

トランスバースラインの高解像数値実験と安定性解析による理論的考察

*山崎一哉, 三浦裕亮 (東京大学大学院理学系研究科)

1. はじめに

ジェット気流や台風のアウトフローに伴う上層雲には、地形性重力波で説明できない、波長数km～数十kmの波状構造が現れることがあり、トランスバースラインあるいは巻雲バンドと呼ばれている。その成因に関しては、ケルビン・ヘルムホルツ不安定であるとする研究[1]がある一方、近年の数値モデルによる研究[2]では、鉛直シアのもとで静的不安定成層に駆動されたレイリー・テイラー(RT)不安定であることが示唆されている。しかし、不安定化要因の定量的評価や、トランスバースライン発生時の現実的な基本場を想定して潜熱の影響を考慮した安定性解析を行った研究は少ない。

本研究では、雲解像モデル SCALE-RM の理想実験により台風のアウトフロー領域でのトランスバースラインを再現し、熱収支解析を行った。さらに、ラジオゾンデ観測にもとづき設定した基本場で線形安定性解析を行い、不安定成長モードとトランスバースラインを比較した。

2. 雲解像モデル実験

2a) 実験設定

外部擾乱の影響を排除して理想的な環境でトランスバースラインを再現するため、周期境界条件を用いた放射対流平衡の枠組みで台風の数値実験を行い、そのアウトフロー領域で自発的に生じるトランスバースラインの内部構造を調べた。

使用したモデルはSCALE-RMのバージョン5.2.1である。水平格子間隔が親領域で2km、子領域で400mの1方向ネスティングで台風の高解像度計算を行った。計算量の制約により計算領域は親領域で640km四方、子領域で320km四方とし、台風の雲域全体を子領域に収めるためにコリオリパラメータを $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ と大きく設定した。また、

2018年7月～2020年7月の気象庁の現業ラジオゾンデ観測からトランスバースラインの内部を通過した29事例を手動で抽出し、モデル実験で得られた成層と風の構造を検証した。

さらに、先行研究[2]では感度実験によって雲一放射相互作用の不安定化への寄与が示唆されていたため、本研究では同様の感度実験に加えて、熱収支解析を行ってその定量化を図った。感度実験では、凝結物の存在を無視して放射過程を計算することで雲一放射相互作用を除去した。熱収支解析においては、湿潤過程における成層不安定化の効果を明瞭に表すため、温度でなく、湿潤静的エネルギー s と定圧比熱 C_p を用いて $\text{MST} \equiv e/C_p$ で定義される湿潤静的温度に対して収支解析を行った。

2b) 実験結果

標準実験では台風のアウトフロー領域においてトランスバースラインが複数出現した。それらの内部では飽和相当温位の鉛直勾配が負になっており、湿潤過程において静的不安定であった(図1)。また、内部の鉛直シアは雲バンドとほぼ平行であり、これらはラジオゾンデ観測と整合的であった。この結果はRT不安定によってトランスバースラインが生じていることを示唆し、先行研究におけるWRFの数値実験の結果[2]と整合する一方、乾燥過程を仮定して安定度を判定した研究[1]とは異なる。

熱収支解析の結果、標準実験においては放射過程によって雲の下部での加熱と上部での冷却が見られ、その大きさは0.5K/時程度であった(図1c)。その一方で、雲一放射相互作用を取り除いた感度実験ではトランスバースラインは消失し、放射過程は時空間的にほぼ一様な冷却源となった。これらの結果は、雲一放射相互作用が雲内の成層不安定化に寄与していることを示し、先行研究を定量的に支持する。

3. 線形安定論

3a) 解析手法

トランスバースラインの周辺で典型的に見られた基本場のもとでブシネスク方程式を線形化し、水平方向に波型の構造を持つ成長モードの性質を調べた。

基本場にはモデル実験にもとづいて厚さ1kmの湿潤静的不安定層を含むように安定度プロファイルを与え、基本風は u 成分のみとした。安定度や鉛直シアの具体的な値は、モデル実験の検証に用いたラジオゾンデ観測の値を参考に設定した。

水蒸気の凝結等是非線形性が強く、線形論で直接扱うのが困難なため、湿潤静的不安定であると想定した特定の層でのみ、浮力振動数 N^2 を [3] で定義された湿潤浮力振動数 N_m^2 に置き換えることで、湿潤過程が安定度に与える影響を間接的に表現した。

3b) 解析結果

得られた成長モードのうち最大成長であったのは、鉛直シアと平行な水平波長1~2kmのロール状対流であった(図2a)。この擾乱は鉛直方向には静的不安定層に局在して

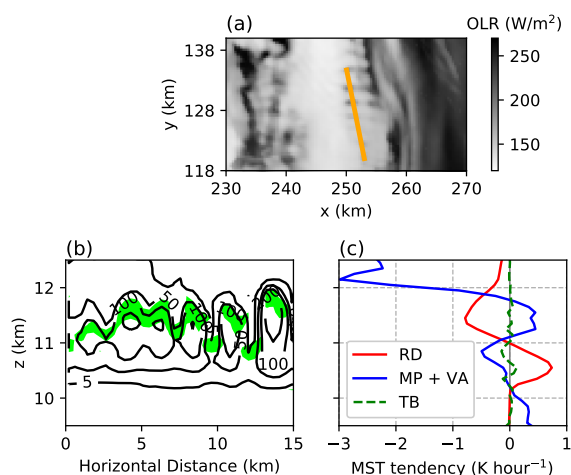


図1 (a) 標準実験における OLR (塗り) と、(b, c) で用いる鉛直断面 (橙実線)。(b) a で示した鉛直断面での雲水量 (mg/kg) と、条件付不安定域 (緑色の領域)。(c) a で示した断面で水平平均した熱収支。RD は放射、MP は微物理、VA は鉛直移流、TB は乱流の寄与を表す。

おり(図2b)、RT不安定の理想的な理論を適用できることが示唆される。この構造はラジオゾンデ観測や、先行研究を含むモデル実験とも整合的であり、トランスバースラインの成因は鉛直シアのもとでのRT不安定であると考えるのが妥当である。

擾乱の水平波長に関しては、現実のトランスバースラインの衛星画像解析から得られた卓越波長は約1~30kmの範囲内ではばらつき、一部のみの事例が線形最大成長モード(1~2km)と整合した。レイリー・ベナール対流の変種において、非線形領域で水平波長が伸びる効果が知られている[4]ことから、波長数十kmという長波長のトランスバースラインも類似した非線形効果で生じている可能性があるが、定量的な評価は今後の課題である。

参考文献

- [1] 大野, 三浦, 1982, 天気, **19(12)**, 1235-1241.
- [2] Trier et al., 2010, *J. Atmos. Sci.*, **67(9)**, 2990-2999.
- [3] Durran and Klemp, 1982, *J. Atmos. Sci.*, **39(10)**, 2152-2158.
- [4] Chapman and Proctor, 1980, *J. Fluid Mech.*, **101(4)**, 759-782.

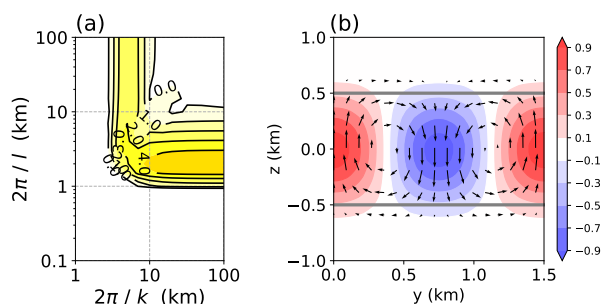


図2 (a) 水平波長別の最速成長モードの成長速度 (e-folding time の逆数 [hour⁻¹])。(b) x 方向に一様、y 方向の波長が 1.5km である擾乱の鉛直流 (塗り) と風ベクトルの鉛直断面。z = ±0.5 km (灰色の実線) で囲まれた領域が基本場の湿潤静的不安定域である。