−研究論文 (原著論文)一

都市型豪雨生成に及ぼす大気汚染物質の影響評価 —新規開発した分割型豪雨採取システムと地理情報システムの活用—

須合 俊貴^{1*},藤原 博伸^{1,2},大河内 博¹,内山 竜之介¹, 中野 孝教¹,鴨川 仁³,荒井 豊明⁴

Impact Assessment of Air Pollutants on the Formation of Summer Urban Heavy Rainfall: Utilization of Newly-developed Sequential Heavy Rain Collection System and Geographic Information System

Toshiki Sugo^{1*}, Hironobu Fujiwara^{1, 2}, Hiroshi Okochi¹, Ryunosuke Uchiyama¹, Takanori Nakano¹, Masaru Kamogawa³, Toyoaki Arai⁴

- 1 Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan
- 2 Joshiseigakuin High School, 3-12-2 Nakasato, Kita-ku, Tokyo 114-8574, Japan
- 3 Global Center for Asian and Regional Research, University of Shizuoka, 3-6-1 Takajo, Aoi-ku, Shizuoka-City, Shizuoka 420-0839, Japan
- 4 Transtech Inc., 1-11-5 Higashi gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0022, Japan
- * Corresponding author: (E-mail) toshiki.asce@ruri.waseda.jp

Urban heavy rains (UHR) during the summer were sequentially collected at Shinjuku by a newly-developed heavy rainwater collector. Geographical distributions of air pollutants just before UHR were also performed by a GIS in the 23 wards of Tokyo. The volume-weighted mean pH of UHR from 2012 to 2019 was 4.41 (n=16), which was lower than other types of rainfall. The total concentration of major inorganic ions in UHR was similar to that in normal rainfall and the sum of H⁺, NO₃⁻, and SO₄^{2⁻} accounted for 62.3% of UHR. Compared to typhoon heavy rain, these acidic components in UHR showed a gradual decrease in concentration during the first stage and nearly constant later. The wet deposition fluxes of H⁺, NO₃⁻, and SO₄^{2⁻} in UHR were 31, 20, and 15 times that in normal rainfall, respectively. A rader image analysis showed that UHR has three patterns, i.e. upper pattern, eastern pattern, and northwestern pattern. A highly concentrated area of PM_{2.5} was formed near the formation area of UHR, but it disappeared before UHR. This suggests that air pollutants were transported and accumulated in the formation area of UHR, and rose to the upper and pattern involved in formation and development of cumulonimbus clouds.

Key words : urban heat island, Geographic Information System, Cloud condensation nucleus, air pollutants, sequential type heavy rain collection system

1. はじめに

気象庁によると、1976年から2018年の期間で時間雨量 50 mm以上の発生回数は10年あたりで27.5回の割合で増加 しており、最近10年間(2009-2018年)の平均年間発生回数 (約311回)は統計期間最初の10年間(1976-1985年)の平均 年間発生回数(約226回)と比べて約1.4倍に増加している (気象庁,2019a)。記録的短時間大雨の発令回数は2017年 には107回、2018年には123回に達し、7月から9月に集中 している。記録的短時間大雨とは数年に一度程度しか発生し ないような短時間の大雨であり、時間雨量でおおむね80-100 mmを超えると発令される。2019年には、台風19号 「ハギス」による季節外れの大雨が10月にもたらされ、関東 から東北に至る大規模な地域で河川氾濫を引き起こし、非常 災害と激震災害に指定された。観光地として有名な神奈川県 箱根では観測史上最大となる大雨が降り、48時間降雨量は 1001.5 mmに達した(気象庁, 2019b)。

一方、20世紀後半から世界中で都市域における夏季の大 雨発生頻度が増加している (Changnon, 1968; Atkinson, 1971; Jauregui and Romales, 1996; Mikami et al., 2005; Goswami et al., 2006; Dou et al., 2015; Zhou et al., 2017; Uchiyama et al., 2018)。特徴としては数十分の短期間に狭 い範囲に激しい雨をもたらすことであり、気象庁では局地的 大雨と定義している。一般に、雲の生成には水蒸気、水蒸気 を上空に持ち上げる強制力、雲凝結核の3つが重要な因子で ある。これまで、都市域における局地的大雨の原因として、

都市郊外と比較して都市部の温度が上昇する都市ヒートアイ ランド現象 (Urban Heat Island phenomenon: UHI) の影響が 指摘されてきた。100万人以上の人口を抱える都市の年間平 均気温は周囲より13℃高いことが報告されている (US EPA, 2019)。ヒートアイランド現象は大気上層と下層の気温差を 生み出し、上昇気流を発生させることによって雲の生成を促 す (藤部, 2004; Mikami et al., 2005; Ryu et al., 2015; Holst et al., 2016)。都市域の気温上昇は水蒸気を上空に持ち上げ る強制力として重要であるばかりではなく、オゾン濃度を局 地的に増加させ(Kheim et al., 2010; Ooka, 2011)、NO_xや SO2の酸化を促進する。都市域では大気汚染度が高く、東京 ではNO_xの年間平均濃度は16 ppbv、SO₂の年間平均濃度は 1 ppbvである (東京都環境局, 2019a)。酸化生成したHNO₃ やH₂SO₄は、一部がNH₃と反応してNH₄NO₃、NH₄HSO₄、 (NH₄)₂SO₄などの吸湿性二次粒子を生成する (McMurry et al., 1983; Seinfeld and Pandis, 2006)。これらの吸湿性粒 子は気温上昇に伴って発生した急激な上昇気流により上空へ 運ばれる過程で有効な雲凝結核として作用し、積乱雲を局地 的かつ継続的に発生する (Bently et al., 2010)。都市大気で はないが、Thornton et al. (2017) は、清浄な外洋大気では船 舶から放出されるPM25により航路上に雷雲が発達し、発雷 回数が増加することを報告している。Rosenfeld et al. (2008)は、大気汚染によるエアロゾル粒子数濃度の増加に より小さい雲粒数濃度を増大させることにより、下層におけ る降水形成が抑制されることを報告している。その結果、雲 粒がより高高度まで運ばれて氷晶を形成し、潜熱放出により 積乱雲内での対流が強化される。対流性雲の発達は大量の水 (雲粒および氷晶)を大気中に保持することを意味しており、 局地的大雨を引き起こすことになる。首都圏における局地的 大雨に対する二次生成無機粒子の影響はUchiyama et al. (2017)によって報告されており、大気汚染物質の集積、二 次粒子生成による多数の雲粒生成、その後の海風流入よる大 量の水蒸気供給と巨大雲凝結核となる海塩粒子の流入が局地 的大雨を引き起こすトリガーとなることを指摘している。し かし、降水中成分の時系列変化、および降水前後における大 気汚染物質の濃度分布状況については未解明である。

都市域における局地的大雨の予報は未だに困難であるが、 これは数値予報モデルの解像度の問題と、前述したようなエ アロゾルと降水の相互作用について未解明な点が多くあるた めである。解像度に関しては、気象庁が2013年5月29日よ り局地モデルの運用を開始している。水平方向に2kmの解 像度であり、地上気温などの予報精度は高くなっている。 Araki et al. (2015)は、一般環境大気測定局で測定された風 向・風速、気温、相対湿度を数値予報モデルへデータ同化す ることによって、局地豪雨事例の一部を再現することに成功 している。したがって、さらなる予報精度の向上のために は、エアロゾルと降水の相互作用にかかわるモデル開発およ びその検証・評価に資する観測データを蓄積する必要があ る。





本研究は、台風性および前線性豪雨以外の10分雨量5 mm を超える局地的大雨を都市型豪雨と定義し、大気汚染物質が 都市型豪雨生成に及ぼす影響の解明を目的としている。その ため、雨水の時系列サンプリングを行い、都市型豪雨の化学 的特徴を明らかにした。さらに、一般環境大気測定局の測定 結果を用いて、豪雨直前の大気汚染物質の状況を地理情報シ ステムで解析することにより、大気汚染物質の集積過程につ いて検討を行った。

2. 研究方法

2.1 雨水の採取地点

雨水の採取は、東京都新宿区に位置する早稲田大学西早稲 田キャンパス51号館屋上(東経139.71度、北緯35.71度、高 度65 m)で行った(Fig. 1)。西早稲田キャンパスは平均流出入 交通量が25,264台/12 hの明治通り(警視庁, 2018)に隣接し ている。新宿区の人口は34.9万人であり(新宿区役所, 2019)、東京湾から北西約6 kmに位置し、日本最大の工業地 帯である京浜工業地帯に近接している。南風が卓越すると、 沿岸部で排出された大気汚染物質とともに海塩粒子を含む 湿った海風が流入する。東京の二酸化硫黄濃度の7割は東京湾 で排出される船舶排ガス由来である(東京都環境局, 2008)。

2.2 雨水の採取方法

2.2.1 一括採取

2012年10月-2019年7月にかけて、雨水を降り始めから 降り終わりまでイベントごとに一括採取した。一括採取には 3Lのポリプロピレン (PP) 製ボトルに直径300 mmのPP製 漏斗を取り付けて行った。採取前にMilli-Q水(比抵抗18.2 MΩ·cm)で洗浄し、デシケーター内で自然乾燥後に使用し た。東京都下水道局が発表している"東京アメッシュ"の 5分ごとの降水レーダーにて確認し、採取容器は降雨が予想 される30-60分前に設置し、採取終了後直ちに回収を行っ た。雨水の降り終わりは東京アメッシュの降雨レーダーにて 確認しており、断続的な降雨の場合は、3時間降雨が観測さ れなかったときに、新たな採取容器を用い、別試料としてサ ンプリングをしている。また、夜間に降水が予想される場合



Fig. 2 (a) Appearance, (b) interior and (c) schematic view of newly-developed sequential summer heavy rainwater collector.

には、あらかじめ採取容器を設置し、翌朝直ちに回収した。 降水総量が0.5 mmを下回った場合には液量不足のため分析 を行わなかった。

2.2.2 分割採取

2017年9月-2019年9月には一括採取と並行し、一定体積 ごとに雨水を分割採取した。採取には新規開発した分割型豪 雨採取システムを用いた (Fig. 2)。本装置は雨水採取部とし て口径30 cmのPP製ロート2個または1個(予想される降水 量によって適宜変更可能)、計量部として100 mLごと(降雨 量1.8 mm相当) に分取する "鹿威し"、100 mL PP容器を 8個ターンテーブルに装着可能な保存部からなる。保存部は 電子クーラーで4℃に常に保たれており、雨水試料の変質や 蒸発を防ぐ構造となっている。本装置は単一乾電池四本で駆 動可能であり、強風や落雷などによる商用電源の喪失の影響 を受けることなく、安全かつ安定的に雨水採水が可能であ る。本装置全体で高さ100 cm、横幅80 cm、奥行き50 cm、 重量30kgである。装置の制御にはマイコンを利用し、以下 のようなフローに基づいて動作する。①雨水センサーで雨を 感知すると、マイコン (PIC) 制御により採水モードに入る。 ②ロートに集められた雨水が鹿威しに流れ込む。③一定量 (100 mL) が溜ると鹿威しが作動し、雨水をロータリーテー ブル上のサンプル瓶へと流し込む。④各ボトルの採水完了時 刻をSDカードに記録する。また、サンプリング終了後には 一括採取と同様に直ちに回収を行っている。

2.3 雨水の分析:主要無機イオン

採取した雨水を混合セルロースメンブレンフィルター(孔

径0.45 µm、Adavantec A045A047A) で吸引ろ過して粒子状 物質を除去し、洗浄済みの100 mL PPボトルに入れて4℃の 冷蔵庫内に保管した。雨水pHはpHメーター (MA325, Mettler Toledo) をpH 6.86および4.01の標準緩衝液 (和光純 薬) で校正した後に測定し、電気伝導度は導電率計 (東亜 DKK、CM-25R) を用い、EC標準溶液 (HANNA instruments, 12880 µS/cm (25℃)) で校正した後に測定した。

主要陽イオン (NH⁴, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) および陰イオ ン (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) をイオンクロマトグラフィーで測定し た。陽イオン分析にはDionex ICS-1000 (分離カラム: Dionex IonPac[®]CG12A RFIC[™] 4×250 mm、ガードカラム: Dionex IonPac®CG12A RFICTM 4×50 mm、溶離液: 18 mM メタンスルホン酸、サプレッサー: Thermo CERS) を用い、 陰イオン分析にはDionex AQUION (分離カラム: Dionex Dionex Ion Pac[™] AG4A-SC RFICTM 4×50 mm、溶離液: 1.8 mM Na₂CO₃+1.7 mM NaHCO₃、 サプレッサー: Dionex AERS-400[™])を用いた。検量線溶液は各イオンの標準溶液 (1000 mg/L、和光純薬)から調製した。回帰直線を用いて 求めた検出限界(上本, 2010)は、それぞれNH4: 0.06 μeq/L、 Na⁺: 0.03 μ eq/L, K⁺: 0.03 μ eq/L, Mg²⁺: 0.04 μ eq/L, Ca²⁺: $0.15 \ \mu eg/L$, $C1^-: 0.05 \ \mu eg/L$, $NO_3^-: 0.19 \ \mu eg/L$, $SO_4^{2-}: 0.05$ µeq/Lであった。溶存無機および有機炭素をTOC計 (TOC-V_{CSH}, SHIMADZU) で測定し、HCO₃およびCO₃⁻濃度を溶 存無機炭素濃度とpHから平衡計算によって算出した。すべ ての検量溶液の調整にはMilli-Q水(比抵抗18.2 MΩ·cm)を 使用した。

総陽イオン濃度 (C) と総陰イオン濃度 (A) から求めたイ オンバランス (C/A) が0.8-1.2以内に収まらず、電気伝導度 の実測値と計算値との比がこの範囲に収まらないものはデー タ解析から除外した。分析を行った総試料178のうち、解析 から除外した試料数は26である。雨水試料は低濃度である ことからpHにも誤差が生じやすく、イオンクロマトグラフ による分析にも細心の注意が必要であることから、この要因 については測定誤差によるものと考えられる。試料の再測定 などの検討を行った結果、分離カラムの劣化による可能性が 疑われたことから、2017年以降は分離カラムを更新し、除 外した試料はない。

2.4 PM_{2.5}データ

本研究ではTSI社製DUSTTRAKTM ENVIRONMENTAL MONITOR (model 854030) を用いてPM25濃度を2分ごと に測定した。3.0 L/minで吸引し、光散乱レーザー光度計で 自動計測を行った。測定可能範囲は0-400 mg/m³であり、 測定誤差は±0.001 mg/m³である。校正にはA1 test dust (ISO12103-1、アリゾナロードダスト)を用いており、補正 係数は0.38である。この装置は常時観測用に設置しており、 データの吸い上げ、メンテナンスは2週間ごとを目安にして 行った。メンテナンスの際には、PM25インパクタープレー トを超純水で湿らせたキムワイプを用いて清掃し、インパク ターオイルを塗布している。インレット部で除湿または加熱 していないと、光散乱を用いるPM2.5センサーは相対湿度が 75%を超えるとPM2.5質量濃度を過大評価することが知られ ている (Jayaratne et al., 2018)。本装置では加熱インレット によりPM2.5に対して相対湿度35%に設定されており、高湿 度に伴う過大評価の影響を受けない。この加熱インレットに

関する半揮発性の硝酸アンモニウムや有機エアロゾルに関す る情報は不明であるが、50℃に加熱したインレットでは半 揮発性成分の揮発が報告されていることから (Grimm and Eatough, 2009)、硝酸アンモニウムや有機エアロゾルなどの 揮散の影響は否定できない。

2.5 豪雨の分類

気象庁では大雨を時間雨量30 mm以上の降雨と定義して いるが、都市部における局地的大雨では通常1時間以内に降 水イベントが終了してしまう。本研究では、気象庁の10分 間雨量を使用し、10分間雨量が5 mmを超える降雨イベント を豪雨、それ以下を通常降雨と定義した。採取地点に最も近 い気象庁観測所である東京(北緯35.7度、東経139.8度、高 度約25 m)と練馬(北緯35.7度、東経139.6度、高度約 51 m)を用いて降雨イベントの分類を行った。

豪雨生成機構に基づいて、豪雨を次の3つに定義した。 (1) 前線豪雨 (Frontal Heavy Rain=FHR):前線による豪雨、 (2) 台風豪雨 (Typhoon Heavy Rain=THR):台風による豪 雨、(3) 都市型豪雨 (Urban-induced Heavy Rain=UHR):前 線性、台風性以外であり局所的な短時間豪雨。なお、台風や 前線の有無は日本気象協会から取得した気象図と気象カメラ 画像を用いた(日本気象協会, 2019)。

2.6 大気汚染物質の空間分布解析

都市型豪雨発生前後の気象条件および大気汚染状況の解析 を行うにあたり、東京都23区を中心とした一般環境大気測 定局 (Fig. 3) のデータを東京都環境局 (2019b) より入手し た。一般環境大気測定局から得られたデータはArcGIS Desktop (Esri Inc., ver. 10.6) を用いて解析を行った。東京



Fig. 3 General ambient air measurement station location in Tokyo.

都23区の地図はESRIジャパン株式会社がサンプルデータと して無償配布している全国市町村界データ(地理座標系:日 本測地系2000)を用いた。各測定局間の大気汚染物質濃度、 気象条件の予測はクリギング法を用いて空間統計処理 (Araki et al., 2011)を行い、内挿した。クリギング法とは、 バリオグラムに基づいてある地点における値を周囲の測定値 から最も小さい誤差で推定する手法であり、バリオグラムは 測定データに基づいて空間確率場の特性を評価する方法であ る (Shoji and Koike, 2007)。本研究ではクリギング法に普通 クリギング、セミバリオグラムには球型モデルを使用した。 なお、一般環境大気測定局のデータにおいてデータ欠損が あった場合、その測定局を除いてクリギングを行った。

3. 結果と考察

3.1 都市部における豪雨の化学成分的特徴:通常降雨との 比較

2012-2019年に早稲田大学西早稲田キャンパスで一括採取 した雨水の主要無機イオンの体積加重平均濃度を降雨の種類 に分けてTable 1に示す。都市型豪雨の体積加重平均pHは 4.41 (n=16) であり、他の雨水に比べて低pHを示した(通 常降雨: 4.84、n=106; 台風性豪雨: 5.23、n=11; 前線性豪 雨: 4.85、n=12)。総主要無機イオン濃度は都市型豪雨 (185 µeq/L) と通常降雨 (186 µeq/L) で同程度であり、台風 性豪雨 (168 µeq/L) および前線性豪雨 (122 µeq/L) で低濃度で あった。陽イオンのうち、NH4濃度は都市型豪雨 (26.7 μeq/ L) と通常降雨 (24.7 µeq/L) で同程度であったが、アルカリ 金属イオンおよびアルカリ土類金属イオン濃度は都市型豪雨 で通常降雨よりも低かった。一方、陰イオンでは、NO3 (41.2 µeq/L) と SO²⁻ (37.8 µeq/L) が都市型豪雨で高濃度で あり、Cl⁻はすべての雨水のなかで低濃度であった。これら の傾向は、Uchiyama et al. (2017) が報告している 2012年か ら2016年までの結果と同様であることから、都市型豪雨で は酸性物質を高濃度に含むという特徴は一般的であると言え る。

Fig. 4には、通常降雨に対する都市型豪雨、台風性豪雨、 前線性豪雨の濃度比をイオン成分ごとに示している。破線は 濃度比が1であり、破線を上回ると通常降雨より高濃度、下 回ると低濃度を表している。都市型豪雨ではH⁺、NO₃、 SO₄²⁻の濃度比がそれぞれ2.69、1.66、1.31と破線以上であ り、通常降雨よりも高濃度であった。これらの成分は台風性 豪雨 (H⁺: 0.40, NH₄⁺: 0.45, NO₃⁻: 0.25, SO₄²⁻: 0.57)、前線性 豪雨 (H⁺: 0.98, NH₄⁺: 0.58, NO₃⁻: 0.47, SO₄²⁻: 0.73)では通常 降雨より低濃度である。一方、都市型豪雨のNa⁺(0.31)、 Cl⁻(0.34)、Mg²⁺(0.32) などの海洋由来成分は通常降雨よ り低濃度であった。なお、Ca²⁺(0.83)、K⁺(0.51)、HCO₃⁻ (0.24)、CO₃²⁻(0.18)の起源は複雑であり必ずしも明確では ないが、都市型豪雨では海洋由来成分と同様に低濃度であっ た。前述のとおり、都市型豪雨と通常降雨の総主要無機イオ ン濃度は同程度であったが、その組成が大きく異なることが わかる。

日本国内で雨水の酸性化を引き起こすのは硝酸と硫酸であ るが(藤田ら,2017)、通常降雨に対する都市型豪雨のNO₃ およびnss-SO₄⁴-濃度比は1.66、1.31であった。したがって、 都市型豪雨では硝酸による酸性化への寄与率が高いと言え る。Uchiyama et al. (2017)は、都市型豪雨直前に窒素酸化物



Fig. 4 The ratio of the concentration of each major ion in (a) UHR (n=16), (b) THR (n=11), and (c) FHR (n=12), to that in normal rain (n=106), from October 2012 to July 2019.

Table 1 The volume-weighted mean concentration of major inorganic ions in normal rain, UHR, THR and FHR from 2012 to 2019.

	aII	Concentration (µeq/L)										
	рп	H^+	NH_4^+	Na^+	K^+	${\rm Mg}^{2+}$	Ca^{2+}	Cl ⁻	NO_3^-	SO_4^2	HCO_3^-	Total
Normal $(n=106)$	4.84	14.4	24.7	26.3	3.14	6.78	19.3	34.8	24.8	29.0	2.18	186
UHR $(n=16)$	4.41	38.9	26.7	8.16	1.63	2.16	16.1	11.8	41.2	37.8	0.52	185
THR $(n=11)$	5.23	5.90	11.1	50.6	1.72	8.79	5.22	58.2	6.43	16.6	3.47	168
FHR (<i>n</i> =12)	4.85	14.1	14.2	16.5	0.40	3.58	9.15	28.7	11.6	21.0	2.61	122

(NOとNO₂)が高濃度になり、光化学反応により硝酸ガスや 硝酸エアロゾルが生成されることを報告している。しかし、 都市域全体で光化学反応が起きて大気汚染物質濃度が上昇し ているのか、都市型豪雨発生地域で局地的に大気汚染物質濃 度が上昇しているのかどうかは不明であった。3.6節では、 地理情報システム (GIS: Geographic Information System)を 用いて大気汚染物質濃度の上昇と都市型豪雨をもたらす積乱 雲の形成・発達との関係について議論する。

台風性豪雨では、通常降雨に比べてNa⁺ (濃度比: 1.92)、 Cl⁻ (1.67)、Mg²⁺(1.30)、HCO₃⁻ (1.59) およびCO₃²⁻ (2.70) が高い値を示した。Na⁺、Cl⁻、Mg²⁺は海水中の主要イオン 成分である (Parungo et al., 1986)。台風の中心に向けて海洋 から水蒸気が流れ込み、空気塊が上昇することにより、水蒸 気が凝結する (Fudeyasu et al., 2008)。大量の水蒸気が凝結 することにより潜熱が放出され、運動エネルギーとなり、地 表に向けて降水規模が大きくなる (Miyamoto, 2016)。この ように、台風は海洋上で海塩粒子を巻き上げながら発達する ため、これらの海洋由来成分が主要なイオン成分となったも のと考えられる。

前線性豪雨ではHCO₃⁻およびCO₃²⁻が高い濃度比 (HCO₃⁻: 1.20, CO₃²⁻: 1.40)を示したものの、その他の成分は通常降 雨よりも低い結果となった (H⁺: 0.98, NH⁴: 0.58, Na⁺: 0.63, K⁺: 0.13, Mg²⁺: 0.53, Ca²⁺: 0.47, Cl⁻: 0.83, NO₃⁻: 0.47, SO₄²⁻: 0.73)。通常降雨と前線性豪雨の生成機構は類似しているこ とから、この違いは降水量の違いによる希釈効果 (鈴木, 1983)の差によって生じた可能性がある。通常降雨と前線性 降雨の平均降水量は14.5 mmおよび45.5 mmであり、降水 量 (通常降雨/前線性降雨)比は0.32であった。しかしなが ら、通常降雨と前線性豪雨の各種イオン濃度 (前線性降雨/ 通常降雨)比はカリウムイオンを除けば0.32以上であったこ とから、濃度の違いは希釈効果だけでは説明できず、降雨前 の大気中濃度の違いを反映していた可能性も挙げられる。

3.2 都市部における豪雨に伴う湿性沈着量

Fig. 5では、(a) に通常降雨と各種豪雨(都市型豪雨、台風 性豪雨、前線性豪雨)の平均降水時間と平均降雨強度を棒グ ラフに、(b) には主要無機イオンの湿性沈着量と各イオン組 成を棒グラフで示す。平均降水時間は通常降雨が14.0時間 であるのに対して、都市型豪雨が1.52時間、台風性豪雨が 22.8時間、前線性豪雨が24.7時間であり、都市型豪雨は降 雨時間が極端に短いことがわかる。なお、この降水時間は 2.2.1項でも記述したように東京アメッシュの降雨レーダー を用いて算出している。都市型豪雨の降雨時間は通常降雨の 約1/10、台風性および前線性豪雨の約1/15であった。平均 降雨強度は都市型豪雨で最も高く(12.6 mm/h)、通常降雨 (1.44 mm/h)の8.78倍、台風性豪雨(2.73 mm/h)の1.89倍、 前線性豪雨(3.22 mm/h)の2.23倍であった。さらに、全イ オンの湿性沈着量では都市型豪雨で2.19 meq/m²/hであり、 通常降雨(0.187 meq/m²/h)、台風性豪雨(0.371 meq/m²/h)、



Fig. 5 (a) Rainfall time per event and hourly mean rainfall amount with (b) total wet deposition of inorganic ion in normal rain (n=106), UHR (n=16), THR (n=11) and FHR (n=12) from October 2012 to July 2019.

前線性豪雨 (0.224 meq/m²/h) のそれぞれ11.7、5.91、9.78 倍であった。

H⁺湿性沈着量は都市型豪雨で461 μ eq/m²/hであり、通常降雨 (14 μ eq/m²/h)、台風性豪雨 (13 μ eq/m²/h)、前線性豪雨 (25 μ eq/m²/h)のそれぞれ30.7、35.2、17.7倍であった。一方、NO₃⁻湿性沈着量では都市型豪雨で509 μ eq/m²/hであり、通常降雨 (26 μ eq/m²/h)、台風性豪雨 (14 μ eq/m²/h)、前線性豪雨 (21 μ eq/m²/h)のそれぞれ19.6、35.8、23.9倍であった。SO₄⁻湿性沈着量では都市型豪雨で445 μ eq/m²/hであり、通常降雨 (30 μ eq/m²/h)、台風性豪雨 (37 μ eq/m²/h)、前線性豪雨 (39 μ eq/m²/h)のそれぞれ15.0、12.1、11.5倍であった。

3.3 都市型豪雨の発生パターン

Fig. 6上部では東京都下水道局が運営している東京アメッ シュの雨雲レーダー画像(XバンドMPレーダー)で都市型 豪雨を観測した例を示している。都市型豪雨の発生パターン を解析したところ、次の3つに分類された。(a) 採取地点近 傍(新宿区) 上空で積乱雲が発達し、新宿区に豪雨をもたら す場合 (n=3、以下、直上パターン)、(b) 新宿より東方向で 積乱雲が発達し、新宿区に豪雨をもたらす場合(n=4、以 下、東パターン)、(c)内陸山間部(北西方向)で発達した雨 雲が南東方向へ輸送され、都心部でさらに雨雲が発達して新 宿区に豪雨をもたらす場合(n=9、以下、北西パターン)で ある。ただし、どのパターンであっても地上部で体感すると 突発的な豪雨イベントであり、差異は感じられない。都市型 豪雨の発生頻度は北西パターンが9回で最多であり、直上パ ターン (3回)、東パターン (4回) の2倍以上であった。Fig. 7には都市型豪雨の発生時間の頻度分布を示す。北西パター ンは14時から20時の間の広い時間帯に発生しており、直上 パターンでは12時から15時の気温が高くなる午後に発生が 集中していた。一方、東パターンでは明瞭な傾向がなく、早



Fig. 6 Chemical compositions of UHR (a) Occurring above urban area, (b) advection from east and (c) advection from west or north. The radar charts of UHR observed day on July 23, 2019 and August 13, 2018 obtained from Tokyo Amesh.

朝に発生しているケースも見られた。

Fig. 6(a) に示した2019年7月23日の都市型豪雨は夜間に 発生した。このときには西部山間部に小規模な雨雲はあるも のの、これらが輸送されたわけではなく、新宿付近で20:30 から21:00にかけて雨雲が発達していた。都市型豪雨発生直 前には新宿区から中央区付近で気温が25℃を超えており、 熱帯夜であった。Fig. 6(b)に示した2018年8月13日の都市 型豪雨は午後に降る典型的なパターンであった (Fig. 7)。西 部山間部で比較的広範囲な雨雲の発達があり、南東方向に移 動していた。一方、これらの雨雲とは独立して東京都と埼玉 県の境付近で雨雲が発達し、南西方向に移動して新宿区に都 市型豪雨をもたらしている。北西パターン (c) のパターンは Fig. 11に示している。

Fig. 6下部には、それぞれの豪雨パターンごとに体積加重 平均化学組成を、総主要無機イオン濃度、平均pH、NO₃^{-/} nss-SO₄⁻⁻比(以下、N/S比)、平均降雨時間および平均時間 雨量とともに示している。総主要無機イオン濃度は直上パ ターンが848 μ eq/L、東パターンが81 μ eq/L、北西パターン が184 μ eq/Lであり、直上パターンで最も高濃度であった。 また、直上パターンで最低pH 4.10を示した(東パターン: pH 4.96、北西パターン: pH 4.41)。N/S比は東パターン (1.33)と北西パターン(1.26)で同程度であったが、直上パ ターンでは1.06であり、他のパターンに比べて硫酸イオン SO₄⁻⁻の寄与が大きかった。平均化学組成は、直上パターン



Fig. 7 Distribution of UHR occurrence time.

で酸性物質由来成分(H⁺, NH[‡], NO³, SO²⁻)が全体の 88.2%を占めており、最も高い割合を占めていた。これは都 心部の地上大気汚染物質の影響を最も顕著に反映しているも のと考えられた。北西パターンでは酸性物質由来成分が占め る割合は72.5%、東パターンで酸性物質由来成分が占める 割合は58.8%であったが、Fig. 7に示すように東パターンで は発生時間にばらつきがあり、3つのパターンの化学組成や 濃度の違いは豪雨発生直前の大気汚染物質濃度の違いを反映 しているものと考えられる。

3.4 都市型豪雨中化学成分の経時変化

Fig. 8には、比較的近い時期に発生した都市型豪雨(2019年7月23日)と台風性豪雨(2019年7月28日)における主要イオ



Fig. 8 Temporal variation of the relative concentrations of major ions to their initial concentrations in urban-induced heavy rain on July 23, 2019 and in typhoon heavy rain on July 28, 2019.

ン成分について、初期降水濃度に対する相対濃度比として変化 率の経時変化を示した。台風性豪雨では、NH⁴、NO³、 nss-SO²-濃度は初期に急激な減少率を示しており(それぞれ 46.4、85.0、56.3%)、その後は徐々に減少した。一方、H⁺ 濃度、HCO³濃度の変動は小さく、pHに大きな変化はな かった。Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻は台風性豪雨で降水初期から中期 にかけて濃度が減少しているものの、後期(降り始めからの 積算降雨量3 mm以降)にかけて急激に上昇した。一般に台 風は眼 (eye)、それを取り囲む積雲の眼の壁 (eye wall)、さ らに、その外側に位置するスパイラルバンド (spiral band) からなる複雑な構造 (Houze, 1993)をもつ。また、広域的に 強風を伴い、様々な物質を地上から巻き上げる。このため、 台風性豪雨は一イベントであっても異なる気塊からの降水と なり、濃度変動は複雑になると考えられる。

一方、都市型豪雨では主要成分である酸性物質由来成分の 降水初期の減少率(最初の分割試料から2回目の分割試料) は台風性豪雨より小さく(NH⁴: 24.0%, NO³: 15.4%, SO⁴⁻: 15.3%)、H⁺濃度は逆に増加した。ただし、この都市型豪雨 では台風性豪雨と異なり、NH⁴、NO³、SO⁴⁻濃度は2回目 から3回目の分割試料まで急激に減少した。都市型豪雨で降 水初期の酸性物質の濃度減少率が低い(H⁺では増加)要因と して考えられるのは、ガス成分の吸収とともにNH₄NO₃、 (NH₄)₂SO₄、NH₄HSO₄などの二次生成粒子が雲凝結核と なって核洗浄されるため比較的緩やかに濃度が減少したこと である。また、都市型豪雨では局地的な現象であるため、周 囲の大気から汚染物質が継続的に集積して供給されているこ とが考えられる。しかし、この都市型豪雨では2回目から 3回目の分割試料まで急激に減少しており、豪雨中イオン成 分の経時変化から大気汚染物質の集積過程について判断する ことができないため、大気汚染物質濃度と合わせて考察を行 う必要がある。都市型豪雨発生時における大気汚染物質の時 系列変化は3.5節で、大気汚染物質の空間的な分布について は3.6節で議論する。また、都市型豪雨では台風性豪雨と異 なり、Na⁺、Cl⁻濃度比は降水量が1.40 mm以降は大きな変 動がなく、ほぼ一定であった。この可能性として、比較的穏 やかな海風流入に伴う海塩粒子の供給が考えられる。

3.5 新宿区における都市型豪雨前後の大気汚染物質の経時 変化

Fig. 9では2018年6月12日に観測された都市型豪雨発生 前後(北西パターン)の一般環境大気測定局、国設東京(新 宿)から得た風向・風速、気温・湿度、大気汚染物質濃度と $PM_{2.5}$ 濃度の変化を示す。降雨時間は水色で示している。ま た、このイベントにおける主要無機イオン成分の組成割合を Fig. 10に示す。Fig. 6(c)に示す北西パターンと同様に酸性 物質 (NO_3^- , SO_4^-)の割合は高い傾向であるが、総濃度は 844 µeq/Lと非常に高濃度であった。海洋由来物質 (Na^+ , Cl^-) が高い割合を示し、海風の影響が示唆される。しかし、pH は4.22 であり、北西パターンの平均pH 4.41 (Fig. 6)より酸 性度が高かった。N/S比は1.65 であり、北西パターンの平均 値 (1.26)よりも高く、酸性化には硝酸イオン NO_3^- の影響が より強かった。

2018年6月12日では13時まで風速1m/s程度の南風が卓 越していたが、14時から北風に変わり、16時頃に雨が降り 始めた。NO_xは12時に最高濃度52 ppbvを示し、その後、 減少して降雨直前では18 ppbvとなった。SO2濃度では大き な変化はなかったものの、降雨直前ではNO_xと同様に濃度 低下が見られた。降雨直前までのNO_xの濃度変化はCOおよ びPM25濃度、風速変化と類似していることから自動車排ガ ス由来の輸送を示唆している。一方、Ox濃度は12時まで10 ppbv前後を推移していたが、風向が北風に変わり、風速が 弱まると増加し、降雨直前では37 ppbvの最高濃度を示し た。豪雨直前のOx濃度の増加と、NOx濃度およびSO2濃度 の減少は硝酸塩と硫酸塩の二次生成を示唆している。CO濃 度も減少しているためNO_x濃度およびSO₂濃度の減少要因 として南風から北風への風向変化に伴う他地域への拡散・輸 送の可能性もあるが、拡散・輸送では豪雨開始に伴うPM25 濃度の増加は説明できない。PM2.5の主成分である硝酸塩と 硫酸塩は主に0.1-2 µmに存在しており、この粒径範囲は雲 底下洗浄を受けにくく、グリーンフィールドギャップと呼ば れている (Lamb and Verlinde, 2011)。豪雨時におけるPM25 濃度の増加はOx濃度の増加に伴ってNOxおよびSO2から酸 化生成された硝酸塩と硫酸塩が周囲から流入してきた可能性 を示している。流入過程としては、海風が内陸部まで侵入 し、局地的な前線を形成したために二次粒子が高濃度化する ケース (Yoshikado, 2007) と、ヒートアイランドによる上昇 気流発生に伴って局地的な低圧部が地上に形成し、大気汚染 物質の収束するケースとが考えられる。しかし、これらは一



Fig. 9 Temporal variation of the concentration of $PM_{2.5}$, CO, NO_x , SO₂, and Ox with meteorological conditions on June 12, 2018.

地点における気象観測および大気汚染データでは判断できない。

3.6 都市型豪雨発生時の大気汚染物質および気象条件の状況

3.1、3.2節では都市型豪雨の化学成分に注目し、その特 徴と降水プロセスを議論してきた。本節では都市型豪雨発生 直前の大気汚染物質の空間分布を明らかにし、豪雨発生プロ セスとの関係について議論する。考察対象としたのは2017 年7月18日に東京都豊島区、新宿区を中心に発生した都市 型豪雨である。このときの1時間ごとの降水レーダーの画像 をFig.11に示す。13時に西部山間部で雨雲の発達が見られ、 14時に弱い雨雲が採取地点の新宿区に達し、15時に豪雨を 観測した。

3.6.1 気温·絶対湿度

Fig. 12には最上段に気温、2段目に絶対湿度の豪雨発生ま での12-15時における分布を示している。絶対湿度A.H.の 算出はワグナーの式 (Vetere, 1991) に基づいて気温 (℃) か ら飽和水蒸気量を計算し、相対湿度を用いて絶対湿度を決定 した。気温は12時から13時で高く、13時には35℃に達する 高温であった。豪雨発生直前の14時には気温は低下傾向に あり、東京23区西部以外でほぼ一様の気温分布を示した。 15時の豪雨発生時には、豪雨発生地点付近の練馬区を中心 に急激に気温が低下した。これは降水に伴って上空の積乱雲 から降りてくる冷気プールの影響を示唆している。絶対湿度 は気温と同様に降水直前までは東京23区全体で一様な分布 を示しながら徐々に低下した。しかし、豪雨発生時には豪雨 発生地点近傍で低湿度となり、地上付近では空気中水蒸気量 が減少した。これは、上空にあった低温の乾燥空気塊が地上 部に降下したことを示している。一方、東京湾沿岸域である 大田区、品川区、港区付近では高水蒸気量であり、沿岸部か らの海風が内陸部にむけて継続的に流入していることを示唆 している。



Fig. 10 Chemical composition of UHR on June 12, 2018.



Fig. 11 The radar charts of UHR observed day on July 18, 2017 obtained from Japan Weather Association. The yellow point shows our sampling site.

3.6.2 風向·風速

前項では気温と絶対湿度より空気塊流動について議論をし たが、実際の風向および風速が重要である。12時から14時 にかけて西よりの風が卓越しているが、東京湾から都市型豪 雨発生地点である新宿区、豊島区方向へ風速は弱いものの海 風が吹いている。15時の豪雨発生時に風向は大きく変化し、 都市型豪雨発生地点の東側では南西から北よりの風となっ た。これは、北西方向にすでに存在している豪雨によるガス トフロントの形成を示唆している。なお、ガストフロントと は積乱雲からの冷たい下降気流が地上部へ吹き出し、暖かい 空気と衝突した際にできる小規模な前線のことである (Lompar et al., 2018)。一方、15時には沿岸部で絶対湿度が 高いことから、東京湾からの海風が都心部に流入して積乱雲 の発達に必要な水蒸気を供給し続けていると考えられる。

Fig. 13 12 12, NOAA HYSPLIT Trajectory Model (Stein et al., 2015) を用いて計算した高度2000mにおける後方流 跡線の解析結果を示している。時間は都市型豪雨が発生した 15時から4時間遡っているが、北西方向からの空気塊の流入 を示しており、地上風系とは異なることがわかった。Fig. 11の降水レーダーでは14時に北西方向に積乱雲が発生して おり、上空の風により雨雲が新宿区方向に進み、地上部では ガストフロントが吹き込んでいる可能性がある。地上部で は、ガストフロントによる西風と南東方向からの海風によっ て押し出された都市大気空気塊がぶつかり、高い温位をもつ 都市大気汚空気塊が上空に輸送され、二次生成粒子を核とし て積乱雲が発達した可能性がある。その後も継続的に海風の 流入があれば水蒸気とともに海塩粒子が供給されることによ り、二次生成粒子を核として形成した多数の雲粒が、海塩粒 子を核として形成した大きな雲粒に併合衝突して急速に雨滴 に成長して豪雨に至る。

3.6.3 窒素酸化物・光化学オキシダント

Fig. 12の下2段ではそれぞれ窒素酸化物、光化学オキシダントの豪雨発生までの12-15時における分布を示している。 窒素酸化物の分布は風向・風速、気温、湿度、降水に左右さ れず、品川・渋谷区付近で局所的に高濃度を示しており、 12時から15時まで高濃度帯も変化していなかった。窒素酸 化物の主な発生源は自動車排ガスであり、東京都などの大都 市では二酸化窒素の64.9%が自動車排ガス由来とされてい る(国土交通省,2001)。自動車排ガスは定常的に排出され 続けており、気象条件の影響を受けにくかったものと考えら れる。

一方、光化学オキシダントは、13時に東京23区西部で高 濃度を示しており、降水イベント直後には急激に濃度が減少 した。また、窒素酸化物の濃度分布と比べると、13時以降、 窒素酸化物の高濃度域で光化学オキシダントが低濃度であ り、窒素酸化物の低濃度域である23区西部で高濃度域を形 成していることがわかる。光化学オキシダントの主成分はオ ゾンであり、オゾンはOHラジカルの起源である(藤田ら, 2017)。OHラジカルはNO_xを酸化させ、硝酸ガスおよび硝 酸エアロゾルを生成する。硝酸ガスおよび硝酸エアロゾルは 一般大気測定局では観測されていないので推測の域をでない が、窒素酸化物が低濃度地域では酸化剤の起源であるオゾン 濃度が高く、硝酸ガスおよび硝酸エアロゾル濃度も高濃度に 生成しているものと考えられる。

3.6.4 PM_{2.5}

Fig. 14では上段にPM_{2.5}の豪雨発生までの12-15時におけ る濃度分布を示している。12時頃から窒素酸化物の高濃度 域より10kmほど北側にずれた新宿区を中心として高濃度域 の形成が始まり、13時では収束がより一層明瞭になってい る。この高濃度域は豪雨の発生地点とほぼ同地点である。し かし、14時になると高濃度域は消失し、東京23区で一様な 濃度分布となった。この時間ではまだ降水は観測されておら ず、降水による大気の洗浄の影響ではない。この他の可能性 として、PM_{2.5}がヒートアイランド現象に伴う上昇気流に よって都市上空へ輸送されていることが考えられる。ただ し、気温分布ではこの地域に特別の高温域は確認されていな い。14時におけるPM_{2.5}の地上高濃度域の消失が上空輸送で あると仮定すると、現状の気温観測網では各測定局は約



Fig. 12 Distribution of temperature, absolute humidity, wind direction (WD) and speed (WS), NO_x and Ox from 12:00 to 15:00 on July 18, 2017.



Fig. 13 The backward trajectory (h=2000 m) from 15:00 to 11:00 on July 18, 2017 obtained from NOAA HYSPLIT model.

5km間隔であり、局地的な気温上昇を捉えられていない可 能性がある。その他の可能性として、3.6.2項で議論したよ うに西風と海風との衝突による大気汚染物質を含む海風の上 昇がある。

この14時のPM2.5の地上高濃度領域の消失から15時の豪

雨発生まではおよそ1時間ある。Rosenfeld et al. (2008) に よれば、エアロゾル数濃度が高い場合には、発達期で生成さ れる雲粒の数が多いため、水蒸気を奪い合い、雲粒から雨滴 への成長を阻害する。このため、PM2.5が上空へ輸送された 直後には豪雨には至らなかった可能性がある。積乱雲の発達 には対流活動が活発になることが重要であり、そのためには 下層の大気がより湿潤になることが必要である。上空へ輸送 される空気が湿潤状態になると比較的高い温度で飽和状態に なるため、より低い高度で持ち上げ凝結高度および自由対流 高度を超えることができるようになる(小倉, 1999; 加藤, 2007)。豪雨発生前に海風が流入してきていることは、気 温、絶対湿度および風向から確認できる。さらに、海風がも たらすのは水蒸気だけではなく、巨大雲凝結核 (Giant CCN、以後、GCCN)と呼ばれているNaClも含まれている (Levin et al., 2005)。海塩粒子のようなGCCNが二次生成粒 子によって生成された小さな雲粒が多数存在する環境に流入 すると、その粒径差により雲内の移動速度に差が生じ、雲粒 の併合衝突を活発化させ (Simpson, 1941)、雨滴まで急速に 成長して都市型豪雨をもたらすと考えることができる。 PM2.5の集積から雲粒形成への過程、および海風流入後の積



Fig. 14 Distribution of $PM_{2.5}$ from 12:00 to 15:00 on July 18, 2017, and possible conceptual diagram of cloud formation mechanism.

乱雲発達のイメージをFig. 14の下段に示す。

ただし、PM_{2.5}の濃度分布とNO_xの濃度分布では高濃度の 位置が異なった。PM_{2.5}は豪雨発生地点付近である新宿付近 で高濃度であるが、NO_xは新宿から南方向に10 km離れた品 川区付近で定常的に高濃度を示している。12時、13時時点 の風向・風速に着目すると約1 m/sの弱風ではあるものの、 品川区から新宿区の方向に向けて風が吹いていた。NO_xは PM_{2.5}の前駆物質であり、NO_xの輸送過程で光化学反応によ り粒子化していることがPM_{2.5}高濃度域の一因と考えられ る。なお、PM_{2.5}の主成分である硫酸塩の前駆物質である SO₂についてもNO_xと同様な検討を行ったが、SO₂を測定し ている一般環境大気測定局の数が少なく、測定局間の間隔が 開きすぎてしまうこと、さらに濃度の有効数字が一桁である ため、細かい濃度分布図を作成することが困難であった。 SO₂はPM_{2.5}の重要な前駆物質であり、SO₂の濃度分布を含 めた解析が今後の課題である。

4. 結 言

2012年から2019年にかけて東京都新宿区にて降水試料を 採取し、都市型豪雨の化学的特徴を通常降雨、台風性豪雨お よび前線性豪雨を比較して明らかにした。さらに、都市型豪 雨発生時の大気汚染物質および気象条件について、一般環境 大気測定局の観測データを用いて地理情報システムにより データ解析した結果、以下の点が明らかになった。

 都市型豪雨は、通常降雨およびその他豪雨に比べて酸性 物質由来成分が高濃度であった。このことから、大気汚 染物質を起源とする二次生成粒子が都市型豪雨の形成に 大きな影響を及ぼしていると考えられた。都市型豪雨に よる酸性物質の湿性沈着フラックスは通常降雨の11倍 であり、都市型豪雨により短時間に大量の酸性物質が地 上にもたらされていた。

- 2) 都市型豪雨発生は12-15時の気温の高くなる時間帯に集中しており、さらにその発達の経路によって、都心付近で発生するパターン(直上パターン、東パターン)と、西部山間部から雨雲が輸送され、都心部で発達するパターン(北西パターン)に分類することができた。発生回数は北西パターンが最も多いが、直上パターンで高濃度かつ酸性物質由来成分が高い割合を占めた。このことは、豪雨発生パターンによって、都心部の地上大気汚染物質が及ぼす影響の度合いに違いがあることを示している。
- 3) 都市型豪雨の降り始めからのNO₃、nss-SO₄⁻の濃度減 少率は台風性豪雨よりも低く、酸性物質由来成分は主に CCNとして核洗浄されているものと考えられた。一方、 海洋由来であるNa⁺およびCl⁻は都市型豪雨では中期か ら後期に一定もしくはわずかに上昇し、途中から海洋粒 子および海塩由来水蒸気の進入を示唆していた。
- 4) 都市型豪雨生成前にはNO_x、SO₂濃度の減少とOx濃度 の増加が認められ、豪雨発生直前から豪雨発生時にかけ てPM_{2.5}濃度が増加していた。このことから、豪雨発生 地点付近へ大気汚染物質が輸送される過程で二次粒子の 酸化生成が示唆された。
- 5) 都市型豪雨発生前後の大気汚染物質の地理的分布を解析 したところ、NOx高濃度域より北側にPM2.5高濃度域が 形成されたが、都市型豪雨発生1時間前にPM2.5高濃度 域は消失した。この地点は都市型豪雨発生地点とほぼ一 致していることから、上昇流の発生によってPM2.5が地 上から上空へ輸送され、雲凝結核として積乱雲を形成し た可能性が示唆された。上昇流発生機構は不明である が、ヒートアイランド現象に伴う空気塊の上昇と、その 低圧に吹き込む弱い海風と西風との衝突に伴う上昇流発 生の可能も考えられた。

以上、本研究は都市型豪雨の地上観測と一般環境大気測定 局の観測データを用いた地理情報システムにより、都市型豪 雨生成前における大気汚染物質の集積とそれに伴う都市型豪 雨発生について議論した。今後はモデルによる大気汚染物質 の集積過程および、それらが都市型豪雨へ与える影響の検証 が必要であるが、都市型豪雨生成機構の解明に向けて新たな 知見を得ることができた。

謝 辞

本研究の一部は、日本生命財団環境問題研究助成、アサヒ グループ学術振興財団、一般財団法人WNI気象文化創造セ ンター「第8回気象文化大賞」の支援によりなされたことを 付記し、ここに謝意を表します。

引用文献

- Araki, K., Seko, H., Kawabata, T., Saito, K.: The impact of 3-dimensional data assimilation using dense surface observations on a local heavy rainfall event, *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **45**, 1.07– 1.08 (2015).
- Araki, S., Sasaki, T., Ueda, S., Yamamoto, K., Tohno, S.: A study of the prediction method of the spatial distribution of ozone by kriging in Otsu city and its surrounding area, J. Jpn. Soc. Atmos. Environ., 46, 241–250 (2011) [in Japanese].
- Atkinson, B. W.: The effect of an urban area on the precipitation from a moving thunderstorm, J. Appl. Meteorol., 10, 47–55 (1971).
- Bently, M., Stallins, T., Ashley, W.: The Atlanta thunderstorm effect, *Weatherwise*, **63**, 24–29 (2010).
- Changnon, S. A., Jr.: The La Porte weather anomaly—Fact or fiction? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **49**, 4–11 (1968).
- Dou, J., Wang, Y., Bornstein, R., Miao, S.: Observed spatial characteristics of Beijing urban climate impacts on summer thunderstorms, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 54, 94–105 (2015).
- Fudeyasu, H., Ichiyanagi, K., Sugimoto, A., Yoshimura, K., Ueta, A., Yamanaka, M. D., Ozawa, K.: Isotope ratios of precipitation and water vapor observed in Typhoon Shanshan, J. Geophys. Res., 113, D12113 (2008).
- 藤部文昭: ヒートアイランドが降水に及ぼす影響―夏の対流 性降水を中心にして―, 天気, **51**, 109-115 (2004).
- 藤部文昭:都市の気候変動と異常気象, pp. 40-43, 朝倉書 店, 東京 (2012).
- 藤田慎一, 三浦和彦, 大河内 博, 速水 洋, 松田秀和, 櫻 井達也: 越境大気汚染の物理と化学, 改定増補版, pp. 36-152, 成山堂書店, 東京 (2017).
- Goswami, B. N., Venugopal, V., Sengupta, D., Madhusoodanan, M. S., Xavier, P. K.: Increasing trend

of extreme rain events over India in a warming environment, *Science*, **314**, 1442–1445 (2006).

- Grimm, H., Eatough, D. J.: Aerosol measurement: The use of optical light scattering for the determination of particulate size distribution, and particulate mass, including the semi-volatile fraction, J. Air & Waste Manage. Assoc., 59, 101–107 (2009).
- Holst, C. C., Tam, C. Y., Chan, J. C. L.: Sensitivity of urban rainfall to anthropogenic heat flux: A numerical experiment, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2240–2248 (2016).
- Houze, R. A.: Cloud Dynamics, p. 573, Academic Press, San Diego (1993).
- Jauregui, E., Romales, E.: Urban effects on convective precipitation in Mexico City, *Atmos. Environ.*, **30**, 3383–3389 (1996).
- Jayaratne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, M., Morawska, L.: The influence of humidity on the performance of a lowcost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog, *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 4883–4890 (2018).
- 加藤輝之:梅雨前線と集中豪雨, 天気, 54(5), 9-12 (2007).
- 警視庁:交通量統計表 (2018), https://www.keishicho.metro. tokyo.jp/about_mpd/jokyo_tokei/tokei_jokyo/ryo.html (2019.11.5アクセス)
- Kheim, M., Ooka, R., Hong, H., Hayami, H., Yoshikado, H., Kawamoto, Y.: Analysis of the relationship between changes in meteorological condition and the variation in summer ozone levels over the central Kanto area, *Adv. Meteorol.*, **2010**, 1–13 (2010).
- 気象庁: 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化 (2019a), https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/ extreme p.html (2019.11.5アクセス)
- 気象庁: 台風第19号による大雨, 暴風等(速報) (2019b), https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/ report/2019/20191012/20191012.html (2019.10.29アク セス)
- 国土交通省: 自動車排ガス対策 (2001), https://www.mlit. go.jp/kisha/oldmot/kisha00/21koutu/kankyou-s7_.htm (2019.11.18アクセス)
- Lamb, D., Verlinde, J.: Physics and Chemistry of Clouds, pp. 484–500, Cambridge University Press, UK (2011).
- Levin, Z., Teller, A., Ganor, E., Yin, Y.: On the interactions of mineral dust, sea-salt particles, and clouds: A measurement and modeling study from the Mediterranean Israeli Dust Experiment campaign, J. Geophys. Res., 110, D20202 (2005).
- Lompar, M., Ćurić, M., Romanić, D.: Implementation of a gust front head collapse scheme in the WRF numerical model, *Atmos. Res.*, 203, 231-245 (2018).

- McMurry, P. N., Takano, H., Anderson, G. R.: Study of the ammonia (Gas) sulfuric acid (aerosol) reaction rate, *Environ. Sci. Technol.*, **17**, 347–352 (1983).
- Mikami, T., Yamato, H., Ando, H., Yokoyama, H., Yamaguchi, T., Ichino, M., Akiyama, Y., Ishii, K.: Climatological study on the summer intensive heavy rainfall in Tokyo, *Annual Report of the Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection*, 33–42 (2005) [in Japanese].
- Miyamoto, Y.: Rotation and intensification of typhoons, *NAGARE*, **35**, 365–372 (2016) [in Japanese].
- 日本気象協会: 過去の天気 (2019), https://tenki.jp/past/chart/ (2019.12.29アクセス)
- 小倉義光:一般気象学第2版, pp. 65-77, 東京大学出版会, 東京 (1999).
- Ooka, R., Khiem, M., Hayami, H., Yoshikado, H., Hong, H., Kawamoto, Y.: Influence of meteorological condition on summer ozone levels in the central Kanto area of Japan, *Prog. Environ. Sci.*, 4, 138–150 (2011).
- Parungo, F. P., Nagamoto, C. T., Rosinski, J.: A study of marine aerosols over the Pacific Ocean, J. Atmos. Chem., 4, 199–226 (1986).
- Rosenfeld, D., Lohmann, U., Raga, G. B., O'Dowd, C. D., Kulmala, M., Fuzzi, S., Reissell, A., Andreae, M. O.: Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, **321**, 1309–1313 (2008).
- Ryu, Y. H., Smith, J., Bou-zeid, E., Baeck, M.: The influence of land surface heterogeneities on heavy convective rainfall in the Baltimore-Washington metropolitan area, *Mon. Wea. Rev.*, 144, 553–573 (2015).
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N.: Atmospheric Chemistry and Physics, 2nd ed., p. 1203, Wiley-Interscience, New Jersey (2006).
- 新宿区役所: 住民基本台帳人口 (2019), https://www.city. shinjuku.lg.jp/kusei/index02_101.html (2019.11.5アク セス)
- Shoji, T., Koike, K.: Kriging-estimation of spatial data taking account of error, J. Geotherm. Res. Soc. Jpn., 29, 183– 194 (2007) [in Japanese].
- Simpson, G. C.: On the formation of cloud and rain, Q.J.R. Meteorol. Soc., 67, 99–133 (1941).
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J., Cohen, M. D., Ngan, F.: NOAA's HYSPLIT

atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 2059–2077 (2015).

- 鈴木啓介: 札幌における降雪の化学的性質, 地理学評論, 56, 171-184 (1983).
- Thornton, J. A., Virts, K. S., Holzworth, R. H., Mitchell, T. P.: Lightning enhancement over major oceanic shipping lanes, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9102–9111 (2017).
- 東京都環境局: 微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 等排出インベントリ 報告書 (2008), http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/ air_pollution/torikumi/pm25-report2011.files/013_ inbentori.pdf (2019. 8. 19アクセス)
- 東京都環境局:大気汚染常時監視測定結果のまとめ (2019a), http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/data/publications/ air/300200a20180301163730638.html (2019. 8. 19アク セス)
- 東京都環境局: 大気汚染測定結果ダウンロード (2019b), http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/ torikumi/result_measurement.html (2020. 1.1アクセス)
- Uchiyama, R., Okochi, H., Kamiya, J., Asai, D., Kaneko, C., Ogata, H., Katsumi, N.: The impacts of "urban-induced heavy rains" on the distribution of deposition fluxes of inorganic acidic substances in the Tokyo metropolitan area in summer, *Atmos. Res.*, **200**, 190–116 (2018).
- Uchiyama, R., Okochi, H., Katsumi, N., Ogata, H.: The impact of air pollutants to the formation of "Urban-induced heavy rainfall (UHR)" in downtown Tokyo, Japan, J. Geophys. Res. Atmos., 112, 6502–6519 (2017).
- 上本道久:検出限界と定量下限の考え方,ぶんせき,5, 216-221 (2010).
- United States Environmental Protection Agency (2019), https://www.epa.gov/heat-islands (2019. 8. 19アクセス)
- Vetere, A.: Predicting the vapor pressures of pure compounds by using the wagner equation, *Fluid Phase Equilib.*, **62**, 1–2 (1991).
- Yoshikado, H.: Air pollution in Japan dominated by local meteorology, J. Jpn. Soc. Atmos. Environ., 42, 62–74 (2007) [in Japanese].
- Zhou, X., Bai, Z., Yang, Y.: Linking trends in urban extreme rainfall to urban flooding in China, *Int. J. Climatol.*, 37, 4856–4593 (2017).

(受稿日2019.12.4) (掲載決定日2020.1.25)

都市型豪雨生成に及ぼす大気汚染物質の影響評価

一新規開発した分割型豪雨採取システムと地理情報システムの活用—

須合 俊貴¹,藤原 博伸^{1,2},大河内 博¹,内山 竜之介¹,中野 孝教¹,鴨川 仁³,荒井 豊明⁴

- 1 早稲田大学大学院創造理工学研究科: 169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1
- 2 女子聖学院高等学校: 114-8574 東京都北区中里3-12-2
- 3 静岡県立大学グローバル地域センター: 420-0839 静岡県静岡市葵区鷹匠 3-6-1
- 4 トランステック株式会社: 141-0022 東京都品川区東五反田1-11-5 電波ビル3F

大気汚染物質が都市型豪雨生成に及ぼす影響の解明を目的として、早稲田大学西早稲田キャンパス(東京都新宿区)で降水の時系列採取を行った。さらに、都内および周辺地域の大気観測値を用いて地理情報システムによる都市型豪雨直前の大気汚染物質の空間解析を行った。2012年から2019年までの都市型豪雨の体積加重平均pHは4.41 (*n*=16)であり、その他の降雨より低かった。総主要無機イオン濃度は都市型豪雨と通常降雨で同程度であるが、都市型豪雨では酸性物質由来成分が高い割合を占めた(62.3%)。都市型豪雨中酸性物質由来成分は台風性豪雨に比べて緩やかな濃度減少を示し、継続的に雲内洗浄されている可能性が示唆された。一方、都市型豪雨によるH⁺沈着量、NO₃⁻沈着量、SO₄⁻⁻沈着量は通常降雨のそれぞれ31、20、15倍であり、短時間に大量の酸性物質を地上に負荷していた。雨雲レーダー画像解析から、都市型豪雨には都心部で発達するパターン(直上パターン、東パターン)と、西部山間部から雨雲が輸送され、都心上空で発達するパターン(北西パターン)があることがわかった。都市型豪雨発生直前には発生地点付近でPM_{2.5}高濃度域が形成されるが、豪雨発生前に消失していた。このことから、大気汚染物質が豪雨発生地点へ輸送・集積し、上空へ輸送されて積乱雲の形成および発達に関与していることが示唆された。