

## 風船法による住宅の自然換気量の測定

戸崎 充男・青木 敦・春山 洋一・三村 泰一郎\*

### Experimental study on natural ventilation of a dwelling house by using CO<sub>2</sub> balloon method

MITSUO TOSAKI, ATSUSI AOKI, YOICHI HARUYAMA  
and TAIICHIRO MIMURA\*

Natural ventilation of a dwelling house has been measured by using CO<sub>2</sub> gas method. To avoid an increase of the atmospheric pressure of the room, a balloon which was filled with CO<sub>2</sub> gas under the same pressure was employed as a CO<sub>2</sub> gas source. The measurement was carried out with a remote control system. The measured decrease of the CO<sub>2</sub> gas concentration was reproduced by sum of two exponential components and constant background level, which indicates that the ventilation of the room is affected at least by three states including the relevant room, surrounding atmosphere and the neighbouring room. We applied two room model, i.e. three states model instead of simple one room model, to analyse the observed decay of CO<sub>2</sub> gas concentration.

(Received August 15, 1989)

#### 緒言

我々は、これまで大気浮遊粉塵に対する住宅の遮断、調整機能について実験研究を重ねてきた<sup>1), 2), 3)</sup>。その結果、質量濃度比（住宅内：住宅外）は季節によらず大体1:2であることや、この比は風向に依存し、隣室がバッファー作用を持つこと等が明らかになってきた。ところで、これまでの測定は主に粉塵濃度の静的な測定であり、粉塵に対する遮断の機構を考える際には、その外界からの出入りを含めた動的な側面を解明する必要がある。粉塵の室内への出入りは、窓などの隙間を通して空気と共に動くことでなされると考えられるから、その遮断の機構を解明するためには住宅のもつ自然換気の実態を把握することが重要である。従来、自然換気量は室内に炭酸ガスを放出し、その濃度の減衰を測定することから求められてきた（放出法）。この方法ではボンベからの放出時の室内圧の増加や、測

定時に測定者の出す炭酸ガスの影響等による曖昧さが含まれるために十分な精度で測定できるとは言い難い。我々は風船につめた炭酸ガスを瞬時に室内に解放すること（置換法）と、遠隔操作で炭酸ガス濃度を測定することで上記の欠点を解消することに成功した。また、測定時間間隔を短縮することによって炭酸ガス濃度の減衰を詳細に知ることができるようになった。さらに、測定された濃度減衰を説明するために、従来のザイデルやレックナーゲルのモデル（1部屋モデル）に隣室の効果を考慮した新しいモデル（2部屋モデル）を作り定量的な解析を行った。なお、換気と気象要素との相関を調べるために、温度、風速及び風向も同時観測したので、これらの結果について報告する。

#### 測定

##### 1. 実験住宅

生活科学部応用物理学講座

Laboratory of Applied Physics, Faculty of Living Science, Kyoto Prefectural University

\*生活科学部住居環境学講座

\*Laboratory of House Environment, Faculty of Living Science, Kyoto Prefectural University

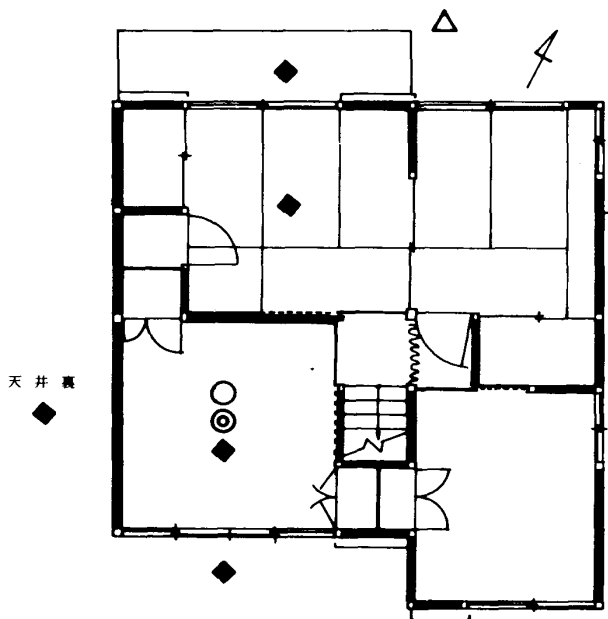


図1 実験住宅二階平面図 (京都市北区)

- ◎ 炭酸ガス供給源
- 赤外線炭酸ガス測定器
- ◆ 温度計
- △ 自動風向・風速計

京都市北区の木造瓦葺二階建個人住宅の二階で測定を行った。この住宅は、市街地の北西にある住宅地域に位置し、その北から西は数百m隔てて山に囲まれている。実験住宅二階の平面図を図1に示す。実験には南西の部屋(以後南室という)を使用した。この部屋は真壁構造の洋室で京間四畳半(19.3m<sup>3</sup>)の広さがある。窓は木枠の四枚仕立て(腰壁90cm)、側壁は土壁に繊維壁の上塗り、床はフローリングに羊毛平織りカーペットの敷詰め、天井は石膏ボードの打ち上げで、階段へ通じる引戸はフラッシュ板戸である。

測定中は、二階の窓は総て閉め、階段の途中をビニールシートで仕切り一階と二階の通気を絶った。

## 2. 測定方法

自然換気量の測定には、炭酸ガスの濃度変化を利用する方法を用いた。即ち、換気量を測定しようとする部屋の炭酸ガス濃度を人為的に高め、その濃度の時間的減衰を測定して換気量を算出する。従来は、炭酸ガスボンベから減圧弁を通して直接ガスを放出してきた(放出法)。しかし、この方法ではボンベからの急激な放出に伴い炭酸ガスの温度が低下し、また、室内の気圧も僅かながら(本実験では約0.2%)上昇するので、測定に好ましくない影響を与える。そこで、今回はそのような影響をとり除くために、我々は室内圧を一定に保つ置換による方法を考えた(置換法)。これ

にはレックナーゲルのモデルを用いて測定者の呼気を発生源とする方法(呼気法)と、大気圧のガスを満たした風船を瞬時に破壊する方法(風船法)が考えられたが、呼気法では発生する炭酸ガス量に個人差があり、それが新たな曖昧さを生じることから、炭酸ガスを一定量発生できる風船法を用いることにした。なお、扇風機で部屋の中の空気を攪はんし、炭酸ガスの分布の均一化を図った。

ガス検知管を用いた従来の炭酸ガス濃度測定法では、通常タイプで5分間、高速タイプを用いても2分~3分程度の時間間隔でしか測定できず、また、読み取り精度が低いという欠点があった。さらに、測定者の呼気による影響が避けられなかった。そこで、本実験では赤外線炭酸ガス測定器(kanomax.model-2312)を用い、サンプリング時間10秒で約1時間の連続測定を繰り返して行い、測定精度の向上を図った。測定は、人の呼気による炭酸ガスの影響を避けるため全て遠隔操作で行った。

## 3. 実験装置

炭酸ガスの発生に用いた装置の概略を図2に示す。1回の測定で約40リットルの炭酸ガスをボンベからポリ袋へ取り出して使用した。このポリ袋(C)は部屋

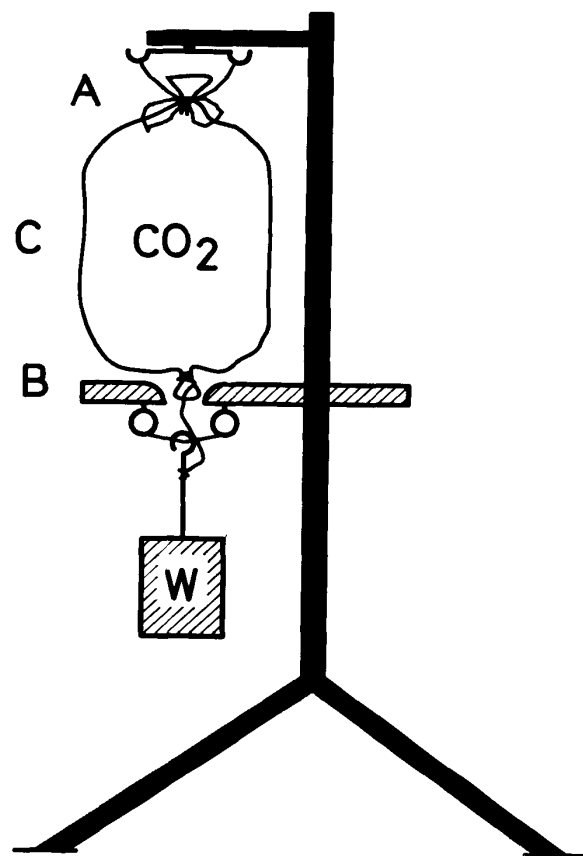


図2 風船法による装置概略図

の中央におもり (W) を付けて吊され、遠隔操作でおもりを落とすことによりポリ袋の口を閉じている上部の結び目 (A) が解け、下にあるオリフィス (B) で炭酸ガスが絞り出されて放出される仕組みになっている。

炭酸ガス測定のサンプリングは、測定室の中央床上約 1 m の位置で行った。この測定器の最小表示単位は 50 ppm であり、標準ガス (1950 ppm 及び 0 ppm) を用いて絶対値の校正をした。測定値の精度は、10% 以下である。

測定中の気温は、多点式のデジタル温度記録計 (横河 type-3874) を用いて 1 分～5 分間隔で観測した。観測点は、南部屋外、南室、北室 (南室の北の部屋)、北部屋外及び天井裏の 5 点で、図 1 に◆印で示してある。

風向風速は、既に報告した自動風向風速測定装置を使用し、マイコン (FM-8) で自動計測処理した。これらの測定器の配置は、図 1 に記入してある。また、自動計測システムの詳細は文献 2) に述べてある。

測定結果

換気量の測定は 1989 年 4 月に、前後 2 回、計 5 回行った (測定番号 # 1～# 5)。それぞれの測定日時と測定期間を表 1 にまとめて示す。

表-1 測定日時

測定番号	測定日	測定時間	データ数
# 1	1989. 4 . 5	14:27-15:27	45
# 2		15:47-16:37	45
# 3	1989. 4 . 26	15:49-16:52	60
# 4		17:13-18:13	56
# 5		20:48-22:48	118

1. 風向・風速及び気温

測定期間中の風速は、1～2 m/s、風向は南東～南西、また、気温は約 20℃ でこれらの気象要素の著しい変化は認められなかった。一例として測定 # 5 に対する気象データを図 3 と図 4 に示す。図 3 の上側に 16 方位に分離した 10 秒毎の風向を○印で示し、N, E, S, W の記号は北, 東, 南, 西の方位を示す。また図の下側にこれらの風向データに対応する風速がプロットしてある。図 4 に各観測場所の 5 分毎の温度データを示す。図中の印は、それぞれ●は屋外、■は炭酸ガス測定を行った南部屋、◆は北部屋、▲は天井裏を表す。

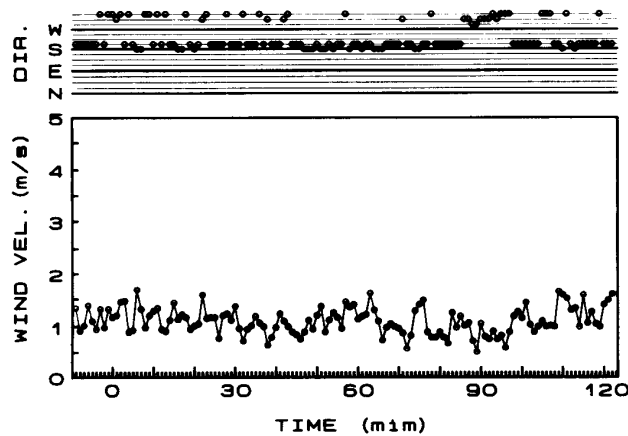


図 3 風向・風速データ (測定 # 5)

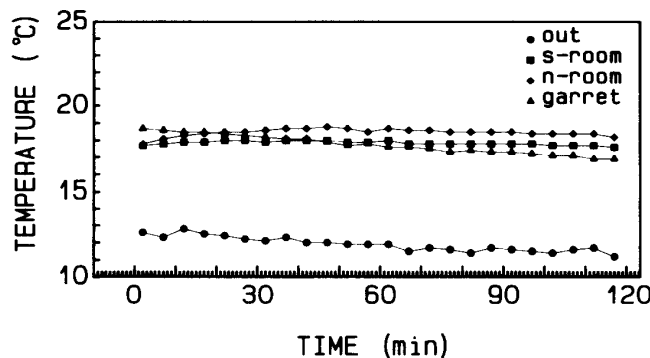


図 4 温度データ (測定 # 5)

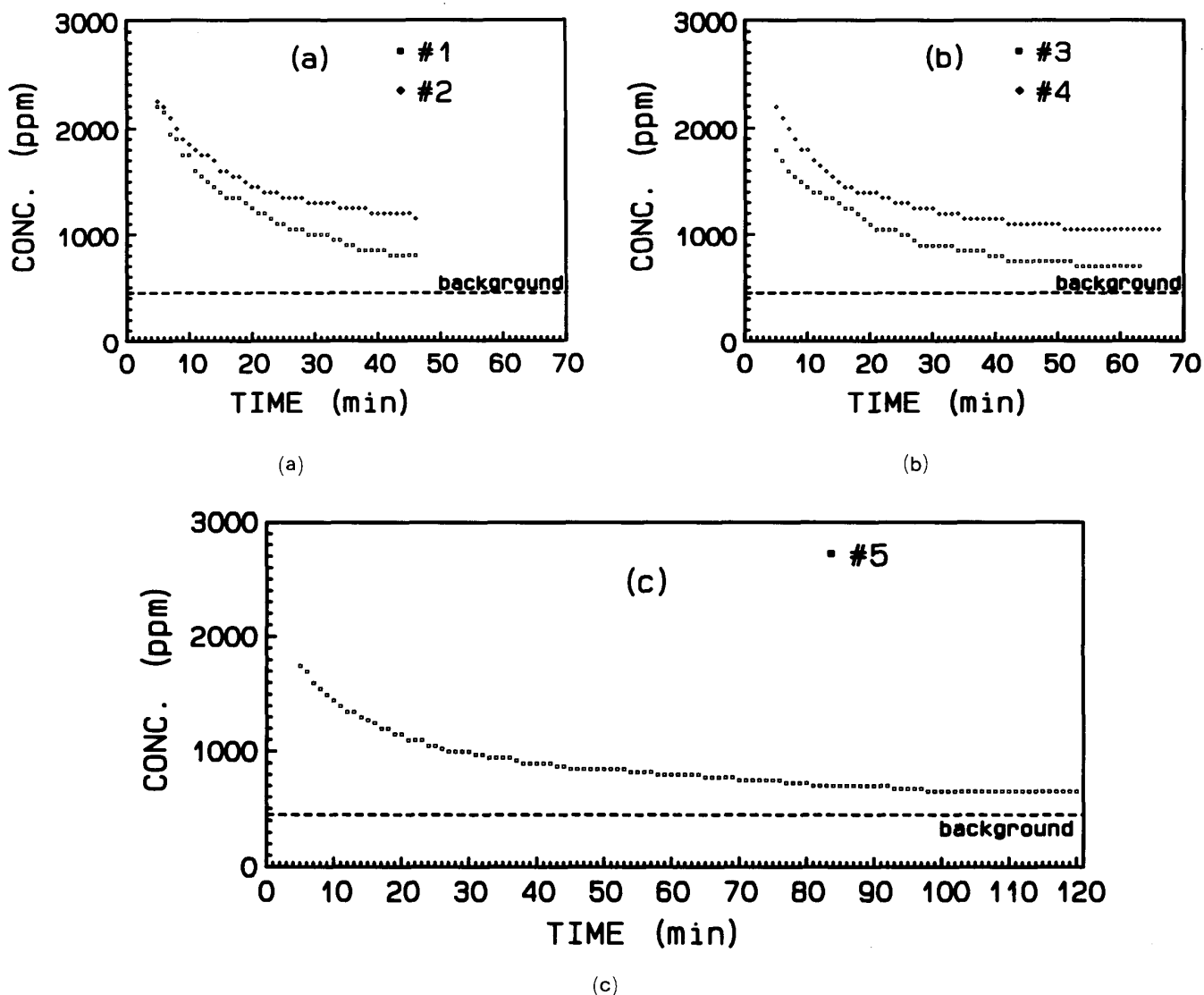


図5 炭酸ガス濃度の時間変化

## 2. 炭酸ガス濃度

炭酸ガス濃度の測定を行う場合、先ず全ての窓を開放して、初期濃度を外気のバックグラウンドレベルに一致させた。今回の測定ではこのバックグラウンドの測定値は常に450ppmで安定していた。測定結果を、図5(a)~(c)に示す。図に於て、横軸は炭酸ガスを放出した時点からの時間(単位:分)、縦軸は炭酸ガス濃度(単位:ppm)を表し、測定データは□印又は◇印でプロットしてある。図6は、測定#5の炭酸ガス濃度を対数表示したものである。測定値から住宅外のバックグラウンド濃度値(450ppm)を差し引いた値を○印で示す。図から、約10分経過するとこの値は指数関数的に減少することが認められる。○印のデータの値から、この指数関数成分を差し引いた値を△印で

プロットすると、これもほぼ直線上にのり、この成分も減少の割合の大きい指数関数で表されることになる。以上のことから、炭酸ガス濃度の変化は減衰係数の異なる2つの指数関数成分を含むことが認められた。このことは、測定#5以外の全ての測定でも認められている。また、測定開始から1時間後の濃度は、2度目のの方が約2倍高いことが認められた(図5(a))。これは、同じ日の相次ぐ測定では炭酸ガス濃度がバックグラウンドまで減衰するのに要する時間に差があることを示している。なお、2度目の測定も、1度目の測定後、各部屋の窓を開け室内の炭酸ガス濃度が外気の濃度になるまで換気してから行っている。さらに、この現象は日を変えて行った測定でも同様に観測され、再現性があることが認められた(図5(b))。

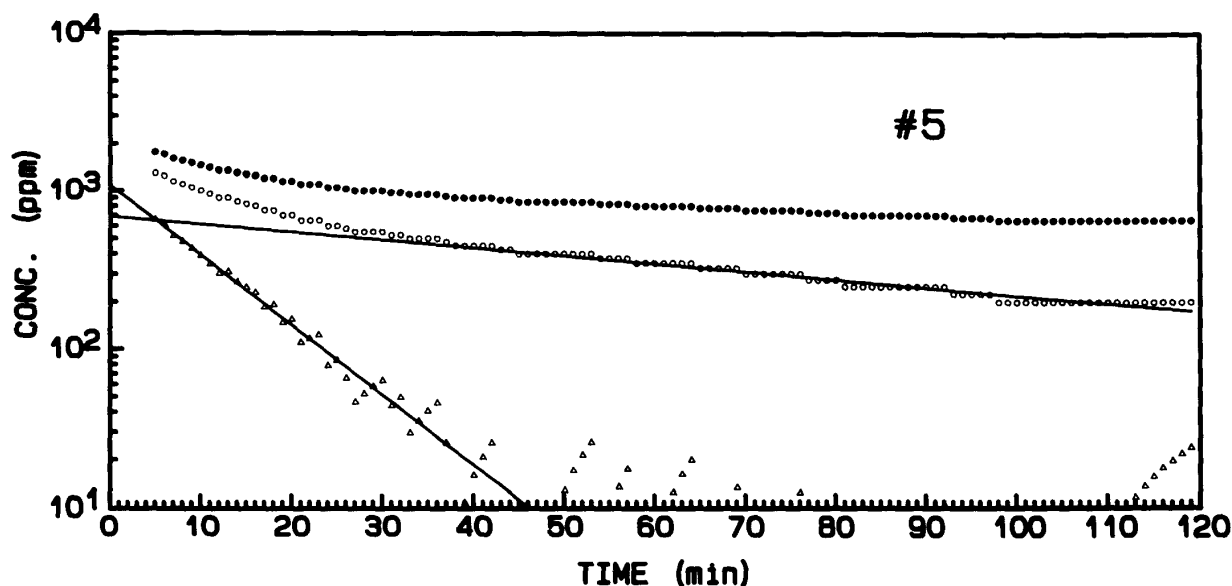


図6 炭酸ガス濃度の片対数表示

解 析

1. 1部屋のモデル

このモデルは、室内に炭酸ガスの発生源がなく、外と部屋の間単純な拡散現象として取り扱う。モデルの概念図を図7に示す。図の変数についてはすぐ後に述べてある。

室内と室外の間で同じ体積の空気が入れ換わるとすると、単位時間当りの炭酸ガス量の変化は、

$$dV/dt = -Qx + Qx_b \tag{1.1}$$

で与えられる。

ここで

V: 室内の炭酸ガス体積の換算値 (m<sup>3</sup>)

x: 室内の炭酸ガス体積百分率 (%)

x<sub>b</sub>: 室外の炭酸ガス体積百分率 (%)

Q: 換気体積 (m<sup>3</sup>/h)

である。

また、(1.1)式を部屋の容積で割ると、これは炭酸ガス濃度の時間変化を表す式になる。

$$dx/dt = -R(x - x_b) \tag{1.2}$$

これを解くと次式を得る。

$$x(t) = (x_0 - x_b) \exp(-Rt) + x_b \tag{1.3}$$

ここでRは換気体積を部屋の容積で割ったもので、換気率 (1/h) である。また、式(1.3)から換気率は室内炭酸ガス濃度の減衰係数になっている。なお、この式は、JIS A1406に採用されている式(ザイデルの式)と同じである<sup>4)</sup>。

このモデルで解析した結果の一例を、図8に示す。図の□印は測定値を、また実線は非線形最小自乗法で求めた曲線を表している。本来、ザイデルの式では減

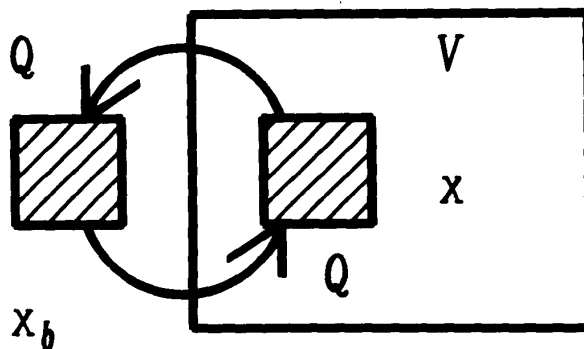


図7 1部屋モデルの概念図

衰係数(R)が1成分しかなく、複数成分を示す今回の実験結果は再現されない。このことは、今回の測定に用いたような複数の部屋を持つ一般の住宅の特定の部屋の換気においては、換気が単純な内外2状態間の拡散だけでは説明されないことを意味している。従って、上記の2状態以外の別の状態(例えば隣室、天井裏)の存在が部屋の換気に重要な影響を与えられられる。そこで、我々は換気を2部屋系で記述するモデルを考えた。

2. 2部屋モデル

このモデルでは、測定室の隣室に部屋があり、外との3状態の変化を取り扱う。このような3状態系では、換気量は各状態間の換気量6成分で表される。しかし、特定の状態が高圧や低圧にならない(発散0)という拘束条件下では独立な成分は4成分であることがわか

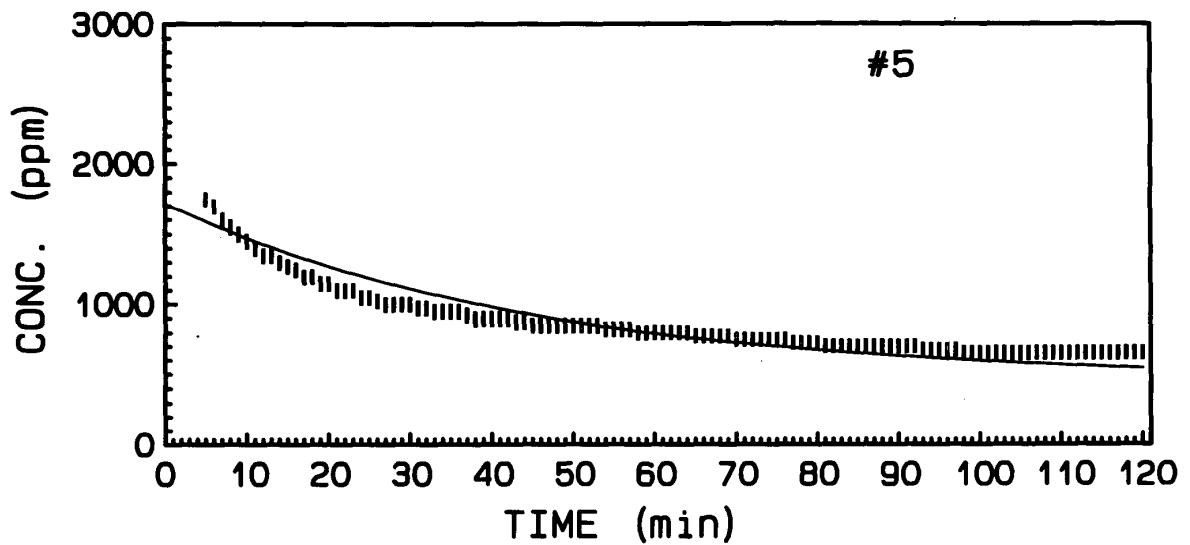


図8 ザイデルの式による評価

□ 実験データ  
 — ザイデルの式による減衰曲線

る。この場合には流れを含む拡散という形式で記述される。このようなことは3状態で初めて生ずることに留意する必要がある。

モデルの概念図を図9に示す(図の変数については後述する)。1部屋モデルと同様の取り扱いから、炭酸ガス量の時間的变化は、

$$dV_1/dt = -(Q_{11} + Q_{12})x_1 + Q_{21}x_2 + Q_{01}x_b \quad (2.1)$$

$$dV_2/dt = -(Q_{20} + Q_{21})x_2 + Q_{12}x_1 + Q_{02}x_b \quad (2.2)$$

で与えられる。ここで、

- $x_i$ : 部屋iの炭酸ガス体積百分率 (%)
- $V_i$ : 部屋iの炭酸ガス体積の換算値 (m<sup>3</sup>)
- $Q_{ij}$ : 部屋iから部屋jへの換気体積 (m<sup>3</sup>)

である。いま、

$R_{ij}$ : 部屋iから部屋jへの換気率 (1/h)

$k$ : 部屋1と部屋2の容積比

とすると、この微分方程式の解は、一般に次の式で与えられる。

$$x_1(t) = C_{11} \exp(-\lambda_1 t) + C_{12} \exp(-\lambda_2 t) + x_b \quad (2.3)$$

$$x_2(t) = C_{21} \exp(-\lambda_1 t) + C_{22} \exp(-\lambda_2 t) + x_b \quad (2.4)$$

ここに、係数 $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{22}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ は、部屋1

2の初期濃度 $x_1(0)$ ,  $x_2(0)$ 及び6個の換気率 $R_{ij}$ の関数で表される。

さて、この系を解く場合には、初期濃度を含めて5つの未知数(隣室, 外はバックグラウンドとして)が表れるが、今回の我々の測定では、初期濃度を含めて4つのパラメータしか解くことができない。そこで、今回の解析では、流れを考えず拡散だけで系を記述することにする。この場合には $Q_{ij} = Q_{ji}$ となり、係数 $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{22}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ は、 $R_{01}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{20}$ ,  $k$ の関数として次式で与えられる。

$$C_{11} = (R_1 - \lambda_2)x_{01} - (R_{12} + R_{01} - \lambda_2)x_b / (\lambda_1 - \lambda_2)$$

$$C_{12} = ((R_1 - \lambda_1)x_{01} - (R_{12} + R_{01} - \lambda_1)x_b) / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$C_{21} = ((R_2 - R_{02})x_b - kR_{12}x_{01}) / (\lambda_1 - \lambda_2)$$

$$C_{22} = ((R_2 - R_{02})x_b - kR_{12}x_{01}) / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$\lambda_1 = (R_{01} + R_{12} + kR_{12} + R_{02})$$

$$+ \sqrt{((R_{01} + R_{12} - kR_{12} - R_{02})^2 + 4kR_{12}^2)} / 2$$

$$\lambda_2 = (R_{01} + R_{12} + kR_{12} + R_{02})$$

$$- \sqrt{((R_{01} + R_{12} - kR_{12} - R_{02})^2 + 4kR_{12}^2)} / 2$$

また、

$$R_1 = (C_{11}\lambda_1 + C_{12}\lambda_2) / (C_{11} + C_{12})$$

$$R_2 = (C_{11}\lambda_2 + C_{12}\lambda_1) / (C_{11} + C_{12})$$

とおくと、上式を逆に解いて

$$R_{12} = \sqrt{((R_1 R_2 - \lambda_1 \lambda_2) / k)}$$

$$R_{01} = R_1 - R_{12}$$

$$R_{02} = R_2 - kR_2 - kR_{12}$$

(2.5)

と書くことができる。

なお、 $R_{12} = 0$ とすると、式(2.3)は一部屋モデルの式(1.3)になる。

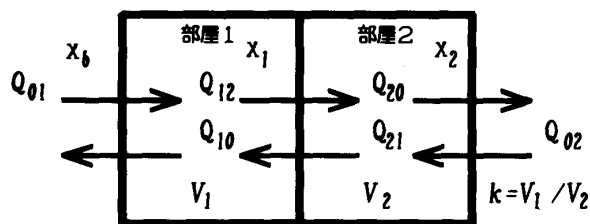


図9 2部屋モデルの概念図

表一 2 非線形最小自乗法で求めたパラメータ

	# 1	# 2	# 3 <sup>a)</sup>	# 4	# 5	平均 <sup>b)</sup>
$C_{11}$	2187 ± 207	1514 ± 79	1302 ± 22	1591 ± 652	1086 ± 476	
$\lambda_1$	7.25 ± 1.0	6.58 ± .27	4.25 ± .03	7.53 ± .04	6.11 ± 2.7	7.47 ± 1.91
$C_{12}$	1261 ± 15	974 ± 6.6	416 ± 1.3	932 ± 1.9	685 ± 43	
$\lambda_2$	1.61 ± .07	.400 ± .02	.613 ± .02	.469 ± .005	.69 ± .05	.469 ± .230

a) ガス放出後14分から24分までのデータは除く。

b) # 3 のデータは除く。

### 考 察

測定した減衰曲線を非線形最小自乗法を用いて式(2.3)の形に展開し、各パラメータ $C_{11}$ 、 $C_{12}$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ を求めた。結果を表2に示す。# 3を除けば得られた $\lambda$ (減衰係数)の値は誤差の範囲で大体一致している。測定期間中の風向は南風が主であった。換気量が主に部屋や住宅の構造に依存するとすれば、風向が一定しているデータから得られた減衰係数が互いにより一致を示すことは理解できる。誤差を考慮した $\lambda$ の平均値(# 3を除く)を表2の最後の欄に示してある。この減衰係数を固定して再フィットした結果を表3と図10(a)–(c)に示す。図において □は測定値(測定誤差±50ppm)を、実線は表3の値を用いて描いた減衰曲線を表している。図から明らかなように、測定された炭酸ガス濃度変化は2部屋モデルによってよく再現されることがわかる。つまり、今回測定した部屋の換気は、単純な内外2状態の拡散だけではなく、バッファ効果をもたらす様な別の状態の存在を意味している。

ちなみに、単純拡散2部屋モデルで各部屋での換気量を(2.5)式を用いて計算してみた。第二の部屋として天井裏を考えた場合( $k=1.15$ )と、隣接する

空間である天井裏、北室及び押入の合計を考えた場合( $k=0.35$ )の2つの場合について求めた結果を表4に示す。天井裏のみを考えた場合には、天井裏と外気との換算率 $R_{20}$ が負の値となり物理的に無意味な解となる。従ってバッファ空間を拡げる必要がある。天井裏に北室や押入を加えた場合には前述したような不都合は生じないが、隣室の炭酸ガス濃度をシミュレートしてみると、十分に観測にかかるほど濃度が上昇していることがわかる(図10)。これは、以前に炭酸ガス検知管法で行った予備実験の結果と一致せず、単純拡散では説明がつかないことが予想される。今回の測定では隣室の炭酸ガス濃度変化を測定していないので、バッファ効果を示す空間を特定できないが、流れを考慮した定量化が必要と考えられる。流れを考慮するためには多くのパラメータを決定する必要があるため、今後の課題として、換気モデルについてより詳細な議論を行うために、炭酸ガスの多点同時測定の実験を遂行する必要がある。

自然換気の機構を解明することにより、また、気象要素との関係を明かにすることにより、住宅が持つ大気浮遊粉塵の遮断、調整機能について詳細な議論が可能になると考えられる。

表一 3 非線形最小自乗法で求めたパラメータ ( $\lambda_1=7.47$ ,  $\lambda_2=0.469$ )

	# 1	# 2	# 3 <sup>a)</sup>	# 4	# 5
$C_{11}$	3364 ± 58	1566 ± 59	1793 ± 56	1583 ± 55	1589 ± 51
$C_{12}$	665 ± 12	1038 ± 13	474 ± 11	930 ± 11	573 ± 8.3

a) ガス放出後14分から24分までのデータは除く。

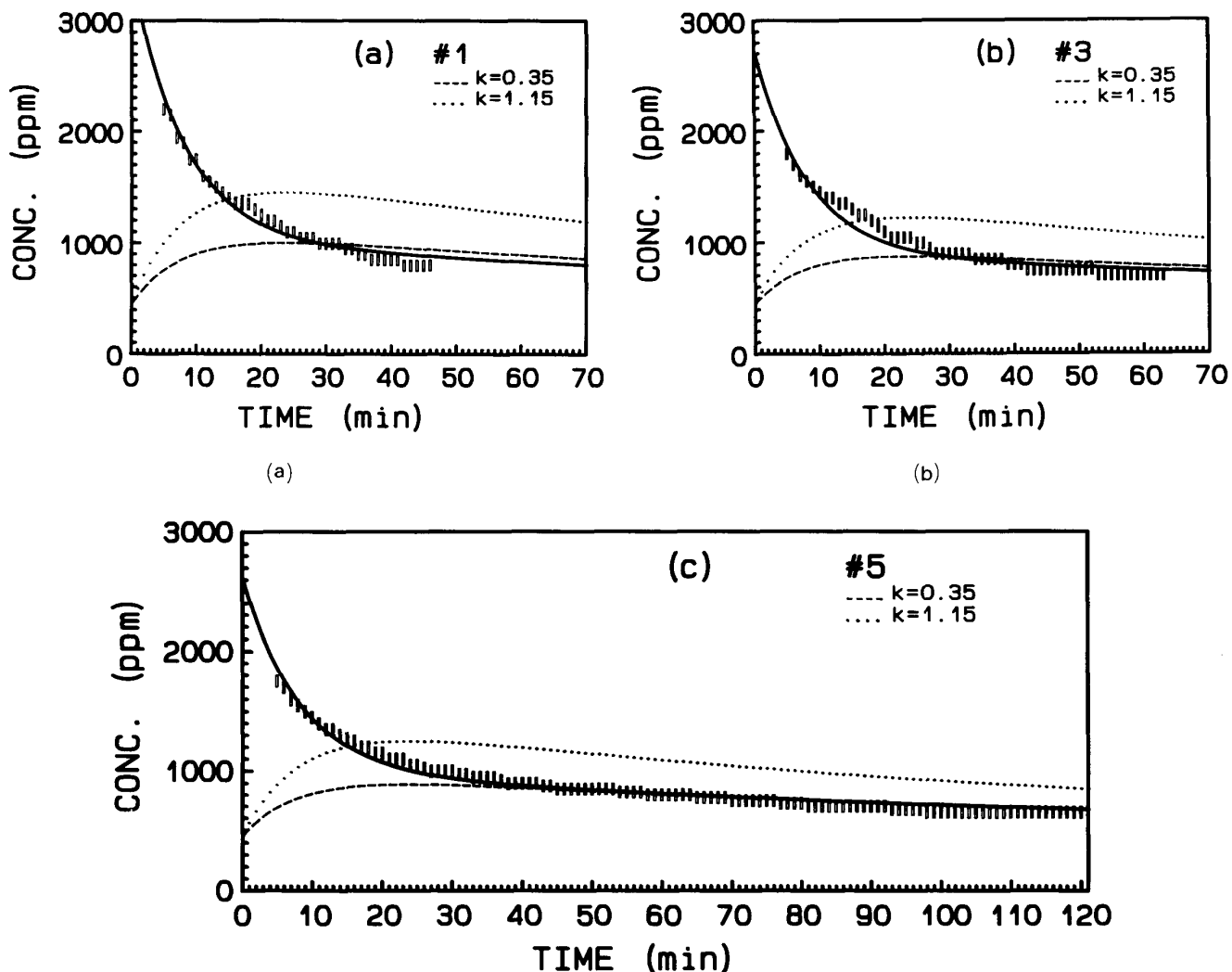


図10 2部屋モデルによる評価

- 実験データ
- 2部屋モデルによる減衰曲線 (測定室)
- - 2部屋モデルによる減衰曲線 (隣室)
- ....  $k = 1.15$
- -  $k = 0.35$

表-4 換気率 (回/時)

	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
$k=1.15$					
$R_{01}$	$2.24 \pm .02$	$2.82 \pm .01$	$2.55 \pm .02$	$2.92 \pm .01$	$2.79 \pm .01$
$R_{12}$	$3.61 \pm .15$	$1.83 \pm .17$	$2.83 \pm .19$	$1.04 \pm .22$	$1.98 \pm .17$
$R_{20}$	$-0.77 \pm .05$	$-0.25 \pm .07$	$-0.65 \pm .07$	$0.33 \pm .12$	$-0.33 \pm .07$
$k=0.35$					
$R_{01}$	$4.78 \pm .02$	$5.80 \pm .01$	$4.82 \pm .02$	$5.71 \pm .01$	$5.22 \pm .01$
$R_{12}$	$1.26 \pm .15$	$-1.11 \pm .17$	$1.19 \pm .19$	$-0.84 \pm .22$	$0.39 \pm .17$
$R_{20}$	$0.23 \pm .05$	$1.23 \pm .07$	$0.25 \pm .07$	$1.06 \pm .12$	$0.50 \pm .07$



文 献

- 1) 青木敦, 春山洋一, 三村泰一郎 京府大学報 (理学・生活科学) 37, 73 (1986)
- 2) 青木敦, 春山洋一, 三村泰一郎 京府大学報 (理学・生活科学) 38, 73 (1987)
- 3) 青木敦, 春山洋一, 戸崎充男, 三村泰一郎 京府大学報 (理学・生活科学) 39, 73 (1988)
- 4) JIS A1406 屋内換気量測定方法 (炭酸ガス法)