

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24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：2009～2011

課題番号：21540446

研究課題名（和文）微細格子雲解像モデルを用いた温帯低気圧に伴う降雨帯の研究

研究課題名（英文）Numerical study of rainbands associated with extra-tropical cyclones using fine-mesh cloud resolving model

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

研究成果の概要（和文）：前線に伴う雲による降水を表現する微細格子雲解像モデルにより温帯低気圧に伴う降雨帯の構造、成因について調べた。まず、理想化した数値実験により、地上の寒冷前線に伴う降雨帯のコア-ギャップ構造について調べ、その成因である水平シア不安定波の発達には環境風の鉛直シア、局所的な鉛直シアに強く依存することなどを示した。また、観測された前線に伴うその他の各種降雨帯の構造、成因について現実的な設定の数値実験により明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The structure and formation mechanism of rainbands associated with extra-tropical cyclones were investigated through a series of numerical experiments using fine-mesh cloud resolving models. Idealized simulations of narrow cold frontal rainbands revealed that the development of core-gap structure of the rainbands due to horizontal shear instability depends strongly on the environmental and local vertical shear. Realistic numerical simulations revealed the formation mechanisms of other types of rainbands.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：温帯低気圧、前線、雲解像モデル

1. 研究開始当初の背景

温帯低気圧は中緯度地域の日々の天気を

支配し、降水をもたらす主要な気象擾乱である。1970年代以降、米国や欧州の研究が

ループにより温帯低気圧に伴う雲・降水の分布の観測が精力的に行われた。これにより降水は寒冷前線や温暖前線に沿ってならぶメソスケール（中規模）の帯状の領域（降雨帯）に集中していることが明らかになり、温帯低気圧に伴う降水の概念モデルが示された。降雨帯のうち、地上の寒冷前線と対応した幅の狭い降雨帯（narrow cold frontal rainband）は、寒気が暖域の空気を強制的に持ち上げることにより生じるが、そこに生じる波長数km～数十kmの波状微細構造（降水コア-ギャップ構造）のメカニズムや環境場依存性については十分に調べられていない。一方、上空の前線に伴う他の降雨帯、すなわち地上の寒冷前線の後方に出現する幅の広い降雨帯（wide cold-frontal band）、低気圧暖域に発生する降雨帯（Warm sector band）地上の温暖前線の前方に出現する降雨帯（warm frontal band）などについての研究は比較的少なく、その成因についてはいまだに不明な点が多い。これは、降雨帯の形成には低気圧の発達に伴う大規模な強制力から微物理過程に至るまで、様々な過程が関与しており、そのようなダイナミックレンジの大きな過程を観測や数値実験で正確に捉えるのが困難ためである。

2. 研究の目的

本研究は微細格子を用いた雲解像モデルにより、前線に伴う雲を適切に表現し、温帯低気圧中の各種降雨帯の成因を解明することを目的としている。これにより、観測をもとに描かれた概念モデルに物理的な解釈を与え、新たな温帯低気圧に伴う降水の概念モデルを構築する。特に、比較的良く観測される幅の狭い寒冷前線降雨帯の降水コア-ギャップ構造、低気圧暖域に発生する降雨帯、上空の寒冷前線に伴う降雨帯を主な対象として、その成因と環境場依存性について調べた。

3. 研究の方法

本研究では大別して以下の2つの方法で降雨帯の数値実験を行なった。

(1) 理想化数値実験

申請者がこれまでのメソ降水システムの研究で用いてきた雲解像モデルを改良・発展させ、水平格子間隔数百m、鉛直格子間隔数十mの微細格子雲解像モデルを作成した。これにより、過去の数値実験では表現されていない前線に伴う層状雲中の対流雲形成など、降雨帯の形成に重要であると考えられる過程を表現できるようにした。

このモデルを用いて、寒冷前線降雨帯の降水コア-ギャップ構造の理想化実験を行ない、その微細構造が生じるメカニズム、環境場依存性について調べた。モデルの領域は東西・南北・鉛直方向に $180 \times 300 \times 10\text{km}$ とし、南北方向には周期条件を用いた。水平格子間隔は $100\text{m} \sim 500\text{m}$ の範囲で変えて実験を行なった。モデル中では予め設定した冷却を与え、それにより生じる冷気流内部に北風運動量強制を与えることで、低気圧性の水平シアを持つ寒冷前線先端部の構造を再現させた。水平シアの強さは運動量強制の係数 (C_w) を変えることで変化させた。成層は湿潤中立に近い安定成層とし前線に直交する環境風の下層の鉛直シアを $5\text{ms}^{-1}/2.5\text{km} \sim 20\text{ms}^{-1}/2.5\text{km}$ の間で変えて実験した。

(2) 現実的設定の数値実験

現実的な設定の実験では、非静力学領域大気モデル Weather and Research Forecasting model (WRF) の Version 3.2 を使い、格子を順に細かくした4重ネスト実験を行った。主要な実験では格子間隔は順に 18km , 6km , 2km , 666m としたが、さらに細かい格子を用いた実験も行い、解像度依存性についても調べた。対象とした事例は北米西海岸や大西洋で過去に観測された低気圧にともなう降雨帯で、それぞれ複数の事例について行なった。この実験により

地上の寒冷前線の他、上空の寒冷前線に伴う降雨帯、暖域の降雨帯の成因を調べた。また、モデル中で用いられる境界層スキーム、微物理過程のスキームに対する感度実験も行なった。

4. 研究成果

以下に(1)理想化数値実験、(2)現実的設定の実験それぞれの成果を記す。

(1) 理想化数値実験

前線に直交する環境風の下層の鉛直シアを変えた実験により、前線に伴う降水コアの発達は鉛直シアの影響を強く受けることが分かった。図1は積分4時間後と8時間後の降水の水平分布で、左から順に前線に直行する下層鉛直シア強度が強くなっており、実験 U20-S0 は下層 2.5km で水平風速が 20m/s 増加していることを意味する。鉛直シアの大きな実験では前線のうねりの振幅が大きく、前線全体に対し時計回りに傾いた軸をもつ降水コアが発達するが、鉛直シアが弱くなると振幅は小さくなり降水も比較的一様である。

この理由について渦度収支解析などにより調べ、鉛直シアが弱まると寒気先端における前線に沿った成分の水平渦度が強まり、水平シア不安定に伴う鉛直渦度アノマリの発達を抑制すること、結果としてある水平シア強度以下では不安定波の発達が完全に抑制されることを明らかにした。前線や密度流の先端など顕著な水平シアのある場であっても、必ずしも不安定波や渦が生じるとは限らないが、この結果はその理由を説明するものである。

一方、地上の寒冷前線に伴う水平シア強度を変えた実験では、擾乱の波長が顕著なシア強度依存性を示すことが明らかになった。図1の U10-S0 について、水平シア強度を変えて行った結果を図2に示す。水平シアが弱い CM=0.2 の場合には、不安定は生じない。CM=0.4 以上の実験では不安定波が生じるが、水平シアが強くなるほどその波

長が長くなっていることが分かる。これは鉛直シアの異なる他の実験についても言える。図3に水平シア強度 ($\partial \bar{v} / \partial x$) と、水平シアの幅でスケールリングした発達初期の波長との関係を示す。波長はシアが強くなるほど長くなった、この傾向は粘性がある場合の単純なシア流不安定の場合と逆である。なお、図2と同様の結果は一定の渦拡散係数を用いた場合についても得られた。

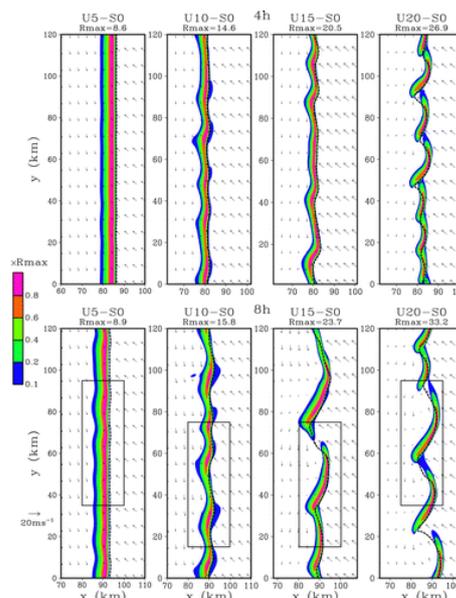


図1. 地上降水強度(最大値で規格化)と降水コアに相対的な風ベクトル。上段は積分4時間後、下段は8時間後。

以上の結果は、前線に伴う局所的な鉛直シアの効果を考えることで説明できる。寒冷前線先端で水平シア不安定が起こる場合、鉛直 Reynolds stress を通して擾乱の運動エネルギーが失われる。すなわち、局所的な鉛直シアにより擾乱の成長が抑制される。局所的な鉛直シアは前線先端からの距離とともに大きくなる。このため、前線と直交する方向に減衰しにくい長波ほど、鉛直シアの抑制効果を強く受けることになる。前線に平行な成分の局所鉛直シアは水平シアに比例するが、前線に直交する成分の局所鉛直シア ($\partial \bar{u} / \partial z$) は水平シアによらず一定で、水平シアが強くなると、相対的な鉛直シアは弱くなる。このため、水平シアが強くなると、鉛直シアの長波抑制効果は小さくなると考えられる。まとめると、

局所的鉛直シアが長波をより強く抑制する効果を持つこと、鉛直シアと水平シアの相対的な強さが変わることにより、波長の水平シア強度依存性が生じると解釈できる。

以上の理想化実験の成果は複雑な設定の数値実験結果を解釈する上での基礎を与えるものでもある。また、対象としたのは寒冷前線であるが、本研究で示した結果・解釈の方法は、海陸風前線や積乱雲からの冷氣外出流などに伴う大気下層のシアライン上に発達する擾乱一般に対しても適用可能な応用性の高いものと考えられる。

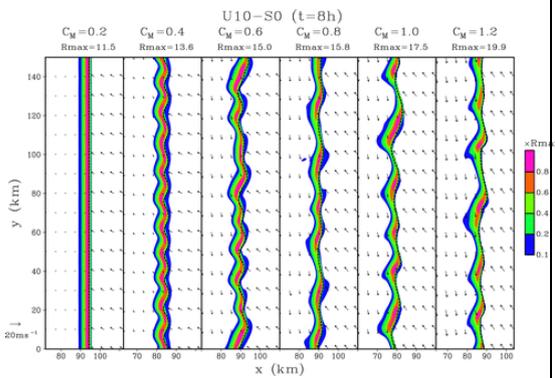


図 2. 水平シア強度を変えた実験結果. 積分 8 時間後の規格化した降水強度と水平風.

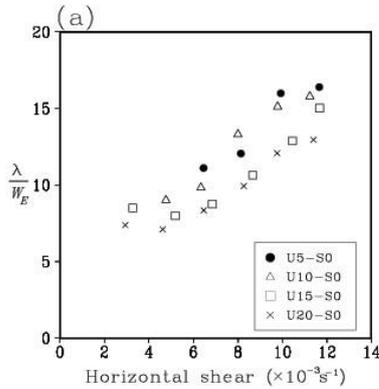


図 3. 水平シア強度とシア幅で無次元化した初期波長の関係.

(2) 現実的な設定の数値実験

数値実験は複数の事例を対象として行なったが、ここでは 1976 年 12 月 8 日にアメリカ西海岸で観測された低気圧に伴う降雨帯の再現実験の結果を示す。

図 4 に格子間隔 667m のモデルで再現さ

れた反射強度（降水物質の混合比から換算したもの）を示す。寒冷前線は全体として南南西-北北東方向の走向をもつが、それに対しやや時計回りに傾いた軸をもつ、高い反射強度の領域が再現されている(NCFR)。これは地上の寒冷前線に伴う降水コアである。その東側には、反射強度は相対的に小さいがバンド状の降水域があり、これは暖域の降雨帯(Warm sector band, WSB)に対応する。NCFRの西には比較的幅の広い降水帯(Wide cold frontal rainband, WCFR)がある。この反射強度の分布はレーダーによる観測結果と良く一致していた。

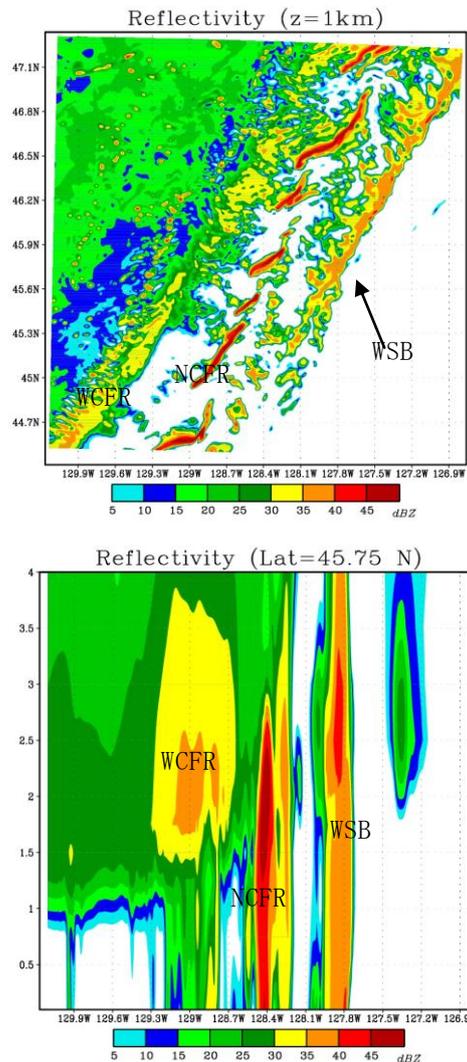


図 4. 高度 1km における反射強度(上図)と緯度 45.75° N における反射強度の東西-鉛直断面(下図).

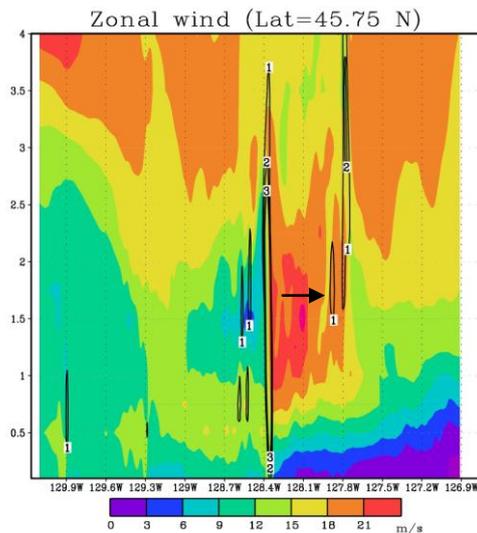


図 5. 緯度 45.75° N における東西風 (陰影) と鉛直風速 (等値線, 1m/s おき) の東西-鉛直断面。

図 5 は東西風と鉛直風速の分布で、NCFR は下層の寒冷前線における収束により生じていることがわかる。一方、WSB を作る上昇流は地上に根を持たず、高度 1.5km 以上に存在している。NCFR に伴う上昇流は高度 1.5km 付近で東西に発散する流れとなるが、このうち東向きの流れの先端付近で収束が起こるため WSB を作る上昇流が生じていることがわかる。

一方、WCFR に伴う上昇流はかなり弱い。WCFR に伴う上昇流は上空の温度の水平勾配が急になった場所の前方で形成されており、そこでのゆるやかな強制上昇により作られている。雲微物理過程を変えて、氷相を含まない実験を行なったところ、そのような上空の温度勾配の強い領域は形成されず、明瞭な WCFR は形成されなかった。

以上のように複数の降雨帯とその微細構造、成因まで数値モデルにより調べた研究例はこれまでに殆どなく、本成果は観測をもとに描かれた降雨帯の概念モデルに物理的な意味を与えるものである。

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 1 件)

Kawashima, M. 2011: Numerical study of horizontal shear instability waves along narrow cold frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 68, 878-903, 査読有, DOI: 10.1175/2010JAS3599.1

[学会発表] (計 1 件)

川島正行: 寒冷前線上の水平シア不安定に対する局所的鉛直シアの影響, 日本気象学会春季大会, 2011年5月18日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)

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

(2) 研究分担者

なし

(2) 連携研究者

なし