

# ダクト内風量測定に関する新技術の紹介

芝 吉 治 郎

YOSHIJIRO SHIBA  
(株)芝田技研 代表取締役社長

永 桶 均

HITOSHI NAGAOKE  
(株)NTTファシリティーズ  
FMサービス部R&DビルFM担当

小 島 通 雄

MICHIO KOJIMA  
(日比谷総合設備  
(株)エンジニアリング本部設計・積算部 部長)

## はじめに

空調設備で磨き上げられる空気品質。なかでも産業空調における空気品質への要求は製品グレードの向上に伴いエスカレートしている。このような空気品質の要求は、必然的に処理コストや処理エネルギーの上昇を招くことになる。そのため、この高価な空気を過不足なくユースポイントへ提供する風量管理は、昨今の共通課題である省エネや地球環境保全に直結する有効な手段になる。

また、従来のような空調設備機器の過剰設計を抑制するためにも、風量など機器性能に関連する物理量を正確に計量し無駄を取り除くことが、これからの課題であろう。

このように、高価な空気の定量的管理や最適設計・最適運用の監視ツールとしてダクト内の風量計測の重要性が高まる傾向にあることは言を俟たない。

ここでは、従来の風量計にない特長を備えたトレーサーガス法（以降ガストレ式と記述）による風量計測方法について、その概要と実用的な検証事例を紹介したい。

## 1. 風量計の現状と問題点

一般的なダクト内の風量計として“ピトー管”“熱線式風速計”“オリフィス”などが知られている。ピトー管や熱線式風速計は取扱いが簡単で重宝されており、オリフィスは歴史に裏打ちされた信頼がある。しかしながら表-1に示すように、夫々固有の問題を抱えている。さらに、前述の風量計を含めた従来型風量計に共通した課題（4項目）が実用上のネックとなり、普及の妨げとなっているのが現状である。

表-1 従来型風量計の課題

No	計測機器	課題
01	ピトー管や熱線式風速計	ダクト内風速分布の偏りの影響を避けるため、測定面を多数の等断面積に分割し、その分割断面の中心部で代表風速を計測し、平均風速を求める多点測定となる。
02	オリフィス	絞り機構を有するため、自身の圧力損失が高くエネルギーを浪費することになる。
03	従来型風量計共通	測定点の上流・下流域に十分な直管部を設け、流れを整流する必要がある。
04	同上	所定の計測環境が得られない場合、測定値の妥当性についての検証ができない。
05	同上	塵埃の付着や測定孔の目詰まりなどによる測定精度の経年的悪化に関して、風量計が設置された、そのままの状態では検証できない。
06	同上	一般的に、測定精度はフルスケールで表されるため低風量域での誤差の悪化が著しい。

## 2. 風量計に望まれる機能

計測機器として、また用途や測定値の重要性を考えると次の機能を備える必要がある。

- (1) 計測機器の正確性の観点から、風量計がダクトに設置された、そのままの状態でも風量指示値の妥当性が検証できる。
  - (2) 省エネの観点から、風量計自体の圧力損失が低く、送風機負荷を上げない構造。
  - (3) 省コストの観点から、既設ダクトへの後付けが容易でコストパフォーマンスが高い。
  - (4) メンテナンスの観点から、ダクトから簡単に着脱でき、測定孔の目詰まりなどの対処が容易にできる。
  - (5) 施工上の観点から、測定点の上流下流に設ける直管が短縮でき、設置環境が緩和できる。
- 我々はこのような必要性を背景に、ガストレ式による風量計測方法の構築と、これを応用したガストレ式風量計を開発した。

## 3. ガストレ式風量計測方法の概要と計測方法

### 3.1 概 要

ガストレ式の風量計測方法は混合希釈法に基づ

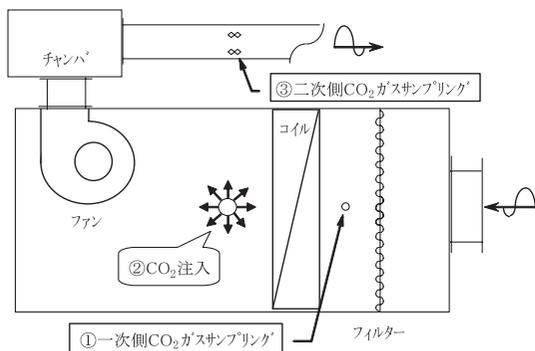


図-1 空調機 (AHU) での風量計測 (実施例)

いている。

測定原理は、まずダクト内の被測定流体である空気中に、流れを追跡するトレーサガス (Tracer Gas) を注入する。この注入域から適切に距離を経た下流域で、注入したガスの希釈度合いと、その時のトレーサガス注入量を基に風量を求める方法である。

### 3.2 計測方法

具体的な計測の方法について計測イメージ図 (図-1) を基に説明する。尚、本例では気流追跡の役目を担うトレーサガスにCO<sub>2</sub>を用いる。

トレーサガスとしてSF<sub>6</sub>を用いる例もあるが、地球温暖化係数が高いことやガス分析機器が高価であることからCO<sub>2</sub>が適当と判断している。

- ① 一次側空気サンプリング：CO<sub>2</sub>ガスは僅かではあるが空気中に含まれており、その割合は場所や時間で変化するため一次側CO<sub>2</sub>濃度 (CO<sub>2</sub>注入に影響されないバックグラウンド) を一次側サンプリング空気にて計測する。
- ② 注入：一次側サンプリングの下流域でCO<sub>2</sub>ガスを被測定流体である空気中にパーズする。このパーズ量は液化CO<sub>2</sub>ポンベの重量変化として重量計で計測する。
- ③ 二次側空気サンプリング：一次空気中にパーズしたCO<sub>2</sub>が拡散混合した領域で二次側の空気をサンプリングし二次側のCO<sub>2</sub>濃度を計測する。混合距離の例として、90°曲管 (内径75mm) 上流の管路中心部でパーズする場合、曲管後80cmの距離で十分混合された結果が報告<sup>1)</sup> されている。
- ④ 分析：①と③の操作で得られたCO<sub>2</sub>の濃度差、②で得られたCO<sub>2</sub>パーズ量および別途計

測するダクト内の絶対圧力や温度を基に風量を算出する。なお、風量  $Q$  を求める基本式は次の通り。

$$Q = \frac{R(\theta, P) \times Wp}{\int (Xo - Xi) dt} \quad (1)$$

$\theta$ ：被測定流体の温度

$P$ ：ダクト内の絶対圧力

$R(\theta, P)$ ：CO<sub>2</sub>のパーズ質量と体積を関係付ける関数

$Wp$ ：CO<sub>2</sub>パーズ質量

$Xi/Xo$ ：それぞれCO<sub>2</sub>パーズ期間中の一次/二次側CO<sub>2</sub>濃度

## 4. ガストレ式の留意点とその対応策

### 4.1 留意点

ガストレ式はトレーサガス (本例ではCO<sub>2</sub>) を注入している期間だけ風量を計測できる一過性であるため、既設風量計の指示値検証 (7章参照) などに有効であるが、連続的に風量を計測するには常時CO<sub>2</sub>を注入する無駄を伴う。この無駄をなくすため次に示す対応策を講じる。これにより、風量を無駄なく連続的に計測でき、冒頭に述べた空調設備機器の最適運用などを進める計測ツールとなり得る。

### 4.2 対応策

ピトー管やオリフィスのように風量 (風速) の変化に応じて検出差圧が変動する差圧検出体 (多孔管の組合せ) を測定対象のダクト内に設置し、次の手順で風量と検出差圧の関係を求める。

- (1) 風量一定とし、ガストレ式で風量を計測。
- (2) (1)の風量を保った状態で、先述の差圧検出体からの検出差圧を計測。
- (3) (1), (2)の計測を3段階以上の風量域で行う。

以上の計測結果を基に、風量と検出差圧の相関を求める。この両者の相関が一旦明らかになれば、トレーサガスを注入しなくとも差圧検出体の検出差圧から風量を導くことができる。

## 5. ガストレ式風量計測方法や風量計の特長

### 5.1 ガストレ式風量計測方法の特長

従来の風量計と測定方式が異なることで、次のような大きな変革をもたらすことになる。

- (1) 流れを整流する必要がないため、複雑に組

み合わされたダクト上でも正確に風量が測定できる。

- (2) 既設風量計の指示値検証がダクトに設置された、そのままの状態で行える。
- (3) 風量の多少に係わらず高い測定精度を維持することができる。

## 5. 2 ガストレ式風量計の特長

シンプル構造の差圧検出体をガストレ式風量計測定方法にて校正した風量計（ガストレ式風量計）の特長を述べる。

- (1) 着脱式の差圧検出体とすることで既設ダクトへの取り付けが簡単になるとともに、定期的なメンテナンスが容易になる。
- (2) 差圧検出体の形状・構造に制約がないため広く材質を選定でき、耐食性や耐熱性を求める用途への対応が可能となる。
- (3) 流れを整流する必要がないため上流・下流域の直管の必要性など設置環境の制約から解放され、設計の自由度が高まる。
- (4) 風量計自体に整流装置を持たないため、圧力損失が低減でき、エネルギーの浪費を抑制できる。

## 6. ガストレ式風量計測方法の妥当性

JIS規格の吸込みノズルを風量測定の基本原器とし、ガストレ式風量計測方法にて求めた風量との比較にて測定方法の妥当性評価、さらに差圧検出体が風量計の役目を担えるか試験を行った。

### 6. 1 試験の概要

図-2 に示す試験装置を用いた。

- (1) CO<sub>2</sub>濃度計や重量計は、基準ガス（±1%）や基準分銅などを用いて計測都度校正する。
- (2) CO<sub>2</sub>のパーセントはチャンバ直前とし、CO<sub>2</sub>濃度計測のための空気のサンプリングはチャンバ下流域（チャンバ吐出7D相当直管後）で行った。
- (3) CO<sub>2</sub>濃度計1台にてダクト内のCO<sub>2</sub>濃度をトレースし、CO<sub>2</sub>パーセント前後のCO<sub>2</sub>濃度差を求めた。
- (4) CO<sub>2</sub>パーセント管は50mmピッチで1mm径の孔を上流域に向け開孔した角パイプを用いた。
- (5) サンプリング管は2本の角パイプの流れに沿って配設し、上流域のパイプは風上に、下流域のそれは風下に向け2mm径の孔を

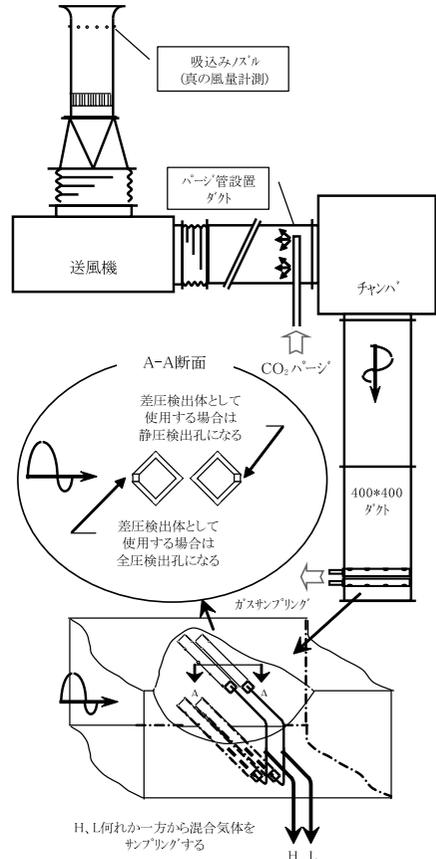


図-2 吸込ノズルとの比較試験装置

50mmピッチで開孔している。本試験でサンプリング管として使用する場合は、下流側のパイプ（L）を用いる。

### 6. 2 吸込みノズルとの風量比較試験結果

表-2 に結果の抜粋を示す。

- (1) 試験No.01~03は風量を一定とし、CO<sub>2</sub>パーセント量を変化させた試験である。この結果から、CO<sub>2</sub>のパーセント量に依らず、吸込ノズルとの誤差は一定と見做すことができる。
- (2) 試験No.04~07はCO<sub>2</sub>パーセント量を一定とし、風量を変化させた試験である。この結果から、風量の変化に対しても有意な誤差の悪化はない（いずれも測定精度±3%以内にある）。

### 6. 3 差圧検出体の検出差圧と風量の関係調査

先述のサンプリング管を差圧検出体として用いた場合の風量と検出差圧の関係を調べ、その相関を基に風量計と成り得るかの評価を行った。

その結果を表-3 と図-3 に示す。

表-2 吸込ノズルによるガストレ方式の評価

No	400×400 ダクト内 目標風速 V (m/s)	吸込ノズル 演算風量 Qn (m³/h)	CO <sub>2</sub> 計測値			ガストレ方式 計測風量 Qg (m³/h)	(Qg/Qn-1) 誤差率 (%)
			一次側 CO <sub>2</sub> 濃度 (ppm)	二次側 CO <sub>2</sub> 濃度 (ppm)	パーシ質量 (g/s)		
01	5.0	2861	462.6	997.1	0.760	2822	-1.4
02	5.0	2863	492.2	1520.0	1.466	2811	-1.8
03	5.0	2859	575.6	1859.6	1.847	2822	-1.3
04	8.0	4570	506.6	1141.0	1.449	4504	-1.4
05	6.5	3690	500.0	1288.9	1.444	3612	-2.1
06	5.0	2871	487.6	1531.7	1.502	2840	-1.1
07	3.0	1856	516.3	2147.0	1.502	1815	-2.2

※網掛け部を一定と見なす。

表-3 差圧検出体の検出差圧と風量の関係

No	400×400 目標風速 (m/s)	吸込ノズル		差圧検出体		
		演算風量 Qn (m³/h)	演算風速 Vn (m/s)	検出差圧 Pv (Pa)	センサ係数 a (-)	a 安定性 a / a v
01	2.5	1371	2.38	7.0	0.695	1.004
02	2.5	1371	2.38	7.0	0.695	1.004
03	3.0	1846	3.20	12.7	0.694	1.003
04	3.0	1843	3.20	12.6	0.696	1.006
05	5.0	2859	4.96	31.0	0.687	0.993
06	5.0	2858	4.96	31.0	0.687	0.993
07	6.5	3676	6.38	51.4	0.687	0.993
08	6.5	3675	6.38	51.1	0.689	0.996
09	8.0	4568	7.93	77.8	0.695	1.004
10	8.0	4562	7.92	77.7	0.694	1.003
XX	-	-	-	平均 a v	0.692	-

表中、センサ係数 a は風量 Q と検出差圧 Pv を関係付ける定数であり、次の関係を持つ。

$$Q = 3600 \times A \times V = 3600 \times 0.4^2 \times a \sqrt{\frac{2}{\rho} P_v} \quad (2)$$

A はダクト断面積 (m<sup>2</sup>)、ρ は空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)。

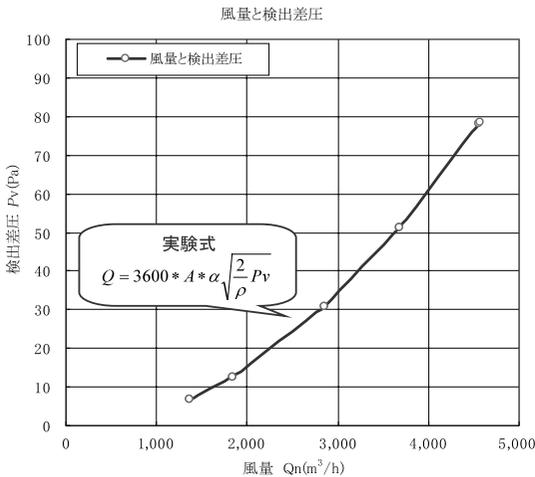


図-3 風量と検出差圧の関係

- (1) 風量と検出差圧を関係づけるセンサ係数 a の値が風速の変化に依らずほぼ一定である。
- (2) このことは、検出差圧値から簡単な開平方で風量が求められることを暗示している。

#### 6.4 考 察

- (1) 表-2 の吸込ノズルとの誤差率が示すよう

に、ガストレ式による風量計測の測定精度は実用上問題ないレベルにあることが判る。

- (2) 表-3 のセンサ係数 a の安定性が示すように、汎用パイプで構成する差圧検出体でも十分風量計として使えることが判る。

### 7. フィールドでの実用性検証

NTT厚木研究開発センタ 研究棟スクラパー系統に設置された既設風量計EVD (差圧方式) の検出値の妥当性について、ガストレ式風量計測方法による風量値と比較することで判断した。

この背景は、風量計設置から10年以上経過していることや測定対象のガスの性状から圧力検出孔の目詰まりや腐食による異常の有無について調査/校正することで、研究施設の排気量を管理し安全性確保を図ることにある。

#### 7.1 調査対象の風量計

基本的な仕様は次の通り (図-4 参照)。

- (1) ダクトサイズ/材質: 500×900角/塩ビ
- (2) EVDの特性: 動圧の4倍に相当する差圧を検出

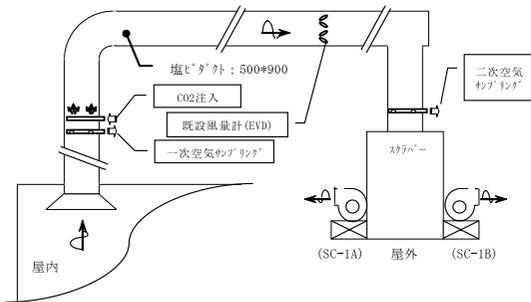


図-4 既設風量計とガストレ方式の計測位置

表-4 各系統の風量と検出差圧の関係

項目 系統名	ファン 運転条件 (周波数×台数)	ガストレ方式 計測風量値 Qg(m³/s)	EVD検出 差圧 Pev(Pa)	動圧比 Pev/Pv 各風量平均
スクラパー SC-1	30Hz×1台	1.032	9.1	4.16
	30Hz×2台	1.774	40.7	
	40Hz×2台	2.226	74.1	
スクラパー SC-2	30Hz×1台	0.898	6.1	4.00
	30Hz×2台	1.537	34.2	
	40Hz×2台	2.065	61.3	

- (3) 調査台数：2台（2系統分）
- (4) 調査部位：風量計本体（圧力伝送器など圧力導管以降含まず）

## 7.2 調査結果

表-4に結果の概要を示す。また、代表例として系統名“SC-1”での30Hz×2台運転状態におけるダクト内CO<sub>2</sub>濃度とCO<sub>2</sub>ガスポンベの重量変化の時間的推移を図-5に示す。尚、既設風量計EVDの目詰まりや劣化の有無を判断する目安として、表の右欄に示す検出差圧の動圧比を採用する。

## 7.3 考察

- (1) 表-4に示す結果から明らかなように、2系統何れも検出差圧特性が動圧の4倍程度を示している。この値はセンサの初期特性と同等であることから、メンテナンスは不要と判断できる。
- (2) このような既設風量計の検証において、従来方式のピトー管や熱線式風速計で対応することは計測環境上（整流器や直管部が確保できない）困難である。
- (3) 今回既設風量計の検証を通じて、ガストレ

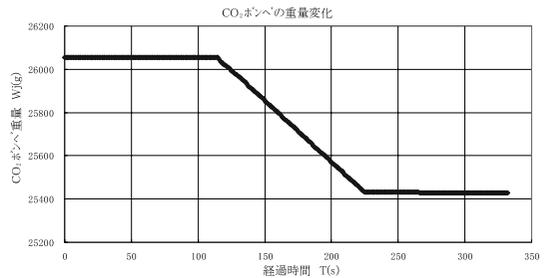
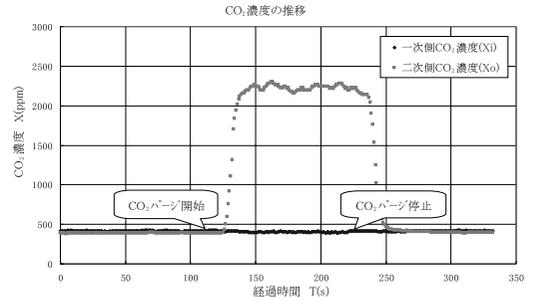


図-5 一次/二次側CO<sub>2</sub>濃度とCO<sub>2</sub>ポンベ重量の推移

式風量計測方法の実用性を確認することができた。

## おわりに

これまで述べてきた通り、ガストレ式の風量計測方法により、“既設風量計の校正”や“シンプル構造の差圧検出体に風量計としての機能を持たせる”ことが可能となることで、従来方式と異なる経済性や運用上のメリットが生まれる。

今後、実用面でのノウハウ（たとえば、注入地点から均一に拡散するまでの拡散距離に関するデータや二次側空気のサンプリングのあり方についての工夫など）の蓄積を急ぎ、市場の要求や期待に応えるとともに、ダクト内の風量計測以外への展開も積極的に図っていきたい。

## 参考文献

- 1) 井伊谷, 田中, 木村: 不活性ガス濃度法による気体流量の測定, 計測自動制御学会論文集, 6-1 (1970), p.39~44

(平成19年8月16日 原稿受理)