

日本で発生する相対的に強い降水に占める大気の川事例の割合

山 田 将 喜^{*1}・釜 江 陽 一^{*2}

要 旨

令和3年8月中旬の大雨をはじめ、近年の東アジアでは、総観規模の水蒸気流入に伴って広い範囲で大雨となる事例が立て続けに発生している。中緯度で発生する細長くのびた水蒸気輸送帯は「大気の川」と呼ばれ、西日本や中部地方で暖候期に発生する強い降水との関係性が指摘されている。本研究では、日降水量の閾値を地域・季節ごとに設定することで、寒候期や北日本を含め、大気の川に伴って日本列島上の広い範囲で起こる強い降水の気候学的な特徴を調査した。寒候期には、大気の川による強い降水は西日本から中部地方にかけての太平洋側で発生する。6月から7月にかけては、東西にのびた前線に沿って大気の川が形成され、西寄りの水蒸気の流れ込みによって北陸から東北地方日本海側に2日以上続く強い降水をもたらす。夏季から秋季にかけては、日本の南海上に存在する台風から南寄りの水蒸気流が流れ込み、南北にのびた大気の川が発生することで、西日本から北日本の広い範囲で強い降水が2日以上続くことがある。

1. はじめに

暖候期の東アジアでは、湿潤な南西気流によって前線が活発化し、広い範囲で強い降水に見舞われることがある。2021年8月中旬から下旬にかけて、平年よりも南偏し、日本の南海上に張り出した太平洋高気圧の縁を回り込むような水蒸気の流れと、中国大陸からの水蒸気の流れが集中する状態が続いたことで、広範囲で強い降水を記録した。8月中旬の全国1,029地点のアメダス降水量の総和は、1982年以降で最大となる218,844mmを記録した(気象庁 2022a)。近年、日本を含む東アジアでは、大規模な水蒸気の流れ込みによる豪雨事例が立て続けに起きている。平成26年8月広島豪雨(Hirota *et al.* 2016)、平成30年7月豪雨(Tsuguti *et al.* 2019 ; Takemura *et al.* 2019 ; Yokoyama *et*

al. 2020)、令和2年7月豪雨(Takaya *et al.* 2020 ; Ueda *et al.* 2021 ; Zhao *et al.* 2021 ; 北畠ほか 2022)では、いずれも強い南西風によって西日本に流れ込む水蒸気の流れが顕著であったことが指摘されている。比較的狭い範囲に強い降水をもたらす線状降水帯(Kato 2020)や局地的大雨に加えて、広範囲に強い降水をもたらす総観規模の持続的な水蒸気流は、その社会経済的影響の大きさからも重要な研究課題である。

日本における、特に梅雨期の強い降水と水蒸気輸送の関係には、長年の研究蓄積がある。二宮(1980)やNinomiya and Murakami(1987)でレビューされているように、梅雨期に日本で発生する強い降水には、下層ジェットによって東方に輸送される水蒸気に加えて、熱帯太平洋から太平洋高気圧の縁を回り込む南寄りの下層の水蒸気流が、下層ジェットと合流することが重要であることが知られている。梅雨期に対流圏中層が湿った領域が中国大陸から日本付近にかけて東西にのびる様子は「湿舌」と呼ばれ、深い鉛直構造を持ち(二宮 1980 ; Kato *et al.* 2003 ; 加藤 2010)、強い降水の原因というよりは、対流活動によって水蒸気が対流圏下層から中層に輸送された結果であると解釈され

^{*1} 筑波大学理工情報生命学術院生命地球科学研究群(現：一般財団法人日本気象協会)。

^{*2} (連絡責任著者) 筑波大学生命環境系。

kamae.yoichi.fw@u.tsukuba.ac.jp

—2021年11月9日受領—

—2022年5月13日受理—

ている。

近年では、東アジアにおける総観規模の水蒸気の流れ込みと強い降水の関係について、世界各地と対比させながらその特徴を調査する試みが進んでいる (Guan and Waliser 2015; Mundhenk *et al.* 2016; Pan and Lu 2020). Kamae *et al.* (2017a) は、鉛直積算水蒸気輸送 (IVT) の絶対値の分布に着目し、過去60年間で発生した強い降水事例と水蒸気輸送の関係を季節ごとに調査した。IVT 絶対値の平年値からの偏差が一定値を超える領域を抽出し、その形状が十分に細長いとき、その現象を「大気のコ」 (atmospheric river; Gimeno *et al.* 2014; Kamae *et al.* 2017b; AMS 2021) と定義し、大気のコ通過時の降水特性を調査した。この手法により定義された大気のコは、梅雨期には下層ジェットに伴って発生する強い水蒸気流 (Ninomiya and Murakami 1987), それ以外の時期には主に東進する温帯低気圧に伴う寒冷前線に沿って形成された強い水蒸気流 (Kamae *et al.* 2021 の図 S1) に相当する。大気のコ通過時には、特に日本列島上の地形の西側・南側斜面において強い降水を観測し、大気のコによる事例は日降水量100mmを超える強い降水事例の40-70%を占めることを報告した。

Kamae *et al.* (2017a) は、水蒸気の流入が特に強い西日本を中心として、日降水量100mmを超える強い降水と大気のコの関係を検証した。一方で、強い降水を定義する際の降水強度を地域・季節に依らず一律とした場合、気候学的な降水強度が、地域・季節ごとに異なることによる問題が生じる。南北にのびた日本列島は、亜熱帯から亜寒帯まで、多様な気候の特徴を有している。第1図に示すように、日降水量100mmを超える強い降水事例の発生頻度は、西日本では統計的検証を行う上で必要となる標本数には十分である (Kamae *et al.* 2017a)。一方で、特に東北地方から北海道にかけては、日降水量100mmを超える強い降水が発生することは極めて稀であり、大気のコのような総観規模の現象が強い降水と対応しているのかを、統計的に検証するために十分な標本数を揃えることが困難である。

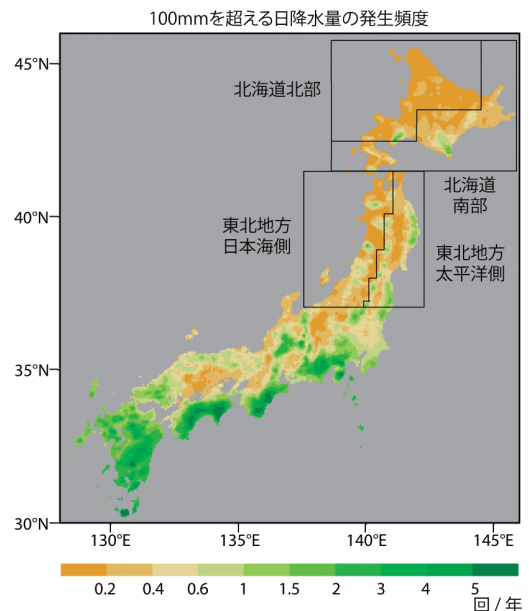
本研究では、その地域・季節における気候学的な降水強度と照らし合わせて相対的に強い降水を定義する閾値を設定することで、相対的に強い降水の発生に対する大気のコの役割を再検証する。西日本で発生する強い降水に果たす大気のコの役割は Kamae *et al.* (2017a) で検証されているため、本研究では特に北日

本に焦点を当てる。

2. 手法

広域の水蒸気の流れを検証するため、気象庁55年長期再解析データ (JRA-55; Kobayashi *et al.* 2015) を使用した。水平解像度は1.25°で、6時間ごと (日本時間3時, 9時, 15時, 21時) の比湿と水平風データをもとに大気のコを抽出した。日降水量には、高解像度日本域降水データセット APHRO_JP V1207 (Kamiguchi *et al.* 2010) を使用した。24時を日界としており、空間解像度は0.05°である。10分間降水量や1時間降水量は積雲対流や組織化された積雲群による降水量に対応するのに対し、日降水量は大規模な擾乱の活動度やその停滞に対応する (二宮 1977)。本研究では、数千 km の規模を持つ大気のコの活動に対応した降水量分布の特性を調査するため、日降水量を用いた。1977年から2015年までの39年間を対象として解析した。

大気のコを定義する方法は Kamae *et al.* (2017b) と同じである。JRA-55の6時間ごとの比湿と水平風データから、式 (1) によって IVT ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) を算出した。



第1図 日降水量100mmを超える降水の年間を通じた発生頻度 (回)。黒い図形は第1表、第2表にまとめている地域の範囲を示す。

$$IVT = \sqrt{\left(-\frac{1}{g} \int_{1000}^{300} q u \, dp\right)^2 + \left(-\frac{1}{g} \int_{1000}^{300} q v \, dp\right)^2} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度 (m s^{-2})、 p は気圧 (hPa)、 q は比湿 (kg kg^{-1})、 u と v はそれぞれ水平風の東西・南北成分 (m s^{-1}) である。水蒸気フラックスの絶対値を1000hPaから300hPaまで積分した値であり、これをもとに日ごとの気候値を算出し、気候値からの偏差が $140 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ を超える格子を抽出する。次に、この格子が連続している領域が細長くのびていて、下記の全ての条件を満たす場合を、大気のカと定義する。

- ・面積が $7.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ を超える
- ・長さが1,500km を超える
- ・長辺と短辺の比が1.325 を超える
- ・20°N よりも赤道側に重心を持たない

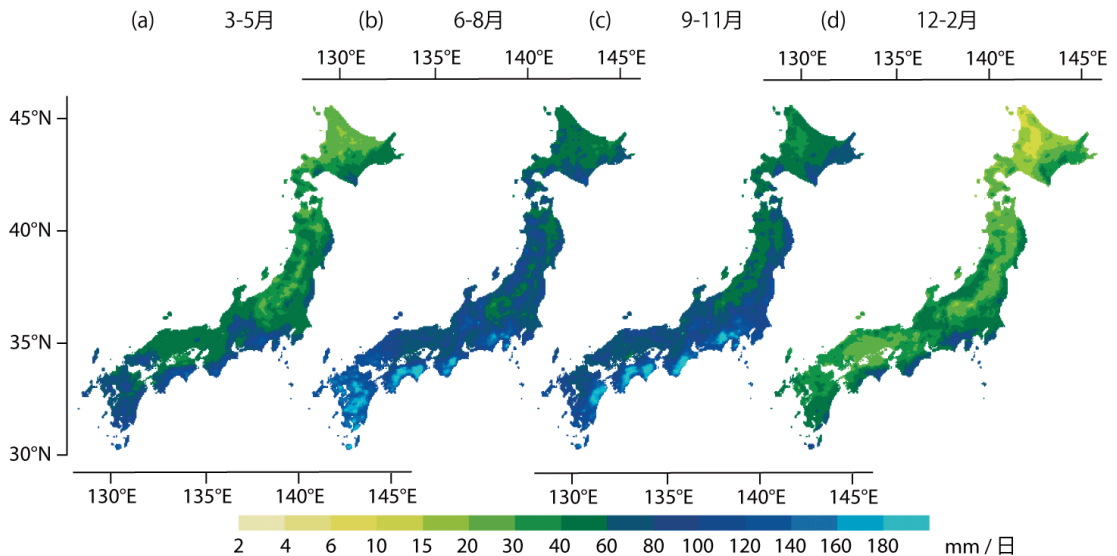
上記の条件は、熱帯低気圧に伴う同心円状の水蒸気流や熱帯域の水蒸気のうねりを除外し、中緯度の細長い水蒸気流のみを抽出するために用いられている。

Mundhenk *et al.*(2016) は、 $1/2^\circ \times 2/3^\circ$ 解像度の MERRA 再解析データを用いて、北太平洋域を対象に大気のカを抽出した。Kamae *et al.*(2017b) は、同じアルゴリズムを用いて、 1.25° 解像度の JRA-55データから北半球を対象に大気のカを抽出した。このとき、解像度が異なるため、Mundhenk *et al.*(2016) で得られた気候学的な特徴を再現できるよう、採用するパラ

メータを調整している。抽出された大気のカの発生頻度の気候学的特徴と年々変動は、Kamae *et al.*(2017b) と Naoi *et al.*(2020) で報告されている。

Kamae *et al.*(2017b) によって抽出された大気のカの位置をもとに、大気のカに伴う降水を定義する。 0.05° の解像度に線形内挿した大気のカの範囲と、APHRO_JP 日降水量とを比較することで、降水を大気のカに伴うものとそれ以外に分ける。ある格子で3時から21時までの4つの時間ステップ(6時間ごと)のうち2ステップ以上、大気のカが存在している場合、その日・その格子における降水を「大気のカに伴う降水」と定義する。この手法により定義された降水量の気候値や年々変動は、Kamae *et al.*(2017a) で報告されている。

本研究では、強い降水を定義するために2つの手法を用いる。各格子、各季節ごとに日降水量0.1mmを超える降水を母集団として、上位1パーセント降水と、上位10パーセント降水を抽出する。前者によって強い降水を抽出することに加え、後者の条件が2日以上続いた場合は、その地域としては比較的大きな積算降水量を記録する強い降水が観測されたものと考えることができる。第2図は季節ごとに平均した上位1パーセント降水量を、第3図は上位10パーセント降水量を示している。暖候期には台風や梅雨前線による強い降水が観測される(例えば水越 1965; 福井 1970) ため、九州、四国、紀伊半島、東海地方を

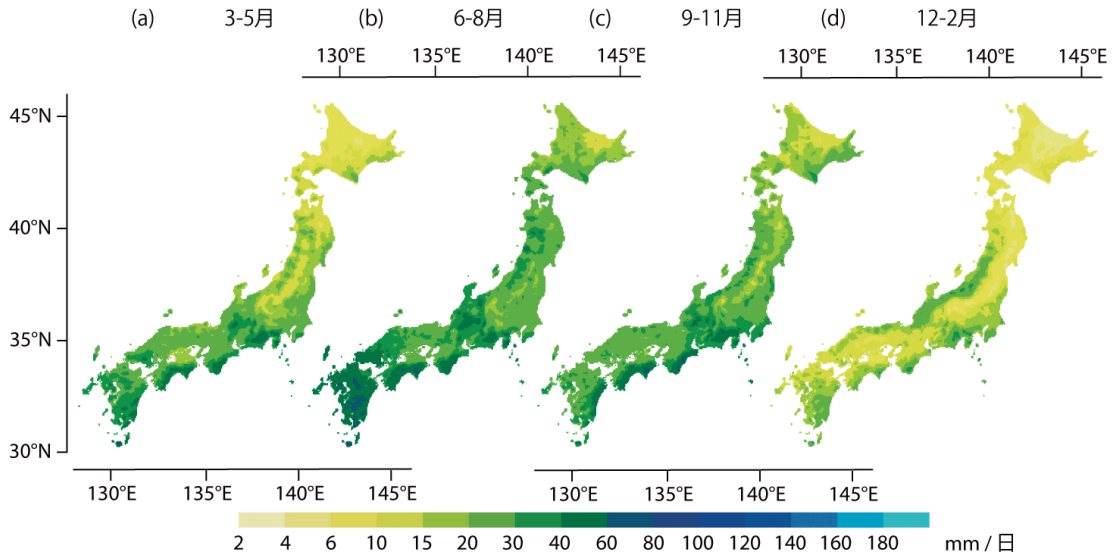


第2図 (a) 3~5月, (b) 6~8月, (c) 9~11月, (d) 12~2月の日降水量の上位1パーセント (mm) の比較。

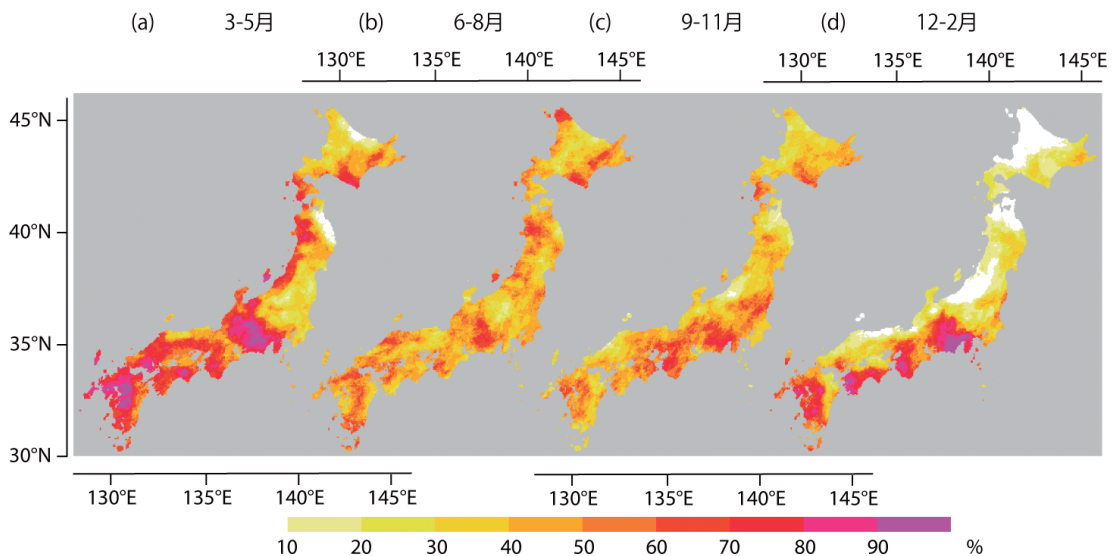
はじめとした太平洋側で上位1パーセント (80-180mm), 上位10パーセント (40-80mm) 降水量が特に大きい値を示す。一方で、北日本では暖候期の上位1パーセント降水量が30-80mmに留まるなど、日本列島上で降水強度に大きな差があることがわかる。

3. 強い降水の発生に占める大気の川事例の割合

第4図は、上位1パーセント降水の発生総数に占める大気の川事例の割合を季節別に示す。日降水量100mmによって強い降水を定義した場合 (Kamae *et al.*(2017a) の Fig. 9) と比べて、上位1パーセント降水を用いた場合、寒候期や北日本でもサンプルを十分に確保できるため、大気の川事例の割合を評価することができる。暖候期における強い降水の発生数に



第3図 第2図に同じ。ただし、日降水量の上位10パーセント (mm) の比較。



第4図 (a) 3~5月, (b) 6~8月, (c) 9~11月, (d) 12~2月の上位1パーセント降水発生総数に占める大気の川事例の割合 (%)。

占める大気のカ事例の割合は、全体的に夏季と秋季に比べて春季に大きい。春季の九州西部、中部、四国地方太平洋側、紀伊半島西部、東海地方、日本アルプスの西側では、上位1パーセント降水のうち80%以上が大気のカ通過時に起きている。この傾向は、冬季にも確認することができる。寒候期には、温帯低気圧が強い勢力に発達しながら東進し、寒冷前線に沿って強い水蒸気フラックス(大気のカ)が流入する(Yoshida and Asuma 2004; Kamae *et al.* 2017a; Kamae *et al.* 2021)。これにより広い範囲で強い降水が観測されるため、上記の地域における大気のカの割合が高くなると考えられる。夏季から秋季にかけては、熱帯低気圧通過時に強い降水が観測されることが多いため、春季に比べて上位1パーセント降水に占める大気のカの割合は限られる。冬季の中国地方から北日本にかけての日本海側では、北西モンスーン気流に伴う降雪・

降雨が卓越する(二宮 2008)ため、強い降水事例に占める大気のカ事例の割合は低い(10%程度)。

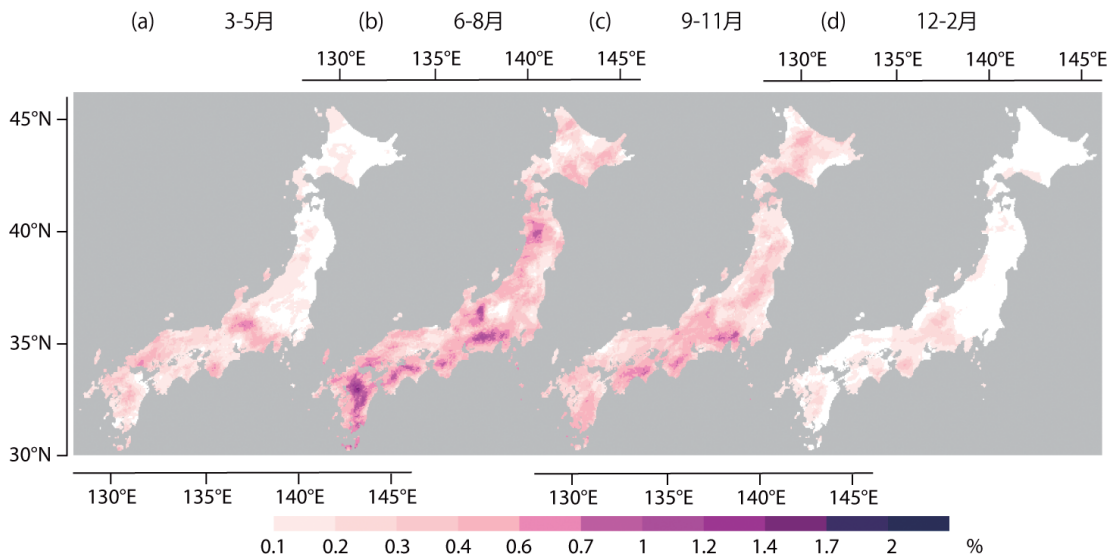
第1表に、北日本の各地域における上位1パーセント降水の発生に占める大気のカ事例の割合を示す。西日本太平洋側における大気のカ事例の割合は春季に60-90%、夏季に30-70%であり(第4図)、先行研究(Kamae *et al.*(2017a)のFig.10)の結果と同様に大気のカ事例の割合が高い。これに対し、東北地方日本海側ではそれぞれ51.4%、47.5%、北海道南部ではそれぞれ48.5%、43.2%であり、北日本でも、強い降水と大気のカが関係していることがわかる。

4. 2日以上続く強い降水の発生に占める大気のカ事例の割合

第5図は、大気のカに伴う日降水量が上位10パーセントを超える日が2日以上続いた日の発生頻度を示す。ここで、発生頻度は母集団となる全ての日数に対する抽出日数の割合であり、例えば90日間に2日間連続する降水事例が1回あれば、発生頻度は2.2%と扱う(90日間のうち2日間)。冬季と春季には、日本アルプスの西側などを除き、発生頻度は全体的に低い(0.4%未満)。一方で、夏季と秋季には西日本から中部地方にかけての地形の西側・南側斜面(Kamae *et al.*(2017a)のFig.3)で頻度が高く、夏季は1.4%、

第1表 北日本の地域ごとの上位1パーセント降水発生頻度に占める大気のカ事例の割合(%). それぞれの地域の範囲は第1図を参照のこと.

	3~5月	6~8月	9~11月	12~2月
北海道北部	30.3	38.7	31.0	8.5
北海道南部	48.5	43.2	41.8	20.8
東北地方日本海側	51.4	47.5	31.7	10.7
東北地方太平洋側	29.8	39.4	35.1	23.7



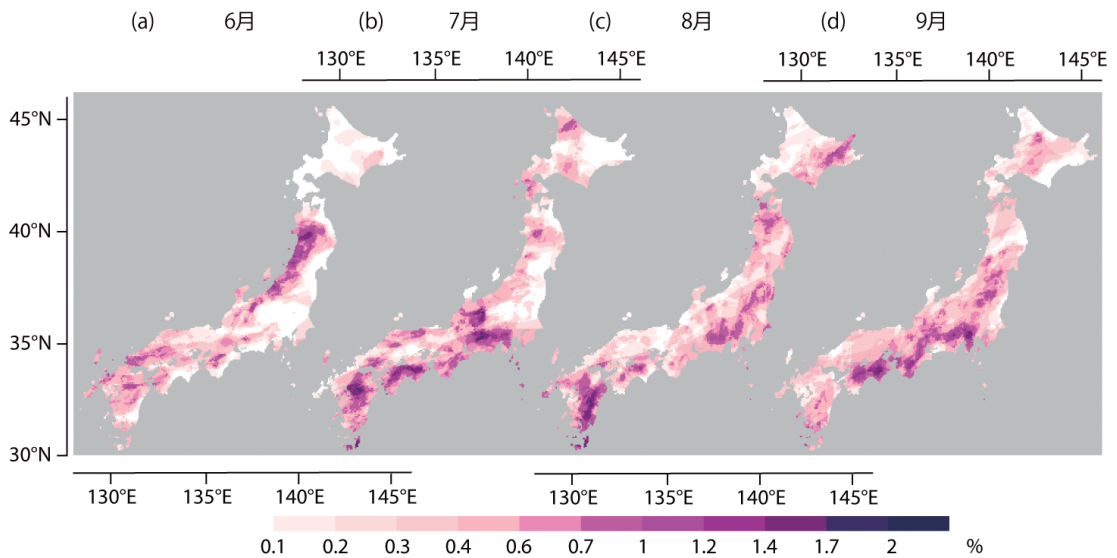
第5図 (a) 3~5月, (b) 6~8月, (c) 9~11月, (d) 12~2月の大気のカに伴う2日以上続く上位10パーセント降水の発生頻度(%).

秋季は0.6%程度である。寒候期の大気のカは、冬季に北米西岸や欧州に接近する大気のカと同様に、温帯低気圧の寒冷前線に沿って発生することが多く (Gimeno *et al.* 2014 ; AMS 2021 ; Kamae *et al.* 2021 ; Li *et al.* 2022), 温帯低気圧の東進とともに通過するため、同一地点に2日以上続けて強い降水をもたらすことは少ない。一方で、平成30年7月豪雨、令和2年7月豪雨、令和3年8月中旬の大雨 (第1節参照) のように、日本列島上に停滞する前線に大量の水蒸気が流れ込む事例の場合、大気のカの位置が大きく変わらず、同じ地点に断続的に強い降水をもたらすことがある。

夏季に注目すると、東北地方日本海側で発生頻度が

高い傾向がある。第6図は、6月から9月にかけての月ごとの特徴を比較したものである。東北地方日本海側の頻度が太平洋側に比べて高い傾向は、主に6月と7月に確認できる。6月の東北地方日本海側では0.7%、太平洋側では0.2%であり、7月はそれぞれ0.4%、0.2%である (第2表)。また、西日本太平洋側や東海地方の地形の西側・南側斜面において頻度が高い傾向は、主に7月・8月・9月に確認できる (第6図)。

第7図に、大気のカによって日本列島上で強い降水が観測された事例のうち、日本列島の上空に梅雨前線が存在していた事例と、日本の南海上に台風が存在し



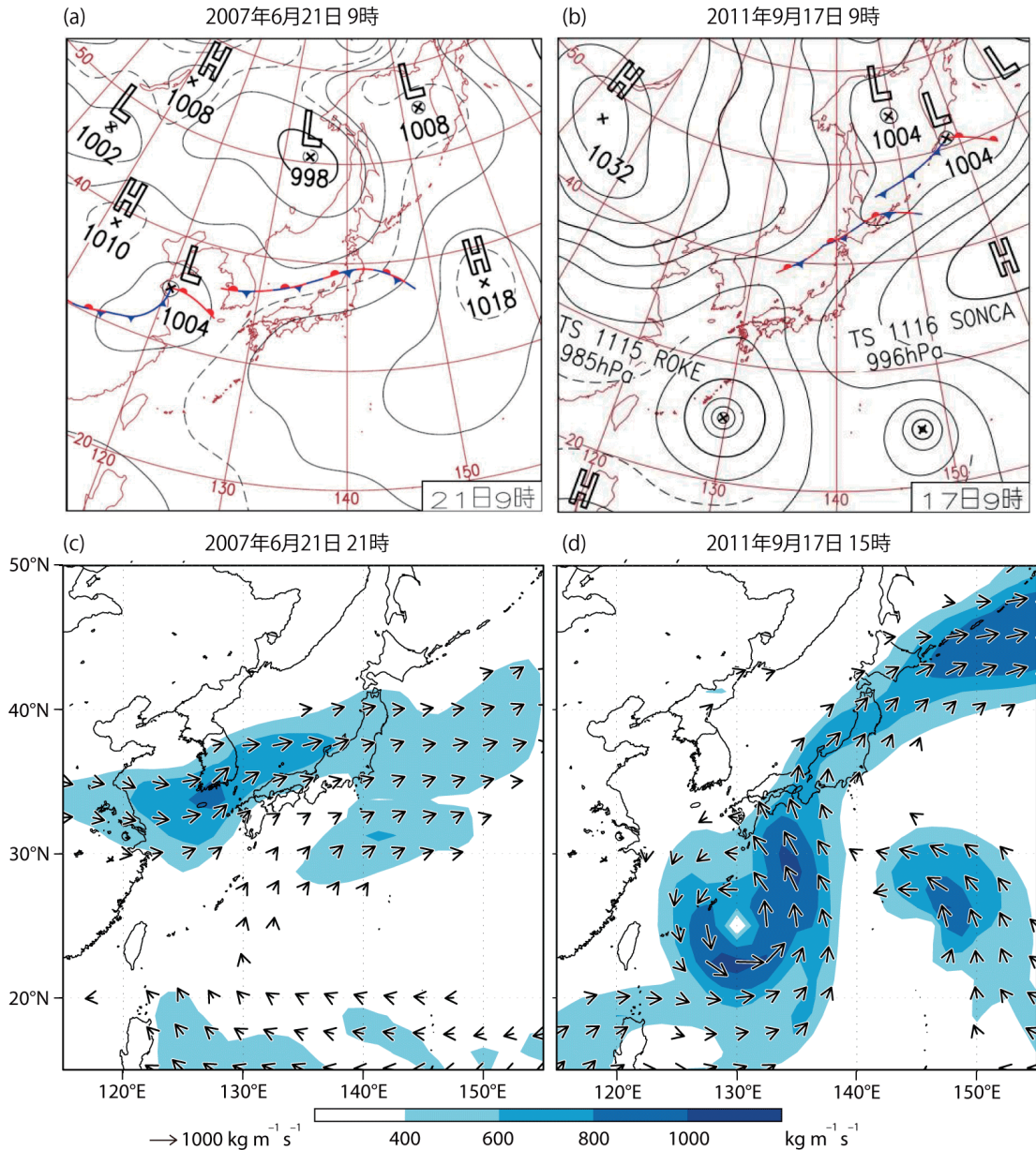
第6図 第5図に同じ。ただし、6月から9月までの月ごとの分布を示す。

第2表 北日本の地域ごとの大気のカに伴う2日以上続く上位10パーセントイル降水の発生頻度 (%), 2日以上続く上位10パーセントイル降水の発生頻度に占める大気のカ事例の割合 (%)。

大気のカに伴う2日以上の大気のカの発生頻度 (%)								
	3~5月	6~8月	9~11月	12~2月	6月	7月	8月	9月
北海道北部	0.06	0.17	0.2	0.01	0.02	0.09	0.05	0.08
北海道南部	0.06	0.28	0.17	0.03	0.03	0.08	0.13	0.06
東北地方日本海側	0.11	0.44	0.22	0.04	0.67	0.35	0.42	0.39
東北地方太平洋側	0.03	0.28	0.23	0.03	0.24	0.17	0.44	0.36
2日以上の大気のカに占める大気のカ事例の割合 (%)								
	3~5月	6~8月	9~11月	12~2月	6月	7月	8月	9月
北海道北部	3.3	12.9	10	0.2	4	18.2	10.2	14.8
北海道南部	5.1	21.1	14.3	1.5	9.4	17.9	26.6	16.2
東北地方日本海側	7.9	24.5	11.4	1.4	37.6	19.3	22.5	22.3
東北地方太平洋側	2.2	15.8	12.2	1.5	19.6	9.6	19.4	21.2

ていた事例を示す。ここで、梅雨前線や台風の位置は「日々の天気図」をもとに議論する。第7図 a, c は、日本付近に停滞する梅雨前線に沿って、大量の水蒸気が流れ込み、連日の強い降水をもたらした事例である。2007年6月21日に北陸と東北南部で梅雨入り（気象庁2022b）を迎えたとき、前線は朝鮮半島から東北地方

にのびており、大量の水蒸気が中国南東部、東シナ海から日本列島へ輸送されている。前線の位置は22日もほとんど変わらず、西寄りの水蒸気の流入により、北陸から東北地方日本海側にかけて強い降水が続いた。気象庁アメダスによると、例えば秋田では、6月21日に31.5mm、22日に41.5mmを観測した。



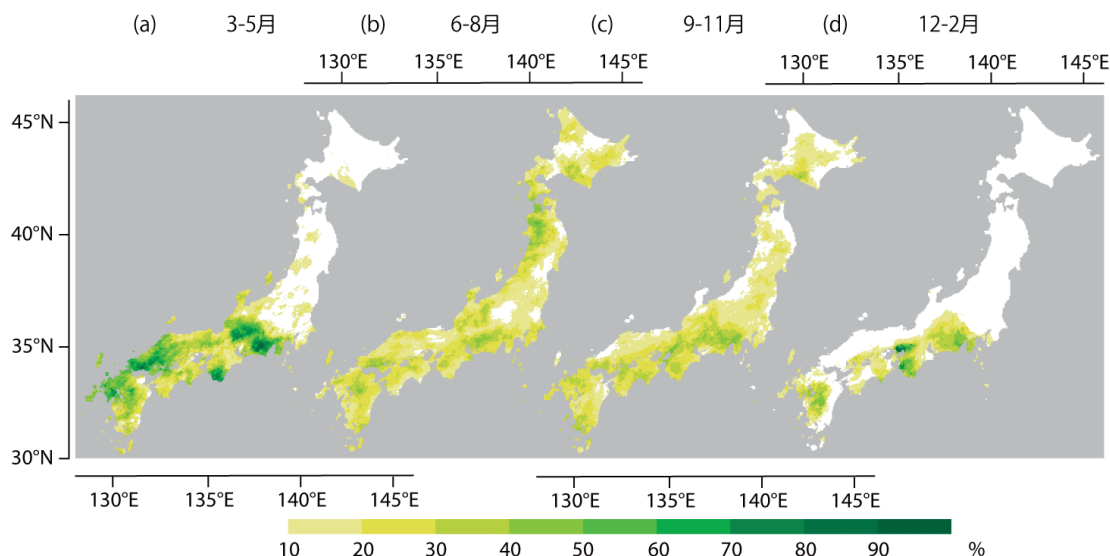
第7図 (a) 2007年6月21日9時（日本時間）と (b) 2011年9月17日9時における地上天気図（日々の天気図より）と (c) 2007年6月21日21時と (d) 2011年9月17日15時における鉛直積算水蒸気輸送 (IVT ; $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) の絶対値（陰影）およびベクトル（矢印）。 $300 \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ より小さいベクトルは省いている。

第7図 b, d は、日本の南海上を北進する2011年台風第15号 (Roke) の影響で強い降水を観測した事例である。台風は9月13日に日本の南海上で発生し、21日に静岡県に上陸後、日本列島を縦断した (気象庁 2022c)。この事例では、台風が日本の南海上に存在する9月17日から18日の時点で、台風から離れた位置にある北日本で強い降水を観測した。17日から18日にかけての北日本上空には、地上天気図上では前線が解析されており (第7図 b)、この前線に向かって日本の南海上にある台風から大量の水蒸気が流れ込み、強い降水が観測された (第7図 d)。この様子は、熱帯低気圧本体よりも極側の離れた場所に、PRE (Cote 2007, 北島 2012) と呼ばれる降雨帯が形成されることと類似している。台風は南大東島の西海上にしばらく留まり、台風の東側の強い南風によって大量の水蒸気が西日本から北日本にかけて流れ込み続けたため、各地で記録的な大雨となった (気象庁 2022c)。暖候期の北西太平洋では、大気の水の活動に台風が遠隔的に影響していると考えられる事例を多く確認することができる。日本付近の大気の水に対する台風の遠隔影響の実態を明らかにすることは、重要な研究課題である (第5節参照)。

第8図は、2日以上続く上位10パーセント降水事例に占める大気の水事例の割合を示す。冬季と春季には、頻度としては限定的である (第5図) もの、西日本から日本アルプスの西側、東海地方で発生する

2日以上続く強い降水事例には、大気の水が占める割合が大きい (30-90%)。これは、東進する温帯低気圧に伴って形成された大気の水が、同じ地域に2日間以上強い降水をもたらすことがあることを反映していると考えられる。夏季と秋季では、北日本を含めた広い範囲で、15%以上の事例が大気の水事例であり、夏季の東北地方日本海側では24.5%を占める (第2表)。6月から9月までの月ごとの特徴を見ると (第9図)、東北地方日本海側で6月と7月に起こる事例のうち、37.6%と19.3% (第2表) が大気の水事例であり、太平洋側 (19.6%, 9.6%) とは大きな差がある。

第7図 b, d に示したように、台風の遠隔影響事例では、台風の影響による強い水蒸気の流れが南北にのび、西日本から東日本にかけての太平洋側、および北日本で強い降水が続くことがある。第4図 b, c (6-11月) や第9図 b, c, d (7-9月) には、台風の遠隔影響を受けた大気の水事例が含まれていると考えられる。東西にのびた大気の水の場合、西寄りの水蒸気の流れは、九州の西部と中部に強い降水をもたらす一方、東部では降水量は少なくなる傾向がある (第4図, Kamae *et al.* (2017a) の Fig. 11)。これに対し、第5図 b, c や第6図 c, d によると、九州東部でも大気の水に伴う連日の強い降水が観測されることがある。これには、台風が南の海上に留まっているとき、その北側にある西日本に向かって、南～南東寄りの流れが吹き込む (第7図 d) ことが寄与していると考えられる。



第8図 2日以上続く上位10パーセント降水の発生総数に占める大気の水事例の割合 (%)。

一方で、梅雨前線が存在する6-7月には、第7図 a, c のように強い水蒸気の流れが東西にのびることで、北陸や東北地方日本海側で数日間に渡って強い降水が観測される。その結果、第6図 a, b や第9図 a, b にあるように、東北地方太平洋側で大気の川による強い降水が少ない一方で、北陸と東北地方日本海側で多い、という東西差が生じやすいのだと考えられる。

以上のように、日本列島上空を通過する大気の川には様々な形状が存在する。水蒸気の経路・向きが異なることで、強い降水が観測されやすい地域が変わるため、形状や性質をもとに大気の川を分類し、整理することは重要な試みである。大気の川の性質ごとに、対応する総観規模の現象や、その発生確率を上げる全球規模の大気循環や海洋のパターンを特定する試みを進めることは、極端現象に起因する災害リスクを予測する（例えば Kamae *et al.* 2017a ; Imada *et al.* 2020）上でも重要であると言える。

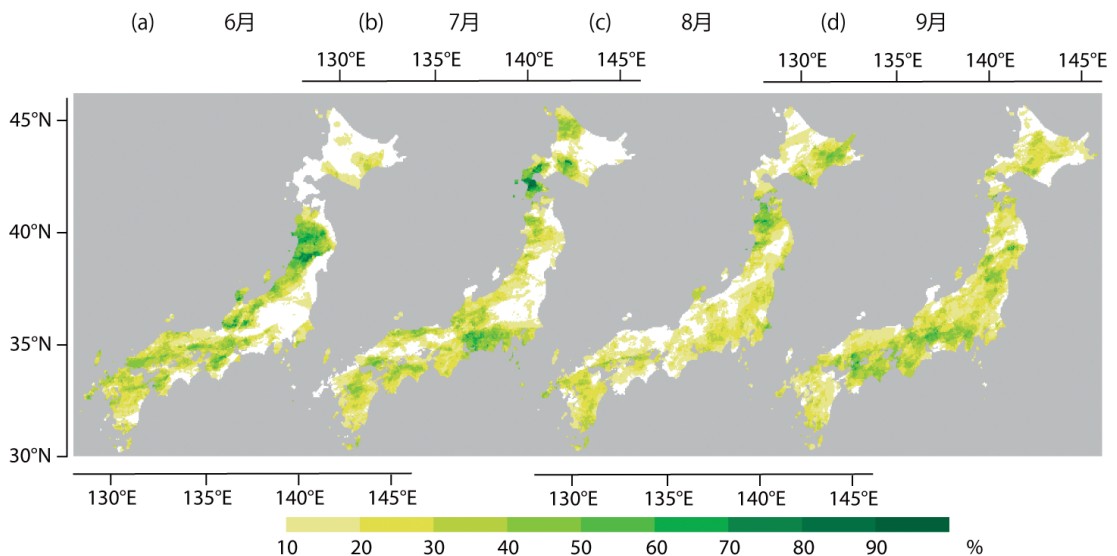
5. まとめと課題

本研究では、地域・季節ごとに降雨強度の閾値を変えることで、日本で発生する強い降水や2日以上続く強い降水事例に占める大気の川事例の割合を評価した。一定の降水強度（日降水量100mm）を閾値に採用した先行研究（Kamae *et al.* 2017a）と比べて、閾値を変更することで、特に寒候期や、北日本における強い降水事例の発生に占める割合を評価することができ

た。加えて、日本列島上の広い範囲に同時に強い降水をもたらす広域水蒸気輸送に、複数の典型的なパターンが存在することを特定することができた。

春季には、発達しながら通過する温帯低気圧に伴って日本列島に大気の川が流れ込むため、西日本の太平洋側や東北地方の日本海側を含む広い範囲で、強い降水の発生に占める大気の川事例の割合が大きい。冬季も西日本の太平洋側を中心に大気の川の割合が大きい。冬季モンスーンに伴う降水量が多い日本海側では、大気の川に伴う強い降水の割合は限られる。2日以上続く強い降水の発生にも、大気の川は重要な役割を果たす。冬季と春季に発生する2日以上続く強い降水には、西日本から東海地方、日本アルプスの西側斜面を除いて、大気の川事例が占める割合は小さい。日本列島上の広い範囲で夏季と秋季に発生する2日以上続く強い降水の一部は、大気の川に伴って発生している。このうち、6-7月の東北地方では日本海側では大気の川事例の割合が高く、太平洋側では低いという東西差が存在し、これには東西にのびる前線の影響により、西からの水蒸気の流れが2日以上続く強い降水をもたらすためだと考えられる。

我が国で発生する大気の川を伴う強い降水事例には、第7図 b, d に示すように、日本列島から離れた南の海上に台風が存在し、その台風を上流とする組織的な水蒸気の流れが日本列島付近の前線に供給され、大気の川を形成する事例が含まれる。東西にのびる大



第9図 第8図に同じ。ただし、6月から9月までの月ごとの分布を示す。

気のカ事例（第7図 a, c）とは水蒸気輸送の向き・経路が大きく異なり、強い降水が生じる地域も異なる（Kamae *et al.* (2017a) の Fig. 11h 参照）。加えて、台風が停滞する場合には、水蒸気輸送の経路が大きく変わらず、同じ地点に2日以上続く強い降水をもたらすことがある。日本列島付近に存在する前線と、熱帯低気圧との位置関係、水蒸気輸送の経路や強さ、その結果として生じる日本列島上の降水特性（地域性、強さ、持続時間）を系統的に検証することは、我が国で広範囲で発生する強い降水の実態を把握し、防災・減災に繋げる上で重要な研究課題であると言える。

謝 辞

筑波大学生命環境系の植田宏昭教授、国立環境研究所の菅田誠治氏、永島達也氏には様々なご助言を頂きました。2名の査読者からは建設的なコメントを頂きました。本研究は文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマA「全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発」JPMXD0717935457、及びJSPS 科研費19H05704の助成を受けたものです。

略語一覧

IVT : Vertically Integrated Water Vapor Transport 鉛直積算水蒸気輸送
 JRA-55 : Japanese 55-year Reanalysis 気象庁55年長期再解析データ
 MERRA : The National Aeronautics and Space Administration's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications
 PRE : Predecessor Rain Event

参 考 文 献

- American Meteorological Society (AMS), 2021: "Atmospheric river". Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Atmospheric_river (2021.11.1閲覧)
- Cote, M. R., 2007: Predecessor rain events in advance of tropical cyclones. M. S. thesis, Department of Atmospheric and Environmental Sciences, University at Albany, State University of New York, 198pp.
- 福井英一郎, 1970: 日本における豪雨の分布. 地理学評論, 43, 581-592.
- Gimeno, L., R. Nieto, M. Vázquez and D. A. Lavers, 2014: Atmospheric rivers: A mini-review. *Front. Earth Sci.*, 2, 2. doi:10.3389/feart.2014.00002.
- Guan, B. and D. E. Waliser, 2015: Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 12514-12535.
- Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Kato and S. Arakane, 2016: Roles of an atmospheric river and a cutoff low in the extreme precipitation event in Hiroshima on 19 August 2014. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 1145-1160.
- Imada, Y., H. Kawase, M. Watanabe, M. Arai, H. Shioyama and I. Takayabu, 2020: Advanced risk-based event attribution for heavy regional rainfall events. *npj Climate Atmos. Sci.*, 3, 37. doi:10.1038/s41612-020-00141-y.
- Kamae, Y., W. Mei and S.-P. Xie, 2017a: Climatological relationship between warm season atmospheric rivers and heavy rainfall over East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, 95, 411-431.
- Kamae, Y., W. Mei, S.-P. Xie, M. Naoi and H. Ueda, 2017b: Atmospheric rivers over the Northwestern Pacific: Climatology and interannual variability. *J. Climate*, 30, 5605-5619.
- Kamae, Y., Y. Imada, H. Kawase and W. Mei, 2021: Atmospheric rivers bring more frequent and intense extreme rainfall events over East Asia under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL096030, doi:10.1029/2021GL096030.
- Kamiguchi, K., O. Arakawa, A. Kitoh, A. Yatagai, A. Hamada and N. Yasutomi, 2010: Development of APHRO_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years. *Hydro. Res. Lett.*, 4, 60-64.
- 加藤輝之, 2010: 湿舌. 天気, 57, 917-918.
- Kato, T., 2020: Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named "Senjo-Kousuitai", causing localized heavy rainfall in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 485-509.
- Kato, T., M. Yoshizaki, K. Bessho and T. Inoue, 2003: Reason for the failure of the simulation of heavy rainfall during X-BAIU-01 —Importance of a vertical profile of water vapor for numerical simulations—. *J. Meteor. Soc. Japan*, 81, 993-1013.
- 気象庁, 2022a: 令和3年8月の記録的な大雨の特徴とその要因について～異常気象分析検討会の分析結果の概要～. https://www.jma.go.jp/jma/press/2109/13a/kentoukai_20210913.html (2022.3.2閲覧)
- 気象庁, 2022b: 昭和26年(1951年)以降の梅雨入りと梅雨明け(確定値). <https://www.data.jma.go.jp/cpd/baiu/index.html> (2022.3.2閲覧)
- 気象庁, 2022c: 台風第15号による暴風・大雨 平成23年(2011年)9月15日～9月22日(速報).

- <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2011/20110915/20110915.html> (2022年3月2日閲覧)
- 北畠尚子, 2012: PRE (Predecessor Rain Event). *天気*, **59**, 171-172.
- 北畠尚子, 牧野眞一, 岩下裕二, 伊藤享洋, 加藤輝之, 2022: 2020年7月3～4日の熊本県の大雨に対する総観場の影響. *天気*, **69**, 87-99.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Li, C., W. Mei and Y. Kamae, 2022: Variability and predictability of cold-season North Atlantic atmospheric river occurrence frequency in a set of high-resolution atmospheric simulations. *Clim. Dyn.*, **58**, 2485-2500, doi:10.1007/s00382-021-06017-y.
- 水越允治, 1965: 日本における日降水量の極値について 第2報. *地理学評論*, **38**, 447-460.
- Mundhenk, B. D., E. A. Barnes and E. D. Maloney, 2016: All-season climatology and variability of atmospheric river frequencies over the North Pacific. *J. Climate*, **29**, 4885-4903.
- Naoi, M., Y. Kamae, H. Ueda and W. Mei, 2020: Impacts of seasonal transitions of ENSO on atmospheric river activity over East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 655-668.
- 二宮洗三, 1977: 豪雨の時間スケールからみた降水強度極値の地理的分布. *天気*, **24**, 63-70.
- 二宮洗三 編, 1980: 梅雨前線帯の豪雨. 気象研究ノート, (138), 279pp.
- 二宮洗三, 2008: 日本海の気象と降雪. 気象ブックス025, 成山堂書店, 190pp.
- Ninomiya, K. and T. Murakami, 1987: The early summer rainy season (Baiu) over Japan. *Monsoon Meteorology* (C. P. Chang and T. N. Krishnarutty, eds.), Oxford Univ. Press, 93-121.
- Pan, M. and M. Lu, 2020: East Asia atmospheric river catalog: Annual cycle, transition mechanism, and precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL089477, doi:10.1029/2020GL089477.
- Takaya, Y., I. Ishikawa, C. Kobayashi, H. Endo and T. Ose, 2020: Enhanced Meiyu-Baiu rainfall in early summer 2020: Aftermath of the 2019 super IOD event. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL090671, doi:10.1029/2020GL090671.
- Takemura, K., S. Wakamatsu, H. Togawa, A. Shimpo, C. Kobayashi, S. Maeda and H. Nakamura, 2019: Extreme moisture flux convergence over western Japan during the Heavy Rain Event of July 2018. *SOLA*, **15A**, 49-54.
- Tsuguti, H., N. Seino, H. Kawase, Y. Imada, T. Nakaegawa and I. Takayabu, 2019: Meteorological overview and mesoscale characteristics of the heavy rain event of July 2018 in Japan. *Landslides*, **16**, 363-371.
- Ueda, H., M. Yokoi and M. Kuramochi, 2021: Enhanced subtropical anticyclone over the Indo-Pacific Ocean associated with stagnation of the Meiyu-Baiu rainband during Summer, 2020. *SOLA*, **17B**, 14-18.
- Yokoyama, C., H. Tsuji and Y. N. Takayabu, 2020: The effects of an upper-tropospheric trough on the heavy rainfall event in July 2018 over Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 235-255.
- Yoshida, A. and Y. Asuma, 2004: Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific region. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1121-1142.
- Zhao, N., A. Manda, X. Guo, K. Kikuchi, T. Nasuno, M. Nakano, Y. Zhang and B. Wang, 2021: A Lagrangian view of moisture transport related to the heavy rainfall of July 2020 in Japan: Importance of the moistening over the subtropical regions. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2020GL091441, doi:10.1029/2020GL091441.

Fractions of Atmospheric–River–Related Events to Relatively Intense Precipitation Events in Japan

Masaki Yamada^{*1}, Youichi Kamae^{*2}

^{*1} *Graduate School of Science and Technology, Degree Programs in Life and Earth Sciences, University of Tsukuba (Present Affiliation : Japan Weather Association)*

^{*2} *(Corresponding Author) Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba
kamae.yoichi.fw@u.tsukuba.ac.jp*

(Received 9 November 2021; Accepted 13 May 2022)

Abstract

During the recent years, synoptic-scale water vapor flows have frequently caused widespread intense precipitation events over East Asia, including the heavy rain event of mid-August 2021. The elongated water vapor transport bands over the middle latitudes are called as “atmospheric rivers (ARs)”. Previous studies found the relationship between the ARs and the warm-season heavy rainfall events over western and central Japan. Here we investigate climatological features of widespread intense precipitation events over Japan including cold seasons and over northern Japan by utilizing variable criteria of precipitation intensity between different regions and seasons. During winter, ARs have caused intense precipitation over the Pacific sides of western and central Japan. In June and July, heavy rainfalls lasting for several days have occurred over the Hokuriku District, Central Japan, and the Japan–Sea side of the Tohoku District, Northeast Japan, due to westerly water vapor flows associated with ARs along zonally-elongated fronts. Tropical cyclones located south of Japan in summer and autumn seasons often bring meridionally-elongated ARs and resultant heavy rainfall over wide areas of western to northern Japan.
