

熱負荷推定モデルを利用した環境調和型オフィスビル設計の研究

東京大学 大学院工学系研究科

東京大学 大学院工学系研究科

国立環境研究所 地域環境研究グループ

三菱冷熱工業 中央研究所

井原 智彦 松橋 隆治 吉田 好邦 堂脇 清志 石谷 久

六川 修一 東 麻衣子

近藤 美則

樋口 修二

1 はじめに

近年、地球温暖化が問題となっており、日本でも CO₂ 排出量削減のために、省エネルギーなどのさまざまな施策がおこなわれている。しかし、依然として、民生・運輸両部門の省エネは進んでいない。

そこで、本研究では、民生部門（業務分野）の省エネ策に注目した。データを詳細に計測している国立環境研究所エコオフィス区域（つくば市）を一例として、本区域を対象に動的熱負荷計算をおこなって実測データと比較することで、まず、本研究で用いる手法の精度を検証する。次に、さまざまなパターンについて動的熱負荷計算をおこない、そしてエネルギー需要を計算するとともに、供給エネルギーの CO₂ 排出量を計算することで、エネルギー自給率の向上と CO₂ 排出量削減の方策について検討する。なお、計測データは、1997 年 1-12 月のもの*を使用した。

2 モデルの概要

2.1 本研究における計算フロー

本研究では、まず動的熱負荷計算をおこなって、熱負荷†を算出し、空調（冷房および暖房）のエネルギー需要を計算する。同時に、空調・給湯・照明・コンセントのエネルギー需要量と自然エネルギー供給量（太陽電池・ソーラーパネル‡）より、外部エネルギー供給量（電力・蒸気）を算出する。そして、外部エネルギー供給量より、CO₂ 排出削減量を算出する。同時に、CO₂ 削減コストも求める。

2.2 動的熱負荷計算モデル

本研究では、以下に説明するように、応答係数法を用いて、熱負荷を計算し、除去熱量を算出する。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、壁体に流し込む、そして、壁体を熱のプールと捉えて、時間遅れを持って、室内や外気に熱流を吐き出していく、という考え方で、熱の移動を計算する方法である。

2.2.1 応答係数

応答係数法では、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（単位

*ただし、数日ほど欠測日が存在する。検証およびシミュレーション時は、欠測日を選んで、計算期間を設定した。

†以下、「熱負荷」と説明するが、専門的には「冷房負荷」がよく用いられる。

‡本研究では太陽熱温水器を「ソーラーパネル」と呼称する。同様に太陽熱温水器システムを「ソーラーシステム」と呼称する。

三角波温度励振）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プールされ、時間遅れを持って、室内に流入する（熱流応答）。

熱流応答（三角波）の値を最近から順に、 $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots$ とすると、 ϕ_j は励振の時点から $j\Delta t$ 時間後に起きている応答を表しており、これを応答係数と呼ぶ。応答係数 ϕ_j は、温度と熱流に関する Fourier の熱伝導方程式 (2.1) (a は熱拡散率) を、壁体の境界条件を設定して解くと算出される。（ θ : 温度, t : 時間, x : 距離）

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

この応答係数は、壁体を構成する各壁材の熱抵抗値および熱容量[§]によって決まる。そして、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、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。室内からの熱流は、始めは壁体内部に向かうが、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。これが吸熱応答である。貫流応答係数 $\phi_{T,j}$ と吸熱応答係数 $\phi_{A,j}$ が壁体の応答の基本形であり、壁体の熱貫流率を K とすると、式 (2.2) が成立する。

$$\sum_{j=0}^{\infty} \phi_{T,j} = \sum_{j=0}^{\infty} \phi_{A,j} = K \quad (2.2)$$

2.2.2 熱取得・熱負荷

以上で述べた外界条件の三角温度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。時点 n における貫流熱取得 $G_{T,n}$ は、次式となり、時間遅れ現象がたたみ込み積分で表される。

$$G_{T,n} = \theta_n \phi_{T,0} + \theta_{n-1} \phi_{T,1} + \dots = \sum_{j=1}^{\infty} \theta_{n-j} \phi_{T,j} \quad (2.3)$$

しかし、この貫流熱取得は、例えば放射熱の場合は、対向壁の温度を上げても、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。熱取得が最終的に熱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熱負荷を計算することができる。

$$L_n = \sum_{j=0}^{\infty} G_{n-j} \varphi_j \quad (2.4)$$

ここで、

[§]熱抵抗値・熱容量ともいずれも長さ、熱伝導率、容積比熱より計算される。

L_n : 時点 n における熱負荷 [kcal/h]

G_n : 時点 n における熱取得 [kcal/h]

φ_j : 重み係数

なお、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 [1] の値をそのまま採用する。

熱負荷としては、以下のものを考慮する。

- 貫流熱負荷 $L_{T,n}$ (顕熱のみ)
- 透過日射熱負荷 $L_{G,n}$ (顕熱のみ)
- 隙間風の熱負荷 $L_{I,n}$ (顕熱および潜熱)
- 照明による熱負荷 $L_{L,n}$ (顕熱のみ)
- 人体による熱負荷 $L_{H,n}$ (顕熱および潜熱)
- 器具発熱による熱負荷 $L_{A,n}$ (顕熱および潜熱)
- 換気による熱負荷 $L_{V,n}$ (顕熱および潜熱)
- 給湯による熱負荷 $L_{W,n}$ (顕熱および潜熱)

以上の合計値が総熱負荷である。なお、上記の算出式は、文献 [1] をエコオフィスに適合するように変更したものである。変更点は、日射受熱量 (太陽位置 [2]、IEA の方法による直散分離 [2, 3])、各種熱負荷 (隙間風 [3]、照明 [4]) の算出および物性値 (気象 [5]、建築 [6]) などである。

2.2.3 除去熱量

熱負荷に対し、除去熱量とは、空調装置が実際に室内空気から取り去る熱量のことである。考慮する除去熱量は以下の通りであり、その合計値を除去熱量とする。

- 全熱交換機による除去熱量 $E_{E,n}$ (顕熱および潜熱)
- 加湿器による除去熱量 $E_{H,n}$ (潜熱のみ)
- 外調機による除去熱量 $E_{A,n}$ (顕熱のみとして計算)
- ファンコイルユニットによる除去熱量 $E_{F,n}$ (顕熱のみとして計算)

なお、ファンコイルユニットによる除去熱量は、モデルの検証時は出入口温度差と流量から求める。シミュレーション時は、これを未知数とし、空調設定条件を満たすように求解する。

2.2.4 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、熱負荷 L_n が発生したが、空調装置が停止して、熱が全く除去されないとすると、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

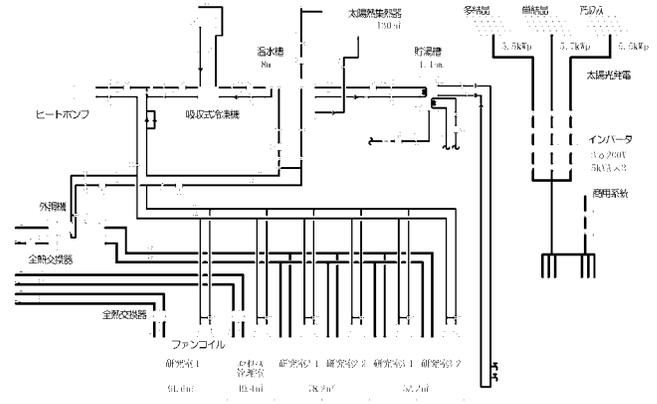


図 2.1 エコオフィスの空調設備系統
位が生じると考えられる。この考え方を演繹させると、追加的な流入熱 (蓄熱負荷) は、次式で表せる。

$$L_{S,n} = - \sum_{j=1}^{\infty} \Delta\theta_{R,n-j} \phi_{R,j} \quad (2.5)$$

2.2.5 室温

そして、時点 n における室温変位 $\Delta\theta_{R,n}$ は、以上で説明した熱負荷 L_n ・除去熱量 E_n ・蓄熱負荷 $L_{S,n}$ (いずれも顕熱のみ) によって決定される。

$$\Delta\theta_{R,n} = \frac{L_n(\theta_{R,n}) + L_{S,n}(\theta_{R,n}) - E_n(\theta_{R,n})}{\phi_{R,0}} \quad (2.6)$$

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 (反復計算 [7]) をおこない、 $\Delta\theta_{R,n} = 0$ となった時点で計算をやめ、その時点の温度を時点 n での室温とする。

シミュレーション時は、逆に設定室温から除去熱量を算出し、算出された除去熱量と、実測除去熱量との比較をおこなう。

なお、室内絶対湿度を決定する潜熱に関しては、蓄熱負荷が存在しない以外は、ほぼ室温と同様の計算である [8]。しかし、実際のエコオフィスでは湿度制御をおこなっていないので、今回は計算していない。

2.3 エネルギー供給モデル

基本的に、需要端で熱負荷に見合うだけの除去熱量を計算し、それに見合うように、供給端から熱量 (もしくは電力) を供給してやる。ただし、供給端は自然エネルギー系統を優先とし、自然エネルギー系統のみでまかなえない場合のみ、商用系統で補う。また、温水蓄熱槽の保有熱量は、給湯系統に優先して回してやり、余った場合についてののみ、空調系統に送っている。なお、図 2.1 が実際のエコオフィスの空調設備系統であり、これを再現するようにモデルを構築した。

2.3.1 ファンコイルユニット・外調機

前述。

2.3.2 温水蓄熱槽

熱損失係数 k_S を蓄熱槽の特性値として考え、時点 n における蓄熱槽の出力熱量や保有熱量を次のように表す [9]。

$$Q_{S,n} = Q_{S,n-1} - Q_{SL,n-1} - Q_{Sout,n} + Q_{Sin,n} \quad (2.7)$$

$$Q_{SL,n-1} = k_S V_S (\theta_{e,n-1} - \theta_{S,n-1}) \quad (2.8)$$

ここで、

$Q_{S,n}$: 時点 n における蓄熱槽の保有熱量 [kcal/h]

$Q_{Sout,n}, Q_{Sin,n}$: 時点 n における出力熱量と入力熱量 [kcal/h]

k_S : 容積当たりの熱損失係数 [kcal/m³・°C]

$\theta_{S,n}, \theta_{e,n}$: 時点 n の平均蓄熱水温、周辺温度 [°C]

V_S : 蓄熱槽の容量 [m³]

なお、出力熱量 Q_{Sout} は、下流側（ファンコイルユニット・外調機）の除去熱量 E_F に合わせて決定されるが、保有熱量 Q_S が 0 になるような Q_{Sout} を上限値とする。また、平均蓄熱水温は、以下のよう

$$\theta_{S,n} = \theta_W + \frac{Q_{S,n}}{V_S} \quad (2.9)$$

ここで、

θ_W : 熱源の供給温度 [°C]（エコオフィスの場合、約 40 [°C]）

2.3.3 その他のエネルギー供給機器

その他、以下の機器に関して、計算をおこなう。いずれも入力エネルギーに、COP や変換効率（定数）を乗算して、出力エネルギーを算出する。

- 太陽電池（電力供給）
- ソーラーパネル（温水供給）
- 吸収式冷凍機（冷水供給）
- ヒートポンプ（冷温水供給）

2.4 CO₂ 排出量算出

省エネルギー材は、生産 → 運用 → 廃棄をライフサイクルとしており、ライフサイクルにわたる CO₂ 排出量（LCCO₂）を算出するには、各段階、場合によってはライフサイクル段階や修繕段階まで、考慮に入れる必要がある。しかし、ここでは、エネルギー消費量のうち大半を占める運用段階のみを計算対象とし、前述したエネルギー供給モデルで、1 次エネルギー消費量を計算、そして CO₂ 排出量を計算する。生産段階や廃棄段階については、今後の課題としたい。

3 シミュレーションモデルの検証

シミュレーションモデルでの計算結果と実測値とを比較することによって、モデルの精度の検証をおこなった。

表 3.1 エコオフィス計測データ

データ種類	測定データ
外気	日射量（2 点）、温度（外気 2 点・4 室各 5 点・太陽電池 3 点）、相対湿度（外気 1 点・4 室各 1 点）
供給電力	太陽電池（3 種）の発電電圧・発電電流・交流発電電力、外部電力・逆流電力・外部蒸気供給量・温度
消費電力	空調機器（冷却塔・全熱交換器・外調機・加湿器・吸収式冷凍機・ヒートポンプ・ファンコイルユニット・換気扇・排気ファンおよび各種動力ポンプ）・太陽電池インバータ、4 室の照明・コンセントの消費電力
熱関係	空調機器の出入口水温・流量・スイッチの状態

表 3.2 エコオフィスの建築概要

項目	詳細
位置	北緯 36° 3' 52"・東経 140° 7' 22" 国立環境研究所 研究本館 III 3 階の一部分
床面積	288.35[m ²]（うち居室面積 241.4[m ²]）
断熱仕様	壁 硬質ウレタン断熱材 50[mm] 窓 5[mm] 複層サッシ
空調設定条件	約 22.5-26.0[°C]・湿度は無設定

3.1 入力データ

エコオフィスでは、さまざまなデータを計測し、30 秒ごとにディスクに保存している。計測データを表に掲げる。計測データ以外のエコオフィスの概要については表 3.2・3.3 の通り。なお、以下、ソーラーパネルおよび吸収式冷凍機・温水蓄熱槽の組み合わせをソーラーシステムと呼称する。

表 3.3 エコオフィスの空調設備

設備	性能	規模
太陽電池	変換効率 5.63%	面積 195.44[m ²]
多結晶	変換効率 8.43%	面積 46.33[m ²]
単結晶	変換効率 9.19%	面積 45.79[m ²]
アモルファス	変換効率 2.80%	面積 103.32[m ²]
ソーラーシステム	変換効率 20.7%	面積 130.65[m ²](124.15[m ²]) ³⁾
ソーラーパネル	COP 0.518	冷却能力 13,000[kcal/h]
吸収式冷凍機	熱損失係数	容量 8[m ³]
温水蓄熱槽	0.00125[kcal/L・°C]	
全熱交換機 ¹⁾		
全熱交換機 1	0.78%	風量 900[m ³]
（外調機）	0.78%	
全熱交換機 2 ²⁾	0.66% / 0.75%	風量 120[m ³]
（換気扇）	0.81% / 0.81%	
全熱交換機 3 ²⁾	0.61% / 0.57%	風量 150[m ³]
（換気扇）	0.75% / 0.75%	
その他		
ヒートポンプ ²⁾	COP 1.58 / 2.58	能力 28,100/43,500[kcal/h]

¹⁾ 上段がエンタルピー交換率、下段が温度交換率である。

²⁾ “/” は、前が冷房時の値、後が暖房時の値である。

³⁾ ソーラーパネルの括弧内の値は、集熱部の面積。

* 研究目的と関係する設備のみ掲載。他の機器電力およびポンプ動力も、計算時には考慮している。

** 値はいずれも実測値。エコオフィスは平成 5 年着工・平成 7 年 10 月竣工の実験的な省エネ化施設なので、現在の技術水準とは異なる。

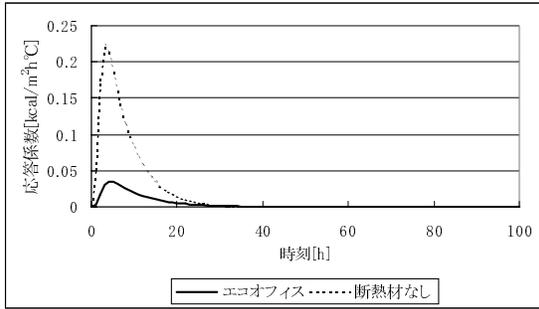


図 3.1 外壁 1 の貫流応答係数

表 3.5 計算値と実測値との比較

期間	決定係数
2月	0.65
9月	0.67

3.2 検証の結果

まず、エコオフィスの壁体（外壁・内壁）の応答係数を算出した。例えば、表 3.4 に掲げるような壁体（外壁 1）の場合、図 3.1 のような応答係数となった。なお、「エコオフィス」は外壁 1 をそのまま計算した結果であり、「断熱材なし」は外壁 1 のうち、50[mm] の硬質ウレタンがないものとして、計算した結果である。

表 3.4 外壁 1 の材質

材質	長さ [m]	熱伝導率 [kcal/mh °C]	容積比熱 [kcal/m³ °C]
外気側表面		$R = 0.05, C = 0$	
コンクリート	0.02	1.2	462
コンクリート	0.15	1.2	462
硬質ウレタン	0.05	0.024	11.3
非密閉中空層	0.014	$R = 0.08, C = 0$	
石こう板	0.009	0.15	246
石こう板	0.012	0.15	246
室内側表面		$R = 0.125, C = 0$	

* R : 熱抵抗 [$m^2h °C$]

** C : 熱容量 [$kcal/m^2 °C$]

そして、算出した応答係数と一連の実測データを用いて、2月と9月について動的熱負荷計算をおこない、1日合計の除去熱量を実測値と比較することで、モデルの検証をおこなった。表 3.5 に結果を掲げる。時間軸で表したのが、図 3.2・3.3 である。2月と9月を取り上げたのは、空調条件が対照的なためである⁴。なお、シミュレーションモデルの助走期間として、2週間余分に計算をおこなっている。

算出された除去熱量が、実測除去熱量と比較してある程度ずれる原因には、以下の要素が考えられる。

- 実際に使用している建物であるため、自然換気量・時間や室内熱容量が不明である。
- モデルの検証時に入力する室温が 4 室平均の室温であって廊下を含んでいない。
- 冷房時の実測除去熱量には、顕熱だけでなく潜熱も含まれている。

⁴8月を取り上げなかったのは、データ欠測日存在のため、十分長い計算期間を設けられなかったことによる。

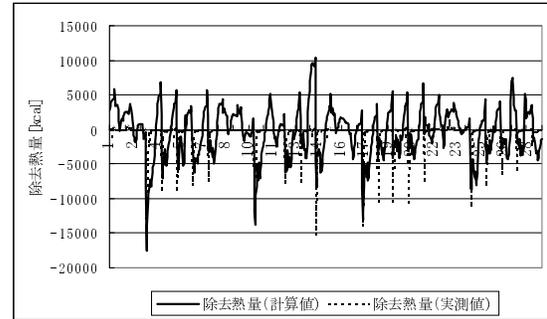


図 3.2 シミュレーション結果と実測値との比較（2月）

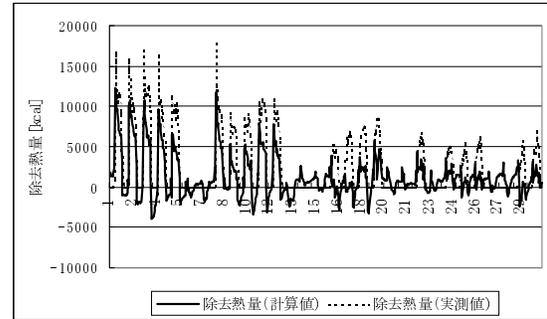


図 3.3 シミュレーション結果と実測値との比較（9月）

これらの違いを考慮すると、おおむね、モデルが検証できたといえる。

4 シミュレーション結果

次に、上記で検証されたモデルを用いて、エコオフィスのエネルギー需給シミュレーションをおこなった。まず、現状のエコオフィスについてシミュレーションをおこなった。その上で、現在導入されている 5 つの省エネ材を取捨選択した場合にもシミュレーションをおこない、計算結果を比較した。なお、現状に比して不足する電力需要は外部系統の電力（商用電力）でまかない、熱需要は外部系統の熱（蒸気）でまかなくなった。また、太陽電池で発電し余剰となった電力は、逆潮流する代わりに、その分、別の時間帯に外部電力を潮流できるとして考えている。一方、ソーラーパネルに関しては、余剰分は温水蓄熱槽に蓄えられ、時間が進むにつれて、損失するものとしている（第 2.3.2 節参照）。

4.1 エネルギー需給量

4.1.1 現状のエコオフィスのエネルギー需給

シミュレーションモデルの計算結果として、図 4.1 に現在のエコオフィス（5 つとも省エネ材を導入した結果）の用途別エネルギー供給量を、図 4.2 に燃料別エネルギー供給量を掲げる。なお、図 4.2 の「外部電力」は外部電力量から太陽電池の逆潮流分を差し引いた値である。それぞれ、比較ケースとしてすべての省エネ材が導入されていない場合（無対策ケース）も掲載した。電力に関しては、火力発電の熱効率率 38.95%^[10]に基づいて 1 次エネルギー換算してから、足し算をおこなっている。

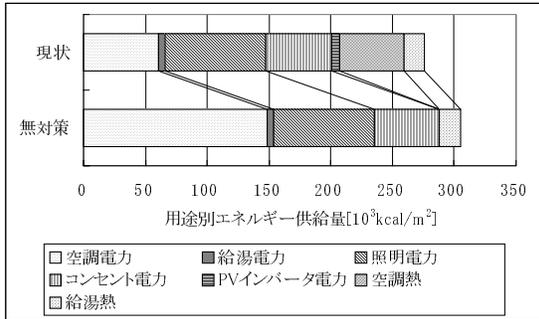


図 4.1 エコオフィスにおける用途別エネルギー供給 (年間)

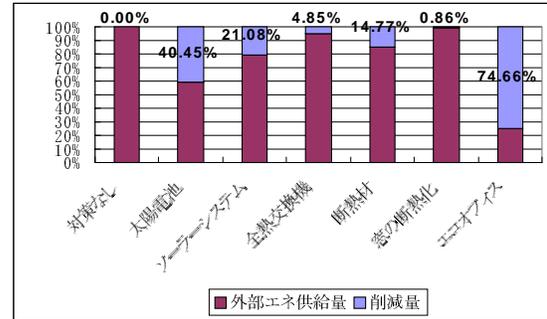


図 4.4 省エネ材導入による外部エネルギー供給の削減率

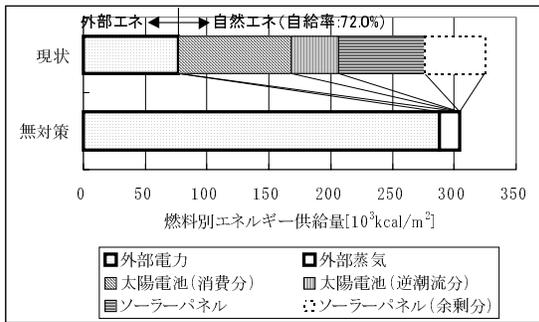


図 4.2 エコオフィスにおける燃料別エネルギー供給 (年間)

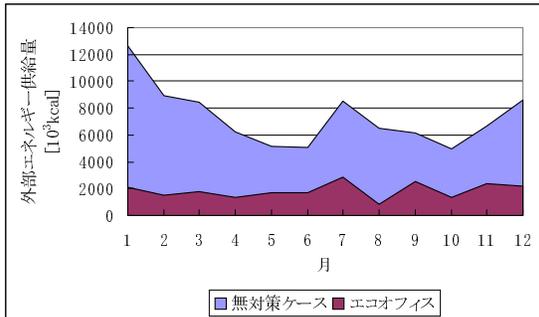


図 4.3 現状のエコオフィスの外部エネルギー供給削減量 (月別)

4.1.2 現状のエコオフィスの外部エネルギー供給削減量

図 4.3 が、無対策ケースと、5 つとも導入した場合 (現状のエコオフィス) の場合との外部エネルギー供給量の結果比較である。なお、外部エネルギーとは、外部電力と外部熱の合計である。

図より、現状のエコオフィスは、外部エネルギー供給を大幅に削減していることが分かる。年間通して、外部電力供給を 73.2% (32300→8670[10³kcal])、外部熱供給を 99.9% (4840→2.77[10³kcal])、そして、外部エネルギー供給を 74.7% (87900→22300[10³kcal]) 削減している。

次に、それぞれの省エネ材の外部エネルギー供給削減量を算出した。無対策ケースと、1 種だけ省エネ材 (太陽電池・ソーラーシステム・全熱交換機・断熱材・窓の断熱化のうち 1 種) を導入した場合とを比較する。

表 4.1 各省エネ材の価格

省エネ材	価格 [円]
太陽電池	1,500,000 [円/kW] (最大出力)
ソーラーパネル	57,000 [円/m ²] (集熱面積)
吸収式冷凍機	130,000[円/USRT] (冷凍能力)
冷却塔	1300×(循環水量 [L/min])+140,000
温水蓄熱槽	260000×(容量 [m ³])+2,000,000
全熱交換機	140×(風量 [m ³])+560,000
断熱材 (50[mm])	490+850 [円/m ²] (面積)
断熱材 (100[mm])	920+1,200 [円/m ²] (面積)
複層ガラス (5-6-5[mm])	30,600[円/m ²] (面積)
一般ガラス (5[mm])	5,800[円/m ²] (面積)

4.2 CO₂ 排出量削減コスト

4.2.1 限界費用曲線

現在エコオフィスに導入されている 5 種の省エネ材を対象に、エコオフィスにおける CO₂ 排出削減量の限界費用曲線を描く。

まず、表 4.1 より省エネ対策 (省エネ材の導入) の初期コストを求め、そして表 4.2 より運用時の削減コスト (無対策ケースに比べて) を求めることによって、省エネ対策を計算した。一方、前小節と同様に外部電力と外部熱供給量を計算し、表 4.2 より CO₂ 排出削減量 (無対策ケースに比べて) を求めた。

表 4.2 供給エネルギーの価格および CO₂ 排出原単位

種別	価格 [円/10 ³ kcal]	CO ₂ 排出原単位	
		[10 ⁻³ kg-C/円]	[10 ⁻³ kg-C/kcal]
電力	24.76 ¹⁾	5.60 ³⁾	0.127 ⁴⁾
蒸気	18.19 ²⁾	2.15 ³⁾	0.053 ⁴⁾

- 1) 電力 10 社平均単価 (業務用電力) 21.29[円/kWh]
- 2) 平成 2 年産業連関表 熱供給業 (民生用) 18.188[円/Mcal]
- 3) 産業連関表 波及需要より一次エネ消費量を計算、熱量は「環境庁 地球温暖化地域推進計画策定ガイドライン」、CO₂ 原単位は「電中研報告 発電プラントの温暖化影響分析 平成 4 年 5 月」p.8
- 4) 事業用電力 19.56[円/kWh]、熱供給業平均 24.92[円/Mcal]

以上から、省エネ対策と CO₂ 排出削減量の限界費用の関係が表 4.3 のように求まる。なお、省エネ材の耐用年数 n はすべて 20 年・利率 p は 5% として、等価償却方式を採用し、式 (4.1) により初期導入コストに伴う年経費率 r を算定することで、CO₂ 削減費用は 1 年当たりで考える。

$$r = \frac{1(1+p)^{n-2}}{(1+p)^{n-1}-1} \quad (4.1)$$

表 4.3 と同様の手順で、限界費用曲線が図 4.5 のように、求まる。この

表 4.3 省エネ材導入による CO₂ 排出削減単価

省エネ材	CO ₂ 削減量 [kg-C]	必要なコスト [円]	削減単価 [円/kg-C]
断熱材 (I)	644	-107,000	-166
全熱交換機 (H)	211	16,500	77.9
窓の断熱化 (D)	37.5	13,400	358
ソーラーシステム (S)	747	738,000	988
太陽電池 (P)	1250	1,730,000	1380

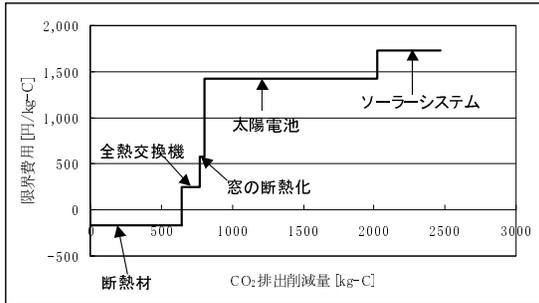


図 4.5 CO₂ 排出量削減の限界費用曲線

図より、エコオフィスにおいては、0→I→IH→IHD→IHDPSの順で、省エネ材を導入していくのがよいということが分かる。

図 4.5 を見れば分かるように、省エネ材の CO₂ 排出削減量は、単純に、各省エネ材の CO₂ 排出削減量の和にはならず、非線形の効果（相殺効果あるいは相乗効果）が現れることが分かる。例えば、表 4.3 の 5 つの省エネ材の CO₂ 排出削減量を合計しても、図 4.5 で、全て導入した場合の CO₂ 排出削減量になってはいない。

4.2.2 より有利な省エネパターン

さらに、省エネ材同士の非線形効果を、系統的に評価してみる。具体的には、考えられる全ての省エネ導入パターン（5 種の省エネ材の導入/非導入）つまり $2^5 = 32$ 通りについて、CO₂ 排出削減量と、その際の削減費用を求める。

その結果の一例として、以下の例を示す。1,200[kg-C] だけ CO₂ 排出量を削減する際、限界費用曲線に沿って省エネ材を導入した場合、IHDPS の 4 種の省エネ材が必要で、削減単価が 829[円/kg-C] に上るのに対し、限界費用曲線とは関係のない IS という組み合わせでは、削減単価が 511[円/kg-C] で済むことが分かった。これは 30% 以上もの費用の削減となる。以上は、系統的な非線形効果であるといえる。この系統的な非線形効果のより詳細な評価については、今後の課題としたい。

5 おわりに

本研究では、エコオフィスを例に、応答係数法を用いた動的熱負荷計算およびエネルギー需給計算をおこない、省エネルギー・CO₂ 排出量削減の効果のほどを算出した。

まず、エコオフィスを対象に構築した熱負荷モデルの精度を検証するために、実測室温を入力して計算される除去熱量と、実測除去熱量との比較をおこなった。そのところ、決定係数が 2 月において 0.65、9 月において 0.67 と、ある程度の結果が算出された。

次に、検証されたモデルを用いて、エネルギー需給計算、CO₂ 排出量の算出をおこなった。その結果、省エネ化されたエコオフィスは、無対策ケースに比べて 74.7% もの外部エネルギー供給を削減していることが分かった。さらに、CO₂ 排出量削減の限界費用曲線を描いたところ、図 4.5 となり、断熱材 → 全熱交換機 → 窓の断熱化 → 太陽電池 → ソーラーシステム¹¹⁾の順に導入すればよいことが分かった。

今回は、5 種の省エネ材について計算をおこなったが、他にも省エネ材が存在する。また、省エネ材の導入量は、現実には固定値ではなく変動値である。一方、ライフサイクル的観点からは、運用段階だけではなく、生産段階や廃棄段階について考慮する必要がある。これらを考慮すれば、より現実に即した CO₂ 排出削減費用が計算できるようになる。さらに、第 4.2.2 節に挙げたが、省エネを系統的に考えることによって、より効果的な省エネがおこなえる、という点のより詳しい分析も今後の課題としたい。今後は、以上の点をふまえて、分析を進めていく予定である。

参考文献

- 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.
- 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.
- 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.
- 橋口敬. 事務所建築の空調設備計画. 鹿島研究所出版会, 1968.
- 国立天文台 (編). 理科年表 平成 6 年版 (机上版). 丸善, 1993.
- (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. 改訂 1 版, 1993.
- 松尾陽, 横山浩一, 猪岡達夫. 空調システムのエネルギーシミュレーションプログラム 第 3 報サブシステムの諸機能. 空気調和・衛生工学会学術講演論文集 (宇都宮), pp. 433-436, 1985.
- 空調設備基準委員会第 2 小委員会負荷計算法分科会. 電算機による動的空調負荷計算法. 空気調和・衛生工学, Vol. 46, No. 3, pp. 3-33, 1972.
- (財) 住宅・建築 省エネルギー機構. 『BECS/CEC/AC』計算マニュアル, 1994. Ver 2.1.
- 通商産業省 (編). エネルギー'97. 電力新報社, 初版, 1997.

¹¹⁾ 前述した通り、本研究では、太陽熱温水器を「ソーラーパネル」、太陽熱温水器・温水蓄熱槽・吸収式冷凍機・冷却塔をまとめた一連の太陽熱利用システムを「ソーラーシステム」と呼称している。