

## 略 歴

1989年	3月	早稲田大学工学部	卒業
1991年	3月	東京工業大学大学院 総合理工学研究科	修士修了
1991年	4月	神奈川大学工学部	助手
1997年	2月	論文博士(工学)の学位授与 (東京大学)	
1999年	9月	英国イースト・アングリア大学 環境科学部	博士研究員
2003年	4月	東京都立科学技術大学 工学部	助教授
2005年	4月	首都大学東京 都市環境学部	准教授
2006年	4月	早稲田大学理工学術院 理工学部	助教授
2007年	4月	早稲田大学理工学術院 創造理工学部	准教授
2008年	4月	早稲田大学理工学術院 創造理工学部	教授
			現在に至る

## 都市温暖化が首都圏夏季豪雨の発生頻度と化学組成に与える影響

気象庁によると1976年から2016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。2017年には記録的短時間豪雨の発令回数が107回にも達し、豪雨発生は7月から9月に集中している。都市部で多発する局地的大雨では、ヒートアイランドによる上昇流が強制力となり、高層ビルによる湿った海風の収束により周囲から積乱雲が発達するという気象的・物理的観点からのモデルが作られ、数値シミュレーションが行われてきたが、都市型豪雨生成を予測できていない。本研究では、都市温暖化の影響として都市域における大気汚染物質の収束と化学反応の促進に注目し、都市型豪雨の化学分析に安定同位体分析手法を組み合わせたという新しい観測研究を行った。本研究により、次のようなことが明らかになった。

- (1) 東京23区では練馬区で豪雨発生頻度が最も高く、過去30年間に時間雨量50mmを越える極端な豪雨発生頻度が6倍に増加し、これに伴って酸沈着量も増加した。
- (2) 東京都新宿区で採取した雨水を、通常降雨と豪雨(都市型、台風性、前線性)に分類した。都市型豪雨では、通常降雨とその他の豪雨よりも低pHであり、通常降雨より酸沈着量が約20倍高く、酸性物質を高濃縮していることが分かった。
- (3) 都市型豪雨の酸素安定同位体比は、積乱雲の発達地点と都市型豪雨の採取地点との距離の指標となる。酸素安定同位体比が増加すると(積乱雲の発達地点から遠くなると)、都市型豪雨中酸性物質濃度が減少することから、酸性物質は都市型豪雨の初期過程で雲内洗浄される。

- (4) 都市型豪雨をもたらす水蒸気は海風の寄与は小さく、都市部からの蒸発過程が重要である。
- (5) 都市型豪雨直前にはNO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、ポテンシャルオゾン濃度が増加し、終盤には急激に減少する。モデル計算により、豪雨直前にHNO<sub>3</sub>およびNH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>生成が示唆された。
- (6) 都市型豪雨の生成には、硫酸塩や硝酸塩のような二次生成無機粒子だけではなく、氷晶核として道路粉塵（一次粒子）、凝結核として有機化合物が関与している可能性がある。

## 1. はじめに

気象庁によると1976年から2016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。2017年には記録的短時間豪雨の発令回数が107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、自由対流圏高度まで持ち上げる強制力（前線、地形など）により線状降水帯を形成することが考えられている。

一方、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。米国ではシカゴをはじめ6都市で夏季の局地的な対流性降水の増加が確認されている（Changnon, 1968）。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（Shepherd et al., 2002）。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50mm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., 2018）。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℃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。

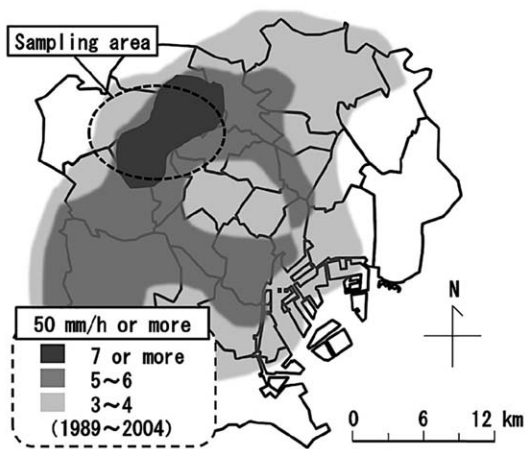


図1 東京23区における1989年から2004年までの時間雨量が50mm/hを越えた回数の分布（Uchiyama et al., 2017）

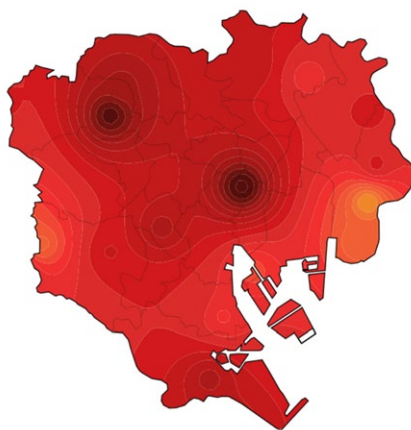


図2 東京23区で2010年に気温30℃以上となった時間の分布（日本経済新聞web版）

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説明できていない。

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 (Rosenfeld et al., 2008) が関与している可能性に着目した。都市大気ではないが、Thornton et al. (2017) は空気が綺麗な外洋では船舶から放出されるPM2.5により航路上に雷雲が発達し、発雷回数が増加することを報告している。都市域の気温上昇はオゾン濃度を局地的に増加させ (Kheim, 2010; Ooka, 2011)、NO<sub>x</sub> や SO<sub>2</sub> の酸化を促進する。酸化生成した HNO<sub>3</sub> や H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> は、一部が NH<sub>3</sub> と反応して NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 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 (Bently et al., 2010)。

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 (大気汚染物質トリガー仮説) 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。

日本の典型的な都市域である東京都新宿 (早稲田大学西早稲田キャンパス) を中心に、雨水をイベント毎に採取した。また、都市型豪雨を効率的に採取するために、分割型自動雨水採取装置の試作を行った。さらに、都市型豪雨の発生頻度が高い練馬を中心に雨水観測を行った結果についても解析を行った。

イベント毎に採取した雨水は、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。さらに、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

### 3. 結果と考察

#### 3.1 都市型豪雨の化学特性

図3には、新宿区で採取した通常降雨、都市型豪雨、台風性豪雨、前線性豪雨の体積加重平均pH、硝酸イオン/非海塩起源硫酸イオン (N/S) 比、主要無機イオンの平均湿性沈着量とその化学組成を平均時間雨量、平均降雨時間とともに示す。都市型豪雨では通常降雨、その他の豪雨に比べてpHが最も低かった。降雨時間は1時間に満たず、時間雨量が大きいことを反映して、湿性沈着量が極めて高く、酸性沈着量は通常降雨に比べて約20倍高かった。N/S比は通常降雨と同程度か若干高く、台風性豪雨および前線性豪雨よりも高い。したがって、都市型豪雨の特徴として、大気中酸性物質を高濃縮していることが分かった。このことは、都市型豪雨直前の大気汚染物質が高濃度であることを示唆している。そこで、都市型豪雨生成前後の大気汚染物質について解析を行った。図4には2018年6月12日に観測された都市型豪雨 (総降雨量1.88mm、降雨時間1時間) 発生前後の気象因子と大気汚染物質濃度の経時変化を示す。降雨時間は灰色で示した。13時まで

風速 1m/s 程度の南風が卓越していたが、14時から北風が変わり、16時頃に雨が降り始めた。降雨3時間前にNO<sub>x</sub> およびCO濃度の減少、O<sub>x</sub>濃度の増加がみられたが、SO<sub>2</sub>濃度に変化はなかった。豪雨直前のO<sub>x</sub>濃度の増加と、NO<sub>x</sub>およびSO<sub>2</sub>濃度の減少は、硝酸塩と硫酸塩の二次生成を示唆しており、PM2.5濃度は豪雨開始とともに増加した。PM2.5の主成分はグリーンフィールドギャップ(0.1-2μm)に存在するため雲底下洗浄を受けにくい。したがって、PM2.5濃度の増加は周囲からのPM2.5の流入、近傍排出および生成の可能性を示している。

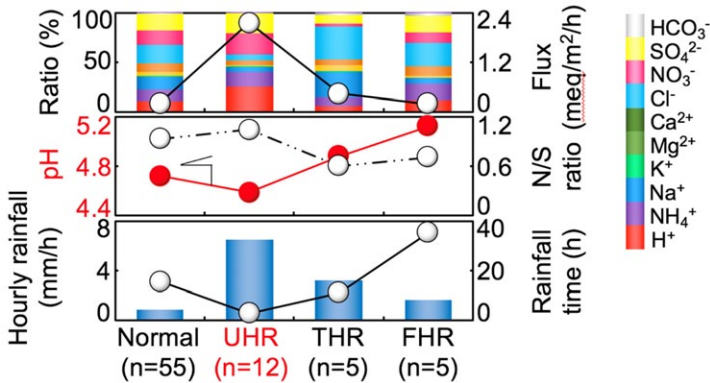


図3 新宿における通常降雨 (Normal)、都市型豪雨 (UHR)、台風性豪雨 (THR)、前線性豪雨 (FHR) の pH、硝酸イオン / 非海塩起源硫酸イオン比 (N/S)、湿性沈着量と化学組成

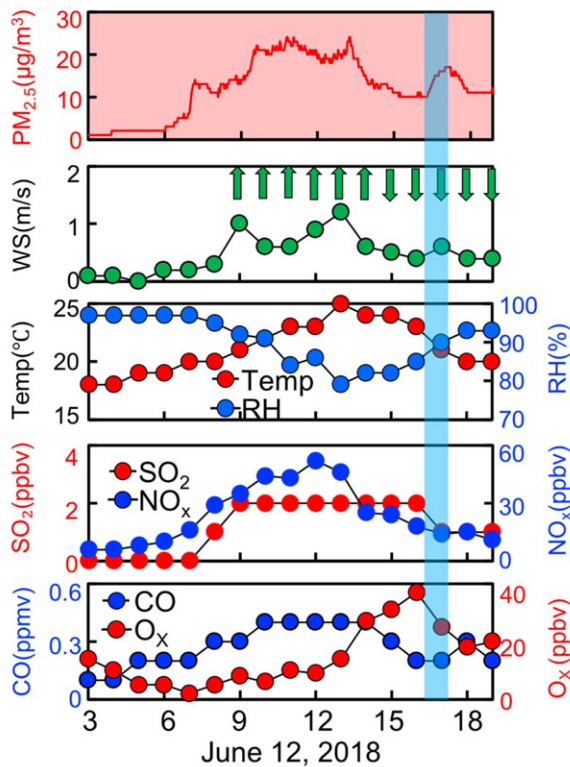


図4 盲新宿で2018年6月12日に発生した都市型豪雨生成前後の大気汚染状況



### 3.2 都市型豪雨の水素・酸素安定同位体特性

図5には、新宿区で採取した通常降雨、都市型豪雨、台風性豪雨、前線性豪雨について、降雨量と水素・酸素安定同位体比との関係を示す。通常降雨では春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)、冬季(12~2月)に分けてそれぞれの水素・酸素安定同位体比の体積加重平均をとり、3種類の豪雨もそれぞれの体積加重平均値を示す。図中の直線は通常降雨の回帰直線である。通常降雨では降雨量が少ない冬季に水素・酸素同位体比が高く、降雨量が多い夏季に低い傾向にあり、水素・酸素同位体比と降雨量に負の高い相関があった。前線性豪雨(FHR)は通常降雨の延長線上にあるが、台風性豪雨(THR)が通常降雨の回帰直線よりも高く、都市型豪雨では明らかに下方に外れていた。都市型豪雨の水素・酸素同位体比が低い要因について検討した結果、都市型豪雨をもたらす水蒸気の起源として海洋性水蒸気の寄与が小さいこと(図6)、地上気温が高いことから再蒸発が活発に起こること、上昇流により積乱雲が発達することから雲頂高度が高いことが考えられた。これまで、首都圏における都市型豪雨をもたらす水蒸気は海風によると考えられていたが、都市部から蒸発した水蒸気が重要であることが明らかになった。さらに、都市型豪雨の酸素安定同位体比と、積乱雲の発達地点(ゲリラ豪雨発生地点)とゲリラ豪雨の採取地点との距離の間には負の高い相関関係があることが分かった(図7)。

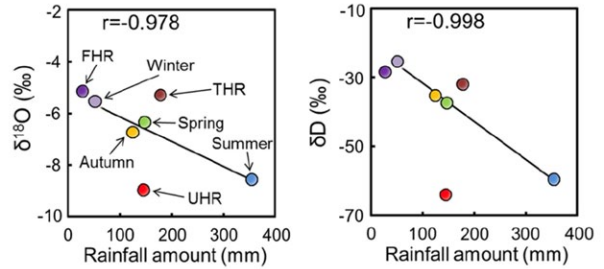


図5 通常降雨(春, 夏, 秋, 冬), 都市型豪雨(UHR), 台風性豪雨(THR), 前線性豪雨(FHR)の酸素安定同位体比(左), 水素安定同位体比(右)と降水量との関係(Uchiyama et al., 2017c)

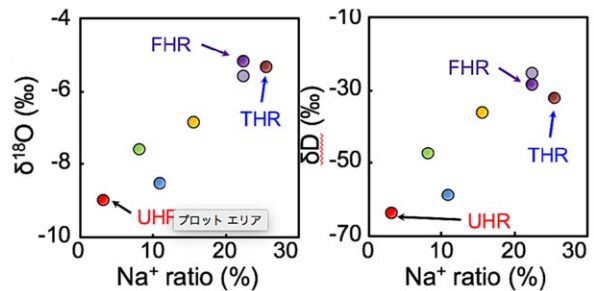


図6 通常降雨(春, 夏, 秋, 冬), 都市型豪雨(UHR), 台風性豪雨(THR), 前線性豪雨(FHR)の酸素安定同位体比(左), 水素安定同位体比(右)とNa比との関係(Uchiyama et al., 2017c)

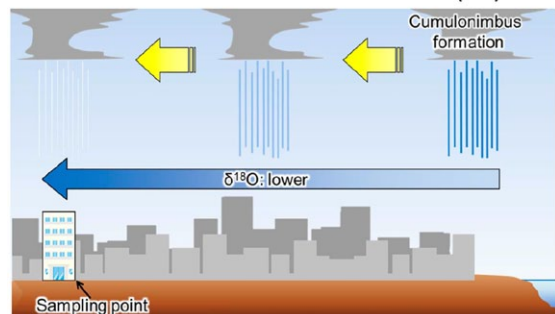
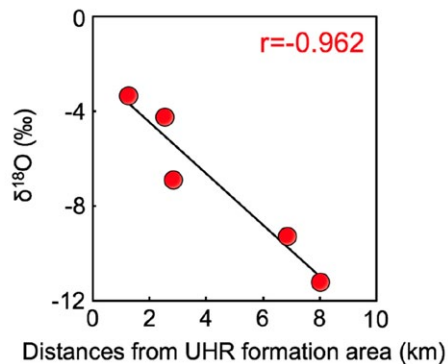


図7 都市型豪雨発生地点と雨水採取地点との距離と酸素安定同位体比(Uchiyama et al., 2017a)

### 3.3 都市型豪雨生成に及ぼす大気汚染物質の影響

図8には、都市型豪雨の酸素安定同位体比と酸性物質濃度との関係を示す。酸素安定同位体比が増加すると、酸性物質濃度が上昇することが分かる。都市型豪雨の酸素安定同位体比は豪雨発生地点の指標となることから(図7)、このことは都市型豪雨発生地点付近で酸性物質が洗浄されていることを示しており、図4で示したように都市型豪雨発生直前に大気中酸性物質濃度が高く、都市型豪雨生成に酸性物質が関与することを示唆している。なお、海塩由来成分である $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ にも同様の相関性が認められたが、酸性成分よりも相関性が低く( $\text{Na}^+ : r=0.715$ ,  $\text{Cl}^- : r=0.630$ )、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ では相関性はなかった。また、都市型豪雨の酸素安定同位体比とFe、Mn、Al、V、Pbの懸濁態中微量元素濃度との間に正の高い相関性( $r=0.80$ 以上)が認められたことから、都市型豪雨生成時の強風によって巻き上げられた道路堆積物も有効な雲凝結核もしくは氷晶核となっている可能性がある(Uchiyama et al., 2019)。さらに、都市型豪雨の時系列解析を行ったところ、都市型豪雨直前には $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、ポテンシャルオゾン濃度が増加し、都市型豪雨の終盤には急激に減少することが分かった。モデル計算により、豪雨直前に $\text{HNO}_3$ および $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 生成が示唆された(Uchiyama et al., 2017b)。

以上のことから、都市型豪雨の生成には硫酸塩や硝酸塩のような二次生成無機粒子だけではなく、氷晶核として道路堆積物(一次粒子)が関与していることが、本研究により明らかになった(図9)。

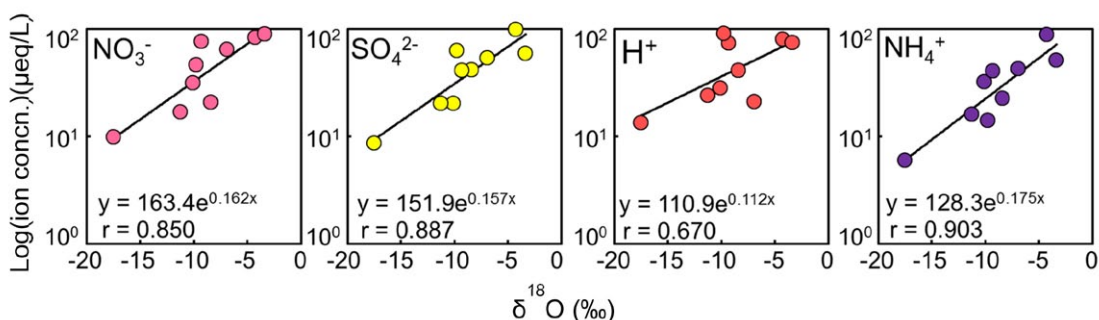


図8 都市型豪雨の酸素同位体比と酸性物質濃度との関係 (Uchiyama et al., 2017a)

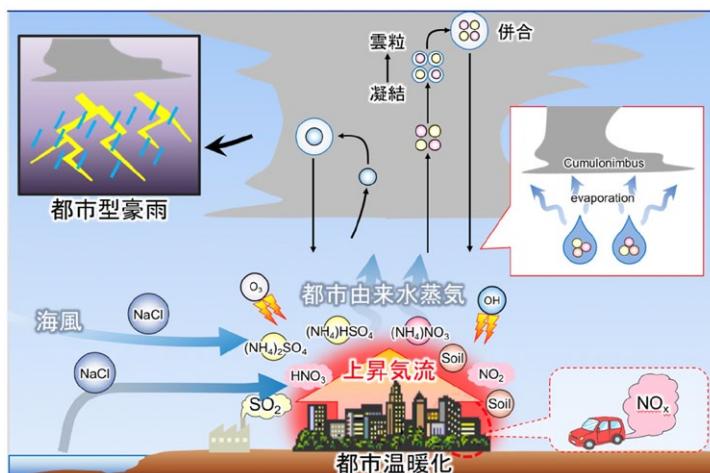


図9 首都圏で想定される都市型豪雨の生成機構 (Uchiyama et al., 2017a)

## 4. 今後の課題

本研究では、大気汚染物質の集積過程を検証できる高時間分解能の計測装置を導入することができなかった。最近ではPM2.5、オゾン、窒素酸化物などの小型センサーが急速に発展しつつあることから、今後はこれらを活用して大気汚染物質の集積過程を明らかにする必要がある。また、観測例は限られるものの、都市型豪雨では酸性成分であるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>に比べてフミン様物質（HULIS）が高濃縮していることを見いだした。都市型豪雨の生成機構の全容を明らかにするためには、有機化合物についてもさらに研究を進める必要がある。

本研究は、地上で採取した雨水の化学分析と安定同位体分析を組み合わせる新しい方法論を提案するものであり、今後は都市型豪雨のみならず、山間部豪雨、熱帯スコール性豪雨の生成機構解明にも適用していく予定である。さらに、上空の雲凝結核や氷晶核、積乱雲の情報を組み合わせることにより、豪雨生成機構の全容解明に迫ることが期待される。

## 5. 謝 辞

アサヒビール学術振興財団から助成していただき、都市型豪雨の生成機構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。アサヒビール学術振興財団に心から御礼を申し上げます。

## 6. 引用文献および本助成金による研究成果

- Bently, M., Stallins, T., Ashley W.: The Atlanta Thunderstorm Effect, *Wetherwise*, **63**, 24-29 (2010).
- Changnon, S.A.Jr. (1968) The La Porte weather anomaly—fact or fiction?, *Bull. American Meteor. Soc.*, **49**, 4-11.
- Khiem, M., Ooka, R., Huang, 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. Meteor.*, **2010**, Article ID 349248, 13 (2010).
- Rosenfeld, D., Lohmann, U., Raga, G.B., O'Dowd, C.D., Kulmala, M., Fuzzi, S., Reissell, A., Andreae, M.O. (2008) Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation?, *Science*, **321**, 1309-1313.
- Shepherd, J. M., Pierce, H., Negri, A. N. (2002) Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite, *J. Appl. Meteor.*, **41**, No.7, 689-701.
- Thornton, J.A., Virts, K.S., Holzworth, R.H., Todd P. Mitchell, T.P (2017) Lightning enhancement over major oceanic shipping lanes, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 9102–9111,
- Uchiyama, R., Okochi, H., Ogata, H., Katsumi, N., Asai, D.; Nakano, T. (2017a) Geochemical

and stable isotope characteristics of urban heavy rain in the downtown of Tokyo, Japan, *Atmospheric Research*, **194**, 109-118.

Uchiyama, R., Okochi, H., Katsumi, N., Ogata, H. (2017b) The impact of air pollutants on rainwater chemistry during "Urban-induced heavy rainfall" in downtown Tokyo, Japan, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, DOI 10.1002/2017JD026803.

Uchiyama, R., Okochi, H., Ogata, H., Katsumi, N.; Asai, D., Nakano, T. (2017c) H and O isotopic differences in typhon and urban-induced heavy rain in Tokyo, *Environmental Chemistry Letters*, DOI 10.1007/s10311-017-0652-0.

Uchiyama, R., Okochi, H., Kamiya, J., Asai, D., Kaneko, C., Ogata, H., Katsumi, N. (2018) The impacts of "Urban-induced heavy rains" on the distribution of deposition fluxes of inorganic acidic substances in the Tokyo metropolitan area in summer, *Atmospheric Research*, **200**, 109-116.

Uchiyama, R., Okochi, C., Ogata, H., Katsumi, N., Nakano, T. (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.