

メコン川下流域における流出氾濫解析と衛星情報を用いた 氾濫原上の諸量の検証

工藤 俊・萬矢敦啓・岩見洋一

1. はじめに

洪水氾濫による被害を軽減するには、氾濫原の水の挙動を理解し、浸水深や浸水継続時間等を適切に把握した上で対策を講じる必要がある。これらの情報を推定、予測する上では流出氾濫現象を再現するモデルの構築が重要である。一般的に降雨流出過程を表すモデルの妥当性の精査には、河道の水位や流量を観測値と比較するケースが多く、氾濫を表現するモデルの場合は人工衛星から得た情報や現地調査から推定した氾濫域を計算結果と比較するケースが多い。一方、洪水時の浸水深や浸水時間など被害に直結する情報を扱う上では、氾濫域のみならず、氾濫原の水の量及びその挙動も検証する必要がある。そこで本報では、降雨流出と氾濫を一体的に解くモデルを用いて流出氾濫解析を実施し、最初に河道内の水位及び流量の検証を実施した上で、氾濫原上を流れる水の流量（以下「氾濫流量」という。）にも着目し、モデルで計算した氾濫流量と衛星情報から推定した氾濫流量を比較する。図-1は対象としたメコン川下流域である。当該地点は毎年のように洪水氾濫が発生し、本研究を実施する上で適した地点である。なお、主要洪水の一つである2011年洪水を対象とした。

2. 流出氾濫解析

2.1 手法

本報では降雨流出氾濫（RRI）モデル²⁾を用いた。このモデルは、以下に示す通り、二次元の連続式と運動方程式を拡散波近似して解く。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \dots\dots\dots \text{式(3)}$$

ここで、 q_x 、 q_y は x,y 方向の単位幅流量、 h は水深、 r は降雨強度、 f は鉛直浸透強度、 H は水位、 n はマンニングの粗度係数、 sgn は符号関数である。

標高分布は、USGSが公開し標高及び河道網情報が得られるHydroSHEDSから、SRTMデータを入力した。鉛直浸透流はGreen-Amptモデルを用いており、パラメータは当該地点の土性を勘察し、クレイロームに相当する値を用いた。斜面の等価粗度係数は $0.4m^{-1/3}s$ とし、河道の粗度係数は工藤ら³⁾の手法を用い、無次元掃流力に応じて時々刻々と変化させた。降水量は地上雨量計による観測結果をThiessen法で補間した。境界条件は、図-1におけるKratie地点で、H-Q式から換算した流量を上流端境界条件として与えた。また、河道の幅と深さについては、現地観測結果に基づき、縦断的に分布した値を設定した³⁾。

2.2 河道内の水位及び流量の検証

図-2及び図-3に水位、流量の観測結果と計算結果の比較をそれぞれ示す。ここで、図中のNSEはナッシュ効率係数である。水位について、メコン川本川の2地点は、特に洪水期に観測結果と計算結果が良く整合する。一方、支川のBassac川及びTonle Sap川は計算水位が過大となる傾向がある。これは、

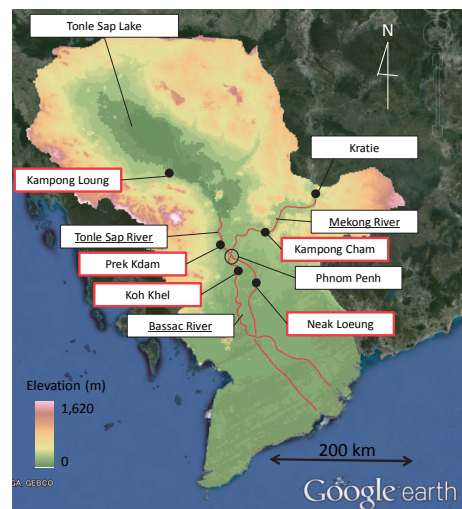


図-1 解析対象範囲¹⁾

Runoff Inundation Analysis in the Lower Mekong River Basin and Validation of Variables over a Floodplain Using Satellite Information

主に河道条件の設定、特に粗度係数の設定に起因すると考えられる。今回は、上述の通り無次元掃流力に応じて粗度係数を時々刻々と変化させた。それにあたり、粒径を与える必要があり、今回はメコン川本川で竹林ら⁴⁾により観測された結果を参考に0.5mmを一律で与えた。一方、支川では粒径が異なる可能性があり、特にTonle Sap川では粒径が本川よりも小さい⁴⁾。工藤ら³⁾によると、当該地点は無次元掃流力が大きくなると粗度が低下するため、粒径が小さい場合には無次元掃流力が大きく、粗度が低下し水位が低下する。すなわち、粒径の空間分布を考慮することで水位の再現性が向上すると期待できる。また、Tonle Sap湖の結果に着目すると、一部では計算水位が観測水位を良好に再現するが、計算水位が過少となる。これは、湖底の形状の設定に起因すると考えられる。今回は、SRTMを一律で掘り下げたものを使用した¹⁾が、より緻密な湖底形状

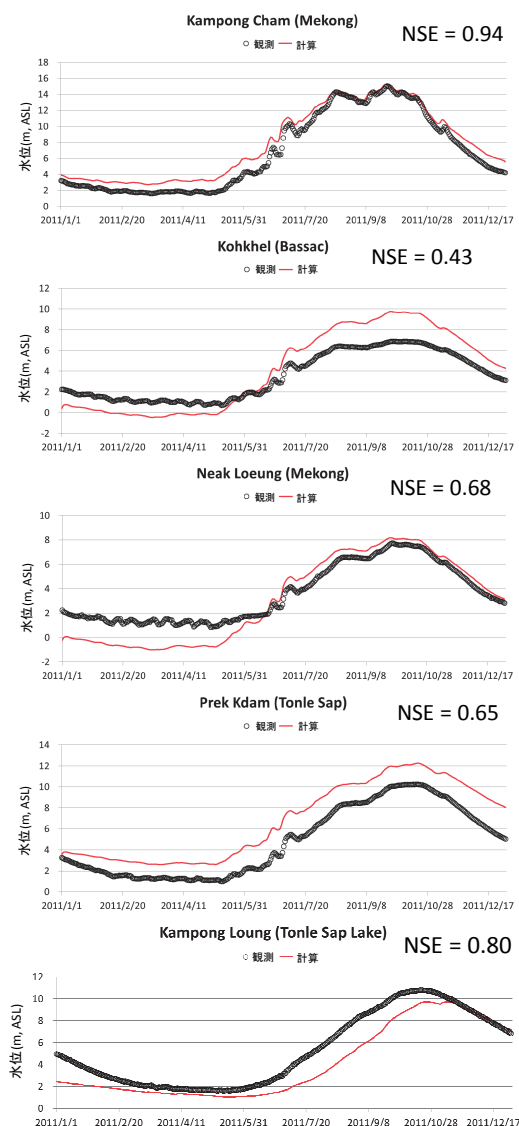


図-2 水位の計算結果¹⁾

を反映することで、湖の水位と湛水量の関係がより正確となり、水位の再現性の向上が期待できる。

流量については、Kampong Loung地点は湖上の水位観測地点のため、これ以外の地点で観測データと計算結果を比較したその結果、いずれも良好に計算できることを確認した。図-3はNSEが最も低い値となったPrek Kdam地点の結果である。洪水期から乾季への移行期間は計算流量が過少になり、これはTonle Sap湖の計算水位の過少に起因すると考えられる。一方、Tonle Sap川の逆流も再現されており、傾向を良好に捉えた結果であることが確認できる。

3. MODISデータを用いた氾濫水の推定

3.1 氾濫域の推定

MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer)から得られる反射率データを用いて氾濫域を推定する。これまで、NDWI、LSWIなど、複数の周波数帯の反射率データを駆使して水域を検出する手法が提案されてきた。これらの技術はある閾値を設けた上で、その値を境に水域と陸域を判別する。適切な閾値を設定できる場合は水域を良好に検出できるが、そのためには思考錯誤を重ねる必要があり、設定した閾値の客観性の説明が難しい場合もある。これは各ピクセルにおける反射率を直接用いる手法である。一方、本報ではGradient Based Method(GBM)と呼ばれる手法に着目し、これを修正した。GBMは画像解析手法の一つで、データの空間的な勾配を利用

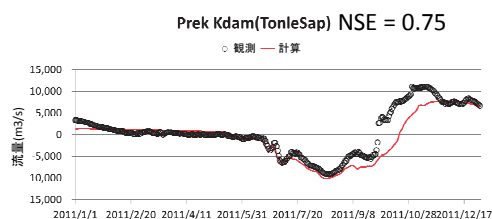


図-3 流量の計算結果¹⁾

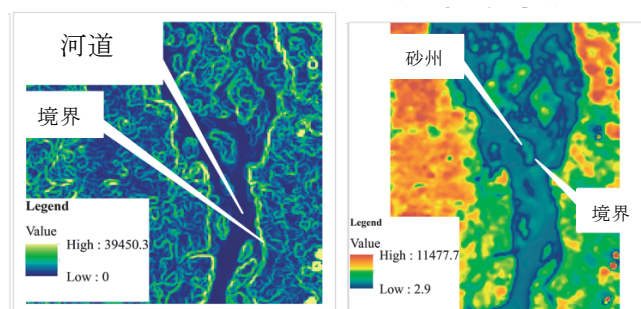


図-4 氾濫域検出手法の適用例⁵⁾
(左：式(5)の分布，右：式(7)の分布)

する。また、本技術はMODISのband1（可視域赤）とband2（近赤外域）の差の勾配に着目した。band1とband2は日データとして公開されており、空間解像度は250mである。他の周波数帯は8日毎のデータとなる8-day compositeデータであり、空間解像度は500 m である。より詳細な時空間解像度データを使用することも、本手法の大きな利点の一つである。以下、手法の概略を説明するが、さらに詳細な説明はBiswas et al⁵⁾を参照されたい。式(4)は反射率の差の勾配を表し、これの絶対値は式(5)で表わされる。

$$\bar{G}(x,y) = \left(\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} \right) f(x,y) \dots\dots\dots \text{式(4)}$$

$$M(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right)^2} \dots\dots\dots \text{式(5)}$$

ここで、 $\bar{G}(x,y)$ は反射率の差の勾配、 $f(x,y)$ は反射率の差、 $M(x,y)$ は $\bar{G}(x,y)$ の絶対値である。

これは勾配に着目することから、土地被覆の境界を強調できる。一方、土地被覆そのものの判別は難しい。そこで、本報では反射率の差に加重平均を付加した項を導入した。式(6)は式(4)を修正したものであり、式(7)は式(6)の絶対値を表す。

$$\bar{G}'(x,y) = \left\{ \left(\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + W \right) + \left(\mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + W \right) \right\} f(x,y) \dots\dots\dots \text{式(6)}$$

$$M'(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} + [W]f(x,y) \right)^2 + \left(\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} + [W]f(x,y) \right)^2} \dots\dots\dots \text{式(7)}$$

ここで、 $\bar{G}'(x,y)$ は反射率の差の勾配を修正したも

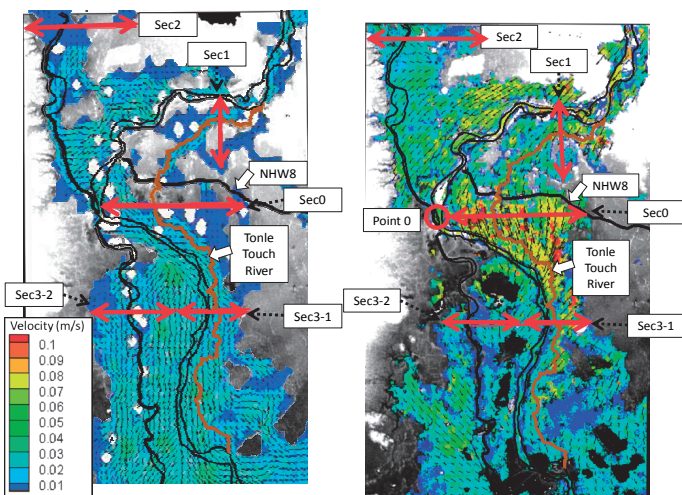


図-5 氾濫域及び流速場の推定結果¹⁾

(左：RRIモデル(2011年10月7日)、
右：MODIS(2011年9月30日～10月7日の8day composite))

の、 $M'(x,y)$ は $\bar{G}'(x,y)$ の絶対値である。

図-4は、Biswas et al⁵⁾が示した本手法の適用例を示す。網状河川であるジャムナ川で適用した例である。図-4左では、土地被覆の境界を強調できるが、どちらが河道かを判別することが難しい。なお、参考として実際の河道位置を図中に示した。一方、図-4右は河道及びその中に存在する砂州を明瞭に判別できる。

図-5に、当該地点に対して本手法を適用した結果を示す。また、RRIモデルによる推定結果を併せて示す。なお、コンターは流速の絶対値を示しており、詳細は後述する。図を比較すると、下流域において

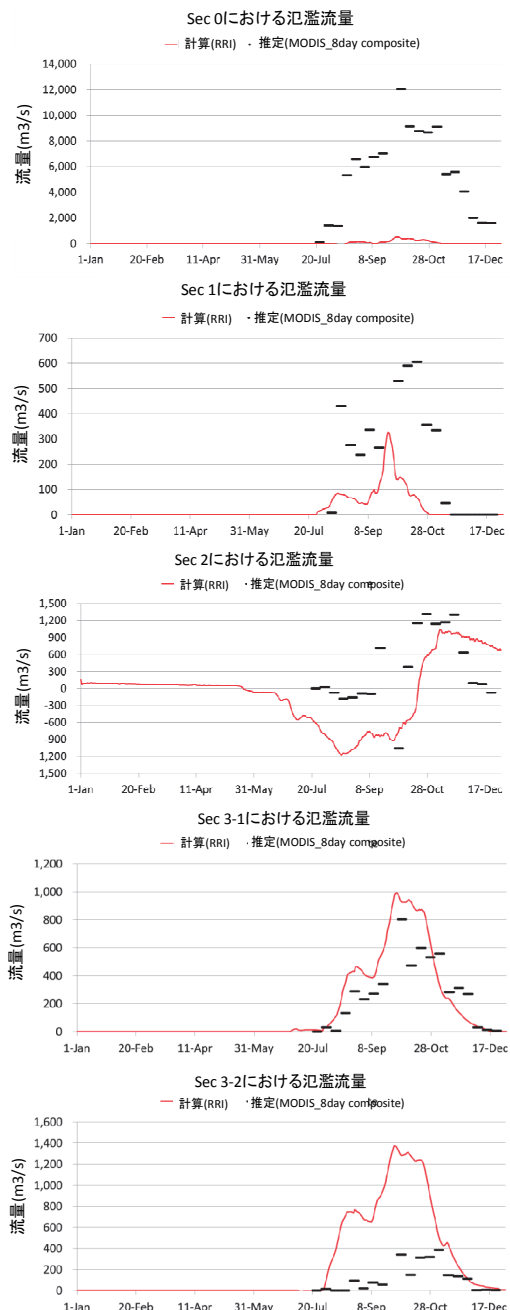


図-6 氾濫流量の計算結果¹⁾

若干の差が見受けられるものの、全体としては良好に整合することが確認できる。

3.2 流速場の推定

氾濫水の水位分布を推定した上で、マニング式から流速場を推定する。水位分布の推定手順は、初めに、氾濫域と陸域の境界の地盤標高をその地点の水位とし、境界に沿った線状の水位分布を得た上で、それを空間内挿して氾濫域内の面的な水位分布を得た。さらに流速場を推定するために、水位分布から求めた水面勾配分布、水位から地盤標高を差し引いて求めた水深分布を用いて、等価粗度係数を $0.4m^{-1/3}s$ としたマニング式から流速場を推定した。図-5に MODIS から得た流速場と RRI モデルから得た流速場を示す。両者を比較すると、全体としては概ね同様の傾向を再現するが、特に国道 8 号線 (NHW8) の下流側では MODIS から推定した流速が大きい結果となった。

3.3 氾濫流量の比較

流速分布と水深分布から氾濫流量を推定する。図-5 に示す通り Sec0~Sec3-2 を定義し、それぞれの氾濫流量を図-6 に示す。Sec2 と Sec3-1 は RRI モデルによる氾濫流量と MODIS による氾濫流量が概ね良好に一致する。Sec2 は Tonle Sap 川周辺の氾濫流量であり、洪水期に流れ方向が逆転する特徴を RRI モデルと MODIS の両者が再現する。一方で Sec0 に着目した場合、両者が乖離する。Sec0 はメコン川本川左岸側の氾濫原にあるが、当該箇所は NHW8 やトンレトーチ川が存在し、氾濫水が複雑な挙動を示す地点である。また、当該地点は灌漑用の小規模な水路が多数存在し、これによる氾濫原への導水効果をモデル化することで、計算精度の向上が期待できる。

まとめ

本報は、頻繁に洪水氾濫が発生するメコン川下流域を対象に流出氾濫解析を実施した。そして河道内の水位と流量の検証のみならず、氾濫原上の水の流量を衛星情報から推定し計算結果と比較した。この技術は特に途上国の大規模流域の洪水氾濫現象把握に役立つと期待できる。今後は、モデルによる計算と衛星情報による推定結果が合わない部分について検討を進める必要があると考える。

謝 辞

本研究の実施にあたり、メコン河委員会事務局から貴重なデータを提供して頂いた。また、カンボジアの国家災害対策委員会(NCDM)から現地調査を補助して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) S. Kudo, A. Yorozuya, H. Koseki, Y. Iwami and M. Nakatsugawa: Inundation process in Lower Mekong River Basin, Journal of Disaster Research. (In press)
- 2) T. Sayama, G. Ozawa, T. Kawakami, S. Nabesaka and K. Fukami: Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, Hydrological Sciences Journal, pp.298-312, 2012
- 3) 工藤俊、萬矢敦啓、E.D.P PERERA、小関博司、岩見洋一、中津川誠：メコン川下流域の洪水氾濫に対する観測結果を反映した河道条件の影響分析、土木学会論文集B1（水工学）、Vol.72、No.4、I_145～I_150、2016
- 4) 竹林洋史、中元達也、藤田正治：粘着性・非粘着性河床材料混在場における土砂輸送特性・トンレサップ川を対象として、京都大学防災研究所年報 第52号B、pp.637～645、2009
- 5) R. K. Biswas, A. Yorozuya and S. Egashira: Modified Gradient Based Method for Mapping Sandbars in Mega-Sized Braided River Using MODIS Image,” Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.72, No.4, I_931-I_936, 2016

工藤 俊



土木研究所水工研究グループ
水文チーム 研究員
Shun KUDO

萬矢敦啓



土木研究所水工研究グループ
水文チーム 主任研究員、Ph.D.
Atsuhiko YOROZUYA

岩見洋一



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 上席研究員
Yoichi IWAMI