シリーズ “混相流先端技術”

光学繊維プローブを用いた混相系計測法の基礎^{*}

Fundamentals of Fiber Optics for Multiphase Flows

幡 野 博 之^{**}
HATANO Hiroyuki

土 屋 活 美[†]
TSUCHIYA Katsumi

Abstract The optical fiber probe technique has been widely used in the analysis of gas-solid fluidized bed phenomena owing to the small size, quick response and flexibility of the probe as well as wide ranges of applicability of the technique as a whole. With potentially equal applicability to gas-liquid and gas-liquid-solid flow systems, this technique has recently witnessed its important role in the multiphase flow research. No systematic, fundamental explanations/guidelines for the usage of the fiber optics, however, are available to our knowledge in the pertaining research field. In this article, we introduce the basic probe structures, characteristics of the obtained signals, the data processing techniques and the range of applicability to further encourage the use of optical fiber techniques “tailored” to the multiphase flow analysis.

Keywords : Optical Fiber Probe, Reflective Type, Penetrative Type, Data Processing

はじめに

光学繊維プローブは応答特性が非常に良く、プローブ直径が細くて屈曲性に富み装置形状に合わせられるといった特徴から、不透明な系における空間的・時間的な局所測定に適している。

大木らが初めて固気系流動層内の粒子挙動の測定に成功して以来[1]、固気系流動層内の気泡挙動、ガス濃度や粒子濃度変動の測定に光学繊維プローブが応用されてきた。これは、流動層が不透明で数ミリHzから数十KHzまでの多様な現象があるためといえる。また、本プローブは固気系以外にも、気液系や気液固三相系にも適用できる。

透明な系のため本プローブは不要とも思われるが、実際には多数の気泡が装置内の観測を妨害する場合や実装置などやはり適用できるケースが多い。そのため、光学繊維プローブは非常に重要な混相系の測定技術といえる。

最近ではこのような研究成果を受けて、世界的に光学繊維プローブの利用例が増えてきている。しかし、光学繊維プローブの特性や信号処理法に関する深い理解が行われないまま測定を行う例も見受けられる。

筆者らは開発者の近くで光学繊維プローブを利用する機会が多く、様々なKnow-Howを知るこ

* 1996.7.20受付

** 資源環境技術総合研究所熱エネルギー利用技術部燃焼システム研究室
〒305 つくば市小野川16番3 TEL(0298)58-8223 FAX(0298)58-8209

† 徳島大学

とができた。本稿ではこれらの点に触れながら測定法の基本的な特徴について解説していく。なお、測定法の詳細な解説と引用文献については別の解説を参照されたい[2,3]。

1. 光学繊維プローブの基本的構造

光学繊維自体は光の伝送路であり、繊維の組み合わせ方によって幾つかのプローブ構造が提案されている。

Fig. 1 に示すように基本的構造は投光用の光学繊維と受光用の2本の光学繊維の組み合わせになる。(a)の反射式と(b)の透過式プローブは典型的な構造といえる。また、(c)に示すように1本の光学繊維が投光用と受光用の2つの機能を兼ねる構造も提案されている。

光学繊維の先端部は基本的には光軸に対して垂直に切断されるが、(d)の気液用プローブでは鉛筆のように円錐状に整形されている。また、(e)のように1本の光学繊維を折り曲げたプローブ形状も考案されている。

(a)では投射された光は粒子表面で反射されそれを受光用の光学繊維で検出している。粒子濃厚相では気泡は反射信号がないことで認識される。(b)では投光用と受光用の光学繊維間の空間が測定空間となり、分光光度計のセルに相当する。測定空間内に粒子が無い場合に気泡として認識される。また、この空間内に光を吸収する物質があり、粒子が侵入しない条件を作ることができれば、その物質の濃度変動を測定することができる。適当なトレーサ流体があればガス速度、液速度なども測定できる[4]。図(c)、(d)、(e)は光学繊維の屈折率と液相や気相の屈折率差による光学繊維端面における全反射率のちがいから液中の気泡を検出することができる[5]。(c)は粒子も検出できる

Fig. 1 光学繊維プローブの基本構造

ため気液系のみならず気液固三相系にも適用できる。

Fig. 1 のプローブを2つ組み合わせ、両プローブに検知された時間差を測定することで1次元の粒子や気泡の速度を知ることができ、プローブ先端の通過時間を知ることによって粒子や気泡の高さを計算できる。

粒子速度の測定の場合、基本構造はFig. 2 (a)に示すような3本の光学繊維の組み合わせとなる。図(b)に示すように7本の光学繊維を組み合わせると2次元の速度を求めることができる。5本の光学繊維を十字に組み合わせたプローブも存在するが、工作も難しく実質的な意味は無い。3次元の速度測定については理想的な条件が満足されれば可能であるが、実用上は非常に難しい。

光学繊維プローブは基本的には局所における測定を行うものである。ただ、プローブを多数配置して同時測定を行うことにより、気泡などの2次元形状の測定を行うことも可能となる。反射式の光学繊維プローブを装置内に10×10本配置し、同様に受光用光学繊維を配列したパネルを装置外に設置することで、映像で気泡形状や気泡のホールドアップを求めることができる。また、光学繊維プローブを2列、計14本配置し、信号と得られた気泡上昇速度から気泡形状を復元することも可能である。このようなマルチ配列プローブは系に与える外乱も大きくなるが、2次元流動層よりは影響が少ないと考えられる。

燃焼場のように高温になると粒子からの放射が増加する。光ファイバーでこれを検知すれば放射温度計となる。照射する光を整形して粒子相の弁別を行うと、火炎温度、燃料粒子温度、媒体粒子温度を別々に測定することができる。また、蛍光塗料を粒子に塗布し、紫外線を照射して可視光を発光させると粒子の混合拡散係数やバルクな粒子移動速度も求められる。

2. データ処理法

光学繊維プローブから得られた信号を処理して粒子速度、粒子移動方向などを求めることができる。粒子速度を求めるために相互相関法、遅れ時間の直接計測法、空間フィルタ法などが提案されている。これらの中で最も多く普及しているのが相互相関法であろう。これは、相関計が多数市販され、相関プログラム例も多いためと思われる。

Fig. 2 粒子速度測定用光学繊維プローブ

ただし、計算量が膨大であるため、オンライン計測は難しく、オフラインで速度変動の測定を行っている。流れの特性、信号の意味を考慮して適切なサンプリング速度、積分時間などを確認し、その上で市販の装置、プログラムを選択する必要がある。

流動層のように時間的変動が激しい場合には大木や石田らのように特別な回路[6]やプログラムを[7]工夫しないとなかなか正確な速度は求められない。また、Fig. 2 (b)のプローブを使うと遅れ時間と偏角との関係[6]、あるいは、最も相関係数の高い方向を求める[7]といったことにより2次元の速度測定が可能となる。ただし、生信号との対比を行いながら計算結果の解釈を行わなければ誤った結果を導く可能性のあることに注意しないといけない。

ハードウェアを工夫した遅れ時間の直接計測法は回路内にピーク検出回路を組み込み、2本の光学繊維から得た信号のピーク間の時間差を求める。これを Δt -V変換器で遅れ時間の逆数に比例した電圧を出力し、オンラインで速度変動の測定が可能にしている。ただし、移動方向は求められない。

空間フィルタ法はFig. 3に示すように複数の光学繊維プローブの出力を1つの光電変換素子に導入し、周波数領域で速度を測定している。中心周波数が速度に比例することを利用して速度を求める場合には非連続測定となる。f-V変換器を利用すれば周波数に比例した出力が得られ、やはりオンラインでの連続測定が可能となる。この場合も移動方向の判定はできない。

粒子信号の周波数は速度と粒子濃度に比例している。そのため、濃度変動がある場合には取り扱いに注意が必要となる。

3. 光学繊維プローブの可能性と適用限界

光学繊維プローブはこれまで固気系流動層で使用されることが多く、粒子濃厚域が主要な測定領

Fig. 3 空間フィルタ法用光学繊維配列の一例

Fig. 4 球形粒子の通過位置による反射式光学繊維プローブの検出特性

(実線は半透明粒子の検出特性、破線は不透明粒子の検出特性。なお、図1(C)を用いると実線の検出特性となる)

域であるとして説明を行ってきた。しかし、フリーボードや循環流動層ライザー、あるいはジェットといった、希薄な領域に適用する場合には信号の取り扱いに注意する必要がある。

反射式の光学繊維プローブの場合、粒子からの反射信号強度はFig. 4に示すような分布となる。検出空間が光学繊維の正面にないため粒子の3次元的位置による信号の分布が生じる。そのため、粒子がプローブの先端付近を通過する場合と離れた位置を通過する場合で得られる速度が異なってくる可能性もある。また、ピークの少ない信号に対して相互相関法をそのまま適用する場合も同様な注意が必要である。

鉄のように不透明な粒子とガラスビーズのような半透明な粒子でz軸方向の信号分布が異なる。そのため、反射式プローブで粒子濃度を測定する場合、濃厚な領域でLambert-Beer則が成立しな

くなる。しかし、Fig. 1 (c)のプロープ構造にするか、細い光学繊維を多数束ねてその一部を光源とすると高粒子濃度領域までこの法則が成立するようになる。

光学繊維の直径と検出可能な粒子径との間には特定な関係が生じる。一般的に、光学繊維の直径より大きな粒子は個々の粒子の判別が容易で、光学繊維径の半分以下の粒子になると個々の粒子を検出することが難しくなってくる。そのため、適切な光学繊維径、粒子径の選択が必要となる。ただし、光学繊維径に比較して粒子径が小さくなると反射式プロープを使った粒子濃厚相と気泡相との区別が容易になる。

おわりに

流動層研究に光学繊維プロープの応用例がますます増加しており、本プロープのポテンシャルが高いといえる。本稿では紙数の都合で筆者らの研

究を紹介する代わりに、光学繊維プロープを混相系の測定に適用する際の一般的な知識、について主として紹介した。プロープ構造、データ処理法などを工夫することにより、ここでは難しいとした測定も可能になることも多い。光学繊維プロープの利用を考えている方の参考になれば幸いである。

引用文献

- [1] 大木ら、化学工学,37,965(1973).
- [2] 石田愈、化学工学,43,208(1979).
- [3] 幡野博之、化学工学,49 337(1985).
- [4] 幡野、石田、化学工学論文集,8,219(1982).
- [5] Ishida,M.and H.Tanaka,J.Chem.Eng. Jpn., 15,389(1982).
- [6] Oki,K.et.al., "Fluidization", p421, Plenum Press(1980).
- [7] Ishida,M.et.al., Powder Technol.,27,1 (1980).