

2018年 WNI 気象文化創造センター「気象文化大賞」報告書.

大気汚染は豪雨生成を促進するか？

：首都圏ゲリラ豪雨とカンボジア熱帯性豪雨の比較研究

研究代表者： 大河内 博 （早稲田大学理工学術院）

1. 目的と意義

気象庁によると 1976 年から 2018 年の期間で 1 時間降水量 50mm 以上の発生回数は 10 年あたり約 20 回の割合で増加した。2018 年には記録的短時間豪雨の発令回数が 123 回にも達し、豪雨発生は 7 月から 9 月に集中している。同じ場所に数時間わたり降り続く集中豪雨の原因として、地球温暖化による海水表面温度の上昇による大量の暖かい湿った空気が大気下層に継続的に流入し、自由対流高度まで持ち上げる強制力(前線、地形など)による線状降水帯の形成が指摘されている。

都市部で多発する局地的大雨の発生要因として考えられているのが、ヒートアイランド現象、すなわち、都市域における局地的な気温上昇である。対流性降水は都市域の風下側を中心に起こり、その傾向は午後に著しい。図 1 に示すように、東京 23 区では練馬で豪雨発生頻度が最も高く、過去 30 年間に時間雨量 50 mm を越える豪雨発生頻度が 6 倍に増加し、酸性沈着量も増加した(Uchiyama et al., 2017)。図 2 は猛暑日が多かった 2010 年における東京 23 区の気温 30°C 以上を記録した時間分布であるが、練馬付近では周囲に比べて高温となる時間が長いことが分かる。首都圏における都市型豪雨生成機構として、次のようなモデルが考えられてきた。①ヒートアイランド現象により、気温が高い地点で暖かい空気が上空に運ばれる。②その結果、気圧が低くなった地上付近に向かって、高層ビルによって収束されて風速が増加した湿った海風が入り込む。③湿った空気が上空に運ばれる過程で凝結し、積乱雲が発達する。このモデルは図 1 と 2 で示した高温地点で都市型豪雨が頻発する現象を説明できそうであるが、数値シミュレーションでは都市型豪雨生成を再現できていない。

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とから、我々は都市型豪雨の生成機構として、大気汚染物質濃度の増加に伴う雲凝結核の増加が関与している可能性に着目した。空気が綺麗な外洋では船舶から放出される PM_{2.5} により航路上に雷雲が発達し、発雷回数が増加することが報告されている。都市域の気温上昇はオゾン濃度を局地的に増加させ、NO_x や SO₂ の酸化を促進する。酸化生成した HNO₃ や H₂SO₄ は一部が NH₃ と反応して NH₄NO₃、NH₄HSO₄、(NH₄)₂SO₄ などの吸湿性エアロゾルを生成する。吸湿性エアロゾル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。

本研究では、都市型豪雨では大気汚染物質が重要な雲凝結核となるという仮説を立て、この仮説検証のために地上部で都市型豪雨の観測を行い、化学分析と安定同位体分析を組み合わせて解析を行った。また、地理情報システムにより大気汚染物質の集積過程について検討を行った。さらに、都市化しつつあるカンボジアで熱帯性豪雨を採取し、ヒートアイランド現象および地球温暖化によって熱帯に近づきある首都圏ゲリラ豪雨との類似点と相違点について検討した。

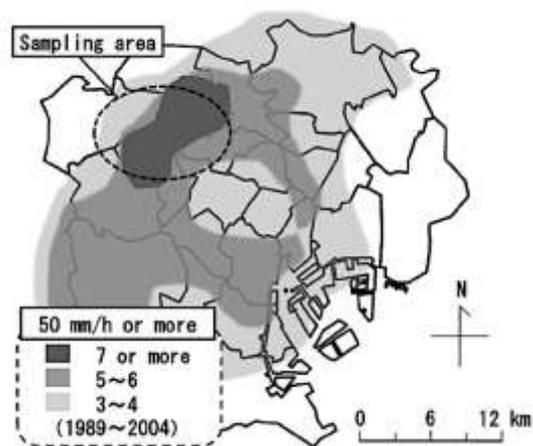


図 1 東京 23 区における 1989 年から 2004 年までの時間雨量が 50 mm/h を越えた回数の分布 (Uchiyama et al., 2017)

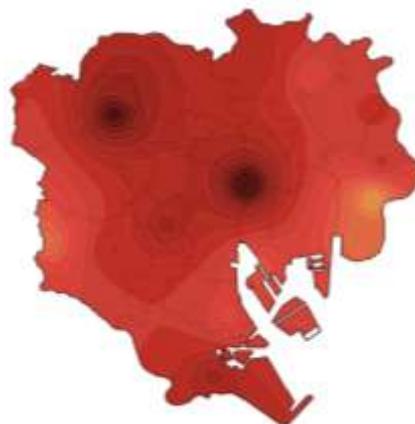


図 2 東京 23 区で 2010 年に気温 30°C 以上となった時間の分布 (日本経済新聞 web 版)

2. 首都圏ゲリラ豪雨の生成機構

首都圏（早稲田大学西早稲田キャンパス，東京都新宿）で雨水をイベント毎または時系列採取した．時系列採取のために体積分割型自動雨水採取装置の開発した（藤原ら，2020；須合ら，2020）．装置開発者である藤原（当研究室社会人博士課程2年）の名を冠して Fujiwara Rotation sampling Gadget から，Waseda Rain FROG（通称：アマガエル）と名付けた．

イベント毎および時系列採取した雨水は，通常降雨，都市型豪雨，台風性豪雨，前線性豪雨に分類した．豪雨の判別には10分雨量データを用いた．10分雨量5mm未満（降水強度30mm/h未満）の降水を通常降雨，10分雨量5mm以上（降水強度30mm/h以上）の降水を含む試料を豪雨と定義した．また，1時間毎の気象衛星画像（赤外画像）および3時間毎の天気図を用いて豪雨を都市型，台風性，前線性に分類した．



図3 新規開発した体積分割型自動雨水採取装置（通常：アマガエル）

2.1 都市域における豪雨の実態解明

都市域における降水の長期的な傾向を明らかにするために，都市域の東京都（練馬，府中，世田谷，東京，江古川臨海，羽田），大阪府（枚方，豊中，大阪，境），愛知県（名古屋，豊田，蒲郡，豊橋）14地域の降水データを解析した．解析期間は1979年から2018年の40年間における，7月から9月の気象庁降水データを用いた．7月から9月に絞ったのは都市型豪雨が起きやすい期間に注目し，他の豪雨（前線性豪雨：6月，台風性豪雨：9月中旬以降）の影響をなるべく少なくするためである．解析期間を10年ごとに区切り，decade1（1979-1988年），decade2（1989-1998年），decade3（1999-2008年），decade4（2009-2018年）の4つの期間として解析した．ここでは首都圏の解析結果を述べる．

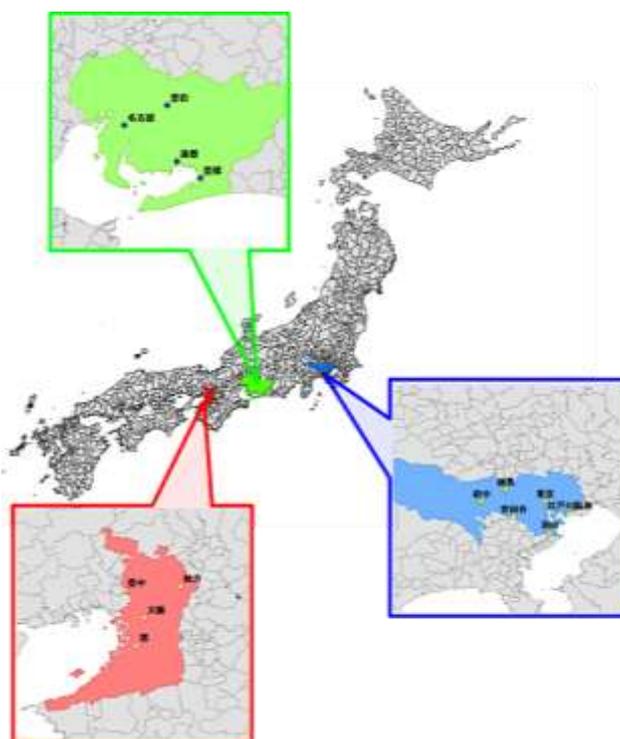


図4 解析を行った気象観測所の配置

図5では，東京都における10年間総降水量を期間毎にまとめて示している．府中はdecade3で最も多く（6148mm），その他の地点ではdecade2が多かった（江戸川臨海：4724mm，羽田：5185mm，世田谷：6285mm，東京：5607mm，練馬：6003mm）．経年的には降水量が減少した．また，沿岸部（江戸川臨海，羽田）における10年間降水量の変化は中間部（東京，世田谷）と類似しているが，総降水量が少ない傾向にあった．内陸部（練馬，府中）では沿岸部における降水量変化とは異なり，decade3で降水量が多い傾向にあった．

図6には、東京都における10年間豪雨回数(時間雨量30 mm以上)を示している。豪雨回数は沿岸部(江戸川臨海, 羽田)ではどの期間も10回以下であり, 経年的変化はない。中間部(東京と世田谷)ではdecade 3に最高回数を記録しているが(東京:19回, 世田谷:18回), decade 4で減少した(東京:10回, 世田谷:13回)。この傾向は羽田にも見られており, 沿岸部の豪雨発生傾向といえる。しかし, 内陸側(府中, 練馬)では豪雨回数は年々増加しており, decade 4で最多であった(府中:17回, 練馬:17回)。

台風性豪雨や前線性豪雨であれば, 降水現象の規模の大きさから考えると, 全体に類似するはずである。しかし, 内陸部(府中と練馬)では豪雨回数は増加しており, 台風性豪雨と前線性豪雨だけでは説明できない。さらに, この2地点の総降水量は減少傾向にあるものの, 強雨イベント回数は増加傾向にあり, 真逆の変化を示している。したがって, より内陸部側で強雨イベント回数が増加していることの要因として, 局所的に発生する都市型豪雨の影響と考えられる。

2.2 都市型豪雨の化学特性

図7には, 2012年から2019年に早稲田大学西早稲田キャンパスでイベント毎に一括採取した雨水(145試料)を, 通常降雨(Normal), 都市型豪雨(UHR: Urban-induced heavy rain), 台風性豪雨(THR: Typhoon heavy rain), 前線性豪雨(FHR: Frontal heavy rain)に分類し, 上段には平均降水時間と平均降雨強度を棒グラフに, 下段には主要無機イオンの湿性沈着量を折れ線で, 各イオン組成を棒グラフで示している。

平均降水時間は都市型豪雨が最も短く, 平均降雨強度は都市型豪雨で最も高かった。全湿性沈着量は都市型豪雨で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),

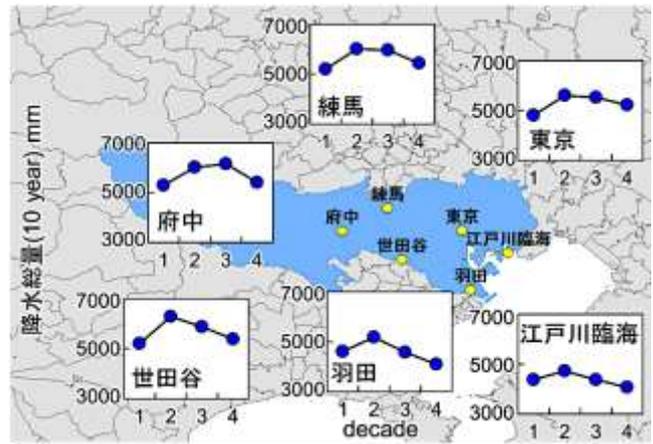


図5 東京における対象地点の10年間降水量の変化

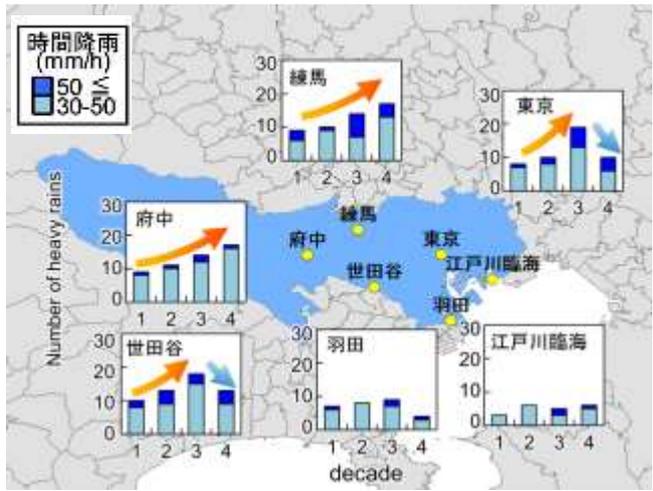


図6 東京における対象地点の10年間豪雨回数の変化

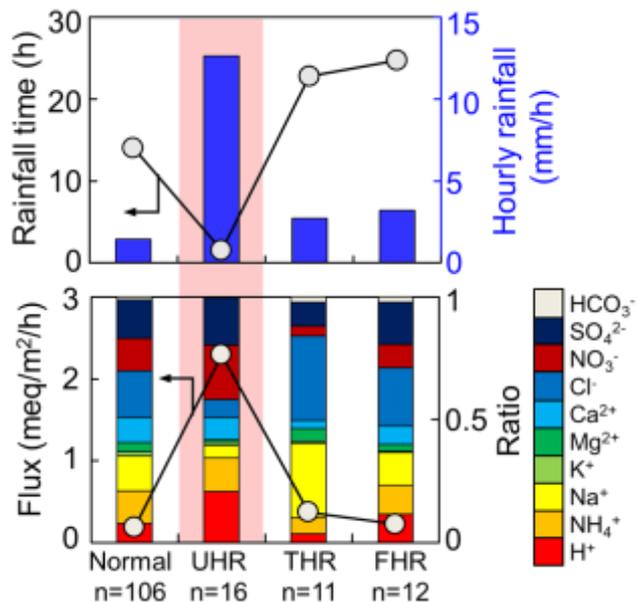


図7 降雨種毎の主要無機イオン湿性沈着フラックス

前線性豪雨(0.224 meq/m²/h) のそれぞれ 11.7 倍, 5.91 倍, 9.78 倍であった。水素イオン湿性沈着量は都市型豪雨で 461 μeq/m²/h であり、通常降雨(14 μeq/m²/h)、台風性豪雨(13 μeq/m²/h)、前線性豪雨(25 μeq/m²/h)のそれぞれ 30.7 倍、35.2 倍、17.7 倍であった。一方、硝酸イオン湿性沈着量では都市型豪雨で 509 μeq/m²/h であり、通常降雨(26 μeq/m²/h)、台風性豪雨(14 μeq/m²/h)、前線性豪雨(21 μeq/m²/h)のそれぞれ 19.6 倍、35.8 倍、23.9 倍であった。硫酸イオン湿性沈着量では都市型豪雨で 445 μeq/m²/h であり、通常降雨(30 μeq/m²/h)、台風性豪雨(37 μeq/m²/h)、前線性豪雨(39 μeq/m²/h)のそれぞれ 15.0 倍、12.1 倍、11.5 倍であった。

以上のことから、都市型豪雨では 1 時間半程度の短時間に、通常降雨の 10 倍以上の全湿性沈着量、約 30 倍の水素イオン沈着量、約 20 倍の硝酸イオン沈着量および、約 15 倍の硫酸イオン沈着量を都市域にもたらすことが明らかになった。

2.3 都市型豪雨の発生パターンと化学特性

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る。図 8(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。

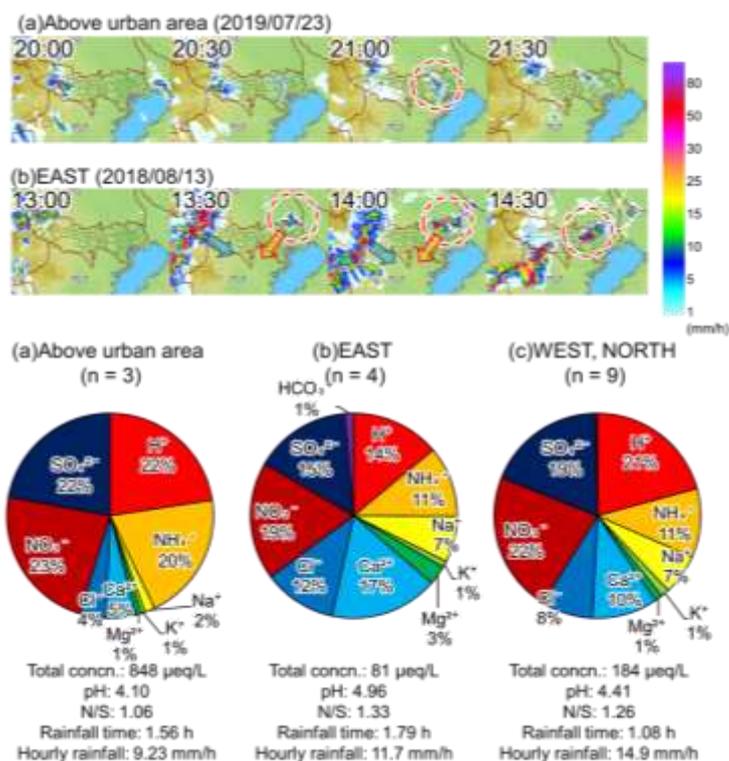


図 8 都市型豪雨の降雨レーダー及び輸送方向別都市型豪雨の化学組成

た。このときには西部の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°C を越えており、熱帯夜であった。図 8(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。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間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。

図 8 下部には、それぞれの豪雨パターン毎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、 $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 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 $848 \mu\text{eq/L}$ 、東パターンが $81 \mu\text{eq/L}$ 、北西パターンが $184 \mu\text{eq/L}$ 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の寄与が大きかった。平均化学組成は、直上パターンで酸性物質由来成分(H^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-})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、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。

3.3 都市型豪雨生成に及ぼす大気汚染物質の影響

一例として、図 9 には 2018 年 6 月 12 日に観測された北西パターンの都市型豪雨発生前後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 DUSTTRAK™ ENVIRONMENTAL MONITOR から得られた $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の変化を示す。降雨時間は水色で示している。

この豪雨時には 13 時まで風速 1 m/s 程度の南風が卓越していたが、14 時から北風になり、16 時頃に雨が降り始めた。 NO_x は 12 時に最高濃度を示し、その後濃度減少して降雨直前では 18 ppbv であった。 SO_2 濃度は大きな変化はなかったが、降雨直前では NO_x と同様に濃度低下がみられた。降雨直前までの NO_x の濃度変化は CO および $\text{PM}_{2.5}$ 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、 O_x 濃度は 12 時まで 10 pptv 前後を推移したが、風向が北風になり、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 O_x 濃度の増加と、 NO_x 濃度および SO_2 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

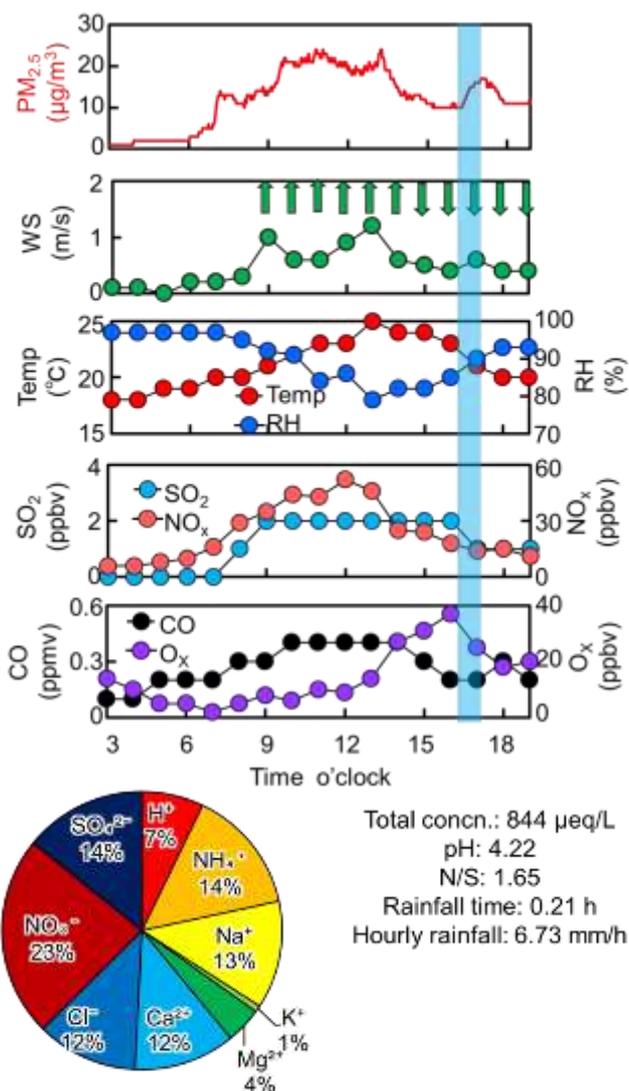


図 9 2018 年 6 月 12 日 都市型豪雨発生時における大気汚染物質の経時変化と雨水化学組成

濃度も減少しているため NO_x 濃度及び 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ともなう PM_{2.5} 濃度の増加は説明できない。PM_{2.5} の主成分である硝酸塩と硫酸塩はグリーンフィールドギャップにあるため雲底下洗浄を受けにくい。豪雨時における PM_{2.5} 濃度の増加は、O_x 濃度の増加に伴って NO_x 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。このときの豪雨の化学組成をみると酸性物質 (NO₃⁻, SO₄²⁻) の割合が高く、総濃度は非常に高濃度であった。pH は 4.22 であり、北西パターン時の平均 pH 4.41 (図 8) より酸性度が高く、豪雨形成に酸性物質が強く影響していた。N/S 比は 1.65 であり、北西パターン時の平均値 (1.26) よりも高く、酸性化には硝酸の影響がより強かった。

3.3 都市型豪雨発生時における大気汚染物質および気象状況

一例として、図 10 には 2017 年 7 月 18 日の都市型豪雨発生前後の大気汚染物質濃度および気象因子をマッピングしたものを示す。

3.3.1 気温・湿度

気温は 12 時から 13 時で高く、13 時には 35°C に達する高温であった。豪雨発生直前の 14 時には気温は低下し、東京 23 区西部以外ではほぼ一様の気温分布を示した。15 時の豪雨発生時には、豪雨発生地の練馬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氣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。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。

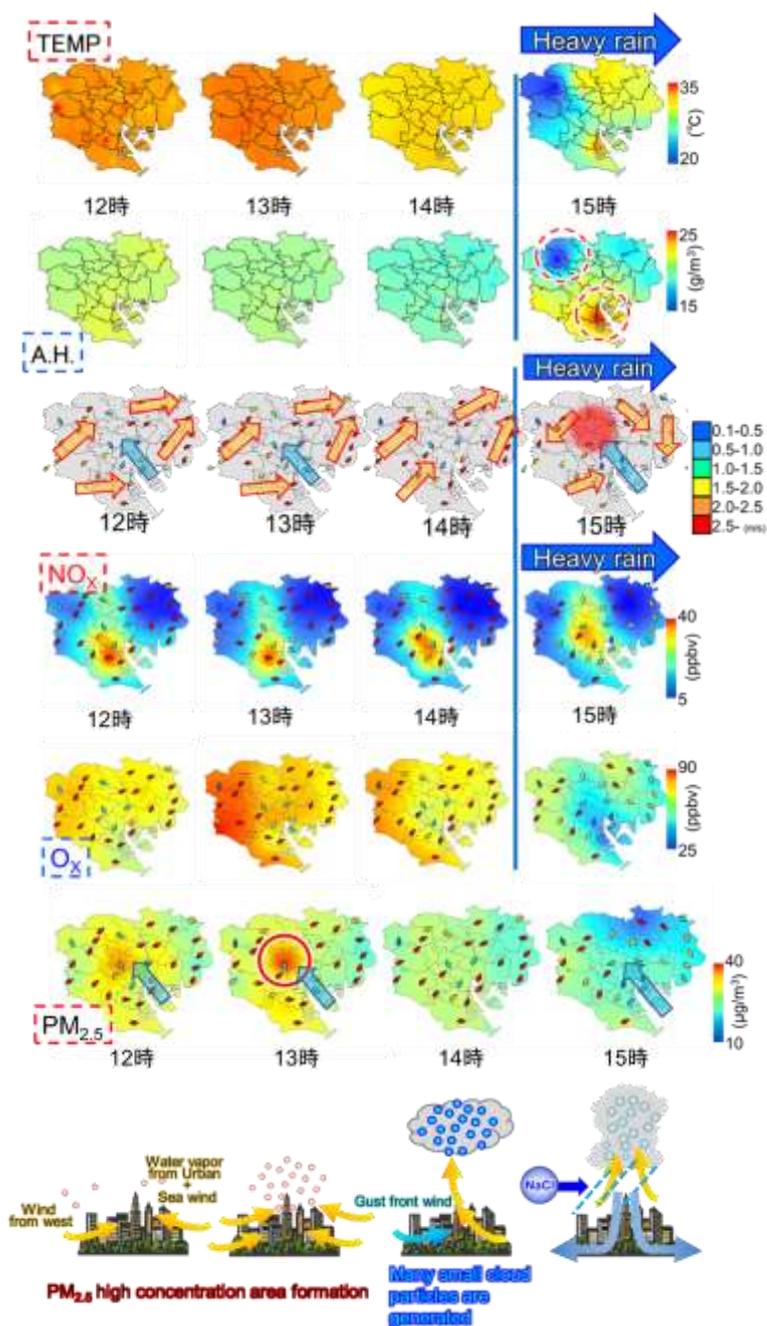


図 10 2017 年 7 月 18 日における大気汚染物質の濃度分布の経時変化

3.3.2 風向・風速

12時から14時にかけて西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、豊島方向へ風速は弱いものの海風が吹いていた。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。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。

3.3.2 窒素酸化物・光化学オキシダント

窒素酸化物の濃度分布は気象因子に左右されず、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6割以上が自動車排ガス由来である。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と考えられる。

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。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。

3.3.3 PM_{2.5}

PM_{2.5}質量濃度は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時に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。

この14時のPM_{2.5}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。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、PM_{2.5}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。積乱雲の発達条件として、上昇した空気塊が持ち上げ凝結高度(Lifted Condensation Level: LCL)を超え、湿潤断熱減率に則りながら温度低下したのちに自由対流高度(Level of Free Convection: LFC)を超えなくてはならない。LFC以上の高度では周囲に存在する空気よりも温度が高くなるため、上昇した空気塊に浮力が働き、対流活動が活発にな

る。対流活動が活発になるための一つの条件として、下層の大気がより湿潤になることがある。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 LCL および LFC を超えることができるようになる。図 10 をみると、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。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、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。PM_{2.5} の集積から雲粒形成への過程、および海風流入後の積乱雲発達イメージを図 10 の下段に示している。

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角に向けて風が吹いていた。NO_x は PM_{2.5} の前駆物質と考えられるが、NO_x の輸送過程で光化学反応により粒子化しているものと考えられる。また、PM_{2.5} の無機成分の多くを占める硫酸エアロゾルの前駆物質である 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。

3.4 カンボジアにおける大気汚染の実態解明と熱帯性豪雨の特徴

カンボジア第 5 番目の都市であり、アンコール遺跡の玄関口である観光都市のシェムリアップで、大気汚染物質とともに熱帯スコール豪雨 (TSHR: tropical squall-induced heavy rain) を採取した。一例として、図 11 には豪雨前後の PM_{2.5} およびブラックカーボン濃度の変化を気象因子とともに示す。豪雨発生 1 時間ほど前からゆるやかに気圧が上昇し、30 分ほど前に急激な気圧上昇と気温低下が見られた。このときには、PM_{2.5} がスパイク上に上昇した。この要因として、下降流により上空の冷氣プールが押し下げられ、上空で形成された PM_{2.5} 高濃度域 (PM_{2.5} プール) が冷気流により地上にもたらされたものと考えられる。

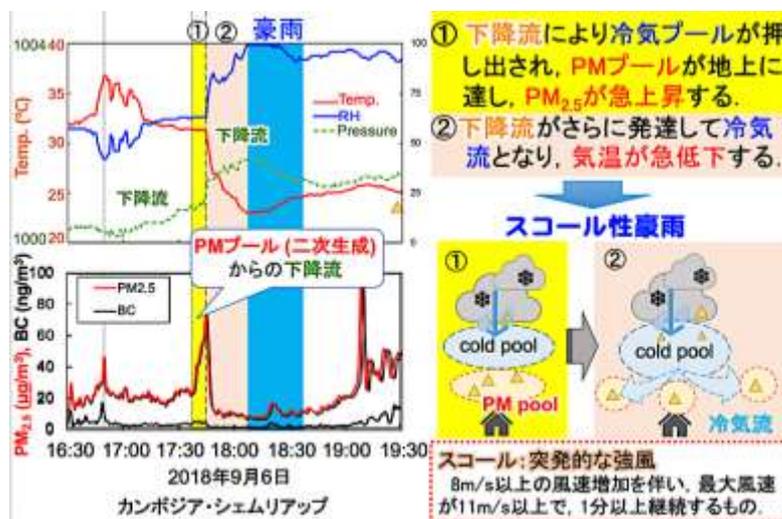


図 11 シェムリアップにおける熱帯スコール性豪雨前後の PM_{2.5} およびブラックカーボン (BC) 濃度の経時変化

都市型豪雨では豪雨発生時に pM_{2.5} の濃度状況が観測されており(図 9)、熱帯スコール性豪雨では PM_{2.5} の濃度上昇がシャープであり、豪雨発生直前に生じている。今後も都市型豪雨と熱帯スコール豪雨の比較研究を行うことにより、都市型豪雨の生成機構の解明につながる可能性がある。

4. 今後の課題

本研究では、都市型豪雨の生成が大気汚染物質の集積によって行っている可能性を、都市型豪雨の化学組成とともに、気象因子および地上大気汚染物質の GIS によるマッピング解析を行って示すことができた。しかしながら、地上における大気汚染観測地点の間隔は粗く、今後、小型センサーを活用して大気汚染物質濃度の観測を高密度で行い、集積過程を明らかにする必要がある。また、この報告書で触れることはできなかったが、都市型豪雨では酸性成分である NO_3^- 、 SO_4^{2-} に比べてフミン様物質 (HULIS) が高濃縮しており都市型豪雨生成に関与している可能性 (Sugo et al., 2019) や、道路堆積物が有効な氷晶核となって豪雨生成に関与している可能性を明らかにした (Uchiyama et al., 2019)。都市型豪雨の生成機構の全容を明らかにするためには、土壌、道路堆積物、一次生成および二次生成有機化合物についてもさらに研究を進める必要がある。

さらに、熱帯スコール性豪雨の発生前には特定の気象および大気汚染物質濃度の変化が生じることを発見した。今後、さらに観測を重ねて熱帯スコール性豪雨の生成に大気汚染がどのように関わっているのかを解明する必要がある。

5. 主要業績

【査読付き論文】

Ryunosuke Uchiyama, Hiroshi Okochi, Hiroko Ogata, Naoya Katsumi, Takanori Nakano (2019) Characteristics of trace metal concentration and stable isotopic composition of hydrogen and oxygen in “urban-induced heavy rainfall” in downtown Tokyo, Japan; The implication of mineral/dust particles on the formation of summer heavy rainfall, *Atmospheric Research*, 217, 73-80.

Toshiki Sugo, Hiroshi Okochi, Ryunosuke Uchiyama, Eri Yamanokoshi, Hiroko Ogata, Naoya Katsumi, Takanori Nakano (2019) The role of humic-like substances as atmospheric surfactants in the formation of summer-heavy rainfall in downtown Tokyo, *City and Environment Interactions*, 3, 100022, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100022>.

内山竜之介, 大河内博, 中野孝教, 緒方裕子, 勝見尚也, 金子千穂, 神谷純一, 朝井大介 (2020) 化学分析及び安定同位体分析を用いた都市型豪雨生成機構の解明, *分析化学*, 69, 45-68.

須合俊貴, 藤原博伸, 大河内博, 内山竜之介, 中野孝教, 鴨川仁, 荒井豊明 (2020) 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, *大気環境学会*, 掲載可.

【学会発表】

Ryunosuke Uchiyama, Hiroshi Okochi, Hiroko Ogata, Naoya Katsumi, Takanori Nakano, “The impact of mineral/dust particles on the formation of summer heavy rainfall in downtown Tokyo, Japan”, 11th Asia Aerosol Conference (AAC2019), May. 27-30, 2019, City University of Hong Kong

Mitsuo Dairiki, Megumi Nakamura, Hiroshi Okochi, Kojiro Shimada, Naoya Katsumi, Minami Yukiya, Hiroshi Kobayashi, Kazuhiko Miura, Shungo Kato, Ryuichi Wada, Kei Toda, “Observation of Cloud Water Chemistry in the Free Troposphere”, 11th Asia Aerosol Conference (AAC2019), May. 27-30, 2019, City University of Hong Kong

Tomoki Kajikawa, Hiroshi Okochi, Takanori Nakano, Kojiro Shimada, “The impact of particulate matters on the formation and chemistry of tropical heavy rain accompanied by squall”, 11th Asia Aerosol Conference (AAC2019), May. 27-30, 2019, City University of Hong Kong

Hiroshi Okochi, Mitsuo Dairiki, Megumi Nakamura, Daisuke Tahara, Naoki Takemura, Takanori Nakano, Kojiro Shimada, Naoya Katsumi, Yukiya Minami, Masaki Takeuchi, Kei Toda, Shungo Kato, Ryuichi Wada, Kazuhiko Miura, Shinichi Yonemochi, Shiro Hatakeyama, Yukiko Dokiya “ Observation of Cloud Water Chemistry in the Free Troposphere and the Atmospheric Boundary Layer on Mt. Fuji (6)”, 8th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Jul.14-19, 2019, National Taiwan University

Tomoki Kajikawa, Hiroshi Okochi, Kojiro Shimada, Takanori Nakano, Etsuo Uchida, Masahide Ishizuka, Takeshi Nakagawa, Toshiya Matsui, Toyoaki Arai, Satoru Udagawa, Poty Lay, Peou Hang, “Air pollution and its impact of tropical heavy rainwater and dew water chemistry in Siem Reap - Angkor region of Cambodia”, 8th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Jul.14-19, 2019, National Taiwan University

Tomoki Kajikawa, Hiroshi Okochi, Takanori Nakano, Kojiro Shimada, Etsuo Uchida, Takeshi Nakagawa, Toshiya Matsui, Mitsumasa Ishizuka, Toyoaki Arai, Lay Poty, Hang Peou, “The Impact of Particle Matters on the Formation and Chemistry of Tropical Heavy Rain Accompanied by Squall”, 第 28 回環境化学討論会(国際セッション), 2019 年 6 月 12-14 日, 埼玉ホール, 英国王立化学会賞

Mitsuo Dairiki, Hiroshi Okochi, Megumi Nakamura, Naoya Katsumi, Yukiya Minami, Shinichi Yonemochi, Kazuhiko Miura, Shungo Kato, Ryuichi Wada, Masaki Takeuchi, Kei Toda, Yukiko Dokiya, Shiro Hatakeyama, “ Observation of Cloud Water Chemistry in the Free Troposphere and the Atmospheric Boundary Layer on Mt. Fuji”, 第 28 回環境化学討論会(国際セッション), 2019 年 6 月 12-14 日, 埼玉ホール, 英国王立化学会賞

藤原博伸, 大河内博, 須合俊貴, 内山竜之介, 中野孝教, 鴨川仁, “ゲリラ豪雨生成機構解明のための多点観測対応型自動雨水採取装置の開発”, 第 28 回環境化学討論会, 2019 年 6 月 12-14 日, 埼玉ホール

藤原博伸, 大河内博, 須合俊貴, 内山竜之介, 中野孝教, 鴨川仁, “ゲリラ豪雨生成機構解明のための多点観測対応型自動雨水採取装置の開発(2)”, 第 60 回 大気環境学会年会, 2019 年 9 月 18-20 日, 東京農工大学

須合俊貴・大河内博・内山竜之介, 中野孝教, 藤原博伸, 鴨川仁, “化学・安定同位体分析を用いた都市型豪雨の実態と生成機構の解明(3)”, 第 60 回 大気環境学会年会, 2019 年 9 月 18-20 日, 東京農工大学

大力充雄, 大河内博, 中村恵, 勝見尚也, 皆巳幸也, 米持真一, 三浦和彦, 加藤俊吾, 和田龍一, 竹内政樹, 戸田敬, 土器屋由紀子, 畠山史郎, “富士山体を利用した自由対流圏および大気境界層における雲水化学特性(6)”, 第 60 回 大気環境学会年会, 2019 年 9 月 18-20 日, 東京農工大学, 学生優秀ポスター賞

梶川友貴, 大河内博, 中野孝教, 島田幸治郎, 内田悦生, 中川武, 松井敏也, 石塚充雅, 荒井豊明, 宇田川智, PHORSDA Phu, LAY Poty, HANG Peou , “カンボジア・シェムリアップ アンコール地域における大気汚染と熱帯性豪雨の化学組成に及ぼす影響”, 第 60 回 大気環境学会年会, 2019 年 9 月 18-20 日, 東京農工大学

6. 謝辞

本研究助成により, 都市型豪雨および熱帯スコール性豪雨生成に関する数々の新たな知見を得ることができました. 本研究で得られたフィールド観測結果を組み込んだモデルを構築することにより, これまで予測困難であった都市型豪雨の予測精度向上に貢献できるものと確信しています. 心から御礼を申し上げます.