

オフィスの実測値に基づいた動的熱負荷および CO₂排出削減シミュレーション

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

新菱冷熱工業 中央研究所

井原 智彦 松橋 隆治 吉田 好邦 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、地球温暖化問題に伴い、CO₂の削減が急務となっているが、本稿では民生部門を対象にCO₂排出削減策を分析する。具体的には、オフィスビルを対象に、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シミュレーションを行うことで、省エネルギー対策（太陽電池や断熱材など）を組み込んだときに、エネルギー消費量やCO₂排出量がどう変化するかを算出する。その結果より、それぞれの省エネ策がどのような形でCO₂排出量の削減につながるか、を分析する。

なお、本稿では、さまざまな省エネルギー策が施された国立環境研究所エコオフィス区域（つくば市）を計算対象のモデルとする。同区域で詳細な空調・気象データを計測しているのを利用して、シミュレーションする前に、実測値と計算値の比較によるシミュレーションモデルを検証する。計測データは1997年のもの（但し欠測日あり、計算対象期間から除外）を用いる。

2 シミュレーションモデルの概要

本稿で用いるシミュレーションモデルは、除去熱量を求める非定常熱負荷計算と、二次エネルギー消費量を求めるエネルギー需給計算とを組み合わせ、1時間ずつ交互に動かすものである。

まず、前者に対象オフィスの外気・空調条件などを入力して、除去熱量（室から取り去るべき熱量）を算出する。そして、後者でその除去熱量をまかなうのに必要な分だけ空調機器稼働させ、同時に給湯や動力のエネルギー消費量、自然エネルギーによるエネルギー供給量も考慮することで、外部系統からのエネルギー供給量を算出する。これを毎時刻計算していき、計算対象期間（初期値影響を排除するため、最初の2週間は助走期間とする）の外部系統からのエネルギー供給量の合計値を、無対策ケースと比較することで、エネルギー供給削減量、

さらにCO₂排出削減量を算出する。

なお、計算対象を具体的に設定し、検証をおこなう関係上、さまざまな式や変数を自由に設定する必要がある。そこで、オブジェクト指向言語（C++）を用いてモデルを自作した。

2.1 動的熱負荷計算部（モデル内）

熱負荷計算部は、よく利用されている応答係数法を用いた動的熱負荷計算 [1] をベースに構築する。但し、湿度無調整のため、顕熱のみ計算する。

2.1.1 応答係数法

応答係数法では、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る。その熱流は時間遅れを持って室内に流入するわけであるが、外気側で三角波の温度変動（単位三角波温度励振）が生じたときの室内側への毎時刻の熱流応答（これも三角波）を表す応答係数と、外気の毎時刻の三角温度波を掛け合わせる（たたみ込み計算）ことによって、毎時刻の熱流応答が計算できる。これを応答係数法という。なお、応答係数は、温度と熱流に関する Fourier の熱伝導方程式を、壁体の境界条件を設定して解くと算出される。つまり、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（いずれも長さ、熱伝導率、容積比熱より計算される）によって決まる。算出に必要な物性値は [2], [3] などをも参考にした。

なお、この室外～壁体～室内の応答係数を貫流応答係数と呼び、室内～壁体～室内の応答係数を吸熱応答係数と呼ぶ。

以上で、室内への熱流応答である熱取得が求まるが、熱取得が、実際に室温上昇をもたらすまで、さらに時間遅れが生じる。熱取得に、重み係数をたたみ込んで、実際に室温上昇の原因となる熱負荷が計算される。

2.1.2 熱負荷

以下を考慮、熱負荷の種類毎に記述するが、実際の計算は、熱負荷部位オブジェクト毎におこなう。

貫流熱負荷 室外と室内の温度差から生じる熱負荷のことである。前小節参照。壁体オブジェクトおよびガラス窓オブジェクトが関係。

透過日射熱負荷 日射に起因。日時より算出された太陽高度を用いて、水平面全天日射量を IEA の方法 [4, 5] で、水平面天空日射量と法線面直達日射量とに直散分離する。念のため、理論日射 [4] を計算しておき、上限を設けておく。両日射量より、任意面に対する直達・天空日射量が計算できるが、これにガラス窓の日射に対する熱取得率を乗じて、熱取得を求める。さらに透過日射重み係数をたたみ込んで、熱負荷を求める。ガラス窓が関係。

人体による熱負荷 人体発熱に起因。作業強度ごとに単位人体の発熱が決まっているので、それに在室人数を乗じて熱取得を求める。さらに人体用重み係数をたたみ込むと熱負荷となる。人体が関係。

発熱器具による熱負荷 器具発熱に起因。器具の表面温度ごとに重み係数が設定されているので、器具発熱量と顕熱・潜熱の割合より熱取得を算出、さらに重み係数でたたみ込んで熱負荷を算出する。発熱器具が関係。

照明による熱負荷 照明発熱に起因。照明種類ごとに重み係数が設定されているので、照明電力および安定器 [6] より照明発熱量を算出、重み係数でたたみ込んで熱負荷を算出する。照明が関係。

隙間風による熱負荷 隙間風による熱負荷。室内外の気圧差 [5] および風速、そして隙間の隙間定数と隙間の長さより、隙間風量が求まる。そして、室内外の温湿度差と風量より熱負荷を算出する。隙間が関係。

換気による熱負荷 換気による熱負荷。本モデルでは換気も熱負荷の1つとして扱う。換気スケジュールより換気風量を決定、熱負荷を求める。換気扇が関係。

2.1.3 除去熱量

全熱交換器による除去熱量 換気熱負荷に全熱交換器の顕熱交換率・エンタルピー交換率を乗じて、除去熱量を算出する。全熱交換器が関係。

ファンコイルによる除去熱量 上記の熱負荷および後述の蓄熱負荷の合計からファンコイル以外による除去熱量を引いた値を、ファンコイルによる除去熱量とする。検証の節でも説明する。

2.1.4 蓄熱負荷

蓄熱応答係数（室の吸熱応答係数）とは、室内に単位三角波温度励振が生じたとき、ファンコイルを除く室の各熱負荷・除去熱量部位は熱量を吸収するが、吸収後、室内側へ逆流する熱流応答を表す係数である。

壁体の場合は、吸熱応答係数に壁体面積を乗じることによって蓄熱応答係数が計算される。ガラス窓は熱貫流率、隙間・換気は風量に単位空気熱容量を乗じた値が、それぞれ、温度励振発生時の係数の値であり、吸収した熱量は応答しないものとする（次の時刻以降の係数はゼロとする）。室内熱容量に関しては、熱容量を単位温度で除した値を温度励振時の係数、その負の値を励振の次の時刻の値とし（つまり次の時刻に全て応答する）、さらに以降はゼロとする。その他の部位は、室温が変動しても熱量を吸収しないと考える。

上記を全て合計することで、室全体の蓄熱応答係数が算出される。そして、蓄熱係数は、室内の温度三角波に蓄熱応答係数をたたみ込むことで算出する。

2.1.5 室温

以上で説明した熱負荷 $L(n)$ 、除去熱量 $E(n)$ 、蓄熱負荷 $S(n)$ より、時点 n における室温変位 $\Delta T_R(n)$ は、次の式で計算される。なお、蓄熱応答係数を $s(j) = \{s(0), s(1), s(2), \dots, s(n)\}$ とする。

$$\Delta T_R(n) = \frac{L(n) + S(n) - E(n)}{s(0)} \quad (2.1)$$

しかし、 $L(n), E(n), S(n)$ はそれぞれ、実際には $L(n, T_R(n)), E(n, T_R(n)), S(n, T_R(n))$ であり、 $T_R(n)$ を含んでいるので、すぐには解けない。そこで、 $\Delta T_R(n)$ に関して収束計算（反復計算 [7]）をおこない、 $\Delta T_R(n) = 0$ となった時点で計算をやめ、その時点の温度を時点 n における室温 $T_R(n)$ とする。

2.2 エネルギー需給計算部（モデル内）

エネルギー計算は、全て熱量単位でおこなう（流量・風量や温湿度は原則として考慮しない）。

2.2.1 エネルギー供給機器

以下を考慮。なお、COP や変換効率など各変数は、実際の計測データより算出した実測値を用いる。

温水吸収式冷凍機 上流からの温水供給可能量を取得し、冷水供給能力を算出する。そして、実際の冷水供給を、冷水供給能力の範囲内で、COP で除して、上流への温水需要を求める。同時に、電力需要を冷水供給量より算出する。

冷却塔 連結している冷凍機の冷水供給量に応じて、電力需要を算出する。

空気熱源ヒートポンプ 冷温水需要を COP で除して、電力負荷を求める。COP は温水/冷水供給で異なる。

水蓄熱槽 毎時刻、保有熱量に、上流からの温水供給（もしくは蒸気供給）を加え、下流への温水供給を減じる。そして、更新された保有熱量より水温を計算、水温と周囲温度との差に、熱損失係数および保有水量を乗じて、熱損失量を求め、保有熱量より減じる。

太陽熱集熱器 法線面直達日射量・水平面天空日射量より、集熱面への日射量を求め、それに集熱効率および集熱面積を乗じて、温水供給量を算出する。

太陽電池 法線面直達日射量・水平面天空日射量より、セル面への日射量を求め、それに変換効率およびセル面積を乗じて、電力供給（直流）を算出する。

インバータ 直流電力に変換効率を乗じて、交流電力に変換する。同時に、処理した直流電力に応じて、制御に要する電力需要を算出する。

全熱交換器 処理風量の熱負荷に応じて、電力需要を算出する。

ファンコイル/ファン/ポンプ 処理する冷温水量もしくは風量の熱量に応じて、電力需要量を算出する。但し、冷却塔～冷凍機のポンプのみ、冷凍機の冷水供給量に依る。

2.2.2 エネルギー供給システムの運転方法

実際のエコオフィスの空調設備システムを図 2.1 に掲載する。実際と同じく、温水蓄熱槽の保有熱量は給湯システムを優先し、残った場合には、必要な分だけ熱量を空調システム

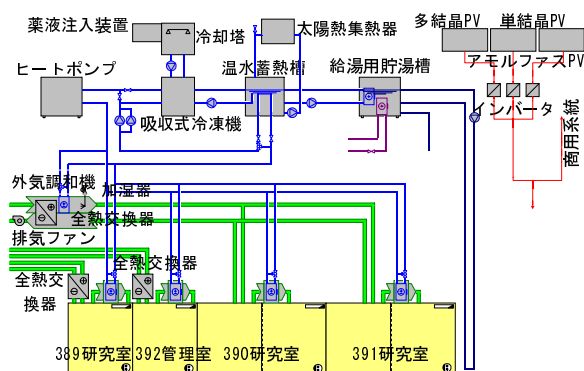


図 2.1 エコオフィスの空調設備系統図

に送る。また、エネルギー需要が発生した際、なるべく自然エネルギーでまかなうようにする。但し、太陽熱集熱器に関しては、温水蓄熱槽へのポンプ動力を節約するため、蓄熱槽の保有熱量が一定値に達したら、ポンプの運転を取りやめる。

2.3 運用段階における CO₂ 排出量算出

以上のシミュレーションモデルより、運用段階におけるエネルギー消費量（電力・ガス）を計算する。そして、それぞれに CO₂ 原単位を乗じることで、CO₂ 排出量を算出する。ライフサイクルの観点からは生産段階や廃棄段階なども考慮する必要があるが、これ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。同時に、エコオフィスの建築概要（表 3.2）、主なエネルギー機器の能力（実測値）（表 3.3）も示す。

表 3.1 エコオフィス計測データ

分類	測定項目
空気状態	日射量（2点）、温度（外気2・4室各5・太陽電池3点）、相対湿度（外気1・4室各1点）
電力供給	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
電力消費	太陽電池インバータ制御、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、排気ファン、各種動力ポンプ、4室の照明・コンセントの合計、貯湯槽
水・蒸気	各機器の出入口水温・流量・外部蒸気供給量・温度
スイッチ	各機器および各機器群のスイッチの状態

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
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

表 3.3 エコオフィスのエネルギー機器

設備	主な能力（実測値）
多結晶 PV	変換効率 10.2%, 面積 46.33[m ²]
単結晶 PV	変換効率 11.2%, 面積 45.68[m ²]
アモルファス PV	変換効率 3.58%, 面積 103.32[m ²]
インバータ	変換効率 86.1%
太陽熱集熱器	集熱効率 27.5%, 面積 124.15[m ²]
吸収式冷凍機	COP 0.532
温水蓄熱槽	熱損失係数 0.00594[kcal/L・°C] 容量 8000[L]
全熱交換器 1 （外調機）	エンタルピー・温度交換率 0.78 処理風量 900[m ³]
全熱交換器 2 （換気扇）	エンタルピー 0.66/0.75, 温度 0.81/0.81 処理風量 120[m ³]
全熱交換器 3 （換気扇）	エンタルピー 0.61/0.57, 温度 0.75/0.75 処理風量 150[m ³]
ヒートポンプ	COP 2.06/3.24
ボイラー	効率 0.8（都市ガス使用、蒸気供給）

* ”/” は、前が冷房時の値、後が暖房時の値である。

** ボイラーのみ推定値。全熱交換器のみ技術資料より。

*** 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。

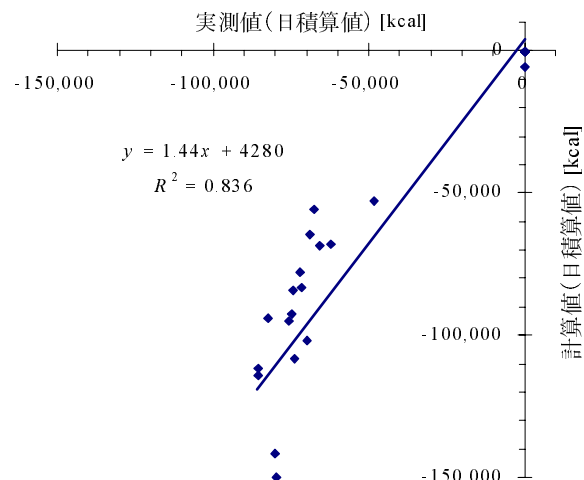


図 3.1 シミュレーション結果と実測値との比較（2月）

3.2 検証手法

一連の実測データを入力し、実測室温を満たすように、ファンコイルによる除去熱量を調整しながら、シミュレーションモデルを動かす。算出されたファンコイルによる除去熱量と、実測のファンコイルによる除去熱量（コイルへの出入口水温と流量より算出）とを比較することで、検証する。

但し、シミュレーションモデルの入力値として、上記で説明する実測データ以外に、在室人数や自然換気量が必要である。そこで、在室人数は調査によって推定した。また、自然換気量に関しては、空調スケジュール外は窓を開けることで温度調整をおこなっているという情報を居住者から得たので、モデルもそのように調整してシミュレーションする。ただし、自然換気は、次節の省エネシミュレーションでは考慮しない。

3.3 検証結果

モデルより算出される除去熱量（日積算値）と、実測された除去熱量（日積算値）とを比較した。なお、計算期間としては、空調条件が対照的な2月と9月を取り上げた（8月を取り上げなかったのは、欠測日存在のため、十分に長い計算期間を設けられなかった事による）。結果を図3.1および図3.2に掲げる。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、未測定項目の存在（および推定時の誤差）、実測除去熱量算出時の誤差（出入口より離れた水温計を使用）、潜熱の無視、実際の空調効率（天井から冷温風を吹き出し）、外気および隣接空間との熱の出入り（ドアの開閉）などが

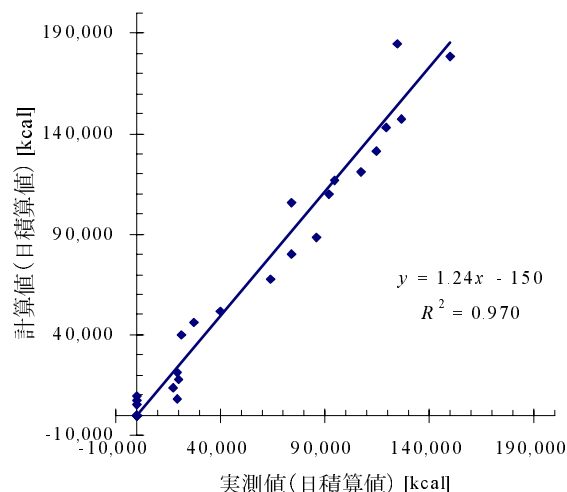


図 3.2 シミュレーション結果と実測値との比較（9月）

表 4.1 エコオフィスに導入されている省エネルギー対策

項目	詳細
太陽電池	太陽電池, インバータ
太陽熱システム	太陽熱集熱器, 冷却塔, 温水吸収式冷凍機（単効用）, 温水蓄熱槽, 各機器間の動力ポンプ
断熱材	断熱材
窓の断熱化	複層サッシ・二重窓
全熱交換器	全熱交換器

考えられる。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。

4 シミュレーション

前節で検証されたモデルを用いて、シミュレーションし、さまざまな省エネルギー対策の CO₂ 排出量の削減効果を算出する。

エコオフィスには、表 4.1 に示す 5 種類の省エネルギー対策が施されているが、これらについて CO₂ 排出量の削減効果を算出する。まず、どの省エネルギー対策も施されていない場合についてシミュレーションし、外部エネルギー供給量および CO₂ 排出量を算出する（以下、「無対策」ケースと呼ぶ）。次に、5 つの省エネルギー対策が施されたケース（「エコオフィス」）および各省エネルギー対策が単独導入されたケースを計算することで、省エネルギー対策導入による CO₂ 排出量の削減効果を分析する。

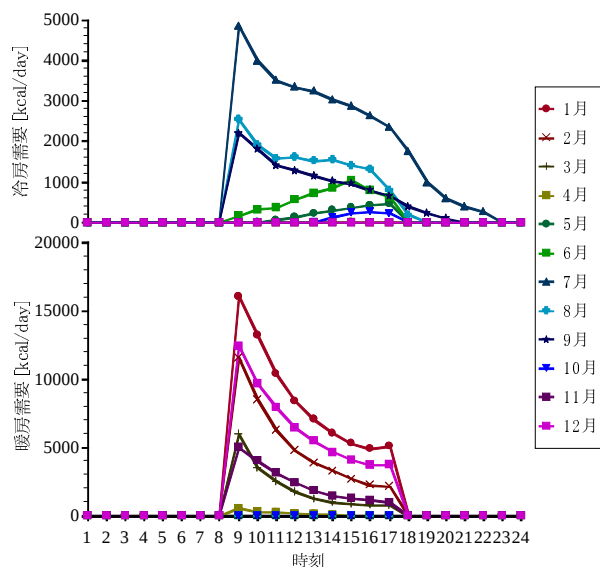


図 4.1 現状の暖房・冷房需要パターン

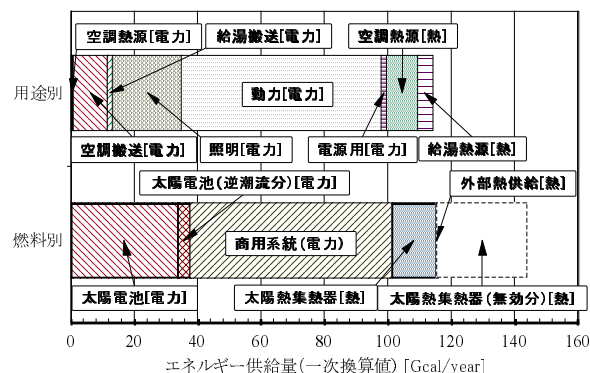


図 4.2 現状のエネルギー供給（用途別・燃料別）

4.1 現状のエコオフィスのエネルギー需給

計算結果として、まず、現状のエコオフィスの空調需要パターンを図 4.1 に、エネルギー供給を図 4.2 に示す。年間を通して冷房需要が存在することが分かる。

4.2 省エネ策による CO₂ 排出削減量

次に、各省エネ策導入による CO₂ を算出した。まず、エネルギー供給削減量を時刻別に算出した（図 4.3）。なお、燃料別 CO₂ 排出原単位として、表 4.2 を用いた。次に、各省エネ策導入による CO₂ を算出した（図 4.4）。

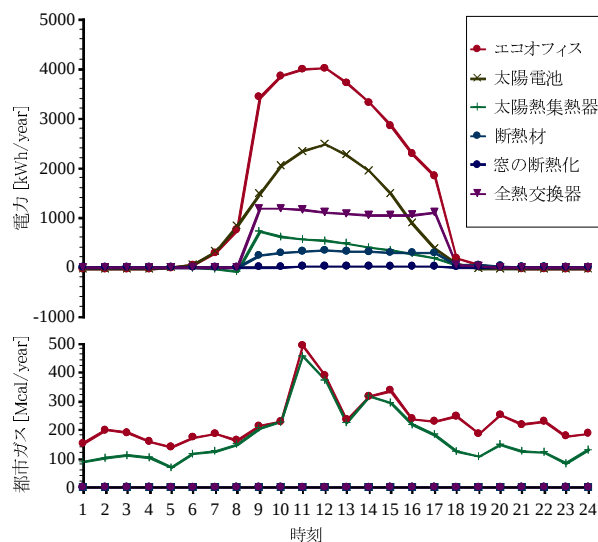


図 4.3 省エネ対策導入によるエネルギー供給削減量

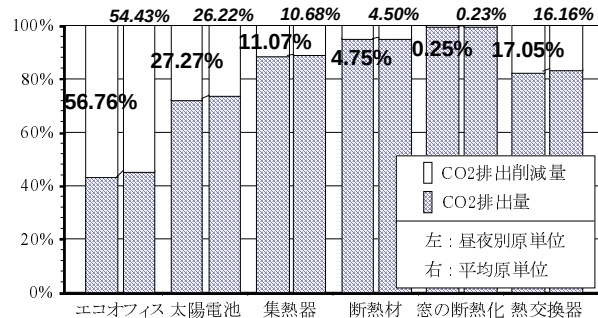


図 4.4 CO₂ 排出削減量

表 4.2 燃料別 CO₂ 排出原単位

燃料	年平均	昼間	夜間
電力 [g-CO ₂ /kWh] ¹	406	431	333
都市ガス [g-CO ₂ /Mcal] ²	260		

¹ 電力の日負荷曲線および各発電形式の CO₂ 原単位より作成。

² 出典: (財) 日本エネルギー経済研究所 定例研究報告会資料

すると、電力原単位を昼夜別に見た際、太陽電池および全熱交換器による CO₂ 削減効果が大きいことが分かった。また、断熱材・窓の断熱化の効果は予想より小さかった。これは内部発熱が多いため、冷房効率を悪化させてしまうことがあるためと考えられる。

そして、原単位を平均で見た場合と昼夜別に見た場合とを比べると、いずれも昼夜別の方が、CO₂ 排出削減量が大きくなっている。これは自然エネルギー供給が昼間おこなわれることと、空調需要が昼間に発生することに

関係する。以上から今回対象とした省エネルギー対策はいずれも昼間型であることが分かる。

5 おわりに

本稿では、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、実測室温を入力して計算される除去熱量と、実測除去熱量とを比較することでモデルの検証をおこない、2月は0.84、9月は0.97という決定係数が得られた。

次に、検証されたモデルを用いて、エネルギー需給量および CO₂ 排出量を算出した。結果、エコオフィスは、無対策ケースに比べて57%もの CO₂ 排出量を削減していることが分かった。同時に、昼夜別の CO₂ 原単位を用いると、CO₂ 削減量が大きく算出されることを示した。

今回は、既存の5つの省エネ策の運用段階について計算したが、他の省エネ策や生産段階・廃棄段階についても考慮する必要がある。一方、対象建築物の内部発熱によって最適な省エネ策が変わる可能性がある。シミュレーションモデルの精緻化とともに、これらの要素を踏まえて、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] 国立天文台(編). 理科年表 平成6年版(机上版). 丸善, 1993.
- [3] (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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 橋口敬. 事務所建築の空調設備計画. 鹿島研究所出版会, 1968.
- [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.