

# 高度な空気環境制御のための気流解析技術研究

## Air flow analysis technique for advanced indoor environmental control

株式会社 山武

齋数 由香子

Yukako Saisu

株式会社 山武

三枝 隆晴

Takaharu Saegusa

株式会社 山武

大曲 康仁

Yasuhito Oomagari

東京工業大学

香川 利春

Toshiharu Kagawa

株式会社 山武

原山 和也

Kazuya Harayama

### キーワード

気流解析,CFD,PIV,トレーサガス,ダクト気流,ヒュームフード,動物飼育ケージ

当社は理念である「人を中心としたオートメーション」の実現のために、建物における「環境制御」を目指し、換気や微細気流の制御を含む様々なソリューションを展開している。その対象は、執務室やダクト、産業用装置、製造エリア、ビルアトリウムなど多岐にわたる。とりわけ、特殊な空間や新規な装置では、「気流や温度の分布が分からない」という課題が多く、どのように計測制御すべきかの課題に直面する。その解決手段として気流解析技術に注力し、解析技術ノウハウと豊富なデータを蓄積してきた。さらに、その蓄積を生かしながら、空気の制御に関する商品の開発や性能向上にも取り組んでいる。本稿では、その代表として「ダクト気流」、「ヒュームフード」、「動物飼育ケージ」の解析事例を紹介する。

To achieve human-centered automation, which is featured in our corporate philosophy, we have developed diverse solutions including ventilation and microscopic airflow control systems, for the environmental control in buildings, including computational fluid dynamics (CFD), particle image velocimetry (PIV) and tracer gas, and to analyze targets. Some of the results are then used in product development and client solutions. This paper introduces three results: duct air flow, fume hood and animal cage.

## 1. はじめに

当社は建物や工場内の空気環境制御の商品やソリューションを提供しているが、その対象は執務室やダクト、産業用装置、製造エリア、ビルアトリウムなど多岐にわたる。サイズや形状が多様であり、熱流の様相も複雑である。とりわけ、特殊な空間や新規な装置では、「気流や温度の分布が分からない」や「計測機器が設置できない」といった課題が多く、どのように計測制御すべきかの相談を頂く機会が多い。

その解決手段として気流解析技術に注力し、解析技術ノウハウと豊富なデータを蓄積してきた。更に、その蓄積を生かしながら、空気の制御に関する商品の開発や性能向上にも取り組んでいる。

## 2. 各種解析手法

数値計算や光学技術の発達に伴い、CFD (Computational Fluid Dynamics) や PIV ( Particle Image Velocimetry ), レーザ光源、高速度カメラといった解析技術が手軽になってきている。表1にその特徴を整理した。対象の大きさや形状、流れ状態を事前に観察し、解析精度やコスト、工数を踏まえ、適材適所に各手法を活用している。

表1 各所解析手法の長短

手法	概要	長所	短所
実測	風速計（ピトー管，熱線など）や静圧センサを用いる	・データとして信頼性を得やすい	・多点計測では工数がかかることがある ・微小空間では計測器が流れを乱す
可視化	スモークを注入し，カメラで撮影・可視化を行う	・視覚的/直感的に分かりやすい	・カメラや光源が設置できないことがある ・可視化用のガス流入が必要である ・高速流では，高速カメラや高出力光源が必要である
PIV	可視化の濃淡動画を画像処理し濃淡の特徴抽出から速度ベクトルを求める	・視覚的/直感的に分かりやすい	・ベクトルなど定量化データが取得可能である ・質のよい濃淡動画が必要である
CFD	数値計算（運動方程式，エネルギー則，物性など）で，温度や気流場を求める	・計器を設置できないところでも推定できる ・条件変更での実施が可能である	・実測データとの比較が必要である ・膨大なメッシュや非定常で計算時間が必要である
トレーサガス	トレーサガスを注入し，そのガス濃度より，空気の対流を把握する	・換気回数の計測方法として定評がある	・安全や清浄の面でガスを流すのが無理なことがある

### 3. ダクト風量制御

#### 3.1 狙い

実際の建物施工では，曲がりや障害物が多く，風量計測に適した十分な直管部がないのが実状である。そのため，曲がりや障害物など厳しい条件のダクトであっても，正確に風量を制御できる技術の確立が望まれている。そのための基礎研究として，ダクトや風量制御機構を対象とした気流解析を実施している。

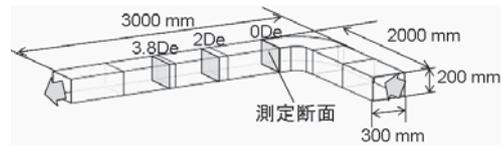


図1 曲がり角ダクトモデル

#### 3.2 ダクト気流

ダクトには様々な形状があり，組み合わせに応じて風量や圧力の分布が異なってくる。その一般化のために，様々なダクト形状に対して，3種類の手法を用いて網羅的な解析を行った。その代表として曲がり角ダクトの例を示す。

##### (1)L型ピトー管による流速分布計測

図1の曲がり角ダクト内にて流速分布を計測した。3つの断面（縦200[mm]×横300[mm]，相当直径De:266[mm]）にて，縦8点，横12点，計96点をL型ピトー管で測定し，各断面の流速分布を調べた。

0Deでは，内周に渦の逆流が発生し，中心から外周にかけて高速となる。その後，2Deや3.8Deと後流になるにつれて分布が平滑化し，流れが発達しつつある様子が観察された。

##### (2)気流の可視化とPIV解析

ダクト内の大まかな流れを把握するため，可視化とPIV解析を行った。ダクト上流側から発生させたスモーク（粒子サイズ:0.25～60[μm]）に，レーザーシート（Nd/YAGレーザ，波長:532[nm]）を照射し，流れの濃淡を高速度カメラで撮影した。

図3のような濃淡画像が撮影されるが，対象範囲にメッシュを区切り，各メッシュの濃淡画像がどのように移動や回転したかを追尾すると，タイムステップ毎の移動ベクトルすなわち速度ベクトルが求まる。

曲がり直後の0.4DeのPIV解析結果を図3に示す。ダクト外周部（図の右側）では直線的なベクトルであるのに対して，ダクト内周（図の左端）で渦が発生しているのが確認された。

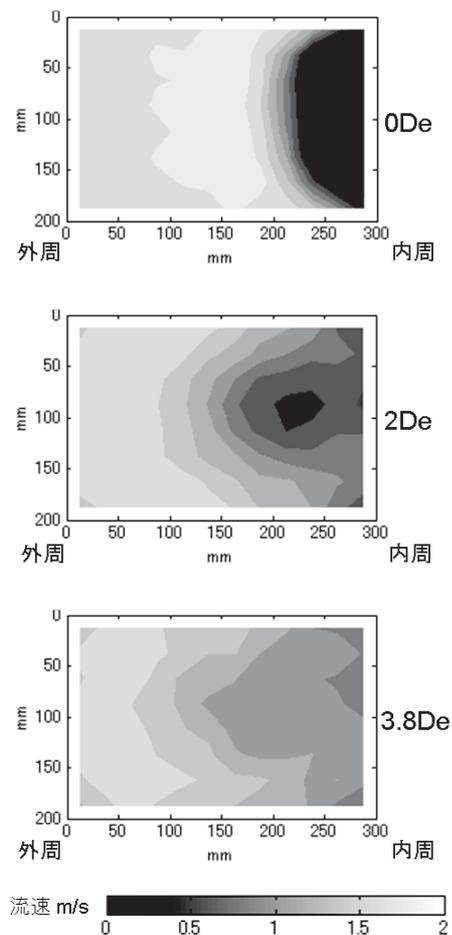


図2 曲がり角ダクト断面の流速分布<実測> (ダクト下流側から見た流速分布)

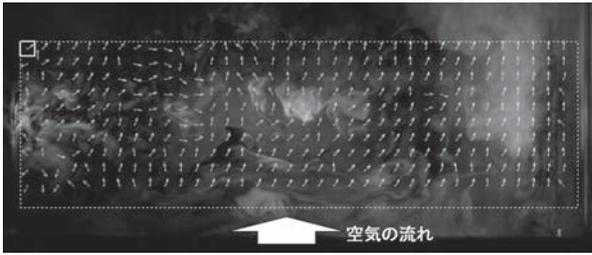


図3 PIV解析結果

(3)CFD解析

解析条件は実測状況を設定し(表2),前出の「L型ビーター管による流速分布計測」や「可視化・PIV解析」の結果と比較した。図4に断面流速分布,図5に流速分布と流線図を示す。

ビーター管の速度分布やPIV解析と同様に,0Deでは,内周に渦の逆流が発生し,中心から外周にかけて高速となる。その後,2Deや3.8Deと後流になるにつれて分布が平滑化し,流れが発達しつつある様子が観察された。このことから,CFDと実測の流速分布傾向が類似して、CFD解析結果が妥当であると言える。実測データは限られた断面データであるのに対して,CFDでは解析範囲のデータを連続かつ網羅的に分析することができる点で大変に有用である。

表2 解析条件

ソフトウェア		SCRYU/Tetra(CRADLE)	
乱流モデル		標準k-εモデル	
解析の種類		定常解析	
流体の物性		空気(20℃)	
		非圧縮性流体	
境界条件	流入	質量流量	0.098kg/s (1.36m/s)
	流出	表面圧力	0 Pa
	壁面	対数則条件	
メッシュ分割	要素数	約100,000	
	要素形状	非構造格子(四面体, 五面体, 六面体)	

3.3 ダンパ

ダクト風量を制御する機構としてエアバルブやダンパがある。アクチュエータを取り付けて,自動で風量を制御する。ダンパの代表例としてバタフライダンパがある。単翼と多翼に大別され,多翼には,羽根が平行なもの(平行翼)と羽根が対向しているもの(対向翼)がある。

風量制御ダンパは,温度制御や外気量制御,室圧制御といった用途毎に使い分けられていて,要求される応答速度やレンジアビリティが異なる。

ダンパ形状による流量特性や気流性状の違いを検証するため,図6に示す4種類の円形ダクト用のダンパ形状に対してCFD解析を行った。表3に解析条件を示す。

(1)流量特性

CFD解析結果より,指数関数で近似曲線化した流量特性の比較を行った。形状①~④の流量特性を図7と図8に示す。ここでの開度は,全開を100%,全閉を0%として表示している。

形状①や②では,指数特性であるクイックオープニングとなり,開き始めの微小風量の制御に難がある。形状③や④はほぼ線形であり無難な特性であると言える。

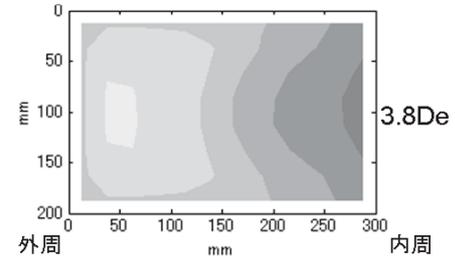
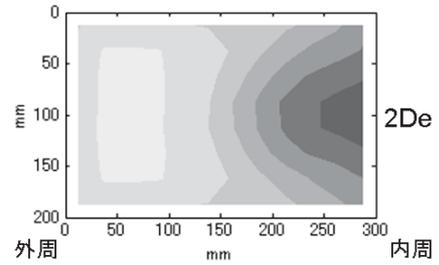
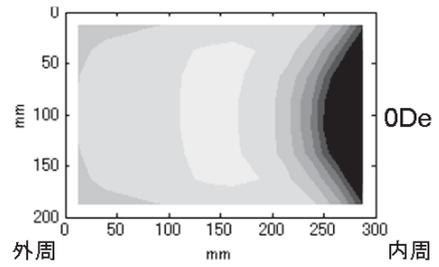


図4 曲がり角ダクト断面の流速分布<CFD解析> (ダクト下流側から見た流速分布)

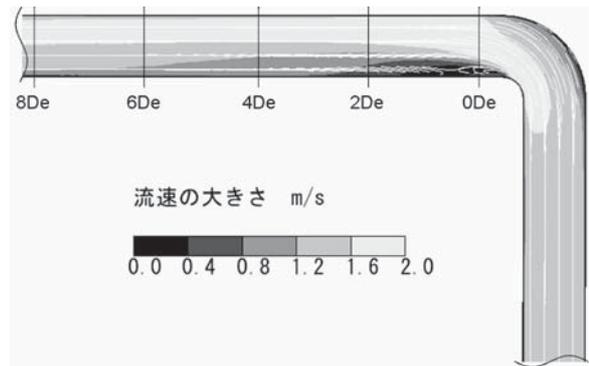


図5 気流性状<CFD解析>

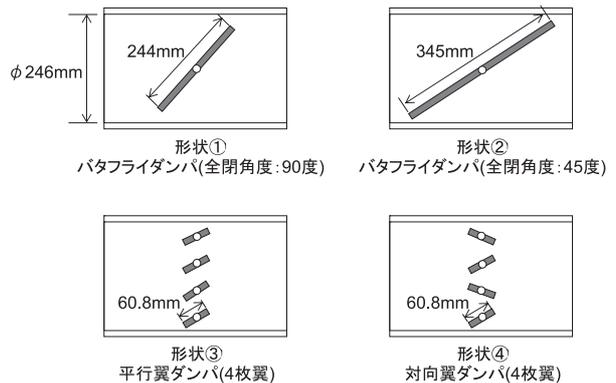


図6 解析対象のダンパ形状

表3 解析条件

ソフトウェア		SCRYU/Tetra(CRADLE)	
乱流モデル		標準k-εモデル	
解析の種類		定常解析	
流体の物性		空気(20℃)	
		非圧縮性流体	
境界条件	流入	表面圧力	500Pa
	流出	表面圧力	0 Pa
	壁面	対数則条件	
メッシュ分割	要素数	約500000	
	要素形状	非構造格子(四面体, 五面体, 六面体)	

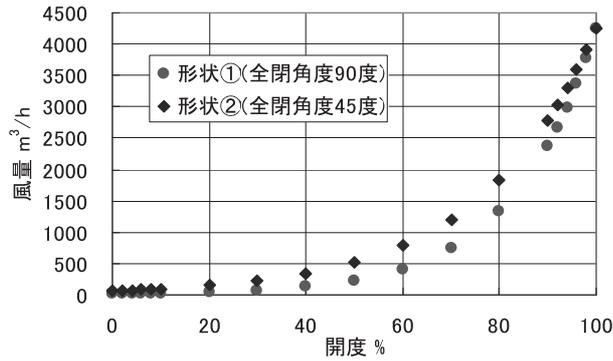


図7 形状①,②の流量特性

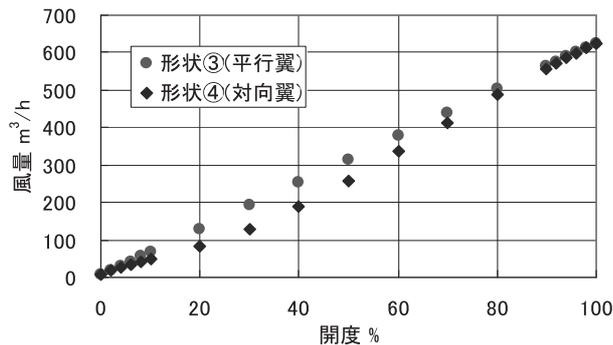


図8 形状③,④の流量特性

(2)気流性状

形状①～④の流速分布および乱流エネルギーを比較したものをそれぞれ図9と図10に示す。図9では流速のコンタプロットと流線を示す白線を同時に表示している。

他3種類のダンパの流速分布と比較して、形状④はダンパ通過後の流れの乱れが少なく、回復が早いことが分かった。

形状①～③は高い乱流エネルギー域が後流まで続いている。とりわけ、形状②と③が顕著である。それに対し、形状④の対向翼ダンパはダンパ周辺でのみ高い乱流エネルギーを示している。

多羽根の対向翼ダンパが全体的な特性としては優れるが、単羽根に比べてコストがかかる。これら解析結果を参考としながら、必要とされる制御性能に応じて、適切なダンパを選定することが大切である。

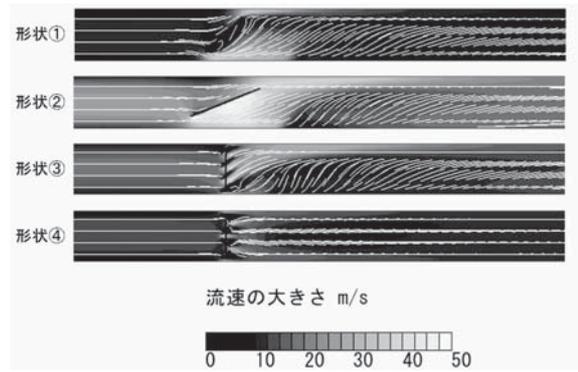


図9 ダンパ形状別の流速分布の比較

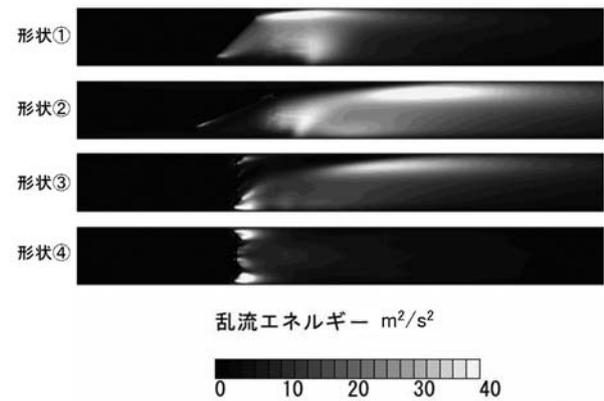


図10 ダンパ形状の別の乱流エネルギーの比較

3.4 まとめ

3章では、ダクトとダンパの気流解析事例を紹介した。その他にも絞りや拡張、ベンチュリ、オリフィスといった様々なダクト形状の解析を行い、データを蓄積してきた。

実際の建物施工では、曲がりや障害物が多く、流れの状態は複雑である。実測とシミュレーションを併用しながら、その複雑な流れのメカニズムを解明しつつある。当社では、風量制御バルブや風量コントローラといった商品を提供しているが、これら解析結果を生かしながら、開発や性能向上に取り組んでいる。

4. ヒュームフード<sup>(1)</sup>

4.1 狙い

化学や製薬などの研究室では、有害ガスは、ヒュームフード(図11)と呼ばれる局所排気装置に封じ込められ速やかに排気される。

労働安全衛生法特定化学物質等障害予防規則では、フード開口部の面風速を0.5m/s(ガス状の物質に対して)とすることが定められている。サッシ開口部の高さや幅を位置センサで検知し開口面積を求めて、目標面風速0.5m/s相当となるように排気風量(面風速×開口面積)を決定する。フードとしての封じ込め性能は、風量制御装置の応答速度に左右され、より早い応答速度が求められると言われている。

しかし、フード内部の流れの状態や封じ込め性能の実態はあまり知られておらず、そこを明らかにするために解析に取り組んだ。

## 4.2 解析モデル

ここでは、ヒュームフードを対象とした定常と非定常の解析を行い、種々の検討を行った。市販のヒュームフード(幅1.0m,奥行き0.75m,高さ2.3m)のサッシ前面75mmに作業者が立っている(図12)。各解析条件を表4に、結果を4.3項以降に示す。

## 4.3 定常解析

3次元風速計で図13に示す点の風速を計測し、CFD結果と表5に比較した。風速計装置自体が流れを乱したり、流れが不安定であり、実測値の精度も保証できず厳密な検討ができないが、CFDでの解析結果にどの程度の誤差があるかの参考になると考えられる。

また、サッシ開度を50%とした時のフード中心部の流線を図14に示す。作業者の脇を通りぬけてフード内部に流入する。フード内部では反時計周りの渦を形成し、排気されることが観察される。

## 4.4 非定常解析

図15の条件にしたがって、4パターンの非定常解析を実施した。サッシ移動に関しては、作業者の平均的なサッシ開閉動作をイメージし、速度0.3m/sで25%→100%の位置にサッシを移動させた。その際に、風量制御装置の応答速度を4条件(①1秒応答②3秒応答③6秒応答④風量制御なし)に変更し、その応答速度と封じ込め性能の関係を検証した。

封じ込め性能の判断のために、フード内部で発生するガスにはトレーサガスに広く利用されるSF<sub>6</sub>(分子量136)をガスイジェクタ(図12)より4L/minの流量で発生させた。

0秒以前ではサッシが閉じトレーサガスが高濃度であった。その後、サッシを開くとサッシ前面から風が流入し、フード内のトレーサガス濃度が一気に希釈される。

2.5秒時の解析結果を図16に示す。条件③や④ではサッシ開後の風量制御が遅れ、サッシ下部にガスが滞留している。条件②ではサッシの下部に若干の滞留がある。条件①では渦状の流れがおき、下部の流れ滞留が解消されている。高い封じ込め性能のためには1秒程度の高速な風量制御装置が必要とされると言われるが、そのことを定量的に示す解析結果であると考えられる。

## 4.5 まとめ

これまで把握が難しかった「ヒュームフード内の気流性状」と「風量制御装置の応答速度による封じ込め性能の違い」を解明した。ヒュームフード内では半時計の流れが発生し、速やかに有害ガスを希釈し、排気していることが分かった。また、サッシ開閉時には面風速を一定に保つために、排気風量をコントロールするが、その風量制御には1秒程度の高速応答が必要であることも確認した。



図11 ヒュームフード

表4 CFD解析条件一覧

		定常(全開, 面風速 0.5m/s)	定常(50%開度, 面風速 0.5m/s)	非定常
結果		表5	図14	図16
ソフトウェア		CFD2000		
乱流モデル		標準k-εモデル		
解析の種類		定常解析	定常解析	非定常解析
境界条件	流入	大気圧		
	流出	8.1kg/s (平均面風速 0.5m/s相当)	16.2kg/s (平均面風速 0.5m/s相当)	図16の要求風量に応じた風量
メッシュ分割	要素数	33840		
	要素形状	構造格子(直方体)		

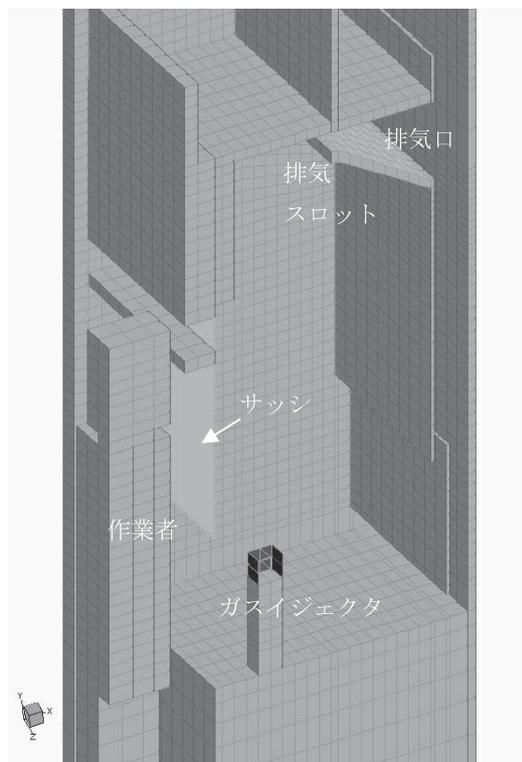


図12 対象モデル

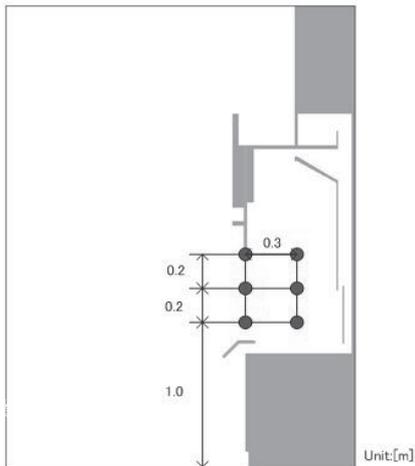


図13 3次元風速の測定点(フード中心部)

表5 実測とCFDの風速比較

	実測	CFD	誤差
左上	(48,-14,-4)	(49,-37,2)	(1,-23,6)
右上	(41,41,-4)	(43,22,0)	(2,-19,4)
左中央	(46,2,-2)	(46,-4,-1)	(0,-6,1)
右中央	(37,7,-5)	(55,7,-7)	(18,0,-2)
左下	(43,2,3)	(45,20,2)	(2,18,-1)
右下	(36,4,-1)	(45,8,8)	(9,4,10)

\*(x,y,z), [cm/s]

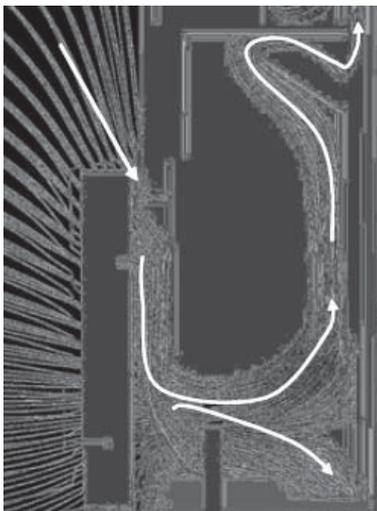


図14 フード内の流線(サッシ開度50%)

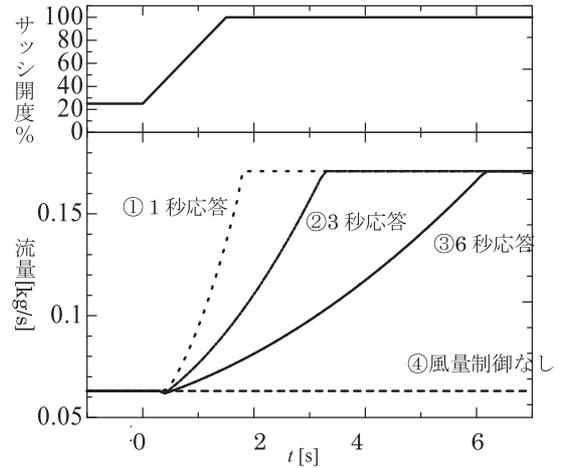


図15 サッシ開度と風量制御装置応答波形

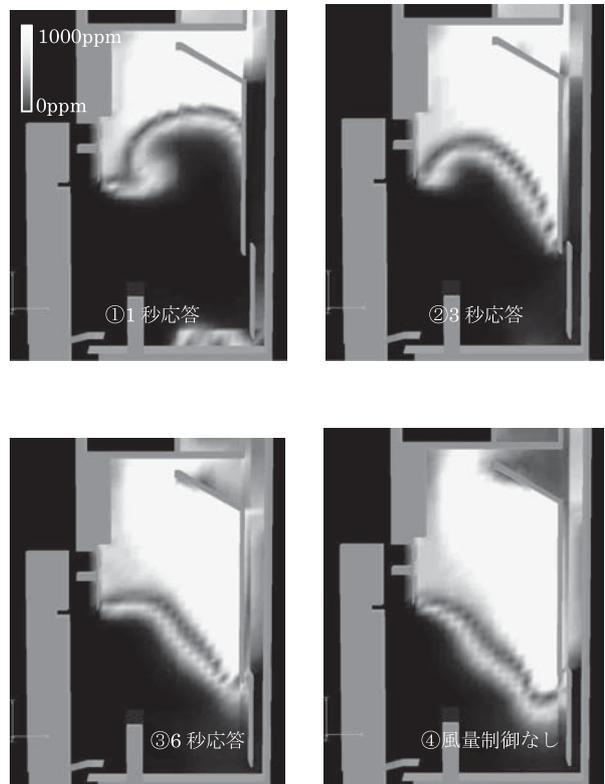


図16 応答速度別の封じ込め性能(2.5s時)

## 5. 動物飼育ケージ<sup>(2)</sup>

### 5.1 狙い

動物飼育室では、マウスなどを飼育するラックが用いられている。直方体のケージが普及しているが、収納効率や着脱の良さを特徴とする図17のような円形状のものが新たに提案されている。しかし、実運用での換気性能が未知であったので、その換気回数測定を行った。

動物や人間の間での感染を防止するために、飼育ケージには清浄度や封じ込め性能が求められる。その性能指標が換気回数である。対象のケージはサイズが小さく、マウスも活動状態になるため、風量の計測は難しく、トレーサガスによる測定を工夫しながら活用した。



図17 円形動物飼育ラック

$$\text{局所換気回数(回/h)} = \frac{1}{A}$$

$$A = \int_{t_0}^{t_e} \frac{C(t) - C(t_e)}{C(t_0) - C(t_e)} dt$$

$A$  :  $t_e$ 時の空気齢(h)  
 $C(t)$  : 時刻 $t$ における $\text{CO}_2$ 濃度(ppm)  
 $t_0$  : 換気開始時  
 $t$  : 換気途中の任意の時間  
 $t_e$  : 換気終了時

数式1 換気回数算出式

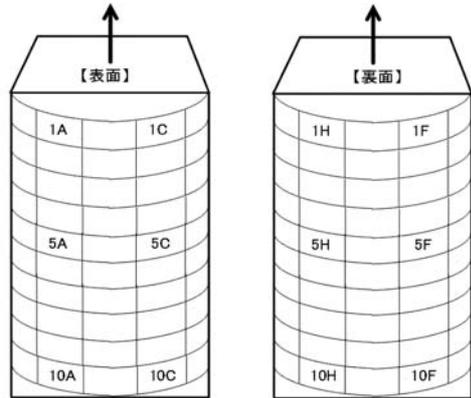


図19 計測ゲージの設置位置

### 5.2 換気回数測定方法

換気回数の測定にはステップダウンと呼ばれる方法を用いた。トレーサガスとして $\text{CO}_2$ を用いた測定原理を図18に解説する。

- ・換気を停止し空間にガスを供給/拡散させる。
- ・ある程度までガス濃度を上昇させた後で、ガス供給を停止する。
- ・換気を開始する。空気が徐々にリフレッシュされ、ガス濃度が減衰してゆく。
- ・減衰の時定数は換気回数で決まる。例えば、減衰の時定数が短ければ、素早くリフレッシュされていて、換気回数は大きいと言える。なお、換気回数は数式1で計算される。

### 5.3 実験方法

実験条件と方法を以下に示す。

- ・対象としたラックは10段×10列の計100個のケージである(図17)。
- ・測定ケージは1/5/10段のA/C/F/H列の計12個である(図19)。

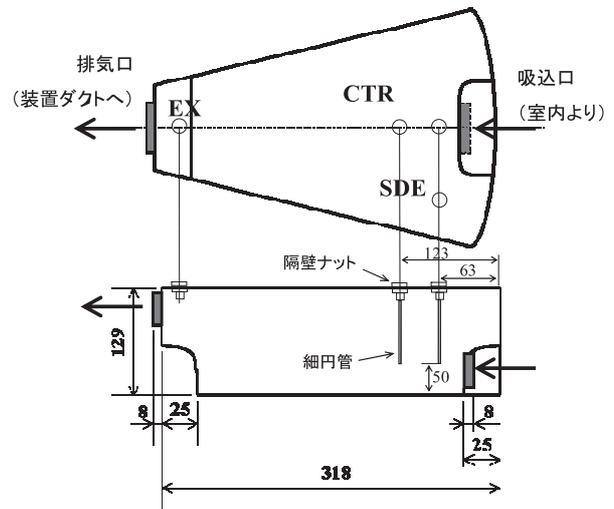


図20 計測対象ケージ

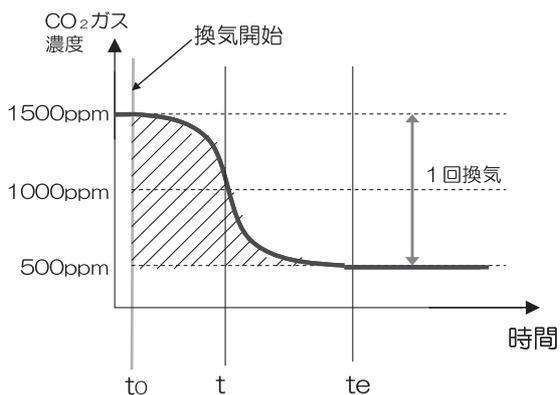


図18 ステップダウン法



図21 計測風景(B6J種)

- ・A/F列に小柄なB6J種の雄が5匹飼育され,C/H列に大柄なICR種の雄が5匹飼育されている。
- ・ケージ外形と換気回数測定点を図20に示す。「中心部(CTR)」、「排気近傍(EX)」、「給気口の横で空気が淀みやすい場所(SDE)」の3点を選定した。測定点にはチューブを挿入し(図21),その後部にCO<sub>2</sub>センサを取り付けた。
- ・換気回数測定には前述のステップダウン法を用いた。なお,CO<sub>2</sub>濃度の上限はマウスや害のない2,000ppm程度までとした。
- ・ラックの上部には排気ダクトが接続されている。排気風量は154m<sup>3</sup>/hで十分な排気量を確保した。

#### 5.4 実験結果と考察

各点での換気回数結果を表6に,考察を以下に示す。

- ・ケージの中心部(CTR)は流れの主流となり換気回数が多い。
- ・吸込口と排気口が正対しショートサーキットや隅の淀みが心配されたが,心配された場所(SDE)でも,150回/h非常の換気回数を確認した。
- ・排気口に近い1段目で,換気回数が多い傾向にある。
- ・若干のばらつきがあるものの,ラック/ゲージ位置での極端な偏りはなかった。
- ・換気回数は排気風量に応じて増減するので,排気風量を適切値に制御することが大切である。

表6 各点での換気回数(回/h)

段	計測点	列			
		A	C	F	H
1	EX	186	166	185	136
	CTR	268	380	232	171
	SDE	188	156	209	167
5	EX	135	123	130	139
	CTR	366	346	259	206
	SDE	167	188	164	155
10	EX	137	132	125	135
	CTR	291	251	228	169
	SDE	150	155	135	163

#### 5.5 まとめ

実運用での換気性能が未知であった「円形飼育ラック」の換気性能をトレーサガス法により明らかにした。その結果,換気回数の分布はあるものの,適当な排気風量を保てば,飼育環境に良好な換気回数に確保できることを検証した。

### 6. おわりに

「ダクト気流」、「ヒュームフード」、「動物飼育ケージ」の気流解析事例を紹介した。いずれも気流性状は複雑であり,その実状把握が難しい対象であったが,各種解析手法を適材適所に活用することで,これらの気流性状を明らかにすることができた。

さらには,これら解析結果を活用しながら,空気の制御に関する商品の開発や性能向上に取り組んできた。今後も研究開発やお客様の課題解決のために解析活動を充実させてゆく所存である。

#### 参考文献

- (1) 香川,大曲ほか:サッシの移動を考慮に入れたヒュームフードの気流解析,「シミュレーション学会」,2004年
- (2) 日置,荒巻,石原ほか:「回転式微陰圧型個別換気ケージシステムにおけるケージ内環境」,「第54回実験動物学会ポスターセッション」,2007年
- (3) 小林,徐ほか:「グランドロビーの空調最適運転に関する研究 — 自然換気量の計測及び換気性能の評価」,空調和衛生工学会学術講演会2004年

#### 著者所属

齋数 由香子	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
大曲 康仁	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
原山 和也	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
三枝 隆晴	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
香川 利春	東京工業大学 教授 精密工学研究所