

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800246

研究課題名(和文)メソモデルの高解像度化に向けた新たな大気境界層乱流モデルの構築

研究課題名(英文)Development of a novel turbulence scheme in the atmospheric boundary layer for high resolution mesoscale models

研究代表者

北村 祐二 (Kitamura, Yuji)

気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・主任研究官

研究者番号：40455275

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：メソモデルが高解像度化されるにつれ、既存の乱流パラメタリゼーションが大気境界層において適用できなくなることが知られている。この問題を解決するために、乱流の長さスケールと空間解像度との関係を高解像度のLarge-Eddy Simulationを用いたアプリアリ解析から推定した。この解析から得られた結果に基づいて、乱流の長さスケールを空間解像度の経験的関数として定式化し、既存のモデルを拡張することで適用した。提案した新しい乱流スキームでは、既存のモデルが適用できない空間解像度であっても、乱流輸送を適切に表現できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：It has been known that existing turbulence parameterization schemes are not applicable to high resolution mesoscale models in the atmospheric boundary layer. The dependence of turbulence length scales on the spatial resolution is estimated from an a priori analysis using high resolution Large-Eddy Simulations to solve this problem. The turbulence length scales are empirically determined as a function of the model resolution on the basis of the result obtained from this analysis, and are applied by extending the existing scheme. It is confirmed that the proposed new turbulence scheme can appropriately represent the turbulent transport even at the spatial resolution where existing schemes cannot be applied.

研究分野：大気科学

キーワード：大気境界層 乱流モデリング 解像度依存性

1. 研究開始当初の背景

大気境界層の数値モデリングの精度向上は、種々の気象現象の正確な予測および評価を行ううえで必要不可欠である。しかし、大気境界層での乱流現象を完全に再現することは現在の計算機をもってしても非現実的であり、乱流による運動量や熱の輸送は何らかのパラメタリゼーション手法によって表現せざるを得ない。広く用いられているパラメタリゼーションは、乱流運動の全てをパラメタライズすることを前提とした Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) た乱流運動のほとんどを解像できていることを前提とした Large-Eddy Simulation (LES) に大別されるが、大気境界層においては水平格子間隔が数百メートル程度になるといずれの手法も適用できなくなることが指摘されている。この領域は Wyngaard (2004) によって Terra Incognita (未開の地) と名付けられた。近年の計算機性能の向上により、メソモデルの空間解像度が Terra Incognita 領域に達することが見込まれることから、Terra Incognita 領域に適用可能な乱流パラメタリゼーションの研究を推進することが必要となる。

2. 研究の目的

本研究課題は、乱流の非等方性を許容することで、サブグリッドスケール (SGS) 成分の乱流の等方性を前提とした LES の適用範囲の拡張可能性について検討を行い、最終的に Terra Incognita を含んだ領域で有効な大気境界層の新しい数値モデリング手法を構築することを目的とする。そこに至るまでには、既存の乱流パラメタリゼーションスキームがどの範囲で適用可能なのか、Terra Incognita 領域では、どのような形で既存のスキームの妥当性が失われるのかについて、まず明らかにすることが必要となる。これらについて、既存の乱流パラメタリゼーションスキームを用いた系統的な数値実験を通じて調査する。

3. 研究の方法

Terra Incognita 領域での乱流モデリングの構築のためには、まず乱流の長さスケールが空間解像度に対してどのように特徴づけられるかを明らかにすることが重要であることが Wyngaard (2004) によって指摘されている。本研究課題では、この考え方を基礎として、まず高解像度の LES の計算結果をリファレンスとして、アプリオリ解析と呼ばれる手法を用いて、乱流の長さスケールと空間解像度との関係を同定する。そのうえで、データ解析の結果に基づき、両者の関係を支配する特徴的な物理量を抽出し、経験的な関数として定式化する。そして、既存の LES スキームを乱流輸送の非等方性を考慮できるように拡張することで、求めた経験式を適用し、Terra

Incognita 領域での乱流輸送表現の妥当性を解像度や地表面熱フラックスを変えた一連の数値実験により検証する。

4. 研究成果

(1) アプリオリ解析を用いた乱流長さの解像度依存性の同定

乱流の長さスケールの解像度依存性を推定するために、不安定混合層を対象とした高解像度の Large-Eddy Simulation を実施し、それをリファレンスデータとしてアプリオリ解析を適用した。アプリオリ解析とは、何らかのリファレンスとなる解析データを用意し、解析データに対して空間フィルタを作用させることで意図的に高波数成分を取り除き、その結果として生じる影響に着目した解析手法である。本研究では、一定の温度フラックス (0.2 Km/s) を与え続ける設定で、空間解像度が 10, 20, 40 m のそれぞれの場合について LES を実施し解析を行った。解像度依存性を同定するにあたり、乱流運動エネルギーの散逸率に着目する方法と、渦粘性係数や渦熱拡散係数に着目する方法のそれぞれについて、長さスケールの推定手法を提案した。特に後者の手法により、乱流長さの非等方性を抽出することが可能となった。図 1 は、渦熱拡散係数の水平・鉛直成分に着目して推定された、熱輸送に関する乱流長さの水平解像度依存性を示している。図から分かるように、両者の解像度依存性は水平格子間隔が小さい場合でも異なる性質を示して、乱流輸送の非等方性を考慮したモデルを設計することの重要性を示唆している。本成果については、論文として掲載済みである (Kitamura 2015, 論文 3)。

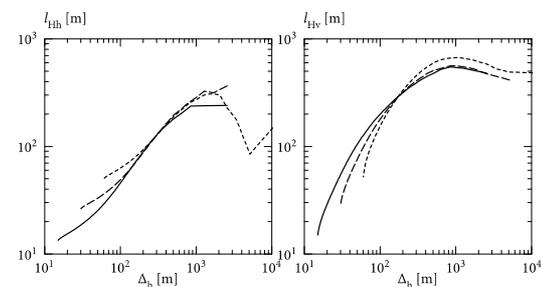


図 1 Large-Eddy Simulation によって推定された熱輸送に関する乱流長さの水平解像度依存性。左図は水平成分、右図は鉛直成分をそれぞれ表している。実線、破線、点線はそれぞれ鉛直解像度が 10, 20, 40m の場合に対応する。

(2) 乱流特性長の解像度依存性を考慮したパラメタリゼーションスキームの構築

前節に述べた結果に基づき、得られた乱流長さスケールの解像度依存性を格子間隔の経験的関数として求め、それを LES のスキームの一つである Deardorff モデル (Deardorff 1980) に適用させた。その際に、Deardorff モ

デルではパラメタライズされる乱流の寄与は等方的であることが前提となっていることから、非等方性の効果を取り入れられるように拡張した。Terra Incognita 領域を含む様々な水平解像度について、Shin and Hong (2015) によって提案されたテストケースを用いた検証実験を行った。図 2 に、運動エネルギーの SGS 成分の割合が、水平解像度によってどのように変化するかを解析した結果を示す。SGS 成分が全体に占める割合は、解像度に応じた乱流運動が適切に表現されているかを検証するための指標として、既往の研究でも広く用いられている。図 2 より、従来型の LES では、水平格子間隔が大きくなるにつれ SGS 成分が過少となる傾向が見られる。このことは、物理的に妥当でない人工的な擾乱が格子スケール成分に含まれていることを意味しており、従来型の LES では Terra Incognita 領域には適用できないことを示している。一方、本研究で提案した新しいスキームでは、概ね Honnert et al. (2011) によって提案された経験式と整合的である。図には示さないが、熱輸送や解像される対流の強度などについても、Terra Incognita 領域で妥当な結果が得られることを確認している。本成果については、論文として掲載済みである (Kitamura 2016, 論文 1)。

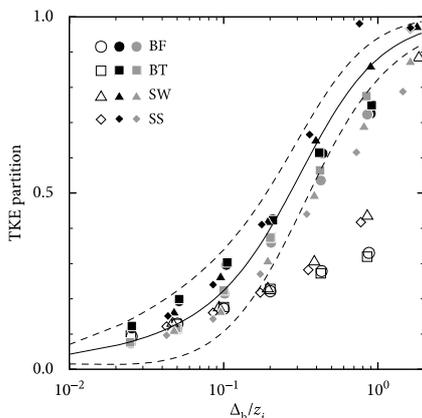


図 2 境界層高度で規格化した水平解像度ごとのサブグリッドスケールの運動エネルギーが占める割合。白と黒のマーカーはそれぞれ従来の LES, 新スキームを適用した LES を示し、グレーのマーカーはアприオリ解析による推定値を示している。実線は Honnert et al. (2011) によって提案された経験式を表している。

(3) 解像度依存性を考慮した地表面顕熱フラックスの診断手法の検討

地表面からの運動量や熱のフラックスは、通常大気最下層の風速・温度から Monin-Obukhov の相似則に基づいて診断される。しかし、平均風速・温度が同じであっても、空間解像度が異なると、それに応じて乱流成分が解像されるようになるため、従来の診断手法では熱フラックスの整合性が破綻す

る問題が生じる。とりわけ、平均風速が小さく自由対流に近い状態では、平均風速に比べて個々の対流によって生じる水平風の寄与が相対的に大きくなるため、この問題は深刻となる。乱流成分の揺らぎを考慮したフラックス診断の補正は Beljaars (1994) によって提案されているものの、この手法では解像度の依存性を考慮することはできない。したがって、Terra Incognita 領域での数値シミュレーションを適切に行うには、地表面フラックス診断においても、解像される揺らぎ成分の強度を考慮した補正手法が必要となる。そこで、本研究ではサブグリッドスケールの乱流エネルギーに基づく新たな補正手法を提案し、地表面の顕熱フラックスに着目して解析・検証した。平均風速が 0 m/s, 1 m/s のときの、地表面顕熱フラックスの水平解像度依存性の一例を図 3 に示した。補正がない場合には、水平格子間隔が大きいほど顕熱フラックスが過少評価になり、Beljaars (1994) の手法を適用すると、水平格子間隔が小さいときに過大評価になることが分かる。一方、本研究で提案した手法では、モデルの水平解像度によらずに整合的な顕熱フラックスが診断可能となっている。本成果については、論文として掲載済みである (Kitamura and Ito 2016, 論文 2)。

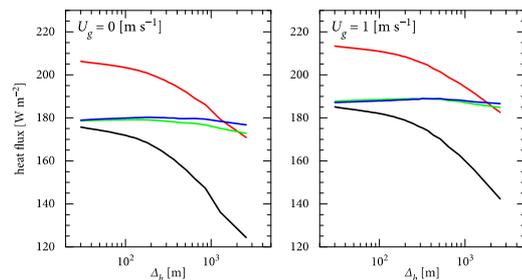


図 3 平均風速が 0 m/s(左図), 1 m/s(右図) ときの、地表面顕熱フラックスの水平解像度依存性の一例。黒線は修正をしないもの、赤線は Beljaars (1994) による修正を適用したもの、青線と緑線はそれぞれ、本研究で提案した修正とその簡易版を適用した結果を示している。

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 3 件)

- (1) Kitamura, Y., Improving a turbulence scheme for the terra incognita in a dry convective boundary layer, 査読有, J. Meteor. Soc. Japan, 94 (2016), 491-506, doi:10.2151/jmsj.2016-028

(2) Kitamura, Y. and Ito, J., Revisiting the bulk relation for heat flux in the free convection limit, 査読有, Boundary-Layer Meteor., 158 (2016), 93-103, doi:10.1007/s10546-015-0075-z

(3) Kitamura, Y., Estimating dependence of the turbulent length scales on model resolution based on a priori analysis, 査読有, J. Atmos. Sci., 72 (2015), 750-762, doi:10.1175/JAS-D-14-0189.1

〔学会発表〕(計 10 件)

(1) Kitamura, Y. and Nishizawa, S., Estimating the energy dissipation rate derived from discretization of the advection term, 2016 AGU Fall Meeting, 2016.12.13, サンフランシスコ(米国)

(2) 北村 祐二, 西澤 誠也, 移流項の差分化によって生じるエネルギー散逸率の推定, 日本流体力学学会年会 2016, 2016.9.28, 名古屋工業大学(愛知県・名古屋市)

(3) Kitamura, Y., A LES Based Parameterization Scheme for the Terra Incognita in a Planetary Boundary Layer, 22nd Symposium on Boundary Layers and Turbulence, 2016.6.24, ソルトレイクシティ(米国)

(4) 北村 祐二, 西澤 誠也, 移流項の差分化によって生じるエネルギー散逸率の推定, 日本気象学会 2016 年春季大会, 2016.5.21, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都・渋谷区)

(5) Kitamura, Y., Developing a parameterization scheme for the gray zone of the atmospheric boundary layer, 2015 AGU Fall Meeting, 2015.12.16, サンフランシスコ(米国)

(6) Kitamura, Y., Developing a parameterization scheme for the gray zone in the atmospheric boundary layer,

International WS Issues in downscaling of climate change projection, 2015.10.6, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)

(7) 北村 祐二, 乱流長さの解像度依存性の推定と大気境界層への適用, 日本流体力学学会年会 2015, 2015.9.28, 東京工業大学(東京都・目黒区)

(8) 北村 祐二, 伊藤 純至, 数値モデルで診断される地表面熱フラックスの水平解像度依存性, 日本気象学会 2014 年秋季大会, 2014.10.23, 福岡国際会議場(福岡県・福岡市)

(9) Kitamura, Y., Estimation of the turbulent length scale across terra incognita with its application to a convective boundary layer, 3rd International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, 2014.9.24, 理化学研究所計算科学研究機構(兵庫県・神戸市)

(10) 北村 祐二, 混合距離の非等方性を考慮した境界層乱流モデルの構築, 日本気象学会 2014 年春季大会, 2014.5.24, 開港記念会館・情報文化センター(神奈川県・横浜市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.mri-jma.go.jp/Member/ap/jikita_murayuuji.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北村 祐二 (KITAMURA, Yuji)

気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・主任研究官

研究者番号: 40455275