湿式ガスメータの水蒸気圧補正の研究[†]

小林 駿*・森田 謙三*
高本 正樹**・小宮 勤—***

Research on Vapor Pressure Compensation for Wet Gas Meter[†]

Hayao KOBAYASHI*, Kenzou MORITA*
Masaki TAKAMOTO** and Kin-ichi KOMIYA***

This paper clarifies the mechanism of the evaluation of water vapor pressures in wet gas meters and shows expressions of compensation for water vapor pressures that we derived from our experimental approaches.

Key Words: wet gas meter, vapor pressure, humidity, calibration

1. はじめに

湿式ガスメータは、原理上ガス密度などの異なるガスを簡易に計測できるガス容積式積算流量計である。したがって、計測ガスの密度、粘度、比重の影響が小さく、計測範囲が広いなどの特徴を有し広く使われている¹⁾。

この湿式ガスメータは回転計量ドラムと自由表面を持つ置換封液に水が使用されているため、測定中に水の気化および気体の凝縮による計量誤差で、精度が問題視されてきた。そのために、旧計量法では1979年に水蒸気圧補正を実施することが制定された。しかし、この水蒸気圧補正の裏付データもないまま、流量計業界では今日もその補正值が使用されている²⁾。水蒸気圧補正実態の有無を当社で調査した結果、数%程度しか行なわれていないことがわかった。

1993年の新計量法以来、トレーサビリティが重要視され、水封式・湿式ガスメータを用いた場合の精度向上の要求が高まってきた。この報文は、湿式ガスメータの水蒸気発生メカニズムを明らかにし、質量計測実験によって水蒸気圧補正式を確立することで、湿式ガスメータの測定精度の向上を図ることを目的とする。

2. 湿式ガスメータの水蒸気圧発生メカニズム

湿式ガスメータの測定原理は、水(封液)と置換してガス体積流量を量る方法である(Fig. 1 参照)。

Fig. 2 は、Fig. 1 の水位面で切断した上面図である。水封式湿式ガスメータに乾燥空気がメータ入口から吸入されると、先ず前室にガスが溜まる。一方、前室では前室の封液表面積 S_1 から気化した水分子の常時拡散で封液表面の温度の指数関数として飽和水蒸気分圧が発生し、計量ガスと混合して湿潤し、膨張したガスは吹込管を通してドラム前室 D_{in} に入り、さらに湿潤が増大する³⁾。そのガスがドラム計量室 D_m に入る。ここではすでに計量を開始している。さらに、湿潤を増大しつつガスが計量される。つぎに計量されたガスは後室に溜り、さらに湿潤が最大になって、出口より排出される。

Fig. 1 Principle of wet gas meter

Fig. 2 Figure mechanism of water vapor pressures in wet gas meter

[†] SICE 第2回流体計測制御シンポジウムで発表(2001・12)

* (株)シナガワ 東京工場 稲城市大丸 2244

** 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 流量計測科
つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第三

*** 工学院大学 東京都新宿区西新宿 1-24-2

* Shinagawa Cop., 2244, Ohmaru, Inagi

** Fluid Flow Division, National Meteorology Institute of Japan, Tsukuba Central 3, Umezono 1-1-1, Tsukuba

*** Kougakuin University, 1-24-2, NishiShinjuku, Shinjuku, Tokyo

(Received March 6, 2002)

(Revised May 24, 2002)

以上のメカニズムにより吸入された乾燥空気の実量は膨張したまま計量されるので、その水蒸気分圧 p_s を引いた値が実量になる。計量実体積を V 、みかけの体積を V' とすると、(1)式が成立¹⁾。

$$p:1 \text{ 気圧} \quad p_r: \text{大気圧} \quad p_m: \text{入口圧力}$$

$$V = V' ((p_r + p_m + p_s)/p) \quad (1)$$

上述の議論は、ガス体の流速が一定であることを前提としているが、流速が極端に小さくなった場合は、吸入ガス量が少ないために、前室での水蒸気の拡散の方が大きくなり、計測ガスの湿潤は100%近傍になることが容易に予測できる。よって、厳密にいうと湿潤の度合いは流量により変わり、流量が停止したときは100%になる³⁾。

3. 実験

水蒸気圧の発生量は本来、湿度を計することで補正量を求めることが最も好ましいと思われる。湿式ガスメータの構造よりドラム内の湿度計測は不可能である。その上、流れるガス湿度を正確に計することは困難なことである。

予備実験として高精度の露点計(精度後述に同じ)と湿度計測用チャンバーを用いることで、高精度での湿度計測をし、湿式ガスメータから吐出された湿度の計測をした。なお、湿式ガスメータに吸入するガスは、湿度50%の空気と、 N_2 乾燥ガスの2点について計測した。

吸入湿度(湿式ガスメータ内にガスが入るときの相対湿度をいう)50%空気の場合は、湿式ガスメータの水溫の低下はほとんど見られず、メータ出口湿度約90%に達するのに約3分間の時間を要した。メータを通ったガスの湿度は88~93%で安定した。

一方、 N_2 乾燥ガスを流した場合湿度50%空気に比べ水の蒸発量が多いため湿式ガスメータの水溫低下は大きかった。特に大流量になるにつれてその現象は顕著であり、経過時間につれて湿度の低下が見られる。よって、水蒸気温度が下がり、水蒸気露点が低下するため湿式ガスメータ内部で凝縮しているものと推測できる。予備実験結果より、大流量での質量実験は結露現象が生じない90分以下が望ましいことが確認された。

3.1 質量法による水蒸気圧補正式の実験方法

Fig. 3 に示してあるように、 N_2 ボンベから減圧されたガスは熱交換器で温度順化後、jcsc で認定された音速ノズル流量

Fig. 3 Layout for vapor pressure compensation

標準器で正確な流量を計測する。

ノズルを経た N_2 乾燥ガスは加湿器を通り、ガス湿度を0~90%RHに調整できるようになっている。加湿器は、湿度の発生方式としては、2点温度法(JIS B 7920)を用いている³⁾。

また、加湿器の吐出部は高精度露点計(標準不確かさ2.0%, パイサラ社製)を基準に吐出湿度が調整できるようになっている。1回転1L型湿式ガスメータ((株)シナガワ製)には、ガス温と水溫を計る温度計が付いており、計量ドラム軸に直結したエンコーダから1000 p/L のパルス信号が出る。そのパルスはカウンターに接続され、体積、流量、時間が計測できる。湿式ガスメータは電子天秤(メトラートレード社製で秤量16.1 kg, 分解能0.1 g, くり返し性0.005 g)の上に乗せ、さらに強固な定盤の上に置かれている。電子天秤、湿度計は事前に校正されている。

なお、湿式ガスメータを通過した N_2 湿潤ガスは大気開放される。流量別、各湿度別に湿式ガスメータから水蒸気として蒸発減量した質量を量り、その量より水蒸気圧を気体体積に演算して計測した。温度は23°C, 吸入湿度は0, 20, 40, 60, 80%, さらにドラム回転数40, 137, 400 rev/h の3流量点について計測した。また、空調による風や静電気の影響を受けないようにメータ全体を覆う透明な風防が設けられている。

3.2 実験結果

Fig. 4 は、計測時間と蒸発質量の関係グラフで中流量(137 rev/h), パラメータは吸入湿度を示す。

質量から体積への換算式は以下のとおりである。

ノズルの通過体積 V 、水の分子量18.015 g, 水の蒸発質量 W , 1 g の水が気化したときの体積 $\Delta V'$ は0°C, 1気圧標準状態で $\Delta V' = 22.4/18.015 = 1.24431 \text{ NL}$ となり、23°C, 1気圧の水蒸気補正量 ΔV は以下の式で表わす⁵⁾。

$$\Delta V = ((\Delta V' \times W \times (273.15 + 23)) / (273.15)) \quad (2)$$

水蒸気圧補正率 Wv は以下の式となる。

$$Wv = ((\Delta V - V) / V) \times 100 \quad (3)$$

Fig. 5 は23°Cにおける実験結果のグラフである。横軸は吸入湿度(%)を示し、縦軸は水蒸気圧補正量 Wv (%)を示している。直線は飽和水蒸気圧100%の時の理論値を示す(日本機械学会)⁴⁾。グラフはドラム回転数40, 137, 400 rev/h の各流量別補正曲線を示す。そして式は近似線形補正式を示す。

Fig. 4 Evaporation of water in wet gas meter

Fig. 5 Vapor pressure compensation diagram, 1 L type

実験の結果、1 L 湿式ガスメータを通過するときの水蒸気圧補正は、厳密にいうと流量により異なる。40 rev/h の小流量域では、吸入湿度 x (%), 水蒸気圧補正 Wv (%) は (1), (2), (3) 式より近似式 (4) を得た。

$$Wv = -0.0253x + 2.7124 \quad (4)$$

また、中・大流量域 (137, 400 rev/h) では近似式 (5) 式を得た。

$$Wv = -0.0238x + 2.4638 \quad (5)$$

なお、(4), (5) 近似式より、吸入湿度から湿式ガスメータの水蒸気圧補正を求めれば良い、また 2 式間の流量は補完すれば良い。

水の飽和水蒸気圧は温度の指数関数に依存することから、飽和水蒸気の実験式としては、古くは O. Tetens (1930 年)、今日では D. Sonntag (1982 年), G. Magnus, そして Antonie の式などがある^{3), 6)}。ここでは、Antonie の (6) 式を用い、水蒸気圧補正 y (Pa) の近似式 (7) が得られる。

$$\log ps = [7.203 - \{1735.74 / (t + 234)\}] \quad (6)$$

$$y = Ps \times k \text{ (Pa)} \quad (7)$$

1 気圧 P のときの水蒸気圧補正 Wp (%) は次式を得る。

$$Wp = Ps \times k \times 100 / P \quad (8)$$

水蒸気圧補正理論式 Wp (8) 式を計算すると実験式 (4), (5) 式と良く一致するので (Fig. 5 参照)、温度のパラメータを含む (9) 式を提案する。

$$Wp = 10^{[7.203 - \{1735.74 / (t + 234)\}]} \times 100k / p \text{ (%) } \quad (9)$$

Ps = 飽和水蒸気圧 (kPa)

t = 測定温度 (°C) … 湿式ガスメータの水温 or 出温

k = 水蒸気圧の湿度補正係数 ($k = 0.95$ or 0.90)

流量に関係なく (9) 式を用いると、吸入湿度 40~60% の通常湿り空気の場合湿度補正係数は 0.95, 20% 以下の乾燥空気は 0.9 と規定していた旧計量法や JMIF 009 規格と良く一致した²⁾。

また、従来のように旧計量法や JMIF 009 規格の「湿度補正線図」を用いて温度より蒸気圧補正値をグラフで求める煩わしさを除くことができる²⁾。

4. ま と め

本研究で、湿式ガスメータの水蒸気発生メカニズムを解明し、蒸発量から補正量の実態を計測することができた。

これまではすべて理論値であったが本研究により実験式が確立でき、湿式ガスメータの測定精度向上に寄与できる結果が得られた。

(4), (5) 式および Fig. 5 より吸入湿度が通常の湿り空気 (40~60%) の場合は、湿度補正係数 k は 95%, 0~20% 乾燥空気の場合は 90% という値は小流量域を除き、旧計量法および JMIF の規定を検証できた。したがって、(9) 式を用いれば良い。微小流量域については、引き続き研究する予定である。

また、乾燥空気を用い (9) 式に $k = 0.95$ を代入すると、水蒸気圧補正をしない場合、常温では、約 2.7% の誤差が生じることがわかる。よって、水封式湿式ガスメータにあっては、水蒸気圧の補正をしないと大きな計測誤差の要因となる。

本稿の作成に当たり、ご指導頂いた産業技術総合研究所・主任研究官 中尾晨一氏に感謝します。

なお、本研究は中小企業総合事業団の委託業務「テーマ：微小流量湿式基準器の研究開発」の成果による。

参 考 文 献

- 1) 工業技術院計量研究所編集協会：改訂計量技術ハンドブック，コロナ社，848/852 (1978)
- 2) 日本計量機器工業連合会：009 気体用流量計器差試験方法，計工連，解説 1/解 9 (1995)
- 3) 日本機械学会：湿度・水分測定と環境モニタ (1992)
- 4) 日本機械学会：蒸気圧表，丸善 (1999)
- 5) 日本機械学会：流体の熱物性集，8/13 (1997)
- 6) 稲松照子：湿度のはなし，日本規格協会 (1999)