

佐呂間町で発生した竜巻をもたらした積乱雲の 再現実験（雲解像モデルによる）においてスーパーセルを確認

気象研究所では集中豪雨や竜巻などの顕著な大気現象を解明するために雲解像モデルの開発を行っています。その雲解像モデルを用いて、11月7日に佐呂間町で発生した竜巻をもたらした積乱雲の再現に成功しました。再現された積乱雲は、対となった強い上昇流域と下降流域を伴うといったスーパーセルの特徴を持っていました。佐呂間町で発生した竜巻はそのスーパーセルに伴って発生したと考えられます。

雲解像モデルは1～2 km以下の水平解像度を持つ数値気象モデルの1つで、水物質（雲水・雲氷・雨水・雪・あられ）を直接予報することにより水平スケールが10kmほどの積乱雲を直接表現することができます。また、水平解像度をさらに高めることにより、積乱雲にともなって発生する竜巻やダウンバーストといった顕著な大気現象を再現できる可能性があります。

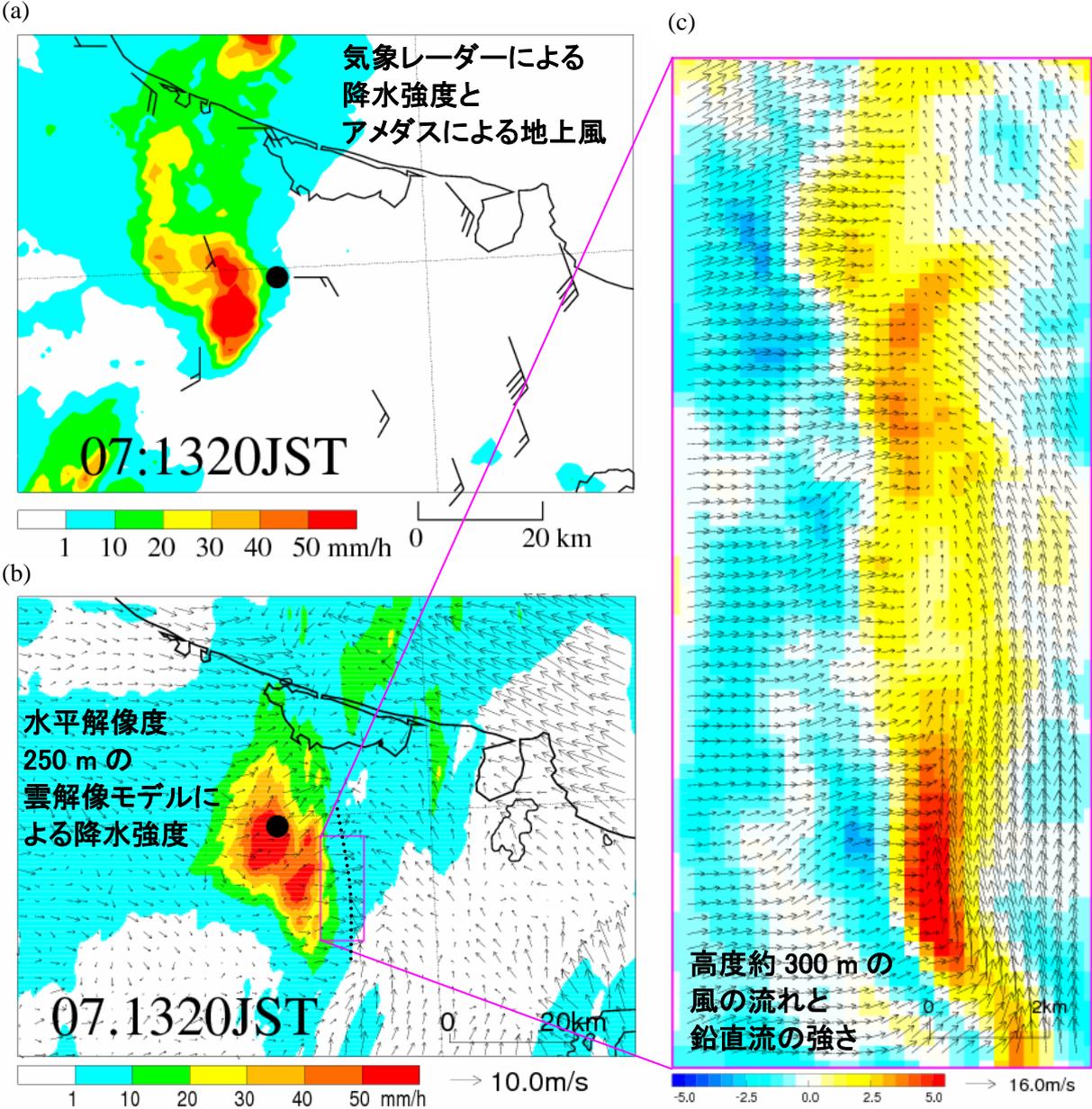
スーパーセルとは、水平スケールが数十 km となる巨大な積乱雲です。スーパーセルでは、特に強い上昇流域が形成され、降水物質（雨や雪など）が上空に吹き飛ばされて、異なる領域に下降流を形成するために上昇流域が維持されて長時間の寿命を持ちます。また、下降流内では雨滴が蒸発することで冷やされて、冷やされた空気は地上で広がり、強い上昇流域に流れ込む空気と衝突し、局地的な前線（ガストフロント）が形成されます。そのガストフロントの位置に、しばしば竜巻が発生するとされています。

水平解像度 250 m の雲解像モデルを用いて、11月7日に佐呂間町で発生した竜巻をもたらした巨大な積乱雲の再現を試みました。再現された積乱雲は、気象レーダーで観測されたものと同様の形状を持ち、再現された位置は観測と比べて約 10 km 東側でしたが、時刻は一致しました。また、積乱雲の内部には強い上昇流域と顕著な下降流域を合わせ持ち、ガストフロントが存在していることから、スーパーセルの特徴を持っていました。このガストフロントの上空には、渦状のものが多数存在していました。11月7日にもこのようなガストフロント及びその上空にこのような多数の渦状のものが存在していた可能性があり、その1つが竜巻になったのではないかと考察しています。今後、雲解像モデルの水平解像度をさらに高めて、竜巻そのものの再現を試み、竜巻発生の原因を究明したいと考えています。なお、台風13号の接近時（9月17日）に延岡で発生した竜巻をもたらした積乱雲の再現にも取り組んでいますが、それらしい積乱雲の再現には至っておらず、今回の再現実験のような結果が常に出るとは限りません。

本件に関する問い合わせ先
気象庁気象研究所企画室
TEL : 029-853-8535

雲解像モデルによる再現結果の概要

佐呂間町で発生した竜巻は、発達した積乱雲の東側に接するように発生しました（下図(a)）。しかし、アメダスによる地上風だけでは、風の流れの状態を把握することができません。水平解像度 250 m の雲解像モデルが再現した地上付近の風の流れ（下図(b)）を見ると、再現された積乱雲からの外出流と南よりの風が積乱雲の東側で衝突し、前線（ガストフロント、位置を点線で示す）を作り出している様子が分かります。また、ガストフロント上空（下図(c)）では、複数の渦状のものが存在し、その1つが選択されて上空に引き伸ばされることで竜巻が発生したと考察しています（積乱雲の再現位置が東に約 10 km ずれていることを考慮して下さい）。再現された積乱雲がスーパーセルの特徴を持っていることについては別紙資料4に示してあります。



(a) 佐呂間町で竜巻が発生する直前（13 時 20 分）の気象レーダーによる降水強度（mm/h）とアメダスによる地上風、(b) 同時刻における、水平解像度 250 m の雲解像モデルによる降水強度（mm/h）と高度 20 m の水平風。竜巻が発生した位置を黒丸●で示す。(c) 高度約 300 m におけるガストフロント付近での風の流れと鉛直流の強さ。(b) のピンク色の領域を拡大。

(別紙資料1)

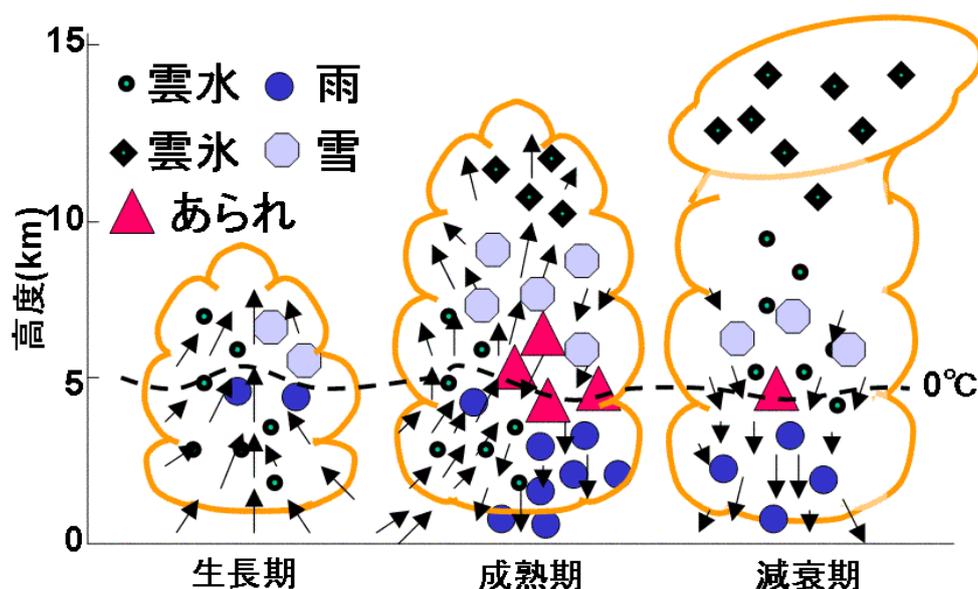
雲解像モデル

積乱雲内では、生長期に上昇流が形成され、その中で水蒸気が凝結し、雲水または雲氷が作られ、それらの衝突等によって雨や雪が作られます(下図の左図)。雨や雪は大きく成長することで上昇流に打ち勝って下降し始め、同時に周囲の空気を引きずり降ろすことによって下降流が形成されます(下図の中図)。そして、積乱雲内では下降流が支配的となり、新たな水蒸気の凝結が起これらなくなって通常の積乱雲は1時間ほどで消滅します(下図の右図)。雲解像モデルでは、このようなライフサイクルに直接かかわる積乱雲内の水物質(雲水、雨水、雲氷、雪、あられ)の生成・消滅の諸過程を取り扱って降水を予想しています。

また、水平スケールが10 kmほどの積乱雲を表現するためには、その中を幾つかに分割して取り扱う必要があり、具体的には10 kmを5～6に分割するために1～2 km以下の水平解像度が必要だとされています。そのようにすることで、積乱雲内の上昇流域や下降流域を分離でき、下図に示す積乱雲のライフサイクルの各ステージを正確に表現することができます。

さらに、水平解像度を100 m以下にすることによって、積乱雲にともなって発生する竜巻やダウンバーストといった顕著な大気現象を再現できる可能性があります。気象研究所では、雲解像モデルを用いることで、それらの発生メカニズムの解明についての研究を進めたいと考えています。これらの研究成果は、顕著な大気現象のポテンシャル予報という形で気象業務への貢献が期待されています。

積乱雲のライフサイクルの各ステージにおける構造



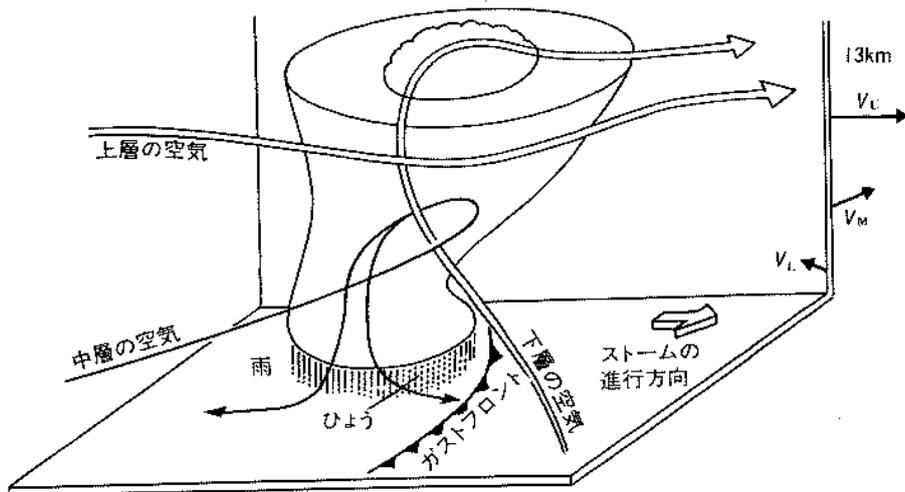
(別紙資料2)

スーパーセル

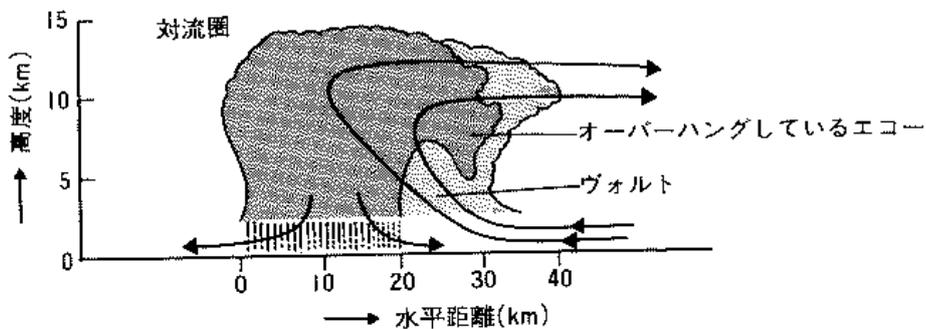
スーパーセルとは、以下の特徴を併せ持つ巨大な積乱雲です。

- ・ 水平スケールは数十 km です
- ・ 寿命は、通常の積乱雲 (~ 1 時間) と異なり、数時間と長寿命です
- ・ 巨大な上昇流と下降流からなる単一の循環が卓越しています (下図(a))
- ・ 上昇流が強いため、内部にヴォルト (「丸天井」の意味します) が存在します (下図(b))
- ・ ヴォルトの上空に存在しているオーバーハングしているエコー領域下部 (エムブリオカーテン) では、強い上昇流の上端に接しているため氷粒子は上下運動してあられが成長し、ひょうが生成します
- ・ 上空ほど風が強く、時計回りに風向が変化しているときに発生しやすいことがわかっています
- ・ ヴォルトが消えはじめ、下降流が強くなるとしばしば強い竜巻が作られます

(a)



(b)



典型的なスーパーセルの模式図
(一般気象学 (小倉義光著)、東京大学出版会から)

(別紙資料3)

竜巻をもたらした積乱雲の発生環境

竜巻をもたらした積乱雲は、図1右図の赤丸○の位置で発生し、速い速度で北北東進し、13時20分頃に佐呂間町に達しました。12時の天気図(図1左図)を見ると、発生位置は寒冷前線の暖域側で、佐呂間町に積乱雲が達した時刻の雲解像モデルの再現結果でも積乱雲は寒冷前線の暖域側に存在していました(図1右図)。

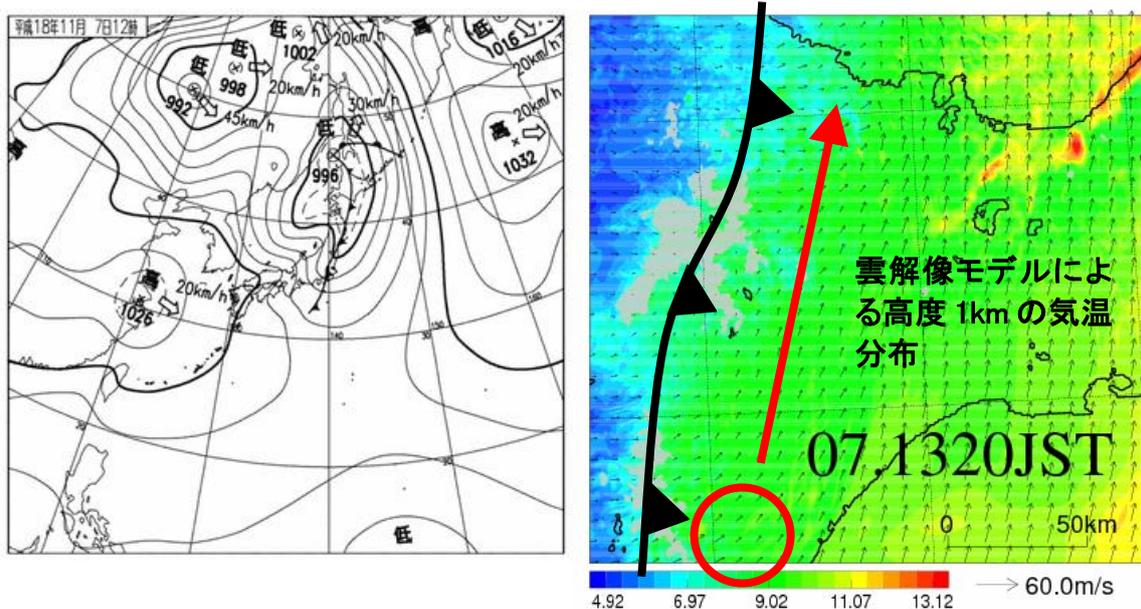


図1 11月7日12時の地上天気図(左図)と水平解像度250mの雲解像モデルによる13時20分での高度1kmの気温分布(右図)。

図2に雲解像モデルが再現した積乱雲の北側の気象状態から作成した風向・風速の変化(ホドグラフ)を示してあります。風向きは高度と共に時計回りに変化して風速も強くなっています。このような気象状態は、スーパーセルが発生するときに見られる特徴です。

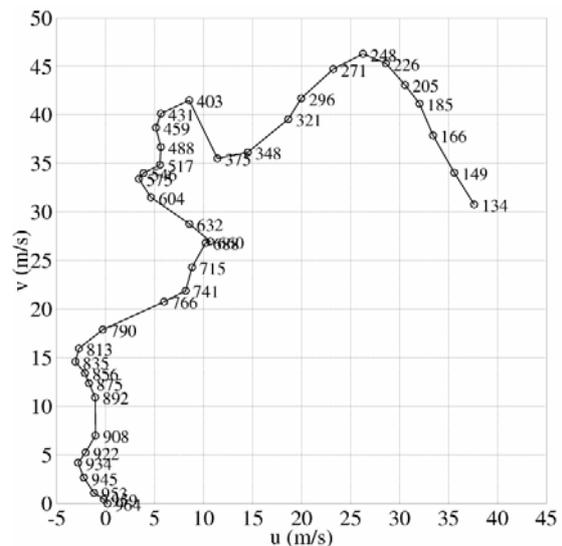


図2 雲解像モデルによる、竜巻をもたらした積乱雲の北側の気象状態から作成したホドグラフ(時刻は12時30分)。高度は3桁の気圧(hPa)で示す。

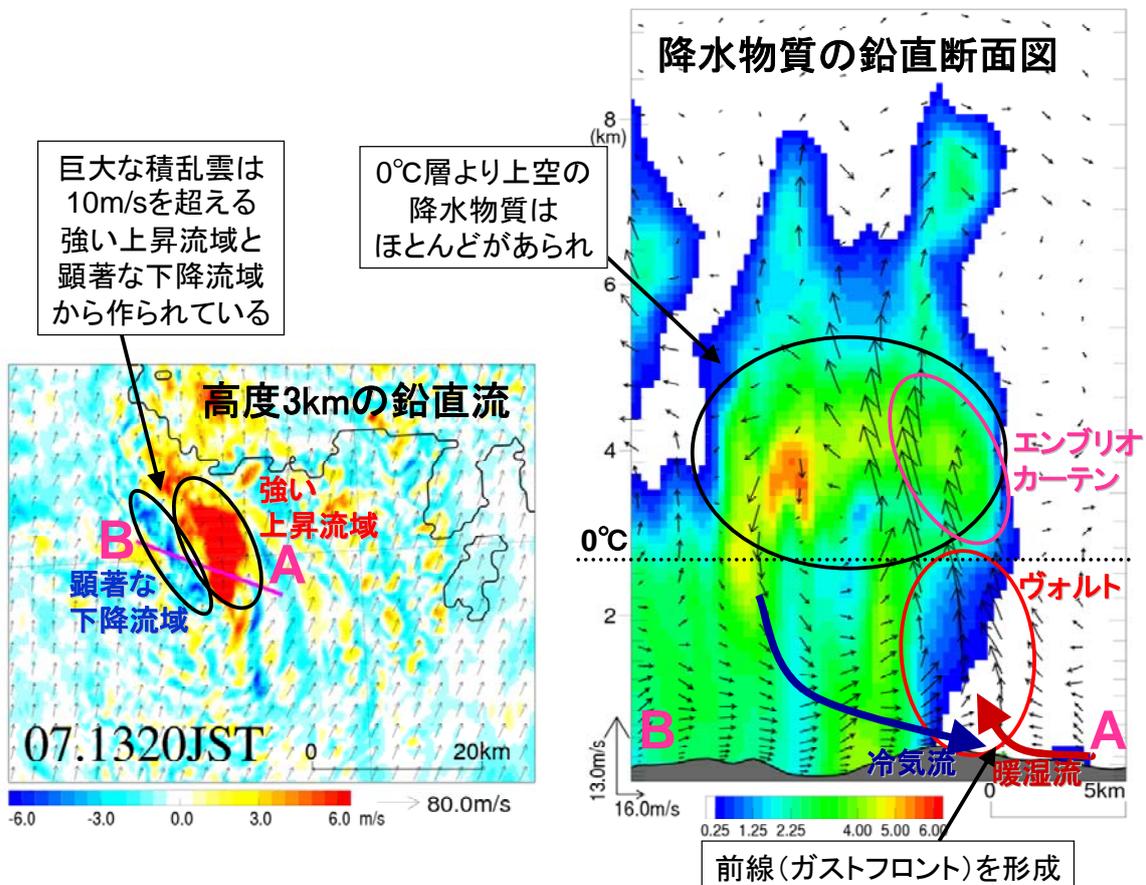
(別紙資料4)

スーパーセルの構造を持った積乱雲を雲解像モデルで再現

雲解像モデルで再現した積乱雲の構造を見てみると、

- ・対となる強い上昇流域と顕著な下降流域が見られます（下図左図）
- ・強い上昇流域の下層には、降水物質が強い上昇流により落下して行くことができない領域（ヴォルト、「丸天井」を意味する）が見られます（下図右図）
- ・その上空には、あられが成長する領域であるエンブリオカーテンが存在しています
- ・0°C層より上空の降水物質はあられで、雪はほとんど存在していません
- ・下降流域では、降水物質の蒸発で空気が冷やされて冷気流が形成されて、南からの積乱雲に流入する暖湿流と衝突し、前線（ガストフロント）が形成されています
- ・強い上昇流内での渦の強さは、スーパーセルの定義とされる $1.0 \times 10^{-2}/s$ よりも大きくなっています（図には示していません）

以上から、雲解像モデルで再現された巨大な積乱雲はスーパーセルの特徴を持っており、佐呂間町で竜巻をもたらした強大な積乱雲はスーパーセルであったと考えられます。



水平解像度 250 m の雲解像モデルによる 13 時 20 分での高度 3km の鉛直流分布（左図）と左図の線分 AB の降水物質の鉛直断面図と空気の流れ（右図）。

(別紙資料 5)

水平解像度の違いによる再現結果の比較

今回、水平分解能 250 m の雲解像モデルを実行するために、最初に水平分解能 5 km の気象庁メソモデルを実行し、さらにその予想値を用いて水平分解能 1 km の雲解像モデルを実行しました。全てのモデルは同一のもですが、雲解像モデルでは気象庁メソモデルと異なり、降水過程の取り扱いが異なります*。

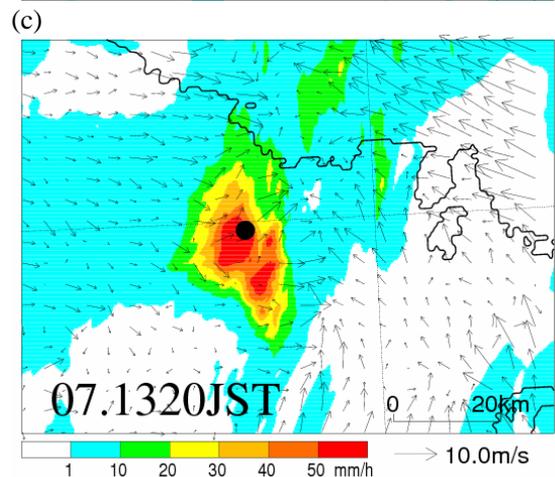
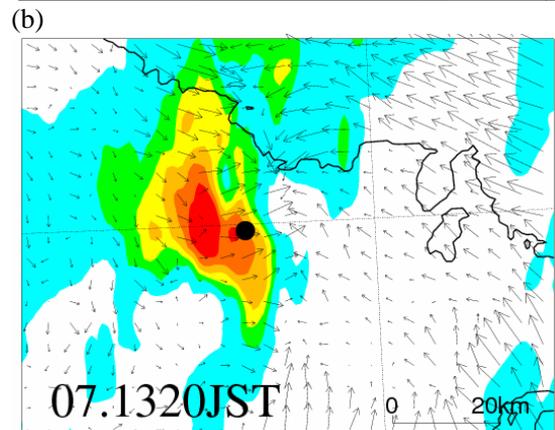
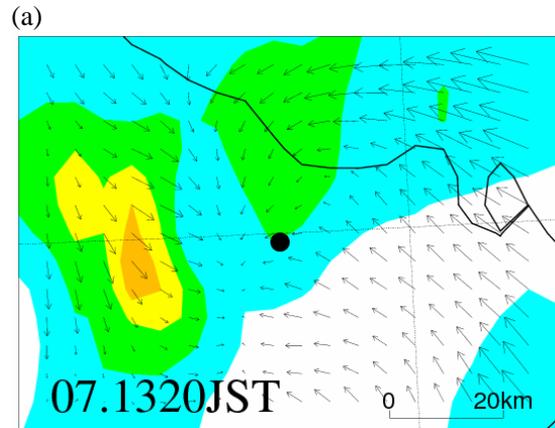
* 気象庁メソモデルでは、別紙資料 1 で示したように積乱雲を直接表現できるだけの水平分解能がありません。そのため、積乱雲の効果を別の方法(積雲対流のパラメタリゼーション)で計算し、降水量を予想しています。

それぞれのモデルによる、佐呂間町で竜巻が発生した時刻の降水強度分布を右図に示してあります。強い降水強度の領域はレーダー観測から見積もられたもの(再現結果の概要を参照)と比べて、水平解像度 250 m (右図(c))ではほとんど一致していますが、水平分解能 1 km (右図(b))では若干広がっています。水平分解能 5 km (右図(a))では、強い降水強度の領域が再現されていません。

これらの違いは積乱雲をどれだけ正確に再現できるかによります。水平分解能 1 km でも再現された降水域が観測とよく一致しているのは、別紙資料 1 で示した理由によるためです。

水平分解能 250 m と 1 km との主な違いは、スーパーセルの東側に形成されるガストフロントでの風の集まる程度(収束)の強さにみられます。そのガストフロント上の領域内で竜巻が発生したと考察していますので、今後さらに水平分解能を高めて、竜巻の再現を試み、竜巻発生の原因を究明したいと考えています。

参考までに、日本全国を覆う領域で、水平解像度 1 km の雲解像モデルを実行するためには現在の気象庁のスーパーコンピュータの約 100 倍(地球シミュレータの約 48 倍)の性能を持つものが必要となります。



(a) 水平解像度 5 km の気象庁メソモデル、水平解像度 (b) 1 km と (c) 250 m の雲解像モデルによる 13 時 20 分の降水強度分布と地上付近の風の流れ。竜巻が発生した位置を黒丸●で示す。