光ファイバ局所湿度測定装置に関する研究*

(第3報, 熱・物質の同時移動を伴う境界層内の水蒸気濃度分布測定)

田中宏史^{*1}, 佐々木明彦^{*2}, 宮武修^{*3}

An Apparatus for Measuring Local Humidity with Optical Fibers (3rd Report, Measuring of Humidity Distribution in a Boundary Layer)

Hiroshi TANAKA, Akihiko SASAKI, and Osamu MIYATAKE

An apparatus for measuring local humidity with optical fibers is reconstructed and applied to the measurement of water-vapor concentration in a boundary layer, in which combined heat and mass transfer in free convection between vertical parallel plates occurs and the temperature distribution is not uniform. The two optical powers of 1.37 μm (absorbed) and 1.24 μm (un-absorbed) is measured simultaneously with a beam splitter and these ratio immediately computed. Then, it is able to compensate for lowering these optical powers by the beam shift due to the temperature distribution. The water-vapor boundary layer is generated between vertical parallel plates, one of which is wetted and heated. Measured distributions of water-vapor concentration at the upper end of the plates agree well with numerical ones.

Key Words: Measurement, Humidity distribution, Boundary layer, Combined Heat and Mass Transfer, Optical Fiber, Infrared Absorption

1. 緒 言

著者らは狭帯域バンドパスフィルタ(以下NBPF)を用いた簡便な光ファイバ局所湿度測定装置を開発し, 現在市販されている湿度センサとほぼ同程度の測定精度の検定結果を得た⁽¹⁾。また, この光ファイバ局所湿度測定装置を実際の水蒸気の空気中への一次元一方向非定常拡散現象での湿度変動の測定に適用し, 実時間での局所の湿度の測定が可能であることも実証した⁽²⁾。さらにミラーを用いて光路長を倍化した局所湿度測定装置による検定および湿度変動の実測も試み, 測定精度の向上と装置のコンパクト化が可能であることも示した⁽²⁾。

元来, これらの研究の目的は熱と物質の同時移動を伴うような対流境界層などの水蒸気の濃度分布を測定できる装置を開発することであった⁽³⁾。従来, 濃度分布のみ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⁽⁴⁾。同時に温度分布のある場合には, 温度変化と濃度変化による屈折率の変化を分離して濃度分布を算出しなければならない。大気中の水蒸気のような微量の場合には非常に高精度の屈折率のデータが入用である。

これまでの研究では, いずれも温度場を一様に保った場で水蒸気濃度を測定したものである⁽¹⁾⁽²⁾。

そこで本研究ではこれまでの装置を温度分布などによる光強度の変動を実時間で相殺できるように改良を行い, 熱と物質の同時移動を伴う鉛直平行平板間の自由対流境界層内での水蒸気の濃度分布の測定を試みる。

2. 光ファイバ局所湿度測定装置の改良

これまでの装置では, 水蒸気の赤外吸収のある波長1.37 μm のNBPFを用いたシステムのほうが直線性と安定性に優れている。また原理的にはダブルビームシステムのほうが同じ水蒸気濃度に対して透過率の減少割合が大きくなるので, それだけ感度がよくなる。そこでダブルビームの1.37 μm NBPFシステムを図1に示すように改良した。ビームスプリッタで測定光を2分割し, それぞれ水蒸気の赤外吸収のある1.37 μm のNBPFと水蒸気の赤外吸収のない1.24 μm の

* 昭和62年5月27日 第24回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和62年9月9日。

^{*1} 正員, 福岡工業大学工学部 (〒811-02 福岡市東区和白東3-30-1)。

^{*2} 准員, 三菱重工業(株)広島製作所 (〒733 広島市西区観音新町4-6-22)。

^{*3} 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

図1 ビームスプリッタ付光ファイバ局所湿度測定装置

図2 光強度の系統図 (改良形光ファイバ局所湿度測定装置)

NBPfに通し、それぞれをそれぞれのGe光検知器に導く。厳密には濃度分布によっても屈折率が変化するので赤外吸収のある波長もない波長も受光部では減光するが本測定の場合は少ない。温度分布による光量変化の補正は受光側からすると光源の変動量と同じとみなすことができ、赤外吸収のある波長とない波長の出力の比を実時間で取ることにより、光源の変動分も含め相殺できるとした。

$$\frac{\{I_m(t_1)/I'_m(t_1)\}P_s}{\{I_m(t_2)/I'_m(t_2)\}P_s=0} = \frac{\{(\prod_{i=1}^{13}\eta_i) \cdot (\prod_{i=1}^{11}\tau_i)\} / \{(\prod_{i=1}^{13}\eta'_i) \cdot (\prod_{i=1}^{11}\tau'_i)\} \cdot \tau_m}{\{(\prod_{i=1}^{13}\eta_i) \cdot (\prod_{i=1}^{11}\tau_i)\} / \{(\prod_{i=1}^{13}\eta'_i) \cdot (\prod_{i=1}^{11}\tau'_i)\}} = \tau_m \dots \dots \dots (1)$$

これらの光強度の関係はこれまでと同様に図2のようになり、測定光路長 l_{opt} での透過率 τ_m は式(1)で算出できる。ここで τ_i と η_i はそれぞれの光学機器の透過率と結合効率である。'は赤外吸収のない波長 $1.24 \mu\text{m}$ での値である。

ビームスプリッタの結合効率は2分割する以上に落ちるので最終的に赤外検知器に入射する光強度 I_m および I'_m はこれまでの1/4以下となる。しかし、プリアンプの改良や光源の光強度を強くするなど工夫し、これまで以上の安定性と測定精度の向上が可能となった。これまでと同様の方法で露点の知られた湿り空気源発生装置によるシングルビーム ($l_{opt}=10.5 \text{ cm}$) とダブルビーム ($l_{opt}=10.5 \text{ cm} \times 2$) での検定結果を透過率 τ_m と飽和水蒸気圧 P_s と l_{opt} の積について図3に示す。測定精度つまり検定の再現性とその安定性はかなり改善されている。測定精度はシングルビームでは透過率で約 $\pm 0.04\%$ 以内である。しかし、ダブルビー

図3 光ファイバ局所湿度測定装置の検定結果

ムでは光量が減る分SN比が下がるので約 $\pm 0.1\%$ 以内となる。測定分解能は同じ測定長については、約 $\pm 1 \text{ g/m}^3$ 以下となり、両システムで同程度となる。また、実験条件に近い水蒸気濃度でのデータから見掛けの吸収係数 k を算出すると $0.031 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{-1}$ となる。 $P_s \cdot l_{opt}$ が大きくなると見掛け上、Beerの法則からの若干のずれがみられる。

3. 水蒸気濃度分布測定の実験装置および測定法

比較的簡単にできる熱と物質の同時移動を伴う対流濃度境界層を、図4の実験装置を用いて発生させた。鉛直平行平板間の一方の飽水壁が加熱され、温度差に

よる自由対流と、水の蒸発で濃度差による自由対流が同時に起こる。高さが15 cmと比較的低く、鉛直平行平板の上端部まで層流タイプの温度境界層と水蒸気濃度境界層ができる。物質伝達係数、つまり平均シャーウッド数 Sh_m は層流境界層を仮定した数値解析結果とよく一致していることが別のところで⁽⁵⁾確かめられている。そこでこの水蒸気濃度の分布の測定を鉛直平行平板の上端部で試みることにした。図5に示す電動トラバース装置に光ファイバ局所湿度測定装置を取付け、ビームの部分が図4の垂直平行平板の実験装置の上端部に平行になるように設置した。つぎに鉛直平行平板の一方の飽水壁を一定温度 T_w に加熱し、熱と水蒸気の同時移動を伴う自由対流が定常に達した後に、パーソナルコンピュータにより電動ステージのパルス

図4 熱と物質の同時移動を伴う鉛直平行平板間の自由対流の実験装置

図5 光ファイバ局所湿度測定装置のトラバース装置

モータを制御し、水平に稼働させ、水蒸気濃度分布を測定した。測定部の移動速度を0.80 mm/sまたは0.26 mm/sに設定した。位置決め精度は0.01 mm以内である。測定室を無人とし、自動的に数回の測定を行い、その再現性を確認したうえで、測定データとした。

4. 測定結果および考察

まず飽水壁に水を含ませない場合、つまり熱伝達のみの場合についての測定結果を図6に示す。ここで $\phi = [(C - C_o)/(C_w - C_o)]$ は無次元濃度 (C は水蒸気濃度 g/m^3) で、 $Y (=y/b)$ は無次元水平方向座標 (y は伝熱面よりの水平方向座標, m) である。 C_w は飽水壁の飽和水蒸気濃度、 C_o は平行平板下端入口付近の空気の水蒸気濃度でミラー型露点計の測定値 DP と温度 T_o より算出した。また、 N は濃度差に基づくグラスホフ数と温度差に基づくグラスホフ数の比、 Gr はそれらの和である。この場合には水蒸気濃度は一様であり、温度分布によるビームのずれによる光の減衰分は相殺されていることがわかる。

そこで、飽水壁に水を含ませ、加熱量を変えた場合の水蒸気の濃度分布の測定結果の例を平行平板間の距離 b が20 mmの場合を図7(a)に、15 mmの場合を図7(b)に示す。実線は数値解析よりもとめた水蒸気濃度分布である。測定結果はともに数値解析結果と比較的よく一致している。図8にはダブルビームとシングルビームの測定結果の比較を示す。水蒸気濃度の差 ($C_w - C_o$) は約 26 g/m^3 であり、両測定システムの差はほぼ測定精度 ($\pm 1 \text{ g/m}^3$) 内である。測定例全体をみると断熱壁側および飽水蒸気面近くで数値解とのずれがみられる例があるが図中に示すようにほぼ測定精度内で、実際に対流現象は微妙な変動がみられ、詳細な検討には測定精度の向上が必要である。

以上より本装置によって温度分布のある境界層内の

図6 境界層内の水蒸気濃度の測定例 (熱伝達のみの場合)

(a) 境界層内の水蒸気濃度の測定例
(平板間距離 $b=20\text{ mm}$ の場合)

(b) 境界層内の水蒸気濃度の測定例
(平板間距離 $b=15\text{ mm}$ の場合)

図 7

水蒸気濃度分布が測定可能であることが示された。

さらに測定精度を向上させるにはコリメータレンズ径を小さくするなどして空間分解性能をあげる、個々の光学機器の結合効率を上げ、光強度を増すことなどにより可能である。

5. 結 言

(1) ビームスプリッタにより (I_m/I_m) を実時間で測定すれば、測定光路内の温度分布 (温度差 15°C 程

図 8 境界層内の水蒸気濃度の測定例
(シングルビームとダブルビームの比較)

度) によるビームのずれなどによる光の変動分を相殺できる。

(2) 熱と物質の同時移動を伴う鉛直平行平板間の自由対流境界層内で水蒸気濃度分布のみを分離して測定可能である。また、測定結果は数値解析結果とも比較的よい一致を示した。

なお本研究には昭和 59 年度および 60 年度文部省科学研究費 (一般研究 C・課題番号 59550158) の補助を受けた。

文 献

- (1) 田中・江頭, 光ファイバ局所湿度測定装置に関する研究 (第1報, NBPF システムおよび検定結果), 機論, 53-485, B (昭 62), 250-253.
- (2) 田中・江頭, 光ファイバ局所湿度測定装置に関する研究 (第2報, 局所湿度変動の実測とダブルビーム・システムの検討), 機論, 53-494, B (昭 62), 3114-3117.
- (3) 田中・ほか 3 名, 光ファイバを用いた局所湿度測定法, 計測自動制御学会論文集, 22-4 (昭 60-4), 423-427.
- (4) Kauf, W. and Grigull, U., Optical Method in Heat Transfer, *Adv. Heat Transf.*, 6 (1970), 133.
- (5) 田中・ほか 2 名, 鉛直平行平板間の熱と物質の同時移動を伴う自由対流 (続報), 第 24 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭 62-5), B 342, 311-313.