

台風Francisco(T0118)の初期渦形成過程

吉田龍二*・石川裕彦

* 京都大学大学院理学研究科

要 旨

台風の発生過程における初期渦形成過程について、Top-Down仮説とBottom-Up仮説のどちらが実際の過程をよく説明するのか検証した。そのためにメソ気象モデルを用いて2001年18号台風Franciscoを再現した。再現されたFranciscoは現実より約3度北で8時間早く発生した。発生前には中層に約100kmスケールのメソ対流渦、下層に複数の約50kmスケールの渦が存在した。これらの渦が接近したあとに、多数の対流スケールの渦が発生し、併合することで初期渦が形成された。メソ対流渦と下層渦の領域で渦度の鉛直プロファイルを調べると、メソ対流渦の領域では時間経過とともに渦度が中層から下層へ広がり、逆に下層渦領域では渦度が下層から上層へ広がった。従って再現された初期渦形成過程では、注目するスケールを変えることでTop-DownとBottom-Upの両方のプロセスが見られた。

キーワード: 台風, 熱帯低気圧, 熱帯大気, メソ気象学

1. はじめに

台風は毎年おおよそ 25 事例の発生があり、そのうち 11 事例が日本に接近する (気象庁)。台風が日本に接近、上陸すれば社会への影響は大きく、時には死者を出す大きな災害へ結びつく。日本だけでなく台湾や東南アジア地域においても台風による被害は大きく、特にフィリピンなどの東南アジアは台風の発生地に近いこともあって接近までのリードタイムが短く予報が難しい。こういった観点から台風の完全な理解は、防災・減災において大変重要な課題であるが、発生・発達過程の理解が特に遅れている。

台風は海面水温の高い熱帯海洋上で、風の鉛直シアが弱く、対流圏下層が収束場になっている環境条件の下で発生しやすく (Gray 1968, 1998), 夏期のモンスーントラフに伴うシアラインや偏東風波動といった局所的に低気圧性の渦度が大きい場で発生する (Ritchie and Holland 1999; 吉田・石川 2010)。そのような環境場の下で発生したクラウドクラスターの中にメソ対流渦 (MCV) と呼ばれる低気圧性渦が形成されることがある。MCVは対流圏中層を中心に存在するメソスケールの渦で、この MCV から台風が発生・発達すると指摘されている (Miller and Fritsch 1991; Chen et al. 1996; Bister and Emanuel 1997;

Simpson et al. 1997; Houze et al. 2009)。一般に台風の発生・発達には、クラウドクラスターから熱帯低気圧 (TC) に至るまでの発生過程と、その後台風強度に達するまでの発達過程に大別される。本研究では前者の発生過程を取り扱う。発生時には TC は下層から中層・上層までコヒーレントな渦を持っている (以後これを初期渦と呼ぶ)。したがって、中層の MCV から初期渦が発達するメカニズムを明らかにすることが大きな課題の一つである。これまでに大きく 2 つのメカニズムが提唱されており、それは “Top-Down” 仮説 (Ritchie and Holland 1997) と “Bottom-Up” 仮説 (Hendricks and Montgomery 2004; Montgomery et al. 2006; Kieu and Zhang 2008) である。前者は数値実験の結果をもとに、中層の MCV が下方へ広がることで下層から中層までつながった初期渦が形成されると主張している。一方、後者の仮説は中層に存在する MCV によって対流圏下部に水平渦度(鉛直シア)が生まれる。これを対流に伴う上昇流が傾け、引き延ばすことで下層から中層までコヒーレントな鉛直渦度が生成されると説明している。

最近では Bottom-Up 仮説が有力な説だと考えられているが (Houze et al. 2009), これらの仮説の検証事例は少なく、実際の TC の初期渦形成過程を説明できるかどうかは明らかではない。また、この過程では

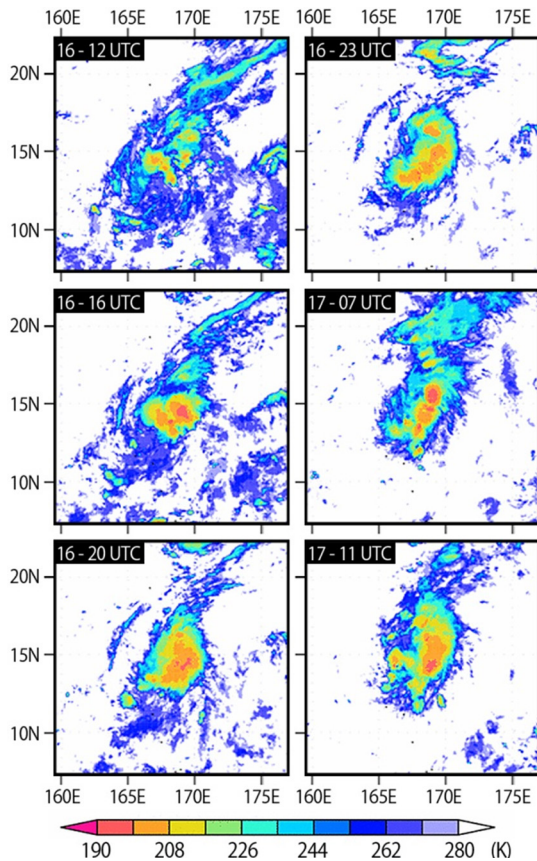


Fig.1 Infrared images (ch1) of Japan Meteorological Agency GSM-5; showing Francisco case from 12 UTC, 16th Sep., 2001 to 11 UTC, 17th

再解析データでは解像できない 100km 以下の現象が重要である。そこで本研究では数値モデルを用いて、実現象を再現することで、詳細な TC の初期渦形成を調べ、前述の仮説によって説明できるものかどうか検証することを目的とする。

2. 対象事例と数値モデルの設定

本研究では北西太平洋上で発生した2001年18号、台風 Francisco を対象事例とする。Joint Typhoon Research Center U.S. (JTWC) のベストトラックデータによれば、Francisco は2001年9月17日06 UTC に 13.5°N, 166.5°E にて Tropical Depression (TD) 強度で発生し、その後19日12 UTC に 14.6°N, 161.5°E にて台風強度に達した。この事例は、Fig.1 に示した気象庁の静止気象衛星GMS-5の赤外面像 (IR1) によると、暖色系で示された背の高い雲域の併合が発生前後に何度も見られることが特徴である。また、National Centers for Environmental Prediction, Final Analysis (NCEP/FNL) 再解析データ (水平格子間隔1度) の 850hPa 高度における水平風成分を調べると、発生3日目の発生地点付近は偏東風に覆われていた。同じ

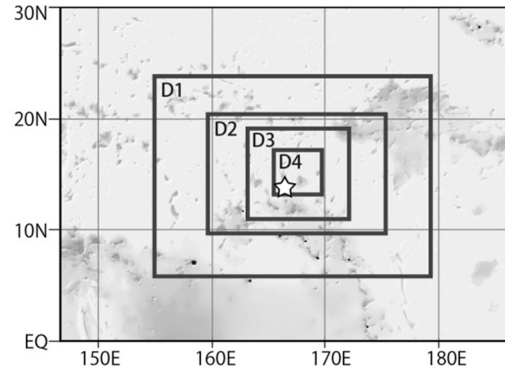


Fig.2 The quadruply nested computational domain; D1: 27km (100×72), D2: 9km (190×127), D3: 3km (313×307), and D4: 1km (448×439); A star shows the genesis location of Francisco.

場所の地上付近には高い低気圧性渦度の領域が広がり、500hPa 高度の対流圏中層には直径100km を越える大きな低気圧性循環が見られた。

再現に当たってはメソ気象モデル WRF-ARW version 3.0.1.1 (Skamarock et al. 2008) を用いた。ドメインは2-way ネスティングを用いて4段階とり、水平格子幅は第1ドメイン: 27km, 第2: 9km, 第3: 3km, 第4: 1km とした (Fig.2)。雲微物理過程は6つの相を扱う WSM6 を使用し、第1, 第2ドメインには積雲パラメタリゼーション (Kain-Fritsch スキーム) を適用した。長波放射には Rapid Radiative Transfer Model, 短波放射には Dudhia scheme, そして境界層モデルには Yonsei University scheme を用いた。モデルに入力する初期値・境界値には NCEP/FNL 再解析データを用い、2001年9月15日00 UTC (発生の54時間前) から6日間の時間積分を行った。したがって、初期値に中層の MCV に対応する循環がある程度表現されていることに注意されたい。

3. 再現結果

3.1 再現性と発生過程の特徴

再現された Francisco は 15.9°N, 167.8°E において16日23 UTC に 850hPa 高度の風速が 13m/s を越えて TD 強度に達した。これは現実のものよりも約8時間早く、その位置は少し北東にずれている。Fig.3 はドメイン1における外向き長波放射 (OLR) と 500hPa 高度の水平風の分布を示している。OLR の低い値は高度の高い雲の存在を意味している。OLR によって示される雲域は、はじめ大きく広がって分布しているが、その中から1つの丸い背の高い雲域が発達してくる様子がわかる。この雲域の変化は Fig.1 でみた衛星画像によく似ている。そして、500hPa 高度には終始、雲域の付近に低気圧性の渦が存在している。この中

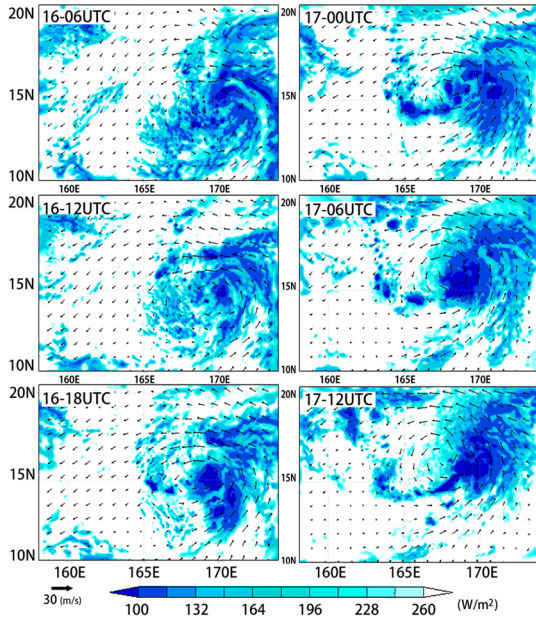


Fig.3 Outgoing long-wave radiation field (color shade) and horizontal wind field at 500 hPa height (vector) for simulated Francisco; showing domain-1

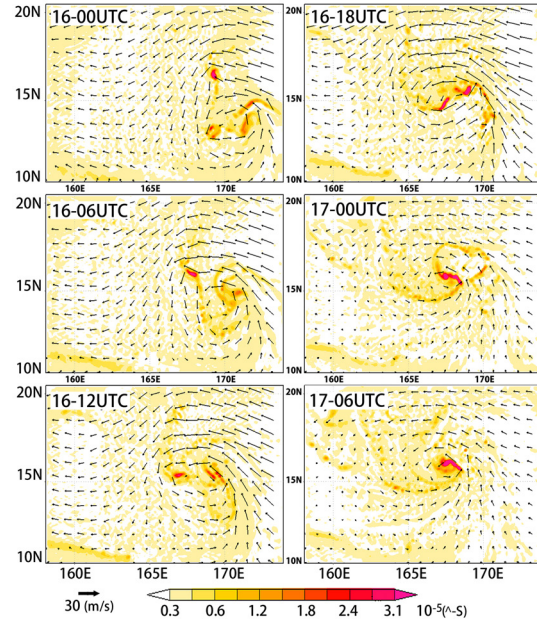


Fig.5 Horizontal wind field at the surface (vector) and relative vertical vorticity at the same level (color shade); showing domain-1

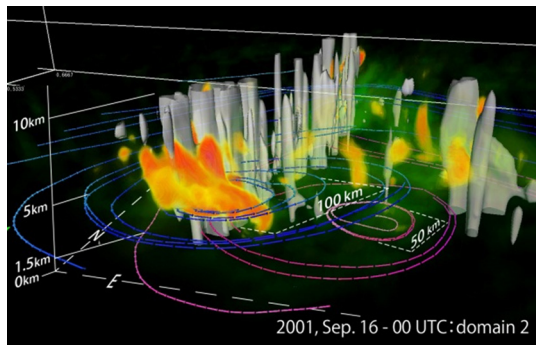


Fig.4 A simulated mesoscale convective vortex (MCV) at 00 UTC 16th, Sep., 2001 drawn by VAPOR using domain-2 (9km); blue and pink colored lines show wind field at 6km and 1.5 km height, respectively. Orange colored volume rendering shows potential vorticity (only positive vorticity). Gray colored isosurface is mixing ratio (3 g/kg) intending convective cloud.

層の低気圧性渦に伴う風速場とポテンシャル渦度 (PV)を3次元空間にプロットした(Fig.4)。ここで青色の線と桃色の線は高度6kmと高度1.5kmの風速場をそれぞれ表している。また、灰色の等値面は液相・固相水混合比の高い値(3g/kg)の等値面を描いており、活発な対流雲域を表現している。橙色のボリュームレンダリングはPVを表しており、ここでは正の値のみを描いている。高いPV領域は6km高度を中心に対流圏中層だけに存在しており、渦の直径はおおよそ100kmである。図には示していないがこの領域には層状雲が広がっており、融解層の高度は約6kmであ

った。このような特徴は先行研究の観測で得られているMCVの特徴と良く一致している。また、MCVの北東側にあたる下層にもメソ渦が見られる。この渦の水平スケールは約50 kmであり、以降この渦を下層渦と呼ぶ。つぎに下層渦について詳しく調べる。

Fig. 5 にドメイン 1 における対流圏下層の地上の風速場 (ベクトル) と地上風から計算された渦度 (カラーシェード) を示した。再現された Francisco の発生過程では複数の下層渦が存在し、それらは中層の MCV の周囲に分布している。複数の下層渦は 16 日 00 UTC ~17 日 00 UTC の間に併合して大きな 1 つの渦へ発達しており、併合が完了した時刻はおおよそ Francisco が TD 強度に達した時刻にあたる。

3.2 初期渦形成過程

3.1 節で述べた MCV と下層渦の 3 次元的位置関係と時間変化を明らかにするため、水平風と正の PV を 3 次元空間にプロットした (Fig.6)。暖色系の色が正の PV、青色線が高度 6km の流れ場、そして桃色線が高度 1.5km の流れ場を表している。Fig. 6a の 16 日 10 UTC は Fig.4 で示した時刻の 10 時間後にあたる。ここでも Fig.4 と同様に中層を中心に MCV に対応する強い PV 領域が広がっており、下層にも渦がみられる。ただし、Fig.6a の時刻には MCV と下層渦がほぼ同じ位置にある。16 日 14 UTC (Fig.6c) になると MCV や下層渦よりも水平スケールは小さいが鉛直に伸びた PV 領域が多数現れる。図には示していないが、これらの渦の位置は対流スケールの上昇

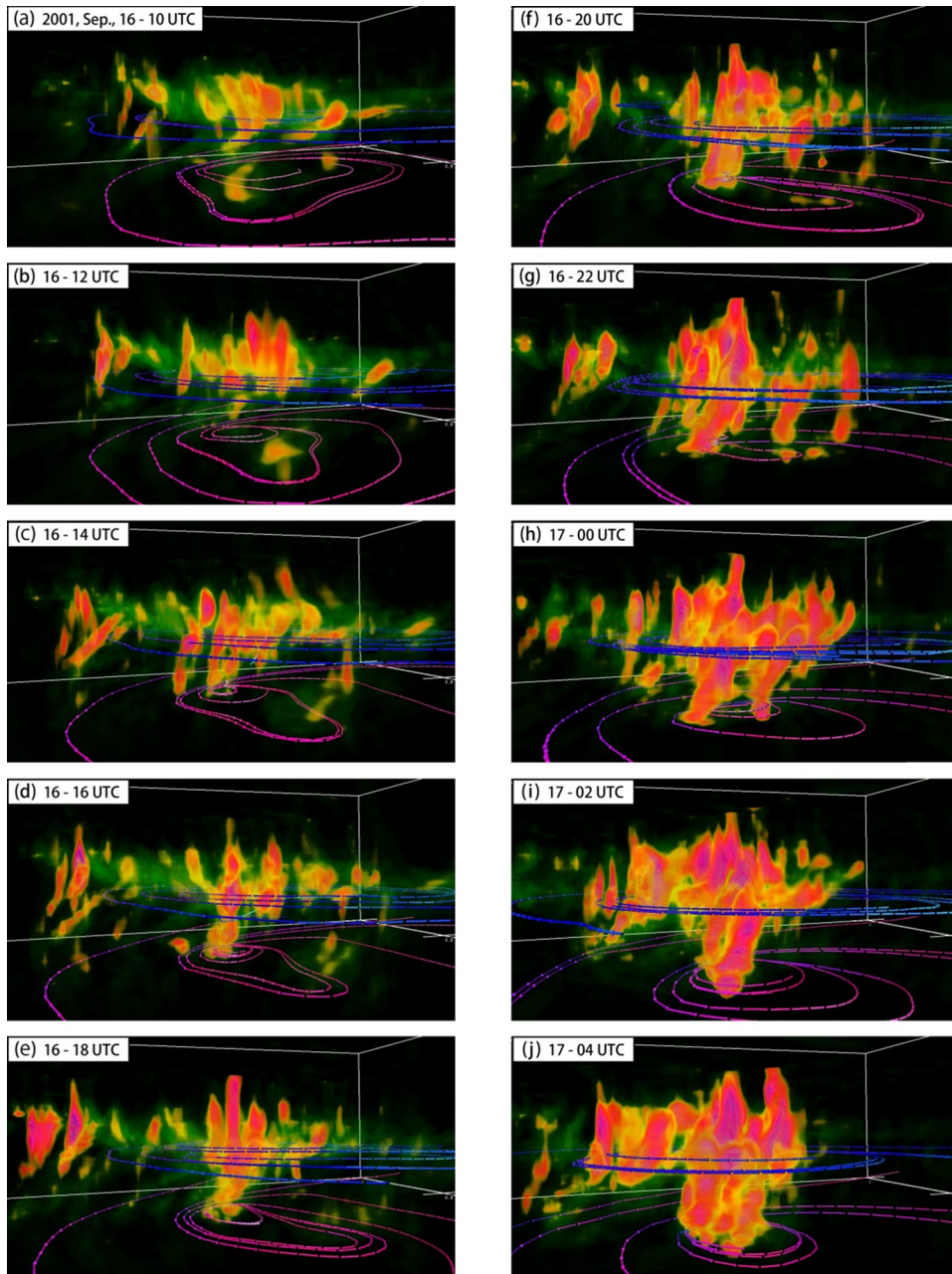


Fig.6 A process of initial vortex organization in simulated Francisco drawn by VAPOR using wind field of domain 2 (9km); potential vorticity is shown by yellow-red volume rendering, horizontal wind field at 6km height is blue line, and that of 1.5km height is pink line. There are a lot of small scale vortices vertically elongated (tens kilometers in diameter). These vortices merged each other, and gradually became a monolithic vortex.

流と対応しており、雲域を伴ったものである。そして正負両方の渦度がペアになって発生しているものが多く、このことから鉛直シアを対流が傾け、引き延ばすことで作られた渦であると考えられる。これらの渦は併合して大きな渦になり (Fig.6e), 16日 22 UTC ~ 17日 04 UTC に、さらに併合を繰り返してより大きな渦に発達した (Fig.6g, h, i, j)。この時点で 13m/s の地上風速を越えており、下層から上層までコヒーレントな渦構造を持つことから TC の初期渦になったと考えられる。このあと初期渦は

雲域を広げながらさらに強度を増し、18日ごろには台風強度に達した。

このように、異なる水平、鉛直スケールの渦がからみあったプロセスであることが再現された Francisco の初期渦形成過程の特徴である。小さな低気圧性渦は背景場の低気圧性の渦度勾配を上るといふ渦の相互作用を踏まえると、MCV や下層渦という比較的大きなスケールの低気圧性渦の中に、鉛直に伸びた小さな渦が多数発生することがポイントであり、このことが小さな渦が積極的に集まり、併合を

起こす原因の1つだと考えることができる。小さな渦が併合してスケールアップすることも再現された初期渦形成の特徴である。さらに小さな渦は対流によって引き起こされたものなので、そもそも温暖核の渦である。したがって、それらが併合して出来る渦も自ずと温暖核になることが予想でき、今後の解析で温暖核の形成についても説明できるかもしれない。

4. Top-DownかBottom-Upか

ここでは3節で述べた初期渦形成過程が Top-Down 仮説と Bottom-Up 仮説のどちらに相当するものなのか調べる。そこで、3.2節で説明したプロセスが進行中の時間 (16日 00 UTC~17日 00 UTC) に MCV と下層渦をトラックし、それぞれの場所における相対渦度と PV の鉛直プロファイル調べた。トラッキングにあたって、MCV や下層渦を以下の定義で代表させた。MCV については、海面更正気圧の最小値を中心にして高度 6km に 200km×200km の領域を設定し、この領域内で直径 100km の円状領域内で平均した PV の平均値が最大となる場所を MCV の位置だと定義した。そして、この位置における円状領域で MCV を代表させることとし、この領域内の平均値の鉛直プロファイルの時間変化を調べる。下層渦についても同様に定義したが、円状領域は高度 1.5km において直径 45km の円形とした。また下層渦は複数存在したので、そのうちの2つだけをトラックすることにし、平均値が第1位と第2位の大きさの値を持つ2つの円状領域をそれぞれ下層渦1、下層渦2として定義した。

Fig. 7に MCV と2つの下層渦のトラッキングの様子を示している。黒丸が MCV、紫丸が下層渦1、そして桃色丸が下層渦2の位置を示しており、背景のカラーは OLR を表している。大方、MCV は雲域の中心に位置し、下層渦は MCV の周りを移動している。

得られたトラックに沿って求めた鉛直プロファイルを描いたものが Fig.8 である。Fig. 8a, b, そして c はそれぞれ、MCV、下層渦1、そして下層渦2の領域における領域内平均の鉛直プロファイルの時間変化を表している。Fig. 8a の MCV 領域をみると最初は中層だけに限定されていた PV (コンター) が 16日 14 UTC 頃に下層へ広がっていくように見える。逆に Fig.8b の下層渦1領域では、最初は下層だけに存在した正の PV は同じく 14 UTC 頃に中層・上層へ広がっていく。下層渦2についてもおおむね同様の様子がみられる。これらの特徴は渦度 (カラーシェード) で見ても同様である。したがって、MCV

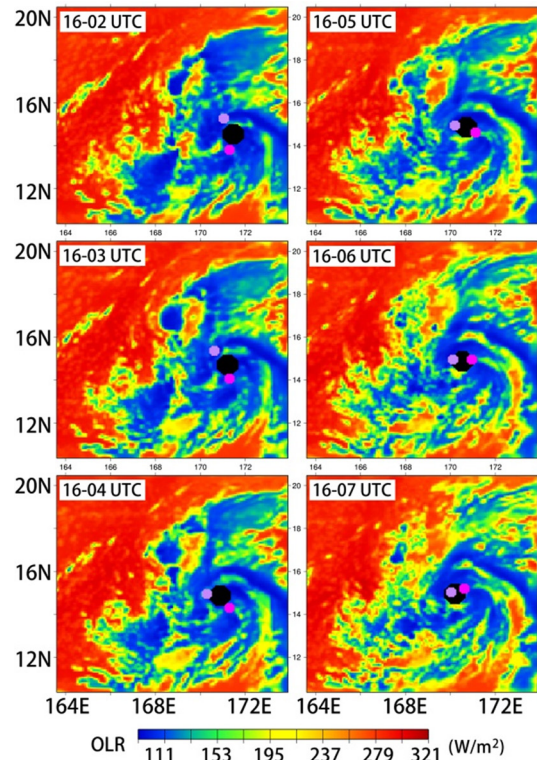


Fig.7 Tracking of MCV and low-level vortices; the detected MCV area is shown by black color circle, low-level vortex-1 is purple color circle, and low-level vortex-2 is pink color circle. The corresponding field of outgoing long-wave radiation is drawn as background.

領域では Top-Down 仮説に相当する渦度の時間変化がみられ、下層渦領域では逆に Bottom-Up 仮説に相当する変化がみられた。言い換えると、再現された Francisco の初期渦形成過程では、平均する水平スケールを変えることで両方のプロセスがみられる。

しかし 3.2 節で述べた初期渦形成過程を踏まえると、再現された過程は Bottom-Up 仮説に近いと考えられる。対流に伴う上昇流が対流圏下層の鉛直シアを傾けて鉛直渦度を作り、それらの渦が併合してスケールアップするという過程は、下層の渦度を起源として初期渦が発達する過程だと考えることができるからである。本節でみた下層渦領域の鉛直プロファイルの時間変化はこれに対応するものになっており、対流スケールの小さな渦が多数併合した時刻と、下層の渦度が上層へ広がる時刻はほぼ一致する。

MCV 領域にはもともと MCV がもつ正の渦度が大きく広がっている。ここに鉛直に伸びた形状の小さなスケールの渦度が多数移流してくる過程を考えると、面積平均の効果のために MCV に由来する中層の渦度が目立ち、下層の渦度は比較的弱く映る。それでも多数の渦が併合してスケールアップすること

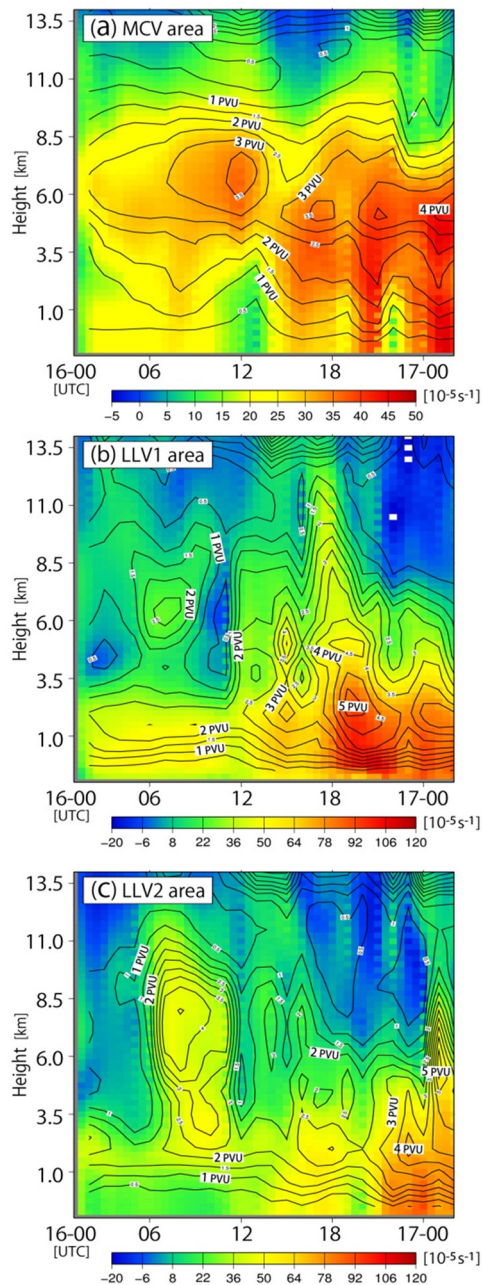


Fig. 8 The temporal changes of vertical profile of relative vorticity (color shade) or potential vorticity (contour) for MCV and low-level vortices; these are calculated by using wind field of domain-2.

で徐々に下層でも渦度が顕著になり始めると、全体の鉛直プロファイルとしては中層から下層へ広がって見えるのではないかと考えられる。したがって、ある程度大きなスケールで平均された場をみると、実際には対流スケールの渦の併合によって引き起こされる Bottom-Up 的なプロセスが鈍されて見え、これが MCV の渦度と相まって Top-Down 的に見えてしまうのではないかと考察する。

5. まとめ

本研究では台風の発生過程に着目し、台風強度に達する前段階の熱帯低気圧の初期渦形成過程を詳細に調べることが目的とした。そのために、実際の台風発生事例である2001年18号台風Franciscoを高解像度のメソ気象モデルを用いて再現した。再現されたFranciscoはおおむね現実に近い発生時刻、場所でTD強度に達し、そのあと台風強度にまで発達した。再現された初期渦形成過程の特徴は、もともなった雲域の対流圏中層にメソ対流渦 (MCV) が存在したこと、下層に50kmスケールの渦や対流スケールの渦が多数みられたことである。鉛直方向に伸びた対流スケールの渦は互いに併合し、大きなスケールに成長して最終的には初期渦の形成に至った。

また、初期渦形成過程の仮説として大きく Top-Down と Bottom-Up の2つが提唱されているが、本研究ではこのうちどちらが現実的なのか調べた。MCV (100kmスケール) と下層渦 (50kmスケール) の領域において鉛直プロファイルの時間変化を描くと、MCV 領域では中層の渦度 (もしくはPV) が下方へ広がるように見え、下層渦領域では下層から上方へ広がるようにみえた。したがって、1つの熱帯低気圧発生事例の中で、平均する水平スケールを変えることによって、両方の仮説に相当する初期渦形成過程がみられた。しかし、平均する水平スケールが大きい場合に、小さな対流スケールの渦よりも面積が大きな中層の MCV の方が目立つため、Top-Down 的にみえると考えられる。実際には複数の対流スケールの渦が併合することで初期渦が形成されていくため、Bottom-Up 仮説に相当するプロセスが現実的だろう。

謝 辞

この研究を行うにあたって解析、考察など様々な面でお世話になった暴風雨・気象環境研究分野の研究室の方々に感謝する。また研究中に心身ともに支えてくれた家族や友人に感謝を述べる。

参考文献

- 吉田龍二・石川裕彦, 2010: 大規模流れ場とメソ対流併合からみた北西太平洋における熱帯低気圧発生の気候学的研究, 京都大学防災研究所年報, No.52B, pp.345-376.
- Bister, M., and K. A. Emanuel, 1997: The genesis of Hurricane Guillermo: TEXMEX analyses and a modeling study, Mon. Wea. Rev., vol.125, pp.2662-2682.

- Chen S. S., R. A. Houze Jr., and B. E. Mapes, 1996: Multiscale variability of deep convection in relation to large-scale circulation in TOGA COARE, *J. Atmos. Sci.*, vol.53, pp.1380-1409.
- Gray W. M., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms, *Mon. Wea. Rev.*, vol.96, pp.669-700.
- Gray W. M., 1998: The formation of tropical cyclones, *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol.67, pp.37-69.
- Hendricks E. A., and M. T. Montgomery, 2004: The Role of “Vortical” Hot Towers in the Formation of Tropical Cyclone Diana (1984), *J. Atmos. Sci.*, vol.61, pp.1209-1232.
- Houze R. A., W. C. Lee, and M. M. Bell, 2009: Convective Contribution to the Genesis of Hurricane Ophelia (2005), *Mon. Wea. Rev.*, vol.137, pp.2778-2800.
- KIEU C. Q. , and D. L. ZHANG, 2008: Genesis of Tropical Storm Eugene (2005) from Merging Vortices Associated with ITCZ Breakdowns. Part I: Observational and Modeling Analyses, *J. Atmos. Sci.*, vol.65, pp.3419-3439.
- Miller, D., and J. M. Fritsch, 1991: Mesoscale convective complexes in the western Pacific region, *Mon. Wea. Rev.*, vol.119, pp.2978-2992.
- Montgomery M. T., M. E. Nicholls, T. A. Cram, and A. B. Saunders, 2006: A Vortical Hot Tower Route to Tropical Cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, vol.63, pp.355-386.
- Ritchie E. A., and G. J. Holland, 1997: Scale interactions during the formation of typhoon Irving, *Mon. Wea. Rev.*, vol.125, 1377-1396.
- Ritchie E. A., and G. J. Holland, 1999: Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the western Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, vol.127, pp.2027-2043.
- Simpson J., E. A. Ritchie, G. J. Holland, J. Halverson, and S. Stewart, 1997: Mesoscale interactions in tropical cyclone genesis, *Mon. Wea. Rev.*, vol.125, pp.2643-2661.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y.
- Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-475+STR, pp.113.

The Organization Process of an Initial Vortex of Typhoon Francisco 2001

Ryuji YOSHIDA* and Hirohiko ISHIKAWA

* Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

The initial vortex organization (IVO) in the early phase of the tropical cyclogenesis is a matter of interest in current study. Two hypotheses for the process of IVO associated with MCVs are proposed. One is Top-Down, and the other is Bottom-Up. These hypotheses, however, have not been confirmed enough. Therefore, we investigate the IVO process in the Typhoon Francisco (2001) case by using numerical simulation, and which process is seen in two hypotheses.

The simulated Francisco is organized at nearly the same time and location. In simulated TCG process, one MCV, several low-level cyclonic vortices (LLVs), and small-scale vortices (SSVs) are seen. SSVs are being merged gradually from 00 UTC 16 to 00 UTC 17. The merged vortex has monolithic PV area with many convective clouds. The vortex got intensity, and becomes tropical storm later.

To investigate development of MCV and LLVs, we investigate vertical profile of PV at the MCV and LLVs areas. PV in MCV area extends from mid-level to low-level. On the other hand, PV in LLVs extends from low-level to mid-level. Therefore, the temporal evolution of vorticity in MCV area seems Top-Down, but that in LLVs area seems Bottom-Up.

Keywords: Typhoon, Tropical Cyclone, Tropical Atmosphere, Meso-scale Meteorology