# 人工衛星データを用いた洪水氾濫水位の 算出手法の検討 ーメコン川下流域を例としてー STUDY ABOUT ESTIMATION OF WATER SURFACE ELEVATION ON

INUNDATED AREA APPLYING SATELLITE BASED INFORMATION

# 萬矢敦啓<sup>1</sup>, 上米良秀行<sup>1</sup>, 岡積敏雄<sup>1</sup>, 郭栄珠<sup>1</sup> Atsuhiro YOROZUYA, Hideyuki KAMIMERA, Toshio OKAZUMI, and Youngjoo KWAK

1正会員 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター(〒305-8516 つくば市南原1-6)

The present study describes about processes to estimate a water surface elevation on inundated area applying satellite based information. For this purposes, 2011 large flood at Lower Mekong Basin was selected. Firstly, Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) was applied for obtained inundated area with calculating Modified Land Surface Water Index (MLSWI), which is the method originally proposed by the authors. Examination of MLSWI in Six month was conducted to classified the flood. Secondary, with combining the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and the inundated area, water surface elevation was determined. Finally, the water surface elevation was validated in terms of gauge data as well as water surface profiles.

Key Words : Estimation of WSE on inundated area, MODIS, SRTM, MLSWI, Satellite Based Info.

# 1. はじめに

近年,2011年のタイの洪水<sup>1)</sup>に代表されるように,世 界中で洪水災害が頻発している.このような洪水災害に 対する災害状況の把握,氾濫被害の算定等,リスクアセ スメントを実施すること,対象国の政策立案者に対して リスクマネージメントのための判断材料を提供すること, さらには洪水氾濫現象を考慮したリスク軽減策を提案す ることが,著者らの考える国際貢献の一つである.本論 文ではこれらの技術提案の最初のステップとなる洪水氾 濫水位の算出方法を検討する.

発展途上国に代表される電子地図の整備が充実してい ない地域における洪水氾濫水位を算出するために、 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 及び数値シ ミュレーションによる氾濫解析を用いる手法が一般的で ある.現にこれらのデータを用いた全球スケール<sup>20</sup>、ア ジア大陸など地域毎<sup>30</sup>及び流域規模<sup>11</sup>又は河道の一部<sup>40</sup>等、 あらゆるスケールに応じた氾濫解析も多数実施されてい て、このデータの高い貢献が窺える.また、萬矢らは Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) が計測す るPanchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) を基にステレオマッチング処 理を用いて作成したDigital Surface Model (PRISM DSM) を、高精度GPSを用いて修正することで、氾濫解析を実 施するに資する修正DSMを提案した<sup>5)</sup>.一方でこれらの氾 濫解析は初期・境界条件に大きく依存するため、特に境 界条件が明確でない地域における検討には、多少の不確 定要素が含まれることも否めない.

氾濫水域を算定する手法として、人工衛星を用いた手 法があげられる.例えばAlsdorfらはLandSat, Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), SPOTに代 表されるイメージセンサーを用いた手法,SAR画像を用 いた手法を紹介し、これらはいくつか限界はあるものの 実用に資する技術であることを指摘している<sup>60</sup>.また Kwak et al.はMODISから氾濫水を検出するための指標を つくり、それを用いて氾濫水域を算出している<sup>70</sup>.

カンボジア国メコン川下流域における洪水氾濫解析に 関してFujii et al. は各氾濫域にZoneを設定し、水バ ランスを算定し、数値計算により氾濫現象を議論してい る<sup>8</sup>.本検討では同氾濫地域に対して、2011年の洪水氾 濫を対象に、観測結果を基にした氾濫水位の算出を試み る.ここでは、MODISを用いた郭らの手法<sup>7)</sup>による氾濫 水域を算定し、SRTMのDSMを組み合わせることで氾濫原 におけるにおける氾濫水位を算出することを試みる.



図-1 対象領域(100km×90km):標高Hのコンター

# 2. 対象領域

本検討の対象領域をカンボジア国のメコン川流域とし, それを図-1に示す.また対象洪水は同流域において近年 で最も大規模な洪水であった2011年の出水とした.メコ ン川はチベット高原を源流として、中国、ミャンマー・ ラオス国境、ラオス・タイ国境、カンボジア、ベトナム を経て南シナ海に流れ込む.同川はカンボジア国の首都 であるPhnom PenhでTonle Sap湖から流れるTonle Sap川 と合流し、Bassac川と分流する.またKampong Chamから メコン川沿いに10km下流付近の図中のDivergeから、 Tonle Touch川が分流する. Kampong Chamにおけるメコ ン川の川幅が約1,200mであるのに対して、Divergeにお けるトンレトーチ川は70m程度である.メコン川本川に は、Kampong Cham、Phnom Penh、Neak Luongに、Tonle Sap川にはPrek Kdamに、Bassac川には、Koh Keolに水位 計がある.

図-2は2011年のKampong Cham, Phnom Penh, Neak Luongにおける水位変化, その時の水面勾配を示す. Kampong Chamにおける水位は,低水時の2.67mから徐々 に水位をあげ,9月25日最大の水位となる.このときの 値は16.02m,9月22日から30日まで一週間の平均水位は 15.74mであった.またPhnom Penhにおける水位は位相差 が出るため,ピーク水位は10月10日で,その時の水位は 10.86mとなる.また9月25日のNeak Leurngにおける水位 は7.84m,9月22日から30日まで一週間の平均水位は 7.89mであった.このときの水面勾配は概ね1/20,000程 度となる.

# 3. 手法

#### (1) MODISを用いた氾濫域の算出と氾濫域の特徴

本検討の対象領域における氾濫域を算定するために、



MODISの8日間のコンポジットデータを用いた. これはほ ぼ全球においてデータが存在すること,500mメッシュ値 であること、8日間のうちで雲などを取り除いた観測値 であることが特徴的である. データは2011年5月下旬か ら2011年11月下旬までのデータを用いた. 氾濫域の算出 にはKwak et al. の手法<sup>7)</sup>を採用し,それは以下に示す 過程を経る. 始めにMODISのband2(近赤外;NIR)及び band7(短波長赤外;SWIR)を用いて濁水を示す指標である Modified Land Surface Water Index (MLSWI)を次の式 を用いて算出する.

$$MLSWI = \frac{A_{SWIR} - R_{NIR}}{A_{SWIR} + R_{NIR}}$$
(1)

ここで $A_i$ ,  $R_i$ はそれぞれの波長の吸収率,反射率を示す. またこの<sub>i</sub>はNIR及びSWIRを示す.これらは $A_i$ (absorption ratio) = 1 -  $R_i$ (reflection ratio)の関係があること から,使用する式が導出される.次にMLSWIの閾値を設 定する.これは通常,0.5から0.8程度の数字を持つ.こ の値は,分光計などを用いた現地計測によるもの,又は DSM及び現地の水位データとの整合性から決定される. 前者は対象とする洪水時に現地計測をする必要がある. 本検討では後者の考え方を採用し0.64を採用した.詳細 は後述する.

図-3は2011年9月30日の結果を示す.図は図-1で示したSRTMのDSMのコンターに、MLSWIが0.64以上を示す全ての領域,氾濫域のZoneを示す.図が示すようにメコン川の氾濫は,Kampong Chamのさらに上流であるメコン川本川からの流入と,Tonle Sap湖から流れるTonle Sap川からの流入に大きく影響を受ける.紙面の都合上ここでは示さないが2011年5月から同年11月までの時系列を見ると,氾濫域を図に示す複数のZoneにわけることで対象領域の氾濫現象を分類できる.Zone1はMekong川の右岸に位置する領域で,領域内をMekong川の自然堤防で囲まれていること,Mekong川流域の特徴である灌漑システム(コルマタージュ)が複数存在することが特徴的である<sup>9</sup>.この領域はMekong川の水位が比較的低い7月下旬から領域内の水域の広がりが確認できる.これは灌漑システムの一部であるため必ずしも氾濫として認識されるもので

はないが、コルマタージュが有効に機能していることに なる.結果, Mekong川と氾濫域内の水位は強い関連があ り、特に本検討の洪水のような大規模出水においては、 両者の最大水位は等しいとして議論することも可能にな る<sup>10)</sup>. Zone2はFujii et alによるとTonle Sap湖の影響 を大きく受ける領域である<sup>8)</sup>. Zone3はMekong川左岸の氾 濫原である、この氾濫原は7月下旬から8月初旬にかける 水位が低いとき、トンレトーチ川沿いの一部に氾濫水の 広がりを確認することができる. それ以上の水位になる と図-1が示すDiverge周辺の自然堤防を越えて、メコン 川から氾濫水が入りこむようになる. これはあたかも図 -3の□で示すラインを中心とした氾濫水の流れのように なることを推察させる.また猪原らの報告<sup>9</sup>にもあるよ うに、Mekong川沿いにはZone3に流入する複数のコルマ タージュが存在するが、その長さはMekong川から数kmで ある. これらのことからZone3の氾濫水の多くはdiverge 周辺からの流入水であることが理解できる. Zone4及び5 はZone1と同様の傾向を持つ. 特にZone5は猪原<sup>9</sup>による と、コルマタージュの数が最も多い領域であるため、河 川水位と氾濫水位の関連性は、Zone1以上に強いことに なる.

次章においてはZone3に代表される河川水位と氾濫水 位の関連性が低い領域において、氾濫水位を推定する手 法を検討する.

#### (2) 氾濫水位の算定方法

図-4は図-1と同じコンター,□は氾濫流の中心として 決定したライン,□を中心とした円の範囲内の氾濫水位, ◆はDSMとMLSWIの接続点を示す.これらの情報から本検 討の氾濫水位の算定方法を以下に述べる.

a) ターゲットとする氾濫現象を考慮して口を決定す る. ここでは口の上流端付近においてKampong Chamの水 位計があること、下流端付近においても若干離れている ものの観測水位が推定できることが特徴的である. ここ では特に同両端の間の水面形を意識して□を配置する. b) □を中心とした検査円の範囲内においてMLSWI値が閾 値をまたぐ点を探す. ここではその検査円の半径を 7500m, 閾値を0.64とした. この結果, 自動検出された 地点を図-4の◆で示す. ここではMLSWIが閾値以下にな る理由を、その地点が周囲と比べて高いため水没してい ないと仮定する. c) ◆の地点におけるDSMの標高値を算 出し、それをW-DSMとする. ここで◆のMLSWIは0.64をま たぐ地点ではあるが、必ずしも0.64ぴったりの数字を持 つわけではない. ここではその隣のピクセルにおける MLSWIとSRTMの関係が線形に決まると仮定し、 MLSWIの 値が0.64に対応するW-DSMを算定する. d) □の水位及び 地盤高を決定する. ここではそれぞれの◆を最も近い□ にグループ化し、グループ内のすべてのW-DSMを平均し □の水位; AW-DSMとする. 同時にそのときの標準偏差 σ も算出する. また口の位置における地盤高をDSMから取



図-3 MLSWIの平面分布と氾濫域のZone



図-4 推定された氾濫水位及び対象領域の標高



り出し、それをB-DSMとする. 最後にe)AW-DSMの平面分 布を決定する. ここでは□が受け持つb)の検査円内のグ リッドの水位をAW-DSMと定義しそれを氾濫水位とする. 上記のa)からe)の過程を踏むことで氾濫水位の平面分布 が算出できた.

次にd)で算出した,AW-DSM, σ, B-DSMを縦軸に,□ の最上流端からの距離を横軸に描画したものを図-5に示 す.図-5の上流端における算定水位は15.4m,下流端に おける算定水位は8.33mとなった.一方,図-2で示した ようにKampong Cham, Neak Luongの9月下旬における計 測水位はそれぞれ15.74m,7.89mである.図-5の下流端 に対応する位置からNeak Luongの距離は20km程度である ため,そのときの水面勾配が1/20,000程度であることを 考慮し,下流端における計測水位を8.89mとした.その 結果,図-5の両端における算定及び計測水位の差は,上 流端で0.34m,下流端で0.56mとなった.

# 4. 考察

図-5の水位の縦断分布を決定するにあたり、3.(2)で 説明した算定手法の過程の中で、b)で採用した検査円の 半径、SRTMの質、MLSWIの閾値によってAW-DSM、 $\sigma$ は異な る値を持つことが想定される.例えば検査円の半径が大 きすぎると異なるzoneの氾濫現象を拾い、逆に小さすぎ ると拾えない.サンプリングの良し悪しは図-4の◆の分 布状況で判断することができる.本検討ではこの円の半 径を5kmから9kmに変化させて感度分析を実施した.結果、 AW-DSM、 $\sigma$ の変化は微小であるものの、5kmを選択した場 合、不自然な水面形になった.この結果を受け、本検討 では検査円の半径を7.5kmとした.

次にSRTMの質に関して議論を進める.例えばSRTMの生 データを使用すると、水位の標準偏差が大きくなる.こ れはDSMが持つジッタノイズを含んだ、ばらつきの大き な標高を拾うことに起因する.このようなノイズを消す ために、萬矢らが提案した手法の一要素である検査窓の サイズを変化させる感度分析を実施した.同サイズを5 ×5、10×10、25×25、50×50と4段階に変化させた結 果、図-5の30km近辺の標準偏差に着目すると、それぞれ 2.3m、2.0m、1.3m、0.93mとなった.この結果を受け、ここ では25×25を採用した.

最後にMLSWIの閾値である.これは水域の分布に大きな影響を及ぼす値である.ここではこれまでの議論とは 逆説的ではあるが現地の水位データに合うように閾値を 決定した.

図-5が示す水面形は以下の特徴を持つ.0から22kmまで1/10k,22kmから40km付近までほぼ平坦,40kmから下 流端までが1/4k程度の水面勾配を持つ.また図-5の44km において東西に国道8号線が位置する.この道路は比高 差が4~5m程度の道路盛土を持つ.ところどころアン ダーパスがあるため氾濫流を完全に阻害することにはな らないが,図-5の水面形を平坦にする要因はこの道路盛 土によるものであることが推定できる.

# 5. 結論

結論を以下に示す.1)人工衛星から得られる情報を 用いて洪水氾濫水位の算出を試みた.対象領域をカンボ ジア国内のメコン川下流域とし、2011年洪水に関して分 析をした.2)使用したデータはSRTM, MODIS及び現地の 水位データである.3)Kwak et al.の提案するMLSWIを 用いて5月下旬から11月下旬の氾濫現象を分析し、氾濫 域を区分けし、本論文で検討する領域を決定した.4) MLSWIから算出した水域とSRTMのDSMから氾濫水位を面的 に算出した.この結果を用いて水位の縦断分布を考察し た結果、現地の河川構造物から水面形の妥当性を得た.

謝辞:MRCから現地の水位データの提供を受けた.ここ に記して感謝の意を示す.

#### 参考文献

- 1) 佐山ら: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B,印刷中
- 2) 竹内ら:気候変動に伴う全休及び特定脆弱地域への洪水リス ク影響と減災対策の評価,21世紀気候変動予測革新プログラ ム、平成23年度研究成果報告書、平成24年3月.
- Youngjoo Kwak et al.: A new approach to flood risk assessment in Asia-Pacific region based on MRI-AGCM outputs, Hydrological Research Letters 6, 70-75 (2012)
- Dai Yamazaki et al. : Adjustment of a spaceborne DEM for use in floodplain hydrodynamic modeling, Journal of Hydrology 436-437 (2012) 81-91
- 5) 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.
- Alsdorf, D. E., E. Rodriguez, and D. P. Lettenmaier (2007), Measuring surface water from space, Rev. Geophys., 45, RG2002, doi:10.1029/2006RG000197.
- Kwak, Y. et al.: Estimation of flood volume in Chao Phraya river basin, Thailand from MODIS images coupled with flood Inundation level, IEEE-IGARSS2012, pp. 887-890., 2012.
- Fujii et al. Hydrological roles of the Cambodian floodplain of the Mekong River, International Journal of River Basin Management, Vol. 1, Iss. 3, 2003, doi:10.1080/15715124.2003.9635211
- 9)猪原:カンボジアにおけるコルマタージュの持つ洪水緩和機能の定量的評価,平成19年度鳥取大学農学部卒業論文要旨
- 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.

(2013.4.4受付)