

我慢をしない省エネへ
—夏季オフィスの冷房に関する提言—

報告書

2014年4月24日

空気調和・衛生工学会

温熱環境委員会（重点研究）

我慢をしない省エネへ
—夏季オフィスの冷房に関する提言—
報告書

目次

概要及び提言

- 1 28℃設定オフィスの問題点
 - 1.1 28℃設定オフィスの実態
 - 1.2 建築物衛生法を満たさないオフィスの増加
 - 1.3 温熱環境が知的生産性に与える影響とその経済試算
 - 1.4 今後のクールビズ
- 2 なぜ28℃設定とされたのか
 - 2.1 28℃設定の根拠
 - 2.2 28℃の意味
- 3 快適な温度とは
 - 3.1 熱的快適性の原理
 - 3.2 オフィスの温熱環境条件緩和による体感効果
 - 3.4 冷房設定温度、空気温度、グローブ温度と冷房熱負荷の関係
 - 3.4 快適性と空調に関する苦情（クレーム）
- 4 室内環境とエネルギー
 - 4.1 電力需給の変化
 - 4.2 空調エネルギーの使用割合
 - 4.3 節電オフィスにおける現場実測
- 5 先駆的事例

我慢をしない省エネへ

—夏季オフィスの冷房に関する提言—

現代社会では高い知識創造を行うことが重要視され、その活動は企業や研究機関などのオフィスで実践されている。そのために、知的生産性が低下しないオフィス空間が求められている。一方で、省エネ対策として業務用建物では28℃設定が推奨されている。しかしながら、無対策で室温緩和を行うとエネルギー消費量は削減できても、居住者に我慢を強いることになり、本来のオフィスの目的である居住者の知的生産性が低下してしまう。また、必ずしも期待されたエネルギー削減効果が得られないことすらある。空気調和・衛生工学会はこの状況には大きな問題があると認識している。そこで、学会として以下の提言を行う。

提言

- ① 居住者の健康性・快適性・知的生産性を低下させない室内環境を実現する
- ② 適切な空調設備の選択や運用により省エネルギーを実現する



©Shunsuke Nakamura 2014

■28℃設定オフィスの問題点

クールビズや節電の取り組みにおいて、「28℃」という値が浸透している。一方で、冷房設定温度を高くすることにより、暑さに対する執務者の不満が生じ、作業効率を低下させる懸念もある。28℃設定オフィスでの実測研究によると、28℃を超える場所や時間帯が生じ、執務者の不満足率が約8割と高かったことが報告されている。また、コールセンターでの実測研究では、空気温度が25℃から28℃に上昇すると、作業効率の低下が約6%となることが報告されている。人件費はエネルギー費の約100~200倍であり、室内環境の悪化による知的生産性の低下による

経済的損失は大きい。省エネルギーとともに、執務者の健康性、快適性、知的生産性を低下させないような室内環境を実現することが重要である。

■なぜ、28℃設定とされたのか

クールビズの設定温度が28℃とされたのは、1970年（昭和45年）に制定された「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（以下、建築物衛生法）」の管理基準温度の上限であると考えられている。同法では環境衛生管理基準として温度を17～28℃と定めている。まず、注意を要するのはこの28℃は設定温度ではなく実際の居住域の温度であるという点である。設定温度と実際のオフィス内の温度は室温センサーの位置や制御方法、内部負荷によりばらつきがある。従って、28℃設定と室温28℃は異なる。建築物衛生法が制定される際の基礎となった資料は厚生科学研究費「ビルディングの環境衛生基準に関する研究」であるが、この報告書の中で28℃とされた理由に関しては理想値、目標値や推奨値ではなく、許容最低限度の上限値であると記述されている。すなわち、28℃を推奨値とすることは間違っている。同報告書では冷房ありの場合の推奨値は22～24℃とされている。

■快適な温熱環境とは

人が感じているのは、空調設定温度ではない。同じ28℃設定でも、不快に感じやすい状況がある。壁、天井や窓の断熱・遮熱性能が低いと、その内表面温度は屋外環境条件の影響を大きく受ける。特に日射が当たる場合は、室温よりも表面温度が高くなりやすい。その結果、体感温度としては実際の室温よりも暑く感じられる。空気温度、放射温度（周囲の表面温度）、気流速度、湿度、代謝量（活動量）、着衣量の6要素の総合的な組み合わせが熱的快適性には重要である。冷房温度として一般的なオフィスでは26℃が推奨される。クールビズ化を行ったオフィスでも27℃が上限であろう。熱的中立時において相対湿度30～70%の範囲では湿度が体感に与える影響は必ずしも大きくない。無理な除湿を行うよりも室温を下げる方が省エネ的に効果的な場合が多い。一方で先端的な空調設備システムが設置されたオフィスでは空気温度が28℃でも天井、床、壁面の放射温度を低く保つこと、除湿を適切に行うことにより体感温度を低下させ快適に執務することも可能である。また、他人によってコントロールされた温熱環境は不快に感じやすい。パーソナル空調など個人による環境調節の度合いを高めることも、心理的に快適性を改善する手法となる。

■東日本大震災による省エネ意識とオフィス環境の変化

東日本大震災が発生した2011年の夏は、オフィスにおいて多くの節電対策が行われた。しかし、主要な節電対策のひとつであった室内温度の緩和は、執務者の快適性・知的生産性を大きく低下させた。一方で、照明の減光による省エネ対策は、執務者に大きな影響を与えなかった。このような実際の経験をふまえて、現在は過度な室温緩和を改め26～27℃程度の設定値に回復し、震災以前、諸外国に比べ高かった日本の750lx照度設定は500lx以下になっている。内部負荷の削減は冷房負荷削減に大きく貢献する。

■室温緩和の省エネルギー効果

室内環境の快適性を確保しながら空気調和設備のエネルギー使用量を削減する方法に関しては、空気調和・衛生工学会が2011年4月20日に公表している「夏季の業務用ビル並びに住宅における節電対策の留意点①業務用建築における節電メニュー」に詳しい。一部のパッケージ型空調システムでは、部分負荷率が低くなると機器効率が低下することにより、期待したほどの省エネルギー効果が得られない場合があることなどが報告されている。我慢＝省エネという直感的な対策に陥らないようにBEMS（Building Energy Management System）などを活用して定量的にその効果を把握しながら対策を進めるべきである。除湿や放射温度変更の省エネ効果に関しては採用されている空調システムにより大きく異なる。

■先駆的事例

空気調和・衛生工学会では省エネルギーであっても快適性や知的生産性が低下しない先進的なビルの事例を紹介し、その中でも特に優れたビルには学会賞を授与している。これらの建築物は今後のモデルとなるものである。

なお、本提言の学術的な根拠資料を報告書として取り纏めた。

1 28℃設定オフィスの問題点

1.1 28℃設定オフィスの実態

1) 夏季のオフィス

環境負荷軽減の取り組みとして、オフィスでは、夏季の冷房設定温度を高くし、軽装化を推奨するクールビズが2005年より政府主導で実施されている。また、2011年に発生した東日本大震災の影響で、冷房需要が大幅に増大する夏季の電力不足に対し、冷房設定温度を上げる取り組みをはじめとした節電の取り組みも行われてきた。

このようなクールビズや節電の取り組みにおいて、オフィスにおける夏季の冷房設定温度としては、「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（以下、建築物衛生法）」の管理基準温度の上限に相当する「28℃」という値が浸透している。

一方で、冷房設定温度を高くすることにより、温熱環境が熱的中立よりも暑くなり、執務者の温熱環境に対する不満が生じ、作業効率を低下させる懸念もある。ここでは、温熱環境が知的生産性に与える影響に関する研究事例を紹介し、オフィスの知的生産性の視点から考える。

2) クールビズオフィスにおける状況

夏季の冷房設定温度を28℃として積極的に取り組んでいるオフィスを対象とし、空気温度等の環境物理量、着衣量および在室者の快適性についての調査を行った。

クールビズ実施期間中の執務者の着衣量をアンケートにより調べたところ、平均着衣量は男性で0.54clo、女性で0.52cloであった¹⁾。これは、半袖襟付きシャツに薄手の長ズボン程度に相当する。

このオフィスの空調設備は基準階を北東・北西・南東・南西の4方向にゾーニングし、各ゾーン21階から23階までの3階層分に1つの空調機が割り当てられ、対象オフィスは北東・北西ゾーンに当たる。給気は空調機から3階層に分配された後、各階においてペリメータ側2系統、インテリア側2系統の計4系統に分配され、天井吹出し口より室内に供給されていた。排気はペリメータ側、還気はインテリア側の天井スリットから行われていた。空調機は3階層分の還気の混合空気温度が冷房設定温度となるように冷温水2方弁の開度を比例制御していた。また、ペリカウンターにあるファンコイルユニット(FCU)もペリメータにある温度センサーが冷房設定温度になるように制御していた。クールビズ実施期間における冷房設定温度は28℃であり、運転時間は9時半から19時までであった。

このオフィスにおける、室内空気温度の平面温度分布を図2に示す。オフィス内の熱源分布や導入されている空調システムによっては、室内設定温度を28℃にしていたとしても、室内に温度分布が生じ、空気温度や放射温度が28℃を超える場所や時間帯があることがわかった²⁾。また、執務者の多くが、温熱環境に不満であった(表1)。改善したい環境要素として温熱環境を挙げ、扇風機等の気流を利用し、暑さの対策を行っていた。

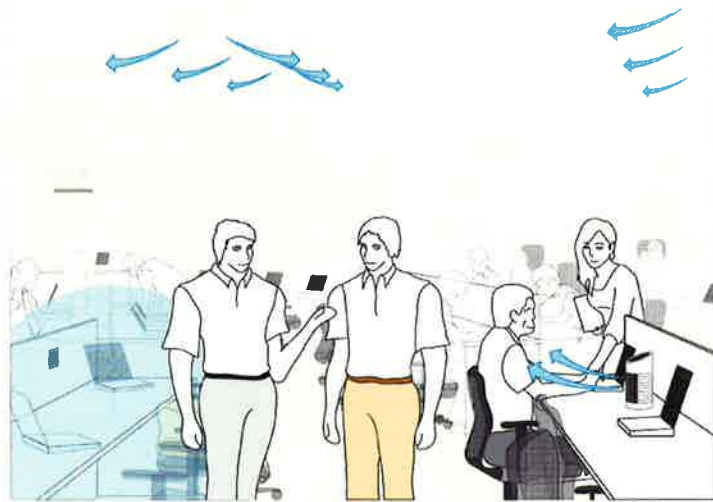


図1 クールビズオフィス

省エネルギーかつ快適なクールビズを実現するためにはどうしたらよいだろうか？

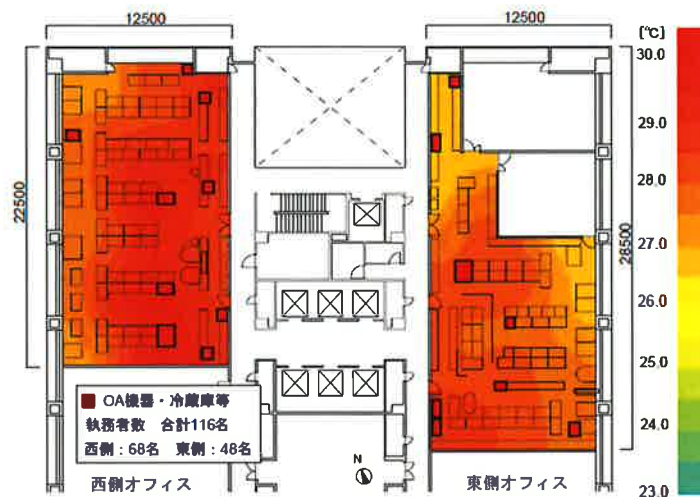


図2 設定温度 28°C オフィスにおける室内空気の平面温度分布 (8月)

表1 設定温度 28°C オフィスにおける温熱環境に関する申告

	7月期		8月期		9月期	
	出勤時	退勤時	出勤時	退勤時	出勤時	退勤時
有効回答件数[件]	171	170	142	141	59	59
温冷感[-]	1.2	1.0	1.8	1.1	0.3	0.8
温熱環境満足度[-]	-0.30	-0.29	-0.50	-0.35	0.04	-0.14
温熱不満足者率[%]	73	74	80	70	37	64

図2のオフィスにおいて、東側オフィス、西側オフィスそれぞれについて、ペリメータ側とインテリア中央部の測定点の室内空気温度の平均値を算出した。いずれの場所においても空調機運転開始時刻の室内空気温度は30°Cを超えており、冷房設定温度である28°Cに達するまでに東側オフィスのペリメータ側で90分、同インテリア側で190分、西側オフィスのペリメータ側で80分を要した。また、同インテリア側ではほぼ終日28°C以上となっていた(図3)。

図4に給気吹出口温度を示す。室内空気温度が設定温度に達した後に、特に執務者やOA機器などの内部発熱負荷の少ない東側オフィスにおいて、給気吹出し口温度が8~10度の幅で上下する、ハンチング現象が確認された。室内空気温度が冷房設定温度である28℃付近まで低下した時間帯以降に確認されたことから、空調機での処理が必要な負荷が減少し、給気温度の制御が困難になったと考えられる。既存の空調設備において、28℃などの室温緩和設定措置を行う場合、空調システムの調整が必要な場合があることがわかった。

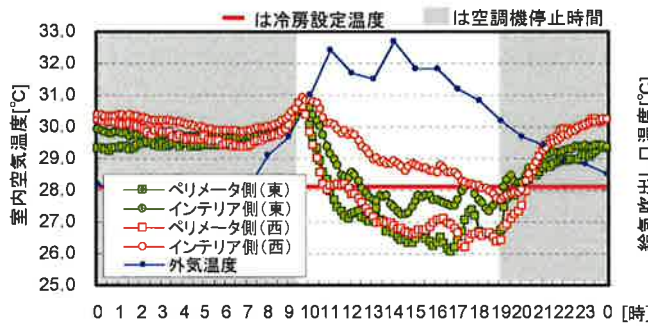


図3 室内空気温度の日変動

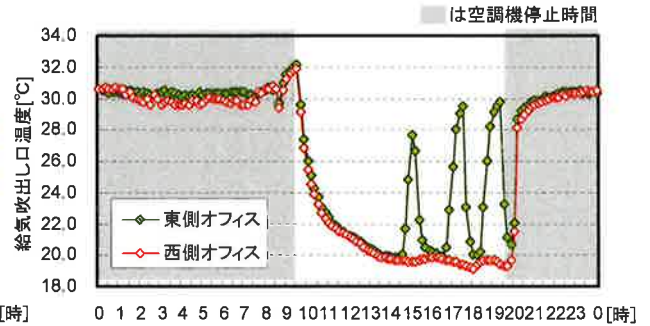


図4 給気吹出し口温度の日変動

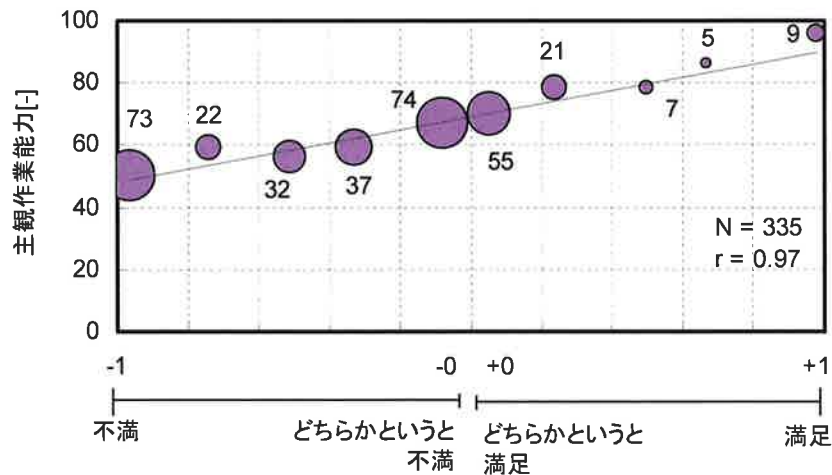


図5 退勤時の温熱環境に関する満足度と主観作業能力の関係

このオフィスにおいて、温熱環境に関する満足度が高いと主観作業能力が高く（図5）、疲労度が低いという関係が認められた。

1.2 建築物衛生法を満たさないオフィスの増加

建築物衛生法では、一定面積以上（3000m²以上、学校は8000m²以上）の面積を有する特定建築物（興業場、百貨店、集会場、図書館、博物館、美術館、遊技場、店舗、事務所、学校、旅館）に対して、空気調和設備を有する場合には、空気環境の調整に関する基準の1つとして、温度で17℃以上28℃以下（かつ居室の温度を居室における温度を外気温度より低くする場合は、その差を著しくしないこと。）という基準を設けている。温度は他の管理基準対象（浮遊粉塵、一酸化炭素濃度、二酸化炭素濃度、相対湿度、気流）とともに、二ヶ月以内に1回測定することが定められているが、最近、夏季の冷房時に管理基準値17～28℃を守れない建物が増加している。

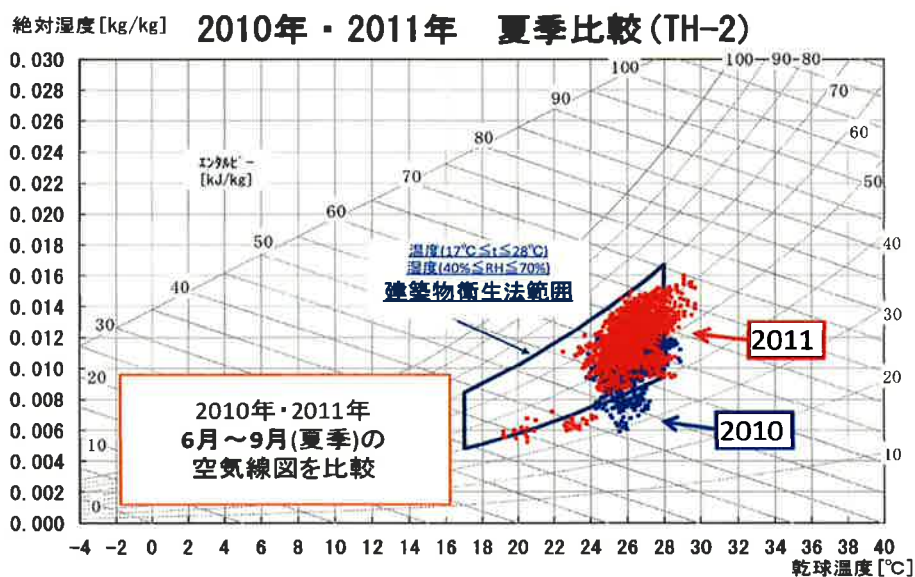


図6 あるオフィスにおける夏季の温湿度の例（大澤から引用）³⁾

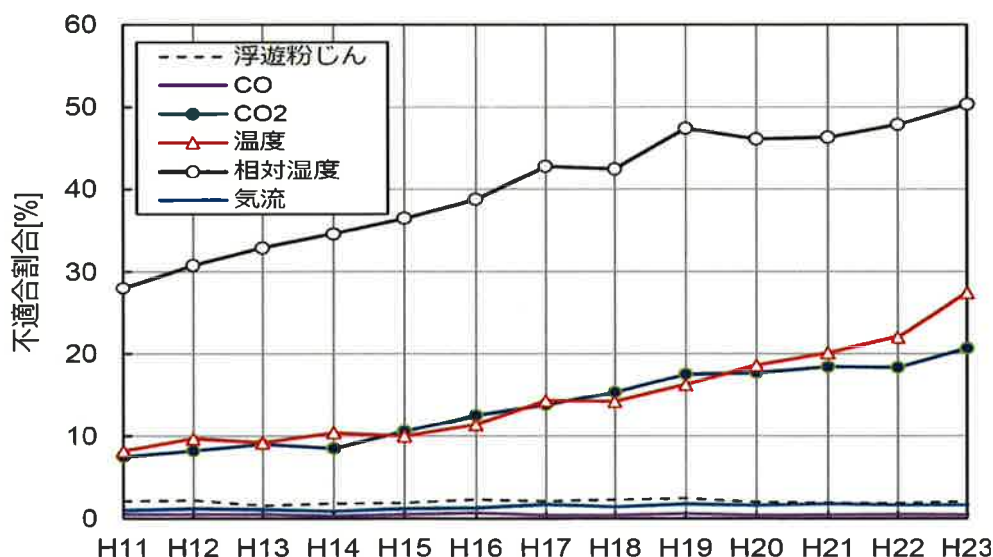


図7 全国の特定建築物の不適合率の経年変化（大澤から引用）³⁾

図6は、あるオフィスにおける2010年と2011年の夏季（6月～9月）の室内温湿度の変化³⁾を示している。横軸は室温、縦軸は絶対湿度であり、図中には相対湿度10～100%が等値線と

して示されている。相対湿度の管理基準値は、40～70%であり、図中には、温湿度の管理基準範囲が太線で示されている。同図より、2010年と比較して2011年は温度、湿度ともに高く、東日本大震災後の節電要求により夏季室温が上昇しており、温度も管理範囲上限の28℃を超える割合が増加していることがわかる。また、冷却水温が高くなるため除湿能力が低下し、湿度も上昇している。傾向はこの建物だけに限ったことではなく、全国的な傾向である。

図7は全国の環境衛生基準不適合建物割合の経年変化³⁾を示している。6つの管理項目のうち、相対湿度の不適合率が最も高く、温度、CO₂濃度が次に高いことがわかる。これらの不適合率は年々増加している。相対湿度については、冬季の乾燥が原因であるが、温度については夏季の室温上昇が原因している。

図8は、東京都における環境衛生基準不適合率の経年変化⁴⁾を示している。これは、東京都福祉保健局ビル衛生検査班による立ち入り検査結果により不適となった建物数が百分率で示されている。室温に関して全国の不適合率に比較して、2011年の東京における不適合率が急増していることがわかる。東京における節電の影響が全国平均より顕著に現れているのではないかと推察できる。

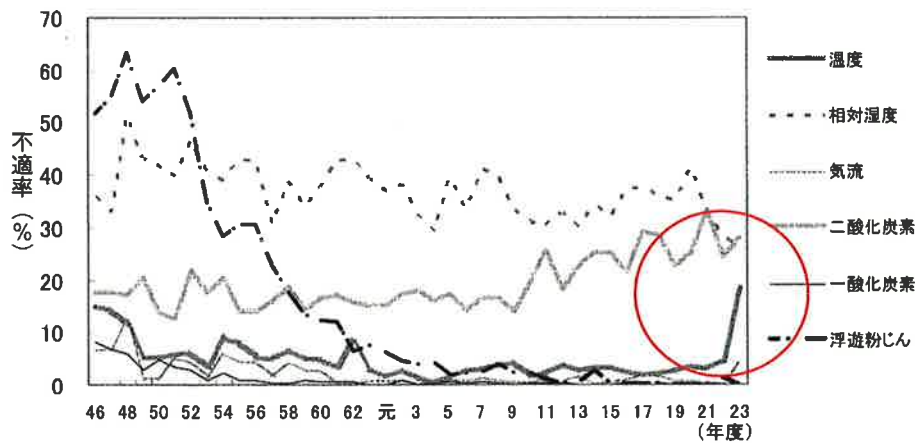


図8 東京の特定建築物の不適合率の年推移⁴⁾

1.3 温熱環境が知的生産性に与える影響とその経済試算

1) 経済試算

米国や日本のような先進国では、人件費はエネルギー費用の約 100～200 倍であり、知的生産性向上によって約 0.5～1.0%の person cost reduction が可能ならば、その値は全エネルギー費用に相当する。ライフサイクルコストを考える際、生産性の向上を人件費に換算し考慮すると、室内環境の改善は極めて費用対効果が大いことがわかる。健康影響を考慮し、室内環境質の改善による経済効果を試算した例としては、米国の NIOSH (米国国立労働安全衛生研究所) による研究⁶⁾がある。室内環境を改善することによって、89 百万人の米国の室内執務者のうち、15 百万人以上の健康に良い影響を与え、その推定便益は、年間 50 億～750 億ドルであると示されている。作業効率の向上を考慮して行った米国の試算⁷⁾では、温熱環境の改善による執務者の作業効率の向上は、米国における年間の潜在的利益として、年間 120 億～1250 億ドルに値すると報告されている。

表 2 オフィスにおけるエネルギー費用および人件費の比較⁵⁾

費用	北米					日本
	Rosenfeld	Abdou と Lorsch	EPA	Woods	BOMA	
人件費 〔ドル/(m ² ・年)〕	3000	2180	2000	2370	1300	3700
空調運営費用 〔ドル/(m ² ・年)〕	-	20-100	60	120	29	-
エネルギー費用 〔ドル/(m ² ・年)〕	15	10-20	20	20	15	36
エネルギー費用に対する人件費の比率	200	114-218	100	118	87	103
年間エネルギー費に相当する 知的生産性向上率 [%]	0.5	0.5-0.9	1.0	0.9	1.2	1.0
年間エネルギー費に相当する 労働時間 [分/(日・人)]	2¼	2-3¾	4⅓	-	5	4⅓

2) 室内温度と生産性に関する現場実測例

① コールセンターにおける現場実測

コールセンターにおいて、四季を通じ累計 13,169 人分のコールデータを対象として行った現場実測⁸⁾では、平均室内空気温度が 25.0℃が 26.0℃に 1.0℃上昇したときに、時間平均応答件数が低下し、その作業効率の低下は 1.9%程度であったと報告している。図 9 に、コールセンターにおける日平均室内温度と平均応答件数を示す。

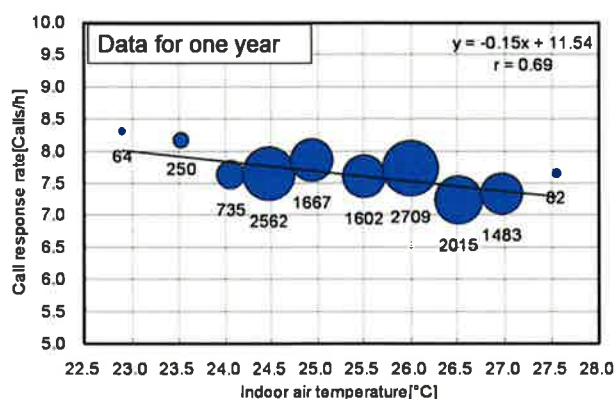


図 9 コールセンターにおける日平均室内温度と平均応答件数⁸⁾

② 過冷房のオフィスにおける現場実測

プログラム開発ルームにおける長期間にわたる実測では、室内温度が熱的中立状態より低いとき1日あたりのタイプ数が少なくなる相関が見られた⁹⁾。過剰に冷房を行ったオフィスにおいて、室内温度が熱的中立温度よりも低下すると知的生産性が低下する可能性が示されている。図10にプログラム開発ルームにおける室内温度とタイピング数を示す。この結果より、涼しすぎてもタイピングの作業効率が低下することがわかる。

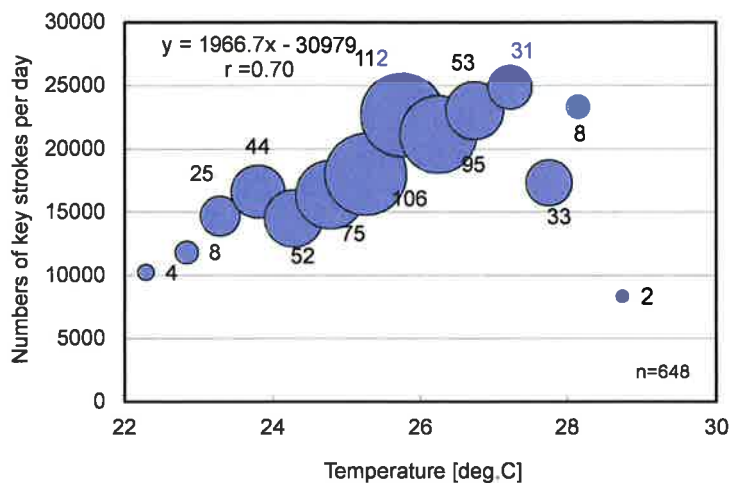


図10 室内温度とタイピング数⁹⁾

1.4 今後のクールビズ

クールビズや節電の取り組みが行われたことにより、着衣の軽装化への心理的な抵抗や社会的な壁が取り払われ、一人一人の個人が省エネルギーを考えるきっかけとなった。一方で、「冷房設定温度 28℃」というキャッチフレーズ通り取り組んでいても、オフィス内の熱源の分布や、空調システムによっては、室内に温度分布を生じ、28℃を超える場所や時間帯が生じるケースがあることや、投入エネルギー量の削減効果を期待したように得ることが難しい場合もあることがわかった。冷房設定温度 28℃を常に前提とするのではなく、環境負荷削減に向けて、より柔軟に対応した環境設備計画や取り組みに関しても考えていくことが必要である。

オフィスでのクールビズや節電については、知的な生産活動を行う場での取り組みであることを認識し、省エネルギー効果のみではなく、投資とそれに対する見返り効果としての生産性が判断基準になると考えられる。オフィスでの現場実測により、オフィスの温度は執務者の生産性に影響を与えることを示した。執務者の満足度や生産性を損ねることなく、省エネルギーを図ることが重要であり、空気調和設備が果たす役割は大きい。

【参考文献】

- 1) 西原直枝, 羽田正沖, 田辺新一: 夏季冷房: 28℃設定オフィスにおける執務者の着衣量および主観申告調査, 日本家政学会誌, Vol. 61, No.3, p.169-175, 2010
- 2) 羽田正沖, 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, pp.389-396, 2009
- 3) 大澤元毅: 「建築物環境衛生管理及び管理基準の今後のあり方に関する研究 (H23-健危—一般-009)」報告書, 国立保健医療科学院, 2013年
- 4) 公益財団法人 日本建築衛生管理教育センター: 「改訂 建築物の環境衛生管理 (上巻)」, 2013年, p.387
- 5) 西原直枝: プロダクティビティ (第5編 第24章 1.4節)、空気調和・衛生工学会編著: 空気調和・衛生工学便覧 (第14版)、丸善, 2010
- 6) Mendell MJ, Fisk WJ, Kreiss K, Levin H, Alexander D, Cain WS, Girman JR, Hines CJ, Jensen PA, Milton DK, Rexroat LP, Wallingford KM: Improving the Health of Workers in Indoor Environments: Priority Research Needs for a National Occupational Research Agenda, American Journal of Public Health, 92, 9, pp.1430-1440, 2002
- 7) Fisk W and Rosenfeld A: Estimates of improved productivity health from better indoor environments, Indoor Air, 7, pp.158-172, 1997
- 8) Tanabe S, Kobayashi K, Kiyota O, Nishihara N, Haneda M: The effect of indoor thermal environment on productivity by a year-long survey of a call centre, Intelligent Buildings International, 1, 3, pp.184-194, 2009
- 9) Nishihara N, Tanabe S, Haneda M, Ueki M, Kawamura A and Obata K: Effect of Overcooling on Productivity Evaluated by the Long Term Field Study, Proceedings of CLIMA 2007, Helsinki, Finland, Vol.1, pp.35-42, 2007

2. なぜ 28℃設定とされたのか

2.1 28℃設定の根拠

クールビズ「室温 28℃設定」はどのような意味を持ち、どのような根拠によって提案されたのだろうか？

建築物衛生法では、年間を通じての室内温度の管理基準を 17℃～28℃、相対湿度 40～70%、気流速度 0.5m/s 以下としている。この「管理値」は規制を強要するものではないが、28℃という値は法律で定める管理基準の上限に当たる。

表 3 建築物衛生法による空気環境の環境衛生管理基準

項目	管理基準
温度	17℃～28℃
相対湿度	40%～70%
気流	0.5 m/sec
一酸化炭素	10 ppm
二酸化炭素	1000 ppm
浮遊粉じん量	0.15 mg/m ³
ホルムアルデヒド	0.1 mg/m ³ (0.08ppm)

そしてこの管理基準は、厚生省が建築物環境衛生管理基準設定の根拠づくりのため空気調和・衛生工学会に委託した 1965 年度（昭和 40 年度）厚生科学研究「ビルの環境衛生基準に関する研究」¹⁾に基づいて制定された。その研究報告書（図 11）は、冬季における許容限度範囲として石川による研究から 17～23℃、夏季における平山、真許、Yaglou らによる研究から 21～28℃を提案している。建築物衛生法における室温 17～28℃という数値はこれらに基づいていると考えられる。

表 4 温度の許容限度（小林陽太郎、昭和 41 年）

	温度(℃)		湿度(%)	備考
冬季	戦前	17-23	55-70	昭 17 年 石川知福 中性範囲 75% 阿久津、 三浦労働科学 38(79)、1962
	1960	19.5-23.5 (女子工場)		
夏季	1960	推奨範囲 21-26 許容限度の範囲 27	60-75	中性範囲 75% 阿久津、三浦 (同上)
		23-27.5 (女子工場)		
	1962	冷房あり 22-24 21-28	55-70	平山、真許、Yaglou らを 参考

2.2 28℃の意味

ここで重要なのは、示された室温 28℃は理想値、目標値や推奨値ではなく、許容最低限度の上限値であるという点である。



図 11 建築物衛生法の根拠となった厚生科学研究報告書
(小林陽太郎、昭和 41 年)

厚生科学研究報告書では環境衛生基準値を「閉鎖された建築物の内部において、最小限 8 時間以上継続的に労働する人体に対し、安全、健康、快適性（選択性）、能率を目的として設定する、種々の環境衛生の観点に立った環境条件の基準を 4 段階に分ける」としている。0 級「理想値」、1 級「目標値」、2 級「推奨値」、3 級「許容最低限度」に分類し、3 級は「安全確保、健康維持という観点から基本的に要求される最低限度の線であって、主として法規により規制することが必要である値であり、この線より悪い状態になる場合、安全な作業環境の条件が満たされないために、何らかの代替的施設または措置の附加が要求されるべき」としている。

室温 28℃という環境はこの 3 級に当たる。そのため、この環境で無理なく作業をするためには軽装、適切な湿度条件、所定の気流が必要不可欠である。つまり、冒頭に述べた「省エネルギーと快適性・知的生産性との両立」の前提として最低限の限界である。

【参考文献】

- 1) 小林陽太郎、昭和 40 年厚生科学研究－ビル環境衛生基準に関する研究、1966
- 2) C.P.Yaglou and Philip Drinker, The summer comfort zone : Climate and Clothing, Transactions American Society of Heating and Ventilating Engineers, 1929

3. 快適な温度とは

3.1 熱的快適性の原理

人に関わる熱環境のことを温熱環境という。室温（空気温度）は、部屋の温熱環境の状態を知るのに便利な指標（数値）である。しかし、実際に人が感じる暑さや寒さは、空気温度だけでは決まらない。例えば、同じ室温 28℃でも日射しがあれば暑く感じ、風があれば涼しく感じる。この章では、人が暑さや寒さを感じる仕組みについて解説する。また、その原理を理解する上で、人間が恒温動物として持っている体温調節機能についても解説する。

1) 体温調節のしくみ

・自律性体温調節

恒温動物である人間は、食物から摂取する栄養分をもとに筋肉や肝臓などの臓器で熱をつくらせている。じっと座っている状態でも、約 100W の発熱に相当する。そして、体深部の温度が約 37℃で一定となるよう、適度に周囲環境へ熱を逃がすことで体温を調節している。意志とは関係なく、人体の生理的反応として行われる体温調節を自律性体温調節という。

体内で産み出された熱は、血液の循環（血流）によって体全体に行き渡っている。周囲環境の温度は、37℃の深部体温より低い場合がほとんどである。そこで、暑いときには、まず血管の拡張反応がおこる。環境に近い皮膚血管を拡張させて血流量を増やし、体内から環境への放熱を増加させる。暑いと肌が紅潮して見えるのは、そのためである。血管拡張による放熱では不十分な場合、発汗が始まる。汗の水分が皮膚表面から蒸発するときに熱を奪っていくため、体は冷却される。蒸発せずに皮膚表面をしたたり落ちる汗に冷却効果はない。

寒いときには、逆に血管の収縮反応がおこる。皮膚血管の収縮により主に体の中心部で血液を循環させ、周囲環境への放熱を減らす。そのため、寒いと肌が青白く見える。それでも不十分な場合はふるえがおこり、強制的に筋肉を運動させることで体を温めようとする。

・行動性体温調節

人間は他の動物と比較して高度な自律性体温調節機能を持っているが、発汗やふるえは長時間持続できない。そのため、実際には行動により自律性体温調節を補っている。着ている衣服の調節（腕まくり、膝掛けを使うなど）、活動量の変化（おしくらまんじゅう、昼寝など）、姿勢の変化、滞在場所の選択などにより、人体からの放熱状態を変化させている。冷暖房設備による温湿度や気流の調節も、人間が獲得してきた広い意味での行動性体温調節手段だといえる。行動のきっかけとなるのが暑さや寒さの感覚であり、これを温冷感という。

2) 人体と周囲環境の熱バランス

温冷感は、体内でつくられる熱と周囲環境へ逃げていく熱とのバランスに深く関係している。

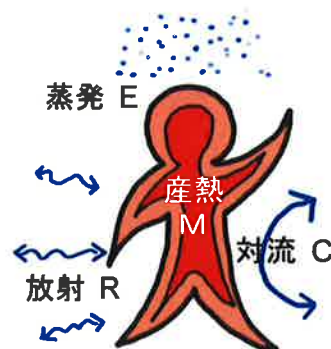


図 12 人体の熱平衡

体内で産み出された熱と環境へ逃げていく熱が等しい場合、差し引きのバランスがとれているため、暑さも寒さも感じない。しかし、環境への放熱が多すぎると体温が低下し、寒さを感じる。逆に環境への放熱が少なすぎて体内に熱がこもると、体温が上昇するため暑さを感じる。体内でつくられる熱を適度に環境に放熱することが快適な温熱環境の条件であるといえる。

3) 熱バランスに関わる6つの要素

人体と周囲環境の熱バランスには、人体に関わる2要素と環境に関わる4要素を考える必要がある。

・人体に関わる要素： 代謝量（活動量）

多くの熱は筋肉でつくられるため、体を動かすことで体内での産熱量、すなわち代謝量が増える。座って安静にしている状態の代謝量を基準として、1 met（メット）という単位で表される。デスクワークは約1.2 met、歩くと約1.6 metになり、同じ環境でも代謝量が高いほど暖かく、または暑く感じることになる。

・人体に関わる要素： 着衣量

衣服には保温効果があり、着込むことで体と環境の熱移動が起こりにくくなる。そこで、着ている衣服の断熱性を着衣量という値で表す。clo（クロ）という単位が使われるが、裸体時は0 clo、下着・半袖シャツ・スラックスの組み合わせで約0.5 cloになる。かつては、真夏でもジャケットを着ることがビジネスマナーであったが、2005年に始まったクールビズにより、ノーネクタイの半袖シャツが一般的になった。着衣量を下げると涼しく感じ、快適と感じる室温を上げられる効果がある。

・環境に関わる要素： 空気温度

直観的にわかりやすく、暑さ寒さの目安に最もよく用いられているのが空気温度（室温）である。室温が高いと暑く感じ、低いと寒く感じる。設定温度も、空気温度が基準となっている。

・環境に関わる要素： 湿度

湿度は、汗の蒸発のしやすさに大きく関係している。湿度が低いとかいた汗が蒸発しやすくなり、体を冷やす効果が高まる。湿度が高いと汗が蒸発しにくいいため、皮膚にまとわりつき、蒸し暑さを感じる。同じ室温でも、湿度が低いほど涼しく、さわやかに感じる。

・環境に関わる要素： 気流速度（風速）

気流（風）は、空気温度の効果を増幅させる。空気温度の高い気流は体を温め、温度の低い気流は体を冷やす。気流速度が大きくなるほど、その効果は大きくなる。ただし、空気温度が30℃近くになると気流の冷却効果が小さくなるため、注意が必要である。気流は汗の蒸発を促進させる効果もある。

・環境に関わる要素： 放射温度

物体表面からは、その表面温度に応じた赤外線（熱線）が放射されている。人体表面よりも周囲の面（主に壁・床・天井など）の表面温度が高いと、人体は放つよりも多くの放射熱を受け、温められる。日射の当たる窓際では、窓やブラインドの表面が熱くなりやすい。また、最上階の部屋では屋根が日射で焼け、天井面の温度が高くなることもある。人体への放射の影響を温度換算したのが放射温度であるが、同じ室温でも放射温度が高いと暑く感じられる。あまり意識されないが、放射温度は空気温度とほぼ同じ程度の影響がある。

4) 温熱環境指標

快適な温熱環境は、6つの要素の組み合わせで決まる。つまりオフィスで28℃といっても、様々な状況があり、以下の場合はいずれも体感的に室温28℃よりも暑く感じる環境となる。①代謝量が高い、②着衣量が高い、③湿度が高い、④気流速度が小さい、⑤放射温度が高い。しかし、これらの条件が逆転すると、涼しく感じられる28℃となる。6要素を総合的に考えた28℃設定とする必要がある。

例えば、自宅での室温28℃はそれほど厳しい条件とはならない。着衣の自由度が高く、風の通りやすい場所を選択する等、個人による調節できる範囲が広いためである。オフィスでの現実的な個人調節の範囲を考えた上で、空気温度以外の環境条件を設定する必要がある。

複合的な温熱環境の効果を表す数値を温熱環境指標という。「作用温度」は最も簡便なものの一つで、空気温度と放射温度の平均値として求められる。室内環境設計の目標値としても使用されている。作用温度よりも複雑にはなるが、6要素の影響を総合的に評価できる代表的な指標として、PMV（予想温冷感申告）やSET*（標準新有効温度）がある。いわゆる体感温度と呼ばれるもので、実際の感覚に近い環境を知ることができる。

肌や衣服が汗で湿った状態や汗のにおいは、温冷感とは異なる不快感につながる。これらは温熱環境指標では評価できないが、現実には考えなくてはならない要素である。

冷房温度として一般的なオフィスでは26℃が推奨される。クールビズ化を行ったオフィスでも27℃が上限であろう。一方で先端的な空調設備システムが設置されたオフィスでは空気温度が28℃でも天井、床、壁面の放射温度を低く保つことにより快適に執務することも可能である。また、他人によってコントロールされた温熱環境は不快に感じやすい。パーソナル空調など個人による環境調節の度合いを高めることも、心理的に快適性を改善する手法となる。

3.2 オフィスの温熱環境条件緩和による体感効果

1) 冷房設定温度と室温

オフィスの温熱環境条件緩和による体感効果に関して検討を行った。計算は、ISO-7730（温熱環境の人間工学—PMV（平均温冷感申告）とPPD（予測不満足者率）指標を用いた温熱快適性の解析的決定と解釈及び居所不快感の快適範囲）による。早稲田大学作成のプログラムを用いた。

PMVとは、デンマーク工科大学のP.O.Fangerによって提案された温熱快適性指標である。空気温度、平均放射温度、相対湿度、気流速度、着衣量、代謝量の温熱6要素から人体の温冷感（PMV）及び不満足者率（PPD）を予測する。PMVは人体の熱平衡式と被験者実験に基づいており、温熱環境6要素を代入するとその条件で暖かいと感じるか、寒いと感じるかを数値として表現してくれる。+3 暑い、+2 暖かい、+1 やや暖かい、0 どちらでもない、-1 やや涼しい、-2 涼しい、-3 寒い という意味を持つ。

表5にISO-7730が推奨する快適範囲を示す。状況によりA、B、C範囲を選択することが出来る。今回は緊急的な対応が必要であることから、C範囲15%PPDを満たす温熱環境を考慮すべきである。PPD15%とは在室者の15%が不満を述べる温熱環境である。

表5 ISO-7730における快適範囲

	PPD	PMV	ドラフト
A	<6%	-0.2<PMV<+0.2	10%PD
B	<10%	-0.5<PMV<+0.5	20%PD
C	<15%	-0.7<PMV<+0.7	30%PD

ちなみに、室内気流を0.15m/s、平均放射温度＝空気温度、着衣量0.6clo（長袖シャツ）、相対湿度50%、代謝量1.1metとすると、A範囲の上限は25.8℃、B範囲の上限は26.8℃、C範囲の上限室温は27.4℃と算出される。夏季には壁、床、天井などの表面温度が空気温度より高いことが多く、この場合は平均放射温度が高くなる。

気流による不快感であるドラフトによる不満足率に関しては、26℃以上では大きな問題は生じない。これは、蒸暑時は気流による不快感が低くなるからである。極限的な条件として室内気流0.5m/s、平均放射温度＝空気温度、着衣量0.35clo（ポロシャツ、短パン）、代謝量1.1met、60%RHとするとA範囲上限が28.3℃、B範囲が28.7℃、C範囲が29.3℃となる。

表6に着衣量0.5clo時の様々な条件における、PMVとPPD算出結果を示す。ここで、着衣量0.5cloの目安は、「半袖シャツ＋薄手膝丈スカート＋下着＋靴」、「半袖シャツ＋薄手長ズボン＋下着＋靴」である。クールビズオフィス（28℃設定）にて実際に測定した平均着衣量は、男性で0.54clo、女性で0.52cloであった。オフィスにおいて活動する服装として、社会的に許容される下限としては0.5clo程度であると考え、この値を試算に用いた¹⁾。

表7は着衣量0.6clo時の同様の検討結果である。0.6cloの目安は、「長袖シャツ＋薄手長ズボン＋下着＋靴」である。代謝量1.1metは通常のタイピングなどのオフィス作業の想定である。表を用いることでいくつかの事例に関して検討した。

前提：

- ・一般的なオフィスを想定

- ・着衣：長袖シャツとズボン（0.6clo 長袖）
- ・気流：通風、扇風機なしで 0.15m/s とした。
- ・活動量：低めのオフィス作業→1.1met
- ・照度等・・・昼間、照明あるが、放射温度に影響は多少あるが無視した。

■条件1

- ・室温 29 度→28 度：PMV：1.44→1.09、PPD：48%→30%
- ・湿度一定（70%）
- ・暑くてとてもオフィス作業は出来ない状態

■条件2

- ・室温 29 度一定：PMV：1.44→1.39、PPD：48%→45%
- ・湿度 70%→65%
- ・5%除湿効果の体感効果は小さい

■条件3

- ・室温 29 度→30 度：PMV：1.44→1.73、PPD：48%→64%
- ・湿度 70%→65%
- ・大きな効果はなく、室温を下げるのが重要である。

2) 湿度の影響

表 6、7 を利用することによって相対湿度が PMV（予想温冷感申告）に与える影響に関して考察することができる。クールビズ（0.5clo）で室温 26℃の時に相対湿度 30%、50%、70%の時に PMV は-0.11、0.05、0.22 となる。

一方、クールビズ(0.5clo)で室温 28℃の時には相対湿度 30%、50%、70%の時に PMV は-0.58、0.76、0.94 となる。PMV によると 28℃・30%rh と 27℃・70%の温冷感が同じとなる。PMV で予測される温冷感に与える湿度の効果は室温よりも小さい。

表 6 半袖シャツ着用時 (0.5clo) 時の PMV、PPD

空気温度 [°C]	平均放射温度 [°C]	風速 [m/s]	相対湿度 [%]	着衣量 [clo]	代謝量 [met]	PMV	PPD [%]
24	24	0.15	30	0.5	1.1	-0.79	18
24	24	0.15	35	0.5	1.1	-0.75	17
24	24	0.15	40	0.5	1.1	-0.72	16
24	24	0.15	45	0.5	1.1	-0.68	15
24	24	0.15	50	0.5	1.1	-0.65	14
24	24	0.15	55	0.5	1.1	-0.61	13
24	24	0.15	60	0.5	1.1	-0.57	12
24	24	0.15	65	0.5	1.1	-0.54	11
24	24	0.15	70	0.5	1.1	-0.50	10
25	25	0.15	30	0.5	1.1	-0.45	9
25	25	0.15	35	0.5	1.1	-0.41	9
25	25	0.15	40	0.5	1.1	-0.37	8
25	25	0.15	45	0.5	1.1	-0.34	7
25	25	0.15	50	0.5	1.1	-0.30	7
25	25	0.15	55	0.5	1.1	-0.26	6
25	25	0.15	60	0.5	1.1	-0.22	6
25	25	0.15	65	0.5	1.1	-0.18	6
25	25	0.15	70	0.5	1.1	-0.15	5
26	26	0.15	30	0.5	1.1	-0.11	5
26	26	0.15	35	0.5	1.1	-0.07	5
26	26	0.15	40	0.5	1.1	-0.03	5
26	26	0.15	45	0.5	1.1	0.01	5
26	26	0.15	50	0.5	1.1	0.05	5
26	26	0.15	55	0.5	1.1	0.09	5
26	26	0.15	60	0.5	1.1	0.14	5
26	26	0.15	65	0.5	1.1	0.18	6
26	26	0.15	70	0.5	1.1	0.22	6
27	27	0.15	30	0.5	1.1	0.23	6
27	27	0.15	35	0.5	1.1	0.28	7
27	27	0.15	40	0.5	1.1	0.32	7
27	27	0.15	45	0.5	1.1	0.36	8
27	27	0.15	50	0.5	1.1	0.41	8
27	27	0.15	55	0.5	1.1	0.45	9
27	27	0.15	60	0.5	1.1	0.49	10
27	27	0.15	65	0.5	1.1	0.54	11
27	27	0.15	70	0.5	1.1	0.58	12
28	28	0.15	30	0.5	1.1	0.58	12
28	28	0.15	35	0.5	1.1	0.63	13
28	28	0.15	40	0.5	1.1	0.67	15
28	28	0.15	45	0.5	1.1	0.72	16
28	28	0.15	50	0.5	1.1	0.76	17
28	28	0.15	55	0.5	1.1	0.81	19
28	28	0.15	60	0.5	1.1	0.85	20
28	28	0.15	65	0.5	1.1	0.90	22
28	28	0.15	70	0.5	1.1	0.94	24
29	29	0.15	30	0.5	1.1	0.93	23
29	29	0.15	35	0.5	1.1	0.97	25
29	29	0.15	40	0.5	1.1	1.02	27
29	29	0.15	45	0.5	1.1	1.07	29
29	29	0.15	50	0.5	1.1	1.12	32
29	29	0.15	55	0.5	1.1	1.17	34
29	29	0.15	60	0.5	1.1	1.22	36
29	29	0.15	65	0.5	1.1	1.26	39
29	29	0.15	70	0.5	1.1	1.31	41

表7 長袖シャツ (0.6clo) 着用時のPMV、PPD

空気温度 [°C]	平均放射温度 [°C]	風速 [m/s]	相対湿度 [%]	着衣量 [clo]	代謝量 [met]	PMV	PPD [%]
24	24	0.15	30	0.6	1.1	-0.54	11
24	24	0.15	35	0.6	1.1	-0.51	10
24	24	0.15	40	0.6	1.1	-0.47	10
24	24	0.15	45	0.6	1.1	-0.44	9
24	24	0.15	50	0.6	1.1	-0.40	8
24	24	0.15	55	0.6	1.1	-0.36	8
24	24	0.15	60	0.6	1.1	-0.33	7
24	24	0.15	65	0.6	1.1	-0.29	7
24	24	0.15	70	0.6	1.1	-0.26	6
25	25	0.15	30	0.6	1.1	-0.23	6
25	25	0.15	35	0.6	1.1	-0.19	6
25	25	0.15	40	0.6	1.1	-0.15	5
25	25	0.15	45	0.6	1.1	-0.12	5
25	25	0.15	50	0.6	1.1	-0.08	5
25	25	0.15	55	0.6	1.1	-0.04	5
25	25	0.15	60	0.6	1.1	0.00	5
25	25	0.15	65	0.6	1.1	0.04	5
25	25	0.15	70	0.6	1.1	0.08	5
26	26	0.15	30	0.6	1.1	0.09	5
26	26	0.15	35	0.6	1.1	0.13	5
26	26	0.15	40	0.6	1.1	0.17	6
26	26	0.15	45	0.6	1.1	0.21	6
26	26	0.15	50	0.6	1.1	0.25	6
26	26	0.15	55	0.6	1.1	0.29	7
26	26	0.15	60	0.6	1.1	0.33	7
26	26	0.15	65	0.6	1.1	0.37	8
26	26	0.15	70	0.6	1.1	0.41	9
27	27	0.15	30	0.6	1.1	0.40	8
27	27	0.15	35	0.6	1.1	0.45	9
27	27	0.15	40	0.6	1.1	0.49	10
27	27	0.15	45	0.6	1.1	0.53	11
27	27	0.15	50	0.6	1.1	0.58	12
27	27	0.15	55	0.6	1.1	0.62	13
27	27	0.15	60	0.6	1.1	0.66	14
27	27	0.15	65	0.6	1.1	0.71	16
27	27	0.15	70	0.6	1.1	0.75	17
28	28	0.15	30	0.6	1.1	0.73	16
28	28	0.15	35	0.6	1.1	0.77	18
28	28	0.15	40	0.6	1.1	0.82	19
28	28	0.15	45	0.6	1.1	0.86	21
28	28	0.15	50	0.6	1.1	0.91	23
28	28	0.15	55	0.6	1.1	0.96	24
28	28	0.15	60	0.6	1.1	1.00	26
28	28	0.15	65	0.6	1.1	1.05	28
28	28	0.15	70	0.6	1.1	1.09	30
29	29	0.15	30	0.6	1.1	1.05	28
29	29	0.15	35	0.6	1.1	1.10	31
29	29	0.15	40	0.6	1.1	1.15	33
29	29	0.15	45	0.6	1.1	1.19	35
29	29	0.15	50	0.6	1.1	1.24	37
29	29	0.15	55	0.6	1.1	1.29	40
29	29	0.15	60	0.6	1.1	1.34	42
29	29	0.15	65	0.6	1.1	1.39	45
29	29	0.15	70	0.6	1.1	1.44	48

3.3 冷房設定温度、空気温度とグローブ温度と冷房熱負荷の関係

1) 冷房設定温度と室温

室温とは室空気温度のことを指し、室内に設置されたアスマン通風乾湿計や極細の熱電対などで測定される温度のことである。空調機の制御には、空調機の設置されている空間にサーミスタなどの温度センサーを取り付け、センサーの測定値が設定温度に近づくように、吹き出し温度や風量が調整される。温度センサーは壁面に取り付けられた温度コントローラに埋め込まれている場合が最も多いが、空調機のリターンダクトや吸い込み口に取り付けられている場合もある。前者の測定温度は室温分布や放射温度の影響をある程度受けると考えられるが、後者の温度は室平均空気温度にかなり近い値を示す。

図 13 にマルチパッケージ型空調機で空調され、温度センサーが吸い込み口に取り付けられている小学校において、設定温度が 28°C の場合の室空気温度と吹き出し温度の時間変化の測定結果の例を示す。空調運転開始（時刻 8:50）から 1 時間程度経過すると室温は概ね 28°C に到達している。空調設備容量が室内の冷房熱負荷に対して十分大きい場合、室温の変化は概ねこのような挙動となる。

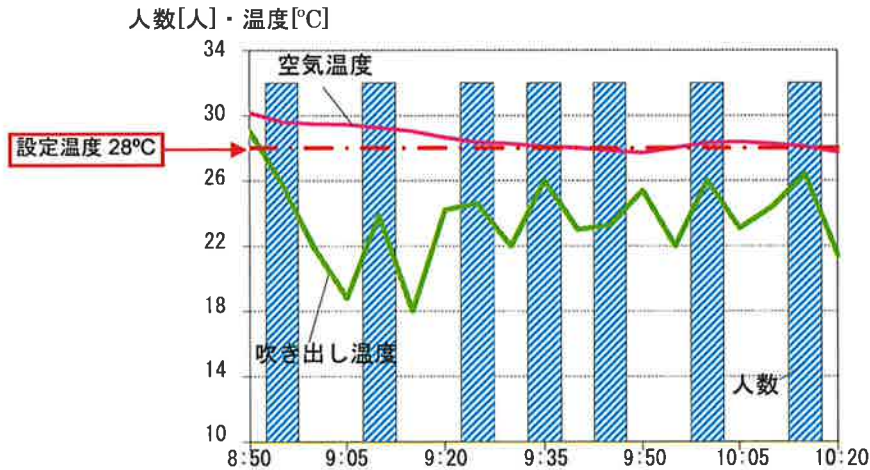
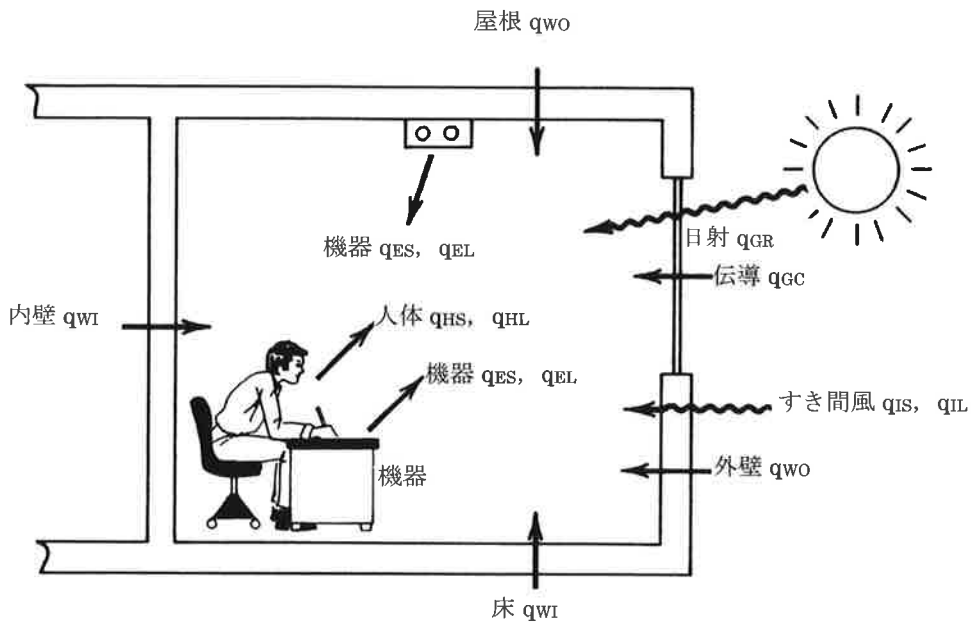


図 13 冷房時における室空気温、設定温度と吹出し温度の時間変化

2) 室温と放射温度、冷房熱負荷

冷房負荷の各要素を図 14 に示す。外壁や屋根から室に侵入する貫流熱 q_{wo} は、外気温や日射の影響により外壁表面から室内に向かって流れる熱流であり、室内表面温度が上昇して対流により室空気に、また放射により他の壁表面に向かって熱が伝達される。窓ガラスを透過する日射熱取得 q_{GR} は、室内に差し込んだ直達日射や天空日射が内壁表面を直接暖め、貫流熱同様対流と放射により、室空気と他の壁面に熱が伝わる。すき間風・換気負荷のうち、顕熱分 q_{is} は直接負荷となる。人体や機器からの負荷の顕熱分 q_{HS} 、 q_{ES} は高温の表面から対流と放射によって伝達されるもの、パソコンの冷却ファン排気のように直接負荷となるもの、照明のように放射で伝達されるものがある。これらの中で放射によって伝達された成分は内壁表面で吸収されてその温度上昇に寄与する。従って、冷房顕熱負荷のうちかなりの部分は、最終的には内壁表面温度（＝放射温度）と室温の差により対流成分として室内に放出されるため、冷房負荷が大きい室ほど放射温度は室温よりも高いと見るべきである。



内 容		顕熱	潜熱
壁体	外壁・屋根	qwo	
	内壁・床・建具	qWI	
窓ガラス	伝導	qGC	
	日射	qGR	
すき間風・換気		qIS	qIL
人体		qHS	qHL
機器（照明・OA 機器）		qES	qEL

図 14 冷房負荷を構成する各要

3) グローブ温度と室温、放射温度

在室者の温熱感覚には人体からの対流と放射による顕熱損失が影響するが、これと密接に関わるのが室温 t_a と放射温度 t_r である。これらの影響を総合的に評価するものとして、作用温度 OT があり、その定義は人体の対流熱伝達率を h_c 、放射熱伝達率 h_r とおいて次式のように表される。

$$OT = \frac{h_c t_a + h_r t_r}{h_c + h_r} \quad (1)$$

つまり、室温と放射温度の熱伝達率の重み付平均となるが、静穏な室内環境では両者は概ね等しいので、近似的に作用温度は室温と放射温度の算術平均値となる。作用温度を直接測定する方法として図 15 に示すグローブ温度計がしばしば用いられる。グローブ温度は対流と放射熱が平衡する温度であり、式(1)の熱伝達率をグローブ温度の値に置き換えたものに等しい。従って、15cm の球と人体の熱伝達率の差がグローブ温度と作用温度の差となるが、静穏な環境ではこれはあまり大きくないとされている。

4) 冷房環境における室温とグローブ温度の測定例

マルチパッケージ型空調機で冷房されている三階建て小学校の二階と三階教室において行われた室温とグローブ温度の測定結果を図 16 に示す。当該小学校は一般的な事務所とは建物形態や断熱条件が異なるが、上記の冷房負荷の放射温度への転換メカニズムは同等と考えられる。空調設定温度は 28℃であるため、室温は概ね 28℃付近で推移しているが、グローブ温度は概ね 30℃程度であり、2℃の差がある。即ち、室温が 28℃に維持されていたとしても（体感温度＝作用温度とすれば）、体感温度は 30℃ということになる。

これは放射温度が空気温度よりもかなり高いことを示した結果であるが、同じ学校の無人（冷房運転中）の二階と三階の教室の熱画像の撮影結果を図 17 に示す。机などは 30℃以下の比較的低温に保たれているが、窓面や天井面（特に三階）の温度は 34℃程度を示しており、このような高温の内壁表面温度が放射温度の上昇を招いていることが分かる。

図 18 に二階、三階教室の午前、午後における室温とグローブ温度測定結果の平均値を示す。午前中は室温とグローブ温度の温度差は 1℃程度であるが、午後になるとその差は 2℃を超えている。外気温の上昇や日射による冷房熱負荷の増加が、放射温度の上昇を招いたことによると推定される。このように室温が同じ条件においても、負荷が大きい条件では、室温と体感温度の乖離が大きくなることを踏まえて、空調機の設定温度を調整すべきである。

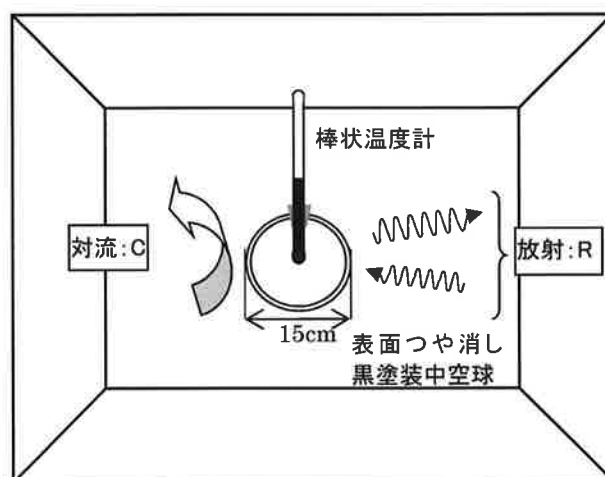


図 15 グローブ温度

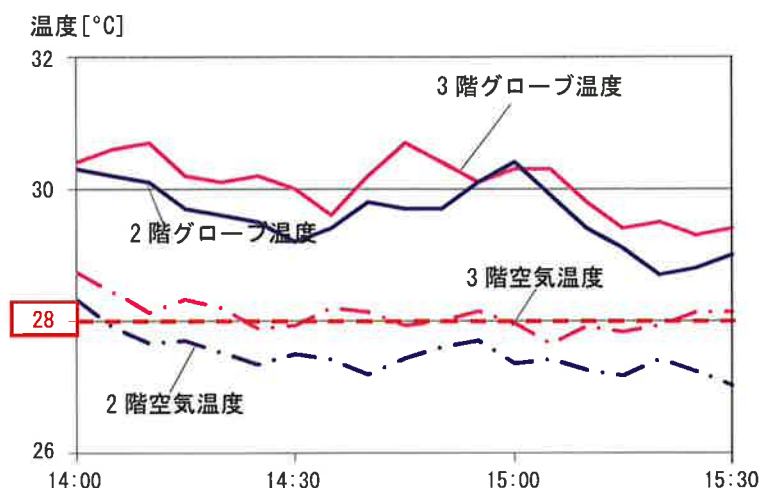
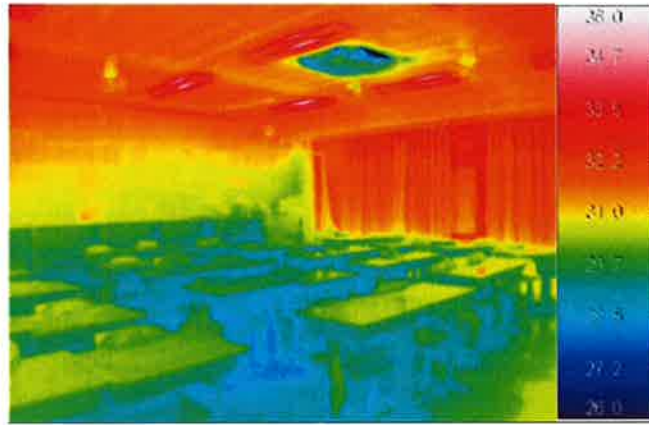
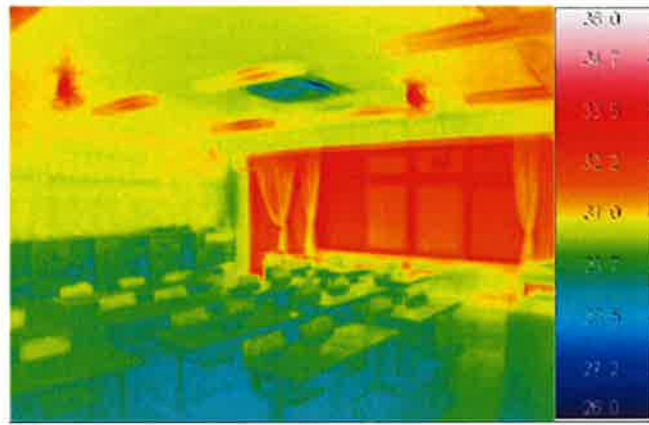


図 16 冷房時におけるグローブ温度と空気温度の時系列変化



3階教室



2階教室

図 17 2・3階教室（冷房中）の熱画像

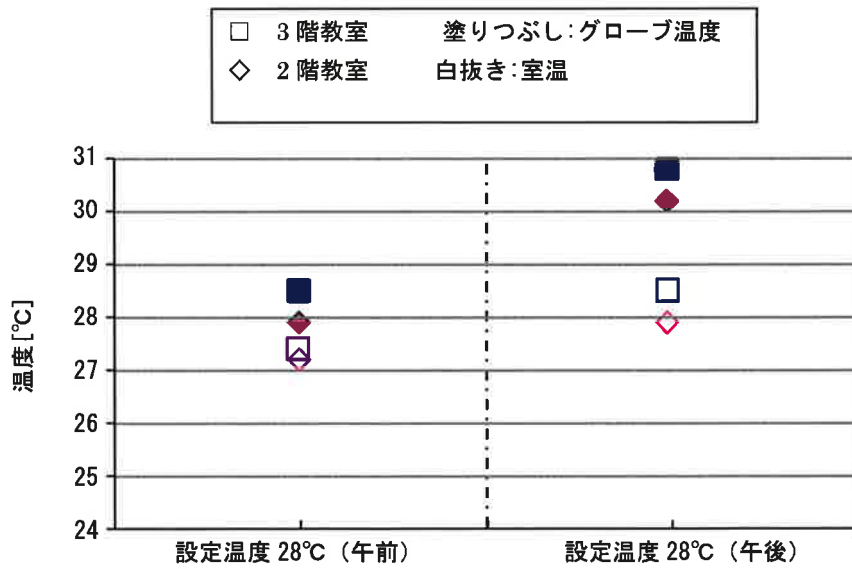


図 18 クラス別平均室温と平均グローブ温度

3.4 快適性と空調に関する苦情

1) ロバスト的温熱環境の重要性

オフィスで苦情（クレーム）が発生する状況を詳しく捕捉するために、「オストラコン」という装置を用いて執務者の温熱環境的非受容申告の収集²⁾を行ったところ、興味深い結果を得た。図 19 は執務者が温熱環境を受容できないと申告した瞬間の温熱環境を示す。オフィスの執務者は一般にいわれている快適範囲内においてもクレームを発している。これには男女の着衣量の違いやペリメータの不均一な温熱環境、吹出口からのドラフトによる温冷感の不均一、温熱環境履歴の個人差などの理由が考えられる。ここから推察されることは、快適範囲ぎりぎりの環境ではこのような微少擾乱がトリガーとなって不満が引き起こされるということである。室内温熱環境には多少のロバスト性（想定とは異なる条件においても環境が概ね維持されること）が必要といえる。

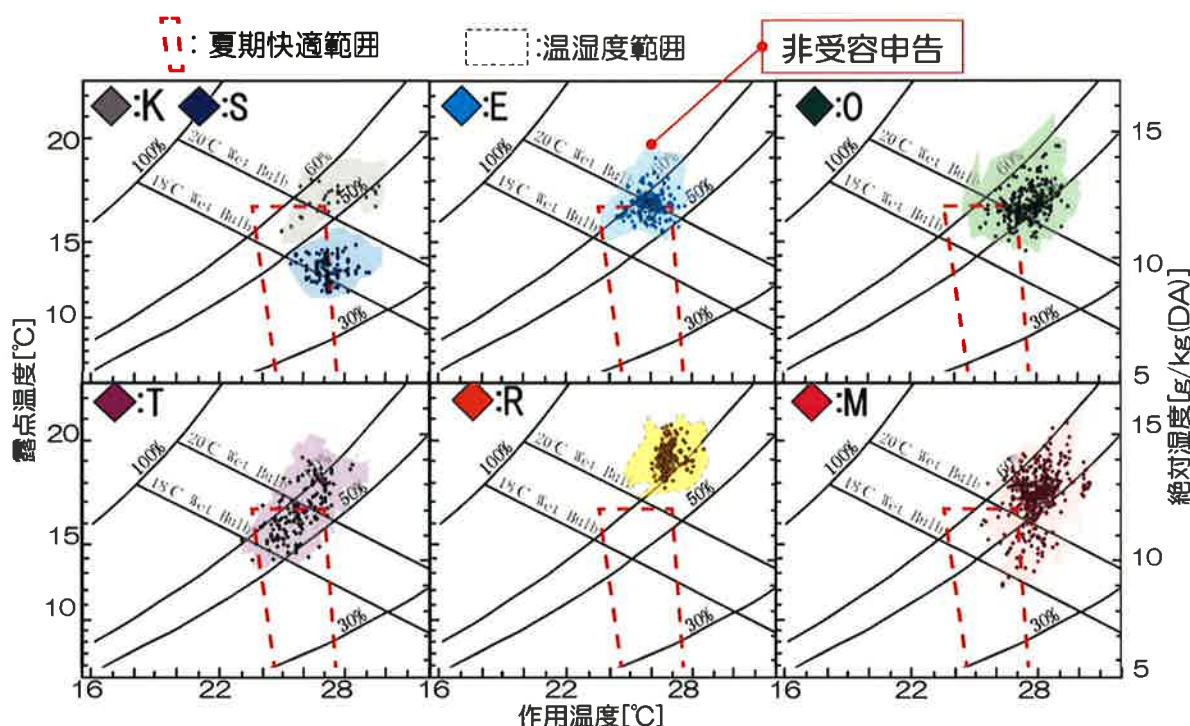


図 19 様々なオフィスにおける夏季非受容申告時の室内環境

2) 空調クレームの発生状況

積極的な快適は「快感」とでも呼ぶべき感覚で、これは「快適」とは区別される。環境工学における「快適」とは「不快でないこと」であるが、最近では知的生産性をその指標とする考え方もある。実務においては、快適環境の実現は「不快の排除」によってもたらされるものと一般に認識されている。

空調設備の黎明期には、従来不可能だった室内気候の能動的な調整が可能となる技術として、恐らく空調は畏敬と感謝の念を持って受け入れられたと思われる。しかし、時代が降って空調がごく当たり前の技術になった現在、在室者は厳しいクレーム（非受容申告及び改善要求）を躊躇なく発する。

このように、空調の実務において「快適」という肯定側の評価はアンケートのように問われ

た場合には出現するものの、執務者が自発的に発することはほとんどなく、通常はクレームという否定的意見のみがフィードバックされる。

図 20 は標準的な中央式空調を備えた某オフィスビルにおける空調クレームの調査結果³⁾である。クレームの発生頻度を在籍者一人あたりに換算すると、平均 0.13 回/人・年にあたる。その発信者の内訳は圧倒的に女性が多く、男性の 12 倍である。女性からのクレームには上職者が申告をさせているケースもあって鵜呑みには出来ないが、男性主体の環境設定がなされていたと推察できる。このオフィスでは比較的均一で一定の温湿度になるように空調が管理されていたが、年間にわたって「暑い」「寒い」というクレームが発生していた。執務をするために会社が提供する「場」として、室内の温熱環境や空気環境にリスペクトが感じられなければ、空調は真っ先にクレームの標的となる。

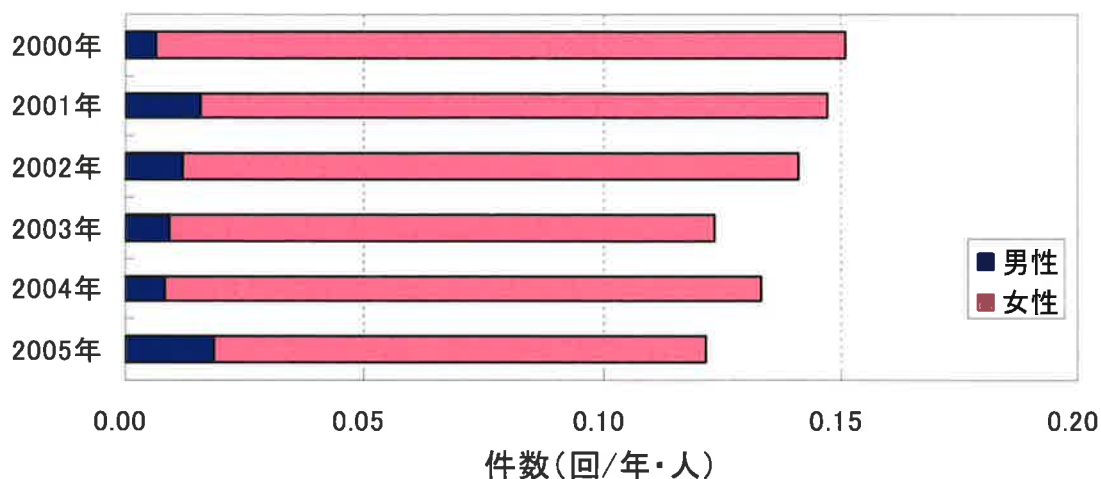


図 20 某オフィスにおける空調クレームの発生数

3) パッケージ空調機のリモコン操作

最近マルチパッケージ型空調システムによる空調が、中小規模の市場を席卷している。空調システムを高度な制御を備えた中央式から簡素なマルチに更新したところ、空調に関するクレームが激減したという話を聞く。そこで執務者がどのようにエアコンのリモコン室温設定を操作しているかについて、あるオフィスで調査⁴⁾した結果を図 21、22 に示す。図 21 は室温設定の変更回数を示す。概ね、一日でリモコンごとに 6~7 回の昇温操作と、同様の下降操作を行っている。また、図 22 は一回の操作で何度の変更を行ったかをまとめたものである。これを見ると±1~2℃程度の穏やかな設定変更ではなく、±5℃の急激な設定変更が頻発していた。

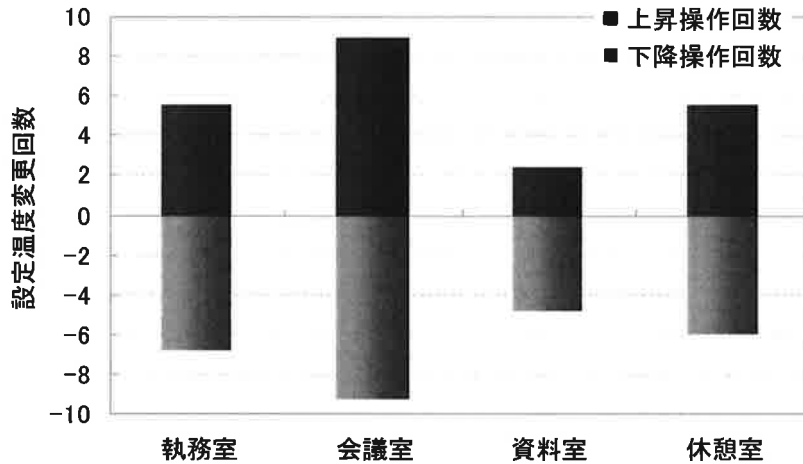


図 21 某オフィスにおけるマルチのリモコン室温設定変更回数（一日あたり）

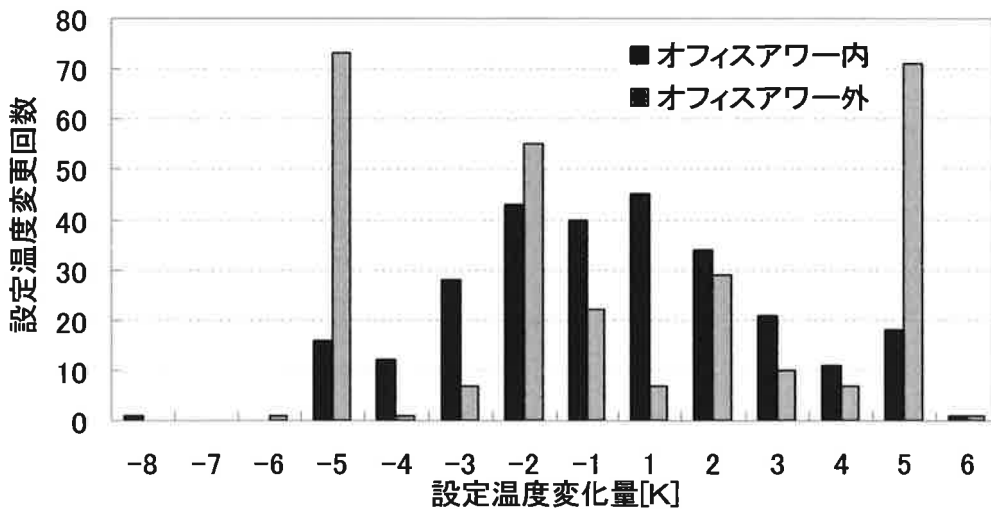


図 22 某オフィスにおけるマルチの室温設定変化量（3週間）

4) 環境選択権と自己効力感

きちんと空調されたオフィスでも暑い寒いに関するクレームは発生するが、バカンスで炎天下のビーチにいる人々で暑すぎるなどと不平を言う人はいない。前者は会社から与えられた環境、後者は自らが自由意志に基づいて獲得した環境である。これは極端な例だが、同じ物理環境下においても与えられた環境と獲得した環境では執務者が感じる意味合いが異なる。

例えば、執務の効率と省エネルギーなどを勘案して会社が提供した室内温熱環境下では執務者はクレームを発し、同一の環境でも前述の事例のように執務者がリモコン操作で調節した結果獲得した環境では、クレームを言わない。前者では執務者に環境選択権はなく、後者には付与されている、というだけの違いであるが、これが空調の最も厳しい評価であるクレームを左右する。

自己効力感とは、行動した結果を確信する能力を指す。扇風機の風もやみくもに他人に当てられると腹が立つが、自分で選択した結果であれば強風でも受容できる。例えば、「団扇であおぐと涼しく感じる」という事例では、団扇を動かす→風が起こる→体表面における対流熱伝達が促進される→涼しく感じる、というシーケンスが経験によって確信となり、自己効力感が発現する。エアコンのリモコンも同様で、設定温度を下げると間もなく涼しくなるという確信が、

設定を変更する人に自己効力感を発現させる。自己効力感がある場合、人はその結果を受容し、クレームの発生は少ない。

【参考文献】

- 1) 西原 直枝、羽田 正沖、田辺 新一、夏季冷房 28℃設定オフィスにおける執務者の着衣量および主観申告調査、日本家政学会誌 61(3), pp.169-175, 2010
- 2) 市川、鶴飼、鈴木、野部：温熱環境の受容に関する研究 第2報：オストラコンによる室内温熱環境と非受容申告に関する調査、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、Vol.10、pp.61-64、2013
- 3) 恩賀、岩佐、野部：室内温熱環境に係わる環境変更要求の発生状況に関する調査、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.1215-1218、2007
- 4) 吉澤、野部、水守：マルチユニット方式室内ユニットのリモコン操作状況に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1081-1082、2007

4. 室内環境とエネルギー

4.1 電力需給の変化

夏の電力需給逼迫に向けて 2011 年 4 月 8 日政府は見通しを発表した。この夏の電力需要予測 5500 万 kW に対して 1000 万 kW 不足すると公表した。その後、需給ギャップはかなり改善したが、夏季に産業、業務、家庭に 15%のピーク電力削減を求めた¹⁾。2010 年の最大値 6000 万 kW の内訳を見るとそれぞれの分野は 1700 万 kW、2500 万 kW、1800 万 kW 程度になる。今までの省エネでは総量を削減すること、すなわち「kWh (kW×時間)」を少なくすることに注視していたが、今回はピークの「kW」低減に大きな意味がある。しかし、報道などでピーク、ピークと言われると突出した部分があるように思われるが、現在の日本の電気エネルギー消費は午前 9 時ぐらいから午後 9 時ぐらいまでだらだらと山が続く状態である (図 23)。例えば、住宅では午後 9 時に最大となる。その時の約 40%がエアコンによる。また、オフィスではピークの午後 2 時では約 50%が空調用途である。もし、これが止められてしまったら、日射遮蔽のない住宅、ガラスの箱の建築はサウナのような状態になってしまう。

結果として東京電力管内で 18% の節電が実際に行われたのは驚異的であった。日本のオフィスの省エネは乾いた雑巾のようだと言われていたが、15%を越える節電が出来てしまったのである。しかし、生産性を低下させる「我慢の節電」は長続きしない²⁾³⁾⁴⁾。

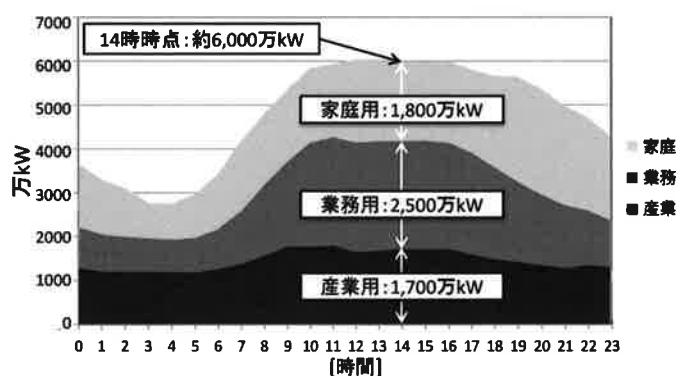


図 23 2010 年 7 月 23 日 (ピーク日) のエネルギー消費量の内訳

4.2 空調エネルギーの使用割合

一般に、夏季に室温を1℃緩和することで、冷房負荷を約10%削減できると言われている。図24に、地域冷暖房を利用するオフィスで室内設定温度を26℃（2004年度（平成16年度））から28℃（2005年度（平成17年度））に変更した事例を示す⁵⁾。受入冷水熱量と外気エンタルピの関係性を回帰直線式からエネルギー削減量を試算すると、室内設定温度28℃時の受入冷熱量は26℃時の場合に比べ約11%削減されたものと推定している。本事例は地域冷暖房に関するものであるが、部分負荷時に効率が悪くなる熱源システムにおいては、必ずしも室温緩和が省エネルギーに寄与する訳ではない点に注意が必要である。

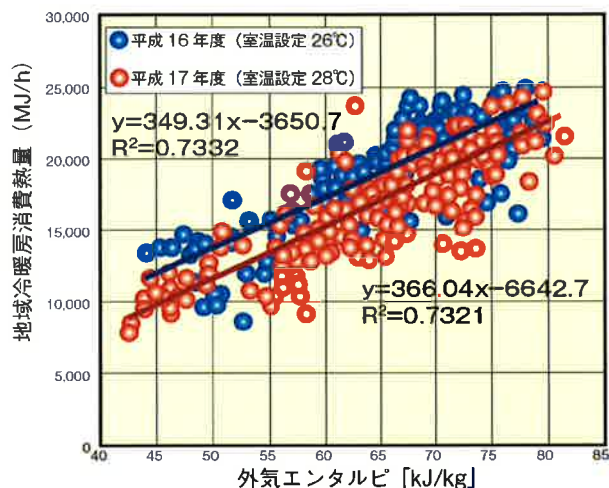


図24 室温設定を2℃上げることによる消費熱量の変化⁵⁾

延床面積7,700㎡の地上7階建ての中規模オフィスで、電気熱源設備を空調に使用する建物を対象として、HASPを用いて年間空調システムシミュレーションを実施した結果を図25に示す⁶⁾。省エネ対策のレベルで3段階設定している。26℃設計オフィスのため、設定温度を26℃から24℃と厳しくした場合、空調機容量の増強を伴い、5～8%電力消費量が増加したが、28℃と緩めても、この場合はわずかな削減となった。部分負荷効率などの問題が影響していると考えられる。

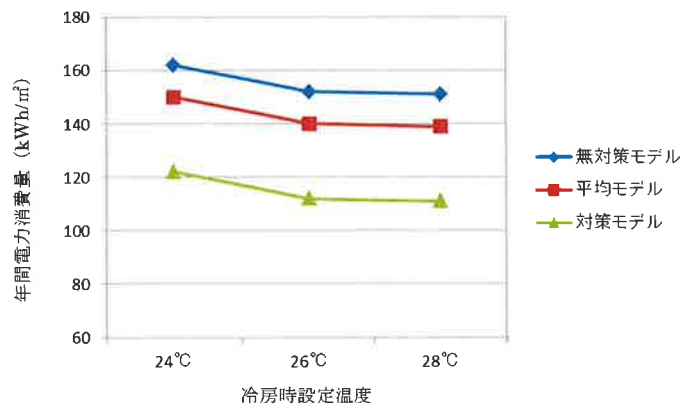


図25 標準的なオフィスビルの夏季冷房時の設定温度の違いによる年間電力消費量⁶⁾

ピーク時の削減効果に関しても、検討が必要となる。冷房時の空調負荷としては、外皮負荷、外気処理負荷、照明・機器・人体などの内部発熱負荷がある。内部負荷は室内設定温度の差に

無関係であり、室内設定温度により変化してくるのは外皮負荷の中の貫流熱負荷、外気処理負荷となる。建物の負荷特性にもよるが、貫流熱負荷、外気処理負荷は、夏季ピーク時で負荷総量の3割程度となる。

夏季ピーク時の外気温度を35℃とすると、26℃から28℃に設定温度緩和して(35℃→26℃の9度差から35℃→26℃の7度差で約2割減)、電気式熱源のオフィスで、概ね6%の熱源・空調動力削減、また最大電力に占める割合は約3%削減に相当する。

しかしながら、ガス式熱源など他の熱源を利用している場合は、電力需要削減の効果が薄くなる。また、空調負荷の半分以上を占めている照明機器の消費電力削減は、機器そのものの電力消費削減の他、機器の発熱負荷削減にもつながり、設定温度緩和以上の効果が期待できる。

これらは空調負荷の変化量の実績であり、空調によるエネルギー消費量の変化でないところに注意が必要となる。表8に夏季の空調によるエネルギー消費量内訳を示す。中央熱源方式では概ね半分が空調機のファン動力、ポンプ動力である。ファンやポンプが定流量で動いている場合は、室内設定温度緩和を行っても、この部分のエネルギー消費削減にはつながらない。また熱源に関しても、部分負荷効率などの特性により、冷房負荷削減が、そのままエネルギー消費削減につながる訳ではない。個別熱源方式に関しても、同様である。このため、エネルギー消費量変化はそれほど期待できない場合も多い。負荷削減の効果を上げるために、中央熱源であれば、熱源容量の最適化、熱源の台数制御、ファン・ポンプの変流量制御などの対策が欠かせない。個別熱源に関しても、局所吹出しや、室内機の千鳥配置などの工夫が試みられている。

表8 標準的なオフィスの夏季最大電力に対する冷房負荷原因別内訳（電気式熱源の場合）⁶⁾

	夏季最大電力に占める割合	熱源・空調動力に占める割合
①外皮負荷（日射・貫流熱）	13%	26%
②外気処理負荷	10%	20%
③内部負荷：照明負荷	13%	25%
④内部負荷：機器負荷	9%	17%
⑤内部負荷：人体負荷	7%	13%

4.3 節電オフィスにおける現場実測

1) 節電意識

2011年に6棟のオフィスビルを調査した結果を紹介しよう^{7), 8), 9)}。図26は節電意識に関するオフィスワーカーの意識である。節電前後における意識の変化を聞いたものである。実に96%の人が節電を意識しているか、意識が高まったと答えている。日本人の意識は非常に高いと考えて良いだろう。しかし、節電対策された自社オフィスに関してどのように思うかと質問したところ72%の人が非常あるいはやや不便・不都合だと感じていると回答している。節電意識は高いもののやはり不便・不都合はあるということである。

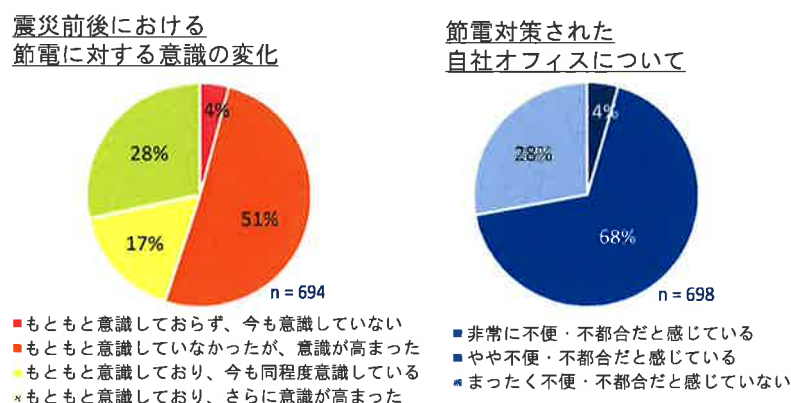


図26 節電に関するオフィスワーカーの意識⁹⁾

2) 室内環境満足度

様々なオフィスで机上面照度、室温、換気量を変えて1,000人を越えるオフィスワーカーに満足度を尋ねる社会実験を行った。このような大規模な実験は震災直後しか出来ない測定であった。

図27に光・温熱・空気質環境満足度を示す。環境測定を実施したすべてのフロアにおける、各物理環境の執務時間中の平均測定値と各環境満足度の相関関係を環境毎に分析した。満足度については、「不満：-2、やや不満：-1、どちらでもない：0、やや満足：+1、満足：+2」として、回答数を重み付けして平均値を算出した。

まず、光満足度をみると、300lx ~ 700lx までほとんど満足度が変化していないことがわかる。震災前の机上面照度750lxは2011年以降ほとんどみられなくなった。属性別詳細に分析すると、老眼になっている年齢層はやはり300lxでは満足度は低くなっていた。しかし、タスクライトを利用している人はある程度の満足度が確保されていた。

一方、室温に関しては室温27℃を越えると急激に不満足者が増加することがわかる。これまでの実験室における被験者実験でも27℃と28℃の間に壁があることには気がついてしたが、実際のオフィスにおいてこれが観察された。裸で寝ているときの快適温度は29℃である。社会的にオフィスでは裸でいることは許されないし、活動量も住宅でくつろいでいる時よりも高いので、それから考えると28℃ではなかなか難しいことは想像できるだろう。

換気量の削減に関しても調査した。図より室内CO₂濃度が高くなると満足度が低下していることがわかる。さらに、CO₂濃度1000ppm未満と1000ppm以上にグループ分けをし、室内温度と空気質満足度の関係を検討した結果を図28に示す。空気質満足度は室内温度と有意な相関があり(1000ppm未満R²=0.62, 1000ppm以上R²=0.83)、室内温度の上昇とともに空気質満足度が低下することが明らかになった。さらに、1000ppm未満の場合は27℃付近から不満側となるのに対し、1000ppm以上では26℃においても不満側であった。このことから、温度の上昇に伴う知覚空気質の悪化により空気質満足度は低下する傾向があり、1000ppm以上では空気質環境自体の悪化により不満が増加する傾向が示された。外気濃度のCO₂濃度が高くなっている

ので、1,000ppm の基準を緩和しようという動きがあるが、あまり大幅な緩和はやはり難しいかも知れない。室内空気質に関する満足度には、CO₂ 濃度だけでなく室温が大きな関係を持つことも実測から判明した。

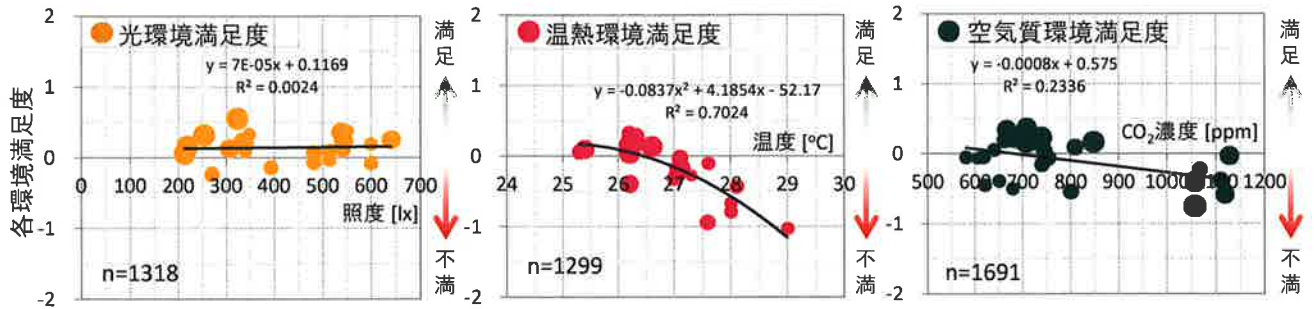


図 27 光・温熱・空気質満足度⁹⁾

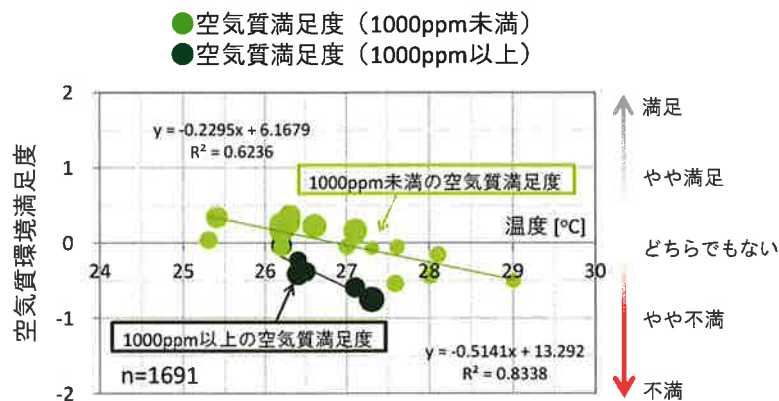


図 28 空気温度と空気質環境満足度⁹⁾

3) 消費電力量

調査を行ったオフィスビルのうちの 1 棟において、節電効果を把握するために調査期間中の消費電力量を解析した。このビルの空調方式は、「個別分散パッケージ方式、タスク/アンビエント空調」である。

図 29 に設定照度別の全天日射量と照明消費電力量の相関を示す。調査期間中の執務時間中の 1 時間毎の照明消費電力量と、その時間の全天日射量の関係を調べた。750lx 設定に関しては前年の夏季のデータを使用した。グラフより、300lx 設定の場合には全天日射量が多いほど照明消費電力量が減少していることがわかる。また、設定照度を 750lx から 500lx にすると 4.2W/m²、750lx から 300lx にすると 6.3W/m² の照明消費電力量の削減が見込まれるという結果となった。

図 30 に外気と室内のエンタルピ差と空調消費電力量の相関を示す。調査期間中の設定温度別に、執務時間中の 1 時間毎の空調消費電力量をみた。なお、照明の発熱分は 300lx に統一し、27°C の空調消費電力量の平均値は外気温が極端に低かった期間を除外して算出した。この結果、外気導入量を半減させて設定温度を 28°C にしても、26°C 設定に比較して 2.3W/m² の消費電力量しか改善されなかった。26°C と 27°C の違いも、今回のシステムでは僅かであった。また 27°C 設定のグラフをみると、設定温度のみならず、外気温が空調負荷に与える影響が大きいことが読み取れた。

温度を上げるよりも照度を下げる方が、不満足者率が小さく電力削減率が大きいたことがわかった。

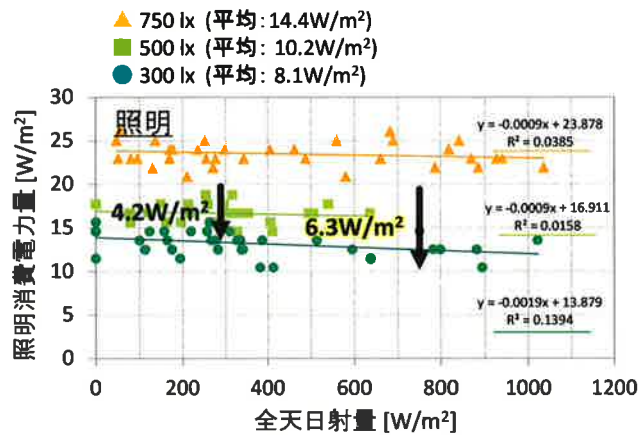


図 29 設定照度別の全天日射量と照明消費電力量の相関⁹⁾

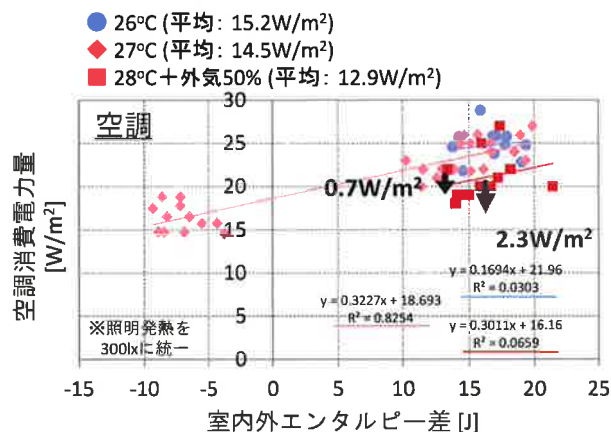


図 30 外気と室内のエンタルピー差と空調消費電力量の相関⁹⁾

結果として震災後のオフィスでは照明電力の削減と OA 機器などの内部負荷の削減が広く行われた。これらは、電力消費量を低減させるだけではなく、冷房用消費エネルギーも低減させることになる。非常に大雑把な知見であるが、照明電力量消費量は震災前が 20W/m^2 程度であったのが LED 化された最新鋭オフィスでは 5W/m^2 程度にまで激減している。また、PC のノートパソコン化やコピー、プリンターの省エネ制御ソフトなどで 20W/m^2 程度から 10W/m^2 ぐらいまで半減している。内部負荷の減少で冬季に寒くなったオフィスも出現しており、建築外皮の性能が重要になっている。内部負荷が小さくなることによって、放射空調、自然換気、昼光利用などの機会は増加するだろう。一方、ERR などの総合指標はこれまで照明の改善で得点を稼いできたが、新しい省エネ法ではこの部分で大幅な得点を得ることが難しくなっていくことが予想される。

【参考文献】

- 1) 経済産業省 HP : <http://www.meti.go.jp/earthquake/shiyoseigen/index.html>, 2011
- 2) 羽田ら : 温熱環境と換気量が知的生産性に与える影響に関する被験者実験, 日本建築学会環境系論文集, Vol.74, No.638, p507-515, 2009. 4
- 3) O. Seppänen, W.J. Fisk and Q.H. Lei : Effect of temperature on task performance in office environment, Proceedings of Cold Climate HVAC conference, Moscow, 2006. 5
- 4) S. Tanabe, K. Kobayashi, O. Kiyota, N. Nishihara and M. Haneda : The effect of indoor thermal environment on productivity by a year-long survey of a call centre, Intelligent Buildings International, Vol.1, No.3, p.184-194, 2009Fisk, W., Rosenfeld, A. : Estimates of improved productivity health from better indoor environments, Indoor Air,7, pp.158-172, 1997
- 5) 省エネセンター 省エネチューニングガイドブック H18.3
- 6) 青柳光広, 柳原隆司, 伊香賀俊治, 山村真司, 近本智行, 宮路知明 : 快適性が電力需要に与える影響に関する研究(その1) 研究の概要および意義, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1245-1248, 1995年10月
- 7) 田辺新一, 對馬聖菜, 岩橋優子, 西原直枝, 平岡雅哉, 弘本真一, 菰田英晴, 田淵誠一, 東日本大震災後の節電環境下における夏季オフィスの快適性・知的生産性・エネルギー消費量(第1報) 節電意識と物理環境測定結果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2012
- 8) 對馬聖菜, 田辺新一, 岩橋優子, 西原直枝, 平岡雅哉, 弘本真一, 菰田英晴, 田淵誠一, 東日本大震災後の節電環境下における夏季オフィスの快適性・知的生産性・エネルギー消費量(第2報) 各環境満足度とエネルギー消費量, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2012
- 9) Shin-ichi Tanabe, Yuko Iwahashi, Sayana Tsushima, Naoe Nishihara, Thermal comfort and productivity in offices under mandatory electricity savings, after the Great East Japan earthquake, Architectural Science Review, pp.1-10, 2013

5. 先駆的事例

過去 10 年間に空気調和・衛生工学会を受賞した物件の中で、28℃の室温環境下でも快適性を維持することが可能である高度な空調設備システムを備えたオフィスの事例として以下のような建築がある。詳細は学会誌、論文集などに紹介されている。放射冷暖房、パーソナル空調、気流付加空調、デシカント空調など室温以外の温熱環境要素を制御して省エネルギー性や快適性を高めるシステムも提案されている。

- ・ 関電ビルディング
- ・ マブチモーター本社
- ・ 大成札幌ビル
- ・ 鹿島赤坂別館
- ・ 大林組技術研究所本館「テクノステーション」

また、自然換気、天井扇を利用したユニークな事例を紹介する。堺ガスビル（2003 年竣工）は、通常のアパートに加えて階段室を利用した自然換気とシーリングファンを段階的に併用したハイブリッド空調により、快適性を維持しながら省エネルギーを図った先進的なオフィスビル¹⁾である。シーリングファンを口の字型照明器具と一体的にレイアウトしている点にも特徴がある²⁾（図 31）。

図 32 に従来型空調と 28℃空調の概念比較を示す。夏期において、室内の設定温度を 28℃・50%RH（相対湿度）とするかわりに、シーリングファンを下向きに運転するとともに、着衣をやや薄着にすることで、在室者の快適性を維持しようとしている。なお、外気温度が 28℃以下で、エンタルピが室内空気以下の場合には、自然換気も併用される。図 33 は、真夏のある一日での同建物内事務室での気流の快適性についてアンケートを行った結果であるが、概ね快適と申告されており、シーリングファンによって「我慢をしない省エネ」が達成できていると考えられよう。シーリングファンを用いて気流を生じさせることで、室温 28℃でも快適な室内を実現することができるが、そのためには、湿度の管理、日射遮蔽による放射熱の抑制、気流コントロールの自由さなど周到な準備が注意である。

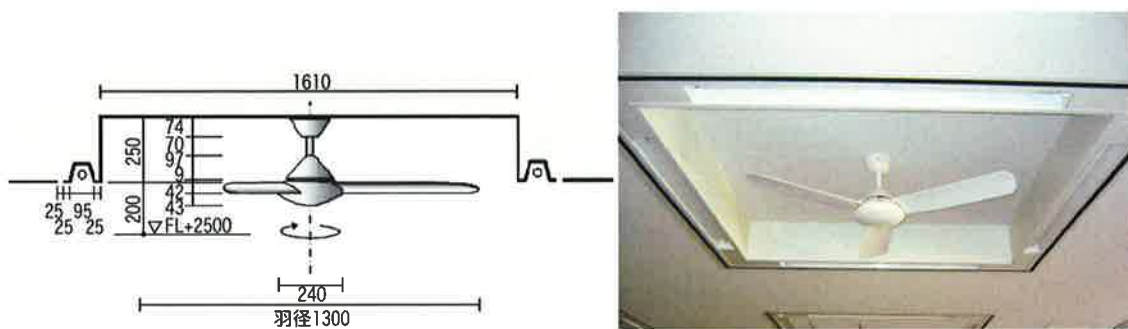


図 31 シーリングファンの断面と写真²⁾

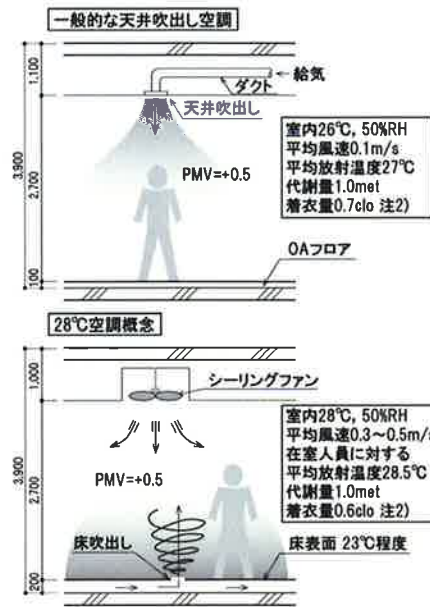


図 32 夏期事務室内での従来型空調（上）とシーリングファンを用いた 28℃空調（下）²⁾

※28℃空調では長袖シャツ着用による一般的夏の着衣量として 0.6clo

26℃空調時はカーディガン等着用者の一部混在を想定し 0.7clo

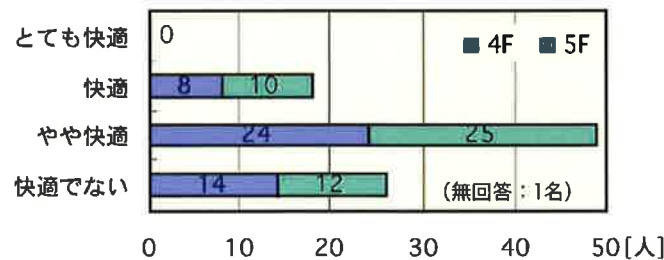


図 33 シーリングファン気流の快適性（2004年7月30日）³⁾

【参考文献】

- 1) 水出喜太郎, 石野久彌, 郡公子, 永田明寛, 長井達夫, 大高一博, 大原千幸: 「自然換気・シーリングファンを併用した空調換気システムの制御手法と性能評価に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集, 日本建築学会環境系論文集, 第 604 号, pp.69-76, 2006 年 6 月
- 2) 水出喜太郎, 石野久彌, 郡公子, 永田明寛, 長井達夫, 大高一博, 大原千幸: 「シーリングファン併用空調システムの計画手法と性能検証 自然換気・シーリングファンを併用した空調換気システムの制御手法と性能評価に関する研究 第 2 報」, 日本建築学会環境系論文集, 日本建築学会環境系論文集, 第 620 号, pp.59-66, 2007 年 10 月

温熱環境委員会（重点研究）

委員一覧

委員長 幹事	田辺 新一	（早稲田大学）	
	中野 淳太	（東海大学）	
	秋元 孝之	（芝浦工業大学）	
	大澤 元毅	（国立保健医療科学院）	
	金 勲	（国立保健医療科学院）	
	倉渕 隆	（東京理科大学）	
	近本 智行	（立命館大学）	
	都築 和代	（産業技術総合研究所）	
	西原 直枝	（聖心女子大学）	
	野部 達夫	（工学院大学）	
	山中 俊夫	（大阪大学）	
	オブザーバ	對馬 聖菜	（早稲田大学）

（敬称略）