

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月13日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560154

研究課題名（和文） 二相分散流システムにおける物質輸送機構のモデル化

研究課題名（英文） Modeling of mass transport mechanisms in two-phase disperse flows

研究代表者

三戸 陽一 (MITO YOICHI)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20422032

研究成果の概要（和文）：高精度数値シミュレーションを用いて、石油パイプライン等の二相流システムにおける物質輸送メカニズムの解明・抵抗低減手法の構築に対して検討を加えた。不均一気体乱流内の粒子・液滴の分散に対して粒子の慣性、重力、粒子・壁面間干渉、気体乱流が及ぼす影響のメカニズムを示した。当該場における乱流輸送速度と平均体積力バランスの計測により、流体乱流の減衰が分散相による大規模流体乱流構造の減衰によることを示した。

研究成果の概要（英文）：The mechanisms of mass transfer and the methods for drag reduction, in two-phase flow systems as are seen in oil pipelines, were examined using numerical simulation with a high degree of accuracy. The influences of particle inertia, gravity, particle-wall interaction and gas turbulence on the mechanisms of dispersions of particles and of droplets in nonhomogeneous gas turbulent flow were presented. The measurements of the turbophoretic velocities and the balances of the mean body forces showed that the damping of the fluid turbulence is due to the attenuation of the large-scale fluid turbulence structures, that is caused by the disperse phase.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，流体力学

キーワード：混相流，乱流，アニュラー流，分散流，マイクロバブル，直接数値シミュレーション，ランジュバン方程式，確率シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 石油パイプラインや原子力発電所において用いられる相変化を伴う熱交換器等において生じる液滴分散流内の液体輸送については、現象の複雑さのため、他の気液二相流れ形態に比較して解析・理解が遅れていたが、2003年に始められた米国イリノイ大学の

Hanratty と三戸による修正ランジュバン方程式を用いた確率シミュレーション・直接数値シミュレーションを用いた理論解析の成功によって、当該場における液体輸送メカニズムの詳細が解明された。

(2) (1)と類似の固気粒子分散流は、各種工業プラントや資源開発技術等において用い

られる気流を用いた粒状物質輸送システム、各種微粒子の気流による拡散とそれらの人体内部への侵入等において現れる流れ形態である。当該場に対する実験、数値シミュレーションを用いた解析は多数存在するが、基本的物理の理解が不十分であるため、精度を有するモデルの構築までには至っていない。

(3) 粒子や液滴の輸送を担う流体乱流の基本的メカニズムの解明が、1980年代以降、主に、直接数値シミュレーションを用いて進められてきている。渦構造の挙動など速度場の構造については詳細が判明しているが、物質や温度等のスカラーの乱流輸送や粒子等による流体乱流変化のメカニズムについては依然不明な点も多く、乱流に対する理解は十分とは言いがたい。このことは、壁面摩擦抵抗低減手法として一部で応用が進められているポリマー、界面活性剤、マイクロバブルの具体的利用方針の不在にも現れている。(1)、(2)における分散相の乱れだけでなく、単相乱流に対するさらなる理解が求められている。

(4) (1)-(2)の分散流における境界・壁面は、多くの場合、波状等の粗面となっている。粗面状に形成される乱流構造や剥離構造による流体運動量輸送の変化、これによる粒子濃度・温度等のスカラーの輸送の変化に対して多くの研究がなされているものの、高精度数値シミュレーションを用いた理論解析、現象に対する理解は依然不足している。

2. 研究の目的

(1) Hanratty・三戸によるチャンネル気体乱流内に形成されるアニュラー型液滴分散流に対する数値解析をさらに拡張し、分散液滴による流体乱流減衰・壁面摩擦低減のメカニズムについて検討を加える。

(2) Hanratty・三戸によるアニュラー型液滴分散流に対する数値解析を固気粒子分散流に拡張し、不均一気体乱流内における固体相の質量輸送のメカニズムとこれに対する粒子慣性と重力の影響に対して検討を加える。当該場における、粒子添加による流体乱流・壁面摩擦の変化のメカニズムについて検討を加える。(1)との比較により、粒子・壁面間干渉が分散相の質量及び運動量の輸送・流体乱流・壁面摩擦に及ぼす影響に対して検討を加える。

(3) チャンネル内液体乱流に対するマイクロバブル添加の影響を直接数値シミュレーションを用いて検討する。

(4) (1)-(2)における粒子・液滴の輸送の解析より、輸送機構としての流体乱流の役割について検討を行う。(1)-(3)の結果を用いて、添加物を用いた壁面摩擦抵抗低減においてキー（鍵）となるメカニズムを導く。

(5) 流体流れの剥離と再付着が流体乱流内

の運動量とスカラーの輸送に及ぼす影響について検討を行うため、流れ場に波状壁を有するチャンネルを仮定する。直接数値シミュレーションを用いて、波状壁による流体乱流構造の変化と、これに伴うスカラー輸送の変化について検討を加える。

3. 研究の方法

本研究は高精度数値シミュレーションにより得られたデータを用いて行う。流体乱流の計算には、直接数値シミュレーションまたはラグランジアン・モデルの一種である修正ランジュバン方程式を用いた確率シミュレーションを用いる。修正ランジュバン方程式には、三戸・Hanrattyによって提案された不均一流体乱流の予測精度を向上させたモデルを用いる。直接数値シミュレーションの空間離散化には、平行平板間チャンネル内流体乱流の計算に対しては擬スペクトル法、片側に波状壁を持つチャンネル内流体乱流の計算に対しては二次精度有限差分法を用いる。粒子・液滴・マイクロバブルの形状には球形を仮定し、気流中の粒子・液滴の運動には流体抵抗と重力、マイクロバブルの運動には流体抵抗、重力、浮力、付加質量力、リフトを考慮する。粒子・液滴・マイクロバブルの流体乱流に及ぼす影響（フィードバック）の計算にはポイント・フォース法を用いる。

(1) アニュラー型液滴分散流は、流路壁面上にランダムに分布させたポイント・ソースからの粒子の射出によるフィルム流のアトマイゼーションのモデル化と、壁面に衝突した粒子の流れ領域からの除去によるデポジションのモデル化によって表される。粒子が気体乱流に及ぼす影響を考慮しない場合、当該場における発達濃度分布は、単一ウォール・ソースから射出された粒子の射出時刻から全粒子がデポジットした時刻までの濃度分布の積分によって表される。粒子が気体乱流に及ぼす影響を考慮する場合には、一定流束で粒子の射出を繰り返し、デポジション流束が射出流束に等しくなる場合にのみ、発達濃度場を得ることができる。発達濃度場においては、壁垂直方向粒子速度成分の濃度重み付き平均は、壁からの全ての距離において0となる。本基準は、固気分散流の発達濃度場の計算においても用いられる。

流体乱流の摩擦レイノルズ数については、確率シミュレーションを用いた解析においては150, 300, 590を考慮、直接数値シミュレーションを用いた解析においては、150と300を考慮した。粒子のサイズについては、計算負荷の小さい確率シミュレーションを用いた解析においては、ブラウン運動の影響が現れる無次元ストークス時間定数1から、流体摩擦の影響が無視できる無次元ストークス時間定数100,000までを考慮、計算負荷

の大きい直接数値シミュレーションを用いた解析においては、粒子運動が流体乱流の影響を大きく受ける無次元ストークス時間定数 5~200 を考慮した。確率シミュレーションを用いた計算では無重力の場合と水平流を考慮、直接数値シミュレーションを用いた計算では無重力の場合を考慮した。水平流における重力効果の検討では、摩擦速度を用いた無次元終端速度 0~3 の領域を考慮した。

(2) (1) アニュラー型液滴分散流の粒子・壁面間干渉に完全弾性衝突を仮定することにより、固気粒子分散流の計算を行った。本計算においては、流体乱流の計算に確率シミュレーションを用いるアプローチは各種パラメータの領域を検討するための予備計算として用い、不均一気体乱流内における固体相の輸送と二相間干渉のメカニズムの解明とモデル化を行う本計算は流体乱流の計算に直接数値シミュレーションを用いて行った。無重力の場合・水平流内・鉛直流内の粒子分散の計算を確率シミュレーションを用いて行った。直接数値シミュレーションを用いた主計算においては、無重力と鉛直流の場合を考慮した。粒子慣性には、粒子運動が流体乱流の影響を強く受ける無次元ストークス時間定数 5~200 の領域を仮定した。流体乱流対重力効果を表すフルード数には、移流効果が支配的な無限大と 5、重力効果が現れる 0.02 の 3 通りを、上昇流と下降流に対して仮定した。分散相が流体乱流に及ぼす影響の検討においては、無重力において、体積割合 0~ 2×10^{-3} を仮定した。二相間の運動量収支の評価においては、従来用いられている平均応力バランスに加えて、平均体積力バランスを用いた。

(3) マイクロバブル分散流の計算は、流体乱流の計算に直接数値シミュレーションを用いて行った。アプローチとして確立されていない点が多いため、まず、気泡の運動において考慮する各力の影響、計算時間ステップが気泡運動に及ぼす影響に対して検討を行った。次に、マイクロバブルが液体乱流に及ぼす影響について、体積割合 0, 1×10^{-4} , 1×10^{-3} の場合に対して検討を加えた。本研究課題終了後、体積割合を拡大し、重力/浮力の効果についてさらに検討を加える予定である。

(4) 波状チャネル内における流体乱流とスカラー輸送の計算用コードを、境界適合座標系、二次精度有限差分法を用いて作成した。本計算は、本研究課題終了後、計算機が確保でき次第、開始する。

4. 研究成果

(1) 重力の影響を無視できる条件（高フルード数）下にあるアニュラー型液滴分散流におけるバルク平均濃度を用いて定義されるデポジション係数の体積割合に対する変化を

図 1 に示す。体積割合の増加に伴うデポジション係数の減少、無次元粒子時間定数 $\tau_p^+ \geq 20$ における粒子慣性の減少に伴うデポジション係数の減少が示される。 $\tau_p^+ \leq 20$ におけるデポジション係数の変化の消失は、図 2 に示される $\tau_p^+ \leq 20$ における平均デポジション速度の体積割合に対する変化の消失に起因する。これは、粒子慣性の減少に伴い、外部領域の流体乱流からのフリーフライトによるデポジションが消失し、デポジションのメカニズムが乱流拡散のみによることに起因する。デポジション係数に対する粒子慣性の影響は、デポジションに対するフリーフライトの貢献の大きさを示す。

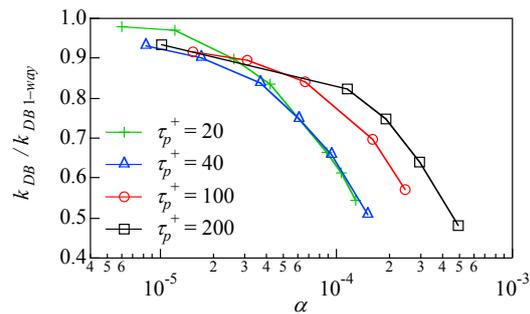


図 1 デポジション係数

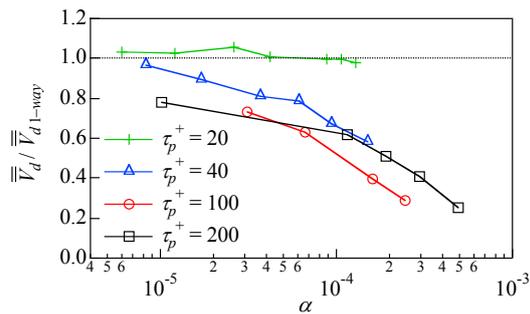


図 2 平均デポジション速度

図 3 にアニュラー型液滴分散流における平均圧力勾配の体積割合に対する変化を示す。体積割合の増加に伴う抵抗の減少が示される。これは、体積割合の増加に伴う流体乱流の減衰、アトマイゼーション時に壁面から高速で射出される粒子群と高速でデポジットする粒子群による壁面近傍領域の流体の加速による。

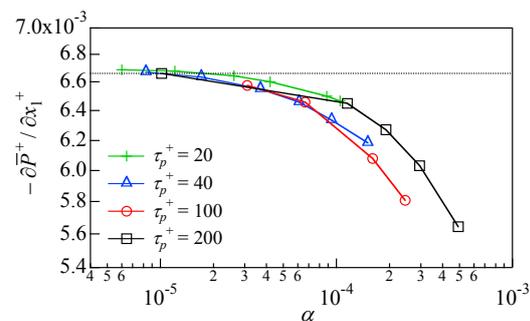


図 3 平均圧力勾配

(2) 図4に、壁面上において粒子の射出とデポジションを仮定したアニュラー型粒子分散流と粒子・壁面間干渉に完全弾性衝突を仮定した固気粒子分散流の体積割合 1×10^{-4} における流体レイノルズ剪断応力の壁垂直方向分布を示す。これは、粒子・壁面間干渉の変化により生じた濃度分布の変化に起因する流体乱流の変化を示す。固気分散流の場合には壁面近傍領域において粒子の大きな集積、アニュラー型分散流の場合には壁面近傍領域における粒子濃度の減少とコア領域における粒子濃度の増加が見られる(図5)。流体乱流の減衰・抵抗の減少には、粒子をコア領域に輸送する(あるいは、壁面近傍領域に粒子を滞留させない)メカニズムが必要であることが示される。

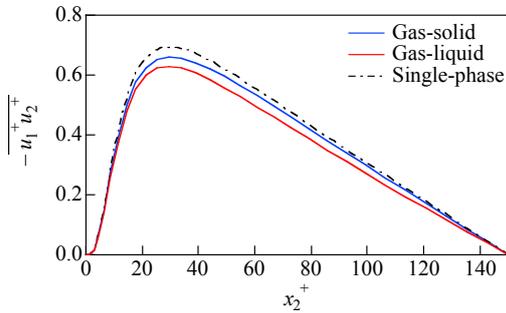


図4 粒子・壁面間干渉の変化に伴う流体レイノルズ剪断応力の変化

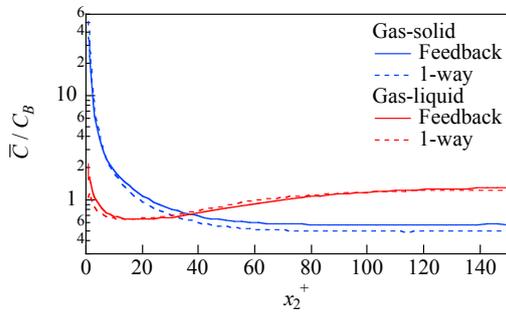
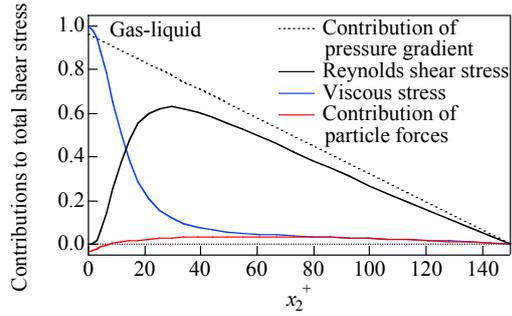
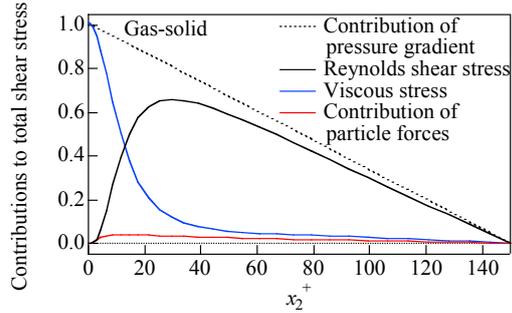


図5 粒子・壁面間干渉の変化に伴う濃度分布の変化

図6に、アニュラー型分散流と固気分散流における流体相の応力バランスを示す。二つの流れ形態において、粒子力による応力の壁近傍における挙動が大きく異なることが示される。固気分散流においては、粒子・壁面間干渉において運動量の流入出がないため、粒子応力の壁面上の値は0となる。アニュラー流においては、アトマイゼーション時の射出粒子とデポジション過程にあるフリーフライト粒子により流体が加速されることが、壁面上粒子応力の負値に示される。



(a) アニュラー型分散流



(b) 固気分散流

図6 粒子・壁面間干渉の変化に伴う応力バランスの変化

(3) Hanratty・三戸の研究により、広範囲の条件の粒子分散の計算において修正ランジュバン方程式を用いた確率シミュレーションの有用性が示されているが、本研究において予備的に行った重力の影響が卓越する鉛直流内粒子分散の確率シミュレーションにおいて、過去の実験結果と大きく異なる傾向が得られた。そこで、本研究では、当該条件における確率シミュレーションの精度と現象の物理を検討するため、直接数値シミュレーションを用いて、広範囲のパラメータ領域に対する数値実験を行った。図7に、重力の影響が卓越するフルード数 0.02 の場合と無重力条件を表すフルード数無限大の場合におけるチャンネル内上昇流・下降流中に形成される発達粒子濃度分布を示す。濃度分布の変化は、粒子乱流の不均一性に起因する乱流輸送による。壁垂直方向粒子乱流強度の分布を図8に示す。中心領域における濃度増加は、重力効果による。下降流の中心領域における濃度の増加すなわち重力効果の増加が示される。図8において、粒子慣性の増加に伴う重力効果の増加、壁面からの距離の減少に伴い流体乱流のスケール・乱流機構が減少することによる重力効果の減少が示される。

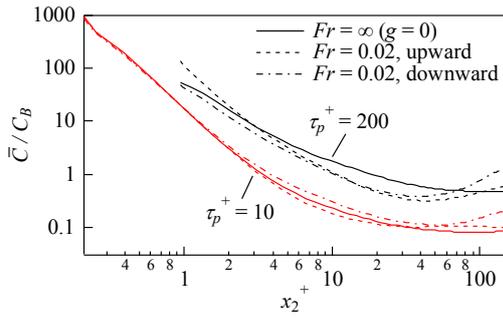


図7 鉛直チャンネル内平均粒子濃度場

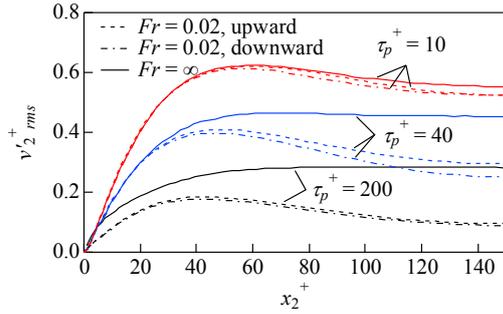


図8 鉛直チャンネル内壁垂直方向粒子乱流強度

図9に、粒子が見る壁垂直方向流体速度変動成分のラグランジアン時間スケールの分布を示す。本結果は、ポイントソースから解放された粒子が見る流体乱流のラグランジアン自己相関係数より計算されたものである。重力効果による粒子が見る流体乱流の時間スケールの減少、本時間スケールが上昇流より下降流において縮小することが示される。後者は、流体乱流におけるラグランジアン相間が、上流側より下流側において縮小することによる。

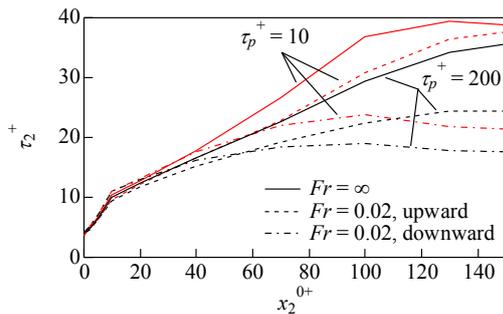
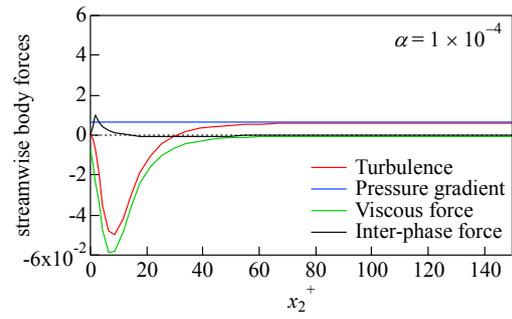
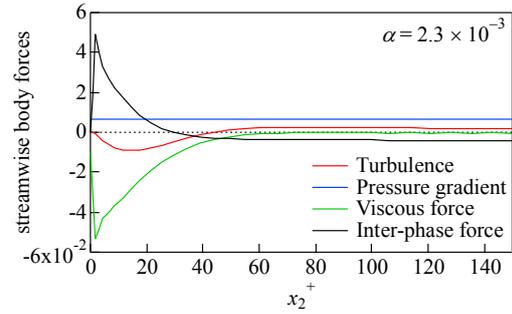


図9 粒子が見る壁垂直方向流体速度変動成分のラグランジアン時間スケール

(4) 図10は、粒子が流体乱流に及ぼす影響を検討するために計算された平均体積力バランスを表す。体積割合の増加により、二相間力が増加し、流体乱流力が減少することが示される。また、二相間力が、乱流力が表す流体の平均的大規模構造を弱める回転を持つことが示される。体積割合 2.3×10^{-3} における流体大規模構造の大幅な減衰が示される。



(a) $\alpha = 1 \times 10^{-4}$



(b) $\alpha = 2.3 \times 10^{-3}$

図10 平均体積力バランス

(5) 図11に、無重力条件下のマイクロバブル添加によるチャンネル内液体乱流の変化を示す。本計算においては、周囲流体の影響の過大評価につながる周囲流体力は考慮していない。小さい体積割合においても流体乱流の減少が見られる。

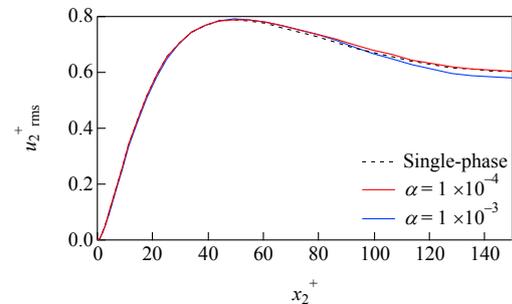


図11 マイクロバブル添加による流体乱流の変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① Yoichi Mito, 2012. Effect of particle-wall interaction in disperse flows. Journal of Chemical Engineering of Japan 45 793-799. DOI: 10.1252/jcej.12we052. 査読有。

〔学会発表〕(計20件)

- ① Yoichi Mito, 2013. Influence of inter-phase forces in turbulent gas-particle channel flow. 9th World Congress of Chemical Engineering, 8月18日-23日, Coex, Seoul, Korea.
- ② Yoichi Mito, 2013. Particle dispersion in vertical gas turbulent channel flow. International Conference on Multiphase Flow, 5月26日-31日, International Convention Center, Jeju, Korea.
- ③ 三戸陽一, 2013. 固気分散流における二相間力と大規模流体乱流構造の相関. 化学工学会第78年会, 3月17日-19日, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪.
- ④ 三戸陽一, 2012. 垂直チャンネル内粒子乱流分散に対する気流方向の影響. 第26回数値流体力学シンポジウム, 12月18日-20日, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京.
- ⑤ Yoichi Mito, 2012. Effect of gravity on particle dispersion in upward turbulent channel flow. 65th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 11月18日-20日, San Diego Convention Center, CA, USA.
- ⑥ 池田祥太, 三戸陽一, 2012. 鉛直チャンネル上昇気体乱流内固体粒子ポイントソースのラグランジアン挙動. 日本機械学会北海道支部第51回講演会. 10月20日, 北見工業大学, 北海道.
- ⑦ 牧野和人, 三戸陽一, 2012. チャンネル内希薄固気発達分散乱流の直接数値シミュレーション. 日本機械学会北海道支部第51回講演会. 10月20日, 北見工業大学, 北海道.
- ⑧ 三戸陽一, 2012. 直接数値シミュレーション/ストカスティック・シミュレーションを用いた壁乱流内粒子分散の解析. 第7回気液固分散工学サロン, 9月19日, 東北大学川内北キャンパス, 宮城.
- ⑨ 三戸陽一, 2012. 垂直チャンネル内粒子分散に対する気体乱流の影響. 化学工学会第44回秋季大会. 9月19日-21日, 東北大学川内北キャンパス, 宮城.
- ⑩ 三戸陽一, 2012. 垂直壁乱流内粒子分散における重力効果の消滅. 日本混相流学会年会講演会, 8月9日-11日, 東京大学柏キャンパス, 千葉.
- ⑪ 三戸陽一, 2012. 垂直チャンネル内固気発達分散流における重力の効果. 第49回日本伝熱シンポジウム, 5月30日-6月1日, 富山国際会議場, 富山.
- ⑫ 三戸陽一, 猿渡祥悟, 2012. 水平チャンネル内固気分散流の流動形態に対する重力の効果. 化学工学会第77年会, 3月15日-17日, 工学院大学新宿キャンパス, 東京.
- ⑬ 三戸陽一, 2011. 固気分散流内気体乱流減衰に対する粒子・壁面間干渉の影響. 第25回数値流体力学シンポジウム. 12月19日-21日, 大阪大学コンベンションセンター, 大阪.
- ⑭ Yoichi Mito, 2011. Effect of particle-wall collisions in gas-solid disperse flows. 1st International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering, 10月4日-7日, 石川.
- ⑮ 三戸陽一, 百田哲隆, 2011. アニュラ型分散流における粒子周囲気体乱流に対する粒子時間定数の影響. 化学工学会第43回秋季大会, 9月14日-16日, 名古屋工業大学, 愛知.
- ⑯ 三戸陽一, 百田哲隆, 2011. 気液アニュラ一流内液滴分散の直接数値シミュレーション. 日本混相流学会年会講演会, 8月6日-8日, 京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス, 京都.
- ⑰ Yoichi Mito, Keita Kawamoto, 2011. Effect of particle size on feedback in an idealized annular flow. ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, 7月24日-29日, アクトシティ浜松・コンgresセンター, 静岡.
- ⑱ 三戸陽一, 2011. チャンネル内固気発達分散流の直接数値シミュレーション. 第48回日本伝熱シンポジウム. 6月1日-3日, 岡山コンベンションセンター, 岡山.
- ⑲ 三戸陽一, 岳上雅輝, 2011. 垂直気液アニュラ一流内の液滴分散に対するフルード数の効果. 化学工学会第76年会3月22日-24日, 東京農工大学小金井キャンパス, 東京.
- ⑳ 三戸陽一, 川本啓太, 2010. 気液アニュラ一流内の液体輸送における液滴径/体積割合の効果. 日本流体力学学会年会, 9月9日-11日, 北海道大学, 北海道.

[その他]

ホームページ等

<http://hanadasearch.office.kitami-it.ac.jp/basis/show/id/1177>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三戸 陽一 (MITO YOICHI)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20422032