

2021 年 一般財団法人 WNI 気象文化創造センター
「気象文化大賞 アジア太平洋地域助成事業」報告書.

Comparative Research of the Effect of Air pollution on the Formation of Heavy Rainfall in the
Tropical and Temperate Regions under Global Warming:
for the development of human resources for the observation of meteorology and air quality in
Cambodia

研究代表者： 大河内 博（早稲田大学理工学術院）

1. はじめに

気象庁によると、1976 年から 2020 年までの期間で、日本における時間雨量 50 mm 以上の発生回数は、10 年あたりで 29.2 回の割合で増加しており、最近 10 年間(2011 年～2020 年)の平均年間発生回数(約 344 回)は、統計期間最初の 10 年間(1976 年～1985 年)の平均年間発生回数(約 266 回)と比べて約 1.5 倍に増加している。国内では**記録的短時間大雨**という、数年に一度程度しか発生しない短時間の大雨が多発し

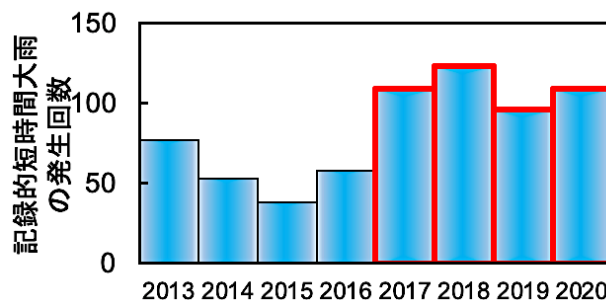


図 1 日本全国における記録的短時間大雨の発生回数

ており、2017 年から 2020 年は年間 100 回程度を推移している(図 1)。その結果、山間部では大規模な土砂災害が発生している。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。地球温暖化による表層海水温度の上昇に伴う大気中水蒸気量の増大は線状降水帯形成をうながす。最近では、大気中を大量の水蒸気が帯状に流れる**大気の川**が日本国内に大雨をもたらすことが明らかになってきており、地球温暖化により大気の川によってさらに激しい雨の頻度が増大することが指摘されている。今後、さらに豪雨が増加して災害が頻発化・激甚化する恐れがあり、豪雨生成メカニズムの解明は喫緊の課題となっている。

日本は国土の 60%以上を急峻な山地が占め、川幅が狭く急流が多いという特徴がある。また、年間降水量が世界平均の約 2 倍と極め多く、豪雨が発生しやすい暖候期には山地災害が多発する。近年の豪雨の増加に伴い、今後は山地災害が激甚化、頻発化する恐れがあり、山地や斜面周辺地域の社会生活に与える影響の増大が予想されている。さらに、局地的大雨は短時間に大量の物質を森林に沈着させることから森林生態系を脆弱化させる恐れがあり、地滑りなどの土砂災害に繋がることが予想される。山間部における局地的大雨の生成機構の解明は、今後の防災政策を検討するとともに、予測モデルの精度向上において喫緊な課題である。

夏季に太平洋高気圧に覆われた晴天日の午後、山地を中心に対流雲がしばしば発達し、局地的大雨や落雷、降雹などによる被害をもたらす。このような対流雲による降水は「不安定性降水」や「気団性雷雨」と呼ばれている。本研究では、山地斜面における 30 mm/h もしくは 5 mm/min 以上の強雨のうち、台風性および前線性以外の短時間豪雨を「山間部局地性豪雨」と定義する。山間部局地性豪雨は、高度化している気象庁局地モデルでも予測精度は未だ不十分である。数値予報モデルの解像度の問題に加え、エアロゾルと降水の相互作用に未解明な点が多くあるためである。既往研究は、数値モデルを用いた気象/気候学的観点からのアプローチが多いが、雲形成に必須である雲凝結核/氷晶核について着目した研究は少ない。

当研究室では、都市部における局地的短時間豪雨を**都市型豪雨(ゲリラ豪雨)**と位置付け、これまで見過ごされてきた雲凝結核と水蒸気の起源に着目して、その生成機構の解明を行ってきた。その結果、都市型豪雨をもたらす積乱雲の発達には、硫酸塩および硝酸塩などの PM_{2.5} が関与していることを明らかにした。また、フミン様物質のような界面活性作用を有する有機化合物が重要な役割を果たすとともに、道路粉じんなどの不溶性鉱物粒子が氷晶核として機能していることを指摘してきた。本研究助成事業では、都市型豪雨研究において当研究室が独自開発した化学分析と安定同位体分析を組み合わせた解析手法を、山間部豪雨と熱帯スコール性豪雨)に適用し、その生成機構を解明することを当初の目的とした。しかし、2020 年からはじまった COVID-19 によるパンデミックに伴って海外渡航は不可能となり、研究活動は制約を受けざるをえなかった。そのため、研究

目的を山間部豪雨の生成機構に目的を絞り、大気汚染物質が山間部豪雨の形成に与える影響について検討した。

2. 研究方法

(1) 山間部における豪雨発生頻度の統計解析

日本全国の山間部に設置してある地上雨量観測所のデータを用いて、豪雨発生頻度の統計解析を行い、山間部豪雨の実態を調査した。国や自治体が設置している地上雨量観測所には、気象庁 AMeDAS、国土交通省水管理・国土保全局の雨量観測所、都道府県の雨量観測所がある。このうち、国土交通省水管理・国土保全局が整備している雨量観測所は、山間部のダムや河川周辺を中心に設置されているため、主にこのデータを用いた。国土交通省水管理・国土保全局の雨量観測所が設置されていない地域に関しては、AMeDAS や都道府県の雨量観測所のデータを用いた。

(2) 太陽電池駆動小型自動雨水採取器の長期性能評価と富士山麓における湿性沈着量

当研究室では、富士山南東麓太郎坊(1290 m a.s.l.)において 2006 年から雨水の長期観測を行っており、大雨が湿性沈着量に及ぼす影響について検討した。

(3) 山間部豪雨の化学特性および水蒸気起源の解明

太郎坊において夏季に豪雨の経時採取およびイベント採取を行った。雨水の主要無機イオン分析、微量金属元素分析、TOC 分析を行い、雲凝結核および氷晶核を推定した。また、酸素・水素安定同位体を測定し、積乱雲の形成に寄与した水蒸気の起源を推定した。豪雨形成時の気象および大気汚染状況について、静岡県や自治体が公表している大気汚染データを用いて大気汚染物質が山間部形成に及ぼす影響について検討した。また、御殿場市内の住宅街(446 m a.s.l.)でも大雨の同時採取を行った。

3. 山間部における豪雨発生頻度の統計解析

3.1 日本全国

図 2 には、標高 400 m 以上の降雨量観測地点を山間部と定義して、全国 193 地点における過去 40 年間(1980 年～2019 年)の暖候期(6 月～10 月)における年間豪雨発生回数を示す。山間部における豪雨の発生回数は、太平洋側の南西斜面で多かった。また、南部ほど高く、北部では少ない傾向があり、沿岸部ほど高く、内陸ほど発生頻度が低下する傾向が見られた。

図 3 には、過去 40 年間の豪雨発生回数の変化を調べるために、前期を 1980 年から 1999 年の 20 年間、後期を 2000 年から 2019 年の 20 年間とし、前期と後期の比をプロットしている。豪雨発生回数は各地点で増加傾向にあり、7 割の観測地点で増加していることが分かった。豪雨発生回数は内陸部や北部で著しく増加しましたが、図 2 で示したように、これらの地域では豪雨発生回数をもともと少ない地域でした。この要因解明にはさらなる解析が必要ですが、地球温暖化に伴う大気中水蒸気量の増大が影響している可能性があります。

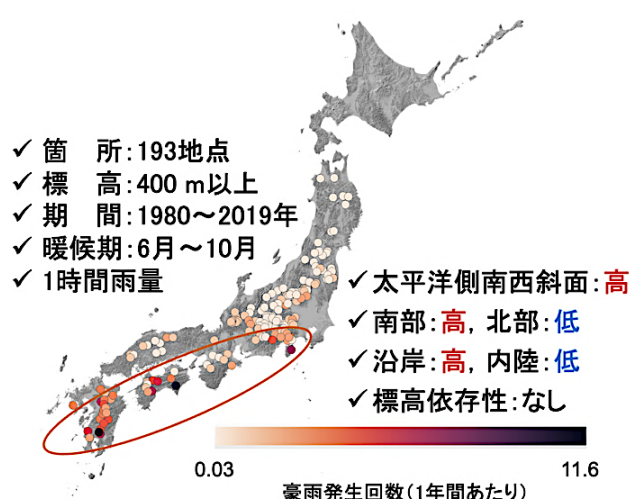


図 2 山間部における年間豪雨発生回数の分布

降水の通年観測を行なっている富士山南東麓太郎坊では、2002 年～2020 年の降水データを解析し、台風と前線による豪雨が増加していることが明らかになった。

富士山周辺の山間部では、太平洋側の富士山斜面において豪雨の増加傾向が見られ、前線性豪雨の増大が要因であることが示唆された。一方、富士山および箱根山の北麓では、豪雨の減少傾向が見られた。これらの地点において、豪雨の発生要因は前線性豪雨の発生割合が少なく、台風性豪雨の影響が大きかった。

全国的な傾向としては、図 1 に示すように、豪雨の発生回数は、多くの山間部で増加していることが示された。また、他地域と比べて豪雨の発生回数が少ない傾向にあった内陸部や東北地方の山間部において、近年豪雨が著しく増加していることがわかった。したがって、地球温暖化により降水強度が増加していることが示唆された。

3.2 富士山周辺

図 4 に富士山周辺における豪雨発生回数を、過去 10 年毎(I 期:1980-1989 年, II 期:1990-1999 年, III 期:2000-2009 年, IV 期:2010-2019 年)に集計し、豪雨発生要因を台風性、前線性、局地性豪雨(台風性、前線性豪雨以外の山間部豪雨)に分けて示す。各地点ともに、豪雨発生要因としては、台風が多くを占めていることが分かる。

富士山南東麓では、過去 20 年と最近 20 年を比較して局地性山間部豪雨の発生回数が増加傾向にある。前線性豪雨が IV 期で増加傾向にあり、2010 年代に豪雨が増加した原因は局地性豪雨および前線性豪雨による。富士山南西麓では、前線性や台風性豪雨の増加が III 期間から IV 期の増加原因となっていた。富士山北麓では、前線性豪雨の発生回数が非常に少なく、豪雨の発生要因としては台風が多くを占めていることが、豪雨発生回数は増えていなかった。

以上より、富士山周辺では南斜面で豪雨が増加しているが、主な要因は前線の発達であり、局地性豪雨の増加も一因である。一方、北側斜面では前線や局地性豪雨の影響は小さく、豪雨の増加傾向は見られない。

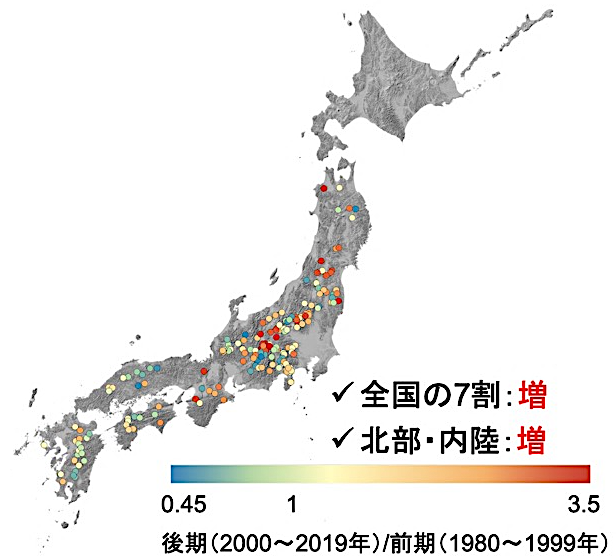


図 3 山間部における豪雨発生回数の過去 40 年間の変化

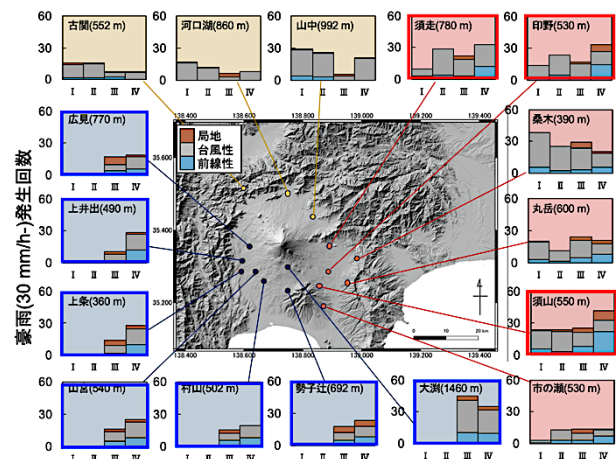


図 4 富士山周辺における豪雨発生回数。
I: 1980-1989, II: 1990-1999, III: 2000-2009, IV: 2010-2019

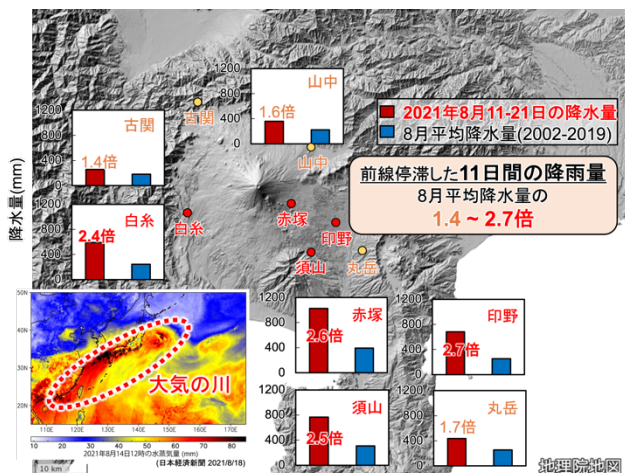


図 5 2021 年 8 月中旬の「大気の流れ」による富士山周辺の大雨

図 5 には、富士山周辺における 2021 年 8 月 11-21 日の降水量を 2002-2019 年の 8 月平均降水量と比較しています。南斜面（白糸，赤塚，印野，須山）では、2.5 倍以上の降水量があったことが分かりました。このときには、「大気の水」の存在が確認されています。この直後に民放の取材があり、富士山頂・馬の背の大規模な土砂流出が起きていたことが撮影されていました（写真）



4. 富士山麓における湿性沈着量の長期トレンド

図 6 には、2015 年から 2021 年までの富士山南東麓における湿性沈着量の経年季節変化を示す。降水中の $\text{NO}_3^-/\text{mss SO}_4^{2-}$ (以下, N/S 比) 比のばらつきは大きいものの減少傾向にあり, pH は緩やかな増加傾向が見られた。この結果は、国内および採取地点周辺における大気中 NO_x 排出量の減少に伴う硝酸濃度の減少を反映しているものと考えられる。

総主要無機イオン沈着量には明確な経年変動が見られなかったが、図 6 の赤枠で示した秋季と夏季に高く、豪雨の影響を強く受けていた。海洋由来成分 (Na^+ , Cl^- , Mg^{2+}) 沈着量は 9-10 月に著しく増加し、台風の影響が示唆された。また、 Ca^{2+} および NO_3^- の沈着量は春季に高く、大陸からの黄砂の輸送を反映していると考えられる。図には示していないが、微量元素沈着量は冬に最も高く、夏季豪雨の影響はみられなかった。

図 7 には、富士山南東麓御殿場口太郎坊（標高 1290 m）で採取した雨水を通常降雨と豪雨に分けて、pH、化学組成、沈着量を示す。局地性豪雨は pH が最も低く (pH 4.76)、酸性物質由来の NO_3^- と SO_4^{2-} の割合が高く、沈着量が前線性豪雨と同程度に高いことが分かる。つまり、局地性豪雨は酸性雨であり、短時間に大量の酸性物質を森林生態系

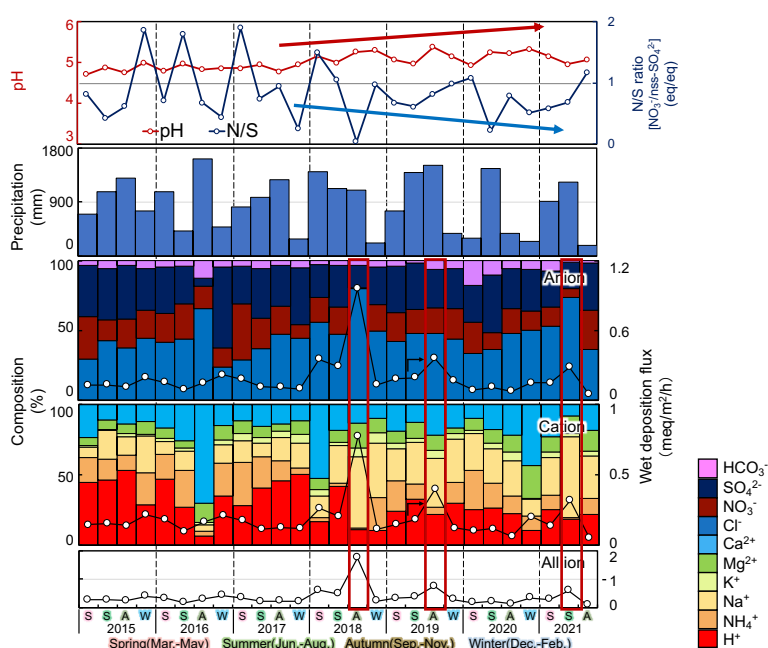


図 6 富士山南東麓における主要無機イオンの湿性沈着量の経年季節変化

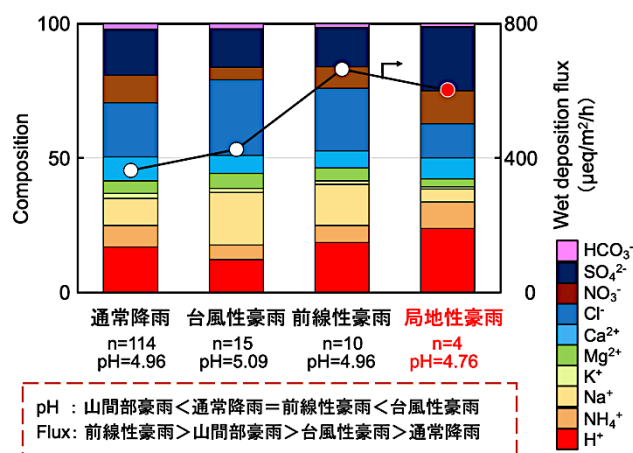


図 7 富士山南東麓における雨水 pH と大気沈着量

に降り注いでいることを意味する。一方、台風性豪雨は pH が最も高く、海洋由来の Na^+ と Cl^- の割合が高く、清浄な降雨であった。

5. 山間部豪雨の化学特性および水蒸気源の解明

5.1 2020 年 8 月 22 日の局地性豪雨: 気象概況

2020 年 8 月 22 日には、富士山麓で局地性豪雨が発生した(図 8)。11 時頃に富士山南西麓で雨雲が発生し、発達しながら東へ移動して 12 時半頃に太郎坊に到達した。この雨雲は 13 時頃に一度衰退するが、13 時半頃に太郎坊付近で再度発達し、太郎坊に豪雨をもたらした。一方、13 時頃には別の積乱雲が御殿場市上空で急発達して豪雨をもたらしている。この 2 つの雨雲は 14:00 頃に太郎坊上空で結合した。その後は分裂と結合を繰り返しながら、徐々に衰退した。

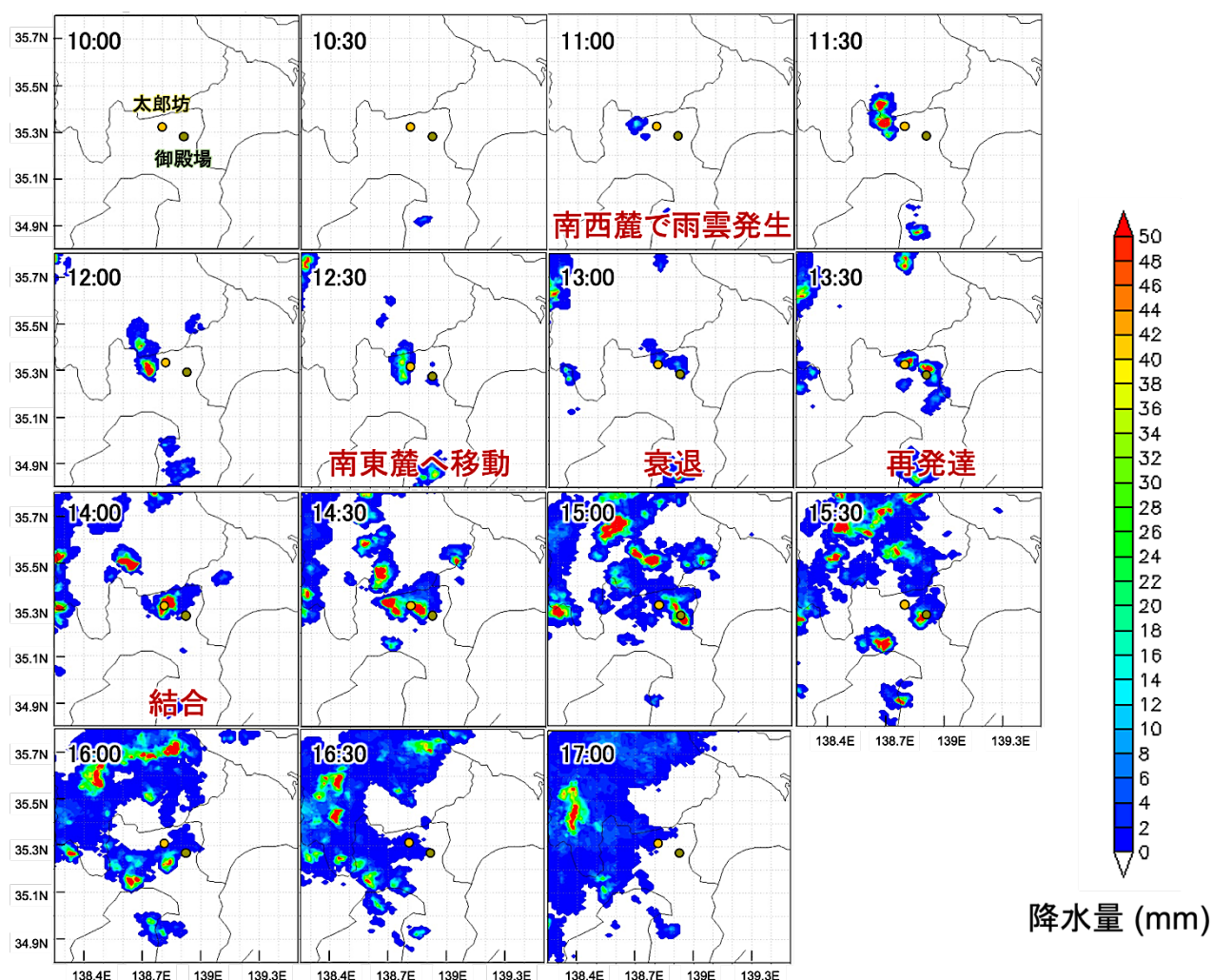


図8 2020 年 8 月 22 日に富士山南東麓太郎坊で発生した局地性豪雨

5.2 2020 年 8 月 22 日の局地性豪雨: 富士山南東麓太郎坊における気象因子と $\text{PM}_{2.5}$ 濃度

図9には、2020 年 8 月 22 日の豪雨前後の太郎坊における気象因子および $\text{PM}_{2.5}$ 濃度を示している。太郎坊では 13 時頃から雨が降り始め、14 時を過ぎたあたりから雨が激しくなり、15 時頃に降り止んだ。風向は 12 時半ごろまで南風が卓越していたが、12 時半からは突如風向が変わり、北風が卓越するようになった。気温は降水開始前から徐々に低下し、雨が最も強く降り始めた 14 時過ぎから急激に低下した。相対湿度は気温と連

動しており、雨が観測された 12 時ごろから上昇し、強雨が降り始めた 13 時半ごろに 99%に達した。大気圧は観測開始から次第に減少し、13:00 頃に落ち着いた。その後 14:00 から 14:20 にかけてわずかに増加し、降雨終了間際に急減した。

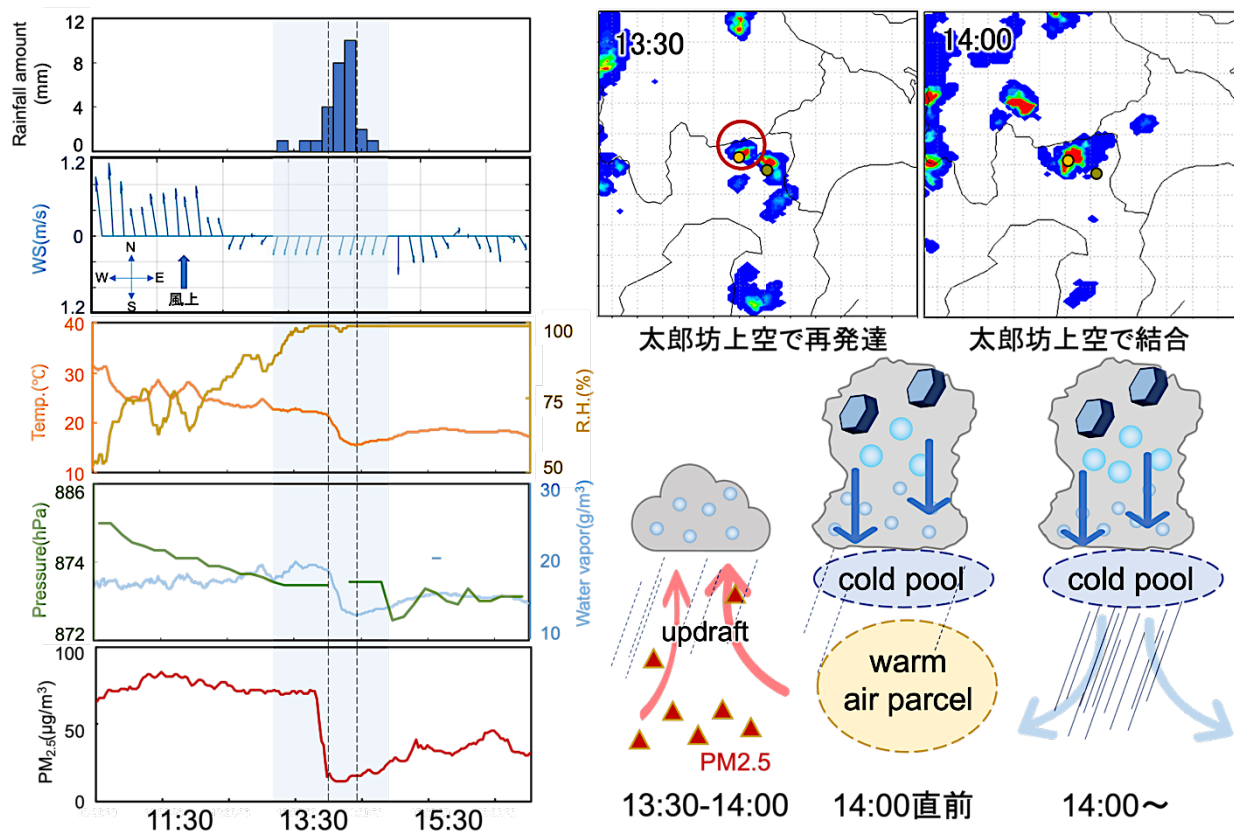


図9 2020 年 8 月 22 日の南東麓太郎坊における気象概況および PM_{2.5} 濃度

PM_{2.5}は降水開始の 13:00 頃から一定値であったが、14 時前に急激に減少し、再び緩やかに増加する傾向が見られた。PM_{2.5} 濃度の急激な減少の少し後に、各気象要素の変化が確認され、変化にタイムラグが生じていることがわかります。この現象は、積乱雲の再発達に関係していると考えられます。図8に示した 13:30 および 14:30 の雨雲レーダーを同時に示しているが、13:30 頃に太郎坊上空で積乱雲が再発達し、14:00 頃にもう一つの積乱雲と結合する様子が確認できた。気象要素の変化はこの間にあたり、新たな積乱雲の生成により発生した冷気外出流の影響を受けていると考えられる。

積乱雲からの降雨直前には、雲底下に冷気プール(cold pool)と呼ばれる冷たい空気塊が形成される。この冷気プールは気温が低く重たいため下降しようとするが、ある程度の温度差にならない限り、地上付近の温かい空気塊によって支持されている。この地表面の空気塊と雲底下の空気塊の温度差が大きくなり、平衡が崩れると冷気プールは急降下し、冷気外出流(cold outflow)として放射上に広がっていく。この直後に積乱雲から降水が地上に到達するようになる。したがって、PM_{2.5}の急減は、上昇気流によって上空へ運ばれて雲凝結核として新たな積乱雲の形成に寄与したことを示しており、各気象要素の変化はその後に発達した積乱雲からの冷気外出流の影響を示唆していると考えられる。

5. 3 2020 年8月22日の局地性豪雨:富士山南東麓御殿場口太郎坊における大気汚染物質の起源解析

図 10 には、駿河湾沿岸都市域で測定された主要大気汚染物質 (NO_x , SO_2 , O_x) の経時変化を示す。各地点で 9~10 時頃に NO_x 濃度の減少および O_x 濃度の増加しており、 NO_x からのオゾン二次生成を示唆している。このときには、同時に $\text{PM}_{2.5}$ 生成も進行しているものと考えられる。富士山南西麓で豪雨が発生したのは 11:00 頃であり、都市域で排出された NO_x および SO_2 の輸送過程で硝酸塩および硫酸塩エアロゾルが二次生成し、海風とともに山間部に流入して対流雲を急速に発達させた可能性がある。

図 9 で示したように、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度が降雨開始直後に減少しなかったのは、硝酸塩および硫酸塩エアロゾルを主成分とする $\text{PM}_{2.5}$ はグリーンフィールドギャップに当たるため、雲底下洗浄の影響を受けにくいためである。都市域から輸送時に生成した $\text{PM}_{2.5}$ が降水初期には雲底下洗浄を受けず、その後、新たな積乱雲の発達の際に上昇気流とともに上空に運ばれて雲凝結核として雲内洗浄された可能性が考えられる。

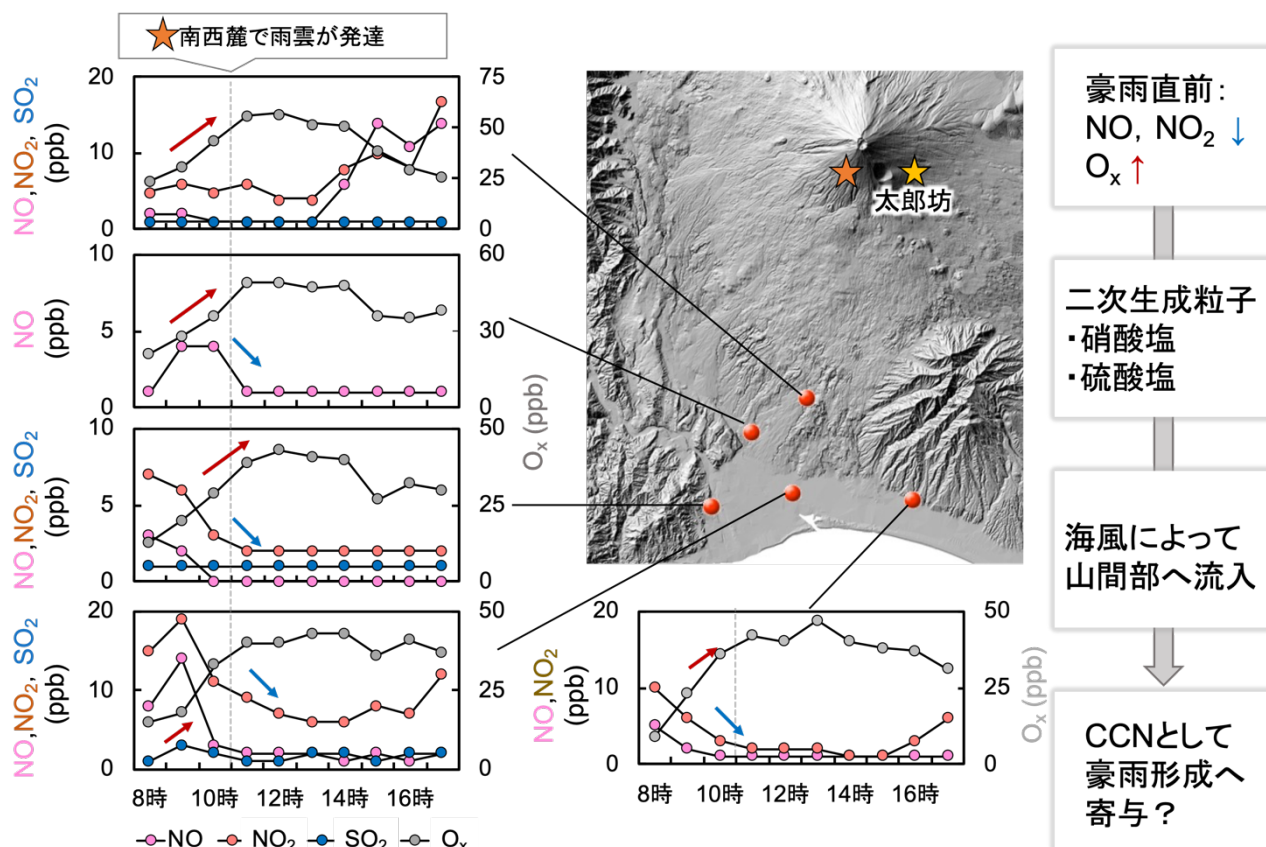


図 10 2020 年 8 月 22 日の富士山南側沿岸都市からの大気汚染物質の輸送

5. 4 2020 年8月22日の局地性豪雨:化学特性

2020 年8月22日には、富士山南東麓および御殿場市で局地性豪雨を同時採取した。図 11 に示すように、山間部局地性豪雨は通常降雨と比べて主要無機イオンの総濃度が 1.7 倍高く、沈着量は 6.86 倍であり、短時間に大量の物質を沈着させることが分かった。山間部局地性豪雨は通常降雨と比べて pH が低く、酸性物質 (NO_3^- , SO_4^{2-}) 濃度および組成割合が高かった。さらに、 Cl^-/Na^+ 比は海水組成比より大幅に低いことから、海から山間部に輸送される途中でクロリンロスが発生し、酸性物質により海塩粒子が変質していることが示唆された。また、局地性豪雨では K^+ の比率も高いが、 K^+ は植物から放出されることから森林由来一次エアロゾルも山間部局地性豪雨生成に関与している可能性もある。今後、森林由来一次および二次生成有機エアロゾルの分析も行って森林由来エアロゾルが山間部局地性豪雨形成に及ぼす影響を解明する必要がある。

水の起源解析では、一般に δD (水素同位対比) と $8 \times \delta^{18}O$ (酸素同位体比) の差を d 値と定義する。地球規模で見ると $d=10$ である。 d 値は水蒸気団の生成時の蒸発速度によって決まり、その後の凝縮過程では変化しないことから、降雨をもたらす雲の水蒸気の起源解析に用いられる。日本周辺では太平洋で発生する水蒸気団は湿潤大気で蒸発するために蒸発速度が遅く、 d 値は 10 前後となる。日本海で発生する水蒸気団は大陸からの乾燥した卓越風が日本海の海水を速やかに蒸発させて生成されるため d 値が 20 前後を示す。

2020 年 8 月 22 日に採取された山間部局地性豪雨の d 値は 6.04 であり、台風性豪雨 (17.2)、前線性豪雨 (8.97)、夏季通常降雨 (12.2) より低い値を示した。局地的な対流雲が発生するとき、強い上昇気流によって雨滴が蒸発の影響を受けるが、降水後期に新たな積乱雲が発達しており、採取地点上空で上昇気流が発生していたと推測される。雨粒が強い上昇気流により蒸発したため、その他の豪雨や通常降雨より d 値が低くなったと考えられる。

都市型豪雨で酸性物質濃度が高いのは、大気汚染物質が雲凝結核として作用するとともに、雲底下における雨滴の蒸発が激しいことが要因と考えられる。

6. 今後の課題

研究助成期間中に観測が行えた山間部局地性豪雨は一例のみであるが、本研究成果から想定される山間部局地性豪雨の生成機構を模式図として図 13 に示す。今後、観測を重ねてシミュレーション研究に反映させる必要がある。本研究では十分な検討を行えなかったが、森林由来物質が豪雨形成に及ぼす影響を解明することが今後の課題である。

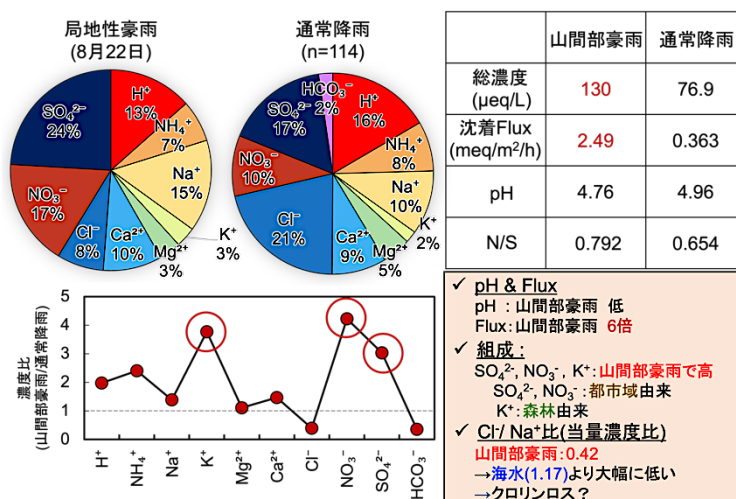


図 11 富士山南東麓における山間部局地性豪雨の化学特性

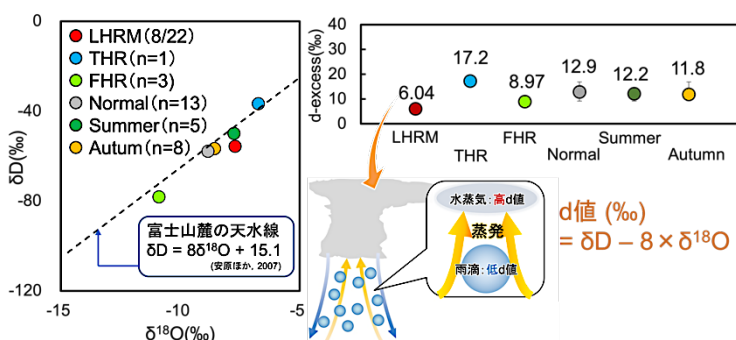


図 12 2020 年 8 月 22 日の富士山南側沿岸都市からの雨水の水素・酸素安定同位体比

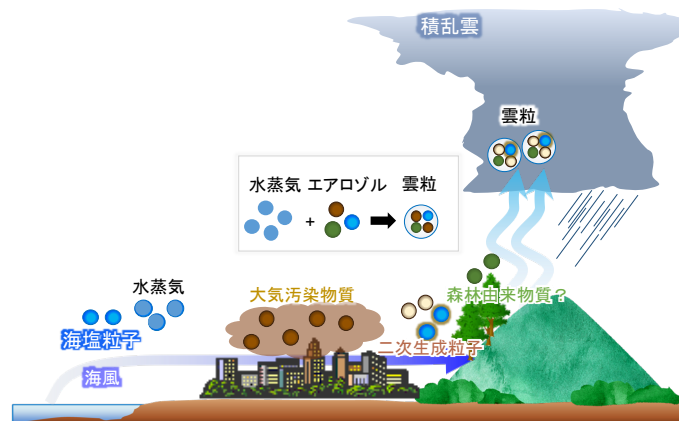


図 13 想定される山間部局地性豪雨の生成機構

7. 主要業績

【学会発表】

Sumika YONETO, Hiroshi OKOCHI, Tomoki Kajikawa, Manabu Igawa, Takanori Iwasaki, Yoshiyuki Takahashi, Hideyuki Shimizu, Kei Toda, Hiroyuki Sase, Masahide Aikawa, Kotaro Murata, The formation mechanism of local heavy rainfall in mountainous regions (LHRM) in Japan from the perspective of atmospheric chemistry (1): Analysis of the long-term trend of LHRM, Pacifichem 2021, December 16 - 21, 2021 (Virtual)

米戸鈴美香(早稲田大学 博士前期課程(修士)「化学・安定同位体分析を用いた山間部豪雨の実態と生成機構の解明(2)」第62回大気環境学会、口頭発表賞受賞 2021.9.17

Sumika YONETO, Hiroshi OKOCHI, Tomoki KAJIKAWA, Shungo KATO, Kazuhiko MIURA, Yoshihiro YAMADA, Manabu IGAWA, Takaya IWASAKI, Kei TODA, Yoshiyuki TAKAHASHI, Hideyuki SHIMIZU, Hiroyuki SASE, Kotaro MURATA, Masahide AIKAWA, Hiroaki YAGOH, Masatoshi KURIBAYASHI, Takanori NAKANO, Chemistry of local heavy rainfall in mountainous regions (LHRM) and impact assessment of air pollutants, 第29回環境化学討論会, 2021.6.1-3(オンライン開催, 国内で英語発表)

8. 謝辞

本研究助成により、山間部における豪雨の実態と山間部局地性豪雨生成に大気汚染物質が関与をはじめて明らかにしました。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。なお、本研究は、早稲田大学創造理工学部大気・水圏環境化学研究室修士課程二年生 米戸鈴美香さんの修士課程研究の成果であり、本報告書は米戸さんの修士論文に基づいて作成致しました。御礼を申し上げます。