

平成 26 年度 地球シミュレータ利用報告 研究成果概要

1. 課題名

大気境界層乱流現象解明のための計算科学

Computational Science of Turbulence in Atmospheric Boundary Layers

2. 課題責任者

石原 卓(名古屋大学大学院工学研究科附属計算科学連携教育研究センター)

Takashi Ishihara

3. 課題の目的

地球科学分野において、大気汚染などの地球環境問題や自然災害でみられる重要な流れの特徴として、温度成層や熱対流などの気象条件のほか、複雑な地形や多様な社会生活などの影響を受け、現象そのものが複雑であることがあげられる。一方、流体力学的な観点からは、それらの乱流現象が非常に高レイノルズ数(Re)であり、流れの自由度数が巨大であることが理解と予測を困難にする本質的な要因であると考えられる。特に、大気境界層では、地面があり乱流が鉛直方向に非一様であること、実際には地面が森林や建物などの粗面であることを考慮する必要がある。従来の数値計算では乱流は適当にモデル化する必要があり、経験則に頼らざるを得ないのが現状である。本研究では、乱流の数値計算に適した地球シミュレータを用いることで、地球科学分野における流れ、特に大気境界層乱流に関係する規範的な問題の大規模直接数値計算を実施し、大気境界層における高 Re 乱流現象の解明を行うことを目的としている。

本プロジェクトにおける応用計算としては、都市域の上空ならびにキャンピー内に形成される大気乱流境界層の LES(Large eddy simulation)を実施し、熱的成層性を有する大気中の危険物質の輸送現象に伴う場合の適切な環境を確保するため、あるいは強風時および突風時に発生する都市あるいは都市を構成する各種建築物・塔状構造物の構造安全性を確保するための大気での輸送に関する物理機構ならびに流体力学的特性を、地球科学的事象のダウンスケーリングを行った上で解明する。さらに、これらの環境問題および減災問題を解決するための方法を提示する。具体的には、建物群が密集する都市域での温度成層境界層における危険物質拡散 LES により、都市キャンピー内での乱流構造とそれに伴うピーク濃度の発生頻度を予測し、建物から局所的排熱を受けた際の拡散特性を明らかにし、危険物質の時空間拡散特性からこの種の問題に対する安全な都市を確立する。また、都市域での竜巻、ダウンバーストなどの局所的突風の発生を想定し、凹凸地表近傍の突風特性を LES で解析し、瞬発的な変動風速の把握から、都市域での突風に対する減災を実現する。さらに深い植生に覆われた複雑地形上での風車などの再生可能エネルギー技術の効率化のための情報を提示するとともに、強風時の各種エネルギー施設の構造安全性を確保するための、エネルギー施設を対象とする臨界状態での変動風力特性を明らかにする。

4. 今年度当初の研究計画

■乱流境界層の大規模直接数値計算とその応用

地球シミュレータ(ES2)を用いて、地球科学分野に関連する乱流 DNS を実施し、その特徴を明らかにする。特に、高レイノルズ数壁乱流の DNS およびデータ解析により高レイノルズ数壁乱流の

壁近傍の渦運動の特徴とその役割を明らかにするほか、ES2 用に開発したコードを用いた数値計算により、ビルを模擬した粗度の効果及び様々な汚染物質をターゲットとしてシュミット数依存性を調査し、都市を想定した粗面モデリングに役立てる。

■固気混相乱流の DNS 解析

微粒子浮遊を引き起こす飛砂現象について、固気混相の壁乱流の直接数値シミュレーション (DNS) を実施し、飛砂のメカニズム解明を行う。その際、固-気および固-固の相互干渉を考慮する 4-way カップリングを導入し、飛砂における粒子・砂床粗面・気相乱流間の影響を調べる。ES2 を用いた大規模 DNS の実施後、得られた結果については、乱流モデルへの適用や実現象予測等の解析に応用する。

■都市域大気乱流境界層の LES 解析と環境・減災問題への展開

1) 都市域温度成層境界層における危険物質拡散 LES と安全性の確立

建物群が密集する都市域での温度成層境界層における危険物質拡散 LES を実施する。都市キャノピー内での乱流構造とそれに伴うピーク濃度の発生頻度を予測し、事故時の危険物質に対する安全性を確保するための拡散性状を提示する。

2) 突風時の凹凸地表近傍変動風速の LES

竜巻、ダウンバーストなどの局所的突風が都市に発生することを想定し、上昇流と下降流が局在する鉛直旋回流を有する突風モデルを構築する。計算モデルに都市型の地表形態を底面境界条件に導入し、地表近傍での突風の乱流構造を LES により推定し、その瞬発的な変動風速の把握から、都市域での強風・突風に対する減災を実現する。

3) 大気境界層中の塔状建造物の安全性確立

深い植生に覆われた複雑地形上での風況を LES により推定し、風車などの再生可能エネルギー技術の効率化のための情報を提示するとともに、強風時の風車の構造安全性を検討するための、円柱断面建造物を対象とする臨界状態での変動風力特性を三次元効果と乱流流入効果の観点から明らかにする。

5. 研究計画に沿った利用状況

(1) ES2 を用いて構築した乱流境界層のデータベースを解析し、乱流境界層における乱流・非乱流界面の構造を調べた結果をまとめた。乱流境界層の DNS コードに粒子追跡のためのコードの組み込み、乱流・非乱流界面近傍の粒子の挙動についての解析を実施した。また、粗面の効果を考慮した乱流境界層の ES 用の DNS コードを ES2 用にチューニングしたプログラム(ベクトル化率 99.501%、並列化率 98.433%、使用可能ノード数 8)を用いて、最も基礎的な粗度である正弦波状壁面の波長・振幅比が、壁面上での汚染物質の拡散に与える影響を定量的に解析した。

(2) チャネル乱流中の有限サイズの粒子の挙動について、固-気および固-固間の相互干渉や各固相粒子の回転運動も考慮した解析コードの作成を行い、結果の妥当性を先行研究と比較して行った。

(3) 複合的な大気乱流場の予測に対して信頼性が確保されている LES を用い、実際の都市あるいは複雑な地形を対象とした、環境・防災問題の低減化をめざした高解像度大規模計算を実施した。

6. 今年度得られた成果、および達成度

<成果>

■乱流境界層の大規模直接数値計算とその活用

乱流境界層の乱流・非乱流界面がテイラー長でスケールする乱流・非乱流遷移層とコルモゴロ

フ長でスケールする表層(スーパーレイヤ)の二重構造であることを明らかにした。また、乱流・非乱流界面が非乱流側の速度変動をブロックする働きがあることを実証した。

さらに、乱流・非乱流界面近傍の慣性粒子の追跡シミュレーションを実施し、非乱流側の慣性粒子が乱流・非乱流界面近傍でブロックされる傾向があることを示すデータを数値計算によって得た。また、ビルを粗度効果として模擬した、最も基礎的な粗度である正弦波状壁面上の流れ場のデータ解析を行った。データは ES2 用に最適化済みの乱流境界層の DNS コードを用いて得られたものである。シュミット数が 0.71 及び 2 における汚染物質の拡散と流れによる抵抗の関係について調査し、その非相似性について相関係数による定量的な評価を行った。

■固気混相乱流の DNS 解析

DNS により、チャンネル乱流中に有限サイズの固体粒子を固定した解析を行い、粒子後流の渦構造や圧力抵抗係数の観点から、定性的・定量的に精度の良い結果が得られたことを確認した。あわせてチャンネル乱流中に固体粒子を複数浮遊させて、固-気および固-固間の相互干渉を考慮した現象の再現を行い、先行研究結果とも妥当な一致を確認している。以上から、固気混相乱流の DNS コードは完成したと見なすことができる。

■都市域大気乱流境界層の LES 解析と環境・減災問題への展開

都市域温度成層境界層における危険物質拡散特性を明らかにするためにブロック群の上空を発達する安定境界層に関する予備的な LES を実施した。また、突風時の地表近傍変動風速を明らかにするために各種条件下での竜巻状旋回流の LES を行った。

さらに、大気境界層中の塔状構造物の安全性の確立をめざし、円柱断面構造物を対象として臨界状態での変動風力特性の三次元効果の検討を行った。高解像度 LES 解析により、臨界レイノルズ数域における対称な円柱まわりの非対称な流れの維持される要因について考察した。その結果、非対称流れの維持は、非対称流れの形成に伴う流量のアンバランスより、淀み点がシフトし、剥離点より風上領域における曲面に沿った境界層の不安定性が起因することが明らかとなった。この流れの不安定性により剥離バブルがスパン方向に大きく波打ちながら変動し、後流の三次元構造が生じる。そのため、逆サイドのせん断層の巻き込みが阻害され、層流状態が維持されることが示された。また、対象な超臨界域の流れとの比較により、剥離・再付着域の流れの不安定特性の違い、剥離バブルの形成の違いなどを明らかにした。さらに、レイノルズ数を上昇させた時の非対称流れの変化について解析を実施し、既往の実験結果と同様な偏った揚力特性を確認するとともに、その要因について検討した。

<達成度>

(年度当初の研究計画を全て達成した場合を 100% / 複数の目標があった場合は、それぞれについて達成度を数値で記載)

乱流境界層の大規模直接数値計算とその活用:95%

固気混相乱流の DNS 解析:50%

都市域大気乱流境界層の LES 解析と環境・減災問題への展開:80%

7. 計算機資源の利用状況

<計算機資源の利用状況>

(計画的に計算機資源を利用できているか、状況を記載)

乱流境界層の大規模直接数値計算については、今年度は慣性粒子追跡用のコード開発と ES2 で作成したデータの解析を主に実施した。

固気混相乱流の DNS 解析については性能検証のみの利用に限られた。

大気境界層中の塔状構造物の解析においては、ノード数:20、計算時間:6000 ノード時間、メモリ 50GB、ディスクサイズ:5TB を用いて、円形断面を有する構造体の空力特性の解明のために優先利用した。また、現象解明を目的とし、時刻歴データ取得のためのディスク容量の追加を行うとともに、ノードを 20 とし長時間計算を実施した。

<チューニングによる成果>

(ベクトル化、並列化チューニング等、計算機資源を有効利用するために行ったこととその効果を記載)

乱流境界層の大規模直接数値計算とその活用:昨年度と同様に、ベクトル化率 99.501%、並列化率 98.433%、使用可能ノード数 8 まで高効率化したプログラムで実施した。

固気混相乱流の DNS 解析:本項目課題における ES2 利用は殆ど進められておらず、性能検証のみの利用に限られている。

都市域大気乱流境界層の LES 解析と環境・減災問題への展開:特になし

<計画的に利用できていない場合、その理由>

乱流境界層の大規模直接数値計算とその活用、および都市域大気乱流境界層の LES 解析と環境・減災問題への展開においては該当なし。

固気混相乱流の DNS 解析では、本項目課題におけるプログラムについて、混相計算プログラムコードの作成と検証に多くの時間を費やしており、MPI 並列化のチューニングの段階までに至っていない。

8. 新聞、雑誌での掲載記事

本プロジェクトの乱流境界層の大規模 DNS に基づく、乱流境界層の乱流・非乱流界面の構造と力学に関する論文が 2015 年 3 月末の時点で、Most Downloaded Journal of Fluids and Structures Articles(過去 90 日)のトップ 8 にランクした。

大気境界層乱流現象解明のための計算科学

石原 卓、名古屋大学大学院工学研究科附属計算科学連携教育研究センター

目的

大気境界層乱流に関係する規範的な問題の**大規模直接数値計算(DNS)**を実施し、**大気境界層における高Re乱流現象の解明**を行う。また、応用問題として、都市域大気乱流境界層のLES解析と**環境・減災問題への展開**を行う。

成果

■乱流境界層の大規模直接数値計算とその活用

乱流境界層のDNSにより、乱流・非乱流界面近傍の乱流・非乱流遷移層と渦あり渦なしの境界となる表層(スーパーレイヤ)の二重構造を明らかにした。また、乱流・非乱流界面が非乱流側の速度変動をブロックする働きがあることを実証*

■固気混相乱流のDNS解析

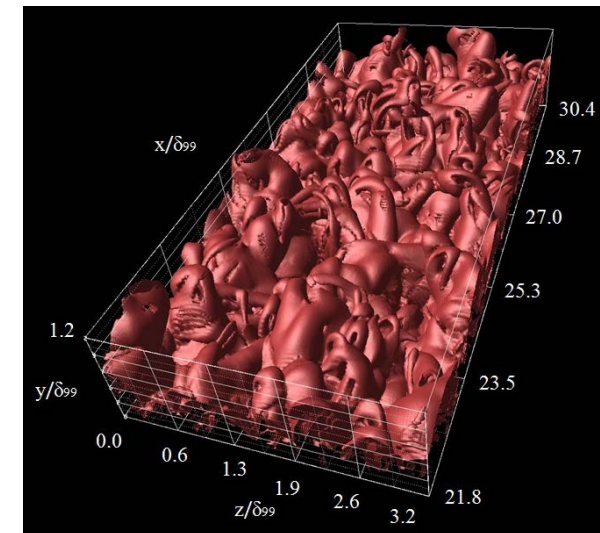
有限サイズの固体粒子の浮遊する乱流固気混相壁乱流DNSコードを開発

■都市域大気乱流境界層のLES解析と環境・減災問題への展開

高解像度LES解析に基づく、円柱断面構造物の臨界状態での変動風力特性の三次元効果の検討により、臨界レイノルズ数域において、対称な円柱まわりで非対称な流れが維持される要因を解明

*成果をまとめた論文

「T. Ishihara, H. Ogasawara, J.C.R. Hunt: J. Fluids and Structures(2015)」が Most downloaded articles top8にランクイン(2015年3月末)



乱流境界層の乱流・非乱流界面