慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	熱負荷計算を用いたオフィスビルにおけるCO2削減策の評価
Sub Title	
Author	井原, 智彦(Ihara, Tomohiko) 石谷, 久(Ishitani, Hisashi) 松橋, 隆治(Matsuhashi, Ryuji)
Publisher	慶應義塾大学産業研究所
Publication year	1999
Jtitle	KEO discussion paper. G : 『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』 (KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-36
JaLC DOI	
Abstract	概要近年、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、京都会議(COP3)で、日本は2010年頃の温室効果ガス排出量の6%削減(1990年比)を目標に設定した。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。 そこで、本論文では、民生部門、特に業務分野の省エネルギーに着目した。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取り上げ、応答係数法を用いた動的熱負荷計算・エネルギー需給計算を行うことで、エネルギー自給率の向上およびCO2削減のための方策について評価を試みた。まず、今回採用した動的熱負荷計算手法の検証を行った。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で、検証した。その結果、2月においては決定係数が2月において0.65、9月において0.67となった。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、断熱材→ 全熱交換器→ 窓の断熱化→ 太陽電池→ 太陽熱システム(太陽熱集熱器+温水蓄熱槽+吸収式冷凍機+冷却塔)の順に導入すればよいことが分かった。さらに各省エネ材のCO2削減効果について詳細に分析した。その結果、例えば、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に比べて、限界費用曲線とは関係のない省エネ材の組み合わせの方が、削減単価が安くなることが分かった。つまり、必ずしも、限界費用曲線通りに導入するのが、コストパフォーマンスの最も高い結果とはならないことが分かった。以上より、個々の省エネ材の性能だけではなく、省エネ材の相互作用についても考えることで、より有利な省エネルギーが行えると結論付けられる。
Notes	表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000036-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

熱負荷計算を用いた
オフィスビルにおけるCO_2削減策の評価

井原　智彦
石谷　　久
松橋　隆治

No.G-36

学振未来 WG2-14

熱負荷計算を用いたオフィスビルにおけるCO_2削減策の評価

井原 智彦　　石谷 久　　松橋 隆治*

平成11年2月

キーワード

民生部門, 業務分野, オフィスビル, 省エネルギー, 動的熱負荷計算, CO_2 削減策, 太陽電池, 太陽熱集熱器, 断熱, 全熱交換器, 限界費用

概 要

近年、世界的に、CO_2 排出量が増大しつつある。CO_2 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、京都会議 (COP3) で、日本は 2010 年頃の温室効果ガス排出量の 6%削減（1990 年比）を目標に設定した。CO_2 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。

そこで、本論文では、民生部門、特に業務分野の省エネルギーに着目した。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取り上げ、応答係数法を用いた動的熱負荷計算・エネルギー需給計算を行うことで、エネルギー自給率の向上および CO_2 削減のための方策について評価を試みた。

まず、今回採用した動的熱負荷計算手法の検証を行った。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で、検証した。その結果、2 月においては決定係数が 2 月において 0.65、9 月において 0.67 となった。

次に、検証されたモデルを用いて、エネルギー需給計算、CO_2 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、CO_2 排出量削減の限界費用曲線を描いたところ、断熱材 → 全熱交換器 → 窓の断熱化 → 太陽電池 → 太陽熱システム（太陽熱集熱器+温水蓄熱槽+吸収式冷凍機+冷却塔）の順に導入すればよいことが分かった。

さらに各省エネ材の CO_2 削減効果について詳細に分析した。その結果、例えば、1,200[kg-C] だけ CO_2 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に比べて、限界費用曲線とは関係のない省エネ材の組み合わせの方が、削減単価が安くなることが分かった。つまり、必ずしも、限界費用曲線通りに導入するのが、コストパフォーマンスの最も高い結果とはならないことが分かった。

以上より、個々の省エネ材の性能だけではなく、省エネ材の相互作用についても考えることで、より有利な省エネルギーが行えると結論付けられる。

*東京大学大学院工学系研究科

この研究は、学術振興会未来開拓技術研究事業「アジア地域の環境保全」Working Group 2 の一環で行われた。なお、本論文に含まれるミスに関しては、筆者の責任である。

1　はじめに

近年、地球温暖化が問題となっており、その主因として、CO_2 排出量の増大が言われている。最近では、京都会議（気候変動に関する国際連合枠組条約第3回締約国会議、COP3）が開催され、日本でも温室効果ガスを6%だけ削減（1990年比[1]、2008年から2012年の5年間についての目標値）することとなった。温室効果ガスのうち、最も大きな割合を占めるのは、言うまでもなく CO_2 であり、施策なしのまま、2010年を迎えると、CO_2 排出量は現在よりも大幅に増加してしまうと考えられている。そこで、日本でも CO_2 排出量削減策を積極的に導入していく必要があり、燃料の脱炭化、熱効率向上などが挙げられ、省エネルギー策は最も重要な施策の1つであると考えられる。しかるに、日本の省エネルギー状況を鑑みると、産業部門では省エネ策が取られているのに対し、民生・運輸両部門では省エネが進んでいない。

そこで、本研究では、民生部門の業務分野の省エネ策に着目し、その一例として、オフィスビルへの省エネルギー策導入を取り上げる。データを詳細に計測しており、かつさまざまな省エネルギー材を導入している国立環境研究所エコオフィス区域（つくば市、図2.2、図4.1参照）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 CO_2 排出量を計算することで、エネルギー自給率の向上と CO_2 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[2]を使用した。

[1]但し、CO_2,CH_4,N_2O,HFC,PFC,SF6のうち、HFC,PFC,SF6については、削減の基準年を1995年としてもよいこととされた。

[2]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、欠測日を避けて、計算期間を設定した。

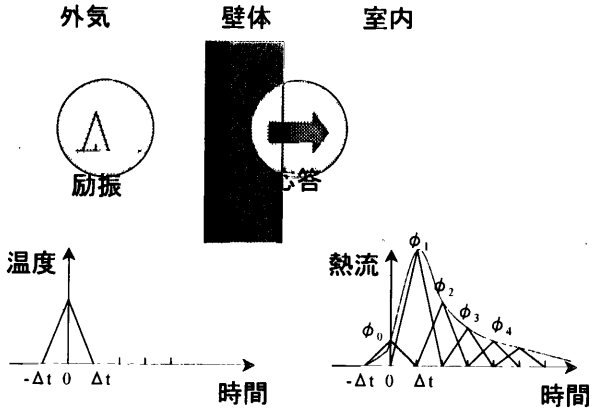

図 2.1　応答係数法

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[3]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・太陽熱集熱器[4]）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、CO_2 排出削減量を算出する。同時に、CO_2 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（図 2.1）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、$\phi_0, \phi_1, \phi_2, \ldots$ 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）

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \tag{2.1}$$

[3]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。
[4]以下、本論文では、太陽熱集熱器・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「太陽熱システム」と呼称する。

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[5]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。

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

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。

$$G_{T,n} = \theta_n\phi_{T,0} + \theta_{n-1}\phi_{T,1} + \cdots = \sum_{j=1}^{\infty}\theta_{n-j}\phi_{T,j} \tag{2.3}$$

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。

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

ここで、

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。

[5]熱抵抗値・熱容量ともにいずれも長さ、熱伝導率、容積比熱より計算される。

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。

- 全熱交換器による除去熱量 $E_{E,n}$（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 ℃] 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いて、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。

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

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。

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

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

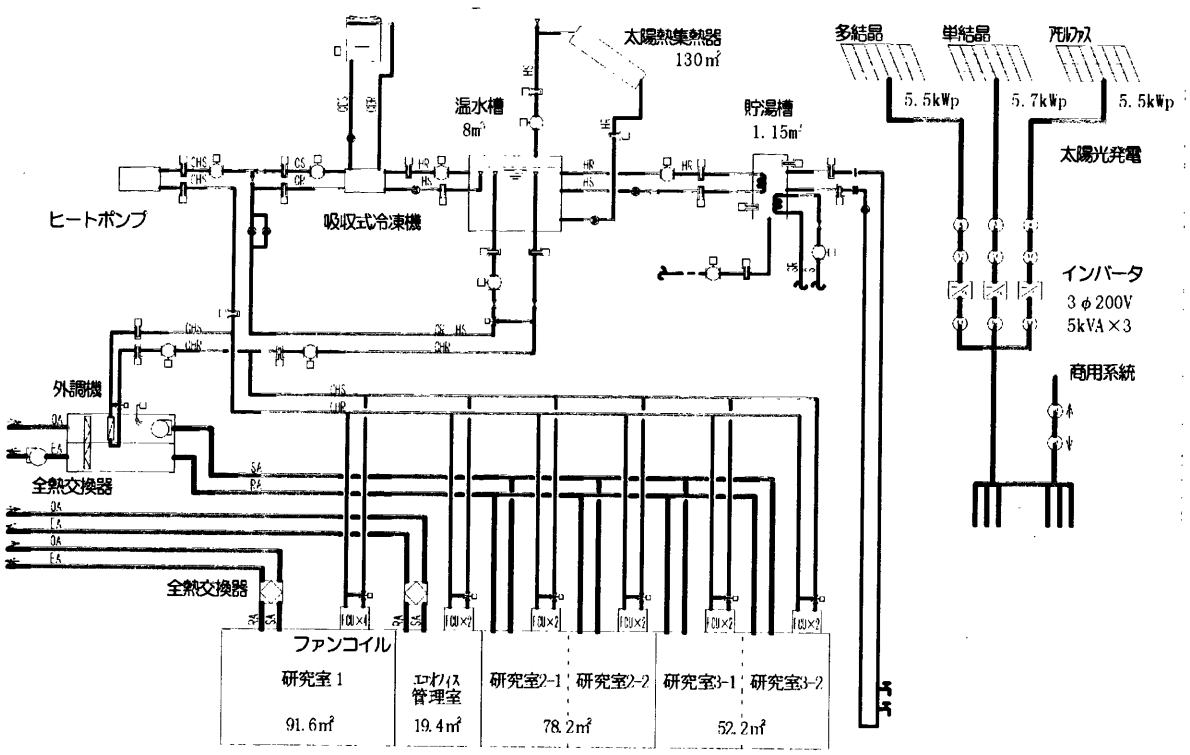

図 2.2　エコオフィスの空調設備系統

り、余った場合についてのみ、空調系統に送っている。なお、図 2.2 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]。

$$Q_{S,n} = Q_{S,n-1} - Q_{SL,n-1} - Q_{S\mathrm{out},n} + Q_{S\mathrm{in},n} \tag{2.7}$$

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

ここで、

$Q_{S,n}$	：時点 n における蓄熱槽の保有熱量 [kcal/h]
$Q_{S\mathrm{out},n}, Q_{S\mathrm{in},n}$	：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/m^3 ℃]
$\theta_{S,n}, \theta_{e,n}$	：時点 n の平均蓄熱水温、周辺温度 [℃]
V_S	：蓄熱槽の容量 [m^3]

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、以下のように計算される。

$$\theta_{S,n} = \theta_W + \frac{Q_{S,n}}{V_S} \tag{2.9}$$

ここで、

θ_W ： 熱源の供給温度 [℃]（エコオフィスの場合、約 40[℃]）

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）
- 太陽熱集熱器（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 CO_2 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 CO_2 排出量（$LCCO_2$）を算出するには、各段階、場合によってはリ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 CO_2 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。

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・逆潮流電力・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[℃]・湿度は無設定

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。

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 3.1 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、太陽熱集熱器および吸収式冷凍機・温水蓄熱槽の組み合わせを太陽熱システムと呼称する。

表 3.3　エコオフィスの空調設備（実測値）

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]
太陽熱システム		
太陽熱集熱器	変換効率 20.7%	面積 130.65[m^2](124.15[m^2])[3]
吸収式冷凍機	COP 0.518	冷却能力 13,000[kcal/h]
温水蓄熱槽	熱損失係数 0.00125[kcal/L·℃]	容量 8[m^3]
全熱交換器[1]		
全熱交換器 1	0.78	風量 900[m^3]
（外調機）	0.78	
全熱交換器 2[2]	0.66 / 0.75	風量 120[m^3]
（換気扇）	0.81 / 0.81	
全熱交換器 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) 太陽熱集熱器の括弧内の値は、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（定格値ではない）。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。

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 ℃]	容積比熱 [kcal/m^3 ℃]
外気側表面		$R = 0.05,\quad C = 0$	
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	$R = 0.08,\quad C = 0$	
石こう板	0.009	0.15	246
石こう板	0.012	0.15	246
室内側表面		$R = 0.125,\quad C = 0$	

* R：熱抵抗 [m^2h ℃]
** C：熱容量 [kcal/m^2 ℃]

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。

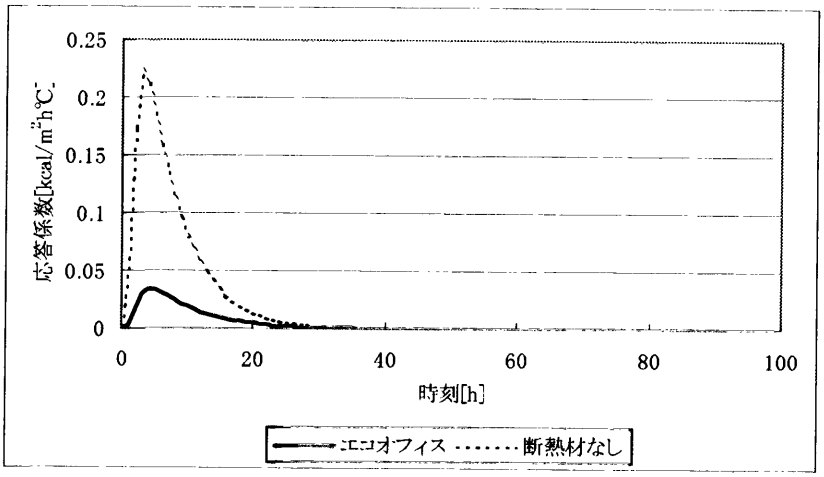

図 3.1　外壁 1 の貫流応答係数

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

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[6]。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。

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。

[6] 8 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。

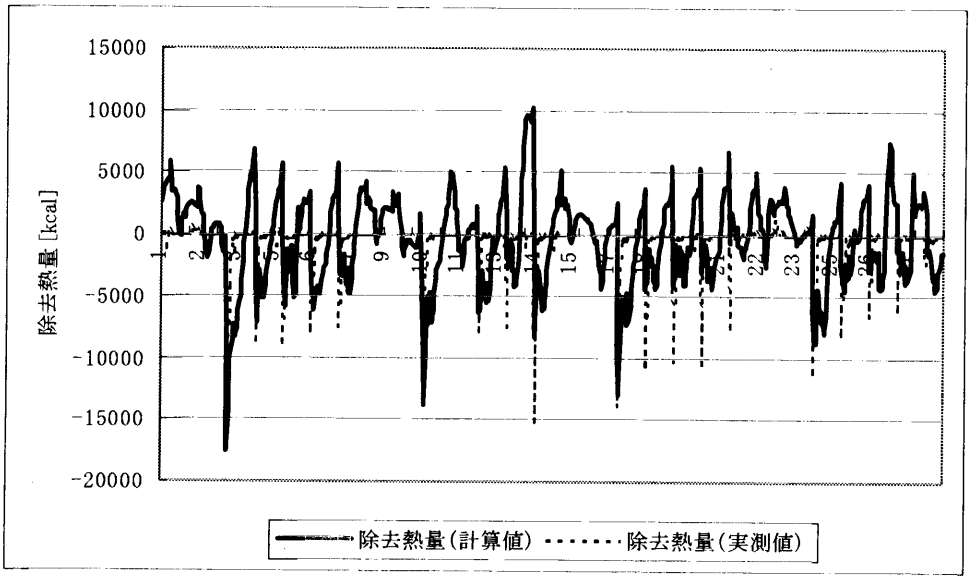

図 3.2　シミュレーション結果と実測値との比較（2 月）

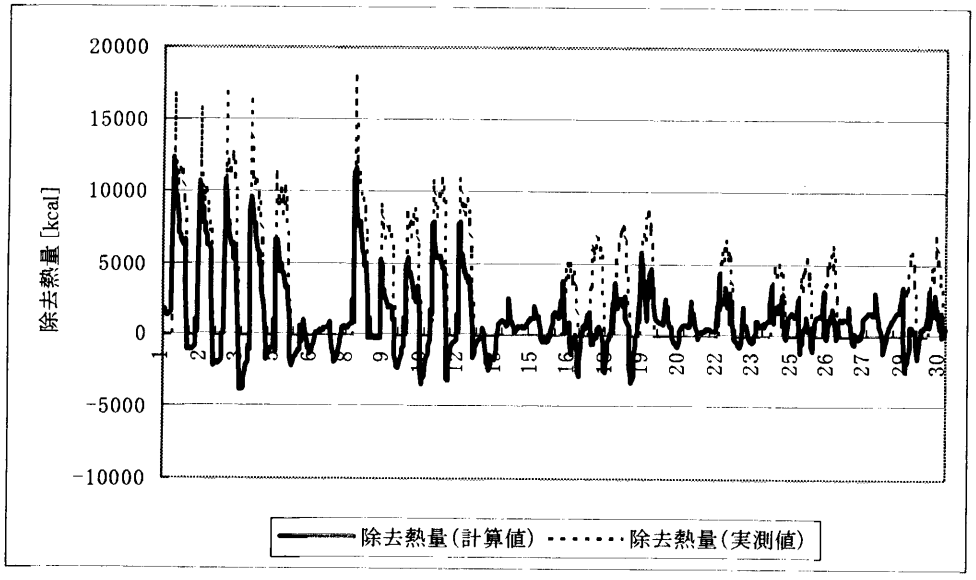

図 3.3　シミュレーション結果と実測値との比較（9 月）

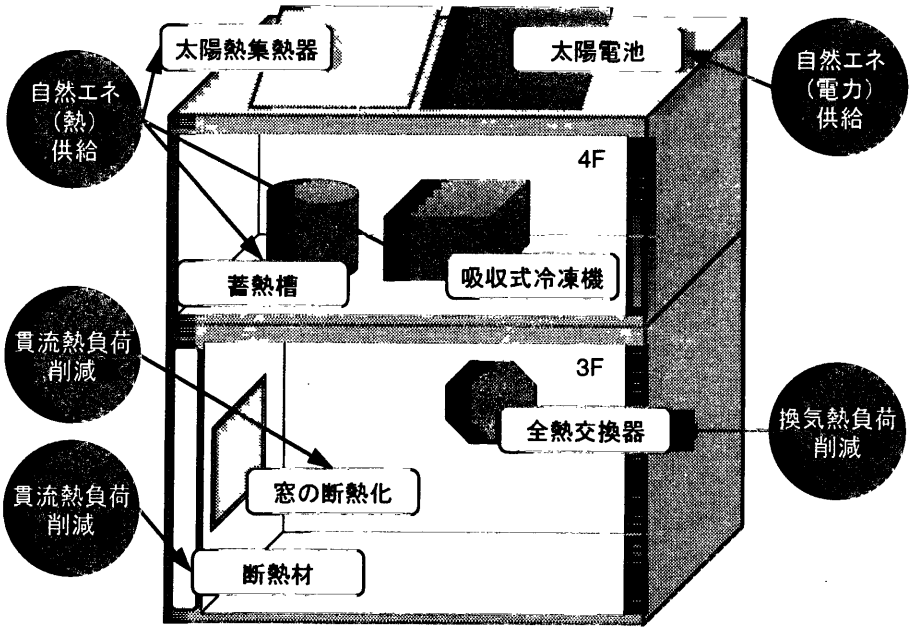

図 4.1　エコオフィスに導入されている省エネルギー材

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（図 4.1）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関して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、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、太陽熱集熱器に関しては、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 4.2 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 4.3 に燃料別エネルギー供給量を掲げる。なお、図 4.3 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 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。

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 4.4 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 4.4 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[10^3kcal]）、外部熱供給を 99.9%（4840→2.77[10^3kcal]）、そして、

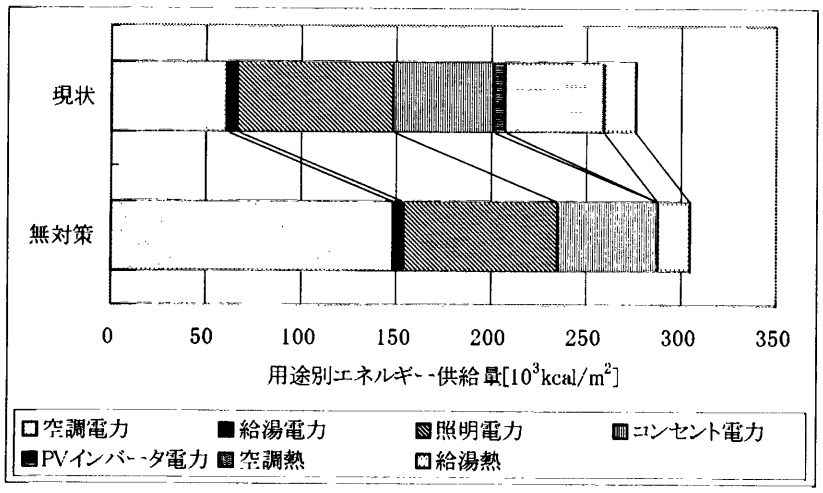

図 4.2　エコオフィスにおける用途別エネルギー供給（年間）

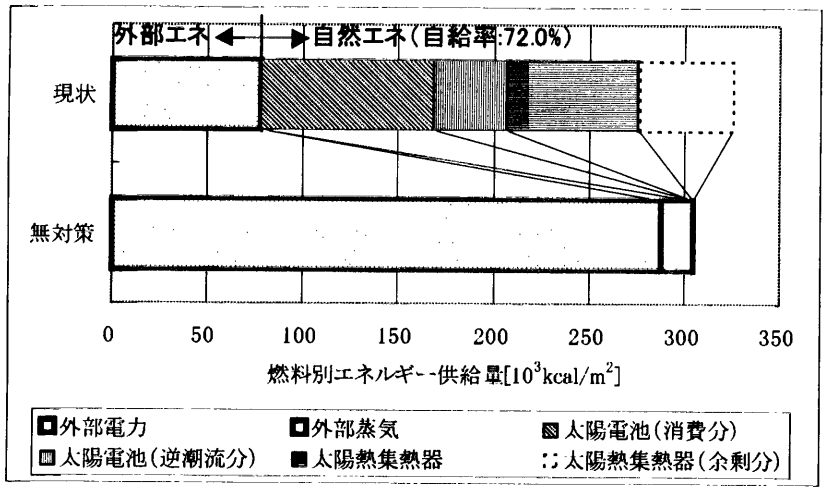

図 4.3　エコオフィスにおける燃料別エネルギー供給（年間）

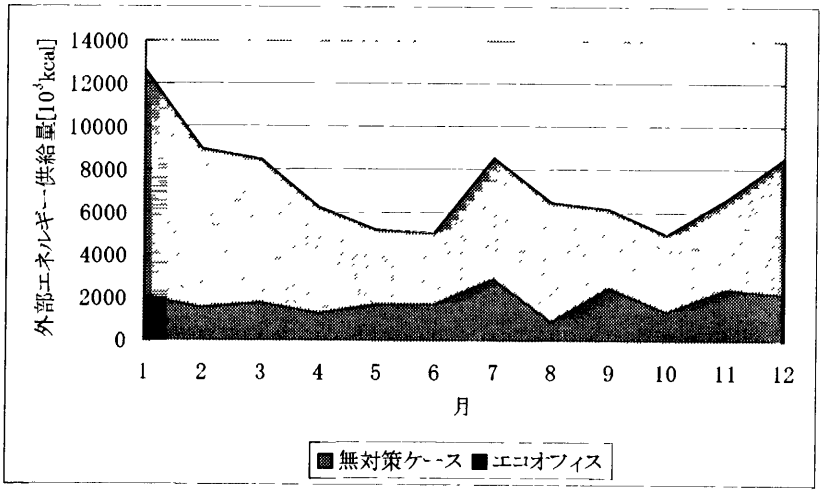

図 4.4　現状のエコオフィスの外部エネルギー供給削減量（月別）

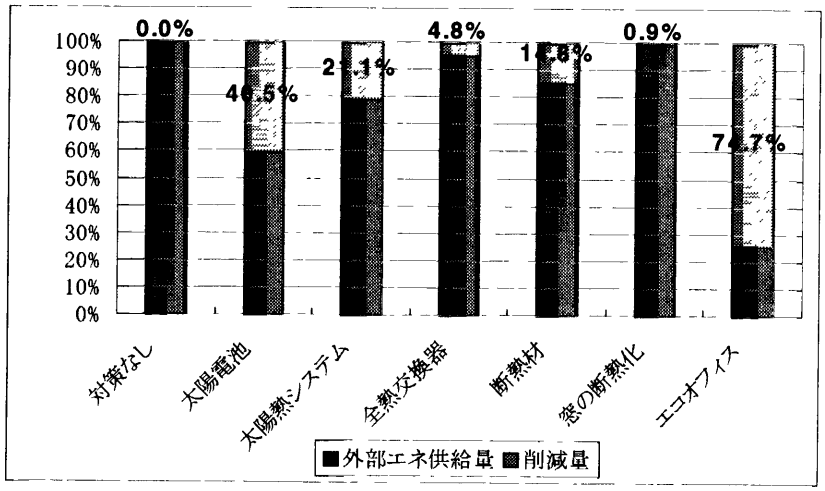

図 4.5　省エネ材導入による外部エネルギー供給の削減率

外部エネルギー供給を 74.7%（87900→22300[10^3kcal]）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・太陽熱システム・全熱交換器・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。その結果が、図 4.5 である。導入量が異なるので、一概にいうことはできないが、エネルギーを供給する太陽電池や太陽熱システムによる効果が大きく、続いて、全熱交換器の効果が大きいことが分かる。

4.2　CO_2 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 CO_2 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 CO_2 排出削減量（無対策ケースに比べて）を求めた。

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）
太陽熱集熱器	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
全熱交換器	140×(風量 [m^3])+560,000
断熱材（50[mm]）	490+850 [円/m^2]（面積）
複層ガラス（5-6-5[mm]）[1]	30,600[円/m^2]（面積）
一般ガラス（5[mm]）[1]	5,800[円/m^2]（面積）

[1] 窓の断熱化に要する費用は、この複層ガラスと一般ガラスの費用の差とした。これは、どの省エネ材もオフィスビル建設時の価格で考慮しているためである。

表 4.2　供給エネルギーの価格および CO_2 排出原単位

種別	価格 [円/10^3kcal]	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]
なお、簡単のため、売電・買電ともこの単価を用いた。

[2] 熱供給業（民生用）18.188[円/Mcal]（文献 [11]）

[3] 産業連関表 [11] の波及需要より一次エネ消費量を計算、熱量は文献 [12]、CO_2 原単位は文献 [13]p.8

[4] 事業用電力 19.56[円/kWh]、熱供給業平均 24.92[円/Mcal]（文献 [11]）を用いて計算。

表 4.3　省エネ材導入による CO_2 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
全熱交換器 (H)	211	16,500	77.9
窓の断熱化 (D)	37.5	13,400	358
太陽熱システム (S)	747	738,000	988
太陽電池 (P)	1250	1,730,000	1380

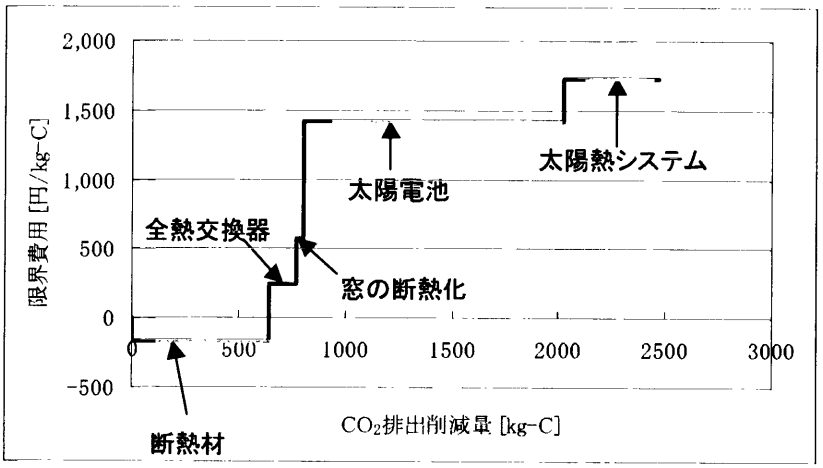

図 4.6　CO_2 排出量削減の限界費用曲線

次に、前節で求まった外部電力および外部蒸気供給量より CO_2 排出量を、併せて省エネ材の導入費用および燃料費（電力・蒸気）よりコストを算出し、無対策ケースと比べることによって、1 年あたりの CO_2 削減量と、必要コストを算出する。以上から、省エネ対策と CO_2 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、CO_2 削減費用は 1 年当たりで考える。[14]

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

表 4.3 と同様の手順で、限界費用曲線が図 4.6 のように、求まる。この図より、エコオフィスにおいては、0→I→IH→IHD→IHDP→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 4.6 を見れば分かるように、省エネ材の CO_2 排出削減量は、単純に、各省エネ材の CO_2 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 CO_2 排出削減量を合計しても、図 4.6 で、全て導入した場合の CO_2 排出削減量になってはいない。

さらに、図 4.6 から分かることとして、省エネ材の導入順序が、表 4.3 の通りにはなっていないことが挙げられる。表 4.3 だけ見ると、0→I→IH→IHD→IHDS→IHDPS の順で省エネ材を導入していくのがよいように見えるが、実際に限界費用曲線を描いてみると（図 4.6）、0→I→IH→IHD→IHDP→IHDPS の順であり、P と S が前後している。これは、複数種の省エネ材を導入すると、省エネ材どうしの相殺効果もしくは相乗効果が起こるが、その効果は、導入する省エネ材の組み合わせ方によって、異なってくるためである。

単独で導入する場合（つまり表 4.3）は、明らかに、S の方が P よりよい。しかし、IHD が既に導入され

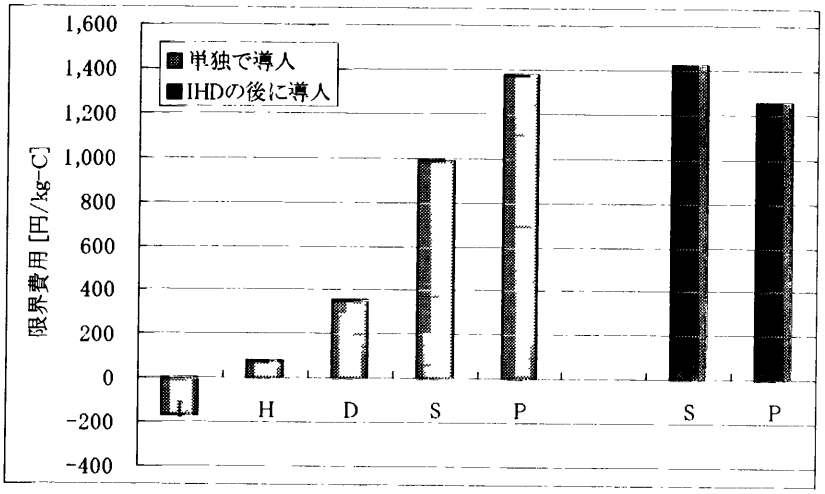

図 4.7　IHD が既に導入されているときの省エネ材の選択

ている場合は、図 4.7 を見ると分かるように、S は単独で導入するより省エネ効果が落ちる（そのため、省エネ単価が上がる）のに対し、P は却って省エネ効果が上がるためである。

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、システム的に評価してみる。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、CO_2 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 CO_2 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、IHDP 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、システム的な非線形効果であるといえる。このシステム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・CO_2 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、CO_2 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、CO_2 排出量削減の限界費用曲線を描いたところ、図 4.6 となり、断熱材 → 全熱交換器 → 窓の断熱化 → 太陽電池 → 太陽熱システム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 CO_2 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、省エネをシステム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

[1] 松尾陽, 横山浩一, 石野久彌, 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.

[2] 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.

[3] 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.

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

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

[6] （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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] （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.

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

[11] 総務庁ほか（編）. 産業連関表（平成 2 年） –計数編 (1)–. 総務庁, 1994.

[12] 環境庁地球環境部（編）. 地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン. 環境庁地球環境部, 1993.

[13] 内山洋司, 山本博巳. 発電プラントの温暖化影響分析. 電力中央研究所報告書 Y91005, （財）電力中央研究所, April 1992.

[14] 松橋隆治, 石谷久, 大村昭二. 統合資源計画における省エネルギー技術の評価. エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, Vol. 12, pp. 35–40, 1993.