

## 南極大陸氷床における建築物と風の関係

—斜面下降風が建築物の外壁熱伝達率と隙間風に及ぼす影響—

野崎 勝利\*

The Relation Between Building and Wind on the Continental Ice Sheet

—The Influence of Wind Descending along the Slope on the Heat Transfer Coefficient and the Draft—

Katsutoshi NOZAKI\*

**Abstract:** Asuka Station (71°31'S, 24°08'E) on the Antarctic continental ice sheet is one of the stations for the Japanese Antarctic Research Expedition. The Station is located in an area where the wind is always descending along the slope. At Asuka Station, heat transfer coefficient on the windward panel has a tendency to increase as the wind speed increases. But the resistance of this heat transfer is negligibly small as compared with that of the heat conduction through a wall panel (140 mm thick polystyrene). On the other hand, the volume of draft at all huts (total area 300 m<sup>2</sup>) is found to increase approximately in proportion to a square of the wind speed.

**要旨:** 日本南極地域観測隊あすか観測拠点 (71°31'S, 24°08'E) の主要建物は、大陸氷床の斜面下降風帯に、木質系パネル組立て構法で建設されている。年平均風速 12.8 m/s の強風にさらされたこれらの建物は、周囲に発達したスノードリフトのために雪面下に埋没しつつある。

これらの観測用建物の居住環境に関する性能評価を目的として、発電棟風上側外壁の熱通過量の観測を行い、強風との関係を検討した。その結果、外側の熱伝達率は風速の増加に従って増す傾向にあることが確認できた。しかしその熱伝達抵抗はパネル個体の熱伝導抵抗の約 1/100 であり、このような強風下であっても外壁全体の熱通過率に対しては無視できる大きさであることがわかった。

さらに本論では建物全体の暖房効率に大きく影響する換気および隙間による通気量を、暖房エネルギーの消費量から概算によって推定し、これが風速の 2 乗に比例することを確かめた。

### 1. はじめに

日本南極地域観測隊は、南極大陸沿岸部と大陸氷床上に 3 つの越冬観測基地を有している。沿岸部の基地は昭和 32 年 IGY (International Geophysical Year, 国際地球観測年) から越冬観測を始めた昭和基地 (69°00'S, 39°36'E, 標高 29 m) で、日本南極地域観測の主観測基地として位置づけられている。昭和基地は開設後 30 年を経た今日では、近代化、都市化が進み、世界でも有数の南極越冬観測基地として知られ、快適な文化生活、観測活動が営まれる施設・設備が充実してきている。

大陸氷床上の基地は、みずほ基地 (70°41'S, 44°19'E, 標高 2230 m) とあすか観測拠点 (71°31'S, 24°08'E, 標高 930 m) である。IMS (International Magnetospheric Study, 国際

\* 埼玉大学施設課: Saitama University, 255, Shimo-okubo, Urawa 338.

磁気圏観測(1976-1978)以来,約10年間恒常的に有人越冬観測活動を続けてきたみずほ基地は,1986年10月以後無人基地となった.一方,あすか観測拠点では,1987年2月より越冬観測活動が開始された.あすか観測拠点の建築物は,みずほ基地のそれと異なり,昭和基地と同様に木製パネル工法により計画され,3年をかけて越冬体制が整えられた.筆者は設営隊員(機械担当)として,あすか観測拠点に初めて越冬した第28次観測隊に参加する機会を得た.あすか観測拠点位置とその主建物平面図を図1及び図2に示す.あすか観測拠点は,南極大陸特有の斜面下降風帯にあり,年間を通して無風日はまれで,おおむね東南東の風が常時吹いている.昭和,みずほ,あすか各基地の月ごとの気温,風速の比較を図3,図4に示す.図5の南極各国基地の気温と風速による気候区分に示されるように,あすか観測拠点は低温環境下における建築物の熱損失に自然状態の風が及ぼす影響を観測するには理想的な気象条件となっている.

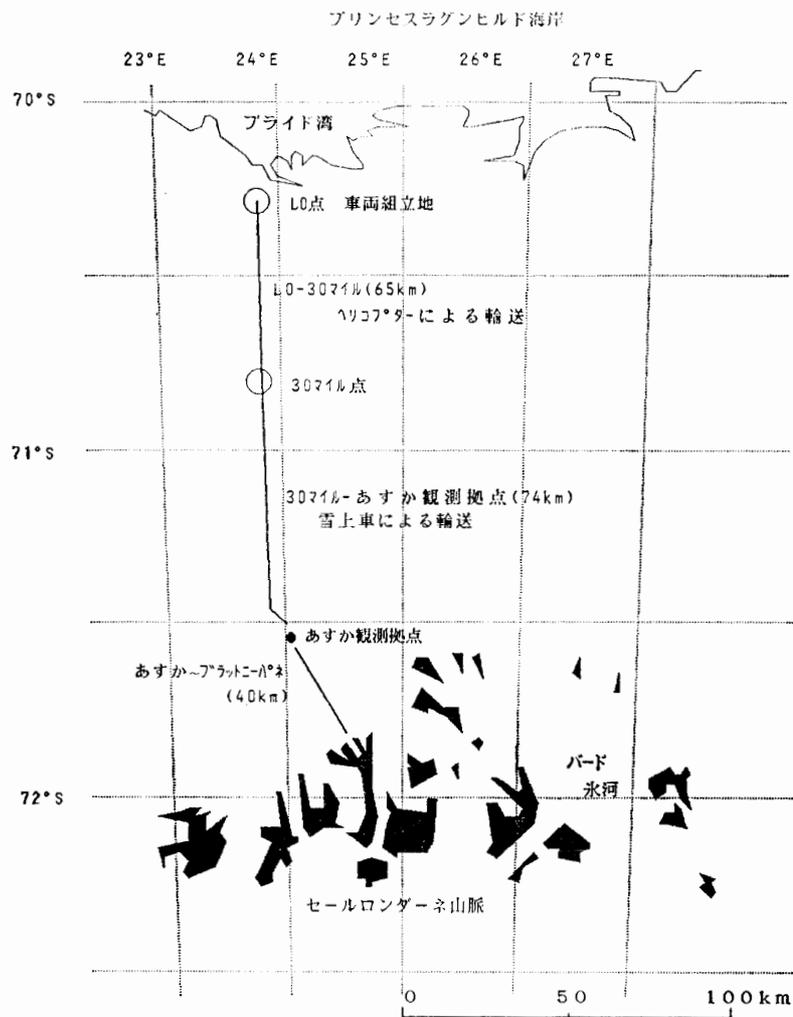


図1 あすか観測拠点周辺(国立極地研究所,1986)

Fig. 1. Surroundings of Asuka Station.

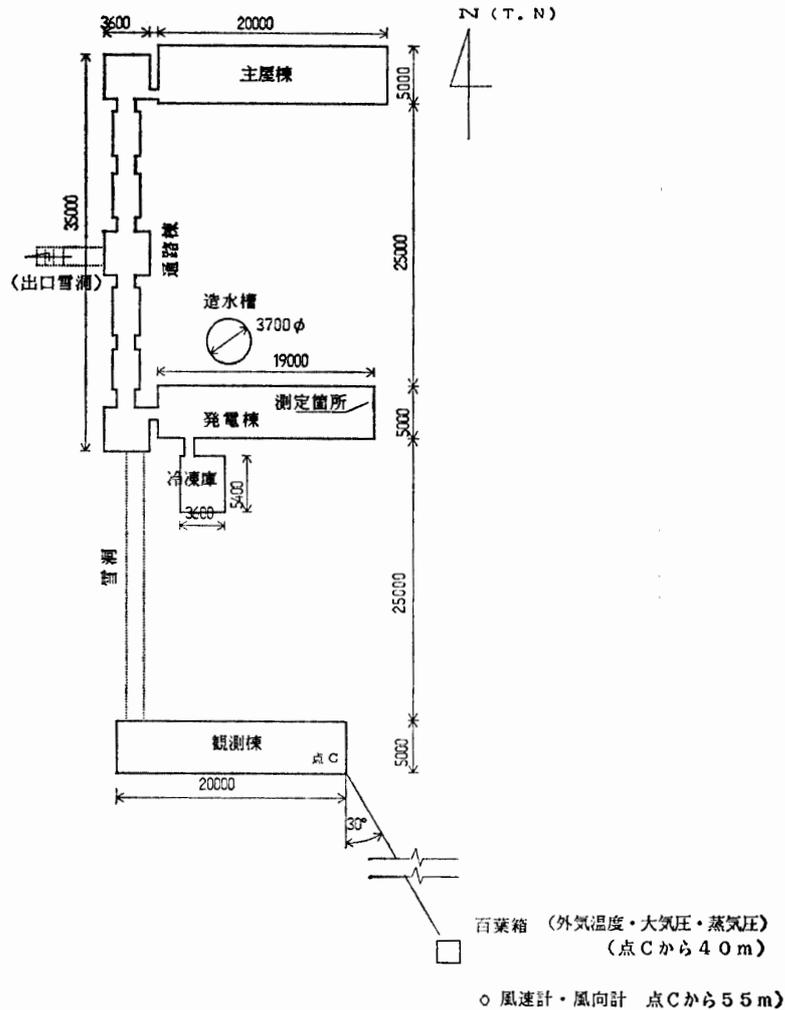


図 2 あすか観測拠点居住域平面図  
 あすか観測拠点の主要建物は、主屋棟 (100 m<sup>2</sup>)・発電棟 (95 m<sup>2</sup>)・観測棟 (100 m<sup>2</sup>)・通路棟 (85 m<sup>2</sup>)・冷凍庫 (19 m<sup>2</sup>) 等があり、観測拠点南東部に百葉箱・気象タワーがある。観測棟へは、雪洞によってブリザードの時でも往来ができる。

Fig. 2. Plan of the living quarters at Asuka Station.  
 Asuka Station is composed of main hut (100 m<sup>2</sup> area), generator hut (95 m<sup>2</sup> area), observatory (100 m<sup>2</sup> area), passage (85 m<sup>2</sup> area) and cold storage (19 m<sup>2</sup> area). The instrument screen and weather observation tower are located in the southeast of the Station.

著者は自然風にさらされた建築物の外表面熱伝達率の変動の知見を得るために、斜面下降風と氷床上建築物を用いてその簡易的、局所的な測定を試みた。

ここでは、さらにその測定結果に基づいて風速と建築物通気量との関係について考察した結果を報告する。

## 2. あすか観測拠点の周辺状況及び気象環境

あすか観測拠点は、昭和基地から西南西約 670 km、ブライド湾に張りだした棚氷上から

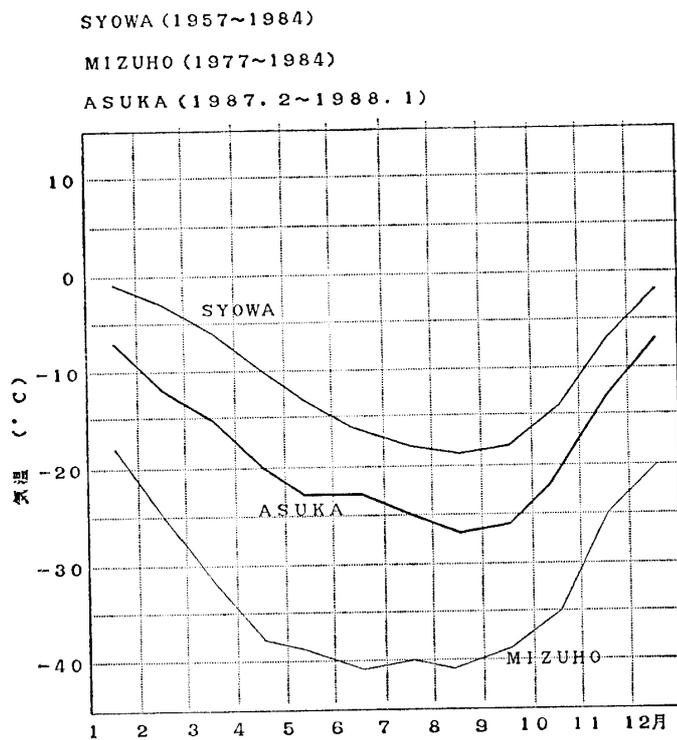


図3 昭和基地・みずほ基地・あすか観測拠点の気温の変化  
(国立極地研究所, 1988)

Fig. 3. Monthly mean air temperature at Syowa, Mizuho, and Asuka Stations.

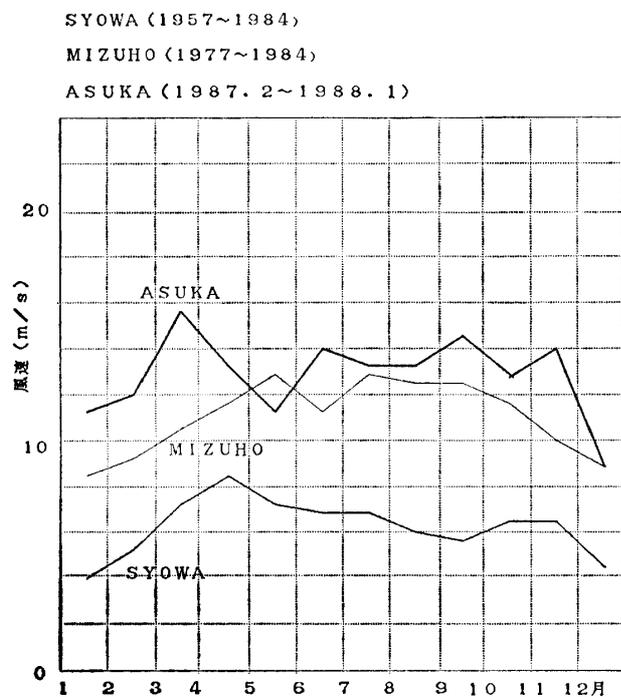


図4 昭和基地・みずほ基地・あすか観測拠点の風速の変化  
(国立極地研究所, 1988)

Fig. 4. Monthly mean wind speed at Syowa, Mizuho and Asuka Stations.

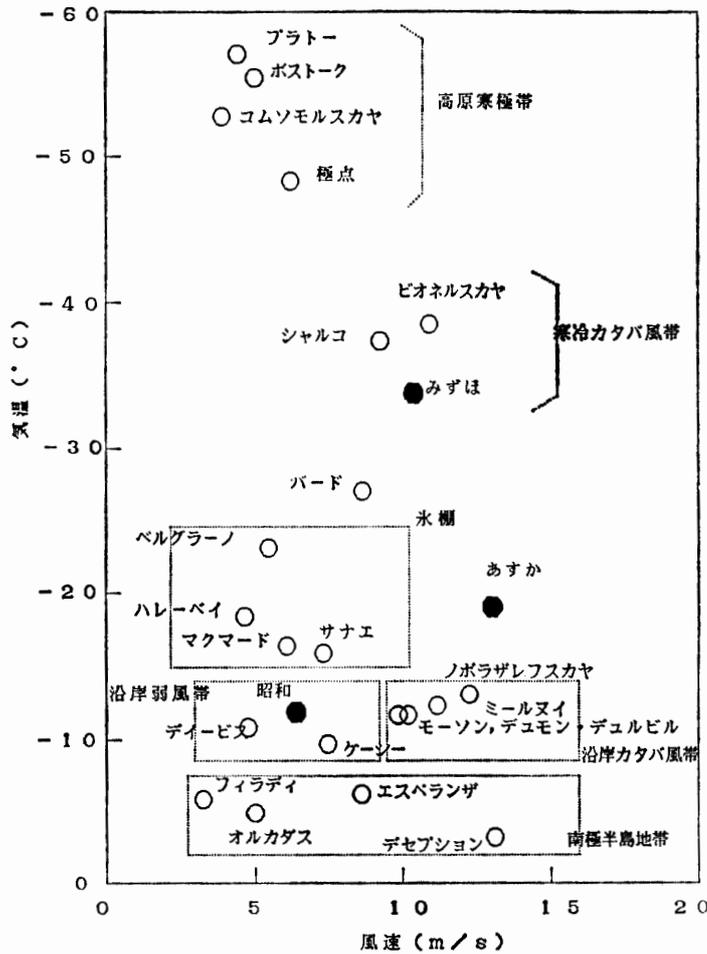


図 5 南極各国基地の気温と風速による気候区分 (国立極地研究所, 1988)

Fig. 5. Climatic division of Antarctic stations by air temperature and wind speed.

120 km の氷床上的の 71°31'34"S, 24°08'17"E, 標高 930 m にあり, その南のセールロンダーネ山地まで約 40 km の位置にある (図 1).

基地の主要建物は, 主屋棟 (100 m<sup>2</sup>・26 次観測隊建設), 飯場棟 (15 m<sup>2</sup>・26 次観測隊建設), 発電棟 (95 m<sup>2</sup>・27 次観測隊建設), 観測棟 (100 m<sup>2</sup>・28 次観測隊建設), 通路棟 (85 m<sup>2</sup>・28 次観測隊建設), 冷凍庫 (19 m<sup>2</sup>・28 次観測隊建設) であり (図 2), これらの建物も 1987 年 12 月の越冬交代時には, 各棟, すでに半分以上が雪面下にあり (冷凍庫・通路棟は, すべて雪面下), いずれすべて雪面下になると思われる. 筆者の越冬期間中, 1987 年 12 月 20 日時点の発電棟 (築後 2 年経過) の埋雪状況を図 6 に示す.

気象状況を表 1 に示す. 気温は年間を通じてプラスになることはなく, 最低気温は -48.7°C (8 月 9 日) を記録した. また平均風速は 12.8 m/s で恒常的に吹いており, 最大瞬間風速は 45.2 m/s (6 月 1 日) を記録した. 合計 133 日のブリザード日数が示すように, 天候は厳しい.

外壁熱伝達率の測定は越冬期の 1987 年 4 月 3 日から 8 月 29 日にかけて実施した. 測定時の

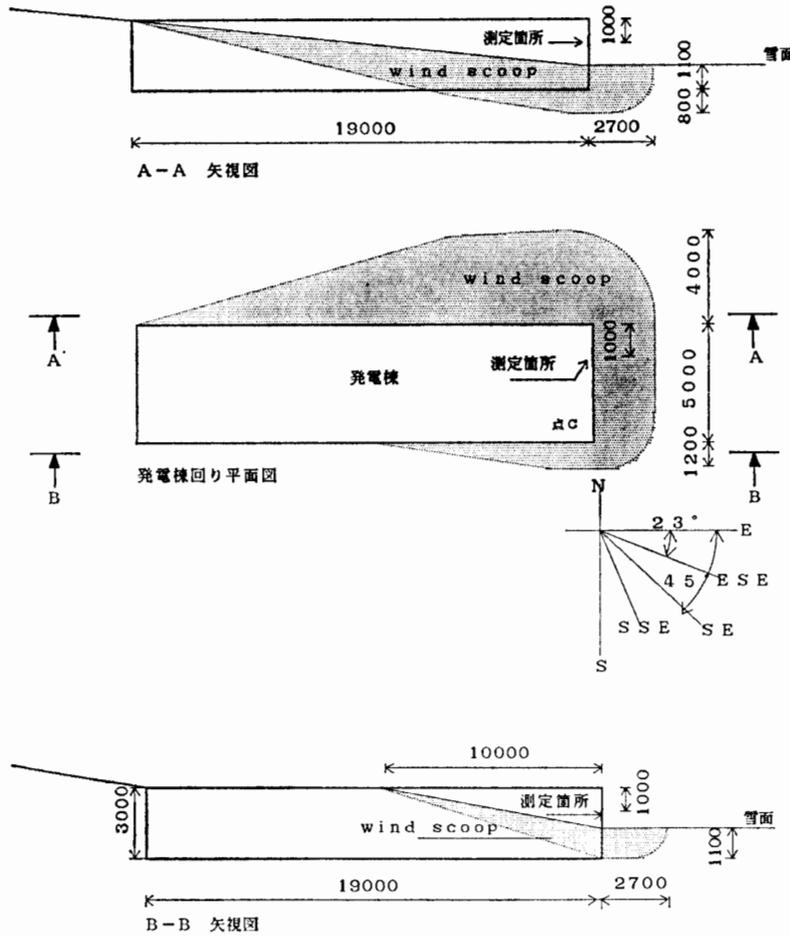


図 6 あすか観測拠点発電棟回りドリフト詳細図 (1987年12月20日状況). 外壁熱伝達率測定建物の発電棟には, 風上側に主風向に沿って深いウィンド・スクープができ, 風下側はドリフトによって屋根まで雪に埋まっている. (観測棟・主屋棟も建設年度が異なるため程度の差はあるが状況は同じ)

Fig. 6. Drift of snow around the generator hut at Asuka Station (December 20, 1987). Around the generator hut where the heat transfer coefficient was measured, deep wind scoop is produced on the windward side, while the drifting snow buries the roof on the leeward.

表 1 あすか観測拠点の気象  
Table 1. Weather conditions at Asuka Station.

項目	1983年												1988年	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	平均	
平均気圧 (mb)	874.8	871.0	870.4	874.0	872.4	874.0	859.9	868.5	863.0	865.8	863.8	879.3	869.7	
平均気温 (°C)	-12.1	-14.9	-19.8	-23.0	-23.3	-25.6	-27.3	-26.3	-21.6	-13.1	-7.2	-7.3	-18.5	
最高気温 (°C)	-6.4	-9.9	-8.8	-10.1	-7.8	-16.8	-17.2	-18.1	-11.6	-7.7	-3.5	-2.9	-10.1	
最低気温 (°C)	-23.1	-24.8	-33.6	-36.0	-44.6	-39.4	-48.7	-40.1	-37.0	-30.7	-14.4	-15.6	-32.3	
平均風速 (m/s)	11.9	15.6	13.0	11.3	14.0	13.3	13.4	14.1	12.8	14.0	8.4	11.4	12.8	
最大風速 (m/s)	22.1	26.6	24.7	23.5	34.3	25.0	24.7	27.4	29.3	23.5	18.2	22.6		
最大瞬間風速	26.6	35.4	32.0	29.8	45.2	30.1	30.4	33.1	36.7	28.6	22.7	26.9		
ブリザード日数	16	17	17	9	14	5	8	11	12	19	0	5	計133	
積雪量 (cm)	-5.4	-6.4	5.1	4.6	18.7	-1.8	-6.3	-0.5	-1.3	2.4	-5.1	4.8	計8.8	

表 2 あすか観測拠点での建築物外表面熱伝達率測定時の風速と風向の分布

Table 2. Distribution of wind speed and wind direction in the measurement of heat transfer coefficient at Asuka Station.

風速 (m/s)	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE
0			4			1										
1				2												1
2			5	1		1										
3	1		7	3	4	2	2									
4			7	5	5	1	1	1		1						
5		2	9	12	2		1									
6	1	2	22	13	4	1										
7		5	41	13	2											
8	1	8	48	5	1											
9	4	12	26	1												
10	5	8	31	2												
11	4	11	21													1
12	5	13	8													
13	2	24	7													
14	1	32	11													
15	5	39	12													
16	2	37	7												1	
17	4	45	4													
18		38														
19	1	32	2													
20		23	2													1
21		18	2													
22		12														1
23		7	1													1
24		4														
25		8														
26		1														
27		2														
28		3														1
29		4														1
30		2														
31																
32																
33																
34		2														
35																

風向頻度分布を表 2 に示す。主たる風向は東南東・南東であり、風向分布の 82.3% を占める。この風向の風速と外気温度の間には、比例関係の傾向が認められる(付録 1 参照)。

### 3. 外壁熱伝達率

#### 3.1. 理 論

熱移動は、伝導・対流・ふく射によって大別される機械<sup>構</sup>により移動する熱流の総量であり、その状況に応じて、様々に組み合わされて生じる。本報告では、以下の仮定が成立するもの

として解析する。

(1) 外壁熱伝達率は、表面と周囲環境流体の温度差による両者の間の対流による熱移動であり、空気の流動によって影響を受ける。

(2) 固体熱伝導は、両表面間で、表面に対して垂直方向のみの熱移動を考える。

(3) 壁体構成部材間の接触熱抵抗は無視する。

(4) 屋外周囲からのふく射の影響は、移動全熱量に比較して微小なため無視できるものとする(付録2参照)。

(5) 1987年5月21日から7月23日までは、暗夜期(太陽が出ない期間)であり、また観測期間中、太陽高度は非常に低いため、日射量は無視する。

(6) 終日、室内の暖房をしたため、蓄熱による影響は無視する。

(7) 観測場所の室内温度は、サーモスタット運転により暖房したため、急激な温度変化はないものとする。

(8) 壁体構成要素での熱伝導率  $\lambda_i$  (kcal/mh $^{\circ}$ C) は一定とする。

以上から、温度の時間的変化のない定常熱伝導と考えて、図7のような平板内温度分布を設定すると平板内で各材質ごとの単位面積を単位時間に伝わる熱量  $q_s$  (kcal/m $^2$ h) はそれぞれ等しいので

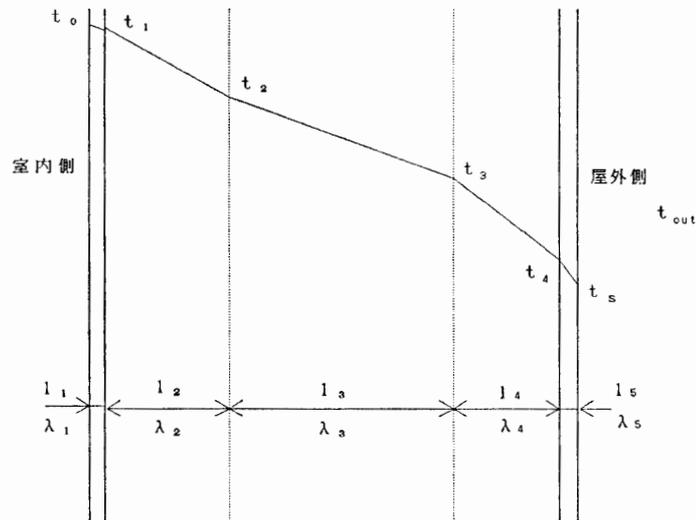


図7 建築物外表面熱伝達率を求める假定モデル

Fig. 7. Assumed model for calculating the heat transfer coefficient.

$q_s$ : 単位時間単位面積当たり壁体内を通過する熱量 (kcal/m $^2$ h)

$q_0$ : 単位時間単位面積当たり外壁面の熱伝達量 (kcal/m $^2$ h)

$\lambda_{1-5}$ : 壁体を構成する各層の熱伝導率 (kcal/mh $^{\circ}$ C)

$l_{1-5}$ : 壁体を構成する各層の厚さ (m)

$t_{1-4}$ : 壁体内温度 ( $^{\circ}$ C)

$t_s$ : 外壁面温度 ( $^{\circ}$ C)

$t_{out}$ : 周囲温度 ( $^{\circ}$ C)

$\alpha$ : 外壁面熱伝達率 (kcal/m $^2$ h $^{\circ}$ C)

$$q_s = \frac{\lambda_3}{l_3} (t_2 - t_3) = \frac{\lambda_4}{l_4} (t_3 - t_4) = \frac{\lambda_5}{l_5} (t_4 - t_s), \quad (1)$$

が成り立つ。また、外壁面から周囲環境に単位時間、単位面積あたりに移動する熱量  $q_0$  (kcal/m<sup>2</sup>h) は、

$$q_0 = \alpha (t_s - t_{out}), \quad (2)$$

となる。ここで、壁面上の単位面積を単位時間に通過する熱量は等しくなければならない ( $q_s = q_0$ )。結局  $t_2, t_3, t_{out}, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, l_3, l_4, l_5$  が既知であると、単位時間単位面積当たりの移動熱量は

$$q_s = \frac{\lambda_3}{l_3} (t_2 - t_3), \quad (3)$$

より求められ、また、外壁熱伝達率  $\alpha$  は

$$q_s = \frac{t_3 - t_{out}}{\frac{l_4}{\lambda_4} + \frac{l_5}{\lambda_5} + \frac{l}{\alpha}}, \quad (4)$$

から求めることができる。

### 3.2. 観測方法

#### (1) 壁体内温度

図8に示すように発電棟風上側の壁パネルに長さ 200 mm、径  $3\phi$  の棒状サーミスターを 100 mm 間隔で2本設置 (図7における  $t_2, t_3$  測定点) し、ポリスチレンフォームで埋め戻し、記録は発電棟内部に設置した KANOMAX Thermometer Model 9312 で行った。

#### (2) 外気温度・風速

外気温度・風速としては、1時間ごとに自動測定される気象観測データ (国際気象地点番号 89524) を使用したが、外気温度変化に対する壁体内温度分布の応答を推定するためにモデル計算を行った結果、外気温度変化が外壁面から 30 mm の点、室内側壁面から 20 mm の点それぞれに影響が表れ始めるのは、0.15-0.2時間後となった (付録3参照)。このため外気温度・風速として、壁体内温度測定時の10分前からの平均気温・平均風速を用いた。外気温度は、図2における観測棟南東 40 m にある百葉箱内温度、風向・風速は同じく 55 m にある高さ 10 m の気象タワーの数値である。

#### (3) 物性値

熱伝導率は以下の値で一定とした。

ポリスチレンフォーム 0.027 (kcal/mh°C),

ベニヤ板 0.13 (kcal/mh°C).

#### (4) 外壁熱伝達率 $\alpha$

$\alpha$  は、図7をもとに式 (3), (4) から、 $q_s$  を消去した以下の式より求めた。

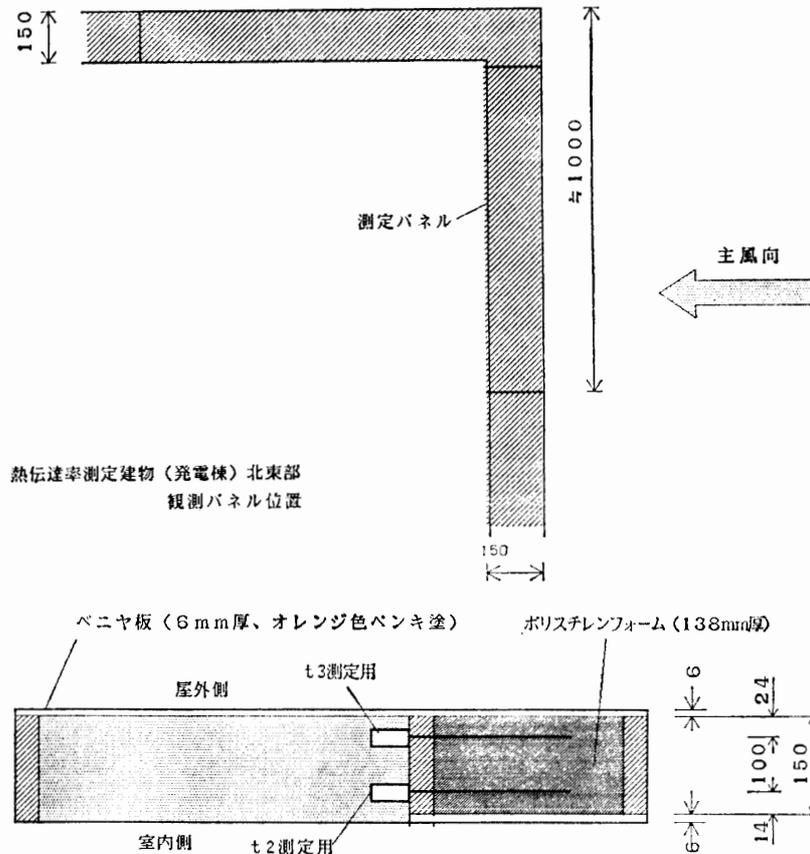


図 8a  
断面図

図 8 あすか観測拠点発電棟外壁熱伝達率測定パネル詳細図  
 発電棟の壁パネルは、138 mm のポリスチレンフォームをひのきで結合し、6 mm 厚のベニヤ板で挟んだものである。発電棟北東部の外壁熱伝達率測定箇所には、長さ 200 mm、径 3φ のサーミスターを 100 mm 間隔（外壁から 30 mm、内壁から 20 mm の位置—図 7 での  $t_3$ 、 $t_2$  測定点）に埋め込み、後に開口部をポリスチレンフォームがふさぐ。

Fig. 8. Details of the measurement panel the heat transfer coefficient of the generator hut. 138 mm thick polystyrene panel, combined with cypress, is sandwiched between 6 mm thick veneer sheets. Two thermistors (200 mm in length, 3 mm in diameter), 100 mm apart, are set at measuring points  $t_2$ ,  $t_3$  (in Fig. 7).

$$\alpha = \frac{1}{\frac{l_3}{\lambda_3} \left( \frac{t_3 - t_{out}}{t_2 - t_3} \right) - \left( \frac{l_4}{\lambda_4} + \frac{l_5}{\lambda_5} \right)} = \frac{1}{\frac{0.1}{0.027} \left( \frac{t_3 - t_{out}}{t_2 - t_3} \right) - \frac{0.024}{0.027} - \frac{0.006}{0.13}}$$

$t_{out}$ : 外気温度 (°C),

$t_2$ : 室内側壁体内温度 (°C),

$t_3$ : 屋外側壁体内温度 (°C),

$l_3=100$ ,  $l_4=24$ ,  $l_5=6$  (mm),

$\lambda_3=\lambda_4=0.027$ ,  $\lambda_5=0.13$  (kcal/mh°C).

(5) 測定時刻・期間

測定時間の間隔は最小 1 時間で、1987 年 4 月 3 日-8 月 29 日の約 5 カ月、測定可能な時、無作為に測定した。

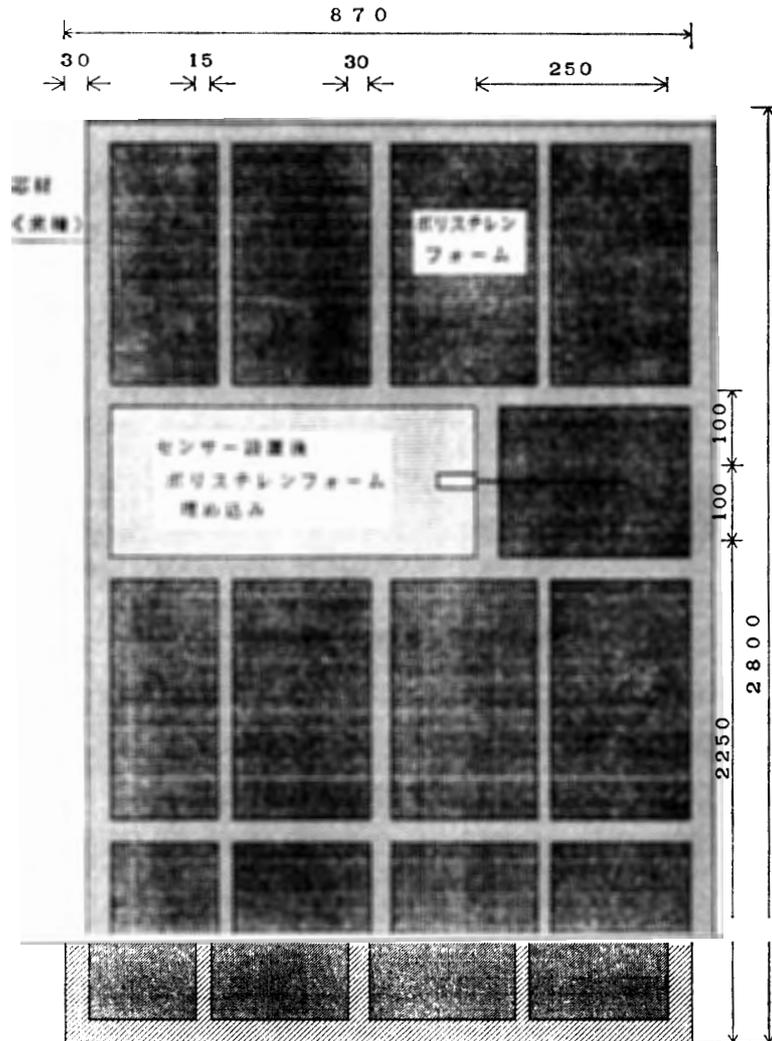


図 8b  
立面図

(6) データ処理

外気温度が、各データで異なるため、以下のように風速、外壁熱伝達率を無次元化し、それぞれ  $Re$  数,  $Nu$  数を用いた。

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu}, \quad Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$$

$Nu$ : スセルト数,

$u$ : 風速 (m/s),

$d$ : 代表寸法 (m) (建物の主風向に対する幅=5 m),

$Re$ : レイノルズ数,

$\alpha$ : 外壁熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>h°C),

$\nu$ : 空気の動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s),

$$= (0.12 + (20 + t_{out}) \times 9 \times 10^{-4}) \times 10^{-4} \quad (t_{out} > -20^\circ\text{C})$$

$$= (0.095 + (50 + t_{out}) \times 8.3 \times 10^{-4}) \times 10^{-4} \quad (t_{out} \leq -20^\circ\text{C})$$

$\lambda$ : 空気の熱伝導率 (kcal/mh°C) =  $0.0207 + t_{out} \times 7 \times 10^{-5}$ .

## (7) データの限定

3.1 節の仮定にあるような定常熱伝導に近い状況のデータに絞って考察する。つまり、138 mm 厚のポリスチレンフォームは均一材料なので、定常状態であれば図 7 の温度分布は直線になるはずである。そこでポリスチレンフォーム部の屋外側表面の温度を  $t_4$  ( $t_{out}$  と  $t_3$  の間で定常状態としての数値計算から求めた),  $l_3=100$  mm,  $l_4=24$  mm として,

$$(24/100) \times 0.9 < (t_3 - t_4) / (t_2 - t_3) < (24/100) \times 1.1,$$

を満たすデータに限定する。これによって風向 ESE, SE のそれぞれのデータは約 3 割に絞られる。

## 3.3. 測定結果

$Re$  数と  $Nu$  数の関係を表 3 に、各風向での分布を図 9 に示す。風速 ( $Re$ ) と外壁熱伝達率 ( $Nu$ ) の関係は SSE を除いてほぼ比例関係にあり、特に風向 45° (SE) の時には分散の小さい以下のような比例関係にある。

$$Nu = -12 + 4.92 \times 10^{-4} Re. \quad (5)$$

しかし、風向 23° (ESE) の時には長続きはしないが、時々生じる  $Nu$  の高い領域と以下のように大多数のデータが占める  $Nu$  の低い領域で各々比例関係が生じている。

$$Nu = 639 + 1.95 \times 10^{-4} Re \text{ (ESE (2))}. \quad (6)$$

これは図 6 に示すように、外壁熱伝達率測定場所が東側壁面の中心からずれているため、正圧パターンが時々大きく偏る (風向 0° における多点同時測定システムを用いた建物模型表面の非定常の圧力分布の可視化 (藤井ら, 1988) による) ことや、建物周辺気流の風向・風速の振動等によって対流熱伝達の形態が変わることが考えられるが、現段階としては明確ではない。

ここで、理論的に求められている熱伝達率との比較を試みる。一様流体中の流れに直角に平板を置いた時の局所熱伝達率については

$$\frac{\alpha \chi}{\lambda} = 0.57 Pr^{0.4} \sqrt{\frac{u_{\infty} \chi}{\nu}}, \quad (7)$$

表 3 あすか観測拠点発電棟東側壁面における  $Nu$  数  
Table 3.  $Nu$ -number on the eastern panel of generator hut.

風 向	回 帰 式	データ数	F 値 (危険率)	
S	—	0	—	(—)
SSE	$2000 - 9.13 \times 10^{-5} \times Re$	4	0.16	(>50%)
SE	$-12 + 4.92 \times 10^{-4} \times Re$	62	11.0	(0.1%)
ESE (mean)	$4592 + 2.45 \times 10^{-5} \times Re$	111	0.0013	(>50%)
(ESE (1))	$-16851 + 5.788 \times 10^{-3} \times Re$	18	2.63	(10%)
(ESE (2))	$639 + 1.95 \times 10^{-4} \times Re$	93	6.48	(1%)
E	$86 + 3.52 \times 10^{-4} \times Re$	8	0.5	(50%)

(ESE (mean)) は全域, ESE (1)・ESE (2) は  $Nu = -775 + 9.67 \times 10^{-4} \times Re$  の直線の上・下の領域での回帰式)

$u_{\infty}$ : 境界層外縁速度,  
 $\chi$ : 平板の中心からの距離,  
 $Pr$ : プラントル数,

が推奨されている(日本機械学会, 1986). また流れに直交して幅  $d$  の平板が置かれたときの前面の境界層外縁速度  $u_{\infty}$  が

$$\frac{u_{\infty}}{u} = 0.78 \left( \frac{2\chi}{d} \right),$$

$u$ : 上流の一様速度,

で与えられると, 式 (7) は次のように書ける.

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = 0.712 Pr^{0.4} \sqrt{\frac{ud}{\nu}}. \quad (8)$$

また, 流れの中に平行に前縁が鋭利に仕上げられていない平板を置いた時の局所熱伝達率については

$$\frac{\alpha \chi}{\lambda} = 0.0296 Pr^{2/3} \left( \frac{u \chi}{\nu} \right)^{0.8}, \quad (9)$$

$\chi$ : 平板先端からの距離,

が推奨されている(日本機械学会, 1986).

ここで, 本観測の ESE (2) の式 (6) による熱伝達率と風向 ESE の平均周囲風速  $u_0$  の壁に直交する成分  $u_0 \cos 23^\circ$  に対する式 (8) による熱伝達率の比較 ( $d$  は, 風向 E に対する建物幅,  $d=5$  m) を図 10 に示す.

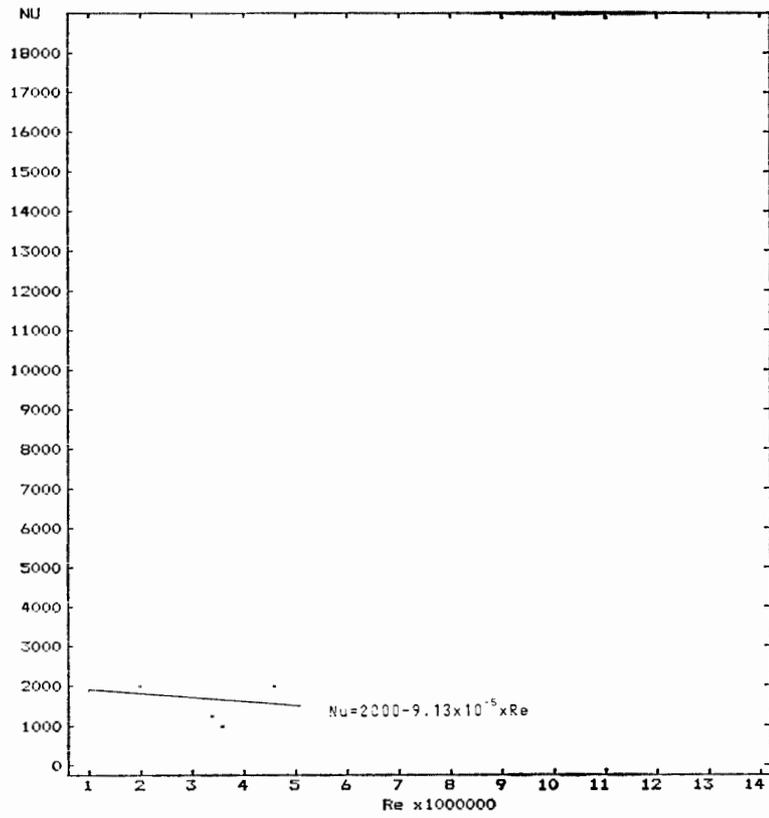
また, SE の式 (5) による熱伝達率 (ただし式 (5) は,  $d=5$  m を  $\chi=4$  m に置き換えた関係式  $Nu = -9.6 + 4.92 \times 10^{-4} Re$  を用いる) と風向 SE の壁に平行する成分  $u_0 \sin 45^\circ$  に対する式 (9) による熱伝達率の比較 ( $\chi$  は風上側角 (図 6 における C 点) からの距離  $\chi=4$  m) を図 11 に示す.

平板での関係式を建築物に適用し, また, 風向が正確に壁と直交というわけではなく, 相当強引な比較ではあるが, 風向 ESE の時には本観測の自然風の風速に対する外壁熱伝達率の増加は, 定常状態での関係式 (8) による熱伝達率の増加と比較的似た傾向にある. また, 風向 SE の時には壁面に直交する成分 ( $u_0 \cos 45^\circ$ ) が平行流に対してかなり影響するためか, 本観測での外壁熱伝達率の増加と式 (9) の誤差は大きなものとなっている.

また, 熱伝達抵抗は ESE (mean) の時約  $0.05 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$  であり, 建物壁体の熱伝導抵抗  $5.1 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$  の  $1/100$  以下で, ほとんど無視できる大きさであった.

凝縮や他の原因 (南極では特に表 1 にあるようにブリザードがある) による湿度は通常, 熱移動の抵抗を減少させるものとして扱われるが, 本観測では明らかな差は認められなかった (風速と相対湿度については付録 1 を参照のこと).

(a) SSE



(b) SE

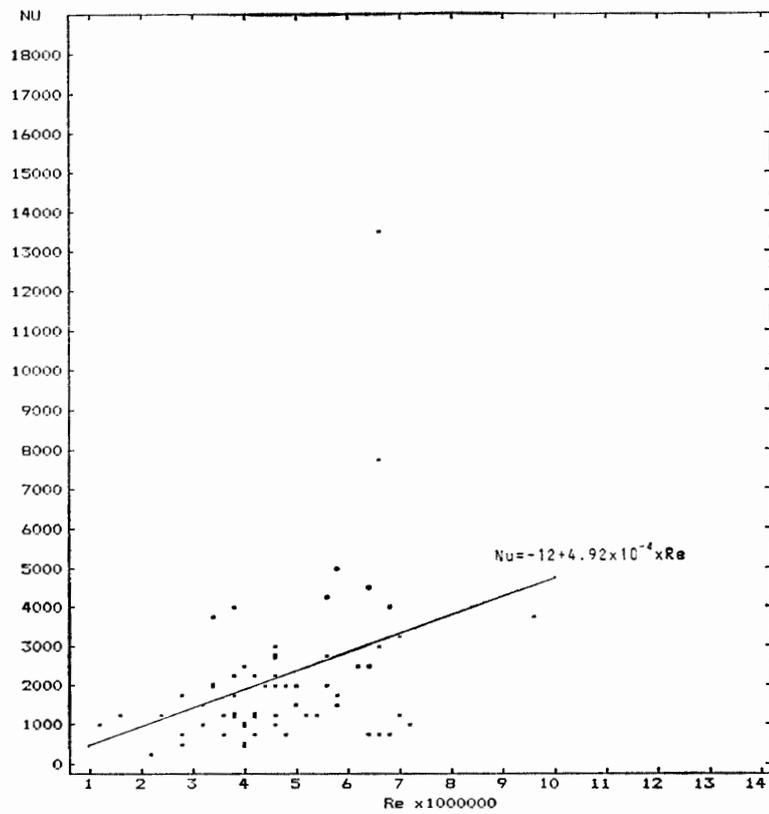
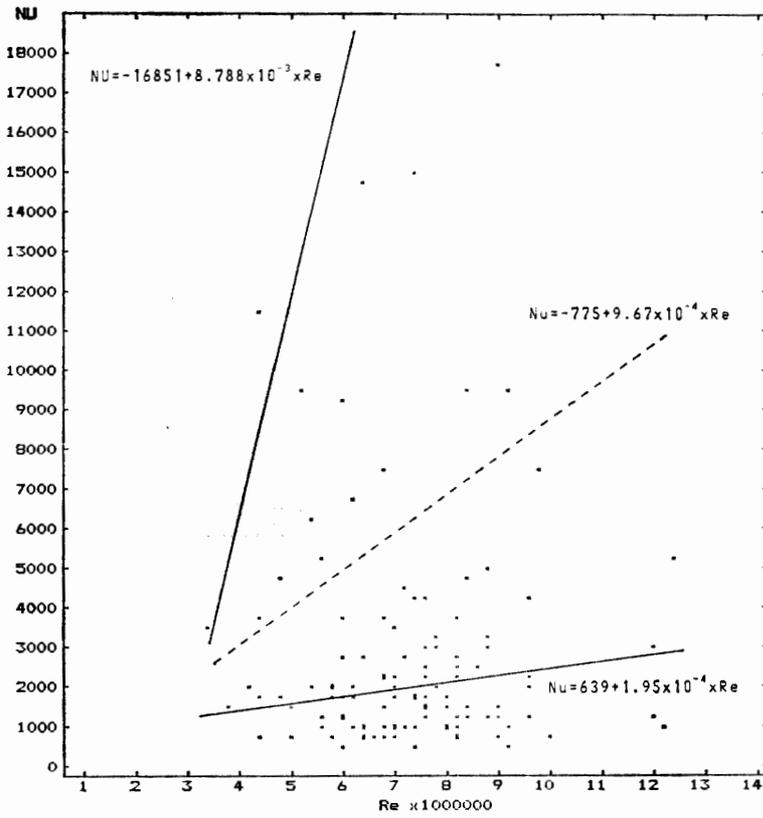
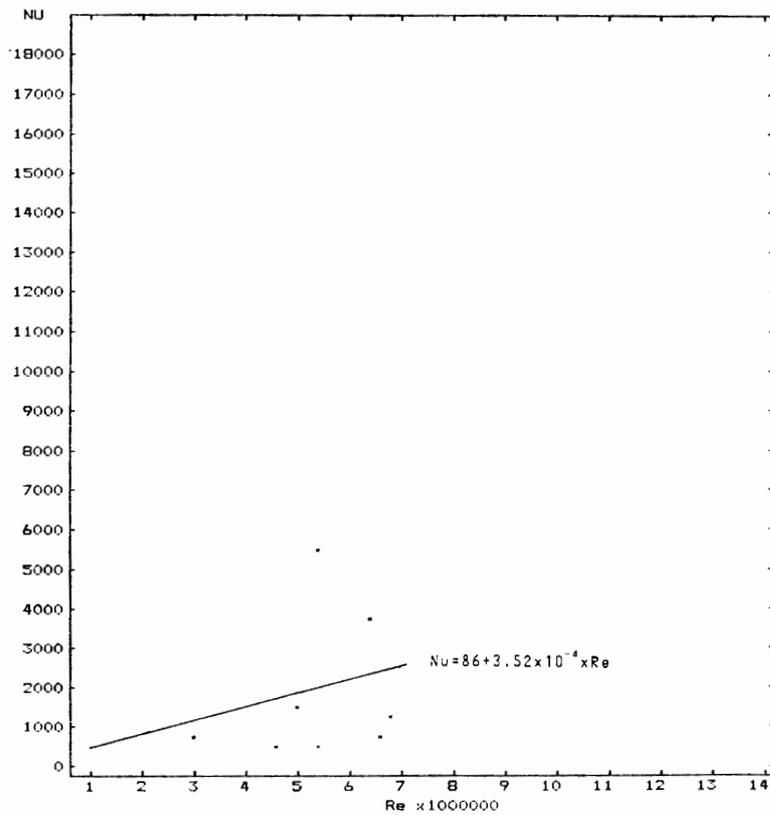


図 9 あすか観測拠点風上側壁体での風速と外壁熱伝達率の関係  
 Fig. 9. Relation between wind speed (Re) and heat transfer coefficient (Nu) at Asuka Station.

(c) ESE



(d) E



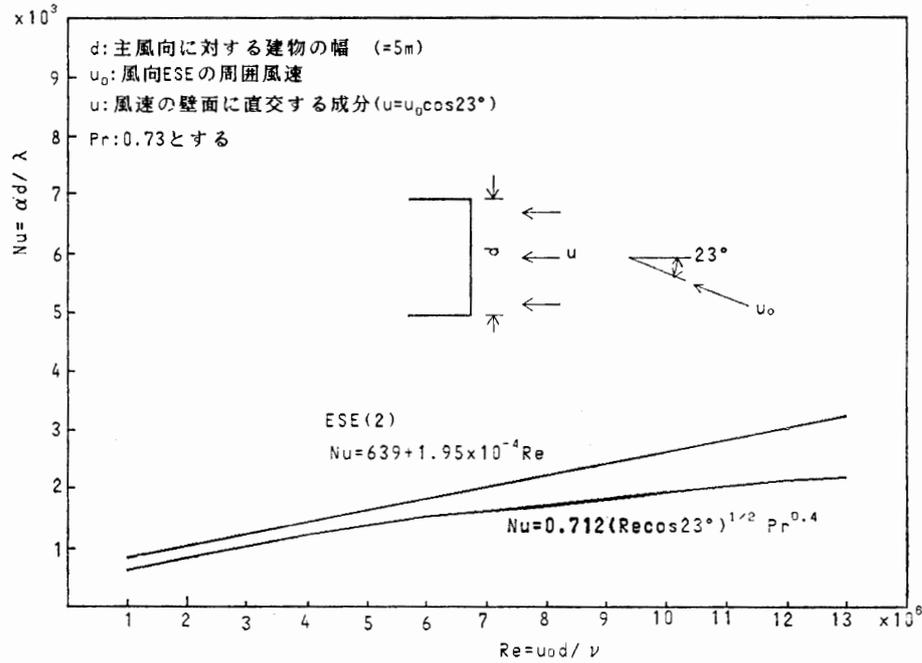


図 10 風向 ESE の時の測定値と式 (8) との比較

Fig. 10. Comparison between the measurements with the ESE wind direction and eq. (8).

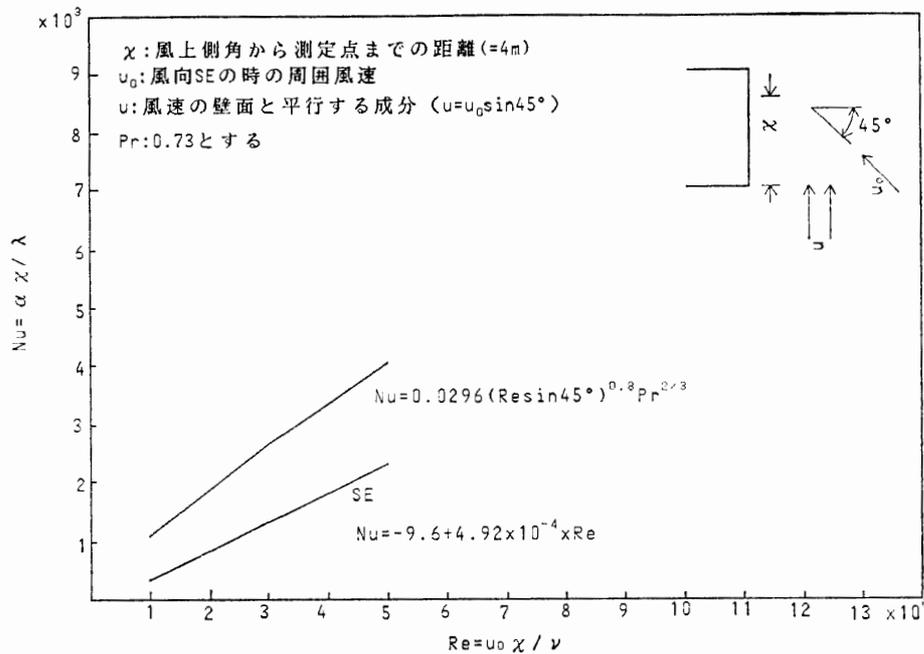


図 11 風向 SE の時の測定値と式 (9) との比較

Fig. 11. Comparison between the measurements with the SE wind direction and eq. (9).

### 4. 建築物通気量

#### 4.1. 実状況

建築物の通気量は、風速 ( $U$ , m/s) とその風向に対する風圧係数 ( $C$ ) により決定される風圧 ( $U^2 \times \gamma \times C / 2 \times g$ ,  $\gamma$ : 空気の比重) と大気圧との差, それと隙間及びダクト等の開口面積・形状によって定まるものである. あすか観測拠点主要建物では, 各棟屋根パネル上にダクトが突き出し (付録 5 参照), また図 6 のように雪に埋まり, 風速 5 m/s を超えるあたりから建物内の給排気系統は, 図 12 にあるように主に風上・風下側のドアから給気され, 屋根パネル上のダクトから排気されるのが観測された.

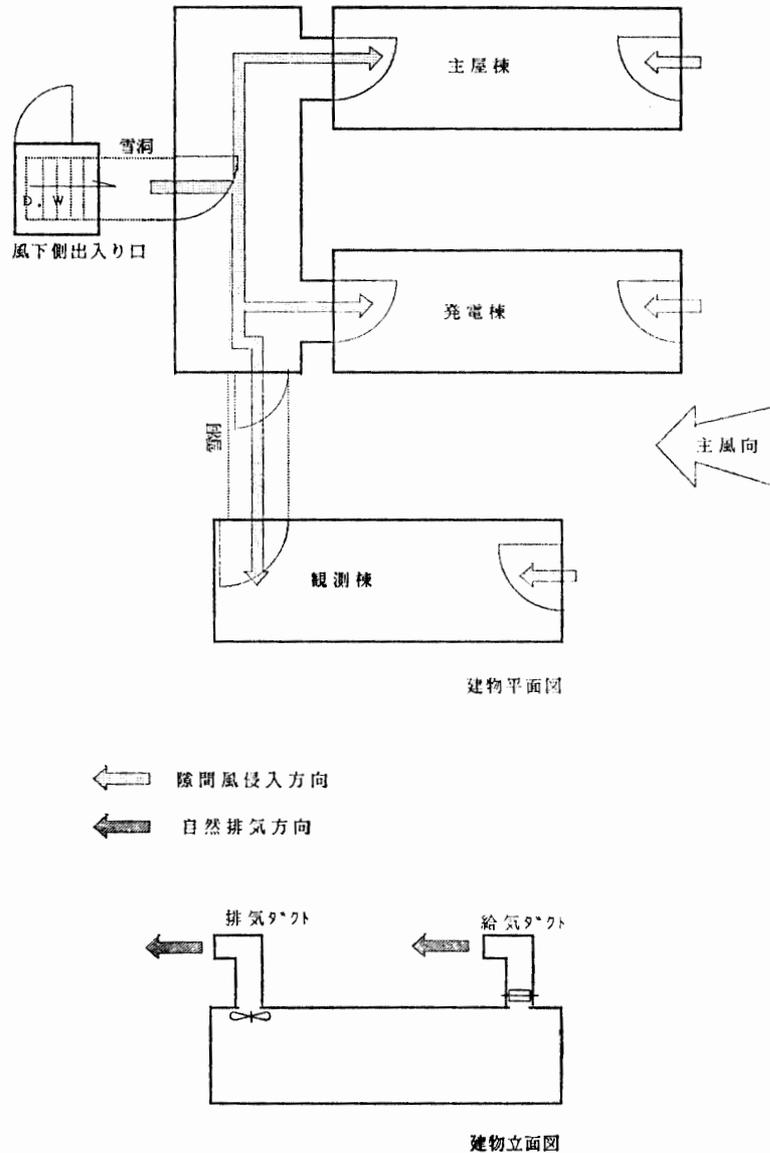


図 12 あすか観測拠点隙間風侵入方向  
Fig. 12. Draft direction at Asuka Station.

## 4.2. 通気量の推定

各建築物について直接細かに給排気量を測定することはできなかつたので、本論ではあすか観測拠点施設全体の熱収支から、通気による熱損失量  $Q$  を概算してこれと風速の関係を探ってみた。

### 4.2.1. 通気による熱損失量推定の理論

あすか観測拠点の暖房系統は、発電機の冷却水から得られる熱量と温水ボイラーから得られる熱量を、室内暖房・(融雪による)造水及び水温維持・給湯・風呂浴槽加温に使用するものである(付録6参照)。熱収支計算は一日単位で求めるが、以下の仮定のもとに算出する。

(1) あすか観測拠点の暖房(造水)システムは、発電機冷却水・温水ボイラーからの取得熱を造水と暖房に用いるものである(給湯・浴槽加温熱損失が一部あるが、暖房に比較して小さいため考慮しない)。

(2) 発電機冷却水・温水ボイラーの取得熱量は各々一日当たりの燃料消費量から求める(効率は実測値の平均値を用いる)。

(3) 観測期間は1987年3月8日-11月8日として日射の影響は考慮しない。

(4) 絶対湿度は小さいため、通気の潜熱は考慮しない。

(5) 厨房発熱、照明等の室内発熱は考慮しないものとする。電力のほとんどは発電機室で消費され、また、発電機等の機器放熱量が多いため発電機室は熱収支計算から除く。

(6) 造水槽加温熱損失は、8時間ごとの造水槽の水位と水温から求めるが、観測期間中85回の造水槽への雪入れによる水位の上昇分は、雪の融解熱量に換算する。

(7) 外壁パネルから0.5m離れた雪中においては、もはや、外壁パネルからの熱移動に起因する雪中の温度変動はなく、1日単位で見ると、その雪温は日平均外気温度と等しいとする(主屋棟回りの除雪時の観察から)。

(8) 建築物・造水槽のドリフトの状況は、観測期間中、風圧係数が変わるほど変化せず、それらの埋雪程度は、風上側から風下側に斜めに体積の1/2が埋まっているものとする。

(9) 風速、風向、外気温度は日平均を用いる。

(10) 室内温度は20°Cで一定とする。

(11) 外気の比熱は0.24 kcal/°Ckgで一定、

比重は  $1.251 - 0.00485 \times t$  ( $0 > t > -20^\circ\text{C}$ ),

$1.348 - 0.00617 \times (t + 20)$  ( $-20 > t > -50^\circ\text{C}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ ) とする。

(12) 風向 ESE の日について計算する。

(13) 露出外壁面(外壁パネル、造水槽)の熱伝達率  $\alpha$  は、東側壁面(主風向側)については3節の式(6)  $Nu = 639 + 1.95 \times 10^{-4} Re$  を、また、主風向と平行な南側壁・北側壁・屋根壁及び造水槽上部については平行流の理論式(9)の平均値、平均熱伝達率  $Nu_m$ ,

$$Nu_m = 5/4 Nu = 0.037 Re_m^{0.8} Pr^{2/3}, \quad (9)'$$

より求める。室内側熱伝達率は  $8 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  とする。

以上の仮定から熱バランスは以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{通気による熱損失 } [Q] &= (\text{発電機冷却水熱取得 } [Q_1]) + (\text{温水ボイラー熱取得 } [Q_2]) \\ &\quad - (\text{建築外壁熱伝導損失 } [Q_3]) - (\text{造水槽外壁熱伝導損失 } [Q_4]) \\ &\quad - (\text{造水槽加温熱損失 } [Q_5]) \quad (\text{kcal/d}). \end{aligned}$$

$$Q_1 = 10300 \times 0.8 \times 0.11 \times L_1,$$

$$Q_2 = 10400 \times 0.85 \times 0.8 \times L_2,$$

$$Q_3 = \left( \sum_{i=1}^3 A_{B(i)} \times K_{B(i)} \right) \times (20 - t_{\text{out}}) \times 24,$$

ここで、

$$K_{B(1)} = 1 / ((l_{\text{snow}} / \lambda_{\text{snow}}) + (\sum l / \lambda)_B + (1 / \alpha_{\text{in}})),$$

$$K_{B(2)} = 1 / ((1 / \alpha_{B(2)}) + (\sum l / \lambda)_B + (1 / \alpha_{\text{in}})),$$

$$K_{B(3)} = 1 / ((1 / \alpha_{B(3)}) + (\sum l / \lambda)_B + (1 / \alpha_{\text{in}})).$$

$$\begin{aligned} Q_4 &= \left( \sum_{i=1}^3 A_{T(i)} \times K_{T(i)} \right) \times (t_{w(8:00)} - t_{\text{out}}) \times 8 + \left( \sum_{i=1}^3 A_{T(i)} \times K_{T(i)} \right) \times (t_{w(16:00)} - t_{\text{out}}) \times 8 \\ &\quad + \left( \sum_{i=1}^3 A_{T(i)} \times K_{T(i)} \right) \times (t_{w(24:00)} - t_{\text{out}}) \times 8 \\ &= \left( \sum_{i=1}^3 A_{T(i)} \times K_{T(i)} \right) \times (t_{w(8:00)} + t_{w(16:00)} + t_{w(24:00)} - 3 \times t_{\text{out}}) \times 8, \end{aligned}$$

ここで、

$$K_{T(1)} = 1 / ((l_{\text{snow}} / \lambda_{\text{snow}}) + (\sum l / \lambda)_T + (1 / \alpha_w)),$$

$$K_{T(2)} = 1 / ((1 / \alpha_{T(2)}) + (\sum l / \lambda)_T + (1 / \alpha_w)),$$

$$K_{T(3)} = 1 / ((1 / \alpha_{T(3)}) + (\sum l / \lambda)_T + (1 / \alpha_w)).$$

$$\begin{aligned} Q_5 &= (V_{(8:00)} \times t_{w(8:00)} - V_{(0:00)} \times t_{w(0:00)}) \times (V_{(16:00)} \times t_{w(16:00)} - V_{(8:00)} \times t_{w(8:00)}) \\ &\quad + (V_{(24:00)} \times t_{w(24:00)} - V_{(16:00)} \times t_{w(16:00)}), \end{aligned}$$

$Q_5$ : 各項ごとに (一) であれば加温されなかったものとして無視し、また  $\Delta V > 0$  であれば雪入れによる増水として融解熱  $\Delta V \times (80 - t_{\text{out}})$  に置き換える。

ただし、

$L_1$ : 1日軽油使用量 (l/d),  $L_2$ : 1日灯油使用量 (l/d),

$t_{\text{out}}$ : 外気温度 ( $^\circ\text{C}$ ),  $t_w$ : 造水槽水温 ( $^\circ\text{C}$ ),  $V$ : 造水槽保有量 (l),

$A$ : 熱伝導の対象となる部分の面積 ( $\text{m}^2$ ),

$K$ : 熱伝導の対象となる部分の熱通過率 ( $\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ ),

添字 (8:00, 16:00, 24:00): 時刻, 添字 B: 建築物, 添字 T: 造水槽,

添字 (1): 埋雪部分, 添字 (2): 露出東面, 添字 (3): 露出南面・北面・屋根面,

添字 snow: 雪, 添字 in: 室内側, 添字 w: 水.

各数値は  $\alpha_{B(2)} (= \alpha_{T(2)}) = \lambda(128 + 1.95 \times 10^{-4} u/v)$  (式(6)より),  
 $\alpha_{B(3)} = 0.01829\lambda(u/v)^{0.8}$  (式(9)'で建築物  $\chi = 20$  m として),  
 $\alpha_{T(3)} = 0.0259\lambda(u/v)^{0.8}$  ( " 造水槽  $\chi = 3.5$  m として),  
 $l_{\text{snow}} = 0.5$ ,  $\lambda_{\text{snow}} = 1.118$  (kcal/mh°C),  
 $\alpha_{\text{in}} = 8$  (kcal/m²h°C),  $\alpha_w = 20$  (kcal/m²h°C),  
 $(\sum l/\lambda)_B = (0.138/0.027) + (0.012/0.13)$ ,  
 $(\sum l/\lambda)_T = (0.02/0.02)$  (kcal/m²h°C),  
 $A_{B(1)} = 361.45$  (m²),  $A_{B(2)} = 38.5$  (m²),  $A_{B(3)} = 337$  (m²),  
 $A_{T(1)} = 16.2$  (m²),  $A_{T(2)} = 6.6$  (m²),  $A_{T(3)} = 9.62$  (m²) とする.

#### 4.2.2. 結 果

前節の理論に基づき、あすか観測拠点暖房建物について得られた風速と建築物通気量の関係を図13に、またその直線回帰式を表4に示す。10月のように太陽高度が上がり、風の弱い日(地吹雪が少ない)には日射量が増すため(4.2.1で日射の影響を考慮していない)、風速0-8 m/sの範囲で危険率50%、通気量  $V_D < 0$  という回帰式になったものもある。

さらに、図13には、4.1節にあるように風圧と大気圧の差に通気量が比例するとして、通

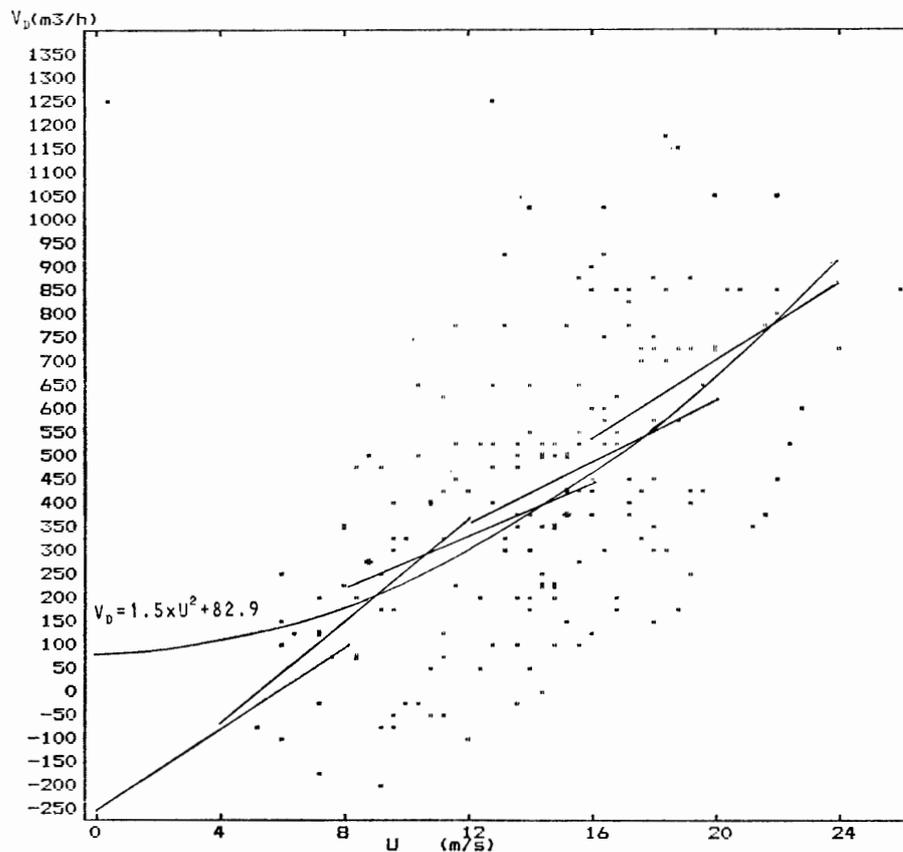


図 13 あすか観測拠点における風速と建築物通気量

Fig. 13. Correlation between wind speed and volume of draft at Asuka Station.

表 4 あすか観測拠点における風速と建築通気量  
Table 4. Wind speed and volume of draft at Asuka Station.

風速の範囲 $U$ (m/s)	回 帰 式	データ数	$F$ 値 (危険率)
0- 8	$-247+44.0 U$	13	0.52 (50%)
4-12	$-295+55.3 U$	54	11.9 (0.1%)
8-16	$-24+29.9 U$	104	8.9 (0.5%)
12-20	$-71+35.4 U$	116	7.9 (0.5%)
16-24	$-116+41.1 U$	67	3.4 (7%)

気量  $V_D$  (m<sup>3</sup>/h) と風速  $U$  (m/s) のデータに回帰式  $V_D=AU^2+B$  をあてはめた結果を示す.

$$V_D=1.5 \times U^2+82.9, \quad (10)$$

(データ数=190,  $F=88.0$ , 危険率=0.1%)

これよりあすか観測拠点の建築物通気量は、風速の2乗に比例する傾向にあるといえる.

## 5. 考 察

3および4節から自然風があすか観測拠点の建築物に熱的に与える影響が明らかになった。さらに、ここでは、あすか観測拠点の1987年3月8日-11月8日の風向 ESE での日平均風速  $U$  (m/s) と日平均外気温度  $T_{out}$  (°C) の相関関係 (付録4参照) を表す,

$$T_{out}=-31.4+0.68 \times U, \quad (11)$$

(データ数=190,  $F=88.0$ , 危険率=0.1%)

に基づいた建築物通気熱損失と熱伝導損失の比較を図14に示す。ただし、建築物通気量は式

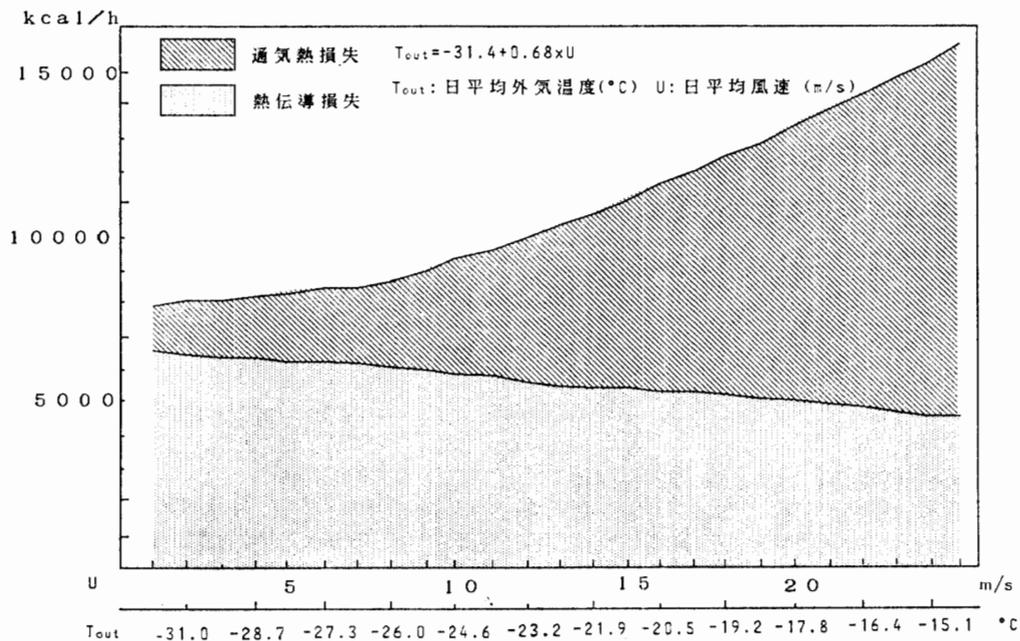


図 14 あすか観測拠点建築物の伝導熱損失と通気熱損失  
Fig. 14. Heat loss of heat conduction panel and draft at Asuka Station.

(10) より, また熱伝導損失は 4.2 節の仮定より計算した.

建築の全熱損失のうち, 熱伝導によって失われる熱量は風速, 外気温度の上昇に従って 6500→4500 kcal/h に減少する. 3 節の考察より, 外壁の熱伝導は風速の増加に伴って上昇するが, その上昇率が数 % のオーダーのため, 式(11)に従った外気温の上昇による温度勾配の低下が熱損失に大きく影響したためである.

一方, 通気熱損失は, 式(10)にあるように通気量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) が風速 ( $\text{m}/\text{s}$ ) の 2 乗に比例するため, 式(11)のもとに風速が 0→25  $\text{m}/\text{s}$  と変化することによって外気温度が上昇しても, 通気熱損失は 1500→11000 kcal/h と大幅な増加を示す.

しかし, 出入り口ドア 6 枚 (2000 h×700 w), また観測拠点維持には不可欠の発電機・温水ボイラー・厨房ガスレンジ等の給排気用開口ダクト面積が  $0.4 \text{ m}^2$  であるにもかかわらず, 隙間幅 1-1.5 mm・隙間長さ 6 m のサッシと同程度の通気量 (風速 15  $\text{m}/\text{s}$  時, 通気量  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  とし計算 (空気調和・衛生工学会, 1981)) に抑えられており, さらに, 図 14 の風速 25  $\text{m}/\text{s}$  時の総熱負荷 16000 kcal/h は, 暖房区域の単位面積当たりの暖房負荷に換算すると  $71 \text{ kcal}/\text{hm}^2$  となり, 国内寒冷地住宅の暖房負荷  $130-180 \text{ kcal}/\text{hm}^2$  と比較して, あすか観測拠点の建築物はかなり優れた断熱性と密封性を持つことがわかる. これから建物が雪面下に埋まるにつれて, 風速・風向に対して, 給排気のダクトの面積・向き等を可変するとさらに省エネルギーになると思われる.

## 謝 辞

越冬中, 丁寧なご指導をして下さった鮎川勝第28次観測隊あすか越冬隊長, 測定に対して協力を惜しまなかった機械班高橋茂夫, 富田瑞穂両隊員, 有益なご意見を下さった第28次観測隊あすか夏作業総括石沢賢二隊員, また本報告をまとめるに際しては国立極地研究所設営専門委員甲藤好郎教授, 半貫敏夫助教授の親切なご指導に深く感謝いたします. 最後に, 南極観測隊に参加することを快く了承して下さい下さった埼玉大学施設課機械係小林拓朗, 齊藤茂両氏に感謝致します.

## 文 献

- 藤井邦雄・日比一喜・上田 宏 (1988): 多点同時測定システムを用いた角柱表面の変動圧の可視化. 流れの可視化, 8, 187.
- 国立極地研究所 (1986): 基地要覧 1986年 (第5版). 東京, 6, 104, 106.
- 国立極地研究所 (1988): 第28次南極地域観測隊報告 (1986-1988). 東京, 403-406.
- 空気調和・衛生工学会 (1981): 空気調和衛生工学便覧II巻 (第10版). 東京, 51, 57.
- 日本機械学会 (1986): 伝熱工学資料 (改訂第4版). 東京, 46, 60, 62, 322.
- 槌田 昭・山崎慎一郎 (1977): 改訂伝熱工学演習. 学献社, 59.

(1989年3月16日受付; 1989年5月26日改訂稿受理)

## 付 録 1

あすか観測拠点の外壁熱伝達率測定時の外気温度と風速の傾向、風速と相対湿度の傾向を図A-1, 図A-2に示す。東南東・南東の風の風速と外気温度の間には比例関係が認められる。また、風向が南または南南東である時は、一般に風速は弱く外気温は低めの傾向を示す。東風の場合は顕著な特徴はないが風速、外気温度ともばらつきの少ない傾向にある。風向に対する風速と相対湿度の関係には、いずれも顕著な相関関係は見られないが、東南東、南東風向時には、ブリザードの日が多くなる傾向にあり湿度は全体に上昇傾向を示している。

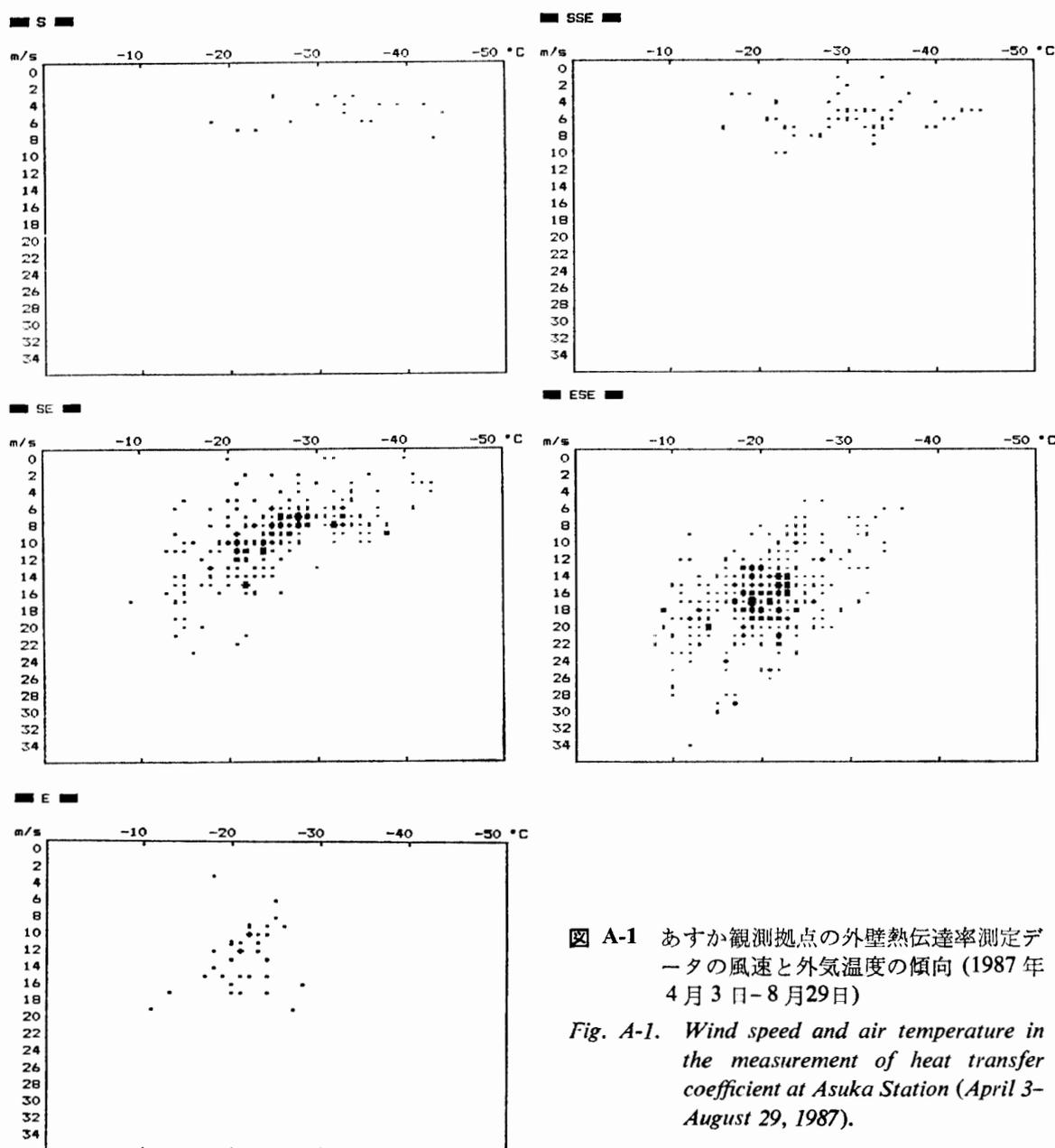


図 A-1 あすか観測拠点の外壁熱伝達率測定データの風速と外気温度の傾向 (1987年4月3日-8月29日)

Fig. A-1. Wind speed and air temperature in the measurement of heat transfer coefficient at Asuka Station (April 3-August 29, 1987).

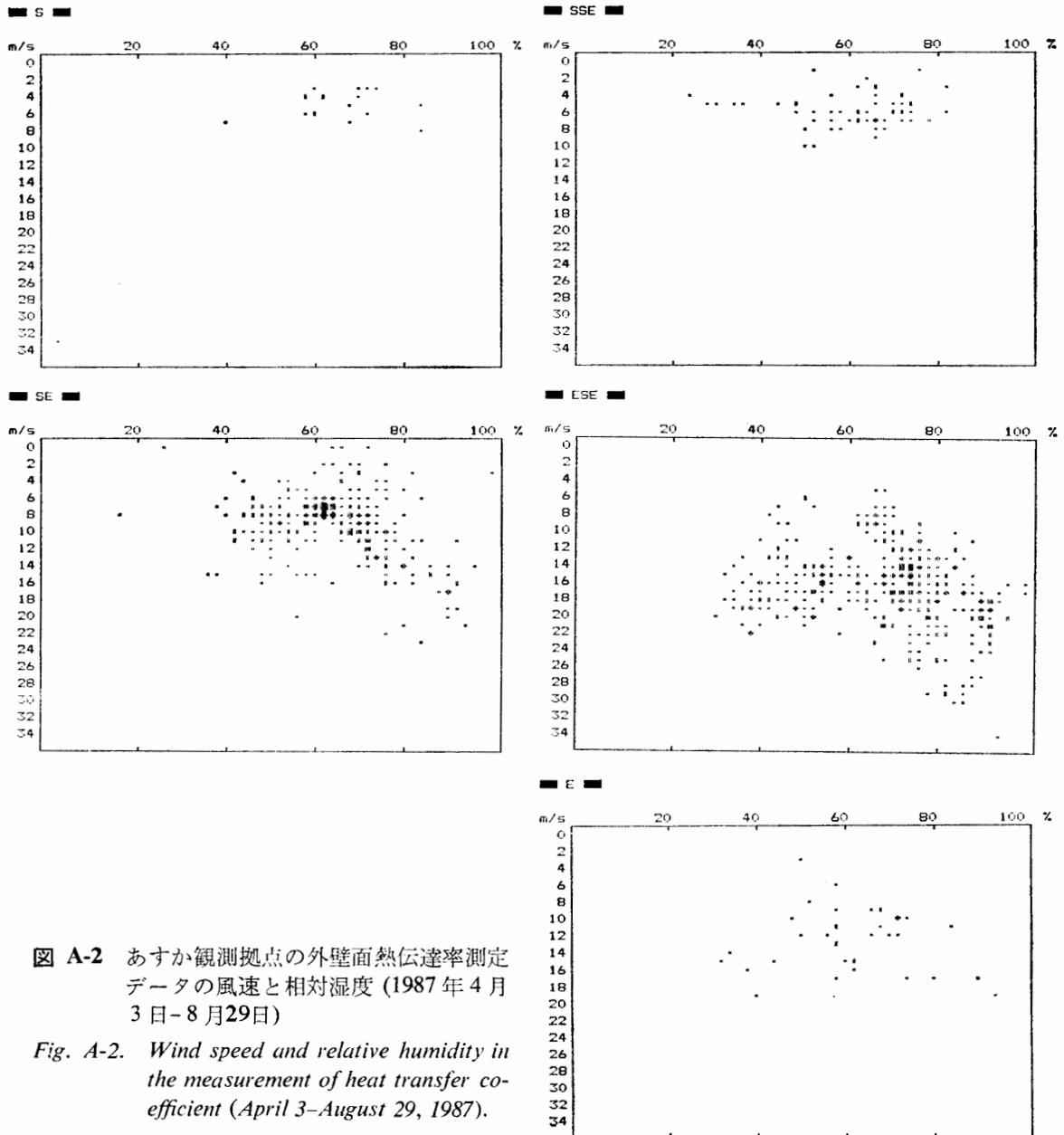


図 A-2 あすか観測拠点の外壁面熱伝達率測定データの風速と相対湿度 (1987年4月3日-8月29日)

Fig. A-2. Wind speed and relative humidity in the measurement of heat transfer coefficient (April 3-August 29, 1987).

## 付録 2

例えば、外気温度  $-21^{\circ}\text{C}$ 、外壁面温度  $-20^{\circ}\text{C}$ 、形態係数  $F=1.0$ 、外表面のふく射率  $\epsilon_1=0.95$ 、周囲ふく射率  $\epsilon_2=0.1$  (常温での値)、ステファン・ボルツマン定数  $=4.88 \times 10^{-8}$  ( $\text{kcal}/\text{m}^2\text{hK}^4$ ) の時

$$\begin{aligned} \text{ふく射熱量 } (Q/S)r &= 4.88 \times 1.0^{-8} \times 0.1 \times 1.0 \times 0.95 \times ((273-20)^4 - (273-21)^4) \\ &= 0.30 \text{ (kcal}/\text{m}^2\text{h)}. \end{aligned}$$

一方、壁体内 100 mm 間の固体熱伝導は、温度差  $25^{\circ}\text{C}$ 、熱伝導率  $\lambda=0.027 \text{ kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}$  の時  $6.75 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}$  となり、ふく射の熱量より十分大きい。

## 付 録 3

外気温度変化に対する壁体内温度分布の応答を推定するために用いたモデルは、外気温度  $-20^{\circ}\text{C}$ 、室内温度  $15^{\circ}\text{C}$  の平衡状態から図 A-3 に示す 0.5 時間で  $1^{\circ}\text{C}$  低下し、0.5 時間で  $1^{\circ}\text{C}$  上昇という外気温度変化パターンに対する 150 mm 厚のポリスチレンフォーム内部の温

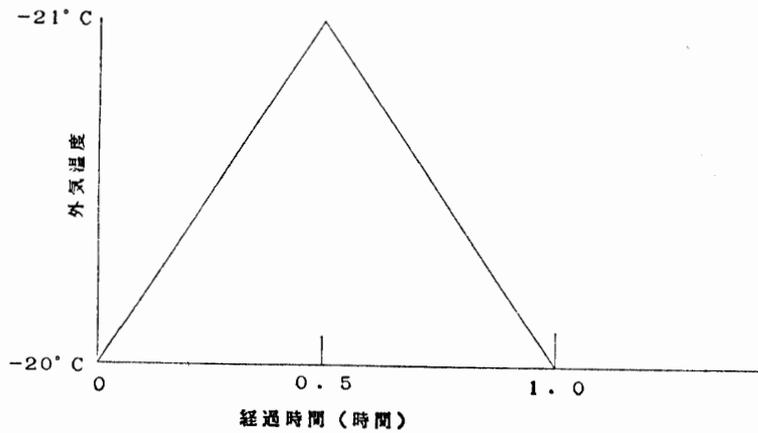


図 A-3 外気温度変化パターン

Fig. A-3. Pattern of air temperature variation.

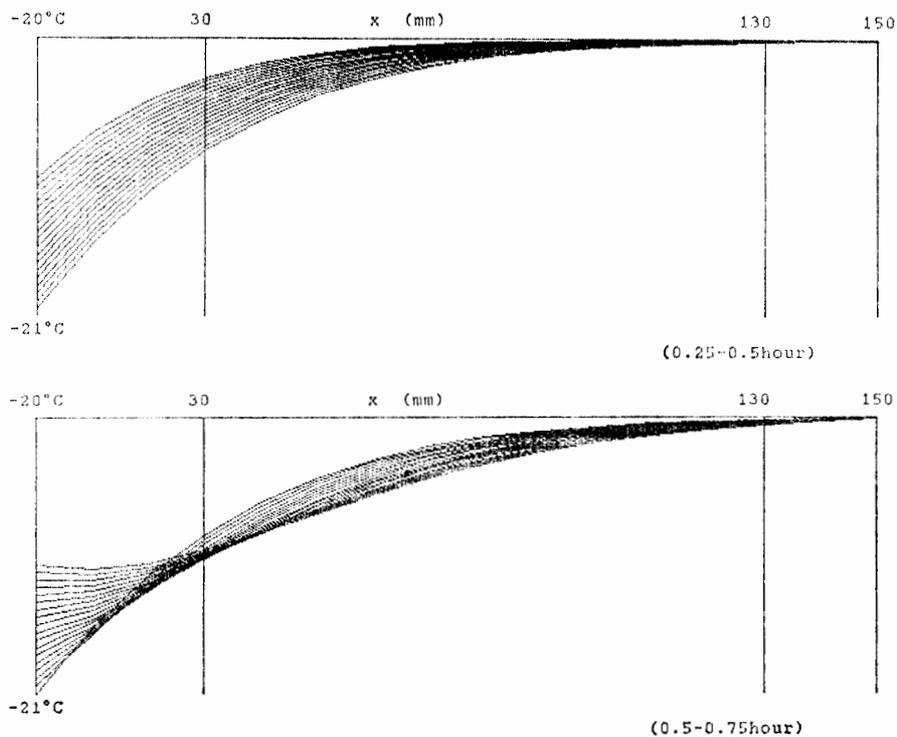


図 A-4 数値解析モデルによる外気温度変化に対する壁体内温度変化

Fig. A-4. Temperature change inside the panel against air temperature change.

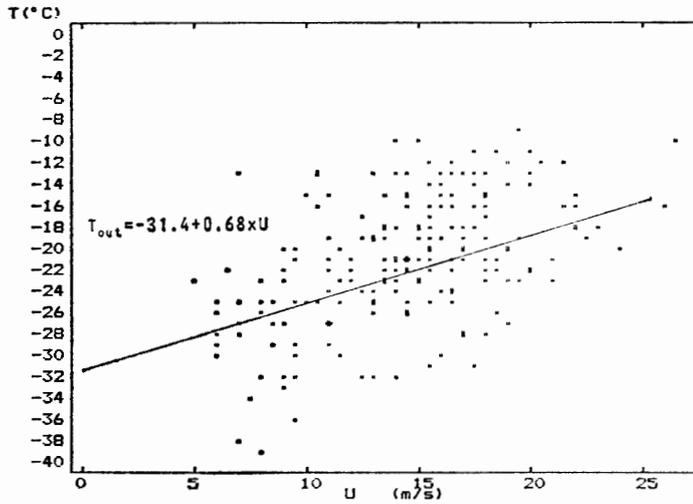


図 A-5 あすか観測拠点における風向 ESE での日平均風速と日平均外気温 (1987年3月8日-11月8日)

Fig. A-5. Daily mean wind speed and daily mean air temperature with the ESE wind direction (March 8–November 8, 1987).

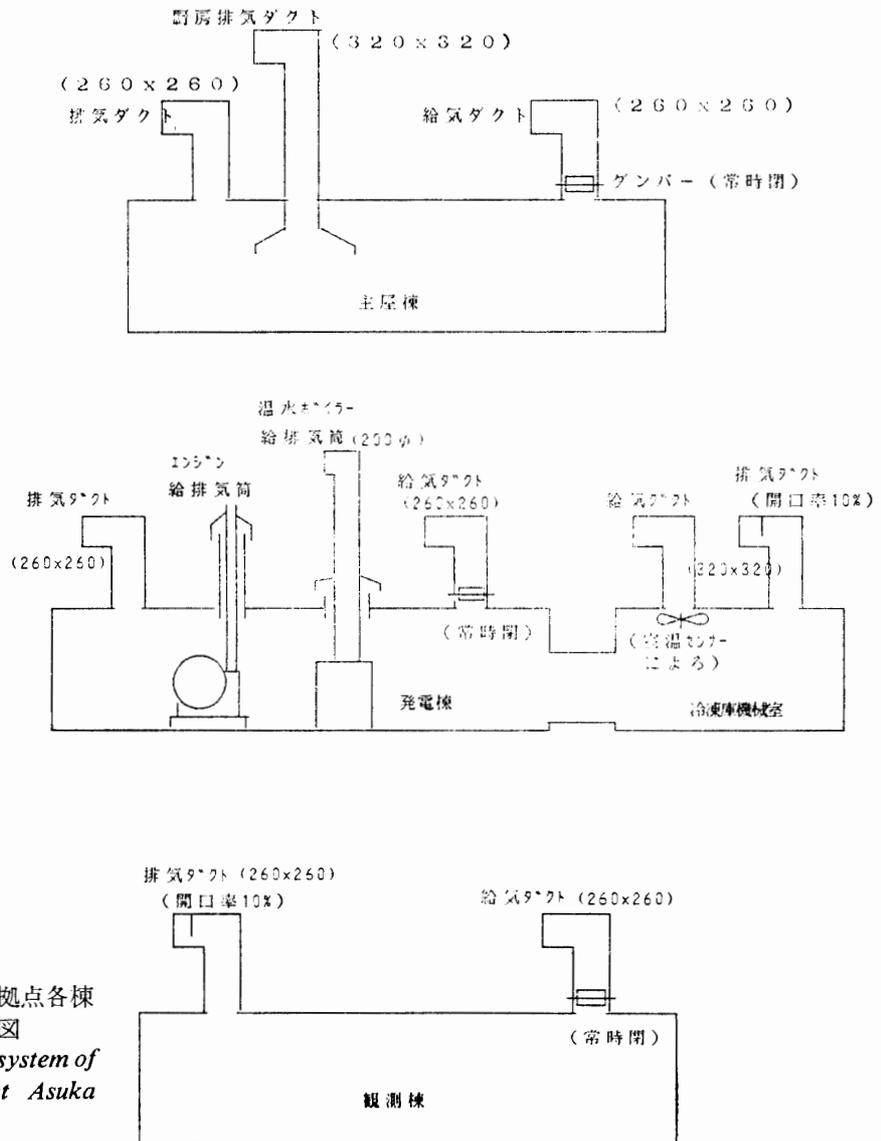


図 A-6 あすか観測拠点各棟給排気系統図  
Fig. A-6. Ventilation system of each hut at Asuka Station.

度分布を、厚さ方向メッシュを  $\Delta x = 10 \text{ mm}$ 、時間メッシュを  $\Delta t = 0.014 \text{ 時間}$ 、壁材の熱伝導率  $\lambda = 0.027 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$  (一定) とした時の壁の厚さ方向の数値解析モデル (槌田・山崎, 1977) であり、図 A-4 には外気温度  $-20^\circ\text{C}$  (左側), 室内温度  $15^\circ\text{C}$  (右側) の平衡状態を水平に変換し、0.25-0.5 時間, 0.5-0.75 時間, それぞれの間の温度分布を示す。ただし、本モデルは傾向を見るだけの目的であるので、簡単のため外気温度=外壁面温度として取り扱う。

#### 付 録 4

あすか観測拠点での風向 ESE での日平均風速と日平均外気温度の傾向 (1987 年 3 月 8 日-11 月 8 日) を図 A-5 に示す。

#### 付 録 5

あすか観測拠点の給排気システムを図 A-6 に示す。

#### 付 録 6

あすか観測拠点の暖房システムを図 A-7 に示す。

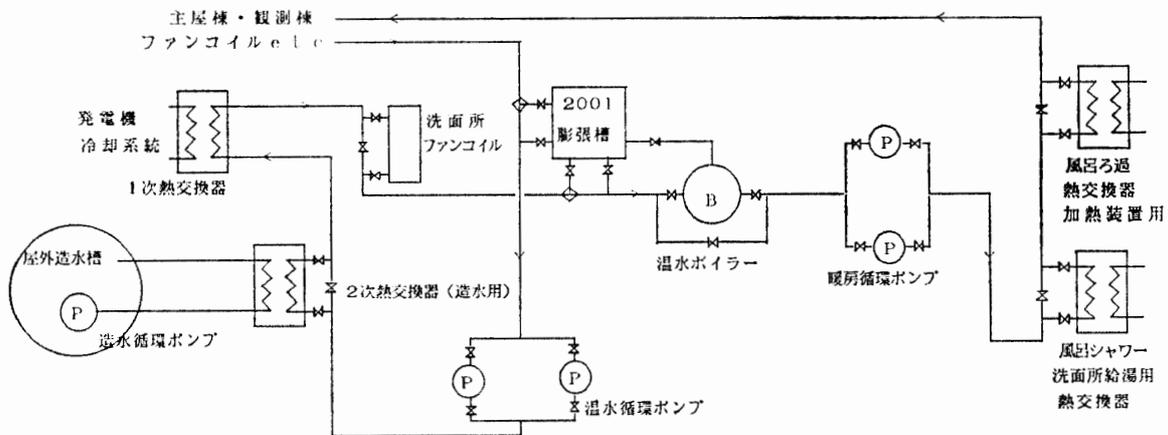


図 A-7 あすか観測拠点暖房系統図

Fig. A-7. Heating system at Asuka Station.