

## 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 136） 実験計画法を用いたエネルギー解析

### Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 136)

#### Energy analysis utilizing the design of experiments

正 会 員 ○ 菰田 英晴（鹿島建設） 特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）  
技術フェロー 石野 久彌（首都大学東京名誉教授） 技術フェロー 郡 公子（宇都宮大学）  
正 会 員 佐藤 誠（佐藤エネルギーリサーチ） 正 会 員 品川 浩一（日本設計）

Hideharu KOMODA\*1 Shuzo MURAKAMI\*2 Hisaya ISHINO\*3

Kimiko KOHRI\*4 Makoto SATOH\*5 Koichi SHINAGAWA \*6

\*1 Kajima Corporation \*2 Institute for Building Environment and Energy Conservation

\*3 Tokyo Metropolitan University \*4 Utunomiya University \*5 Satoh Energy Research Co.,Ltd.

\*6 Nihon Sekkei Co.,Ltd.

At the design stage, making the building does not incorporate the load, make the system low energy consumption and operate without fail that system is required. And eaves, insulation, windows, set temperature and PMV, their impact is very large on the architectural design. By using the BEST, about the size and system architecture affect factor, equipment capacity, we examined the significant factor in primary energy consumption and heat load utilizing the design of experiments. Calculating the load, the effect estimates of power consumption, it was confirmed a significant field for each.

#### はじめに

近年では、スマートをキーワードに、社会に対してライフサイクルに亘る空調システムの貢献が求められている。スマート社会における空調の役割は、時間、空間的にエネルギーを多消費しないことだととらえると、空調設備のデザインプロセスにおいては、設計時に負荷を取り込まない、逃がさない建物を作り込むこと、運用時に多消費しないシステムを作りこむこと、そしてそのシステムを間違いなく操作できることが必要である。

従来の空調のシステム性能は、室内で発生した熱量とその熱量を処理するために必要なエネルギー量との関係で評価されることが多い。設計時点において、負荷を取り込まない、逃がさないように建物を作り込む場合には、建築デザインに影響が大きい庇、断熱、窓などに工夫をこらすこと、また、運用時に多消費しないシステムを作りこむ場合には、環境デザインへの影響が大きい PMV や設定温度に工夫をこらすこと、さらには、使用者がどのように利用されるのか、内部発熱密度状態がどのようになるのかを十分に把握することが重要である。

そこで、本報では建築を設計する上で必要な設計因子が建物エネルギー性能に与える影響を定量的に把握することを目的とし、加えて従来の選定手法によって決定された装置容量の大きさが与える影響についても考慮する。

解析手法としては、直交配列による実験計画法を採用した。実験計画法を適用した建築環境分野の研究では、効率化実験と母集団の F 検定への適用<sup>1)</sup>、あるいは、シミュレーションによる熱負荷の簡易検討への応用<sup>2)</sup>などがあり、ここでは、BEST を用いて熱負荷および一次エネルギー消費量に影響を及ぼす建築因子やシステム、装置容量の大きさについて、その有意な要因について検討を行った。

#### 1. 検討概要

実験計画法について解析を行う場合、要因をどのように選択するかが重要である。結果を導き出すための特性値としては、単位面積あたりの一次エネルギー消費量とするが、同時に熱負荷も特性値の一つとして考慮する。また、特性値毎に因子および水準を決定すべきであるが、主の目的は一次エネルギー消費量削減であることから、これに対しての因子および水準を決定した。表-1 に因子および水準を示す。交互作用は、窓仕様が最も影響が大きいと予想されるのでこれと壁体の U 値、発熱密度、装置容量と、発熱密度と外気処理方式とした。因子を 5 個、交互作用を 4 組としたので合計自由度は 9 となり、その結果、最低 10 回の実験を必要となるので図-1 に示す線点図を用い、表-2 に示す L16 直交表に割り付けた。

表-1 因子および水準

	水準1	水準2
A: 窓種類	単板8mm U値=5.78W/m <sup>2</sup> ・K η=0.81	複層12mm 日射遮蔽Low-E +透明8mm U値=1.68W/m <sup>2</sup> ・K η=0.4
B: 断熱性能	U値=3.2W/m <sup>2</sup> ・K	U値=2.4W/m <sup>2</sup> ・K
C: 発熱密度	機器15W/m <sup>2</sup> 照明15W/m <sup>2</sup>	機器10W/m <sup>2</sup> 照明5W/m <sup>2</sup>
D: 外気処理方法	外調機	全熱交換器
E: 装置容量	従来設計容量	従来×0.6の容量

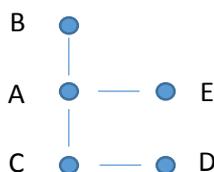


図-1 線点図

表-2 直交表 L16 への割り付け

	因子								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	A	B	A × B	C	A × C	D	C × D	A × E	E
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	1	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	1	1	1
5	1	2	2	1	1	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	2	1	1
8	1	2	2	2	2	2	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	1	1	2
10	2	1	2	1	2	2	2	2	1
11	2	1	2	2	1	1	2	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	1	2
13	2	2	1	1	2	1	1	2	1
14	2	2	1	1	2	2	2	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2
16	2	2	1	2	1	2	1	2	1

各因子について以下に記す。

窓種類として、単板、複層の日射遮蔽 Low-E8mm+透明 8mm (Air12mm) の 2 水準とし、それぞれの U 値は 5.78、1.68W/m<sup>2</sup>・K、η 値は 0.81、0.4 とした。

断熱性能として、上記の窓種類、壁種類、壁厚さを加味し、壁体合計の U 値として 3.2、2.4W/m<sup>2</sup>・K の 2 水準とした。

発熱密度として、標準的な設計値である機器・照明 15W/m<sup>2</sup> (合計 30W/m<sup>2</sup>) と近年の実態および今後の省エネ性を反映した機器 10W/m<sup>2</sup>、照明 5W/m<sup>2</sup> (合計 15W/m<sup>2</sup>) の 2 水準とした。

外気処理方法として、外調機、全熱交換器の 2 水準としたが、外調機方式の場合には室内負荷処理系統と外気処理系統とに屋外機を分割し、それぞれのタイプの屋内機を接続する方式とした。そのため、室外機は各因子、水準ともに冷暖切り替えとした。

最後に、近年の設計容量に対する余裕率に対する懸念

を考慮し、装置容量としては従来設計手法によって決定された容量“×1.0倍”と、その装置容量“×0.6倍”の 2 水準とした。“×0.6倍”については、文献<sup>4)</sup>を参考に決定した。

尚、どの因子においても窓のブラインドは全開として計算し、ブラインドの開閉にともなう U 値の変化や取得日射量に差による影響が出ないように考慮した。また、窓面積率についてはいずれの場合も 40%とした。

## 2. シミュレーション概要

検討は、実在の建物<sup>3)</sup>を用いて行った。対象とした建物は、東京に立地する中規模程度の標準的なビルで、個別分散方式の空調システムが採用されているビルである。表-3に対象建物概要、図-2に基準階平面図を示す。基準階フロアは、6つのゾーンに分かれており、その各ゾーンに個別分散システムの室外機が、全熱交換器の場合は1つ、外調機方式の場合は2つ設置されている。それらのゾーンはさらに6つのエリアに分かれており、各エリアに1つの室内機が設置されている。

なお、各ゾーン間、各エリア間に間仕切り壁などはない。計算対象としたのは基準階の系統Dについて行った。隣接するコアについては非空調室として扱い、空調計算対象エリア間については空間換気を行っている。

分析にあたっては、負荷と空調エネルギー消費量(室内機と室外機の合計)とし、負荷、エネルギー消費量ともに夏期(4~11月)、冬期(1~3、12月)に分けて分析を行った。エネルギー消費量については、年間分析を実施した。

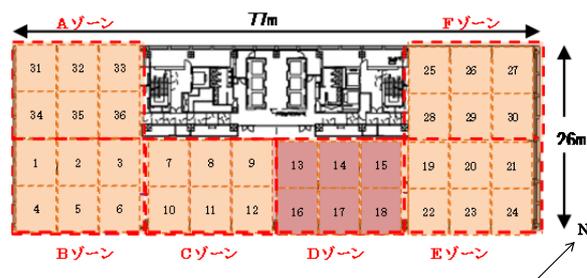


図-2 基準階平面図

表-3 計算対象建物概要

主用途	事務所、共同住宅
所在地	東京都港区
延床面積	33,350.75m <sup>2</sup> (事務所: 22694.88m <sup>2</sup> )
階数	地価2階、地上15階、塔屋1階
構造	SRC・S造、一部RC造
解析対象	系統D 246m <sup>2</sup>

## 3. 各種エネルギー統計値の分散分析と結果

分散分析に使用した記号を表-4に、分散分析に利用した数式を表-5に示す。

表-4 記号

$y_i$ : 実験特性値(負荷、電力消費量)	$S_{A \times B}$ : A×Bの交互作用
N: 実験数	$A_{Bj}$ : 因子Aiかつ因子Bjでの特性値の総計
$T_m$ : 特性値の全平均(基準値)	$S_e$ : 誤差変動
CF: 修正項	$\phi$ : 自由度
$S_T$ : 全変動(総平方和)	V: 不偏分散(平均平方)
$S_A$ : Aの主効果	SS: 要因効果
a: 因子Aの水準数	$S_e'$ : プーリング後の誤差変動
$A_i$ : 因子Aiでの特性値の平均	$\phi_e'$ : プーリング後の誤差自由度
$A_i$ : 因子Aiでの特性値の総計	$V_e'$ : プーリング後の誤差分散
r: 因子Aiでの特性値数(反復数)	$\rho$ : 寄与率
	$n_e$ : 有効反復数

表-5 分散分析

全平均:	$T_m = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}$
修正項:	$CF = \frac{(\sum_{i=1}^N y_i)^2}{N}$
全変動:	$S_T = \sum_{i=1}^N y_i^2 - CF$
主効果:	$S_A = \frac{\sum_{i=1}^a A_i^2}{r} - CF$
交互作用の効果:	$S_{A \times B} = \frac{1}{4} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (A_i B_j)^2 \right\} - S_A - S_B - CF$
誤差変動:	$S_e = S_T - (S_A + S_B + \dots + S_N) - (S_{A \times B} + S_{B \times C} + \dots + S_{D \times E})$
不偏分散:	$V = \frac{SS}{\phi}$
F検定:	$F_0 = \frac{V}{V_e'}$
信頼限界:	信頼限界 = $\pm \sqrt{\frac{F_{0, \phi_e', 1}(0.05)}{n_e} \times V_e'}$

表-6 に負荷の基準値と信頼限界(95%)、表-7 に電力消費量の基準値と信頼限界(95%)を示す。信頼限界により、負荷および電力消費量のおおよその傾向を把握できる。また、表-8 に負荷の有意効果のある項目、表-9 に電力消費量の有意効果のある項目を示す。負荷であれば夏期、冬期ともに窓性能、発熱密度、外気処理方式となり、冬期ではさらに壁体U値、発熱密度と外気処理方式の交互作用が有意な要因となっている。電力消費量であれば、年間では、窓性能、発熱密度であり、夏期では窓性能、発熱密度、外気処理方式、冬期では窓性能、壁体のU値と外気処理方式が有意な要因となっている。

図-3 に負荷の効果推定値、図-4 に電力消費量の効果推定値を示す。負荷については、冷房負荷、暖房負荷それぞれについて、電力消費量については、年間、夏期、冬期について評価を行った。

夏期の負荷に対しては、熱貫流率と日射熱取得率がともに小さい窓を使用すること、発熱密度を小さくすること、外気処理方式を全熱交換器とすることが処理負荷の削減に有効である。冬期の負荷に対しては、外気処理方式を全熱交換器とすること、壁体のU値を小さくすることが処理負荷の削減に有効である。窓仕様と発熱密度との関係においては、熱貫流率と日射熱取得率がともに小さい窓を使用すると、夏期は負荷の削減になるが、冬期は内部発熱負荷の処理量が増大するなど、外部からの熱

取得と外部への放熱の関係に注意が必要である。

年間では、熱貫流率と日射熱取得率がともに小さい窓を使用すること、発熱密度を小さくすることで電力消費量の削減に有効となる。また、対象とした建物が東京に立地していることから、夏期、冬期で効果推定が逆になっている場合でも、夏期の影響が強く表れている。

図-5 に負荷の交互作用(A×B、A×C、A×E)、図-6 に電力消費量の交互作用(A×B、A×C、A×E)について示す。負荷では、窓性能とU値の冷房について、窓性能と装置容量の冷房について交互作用が見られる。電力消費量では、窓性能とU値の年間と夏期について、窓性能と発熱密度の冬期について、わずかではあるが窓性能と装置容量の年間、夏期、冬期について交互作用が見られる。

表-6 基準値と信頼限界(95%)(年間熱負荷)

	夏期	冬期
基準値±信頼限界(MJ/m2・年)	296±18	71±13

表-7 基準値と信頼限界(95%)(電力消費量)

	年間	夏期	冬期
基準値±信頼限界(kWh/m2・年)	70.6±3.1	53.2±1.7	17.5±1.6

表-8 有意効果(年間熱負荷)(\* : 5%、\*\* : 1%有意)

	A	B	C	D	E	A×B	A×C	A×E	C×D
夏期	*		*	*	*	**		**	
冬期	*	*	*	*			**		*

表-9 有意効果(電力消費量)(\* : 5%、\*\* : 1%有意)

	A	B	C	D	E	A×B	A×C	A×E	C×D
年間	*	**	*	**		**		*	**
夏期	*		*	*		**	**	*	
冬期	*	*	*	*			**	**	

#### 4. まとめ

以下にまとめを記す。

- ・設計因子が建物エネルギー性能に与える影響を定量的に把握するために、実験計画法を用いて検討を行った。
- ・負荷、電力消費量の効果推定値を算出し、それぞれに対して有意な項目を確認した。

今後は、たとえば庇の影響といった建築的な工夫の水準の追加や、地域性の加味、セントラルシステムの場合といった設備要素の追加について考慮した実験を行う予定である。

参考文献 1) 横山他：空調装置の運転費計算の簡略化, 1975 年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2) 横山他：省エネルギー設計の為の熱負荷簡易計算法, 3) 平岡ら、個別分散型ヒートポンプパッケージの高度利用に関する研究(その13) 東日本大震災前後のエネルギー特性の評価、平成25年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2013.8 4) 平岡他：空調設計条件および機器選定の余裕度による省エネルギー・居住環境への影響に関する研究(第1報) ケーススタディー条件と熱負荷計算, 平成26年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2014.9

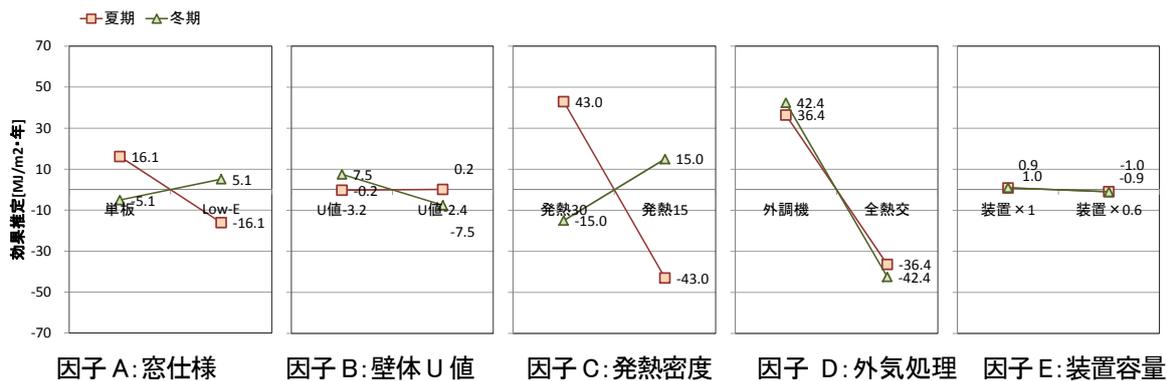


図-3 年間熱負荷の効果推定値

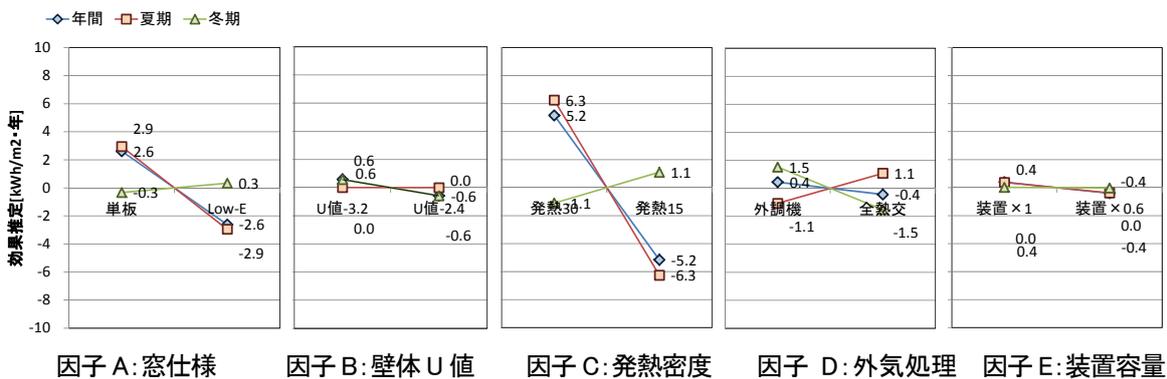


図-4 電力消費量の効果推定値

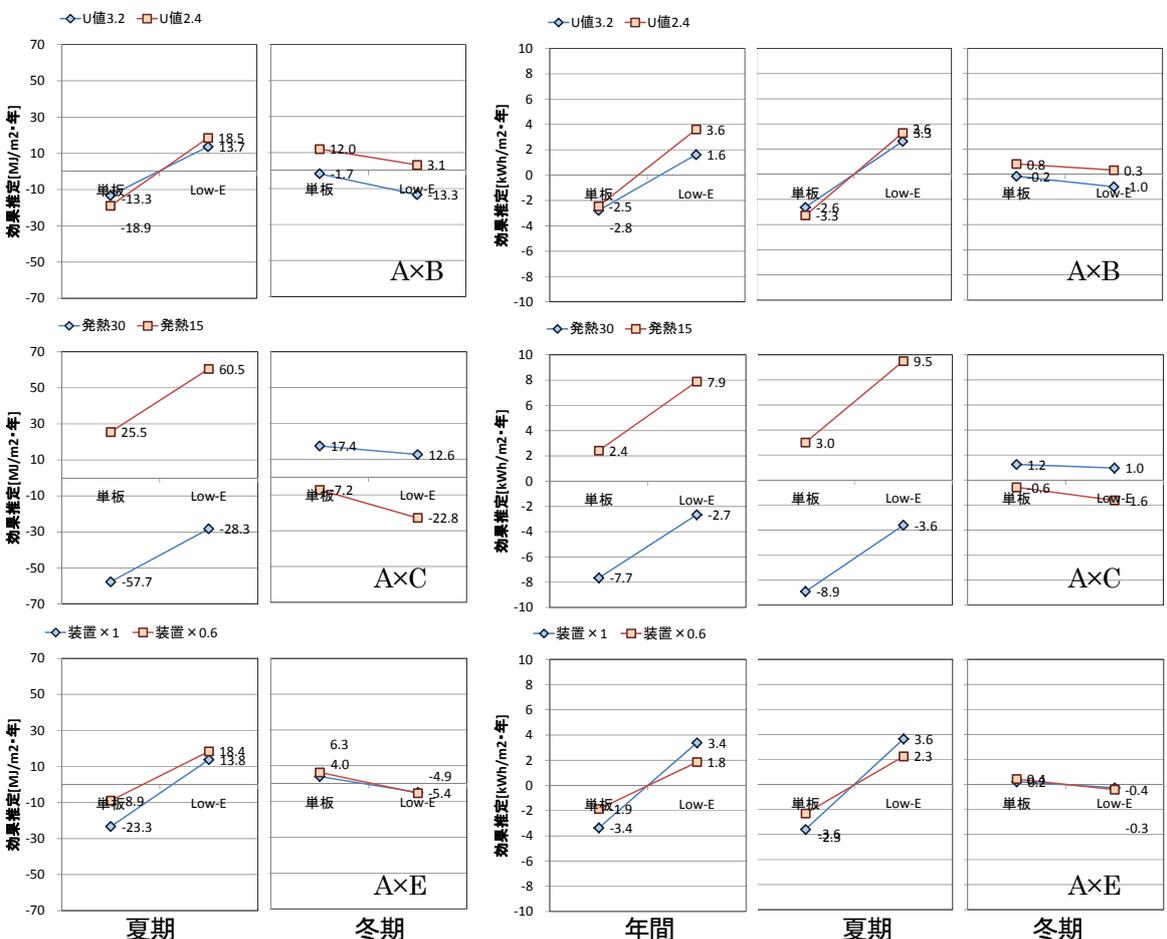


図-5 年間熱負荷の交互作用 (A×B、A×C、A×E) 図-6 電力消費量の交互作用 (A×B、A×C、A×E)