1.5.　アジアにおける水災害リスク評価と適応策情報の創生

課題代表者：田中　茂信
（土木研究所　水災害・リスクマネジメント国際センター　水災害研究グループ長）

（土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター）田中茂信・竹内邦良・深見和彦・岡積敏雄・上野山智也・佐山敬洋・萬矢敦啓・鍋坂誠志・廣江亜紀子・牛山朋來・郭　栄珠・上米良秀行・杉浦　愛・長谷川聡・宮本　守・E.D.P Perera・Maksym Gusyev・Shrestha　Badri Bhakta
（山梨大学　大学院医学工学総合研究部）馬籠　純

a.　要約

洪水や渇水といった水災害リスクが気候変動によってどの程度変化するのかを、いくつかの特定脆弱地域（河川流域）において、不確実性を含めて定量的に予測し、かつ、それに伴う社会経済影響を評価することを目的とする。平成 24 年度は、個別河川流域での洪水ハザードを定量的に予測する手法を開発するために、21 世紀気候変動予測革新プログラム（革新プロ）で開発したバイアス補正、洪水流出解析モデルを基盤としながら、気象・水文資料の不足状況も考慮しつつ、GCM の予測を様々な河川流域に適した時空間スケールにダウンスケーリング手法する手法の開発、流域スケールでの洪水氾濫を含む洪水ハザード評価モデルの開発に着手した。また、洪水のみならず渇水の際の社会経済被害を評価するための洪水・渇水リスク評価モデルの開発に着手した。また、これらの研究開発に必要となる情報収集を図るための現地調査をメコン川中下流域およびソロ川流域において実施した。

b.　研究目的

本研究は、土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）が 21 世紀気候変化予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」（革新プロ）ほかで開発してきた流域規模分布型水文モデル、GCM 降雨バイアス補正手法等によるハザード評価研究を、アジアの水災害が懸念される複数の特定脆弱地域に当てはめ、水災害リスクの社会経済影響評価を行い、気候変化適応のための主要課題解決に向けた計画立案、意思決定等に必要な情報を創出するものである。

特定脆弱地域としては、最近大きな水災害を経験し、気候変動影響も大きいと予想される地域の代表として、パキスタンのインダス川、タイのチャオプラヤ川、メコン川、インドネシアのソロ川、ならびにフィリピンのパンパンガ川を対象とする。

c.　研究計画、方法、スケジュール

本研究は、以下のサブ課題群で構成する。

小課題(1) 流域スケールでの影響評価基本技術の開発

（1-1）不確実性を考慮した河川流域スケールでの GCM 予測値に基づく洪水・渇水ハザード予測値の現地適用（ローカルカスタマイズ）手法の開発

① GCM による降水量予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発
② GCM による河川流出量（洪水・渇水）予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発
③ GCM 降雨予測値を用いた不確実性を考慮した河川流域スケールでの洪水氾濫予測手法の開発

（1-2）社会経済評価のための基本技術の開発

① 洪水リスク評価モデルの改良
② 渇水リスク評価モデルの開発
③ 水マネジメントシステムにおける洪水リスクと渇水リスクの適正な配分の検討

④　脆弱性モニタリングシステムおよび対策指標の開発

小課題(2)特定脆弱地域での影響評価（具体的な河川流域での事例研究）
①　インダス川流域
②　メコン川中下流域
③　チャオプラヤ川流域
④　ソロ川流域
⑤　パンパンガ川流域

実施期間を平成 24 年度～平成 28 年度の 5 年間とし、以下の年次計画、方法で実施する。
【平成 24 年度】
特定脆弱地域としてまず先行研究対象とする河川流域を選定する。それら流域において、流域スケールでの洪水・渇水ハザード評価を行うために必要なダウンスケーリングに着手する。
また、流域スケールでの水文流出解析モデルの構築と併せて社会経済影響評価のための情報収集・整理を行い、洪水・渇水リスク評価モデルの開発に着手する。

【平成 25 年度】
特定脆弱地域のうち、小規模流域では MRI- AGCM3.2S による現在気候実験データの力学的ダウンスケーリングに着手する。大規模流域では CMIP5 等の現在気候および将来気候予測実験のバイアス補正および統計的ダウンスケーリングを実施する。また、渇水から洪水までを長期連続的に再現する流出解析モデルと、降雨を入力して流域一体で氾濫現象を再現する流出氾濫モデルの構築と特定脆弱地域における検証を行う。

【平成 26 年度】
複数の対象河川流域における CMIP5 の各種実験の大気の力学的ダウンスケーリングを開始し、極端イベントのサンプル数を増やす。一方、現地河川流域スケールでの洪水・渇水ハザード指標とその不確実性の分析を行う手法を提案し、対象河川流域における具体的な評価に着手する。
また、洪水リスクについて、洪水に対する脆弱性をグローバル GIS データ等から評価する手法を開発する。一方、各対象流域内における社会構造の変化シナリオを設定し、それに基づく将来水需要および水ストレスの推定に着手する。

【平成 27 年度】
ダウンスケーリング手法について修正を行い、複数の対象河川流域における各種 RCP シナリオ実験について大気の力学的ダウンスケーリングを行う。また、現地河川流域スケールでの洪水・渇水ハザード指標とその不確実性の予測結果をとりまとめる。
さらに、洪水・渇水リスク評価モデルを完成させ、将来気候の下での洪水・渇水リスク変化予測マップを試作する。

【平成 28 年度】
河川流量解析システムや社会構造の変化予測の最終成果を活用し、洪水／渇水ハザードの変化の社会経済影響評価結果を整理するとともに、洪水・渇水リスクの変化予測結果についてとりまとめる。

d.　平成 24 年度研究計画

平成 24 年度は、c.に示した小課題(1)では、(1-1)の①～③、(1-2)の①②に着手する。また、これらの研究に必要な情報収集を図るため、対象河川流域での現地調査を実施する。今年度は、メコン川中下流域（②）およびソロ川（④）における現地調査にまず着手した。

e.　平成 24 年度研究成果

1.5.1.　流域スケールでの影響評価基本技術の開発

1.5.1.1.　不確実性を考慮した河川流域スケールでの GCM 予測値に基づく洪水・渇水ハザード予測値の現地適用（ローカルカスタマイズ）手法の開発

(1)　GCM による降水量予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発

本研究は、特定脆弱地域のうち流域面積の小さいソロ川およびパンパンガ川流域について、GCM 実験データの力学的ダウンスケーリングを行い、河川流域スケールでの降水量の将来変化を予測するものである。

力学的ダウンスケーリングを行うためには、GCM の出力として少なくとも 3 次元 6 時間間隔の基本変数が必要である。今回は、CMIP5 の GCM 出力の中で上記データが入手可能で、解像度も比較的高い(1.4 度間隔) MIROC5 を対象とした力学的ダウンスケーリング手法を開発した。力学的ダウンスケーリングを行う領域モデルは WRF を用いた。MIROC5 は緯度座標と鉛直座標が等間隔ではなく、そのままでは WRF で読み込めないため、等間隔に変換した。なお、高度データは出力に含まれていないため、元の格子系で地上気圧と気温から測高公式を用いて求めた。このようにして作成した MIROC5 のデータを WRF に導入し、ダウンスケーリングができることを確認した。

①　インドネシア・ソロ川流域でのダウンスケーリング

第 1 の計算対象流域として、インドネシア・ソロ川流域で水平解像度 15km と 3km のダウンスケーリング実験を行った。対象として、1979 年の 1 年間の降水データから最も降水強度が大きかった 10 月 1 日～10 日を選択した。MIROC5 の 3 時間毎降水量データでは、この期間中 2 日間は降水が持続し、結果として大きな積算雨量をもたらしていた。しかし、WRF によるダウンスケーリングでは積雲対流の日変化が強過ぎ、日中は強い降水が計算されるものの、夜間は降水が持続しなかった。

積雲対流の日変化を抑えることを目的として雲物理パラメタリゼーションを変えた実験を行った。その結果、雲量・積算降水量・降水量の日々変動に変化が見られたが、いずれの場合も積雲対流の日変化を抑えることはできなかった。また、MIROC5 の海表面温度を WRF に与える実験を行ってみたが、結果に大きな変化は見られなかった。

②　フィリピン・パンパンガ川流域でのダウンスケーリング

第 2 の計算対象流域として、フィリピン・パンパンガ川流域で水平解像度 10km と 2km へのダウンスケーリング実験を行った。まず、ダウンスケーリング計算の妥当性の検証を行うため、NCEP 再解析データ（水平格子間隔 1 度）をダウンスケーリングし、地上雨量計による観測データと比較した。対象として、この地域に洪水をもたらした 2011 年 9 月の台風 17 号にともなう降水イベントを用いた。WRF によるダウンスケーリング結果は台風の構造を明瞭に再現し、計算されたパンパンガ川流域の降水量は地上雨量計と比較して、時間的なずれなどはあるものの、最大降水強度・積算降水量・

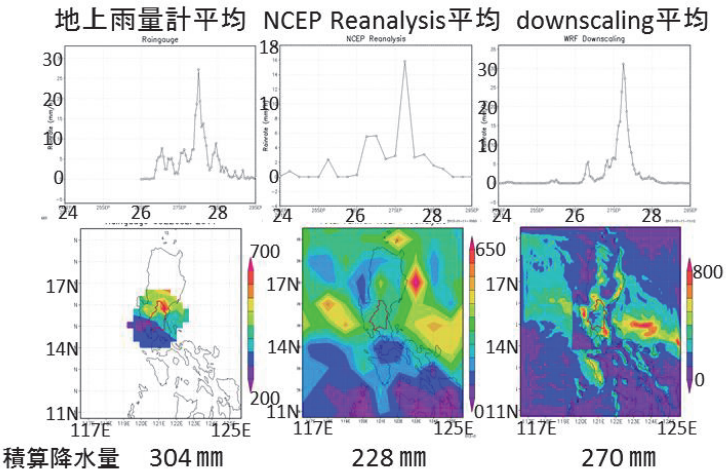


図 1　フィリピン・パンパンガ川流域における NCEP 再解析データのダウンスケーリング実験の結果。上の 3 枚は、パンパンガ川流域平均雨量の時系列。下の 3 枚の図は、期間積算雨量。

豪雨継続時間をよく再現していた（図 1 上の左と右）。

次に、MIROC5 を用いたダウンスケーリング実験として、1979 年の 1 年間の降水データから最も降水強度が大きかった 7 月 25 日前後を対象とした計算を行った（図 2）。MIROC5 の計算結果では、この降水をもたらした現象は台風であることは想像できたが、水平解像度が 150km 程度であるため台風の構造までは判断できなかった（図 2 左下）。それが、水平解像度 10km のダウンスケーリングによって台風の構造が明確に見えるようになり(図 2 右下)、また水平解像度 2km のダウンスケーリングによりパンパンガ川流域内の降水分布も明瞭に見えるようになった。また、空間平均積算降水量は MIROC5 に比べて 2 倍程度に大きくなった（図 2 上）。

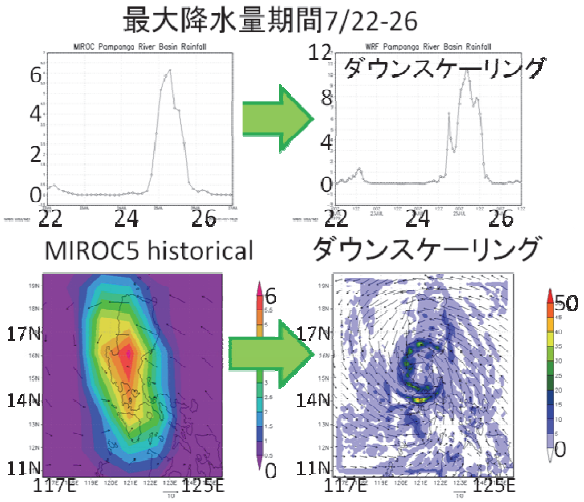


図 2　フィリピン・パンパンガ川流域を対象とした MIROC5 出力のダウンスケーリング実験結果。上の 2 枚がダウンスケール前後の流域平均降水強度、下の 2 枚が台風上陸時のスナップショット。

(2)　GCM による河川流出量（洪水・渇水）予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発

①　対象流域と流出解析モデルの選定

様々な空間スケールと自然・社会特性を有する河川において、不確実性の小さい洪水・渇水リスク予測を実現するためには、まず、洪水・渇水のハザードを定量的に算定するための洪水および低水の流出解析モデルを構築する必要がある。しかしながら、ここで対象となる河川は、水災害が頻発している発展途上国にある河川である。そこでは、しばしば雨量や水位・流量といった水文観測所が十分整備されず、従来広く用いられてきた Data Driven 型の集中定数型流出解析モデルを構築するには、データの量や質において不十分であることが多い。このため、水文観測データの不足を GIS データによってある程度補うことのできる分布定数型流出解析モデルを基盤とした流出解析モデルの構築を目指すこととする。

ここで検討を開始する対象流域としては、本研究で対象とする 5 つの流域のうち、流域面積スケールや流域特性が日本の河川流域に近いと考えられるインドネシア国ジャワ島のソロ川（流域面積 16,800km^2）とした。

選定候補となるモデルは、BTOP（Block-wise TOP）モデル(Takeuchi et al., 2007)と、IFAS（総合洪水解析システム）(Sugiura et al., 2010)に実装された土研分布モデルである。BTOP モデルは、革新プロにおいて、全球規模で構築すべき洪水流出解析システムの母体として採用し、世界主要河川に対して 20km メッシュスケールで河道網を作成しモデル構築を行った。創生プロでは、全球洪水・低水流量解析システムの母体として、この革新プロモデルを引き継ぎ、洪水だけでなく低水を含めた主要河川での定数の最適化や必要機能の追加に取り組んでいる。そこで、ここでは、まず IFAS の適用性を検討する。IFAS は、元来は、水害が頻発する発展途上国に多い水文観測データが不十分な河川でも、洪水流出解析によるハザード分析やリアルタイム洪水予測システム整備による早期警報システムの早期立ち上げを可能とすることを目的として、分布定数型の流出解析モデル（土研分布モデル）を基盤としつつ、必要な入出力インターフェースや解析ツールを一体化したソフトウェアパッケージであり、土木研究所 ICHARM において開発を継続している。IFAS 上に実装された土研分布モデル（Ver.2）のメッシュ毎の鉛直モデル構造を図 3 に示す。地上水文観測資料が不足している流域でも、土地利用等の GIS データを用いて各メッシュのモデル定数の 1 次近似値を初期設定するとともに、グローバルに入手可能なデジタル地形データ(DEM)から落水線網・河道網を構築して各メッシュからの流出を合算することが可能であるとともに、地上雨量の代わりに衛星観測雨量を入力することで流出解析を行うことができるところに特長があ

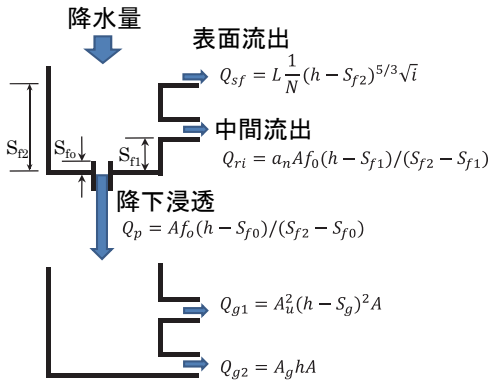


図 3　土研分布モデル(Ver.2)鉛直構造図

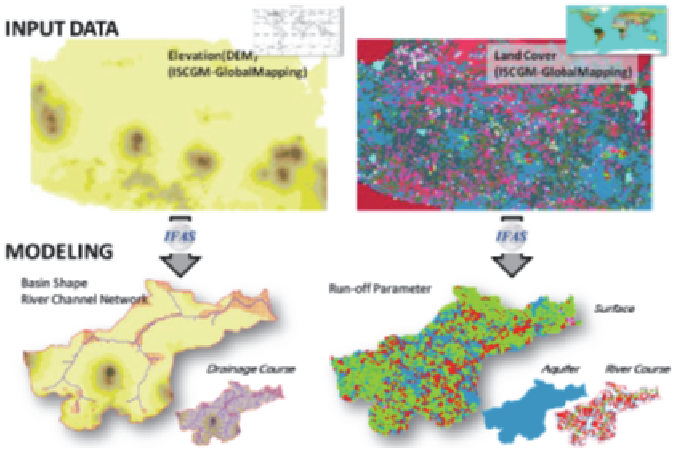


図 4　Global Map(DEM、Landcover)によるモデル定数の現時点での標準値による初期推定

る。後述する RRI モデルと異なり、洪水氾濫の効果を高精度に評価することはできないが、氾濫貯留の効果が及ぶ河川区間より上流側の河川計画・洪水予報基準点見合いで確率流量を算出することで、その下流側の洪水リスクを評価する目的であれば、比較的簡便・高速に解析を行うことができる点はメリットとなり得る。

② 衛星雨量を活用したモデル定数同定と流出解析

グローバルに入手可能な、地球地図国際運営委員会が整備している Global Map による DEM ならびに土地被覆データにもとづき、ソロ川流域の抽出・河道網作成と各メッシュの土研分布モデル定数初期推定を行った結果を図 4 に示す。さらに、モデル定数のチューニングと検証を行うために、2007 年 12 月から 2009 年 12 月までの雨量・流量資料を収集した。雨量観測所そのものは 129 地点存在し、数としては少なくないが、そのほとんどは日雨量しか計測しておらず、洪水解析に必要となる時間雨量データはソロ川上流域（8 カ所）のみに存在する。また、水位観測所についても、40 地点以上の観測値を収集したが、そのほとんどは日単位であり、時間単位でデータが存在するのが上流 3 カ所と中流 1 カ所のみである。雨量観測所との関係も考慮し、ここではソロ川の上流側に位置する Jerug 水位流量観測所（上流域面積：3,580km^2）において土研分布モデルのモデル定数調整と検証を行うこととした。

まず、Jerug 上流域にある 7 地点の地上雨量データを用いた流出解析を行ったが、良好な結果を得ることができなかった。このため、地点雨量としての定量性では劣るが、流域を網羅するデータが得られる衛星雨量を用いることを試みた。用いた衛星雨量は、0.1 度（約 10km）メッシュ時間雨量を公開している JAXA による GSMaP である。但し、生データのままでは、強雨時に一般に時間雨量値を過小評価することが知られており、かつ、ソロ川では対流性の短時間豪雨が頻発することから、時間単位で地上雨量との相関性を検証することが困難であった。このため、白石ら(2009)が開発した雨域移動情報を活用した ICHARM 独自の自己補正手法を基盤としつつ、補正係数について日雨量単位でソロ川上流域で最適化を図った。図 5 にソロ川上流域平均日雨量としての衛星雨量生値・補正値と地上雨量との相関図を示す。この補正手法を

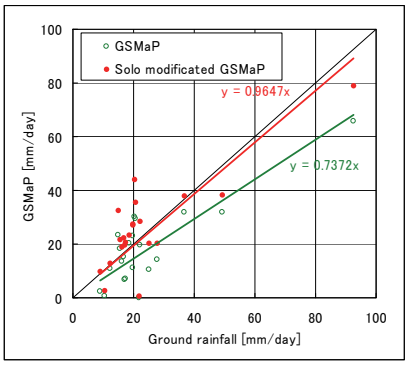


図 5　地上雨量と GSMaP(生値および補正値、mm/日)の相関（流域平均雨量,洪水イベントのみ）

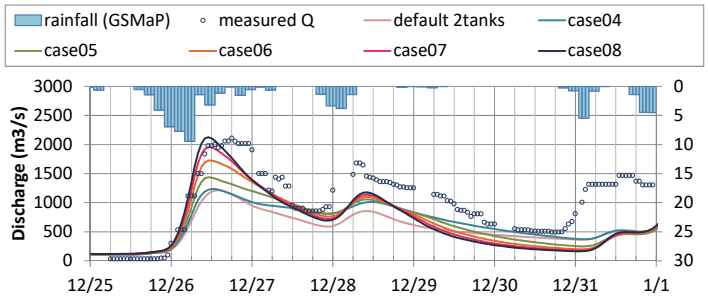


図 6　モデル定数感度分析例（中間流出係数 a_n）

GSMaP 時間雨量に適用した上で、降雨－洪水流出解析とモデル定数調整を行った。図 6 に早い中間流出を規定する係数値の感度分析を行った事例を示す。これらの結果をもとに調整された定数セットを用いて 2007 年 12 月の当地最大規模の洪水での検証を行った事例を図 7 に示す。なお、ソロ川では、時間単位での雨量・流量観測を行う観測地点を今後増やすことが計画されている。衛星雨量は時間単位のデータの精度が高くない。地上時間雨量データが入手できるようになれば、主要な地先における洪水ハザードをより定量的に評価するためにも、それらの地上観測データを十分に活用して雨量入力資料を再調整するとともにモデル定数調整を再度実施することが必要となる。

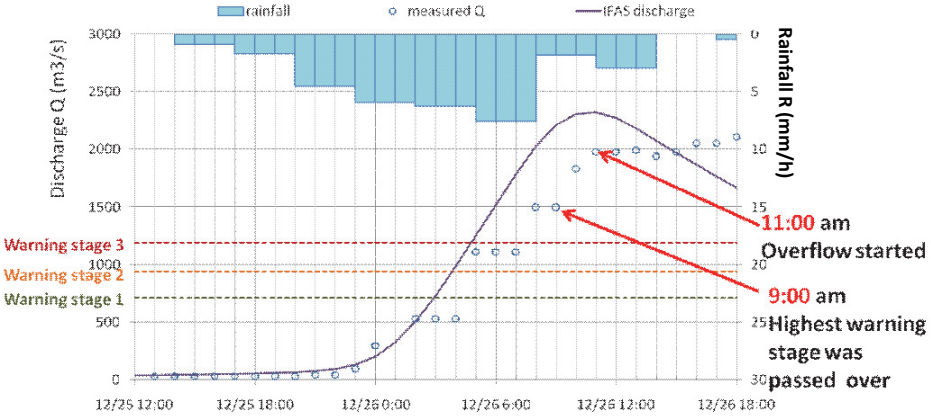


図 7　ソロ川 Jerug 地点における GSMaP 補正雨量を用いた洪水流出計算事例（2007 年 12 月洪水）

(3)　GCM 降雨予測値を用いた不確実性を考慮した河川流域スケールでの洪水氾濫予測手法の開発

本研究は、特定脆弱地域を対象に、降水量の将来予測から流域スケールで洪水ハザードの将来変化を予測し、その予測結果を、別途検討する被害関数にあてはめることによって、将来の洪水リスクを算定するものである。河川流域における水災害をもたらす直接の要因（すなわち被害関数の主要な因子）は洪水氾濫である。そこで、土木研究所 ICHARM で別途開発を進めてきた降雨流出氾濫モデル(Rainfall-Runoff-Inundation: RRI Model)(Sayama et al., 2011)を適用することで、2 次元的な洪水氾濫ハザードを評価する手法の開発・検証を行う。したがって、各流域における基本的な研究手順は、以下の 4 ステップとなる。

各流域における基本的な研究手順は、以下の 4 ステップとなる。

１）観測雨量を入力した大規模洪水の再現 ：河川流量・水位・氾濫域の再現検証

２）観測雨量を入力した長期の降雨流出氾濫計算：長期連続の河川流量の再現検証

３）GCM 現在気候を入力した降雨流出氾濫計算：河川流量・氾濫の統計特性を２）と比較

４）GCM 将来気候を入力した降雨流出氾濫計算：河川流量・氾濫の統計的特性の変化予測

平成 24 年度は、2011 年に甚大な洪水被害が発生したタイ・チャオプラヤ川流域に焦点を当てて分析を開始した。上記１）については、佐山ら(2013)の研究によって 2011 年タイ洪水の再現計算を進めており、本検討ではとくに２）について蒸発散や土壌による貯水の効果を考慮に入れながら、1980 年から 2004 年までの長期連続計算を実施し、過去の観測情報と比較した。

図 8 にチャオプラヤ川流域の概略図と主要地点における月流量の観測・計算結果を比較する。基本的には 2011 年の再現計算で同定したモデル・パラメータをもとに、山地の森林土壌でより多くの水が保水できるように改良することによって、長期の流出を再現できるようになった。

図 9 は 2006 年から 2011 年における各年の最大浸水域について、衛星観測情報と RRI モデルのシミュレーション結果とを比較したものである。C2 地点(ナコンサワン地点)上流でモデルの氾濫域がやや過小評価になるなど、いくつかの要改善点はあるものの、年ごとの氾濫域の大小などをモデルはよく再現した。なお浸水深については 2011 年に限って別途詳細な比較検証を行っている。

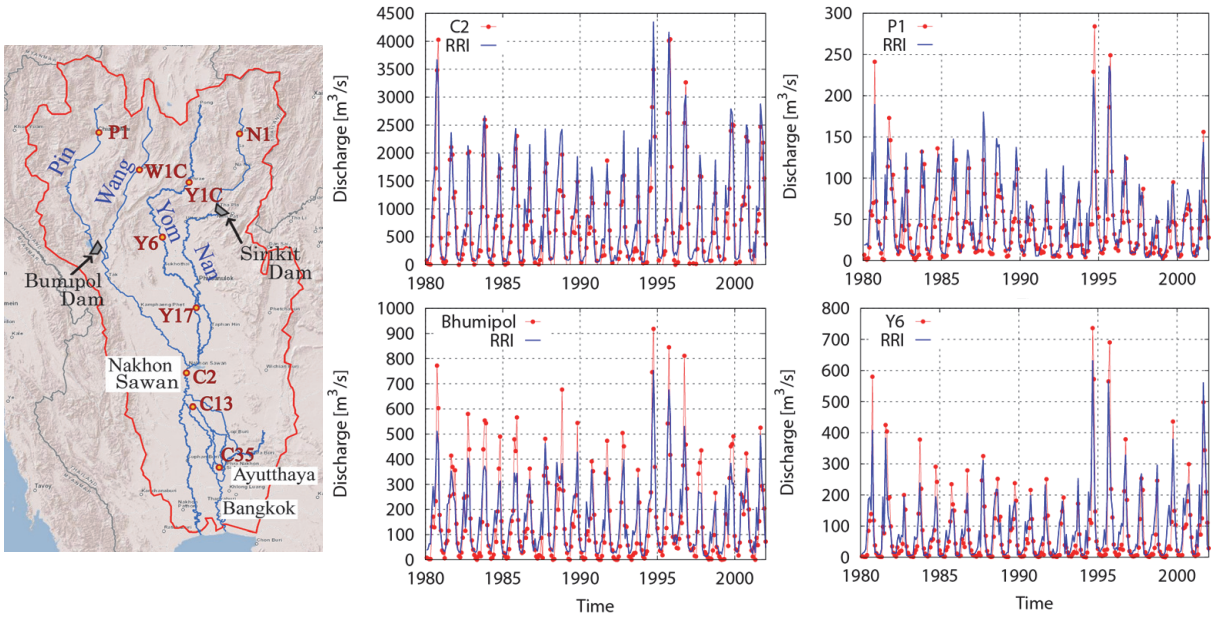


図 8　チャオプラヤ川流域と主要地点における観測・計算の月流量比較

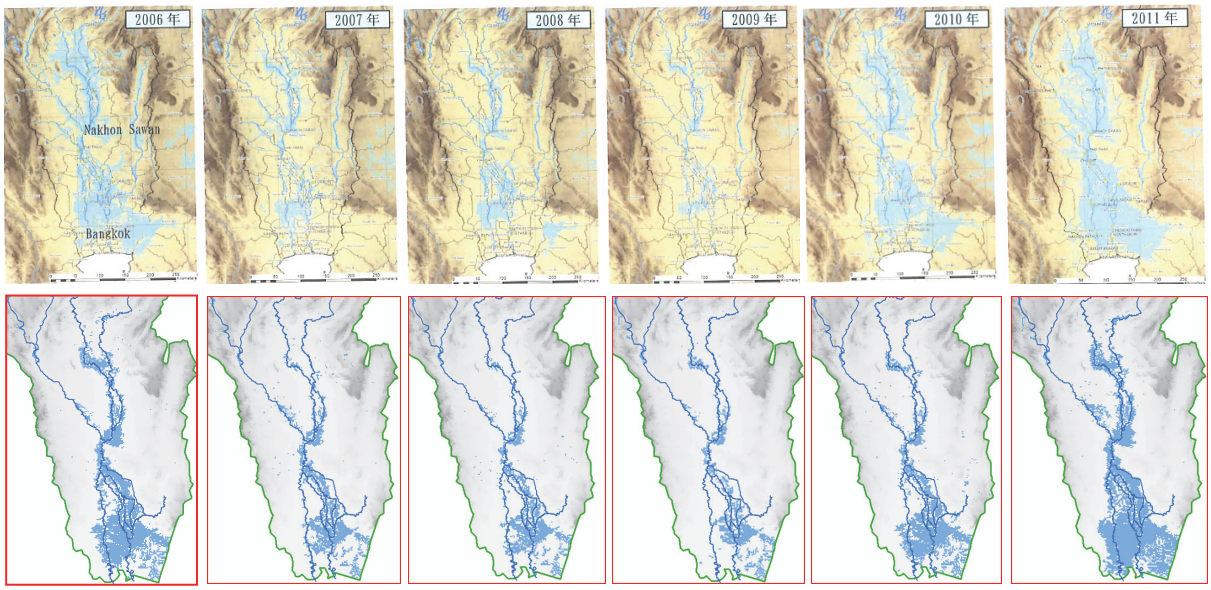


図 9　チャオプラヤ川流域における年最大浸水域(上：衛星画像、下：RRI モデル)

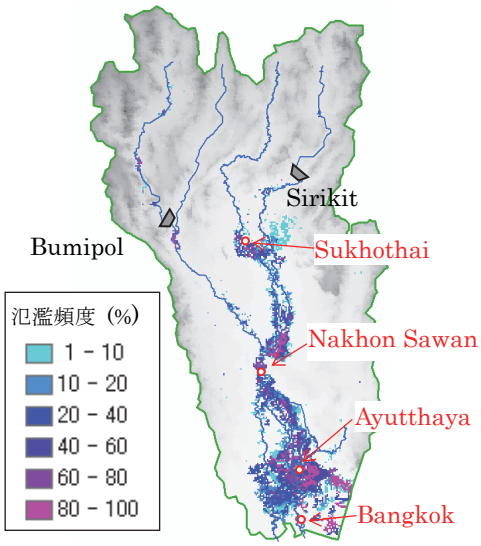


図 10 長期計算による氾濫頻度マップ

図 10 は 1980 年から 2004 年および 2011 年の計 26 年間の流出氾濫計算に基づき、26 年間で浸水した年の割合を示している(浸水したかどうかの判断基準は最大浸水位が 50 cm 以上とした)。この図からスコータイ周辺やナコンサワン周辺、アユタヤ周辺の氾濫頻度が 80%以上となり、氾濫しやすい条件であることが分かる。

このような氾濫頻度マップは、流域の地形条件だけでなく、気象・土地利用・河川の条件を反映して作成されている。堤防などの人工構造物の影響が小さい流域であれば他の流域にも比較的容易に展開できる。また GCM 出力による気候の将来予測情報を入力すれば、氾濫頻度が将来どのように空間的に変化するかを明らかにすることができる。

1.5.1.2.　社会経済評価のための基本技術の開発

(1)　洪水リスク評価モデル

①　概要

特徴の異なるアジアの5河川流域を対象に、住民生活や農業生産等の社会経済活動に対する洪水被害を数量化しその地理分布を推定できる洪水リスク影響評価手法を開発する。この手法開発での最も大きな課題は、データが未整備であることである。このため、衛星情報やモデルを組み合わせてこのデータ不足を克服することが必要となる。

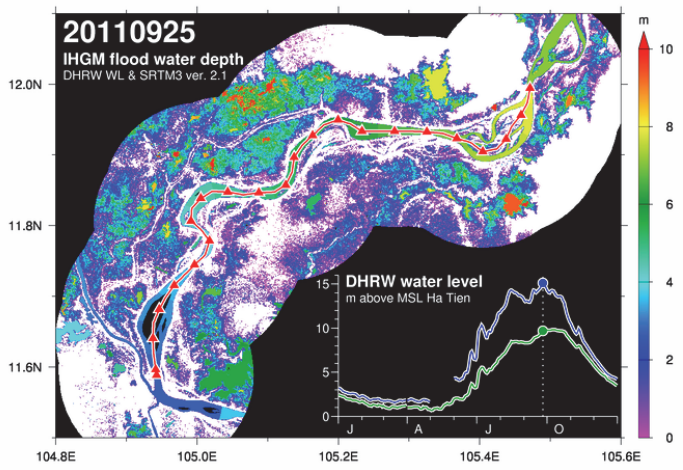


図 11　メコン川下流域の氾濫推定の事例

この手法は、地上・衛星観測や水文・水理モデリングに基づいて洪水氾濫現象の空間時間分布を求める技術と、センサス資料や衛星観測に基づいて家屋や水田等の分布を求め、それに浸水被害推定式を適用して氾濫水深を被害額に換算する技術で構成される。前者は多様な流域でも共通に適用可能な技術であるが、各流域の氾濫特性を踏まえた調整が必要となる。後者は各流域の社会経済、文化、生活様式、農業形態等の地域事情に応じて個別に開発を進める必要がある。今年度はメコン川下流域での開発に着手した。

②　氾濫情報の推定

氾濫水位および範囲の特定において、今年度は試行的に二つの手法に取組んでいる。まず、第一次近似として、メコン川下流域の特徴を利用して推定した。カンボジア氾濫原は、シルト分を含む洪水を取り込むコルマタージュ農業が発達しており、その水路が河川の流れと横断方向に耕作地に引き込まれている。そのため河川水位が高い場合には氾濫水位とほぼ同程度の水位になることがメコン川委員会の調査で明らかにされている。そのため、想定されている時期の通常の水位であれば洪水被害が生じず、その時期以外で高い水位になることで被害となる。

この特徴から、氾濫水深の分布は複数地点の河川水位観測を内外挿して求めた水位分布と衛星観測に基づく微地形情報を組み合わせて求めた。カンボジア水資源気象省水文河川局の水位観測は毎日2回現地時刻7時19時に実施されるので、2つの水文観測所の河川水位を内挿して各流下距離での水位を求め、河川水位と河道周辺の氾濫水位が等しくなるように外挿して求めた。

二つ目の方法は、湛水分布を Terra/Aqua 衛星搭載センサ MODIS の観測から推定する方法（Kwak et al., 2012）である。地形情報は全球3秒格子の数値標高モデル STRM3 の 2.1 版を用いた。この手法で得られた水深分布から氾濫現象の正確な理解が可能となる。

なお、さらにこれらの精度を高める方法として、ALOS 衛星搭載センサ PRISM の観測に基づく数値標高モデルによる補正を実施中（萬矢ら、2013）であり、この解析結果をあわせることにより洪水氾濫解析モデルの検証や家屋分布推定の精度向上に資することとなる。

③　浸水被害推定式の開発

洪水被害額の推定では、まずは家屋・家財を対象とし、メコン川委員会が 2008 年に実施した現地調査及び今年度実施した現地調査に基づく浸水被害曲線の作成・検証作業を進めている。浸水被害曲線を面的に適用するために必要な家屋分布は、LandScan 等の高空間分解能の人口分布データ、カンボジア計画省統計局によるセンサス資料、及び衛星観測に基づく微地形情報等を組み合わせて統計学的に求める。今年度はその準備として上述基礎データの収集・整理作業に取り組んだ。高床式住居はメコン川下流域で広く認められる居住様式であり、家屋床高の違いを考慮した洪水被害の検討が重要である。地盤高等の立地条件や家屋の材料・構造・築年数等の因子を他の

流域での解析手法を考慮しつつ分析を進めることとしている。

(2) Drought Risk Evaluation Model

① Framework

A drought risk evaluation framework was proposed to characterize a socio-economic drought exposure using sophisticated hydrologic model outputs and historical drought events. The proposed framework was developed from extensive literature review of drought characterization methods. Despite many existing drought indices and models, there is still no universally applicable method to describe all related processes and parameters causing the socio-economic drought. A socio-economic drought is defined as a lack of weather-related water supply to meet anthropogenic water demand for domestic, industrial and agricultural activities. In Asian developing countries, the water demand data is often unavailable and the absence of the water demand information makes the socio-economic drought characterization an impossible task.

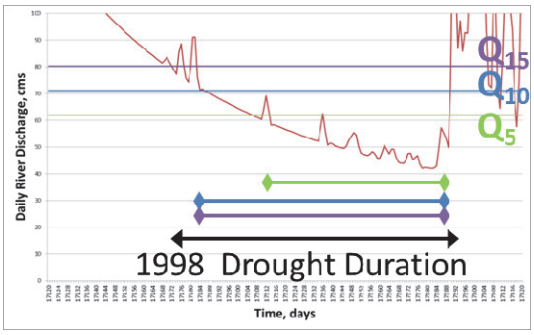


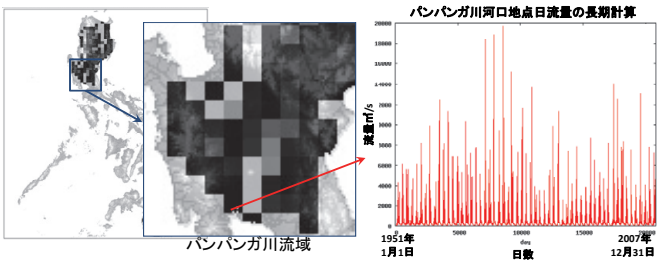
Figure12 The concept of applied threshold level method

② The Applied Threshold Level Method(ATLM)

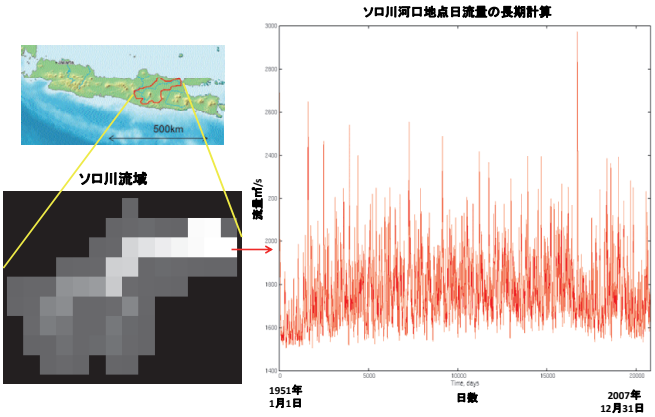
The ATLM defines socio-economic drought based on time-dependent water demand, which is estimated from the domestic, agricultural and industrial water demand data. When this water demand information is unavailable, the threshold level for the socio-economic drought can be established using hydrologic drought parameters with historical drought records. Once the threshold level is determined, the cumulative water stress can be used to define the drought exposure. The local water demand data collection is an essential component of the socio-economic drought characterization. The local field survey is needed to obtain the agricultural water demand, which varies during the growing season and depends on local farming practices.

③ BTOP model for reproduction of river discharge

In the water supply side, a distributed hydrologic model BTOP can be used to produce simulated river discharge. The five study river basins have been developed in the BTOP model. The BTOP model for the Mekong River basin has been calibrated and the model calibration is ongoing for the other four river basin BTOP models.



(a) パンパンガ川、フィリピン



(b) ソロ川、インドネシア

Figure13 River basins implemented in the global BTOP model and the simulated daily river discharge at outflow of the river basins.

1.5.2.　特定脆弱地域での影響評価

1.5.2.1.　メコン川下流域現地調査

(1)　洪水氾濫域調査

洪水氾濫域を調査するため、次のステップを踏んだ。1) 氾濫現象の一次解析をすることで全体像を把握、2) 1)の結果を受けて氾濫解析方法を選択、3) 選択した解析方法においてクリティカルとなる箇所を解明するための現地調査を行う。

1) 氾濫現象の一次解析

衛星搭載の MODIS によるデータから氾濫状況の一次解析を実施する。ここで用いる MODIS データは約一週間に一度作成される約 500m メッシュのデータである。これらをもとに Kwak et al.(2012)の手法を用いて MLSWI を算出する。この MLSWI は 0.0～1.0 の範囲の数字であるため、0.7～0.8 程度の数字を閾値として設定する。図 14 は 2011 年 5 月下旬から 2011 年 11 月下旬までの同結果を全てプロットしたものであるが、青が 0.7 以上 0.8 以下、赤が 0.8 以上を示す。またこの解析結果から多くの氾濫域は、コルマタージュが行われ、河川水位が自然堤防を越えない状況でさえも浸水が確認できるような地域であり、一方、氾濫域 2 及び 9 に関してはいわゆる日本で見られる外水氾濫のような形態であることがわかった。

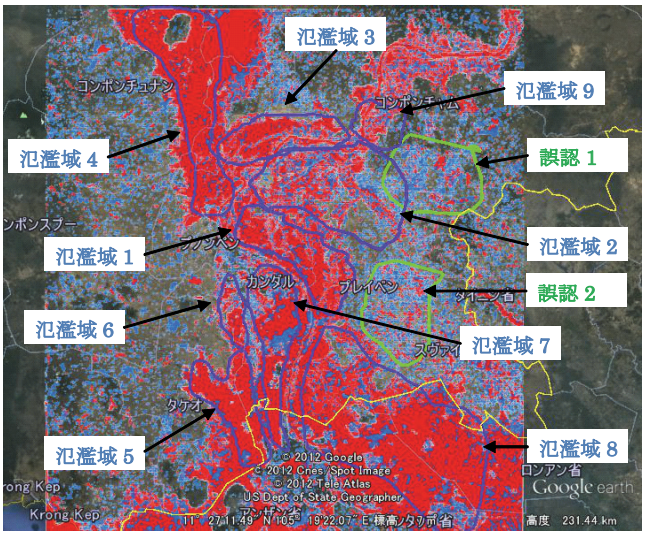


図 14　MODIS 及び MLSWI を用いた氾濫域と氾濫現象の分類

2) 氾濫解析方法の選択

1)の知見を受け、それぞれの領域に対する観測項目を選択した。すなわち氾濫域 2 及び 9 に関しては、氾濫流入量を決定し、氾濫流を解くような手法が必要となる。またその他の地域に関しては、コルマタージュを辿って流入する氾濫水が圧倒的に多いことから、高水位時にはメコン川本川の河川水位と氾濫域の水位が等しいと仮定する、Shresta et al. (2013)の手法が有効であること判断した。

3) 現地調査

1)及び 2)の検討結果を受け、それぞれに応じた現地調査を実施した。その一例を図 15 に示す。この図は図 14 が示す氾濫域 2 を拡大したものである。また MLSWI は 2011 年 9 月 30 日の値である。道路地図から氾濫域 2 の下流端近辺には幹線道路があり、現地調査から、この道路は 5m 程度の比高を持つ連続した道路盛土であること、部分的にアンダーパスが存在することが認められた。このような道路盛土は氾濫現象に大きな影響を及ぼす構造物であることから、氾濫解析を実施するための Digital Surface Model(DSM)に反映させる必要がある。このような観点から同道路盛土の形状を高性能 GPS（NavCom Technology 社の受信機 SF-3050 を使用。鉛直方向に±15cm 程度の誤差）により計測した。図 16 は JAXA が作成した PRISM DSM である。この図が示すように多くのノイズが見ら

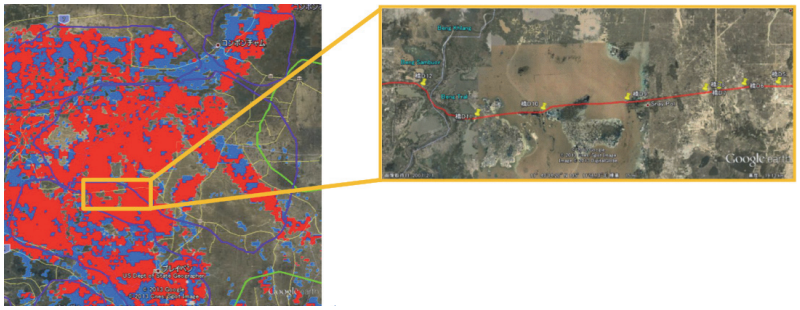


図 15　氾濫域 2 の拡大図：コンターは 2011 年 9 月 30 日における MLSWI

れ、上記の道路盛土が観測されていないことなどが特徴的である。これを萬矢ら(2013)の手法を用いてPRISM DSMの修正、また道路盛土、アンダーパスを反映させた（図17）。

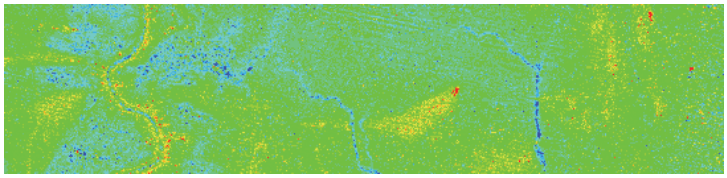


図 16 PRISM DSM の生データ

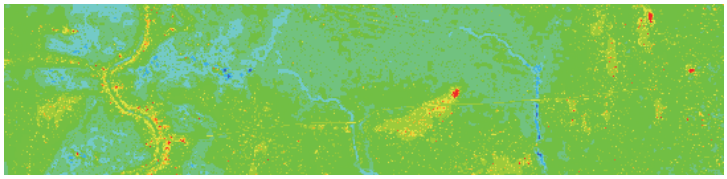


図 17 修正 PRISM DSM

(2) 家屋調査

家屋洪水被害額の推定に用いる関係式を作成・検証するために、2011年雨季の洪水被害状況について2012年12月にカンボジアでの現地調査を実施した。家屋調査は4日間でTakeo州、Kandal州、Kampong Cham州の12集落（図18赤丸）57世帯を訪問しヒアリングを行った。世帯人員・構成、収入、家屋価値、氾濫水深、床上浸水深、家屋・家財被害額等を聞き取り、併せて、前出の高精度GPS測位及び簡易レーザー測量（Laser Technology社のTruPulseを使用）により、地盤面の高さと家屋の床高を計測した。2008年のメコン川委員会の調査結果があるが、今回は上流と下流の違いを確認するため前回対象外であった上流のKampong Cham州を対象にしたこと、及び、同様に前回調査では実施していない地盤高・家屋床高の計測を実施した。今後、両調査結果を分析し、広域に適用可能な洪水リスク評価手法の構築を目指している。さらに、この地域の住居様式の特徴である高床式住居と、微地形、主要幹線道路や治水利水構造物との位置関係などを現地調査や衛星観測に基づく詳細な分析により解明していくこととしている。

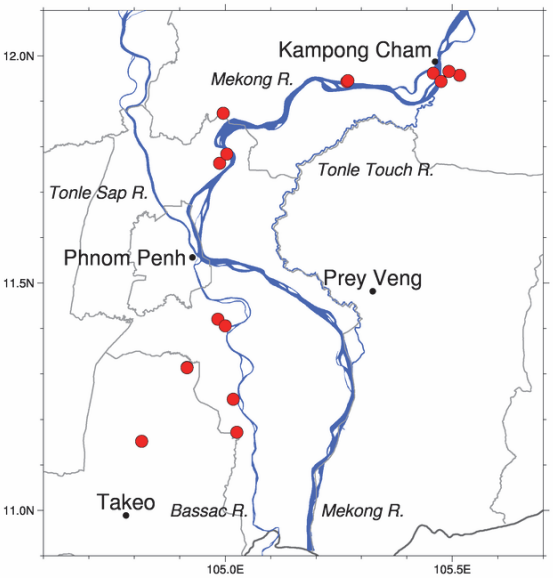


図 18 家屋洪水被害調査実施集落（赤丸）

1.5.2.2. ソロ川流域現地調査

(1) 洪水氾濫域調査

ここでもメコン川と同様の仮定を基に、現地調査を実施した。それらは1) 氾濫現象の一次解析で全体像を把握、2) 氾濫解析手法の選定、3)2)にあわせた現地調査を実施することである。以下、これらを説明する。

1) 氾濫現象の一次解析及び氾濫解析手法の選定

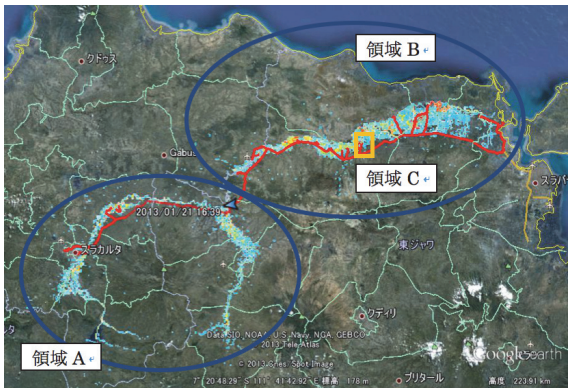


図 19 ソロ川流域における氾濫状況の解析結果

図19はソロ川流域とその氾濫状況を示す。この河川の氾濫域は大きく2つの領域に区分することができる。領域Aはカルデラ地帯の中の河川であり、領域Bは低平原における河川である。領域A及びBの境界付近は外輪山の様相を示し、この間では30kmで50m程度の標高差がある。一方、領域Aの氾濫域ではおおよそ100kmで30mの標高差、領域Bの氾濫域ではおおよそ130kmで35mの標高差となる。ここでは2007年の大規模洪水に着目し、MODISデータを用いたMLSWI、ALOS PalsarとRRIモデルを用いた氾濫解析結果を比較した。また現地Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo（ソロ川河川事務所）が発行した氾濫域を比較した。それによると、RRI(Sayama et al., 2011)の解析結果とMODISを用いたMLSWI、ALOS Palsarの結果は概ね一致し

た。

ソロ川ではメコン川と同じ氾濫手法は使えず、降雨と流出を同時に解析できる RRI が最適であると判断した。

図 20 は図 19 の示す領域 C の拡大図である。ここでは MLSWI、 ALOS Palsar、 RRI の解析結果を示している。この図から三者がほぼ同様の結果となっていることを示している。他方、図 21 は BBWS Bengawan Solo の調査結果である。ピンク及び水色の範囲が氾濫域を示す。これを見ると、メコン川の左岸は氾濫しているが、右岸は氾濫していないことを示している。

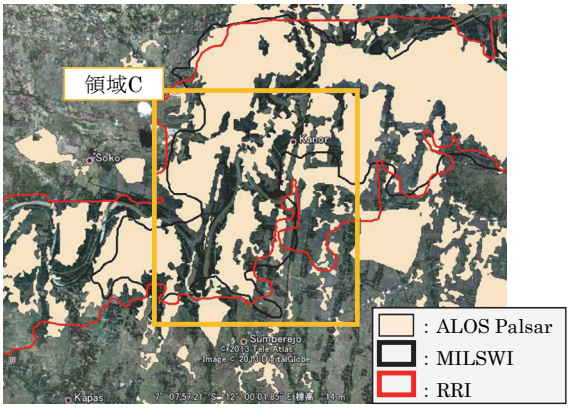


図 20 MLSWI, ALOS Palsar, RRI の解析結果

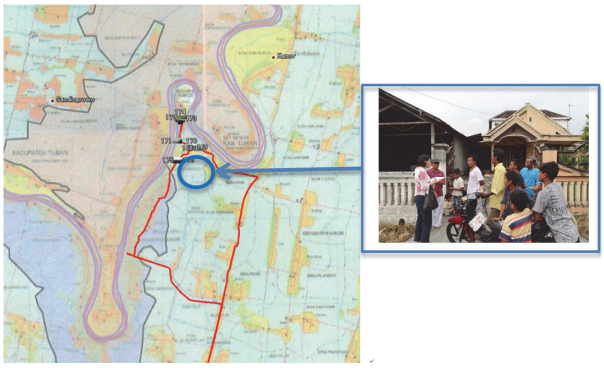


図 21 BBWS Bengawan Solo の調査結果

(図 19 の領域 C に相当する範囲)

2) 現地調査

現地調査は図 19 が示すソロ川沿いを全川にわたり調査しているが、ここでは特徴的な箇所の紹介をする。図 21 の示す赤のラインは本現地調査ルートで、青丸で示す地点におけるヒアリング、それによる洪水痕跡から、同地点は洪水氾濫実績があることが確認できた。なお、現在この地域は堤防に囲まれているが、それが完成したのが 2007 年洪水後であることが確認でき、これらから、この地域は図 21 が示すような氾濫状況（すなわち左岸だけが浸水して右岸は浸水していない）ではないことが理解できた。

(2) House Hold Survey

The objective of the household survey was to approach and set a strategy to gather the necessary information in order to be able to assess flood related damages in Solo river basin.

Hence, 22 households in 9 villages in 7 Kecamatan, 3 Kabupaten and 2 Provinces were interviewed for the biggest flood events they experienced in the flood event of December 2007-January 2008.

The main information on house damages was that:

In average this December 2007 flood lasted 8 days with water depth of 1m±0.5m near and inside the house.

People are very reluctant to talk about money and they find difficult to value what they have, especially the houses structures. People were relatively poor (in average living with 36,000Rp/day for 5 persons in the household, under 1$/day/person) .

In general, as water rises slowly, households have time to put valuables in higher places and limit damages. Moreover, it was very difficult to get people imagine what would be the damages if as they told us about the greatest flood they have experienced.

Bamboo, wood houses as well as concrete houses present the same type of roof, therefore while using remote sensed images, it won't be possible to conduct speculation on house value by only looking at roofs. Considering roof area might be an alternative.

The main information on agricultural damages as most of the households live from rice production was that:

2 to 3 cycles of 3-4months per year (seeding in April and September and harvest in July and December). (some farmers also rotate with one cycle of vegetable crops).

Rice production is conducted from seed, and is irrigated, highly fertilized (around 500-600kg/ha N, P, K, M) and treated with pesticides (1 to 2L/ha).

The average yield is 7-7.5ton/ha per harvest and the height of the plant at maturity is 90-100cm.

The vulnerable stage is once there is a panicle. Indeed, if the field get flooded, it cannot be harvested anymore as the plant will fall and even though the plant is still good, mice and other pest will come and destroy the harvest. Problem is not water depth or getting submerged but the loss of rigidity/turgescence.

f. 考察

インドネシア・ソロ川流域におけるダウンスケーリング実験で積雲対流の日変化が強く出過ぎたことは、赤道島嶼域の日射による地表面温度上昇・海陸の温度差が強過ぎたことが原因だと考えられる。これらの問題を解決するためには、地表面分類・土壌水分量・海表面温度の再現精度を改善することが求められるが、現地観測データがないために実現は困難である。熱帯島嶼域は、日変化によって引き起こされる積雲対流の影響が大きく、総観規模スケールの現象の効果が中緯度と比較して小さいため、数値予報が困難であることが報告されている（Hayashi et al.2008)。しかし、洪水を引き起こすような降水イベントは総観規模スケールの現象によって引き起こされることが考えられる。そのため、今後は総観規模スケールの現象にも注目し、その再現性を高めることによって、洪水をもたらす降水現象の再現性を高めていくことが重要と考えられる。

一方、フィリピン・パンパンガ川流域におけるダウンスケーリング実験では、台風を解像できることを確認した。また、NCEP 再解析データをダウンスケーリングした実験では、計算された降水変動は地上雨量計の観測結果の特徴をよくとらえていた。得られた結果から、今回開発した WRF を用いたダウンスケーリング実験は、パンパンガ川流域における水災害リスク評価を行う上では有効であると言える。

洪水ハザードを簡便に予測するために必要な洪水流出解析モデルについては、本研究では水文資料が不足する流域で適用しなければならない条件が多くなると想定される中で、インドネシア・ソロ川における検討は重要な先行事例になった。そこでは衛星雨量を必要に応じて適切に補正しながら、グローバルに入手可能な GIS データによってモデル構築が可能な IFAS と組み合わせて活用することで、地上水文資料の不足を補う可能性を示した。今後は、温暖化シナリオや GCM により異なる将来予測降雨シナリオを活用し、確率洪水流量の変化を評価する手法を確立するとともに、渇水のハザードについても変化予測を行う手法を検討していく必要がある。

一方、水災害に直結する洪水氾濫ハザードをきめ細かく予測するための降雨流出氾濫予測の課題では、本年度は特にチャオプラヤ川流域に焦点を当てて、長期連続計算による河川流出と広域の洪水氾濫の再現精度を検証した。同様の解析を GCM による出力結果をもとに実行することで、将来の洪水リスクを評価できる。今後は、今年度実行した再現計算の分析をさらに進め、流域氾濫量の降水量に対する感度を明らかにしたうえで、気象研究所による AGCM3.2S(=約 20 km 解像度)および 3.2H(=約 60 km 解像度)のアンサンブル予測を入力して流出氾濫解析を実行する方針である。他の CMIP5 の GCM 出力については、全ての予測情報を入力するのは困難であるため、降雨量の変化傾向を見ながら、上述の氾濫の感度に基づいて、将来の洪水リスクの変化を分析する予定である。

メコン川とソロ川においては、データ不足を克服するため衛星情報を最大限活用したうえで、氾濫解析モデルの検討とあわせて効果的現地調査を行い氾濫の状況を把握した。メコン川では氾濫の概略検討を行い、道路等の氾濫形態のクリティカルになる構造物の把握を現地で行った。ソロ川では RRI モデルで解析を行い、過去の氾濫情報の補正等を現地ヒアリング等で行った。さらに、PRISMDSM の修正を行い今後の氾濫解析に活用できる氾濫原データの作成を行った。今後これらを活用して洪水リスク評価モデルの構築に検討を進めていくこととしている。

メコン川下流域では多数の高床式住居が広く分布するため、この地域の家屋洪水被害推定においては家屋床高を考慮した推定方法を検討する必要がある。家屋床高の高低には各世帯の経済状況等の個別事情が反映されている場合も少なくないが、家屋床高の地域性、地理分布を考える上では、その他にも、微地形との対応、主要幹線道路や治水利水構造物との位置関係などを把握す

る必要があり、地盤高等の立地条件や家屋の材料・構造・築年数等の因子も考慮しながら、現地調査や衛星観測に基づいて詳細な分析を進める。他の流域でも現地調査を通じて生活様式等を把握し、それらを踏まえて最適な被害推定手法の検討を進める。過去のメコン川委員会での調査結果と今回の現地調査結果の両者を詳細に分析して、カンボジアの住居形式や氾濫形態にあった浸水被害曲線を、洪水リスク評価手法の検討や現地での追加補足調査を組合せながら構築していくこととしている。

ソロ川における現地調査により、家屋の資産調査、貧富のレベル調査等を行ったがほとんどの家で明快な回答が得られず、今後電化製品などの家財からの資産検討等をしていく必要がある。カンボジアで適用した穀物の浸水被害推定を、そのままインドネシアの農業では活用できないことがわかり、今後他の情報からの浸水被害推定が必要との課題が明らかになった。

渇水リスク評価については、一定の仮定の下による新たな手法による解析が必要と判断し、流出計算モデル（BTOP）の各流域への適用を進め、メコン川では検証も完了した。また、渇水の評価として過去の渇水履歴とモデルの再現計算をもとに ATLM を提案してパンパンガ川で試行を行った。各国の適切なコンタクト先に引き続き接触して不足情報の入手に努めるとともに、モデルの開発及び検証を進めていく。

g. 引用文献

Fahmi Hidayat,Harry M. Sungguh,Harianto, 2008, Impact of Climate Change on Floods in Bengawan Solo and Brantas River Basins, Indonesia, River Networks.

Hayashi, S., K. Aranami, and K. Saio, 2008: Statistical verification of short term NWP by NHM and WRF-ARW with 20km horizontal resolution around Japan and Southeast Asia. SOLA, 4, 133-136.

Kwak, Y. et al. 2012. Estimation of flood volume in Chao Phraya river basin, Thailand from MODIS images coupled with flood Inundation level, IEEE-IGARSS2012, pp. 887-890.

Mishra, A.K. and V.P. Singh. 2010. A review of drought concepts. Journal of Hydrology 391: 202-216.

Mishra, A.K. and V.P. Singh. 2011. Drought modeling - A review. Journal of Hydrology 391: 157-175.

Miyamoto, M., A. Sugiura, T. Okazumi, S. Tanaka, S. Nabesaka and K. Fukami, 2012: Suggestion for an advanced early warning system based on flood forecasting in Bengawan Solo River Basin, Indonesia, Proceedings of the 10th International Conference on Hydroinformatics, Hamburg, Germany.

佐山敬洋、建部祐哉、藤岡 奨、牛山朋來、萬矢敦啓、田中茂信、2013：2011 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、印刷中

白石芳樹、深見和彦、猪股広典、 2009：雨域移動情報を活用した衛星観測雨量データ補正方法の提案－吉野川流域の事例解析－、 水工学論文集、 第 53 巻、pp385-390

Shresta et al. Development of flood vulnerability indices for lower Mekong basin in Cambodian floodplain, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.69, No.4, I_1-I_6,2013

Smakhtin, V.U., and E.L. Schipper. 2008. Droughts: The impact of semantics and perceptions, Water Policy, 10: 141-143.

Takahiro Sayama, Go Ozawa, Takahiro Kawakami, Seishi Nabesaka and Kazuhiko Fukami (2011): Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Science Journal, IAHS

Takeuchi K. et al., 2007: A BTOP model to extend TOPMODEL for distributed hydrological simulation of large basins, Hydrological Processes, vol.22, No.17, pp.3236-3251.

建部 祐哉・佐山 敬洋・牛山 朋來・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.

Tomonobu Sugiura, Takahiro Kawakami, Go Ozawa, Kazuhiko Fukami, Jun Magome, Seishi Nabesaka, EXPERIMENTAL APPLICATION OF FLOOD FORECASTING SYSTEM (IFAS) USING SATELLITE-BASED RAINFALL Proceeding of the 9th International Conference on Hydroinfomatics (HIC2010), (2010), CD-ROM

Van Loon, A.F. and H.A.J. Van Lanen. 2012. A process-based topology of hydrological drought. Hydrology and Earth System Sciences 16: 1915-1946.

Van Huijgevoort, M.H.J., P. Hazenberg, H.A.J. Van Lanen, and R. Uijlenhoet. 2012. A generic method for hydrological drought identification across different climate regions. Hydrology and Earth System Sciences 16: 2437-2451.

Yevjevich V. 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Hydrology Papers 23, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

萬矢ら、氾濫解析のための PRISM DSM の活用と GPS を用いたその修正方法に関する研究、土木学会論文集 B1(水工学)Vol.69、 No.4、 I_1549-I_1554、 2013

website of data and information on disaster in Indonesia　http://dibi.bnpb.go.id/

Indeks Rawan Bencana Indonesia (Natural Disaster Indices for Indonesia), BNPD, UNPD, 2011.

h.　成果の発表

論文（受理、印刷済み）平成 24 年度：2 件

1. Shresta et al. Development of flood vulnerability indices for lower Mekong basin in Cambodian floodplain, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.69, No.4, I_1-I_6,2013
2. 建部 祐哉・佐山 敬洋・牛山 朋來・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.