

# 実大居室模型を用いた再循環空気存在下の 規準化居住域濃度の測定と数値予測

菊池 世欧啓 \*1  
小林 信行 \*2  
伊藤 一秀 \*2

空気調和・衛生工学会の HASS 102 換気規準は、室内の換気効率(=排気濃度で無次元化した居住域平均濃度、規準化居住域濃度  $C_n$ )を考慮した換気設計を推奨している。更に 2002 年に規格化された HASS 115 室内換気効率の現場測定法では、設計段階で用いた規準化居住域濃度  $C_n$  の現場測定を行い、予測精度を検証することも推奨している。

本研究では、HASS115 に示されたステップアップ法およびステップダウン法による居住域平均空気齢の測定法に従い、単室の実大居室模型を対象として規準化居住域濃度を測定する。あわせて空調吹出空気に含まれる Return Air (再循環空気)の割合を変化させた場合の汚染質濃度場についての構造評価も試みる。更に実験と同条件で数値解析を行い、Return Air が存在する場合の濃度場の線型重ね合わせによる規準化居住域濃度の予測結果と測定結果を比較し、HASS115 に示された現場測定法の精度を検証する。

**キーワード**：再循環空気・規準化居住域濃度・空気齢・ステップアップ法・ステップダウン法

## 1. 序

簡易に換気計画を行う際には、室内の完全混合を仮定し、室内における汚染質の濃度分布を無視した状態で必要換気量の算定を行うことが通常である。しかし一般には、室内に汚染源が偏在し、不均一濃度場が形成されていることが多い。この様な場合、居住域、人間の呼吸域周辺、発熱機器あるいは調理機器周辺といった室内の限られた範囲における空気質制御が重要となる。特に空気調和・衛生工学会で提案されている HASS 102 換気規準<sup>1)</sup>では、完全混合の仮定が成立しない居室に対し、室内の中で特に居住域の換気効率 (=排気濃度で無次元化された居住域平均濃度、規準化居住域濃度)を加味した換気設計を行うことを推奨している。

また、空気調和・衛生工学会では、HASS102 換気規準で定義されている規準化居住域濃度  $C_n$  を補完する形で、HASS115 室内換気効率の現場測定法<sup>2)</sup>を規格化している。規準化居住域濃度を測定するためには、汚染質発生量と換気量より定められる完全混合濃度(排気口濃度)と居住域平均濃度を測定する必要があるが、HASS115 では、居住域の各

点において濃度を測定し居住域平均濃度を算出する方法の他、トレーサーガス法(ステップアップ法もしくはステップダウン法)を用いて局所平均空気齢を算出することで居住域平均濃度を算出する方法を提示している。また HASS115 では、測定対象空間として基本的に単室で単一の換気システムを有する場合を想定しているが、現実には単室においても再循環空気が存在する場合や複数室が単一の換気システム下に存在する場合、単一空間に複数の換気システムが存在する場合等があり、こういった条件下でも規準化居住域濃度の現場測定法を整理・検討しておく必要性が高い。

一方、HASS115 の測定法に従った測定例は、HASS115 の解説中にオフィスビルを対象とした測定例があるものの、ほとんど報告例がないのも現状である。

本報では、比較的測定精度の確保が容易な実大居室模型を対象として、HASS115 に示された測定法に厳密に従って規準化居住域濃度を求め、実大居室模型の条件を採用した数値解析との比較により測定法の精度を検証することを目的とする。さらに、特に再循環空気が存在する場合の規準化居住域濃度の測定も併せて行うことで、給気量が一定で再循環空気量が変化した場合の規準化居住域濃度の変化に関して整理を行った結果について報告する。

\*1 東京工芸大学 (川本工業㈱) 正会員

\*2 東京工芸大学 正会員

また設計段階における規準化居住域濃度の予測精度確認の為、実大居室模型実験を対象として CFD (計算流体力学) 解析を行い、規準化居住域濃度を推定することで、現場測定結果との比較を行う。

## 2. 規準化居住域濃度 $C_n$

上述のように、規準化居住域濃度は完全混合濃度(排気口濃度)と居住域平均濃度の比として(1)式のように定義される(外気濃度は 0 と仮定)。

$$C_n = \frac{C_p}{C_{ext}} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $C_n$ は規準化居住域濃度、 $C_p$ は居住域平均濃度、 $C_{ext}$ は排気口濃度(完全混合濃度)を示す。HASS 102 換気規準では、この  $C_n$ を用いて完全混合状態を仮定して算出された基本必要換気量  $Q$ を増減することが可能とされている。

## 3. 定常濃度測定に基づく $C_n$ の算出法

HASS 115 によって示されている定常濃度測定法に基づく規準化居住域濃度  $C_n$ の測定は、(1)式で示される居住域平均濃度  $C_p$ と排気口濃度  $C_{ext}$ を直接測定することにより  $C_n$ を算出する方法である。

$C_p$ は居住域の複数点で濃度を測定し、その平均値を用いることで算出する。濃度測定点位置および測定数に関しては、HASS115 に詳細<sup>2)</sup>が示されており、測定点数に応じて補正を行うことが推奨されている。 $C_{ext}$ も同様に直接測定により与えられる。ここで、再循環空気が 0%の場合(外気濃度は 0 と仮定)の  $C_n$ は(2)式で与えられる。

$$C_n = \frac{C_{p(0)}}{C_{ext(0)}} \quad \dots\dots(2)$$

$$C_{ext(0)} = \frac{q}{Q_{(0)}} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 $q$ は汚染質発生率を示す。(2)式中の  $C_{p(0)}$ および  $C_{ext(0)}$ は再循環空気が存在せず、全外気運転を行っている場合の値であり、 $Q_{(0)}$ は給気口から室内に供給される空気量である。定常状態を仮定した場合、給気口から室内に供給される汚染質は室内一様に拡散する。そのため室内で発生した汚染質を含む再循環空気が存在する場合には(4)式を用いて  $C_n$ が算出されることとなる。

$$C_n = \frac{C_{p(x)}}{C_{ext(x)}} = \frac{C_{p(0)} + \alpha}{C_{ext(0)} + \alpha} \quad \dots\dots(4)$$

(4)式中の  $C_{p(x)}$ および  $C_{ext(x)}$ は再循環空気が  $x$  %存在する場合の値である。また  $\alpha$ は再循環空気が 0%の場合の平均濃度に対し、再循環空気が存在することによる平均濃度の増分であり、この値は以下の(5)式で与えられる。

$$\alpha = \frac{x/100}{1-x/100} C_{ext(0)} \quad \dots\dots(5)$$

流れ場は定常(固定)と仮定した場合、汚染質濃度場を決定するスカラ輸送方程式は線型となり、室内で発生した汚染質が形成する濃度場と吹出口から供給される汚染質が形成する濃度場は重ね合わせが成立する<sup>3)</sup>。

定常濃度測定法を用いる場合は、直接  $C_{p(x)}$ および  $C_{ext(x)}$ が測定されるため、(4)式より再循環空気が存在する場合の汚染質混合状態における  $C_n$ が直接算出される。また、再循環空気の割合  $x$  %を測定することで再循環空気の割合を変化させた場合の  $C_n$ が推定可能となる。

## 4. 空気齢に基づく $C_n$ の算出法

再循環空気が存在しない場合に居住域平均空気齢を用いて規準化居住域濃度  $C_n$ を表現すると(6)式となる<sup>1,2)</sup>。

$$C_n = \frac{A_{p(0)}}{\tau_{n(0)}} \quad \dots\dots(6)$$

$$\tau_{n(0)} = \frac{V}{Q_{(0)}} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 $A_{p(0)}$ は再循環空気が存在しない場合の居住域平均空気齢、 $\tau_{n(0)}$ は再循環空気が存在しない場合、すなわち新鮮外気量のみより定義される名目換気時間、 $V$ は室容積、 $Q_{(0)}$ は給気口から室内に供給される空気量を示す。

ステップアップ法を用いて空気齢を測定する場合、居住域平均空気齢は(8)式で算出される。

$$A_{p(0)} = \int_0^{te} \left\{ 1 - \frac{C_p(t)}{C_p(te)} \right\} dt$$

$$= \sum \left\{ 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(t+\Delta t) + C_p(t)}{C_p(te)} \right\} \cdot \Delta t \quad \dots\dots(8)$$

室内で発生した汚染質を含む再循環空気が存在する場合には、居住域平均空気齢は(9)式となる。

$$A_{p(x)} = \int_0^{te} \left\{ 1 - \frac{C_{p(x)}(t)}{C_{p(x)}(te)} \right\} dt$$

$$= \sum \left\{ 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{p(x)}(t+\Delta t) + C_{p(x)}(t)}{C_{p(x)}(te)} \right\} \cdot \Delta t \quad \dots\dots(9)$$

ここで添字(x)は再循環空気  $x$  %の場合の値を示す。

室内で発生した汚染質を含む再循環空気が存在する場合には、(10)式を用いて  $C_n$ が算出される。

$$C_n = \frac{A_{p(x)}}{\tau_{n(x)}} = \frac{A_{p(0)} + \beta}{\tau_{n(0)} + \beta} \quad \dots\dots(10)$$

(10)式中の  $A_{p(x)}$  および  $\tau_{n(x)}$  は再循環空気が  $x$  % 存在する場合の値である。  $\tau_{n(x)}$  は  $Q_{(0)}$  が一定と仮定すると、再循環空気が増加した場合に新鮮外気量が減少し、  $\tau_{n(0)}$  と比較して大きな値となる。すなわち  $\tau_{n(x)}$  は汚染質を含まない新鮮外気のみで定義される名目換気時間を示す。また、(9)式右辺は線型であるため、  $A_{p(x)}$  は再循環空気が存在しない場合の  $A_{p(0)}$  と、再循環空気が存在する場合の増分である  $\beta$  に分離して(10)式で表現することが可能である。(10)式における  $\beta$  は次式で表現される。

$$\beta = \frac{x/100}{1-x/100} \cdot \frac{V}{Q_{(0)}} = \frac{x/100}{1-x/100} \cdot \tau_{n(0)} \quad \dots\dots(11)$$

再循環空気が存在する場合も、通常のステップアップ法を行うことで(10)式より再循環空気が存在する場合の汚染質混合状態における  $C_n$  が直接算出される。また再循環空気の割合  $x$  を測定することで再循環空気の割合を変化させた場合の  $C_n$  の値を予測することが可能である。また、ステップダウン法の場合も(10)、(11)式と同様となる。

当然のことながら、上述の議論は吹出气流に含まれる再循環空気を室内の攪拌气流と見なし、室内流れ場の  $Re$  数依存性を無視した上で、室内に供給される新鮮外気量のみに着目して濃度場形成を考えた場合と同一となる。

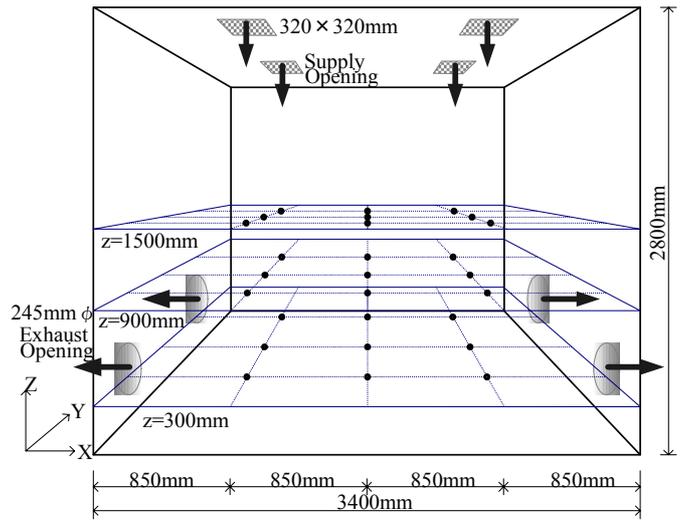
## 5. 居室模型実験による $C_n$ 測定

### 5.1 実験概要

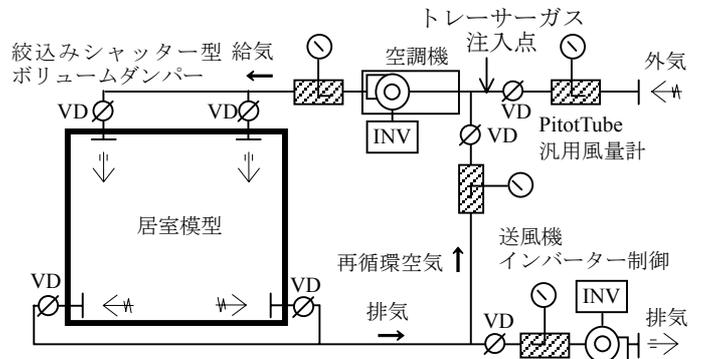
単室を対象として HASS 115 室内換気効率の現場測定法に沿った換気効率測定を行う。特に吹出風量が一定で再循環空気量が変化した場合に着目して測定を行う。

実験対象とする実大居室を 図-1(1) に、ダクトシステムを 図-1(2) に示す。測定空間は 3.4m (x) × 3.4m (y) × 2.8m (z) の 3次元空間で、天井面 4ヶ所に 320mm × 320mm のノズル型給気口、壁面下部 4ヶ所に 245mm φ の排気口が設置されている。また第 1種機械換気システムにより給排気バランスを確保しており、実験模型内外の圧力差がほぼ 0 の状態で実験を行っている。吹出空気ならびに室内は等温(25±1.0℃)で実験を行っている。温度測定はダクト内の他、居室模型内に 0.3mm φ の T 型熱電対を 42 点設置し、温度変動を 5 分間隔でモニタリングしている。換気回数は 14.6 回/h (給気口平均風速は 0.32m/s) に制御している。トレーサガスの注入点は外気ダクトが再循環空気ダクトと合流する部分の手前としている。

実大居室模型はインバータ制御された給排気ファンにより給気量ならびに排気量を制御することが可能で、ダクト内に設置した絞込みシャッター型 VD (ボリュームダンパー) により流量の微調整が可能な構造となっている。各ダクト内風量は Pitot Tube を用いた汎用風量計により常時モニタリングしている。



(1) 実大居室模型と濃度測定点



(2) ダクト系統図

図-1 実大居室模型概要

表-1 実験条件

吹出風量	474 m <sup>3</sup> /h (換気回数: 14.6 回/h) (名目換気時間: 246 sec)
吹出風速	$U_{in}=0.32$ m/s
換気システム	第 1 種機械換気システム
Tracer Gas	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (エチレン)
ガス分析機器	INNOVA マルチガスモニタ
温度	室温, 吹出空気温度共に 25±1.0℃

### 5.2 流れ場の測定

Passive Contaminant を仮定した場合、汚染質濃度場は流れ場によって決定される。そのため、換気効率測定の際の基本データである実大居室模型内の風速分布を 3次元の超音波風速計を用いて測定する。データサンプリング速度は 10Hz、1測定点あたり 10分間の時間平均化を行う。風速測定は 図-1 に示す模型内の吹出口および吸込口の両者を含む x-z 断面を対象とする。

### 5.3 規準化居住域濃度 $C_n$ の測定

本報では、HASS115 に示された空気齢による測定法に基づいて規準化居住域濃度の測定を行う。空気齢測定は給気口位置から十分に上流側のダクト内に Tracer Gas (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) を定期的に供給し、ステップアップ法を行った後、Tracer Gas 供

給を停止し、そのままステップダウン法に移行して行う<sup>注1)</sup>。Tracer Gas 実験を行う際に、事前に給気口断面で Gas 濃度の分布を測定しており、ばらつきが 5%程度であることを確認している。実験は全外気運転(All Fresh Air)の場合ならびに同一の給気量で再循環空気量が 80%の場合<sup>注2)</sup>の 2 ケースを対象とする。

本測定では、床面より 1.8m の空間を居住域と仮定し、図-1 中に示すように床面から  $z=0.3\text{m}$ ,  $0.9\text{m}$  および  $1.5\text{m}$  の  $x$ - $y$  平面の各々で 9 点、合計 27 点で濃度履歴の測定を行う。居住域平均空気齢は濃度測定点 27 点の値を用いて空間平均値として算出する。

また、測定装置精度<sup>注1)</sup>ならびに測定条件等<sup>注3)</sup>は、HASS 115 に従い測定を行う。表-1 に実験条件を示す。

## 6. 数値解析によるケーススタディ

HASS 102 換気規準では、設計段階において規準化居住域濃度  $C_n$  を CFD(計算流体力学)により予測することを推奨している。CFD による室内流れ場の予測精度ならびに換気効率解析に関しては、すでに多くの研究蓄積が存在している<sup>4,5)</sup>。本報では設計段階における  $C_n$  予測を含めた HASS 102 および HASS 115 に示された一連の  $C_n$  評価を行うことを目的とし、実験と同条件で数値解析を行い、特に再循環空気の割合を変化させた場合に着目して規準化居住域濃度の解析を行う。

### 6.1 計算概要

図-1 に示す実大居室模型を解析対象とする。境界条件は表-1 に示した実験条件の吹出条件および温度条件とする。流れ場は低 Re 型  $k$ - $\epsilon$  model (Abe-Nagano model<sup>6)</sup>)による 3 次元解析を行う。境界層粘性底層までの解析を行うため、 $y+(\text{wall unit}) < 10$  に最小 mesh 幅を 1mm として 3 メッシュ以上確保した不等間隔メッシュを用いる。計算および解析条件を表-2 に示す。

### 6.2 規準化居住域濃度の解析

気流解析の後、passive contaminant を発生させ、定常濃度法に基づいて規準化居住域濃度の解析を行う。定常濃度法と模型実験での濃度解析に採用している空気齢を用いる方法で汚染質発生条件を同一とするために、汚染質は空間一様<sup>7)</sup>に発生させる。数値解析により再循環空気が存在する場合の規準化居住域濃度を予測する場合~~際には~~、定常濃度法を用いる場合~~際は~~、空間一様で汚染質を発生させ、再循環空気が 0%の場合の排気口濃度で無次元化した居住域平均濃度を算出し、(4)式および(5)式を用いて供給空気量一定で、再循環空気が増加した場合の規準化居住域濃度を算出する。空気齢を用いる方法では、給気口位置に一定濃度の汚染質発生を与え、非定常解析を行うことで、再循環空気が 0%の場合の名目換気時間で無次元化した居住域平均空気齢を算出し、(10)式および(11)式を用いて再循環空気が増加した場

表-2 計算および解析条件

乱流モデル	低 Re 型 $k$ - $\epsilon$ model (Abe-Nagano model)
メッシュ	$80(x) \times 80(y) \times 66(z)$
差分スキーム	移流項: QUICK
流入境界	$U_{in}=0.32 \text{ m/s}$ , $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$ , $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / \ell_{in}$ , $C_{\mu}=0.09$ $\ell_{in}=\text{吹出口幅 } L_0(=0.32\text{m})$ の 1/7 乱流 plandtl 数=1
流出境界	$U_{out}$ , $k_{out}$ , $\epsilon_{out} = \text{free slip}$
壁面境界	速度: no slip, 壁面は汚染質の吸脱着なし

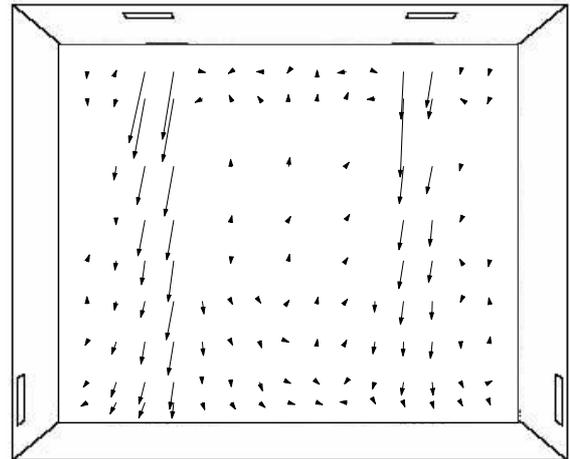


図-2 流れ場の測定結果 (平均風速ベクトル)

合の規準化居住域濃度を算出することとなる。また汚染質空間一様発生<sup>8)</sup>の仮定を用い、加藤らにより提案されている SVE3<sup>9)</sup>により空気齢分布を解析する方法もある。

汚染質空間一様発生<sup>8)</sup>の仮定の下では、定常濃度法ならびに空気齢を用いる方法の両者において数値解析結果は厳密に一致することが一般的であり、本報では、汚染質空間一様発生<sup>8)</sup>の条件における汚染質濃度分布を解析し、定常濃度法を用いて規準化居住域濃度を算出する。

## 7. 測定ならびに数値解析結果

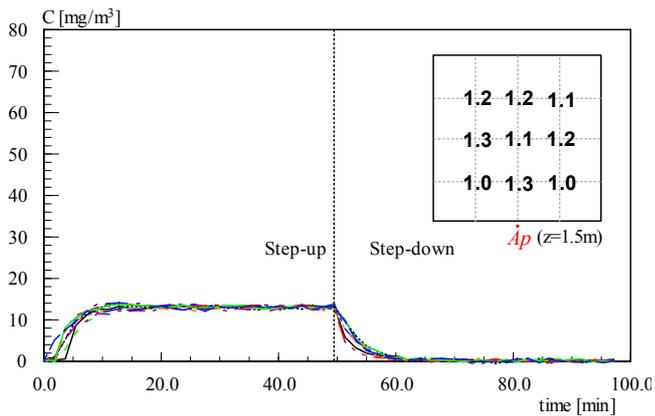
### 7.1 実大居室模型内流れ場の測定結果

風速分布測定に先立ち、天井面に設置された 4 カ所の吹出口の供給空気量を測定した結果、各吹出風量のばらつきは 10%以内に収まっていることを確認している。

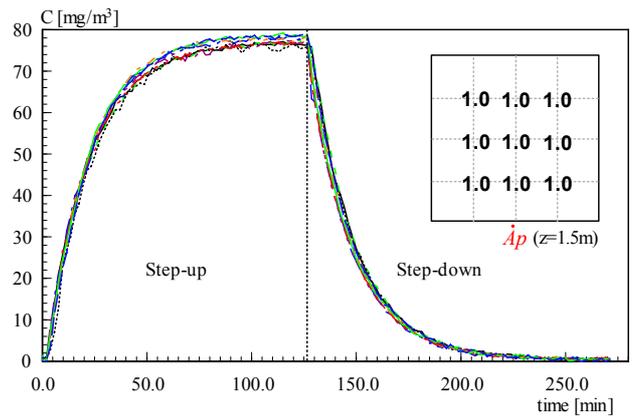
模型内の給気口および排気口の両者を含む  $x$ - $z$  断面の平均風速ベクトル図を図-2 に示す。吹出口近傍ならびに吹出気流の到達域において若干対称性が崩れているものの、天井面に設置された給気口からの吹出気流は床面に到達し、室中央部ならびに壁面近傍において上昇流を形成する様子が観察される。

### 7.2 規準化居住域濃度の測定結果

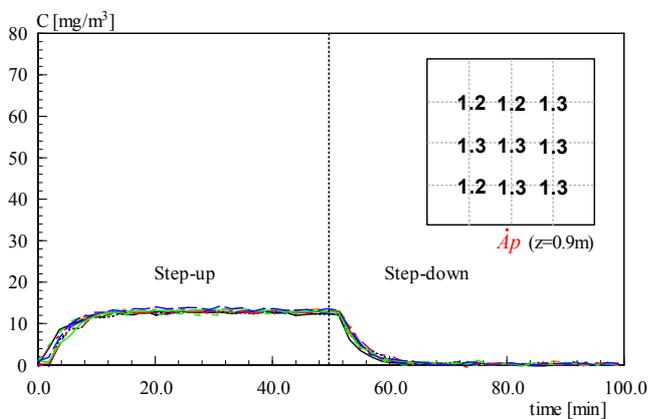
一連のステップアップ法ならびにステップダウン法による各測定点の濃度履歴を図-3 に示す。図-3(1)および(2)の各図中には同平面で測定された 9 カ所の濃度履歴を重ねて示



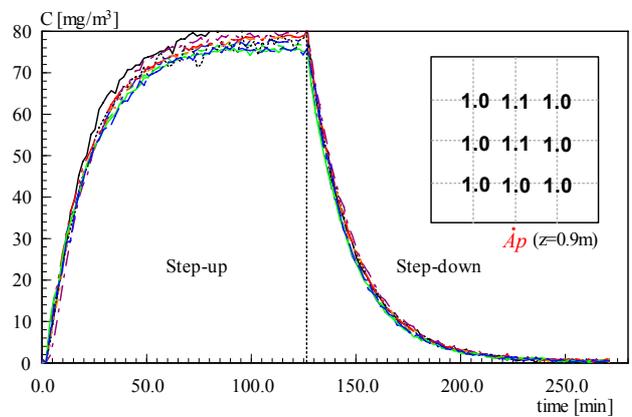
(1-a)  $z=1.5$  m 位置の  $x$ - $y$  平面



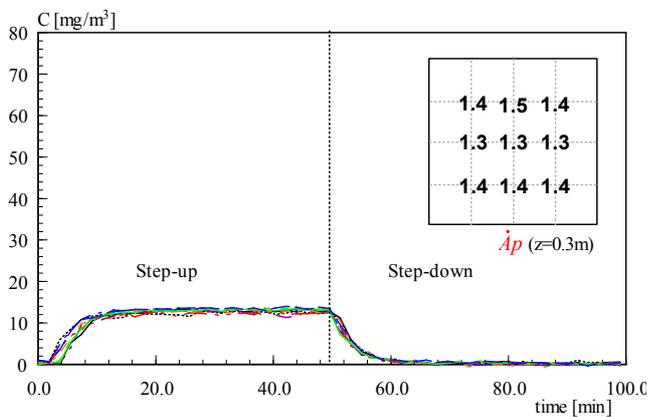
(2-a)  $z=1.5$  m 位置の  $x$ - $y$  平面



(1-b)  $z=0.9$  m 位置の  $x$ - $y$  平面

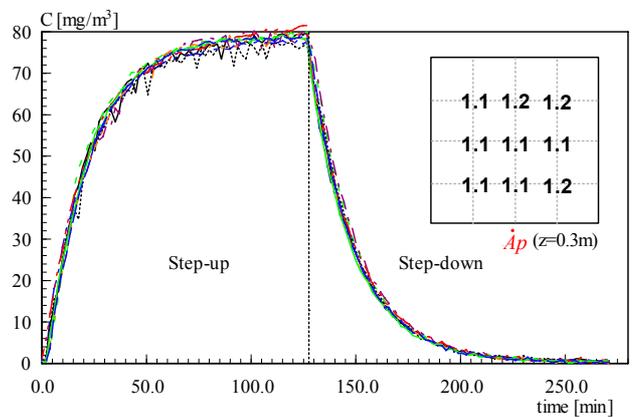


(2-b)  $z=0.9$  m 位置の  $x$ - $y$  平面



(1-c)  $z=0.3$  m 位置の  $x$ - $y$  平面

(1) 全外気運転の場合



(2-c)  $z=0.3$  m 位置の  $x$ - $y$  平面

(2) 再循環空気(RA) 80%の場合

図-3 濃度履歴および  $\dot{A}_p$  測定結果

している。測定は同条件で2回繰り返して行い、再現性を確認している。また、同図中に示された値は、各測定点で算出された平均空気齢の値を名目換気時間で無次元化したものである。今回の測定では、ステップアップ法ならびにステップダウン法により算出した平均空気齢の差は5%程度であったため、図-3中には両者の平均値を記載している。

測定された各点の空気齢より算出した居住域平均空気齢

ならびに規準化居住域濃度の値を表-3に示す。今回の実験条件では、換気回数が14.6回/hと比較的大きいので、模型内がよく混合され、再循環空気が0%の場合、すなわち全外気の場合において、規準化居住域濃度が1.22と、比較的完全混合状態(=1.0)に近い値となっている。また再循環空気量を80%と設定した場合は更に完全混合状態に近づき、 $C_n$ は1.02となった<sup>注4)</sup>。

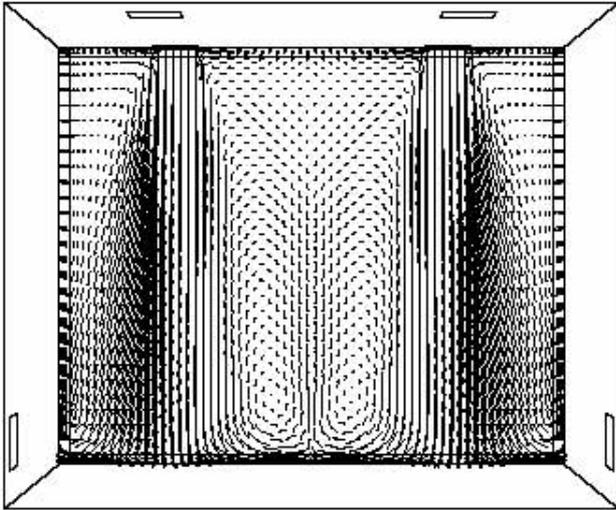


図-4 CFDによる流れ場解析結果

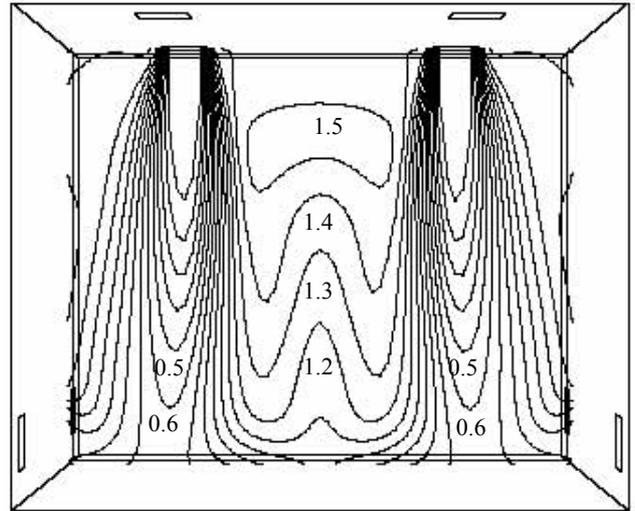


図-5 CFDによる濃度場解析結果  
(空気齢 SVE3 分布を示す)

### 7.3 流れ場・濃度場の数値解析結果

図-4 に数値解析による流れ場の解析結果を示す。天井に設置された給気口から供給された吹出気流は床面に到達し、室内で循環流を形成している。室中央上部では滞留域が観察される。実験結果(図-2)とも定性的には良く一致していると言える。図-5 に汚染質を室内一様発生させた場合の室内濃度分布を示す。図中の値は排気口濃度  $C_{ext}$  (完全混合濃度) で無次元化しており、吹出気流に再循環空気は含まれていない(給気口濃度は 0)。室内で汚染質を一様発生させて得られた濃度場を排気口濃度で無次元化した濃度分布は、名目換気時間で無次元化した局所平均空気齢分布と一致する<sup>5)</sup>。そのため、図-5 に示す濃度分布は局所平均空気齢(SVE3)分布<sup>5)</sup>となる。

### 7.4 規準化居住域濃度の数値解析結果

濃度場の解析結果より、再循環率が 0%(全外気運転)の場合の規準化居住域濃度は 1.12 となる。模型実験結果と比較すると約 10%程度数値解析結果が小さい値となった。この原因は実験において流れ場に若干の非対称性がみられたこと、すなわち実大居室内流れ場の解析精度に起因すると考えられる。

本報で示した模型実験は実大スケールの居室とはいえ、実験室内で物理環境を十分に制御して行ったもので、竣工後の建物で行う現場実測と比較し、数値解析による再現性が期待できるケースであった。今回の実験結果ならびに数値解析結果が最大 10%の差を有していることから、設計段階における  $C_n$  適用の際には、最大 10%の安全率を考慮する必要があると推測される。安全率を考慮する際は、例えば、等温流れ場で汚染質は一様発生しているなど、模型実験や数値解析の条件と設計条件を十分に照合する必要がある。

### 7.5 考察

図-6 に給気量が一定で、再循環空気量が順次増加してい

表-3 平均空気齢ならびに規準化居住域濃度  
(1)再循環空気 0%の場合

	居住域平均空気齢	規準化居住域濃度
模型実験	300.1 sec	1.22
CFD	275.5 sec	1.12

(2) 再循環空気 80%の場合

	居住域平均空気齢	規準化居住域濃度
模型実験	1256.4sec	1.02
CFD	1242.3sec	1.01

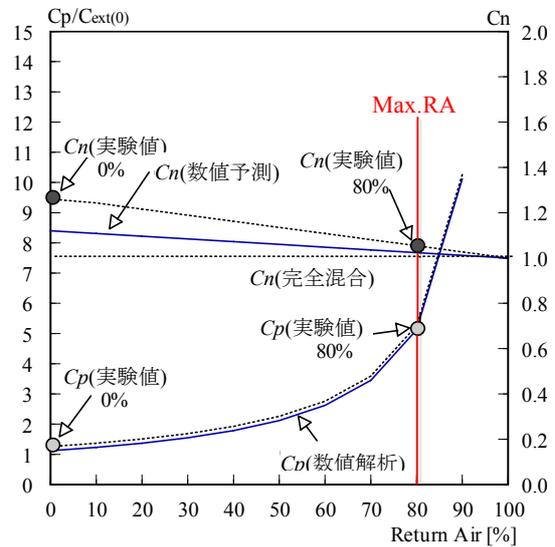


図-6 再循環空気量が増加した場合の  $C_p$ ,  $C_n$

った場合の居住域平均濃度  $C_p$ 、および規準化居住域濃度  $C_n$  の変化の予測値を示す<sup>5)</sup>。実験結果および数値解析結果の両者を併せて記載している。実験結果の  $C_p$ 、および  $C_n$  に着目した場合、再循環空気 0%の場合の値を基に、(10)式および(11)式を用いて濃度場の線形重ね合わせより予測した再循環空気量が増加した場合の  $C_p$  および  $C_n$  (図-6 中の破線)は、再循環空気 80%の場合に行った実際の測定結果と十分

に一致している。すなわち実大居室模型内においても濃度場の線形重ね合わせが十分に成立しており、再循環空気が存在する場合においても HASS 115 に示された濃度測定法を用いることで十分な精度で濃度場測定が可能なが確認された。

実験結果および数値解析結果の両者共に、(4)、(5)式および(10)、(11)式で示した通り、 $C_p$ (および $\alpha$ )は供給空気量一定の条件下で再循環空気の割合が増加するに伴い、急激に値が増加し、再循環空気 100%で無限大の値をとる。室内の拡散場は、再循環空気の割合が増加するに従い、完全混合に近づき、 $C_n$ は 1 に収束する。

## 8. 結語

- (1) HASS102 換気規準で定義される規準化居住域濃度  $C_n$  に関して、吹出空気に再循環空気が含まれる場合の  $C_n$  測定を行った結果、濃度場の線形重ね合わせより予測される値と十分に一致し、再循環空気が存在する場合においても HASS 115 に示された換気効率測定法の十分な精度が確認された。
- (2) 居室模型を対象とした実験ならびに数値解析を行い、供給空気量一定の条件下で再循環空気の割合が増加した場合の規準化居住域濃度  $C_n$  の変化を解析した結果、再循環空気の増加に伴う居住域平均濃度の変化、ならびに  $C_n$  の変化は予測式と十分に一致するものの、 $C_n$  の予測精度に関しては実験と数値解析において本論では最大 10%の差が現れた。本報で示した結果は、実務における  $C_n$  適用に際して、安全率のオーダを評価する際の目安となるであろう。

### 記号一覧

$C_n$	: 規準化居住域濃度[－] (居住域平均濃度と定常完全混合状態の場合の汚染質濃度との比)
$C_p$	: 居住域平均濃度[ kg/m <sup>3</sup> ]
$C_{ext}$	: 排気口濃度(定常完全混合濃度) [ kg/m <sup>3</sup> ]
$q$	: 汚染質発生率[－]
$x$	: 給気量に対する再循環空気量の割合[－]
$Q$	: 給気口から室内に供給される空気量(設計必要換気量)[ m <sup>3</sup> /sec ]
$C_{n(x)}$	: 再循環空気が $x\%$ の場合の規準化居住域濃度[－]
$C_{p(x)}$	: 再循環空気が $x\%$ の場合の居住域平均濃度[ kg/m <sup>3</sup> ]
$C_{ext(x)}$	: 再循環空気が $x\%$ の場合の排気口濃度[ kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	: 再循環空気が 0% の場合の平均濃度 $C_{ext(0)}$ に対し再循環空気が存在することによる平均濃度 $C_{ext(0)}$ の増分[ kg/m <sup>3</sup> ]
$Ap$	: 居住域平均空気齢[ sec ]
$\tau_n$	: 名目換気時間[ sec ]
$V$	: 室容積[ m <sup>3</sup> ]
$Q_{(x)}$	: 再循環空気が $x\%$ の場合の給気口から室内に供給される空気量[ m <sup>3</sup> /h ]
$Ap_{(x)}$	: 再循環空気が $x\%$ の場合の居住域平均空気齢[ sec ]
$Ap$	: 再循環空気が $x\%$ の場合の居住域平均空気齢を名目換気時間で無次元化したもの[－]
$\tau_{n(x)}$	: 再循環空気が $x\%$ の場合の名目換気時間[ sec ]
$\beta$	: 再循環空気が 0% の場合の名目換気時間 $\tau_{n(0)}$ に対し再循環空気が存在することによる名目換気時間 $\tau_{n(0)}$ の増分[ kg/m <sup>3</sup> ]

$t_e$	: ステップアップ法のトレーサーガス濃度が定常に達した時刻[ sec ]
$t_f$	: ステップダウン法のトレーサーガス濃度が減衰するまでの時刻[ sec ]
$\Delta t$	: 各測定点での濃度の測定間隔[ sec ]
$U_{in}$	: 吹出風速[ m/s ]
$K_{in}$	: 吹出の乱流エネルギー[ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\epsilon_{in}$	: 吹出の散逸率[ m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$l_{in}$	: 乱れの長さスケール[ m ]
$U_{out}$	: 排気口の吹出風速[ m/s ]
$K_{out}$	: 排気口の乱流エネルギー[ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\epsilon_{out}$	: 排気口の散逸率[ m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]

### 注釈

- (1) HASS115 では対象空間に応じた測定法を適用することとなっている。本研究で行う実大居室実験では汚染質発生源は特定せず、室内一様発生と同条件を仮定する。換気方法は全般換気として空気齢に基づく測定方法であるステップアップ法ならびにステップダウン法を選択している。測定機器の精度については HASS115 の 6. 測定機器および周辺装置に 6.1 トレーサーガス、6.2 トレーサーガス分析装置、6.3 風量測定装置として示されている。6.1 のトレーサーガスに関しては、大気への放出が禁止されていないもので、かつ測定時における濃度レベルで、人体に対して毒性を有しないものでなければならないとあり、本研究では無害無臭で空気と同様な物性値の C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> を使用している。6.2 のトレーサーガス分析装置に関しては、使用されるトレーサの濃度が安全にかつ確実に測定できるものでなければならない、また同一濃度における指示値の時間変動が少なくトレーサーガス以外の室内空気中に存在するガスの相互干渉影響がなく較正が容易にできるものと要求されている。本研究で使用した分析計(マルチガスモニタ)は事前に較正し精度を確保している。6.3 の風量測定装置に関しては、原則として JISA1431 に準拠して行うものとし、ただし JIS と同等の圧力損失補正機能を有し、十分な測定精度をもつ風量測定装置を用いることもできるとある。本研究ではダクト内風量を Pitot Tube により測定すると共に、吹出口をダクト法(測定器に付属した簡易ダクトで覆い風量を測定する方式の風量測定装置)により風量測定を行うことで流量バランスの確認を行っている。また測定中は Pitot Tube を用いた風量測定装置により給気・外気・還気・排気の風量を常時測定し、変動を監視している。
- (2) 解析対象空間に 0.2 人/m<sup>2</sup> の人員密度を仮定し、一人あたり 30m<sup>3</sup>/h の新鮮外気量を確保した場合、吹出風量に対する新鮮外気量の比(再循環空気量)は 80%程度となる。
- (3) 測定条件は(1)ガス分析計の校正、(2)トレーサのサンプリング点および注入点の選択と機器の設置、(3)トレーサの放出とサンプリング開始、(4)トレーサ濃度の測定がある。(1)の詳細については、注釈 1 を参照。(2)トレーサーガスの注入点は還気のある場合は新鮮外気が還気と混合する前の箇所あるいは外気取入口であり、トレーサ放出量に変動がないように、フローコントロールを用い、サンプリング点は測定中に位置がずれないようにスタンド等に固定することとなっている。本研究では新鮮外気が還気と混合する前の箇所で、給気口から十分に離れたダクト内でトレーサーガスを放出している。サンプリング点の高さは座位が対象ならば床上 110cm、立位なら 160cm とある。またサンプリング点数は 3 箇所とし、より高い精度を要求される場合には 6 箇所以上とある。本研究の測定点は床上 180cm の間の居住域空間を対象とし評価対象居住域に 27 箇所設定しており、HASS115 の測定条件を十分に満足している。注入点の条件は本文 5.3 に示したとおりであり測定条件を満足している。(3)のガスの放出は、給気ダクト内で吹出気流の流速や分布に影響せず、ダクト内で十分混合していることとあり、混合状態等は本文 5.3 に示している。サンプリング開始は、特にステップアップ法では正確にガス放出時間とサンプリング時間を合わせるとあり、本研究では放出開始時刻と同時にサンプリングを開始しており、各測定点のサンプリング間隔は 1 分以内である。(4)について測定時は実大居室模型への人の出入り、ドアの開閉、空調のオン/オフ等の測定状態が極端に変化しないこととある。本研究では実験中のドアの開閉は皆無でありトレーサ濃度の測定にこれらの外乱の影響はない。また居室モデルを含む全システムの気密性に関し、実験システムの気密性は、実験に先立って供給風量と吹出風量および吸込風

量と排気風量を測定し、その差が10%以下であることを確認している。また居室模型部分は、第1種換気システムにより給排気バランスを確保し、居室模型内外の圧力差がほぼ0の状態を実験し、空気の流入・流出を防いでいる。

- 4) HASS115ではサンプリング点数は3箇所以上とし、より高い精度が要求される場合には6箇所以上とある。本研究の測定点は評価対象居住域に9箇所ありHASS115の測定条件を満足する。ここでHASS115ではサンプリング点数が6箇所未満の場合にはHASS115で示す信頼性上限値の計算により濃度測定値を評価しなければならないとある。求めた結果は、実際の規準化居住域濃度が90%または95%以内の確立で信頼性上限値を超えないことを示し、従って規準化居住域濃度  $C_n$  を  $C_n$ =信頼性上限値として与えるとしている。  
ここでは参考にその値を記す。

表-4 規準化居住域濃度の信頼性上限値(=補正した  $C_n$  値)

	再循環空気の割合	
	0%	80%
評価対象領域内の測定データの平均値	1.27	1.05
測定結果の標準偏差	0.12	0.07
測定結果の標準誤差	0.02	0.01
信頼性上限値 (信頼限界95%の場合)	1.31	1.08
信頼性上限値 (信頼限界90%の場合)	1.30	1.07
規準化居住域濃度 $C_n$ (模型実験)	1.22	1.02

- 5) 再循環空気が給気量の80%を占める場合のみ解析している。

#### 参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会規格 HASS102- 1997, 換気基準・同解説 (1997)
- 2) 空気調和・衛生工学会規格 HASS115- 2002, 室内換気効率の現場測定法・同解説 (2001)
- 3) 加藤, 伊藤, 村上 (2000) 換気システムを変化させた場合の規準化居住域濃度, Visitation Frequency, Purging Flow Rate の系統的解析 オフィス空間を対象とした居住域換気効率の評価に関する研究 第1報: 空気調和・衛生工学会論文集, No. 78, pp 45-56
- 4) 例えば, Launder, B. E., and Spalding, D. B. (1974) The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering
- 5) S. Kato, et. al. (1988) New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation. ASHRAE Transactions 94(2), pp. 309- 330
- 6) 安部, 長野, 近藤 (1992) はく離・再付着を伴う乱流場への適用を考慮した  $k-\epsilon$  モデル, 日本機化学会論文集 B 編, 58 巻, 554 号, pp. 57-64

(平成 15.?.? 原稿受付)

## Experimental and Numerical Study of Normalized Concentration in an Occupied Zone Under Various Returned Airflow Rate

By Seohiro Kikuchi<sup>\*1</sup>, Nobuyuki Kobayashi<sup>\*2</sup>, Kazuhide Ito<sup>\*2</sup>,

Key Words : Return Air, Normalized Concentration in an Occupied Zone, Age of Air, Step-up Method, Step-down Method

**Synopsis :** The Ventilation Standard HASS 102 of The Society of Heating, Air- Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE) was revised in November 1997 and The Ventilation Standard HASS 102 recommends the ventilation design, which takes into account a ventilation effectiveness in an occupied zone, under the incompletely mixed condition. This index is called Normalized Concentration in an Occupied Zone ( $C_n$ ), which defined as the ratio of the difference between the average pollutant concentration in an occupied zone and that of the completely mixed indoor air. Furthermore, The Standard of Measuring Method of Ventilation Effectiveness HASS 115 was published in order to supplement HASS 102 in April 2002.

This paper contains three topics. The first is theoretical analysis of Normalized Concentration in an Occupied Zone ( $C_n$ ) under

various returned Airflow rate. The second is  $C_n$  measurement by tracer gas methods in model room (3.2m(x)×3.2m(y)×2.8m(z)). The third is numerical analysis, which is corresponding to the experimental conditions.

In these measurement and numerical analysis, the prediction accuracy of  $C_n$  had the difference about 10% compared with experimental result.

Furthermore, the effects of the increment of return air, which induced in a supplied air, are also studied and it is confirmed that the Normalized Concentration in an Occupied Zone ( $C_n$ ) got closer to 1.0 (the concentration of the completely mixed indoor air) for the increment of return air in supplied air

(Received ?? ??, 2003)

\*1 Tokyo Polytechnic University (Kawamoto Ind. Ltd.), Member

\*2 Tokyo Polytechnic University, Member