分散系二相流のレーザ複合計測*

日本機械学会論文集(B編)
74巻742号(2008-6)

菱 田 公 —*1

Combined Laser-Based Measurements for Dispersed Two-Phase Flows

Koichi HISHIDA*2

*2 Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

This paper presents mainly a review of experimental study on the turbulent structure of dispersed two-phase flow employing advanced laser techniques such as Shadow Doppler Velocimetry and Particle Image Velocimetry combined with Laser Induced Fluorescence. Shadow Doppler Velocimetry has been developed for particle sizing of arbitrary shaped particle, i.e. non-spherical particle. For the bubbly flow, combined shadow image and DPIV techniques allow us to acquire the detailed information of two-dimensional bubble motion and velocity vectors very close to the bubble. Microscale structures of turbulence associated with dispersed phase motion are certainly obtained by these Laser measurement techniques. Furthermore, PIV measurements in micro channel flow with sub-micron solid particles evaluated electroosmotic flow from particle motion in an applied electric field.

Key Words: Dispersed Flows, Gas-Solid, Gas-Liquid, Liquid-Solid Two-Phase Flows, Laser Techniques, Particle Image Velocimetry, Micro Scale

1. はじめに

連続媒体中に異相物質が分散する二相流では、運動量、物質およびエネルギーの移動が複雑に絡み合うため、いまだ解明されていない部分が数多い。このような混相流動の本質を把握するためには流れの構造が本質的に多重化される乱流の微細構造を実験的に明らかにすることが、より普遍的な混相乱流のモデル化には必要不可欠である。

非接触法による測定という観点からは、レーザを用いる光学的測定法が挙げられる。もちろん、光学的な測定は光路をさえぎる粒子の量が多くなると、測定が困難になるという弱点があるにせよ、場を乱さずに測定ができるというこれまでになかった非接触法であることから、レーザを用いる計測法は新しい知見を得るための有力な方法の一つとなる。代表的な方法にはレーザドップラー流速計 LDV (Laser Doppler Velocimetry) と粒子画像流速計 PIV (Particle Image Velocimetry) がある。LDV が 1964 年に Yeh-Cum-

mins⁽¹⁾ により発表されて四十余年、PIV は 1984 年に Adrian⁽²⁾ により初めて発表され、二十余年が過ぎようとしている。

1970 年代にはいって急速に進歩し、性能が安定してきたレーザドップラー流速計 (LDV) を二相流に適用することが考えられ、多くの研究者によって測定が試みられてきた。さらに、光減衰に対応し得るドップラー位相法の手法の開発・改良が進み、より高度の情報が入手できるようになってきている。

一方、近年のデジタル技術の著しい進展によって、点計測から面的な計測が可能になってきた。これらは Adrian⁽³⁾ による面的な測定法のレビューにまとめられている。最近では熱流動場の多点同時計測を目的として、ビデオ画像を利用した流速や温度、濃度等の面的計測手法に関する論文が数多く発表されており、強力な計測法として認められつつある。その中では流速測定法として確立されてきており、計測装置としての製品化も進んでいる。しかし、高価な画像計測システム一式を購入したとしても、ハードウェアに依存した多くの限界や細かいノウハウの不足によって、必ずしも満足な結果をもたらすとはいえない。そこには実験者が測定原理および計測システムの詳細を理解していることはもちろんのこと、独自に工夫した計測を行

* 原稿受付 2008 年 2 月 28 日。

*1 正員、フェロー、慶應義塾大学理工学部 (〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

E-mail: hishida@sd.keio.ac.jp

う必要がある。

著者の恩師(前田昌信慶大名誉教授)は最近, これらの経緯について連載記事にまとめられておられるので, 参考にしていただきたい⁽⁴⁾。この展望では著者らの研究室でこの20年あまりの間に自分自身で開発し, 単なる速度測定にとどまらず, 粒子径やその形状の測定などを付加した複合計測システムについて展望することにする。

2. レーザ流速計による二相流動計測

レーザ流速計は図1に示すようにレーザ光を2本に分け, 1点に結ぶことにより, その交差部分を通過する粒子の速度が測定できる。LDVに分散相の粒子径を測定できる機能を加える方法を図1に示す。Mieの散乱理論に基づき散乱光強度を測定するもの, ドップラー信号の明りょう度(ビジビリティ)より測定するもの, 複数の受光素子間の位相を検出して粒径を測定するものなどがある。著者らもこれらの手法を開発

し, 二相流の流動の解析を行ってきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。散乱光強度法は散乱パラメータ($=\pi d/\lambda$, λ :レーザ光の波長)が約5以上では散乱光強度は粒径のほぼ二乗に比例するのでLDVの測定体積のほぼ中央を通過した粒子の信号を検出すれば粒径と速度が同時に測定できる。その信号処理は, 図2に示されるようなペデスタル信号にフィルタをかけ, おおののドップラー信号の周波数を計測すれば速度が求められる。処理器としては, カウンタとトラッカタイプのものがよく用いられてきたが, 最近では, デジタル信号処理技術の進展に伴い, 自己相関法やFFT法⁽⁷⁾による処理器が広く用いられている。これらは従来のカウンタタイプに比べノイズに強いなどの特徴を有する。

二相流中での乱流構造を明らかにするには, 両相の変動速度までの確にとらえる必要がある。そのような場合, 大径および小径粒子が弁別できる程度でも, 両相の速度を正確にとらえられることのほうが重要である。連続相に1 μm 程度のトレーサ粒子を混入してお

Fig. 1 Modified Laser Doppler Velocimetry with particle size discrimination

Fig. 2 Typical signals from LDV and principles for particle sizing

Fig. 3 Mean velocity profiles in jet flow

Fig. 4 Turbulence intensity profiles in jet flow

けば両相の速度および乱流諸量を測定できる。粒径測定の場合は悪くても、トレーサ粒子(小径粒子)と分散相の大径粒子との判別がつけられるような場合には、はん用の光学系をそのまま用いることができ、比較的簡単に二相流動場の測定が可能である。信号処理系は通常の LDV よりもやや複雑になっているが、測定体積のほぼ中央部を通過する粒子からの散乱光強度の差によって、気相のトレーサ粒子と、大径のガラス粒子とを弁別する⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これにより分散相側の速度と連続相である気相の速度の同時計測が可能となる。

噴流に関しては比較的多くの実験結果が報告されている。市販の LDV 単体では単に分散相の速度を計測することは容易であるが、気相の乱れの測定を行うことは難しい。それぞれの研究者ごとに前述のような信号処理の工夫をこらしている。Modarress ら⁽¹⁰⁾は 2 波長 LDV を用いて気相と分散相との信号を分離している。

著者らの行った噴流での結果⁽⁹⁾をまとめて示す。これらは十分発達した円管から重量混合比 0.3 で鉛直下方に流れる場についての測定結果である。図 3 は流れ方向の平均速度分布である。重力方向に流れる下降流であるために、気相より粒子が先行しているのがわかる。また、二相時の気相速度は粒子により単相時に

Fig. 5 Optical arrangement of Shadow Doppler Velocimetry

Fig. 6 Signal processing for shadow image

比べ加速されているのが示されている。図 4 には流れ方向と半径方向の気相の乱れ強さの分布を示す。せん断が最も強い半値幅付近で大きく乱れが減少している。これらの粒子による乱流の変調が定量的にとらえられた結果は、二相乱流の数値モデルの構築に多大の寄与をした。

3. 投影法レーザ流速計(非球形粒子計測)

工業上現れる固気二相流はほとんどの場合、非球形粒子群であるが、それらの流れに対する計測法の一つとして、レーザ流速計の光学系を基本とした非球形粒子の計測システムについて解説する。このほかにも回折光強度による等価直径の計測法がある⁽¹¹⁾。ここでは、粒子の二次元的な形状をも測定する投影法レーザ流速計(Shadow Doppler Velocimetry: SDV)について述べる。

投影法の基本的な原理と構成に関して、図 5 に光学系の概略図を示す⁽¹²⁾。送光にははん用の 2 ビーム LDV を使い、2 組の独立した受光系で速度と粒径測定を行う。粒子の速度は、フォトダイオード(APD)で受光したドップラー信号から FFT 法で算出した。粒径測定受光系には、32 チャネルの並列出力をもつニアフォトダイオードアレイが取り付けられており、粒子が測定体積に進入すると、結像面上に粒子の二次元的な影が投影される。

Fig. 7 Example of measured particle shape

Fig. 8 Terminal velocity of spherical and non-spherical particles and their attitudes

図6に示されるようにセンサの瞬時の出力は、粒子の水平方向の一次元像に対応するので、速度情報を用いて信号を時系列に追えば粒子の二次元形状を再構成できる。信号処理において、記録には32チャンネル、8bit トランジェントレコーダを用い、データはパーソナルコンピュータに転送後、ソフトウェア上で処理を行った。なお、実際の像面積の計算は、各粒子のデータを二つのしきい値で3値化(濃い影、薄い影および影なし)したのちに計算される。図7にステンレス粒子に対する測定例を示した。その飛行姿勢も含めて計測されているのがわかる。図8は静止雰囲気中を自然落下する球形ポリエチレン粒子と非球形の銅粒子の速度とその際のアスペクト比を示す。球形粒子では、落下終端速度で表される理論値とほぼ等しい値を有するのに対して、非球形の粒子ではそれより著しく小さな値を示している。そして水平方向の長さを分母にしたアスペクト比も0.7付近にピークを有し、抵抗が大きくなるようにして落下する様子がとらえられている。

4. 固液二相流中のラグランジアン計測⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

粒子画像流速計(PIV)は面的な流れ場の計測が可能で、現在では汎用の計測器として広く使用されるに至っている。著者らも、PIVの開発の初期の段階から、種々の工夫を加えてきた。現在では常識的に使わ

Fig. 9 Lagrangian PIV system for channel flow

Fig. 10 Strain and vorticity in solid-liquid two-phase turbulent flow

れている CCD カメラを使い、オンラインで信号処理することである。初期の PIV は写真フィルムを使い、その処理は多大な時間を要していた時代である。そこで Sakakibara ら⁽¹⁵⁾により、連続的な撮像により、時系列の面的な流れ場の計測を行えるようになった。この当時、従来の PIV と区別するために DPIV (Digital-PIV) と呼んでいた。もちろん、この手法は分散相の形状まで認識でき、固液二相乱流への適応に展開した。

図9に固液二相流の計測に用いた DPIV システムの概略を示す。CCD カメラと光源はシャトルに固定されており、上下移動する。これは後述するラグランジアン計測の場合に利用する。トレーサ粒子として 10 μm 高密度ポリエチレン粒子(比重 0.96)を懸濁した流動場の X-Y 面上に、レーザライトシートを照射し、流動場の画像を CCD カメラに録画する。録画した映像を 1 ビデオフレームずつコンピュータ中の画像取込装置に格納する。撮影した 2 画像間の局所的な濃度分布パターンを相互相関係数によりマッチングさせて、分散粒子およびトレーサ粒子の速度を求める。分散粒

Fig. 11 Measuring system for two-phase flow using fluorescence tracer particles (left side picture) and Show Imaging (right side), and high repetition YLF laser

Fig. 12 Instantaneous velocity correlation, $u_z u_r$: left for single phase flow and right: in two-phase flow with 1-2 mm in diameter bubbles

子とトレーサ粒子の弁別は、分散粒子の参照パターンを用いて行う。流動場は鉛直チャンネル流で、流体には水を用いる。チャンネル幅を用いたレイノルズ数を5700とし、試供粒子には450 μm ガラス粒子 ($Re_p = 30$) ほか4種類の粒子を用いる。粒子および流体の速度の計測にはPIVを使用する。

図10は測定結果の一例で、ラグランジアン座標からみた粒子群周りの変動速度のひずみ度 S と渦度 ω の瞬時の分布が示されており、粒子間距離が短くなると粒子間に大きなひずみが生じていることが明確に示されている。

5. 蛍光粒子を用いた気泡流の計測^{(16)~(18)}

刻々と変化する気泡形状とその周囲流体の相互作用の解析には、多点同時計測が可能である粒子画像流速

計は非常に有効手段ではあるが、トレーサ粒子に比べて1000倍以上の径を有する気泡を含む流れでは、気液界面の存在により、さまざまな方向に屈折するレーザ光の強度がトレーサ粒子の反射光に比べて非常に大きいため、CCDの飽和を引き起こし、気泡近傍のトレーサ粒子像の認識が困難となる。そこで、LIF (Laser-Induced Fluorescence) を応用することによりこの問題を解決し、図11にこのシステムの概略を示す。

可視化用トレーサとしてMMA(メタクリル酸メチル)にローダミンBを混入させた蛍光粒子(比重1.02, 粒径3~5 μm)を用い、反射光をカットするカラーフィルタを装着したCCDカメラで蛍光粒子の蛍光のみを撮影する。これによって気泡とトレーサ粒子を画像上で分離することが容易となり、気泡のごく近傍においてもトレーサ粒子の撮影が可能となる。一方、気泡の形状測定については赤外線投影形状測定法(Infrared Shadow Technique)を用いる。これは対象とする物体に光源から赤外光を照射し、物体に対して光源と対面に置かれた撮像センサによりその影を撮影することで物体の形状を認識する方法である。

図12に示す計測システムには1284×1024 pixelsの解像度で500 Hzまで撮像可能なCMOSの高速度デジタルカメラを用いて、時系列のPIV計測が可能となっている。レーザシート光および撮影される画像の屈折によるひずみを極力抑えるためにFEP (fluorinated ethylene propylene copolymer)を用いて円管直径44 mmを上昇する流れを対象としている。レイノルズ数は約10000、ボイド率約1%程度で、上昇気泡流の流動計測を行った結果よりレイノズル応力の空間分布を示したもので、単相時には管壁近くにおいて大きな正の値を有する部分が存在するのに対して、気泡混入時ではその値が極端に小さくなり分布していることがわかる。

6. 干渉画像法による高密度液滴群の計測⁽¹⁹⁾

高密度の噴霧などの粒径や速度の情報を得ることは、噴霧燃焼などの高効率化など極めて重要な問題である。従来から粒径と速度の同時測定に関しては位相ドップラー法などが確立されているが、点計測であり、瞬時の面的な情報を得ることができない。そこで、著者らの研究グループでは、干渉画像法による新しい手法を開発した。

図13では、レーザシート光の中の球形の液滴からの散乱光を集光すると焦点面には二つの点が観測される。これを噴霧群に適応したものが図14に示す可視

Fig. 13 Basic configuration of the interferometric laser imaging technique

Fig. 14 Example of interferometric image of spray

Fig. 15 Details of the receiving optics for compression with cylindrical lenses, and an example of measured interferometric image with compression lenses

化画像である。焦点からはずれた画像はあたかもピンぼけのように見えるがさらに拡大してみると、そこに干渉じまが観察される。これは、液滴の表面反射と内部屈折の光路差に基づくもので、この干渉じまの数が粒径に対応している。しかしながら、高密度の噴霧では画像が重なり合い、それぞれを同定することは難しい。そこで、この画像を一定方向だけに圧縮すると、図15に示すような画像に変換される。さらに2枚の画像から、それぞれの移動量から速度が評価される。計測システムとしては、比較的高出力(100 mJ/pulse)のYAG(532 nm)を用いて、撮像装置は1000×1000 pixelsの高解像度のデジタルカメラを設置してい

Fig. 16 Examples of the measured results of instantaneous droplet size and velocity distribution at $z=25$ mm, 45 mm of $r=20$ mm from the nozzle at $t=4.2$ ms after the start of injection

Fig. 17 Schematic of the measurement system using inverted epi-fluorescent microscope

る。図16は間欠燃料噴射ノズルからの液滴の速度と粒径の大きさを測定した結果の一例で、噴射後1.2 ms後の粒径、速度の瞬時の空間分布である。図16中に示されるように下流域でより大径の液滴が多く存在していることが示されている。

7. サブミクロン粒子を用いたゼータ電位の評価⁽²⁰⁾

近年、微細加工技術の進展に伴い、幅数 μm から数百 μm の流路の作製が実現されてきた。マイクロ流路内の流れの大きな特徴は、表面積・体積比が大となる

Fig. 18 Schematic of electroosmotic flow and electrophoresis

Fig. 19 Calculation flow chart of zeta-potential

ことで、m オーダ以上の流体では埋もれがちな流路壁面の電気的性質(ゼータ電位に起因)が顕在化し、電界を印加することで流動が生じることにある。この流れは電気浸透流と呼ばれ、その速度はゼータ電位の大きさに依存する。そのため、従来からゼータ電位の計測法の確立が望まれてきた。

著者らの研究グループでは、流体中にサブミクロン蛍光粒子を混入し、図 17 に示すような蛍光顕微鏡とマイクロ PIV を用いて、速度計測結果からゼータ電位を評価する手法を提案した。マイクロ流路内に電界を印加すると、図 18 に示すように負に帯電した粒子は電気泳動により正極へ移動し、流体は栓流となって負極へ駆動される。そのため、マイクロ PIV による見掛けの粒子速度 U_{obs} は、電気泳動速度 U_{EP} と電気浸透流速度 U_{EOF} の合成速度となる。図 19 にゼータ電位を算出するまでのフローチャートを示す。電気泳動速度は密閉セル内の粒子挙動を計測し理論的に解析することで求められることから、電気浸透流速度は見掛けの粒子速度から電気泳動速度を差引くことで評価

Fig. 20 Electroosmotic flow velocity and zeta-potential of silica glass microchannel with 95% confidence level in comparison to empirical equation versus pH

できる。さらに、流路壁面のゼータ電位は、電気浸透流速度との線形関係から評価でき、その結果を図 20 に記した。なお、図 20 に併記した実線はゼータ電位の経験式であり、実験値と良好な一致を示していることが明らかである。これらの計測は、マイクロ PIV の応用の一つであるが、ミクロンオーダでの分散系二相流動がその電気化学的な性質に依存して発生していることに着目して計測システムを構築した例である。

8. おわりに

本研究展望では、著者らが過去に行ってきたレーザを利用した流動計測について解説を行った。本文中にも少し述べたが、この種の計測にはこの 20 年のエレクトロニクスの進展に負うところも少なくない。特にパーソナルコンピュータの能力の向上は計測システムの中においてインテリジェント化に大きく貢献してきた。現在では一般的な流れ場・温度場であれば、だれでも簡便に計測できるようになった。レーザ流速計や粒子画像流速計などにおいても計測システムのパッケージ化が進み、高度なデータ処理までもが簡単に行うことができる。これらは長年にわたり研究された要素技術の蓄積の結果であるが、すぐ結果が得られる市販のシステムを利用し、ある程度の成果が得られてしまうと、さらに本質的な現象を見いだそうとする努力をすることが薄れてきたように思われる。混相流の流動計測のみならず、熱流動のかかわる計測には物理学・化学の原理原則を基礎とし、斬新なアイデアと融合して、さらなる進展が行われる。「未知なる量を極限に至るまでとらえたい」という研究者の探究心をもち続け、ノウハウを蓄積した手作り装置で試行錯誤を繰返すことで、新しい計測技術となって実用に供する基盤技術となっていくものであると著者は信じている。こ

の研究展望が熱流体の複雑な現象解明や設計要素としての重要な情報の収集の一助となれば幸いである。

文 献

- (1) Yeh, Y. and Cummings, H. Z., Localized Fluid Flow Measurements with an He-Ne Laser Spectrometer, *Applied Physics Letters*, Vol. 4 (1964), pp. 176-178.
- (2) Adrian, R. J., Scattering Particle Characteristics and Their Effect on Pulsed Laser Measurements of Fluid Flow; Speckle Velocimetry vs. Particle Image Velocimetry, *Applied Optics*, Vol. 23 (1984), pp. 1690-1691.
- (3) Adrian, R. J., Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, *Annual Reviews Fluid Mechanics*, Vol. 23 (1991), pp. 261-304.
- (4) Maeda, M., The Development of Flow Measurements Supported by the Progress of Novel Electronic Devices, *Journal of Japan Society of Fluid Mechanics*, Nagare, Vol. 25 (2006)-Vol. 26, (2007).
- (5) Hishida, K., Wanajou, T. and Maeda, M., Characteristics of Fluid Flow and Heat Transfer in Gas-Solids Multiphase Flow Behind a Step (Measurements of Turbulent Flow by Laser Velocimeter), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 51, No. 467 (1985), pp. 2176-2183.
- (6) Hishida, K., Takemoto, K. and Maeda, M., Turbulence Characteristics of Gas-Solids Two-Phase Confined Jet (Effect of Particle Density), *Japanese Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1, No. 1 (1987), pp. 56-69.
- (7) Hishida, K., Kobashi, K., Sanai, N. and Maeda, M., Simultaneous Measurement of Velocity and Size of Flowing Particles (Detection of Phase Shift of Doppler Signals by Fast Digital Processor), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 55, No. 509 (1989), pp. 80-85.
- (8) Maeda, M., Hishida, K., Matsumoto, C. and Ikai, S., Velocity Measurements of Dispersed and Continuous Phase in Suspension Flow by a Modified LDV System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, Vol. 48, No. 425 (1982), pp. 88-96.
- (9) Hishida, K., Kaneko, K. and Maeda, M., Turbulence Structure of Gas-Solids Two-Phase Circular Jet, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, Vol. 51, No. 467 (1985), pp. 2330-2337.
- (10) Modaress, D., Tan, H. and Elgobashi, S., Two-Component LDA Measurement in Two-Phase Turbulent Jet, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 22 (1983), pp. 624-630.
- (11) Morikita, H., Hishida, K. and Maeda, M., Simultaneous Measurements of Velocity and Equivalent Diameter of Nonspherical Particles Using Light Scattering Method, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 59, No. 568 (1993), pp. 3749-3755.
- (12) Hardalupas, Y., Hishida, K., Maeda, M., Morikita, H., Taylor, A. and Whitelaw, J. H., Shadow Doppler Technique for Sizing particles of Arbitrary Shape, *Applied Optics*, Vol. 33, No. 36 (1994), pp. 8417-8426.
- (13) Sato, Y., Hayashi, I. and Hishida, K., Particle Dynamics in a Turbulent Channel Flow by Lagrangian Measurements, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 64, No. 619 (1998), pp. 701-708.
- (14) Sato, Y., Fukuichi, U. and Hishida, K., Effect of Inter-Particle Spacing on Turbulence Modulation by Lagrangian PIV, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21 (2000), pp. 554-561.
- (15) Sakakibara, J., Hishida, K. and Maeda, M., Measurement of Thermally Stratified Pipe Flow Using Image-Processing Techniques, *Experiments in Fluids*, Vol. 16 (1993), pp. 82-96.
- (16) Tokuhito, A., Maekawa, M., Iizuka, K., Hishida, K. and Maeda, M., Turbulent Flow Past a Bubble and an Ellipsoid Using Shadow-Image and PIV Techniques, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 24 (1998), pp. 1383-1406.
- (17) Fujiwara, A., Maekawa, M., Iizuka, K., Hishida, K. and Maeda, M., The Structure of Turbulent Fluid Flow Involving Gas Bubble (Measurement of the Fluid Flow in the Vicinity of Bubble by PIV), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 64, No. 622 (1998), pp. 1697-1704.
- (18) Sato, Y. and Hishida, K., Energy Transport Mechanisms in Particle-Laden Turbulent Water Channel Flow, *Third International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Vol. 1 (2003), pp. 215-220.
- (19) Maeda, M., Kawaguchi, T. and Hishida, K., Novel Interferometric Measurement of Size and Velocity Distributions of Spherical Particles in Fluid Flows, *Measurement Science and Technology*, Vol. 11 (2000), L13-L18.
- (20) Ichiyanagi, M., Sato, Y. and Hishida, K., Evaluation of Electroosmotic Velocity and Zeta-Potential in Micro-channel Using Submicron Fluorescent Particles, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 71, No. 709 (2005), pp. 2316-2323.