

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

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST

(Part 213) Energy Analysis of High-Performance Window Systems  
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

This study aims to analyze how several factors (thermal load, energy consumption, etc.) are affected by the types of various building elements (window area ratio, window glass type, direction, daylighting, etc.) on double skin facades and airflow windows. Sensitivity analysis of each factor was carried out using the design of experiments technique and the estimated effect value was obtained.

## はじめに

高性能窓システムであるダブルスキン (以下, DSF), エアフローウィンドウ (以下, AFW) について, 窓面積率, 窓ガラス種類など, 熱負荷や省エネルギー性に影響を与える各種要因の違いによる性能評価の研究は多い (例えば文献 1) などが, 昼光利用を含めた評価は少ない。既報<sup>2)</sup>では, 特性値として「熱負荷」と「空調+照明電力消費量」を取り上げ, それらに影響を与える各種要因の複合効果の把握を目的として, 要因に昼光利用を含めて, 実験計画法を用いた検討を行った。BEST では DSF や AFW の仕様を変えた計算が可能であるので, 本報では, DSF の換気口サイズ, AFW の通気量を要因 (因子) に追加して, 特性値に PMV も加えた検討を行った。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<sup>3)</sup>による推定値と精算解の比較を行った。

### 1. 計算条件

解析手法として直交配列による実験計画法を用いた。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<sup>3)</sup>があり, その手法を用いたエネルギー消費量の検討<sup>4)</sup>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。

図-1 に建物モデル, 表-1 に計算条件を示す。基準階の大部屋事務室の 1 スパン (6m) を切り出した, ペリメータ・インテリア 2 ゾーンモデルである。検討した窓システムは DSF, AFW, 一般窓 (庇無し) の 3 種類とした。ペリメータを解析対象とし, 特性値として, 年間熱負荷 (冷房と暖房の装置負荷全熱の絶対値の合計), 年間冷房

負荷, 年間暖房負荷, 空調+照明合計年間電力消費量, PMV および作用温度 (OT) を取り上げた。熱負荷は装置負荷全熱とする。空調電力消費量は年間システム COP を 1.5 として年間熱負荷から算出した。

表-2 に因子と水準を示す。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。因子と水準は, 熱負荷, 電力消費量の検討を主目的に設定しているが, 同じ条件で PMV, OT も検討した。

地域差の検討のため, 同じ因子と水準を用いて札幌, 東京, 那覇の 3 地点を検討した。但し, 地点により季節の期間, 断熱厚さ, ガラス種類を区別した (表-1,2)。

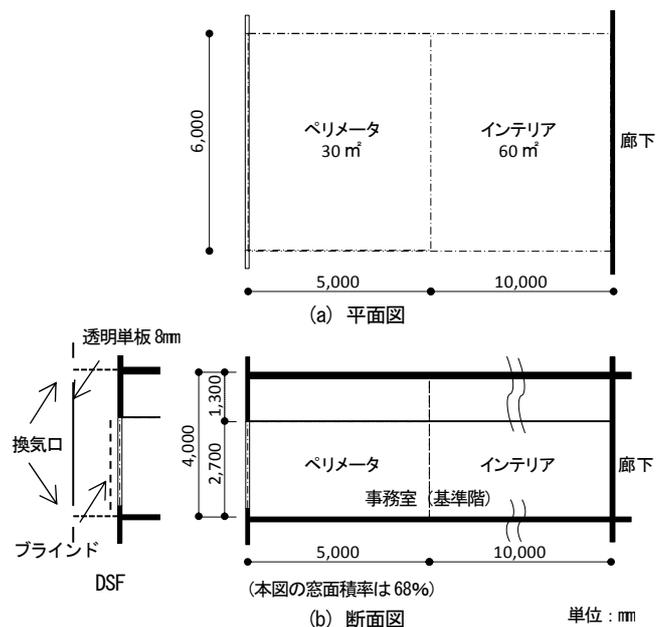


図-1 建物モデル

表-1 計算条件

気象データ	2001-2010年拡張アメダス標準年気象データ
設定温湿度	夏期 26°C, 60%RH以下 冬期・中間期 22~26°C, 40%RH以上
空調時間	8:30~21:00, 平日:空調運転, 土日祝日:空調停止 外気導入量 5m³/(m²h), 隙間風 0.2回/h
内部発熱	照明, 機器:表-2参照
人体条件	人員:0.15人/m², 代謝量1.2Met(通年), 着衣量0.5clo(夏期), 0.85clo(冬期), 0.7clo(中間期), 気流速度0.2m/s
昼光利用	昼光利用時, 調光:床面高さ750mmにて750lx
ブラインド	白色, 常時閉
DSF	奥行1m, 吹抜層数:1層 換気口:上下有効開口面積 表-2参照 換気制御:夏期・中間期:常時自然換気 冬期:DS内空気温度35°Cを超えたら自然換気
AFW	奥行:0.4m 通気量:表-2参照(空調時間帯に運転) 熱回収無し
季節	札幌:夏期7~9月, 冬期11~4月, 中間期5,6,10月 東京:夏期6~9月, 冬期12~3月, 中間期4,5,10,11月 那覇:夏期5~10月, 冬期1~3月, 中間期4,11,12月
外壁断熱厚さ	札幌40mm, 東京20mm, 那覇0mm

表-2 因子と水準

因子	水準1	水準2	水準3	水準4
A 窓面積率	68% 幅6m×高2.7m 連窓	39% 幅6m×高1.35m 連窓		
B 窓ガラス	透明単板(8)	日射遮蔽型Low-E 複層(8+12+8)		
C 昼光利用	無	有		
D 内部発熱	機器 15W/m² 照明 15W/m²	機器 10W/m² 照明 15W/m²		
E 方位	南	西	北	東
F※1 換気口	0.01m²/m	0.1m²/m		
F※2 通気量	2.6L/(sec・m²)	10L/(sec・m²)		

(備考)

- 窓ガラスは, DSFの場合は室内側, AFWの場合は屋外側を示す。  
(DSFの屋外側, AFWの室内側は, 共に透明単板)
- 窓ガラスは, 札幌の場合は, 水準1 透明複層, 水準2 高日射取得型Low-E複層とした。
- 因子F ※1はDSFの場合, ※2はAFWの場合の因子  
一般窓の場合はFの因子は無し

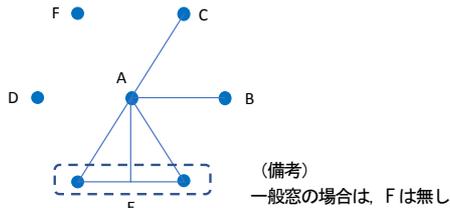


図-2 線点図

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
1	A	E	A×E	%E	A×E	%E	A×E	C	A×C	B	A×B	D			F
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	2	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
5	1	3	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2
6	1	3	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	4	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	1	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	2	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	3	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2
15	2	4	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

(備考) 4水準の因子Eは, 第2, 4, 6列(%E)に割り付けた。

2. 計算結果

表-4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。暖房負荷の符号は正で表している(以降の図表も同様)。

表-5に東京における各特性値の有意効果のある要因, 図-3に効果推定値を示す。PMV, OTについては代表して東京だけ示した。熱負荷, 電力量に対して, 窓面積率, 窓ガラス, 内部発熱, 方位に高い有意効果が見られ, 効果推定値も大きな値となっている。内部発熱は年間熱負荷では冷房と暖房で相殺されて効果推定値は小さくなる。DSFの換気口サイズも高い有意効果が見られ, AFWの通気量はやや小さめの効果となっている。昼光利用については, 熱負荷に対して有意効果はあまり見られないが, AFWと一般窓の電力量では効果が見られる。地域差として, 札幌, 東京では, 一般窓に比べて, DSF, AFW

表-4 基準値と信頼限界(95%)

(a) 札幌 単位: 熱負荷[MJ/m²年], 電力量[MJ/m²年], PMV[-], OT[°C]

	DSF	AFW	一般窓
年間熱負荷	329.6 ± 7.6	336.6 ± 14.6	409.7 ± 12.2
冷房負荷	140.5 ± 8.6	165.8 ± 17.1	216.9 ± 15.6
暖房負荷	189.1 ± 9.6	170.7 ± 11.8	192.8 ± 14.3
電力量	364.1 ± 7.9	367.9 ± 12.7	415.7 ± 14.7
PMV(8月)	0.35 ± 0.01	0.38 ± 0.02	0.39 ± 0.01
PMV(1月)	-0.44 ± 0.03	-0.40 ± 0.03	-0.39 ± 0.03
OT(8月)	26.6 ± 0.0	26.7 ± 0.1	26.7 ± 0.1
OT(1月)	21.8 ± 0.1	22.0 ± 0.1	22.1 ± 0.1

(b) 東京 単位: 熱負荷[MJ/m²年], 電力量[MJ/m²年], PMV[-], OT[°C]

	DSF	AFW	一般窓
年間熱負荷	369.4 ± 17.2	368.7 ± 20.6	433.2 ± 24.3
冷房負荷	312.2 ± 19.9	314.1 ± 24.4	357.2 ± 9.7
暖房負荷	57.2 ± 5.8	54.7 ± 7.5	76.0 ± 11.7
電力量	390.3 ± 15.5	388.9 ± 16.5	430.8 ± 19.0
PMV(8月)	0.47 ± 0.01	0.46 ± 0.02	0.46 ± 0.01
PMV(1月)	-0.20 ± 0.06	-0.18 ± 0.11	-0.23 ± 0.09
OT(8月)	26.8 ± 0.0	26.8 ± 0.1	26.8 ± 0.0
OT(1月)	22.9 ± 0.3	23.0 ± 0.5	22.7 ± 0.4

(c) 那覇 単位: 熱負荷[MJ/m²年], 電力量[MJ/m²年], PMV[-], OT[°C]

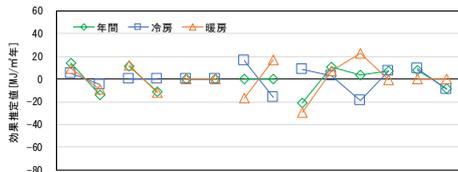
	DSF	AFW	一般窓
年間熱負荷	683.3 ± 27.9	611.7 ± 33.7	639.5 ± 28.1
冷房負荷	682.5 ± 28.0	610.8 ± 33.7	638.3 ± 28.2
暖房負荷	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1	1.2 ± 0.2
電力量	599.5 ± 23.0	550.6 ± 21.9	570.3 ± 18.8
PMV(8月)	0.56 ± 0.02	0.51 ± 0.01	0.48 ± 0.02
PMV(1月)	0.70 ± 0.02	0.64 ± 0.02	0.56 ± 0.03
OT(8月)	27.1 ± 0.1	27.0 ± 0.0	26.9 ± 0.1
OT(1月)	26.2 ± 0.1	26.0 ± 0.1	25.6 ± 0.1

(備考) PMV, OTは, 代表月の空調時間の平均値を示す。

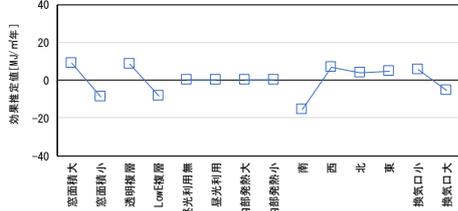
表-5 有意効果(東京)

	A	B	C	D	E	F	A×B	A×C	A×E
DSF	年間熱負荷	**	**		**	**	*		
	冷房負荷	*	**		**	**			
	暖房負荷	*	**	*	**	**	*		
	電力量	*	**		**	**	**		
	PMV(8月)	**	**		**	**	**		
	OT(8月)	**	**		**	**	**		
AFW	年間熱負荷	**	**		**	*			
	冷房負荷	**	**		**	**			
	暖房負荷	*	**		**	**			
	電力量	**	**	*	**	*			
	PMV(8月)	**	**		*	**	**		
	OT(8月)	**	**		*	**	**		
一般窓	年間熱負荷	**	**		**	**	*		
	冷房負荷	**	**	**	**	**			**
	暖房負荷	*	**		**	**	**		
	電力量	**	**	*	**	**			
	PMV(8月)	**	**	*	**	**	**		
	OT(8月)	**	**	*	**	**	**		

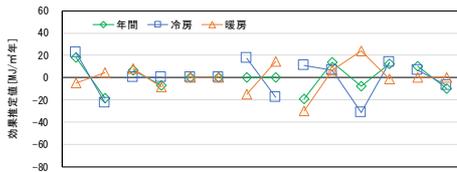
(備考) \*: 5%有意, \*\*: 1%有意



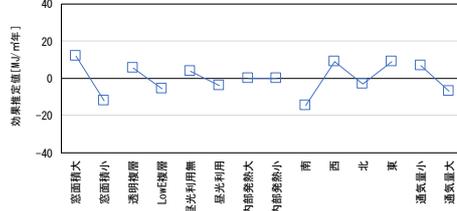
①-1 年間熱負荷 (DSF)



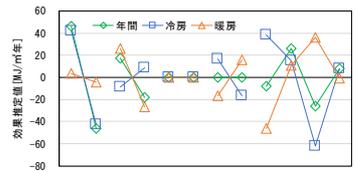
②-1 電力消費量 (DSF)



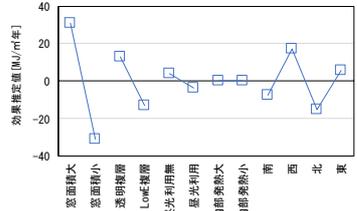
①-2 年間熱負荷 (AFW)



②-2 電力消費量 (AFW)

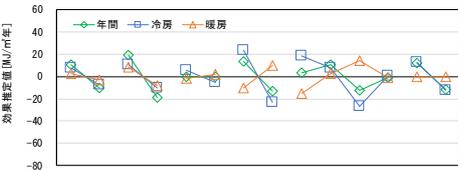


①-3 年間熱負荷 (一般窓)

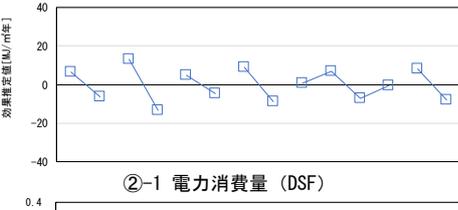


②-3 電力消費量 (一般窓)

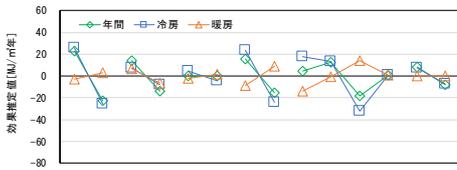
(a) 札幌



①-1 年間熱負荷 (DSF)



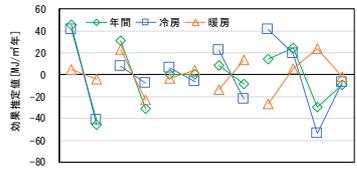
②-1 電力消費量 (DSF)



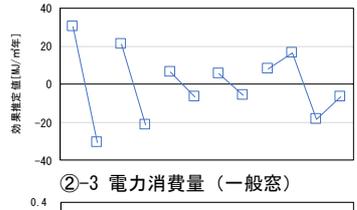
①-2 年間熱負荷 (AFW)



②-2 電力消費量 (AFW)



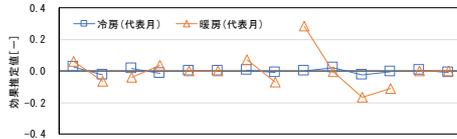
①-3 年間熱負荷 (一般窓)



②-3 電力消費量 (一般窓)



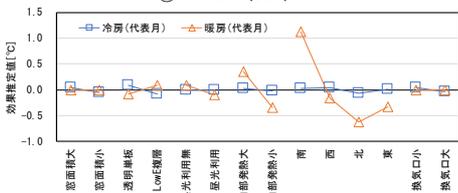
③-1 PMV (DSF)



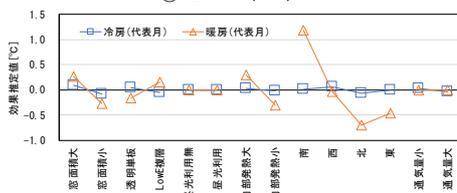
③-2 PMV (AFW)



③-3 PMV (一般窓)



④-1 OT (DSF)

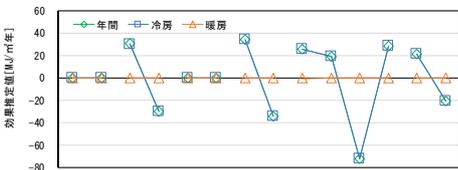


④-2 OT (AFW)

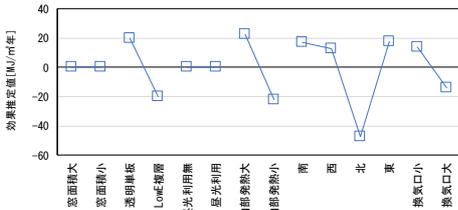


④-3 OT (一般窓)

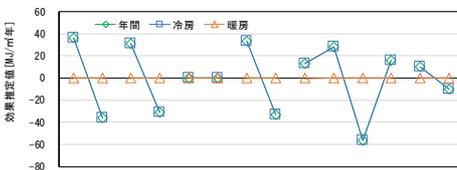
(b) 東京



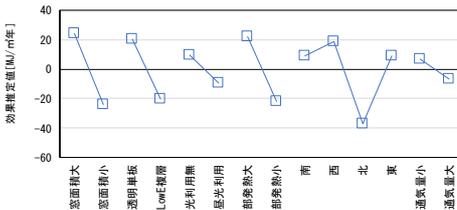
①-1 年間熱負荷 (DSF)



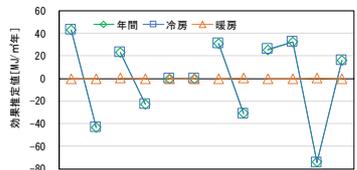
②-1 電力消費量 (DSF)



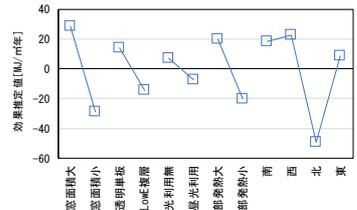
①-2 年間熱負荷 (AFW)



②-2 電力消費量 (AFW)



①-3 年間熱負荷 (一般窓)



②-3 電力消費量 (一般窓)

(c) 那覇

図-3 効果推定値

の方が各要因の効果推定値は小さい傾向がある。那覇では、窓面積率以外はDSF, AFW, 一般窓に大きな差は見られない。交互作用は、窓面積率×窓ガラスだけ多少の有意効果が見られるが、他はあまり見られない。PMV, OTは方位の効果は他の因子よりも大きい。

### 3. 特性値の推定

#### 3.1 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<sup>3)</sup>。

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

式-1において、主効果の効果推定値は、右辺第1～3項の( )の値、また交互作用の効果推定値は、右辺第4項の{ }の値であり、これらを数表化しておくことで特性値の簡易計算が可能となる。一例として、表-6, 7に、東京のDSFの熱負荷、AFWの熱負荷の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-4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。

#### 3.2 試算

有意要因数値表による推定値と、BEST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。試算条件は、東京のDSFとAFWとし、すべての因子が水準2の場合(下記)とする。  
計算条件: 窓面積率39%, 窓ガラスLowE複層, 昼光利用有り, 内部発熱10W/m<sup>2</sup>, 方位=西, DSFの場合は換気口0.1m<sup>2</sup>/m, AFWの場合は通気量10L/(sec・m<sup>2</sup>)

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。

#### 4. まとめ

実験計画法を用いて、高性能窓システムにおけるペリメータの熱負荷、空調+照明電力消費量、PMV等に与える要因に昼光利用を含めて、有意要因を検討した。また効果推定値による推定法を用いることにより、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。

#### 【参考文献】

- 1) 須崎他: 高性能窓システムをもつ建築の熱負荷解析 第18報 熱負荷曲線に基づく年間熱負荷と室内環境評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集2017.8
- 2) 相沢他: 建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発 第32報 実験計画法を用いた高性能窓の感度解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018.9 (投稿中)
- 3) 横山他: 省エネルギー設計の為に熱負荷簡易計算法, 日本建築学会論文報告集第278号, 1979.4
- 4) 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, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.33-36, 2015.9

表-6 有意要因数値表: DSF (東京)

		基準値 ± 信頼限界				312.2 ± 19.9			
A	窓面積率	68%	39%			7.3	-7.3		
B	窓ガラス	透明単板	LowE複層			10.6	-10.7		
C	昼光利用	無	有			5.2	-5.2		
D	内部発熱(機器)	15W/m <sup>2</sup>	10W/m <sup>2</sup>			23.3	-23.3		
E	方位	南	西	北	東	18.3	7.7	-26.6	0.6
F	換気口[m <sup>2</sup> /m]	0.01	0.1			12.8	-12.8		

(b) 年間暖房負荷 単位: MJ/(m<sup>2</sup>・年)

		基準値 ± 信頼限界				57.2 ± 5.8			
A	窓面積率	68%	39%			2.8	-2.8		
B	窓ガラス	透明単板	LowE複層			8.3	-8.3		
C	昼光利用	無	有			-2.0	2.0		
D	内部発熱(機器)	15W/m <sup>2</sup>	10W/m <sup>2</sup>			-10.1	10.1		
E	方位	南	西	北	東	-15.3	2.7	13.8	-1.2
A×B	窓面積率×窓ガラス	68%×単板	39%×単板			2.6	-2.6		
		68%×LowE	39%×LowE			-2.6	2.6		

表-7 有意要因数値表: AFW (東京)

		基準値 ± 信頼限界				314.1 ± 24.4			
A	窓面積率	68%	39%			25.4	-25.4		
B	窓ガラス	透明単板	LowE複層			7.8	-7.8		
C	昼光利用	無	有			4.7	-4.7		
D	内部発熱(機器)	15W/m <sup>2</sup>	10W/m <sup>2</sup>			23.9	-23.9		
E	方位	南	西	北	東	18.0	13.3	-31.9	0.5
F	通気量[L/(sec・m <sup>2</sup> )]	2.6	10			7.4	-7.4		

(b) 年間暖房負荷 単位: MJ/(m<sup>2</sup>・年)

		基準値 ± 信頼限界				54.7 ± 7.5			
A	窓面積率	68%	39%			-2.9	2.9		
B	窓ガラス	透明単板	LowE複層			6.4	-6.4		
C	昼光利用	無	有			-1.8	1.8		
D	内部発熱(機器)	15W/m <sup>2</sup>	10W/m <sup>2</sup>			-8.6	8.6		
E	方位	南	西	北	東	-13.6	-0.8	13.9	0.5

表-8 推定値と精算解の試算

DSF 年間冷房負荷	
①推定値	312.2 + (-7.3 - 10.7 - 5.2 - 23.3 + 7.7 - 12.8) = 312.2 - 51.6 = 260.6
②精算解	271.3
①-②(絶対値)	10.7 < 信頼限界 19.9
DSF 年間暖房負荷	
①推定値	57.2 + (-2.8 - 8.3 + 2.0 + 10.1 + 2.7 + 2.6) = 57.2 + 6.3 = 63.5
②精算解	58.4
①-②(絶対値)	5.1 < 信頼限界 5.8
AFW 年間冷房負荷	
①推定値	314.1 + (-25.4 - 7.8 - 4.7 - 23.9 + 13.3 - 7.4) = 314.1 - 55.9 = 258.2
②精算解	260.9
①-②(絶対値)	2.7 < 信頼限界 24.4
AFW 年間暖房負荷	
①推定値	54.7 + (2.9 - 6.4 + 1.8 + 8.6 - 0.8) = 54.7 + 6.1 = 60.8
②精算解	60.9
①-②(絶対値)	0.1 < 信頼限界 7.5

#### 【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), 山本佳嗣(東京工芸大学), 小林信裕(前田建設工業), 菟田英晴(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), 長井達夫(東京理科大学), 二宮秀典(鹿児島大学), 相沢則夫(大林組), 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), 事務局: 生稲清久, 石田真理(建築環境・省エネルギー機構)