

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540465

研究課題名(和文) ラージエディ・シミュレーションによる前線の乱流構造の研究

研究課題名(英文) Large eddy simulations of frontal turbulence structure

研究代表者

川島 正行 (Kawashima, Masayuki)

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号：10281833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：前線や前線に伴う小規模擾乱の形成における小規模乱流の役割について、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)により調べた。従来のメソモデルによる実験では前線の構造は、物理的ではなく、格子間隔などの計算の設定で決まっていた。本研究で行った実験では小規模な乱流を陽に解像することにより、前線を物理的に正しく表現することができた。一連の実験により、前線や前線に伴う小規模擾乱の物理的特性について調べ、それらが乱流の表現の仕方や前線強制などの外的要素にどう依存するか系統的に調べた。

研究成果の概要(英文)：The role of turbulence in determining the structures of fronts and associated small-scale disturbances was examined through a series of Large-Eddy-Simulations (LES). The structures of fronts were determined not physically, but by the choice of numerical parameters such as the model grid size in previous mesoscale model simulations. The LES simulations conducted in this study reproduced the frontal structure in a physically significant manner, by explicitly resolving small-scale turbulence associated with the front. The physical properties of the fronts and associated small-scale disturbances, and their dependencies on the representation of turbulence and the external forcings such as the frontogenetic forcing as well, were examined systematically using the LES.

研究分野：気象学

キーワード：温帯低気圧 前線 ラージ・エディ・シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

発達した温帯低気圧は前線を伴う。前線は傾圧不安定に伴う合流変形やシア変形などの大規模場の強制（前線強化）を受けて発達するが、その幅は無限に小さくはならず、十分発達した寒冷前線においても寒気と暖気の境界（前線層）の幅は数 100m～数 km あることが示されている。観測から前線層は乱流の強い遷移層であり（図 1）、前線強化と前線面におけるシア不安定などにより生じた乱流による拡散の平衡によってその幅が決まると考えられている。

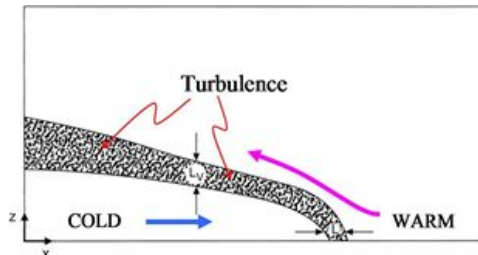


図 1. 寒冷前線の概念図。寒気と暖気の境界には一定の幅を持つ乱流の強い層が形成する。

計算機資源の発展により、近年の気象シミュレーションでは格子幅数 km～数 100m 程度の高解像度のモデルで低気圧全体を再現することが可能となり、大きな物理量の傾度を伴う前線や前線に伴うメソスケールの擾乱もある程度再現できるようになった。申請者は高分解能の雲解像モデルを用いて、寒冷前線に伴う各種降雨帯の数値実験を行った。これにより、降雨帯を作る擾乱の構造や波長は前線層の鉛直軸からの傾きや幅などによって決まることを示したが、これらの量は実験に用いた格子間隔に強く依存してしまうという問題が残された。

これは、雲解像モデルの乱流のパラメタリゼーションが、LES の方式をそのまま用い、格子幅に比例した拡散係数を用いていることに起因する。LES は慣性小領域の乱流渦は陽に解像することを仮定しているが、雲解像モデルの解像度ではこの仮定は成り立たず、前線の幅や物理量の傾度は、物理的に決まるのではなく計算格子間隔や数値粘性など、モデル依存したパラメータの効果で決まってしまう。

2. 研究の目的

本研究は、LES モデルを用いた数値実験により前線と前線に伴う乱流構造を再現し、それらの環境場依存性や、乱流が前線の構造に与える影響について明らかにすることを目的としている。実験は解析や感度実験の行いやすい理想化された設定、初期場、境界条件で非静力学モデルに LES をネストする形で行う。まず、前線層の幅、前線の構造を物理的に表現するために必要な格子間隔や、ネ스팅の際の不整合が生じないための境

界条件の設定などについての検討を行い、LES による実験方法を確立することを第一の目的とした。

次に、前線およびその乱流構造の環境場依存性について、合流変形やシア変形などの前線強化パラメータ、成層の安定度、地表面摩擦などを変えて行う一連の感度実験から明らかにする。また、寒冷前線前方の暖域下層の組織的な大規模乱流構造が前線の空間的な変動に影響を与えることが示唆されているが、これについても境界条件を変えた数値実験により明らかにする。さら LES の結果との比較から現状の雲解像モデルの問題点を明らかにする。

温帯低気圧に伴う前線の形成は、傾圧不安定のエネルギーから乱流へのエネルギー輸送、散逸という、ダイナミックレンジの極めて大きなプロセスからなる。本研究ではこれらの物理プロセスを考慮してラージ・エディ・シミュレーション（Large-Eddy Simulation, 以下 LES）による前線の理想化数値実験を行う。これにより、小規模乱流が前線形成に及ぼす効果、前線構造の環境場依存性についての系統的理解を目指す。

3. 研究の方法

まず、LES を用いた前線の数値実験の確立を行った。現状の計算機資源では温帯低気圧に伴う前線全体を LES を用いて計算することは不可能である。また、現実的な三次元の枠組みで各種感度実験を行い、結果の解釈を行うことは困難である。そこで、これまで申請者が前線の理想化数値実験で用いてきた方法を踏襲し、計算負荷の小ささが小さく、結果の解釈が容易な水平・鉛直二次元のモデルと、地上の前線に沿った方向に周期境界条件を課した準三次元モデルを併用した実験を行った。

非静力学モデルはこれまで前線やメソ降水系の研究に用いてきた申請者が作成したモデルを、LES モデルは Weather Research and Forecasting (WRF) を LES の設定で使用する。実験は、湿潤過程、雲微物理過程は考慮するが、複雑な地表面過程や放射過程は入れずに行った。

水平格子間隔 1km 程度の非静力学モデルで東西・鉛直の二次元の領域で前線強化実験を行った。領域の幅は従来の前線強化実験と同様 4,000km 程度とし、これにより前線全体の構造、メソスケールの循環を大まかに再現した。次に二次元非静力学モデルの出力値を南北方向に一樣な初期値、東西方向の側面境界値として利用し、東西方向に数 10km 程度、南北方向に数 km 程度、鉛直方向に数 km 程度の三次元領域について LES を用い各種感度実験を行った。

4. 研究成果

格子間隔の粗いモデルに LES をネストする場合、モデルの境界で生じる数値的ノイズが

LES の計算結果に影響を与えてしまうため、適切な境界条件の設定が不可欠である。そこで、見るべき領域の境界付近を中心とする LES モデルを別途走らせ、ノイズの影響の小さいモデル中央付近の出力値を改めて側面境界条件とするなど、ノイズの影響を極力軽減するための方法について検討を行った。これにより、前線に沿った方向に周期境界条件を課した準二次元的な設定ではあるが、LES によるある程度現実的な前線構造の再現が可能となった。

以上の LES の実験設定の確立後、以下(1)~(4)の数値実験を行った。

(1)前線強化の変化に対する前線構造の感度
傾圧不安定に伴う合流変形(confluence)やシア変形による南北温度傾度の差分移流といった基本的な前線強化要素の変化に対し、前線層の幅や前線層における乱流構造、寒冷前線先端部の形状などがどのように変化するか、感度実験により調べた。この結果、前線強化が強まるにつれて前線層の幅は小さくなったが、ある閾値を超えると強いシアに起因した二次元的な組織的乱流構造(ケルビンヘルムホルツ不安定波)が生じ、結果として平均的な前線層の幅が増大することが示された。また、この不安定波に起因し、過去の温帯低気圧の観測で報告されている波状の雲・降水パターンが形成することを示した。

(2) 暖域下層の組織的大規模乱流構造の影響

寒冷前線前方暖域に鉛直シアの影響を受けて生じたロール状の大規模乱流構造などが前線の構造に影響を及ぼす可能性が指摘されている。そこで一様流入条件と乱流流入条件の実験の比較を行い、地上付近の寒冷前線前方の乱流が前線の構造に及ぼす影響について調べた。前線先端における水平シアが弱い場合はロール状の乱流構造が地上寒冷前線における収束に規則的な波状のパターンを作り、結果としてロール状の乱流構造と同じ波長の降水パターンが形成されることが分かった。一方、前線先端の水平シアが十分大きくなると、降水のパターン形成においては前線先端における水平シア不安定の影響が卓越することが分かった。

(3) 地表面摩擦に関する感度実験

地上寒冷前線の幅の地表摩擦係数依存性について調べた。結果として、ある程度摩擦係数が小さな範囲では、摩擦係数の増加に応じて前線の水平幅は狭くなる傾向が見られた。また、前線に伴うシア流の不安定により生じる水平シア不安定波の波長は摩擦の増加に応じて短くなる傾向が見られたが、摩擦がさらに強くなると寒気が暖気に局所的に乗り上げるような構造となり、前線の平均的な幅が増加することが示された。

(4)融解層の効果

過去のレーダ観測によりで詳細な前線の構造が得られている事例について、特に融解冷却の効果に着目して実験を行った。その結果、LES で再現される、幅を持った前線層と融解層とが交差することにより、過去の観測と整合的な幅を持つ、寒冷前線に伴う幅の広い降雨帯(図2)が形成することが分かった。

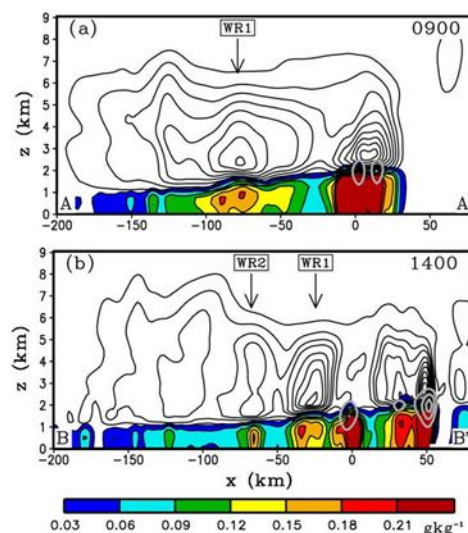


図2 寒冷前線に伴う雪水(等値線、 0.1 g kg^{-1} 間隔)と雨水(陰影)の鉛直断面。WR1、WR2は幅の広い寒冷前線降雨帯。

この降雨帯は前線層と融解層が交差することにより重力波が励起されることにより生じるが、励起される重力波の水平波長は前線層の幅に依存するため、降水帯の性格な再現には、LES による前線層の正確な表現が求められる。

また、融解冷却が小さいケースでは前線は冷却に対して線形的に応答するため、結果の格子間隔依存性は弱く、冷却により生じる重力波による降雨帯形成が格子の大きさに依らず見られた。

融解冷却が強いケースでは、格子間隔を小さくすると融解層内での成層の不安定化による小規模な積雲の発達を促進され、降水が強化されることが確認できた。また、大気下層に融解冷却起源の冷気外出流が発達し、その先端で新たな対流性の降雨帯が形成することも確認された。

全体を通じて得られた主要な成果として、まず、前線の LES による数値実験方法の確立を行い、前線層における乱流を陽に解像する格子間隔で数値実験を行うことにより、現実的な前線構造が再現できたことが挙げられる。小規模乱流が陽に解像されることにより前線面はある程度の幅を持つ前線層として表現された。

従来の数値実験では、前線に伴う擾乱の強さやスケールは物理的に決まるのではなく、計算格子間隔や数値粘性など、モデル依存し

たパラメータにより決まっていた。本課題で行った数値実験で再現された降水の微細構造やシア不安定波などの各種擾乱は物理的に意味のあるものであり、その特性・環境場依存性について得られた知見は重要であると考えられる。

LES 実験の結果をもとにしたパラメタリゼーションの改良・開発までは期間内にできなかったが、本課題で得られた結果は雲解像モデルのパラメタリゼーションの精度向上に資すると考えられる。

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)

[学会発表](計 2 件)

川島正行: 幅の広い寒冷前線降雨帯の形成における融解の効果、
日本気象学会春季大会、2013 年 5 月 15 日、
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)

川島正行: 幅の広い寒冷前線降雨帯の形成における降水粒子の融解冷却の効果
第 15 回非静力学モデルに関するワークショップ、2013 年 9 月 26 日、北海道大学低温科学研究所 (北海道札幌市北区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川島 正行 (KAWASHIMA MASAYUKI)
北海道大学・低温科学研究所・助教
研究者番号: 10281833