

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22510200

研究課題名（和文） 豪雨前兆観測システムの開発

研究課題名（英文） Development of observation system for forecasting heavy rainfall.

研究代表者

足立 アホロ（ADACHI AHORO）

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：80354520

研究成果の概要（和文）：潜在的に豪雨をもたらす可能性のある積雲を直前に検知するための手法をシミュレーションを用いて開発し、そのアルゴリズムを実際のレーダー観測に用いて検証を行った。その結果、豪雨を伴う積雲では、地上で豪雨が発生する 10 分ほど前に、上空に降雨強度の高い領域が発生し、また反射因子差（ $Z_{DR}$ ）の高い領域が気温 0 度の高度よりもさらに上空にまで達していることがわかった。このような特徴は豪雨を伴わない積雲には見られなかったことから、これらの特徴が潜在的に豪雨をもたらす積雲を識別する指標になり得ることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：A method for forecasting very short-term rainfall to detect potentially hazardous convective cloud that produces heavy local rainfall was developed using simulation and actual C-band polarimetric radar data.

Two kinds of cumulus cells were analyzed, one of which developed and later produced heavy rainfall, whereas the other did not. Observations made by polarimetric radar revealed that a high vertical maximum intensity of rainfall rate and a vertical area of enhanced differential reflectivity extending above the freezing level, often termed a high  $Z_{DR}$  column, were clearly formed about 10 min prior to the onset of heavy rainfall on the ground. The results suggest that both the vertical maximum intensity of the rainfall rate and a high  $Z_{DR}$  column, estimated from polarimetric measurements, can be used to identify potentially hazardous clouds.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,500,000	0	1,500,000
2011 年度	1,300,000	0	1,300,000
2012 年度	600,000	0	600,000
総計	3,400,000	0	3,400,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：気象災害

## 1. 研究開始当初の背景

近年、局地的大雨いわゆる「ゲリラ豪雨」による災害が頻発している。2008 年神戸市灘区の「都賀川」で起きた「ゲリラ豪雨」では休日に訪れていた子供を含む市民 5 人の命が鉄

砲水に襲われ失われた。調査の結果この時には降水開始から 10 分程度の間には都賀川の水位が 1.3m も上昇し 15 分で濁流となったことが判明している。災害防止の観点からは豪雨の正確な観測、また豪雨の前兆をいち早く捉

え、観測することがきわめて重要である。

従来の研究では、いわゆる「ゲリラ豪雨」と呼ばれる局地豪雨は、力学的には収束場が、熱力学的には十分な水蒸気補給による積乱雲生成が重要と言われている。これまで豪雨予測は簡単には

(1) 数値モデルによる予測

(2) レーダー観測による降水域の移動パターンから予測

(3) 水蒸気、不安定性等大気条件から気象環境場予測から行われてきた。しかし、(1)のように数値モデルで実際に豪雨をもたらす積乱雲の特定をするのはまだ不可能である。また(2)、(3)の方法においても、豪雨をもたらす積乱雲の前兆を得ることは困難である。

## 2. 研究の目的

本研究は、発達する降水セルは強い上昇流で大きな雨滴が生成、また落下時にも小粒子を併合し発達するという、降水微物理過程の基本に立ち戻り、豪雨の前兆を捉える技術を開発することを目的とする。具体的には、(1)降水セルでの上昇流による雨滴サイズの変化および(2)雨滴落下時の成長に重要な下層での雲水量の観測技術をシミュレーション実験を通じて開発し、豪雨前兆を捉える観測システムを提案することを目的とする

## 3. 研究の方法

大雨の前兆となりうる降水微物理過程の観測技術について以下の3項目について研究を行う。(1)雲水量推定：通常気象レーダーは雲を感知することはできない。しかし散乱対象となる降水とレーダーアンテナの間に雲があると電波は減衰される。この減衰から雲を観測するこの手法についてレーダー周波数の選択、観測誤差等の評価を行い局地的大雨に適した観測アルゴリズムを開発する。

(2)偏波レーダーによる雨滴サイズ推定：偏波レーダーで観測される偏波パラメータは、雨滴サイズの情報が含まれている。この推定方法について誤差、評価を行うとともに局地的大雨観測に適した雨滴サイズの鉛直プロフィールを抽出する手法を開発する。

(3)上記データから豪雨予測アルゴリズムのプロトタイプ開発、観測システムの提案を行う。

## 4. 研究成果

豪雨時には大粒の雨が生まれ、逆に弱い雨には大粒の雨は含まれていないことが観測から知られている。そこで本研究は、内部に含まれる雨滴の大きさを用いて、豪雨をもたらす積乱雲の前兆を探知する手法の開発を行った。具体的には大粒の雨ほど落下中の空気抵抗により上下に押されて扁平となるため、扁平度から雨滴の直径が推定できることが予想できる。そこでまず、偏波レーダーのデ

ータから求めた雨滴の扁平度から雨滴の直径を推定し、さらにこれから降水強度を推定してその鉛直プロフィールを抽出する手法を開発した。

偏波レーダーは水平と垂直の電波を送信し、雨滴から散乱された水平と垂直の偏波特性を測定する。この時観測される水平( $Z_h$ )と垂直( $Z_v$ )の受信信号の強度の比、すなわち $Z_{DR} (=Z_h/Z_v)$ は雨滴の扁平率によって変化するため、原理的には $Z_{DR}$ から雨滴の平均的な直径を推定できる。しかし $Z_{DR}$ は雨滴の直径だけでなく散乱の非線形性から電波の周波数によっても大きく変化する。特に本研究では直径の大きい雨粒に感度が高い電波の周波数を選択する必要がある。そこで現在気象レーダーで一般に用いられている電波の波長(0.3, 0.9, 3, 5, 10cm)において $Z_{DR}$ がどのように変化するかをシミュレーターで計算した。一般に雨滴は衝突併合によって成長するが、7-8mm程度の直径になると不安定になり分裂するため直径6mm位の雨粒に感度が高いことが望ましい。計算の結果、直径6mm程度の雨滴に感度が高いのは波長5cm(Cバンド)のレーダーであることが分かった。

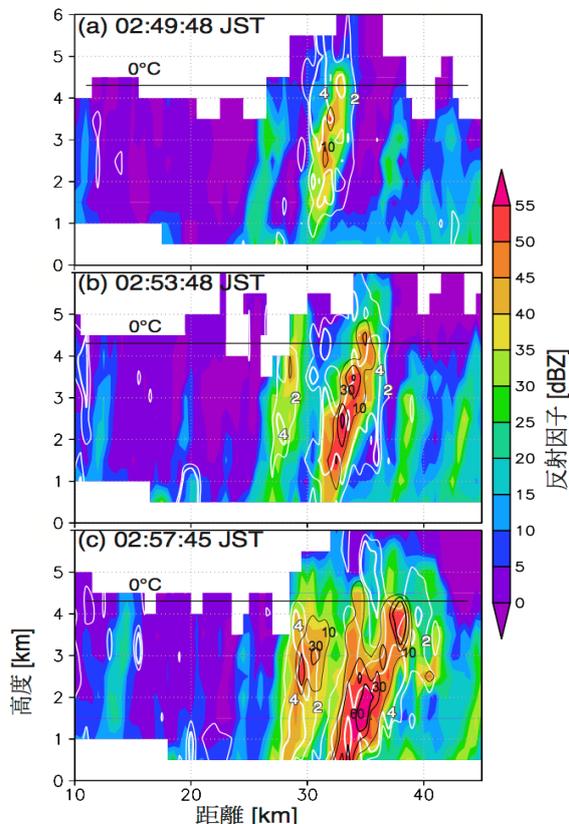
一方、雨滴の扁平率は雨滴を観測する角度、即ちレーダーアンテナの仰角によっても変化する。特に雨滴サイズの鉛直プロフィールを推定する際には仰角の影響は大きい。そこで実際の対流性降雨で観測された雨粒の粒径分布を元に $Z_{DR}$ の仰角補正手法をシミュレーターで開発した。更にこれらを実際のCバンドのレーダーで観測されたデータに応用し、降水強度の鉛直プロフィールを推定するためのアルゴリズムを開発した。また、衝突併合により発達する雨滴は、衝突する相手が雨滴のときには雨水量や雲水量は変化しないが、雲粒と衝突併合する時には雨水量が増加し、雲水量は減少することが予想できる。すなわち雨水量の時間変化から雲水量をある程度推定できる。そこで雨水量を偏波レーダーから推定する手法も開発した。

次にレーダーシミュレーターで得られた上記の結果を実際のレーダーの観測データに応用してその有効性の検証を行った。具体的には気象研究所のC-band偏波レーダーで、豪雨を伴う積雲と豪雨を伴わない積雲を観測し、シミュレーターの結果を用いて $Z_{DR}$ などの観測データに仰角補正、減衰補正、固体降水(アラレなど)の影響の除去などを行い、さらに雲内の雨水量や降雨強度などの推定を行った。なお、この $Z_{DR}$ や降水強度などの推定アルゴリズムの精度の検証は、地上に設置したディストロメーターを用いて別に行った。

解析の結果、豪雨を伴う積雲では例えば地上で100mm/hを超える強い雨が降る15分ほど前に上空4km程度付近に雨水量が $4g/m^3$ を

超える領域が存在し、また 10 分程度前から 60mm/h 程度の降雨域が上空に観測された。両者とも強度や領域体積を増やしながら時間とともに地上に落下してくる様子が捉えられた。また豪雨を伴う積雲は上空の降雨強度が強化される以前から、 $Z_{DR}$  の大きい(>3dB)領域が雲底付近から周囲の気温が  $0^{\circ}\text{C}$  となる高度よりも高い高度まで鉛直方向に伸びていることがわかった。これは積雲内部の上昇流により雲底付近の大粒の雨粒が上空に輸送されているためだと考えられる (第 1 図)。

一般に上昇流が強い積雲ほど発達し豪雨をもたらすことが知られている。シミュレーションの結果、解析された大粒の雨は周囲の気温が  $0^{\circ}\text{C}$  となる高度を超えて上昇しても液体であることがわかった。すなわち下層の暖かい大気が雨粒と共に上昇流により局所的に上空に輸送されていることを示唆している。上昇流が強いほど大粒の雨は  $0^{\circ}\text{C}$  となる高度よりさらに上空まで到達するため、その到達高度が積雲のその後の発達を推定する目安となる。一方、これらの特徴は豪雨を伴わない積雲では見られなかったことから、上空の高い雨水量や降雨強度、 $Z_{DR}$  の大きい領域の到達高度が、豪雨を伴う積雲と伴わない積雲を事前に特定するための指標になり得ることがわかった。



第 1 図 豪雨をもたらせた積乱雲の断面図の時間変化。図中、色は電波の反射強度 (反

射因子)、黒線は雨量強度(mm/時間)、白色は反射因子差( $Z_{DR}$ )を表す。地上では(c)3時頃から大雨となるが、その7分前の(b)02:53には上空 3km 付近に雨量強度が 60mm を超える領域が形成されている。さらにその4分前の(a)02:49には既に  $Z_{DR}$  の高い領域が高度 1km 付近から気温が  $0^{\circ}\text{C}$  以下となる高度 (4.2km) よりも上空に達している様子が見られる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Ahoro Adachi, Takahisa Kobayashi, Hiroshi Yamauchi, Shigeru Onogi, Detection of potentially hazardous convective clouds with a dual-polarized C-band radar, Atmos. Meas. Tech. Discuss., 6, 2013, 3675-3722, doi:10.5194/amtd-6-3675-2013
- ② Ahoro Adachi, Takahisa Kobayashi, Hiroshi Yamauchi, Shigeru Onogi,, Detection of potentially hazardous convective cells with a dual-polarized C-band radar, Proc. of the 9th Int'l Sympo. on Tropospheric Profiling, 査読有, SC, 2012, 8, ISBN/EAN: 978-90-815839-4-7
- ③ Adachi, A., T. Kobayashi, H. Yamauchi and S. Onogi, Detection of convective cells with a potential to produce local heavy rainfalls by a C-band polarimetric radar, Proc. of SPIE, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XVI, 査読有, 2011, 8177, 8177101-6, doi: 10.1117/12.897702

[学会発表] (計 14 件)

- ① 足立アホロ、小林隆久、山内洋、小野木茂、レーダーシミュレーターによる偏波パラメタ計算結果のレーダー観測への応用(その 4)偏波パラメタを用いた C-band レーダーの自己校正手法の検討、日本気象学会、東京、2013.
- ② 石元 裕史、MPS 法を用いた氷粒子の融解シミュレーション、日本気象学会、東京、2013.
- ③ Adachi, A., Kobayashi, T., Yamauchi, H., Onogi, S., Detection of Potentially Hazardous Convective Cells with a Dual-Polarized C-band Radar, 9th Int'l Sympo. on Tropospheric Profiling, L'Aquila, Italy, 2012.
- ④ 足立アホロ、小林隆久、山内洋、小野木茂、レーダーシミュレーターによる偏波

パラメタ計算結果のレーダー観測への応用(その 3) 偏波レーダーによる豪雨をもたらす積乱雲の直前予測の可能性、日本気象学会、つくば、2012.

- ⑤ 山内洋、足立アホロ、鈴木修、佐藤英一、小林隆久、C バンド固体素子二重偏波レーダーで捉えた 2011 年 8 月 26 日の東京の大雨、日本気象学会、つくば、2012.
- ⑥ Adachi, A., T. Kobayashi, H. Yamauchi and S. Onogi, Rainfall estimation and detection of hazardous convective cells with a Dual-Polarized C-band radar, AGU, Waikoloa Beach, USA, 2012.
- ⑦ 足立アホロ、小林隆久、山内洋、小野木茂、レーダーシミュレーターによる偏波パラメタ計算結果のレーダー観測への応用(その 2)反射因子差を用いた降水強度推定手法の特性、日本気象学会、名古屋、2011.
- ⑧ 小林隆久、足立アホロ、山内洋、衛星搭載雲・降水レーダーにおける多重散乱、日本気象学会、名古屋、2011.
- ⑨ Adachi, A., T. Kobayashi, H. Yamauchi and S. Onogi, Detection of convective cells with a potential to produce local heavy rainfalls by a C-band polarimetric radar, SPIE remote sensing co-located with SPIE Security+ Defense, Prague, Czech Republic, 2011.
- ⑩ 小林隆久、増田一彦、足立アホロ、山内洋、雲・降水レーダーシミュレーターの開発：3 -雨滴生成モデル-、日本気象学会、東京、2011.
- ⑪ 足立アホロ、小林隆久、山内洋、小野木茂、レーダーシミュレーターによる偏波パラメタ計算結果のレーダー観測への応用、日本気象学会、京都、2010.
- ⑫ 小林隆久、増田一彦、足立アホロ、山内洋、雲・降水レーダーシミュレーターの開発-2-、日本気象学会、京都、2010.
- ⑬ 山内洋、足立アホロ、小林隆久、鈴木修、猪上華子、小野木茂、C バンド固体素子二重偏波レーダーによる降水強度推定の検証、日本気象学会、京都、2010.
- ⑭ Kobayashi, T., K. Masuda, A. Adachi and H. Yamauchi, Development of a radar simulator for space-borne and polarimetric radar, 6th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Sibiu, Romania, 2010.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

足立 アホロ (ADACHI AHORO)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：80354520

### (2) 研究分担者

小林 隆久 (KOBAYASHI TAKAHISA)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・部長

研究者番号：40343892

山内 洋 (YAMAUCHI HIROSHI)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：00354522

増田 一彦 (MASUDA KAZUHIKO)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・室長

研究者番号：90354513

石元 裕史 (ISHIMOTO HIROSHI)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：70281136