光ファイバを用いた局所湿度測定法[†]

田 中 宏 史*・藤 井 哲*・多 田 直 弥**・上 山 伸 英***

A New Method for Measuring Local Humidity with Optical Fibers

Hiroshi TANAKA*, Tetsu FUJII*, Naoya TADA** and Nobuhide UYAMA***

Two-dimensional humidity distribution can be measured based on the infrared absorption principle, when an infrared beam is introduced into the humidity field from its one side through an optical fiber and the damped beam is caught from the other side of the field by another optical fiber. This paper proposes a measuring system and presents its calibration results.

Moist air of known dew-point as 20, 25, 30, 35 and 40°C of 16 cm and 30 cm optical path length and infrared light of 1.86 μm wave length are used in the calibration test. Apparent absorption coefficients obtained based on Beer's law are 0.043 (kPa $\cdot$ m)⁻¹ and 0.034 (kPa $\cdot$ m)⁻¹ and the accuracy of the present measurement is estimated to be $\pm 3 \text{ g/m}^3$ and $\pm 2 \text{ g/m}^3$ for 16 cm and 30 cm optical path, respectively. These results suggest the necessity of case by case calibration at present. Some proposals for improving the elements of the measuring system are also discussed, particularly for measuring low humidity.

Key Words: humidity distribution, hygrometric measuring system, optical fiber, infrared absorption, calibration test

1. 緒 言

凝縮や蒸発を伴う対流熱伝達など熱・物質同時移動

現象の解明には境界層内の温度分布や速度分布だけでなく濃度分布の測定が必要である。濃度分布の測定にはシュリーレン法や光干渉法が用いられているが、同時に熱移動がある場合には温度分布による影響の補正に複雑な計算が必要である。

光ファイバによる濃度分布の測定については、流体中に吸光物質を添加してその濃度変動を測定し、乱流機構解明の研究に利用したものがある¹⁾。また、光ファイバを用いた各種のガス濃度の遠隔監視システムも提案されている²⁾。

従来の、湿度測定法のほとんどのものは被測定空気を感じ湿部に強制的に接触させるものである。1960年代に、アメリカの気象庁で水の赤外吸収特性を利用した湿度計が非接触で場を乱さない湿度の測定法として、かなり研究された^{3)~7)}。光路長の長いものは大気観測のリモートセンシング用として使われているが、光路長の短いものつまり赤外線湿度計のはほう現在まだ一般には使用されていないようである。

本研究では、光ファイバを用いて、水蒸気の赤外線吸収特性を利用した局所湿度の測定法を提案し、試作した局所湿度測定装置について露点の知られている湿り空気での検定実験結果を示す。さらにこの測定法の精度とその改良の可能性について検討する。

2. 測定原理および測定装置

測定原理は、赤外線湿度計といわれるものと同様に、あらかじめ透過率 τ_m と水蒸気分圧 P_s (あるいは水蒸気濃度 C) の検定曲線を求めておき、実際の測定光路での透過率 τ_m の測定値より水蒸気濃度 C (あるいは湿度) を求めるものである。

水蒸気には 1.37 μm 、1.86 μm 、2.6 μm および 6.3 μm のバンドで強い吸収がある。そしてこれらの順に吸収が強くなっている。また従来から試みられた水蒸気の赤外吸収特性を利用した湿度計の一連の研究^{4)~9)}

[†] 第 23 回計測自動制御学会学術講演会で発表

(昭 59・7)

* 九州大学生産科学研究所 春日市春日公園 6-1

** (株) 東芝富士工場 富士市蓼原 336

*** 昭和電工(株)大分工場 大分市中ノ州 2

* Institute of Industrial Science, Kyushu University, Kasuga

** Fuji Factory, Tohiba Corp., Fuji

*** Oita Factory, Showa Denkou Corp., Oita

(Received October 21, 1985)

(Revised January 10, 1986)

からいえることは吸収の強い $2.6\mu\text{m}$ あるいは $6.3\mu\text{m}$ バンドを使い測定光路長をできるだけ短くし、測定精度の向上と機器のコンパクト化を図ろうとしていることである。また光源、分光用のフィルタ、光検知器などの安定性に問題を残している。

本測定法では光ファイバを用いるのでこのような波長ではそれ自身の透過率が非常に悪くなり、検知が不可能である。現在の石英系の光ファイバは $1.3\mu\text{m}$ 近くで透過率が最高であることを考えて、 $1.8\mu\text{m}$ バンドの赤外吸収特性を利用する。

測定系統の概略図を Fig. 1 に示す。光源にはハロゲンランプを用い、分光器で水蒸気の赤外吸収のある $1.86\mu\text{m}$ と赤外吸収のない $1.65\mu\text{m}$ に分光し、それぞれ測定用光路および参照用光路に導く。分光器を用いたのはフィルタより光学的安定性がよいことと他の赤外吸収バンドでの測定も試みるためである。2 個の PbS 光検知器（ドライアイスとメタメルで冷却）、増幅器（ロックインアンプ）および比率計によってそれらの出力の比をもとめ、分光器内の水蒸気と光源の変動の影響を相殺するようにした。

Fig. 2 には測定用および参照用の光強度の変化のフローを示す。図に示す各光路内の光学機器の透過率を τ_i , τ'_i 結合効率を η_i , η'_i とする。 $1.86\mu\text{m}$ および $1.65\mu\text{m}$ のそれぞれの波長における光検知器の光強度 I_m , I_r の比は次式で表わされる。

$$(I_m/I_r)_{Ps} = \left(I_0 \eta_1 \tau_1 \prod_{i=1}^8 \tau_{mi} \prod_{i=1}^6 \tau_{ri} \right) / \left(I_0 \eta'_1 \tau'_1 \prod_{i=1}^8 \tau'_{mi} \prod_{i=1}^6 \tau'_{ri} \right) \cdot \tau_m$$

$$\begin{aligned} & \left(I_0 \eta_1 \tau_1 \prod_{i=1}^4 \tau_{ri} \prod_{i=1}^3 \tau_{ri} \right) \cdot \tau_m \\ &= \left(\prod_{i=1}^8 \tau_{mi} \prod_{i=1}^6 \tau_{ri} \right) / \left(\prod_{i=1}^4 \tau_{ri} \prod_{i=1}^3 \tau_{ri} \right) \cdot \tau_m \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (I'_m/I'_r)_{Ps} &= \left(I_0 \eta'_1 \tau'_1 \prod_{i=1}^8 \tau'_{mi} \prod_{i=1}^6 \tau'_{ri} \right) / \left(I_0 \eta'_2 \tau'_2 \prod_{i=1}^4 \tau'_{ri} \prod_{i=1}^3 \tau'_{ri} \right) \cdot \tau'_m \\ &= \left(\prod_{i=1}^8 \tau'_{mi} \prod_{i=1}^6 \tau'_{ri} \right) / \left(\prod_{i=1}^4 \tau'_{ri} \prod_{i=1}^3 \tau'_{ri} \right) \cdot \tau'_m \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、' は $1.65\mu\text{m}$ での値とする。 η_{ms} , η'_{ms} , η_{rs} および η'_{rs} には PbS 光検知器の感度特性を含める。これらを除き他の透過率および結合効率等はすべて波長 $1.86\mu\text{m}$ と $1.65\mu\text{m}$ で変わらないとする。また波長 $1.65\mu\text{m}$ では測定用光路内での透過率 $\tau'_m=1$ とし、(1) 式と (2) 式の比を求めると、次式ようになる。

$$[(I_m/I_r)/(I'_m/I'_r)]_{Ps} = (\eta_{ms}/\eta'_{ms})/(\eta_{rs}/\eta'_{rs}) \cdot \tau_m \quad (3)$$

実際の検定では光源のスペクトルおよび PbS 光検知器のドリフトなどが各 RUN ごとに若干起こり、(3) 式の右辺の係数 $(\eta_{ms}/\eta'_{ms})/(\eta_{rs}/\eta'_{rs})$ の値は再現性がなかった。そこで基準として、水蒸気分圧 P_s が 0 の場合、すなわち乾き空気の場合との比、

Fig. 1 Schematic diagram of measuring system

Fig. 2 Quantitative relation between optical devices

$$\left[\frac{I_m}{I_r}\right] / \left[\frac{I'_m}{I'_r}\right]_{P_s} / \left[\frac{I_m}{I_r}\right] / \left[\frac{I'_m}{I'_r}\right]_{P_s=0} = \tau_m \quad (4)$$

をとり、測定光路内の波長 $1.86 \mu\text{m}$ での透過率 τ_m を求めた。

3. 検定装置および検定結果

空気中の水蒸気の濃度は薄く、その変化に対する透過率の変化を検知できるためにはある程度長い光路長が必要である。しかし、本装置で用いたセルフフォーカス・マイクロレンズでは光路長が長くなると結合効率がかなり落ちる。それぞれの波長の光について光路長 l のみ変えた場合の光強度 I の減少の測定例を Fig. 3 に示す。以下に示す検定ではテスト・チャンバーの光路長を 16 cm と 30 cm の 2 種類とした。結合効率はそれぞれ約 1/10 および 1/50 である。

Fig. 1 の測定光路内にテスト・チャンバーを置き、水蒸気濃度既知の空気を導き、検定を行った。そのル

Fig. 3 Coupling efficiency of micro-lens with measuring path length change

Fig. 4 Configuration of calibration apparatus for producing the air of known dew-point

ープを Fig. 4 に示す。内径 56 mm、高さ 110 mm のステンレスパイプ製の 3 個のバブリング槽に蒸留水を入れ、それぞれゴム栓で密閉した。それらを銅パイプで連結したものを露点設定用の恒温水槽内に沈めた。連結パイプの水中にある部分の下端にエア・ストーンを取りつけ、3 個のバブリング槽の蒸留水内にエアポンプで空気を送り、連続してバブリングさせた。確実に飽和させるために文献 10) に従って、最初のバブリング槽入口手前の加熱器で送入空気が設定値より $7 \sim 8^\circ\text{C}$ 高くなるように加熱した。このようにして発生させた飽和空気を、最後のバブリング槽出口にとりつけたグラハムチューブで別の測定温度設定用恒温水槽の温水を用いて一定温度 (約 53°C) に加熱した。またテスト・チャンバーおよび途中の管路もその温水で保温した。最後のバブリング槽内で、蒸留水の温度と飽和空気の温度を熱電対で測定し、ともに露点設定用恒温水槽の設定温度と一致することを確認した。さらに、テスト・チャンバー出口でミラー式の露点計を用いて湿り空気の露点を測定した。それと設定温度との比較を Table 1 に示す。露点計の測定可能範囲内の 30°C までではあるが本装置は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の精度で露点の設定が可能であることが確認された。検定には露点は 20°C , 25°C , 30°C , 35°C および 40°C の 5 点変えた湿り空気を用いた。

三方コックで、これまでのループを遮断し、空気乾燥ループに切り替える。テスト・チャンバー内の湿り空気をエアポンプで、モルキュラーシーブ 13X を充填したカラム内を通して循環させ、乾燥させた。この乾き空気での測定値を吸収のない場合の基準値とした。

各設定露点の湿り空気について、(4)式の左辺で示される透過率の値を求め、水蒸気分圧 P_s に対する変化を検定光路 16 cm と 30 cm の場合についてそれぞれ、Fig. 5(a) および (b) に示す。縦軸には対数目盛が取ってある。露点が 40°C までの湿り空気に対する

Table 1 Comparison between water bath temperature and dew-point of moist air

WATER BATH TEMP. ($^\circ\text{C}$)	DEW-POINT* ($^\circ\text{C}$)
10.1	10.5
20.1	20.3
22.1	22.4
25.0	24.9
28.1	27.6
29.6	29.0

* dew-point measured by mirror-type dewpointmeter

(a) measuring path length 0.16 m

(b) measuring path length 0.30 m

Fig. 5 Relation between transmittance τ_m and partial pressure P_s .

4 回の RUN においてはほぼ $\pm 0.3\%$ 以内の精度で再現性のある検定曲線が得られた。このことは、求めた検定曲線を使うことによって、光ファイバによる局所湿度測定が可能であることを示している。

測定された透過率 τ_m を Beer の法則で表現すると

$$\tau_m = e^{-kPs l} \quad (5)$$

となる。 k は見かけの吸収係数である。また l はテスト・チャンバーの光路長である。Fig. 5(a) および (b) に示される結果は光路長が 16 cm と 30 cm のそれぞれの場合について、水蒸気分圧 P_s に対してほぼ直線とみなせる。したがって透過率 τ_m と水蒸気分圧 P_s は指数関数関係を示している。したがって見かけの吸収係数 k が求まり、それぞれ $0.043 \text{ (kPa}\cdot\text{m)}^{-1}$ 、 $0.034 \text{ (kPa}\cdot\text{m)}^{-1}$ となる。すなわち、両者は一致しない。これは測定部への出射光が厳密には平行光でないことと測定光の光強度が参照光の $1/20$ 程度であり、かつ前述のように光路長が 30 cm の場合の受光量が 16 cm の場合に比べ、 $1/5$ 程度であるような広範囲の光強度に対して PbS 光検知器の感度の直線性に疑問があることなど考えられるが、詳細は不明である。し

たがって現時点では測定光路の長さが異なるごとに検定が必要である。

本検定に先だって、他の赤外吸収バンドでの検定を試みた。まず $1.3 \mu\text{m}$ バンドでは $1.37 \mu\text{m}$ を測定光に $1.24 \mu\text{m}$ を参照光にして同様な検定を行ったが、前述の $1.8 \mu\text{m}$ バンドのものより再現性のよいデータは得られなかった。つぎに、 $2.6 \mu\text{m}$ バンドでは光ファイバの透過率が悪く、特に測定光の光強度が非常に弱くなり検知ができなかった。

5. 測定精度の評価と改良の可能性

一般に吸光光度法では透過率 τ_m が 0.4 程度の測定が最も精度がよいとされている。露点が 40°C の湿り空気での透過率は光路長が 16 cm の場合に 0.95、光路長 30 cm の場合に 0.91 程度である。本検定曲線はほぼ $\pm 0.3\%$ の精度で求まっているので、水蒸気濃度の測定分解能はそれぞれ、 $\pm 3 \text{ g/m}^3$ および $\pm 2 \text{ g/m}^3$ と推定される。そこで本検定曲線を用いて実際の空気中の局所の相対湿度を測定する時の測定精度の見積例を Table 2 に示す。露点が高いほど、測定精度はよくなるので現時点では比較的水蒸気濃度の高い場合に有効である。

室温レベル (25°C) で相対湿度 $\pm 3\%$ の精度で測定するためには (吸収係数を $0.04 \text{ (kPa}\cdot\text{m)}^{-1}$ と仮定)、次のいずれかの改良によって可能であると予測される。

- 1) 光路長を 80 cm 程度に長くする。このためにはコリメータ・レンズ (セルフォックレンズ) の改良、あるいは $1.8 \mu\text{m}$ バンドの波長のレーザー光源が必要である。
- 2) 吸収係数が $1.8 \mu\text{m}$ バンドより強い $2.6 \mu\text{m}$ バンドを使えるようにする。このためには $2.6 \mu\text{m}$ まで透過する光ファイバが必要である。
- 3) 透過率の測定精度を $\pm 0.1\%$ 程度に向上させ

Table 2 Estimated accuracy for measuring relative humidity

MOIST AIR TEMP. ($^\circ\text{C}$)	ABSOLUTE HUMIDITY (g/m^3)	RELATIVE HUMIDITY ACCURACY (%)
Measuring path length 16 cm		
20.0	17.5	± 18.4
30.0	30.3	± 10.3
40.0	50.9	± 6.0
50.0	82.9	± 3.0
Measuring path length 30 cm		
20.0	17.5	± 12.8
30.0	30.3	± 7.2
40.0	50.9	± 4.2
50.0	82.9	± 2.6

る。このためにはさらに安定な光検知器や光源が必要である。

また実際の測定装置では分光器でなく狭帯域バンドパス・フィルタを用いるなどの検討が必要である。

6. 結 言

水蒸気の赤外線吸収特性を利用した光ファイバによる局所湿度測定法の提案を行い、露点の知られている湿り空気を用いた検定実験を行い、透過率と水蒸気分圧に関して $\pm 0.3\%$ 程度の再現性のある検定曲線が得られた。これにより2次元的な局所湿度の測定に適用可能であることが実証された。また、測定精度の検討と実用化のための検討もあわせ行った。今後、光ファイバ素材も含めそれらの周辺の光学機器、電子機器の発達が期待されるので、光ファイバを用いた局所湿度測定法の実用化は可能である。

参 考 文 献

- 1) 中村, 宮田, 酒井, 吸光度法による濃度測定について: 日本機械学会論文集, **B-48**-436, 2484/2491 (1982)
- 2) 稲葉文男: 遠隔物質濃度分析光学計測装置, 特許 56-7037 (1981)
- 3) 稲松照子: 湿度センサの特性と適用上の留意点, センサ実用便覧 (大森豊明), 131/152, フジテクノシステム (1978)
- 4) L. W. Foskett and N. B. Foster: A Spectroscopic Hygrometer, Bull. Amer. Meteor. Soc., **24**, 146/153 (1943)
- 5) L. W. Foskett, et al.: Infrared Absorption Hygrometer, Mon. Wea. Rev., **81**, 267/277 (1953)
- 6) R. C. Wood: Improved Infrared Absorption Spectra Hygrometer, Rev. Sci. Instr., **29**, 36/42 (1958)
- 7) R. C. Wood: The Infrared Hygrometer as Potential Meteorological Aid, Bull. Amer. Meteor. Soc., **40**, 280/284 (1959)
- 8) P. Hyson and B. B. Hicks: A Single-beam Infrared Hygrometer for Evaporation Measurement, J. Appl. Met., **14**, 301/307 (1975)
- 9) 木村茂行, 市村 勉: 赤外線湿度計, 計測技術, **5**, 42/56 (1977)
- 10) 芝, 一瀬, 上田: 露点の知られている空気源, 計測自動制御学会論文集, **8-5**, 14/19 (1972)