化であり、年間気象データも 1 時間単位であるので CL は 1 時間単位で求めておき、5 分毎の CL は表計算で 1 時間毎の CL から補間して作った。

付 2. 5 分単位の室温変動の重み係数

室温変動の重み係数 WF とは室温を励振とする壁床天井の吸熱応答である。NewHASP/ACLD では多

層壁の応答係数をラプラス変換して極を求め、逆変換してステップ応答を求め、更に積分して△波に変換している。分単位の WF を求めるためには下式で△波に変換する際の時間間隔を $\Delta\tau = 5/60$ [h] とすればよい。この計算は NewHASP/ACLD を改造して求めた。

$$WF_{(0)} = A_0 + \sum_i \frac{A_i}{\alpha_i \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_i \Delta\tau}) \quad (1)$$

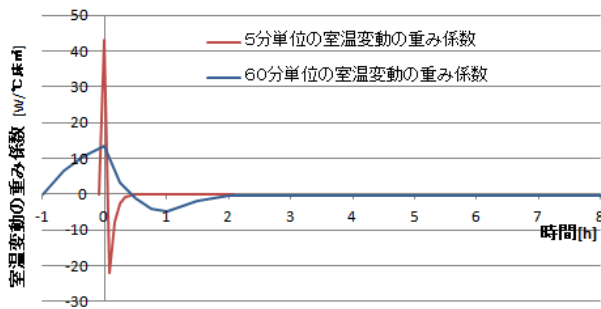
$$WF_{(K)} = -\sum_i \frac{A_i}{\alpha_i \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_i \Delta\tau})^2 e^{-\alpha_i (K-1)\Delta\tau} \quad (2)$$

ここに、 $WF_{(0)}, WF_{(K)}$: 室温変動の重み係数の初項と2項以降 [W/m²K]

A_0, A_i, α_i : ステップ応答の係数

1 時間単位の室温変動の重み係数と 5 分単位の室温変動の重み係数は付図のようである。

なお、NewHASP/ACLD では空調のオンオフ時には直角△波を用いて不連続を計算しているが、本研究のように 5 分単位の計算では直角△波は不要で、△波のみで計算して良い。この意味では計算を簡略化できる。



付図 60 分単位と 5 分単位の室温変動の重み係数

付 3. 室温変動と除去熱量の計算

付 3.1 熱平衡式

CL と WF までは NewHASP/ACLD で求め、csv ファイルに出力して、以下の計算は表計算 EXCEL で行った。先ず熱平衡式を示す。

$$CL + ST_{(1)} + WF_{(0)}(t_B - t_R) - H = 0 \quad (3)$$

ここに CL : 5 分単位の連続空調負荷 [W/m²]

$ST_{(1)}$: 蓄熱熱流の第 1 項目 [W/m²]

$WF_{(0)}$: 室温変動の重み係数の 0 項目

H : 5 分単位の除去熱量 [W/m²]

t_B : 基準温度 (仮の室温) [°C]

t_R : 5 分単位の実際の室温 [°C]

除去熱量 H は空調が処理する熱負荷である。基準温度 t_B は CL を求める際の任意の仮の室温であるが、 $t_B = 28^\circ\text{C}$ とした。

付 3.2 空調停止時の計算

空調停止時は除去熱量を $H = 0$ と置いて、室温 t_R について解く。即ち、

$$t_R = t_B + (CL + ST_{(1)}) / WF_{(0)} \quad (4)$$

付 3.3 空調運転時の計算

1) 室温の計算

先ず、先の式(4)で室温 t_R を求め、その上で室温の上下限をチェックする。

$$\textcircled{1} t_R > t_{R,Hi}$$

室温が上限 $t_{R,Hi}$ を超える場合は冷房をする。

室温は $t_R = t_{R,Hi}$ に設定する。

$$\textcircled{2} t_R < t_{R,Low}$$

室温が下限 $t_{R,Low}$ を下回る場合は暖房をする。

室温は $t_R = t_{R,Low}$ に設定する。

$$\textcircled{3} t_{R,Low} \leq t_R \leq t_{R,Hi}$$

室温が上下限の範囲にある場合は冷房も暖房も必要無く、除去熱量は $H = 0$ で確定し、室温 t_R も確定する。

なお、本研究では夏期のクールビズを想定し、室温の上限は $t_{R,Low} = 28 + \Delta t$ とし、 Δt をパラメータとしてケーススタディをした。

2) 除去熱量の計算

先の①②の場合、室温を上限または下限に設定し、除去熱量 H について解く。即ち、

$$H = CL + ST_{(1)} + WF_{(0)}(t_B - t_R) \quad (5)$$

なお、熱負荷計算では冷房を+で暖房を-で表す。

$$\textcircled{1} H > H_{C,max}$$

除去熱量が冷房能力 $H_{C,max}$ を超える場合は

$H = H_{C,max}$ と置いて、改めて付 4 で室温 t_R を求める。

$$\textcircled{2} H < H_{H,max}$$

除去熱量が暖房能力 $H_{H,\max}$ を超える場合は $H = H_{H,\max}$ と置いて、改めて室温 t_R を求める。

③ $H_{H,\max} < H < H_{C,\max}$

除去熱量が暖房能力 $H_{H,\max}$ と冷房能力 $H_{C,\max}$ の範囲にある場合は、除去熱量 H と室温 t_R が確定する。

なお、本研究は夏期の冷房時の分析であるので、暖房能力は $H_{H,\max} = 0$ とした。

3) 室温の再計算

先の①②の場合、除去熱量を冷房または暖房能力に設定し、改めて室温 t_R を求める。

$$t_R = t_B + (CL + ST_{(1)} - H) / WF_{(0)} \quad (6)$$

この室温 t_R が冷暖房能力の範囲で実現される室温である。

付 4. 蓄熱熱流の計算

室温が変動すると吸熱応答が生じる。問題はこの吸熱応答により時間遅れを伴って室内に逆流する蓄熱熱流である。

1) 室温変動

室温変動 Δt_R は基準温度からの変動量である。

$$\Delta t_R = t_R - t_B \quad (7)$$

2) 蓄熱熱流の計算

$$ST_{(K)}^* = -\Delta t_R \times WF_{(K)} + ST_{(K+1)} \quad (8)$$

ここに $ST_{(K)}^*$: 1 時間繰り上がった蓄熱熱流

$ST_{(K+1)}$: 前時刻の $K+1$ 項目の蓄熱熱流

式(8)は過去の蓄熱熱流と J 時に新たな室温変動で生じた吸熱応答による蓄熱熱流との和である。なお、 J 時の室温変動による吸熱応答の項に負の符号が付いているが、これは吸熱応答を+で表し、時間遅れで室内に逆流する蓄熱熱流を-で表すためである。

また、左辺の $ST_{(K)}^*$ は次の時間の $ST_{(K)}$ となる。特に $ST_{(1)}^*$ は次の時間に式(1)～式(6)で使われる蓄熱熱流 $ST_{(1)}$ となる。

室温変動の重み係数 WF は NewHASP/ACLD では第 0 項目から 7 項目まで求められる。第 8 項以降は第 7 項を初項とする等比数列で表される。よって式(8)の蓄熱熱流の第 7 項は下式となる。

$$ST_{(7)}^* = -\Delta t_R \times WF_{(7)} + ST_{(7)} \times CR \quad (9)$$

ここに CR : 公比

この室温変動による過去からの蓄熱熱流の重ね合わせの計算を逆たみ込み演算という。