

JAERI - M
87-191

家屋の放射能防護効果に関する研究 (II)
— 実家屋の自然換気率測定 —

1987年11月

加藤 正平・野口 宏・村田 幹生
国分 守信・奥山 博康*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷㈱

家屋の放射能防護効果に関する研究(II)

—実家屋の自然換気率測定—

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

加藤正平・野口 宏・村田幹生

国分守信⁺・奥山博康^{*}

(1987年10月20日受理)

原子炉事故時の施設周辺住民の防護対策の一つとして屋内退避は容易にかつ安全に実施できる方法である。屋内退避による内部被曝防護効果においては家屋の自然換気の程度が重要である。自然換気率の性質の把握と換気率計算コードの検証のためのデータを得るため、3種類の実家屋を対象に自然換気率を測定した。測定には炭酸ガストレーサー法を用い、得られたデータを最小2乗法を用いて解析し換気率を推定した。

実験から以下の結果が得られた。1)実験条件内では、気温差は換気量に対して影響が小さかった。また、風向と家屋の主要換気経路との関係が換気風量に大きな影響を与え重要である。2)木造2階建家、鉄筋コンクリートアパート、鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量はそれぞれ220～240, 80～110, 95～200 m³/hであった。3)また、自然換気回数は、それぞれ0.77～0.83, 0.92～1.2, 0.80～1.7回/時であった。

The Effectiveness of Sheltering against Internal Exposure
in Nuclear Reactor Accidents (II)

— In-situ Measurement of Ventilation Rate of Houses —

Shohei KATO, Hiroshi NOGUCHI, Mikio MURATA
Morinobu KOKUBU⁺ and Hiroyasu OKUYAMA*

Department of Health Physics
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 20, 1987)

Sheltering is one of simply and safety applicable protection actions in nuclear reactor accident. The protection effect of sheltering against internal exposure due to inhalation depends on natural ventilation rate of houses. Therefore, the natural ventilation rates for three types of houses were measured to prove the characteristics of ventilation of houses and to obtain data for verification of a calculation code of ventilation rate. The ventilation rates were measured by tracer gas method and estimated by least square analysis.

The following results were obtained. 1) The effect of temperature difference on ventilation rate was small under the experimental conditions. 2) The relation between wind direction and the position of main air flow path of house was important for the ventilation rate. 3) Ventilation flow rates of a two story wooden house, three story RC house and two story RC terrace house were 220~240, 87~110, 95~200 m³/h, respectively, and the ventilation rates were 0.77~0.83, 0.92~1.2, 0.80~1.7 changes/hour, respectively.

Keywords: Reactor Accident, Internal Exposure, Effectiveness of
Sheltering, House, In-situ Measurement, Ventilation Rate
Tracer Gas Method, Least Square Analysis

+ Department of Administrative Services, Oarai Research Establishment

* Shimizu Construction Company

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	2
2.1 トレーサーガス法	2
2.2 トレーサーガスランダム注入法による換気量推定法	2
2.3 測定システム	3
3. 実験条件および結果	5
3.1 木造家屋の換気率測定	5
3.2 鉄筋コンクリートアパートの換気率測定	6
3.3 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気率測定	8
4. 考 察	55
5. 結 言	55
参考文献	56
付 録 トレーサーガス法による換気量推定法の理論	57

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental method	2
2.1 Tracer gas method	2
2.2 Estimation of ventilation rate by the method of random injection of tracer gas	2
2.3 Measurement system	3
3. Experimental condition and results	5
3.1 Ventilation rates of wooden house	5
3.2 Ventilation rates of RC house	6
3.3 Ventilation rates of RC terrace house	8
4. Discussion	55
5. Conclusion	55
Reference	56
Appendix Estimation theory of ventilation rate by tracer gas method	57

1. 緒 言

原子炉事故により問題となるような量の放射性物質が施設外に放出される場合には、放出放射能による公衆への影響を迅速に予測するとともに、被曝防護対策を講じなければならない。施設周辺住民の防護対策の一つとして屋内退避は容易かつ安全に実施できる方法であると考えられる¹⁾。そのため、屋内退避による被曝防護効果を明らかにしておくことは、緊急時対策を立案する上で大変重要である。屋内退避による被曝防護効果は、家屋の放射線遮蔽による放射線防護効果と、家屋の気密性による放射能防護効果がある。前者の効果についてはすでに原研から報告されている²⁾。本研究は家屋の気密性による放射能防護効果を明らかにし、緊急時対策立案に資することを目的として行ったものである。

家屋の気密性による放射能防護効果の評価においては、家屋の自然換気率の評価が重要である³⁾。すなわち、家屋の自然換気率を知ることにより放射性核種の家屋内侵入の程度が推定され放射能防護効果が評価できる。本論文では家屋の放射能防護効果に関する研究の一環として、家屋の自然換気率を明らかにするために実家屋を対象として自然換気率を測定した結果について述べる。

対象家屋には、鉄筋コンクリート集合住宅、木造2階建家、鉄筋コンクリートテラスハウスの3種類の代表的家屋を選んだ。測定は炭酸ガスを用いたトレーサーガス法を採用して行った。測定値から換気率を得るための解析には最小2乗法を用いた。

実験においては、気温、風速、風向もあわせて測定し、また家屋の構造や使用している建具などのデータを調査した。換気率の計算にはこれらの結果は利用しないが、本論文においては、その結果もあわせてできる限り詳細に掲載した。その理由は、別の報告⁶⁾において述べる換気率のシュミレーション計算において、本実験で測定した気温、風速、風向等の気象条件、および家屋の構造や使用している建具などのデータを用いて換気率のシュミレーションを行った結果と、本実験で測定した換気率の結果とを比較し検証するためである。

2. 実験方法

2.1 トレーサーガス法

トレーサーガス法は、あるトレーサーガスを室内に放出し、その後の濃度の時間的変動を観測することにより換気量を推定する方法である。この測定法は大きく、濃度減衰法、一定供給法、およびランダム注入法に分けられる。

濃度減衰法はトレーサーガスを所定の濃度になるまで室内に放出し、その後の濃度の時間的減衰を観測することにより換気量を推定する方法である。一定供給法はトレーサーガスを観測期間中連続して一定の割合で室内に放出し、その後の濃度の時間的変化を観測することにより換気量を推定する方法である。上述した方法は、換気率に影響を及ぼす外気濃度、外気風速、気温などが測定中は一定であるという仮定に基づいているため、現実の条件を反映した結果とは必ずしもいえない。また、測定値の観測誤差を統計的に処理していないという欠点を有している。

ランダム注入法は、複数の部屋よりなる家屋について有効であり、トレーサーガスをランダムに選んだ部屋にある時間放出し、各部屋へのガス注入量と濃度の時間的変動を観測することにより換気量を推定する方法である。

本実験では炭酸ガスをトレーサーとしたランダム注入法を採用し、得られたデータの解析は最小2乗法により処理し自然換気率を推定した。この解析法は濃度減衰法や一定供給法の欠点を解消する方法である。すなわち、多数チャンバよりなる家屋に対し、外気濃度、ガス供給量が時間的に変動している場合に適用でき、測定誤差を統計的に処理することができる。

2.2 トレーサーガスランダム注入法による換気量推定法

トレーサーガスランダム注入法による換気量の推定は、多数チャンバ拡散系で各チャンバ内ガス濃度、外気濃度、ガス発生量を観測値とし、チャンバ間の風量をパラメータとした状態方程式について、最小2乗法により推定する方法により行った。本推定法の詳細は付録に譲り、ここでは推定法の概略を述べる。

いま図1に示すようにチャンバ1～kよりなる多数チャンバ拡散システムについて考える。j番目のチャンバ容積を m_{jj} 、チャンバiからjへの換気量を C_{ij} 、チャンバjの濃度を x_j 、ガス発生器から直接j番目のチャンバへ注入されるガスを g_i とする。また、外気濃度は一般に均一濃度ではない。ここでは、外気濃度は仮想的に n_0 個の独立したチャンバより成るものとする。このとき次式が成立する。

$$m_{jj} \cdot \dot{x}_j = \sum_{i=1}^{n+n_0} C_{ij} x_i - \sum_{i=1}^{n+n_0} C_{ji} \cdot x_j + g_i \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x} = {}^t(x_1, \dots, x_n)$ 、 $\mathbf{x}_0 = {}^t(x_{n+1}, \dots, x_{n+n_0})$ 、 $\mathbf{g} = {}^t(g_1, \dots, g_n)$ とすると、(1)式は以下のように表わされる。

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{C}_0 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g} \quad (2)$$

\mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{C}_0 , \mathbf{R} はそれぞれ容量マトリックス, コンダクタンスマトリックス, 固定入力マトリックス, および自由マトリックスとする。(2)式について, 既知システムパラメータでできる項は左辺に移行させると,

$$\mathbf{y} = -\tilde{\mathbf{M}} \cdot \dot{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{C}} \cdot \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{C}}_0 \cdot \mathbf{x}_0 + \tilde{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{g} \quad (3)$$

ここで, $\tilde{\mathbf{M}}$, $\tilde{\mathbf{C}}$, $\tilde{\mathbf{C}}_0$, $\tilde{\mathbf{R}}$ はそれぞれ \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{C}_0 , \mathbf{R} から既知パラメータを抜いた後のマトリックスを表わす。さらに同定すべきパラメータよりなるシステムパラメータベクトル \mathbf{a} が次式で表わされるように定める。

$$\mathbf{y} = \mathbf{z} \cdot \mathbf{a} \quad (4)$$

ここに \mathbf{y} は観測ベクトル, \mathbf{z} を観測マトリックス, この式をシステムパラメータ \mathbf{a} に関する観測方程式と呼ぶ。

(4)の方程式誤差 \mathbf{e} は次式で定義される。

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{z} \cdot \mathbf{a} \quad (5)$$

\mathbf{e} の評価関数 J を時間区間 $[0, T]$ の積分量で定義し次式で表わす。

$$\mathbf{J}(\mathbf{a}) = \int_0^T \mathbf{e}^T(t) \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{e} dt \quad (6)$$

ここで \mathbf{W} は観測誤差について不偏推定をするための重みマトリックスである。

システムパラメータの最良の推定値は最小2乗法の考えから,

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{a}} = 0 \quad (7)$$

を解くことによって得られる。

2.3 測定システム

図2に実家屋の自然換気率測定システムの概略図を示す。測定システムは炭酸ガス供給装置, ガス濃度測定装置, データ解析装置, および気温, 風向, 風速測定装置から構成されている。実験では家屋の個々の部屋に炭酸ガス供給用, およびガス濃度測定用ビニールチューブを配置した。炭酸ガスをランダムに選んだ部屋にある期間毎に放出し, 各部屋へのガス注入量と濃度の時間的変動を観測し, データ解析装置により換気量を計算した。また, 同時に気温, 風向, 風速を測定記録した。炭酸ガスのある期間毎にランダムに選んだ部屋に放出するのは, パーソナルコンピュータにより自動的に行った。炭酸ガス供給にはガスポンベを用い, ガス濃度測定は赤外線式ガス濃度分析計で行った。本測定システムで重要な測定データの解析は, 前節の換気率推定法で述べた最小2乗法を基礎にした方法で行った。実際にはリアルタイムで行うため解析プログラムを組み込んだパーソナルコンピュータを用いた。

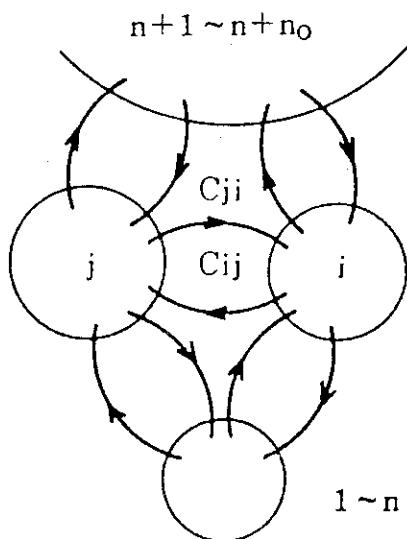


図1 多数チャンバのシステム

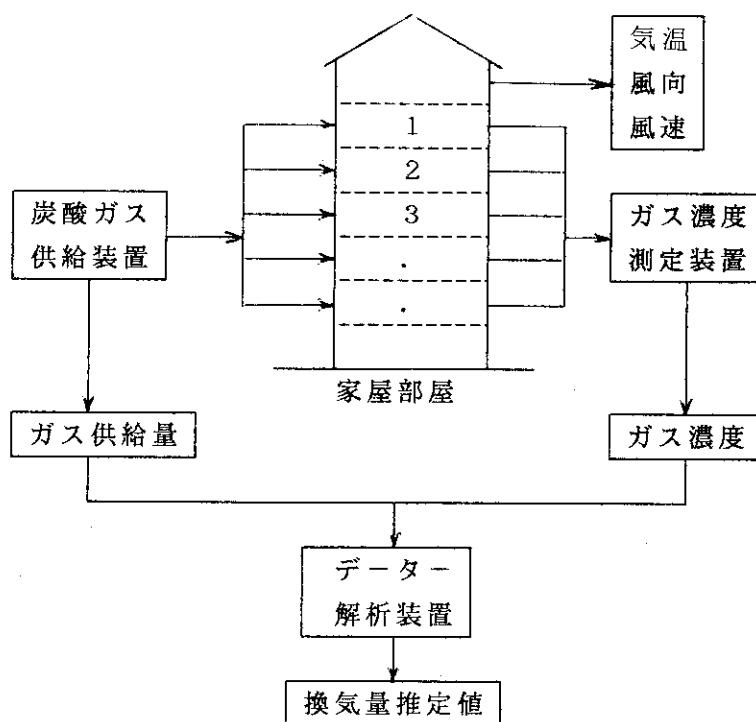


図2 家屋の自然換気量測定システム概略図

3. 実験条件および結果

3.1 木造家屋の換気率測定

(1) 建物の状況

測定を行った木造家屋は、東京都世田谷区奥沢にあり、1階部分は、畳敷きの室が5室、洋室が1室、そのほか台所、浴室、便所がある。2階には、小さな3畳間も含み2室ある。

図3に、その平面図、断面図と階段の断面図を示す。当建物の窓、戸やドアのサッシは全て木造である。さらに建物自体が、かなり古く、サッシのまわりの隙間も大きくなっている。南側の裏庭に面する窓は床面からの大きなものである。サッシの位置は室ごとに展開図として付図A-1から付図A-9に示す。ここに室番号とは、換気測定上定義したものを意味し、これらは図3に示す。

(2) 実施状況

実験に用いた建物の平面図を図3で示す。この図において、便所、浴室と台所は、その出入口の戸を目ざりすることにより空気の流通を防ぎ、測定対象の室とはしなかったため、省いてある。

この図においてNo.7は玄関、No.8は階段を1つの室とみなしたものである。No.2とNo.3の室は縁側を含み、No.3はさらに廊下も含む。2階は間仕切の襖を取り去り、1室として扱い、室番号はNo.9である。No.10は外気を表わす。

これらの室へのトレーサーガス注入は、ビニールチューブを通して、各室の天井ぎわのコーナーから行い、チューブの先端には攪拌ファンを取り付けた。No.2とNo.3の室は、縁側と畳敷きの境の上に、天井からたれ壁がさがっているため、そのたれ壁の開口部分に同じ攪拌ファンを増設した。ガスサンプリングの位置は1室あたり、5ヶ所の分散した位置から行い、分岐管でまとめて1本とした。

温度の計測は、各室の中心部で1点ずつ行った。結果は多点温度集録装置のプリンターに逐次打ち出した。

風向風速のセンサーは、2階の物干場から、角材を延長して地上から高さ8mに取り付けた。記録はペンレコーダーを用いた。

雨戸を持つ窓については、雨戸だけは開いた状態で測定を行った。ある室が、押入を持つときは、その戸を取りはらい、押入内の容積は室内容積に含まれるようにした。室間の間仕切りの襖は閉じた。

当家屋においては自然室温の状態だけで測定を行った。1回目の測定は昭和59年11月29日であり、測定開始が、10時25分で、終了が18時45分である。天候は晴であった。2回目は12月1日であり、測定開始は11時、終了は18時30分である。天候は晴のち雨であった。

(3) 測定結果

11月29日の測定結果のうち各室のガス濃度の変化を図4-1～図4-10に示す。室番号

10 とは外気を表わす。たて軸は炭酸ガスの濃度 (ppm) であり、横軸は実験開始からの経過時間 (min) である。また各室への炭酸ガス注入流量を図 5-1 ~ 図 5-10 に示す。たて軸は毎秒あたりの注入流量 (ℓ/s) である。室温と外気温の変化を図 6 に示す。風向風速のグラフを図 7 に示す。これはペンレコーダーの記録紙をもとに、10 分間ずつの平均値を求め、プロットしたものである。ガス濃度と注入流量の測定値から逐次に換気風量の推定結果が得られるが、この推定値は時間が経過するにつれて、ある値に収束していく傾向がある。従って実験終了時の推定結果を採用することとした。11 月 29 日の結果を図 8 に示す。この図から外気に面して流出あるいは流入する風量に加え合せて、総室の容積で割れば換気回数 (回/時) が計算される。これは、実験時間内の平均内外温度差と平均風速とともに、同じ図に書き込んでいる。平均室温とは各室の時間的平均値をさらに容積加重平均した値である。

同様に 12 月 1 日分については、室温の変化を図 9、風向風速のグラフを図 10 に示す。また同様に、換気風量を図 11 に示す。

表 1 に換気率の測定時の温度差、風速、換気回数をまとめたものを示す。ここで換気回数は次式で定義される。

$$\text{換気回数} = \frac{\sum C_{\text{out},j}}{\sum m_{jj}}$$

$C_{\text{out},j}$: 屋外から部屋 j への風量 (m³/h)

m_{jj} : 部屋 j の容積 (m³)

表 1 木造 2 階建家の換気率測定結果

実験実施日	風 向	風速 (m/s)	温度差 (°C)	換気回数 (回/時)
11 / 29	SE ~ N	1.07	0.17	0.77
12 / 1	E ~ NW	0.84	0.75	0.83

11 月 29 日の実験結果を 1 例として若干の考察を行った。図 5-3 に示したように部屋 3 にガスが注入され始めると、部屋 3 のガス濃度は次第に上昇し、また注入が止まると減少し始めた (図 4-3)。しかし濃度の減少は単純ではなく、曲線は凹凸したものとなっており他の部屋からの流入の影響によるものと考えられる。

部屋間の風量は図 8 に示すように、部屋 3 から部屋 2 へは 5.22 ℓ/s であり、その逆に部屋 2 から部屋 3 への風量は 7.8 ℓ/s であった。このことは、部屋から部屋への風量は一方的でないことを表わしている。

複数の部屋よりなる家屋においては、外気の浸入する速さは部屋毎に異なることが考えられ、屋内退避による内部被曝防護効果は部屋毎に考慮する必要がある。

3.2 鉄筋コンクリートアパートの換気率測定

(1) 建物の状況

測定を行った鉄筋コンクリートアパートは、東京都世田谷区粕谷 3 の 1 の 6 にある、清水建

設鳥山寮である。これは3階建であり、一戸あたり3DKの大きさを持つ集合住宅の形式をとっている。敷地内の配置図を図12-1に示す。建物の長手方向は、ほぼ南北方向に一致する。東立面図を図12-5に、西立面図を図12-4に、北立面図を図12-3に示す。図12-2は断面図である。測定対象の室は、最も南の端の1階の一戸部分である。この一戸についての平面図を図13に示す。畳敷きの室が3室、台所兼食事室が板敷きとなっている。このほか浴室と便所、さらに玄関に面する廊下がある。外気に面する窓およびドアはスチール製のサッシからできている。従って、ウェザーストリップなどを持つアルミサッシに比べ、気密性はよくない。内部の間仕切りについては、浴室と便所に入るドアが木製ドア、台所兼食事室から玄関に向う戸は、ガラスをはめこんだ木製の引き戸である。その他の室間の間仕切りは、襖であり、立て付けは悪い方である。外気に面する窓、ドアの中で特に気密性が良くないのは玄関のスチールドアである。これは上、下に比較的大きなすき間があり、郵便受の穴もついている。

なお、サッシの形状と展開図は付図B-1～B-2に示す。

(2) 実施状況

トレーサーガスの一様拡散を仮定した室は、図13のごとく、室番号1が西側の畳敷き6畳の室、2番が東側の畳敷き6畳の室、3番が西側の畳敷き4.5畳の室、4番が台所兼食事室、5番が廊下と玄関、6番が浴室、7番が便所である。さらに外気も室番号を用いて表現し、8番とした。

室温の状況については、自然室温状態と、電熱ヒーターによる暖房状態の二通りについて測定を行った。電熱ヒーターは1個800Wのもので、室番号1と4の室に、それぞれ1個ずつ設置した。

その他ガス注入法やサンプリング法等については、木造家屋の場合と同様である。

当建物においては、測定総日数4日分のデータを採った。まず、昭和59年11月19日では、14時に測定を開始し、17時に終了した。天候は雨であった。電熱ヒーターは用いず、自然室温状態である。2回目の測定は、昭和60年1月21日であり、開始が10時10分、終了は16時40分である。天候は晴、ヒーターを用いた暖房状態である。3回目は1月23日であり、開始が11時45分、終了は17時10分である。天候は晴、やはりヒーターを用いている。4回目は1月24日であり、開始が9時20分、終了が16時である。天候はくもり、自然室温状態である。これらの実施状況をまとめると、次の表2となる。

表2 鉄筋コンクリートアパートでの実施状況

測定実施日	天候	測定時間	ヒーター
11月19日	雨	14時～17時	無
1月21日	晴	10時10分～16時40分	有
1月23日	晴	11時45分～17時10分	有
1月24日	曇	9時20分～16時	無

(3) 測定結果

11月19日の測定結果を示す。室温と外気温の変化を図14に示す。風向風速のグラフを図15に、また、11月19日の結果を図16に示す。

同様に1月21日の分については、室温の変化を図17、風向風速のグラフを図18に示す。また、同様に、換気風量を図19に示す。

3回目の1月23日の分については、室温の変化を図20、風向風速のグラフを図21に示す。換気風量を図22に示す。

4回目の1月24日の分については、室温の変化を図23、風向風速のグラフを図24に示す。換気風量を図25に示す。

表3に換気率測定時の温度差、風速、換気回数をまとめたものを示す。

表3 鉄筋コンクリート集合住宅の換気率測定結果

実験実施日	風 向	風速 (m/s)	温度差 (°C)	換気回数 (回/時)
11 / 19	SSW ~ WSW	2.69	2.94	1.19
1 / 21	NE	4.58	0.71	0.92
1 / 23	N ~ NE	3.65	2.32	0.96
1 / 24	NNE ~ ENE	2.56	1.52	1.02

換気回数は0.92～1.2回/時であった。これらの結果から風向、風速、温度差などと換気回数との関係を導くのは難しい。部屋間の風量、特に放射能防護効果で重要となる外気の流入については玄関からの流入が他の部屋よりかなり大きかった。これは玄関のドアの郵便受開口部とドア上部と下部のすき間が大きな通路となっているためと考えられる。

室温の効果を調べるため1月21日と1月23日については部屋1と4にヒーターをとりつけた。ヒーターをとりつけなかった場合(図16、図25)と、とりつけた場合(図19、図22)の場合とは、部屋間の空気の流れに大きな変化はみられなかった。ヒーターをとりつけたときの温度差が約4°Cであるが、この程度では大きな影響がでないことを示しているものと考えられる。

3.3 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気率測定

(1) 建物の状況

3種類目の住宅は、2階建のRC造集合住宅の1戸であり、住所は茨城県那珂郡東海村原研長堀住宅である。この集合住宅はメゾネット型で各戸に内部階段があり、出入口は1階部分だけである。1階部分には、玄関、廊下、便所、6帖和室と台所兼食堂、洗面脱衣室、浴室がある。2階には6帖和室と4.5帖和室がある。

図26-1に1・2階平面図、図26-2に断面図、階段断面図を示す。当住宅のサッシは北面がアルミ製、南面がスチール製である。サッシの位置は部屋ごとに断面図として付図C-1～C-8に示す。図26-1に示すように、室番号1が玄関、1階の廊下、および階段室の1

階部分，2番が便所，3番が1階の6帖和室，4番が台所兼食堂，5番が洗面脱衣室と浴室，6番が2階の6帖和室，7番が2階の廊下，8番が2階の4.5帖和室である。

(2) 実施状況

各室へのトレーサーガス注入は，内径6mmのビニールチューブを通して，各室の天井ぎわのコーナーから行い，チューブの先端には攪拌ファンを取り付けた。室番号1，4，5の各室には注入口の対角にあたる天井ぎわのコーナーにも攪拌ファンを取り付けてトレーサーガスが一樣となるようにした。

風向風速の計測には超音波風向風速計を当建物の屋上の地上12mに設置し，データの収録には，前述のデータロガーおよびパーソナルコンピューターを用いた。

当建物においては，測定総日数6日分のデータをとった。その際の天候，測定時間等の一覧表を表4に示す。

表4 換気測定の実施状況

測定実施日	天候	測定時間
10月1日	曇のち晴	18時40分～22時10分
10月2日	晴	17時20分～21時40分
10月3日	晴	11時10分～18時10分
10月4日	曇	8時40分～18時10分
10月5日	曇のち雨	8時50分～16時10分
10月7日	晴	9時10分～16時10分

(3) 測定結果

測定は10月1日～10月5日および10月7日に行った。各測定日の部屋の温度変化を図27～図32に示す。各々の測定日の風向，風速を図33～図38に示す。

換気風量の結果は10月1日と10月2日は1つつつ，10月3日，10月4日，10月5日，および10月7日は2つつつ得られた。それぞれの結果を図39～図48に示す。

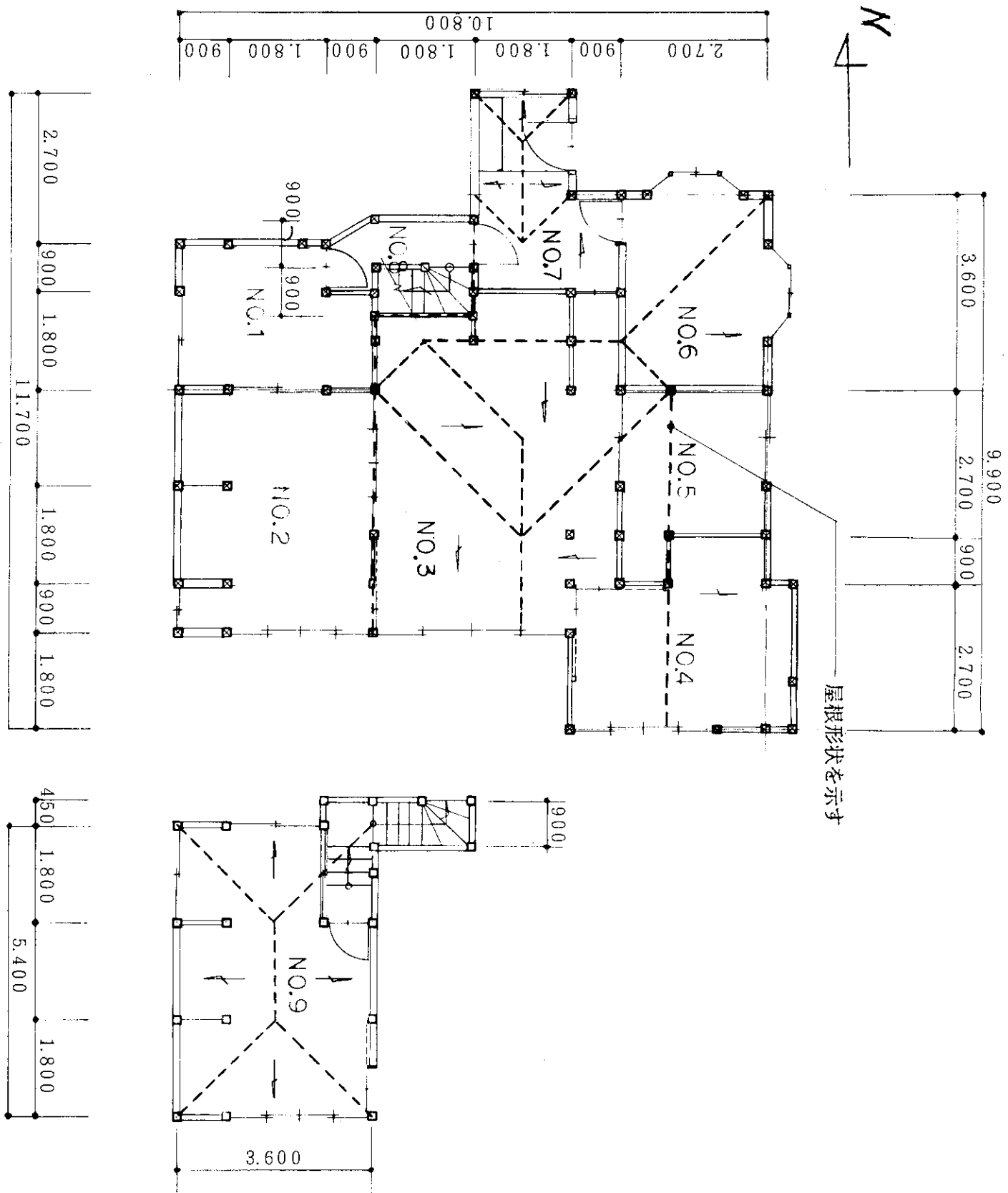
表5に換気率測定時の温度差，風速，および換気回数をまとめたものを示す。

10個の実験結果が得られ，換気回数は0.80～1.72回/時であった。換気回数が大きかった10月1日は風速，温度差の両方とも大きかった。全体として風速と温度差の小さい場合は換気回数が小さい傾向を示した。

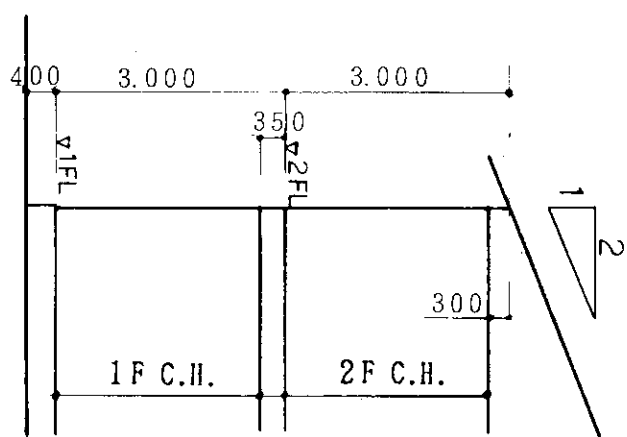
10月2日のような場合，玄関①の外気流入量の大きいのが目立つが，これは鉄筋コンクリート集合住宅の場合と同様，郵便受開口部が通気路となっているためと考えられる。

表5 鉄筋コンクリート2階建テラスハウスの換気率測定結果

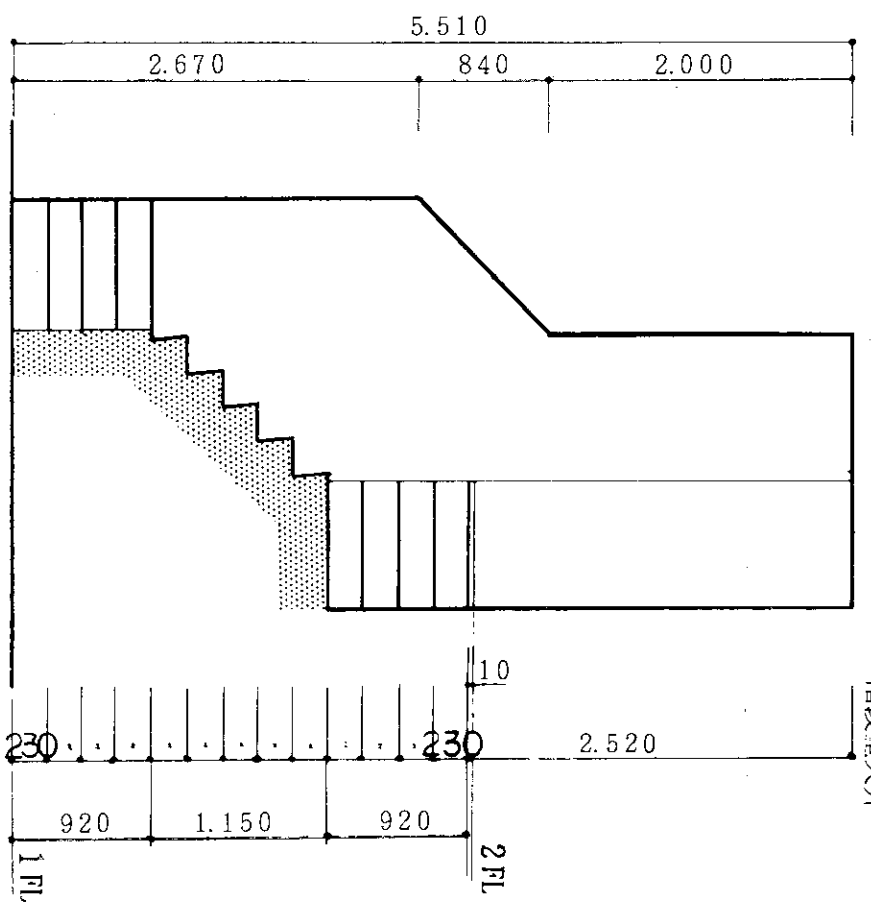
実測日時	風 向	風 速 (m/s)	温度差 (℃)	換気回数 (回/時)
10月 1日	W ~ NW	0.9	3.12	1.72
10月 2日	N ~ NE	0.3	2.08	1.59
10月 3日(1)	E ~ SE	0.5	0.94	1.10
10月 3日(2)	E ~ SW	0.4	1.50	1.16
10月 4日(1)	S ~ SW	0.2	0.86	0.80
10月 4日(2)	E ~ SW	0.2	0.32	0.93
10月 5日(1)	S ~ NW	0.4	0.92	1.04
10月 5日(2)	N ~ NW	0.3	0.58	0.96
10月 7日(1)	SE ~ W	0.4	0.79	1.06
10月 7日(2)	E ~ S	0.6	0.70	0.95



— : 屋根勾配を示す。
 - - - : 屋根形状を示す。



断面図 S : 1/100



階段断面図 S : 1/50

平面図 (含 屋根伏) S : 1/100

図 3 木造家屋の平面図 (含屋根伏)・断面図・階段断面

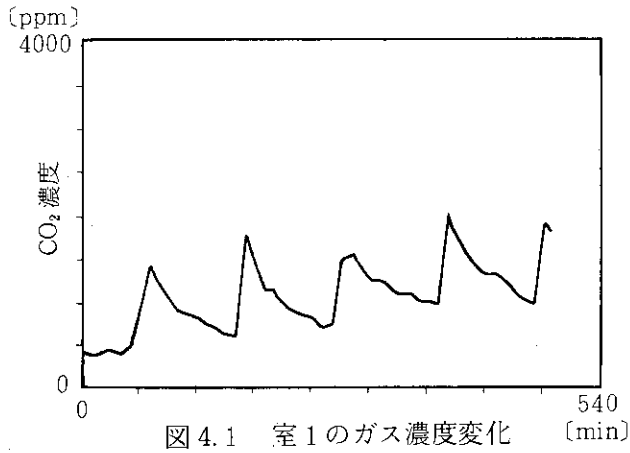


図 4.1 室1のガス濃度変化 [min]

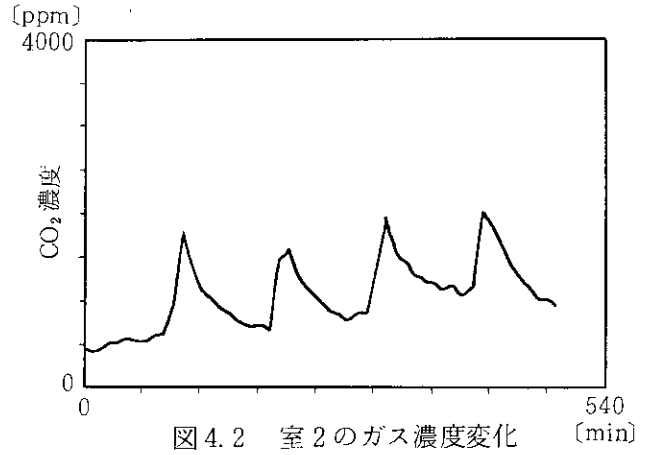


図 4.2 室2のガス濃度変化 [min]

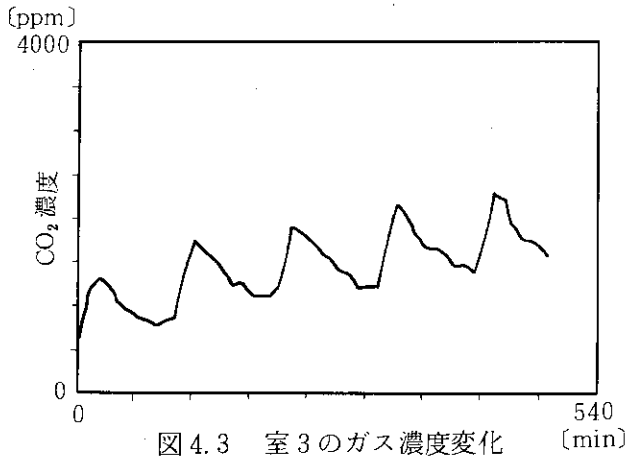


図 4.3 室3のガス濃度変化 [min]

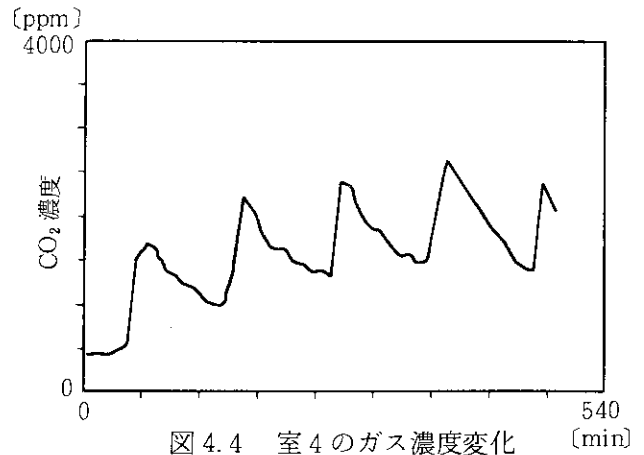


図 4.4 室4のガス濃度変化 [min]

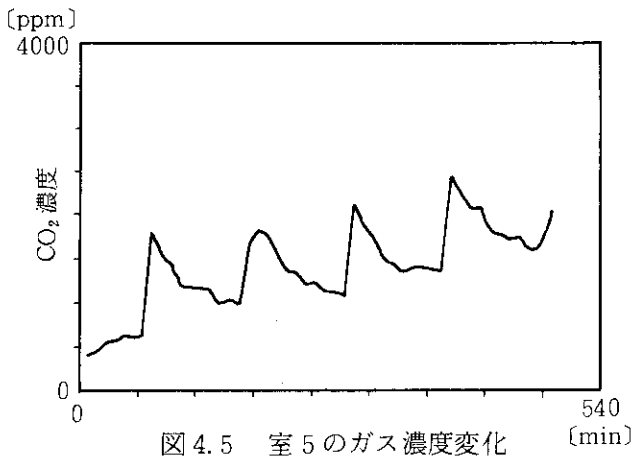


図 4.5 室5のガス濃度変化 [min]

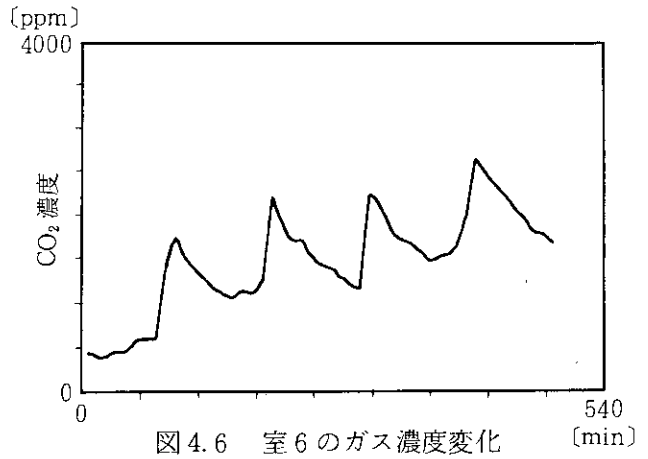


図 4.6 室6のガス濃度変化 [min]

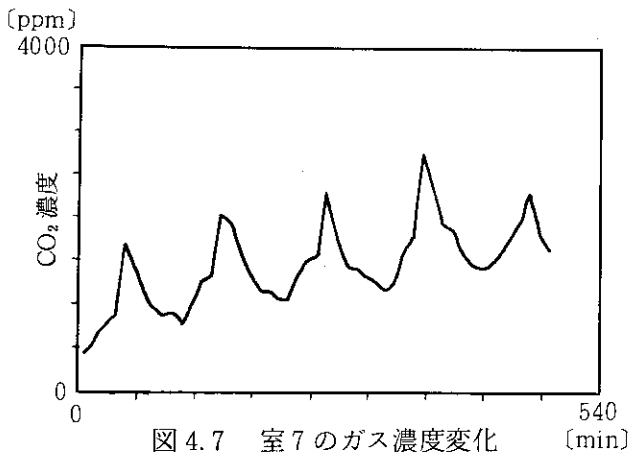


図 4.7 室7のガス濃度変化 [min]

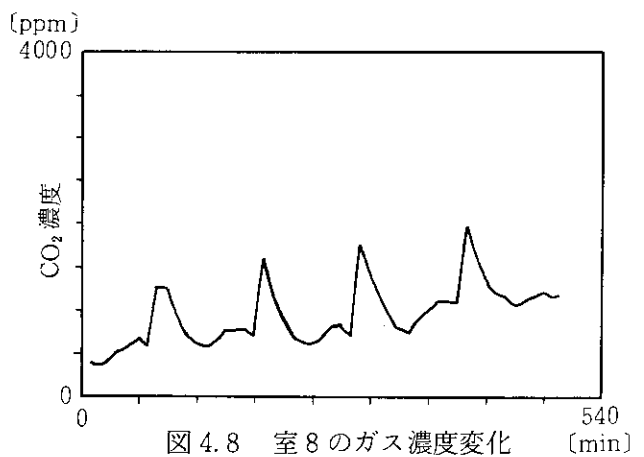


図 4.8 室8のガス濃度変化 [min]

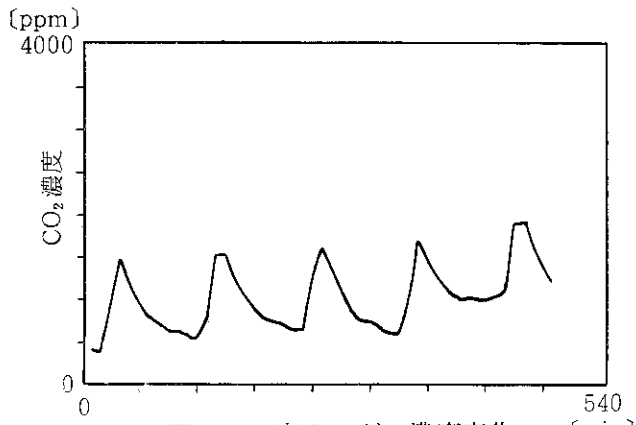


図 4.9 室 9 のガス濃度変化 [min]

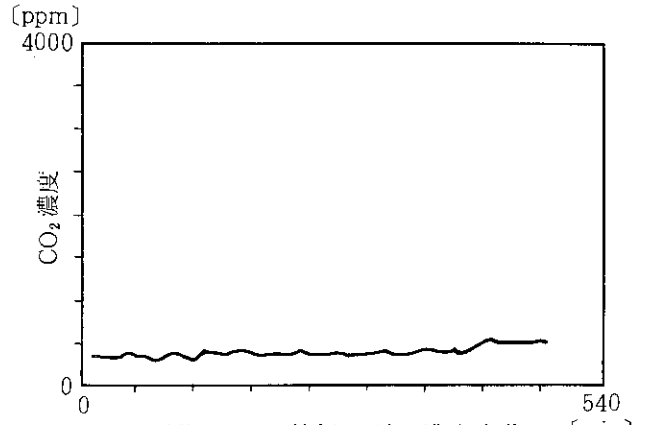


図 4.10 外気 のガス濃度変化 [min]

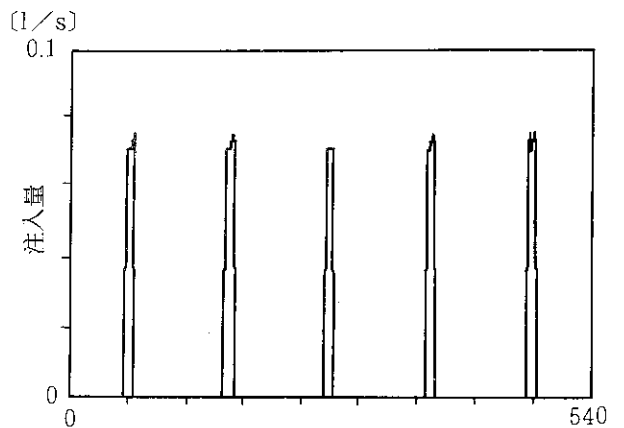


図 5.1 室 1 へのガス注入流量 [min]

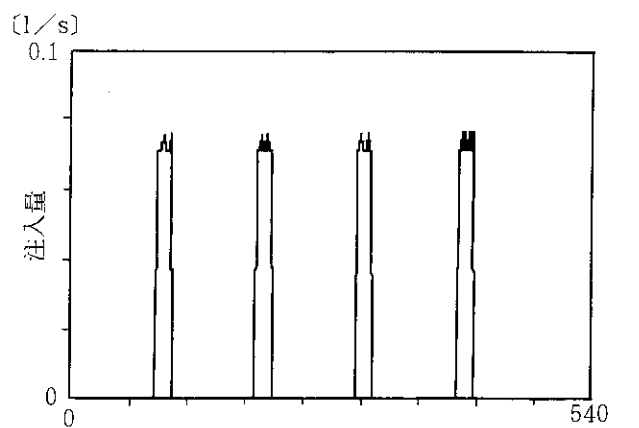


図 5.2 室 2 へのガス注入流量 [min]

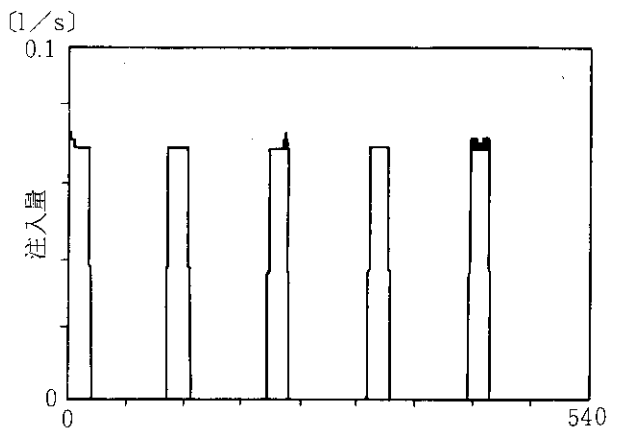


図 5.3 室 3 へのガス注入流量 [min]

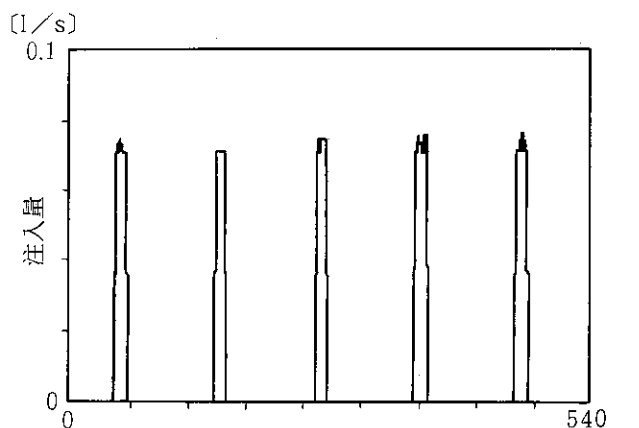


図 5.4 室 4 へのガス注入流量 [min]

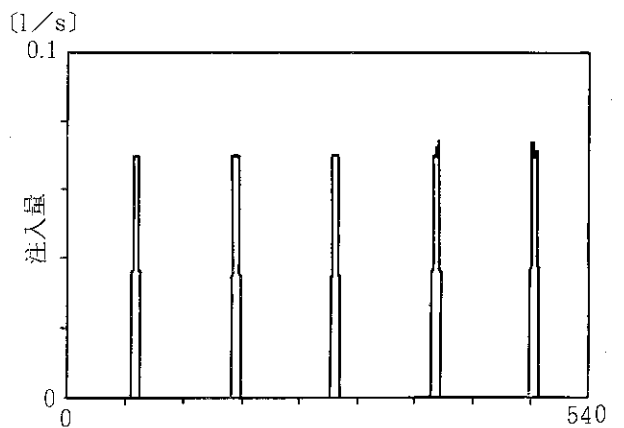


図 5.5 室 5 へのガス注入流量 [min]

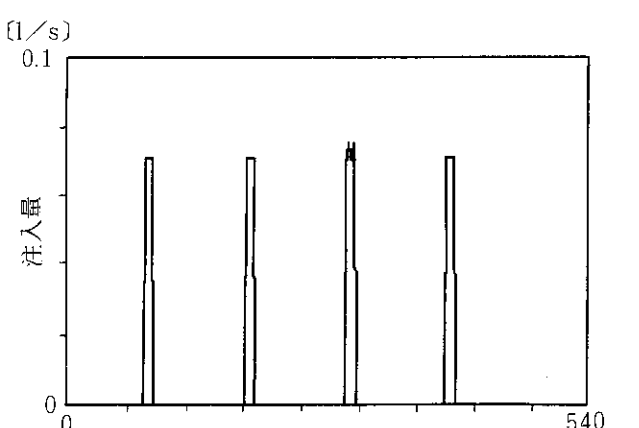


図 5.6 室 6 へのガス注入流量 [min]

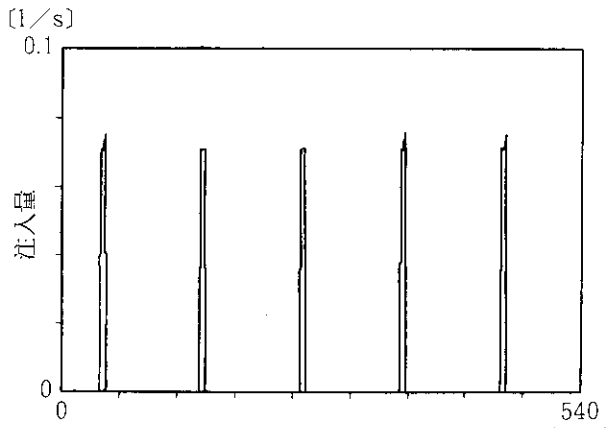


図 5.7 室7へのガス注入流量 [min]

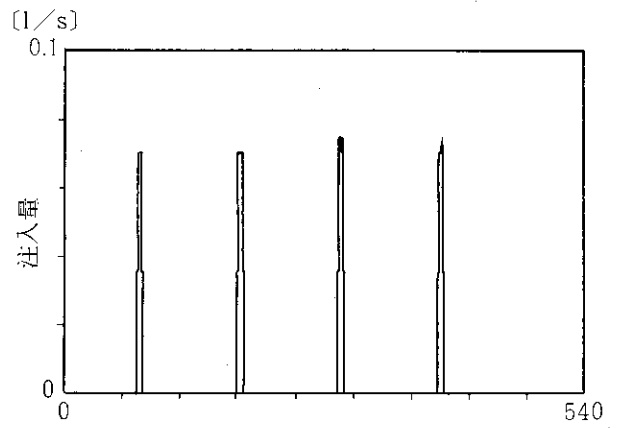


図 5.8 室8へのガス注入流量 [min]

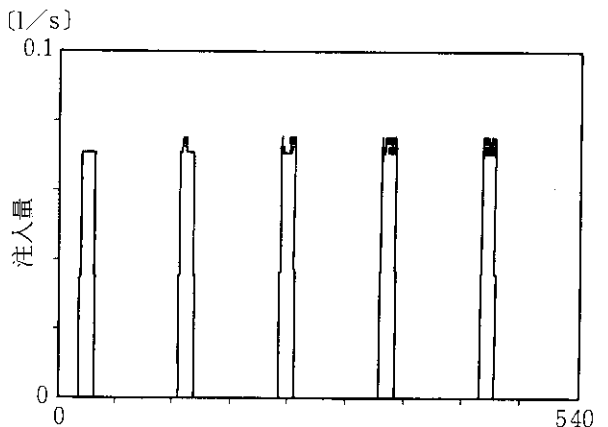


図 5.9 室9へのガス注入流量 [min]

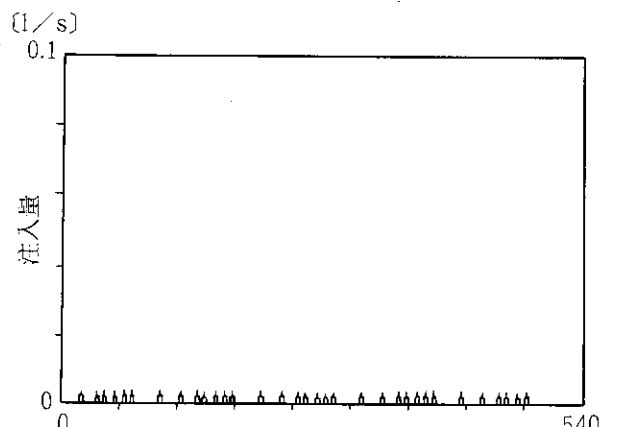


図 5.10 外気へのガス注入流量 [min]

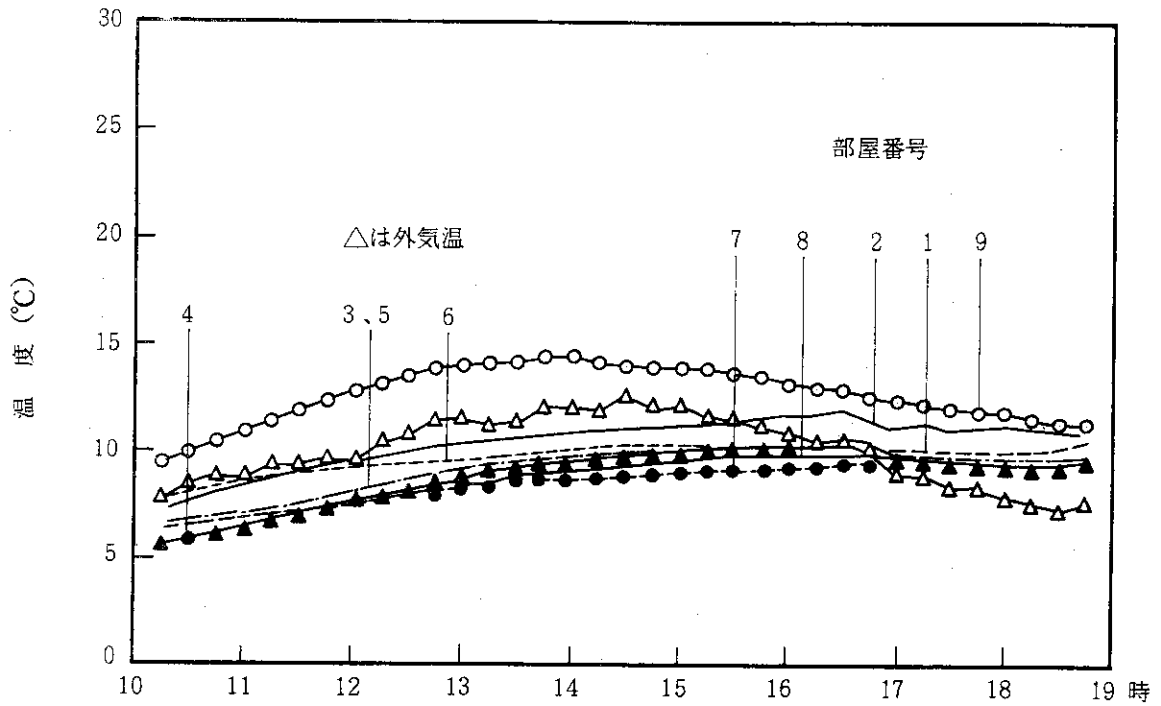


図6 木造家屋の実験時の温度変化（11月29日）

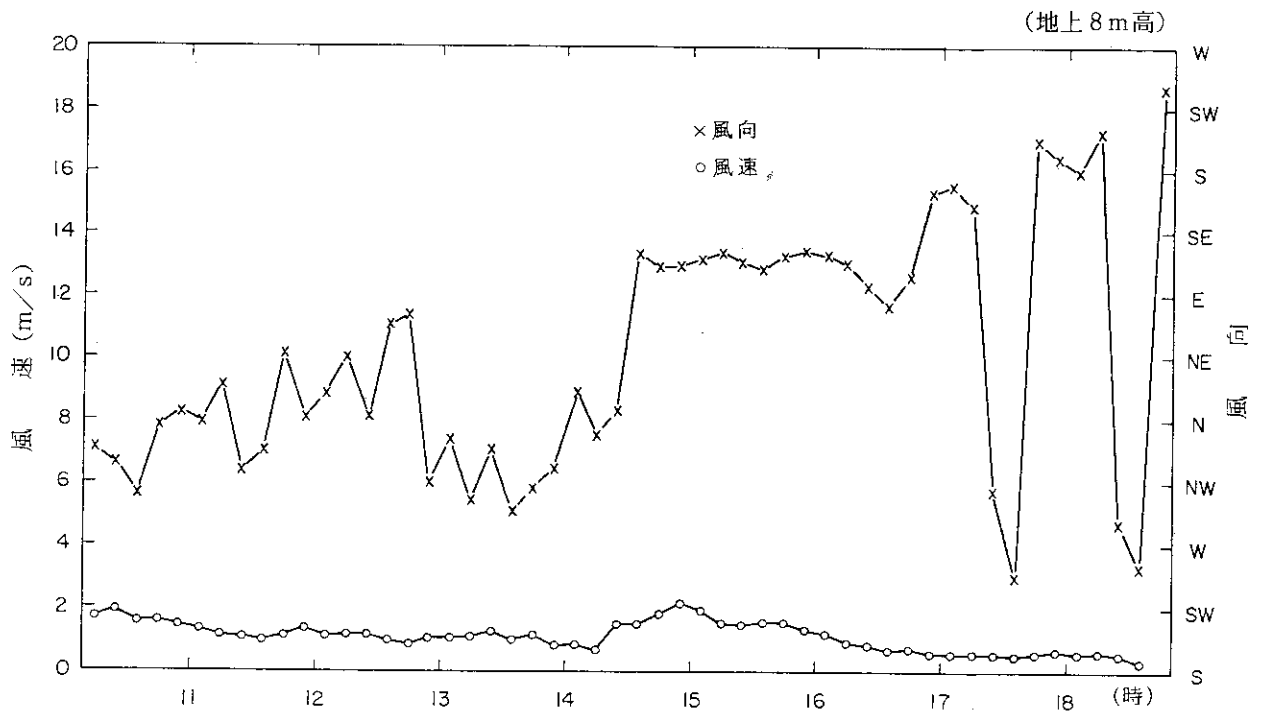


図7 木造家屋の実験時における風向風速（11月29日）

11月29日

各室の容積

- | | |
|------------------------|------------------------|
| ① 22.29 m ³ | ⑥ 25.45 m ³ |
| ② 42.37 m ³ | ⑦ 17.14 m ³ |
| ③ 66.12 m ³ | ⑧ 16.43 m ³ |
| ④ 31.86 m ³ | ⑨ 46.15 m ³ |
| ⑤ 20.79 m ³ | 計 289 m ³ |

風 向 南東～北
 風 速 0～2 m/s (平均値 1.07 m/s)
 換気回数 0.77 回/h
 外 気 温 10.06 °C
 平均室温 9.89 °C
 温 度 差 -0.17 °C
 総換気風量 222.7 m³/h

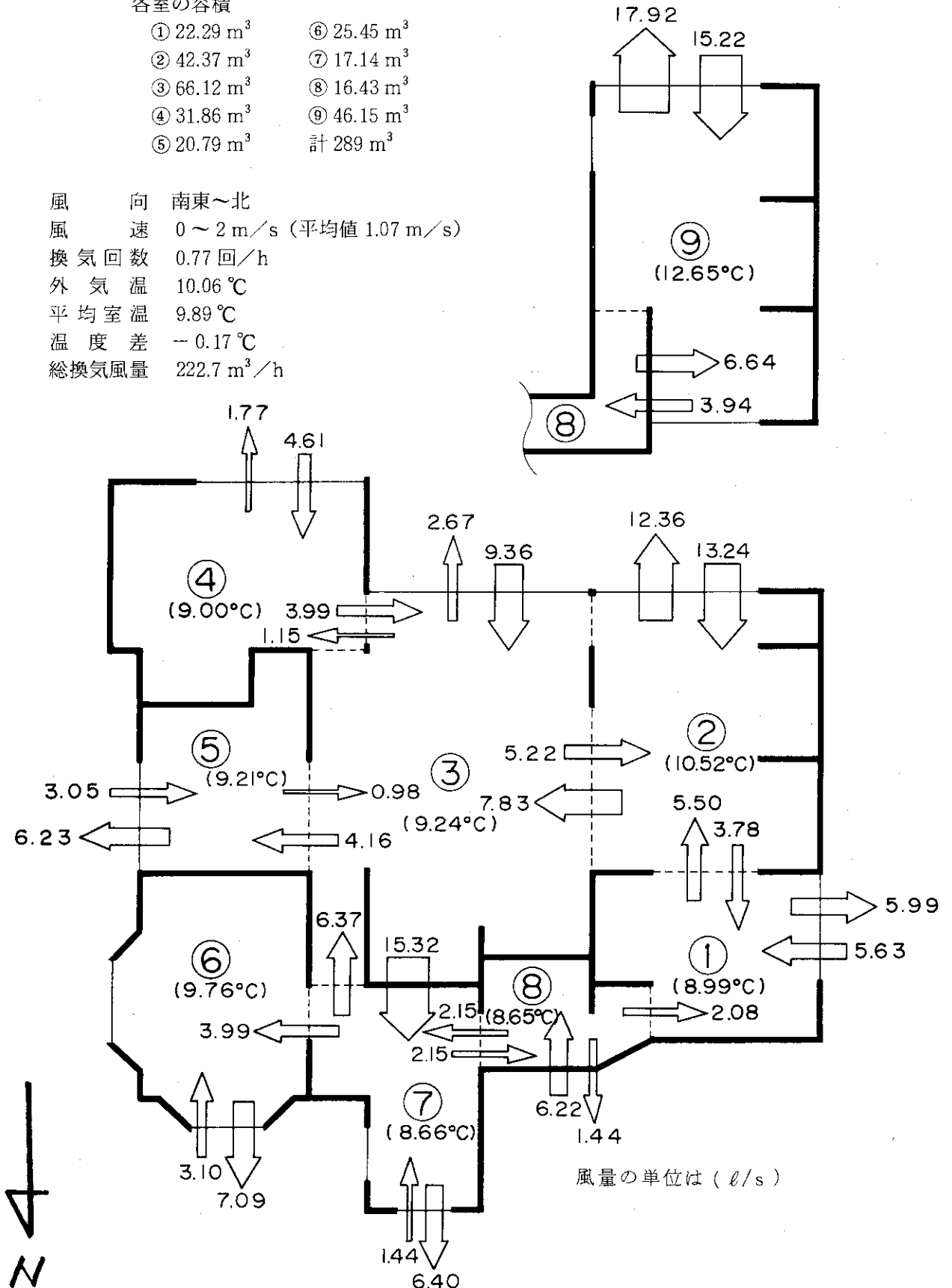


図8 木造家屋の換気風量の分布

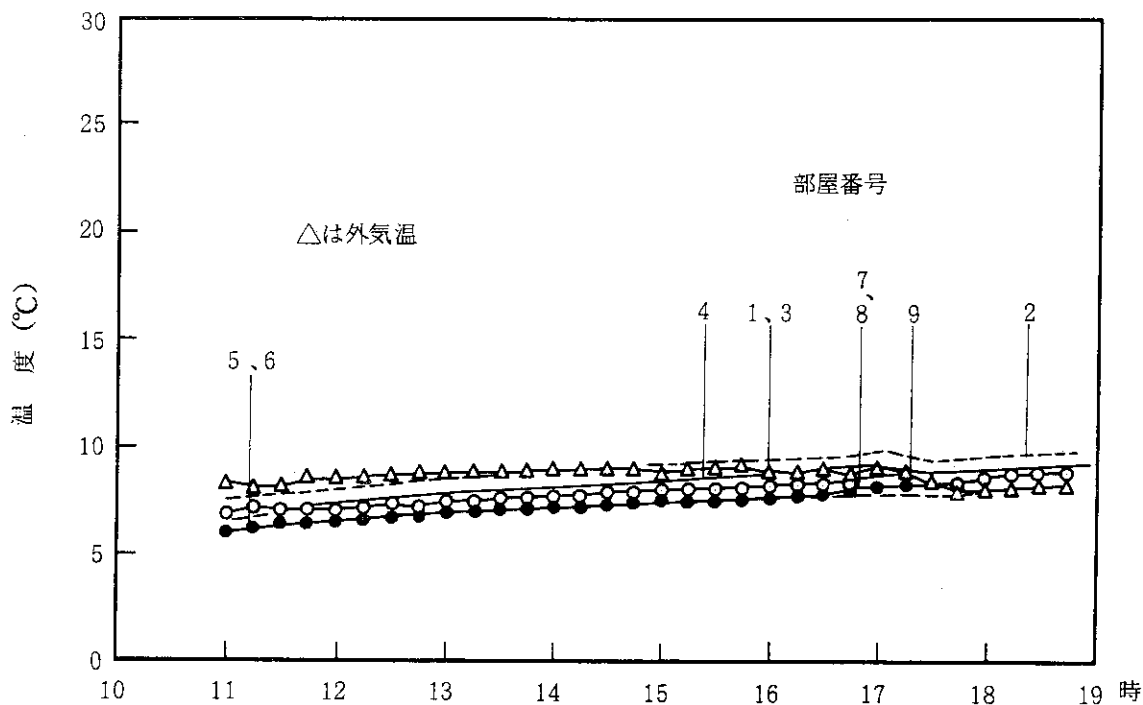


図9 木造家屋の実験時の温度変化 (12月1日)

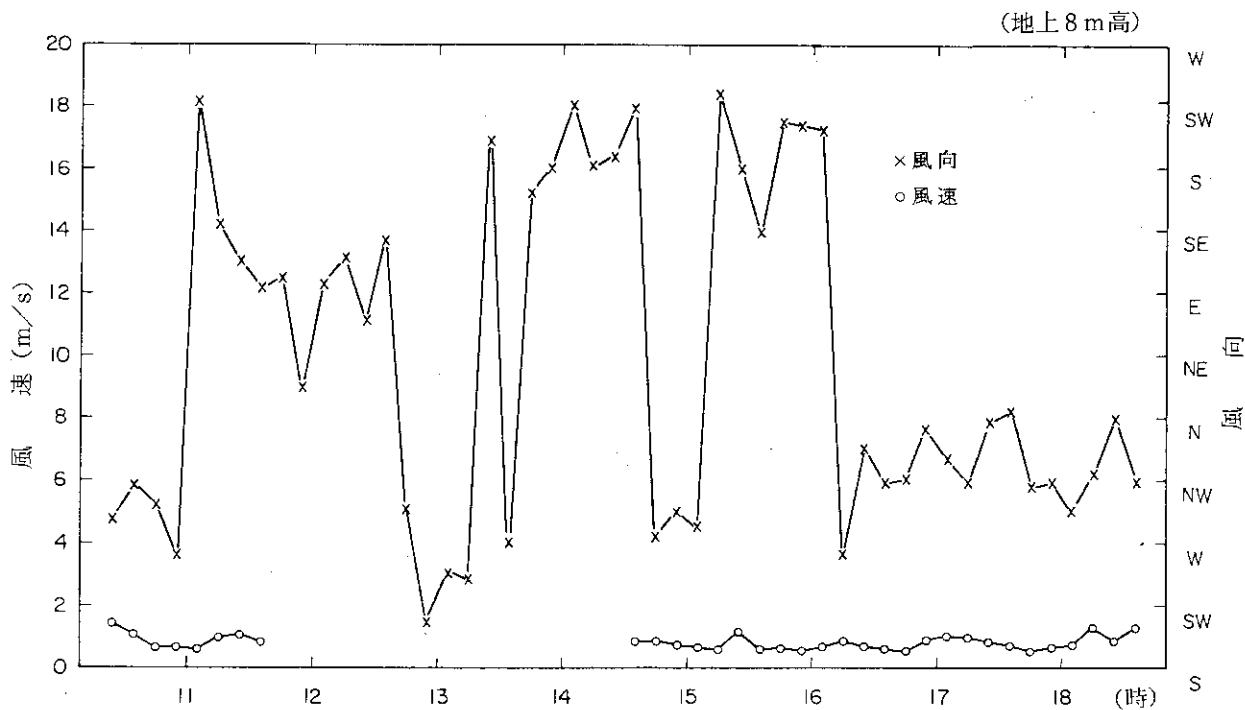


図10 木造家屋の実験時の風向風速 (12月1日)

12月1日

各室の容積

- | | |
|------------------------|------------------------|
| ① 22.29 m ³ | ⑥ 25.45 m ³ |
| ② 42.37 m ³ | ⑦ 17.14 m ³ |
| ③ 66.12 m ³ | ⑧ 16.43 m ³ |
| ④ 31.86 m ³ | ⑨ 46.15 m ³ |
| ⑤ 20.79 m ³ | 計 289 m ³ |

風 向 東～北西
 風 速 0～1.5 m/s (平均値 0.84 m/s)
 換気回数 0.83 回/h
 外気温 8.55 °C
 平均室温 7.80 °C
 温度差 -0.75 °C
 総換気風量 238.9 m³/h

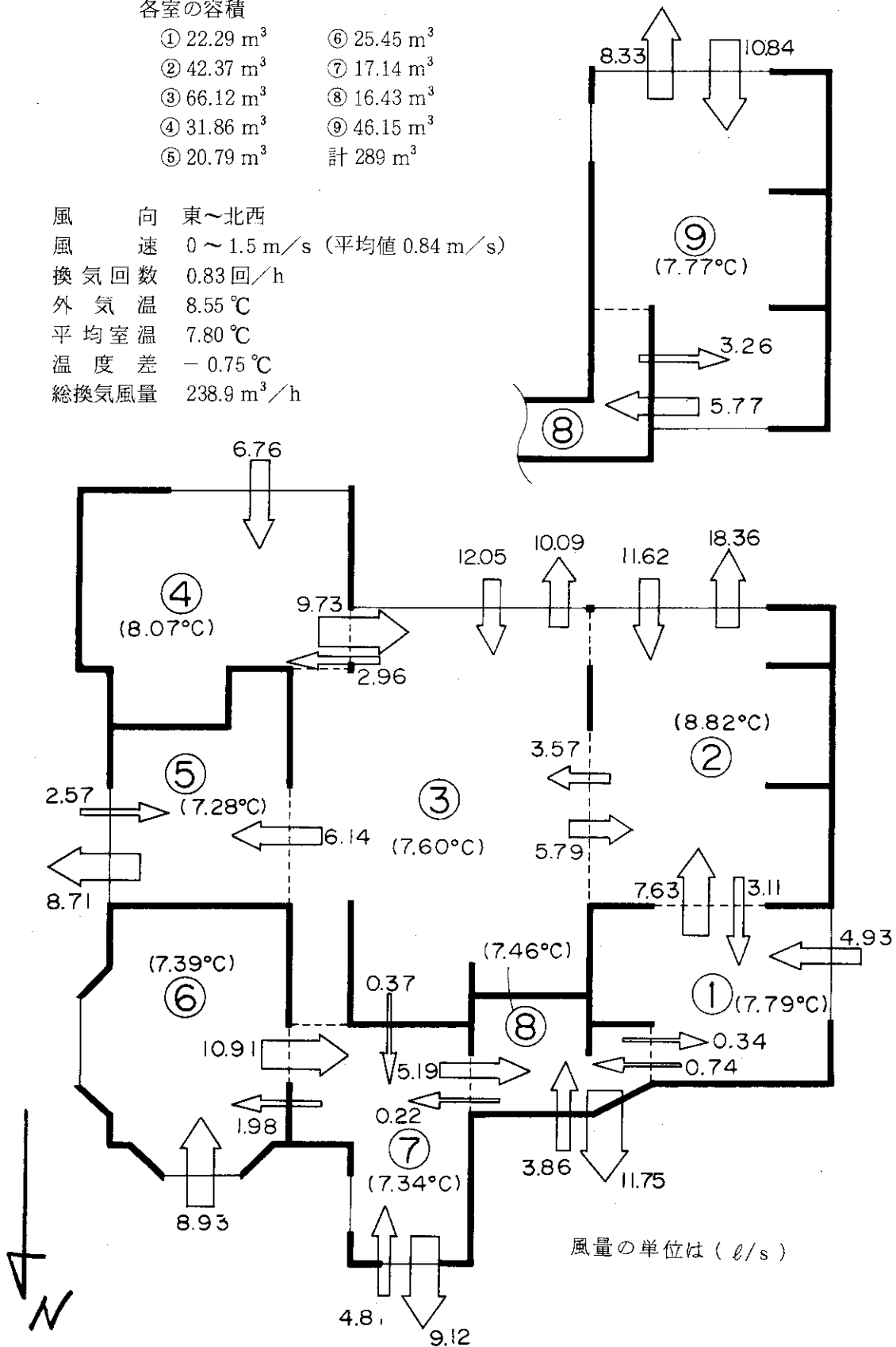


図 11 木造家屋の換気風量の分布

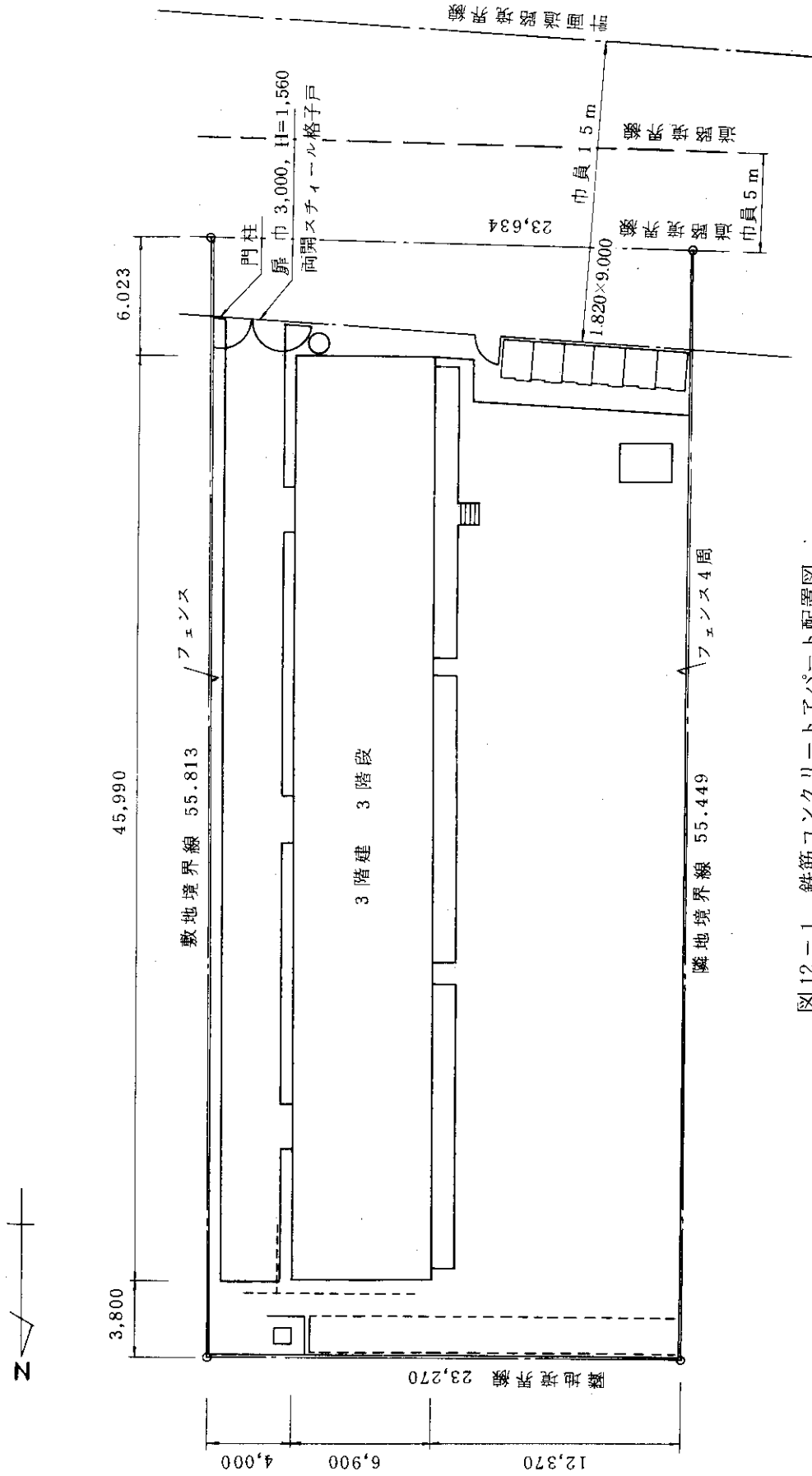


図12-1 鉄筋コンクリートアパート配置図

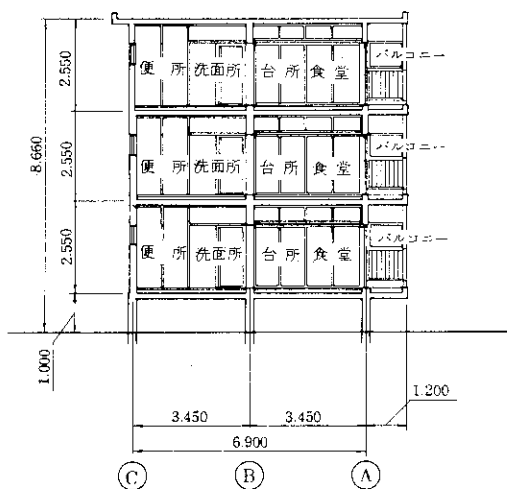


図 12 - 2 鉄筋コンクリートアパート断面図

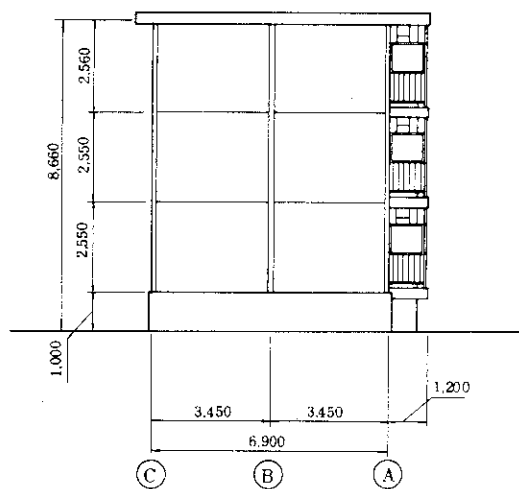


図 12 - 3 鉄筋コンクリートアパート北 立面図

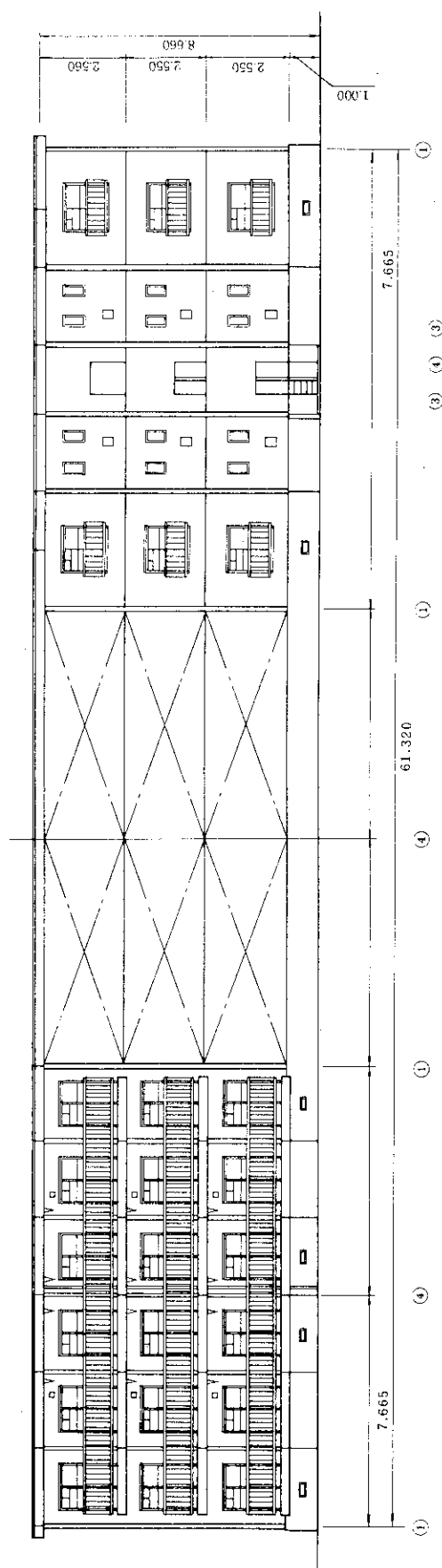


図 12 - 5 鉄筋コンクリートアパート東 立面図

図 12 - 4 鉄筋コンクリートアパート西 立面図

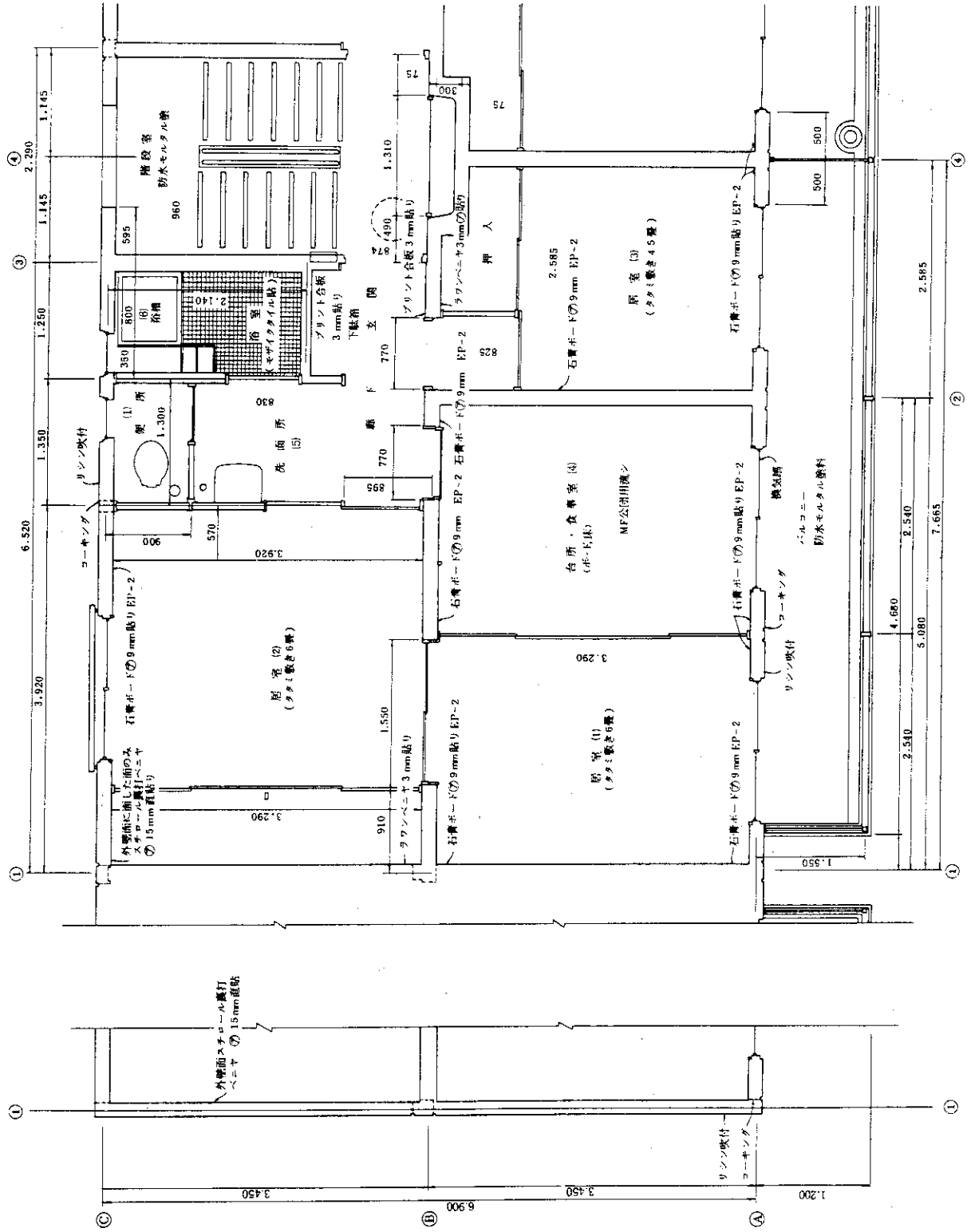


図 13 鉄筋コンクリートアパート間取り図

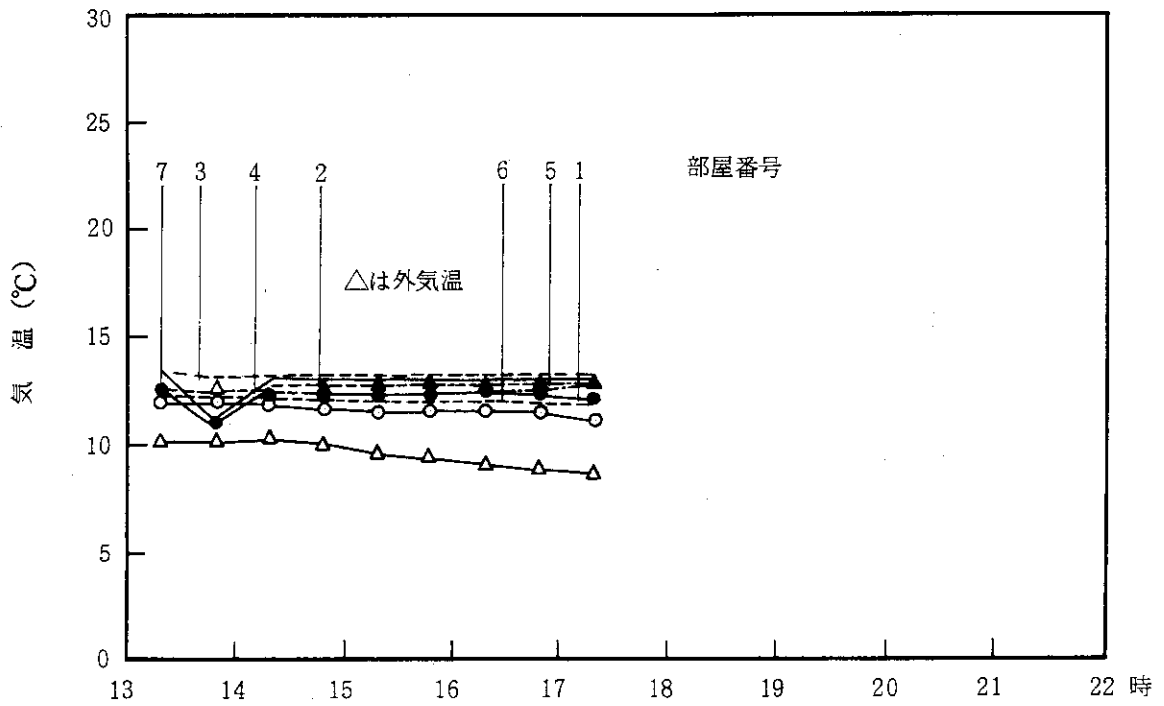


図 14 鉄筋コンクリートアパートの実験時の温度変化 (11月19日)

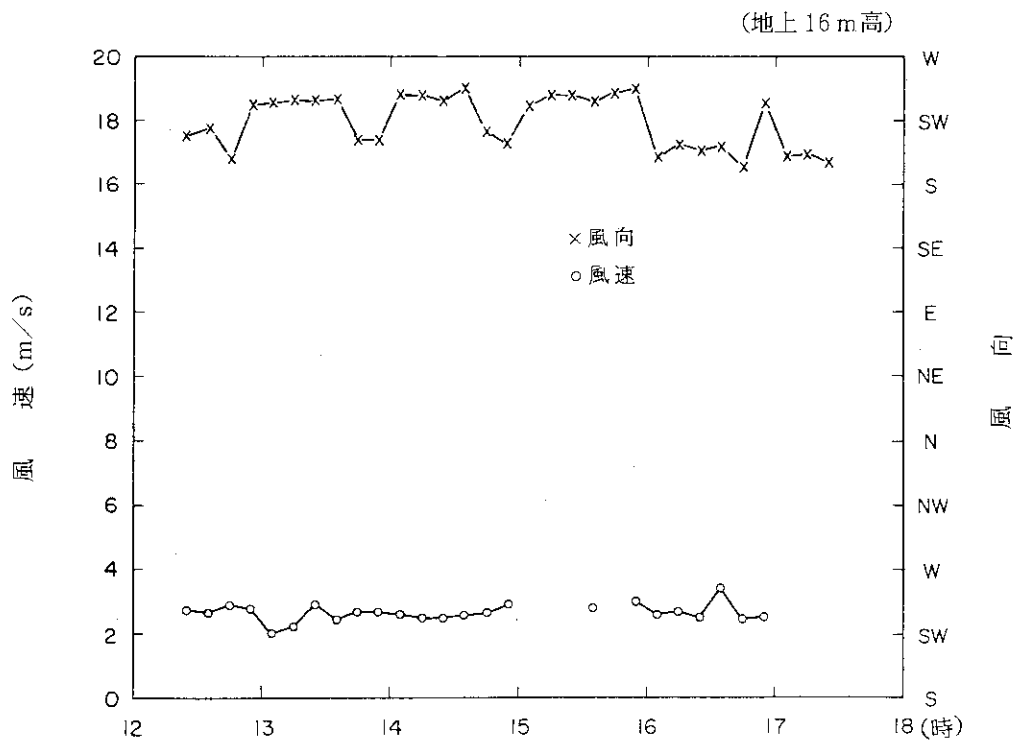


図 15 鉄筋コンクリートアパートの実験時の風向風速 (11月19日)

11月19日

風 向 南南西～西南西

各室の容積

風 速 2～3 m/s (平均値 2.69 m/s)

① 17.80 m³

⑤ 11.90 m³

換気回数 1.19回/h

② 26.10 m³

⑥ 5.00 m³

外気温 9.75℃

③ 14.60 m³

⑦ 2.40 m³

平均室温 12.69℃

④ 17.20 m³

計 95.00 m³

温度差 2.94℃

総換気風量 113.3 m³/h

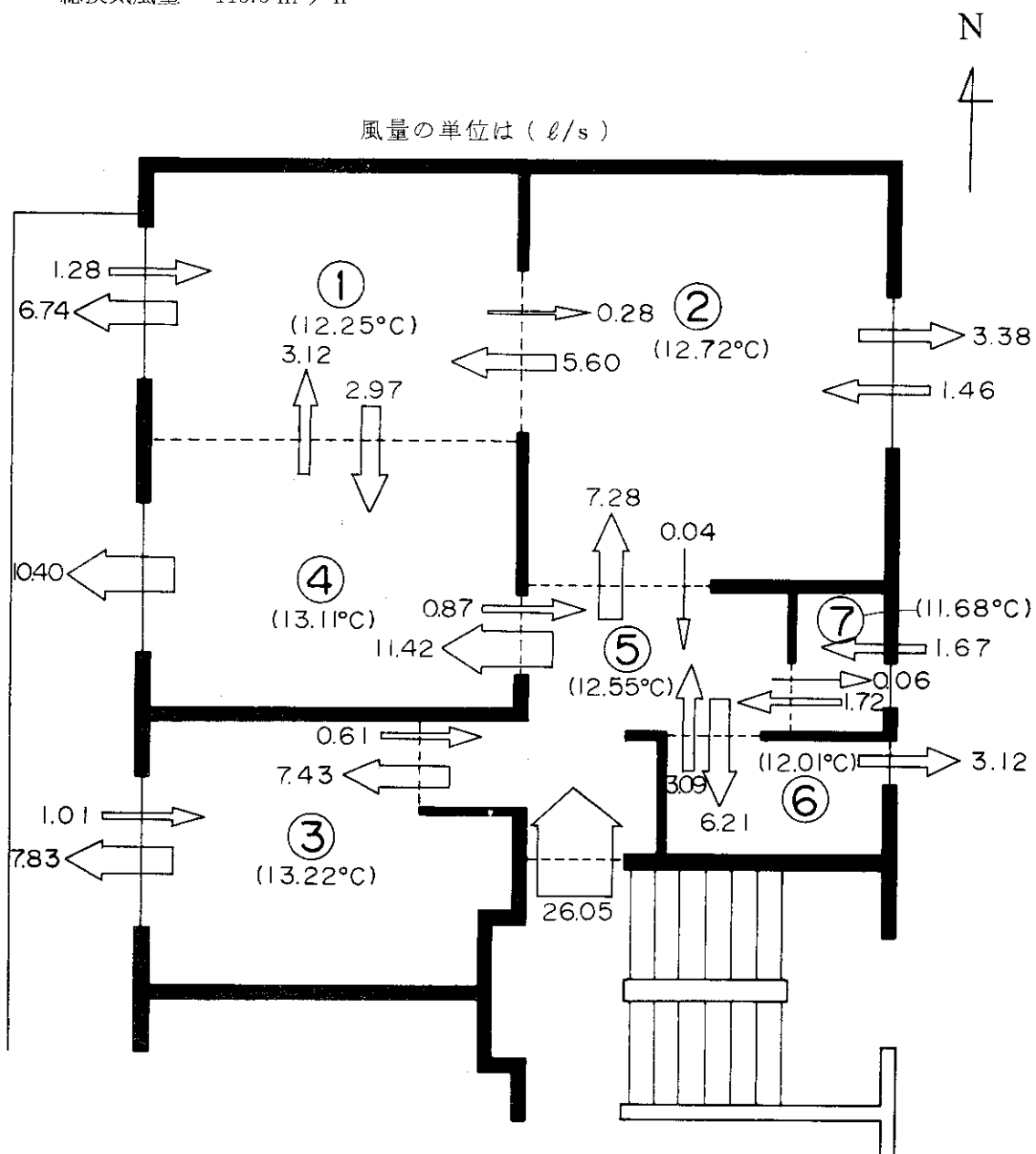


図 16 鉄筋コンクリートアパートの換気風量の分布

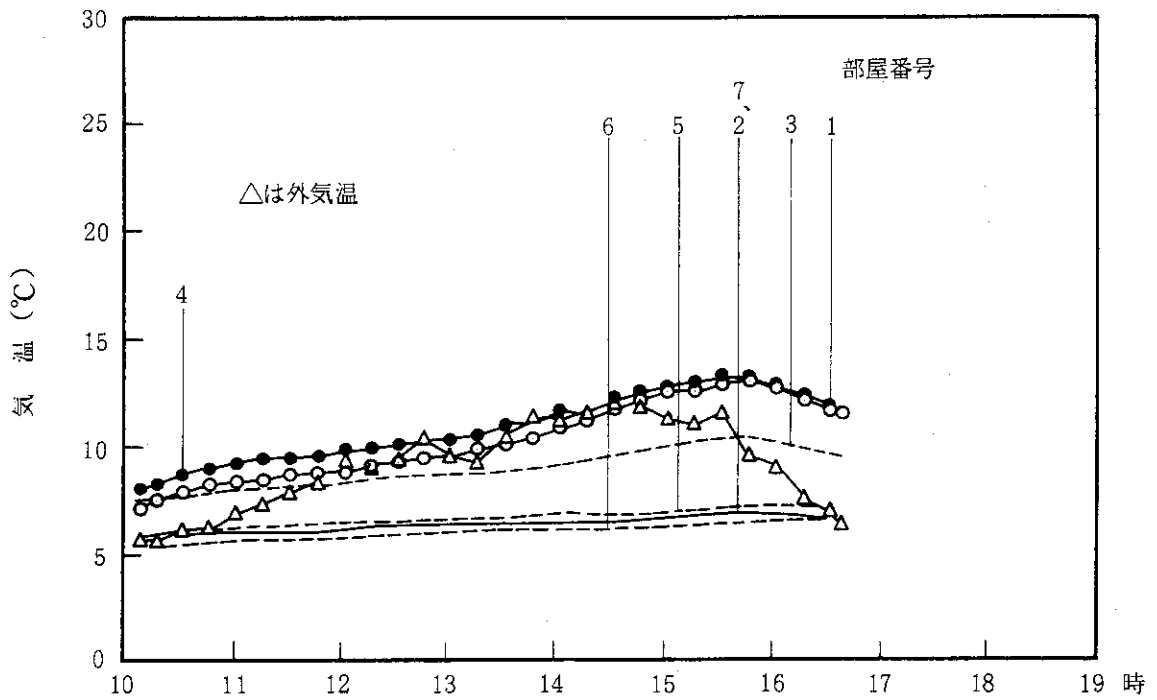


図17 鉄筋コンクリートアパートの実験時の温度変化 (1月21日)

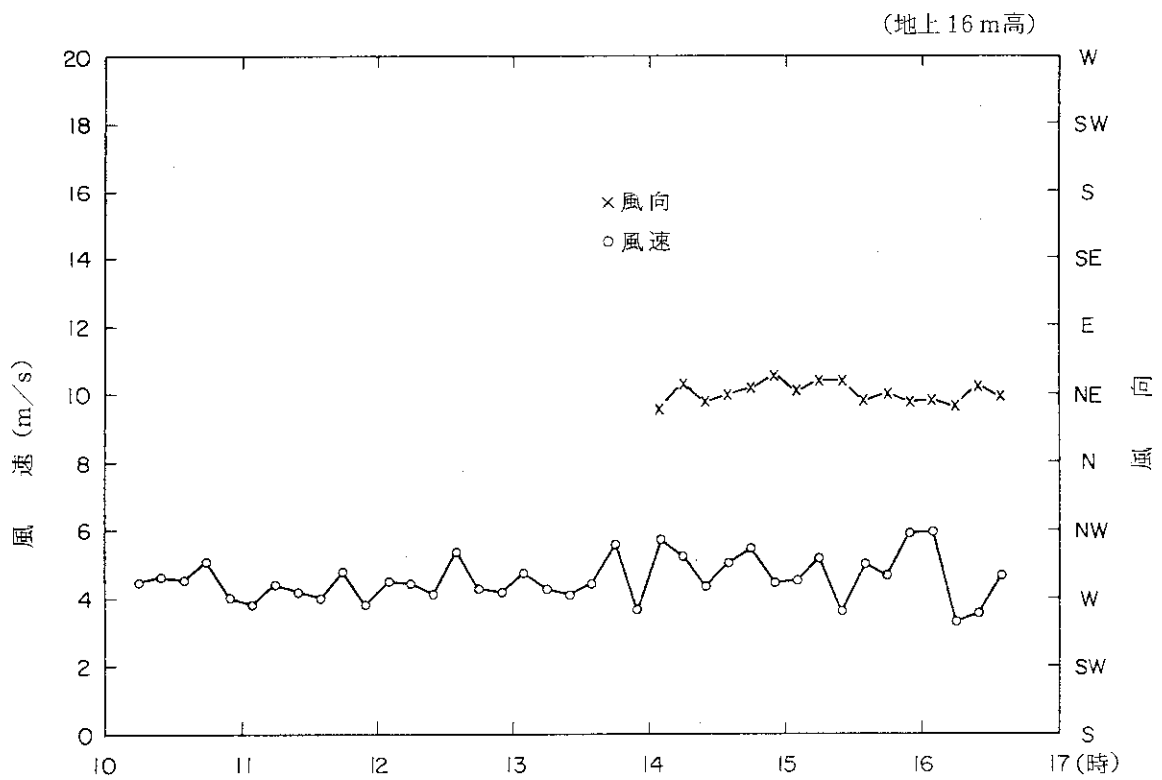


図18 鉄筋コンクリートアパートの実験時の風向風速 (1月21日)

1月21日

風 向 北東

風 速 4 ~ 5 m/s (平均値 4.58 m/s)

換気回数 0.92回/h

外 気 温 9.00 °C

平均室温 8.29 °C

温 度 差 - 0.71 °C

総換気風量 87.4 m³/h

各室の容積

① 17.80 m³

⑤ 11.90 m³

② 26.10 m³

⑥ 5.00 m³

③ 14.60 m³

⑦ 2.40 m³

④ 17.20 m³

計 95.00 m³

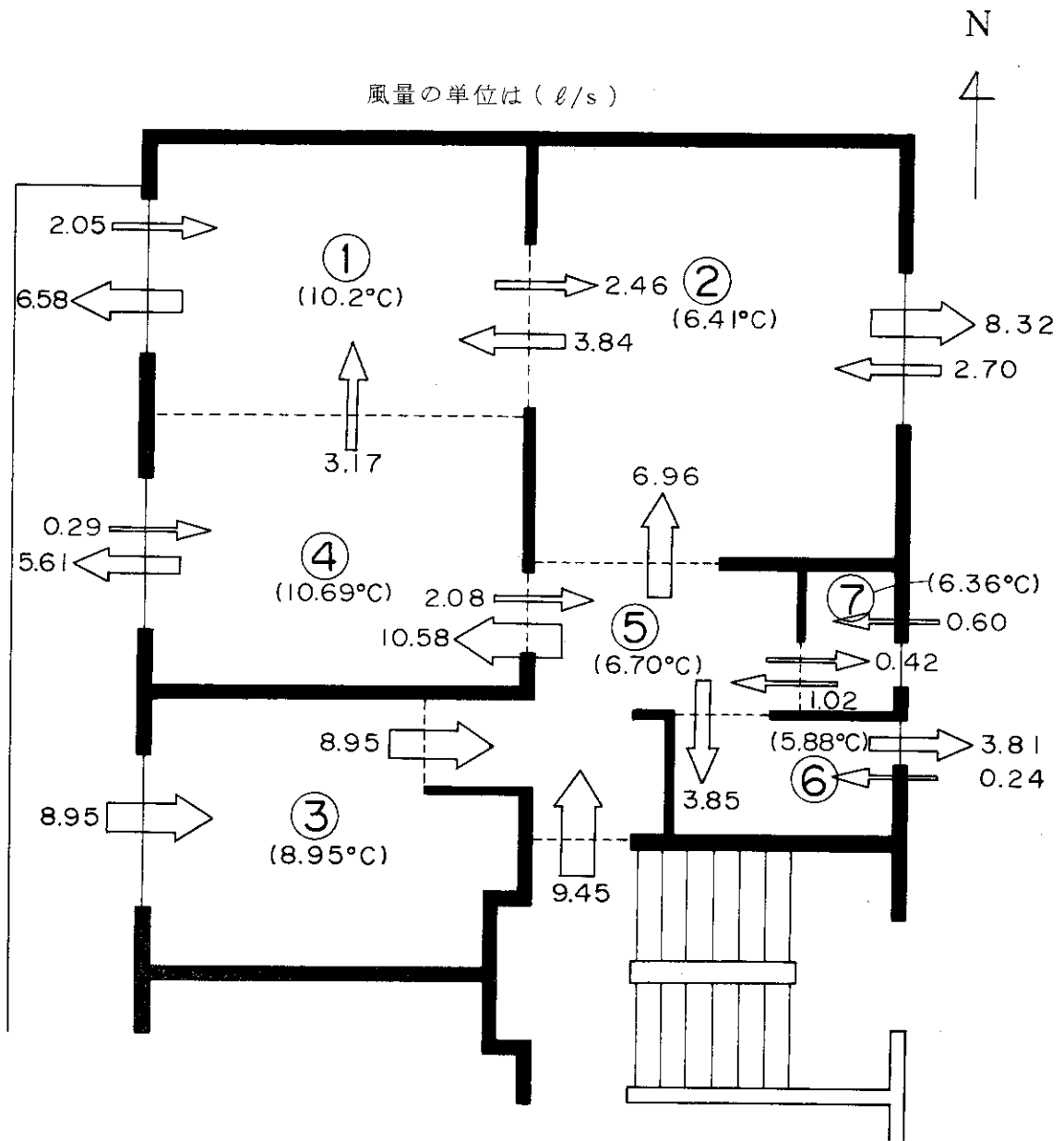


図 19 鉄筋コンクリートアパートの換気風量の分布

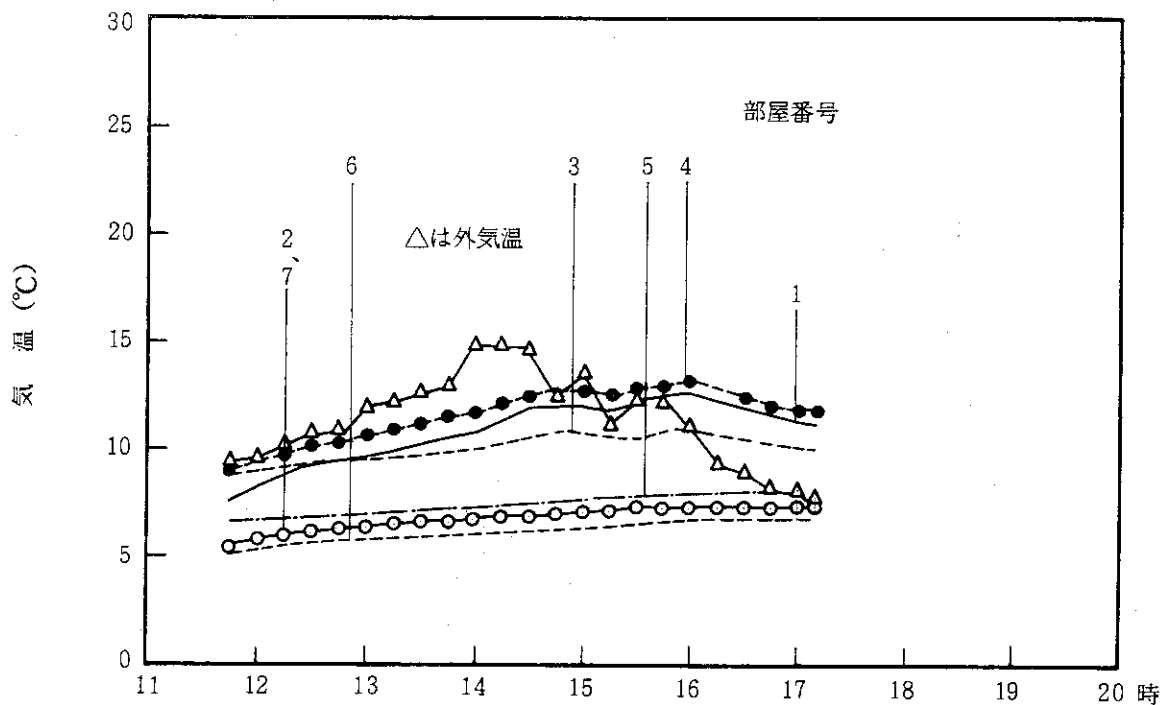


図 20 鉄筋コンクリートアパートの実験時の温度変化 (1月23日)

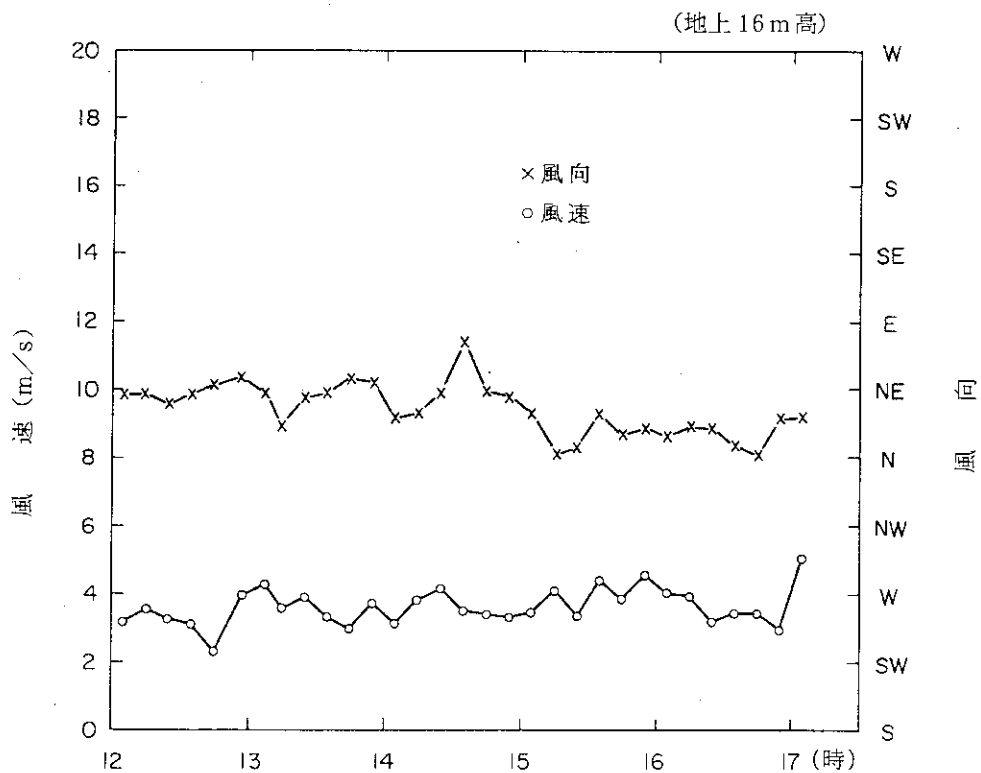


図 21 鉄筋コンクリートアパートの実験時の風向風速 (1月23日)

1月23日

風 向 北～北東

各室の容積

風 速 3～5 m/s (平均値 3.65 m/s)

① 17.80 m³

⑤ 11.90 m³

換気回数 0.96 回/h

② 26.10 m³

⑥ 5.00 m³

外 気 温 11.27 °C

③ 14.60 m³

⑦ 2.40 m³

平均室温 8.95 °C

④ 17.20 m³

計 95.00 m³

温 度 差 - 2.32 °C

総換気風量 91.1 m³/h

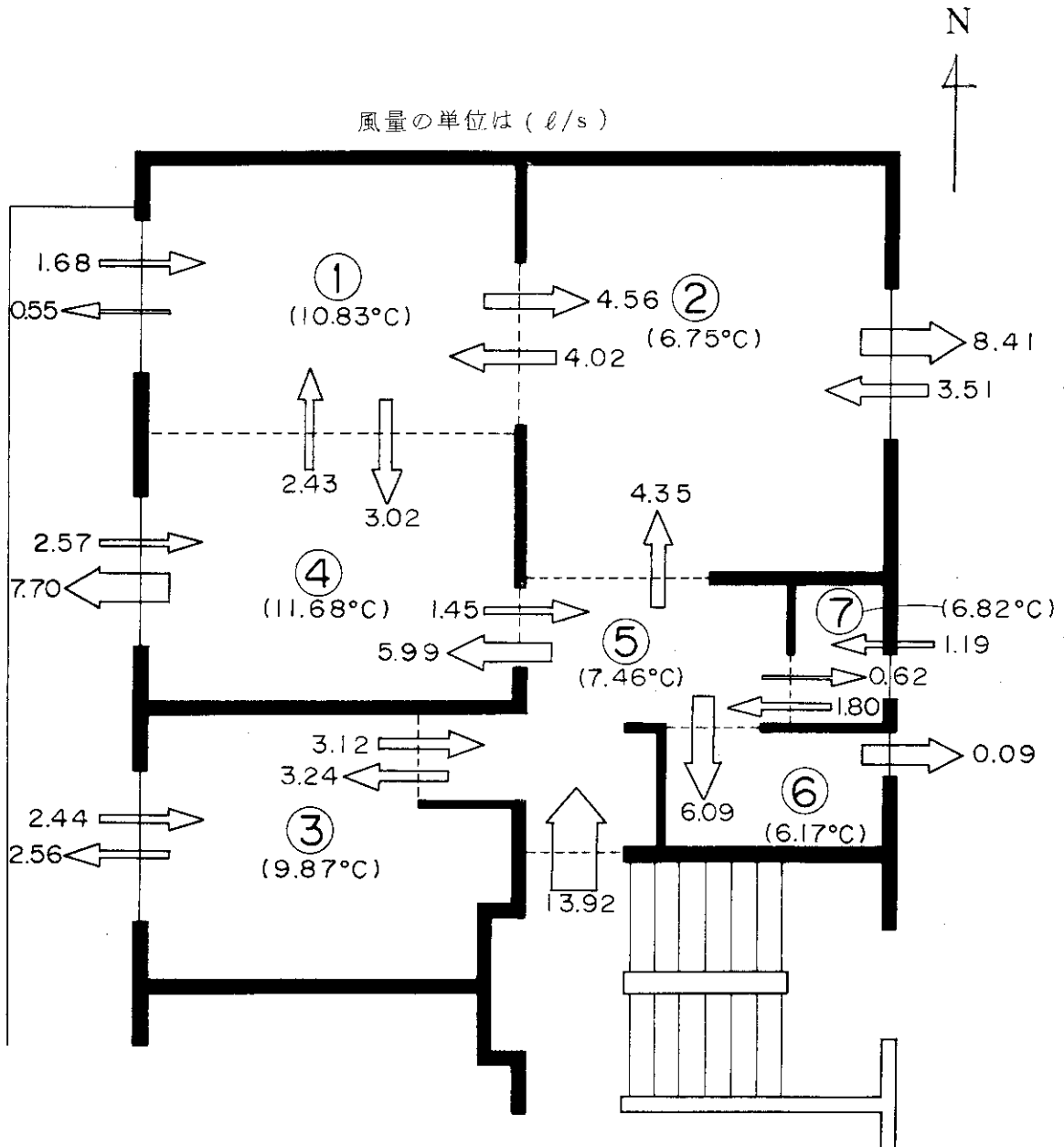


図 22 鉄筋コンクリートアパートの換気風量の分布

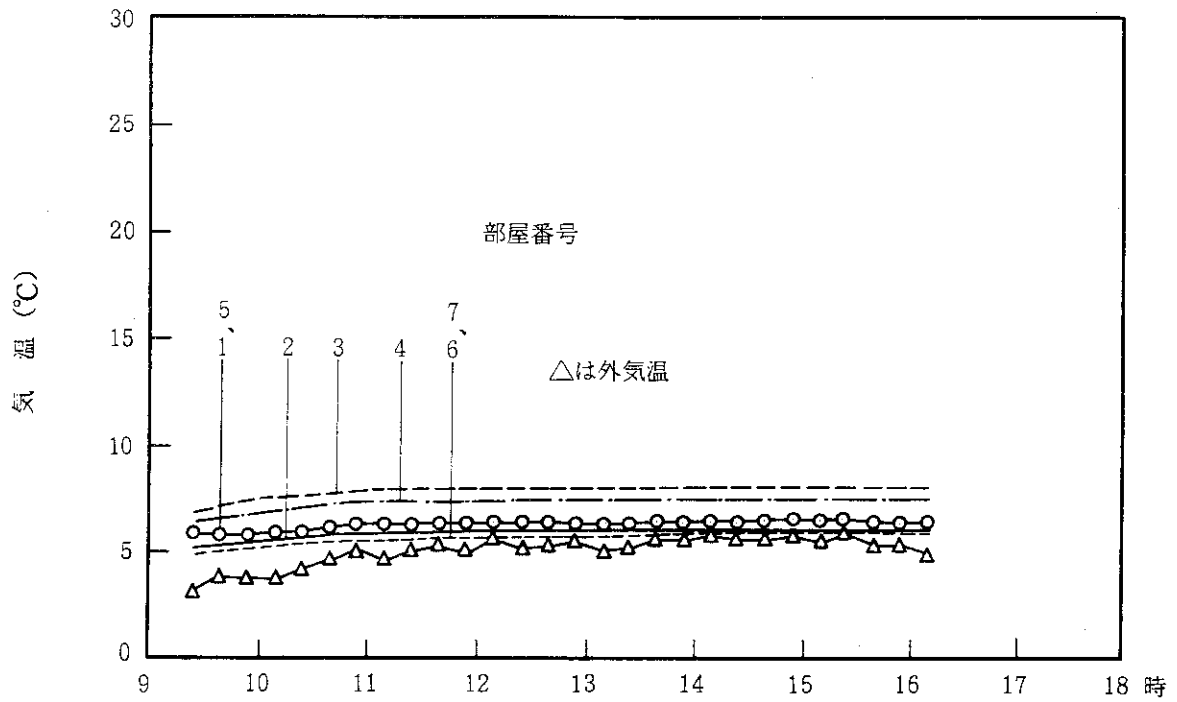


図 23 鉄筋コンクリートアパートの実験時の温度変化 (1月24日)

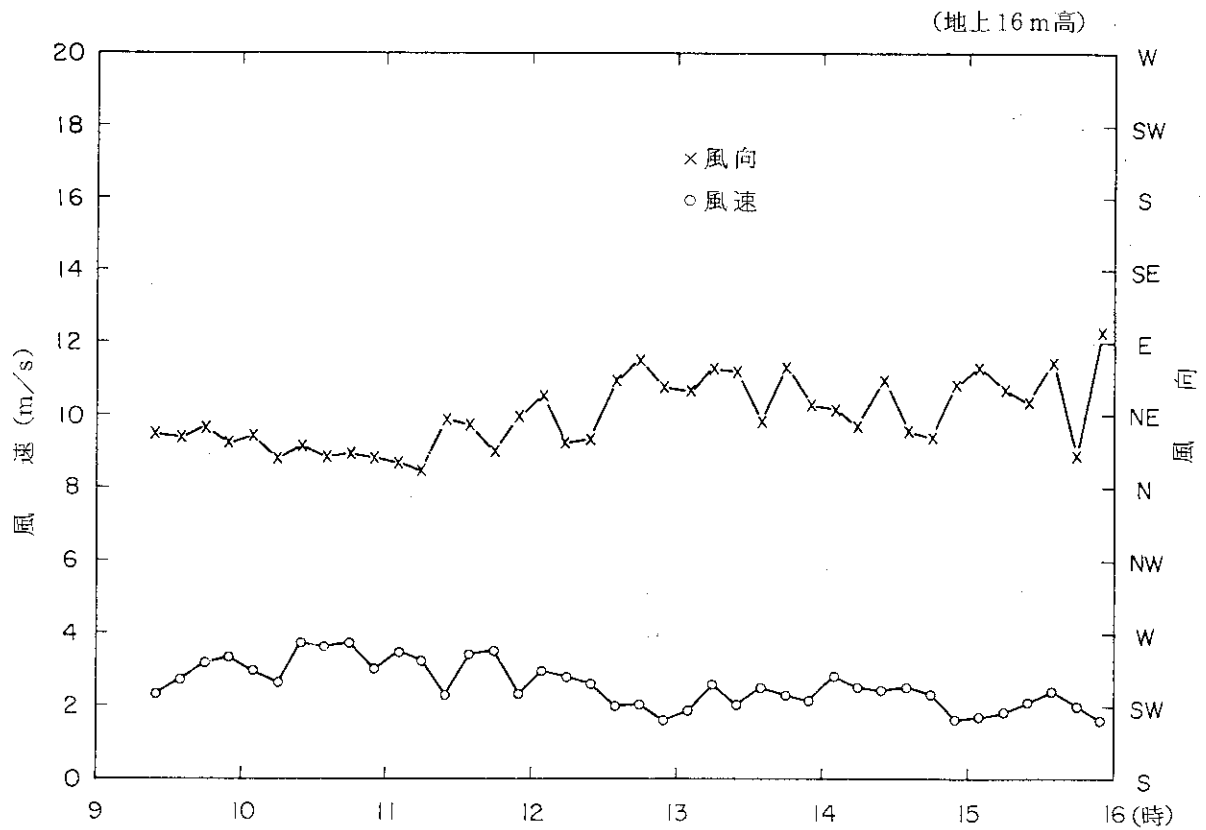


図 24 鉄筋コンクリートアパートの実験時の風向風速 (1月24日)

1月24日

風 向 北北東～東北東

各室の容積

風 速 2～4 m/s (平均値 2.56 m/s)

① 17.80 m³ ⑤ 11.00 m³

換気回数 1.02回/h

② 26.10 m³ ⑥ 5.00 m³

外 気 温 5.11 °C

③ 14.60 m³ ⑦ 2.40 m³

平均室温 6.63 °C

④ 17.20 m³ 計 95.00 m³

温 度 差 1.52 °C

総換気風量 96.3 m³/h

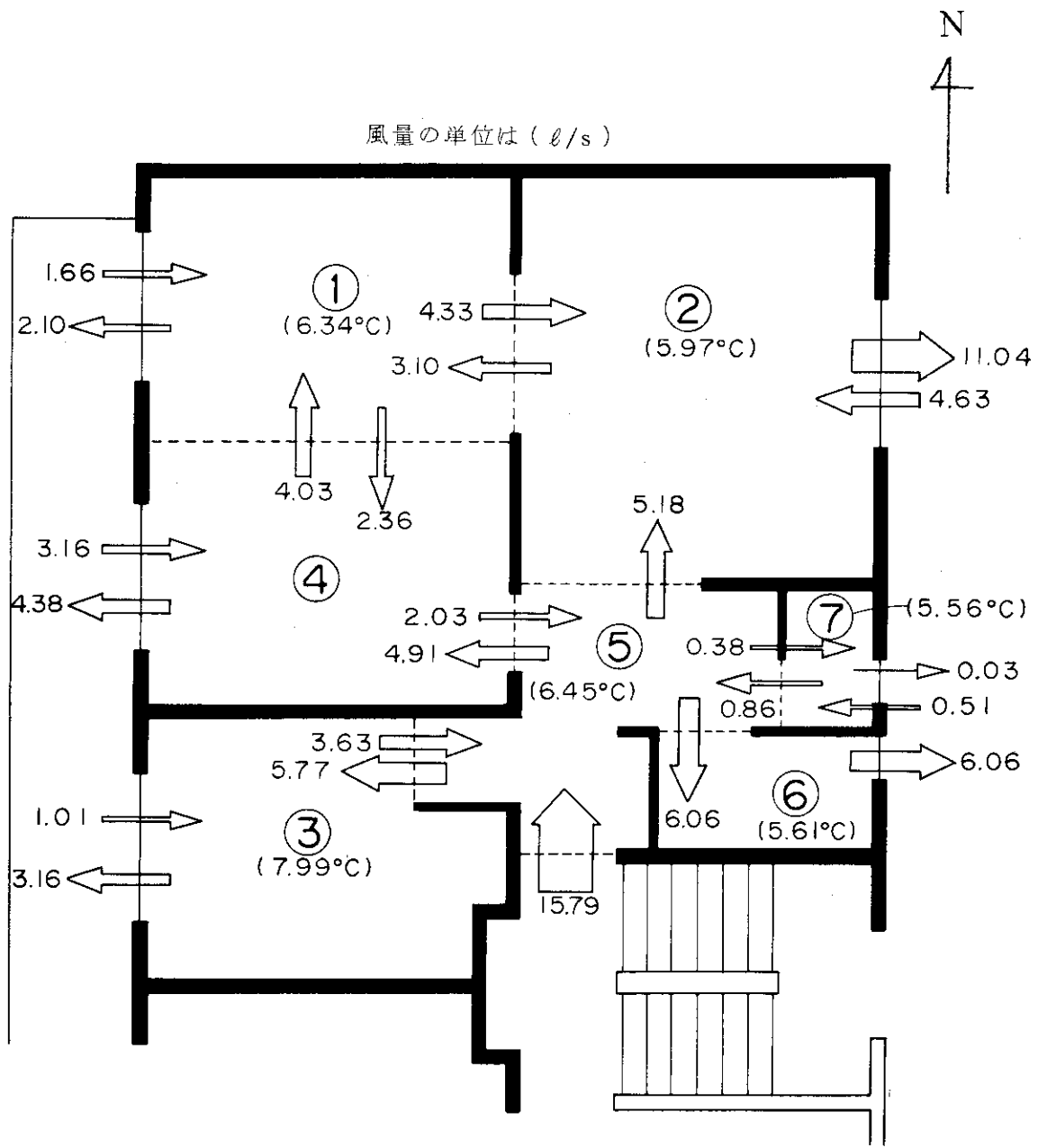
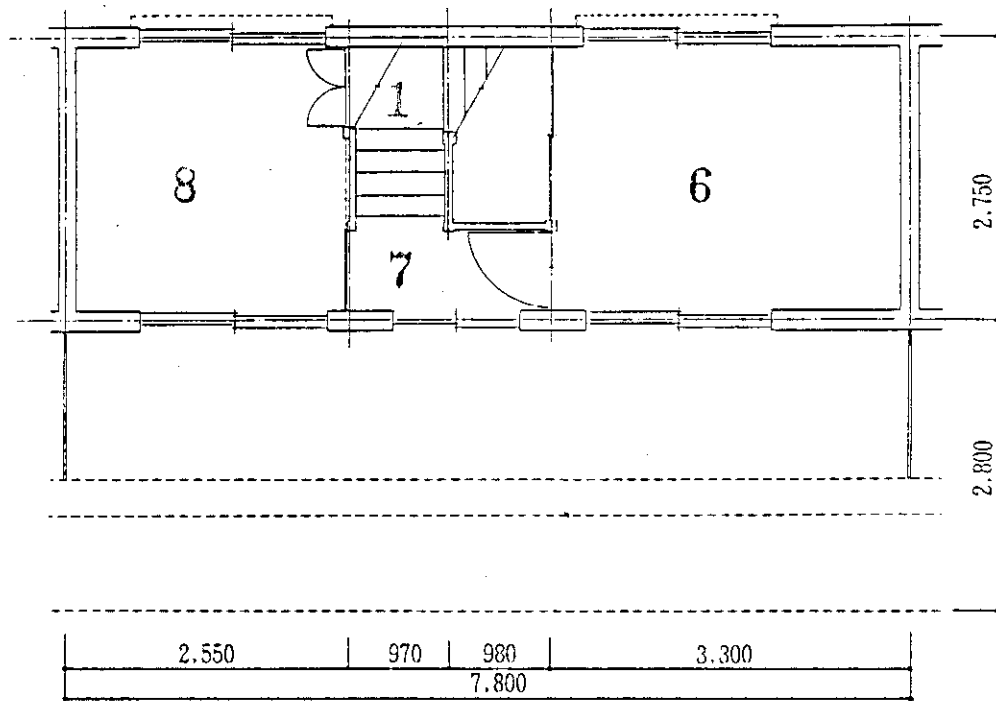
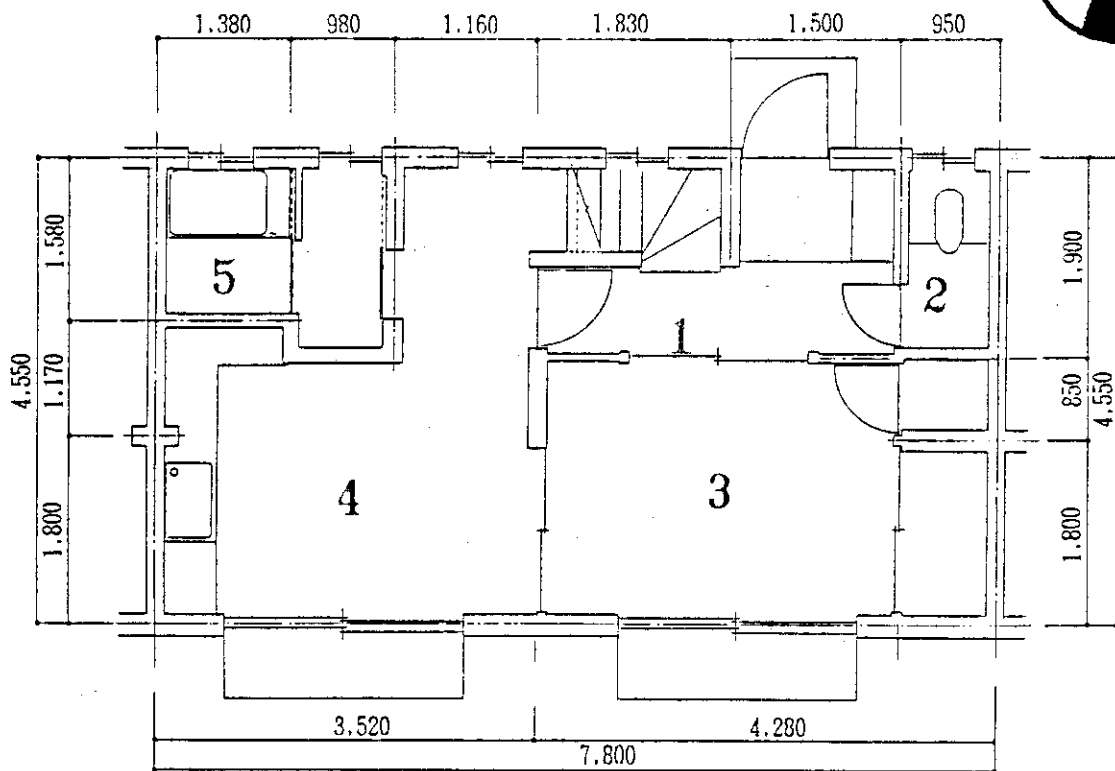


図 25 鉄筋コンクリートアパートの換気風量の分布



2階平面図



1階平面図

図 26 - 1 鉄筋コンクリートテラスハウスの1・2階平面図

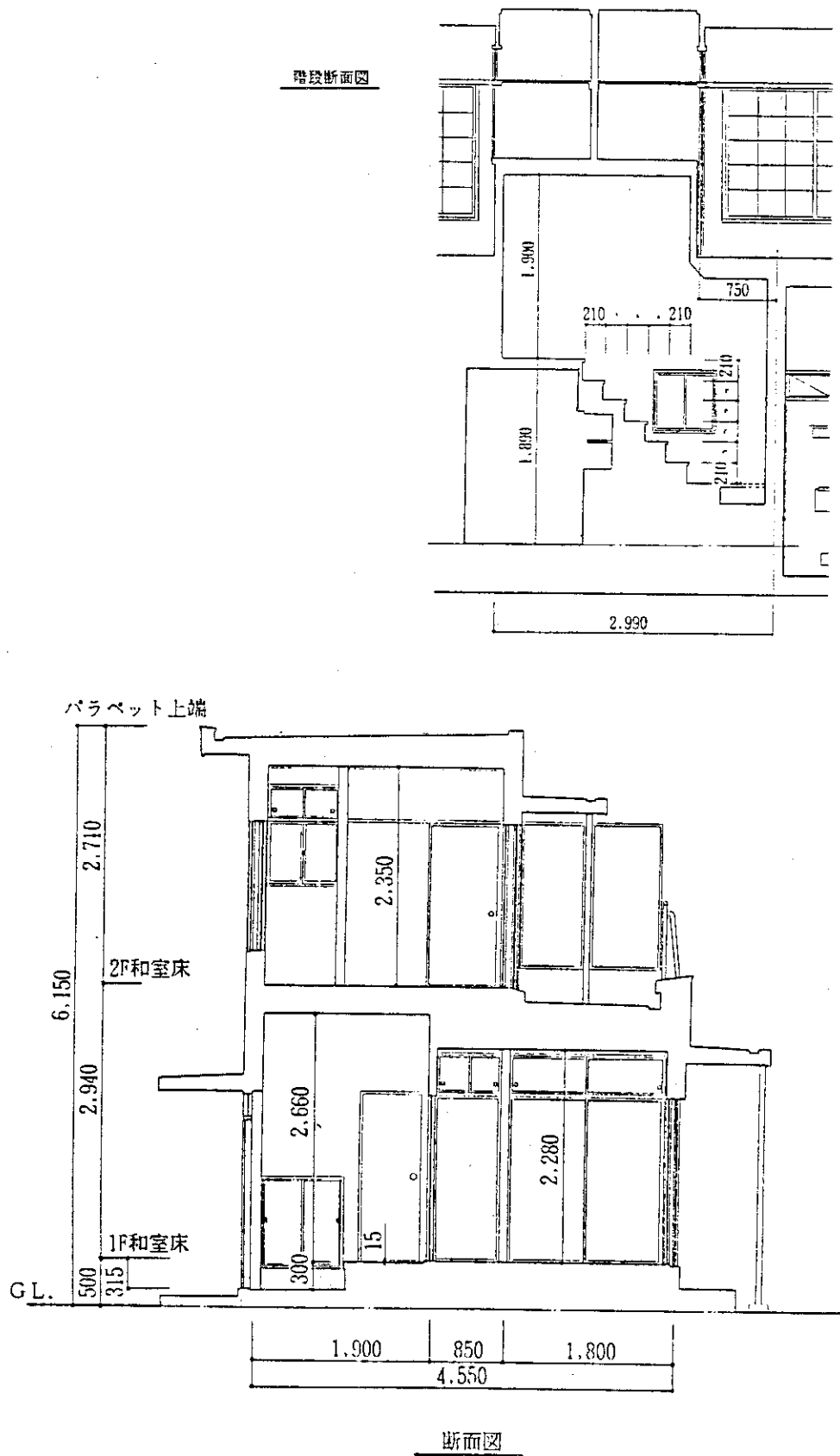


図 26 - 2 鉄筋コンクリートテラスハウスの断面図・階段断面図

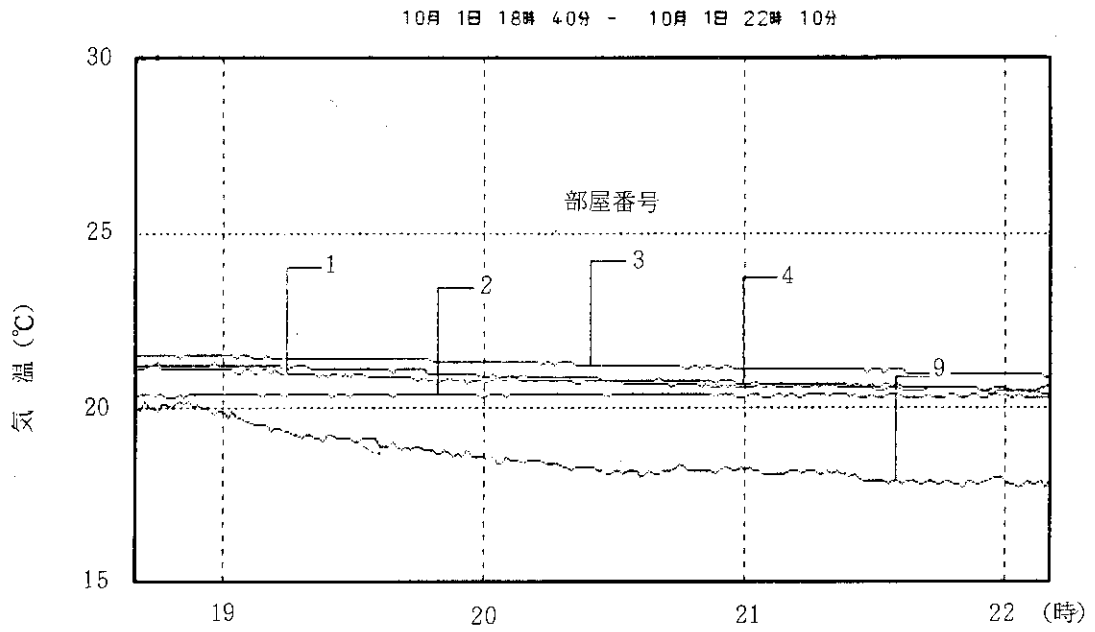


図 27 - 1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月1日)
 における室 1・室 2・室 3・室 4 の温度変化

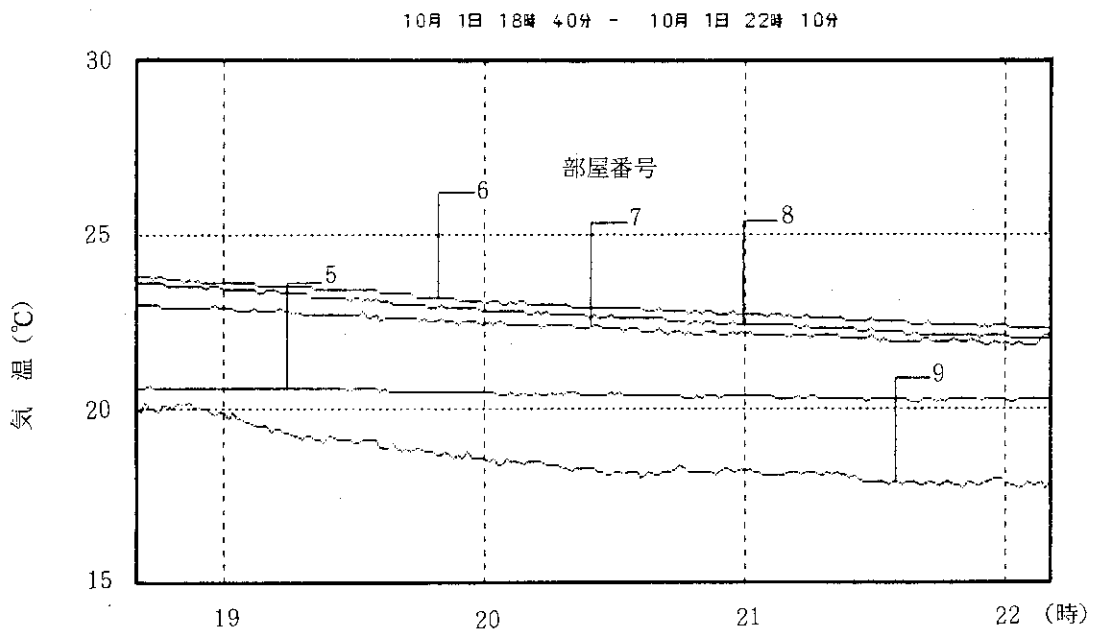


図 27 - 2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月1日)
 における室 5・室 6・室 7・室 8 の温度変化

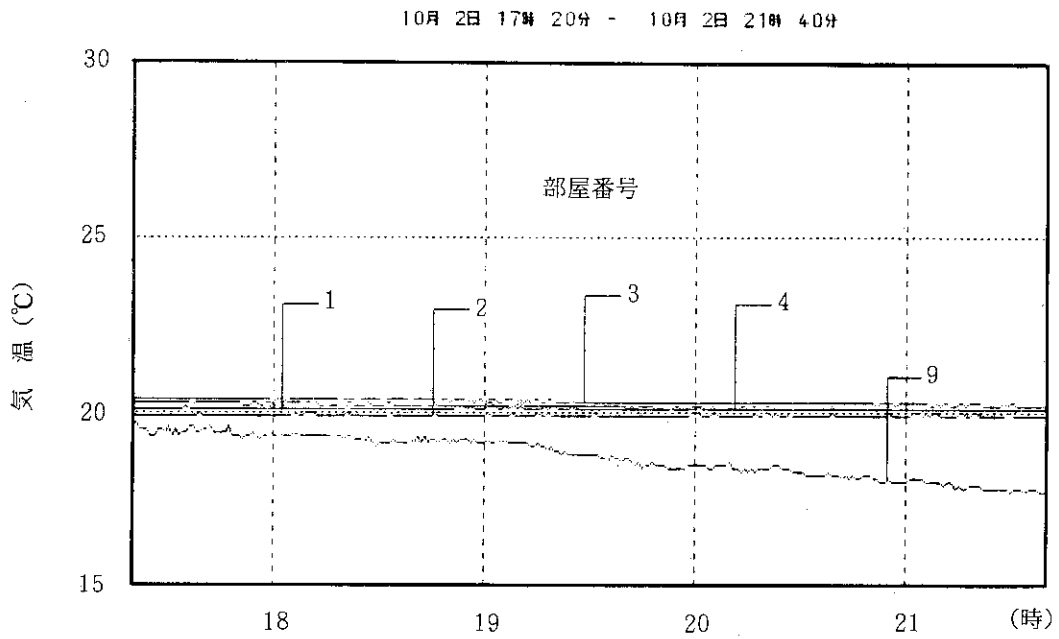


図 28-1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 2日) における室 1・室 2・室 3・室 4 の温度変化

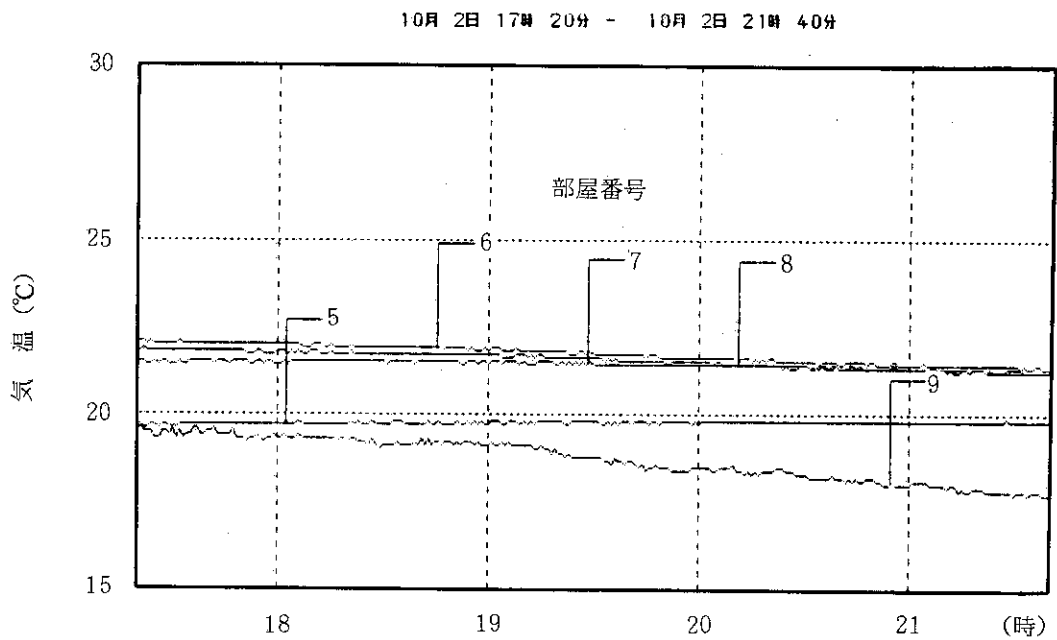


図 28-2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 2日) における室 5・室 6・室 7・室 8 の温度変化

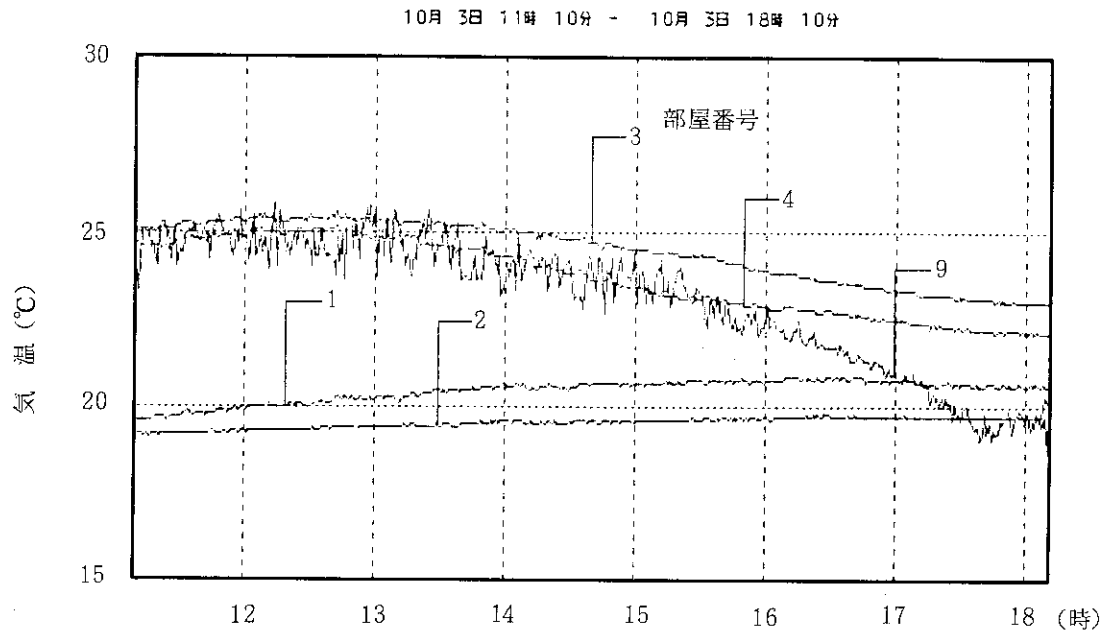


図 29 - 1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 3日)
における室 1・室 2・室 3・室 4 の温度変化

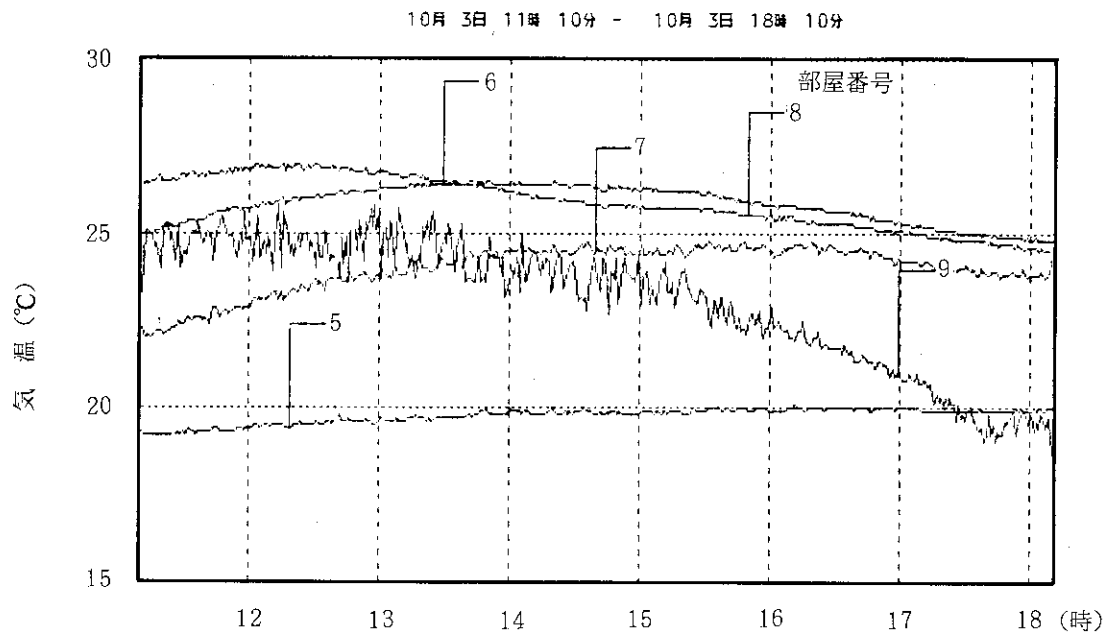


図 29 - 2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 3日)
における室 5・室 6・室 7・室 8 の温度変化

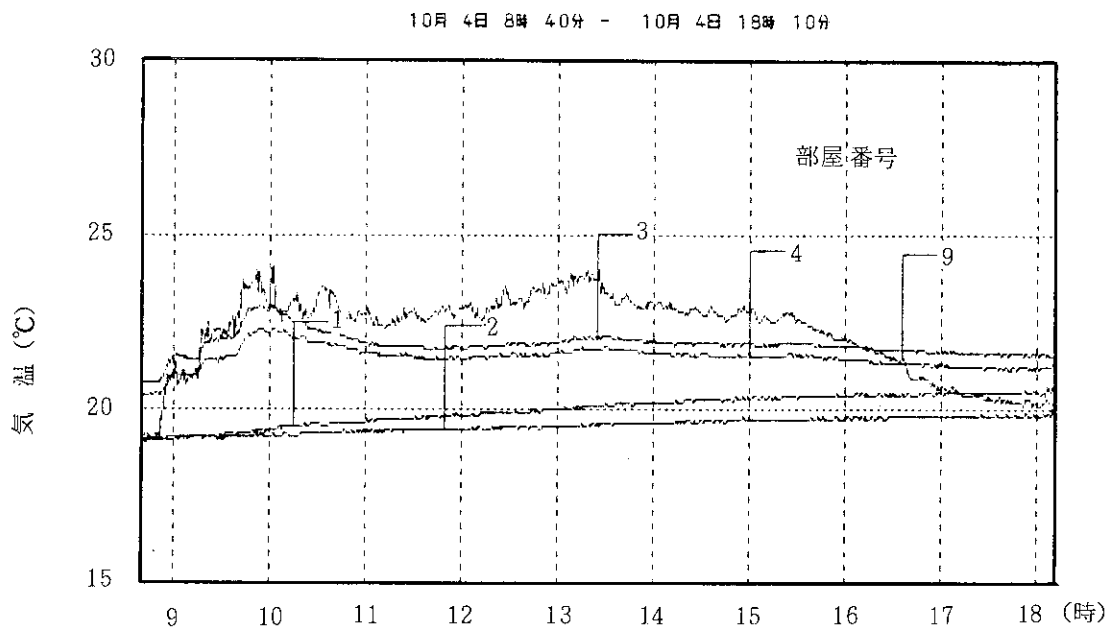


図 30-1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月4日)
 における室1・室2・室3・室4の温度変化

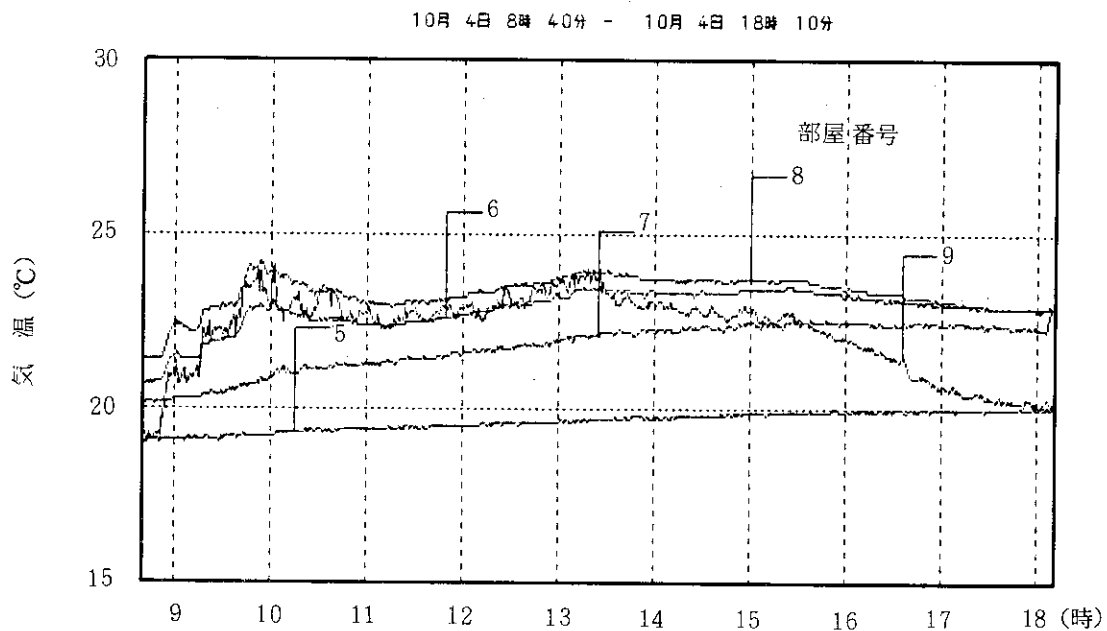


図 30-2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月4日)

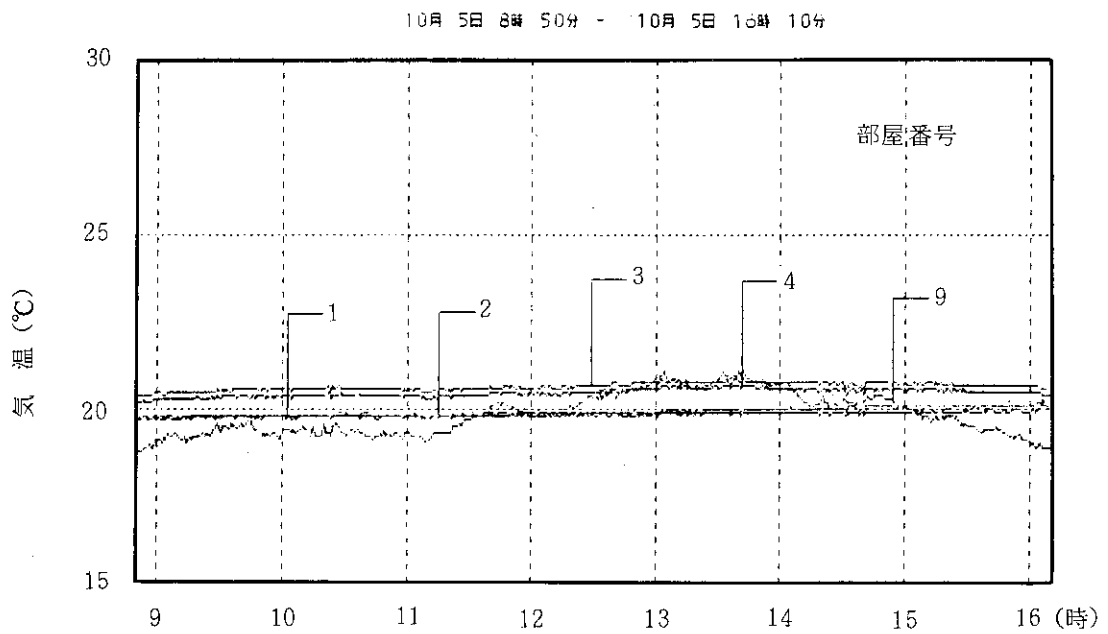


図 31 - 1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 5日)
における室 1・室 2・室 3・室 4 の温度変化

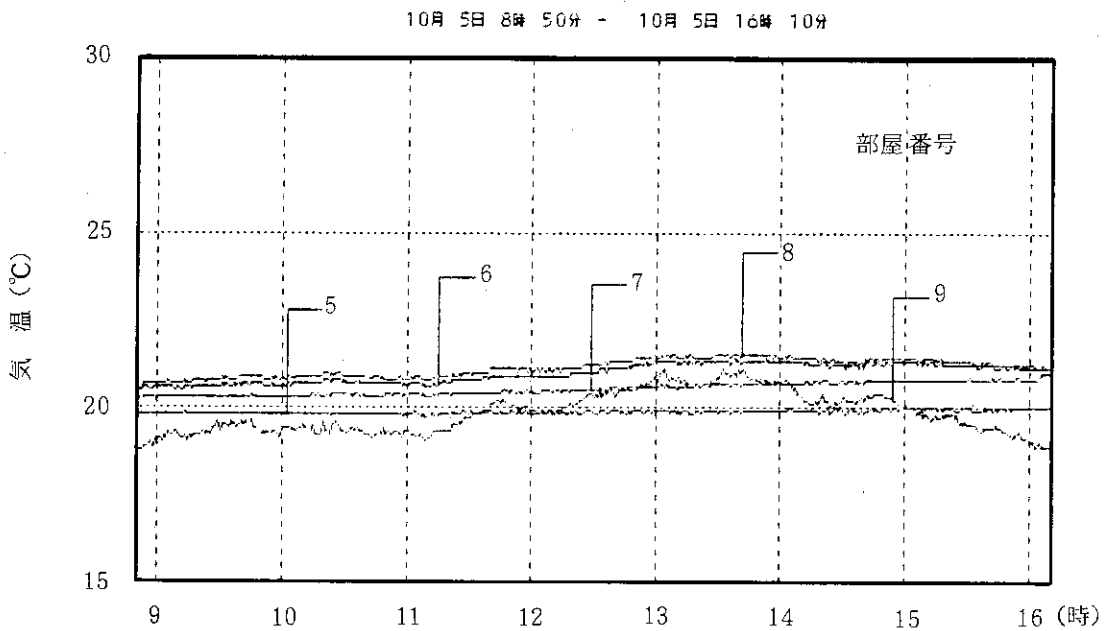


図 31 - 2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 5日)
における室 5・室 6・室 7・室 8 の温度変化

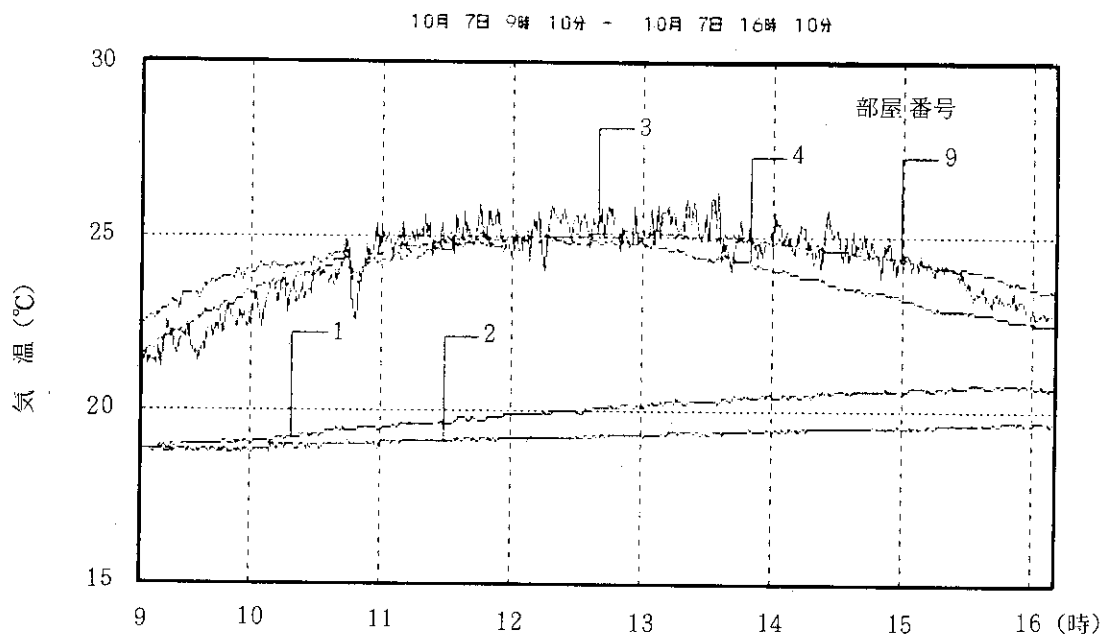


図 32-1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 7日)
 における室 1・室 2・室 3・室 4 の温度変化

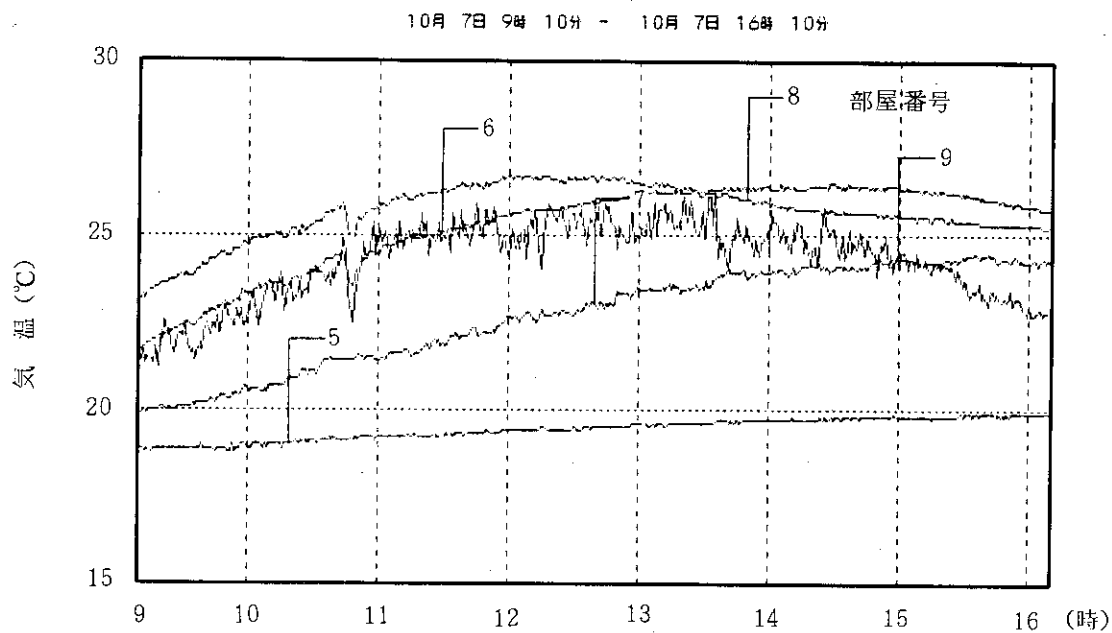


図 32-2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 7日)
 における室 5・室 6・室 7・室 8 の温度変化

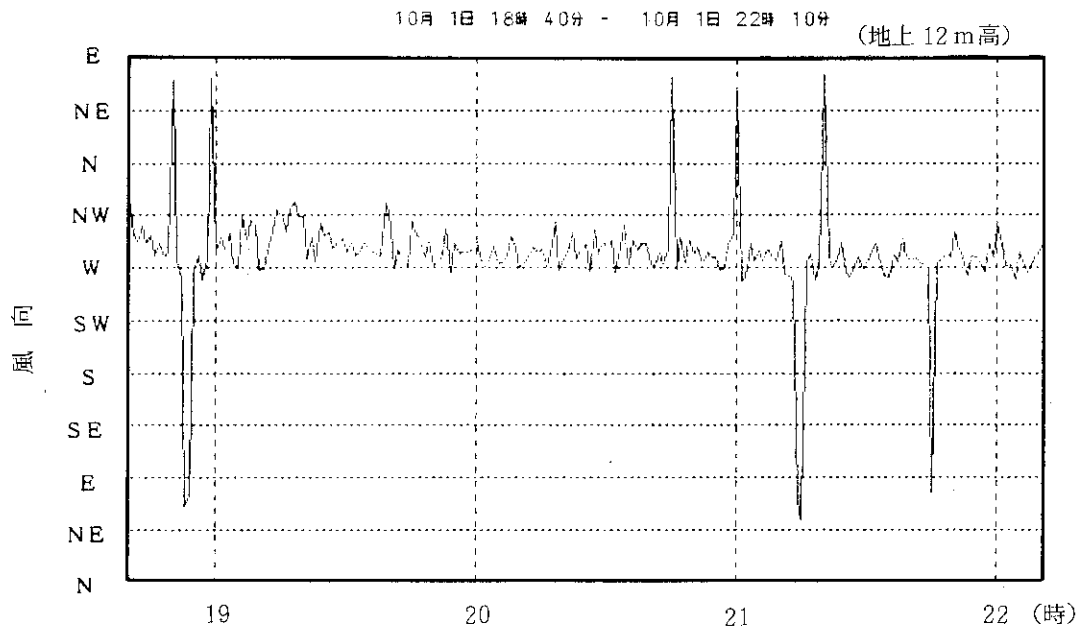


図 33 - 1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月1日) における風向の変化

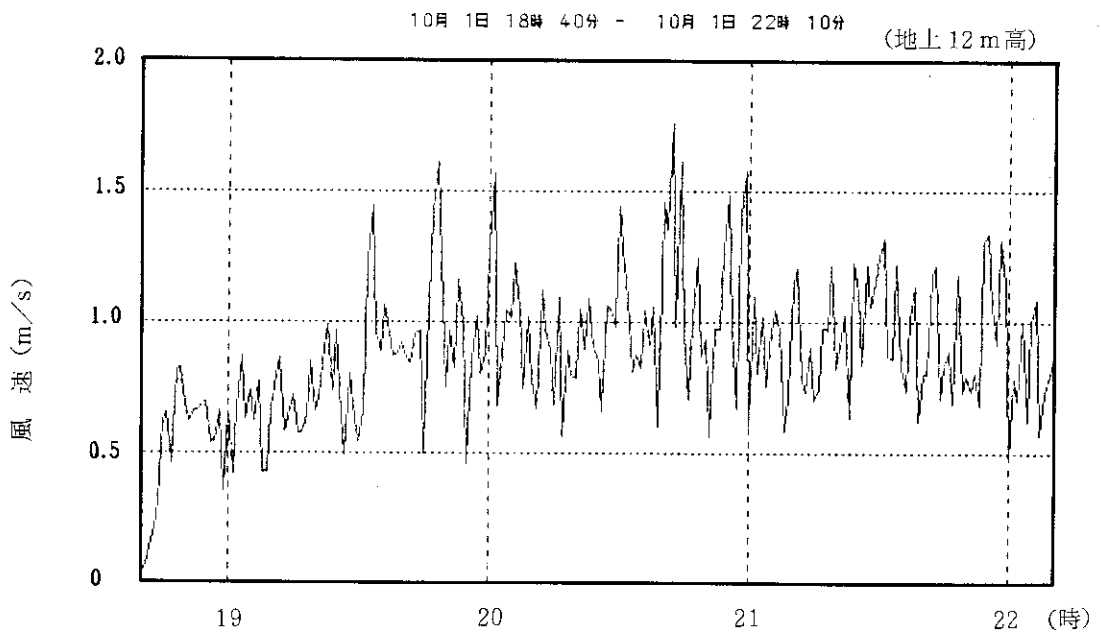


図 33 - 2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月1日) における風速の変化

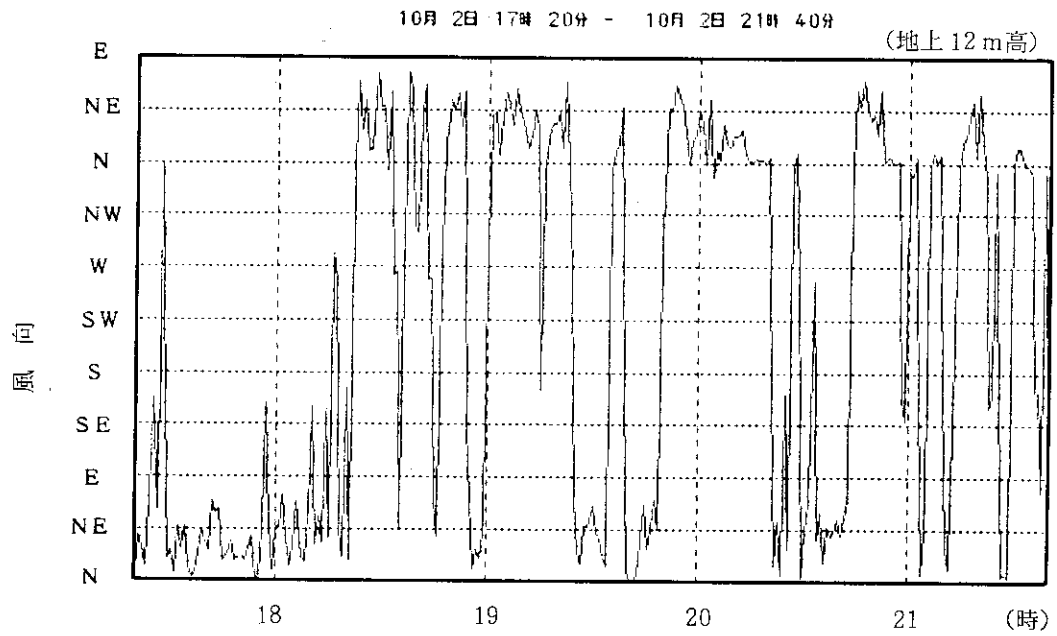


図 34 - 1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 2日) における風向の変化

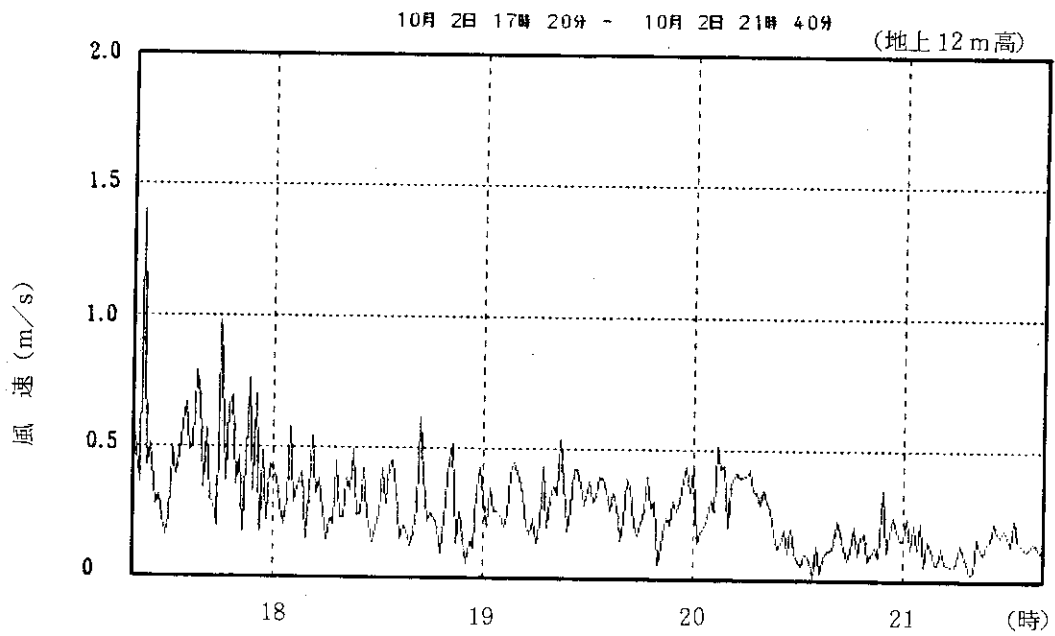


図 34 - 2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 2日) における風速の変化

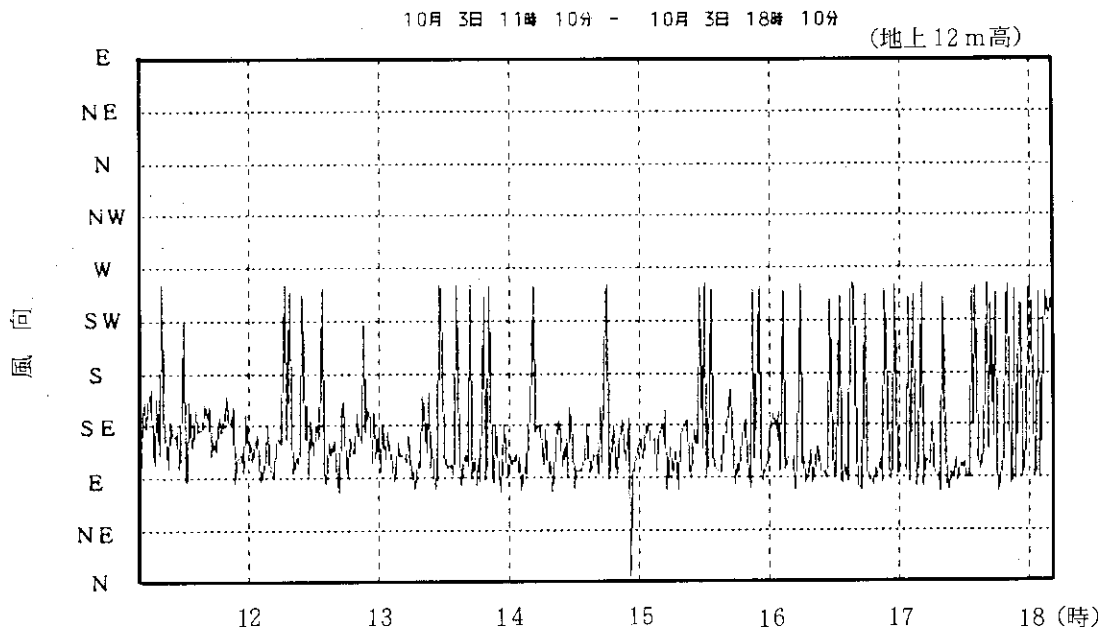


図 35-1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月3日) における風向の変化

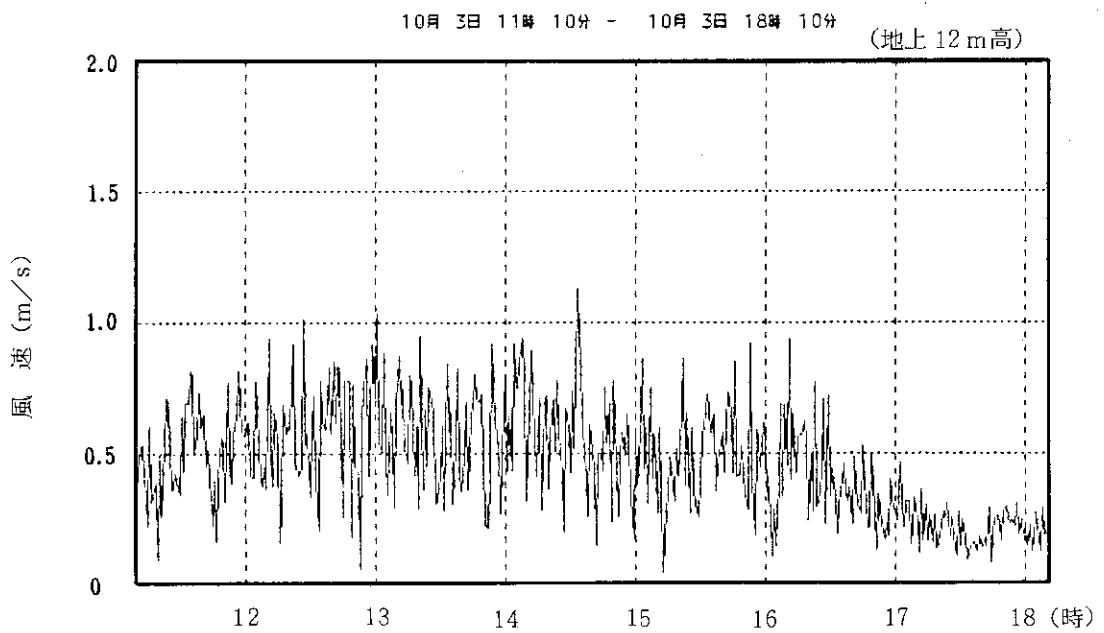


図 35-2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月3日) における風速の変化

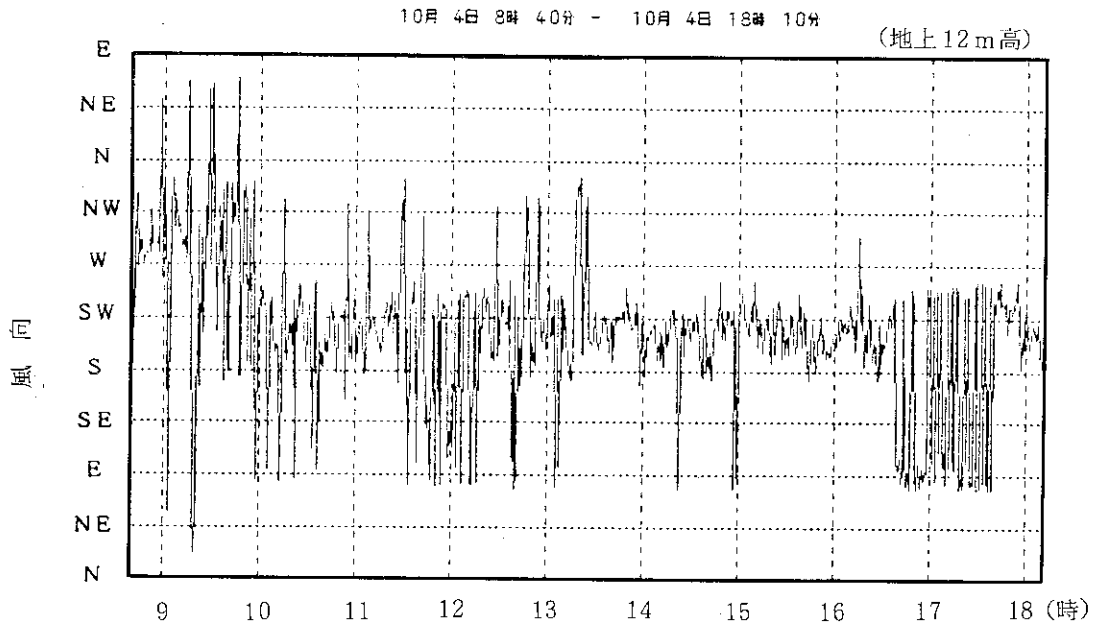


図 36 - 1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 4日) における風向の変化

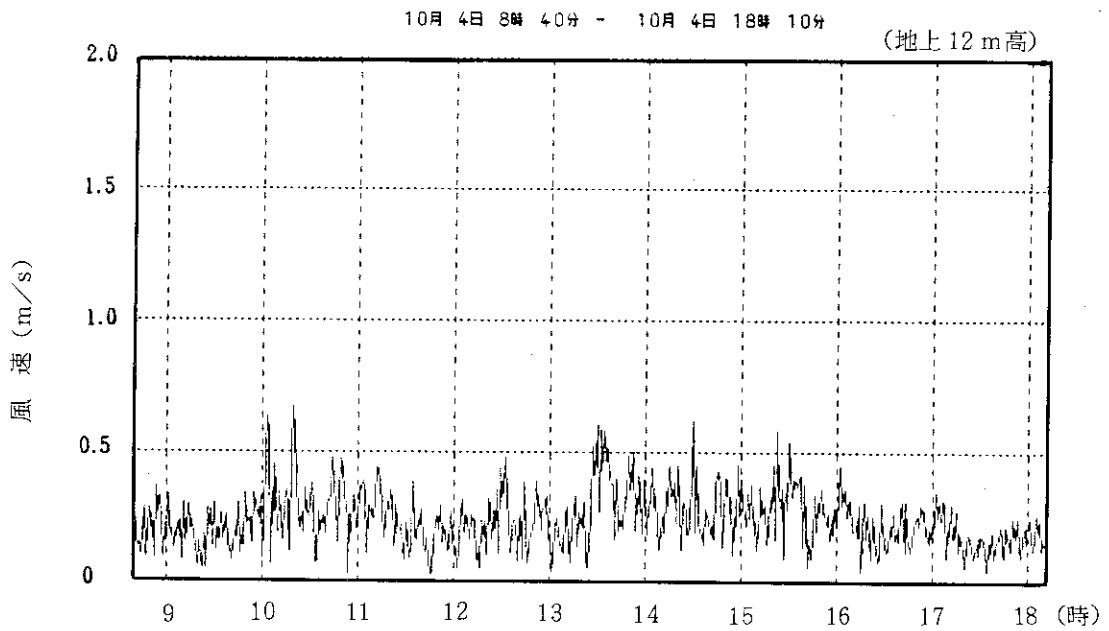


図 36 - 2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 4日) における風速の変化

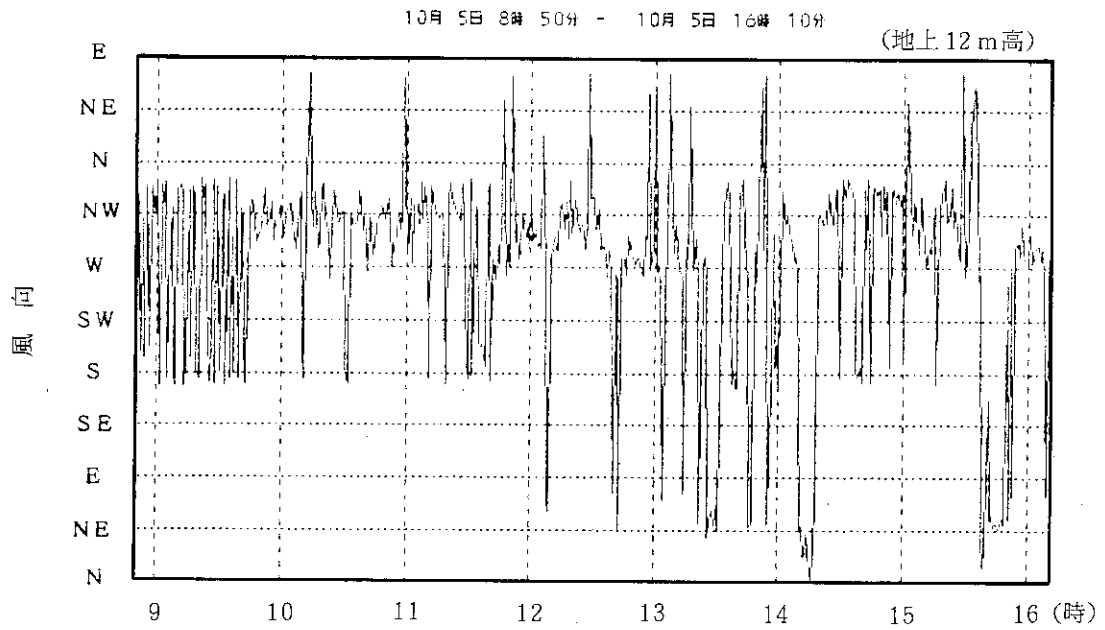


図 37 - 1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 5日) における風向の変化

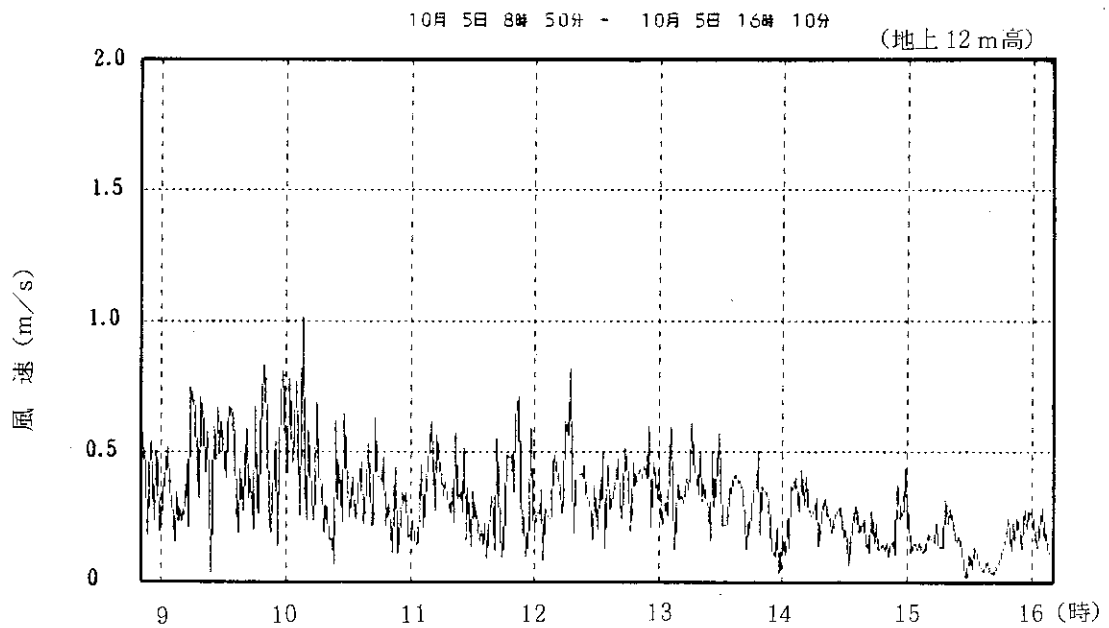


図 37 - 2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 5日) における風速の変化

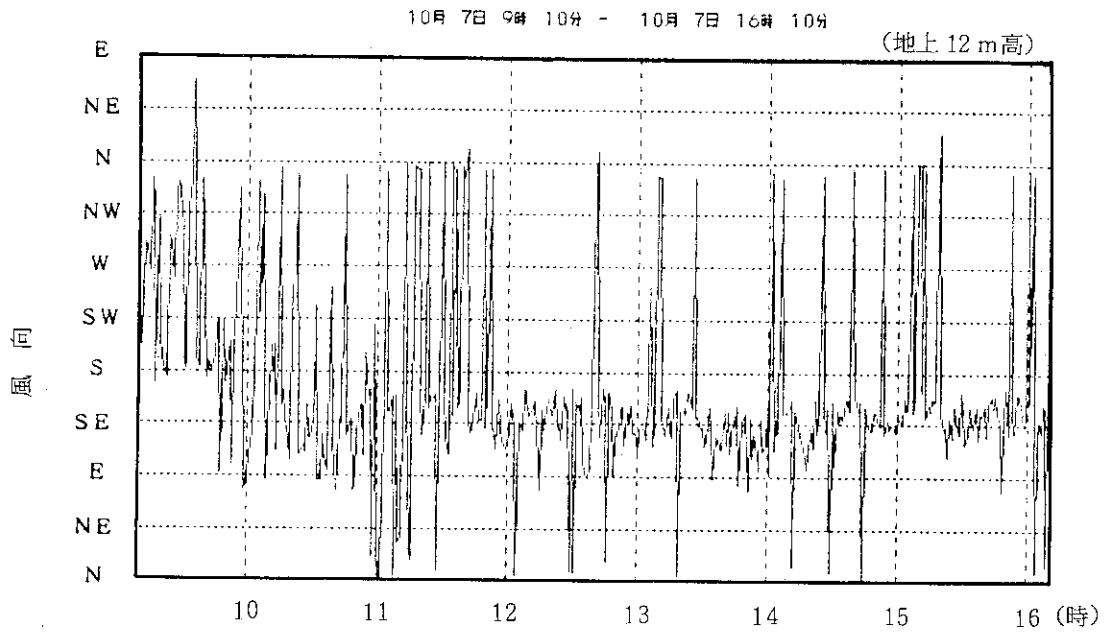


図 38 - 1 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 7日)
における風向の変化

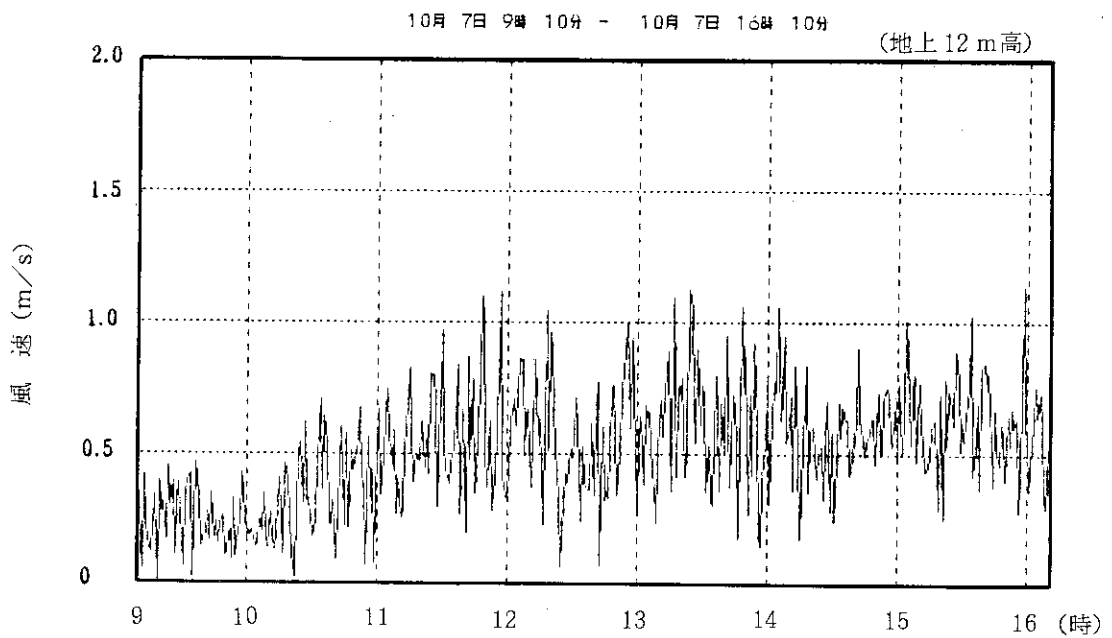


図 38 - 2 鉄筋コンクリートテラスハウスの実験時 (10月 7日)
における風速の変化

10月1日

風 向	W~NW	各室の容積	
風 速	0.5 ~ 1.6 m/s (平均値 0.9 m/s)	① 15.89 m ³	⑥ 23.07 m ³
換気回数	1.72 回/h	② 3.48 m ³	⑦ 4.86 m ³
外気温	18.60 °C	③ 23.52 m ³	⑧ 16.47 m ³
平均室温	21.72 °C	④ 21.89 m ³	
温度差	3.12 °C	⑤ 8.92 m ³	計 118.10 m ³
総換気風量	202.8 m ³ /h		

風量の単位は (ℓ/s)

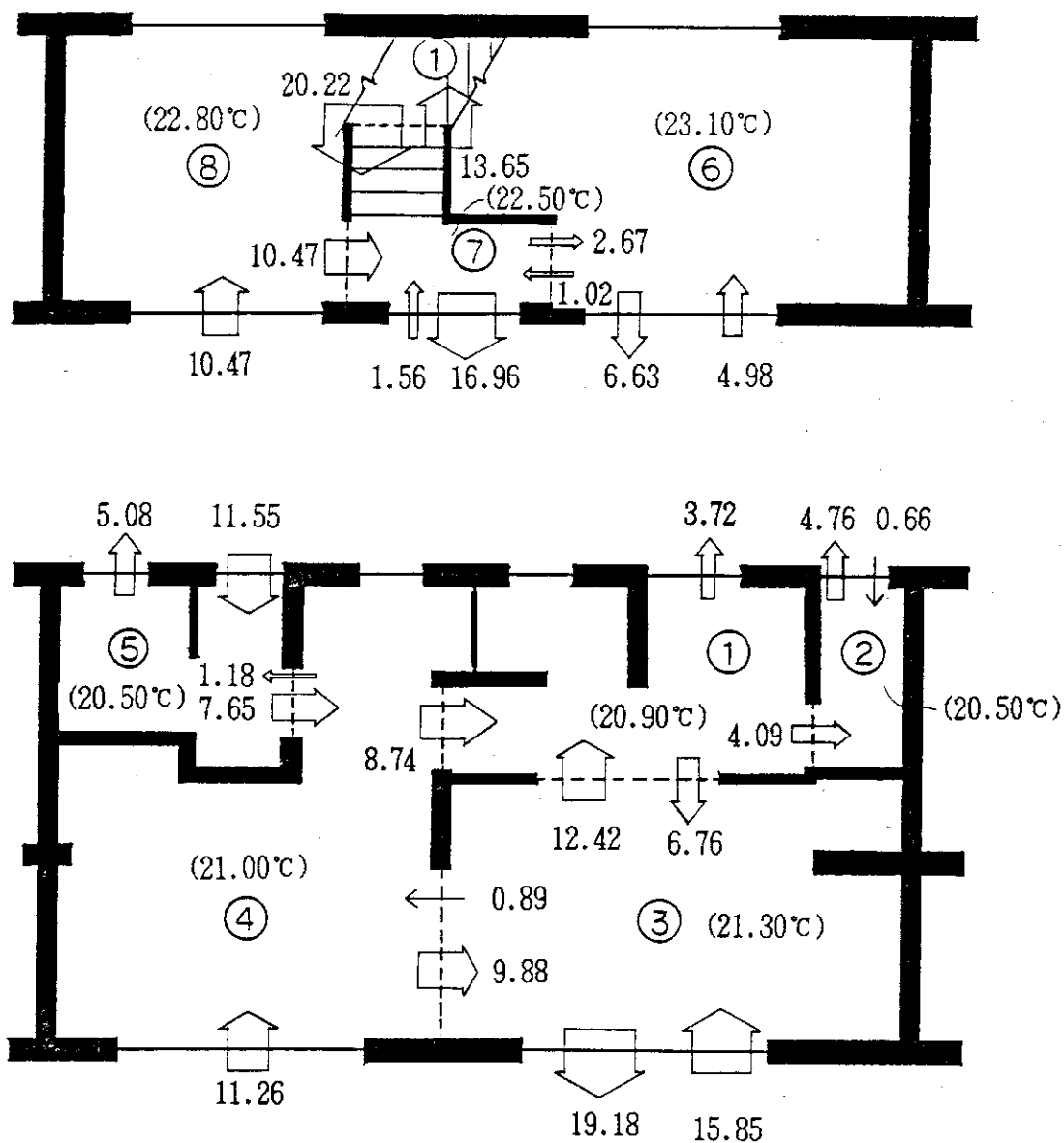


図 39 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月1日)

10月2日

風 向 N~NE

各室の容積

風 速 0~1.0 m/s (平均値 0.3 m/s)

① 15.89 m³ ⑥ 23.07 m³

換気回数 1.59回/h

② 3.48 m³ ⑦ 4.86 m³

外 気 温 18.70 °C

③ 23.52 m³ ⑧ 16.47 m³

平均室温 20.78 °C

④ 21.89 m³

温 度 差 2.08 °C

⑤ 8.92 m³ 計 118.10 m³

総換気風量 187.6 m³/h

風量の単位は (ℓ/s)

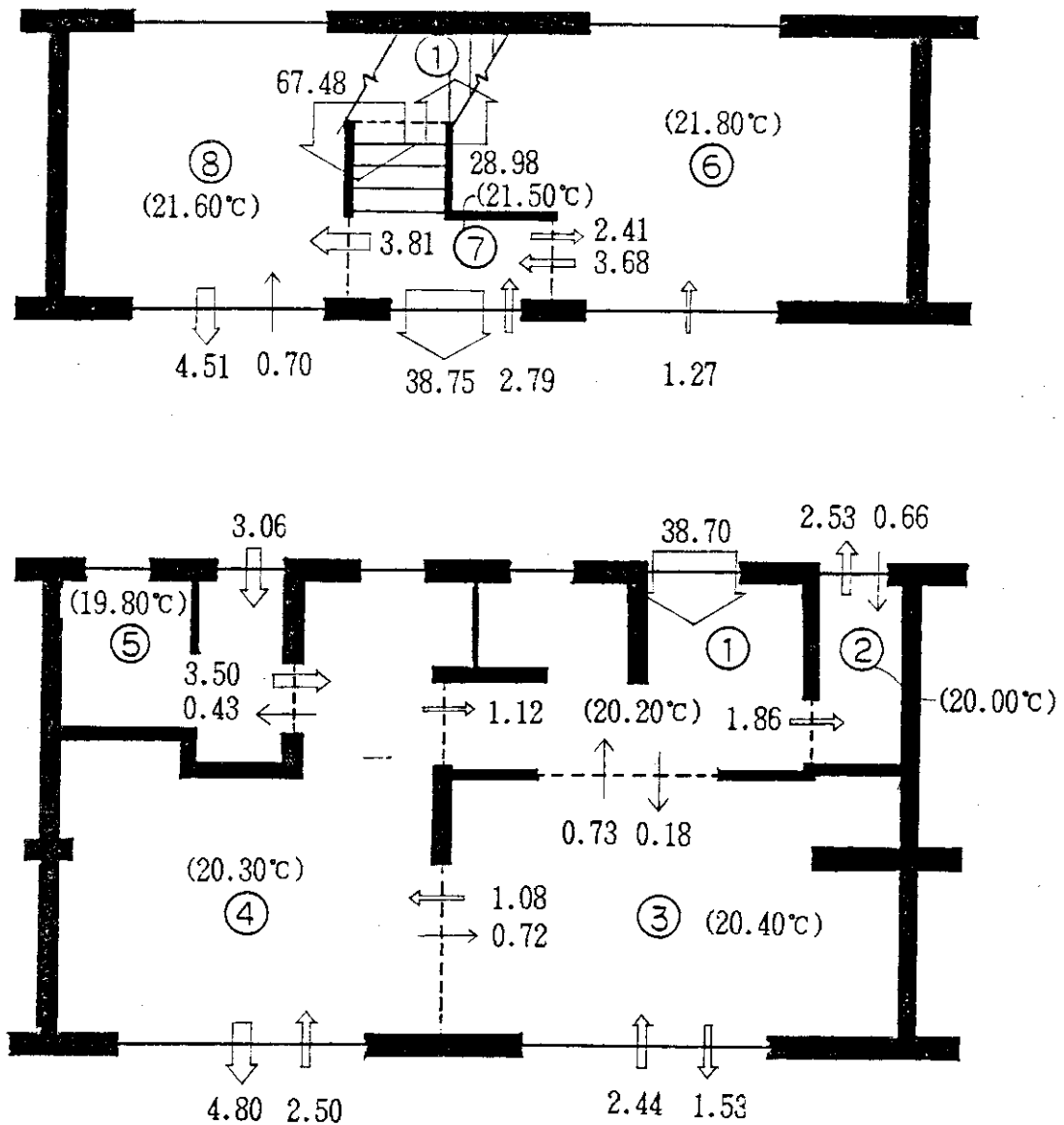


図40 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月2日)

10月3日(1)

風 向	E~SE	各室の容積	
風 速	0.2 ~ 1.0 m/s (平均値 0.5 m/s)	① 15.89 m ³	⑥ 23.07 m ³
換気回数	1.10 回/h	② 3.48 m ³	⑦ 4.86 m ³
外 気 温	25.0 °C	③ 23.52 m ³	⑧ 16.47 m ³
平均室温	24.06 °C	④ 21.89 m ³	
温 度 差	-0.94 °C	⑤ 8.92 m ³	計 118.10 m ³
総換気風量	129.8 m ³ /h		

風量の単位は (ℓ/s)

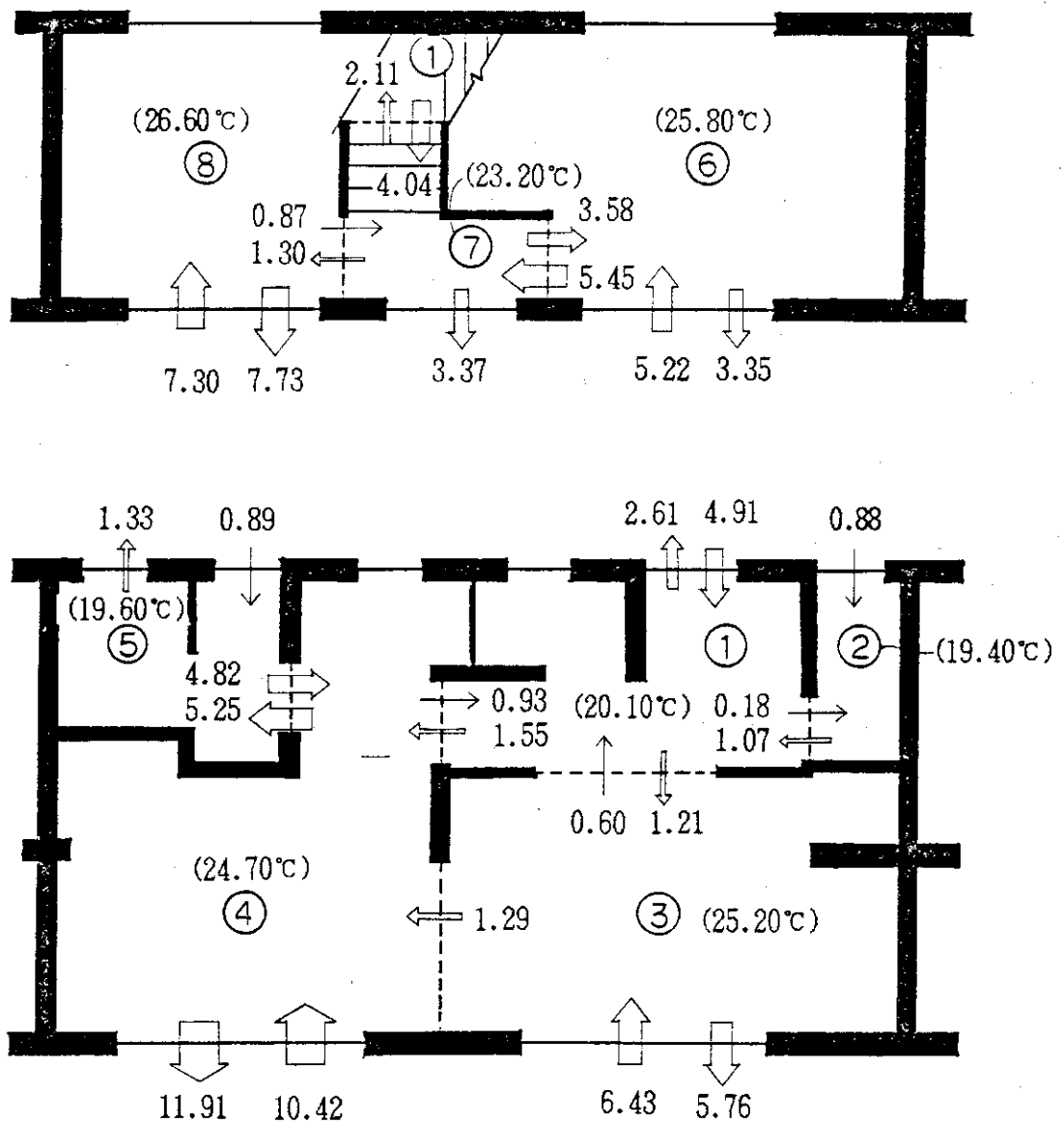


図 41 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月3日の前半)

10月3日(2)

風 向 E~SW

各室の容積

風 速 0.1 ~ 0.9 m/s (平均値 0.4 m/s)

① 15.89 m³

⑥ 23.07 m³

換気回数 1.16回/h

② 3.48 m³

⑦ 4.86 m³

外気温 22.00 °C

③ 23.52 m³

⑧ 16.47 m³

平均室温 23.50 °C

④ 21.89 m³

温度差 1.50 °C

⑤ 8.92 m³

計 118.10 m³

総換気風量 136.8 m³/h

風量の単位は (ℓ/s)

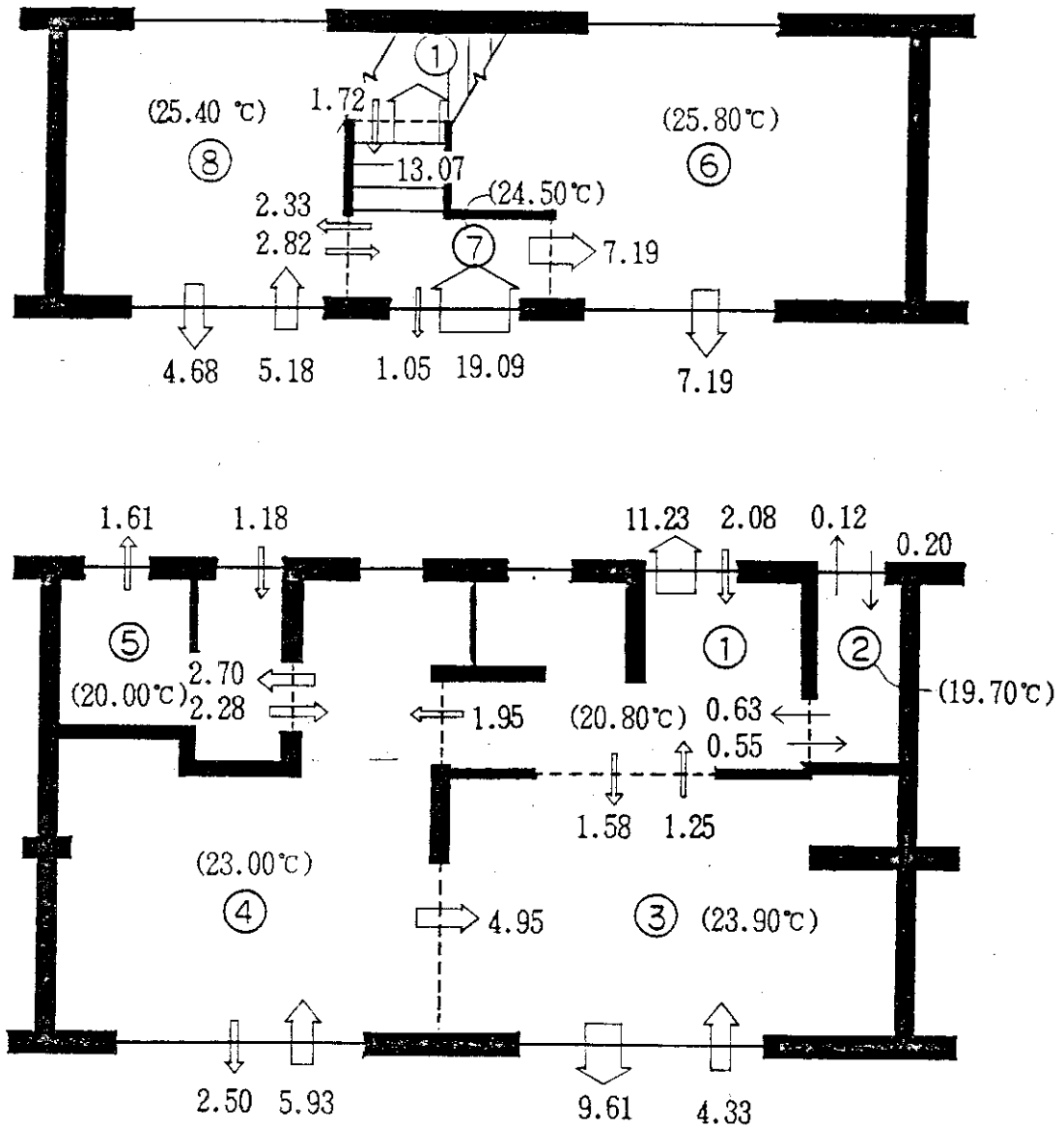


図 42 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月3日の後半)

10月4日(1)

風 向	S~SW	各室の容積	
風 速	0.1~0.6 m/s (平均値 0.2 m/s)	① 15.89 m ³	⑥ 23.07 m ³
換気回数	0.80 回/h	② 3.48 m ³	⑦ 4.86 m ³
外 気 温	22.40 °C	③ 23.52 m ³	⑧ 16.47 m ³
平均室温	21.54 °C	④ 21.89 m ³	
温 度 差	-0.86 °C	⑤ 8.92 m ³	計 118.10 m ³
総換気風量	94.7 m ³ /h		

風量の単位は (ℓ/s)

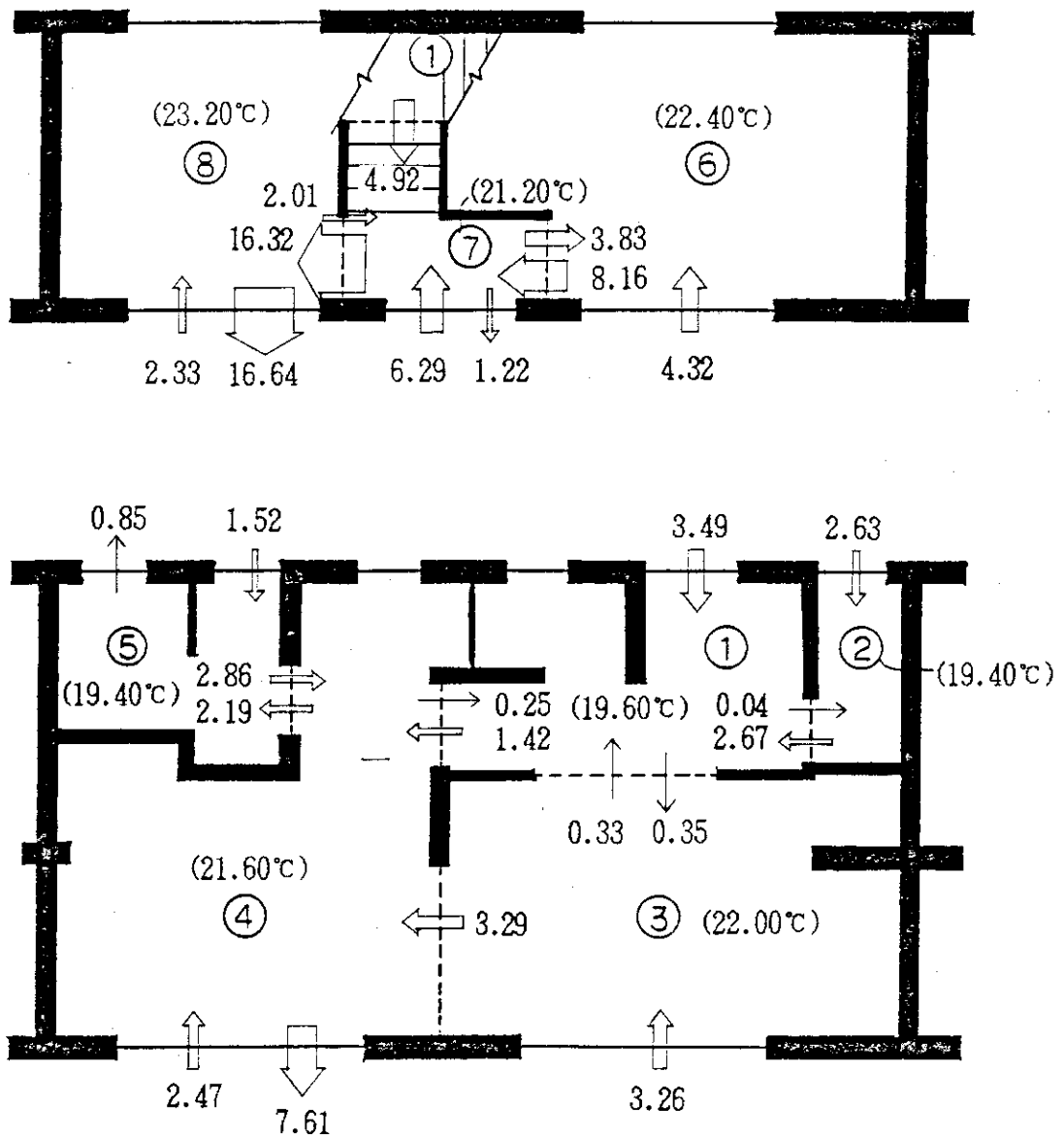


図 43 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月4日の前半)

10月4日(2)

風 向	E~SW	各室の容積	
風 速	0.1 ~ 0.6 m/s (平均値 0.2 m/s)	① 15.89 m ³	⑥ 23.07 m ³
換気回数	0.93回/h	② 3.48 m ³	⑦ 4.86 m ³
外 気 温	21.60 °C	③ 23.52 m ³	⑧ 16.47 m ³
平均室温	21.92 °C	④ 21.89 m ³	
温 度 差	0.32 °C	⑤ 8.92 m ³	計 118.10 m ³
総換気風量	109.5 m ³ /h		

風量の単位は (ℓ/s)

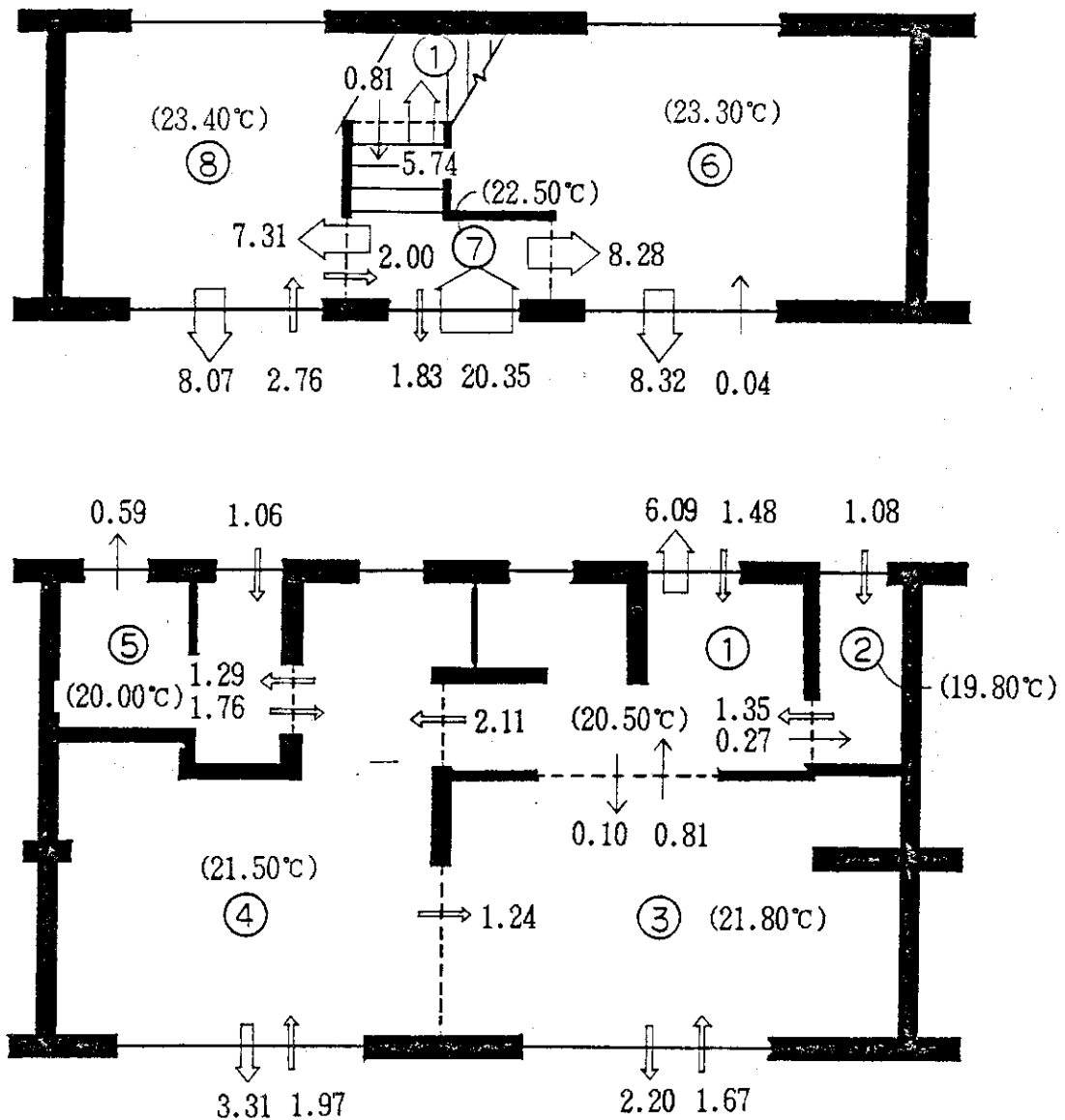


図 44 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月4日の後半)

10月5日(1)

風 向	S~NW	各室の容積	
風 速	0.2 ~ 1.0 m/s (平均値 0.4 m/s)	① 15.89 m ³	⑥ 23.07 m ³
換気回数	1.04 回/h	② 3.48 m ³	⑦ 4.86 m ³
外 気 温	19.60 °C	③ 23.52 m ³	⑧ 16.47 m ³
平均室温	20.52 °C	④ 21.89 m ³	
温 度 差	0.92 °C	⑤ 8.92 m ³	計 118.10 m ³
総換気風量	122.5 m ³ /h		

風量の単位は (ℓ/s)

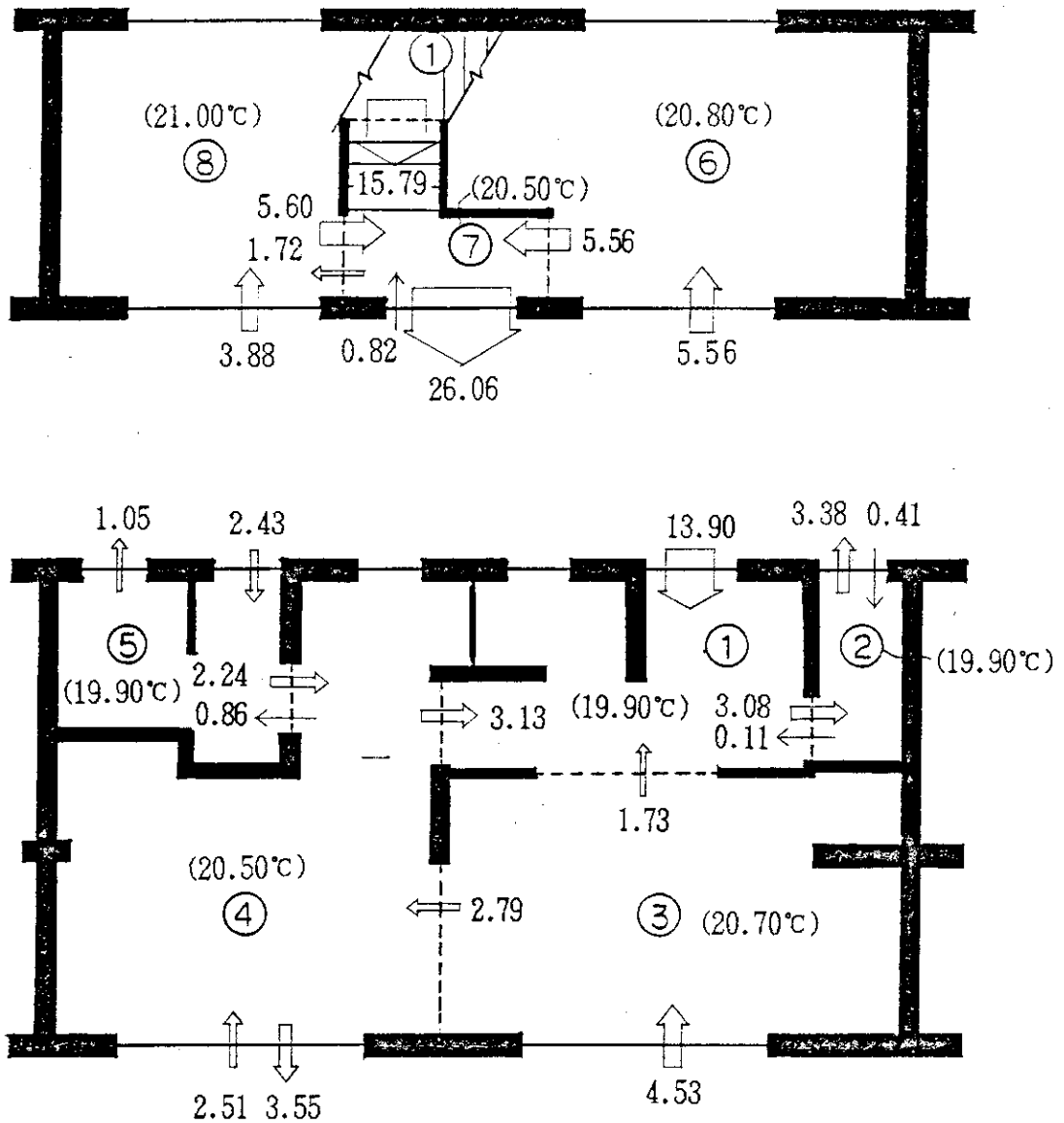


図 45 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月5日の前半)

10月5日(2)

風 向	N~NW	各室の容積	
風 速	0~0.6 m/s (平均値 0.3 m/s)	① 15.89 m ³	⑥ 23.07 m ³
換気回数	0.96 回/h	② 3.48 m ³	⑦ 4.86 m ³
外 気 温	20.20 °C	③ 23.52 m ³	⑧ 16.47 m ³
平均室温	20.78 °C	④ 21.89 m ³	
温 度 差	0.58 °C	⑤ 8.92 m ³	計 118.10 m ³
総換気風量	113.0 m ³ /h		

風量の単位は (ℓ/s)

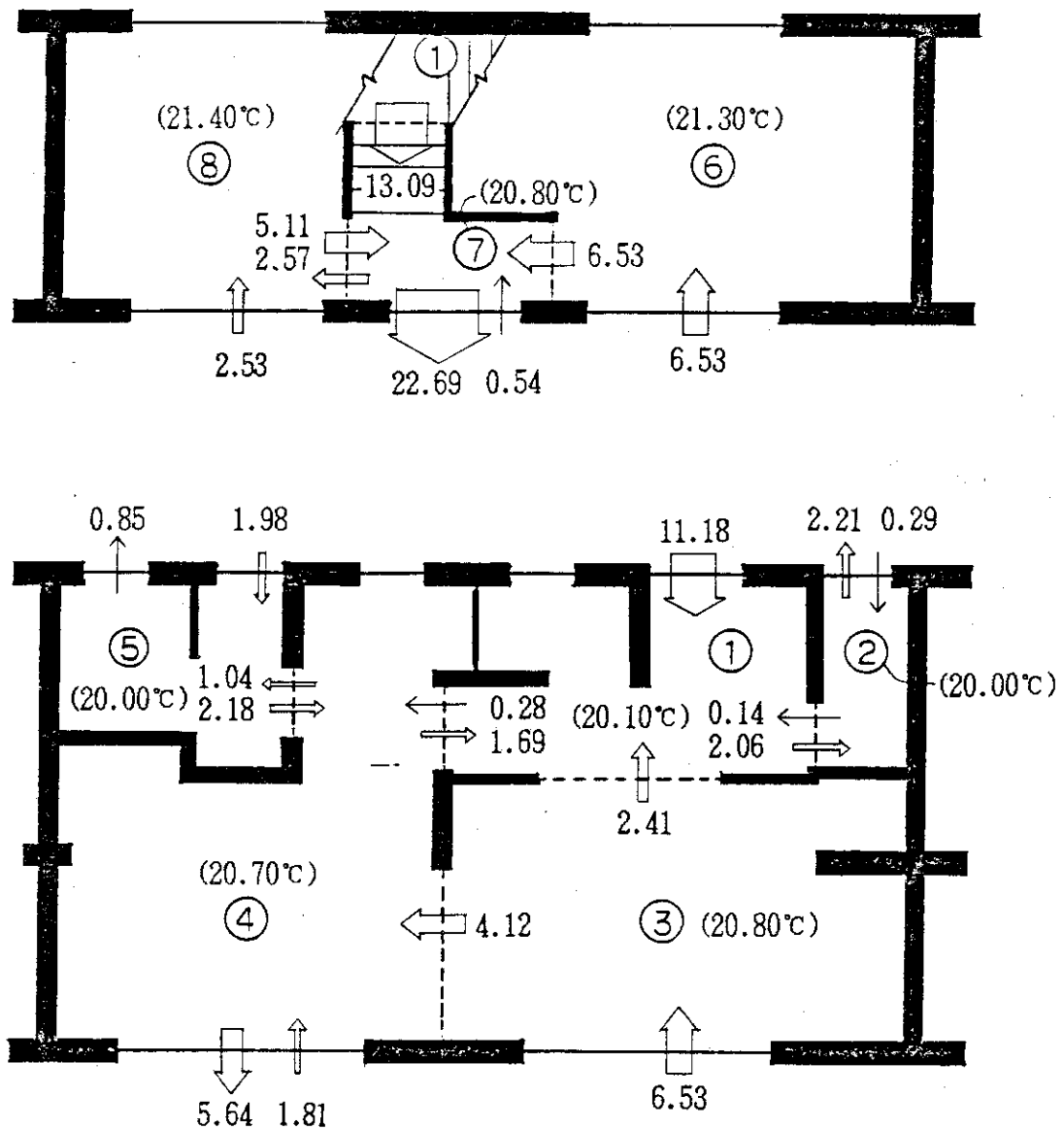


図46 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月5日の後半)

10月7日(1)

風 向	SE~W	各室の容積	
風 速	0.1~1.0 m/s (平均値 0.4 m/s)	① 15.89 m ³	⑥ 23.07 m ³
換気回数	1.06 回/h	② 3.48 m ³	⑦ 4.86 m ³
外 気 温	24.10 °C	③ 23.52 m ³	⑧ 16.47 m ³
平均室温	23.31 °C	④ 21.89 m ³	
温 度 差	-0.79 °C	⑤ 8.92 m ³	計 118.10 m ³
総換気風量	125.7 m ³ /h		

風量の単位は (ℓ/s)

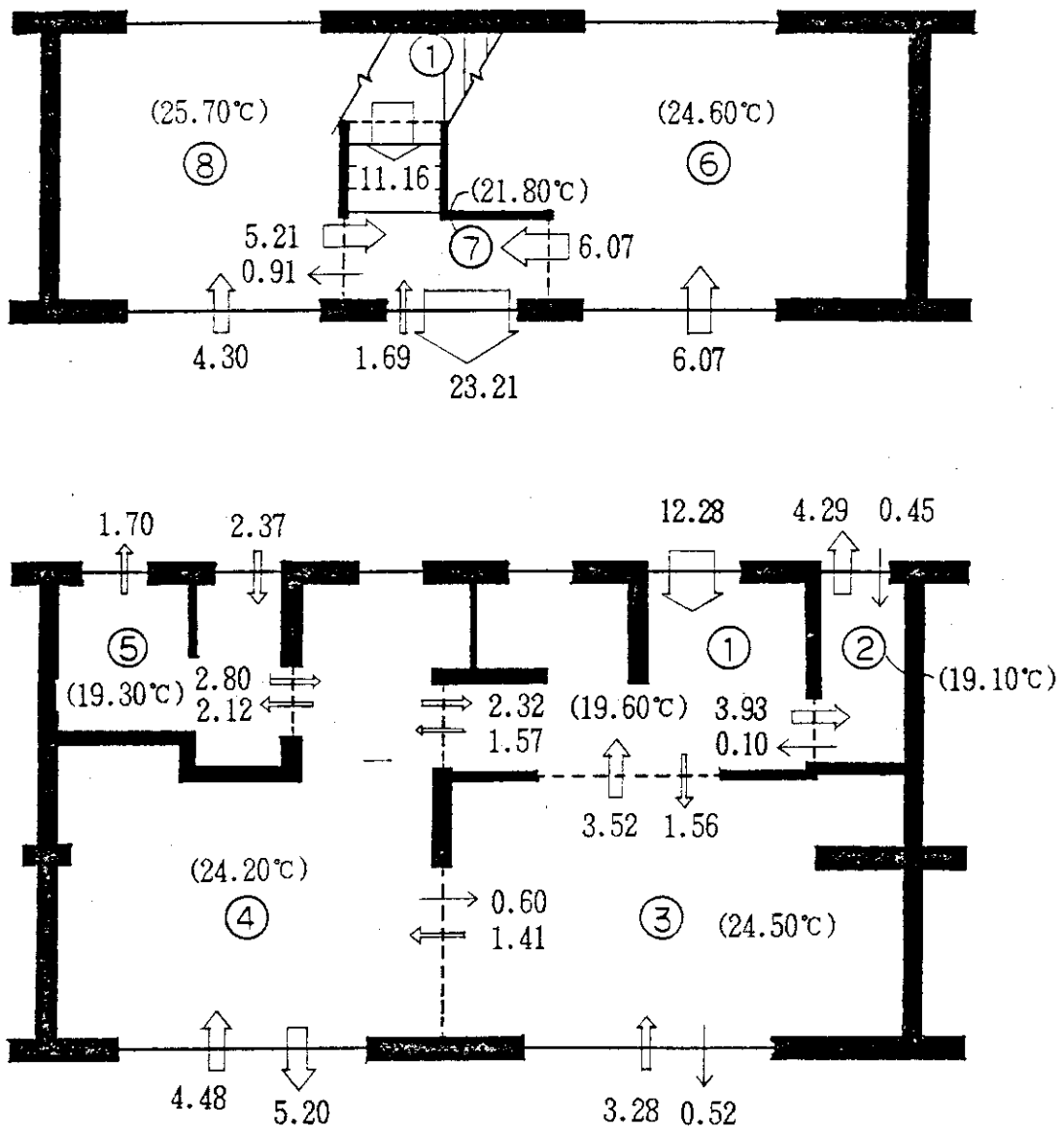


図 47 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月7日の前半)

10月7日(2)

風 向	E~S	各室の容積	
風 速	0.2 ~ 1.0 m/s (平均値 0.6 m/s)	① 15.89 m ³	⑥ 23.07 m ³
換気回数	0.95 回/h	② 3.48 m ³	⑦ 4.86 m ³
外気温	24.60 °C	③ 23.52 m ³	⑧ 16.47 m ³
平均室温	23.90 °C	④ 21.89 m ³	
温度差	-0.70 °C	⑤ 8.92 m ³	計 118.10 m ³
総換気風量	112.2 m ³ /h		

風量の単位は (ℓ/s)

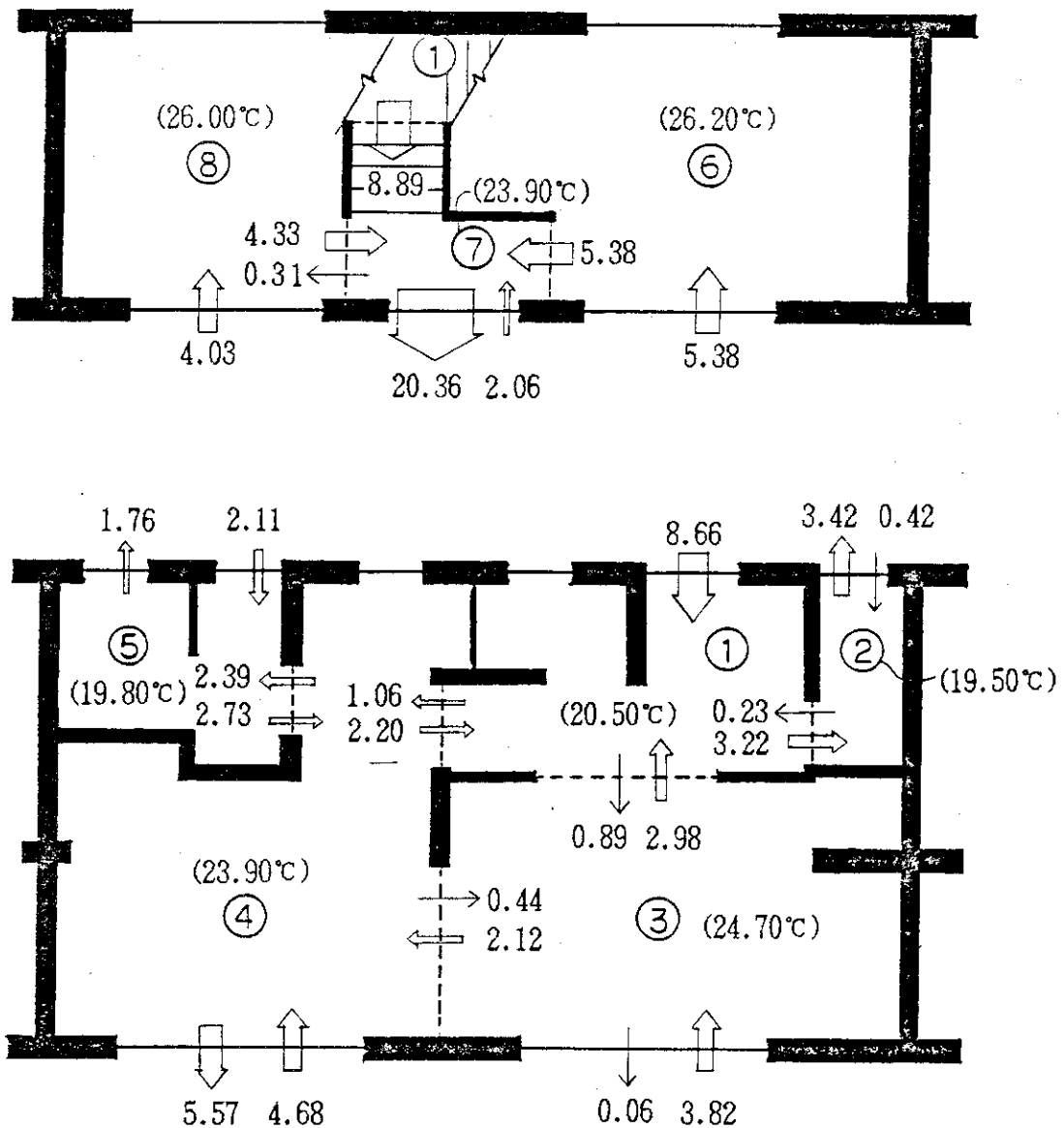


図 48 鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量の分布 (10月7日の後半)

4. 考 察

換気風量の計算において、実験条件によっては推定値が収束するまでに時間を要した。その理由として、解析には、瞬時一様拡散を仮定していること、また実際には、時々刻々と風向、風速が変化し、換気量もそれに応じ時々刻々と変化しているが、データ処理がこれらの変化に追従できていないことなどが考えられる。

換気風量と風向、風速、温度差などとの相関を検討できるほど十分な結果が得られなかった。しいて相関を述べるなら、鉄筋コンクリートアパートにおいてヒーターを用いて温度差を強制的に与えた場合においても部屋間の風量に顕著な変化が見られなかったこと、また気温差があまり変化していなくても部屋間の空気の主要移動方向と風量は変化している場合が多いことなどがあげられる。このことから今回の実験条件の範囲では温度差は換気風量に強く影響を与える要素にはなっていなかったと考えられる。

鉄筋コンクリートテラスハウスのドアの郵便物受けなどの大きな開口部に対して風が吹いている場合には特に風量が増す傾向にあった。このことは、風向と家屋の主要通気路との関係が重要であることを示唆している。

木造2階建家、鉄筋コンクリートアパート、鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量はそれぞれ220～240、87～110、95～200 m³/hであった。また、自然換気回数は、それぞれ0.77～0.83、0.92～1.2、0.80～1.7回/時であった。木造家屋の風量は他の鉄筋コンクリート家屋より大きいにもかかわらず、換気回数がほぼ同じなのは木造家屋の部屋の容量が大きいためであろう。

5. 結 言

原子炉事故時の施設周辺住民の防護対策の一つとして屋内退避は容易にかつ安全に実施できる方法である。屋内退避による被曝防護効果では、家屋の自然換気率の程度が重要である。本研究では、実家屋の自然換気率の特徴の把握と自然換気率シュミレーションの検証のためのデータを得ることを目的として、自然換気率を測定した。測定対象家屋は木造2階建家、鉄筋コンクリートアパート、鉄筋コンクリートテラスハウスである。測定法にはトレーサーガス法を採用した。実験では炭酸ガスを注入し部屋内のガス濃度とガス注入量などを測定した。得られたデータは最小2乗法を用いて解析し部屋間の換気風量を推定した。以下に結果をまとめる。

- 1) 各部屋間の空気の流入出があるため、放射能防護効果の評価にはこれらを考慮して行う必要がある。
- 2) 実験条件内では、気温差は換気量に対して影響が小さかった。また、風向と家屋の主要換気経路との関係が換気風量に大きな影響を与え重要である。
- 3) 木造2階建家、鉄筋コンクリートアパート、鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量は

4. 考 察

換気風量の計算において、実験条件によっては推定値が収束するまでに時間を要した。その理由として、解析には、瞬時一様拡散を仮定していること、また実際には、時々刻々と風向、風速が変化し、換気量もそれに応じ時々刻々と変化しているが、データ処理がこれらの変化に追従できていないことなどが考えられる。

換気風量と風向、風速、温度差などとの相関を検討できるほど十分な結果が得られなかった。しいて相関を述べるなら、鉄筋コンクリートアパートにおいてヒーターを用いて温度差を強制的に与えた場合においても部屋間の風量に顕著な変化が見られなかったこと、また気温差があまり変化していなくても部屋間の空気の主要移動方向と風量は変化している場合が多いことなどがあげられる。このことから今回の実験条件の範囲では温度差は換気風量に強く影響を与える要素にはなっていなかったと考えられる。

鉄筋コンクリートテラスハウスのドアの郵便物受けなどの大きな開口部に対して風が吹いている場合には特に風量が増す傾向にあった。このことは、風向と家屋の主要通気路との関係が重要であることを示唆している。

木造2階建家、鉄筋コンクリートアパート、鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量はそれぞれ220～240、87～110、95～200 m³/hであった。また、自然換気回数は、それぞれ0.77～0.83、0.92～1.2、0.80～1.7回/時であった。木造家屋の風量は他の鉄筋コンクリート家屋より大きいにもかかわらず、換気回数がほぼ同じなのは木造家屋の部屋の容量が大きいためであろう。

5. 結 言

原子炉事故時の施設周辺住民の防護対策の一つとして屋内退避は容易にかつ安全に実施できる方法である。屋内退避による被曝防護効果では、家屋の自然換気率の程度が重要である。本研究では、実家屋の自然換気率の特徴の把握と自然換気率シュミレーションの検証のためのデータを得ることを目的として、自然換気率を測定した。測定対象家屋は木造2階建家、鉄筋コンクリートアパート、鉄筋コンクリートテラスハウスである。測定法にはトレーサーガス法を採用した。実験では炭酸ガスを注入し部屋内のガス濃度とガス注入量などを測定した。得られたデータは最小2乗法を用いて解析し部屋間の換気風量を推定した。以下に結果をまとめる。

- 1) 各部屋間の空気の流入出があるため、放射能防護効果の評価にはこれらを考慮して行う必要がある。
- 2) 実験条件内では、気温差は換気量に対して影響が小さかった。また、風向と家屋の主要換気経路との関係が換気風量に大きな影響を与え重要である。
- 3) 木造2階建家、鉄筋コンクリートアパート、鉄筋コンクリートテラスハウスの換気風量は

それぞれ 220 ~ 240, 80 ~ 110, 95 ~ 200 m³/h であった。

4) また、自然換気回数は、それぞれ 0.77 ~ 0.83, 0.92 ~ 1.2, 0.80 ~ 1.7 回/時であった。
木造家屋の気密性は他の鉄筋コンクリート家屋より悪いにもかかわらず、換気回数がほぼ同じなのは木造家屋の部屋の容量が大きいためである。

今後、家屋構造等のデータ、および風向、気温などのデータをもとに換気率シュミレーション計算を行い、実験結果との比較により計算コードを検証していく予定である。

なお、鉄筋コンクリートテラスハウスの換気率測定においては、日本原子力研究所保健物理部放射線管理第1課風間広志氏に協力して頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) ICRP, "大規模放射線事故の際の公衆の防護：計画のための原則", ICRP Publ. 40, 日本アイソトープ協会
- 2) 山口恭弘, 南賢太郎, 大谷暁, "各種建築材の γ 線遮蔽効果", JAERI-M 85-119 (1985)
- 3) US. EPA, "Protection Action Evaluation. Part 1 The Effectiveness of Sheltering as a Protection Action Against Nuclear Accidents Involving Gaseous Releases", EPA/1-78-001A (1978)
- 4) US. DOE, "Air Infiltration in Building", DOE/CS-0099-D (1979)
- 5) 奥山博康, "一般拡散システムの回路網による状態方程式とそのシステムパラメータの同定理論", 日本建築学会論文報告集, 334, 80 (昭和 59 年)
- 6) 村田幹生, 加藤正平, 野口宏, 国分守信, 奥山博康 "家屋の放射能防護効果に関する研究 (Ⅳ) 家屋の自然換気率および放射能防護効果計算コード (VENTG) の開発", JAERI-M 予定 (1987)

それぞれ 220 ~ 240, 80 ~ 110, 95 ~ 200 m³/h であった。

4) また、自然換気回数は、それぞれ 0.77 ~ 0.83, 0.92 ~ 1.2, 0.80 ~ 1.7 回/時であった。
木造家屋の気密性は他の鉄筋コンクリート家屋より悪いにもかかわらず、換気回数がほぼ同じなのは木造家屋の部屋の容量が大きいためである。

今後、家屋構造等のデータ、および風向、気温などのデータをもとに換気率シミュレーション計算を行い、実験結果との比較により計算コードを検証していく予定である。

なお、鉄筋コンクリートテラスハウスの換気率測定においては、日本原子力研究所保健物理部放射線管理第1課風間広志氏に協力して頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) ICRP, "大規模放射線事故の際の公衆の防護：計画のための原則", ICRP Publ. 40, 日本アイソトープ協会
- 2) 山口恭弘, 南賢太郎, 大谷暁, "各種建築材の γ 線遮蔽効果", JAERI-M 85-119 (1985)
- 3) US. EPA, "Protection Action Evaluation. Part 1 The Effectiveness of Sheltering as a Protection Action Against Nuclear Accidents Involving Gaseous Releases", EPA/1-78-001A (1978)
- 4) US. DOE, "Air Infiltration in Building", DOE/CS-0099-D (1979)
- 5) 奥山博康, "一般拡散システムの回路網による状態方程式とそのシステムパラメータの同定理論", 日本建築学会論文報告集, 334, 80 (昭和 59 年)
- 6) 村田幹生, 加藤正平, 野口宏, 国分守信, 奥山博康 "家屋の放射能防護効果に関する研究 (Ⅳ) 家屋の自然換気率および放射能防護効果計算コード (VENTG) の開発", JAERI-M 予定 (1987)

付録 トレーサーガス法による換気量推定法の理論

換気量の推定理論を述べる。本論は奥山の「一般拡散システムの回路網による状態方程式とそのシステムパラメータの同定理論」⁵⁾をもとにしている。

いま1番からn番までのチャンバがあり、それらの内部のトレーサーガス濃度を x_1 から x_n とする(図1参照)。家屋外周の外気濃度は一般には均一ではなく x_{n+1} から x_{n+n_0} まで n_0 種類ある

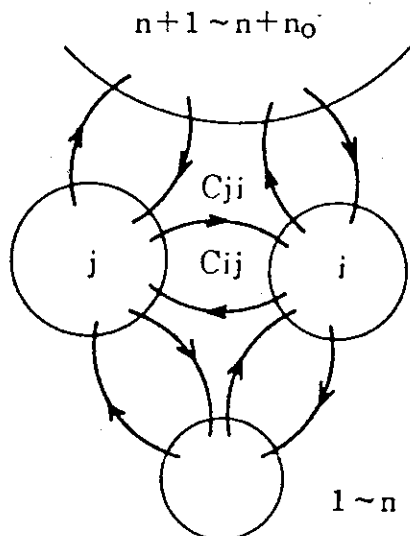


図1 多数チャンバのシステム

とする。またトレーサーガスの発生器が1から n_g まで n_g 個あるとする。外気濃度 x_{n+1} から x_{n+n_0} は独立した濃度を持つ仮想的な $n+1$ から $n+n_0$ 番チャンバの濃度とみなせば、一般に、 i 番から j 番チャンバへの風量は c_{ij} と定義される。ある j 番チャンバにおける濃度推移の微分方程式は次式となる。ドットは時間微分を意味する。

$$m_{jj} \cdot \dot{x}_j = \sum_{i=1}^{n+n_0} c_{ij} \cdot x_i - \sum_{i=1}^{n+n_0} c_{ji} \cdot x_j + g_{dj} \quad (1)$$

ここに m_{jj} は j 番チャンバの容積、 g_{dj} はガス発生器から直接 j 番チャンバへ入力されるガスの量である。 i 番のガス発生器のガス発生量 g_i から、 j 番チャンバへ入力される入力率を r_{ij} とすると次式が成立する。

$$g_{dj} = \sum_{i=1}^{n_g} r_{ij} \cdot g_i \quad (2)$$

この換気による拡散システムの状態ベクトルを $\mathbf{x} = {}^t(x_1, \dots, x_n)$ 、固定入力ベクトルを $\mathbf{x}_0 = {}^t(x_{n+1}, \dots, x_{n+n_0})$ 、自由入力ベクトルを $\mathbf{g} = {}^t(g_1, \dots, g_{n_g})$ と定義すれば、状態方程式は直ちに次のように構成される。

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{C}_0 \cdot \mathbf{x}_0 + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g} \quad (3)$$

\mathbf{M} は容量マトリクス(n, n)、 \mathbf{C} はコンダクタンスマトリクス(n, n)、 \mathbf{C}_0 は固定入力マトリクス(n, n_0)、 \mathbf{R} は自由入力マトリクス(n, n_g)と呼ぶことにする。 \mathbf{M} は m_{jj} によって、 \mathbf{C}

と \mathbf{C}_0 は c_{ij} によって、 \mathbf{R} は r_{ij} によって構成される。

以上により観測値とは \mathbf{x} , \mathbf{x}_0 , \mathbf{g} であり、これらによって同定すべきシステムパラメータとは m_{ij} , c_{ij} , r_{ij} である。ただし m_{ij} とは \mathbf{M} の i 行 j 列要素を表わす。

同定すべき m_{ij} を任意の要素順番でもつベクトルを \mathbf{m} , c_{ij} のそれを \mathbf{c} , r_{ij} のそれを \mathbf{r} とする。 \mathbf{c} の要素間には質量保存則から $\sum_{i=1}^{n+n_0} c_{ij} = \sum_{i=1}^{n+n_0} c_{ji}$ などの拘束式が存在するから、 \mathbf{c} の部分ベクトル \mathbf{c}_m によって $\mathbf{c} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{c}_m$ なる従属関係が作られる。 \mathbf{L} を \mathbf{c} の縮小マトリクスと呼ぶことにする。

(3) の状態方程式から、既知なシステムパラメータによってできる要素は左辺に、残りは右辺に移項すれば次式となる。

$$\mathbf{y}(t) = -\tilde{\mathbf{M}} \cdot \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + [\tilde{\mathbf{C}}, \tilde{\mathbf{C}}_0] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_0 \end{bmatrix} + \tilde{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{g} \quad (4)$$

ここに $\tilde{}$ は既知なパラメータが左辺の \mathbf{y} へ抜けていったあとのマトリクスを表わす。同定すべきパラメータは右辺の $\tilde{\mathbf{M}}$, $\tilde{\mathbf{C}}$, $\tilde{\mathbf{C}}_0$, $\tilde{\mathbf{R}}$ の中に入っているが、それらを \mathbf{m} , \mathbf{c}_m , \mathbf{r} とおいたので (4) 式の右辺をこれら \mathbf{m} , \mathbf{c}_m , \mathbf{r} が外に出て、明らかな形になるように変形する。すると (4) 式は次式のように表わされる。

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{D}(\dot{\mathbf{x}}_i) \cdot \mathbf{m} + \mathbf{X}(\mathbf{x}_i) \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{c}_m + \mathbf{G}(\mathbf{g}_i) \cdot \mathbf{r} \quad (5)$$

これらのマトリクス $\mathbf{D}(\dot{\mathbf{x}}_i)$, $\mathbf{X}(\mathbf{x}_i)$, $\mathbf{G}(\mathbf{g}_i)$ は \mathbf{m} , \mathbf{c} , \mathbf{r} の内容が定義されれば、回路網の概念により、直ちに一意的に構成される。

いま $\mathbf{Z}(t)$ を観測マトリクスと呼んで次式で定める。

$$\mathbf{Z}(t) = [\mathbf{D}(\dot{\mathbf{x}}_i), \mathbf{X}(\mathbf{x}_i) \cdot \mathbf{L}, \mathbf{G}(\mathbf{g}_i)] \quad (6)$$

また \mathbf{a} をシステムパラメータベクトルと呼んで次式で定める。

$$\mathbf{a} = {}^t(\mathbf{m}, \mathbf{c}_m, \mathbf{r}) \quad (7)$$

したがって (5) 式は次式のように簡潔に表現される。

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{Z}(t) \cdot \mathbf{a} \quad (8)$$

ここに、 $\mathbf{y}(t)$ は観測ベクトルと呼ぶことにし、(8) 式をシステムパラメータ \mathbf{a} に関する観測方程式と呼ぶことにする。なお \mathbf{a} のサイズを n_a と表わす。

観測方程式誤差を $\mathbf{e}(t)$ とするとき、それは次式で表される。

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t) - \mathbf{Z}(t) \cdot \mathbf{a} \quad (9)$$

$\mathbf{e}(t)$ の評価関数 \mathbf{J}_s を次式のように、 $[0, T]$ 時間区間での $\mathbf{e}(t)$ の二次形式積分量で表わす。

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{a}) = \int_0^T \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{W}(t) \cdot \mathbf{e}(t) dt = \sum_{j=1}^P \int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} {}^t \mathbf{e}_j(t) \cdot \mathbf{W}(t) \cdot \mathbf{e}(t) dt \quad (10)$$

ただし (10) 式右辺は $[0, T]$ を Δt で P 分割したものである。また $\mathbf{W}(t)$ は観測誤差について不偏推定をするための重みマトリクスである。決め方は後述する。(11) 式を数値計算可能なように差分化すると次式の近似評価関数 $\mathbf{J}(\mathbf{a})$ が得られる。

$$\mathbf{J}(\mathbf{a}) = \sum_{j=1}^P \frac{1}{\Delta t^2} \left(\int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} {}^t \mathbf{e}(t) dt \right) \left(\int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} \mathbf{W}(t) dt \right) \left(\int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} \mathbf{e}(t) dt \right) = \sum_{j=1}^P \frac{1}{\Delta t^2} {}^t \mathbf{e}_j \cdot \mathbf{W}_j \cdot \mathbf{e}_j \quad (12)$$

$$= \sum_{j=1}^p \frac{1}{\Delta t^2} {}^t(\mathbf{y}_j - \mathbf{Z}_j \mathbf{a}) \cdot \mathbf{W}_j \cdot (\mathbf{y}_j - \mathbf{Z}_j \cdot \mathbf{a}) \quad (13)$$

$\mathbf{J}(\mathbf{a})$ を \mathbf{a} に関して最小にする条件は

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{a}} = 0 \quad (14)$$

であり、これを計算すれば \mathbf{a} の推定値 $\hat{\mathbf{a}}$ が次式のように得られる。

$$\hat{\mathbf{a}} = \left(\sum_{j=1}^p {}^t \mathbf{Z}_j \cdot \mathbf{W}_j \cdot \mathbf{Z}_j \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^p {}^t \mathbf{Z}_j \cdot \mathbf{W}_j \cdot \mathbf{y}_j \right) \quad (15)$$

重みマトリクス \mathbf{W}_j は次のようにして定められる。 x_i の観測誤差の標準偏差を σ_{x_i} 、 g_i のそれを σ_{g_i} とするとき、ベクトル $\sigma_{x_n} = {}^t(\sigma_{x_1}, \dots, \sigma_{x_n})$ 、 $\sigma_{x_{n+no}} = {}^t(\sigma_{x_1}, \dots, \sigma_{x_{n+no}})$ 、 $\sigma_g = {}^t(\sigma_{g_1}, \dots, \sigma_{g_{ng}})$ を定義する。このとき観測方程式誤差の分散共分散マトリクス \mathbf{A}_0 は次式となる。

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{M} \cdot \text{diag}(\sigma_{x_n} \cdot {}^t \sigma_{x_n}) \cdot {}^t \mathbf{M} + [\mathbf{C}, \mathbf{C}_0] \text{diag}(\sigma_{x_{n+no}} \cdot {}^t \sigma_{x_{n+no}}) \cdot {}^t [\mathbf{C}, \mathbf{C}_0] + \mathbf{R} \cdot \text{diag}(\sigma_g \cdot {}^t \sigma_g) \cdot {}^t \mathbf{R} \quad (16)$$

ここに diag はそのアーギュメント内のマトリクスの対角要素のみによって構成されるマトリクスを表わす。重みマトリクスは次式で計算される。

$$\mathbf{W}_j = \left(\int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} \mathbf{A}_0 dt \right)^{-1} \quad (17)$$

(16) の誤差伝播構造は \mathbf{a} に左右されているから (15) 式によって一括同定する場合は、最初 \mathbf{W}_j を全て単位マトリクスにおいて同定し、次回からは前回の同定結果によって \mathbf{W}_j を作り同定を行い、これを繰り返して同定解に収束させる。

次にシステムパラメーター \mathbf{a} に関する離散時間システムを作る。

いま \mathbf{A}_k を次式のように定義する。

$$\mathbf{A}_k^{-1} = \sum_{j=1}^k {}^t \mathbf{Z}_j \cdot \mathbf{W}_j \cdot \mathbf{Z}_j = \mathbf{A}_{k-1}^{-1} + {}^t \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{W}_k \cdot \mathbf{Z}_k \quad (18)$$

(18) 式に Householder または Woodbury の逆行列公式¹⁴⁾ を適用すれば次式となる。

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{A}_{k-1} - \mathbf{A}_{k-1} \cdot {}^t \mathbf{Z}_k \cdot (\mathbf{W}_k^{-1} + \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{A}_{k-1} \cdot {}^t \mathbf{Z}_k)^{-1} \cdot \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{A}_{k-1} \quad (19)$$

(19) 式を用いて (15) 式を変形すれば、次式の \mathbf{a} に関する離散時間システムが得られる。

$$\mathbf{a}_k = \boldsymbol{\phi}_k \cdot \mathbf{a}_{k-1} + \mathbf{B}_k \cdot \mathbf{y}_k \quad (20)$$

ここに k は時刻添字であり、時間増分は Δt である。また、推移行列 $\boldsymbol{\phi}_k$ 、駆動行列 \mathbf{B}_k はそれぞれ次式で表される。

$$\boldsymbol{\phi}_k = \mathbf{E}_a - \mathbf{A}_{k-1} \cdot {}^t \mathbf{Z}_k \cdot (\mathbf{W}_k^{-1} + \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{A}_{k-1} \cdot {}^t \mathbf{Z}_k)^{-1} \cdot \mathbf{Z}_k \quad (21)$$

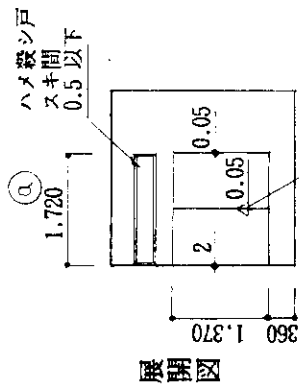
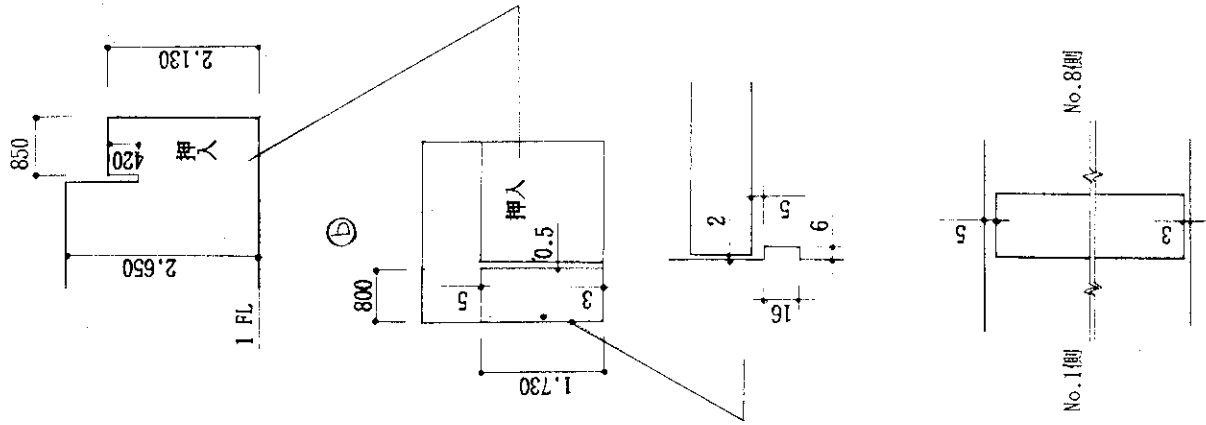
$$\mathbf{B}_k = \mathbf{A}_k \cdot {}^t \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{W}_k \quad (22)$$

ただし \mathbf{E}_a は \mathbf{a} のサイズの単位マトリクスである。

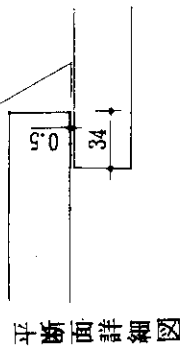
最後に同定のアルゴリズムについて述べる。

十分な観測期間を経たあと、一括して同定を行うアルゴリズムは次のようになる。まず $\hat{\mathbf{a}}_0$ を 0 におく。

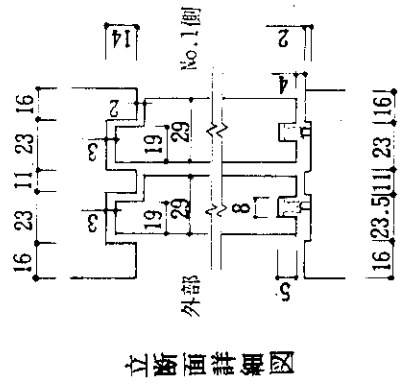
- ① もし一回目の同定であれば、重みマトリクス \mathbf{W}_j は単位マトリクスにおき、二回目以降の同定であれば前回で得られている同定結果 $\hat{\mathbf{a}}_0$ を用いて、(16)式により Λ_0 を計算し、(17)式により \mathbf{W}_j を決める。そして(15)式右辺の ${}^t\mathbf{Z}_j \cdot \mathbf{W}_j \cdot \mathbf{Z}_j$ と ${}^t\mathbf{Z}_j \cdot \mathbf{W}_j \cdot \mathbf{y}_j$ のそれぞれの和を計算していく。
- ② (15)式により推定値 $\hat{\mathbf{a}}$ を求め、これを $\hat{\mathbf{a}}_1$ におく。
- ③ $\|\hat{\mathbf{a}}_1 - \hat{\mathbf{a}}_0\| < \varepsilon$ (ε は許容誤差) であれば同定完了とする。もしそうでなければ $\hat{\mathbf{a}}_0$ に $\hat{\mathbf{a}}_1$ を置き換え、①にもどる。



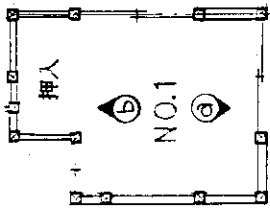
展開図



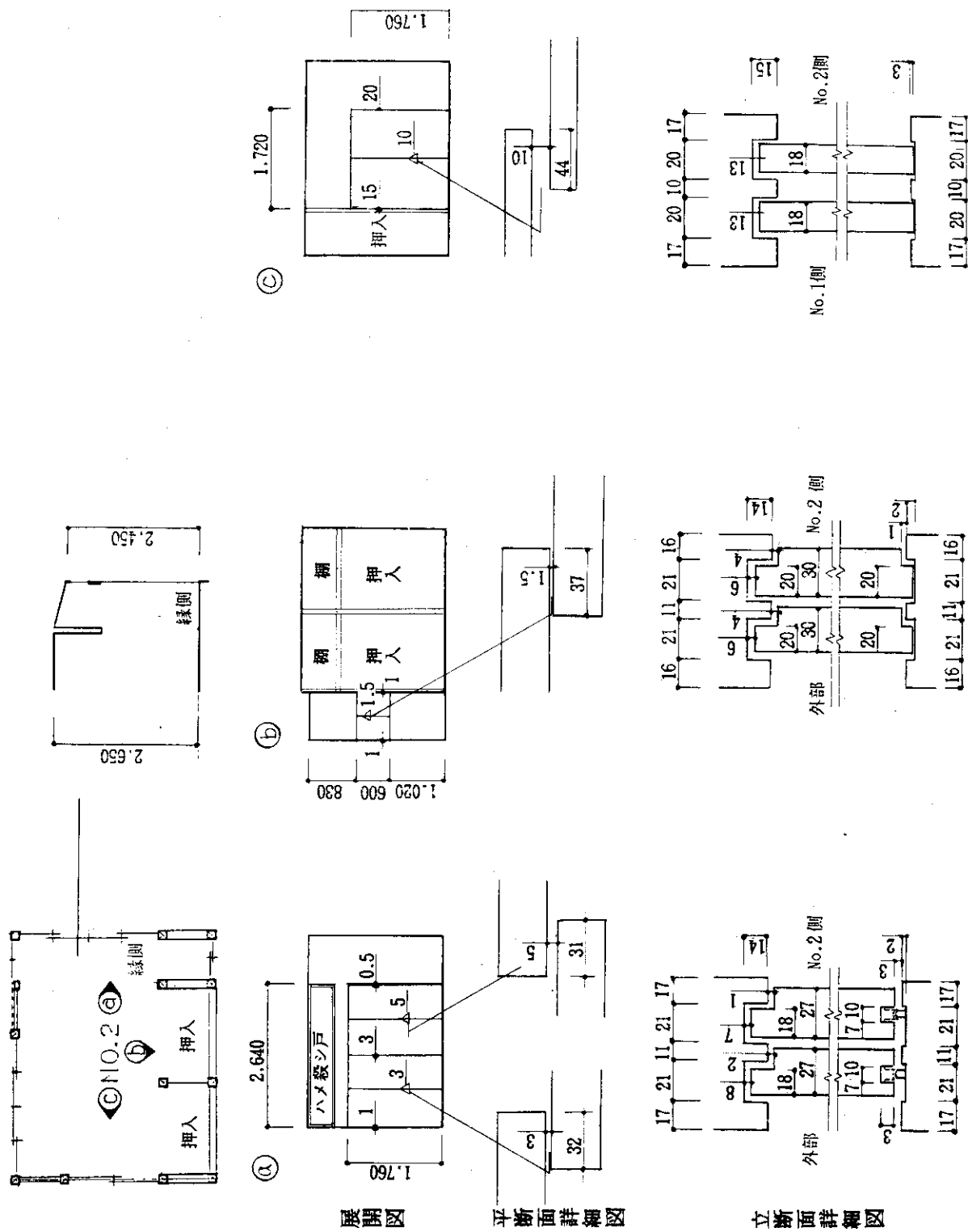
平断面詳細図



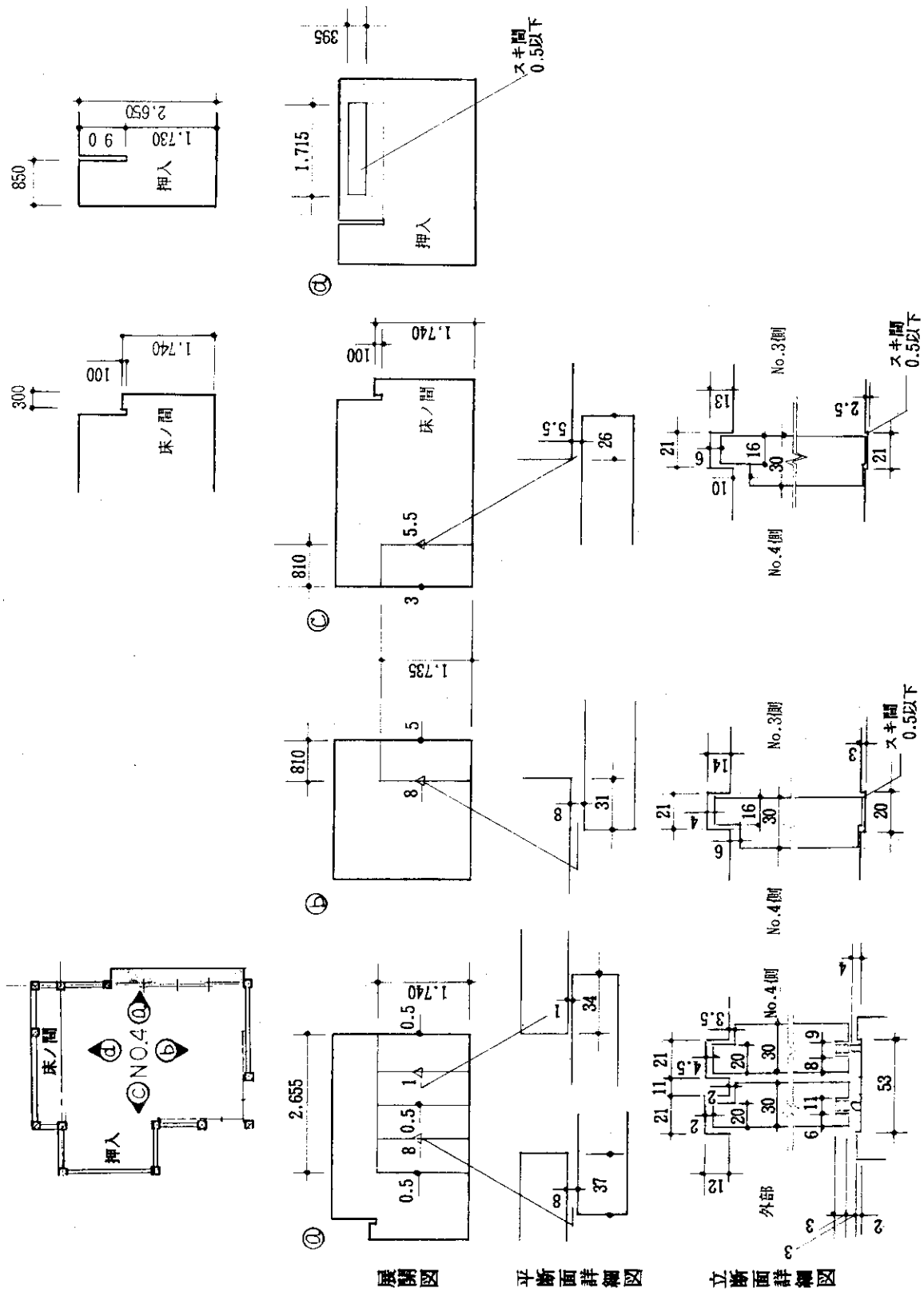
立断面詳細図



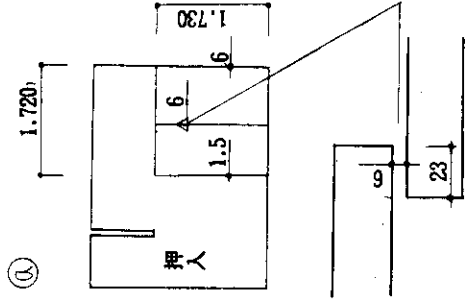
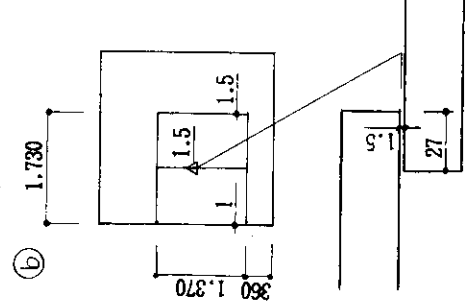
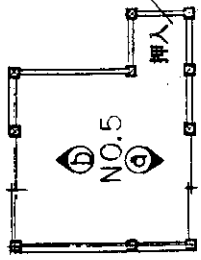
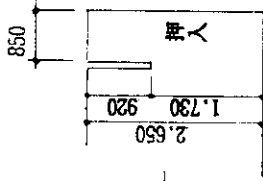
付図 A-1 部屋 No. 1 展開図・開口部断面詳細図



付図 A-2 部屋No.2 展開図・開口部断面詳細図

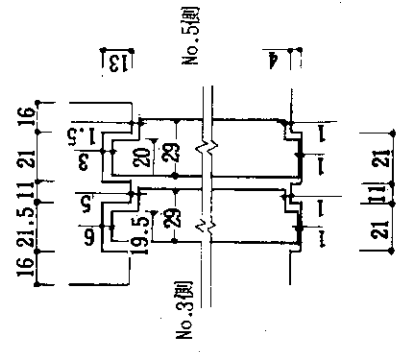
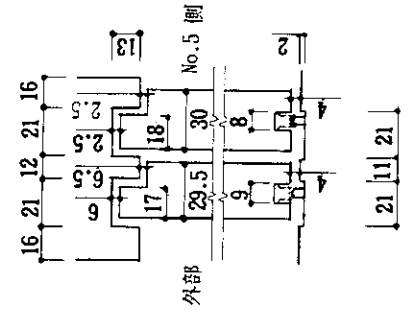


付図 A-4 部屋No.4 展開図・開口部断面詳細図



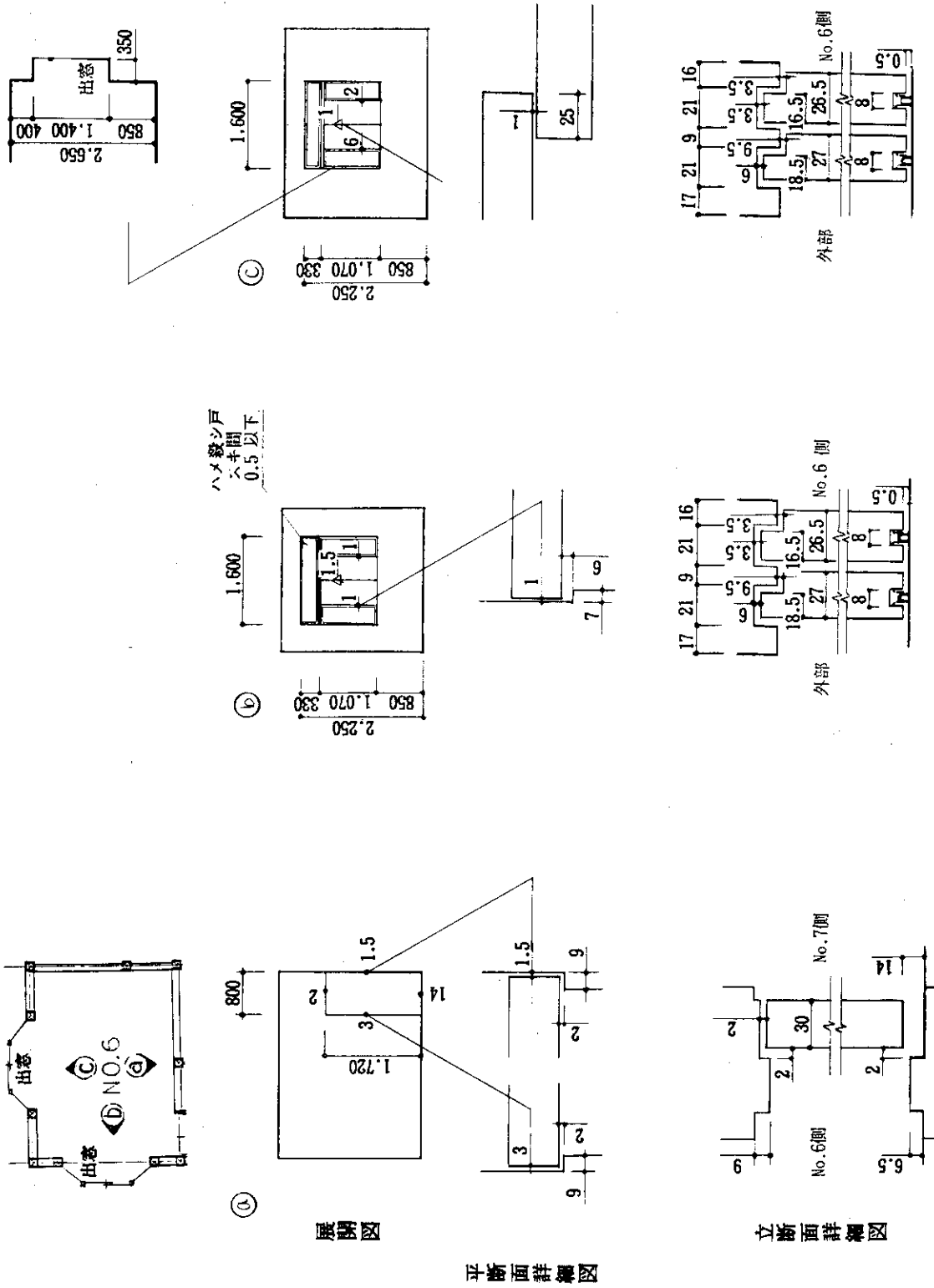
展開図

平断面詳細図

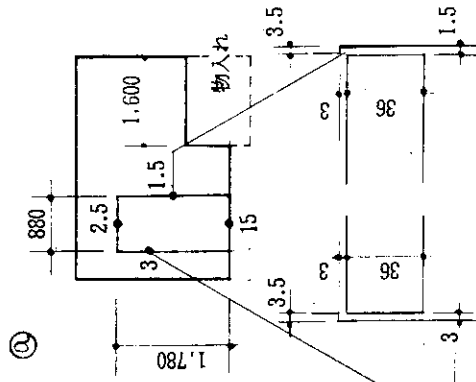
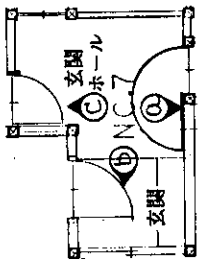


立断面詳細図

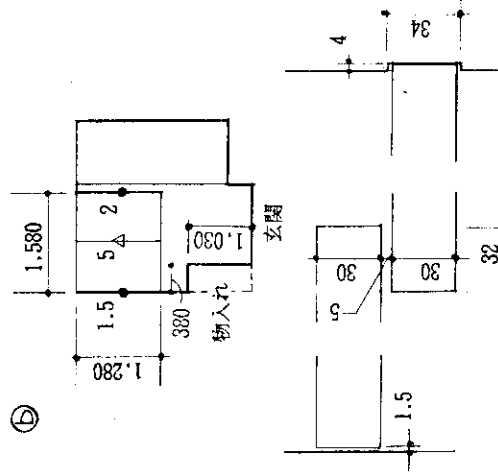
付図 A-5 部屋 No.5 展開図・開口部断面詳細図



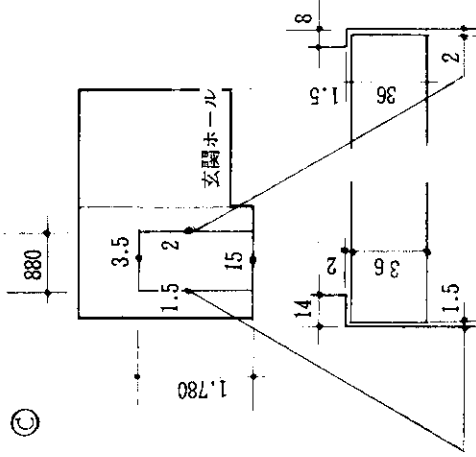
付図A-6 部屋No.6 展開図・開口部断面詳細図



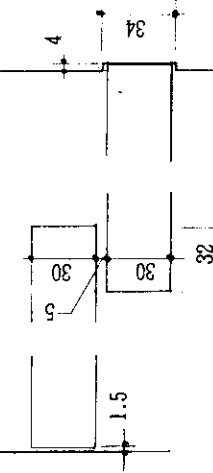
展開図



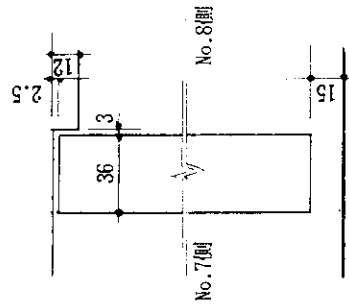
B



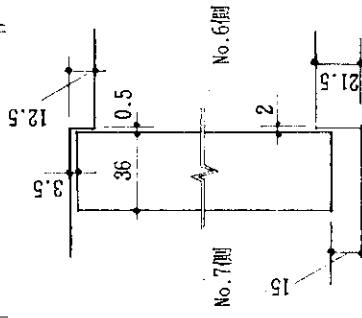
C



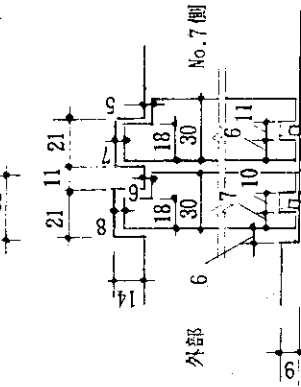
立断面詳細図



立断面詳細図

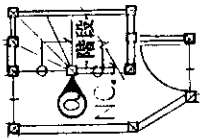


No. 7側
No. 6側

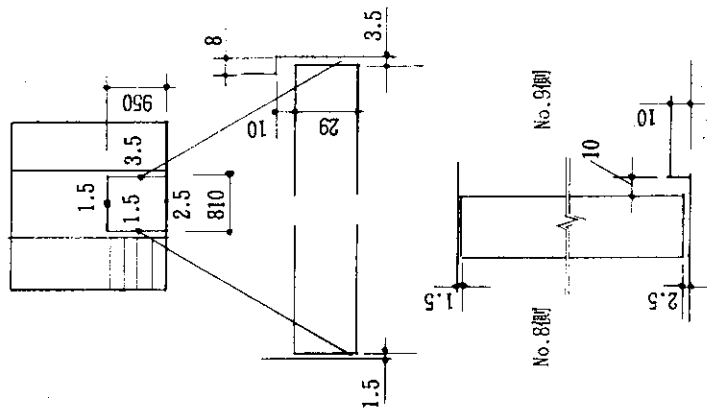


No. 7側
外部 6

付図A-7 部屋No.7 展開図・開口部断面詳細図



㉑

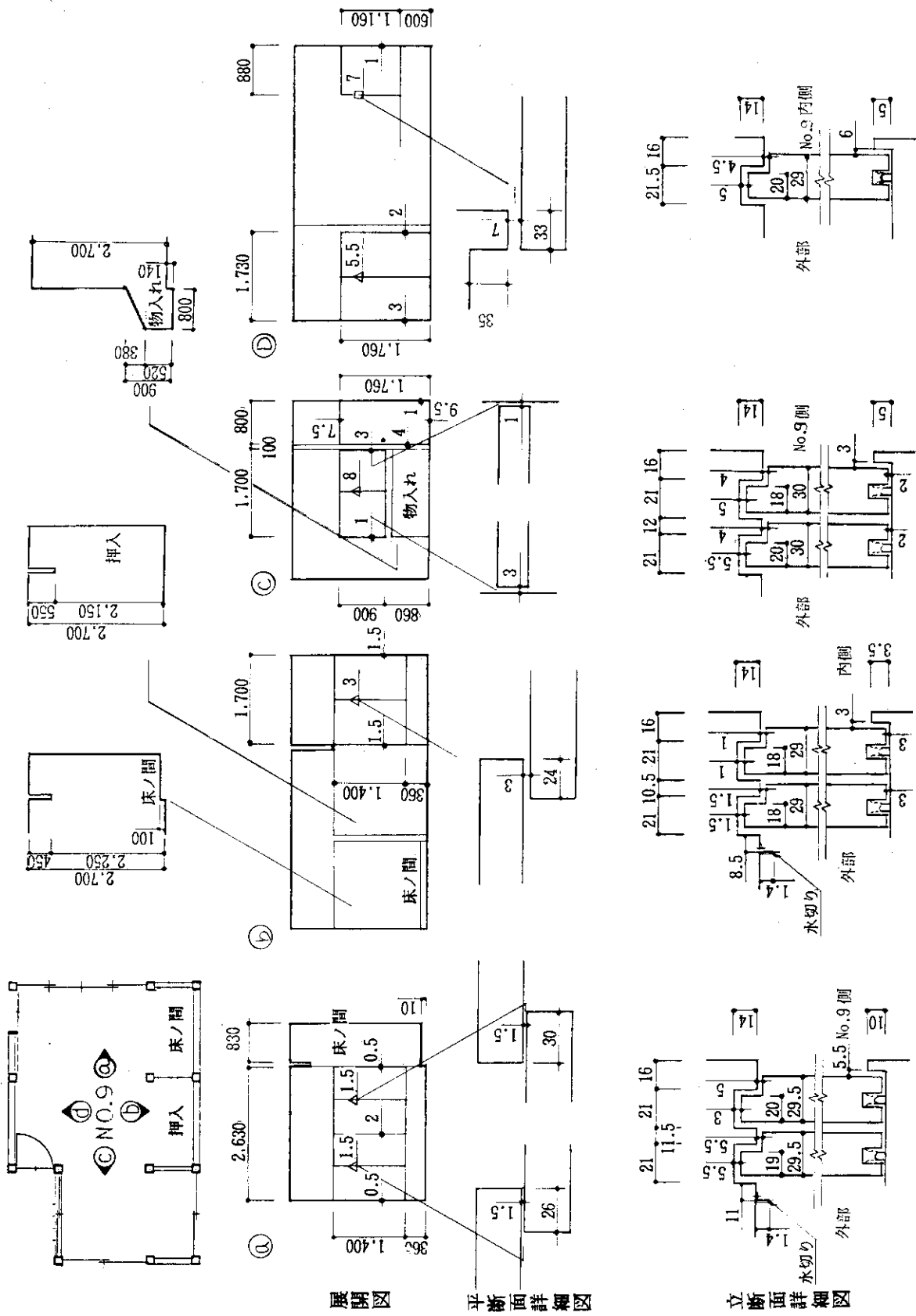


展開図

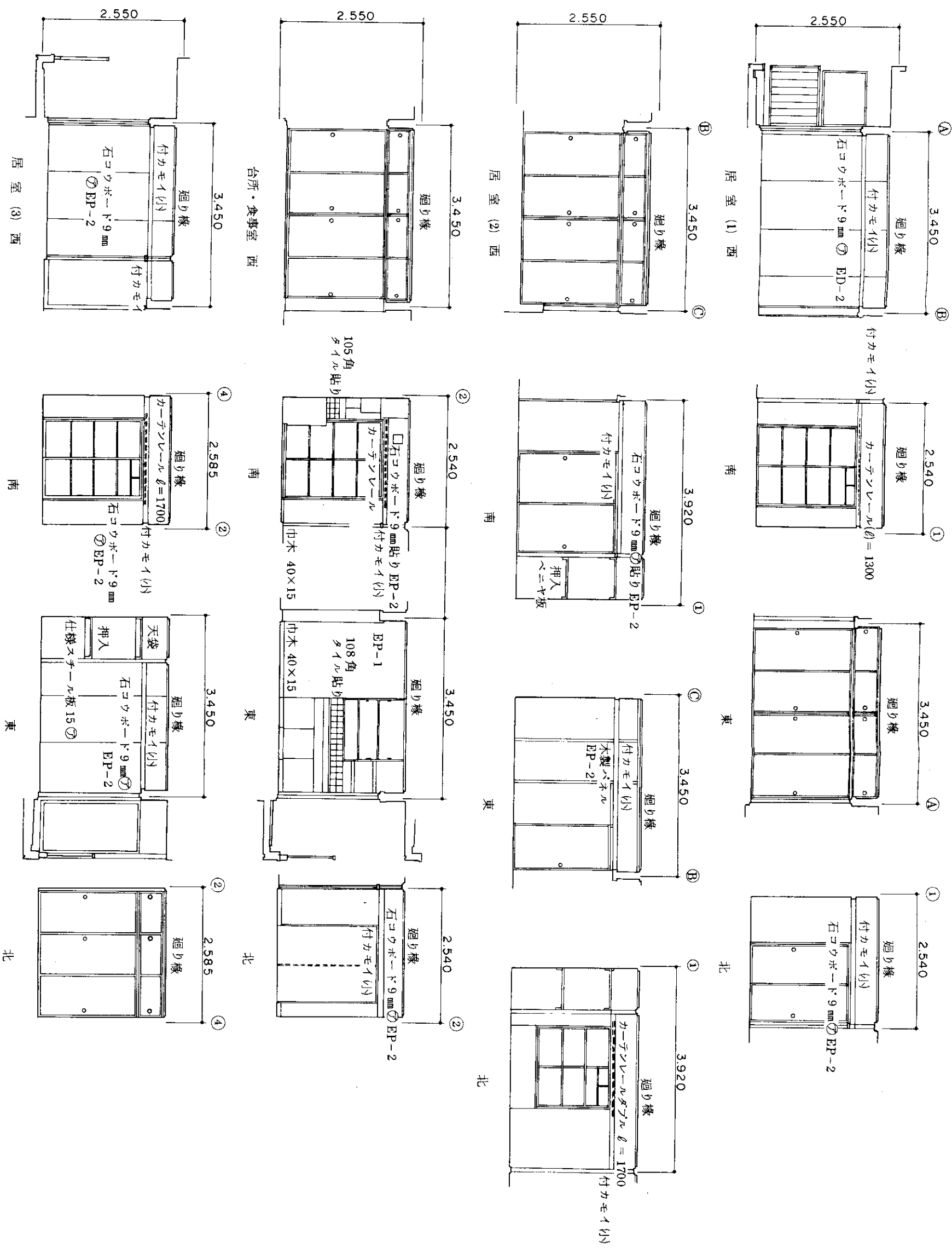
平断面詳細図

立断面詳細図

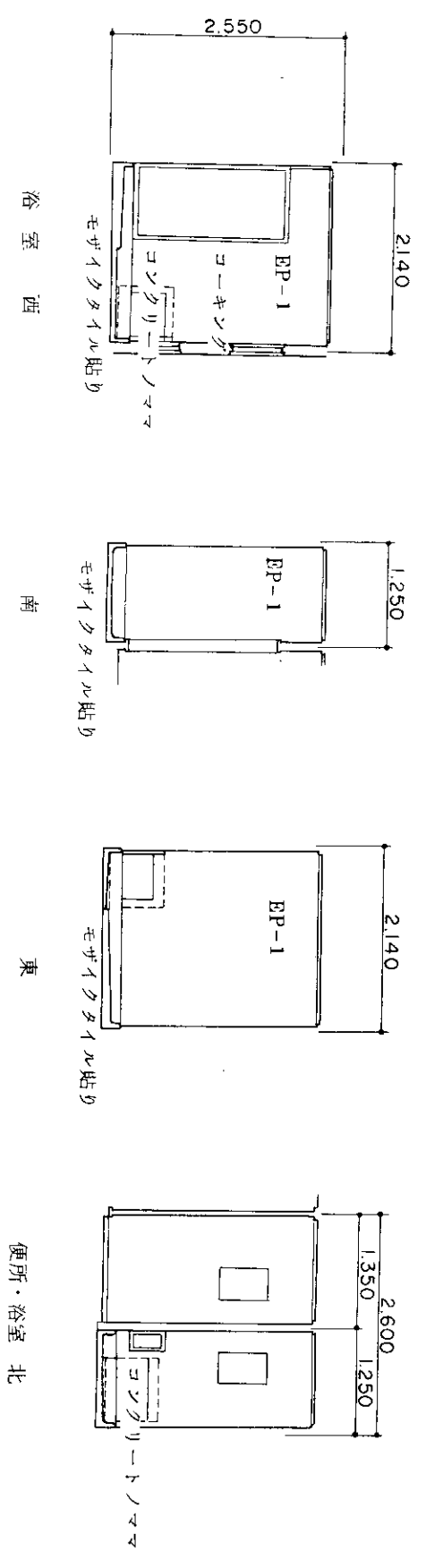
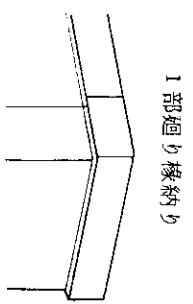
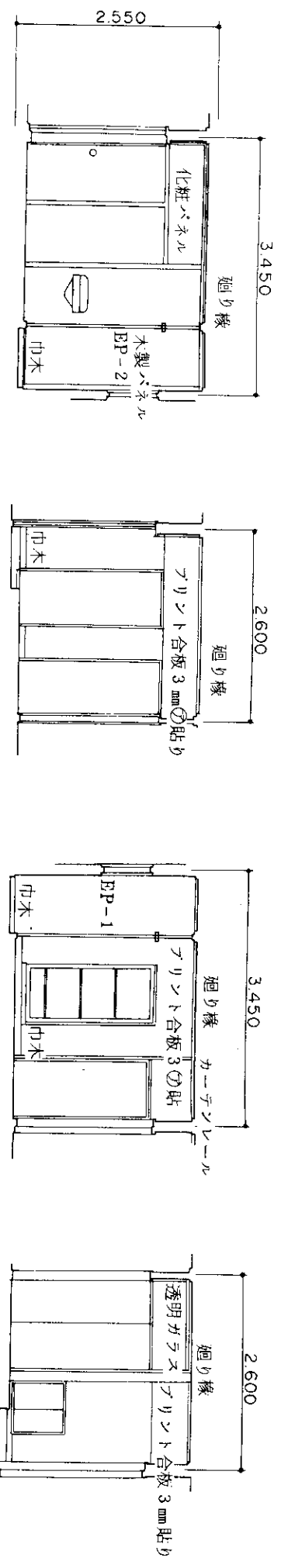
付図A-8 部屋No.8 展開図・開口部断面詳細図



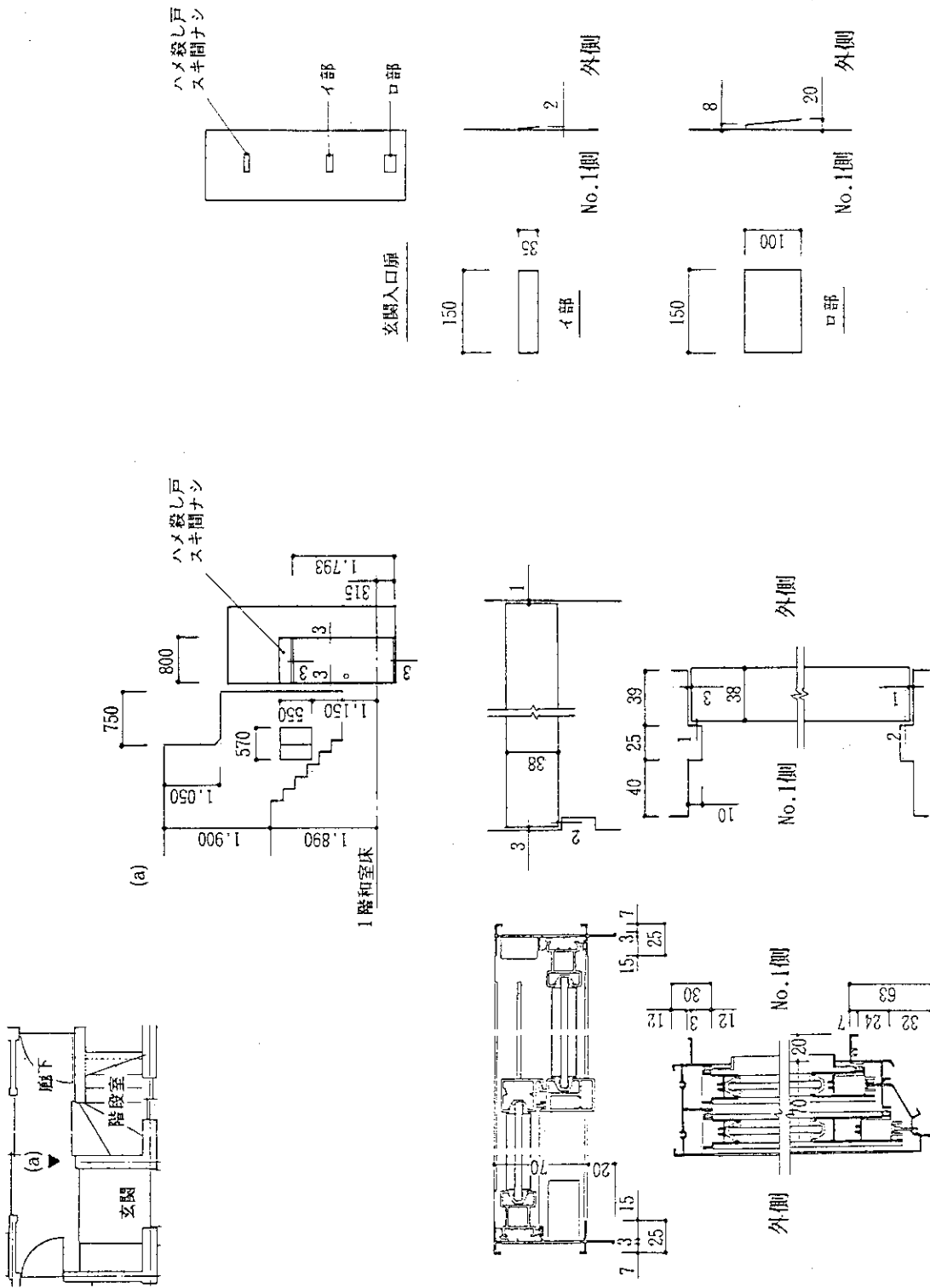
付図 A-9 部屋 No. 9 展開図・開口部断面詳細図



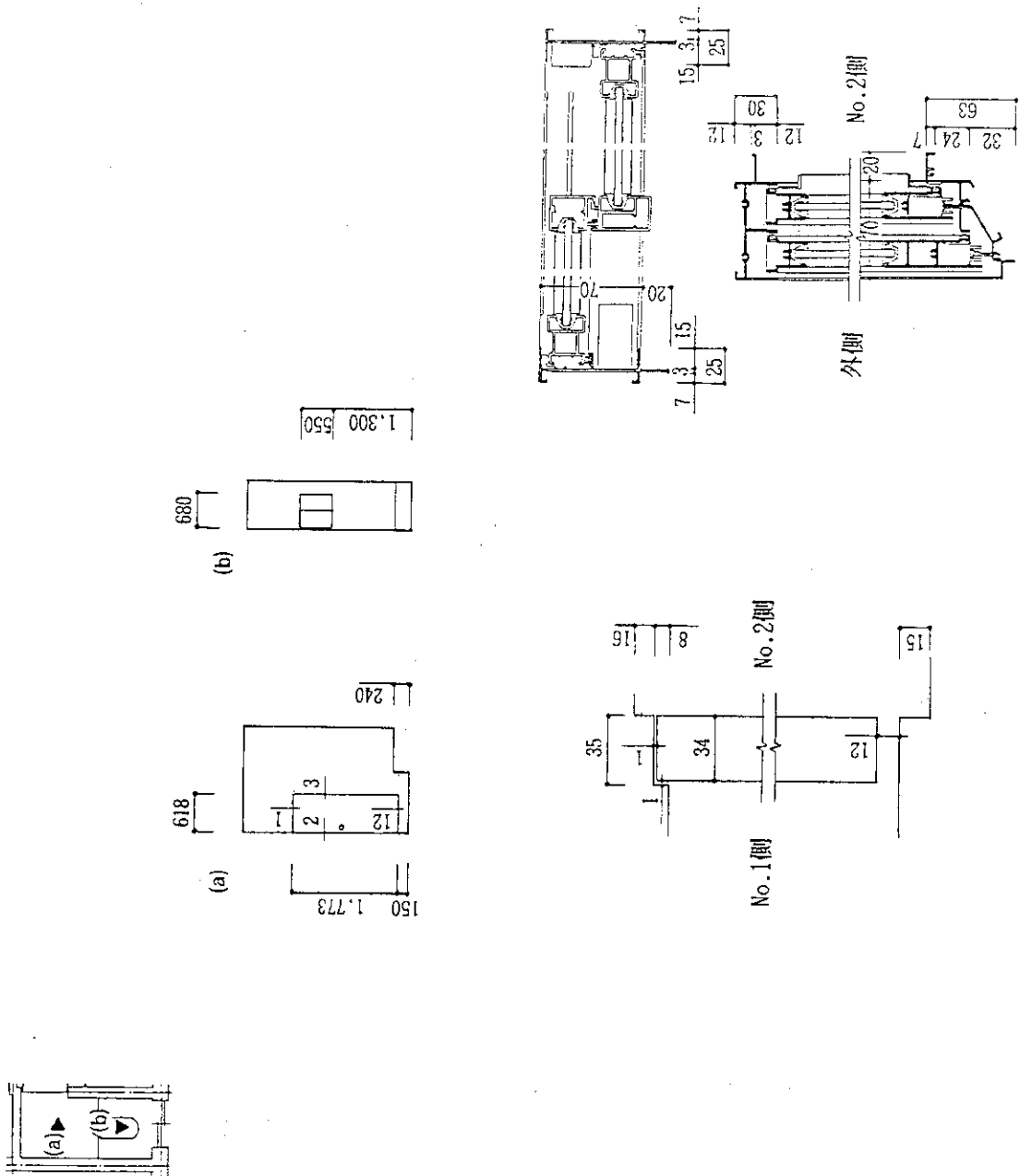
付図B-1 鉄筋コンクリートアパートの展開図



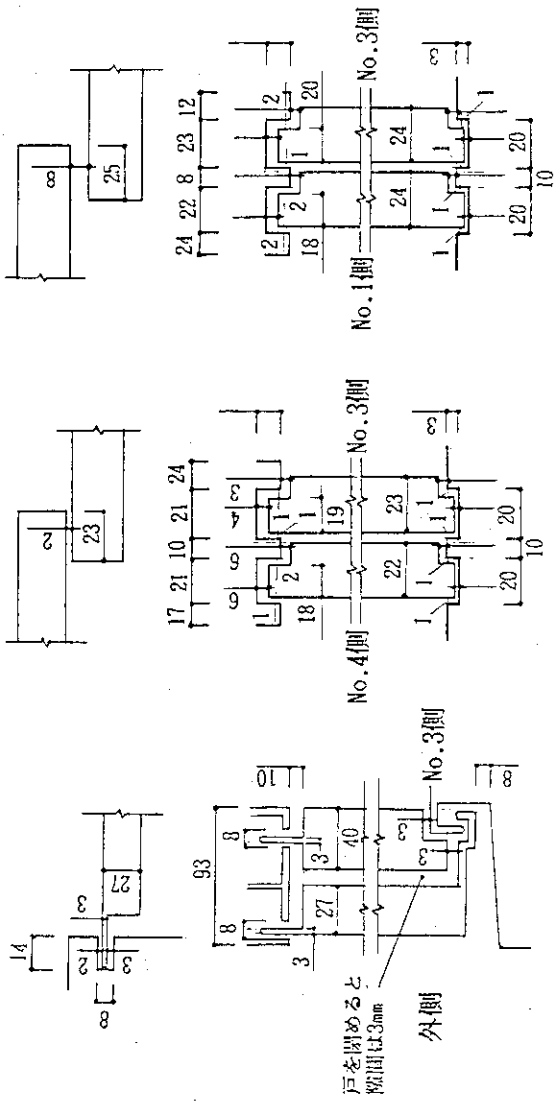
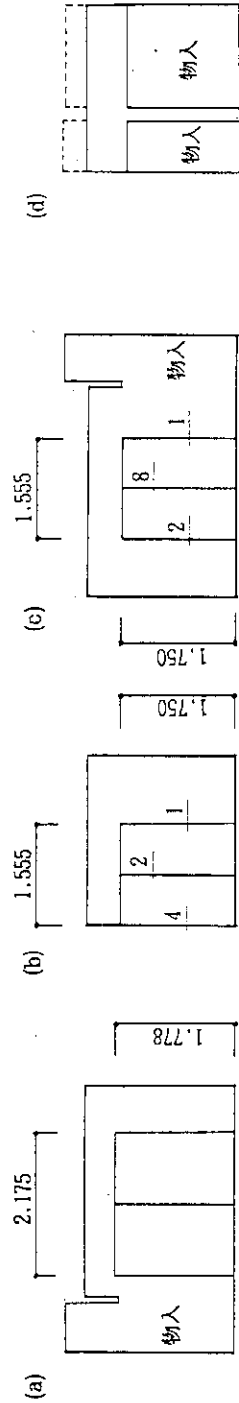
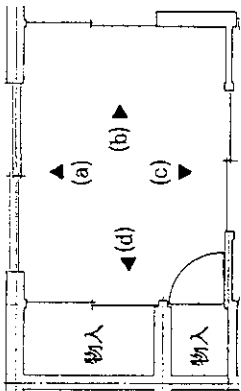
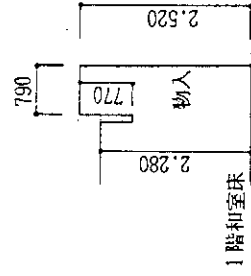
付図B-2 鉄筋コンクリートアパートの展開図



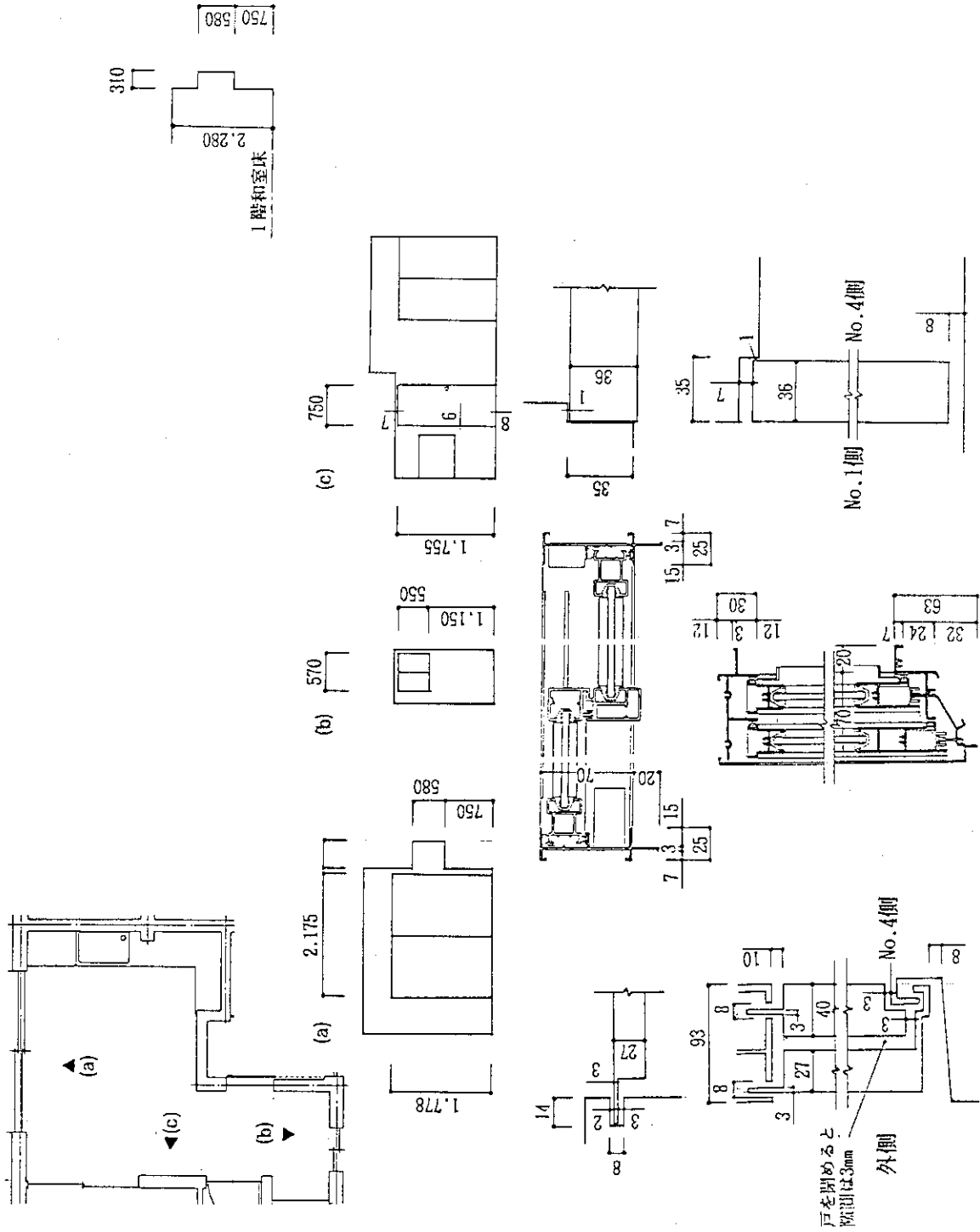
付図C-1 室1展開図・開口部断面詳細図



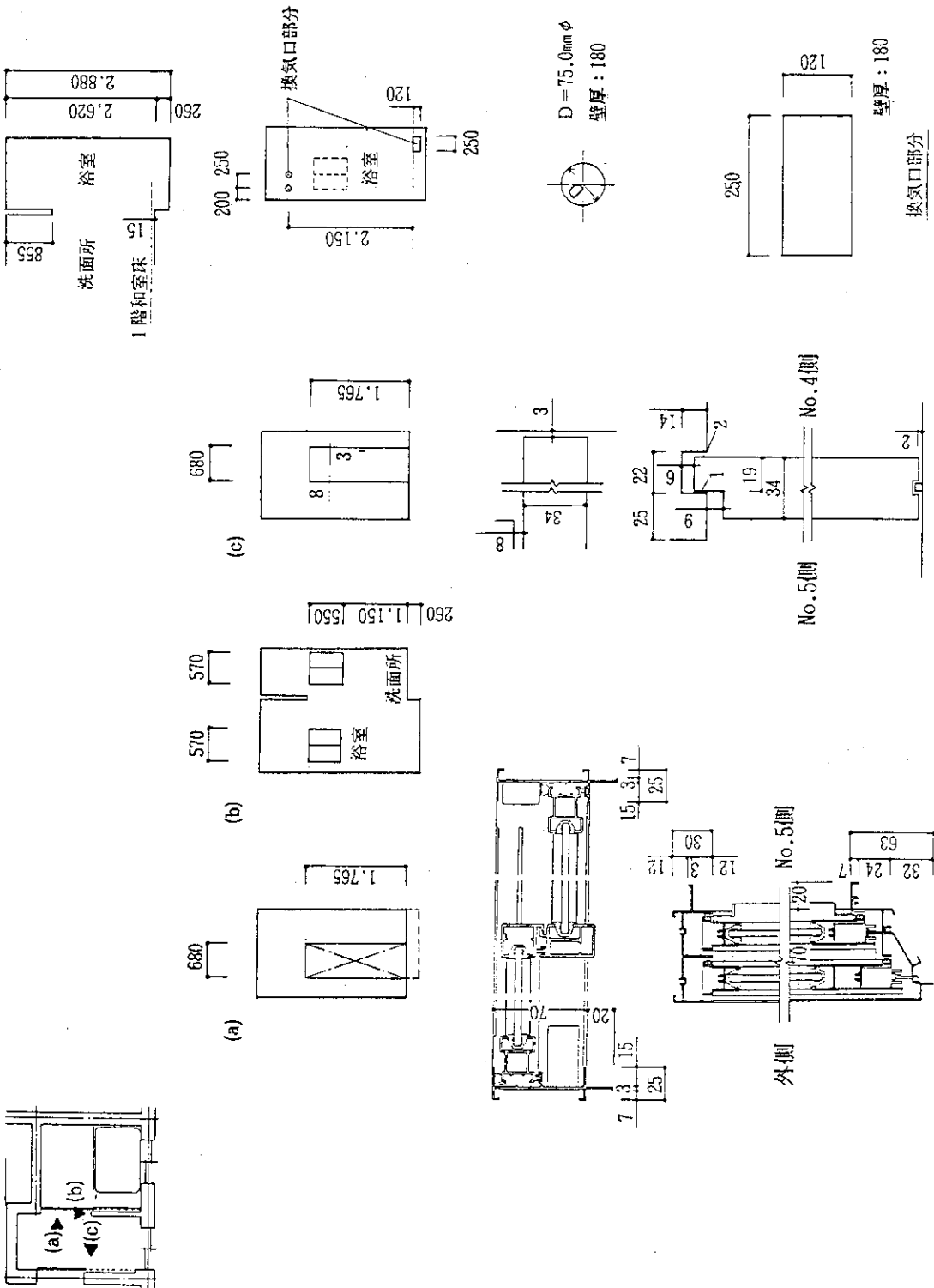
付図C-2 室2展開図・開口部断面詳細図



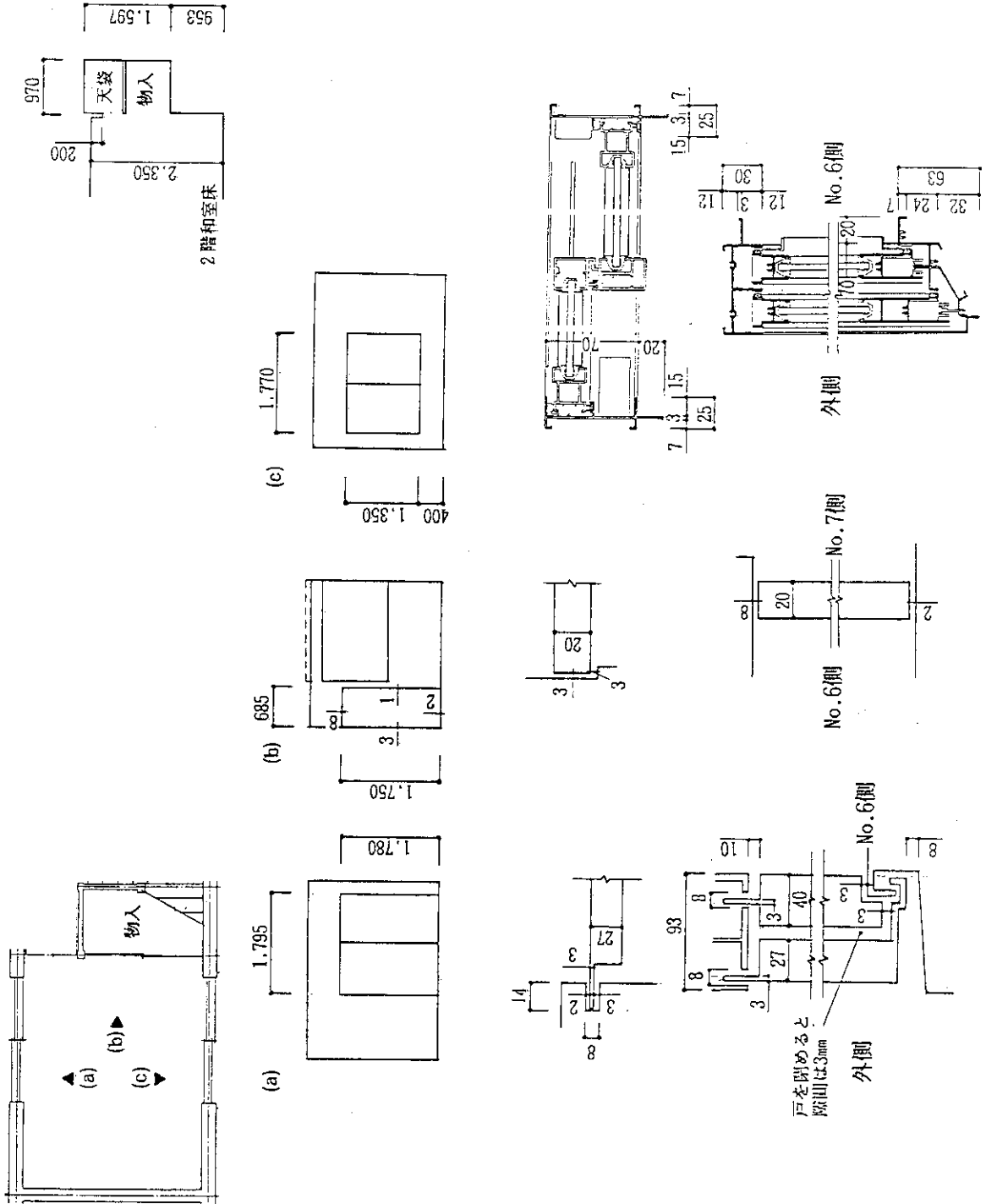
付図C-3 室3展開図・開口部断面詳細図



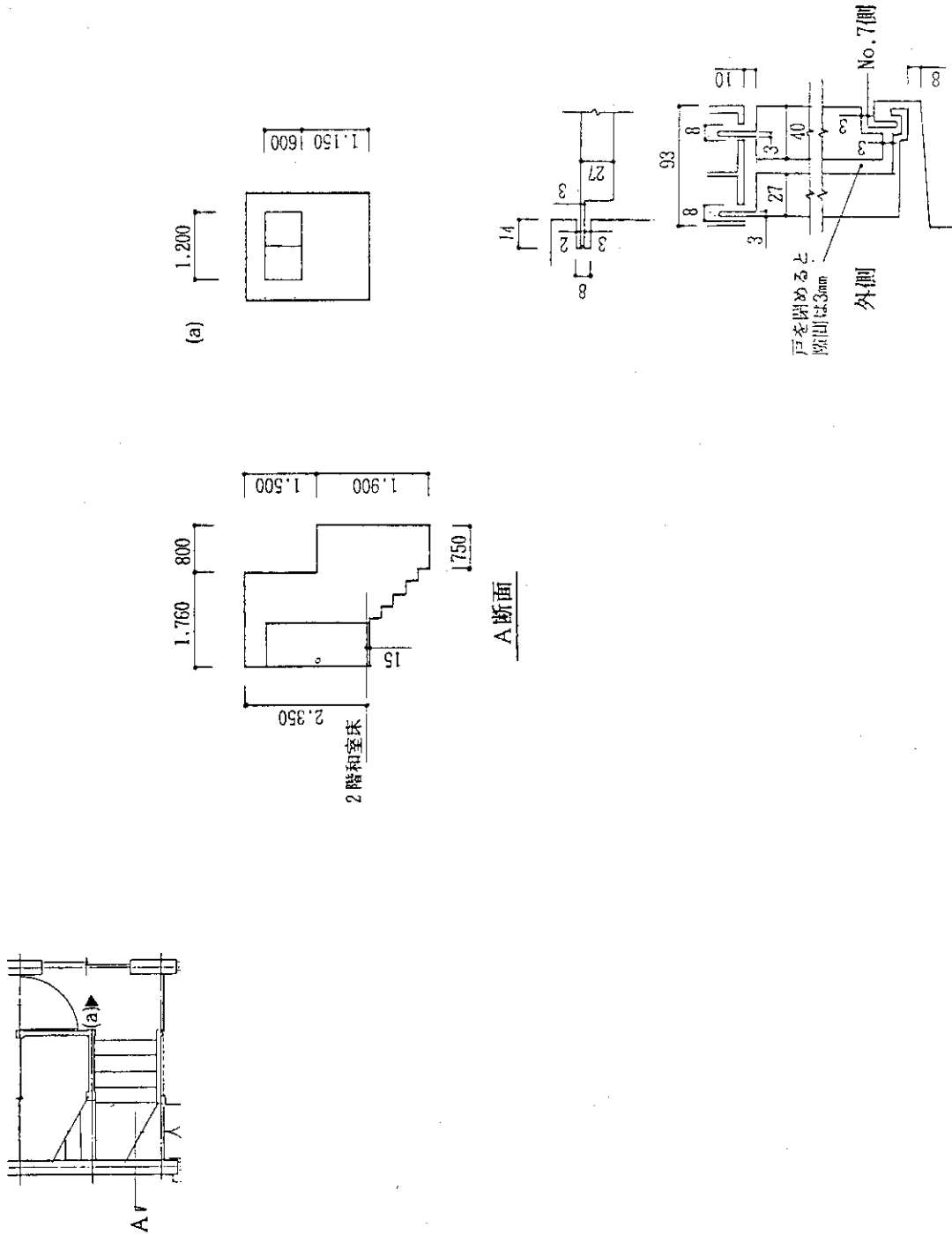
付図C-4 室4展開図・開口部断面詳細図



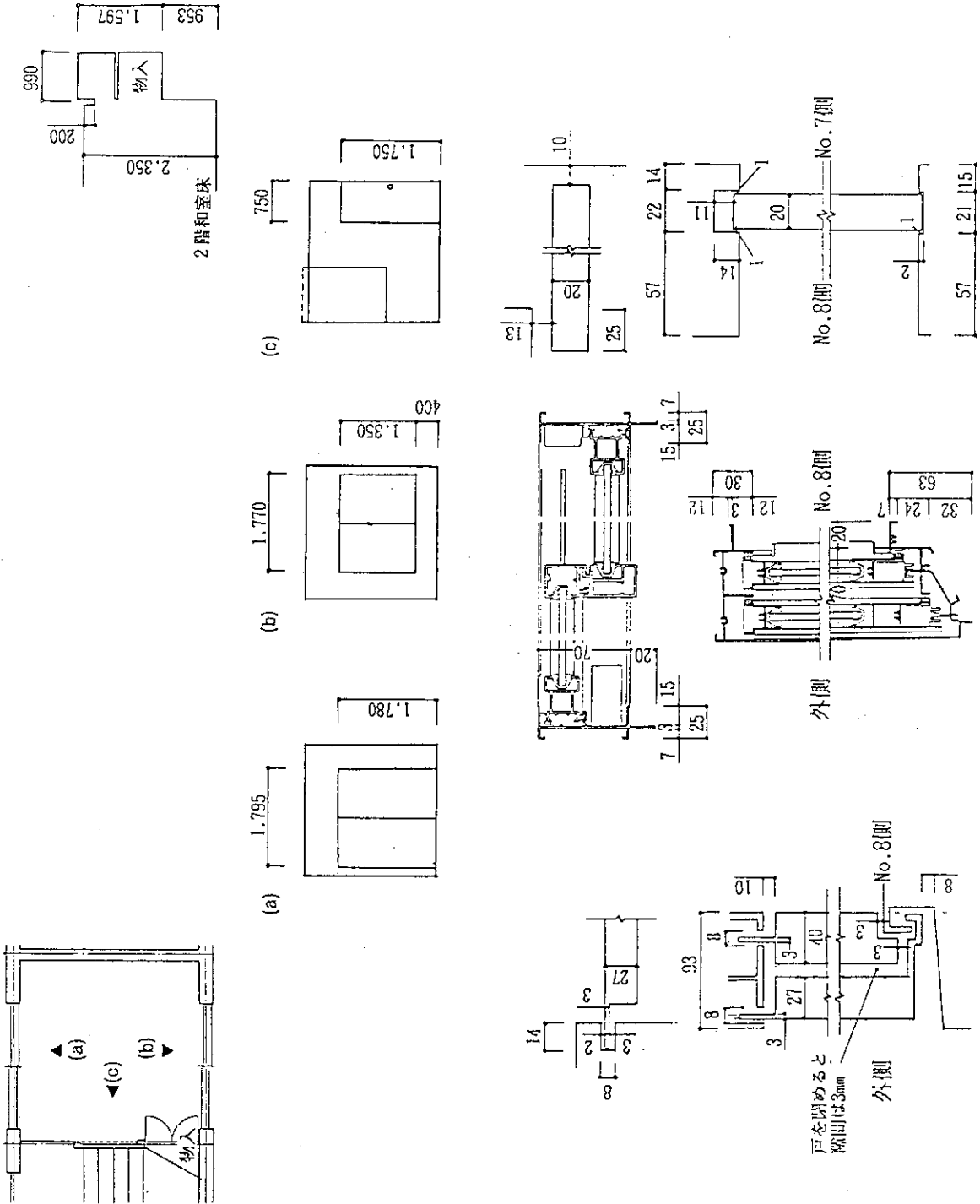
付図C-5 室5展開図・開口部断面詳細図



付図C-6 室6 展開図・開口部断面詳細図



付図C-7 室7展開図・開口部断面詳細図



付図C-8 室8展開図・開口部断面詳細図