業務用建物における各種省エネルギー施策の総合的評価

学生員 岩船由美子 (東京大学)

正員 山地 憲治 (東京大学)

Comprehensive Evaluation of the Effect of Energy Saving Technologies in Commercial Buildings

Yumiko Iwafune, Student-member, Kenji Yamaji, Member (The University of Tokyo)

In recent years, energy consumption in the commercial sector is increasing and this trend is expected to continue in the future. This paper proposes a comprehensive model to examine potential energy savings and CO₂ emission reduction in commercial buildings from architectural and facility improvements. We use the dynamic cooling and heating demand calculation model to estimate thermal energy consumption and the effect of energy saving technologies such as insulating and efficient lighting system. Thermal energy and electric supply system model is also developed for the analysis of electric power and gas requirement by various systems in commercial buildings. Finally CO₂ emission reduction by the energy saving technologies is calculated using the estimated energy consumption and the CO₂ emission intensity of electricity obtained by a power generation best mix model.

We evaluate the economic efficiency and potential CO₂ emission reduction by energy saving technologies in the commercial buildings in Tokyo with this approach.

キーワード：省エネルギー，動的熱負荷計算，コジェネレーション，最適電源構成モデル

1. はじめに

我が国の 98 年度の最終エネルギー消費量は、景気の停滞等による産業部門の消費量 3.0% 減少が影響したことから対前年度比 1.1% 減と、82 年度以来の対前年度比減少となっている。民生部門においても 0.3% 増と低い伸びにとどまっているが、これは家庭部門の消費が減少したためであり、業務部門では電力消費、都市ガス消費が引き続き顕著な増加を示し、エネルギー消費は対前年度比 +3.0% となっており、わが国全体のエネルギー消費の 12.5% に達している。今後もサービス産業の拡大、新規建物の OA 化の進展などにより増加傾向が続くものと予想されている。

業務用建物における省エネルギーについての研究事例は多く、主として建築構造や機器効率化などの観点からエネルギー需要そのものの改善について検討されたものと、熱源システムのリプレイス等設備面の省エネルギーについて検討されたものに大別できる。前者は、文献 1 に示されるように、多種多様なエネルギー負荷の作用因子の影響を分析し一般化することによって、最終的には建物の省エネルギー基準である PAL (年間熱負荷係数) や CEC (空調エネルギー係数) などに反映されているが、近年ではエコオフィス等の個別の建物の省エネルギー特性について検討されている事例が多い。後者は、コジェネレーションや蓄熱

等の各種エネルギー供給システムの省エネルギー性、経済性について設置・運用方策を決定するものであるが、一般に各季節毎の電力・熱需要は所与として検討が進められている⁽²⁾。

筆者らは、両者を統合し、業務用建物における省エネルギー施策の経済性や効果について包括的に評価するための解析モデルを作成し、個別の省エネルギー施策が全体としてどこまでエネルギー消費削減、CO₂ 削減に貢献できるかを検討する。本モデルにより複合的な省エネルギー施策の省エネルギー効果や、建物の構造や気候条件などによる影響、冷暖房需要と熱源機器のバランス、電源構成に与える影響等、様々な角度から省エネルギーシステムの特性を評価することが可能である。

今回はモデルを東京都に適用し、業務用建物における省エネルギー施策によるエネルギー消費削減ポテンシャル、CO₂ 削減ポテンシャルさらに電力ピーク削減効果について検討を行った。

2. 省エネルギー施策評価モデル⁽³⁾

提案モデルの概念を図 1 に示す。まず、動的熱負荷計算モデルにおいて、気象データや建物に関する諸データを用いて年間熱負荷計算を行い、時間毎の冷暖房需要を算定する。断熱材や照明効率化等による冷暖房需要の変化や空

調・熱源搬送用動力削減等による電力需要変動分がこのモデルによって算定される。

得られた冷暖房需要、電力需要、外生的に与えられる給湯需要に対して、熱源システム評価モデルで各種熱源による電力及びガス消費量及びシステムコストを算定する。さらに、時間毎の電力需要の変化が電気事業者の最適負荷配分を決定する最適電源構成モデルに引き渡され、省エネルギー施策によるCO₂削減量が算定される。

図 1 省エネルギー施策評価モデルの概念
Fig. 1 Proposed energy saving evaluation model.

〈2・1〉 動的熱負荷計算モデル 冷暖房需要算定のために、本研究では、応答係数法を利用し、任意に変化する外界条件に対応して、時間を追って熱負荷を動的に計算する動的熱負荷計算（年間熱負荷計算）を用いる。応答係数法とは、空気温度の二等辺三角波励振に対する壁体表面での単位時間ごとの熱流応答を積み込むことによって熱負荷を算定する方法である⁽⁴⁾。時刻 $t = n\Delta t$ において、その時点の温度励振 θ_n による熱流応答は $\theta_n \phi_0$ (ϕ_j は励振 1℃に対する応答であり、応答係数と呼ばれる。) であり、1 ステップ前の励振 θ_{n-1} による応答は $\theta_{n-1} \phi_1$ となり、以下同様に得られる応答すべてを加え合わせた、

$$q_n = \theta_n \phi_0 + \theta_{n-1} \phi_1 + \theta_{n-2} \phi_2 + \dots = \sum_{j=0}^{\infty} \theta_{n-j} \phi_j \quad (1)$$

が $t = n\Delta t$ の熱流応答となる。この積み込みの操作が応答係数法の基本であり、応答係数 ϕ_j は温度と熱流に関する Fourier の熱伝導方程式を解くことによって得られ、壁体を構成する各壁材の熱抵抗値及び熱容量により決定される。この熱流応答に、さらに輻射成分を含む要素については熱負荷になるまでの時間遅れを積み込むことによって各時間帯の熱負荷が得られる。熱負荷の構成要素として壁体からの貫流熱負荷、窓からの透過日射熱負荷、隙間風による負荷、照明・人体等の内部発熱による負荷、換気による負荷など

が考慮される。

動的熱負荷計算ソフトウェアとしては空調衛生工学会による HASP/ACLD が汎用的に用いられているが、他のモデルとの協調を取るために扱いやすいプログラムが必要であったこと、また、将来的なモデルの拡張を考慮し、独自にモデルを作成した。モデルの妥当性については汎用プログラムの計算結果とあわせてチェックした。空調用のファン・ポンプ動力のモデル化も合わせて行い、これらの消費電力を算定している。

〈2・2〉 熱源システム評価モデル 熱源システム評価モデルは、与えられた電力・熱需要に対する各種のエネルギーシステムによるエネルギー供給フローをモデル化したものであり、システム設備容量を決定し、運転に要するエネルギー、コストを算定する。本モデルは最適化モデルではないが、外気温特性やシステムの部分負荷特性、組み合わせる熱源の運転優先順位、熱源分割台数、さらに電力やガスの料金体系を反映させた詳細なモデルとなっている。電気冷凍機、電気ヒートポンプ、ガス吸収冷温水器、ガス吸収冷凍機、ガスヒートポンプ、ボイラなど一般に業務用建物で使用されている熱源のほか、コージェネレーション (CGS) のモデル化も行った。

CGS 以外の機器のエネルギー消費・設備容量は基本的に以下の (2) ~ (8) 式に基づいて決定される。ヒートポンプのような冷暖房兼用の熱源の場合、過不足なく冷暖房需要を満足させるためには冷凍機等の補助熱源が必要となり、主熱源の賄えない残りの冷暖房需要を供給できる容量が補助熱源の容量となる。

①主熱源の需給バランス

$$\eta_{i,t} \cdot X_{i,t} = S_{i,t} \quad (2)$$

$$S_{i,t} \leq Y_i = \max_i (D_{i,t}) \quad (3)$$

・冷暖房兼用機の場合

$$Y_h = Y_c = \begin{cases} \max_i (D_{h,t}) & (Z_h \geq Z_c) \\ \max_i (D_{c,t}) & (Z_h < Z_c) \end{cases} \quad (4)$$

$$Z_i = \max_i (D_{i,t} / \eta_{i,t}) \quad (i = h, c) \quad (5)$$

$$\eta_{i,t} = f(P_i, TO_i) \quad P_i = S_{i,t} / Y_i \quad (6)$$

②補助熱源の需給バランス

$$\eta_{a,i,t} \cdot X_{a,i,t} = D_{i,t} - S_{i,t} \quad (7)$$

$$Y_{a,i} = \max_i (D_{i,t} - S_{i,t}) \quad (8)$$

CGS の運用、設備容量は (9) ~ (18) 式に基づいて決定されるが、CGS 容量は冷暖房を除く固有用途の電力需要ピークに対する比率として (10) 式のように表し、 k の値を 0% から 100% まで 10% 刻みで変化させ、年間総費用（設備費及び燃料費）を算定し、この値が最小となるとき容量を導入容量とした。

③CGS の発電電力量、購入電力量

$$\eta_{e,CGS,t} \cdot X_{CGS,t} = S_{e,CGS,t} \quad (9)$$

$$S_{e,CGS,t} \leq Y_{CGS} = k \cdot D_{e,peak} \quad (10)$$

$$X_{ebuy,t} = D_{e,t} - S_{e,CGS,t} \quad (11)$$

④CGS の排熱回収量、購入電力量

$$\eta_{r,CGS,t} \cdot X_{CGS,t} = S_{r,CGS,t} \quad (12)$$

$$\eta_{j,CGS,t} = f(P_{j,CGS,t}), P_{j,CGS,t} = S_{j,CGS,t} / Y_{CGS} \quad (j = e, r) \quad (13)$$

⑤CGS の排熱利用バランス

$$S_{w,CGS,t} = \min(S_{r,CGS,t}, D_{w,t}) \quad (14)$$

$$S_{h,CGS,t} = \min(S_{r,CGS,t} - S_{w,CGS,t}, D_{h,t}) \quad (15)$$

$$S_{c,CGS,t} = \min(S_{r,CGS,t} - S_{w,CGS,t} - S_{h,CGS,t}, D_{c,t}) \quad (16)$$

⑥補助熱源による供給

$$\eta_{a,i,t} \cdot X_{a,i,t} = D_{i,t} - S_{i,CGS,t} \quad (17)$$

$$Y_{a,i} = \max(D_{i,t} - S_{i,CGS,t}) \quad (18)$$

表 1 熱源システム評価モデルにおける変数の定義

Table1. Variables for energy supply system model.

$i=h,c,w$	: 用途種別 (暖房、冷房、給湯)
$X_{i,t}$	: 時間 t ・用途 i における主熱源の電力またはガス消費量 (Mcal)
Y_i	: 用途 i における各主熱源容量 (Mcal/h)
$\eta_{i,t}$	: 用途 i における熱源部分負荷率 P_i 、気温 TO_i のときの熱源効率
$S_{i,t}$	: 時間 t ・用途 i における各主熱源による供給熱量 (Mcal)
$D_{i,t}$	: 時間 t ・用途 i における用途別エネルギー需要 (Mcal)
$X_{a,i,t}$	: 時間 t ・用途 i における補助熱源電力 (kWh/h) またはガス消費量 (Mcal)
$\eta_{a,i,t}$	: 部分負荷率 P_i 、気温 TO_i のときの補助熱源効率 ((6)式同様)
$Y_{a,i}$	: 用途 i における補助熱源容量 (Mcal/h)
$X_{CGS,t}$	: 時間 t における CGS ガス消費量 (Mcal)
$S_{e,CGS,t}, S_{r,CGS,t}$	: 時間 t における CGS 供給電力 (kWh/h) / 排熱回収量 (Mcal)
$\eta_{e,CGS,t}, \eta_{r,CGS,t}$	: CGS 部分負荷率 P_i のときの発電効率 / 排熱回収効率
Y_{CGS}	: CGS 容量 (kW)
k	: CGS 容量のピーク電力に対する比率 (0~100%, 10% 刻み)
$D_{e,t}, D_{e,peak}$	: 時間 t における電力需要 (kWh/h) / ピーク電力需要 (kW)
$X_{ebuy,t}$	: 時間 t における系統からの購入電力 (kWh/h)
$S_{i,CGS,t}$	: 時間 t ・用途 i における CGS 回収排熱による供給熱量 (Mcal)
	(優先順位は給湯、暖房、冷房の順)

<2.3>最適電源構成モデル⁽⁶⁾ 省エネルギー施策によって削減される電力の CO₂ 原単位は、どの時間帯の電力消費を削減するかによって代替する電源が異なってくるため、ガスと異なり単純な係数として与えられない。そのため、省エネルギー施策による電力需要削減量が系統全体の電力供給構造にどのような影響を及ぼすかを評価し、省エネルギー施策が代替する電力 CO₂ 原単位を算定する必要がある。そこで、本研究では、最適電源構成モデルを用いて省エネルギー施策の CO₂ 削減効果、さらにピークカット効果について検討するものとする。

最適電源構成モデルはある年度における電気事業者の総発電費用 (電源設備費、燃料費) 最小化を目的とした最適計画を線形計画法により求めるものであり、結果として電源の設備容量や各時間帯の発電出力が決定される。一年を夏期最大三日、各月平日および休日の 25 パターンに分割し、各期の需要を日負荷曲線により与える。以下に目的関数及び制約条件を示す。

・目的関数 (年間総費用最小化):

$$\min TC = \sum_{plt=1}^m \sum_{ptn=1}^{25} \sum_{hr=1}^{24} (a_{plt} \cdot days_{ptn} \cdot X_{plt,ptn,hr} + b_{plt} \cdot Y_{plt}) \quad (19)$$

・制約条件:

①需給バランス

$$\sum_{plt=1}^m X_{plt,ptn,hr} - X_{pump,ptn,hr} + ex_{ptn,hr} = D_{ptn,hr} \quad (20)$$

②プラント建設容量制約

$$Y_{plt} \geq YO_{plt} \quad (21)$$

③揚水発電所貯水量制約

$$\sum_{plt=1}^m X_{plt,ptn,hr} \geq ST_{ptn,hr} \quad (22)$$

④揚水発電所日間運用バランス

$$\sum_{hr=1}^{24} X_{pump,ptn,hr} = \eta_{pump} \cdot \sum_{hr=1}^{24} ST_{ptn,hr} \quad (23)$$

⑤プラント設備利用率上限制約

$$X_{plt,ptn,hr} \leq U_{plt} \cdot Y_{plt}, ST_{ptn,hr} \leq U_{pump} \cdot Y_{pump} \quad (24)$$

⑥プラント負荷追従制約

$$X_{plt,ptn,hr+1} \geq Fdown_{plt,ptn} \cdot X_{plt,ptn,hr} \quad (25)$$

$$X_{plt,ptn,hr+1} \leq Fup_{plt,ptn} \cdot X_{plt,ptn,hr} \quad (26)$$

⑦LNG 年間消費量上限制約

$$\sum_{plt=p \text{ to } g} \sum_{ptn=1}^m \sum_{hr=1}^{24} days_{ptn} \cdot C_{plt} \cdot X_{plt,ptn,hr} \leq LNGMAX \quad (27)$$

表 2 最適電源構成モデルにおける変数の定義

Table2. Variables for power generation best mix model.

plt	: プラント種類 index (m 種類: 今回の試算では m=7) pump は揚水、plng は LNG を燃料とするプラントを表す
ptn	: 需要季節パターン index (25 パターン)
hr	: 時間 index (1~24)
$X_{plt,ptn,hr}$	: パターン ptn 、時間 hr におけるプラント plt の発電電力量 (kWh/h)
Y_{plt}	: プラント plt の設備容量 (kW)
a_{plt}, b_{plt}	: プラント plt の可変費 (円/kWh) 及び固定費 (円/kW)
$days_{ptn}$	: パターン ptn の発生日数 (日)
$ex_{ptn,hr}$	: パターン ptn 、時間 hr における外生発電電力量 (kWh/h)
$D_{ptn,hr}$	: パターン ptn 、時間 hr における送電端電力需要 (kWh/h)
YO_{plt}	: プラント plt の既設設備容量 (kW)
$ST_{ptn,hr}$	: パターン ptn 、時間 hr における揚水貯蔵電力量 (kWh/h)
η_{pump}	: 揚水貯蔵効率
U_{plt}	: プラント plt の設備利用率上限
$Fdown_{plt,ptn}, Fup_{plt,ptn}$	: プラント plt のパターン ptn における負荷追従率下限及び上限 (1 時間に变化させることのできる出力範囲)
C_{plt}	: 発電電力量当たり LNG 消費量 (ton/kWh)
$LNGMAX$	: LNG 年間消費量上限 (ton)

今回は 90 年度を対象とし、過去の実績データを踏まえ、90 年時点の発電設備の出力を再現し、設備容量を固定とし、発電出力の運用のみを最適化するものとする。すなわち制約 (21) 式が等式制約となる。

省エネルギー施策によって削減される電力 1 kWh あたりの CO₂ 削減量は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \text{省エネ施策削減電力 CO}_2 \text{ 原単位 (g-C/kWh)} \\ &= \frac{\text{省エネ導入前後の CO}_2 \text{ 総排出量の変動分}}{\text{省エネ導入による電力削減量 kWh}} \end{aligned}$$

3. 東京都における業務用エネルギー消費量の推定

〈3・1〉 各種建物における冷暖房需要の算定 今回、省エネルギー施策評価の対象とする業務用建物は、事務所、店舗、ホテル・旅館、病院の4種類であり、これらの用途は床面積およびエネルギー消費量で東京都全体の業務部門の約3/5をカバーしている⁽⁶⁾。それぞれの業種毎でも、建物構造や使用条件などは多種多様であり、一般化するのは困難ではあるが、今回は以下のような設定のもと標準的な冷暖房需要曲線を得ることを試みた。

〈3・1・1〉 建物構造 方位差をなくすために中心部に非空調部であるコアのある正方の建物を想定し、各方位毎に熱負荷を算定する。各窓の向かいに12m道路を挟んで同じ高さ規模の建物を想定し、壁仕様については建築学会、空調調和衛生工学会で事務所ビルエネルギー試算に用いられるモデルをベースとして設定した⁽⁷⁾。本来であれば業種毎に一般的な壁仕様も異なるはずであるが、他の業種については参考とすべき情報が無く、また、これらの設定が影響する貫流熱負荷が室内内部発熱負荷（人体発熱、照明等）に比べて比較的小さいため、すべての業種において同じ仕様としている。材料に関する詳細は省くが、窓ガラスは熱線吸収ガラス、壁・窓の断熱はそれぞれ25mm、50mmとし、階高3.8m、天井高2.6mの建物を想定した。各業種毎に大規模、小規模建物の床面積、階数を与え、1階、最上階、その他階と3つに分類して熱負荷を算定した。

〈3・1・2〉 室内条件 照明、人体、機器発熱スケジュールと空調運転時間、外気量、基準温湿度等の建物室内条件については、CECの設定基準を採用した⁽⁸⁾。室内条件は業種毎にさらに細かく分類されているため、表3に示すように用途比率を想定した。建物規模等は文献9等を参考に決定した。事務所、店舗の小規模分については、パッケージ空調機の採用が一般的であるため、これと一緒に構成される全熱交換器の採用を標準とした。

〈3・1・3〉 動的熱負荷計算モデルによるシミュレーション結果

以上の想定のもと、動的熱負荷計算モデルにより、業種毎の冷暖房需要を算定した。図2は大規模事務所ビルの冷暖房試算結果であり、冷房負荷をプラス、暖房負荷をマイナスで表している。大規模ビルでは取り入れ外気のための外気負荷が大きく、また人体・照明その他機器発熱による負荷が大きいことがわかる。業種毎の年間及びピーク冷暖房需要の試算結果を図3に示す。同図に示した参考データ⁽¹⁰⁾はばらつきが大きい、今回の試算はホテル・店舗のピークを除きほぼ参考データの範囲内に収まっているといえる。既述の通り、小規模事務所・店舗では全熱交換器の採用を標準としたため、外気冷房が削減され冷暖房需要が大規模型にくらべて小さくなっている。ホテルの場合大規模のほうが冷房は大きく、暖房は小さくなっているが、これは建物の用途比率において、内部発熱の小さい客室の比率が小規模ホテルの方が大きいためである。内部発熱の大きい店舗、レストラン、宴会場の比率が増加すると、冷房需要が

増加し、暖房需要が減少する。病院の場合、大規模のほうが暖房負荷は小さくなっているが、これは内部発熱の大きい病室面積が小規模病院に比べて大きいためである。業務用建物においてはある程度の断熱が既に施工されているため、壁からの貫流熱負荷は比較的小さく、内部発熱の大きさが冷暖房需要の変動に大きく寄与するものと考えられる。

表3 業種別設定パラメータ

Table 3. Parameters according to the type of business.

事務所	共通	空調率 80% (コア面積 20%)、窓面積率 30% 土日祝日休
	大規模	延べ床面積 10000m ² (10F) 用途：事務室 80%、会議室 15%、ホール 5% (各階)
	小規模	延べ床面積 2000m ² (5F) 用途：事務室 80%、会議室 15%、ホール 5% (各階) 全熱交換器採用
店舗	共通	空調率 80% (コア面積 20%) 1Fのみ連窓を想定し、2F以上は窓無し 水曜休 (平日日の人体発熱量の差を考慮)
	大規模	延べ床面積 20000m ² (5F) 用途：店舗 85%、事務室 10%、ホール 5%
	小規模	延べ床面積 2000m ² (2F) 用途：店舗 85%、事務室 10%、ホール 5% 全熱交換器採用
ホテル・旅館	共通	空調率 80% (コア面積 20%) 窓面積率 20% 休日無し
	大規模	延べ床面積 20000m ² (10F) 用途：1F：ロビー50%、レストラン店舗 50% 2F：宴会場 50%、レストラン店舗 50% 3F：宴会場 100% 4~10F：客室
	小規模	延べ床面積 5000m ² (10F) 用途比率：1F：ロビー50%、レストラン店舗 50% 2~10F：客室
病院	共通	空調率 80% (コア面積 20%) 窓面積率 30% 診療部分のみ土曜半休、日曜休
	大規模	延べ床面積 15000m ² (6F) 用途：1F：外来診療・ロビー90%、食堂売店 10% 2F：中央診療・検査室 3~6F：病室 85%、ナースステーション・ICU等 15%
	小規模	延べ床面積 3000m ² (4F) 用途：1F：外来診療・ロビー90%、食堂売店 10% 2F：中央診療・検査室 3~4F：病室 85%、ナースステーション・ICU等 15%

図2 大規模事務所基準モデル冷房（上）暖房（下）需要
Fig 2. Cooling and heating demand in office buildings.

図3 業種・規模別年間冷暖房需要(上)及びピーク需要(下)
Fig. 3. Annual cooling and heating demand and peak demand according to the type of business and scale.

〈3・2〉熱源システム評価モデルによるエネルギー消費量の算定 3.1 で得られた冷暖房需要及び外生的に与える電力、給湯需要データ⁽¹⁰⁾に対して、実際に熱源が消費する電力及びガス需要を算定する。なお、OA 機器やその他固有用途が消費する電力需要については、文献 11 に基づいて業種別の電力需要を推計しているが、冷暖房算定に用いた CEC の内部発熱条件と矛盾が無いように調整している。

東京都において現状各種建物において採用されている熱源比率及び規模別の延べ床面積比率の設定、90 年の延べ床面積実績を表 4 に示す。熱源には本来はボイラには重油なども含まれるが、今回は東京都が対象ということでこれをすべてガスボイラとしてシミュレーションを行った。個別熱源の場合は各階各方位毎にインテリア・ペリメータに分割するものとした。延べ床面積比率は、文献 12 を参考に熱源比率の類似性から事務所・病院については 5000m²以上を大規模、それ以外を小規模とし、店舗・ホテルについては 10000m²以上を大規模、それ以外を小規模とした。熱源に関するデータは表 5 に示すとおりであるが、部分負荷による効率低下、ヒートポンプの気温依存性を考慮している。

各業種毎・各熱源毎の一次エネルギー消費を算定した結果を図 4 に示す。全般に空調用動力の大きい中央熱源のほうが個別に比べて消費量が大きくなっている。中央熱源ではガスよりも電気のほうが、個別では電気よりもガスの HP のほうがエネルギー消費が小さくなっている。CGS は給湯需要の多い業種と相性がよく、ホテルや病院でエネルギー消費量が他の熱源に比べて小さくなっているが、給湯需要の小さい店舗では逆に大きくなっている。

これらのエネルギー消費量を表 4 の熱源採用比率で重み付けし、さらに建物規模毎の述べ床面積比率で加重平均をとった結果を図 5 に示す。参考データと比較のため 2 次エネルギー換算している。電力による冷暖房が大部分を占める小規模建物の多い事務所の場合、ほとんどが電力消費となっている。冷暖房需要と給湯需要の多いホテルではガスの消費量が大きくなっており、4 業種中エネルギー消費量が最も大きくなっている。図 5 中に示した参考データと比較すると、事務所、店舗の原単位はほぼ一致しているが、ホテル、病院のエネルギー消費量は若干小さくなっている。これはホテルの場合は厨房負荷分が、病院の場合は冷暖房給湯以外の固定需要である蒸気等従来重油などで賄ってきた分の需要が今回の計算には含まれなかったためであると考えられる。

表 4 現状の熱源採用比率及び延べ床面積比率

Table 4. Heating and cooling equipment ratio and floor area ratio.

	熱源採用比率 ⁽¹²⁾				建物延べ床面積比率 ⁽⁹⁾	1990 年述べ床面積(千 m ²) ⁽⁹⁾
	個別電気 (HP)	個別ガス (GHP)	中央電気 (HP)	中央ガス (ガス吸収冷温水器)		
事務所 (大)	10%		40%	50%	30%	80,122
事務所 (小)	80%		15%	5%	70%	
店舗 (大)	30%		10%	60%	30%	8,900
店舗 (小)	60%	10%	5%	25%	70%	
ホテル (大)	10%		20%	70%	30%	5,163
ホテル (小)	30%			70%	70%	
病院 (大)	15%		25%	60%	40%	5,518
病院 (小)	40%		5%	55%	60%	
台数	階数×8	階数×8	5 台	2 台		

表 5 熱源に関するパラメータ⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

Table 5. Parameter of heating and cooling equipments.

効率	
スクリー式 HP チラ (中央熱源)	冷房時効率 3.2 / 暖房時 4.2 (定格時)
ビルマルチ型パッケージ HP (個別熱源)	冷房時効率 2.2 / 暖房時 3.2 (定格時)
直燃式吸収冷温水機	冷房時 1.13 (定格時) / 暖房時 0.85
ガスエンジンヒートポンプ	冷房時効率 0.8 / 暖房時 1.0 (定格時)
ガスボイラ	効率 85%
ガスエンジンコジェネレーション	発電効率 32% (定格時) 排ガスボイラ熱回収率 18.3% (定格) ジャケット水熱回収率 27.1% (定格)
コスト	
電動冷凍機	13x+9,000 千円/kW
電動ヒートポンプ	100x+6,000 千円/Mcal/h
ガス吸収冷温水機	30x+15,000 千円/Mcal/h
ガス吸収冷凍機	26x+17,000 千円/Mcal/h
ガスヒートポンプ	80x+300 千円/Mcal/h
ガスボイラ	10 千円/Mcal/h
電力料金	東京電力料金規定に基づく
ガス料金	東京ガス料金規定に基づく
ガス高位発熱量	11,000kcal/m ³
システム耐用年数	15 年 (利子 5%)

図4 各種熱源による業種・規模別1次エネルギー量
Fig 4. Estimation of primary energy consumption by heating and cooling equipments.

図5 2次エネルギー消費原単位試算結果
Fig 5. Estimation of secondary energy consumption intensities and reference data.

4. 省エネルギー施策の評価

以上得られた基準モデルに対し、表6に示すような現状の技術レベルで考えられる省エネルギー施策を採用した場合の経済性、省エネルギー性について検討を行った。図6は各技術を単独で導入した場合の一次エネルギー削減率を示したものである。熱需要の多いホテル・病院でCGSの導入による削減率が高く、18~28%まで達しているが、店舗や小規模事務所では逆に増加している。事務所では内部発熱削減に寄与する照明の効率化による省エネルギーが大きい。これは照明需要が昼に多く、また店舗に比べ窓面積率が大きいと設定しているためである。店舗ではやはり照明効率向上の影響が大きく10%以上の省エネルギーが達成できる。24時間空調が行われるホテルでは全熱交換器による外気負荷削減の効果、ファンインバータ化による空調負荷削減効果が大きく、全体的にも最も省エネルギーポテンシャルが高い。病院ではCGSのほかインバータファンの採用による効果が大きい。他の業種では現れない断熱強化などの外皮負荷削減の効果が発生している。その他OA機器リプレイスによって3%程度の事務所における省エネが期待でき、また、熱源機器効率化によって2%

程度の省エネが期待できる。

表6 考慮した省エネルギー施策(1)(11)(15)(16)(17)

Table 6. Energy saving methods.

対象	対策	内容	対策費用
外皮 負荷	断熱の強化	外壁・屋根の断熱材をそれぞれ 25mm→50mm、50mm→100mmへと強化	断熱材 25mm1,000 円/m ² 50mm2,000 円/m ² 100mm3,400 円/m ²
	窓の複層化	単層ガラスを複層化し透過熱負荷を削減	単層 5,000 円/m ² 複層 15,000 円/m ²
空調 負荷	インバータ制御ファン	中央熱源システムにおけるVAV(変風量方式)の採用	25,000 円/空調機kw
	インバータ制御ポンプ	中央熱源システムにおける二次ポンプのCWV→VWV(変流量方式)の採用	25,000 円/ポンプkw
外気 負荷	全熱交換器	外気取り入れに全熱交換器(熱交換効率70%)の採用	140x+560,000 円(x:外気量 m ³ /h)
照明 の効率化	高効率照明の採用	Hfインバータ・Hf蛍光灯の採用(20%削減) 照度向上の為台数 2/3 になる	従来型 18,200 円/台(40W2 灯) 高効率 23,400 円/台(32W2 灯)
	昼光制御	高効率照明を採用しセンサにより昼光による明るさを検出し適切な光量に自動制御	50,000 円/台(32W2 灯・照度向上の為台数 2/3 に)
電力 負荷	エレベータ	従来型からVVVF制御への転換により10%消費電力減	費用差 101 円/m ² (床面積)
	省電力型OA機器の採用	IC動作電圧の低下、液晶モニタの採用等OA機器消費電力が50%削減されることを想定	・
熱源	CGSの採用	CGSの排熱利用による省エネルギー	150x+20,000 千円/kW
	熱源システム効率向上	EHP, 冷水器, GHP の効率10%向上を想定	・

図6 省エネ施策による一次エネルギー消費削減効果
Fig 6. Energy saving effects in commercial buildings.

省エネルギー施策の経済性としては、各種の指標が考えられるが、今回は需要家はその施策を導入するか否かを決定する指針となる投資回収期間で表すものとする。その定義は以下の通りである。

$$T = - \frac{\ln(1 - \frac{I \cdot i}{S})}{\ln(1 + i)} \quad (28)$$

T:投資回収期間(年), I:初期投資費用(円), i:金利(%), S:年間コスト削減(円/年)

金利は3%と想定し、各技術の投資回収期間を求めた結

果が図7である。ここで初期投資費用Iは、従来型の技術と省エネルギー技術を導入した際の差分であり、年間コスト削減Sは省エネルギー導入がある場合と無い場合の年間総費用（熱源の設備費用及び燃料費）の差分である。事務所の断熱強化などグラフに現れていない部分は投資回収が不可能な経済性が悪い技術である。ここで、OA機器のリプレイスと熱源の効率改善はコスト設定が困難であるため除外している。インバータファンやポンプ、熱交換器の投資回収期間は業種を問わず2年以内と短く、また高効率照明の場合はマイナスとなっている。これは高効率照明の一台あたりの単価は高くなるもの、技術革新により従来蛍光灯の1.5倍の照度が達成できているため設置台数が減り、結果としてイニシャルコストが低くなっているためである。CGSの投資回収期間は大規模なホテル、病院、店舗で5年程度と短くなっているが、小規模ではホテルを除いて投資回収が不可能という結果になっている。これは電力需要・熱需要のバランスの問題もあるが、CGSの設備コストにスケールメリットがあり、小規模容量ではイニシャルコストが大幅に高くなるためである。その他窓複層化は経済性が悪いが、これは東京都のような温暖な地域を対象としているためである。寒冷地の場合は暖房負荷削減効果が大きいので、全く異なる結果となるものと予想される。

この投資回収期間を基準として段階的な省エネルギー施策導入を考える。本稿では市場ポテンシャルとして5年、経済ポテンシャルとして15年以内の投資回収年数を想定して、省エネルギー量を推計した。各施策の分類を表7に示す。冷暖房需要の削減が熱源設備容量を減少させ熱源の部分負荷効率を向上させる等、省エネルギー施策の効果は複合的に作用するため、組み合わせによる効果を求めるためには単純に図6の省エネルギーポテンシャルの和をとることはできない。本研究で用いるモデルでは、考慮する省エネルギー施策の有無をパラメータとして扱い、新たな条件下での冷暖房需要、熱源設備容量、燃料消費量を算定するため、このような複合的な効果を適切に評価することが可能である。

図8は各業種毎に表7の省エネルギー施策を段階的に追加したときの省エネルギーポテンシャルを算定した結果である。この省エネルギー率は省エネ施策なしの場合の業種別エネルギー消費量に対する比率であり、建物規模別の省エネルギー率に表4の床面積比率を乗じて各業種別のポテンシャルを算定している。全般に小規模建物における投資回収期間が短くなっており、経済ポテンシャルまでの省エネルギー施策で大部分の省エネルギーが達成できている。ホテルや病院では照明のマイナスの投資回収年が効いているため6年以下の比較的短い投資回収期間の施策でそれぞれ50%、35%強の省エネルギーを達成することが可能である。ホテル・病院ではエネルギー削減率が高いところはCGSが導入されている部分である。事務所・店舗では20%程度の省エネルギーポテンシャルが存在するが、最大ポテンシャルで追加される昼光制御のコストが高いために、事

務所ビルでは10年以上の投資回収期間となっている。

図7 省エネ施策の投資回収期間

Fig 7. Pay back time of investments for energy saving methods.

表7 投資回収期間による導入施策の分類

Table 7. Energy saving methods categorized by investment pay back time.

	事務所	店舗	ホテル	病院
市場ポテンシャル (T≤6年)	インバータファン インバータポンプ 全熱交換器(大) 高効率照明 エレベータ	インバータファン インバータポンプ 全熱交換器(大) 高効率照明 エレベータ CGS(大)	インバータファン インバータポンプ 全熱交換器 高効率照明 エレベータ CGS(大)	高断熱化(大) 窓複層化(大) インバータファン インバータポンプ 全熱交換器 高効率照明 エレベータ CGS(大)
経済ポテンシャル (T≤15年)	CGS(大)	昼光制御	高断熱化(小) CGS(小)	高断熱化(小) 窓複層化(小)
最大ポテンシャル	窓複層化(小) 昼光制御		高断熱化(大) 窓複層化(小) 昼光制御(大)	

(小：小規模建物、大：大規模建物、()がないものは大小両方において導入される技術)

注：大または小は建物の規模を、それ以降は表7に示す3段階の省エネポテンシャルを表す。例えば「小・経済P」とは「小規模建物における経済ポテンシャルまでの省エネルギー技術の導入」を表し、店舗の場合、市場ポテンシャル中の大規模のみを除く4技術と経済ポテンシャルに分類される昼光制御技術の計5技術を導入したときの試算結果となる。

図8 省エネ施策の省エネルギーポテンシャルと投資回収期間の相関

Fig 8. Potential energy saving and investment pay back time.

5. 最適電源構成モデルによる省エネルギー施策のCO₂排出量の評価

以上得られた省エネルギーポテンシャルから東京都におけるCO₂排出削減可能量について検討する。上述のように、電気事業者の電源構成モデルに本モデルから得られる時間別の省電力量を需要曲線の変化分として与え、電源構成の変化を検討する。

〈5.1〉 シミュレーション条件 東京都を含む A 電力の過去の実績データ⁽¹⁸⁾をもとに、各種データを作成した(表 8)。本モデルで考慮した電源は、1990 年時点で A 電力が保有していた原子力、石炭火力、LNG 火力、石油火力、揚水発電、水力発電および他社受電であるが、水力発電および他社受電は外生的にその出力を与えるものとし、最適化の対象としない。水力発電の出力は年間ベースとして一定とし、他社受電の出力は 1990 年度の各月の最大電力、受電計画値に基づき、需要量に合わせて割り当てるものとした。なお、省エネルギー施策によって削減されるのは需要端電力であるため、供給側の送電ロス 5%を見込んで送電端需要から差し引くものとした。

省エネルギー施策導入パターンとしては、

1. 市場ポテンシャル導入時
2. 経済ポテンシャル導入時
3. 最大ポテンシャル導入時

の 3 ケースを想定し、東京都において対象となる建物全てに導入するものとする。

表 8 1990 年度 A 電力各種データ

Table 8. Utility data.

最大電力	47,400MW
年間総需要(送電端)	229,600GWh
保有発電設備容量実績	
原子力	11,296MW
石炭火力	630 MW
LNG 火力	9,475 MW
石油	17,985 MW
揚水	4,000 MW
水力発電量実績	12,629 GWh
他社受電実績	27,319GWh

〈5.2〉 シミュレーション結果 各省エネ施策導入時の電源構成に与える影響を整理した結果を表 9 に、経済ポテンシャルまで省エネ施策を導入した場合の夏期ピーク時の電源構成及び年間発電量内訳を図 9 に示す。業務用建物における省エネルギーは、昼ピークをにう石油火力を主として代替する。そのため省エネ施策による削減 CO₂ 原単位はいずれのケースも 207g-c/kWh 強となっており、これは石油火力の CO₂ 排出原単位 197g-c/kWh に送電ロス分を上乗せした量にほぼ一致し、全発電所平均 CO₂ 排出原単位(97g-c/kWh) はいうまでも無く、火力発電所平均 CO₂ 排出原単位(178g-c/kWh) よりも大きくなっている。このことは業務用建物の省エネルギーによる CO₂ 削減効果が、電力量削減効果よりも実質的に大きいということを意味し

ており、本モデルのように電力需要と省エネルギー効果の時間特性を考慮することによってはじめて定量的にその効果を算定することができる。

最大ポテンシャルまで省エネルギー施策を導入した場合には CGS による系統電力削減効果が大きく、総発電電力量の 3.5% を削減することができ、ガスによる寄与分とあわせて東京都の 90 年の CO₂ 排出量の 6.4% を削減することが可能である。投資回収期間が 5 年以内の市場ポテンシャルケースにおいても 4.5% の CO₂ 削減が期待できる。

この試算により得られた削減 CO₂ 原単位を用いて CO₂ 削減投資費用曲線を求めた(図 10)。これは 4 業種すべての最大ポテンシャルまでの省エネ施策を導入した場合の CO₂ 削減ポテンシャルを積み上げたものである。CO₂ 削減投資費用は初期投資コスト追加分を削減 CO₂ 量で除した値である。比較的短期間に回収可能な市場ポテンシャル技術の導入により 5 万円/t-C までの CO₂ 削減投資費用で約 800kt-C の CO₂ 削減が可能である。最大ポテンシャル約 1200kt-C のうち、約 7 割の CO₂ 削減が事務所によるものである。これはいうまでもなく事務所の述べ床面積が他の業種に比べて突出して大きいためである。CO₂ 削減投資費用が 10 万円/t-C を越える事務所の CO₂ 削減ポテンシャルは主として昼光制御施策による分であるが、投資費用は高いもののその CO₂ 削減ポテンシャルは大きく、CO₂ 抑制のための効果的な施策として補助金などによるバックアップによって経済性を成立させていくことが望ましい。

東京都においては業務用建物全体の床面積のうち事務所ビルの占める割合が大きく、そのうち 7 割は小規模ビルである。この分野での効果的な、かつ経済的に成立する省エネルギー施策を検討していくことが全体の CO₂ 排出量抑制をはかる上で重要であると考えられる。

表 9 最適電源構成モデルによる算定結果

Table 9. Results of power generation best mix model.

省エネ施策導入後系統電力による CO ₂ 排出量					20,562(千t・C)	
東京都エネルギー消費による CO ₂ 排出量 (1990) *					18,300(千t・C)	
省エネ施策導入後	ピークカット率	系統電力に対する CO ₂ 削減率	系統電力に対する CO ₂ 削減率	代替電力原単位 g・C/kWh	ガスも含めた CO ₂ 削減量 (千t・C)	東京都 CO ₂ 排出量に対する割合
市場ポテンシャル	2.8%	3.9%	1.8%	207.7	818	4.5%
経済ポテンシャル	4.6%	7.2%	3.2%	207.4	1,065	5.8%
最大ポテンシャル	5.9%	7.6%	3.5%	207.4	1,173	6.4%

* 文献 6 より省エネ施策導入前の電力 CO₂ 排出原単位 89.6g-c/kWh を用いて算定

図9 夏期最大時の発電出力(上)および年間発電量内訳(下)(経済ポテンシャル省エネ施策導入後)

Fig. 9. Power plant generation on the peak day and annual generation ratio after introducing economical potential energy saving methods.

図10 CO₂削減投資費用とCO₂削減ポテンシャル

Fig. 10. Investment cost per CO₂ reduction and potential CO₂ reduction.

6. まとめ

本研究においては、業務用建物における省エネルギー施策の経済性や効果について包括的に評価するための解析モデルを提案し、東京都について試算を行いエネルギー消費削減ポテンシャル、CO₂削減ポテンシャルを求めた。ホテルや病院においてはCGS導入効果が大きく、投資回収期間も大規模建物においてはいずれも短い。冷房負荷削減と電力消費削減の二重の効果を有する照明の効率化も特に事務所や店舗などにおいて効果が高い。各種の省エネルギー施策を組み合わせることにより、東京都の排出量の7%に相当する約1,200kt-C/年のCO₂削減が期待でき、そのうち70%程度まではCO₂削減投資費用が5万円/t-C以下に収まる。

今後は業務用建物の新築や改築需要、延べ床面積の増減などを考慮に入れ、電源計画と合わせた時系列的な分析を行い将来の電源建設の回避等のメリットについて検討を行う予定である。また、業務用建物よりも省エネルギーポテンシャルが高いともいわれる住宅需要についても同様の試算が有意であると考えられ、さらなる省エネルギーの可能性について検討してゆきたいと考えている。

(平成12年04月03日受付, 同07月14日再受付)

文献

- 1) 日本建築学会編, 建築の省エネルギー計画, 彰国社, 1985
- 2) 伊東他, コージェネレーションの最適計画, 産業図書, 1990
- 3) 岩船他, 業務用建物における省エネルギー施策の評価, 第16回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 2000
- 4) 松尾他, 空調設備の動的熱負荷計算, (社)建築設備技術者協会, 1992
- 5) 高橋他, CO₂排出抑制下での最適電源計画の分析, エネルギー・資源学会第15回研究発表会講演論文集, 1996
- 6) 東京都におけるエネルギー需給構造の現状と将来展望に関する調査報告書, 東京都生活文化局, 1993
- 7) シンポジウム地球環境時代における建築設備の課題, (社)空気調和・衛生工学会, 1995.7
- 8) 建築物の省エネルギー基準と計算の手引き改訂6版, (財)住宅・建築省エネルギー機構, 1999
- 9) 民生部門エネルギー消費実態調査(財)日本エネルギー経済研究所, 1987, 1995, 1996
- 10) 都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価, (社)空気調和・衛生工学会, 1994
- 11) 永田他, 民生部門における機器効率化による省電力効果, (財)電力中央研究所研究報告Y95001, 1995
- 12) 建築設備情報年鑑, 建築設備技術者協会, 1994
- 13) 日本コージェネレーション研究会, コージェネレーションCOGEN-PLAN1.31 ユーザーズマニュアル, 1993
- 14) 彰国社, 建築文化デザイナーのための建築設備チェックリスト1998年度版10月号臨時増刊, 1998
- 15) グリーン庁舎計画指針及び同解説, 一環境配慮型官庁施設計画指針, (社)公共建築協会, 1999
- 16) 井原他, 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, 第15回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 1999
- 17) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 新エネルギーデータ集平成11年度版
- 18) 平成3年度電力需給の概要, 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部編1991

岩船由美子 (学生員) 1968年4月18日生まれ。1991年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。1993年3月同大学工学研究科電気工学専攻修士課程終了。(株)三菱総合研究所入社。1998年3月退社。1998年4月東京大学工学系研究科博士課程入学。現在に至る。エネルギーシステムに関する研究に従事。

山地 憲治 (正員) 1950年2月25日生まれ。1972年東京大学工学部原子力工学科卒業。1977年東京大学大学院工学系研究科博士課程終了。同年(財)電力中央研究所入所。その後米国電力研究所(EPRI)客員研究員、電力中央研究所・エネルギー研究室長を経て、現在東京大学教授(新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻)。エネルギー分析、技術評価に関する研究に従事。エネルギー・資源学会、日本原子力学会、国際エネルギー経済学会会員。工学博士。