

機関番号：82109

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20740276

研究課題名(和文) 数値実験と風洞実験の融合による新しい大気乱流パラメタリゼーションの提案

研究課題名(英文) A study on new turbulence parameterization with utilization of numerical and wind-tunnel experiments

研究代表者

北村 祐二 (Kitamura Yuji)

気象庁気象研究所・物理気象研究部・研究官

研究者番号：40455275

研究成果の概要(和文):数値モデルにおいて大気境界層における乱流輸送を再現するためには、パラメタライズされた乱流を適切に表現することが重要である。Large-Eddy Simulation(LES)やレイノルズ平均モデル(RANS)で用いられる乱流パラメタリゼーションの改善を目的として、以下の研究を実施した。まず、LESを用いて安定境界層の数値実験を行い、ジェルマノの恒等式に基づいて、鉛直フラックスの自己整合性の検証を試みた。次に、安定成層の場合に Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN)モデルに見られる問題を解決する目的で、温度・圧力相関の時間スケールを修正することを試みた。MYNNモデルとは異なり、修正したモデルはレベル2モデルにおいて臨界リチャードソン数を持たず、全てのリチャードソン数について乱流の効果が現れる。最後に、フラックスリチャードソン数の大気安定度に対する依存性を同定するために、LESや大型実験風洞を用いた数値的・実験的研究を実施した。その結果、境界層上端ではフラックスリチャードソン数が1を超える可能性があることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文):

An appropriate formulation of parameterized turbulent motions is absolutely essential for reproducing turbulent transfer in the atmospheric boundary layer with a numerical model. The following studies are conducted in order to improve turbulence parameterization schemes used in the Large-Eddy Simulation (LES) and the Reynolds Averaged Numerical Simulation (RANS). First, we perform a set of numerical simulations based on the LES in a moderately stable boundary layer and attempt to evaluate the error of the vertical flux in terms of self-consistency, based on the Germano identity. Second, to solve problems with the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) model, we attempted to modify a relaxation time scale of temperature-pressure correlation for the stable stratification case. In contrast to the original MYNN model, the modified model has no critical Richardson number, and the effect of turbulent motions remains for all Richardson number values in the level 2 model. Lastly, we perform numerical and wind-tunnel experiments to identify dependence of flux Richardson number on atmospheric static stability. These results indicate that flux Richardson number can be over unity.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	0	1,800,000
2009年度	700,000	0	700,000
2010年度	800,000	0	800,000
総計	3,300,000	0	3,300,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学，気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気象学，大気境界層，数値モデリング

1. 研究開始当初の背景

Large-eddy Simulation (LES) とは，慣性小領域に至るまでの乱流現象を陽に扱い，格子スケールで表現できない乱流現象のみをパラメタライズする手法である。したがって，GCM や領域モデル等の数値気象モデルで採用されているレイノルズ平均モデル (RANS) と比べると，一般的に LES の方が計算コストが大きくなる。そのため，現状では気象の問題において LES の手法が有効なのは，境界層現象の記述に特化したようなモデルに限定されるが，より精度の良い結果が得られることは大きなメリットであり，気象モデリングの分野での LES の研究は近年重要性が増してきている。

LES における乱流パラメタライゼーションスキームの方法は，Smagorinsky スキーム (Smagorinsky, 1962) や Deardorff スキーム (Deardorff, 1980) をはじめとして，今日までに様々な手法が提案されている。しかし，例えば Beare et al. (2006) が報告しているように，個々のスキームを用いて得られる結果には，スキーム間のばらつきもあるうえに，モデルの解像度にも大きく依存しており，十分な精度を保証できるスキームの開発はまだ途上にあるのが現状である。したがって，乱流パラメタライゼーションスキームの改善のための研究を推進することは極めて重要である。さらに，LES によってある程度信頼できる結果が得られるようになれば，数値気象モデルで用いている RANS のモデリングの改善に向けて有用な情報が得られることが期待できる。

乱流パラメタライゼーションスキームの改善には，乱流輸送の統計的性質を実験・数値モデルの両面から明らかにし，既存のスキームでの問題点を定量的に抽出するプロセスが不可欠である。実験・観測的手法と数値モデルを用いた手法は相補的であり，両者を組み合わせることで新たな知見が生まれることが期待される。

2. 研究の目的

大気境界層は地表面と運動量・熱・水蒸気の交換を直接的に行っている領域であり，これらの乱流による鉛直輸送を通して，境界層での物理過程は大気全体の気象現象にも影響を及ぼしている。したがって，大気境界層における乱流輸送を精度よく見積もることは，種々の気象現象の正確な予測および評価を行う上で必要不可欠であるといえる。しかしその一方で，大気境界層での乱流現象の特

徴的な時空間スケールは，領域モデルや GCM で対象としている現象と比べると遥かに小さいことが知られている。そのため，領域モデルや GCM では，大気境界層乱流による運動量や熱の鉛直輸送の効果を，経験的に得られたパラメタライゼーションスキームを用いて簡便な形で表現せざるを得ないのが現状である。本研究では，大気境界層に特化した数値モデルと風洞を用いた室内実験とを融合的に活用することによって，Large-eddy Simulation (LES) やレイノルズ平均モデル (RANS) において用いられている乱流パラメタライゼーションの問題点を抽出し，これらの乱流パラメタライゼーションスキームの改善に資する提案を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 乱流パラメタライゼーションスキームの問題点を抽出する手法として，Germano の恒等式に基づく乱流輸送量の自己整合性の定量化を試みる。この手法は大気境界層乱流ではこれまで活用されてこなかった手法である。既存の乱流パラメタライゼーションスキームを用いて一連の LES を実施し，得られる結果について異なる解像度間でのサブグリッドスケールの自己整合性の評価を行う。

(2) RANS モデルの改善に向けた試みとして，多くの気象モデルで用いられている乱流モデルの一つである MYNN モデルについて，その定式化について検討を行う。強安定の場合の乱流輸送量の見積もりについて，フラックスリチャードソン数が大気安定度にどのように依存しているかに着目した研究を実施する。

(3) 実験風洞を活用して，平均風速，密度成層の強さの異なる様々な基本場について系統的な実験を行い，数値実験との比較のためのデータの集積を行う。とりわけ，安定成層でのフラックスリチャードソン数や乱流プラントル数の見積もりが数値実験の結果に大きな影響を及ぼすことが明らかとなっているため，風洞実験から見積もられるこれらの統計量が数値実験の結果とどの程度整合しているのかを調査する。

4. 研究成果

(1) 自己整合性に基づくサブグリッドスケールの乱流フラックスの検証

既存の乱流パラメタライゼーションスキームを用いて一連の安定境界層の理想実験を実施し，個々のスキームの特性についての解析を行った。特に，数値実験から得られる結

果の妥当性を検証するために、Germano の恒等式を活用して、乱流パラメタリゼーションによって表現されるサブグリッドスケールの鉛直フラックスが、数値モデルにおいて自己整合性をどの程度持ち得るかについて定量化することを試みた。結果の一例を図1に示す。解析の結果、乱流運動エネルギーを予報変数とする Deardorff スキームでは解像度が低くなったときに熱フラックスを過大評価する傾向があること、Smagorinsky スキームでは解像度が低くなると、サブグリッドスケール成分が混合層上端の温度勾配を過大に解消するように働き、混合層の構造を維持できなくなることなどを定量的に評価することができた。また、スキーム間での熱フラックスの違いは、乱流プラントル数の定式化がスキームによって異なることが無視できないことが明らかとなった。さらに、リファレンスデータの作成の際に空間フィルタを利用することで、用いるリファレンスデータに依存せずに一貫した解析結果が得られることを確認した。今回の結果は、Germano の恒等式に基づく解析が、時空間的に密な観測データの取得が困難な大気境界層の数値モデリングの検証にとって有効なツールとなり得ることを示唆している。

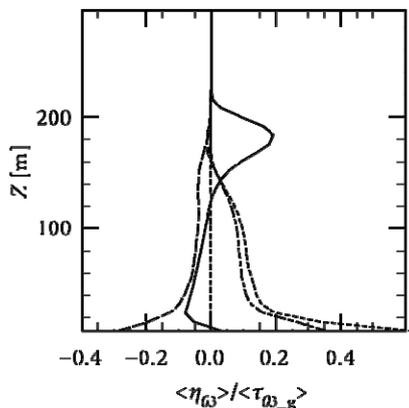


図 1: 各パラメタリゼーションスキームを用いて Germano の恒等式に基づいて見積もった熱フラックスの誤差の水平平均を求めた結果。ただし、最下層のフラックスで規格化した値をプロットしている。実線、破線、点線、一点鎖線はそれぞれ、Smagorinsky model, Dynamic Smagorinsky model, Deardorff model, Two-part model を用いてサブグリッドストレスを求めた結果に対応している。

(2) MYNN モデルの定式化についての検討

多くの気象モデルで用いられている乱流モデルの一つである MYNN モデルの定式化について検討を行った。先行研究では、フラックスリチャードソン数には上限があり、臨界リチャードソン数が存在しないことが指摘

されている。MYNN モデルは境界層の発達過程をよく再現することが報告されている一方で、強安定の場合の乱流輸送に関して、現状の MYNN モデルは最近の研究で報告されている結果と整合しない可能性がある。この問題に対処するため、Canuto et al. (2008) によって提案された定式化に基づき、MYNN モデルについて見直しをはかった。

図2にレベル2モデルでの運動量に関するシア関数の Richardson 数依存性を示す。図から、修正した MYNN モデル(実線)では臨界 Richardson 数が存在していないことが分かる。一方で、Nakanishi and Niino (2009) で提案されている MYNN モデル(破線)を用いた場合には、臨界 Richardson 数が存在する結果となる。さらに、修正したモデルはレベル2.5モデルやレベル3モデルにおいても利点がある。フラックスリチャードソン数が非有界で、乱流運動エネルギーに制限を課す必要のある MYNN モデルとは異なり、修正したモデルにはこれらの性質は見られない。

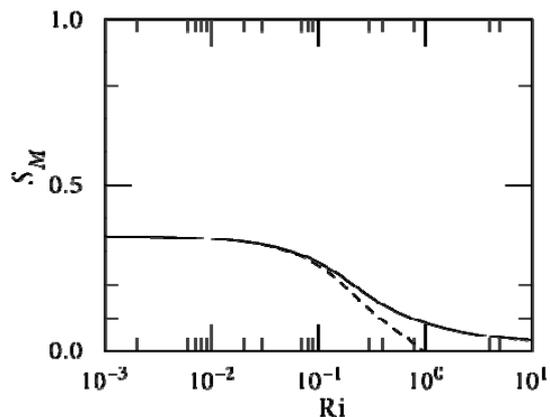


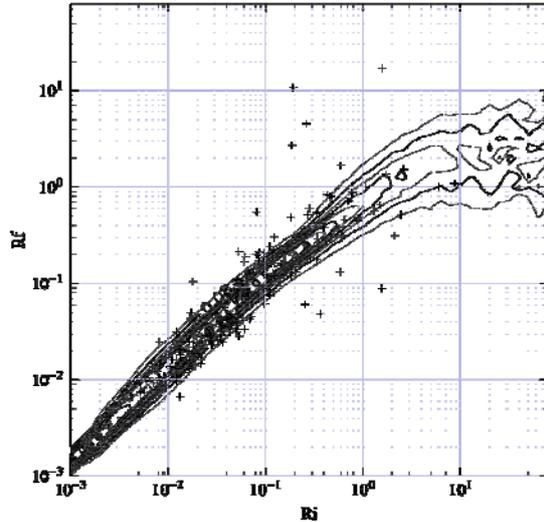
図 2: レベル2モデルでの運動量に関するシア関数の Richardson 数依存性。実線は本研究で提案されたモデルの結果、破線は Nakanishi and Niino (2009) のモデルによる結果を表す。

(3) LES と風洞実験を活用したフラックスリチャードソン数、乱流プラントル数の同定

本研究を通じて、フラックスリチャードソン数や乱流プラントル数が大気安定度どのように依存するかは、乱流クロージャモデルの妥当性を検討するうえで重要な役割を果たしていることが明らかとなった。したがってこれらの統計量を定量的に同定することが必要である。そこで、これらの統計量に着目し、Large-Eddy Simulation や大型実験風洞を用いた数値的・実験的研究を実施した。その結果、境界層上端ではフラックスリチャードソン数が1を超える可能性があることが明らかとなった(図3)。また、このような領域では、乱流運動エネルギーの鉛直輸送や圧

力・速度相関といった非局所的な効果が重要な役割を果たしていた。この結果は、従来の研究では指摘されていなかったことであり、クロージャモデルの設計において重要な示唆をもたらすものと考えられる。

図 3: フラックスリチャードソン数(Rf)の勾



配リチャードソン数(Ri)に対する依存性。LESを用いて見積もられた結果はRiに関する条件付き確率密度としてコンターで示されている。また、風洞実験から得られた結果を+のマーカで示した。

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3件)

(1) Kitamura, Y. and Matsuda, Y., Energy cascade processes in rotating stratified turbulence with application to the atmospheric mesoscale, J. Geophys. Res., 115 (2010), D11104.

(2) Kitamura, Y., Self-consistency validation of subgrid scale parameterization schemes in a large-eddy simulation, J. Meteor. Soc. Japan, 88 (2010), 813-825.

(3) Kitamura, Y., Modifications to the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) model for the stable stratification case, J. Meteor. Soc. Japan, 88 (2010), 857-864.

[学会発表] (計5件)

(1) 北村 祐二, Germano の恒等式を用いたサブグリッドスケールのフラックスの評価, 日本気象学会 2008 年秋季大会 (2008. 11. 21)

(2) Kitamura, Y., An intercomparison and self-consistency verification of subgrid scale parameterization schemes in large-eddy simulation, International

workshop on Rotating Stratified Turbulence and Turbulence in the Atmosphere and Oceans (2008. 12. 8 - 12)

(3) Kitamura, Y., Self-consistency validation of subgrid scale parameterization schemes in large-eddy simulation, AGU fall meeting (2009. 12. 14)

(4) 北村 祐二, 安定成層下での MYNN モデルの修正について, 日本気象学会 2010 年春季大会 (2010. 5. 26)

(5) Kitamura, Y., Modifications to the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) model for the stable stratification case, First International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models (2010. 09. 29)

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・物理気象研究部・主任
研究官

研究者番号: 40555275