

# 再循環空気がある場合の規準化居住域濃度の解析

正会員 ○小林信行 (東京工芸大学)

正会員 伊藤一秀 (東京工芸大学)

正会員 加藤信介 (東京大学生産技術研究所)

## 1. 序

空気調和・衛生工学会の換気性能設計法小委員会では、HASS102 換気規準<sup>文1)</sup>で定義されている規準化居住域濃度を補完する形で、規準化居住域濃度の現場測定法に関する規格化を検討している。

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必要があるが、学会規格案では、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、トレーサガス法(step-up 法もしくは step-down 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。

学会規格案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、こういった条件下における規準化居住域濃度の現場測定法を整備する必要性が非常に高い。本報では再循環空気が存在する場合の規準化居住域濃度の測定法に関して理論的な検討を行うと共に、数値解析によりケーススタディを行った結果を示す。以降の検討は、簡便のため、給気口および排気口を各1個有する単室を想定して行っている。

## 2. 規準化居住域濃度 $C_n$

上記のように、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)。

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

ここで、 $C_n$ は規準化居住域濃度、 $C_p$ は居住域平均濃

度、 $C_{ext}$ は排気口濃度を示す。HASS 102 換気規準では、この規準化居住域濃度を用いて設計必要換気量  $Q$ を増減することが可能となっている。

## 3. 定常濃度測定に基づく $C_n$ の算出法

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。

居住域平均濃度  $C_p$  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される。濃度測定点位置および測定数に関しては、「規準化居住域濃度の現場測定法 Public Review 版」に詳細が示されている<sup>文2)</sup>。排気口濃度  $C_{ext}$ 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)の規準化居住域濃度  $C_n$ は(2)式で与えられる。

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

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

(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)式を用いて規準化居住域濃度  $C_n$ が算出される。

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

(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、この値は次の(5)式で与えられる。

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

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る。そのため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>文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規準化居住域濃度  $C_n$  が直接算出される。また、再循環空気の割合  $x\%$  を測定することで全外気運転の場合、ならびに再循環空気の割合を変化させた場合の規準化居住域濃度  $C_n$  の値が算出可能となる。

#### 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>文1,2)</sup>。

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

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

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の名目換気時間、 $V$  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。

Step-up 法を用いる場合、居住域平均空気齢は(8)式で算出される。

$$\begin{aligned} A_{p(0)} &= \int_0^{te} \left\{ 1 - \frac{C_p(t)}{C_p(te)} \right\} dt \\ &= \sum \left\{ 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(t+\Delta t) + C_p(t)}{C_p(te)} \right\} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (8)$$

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。

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

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

ここで、添字(x)は再循環空気が  $x\%$  の場合の値である。

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)式を用いて規準化居住域濃度  $C_n$  が算出される。

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

(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)式のように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。

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

再循環空気が存在する場合も、通常の Step-up 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規準化居住域濃度  $C_n$  が直接算出される。また再循環空気の割合  $x$  を測定することで全外気運転の場合、ならびに再循環空気の割合を変化させた場合の規準化居住域濃度  $C_n$  の値を予測することが可能である。

Step-down 法およびパルス法を用いて  $A_{p(x)}$  を測定した場合も(10)式および(11)式と同様となる。

#### 5. 数値解析によるケーススタディ

図1に示すような給気口および排気口を各1個有する単室を想定して、再循環空気の割合を変化させた場合の規準化居住域濃度を解析する。

##### 5.1 計算概要

解析対象は  $75 L_0 (x) \times 50 L_0 (z)$  ( $L_0$  は吹出スロット幅)の2次元空間と仮定する。簡便のため等温と仮定する。流れ場は低 Re 型 k- $\epsilon$  model (Abe-Nagano model

文<sup>4)</sup>により解析する。計算および解析条件を表 1 に示す。

### 5.2 規準化居住域濃度の解析

気流解析の後、passive contaminant を発生させ、規準化居住域濃度の解析を行う。定常濃度法と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、汚染質は空間一様で発生させる。定常濃度法を用いて規準化居住域濃度を算出する場合には、数値解析により、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、数値解析により、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合の規準化居住域濃度を算出する。

本解析では、室全体を居住域と仮定し、室平均濃度を居住域平均濃度としている。

### 5.3 流れ場・濃度場の解析結果

図 2 に流れ場の解析結果(stream line)を示す。室内には右回りの大循環流が生じており、床面隅角部には大循環流と逆向きに 2 次渦が観察される。

図 3 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、吹出口には再循環流は含まれていない(吹出口濃度は 0)。室内には循環流にそって濃度分布が形成されており、床面隅角部に高濃度領域が生じている。排気口濃度  $C_{ext}$  で無次元化した室平均濃度  $C_p$  は 1.349 である。

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>文 5)</sup>。そのため、図 3 に示す濃度分布は局所平均空気齢 (SVE3) 分布となる。

### 5.4 規準化居住域濃度の解析結果

本解析条件では、排気口濃度で無次元化した居住域平均濃度の値と、名目換気時間で無次元化した居住域平均空気齢の値は一致する。

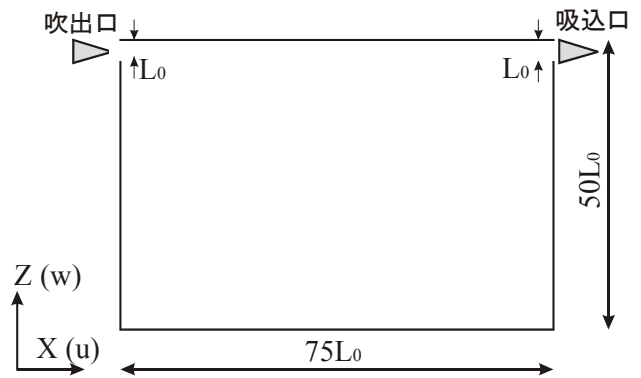


図 1 解析対象空間 (2D)

表 1 計算および解析条件

乱流モデル	低 Re 型 k- $\epsilon$ model (Abe-Nagano)
メッシュ	68 (x) $\times$ 64 (z)
差分スキーム	移流項 : QUICK
流入境界	$U_{in}=3.0$ m/s, $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$ , $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $C_{\mu}=0.09$ $l_{in}$ =吹出スリット幅 $L_0$ (=0.02m) の 1/7
流出境界	$U_{out}$ =(質量保存による), $k_{out}, \epsilon_{out}$ = free slip
壁面境界	速度 : no slip

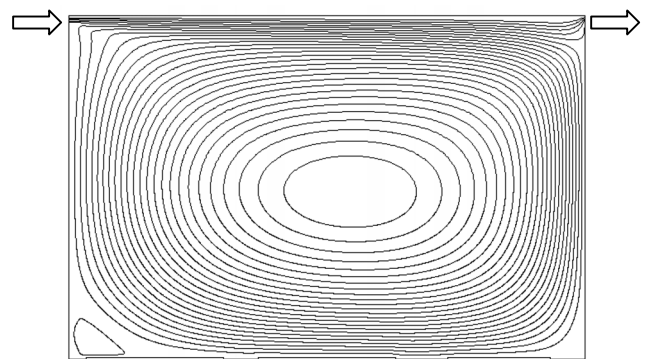


図 2 流れ場解析結果 (stream line)

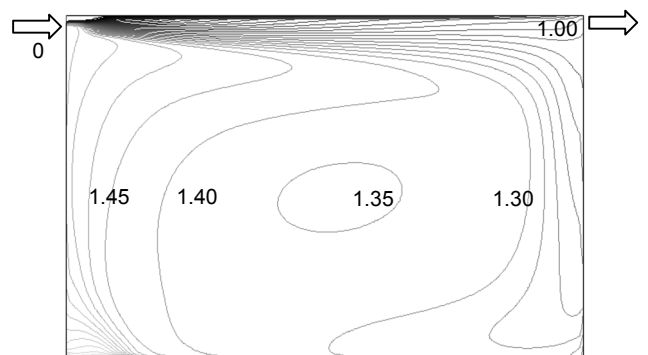


図 3 濃度場解析結果  
(排気口濃度  $C_{ext}$  で無次元化)

表2に吹出空気に含まれる再循環空気の割合を順次変化させた場合の居住域平均濃度  $C_p$  および居住域平均空気齢  $A_p$  の解析結果を示す。

また、図4に再循環空気(R.A.)を順次増加させた場合の  $\alpha$ 、 $C_p$ 、 $C_n$  の変化を示す。 $\alpha$  および  $C_p$  は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(図4(1)および(2))。

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、規準化居住域濃度  $C_n$  は1に収束していく。

## 6. 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、吹出空気に含まれる再循環空気が含まれる場合の  $C_n$  の定義に関して考察を行った。

(2) 定常濃度法および空気齢を用いる方法の両者において、再循環空気の割合  $x$  [%] と規準化居住域濃度  $C_n$  の関係を明らかにした。

(3) 2次元室内モデルを対象とした数値解析を行い、再循環空気の割合が順次増加した場合の規準化居住域濃度の変化を解析した。その結果、再循環空気の増加に伴い、居住域平均濃度は急激に増加するのに対し、規準化居住域濃度は1に収束することが明らかとなった。

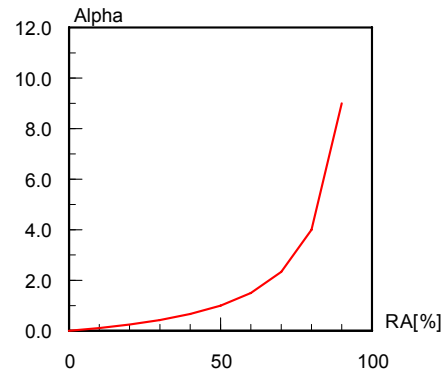
## 参考文献

- [1] 空気調和・衛生工学会：HASS 102 換気規準・同解説, 1997
- [2] 空気調和・衛生工学会：規準化居住域濃度の現場測定法 Public Review 版, 2000
- [3] 加藤、伊藤、村上：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, 2000, pp 45-56
- [4] 安部、長野、近藤：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, 1992, pp. 57-64
- [5] S. Kato and S. Murakami.: New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation. ASHRAE Transactions 94(2), 1988, pp. 309- 330

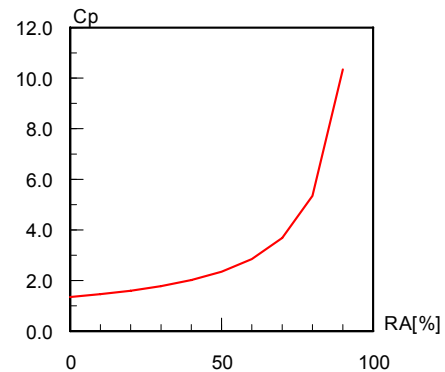
表2 規準化居住域濃度解析結果

R.A. [%]	$\alpha$	$C_p + \alpha$	$C_{ext} + \alpha$	$C_n$
0	0.000	1.349	1.0	1.349
10	0.111	1.460	1.111	1.314
20	0.250	1.599	1.250	1.279
30	0.429	1.778	1.429	1.244
40	0.667	2.016	1.667	1.209
50	1.000	2.349	2.000	1.175
60	1.500	2.849	2.500	1.140
70	2.333	3.682	3.333	1.105
80	4.000	5.349	5.000	1.070
90	9.000	10.349	10.000	1.035

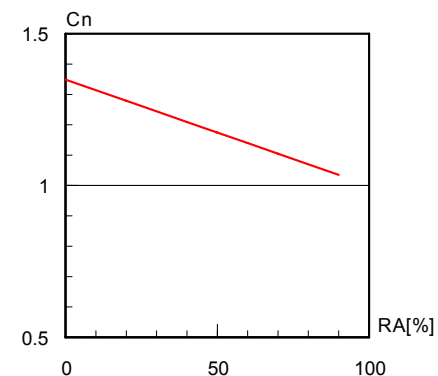
R.A.=再循環空気の割合[%]、本解析条件では  $\alpha = \beta$  となる RA=0% の場合の  $C_p$  は完全混合濃度  $C_{ext}$  で規準化した値



(1) R.A.増加と  $\alpha$  の相関図



(2) R.A.増加と  $C_p$  の相関図



(3) R.A.増加と  $C_n$  の相関図

図4 再循環空気(R.A.)増加と  $\alpha$ 、 $C_p$ 、 $C_n$  の関係