

氷相過程が台風の発達に及ぼす影響

*沢田雅洋、岩崎俊樹、余偉明（東北大院・理）

1. はじめに

台風の主なエネルギー源は凝結熱であるが、氷相過程も台風の構造や発達過程に影響を及ぼす。氷相過程の主な役割は融解・昇華による冷却が下降流の生成・強化を促し、この下降流が台風中心に吹き込む流れを妨げ(Lord et al. 1984¹⁾; Lord and Lord 1988²⁾; Wang 2002³⁾)、下層の水蒸気量を減らす(Wang 2002)と指摘されている。一方Zhu and Zhang (2006)⁴⁾は凝固、凝華加熱が台風を強化し、コンパクトな眼を形成すると述べている。Wangらとの違いは環境場が異なること、用いた数値モデル(物理過程)が異なるためと指摘している。これらの結果からも氷相過程の影響は十分理解されているとは言い難い。

本研究では理想化した環境場で雲解像した台風の数値実験をいくつか行うことで、氷相過程がもたらす影響(相変化に伴う非断熱加熱と落下速度の違い)について調べるのが目的である。

2. モデル概要と実験概要

数値モデルは気象庁非静力学モデルNHMを使用した。計算領域は1200km×1200km×25.6km、格子間隔は水平に5km、鉛直に42層(40m~1240m)とした。境界条件として、側面は放射条件、上端はfree-slip、下端は領域全体を海とし、kondo (1975)の方法⁵⁾を用い、側面100km、高度17km以上でrayleighダンピングをかけた。移流項は4次精度のflux型を使用した。乱流過程は1.5次の乱流エネルギー予報式を用いた。雲物理過程はcold rain(雲水、雨水、雲氷、雪、霰)を用いて実験を行った。対流パラメタリゼーションは用いない。初期の風速分布は以下の式⁶⁾、

$$v_{\tan} = \frac{2\hat{r}/\hat{r}}{1 + (\hat{r}/\hat{r})^3} \begin{pmatrix} \hat{r} = 150\text{km} \\ \hat{v} = 20\text{m/s} \end{pmatrix} \quad (r \text{ は領域中心からの距離})$$

に従って与え、高度10kmでゼロになるよう線形に分布させた。この渦を台風の初期擾乱として与え、その発達過程について解析した。温位、相対湿度は再解析データERA40の1998–2002年の8月について5年分を、熱帯域(120E–160E, 5N–30N)の時間領域平均プロファイルを与え(図1)、SSTは303Kとした。積分時間は120時間である。この初期条件に対し5つの実験を行う。1つは標準実験としてcontrol、氷相過程の役割を調べるため、warm rainを使用する実験warm、氷過程による冷却の影響を調べるため、融解・昇華冷却を除いた実験no_icec、氷過程による加熱の影響を調べるため、凝固・凝華加熱を除いた実験no_iceh、落下速度が遅い氷物質の影響を調べるため、雪・霰の落下速度を雨水の落下速度と同じになるよう扱う実験adjust_tvを行う。

3. 結果

3.1 台風の発達過程と構造

まずcontrolを見ると、対流活動が約T=10hを過ぎたところで始まる。しばらく低気圧性循環をしながらまばらに発達する個々の積雲はT=36h付近で中心付近に集まり組織化していく。組織化と共に中心気圧も下がり始め、中心から半径300km内で領域平均

した運動エネルギーも徐々に増加していく(図2)。T=54hを過ぎた頃には顕著な眼を持ち、気圧は下がり続けて最低気圧は約933hPaに達する。T=120hでの雲の水平構造を見ると半径40kmほどに壁雲が見られ、その外側にスパイラルバンドなどの特徴的な雲構造が見られる(図3)。絶対角運動量(AAM)と上昇流の鉛直構造を見ると、AAMの等値面に沿って強い上昇流が見られ、これはAAMをほぼ保存しながら気塊が輸送されていることを示す(図4)。一方、氷相過程を含まないwarmの発達過程を見ると、対流活動の始まる時間はほぼ等しいが積雲が組織化していくタイミングが大きく異なる。中心気圧、運動エネルギーの時間変化を見ると、T=24h頃に渦の発達が始まり、controlに比べて12時間ほど早く組織化が始まる。積雲の組織化は急速に進み気圧低下や運動エネルギーの増加の割合はcontrolより大きく、最低気圧は約922hPa、運動エネルギーは2倍以上に達する(図2)。壁雲の位置を見ると半径60km付近に形成され、controlに比べて1.5倍大きいことが分かる。また強風域(風速25m/s以上)も同様に1.5倍ほど広い領域を持つ(図には示さない)。壁雲でのAAMはcontrolの約1.7倍であり、大きな遠心力を持つ。大きなAAMを持つ気塊が下層で吹き込み、壁雲で上昇するに従って相対的に気圧傾度力が小さくなるので、強く外側に吹き出し大きな傾きを持った壁雲を形成する。大きなAAMを持つ原因について以下の感度実験から推察する。

3.2 融解・昇華冷却の役割

融解・昇華冷却を除いた場合(no_icec)、5つの実験の中で、台風の組織化が最も早く始まり、運動エネルギーの増加が急速である。T=72hを過ぎるとほぼ定常状態に達し、最低気圧は960hPaで最も高いが、運動エネルギーはcontrolより大きい。壁雲での上昇流はシャープではないが、大きなAAMを持つためその等値線に沿って大きく傾いている。no_icecは冷却効果が弱く(図5)、対流性下降流が生成されにくくなる。対流性下降流はAAMの輸送を妨げる効果を持つが、この働きが弱めるためAAMが大きくなると考えられる。またAAM輸送の増加に伴い組織化が早く起こり、台風の発達が早くなると見られる。

3.3 凝固・凝華加熱の役割

no_icehの渦の発達過程・構造はほぼcontrolと等しくなる。ただし最低気圧は941hPa、運動エネルギーはcontrolの8割程度でcontrolより僅かに弱い。壁雲での非断熱加熱は上層でcontrolよりやや小さく、運動エネルギーが小さいことと整合的である。冷却率はほぼ等しいため、controlと同様に対流性下降流を形成しAAMの輸送を妨げるため、台風のサイズに影響しない。

3.4 落下速度の違いの影響

雪や霰の落下速度を雨水と同じにすると、氷物質の落下速度は速くなる。そのため壁雲での上昇流域で形成した雪や霰は融解層付近で水平方向に広がる前にすぐに落下する。非断熱加熱による冷却分布を見ると、adjust_tvはcontrolに比べ融解層付近での冷

却域が狭くなり、冷却率も小さくなっているのが分かる。冷却効果が弱まるため対流性下降流は強化されず、高 AAM を輸送することになり、no_icec と相似な効果をもたらす。結果として高 AAM の輸送は control より台風の発達を早め、壁雲を傾ける働きを促す。

4. まとめと課題

台風の発達過程における氷相過程の役割について調べるために理想化した台風の数値実験を行った。氷相過程を含むと、台風の発達するタイミングが遅く、運動エネルギーが小さくなり、壁雲や強風域が狭まった。いくつかの感度実験の結果から、融解・昇華による冷却と氷物質を含むことによる落下速度の違いが台風の発達や構造に違いをもたらす要因と示唆された。融解・昇華による冷却は強い下降流をもたらし、絶対角運動量の輸送を妨げ、積雲が組織化するのを抑制する。角運動量が小さくなると、壁雲の傾きは小さくなり強風域も狭まる。落下速度の遅い雪や霰は上層の吹き出しによって水平方向に広がり、融解層付近で強い冷却域を形成する。この冷却は下降流を形成するので、台風の発達を抑制すると考えられる。

参考文献

- 1) Lord, S. J., H. E. Willoughby and J. M. Piotrowicz: J. Atmos. Sci., 41(1984) 2836
- 2) Lord, S. J. & J. M. Lord: J. Atmos. Sci., 45(1988) 1453
- 3) Wang, Y. Q.: Mon. Wea. Rev., 130(2002) 3022
- 4) Zhu, T. & D.-L. Zhang: J. Atmos. Sci., 63(2006) 109
- 5) Kondo, J.: Boundary-Layer Meteor., 9(1975) 91
- 6) Nasuno, T. & M. Yamasaki: J. Meteor. Soc. Japan, 75(1997) 907

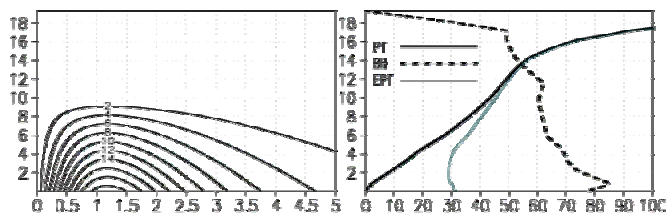


図1 初期の風速分布（左図：コンター間隔:2m/s）と温位、相対湿度、相当温位のプロファイル（右図）。温位は太い実線（+300K）、相対湿度は点線（%）、相当温位は細い実線（+300K）。

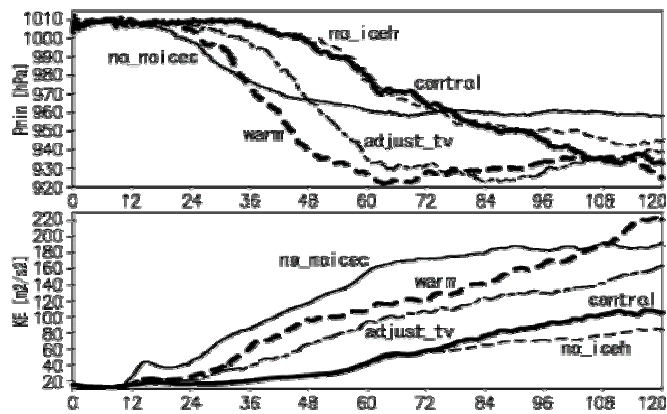


図2 中心気圧、半径 300km 以内の領域平均した運動エネルギーの時系列。太い実線が control、太い点線が warm、細い実線が no_icec、細い点線が no_iceh、一点鎖線が adjust_tv である。

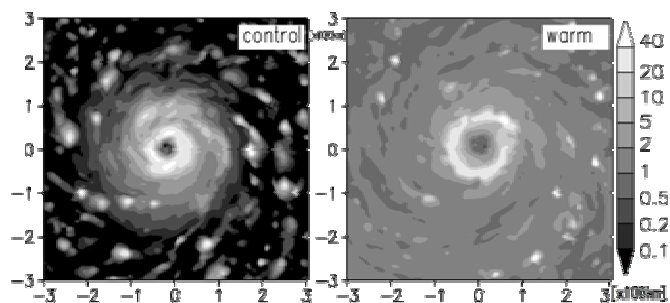


図2 全凝結物（雲水、雨水、雲氷、雪、霰）の鉛直積算量[kg/m³]。計算領域中心から 300km 四方を示す。左側が control、右側が warm。

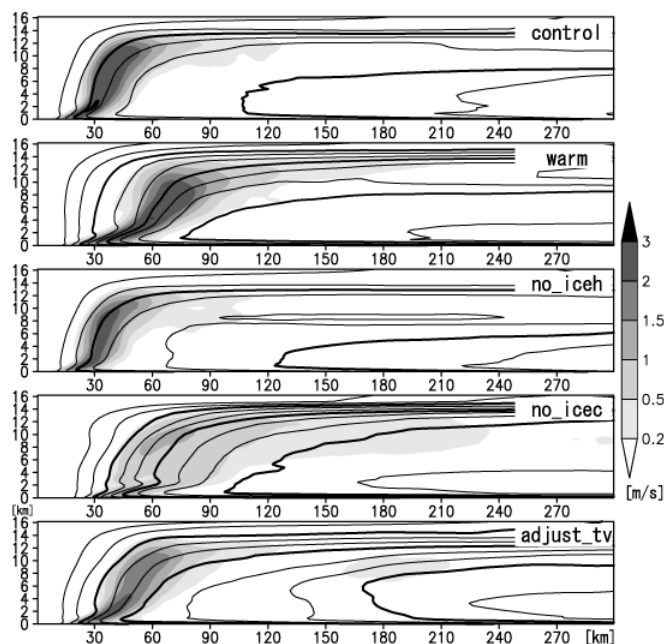


図3 時間、軸平均した絶対角運動量（コンター間隔: $5 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）と上昇流[m/s]の高度-半径断面図。T=114-120h で平均。上から control, warm, no_iceh, no_icec, adjust_tv である。

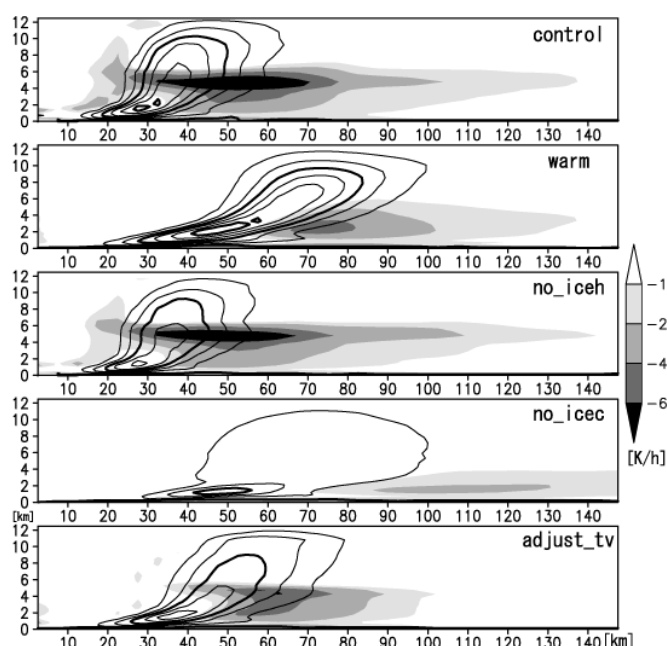


図4 図3 と同様。ただしコンターは相変化による加熱率（10K/h 間隔）、陰影が相変化による冷却率である。