

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 227) 実験計画法を用いた自然換気システムの効果推定法

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST
(Part 227) Effect Estimation Method of the Heat Load Characteristics of
Natural Ventilation System utilizing the design of experiments

正会員 ○相沢 則夫 (大林組) 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)
Norio AIZAWA*1 Shuzo MURAKAMI*2 Hisaya ISHINO*3 Kimiko KOHRI*4

*1 Obayashi Corporation *2 Institute for Building Environment and Energy Conservation

*3 Tokyo Metropolitan University *4 Utsunomiya University

We examined the effects of various factors that affect the cooling load reduction by the natural ventilation system using the design of experiments technique. Furthermore, a simplified estimation of the cooling load reduction quantity was performed using the obtained effect estimation value for each factor.

はじめに

自然換気システムは、空気調和・衛生工学会が公表しているエネルギー消費性能計算プログラム (非住宅版) (WEB プログラム) における未評価技術 9 項目¹⁾にも挙げられているように、評価手法が強く希望されている省エネ技術である。BEST 専門版では自然換気の計算が可能であるが、より簡易に計算できる方法があると、計画段階での検討に便利である。

本報では、実験計画法を用いて、自然換気システム採用時の年間冷房負荷削減量に影響を与える各種要因の効果を検討した。更に、得られた因子毎の効果推定値を利用して、負荷予測式による推定法²⁾に基づく有意要因数値表を作成し、冷房負荷削減量の簡易推定を行った。

1. 計算条件

文献 3) を参考に計算条件を設定した。図-1 に計算対象室、表-1 に計算条件を示す。非空調ゾーンのコアを含む 9 ゾーンについて、隣室温度差係数のような計算の簡易化は行わない計算を行う。自然換気条件は、期間を通年とし、許可条件を満たせば自然換気することとした。地域差の評価のため、札幌、東京、那覇の 3 地点を検討した。

自然換気による効果は、文献 4) と同様、年間冷房負荷削減量で評価した。削減量は、

$$\begin{aligned} & \text{「自然換気による年間冷房負荷削減量」} \\ & = \text{「自然換気無しの年間冷房負荷」} \\ & - \text{「自然換気有りの年間冷房負荷」} \end{aligned}$$

として算定した。なお、冷房負荷は南北 2 室の空調 8 ゾーンの合計装置負荷(全熱)として評価した。

2. 実験計画法

解析手法として直交配列による実験計画法³⁾を用いた。実験計画法を適用した建築環境分野の研究では、熱負荷簡易計算法への応用⁴⁾があり、その手法を用いた窓システムの感度解析⁵⁾などが報告されている。本報でも同手法を用いて検討を行った。

特性値として、自然換気による年間冷房負荷削減量を取り上げる。また併せて年間冷房負荷も検討する。表-2 に因子と水準を示す。各特性値で同じ因子と水準とした。因子は、建物仕様 (内部発熱、外皮仕様) 4 ケと自然換気システム仕様 (有効開口面積、他) 3 ケの 7 ケとしている。有効開口面積は既往の研究⁶⁾から主流と考えられる $5\text{cm}^2/\text{m}^2 \sim 50\text{cm}^2/\text{m}^2$ (床面積当り有効開口面積) に、自然換気をあまり行わないケースとしてより小さい $1.6\text{cm}^2/\text{m}^2$ (外皮長さ当り $0.001\text{m}/\text{m}^2$) を加えた 4 水準とした。また、地点により、外壁断熱と窓ガラス仕様を区別した。

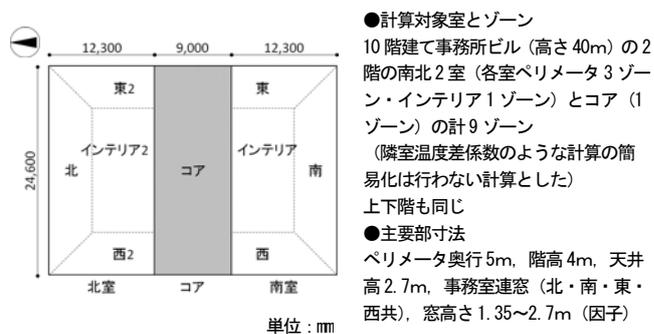


図-1 計算対象オフィス平面図

図-2 に示す線点図を用いて、表-3 に示す L16 直交表に割り付けた。なお、他の交互作用（例えば因子 A×B など）の有無の検討のために予備検討を行った結果の一例を後述の補足に示す。

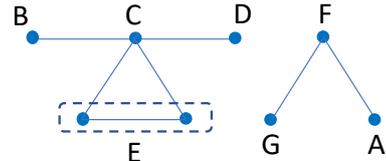


図-2 線点図

表-1 計算条件

事務室	
気象データ	2010年版標準年拡張アメダス気象データ
設定温湿度	年間共通 冷却除湿 26℃ 60%RH 加熱加湿 22℃ 40%RH (ゼロエナジーバンド)
空調時間	年間負荷計算用 8:00~21:00 外気導入8:45~21:00 最大負荷計算用 8:30~18:00 外気導入8:45~18:00 (予冷熱30分) 平日：空調運転，土日祝日：空調停止 外気導入量：3.75m ³ /(m ² h)
内部発熱	照明：10W/m ² ，機器：表-2参照（因子） 人員：0.15人/m ²
窓ガラス	表-2参照（因子）
ブラインド	明色，常時閉，昼光利用無し
隙間風	0.2回/h
家具類	顕熱熱容量：15J/(lit・K) 潜熱熱容量係数：1
ゾーン間換気	ペリメータ・インテリア間 250CMH/m（双方向）
コア	
空調	非空調，外気導入無し
内部発熱	照明：2W/m ² ，機器：無し，人員：無し
隙間風	0.2回/h
家具類	顕熱熱容量：15J/(lit・K)、潜熱熱容量係数：1
ゾーン間換気	事務室から30CMH/m（事務室→コア，一方方向）

表-3 直交表L16への割り付け

実験No	因子														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	C	E		G	A	B	B×C	%E		%E	F	D	C×D	A×F	F×G
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	3	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	4	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	3	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	4	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	3	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	4	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	3	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	4	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

【注記】4水準の因子Eは、第2, 8, 10列(%E)に割り付けた。

表-4 年間冷房負荷削減量・削減率（東京の場合）

実験No	①	②	③=①-②
	自然換気無し 冷房負荷 MJ/m ² 年	自然換気有り 冷房負荷 MJ/m ² 年	冷房負荷 削減量 MJ/m ² 年
1	436.3	393.9	42.4
2	403.8	356.3	47.5
3	289.0	282.7	6.3
4	277.3	252.6	24.7
5	409.6	329.9	79.7
6	393.5	301.0	92.5
7	293.9	264.1	29.9
8	290.5	224.6	65.9
9	223.5	213.2	10.3
10	227.7	193.4	34.3
11	324.2	320.7	3.5
12	327.4	265.4	62.0
13	211.0	174.9	36.2
14	221.7	191.3	30.4
15	344.0	268.1	75.8
16	365.0	309.5	55.5
平均	314.9	271.3	43.6

表-2 因子と水準

因子	水準1	水準2	水準3	水準4
A 内部発熱 ※1	機器 20W/m ²	機器 5W/m ²		
B 外壁断熱厚さ ※2	札幌 100mm 東京 50mm 那覇 30mm	札幌 20mm 東京 10mm 那覇 0mm		
C 窓面積率	68%	34%		
D 窓ガラス ※3	日射遮蔽型Low-E 複層 (8+12+8)	透明単板 (8)		
E 有効開口面積 ※4	0.001m ² /m ² 【1.6cm ² /m ² 】	0.01 【16.3】	0.02 【32.5】	0.03 【48.8】
F 自然換気許可条件	下限外気温13℃ 非空調時13℃	下限外気温20℃ 非空調時18℃		
G 非空調時の自然換気有無	非空調時も 自然換気	空調時のみ 自然換気		

【注記】

- ※1 照明，人員は固定値とする。(表-1 参照)
- ※2 断熱材：吹付硬質ウレタンフォームA種1
外壁断熱は地点により変えている。
- ※3 窓ガラスは地点により変えている。表中数値は東京，那覇の場合を示す。
札幌の場合は下記とする。
水準1 高日射取得型LowE複層 (8+12+8)，水準2 透明複層 (8+12+8)
- ※4 有効開口面積の上段は外皮長さ当り[m²/m]，下段【】内の値は床面積当り[cm²/m²]を示す。

表-5 基準値と信頼限界（95%）

	単位：[MJ/m ² 年]		
	札幌	東京	那覇
冷房負荷削減量	63.0 ± 28.6	43.6 ± 19.5	53.2 ± 21.1
冷房負荷	134.5 ± 45.1	271.3 ± 28.4	572.1 ± 34.1

表-6 有意効果

*：5%有意 **：1%有意

	A	B	C	D	E	F	G	A×F	B×C	C×D	F×G
札幌	冷房負荷削減量	*			**	**					
	冷房負荷	**	**		*	*					
東京	冷房負荷削減量	**			**	*					
	冷房負荷	**	**		*	*					
那覇	冷房負荷削減量	**			**	*					
	冷房負荷	**	**	*	*	*					

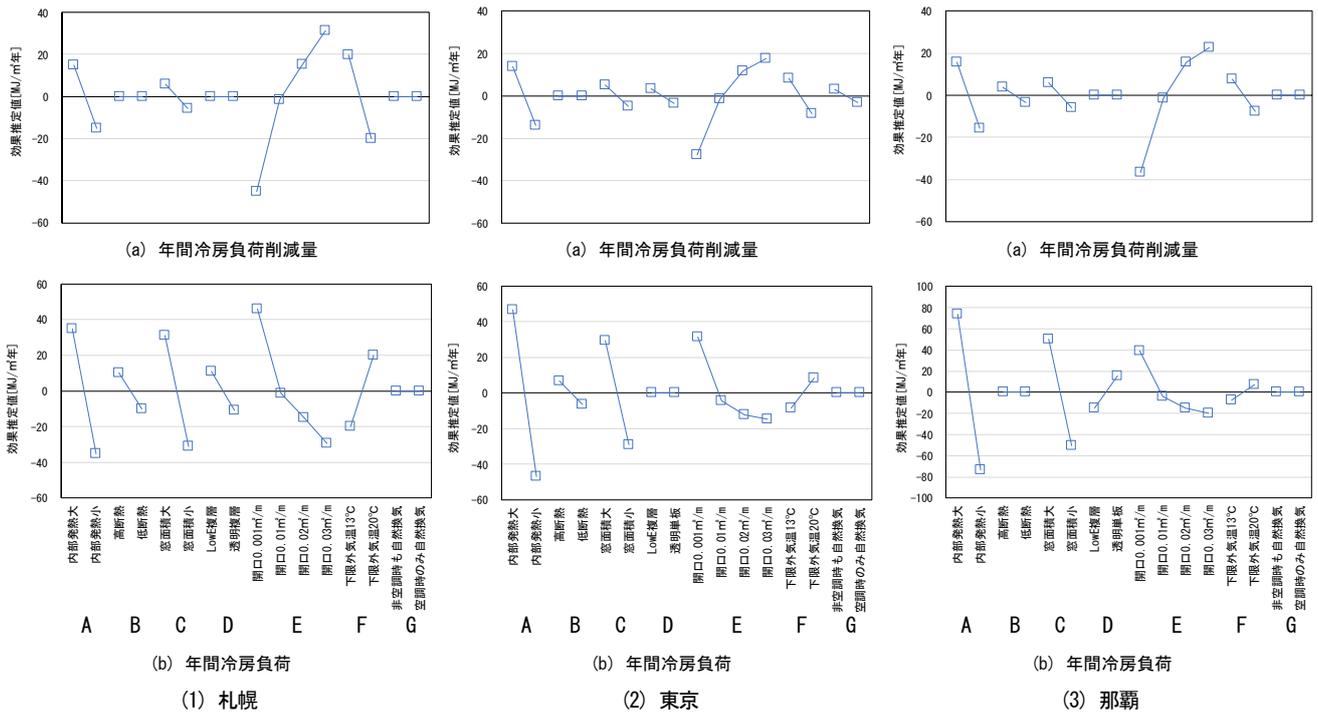


図-3 効果推定値

3. 計算結果

表-4 に直交表 16 ケースの実験結果，即ち，自然換気による年間冷房負荷削減量および年間冷房負荷の計算結果（東京の場合）を示す。表-5 に各特性値の基準値（表-3 の 16 ケースの計算結果の平均値）と信頼限界（95%）を示す。

表-6 に有意効果を示す。5%有意よりも1%有意の方が，効果が大きいことを示している。いずれの特性値においても交互作用は有意になっていない。

図-3 に効果推定値を示す。冷房負荷削減量について，3 地点共，A 内部発熱，E 有効開口面積，F 自然換気許可条件の下限外気温の効果が大きく，B 外壁断熱，C 窓面積率，D 窓面積率，G 非空調時の自然換気有無の効果は小さく，ほとんど効果の見られないものもある。E 有効開口面積が大きくなると効果の上昇割合が緩やかになっている傾向が伺える。また，E，F の効果は，那覇よりも札幌の方が大きい，外気温が低いためと考えられる。

冷房負荷については，A 内部発熱，C 窓面積率，E 有効開口面積の効果が大きく，F の効果は札幌を除いて効果が小さくなっている。

4. 特性値の推定

4.1 推定法

任意の因子水準の組合せにおける負荷予測式は，基準値を T_m とし，因子 $A, B, C, A \times B$ を有意とし，その各々の水準を i, j, k, ij ，母平均を $\bar{A}_i, \bar{B}_j, \bar{C}_k, \bar{A}_i \bar{B}_j$ とすると，式-1 と表現される²⁾。

$$\hat{\mu}_{A,B,C,A \times B} = T_m + (\bar{A}_i - T_m) + (\bar{B}_j - T_m) + (\bar{C}_k - T_m) + \{ \bar{A}_i \bar{B}_j - T_m - (\bar{A}_i - T_m) - (\bar{B}_j - T_m) \} \quad (式-1)$$

式-1 において，主効果の効果推定値は，右辺第 2～4 項の () の値，また交互作用の効果推定値は，右辺第 5 項の { } の値であり，これらを数表化しておく特性値の簡易計算が可能となる。

表-7 に，効果推定値を数表化した（有意要因数値表）。有意でない因子の数値は除いている。有意要因数値表により求められる推定値の信頼限界は表-5 に示した値となる。この信頼限界内に精算解が入る信頼度が 95% となる。

4.2 試算

有意要因数値表による推定値と，BEST 専門版によるシミュレーション結果（精算解）を試算し，精算解が信頼限界内に入ることを確認する。試算条件を下記に示す。有意でない因子は計算には含めない。水準間の値は直線補間して算出する。

計算条件：

- A 機器発熱 12W/m²，B 外壁断熱厚さ 30mm，C 窓面積率 50%，D 窓ガラス 熱反シルバー＋透明 (8+6+8)，E 有効開口面積 0.015 m²/m，F 自然換気許可下限外気温 18℃（非空調時 16℃），G 非空調時の自然換気 平日 3:00～8:00（5 時間）

計算結果を表-8 に示す。②精算解が①推定値の信頼限界内に入ることが確認できる。以上のように，表-7 の数値表を利用して年間冷房負荷削減量，年間冷房負荷の簡易推定をすることができる。

表-7-1 有意要因数値表（札幌）

(a) 年間冷房負荷削減量 単位: MJ/(㎡・年)

		基準値 ± 信頼限界				63.0 ± 28.6			
A	内部発熱（機器）	20W/㎡	5W/㎡			15.1	-15.1		
C	窓面積率	68%	34%			5.7	-5.7		
E	有効開口面積	0.001㎡/㎡	0.01	0.02	0.03	-45.0	-1.5	15.1	31.4
F	下限外気温	13℃	20℃			20.0	-20.0		

(b) 年間冷房負荷 単位: MJ/(㎡・年)

		基準値 ± 信頼限界				134.5 ± 45.1			
A	内部発熱（機器）	20W/㎡	5W/㎡			35.0	-35.0		
B	外壁断熱厚さ	100mm	20mm			10.2	-10.2		
C	窓面積率	68%	34%			31.0	-31.0		
D	窓ガラス	Low-E複層	透明複層			11.0	-11.0		
E	有効開口面積	0.001㎡/㎡	0.01	0.02	0.03	45.9	-1.6	-14.8	-29.5
F	下限外気温	13℃	20℃			-19.9	19.9		

表-7-2 有意要因数値表（東京）

(a) 年間冷房負荷削減量 単位: MJ/(㎡・年)

		基準値 ± 信頼限界				43.6 ± 19.5			
A	内部発熱（機器）	20W/㎡	5W/㎡			13.8	-13.8		
C	窓面積率	68%	34%			5.0	-5.0		
D	窓ガラス	Low-E複層	透明単板			3.5	-3.5		
E	有効開口面積	0.001㎡/㎡	0.01	0.02	0.03	-27.9	-1.4	11.8	17.5
F	下限外気温	13℃	20℃			8.4	-8.4		
G	非空調時の自然換気有無	有り	無し			3.1	-3.1		

(b) 年間冷房負荷 単位: MJ/(㎡・年)

		基準値 ± 信頼限界				271.3 ± 28.4			
A	内部発熱（機器）	20W/㎡	5W/㎡			46.8	-46.8		
B	外壁断熱厚さ	50mm	10mm			6.5	-6.5		
C	窓面積率	0.68	0.34			29.3	-29.3		
E	有効開口面積	0.001㎡/㎡	0.01	0.02	0.03	31.3	-4.4	-12.1	-14.8
F	下限外気温	13℃	20℃			-8.4	8.4		

表-7-3 有意要因数値表（那覇）

(a) 年間冷房負荷削減量 単位: MJ/(㎡・年)

		基準値 ± 信頼限界				53.2 ± 21.1			
A	内部発熱（機器）	20W/㎡	5W/㎡			15.7	-15.7		
B	外壁断熱厚さ	30mm	0mm			3.7	-3.7		
C	窓面積率	68%	34%			6.0	-6.0		
E	有効開口面積	0.001㎡/㎡	0.01	0.02	0.03	-36.8	-1.5	15.7	22.5
F	下限外気温	13℃	20℃			7.8	-7.8		
B×C	外壁断熱×窓面積率	30mm×68%	30mm×34%			-6.9	6.9		
		0mm×68%	0mm×34%			6.9	-6.9		

(b) 年間冷房負荷 単位: MJ/(㎡・年)

		基準値 ± 信頼限界				572.1 ± 34.1			
A	内部発熱（機器）	20W/㎡	5W/㎡			73.6	-73.6		
C	窓面積率	68%	34%			50.5	-50.5		
D	窓ガラス	Low-E複層	透明単板			-15.3	15.3		
E	有効開口面積	0.001㎡/㎡	0.01	0.02	0.03	38.9	-3.7	-15.3	-19.9
F	下限外気温	13℃	20℃			-7.6	7.6		

表-8 推定値と精算解の試算（東京）

年間冷房負荷削減量	
①推定値	43.6 + (-0.9 - 0.3 + 0.0 × a + 5.2 - 3.6 - 0.3 × b) = 43.6 + 0.1 = 43.7
②精算解	56.2
①-②（絶対値）	12.5 < 信頼限界 19.5
年間冷房負荷	
①推定値	271.3 + (-3.1 + 0.0 - 1.7 - 8.3 + 3.6) = 271.3 - 9.5 = 261.8
②精算解	261.3
①-②（絶対値）	0.5 < 信頼限界 28.4

【注記】※a 窓ガラスは熱貫流率、日射熱取得率が概ね2水準の間なので数値表の中央値とした。※b 非空調時の自然換気は、平日の非空調時間の自然換気許可時間が水準1で11時間なので、5÷11=45%で水準間を按分した。

5. まとめ

実験計画法を用いて、自然換気システム採用時の冷房負荷削減量に与える要因効果を検討した。また、効果推定値による推定法を用いることにより、簡易推定が可能な数値表を示した。この数値表を用いると精算解と信頼限界の範囲で特性値を推定できることを確認した。

【補足】

交互作用の検討のため、地点を東京として予備検討を行った一例を表-9に示す。表-2の因子と水準において、Gを除いた6因子での検討である（線点図は図-2とは異なる）。表-9に示すように交互作用はみられない。

表-9 有意効果（予備検討）

*: 5%有意 ** : 1%有意

		A	B	C	D	E	F	A×B	A×C	A×D	A×E
東京	冷房負荷削減量	**			*	**	*				
	冷房負荷	**		**		**					

【参考文献】

- 1) 空気調和・衛生工学会ホームページ：エネルギー消費性能計算プログラム（非住宅版）における未評価技術の解説, 2019.3
- 2) 横山他：省エネルギー設計の為の熱負荷簡易計算法, 日本建築学会論文報告集第278号, 1979.4
- 3) 郡他：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196）外気導入制御の運転状態の季節特性・地域特性, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.37-40, 2017.9
- 4) 芝原他：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175）自然換気併用空調の効果の感度解析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.25-28, 2016.9
- 5) 森田浩：よくわかる最新実験計画法の基本と仕組み, 秀和システム, 2010
- 6) 相沢他：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213）実験計画法を用いた高性能窓システムの感度解析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.65-68, 2018.9
- 7) 宇高他：自然換気建物における開口部面積と換気性能の実態に関する調査研究（その2）各開口部面積の分析及び換気回路網計算との比較, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.205-208, 2016.9

【謝辞】

本報は、(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「企画開発委員会(村上周三委員長)」およびプログラム開発委員会(石野久彌委員長)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表するものである。プログラム開発委員会名簿(順不同) 主査：石野久彌(首都大学東京名誉教授), 委員：郡公子(宇都宮大学), 長井達夫(東京理科大学), 二宮秀典(鹿児島大学), 山本佳嗣(東京工芸大学), 大木泰祐(大成建設), 小林信裕(前田建設工業), 菰田英晴(鹿島建設), 芝原崇慶(竹中工務店), 品川浩一(日本設計), 新武康(清水建設), 笹本太郎(東京ガス), 佐藤誠(佐藤ER), 野原文男, 長谷川巖, 二宮博史, 久保木真俊, 飯田玲香(以上, 日建設計), 相沢則夫(大林組), 事務局：生稲清久, 三田茂(建築環境・省エネルギー機構)