

平成22年5月4日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19760116  
 研究課題名 (和文) 固体粒子-微細要素渦間の直接相互作用について (乱流変調の理解に向けて)  
 研究課題名 (英文) On the direct interactions between a solid particle and coherent eddies (for the understandings of turbulence modification phenomenon)  
 研究代表者  
 辻 拓也 (TSUJI TAKUYA)  
 大阪大学・工学研究科・特任准教授  
 研究者番号：90379123

## 研究成果の概要 (和文)：

乱流変調現象の理解促進に向けて、壁乱流に添加された固体粒子と、乱流要素渦などの乱流が持つ構造との相互作用を、埋め込み境界法に基づく直接数値計算と、多重スケール PIV 計測に基づく実験により観察した。壁面近傍に存在する粒子と、高い乱れエネルギーを持つ要素構造との相互作用をイベントレベルで観察したところ、要素構造が粒子に接近した後、粒子後流渦の発生を促し、これにより乱れが促進されることを確認した。

## 研究成果の概要 (英文)：

Interactions between a solid particle and turbulent coherent structures are observed in a fully-developed wall turbulence by means of direct numerical simulation based on immersed boundary method and multi-scale PIV. From the observation of interactions between a particle existing near the wall and a coherent structure which has high turbulent energy, it is observed that the coherent structure promotes the formation of wake behind the particle and enhances turbulent fluctuation.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	630,000	3,830,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学、混相流、乱流変調、直接数値計算、埋め込み境界法、多重スケール PIV

## 1. 研究開始当初の背景

乱流中に固体微粒子を添加すると乱れ強度やレイノルズ応力などの乱流特性量が劇

的に変化する、いわゆる「乱流変調」が起こる。乱流変調現象は、流れの各種輸送特性と密接に関連するため、この種の流れが関連す

る工業装置の設計には、その振る舞いを把握することが極めて重要である。固体粒子を含む乱流には、単相乱流のパラメータに加え、粒子サイズや濃度、物質密度、応答時間、形状、サイズ分布など多くの付加的なパラメータが存在し、その振る舞いはこれらのパラメータの組み合わせに応じて大きく変化する。また、一般的にこの種の流れを伴う工業装置内において、粒子は流れの代表スケールより3桁以上小さく、粒子スケールにおいて発生した付加的なエネルギーのソース/シンクが、流れのマクロ特性に影響を与える典型的な多重スケール構造を持つ。加えて、粒子濃度がそれほど高くない場合であっても、粒子-粒子間、粒子-壁面間の衝突による相互作用の影響もある。実際の流れでは、これらが複合的に組み合わさって起こり、その振る舞いは大変複雑であり、現象の解明は容易なことではない。これまで多くの研究者により、乱流変調現象の理解促進に向けた研究がなされてきたが、実験計測の困難さもあいまって、どのような条件において、乱れが増加もしくは減少するのかという最も基本的な問題に対してさえ明確な回答は得られておらず、依然としてその本質を理解しているとは言い難かった。

## 2. 研究の目的

乱流が持つ乱れエネルギーは、要素渦と呼ばれるコヒーレントな構造がそのほとんどを保持していることが知られている。乱流変調現象についても、粒子濃度が比較的 low、粒子-乱流間の相互作用が支配的な領域においては、個々の粒子と要素渦間で直接起こる相互作用を知ることができれば、乱流変調現象そのものの本質的な理解につながると考えられる。これまで、現象の理解を目的としたこういった粒子レベルでの研究は、ほとんど行われて来ていない。本研究では、十分に発達した壁乱流中に形成される要素渦と、さらに乱流要素渦の素過程モデルであるバーガーズ渦を対象とし、直接数値計算と2次元PIVによる実験を実施し、乱流構造-固体粒子間の直接的な相互作用について観察を行うことにより、現象に対する理解を深め、乱流変調現象の理解促進に寄与することを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、添加する固体粒子のサイズが、乱流の最小スケールより大きい場合を対象とした。こういった領域の数値解析においては、粒子の体積の影響を無視することはできない。本研究では、有限体積を持つ移動物体を容易に取り扱える埋め込み境界法に基

づく直接数値計算を実施した。埋め込み境界法の多くは、固定格子を採用しており、本研究で対象とするような多重スケール構造を持つ粒子を含む乱流において、個々の粒子周りの流れを適切に解像するには、膨大な格子数が必要であり、大きな計算コストとなる。本研究では、埋め込み境界法(IB)法をベースとして、これに局所細密格子(LMR)法を組み合わせることにより、粒子周辺などの特定の領域の解像度を任意に設定できる計算手法の開発を行った。

(2) この種の問題はその振る舞いが大変複雑であり、また数値計算の精度確認のためにも、実験による現象観察が必要不可欠である。本研究では、通常の単一カメラを用いた粒子画像速度計測(PIV)法に加え、多重スケール構造についての観察が可能なように、計測時・空間スケールの異なる2台のカメラを同期して撮影を行う多重スケールPIVシステムを構築し、実際にこれを用いて計測を行った。

(3) 十分に発達した乱流場における観察に加えて、乱流要素渦の素過程モデルとして知られているバーガーズ渦を対象として、これに固体粒子を接近させることにより素過程を対象とした現象の観察も行った。この検討においては、格子ボルツマン法に基づく直接数値計算と、2次元PIV法による実験観察を実施した。

## 4. 研究成果

本研究で得られた成果は多岐に渡るため、ここでは代表的なもののみを箇条書きにて示す。

(1) 埋め込み境界法と局所細密格子カップリング(LMR-IB)法の開発: 固気混相乱流の大きな特徴は、それが多重スケール的な構造を持つことにある。特に添加する粒子サイズが小さくなればなるほど、粒子スケールでの現象を的確に捉えることは困難となる。本研究では、図1に示すように基本となる格子に、細かい格子を選択的に重合して配置することにより、全体の計算コストは抑えたまま、必要に応じて詳細な観察を可能とする埋め込み境界法と局所細密格子カップリング

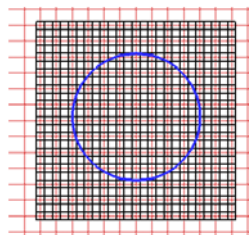


図1 局所細密格子の例

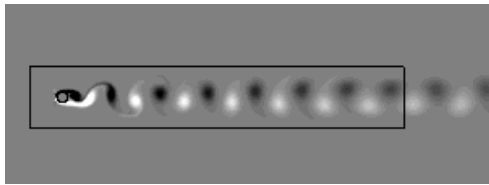


図2 LMR-IB法による円柱から発生するカルマン渦の計算例

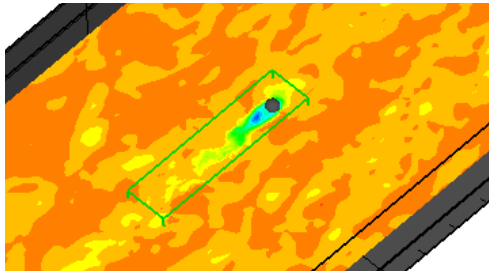


図3 LMR-IB法による乱流中の粒子周り流れの計算例

(LMR-IB)法の開発を行った。本提案手法は、間隔の異なる格子を複数用いることにより、容易に多重スケール化できるが、ここでは図AAAに示すように2つの格子を用いて計算を実施した。図2に定常流れ中に設置した円柱から発生するカルマン渦の様子を、図3に発達した乱流中に固定した粒子周り流れの計算例を示す。図中において実線で示している領域内において、細かい格子を重ねて配置している。円柱や球に働く流体抗力の比較結果より、局所細密格子を用いることにより、計算精度が向上することが確認された。また、これはあくまでも最密化領域のサイズに依存するが、これらの例では、局所細密格子を使用しない場合と比較して、7割程度計算コストを削減できることを確認した。

(2) 多重スケール PIV 計測システムの開発：本研究では、エネルギー含有スケール（ラージスケール）と、粒子スケール（スモールスケール）が持つ異なる時間・空間スケールに合わせて調整した二台の高速度カメラを同期して用い、それぞれのカメラで取得した画像から速度場計測を行う多重スケールPIVシステムを構築した。その概要を図4に示す。

このシステムを用いて実際の流れ場の観察を行うために、水平に設置した閉ループ流路を作成した。この流路中の壁面近傍に固体粒子を固定し、実際に計測を行った。図5に、計測により求められた瞬時の速度分布の例を示す。ラージスケール計測だけでは、粒子

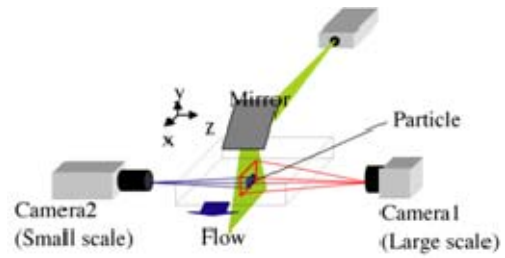
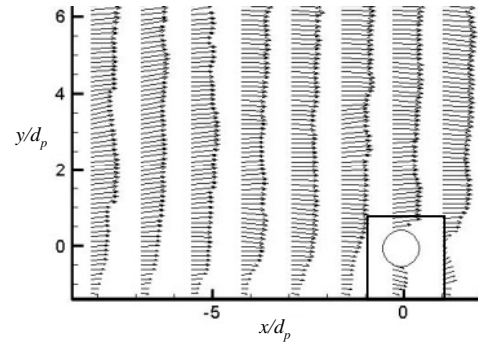
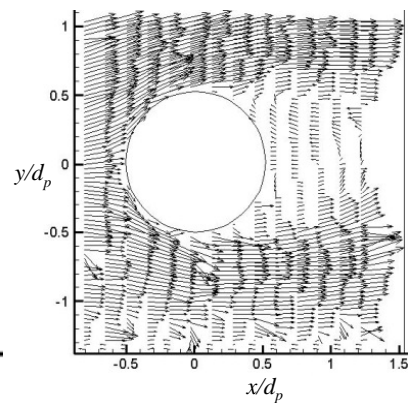


図4 マルチスケールPIV計測



(a) ラージスケール



(b) スモールスケール

図5 多重スケールPIV計測の例

レベルでの微視的な現象の観察が困難であるが、スモールスケール計測を合わせて行うことにより、流れ場全体での大きな構造から、後流渦などの粒子スケールでの構造まで、粒子を含む乱流が持つ多重スケール構造の詳細な観察が可能となった。

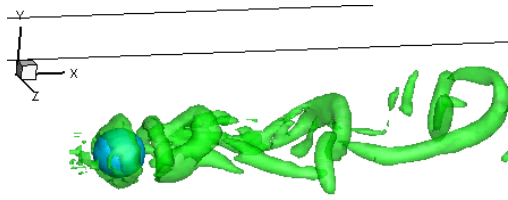
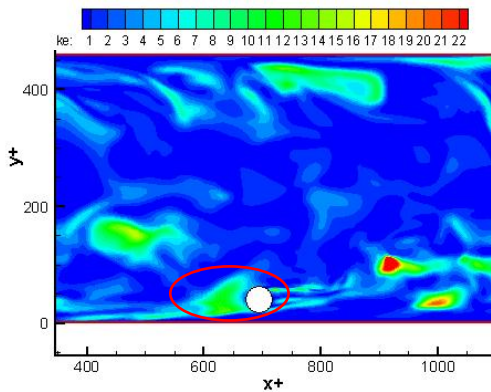
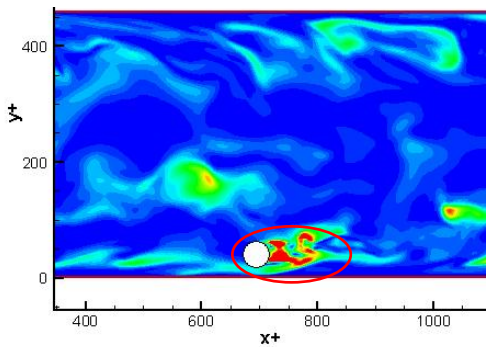


図6 壁乱流中での粒子後流渦



(a) 衝突直前



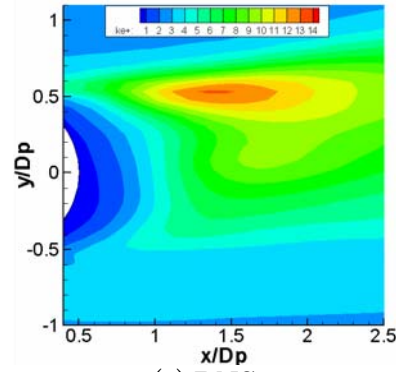
(b) 衝突直後

図7 乱れと粒子との干渉

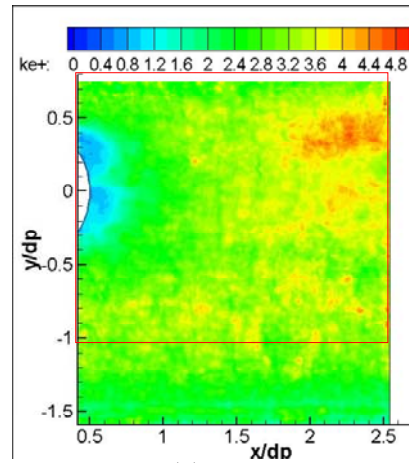
(3) 直接数値計算による発達した壁乱流中での現象観察：十分に発達した壁乱流中において、固体粒子と乱流構造間に起こる相互作用をイベントレベルで直接観察することを目的として直接計算を実施し、以下の結果を得た。

①本計算では、乱流のレイノルズ数を  $Re_\tau = 230$  と設定した。図6は、壁近傍に存在する単一の固体粒子から放出される後流れ渦を可視化したものである。今回の検討は、比較的弱い弱い乱流で行われたが、非定常な乱れが存在するにも関わらず、形成される後流渦の形状は、層流中で形成されるものに近い。この時の、平均粒子レイノルズ数は417である。

②図7は、ある瞬間の乱れエネルギー分布を、壁面近傍に存在する固体粒子の中心を含む



(a) DNS



(b) PIV

図8 時間平均場での乱れ分布

断面において示したものである。これまでの単相乱流の研究により、乱流の持つ乱れエネルギーのほとんどは、要素渦によって保持されていることがわかっている。図7においても、粒子近傍以外で、高い乱れエネルギーが存在する領域は、要素渦に対応している。本計算は、粒子を固定して実施したので、周囲流体の変動運動に粒子が全く追従しないストークス数無限大の条件に相当する。図7(a)において紙面向かって左側から粒子に接近してきた高い乱れを持つ構造は、粒子を避けるようなことはなく、粒子に衝突する。高い乱れを持つこれらの成分は、平均速度より相対的に速度成分が大きいので、粒子表面に生じるせん断応力を強め、その結果、粒子後方に乱れの極めて強い領域が形成される(図7(b))。これを時間平均したものが、図8(a)である。これらの乱れ構造と粒子との相互作用の結果、粒子後方に乱れの強い領域が形成されていることがわかる。乱れの強い領域が粒子後方の上部のみに集中しているのは、壁の影響で後流渦の形状が変化するのに加えて、平均場においても大きな速度勾配があるためである。図8(b)は、ほぼ同じ条件において、実験によって求めた結果であり、同様な傾向が観察された。



(4) 固体粒子-バーガーズ渦相互作用の観察:バーガーズ渦の近傍において、渦軸と平行な方向に固体粒子を自重沈降させることにより相互作用の観察を行った結果、以下の結果を得た。

①沈降する粒子が伴う後流渦は、粒子がバーガーズ渦の強制渦領域を追加する際には、引き伸ばされ、バーガーズ渦自体に絡みつくような構造となる。

②沈降する粒子には、その後方にエネルギー散逸率の強い領域が形成される。バーガーズ渦近傍では、その旋回運動によりこれが周囲に広がり、バーガーズ渦自体のエネルギー散逸率の増加を引き起こす。特に、粒子が強制渦領域を通過した際には、散逸率の増加量に特徴的な変化が確認される。これは固体粒子がバーガーズ渦近傍を沈降する際に形成される特徴的な後流渦の形状による。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Yohsuke Tanaka, Takuya Tsuji, Toshitsugu Tanaka, Interaction between a Burgers vortex and wake vortex structure generated by a settling particle, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, refereed journal vol. 9, 2009, pp. 1-6
2. 田中洋介, 大津一晃, 辻拓也, 田中敏嗣, 単一自由落下粒子が Burgers 渦に与える影響について, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 73 巻 (734), 2007, pp. 2107-2115
3. 同じ応答時間を持つ粒子による乱流変動 (高ストークス数条件での検討), 辻拓也, 田中敏嗣, 混相流の進展, 査読有, 2 巻, 2007, pp. 91-99

[学会発表] (計 11 件)

1. 矢田大貴, 辻拓也, 田中敏嗣, 高濃度に粒子が存在する流れ場の直接数値計算, 第 23 回数値流体シンポジウム, CD-ROM A8-3, 2009 年 12 月 16 日
2. 藤原弘道, 澤村和宏, 辻拓也, 田中敏嗣, 添加した単一粒子が壁乱流特性に与える影響, 第 23 回数値流体シンポジウム, CD-ROM A8-4, 2009 年 12 月 16 日
3. 矢田大貴, 辻拓也, 田中敏嗣, 高濃度粒子を含む流れ場の直接数値計算, 第 87 期日本機械学会流体工学部門講演会, pp. 453-454, 2009 年 11 月 7 日
4. 藤原弘道, 辻拓也, 田中敏嗣, 固定粒子が壁乱流特性に与える影響, 日本混相流学会年会講演会 2009, pp. 380-381, 2009 年 8 月 7 日

5. 辻拓也, 田中大輔, 田中敏嗣, 埋め込み境界法と局所細密格子との組み合わせによる粒子系混相乱流の高解像度シミュレーション, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, CD-ROM C4-3, 2008 年 12 月 17 日
6. 大津一晃, 田中洋介, 川口寿裕, 辻拓也, 田中敏嗣, 渦放出を伴う沈降粒子がバーガーズ渦に与える影響について, 日本機械学会関西支部第 83 期定時総会講演会, 10-8, 2008 年 3 月 14 日
7. 田中大輔, 辻拓也, 田中敏嗣, Nest 型解適合格子と Immersed Boundary 法の組み合わせによる分散性混相流れの直接数値計算, 日本機械学会関西支部第 83 期定時総会講演会, 10-4, 2008 年 3 月 14 日
8. 田中洋介, 辻拓也, 田中敏嗣, 単一沈降粒子が Burgers 渦に与える影響, 日本機械学会関西支部第 83 期定時総会講演会, 4-4, 2008 年 3 月 14 日
9. 田中洋介, 大津一晃, 辻拓也, 田中敏嗣, 沈降粒子が Burgers 渦に与える影響について, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, 2 巻, pp. 127-128, 2007 年 9 月 9 日
10. Yohsuke Tanaka, Takuya Tsuji, Toshitsugu Tanaka, Experimental study on the interaction between Burgers vortex and single particle for modeling of a particulate turbulent flow, Proceedings of 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Vol. 3, pp. 1343-1348, 27 August, 2007
11. Yohsuke Tanaka, Kazuaki Otsu, Takuya Tsuji, T. Tanaka, Measurement of the interaction between a single particle and a single Burgers vortex, Proceedings of ASME/JSME FED Summer meeting, CD-ROM FEDSM2007-37217, 7 July, 2007

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻 拓也 (TSUJI TAKUYA)

大阪大学・工学研究科・特任准教授

研究者番号: 90379123