\* 柳瀬 亘・新野宏 (東京大学/海洋研究所)

#### 1. はじめに

ポーラーロウは冬季高緯度の海洋上に発生する 200 ~1000kmの小低気圧であり、ベーリング海・バレンツ 海・ラブラドル海・南極大陸周辺海域など多くの海域 で観測されている。ポーラーロウは冬季の日本海上で も発生し、日本海側の豪雪、6千トン級船舶の海難事故 (1981年)、暴風による餘部鉄橋での列車転落事故(1986 年)などの気象災害を引き起こしている。衛星画像で見 られるポーラーロウの雲パターンは実に多様であり、台 風のようなスパイラル状、温帯低気圧のようなコンマ 状、そのどちらにも分類されない奇妙な形状などが報告 されている。

先行研究で指摘されているポーラーロウの発達メカ ニズムは単一ではなく、積雲対流の凝結熱をエネルギー 源とする熱的な不安定であるとする説や、基本場の水 平温度勾配をエネルギー源とする傾圧不安定とする説、 さらに上層擾乱や地形の影響などを指摘する説もある。 実際には複数のメカニズムが寄与の度合いを変えなが ら同時に働くと考えられる。特に熱的不安定と傾圧不安 定とは多くの先行研究で指摘されている不安定メカニ ズムであり、両者の相互作用はポーラーロウの発達に重 要な役割を果たしていると考えられる。しかしながら現 実の事例は複雑であり、特定の効果だけを純粋に調べる ことは困難である。本研究の目的は、熱的不安定と傾圧 不安定との相互作用に関して、東西一様の単純な環境場 の中で発達するポーラーロウのメカニズムを調べるこ とである。

# 2. 実験の設定

数値実験においては環境場はなるべく単純化するが、 ポーラーロウ内部の構造や積雲対流は現実的に表現す るため、雲水・雲氷・雨・雪・あられの雲微物理過程 を考慮した解像度 5km の気象庁非静力学モデルを用い た。領域サイズと境界条件は東西 1000km(周期)、南北



図 1: 擾乱場 (東西平均からの偏差)の運動エネルギーの時間 変化. 縦軸は対数座標なので、グラフの傾きが発達率を示す.

1000km(摩擦のない壁)、高さ10.42kmとし、海面では バルク法で顕熱・潜熱フラックスと地表面摩擦を与えた。

本研究での重要なパラメータである環境場の傾圧性は、 温位の南北勾配と温度風バランスをする東西風の鉛直シ アの値で定義する。鉛直シアを0,0.5,1,1.5,2,3,4ms<sup>-1</sup>/km と変化させた7つの実験を行ない、それぞれ実験名を M0,M0.5,M1,M1.5,M2,M3,M4とする。東西風は最下層 で0ms<sup>-1</sup>とし、高度とともに西風が大きくなる鉛直シア を与えている。環境場の成層は5km以下で1K/km,5km 以上で10K/kmと単純化している。初期場には半径20km で最大風速7ms<sup>-1</sup>を持つ下層で強い軸対称渦を置き、 この渦の時間発展を調べた。

# 3. 結果

図1にM0~M4の実験における擾乱場の運動エネル ギーの時間発展を示す。傾圧場を全く与えていないM0 の実験でもポーラーロウは発達し、傾圧場を強くするほ ど発達率は大きくなった。エネルギー収支解析を行なっ たところ(図略)、M0の実験では積雲対流の凝結熱だけ がエネルギー源であるのに対し、傾圧場が強い実験ほど 基本場の温位勾配からのエネルギー源が加わり、M3の 実験では2つのエネルギー源は同程度の寄与であった。 雲パターンはM0~M4で連続的に変化していたが、明 らかに形状が異なるM0,M1,M3の雲パターンを代表と して示す。M0の実験では軸対称構造を持つ小さなポー ラーロウが発達した(図2a)。水平解像度を2kmに細か くした追加実験での中心付近(図2d)を見ると、台風の



図 2: 代表的な実験の雲パターン (鉛直積算した凝結水の量; 影) と海面気圧 (コンター;3hPa ごと). (a) 実験 M0(60 時間 後), (b) 実験 M1(60 時間後), (c) 実験 M3(30 時間後), (d) 水 平解像度 2km の実験 M0 の中心付近 (60 時間後). M1 と M3 ではポーラーロウは東に移動するが、東西方向に周期境界で あることを利用して図の中心を低気圧中心に合わせている.

様なスパイラルバンドや中心部の眼と壁雲の構造を持 っことがわかる。傾圧場を少し強くした M1 では軸対称 性が崩れたポーラーロウが形成し (図 2b)、傾圧場をさ らに強くした M3 ではコンマ状の大きなポーラーロウ が発達した (図 2c)。このように環境場の傾圧性を変化 させるだけで、衛星観測で見られるような多様な形状の ポーラーロウを説明できることが確認できた。

次に異なる雲パターンを示した実験 M0,M1,M3の個々 の特徴を調べた。実験 M0 では雲パターンが軸対称的 であったため、気圧中心から等距離にある値を平均した 場の動径鉛直断面を図3に示す。接線風の最大値は半径 40km 付近の下層にあり、これと温度風バランスして中 心には暖気核構造が見られた(図3a)。動径鉛直面内の 流れは、海面付近で中心へ向かい、壁雲の見られた半 径40~70km で上昇し、上層(高度5km)で外側に吹き 出すという二次循環が見られた(図3b)。また中心の眼 の領域(図2d)では、下降流が上層の乾いた空気を運ぶ ため相対湿度は低かった(図3b)。また、感度実験から は(図略)、M0では地表面摩擦が積雲対流を組織化して 中心気圧を深める役割があること、初期渦が弱いとポー ラーロウが全く発達しないこともわかった。

実験 M3 では低気圧中心の東側に雲域があることから (図 2c)、基本的には傾圧不安定波に似た性質を持っていることが予想される。気圧中心を通る東西鉛直断面を図4に示す。まずメソαスケール (200km 以上)のポーラーロウ全体の構造に着目すると、低気圧の軸は高度ともに西に傾き (図 5, コンター)、低気圧の東側に上昇流 (図 5a) と暖気 (図 5b) が存在するという傾圧不安定波の特徴がよく見られる。しかし、メソβスケール (20~200km)の構造に着目すると、バンド状の対流

域 (図 2c) に対応して上昇流の幅が狭いこと (図 5a)、低 気圧中心付近において低気圧の軸が直立していること (図 5, コンター)、下降流に伴う暖気核が形成している こと (図 5b) などの特徴が見られた。すなわち、凝結熱 はポーラーロウのメソβスケールの構造を変形する影 響があることがわかった。また、凝結熱はポーラーロウ の発達率を大きくするという線形解析などの先行研究 と整合的な結果も確認された (図略)。

#### 4. まとめ

ポーラーロウの重要な発達メカニズムである熱的不 安定と傾圧不安定との相互作用に関して、環境場を単 純にした理想化実験を行なった。傾圧場の弱い実験 M0 では台風と良く似た構造のポーラーロウが発達し、傾圧 場の強い実験 M3 では傾圧不安定波のメソβスケール 構造が凝結熱で変形した特徴を持つポーラーロウが発 達した。また傾圧場が中間的な値を持つ実験 M1 では、 発達率や構造も中間的な特徴を持っていたが、ポーラー ロウが時間とともに北上するという特有の性質も見ら れた (図略)。このような熱的不安定と傾圧不安定との 相互作用は、ポーラーロウだけでなく亜熱帯低気圧や梅 雨前線上擾乱など多くのメソスケール低気圧、さらには 熱帯低気圧の温帯低気圧化など、現実の様々な低気圧を 理解するのに重要なメカニズムであると考えられる。

### 参考文献

Yanase and Niino (2004), Geophys. Res. Lett., 32, doi:10.1029/2005GL020469 (図 1~4 はこの論文から引用).

Yanase and Niino (2007), J. Atmos. Sci., 64, 3044-3067.



図 3: 実験 M0 で発達したポーラーロウの動径鉛直断面 (接線 方向に値を平均した軸対称構造; 60~70 時間の平均). (a) 温 位 (影) と接線風 (コンター;3ms<sup>-1</sup> ごと). (b) 相対湿度 (影; 単位は%) と動径風 (白コンター;1ms<sup>-1</sup> ごと) と鉛直風 (黒 線;0.03ms<sup>-1</sup> ごと). コンターは正の値を実線で、負の値を破 線で示す. ここでは格子間隔 2km の高解像度実験の結果を示 すが、定性的な特徴は格子間隔 5km の実験でも同じである.



図 4: M3 の気圧中心を通る東西鉛直断面 (30 時間後). (a) 鉛 直流 (影; ms<sup>-1</sup>). (b) 温位偏差 (影;K). コンターは気圧偏差 (3hPa ごと).