

戦-47 短時間急激増水に対応できる降雨予測技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 26

担当チーム：水災害研究グループ（水文）

研究担当者：深見和彦、菅野裕也、牛山朋来、
萬矢敦啓

【要旨】

本研究は、発展途上国域を含めて、急激な増水を伴う洪水(Flash Flood)災害に対応できる降雨予測技術を開発することを目指すものであり、今年度は、領域気象モデルを活用することで、国内における中小河川流域スケールでの Flash Flood 発生の主要な原因となる局地的な豪雨予測を行う可能性を調べるため、2010年7月5日に発生した東京・板橋豪雨を事例として検討を行った。その結果、3つの海風の収束という、比較的大きなスケールの現象が豪雨発生要因であったこともあり、特別なデータ同化等の手段を用いない数値モデルでも数値的に再現することができた。今後は、発展途上国域の事例を含めてさらに数値予測の知見を蓄積していく必要がある。キーワード：Flash Flood、領域気象モデル、WRF-ARW、板橋豪雨、XバンドMPレーダ

1. はじめに

沖積平野や山地上流域での急激な開発・都市化が進む中で、上流域での流出率上昇や、中下流部の洪水脆弱地域への人間の居住・財産の集積が進み、一方で、局所的な豪雨が多数発生している結果として、Flash Flood（急激な増水を伴う洪水）が国内外で急増している。2009年8月に発生した兵庫県佐用町水害や2010年8月以降に深刻化したパキスタン国インダス川大水害の契機となった左支川カブール川でのFlash Flood災害などは記憶に新しい。

発展途上国など水文情報が乏しい地域において洪水予警報を行うため、人工衛星による準リアルタイム雨量情報を活用した総合洪水解析システム（IFAS）の開発を行っているが、衛星降雨の時空間解像度において、都市河川や山地河川におけるFlash Floodへの対応には限界がある。これに関連して、日米欧の主要な気象機関では、全球規模での数値気象予測を既に実施しているが、現状ではそのプロダクトは洪水予測に用いる降雨予測としての観点での検証がなく、実際に途上国が河川流域スケールで利用するためのダウンスケール手法も確立していない。また、従来から途上国でも、重要地域でレーダ雨量計の配備が行われつつあるが、定量的な降雨量観測のためのレーダ定数設定やオンライン補正が行われていないために、水文観測を補うための降雨量観測や洪水予測のための情報として有効に活用されていない事例が多い。

このように、国内はもとより発展途上国においても、Flash Floodに対応できる洪水予測システム構築のための降雨予測技術の確立が求められている^{1)~6)}。

本研究は、Flash Flood 予測対応のために必要となる降雨予測手法の確立と洪水予測の高度化を図るため、気象数値予測の精度検証とダウンスケール手法、および不確実性を考慮した洪水予測技術とその表示方法の開発を行う。また、これらの技術は途上国におけるFlash Flood対応にも共通で有効であり、途上国でのデータ利用可能状況に応じて降雨予測ダウンスケール技術の開発と検証を行う。これらの知見を総合化することにより、国内外のFlash Floodに対応できる洪水予測システム構築のための降雨予測技術の確立を目指すものである。

ところで、ここで、Flash Floodの定義を再確認しておきたい。Flash Floodは、国内では「鉄砲水」と訳されることがあり、山間地の極めて小規模な溪流における土石流を伴う洪水と結びつけられ、極めて小さなスケールでの洪水・土砂災害と理解されている向きがある。しかし、国際的には、「降雨の降り始めから6時間以内に発生する洪水」と定義されているほか、実際には、いわゆる季節的洪水、もしくは、大河川の沿岸（例えば長江下流部等）で発生するRiverine floodに對置されるべき洪水と位置づけられ、より幅広い洪水を包含する概念と一般に理解されている。例えば、バングラデシュでは、ガンジス川やブラマプトラ川からの洪水はRiverine Flood

であるが、メグナ川（流域面積 82,000km²）上中流域で発生する洪水やインド国境外から入る洪水などは、Flash Flood の典型として言及される。また、2010年7月末から8月にかけてインダス川上流域での豪雨に端を発した大洪水では、流域北西部のカブール川（流域面積 92,605km²）におけるFlash Floodが1,000人以上の死者、20万棟以上の家屋被害をもたらした。すなわち、流域面積のスケールに関係なく、十分な避難対応の時間の余裕無く襲う洪水は、幅広くFlash Floodと呼ばれる。日本の大多数の河川における洪水も、世界的視点に立って自然現象のみに着目すれば、Flash Floodの範疇に入れてもおかしくない洪水と言える。そこで、我々は、Flash Floodを「鉄砲水」ではなく「急激な増水を伴う洪水」あるいは「短時間急激増水」の訳語をあてている。

今年度は、領域気象モデルを活用することで、国内における中小河川流域スケールでのFlash Flood発生の主要な原因となる局地的な豪雨予測を行う可能性を調べるため、2010年7月5日に発生した東京・板橋豪雨を事例として検討を行った。

2. 板橋豪雨の概要

対象とした局地的豪雨は、2010年7月5日に東京都板橋区で発生した事例である。この日関東は、太平洋高気圧の北の縁に位置し、低気圧や前線の影響は無視できる。

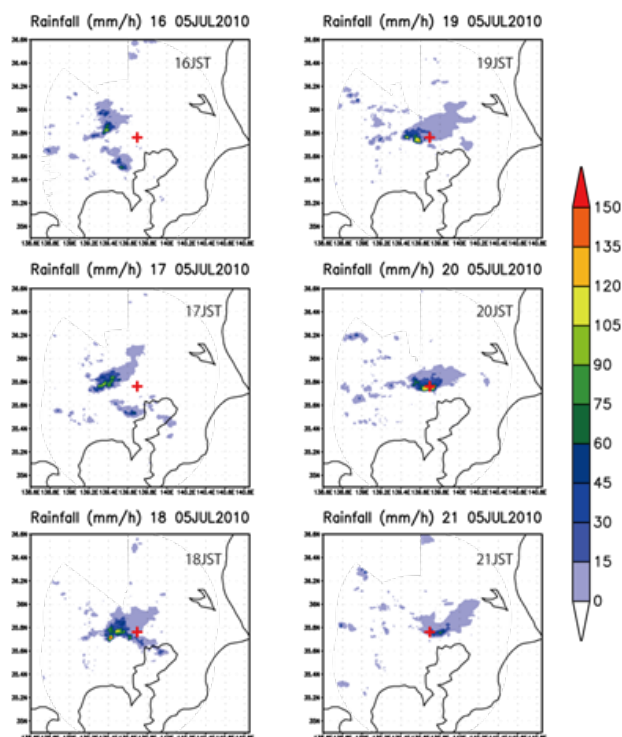


図-1 Xバンドレーダー合成雨量の1時間毎の時間変化、中心の+印は板橋の位置を示す。

この事例は、16時頃から埼玉県南部の秩父山地のふもとで顕在化した後、徐々に東進し、東京都心に達した19時頃に板橋周辺で停滞した。そのため、板橋で19:30～20:30の1時間に107mmの降水を観測し、床上浸水23棟、道路冠水による自動車の水没、石神井川の氾濫、ブロック塀倒壊などの被害をもたらした。

図-1に1時間毎のXバンドMPレーダーによる合成雨量観測値の分布を示す。雨量分布は、16時に南北2つに分かれていたものが18時に1つに合体し、その後中心部が19時～21時にかけて板橋付近に停滞していたことが分かる。このときの降雨の中心が板橋付近にかかり、豪雨をもたらした。

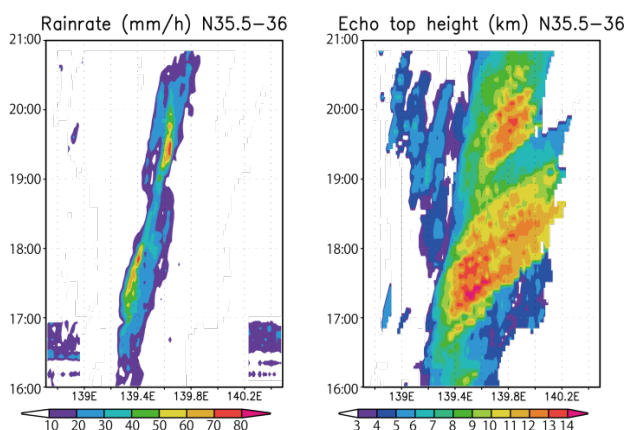


図-2 降水系の時間-東西断面（左）降水強度（N35.5～N35.9の南北平均）、（右）Zhが15dBZ以上のエコー頂高度（N35.5～N35.9の最大値）。時刻は5分間隔。

続いて図-2に、豪雨をもたらした降水系の時間—東西断面を示す。16時から21時にかけて、降水系がゆっくりと東に移動しているのが見て取れる。図3左の降水強度には、17時台後半と19:30頃の2回降水強度のピークがあることが分かる。それらに対応して、図3右の15dBZのエコー頂高度が増大し、最大値は13kmを越えた。エコー頂高度の値が東に流されているのは、降水粒子が高度10km付近で卓越していた強い西風に流されて東に運ばれた結果と考えられる。

3. 領域気候モデルによる板橋豪雨再現の数値実験

上記豪雨を対象として、領域気象モデルWRF-ARW（Weather Research and Forecasting-Advanced Research WRF）⁷⁾ V3.2.1を用いて数値的に降雨を再現する実験を行った。実験設定を表-1に示す。モデルで用いた地形と土地利用分布は図-3の通りである。関東平野を取り巻く領域を含み、板橋を中央に設定した。土地利用分布は、白が市街地、赤が水田、黒が畑地、緑が水田と畑地の混

表-1 WRF モデル設定

格子数	203×203×40
水平格子間隔	1km
計算時間	7月5日 12時～21時
初期、境界条件	気象庁 MSM-GPV
雲物理過程	Lin スキーム(氷相を含む)
境界層過程	Mellor-Yamada-Janjic スキーム
地表面過程	5層熱拡散モデル
土地利用分布	USGS 30秒間隔
海面温度	298.5K 固定

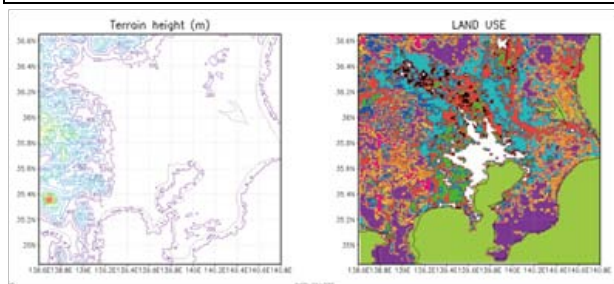


図-3 モデル地形と土地利用分布

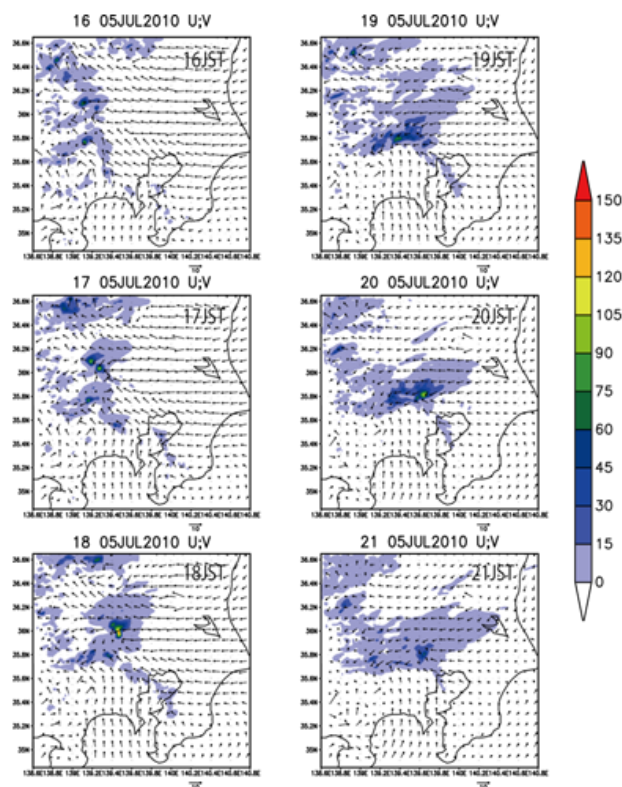


図-4 数値実験による降水分布と地表風速場の時間変化

合、水色が低木地、オレンジが常緑針葉樹林、紫が混合林、黄緑が水面である。

図-1 に数値実験による地上降水分布と風の時間変化を示す。降水系の時間発展の様子は、数値実験の方が降水領域を過大評価しているものの、降水の中心位置や形状については図-2 の観測データとよく似た分布を再現

していた。特に 17 時まで南北に 2 つあった降水系が 18 時過ぎには 1 つに合体し、その後ゆっくり東進したこと、また 19 時から 20 時にかけて板橋に豪雨があった時刻には降水の中心がほぼ板橋付近に停滞した点などが、よく再現されていた。また、数値実験による板橋周辺の最大積算雨量は 144mm であったが、これは板橋の積算総降水量の 133mm と整合的であった。

続いて、図-2 の観測データとほぼ同じ領域の数値実験による降水量とエコー頂高度を図-5 に示す。ただし、数値実験で再現された降水系はやや北にずれていたため、図-6 の範囲は図 3 に比べて 0.2° 分だけ北にずらしてある。

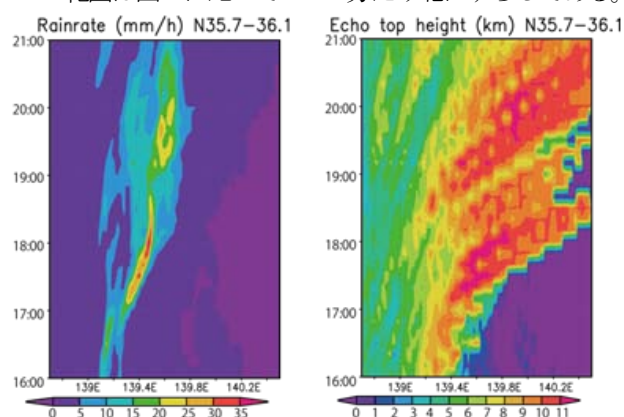


図-5 数値実験による降水量とエコー頂高度の時間-東西断面、時間は 10 分間隔

図-2 と図-5 の比較から、数値実験でも 2 段階の発達を再現しており、17 時台後半と 19 時半頃に経度の 139.3° と 139.6° で発達したことは観測とよく一致していた。図-5 右のエコー頂高度も 2 段階の発達の点では一致していたが、数値実験では 2 回目の発達の時に上空への降水粒子の広がりが大き目に出ていた。

同様に、観測と数値実験による時間-南北断面を図-6、図-7 に示す。ここでは、東経 139.6 度線(三浦半島の西)に沿った南北断面の時間変化を示している。それぞれの降水強度の時間変化を比べると、①最初に北緯 35.5° 付近で発生した降水系が北上し、②北から南下してきた降水系と合体し、③その後 19 時～20 時にかけて強い降水をもたらした、という 3 点について良く一致している。ただし、水平分布(図-5)にもみられるように、数値実験の結果はやや北にずれている点が多く、18 時以前に北方から南下してくる降水系の位置は現実よりも 0.3° 北にずれていた。また、19 時から 20 時における豪雨の中心は 0.5° 北にずれ、また北側への広がりが観測より大きかった。さらに、南と北から移動してきた降水系が合体する時刻が観測よりも約 1 時間遅れていた。

図-2 と図-5 の比較でも現れているように、数値実験の

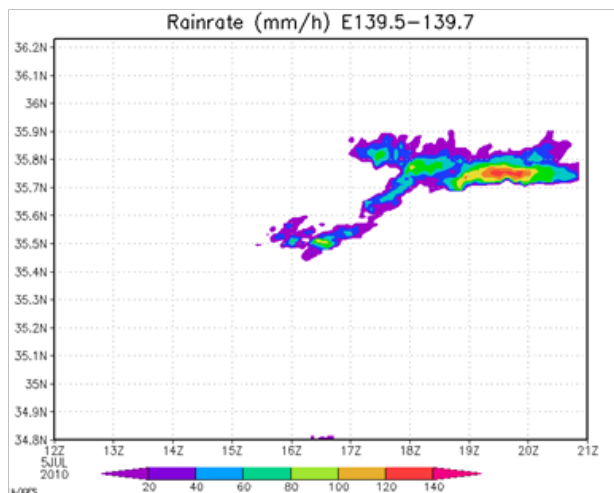


図-6 レーダー観測による降水強度の時間-南北断面、
値は東経 139.5° ~139.7° の平均

結果は観測に比べて大きな降水系を再現している。これは、恐らく数値モデルの水平解像度が大きすぎたために水平収束の領域が大きくなり、現実よりも大きな降水系を再現してしまったものと推測される。

このように、今回の数値実験はいくつか問題はあるものの、板橋における豪雨の基本的な特徴はうまく再現していたと言える。

4. 板橋豪雨の発達過程に関する議論

これまでの解析により、数値実験により板橋における豪雨をうまく再現できたことがわかった。次に、この豪雨をもたらした降水系の発達過程を議論する。

図-7 では、降水強度の他に水蒸気量もカラー等値線で示している。まず昼過ぎに北緯 35.4° を中心として水蒸気量の大きい部分が現れる。これは、南風に乗って太平洋から水蒸気の移流があり、それが湘南海岸付近に達したためである。そして、15時から17時にかけてこの水蒸気量のピークが徐々に北上している。これは、次のように説明できる。図-4の1枚目と2枚目に見られるように、相模湾からの南風（海風）が関東平野に流入し、東京湾奥から吹きこむ南東風との間に収束線を形成している。この収束線に沿って水蒸気も収束し、蓄積される。そして、その南風の先端が海風の発達に伴って北上するのに従い、収束線が北上するとともに水蒸気量のピークも北上したと考えられる。17時30分になると、水蒸気量のピークの延長線上から降水が生成されている。これは、海風の収束線付近で水蒸気の蓄積にともない対流が励起され、雨水が生成されたと考えられる。南から北上してきた降水系は海風の収束によって形成されたことが示唆された。それでは、北から南下した降

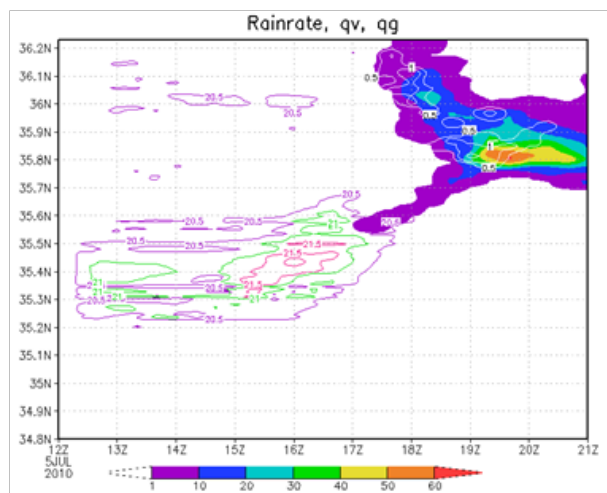


図-7 数値実験による降水強度(カラーシェード)、地表水蒸気混合比(カラー等値線)、および高度 5.5km の水蒸気混合比(白等値線)の時間-南北断面. 水蒸気混合比のみ東経 139.6° の値で、他は東経 139.5° ~139.7° の平均値

水系はどのように発生したのだろうか。発生初期の16時の水平分布を見てみると(図-4、1枚目)、主な対流は、北緯 35.8° と北緯 36.1°、東経 139.1° で発生している。これは、図-3左に見られるように、秩父山地のふもとである。さらに、図-4の1枚目と2枚目に見られるように、東京湾奥から北西方向に秩父山地に向かって風の収束線が見られる。これは鹿島灘からの東風と東京湾からの南東風が収束したもので、ここにも小さいながらも水蒸気の蓄積が見られる(図-7)。この水蒸気量の大きい空気が下層東風によって秩父山地を上昇し、対流が発生したと考えることができる。

この日、下層では図-4に見られるように降水系の周囲では東風が吹いているが、高度 3km 以上では西風が卓越し、高度 3km で 6m/s、高度 5km で 10m/s、高度 10km で最大の 28m/s に達していた。この強い西風に流されて降水系は東に移動したと考えられる。

図-7において、北と南の降水系が合体する前の18時頃と、合体した後の19時以降は霰が多く生成され、降水系の発達高度が高くなるとともに、氷相の雲物理過程が上空で卓越していた。これは、それぞれ図-3にある1回目と2回目の発達に相当しており、観測でエコー頂高度が高くなっていることと対応する。しかし、観測では1回目の発達が北と南の降水系が合体した直後であるのに対し、数値実験では合体前であるため、この部分のメカニズムはうまく再現できなかったと言える。

19時から20時にかけて、板橋周辺で豪雨が発生しているのが図-7にも現れている。図-4では5枚目の20時における図が最も降水強度が大きくなっている。ここで

は、東西に広がった降水系に対して、地上では南または南東から風が吹き込んで水蒸気を供給している。これらの風は、相模湾・東京湾・鹿島灘の3方向からの海風がすべて収束し、効果的に水蒸気を供給していたことが示唆される。

豪雨の時間帯の気流と水蒸気場の関係をより詳しく見るため、図-8を示す。この図に見られるように、3方向からの海風は板橋付近で収束しており、またそれに至る収束線上で水蒸気量が極大となっている。このように、豪雨の時間帯には海風の収束が効果的に板橋付近の降水系に水蒸気を供給していたことが示された。また、この収束線では、図-7に見られるように午後から水蒸気を収束させており、それまでため込まれた水蒸気がこの19時台にはすべて板橋付近の降水系に向かって吹きこんでいたと考えられる。3方向からの海風により、2本の収束線に沿ってため込まれた水蒸気が、さらに1本に合流して降水系に供給されたことで、今回の異常ともいえる豪雨を引き起こしたと考えることができる。

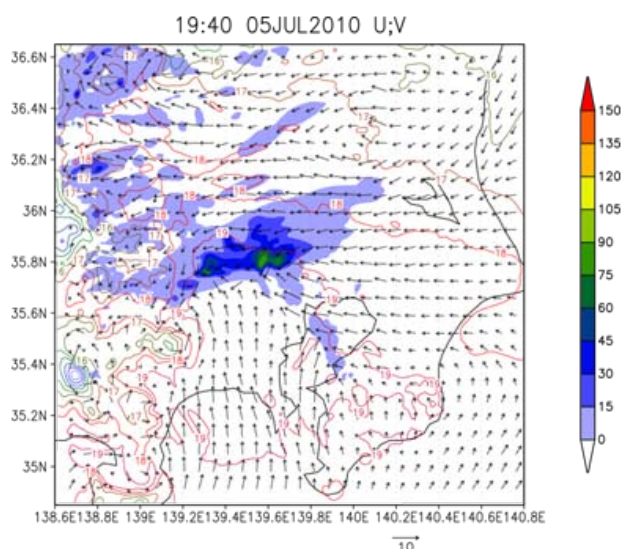


図-8 19時40分における降水強度(カラーシェード)、
下層水蒸気混合比(カラー等値線)、地上風(矢印)。

相模湾東京湾や鹿島灘からの海風の収束によって下層水蒸気量が増加し豪雨をもたらすというパターンは、過去にも多くの報告例がある⁸⁾。Seko等による1999年7月に起こった練馬豪雨の解析⁹⁾では、関東平野で気温が上昇して局地的に気圧が下がるため、相模湾と東京湾、および鹿島灘からの海風が発達する様子が示されている。そして、それらの海風が収束する東京都心(練馬区)において水蒸気収束が起こり、豪雨が発達する様子が解析されている。

本研究においても、この練馬豪雨の場合と同様に、海

風による水蒸気収束が豪雨の発生発達に対して重要な役割を持っていたと考えられる。また、板橋区と練馬区は隣り合っていて位置的にも近いこと、関東平野の海風の収束についてもよく似たメカニズムが働いていた可能性が考えられる。しかしながら、練馬豪雨の場合はいくつかの降水セルが東西および南北方向に発生したのに対し、今回の板橋の事例では豪雨をもたらした時間帯にはほぼ一つの降水系に集中していた(図-1, 図-4)という違いがある。従って練馬豪雨の場合には降水セル間の相互作用が豪雨をもたらす降水セルの発達に影響を及ぼしていたのに対し、本研究の事例では一つの降水セルの発達によって決まる比較的単純な発達過程であったと考えられる。

このような違いが現れた原因の一つとして考えられるのは、海風の進入過程が異なっていたことである。練馬豪雨の場合は相模湾からと東京湾からの海風が南西風の一つの流れとなって東京都心付近に入っているのに対し、今回の板橋の事例では相模湾からと東京湾からの海風は、それぞれ異なった風向を持つ独立したものであった。従って、下層収束線の分布も異なっていたのではないかと推測することができる。

5. 板橋豪雨の事前予測可能性

レーダ観測と数値モデルWRFにより板橋で発生した豪雨の構造を再現し、発達過程を調べることができた。ここでは、明らかになった発達過程をもとに、予測可能性について議論する。

今回の豪雨は、最初に相模湾からの海風と東京湾からの海風の収束、および東京湾からの海風と鹿島灘からの海風の収束によって発生した。従って、これらの海風を正確に予測することが豪雨予測にとって第1に重要な点である。

今回の数値実験の感度実験として、計算開始時刻を12時ではなく15時から開始する実験も行った。その場合、海風の発達が遅れ、降水系の発達が遅れたため、南北の2つの降水系の合体が21時頃になり、位置も板橋よりも40km西北西にずれていた。また、この実験では秩父山地のふもとにおける水蒸気量が12時開始の基本実験に比べて少なくなっており、海風収束の遅れとともに、水蒸気の蓄積も不十分であった。従って、日中の海風の発達や、水蒸気の蓄積を表現するためには、少なくとも午後いっぱい計算することが必要であると言える。

次に、雲物理過程のパラメタリゼーションスキームの依存性を調べるため、基本実験で用いたLinのスキームの他、Goddard GCEスキームと、WSM 6-class graupel

スキームについても実験を行って見た。これらはいずれも氷相を含む、先進的な雲物理パラメタリゼーションスキームである。Goddard スキームの場合、豪雨は再現されるものの1時間程度遅れて発生し、位置が北に10km程度ずれていた。WSM6の場合、豪雨の発生が2時間以上遅れ、位置が北に10kmずれていた。これらの結果から、豪雨の発生の予測には、雲物理パラメタリゼーションスキームの選択も重要な要素であることが言える。これらの雲物理スキームの違いは、氷相過程の扱いの違いであり、氷相過程が卓越する18時以降に差異が広がった。

今回の事例では、1kmメッシュのWRFモデルを用いてほぼ重要な過程を表現することができた。これは、発達過程が3方向からの海風の収束によって決まるため、これらの海風の分布を精度良く求めることで、豪雨の発達も表現できたからと考えられる。一般に、関東平野の局地的豪雨は、予報モデルで再現するのは困難であるとの報告が多いが²⁾、それは20kmより小さいメソスケールにおける風や水蒸気量などの局地的分布に強く依存するためと考えられる。しかし今回の事例では、水蒸気量分布も数10kmスケールのメソβスケールの現象により決定されていたために、数値モデルによる再現が可能になったと考えられる。

このように、今回の数値実験では豪雨をもたらした降水系の主要な発達過程を再現することができた。しかしながら、再現に失敗している部分も残されている。それは、北と南の降水系の合体が観測よりも1時間遅れたこと、北の降水系よりもさらに北に、発達初期に多くの降水系が出現していたことなどである。これについては、数値モデルのチューニングやパラメタリゼーションスキームの組み合わせ、ネスティング等によって解決可能かどうか検討する必要がある。

6. まとめ

今年度は、2010年7月5日に東京都板橋で発生した豪雨を対象に、レーダデータ解析と領域気象モデルWRFによる数値実験を用いて、発達過程を解析した。この豪雨事例は、3つの海風の収束という、比較的大きなスケールの現象が決め手となっていたために、特別なデータ同化等の手段を用いない数値モデルで再現することができたのではないかと考えられる。また、初期・境界条件として信頼性の高いGPVデータを利用することができた点も大きな要因である。

今後は、降雨予測の数値実験に必要な信頼性の高いGPVデータが入手できるとは限らない発展途上国域の事

例を含めたその他の局地的豪雨事例についても数値実験を行い、さらに発達過程と予測精度についての知見を蓄積していく必要がある。

謝辞: 板橋豪雨の事例研究の実施にあたっては、国土交通省河川局から「XバンドMPレーダ等の観測情報の活用に関する技術開発」の助成を受けている。気象庁のMSM-GPVデータは、京都大学生存圏研究所生存圏データベースからダウンロードした。また東京都所管の板橋区の雨量観測データは東京都土木技術支援・人材育成センターから提供を受けた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 中北英一, 山邊洋之, 山口弘誠: ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究, 水工学論文集, 第54巻, pp. 343-348, 2010
- 2) 下重亮, 仲吉信人, 神田学: 都市要因を考慮した夏季関東における都市型集中豪雨の多事例解析, 水工学論文集, 第54巻, pp. 349-354, 2010.
- 3) 中北英一: 集中豪雨のモニタリングと予測, ながれ, 29, pp. 203-210, 2010.
- 4) Masayuki Maki, Sang-Goon Park, and V.N. Bringi: Effect of natural variations in rain drop size distributions on rain rate estimators of 3 cm wavelength polarimetric radar. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 871-893, 2005.
- 5) 山口弘誠, 中北英一: 偏波気象レーダーを用いた降水粒子タイプ情報のデータ同化手法の開発, 京都大学防災研究所年報, 第52号B, pp. 539-546.
- 6) 川俣石矢, 小司禎教, 瀬古弘, 斉藤和雄: GPSによる水蒸気情報同化手法の高度化, 日本気象学会2010年度春季大会予稿集, pp. 125, 2010.
- 7) Michalakes, J., and others: The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Eds. Walter Zwiefelhofer and George Mozdzynski. World Scientific, 2005, pp 156 - 168, 2005.
- 8) Hiromu Seko, Yoshinori Shoji, and Fumiaki Fujibe: Evolution and airflow structure of a Kanto thunderstorm on 21 July 1999 (the Nerima heavy rainfall event). J. Meteor. Soc. Japan, 85, 455-477, 2007.
- 9) 牛山朋来, 萬矢敦啓, 菅野裕也, 深見和彦: 2010年7月5日に板橋区で発生した局地的豪雨の数値実験, 水工学論文集, 55, S_493-498, 2011年2月

STUDY ON RAINFALL FORECASTING TO COPE WITH FLASH FLOOD

Budgeted : Grants for operating expenses, General account

Research Period : FY2010-2014

Research Team : Hydrologic Engineering Research Team,
Water-related Hazard Research Group

Author : FUKAMI Kazuhiko

KANNO Yuya

USHIYAMA Tomoki

YOROZUYA Atsuhiko

Abstract : Torrential rainfall events often brought flash floods and damages especially in urban area. However, it is still hard to forecast the occurrence of torrential rainfall. In this study we analyzed evolution process of a torrential rainfall event that was occurred at Itabashi, Tokyo, on July 5, 2010, to accumulate knowledge of developing mechanism and possibility of forecast of this type of rainfall. The regional meteorological model, WRF (Weather Research and Forecasting), reproduced the torrential rainfall event fairly well by the use of JMA-MSM (Japan Meteorological Agency-Mesoscale Model) data as initial and boundary conditions. For the development and maintenance of the rainfall, three streams of sea-breezes from Sagami bay/ Tokyo bay/ Kashima Nada played a key role in accumulating moisture and supplying it into the precipitating system. The model reproduced the sea-breezes well, that is why it could reproduce the rainfall well.

Key words : Flash flood, Regional meso-scale meteorological model, WRF-ARM, Itabashi Storm, and X-band MP radar