

機関番号：82706

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760143

研究課題名 (和文) 高レイノルズ数流れにおける微小慣性粒子の衝突機構の解明

研究課題名 (英文) Collisions of inertial droplets in high Reynolds number flow

研究代表者

大西 領 (ONISHI RYO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・研究員

研究者番号：30414361

研究成果の概要 (和文)：定常等方性乱流場を実現するための効率的な強制法と、その強制法を組み込んだ大規模並列二相乱流シミュレーション法の開発を行った。実際にスーパーコンピュータをも使った大規模並列計算を実行し、テイラーマイクロスケール基準乱流レイノルズ数  $Re_\lambda$  が340という高いレイノルズ数における慣性粒子の衝突頻度データを得ることに成功した。得られたデータを使って既往の衝突頻度予測モデルの検証を行った結果、既往モデルは高レイノルズ数の時に乱流衝突頻度を過小評価することを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：A high-performance parallel code for particle-immersed turbulence has been developed to investigate turbulent collisions of inertial particles in air turbulence. The code adopts our original forcing method, named reduced communication forcing, to achieve a stationary state. The code has enabled us to obtain the statistics concerning turbulent collision frequency in as high as  $Re_\lambda=340$ , where  $Re_\lambda$  is Taylor microscale based Reynolds number. This data has revealed that a conventional collision frequency model underestimates turbulent collision frequency in high  $Re_\lambda$  flows.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：環境流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流、豪雨予測、粒子衝突、直接数値計算、大規模並列計算、雲乱流

## 1. 研究開始当初の背景

近年、豪雨による被害が社会問題になっている。特に2008年の夏は突発的な局地的豪雨が首都圏を幾度も襲った。過去にも、例えば、平成16年7月の新潟・福島豪雨や平成12年9月の東海豪雨、また、海外では2005年8月末にアメリカ南部を襲ったハリケーン・カトリーナによる被害など、枚挙に暇がない。その被害額は甚大であり、国土交通省

のまとめによると東海豪雨では愛知県だけでも8650億円もの被害が報告されている。また、ハリケーン・カトリーナの被害に至っては、総額で11兆円を超えたとの報告もある。人的・経済的被害を最小限に抑えるために、豪雨の発生を出来るだけ早くかつ正確に予測すること、つまり豪雨予測の高精度化が急務の課題である。

豪雨予測の高精度化のために、観測と数値

シミュレーションの両面から研究が進められてきた。その結果、時間・空間解像度の向上によって、豪雨予測の高精度化が着々と進みつつある。しかし、解像度の向上だけでは、予測精度の向上にも限界がある。さらなる豪雨予測の高精度化のためには、気象予測シミュレーションの中の物理モデルの高精度化が必要不可欠である。その一つとして、雲粒の成長プロセス計算の高精度化が考えられる。従来用いられてきたバルク法の代わりに、ビン法を用いるという動きがある。ビン法では、雲粒を大きさ別にいくつものクラスに分類することによって、雲粒の大きさを考慮することができる。バルク法に比べて計算負荷が高いが、コンピュータ性能の向上のおかげでこのビン法を用いた豪雨予測が可能となってきた。実際、ビン法を用いることによって豪雨の予測精度が向上するとの報告もある。しかし、ビン法で用いられる雲粒の成長プロセスモデルにはまだ不完全な点も多い。中でも、本研究では、乱流による雲粒の衝突成長促進効果に着目する。豪雨をもたらす雲は鉛直方向に発達する対流雲であり、その中では上昇気流によって強い乱流場が形成されている。乱流によって粒子の衝突成長が大きく促進されることが報告されており、その乱流効果を考慮することが豪雨予測の高精度化に欠かせない。そのためには、乱流効果が考慮された衝突頻度モデルが必要であった。しかし、雲乱流に見られるような高レイノルズ数流れに関しては、衝突頻度モデルを評価する衝突頻度データすらない状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、流体を通しての粒子間相互作用までを考慮できる大規模並列二相乱流シミュレーションを開発・実行すること、さらに得られた衝突頻度データによって、衝突頻度モデルの開発に資することを目的とした。

## 3. 研究の方法

3次元気相乱流場の時間発展をNavier-Stokes方程式を直接計算することによって計算し、微小慣性粒子の個々の運動をラグランジアン法により追跡計算することによって衝突頻度データを取得するプログラムを開発する。そもそも研究代表者の過去の研究によって、上記の計算を行う小規模プログラムは既に開発されていた。しかし、そのプログラムは擬スペクトル法に基づいており、並列化されていなかった。そこで、まず差分法に基づいた大規模並列プログラムの開発を行った。本プログラムの特徴は以下のようになる。

(1)気相乱流の計算には、高い並列化率が期待される差分法を用いる。

(2)差分法に親和性の高い大スケール強制法を用いる。

(3)ベクトル計算機で高い演算速度を発揮できるように、高ベクトル化率を実現する。

(4)粒子計算には分子シミュレーションで用いられるcell-index法を用いる。

本プログラムコードはその開発自体が研究になり得る、先進的なものである。

続いて、完成したプログラムを使って、慣性粒子の衝突機構がレイノルズ数によってどのように変化するかを調べる。半径 $r_1, r_2$ の粒子間の衝突頻度 $N_c(r_1, r_2)$ は粒子数密度 $n_p$ と衝突頻度因子 $K_c$ を用いて、

$$N_c(r_1, r_2) = K_c(r_1, r_2) n_p(r_1) n_p(r_2)$$

と表される。乱流中での衝突頻度因子 $K_c$ は次のように定式化される。

$$K_c(r_1, r_2) = 2\pi R^2 \langle |w_r| \rangle g(R)$$

ここで、 $R(=r_1+r_2)$ は衝突半径、 $\langle |w_r| \rangle$ は接触時相対接近速度、 $g(R)$ は近接粒子分布関数と呼ばれる。このうち、 $g(R)$ は粒子が偏在する(クラスターを形成する)ために、時間平均した衝突頻度因子が増大する効果を表す量であり、 $g(R) \geq 1$ である。

本研究は、テイラーマイクロスケール基準レイノルズ( $Re_\lambda$ )数によって、衝突機構だけでなくクラスタリングがどのように変化するかにも注目する。これらをまずは $r_1=r_2$ の場合、つまり同一径粒子だけが計算領域内にある場合について調査する。その際には、無次元量として $Re_\lambda$ だけでなく、粒子サイズ(半径 $r$ )の代わりに粒子の緩和時間と流体のコルモゴロフ時間の比を表すストークス( $St$ )数も導入する。 $St$ によって衝突頻度がどう変化するか、また、 $Re_\lambda$ が雲に見られるような高い値になった場合にどう変化するか。これら大規模並列計算によって得られるデータを使って調べる。

## 4. 研究成果

本研究では、省通信型大スケール強制法(Reduced communication forcing, RCF)を提案した。このRCF法は、従来大スケール強制法と同様に、大スケールのみエネルギーを供給することによって定常状態を達成する。従来の方法と大きく違う点は、フーリエ変換を行う前に速度に体積平均操作を行う点である。これによって、並列計算時に必要となるデータ通信量を劇的に減らすことが可能になった。具体的には、図1に示す手順で、強制力を計算する。必要なデータ通信量が小さいため、有限差分法の高い並列効率を損なうことなく、大スケール流れに強制力を負荷し、定常な流れ場を得ることが可能になった。

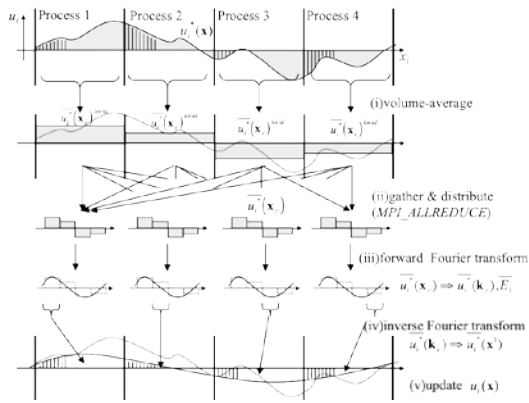


図1 : Illustration of the procedures of the reduced communication forcing (RCF)

本研究では、このRCF法の開発に関連して、さらに以下の知見を得た。

- (1) 保存型の4次精度中心差分法を用いた有限差分法は等方性乱流場における乱流統計量をスペクトル法と同様の精度で得ることができる。
- (2) 提案したRCF法は従来の大スケール強制法と同様に働き、かつ、計算コストが小さいという特徴を持つ。
- (3) 計算格子数が同じ時には、線形強制法は計算コストが一番小さい。しかし、同じレイノルズ数の流れを再現するためには、他の方法よりも多くの格子数を必要とするため、より多くの計算コストがかかる。
- (4) 有限差分法とRCF法との組み合わせは、データ通信量が小さいため、高い並列性能を持つ。
- (5) 定常等方性乱流場に対する大規模並列計算において、有限差分法とRCF法との組み合わせはスペクトル法に変わるツールとなり得る有望なツールである。

上記成果は流体計算に関するものであったが、続いて、粒子衝突計算までを含めた計算プログラムも開発した。そのプログラムのフローチャートを図2に示す。また、プログラムの特徴を以下に列挙する。

- (1) 定常等方性乱流場を得るための強制法として、有限差分法の高い並列化率を損なわない Reduced-Communication Forcing (RCF) 法を用いた。
- (2) 粒子間衝突を効率的に検出するために、cell-index 法を用いた。
- (3) 共有メモリ型並列(自動並列化ライブラリ)と分散メモリ型並列(MPI ライブラリ)の両方に対応し、両方を同時に用いるハイブリッド計算に対応した。
- (4) MPI 並列計算領域からはみ出した粒子情報の通信や cell-index 情報の更新をある時間ステップ (INTERVAL) 毎にだけ行うようにコードを設計し、分散メモリ型並列計算でのプロセス間通信コストを削減した。

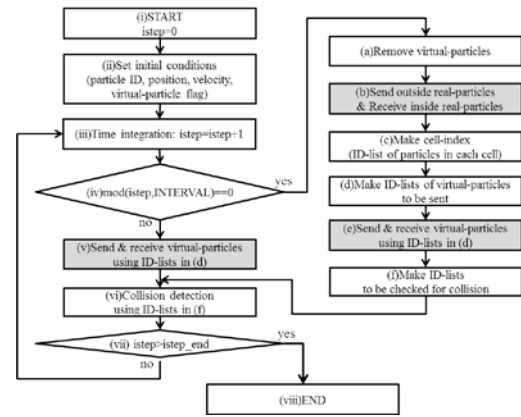


図2 : Flowchart of the particle calculation.

Procedures in gray require MPI communications.

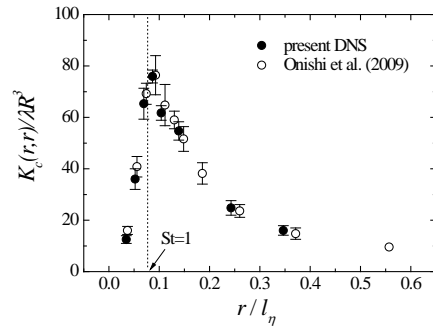


図3 : Collision kernels of monodispersed particles in the flow with  $Re_\lambda=52.3$

開発したプログラムの信頼性を確認するために、既往研究で得られた衝突頻度データを用いて本プログラムの検証を行った。図3に $Re_\lambda=52.3$ の流れ場における、様々な大きさ (St) の粒子同士の衝突頻度因子を示す。本プログラムから得られた結果はOnishi et al., *Phys. Fluids*, (2009)とよく一致しており、高い信頼性が確認された。

図4に示すように、大規模並列計算テストを行った結果、高い線形拡張性と数値計算性能も確認された。

図5にレイノルズ数が高くなるにつれて、クラスタリングがどのように変化していくかを示す。クラスタリングは小スケールの渦運動に支配されるため、レイノルズ数が高くなるにつれて、計算領域 (大スケール) とクラスタスケールの比が大きくなる。なお、図5 (d) で得られた $Re_\lambda=340$ というデータは衝突頻度データとしては最大のレイノルズ数である。

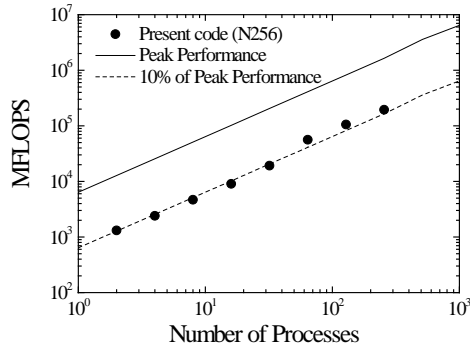


図 4 : Strong scaling of the present code

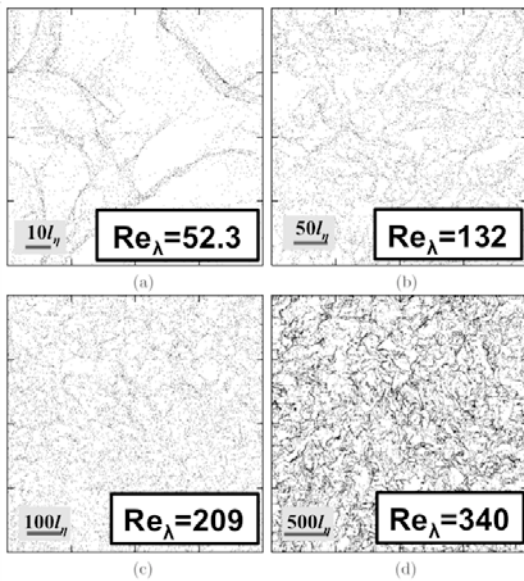


図 5 : Clustering of St=1 particles.

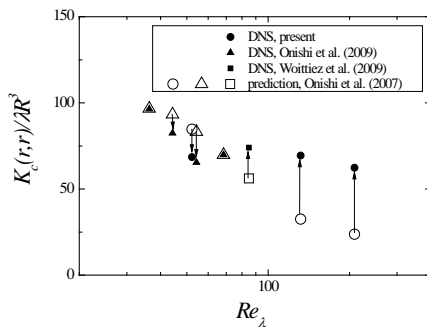


図 6 : Collision kernel of St=1 particles against Reynolds number.

図 6 に St=1 の粒子同士の衝突頻度因子のレイノルズ数依存性を示す。この図から、レ

イノルズ数が高くなるにつれて、衝突頻度因子が小さくなる様子がわかる。しかし、その減少の割合はレイノルズ数が高くなると小さくなる。既往の衝突頻度因子予測モデル（例えば、大西ら、機論 B(2007)）は、高レイノルズ数の時に衝突頻度因子を過小評価することが明らかになった。本研究で得られたデータは、今後の衝突頻度予測モデルの改良に資すると期待される。

#### 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 2 件）

① Ryo Onishi, Yuya Baba, Keiko Takahashi, Large-Scale Forcing with Less Communication in Finite-Difference Simulations of Stationary Isotropic Turbulence, *Journal of Computational Physics*, 230, pp4088-4099 (2011) 【査読有】

② Ryo Onishi, Keigo Matsuda, Keiko Takahashi, Ryoichi Kurose and Satoru Komori, Linear and nonlinear inversion schemes to retrieve collision kernel values from droplet size distribution change, *International Journal of Multiphase Flow*, 37-2, pp125-135 (2011) 【査読有】

〔学会発表〕（計 2 件）

① 大西 頌, 乱流中での粒子衝突に対する大規模並列計算, 第 24 回数値流体力学会シンポジウム, 2010 年 12 月 22 日, 慶応大学日吉キャンパス

② Ryo Onishi, Efficient Large-Scale Forcing in Finite-Difference Simulations of Steady Isotropic Turbulence, 3rd Chaotic Modeling and Simulation International Conference, 2010/6/3 発表, Chania, Greek

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：粒子状態計算装置及び粒子状態計算方法

発明者：大西 頌、高橋桂子

権利者：独立行政法人海洋研究開発機構

種類：特許

番号：特願 2010-281808

出願年月日：平成 22 年 12 月 17 日  
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.jamstec.go.jp/esc/research/Mssg/members/onishi/kakenB21760143.html>  
にて、取得データの公開を行っている。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大西 領 (ONISHI RYO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・研究員

研究者番号：30414361

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし