

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18125

研究課題名(和文) 船舶レーダーと画像解析に基づく都市域における降雨微細構造の解明

研究課題名(英文) Estimation of the Movement of Rainfall Structure using Marine Radar Images

研究代表者

小田 僚子 (ODA, Ryoko)

千葉工業大学・創造工学部・准教授

研究者番号：50553195

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：東京湾沿岸部にある建物屋上に設置したXバンドの船舶レーダーを用いて、高時空間分解能(約2秒, 12m分解能)で降雨の鉛直分布観測を実施した結果、以下の成果を得た。(1)雨滴が上空で確認され地上に到達するまでの降雨のリードタイムを評価した結果、強い降雨(対流性降雨)であっても地上に雨滴が到達する約10分前に降雨予測をできる可能性が示唆された。(2)降雨エコーをトレーサー粒子としたPIV解析から発達中の対流性降雨の内部では雨滴落下速度が局所的に $-4 \sim +4$ m/sと激しく変動していることがわかった。(3)局地的大雨前後の上空風変化から降雨直前に強い上昇流が発生していることが示された。

研究成果の概要(英文)：This study investigated vertical structure of rainfall in urban area using marine radar images. Marine radar is an X-band radar, which accomplishes high spatiotemporal resolution of the detection as 12-m range resolution and 2-s scan interval. This radar was installed near Tokyo Bay, and captured vertical slice of the droplet distribution. The major outcomes of this research are as follows: (1) We can detect the rainfall 10-minutes before the rain droplets reach at the ground under the condition of convective rainfall. (2) The moving speed of the group of droplets is estimated by using the particle image velocimetry which is applied to the echo images. It revealed that the spatial fluctuation of the moving speed of droplets ranged within 4 m/s under condition of convective rainfall. (3) Doppler lidar observation was conducted with the radar observation. It observed that strong updraft occurs just before the localized heavily rainfall.

研究分野：水工水理学

キーワード：レーダー 降雨 鉛直分布 乱流 大気擾乱

1. 研究開始当初の背景

(1) 首都圏には局地的大雨といった深刻な大気環境問題が顕在化している。これに対し、首都圏を対象とした極端気象の発生メカニズムの解明・予測システムの構築を目指した産官学一体の大規模なプロジェクト(科学技術戦略推進費,平成22~26年度,「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」)が展開されるなど,地上気象観測やレーダー等による稠密な観測網の整備に加え,都市域では観測実施が困難とされてきたラジオゾンデ多点観測が実施されるなど都市域の降雨予測に対する基盤整備が進められてきた。既往の研究から,局地的大雨の発生には隣接する東京湾から流入する海風や都市特有の地表面凹凸および熱的作用で発達する乱流構造との関連が指摘されているが,降雨前から降雨終息までの地表面-上空間の乱流輸送過程と降雨プロセスとの関連性を理解するには至っていない。

(2) 首都圏において多地点に配備された気象レーダーの多くは広域を対象としているため,鉛直分布を含む時空間的に詳細な降雨形態を把握することは難しい。

2. 研究の目的

1に記す背景を踏まえ,本研究では東京湾の沿岸部において気象レーダーに比べて設置が容易かつはるかに高い時間・空間解像度で雨雲を捉えることが可能な船舶レーダー(Xバンド)を用いて,降雨プロセスの詳細な時空間挙動(鉛直断面)を捉え,可搬型ドップラーライダー等の観測機器から得られる降雨前の風(乱流)との関連を大気乱流変動の視点から明らかにすることを目的とした。具体的には以下に記す通りである。

(1) 船舶レーダーにより降雨の鉛直分布を捉え,これらの画像データから Particle Image Velocimetry 解析(以降,PIV解析)手法により降雨中の大気乱流変動や降雨速度を上空から地上まで連続的に定量評価すること。

(2) 船舶レーダーと同地点に小型の可搬型ドップラーライダー(WLS8)を設置し,大気境界層下層の風鉛直プロファイルおよび乱流変動を測定することで,降雨前後での風系場の変動を評価すること。

3. 研究の方法

東京湾沿岸部の千葉県習志野市にある千葉工業大学新習志野キャンパスの建物屋上(高度42.35m)に,Xバンド(9,410MHz)の船舶レーダー(MDC-2920/光電製作所)を設置し,アンテナを縦向きに取り付けることで,高い時間・空間分解能(約2秒,12m分解能)で降雨の鉛直分布を捉える観測を実施した。図1に船舶レーダーの設置状況を示す。なお,南北断面の降雨を捉える設定とし,



図1 船舶レーダー(MDC-2920/光電製作所)の設置状況。アンテナを縦向きに取り付けることで降雨の鉛直分布を捉える。船舶レーダーの後ろに設置してあるのが複合気象装置と屋外カメラである。

観測範囲は鉛直方向に約4海里(約7.4km;1海里=1.852km),水平(南北)方向に約2海里(約3.7km)である。レーダー画像はBMPファイル形式で保存しており(画像サイズ:1280×1280px),白黒256階調(0~255)で表される。また,船舶レーダーと同地点には地上における雨滴の落下速度や粒形を捉えるディストロメータ(Parsivel-2/OTT社),気温や湿度,地上降雨量を把握するための複合気象装置(WS-601/Lufft社),雲の流れを監視するための屋外ネットワークカメラ(BB-HCM735/Panasonic)を設置し,通年で観測を実施した。さらに,2016年7~9月には可搬型ドップラーライダー(WLS8/Leosphere社)による同期観測も実施した。これらの観測機器を用い,以下に記す観点で研究を遂行した。

(1) 降雨形態の分類とリードタイムの評価

夏季の降雨に着目し,層状性降雨,浅い対流性降雨,深い対流性降雨に分類した。それぞれの降雨形態について,雨滴が上空で確認されてから地上に到達するまでの時間を降雨のリードタイムと定義し,降雨予測の可能性を検討した。

(2) 対流性降雨の鉛直構造変化と降雨中の大気乱流変動の評価

短い時間スケールで非常に強い降雨をもたらす対流性降雨について,発生・発達・終息段階の降雨構造の変化を捉え,降雨エコーをトレーサー粒子として用いたPIV解析手法により降雨中の乱流変動の定量評価を行った。

(3) 降雨形態と雨滴粒径分布との関係

ディストロメータにより地上付近の雨滴粒径分布を測定し,対流性降雨の発生・発達・終息段階の降雨形態と雨滴粒径分布及び落下速度の関係性を評価した。

(4) 降雨前後の上空風変化

対流性降雨時間中で最も降雨量が多く観測された時間を降雨極大時刻とし、その前後を降雨前・降雨後としてドップラーライダーによる上空風の解析を行った。

4. 研究成果

3に示した研究内容ごとに得られた成果を以下に記す。

(1) 降雨形態の分類とリードタイムの評価

降雨形態は、雨粒の融解層であるブライトバンドを伴う“層状性降雨”(図2(a))と非地形性の上昇流によって起こる“対流性降雨”(図2(b))の大きく2つに分類され、対流性降雨はさらに、局地的大雨のように短時間で降雨強度が強い“深い対流性降雨”(図3参照)と、降雨強度が比較的弱い“浅い対流性降雨”(図2(b))に区別できる。本研究では夏季の降雨に着目し2015年6~9月を解析対象として、上記の3形態の発生頻度を把握するとともに、それぞれの降雨形態における降雨予測の可能性を検討した。

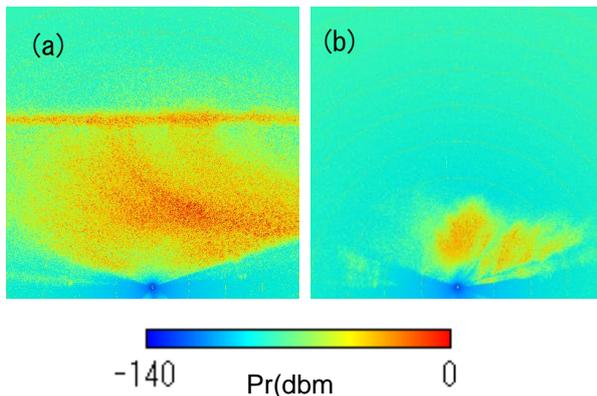


図2 船舶レーダーで観測された(a)層状性降雨と(b)浅い対流性降雨の例

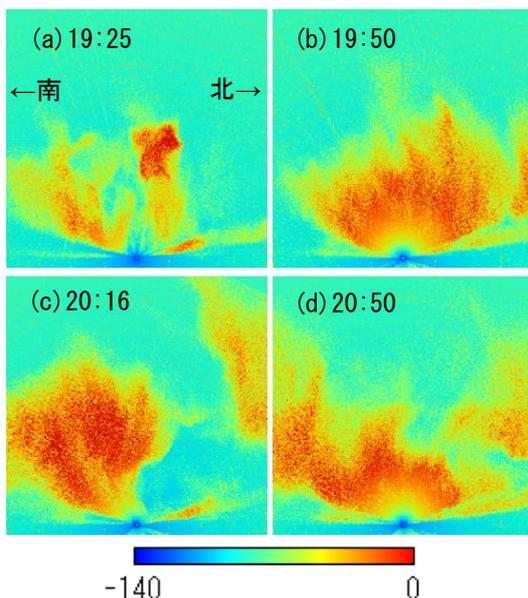


図3 深い対流性降雨の時間変化(2015年6月23日19:25~20:50)

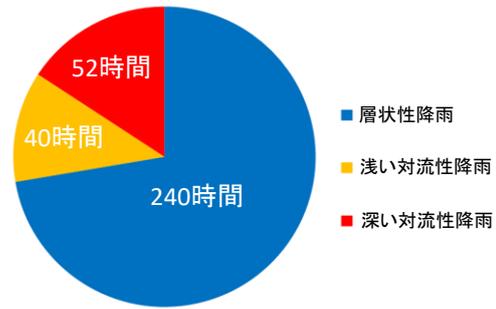


図4 降雨形態の分類結果

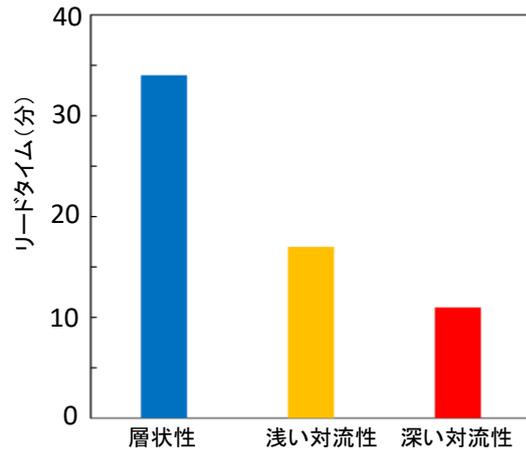


図5 降雨形態別の平均リードタイム

図4に降雨形態の分類結果を示す。対象期間の総降雨時間は311時間であり、全体の割合を見ると層状性降雨が240時間(72%)、浅い対流性降雨は40時間(12%)、深い対流性降雨は52時間(16%)であった。なお、上層にブライトバンドを伴う層状性降雨が確認され、下層で深い対流性降雨が確認された時間が21時間あり、この降雨は層状性降雨と深い対流性降雨にそれぞれ加算した。夏季において、層状性降雨が降雨事例の大部分を占めていることがわかった。

それぞれの降雨形態における平均リードタイムは、層状性降雨で34分、浅い対流性降雨で17分、深い対流性降雨では11分となった(図5)。深い対流性降雨のリードタイムが最も短いですが、降雨の鉛直分布を時空間的に高頻度で観測することができれば、10分間降雨量10mmを超える強い降雨であっても、地上に雨滴が到達する約10分前に降雨予測をできる可能性が示された。

(2) 対流性降雨の鉛直構造変化と降雨中の大気乱流変動の評価

4(1)で示したように深い対流性降雨の発生頻度は少ないが、短い時間スケールで非常に強い降雨をもたらす対流性降雨の鉛直構造を把握することは重要である。しかしながら、対流性降雨の発生・発達・終息段階の降雨構造変化の詳細については観測事例が少ないことから不明な点が多い。図3は2015年6月23日19:25~20:50において観測され

た“深い対流性降雨”の鉛直構造である。降雨エコーは観測地点の南側から発生しており、19:25には上昇流によって雨が巻き上がっている様子が確認された(図3(a))。19:00の地上風分布や19:30~20:00にかけての気温変化から、観測地点に風が収束し冷たい空気塊が流入していたことがわかった。19:50には降雨エコーが強まり複合気象装置でも10分間降水量12mmを観測した(図3(b))。20:16には北側で一時的に降雨が弱まり(図3(c))、これに対応して20:30の10分間降水量は2.5mmと急激に減少していた。その後、再度降雨エコーが強まった後、徐々に弱い降雨に変わっていく様子が観測された(図3(d))。降雨エコーが短い時間で発生・発達し終息する複雑な降雨形態を示した。

図6(a)に降雨エコー発達時(19:26)の速度ベクトルの鉛直分布を示す。暖色系が上昇流、寒色系が下降流を表す。下層では雨滴が地上に向かって落下しているが、上層では上空に巻き上がっている様子が見られる。図6(b)は19:26~19:28の速度ベクトルの平均高度分布である。上述の通り、上層3.5km以下では約 1 m s^{-1} の下降流が卓越しているが、高度4km付近では約 4 m s^{-1} の上昇流も観測されており、雨滴落下速度の標準偏差が大きいことから上昇・下降流の変動が激しく生じていたことがうかがえる。発達中の対流性降雨の内部で、局所的に大気が激しく乱れている様子を観測により確認できたことは、降雨プロセスの解明に資する観測として極めて意義深い。今後、事例を増やした統計的な解析により、対流性降雨中の大気擾乱の実態が明らかになることが期待される。

(3) 降雨形態と雨滴粒径分布との関係

2016年8月より船舶レーダーと同地点に導入されたディストロメータにより、地上における雨滴粒径分布を捉え、降雨形態の変化との関係性について検討を行った。図7は局地的大雨が発生した2016年8月18日の15:35~17:45までの降雨強度、雨滴粒径、落下速度の時間変化である。なお、雨滴粒径と落下速度に関しては全雨滴に対する割合で評価している。層状性降雨の特徴であるブライトバンドが見られた時間をCase1(発達前)、Case3(終息)、対流性降雨の特徴である上昇流により巻き上げられたエコーが見られた時間をCase2(発達)として分類し解析を行った。

Case1では1mm未満の小さな粒径が占めている。これは降雨の発達前の段階であり雨滴の衝突・併合がほとんど行われなかったためと考えられる。Case2の発達段階では16:05頃から降雨強度が強くなり始め、2mm以上の大きな雨滴が急激に増え約20%を占めていた。それに伴い落下速度も 5 m s^{-1} 以上が約30%を占めていた。しかし、1mm未満の小さな雨滴は減少することなく約60%も存在している。対流性降雨の強い上昇流によ

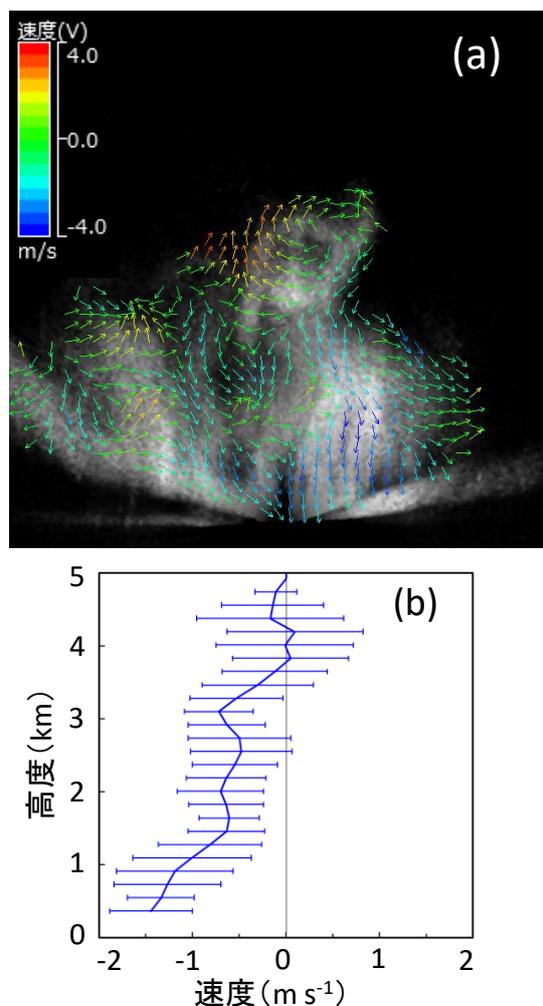


図6 PIV解析による降雨エコー発達時の(a)速度ベクトル鉛直断面図と(b)速度ベクトル

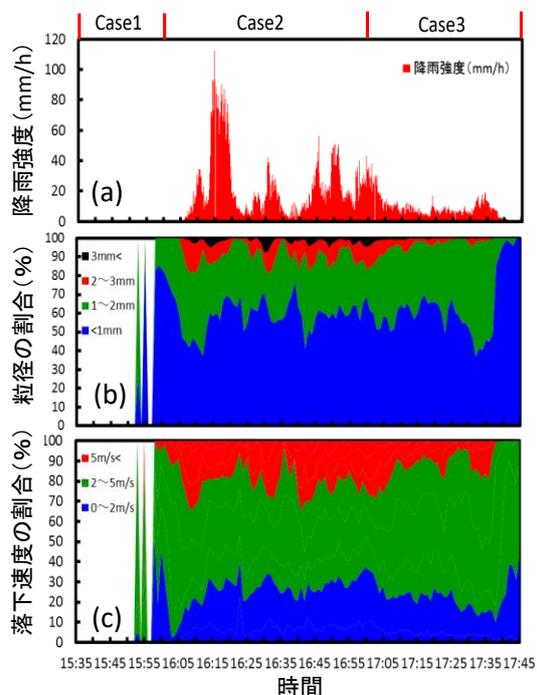


図7 対流性降雨の発達段階の違いによる(a)降雨強度、(b)雨滴粒径、(c)落下速度の時間変化。Case1は発達前(層状性)、Case2は発達中(対流性)、Case3は終息段階(層状性)を表す。

って雨滴の衝突・併合が頻繁に行われ大小様々な大きさの粒径が現れたと考えられる。Case3は降雨の終息段階であり、降雨強度も徐々に弱まっていることがわかる。2mm以上の大きな雨滴も終息するに伴い減少していき、17:45には1mm未満の小さい雨滴が約100%と支配的となった。しかし、同時刻の落下速度に着目すると1mm未満の雨滴でも落下速度にばらつきがあることがわかる。これは衝突・併合が行われた際に生じた小さな雨滴が降雨の終息に伴い落下してきたことが考えられる。

降雨強度の強い対流性降雨であっても大きな雨滴のみならず小さな雨滴も多く存在し、層状性降雨では同じ降雨イベント内であっても大小様々な大きさの雨滴が存在していることがわかった。

(4) 降雨前後の上空風変化

船舶レーダーと同地点に可搬型ドップラーライダーを設置し、2016年7月8日～9月5日にかけて上空風の集中観測を実施した。本ライダーは高度500mまでの下層の風を高度分解能20m、時間分解能約7秒で測定できるものである。観測期間内で降雨が確認された日は15日間であり、このうち局地的大雨が発生した2016年8月2日に着目し、降雨前後の上空風の特徴について評価した。図8は3:30～4:30にかけて観測された鉛直風の結果である。寒色系は下降流、暖色系は上昇流であることを意味する。4:20～5:50までに局地的な大雨が観測され、降雨極大時刻である4:30には10分間降雨量13.5mmを記録した。降雨開始30分前の3:50頃には下層から上層まで約 1.3 m s^{-1} の上昇流が卓越しその直後に強い下降流が見られた。この下降流の見られたタイミングで船舶レーダーでは降雨エコーが確認されている。降雨前に風が収束しており、そのため上昇流が強まり、急激に激しい降雨がもたらされたと考えられる。降雨前に強い上昇流が発生することは以前より指摘されているが、降雨プロセスの前後における大気擾乱（上昇・下降流）を直接的に観測できた事例は少なく、解析事例が増えることで局地的大雨発生前の大気擾乱の一般的な特性を明らかにすることが期待できる。

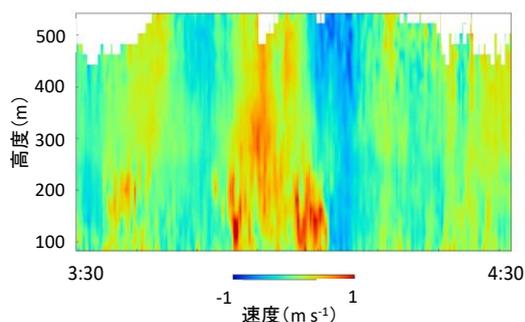


図8 局地的大雨事例における降雨前の鉛直風 (2016年8月2日 3:30～4:30)

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 松井貴裕, 小田僚子, 船舶レーダーによる降雨鉛直観測の試み, 日本気象学会 2016年度春季大会, P121, 2016年5月18日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都・渋谷区).
- ② 松井貴裕, 小田僚子, 船舶レーダーで観測された降雨の鉛直構造, 第43回土木学会関東支部技術研究発表会, 2016年3月14日, 東京都市大学世田谷キャンパス (東京都・世田谷区).
- ③ Daiki Hashikita, Ryoko Oda, Hirofumi Sugawara, Naoko Seino, Monitoring of atmospheric turbidity and cloud above Tokyo using ground based network cameras, 9th International Conference on Urban Climate, 2015年7月23日, Toulouse (France).

[その他]

ホームページ等

<http://www.le.it-chiba.ac.jp/oda/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小田 僚子 (ODA, Ryoko)

千葉工業大学・創造工学部・准教授

研究者番号：50553195