

風速測定結果に基づく屋内換気特性の簡易評価手法の開発

諏訪 好英 土井 暁
坂本 滋

Development of a Simplified Method for Evaluating Indoor Ventilation Efficiency Using the Results of Three-dimensional Airflow Velocity Measurement

Yoshihide Suwa Satoru Doi
Shigeru Sakamoto

Abstract

A simplified method for evaluating indoor ventilation efficiency has been developed for in-situ field measurements. Measured three-dimensional airflow velocities are interpolated to fine grid systems, and an 'age of air' or 'SVE-3 (Scale for Ventilation Efficiency)' distribution is obtained using the interpolated velocity field. Experimental studies have shown that results obtained from this method showed good agreement with numerical simulations.

概要

屋内換気性能の現場測定を目的として、風速測定結果に基づき換気性能評価を行う簡易手法を開発した。本手法では、屋内各部で実測した三次元風速データを空間補間し、これを基に濃度輸送方程式の解析を行って空気齢、SVE-3などの換気性能分布を算出する。模型実験により試行評価を行った結果は、同一条件について実施した数値シミュレーション結果とよい一致を示した。

1. はじめに

近年、シックビルや化学物質過敏症などの健康影響の問題を中心として屋内空気質への関心が高まっている。室内に良好な空気質を維持するためには、汚染の発生源を絶つことと同時に、適切な換気状態を実現することが重要である。VOCなど主要な汚染物質についてはすでに厚生労働省よりガイドライン¹⁾が提示され、竣工検査等で屋内汚染物質濃度の測定が行われるようになった。換気性能についても改定建築基準法や空気調和・衛生工学会HASS-102関連基準等の整備の動きが活発化している²⁾。今後、屋内の換気性能に関して定量的な性能保証が求められるようになっていくものと予測される。

これまで、換気性能の測定・評価手法についてさまざまな方法が提案されているが、いずれも高度な実験技術を必要とすること、有害性のあるトレーサガスを用いることなどから、そのままの形で現場測定に適用することは困難と思われる。本研究では、現場測定への適用を目的として、屋内各部の三次元風速測定結果から屋内換気性能を簡易的に評価する新たな手法を開

発した。本報では開発した簡易評価手法の概要と、これを用いて実施した試行実験結果について報告する。

2. 従来の換気性能評価手法における問題点

屋内換気性能の評価手法として非定常濃度法、一定濃度法、パッシブ法などガスを用いたさまざまな手法が提案されている³⁾。最も多用されている非定常濃度法では、対象室の給気口にトレーサガスを導入したり(ステップアップ法)、ガスを充填した室内に新鮮空気を導入した場合(ステップダウン法)の濃度変化から対象空間の換気性能を評価する。しかしこの方法では、均一濃度のガス雰囲気を設定する方法やガスの導入方法、周囲環境条件の制御方法などに高度な実験技術を必要とし、現場測定法として適用することは難しいと思われる。また、トレーサガスの使用そのものにも大きな問題がある。トレーサガス法では、ガスの判別を容易にする都合から通常の屋内環境に存在することの少ないガスが用いられる。既往の手法で用いられてきたガスには、一酸化炭素、6フッ化イオウ、亜酸化窒素など人体や地球環境に有害なものや、エタン、メ

タンなど強い引火性を持つものが多く、扱いが非常に厄介であった。さらに評価対象空間がアトリウムや屋内競技施設のような大空間の場合には、導入すべきトレーサガスの量が膨大となり、事実上トレーサガス法の適用は不可能と考えられる。

筆者らは、従来の手法がもつ問題点の多くはトレーサガスの使用に伴うものであると考え、ガス濃度以外の物理量に着目した評価手法を考案した。

3. 簡易評価手法の開発

3.1 評価手法の概要

開発した評価手法は、屋内各点で測定した三次元風速測定結果から対象領域全域について速度場の空間補間値を算出し、その速度場を用いた濃度輸送方程式の

解から空気齢⁴⁾やSVE-3 (換気性能評価指標: Scale for Ventilation Efficiency)⁵⁾の空間分布を評価するものである(Fig.1)。トレーサの一樣かつ定常発生を想定した場合の各点の濃度を瞬時一樣拡散濃度で正規化した値はSVE-3に相当し、空気齢を名目換気時間で正規化した結果とも一致することが既往の研究により示されている⁵⁾。したがって、濃度輸送方程式の解析が可能な速度場の分布を求めることができれば、対象空間における空気齢、SVE-3等の屋内換気性能分布を評価することが可能となる。

各点の風速ベクトルは超音波三次元風速計などを用いて測定可能である。しかし実測可能な測定点数には限度があるため、測定結果はまばらにしか得られない。一方、濃度輸送方程式の解析では、対象空間を格

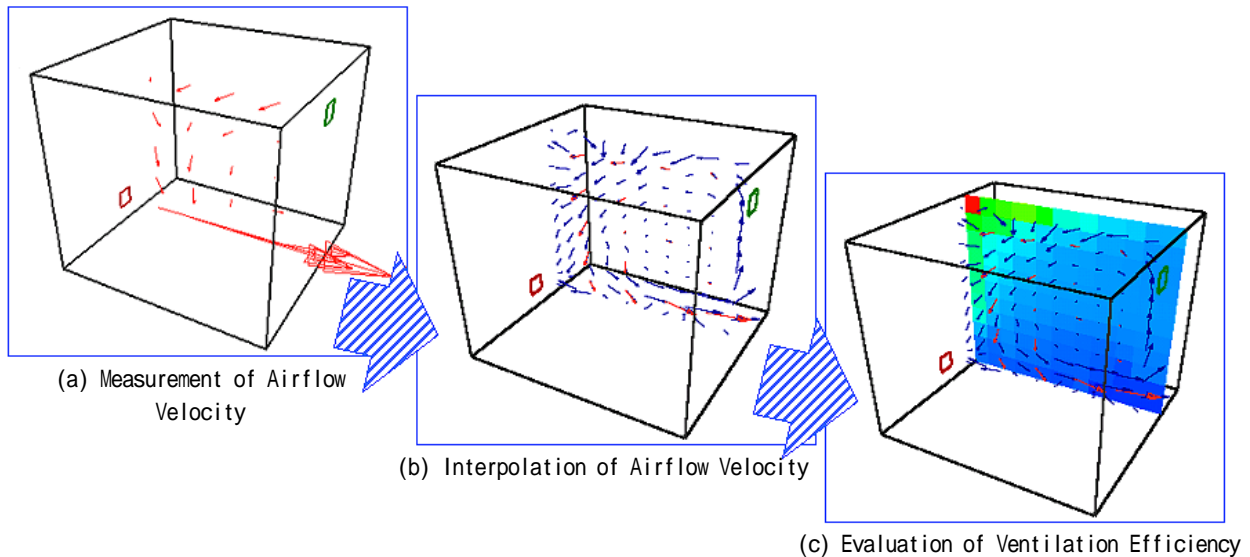


Fig.1 開発した屋内換気性能の簡易測定手法の概要
The Outline of Developed Simplified Air Ventilation Evaluating Method

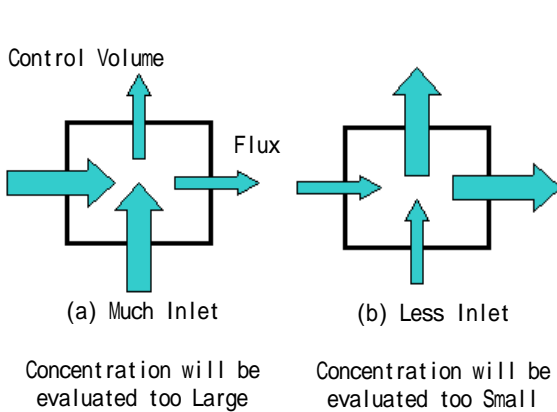


Fig.2 連続性が満足されない場合の問題点
Problems at those Control Volumes where the Continuity Equation is not satisfied

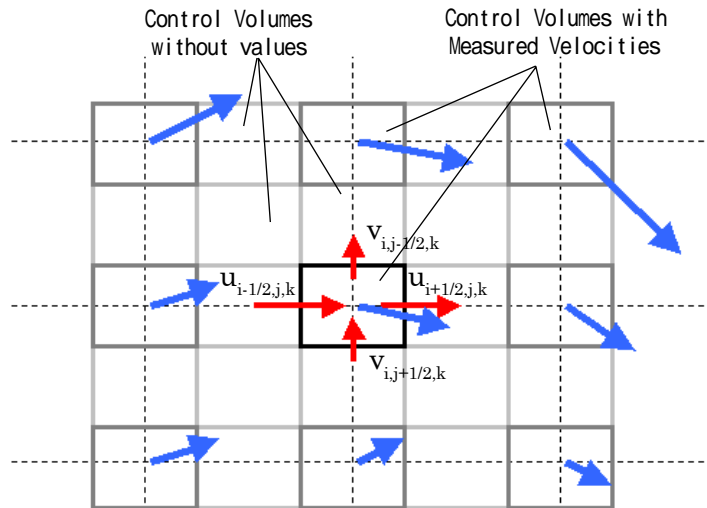


Fig.3 格子空間と変数の定義
Grid System and Definition of variables

子分割し、その各点に速度データを持つ高解像度な速度場を必要とする。さらに、解析に用いる速度場は、格子空間に対して連続性を保証するものでなければならない。本研究では、まばらな測定点で得られた速度ベクトルから任意の格子空間について速度場の空間補間を行うアルゴリズムを開発し、濃度輸送方程式の解析と組み合わせた⁶⁾。

3.2 風速測定結果からの速度場の算出

測定結果は風速計プローブの設置個所における点領域のデータであり、測定点の周囲に任意のコントロールボリューム(以下CVと表す)を想定した場合、連続性を保証できない。このような速度場を用いて濃度解析を行うと、Fig.2に示すように解が発散し、物理的に意味のある結果が得られないこととなる。

いま、Fig.3のような格子空間を想定し、格子空間上のとびとびの点では、測定により三次元風速が得られているものとする。各CVにおける連続の式は、スターガード変数配置されたCV界面の速度フラックスを用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{v} = & (u_{i+1/2,j,k} - u_{i-1/2,j,k}) \Delta y \Delta z + (v_{i,j+1/2,k} - v_{i,j-1/2,k}) \Delta x \Delta z \\ & + (w_{i,j,k+1/2} - w_{i,j,k-1/2}) \Delta x \Delta y = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに速度の実測値 ($U_{i,j,k}$, $V_{i,j,k}$, $W_{i,j,k}$) はCV中心で定義されており、その各成分は、

$$\begin{aligned} & (1/2 \cdot (u_{i+1/2,j,k} + u_{i-1/2,j,k}), 1/2 \cdot (v_{i,j+1/2,k} + v_{i,j-1/2,k}), \\ & 1/2 \cdot (w_{i,j,k+1/2} + w_{i,j,k-1/2})) \end{aligned} \quad (2)$$

で表せるものとする。このとき、実測値を持つCVは格子空間にまばらにしか存在しないことを考えると、隣接するCVには測定値が存在しないから任意の値を与えてよく、界面フラックスを調整するための自由度を得ることとなる。逆に、すべてのCV界面において(1)式を満足する速度フラックスが何らかの方法により得られたとすると、測定値が存在しないCVにも妥当な速度ベクトルが与えられたこととなり、測定値のないCVについて空間補間ができたことになる。

ここでは、非圧縮性粘性流体の解析に速度-圧力連成アルゴリズムとして用いられるHSMAC (Highly Simplified Marker and Cell)法⁷⁾を反復的な空間補間処理として利用することを考えた。すなわち、CV内における圧力補正量 δp のポアソン方程式を優対角近似して得られる以下の圧力補正式、

$$\delta p = -\omega D / 2\Delta\tau (1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2 + 1/\Delta z^2) \quad (3)$$

D : 格子領域における発散,
 ω : 加速係数,
 $\Delta\tau$: 反復計算の修正幅

を用いて、CV界面の速度フラックスは次のように補正できる。

$$\begin{aligned} \delta u_{i\pm 1/2,j,k} &= \pm \Delta\tau \delta p / \Delta x, \quad \delta v_{i,j\pm 1/2,k} = \pm \Delta\tau \delta p / \Delta y, \\ \delta w_{i,j,k\pm 1/2} &= \pm \Delta\tau \delta p / \Delta z \end{aligned} \quad (4)$$

開発した手法では、(4)式によるCV界面の速度フラックス補正を反復的に行う際に、測定データを持つCVについてはCV中心点の値を常に強制的に与えることで、実測値を反映し、かつ連続性を満足した速度場を算出することが可能となる。なおFig.3では説明を簡略化するため、実測値を持つCVと補間対象となるCVとが交互に並ぶ場合を示したが、本手法は補間対象となるCVが複数個づつ並ぶような格子系を設定した場合にも適用可能であり、実測により得られた風速ベクトルを任意の解像度を持つ速度場に補間することが可能である。

3.3 SVE-3および空気齢分布の算出

3.2節までの操作により得られた速度場を用いて、濃度輸送方程式の解析が可能となる。領域内に一樣な定常発生を想定した濃度分布の定常解を求め、SVE-3、空気齢を順次算出して対象領域の換気性能評価を行うことができる。従来のトレーサガス法では、室内平均空気齢など対象空間についての代表値しか得られなかったのに対し、開発した手法では空気齢分布、SVE-3

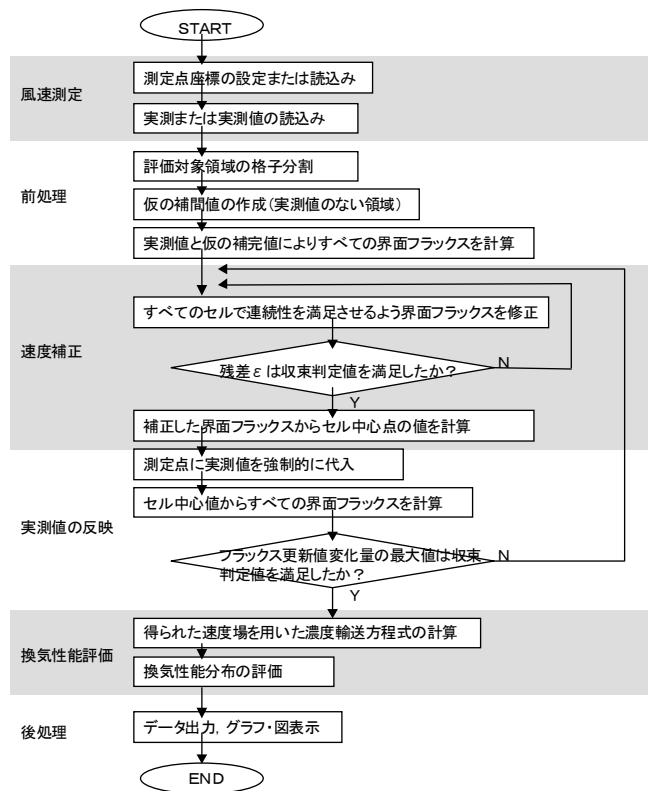


Fig.4 開発した簡易評価手法のフローチャート
 Flow Chart of the Simplified Evaluation Method

分布などを得ることが可能であり、評価結果を基に換気性能向上のための検討を行うことも可能である。

開発した簡易手法により換気性能評価を行うためのフローチャートをFig.4に示す。

4. 速度補間精度の検証と試行実験

4.1 補間精度の検証

本手法では、速度場の空間補間値を濃度輸送方程式の解析に用いる。このため、測定結果を空間補間する際の精度が、換気性能評価の精度にそのまま反映してしまう。そこで、気流と換気性能に関して実施した数値シミュレーション結果から、測定点に相当する個所の速度データを抽出し、本手法により空間補間した結果と基のシミュレーション結果とを比較した⁸⁾。数値シミュレーションには標準k-モデルによる非圧縮性乱流解析手法を適用し、気流と濃度輸送方程式の定常解からSVE-3分布を求めた。図では気流ベクトルを省いて示しているが、計算に用いた格子解像度は図示した4倍(44×44×40)のものを用いている。

結果をFig.5およびFig.6に示す。空間補間により求めた気流分布およびこれを基に解析したSVE-3分布は、数値シミュレーション結果と定量的によい一致を示した。またFig.6に示すように、各部垂直断面における風速およびSVE-3分布を比較したところ、本手法による結果と数値シミュレーション結果との差はいずれの場合も数%

以内であった。

4.2 模型実験

模型実験により、換気性能の試行評価を実施した^{6,8,9)}。Fig.7に実験装置を示す。模型は2,500×2,400×1,920mmの立方体空間とし、対向する2つの壁面は、金属フレームにアクリル製パネルをはめ込む構造として給気口や排気口の設置位置をパネルの交換によって変更できるようにした。また給気側にはインバータ制御のファン送風機を使用し、任意の供給風速を設定できるようにした。

Fig.8に風速測定点の位置を示す。測定点は対象空間を各軸方向にそれぞれ等分割した格子点とし、x方向4点(500mm間隔)、y方向5点(400mm間隔)、z方向5点(320mm間隔)の合計100点とした。各点の風速には超音波三次元風速計(カイジョー：WASP-007)を使用し、それぞれの点について気流の安定状態を確認した後、30秒間連続測定したときの時間平均値を求めた。

4.3 換気性能の試行評価

開発した手法を用いて、換気性能の試行評価を行った。実験は以下に示す3種類の給排気条件について実施した。

・ケース1：

一方の壁面の中央下部に供給口、対向する壁面の中

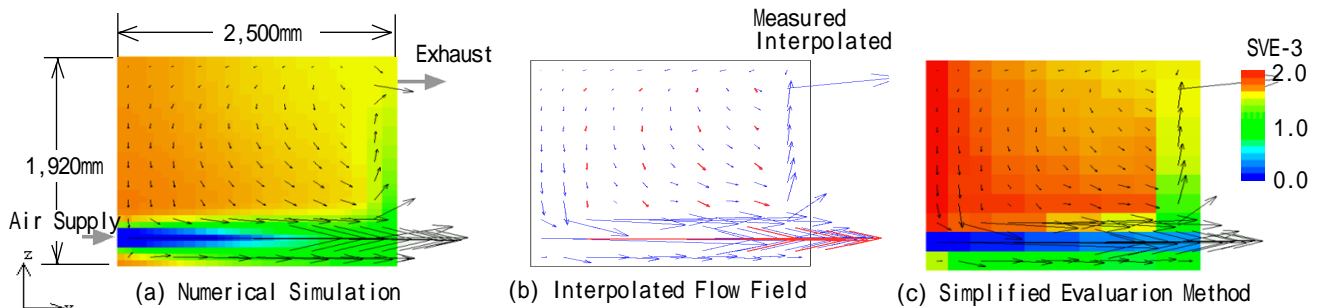


Fig.5 数値シミュレーションと簡易評価法による気流分布およびSVE-3分布の比較
Comparison of Airflow and SVE-3 Distributions

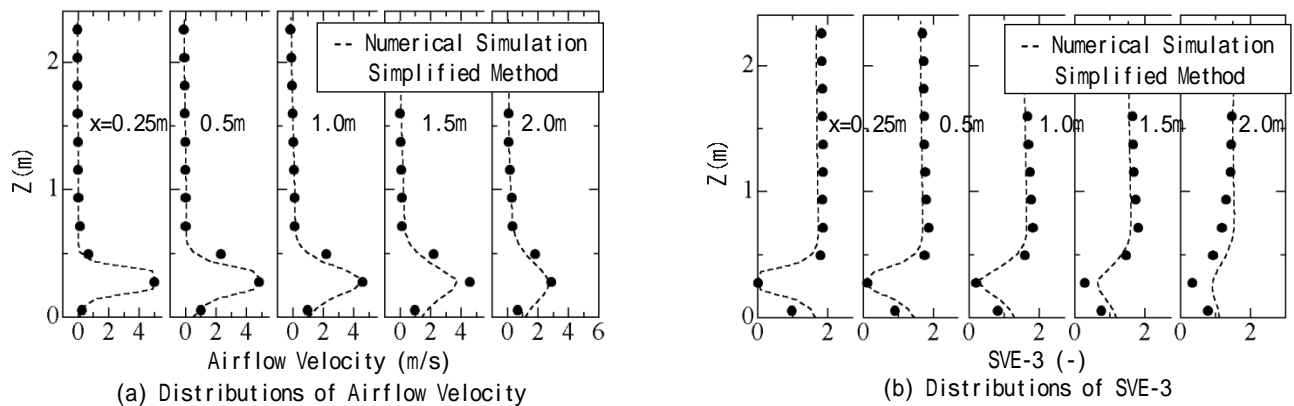


Fig.6 各部垂直断面における風速およびSVE-3の分布
Distributions of Airflow Velocity and SVE-3 in each Vertical Section

中央部に排気口を設けた場合

- ・ケース 2 :
ケース 1 の排気口を壁面上部2箇所とした場合
- ・ケース 3 :
一方の壁面の中央上部に下向き30° に吹き出す供給口を、また対向する壁面の下部2箇所に排気口を設

け、さらに室内中央に障害物を設けた場合

なお、いずれの場合も給気側はガラリ付き200×200mmの吹き出し口とし、流入風速5m/sを与えた。排気口は直径180mmのダクトとし、圧力差により自由流出させることとした。また、それぞれのケースについては、比較のため、実験と同一条件を想定した数値シミュレーションを

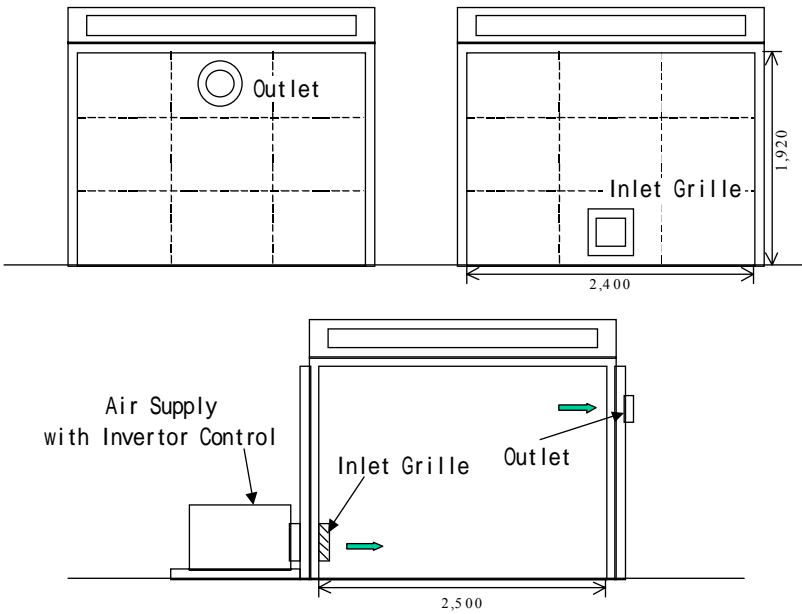


Fig. 7 実験模型
Experimental Model

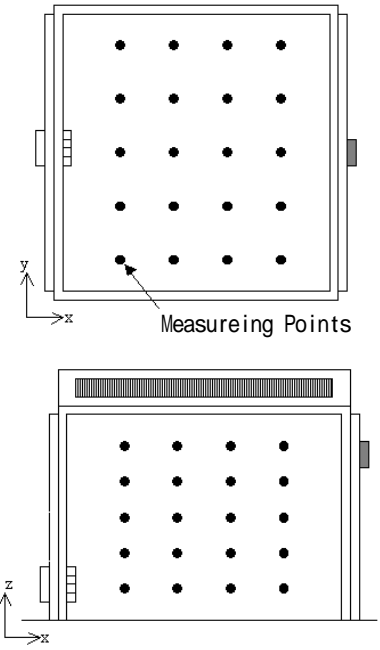
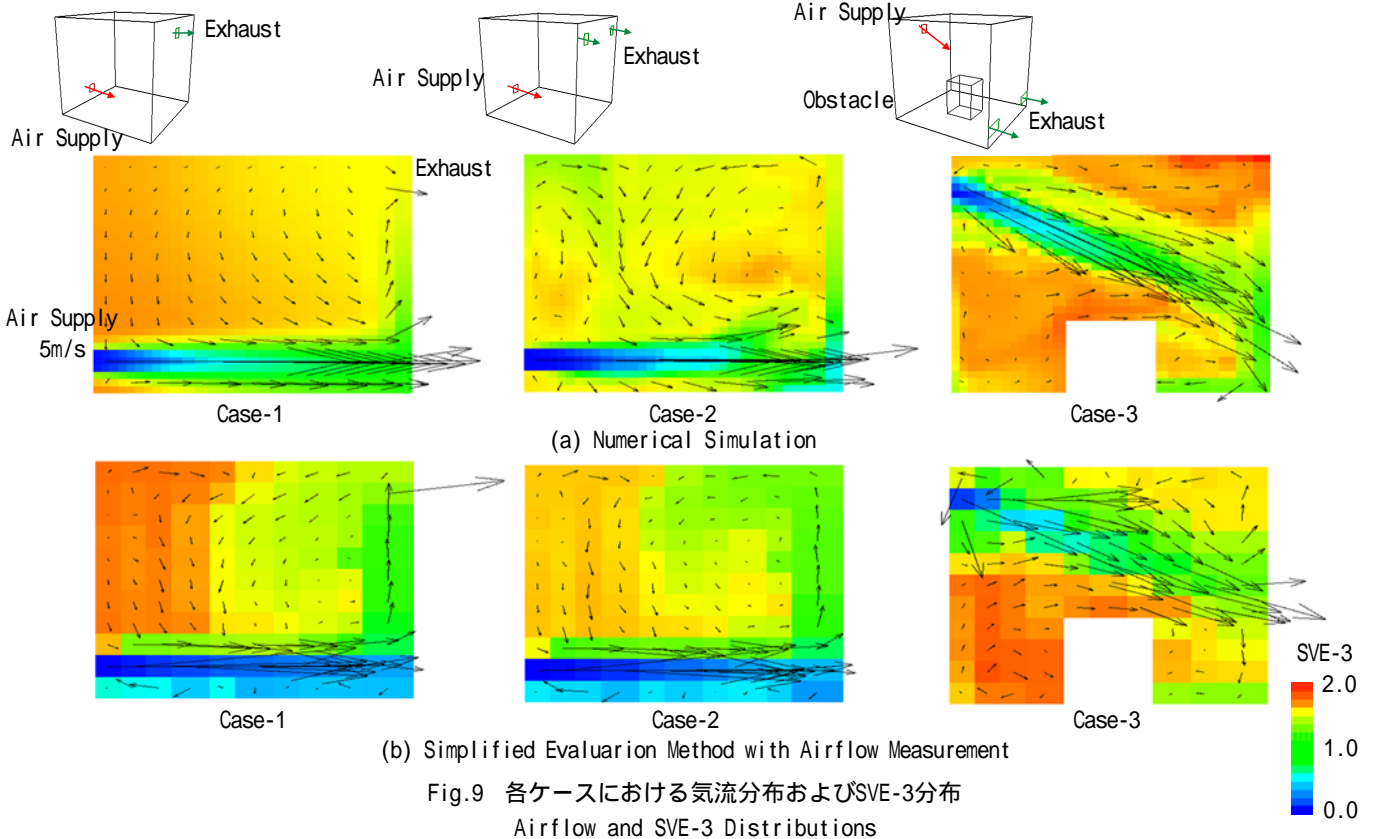


Fig. 8 風速の測定点
Measuring Points for Airflow Velocity



(b) Simplified Evaluation Method with Airflow Measurement

Fig. 9 各ケースにおける気流分布およびSVE-3分布
Airflow and SVE-3 Distributions

Table 1 数値シミュレーションおよび簡易評価手法により評価した各ケースの<SVE-3>
<SVE-3> of each Case evaluated by Numerical Simulation and Simplified Method

	Numerical Simulatiuon	Simplified Method
Case-1	1.619	1.635
Case-2	1.449	1.551
Case-3	1.804	1.878

実施した。

各ケースについて求めた気流分布およびSVE-3分布を Fig.9に示す。開発した手法により求めた気流分布，SVE-3分布と数値シミュレーション結果には若干の差異も認められるが，よどみや旋回流の発生状況など，大局的な分布状況は両者とも一致している。

それぞれのケースについてSVE-3の屋内平均値(以下<SVE-3>と表す)求め，比較した。結果をTable 1に示す。Fig.9の結果からも予測できるように，よどみの大きいCase-3の場合に<SVE-3>は最も大きく，相対的に排気口面積の大きいCase-2の場合に最も小さい値を示した。開発した手法による<SVE-3>は，数値シミュレーションともよい一致を示しており，開発した手法を用いて換気性能の評価が可能であると判断した。

5. 測定・評価システムFlowVent- の開発

開発した手法は，従来の手法に比べて実施が容易であり，また試行実験の結果から十分な精度を持つことがわかった。そこで，本手法を基に換気性能測定・評価用の統合システム「Flow Vent- 」としてパソコン用ソフトウェアを開発した。コントロール画面の一部をFig.10に示す。本システムでは，超音波三次元風速計による各点の風速測定，換気性能評価までのデータ処理，およびSVE-3など解析結果の三次元グラフィックス表示が可能であり，本手法の運用に必要なすべての操作を行うことができる。本研究では，今後も換気性能の簡易評価手法について継続的な検討を進めていく予定であるが，その成果を順次 Flow Vent- に盛り込んでいきたいと考えている。

6. まとめ

風速測定結果に基づき換気性能を評価できる簡易評価手法を開発した。本手法は，従来のトレーサガス法に比べて簡便であり，現場測定への適用が容易と考えられる。模型実験や数値シミュレーションとの比較により，本手法により十分な評価精度が得られることを確認した。現場測定への本格的な適用には，必要風速測定点数

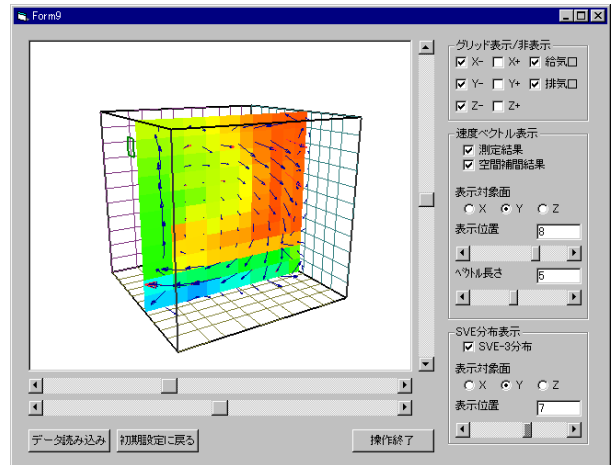


Fig.10 パソコン用統合システム「Flow Vent- 」のグラフィックコントロール画面

A View of Ventilation Evaluating System `Flow Vent-`

の明確化や複雑形状屋内への対応を考えていく必要があり，今後さらに検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 厚生労働省：シックハウス(室内空気汚染)に関する検討会中間報告書(2000)，および 室内空气中化学物質の測定マニュアル(2001)。
- 2) 換気性能評価小委員会平成12年度活動報告(2001)，空衛学会 空気調和設備委員会 換気性能設計法小委員会。
- 3) ISO-12569: Thermal Performance of Buildings - Determination of Air Change in Buildings- Tracer Gas Dillution Method (2000)。
- 4) D.Etheridge and M.Sandberg: Building Ventilation -Theory and Measurement,John Wiely and Sons (1986)。
- 5) 村上，加藤：新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法，空気調和・衛生工学会論文集，32(1986 10)，pp91～101。
- 6) 土井，諏訪，坂本：屋内における空気齢簡易測定法の開発，第19回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会，日本空気清浄協会(2001)，pp90～92。
- 7) C.W.Hirt and J.L.Cook: Calculating Three-dimensional Flows around Structures and Over Rough Terrian, J.Computational Physics, 10(1972),324。
- 8) 坂本，土井，諏訪：屋内換気性能の簡易測定法の開発(その2：風速測定結果を用いた簡易測定法の開発)，日本建築学会大会学術講演梗概集，(2001)，pp701～702。
- 9) 諏訪，土井，坂本：屋内換気性能の簡易測定法の開発，第18回エアロゾル科学・技術研究討論会，(2001)，168～170。