

流れの時間スケールを考慮した換気・通風空間のむらの評価指標と マクロモデルへの展開

VOLUME INDEX TO EVALUATE THE SPACE WITH UNEVENNESS IN CONSIDERATION OF TIME SCALE AND DEVELOPMENT IN MACRO MODEL FOR CROSS VENTILATION

西澤繁毅*, 繪内正道**, 羽山広文***, 森 太郎****
Shigeki NISHIZAWA, Masamichi ENAI, Hirofumi HAYAMA
and Taro MORI

It's difficult to apply the age of air and ventilation effectiveness to evaluating the space with natural ventilation and cross ventilation, because the property of indoor environment changes under the influence of external condition. New index which expresses the unevenness in space for natural ventilation and cross ventilation is examined from movement and diffusion of tracer gas, in consideration of time scale of airflow field. And 2-zone model is examined as the macro model in consideration of unevenness.

1. Volume index is derived from concentration at exhaust to gas input at supply. And it is confirmed the index expresses the unevenness in space.
2. It is confirmed to be able to grasp the overview of velocity distribution from the volume index.
3. 2-zone model based on the volume index is presented. And correspondence to the transient analysis is considered.
4. The identification method of the interzonal airflow rate is examined.

Keywords : Ventilation, Indoor air flow, Unevenness, Time scale, Volume index, Macro model analysis

換気, 室内気流, むら, 時間スケール, 容積指標, マクロモデル解析

1. はじめに

室内の換気性状を把握するために、空気齢とそれをもとにした換気効率が指標として広く用いられている。空気齢をもとにした換気効率指標は機械換気空間に適用される¹⁾とともに、外界と室内気流の変化を時間平均的に捉えることで住宅空間にも適用されている²⁾。しかし、空気齢は室内気流が定常である(外界の変化が影響を及ぼさない)ことを前提としており、外界や室内気流が経時的に変化する非定常状態の空間に適用することは困難である。これは、局所空気齢が定常気流場における時刻 $t=0\sim\infty$ を対象とした空気分子の平均到達時間で定義され、その分布が短い時間スケール(時刻 $t=0\sim t_0$)の間に広がる流入空気の分布と異なることに由来している。外界の変動により換気量が増減し、室内気流が大きく変化するハイブリッド換気や自然換気、通風を行う空間の性状を検討する際には、短い時間スケールで空間に形成されるむら³⁾を評価する指標を用いる必要がある。

筆者らは、これまでに通風空間に生じるむらを定量的に評価する手法として有効混合容積⁴⁾を用いた手法を検討している^{4),5)}。また、パルス法でのトレーサーガスの追跡から通風輪道を領域として把握する手法を検討している⁶⁾。これらの検討を通して、むらの大きな空間の性状を定量的にとらえる際には、流れ場の時間スケールが重要なファクターとなることを確認している。本報は、トレーサーガスの移動・拡散の状況を

検討し、時間スケールを考慮した空間のむらを定量的に表す指標を提案することを目的としている。また、その指標をもとに空間のむらを考慮したマクロモデル化の検討を行っている。

2. 空間のむらを表す指標の導出

1) 導出モデルと概略

図1の一对の流入流出口を持つ空間について検討をすすめる。容積を $V[m^3]$ 、流入、流出口面積を $S_i, S_o[m^2]$ 、換気量を $Q[m^3/s]$ 、平均流入速度を $U_i(=Q/S_i)[m/s]$ とする。この空間の流れ場は定常で既定であると、流入口でトレーサーガスを放出するステップアップ法、パルス法で空間のむらを表す指標の導出を行う。流入口での無次元濃度を $C_i(=1.0(t>0))[-]$ (ステップ入力)、 $C_i'(=dC_i/dt=\delta(t))[s^{-1}]$ (パルス入力)、流出口の濃度を $C_o[-]$ (ステップ応答)、 $C_o'(=dC_o/dt)[s^{-1}]$ (パルス応答)とする。

流入口で与えたガス濃度のステップ入力 C_i に対して、流出口で濃度応答 C_o (図2、後述のTest 1の応答、 \bar{C} は平均濃度、 C_{dir} は瞬時一様拡散

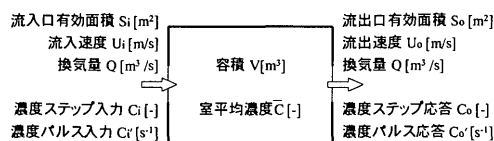


図1 導出モデル

* 建築研究所環境研究グループ 研究員・博士(工学)

** 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)

**** 北海道大学大学院工学研究科 助手・博士(工学)

Research Engineer, Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Instructor, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

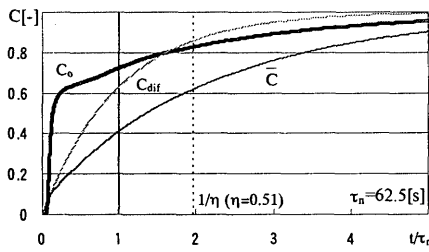


図2 濃度ステップ応答C_o(Test 1)

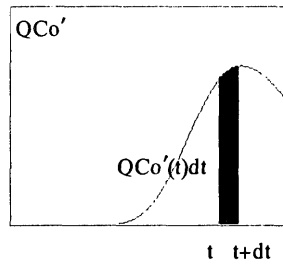


図3 QC_o'(t)dt

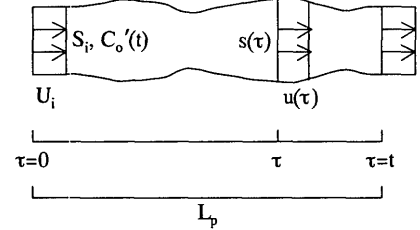


図4 管Rのピストンフローモデル

を仮定したときの濃度)が得られるとき、流入空気がこの空間の流れに応じて移動拡散した結果として応答C_oが得られることから、濃度応答C_oはその空間全体の流れを反映したものであると言える。以上の観点から、濃度応答C_oならびにその時間微分C_o'(パルス応答)をもとに、時間スケールに応じた空間むらを表す指標の導出を行う。

2) 流入口のパルス入力C_o'(t)δ(t)に対応した管Rの設定

パルス応答C_o'(t)は、時刻t=0に流入した空気のうち、時刻tに流出した空気の割合を示すものである。図3は、時間t~t+dtに流出する空気量U_iS_iC_o'(t)dt(=QC_o'(t)dt)を取り出したものであり、この応答は、通過に時間tを要するピストンフロー(図4)において、入口におけるC_o'(t)δ(t)のパルス入力に対応して出口で得られる応答と考えることができる。

図4のピストンフローのモデルにおいて、時刻τ=0におけるパルス入力C_o'(t)δ(t)で管pに流入する空気塊の容積はU_iS_iC_o'(t)dtである。この塊は変形を許容しながらも、分割されることなく、一定の容積(管の断面積s(τ)の増減により速度u(τ)が変化しu(τ)s(τ)=一定を保つ)、時刻τの経過に従ってスムーズに流出口まで流れ、と考える(U_iS_iC_o'(t)dt=u(τ)s(τ)C_o'(t)dt=QC_o'(t)dt)。すると、この管Rの容積V_r(t)は、

$$V_r(t) = \int_0^t u s C_o'(t) dt = \int_0^t Q C_o'(t) dt = Q t C_o'(t) \quad \dots\dots(1)$$

と表せる。この容積V_r(t)は、時刻τ=0にパルス入力C_o'(t)δ(t)で流入した空気が、τ=tに流出するまでに占める軌跡の容積である。ただし、C_o'(t)δ(t)のパルス入力に対応した管Rの容積V_r(t)が定まるとしても、図4の管Rが実空間中に現れるわけではないことに注意が必要である。実際には、C_o'(t)δ(t)のパルス入力で流入した流体粒子は、それぞれ異なる経路をたどり時刻tに流出することになるため、容積V_r(t)は空間中に「網目」の様に存在する管Rの容積ということになる。

3) 時刻t₀までに流出口に到達する管Rの占める容積V_a(t₀)の導出

容積V_r(t)をt=0~t₀で積分した容積をV_a(t₀)とする。この容積V_a(t₀)は、時刻t=0に流入した空気量Qのうち、時刻t₀までに流出した空気量QC_o(t₀)が空間に残した軌跡の容積を表している。

(1)式をt=0~t₀で積分してV_a(t₀)を求めるためには、応答C_o'(t)を数式で表現する必要がある。ステップ応答C_o(t)は、

$$C_o(t) = 1 - \int_0^t a(b)e^{-bt} db \quad \dots\dots(2)$$

と表すことができるため、パルス応答C_o'(t)は、

$$C_o'(t) = \frac{dC_o}{dt} = \int_0^t a(b)e^{-bt} db \quad \dots\dots(3)$$

と表せる。(2)、(3)、(5)式を用いて、容積V_a(t₀)を求めると、

$$\begin{aligned} V_a(t_0) &= \int_0^{t_0} Q t C_o'(t) dt = \int_0^{t_0} Q t \int_0^t a(b)e^{-bt} db dt \\ &= Q \int_0^{t_0} \frac{a(b)}{b} (1 - e^{-bt_0}) db - Q t_0 \int_0^{t_0} a(b)e^{-bt_0} db \\ &= Q \int_0^{t_0} (1 - C_o) dt - Q t_0 (1 - C_o) \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

$$\int_0^{t_0} (1 - C_o) dt = \int_0^{t_0} \int_0^t a(b)e^{-bt} db dt = \int_0^{t_0} \frac{a(b)}{b} (1 - e^{-bt_0}) db \quad \dots\dots(5)$$

となる。

4) 容積V_a(t)、V_{ab}(t)、V_b(t)、V_c(t)の検討

(4)式で得られた容積V_a(t)の持つ意味を図5を用いて検討する。図5はステップ応答C_oと換気量Qの積の経時変化を示したものである。

図5上で(4)式をとらえると、(4)式右辺第1項の積分は図中A+Bの面積を表し、右辺第2項はBの面積を表すことになる。そのため、時間スケールt₀でのV_a(t₀)は図5のAの面積となる。

ここで、時刻t=0に流入する空気Qが空間内を移動拡散し排出されるまでを図4の管Rの集合してとらえた図を考える(図6)。図6は、通過に要する時間t毎に図4の管Rを重ねて記した模式図であり、それぞれの管の左端(t=0)が流入口、右端が流出口にあたる。このピストンフローの集合で空間全体の流れを表した図6は、実は図5そのものであり、時刻t=0に流入した空気Qの残した軌跡の容積は、ステップ応答C_oと換気量Qの積から求めることができることを示している。

図5、6より、V_a(t₀) (Aの面積)は、前項の通り、時刻t=0に流入した空気のうち、時刻t=t₀までに流出した空気(QC_o(t₀))が空間に残した軌跡の容積を表していることが分かる。また、A+Bの面積((4)式右辺第1項)は、時刻t=0にパルス入力した空気Qがt=t₀までに空間に残した軌跡の容積(V_{ab}(t₀)とする)を示し、Bの面積((4)式右辺第2項)は、流入空気Qのうち、t=t₀の時点で空間にとどまっている空気(Q(1-C_o(t₀)))がt=t₀ま

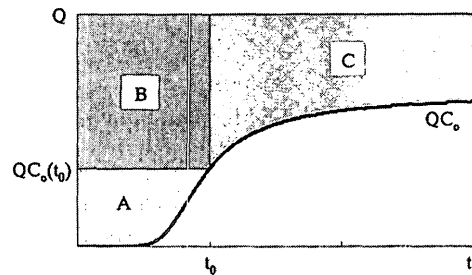


図5 QC_oの経時変化と領域A,B,C

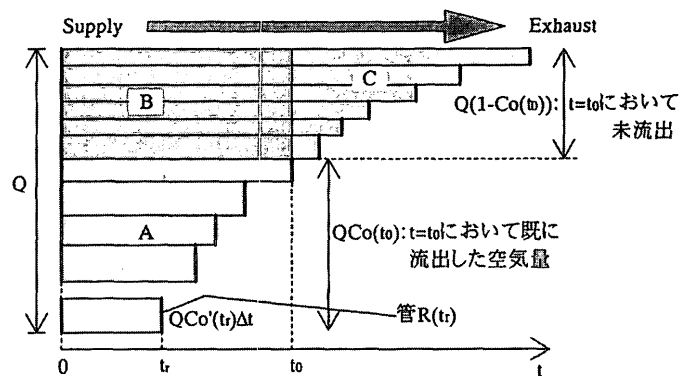


図6 換気量Q全体のピストンフロー概略と領域A,B,Cの関係

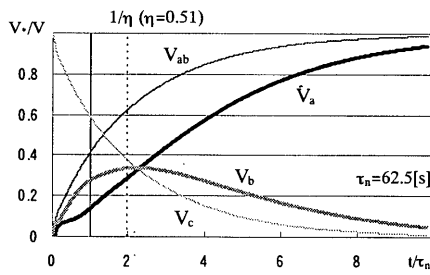


図7 各容積の経時変化 (Test 1)

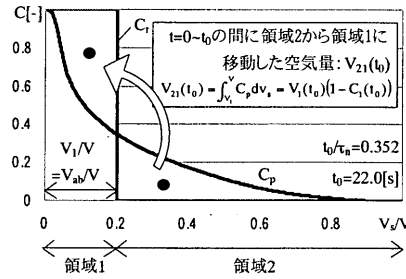


図8 空間濃度分布

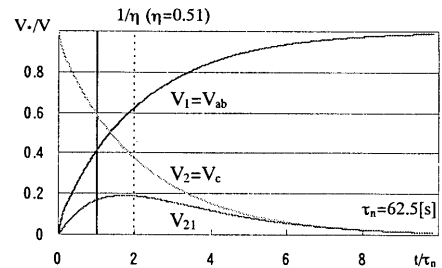


図9 V₁, V₂, V₂₁ の変化 (Test 1)

でに残した軌跡の容積 ($V_b(t_0)$) を示している。領域Cの面積は、 $t=t_0$ の時点で空間にとどまっている空気 ($Q(1-C_0(t_0))$) が、 $t=t_0$ 以降に、流出するまでに通過する容積 ($V_c(t_0)$) を示す。 $V_{ab}(t_0)$ 、 $V_b(t_0)$ 、 $V_c(t_0)$ を式で表すと以下ようになる。

$$V_{ab}(t_0) = Q \int_0^{t_0} (1 - C_0) dt \quad \dots\dots(6)$$

$$V_b(t_0) = Q t_0 (1 - C_0(t_0)) \quad \dots\dots(7)$$

$$V_c(t_0) = V - V_{ab}(t_0) = Q \int_{t_0}^{\infty} (1 - C_0) dt \quad \dots\dots(8)$$

図2の $C_0(t)$ から求めた各容積の経時変化を図7に示す。(6)式より、 $V_{ab}(t)$ は $t \rightarrow \infty$ で $Q\tau_n = Q\tau_n = V$ と実容積 V に収束する。また、 $V_b(t)$ は $t=0$ 、 $t \rightarrow \infty$ で0となる(7)式)。 $V_a(t)$ は $V_{ab}(t)$ より遅れて V に収束する(図7)。このように、流入口のステップ入力に対する流出口のステップ応答 C_0 が求まっていれば、経時変化する $V_a(t)$ 、 $V_{ab}(t)$ 、 $V_b(t)$ 、 $V_c(t)$ を容易に求めることができ、容積 $V_a(t)$ 、 $V_{ab}(t)$ 、 $V_b(t)$ 、 $V_c(t)$ は、流入した空気の経時的な移動拡散を反映していることから、時間スケールに応じた空間のむらを表す指標となると考えられる。ただし、容積が $V_a(t)$ 、 $V_b(t)$ 、 $V_c(t)$ となるような領域A、B、Cが、実空間中に明確に現れるわけではないことに注意が必要である。領域A、B、Cが混合した状態で実際の空間が形成されていることになる。

5) 各容積と室平均濃度の関係

図1のモデルにおいては、ステップ入力 C_1 、ステップ応答 C_0 と室平均濃度 \bar{C} の関係は、質量収支式より、

$$V \bar{C} = Q \int_0^t (1 - C_0) dt \quad \dots\dots(9)$$

$$V \frac{d\bar{C}}{dt} = Q(1 - C_0) \quad \dots\dots(10)$$

となるため、各容積は室平均濃度 \bar{C} を用いて、

$$V_a(t) = V \bar{C} - V t \frac{d\bar{C}}{dt} \quad \dots\dots(11)$$

$$V_{ab}(t) = V \bar{C} \quad \dots\dots(12)$$

$$V_b(t) = V t \frac{d\bar{C}}{dt} \quad \dots\dots(13)$$

$$V_c(t) = V(1 - \bar{C}) \quad \dots\dots(14)$$

と表すことが可能である。しかし、むらのある空間の室平均濃度を測定で求めるのは難しく、CFD解析以外では流出口濃度を用いる方が容易であると思われる。

6) 局所濃度 C_p と V_{ab} 、 V_c の関係

空間内の任意の点の濃度 $C_p(t)$ と容積 $V_{ab}(t)$ 、 $V_c(t)$ の関係を考える。図6において、時刻 $t=0$ からステップアップ入力 $C_1=1.0$ ($t>0$) を行った場合を考えると、管R中の流れはピストンフローでモデル化されているため、時刻 $t=t_0$ で、領域A、Bの濃度は1.0、領域Cの濃度は0.0となる。しかし、前述のように、領域A、B、Cは混然とした状態で実空間に拡がっており、空間内の任意の点pは、領域A、B、Cそれぞれを要素に

含んでいることになる。そのため、濃度 $C_p(t)$ は、その時刻における点pが濃度1.0の領域A、Bと濃度0.0の領域Cに属する比率を表すものと考えることができる ($C_p = 1.0 * V_{ab,p} + 0.0 * V_{c,p} = V_{ab,p} : V_{c,p}$ は、点pが領域A+Bに属する割合)。また、濃度 $C_p(t)$ が、点pの時刻tにおける領域A+Bに属する割合を示すことから、局所空気齢 τ_p は、時間tとともに流入口から拡がっていく領域A+Bが点pに到達する平均の時間であり、室平均空気齢 $\langle \tau \rangle$ は、領域A+Bが空間に拡がる平均的な時間を示す、とすることができる。

7) 領域A+Bから領域1への対応

ここまで検討してきた容積 V_a 、 V_b 、 V_c の表す領域は、前述の通り、空間の中に明確に区別できないものとして示されてきた。ここでは、ある時刻 t_0 における空間濃度分布をもとに、幾何的に明確に区分できる領域1、2を考える。

図8は、図2のケース(後述のTest1)の時刻 $t_0=0.352\tau_n=22.0[s]$ における濃度 C_p の空間分布である (C_p を降順で整理、横軸に累積した容積比 V_i/V をとる)。図6のピストンフローモデルが実空間に対応しているものと仮定して空間濃度分布に当てはめると、 $V_{ab}(t_0)=0.20V$ を境に $C_{ab}=1.0$ 、 $C_c=0.0$ となる C_1 の濃度分布が現れることになる(図8)。しかし、実際の濃度分布は C_p である。ここで、領域1が V_{ab} と同じ容積を占めると定義し ($V_1 \equiv V_{ab}$ 、ただし、領域1は領域A、B、Cと異なり空間内でその他の領域(領域2)と幾何的に明確に区別できる領域である)、図8において濃度分布 C_p を $V_{ab}/V = V_1/V$ で領域1と領域2に区分すると、領域1の平均濃度は $C_1=0.63$ となる。ピストンフローを仮定すると濃度が1.0となる領域で、実濃度が C_1 になるとすれば、その差は領域1以外(領域2)から濃度0.0の空気が流入した分にあたりと解釈できる。すなわち、 $V_{21} = V_1(1 - C_1) = V_2 C_2 = 0.075V$ (図中●の面積に相当)は、ステップ入力に対して、時刻 $t=0 \sim t_0$ の間に、領域2から領域1に移動する空気量と考えることができる。

図9に図2のステップ応答のケース(後述のTest1)で求めた V_1 、 V_2 、 V_{21} の時間スケールによる変化を示す。 V_{21} は、名目換気時間 τ_n と室平均空気齢 $\langle \tau \rangle$ の間で最大値を示し、 V_1 の3割から5割を占めることになる。

図10に時間スケールに応じて領域1が変化の様子を示す。領域1

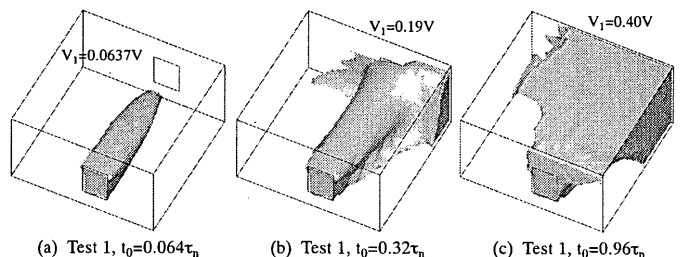


図10 時間スケールとともに変化する領域1 (Test 1)

は、ステップ入力した空気の移動拡散に対応しており、時間スケールが大きくなるとともに空間に広がっている様子が分かる。以上

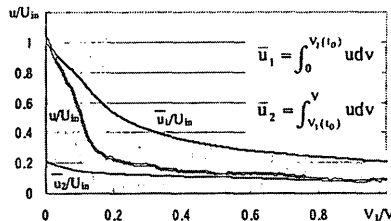


図11 容積 V_1 と速度分布 (Test 1)

からこの領域1とその容積 V_1 を、時間スケールに応じた空間のむらを表す指標と考えることができる。

8) 領域1と速度分布

領域1は流入空気の移動拡散の状況から時間スケールに応じて求めるため、ここまで検討してきた領域1が表す「むら注1)」

は、あくまでも流入する空気が示すむら(空気質のむら)であり、その他の環境要素のむらとは異なる。しかし、温湿度のむらが流入する空気の流れの影響を強く受けて空間に形成されることを考えれば、温湿度のむらも空気質のむらを表す領域1でとらえることが可能だと考える。しかし、流速のむらは空気質のむらとは構造が異なる(流入口近傍の流速の大きな領域は、短い時間スケールにおいて領域1に含まれることになるが、流出口近傍の領域は同程度の流速であっても、長い時間スケールにおける領域1に含まれることになる)。領域1と流速の関係を図11に示す。横軸の時間スケールに応じて変化する領域1の容積比 V_1/V に対応する風速比とその移動平均 u/U_{in} を表しており、領域1が大きくなるにつれて流速が小さくなる傾向が見てとれる。流速の移動平均 u/U_{in} からは、この空間が $V_1=0.2V$ 付近で速度の大きな領域(通風輪道)と小さな領域(滞留域)に二分される傾向が分かり、容積 V_1 の示す領域であっても流速のむらを把握することができると言える。時間スケール $t_0=22.0[s]$ における領域1($V_1=0.20V$)の平均風速 \bar{u}_1 は $0.53U_{in}$ 、領域2の平均風速 \bar{u}_2 は、 $0.13U_{in}$ となっている。

3. ケーススタディ

CFD解析を用いて、通風換気を行う空間を対象にむらを表す容積 $V_{ab}(t)=V_1(t)$ 他を求める。モデルの解析条件を図12に、CFD解析の概要を表1に記す。定常気流場を求めた後に、流入口にガス濃度のステップ入力を与え、時間間隔 $\Delta t=0.02[s]$ で濃度の経時変化を計算し、各容積を算出した。解析結果として、表2にTest 1~3の空気齢と換気効率指標

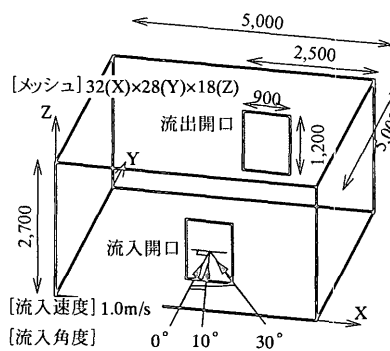


図12 解析条件

表1 CFD概要

乱流モデル	標準k-εモデル
解析法	有限体積法 (SIMPLE法)
差分スキーム	べき乗法
流入境界	$k_{in}=(U_{in}*0.05)^2/2$ $\epsilon_{in}=C_{\mu} k_{in}^{3/2}/L$ L:開口幅の20%
流出境界	開口流量指定
壁表面	一般化対数則

表2 換気性状

	Test 1	Test 2	Test 3
換気量 $Q[m^3/s]$	1.08	1.06	0.94
名目換気時間 $\tau_n[s]$	62.5	63.5	72.2
室平均空気齢 $\langle \tau \rangle [s]$	121.8	75.9	71.8
平均空気交換効率 η	0.51	0.84	1.00

* $\eta=\tau_n/\langle \tau \rangle$

を、図13~18にTest 2, 3のステップ応答 $C_0(t)$ と容積 $V_a(t)$ 等の経時変化、容積 V_1 と流速の関係を示す。Test 1については、既に図2、図7、図9、図11で示している。

流入した外気がスムーズに流出するTest 1($\eta=0.51$)では、各容積は名目換気時間 τ_n に対して、ゆるやかに収束している。 $t=\tau_n$ では、 V_a は $0.14V$ であり、 $V_{ab}(=V_1)$ は $0.41V$ となる(図7)。室内の混合の程度が大きくなると、各容積の収束は早くなり、流入角度が 10° のTest 2では、 $t=\tau_n$ での V_a が $0.18V$ 、 $V_{ab}(=V_1)$ が $0.54V$ (図13)、Test 3では V_a が $0.26V$ 、 $V_{ab}(=V_1)$ が $0.62V$ となる(図16)。従って、空間の平均空気交換効率 η が大きくなるにつれ、 V_a 、 V_{ab} は、同じ時間スケール t/τ_n で大きな値をとることが分かる。また、図7、13、16から室平均空気齢 $\langle \tau \rangle$ で V_b が極大値を示すことが分かる。また、 V_{21} も $V_1(=V_{ab})$ 、 $V_2(=V_c)$ と同様に、室内の混合の度合いが大きくなるにつれ、早い時間スケールでピークを迎える傾向にある。

領域1と流速の関係については、Test 2、Test 3では、Test 1と異なり容積 V_1 に対して速度 u が単純に減少する傾向を示さないことが分かる。比較的長い時間スケールにおける領域1(Test 2の $V_1=0.1V\sim 0.5V$ 、 $0.7V\sim 0.8V$ 、Test 3の $V_1=0.3V\sim 0.6V$)においても、流入速度 U_{in} と同程度の流速を示すポイントがあり、移動平均 u/U_{in} は、 $V_1=0.2V$ 付近で極小値を、Test 2は $V_1=0.27V$ で、Test 3は $V_1=0.3V$ では極大値を示している。このような関係は、流入した空気が短い時間スケールにおける領域1の周囲の空気を誘引し、比較的長い時間スケールの領域1の空気に運動エネルギーを与えているために生じており、その結果、室内の混合が

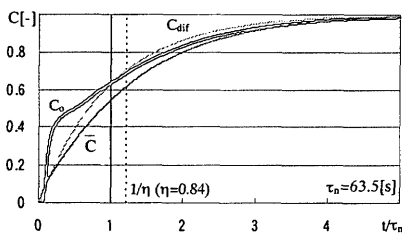


図13 濃度ステップ応答 C_0 (Test 2)

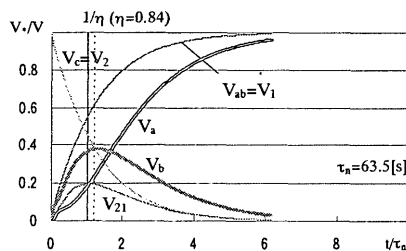


図14 各容積の変化 (Test 2)

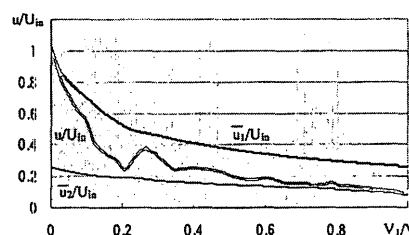


図15 容積 V_1 と速度分布 (Test 2)

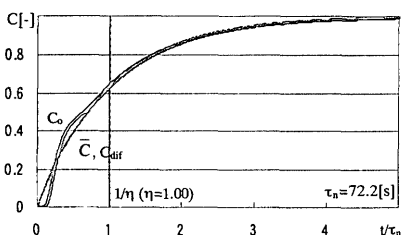


図16 濃度ステップ応答 C_0 (Test 3)

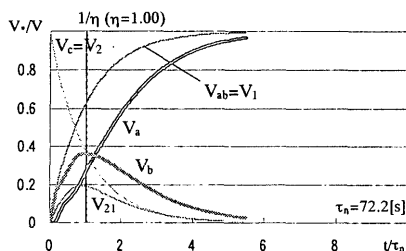


図17 各容積の変化 (Test 3)

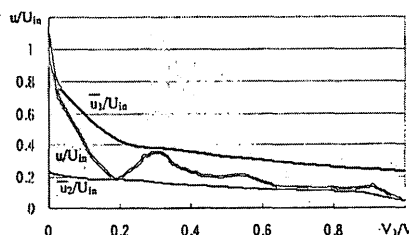


図18 容積 V_1 と速度分布 (Test 3)

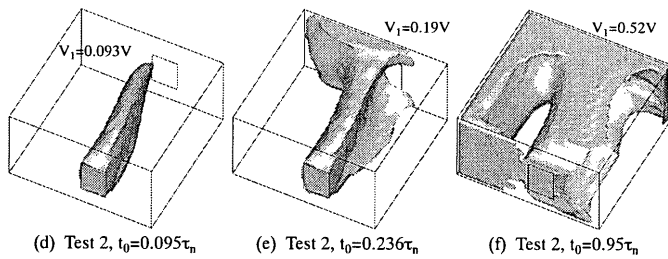


図19 時間スケールとともに変化する領域1 (Test2)

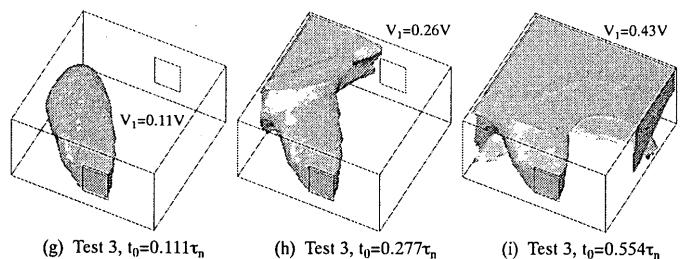


図20 時間スケールとともに変化する領域1 (Test3)

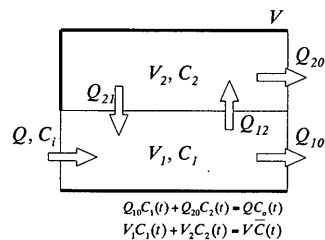


図21 2ゾーンモデル

促進されている、と捉えることができる。以上のように、領域1と流速分布の間に厳密な対応関係があるわけではないが、時間スケールに応じて空間を分割した領域1と領域2によって、風速の分布をマクロに捉えることは可能であると考えられる。

図19、図20にTest 2とTest 3の領域1を示す。図10のTest 1と併せて見ることで、流入角度による領域1の形状の違いが分かり、ステップ入力した流入空気が時間に応じて拡がっていく構造が示されている。

4. 2ゾーンモデルへの展開

1) 空間に生じるむらを考慮したマクロモデル化

マクロモデル解析では、空間の瞬時一様拡散を仮定して、空間全体を1点で代表するモデルを使うことが多い。空間内の気流が穏やかで急激な変化が無い場合(=空間の時間スケールを長くとらえることができる場合)には、このモデル化は簡便で有効であり、広く用いられている。しかし、温度や気流のむらが大きい空間を1質点モデルで表現することは不可能であり、1室を複数点で表し空間のむらを考慮する多質点モデルの検討がこれまでになされている。多質点モデルでは、温度積層をもとにしたモデル化⁹⁾や、インテリアとペリメータといった空間の異なる性質によって分割するモデル化⁹⁾がこれまでに考案されている。しかし、気流によって生じるむらを考慮したマクロモデルは、大空間における吹出気流¹⁰⁾を扱った戸河里らのモデル⁷⁾や混合損失を検討した小島らのモデル¹¹⁾など数少なく、その中でも、外界の影響を強く受け、経時的に大きく変化する通風換気や自然換気、ハイブリッド換気を行う空間に適した、室内の流れの状況に応じたマクロモデルは未だ考えられていない。ここでは、流れ場によって空間に生じるむらを考慮したマクロモデルとして、時間スケールに応じた容積 V_1, V_2 をもとにした2ゾーンモデル(2質点モデル)の検討を行う。

2) 2ゾーンモデル

図21に2ゾーンモデルの概略を示す。このモデルでは、室内空間は外界から空気が流入する領域1とその周辺の領域2に分かれ、領域間の空気移動量を Q_{12}, Q_{21} としている。また、流出量 Q を領域1からの流出量 Q_{10} と、領域2からの流出量 Q_{20} の和でモデル化する。容積 V_1, V_2 は、前項で検討した時間スケールによって変わる容積であり、着目するむら(もしくは流れの時間スケール)に応じて任意に設定可能とする。そして、容積 V_1, V_2 に応じた領域間空気移動量 $Q_{12}, Q_{21}, Q_{10}, Q_{20}$ を設定することで、領域1, 2の濃度、温度、湿度等を経時的に求めることができる。2ゾーンモデルにおけるガスの収支式は次のようになる。

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = QC_1 + Q_{21}C_2 - Q_{12}C_1 - Q_{10}C_1 \quad \dots\dots(15)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = Q_{12}C_1 - Q_{21}C_2 - Q_{20}C_2 \quad \dots\dots(16)$$

この2ゾーンモデルの対象としては、大きく分けて2つのケースが考えられる。1つは名目換気時間 τ_n より極めて短い時間スケール($C_0 \equiv 0$ である時間スケール)に対応する領域1に対してむらを考慮するケースである。このケースでは、領域1は流出口近傍に到達しておらず、容積 V_1 は小さく、 $Q_{10} \rightarrow 0, Q_{20} = Q_{12} - Q_{21} \equiv Q$ となり、流入→領域1→領域2→流出というピストンフロー状のモデルになる。大空間における吹出気流やタスクアンビエント空調のタスク域をその周囲の空間と区分して検討する場合はこのケースに対応する(①)。

もう1つのケースは、上記のケースより長い時間スケール(C_0 が極大を迎える前後の時間スケール)に対応する領域1に対して空間のむらを検討するケースである。このケースでは、領域1は流出口近傍に到達しており、 $Q_{20} \rightarrow 0, Q_{10} \equiv Q, Q_{12} \equiv Q_{21}$ となる。通風換気時にすば抜けて空気が流出する(流入空気の動圧が室内で保持される)場合はこのケースに相当する(②)。

実際には $Q_{10} \rightarrow 0$ や $Q_{20} \rightarrow 0$ とできるケースばかりではなく、2つのケースの間で Q_{10}, Q_{20} (ただし $Q_{10} + Q_{20} = Q$)を流れに応じて設定することになる。

3) 領域間空気移動量 $Q_{12}, Q_{21}, Q_{10}, Q_{20}$ の検討

任意の時間スケールに応じて容積 V_1, V_2 を設定した2ゾーンモデルで領域1, 2の濃度、温度、湿度等の経時変化を求めるためには、容積 V_1, V_2 に応じた適当な領域間空気移動量 $Q_{12}, Q_{21}, Q_{10}, Q_{20}$ を与える必要がある。ここでは、2つの方法で空気移動量を算出して、容積 V_1, V_2 と領域間空気移動量 $Q_{12}, Q_{21}, Q_{10}, Q_{20}$ の関係の検討を行い、適当な空気移動量の同定法について考察する。

1つめの方法は、 V_{21} をもとに空気移動量を定める方法である(方法1とする)。図8で説明される V_{21} は、流入口におけるステップ入力に対して、時刻 $t=0 \sim t_0$ の間に領域2から領域1に移動する空気量と考えられることから、時間スケール t_0 における V_{21} を領域1, 2の平均濃度 C_1, C_2 と空気移動量 Q_{21} [m³/s]を用いてモデル化すると、

$$V_{21}(t_0) = \int_0^{t_0} C_p dv_s = V_1(t_0)(1 - C_1(t_0)) = Q_{21} \int_0^{t_0} (C_2(t) - C_1(t)) dt \quad \dots\dots(17)$$

と表すことができる。また、 Q_{10}, Q_{20} は、

$$Q_{10} \int_0^{t_0} C_1(t) dt + Q_{20} \int_0^{t_0} C_2(t) dt = Q \int_0^{t_0} C_0(t) dt \quad \dots\dots(18)$$

と $Q_{10} + Q_{20} = Q$ から求めることができ、 Q_{12} は Q_{20} と Q_{21} の和から求める(図21)。ただし、 $C_1(t), C_2(t)$ は(15)、(16)式を用いて経時的に求める値であるため、(17)、(18)式を満たすように収束計算を行って空気移動量を同定する。もう1つの方法は、CFD解析で時々刻々求めた領域1, 2の平均濃度 $C_1(t), C_2(t)$ から、(15)、(16)式を用いて瞬時の $Q_{12}(t), Q_{21}(t), Q_{10}(t), Q_{20}(t)$ を求め、その時間平均値を用いる方法である(方法2とす

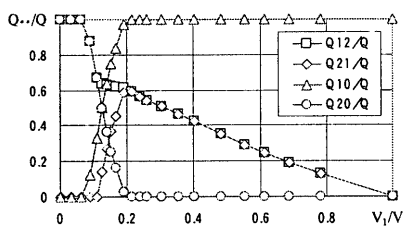


図22 Test 1 - 空気移動量 (方法1)

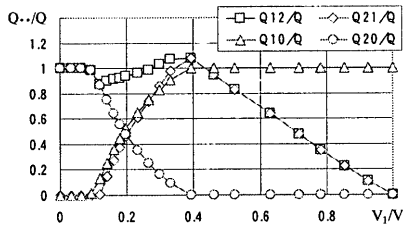


図26 Test 2 - 空気移動量 (方法1)

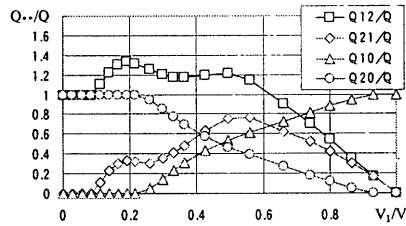


図30 Test 3 - 空気移動量 (方法1)

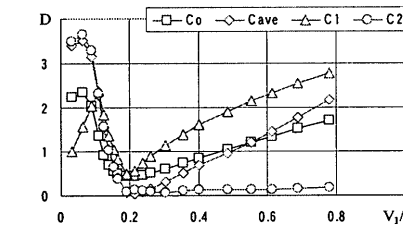


図23 Test 1 - D値による差の評価 (方法1)

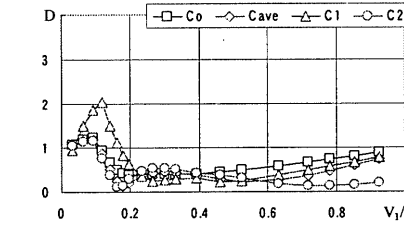


図27 Test 2 - D値による差の評価 (方法1)

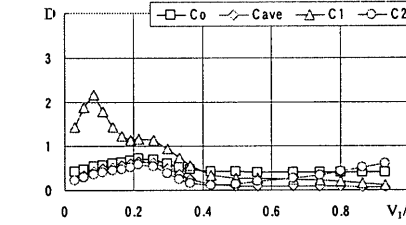


図31 Test 3 - D値による差の評価 (方法1)

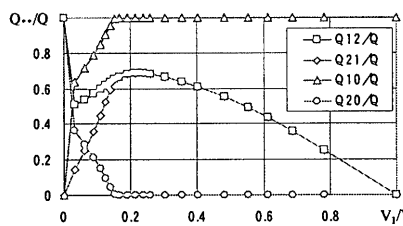


図24 Test 1 - 空気移動量 (方法2)

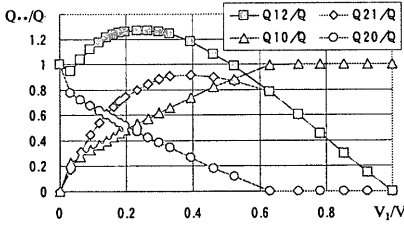


図28 Test 2 - 空気移動量 (方法2)

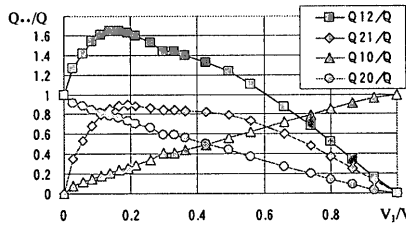


図32 Test 3 - 空気移動量 (方法2)

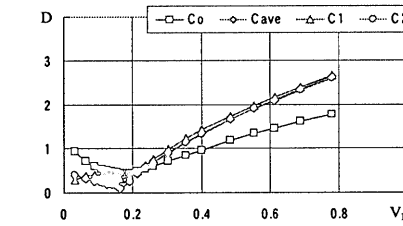


図25 Test 1 - D値による差の評価 (方法2)

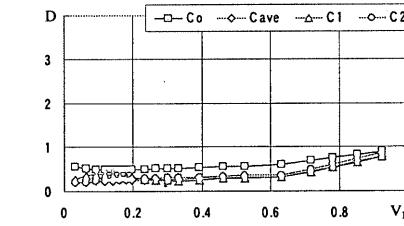


図29 Test 2 - D値による差の評価 (方法2)

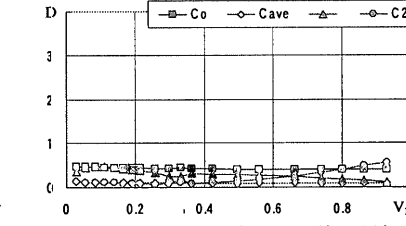


図33 Test 3 - D値による差の評価 (方法2)

る。ただし、どちらの方法においても Q_{12} 、 Q_{21} 、 Q_{10} 、 Q_{20} が負にならない(領域間の濃度勾配と逆方向にガスが輸送されることが無い)条件(非負条件)を課している。

Test 1において、方法1で求めた領域間空気移動量 Q_{12} 、 Q_{21} 、 Q_{10} 、 Q_{20} と容積 V_1 の関係を図22に示す。また、ある時間スケール t_0 における容積 V_1 と対応する領域間空気移動量 Q_{12} 、 Q_{21} 、 Q_{10} 、 Q_{20} (図22)を用いて(15)、(16)式から求めた濃度 $C_0(t)$ 、 $\bar{C}(t)$ 、 $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$ と、CFD解析で求めたそれぞれの濃度(図32)とのずれを、次式で定義するD値を用いて評価する(図23)。

$$D = \sqrt{\int_0^{\infty} (C_{i,zone} - C_{i,CFD})^2 dt} \quad \dots\dots(19)$$

このD値が小さいほど、2ゾーンモデルによる濃度とCFD解析による濃度の差が小さい(濃度の経時変化を表す図34において近接する)と評価できる。以下同様に、Test 1において、方法2で求めた Q_{12} 、 Q_{21} 、 Q_{10} 、 Q_{20} を図24に、そのときのD値を図25に、Test 2、Test 3の結果図26～33に示す。

方法1と方法2で求めた領域間空気移動量 Q_{12} 、 Q_{21} 、 Q_{10} 、 Q_{20} では、傾向は似ているものの細部で異なり、それぞれの領域間空気移動量を用いて求めた濃度の経時変化に大きな違いとして現れている。方法1で求めた領域間空気移動量をもとに、濃度の経時変化を求めた場合には、時間スケール t_0 が短く、領域1が小さい範囲 ($V_1 < 0.2V$ (Test 1 (図23)、Test

2 (図27)、 $V_1 < 0.4V$ (Test 3 (図31)))で、CFD解析で求めた領域濃度と大きくずれている。この範囲では特に C_1 のずれが顕著であり(図34-a-2、d-2、g-2)、短い時間スケールにおける V_{21} をもとに空気移動量を同定しているために、短時間での濃度の急速な立ち上がりには追従する分、時間が経つとともにずれが大きくなると考えられる。また、Test 1、Test 2では、領域1が大きくなるとともにD値が大きくなる傾向にある(Test 1: $V_1 > 0.2V$ (図23)、Test 2: $V_1 > 0.4V$ (図27))。平均空気交換効率 η が小さく、流入した外気がスムーズに流出するケースでは、領域1が大きくなると領域1の濃度が流出濃度を下回り ($C_1 < C_0$)、(17)、(18)式から $Q_{10} > Q$ 、 $Q_{20} < 0$ となるのを、非負条件を課して $Q_{10} = Q$ 、 $Q_{20} = 0$ としているため、濃度のずれが大きくなってしまう(図34-c-2)。この非負条件を課したことによるずれは、領域1が小さいときにも現れており(ただし、 $Q_{10} = 0$ 、 $Q_{20} = Q$ とする非負条件)、この範囲でのずれの原因の一つと言える。

方法2で求めた領域間空気移動量をもとに濃度の経時変化を求めた場合は、方法1より全体的にD値が小さくなっている(図25、29、33)。領域1が小さい範囲 ($V_1 < 0.2V$ (Test 1 (図25)、Test 2 (図29))、 $V_1 < 0.4V$ (Test 3 (図33)))では、方法1と比べてD値が低く抑えられている。 C_0 、 C_1 の立ち上がり時にずれがあるものの、CFD解析で求めた濃度と良く一致していると言える(図34-a-3、d-3、g-3)。これは、方法2では、この範囲の空気移動量が非負条件の適用なしに定まるためである(図24、28、

32)。一方、領域1が大きい時(Test 1: $V_1 > 0.2V$ (図25)、Test 2: $V_1 > 0.6V$ (図29))には、流出空気量に非負条件($Q_{10}=Q, Q_{20}=0$)が課せられるようになるため、方法1と同様にずれが大きくなる(図34-c-3)。

以上の検討から、方法2の方が領域間空気移動量を同定する方法として適当であると判断できる。しかし、方法2を用いても、平均空気交換効率 η が小さくなる(流入した外気がスムーズに流出する)ほど、 $Q_{10}=Q, Q_{20}=0$ となる容積 V_1 が小さくなり、それ以上では非負条件が課せられてCFD解析の濃度とのずれが大きくなる。しかし、2)であげた2ゾーンモデルの対象を考えれば、①のケースの空調吹出気流やタスク域を考慮する場合は、 V_1/V が非常に小さく、かつ $\eta \approx 1$ (Test 3の非常に小さい V_1/V の時に相当)であり、②の $Q_{20} \rightarrow 0, Q_{10} = Q, Q_{12} = Q_{21}$ となるケースには図34-bの条件が相当し、この条件は、方法1でも方法2でも、Test 1の中でD値が小さな値をとる条件となっている。よって、解析対象を考えれば大きな問題はないと考えられる。

5. まとめ

本報では、トレーサーガスの移動・拡散の状況から、時間スケールに応じた空間のむらを定量的に表す新しい指標を検討し、その指標をもとに空間のむらを取り込んだマクロモデル化の検討を行ってきた。得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 一对の流入流出口を持つ空間において、流入口の入力に対する流出口の濃度応答から容積 $V_a(t), V_{ab}(t), V_b(t), V_c(t)$ を導出し、それらの容積の性質を検討して時間スケールに応じた空間のむらを表す指標となることを確認した。
- 2) 容積指標 $V_{ab}(t), V_c(t)$ から幾何的に識別できる領域1, 2を示し、時間スケール t_0 の間に領域2から領域1に移動する空気量 V_{21} を示した。
- 3) 領域1, 2と流速分布の関係を検討し、領域1, 2で空間の流速をマクロにとらえることが可能であることを示した。
- 4) 空間に生じるむらを考慮したマクロモデルとして、時間スケールに応じた空間のむらを表す容積 V_1, V_2 をもとにした2ゾーンモデルを提示し、容積 V_1 に応じて、妥当な濃度変化を与える領域間空気移動量 $Q_{12}, Q_{21}, Q_{10}, Q_{20}$ の同定法を示した。

本報の空間のむらを表す指標は、風速分布や空気齢分布とは異なる、気流場の移動拡散の状況を表す新しい指標として提案してきたが、この指標に関してまだ検討すべき点がいくつかある。まず、多数の流入流出口がある場合の容積指標を検討する必要があるが、SVE4, SVE5¹²⁾と同様な展開により検討可能であると考えている。また、実際の空間との整合性を検討するために実験を行う予定である。

空間のむらを考慮したマクロモデル解析の展開については、端緒に就いたばかりである。本報の2ゾーンモデルはCFD解析と1質点モデルの間に位置づけられ、このモデルを用いて解析することで、室内気流を

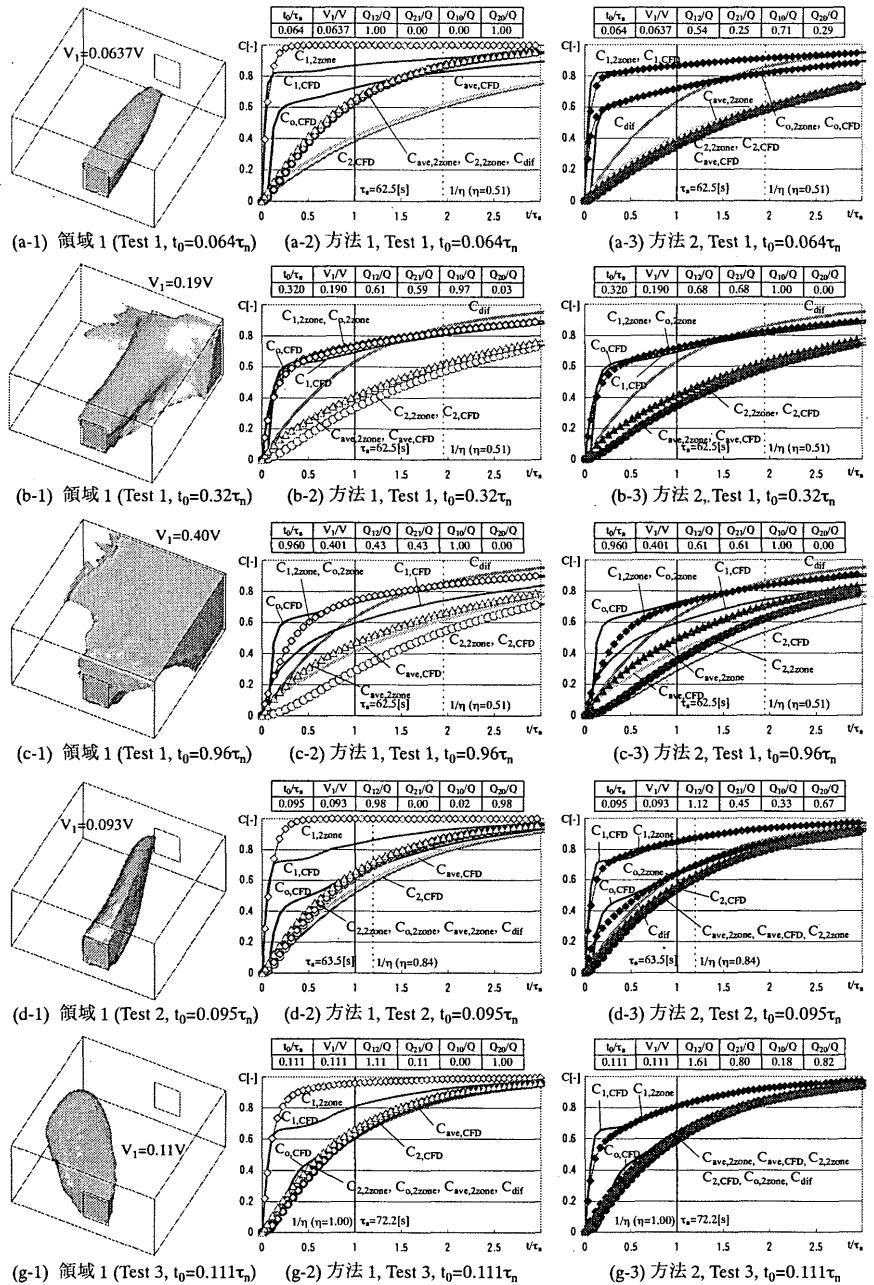


図34 CFDと2ゾーンモデルで求めた濃度変化の比較

マクロに反映した長期間にわたる除去熱量や温熱感等の検討を行えると考えている。そのためには、CFD解析を用いて、空間の大きさや形態、開口(給排気口)の大きさや配置、風向風速といった要素が領域1の容積 V_1 と平均流速、領域間空気移動量 $Q_{12}, Q_{21}, Q_{10}, Q_{20}$ にどのような影響を与えるかを検討し、むらのある空間を表す指標のデータベース化を進める必要がある。2ゾーンモデルの非定常解析への対応については、空調吹出気流やタスクアンビエント空調といった領域1を静的に設定できる場合は通常多質点モデルのマクロモデル解析と同様に扱うことができるが、通風環境のように外界の変化によって室内の気流が刻々と変化する空間では、領域1と空気移動量を動的に設定する必要が生じ、時間進行に対して異なる対応が必要となる。現在念頭に置いている、時間進行に対して領域を動的に変更する方法を図35に示す。2ゾーンモデルの展開は図35をもとに進めてきた^{注2)}が、この方法が2ゾーンモデルの非定常解析への対応として妥当かどうかは、今後検討を続ける必要が

ある。

6. 記号

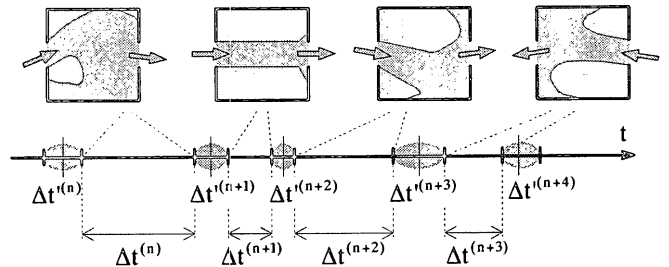
- $\bar{C}(t)$: 空間平均無次元濃度 [-]
- $C_{diff}(t)$: 瞬時一様拡散を仮定した空間無次元濃度 [-]
- $C_i(t)$: 流入口の無次元濃度ステップ入力 (=1.0(t>0)) [-]
- $C_i'(t)$: 流入口の無次元濃度パルス入力 (=dC_i/dt=δ(t)) [s⁻¹]
- $C_o(t)$: 流出口の無次元濃度ステップ応答 [-]
- $C_o'(t)$: 流出口の無次元濃度パルス応答 (=dC_o/dt) [s⁻¹]
- $C_p(t)$: 空間内の任意の点の無次元濃度 [-]
- $C_r(t, V_s)$: ピストンフローモデルを適用した時の空間無次元濃度 [-]
- D : CFD解析と2ゾーンモデルの濃度のずれを評価する指標
- Q : 換気量 [m³/s]
- Q₁₂, Q₂₁ : 領域1→領域2、領域2→領域1の空気移動量 [m³/s]
- Q₁₀, Q₂₀ : 領域1、2からの流出量 [m³/s]
- S_i, S_o : 流入、流出口面積 [m²]
- s(τ) : 時刻τにおける管Rの断面積 [m²]
- t : 時刻 [s]
- t₀ : 流れの時間スケール [s]
- u(τ) : 時刻τにおける管R内の流速 [m/s]
- ū₁, ū₂ : 領域1、2の平均風速 [m/s]
- U_i, U_o : 平均流入、流出速度 [m/s]
- V : 容積 [m³]
- V_a(t) : 時刻t=0に流入した空気Qのうち、時刻tまでに流出した空気(QC_o(t))が空間に残した軌跡の占める容積 [m³]
- V_{ab}(t) : 流入空気Qが時刻tまでに空間に残した軌跡の容積 [m³]
- V_{ab}(t) : 時刻tの時点で空間にとどまっている空気(Q(1-C_o(t)))が時刻tまでに残した軌跡の容積 [m³]
- V_c(t₀) : 時刻tの時点で空間にとどまっている空気(Q(1-C_o(t)))が、時刻t以降流出するまでに通過する軌跡の容積 [m³]
- V_r(t) : 管R(t)の容積 [m³]
- V_s : 累積容積 [m³]
- V₁(t) : 領域1の容積 (=V_{ab}(t)) [m³]
- V₂(t) : 領域2の容積 (=V_c(t)) [m³]
- V₂₁(t) : ステップ入力に対して、時刻t=0~tの間に、領域2から領域1に移動する空気量 [m³]
- Δt : CFDによる濃度解析での時間間隔 [s]
- Δt⁽ⁿ⁾ : 疑似定常的な解析が可能な時間(図35) [s]
- Δt⁽ⁿ⁾ : 遷移時間(図35) [s]
- η : 平均空気交換効率 (=τ_n/⟨τ⟩) [-]
- τ : ピストンフローモデルにおける時刻 [s]
- ⟨τ⟩ : 室平均空気齢 [s]
- τ_n : 名目換気時間 [s]
- τ_o : 流出口における空気齢 [s]

注

注1) 本報の「むら」は、空間に形成される気流速や温湿度、空気質といった環境要素の分布を指す。通常、学術的な意味では、ある要素の拡がりや分布を「分布」という表現が用いられるが、自然換気や通風では空間に形成される「むら」を積極的に活かして環境調整を行うことから、中立的な意味の大きな「分布」ではなく意図的な意味を含む「むら」という表現を用いている。

注2) マクロモデル解析の目的は、流れ場の微細な時間変化の検討ではなく、長

期間にわたる室内の平均的な挙動の検討にある(詳細な流れ場の変化を検討するには非定常のCFD解析が必要となるが、長期間を対象とした解析は現実的ではない)。マクロモデル解析で用いる外界のデータは、通常1時間毎、短くても5分、10分間隔のオーダーであり、通風空間の時間スケールはそれに比べて十分に短いと言える(Test 1~3の室平均空気齢⟨τ⟩は1~2分程)。そのように考えると、通風環境を対象にしたマクロモデル解析は、外界条件の変化に応じて室内の流れ場が速やかに収束に向かう、と仮定することができれば、通風環境をマクロに捉えることが可能となり、図35に示したように、定常状態の流れ場で求めた室内のむらのパターン(領域1)を、外界条件の変化に応じて切り替えていくことで、通風環境に生じるむらを考慮した非定常マクロモデル解析を行うことが可能になると考えている。



※通風空間の非定常な挙動を、外界条件の変化に応じて、疑似定常的な解析が可能な時間Δt⁽ⁿ⁾とその間をつなぐ遷移的のみなさなければならない時間Δt⁽ⁿ⁾(楕円部)に分けて考えることができるとすれば、疑似定常的な解析が可能な時間間隔Δt⁽ⁿ⁾にその時の外界条件に応じた2ゾーンモデルのパターンを適用し、遷移時間Δt⁽ⁿ⁾を挟んで2ゾーンモデルを置き換えていくことで外界条件の変化に対応するという方法が考えられる。ここで問題となるのは、遷移時間Δt⁽ⁿ⁾の扱いであるが、実測によって確かめる必要があるものの、Δt⁽ⁿ⁾=0としてしまうのも簡易化を図るための一つの方法であろう。同様に、外界条件によって変化する疑似定常的な解析が可能な時間間隔Δt⁽ⁿ⁾についても、Δt⁽ⁿ⁾=一定値、と扱うことで簡易化を図れる。ただし、いずれにしても、2ゾーンモデルの非定常解析への対応については、今後更なる検討が必要である。

図35 2ゾーンモデルの非定常解析への対応

参考文献

- 1) 赤林伸一, 坂口淳, 村上周三, 加藤信介, 深尾仁, 長谷川功, 須山喜美: オフィスビルを対象とした換気効率に関する実測調査, 日本建築学会計画系論文集, 第516号, pp.39, 1999.2
- 2) 坂口淳, 赤林伸一: 集中換気システムを設置した木造独立住宅の換気効率に関する実測調査—住宅の換気システムに関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, 第488号, pp.35, 1996.10
- 3) 奥山博康, 梶岡智明, 鈴木道哉, 竹林芳久: 多数室換気測定法の現場測定における誤差検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, pp.613-614, 1996
- 4) 西澤繁毅, 繪内正道, 羽山広文, 森太郎: 有効混合容積を指標とした通風空間の換気特性について, 日本建築学会技術報告集, 第14号, pp.165-170, 2001.12
- 5) 西澤繁毅, 繪内正道, 羽山広文, 森太郎: 有効混合容積をもとにモデル化した容積と空気齢の関係—有効混合容積による通風空間の基礎的検討 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, pp.747-748, 2002.8
- 6) 西澤繁毅, 繪内正道, 羽山広文, 森太郎: パルス法による通風輪道の同定とその検討, 日本建築学会技術報告集, 第15号, pp.155-160, 2002.6
- 7) 戸河里敏, 荒井良延, 三浦克弘: 大空間における上下温度分布の予測モデル—大空間の空調・熱環境計画手法の研究 その1, 日本建築学会計画系論文報告集, 第427号, pp.9-19, 1991.9
- 8) 繪内正道, 荒谷登, 久保田克己, 松村博文: 温度積層空間を上中下の3仮想室に分割した非定常熱解析手法と大規模吹抜け空間への適用結果, 日本建築学会計画系論文報告集, 第419号, pp.21-29, 1991.1
- 9) 戸河里敏, 武政祐一: オフィス空間の空調・熱環境計画手法の研究 その7 ベリメータとインテリアの熱・空気の混合評価モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集D2, pp.737-738, 1995
- 10) 窪田英樹: 大空間へ水平に吹き出す非等温気流の解析, 空気調和・衛生工学, 第47巻第6号, 1973.6
- 11) 小島昌一, 渡辺俊行, 龍有二, 赤司泰義, 西山紀光, 高橋淳一: 室内空気温度分布を考慮した室モデルによる室内混合損失シミュレーション, 日本建築学会計画系論文集, 第509号, pp.33-39, 1998.7
- 12) 小林光, 村上周三, 加藤信介: 不完全混合室内における局所領域の換気効率の同定に関する研究(その1) 室内における空調吹出口と排気口の勢力範囲, 日本建築学会大会学術講演梗概集D2, pp.539-540, 1992

(2003年6月10日原稿受理, 2003年11月25日採用決定)