

多角形眼を伴った台風SONGDA (2004) のエネルギー解析

中道啓輔*・竹見哲也

* 現 全日本空輸株式会社

要 旨

本研究は、多角形眼を伴っていた台風Songda (2004) の現実事例について、NCAR (National Center for Atmospheric Research) / NCEP (National Centers for Environmental Prediction)において開発された領域気象モデルWRFを用いて再現し、壁雲周辺の力学的不安定の量を定量的に知るためにエネルギー解析を行った。その結果、対流圏下層ではメソ渦に起因するエネルギーのやり取り、中・上層では局所的な非断熱加熱に起因するエネルギーのやり取りが示唆された。また、下層のエネルギー変換率量と眼の壁雲の波数との間に密接な関係性があるという結果が得られた。

キーワード：台風，メソ渦，多角形眼，非軸対称構造，エネルギー解析，WRF

1. はじめに

近年、気象観測衛星の計測精度が向上し、衛星を用いて熱帯低気圧（台風，ハリケーン，サイクロン）の眼を詳細に観測できるようになりつつある。その一例として、5角形眼が観測された Isabel(2003)が挙げられる。このハリケーンの眼の中には6個のメソβスケールの渦が存在しており、1個はハリケーンの中

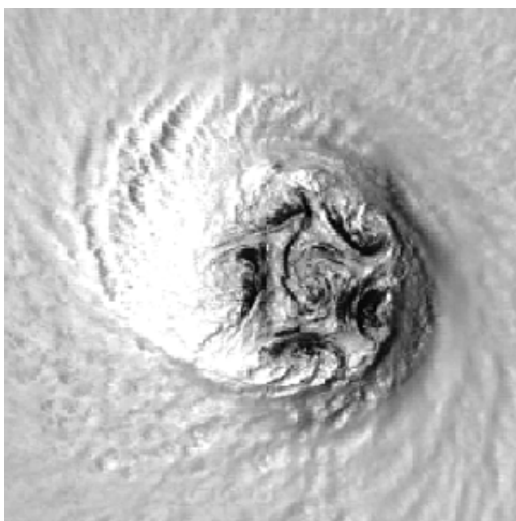


Fig. 1 The polygonal eyewall with 6 mesovortices of hurricane Isabel (2003). (From Fig. 1 of Kossin and Schubert (2004))

心に、他の5個は5角形の頂点付近に存在していた (Fig. 1)。これらの渦は、「メソ渦 (mesovortex または mesocyclone)」と呼ばれている。

このメソ渦と多角形眼を結びつけた理論的研究が Schubert et al. (1999), Kossin and Schubert (2001) によってなされた。Schubert et al. (1999) は、眼の壁雲付近の接線風速の水平シアが大きくなっているところで眼の変形が起きているという観測的研究 (Muramatsu, 1986) や竜巻の研究を基に、順圧不安定（水平シア不安定）の結果として台風多角形眼が生じるという仮説をたてた。この仮説を検証するために、擬スペクトル順圧非発散モデルを用い、非線形方程式系を直接数値計算した。その結果 (Fig. 2)、彼らが設定した初期値の場合、まず波数4の渦度の波が卓越する。この過程においてメソ渦が生成され、多角形眼の原因となっていることがわかる。さらに時間発展すると単極の渦に併合するという結果が得られた。また、Kossin and Schubert (2001) は、Schubert et al. (1999) と同様の方法で数値積分を行うが、先行研究に比べて、より観測で得られた知見に基づいた渦度場の初期値を用いた。その結果、メソ渦の併合が起こりにくく、多角形眼の形状を長い時間に渡って維持できることを示した。これらの研究によって、順圧不安定により擾乱（メソ渦）が生成され、台風の多角形眼の原因になっていることが分かっている。

一方、台風眼周辺での擾乱生成については傾圧不

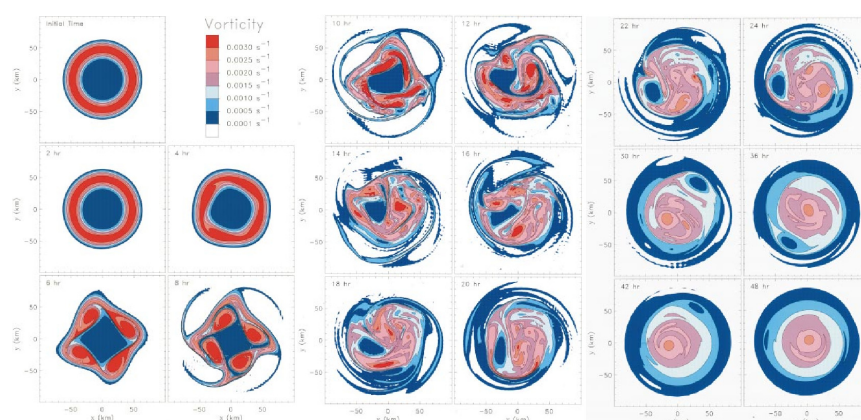


Fig. 2 The time evolution of vorticity field. Low vorticity values are shaded blue and high values are shaded red.
(From Schubert et al. (1999))

安定が影響していることを示唆する研究もある。台風は暖気核を持っているため、台風の中心から動径方向に温度勾配が存在している。さらに、台風自体が回転しているため、回転流体ととらえることができる。したがって、このような状況においては台風眼付近では、ある条件を満たせば傾圧不安定が生じるはずであるが、前述の研究では注意が払われてこなかった。そこで、Kwon and Frank (2005) は、台風渦のコア付近で順圧不安定と傾圧不安定が生じる可能性を擾乱エネルギー方程式を用いて調べた。方法としては、まずよくバランスした台風渦を作成する。その台風渦を、外力（鉛直シア、地表面起伏、移動速度の効果）を除いたf平面上で、雲物理スキームおよび惑星境界層スキームを使わない設定にして、PSU (Pennsylvania State University) – NCAR (National Center for Atmospheric Research) MM5 (5th-generation Mesoscale Model) を用い、以下の場合について理想実験を行った。

[EXP-1] コントロール渦より動径方向の温度勾配を60%増やし、暖気核を強くした場合。

[EXP-2] 相対湿度の水平勾配の符号が動径方向で変化するように、風速プロファイルを変化させた場合。

その結果、EXP-1では傾圧不安定のエネルギーの流れが、またEXP-2では順圧不安定のエネルギーの流れが

それぞれの実験において卓越することが示された (Fig. 3)。したがって、台風渦のコア付近では、擾乱の生成に関して傾圧不安定の影響があることが考えられる。

このように、台風眼周辺の擾乱生成については順圧不安定と傾圧不安定が関与することが分かった。しかしながら、これらの研究は現実の台風に似せた理想場で数値実験を行い、研究を進めている。では、現実的に再現された台風のコア周辺においては、擾乱の生成に関わる力学的不安定がどの程度あるのだろうか？また、空間分布はどうなっているのだろうか？仮に、順圧不安定の量が支配的であれば、順圧不安定の量の時間変化と台風眼壁雲の波数の時間変化との間に関係性が見出せるのであろうか？

これらを調べるために、本研究では、現実の多角形眼を伴っていた台風事例を選定し、領域気象モデルで再現する。さらにKwon and Frank (2008)で用いられたエネルギー方程式から各エネルギー変換量を定義し、エネルギー解析を行う。

2. 解析対象事例、実験設定および解析手法

本章では、解析対象にした台風の概要、数値シミュレーションの設定、エネルギー解析の手法について説明する。

2.1 台風Songda (2004) の概要

力学的な不安定によって多角形眼が生じていると考えられている (Kossin and Schubert, 2001) ため、実際の観測データから多角形眼が解析された台風をエネルギー解析の対象としたい。本研究においては、台風 Songda(2004): T0418 を選定した。この理由は、Songda が上空を通過した那覇空港に設置されているドップラーレーダーで得られた観測データを定量的に解析した結果、沖縄上陸前には波数4-5、上陸後

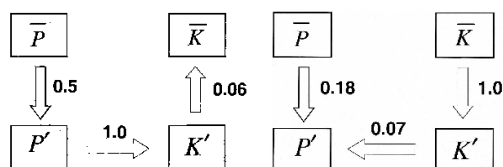


Fig. 3 Energy diagram for the EXP-1(left) and EXP-2(right). The energy transfer values are normalized with each maximum value. (From Kwon and Frank (2005))

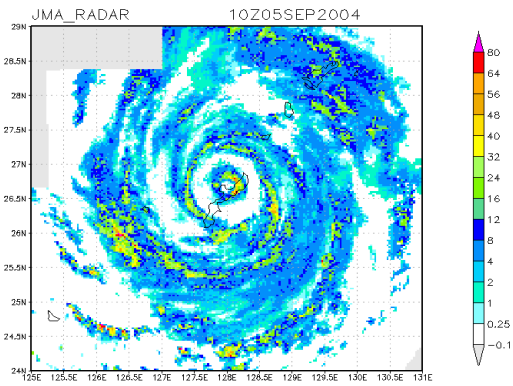


Fig. 4 Radar echo from the Okinawa Weather Surveillance Radar at 1000UTC 5 September 2004.

Typhoon Songda has double eye structure.

には波数2の多角形眼が解析されている (Kusunoki and Mashiko, 2006) からである。また, Songda の構造的な特徴としては2重眼を持っていることである (Fig. 4)。

2.2 実験設定

数値シミュレーションを行う領域気象モデルとして, NCAR/NCEP (National Centers for Environmental Prediction) で開発されている Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.0.1 を用いた。また, 初期値境界値に用いたデータは, 気象庁領域客観解析データ (RANAL: 水平分解能 20km) と NCEP Final Analysis (NCEP FNL: 水平分解能 1°) データである。水平格子間隔は, 第1領域 (D1) で9km, 第2領域 (D2) は3kmである。水平格子点数は, D1が290×270, D2が166×166とすることから, 計算領域はD1が28N, 127Eを中心とする2610km×2430km, D2が498km×498kmである (Fig. 5)。D2の大きさは台風 Songda の中心からレインバンドまで十分計算できて

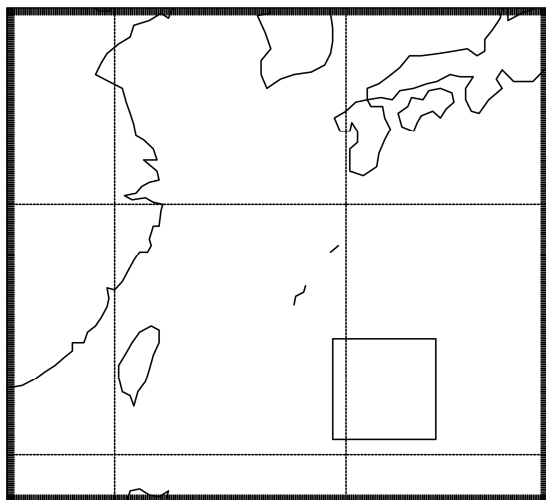


Fig. 5 Model computational domains.

いるものである。なお, D2は双方向移動ネスティング機能を用いて, 台風中心を追跡しながら時々刻々と領域設定されている。積雲対流パラメタリゼーションは, D1にKain-Fritschスキームを用い, D2には使用していない。惑星境界層乱流スキームにはノンローカルクロージャーモデルのひとつであるYSUスキームを使用している。雲微物理スキームとしては, 雲水・雨水・雲氷・雪・水蒸気の混合比を予報変数として各種別間の変換過程をモデル化したWSM5スキームを採用している。Table 1にシミュレーションの主な設定をまとめて示す。

Table 1 Configuration of this numerical simulation.

	D1	D2
Data	RANAL	RANAL
Initial Time (UTC)	04.9.3.1200	04.9.4.0000
Finish Time (UTC)	04.9.7.1200	04.9.7.1200
Time Interval (s)	36	12
Hori. Space Interval (km)	9	3
Hori. Grid Number	290×270	166×166
Vertical Grid Number	35	35
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch	Non
PBL Scheme	YSU	YSU
Microphysical Scheme	WSM5	WSM5

2.3 エネルギー解析

本研究では Kwon and Frank (2008) で用いられたエネルギー方程式を使って, 平均場や擾乱成分の運動エネルギー, 有効位置エネルギーの変換過程を調べる。エネルギー方程式の導出については Kwon and Frank (2008) を参照されたい。なお, 平均場とは台風中心を原点として, シミュレーションで得られた各物理量を方位角平均した場: 台風軸対称成分を示す。また, 擾乱とは平均場からの偏差を示す。

2.4 台風中心の決定

エネルギー解析では, 台風中心の位置は重要である。なぜならば, 中心の位置の違いによって, 各物理量の平均場や偏差の値に影響するからである。

最も簡単な中心の定義は海面気圧の最低値の位置であるが, この方法ではシミュレーションの解像度が向上すればするほど, 真の中心の周りを反時計回りに回転することが知られている。

そこで本研究では, 気圧場の幾何学的な中心, つまり気圧場の重心を台風の中心として定義した。これによって中心が大きく振動せず, 強い接線風速や渦度の輪の重心を見付けることができる (Braun 2002)。

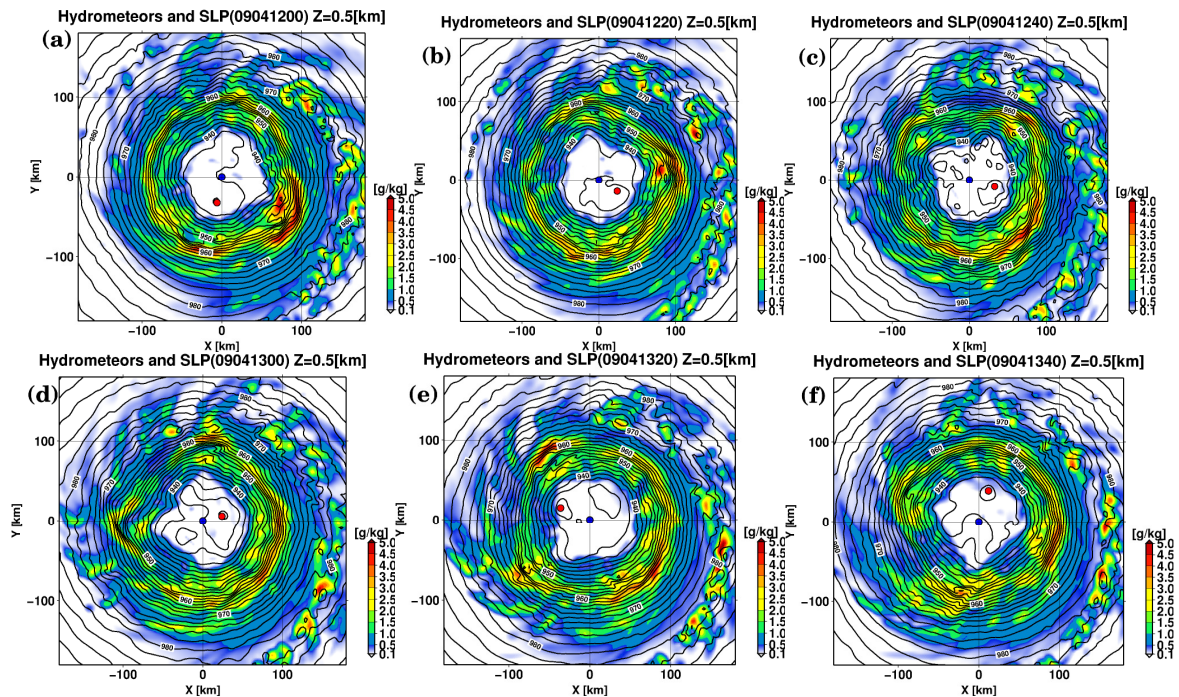


Fig. 6 Time evolution of the eyewall of simulated typhoon Songda. Shaded color denotes hydrometeors of cloud water, cloud ice, rain water and snow at a height of 0.5km. Contour line denotes sea level pressure. Blue circle denotes centroid center. Red circle denotes minimum pressure center. (a)1200UTC, (b)1220UTC, (c)1240UTC, (d)1300UTC, (e)1320UTC and (f)1340UTC.

3. シミュレーション結果とその検証

本章では, Songda(2004) をARWで数値シミュレーションした計算結果と現実との差異を眼の壁雲の構造・経路・中心気圧などで示す。その際, 本研究で用いた方法によって決定された台風中心の正確さについても評価する。

3.1 台風中心の検証

本節では, 本研究における台風中心の定義に基づいて決定した中心位置の精度を検証する。Fig. 6 はARWでシミュレートされた台風Songdaの中心付近の高度0.5kmにおける凝結水分量および海面気圧である。左上から右下まで順に, 9月4日1200UTCから9月4日1340UTCまでの水平分布を示している。赤丸が最低気圧の格子点を示しており, 青丸が本研究における台風中心位置である。眼の壁雲の時間変化(Fig. 6のシェード)を見ると, 最低気圧の位置は各時刻において, 壁雲に近い位置に偏っている。その一方で, 本研究において定義した中心位置は, 壁雲の重心付近に位置しているように見える。このことから, 本研究における台風中心の定義に基づくことで時間・空間的にほぼ正確に台風中心の位置を求められていることが分かる。

3.2 台風眼の構造

気象庁合成レーダー図(Fig. 4)で見られるようにSongdaは, はっきりとした2重眼構造を呈していた。このとき眼の大きさについては, 内側の眼の直径が30-40km程度, 外側の眼の直径が100km程度であった。一方, Fig. 6は前述した合成レーダー図(Fig. 4)の時間的にほぼ対応したシミュレーション結果におけるSongdaの中心付近の凝結水分量(シェード)である。2重眼の構造は再現されていないことが分かる。なお, この時間帯以外の計算結果にも2重眼構造は再現されなかった(図省略)。この再現された眼の大きさは直径100km程度である。したがって, 現実台風における外側の眼を十分に再現していると考えられる。

3.3 経路

Fig. 7は台風Songdaの気象庁ベストトラックの経路(赤実線)と計算結果から求めた中心の経路(黒実線)を示している。計算結果はベストトラックが示す中心位置から数時間遅れて北上していることが分かる。また, 計算結果の経路はベストトラックよりも約100km西を北西(転向後は北東)に進行していることが分かる。しかしながら, このような差異はあるものの, 移動パターンはよく一致していると見て取れる。

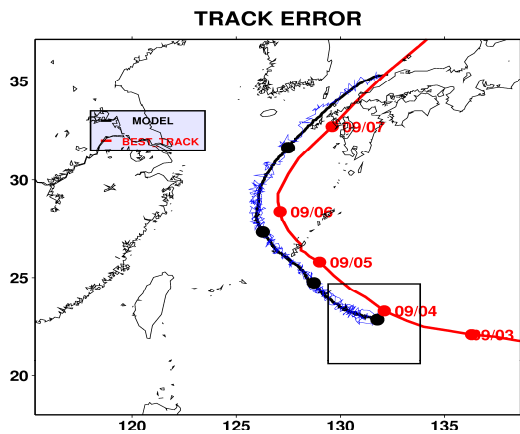


Fig. 7 Tracks of typhoon Songda from JMA(Japan Meteorological Agency) best track analyses (red line) and the model output (black line). Number symbols denote the positions every 24h, with the corresponding date and the time given (00UTC). Blue line denotes the position of minimum sea level pressure center.

3.4 中心気圧

Fig. 8はベストトラックの中心気圧（赤実線）と計算結果の中心気圧（黒実線）である。ベストトラックによる最低中心気圧は925hPaであることに対して、計算結果では930hPa程度である。また時系列で比較すると、 ± 10 hPa程度の差異が生じている。しかしながら、中心気圧の値および時間推移ともに、全般的にはモデルで再現された台風は現実台風とよく一致していると言える。

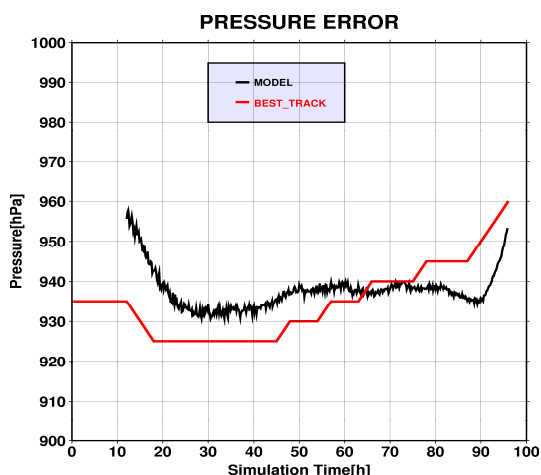


Fig. 8 Time series of the center pressure of typhoon Songda from JMA best track analyses (red line) and the model output (black line). The latter line draws from 12h in a simulation time when the simulation of second domain begins.

3.5 シミュレーション結果と現実台風との妥当性

シミュレーション結果と現実台風の差異に関して3.2節から3.4節で示したことをまとめると以下のようになる。

- ・経路についてはパターンがよく一致していた。
- ・スピンアップ後の中心気圧は発達した現実台風を十分に再現している。
- ・2重眼は再現されていないものの、外側の眼の大きさは現実台風と整合的であった。

以上のことからシミュレートした台風は現実台風と比較すると、2重眼が再現されていないことなどに差異はあるものの、経路・強度および外側の眼の大きさはよく再現されていた。したがって、現実台風で作用している物理過程について、シミュレーションにおいても表現されていると考えられる。そこで、シミュレーション結果を解析することで、多角形眼を伴う台風の力学過程を調べることにする。

4. メソ渦の存在

Hydrometeors and Asym. Wind(09041240) Z=0.5[km]

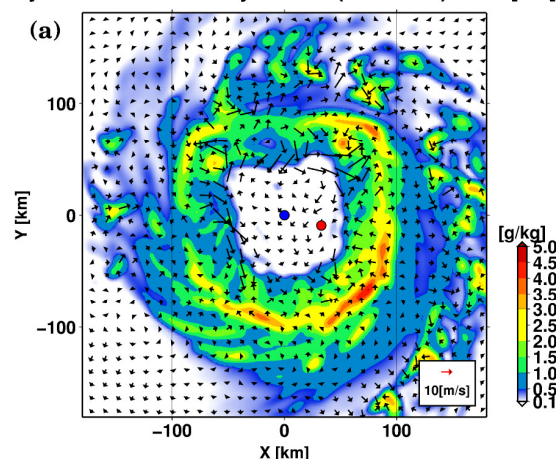


Fig. 9 Shaded in color is the hydrometeors. Vector are the asymmetric winds relative to the moving typhoon at a height of 0.5km. Blue circle shows typhoon center.

Fig. 9の非軸対称風ベクトルに注目すると、中心から約80km離れた北西、北東、南東象限に渦を巻くシステムがあることがはっきりと分かる。非軸対称風速から計算した渦度の鉛直成分を調べると（図省略）、ほぼそれらのシステムに対応した位置で渦度が大きくなっていることが分かる。これらの渦は、それに伴う凝結水分量や非軸対称風の水平分布から、鉛直スケールが2-3km、また水平スケールが20-30km程度のメソ渦であると言える。同時に、このメソ渦は多角形眼の頂点付近に存在していることも見てとれる。

5. 台風壁雲付近のエネルギー解析

本章では、現実的に再現された台風Songdaの壁雲付近のエネルギー量および力学的不安定の量を定量的に見積もるために、エネルギー解析を行う。

5.1 エネルギー解析の概念図

エネルギー解析の詳細については、Kwon and Frank (2008)を参照頂きたい。ここでは、エネルギーのやり取りを概念化した図を示す。

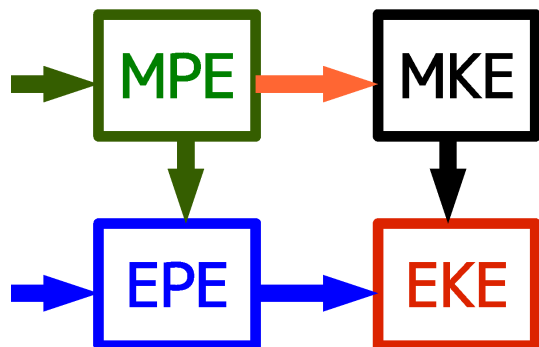


Fig. 10 Energy flow diagram. MPE, EPE represent azimuthal mean available potential energy and perturbation available potential energy, respectively. MKE, EKE are azimuthal mean kinetic energy and perturbation kinetic energy, respectively. The energy produced by diabatic heating flows in MPE or EPE.

Fig. 10のMPE, EPEはそれぞれ、平均場の有効位置エネルギー、擾乱の有効位置エネルギーを示している。MKE, EKEはそれぞれ、平均場の運動エネルギー、擾乱の運動エネルギーを示している。矢印は各エネルギー間の変換率量(正)を示している。なお、MPEとEPEに流入するエネルギー変換率量は、非断熱加熱によるエネルギーソースである。

5.2 解析時間

解析時間として、2004年9月4日1200UTC(シミュレーション時間:24h)から同年9月6日0600UTC(同:66h)までと設定した。この解析時間の設定理由は、開始時間については十分スピナップが完了した時間であり、終了時間についてはシミュレートされた台風Songdaが転向する前の時間であるからである。

この解析時間内では、代表的な外力成分である台風の移動速度が小さく、鉛直風シアも弱いことが分かっている(図省略)。

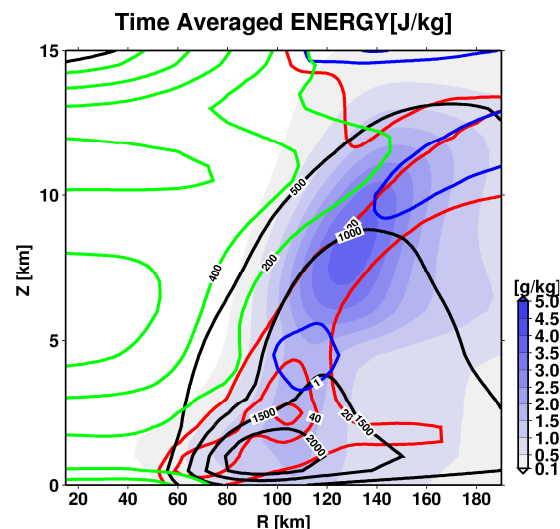


Fig. 11 The spatial distribution of time averaged each energy [J/kg]. MPE, EPE, MKE and EKE are indicated by green line (contour interval: 200 [J/kg]), blue line (1 [J/kg]), black line (500 [J/kg]) and red line (20 [J/kg]), respectively. Shaded color denotes hydrometeors corresponding to typhoon's eyewall.

5.3 時間空間平均したエネルギー分布

本節では、解析時間内で時間平均し、台風中心を中心として空間平均したエネルギー分布を示す。Fig. 11は時間平均したMKE(平均場の運動エネルギー)、EKE(擾乱の運動エネルギー)、MPE(平均場の有効位置エネルギー)、EPE(擾乱の有効位置エネルギー)を表している。

MKE(Fig. 11の黒線)には台風の壁雲付近のエネルギー量として最も大きいものである。これは接線風速の分布によく似ている。MKEのピークは高度約1.5km半径100kmにあり、その値は約2000J/kgである。

EKE(Fig. 11の赤線)には特徴的なピークが2箇所ある。1箇所目は高度約1km半径70kmで、2箇所目は高度約2.5km半径105kmの地点である。前者はその存在箇所から、メソ渦に対応したものであると考えられる。後者は眼の壁雲から発散と考えられる。二つのピークの他に上方へとつながるEKEの存在箇所は、眼の壁雲の位置とよく一致していることから、眼の壁雲の対流活動による非軸対称性と考えられる。

MPE(Fig. 11の緑線)には台風の暖気核に一致している。台風中心に近づくにつれて値が大きくなっている。

EPE(Fig. 11の青線)には2箇所のピークが見られる。1箇所目は眼の壁雲付近の高度約5km半径110kmである。2箇所目は対流圏上層の眼の壁雲に沿った場所である。

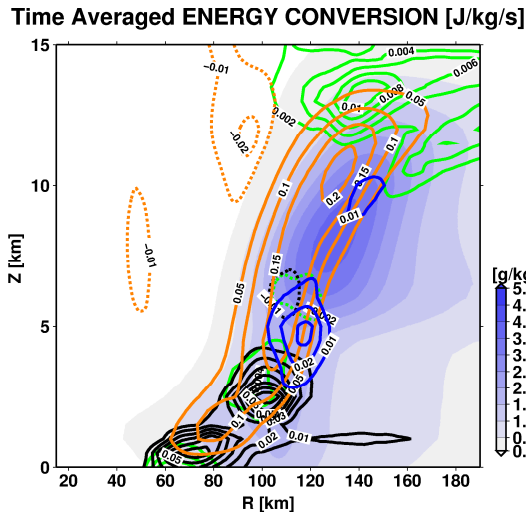


Fig. 12 The spatial distribution of time averaged each energy conversion [J/kg/s]. MPE→EPE (baroclinic energy conversion), MKE→EKE (barotropic energy conversion), MPE → MKE and EPE → EKE are indicated by green line (contour interval: 0.002 [J/kg/s]), black line (0.01 [J/kg/s]), orange line (0.05 [J/kg/s] :solid: positive, 0.01 [J/kg/s] :dash: negative) and blue line (0.01 [J/kg/s]), respectively. Shaded color denotes hydrometeors corresponding to typhoon's eye-wall.

5.4 時間空間平均したエネルギー変換率の空間分布

本節では、5.3節と同様の方法を用いて、台風眼周辺におけるエネルギー変換率の空間分布を求めた結果を示す。

順圧エネルギー変換率(MKE→EKE)(Fig. 12の黒線)は2箇所正のピークがある。1箇所目は高度約1km半径70kmにあるものである。これは接線風速の水平シアが大きい領域に対応している。2箇所目は高度約2.5km半径100kmの位置のものである。これら2箇所はEKEの分布とよく似ており、台風壁雲付近で台風渦の運動エネルギーが擾乱の運動エネルギーによく変換されていることがわかる。

傾圧エネルギー変換率(MPE→EPE)(Fig.12の緑線)は対流圏上層である高度約13km半径140kmにピークがある。最大値は0.01[J/kg/s]程度である。

MPEからMKEに変換されるエネルギー変換率(Fig.12の橙線)は他のエネルギー変換率よりも量が多く、壁雲全体に分布しているのが分かる。最大値は高度約10km半径130kmにおいて0.2[J/kg/s]程度である。また、眼の中には負の領域もある。

EPEからEKEに変換されるエネルギー変換率(Fig.12の青線)は高度約5km半径120kmにピークが見られる。最大値は0.03[J/kg/s]である。

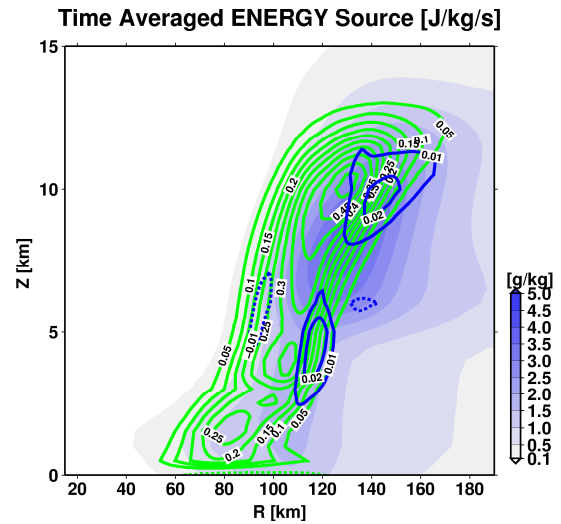


Fig. 13 The spatial distribution of time averaged each energy source [J/kg/s] by diabatic heating. →MPE, →EPE are indicated by green line (contour interval : 0.05 [J/kg/s]), blue line (0.01 [J/kg/s]), respectively. Shaded color denotes hydrometeors corresponding to typhoon's eye-wall.

5.5 時間空間平均したエネルギーソース率の空間分布

5.4節と同様に、エネルギーソース率を求めた結果を示す。Fig. 13は時間平均した各有効位置エネルギーソースの空間分布である。

非断熱加熱による平均場の有効位置エネルギーソース(Fig.13の緑線)は眼の壁雲の広い領域に存在していることが分かる。3箇所ピークが見られ、それぞれ高度約2km半径80km、高度約4km半径100km、高度約10km半径130kmの場所である。

非断熱加熱による擾乱の有効位置エネルギーソース(Fig.13の青線)は平均場の有効位置エネルギーソースに比べて、局所的にソースが存在しているという特徴がある。ピークは高度約5km半径120kmと高度約10km半径140kmにある。量的には、MPEのエネルギーソースの方がピークの場所において20倍程度大きい。

6. 台風眼の波数と順圧不安定の量との関係

本章では、台風の眼の波数と順圧不安定の量(順圧エネルギー変換率)の関係を議論する。メソ渦(擾乱)生成に関わる順圧不安定と台風眼の波数には関係性があると示唆されている(Kossin and Schubert 2001)。この関係性を念頭に置き、エネルギーという視点に立って、台風眼の波数を説明できるかどうか調べる。この際、シミュレーションで再現されたメソ渦の鉛

直・水平スケールを考慮して、エネルギー解析を実施する体積積分範囲を決定する。

6.1 解析時間

解析の対象とした期間は、外力（例えば、鉛直シアや移動の効果）が小さい2004年9月4日1200UTC（シミュレーション時間:24h）から2004年9月6日0600UTC（同:66h）までと設定した。これは外力による擾乱の発生の可能性を否定できず、これらの影響を最小限にするためである。なお、この解析時間の時間設定は5章と同様である。

6.2 メソ渦の鉛直・水平スケールとエネルギー解析の体積積分範囲

メソ渦の鉛直スケールについて、注意深く高度別の水平断面を観察すると高度3kmでは、それよりも下層に存在していた渦の回転成分がより小さくなっていることが分かる。したがって、メソ渦の鉛直スケールは約3kmであると言える。これらのメソ渦の鉛直・水平スケールから、エネルギー解析を施す体積積分の範囲を水平には半径50kmから100kmとし、鉛直には0.5kmから3kmとした。

6.3 エネルギー解析

本節では6.2節で定義した積分範囲におけるエネルギー量および順圧エネルギー変換率を中心に各エネルギー変換率の量を求める。

Fig. 14(a)は各エネルギーの時間変化である。

MKE(Fig. 14(a)の黒線)は時間の経過とともに減少

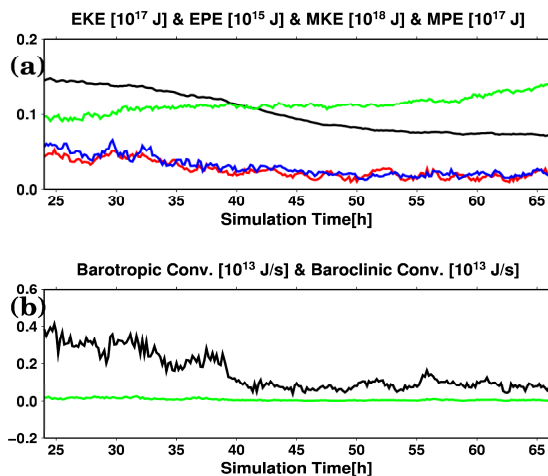


Fig. 14 The time series of (a) each energy [J] and (b) each energy conversion [J/s]. (a) MPE, EPE, MKE and EKE are shown by green line, blue line, black line and red line, respectively. (b) Barotropic energy conversion and baroclinic energy conversion are by black line and green line, respectively.

している。特に、解析時間の前半(24-45h頃)は大きな減少傾向がみられるが、解析時間の後半(45-66h)には減少率は小さくなっているのが分かる。

MPE(Fig.14(a)の緑線)は漸次増加していることが分かる。これは台風の眼の暖気核が時間とともに発達していることに対応していると考えられる。

EKE(Fig. 14(a)の赤線)とEPE(Fig. 14の青線)は解析時間の前半に減少している。また、EKEの解析時間後半には、周期約3時間の波が見られる。

Fig. 14(b)は平均場から擾乱に変換されるエネルギー変換率量の時間変化を示している。

順圧エネルギー変換率(Fig. 14(b)の黒線)には大きな変動があり、解析時間の前半は後半よりも2-3倍大きな値をとっている。40hを過ぎたころから小さな変動がのっているものの定常状態に近くなっている。

傾圧エネルギー変換率(Fig. 14(b)の緑線)の量は、他のエネルギー変換率量に比べて明らかに小さい。

6.4 台風眼の波数解析

台風眼の壁雲に発生している波の波数を定量的に解析するため、フーリエ級数展開をした。フーリエ級数展開の対象として、高度0.5km半径80kmの気圧場を選んだ。この理由はメソ渦が存在している領域が半径80km周辺で、メソ渦による気圧低下を考慮できると考えたからである。

Fig. 15は波数解析した結果である。解析時間の前半（シミュレーション時間:20-45h）ではより高波数の波の振幅が大きいことが観察できる。また、解析時間後半（同:45-66h）は波数2の波が3時間程度の周期をもって卓越していることが分かる。

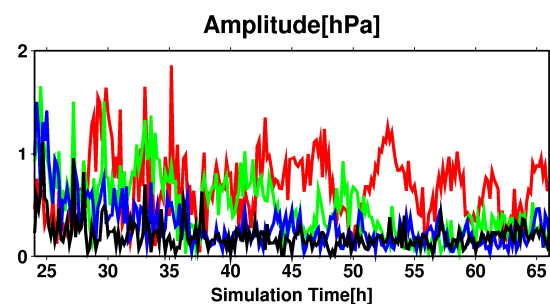


Fig. 15 The time series of the spectrum for pressure field at 0.5km (altitude) and 80km (radius). The wave number 2, 3, 4 and 5 are red line, green line, blue line and black line, respectively. The vertical axis is amplitude [hPa].

7. 考察

本章では、5章および6章の考察を行う。

7.1 眼の壁雲下層のエネルギーのやり取り

眼の壁雲内でエネルギー変換率を表した(Fig. 12)では、高度4km以下では順圧エネルギー変換(Fig. 12 黒線)が2箇所において特に卓越していることが分かる。この1箇所(高度約1km半径70km)はメソ渦の存在している場所とよく似ており、現実的にシミュレートされた台風においても順圧エネルギー変換によってメソ渦が生成されていることを示唆している。このことは、Schubert et al. (1999) やKossin and Schubert (2001)が主張している順圧不安定によるメソ渦の生成について、エネルギー論的に裏付けたと考える。これらの下層での順圧エネルギー変換が卓越しているという事実と非断熱加熱によるMPEのソースやMPEとMKE間のエネルギー変換率の空間分布や量を考えると、高度4km以下では次のようなエネルギーフローの概念図(Fig. 16)ができる。この図では、線の太さは、量や変換率量が大きさに比例している。

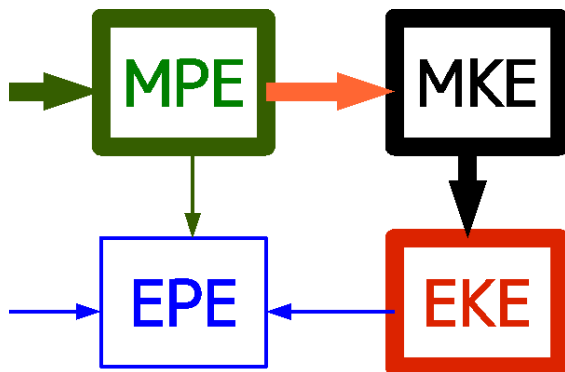


Fig. 16 The conceptual energy flow diagram below 4km.

7.2 眼の壁雲中・上層のエネルギーのやり取り

高度4-6km半径120kmに注目すると非断熱加熱によってEPEのエネルギーソースが大きい(Fig. 13 青線)ことが分かる。これは、この場所においてEPEの増加につながり(Fig. 11 青線)、さらにEPEからEKEに変換されて(Fig. 12 青線)、EKEの増加につながっている。このようなエネルギーのやり取りは高度10km半径140kmでも認められる。これらの原因は、エネルギーソースの式の定義から、非断熱加熱が局所的に増加したと捉えることができる。すなわち、眼の頂点付近にある下層のメソ渦によって眼の壁雲に高相当温位の空気塊が非軸対称に流入し、こ

れらが大量に凝結することで周りの空気を暖めていることに相当する。

この空間でのエネルギーフローの概念図はFig.17のように考えられる。

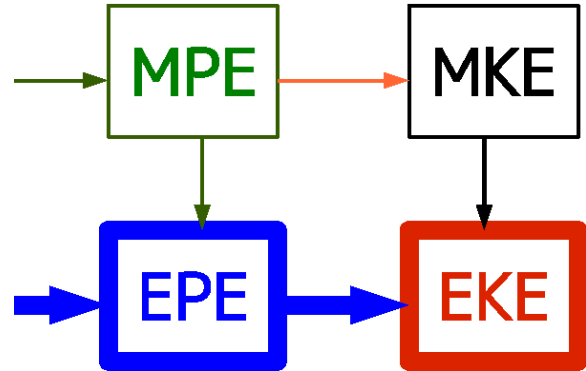


Fig. 17 The conceptual energy flow diagram above 4km.

7.3 台風眼の波数と順圧不安定の量との関係

メソ渦が存在している領域で体積積分した順圧不安定の量(Fig. 14 黒線)とメソ渦の存在している台風半径における気圧場のスペクトル(Fig. 15)を比較する。順圧不安定の量が大きくなっている時間帯(24 - 40h)では、波数4または波数5の波の振幅が大きくなっている。一方、順圧不安定の量が全体として小さいときには、そのピーク(51h, 56h, 61h頃)に比べて、波数2の振幅のピーク(53h, 58h, 62h頃)が約2時間程度遅れて生じているが、良い対応を示している。これらの事実から、順圧エネルギー変換率の量が大きいときには、より高波数の波にエネルギーが渡されるということが推測される。

8. 結論

本研究では、現実台風眼周辺のエネルギーのやり取りに関する研究課題を設定した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

眼の壁雲付近の高度4kmまでは、→MPE→MKE→EKEというエネルギーのやり取りがある。これらはメソ渦との関連が深い。一方、眼の壁雲付近の高度4-6km、高度10kmでは、→EPE→EKEというエネルギーのやり取りがある。これらは、下層でメソ渦によって流入した高相当温位塊が局所的に凝結し、非断熱加熱増加したことが原因だと考えられる。

順圧エネルギー変換が大きいときには、波数の大きい波にエネルギーが渡されて、台風眼はより多角形眼になる。逆に、順圧エネルギー変換が小さいときには、波数の小さい波にエネルギーが渡されて、台風眼は楕円眼になる。

謝 辞

京都大学防災研究所気象・水象災害研究部門暴風雨・気象環境研究分野 石川裕彦教授には、建設的なご意見を頂戴致しました。この場を借りてお礼申し上げます。

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.
- Braun, S. A., M. T. Montgomery, and Z. Pu, (2006) : High-resolution simulation of hurricane Bonnie (1998). Part I : The organization of eyewall vertical motion. *J. Atmos. Sci.*, 63, 19-42.
- Hong, S. Y., and H. L. Pan, (1996) : Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.
- Hong, S. Y., J. Dudhia, and S. H. Chen, (2004) : A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103-120.
- Kossin, J. P., and W. H. Schubert, (2001) : Mesovortices, polygonal flow patterns, and rapid pressure falls in hurricane-like vortices. *J. Atmos. Sci.*, 58, 2196-2209.
- , and ———, (2004) : Mesovortices in hurricane Isabel. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 151-153.
- Kain, J. S., J. M. Fritsch, (1993) : Convective parameterization for mesoscale models: The Kain - Fritsch scheme , The representation of cumulus convective in numerical models, K. A. Emanuel and D. J. Raymond, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 246pp.
- Kusunoki, K. and Mashiko, (2006): Doppler radar investigations of the inner core of typhoon Songda (2004) polygonal / elliptical eyewalls, eye contraction, and small-scale spiral bands. Presented at 27th Conf. Hurric. Trop. Meteorol., Monterey, CA.
- Kwon Y. C., and W. M. Frank, (2005) : Dynamic instabilities of simulated hurricane-like vortices and their impacts on the core structure of hurricanes. Part I : dry experiments. *J. Atmos. Sci.*, 62, 3955-3973.
- , and ———, (2008) : Dynamic instabilities of simulated hurricane-like vortices and their impacts on the core structure of hurricanes. Part I: moist experiments. *J. Atmos. Sci.*, 65, 106-122.
- Mashiko W., (2005) : Polygonal eyewall and mesovortices structure in a numerically simulated typhoon Rusa. *SOLA*, 1, 29-32.
- Marks, F. D., and R. A. Houze, (1984) : Airborne doppler radar observations in hurricane Debby. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 65, 569-582}.
- Muramatsu, T., (1986) : The structure of polygonal eye of a typhoon. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 64, 913-921.
- Schubert, W. H., M. T. Montgomery, R. K. Taft, T. A. Guinn, S. R. Fulton, J. P. Kossin, and J. P. Edwards, (1999) : Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 56, 1197-1223.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, and X. Y. Huang, W. Wang, J. G. Powers, (2008) : A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note, NCAR / TN-475+STR, 126pp., Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo.

The energy analysis of Typhoon SONGDA(2004) with a polygonal eyewall

Keisuke Nakamichi* and Tetsuya Takemi

*All Nippon Airways Co., Ltd.

Synopsis

In this study, we simulate Typhoon Songda(2004) which had a polygonal eyewall with a regional atmospheric model to elucidate the spatial distribution of each energy and energy conversion around its eyewall under a realistic meteorological setting. The simulated results indicate that there were energy exchange produced by mesovortices in the lower layer of the troposphere and by diabatic heating in the middle and the upper layer. We conclude that there is a close relationship between the energy conversion and the wavenumber of typhoon eyewall in the lower layer of the troposphere.

Keywords: Typhoon, Mesovortex, Polygonal eyewall, Asymmetric structure, Energy analysis, WRF