

# 実験計画法に基づく屋根散水の 蒸発冷却効果に関する研究

## 第2報 分散分析による要因効果の推定

STUDIES ON THE EFFECTS OF EVAPORATIVE COOLING BY  
ROOF SPRAYING BASED ON THE DOE METHOD  
Part.2 Factor-Effects Estimated by the Analysis of Variance

石川 幸雄\*  
Yukio ISHIKAWA

### Abstract

Evaporative cooling by means of roof spraying is taken up as a technique of passive cooling and analysis of factors concerning the effects of passive cooling and energy saving by roof spraying is performed on a model private residence, taking account of nocturnal radiation and natural wind force. The previous paper, the first part of the study, described of the Design of Experiment and the results of numerical simulation. In this paper, the second part of the study, with the use of the simulation results, the factor considered to be statistically significant is found and main effect of each factor or interaction of factors is examined, by conducting the Analysis of Variance and the F-Test. Furthermore, based on the main effect of each factor, factor-effects upon each characteristic value such as passive cooling hours, average room temperature, and rate of heat extraction are examined and an estimate table of the factor-effects is shown, by which every characteristic value can be estimated easily.

**Key Words:** Passive cooling, Evaporative cooling, Roof spraying, Energy saving, F-test, Design of experiment method, Analysis of variance, Factor-effects

### 1. 緒言

本研究では、建築における自然エネルギー、自然環境利用の冷房手法として屋根散水を取り上げ、更に、夜間ふく射及び自然通風による風力の利用をも考慮し、戸建住宅をモデルに、実験計画法を用いて夏季の室内温度と除去熱量の数値シミュレーションを行ない、得られた結果を因子分析することによって、屋根散水による蒸発冷却効果としての自然冷房効果と省エネルギー効果を推定する。

前報<sup>(1)</sup>では、以上のうち、まず数値実験計画の概要とその方法について述べた。ここでは、自然冷房手法及び夏季の省エネルギー手法などに関する諸要因の中から、数値実験計画に取り上げた因子と水準の選択について述べ、更に、2水準系の直交配列表を用いた数値実験の組み立てを示した。次に、自然冷房効果、除

去熱量低減による省エネルギー効果を代表する特性値として自然冷房時間、除去熱量などの設定について述べ、数値実験計画に基づき、各特性値について行なった数値シミュレーションの結果を示した。

本報では、数値シミュレーション結果を用いて分散分析とF検定を行ない、各特性値に対する有意要因を検出し、あわせて自然冷房効果、省エネルギー効果に対する屋根散水の主効果と各要因の効果を推定する。更に、各因子の各水準に対する各々の特性値を簡易計算によって推定し得る効果推定表を与える。

### 記号

F : F 値

F<sub>0</sub> : 分散比

n<sub>0</sub> : 有効反復数

R : 信頼限界 (°C, hr又はkWh/m<sup>2</sup>・期)

S : 平方和

V : 不偏分散

X : 数値実験値 (°C, hr又はkWh/m<sup>2</sup>・期)

原稿受付 平成4年1月5日

\*会員、(株)竹中工務店技術研究所 主任研究員  
(〒136 東京都江東区南砂2-5-14)

$\rho$  : 寄与率 (%) $\phi$  : 自由度

添字

A : 屋根散水の有無

B : 断熱の有無

C : 窓の種類

D : 床の有無

E 又は e : 誤差

i : 数値実験のケース i

m : 平均値

T : 合計

## 2. 分散分析及び効果推定

### 2. 1 分散分析と F 検定の方法

数値実験計画の因子である A : 屋根散水、B : 断熱、C : 窓、D : 床については、各々 2 水準を設定してその主効果を調べ、更に A × B : 屋根散水と断熱、A × C : 屋根散水と窓、A × D : 屋根散水と床、について各々 2 因子交互作用を調べることで、各検討目的別に合計 7 通りが数値実験上考慮されている。

全平均値  $X_m$  は、数値実験ケース i の実験値を  $X_i$  で表わすと、式(1)となる。

$$X_m = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 X_i / 8 \quad (1)$$

又、全平方和を  $S_T$  で表すと、 $S_T$  は式(2)となる。

$$S_T = \sum_{i=1}^8 (X_i - X_m)^2 \quad (2)$$

各要因の平方和 S について、因子 A と交互作用 A × B を例として示すと、式(3)、(4)となる。

$$\begin{aligned} S_A &= 4 \cdot \sum_{i=1}^2 (X_{\bar{A}i} - X_m)^2 \\ &= \frac{1}{8} \cdot \left( \sum_{i=1}^4 X_{A2,i} - \sum_{i=1}^4 X_{A1,i} \right)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S_{AB} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (X_{\bar{A}\bar{B}ij} - X_{\bar{A}i} - X_{\bar{B}j} + X_m)^2 \\ &= S_{AB} - S_A - S_B \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $S_{AB}$  は級間平方和で、

$$S_{AB} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left\{ \sum_{k=1}^2 (X_{i,j,k} - X_m) \right\}^2 \quad (5)$$

となる。但し、k は繰り返しのパラメータである。誤差平方和  $S_e$  は、式(6)で表わされる。

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D) - (S_{AB} + S_{AC} + S_{AD}) \quad (6)$$

更に、各要因の不偏分散 V は、その自由度を  $\phi$  とすると、式(7)で表わされる。

$$V = S / \phi \quad (7)$$

本実験計画においては、直交配列表 L<sub>8</sub> (2<sup>7</sup>)において、7 列全てに要因を割り付けているので誤差の自由度  $\phi_e$  は 0 となり、又、 $S_e$  も 0 となる。誤差項へのブーリングについては、田口<sup>(4)</sup> の方法に従って、要因効果の小さい順に誤差項へブーリングすることとした。

$$\phi'_e = \phi_e + (\text{プールした要因の自由度}) \quad (8)$$

$$S'_e = S_e + (\text{プールした要因の平方和}) \quad (9)$$

$$V'_e = S'_e / \phi'_e \quad (10)$$

となり、各要因に対する分散比  $F_0$  は、式(11)で表される。

$$F_0 = V / V'_e \quad (11)$$

次に F 検定を行なう。

$F_0 \geq F (\phi, \phi'_e; 0.01)$  ならば、要因は 1 % 有意(\*)である。

$F (\phi, \phi'_e; 0.01) > F_0 \geq (\phi, \phi'_e; 0.05)$  ならば、要因は 5 % 有意(\*)である。又、各要因の寄与率  $\rho$  (%) は、因子 A を例にとると、式(12)で表される。

$$\rho_A = \frac{S_A - \phi_A \cdot \frac{S_e}{\phi_e}}{S_T} \times 100 \quad (12)$$

要因効果の推定値に対する確率 95% の信頼限界は、これを R で表すと、式(13)となる。

$$R = \pm \left( \frac{F(1, \phi'_e; 0.05) \cdot V'_e}{n_e} \right)^{1/2} \quad (13)$$

ここで、 $n_e$  は有効反復数であり、田口<sup>(4)</sup> によれば、 $n_e$  は式(14)で表される。

$$n_e = \frac{8}{1 + \text{推定に用いる有意要因の自由度の合計}} \quad (14)$$

### 2. 2 分散分析の結果

屋根散水の自然冷房効果の検討と除去熱量低減による省エネルギー効果の検討に関する分散分析および F 検定の結果を示す。

#### 2. 2. 1 自然冷房効果の検討

特性値として選定した各方位に対する夏季期間の自然冷房時間（環境温度及び室内温度について 26°C を基準とした場合）及び夏季期間の平均環境温度及び平均室内温度に関する分析結果を示す。

##### a. 自然冷房時間(PCH) (環境温度 26°C 基準)

###### (1) 東西軸

表 1 に示す。

###### (2) 南北軸

表 2 に示す。

##### b. 自然冷房時間(PCH) (室内温度 26°C 基準)

###### (1) 東西軸

表3に示す。

(2) 南北軸

表4に示す。

c. 夏季期間の平均環境温度(TEI)

(1) 東西軸

表5に示す。

(2) 南北軸

表6に示す。

d. 夏季期間の平均室内温度( $\bar{t}_r$ )

(1) 東西軸

表7に示す。

(2) 南北軸

表8に示す。

## 2. 2. 2 除去熱量低減による省エネルギー効果の検討

特性値として選定した各方位に対する夏季期間の除去熱量(全熱、顕熱)に関する分析結果を示す。

a. 全熱除去熱量(HEt)

(1) 東西軸

表9に示す。

(2) 南北軸

表10に示す。

b. 顕熱除去熱量(HEs)

(1) 東西軸

表11に示す。

(2) 南北軸

表12に示す。

## 2. 3 有意要因と効果推定

前節で示したF検定結果から得られた有意要因に基づき、各特性値に対する各要因の効果推定を行なう。自然冷房効果については、一例として、環境温度に基づく26°C基準の自然冷房時間及び夏季期間の平均環境温度、又、除去熱量低減による省エネルギー効果については、全熱及び顕熱除去熱量に対する要因効果の推定結果を示す。

なお、本節では、有意要因だけでなく、取り上げた因子全ての主効果による効果推定結果を示す。効果推定表では、各因子の主効果及び交互作用（本研究における数値実験結果では、たまたま全ての交互作用は有意とならなかった）を数値で示し、これらを各特性値の平均値に加算することにより、任意のケースの特性値の推定が可能となる。

### 2. 3. 1 自然冷房効果の検討

環境温度26°C基準の自然冷房時間及び夏季期間の平均環境温度に対する各要因の効果推定表を表13に示す。表13より、一例として、東西軸の最良ケースの

特性値を推定する。自然冷房時間については、

平均値土信頼限界	1872.5±65.2
A : 屋根散水あり	+45.3
B : 断熱なし	+48.8
C : 窓 熱線吸収ガラス	+24.1
D : 床 あり	+4.8

合計 1995.5±65.2(hr)

となる。このケースはたまたま実験No.1と同じであり、実験No.1のシミュレーション結果は2001.0hrであり、シミュレーション結果は、十分推定値の信頼限界内に入っている。更に、参考として、数値実験の組み合わせにはないケースについて検討を行なう。その一例として、上記実験No.1に対して、断熱ありとした場合を検討すると、同様の計算により、自然冷房時間の推定値は1897.9±65.2hrであるのに対して、シミュレーション結果は1881.0hrであり、推定値の信頼限界内に入っていることがわかる。

又、夏季期間の平均環境温度について、同様に最良ケースは実験No.1であり、この場合の平均環境温度の推定値は24.50±0.24°Cであるのに対して、実験No.1のシミュレーション結果は、24.44°Cとなっている。更に、実験No.1について、断熱をありとした検討ケースでは、推定値24.86±0.24°Cに対して、シミュレーション結果は、24.89°Cとなっており、シミュレーション結果はいずれも十分推定値の信頼限界内に入っている。

## 2. 3. 2 除去熱量低減による省エネルギー効果の検討

夏季期間の全熱及び顕熱除去熱量に対する各要因の効果推定表を表14に示す。表14より、一例として、東西軸の最良ケースの特性値を推定する。全熱除去熱量については、

平均値土信頼限界	29.591±3.776
A : 屋根散水あり	-2.535
B : 断熱あり	-1.406
C : 窓 热線吸収ガラス	-2.463
D : 床 あり	-0.224

合計 22.963±3.776

(kWh/m<sup>2</sup>・期)

となる。このケースに対するシミュレーション結果は、23.188kWh/m<sup>2</sup>・期であった。又、同ケースの顕熱除去熱量については、推定値13.344±3.773kWh/m<sup>2</sup>・期であるのに対し、シミュレーション結果は13.572kWh/m<sup>2</sup>・期となっており、いずれも十分推定値の信頼限界内に入っていることがわかる。

表1(a) 分散分析表-1 (自然冷房時間 (環境温度基準)、東西軸)

Factor	S	$\phi$	V	$\rho(\%)$
A	16562.00	1	16562.00	39.90
B	19800.50	1	19800.50	47.70
A×B	220.50	1	220.50	0.53
C	4704.50	1	4704.50	11.33
A×C	40.50	1	40.50	0.10
D	162.00	1	162.00	0.39
A×D	18.00	1	18.00	0.05

表1(b) 分散分析表-2 (自然冷房時間 (環境温度基準)、東西軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	16562.00	1	16562.00	16.09*	39.90
B	19800.50	1	19800.50	19.24**	47.70
(=C+D +A×B +A×C +A×D)	5145.50	5	1029.10		

表2(a) 分散分析表-1 (自然冷房時間 (環境温度基準)、南北軸)

Factor	S	$\phi$	V	$\rho(\%)$
A	17020.13	1	17020.13	34.88
B	23871.13	1	23871.13	48.92
A×B	351.13	1	351.13	0.72
C	7503.13	1	7503.13	15.37
A×C	10.13	1	10.13	0.02
D	15.13	1	15.13	0.03
A×D	28.13	1	28.13	0.06

表2(b) 分散分析表-2 (自然冷房時間 (環境温度基準)、南北軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	17020.13	1	17020.13	10.76*	34.88
B	23871.13	1	23871.13	15.09*	48.92
(=C+D +A×B +A×C +A×D)	7907.63	5	1581.53		

表3 分散分析表-2 (自然冷房時間 (室内温度基準)、東西軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	9660.50	1	9660.50	55.33**	47.18
B	9940.50	1	9940.50	56.93**	48.55
(=C+D +A×B +A×C +A×D)	873.00	5	174.60		

表4 分散分析表-2 (自然冷房時間 (室内温度基準)、南北軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	10153.13	1	10153.13	35.86**	44.94
B	11026.13	1	11026.13	38.94**	48.80
(=C+D +A×B +A×C +A×D)	1415.63	5	283.13		

表5(a) 分散分析表-1 (夏季期間平均環境温度、東西軸)

Factor	S	$\phi$	V	$\rho(\%)$
A	0.1420	1	0.1420	28.41
B	0.2858	1	0.2858	57.18
A×B	0.0114	1	0.0114	2.28
C	0.0558	1	0.0558	11.17
A×C	0.0000	1	0.0000	0.00
D	0.0048	1	0.0048	0.96
A×D	0.0000	1	0.0000	0.00

表5(b) 分散分析表-2 (夏季期間平均環境温度、東西軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	0.1420	1	0.1420	9.86*	28.41
B	0.2858	1	0.2858	19.85**	57.18
(=C+D +A×B +A×C +A×D)	0.0720	5	0.0144		

表6 (a) 分散分析表-1 (夏季期間平均環境温度、南北軸)

Factor	S	$\phi$	V	$\rho(\%)$
A	0.1659	1	0.1659	26.38
B	0.3638	1	0.3638	57.84
A×B	0.0099	1	0.0099	1.57
C	0.0890	1	0.0890	14.15
A×C	0.0000	1	0.0000	0.00
D	0.0004	1	0.0004	0.06
A×D	0.0000	1	0.0000	0.00

表6 (b) 分散分析表-2 (夏季期間平均環境温度、南北軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	0.1659	1	0.1659	8.35*	26.38
B	0.3638	1	0.3638	18.32**	57.84
(=C+D +A×B +A×C +A×D)	0.0993	5	0.0199		

表7 分散分析表-2 (夏季期間平均室内温度、東西軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	0.0504	1	0.0504	45.82**	29.49
B	0.1150	1	0.1150	104.55**	67.29
(=C+D +A×B +A×C +A×D)	0.0055	5	0.0011		

表8 分散分析表-2 (夏季期間平均室内温度、南北軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	0.0677	1	0.0677	28.21**	28.16
B	0.1607	1	0.1607	66.96**	66.85
(=C+D +A×B +A×C +A×D)	0.0120	5	0.0024		

表9 (a) 分散分析表-1 (全熱除去熱量、東西軸)

Factor	S	$\phi$	V	$\rho(\%)$
A	51.40	1	51.40	40.30
B	15.83	1	15.83	12.40
A×B	11.35	1	11.35	8.89
C	48.50	1	48.50	38.02
A×C	0.08	1	0.08	0.06
D	0.41	1	0.41	0.32
A×D	0.01	1	0.01	0.01

表9 (b) 分散分析表-2 (全熱除去熱量、東西軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	51.40	1	51.40	17.36*	40.30
B	15.83	1	15.83	5.35	12.40
C	48.50	1	48.50	16.39*	38.02
(=D+A×B +A×C +A×D)	11.85	4	2.96		

表10 (a) 分散分析表-1 (全熱除去熱量、南北軸)

Factor	S	$\phi$	V	$\rho(\%)$
A	53.55	1	53.55	35.46
B	12.01	1	12.01	7.96
A×B	11.79	1	11.79	7.81
C	73.34	1	73.34	48.56
A×C	0.07	1	0.07	0.05
D	0.23	1	0.23	0.15
A×D	0.01	1	0.01	0.01

表10 (b) 分散分析表-2 (全熱除去熱量、南北軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	53.55	1	53.55	17.67*	35.46
B	12.01	1	12.01	3.96	7.96
C	73.34	1	73.34	24.20**	48.56
(=D+A×B +A×C +A×D)	12.10	4	3.03		

表11 分散分析表-2 (顯熱除去熱量、東西軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	51.24	1	51.24	17.37*	40.20
B	16.07	1	16.07	5.45	12.60
C	48.33	1	48.33	16.38*	37.93
E (=D+A×B +A×C +A×D)	11.81	4	2.95		

表12 分散分析表-2 (顯熱除去熱量、南北軸)

Factor	S	$\phi$	V	$F_o$	$\rho(\%)$
A	53.40	1	53.40	17.68*	35.41
B	12.21	1	12.21	4.04	8.09
C	73.15	1	73.15	24.22**	48.49
E (=D+A×B +A×C +A×D)	12.09	4	3.02		

表13 自然冷房効果推定表

Factor	East-West Axis		North-South Axis		Level	
	PCH(Tei Basis) (hr)	Tei (°C)	PCH(Tei Basis) (hr)	Tei (°C)	1	2
	1872.5 ± 65.2	24.91 ± 0.24	1854.1 ± 80.8	25.00 ± 0.28	Mean Value ± R	
A:Roof Spraying	+45.3, -45.3	-0.13, +0.13	+46.1, -46.1	-0.14, +0.14	Sprayed, Not Sprayed	
B:Insulation	+48.8, -48.8	-0.18, +0.18	+54.8, -54.8	-0.21, +0.21	Not Provided, Provided	
C:Window	+24.1, -24.1	-0.08, +0.08	+30.8, -30.8	-0.23, +0.23	H.A.F.G., F.G.	
D:Overhang	+4.8, -4.8	-0.02, +0.02	-1.3, +1.3	-0.06, +0.06	Provided, Not Provided	

表14 省エネルギー効果推定表

(kwh/m<sup>2</sup> Season)

Factor	East-West Axis		North-South Axis		Level	
	HET	HES	HET	HES	1	2
	29.591 ± 3.776	19.977 ± 3.773	31.521 ± 3.820	22.487 ± 3.816	Mean Value ± R	
A:Roof Spraying	-2.535, +2.535	-2.531, +2.531	-2.588, +2.588	-2.584, +2.584	Sprayed, Not Sprayed	
B:Insulation	+1.406, -1.406	+1.418, -1.418	+1.226, -1.226	+1.235, -1.235	Not Provided, Provided	
C:Window	-2.463, +2.463	-2.459, +2.459	-3.028, +3.028	-3.023, +3.023	H.A.F.G., F.G.	
D:Overhang	-0.224, +0.224	-0.226, +0.226	-0.169, +0.169	-0.169, +0.169	Provided, Not Provided	

表15 有意要因一覧

Passive Cooling								Active Cooling Energy Saving			
Passive Cooling Hours				Summer Mean Temperature				Rate of Heat Extraction			
Tei Basis		tr Basis		Tei		tr		HET		HES	
E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S
B**	A*	A**	B**	B**	A*	A**	B**	A*	C**	A*	C**
A*	B*	B**	B**	A*	A*	B**	B**	A*	C*	C*	A*

\*\*:Significant Level of 1% \*:Significant Level of 5%

## 3. 考察

- (1) 自然冷房効果の検討、除去熱量低減による省エネルギー効果の検討において得られた有意要因をまとめると表15となる。表15より、屋根散水は各検討目的における各特性値に対して全て有意となることがわかる。この結果、屋根散水は、夏季において、冷房を行なわない場合の室内温熱環境又は自然冷房時間の観点からのみでなく、冷房を行なう場合の除去熱量低減の観点からも、パッシブクーリングの手法として効果的であることが示される。
- (2) 自然冷房効果における各特性値に対する分散分析結果を考察する。

## 1) 自然冷房時間

環境温度を基準にした場合、室内温度を基準にした場合ともに屋根散水と断熱の主効果が有意となる。特に、室内温度基準の場合は、方位にかかわらず、両因子とも1%有意となる。又、環境温度

基準の場合、東西軸(南向き)については、断熱が1%有意となっている。

- 2) 夏季期間の平均環境温度、平均室内温度環境温度、室内温度とともに、屋根散水と断熱の主効果が有意となり、方位による有意因子の相違はみられない。室内温度については、方位に関係なく両因子とも1%有意であり、又、環境温度については、方位に関係なく断熱が1%有意となっている。

## 3) 自然冷房効果に対する総合的考察

自然冷房効果には屋根散水と断熱の主効果が有意となる。ここで、断熱因子が有意と検出されているのは、自然冷房については夜間も含めて、夏季期間の全時刻を考慮しており、壁体の断熱性能を低下させることによる夜間の壁体内表面温度低下効果の影響が表われているためと考えられる。特に、室内のふく射環境を考慮した環境温度の夏季期間平均値及び室内温度の夏季期間平均値におい

- て断熱因子の寄与率が比較的大きくなっている。
- (3) 除去熱量低減による省エネルギー効果については、全熱、顯熱除去熱量ともに屋根散水と窓の主効果が有意となる。特に、南北軸（西向き）に対しては窓の主効果が1%有意であり、方位によって有意要因の寄与率の大小に相違がみられる。これは、夏季において、南北軸の場合、東西軸（南向き）の場合に比べて、全般的に窓に対する太陽入射角が小さくなり、この結果、窓からの日射熱取得の影響が東西軸より大きくなることによって除去熱量に及ぼす窓の影響が大きくなるためと考えられる。
- (4) (2)、(3)に述べた結果を考察すると、自然冷房効果検討の場合と除去熱量低減による省エネルギー効果の検討の場合とでは各特性値に対して有意となる要因に相違がみられる。これは、除去熱量に関しては、通常の空気式冷房装置を想定し、室内温度に基づいて計算を行なっているのに対し、自然冷房効果の検討においては、環境温度など、室内的ふく射環境をも考慮している点、又、除去熱量は通常の間欠冷房運転時を想定しているので昼間の外乱の影響を強く受けがるが、これに対し、自然冷房効果の検討では昼間のみでなく夜間をも含めて考慮している点など、に起因しているものと考えられる。
- (5) 要因効果の推定結果によれば、自然冷房効果の立場からは断熱がない場合の方が自然冷房時間は増加し、又、夏季期間の平均環境温度、平均室内温度も低下するので望ましいが、省エネルギー効果の立場からは断熱がある場合の方が除去熱量が低下し望ましいとの結果を得る。このように、有意要因において、自然冷房の立場と冷房を前提とした省エネルギーの立場とでは、最適特性値を実現する上で、異なった水準を採用すべき因子がある。
- (6) 各特性値に対する庇の主効果の寄与率は、本例では全般的に小さいが、特に、東西軸に比べて南北軸では、庇の日射しゃへい効果は小さくなっている。自然冷房時間の効果推定において、南北軸では庇の昼間の日射しゃへいによるプラス効果と、夜間の窓面での夜間ふく射量の低下（窓の天空に対する形態係数の低下）によるマイナス効果が相殺し、庇の主効果の寄与率は特に小さくなっている。このため、庇がある時の効果推定値が負の値となり、庇がない時の効果推定値が正の値となることがあるが、この場合その各々の絶対値は極めて小さく、0（庇の効果が検出されない）と解釈しうるものである。
- (7) 夏季期間における検討のみでなく、冬季の暖房期も含めて年間の最適化を図る必要があるが、この

ためには、断熱、窓などの因子について夏季とは異なる水準を選定する場合が生じる。この場合、夏季における各特性値に対しては幾分、効果低下を招くことになるが、その効果低下量は効果推定表により容易に把握することが出来る。例えば、夏季において、自然冷房の場合、断熱をありとすると、断熱がない場合に比べて東西軸においては、環境温度26°C基準の自然冷房時間は約98時間低下し、又、夏季期間の平均環境温度は約0.4°C増大すると推定される。

(8) 夏季冷房期においても、自然冷房とするか、冷房を行なうことを前提とするかを検討し、これに基づき建物の熱的条件（壁体の断熱、窓の種類など）を考慮することが必要となる。

(9) 自然冷房時における自然通風の効果を把握するため、窓の開閉状態を変えた場合の自然冷房時間、夏季期間の平均環境温度などの自然冷房効果に対する特性値の変化量を調べた。

検討の一例として、数値実験によって得られた東西軸の最良ケースとしての実験No.1（7時～21時まで窓半開）に対して、全時刻窓を閉めた場合を想定（実験No.1'とする）してシミュレーションを行ない、実験No.1の結果と比較した。結果を表16に示す。実験No.1'では、環境温度基準の自然冷房時間についても、夏季期間の平均環境温度についても自然通風の効果が検出されていない。実験No.1'は、窓が熱線吸収ガラスであるが、その原因には窓の種類による影響が大きいものと考え、次に実験No.2（実験No.1に近いケースで窓が普通板ガラスの場合、但し庇なし）について、窓を常時閉とした場合（実験No.2'）のシミュレーションを行なった。結果を表16に示すが、実験No.2と実験No.2'を比較すると、いずれも自然通風の効果が検出されている。実験No.1、実験No.2は庇の水準が異なるが、庇の主効果の寄与率は小さいことから、その影響を無視すると、本例では、熱線吸収ガラスを用いた場合は自然通風による自然冷房効果は明確ではないが、普通板ガラス

表16 自然通風効果の検討結果

Experiment	Passive Cooling Hours(hr)		Summer Mean Temperature(°C)	
	Tei Basis	tr Basis	Tei	tr
No.1	2001.	1961.	24.44	24.56
No.1'	2027.	1943.	24.36	24.70
No.2	1945.	1948.	24.66	24.60
No.2'	1872.	1821.	24.92	25.12

Experiment No.1' (Experiment No.1+ Window Always Closed)  
Experiment No.2' (Experiment No.2+ Window Always Closed)

の場合は自然通風による自然冷房効果が顕著であることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究では、戸建住宅をモデルに自然エネルギー、自然環境利用の冷房手法として屋根散水を取り上げ、夜間ふく射と自然通風による風力の利用をも考慮して、実験計画法を用いて屋根散水の蒸発冷却効果としての自然冷房効果、除去熱量低減による省エネルギー効果の検討を行なった。

本報で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 前報<sup>(1)</sup>で実験計画法を用いた数値実験計画を行い、これに基づき、自然冷房効果、省エネルギー効果を代表する特性値として選定した自然冷房時間、除去熱量などに関する数値シミュレーションを行なった。本報では、この数値シミュレーション結果を分散分析し、F検定を行なうことによって、各因子の主効果と因子間の交互作用を調べ、各特性値に対して有意となる要因を検出した。
- (2) (1)の結果から、屋根散水の主効果は、自然冷房効果に対しても、冷房時の除去熱量低減による省エネルギー効果に対しても、各方位について全て有意となり、屋根散水は夏季における自然エネルギー、自然環境利用の冷房手法として効果的であることを示した。
- (3) 自然冷房効果及び除去熱量低減による省エネルギー効果に関する各特性値に対して、方位別に有意となる要因を調べ、これについて検討し考察を加えた。この結果、自然冷房効果検討の立場では屋根散水と断熱の主効果が有意となり、省エネルギー効果検討の立場からは屋根散水と窓の主効果が有意となつた。このように、熱的効果の分析において、その検討目的によって特性値に対して有意となる因子、あるいは因子の水準に相違がみられ、設計に当たっては、この点に注意を要する。
- (4) 各因子の主効果から、各特性値に対する要因効果を推定し、効果推定表を与え、任意のケースの各特性値を求める簡易計算式を示した。これを用いて、夏季冷房期における自然冷房時間、除去熱量などの特性値に関する最良ケースを推定した。又、夏季冷房期の最適化のみでなく、冬季暖房期の自然暖房、暖房負荷低減の立場から、断熱因子などの水準を夏季とは変えた場合における夏季の各特性値の効果低下量をも示した。
- (5) 自然通風の自然冷房効果について検討し、その

結果について考察を加えた。

本研究では、対象地域を東京とした場合の検討結果を示したが、今後、対象地域を増やしつつ、建物規模、構造様式などを制御因子として扱った同様の検討を行なうことによって、特性値の推定を更に一般化することができよう。

#### 謝辞

本研究において、早稲田大学木村建一教授に御指導を賜った。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) 石川幸雄：実験計画法に基づく屋根散水の蒸発冷却効果に関する研究、第1報 数値実験計画の概要とシミュレーション結果、日本太陽エネルギー学会、太陽エネルギー、研究論文、Vol.19、No.3、(1993)、pp.29~35
- (2) 石川幸雄：屋根散水の自然冷房効果に関する因子分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、(1985)、pp.939~940
- (3) 石川幸雄：屋根散水の省エネルギー効果に関する因子分析、空気調和・衛生工学会学術論文集、(1985)、pp.241~244
- (4) 田口玄一：実験計画法、上、下、丸善、(1974)
- (5) 石川幸雄：散水屋根面のある多數室室温計算の簡易化と散水の熱的効果に関する研究、第1報 計算法の概要、空気調和・衛生工学会論文集、No.30、(1986)、pp.21~30
- (6) 石川幸雄：散水屋根面のある多數室室温計算の簡易化と散水の熱的効果に関する研究、第2報 热的効果と簡易計算法の評価、空気調和・衛生工学会論文集、No.30、(1986)、pp.31~40
- (7) 石川幸雄、木村建一：屋根散水と自然換気による自然冷房複合効果の検討、空気調和・衛生工学会論文集、No.26、(1984)、pp.51~64
- (8) 石川幸雄、木村建一：湿相当外気温度に基づく屋根散水の熱的効果に関する研究、日本建築学会論文報告集、第334号、(1983)、pp.89~100
- (9) IHVE Guide, Book A and B, (1970), pp. A1-5, B1-2
- (10) 石川 馨、藤森利美、久米 均：化学者および化学技術者のための実験計画法、上、下、東京化学同人、上(1977)、下(1978)
- (11) 横山浩一、牧 英二、石野久彌：建築における省エネルギー手法の効果分析、(I)、(II)、(III)、日本建築学会大会学術講演梗概集、(1976)、pp.359~364