

非静力学モデルを用いた 2012 年台風 15 号の多重壁雲の維持に関する研究

*辻野 智紀・坪木 和久 (名古屋大学 地球水循環研究センター)

1. 研究目的

台風をはじめとする熱帯低気圧は、中心からおよそ百 km 以内に壁雲とよばれる対流活動の盛んな円形の雲域を有している。熱帯低気圧はまれに、この同心円状の壁雲を複数有することがあり、多重壁雲 (Concentric Eyewall) と呼ばれる。Houze et al. (2007) では、顕著な多重壁雲構造を伴ったハリケーン Rita (2005) の航空機観測を行い、多重壁雲の詳細な構造を示した。多重壁雲は一度形成されると、内側の壁雲がゆっくりと減衰し、外側の壁雲が徐々に内側に収縮するという壁雲の置き換え (Replacement) が起こる。この置き換わりの前後で熱帯低気圧の強度が急速に変化する。したがって、壁雲の置き換えを理解することは熱帯低気圧の正確な強度予測という観点で重要である。Rita の場合には、多重壁雲が形成されて壁雲の置き換えが起こるのにおよそ 12 時間程度を要していた (Houze et al., 2007)。しかし、2012 年の台風 15 号 (Bolaven) は気象庁のレーダ観測 (図 1) から、多重壁雲が形成されてから少なくとも 1 日以上維持しており、明瞭な壁雲の置き換えは見られなかった。Replacement の発生メカニズムとして、Houze et al. (2007) は下層のインフローによる壁雲への水蒸気供給が内側から外側へシフトし、内側の壁雲が徐々に減衰することで発生すると述べている。つまり、Replacement には下層からの壁雲への水蒸気供給が重要であると考えられる。

そこで、本研究では、3 次元非静力学モデルを用いて Bolaven に伴う多重壁雲構造の再現実験を行い、多重壁雲の長時間維持を再現する。さらに、その再現実験の結果を用いて、多重壁雲がどのようにして長時間維持されていたのかということ調べるため、水蒸気と水収支の解析を行う。

2. 数値モデル・解析手法

本研究では、名古屋大学地球水循環研究センターで開発された非静力学雲解像モデル (CReSS; Cloud Resolving Storm Simulator) を用いた。初期値・境界値には気象庁 GSM (全球) の初期値データを用い、水平解像度 5 km で計算した。さらに 5 km (domain 1) の結果を用いて水平解像度 2.5 km (domain 2) の計算を、さらに 2.5 km の結果を用いて水平解像度 1 km (domain 3) の計算を行った。いずれも側面境界条件は open boundary、鉛直境界条件は固定境界、鉛直方向の格子数は 45 層でスポンジ層を上層 17km 以上に設定した。各計算における積分時間等は表 1 に示す。また、海面水温は気象庁 mgdsst データを用い、鉛直 1 次元方向に水温の熱伝導過程のみ計算する。雲物理過程は氷相を考慮したバルク法パラメタリゼーション、乱流過程は 1.5 次の乱流運動エネルギーを予報するクロージャースキーム、地表面はバルク法パラメタリゼーション (Kondo, 1975) を用いた。

この計算設定で行われた再現実験の結果のうち、水平解像度 1 km (domain 3) の結果を元に、水蒸気・水収支解析を行った。具体的には domain 3 の計算結果について、各時刻における台風の軸対称中心を決定し (Braun, 2002)、デカルト座標系で定義されている計算結果の各物理量を、先に求めた軸対称中心点を原点とする円筒座標系に変換した。そして、中心から半径 70 km、鉛直方向の高さは約 20 km の円筒領域について、

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \text{ADV} + \text{PREC} + \text{EVAP} \quad (1)$$

で表される水蒸気・水収支を元に収支解析を行った。ここで、ADV, PREC, EVAP はそれぞれ円筒側面における水蒸

気・凝結水物質フラックス、円筒底面における降水フラックス、円筒底面からの蒸発の効果を表す。また、 Q は円筒領域内における水蒸気・凝結水物質の総和を表す。

表 1 各数値実験における設定。

各実験	5 km	2.5 km	1 km
鉛直上端	27 km	22.5 km	20.3 km
計算開始時刻	08/22 00Z	08/23 06Z	08/24 12Z
計算時間	6 日	4 日	2.5 日

3. 結果

図 2 は水平解像度 1 km における降水強度の水平分布 (シェード) と海面気圧 (等値線) である。この図から、気象庁レーダと同じような多重壁雲構造が再現されていることが確認できる。ただし、実際のレーダ観測で見られるもっとも内側の半径 10 km 程度の壁雲は、今回の計算で再現されていない。図 3 は、台風の中心について接線方向に平均した降水強度の動径-時間断面図である。左側が台風の中心である。再現された Bolaven の中心から半径 30 - 60 km に降水強度の強い領域が存在し、計算開始 10 時間あたりで、その外側にもう 1 つの壁雲が形成されている。内側の壁雲に相当する強い降水は計算開始から計算終了までほぼ同じ位置に維持しつづけており、Houze et al. (2007) のような明瞭な壁雲の置き換えは見られなかった。紙面の都合で図は示さないが、気象庁ベストトラックと比較すると、経路に関しては観測より西に 100 - 200 km 程度ずれているが、進路の傾向は一致している。また、最低中心気圧で見た強度は観測より 10 hPa 程度弱く再現されている。

図 4 は (1) 式における各項 (上から、水蒸気・水物質の領域側面からの移流、降水、海面からの蒸発の時間変化)、そして (1) 式の右辺全てを足し合わせた時間変化を示している。これらの値は円筒について体積積分されており、正值は円筒内への水蒸気・水物質の供給、負値は円筒内での水蒸気・水物質の消費を表すことに注意する。

Bolaven の壁雲域に水蒸気・水物質を供給しているのは、外側からのインフローであり、これは主に境界層内から供給されている。海面からの蒸発は一定量存在するが側面からの移流に比べると 1-2 オーダー小さい。外側から供給された水蒸気・水物質は全て降水によって消費されている。このときの降水はそのほとんどが内側の壁雲で発生している。

興味深い点は、外側の壁雲が明瞭になる積分開始 10 時間付近から積分終了まで、外側からの移流および降水の大きさがほとんど変化していないことである。各項の和の時間変化をみても顕著な変化が見られない。図 5 は多重壁雲構造が維持されている時間における接線平均した鉛直流と動径風速の半径-高度断面図である。半径 30 km 付近に見られるほぼ直立した強い鉛直流域が内側の壁雲に相当する。一方、半径 100 km 付近に見られる相対的に外側に傾いた鉛直流域が外側の壁雲に相当する。この図から、境界層内のインフローは外側壁雲の下端付近で最大値をもつが、その内側でもある一定量のインフローが存在していることがわかる。

4. まとめ・考察

3 次元非静力学モデルを用いて、2012 年台風 15 号に伴う多重壁雲の数値実験を行った。気象庁レーダによる観測と同じように、多重壁雲構造が形成されて 1 日以上長時間に渡り、内側の壁雲が維持され、壁雲の置き換えは発生しなかつ

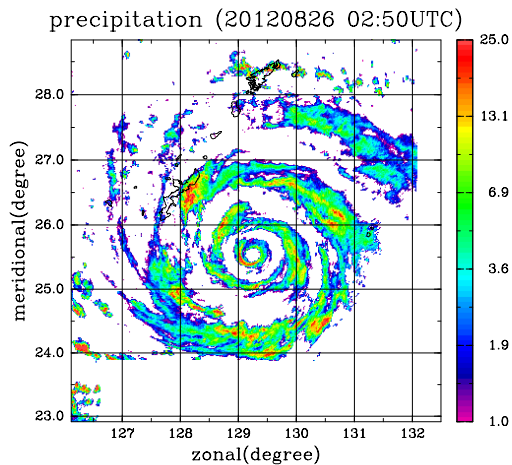


図1 気象庁ドップラーレーダによって観測された Bolaven の多重壁雲構造。(シェードは降水強度; mm/h.)

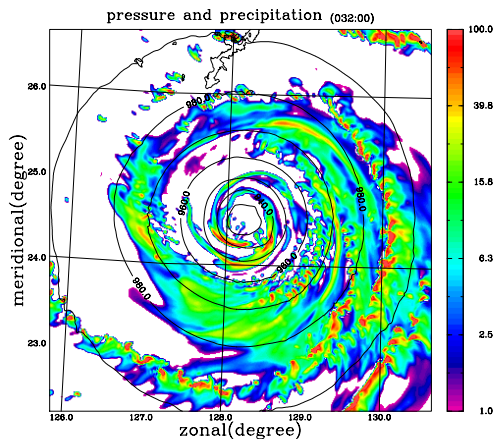


図2 数値モデルにおいて再現された Bolaven の多重壁雲構造。(シェードは降水強度; mm/h, 等値線は海面気圧; hPa.)

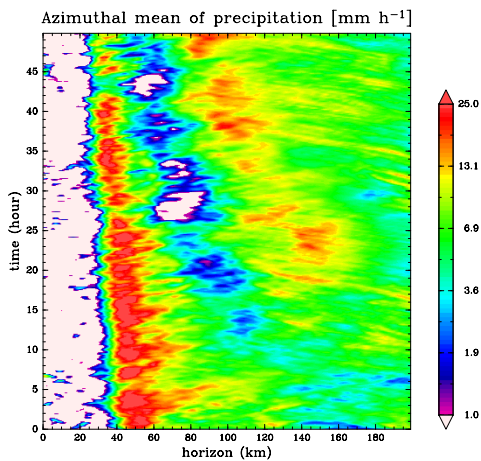


図3 中心について接線平均した降水強度の時間変化。(シェードは降水強度; mm/h.)

た。ただし、レーダで観測されたもっとも内側の壁雲は今回の再現実験では再現することができなかった。

モデルで再現された Bolaven の内側壁雲域について、水蒸気・水収支解析を行った。内側領域では外側からの水蒸気供給の減少が見られず、常に一定量の水蒸気がインフローとともに供給されていることがわかった。この理由から先行研究で述べられている Replacement メカニズムに必要な条件を満たしていないため、明瞭な壁雲の Replacement が発生しなかったと考えられる。下層のインフローが長時間持続した理由は、外側壁雲が内側壁雲に比べて鉛直流の下端が浅く、また内側と比較して鉛直流が小さくなっており、外からのイン

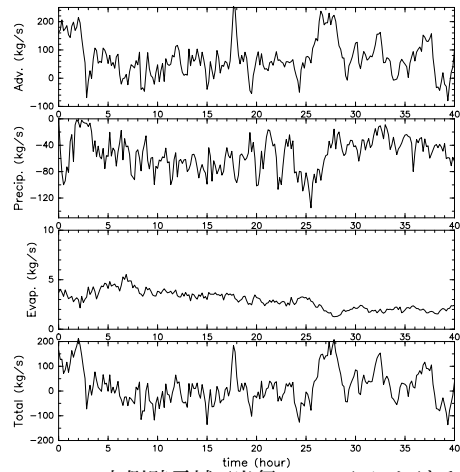


図4 Bolaven の内側壁雲域 (半径 70 km) における水蒸気・水収支の時間変化。上から ADV, PREC, EVAP, 各項の和をそれぞれ表す。(単位は $\times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$.)

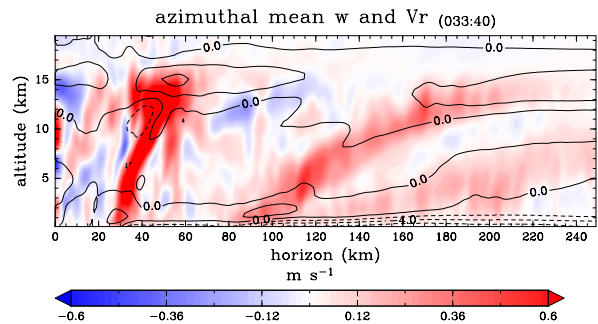


図5 外側壁雲形成後の接線平均した鉛直流 (陰影) と動径風 (等値線) の分布。

フローを外側壁雲において十分に捕捉することができなかったためと考えられる。

今回の再現実験では、実際の観測で見られた半径 10 km のもっとも内側の壁雲は再現されていない。したがって、今回の解析結果は実際の Bolaven の多重壁雲のうち、内側から 2 目目の壁雲の維持を説明するものと考えられる。

今後の課題として、なぜモデルで再現された外側壁雲が深く発達できなかったのかという点について、力学的な観点から調べる。また、実際の観測で見られたもっとも内側の壁雲を数値モデルで再現する。

参考文献

- Braun, S. A., 2002 : A cloud-resolving simulation of Hurricane Bob (1991): Storm structure and eyewall buoyancy. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1573-1592.
- Houze, R. A. et al., 2006 : The hurricane rainband and intensity change experiment: Observations and modeling of Hurricane Katrina, Ophelia, and Rita. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 1503-1521.
- Houze, R. A. et al., 2007 : Hurricane intensity and eyewall replacement. *Science*, **315**, 1235-1239.
- Houze, R. A., 2010 : REVIEW: Clouds in tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 293-344.
- Kondo, J., 1975 : Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Bound. - Layer Meteor.*, **9**, 91-112.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2007 : Numerical prediction of high-impact weather systems: The textbook for seventeenth IHP Training Course in 2007. HyARC, Nagoya Univ., 273pp.