

環境調和型オフィスビル設計のための熱負荷推定モデルの研究

指導教官 石谷 久 教授・松橋 隆治 助教授

東京大学工学部地球システム工学科 開発工学研究室所属 井原 智彦*

平成 10 年 2 月 20 日

1 序論

1.1 研究の背景

近年、世界的に、CO₂ 排出量が増大しつつある。CO₂ 排出量の増大は、地球規模の気候変動に結びつくと言われており、昨年の国際会議で、日本は温室効果ガス排出量の 6%削減（1990 年比）を義務づけられた。CO₂ 排出を削減する方策はいろいろあるが、省エネルギーもその 1 つである。我が国では近年、産業部門の省エネルギーは進んでいるが、民生・運輸両部門の省エネルギーは進んでいない。

1.2 研究の目的

そこで、本論文では、データを詳細に測定している国立環境研究所エコオフィス区域を例に、応答係数法を用いた動的熱負荷計算および電力需給計算を行い、電力・エネルギー自給率の向上策について検討を行った。なお、1996 年のデータを用いた。

2 動的熱負荷計算モデル

2.1 概略

応答係数法とは、壁体への熱流を、単位時間ごとの三角波の合計として捉え、壁体に流し込んでいく、そして、壁体を熱のプールと捉え、時間遅れをもって、室内や外気に熱流を吐き出していく、といった考え方で、熱移動を計算する方法である。

本研究では、文献 [16] に記載の理論を改良して用い、プログラムを作成した。

2.2 応答係数

単位時間ごとの外気温度のサンプル値を「三角温度波」の形にして補正する。外気側で三角波形の温度変動が起こったとき、壁体への熱流が発生する。壁

体は通常大きな熱容量を持つので、熱は壁体内で一時的に蓄えられて対流し、時間遅れをもって屋内に流入する。要するに、壁体に、単位三角波温度（励振）が作用した結果、一連の三角波形で表される熱流（応答）が発生する。

各三角の頂点の高さを左から順番に、 $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots$ とすると、一般に、 ϕ_j は励振の時点から $j\Delta t$ 時間後に起きている応答の大きさを表しており、これを応答係数と呼ぶ。すなわち、応答係数とは、単位三角波励振による熱流応答係数時系列なのである。なお、応答係数の理論は、Fourier の熱伝導式より導かれ、応答係数の値は、壁体に含まれる各壁材の容積比熱および熱抵抗によって決まる。

2.3 たたみ込み積分

以上で述べた外界条件の三角波列と応答係数を組み合わせることによって、壁体貫流熱を計算できる。応答係数を定義したときの基本励振波は $1[^\circ\text{C}]$ であるので、励振温度が θ である時の応答時系列は、応答係数を θ 倍した $\theta\phi_j$ となる。また、ある時刻 $t = n\Delta t$ においては、その時点の励振 θ_n による応答 $\theta_n\phi_0$ 、1 時点前の励振 θ_{n-1} による応答 $\theta_{n-1}\phi_1$ 、……、という過去の励振によって生じている全ての応答を加え合わせたものが、貫流熱量となる。すなわち、時点 n における貫流熱 q_n は、次式となる。

$$q_n = \theta_n\phi_0 + \theta_{n-1}\phi_1 + \dots = \sum_{j=1}^{\infty} \theta_{n-j}\phi_j \quad (2.1)$$

この式が、応答係数法で任意に変動する励振に対して応答熱量を計算する基本式であって、この計算方法は、たたみ込み積分と呼ばれている。

2.4 応答係数の種類

壁体は両側で空気に接しているため、そのどちら側の空気温度が励振されるか、また応答として壁のどの場所での熱流を捉えるかによって、いろいろな種類の応答係数が考えられる。

*E-mail ihara@globalenv.t.u-tokyo.ac.jp

外側の空気温度で励振され、内側の壁表面に生じる熱流を応答とするものを貫流応答係数 $\phi_{T,j}$ という。

一方、室内側空気温度が三角波で励振されたときに、壁の内側表面に生じる熱流の応答を吸熱応答と呼ぶ。熱流は、始めは内部に向かうが、壁体の温度が上昇し、一方で、室温は 0 に戻るため、熱の逆流が始まる。

2.5 熱負荷

前述した貫流熱（熱取得）は、例えば放射熱の場合は、対向壁の温度を上げて、直接、室温を上昇させるわけではなく、時間遅れを持って室温を上昇させる。熱取得が最終的に冷房負荷に変わるまでを表現するたたみ込み係数は重み係数と呼ばれ、次式により熱取得から冷房負荷を計算することができる。

$$L_n = \sum_{j=0}^{\infty} G_{n-j} \varphi_j \quad (2.2)$$

ここで、

L_n : 時点 n における冷房負荷 [kcal/h]

G_n : 時点 n における熱取得 [kcal/h]

φ_j : 重み係数

重み係数は、一般に近似値を使用することが多く、本研究でも文献 [16] の値をそのまま採用した。

熱負荷としては、貫流熱負荷 $L_{T,n}$ 、透過日射熱負荷 $L_{G,n}$ 、隙間風の熱負荷 $L_{I,n}$ 、照明による熱負荷 $L_{L,n}$ 、人体による熱負荷 $L_{H,n}$ 、器具発熱による熱負荷 $L_{A,n}$ 、換気による熱負荷 $L_{V,n}$ 、給湯による熱負荷 $L_{W,n}$ を考慮した。

2.6 除去熱量

冷房負荷に対し、除去熱量とは、空調装置が実際に室内空気から取り去る、あるいは、取り去らなければならない熱量のことである。ここでは、除去熱量の性格を踏まえて、全熱交換機・加湿器の性能も除去熱量として扱うことにした。つまり、全熱交換機による除去熱量 $E_{E,n}$ 、加湿器による除去熱量 $E_{H,n}$ 、空調系統による除去熱量 $E_{A,n}$ の和を除去熱量とする。なお、空調系除去熱量は、モデルの検証時は出入口温度差と流量から求めた。シミュレーション時は、これを未知数とした。

2.7 蓄熱負荷

室の吸熱応答係数 ϕ_R [kcal/h $^{\circ}$ C] とは、室を構成している全部位について、その吸熱応答係数に面積をかけて合計したものである。

ところで、ある時刻に、冷房負荷 L_n が発生したが、空調装置が停止していて、熱が全く除去されないとなると、空気に流れ込んだ熱 L_n によって、室温の基準値から、 $\Delta\theta_{R,n}$ だけ変位が生じる。つまり、室温変位 $\Delta\theta_{R,n}$ によって、室を構成する全ての部位に吸熱応答が発生し、その吸熱量の合計が、ちょうど L_n と同じ大きさだけ、変位が生じると考えられる。この考え方を演繹させると、追加的な流入熱（蓄熱負荷）は、次式で表せる。

$$L_{S,n} = - \sum_{j=1}^{\infty} \Delta\theta_{R,n-j} \phi_{R,j} \quad (2.3)$$

2.8 室温

そして、時点 n における室温変位 $\Delta\theta_{R,n}$ は、次式によって計算される。

$$\Delta\theta_{R,n} = \frac{L_n(\theta_{R,n}) + L_{S,n}(\theta_{R,n}) - E_n(\theta_{R,n})}{\phi_{R,0}} \quad (2.4)$$

しかし、上式は、両辺に $\theta_{R,n}$ を含んでいるので、すぐには解けない。そこで、 $\theta_{R,n}$ についての収束計算を行い、 $\Delta\theta_{R,n} = 0$ となった時点で計算をやめ、その時点の温度を時点 n での室温とした。なお、シミュレーション時は、逆に室温から除去熱量を算出した。

3 電力・エネルギー需給計算モデル

3.1 概略

電力計算は、本論文では、ある程度は単純に扱えるものと判断して、単純な回帰式を利用して求めた。すなわち、太陽電池は発電効率（定数）、吸収式冷凍機・ヒートポンプは、COP（定数）から単純計算した。なお、エネルギー供給量自体は、空調系統と同じく、冷温水の出入口温度差と流量より算出している。

4 計算結果

4.1 応答係数の計算結果

壁体の応答係数を求めたところ、エコオフィスの方が、断熱なしのケースより、貫流応答係数・吸熱応答係数とも低い値を示した。

4.2 動的熱負荷計算の検証

前節で求めた応答係数と一連のデータを利用して、動的熱負荷計算の検証を行った。なお、計算では、直

接空調の利いていない廊下や EPS、DS まで含めて計算しているので、室の吸熱応答係数を過大に評価している可能性がある。そこで、壁材の吸熱応答係数に一律 0.5 をかけてから、室の吸熱応答係数を算出した。

その結果、両者の誤差を比較すると、相関係数が 2 月では 0.87、8 月では 0.65 となった。8 月の方が低いのは、室温変動そのものが小さいので、結果として、1 対 1 対応の相関が小さくなってしまったためと考えられる。

4.3 電力需給の計算結果

検証されたモデルを利用して、シミュレーションを試みた。なお、室の設定温度は、 $22.5\text{--}24.5[^\circ\text{C}]$ とし、空調は全室とも同じように制御されるものとした。

なお、以降の「エネルギー」とは、空調系統、給湯系統の熱量、電力の 3 つを合計した数字である。換算は、温度に関わらず冷熱・熱とも等価値と考え、電力は発電効率（38.95%[8, p. 38]）で割ることで等価になると考えた。

4.3.1 現状の省エネルギー対策の効果

次に、既にエコオフィスに導入されている省エネルギー対策の効果を計算した。現在、エコオフィスには、「断熱材」「窓の断熱化」「全熱交換機」「ソーラーパネル（および吸収式冷凍機・温水蓄熱槽）」「太陽電池」という 5 種類の省エネルギー対策が導入済みである。以上の 5 種類が全て導入されていない場合と、それぞれ 1 種類のみ導入された場合、そして全ての対策が導入された場合（つまり現状）とで、電力需要量およびエネルギー需要量を比較した。

なお、全熱交換機、ソーラーパネル、太陽電池が導入されていない場合は、それぞれ関連機器の電力消費を差し引いた。また、現状より不足する空調エネルギーに関しては、ヒートポンプで追い炊きするものとした。給湯エネルギーについては、不足分は、蒸気でまかなっている。

以上の結果から、エネルギー削減率を計算すると、以下の通りとなった。

- 断熱材の導入は、エコオフィスにおいて、電力需要を 13.8%削減し、エネルギー需要を 13.4%削減する効果が見られた。2 月において 17.6%削減しているのに対し、8 月においては 6.3%の削減に過ぎない。
- 同じく、断熱窓の導入は、電力需要を 0.7%削減し、エネルギー需要を 0.7%削減した。

- 全熱交換機の導入は、電力需要を 16.5%削減し、エネルギー需要を 16.0%削減した。
- ソーラーパネルおよび吸収式冷凍機・温水蓄熱槽の導入は、電力需要を -3.3%削減し、エネルギー需要を 4.4%削減した。
- 太陽電池の導入は、電力需要を 20.0%削減し、エネルギー需要を 19.4%削減した。なお、非売電時（余剰電力の売却が行えない場合）はそれぞれ 17.3%、16.8%の削減にとどまった。
- 上記の対策を全て導入している現状のエコオフィスは、全く導入していない場合と比べて、電力需要を 48.9%削減、エネルギー需要を 54.5%削減していた。非売電時は、それぞれ 47.1%、52.7%となった。

4.3.2 将来的な省エネルギー対策の効果

エコオフィスの電力・エネルギー自給率を向上させる将来的な対策の 1 つとして、既存の太陽電池を、現在商用で最も高い 15%の発電効率を持つ太陽電池に取り替えるという策が考えられる。ちなみに、現在、エコオフィスに備え付けられている太陽電池の発電効率は、約 10.2%（多結晶）約 10.8%（単結晶）約 3.4%（アモルファス）である（平均 6.7%）。新しく導入した電池は常に 15%の発電効率を維持できるとして、試算した。但し、インバータの電力は現状と比べて変化しないものとする。

年間通しての自給率は、現状では、電力自給率が 29.3%（非売電時は 26.7%）、エネルギー自給率が 35.5%（32.9%）と算出された。それに対し、既設の太陽電池を、現在商用で最高の効率である発電効率 15%のものに取り替えたときは、電力自給率が 77.1%（非売電時は 47.2%）、エネルギー自給率が 83.0%（53.3%）に向上した。

5 結論

5.1 本研究のまとめ

本研究では、さまざま省エネルギー対策を導入したオフィスビルに対して、省エネルギー対策の効果のほどを算出するために、応答係数法を用いた動的熱負荷計算を用いた。まず、冷房負荷・除去熱量をデータとして与えて計算される室温と実測の室温を比較することにより、計算手法の検証を行った。その結果、2 月の相関係数が 0.87 となり、8 月は 0.65 となった。2 月は十分合っていると見えるが、8 月は今度向上させる必要がある。

以上によって検証されたモデルを利用して、省エネルギー対策の効果を計算した。その結果、省エネルギー対策として、太陽電池もさることながら、全熱交換機の効果が非常に大きいことが分かった。

次に、エコオフィスの電力自給率・エネルギー自給率を現状よりさらに向上させる対策として、高発電効率の太陽電池への転換を取り上げた。エコオフィスは、建築物の総床面積の20%弱のスペースを占めるに過ぎず、建築物の屋根を全て使って80%程度の自給率しか向上できないとなると、現状では、エネルギー自律型オフィスビル設計は難しいと言える。

5.2 今後の課題

前小節で述べたように、確かに、現状の自給率は低い。しかし、空調運転の最適化、各種空調機器の高効率化なども、現在、実施可能な省エネルギー対策として残されている。これらを改善して、さらに高いエネルギー自給率を目指したい。

今回は、冷房負荷を算出するために、応答係数法という確立した理論を用いたが、一方で他の消費電力や除去熱量の算出は、簡単な理論あるいは単純な1対1の回帰式を用いている。省エネルギー対策による変化を正確に導出するためには、できるだけ、理論式を用いる必要がある。特に、冷温水の出入口温度差と流量のみから計算している、空調・給湯関係のエネルギー需要に関しては、実際に計算する限り、かなり誤差を含んでいると言える。

また、測定されているデータは精密であるが、その他のデータ（在室人数、各種機器の切り換え）に関しては、大胆な仮定を置くこととなってしまった。計測対象が増えれば、それだけ仮定を減らし、より正確な結果を算出できる。

今回の対象は、あるオフィスビルの一区画のみを対象としたが、これは、その地点でしか、データが得られなかったためである。オフィスビル全体、また様々な種類のオフィスビルを計算すれば、それだけマクロな部門に対する推論が可能になるだろう。

そして、省エネ策導入による電力削減が、外部の商用電力系統に関して、どのように影響しているのか、同じ削減量でもどのような形・時間帯での削減が、商用電力の負荷を減らす結果になるのか、考察するのも興味深い。

参考文献

[1] 荏原製作所. エバラ<ステンレス製>ラインポンプ LPS 型/LPSJ 型取扱説明書. 荏原製作所, 1995.

[2] 川崎智央. 民生部門における電力消費の改善についての研究. 平成8年卒業論文, 東京大学, 1996.

[3] 国立天文台(編). 理科年表 平成6年版(机上版). 丸善, 1993.

[4] 小宮山宏ほか. 地球環境のための地球工学入門. オーム社, 第1版, 1992.

[5] (財)住宅・建築省エネルギー機構(編). 建築物の省エネルギー基準と計算の手引. (財)住宅・建築省エネルギー機構, 改訂1版, 1993.

[6] (財)日本エネルギー経済研究所(編). EDMC/エネルギー・経済統計要覧(1997年版). (財)省エネルギーセンター, 第1版, 1997.

[7] 新晃工業. 空冷式年間加熱冷却型ヒートポンプチリングユニット仕様書. 新晃工業, 1995.

[8] 通商産業省(編). エネルギー '97. 電力新報社, 初版, 1997.

[9] 中谷直一. 統合資源計画のための民生部門省エネルギー技術の評価. 平成8年修士論文, 東京大学, 1996.

[10] 日本太陽エネルギー学会(編). 太陽エネルギーの基礎と応用. オーム社, 第1版, 1978.

[11] 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会(編). 太陽エネルギー利用ハンドブック. 日本太陽エネルギー学会, 初版, 1985.

[12] 橋口敬. 事務所建築の空調設備計画. 鹿島研究所出版会, 1968.

[13] 樋口修二. エコオフィスシステムのデータ収集解析. 平成7年度国立環境研究所委託業務結果報告書, 三菱冷熱工業(株), 3月1996.

[14] 樋口修二. エコオフィスシステムのデータ収集解析. 平成8年度国立環境研究所委託業務結果報告書, 三菱冷熱工業(株), 3月1997.

[15] 古川道信. 首都圏におけるヒートアイランド対策の研究. 平成9年卒業論文, 東京大学, 1997.

[16] 松尾陽, 横山浩一, 石野久禰, 川元昭吾. 空調設備の動的熱負荷計算入門. (社)建築設備技術者協会, 第1版, 1970.

[17] 三菱電機. 三菱全熱交換型換気機器 ロスナイ 総合カタログ. 三菱電機, 11月1993.

[18] 山地憲治, 藤井康正. グローバルエネルギー戦略. 電力新報社, 初版, 1995.