

トレーサーガスを用いた風道内の 風量計測方法の解説と応用事例

芝 吉治郎*

地球温暖化に端を発した、低炭素社会実現への社会システム改革は国を超えた共通課題として認識されつつある。建築業界においても、オフィスビルの空調設備や工場における生産設備への供給空気について、空気品質の追求だけでなく供給量を適切に管理することで、処理・搬送エネルギーを最適化し省エネや省コストを推進しようとする動きが高まっている。

この動きに対し、大きな障害となっているものとして空気の流量（風量）計測に関する難しさがあげられる。本稿では、従来の風量計にない特徴を備えた混合希釈法（以下ガストレ式と呼ぶ）による風量測定方法の概要と、このガストレ式風量計測と組み合わせることによって得られる検量線を利用した定置式風量計『GT センサー』についての実用例を報告する。

1. 従来の風量計測方法と問題点など

1-1. 測定方法

1-1-1. 絞り機構を用いる測定方法

流路断面を部分的に絞ることによって、その絞り

の前後に圧力差が発生する。この圧力差と風量に一定の関係があることを利用し、圧力差を測定することで風量を求める方法で、円筒流路での測定ができる。オリフィスやベンチュリー管（図1参照）などが代表的である。

計測環境は、図2に示すとおり、前後に十分な直管部や整流格子を設け、風速分布が定常で滑らかになっている点で測定することが大切である。

1-1-2. 風速計を用いる測定方法

流路断面を16分割以上（実際には流路徑や計測環境により適宜対応するケースが多い）に等分割し、各分割断面の中心における風速の平均値と流路断面積を乗じることにより求める方法で、円筒・矩形いずれの流路にも利用でき、簡便な方法として多く採用されている。ピトー管や熱線風速計が代表的である。

計測環境は図3に示すとおり、絞り機構による測定方法よりわずかに緩やかな条件になる。図4は円筒、矩形ダクトにおける風速の測定点である。

1-1-3. ドップラー効果を用いる測定方法

流路内を横断する音波の時間遅れ（ドップラー効果）が、風速と一義的な関係を持つことを利用し、風量を求める方法で、円筒流路での測定ができる。超音波流量計が代表的である（図5参照）。

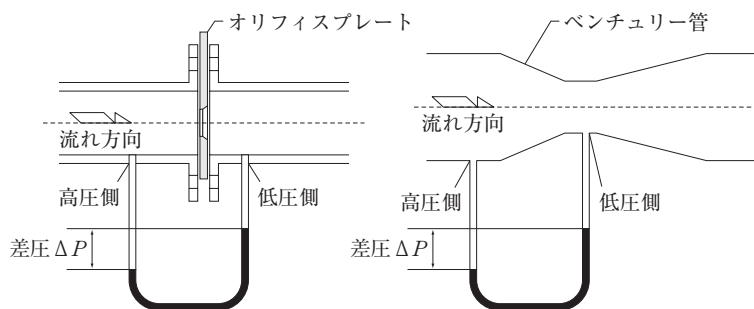


図1 オリフィスやベンチュリー管による風量計測

* Yoshijirou SHIBA；(株)芝田技研 代表取締役社長
(Tel. 03-5935-7801)

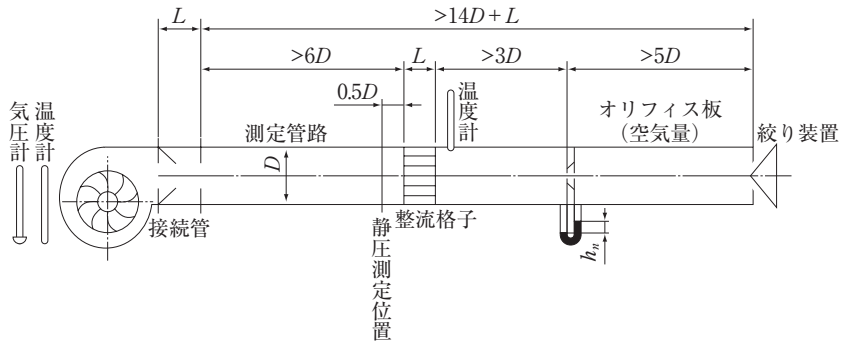


図2 オリフィスを用いた送風機の風量計測に関する規格 (JISB8330)

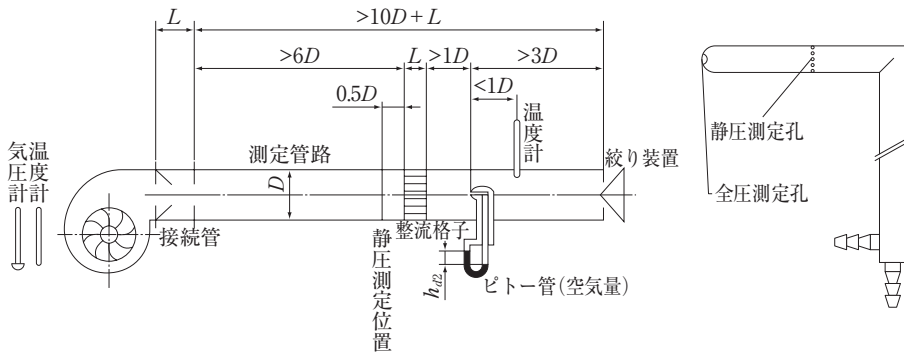


図3 ピトー管を用いた送風機の風量計測に関する規格 (JISB8330) とピトー管

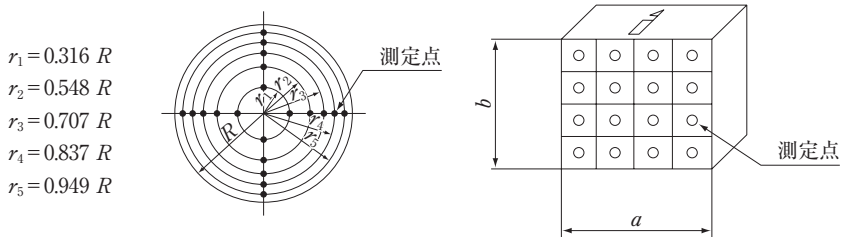


図4 円筒、矩形ダクトにおける風速の測定点 (JISB8330)

1-2. 測定上の問題点

従来の測定方法の多くは、流体力学をベースとしているため、流路内の流れの状態（風速分布）により測定精度が支配されるという大きな問題を抱えている。さらに、測定方法によっても固有の問題がある。これらを表1にまとめた。

1-3. 校正について

流路内に常設される風量計も他の計測機器同様、次に示す2つのケースにおいて、校正が必要である。さらに、校正する上で重要なことは、風量計が設置されている環境下で、いい換えれば流れの状態が同一の条件下で校正しなければならない。

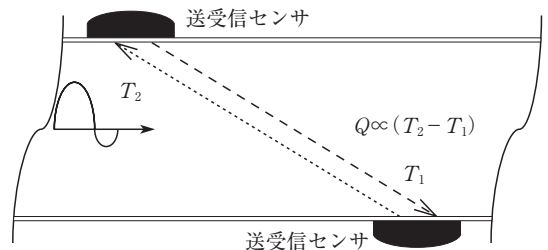


図5 伝播時間差方式

1-3-1. 初期校正

先述のとおり、従来の風量計は測定精度が設置された断面の風速分布によって支配される。この風速

表1 従来風量計の問題点

No.	計測機器	問題点
1	オリフィス ベンチュリー管	絞り機構を有するため自身の圧力損失が大きく、無駄なエネルギーを消費することになる
2	ピトー管や 熱線式風速計	分割断面（16分割以上）中心部での多点測定を行い、代表風速を求めるため、時間的負担が高く、測定者の熟練度によって測定結果が左右される（図4に示す風速測定点参照）
3	共通	測定精度が風速分布に支配されるため、測定点の上流・下流域に十分な直管部と整流装置が必要
4	共通	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検証が困難
5	共通	一般的に、測定精度がフルスケールで表示されるため低風量域での誤差の悪化が著しい

分布は風量計前後の配管の組み合わせによって異なるため、設置されたその環境で、測定値の確かさを調べる必要がある。

1-3-2. 定期校正

流路内にいったん設置された風量計は、金属配管に覆われているため、内部で進行するセンシング部の汚れ・目詰まりおよび劣化などの状態確認ができない。測定値に異常を引き起こすこのような事象は、徐々に進行することが多く、気が付かずに測定精度が悪化するケースがある。そのため、定期的な校正は必須である。

2. 風量計のあるべき姿

省エネの推進や設備機器などを最適に運用するためのツールとして風量計を捉えた場合に、望まれる機能を要約すると次のようになる。

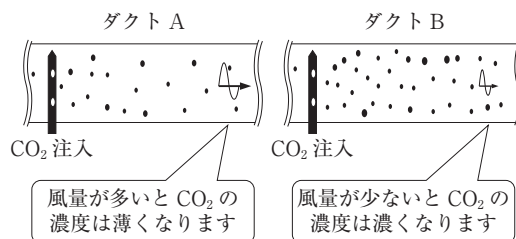
① 測定値の確かさとその確認

風量計が配管上に設置された、そのままの状態でも風量指示値の妥当性が検証できること。風量の測定精度は計測断面の風速分布によって支配され、この分布は配管の組み合わせで決まる。そのため、使用している設置環境で測定値の妥当性を確認する必要がある。

② 設置制約の緩和

計測環境として必要な風量計測機器前後の直管部

ダクト A・B の風量を知りたいとき、ダクトの上流からトレーサガスとして CO₂ ガスをダクト内に注入する



注入した CO₂ ガスの量と、注入した後のダクト内の CO₂ 濃度が分かれば、風量を求めることができる。

図6 ガストレ式風量計測方法の概念

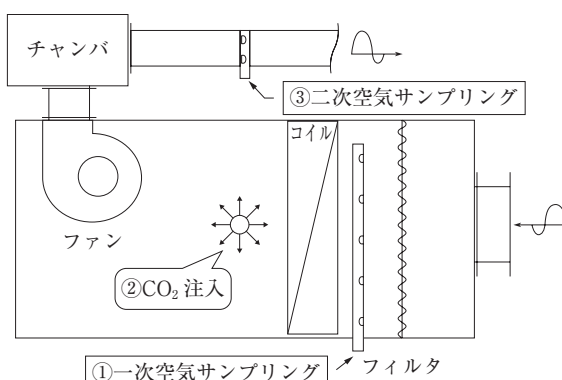


図7 空気調和機 (AHU) での風量計測例

が短縮化できること。これにより、配管設計の自由度が高まり、最適設計が可能になる。

③ 圧力損失が少ない（空気抵抗が低い）

風量計自体の圧力損失が少なく、送風機の負荷を上げない構造であること。たとえば、風量が 3,000 m³/h で、900 Pa の圧力損失がある風量計を用いた場合、年間の経済損失は約 15 万円に達し、余剰な CO₂ の排出量は 6 t にも及ぶ（試算条件：15 円/kWh, 0.555 kg-CO₂/kWh, ファン効率 0.65, 24 h 運転）。

以上、従来風量測定の問題点、および①～③の機能を備えた風量計を提供するため、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 GT センサーを開発した。

3. ガストレ式風量計測方法の概要と仕組み

3-1. 概要

ガストレ式風量計測方法は、混合希釈法に基づいている。測定原理は、流路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ーガスを注入する。この注入域から適切に距離を隔てた下流域で、注入したガスがどれだけ希釈されたか、さらにその時のトレーサーガス注入量がどれだけであったかを基に風量を求める方法である。この方法は数十年前から提唱されており、トレーサーガスとしてSF₆を用いるケースもあるが、ここではCO₂を採用している。この理由は、地球温暖化係数がSF₆に比べ遙かに低いこと、さらに、CO₂ガス分析器は高精度でポータブルなタイプが豊富であり、比較的安価に提供されている点などがあげられる。図6は、ガストレ式風量計測方法の概念を示している。

3-2. 仕組みと操作

具体的な計測方法について計測イメージ(図7: AHUでの風量計測例)を基に説明する。

① 一次空気サンプリング操作

CO₂ガスはわずかであるが空気中に含まれており、その割合は時間や場所によっても異なる。そのため、一次側のCO₂濃度(CO₂を注入しても影響を受けない領域でのバックグラウンド)を計測する。

② 注入操作

一次空気サンプリングの下流域でトレーサーガスとなるCO₂ガスを被測定流体である空気中に注入する。この注入量は液化CO₂ボンベの重量変化として表れ、重量計で計測する。

③ 二次空気サンプリング操作

空気中に注入したCO₂ガスが拡散混合した領域で二次側空気をサンプリングし二次側のCO₂濃度を計測する。

④ 分析操作

①と③の操作で得られたCO₂の濃度差、②で得られたCO₂注入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次式(1)で風量を算出する。

$$Q = \frac{R(\theta, P) \cdot W_p}{\int (X_o - X_i) dt} \quad (1)$$

ここに、 $R(\theta, P)$ はCO₂のパーセント質量と体積を関係づける関数、 θ は被測定流体の温度、 P はダクト内絶対圧力、 W_p はCO₂注入量、 X_i/X_o はそれぞれCO₂パーセント期間中の一次/二次側のCO₂濃度とする。

3-3. 計測上の要点

3-3-1. 機器の校正

ガストレ式の測定精度を大きく支配する要素として、CO₂のバックグラウンドや混合希釈後のCO₂濃度を計測する分析計、および流路内へのCO₂注

入量を求める重量計がある。この2つの要素については、基準ガスや基準分銅を用いて、実際に計測する現地でそれぞれの機器を直前に校正することが望ましい。

3-3-2. サンプリングポイントの適性判断

分析機器を除いた計測に関わる誤差要因として、トレーサーガスの拡散状態がある。十分な拡散(均一混合)が得られない環境で二次側空気をサンプリングし、代表値として扱った場合、測定誤差が大きくなる。この拡散状態を確認する目的で、サンプリングポイントを適宜移動し、測定結果が同じであることを確かめる方法や、同一のサンプリング断面でサンプリング位置を変えて多数サンプリングし、統計的処理を施す方法がある。いずれにしても、注入ポイントから十分な拡散距離を設けることが望ましい。たとえば、送風機やチャンバ、エルボなどを介することで、トレーサーガスの混合拡散が加速されることが分かっている。

3-3-3. その他

一次空気や二次空気をサンプリングする際に、トレーサーガスを吸着する材質のチューブの使用や、トレーサーガス分析計の妨害となるガス雰囲気下での計測は避けるべきである。

4. ガストレ式風量計測の留意点と対応策

4-1. 留意点

ガストレ式はトレーサーガス(CO₂)を注入している時だけ風量が計測できる一過性であるため、既設風量計の校正などに有効であるが、連続して風量を計測するには常時CO₂を注入する必要がある。この問題を解決するため次の対応策を講じる。この方策により、無駄なく連続的に風量を監視することができ、冒頭に述べた風量計測の目的を達成することができる。

4-2. 対応策

先述のピトー管やオリフィスのように風量の変化に応じて検出差圧が変化する簡便な差圧検出体(多孔ピトー管の組み合わせなど)を測定対象の流路内に設置し、次の要領で風量と検出差圧の関係を求める。

① 風量の計測

流路内を流れる風量を一定に保ち、ガストレ方式でその時の風量を求める。

② 検出差圧の計測

①の操作と並行して流路に設置した差圧検出体からの検出差圧を計測する。

表2 風量計測値とGTセンサー検出差圧

No.	試験条件と環境		ガストレ計測風量 Q_{gt} [m ³ /s]	試験体GTセンサー	
	ファン Hz [1/s]	空気密度 ρ [kg/m ³]		検出差圧 ΔP_{gt} [Pa]	センサー係数 α [-]
1	30	1.213	6.733	34.4	0.745
2	38	1.213	8.057	51.2	0.731
3	45	1.213	9.671	73.1	0.734
TL				平均 α_{av}	0.737

$$Q_{gt} = A \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta P_{gt}} \quad (2)$$

ここに、 A はダクトの断面積 [m²]、 ρ は空気密度 [kg/m³] を示す。

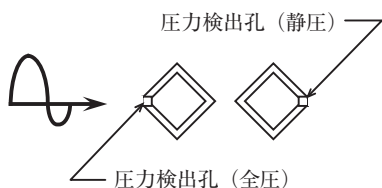


図8 差圧検出体(多孔ピトー管)の断面

③ 風量の変化と計測の繰り返し

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が明らかになると、両者の関係をグラフや数式化することで検量線ができる。いったん、この検量線ができればトレーサーガスを注入しなくても差圧検出体の検出差圧を基に風量を求めることができるようになる。このように差圧検出体からの検出差圧とガストレ式風量計測による風量値を関係づけることで、差圧検出体に風量計としての機能を付加させた状態を以降『GTセンサー』と呼ぶ。

5. ガストレ式風量計測方法やGTセンサーの特徴

5-1. ガストレ式風量計測方法の特徴

既存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ができた。

① 測定原理が流体力学によらないため、測定精度が風速分布に支配されない。このことにより、これまでネックであった流れを整流する必要がなく、複雑に組み合わされた配管の風量でも正確に計測できる。

② 従来困難であった、既設風量計の指示値検証が流路に設置されたあるがままの状態で行える。

③ 風量の多少に関わらず、簡便に高い測定精度で計測できる。

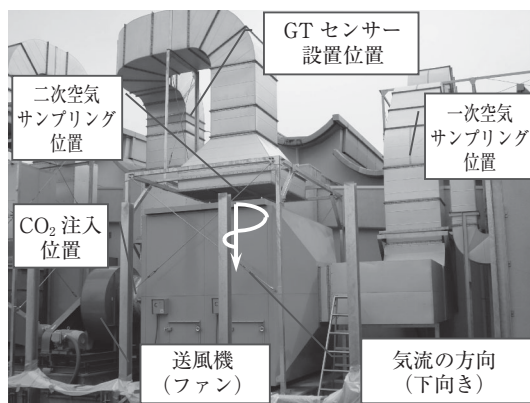


写真1 GTセンサーの設置環境

5-2. GTセンサーの特徴

シンプル構造の差圧検出体をガストレ式風量計測方法にて校正したGTセンサーの特徴を述べる。

① 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。

② 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。

③ 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. GTセンサーの活用事例

某公共施設の換気設備の風量を管理するために設けたGTセンサーの事例を紹介する。

6-1. 設備の概要

- ・ダクトサイズ：1,000×1,200
- ・風量調整：インバータ
- ・GTセンサーの構造と仕様
差圧検出体の材質：SUS304

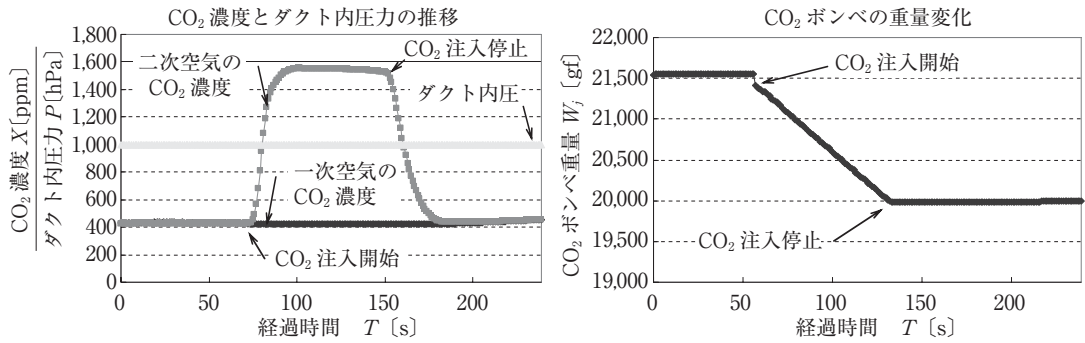


図9 CO₂ の濃度推移と CO₂ ボンベの重量変化

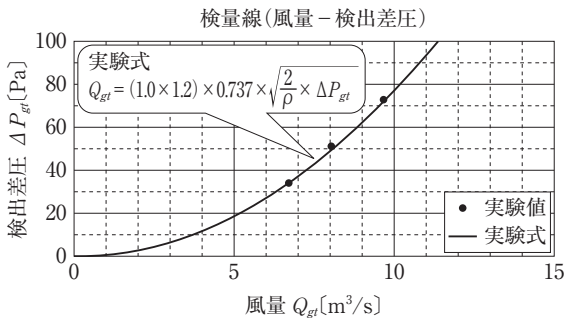


図10 検量線

差圧検出体の構造：菱形の中空体（図8参照）

圧力損失：3.5 Pa（常用風量にて）

・GT センサー設置環境：写真1参照

6-2. ガストレ式風量計測と差圧検出体の検出差圧調査

先述のとおり、GT センサーはガストレ式風量計測方法を用い差圧検出体が設置された環境下で、差圧検出体の検出差圧と風量の間どのような相関があるかを調べる必要がある。この結果について概要を表2に示す。

また、代表としてファン運転周波数を 30 Hz とした試験条件下でのダクト内 CO₂ 濃度と CO₂ ボンベ重量の時間的推移を図9に示す。

なお、表2に記載したセンサ係数 (α) は、式(2)に示すようにGTセンサーとなる差圧検出体の検出差圧 (ΔP_{gt}) とガストレ式で計測した風量 (Q_{gt}) を関係づける係数であり、風量の変化に対してこの数値が一定であることが、風量計としての評価基準になる。

6-3. 検量線の作成

以上の調査結果から、GT センサーの特性を表す検量線を作成する。さらに、この特性を数式化(実験式)することでGTセンサーの検出差圧 (ΔP_{gt}) から簡単な開平演算で風量や風速を求めることができるようになる。なお、図10に検量線と実験式を示す。

6-4. 結果総括

本事例では、送風機吐出域で直前に消音装置を持つ気流が乱れた計測環境にある。従来の風量計では整流装置は無論のこと、風量計の上流に相当の直管部分を設ける必要がある。仮に、このような計測条件下に設置した場合、大きな測定誤差が伴う。GTセンサーのメリットは、本来発生するこの誤差分を含めて検量線を作成(現地でゲージング)することにある。

このようなことから、GTセンサーは測定値の正確性はもちろん、ランニングコストなどの経済性も含めて、複雑な配管が行われているフィールドにおいて、有効な風量計といえる。

7. おわりに

ガストレ式風量計測方法は、数十年前に提唱された測定原理であるが、世間的な認知はきわめて低いといわざるを得ない。一方、空調設備などで磨き上げられた空気は、電気やガスと同じエネルギー媒体であることから、環境経営の観点からも、これからは風量の絶対量管理が必要になってくるものと推察する。その際に、この計測手法やGTセンサーがお役に立てれば幸いである。