

The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan

**SHASE-S**

**Standard**

**SHASE-S 116-2003**

**トレーサガスを用いた単一空間の換気量測定法**

Ventilation Rate Measurement of a Single Zone Using Tracer Gas Technique

空気調和・衛生工学会規格

社団法人 空気調和・衛生工学会

## 原案作成：スタンダード委員会換気量測定法小委員会(平成15年度)

主査	吉野 博	東北大学大学院			
幹事	早川 眞	日本大学	内海 康雄	宮城工業高等専門学校	
委員	赤林 伸一	新潟大学	小林 仁	宮城工業高等専門学校	
	絵内 正道	北海道大学	近藤 靖史	武蔵工業大学	
	奥山 博康	清水建設(株)	諏訪 好英	(株)大林組	
	加藤 信介	東京大学	長谷川 功	(株)三井住友建設	
	倉渕 隆	東京理科大学	松本 博	豊橋技術科学大学	
	小林 信行	東京工芸大学	山中 俊夫	大阪大学	

## 原案審議：標準化運営委員会

委員長	柳原 隆司	東京電力(株)			
副委員長	塚本 宏怡	(株)日本設計			
幹事	高瀬 知章	(株)三菱地所設計			
委員	小沢 眞吾	鹿島建設(株)	橋本 健	新菱冷熱工業(株)	
	鈴木 寿一	国土交通省	前島 健	(株)森村設計	
	高草木 明	(株)NTT 建築総合研究所	山崎 和生	(株)西原衛生工業所	

## 原案審議：スタンダード委員会

委員長	小沢 眞吾	鹿島建設(株)			
幹事	山崎 和生	(株)西原衛生工業所			
委員	板本 守正	日本大学	高橋 紀行	(株)竹中工務店	
	市川 憲良	東京都立短期大学	田中 孝	(有)タナカ建築設備	
	大澤 明廣	(株)大林組	西脇 康夫	(株)総合設備計画	
	小倉 正	(株)総合設備コンサルタント	長谷川 誠	清水建設(株)	
	鎌田 元康	東京大学大学院	平川 清	(株)ピーエーシー	
	木内 俊明	国士館大学	前島 健	(株)森村設計	
	倉渕 隆	東京理科大学	松島 修	(株)エヌ・ティ・ティ ファシリティーズ	
	小林 信行	東京工芸大学	三輪 周吉	(株)日建設計	
	小峯 裕己	千葉工業大学	村上三千博	高砂熱学工業(株)	
	鈴木 康文	都市基盤整備公団	山田 賢次	(株)西原衛生工業所	
	関本 昌弘	国土交通省	吉野 博	東北大学大学院	
	高地 進	蔵前工業高校			

制定：2004年(平成16年)4月

換気関連の規準として、SHASE-S 102 換気規準・同解説(1997年)、SHASE-S 115 室内換気効率の現場測定法・同解説(2002年)が制定されている。一方、それらの基本となる換気量測定法としては、“屋内換気量測定法(炭酸ガス法)JIS-A 1406-1974”が定められているが、制定から30年経過しており、その内容や紹介する機器は古くなっている。そこで、空気調和設備委員会換気性能設計法小委員会において原案が作成され、二度のシンポジウムと学会誌によるパブリックレビューを経て、スタンダード委員会換気量測定法小委員会にて最終案が作成され、審議・承認のうえ本規格は制定された。

付録表 B-3 測定結果

	室名	室容積 [m <sup>3</sup> ]	換気回数 [回/h]	局所平均 空気齢[h]
1階	機械室	47.3	0.70	1.42
2階	玄関	23.9	0.73	1.36
	ダイニング	100.5	0.64	1.55
	和室	32.6	0.80	1.25
3階	ホール	16.7	0.72	1.40
	書斎	37.8	0.60	1.67
	寝室	38.5	0.80	1.26
	子供室	30.8	0.91	1.10

## 参考文献

- 1) Etheridge, D. and Sandberg, M.: BUILDING VENTILATION, Theory and Measurement, JOHN WILEY & SONS, (1996)
- 2) Stymne, H. and Boman, C.A.: Measurement of Ventilation and air distribution using the homogeneous emission technique a validation, Healthy Buildings, '94, Proceedings of the 3rd International Conference, (1994)
- 3) 坂口 淳・赤林伸一: 新潟県の住宅における室内化学物質汚染の実態調査 その2 PFT法による換気回数と VOCs 濃度の関係, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 I (2000)

C 断続供給法——最小二乗によるシステム同定法で換気風量  $Q$  と有効混合容積  $V_{ef}$  を同時に求める方法と残差分析に基づく同定誤差評価方法

本付録で言及する断続供給法とは、トレーサガスの供給法に注目した場合の名称であり、時系列のガス濃度変化などの測定値から換気量を求める数学的方法の観点からは、システム同定法と呼ぶ。この方法においては、ガスを断続的に供給することで濃度の時間変化を作り出し、これらのガス供給流量変化とガス濃度変化の測定値から、最小二乗法を原理としたシステム同定を行うことで、換気風量や有効混合容積を推定する。ここでは、換気風量  $Q$  および有効混合容積  $V_{ef}$  を一定値とした場合を説明するが、これらが時間的に変動する場合にも適用可能である。

## 1 断続法の長所と短所

- a 換気量と有効混合容積の二つのパラメータが同時に推定できる

換気風量を推定するために有効混合容積の仮定値を用いる方法では、仮定値が大きく間違っている場合に換気風量も大きな誤差を持つことになる。こうしたリスクを回避できる。

- b 単室モデルだけでなく多数室モデルに容易に拡張できる一般性がある

理論の一貫性により、使用するソフトも同一でよく資源の節約になる。

- c 統計的方法なので各種の誤差の悪影響に強く推定結果の誤差評価も合理的に行える

原理は最小二乗法なので、測定値が確率的に持つ誤差には強い。実際の誤差原因は、実現象と数学モデルとの食い違いが支配的であるが、これも方程式の残差として現れる。本方法では重回帰分析と同様な残差分析手法<sup>9)</sup>を用いることで、こうした誤差原因による評価も適切に行える。

- d 換気量などの時間変化にも追従でき、また実現象とモデルの食い違いが把握できる

換気風量などの推定値を得るために数時間の測定期間を要するが、この期間を少しずつずらしていけば、移動平均を求める場合の

ような意味での時間変化を把握することができる<sup>9)</sup>。なお、推定された有効混合容積と幾何的室容積に大きな違いが生じた場合は、ガス混合の不十分さや換気量の急激な時間変化などの問題が推察できる。

- e ガスの供給制御と濃度測定などに比較的複雑な装置が必要  
ガスの断続供給と供給流量測定、および連続的な濃度測定のための装置<sup>9)</sup>が必要である

- f 比較的複雑な測定データ処理が必要である  
連立方程式や逆行列を解く測定データ処理が必要となる。

## 2 単室の基本方程式モデル

基本方程式モデルは本文の次式(9)から導く。この式の排気濃度  $C_E$  は、一般にすきま風状態などでは不明である。そこで対象ゾーンの平均濃度  $C$  が  $C_E = C$  と仮定し、次式(C1)を基本式とする。 $C_0$  は外気のトレーサガス濃度、 $V_{ef}$  は有効混合容積、 $Q$  は換気風量、 $m$  はトレーサガス発生流量である。

$$\frac{dV_{gas}(t)}{dt} = m(t) - CE(t)Q(t) \quad \dots\dots[\text{本文の式(9)再掲}]$$

$$V_{ef} \cdot \frac{dC}{dt} = Q \cdot (C_0 - C) + m \quad \dots\dots(C1)$$

## 3 重回帰分析への定式化

既製の重回帰分析プログラムが利用できるように定式化する。 $V_{ef}$ 、 $Q$  のパラメータが不明とし、ガス供給流量  $m$  は既知と考えて、既知の量から構成される項は左辺に、未知として推定すべき量で構成される項は右辺に移項する。

$$-m = -V_{ef} \cdot \frac{dC}{dt} + Q \cdot (C_0 - C) \quad \dots\dots(C2)$$

一方、これに相当する重回帰分析での回帰式を、よく用いられる記号で記述する。いわゆる目的変数を  $y$ 、説明変数を  $x_1$ 、 $x_2$  の2個とし、これらに係る回帰係数をそれぞれ  $a_1$ 、 $a_2$  とする。普通であれば、導入される定数項  $a_0$  は0と見なすことができる。

$$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 \quad \dots\dots(C3)$$

以上の式(C2)と式(C3)を比較する。 $y$  には  $-m$  が対応し、 $a_1$  には  $-V_{ef}$  が、 $a_2$  には  $Q$  が対応する。説明変数  $x_1$  には  $-dC/dt$  が、 $x_2$  には  $(C_0 - C)$  が対応する。重回帰分析では、説明変数とこれに対応する目的変数のセットが、さまざまな条件下の測定値ないしは観測値として、たくさん得られていることが必要である。

## 4 重回帰モデルの変数の計算の仕方

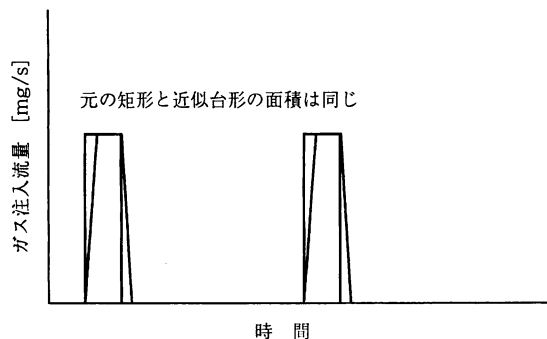
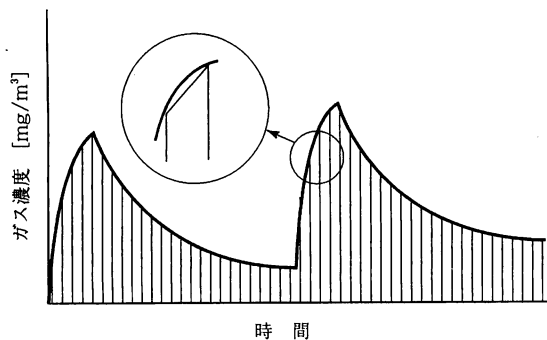
重回帰モデルでの説明変数とこれに対応する目的変数のセットをたくさん得ることは、時間軸方向に連続的に長い期間測定することで実現できる。この長い期間  $T$  を  $\Delta t$  の短い時間間隔で分割し、それぞれの  $\Delta t$  の区間から、説明変数と対応する目的変数のセットをつくる。また、変化に富んだ説明変数とこれに対応する目的変数のセットを得るために、ガス供給流量を変化させてガス濃度の変化をつくる。

ただし、瞬間瞬間の微分項を用いると、測定機器誤差や細かな変動によって悪い影響を受けやすいので、積分した形を用いる。式(C2)を時間区間の  $(k-1)\Delta t$  から  $k\Delta t$  まで積分し式(C4)を得る。

$$-\int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} m dt = -V_{ef} \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} \frac{dC}{dt} dt + Q \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} (C_0 - C) dt \quad \dots\dots(C4)$$

右辺第1項の積分は  $(k-1)\Delta t$  から  $k\Delta t$  への濃度の増分となる。ほかの2項の積分は  $\Delta t$  の区間内での面積の計算になる。多くの測定では、 $\Delta t$  は1分ぐらいが用いられる。この間の時間変動は直線補間近似でも十分なことが多い。逆に直線補間でも、誤差が大きくなりすぎない程度の時間間隔をとる必要がある。式(C4)各項の直線補間近似積分をそれぞれ  $m_k$ 、 $C_k$ 、 $C_k$  で定義する。

$$m_k = \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} m dt \cong \frac{\Delta t}{2} \cdot (m(k\Delta t) + m((k-1)\Delta t)) \quad \dots\dots(C5)$$



付録図-C1 重回帰分析の変数を得るための時間区間分割

$$\delta C_k = \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} dc = C(k\Delta t) - C[(k-1)\Delta t] \quad \dots\dots (C6)$$

$$\begin{aligned} \delta C_k &= \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} (C_0 - C) dt \approx \frac{\Delta t}{2} [(C_0(k\Delta t) - C(k\Delta t)) \\ &+ [C_0(k-1)\Delta t] - C[(k-1)\Delta t]] \quad \dots\dots (C7) \end{aligned}$$

すると式(C4)は次式のように書き直せる。

$$-m_k = V_{ef} \cdot (-\delta C_k) + Q \cdot (\delta C_k) \quad \dots\dots (C8)$$

この式(C8)を重回帰式の式(C3)と比較すれば、既製の重回帰分析プログラムを適用するための各変数の計算方法が明らかとなる。

### 5 既製の重回帰分析計算プログラムを用いる方法

前述の式(C8)について、時間区間  $k=1$  から  $nt$  までの測定データの  $nt$  個の組合せを得て、マトリックスの行方向に並べれば、次式が記述できる。

$$\begin{bmatrix} -m_1 \\ -m_2 \\ -m_3 \\ \vdots \\ -m_{nt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\delta C_1), & (\delta C_1) \\ (-\delta C_2), & (\delta C_2) \\ (-\delta C_3), & (\delta C_3) \\ \vdots & \vdots \\ (-\delta C_{nt}), & (\delta C_{nt}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ef} \\ Q \end{bmatrix} \quad \dots\dots (C9)$$

普通の重回帰分析での記法では、この式は次のように表される。

$$Y = X \cdot A \quad \dots\dots (C10)$$

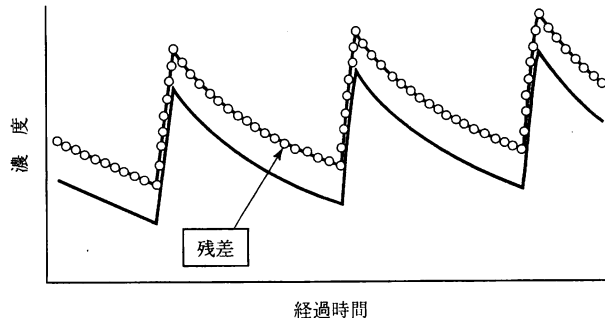
ここに、特に  $A$  の中身は  $t[V_{ef}, Q]$  である。またパラメータ  $A$  の解式は次式となる。

$$A = \begin{bmatrix} V_{ef} \\ Q \end{bmatrix} = (X \cdot X)^{-1} \cdot (X \cdot Y) \quad \dots\dots (C11)$$

この計算と誤差分析は既製の重回帰分析プログラムが行うので、特別に計算プログラムを作る必要はないが、式(C5)から式(C7)で計算される各変数値を表計算ソフトなどで準備する必要がある。また、推定精度は付録図-C2で示すように、推定された  $V_{ef}$  と  $Q$  により式(C1)で計算される方程式残差分析で行うことができる。

### 6 ガス供給と濃度測定の方法

測定原理は最小二乗法であるから、ガス濃度変化が時間的に変化に富むことが必要である。また、ガス濃度測定もガス供給流量変化



付録図-C2 ガス濃度変化とその残差

の測定も、連続的になされることが望ましい。もし測定機器の制約で離散時間的に行わなければならない時には、これらの離散的測定点の間を直線補間近似して時間積分した値と真値の差は、3%を超えない程度に時間間隔を定めなければならない。多くの場合に、1分間隔の測定であれば十分である。断続法という名のとおり、ガス供給流量の変化を矩形波にすることは、制御が簡単であるうえに、矩形波を周波数分解した際に多くの周波数成分を含むので、システム同定の励振としても適当である。

ガスの供給流量の絶対値と供給の継続時間と停止の時間も、適切に設定する必要がある。望ましいのは、フィードバック制御により、ガス濃度分析計の適切な検出範囲に収まるように供給流量を調整できることであるが、多くの場合にあらかじめ、およその換気量が予測がつくので、スケジュール的な簡単な制御でも間に合わせることができる。ガス濃度変化は上昇と下降を繰り返すことになるが、離散時間的にガス濃度を測定する場合には、その山と谷は測定するように留意する。またガスの供給流量と継続時間と停止時間は、この谷から山が30%以上の差異が生じるように定める。付録図-C1の右に示すように、ガス供給流量も1分間隔ぐらいの測定を折れ線近似で積分する。本来は矩形的なものを台形近似することになるので、面積は図のように同じにし、ガス供給の継続時間は短くとも  $\Delta t$  の10倍はとるようにする。

長い期間の測定値が利用できることがシステム同定精度の向上につながるが、実用上からはなるべく短い期間が望ましいし、すきま風などは本来時間変化するものである。そこで最低2回のガス濃度の山あるいは谷が含まれる期間とする。単室モデルであれば、この期間は2~3時間が必要である。

### 7 換気量 $Q$ と有効混合容積 $V_{ef}$ の時間変化の推定法

もし換気量などの時間変化が知りたい場合には、長い期間のガス供給流量と濃度変化の測定を行ったうえで、システム同定のために用いる2~3時間の区間を、移動平均をとる場合のようにずらしていけばよい。瞬間瞬間の値は求められないが、室内温度と外気温度の差の変化に伴う換気量変化などの検討には使える。

### 8 多数室換気測定への拡張の概要

多数室モデルではガス濃度変化の常微分方程式は室数分立てられ、連立した常微分方程式が基本式になる。さらに、各室での風量収支の式を考慮しなければならない。単室の場合は風量収支が前述の(C1)式にすでに組み込まれている。

一般に  $n$  室モデルで風量が  $nq$  個の場合には、 $n$  本の風量収支式によって  $n$  個の風量は  $(nq - n)$  個のほかの風量で計算する式が得られる。推定する風量の個数は  $(nq - n)$  個に減らすことができるとともに、風量収支の拘束条件が考慮できる。あるいは風量収支を、拘束条件として基本式に組み込むのではなく、最小二乗で満たすべき一種の観測値の組合せとして考慮する方法もある。この場合は式(C9)のマトリックス  $X$  の各行に風量収支の式を追加するのも一つの方法である。さらに、実用性を向上させるために測定装置系を改良する案も示されている<sup>1)</sup>。

参考文献

- 1) 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ーの同定理論，日本建築学会論文報告集，Vol. 344(1984.10)，pp.103～115
- 2) Okuyama, H.: System Identification Theory of the Thermal Network Model and an Application for Multi-chamber Airflow Measurement, Building and Environment, Vol. 25, No. 4(1990)，pp.349～363
- 3) Okuyama, H.: Recent Progress on the Multi-Chamber Airflow Measurement System, 1992 International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness ISRACVE, 22-24 July(1992), Tokyo, pp.351～356
- 4) 奥山博康：換気を含めた熱性能指標の推定，日本建築学会環境工学委員会，熱環境小委員会，伝熱WG，熱性能評価SWGシンポジウム「建物の熱性能とその評価一品確法・コミッショニングを視野に入れて」(2003.3)，pp.33～40
- 5) 中川 徹・小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析，東大出版会(1982)
- 6) 佐和隆光：回帰分析，朝倉書店(1980)

D 濃度減衰法などの適用事例

1 濃度減衰法による換気量測定

濃度減衰法は，日本工業規格の屋内換気量測定方法(炭酸ガス法)などにあるように，一般的な換気量・換気回数測定方法である。ここでは，オフィスビルにおける測定結果を示し，測定手順と換気量算出方法について解説する。

1.1 対象建物の概要

対象空間の平面図を付録図-D1に示す。4階建て鉄骨造事務所ビルの3階執務室を測定対象とする。床面積は300m<sup>2</sup>，天井チャンバ，床下チャンバ，機械室を含む容積は1110m<sup>3</sup>，室空間のみの容積は765m<sup>3</sup>である。3階執務室は電磁シールドが施工されており，比較的気密性能が高いと考えられる。対象空間には各階ごとに独立した換気・空調システムが設置されて各空間の給排気量のバランスがとれており，隣室の影響は比較的小さいと考えられる。

空調換気設備の概要を付録図-D2に示す。外気は機械室に導入され，還気と混合されて，床下をサブライチャンバとして床面に分散配置された114箇所の吹出し口から執務室に給気される。還気は，天井裏をレターンチャンバとして照明器具(20箇所)から吸い込まれる(床吹き出し，天井吸込み方式)。排気は天井に設置した排気口(6箇所)より吸い込まれ，それぞれの排気口からそれぞれの排気ファンによって直接執務室から排気する。室内の設計給気風量は3200m<sup>3</sup>/h，また設計取入れ外気量は1800m<sup>3</sup>/hである。測定は休日に行ったため，照明以外の執務室内のOA機器，人体の負荷は

なく，空調・換気運転は中間季の通常使用状態で運転する。機械室と執務室の扉および執務室の窓，出入口扉はすべて閉鎖する。

1.2 測定方法の概要

本測定は対象空間内の空気齢の測定<sup>1)</sup>を意図したものであったため，最初にトレーサガスを連続的に供給するステップアップ法を行い，ステップアップ法終了後に室内をファンで十分に混合させ，トレーサガスの供給を停止するステップダウン法の2種類の測定を行っている。ここでは，ステップダウン法の濃度減衰結果から対象空間の換気回数を測定することを試みる。トレーサガスにはエチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)を使用し，マスフローコントローラにより外気取入れ口より毎分6.4l供給する。室内のトレーサガス濃度測定はマルチガスモニタ[BK社(デンマーク)，Type 1302]によって測定する。トレーサガス濃度測定インターバルは，測定点ごとに約8分間隔で測定する。

濃度減衰開始直前の室内濃度分布は192.5から203.3ppmの範囲であり，測定した18点の室平均濃度198.6ppmの約3%以内とばらつきは小さい。濃度測定結果を付録図-D3に示す。濃度は床下給気チャンバ内を除き，床上1m濃度測定点および排気口濃度測定点はほぼ同様に減衰し，約2時間で2～7ppmまで減衰する。

1.3 濃度減衰二時点法

濃度減衰法による換気回数の算出方法には4.にあるようにいくつかの種類が可能である。付録図-D3の排気口測定点⑩の濃度測定結果から，濃度減衰二時点法を用いて時間平均換気回数を算出する。測定開始後7分(0.117時間)の排気口濃度は151ppm，濃度減衰開始1時間34分後(1.567時間後)の濃度は10.2ppmより，式(D1)に代入すると，濃度測定期間中の時間平均換気回数は1.86回/hとなる。

$$\bar{N} = \frac{1}{t_2 - t_1} \log_e \frac{C(t_1)}{C(t_2)} \quad \dots\dots (D1)$$

$$= \frac{1}{1.567 - 0.117} \log_e \frac{151[\text{ppm}]}{10.2[\text{ppm}]} = 1.86[\text{回/h}]$$

C(t) : tにおける室内濃度 N : 時間平均換気回数

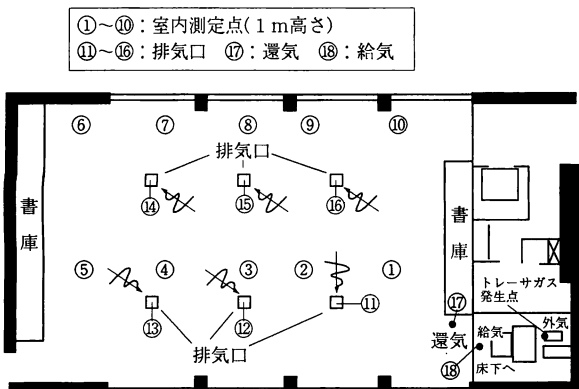
1.4 濃度減衰多時点法

濃度減衰多時点法は，室内濃度分布が一様で，かつ測定期間中の換気回数が時間変化しない時に式(D2)の関係から求めることができる。付録図-D4は，排気口測定点⑩の濃度の自然対数と経過時間との関係を表したグラフである。グラフより濃度の自然対数と経過時間には直線関係がある。式(D2)の近似直線より濃度減衰多時点法による換気回数は1.86回/hと算出される。

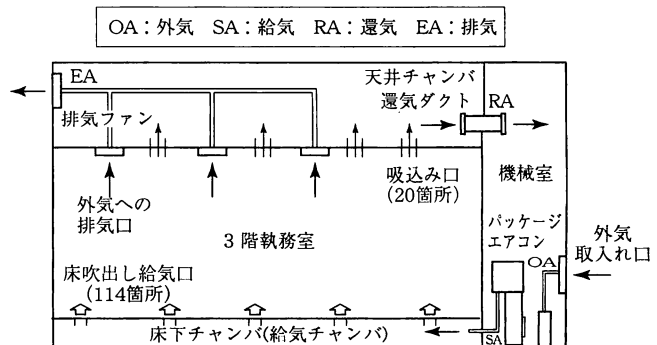
$$\log_e C(t) = \log_e C(t_0) - N(t - t_0) \quad \dots\dots (D2)$$

1.5 ステップダウン排気濃度法

ステップダウン排気濃度法では，式(D3)のように，排気口における局所平均空気齢の逆数により室の換気回数を算出することがで



付録図-D1 対象空間平面および濃度測定点



付録図-D2 対象空間の空調・換気設備の概要