平成25年台風18号を対象とした WRFによる降水の再現と海面水温温暖化実験

REPRODUCTION OF THE HEAVY RAINFALL BY TYPHOON 1318
AND ITS SST GLOBAL WARMING NUMERICAL EXPERIMENT
USING A MESO-SCALE METEOROLOGICAL MODEL

能登谷拓¹・小林健一郎²・奥勇一郎³・木村圭佑⁴

Taku NOTOYA, Kenichiro KOBAYASHI, Yuichiro OKU and Keisuke KIMURA

¹学生会員 神戸大学 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 Dr.-Ing. 博(工) 神戸大学准教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³非会員 博(理) 大阪市立環境科学研究所 調査研究課 (〒543-0026 大阪市天王寺区東上町 8-34)

⁴学生会員 神戸大学 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

Recently heavy rains occur frequently and researchers consider a climate change may be one of the causes. Thus, this study estimates the influence of the sea surface temperature changes on rainfall intensity due to a Typhoon. First the Typhoon No.18, 2013 which caused heavy damage on Kyoto and Shiga prefectures due to the heavy rainfall is reproduced (control run). Then its SST global warming experiment is carried out using latest meso-scale meteorological model WRF. As the result of the SST global warming experiment, the catchment average rainfall of the Yodogawa river above Hirakata becomes 1.5 times larger than that of the control run. This result indicates a possibility that further heavier rainfall may occur in the future due to a climate change.

Key Words : WRF, SST global warming experiment, climate change, Yodogawa river catchment

1. 研究の背景

我が国は島国で国土が小さいうえに、山間部が多い。そのため国内の多くの河川は、流域面積が小さく急勾配となっている。大陸の広大な平地を流れる河川に比して、上流地域で降った雨がすぐに下流へと流れ込むため、短時間に大幅な水位上昇が起こりやすく、河川の氾濫による短期的な洪水災害が発生しやすくなっている。加えて我が国は台風の常襲地帯であり、洪水により古くから社会的、人的な被害を受けてきた。2013年には台風18号が愛知県豊橋市付近より日本列島に上陸し、四国から北海道にかけての広い範囲に大雨をもたらした。近畿地方においては、通常太平洋側に比して降水量の少ない日本海側の地域でも豪雨となり、淀川水系の桂川や宇治川が氾濫するなど、京都府や滋賀県を中心として大規模な浸水被害が生じた。

また、IPCC第4次報告書は、地球温暖化の影響により今後台風が強大化していくことを指摘している¹⁾。そのため、上記のように洪水リスクの高い我が国において治水計画を考えるうえでは、温暖化が台風の降水特性に与える影響を定量的に把握することが求められている。

昨今、将来気候場の台風による影響評価を試みた

研究は数例なされている。例えば、奥ら (2010) は、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデルMRI-AGCM-3.2S²⁾により再現された21世紀末に日本へ来襲する台風を対象とした複数経路計算を行い、最悪ルートにおける地上風速や降水量の可能最大値の推定を行っている³⁾。他方、吉野ら (2010) は戦後最大の被害をもたらした伊勢湾台風をモデル台風として、複数の初期値、境界値を用いた数値実験を行い、将来気候場における可能最大級台風がもたらす降水量を算出している⁴⁾。

本研究は、メソ気象モデルを用いた温暖化実験により、淀川流域を対象とした将来的な大雨の影響評価を行うものである。具体的には、近年淀川流域に最も影響を与えた平成25年台風18号を対象とした降水の再現と、温暖化差分を加えた海面水温を境界値とする海面水温温暖化実験を行う。本来温暖化の影響を厳密に評価するためには、気温、水蒸気量、気圧などのあらゆる諸物理量の気候変動の影響を考慮した擬似温暖化実験の手法が用いられるべきという報告がある⁵⁾。しかしながら、一般に擬似温暖化実験における温暖化差分の計算は、例えば本研究のように9月の事例を対象とする場合、将来における9月の気候値から現在における9月の気候値の差を温暖化差分として求める。あくまで平均的な気候場の変

化を反映させただけであって、将来変化のゆらぎの部分は考慮されない。温暖化予測実験において大気の状態が極端に不安定な気象場が計算され、極端に強い台風が計算されたとしても、前述の方法で温暖化差分を計算すると、必ずしも台風の発達を促進するような温暖化差分にならない可能性がある。例えば、大気が一様に温暖化するのではなく、下層に比べて中上層における温度上昇の方が大きければ大気はより安定な状態になり、対流の発達は抑制されることになる。つまり、台風の発達が抑制され、結果として降水量が減少する場合がある。一方、海面水温温暖化実験では大気側の温暖化を全く考慮しておらず、海面水温の上昇により大気の下層は少なからず気温上昇することから、台風の発達が好都合となる大気の状態がより不安定化した場合の気象環境が提供される。将来の大雨による影響評価が目的である本研究では、流域の総合的な治水計画策定の視点から対象台風がより多くの雨をもたらす環境を設定する必要があり、擬似温暖化実験による評価も重要であるが今回は海面水温温暖化実験に着目した。

2. 平成25年台風18号の概要

日本時間9月13日3時（本稿では特に断りのない限り、日時は日本時間とする）に小笠原諸島近海で発生した台風18号は西寄りに進んだのち、勢力を上げながら北上し、16日の8時前に暴風域を伴って愛知県豊橋市付近に上陸した。上陸した台風は関東甲信地方、東北地方を通過し、三陸沖へと抜け、16日21時に北海道の東で温帯低気圧となった。中心気圧は最低で960hPaを記録した。日本海から流入した湿潤な大気の影響により近畿地方、東海地方を中心とした広い範囲で16日未明から記録的な大雨となった。特に京都府、滋賀県、福井県の3府県には16日5時5分に大雨特別警報が発表された。「予想される現象が特に異常であるため重大な災害の起こる恐れが著しく大きい旨を警告して行う警報」と定義される特別警報が、同年8月30日の運用開始後、初めて適用された。代表観測地点の9月15日から16日までの総降水量は、京都府京都で250.5mm、京都府園部で311.5mm、滋賀県大津で328.0mm、滋賀県信楽で332.0mmとなった⁶⁾。京都府では由良川や桂川が氾濫し、渡月橋がほぼ冠水するなど各地で住宅の浸水、道路の損壊が相次いだ。府内において、損壊や浸水による住家被害は合計で5400棟に上った。滋賀県においても、河川の決壊などが起こり、全域において浸水被害が広がった⁷⁾。

台風18号が発達しながら接近、上陸した原因として、台風上陸前の日本列島付近での海面水温が平年よりも1～2℃程度高かったことが挙げられる（図-1、図-4）。秋の台風は北上するにつれて海面水温の低下により、日本列島付近では衰弱することが多いが、本事例では海面水温が27℃以上の台風が発達しやすい条件となっていた。図-1に9月14日9時における海

図-1 9月14日9時における海面水温分布
(NCEP全球客観解析データFNLをもとに作成)

面水温分布を示す。海面水温27℃以上の水域が北陸地方まで達しており、日本周辺で平年よりも海面水温が高くなっていたことがわかる。

3. 数値実験概要

(1) 使用モデル

今回の実験では最新のメソ気象モデルである The Weather Research and Forecasting (WRF) Model を用いた。WRF は、大気の研究および実用的な気象予報の用途で用いられるために開発された、3次元完全圧縮性非静力学モデルである。開発は1990年代の後半から始まり、National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Center for Environmental Prediction (NCEP), Forecast Systems Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), University of Oklahoma (オクラホマ大学) らによって共同で行われた。NCAR と The Pennsylvania State University (ペンシルバニア州立大学) によって共同開発された非静力学モデルである MM5 の次世代モデルとして位置づけられている。高精度な計算スキームや最新の物理モデルが導入されており、突発的な豪雨の予測、再現に適したモデルである⁸⁾。研究用の Advanced Research WRF (ARW) と実業用の Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) の二種の解法が用意されている。なお、今回用いたのは ARW である。

(2) 再現実験

淀川流域における降水が観測値と近くなることを目標として、平成25年台風18号の再現実験を行う。初期値、境界値を NCEP の Final Operational Model Global Analysis data (全球客観解析データ FNL) で与えた。なお、NCEP/FNL の空間解像度は 1°であり、時間間隔は 6 時間である。表-1 に実験の計算条件、図-2 に計算領域を示す。計算領域は水平解像度 20km の日本全域を含む親領域 (D1) と two-way nesting 手法による近畿地方周辺の子領域 (D2) を設定した⁹⁾。D2 では降水の水平解像度依存性を調べるために、3つの異なる水平解像度 (5km, 4km,

表-1 計算条件

気象モデル	WRF/ARW 3.5.1	
格子点数	D1	150×150×30
	D2-5km	73×73×30
	D2-4km	91×91×30
	D2-2km	181×181×30
水平解像度	20km, 5km, 4km, 2km	
時間ステップ	100s, 25s, 20s, 10s	
計算開始日時	2013/09/12 09JST	
計算終了日時	2013/09/16 21JST	
境界層スキーム	Mellor-Yamada-Janjic	
雲微物理スキーム	WRF Single-Moment 6-class scheme	
積雲スキーム	D1	Kain-Fritsch
	D2-5km	Kain-Fritsch
	D2-4km	None
	D2-2km	None
接地層スキーム	Monin-Obukhov

図-2 計算領域

2km) での計算を行った。今回はデータの同化は行っていない。

(3) 海面水温温暖化実験

海面水温温暖化実験では、再現実験で境界値として用いた海面水温（図-1）に温暖化差分を上乗せした値を海面水温の境界値として用いた。将来（2075-2099年）における9月の月平均海面水温と現在（1979-2003年）のそれとの差をIPCC第4次報告書のSRES-A1Bシナリオに基づくCMIP3マルチモデルアンサンブル平均値で求め、これを海面水温の温暖化差分とした¹⁰⁾。再現実験からの変更点は海面水温のみであり、再現実験と同様の条件でネスティングを行った。図-3に9月の海面水温温暖化差分を可視化した図を示す。日本付近の海域において海面水温が大幅に上昇しており、特に北緯40度周辺では2.5度以上も高くなっている。実験で用いた海面水温の境界値と過去の9月平均海面水温との比較を図-4に示す。過去の海面水温はハドレーセンターのデータ¹¹⁾を用いており、各年の9月月平均海面水温を台風18号が発達する期間に通過した海域である東経130-145度、北緯20-35度で領域平均した値を示している（図-5の領域1参照）。また、図中の再現実験と海面水温温暖化実験について

図-3 9月の海面水温温暖化差分分布

図-4 過去の9月平均海面水温と実験で用いた海面水温の比較（図中のCTLは再現実験、SGWは海面水温温暖化実験を表す。）

は、それぞれの実験で用いた海面水温の境界値の平均をとり、東経130-145度、北緯20-35度で領域平均した値を示している。図-4から計算期間中の海面水温は過去44年間の月平均値と比べると最も高い状態であり、海面水温温暖化実験では、さらにそれを2度ほど上回る状態であったことがわかる。

4. 実験結果

(1) 台風経路と中心気圧の比較

図-5に各実験の台風経路と気象庁発表経路の比較を示す。各実験の台風は上陸後実際よりも北側の進路となっているが、近畿地方周辺での位置は近く、淀川流域で降水を比較するうえでは問題にならない程度であると判断した。

図-6に図-5で示した各台風の中心気圧を示した。再現実験では、台風の経路を比較的良く再現することができたが、中心気圧を比較すると観測値よりも全体的に低く、最低値は観測値よりも30hPa程度低い結果となった。海面水温温暖化実験においても、中心気圧が全体的に低くなっており、最低値は再現実験よりもさらに40hPa低くなった。しかし、本研究の解析対象はあくまで台風による雨であるため、台風の構造自体の再現は目指しておらず、許容範囲内であると判断した。

また、図-5の台風経路において再現実験と海面水温温暖化実験との間に若干の差がみられるのは、気圧場の違いによるものである。海面水温の上昇は

対流の発達に影響を与えるため、再現実験と海面水温温暖化実験では必ずしも同じ場所に対流（積乱雲）が発達するとはいえない。対流が発達する場所や強さが変われば、それは気圧場に影響を与える。結果として再現実験と海面水温温暖化実験の気圧場がまったく同じになるとはいえない。一方、台風の位置は気圧が最低となる場所と与え、台風の経路は台風の位置を経時的に追跡した結果である。そのため再現実験と海面水温温暖化実験の台風経路に差が生じている。

(2) 積算降水量の比較

再現実験および海面水温温暖化実験により得られた降水分布を、計算開始から終了までの積算値として示す。D1における結果を気象庁の解析雨量と合

わせて図-7 に示す。再現実験に比べ海面水温温暖化実験においては、降水域が大幅に広がっており、およそ北緯 25 度から 30 度にかけて積算降水量が 400mm を超える領域が現れていることが見て取れる。一般に、海面水温が上昇すると海面から大気への潜熱フラックスが増加する。潜熱フラックスが増加すると、大気中に含まれる水蒸気量が増加する。

図-9 に両実験の 9 月 15 日 21 時における可降水量（水蒸気量の鉛直積分）の比較を示した¹²⁾。日本付近における可降水量の差が顕著に表れていることがわかる。さらに、水蒸気量が増えると水蒸気凝結による潜熱放出により大気がより暖められ、台風のウォームコア（暖気核）がより発達する。その結果として、海面水温が上昇する前に比べて、ある特定の地域の降水量が増えるわけではなく全体として降

図-5 D1における台風経路の比較（JMAは気象庁発表経路、CTLは再現実験、SGWは海面水温温暖化実験を示している。）

図-6 D1における台風中心気圧の比較

図-7 D1における積算降水量の比較（(a)が解析雨量、(b)が再現実験、(c)が海面水温温暖化実験を示している。）

図-8 D2-2kmにおける積算降水量の比較（(a)が解析雨量、(b)が再現実験、(c)が海面水温温暖化実験を示している。）

図-9 台風接近時（2013年9月15日21時）の可降水量の比較（(a)が再現実験，(b)が海面水温温暖化実験を示している。）

図-10 枚方上流域

水量が増える傾向がある。また同様に，D2-2km における結果を図-8 に示す。近畿地方周辺では，再現実験の台風の方が海面水温温暖化実験の台風よりも北側の進路となっているため，降水量の多い範囲が海面水温温暖化実験に比べ北に位置している。再現実験に比べ海面水温温暖化実験では，紀伊半島中央部から南部にかけての広い範囲で降水が多くなっていることが見て取れる。

(3) 枚方上流域における比較

図-10に黒枠で示した枚方上流域における流域平均降水量の比較を行った。流域平均降水量の観測値は国土交通省の地上観測雨量により算出されたものである。枚方地点は淀川流域における洪水防御の基準地点であり，枚方上流域での降水の評価は流域の治水計画策定の基準となる¹³⁾。降水の評価のために，枚方上流域での比較が最適であるとは限らないが，今回は河川計画との整合性のために枚方上流域を評価対象とした。なお，図中の大きい赤点で示した位置が枚方地点である。図-11に枚方上流域における流域平均1時間降水量の比較，図-12に流域平均積算降水量の比較を示す。9月14日24時から16日21時までの比較である。図-11，図-12の再現実験値および海面水温温暖化実験値はD2-2kmの結果を示している。最大1時間降水量は，観測値が23.0mm（9月15日23時），再現実験が25.9mm（9月16日1時），海面水温温暖化実験が67.6mm（9月15日21時）となっている。海面水温温暖化実験が，観測値のおよそ2.9倍，再現実験のおよそ2.6倍である。図-5に示すように再現実験と比較すると海面水温温暖化実験に

図-11 枚方上流域における流域平均1時間降水量

図-12 枚方上流域における流域平均積算降水量

図-13 水平解像度の違いによる
枚方上流域積算降水量の差

おける台風の移動速度の方が大きくなっているため，海面水温温暖化実験の降水は短時間に集中するという結果が表れている。流域平均積算降水量については，最終的に観測値が295.1mm，再現実験が227.2mm，海面水温温暖化実験が346.4mmとなっている。海面水温温暖化実験が観測値のおよそ1.2倍，再現実験のおよそ1.5倍である。さらに，水平解像度による再現性の違いを検証するために，図-13に

各水平解像度での枚方上流域積算降水量を示す。水平解像度により観測値と再現実験値の差にばらつきが見られるが、地形による詳細な降水の差が表れたことや積雲スキームの有無が関係していると考えられる。海面水温温暖化実験については、解像度を変更しても大きな差は表れなかった。そのため海面水温の上昇は、水平解像度の差に関わらず明確な降水の増大をもたらしていることがわかる。

また、図-12および図-13の観測値と再現実験値との比較から、再現実験値は観測値よりも過小評価となっていることがわかる。このような差は図-11に示すように、強い降水の継続時間が観測よりも再現実験において短くなっていることに起因している。今後、シミュレーション結果を客観解析値に近づけるなどの補正法の適用を検討する必要があるかもしれないが、海面水温温暖化実験結果の降水量は十分に大きく、そのまま計画降雨の一つとすることも可能ではないかと考える。なお、時間雨量が最大となるタイミングやその値は再現実験と観測値で似通っており、台風18号による降水の特徴は良くとらえられていると考える。

5. 結語

本研究では、海面水温温暖化手法を用い、淀川流域を対象とした将来の気候変動影響下における台風がもたらす降水の影響評価を行った。対象台風を、淀川流域を含む近畿地方北部を中心に未曾有の豪雨をもたらした平成25年台風18号とし、将来の温暖化した環境におけるこの台風がもたらす豪雨についての検討を行った。実験の結果、枚方上流域積算降水量については、海面水温温暖化実験が再現実験のおよそ1.5倍となっており、大幅な上昇が確認された。なお、今回の実験では海面水温の将来変化のみを与え、大気場の将来変化については考慮していないため、降水が過大評価となっているものと考えられる。この点に関しては、擬似温暖化実験との違いとして十分に留意する必要がある。しかしながら、本研究の目的は流域の治水計画策定に資するような結果を得ることであり、対象台風がより多くの雨をもたらす場合を想定したものである。一方、現在の治水計画は既往の降雨データに基づいて設定されたものであり、これまで日本の安全を守ってきた。今後は将来を見据えた研究結果が蓄積され、気候変動の影響も加味したより安全度の高い計画手法の確立がなされるべきであるとする。今回は降水のみの比較となっているが、そのような計画策定に資するために、地上での浸水域や河川流量の比較を行い、厳密に流域に及ぼす影響を定量化することを想定している¹⁴⁾。また、台風による降水は地形による影響を大きく受けるものである。そのため今回の手法を複数の事例に適用したり、経路の違いを考慮したりすることによって、多数のシナリオからの影響を評価することが必要であるとする。

謝辞：第2著者は土木学会水工学委員会京都・滋賀水害調査団（京都大学中川一団長、竹林洋史幹事長）の一員として、国土交通省近畿地方整備局より水文データを提供していただきました。本研究は気候変動リスク情報創生プログラムの成果でもあります。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Emanuel, K. A.: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years, *Nature*, Vol. 436, pp. 686-688, 2005.
- 2) Mizuta, R., Yoshimura, H., Murakami, M., Matsueda, H., Endo, T., Ose, K., Kamiguchi, M., Hosaka, M., Sugi, S., Yukimoto, S., Kusunoki, A. and Kitoh, A.: Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid, *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, Vol. 90A, pp. 233-258, 2012.
- 3) 奥勇一郎, 吉野純, 石川裕彦, 竹見哲也, 中北英一: 将来の極端台風の複数経路計算による可能最大被害予測, 京都大学防災研究所年報, 第53号B, pp. 371-375, 2010.
- 4) 吉野純, 飯田潤士, 安田孝志: 紀伊半島に上陸する可能最大級台風に伴う降水量の地球温暖化による変化, 土木学会水工学論文集, 第54巻, pp. 229-234, 2010.
- 5) 小林健一郎, 奥勇一郎, 寶馨, 石川裕彦, 竹見哲也, 中北英一: 物理ダウンスケール法による極端台風を用いた淀川流域の洪水評価, 京都大学防災研究所年報, 第55号B, pp. 9-14, 2012.
- 6) 気象庁: 台風18号による大雨, 23 pp., 2013.
- 7) 土木学会水工学委員会: 京都・滋賀水害調査速報会報告書, 28 pp., 2013.
- 8) 辰巳賢一・竹見哲也・石川裕彦: WRFモデルを用いた高解像度気象シミュレーションシステムの構築: 豪雨の事例解析, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp. 437-448, 2008.
- 9) Harris, L. M. and Durran, D. R.: An Idealized Comparison of One-Way and Two-Way Grid Nesting, *Monthly Weather Review*, Vol. 138, pp. 2174-2187, 2010.
- 10) Ishikawa, H., Oku, Y., Kim, S., Takemi, T. and Yoshino, J.: Estimation of a possible maximum flood event in the Tone River basin, Japan caused by a tropical cyclone, *Hydrological Process*, Vol. 27, pp. 3292-3300, 2013.
- 11) Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., Kent, E. C. and Kaplan, A.: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, Vol. 108, No. D14, 4407, 37 pp., 2003.
- 12) Pozo, D., Illanes, L., Caneo, M. and Curé, M.: PWV FORECAST VALIDATION AT ALMA SITE, *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, Vol. 41, pp. 55-58, 2011.
- 13) 立川康人, 佐山敬洋, 寶馨, 松浦秀起, 山崎友也, 山路昭彦, 道広有理: 広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用, *自然災害科学*, Vol. 26, No. 2, pp. 189-201, 2007.
- 14) 小林健一郎, 奥勇一郎, 中北英一, 中野満寿男, 寶馨: 伊勢湾台風擬似温暖化実験による淀川流域における洪水規模の変化予測, 土木学会水工学論文集, 第58巻, pp. 391-396, 2014.

(2014. 9. 30受付)