

海面水温データの不確実性が豪雨予測に及ぼす影響

飯塚 聡 (防災科学技術研究所)、中村 尚 (東京大学先端科学技術研究センター)

はじめに

冬季日本海沿岸の降水・降雪量に対して、日本海からの蒸発供給を通じた気団変質の重要性が広く認識されている (例えば、Manabe 1957)。このような海上での気団変質は、あまり認識はされていないが夏季においても生じる。Ninomiya(1974)は、梅雨期の東シナ海における海面水温分布と大気成層状態およびレーダエコー分布の関係を調べ、冷水域上では気団が冷却され、大気下層の成層状態が安定化するためにエコーの発達抑制されることを指摘している。また、Manda *et al.* (2014)では、東シナ海の海面水温の季節的な違いが、九州で発生する豪雨量に強い影響を及ぼすことを数値実験から示している。

数値モデルで豪雨の予測を行う上では、特に初期条件の水蒸気量を適切に与えることが重要となる。例えば、Seko *et al.* (2011)は GPS 可降水量の観測値をデータ同化することにより、強い降水帯が数値モデルで再現されることを報告している。さらに、Shoji *et al.* (2009)では、国内のみならず上流の東アジアの GPS 可降水量の観測値もデータ同化に組み込むことで、日本の豪雨の再現性が向上することを指摘している。

一方、数値モデルの境界条件として与える海面水温データの作成に際しては、衛星による観測ができない雲下の情報をなんらかの手法により内外挿する必要がある。しかし、その手法は衛星データプロダクト毎により異なるため、既存の衛星観測に基づく海面水温データ間には一定程度のばらつきが存在する。したがって、境界条件として与える海面水温データが異なると、このような海面水温データの不確実性が大気下層の成層状態を変え、数値モデルでの豪雨予測に影響を及ぼす可能性が考えられるが、これまで系統的に調べた研究はほとんどない。

2013年8月9日に秋田・岩手の両県で豪雨・土砂災害が発生した。秋田周辺の大気下層では日本海上の南西風が水蒸気を運ぶ状況であった一方で、上空では北東から寒気が流入する状況となっており、東北地方北部では大気が不安定な状況となっていた。また、山陰から北陸にかけての沿岸域では、平均よりも高い27°Cを超える高水温が広がっていた (図略)。本研究では、この際の豪雨を対象として、様々な衛星観測に基づく海面水温データセットの違いが、その再現性に及ぼす影響について調べた結果を報告する。

モデル概要と海面水温データ

本研究では、WRF (Skamarock *et al.*, 2008) を用いた。水平解像度は1kmとし、鉛直には40層を取っている。初期条件および境界条件には気象庁のMSMを、MSMに含まれていない初期の土壌温度・水分および100hPaより上空での大気条件はNCEP-fnlのデータを利用した。8月8日12時(UTC)を初期時刻として、海面水温データは時間変化させずに30時間の数値積分を実行した。コントロール実験に用いた気象庁のMGDSSTに加え、表1に記載のGHRSSST (<https://data.nodc.noaa.gov/ghrsst/L4/GLOB/>) (Martin *et al.*, 2012) とJCOPE-T (Varlamov *et al.*, 2015) およびNCEP-fnlの海面水温データを用いて、海面水温データ間の違いの影響を調べた。図1にMGDSSTの海面水温分布とその他の各データとMGDSSTとの差を示している。各機関が作成した衛星観測に基づく海面水温データには、アルゴリズムなどの違いにより違いが見られる。データ間の標準誤差は、沖合では0.5度以下だが、沿岸近くでは1度以上にもなる (図11)。これらの値はAVHRRに基づく海面水温データの平均誤差とほぼ一致する (Brewin *et al.*, 2017)。

表 1. 実験に使用した各海面水温プロダクト

Name of Experiment	Name of SST Product	Grid interval	Name of Institute
MGDSST	MGDSST	0.25°	Japan Meteorological Agency
OISST	OISST AVHRR	0.25°	NOAA
ABOM	ABOM GAMSSA	0.25°	Australian Bureau of Meteorology
CMC	CMC	0.20°	Canadian Meteorological Center
NAVO	NAVO K10	0.10°	Naval Oceanographic Office
REMSS	REMSS MW/IR	~ 0.09°	Remote Sensing Systems
UKMO	UKMO OSTIA	0.05°	UK Met Office
JPL MUR	JPL MUR	0.011°	NASA JPL
JPL OUROCEAN	JPL OUROCEAN	0.01°	NASA JPL
JCOPE-T	JCOPE-T	1/36°	JAMSTEC
NCEP-fnl	NCEP-fnl	1.0°	NCEP

数値実験の結果

図3に、各海面水温データを境界条件として数値積分した8月8日18時から9日18時までの24時間の積

算雨量の分布を示す。観測 (図 3f) と比べると強い降水帯の幅は狭いが、どのケースにおいても、秋田県から岩手県にかけて南東方向に延びる 2 本の顕著な降水帯が再現されている。また、図は省略するがその時間発展の様子も観測とおおむね一致していることを確認している。

各データ間の海面水温の違いが豪雨に及ぼす影響を評価するために、図 1 の破線のボックス域で平均した日本海海面水温と図 2 に示した破線のボックス域の 24 時間積算雨量のボックス平均値との関係を図 3 に、破線のボックス域の 24 時間積算雨量を南北方向に平均した値を図 4 に示す。これらから、風上の日本海海面水温が高いほど北東北地方での総積算雨量が増加し、しかもその増加の多くは脊梁山脈が位置する約 141°E より日本海側の秋田県側で変化している傾向が見て取れる。

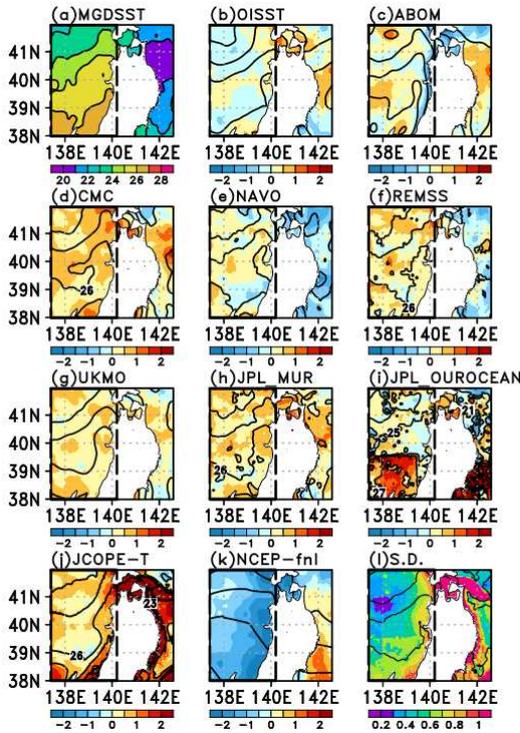


図 1 : MGSST の海面水温(a)と各海面水温プロダクトと MGSST との差 (b-k)。各プロダクトの標準誤差(l)。等値線は水温で、間隔は 1 度。

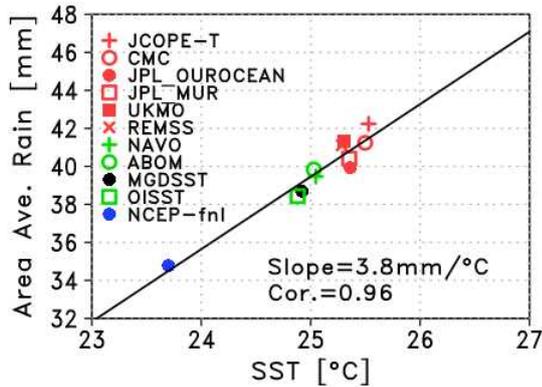


図 3 : 各海面水温プロダクトの日本海での平均海面水温と境界条件として得られた北東北地域で領域平均した 24 時間積算雨量の散布図。

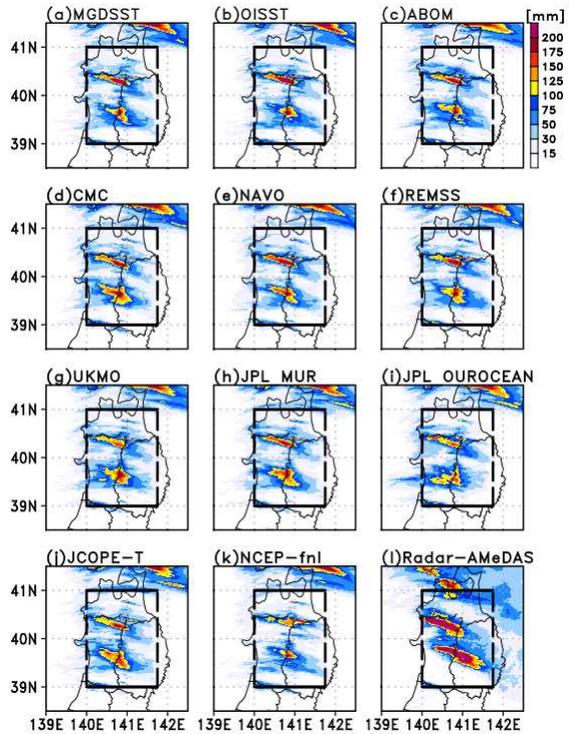


図 2 : 各海面水温プロダクトを条件として得られた 24 時間積算雨量 (a-k) とレーダアメダスの積算雨量 (l)。

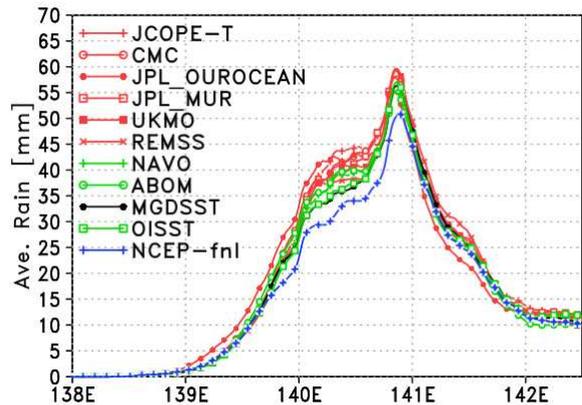


図 4 : 各海面水温プロダクトを境界条件として得られた 24 時間積算雨量を南北平均して得られた東西分布図。

次に、サンプル数を増やすために、図 1 の破線のボックス域で平均した日本海海面水温を指標として、回帰係数を計算することにより典型的な誤差の空間分布 (図 11 にほぼ一致) を作成後、それを 20% 刻みで -240% から 240% まで増減させることにより疑似的に海面水温のバイアスデータを構築し、同様な数値実験を試みた。100% のバイアスは、平均した日本海海面水温に約 0.65 度のずれがあることに相当する。図 5 は、海面水温に冷たいバイアスがある 5 ケース (-140%, -120%, -100%, -80%, and -60%), 中程度のバイアスがある

5 ケース (−40%, −20%, 0%, 20%, and 40%) および暖かいバイアスがある 5 ケース (60%, 80%, 100%, 120%, and 140%) について、それぞれ平均した 1 時間降雨の時間発展を示したものである。降水帯が海上に位置する 8 日 18 時の時点では、各ケースによる違いははっきりしないが、沿岸域に達する 8 日 21 時になると暖かいバイアスがあるケースの方が雨量は多くなるとともに、位置の違いも見られてくる。さらに、9 日 0 時以降では、暖かいバイアスのあるケースでは降水帯が日本海側に、冷たいバイアスのあるケースでは降水帯が太平洋側に相対的に位置している。これらの結果から、今回対象とした秋田・岩手豪雨のような状況では、高い (低い) 海面水温バイアスは、総雨量の増 (減) のほかに、降水帯の風上 (風下) 側への位置変化をもたらす可能性が示唆される。

考察

ここでは、海面水温バイアスが降水帯の位置変化と雨量に及ぼす過程について考察する。

図 6 は海面水温に冷たいバイアスのあるケースと暖かいバイアスのあるケースに関する 8 月 8 日 21 時における各種物理量の東西断面図を示したものである。暖かい (冷たい) 海面水温のバイアスに応じて、海上の大気下層の相当温位は高く (低く) なっている。大規模場の風が収束している 140°E 付近の上昇流を比較すると、冷たい海面水温のバイアスがあるケースの方が、強い上昇流の軸が相対的に東に傾いている。一方、暖かい海面水温のバイアスがあるケースでは、直上に延びる上昇流も見られ、相対的に広い範囲で強い上昇流が見られる。両ケースにおける上昇流の分布の違いに対応して、雲水、雨水、雪、あられの各種雲物理量の分布は、暖かい海面水温のバイアスがあるケースでは日本海沿岸から脊梁山脈にかけての広い範囲に広がっている一方で、冷たい海面水温のバイアスがあるケースでは沿岸側での上空での各種雲物理量は少なくなっている。これらの特徴は、図 4 に見られた 24 時間積算雨量の東西分布のばらつきと整合的である。

Schumacher (2015) は、米国の対陸上で見られる大規模場の上昇流がある積雲対流システムにおいて、初期の地表面の大気中の水蒸気量をわずかに下げると、積雲対流システムに取り込まれず積雲システムが相対的に弱くなることを数値実験から示している。また、局所的な大雨をもたらすバックビルディングタイプの降水系を弱体化させ、総雨量も減らすことも示している。図は省略するが、本研究においても、暖かい海面水温のバイアスがある場合の降水帯近傍の陸上での地上気温は、冷たい海面水温のバイアスに比べて低いことから、降水に伴う冷氣プールの形成に違いがあると推定される。これらから、海面水温のバイアスが大気下層の水蒸気量を変えることを通じて、同様な過程で降水帯の位置や総雨量の変化をもたらしているものと考えられる。

また、海面水温の違いは、大気境界層の鉛直混合を変え、大気下層の収束の強度を変えることを通じて、降水帯に影響を及ぼす可能性も考えられる (Katsafados *et al.*, 2011)。実際、暖かい海面水温のバイアスがある場合は、日本海上での最下層の西風が相対的に強くなっており、沿岸付近での下層収束を強化した結果、降水帯が強化した可能性も考えられる (図略)。一方、地中海の積雲対流システムを対象に海面水温の影響を調べた研究では、海面水温の違いが海面気圧や海陸間の気圧差などを変えることを通じて、降水帯の位置を変化させる可能性を指摘している (Berthou *et al.*, 2014; Cassola *et al.*, 2016; Mazon and Pino, 2016)。しかし、図は省略するが、本研究ではそのような明瞭な気圧差は見られなかった。このような違いの要因として、本実験で想定した海面水温バイアスの空間構造が比較的一様であることが関係していると考えられる。但し、海面水温の空間構造が複雑な領域では、異なるプロセスが働く可能性も考えられ、この点の調査は今後の課題である。

次に、総雨量を変える過程について考察する。水蒸気が飽和した空気塊を断熱的に持ち上げる場合、凝結率は以下のように表せる。

$$c = -w \frac{dq_s}{dz} = w \gamma_s \quad , \quad (1)$$

ここで、 w は鉛直流、 q_s は飽和比湿、 γ_s は湿潤断熱減率である。飽和した格子点について上式を鉛直方向に積分すれば、正味の凝結率 C が得られ、地表面での降水率と比較的対応が良い (O’Gorman & Schneider, 2009; Shi & Durran, 2015, 2016)。Emori and Brown (2005) に従い、各実験での正味の凝結率 C の違いを以下のように分離する。

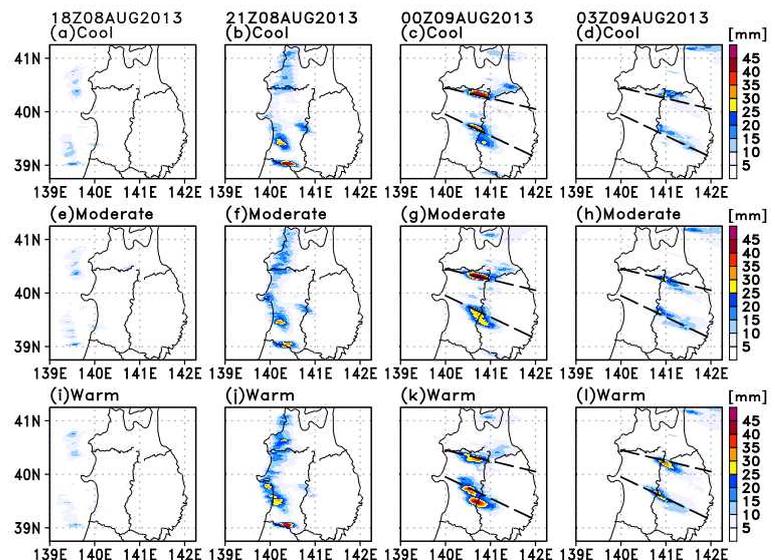


図 5: 海面水温に冷たいバイアス (a–d)、中程度のバイアス (e–h)、暖かいバイアス (i–l) がある 5 ケースで平均した 1 時間雨量の分布を 8 月 8 日 18 時から 9 日 3 時までの 3 時間ごとに示した図。比較のために中程度のバイアスの降水帯の位置を破線で示している。

$$\delta C = \int_{-\infty}^{+\infty} c(w)\delta f(w)dw + \int_{-\infty}^{+\infty} \delta c(w)f(w)dw + \int_{-\infty}^{+\infty} \delta c(w)\delta f(w)dw \quad , \quad (2)$$

ここで、 $c(w)$ は凝結率と上昇流の関係を表す式である。 $f(w)$ は確率密度関数で、 $dw = 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ とし26分割して求めた。(2)式の右辺第一項は上昇流の違いにより生じる力学的効果、第二項は熱力学的な効果、第三項は両者の組み合わせの効果による変化を表している。図7に、この(2)式を図2の破線で表したボックスで領域平均した結果を示す。この結果は、明らかに海面水温のバイアスによって生じた雨量の違いは、ほぼ力学的な効果の違いによって生じていることを示している。

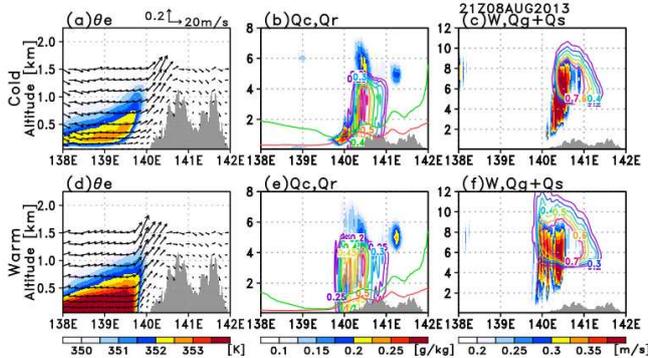


図6:海面水温に冷たいバイアスがあるケースの8月8日21時における相当温位(色彩)と風(矢印)(a)、雲水(色彩)と雨水(等値線)(b)、上昇流(色彩)と雲雪とあられの和(等値線)(c)。(d-f)は海面水温に暖かいバイアスがあるケースの(a-c)の変数に相当。(b)と(e)における赤(緑)線はLCLとLFC。各物理変数は、図2の破線のボックスの範囲で南北に平均している。また、灰色は山岳部を表している。

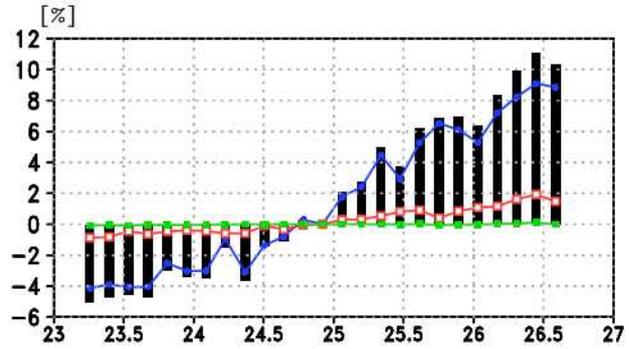


図7:コントロール実験に対する凝結率の変化(黒棒)、力学的効果(青線)、熱力学的効果(赤線)、両者の組み合わせ効果(緑線)による変化。横軸は日本海での平均海面水温で、20%刻みで-240%から240%までの結果を表示している。

まとめ

本研究では、現在利用可能な様々な衛星観測に基づく海面水温データセットの比較を行い、2013年8月の秋田・岩手豪雨を対象として、海面水温データセット間の違いが、降雨の再現性に及ぼす影響について調べた。その結果、海面水温データに暖かい(冷たい)バイアスがあれば、雨量が過大(過小)評価されるだけでなく、降水帯の位置が風上(風下)方向へずれるバイアスが生じることが示された。現在の海面水温データは雲下の情報は、内外挿などで補完しており不確実性が内在する。また、日変化の情報も含まれていないなどの問題もある。住民の行動につなげる気象情報の精度向上につなげるためにも、このような従来考慮されてこなかった海面水温の細かな時空間変動が豪雨などの現象の再現性に及ぼす影響の理解を進める必要があると思われる。なお、本研究の詳細はIizuka and Nakamura (2019)に記されている。

謝辞

本研究は、科研費(16H01844, 16H01846, 19H05697)を、また第二著者は the Japan Science and Technology Agency through Belmont Forum CRA “InterDec.”の支援も受け実施されたものです。JCOPE-TのデータはJAMSTECの美山博士より提供してもらいました。MGDSST, GHRSSST, MSM, NCEP-fnlのデータはそれぞれ <https://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/database.html>, <https://data.nodc.noaa.gov/ghrsst/L4/GLOB/>, <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/original/>, <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2> からダウンロードしました。

参考文献

- Berthou, S., Mailler, S., Drobinski, P., Arsouze, T., Bastin, S., Béranger, K., & Lebeaupin-Brossier, C. (2014). Sensitivity of an intense rain event between atmosphere-only and atmosphere-ocean regional coupled models: 19 September 1986. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(686), 258–271. <https://doi.org/doi:10.1002/qj.2355>.
- Brewin, R. J. W., de Mora, L., Billson, O., Jackson, T., Russell, P., Brewin, T. G., et al. (2017). Evaluating operational AVHRR sea surface temperature data at the coastline using surfers. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 196, 276–289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2017.07.011>
- Cassola, F., Ferrari, F., Mazzino, A., & Miglietta, M. M. (2016). The role of the sea on the flash floods events over Liguria (northwestern Italy). *Geophysical Research Letters*, 43, 3534–3542. <https://doi.org/10.1002/2016GL068265>
- Emori, S., & Brown, S.J. (2005). Dynamic and Thermodynamic change in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophysical Research Letters*, 32, L17706. <https://doi.org/10.1029/2005GL023272> Katsafados P.,

- Mavromatidis, E., Papadopoulos, A., & Pytharoulis, I. (2011). Numerical simulation of a deep Mediterranean storm and its sensitivity on sea surface temperature. *Natural Hazards Earth System Science*, 11, 1233–1246. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1233-2011>
- Katsafados P., Mavromatidis, E., Papadopoulos, A., & Pytharoulis, I. (2011). Numerical simulation of a deep Mediterranean storm and its sensitivity on sea surface temperature. *Natural Hazards Earth System Science*, 11, 1233–1246. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1233-2011>
- Iizuka, S. & Nakamura, H. (2019). Sensitivity of Midlatitude Heavy Precipitation to SST: A Case Study in the Sea of Japan area on August 9, 2013. *Journal of Geophysical Research–Atmospheres*, 124(8), 4365–4381. <https://doi.org/10.1029/2018JD029503>
- Manabe, S. (1957). On the modification of air-mass over Japan Sea when the outburst of cold air predominates. *Journal of meteorological Society Japan*, 35, 311–326. [DOI] https://doi.org/10.2151/jmsj1923.35.6_311
- Manda, A., Nakamura, H., Asano, N., Iizuka, S., Miyama, T., Moteki, Q., et al. (2014). Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon. *Scientific Reports*, 4, 5741. <https://doi.org/10.1038/srep05741>
- Martin, M., Dash, P., Ignatov, A., Banzon, V., Beggs, H., Brasnett, B., et al. (2012). Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST) analysis fields inter-comparisons. Part 1: A GHRSSST multi-product ensemble (GMPE). *Deep Sea Research II*, 77–80, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.013>
- Mazon, J., & Pino, D. (2017). The influence of an increase of the Mediterranean sea surface temperature on the two nocturnal offshore rainbands: A numerical experiment. *Atmosphere*, 8(3), 58. <https://doi.org/10.3390/atmos8030058>
- Ninomiya, K. (1974). Influence of the sea surface temperature on the stratification of airmass and the cumulus activity over the East China Sea in the Baiu season. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 25(3), 159–175. https://doi.org/10.2467/mripapers1950.25.3_159
- O’Gorman, P.A., & Schneider, T. (2009). The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. *PNAS* 106(35) 14773–14777. <https://doi.org/10.1073/pnas.0907610106>
- Schumacher, R.S. (2015). Sensitivity of precipitation accumulation in elevated convective systems to small changes in low-level moisture. *Journal of the Atmosphere*, 72, 2507–2524. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0389.1>
- Seko, H., Miyoshi, T., Shoji, Y., & Saito, K. (2011). Data assimilation experiments of precipitable water vapour using the LETKF system: intense rainfall event over Japan 28 July 2008. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63:3, 402–414, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00508.x
- Shi, X., & Durran, D.R. (2014). The response of orographic precipitation over idealized midlatitude mountains due to global increases in CO₂. *Journal of Climate*, 27, 3938–3956. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00460.1>
- Shi, X., & Durran, D.R. (2015). Estimating the response of extreme precipitation over the midlatitude mountains to global warming. *Journal of Climate*, 28, 4246–4262. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00750.1>
- Shoji, Y., Kunii, M., & Saito, K. (2009). Assimilation of nationwide and global GPS PWV data for a heavy rain event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan. *SOLA*, 5, 045–048. doi:10.2151/sola.2009–012
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M., et al. (2008). A description of the advanced research WRF version3. *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-475_STR. 1–113. Retrieved from http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf
- Varlamov S.M., Guo, X., Ichikawa, K., Miyama, T., Waseda, T., & Miyazawa, Y. (2015). M2 baroclinic tide variability modulated by the ocean circulation south of Japan. *Journal of Geophysical Research*, 120, 3681–3710. <https://doi.org/10.1002/2015JC010739>