

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 244) 実験計画法を用いた自然換気システムの効果推定

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

(Part 244) Effect Estimation of the Heat Load Characteristics of
Natural Ventilation System utilizing 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 (東京都立大学名誉教授) 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. It was performed examination in consideration of wind power ventilation.

はじめに

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。既報¹⁾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、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⁾による簡易推定を行った。既報では温度差換気によるみ着目(外部風を無視)して検討したが、本報では、より実務に参考になる簡易推定を目指して、外部風を考慮した検討を行った。

1. 計算条件

図-1 に計算対象室、表-1 に計算条件を示す。風向の影響を評価に加えるため、外壁を1面だけのモデルとした。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地点を取り上げ、地点により、外壁断熱厚さと窓ガラス仕様を区別した。また、参考として、同じ計算条件で外部風を考慮しない計算も行った。

2. 実験計画法

既報と同様、解析手法として直交配列による実験計画法を用いた。特性値も既報と同様、自然換気による年間冷房負荷削減量(算出式は下記)、年間冷房負荷とした。熱負荷は装置負荷(全熱)とし、ペリメータ+インテリア合計値とした。

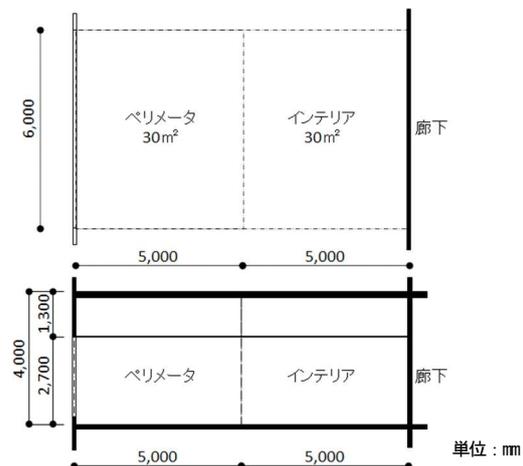
「自然換気による年間冷房負荷削減量」

= 「自然換気無し時の年間冷房負荷」

- 「自然換気有りの年間冷房負荷」

表-2 に因子と水準を示す。因子は、建物側の仕様(方

位、他)3ケと自然換気システム側の仕様(有効開口面積、他)3ケの計6ケとした。有効開口面積は既報と同様に、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 $1\text{cm}^2/\text{m}^2$ (外皮長さ当り $0.001\text{m}/\text{m}^2$)を加えた4水準とした。各特性値について同じ因子と水準とした。



- 計算地点：札幌、東京、那覇
- 10階建て事務所ビル(高さ40m)の2階
方位：南・西・北・東【因子】
廊下は非空調室(インテリア・廊下間の隣室温度差係数0.2)
上下階は空調室
- 窓は連窓、窓高さ1.35~2.7m(窓面積率34%~68%)【因子】
ブラインド：明色、常時閉、屋光利用無し
- 外壁断熱：吹付硬質ウレタンフォームA種1
断熱厚さは地点により変えている。札幌 50mm、東京 25mm、那覇 0mm
- 窓ガラスは地点により変えている。
札幌 高日射取得型Low-E複層ガラス(8+12+8)
東京、那覇 日射遮蔽型Low-E複層ガラス(8+12+8)

図-1 計算対象室

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、交互作用(例えば因子A×Bなど)について、地点を東京として予備的に実験計画法で検討を行ったところ、交互作用はほとんど見られなかったが、B×Eだけ若干の有意性が見られたため、B×Eを含む割り付けとした。表-3の条件に基づいて、BEST 専門版で16ケースの計算を行い実験計画法の手法で効果推定を行った。

表-1 計算条件

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°C 60%RH 加熱加湿 22°C 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：4.5m ³ /(m ² h)
内部発熱	機器：表-2 参照 (因子) 照明：10W/m ² ，人員：0.15人/m ²
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)
隣室条件	隣室温度差条件α=0.2
自然換気条件	
自然換気期間：通年	
自然換気時間：24時間，平日・土日とも 非空調時間帯の自然換気有無 (因子)	
下限外気温度：表-2 参照 (因子)	
上限外気相対湿度：90%RH	
上限外気露点温度：19°C DP	
上限外気 (屋上) 風速：10m/s	
下限室温：24°C (空調時，非空調時とも)	
室内外エンタルピー差考慮	
ハイブリッド空調 (冷房時に自然換気許可)	
計算上の仮定：無風時の中性帯の高さは建物高さの2/3の位置	

表-2 因子と水準

因子	水準1	水準2	水準3	水準4
A 方位	南	西	北	東
B 機器発熱 ※1	20W/m ²	10W/m ²		
C 窓面積率	68%	34%		
D 有効開口面積 ※2	0.001m ² /m ² 【1cm ² /m ² 】	0.015 【15】	0.03 【30】	0.045 【45】
E 自然換気許可条件	下限外気温13°C 非空調時13°C	下限外気温20°C 非空調時18°C		
F 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 上段は外皮長さ当り[m²/m²]，下段【】内の値は床面積当り[cm²/m²]を示す。

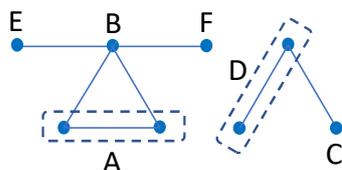


図-2 線点図

表-3 直交表への割り付け

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

【注記】4水準の因子Aは，第2，8，10列(%A)に，因子Dは，第4，11，15列(%D)に割り付けた。

表-4 年間冷房負荷削減量 (東京)

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	425.3	396.8	28.5
2	386.1	311.3	74.8
3	350.3	309.5	40.8
4	335.5	266.5	69.0
5	328.4	283.0	45.5
6	382.9	380.8	2.1
7	304.3	239.9	64.3
8	334.0	236.8	97.2
9	249.5	194.0	55.5
10	246.0	239.1	6.9
11	315.5	273.5	42.0
12	293.4	237.9	55.5
13	220.0	214.0	6.0
14	244.5	223.6	20.9
15	244.0	209.0	35.1
16	289.6	214.3	75.3
平均	309.3	264.4	45.0

表-5 基準値と信頼限界 (95%)

(a) 外部風考慮

単位：[MJ/m²年]

	札幌	東京	那覇
冷房負荷削減量	51.1 ± 25.5	45.0 ± 16.6	41.8 ± 20.4
冷房負荷	130.3 ± 33.6	264.4 ± 27.8	549.8 ± 36.2

(b) 外部風無し (参考)

単位：[MJ/m²年]

	札幌	東京	那覇
冷房負荷削減量	58.5 ± 26.3	48.1 ± 15.8	53.3 ± 14.9
冷房負荷	122.8 ± 33.2	261.2 ± 26.7	538.3 ± 22.9

表-6 有意効果

(a) 外部風考慮

*: 5%有意 **: 1%有意

		A	B	C	D	E	F	B×E	B×F
		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	**	**	**	*				

(b) 外部風無し (参考)

*: 5%有意 **: 1%有意

		A	B	C	D	E	F	B×E	B×F
		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	**	**	**	**	*	*		

【注記】A~Fは表-2の因子，B×E，B×Fは交互作用を示す。

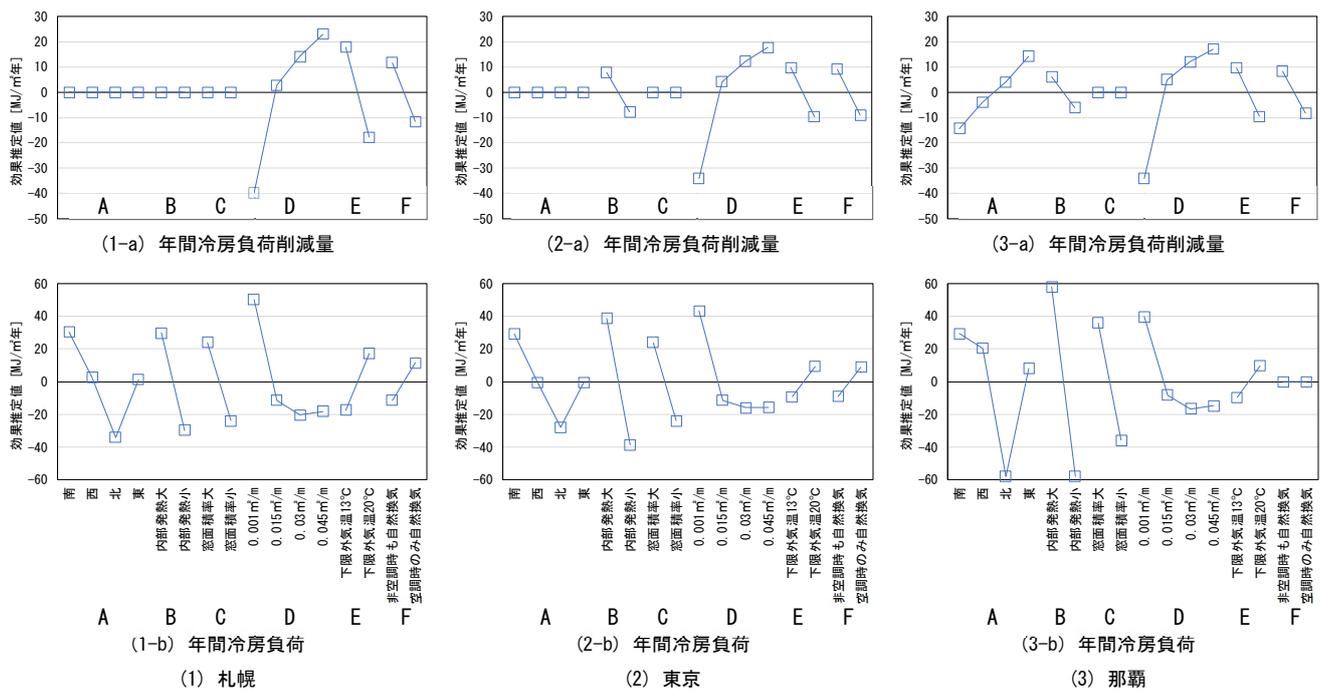


図-3 効果推定値

3. 計算結果

表-4に、表-3の16ケースの実験結果（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。冷房負荷に対する冷房負荷削減量の割合は、札幌>東京>那覇になっている。

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が、3地点共、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。

表-5、表-6には、参考に検討した「外部風を考慮しない（温度差換気のみに着目）」計算結果も示している。外部風を考慮する（風力換気を考慮する）と、考慮しない場合に比べて、多少であるが、年間冷房負荷削減量は小さくなり、年間冷房負荷は大きくなっている。有意効果は札幌、東京にはあまり違いは見られないが、那覇には違いが見られる。外部風考慮有無の違いについて、後述の補足に考察する。

図-3に効果推定値を示す。年間冷房負荷削減量について、因子A～Cは効果が小さい。A方位は那覇に、B内部発熱は東京、那覇に小さい効果が見られる。C窓面積率の効果は見られない。3地点共、D有効開口面積の効果が大きい。Dについては、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、D、E自然換気許可条件の下限外気温、F非空調時の自然換気有無の効果は、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。年間冷房負荷については、3地点共、A～Dの効果が大きい。E、Fの効果はA～Dより小さく、札幌より那覇の方が小さい。

4. 特性値の推定

4.1 効果推定法

表-7-1～表-7-3に、図-3の効果推定値（外部風考慮）を数値化した有意要因数値表を示す。表の右側4列の数値が効果推定値で、左側に示す水準に対応している。有意要因数値表を用いると特性値の推定値が簡易に計算できる。今回、交互作用がなかったため、負荷予測式は以下となる（詳細は文献2)参照）。

推定値＝基準値＋各因子の効果推定値の合計

表-7には表-5の基準値と信頼限界も示している。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 専門版による計算結果（精算解）を比較し、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まれない。水準間の値は直線補間して算出する。

計算条件

A 方位 南, B 機器発熱 15W/m², C 窓面積率 50%,
D 有効開口面積 0.02 m²/m, E 自然換気許可下限外気温 18℃ (非空調時 16℃), F 非空調時の自然換気 平日 3:00～8:00 (5時間)

東京の場合の計算結果を表-8に示す。②精算解が①推定値の信頼限界内に入ってい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。

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。既報りと同様

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						51.1	±	25.5	
D	有効開口面積	0.001㎡/m	0.015	0.03	0.045	-39.8	2.8	14.1	22.9
E	下限外気温	13℃	20℃			17.8	-17.8		
F	非空調時の自然換気有無	有り	無し			11.6	-11.6		

(b) 年間冷房負荷 単位: MJ/(㎡・年)

基準値 ± 信頼限界						130.3	±	33.6	
A	方位	南	西	北	東	30.3	2.7	-34.2	1.3
B	内部発熱	20W/㎡	10W/㎡			29.7	-29.7		
C	窓面積率	68%	34%			24.0	-24.0		
D	有効開口面積	0.001㎡/m	0.015	0.03	0.045	50.2	-11.5	-20.4	-18.3
E	下限外気温	13℃	20℃			-17.3	17.3		
F	非空調時の自然換気有無	有り	無し			-11.5	11.5		

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						45.0	±	16.6	
B	内部発熱	20W/㎡	10W/㎡			7.8	-7.8		
D	有効開口面積	0.001㎡/m	0.015	0.03	0.045	-34.1	4.2	12.2	17.7
E	下限外気温	13℃	20℃			9.7	-9.7		
F	非空調時の自然換気有無	有り	無し			9.1	-9.1		

(b) 年間冷房負荷 単位: MJ/(㎡・年)

基準値 ± 信頼限界						264.4	±	27.8	
A	方位	南	西	北	東	29.1	-0.7	-27.9	-0.5
B	内部発熱	20W/㎡	10W/㎡			38.7	-38.7		
C	窓面積率	68%	34%			23.9	-23.9		
D	有効開口面積	0.001㎡/m	0.015	0.03	0.045	43.3	-11.4	-16.1	-15.8
E	下限外気温	13℃	20℃			-9.2	9.2		
F	非空調時の自然換気有無	有り	無し			-9.0	9.0		

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						41.8	±	20.4	
A	方位	南	西	北	東	-14.3	-4.0	4.0	14.2
B	内部発熱	20W/㎡	10W/㎡			6.1	-6.1		
D	有効開口面積	0.001㎡/m	0.015	0.03	0.045	-34.1	5.0	12.0	17.1
E	下限外気温	13℃	20℃			9.5	-9.5		
F	非空調時の自然換気有無	有り	無し			8.3	-8.3		

(b) 年間冷房負荷 単位: MJ/(㎡・年)

基準値 ± 信頼限界						549.8	±	36.2	
A	方位	南	西	北	東	29.4	20.4	-57.9	8.1
B	内部発熱	20W/㎡	10W/㎡			58.0	-58.0		
C	窓面積率	68%	34%			36.0	-36.0		
D	有効開口面積	0.001㎡/m	0.015	0.03	0.045	39.7	-8.3	-16.5	-14.9
E	下限外気温	13℃	20℃			-9.7	9.7		

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	45.0 + (0.0 + 6.9 - 4.2 - 0.8) × a = 45.0 + 1.9 = 46.9
②精算解	58.1
①-②（絶対値）	11.2 < 信頼限界 16.6
年間冷房負荷	
①推定値	264.4 + (29.1 + 0.0 - 1.4 - 13.0 + 3.9 + 0.8) × a = 264.4 + 19.4 = 283.8
②精算解	272.3
①-②（絶対値）	11.5 < 信頼限界 27.8

【注記】※a 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。

の手法を用いて、本報では外部風を考慮して検討した。負荷予測式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、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】

表-5、表-6に示すように、外部風を考慮する（風力換気を考慮する）と、考慮しない（温度差換気のみ考慮する場合）に比べて、自然換気効果が小さくなっている。この理由は、自然換気口に対して外部風が向かい風とは逆向きの場合には風圧係数がマイナス（換気口は負圧）になり自然換気風量を減じるが、この影響が大きいと考えられる。なお、検討した3地点では外部風を考慮すると冷房負荷削減量が小さくなったが、地点により風向、風速等異なるので、地点毎の評価が必要と考える。

表-9に自然換気運転時間が多い月の風向の発生割合を示す。月により発生割合の多い風向は異なっており、ある程度ばらつきがあるので、通年では向かい風と逆風で相殺されて、風力換気効果が現れにくいと思われる。3地点共、西風は少ないが那覇は南風も少ない。表-6(a)外部風考慮で、冷房負荷削減量について、那覇にだけA方位の有意効果が出ているのは、風向の偏りの違いが一因と思われる。なお、外部風を考慮しない検討（表-6(b)）では、冷房負荷削減量について、3地点共、方位の有意効果は見られない。

表-9 風向の発生割合（平日の空調時間9～21時）

(1) 札幌	5月	6月	7月	8月	9月	10月
	南風	31%	15%	28%	35%	28%
西風	7%	10%	7%	12%	20%	28%
北風	44%	36%	18%	32%	33%	17%
東風	18%	38%	48%	20%	19%	17%
合計	100%	100%	100%	100%	100%	100%

(2) 東京	4月	5月	6月	9月	10月	11月
	南風	40%	37%	28%	30%	12%
西風	16%	11%	11%	10%	6%	5%
北風	20%	23%	21%	39%	49%	51%
東風	25%	30%	39%	21%	33%	23%
合計	100%	100%	100%	100%	100%	100%

(3) 那覇	1月	2月	3月	4月	11月	12月
	南風	10%	18%	11%	17%	21%
西風	12%	2%	7%	3%	3%	2%
北風	57%	58%	46%	43%	49%	68%
東風	21%	22%	36%	37%	26%	27%
合計	100%	100%	100%	100%	100%	100%

【注記】南風：南東～南西の風向の発生時間÷月合計時間（空調時間）他の風向も同じ。

【参考文献】

- 1) 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227）実験計画法を用いた自然換気システムの効果推定法、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.25-28, 2019.9
- 2) 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

【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(東京都立大学名誉教授)、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)、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)、佐々木尚(安井建築設計事務所)、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、西田裕道(以上、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)