

稠密観測による極端気象のメカニズム解明

局地的大雨をもたらす積乱雲の発生・発達メカニズムに迫る

気象庁 気象研究所 気象衛星・観測システム研究部長 石原正仁



はじめに

世界各国の専門家が連携して地球温暖化の研究や対策を評価している「気候変動に関する政府間パネル：IPCC」の第4次評価報告書(2007)では、「地球温暖化の進展に伴い世界のほとんどの陸域で大雨の頻度が増加し、非常に強い台風の発生数が増加する可能性が高い。」と予測しています。人口が集中する都市域では、人工排熱や緑地の減少によるヒートアイランド現象が地球温暖化と相まって、局地的大雨などの極端気象を増加させると推測されています。気象庁のアメダスによる統計によると、過去30年間の1時間50mm以上の大雨では、最近10年間の頻度がそれ以前の頻度より増加していることがわかっています。

これまで大雨による被害をもたらすとして注目されてきた気象現象は水平規模が数100kmに及ぶ低気圧や梅雨前線、そして台風でした。これらは集中豪雨として長年研究されてきた結果、現在では発生や接近の様子が理論や数値予報によって高い精度で予測できるようになってきました。同時にレーダー・気象衛星・アメダスなど、全国を覆う気象観測網による監視体制も充実しています。

その一方で、晴れた空のもとで突然発生する積乱雲は10km四方程度のごく狭い地域に強い雨をもたらす、ときには竜巻・ダウンバーストなど激しい突風を起こします。交通網や通信網

が高度に発達した現代の都市では、ひとたびこうした極端(シビア)な大気現象「極端気象」が発生すると、地下街、道路、工事現場などでは降った雨が狭い箇所一気に流れ込むなどして大きな被害が発生することが多くなっています。

2008年8月5日の首都圏では朝からあちこちで積乱雲が発生していました。都心南部で発生した積乱雲はゆっくりと北上し、豊島区雑司が谷を通過しました。このとき1時間に約60mmの非常に強い雨が降り、下水道の工事現場で5名の関係者が亡くなりました。また、同年7月28日には兵庫県中部に大規模な雨域がありましたが、ここから南に10kmほど離れた神戸市に突然積乱雲が発生しました。この積乱雲がもたらした雨は都賀川の水位をわずか10分の間に1.3mも増加させ、公園となっている川のほとりや遊歩道で遊んでいた子供を含む5名の方が流されて亡くなりました。さらに2009年8月19日の沖縄県那覇市では、ひとつの積乱雲が通過したことによって市内のガープ川が急増水し、4名の工事関係者が亡くなりました。

気象庁では天気図や数値予報から大雨の発生が想定されると、まず大雨注意報を発表します。次にアメダスやレーダーなどによる監視のもと、大雨による重大な災害の発生が予測されると大雨警報が発表されます。また河川が増水し重大な災害が発生するおそれがあると予想したときには洪水警報を発表し、さらに指定された河川では国土交通省や都道府県と共同で洪水予報を

発表しています。

低気圧、前線、台風などともなう大雨では、多くの場合発生の数時間前にはこうした警報を発表することができます。しかし、突然発生する積乱雲がもたらす大雨（気象庁ではこれを「局地的大雨」と呼んでいます）については、十分な時間的余裕を持って大雨警報を発表することは現時点では困難です。その理由は積乱雲が発生・発達し大雨がもたらされるまでの詳細なプロセスやメカニズムが解明されておらず、それに対応する監視・予測技術が開発されていないことです。「局地的大雨」のことをマスコミ等では「ゲリラ豪雨」と呼ぶことがありますが、この言葉は予期せず発生し被害を与えるこうした極端気象の性格から名付けられたものと思われる。

前節の眞木部長による解説のとおり、科学技術振興調整費による「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」の課題1では、こうした局地的大雨をもたらすような比較的小規模な積乱雲を対象として、最新の気象観測技術と既存の研究・現業観測網を連携させた高い空間・時間分解能の「稠密観測網」による観測と解析、さらに数値実験を組み合わせて、主に局地的大雨をもたらす積乱雲のそのメカニズム解明を進めていきます。

積乱雲のメカニズム研究の課題

本格的な積乱雲の研究は1940年代中頃に米国で行われた“Thunder Storm Project (雷雨プロジェクト)”に始まるとされています。その後、米国では大型の竜巻“トルネード”の被害を軽減するため積乱雲の研究が大きく進みました。わが国でも同時期に関東平野で「雷雨特別観測」が行われました。

関東平野は全国で最も多く積乱雲が発達する

地方です。地元位置する気象研究所や防災科研では、関東地方に発生する積乱雲がひとつの研究テーマとなってきました。1990年代後半には国内の多数の研究機関・大学が参加して「つくば域降雨実験」が実施されました（吉崎ほか、1999）。こうした研究により積乱雲について多くのことが理解されるようになりましたが、局地的大雨に対処するためには不明な点が多く残されており、研究や調査が必要です。

積乱雲のメカニズムを解明すると一口にいても、たくさんのプロセスに対応する研究が必要です。本研究では次のような課題を設定しています。

- 積乱雲を発生させる大気環境場
- 都市域における大気境界層と積乱雲発生の関係
- 積雲が発生する過程とメカニズム
- 積雲が積乱雲に進化する過程とメカニズム
- 積乱雲が成長する過程における内部の降水粒子や気流の分布
- 積乱雲の下で大雨が発生し終焉する過程
- 積乱雲の移動の過程や分裂や合併により積乱雲が長続きする過程とメカニズム
- 積乱雲やそれともなう大雨の統計解析
- 積乱雲の観測に必要な技術開発

次節では、まず首都圏で発生する積乱雲の実態を紹介します。次に、本プロジェクトの主題である首都圏稠密観測を中心にすえて、これらの研究について解説します。

首都圏の積乱雲

関東地方に発生する積乱雲には大きく分けて2つのタイプがあります（小倉ほか、2002）。ひとつは、群馬県・栃木県・埼玉県・東京都の山地で発生するタイプで、そのうちのいくつかは南または東に移動して首都圏に達します。もうひ

とつははじめから首都圏に発生するタイプです。

先にお話した豊島区雑司が谷の大雨は後者のタイプの積乱雲によるものです。この日、東京都とその周辺域では179個の積乱雲が発生していました。図1は179個の積乱雲の大きさと寿命の分布です。大きさで見ると、平均値は20km²（直径5kmの円に相当）で、最大でも80km²（直径10kmの円に相当）でした。レーダーの画面上に積乱雲が出現し消え去るまでの時間を寿命とすると、積乱雲の総数の2/3は60分以下で、全体の86%が80分以下でした。すなわち積乱雲の寿命は1時間そこそこということになります。

レーダー画面に積乱雲が出現して地上で雨が降り始めてから雨のピークを迎えるまでの時間を調べると、それは10～20分でした。すなわち、レーダーによって積乱雲の動向を監視しながら地上で大雨が発生することを予測しようとすると、われわれに与えられる時間は10～20分であると言い換えられます。大気環境が異なると積乱雲の振舞いも異なってくるので、この日の事例だけで結論づけはできませんが、局地

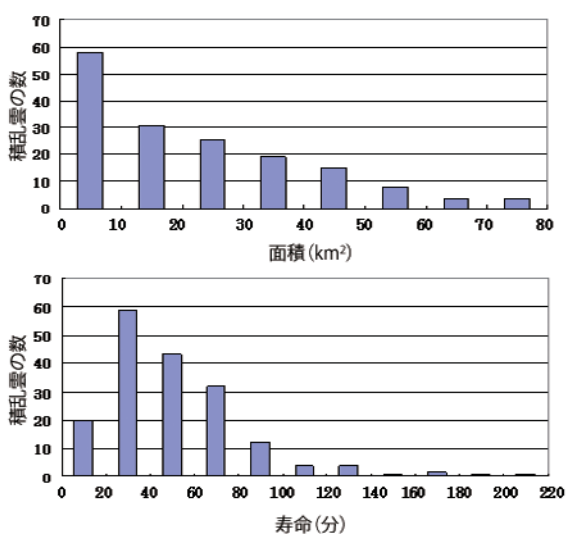


図1 2008年8月5日に首都圏で発生した179個の積乱雲の面積(上)と寿命(下)の頻度分布。

的大雨の監視や予測には大きな時間的ハードルが設けられているといえます。

首都圏稠密観測

さて本題の首都圏稠密観測網に話を進めましょう。図2は現在準備中の首都圏稠密観測網のイメージ図です。観測機器の配置などは実際と多少異なりますが、観測網の概要を見渡すことができます。全体は今回のプロジェクトのために実施する研究観測網、既存の研究観測網、気象庁などの現業観測網の3つに分類されます。その1 今回のプロジェクトのために導入される観測システムは次のとおりです。

- Kuバンドレーダー：大阪大学で最近開発された波長2cmの小型気象レーダーです。これまでの気象レーダーでは常識であった5～10分間の時間分解能（3次元走査の場合）と100m程度の距離分解能を、このレーダーは一挙に1～2分と10mに短縮しました。さらにドップラー速度測定や二重偏波などのマルチパラメータ（MP）機能により降水粒子の大きさの推定ができます。探知範囲が20km程度と狭いことが短所ですが、急激に変化する積乱雲の内部構造を知るには最適なレーダーです。
- 航空機観測：電子航法研究所が保有するビーチクラフト B99が観測に参加します。機動性と高速性を生かして、わが国ではこれまで測定されたことのない積乱雲が発生する直前や発生後の積乱雲周辺の気温、湿度、風などの大気状態を測定します。
- ドップラーライダー：大気中に浮遊するエアロゾルを媒体として地上付近の気流やエアロゾルの分布を測定します。北海道大学低温科学研究所が目黒区に、情報通信研究機構が小金井市でドップラーライダーの観測を行いま

す。羽田空港で運用されている気象庁の現業ドップラーライダーを加え3台が連携することにより、東京湾から多摩地区東部にかけてのドップラーライダー回廊ができあがります。これにより積乱雲の発生に先立って東京湾から都心部に進入して来る海風前線や積乱雲が作り出すガストフロントなどレーダーが不得手とする観測対象を可視化することができるかと期待されます。

- 大気境界層観測：防衛大学校、気象研究所そして情報通信研究機構が協力して、大気のゆらぎを測定するシンチロメータやラジオゾンデなど使って大気境界層における熱の鉛直輸送量を測定します。大気境界層とは地上から高度1km程度までの地表の影響を強く受けた気層で、地表から大気へ熱や水蒸気を輸送し、積乱雲の発生環境を整える領域です。都市域では人口廃熱やビルなどにより周辺の田園地域とは異なった大気境界層が形成され、積乱雲の発生に影響を与えていると推測されています。
- 高密度地上観測網：気温・湿度・気圧・風・雨滴粒径分布を測定する12地点からなる観測網を大雨の発生が多いとされている都区西部に展開します。気象研究所などの山形県庄内平野における実績をもとに、各地点の間隔を3kmとし、気象庁のアメダスの17kmにくらべるとたいへん高い空間密度の観測が実現します。これにより積乱雲の発生前後の地上付近の気象状況が精密に測定されます。
- GPS受信網：GPS衛星から発射される信号が大気中の水蒸気によって真空中より遅くなることを利用して大気中の水蒸気の量を測定し

ます。気象庁は全国約1200地点の国土地理院のGPS受信網GEONETのデータを日々の数値予報の初期値解析に利用しています。首都圏稠密観測ではGEONETのデータを強化するためGPS受信機を水蒸気の流入口である東京湾岸や区内に5台設置します。東京湾上の『海ほたる』にも1台を設置する予定です。これらにより積乱雲の発生に必要な水蒸気の量を詳細に測定します。

その2 関東地方では既存の研究観測網が充実しています。

- その代表格はX-NETです。防災科研が中心となり、防衛大学校、中央大学、山梨大学、気象協会、電力中央研究所が参加して首都圏を覆うように7台の波長3cmのXバンドレーダーが運用されています。このうちのいくつかはマルチパラメータ機能により、電波が雨滴の中を通過する際に電波の位相が遅れることを利用して雨量計に匹敵する精度の雨量測定を行っています（Kato and Maki, 2009）。マルチドップラー機能により雨域内の風向風速のリアルタイム測定も可能です。
- 気象研究所のMPレーダーは、波長5cmのC

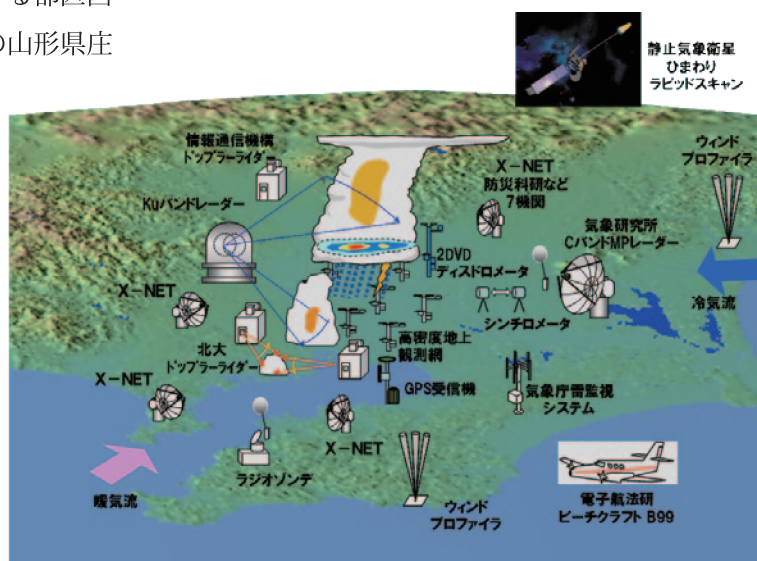


図2 首都圏稠密観測網のイメージ図。観測機器の数や配置は実際とは異なります。

バンド気象レーダーとしては世界に先駆けて送信機に固体素子を採用し、今後の気象レーダーの進路を占うものです。製造会社の(株)東芝も参加して固体素子特有の技術的課題を検討するとともに、高密度地上観測網と連動してMP機能を生かして積乱雲内の降水粒子の判別、雨滴粒径分布の測定を行います。また、柏・成田空港・羽田空港の気象庁現業レーダーやX-NETのレーダーとの連携で、積乱雲内の詳細な気流分布などの解析が可能となります。

その3 気象庁などの高層気象観測、レーダー、地上気象観測などの現業データも有効に利用する予定です。中でも静止気象衛星ひまわりの『ラピッドスキャン』が注目されます。ひまわりは通常日本を含む南北半球の雲画像を30分間隔で撮影し地上に送ってきます。ラピッドスキャンでは、日本周辺に限りますが5分程度の間隔で雲画像を撮影します。まだ試験観測の段階ですが、本プロジェクトではこのデータが利用できる予定です。これにより今までにだれも見ることがない積雲が発生し積乱雲に発展する様子が克明に観察されるはずで

研究の流れ

実際の稠密観測網による観測とその後の研究の流れをシナリオ風に考えてみます。このプロジェクトのため、気象研究所では夏の期間中の毎日、1kmメッシュの特別に細かい数値モデルによる予報実験を行います。これによって翌日首都圏に積乱雲が発生することが予想されると、観測用航空機が待機に入ります。

当日午前中には、観測用航空機が関東南部を周回して上空の気象観測を行います。各機関の研究者はリアルタイムに送られてくる観測データをディスプレイ上で監視します。時間の経過

とともに、ドップラーライダー群は海風前線が東京湾から都内に進入するようすを捉えるでしょう。大気境界層の観測では熱の鉛直輸送量の増大が認められるかもしれません。ひまわりラピッドスキャンが積雲の発生を認めると、Kuバンドレーダーは積雲の中の雲粒が集まって降水粒子に変化する過程を捉えるはずで

す。積雲が垂直方向に伸びて積乱雲に変化すると、X-NETや現業レーダーがその発達過程を追跡します。積乱雲の中で大雨が形成される過程を見るため、研究者の手で操作される気象研究所のCバンドMPLレーダーが特に積乱雲内部の降水粒子の鉛直分布の変化を追跡します。その後、積乱雲の発達、大雨の開始、積乱雲の分裂や併合、そしてその終焉までを各観測システムが追跡します。

観測で得られたデータは気象研究所のサーバにアーカイブされ、必要な品質管理を施した後に研究者間で利用に供されます。データ解析による事例解析、格子間隔が500mなどの高分解能数値モデルを使ったデータ同化による再現実験、統計的解析等が行われ、積乱雲の発生・発達のメカニズムと局地的大雨の発生過程が解明されていくことになります。

参考文献

- ・小倉義光、奥山和彦、田口晶彦、2002：SAFIRで観測した夏期の関東地方における雷雲と大気環境。I：雷雨活動の概要と雷雨発生のメカニズム。天気、49、541-553。
- ・Kato, A. and M. Maki, 2009; Localized heavy rainfall near Zoshigaya, Tokyo, Japan on 5 August 2008 Observed by X-band polarimetric Radar — preliminary analysis —. SOLA, 5, 89-92.
- ・吉崎正憲、中村 一、中村建治(編)、1999：つくば域降雨実験。気象研究ノート、193、288pp。