走行台車を用いた気体低流速標準の研究

寺 尾 吉 哉*・高 本 正 樹*

Low Velocity Standard for Air Flow Using a Towing Carriage

Yoshiya TERAOKA* and Masaki TAKAMOTO*

Measurements of low range air flow velocity have been important to monitor the ventilation rate in buildings and coal pits. In recent years air flow velocity measurement, especially in the range below 0.5 m/s, has become more important in testing and controlling of industrial clean rooms.

However, there has been no practical standards for low range air flow velocity so that there is a major problem of incompatibility between velocimeters made by different manufacturers.

In the present study, the standard of low range air flow velocity has been established using a towing carriage which moves on a 45 meters long rail placed in an underground tunnel. An ultrasonic velocimeter was calibrated using this apparatus in the velocity range from 0.05 to 0.6 m/s. As a result of detailed estimation it is found that the uncertainty of the calibration is sufficiently minimal.

In order to supply the standard, the secondary standard velocimeters of the major manufacturers and users were calibrated. The standard established in this research is expected to make a considerable contribution to accurate measurements of low range air flow velocities in various fields.

Key Words: air flow velocity standard, low velocity, velocimeter calibration, towing carriage, clean room

1. はじめに

気体、主として空気の低流速域での流速測定は従来より炭坑の安全確保を目的とした通気量測定¹⁾のため、また労働環境の指標の一つとしての室内空気流の測定

のために重要であった。また、近年ではクリーンルームの完工検査や運転管理のために 0.5 m/s 以下の非常に低い流速域での流速測定が強く要求されるようになった。

この分野の規格として、日本工業規格では JIS T 8202-1976 (携帯用熱式風速計) および JIS M 7606-1978 (鉱山用熱式風速計) が定められている。JIS T 8202 では最大目盛値 2 m/s 以下の風速計に最大目盛値の 5 % 以内の精度を、JIS M 7606 では最大目盛値 5 m/s 以下の風速計に最大目盛値の 5 % 以内の精度を規定しているが、クリーンルーム内の気流測定を対象としていないため、あまり参照されていないのが現状である。また、国際規格では ISO 7726²⁾に風速測定に関する規定があり、0.05~1 m/s の範囲で要求される精度を指示値の 5%+0.05 m/s、また望ましい精度を指示値の 7%+0.02 m/s としている。米国 IES (Institute of Environmental Sciences) の推奨規格³⁾では風速計の精度を 0.25~1 m/s の範囲で 2 % と規定している。規格ではこのように風速計の精度を定めているが、その校正方法については IES 規格に「風洞内で NBS (現 NIST: National Institute of Standard and Technology) またはこれと同等な 1 次国家標準にトレーサブルな校正を行う」と述べられている以外に明確な規定がない。

このため、特に国内では現在多数のメーカから流速計が市販されているにもかかわらず、低流速域での流速標準が確立されていないので、その値付けは各メーカに任されている。市販されている多数の流速計の比較試験を行った結果、流速計の指示値には数 10 % にもものぼる大きな差があることが報告されている⁴⁾。本研究はこのような状況を踏まえ、低流速域の国家標準の実現と供給を目的として、(社)日本産業機械工業会、超清浄空間評価基準に係わる調査研究委員会との協力のもとに実施された。

低流速域で流速計を校正するには、特別に設計され

* 計量研究所 つくば市梅園 1-1-4

* National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba

(Received July 12, 1989)

(Revised September 7, 1989)

た低速用風洞を用いる方法と、静止流体中で流速計を一定速度で運動させる方法がある。前者で最も大きな問題は基準流速の測定方法である。一般的に用いられるピトー管は動圧が小さくなり、またピトー管係数が 1 とみなせなくなる⁶⁾ために使用できないので、従来から熱や煙をトレーサとしてその移動速度を検出する方法が用いられてきた^{6), 7)}。この方法は熱や煙を発生するワイヤの後流の影響でトレーサの移動速度が主流よりも小さくなるという欠点がある。高木⁸⁾は加熱ワイヤとセンシングワイヤを小さなプローブにまとめた場合に熱トレーサの移動速度が主流流速の 82% になることを報告している。藤井ら⁹⁾は風洞測定部の上流にスモークワイヤを置き、煙の通過をレーザーで検出して基準流速を求め、流速計を校正している。この方法では後流の影響は比較的小さいと思われるが、定量的には明らかにされていない。また、低流速では煙や熱トレーサの浮力の影響が顕著になることも考えられるが、この点を明らかにした研究は見あたらない。

近年は、レーザードップラ流速計 (LDV) に周波数シフタを用いることによりきわめて低流速での測定が可能になった。米国 NIST では LDV を基準として風洞内で流速計の校正を行っている^{10)~15)}。風洞は長さ 6.1 m、高さおよび幅 0.91 m の測定部をもち、発生可能な流速域は 0.05~16 m/s である。通常、LDV による気体の測定では測定部の上流で粒子を注入する必要がある流れを乱す要因となるが、ここでは人工的なシーディングを行わずに測定ができると報告されている。

また、応答の速い熱線流速計を一樣流中で振動させ、2 m/s 以下の低流速域で基準風速計を用いずに校正する方法も提案されている¹⁶⁾。

一方、静止した流体中において流速計を一定速度で運動させる方法は、基準となる速度が流速計プローブの運動速度として比較的容易に求められること、流速計の周りに安定な低流速流れを実現できることが特長である。この方法では、移動手段として回転腕もしくはターンテーブルを用いると流速計やその支持装置の後流の影響を避けることができないので、流速計を直線運動させなければならないが、応答の遅い流速計を校正するためには走行距離が長くなり、装置が大がかりになる欠点がある。また、間欠的にしか測定できず、測定部の空気を十分静止させるためには測定の間十分な時間を置く必要があるので校正に長時間を要することも欠点であ

る。これまでに、Aydin and Luetherusser¹⁷⁾ や Tabatani, et al.¹⁸⁾ の例があるが、Aydin-Luetherusser では走行距離 10 m、Tabatani, et al. では 4 m と比較的小規模である。国内では高木⁸⁾が航空機実験用の走行実験設備 (走行距離 185 m)¹⁹⁾を用いて熱トレーサを使った流速計の校正をしているが、0.4 m/s 以下で空気のゆらぎの影響がみられた。したがって、通常の建築物の内部では、自然対流などの原因で測定部の空気を十分静止させることができないと思われる。

本研究では、上記の諸問題を考慮したうえで校正の不確かさを小さくすることを第一に考え、台車上に流速計を載せ直線レールの上を走行する方法を採用した。十分な測定時間を確保するためレール長は 45 m とし、自然対流の影響を避けるため装置は地下トンネル内に設置した。地下トンネル内はきわめて安定した環境にあるため、このなかで流速計を載せた台車を走行させることで、非常に不確かさの小さい低流速の標準が実現できた。この報告では、装置の概要と校正法ならびに 0.05~0.6 m/s の範囲で超音波流速計を校正した場合の不確かさについて報告する。また、この装置を用いて流速計のメーカーならびにユーザの基準流速計を校正し標準供給を行ったので、これについても述べる。

2. 装置の概要

2.1 走行台車

台車は Fig. 1 に示すように長さ 1 m、幅 0.7 m のアルミ製で、4 個のプラスチック製車輪により支持される。台車の前後には長さ 1 m のアームがあり、その先端に支持金具により流速計プローブを取り付けることができる。形状は前後対称なので図中の A、B どちらの方向でも校正ができる。速度を検出するためのロータリエンコーダは支持車輪とは別の鉄製車輪でレールに接しており、台車が 0.5 mm 移動するごとにパルスが発生する。

装置の全体を Fig. 2 に示す。トンネルの床上 0.7 m に上面および側面を機械加工した鉄製のレールが

Fig. 1 Towing carriage

Fig. 2 Calibration apparatus in an underground tunnel

45 mにわたり設置されている。レール端の床上に直流モータがあり、ワイヤロープで台車を牽引する。速度は0.001~5 m/sの範囲で0.001 m/s刻みで設定できる。モータ回転数を一定にするためモータ出力をフィードバック制御している。

この装置が設置されたトンネルは高さ2.85 m、幅2.86 m、長さ400 mで、このうち約50 mを本装置で利用している。トンネルは地下8 mにあり二重構造の壁が設けられているため、内部の環境は非常に安定で、気温変動は年間で2°C以内である。トンネル内部の空気をさらに安定させるため、装置が置かれた部分の両側の断面をカーテンで仕切り、さらにレールの中央部約38 mにビニールシートの覆いを設けこのなかを測定部とした。

2.2 測定機器

測定器の構成をFig. 3に示す。台車上にデータロガーがあり、測定中に流速計の電圧出力とロータリエンコーダパルスの積算値を記録し、測定終了後に流速計出力の平均値を演算しワイヤレスモデムを経由してパーソナルコンピュータへ転送する。また、ロータリエンコーダパルス積算値の測定開始時と終了時の値もパーソナルコンピュータへ転送され走行速度が求められる。走行速度の設定と発進停止およびデータロガーの制御はパーソナルコンピュータにより行えるので被

Fig. 3 Data acquisition system

試験流速計を台車に取り付けた後は無人運転が可能である。

3. 超音波流速計の校正

3.1 校正手順

本装置により市販の超音波流速計を校正した。この流速計はクリーンルーム用として市販されているもので、3組の超音波振動子により流速ベクトルの3成分を測定する。測定レンジは1~10 m/s間で可変である。ここでは1 m/sレンジを使用した。応答速度は0.5 sとされている。

校正の設定流速は0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 m/sの8点で、各流速において5回繰り返し測定を行った。Fig. 1に示す位置に流速計プローブのZ軸を台車の進行方向に向けて取り付けた。走行方向はA方向である。後で述べる定常流の評価のために0.5 m/sではB方向でも5回の測定を行った。測定部の空気を十分静止させるために、1回目は測定者が室外に出てから60分以上経過後に開始し、2回目以降の測定には30分以上の間隔を置いた。

各測定では、流速計の x , y , z 出力をそれぞれサンプリング周波数5 Hzでデータロガーに取り込んだ。データ収録は台車が発進する20秒前に開始し、台車が28 m走行した時点で終了した。発進前の20秒間の出力を x , y , z の各成分ごとに平均し、これを無風時の出力とした。発進後5 mを出力を安定させるための助走区間とし、助走区間通過後からデータ収録終了までの間の出力を成分ごとに平均した値から流速計指示値を算出した。

3.2 器差の算出

1回の測定ごとに次式により器差 U_e を求め、5回の測定についての平均を各設定流速における流速計の器差とした。

$$U_e = U_m - U_a \quad (1)$$

ここに、

U_e : 1回の測定で求められた流速計の器差

U_m : 流速計指示値

U_a : プロブ周りの空気の流れ, 基準流速

流速計指示値 U_m は, x , y , z 各方向の出力を無風時と測定区間のそれぞれで時間平均した値から次式により求めた流速ベクトルの絶対値である.

$$U_m = K_m [(E_x - E_{x0})^2 + (E_y - E_{y0})^2 + (E_z - E_{z0})^2]^{0.5} \quad (2)$$

ここに,

K_m : 流速計出力電圧から流速への換算係数, 1 V/s/m

E_x, E_y, E_z : 流速計出力電圧, それぞれ x , y , z 方向の成分を示す.

E_{x0}, E_{y0}, E_{z0} : 無風状態での流速計出力電圧

台車が一定速度で走行していても基準流速 U_a すなわちプロブ周りの流速と台車速度 U_c は厳密に一致するとはいえない. その原因として第一に台車が前方の空気を押し除けるために起こる, いわゆる排除効果がある, 第二に測定部の空気が十分静止せず, 流れが残留していることの影響が考えられる. したがって,

$$U_a = U_c + U_f + U_d \quad (3)$$

ここに,

U_c : 台車の移動速度

U_f : 測定部の残留流れの影響

U_d : 台車の排除効果による影響

とし, U_c, U_f は後述の方法でそれぞれの値を見積った.

また, 台車速度 U_c はロータリエンコーダパルス積算値および測定時間より求めた.

$$U_c = N_p L_p / T_m \quad (4)$$

ここに,

N_p : エンコーダパルス積算値

L_p : 1 パルスあたりの台車の移動量, 0.5 mm

T_m : 測定時間

3.3 台車の排除効果による影響

台車の排除効果を評価するためには台車周りの流速分布を把握することが必要であるが, レイノルズ数が小さいために実際の台車またはその模型の周りの流速を測定することはかなり困難である. このため本研究では数値解析により台車周りの流れ場を明らかにした²⁰⁾. 使用したハードウェアは工業技術院情報計算センターの CRAY X/MP, ソフトウェアは Fluid Dynamics International 社の FIDAP である. Fig. 4 に示すような 2 次元モデルを用いて台車速度 U_c が 0.01~1 m/s の範囲において計算を行った. U_c が 0.1 m/s 未満では層流として, これ以上では $k-\epsilon$ モデルを用いた乱流として, 計算した. また, 台車上に流

(a) Dimension

(b) Boundary condition

Fig. 4 Example of calculation model

Fig. 5 Contour of calculated velocity distribution

速計本体を搭載することにより台車の体積が増加するが, この場合は流速計本体の進行方向への投影面積を台車の幅で除した長さを台車の高さに加算し近似的にその影響を調べた.

その結果, 流速計取り付け位置での流速は台車速度よりも小さくなり, すなわち(3)式の U_d は負であり, その絶対値が最も大きくなるのは $U_c = 0.01$ m/s で, 流速計本体を台車上に載せた場合であることがわかった. この場合に Fig. 5 に示す流速分布が得られ, U_d は U_c の -0.2% であった. 本来ならばこの結果より $U_d = -0.002U_c$ とすべきであるが, U_d の絶対値が小さいことと, モデルが 2 次元であり実際の流れとの差異が明確でないことから $U_d = 0$ とし, その不確かさを若干の安全率を見込んで $\delta U_d / U_c = 0.3\%$ と見積った. このように考えられる最大限の不確かさに対する寄与は小さい.

3.4 測定部の残留流れの影響

測定部の空気が静止していることは本研究で採用し

た校正法にとって最も重要なことである。これを確認するために測定中に被校正流速計と同型の流速計をレーン側に設置し出力を記録したところ、台車が発進する直前には出力波形の変動の振幅は常に $\pm 0.003 \text{ m/s}$ 以下になっていた。しかし、流速計の零点のドリフトが変動の振幅と同程度であるので、平均流速は観測できない。したがって、この方法で観測されるのは比較的小さいスケールの小さい空気のゆらぎであり、校正される流速計の出力は測定区間全体で平均されるのでこのようなゆらぎの影響は受けにくいと思われる。むしろ、校正結果に影響を及ぼすのは測定区間全体にわたる大きなスケールの流れである。加えてこのような流れが時間的に安定に存在した場合、その影響は多数回の校正結果の平均をとることで除去できない。

この定常流の影響を見積るため、設定速度 0.5 m/s において台車の進行方向を変えて各 5 回の測定を行った。その結果を Fig. 6 に示す。A, B 両方向で測定された器差 U_e の平均値および標準偏差の推定値を併せて図中に示した。測定方向による器差の平均値の差は統計的に有意ではない。したがって、測定部の空気は 5 回の測定値の平均値の偶然不確かさの範囲内で静止していると考えられるので、測定部の流れの影響 $U_f = 0$ とした。その不確かさ δU_f は、 U_e の平均値の偶然不確かさに等しいとして ASME PTC 19.1²¹⁾ に従い次式で算出した。

$$\delta U_f = \frac{t}{\sqrt{n}} U'_e = 0.00179 \text{ (m/s)} \quad (5)$$

ここに、

U'_e : U_e の標準偏差の推定値 (不変標準偏差), 0.00144 m/s

n : 測定回数, 5 回

t : U_e の平均値の自由度 ($n-1=4$) に対する対称学生 t 値, 2.776

Fig. 6 Comparison of instrument error obtained from measurements in direction A and B

Fig. 7 Calibration result of ultrasonic velocimeter

3.5 校正結果

超音波流速計の器差が Fig. 7 に示すように求められた。校正範囲全域にわたり指示値は基準流速よりも低い値を示している。プローブ自身の影響により超音波振動子間の流れが、周囲の流れよりも遅くなっているためと考えられる。ただし、直線性、再現性ともに高いのでゲインの調整によって十分器差を小さくできる。

3.6 不確かさの解析

(1) 系統的な不確かさ

校正により求められた器差の系統的な不確かさを ISO 5168²²⁾ならびに ASME PTC 19.1²³⁾に従って求めた。

(1)~(4)式に現れる独立な変数について不確かさ、感度係数ならびに器差の不確かさに対する寄与を求め、これらを組み合わせて器差の不確かさを求めた。結果を Table 1 に示す。前述の U_f , U_a 以外の変数の不確かさは以下のとおり見積った。

●電圧測定 ($E_x, E_y, E_z, E_{x0}, E_{y0}, E_{z0}$) の不確かさ

データロガーをメーカ保証精度が指示値の $0.03\% + 0.1 \text{ mV}$ であるマルチメータと比較したところ、指示値の $0.1\% + 0.25 \text{ mV}$ で一致した。したがって、電圧測定の不確かさは、指示値の $0.1\% + 0.3 \text{ mV}$ とした。

●測定距離 (N_p, L_p) の不確かさ

台車を 5 m 走行させ、エンコーダパルスより求めた走行距離と JIS 1 級の巻尺 (不確かさ 0.02%) と比較したところ、10 回の平均偏差が $+0.006\%$ であった。したがって、 L_p の不確かさを 0.02% すなわち 10^{-7} m とした。 N_p の不確かさもこれに含まれる。

●測定時間 (T_m) の不確かさ

メーカの保証により 0.02% とした。また、念のため市販のカウンタとも比較し一致することを確認した。

Table 1 より実質的に影響があるのは E_z , U_a , U_f の不確かさのみであることがわかる。ここで求めた系

Table 1 Systematic uncertainty

Parameter	Approximate value	Uncertainty (Bias limit) δ_i	Absolute value of sensitivity coefficient $ \theta_i $	Product $ \theta_i \delta_i$ (m/s)
E_x	0~0.01 (V)	$10^{-3}E_x + 3 \times 10^{-4}$ (V)	$ E_x - E_{x0} /K_m^2 U_m < 0.01$	$0 \sim 10^{-6}$
E_y	0~0.01 (V)	$10^{-3}E_y + 3 \times 10^{-4}$ (V)	$ E_y - E_{y0} /K_m^2 U_m < 0.01$	$0 \sim 10^{-6}$
E_z	U_c (V)	$10^{-3}E_z + 3 \times 10^{-4}$ (V)	$ E_z - E_{z0} /K_m^2 U_m \approx 1$	$0.001 U_c + 3 \times 10^{-4}$
E_{x0}	0~0.01 (V)	$10^{-3}E_{x0} + 3 \times 10^{-4}$ (V)	$ E_{x0} - E_x /K_m^2 U_m < 0.01$	$0 \sim 10^{-6}$
E_{y0}	0~0.01 (V)	$10^{-3}E_{y0} + 3 \times 10^{-4}$ (V)	$ E_{y0} - E_y /K_m^2 U_m < 0.01$	$0 \sim 10^{-6}$
E_{z0}	0~0.01 (V)	$10^{-3}E_{z0} + 3 \times 10^{-4}$ (V)	$ E_{z0} - E_z /K_m^2 U_m \approx 1$	3×10^{-4}
U_d	0	$0.003 U_c$	1	$0.003 U_c$
U_f	0	0.00179 (m/s)	1	0.00179
N_p	46,000	0	—	—
L_p	0.0005 (m)	10^{-7} (m)	$N_p/T_m = 2000 U_c$	$2 \times 10^{-4} U_c$
T_m	$23/U_c$ (s)	$2 \times 10^{-4} T_m$	$N_p L_p/T_m^2 = U_c^2/23$	$2 \times 10^{-4} U_c$

$$\text{Systematic uncertainty: } \delta(U_e)_s = \sqrt{\sum \theta_i^2 \delta_i^2} = \sqrt{(0.00317 U_c)^2 + (0.00184)^2} \text{ (m/s)}$$

統不確かさは校正される流速計の特性を含まないので、他の流速計の校正にも適用できる。

(2) 偶然不確かさ

5回の測定平均値として得られた器差の偶然不確かさ $\delta(U_e)_r$ は(5)式と同様に求めた。

$$\delta(U_e)_r = \frac{t}{\sqrt{n}} U'_e = 1.241 U'_e \quad (6)$$

偶然不確かさは校正装置と校正される流速計双方の再現性を含んでいる。

(3) 総合不確かさ

各流速において上述の方法によって求めた系統ならびに偶然不確かさ、これらの2乗平均として求めた総合不確かさ(95%包括度)を校正結果とともに Table 2に示す。総合不確かさを通常用いられる1次式で表わすには基準流速の $0.25\% + 0.002 \text{ m/s}$ とすれば、Table 2に示した値はすべてこれ以下となる。ここで求めた不確かさは校正された超音波流速計の不確かさを含んでいる。装置の不確かさは1章で述べた規格に規定された精度に比べて十分に小さく、本装置は1次標準として満足できる水準であるといえる。また、偶

然不確かさよりも系統的不確かさが常に大きく、全体として U_f の不確かさが支配的である。

4. 標準の供給

4.1 標準供給の概要

標準を供給し、トレーサビリティを確立するために国内の流速計メーカならびに大手ユーザの基準用流速計が本装置によって校正された。第1回の校正は1989年前半に行われ、対象の流速計はメーカ7社より7台、ユーザ8社より9台の計16台であった。形式別の内訳は熱式が12台、超音波式が5台である。校正流速は0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m/sの5点で、各流速での測定手順は3章で述べたものと同じである。ただし、熱式流速計の中に応答の遅いものがあったので、機種ごとに出力波形を観察し、助走区間の距離を5~10mの範囲で変化させた。また、熱式流速計は無風時の出力値を測定値から差し引かず、無風時の器差として別に表示した。

4.2 校正結果

Fig. 8 は全体の校正結果である。校正流速全域に

Table 2 Calibration result and its uncertainty

Standard velocity U_a m/s	Error of velocimeter U_e m/s	Standard deviation U'_e m/s	Systematic uncertainty $\delta(U_e)_s$ m/s	Random uncertainty $\delta(U_e)_r$ m/s	Overall uncertainty	
					$\delta(U_e)_a$ m/s	$\delta(U_e)_a/U_a$
0.0479	-0.0105	0.0004	0.0018	0.0005	0.0019	3.8%
0.0967	-0.0193	0.0005	0.0019	0.0006	0.0020	2.0%
0.1458	-0.0246	0.0009	0.0019	0.0011	0.0022	1.5%
0.1954	-0.0304	0.0002	0.0019	0.0002	0.0020	1.0%
0.2965	-0.0425	0.0007	0.0021	0.0008	0.0022	0.7%
0.3949	-0.0512	0.0013	0.0022	0.0016	0.0028	0.7%
0.4935	-0.0612	0.0015	0.0024	0.0018	0.0031	0.6%
0.5912	-0.0710	0.0018	0.0026	0.0022	0.0035	0.6%

わたって大きくばらついている。機種ごとの校正結果とカタログ記載の仕様を比較するとメーカーが定めた精度を越えた器差を示しているものが多い。校正対象に1社で2台以上の流速計が含まれたメーカーについて、

Fig. 8 Calibration result for all velocimeters

(a) Manufacturer A, ultrasonic type

(b) Manufacturer B, thermal type

(c) Manufacturer C, thermal type

Fig. 9 Calibration result for each manufacturer

メーカー別の校正結果を Fig. 9 に示す。同一メーカーの製品では比較的ばらつきが小さいことがわかる。したがって、Fig. 8 に見られた大きなばらつきは国家標準が欠如していたことによるメーカー間の基準の不統一が大きな原因であるといえる。また、Fig. 9(b)のなかに大きな負の器差を示しているものがあるが、これはユーザで使用中だったものであり、使用中の適正な管理と定期的な校正の必要性を示しているといえよう。また、Fig. 9(b), (c)より熱式流速計は0.1m/s以下で完全にリニアリティを失うことがわかる。熱式流速計を使用の際には注意が必要であろう。

5. おわりに

地下トンネル内に設けられた全長45mの直線レール上を走行する台車によって低流速域の標準を実現した。この装置により超音波流速計を0.05~0.6m/sの範囲で校正した。校正の不確かさを詳細に見積った結果、95%包括度の総合不確かさは基準流速の0.25%+0.002m/s以下であり、本装置は1次標準として十分な水準にあることがわかった。

また、標準供給を目的として国内主要メーカーおよびユーザの基準用流速計の校正を行った。これまで問題になっていた低流速域での流速計の指示値の食い違いの主要原因はメーカー間の基準の不統一であることが校正結果から明らかになった。本装置によって供給された標準によりメーカーの流速基準を統一することにより、低流速域での流速測定の精度が大きく改善されることが期待される。

本研究における標準の供給は、超清浄空間の評価基準に関わる調査研究委員会ならびに(財)機械電子検査検定協会の協力により行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 稲葉, 小山, 野田: 流速計の災害防止および監視への応用, 自然発火火災の早期発見と計測シンポジウム要旨集, p. 47, 北海道炭坑技術会 (1984)
- 2) ISO 7726-1985, Thermal Environments—Instruction and Methods for Measuring Physical Quantities (1985)
- 3) IES-RP-CC-013-86-T, Institute of Environmental Sciences Recommended Practice for Equipment Calibration or Validation Procedures (1986)
- 4) 超清浄空間の評価基準に係わる調査研究報告書, p. 73, 日本機械工業連合会, 日本産業機械工業会 (1988)
- 5) E. Ower and R.C. Pankhurst: The Measurement of Air Flow (5th Edition), p. 29, Pergamon Press (1977)
- 6) L. S. G. Kovasznyai: Hot-Wire Investigation of the Wake behind Cylinders at Low Reynolds Numbers,

- Proc. Roy. Soc. A. 198, 174/190 (1948)
- 7) 荒石, 加野: 熱パルスによる低流速の測定, 計測自動制御学会論文集, **12**-6, 694/700 (1976)
 - 8) 高木正平: 熱線を 3 本用いた低流速用直示式流速計の試作, 航空宇宙技術研究所報告, R-727 (1982)
 - 9) 藤井, ほか: 低流速域における風速計の特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1988)
 - 10) L. P. Purtell and P. S. Klebanoff: A Low-Velocity Airflow Calibration and Resaerch Facility, NBS Technical Note, **989** (1978)
 - 11) L. P. Purtell: Low Velocity Performance of a Ball Bearing Vane Anemometer, NBSIR 78-1485 (1978)
 - 12) L. P. Purtell: Low Velocity Performance of an Impact-Deflection Anemometer, NBSIR 78-1561 (1978)
 - 13) L. P. Purtell: Low Velocity Performance of a Vortex-Shedding Anemometer, NBSIR 78-1565 (1978)
 - 14) L. P. Purtell: Low Velocity Performance of a Magnetic Pick-Up Vane Anemometer, NBSIR 78-1566 (1978)
 - 15) L. P. Purtell: Low Velocity Performance of a Heated Foil Anemometer, NBSIR 79-1708 (1979)
 - 16) 高木正平: 熱線に振動を加えて低流速域における熱線風速計を校正する方法, なかれ, **1**-4, 382/387 (1982)
 - 17) M. Aydin and H. J. Luetherusser: Very Low Velocity Calibration and Application of Hot Wire Probes, DISA Information, **25**, 17/18 (1980)
 - 18) M. Tabatani, et al.: A Device for Calibrating Hot-Wire Probes at Low Velocities, J. Phys. E, **19**, 630/632 (1986)
 - 19) 谷, 小橋, 佐藤: 流体力学実験法, p. 33, 岩波書店(1977)
 - 20) 寺尾, 高本: 気体低流速校正装置における流速分布の影響, 計量研究所報告, **39**-1, 印刷中 (1990)
 - 21) ANSI/ASME PTC 19.1-1985, Measurement Uncertainty, Supplement to ASME Performance Test Codes, Instruments and Apparatus, Part 1, p. 20 (1986), (日本機械学会訳: 計測の不確かさ, 丸善(1987))
 - 22) ISO 5168-1978: Measurement of Fluid Flow—Estimation of Uncertainty of a Flow-Rate Measurement (1978), (石橋雅弘訳: 流量測定—流量測定の不確かさの評価(1), 計量管理, **35**-10, 638/644 (1986))
 - 23) 文献 21) の第 2 章および第 3 章