

メソアンサンブル気象計算に基づく 平成29年7月九州北部豪雨のメカニズム調査, およびトリガーとなる気象擾乱の検知

INVESTIGATION OF MECHANISM OF LINE-SHAPED RAINBAND OCCURRED
AT THE NORTHERN PART OF KYUSYU IN 2017 BASED ON MESO-ENSEMBLE
METEOROLOGICAL SIMULATION~WHAT IS ITS TRIGGER?~

仲吉信人¹・長寄真²・金子凌³
Makoto NAKAYOSHI, Shin NAGASAKI and Ryo KANEKO

¹正会員 博士(工学) 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-0850 千葉県野田市山崎2641)

²非会員 学士 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-0850 千葉県野田市山崎2641)

³学生会員 工修 東京理科大学 理工学研究科土木工学専攻 (〒278-0850 千葉県野田市山崎2641)

This study investigates the impact of the first domain size, initial and boundary conditions, and sea surface temperature on occurrence of the record-breaking line-shaped rainband at the northern part of Kyusyu in July 2017, which caused 39 casualties. The smaller the first domain, the stronger the line-shaped rainband and the better reproducibility. The boundary of the first domain in accurate simulations overlapped the high humidity regions, thereby indicating the importance of proper setting of the lateral boundary of water vapor. Incorporating accurate SST led to the better reproducibility, too. Pressure gradient from East China Sea to the northern part of Kyusyu played an important role in the occurrence of this rainband with the water vapor supply by atmospheric river which covered the whole Kyusyu and the northern sea of Kyusyu.

Key Words : line-shaped rainfall band, heavy rainfall, WRF, atmospheric river.

1. はじめに

昨今、我が国で集中豪雨が頻発している。集中豪雨は局所的な現象で、河川氾濫や土砂災害を引き起こし、甚大な物的被害・人的被害をもたらす。平成29年7月九州北部豪雨では、福岡県朝倉市、大分県日田市等で最大24時間降水量が観測史上1位を更新する大雨となり死者39名、行方不明者4名の惨事となった。この豪雨は当日でも予測できておらず、防災上の観点からも気象モデルの精度向上が望まれている。

数値気象計算は、初期値・境界値やモデルの不確実性に起因するカオスの挙動により豪雨を予測することは困難を極める。この問題の解決策として複数の数値計算の集合(アンサンブル)を平均して最も確からしい結果を得る手法があり、初期値アンサンブル、境界値アンサンブル、モデルアンサンブルといった多様な集合の取り方が考案されている。

山口ら¹⁾は、アンサンブル計算により平成29年7月九州

北部豪雨の予測可能性を検討した。計30のメンバーの内、2ケース実況と近い雨量を再現しており、単純なアンサンブル平均を供するだけでなく、個々のメンバー自体の有効利用の必要性を言及している。一方で、初期値に摂動をもたせる山口ら¹⁾の検討では、個々のアンサンブルメンバー計算値の物理的解釈が難しい。

本研究では、領域の取り方や、初期・境界値、海水面温度(SST)の与え方の違いによるアンサンブル計算を実施し、平成29年7月九州北部豪雨への影響を検討する。物理的に理解しやすい計算ケースを設定することで、当該豪雨のメカニズムやトリガーとなる気象擾乱の検討を可能にする。気象計算では、水蒸気・風の側方境界値を適切に設定することが豪雨再現に重要であると考えられるが、計算領域の設定は研究者の経験によるところが大きく明文化されていない。また、金子・仲吉²⁾は豪雨の再現には海面水温の精度が重要であることを示している。本研究ではそれらに焦点をあてた検討を行う。

2. 計算手法

(1) 気象モデル

領域気象モデルWRFのバージョン3.9.1を用いて当該豪雨の再現計算を行った。用いた物理スキームを表-1に記す。物理スキームは金子・仲吉²⁾と同じものを用いている。著者らが中身を理解しているスキームの中から、既往研究での使用実績を考慮し選定した。アンサンブルメンバーとしては、第一領域サイズの違い、海水面温度(SST)の違い、初期値・境界値の違いにより計30メンバーを設定した。詳細は下に記す。

積分時間は7月4日9時より7日9時までの72時間である。

(2) 計算条件

a) 領域設定

設定した計算領域を図-1に示す。第1領域は、一番狭い領域として沖縄・九州・中国地方を含む領域(図-1中Number1)、一番広い領域として南シナ海から北海道までを含む領域(図-1中Number7)を設定し、段階的に広くした計7ケース用意した。全ケースにおいて第2領域(図-1中破線囲いエリア)、第3領域は共通であり、第3領域は熊本以北から北九州を含むように設定した(図-1中灰色の最小矩形囲いエリア)。第3領域の範囲は、線状降水帯の発生エリアを十分にカバーし、かつ、線状降水帯形成に影響を及ぼす可能性のある地形を含むように設定した。第2領域は、九州全域を含め、かつ、第一領域と第3領域の接続性を考慮し設定した。第1領域各ケースでの水平格子数はNumber1から32×32、48×48、64×64、80×80、96×96、112×112、128×128である。鉛直方向は全て50層である。

第1領域の格子数以外の格子情報は表-1の通りである。

b) 初期値・境界値

NCEPのFinal Operational Global Analysis data(以降、FNL)、気象庁のメソ数値予報モデル(MSM)を用いた。MSMを用いる場合でも、土壌温度、土壌水分データはFNLから与えた。時間・空間解像度はそれぞれ、FNLで6時間、1度、MSMで3時間、5 kmである。データ領域の制約より、MSMでは図-1のNumber4からNumber7に相当する計算は実施していない。

c) SST

ひまわり8号のSSTプロダクト(以降H_SST)³⁾、MODIS Level3 SSTプロダクト(以降M_SST)⁴⁾、FNLのSST(以降F_SST)の3種のSSTを用いた。

H_SSTとM_SSTは、衛星観測された輝度データから推定されたSSTであり、雲が存在する領域では欠測となる。そこで、次の方法により補間し使用している。H_SSTは、0:00-5:50、6:00-11:50、12:00-17:50、18:00-23:50の4つの時間フレームについて、格子ごとに数日分の時間平均を施し、それでも欠測を除去できないデータは空間補間で埋めた。時間平均を先に施すことで、海流などの特徴的なSSTパターンを保存することができる。平均化日数は極力多くの欠測を埋めるよう設定した。M_SSTの補間方

法は金子・仲吉²⁾を参照されたい。

H_SST、M_SSTの元々の時間解像度の違いから、欠測を除去するのに要した平均化時間はH_SSTでは2日、M_SSTでは1ヶ月であった。実観測であること、時間解像度が高いことから3つのSSTの中ではH_SSTがより正確なSSTと言える。

d) メンバーのケースID

30メンバーのケースIDは3文字の英数字(A-B_C)で表し、次の規則で命名する。

A: 初期・境界値を表し、FNLもしくはMSMの頭文字が入る。

B: SSTの種別を表し、H_SST、M_SST、F_SSTの頭文字が入る。

C: 第一領域サイズに対応する数字が入る。例えば、

表-1 計算設定

	第1領域	第2領域	第3領域
格子数 (東西×南北×鉛直)	※本文中 に記載	106×106 ×50	221×221 ×50
格子解像度 時間解像度	25 km 90 s	5 km 18 s	1 km 3.6 s
物理モデル	使用スキーム		
microphysics	Kessler scheme		
Long-wave	rrtm scheme		
Short-wave	Dudhia scheme		
PBL	MYNN 2.5 level		
Surface layer	MYNN		
Land surface	unified Noah land-surface model		
Urban canopy	Single-layer model		

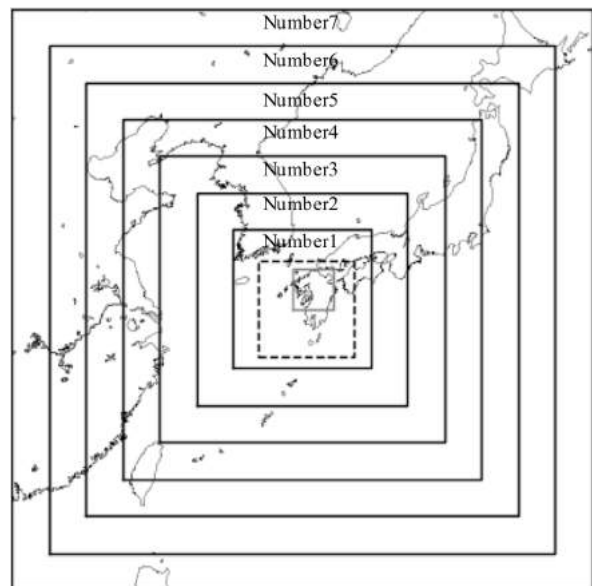


図-1 計算領域。破線は第2ネス領域、灰色実線は第3ネス領域を示す。黒実線は第1領域を示す。Number1～Number7の数値は計算ケースの名称と対応する。

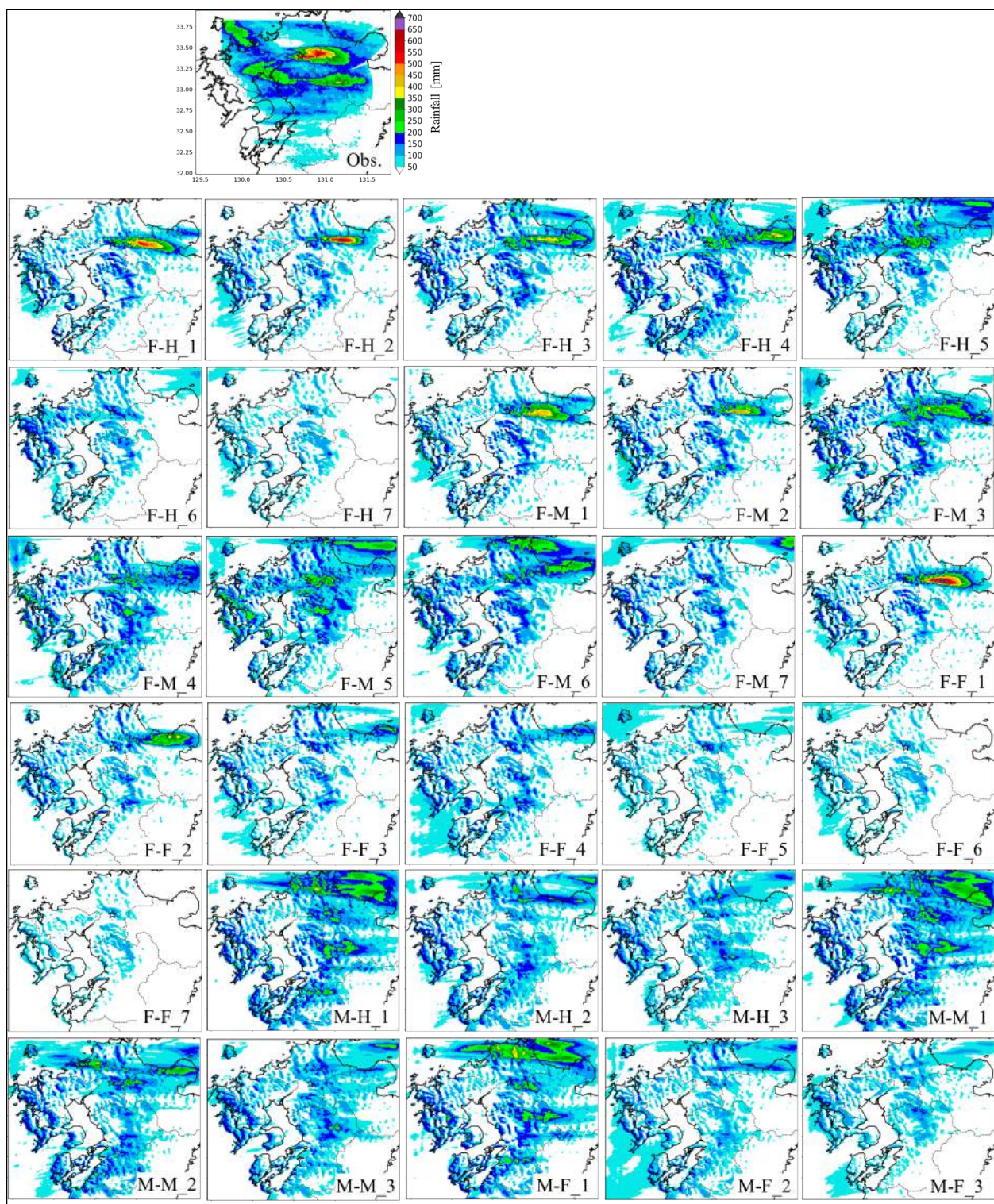


図-2 24時間積算雨量. 各図の右下英数字はケースIDを示す. Obs.はXRAIN（国土交通省）による実況を示す.

図-1のNumber1に該当する場合はCには1が入る.

3. 結果

各ケースの再現精度について、九州全域の積算雨量の空間分布、および朝倉近辺の累積雨量の観点から結果を示す.

(1) 積算雨量

図-2に7月5日9時からの24時間積算雨量の空間分布を示す. 実況（図-2中のObs.）は国土交通省整備のレーダー雨量（XRAIN）により可視化した. 朝倉市周辺にかけて500 mmを超える明瞭な線状降水帯が確認される.

計算値でもいくつかのケース（F-H_1, F-H_2, F-M_1, F-F_1）において九州北部において明確な線状降水帯が解像され、また総降水量も実況と類似している.

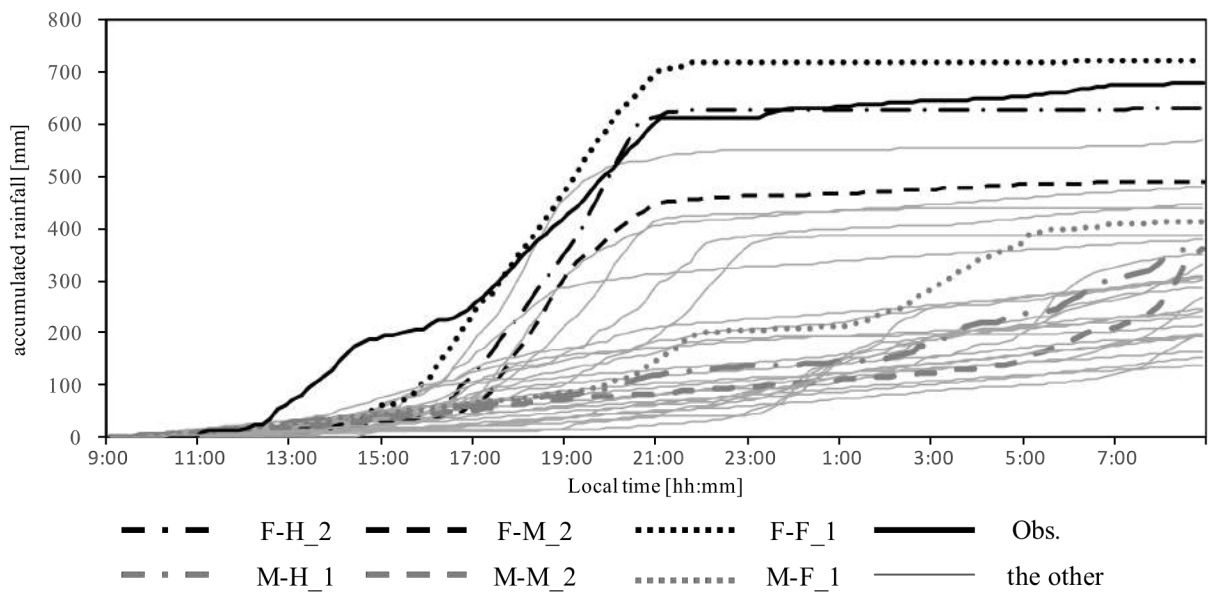


図-3 第3領域内最大積算雨量地点における累積雨量

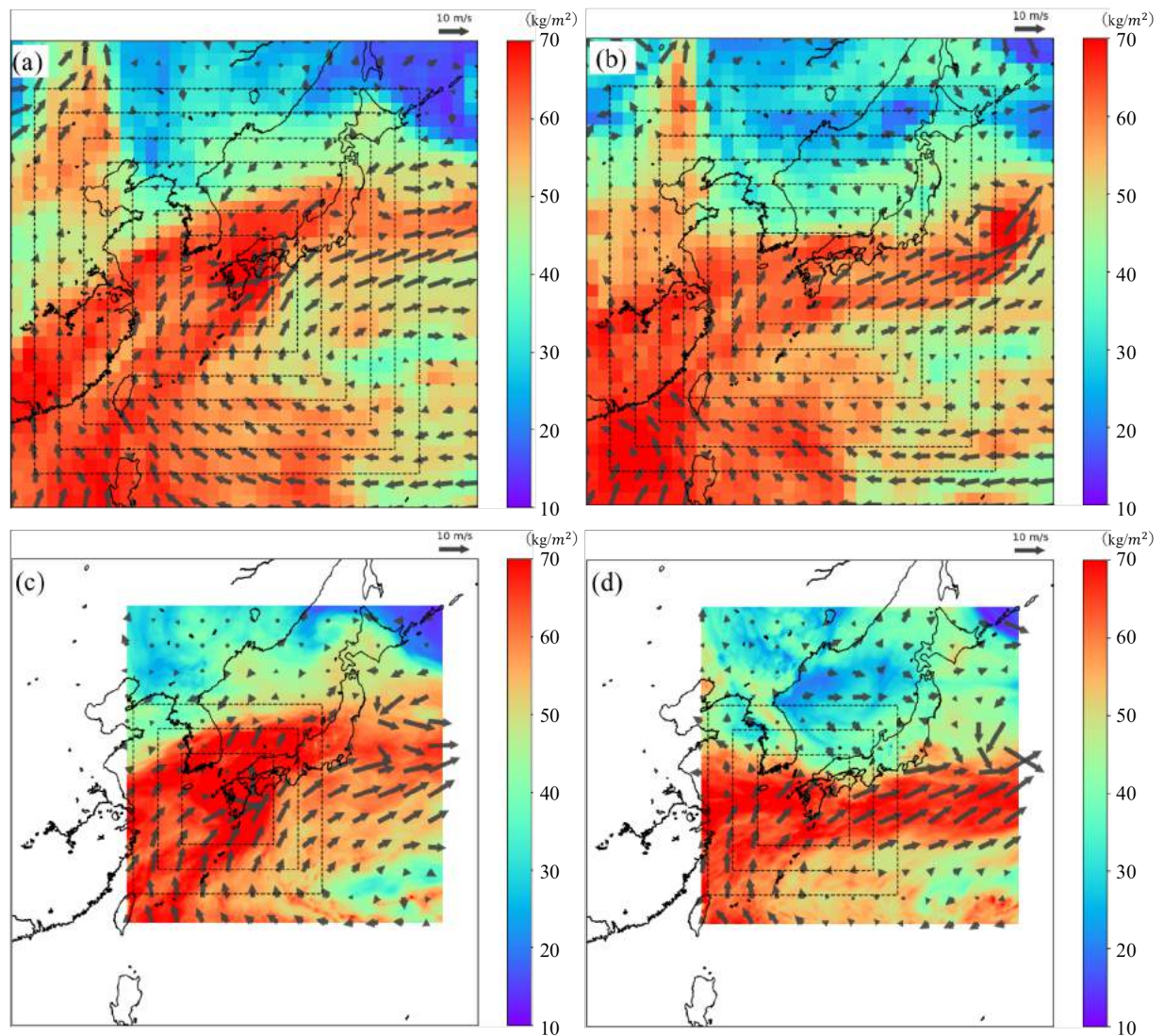


図-4 鉛直積算水蒸気量と地上風速ベクトル. (a),(b) : FNLの7月4日・5日9時, (c),(d) : MSMの7月4日・5日9時

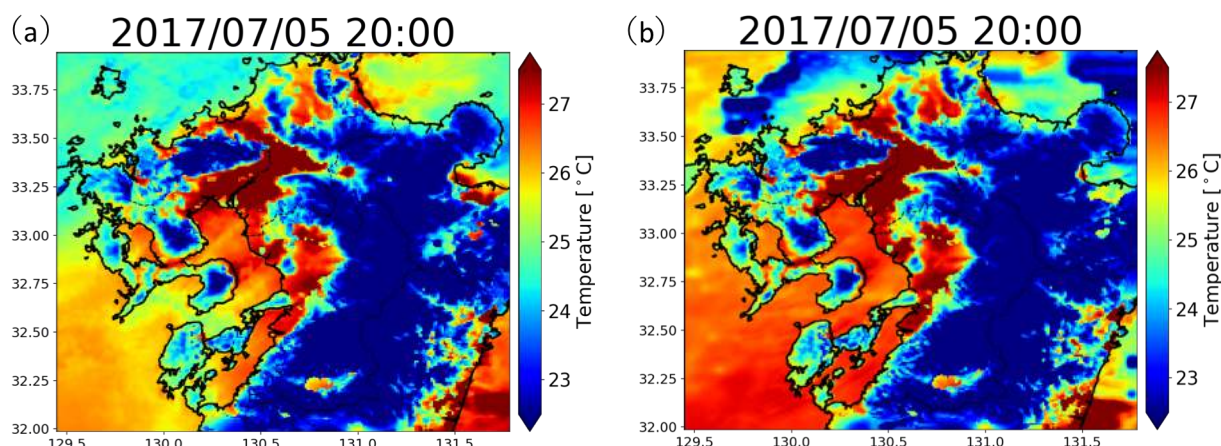


図-5 地上2m気温. (a)H_SST, (b)M_SST. (a), (b)ともにNumber2のケース

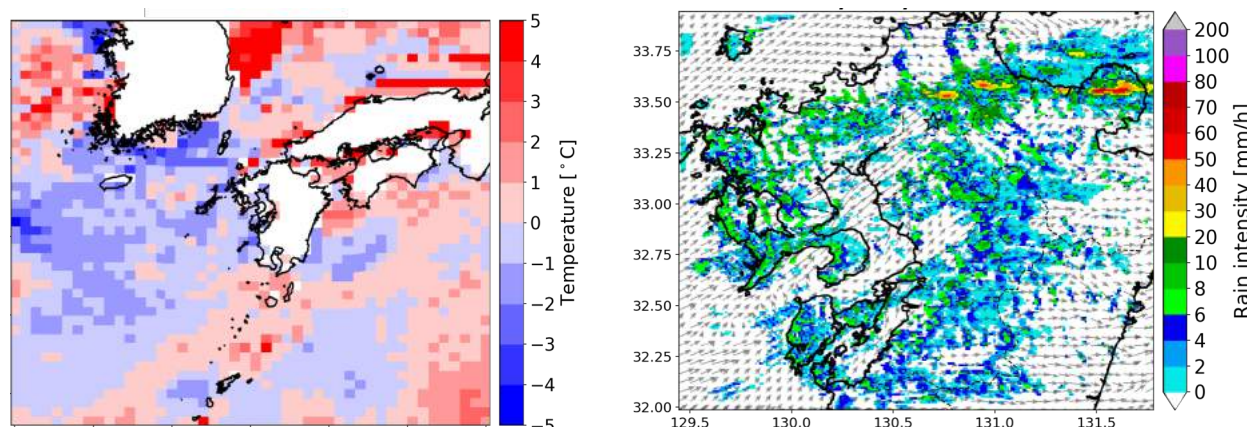


図-6 海水面温度差. H_SST - M_SST

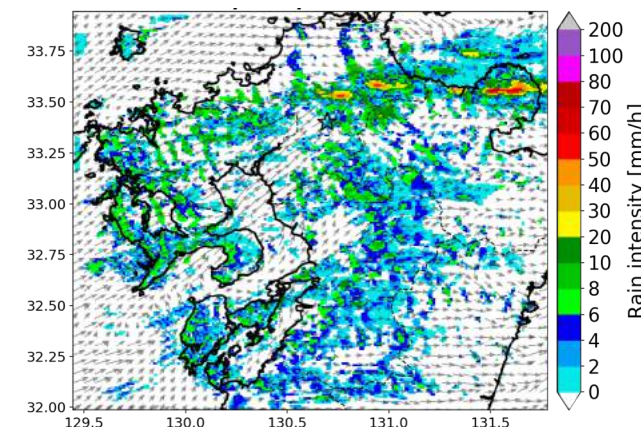


図-7 7月5日13:20でのF-H₂の降雨強度と地上風速の分布

初期・境界値にFNLを用い、かつ第一領域が狭いケースにおいて線状降水帯の解像が顕著と言える。SSTの違いは降水空間分布の差異よりも、線状降水帯の降水量の増減に強く影響しているように見える。

MSMを用いたケースでは、線状降水帯が明瞭に解像されず、また降水域が北よりに遷移していた。

(2) 累積雨量

図-3に7月5日9時から6日9時までの累積雨量の変化を示す。観測値は朝倉地点でのXRAINデータを積算したものであり、計算値は積算雨量が最大値を示した地点での累積雨量である。FNLを用いたケースでは朝倉付近となっているが、MSMを用いたケースでは朝倉よりも北に位置した点となっている。各初期・境界値、各SSTで、実況と最も再現精度が高いケースのみ線種を変えて強調し、その他のケースは灰色細線で示している。上の議論と同様、第一領域サイズが小さいケースにおいて実況と近い降水が解像された。

一方、降雨の立ち上がり時刻は実況と計算で異なっていた。実況では12時30分ごろより累積雨量が立ち上がり始めるのに対し、計算値では早くても15時頃からの立ち上がりである。また、MSMよりもFNLを用いたケース

で累積雨量の立ち上がりが早く、かつ実況に近い。MSMのケースでは雨量を過小評価していることが分かる。どのケースでも、実況の降水立ち上がりを再現できていなかった。

4. 考察

図-2、図-3より、MSMよりもFNLを用いたケースの再現性が高く、初期・境界値が同じであれば第一領域サイズが小さいケースで実況に近い雨が解像されることがわかった。また、SSTの差異は、降水量の増減に繋がる傾向が確認された。これらの結果が生じた理由について考察する。

(1) 第一領域サイズの影響

図-4に計算初期値である7月4日9時とその24時間後の5日9時の鉛直積算水蒸気量と地上風速ベクトルを示す。日本列島を縦断するような高湿度帯がマニラ・台湾海上から北陸・東北エリアまでを覆っていることが分かる。これはatmospheric river (AR)⁵⁾と称される水蒸気輸送と考えられ、東アジアではAR発生時には大量の雨が発生することが報告されている⁶⁾。FNLでは(図-4(a), (b))、

Number1・Number2に対応する領域が高水蒸気値と一致しており、また、風速ベクトルから水蒸気が計算領域に供給されることが確認される。上空の風速ベクトルに関しても同様の傾向を示していた（図略）。5日においては九州付近のARの幅が狭まりFNLケースNumber1領域の南北境界と高水蒸気帯が一致している。つまり、領域サイズの影響とは、水蒸気境界条件の適切さを見ていたことと解釈できる。

(2) 初期値・境界値の影響

図-4(c), (d)にMSMの鉛直積算水蒸気量と地上風速ベクトルを示す。FNLと同様にARの発生が確認されるが、5日の水蒸気量はFNLよりも南北方向に狭域化している。北側境界からの乾燥空気の流入がMSMケースでの降水解像を弱め、再現性を下げた要因と考えられる。また、MSMでの4日の風速ベクトルに注目すると、Number1・Number2の北側で南風となっている。これが、九州北部での風の収束を弱め、線状降水帯を発生させなかった理由と考えられる。

(3) SSTの影響

M_SSTよりもH_SSTケースで総じて降水量が大きくなった。線状降水帯形成の一翼を担っているのは有明海から朝倉に向かう南西の風であるが、M_SSTケースではそれが弱められていた（図略）。その要因として、海・陸の気圧勾配に伴う風の駆動力の違いを挙げる。図-5にH_SSTとM_SSTの2 m気温を示す。長崎県より南西部での海上気温はM_SSTケースの方が高く、そのためM_SSTケースでは筑紫平野との気温差が小さくなる。これに伴う気圧勾配の減少が朝倉付近での収束を弱めた要因の一つと言える。

M_SSTでの海上気温を高くした要因は、H_SSTとM_SSTの差に他ならない。図-6に2つのSSTプロダクトの差分を示す。九州以西から東シナ海に向かい、M_SSTが2~3 Kほど高い。2. (2). c)で述べたようにH_SSTがより正確なSSTと考えられ、M_SSTにおけるSSTの過大評価が降雨再現精度を下げた要因といえる。

(4) 本豪雨の発生メカニズム、トリガーとなる気象擾乱

本豪雨では、朝倉付近で長時間に渡り強い収束場が形成されており、その高度は1500~2000 m付近にまで及んでいた（図略）。収束場の形成は、東シナ海から有明海を経由し筑紫平野に導入される風と、九州北部の海域（壱岐水道、玄界灘）を通り背振山地の東側で南下する風によってなされていた（図-7）。この駆動力は、東シナ海から九州北部に向かう総観場スケールの気圧勾配であり、これにSSTによる海・陸の気圧勾配が補助的に作用していたと考えられる。さらに、ARによる水蒸気の供給が重なり、観測史上1位となる豪雨に繋がった。

5. まとめ

平成29年7月九州北部豪雨に対し、初期値・境界値、第一領域サイズ、SSTの種別を変えた計30メンバーのメソスケール計算を実施し、各メンバーの降雨再現性の良否に基づき計算結果を考察した。得られた主要な結果を列挙する。

- 1) FNLを用いたケースはMSMを用いたケースよりも降雨再現性が高く、それは両者の水蒸気分布の差異によりもたらされていた。
- 2) 第一領域を小さく設定したケースほど降雨再現性が高く、これは水蒸気の境界条件設定の重要性を示していた。
- 3) ひまわり8号SSTを用いたケースで降雨再現性が高くなる傾向を示した。SSTの違いは海陸気圧勾配を修正し、九州北部での収束場に影響していた。
- 4) 東シナ海から有明海を経由し筑紫平野に導入される風とatmospheric riverにおける水蒸気流入が本豪雨の形成に繋がっていることが示された。

謝辞：「(ひまわり8号から作成した)海水面温度に関する研究プロダクト」は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の分野横断型プロダクト提供サービス(P-Tree)より提供を受けた。また、本研究は次の科学研究費補助金の支援を受けた。ここに謝意を表す。課題番号:18K13840および17H01292。

参考文献

- 1) 山口弘誠, 堀池洋佑, 中北英一: 平成29年7月九州北部豪雨における線状降水帯の予測可能性と発達機構の解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol74(5), pp. I_277-I_282, 2018.
- 2) 金子凌・仲吉信人: 平成29年7月九州北部豪雨の数値再現実験, 河川技術論文集, 第24巻, pp421-426,, 2018.
- 3) Kurihara Y., Murakami H., and Kachi M.: Sea surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari-8 satellite. Geophys. Res. Letters, Vol.43(3), pp.1234-1240, 2016
- 4) Werdell, P.J., B.A. Franz, S.W. Bailey, G.C. Feldman and 15 co-authors: Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties, Applied Optics Vol.52, pp.2019-2037, 2013.
- 5) Gimeno L., Dominguez F., Nieto R., Trigo R., Drumond A., Reason C. J. C., Taschetto A. S., Ramos A. M., Kumar R., and Marengo J.: Major mechanisms of atmospheric moisture transport and their role in extreme precipitation events. Ann. Rev. Environ. Res., 41, pp.117-141, 2016.
- 6) 釜江陽一, Mei Wei, Xie Shang-Ping: 日本列島におけるatmospheric river 通過時の豪雨の気候学, 平成29年度「異常気象と長期変動」研究集会報告(2018), pp.124-127, 2018
(2019. 4. 2受付)