

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01163

研究課題名（和文）都市における「暖かい雨」メカニズムの解明と数値予報モデルの最適化

研究課題名（英文）Elucidation of the mechanism of "warm rain" in urban atmosphere and optimization of numerical forecast models

研究代表者

三隅 良平（MISUMI, Ryohei）

日本大学・文理学部・教授

研究者番号：20414401

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：都市域ではエアロゾル粒子が多く、「暖かい雨」による降水形成が起こりにくいと考えられてきた。にもかかわらず、東京周辺ではしばしば暖かい雨が観測される。そのメカニズムを、Kaバンドレーダーや雲粒スペクトロメータ等を用いた観測、および数値シミュレーションで調べた。その結果、雲粒数濃度が1200個/cm³未満の場合は、雲粒の凝結過程によって併合成長可能な小雨滴が形成され、落下しながら他の雲粒を併合して雨滴を形成することが分かった。また気象庁非静力学モデルに、観測に基づく雲粒粒径分布を導入することにより、雲水から雨への自己変換率が高まり、暖かい雨の予報に大きな影響を及ぼすことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東京上空におけるエアロゾル、雲凝結核、雲粒の数濃度のデータが学術論文を通して公表され、気象モデルの基礎となるデータが提供された。また、東京で起こる「暖かい雨」のメカニズムが明らかになり、この成果を通して「雨滴がどのようにして形成されるのか」について概念モデルが構築された。さらに雲粒粒径分布の仮定が、暖かい層状性降水の予報に影響を及ぼすことが分かり、数値予報モデルの高度化の方向性が示された。

研究成果の概要（英文）：It has been believed that precipitation through the warm rain process is less likely to occur in urban areas due to the abundance of aerosol particles. However, warm rain is often observed in Tokyo. The warm rain process in Tokyo was investigated through observations using Ka-band radar, a cloud droplet spectrometer, and numerical simulations. The results showed that large droplets formed through condensation process, and the droplets grew through collision coalescence with other particles. This process could occur when the cloud droplet number concentration was less than 1200 cm⁻³. An introduction of observation-based cloud droplet size distributions into the JMA nonhydrostatic model had a significant impact on the forecasting of warm stratiform rainfall through the increase of auto-conversion rate from cloud water to rain.

研究分野：気象学

キーワード：降水システム 雲物理 暖かい雨 雲粒

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

雨滴は雲の中でどのようにして形成されるのか。あたり前とも思える問いであるが、実際にはそのメカニズムが完全に解明されているわけではない。歴史を遡ると、雲の中に雨粒が形成される過程を最初に理論的に示したのは大陸移動説を提唱した Wegener であり、1933 年に Bergeron によって世に広く知られた。彼らの考えは、過冷却水滴と氷晶との間の飽和蒸気圧の違いによって氷晶が成長し、やがて融解して雨滴が形成されるもので「冷たい雨」と呼ばれている。その後、氷晶を含まない雲においても雲粒同士の衝突併合によって雨滴が形成されることが分かり、後者は「暖かい雨」と呼ばれている。

「暖かい雨」の過程において、雲粒どうしの衝突併合が起こるためには、雲粒が十分大きな落下速度をもつ必要がある。初期の研究では、大気中の巨大エアロゾル(直径数 μm)が凝結核として働き、それが凝結成長して雨滴の種となると考えられてきた。しかしその後の研究で、巨大エアロゾルの存在は必ずしも「暖かい雨」に必要なではないことが分かってきた。たとえば海洋上のような凝結核の少ない環境では、巨大エアロゾルがなくても、通常の雲凝結核の成長によって雲粒が十分に大きくなり、衝突併合が起こり得る。一方、凝結核となるエアロゾル粒子が豊富な都市域では、粒径の小さな雲粒が数多く形成されるため、雲粒が大きくなりやすく、「暖かい雨」が起こりにくいと考えられてきた。

しかし近年、東京のような大都市でもしばしば暖かい雨が起きていることが指摘されている。例えば 2010 年 7 月 5 日に東京で発生した豪雨は、雲頂高度が 6 km 未満であり、「暖かい雨」によって引き起こされた豪雨であったと結論づけられている。また研究代表者らも、東京近郊において、暖かい雨と考えられる事象を Ka バンドレーダで観測している。東京のように凝結核として働くエアロゾルが多く、大きな雲粒が形成されにくい環境で、どのようにして暖かい雨が起るのかは興味深い研究テーマである。

一つの可能性は、人間活動の影響である。都市における人間活動により、粒径が大きなエアロゾル粒子が大気に放出されているとすれば、それが粒径の大きな雲粒を形成し、暖かい雨のきっかけをつくっていることが考えられる。しかしこれは仮説であって、これまで都市における「暖かい雨」メカニズムを、観測に基づいて研究した例はない。なぜなら散発的な航空機観測では、頻度がそれほど多くない「暖かい雨」を捉えるのが困難だからである。

2. 研究の目的

本課題の目的は、東京のような凝結核が豊富な環境下で、どのようにして「暖かい雨」が起こるのかを明らかにし、その成果を数値予報モデルに反映させることである。

この目的を達成するためには、「暖かい雨」が起こる事例において、雲の中で雲粒を連続的に観測し、雲粒粒径分布の変動を解析する必要がある。そのための方法の一つは、航空機を用いた雲粒のサンプリングである。しかし航空機観測は多額の経費を要するとともに、長期的・連続的な観測が困難であり、本目的において着実な成果を得るのが難しい。そこで本研究では、世界一の高さをもつ電波塔である東京スカイツリーを利用する。東京スカイツリーは高さが 634m であり、しばしば塔体上部が下層雲に覆われる。東京スカイツリーに観測機器を設置することによって、下層雲における雲粒粒径分布の連続的な変化を直接観測することができる。

東京スカイツリーを用いた雲観測のメリットは、長期間にわたって多数の降水事例が観測できることである。これにより、本申請が目的とする「暖かい雨」の事例についても着実にデータが得られるとともに、多くの比較事例が得られることが期待できる。このような塔体を用いた雲粒観測は、世界でも例を見ないものである。

また「暖かい雨」メカニズムを解明するため、観測された事例の数値シミュレーションを行う。本提案では、2 種類の数値シミュレーションモデルを用いる。一つは研究代表者と分担者が共同で開発してきた詳細雲物理モデルで、雲粒粒径分布とエアロゾルの粒径分布を同時に扱うことができるユニークなものである。もう一つは数値予報モデル JMA-NHM で、降水過程は簡略化して表現されているものである。詳細雲物理モデルを用いて都市における「暖かい雨」メカニズムを解明し、さらに数値予報モデルの降水過程の最適化を図ることにより、降水予報技術の高度化を目指す。

3. 研究の方法

本研究では下記の項目により東京における暖かい雨メカニズムの解明と数値予報モデルの最適化に取り組んだ。

(1) 東京スカイツリーにおけるエアロゾル・雲粒・雨滴観測

東京スカイツリー高度 458m 地点において、研究代表者らがすでに設置している雨滴計(Laser Precipitation Monitor)、ドリズル(霧雨)計(Meteorological Particle Sensor)、雲粒スペクトロメータ(Fog Monitor)、雲凝結核計(CCN Counter)、走査型移動度粒径測定器(Scanning Mobility Particle Sizer)を連続的に運用し、東京上空におけるエアロゾル粒径分布、雲凝結核の個数、雲粒粒径分布、霧雨・雨滴の粒径分布を観測する(図 1)。また地上観測として、雲底

計(シーロメータ)を用いた雲底高度や混合層高度の観測、雨滴計による雨滴粒径分布観測を行う。さらにKaバンドレーダおよびXバンドレーダを用いて下層雲の詳細な構造を観測する。これらの観測を通して、数値シミュレーションへの入力データや比較データを得る。

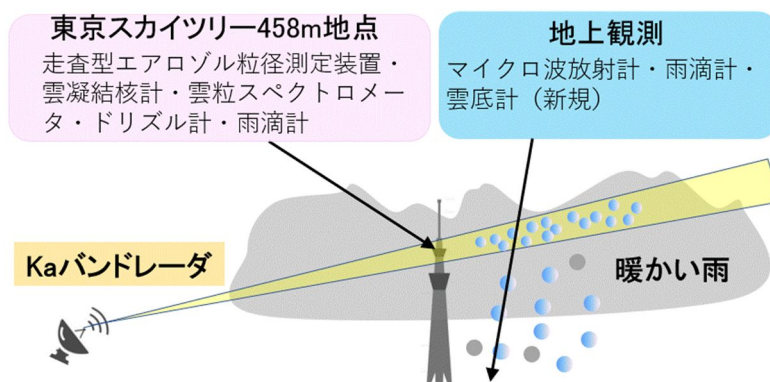


図1 . 本課題における観測の概要

(2)「暖かい雨」メカニズムの解明

研究代表者と分担者がこれまでに開発してきたビン法雲物理モデルを活用し、観測された雲粒粒径分布の変動、雨滴形成過程、下層雲の構造の変化を再現し、東京における暖かい雨メカニズムを解明する。具体的には、東京スカイツリー458 m付近で観測された雲底付近の雲粒粒径分布を入力値としてシミュレーションを行うことにより、雨滴の形成過程を調べる。

(3) 数値予報モデルの最適化

気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)を用いて観測された事例のシミュレーションを行い、結果を観測データと比較することにより、数値予報モデルにおける雨滴形成スキームの最適化を図る。

4 . 研究成果

(1)東京におけるエアロゾル・雲相互作用の実態の解明

暖かい雨が起る大気環境を調べるため、東京スカイツリー高度458 m地点でエアロゾルと雲粒の連続観測を行い、エアロゾル粒子の数濃度と雲粒数濃度の関係を調べた。エアロゾル・雲相互作用は、エアロゾル数濃度の増加に雲粒数濃度が敏感に応答する「エアロゾル制限レジーム」、ほとんど応答しない「上昇流制限レジーム」、その中間の「遷移レジーム」に分けることができた。これらのレジームの違いは、雲粒が形成される時の過飽和度の違いで説明できた。エアロゾル制限レジームは、北風が卓越するときに頻繁に現れ、東京周辺の局所的な汚染源がエアロゾル雲の相互作用に影響を与えていることを示している。

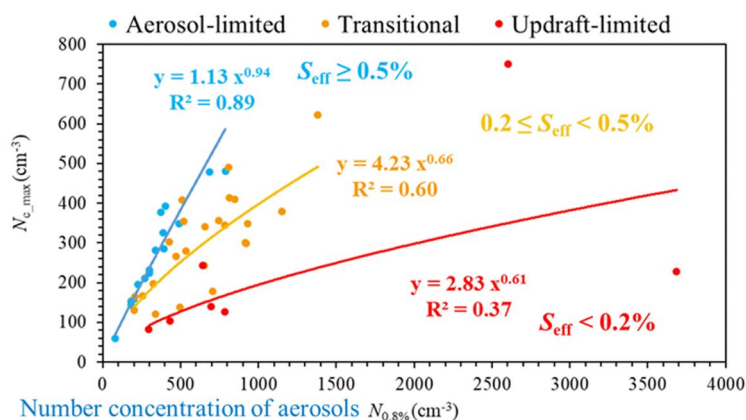


図2 . 東京上空におけるエアロゾル粒子の数濃度(横軸)と雲粒数濃度(縦軸)の関係。水色が「エアロゾル制限レジーム」、赤色が「上昇流制限レジーム」、黄色が「遷移レジーム」を表す。

(2)東京における「暖かい雨」の形成機構の解明

エアロゾル粒子が豊富な都市域での「暖かい雨」形成機構を調べるため、2019年8月19~20日に東京付近に激しい雨をもたらした暖かい対流雲について、Xバンド偏波レーダ、Kaバンドレーダ、雲粒スペクトロメータ、光学式ディストロメータを用いてその特徴を記述するとともに、

詳細雲物理モデルにより降水形成過程を議論した。レーダで観測されたパラメータは、レーダ反射因子 (Z_H) と比偏波間位相差が下層ほど増加する傾向にあり、降雨粒子が併合成長しながら落下していることが示唆された。一方、レーダ反射因子差 (Z_{DR}) は下層ほど減少する傾向があり、エコー頂付近に低濃度の大きな雨滴が存在することが示唆された。また降水雲は複数のストリーク状エコーで構成されていた。地上では、降水強度が強くなると直径 2 mm 以上の雨滴と直径 1 mm 以下の雨滴の両方が増加し、その結果、雨滴粒径分布の形状は弓型となった。雲底付近の雲粒数濃度は、平均 370 cm^{-3} 、最大値 606 cm^{-3} で、東京の下層雲の平均値 (213 cm^{-3}) より大きかった。パーセルモデル・シミュレーションの結果は、凝結過程を通して高度 1.8 km より上空では、雲粒の有効半径が暖かい雨を発生させる閾値となる $13 \mu\text{m}$ を超える。詳細雲物理モデルを用いた感度テストの結果によると、雲粒数濃度が 1200 cm^{-3} を超えると暖かい雨が起こりにくくなる。

これらの事実を踏まえ、図 3 のような降水機構が推定された。降水システムの内部を上昇するパーセルにより、主として凝結過程により、高度 2 km より上層に併合可能な降水粒子 (collision-coalescence initiators; CCIs) が形成される。CCIs は落下しながら他の雲粒を併合し、幅 1 km 程度のストリーク状エコーを形成する。多くのパーセルは高度 2~2.5 km で浮力を失い、それより下層でストリーク状エコーを形成するが、一部のパーセルは強い上昇流を伴って高度 4 km に達する。高度 4 km に達するパーセルは少ないため、低濃度で粒径の大きな雨滴が形成され、大きな Z_{DR} と小さな Z_H を示す。形成された大きな雨滴は落下し、高度 3 km より下層で比較的粒径の小さい雨滴と混合し、 Z_H は増加するが Z_{DR} が減少する。こうして強い降水は、大雨滴と小雨滴が混じった雨滴粒径分布を形成する。

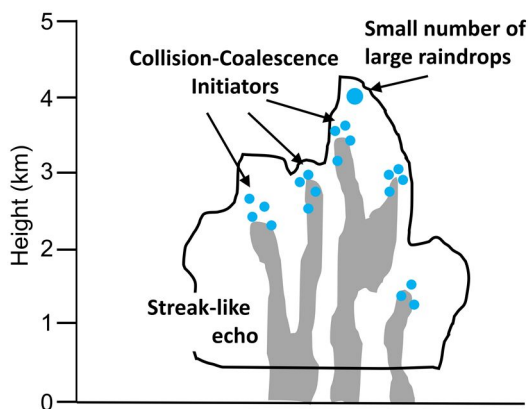


図 3 . 暖かい対流性降水の模式図

(3) 数値予報モデルの最適化

気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) の 2 モーメントスキームでは、観測に基づかない雲粒粒径分布の既定値が与えられている。この雲粒粒径分布は、東京の下層雲の観測値に比べて分布の幅が狭い。そこで東京周辺で観測された暖かい層状性降水について、JMA-NHM の既定値を用いた場合と、東京スカイツリーで観測された平均的なパラメータを与えた場合とでシミュレーションの結果を比較した。その結果、既定値を用いたシミュレーションでは、観測データと比較して雲粒の数濃度が大きく、レーダ反射強度が小さくなった。この結果は、雲粒粒径分布が実際より狭いために生じたと解釈された。観測に基づく雲粒粒径分布パラメータを与えることにより、雲粒数濃度が小さくなり、レーダ反射強度が大きくなった。のみならず、雲水から雨への自己変換率が高まり、降水量が増加した (図 4)。これは直ちに降水量の予報精度を改善するものではないが、より現実に近い雲粒粒径分布を仮定することは、暖かい雨の予報において大きな影響を及ぼすことが分かった。

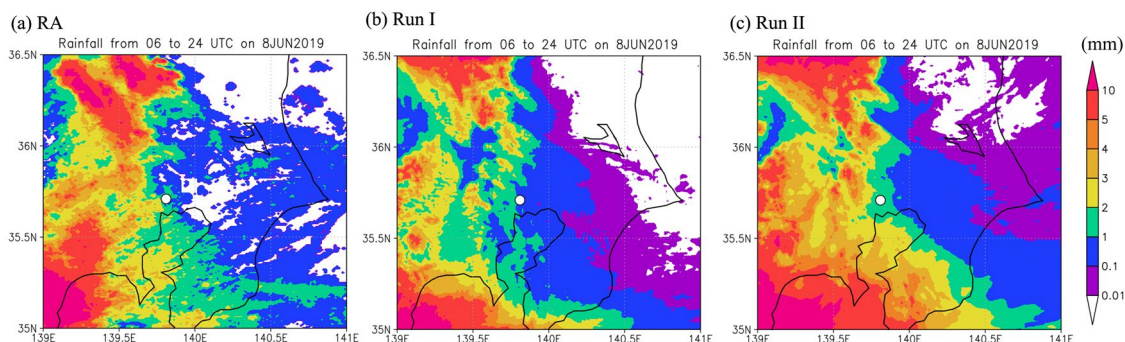


図 4 . 2019 年 6 月 8 日 06~24UTC における総降水量。(a)解析雨量、(b)JMA-NHM によるシミュレーション、(c)観測に基づく雲粒粒径分布に変更した場合のシミュレーション。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 三隅 良平, 岩本 洋子, 當房 豊, 森 樹大, 三浦 和彦	4. 巻 37
2. 論文標題 東京スカイツリーでのエアロゾル・雲研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 エアロゾル研究	6. 最初と最後の頁 96-103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11203/jar.37.96	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Misumi Ryohei, Uji Yasushi, Miura Kazuhiko, Mori Tatsuhiro, Tobo Yutaka, Iwamoto Yoko	4. 巻 272
2. 論文標題 Classification of aerosol-cloud interaction regimes over Tokyo	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmospheric Research	6. 最初と最後の頁 106150 ~ 106150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosres.2022.106150	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Misumi Ryohei, Uji Yasushi, Maesaka Takeshi	4. 巻 20
2. 論文標題 Microphysical Characteristics of Warm Convective Precipitation in Tokyo	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 8 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/sola.2024-002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Matsuoka Yuta, Misumi Ryohei, Maesaka Takeshi	4. 巻 未定
2. 論文標題 Structure of shallow squall line-like precipitation system observed in Kanto Region, Japan, using Ka-band and X-band radars	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Atmospheric Research	6. 最初と最後の頁 107350 ~ 107350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosres.2024.107350	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto Akihiro, Ryohei Misumi	4. 巻 53
2. 論文標題 Numerical simulations of a warm rain event observed in Tokyo, Japan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Research Activities in Atmospheric and Earth System Modelling/WMO	6. 最初と最後の頁 5-09 ~ 5-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 三隅良平, 宇治靖, 前坂剛
2. 発表標題 都市大気で起こる暖かい雨 – 東京都心部における事例解析 –
3. 学会等名 日本気象学会2023年度春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三隅良平
2. 発表標題 令和元年東日本台風に伴う豪雨のメカニズムについて
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会 [U-11] 気圏・水圏・地圏にまたがる複合災害 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三隅良平
2. 発表標題 都市大気で起こる暖かい雨 東京都心部における事例解析
3. 学会等名 2022年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三隅良平，宇治靖，當房豊，三浦和彦，森樹大，岩本洋子
2. 発表標題 東京におけるエアロゾル・雲相互作用のレジーム分類
3. 学会等名 日本気象学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三隅良平，橋本明弘
2. 発表標題 JMA-NHM 2 モーメント雲微物理スキームへの観測に基づく雲粒粒径分布の導入実験
3. 学会等名 日本気象学会2024年度春季大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	橋本 明弘 (HASHIMOTO Akihiro) (20462525)	気象庁気象研究所・気象予報研究部・室長 (82109)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------