

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560143

研究課題名(和文) 非構造格子系 LES に適したマルチスケールハイブリッド乱流モデルの開発

研究課題名(英文) Development of the multi-scale hybrid turbulence model for large-eddy simulation using unstructured grid

研究代表者

坪倉 誠 (TSUBOKURA MAKOTO)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40313366

研究成果の概要(和文)：任意の多面体格子を用いた LES に適した乱流モデルと数値解析手法の開発を行った。特に壁面からの距離に応じた風上差分法のブレンド率と適用する SGS 乱流モデルの最適化を行うことで、球の流体抵抗係数がレイノルズ数に応じて大きく変化するドラッグクライシス現象(臨界レイノルズ数)の再現に成功した。さらに得られた知見を回転球に適用することで、臨界レイノルズ数領域で見られる負のマグナス力の発生メカニズムを解明した。

研究成果の概要(英文)：Sub-grid scale turbulence model and numerical method for large-eddy simulation have been developed based on the unstructured finite volume method. By optimizing the blending factor and SGS turbulence model considering the length from the solid wall, the drag crisis phenomena, in which drag coefficient of the sphere drastically decreases at a specific Reynolds number, was successfully simulated, and the numerical method developed has been validated. In addition, the method has been verified by applying it to the rotating sphere cases and the negative Magnus effect predicted in past wind-tunnel measurements has been realized in LES. The physical mechanism of causing the negative Magnus effect and its discrepancy from the theory was explained and discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：乱流、ラージエディシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

乱流場の主要渦構造は直接解析し、等方的で普遍的な微小渦をモデル化するラージエディシミュレーション(LES)は、直接数値解析(DNS)が適用できない高レイノルズ数条件下で、壁乱流や噴流といった基礎的せん

断乱流場に対してその有用性が示されている。さらにレイノルズ平均モデル(RANS)に対して乱流場の非定常特性を直接捉えられるという利点から、現在、乱流場制御、空力音予測、流体構造連成解析等、幅広い工学的展開が図られている。ただし LES が工学

的乱流場解析ツールとして真の地位を得る為には、複雑な幾何形状を有する場への対応が不可欠である。

CFD の複雑形状問題への対応技術（中橋 2001-2003, 科研）は一見成熟した感があり、非構造格子を用いた市販ソフトウェアが既に普及し、RANS を用いた乱流解析が実用設計段階で利用されている。しかし LES で推奨されている非散逸スキームに基づいて非構造解析を行った場合、空間離散誤差が顕在化して安定解が得られない。DNS/LES の数値スキームを開発する場合、構造格子系では運動量・エネルギーの保存特性が指標として用いられてきたが（Morinishi et al. 1998, J. Comp. Phys.）、市販ソフトでは安定性を重視してブラックボックス的に安定化スキームを用いて安定解を得ている。しかし盲目的な安定化は、直接解析する主要渦挙動に影響を与え、精度悪化に直結する。

一方 LES の改良は、基礎的乱流場の性状が合わさった複雑乱流場や、浮力等の外力が作用する複合乱流場への対応を目指して、サブグリッドスケール (SGS) 乱流モデルに対する高精度化と改良がなされてきた。これらのモデルのほとんどは、数値スキームとは個別に物理的視点からの開発がなされているが、高次精度スキームの適用が実質上不可能で数値誤差の影響が構造格子系解析と比べて顕在化する非構造格子系 LES では、物理モデルとしての高精度化に加えて、数値スキームの影響を考慮するという新たな視点からのモデルの構築が必要である。

さらにより実用的な問題として、壁面近傍の微小乱流構造を LES 解析するには膨大な計算負荷（領域全体の凡そ 80%程度）を必要とし、LES 実用化の妨げとなってきた。この解決策として壁面近傍に RANS モデルを用いるハイブリッドモデルが幾つか提案されている。しかし最も汎用的な DES モデル（Spalart et al. 1997）を用いて壁乱流解析を行った場合、RANS と LES の接合領域で、平均流速の不一致が見られる。この問題の抜本的解決の為には、単に乱流モデルのスケールパラメータをスイッチするというような数理的に簡便な方法ではなく、内層微小ストリークから外層大規模構造に至る壁乱流の階層的乱流構造の知見に基づくモデル化が必要である。

即ち、安定性、保存特性、精度の三つの観点から、非構造格子系に適した LES 数値スキームと乱流モデルを再構築することが強く望まれている（Ham et al. 2006, CTR Ann. Rep.）

申請者はこれまで、差分離散化誤差の影響を考慮した SGS モデルの開発を行った。またこの高精度 LES 解析手法を用いて、壁乱流マルチスケール乱流構造の解析、及びハイ

ブリッドモデルによる乱流構造再現性について吟味し、外層大規模構造の自律性と内層構造のレイノルズ数依存性、スケール間の相互作用、現行ハイブリッドモデルの問題点について明らかにしてきた。

2. 研究の目的

本研究では、任意の多面体格子系 (polyhedral) に対応できる非構造格子系有限体積法を用いた LES の高精度化を目指し、LES 手法の欠点を補うモデルを併用した、ハイブリッド LES 乱流モデルの構築を行う。ここでは実用的 LES 解析において特に問題となる固体壁面境界処理にターゲットを絞り、壁乱流のマルチスケールメカニズムに着目したモデル構築を行い、壁面境界モデルの提案を行う。

機械工学で最も汎用性の高い単層の非圧縮性ニュートン流体を対象とし、提案したモデルの有用性の検証は、チャンネル乱流 ($Re=10,000$)、及び実用的なブラフボディ形状 ($Re \sim 10^6$) に対して行う。チャンネル乱流では、外層の LES 域における大規模乱流組織構造の再現に着目し、壁面近傍モデルの高精度化をめざす。次により実用的な見地からブラフボディ形状では、定常空力（揚力・抗力）の予測精度に対して、車両風洞実験における予測精度に匹敵する予測誤差 5%を目指す。

3. 研究の方法

以下に示す (1) ~ (5) の研究課題を段階的に進める。

乱流 CFD の結果を大きく左右する 2 大要因である乱流モデリング誤差と離散化誤差（坪倉他共訳、「コンピュータによる流体力学」

2003）に着目して研究を進める。まず (1)

(2) ではモデリング誤差を除去するために DNS 解析を実施し、非構造格子系での各種スキームがもつ離散化誤差の特性を把握した上で安定化スキームの最適化を行い、離散化スキームの構築を行う。(3) (4) では離散式から乱流モデルを再構築し、数値誤差の影響を加味した上で物理的見地から壁乱流マルチスケールメカニズムに基づく乱流モデルの導出を行い、(4) (5) で検証を行う。

(1) 「非構造有限体積法離散スキームの構築～物理量定義点の決定～」

本研究で基盤となる、非構造格子系有限体積法の離散化スキームの構築を行う。ここでは物理量定義点として要素中心定義と節点中心定義の二種を候補とする。LES/DNS への適用を想定して、時間発展する熱輸送問題、二次元テイラー渦、一様乱数場を対象に、エネルギー保存特性、離散誤差整合性、要素形状・スキューネス依存性、解析時間について詳細に比較・検討する。

(2) 「非構造有限体積法離散スキームの構築～安定化手法の最適化～」

(1)の知見をもとにさらに、一様等方性乱流とチャンネル乱流に対して検討を行い、非構造格子系で必然となる各種安定化スキームの最適化を行う。非構造格子に特有の数値不安定性を除去した上で、得られた乱流場のスペクトル特性を既存のスペクトル法による解析結果と比較することで、想定される数値スキーム下でSGSモデルが担うべき特性を同定する。

(3) 「非構造格子系に適したSGSモデルの構築と高精度化」

(2)で得られた知見をもとに、離散誤差の影響を陽的に取り組んだSGSモデルの構築を行う。離散式レベルでLES基礎式を再構築した上でモデルの導出を行う。対象は高レイノルズ数チャンネル乱流とし、用いた数値スキームや要素形状スキューネスに対するロバストネスを基準とした検証を行う。

(4) 「マルチスケールハイブリッドモデルの構築と壁乱流における検証」

壁面近傍計算負荷低減を目的としたハイブリッド乱流モデルの構築を行う。高レイノルズ数チャンネル乱流を対象とし、マルチスケール壁乱流構造のLES域での再現性を第一課題として検証を行う。

(5) 「実用的ブラフボディ空力における検証」

構築したハイブリッド乱流モデルをブラフボディに適用し、精度検証を行う。ブラフボディとしては産業応用の見地から、自動車形状を一般化させた簡易車両モデルとし、車両表面で境界層剥離を有し、その位置の予測如何で全体の空力特性が大きく変化するような挑戦的な形状を選定する。

4. 研究成果

2008年度は研究の方法の(1)に取り組み、非構造有限体積法の離散化誤差の把握と最適化を図り、非構造有限体積法スキームの構築を行った。まずは物理量定義点について、要素中心と節点中心の二種類の離散化手法に対して解析コードを作成した。次にコロケート格子系の実用問題で不可避である安定化スキームについて、中心差分に高次精度風上差分をブレンドする手法の検討を行った。

解析対象は、まずはモデリング誤差を極力排するために、低レイノルズ数 ($Re \sim 100$) 球周り流れとし、実験経験則と比較することで精度検証を行った。同時に、同手法を乱流境界層が解像できない高レイノルズ数 ($Re \sim 10^5$) 場に適用し、風上ブレンド率の最適化を行った。ブレンド率を流れ場で一律とするのではなく、壁面距離関数を利用してブレンド率を壁面近傍から減衰させることで壁面摩擦抵抗の予測精度が向上することを明らかにした。

2009年度は研究の方法の(2)~(4)に取り組み、非構造格子系に最適化されたモデリング誤差低減手法の開発を行った。

既存の渦粘性型モデルに対して、離散式レベルでのモデル導出による再構築を試み、最適化を行った。特に昨年度より実施している、対流項に対する風上差分のブレンド率を壁面距離に応じて最適化することで、空力予測性能の向上を図った。

検証対象として、DNSデータの存在する $Ret=395$ 程度のチャンネル乱流の他、境界層の遷移・剥離の予測精度を検証するために、ドラッグクライシスが発生するレイノルズ数近傍での球周りの流れのLES解析を行った。

各種乱流モデルに対して、非構造格子の各種形状(テトラ、プリズム、ヘキサ等)とスキューネス、解像度を変化させて、速度・圧力の差分誤差の整合性(精度)と時間発展に対する安定性について検討を行った。

さらに(4)として工学的問題への適用を考慮して、自動車周りの流れや人体周りの流れ(スキージャンプ)に開発した手法を適用し、その有用性を風洞実験値と比較することで検証した。

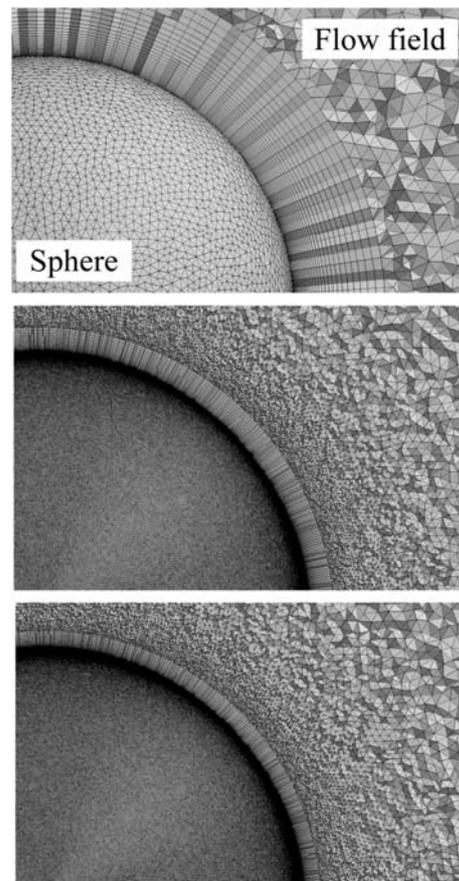


図1: 球解析に用いた非構造格子 (上: $Re=1.0 \times 10^4$ 、中: 2.0×10^5 、下: 1.14×10^6)

2010年度は昨年同様(2)~(5)に取り組み、非構造格子系に最適化されたモデリング誤

差低減手法の開発を行った。特に対流項に対する風上差分のブレンド率を壁面距離に応じて最適化することで、空力予測性能の向上を図った。

検証対象として昨年同様、まずブラフボディ形状の代表である球を選定し、境界層の遷移・剥離の予測精度を検証するために、ドラッグクライシスが発生するレイノルズ数近傍での LES 解析を行った。昨年度までに得られた知見をもとにプリズムとテトラを併用した非構造格子を構築し(図 1 参照)、風上差分のブレンド率及び乱流モデルの最適化を行った。さらにシュリフティングによる層流境界層厚さの見積もりの式を利用して格子のスキューネスと解像度を最適化することで、図 2 に示す通り、4 千万要素数という比較的粗い格子数にも関わらず、 $10^4 \sim 10^6$ の範囲のレイノルズ数で Cd 値の急激な変化(ドラッグクライシス)の再現に成功した。

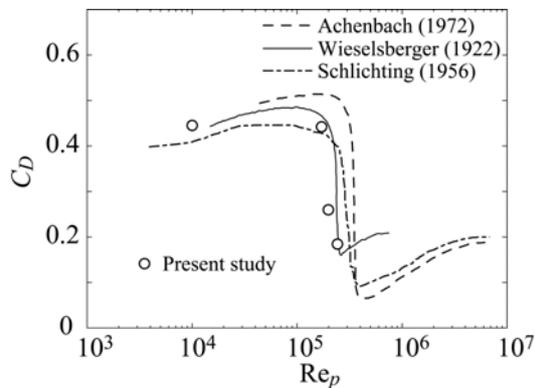


図 2: 本研究で提案した非構造 LES 解析による球解析ドラッグクライシスの再現

一様流中で球を主流方向に垂直な軸周りに回転させると、揚力(マグナス力)が発生することが知られている。一方、このレイノルズ数がドラッグクライシスを示す領域では、球表面の境界層が流れに沿って、層流剥離、再付着、乱流遷移、乱流再剥離するという物理的に複雑な挙動を示すことが知られている。この結果、球を回転させた場合、揚力が理論と逆方向に作用する逆マグナス揚力が発生する可能性があることが、過去のいくつかの実験で指摘されている(例えば Macoll, 1928, Barkla et al., 1971)。ただしその物理メカニズムについては、推論はされつつも実験による流れ場構造の把握が困難であることから、十分な検討が未だなされていない。そこで本研究手法の有用性を検証するために(verification)、図 2 で示したドラッグクライシス領域の解析に対して球を回転させ、その揚力を計測すると共に、解析結果から流れ場の三次元構造を解析することで、負のマグナス力の発生機構を明らかにした。

図 3 に亜臨界、臨界、超臨界の 3 つのレイノルズ数に対して、回転数を変化させた場合の揚力の変化を示す($\Gamma = \omega r / U$, ω は回転角速度、 r は球の半径、 U は一様流速)。

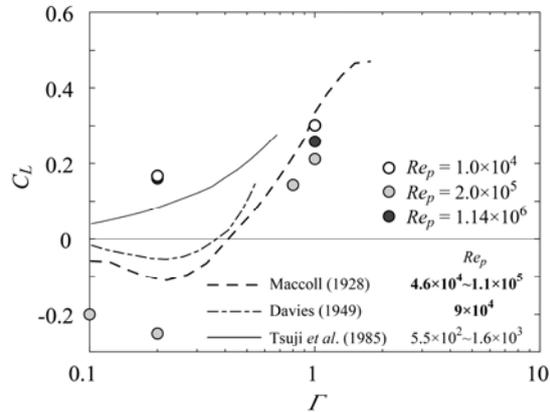


図 3: 球の回転速度とマグナス揚力の関係

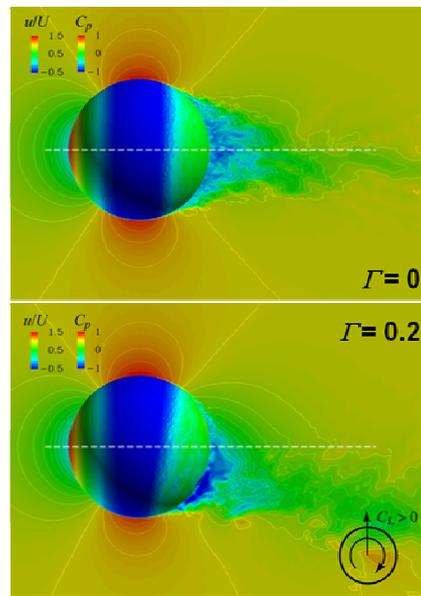


図 4: 超臨界域 ($Re = 1.14 \times 10^6$) での流速と表面圧力(球は時計方向回転)

図からわかるとおり、臨界レイノルズ数 ($Re = 2.0 \times 10^5$) においてスピンパラメータ $\Gamma = 0.2$ 程度で負のマグナス力が発生していることがわかる。図 4 と 5 に超臨界域、臨界域での非回転、回転時の流れ構造を示す。超臨界域では回転時のウェークが下方方向に歪んでおり、球に揚力が作用していることがわかる反面、臨界域ではウェークが上方方向を向いており、同じ回転速度を与えているにもかかわらず、球に負の揚力が作用していることがわかる。この負のマグナス力の発生要因を探るために流れ場の非定常三次元流れ構造を可視化した図を 6 に示す。球上面の主流に順

方向に回転している面では、主流に対する相対レイノルズ数が下がる為、層流剥離を起こしている一方、球下面の主流に逆方向に回転している面では、相対レイノルズ数が増える為境界層が乱流遷移を起こした後、剥離していることがわかる。この結果、非回転時と比較して、球上面では剥離点が上流側に、球下面では下流側に移動することで、球下面圧力が相対的に低下し、負のマグヌス力が発生していることが明らかとなった。

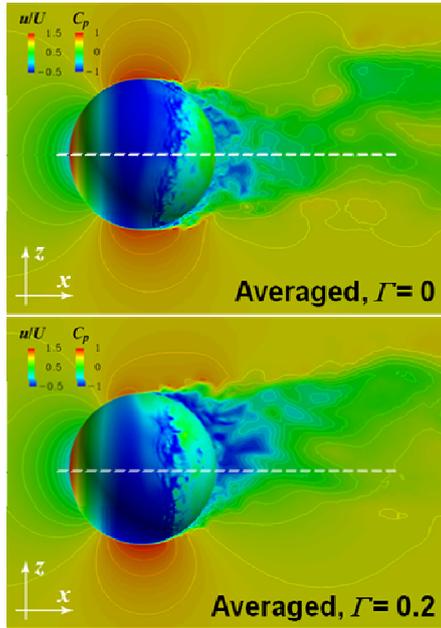


図5: 臨界域 ($Re=2.0 \times 10^5$) での流速と表面圧力 (球は時計方向回転)

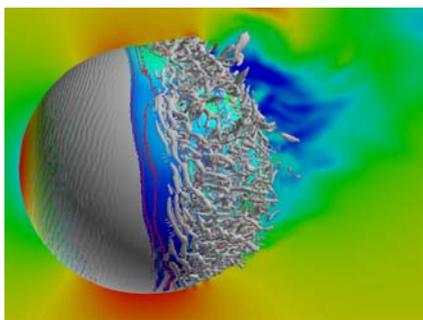


図6: 負のマグヌス力が発生しているときの球表面の流れ構造 (圧力のラプラシアンと球表面圧力)。球は時計方向回転

次に(5)として工学的問題への適用を考慮して、より実用的な自動車周りの流れに対してその有用性の検討を行った。対象は図7に示す簡易自動車形状とし、①～⑤に示す部分に微小な形状変化が施してある。この2車種に対して本研究で得られた知見をもとに LES 解析を実施し、両車種の微小な空力特性の差

異が再現できるか検証を行う。

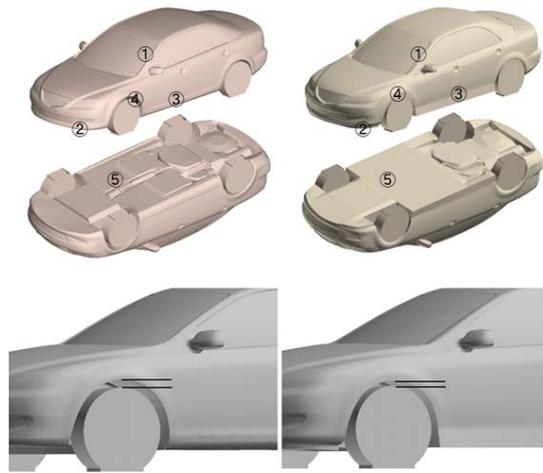


図7: 簡易自動車形状に対する空力解析 (左 A 車、右 B 車)

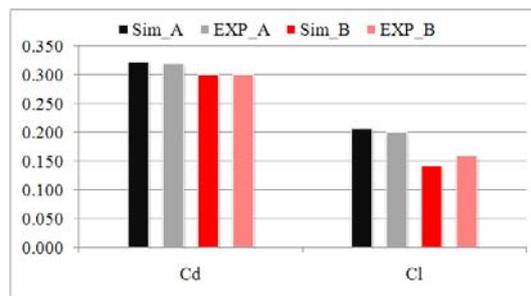


図8: 本 LES と風洞実験値の抗力係数(左)と揚力係数(右)の比較 (Sim_A、Sim_B:本 LES; EXP_A、EXP_B:風洞実験値)

図8に得られた抗力係数と揚力係数の風洞実験値との比較を示す。風洞実験結果から、車両Aと比較してB車では抗力係数が6%低減 (ΔC_d)、揚力係数が20%低減 (ΔC_l) している。本 LES はこの空力改善傾向を大変良く再現しており、抗力係数に対して7%、揚力係数に対して31%の低減を予測している。特に空気抵抗については、A車、B車のどちらに対しても風洞実験値との誤差は1%程度であり、本研究の目標として掲げた誤差5%以内を大きく上回る予測精度が達成できた。

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. 武藤昌也、坪倉誠、大島伸行、回転球に作用する負のマグヌス力の数値解析、日本機械学会論文集 B 編、査読有、77 巻 775 号、2011、pp781-792

〔学会発表〕 (計9件)

1. 山崎規司、武藤昌也、坪倉誠、回転球に作用する負のマグナス力の LES 解析、第 24 回数値流体力学シンポジウム、2010 年 12 月 20 日、慶應義塾大学日吉キャンパス、横浜
2. Masaya Muto、Makoto Tsubokura、 and Nobuyuki Oshima、 Numerical Simulation of Negative Magnus Force on a Rotating Sphere、 The 2010 American Physical Society、 Division of Fluid Dynamics、 63rd Annual Meeting、 2010 年 11 月 23 日、 Long Beach Convention Center、 Long Beach (USA)
3. 武藤昌也、坪倉誠、大島伸行、回転球に作用する負のマグナス力について、日本流体力学会年会 2010、2010 年 9 月 9 日、北海道大学、札幌
4. Masaya Mutoh、Makoto Tsubokura and Nobuyuki Oshima、 Aerodynamic Forces on a Rotating Sphere at Reynolds Number around the Drag Crisis Region、 14th International Symposium on Flow Visualization、2010 年 6 月 21 日～24 日、EXCO、Daegu (Korea)
5. (招待講演) Makoto Tsubokura、 Unstructured LES for Unsteady Aerodynamics of Road Vehicle、 The 2nd International Workshop on Advances in Computational Mechanics、 2010 年 3 月 31 日、パシフィコ横浜、横浜
6. 坪倉誠他 4 名、突風を受ける自動車に作用する HPC-LES 非定常空力解析、第 23 回数値流体力学シンポジウム、2009 年 12 月 16 日、仙台市民会館、仙台
7. Masaya Muto、Makoto Tsubokura、 and Nobuyuki Oshima、 Drag Reduction of a Sphere by Ambient Perturbation and its Relationship with Stokes Layer、 The 2009 American Physical Society、 Division of Fluid Dynamics 62nd Annual Meeting、 2009 年 11 月 24 日、Minneapolis Convention Center、Minneapolis (USA)
8. 伊川雄希、坪倉誠他 2 名、スキージャンプテイクオフ動作時の LES によるジャンパー周りの流れ解析、日本機械学会 2009 年度全国大会、2009 年 9 月 15 日、岩手大学、盛岡
9. Masaya Mutoh、Takuji Nakashima、Makoto Tsubokura、 and Nobuyuki Oshima、 Effect of Ambient Turbulence on the Drag Force of Particle at High Stokes Number、 The 61st Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics、 American Physical Society、 2008 年 11 月 25 日、San Antonio Convention Center、San Antonio (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪倉 誠 (TSUBOKURA MAKOTO)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：40313366

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし