

図41 (a) 1996年7月7日11時30分の現業レーダーで観測した降水強度。注目している降水帯bに組織化する降水帯の位置を赤い楕円で示した。(b) 1996年7月7日11時30分のGPSデータから求めた可降水量の偏差。標高の影響を除くために1996年7月7日00～18時までの可降水量の時間平均を11時30分の値から差し引いた。等値線間隔は1mmである。2mm以上少ない領域を青い影域で示した。(c)と(d)は、(b)内の赤い実線に沿った11時30分の水蒸気量の水平平均からの偏差の鉛直断面図である。(c)と(d)の白い矢印は乾燥した気塊の侵入を示す。

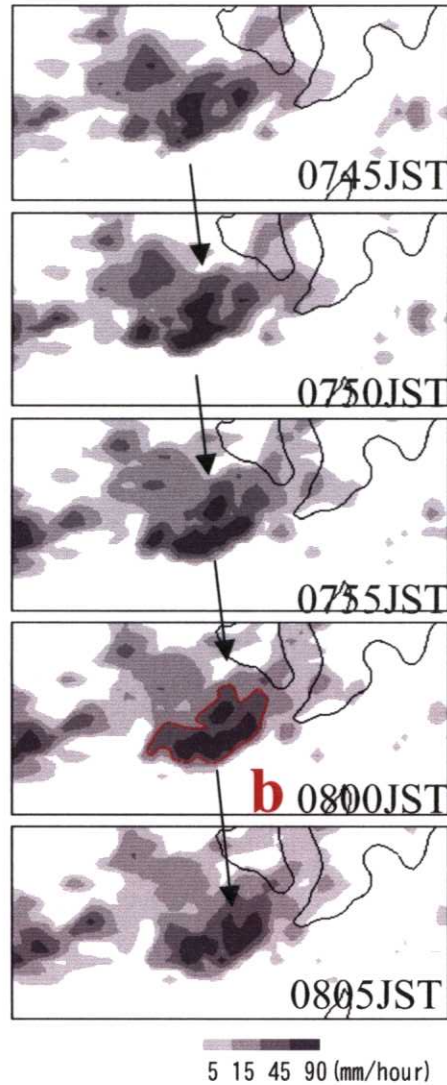


図42 NHMで再現した1996年7月7日7時45分～8時05分 (FT=4h45m～5h05m) の降水強度分布。赤い実線と細い矢印は降水帯 b の位置と移動を示す。

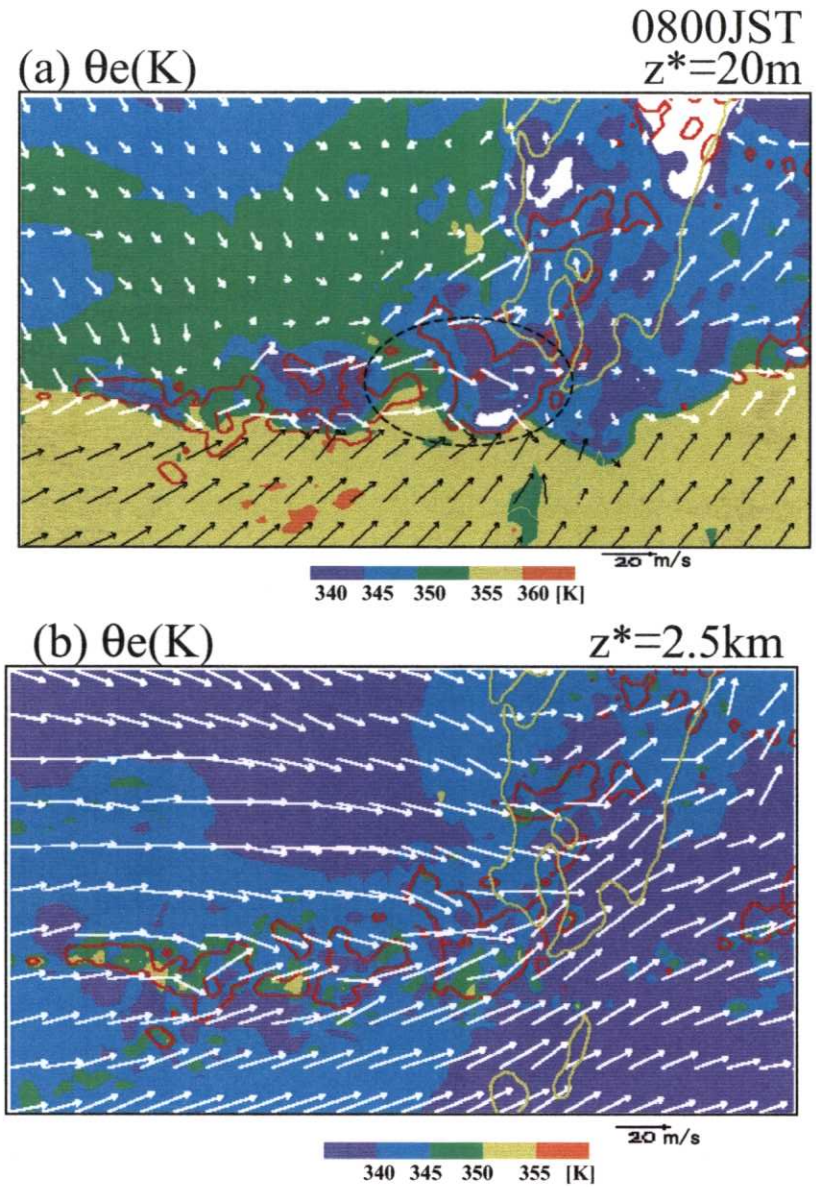


図43 NHMで再現した1996年7月7日8時00分 (FT=5h00m) の (a) 高度20mと (b) 2.5kmの相当温位と水平風の分布。赤い実線は1mm/hour以上の降水強度の降水域、黄色い実線は海岸線である。(a) の破線の楕円は、降水帯 b とその西側の強い北西風や西南西風の領域を示している。

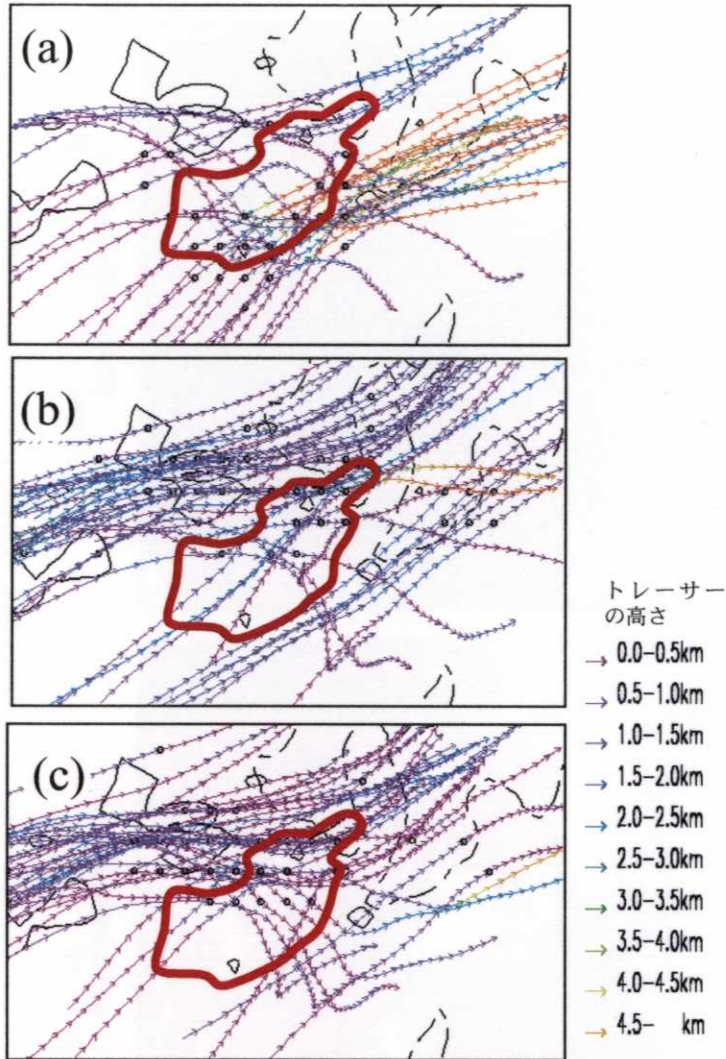


図44 FT=5h00m (8時00分)に空気と一緒に動くトレーサーを降水帯b付近に置き、トレーサーを前後2時間追跡した軌跡。赤い実線は降水域bを示す。(a)は高度1.0kmに置き、前後2時間に2.5km以上上昇したトレーサーの軌跡、(b)と(c)は高度2.0kmと1.0kmに置き、前後2時間に500m以上下降したトレーサーの軌跡を示す。○はトレーサーをFT=5h00m (8時00分)に置いた位置を示す。

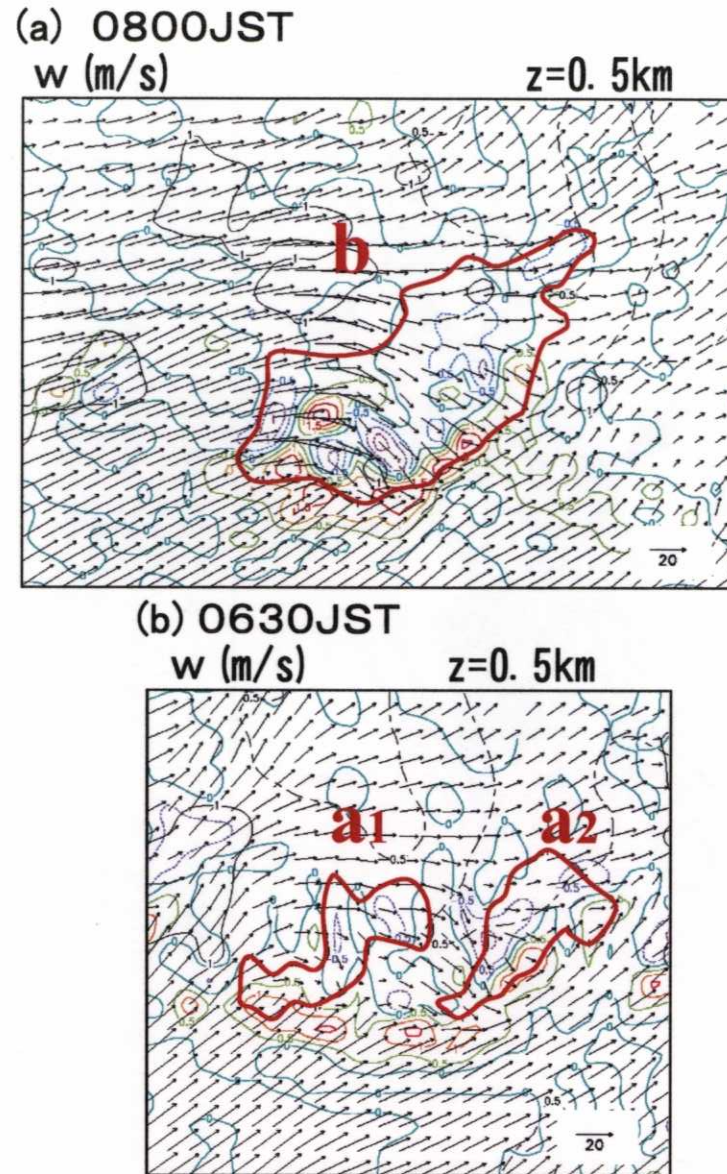


図45 (a) FT=5h00m (8時00分) と (b) FT=3h30m (6時30分) の高度0.5 kmにおける鉛直流と水平風の分布。黒い実線は1mm/hour以上の降水域、破線は海岸線を示す。赤い実線は降水域bとaを示す。

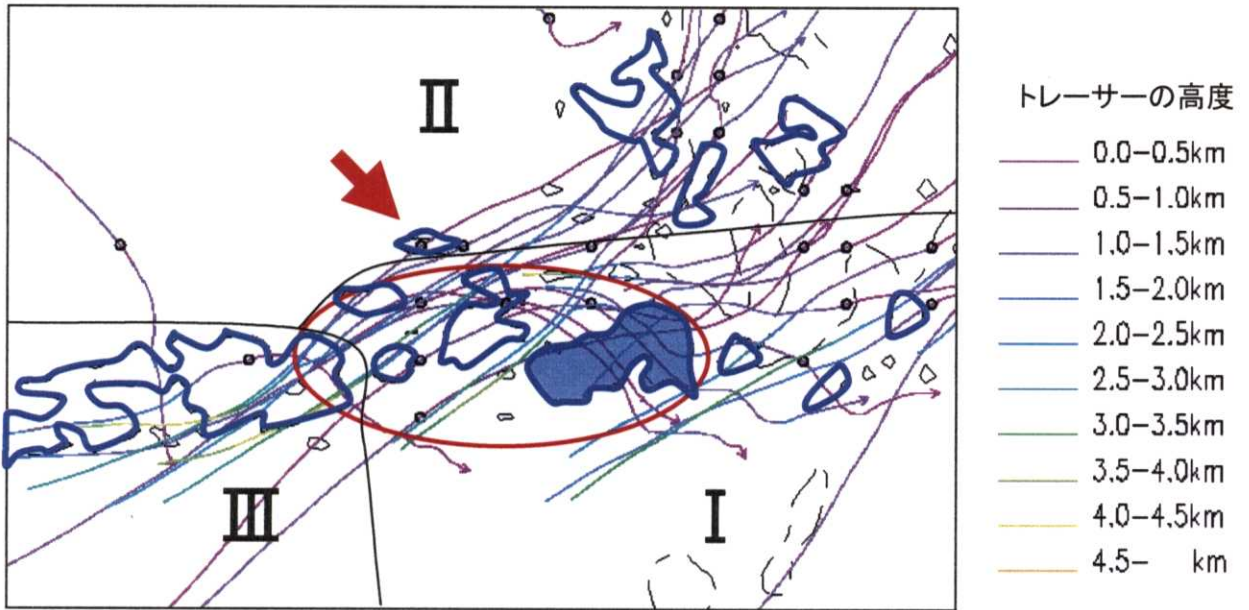


図46 FT=4h00m (7時00分) に500mの高度にあって、FT=1h00mからFT=7h00m (4時00分から10時00分) に500m以上下降したトレーサーの軌跡。小さい○はFT=4h00m (7時00分) でのトレーサーの位置を示す。青い実線はFT=4h00m (7時00分) の降水域を示し、青い影をつけた領域は降水帯bに組織化する降水域である。赤い矢印は衰弱している降水域IIの南西部分の降水域を示す。赤い楕円は、降水帯bの下層に北西側から侵入している気流を示している。

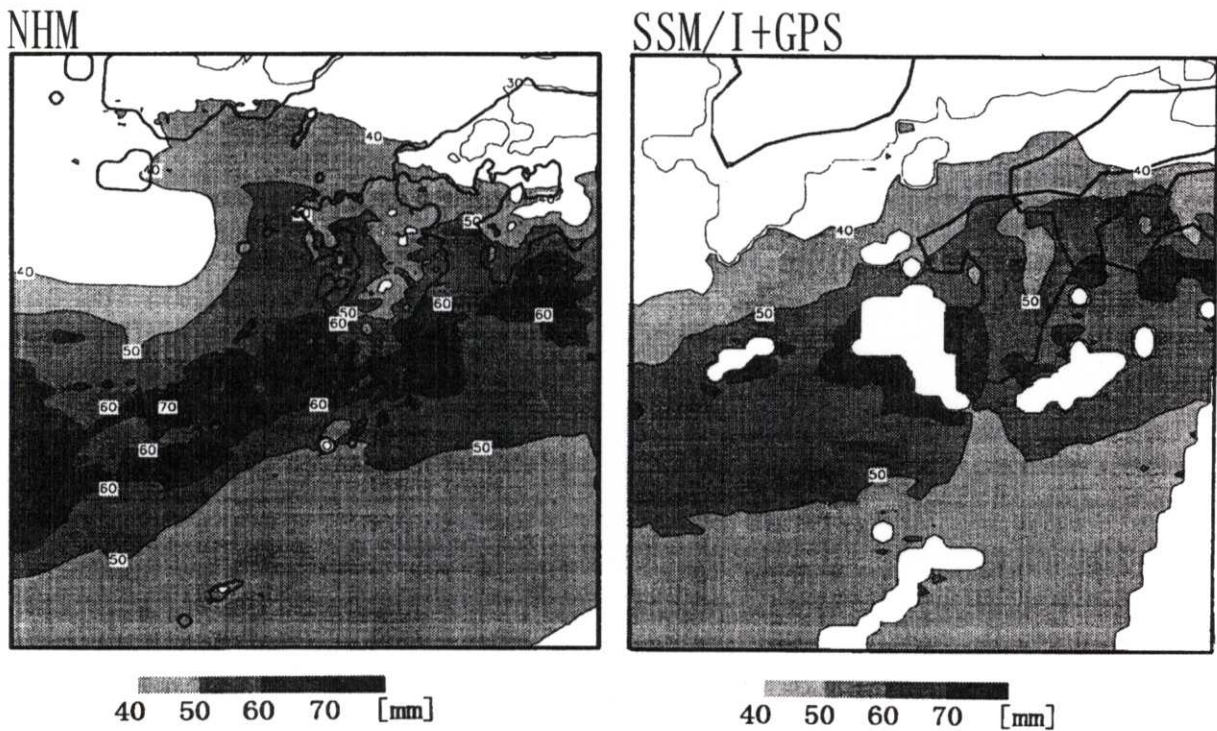


図47 (a) NHMで再現したFT=3h00m (1996年7月7日06時00分) の可降水量分布とほぼ同じ時刻の (b) SSM/I (海上) とGPS (陸上) で観測した可降水量分布。

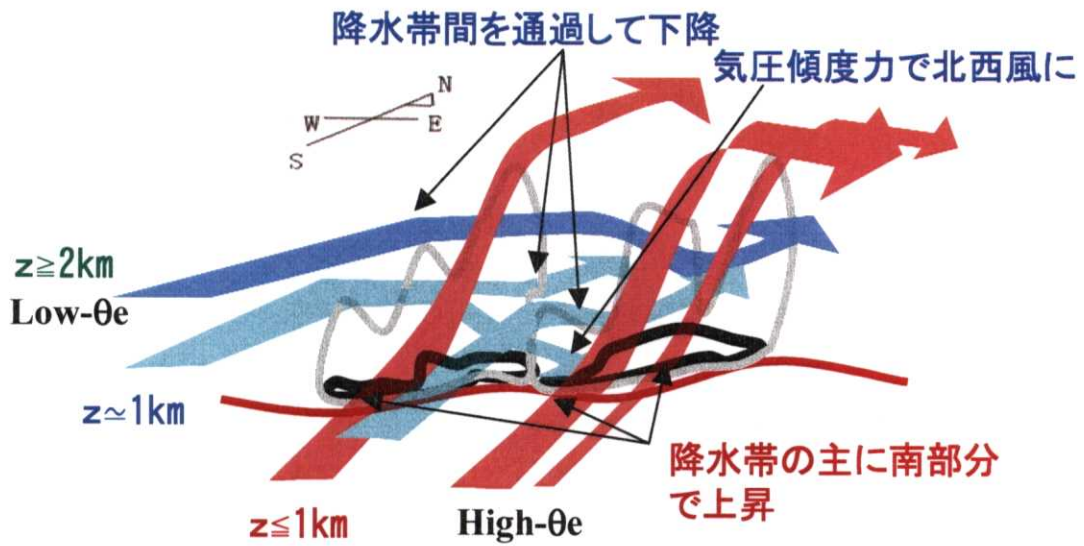


図48 降水帯 a の気流構造を示す模式図。黒い実線は地上の降水帯の降水域、灰色は降水帯の3次元の形状、赤い矢印は降水帯の主に南側で上昇する高相当温位の下層inflow、緑と青い矢印は降水帯の間を通過する気流を示す。

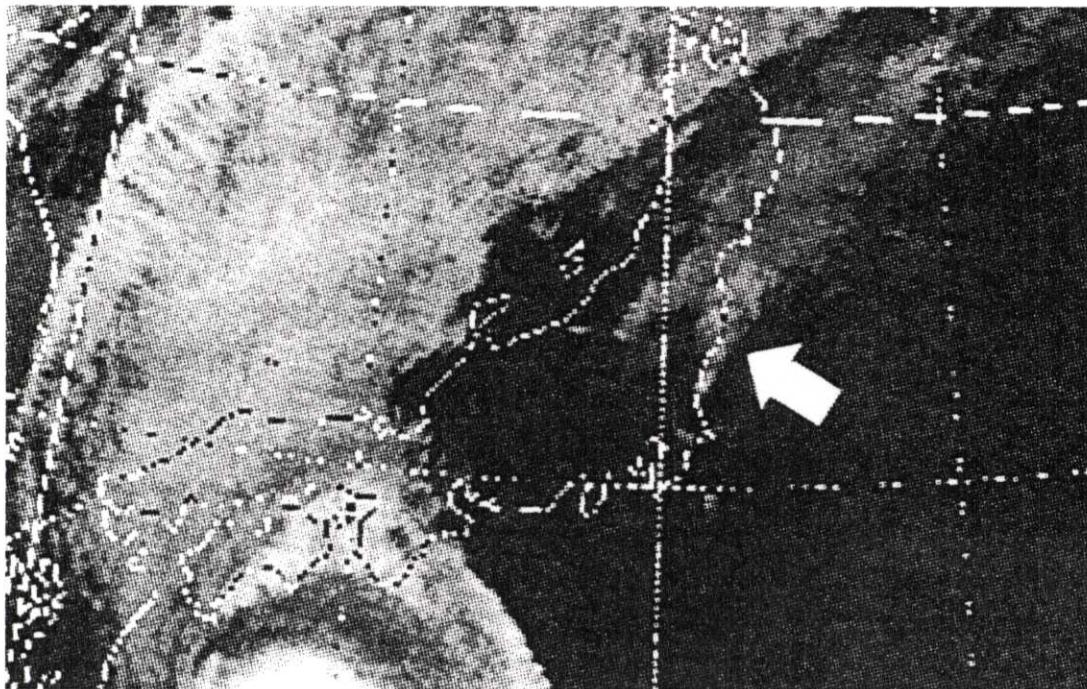


図49 1994年9月29日15時のGMSの赤外画像。白い矢印でニンジン状の雲域を示す。

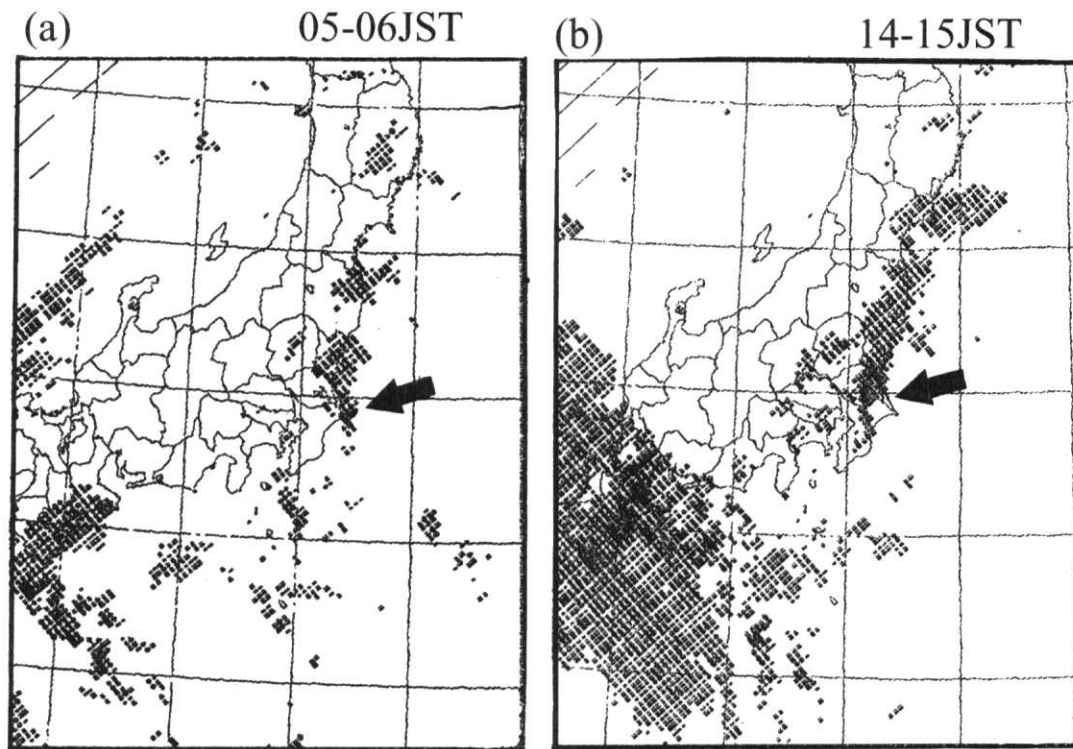


図50 1994年9月29日の(a) 05~06時と (b) 14~15時のレーダーアメダス合成図。ドット域は降水域を示す。矢印はニンジン状の雲域を持つ降水帯を示す。

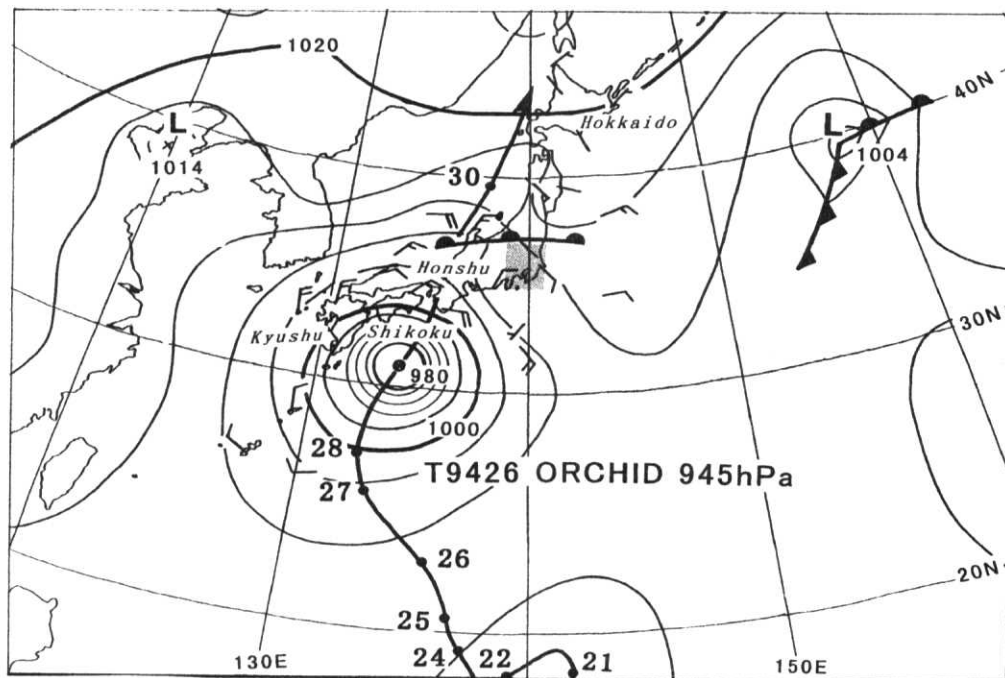


図51 1994年9月29日 (a) 09時の地上天気図。台風9426号 (Orchid) の進路を太い実線で、毎日の09時の台風の位置を●で示す。影域はニンジン状の雲域を持つ降水帯が組織化した関東地方を示す。

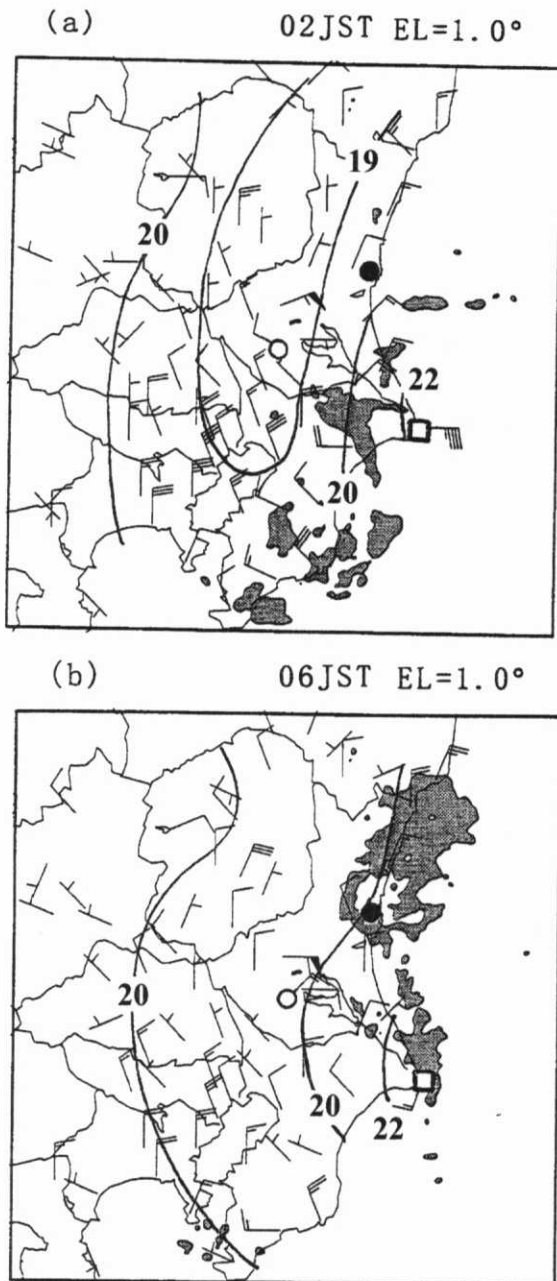


図52 1994年9月29日 (a) 02時と (b) 06時のアメダスで観測した地上の気温(°C)と水平風の分布。影域は、つくばのドップラーレーダーで観測した仰角1度での反射強度20dBZ以上の降水域を示す。矢羽は2m/s、ペナントは10m/sである。実線は地上気温の等温線である。○と●、□はつくばと平磯、銚子の位置を示す。

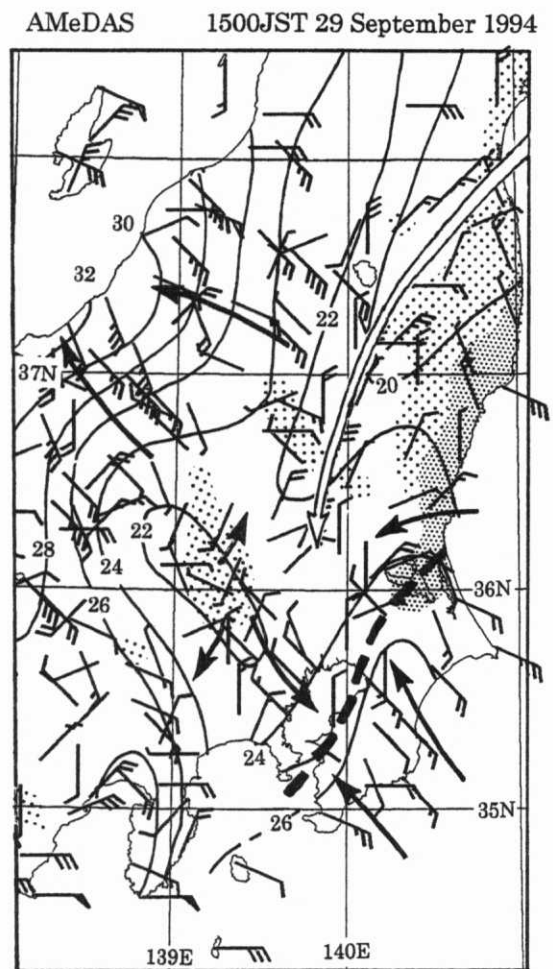


図53 1994年9月29日15時のアメダスで観測した降水域と地上の気温、水平風の分布。濃い(薄い)影域は、10mm/hour(1mm/hour)の降水域を示す。白い矢印は、奥羽山地に沿って南下した北風を示す。矢羽は2m/s、ペナントは10m/sである。太い破線はメソスケール前線を示す。

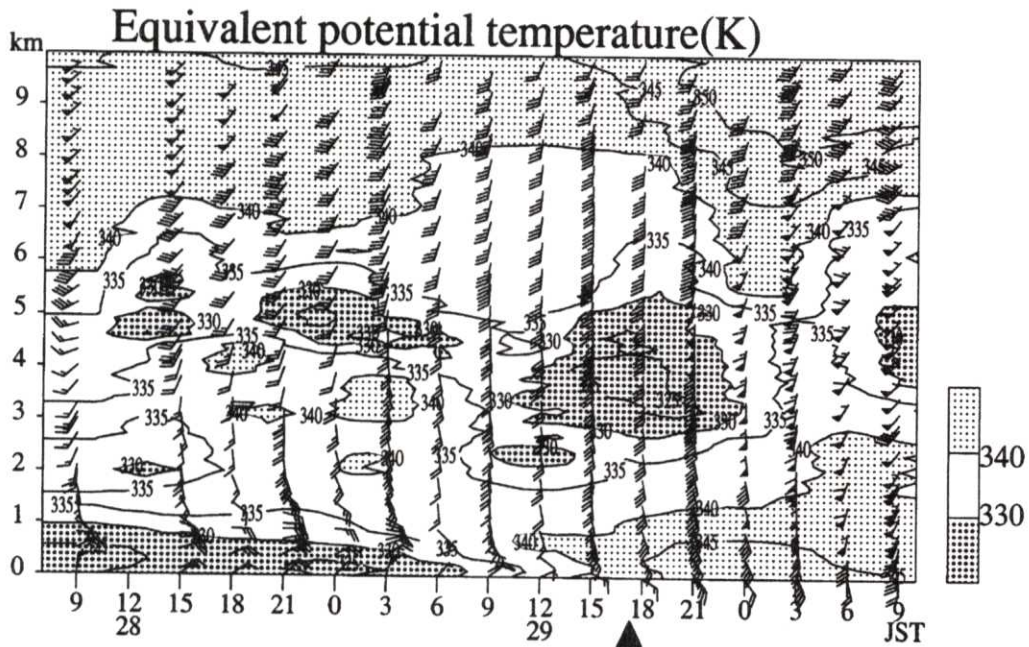


図54 1994年9月28日09時～30日09時までのつくばで観測した高層観測データから作成した水平風と相当温位の時系列。矢羽は5m/s、ペナントは25m/sである。濃い（薄い）影域は、相当温位が330K以下（350K以上）の領域である。▲はメソスケール前線がつくばを通過した時刻を示す。

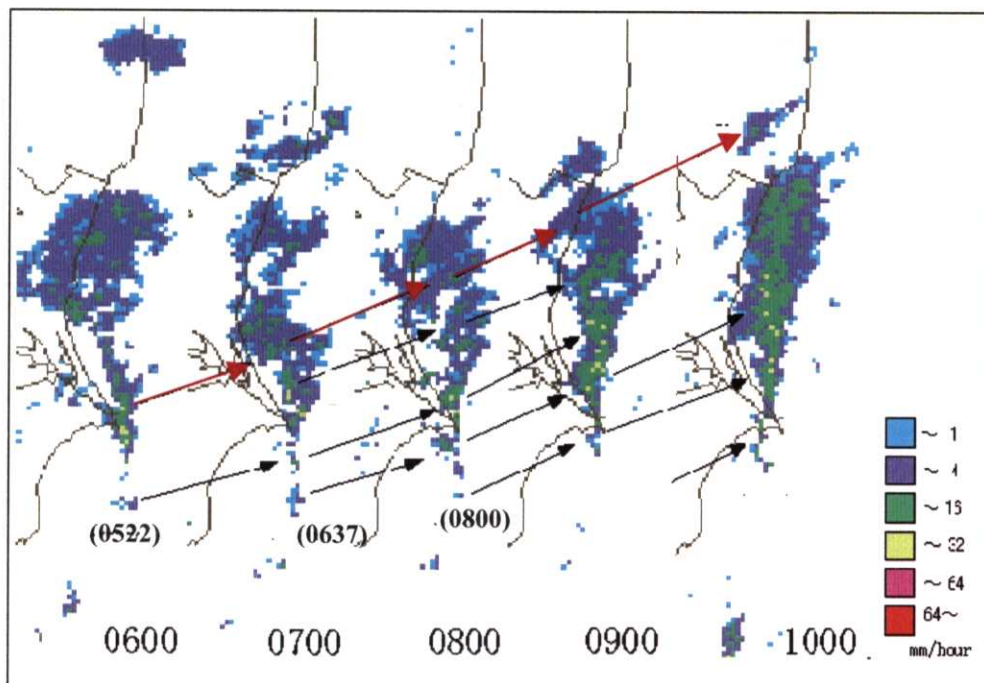


図55 1994年9月29日06時00分～10時00分の現業レーダーで観測した降水強度の時系列。矢印は降水帯の南側の小さい降水域と西側に膨らんだ領域の動きを示す。括弧内の時間は、南側の小さい降水域の発生時刻である。

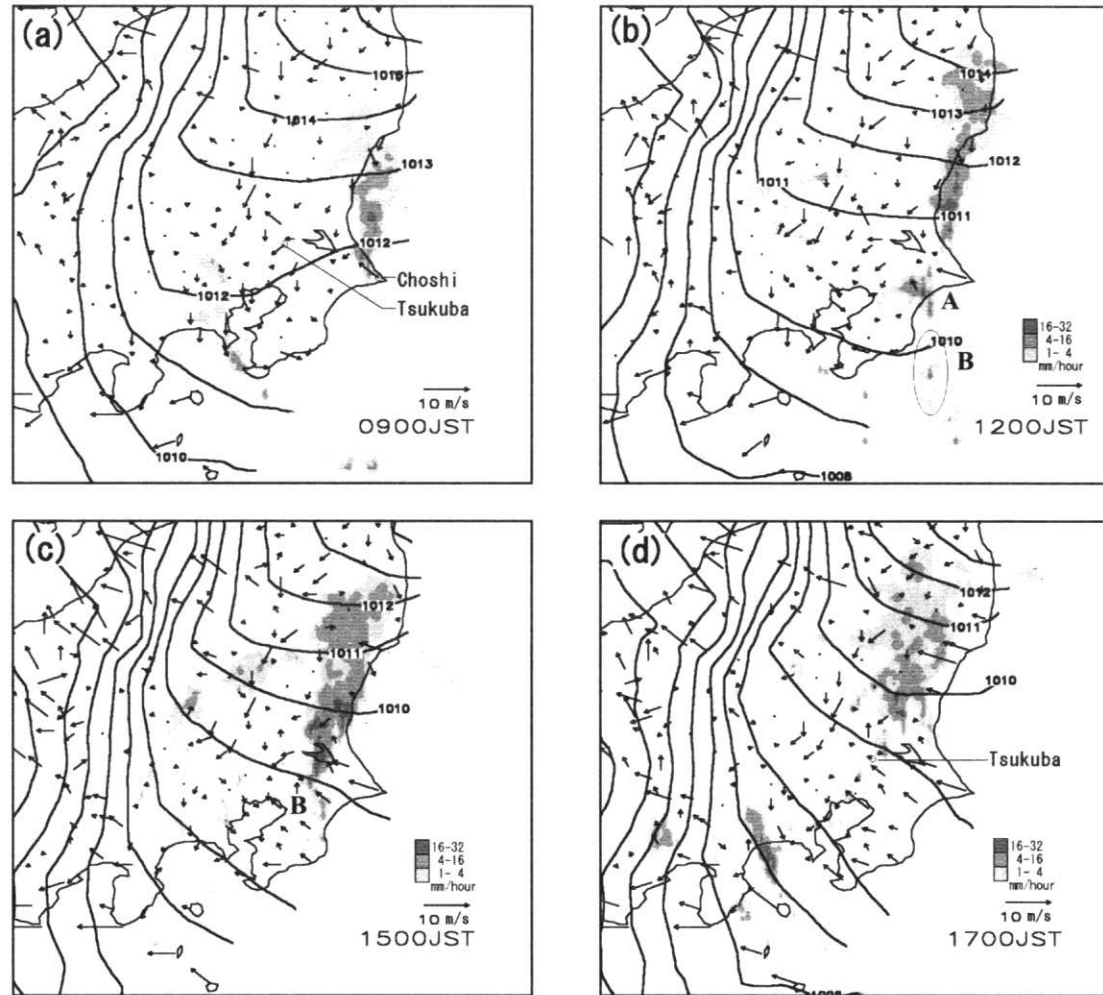


図56 1994年9月29日09時00分～17時00分の現業レーダーで観測した降水強度と地上気圧、アメダスの地上風の分布。地上気圧は気象官署のデータから距離の重み付け平均（影響半径100km）をおこなって格子点値を作成し、描画した。

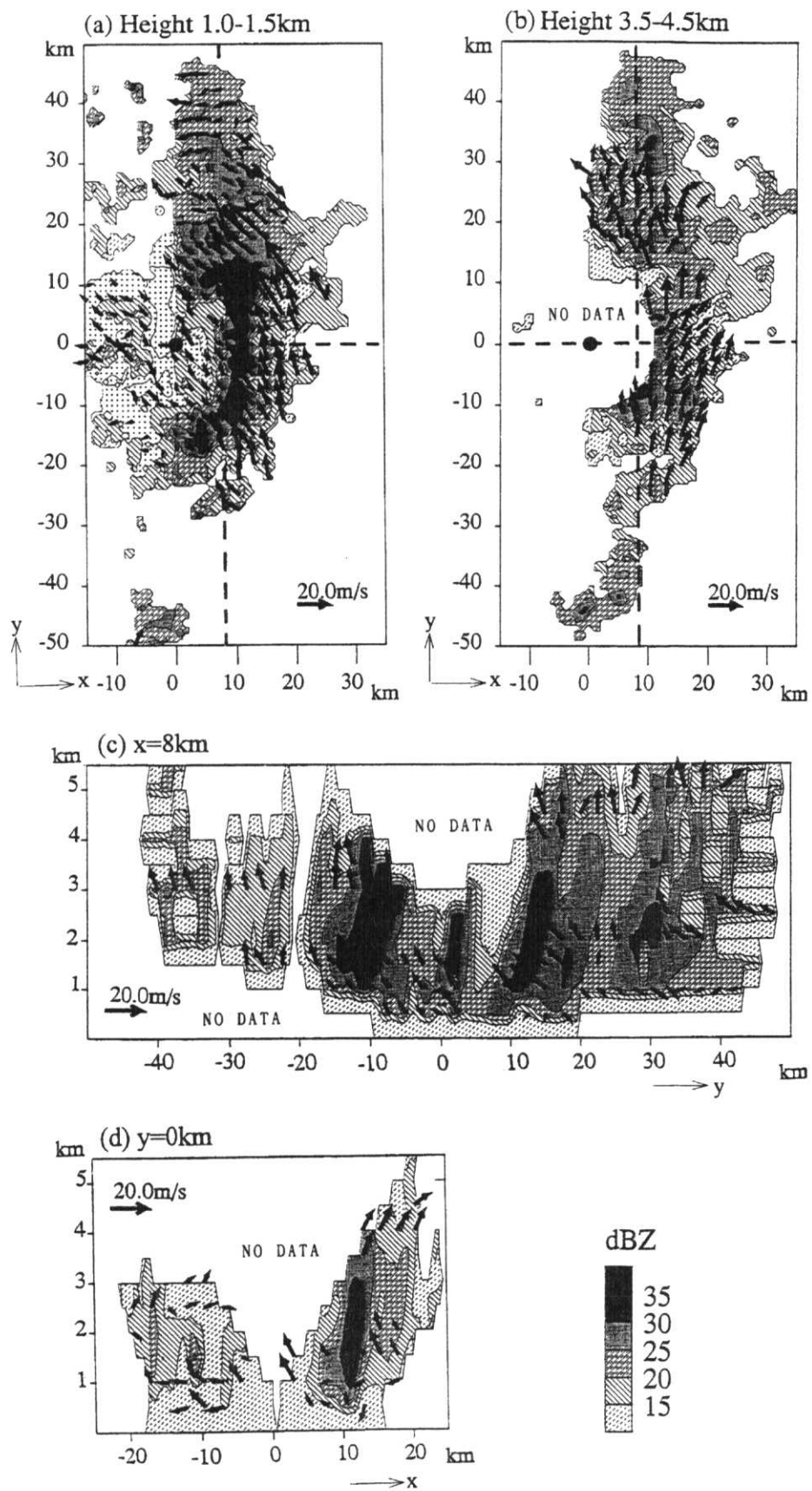


図57 1994年9月29日10時38分の (a) 高度1.0~1.5kmと (b) 高度3.5~4.5kmの水平風と反射強度の水平分布。水平風はつくばと平磯に設置したドップラーレーダーのデータからデュアル解析で求めた。黒い丸は平磯のドップラーレーダーの位置である。(a)と(b)の破線に沿った鉛直断面図を(c)と(d)に示している。

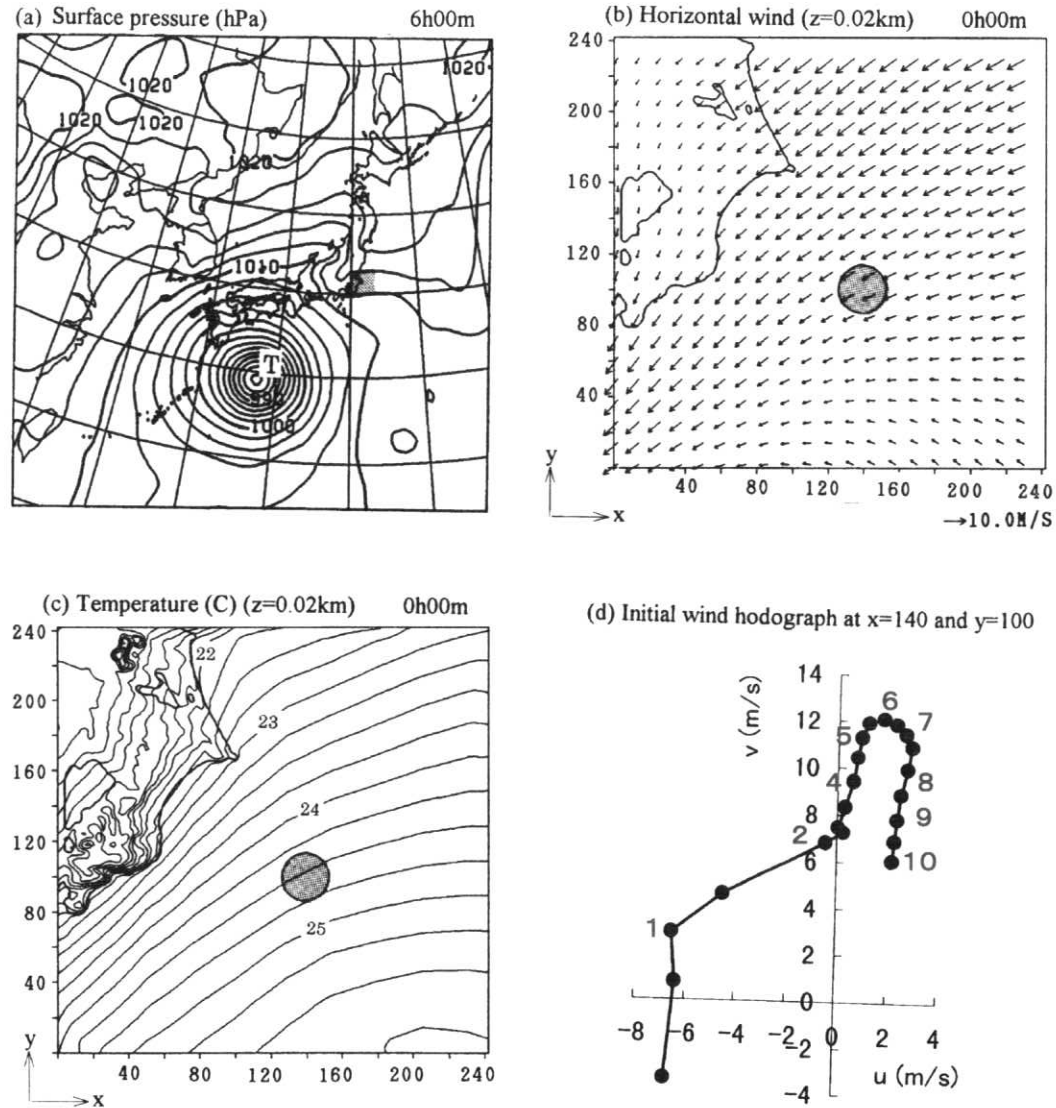


図58 格子間隔約30kmのJSMを28日21時00分から6時間時間積分した (a) 地上気圧と高度20mの (b) 水平風と気温の分布。(a) の影域はNHMの計算領域である。(b) と(c) はJSMの結果を内挿した分布で、NHMの初期値として使用した。(b) と(c) の影域は初期に与えた人工的な浮力の位置と大きさを示している。(d) は人工的な浮力の位置の風のホドグラフである。青い数字は高度(km)を示している。黒い●を高度500m毎に付けた。

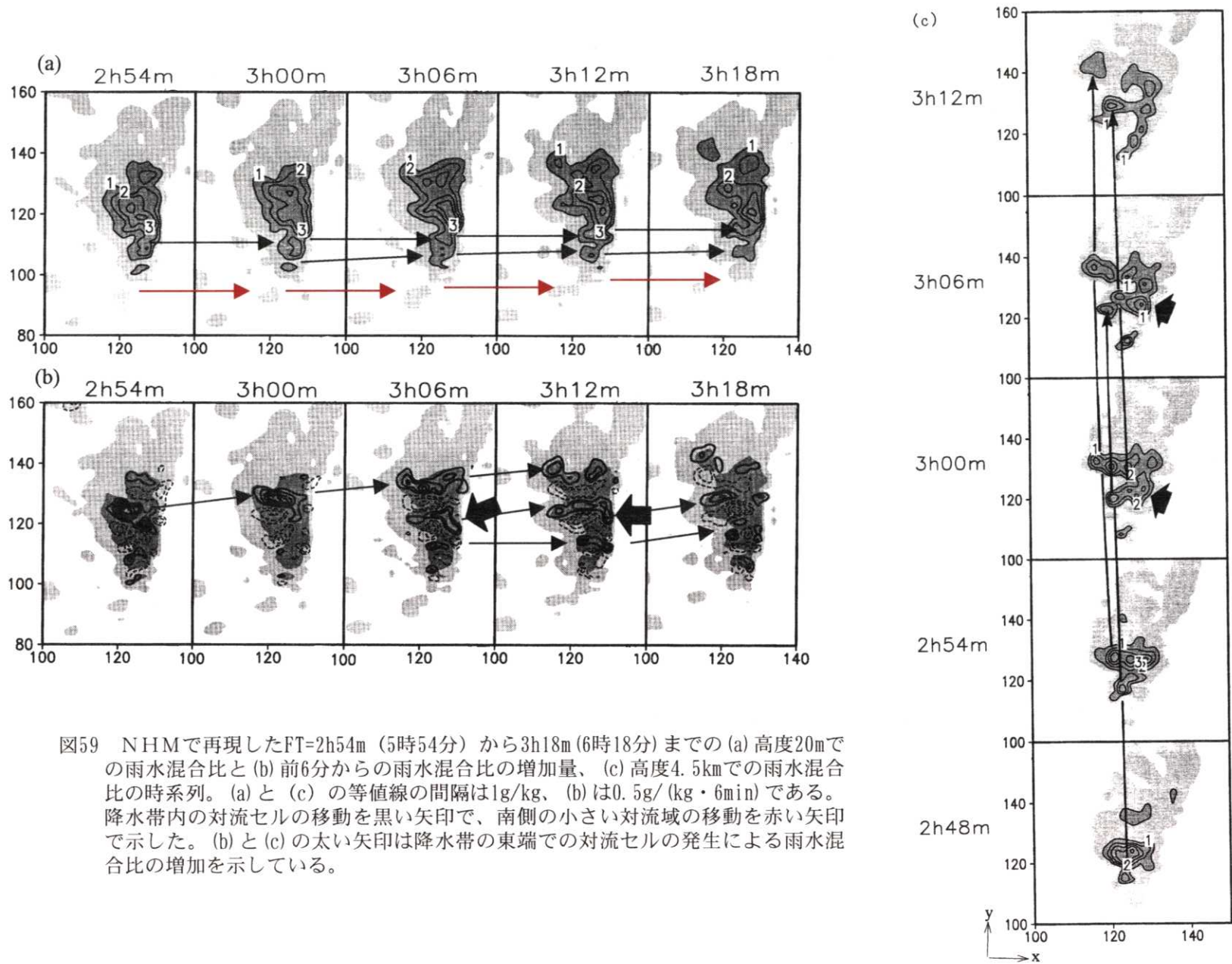


図59 NHMで再現したFT=2h54m (5時54分) から3h18m (6時18分) までの (a) 高度20mでの雨水混合比と (b) 前6分からの雨水混合比の増加量、(c) 高度4.5kmでの雨水混合比の時系列。(a) と (c) の等値線の間隔は 1g/kg 、(b) は $0.5\text{g}/(\text{kg}\cdot 6\text{min})$ である。降水帯内の対流セルの移動を黒い矢印で、南側の小さい対流域の移動を赤い矢印で示した。(b) と (c) の太い矢印は降水帯の東端での対流セルの発生による雨水混合比の増加を示している。

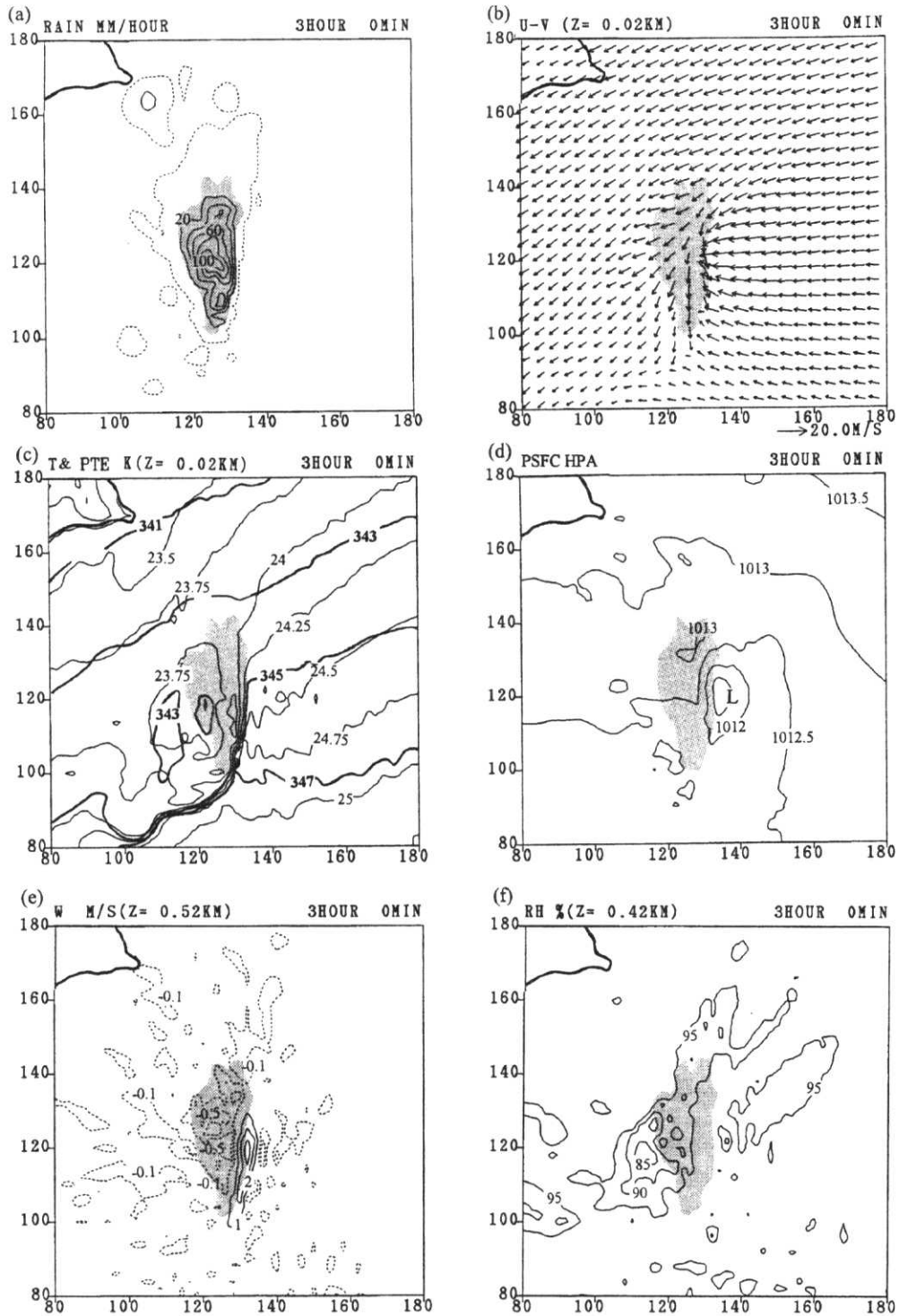


図60 NHMで再現したFT=3h00m (6時00分) の (a)降水強度 (mm/hour)、高度20mの (b)水平風、(c)気温 (°C) と相当温位 (K)、(d)地上気圧 (hPa)、高度0.42kmの (e)鉛直流 (m/s) と (f)相対湿度 (%)。影域は降水強度10mm/hour以上の領域である。左上端の太い実線は海岸線である。

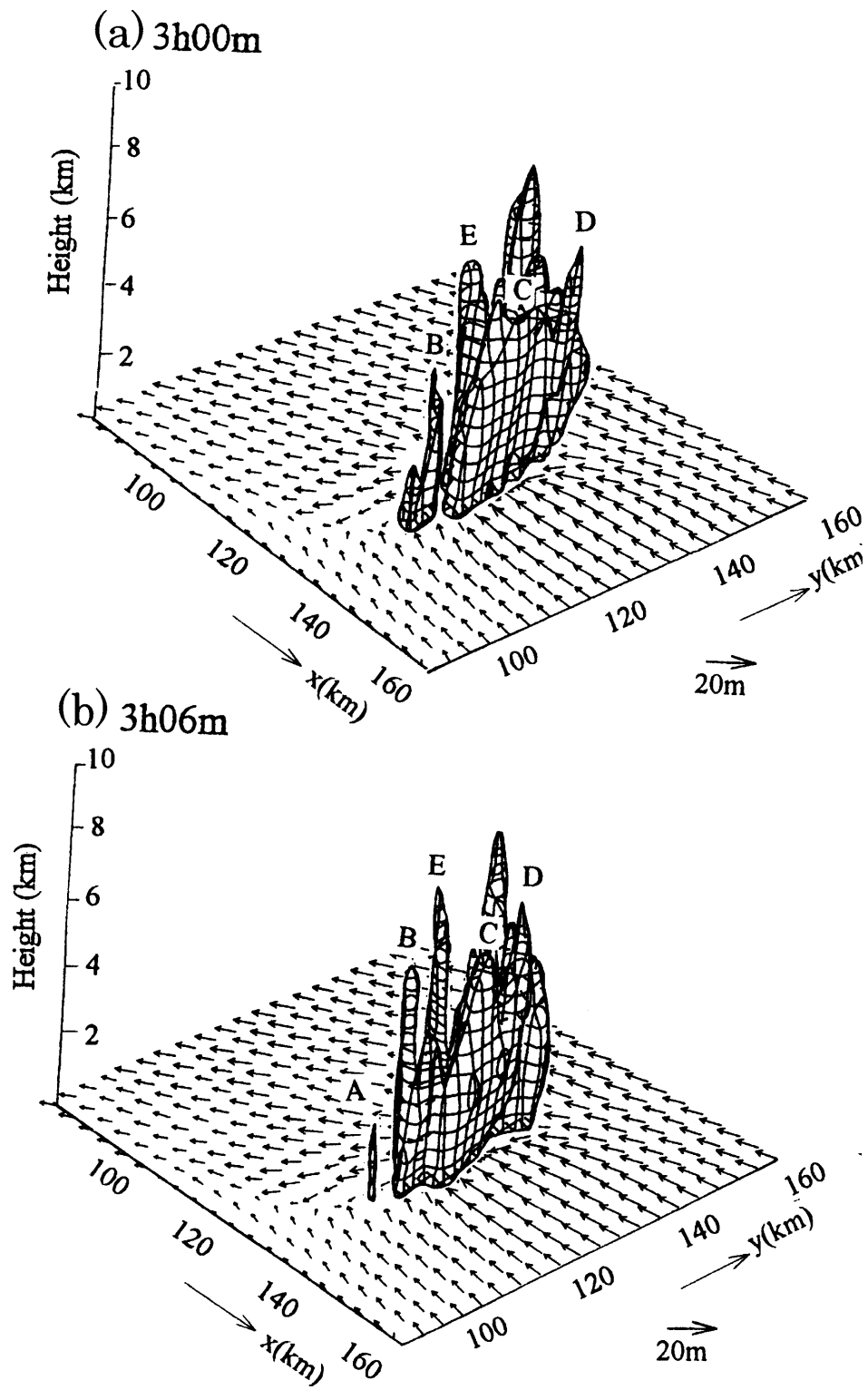


図61 (a) FT=3h00m (6時00分) と (b) FT=3h06m (6時06分) の高度20mの水平風と2g/kgの雨水混合比の等値面。

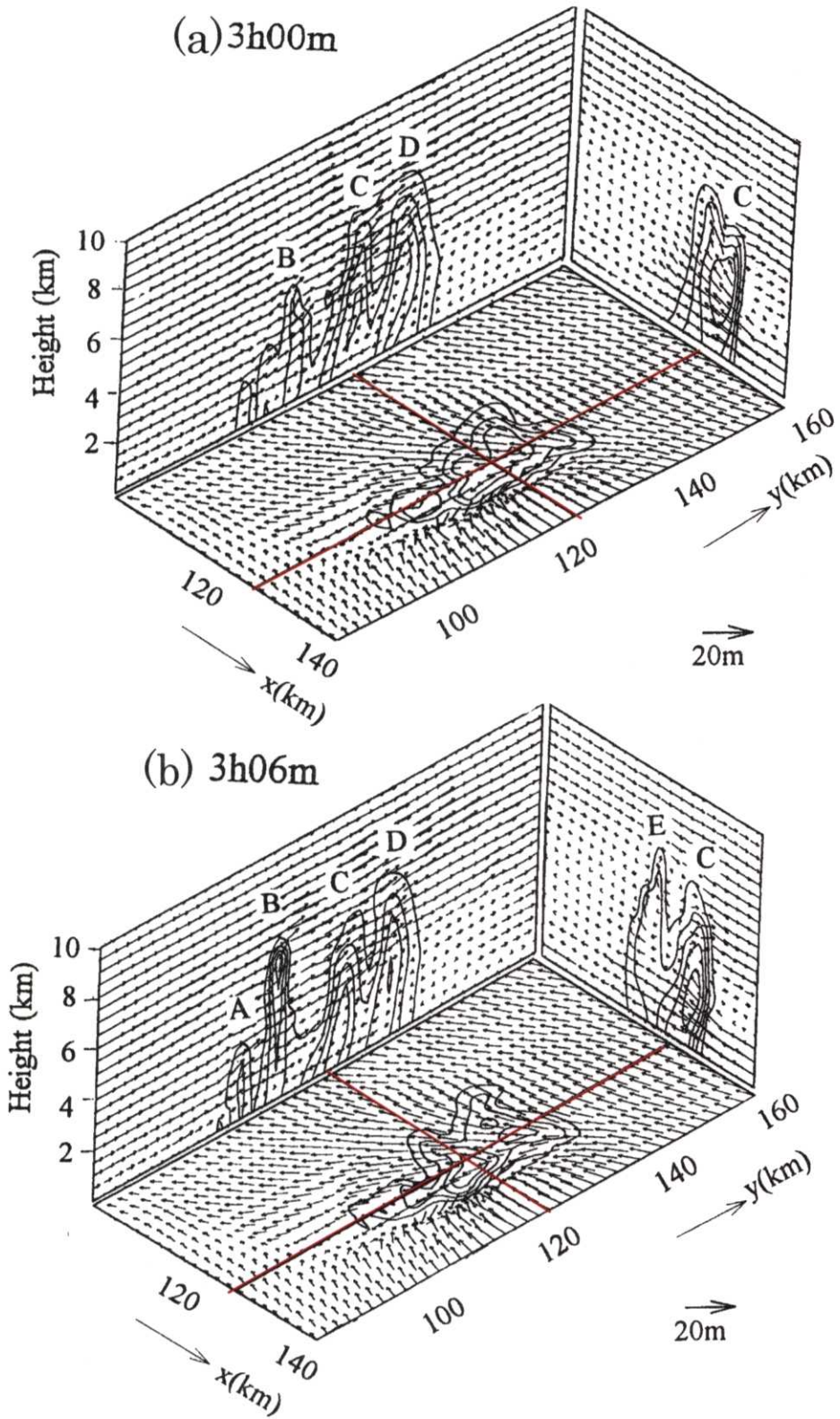


図62 (a) FT=3h00m (6時00分) と (b) FT=3h06m (6時06分) の雨水混合比と風の分布。水平分布は高度20mの分布を示し、鉛直断面図は赤い実線に沿った分布を示している。

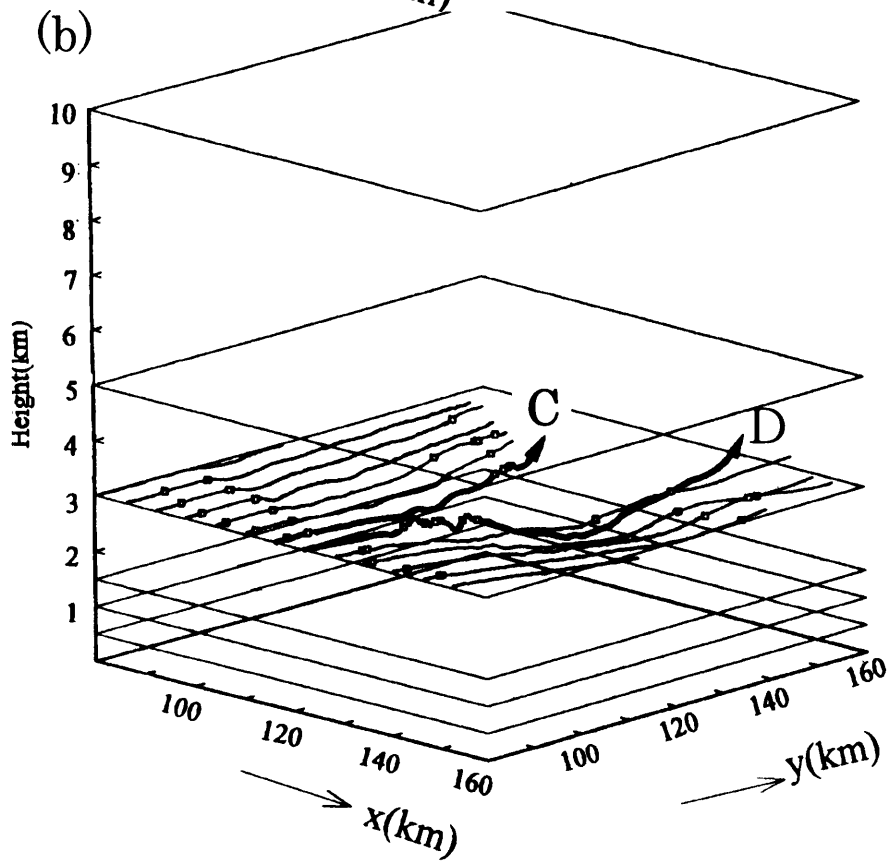
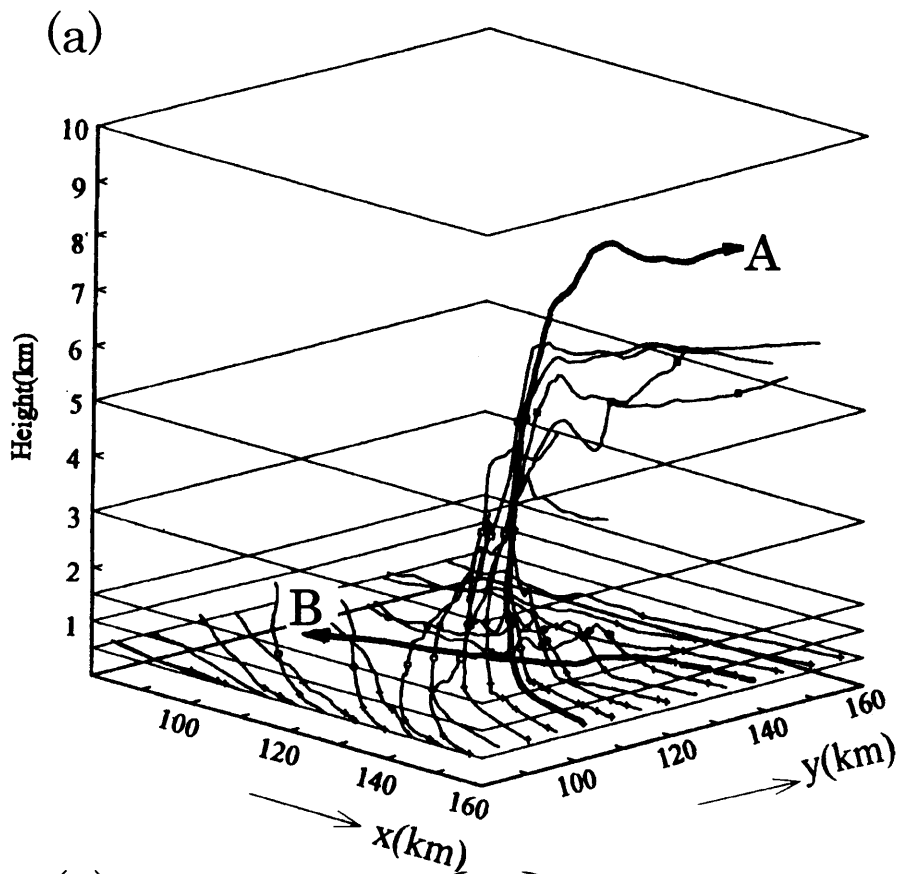


図63 高度 (a) 0.5km と (b) 3.0km の高度からトレーサーを追跡した軌跡。トレーサーは FT=2h00m~4h00m (5時00分~7時00分) の間を追跡した。軌跡上の×, ○, ●, □, ■は高度 0.5km と 1.0km, 1.5km, 3.0km, 5.0km を通過した位置を示す。

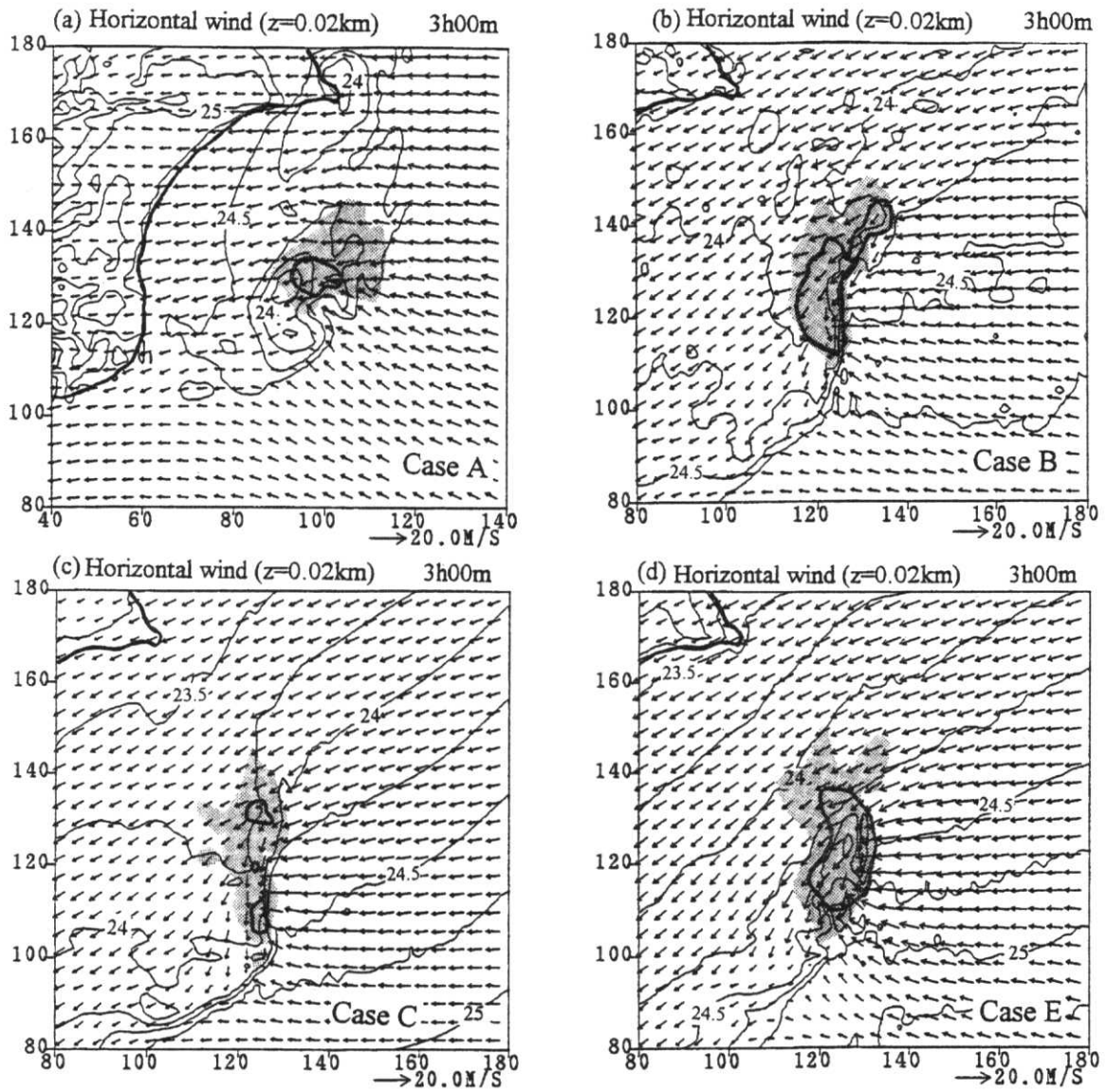


図64 (a) ケースAと (b) ケースB, (c) ケースC, (d) ケースEの降水強度と高度20mの気温、水平風の水平分布。影域と太い実線は3mm/hourと10mm/hourの降水強度の領域を示す。左上端の太い実線は海岸線である。

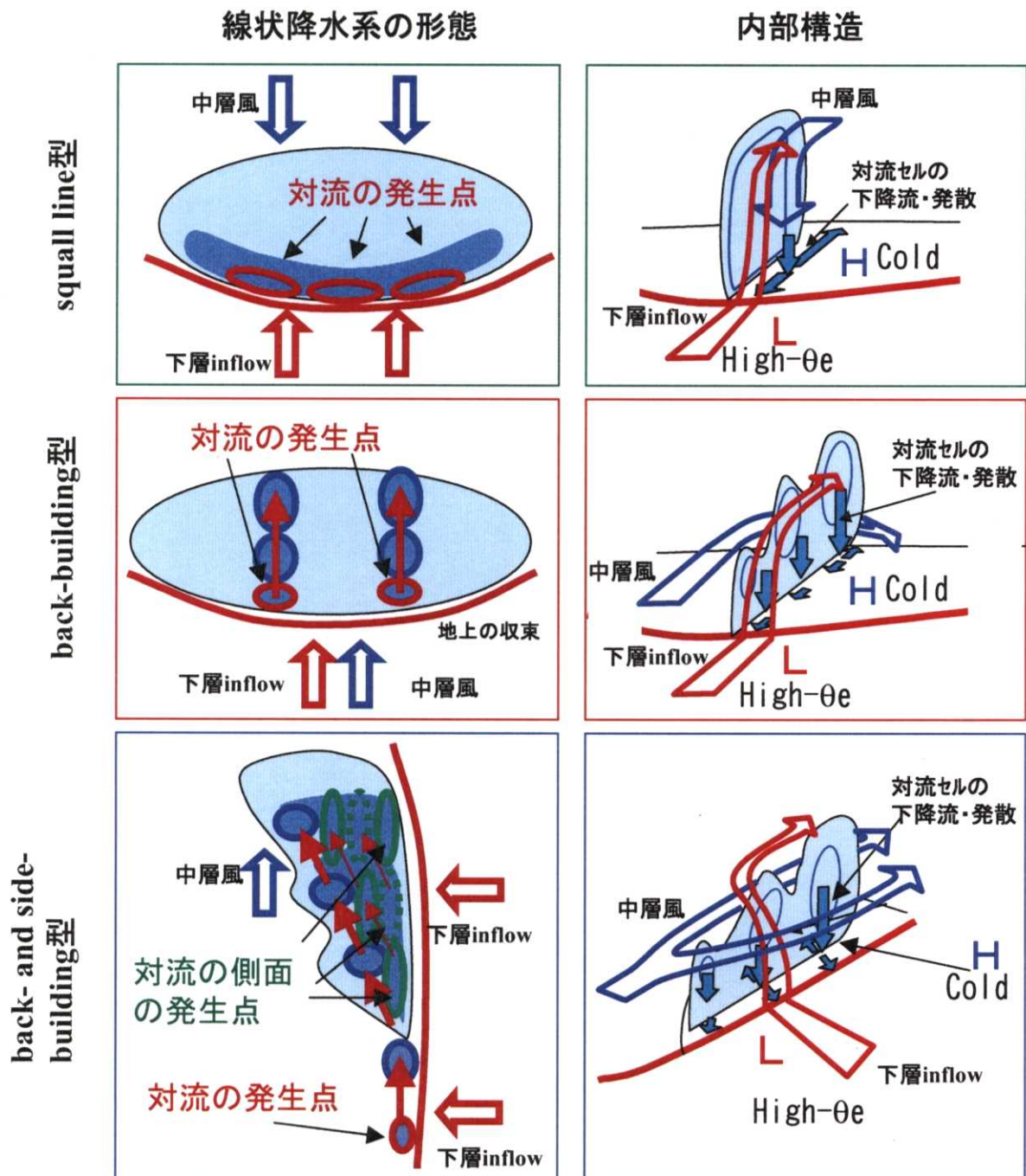


図65 SL型とBB型、BSB型の降水系の形態と内部構造の模式図。左側の図は対流セルの様子である。丸は対流セルを表し、赤い矢印は対流セルの移動を示す。右側の図は降水系の内部構造である。赤と青の太い矢印は下層inflowと中層風を示し、青い矢印は対流セルの下降流と発散する気流である。




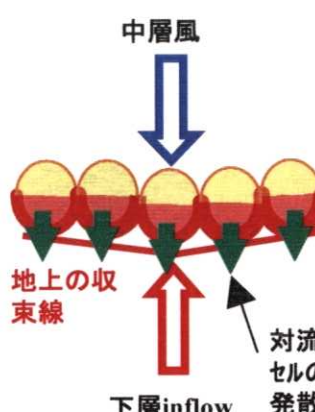
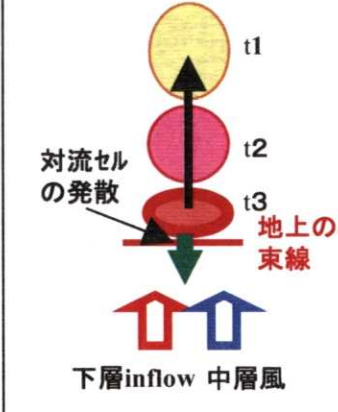
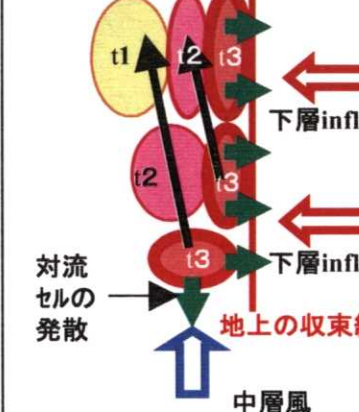
	Squall line 型	Back-building型	Back- and side-building 型
下層風と上層風 の関係	逆方向	同方向	直交方向
対流セルの 移動	 <p>中層風 ↓ 対流の発生点 で固定 ↑ 下層inflow</p>	 <p>t1 ↑ t2 ↑ t3 対流セルは 中層風で 流される。 下層inflow 中層風</p>	 <p>t1 ↑ t2 ↑ t3 対流セルは 中層風で 流される。 中層風 下層inflow</p>
対流セルが 発生する場 所	 <p>中層風 ↓ 地上の収束線 ↑ 下層inflow 対流セルの 発散</p>	 <p>t1 ↑ t2 ↑ t3 対流セルの 発散 地上の収束線 下層inflow 中層風</p>	 <p>t1 ↑ t2 ↑ t3 対流セルの 発散 地上の収束線 下層inflow 中層風</p>

図66 メソβスケール線状降水系の形態と対流セルの移動の模式図。丸と黒い矢印は対流セルとその移動を示す。対流セルの色は、発生時刻の新しいものは赤く、古くなると黄色になるように配色した。緑の矢印は対流セルの発散流、赤と青の矢印は下層inflowと中層風の風向を示す。t1~t3はそれぞれの対流セルの発生した時刻を示す。

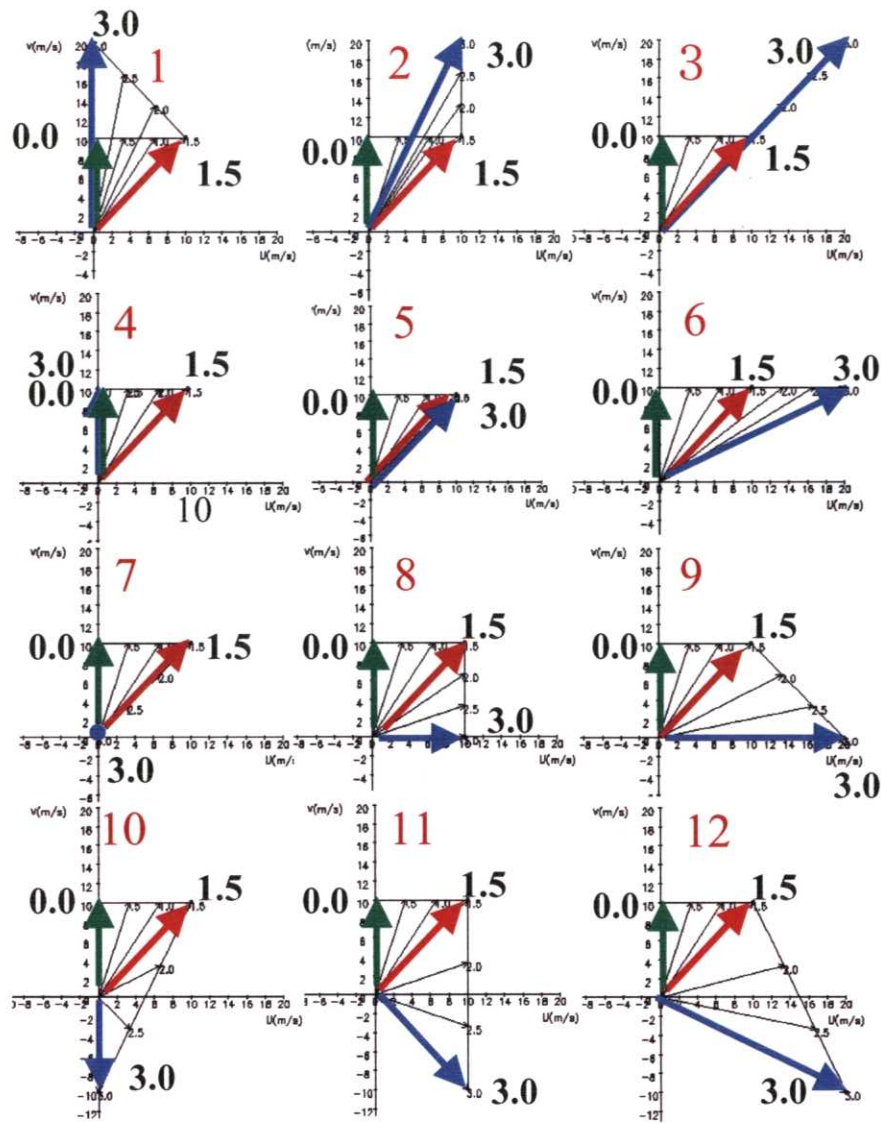


図67 環境として初期値に与える水平風のホドグラフ。赤い数字はケースの番号を示す。矢印の先の数字は、その水平風の高度を示す。

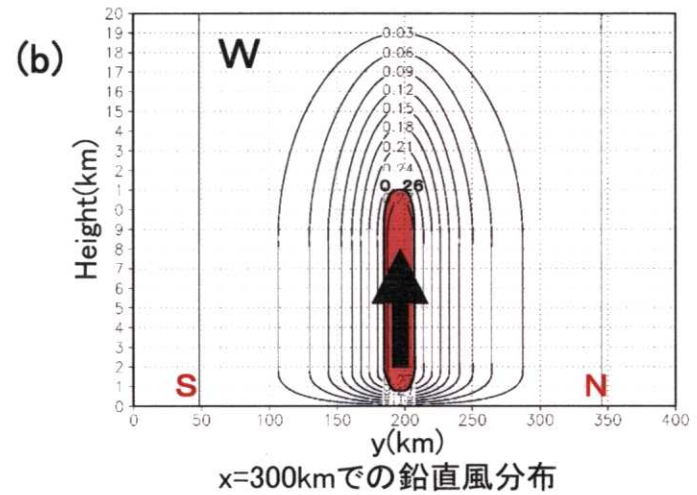
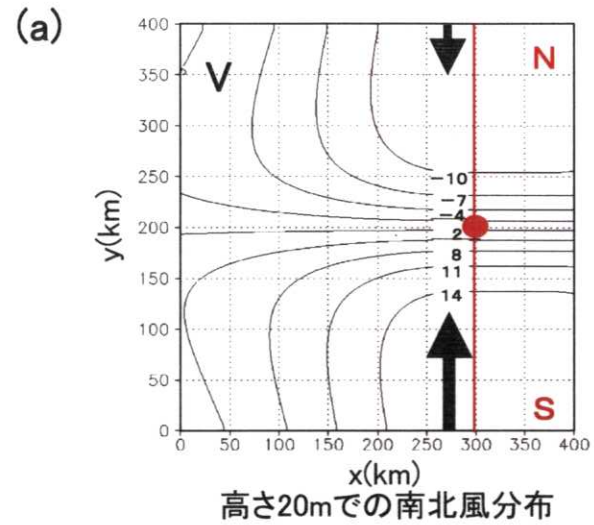


図68 (a) メソ α スケールの収束を与える南北風分布と (b) 収束に伴う鉛直風分布。高度20mで南北両側の風速差が24m/sになるように、下層1.5kmに南北風の収束を与えた。(a)の計算領域の西部分で収束が弱いのは、高度1.5kmに与えた10m/sの西風により西側の境界で不自然な対流が発生しないようにするためである。図67のホドグラフは (a)の赤丸の地点の水平風である。(b)の赤い影域は加湿して飽和させた鉛直風0.26m/s以上の領域を示す。

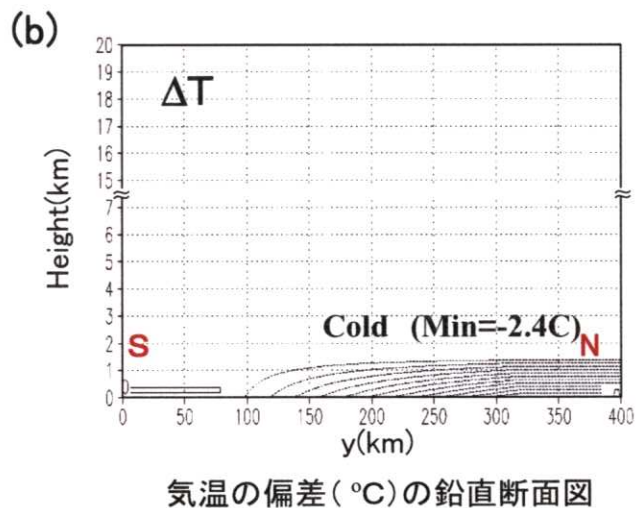
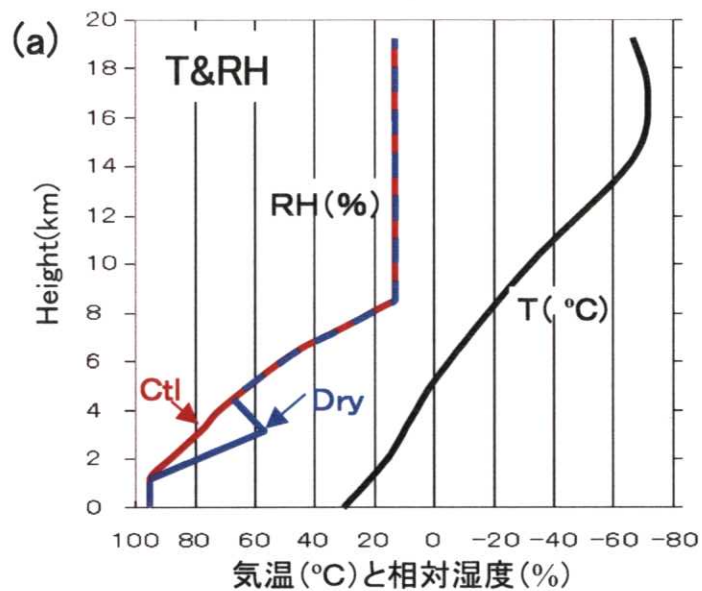


図69 メソ α スケールの収束域の南側の (a) 温度 (°C) と湿度 (%) の鉛直プロファイルと (b) 温度偏差の南北方向の鉛直断面図。(b) の等値線は 0.2 °C 毎である。

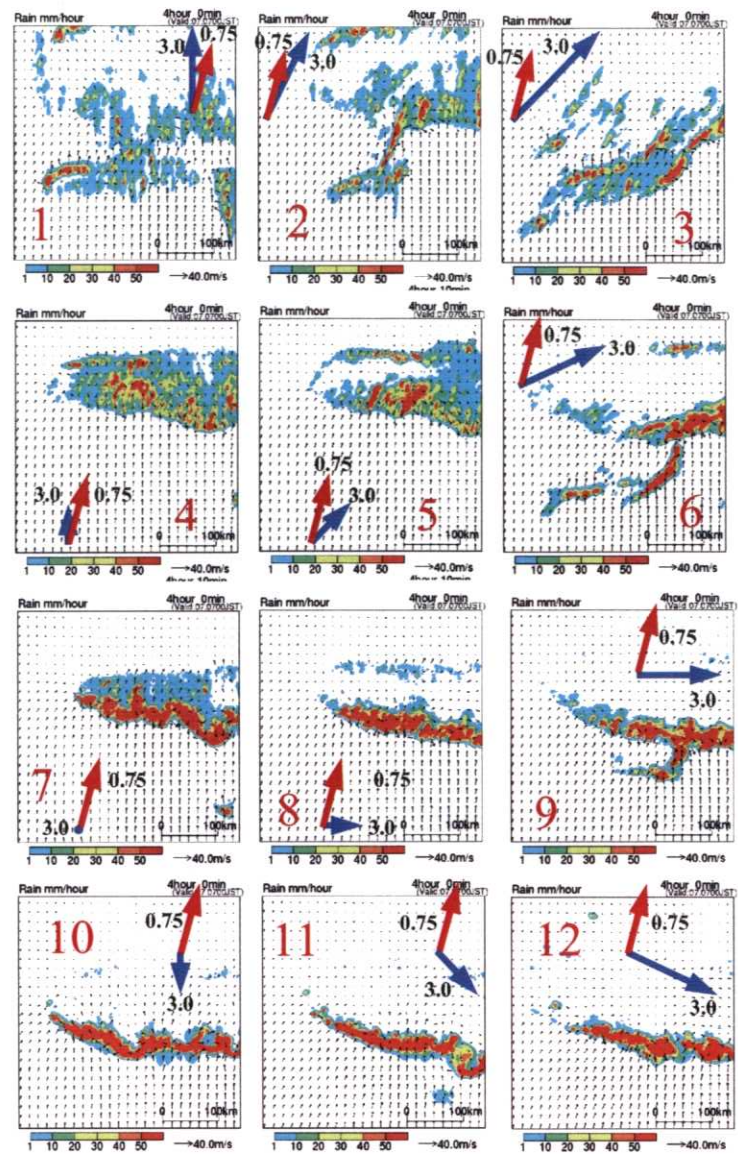


図70 FT=4h00mの組織化した線状降水系の降水域の分布。下層inflow側の下層風と中層風の代表として、高度0.75kmと3.0kmの水平風を赤と青の矢印で示した。赤い数字はケースの番号である。

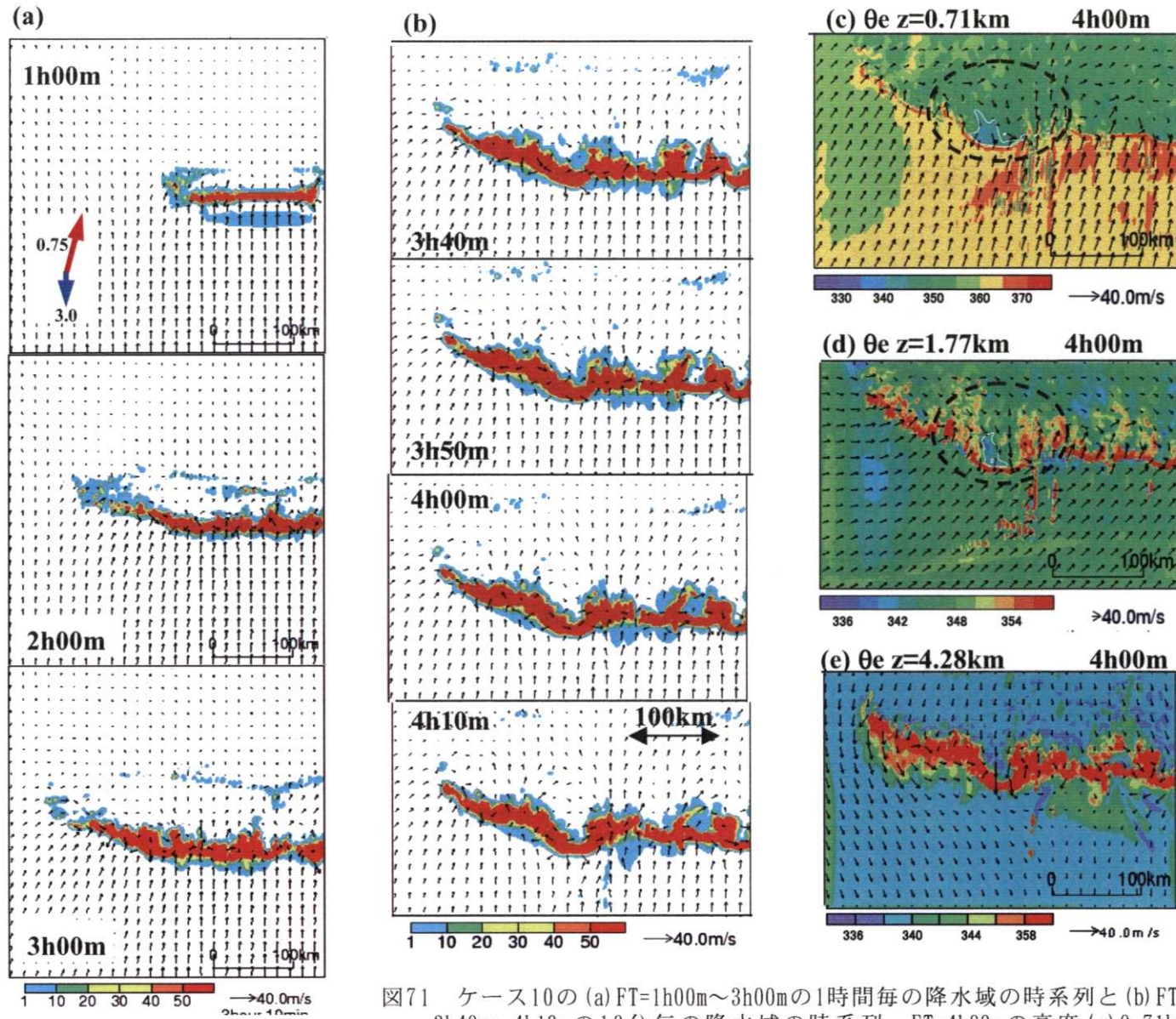


図71 ケース10の (a) FT=1h00m~3h00mの1時間毎の降水域の時系列と (b) FT=3h40m~4h10mの10分毎の降水域の時系列、FT=4h00mの高度 (c) 0.71kmと (d) 1.77km, (e) 4.28kmの水平風と相当温位の分布。(c)と(d)の破線の楕円は、降水域の北側の低相当温位の北風の領域を示している。それぞれの破線の楕円内の345K以下と342K以下の相当温位の領域を白い実線で囲んだ。下層inflowと中層風の代表的な風を(a)に示した。

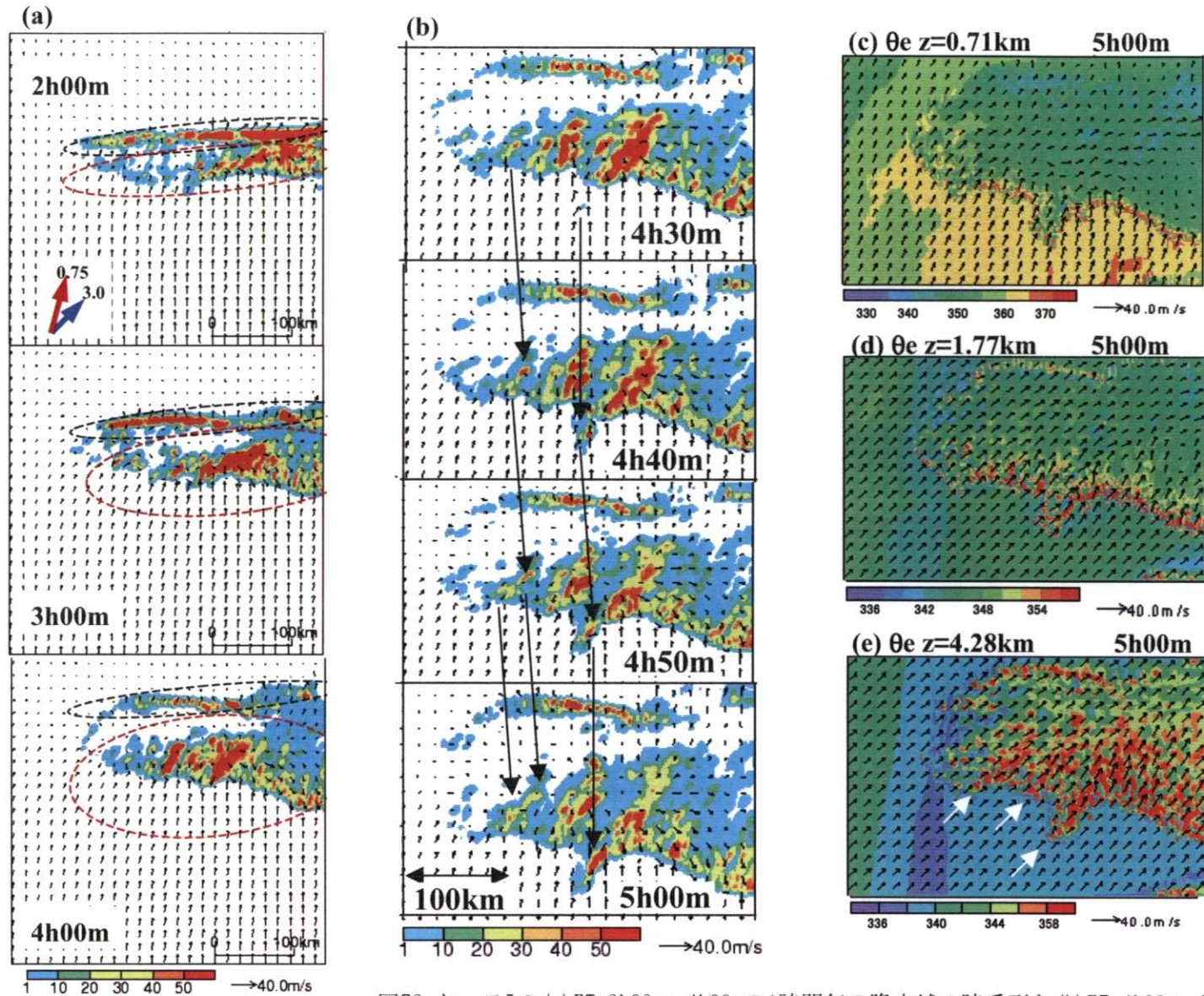


図72 ケース5の (a) FT=2h00m~4h00mの1時間毎の降水域の時系列と (b) FT=4h30m~5h00mの10分毎の降水域の時系列、FT=5h00mでの高度 (c) 0.71kmと (d) 1.77km, (e) 4.28kmの水平風と相当温位の分布。(b)の矢印は、降水域内で組織化した降水帯内の対流セルの移動を示している。下層inflowと中層風の代表的な風を(a)に示した。(e)の白い矢印は、降水帯に対応する高相当温位の領域である。

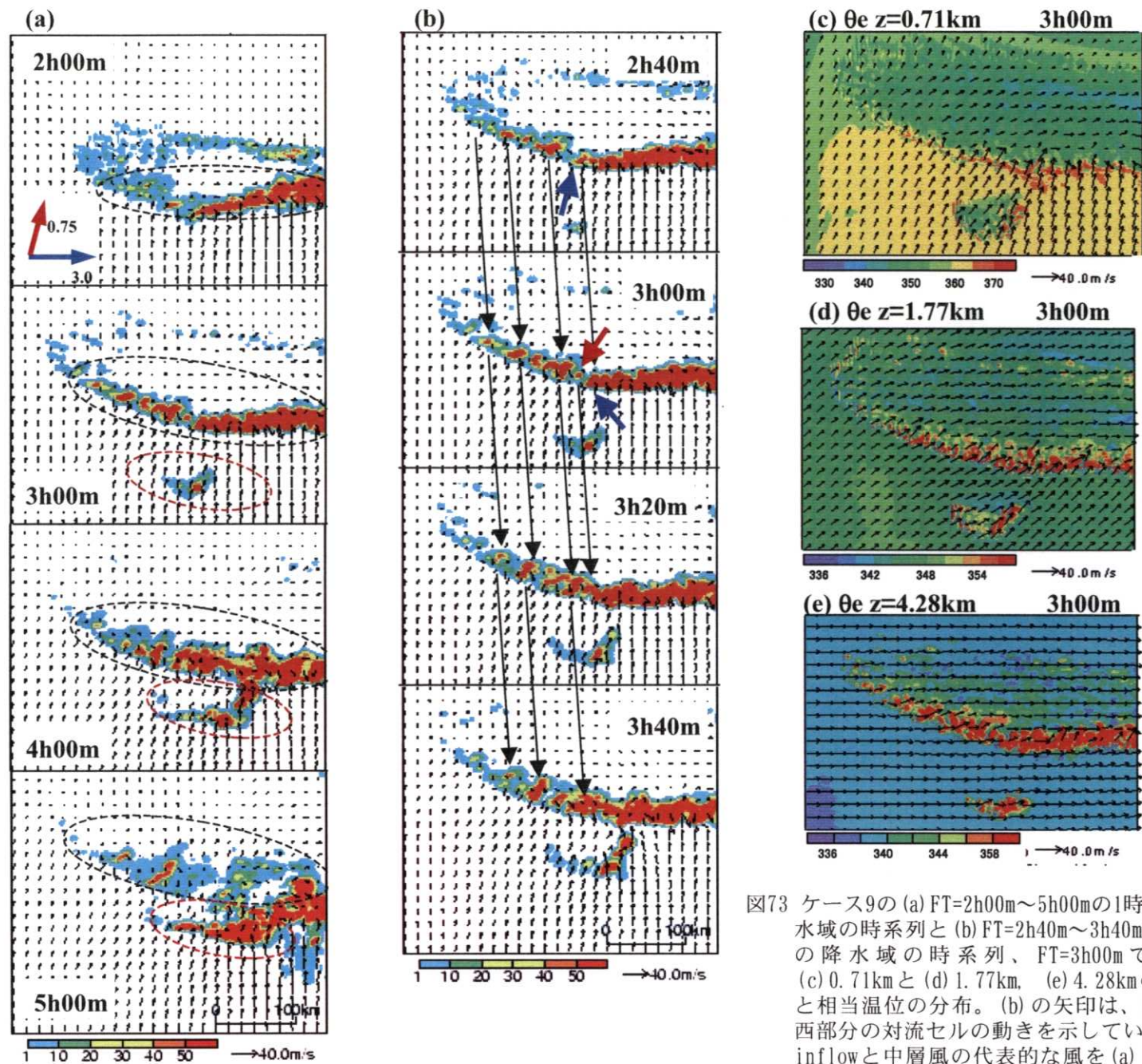


図73 ケース9の (a) FT=2h00m~5h00mの1時間毎の降水域の時系列と (b) FT=2h40m~3h40mの20分毎の降水域の時系列、FT=3h00mでの高度 (c) 0.71kmと (d) 1.77km、(e) 4.28kmの水平風と相当温位の分布。(b)の矢印は、降水帯の西部分の対流セルの動きを示している。下層inflowと中層風の代表的な風を(a)に示した。

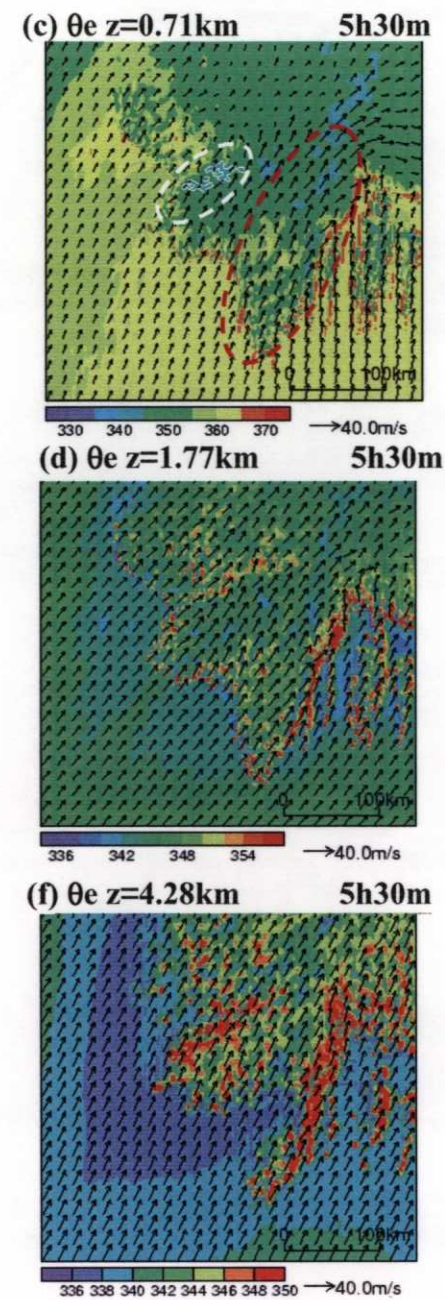
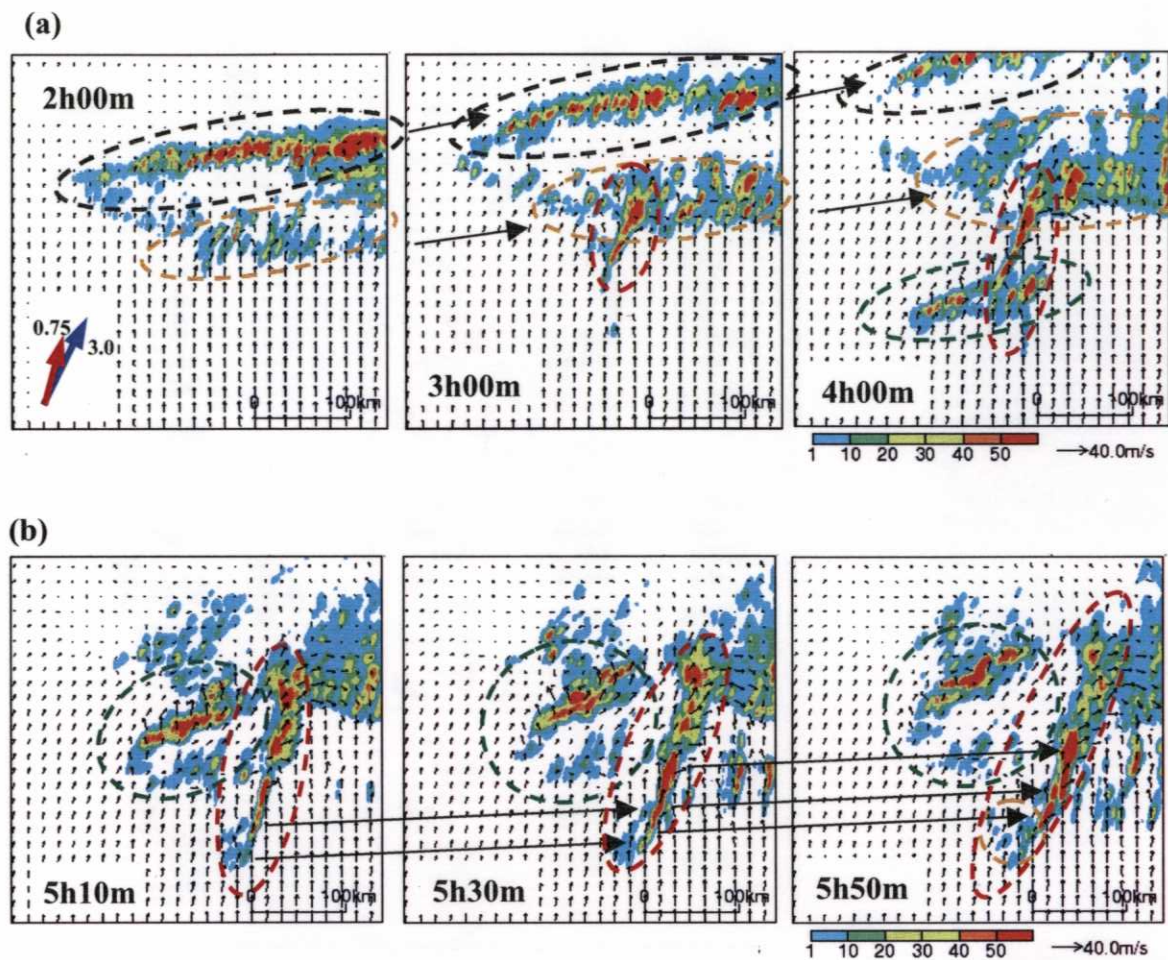


図74 ケース2の (a) FT=2h00m~4h00mの1時間毎の降水域の時系列と (b) FT=5h10m~5h50mの20分毎の降水域の時系列、FT=5h30mの高度 (c) 0.71kmと (d) 1.77km, (e) 4.28kmの水平風と相当温位の分布。(b)の矢印は、赤い破線で囲んだ降水帯の対流セルの移動を示している。下層inflowと中層風の代表的な風を(a)に示した。(c)の白い破線の楕円内の345K以下の相当温位の領域を白い実線で囲んだ。

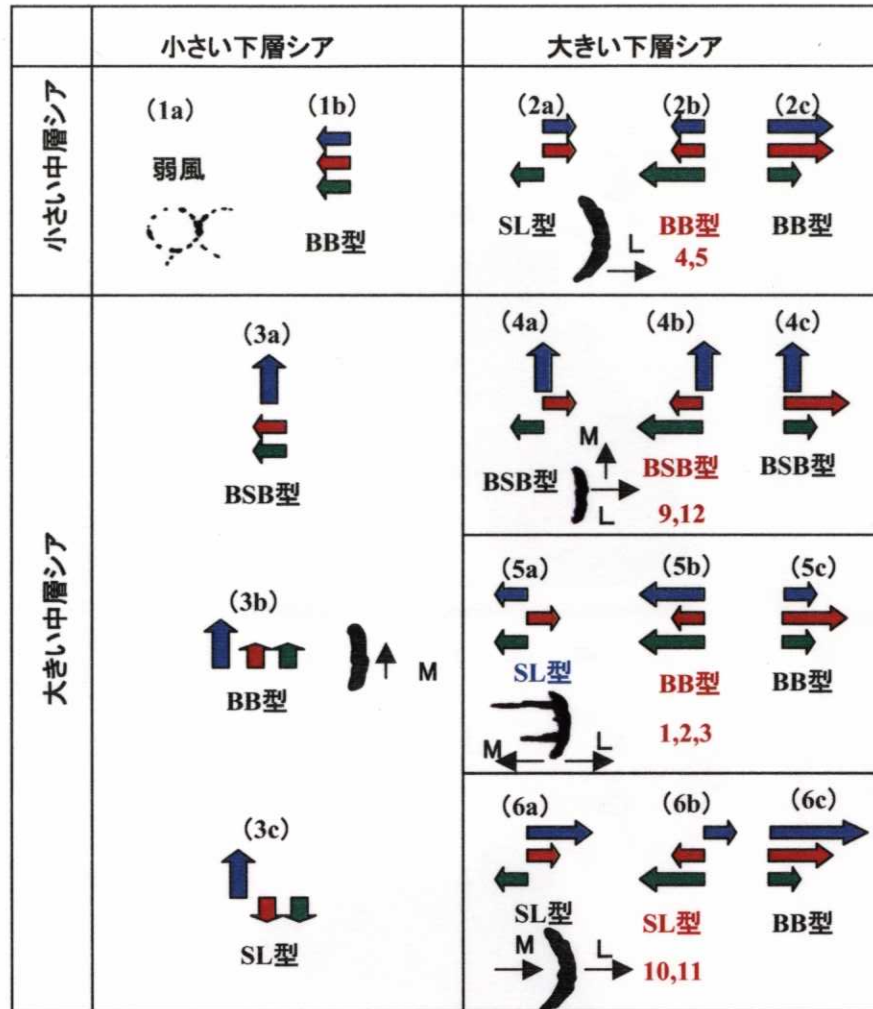


図75 LeMone *et al.* (1998) の図16に下層inflowとその上の水平風、中層風を加筆した図。下層シアと中層シアが同じ方向で強い組み合わせを追加している。緑と赤、青の矢印は地上inflowとその上側の風、中層風を示す。数値実験で与えた水平風が該当するときには、数値実験で組織化した降水系の型とケースの番号を、該当しない場合には期待できる型を書き加えた。

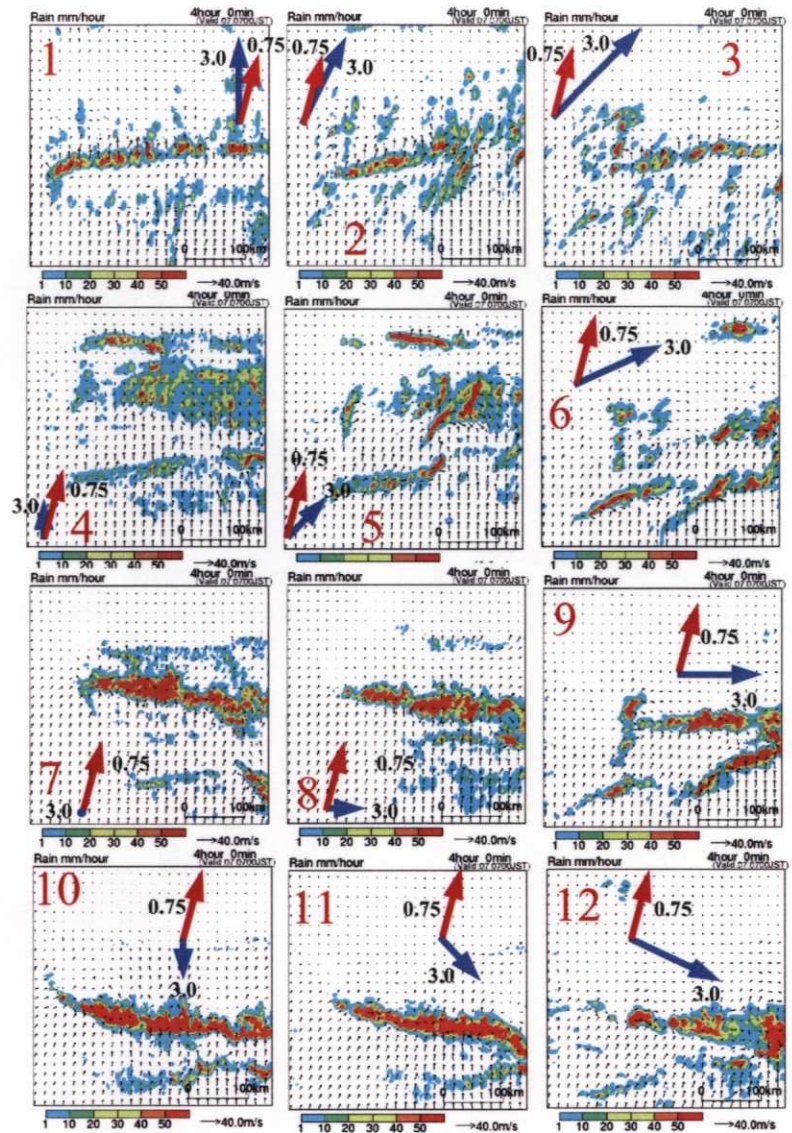


図76 高度3.5kmで湿度がコントロールランの60%になるように高度1.5~4.5kmの湿度を減少させたときの図70と同様の図。

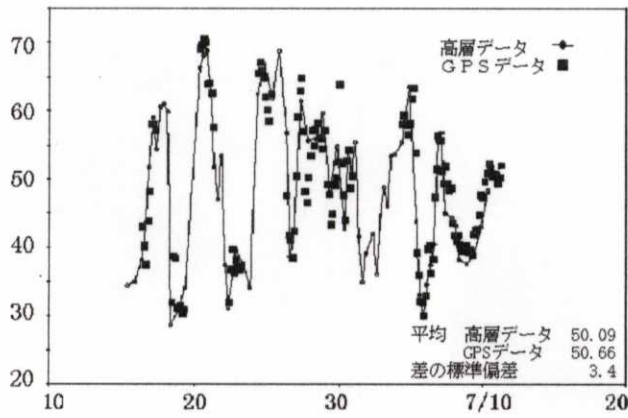


図77 1996年6月16日～7月11日の高層観測点（福岡）の可降水量と、GPS観測点（前原）の可降水量の時系列。

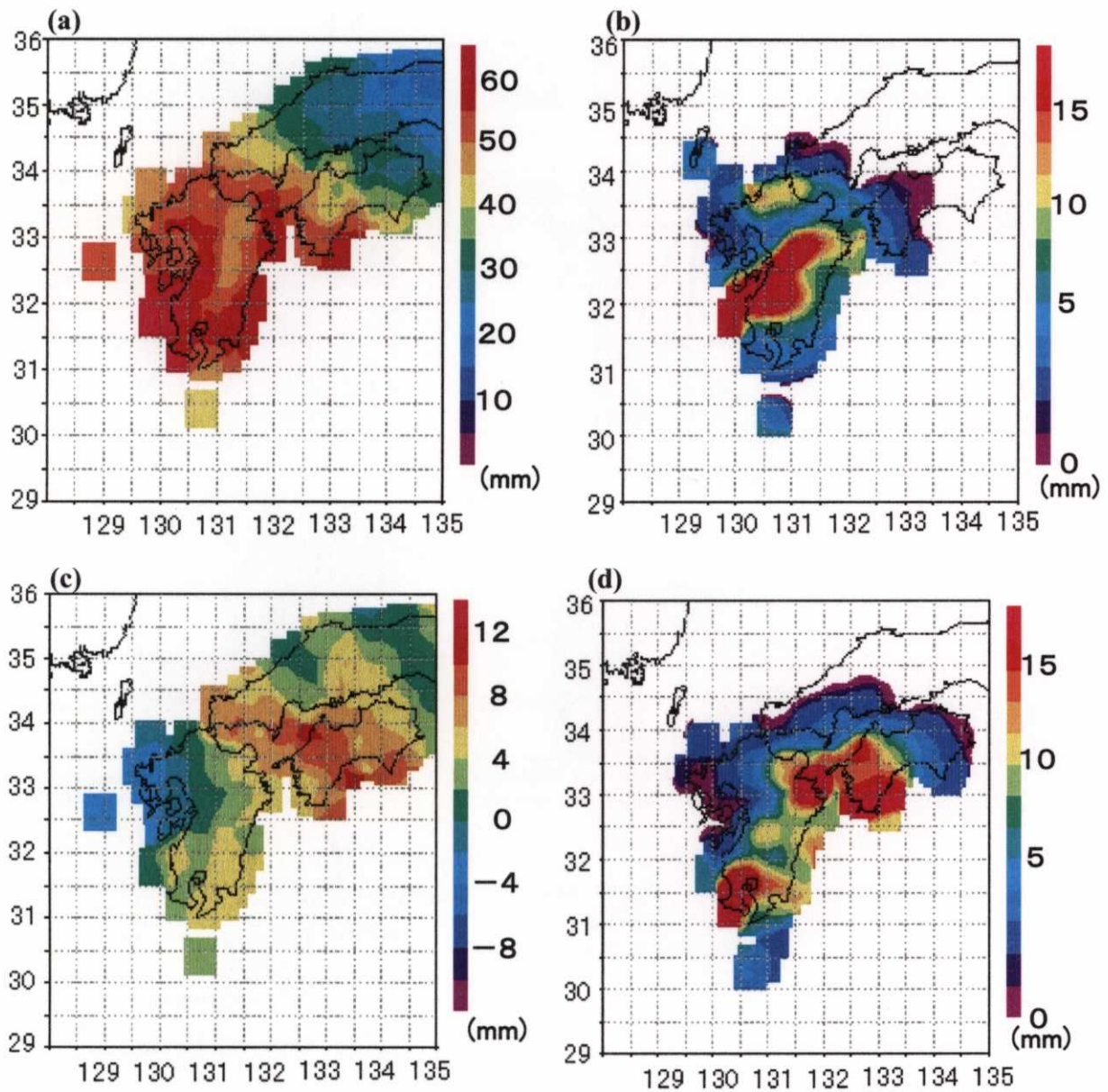


図78 1996年7月7日の (a) GPSから求めた03時の可降水量 (mm) と (b) アメダスによる00時から03時までの3時間降水量 (mm)、(c) GPSから求めた00時から03時までの可降水量の増加量 (mm)、(d) 03時から06時までの3時間降水量 (mm)。

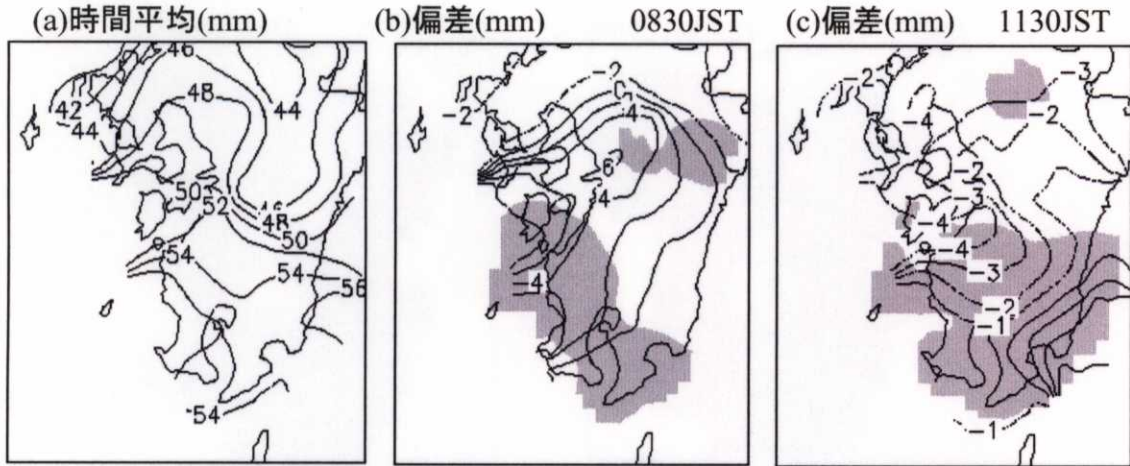


図79 (a) 1996年7月7日00時から18時までの可降水量の時間平均、(b) 08時30分と(c) 11時30分の可降水量の時間平均からの偏差。黒い影域は2mm/hour以上の降水域を示す。

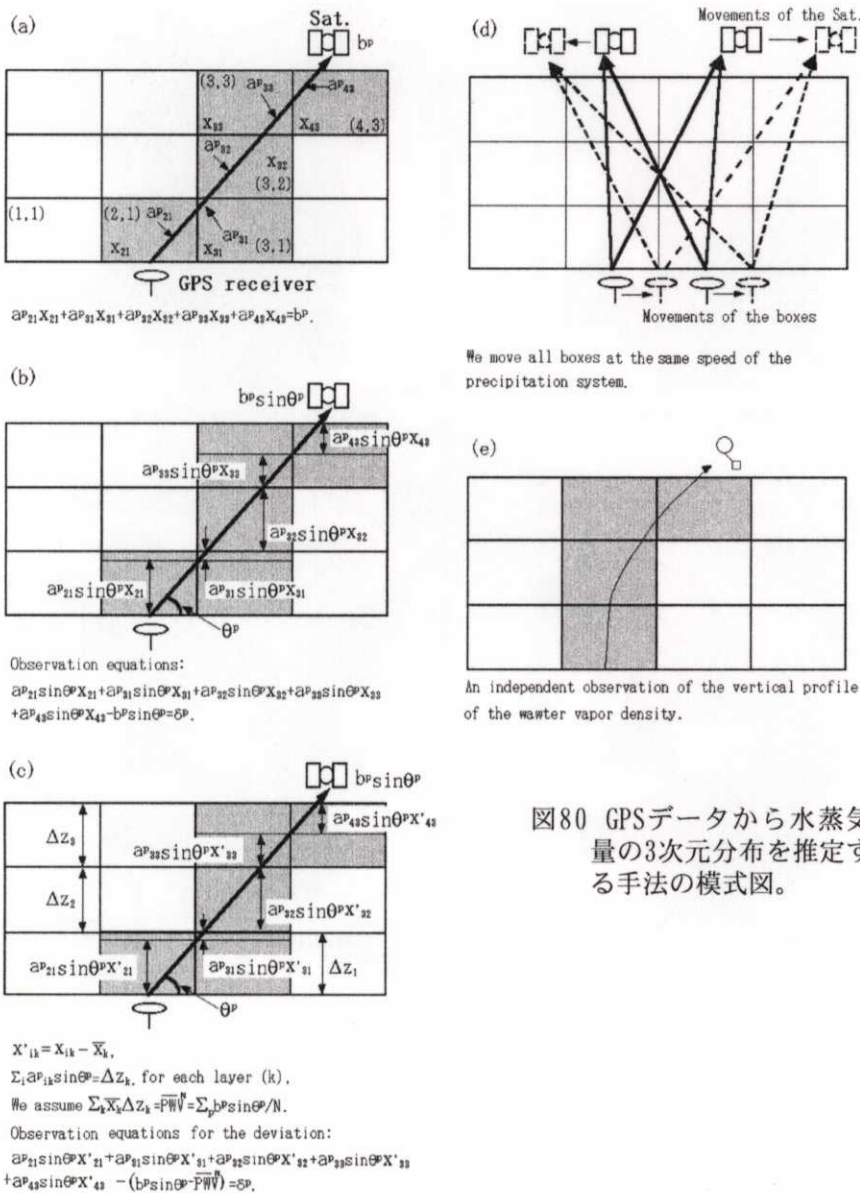


図80 GPSデータから水蒸気量の3次元分布を推定する手法の模式図。

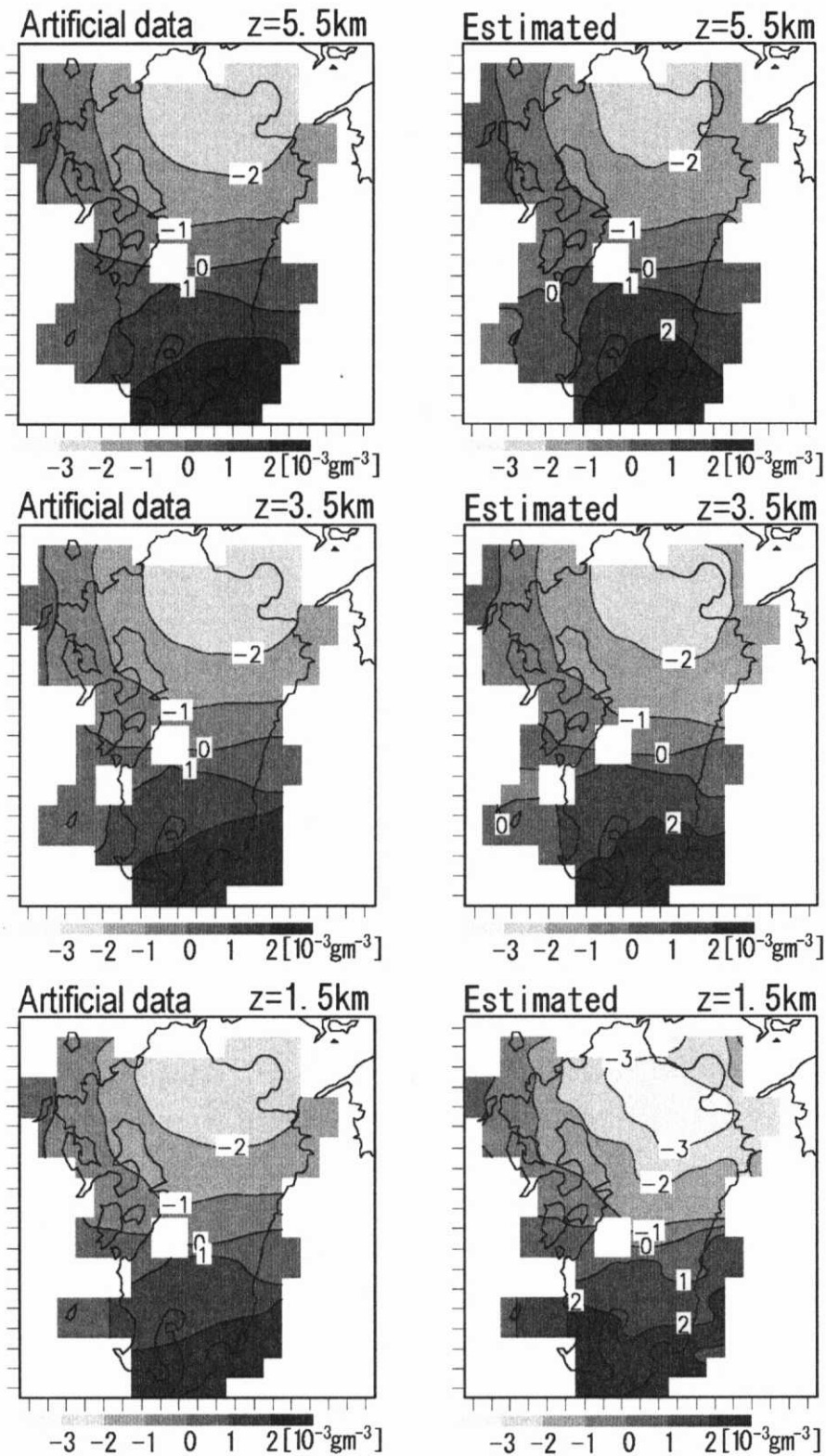
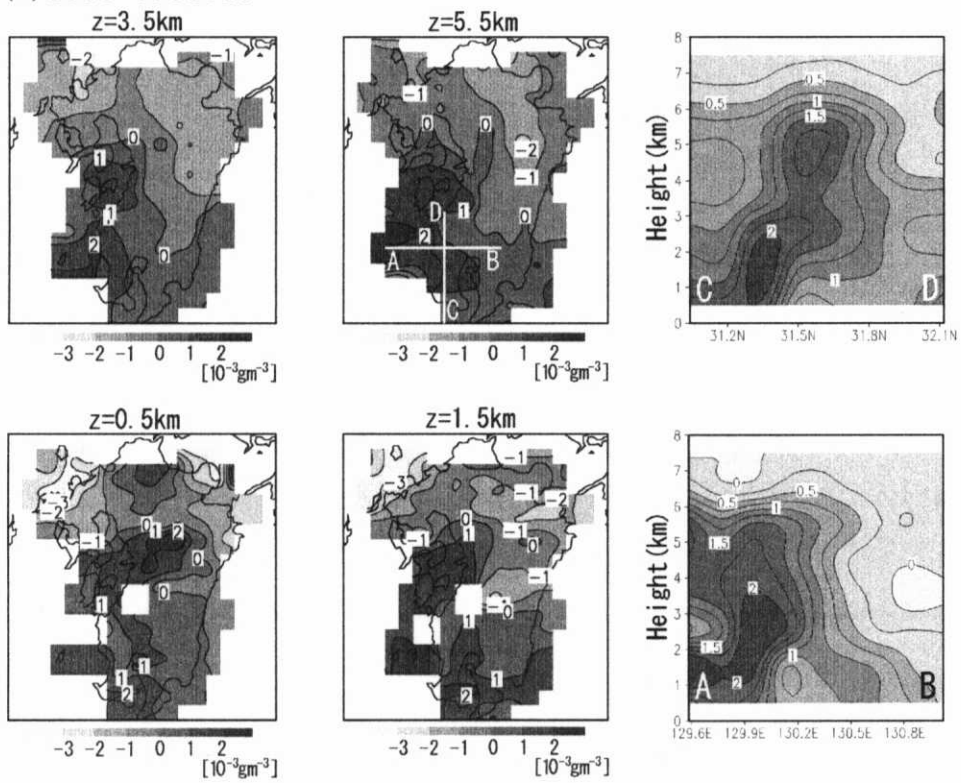


図81 人工的に与えたテストデータの分布（左）と本手法で再現にした分布（右）。枠の刻みは推定に用いた直方体の大きさを示す。

(a) 0800-0900JST



(b) 1100-1200JST

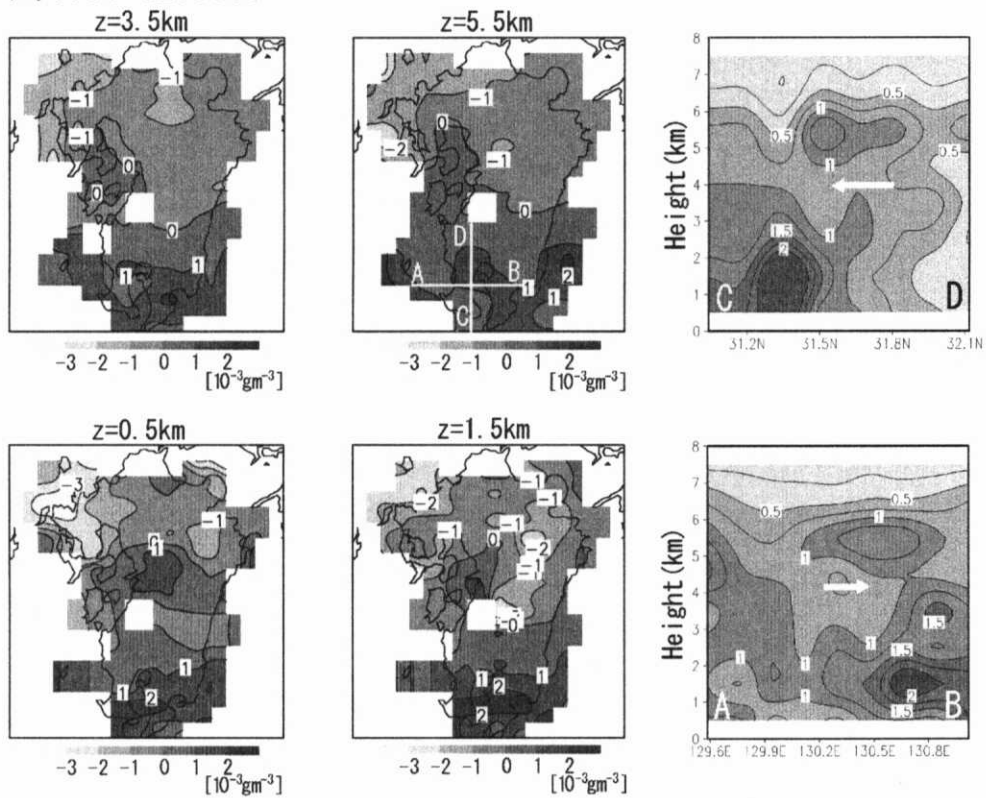


図82 1996年7月7日の (a) 08-09時と (b) 11-12時の水蒸気量の水平平均値からの偏差 (10^{-3}gm^{-3}) の水平分布と鉛直断面図。高度5.5kmの白線は鉛直断面図の位置を示す。(b)の鉛直断面図内の矢印は、乾燥気塊の侵入を示す。

Study of the shapes and maintenance mechanisms of meso- β scale line-shaped precipitation systems in the middle-latitudes

Abstract

Meso- β scale (~100km scale) line-shaped precipitation systems often last for long time and cause severe disasters like localized torrential downpour. In the precipitation systems, convective cells repeatedly generate and develop one by one sustaining long lives of the systems. Because generating position and moving direction of convective cells are affected by the environment around the precipitation system (e. g. vertical profiles of horizontal wind and humidity), the shape of the precipitation system (i. e. the orientation of the precipitation system and the extension of precipitation areas) depends on the environment. To investigate the shape of the line-shaped precipitation systems, and their structure (i. e. evolution and moving direction of convective cells and airflows inside), some of meso- β scale precipitation systems developed in the middle-latitudes were analyzed by using the special observation data and numerical model outputs. There have been reported so far the squall line type and back-building type as mechanisms to generate and maintain the line-shaped precipitation systems. Besides these ones, we found a new one that should be named "back- and side-building type". In the precipitation system of the back- and side-building type, the convective cells generate at the windward side of the middle-level wind and move to leeward. The direction of the low-level inflow with the high equivalent potential temperature air is almost perpendicular to that of the middle-level wind. Therefore, the low-level inflow enters into the convective cells from their sides and is continuously enhancing the cells.

The comparison of the observed precipitation systems suggest that the middle-level wind direction relative to that of the low-level inflow and middle-

from their sides and is continuously enhancing the cells.

The comparison of the observed precipitation systems suggest that the middle-level wind direction relative to that of the low-level inflow and middle-level humidity are important factors of the environments which determine the shapes of the line-shaped precipitation systems. The numerical simulations were performed by changing these environments. When the direction of the middle-level wind was opposite, same and perpendicular to that of the low-level inflow, the squall line type, back-building type and back- and side-building type precipitation systems were organized, respectively. The mechanism of the meso- β scale line-shaped precipitation systems can be explained by the following two key points; (1) the convective cells move by middle-level wind, (2) the convective cells generate and develop where the low-level inflow converges with the diverging airflow from the precipitation system. Dry middle-level air does not affect the type of meso- β scale line-shaped precipitation systems, however it decreases the precipitation amount. The influence of dry middle-level air is strongest in the back-building case, because dry middle-level air evaporates the cloud water while passing through the meso- β scale precipitation system. In contrast, the decrease in the precipitation amount is smallest in the squall line type, because dry middle-level air enhances the convergence near the surface.