

1.2 短時間急激増水に対応できる洪水予測に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：深見和彦、佐山敬洋、牛山朋来、
藤岡 奨、建部祐哉

【要旨】

発展途上国における短時間急激増水に対する洪水予測を実現するため、本研究では全球数値気象予報モデルの物理的ダウンスケーリングを実施することで降雨の時空間分布を把握し、その情報をもとに降雨流出氾濫モデル（以下、RRI モデル）を用いて河川の流出や氾濫形態までを一体的に予測する検討を進めている。本年度は、観測データを同化することで予測精度を向上させると同時に、アンサンブルで予測の信頼性を評価するアンサンブルカルマンフィルターの領域気象モデルへの導入について研究を開始した。また、RRI モデルの開発については、蒸発散の影響を考慮しながら RRI モデルを長期連続的に実行するためのモデル改良とその計算精度を検証した。キーワード：洪水予測、物理的ダウンスケーリング、WRF モデル、RRI モデル、チャオプラヤ川

1. はじめに

近年、局地的豪雨の発生に伴う洪水被害が国内外で頻発している。2010 年に発生したパキスタン洪水のように、気象水文情報の乏しい地域において、短時間急激増水が発生すると多数の死者を伴う甚大な被害が発生する。発展途上国における短時間急激増水に対応する住民避難や河川施設の運用を通じた洪水被害の軽減を実現するために、限られた時間で降雨の時空間分布を予測・把握し、その情報をもとに河川の流出や氾濫形態までを一体的に予測することが求められている。

本研究では、短時間急激増水の短時間予測を最終の目標とし、全球数値気象予報モデルの物理的ダウンスケーリング手法と、流出氾濫の一体解析手法について研究する。

上記の目標を達成するため、昨年度は、パキスタン・カブール川の 2010 年洪水、インドネシア・ソロ川の 2007 年洪水を対象として、数値気象予報モデルのダウンスケーリングを実施し、その再現性を確認した。カブール川においては、タイムラグアンサンブルによって流出氾濫を予測することで、不確実性情報を含めた洪水予測が可能で、ダウンスケーリング前の全球モデルの予測結果に比べて、河川流量・洪水氾濫の精度が向上することを示した。さらに、2011 年に発生したタイ洪水に対して緊急対応として降雨流出氾濫モデルを用いた洪水予測を実施し、その後の現地調査の結果と比較しながら予測精度の

検証を実施した。

カブール川の事例で領域気象モデルによるダウンスケールの効果が示された一方、インドネシアをはじめとする熱帯域を対象にした場合には、予測雨量の精度が低下することが分かった。また RRI モデルの開発については、イベントベースの流出氾濫予測は実現可能となってきたものの、特に乾燥地域においてはその初期値をどのように設定するかが問題となり、本研究の最終目標を達成するうえでは、蒸発散を考慮しながら長期連続的に RRI モデルを実行することが望ましいことが分かった。

このような背景のもと、本年度はアンサンブルカルマンフィルターを応用した物理的ダウンスケールの研究と、RRI モデルによる長期連続計算のための改良およびその精度検証を実施した。前者の検討にあたっては、まず同化するデータの入手が容易な国内のダム流域(京都府日吉ダム流域)を対象にした検討を開始した。

2. アンサンブルカルマンフィルターを用いた降雨流出予測実験

2.1 方法

本研究では、一般的なワークステーションでも計算を可能にするため、領域を限定した領域アンサンブル予報を行った。アンサンブル予報の手法として、

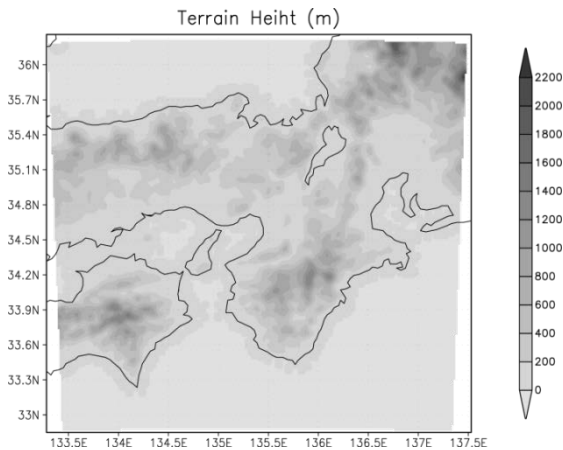


図-1 モデル計算領域。影は標高(m)を表わす

アンサンブルカルマンフィルターを用いた。これは、データ同化とアンサンブル予報を結合させた手法であり、同時に両方の目的が達せられる^{1),2)}。得られた予測雨量は流出モデルに導入し、信頼性情報を加味した洪水管理等に役立てる³⁾ことを目的としている。解析対象として、2011年に紀伊半島で大きな被害をもたらした台風第12号と台風第15号を用いた。そして、領域アンサンブル予報結果を地上観測やレーダ観測と比較し、さらに予報流量を観測値と比較することにより、予測の精度や有効性について議論を行う。

カルマンフィルターは、モデル内の予報誤差と観測誤差から適切な重みを求め、予報値と観測値から解析値を推定することを目的としたデータ同化手法である。大気力学系では予報誤差の情報が膨大過ぎるため計算機で解くことができない。そこで、アンサンブルカルマンフィルターでは、限られたメンバー数によるアンサンブル予報から予報誤差の情報を推定することにより、カルマンフィルターを適用する。本研究で用いたアンサンブルカルマンフィルターは、三好らによって開発された局所アンサンブル変換カルマンフィルター(Local Ensemble Transform Kalman Filter; LETKF)^{4),5)}である。この手法は、アンサンブルカルマンフィルターを並列計算に適した構造に改変し、さらに同化する観測データ密度に応じた安定化係数(誤差共分散膨張係数)を自動的に与えるなどの最新の機能を持つ。

また、用いた領域気象予報モデルは、米国で開発され、これまでに多くの実績を持つWRF(Weather Research and Forecasting) ver. 3.4である。同化したデータは、米国NCEP(National Centers for Environmental Prediction)で保存されている(PREPBUFRと呼ばれ

表-1 WRFモデル設定

格子数	126×126×40
水平格子間隔	3km
計算時間1	2011年8月31日12時～4日9時
計算時間2	2011年9月20日0時～21日9時
初期、境界条件	気象庁MSM、1部NCEP gfs4を流用
雲物理過程	Linスキーム(氷相を含む)
境界層過程	MYNN2.5スキーム
土地利用分布	USGS 30秒間隔

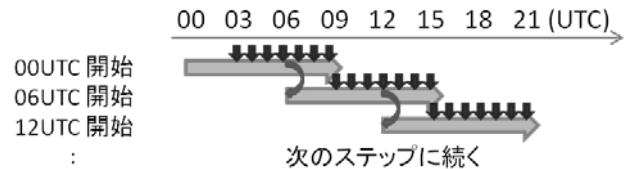


図-2 LETKFの計算進行の概念図

る)1時間毎の地上海上観測、ラジオゾンデ(風、気温、比湿)、衛星追尾風(風)、および気象台測候所32か所(風、気温)の1時間毎瞬間値である。データ数は6時間分で東西風・南北風・気温は1000～5000個前後、比湿は10個程度である。これらは、インターネット上から自由に取得することができる。

計算領域として、図-1のように紀伊半島南海上を含む375km四方の領域を設定した。格子間隔は3kmである。計算設定は、気象庁領域予報モデルMSM(計算格子間隔5km)を境界条件とする一重の計算領域とした。アンサンブルスプレッドを維持するため、別に計算した15km格子モデルによるアンサンブル予報から求めた摂動を側面境界に3時間毎に加えた。その他のモデル設定を表-1に示す。なお、50hPa面や土壌水分などのMSMに含まれていない情報をNCEP gfs4(global forecast system version 4)から流用した。

次に、LETKFによる計算の進め方を図-2に示す。右向き太い矢印がWRFによるアンサンブル予報を表わす。1回の予報サイクルは9時間で、メンバー数は21とした。WRFによる9時間予報が終了した後、縦の小さな矢印で示された1時間毎の観測データを後半6時間の予報値に同化するLETKF計算を行い、この6時間の中央時刻における解析値(21メンバー)を得る。得られた解析値は次のアンサンブル予報サイクルの初期値として用られ(下向きの曲線矢印)、再び21メンバーの9時間予報を行う。以下、6時間毎に同じ操作を繰り返す。

なお、後の議論に用いられる予測降水量は、各9時間予報の後半6時間分を用いた。従って今回の予報実

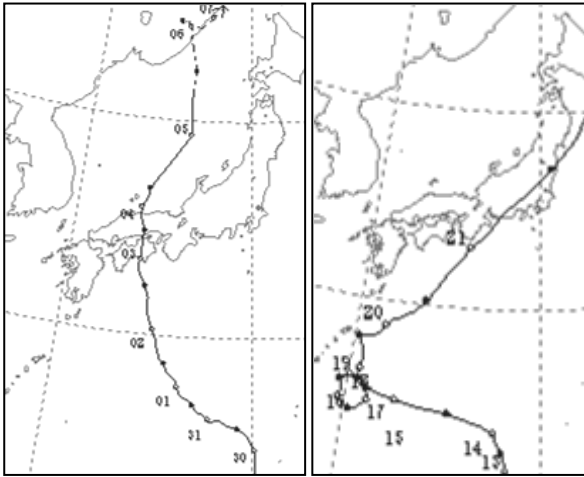


図-3 台風第12号(左)と台風第15号(右)の気象庁ベストトラック。数字は日付を表わし、白丸は00UTC、黒丸は12UTCの位置

験は、一続きの予報ではなく、6時間毎の予報・解析サイクルの各時点における予報値を集めた最善の結果である。予報リードタイムは各サイクルで最大9時間であるが、将来長時間予報が必要となった場合には、各サイクルの解析値から長時間積分を行うことで長時間予報を行うことができる。

また、最初の時刻(図-2では00時)の初期値は、別の方法で用意する。この時点の初期値は、それぞれ適当なスプレッド(アンサンブルメンバーばらつき)を持ち、それらがLETKF処理を繰り返すことにより適切なスプレッドを持つアンサンブル予報値となる。最初の初期値は、適当なスプレッドを持ち、しかも計算不安定が起こらないものである必要がある。そこで、異なる日付の同じ時刻を初期値とし、共通の境界条件を用いて2日間スピナップを行った予報値を初期値として用いた。

なお、アンサンブル予報の効果を検証するため、アンサンブルを用いない決定論的予報も行った。これは、同じモデル設定で、アンサンブル予報に使用したものと同様のMSMの境界条件を与えた。

最後に、これらの予報実験で得られた雨量分布を用いて流出計算を行った。対象流域は琵琶湖の西に位置する日吉ダム流域(流域面積320km²)である。用いたモデルは、京都大学で開発されたセル分布型モデルである⁶⁾。これを、レーダー雨量を用いて観測流量と合うようにキャリブレーションを行ったうえで、計算に使用した。流出計算には、洪水予報の現状をふまえ、LETKFの6時間毎の予報サイクルに応じて更新された6時間先までの予報雨量と、その時点以前のレーダー

データを用いた。つまり、その時点における最も信頼できる雨量情報を使って、6時間毎に流出予測を繰り返す、という方法を採用した。なお、決定論的予報については、すべて予報雨量を用いて流出計算を行った。

2.2 台風第12号と台風第15号の特徴

台風201112号と201115号は、ともに関西付近を通過した(図-3)。12号は非常にゆっくりと四国から中国地方を縦断したため、紀伊半島を中心に多大な降水をもたらした、

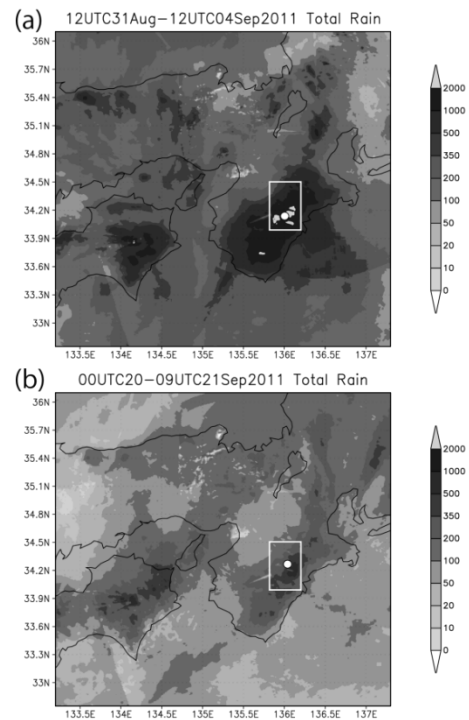


図-4 国交省Cバンドレーダによる台風第12号(a)と台風第15号(b)に伴う解析期間総降水量(mm)。図中の四角は領域平均を行った範囲で、その中の白丸は(a)上北山と(b)宮川のアメダス地点

奈良県上北山観測点の雨量は8月31日から9月4日までの雨量は1812mmと、9月の月間降水量の4倍以上となった(図-4)。それによる土砂災害、浸水、河川氾濫等により和歌山奈良三重などで死者78名、行方不明者16名となる大災害となった⁷⁾。

また、台風第15号は台風第12号で被害を受けた直後に襲来し、紀伊半島南海上を通過した21日00UTCには中心気圧が950hPaとなる強い勢力を保持していた。この台風は南大東島の西海上にしばらく留まり(図-3)、湿った空気を本州南岸に供給したこ

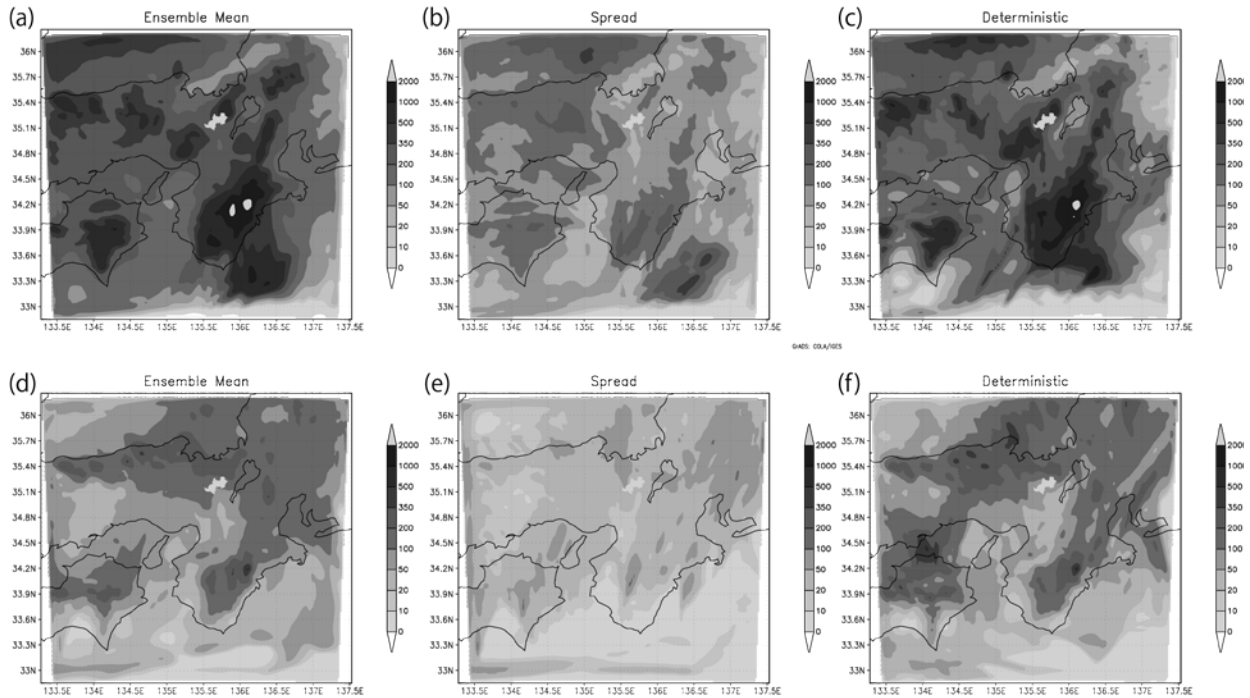


図-5 予測雨量のアンサンブル平均(a), (d), アンサンブルスプレッド(b), (e), および決定論的予報(c), (f)の分布。上段が台風第12号, 下段が台風第15号のものである。琵琶湖の西側の薄い色のひょうたん型領域は日吉ダム流域である。

とから、九州四国南部を中心に1000mmを越える降水量をもたらし、紀伊半島でも三重県大台町宮川で794mmに達した。しかし、本州南岸に近づいた21日以降は比較的速い速度で進み、静岡県に上陸し福島県沖に抜けるまで関東から東北地方を縦断した。

このように二つの台風は社会的にも大きな影響を与えた台風であった。台風第12号の全国での死者行方不明者は94名であり⁷⁾、2004年10月の台風第23号(98名)以来の多さであった。その多くは大雨による土砂災害が原因であり、降水量の予測検証を行う対象として適当なものだと言える。

2.3 結果

最初に数値予報による積算降水量分布を図-5に示す。図-5aの台風第12号雨量のアンサンブル平均は、図-4aの観測値と比較すると、紀伊半島から鈴鹿山脈にかけての降水域は、分布・量ともによく一致していた。しかし、琵琶湖の西側に位置する日吉ダム流域ではやや多めの予報値となった。また、日本海から鳥取県にかけての降水量が過大評価となっていた。四国東部の降水域は、分布は良く再現したが、やや過小評価していた。一方、観測には現れていた淡路島周辺の降水が予報されなかったのに対し、兵庫県東部には観測に無い雨域が現れた。これらの

についてはアンサンブル平均と決定論的予報には大きな違いはなかったが、台風第15号についてはアンサンブル平均が降雨域の再現のいくつかの点で勝っていたと言える。

次に、図-6に2つの台風について最大地上降水量を観測したアメダス地点の降水量と、アンサンブル予報および決定論的予報による予測雨量を示す。図-6aの台風第12号の事例では、8月31日には雨が降り始めており、9月2日と3日は30mm/h前後の雨が終始降り続いていた。予測時間雨量は、いずれの場合も1日15時まで過小評価していたが、1日21時から3日15時までには観測降雨を良く表現した。しかし、3日15時から4日0時まで予報雨量は観測を大幅に過大評価していた。

図-6bの台風第15号の場合も予報降水量は観測変動を良く表わしていたが、終始過小評価となった。また、この場合ではアンサンブル予報は決定論的予報よりも過小評価傾向が大きかった。以上のことから、地点予報値については、アンサンブル予報・決定論的予報ともに雨の変動を表現できていたものの、十分な精度があるとは言えなかった。

次に、図-7に、図-4で示した領域平均雨量の国交省Cバンドレーダ観測値と予報値を示す。領域の大きさは約30km×60kmである。領域平均雨量に関し

でも予測雨量は観測雨量変動をよく再現していた。また、地点雨量の予測に比べて領域平均雨量予測は観測値に近く、予測精度が高かった。例えば、**図-7a**の台風第12号の場合、3日前半までの予測雨量は観測雨量に対する追随性が良く、3日後半の過大評価傾向も小さかった。**図-7b**の台風第15号の場合も、地点雨量の場合に比べて予報値は観測値により近かった。このように、地点雨量に対しては雨量予測は困難であるものの、領域平均雨量では比較的高い精度で予測できることが示唆された。

続いて**図-8**に、日吉ダム流域の積算雨量変動を示す。この流域では、台風第12号、15号ともにアンサンブル予報の精度が決定論的予報を上回っていた。特に台風第15号の場合、25%程度過小評価していた決定論的予報に対して、アンサンブル予報は観測とほぼ同じ積算雨量を予報した。しかしながら、台風第12号の場合はアンサンブル予報・決定論的予報ともに2倍近い過大評価となった。これは、**図-5**に示したように、ちょうどこの地域が予報精度の悪い部分に位置していたことを反映している。

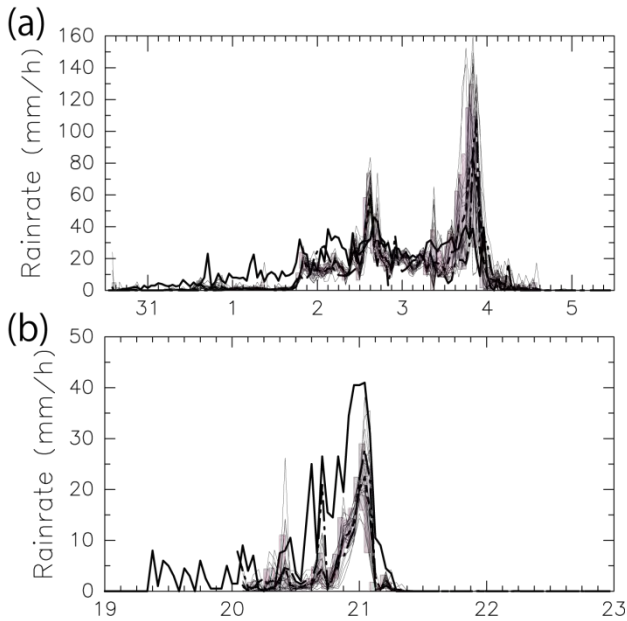


図-6 アメダス奈良県上北山(a)および三重県宮川観測点(b)における1時間雨量。アメダス観測値(太実線)、アンサンブル平均(太破線)、決定論的予報(太一点鎖線)、各アンサンブルメンバー(細実線)。灰色領域はアンサンブル平均±スプレッド。(a)台風第12号、(b)台風第15号。

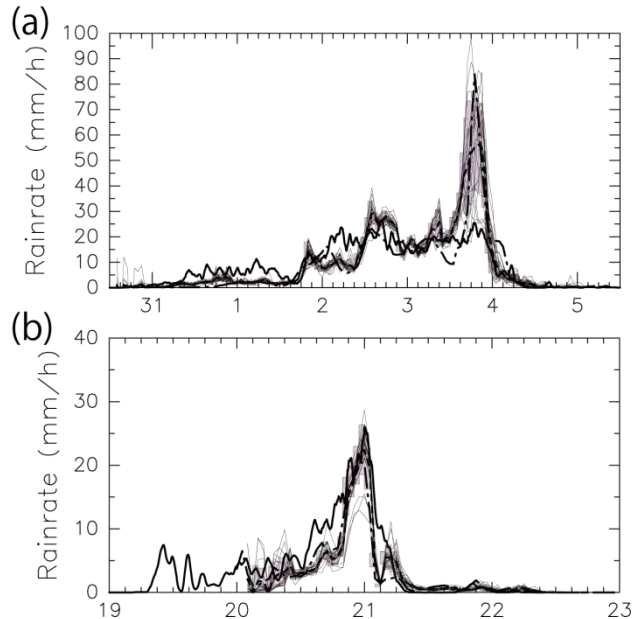


図-7 紀伊半島南部山地の領域平均平均降水強度。国交省Cバンドレーダ(太実線)、アンサンブル予報平均(太破線)、決定論的予報(太一点鎖線)、各アンサンブルメンバー(細実線)。(a)台風第12号、(b)台風第15号。

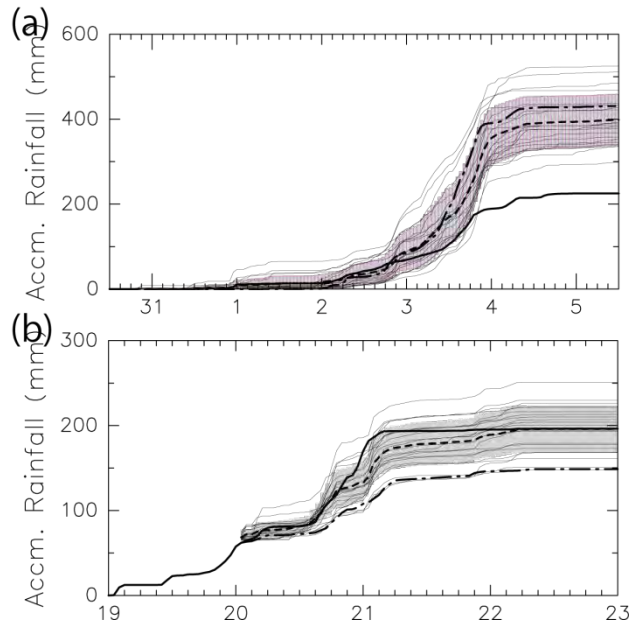


図-8 日吉ダム流域の積算雨量。国交省Cバンドレーダ(太実線)、アンサンブル平均(太破線)、決定論的予報(太一点鎖線)、各アンサンブルメンバー(細実線)。(a)台風第12号、(b)台風第15号。棒グラフと赤実線は観測による降水強度と積算雨量で、水色の線が予測時間雨量と積算雨量。

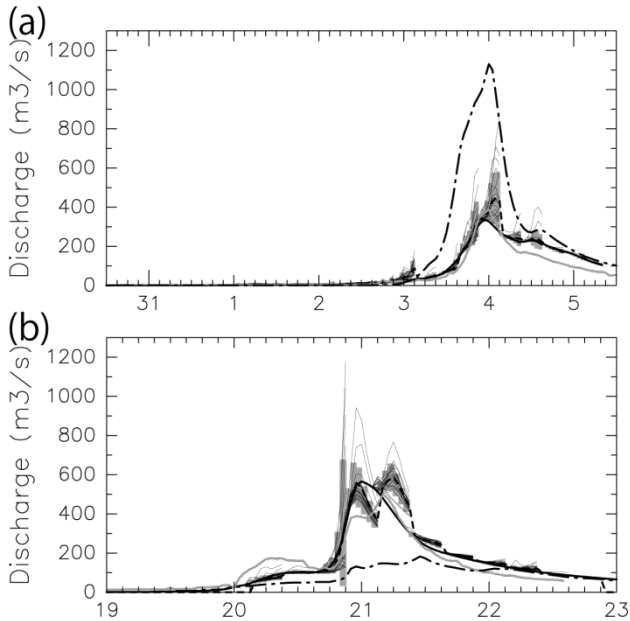


図-9 日吉ダム流域流量。国交省Cバンドレーダ(太実線)、アンサンブル予報平均(太破線)、決定論的予報(太一点鎖線)、各アンサンブルメンバー(細実線)、観測流量(太灰色実線)。(a)台風第12号、(b)台風第15号。

続いて図-9に、これらの予報およびレーダー観測による雨量分布を用いて流出計算を行った結果を示す。台風第12号の例では、それまで無降雨期間が長かったため、2日の降雨開始から流出が増えるまでタイムラグがあり、総降水量に対する流出量も小さ目であった。台風第15号の例ではこの直前の9月16、17日にも降水があったため、流出量は多めとなった。

予報流出量は、台風第12号の例では予報雨量が過大であったためアンサンブル流量予測も過大傾向となり、特に3日後半から4日前半にかけて過大となった。また、すべて予報雨量を用いた決定論的予報による流量予測も観測の3倍にも達した。しかし、4日以降はアンサンブル降水予報は観測に近く、また予報は雨の終息を正しく予測できていたため、4日3時以降はアンサンブル予測流量がレーダーから求めた流量付近に散らばるといった理想的な予報結果となった。

台風第15号の例ではアンサンブル流量予測は観測に近いものであった。流量の極大の21日0時付近ではアンサンブル流量予測はやや過小評価傾向にあり、その次の21日3時から9時については過大評価傾向にあった。これらのずれは、図-8bに現れているように、22日21時頃に観測された強い降雨が予報では4時間程度遅れて予報されたためと考えられる。

しかし、アンサンブル流出予測は、レーダー観測による流出変動を概ね予測できていた。さらに、アンサンブル予報は決定論的予報の大幅な過小評価傾向を修正することができた。

2.4 議論

これまで示してきた領域アンサンブル予報は、予報対象領域の場所や大きさにより精度がまちまちであり、雨の予報精度については課題が残った。しかしながら、予報雨量とレーダー観測雨量を組み合わせ用いた流出予測は、未来の流量変動を知る上で有用な情報だと考えられた。このような情報があれば、数時間先までの流量変動について、変動幅も合わせて予測することが可能となる。

今回の領域アンサンブル予報では、一般的なワークステーションでも計算を可能にするため、計算領域を限定して実験を行った。そのため、側面境界の影響をより敏感に受けたと考えられる。当初、側面境界摂動を導入しない予報実験を行った時には、時間とともにすべてのアンサンブルが同じ結果に収束し、アンサンブルスプレッドがゼロに近くなった。今回側面境界に摂動を導入した結果、アンサンブルスプレッドは維持され、データ同化の効果を持続させることができた。しかし、側面境界摂動の性質は結果に大きく影響する要素なので、今後も調査が必要である。

その他予報結果に影響する要素として、モデル解像度、モデル領域の大きさ、同化データの種類や密度等があげられる。これらの要素を向上させることで、予報精度を改善することが期待できる。その反面、計算機資源と予報精度の折り合いも考慮すべきである。今後これらの要素について数多くの検証を行う必要がある。

3. RRIモデルによる長期連続の降雨流出氾濫解析

本研究のもう一つの柱は、降雨を入力して河川流量から洪水氾濫までを一体的かつ迅速に解析する降雨流出氾濫モデル(RRIモデル)の開発である。昨年度は、タイ・チャオプラヤ川流域における大規模洪水を対象にして、RRIモデルを用いた緊急対応の予測シミュレーションを実施し、同洪水がピークを迎える2011年10月中旬の時点で、11月末までアユタヤ周辺の氾濫が継続することを示した。また、その後の現地調査によって、その予測が概ね妥当であったことを確認するとともに、より詳細な入力情報を反

映したシミュレーションを実施し、河川流量・水位・氾濫域・浸水位の観点から多角的に検証した⁸⁾。

RRIモデルの一つの特徴は、限られた情報をもとに流域スケールで洪水氾濫を予測できる点にあると考えられるが、本研究の最終目標である短時間急激増水を対象にした洪水予測を考えた場合には、同モデルを連続的に実行し、予測降雨を入力しながら河川の流量や氾濫を予測し続けることが大切となる。そのためは、これまでイベントベースのモデルとして開発を進めてきたRRIモデルを、長期連続のモデルに改良していく必要がある。

以上の背景より、本研究では、チャオプラヤ川全流域を対象にした長期の降雨流出氾濫解析を行う。RRIモデルの外力として、大気陸面モデル(LSM)によって推定された実蒸発散量と観測降雨を入力し1980年から2004年までの連続計算を実施する。研究の手順として、まず2011年の洪水を対象に同定したパラメータ³⁾を用いて連続計算し、そこで明らかになるモデルの問題点を改良する⁹⁾。

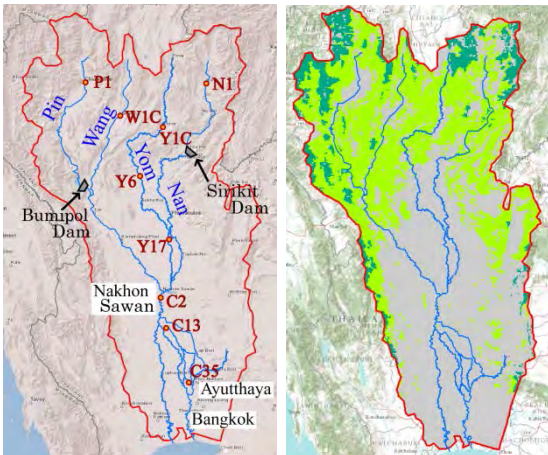


図-10 チャオプラヤ川流域図(左)と土地分類図(右)

3.1 降雨流出氾濫モデル

図-11に示すように、降雨流出氾濫モデル(RRIモデル)は対象とする流域を斜面部と河道部とに分けて取り扱う。斜面部は一樣な大きさのグリッドセルに分割する。河道グリッドセルにおいては、一つのグリッドセルに河道と斜面の両方が存在することを仮定する。河道はグリッドセルの中央を流れるベクトルとして表現し、上流・下流における河道の接続情報を持つ。降雨は斜面部にのみ入力し、斜面部・河道部でそれぞれ水の挙動を追跡した後に、適当な時間刻みで斜面部と河道部との水のやり取りを計算

する。

RRIモデルの3つの特徴として、①二次元の拡散波近似解析、②側方地中流、鉛直浸透流の反映、③河道と斜面のインタラクションなどが挙げられる。RRIモデルの詳細なアルゴリズムや基礎式については既往文献⁸⁾、¹⁰⁾を参照されたい。

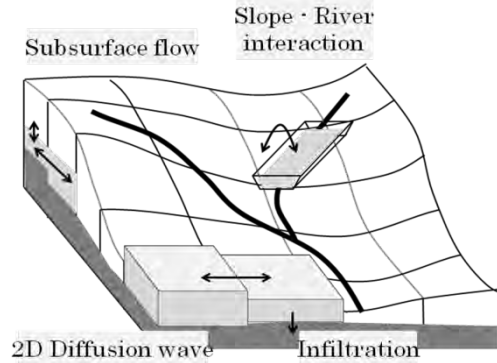


図-11 降雨流出氾濫モデルの構成

3.2 既往モデルによる長期解析

(1) 計算条件

チャオプラヤ川全流域を対象にした長期の降雨流出氾濫解析を行うにあたり、標高、流下方向、集水面積データをHydroSHEDSから抽出し、60sec格子で整備した。図-10右に示す山地森林域には、中間流・表面流モデルの流量流積関係式¹¹⁾を適用した。

$$q_x = \begin{cases} -kh \frac{\partial H}{\partial x}, & (h \leq d) \\ -\frac{1}{n} (h-d)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right] - k(h-d) \frac{\partial H}{\partial x}, & (d < h) \end{cases}$$

ここに、 q_x はx方向の流量フラックス、 h は水深、 H は基準面からの水位、 k は側方の飽和透水係数、 d は土層厚×有効空隙率、 n は粗度係数である。図-1に示す平地部においては、鉛直方向の浸透による損失が重要であると考え、Green-Amptモデルを適用した。

計算期間は1980年から2004年とした。RRIモデルの入力情報となる降雨は、小槻ら¹²⁾が、大気陸面モデルであるSiBUCモデル¹³⁾をチャオプラヤ川全流域で実行する際に整備した地上観測雨量のデータセットを利用した。また、蒸発散についてはSiBUCの実蒸発散量の推定値を利用し、RRIモデル上の各グリッドに存在する水分量を差し引いた。

表-2 計算条件一覧表

計算期間	1980年～2004年	
計算時間間隔	河道：60sec, 斜面：600secを最大とし、 数値誤差に応じて時間間隔を自動調整	
計算格子間隔	60sec (1,776×1,844m)	
入力降水量	SiBUCモデル雨量	
蒸発散量	SiBUCモデル蒸発量	
ダム	ダム考慮なし	
下流端境界条件	動水勾配=河床勾配として設定	
河道断面	断面情報をもとに設定	
パラメータ	山地	平野
n [$m^{-1/3}s$]	0.35	0.35
n_{river} [$m^{-1/3}s$]	0.03	0.03
d [m]	0.3	-
k [m/s]	0.1	-
k_v [cm/h]	-	0.06
ϕ	-	0.475
S_f	-	0.316
F_{limi} [m]	-	0.4

※ n (n_{river}) : 斜面 (河道) の粗度係数
 ※ k_v , ϕ , S_f は Green Ampt モデルのパラメータであり、
 上記の値は Clay に相当。 F_{limi} : 積算鉛直浸透量の最大値。

Green-Ampt モデルを適用した平地部においては、
 実蒸発散量に見合うだけの水分量が不足する場合、
 同式の積算浸透量から蒸発散分を差し引いた。2011
 年の洪水を対象に同定したパラメータを表-2 に示
 す。なお、2011年のタイ洪水の再現計算ではブミ
 ポンダムとシリキットダムについて簡単なダムモ
 デルを導入しているが、本研究では長期流出計算の
 再現精度を検証することが目的であることからダム
 モデルは用いない。ダムの影響を受けるナコンサ
 ワン地点は、観測流量からダムの影響を差し引いた
 ダム戻し流量を計算結果と比較した。なお、本研
 究では既

往モデルによる長期解析を Case. 1、後述する山地
 土壌の不飽和層を考慮した長期解析を Case. 2 と
 する。

各流量観測地点における観測流量と RRI モ
 デルの計算流量の年平均値の比較を図-12 に示
 す。同図の赤線は観測流量を示し、緑線が Case. 1
 の計算流量を示す。青線である Case. 2 の条件と
 評価については後述する。C2、Sirikit、Bumipol
 地点の観測流量はダムの影響を考慮して、ダム
 戻し後の流量を示している。同図より、Case. 1
 についてみると、P1、C2、Y6、Bumipol 地点
 における年平均流量は、観測流量の約 140~240%
 程度と過大に評価している。一方、N1 地点は約
 75%程度と過小評価、Sirikit 地点は約 105%
 程度であった。

同様に、各流量観測地点における観測流量と
 RRI モデルの計算流量の月平均値の比較を図-13
 に示す。年平均流量と同様、N1、Sirikit 地点
 以外の地点ではピーク月平均流量を過大に評価
 している。この原因を調べるために、1995年にお
 ける降雨量と蒸発量の流域平均値を算定した。
 1995年は1980年から2004年において、C2
 地点の最大流量を記録した年である。蒸発散量
 の算定の結果、乾季である11月から4月にか
 けて、RRI モデルで計算されている実蒸発散量
 は、モデル外力として与えている SiBUC の実蒸
 発散量よりも約 1mm/day 程度ほど小さい値と
 なっていることが分かった。この原因として、雨
 季に降った降雨が過大に流出し、乾季には蒸発
 すべき水が流域内に存在していないことが考え
 られた。

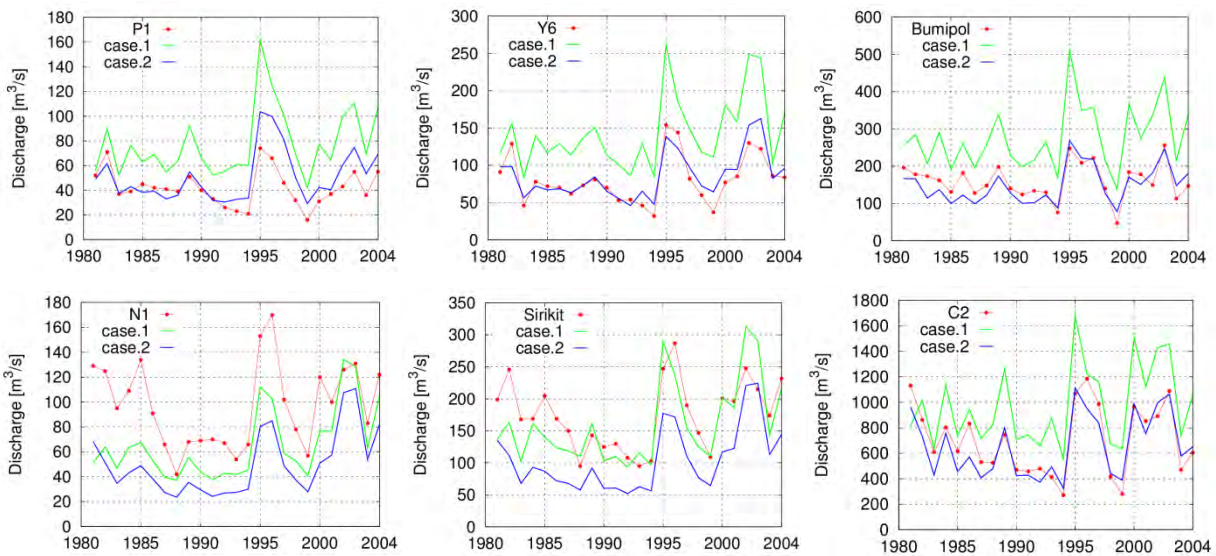


図-12 各観測地点における年平均流量比較図

図-13 各観測地点における月平均流量比較図

また、土壌中の水分量が不足する空間的な位置は山地森林域に集中していた。よって、山地森林域の土壌中により多くの水分量を保持させる必要がある。以上から、山地森林域の流量流積関係式とその流域パラメータを変更することを試行した。

3.3 山地土壌の不飽和層を考慮した長期解析

ここでは山地森林域の不飽和層を考慮した長期解析を実施する。(1)式で示した表面流・中間流の流量流積関係式を、飽和・不飽和流れを反映する以下の式¹⁴⁾に変更した。

$$q_x = \begin{cases} -k_c \frac{\partial H}{\partial x} d_c \left(\frac{h}{d_c} \right)^\beta, & (0 \leq h \leq d_c) \\ -k_c \frac{\partial H}{\partial x} d_c - k_a \frac{\partial H}{\partial x} (h - d_c), & (d_c \leq h \leq d_a) \\ -k_c \frac{\partial H}{\partial x} d_c - k_a \frac{\partial H}{\partial x} (h - d_c) \\ - \frac{\sqrt{\frac{\partial H}{\partial x}}}{n} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) (h - d_a)^{5/3}, & (d_a < h) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 β は k_a / k_c であり、 k_a は大空隙部の飽和透水係数、 k_c はマトリクス部の飽和透水係数である。また、 d_a は土壌中の最大水分量に対応する水深高さ、 d_c はマトリクス部の最大水分量に対応する水深高さである。設定した流域パラメータを表-3に示す。ここでは、山地土壌中に水分量を保持させるため、主に土層厚を大きく設定した。このように、山地森林域の不飽和層を考慮した場合のケースをCase. 2として検討した。

表-3 流域パラメータ

パラメータ	山地
n [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$]	0.35
n_{river} [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$]	0.03
d_c [m]	1.5
d_a [m]	3.0
k_a [m/s]	0.01
β	8.0

計算結果として、まず蒸発散量の結果を確認したところ、RRIモデルで計算されている実蒸発散量は、モデル外力として与えているSiBUCの実蒸発散量にほぼ等しくなっていた。つまり、土壌中の水分量を保持することにより、SiBUCが推定した蒸発散量

を RRI モデルから適切に差し引くことができた。

次に、各観測地点における月平均流量の再現性を確認する (図-13)。N1 地点、Sirikit 地点を除く地点において、観測流量を概ね再現できているといえる。また、月平均流量ハイドログラフの再現性を評価する指標として、Nash-Sutcliffe 指標を算出した。Case. 1 の場合、Nash 指標は総じて低いことが分かる。しかし、Case. 2 では多くの地点においてモデル精度の向上が見られた。精度が向上しなかった N1、Sirikit 地点は、ともにナン川流域であるため、ナン川流域の特殊性 (土層厚が他流域と異なる、あるいは地上雨量観測所の観測密度が小さい等) の存在が考えられる。

次に、ピーク月における月平均流量に着目し、観測流量をx軸に計算流量をy軸にプロットした (図-14)。同図には図-12、図-13 で示した地点を含み計9地点の観測所における計算結果をまとめている。同図より、Case. 1 に比して、Case. 2 はピーク月における月平均流量でも観測流量と良い対応を示すことが見てとれる。また、これらのRMSEを算出すると、Case. 1 が $452\text{m}^3/\text{s}$ 、Case. 2 が $189\text{m}^3/\text{s}$ であり Case. 2 の精度向上を確認できた。

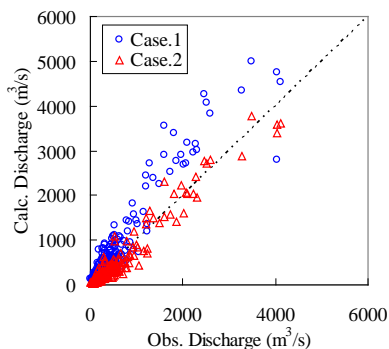


図-14 毎年のピーク月における月平均流量比較

4. 結論

本研究は、発展途上国における降雨の時空間分布を予測・把握し、その情報をもとに降雨流出から洪水氾濫までを一体的に予測することを最終的な目標としている。昨年度までの検討で、領域気象モデルによるダウンスケールの効果が示された一方、インドネシアなどの熱帯域を対象とした場合には、予測雨量の精度が必ずしも十分でないことが分かった。また RRI モデルについては、出水時のイベント解析は可能になってきたものの、本研究の最終的な目標のためには、長期連続的に RRI モデルを実行するこ

この重要性が明らかになってきた。そのため、今年度はアンサンブルカルマンフィルタの導入による数値気象予測の精度向上と、RRI モデルによる連続計算に向けたモデル改良・精度検証を行った。以下に今年度に得られた結論をまとめる。

局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を WRF モデルに適用してアンサンブル予報を行い、台風 201112 号および 201115 号による紀伊半島の降水の再現を試みた。最大降水量を記録した地点雨量については予測降水量は信頼性が低かったものの、最大降水地点を含む領域平均予測雨量は精度が向上した。しかし、流出計算の対象である日吉ダム流域に対しては、台風第 15 号の場合に理想的な予報結果が得られたものの、台風第 12 号の事例では大幅に過大評価となった。これらの雨量を用いたアンサンブル流出予報は、未来の流量を知る上で有用な情報を提供できると考えられるが、さらに多くの改善が必要である。

タイ・チャオプラヤ川流域に RRI モデルを適用し、長期連続の流出氾濫解析を実行した。2011 年の洪水再現パラメータを用いて解析を行った結果、乾季における土壌水分量が足りないことが原因で、実蒸発散量が過小に見積もられることが分かった。その結果、多くの地点で流量が過大に評価された。

乾季における土壌水分量を RRI モデル上で確保するため、飽和・不飽和流れを考慮したモデルを山地森林域に適用した。これにより、乾季の蒸発散量は大気陸面モデルが推定した値と一致し、年流量や月流量の計算結果が観測結果をよく再現できることが分かった。今年度の検討を通して、RRI モデルは長期にわたる連続計算にも適用できることが分かった。

今年度は WRF による気象予測と、RRI による降雨流出氾濫予測の研究をそれぞれ進展させた。両者の研究をさらに深化させて統合することにより、本研究の最終目標である短時間急激増水に対応した降雨・流出・氾濫の一連の予測が可能となる。

参考文献

- 1) Cloke, H. L., and F. Pappenberge: Ensemble flood forecasting: A review. *J. Hydrol.*, 375, pp.613-626, 2009.
- 2) Cuo, L., T. C. Pagano, and Q. J. Wang: A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short- to medium-range streamflow forecasting. *J. Hydrometeorol.* 12, pp.713-728, 2011.
- 3) 三石真也, 角哲也, 尾関敏久: WRFによる降雨予測を活用し

たダム操作に関する検討,ダム工学,20,pp.94-104, 2010.

- 4) Miyoshi, T., and M. Kunii: The local ensemble transform Kalman filter with the weather research and forecasting model: experiments with real observation. *Pure Appl. Geophys.* DOI 10.1007/s00024-011-0373-4, 2011.
- 5) Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, 230, 112-126, 2007.
- 6) 児島利治,宝 馨,岡 太郎,千歳知礼 : ラスター型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響,水工学論文集,第42巻,pp. 157-162.
- 7) 気象庁 : 災害時気象速報,平成23年台風第12号による8月30日から9月5日にかけての大雨と防風, http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2011.html.
- 8) 佐山敬洋,建部祐哉,藤岡 奨,牛山朋来,萬矢敦啓,田中茂信, 2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 69, No. 1, p. 14-29, 2013.
- 9) 建部祐哉・佐山敬洋・牛山朋来・藤岡 奨・田中茂信 : チャオプラヤ川流域における長期降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 69, No. 4, I_457-I_462, 2013.
- 10) Takahiro Sayama, Go Ozawa, Takahiro Kawakami, Seishi Nabesaka, Kazuhiko Fukami, Rainfall-Runoff- Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), DOI:10.1080/02626667.2011.644245, pp. 298-312, 2012.2.
- 11) 高埴琢馬・椎葉充晴: Kinematic Wave 法への集水効果の導入, 京都大学防災研究所年報, 第24号, B-2, pp.159-170, 1981.
- 12) 小槻峻司,田中賢治,小尻利治,浜口俊雄: 灌漑を考慮した陸域水循環モデルの構築, 水工学論文集,第55巻, pp. 553-558, 2011.
- 13) 田中賢治,池淵周一 : 都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用,京都防災研究所, 第37号,B-2,1994.
- 14) 立川康人,永谷 言, 宝 馨 : 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発,水工学論文集,第48巻,pp. 7-12,2004.

Study on Flood Prediction Applicable to Flash Floods

Budgeted : Grants for operating expenses (General Account)

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Water-related Hazard research Group

Author : Kazuhiko Fukami,

Takahiro Sayama

Motoki Ushiyama

Susumu Fujioka

Yuya Tatebe

This project investigates the physical downscaling of a global scale weather prediction using a meso-scale weather model, particularly WRF model, and rainfall-runoff-inundation predictions with RRI model for providing useful information for short-term flood predictions including flash flooding in developing countries. In this progress report, we present the application of Ensemble Kalman Filter (EnKF), in particular Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF), to the WRF model for improving weather prediction and quantify its reliability. In terms of the RRI Model development, we tested the model ability for continuous rainfall-runoff-inundation simulation incorporating evapotranspiration effects and updated the model to improve the prediction accuracy.

Key words: Flood prediction, physical downscaling, WRF model, RRI model, Chao Phraya River