地域の気候特性を考慮した業務建物における空調機器の 容量・稼働条件決定モデルに関する研究

正 員 石田 武志* 正 員 森 俊介**

Research on the Decision Model on Capacity and Operation of Air conditioning Systems of the Commercial Building Considering Regional Weather Conditions

Takeshi Ishida*, Member, Shunsuke Mori**, Member

It is said that the cogeneration system(CGS) and Heat pump system(HP) are effective air conditioning systems for energy saving and CO₂ reduction in the commercial building. However, the economic, energy and environmental efficiency characteristics of these systems vary so much depending on the weather conditions and the demand patterns of heat and electric power.

In this research, we develop a model to evaluate the optimum capacity and the operating patterns of air conditioning system by nonlinear mixed integer programming in order to formulate the partial load properties of heating equipments in practical operation. Since our model involves the estimation procedure of energy load of the building based on the human density and the structure of that, it enables us to evaluate the optimum condition of tenants from the air conditioning demands.

The compatibility between the economy and the energy saving of the air conditioning system implementation planning has been the problem. We propose a new measure to develop an optimal energy saving system under the constraint of the investment recovery years as economic efficiency for the commercial building.

The results show us that the optimum planning depends on the regional weather conditions as well as energy equipments and energy load patterns.

キーワード : 業務建物, コージェネレーションシステム, ヒートポンプシステム, 非線形混合整数計画

Keywords : Commercial building, Cogeneration system, Heat pump system, Mixed integer nonlinear programming

1. 緒 言

温室効果ガス排出を削減するための気候変動枠組条約・京都議定書が発効される状況となってきたが、国内での業務部門における排出量は依然増加の傾向にあり、CO₂削減、省エネルギーの推進が緊急の課題である。

業務部門のエネルギー消費構成においては、空調用エネルギーが大きな比率を占めているが、業務ビルにおける空調システムは、旧来からの吸収式冷凍機や電動冷凍機などを始め、ヒートポンプシステム (HP)、コージェネレーションシステム (CGS) など多様なものが存在する状況である。

このうち CGS は、年間の稼働時間や熱と電力の需要のバランスにより経済性が大きく変動し、CGS 導入量の設定によっては省エネ性や経済性が悪化する場合もあると考えられる。また HP は外気温により効率が変動し、気候により性能が大きく変動する場合がある。このため CGS と HP の選択を含む最適な空調機器の決定は、地域の気候特性や建物用途構成により異なり、これらを検討していくためには、気候特性を踏まえたエネルギー負荷推計と、機器の負荷特性の具体的な表現と定式化が必要となる⁽¹⁾。

従来、業務建物のエネルギー負荷を推計する方法としては、実測等に基づくエネルギー原単位により推計する方法（例えば⁽²⁾など）と、MICRO-PEAK/2000(建築設備技術協会, <http://www.jabmee.or.jp/>)や BECS/SER(建築・環境省エネルギー機構, <http://www.ibec.or.jp/index.html>)等の空調負荷推計モデルを用いる方法がある。原単位による方法は、簡易にエネルギー負荷を求めることが可能であるが、外気温等の気候特性による負荷の変動を表すことは、当該地域の実測データ等が整備されていない場合は困難である。一方で

* 東京理科大学大学院理工学研究科博士課程
(財団法人 日本システム開発研究所)
〒162-0067 東京都新宿区富久町 16-5
Systems Research & Development Institute of Japan,
16-5, Tomihisacho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0067

** 東京理科大学工学部経営工学科
〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641
Tokyo University of Science,
2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510

空調負荷推計モデルは、気象データにより地域別の空調負荷を導出することが可能であるが、建物の詳細な条件を設定する必要があるため、負荷データを空調最適化モデルの入力データとして利用することは可能であるが、空調最適化モデルと一体で扱い、最適な建物条件等を導出することは困難であった。

次に最適な空調システムの導入条件を決定する一般的な方法としては、システムシミュレーションによる方法や、最適化手法によるものがある。システムシミュレーションによる方法としては、例えば CGS の評価を行う空気調和・衛生工学会による CASCADE⁽³⁾ などがあるが、これらによる方法は、導入条件に関するパラメータが多い場合、組合せパターンが非常に多くなり、最適な条件を導き出すことが困難になる。一方で、最適化手法による方法としては、数理計画法によるもの（例えば文献（4）（5））や、遺伝的アルゴリズムによるもの（例えば文献（6））、高次元アルゴリズムによるもの（例えば文献（7））などが多く報告されているが、エネルギー需要が所与とされていたり、機器特性が単純化されることが多い。これは最適化法を用いる場合は、気候特性や機器特性等の詳細な条件を設定したうえでの最適容量の決定が大規模な数理計画問題となり、従来の計算機環境では求解が困難である場合が多かったためと考えられる。

このように、業務用空調システムの選択肢が多様になる中で、地域の気候特性や建物条件等を踏まえた業務用建物のエネルギー負荷を推計し、最適な空調システムの選択と容量・稼働条件を求める手法の開発・普及は、今後の業務部門の省エネルギーを考えていく上で非常に重要であると考えられる。

2. 研究目的

本研究は、特定用途の業務建物におけるエネルギー負荷に関して、気候特性や建物概況をふまえて推計する簡易モ

図1 本研究における最適化モデルの概要
Fig. 1. Outline of the optimization model in this study.

デルを構築するとともに、この簡易負荷モデルを、システムの部分負荷や経済性の制約を考慮した CGS 及び HP の最適導入容量・稼働条件を決定するモデルと一体化した形で数理計画法により構築を行うことを目的としたものである。

このモデルの構築では、外気温特性や部分負荷の考慮、複数台運転の制御などの詳細な設定ができるようにするため、非線形混合整数計画法（MINLP）によりモデル化を行った。

筆者らは既に文献⁽¹⁾で CGS の部分負荷特性を混合整数非線形モデルで表現し、現実的な機器特性のもとでの最適計画・運用計画を導出し、CASCADE より一様に優れた結果を導いた。本論文ではさらにこのモデルを拡張し、HP の特性や地域気候特性を併せ最適な業務建物の空調システムを求めるものである。

これにより国内各都市の気候データに基づいたエネルギー負荷推計と、外気温特性を踏まえた空調システムの最適容量・稼働条件の導出が一体化したモデルで可能となる。さらに業務用途構成比等を変数にすることにより、ある空調システム容量に対する最適な業務用途構成比の導出等も可能となる（図1）。

さらに従来、経済性と省エネルギー性のトレードオフ評価は、両者の重み付けにより最適化を行う多目的関数による評価が用いられてきたが、重み係数の解釈が不明瞭であった。そこで筆者らは文献（1）に示したような、投資回収年を制約した下での一次エネルギー最小化による方法を用いた。

3. 空調システムのモデル化と定式化

検討対象として図2に示すような HP と CGS 等の空調熱源システムの容量・稼働条件を決定するモデルを考え、CGS の補助システムとしては、ガス冷温水機を想定した。図2は対象とする全ての機器構成を含むフローであり、この中からエネルギー需要を満たす最適な機器及びフローが選択され、他の機器の容量を 0 とすることで、機器の選択を表

図2 業務建物の空調システムのモデル化
Fig. 2. Modeling of the air conditioning system.

現している。ただし、機器特性、需要パターン、評価関数の設定による複数機器の保有の可能性も排除はしていない。

〈3・1〉空調システムモデルの定式化 モデル化された空調システムの各構成要素について、エネルギーの制約、収支を以下のように定式化した。

(定式化の構成)

- ・熱・電力需要の制約式（詳細は文献（8）参照）
- ・各構成機器の電力、熱のバランス式（詳細は文献（8）参照）
- ・部分負荷効率の式（下記参照）
- ・CGS 運転の稼働・停止の制御式（詳細は文献（1）参照）
- ・経済性の制約式
- ・回収年=CGS・HP 初期設備費増分
／（従来システム運転コスト－CGS・HP 運転コスト）
- ・単純回収年≤X 年
- ・目的関数：一次エネルギー最小化

〈3・2〉HPとCGSの部分負荷特性、HPの外気温特性のモデル化 HP、CGS とともに部分負荷運転時は効率が低下し、また運転負荷率には下限値がある。今回、HP の部分負荷運転時の COP(c)を求めるために以下の式をモデルに導入した（図3）。 r_0 はHPの最低負荷率、 δ は0、1の整数であり、HPの稼働・停止をあらわしている。また t は外気温、 t_0 はHPのCOPを定めている基準温度であり、 Δc はHPの外気温特性による性能の変化を表しており、標準外気温に対して1℃変化するごとのHPのCOPの変化値である。これにより外気温の変動によりHPのCOPが変化するようにして外気温特性を表現できるようにした。COPは文献（9）を参考に、冷房時は基準温度35℃から外気温が1℃低下するごとに1.9%増加し、暖房時は基準温度6℃に対し外気温が1℃低下するごとに0.7%低下するように設定した。

また、CGSは部分負荷特性のみについて同様なモデル化を行った⁽¹⁾。その他具体的なパラメータの設定は後述する。

$$\delta = \{0, 1\} \quad ; \quad r \leq \delta \quad \text{かつ} \quad r \geq r_0 \cdot \delta$$

$$c = \left\{ c_{\min} + (r - r_0) \times \frac{c_{\max} - c_{\min}}{1 - r_0} \right\} \times (t - t_0) \Delta c$$

図3 ヒートポンプの部分負荷特性及び外気温特性の定式化

Fig. 3. Model of partial load of Heat pump system.

4. 業務建物の電力・熱負荷の簡易推計モデル

〈4・1〉負荷推計モデルの概要 従来、業務用建物における空調熱源システムを検討する場合、建物設計時におけるエネルギー負荷予測や、エネルギー負荷計測事例から作成した用途別エネルギー負荷原単位により推計することが一般的である。しかし、実際の建物におけるエネルギー消費は、建物内の用途構成比やそれぞれのテナントにおける稼働形態、稼働時間などで様々に変動する。従来の方法ではこのような外部条件による負荷変動を詳細に考慮することが困難であった。また空調負荷を推計する既存システム（例えばMICRO-PEAKなど）を負荷推計システムとして最適化モデルに含めることは困難であった。

図4 建物エネルギー負荷の推計の構成

Fig. 4. Estimate method of the building energy load.

表1 内部電力負荷原単位の設定

Table 1. Primary unit of electric power load of the equipment used in the building's interior.

	Business machine, lighting equipment	Air conditioning pump power	Elevator power
office (W/m ²)	14.2	46.4	7.7
shop (W/m ²)	26.7	79.5	11.3
hotel (W/m ²)	4.6	32.0	8.0

表2 人体から発生する顕熱・潜熱・人員密度の設定

Table 2. Setting of humans sensible heat, humans latent heat and personnel density.

	Human sensible heat unit(W/m ²)	Human latent heat unit(W/m ²)	Human density (human/m ²)
office	43	63	0.2
shop	43	74	0.35
hotel	43	63	0.2

今後、CGS や HP などの空調システムの導入可能性を、精度良く検討するためには、建物のエネルギー負荷を各種省エネルギー対策も含めて、エネルギーシステムの評価と一体化して推計することが必要である。本報では図 4 に示すように、建物の電力・エネルギー負荷を細分化して定式化し、建物概要、建物用途、気象データに基づく建物内部からの発熱、壁面での熱貫流や外気交換による熱損失などの算出方法を明確にし、様々な条件下でのエネルギー負荷を簡易推計する計算ブロックをモデル内に明示的に導入することを可能とした。

空調負荷の推計式の構成は以下になる。また、各項の推計に用いた主な基準パラメータを表 1、2 に示す。内部電力負荷や人体発熱は、地域間や用途間の比較に重点を置いたため、建物用途の違いによる人員密度の相違までモデル化し、時間変動については一定としている。建物の貫流熱を求める際の壁面熱貫流係数等の建物の設定は、外気温特性による地域間比較を明確にするため、今回は条件を用途や都市によらず一定としている。また、給湯負荷は需要を積み上げ計算して求めるだけのデータが整備されていないため、空気調和・衛生工学会の原単位データより推計している⁽²⁾。

(推計式の構成)

$$\begin{aligned} \text{空調負荷} &= \text{外から貫流する熱} + \text{内部発熱} + \text{潜熱負荷} \\ &= (\text{壁から貫流する熱} + \text{外気取入れによる熱} \\ &\quad + \text{窓からの日射}) + (\text{内部機器の発熱} \\ &\quad + \text{人体からの発熱}) + \text{潜熱負荷} \end{aligned}$$

主なパラメータ

- ・壁面熱貫流係数： $3.6\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
- ・内部電力負荷： 表 1
- ・人体発熱・人員密度： 表 2
- ・全熱交換機効率： 0.8
- ・空気交換量 (m^3/m^2) office : 7.2, shop : 20, hotel, 3

〈4・2〉 負荷推計モデルによる推計結果と実データ比較

業務建物に関する既存の負荷データ（寒冷地を除く）ELPAC2000⁽¹⁰⁾ や（社）空気調和・衛生工学会（SHASEJ）によるエネルギー負荷原単位⁽²⁾ と、東京の気象データに基づく本簡易負荷推計法による結果を、事務所ビルを例として比較すると図 5、図 6 のようになる（図 6 の ELPAC2000 の熱需要データ数が図 5 に示す電力データ数より少ないのは、ELPAC2000 元データの欠損によるものである）。図 6 の熱需要は空調（冷房、暖房）、給湯を合わせたものである。空調簡易推計モデルによる電力消費量や熱需要量は、基準パラメータで実データに近いエネルギー負荷を推計しており、パラメータの調整により、さらに個別ケースでの評価が可能になることがわかる。

〈4・3〉 エネルギー需要負荷の設定 エネルギー負荷簡易負荷推計モデルを用いて、業務建物における各月の代表日における 24 時間データを生成した。気象データとしては、日本建築学会 拡張アメダスデータにおける標準気象デ

図 5 年間電力消費量の比較（事務所ビル）

Fig. 5. Comparison of the annual electricity consumption (office).

図 6 年間熱需要量の比較（事務所ビル）

Fig. 6. Comparison of the annual heat consumption (office).

図 7 暖房負荷の推計結果（2 月）

Fig. 7. Estimate result of the heating load (February).

図 8 冷房負荷の推計結果（8 月）

Fig. 8. Estimate result of the cooling load (August).

図9 一般電力負荷の推計結果(8月, 各都市共通)

Fig. 9. Estimate result of the other electric power load (August, each city commonness).

ータ(月別24時間値)を用いて, 主要8都市(札幌, 青森, 仙台, 東京, 大阪, 広島, 鹿児島, 那覇)の負荷を求めた。以下に示す建物条件で推計した負荷パターンの例を図7~9に示す。

(負荷データを決定するための設定データ)

- ・建物床面積 : 10,000m²
- ・建物用途構成比: 事務所 20%, 店舗 20%, ホテル 60%

5. 最適化モデルの計算条件

以上で示したモデル式の計算を数値計画ソフトウェアGAMSにより実施した。GAMSでは, MINLPのソルバーとしてCONOPT2とSBB(分岐限定法)を併用して求解している⁽¹¹⁾。ここでHP及びCGSの計算条件は以下に示す。CGS, ガス冷温水機, 吸収式冷凍機に関する各設定はCASCADEの基準設定に従っている。HPのCOPはメーカー資料等を参考に設定した。

(試算条件)

- ・逆潮流 : なし
- ・CGS最高負荷率 : 100%
- ・CGS最低負荷率 : 30%
- ・CGS補機動力消費量 : 5%
- ・CGS最低買電量 : 10%
- ・CGS補助システム : ガス冷温水機 + 給湯ボイラー
- ・CGS比較システム : ガス冷温水機 + 給湯ボイラー
- ・HP最高負荷率 : 100%
- ・HP最低負荷率 : 30%
- ・貯湯槽, 蓄熱槽 : 0m³

(CGSとHPの比較をするため簡単化のため0に設定)

- ・蒸気ボイラー容量 : 0t/h

(CGSとHPの比較をするため簡単化のため0に設定)

- ・最大導入台数 : CGS 2台, HP 2台

・機器効率

CGS : 0.34 (100%負荷時) 0.32 (75%負荷時)
0.30 (50%負荷時) 0.28 (25%負荷時)
熱回収効率 : 0.40 (一定)

ガス冷温水機 COP : 0.80 (暖房), 1.00 (冷房)

温水吸収式冷凍機 COP : 0.70

ボイラー 効率 : 0.80

HP (空気熱源ヒートポンプ) のCOP

冷房時 COP : 5.0 (100%) - 4.5 (30%)

暖房時 COP : 5.0 (100%) - 4.5 (30%)

・導入コスト

- ・CGS初期コスト = 300,000円/kW
- ・CGSメンテナンスコスト = 3.0円/kWh
- ・HP初期コスト = 300,000円/kW
- ・電力料金 : 1560円/kW (月基本料)
: 16.0円/kWh (従量・夏期)
: 14.5円/kWh (従量・その他季節)
- ・ガス料金 (既存システム) = 70円/m³
- ・ガス料金 (CGSシステム) = 50円/m³
- ・単純回収年の制約 : 3~10年以内

- ・事業用電力のCO₂排出係数 : 0.357kgCO₂/kWh (全電源平均)
0.690kgCO₂/kWh (火力平均) (HPの外気温特性等を中心にみるため, 電力会社ごとの係数を用いず全国平均値を使用した。)

6. 計算結果

〈6・1〉 気候条件の相違による都市別の最適空調システム

空調機器の条件を同じにし, 主要8都市での気候特性に基づき業務建物のエネルギー負荷データを推計し, CGS及びHPを導入した場合のそれぞれの最適容量を導出した場合の結果を表3に, 都市別の一次エネルギー消費量を図10に示す。投資回収年の制約は10年以内とし, 実質的には一次エネルギー最小化という条件になっている。

この結果より, 東京と鹿児島ではCGSに比べHPのほうが一次エネルギーは小さくなっており, その他の都市ではCGSのほうが一次エネルギーが小さくなった。特に札幌や青森などの寒冷地では, HPとCGSによるエネルギー消費量の差が大きくなることがわかる。これはHPの外気温特性により, HPは寒冷地ほど, 暖房時のCOP低下が大きく, 年間を通じた評価でもエネルギー利用効率がCGSに比べ低下することによるものである。図11に都市別のHPとCGSの年間平均エネルギー効率を指数にしたものを示す。ここでの年間平均エネルギー効率は, 年間を通じた実際の熱負荷(冷房, 暖房, 給湯の合計)と, 一次エネルギー投入量の比である(年間平均効率 = 年間熱負荷合計 / 年間一次エネルギー投入量)。これより, HPの場合, 寒冷地の都市ほど年間平均エネルギー効率が低いことがわかる。

また図10では, 気候特性が近いと考えられる東京, 大阪, 広島の3都市において, HPとCGSの一次エネルギー消費量が僅かではあるが変化するのは, 図11の年間平均エネルギー効率の比較からわかるように, 東京に比べ大阪, 広島の評価時の効率がHPについては僅かに低下し, CGS効率が僅かに良くなることによるものである。HPの効率が低下する原因は, 図7の暖房負荷に示すように東京に比べ大阪, 広島の暖房負荷が僅かに大きくなっており, 建物条件を統一したうえで暖房負荷を推計しているため, この差は冬季の外気温が東京に比べ大阪, 広島が低いことを示しており, このため東京に比べ大阪, 広島のHPの効率が低下することによるものである。すなわちこのようなHPとCGSの優劣の差は, 都市別の気候データの相違に基づくエネルギー負荷データの相違と空調システムの容量・運転状況の相違に

表 3 各都市における最適システム容量の評価結果

Table 3. Estimated result of optimum system capacity in each city.

City	Heat system	COP of Heat pump	Capacity of system (kW)	Primary energy (GJ/Year)	CO ₂ emission (t-CO ₂ /year)	Investment-return years
Sapporo	HP	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 98 No.2 107	28,781	1,127 (2,006)	4.50
	CGS	—	No.1 134 No.2 342	28,271	1,248 (1,536)	9.82
Aomori	HP	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 77 No.2 108	28,253	1,106 (1,970)	4.44
	CGS	—	No.1 68 No.2 342	27,443	1,224 (1,452)	8.13
Sendai	HP	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 68 No.2 66	27,054	1,053 (1,906)	3.62
	CGS	—	No.1 134 No.2 339	26,884	1,190 (1,451)	10.00
Tokyo	HP	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 76 No.2 49	26,335	1,025 (1,855)	3.89
	CGS	—	No.1 342 No.2 0	26,535	1,174 (1,433)	8.08
Osaka	HP	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 47 No.2 87	26,523	1,033 (1,866)	3.97
	CGS	—	No.1 66 No.2 277	26,309	1,166 (1,416)	7.71
Hiroshima	HP	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 77 No.2 50	26,512	1,032 (1,868)	3.79
	CGS	—	No.1 66 No.2 342	26,429	1,176 (1,409)	8.88
Kagoshima	HP	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 125 No.2 92	26,171	1,021 (1,836)	6.39
	CGS	—	No.1 267 No.2 0	26,443	1,157 (1,470)	7.28
Naha	HP	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 130 No.2 0	25,817	1,017 (1,780)	7.87
	CGS	—	No.1 134 No.2 0	25,747	1,087 (1,552)	6.94

※CO₂ emission factor is a mean value of all power plant. Numerical value in the parenthesis used emission factor of the average of thermal power plant.

表 4 HP の COP を変化させた場合の最適空調容量

(気象データ：東京)

Table 4. The optimum air conditioning capacity in various COP of HP(Tokyo).

Heat system	COP of Heat pump	Capacity of system (kW)	Primary energy (GJ/Year)	CO ₂ emission (t-CO ₂ /year)	Investment-return years
CGS	—	No.1 342 No.2 0	26,535	1,174 (1,433)	8.08
HP	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 76 No.2 49	26,335	1,025 (1,855)	3.89
HP	C:4.5-4.0 H:4.5-4.0	No.1 95 No.2 45	27,067	1,070 (1,854)	5.13
HP	C:4.0-3.5 H:4.0-3.5	No.1 146 No.2 95	27,402	1,083 (1,879)	7.75

※CO₂ emission factor is a mean value of all power plant. Numerical value in the parenthesis used emission factor of the average of thermal power plant.

表 5 HP の外気温特性の適用有無による評価結果の比較

Table 5. Comparison of the estimated result by application existence of the ambient temperature characteristics of HP.

City	COP of Heat pump	COP change by the ambient temperature	Capacity of Heat pump (kW)	Primary energy (GJ/Year)	Difference
Tokyo	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	Applied	No.1 70 No.2 70	26,669	0.47%
		Not applied	No.1 70 No.2 70	26,795	
Sapporo	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	Applied	No.1 70 No.2 70	29,213	-1.75%
		Not applied	No.1 70 No.2 70	28,703	
Naha	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	Applied	No.1 70 No.2 70	25,096	1.00%
		Not applied	No.1 70 No.2 70	25,347

図 10 空調エネルギー消費量の都市別評価結果

Fig. 10. Estimated result of air conditioning energy consumption of each city.

図 11 HP 及び CGS の年間平均エネルギー効率 (指標)

Fig. 11. Average energy efficiency of HP and CGS (index).

より、運転時間の相違及び効率のわずかな相違を生じさせていることに起因するものと考えられる。

〈6・2〉 最適容量決定における HP の COP 依存性と外気温特性の有無による感度の評価 東京の気象データに基づいたエネルギー負荷推計データを使用した場合の最適容量決定において、HP の COP に対する感度を求めた。HP の COP を変化させていった場合の最適容量の結果を表 4 に示す。COP が低い場合は CGS のほうが一次エネルギー投入は少ないが、COP が冷房 5.0-4.5、暖房 5.0-4.5 になると、HP のほうが一次エネルギーが小さくなるのがわかる。

次に HP の外気温特性を考慮した場合としない場合の比較結果を表 5 に示す。HP 容量を一定とした場合、外気温特性の考慮の有無により、地域によって約 0.5% から 1.75% の差が生じることがわかる。実務的に数% の省エネルギーを評価することが必要な状況においては、地域による気象条件の考慮の有無は省エネルギー性の評価に大きく影響する可能性があることがわかる。

〈6・3〉 経済性制約に対する最適空調容量の選択

〈6・2〉と同様に東京及び札幌の気象データに基づいたエネルギー負荷推計データを使用して、投資回収年の制約を変化させた場合の CGS と HP の最適容量の変化を求めた結果を表 6、図 12 に示す。投資回収年を厳しくするにつれ、導入できる HP 容量が小さくなり、それに伴い一次エネルギー消費量が増加していることがわかる。

表6 投資回収年の制約による最適空調容量の比較
Table 6. Comparison of the optimum air conditioning capacity by the constraint in the investment-return year.

(a)Tokyo

Constraint in Investment-return years	COP of Heat pump	Capacity of Heat pump (kW)	Primary energy (GJ/Year)	CO ₂ emission (t-CO ₂ /year)	Investment-return years
10 years	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 76 No.2 49	125	26,335 1,025 (1,855)	3.89
4 years	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 76 No.2 49	125	26,335 1,025 (1,855)	3.89
3 years	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 60 No.2 0	60	27,328 1,079 (1,878)	3.00

※CO₂ emission factor is a mean value of all power plant. Numerical value in the parenthesis used emission factor of the average of thermal power plant.

(b)Sapporo

Constraint in Investment-return years	COP of Heat pump	Capacity of system (kW)	Primary energy (GJ/Year)	CO ₂ emission (t-CO ₂ /year)	Investment-return years
10 years	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 98 No.2 107	204	28,781 1,127 (2,006)	4.50
4 years	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 99 No.2 89	189	28,220 1,098 (1,986)	4.00
3 years	C:5.0-4.5 H:5.0-4.5	No.1 97 No.2 0	97	29,085 1,152 (1,988)	3.00

※CO₂ emission factor is a mean value of all power plant. Numerical value in the parenthesis used emission factor of the average of thermal power plant.

(a)Tokyo

(b)Sapporo

図12 投資回収年の制約による最適空調容量の比較
Fig. 12. Comparison of the optimum air conditioning capacity by the constraint in the investment-return year.

〈6・4〉 建物の最適業務用途構成の決定 エネルギー負荷推計と空調システム容量最適化モデルの一体化の特徴を生かし、一定の空調容量に対して、業務用途構成比を変数として、最適な用途構成の導出を試みた。目的関数としてエネルギー最小化を採用した場合、一般的には事務所用

表7 業務用途構成比の最適化の結果
(気象データ：東京)

Table 7. Result of the optimization of the floor area ratio of the building(Tokyo).

CGS capacity (kW)	Primary energy (GJ/Year)	CO ₂ emission (t-CO ₂ /year)	Investment-return years	Ratio of floor Space (%)
20kW×2	22,409	909 (1,463)	6.70	Office 77 Hotel 3 Shop 20
40kW×2	22,524	920 (1,453)	8.27	Office 75 Hotel 5 Shop 20
100kW×2	22,697	952 (1,387)	10.07	Office 67 Hotel 13 Shop 20
150kW×2	23,025	982 (1,357)	11.35	Office 60 Hotel 20 Shop 20
200kW×2	23,497	1,013 (1,351)	12.64	Office 53 Hotel 27 Shop 20

※CO₂ emission factor is a mean value of all power plant. Numerical value in the parenthesis used emission factor of the average of thermal power

図13 業務用途構成比の最適化の結果
(気象データ：東京)

Fig. 13. Result of the optimization of the floor area ratio of the building(Tokyo).

途がホテルや店舗に比べ単位面積当たりのエネルギー消費量が少ないため、事務所用途の構成を大きくする方向に解が定まるが、空調容量の大きさと投資回収年の条件により、ホテル用途との構成比のバランスが定まる。これは、ホテル用途のほうが単位面積当たりの熱需要が大きく、CGSの熱を有効に用いることができ、それにより経済性が改善され投資回収年制約の条件に適合しやすくなることによる。

表7及び図13に用途構成比の最適化の結果を示す。CGS容量の設定を大きくするほど、熱を有効に利用するためにホテルの面積比率が大きくなっていくことがわかる。

(計算条件)

- ・建物床面積 : 10,000 m²
 - ・気象データ : 東京
 - ・建物用途構成比: 店舗 20%, 事務所とホテルを変数
 - ・空調システム: CGS (50~200kW×2 台)
- (CGSの効率, コスト等の条件は5.に示したものと

同様とする。)

- ・単純回収年の制約： 20 年以内 (CGS 容量と用途構成比の関係を見やすくするため投資回収年は 20 年と緩く設定している。)

7. まとめと今後の課題

部分負荷や外気温特性を考慮できる空調システム容量・稼動条件決定モデルを、エネルギー負荷簡易推計モデルと一体化した形で非線形混合整数計画法により実現した。本モデルを用い国内の主要 8 都市における最適空調機器の構成を求め、地域によって CGS と HP の優位性が変化することを導いた。また外気温の影響や HP の COP に対する感度を求め、業務建物における最適な空調機器の計画・運用において、機器部分負荷特性や地域特性の関係を明らかにすることができた。

また投資回収年の制約下での最適化を行うことにより、現実的な経済性の範囲内での最適化を行うことも可能となった。

今後の課題としては、CGS の熱回収部分や付帯機器の部分負荷を考慮して評価することや、多様な CGS 原動機の種類、空調熱源機器への対応などである。また、エネルギー需要の変動や気象条件における極端な猛暑日等への対応を考えるため、平均的なエネルギー需要や気象条件からの変動幅を考慮し、余裕率等を考察できるモデルの開発を行っていく必要がある。さらに本モデルを商業集積地域の業務エネルギーシステムの最適化などへ応用していくことも可能であると考えられる。

(平成 17 年 1 月 25 日受付, 平成 17 年 6 月 20 日再受付)

文 献

- (1) T. Ishida, S. Mori, and K. Douwaki : "A Development of the Decision Support System for the Optimum Cogeneration Planning Under the Constraints of the Economic Efficiency and Partial Load Properties for the Commercial Building", *IEE Japan*, Vol.125-B, No.4, pp.373-380 (2005-4) (in Japanese)
石田武志・森 俊介・堂脇清志：「経済性制約と機器の部分負荷特性を考慮した業務建物の最適 CGS 導入決定支援システムの構築」, 電学論 B, **125**, 4, pp.373-380 (2005-4)

- (2) (社) 空気調和・衛生工学会：「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」,(1994)
- (3) (社) 空気調和・衛生工学会：「都市ガスによるコージェネレーション評価プログラム-CASCADE-Computer Aided Simulation for Cogeneration Assessment & design」,(1998)
- (4) 伊藤弘一・蒲生恵司・横山良一：「エネルギー需要量を連続型確率変数として考慮したコージェネレーション・システムの多目的最適計画」, 資源・エネルギー学会第 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, pp.625-630 (2000)
- (5) 上甲勝弘・伊藤弘一・横山良平・蒲生恵司：「多目的最適化手法に基づくマイクロガスタービン・コージェネレーション・システムの導入可能性分析」, 資源・エネルギー学会第 17 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, pp.543-548 (2001)
- (6) 原田 拓・森 俊介：「遺伝アルゴリズムを用いた分散型エネルギーシステム導入計画」, 資源・エネルギー学会第 11 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, pp.131-136 (1995)
- (7) 柳 正秀・藁谷至誠・植草常雄・北川美宏・斉藤 茂：「建物エネルギー需要特性がコージェネレーションシステムの規模と運用に与える影響」, 日本建築学会計画系論文集, No.555, pp.85-92 (2002)
- (8) 大嶋 勲・堂脇清志・森 俊介：「業務用ビルへの部分負荷運転を考慮した CGS 運転時の環境性・経済性の評価」, 資源・エネルギー学会第 23 回研究発表会講演論文集, pp.105-108 (2004)
- (9) (社) 空気調和・衛生工学会：「空気調和・衛生設備データブック」, V 編機器及び材料, p.457 (2003)
- (10) (社) 建築設備技術者協会：「ELPAC2000」,(2000)
- (11) <http://www.gams.com/solvers/conopt.pdf>

石 田 武 志

(正員) 1966 年 6 月 22 日生。1992 年 3 月東京理科大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。1992 年 4 月より (財) 日本システム開発研究所にて、環境・エネルギー分野の政策分析、環境シミュレーションの研究に従事。

森 俊 介

(正員) 1953 年生。1978 年東京大大学院電気工学修士課程修了。1981 年同博士課程修了, 工学博士。同年 4 月東京理科大学理工学部経営工学科助手, 1983 年同講師, 1989 年同助教授, 1994 年同教授, 現在に至る。エネルギーシステム, 社会システム等に従事。