

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 161） 実験計画法を用いたビル用マルチシステムの感度解析

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 161)

Energy analysis of Multi-split Type Air-conditioning System 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

既報¹⁾では、実験計画法を用いたエネルギー解析手法について予備的な実験を行った。その実験結果をもとに、本報では、ビル用マルチシステムを有する事務所ビルについて展開し、解析を行ったので、その内容を報告する。

解析手法は、既報と同様に直交配列による実験計画法を採用し、BEST を用いて熱負荷および一次エネルギー消費量、COP に影響を及ぼす建築因子やシステムについて、その有意な要因について検討を行った。

1. 検討概要

特性値は、単位面積あたりの熱負荷、一次エネルギー消費量及びシステム COP とした。本来は、特性値毎に因子および水準を決定すべきであるが、主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、庇の有無と窓面積率、運転時間と外気処理、運転時間と発熱密度とした。因子を 8 個、交互作用を 3 組としたので合計自由度は 11 となり、その結果、最低 12 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	備考
A	窓材料 U値 W/m ² ・K η 値	複層 透明 U値=2.36 η 値=0.49	複層 LOW-E (遮蔽) U値=1.51 η 値=0.32	ブラインド 中間色
B	庇 m	なし	0.6	箱型
C	断熱性能 U値 W/m ² ・K	2.4	3.2	窓+壁
D	窓面積率 %	40	60	
E	運転時間 h	12	16	
F	外気処理	外調機	全熱交	
G	発熱密度 W/m ²	10(5+5)	20(13+7)	機器+照明
H	方位	南	東	

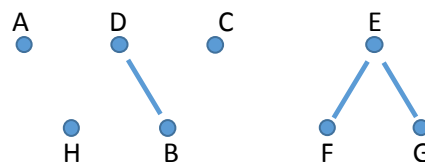


図-1 線点図

各因子について以下に記す。

A: 窓種類は、複層の透明 8mm+透明 8mm (Air12mm)、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 値はブラインド有りで 2.36、1.51W/m²・K、η 値は 0.49、0.32 とした。

B: 庇は、なしと箱型庇 0.6m の 2 水準とした。

C: 断熱性能は、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 1.6、2.4W/m²・K の 2 水準とした。表-3 に窓種類、断熱性能別の壁体構成を示す。

D: 窓面積率は、横連窓を想定した 40% とフルハイトの窓システムを想定した 60% の 2 水準とした。

E: 運転時間は、8 時から 20 時までの 12 時間運転と、7 時から 23 時までの 16 時間運転とした。

F: 外気処理方法は、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。

G: 発熱密度は、標準条件として機器 7 W/m²、照明 13W/m² (合計 20W/m²) と近年の実態および今後の省エネ性を反映した機器 5W/m²、照明 5W/m² (合計 10W/m²) の 2 水準とした。

H: 方位は、南と東の 2 水準とした。

表-2 直交表 L16 への割り付け

検討ケース	D	H	F	G	A	B	B × D	E	C	E × G	E × F
	窓面積	方位	外気	発熱	窓材料	庇		運転	断熱		
水準1	40	南	外調機	10	複透明	なし		12	1.6		
水準2	60	東	全熱交	20	複Low E	0.6 m		16	2.4		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2
4	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1
7	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1
8	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1
10	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2
12	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2
14	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2
16	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1

表-3 窓種類、断熱性能別の壁体構成

窓種類	断熱 U	吹付硬質ウレタンフォーム mm	コンクリート mm	中空層	せつこうボード+セメントモルタル+タイル mm
窓 複層透明	断熱 U=1.6	20	150	あり	12+20+10
窓 複層透明	断熱 U=2.4	3	150	あり	12+20+10
窓 複層Low-E	断熱 U=1.6	10	150	あり	12+20+10
窓 複層Low-E	断熱 U=2.4	2	70	なし	12+20+10
窓 複層透明	断熱 U=1.6	60	150	あり	12+20+10
窓 複層透明	断熱 U=2.4	3	150	あり	12+20+10
窓 複層Low-E	断熱 U=1.6	9	150	あり	12+20+10
窓 複層Low-E	断熱 U=2.4	0	60	なし	12+20+10

2. シミュレーション概要

検討は、実在の建物²⁾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-4 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。基準階の系統Dを計算対象とした。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室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。

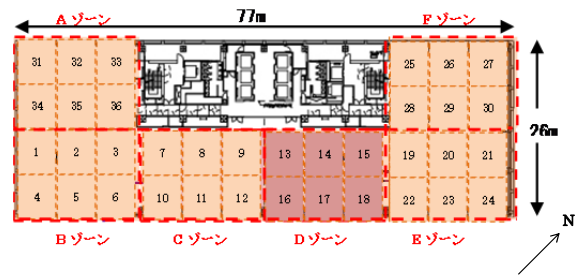


図-2 基準階平面図

表-4 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 ² (事務所:22694.88m ²)
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 ²

表-5 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	$A_i B_j$: 因子 A _i かつ 因子 B _j 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	ϕ : 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
\bar{A} : 因子 A _i での特性値の平均	ϕ'_e : プーリング後の誤差自由度
A_i : 因子 A _i での特性値の総計	V'_e : プーリング後の誤差分散
r: 因子 A _i での特性値数(反復数)	ρ : 寄与率
	n_e : 有効反復数

表-6 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:	$S_A = \sum_{i=1}^r A_i^2 - CF$
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:	$V = \frac{S_e}{\phi}$
F検定:	$F_0 = \frac{V}{V'_e}$
信頼限界:	信頼限界 = $\pm \sqrt{\frac{F_{0.05}^2(0.05)}{n_e} \times V_e}$

表-7 各ケースの最大負荷と装置容量

ケース NO.	W/m2				W/m2				W/m2	
	冷房 顕熱	冷房 潜熱	暖房 顕熱	暖房 潜熱	冷房 顕熱	冷房 潜熱	暖房 顕熱	暖房 潜熱	冷房	暖房
1	39	46	-48	-22	92	47	-60	-22	65	72
2	49	46	-43	-22	98	47	-63	-22	57	63
3	39	47	-52	-21	93	47	-79	-21	65	72
4	51	47	-36	-21	75	47	-49	-21	61	67
5	50	46	-44	-22	96	47	-58	-22	65	72
6	39	46	-53	-22	86	47	-74	-22	61	67
7	51	47	-40	-21	134	47	-61	-21	93	103
8	40	47	-49	-21	95	47	-59	-21	81	89
9	51	47	-32	-20	131	47	-44	-20	89	98
10	39	47	-48	-20	103	47	-68	-20	77	85
11	49	46	-38	-21	119	47	-63	-21	65	72
12	39	46	-49	-21	78	46	-61	-21	53	58
13	40	47	-50	-20	112	47	-58	-20	89	98
14	51	47	-40	-20	119	48	-58	-20	85	94
15	39	46	-48	-21	155	47	-67	-21	98	107
16	50	46	-34	-21	133	47	-46	-21	89	98

最大負荷…インテリア パリメータ 装置容量

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-5に、分散分析に利用した数式を表-6に示す。

表-7に各ケースのインテリア、パリメータ別の最大負荷と装置容量を示す。ケース毎に算出されたピーク日の時刻別負荷から装置容量を算出した。(外調機系統は除く)装置容量は、冷房が主体であったことから冷房負荷から選定し、暖房側の装置容量は主要なメーカーカタログの平均的な値として、冷房装置容量の×1.1倍とした。表-8に負荷、電力消費量、COPの基準値と信頼限界(95%)を示す。年間熱負荷では信頼限界値の値が大きいことから精度がそれほどよくないことがわかる。

表-9に負荷の有意効果のある項目、表-10に電力消費量の有意効果のある項目、表-11にCOPの有意効果のある項目を示す。夏期、冬期ともに優位な要因となっているのは、負荷、電力消費量ともに、窓種類、庇、窓面積率、運転時間、外気処理、発熱密度、運転時間と外気処理の交互作用である。COPでは、年間窓種類、庇、断熱性能、運転時間、外気処理、発熱密度、方位、運転時間と外気処理の交互作用が有意な要因となっている。

図-3に負荷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。

夏期の負荷については、壁体関連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、庇をつけること、壁体の断熱性能をあげること、窓面積率を小さくすることが処理負荷に有効である。システムでは、運転時間を少なくすること、全熱交換器を採用すること、発熱密度を小さくすることが有効である。特に、選手時間、外気処理、発熱密度は主効果が大きい。冬期はその反対の関係になっている。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。

電力消費量については、運転時間、外気処理、発熱密

度の主効果が大きい。運転時間では、12時間とすることの効果は季節によらず特に大きくなっている。外気処理では全熱交換器とすることで特に冬期の効果が大きくなっている。発熱密度では、10Wの場合には夏期に効果があるが、冬期は20Wの方が削減効果が高くなっている。他の要因である建築性能の効果はあまり高くない。

COPについては、外気処理と発熱密度の効果が大きくなっている。特に外気処理では、外調機の方がCOPが高くなっている。

図-4に効果推定要因を示す。B×D、E×G、E×Fの交互作用について確認した。負荷、電力消費量、COPともに、庇と窓面積に大きな交互作用が見られる。同様に運転時間と外気処理についてもわずかではあるが、交互作用が見られる。

表-8 基準値と信頼限界(95%)

基準値±信頼限界	年間	夏期	冬期
負荷(MJ/m2・年)		257±15	125±20
電力消費量(MJ/m2・年)	52.2±2	36.6±1.7	15.6±1.1
COP(-)	2.03±0.04	1.96±0.06	2.08±0.25

表-9 有意効果(年間熱負荷)(* : 5%、** : 1%有意)

	A	B	C	D	E	F	G	H	B×D	E×G	E×F
夏期	*	*	**	*	*	*	*	**	*	**	*
冬期	*	*	*	*	*	*	*	*			*

表-10 有意効果(電力消費量)(* : 5%、** : 1%有意)

	A	B	C	D	E	F	G	H	B×D	E×G	E×F
年間	**	**	*	*	*	*	**	*			*
夏期	*	*	*	*	*	*	*	*			*
冬期	*	*	*	*	*	*	*	*			*

表-11 有意効果(COP)(* : 5%、** : 1%有意)

	A	B	C	D	E	F	G	H	B×D	E×G	E×F
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、COP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、装置容量、室内環境との関係や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) 菟田他：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, 2014年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2) 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

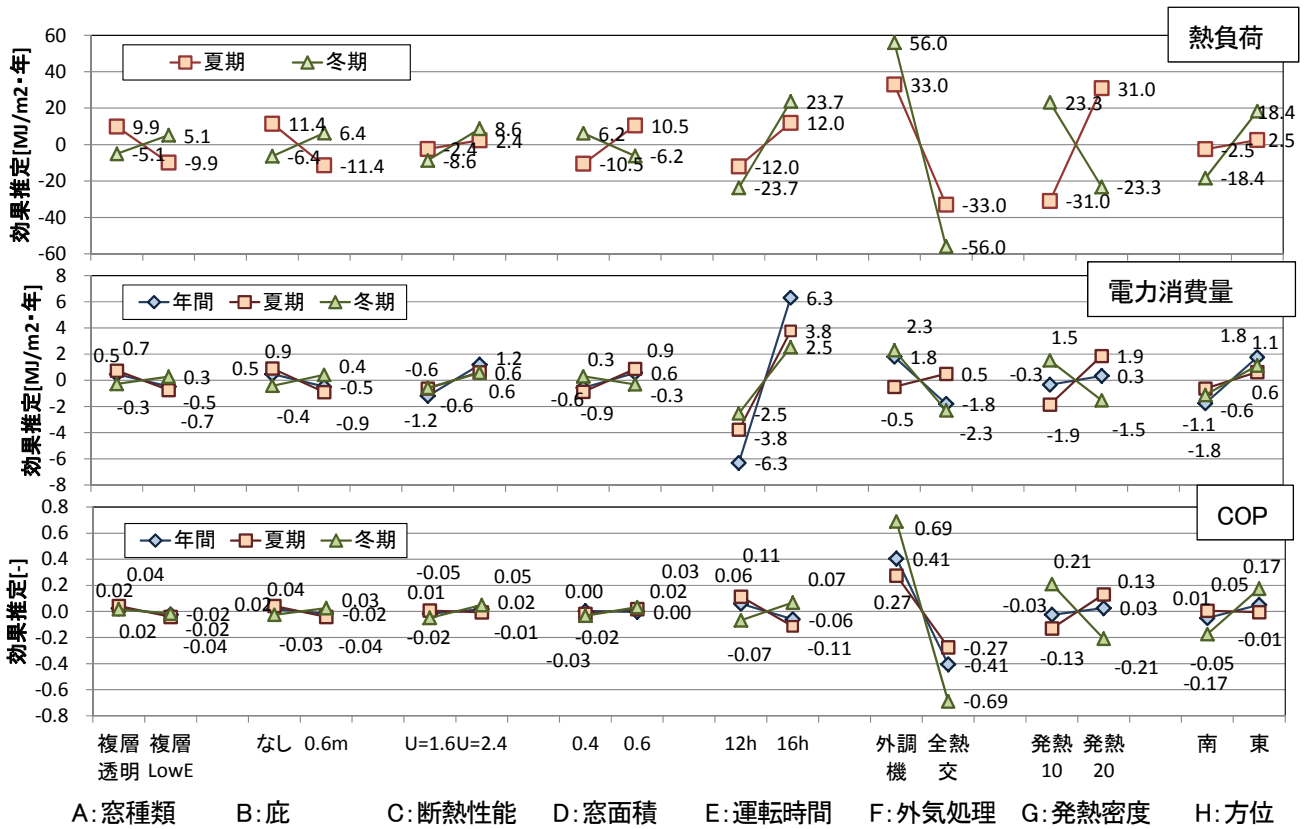


図-3 効果推定値

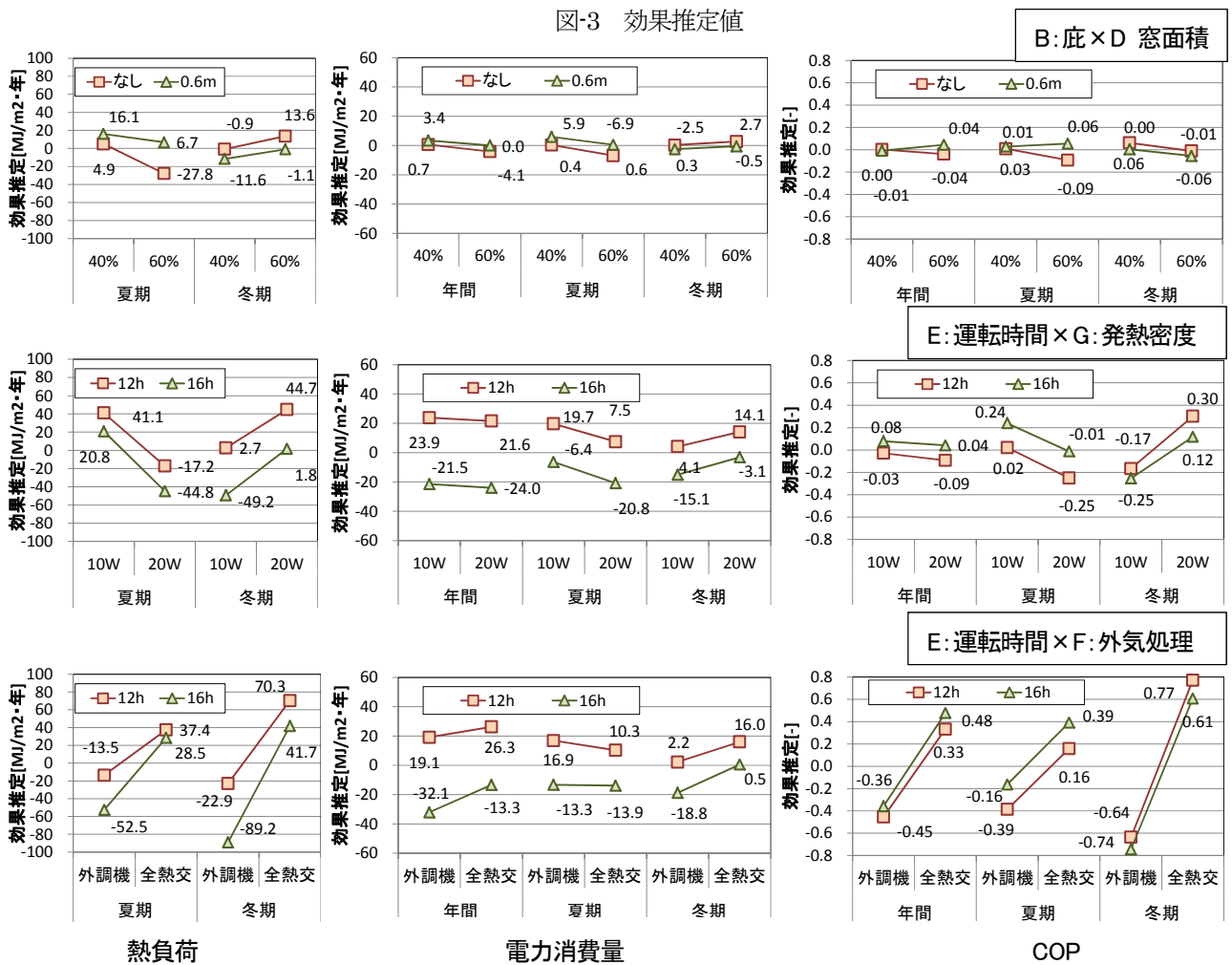


図-4 効果推定要因 (交互作用)