

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630054

研究課題名(和文)乱流と有限サイズの固体粒子群の相互作用に関する直接数値シミュレーション研究

研究課題名(英文)Direct numerical simulations on the interaction between fluid turbulence and finite-size solid particles

研究代表者

後藤 晋(Goto, Susumu)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：40321616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：乱流中には秩序だった渦構造が階層をなす。この秩序渦構造の影響を受けて、固体粒子群は乱流中で多重スケールのクラスタを形成する。本研究課題では(これまで多くの研究で質点として扱われてきた)固体粒子の大きさの影響を明らかにするために、埋め込み境界法を用いた数値シミュレーションを実行した。その結果、乱流中の渦の階層の詳細や固体粒子が乱流渦と相互作用する際に粒子の大きさが与える影響等を明らかにした。得られた結果は定性的には理に適っているが、用いた数値アルゴリズムの定量的な問題点も浮き彫りになった。いずれにしても、本研究課題の実施により、この挑戦的な課題を今後も継続的に遂行するための基盤が形成された。

研究成果の概要(英文)：Turbulence is composed of a hierarchy of coherent vortices. Solid particles are affected by these multiple-scale vortices and form multiple-scale clusters in turbulence. In previous studies, particles were treated as point-wise ones, while we conduct direct numerical simulations of finite-size particles in turbulence by using the immersed boundary method so that we can reveal effects of the finiteness of particle size. We have shown details of the hierarchy of vortices and the finite-size effects of particles on the interaction between particles and vortices. The results are qualitatively reasonable. However, we have also shown the quantitative problems of the numerical algorithm adopted in the present study. Nevertheless, we have constructed the foundation for future studies on this challenging problem on the interactions between fluid turbulence and solid particles.

研究分野：流体力工学

キーワード：乱流 混相流 固体粒子 クラスタリング 輸送現象 数値シミュレーション 秩序構造 渦

1. 研究開始当初の背景

乱流中の重い微小粒子の挙動に関する研究は、Squires and Eaton (1991) の先駆的な数値シミュレーションののち、とくに最近十年ほどの間に非常に多くの研究が行われた。たとえば、統計的に一樣な乱流中でも、粒子群が非一樣に分布しクラスタ(図1)を形成するという現象は多くの乱流研究者の興味を引き、その物理機構等の解明に向けて、精力的な研究が行われた。さらに、粒子群のクラスタ形成は粒子間の衝突を促すので、雲中での雨滴の成長や惑星形成等においても強い影響をもつことも明らかにされた。

ところが、高レイノルズ数の乱流中の固体粒子群の運動に関するこれまでの数値シミュレーション研究のほとんどは固体粒子を質点として扱い、また、粒子群の存在による乱流の変調効果も無視している。しかし、実現象の多くでは粒子の大きさや形状の影響は無視できないし、粒子群による乱流の変調も本質的な役割を演じる。一方で、数値シミュレーション環境の急速な改善と新しい混相流の数値アルゴリズムの提案により、より現実的な混相乱流の直接数値シミュレーションが可能になりつつある。



図1 乱流中の粒子群のクラスタ(粒子を質点として扱った数値シミュレーション結果)。

2. 研究の目的

高精度の直接数値シミュレーションを実行することで、有限の大きさを有する固体粒子群の高いレイノルズ数の乱流中における挙動を、明らかにすることが目的である。この研究は従来までの質点粒子の乱流中での挙動に関する数値シミュレーション研究に比べて格段に挑戦的であり、成功すれば、粒子の大きさが乱流中の粒子クラスタリング等に与える影響を初めて明らかにすることができる。

ところで、固体粒子群は乱流中の秩序立った渦構造の影響を強く受けて運動する。言い換えると、固体粒子群の乱流中での挙動や乱流への影響を解明するためには、乱流中の渦構造の詳細を理解しなければならない。したがって、本研究課題の遂行を通じて、高いレイノルズ数の乱流中の秩序渦の動力学や統計性質を明らかにすることも重要な目的で

ある。

3. 研究の方法

固体粒子群を含む乱流の流速場等を室内実験で高精度に計測することは必ずしも容易ではない。そこで本研究では、最新鋭のスーパーコンピュータの計算能力を利用してかつ、最先端の数値アルゴリズムを実装した高効率の数値シミュレーションプログラムを開発、実行する。

ただし、流れ場には空間三方向ともに周期境界条件を課し、固体境界を含まない単純な流れを扱う。このとき、流れ場を駆動するための外力が必要であるが、空間周期的で時間定常な外力を用いる。従来までの乱流の数値シミュレーションでは、統計的に一樣等方な乱流場を実現するために複雑な(たとえば、乱数を用いる)外力を課すことが多かったが、ここでは可能な限り単純な外力を用いる。

一方、固体粒子群と流れ場の相互作用は、『埋め込み境界法』により実装する。埋め込み境界法は、固体粒子と乱流との相互作用を簡便に扱える優れた数値手法であり、さまざまな実装方法が提案されている。本研究ではおもに、Uhlmann (2005) により提案されたアルゴリズムを改良して用いる。この方法では、各固体粒子表面に粒子と流体の相互作用を司る『外力点』を配置する。この工夫により、粒子が空間格子を通過する際の数値振動等が抑えられる一方、外力点上の流速等を補間により評価する必要があるため数値誤差が増える懸念もある。

数値シミュレーションは自然科学研究機構のスーパーコンピュータ等の十分な計算時間を確保して実行した。

4. 研究成果

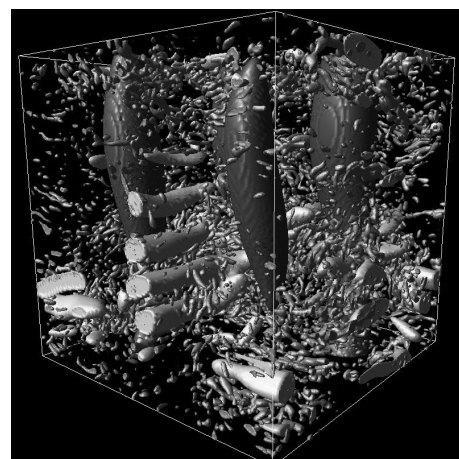


図2 乱流中の渦の階層構造(異なる長さスケールで粗視化した渦度の大きさの等値面)。

本研究を通じて得られた最も顕著な成果は発達した乱流中の渦構造の詳細が明らかになった点である。これは乱流と粒子群との相互作用を明らかにするために必要な知見を

得るために遂行した研究であったが、想定よりも研究がうまく進展した。我々の数値シミュレーションによれば、乱流中には管状の渦が階層をなして存在する(図2)。また、これらの管状渦は互いに逆向きに旋回するもの同士が対をなす傾向がある。これらの渦対の間には、強いせん断流が存在するので、より小さい渦が引き伸ばしにより効率よく生成される。このようなエネルギーカスケード現象により、より太い渦管の周囲により細い渦管が生成され、その過程により、コルモゴロフの局所平衡仮説が破れることも示された。これらの知見は、乱流中の輸送現象を考える上で重要である。

一方で、本研究の主目的であった、有限の大きさをもつ固体粒子群と乱流との相互作用の影響の解明については、残念ながら、完全には目標を達成することはできなかった。図3に示すように、(流体よりも重い)粒子が渦から排除される様子は我々の数値シミュレーションによりの確に捉えられるし、粒子の大きさを変えたときに、渦の大きさとの比に応じて、粒子群クラスタの性質が変化することも明らかにできた。本研究により明らかにされた粒子群の挙動は定性的には理に合っているが、その定量的な評価を行ったところいくつかの問題点が浮き彫りになった。たとえば、我々が開発した数値シミュレーションプログラムを用いて、単一粒子に作用する流体力の定量的な検証を行ったところ、理論や実験値を再現するためには、我々が想定したものよりもずっと大きな格子解像度が必要になることが明らかになった。つまり、高いレイノルズ数の乱流中での固体粒子群の挙動を正確に評価するためには、かなり慎重な数値シミュレーションの遂行が必要であることが分かった。そこで、現在は、数値アルゴリズムのさらに詳細な検証を行っている。

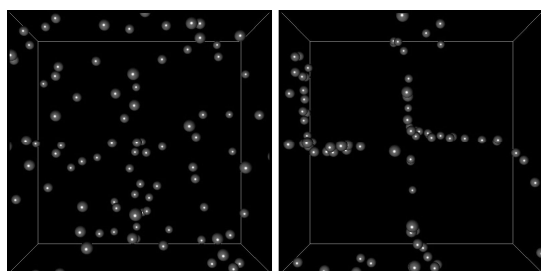


図3 渦から(遠心力の効果により)排除された(有限サイズの)粒子群の様子。粒子の慣性の影響の強さによりクラスタの性質が異なる。

なお、研究の最終年度には、我々が用いた数値アルゴリズムの開発者である Uhlmann 博士の研究室に滞在することで、我々の数値シミュレーションの問題点を整理することができた。また、一方で、彼らのグループの数値シミュレーション研究について詳細な議論を行い、我々が質点系に対して提案した理論(Goto and Vassilicos 2008)が、有限の大きさをもつ粒子群に対しても成り立つ

ことを確認した。ただし、粒子の大きさの有限性が、粒子群の乱流中でのクラスタ形成に与える影響については、依然として、未解決の問題が数多く残されていることも明白になった。本研究課題の実施を契機として、我々の独自研究をさらに進めることはもちろんのこと、それと平行して、Uhlmann 博士との国際共同研究も継続して行う計画である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

J. C. Vassilicos, Susumu Goto, Proceedings of the 15th European Turbulence Conference, Vol. 1, 2015, 151.

<http://www.etc15.nl/proceedings/proceedings/documents/151.pdf>

Susumu Goto, J. C. Vassilicos, Local equilibrium hypothesis and Taylor's dissipation law, Fluid Dynamics Research, Vol. 48, 2016, 021402 (12 pages)

doi:10.1088/0169-5983/48/2/021402

Susumu Goto, J. C. Vassilicos, Unsteady turbulence cascades, Phys. Rev. E, Vol. 94, 2016, 53108 (11 pages)

doi:10.1103/PhysRevE.94.053108

Susumu Goto, Yuta Saito, Genta Kawahara, Hierarchy of antiparallel vortex tubes in spatially periodic turbulence at high Reynolds numbers, Phys. Rev. Fluids, 2017, in press.

〔学会発表〕(計19件)

後藤晋, 乱流渦構造の可視化, 第42回可視化情報シンポジウム, 2014年7月22日, 工学院大学(東京都・新宿区)

後藤晋, J. C. Vassilicos, 非定常乱流におけるコルモゴロフの相似仮説の破れ, RIMS 研究集会『乱流研究のフロンティア』, 2014年7月23日, 京都大学(京都府・京都市)

Susumu Goto, Hierarchy of multi-scale coherent vortices in unsteady turbulence driven by steady force, JSPS Supported Meeting on Interscale Transfers and Flow Topology, 2014年9月15日, シェフィールド(イギリス)

後藤晋, 乱流輸送現象の解明に向けた数値シミュレーションと室内実験, 日本伝熱学会関西支部 第21期 第3回講演討論会, 2014年12月3日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)

後藤晋, J. C. Vassilicos, 非定常乱流におけるエネルギー散逸則(数値的検証), 日本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月22日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

Susumu Goto, Unsteadiness of turbulence driven by steady forces in a periodic cube, The International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2015年6月15日, ストックホルム(スウェーデン)

後藤晋, 齋藤雄太, 河原源太, 高レイノルズ数乱流中の渦の階層の周期的再生, RIMS 研究集会「乱流を介在した流体现象の数理解」, 2015年7月23日, 京都大学(京都府・京都市)

Susumu Goto, Pattern formation in turbulence at high reynolds numbers, Workshop on "New Trends in Patterns and Waves", 2015年8月17日, 北海道大学(北海道・札幌市)

J. C. Vassilicos, Susumu Goto, Energy dissipation and flux laws for unsteady turbulence, The 15th European Turbulence Conference, 2015年8月25日, デルフト(オランダ)

後藤晋, 齋藤雄太, 河原源太, 高レイノルズ数乱流中の渦の階層, 日本物理学会2015年秋季大会, 2015年9月18日, 関西大学(大阪府・吹田市)

後藤晋, J. C. Vassilicos, Yuta Saito, Genta Kawahara, Kolmogorov's local equilibrium hypothesis and Taylor's dissipation law, 2nd France-Japan Workshop on Subcritical Transition to Turbulence, 2015年10月15日, 東京理科大学(東京都・葛飾区)

Susumu Goto, Yuta Saito, J. C. Vassilicos, Genta Kawahara, Physical mechanism of energy cascade and non-equilibrium statistics in developed turbulence, EUROMECH-ERCOFTAC Workshop "Turbulence Cascades", リール(フランス)

後藤晋, 乱流中の渦の階層とエネルギーカスケード, 平成27年度短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」, 2016年1月6日, 東京大学(千葉県・柏市)

後藤晋, 乱流中のエネルギーカスケードの物理, 日本物理学会 第71回年次大会 領域6/領域11/領域1合同シンポジウム『量子乱流が拓く新しい乱流科学』, 2016年3月20日, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

後藤晋, 乱流の統計と渦の階層, 研究集会『応用非線形偏微分方程式論の展開』, 2016年3月27日, 大阪大学(大阪府・豊中市)

後藤晋, 乱流輸送現象の物理 ~ 数値シミュレーションと室内実験, プラズマ科学のフロンティア2016研究会, 2016年8月5日, 核融合科学研究所(岐阜県・土岐市)

後藤晋, 種々の輸送現象に関する大規模

数値シミュレーション, プラズマシミュレータシンポジウム2016, 2016年9月7日, 核融合科学研究所(岐阜県・土岐市) 岡温, 後藤晋, 埋め込み境界法による乱流中の固体粒子の数値シミュレーション, 第30回数値流体力学シンポジウム, 2016年12月13日, タワーホール船堀(東京都・江戸川区)

後藤晋, 乱流混合の物理とその応用, 豊中地区交流会, 2016年12月20日, 大阪大学(大阪府・豊中市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 晋 (GOTO, Susumu)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号: 40321616