

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

INFLUENCE ANALYSIS OF OBSERVED RIVER CHANNEL CONDITIONS ON INUNDATION PROCESS IN LOWER MEKONG RIVER BASIN

工藤俊¹・萬矢敦啓²・E.D.P PERERA³・小関博司¹・岩見洋一¹・中津川誠⁴
Shun KUDO, Atsuhiro YOROZUYA, E.D.P PERERA, Hiroshi KOSEKI, Yoichi IWAMI and
Makoto NAKATSUGAWA

¹正会員 工修 国立研究開発法人土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 Ph.D 国立研究開発法人土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³非会員 Ph.D 国立研究開発法人土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴正会員 博(工) 室蘭工業大学大学院 工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

This study aims to analyze the influence of observed river channel conditions on inundation simulation in terms of discharge within a river channel and inundation area and depth over a floodplain. The target area is the Lower Mekong River Basin, which suffered from severe floods in 2000 and 2011. First, measurement using an acoustic Doppler current profiler is conducted to understand the longitudinal distribution of cross sectional shapes and roughness change during a flood in a river channel. Based on the observation results, inundation simulation with the Rainfall-Runoff-Inundation model is conducted. The calculation results show that the reproducibility of discharge improves by taking the longitudinal distribution of the width and depth of the river reach into consideration, and that the water depth over the floodplain has a high sensitivity to both cross sectional shapes and roughness change during the flood.

Key Words : Inundation simulation, Observation, Cross sectional shape, Roughness change

1. はじめに

洪水被害を軽減するための対策を講じるには、あらかじめ洪水時の河道内の流量などの基礎的な水文量及び、氾濫域や氾濫水深など被害に直結する情報を把握することが不可欠であり、これらの現象を予測するモデルを構築することは重要である。図-1は、本研究で対象とするメコン川下流域を示す。この地域では2000年と2011年に大きな洪水被害が発生し、特に2000年洪水はカンボジア24州のうち18州が被災するほどの甚大な被害であった¹⁾。当該地域ではプノンペン付近でメコン川本川にトンレサップ川が合流し、その直後にバサック川に分流する。さらに洪水期はトンレサップ川が逆流するなど、複雑な流下特性を持つ特徴がある。また、後述するように川幅は急拡大と急縮を繰り返すことと、洪水期の粗度係数が時々刻々と変化する²⁾ことが特徴的である。河道の横断形状及び粗度係数は河道の流下能力に直接的に関係するため、洪水氾濫解析においてこれを的確にモデル化する

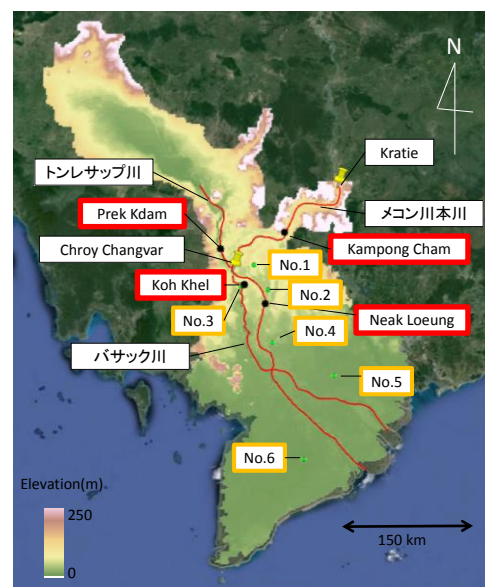


図-1 解析対象範囲 (Google earthから得た衛星写真にDSMを重ねた上で追記したもの。赤枠の地点は流量検証地点、オレンジ枠の地点は氾濫水深検証地点を表す。)

ことは重要である。その一方で、一般的に発展途上国の流域では観測データは限られるため、このような流域ではモデルの構築においては単純化する必要がある。例えば、川幅など河道の横断形状は一般的にレジーム則³⁾などを用いて設定する場合が多く、河道の粗度係数はハイドログラフを概ね再現できるような値を、一般的に使用される範囲の中から一定値として与える場合が多い。このような背景を踏まえ、本研究ではメコン川下流域を対象として、acoustic Doppler current profiler（以下、ADCP）を用いた観測を実施し、観測結果から得られた河道条件をモデルに反映した計算を実施し、その影響を分析する。具体的には、川幅、河道高さ、河道の粗度係数に着目し、観測結果を踏まえてこれらの河道条件を緻密にモデルに反映した場合に、単純化させる仮定を用いる場合に対して河道流量、氾濫域、氾濫水深がどの程度変化するかを分析する。

2. 河道特性

筆者らは2013年12月と2014年10月にADCPを用いた観測を実施した。観測はプノンペン周辺で実施し、主に横断観測により流量と断面形状を得つつ、縦断方向に大きく移動する際には河床高計測を目的とした縦断観測も併せて実施した。図-2には観測時の航路の一例を示す。なお、プノンペン付近における観測の詳細は萬矢ら⁴⁾を参照されたい。2009年にはメコン河委員会事務局（以下、MRCS）によりカンボジア国内の複数の水位計設置地点で流量観測が集中的に実施された⁵⁾。ここではこれらの観測から得られたデータを用いて河道特性の分析を行う。

図-3はChroy ChangvarからKampong Chamまで約2 km間隔の観測により得られた川幅と平均水深の縦断分布である。ここで、平均水深は流積を川幅で除したものである。図中に水と土砂の連続式、マンニングの平均流速公式、流砂量式から導出した川幅と水深の関係式⁶⁾から推定した計算水深を示す。計算式は次の通りである。



図-2 2014年10月12日、13日の観測における船の航路（背景画像はGoogle earthより）

$$h_{n+1} = h_n \cdot \left(\frac{B_{n+1}}{B_n} \right)^{-24/35} \quad (1)$$

ここで、 h 、 B はそれぞれ水深、川幅を表し、 n 、 $n+1$ はある任意地点とその上流または下流地点を意味する。

同式によれば、川幅が大きい地点では水深が小さく、川幅が小さい地点では水深が大きい関係にあることがわかる。計算水深と実測平均水深の比較より、両者は良好に一致することがわかる。このことは、衛星情報から得た川幅分布とある一点の水深の計測結果があれば、連続式を満たす区間内では水深分布を推定できることを表す。

図-4はChroy Changvar地点（図-1参照）における観測データの断面平均値を用いて τ_* - τ_*' 関係を分析した結果を示す。ここで、 τ_* は無次元掃流力のことであり、 τ_*' は無次元有効掃流力と呼ばれる平坦河床見合いの物理量である。すなわち、両者の関係の分析から、表面抵抗と形状抵抗それぞれが全抵抗に対しどれほど寄与するか把握できる。なお、粒径はプノンペン周辺で実施された竹林ら⁷⁾の観測結果を参考に0.5 mmを用いる。観測結果から得られるデータとEngelund⁸⁾が提案した τ_* - τ_*' 関係を比較すると、観測データは特に τ_* が0.4以上の範囲においてEngelundが提案したものと良く一致している。一方で τ_* が小さい場合は両者に乖離が見られる。図のように、観測データの τ_* は大きく、 τ_*' は小さい。観測データの中で最小の τ_*' は約0.025となる。また、Shieldsダイアグラム⁹⁾から無次元限界掃流力を調べると約0.03であり上述の τ_*' とほぼ同一の値となる。そこで、この

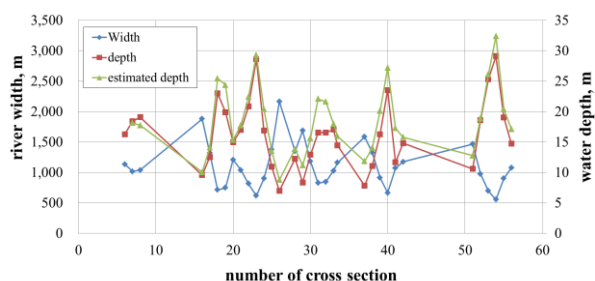


図-3 川幅、実測平均水深、計算水深の関係

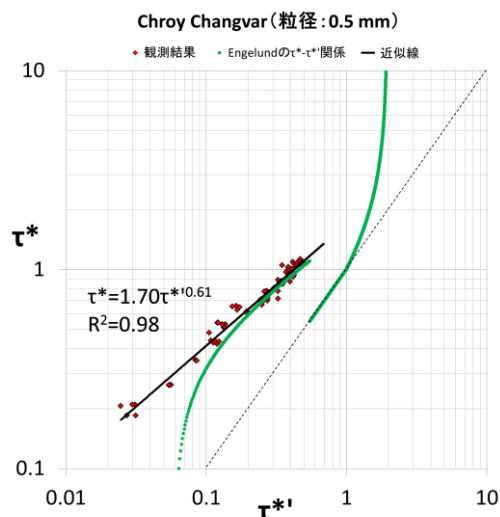


図-4 τ_* - τ_*' の分析結果（工藤ら²⁾の図を加工したもの）

ような領域で土砂移動を前提とした粗度変化を議論することが妥当であるか精査するために τ_*' の横断分布を調べると、流心では τ_*' は約0.045であった。これより、流心付近では土砂移動が発生すると考えられ、河床波等による粗度変化が起こると推測される。そこで、本研究では観測結果を両対数における直線近似で表した式、すなわち $\tau_* = 1.70\tau_*'^{0.61}$ を用いて粗度変化を計算する。図-5は、Chroy Changvar地点の τ_* と粗度係数の関係である。粗度係数はマニングの平均流速公式から逆算したものと、上述の $\tau_* = 1.70\tau_*'^{0.61}$ から計算したものを示す。これより、両者は良く一致することがわかる。また、粗度係数は τ_* の増加に伴い小さくなることが特徴的である。

筆者らのADCP観測ではChroy Changvar地点よりも上流側において、河床高計測を目的とした縦断観測を実施した。その結果によると、乾季である2013年12月15日の平均的な河床波の波長は87m、波高は3.1mである。一方で、洪水期である2014年10月12日の平均的な河床波の波長は111m、波高は1.7mである。両者を比較すると洪水期の方が波長が長く波高は低い。すなわち、洪水期の方が河床波による流水抵抗が小さく、これは粗度係数が τ_* の増加に伴い低下することと整合する。なお、河床変動の状況を分析するために、Chroy Changvar地点における2013年12月14日と2014年10月10日の平均河床高を比較した結果、その差は約3 cmであった。これは2回の観測結果の比較であるため更なる検証が必要であるものの、当該地点では大規模な河床変動は確認されなかった。

3. 洪水氾濫解析及び計算条件

本研究では降雨流出と氾濫を一体的に解く手法を採用し、佐山ら¹⁰⁾が開発した降雨流出氾濫モデル（以下、RRIモデル）を用いる。RRIモデルの詳細な基礎式などについては既往文献¹⁰⁾を参照されたい。

DSM (Digital Surface Model)はHydroSHEDSから得たものを60sec (約2 km) に低分解能化¹¹⁾して用いる。本研究の対象地点は緩勾配の低平地が広がることから、側方地中流は考慮せずGreen Amptモデルにより鉛直浸透流を考慮した。Green Amptモデルのパラメータについては、本研究の対象地域ではClay loamが広く分布することを踏まえ、これに準拠する値¹²⁾として鉛直方向の飽和浸透係数は 5.56×10^{-7} m/s、土壌の空隙率は0.464、湿潤前線における吸引圧は0.209 mを用いる。斜面の粗度係数は土地利

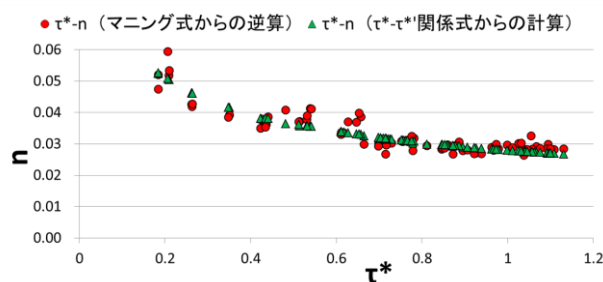


図-5 τ_* と粗度係数の関係（工藤ら²⁾の図を加工したもの）

用を勘案して0.4を用いる。なお、これらのパラメータの値は最初に設定したものから変更せず、川幅及び河道高さの変更のみで後述するケース2における流量のNash効率係数が得られた。降水量は解析対象範囲内の地上雨量計の観測データをThiessen法で補間して用いる。蒸発散量についてはZhouら¹³⁾により推定された可能蒸発散量を用いる。境界条件はKratie地点の観測流量を上流端境界条件として与える。計算対象期間は大規模な洪水が発生した2000年とし、1999年の一年間を助走期間として設ける。また、プノンペン付近でメコン川本川とバサック川に分流する地点と、下流部でメコン川本川とバサック川が合流した直後に再び分流する地点の2点を分派点として設定しており、メコン川本川からバサック川への分派率はADCP観測結果を踏まえて0.11とし、下流の地点の分派率は川幅がほぼ同一であることから0.5とする。

河道条件は3ケースを設定する。ケース1では川幅及び河道高さを区間内一定とし、粗度係数も一定値として最も単純化する仮定を用いる。ケース2では川幅及び河道高さはグリッド毎に分布させ、粗度係数は一定値とする。ケース3では川幅及び河道高さをグリッド毎に分布させ、かつ粗度係数も時々刻々と変化させて河道条件を最も緻密に与える。ここで、河道高さとは河道を矩形と仮定した上での河床から川岸までの高さのことであり、本研究では堤防高は考慮しない。なお、ケース1及び2の粗度係数は図-5に示すデータの平均的な値として0.035を与える。ケース1～3の河道条件の作成手順を以下に示す。

ケース1：川幅、河道高さを一定、粗度係数を一定。

- ①衛星画像から各区間の平均的な川幅を得る。
- ②ADCP観測結果から、それぞれの区間につき1点の流積を得た上で、流積を川幅で除して区間毎に水深を算出。
- ③水面から川岸までの高さを水深に加算して河道高さを得る。本研究では、現地観測の状況から2 mを水深に加算して河道高さとした。

図-6に設定された河道高さを示す。支流及び、2つに分派する下流域エリアの河道高さについては観測データを所有していない。そこで、支川については他のエリア

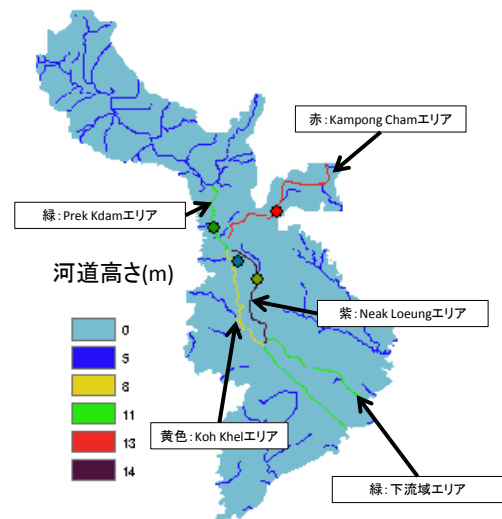


図-6 ケース1における河道高さの分布

よりも小さい値として5 mとした。下流域エリアについては、2つの河道の流積が同一であると仮定し、分派する2つの河道の川幅がほぼ同一であることを踏まえて、Koh KhelエリアとNeak Loeungエリアの河道高さの平均をそれぞれの河道高さとした。

ケース2：川幅、河道高さを分布、粗度係数を一定。

- ①衛星画像からグリッド毎の川幅分布を得る。
- ②ADCP観測結果から、それぞれの区間につき1点の流積を得て水深を算出した上で、式(1)を用いてグリッド毎の水深分布を得る。
- ③観測水位を直線近似で内挿しグリッド毎の水位を得る。
- ④水位から水深を差し引きグリッド毎の河床高を得る。
- ⑤DSMから河床高を差し引きグリッド毎の河道高さを得る。

ケース2では、プノンペン付近で合流、分流する4つのエリアについてグリッド毎の値を与え、支流及び下流域エリアについてはケース1と同一の値を与えた。

ケース3：川幅、河道高さを分布、粗度係数を変動。

- ①各タイムステップ、グリッド毎に水深及び水面勾配を用いて τ_* の値を得る。なお、土砂の水中比重は1.65とし、粒径は、0.5 mmを計算範囲内で一定値として与えた。
- ② $\tau_* = 1.70\tau_*^{0.61}$ に従い、 τ_* から τ_*' を得る。
- ③ τ_*' から、平坦河床見合いの水深(R')を得る。
- ④流速の対数分布から導出した平均流速の式： $u = \sqrt{gR'I} \left(6.0 + 2.5 \ln \frac{R'}{2d} \right)$ とマンニングの平均流速公式： $u = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$ から粗度係数(n)を計算し、各グリッドの次のタイムステップの計算に反映する。

図-7はケース3で計算されたKampong Cham地点の粗度係数の時系列変化を表したものである。粗度係数が洪水期に低下し、この時々刻々と変化する粗度係数が各

タイムステップの計算に反映される。なお、粗度係数が非現実的な値になることを避けるために、計算された粗度係数が0.05以上となる場合は0.05を用いる。図-4の近似線は主に洪水期の観測データから作成したものであり、乾季の粗度係数の変化はさらに観測及び分析を進める必要があるものの、本研究では洪水氾濫解析を主眼としているため、このようにして定めた値を用いる。図-7では洪水期の粗度係数は0.03程度まで低下し、図-5に示す粗度係数の最小値と同程度の値となることが確認できる。

4. 計算結果と考察

図-1に示す4観測地点において観測流量と計算流量の比較を行う。図-8は各地点、各ケースのハイドログラフ及びNash効率係数を示したものである。Kampong Cham地点では、すべてのケースで良好な計算結果が得られる。Prek Kdam地点ではNash効率係数は比較的低い値となるものの、洪水期のトンレサップ川の逆流を再現できており、これはメコン川とトンレサップ川の水位の関係を妥当に計算できている成果である。Neak Loeung地点では洪水逓減期に計算流量が過小となる傾向があるものの、ピーク流量は妥当に再現できている。ここで、Koh Khel地点の計算結果に着目すると、ケース1で過大であった計算流量がケース2及びケース3では大きく改善され、観測流量に近づくことが確認できる。川幅及び河道高さの変更によるものであり、これについて詳しく分析するために、表-1に各地点、各ケースの川幅、河道高さ、断面積を示す。各地点の断面積の変化割合を比較すると、Koh Khel地点では変化割合が0.38であり特に小さく、断面積がケース2及びケース3で大きく減少する。このこと

表-1 各地点、各ケースの川幅、河道高さ、断面積

	Kampong Cham	Prek Kdam	Neak Loeung	Koh Khel
Case1	Width(m) 2000 Depth(m) 13.00 Area(m ²) 26000	750 11.00 8250	2000 14.00 28000	500 8.00 4000
Case2及びCase3	Width(m) 1500 Depth(m) 14.42 Area(m ²) 21630	700 9.19 6433	1000 19.02 19020	400 3.76 1504
Areaの変化割合	0.83	0.78	0.68	0.38

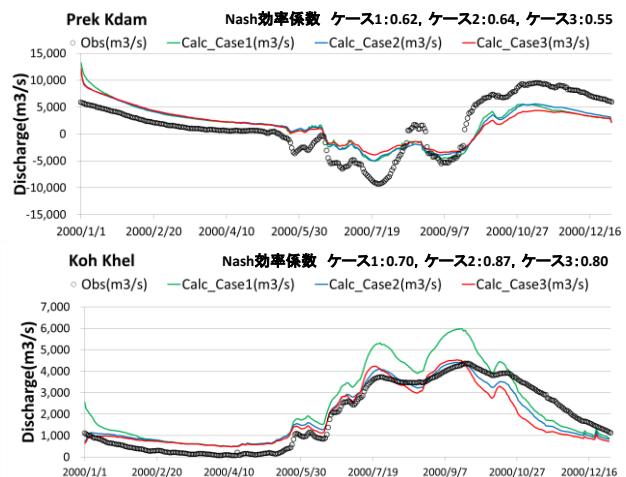
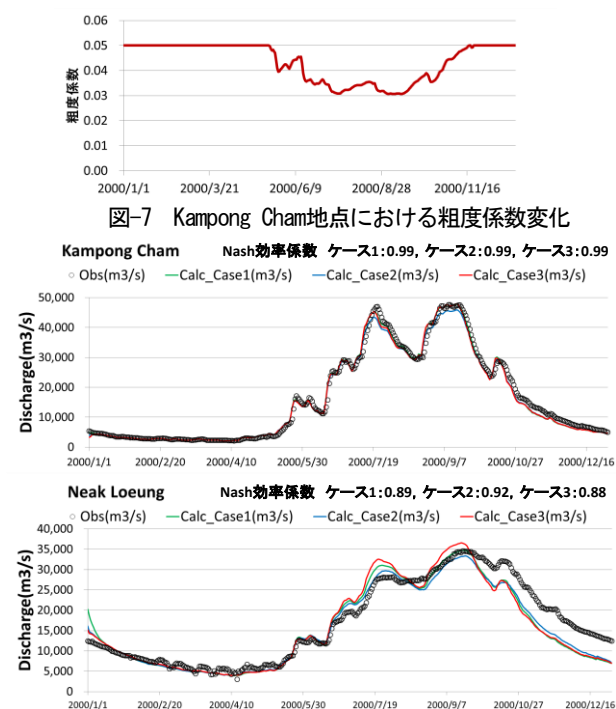


図-8 各地点における観測流量と計算流量の比較

から、ケース1で過大に与えられていた断面積が修正されて河道容量が適切なものとなり、河道の水が適切に溢れて氾濫水へ回ようになった（または氾濫水の河道への流入が適切に抑制された）結果として流量の再現性が大きく向上したと推察される。なお、Neak Loeng地点及びKoh Khel地点の洪水逓減期では計算流量が過小となっているが、これはトンレサップ川からメコン川本川への流入が過小であることが理由の一つとして考えられる。地点ごとに各ケースのNash効率係数を比較すると、ケース2ではケース1よりも精度が向上することが確認でき、川幅、河道高さを緻密にモデルに反映させることで河道の流量の精度が向上することがわかる。

図-9に2000年洪水の際にメコン河委員会が示した推定氾濫域図と、ケース3で計算された最大氾濫域を示す。これにより計算氾濫域は推定氾濫域を概ね再現していることが確認できる。各ケースの精度を比較するために、以下に示すFIT指標を用いて各ケースの値を比較する。

$$FIT = \frac{IA_{obs} \cap IA_{sim}}{IA_{obs} \cup IA_{sim}} \quad (2)$$

ここで、 IA_{obs} 、 IA_{sim} はそれぞれ推定氾濫域及び計算氾濫域を表す。なお、トンレサップ湖の湖面域と氾濫域を分けた上で比較するために、Prek Kdam地点の上流域を除いた範囲でFIT指標を算出する。

FIT指標はケース1で0.49、ケース2で0.51、ケース3で0.52となり、洪水時の粗度変化を考慮するケース3で最も高い値となる。また、紙面の都合上図は省略するが、最下流域で、ケース1からケース3にかけて計算氾濫域が過大である傾向が改善されていくことが特徴的である。

次に、図-1に示したNo.1～No.6の地点で、各ケースの氾濫水深を比較する。なお、No.3はKoh Khel地点の直近として抽出した地点であり、その他の地点は氾濫原内で空間的な偏りがないように無作為に抽出した。図-10に

各地点、各ケースの氾濫水深の時系列変化を示す。No.3のケース1とケース2を比較すると、ケース2の方が氾濫水深が大きい値で推移することが確認できる。これはKoh Khel地点の河道内の流量と氾濫水の関係、すなわち川幅及び河道高さが小さく修正され、流量が小さい値となる一方で氾濫に回る水が増加するためと推察される。

各地点の結果を見ると、ケース間の変化が顕著な地点と比較的変化が小さい地点があり、特にNo.1では変化が大きい。ケース1のピーク水深は約0.5 m、ケース2のピーク水深は約0.9 m、ケース3のピーク水深は約0.5 mである。言い換えると、川幅及び河道高さを緻密に反映するとピーク水深が約1.8倍となり、洪水時の粗度変化を考慮するとピーク水深が約0.6倍となる。このことから、氾濫水深において河道条件が非常に高い感度を有する地点があることがわかる。また、比較的上流側に位置するNo.1～No.3では、ケース1よりもケース2の方が氾濫水深が増加する一方で、比較的下流側に位置するNo.4～No.6では、ケース1よりもケース2の方が氾濫水深が減少するという違いがある。Koh Khel地点のように河道の断面積

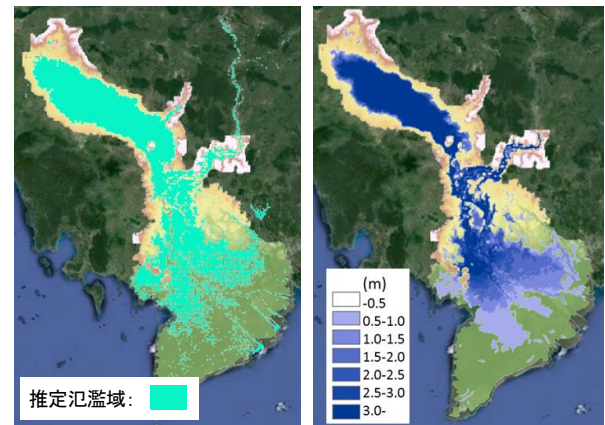


図-9 氾濫域の比較（左：メコン河委員会による推定、右：ケース3の最大氾濫域）

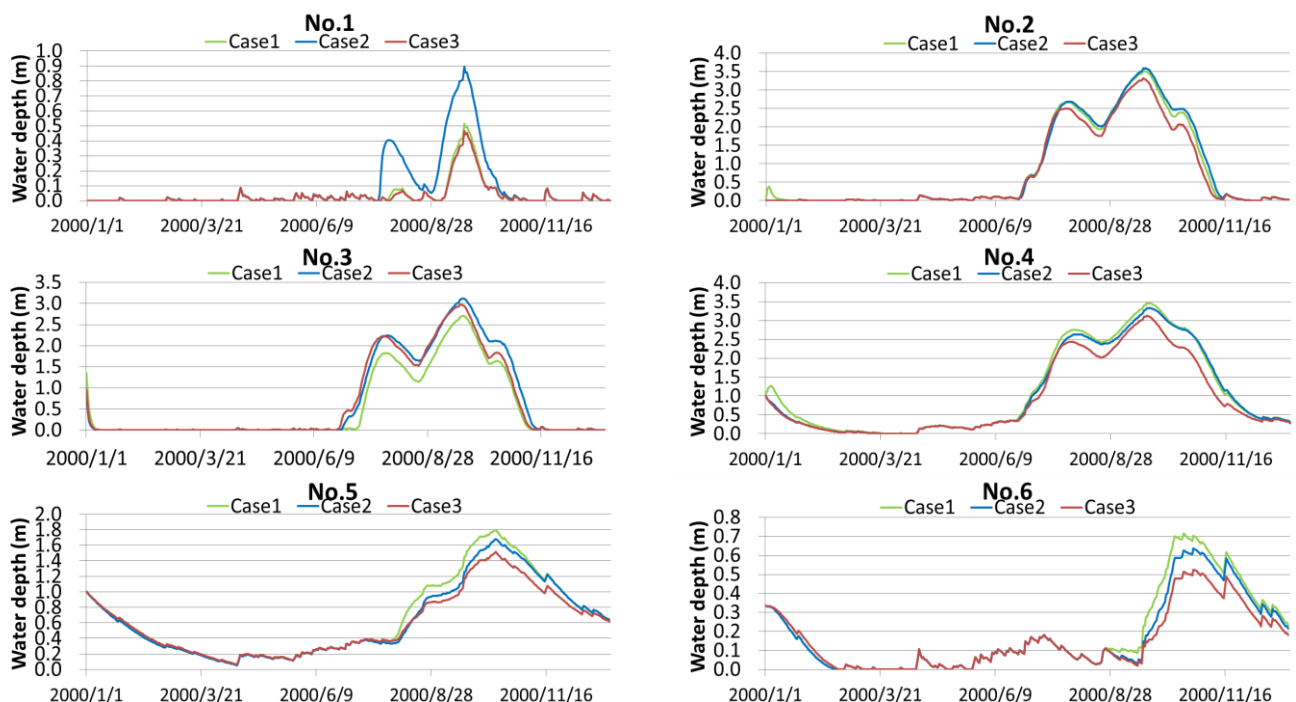


図-10 各地点、各ケースにおける氾濫水深

が小さく修正される箇所では氾濫水深が大きくなり、河道内の水は少なくなることを踏まえて理由を考察すると、計算領域の上流側で河道の水が氾濫に回りやすくなり氾濫水が多くなる一方で、河道を伝って下流へ伝達される水は少なくなるため下流側では氾濫水も減少して水深が小さくなると考えられる。また、ケース2とケース3を比較すると、いずれの地点でもケース3で氾濫水深が減少する。これは、洪水期の粗度係数の低下、すなわち河道の通水能の向上を計算に反映した結果、河道が受け持つ水が増えて氾濫に回る水が少なくなるためと推察される。また、ケース間のピーク水深の差としてはNo.1, No.3で見られるように最大で40 cmほどとなる結果になった。

5. まとめ

観測結果を踏まえた川幅、河道高さの分布及び粗度変化をモデルに反映した洪水氾濫解析を実施し、その影響を調べた結果、以下の成果が得られた。

- 1) 川幅及び河道高さをグリッド毎に分布させてモデルに反映した結果、他のパラメータの調整を施すことなく観測流量と計算流量のNash効率係数が向上した。特にKoh Khel地点で大きく向上し、これは河道の断面積を小さく修正することで河道の水が適切に氾濫水へ分配されることに起因する。
- 2) 洪水時の粗度係数の変化をモデルに反映した結果、メコン河委員会により推定された氾濫域と計算氾濫域のFIT指標が向上した。
- 3) 対象範囲内で複数の地点を抽出して氾濫水深の時系列変化を分析した結果、上流側で氾濫水深が増加する一方で、下流側では減少する結果となった。これはKoh Khelなどの地点で氾濫水が増加する一方で、河道を伝って下流側に流れる水が減少するためと推察される。
- 4) 粗度係数の変化をモデルに反映した場合は、洪水ピーク付近における粗度係数が低下して河道の通水能が向上する。その結果、氾濫水深は今回抽出した全ての地点で小さくなる。今回抽出した地点の中では最大40 cm程度小さくなった。

今後の検討としては、トンレサップ川からメコン川本川への流入量をさらに精査することが挙げられる。具体的には、本研究ではトンレサップ湖の湖底の形状はDSMをそのまま使用しているが、これをさらに正確にモデルに反映することで湖の湛水量及びトンレサップ川への流出量の精度向上が期待できる。メコン川下流域のように複雑な流下特性を持ち、頻繁に氾濫が発生する地域で洪水氾濫計算の精度を向上させることは、当該地域の洪水防災対策を推進する上で重要であると考えられる。

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。さらに、土木研究所ICHARMの江頭進治研究・研修指導監から本研究の遂行にあたり種々のご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) United Nations in Cambodia: CAMBODIA – Flood Season Situation Report #8, 2011.
- 2) 工藤俊, 萬矢敦啓, 小関博司, 岩見洋一, 中津川誠: メコン川の流水抵抗を踏まえた流量の推定, 第23回地球環境シンポジウム講演集, pp.11-16, 2015.
- 3) 井上和則: 沖積地の安定な流路幅に関する既往研究の総説の試み, 河川技術論文集, 第17巻, pp.113-118, 2011.
- 4) 萬矢敦啓, 本永良樹, 岩見洋一: 大陸河川におけるADCPを用いた流況・流量・河床高観測の注意点と観測結果の一例, 河川流量観測の新時代, 第4巻, pp.48-56, 2014.
- 5) Mekong River Commission Secretariat: FINAL REPORT on IMPLEMENTATION OF DISCHARGE MEASUREMENTS ON THE MEKONG MAINSTREAM, THE TONLE SAP RIVER AND BASSAC RIVER IN THE KINGDOM OF CAMBODIA, 2010.
- 6) A. Yorozuya, Md. Islam, M. Kamoto and S. Egashira: Influence of Jamuna Bridge on river morphology, Advances in River Sediment Research, Fukuoka et al.(eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 299-308, 2013.
- 7) 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.
- 8) Engelund, F.: Closure to “Hydraulic Resistance of Alluvial Streams,” Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, No. HY-4, pp. 287-296, 1967.
- 9) 土木学会: 水理公式集[平成11年度版], 1999.
- 10) 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, pp.14-29, 2013.
- 11) 舩谷敬一, 赤井計之, 馬籠純: 格子状疑似河道網のスケール変換に関する新しい方法, 水文・水資源学会誌, 19(2), pp.139-150, 2006.
- 12) Raws, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L. and Shirmohammadi, A.: Infiltration and soil water movement, Handbook of Hydrology, McGraw-Hill Inc., New York, 5.1-5.51, 1992.
- 13) M.C. Zhou, H. Ishidaira, H.P. Hapuarachchi, J. Magome, A.S. Kiem, K. Takeuchi.: Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model and NOAA-AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River Basin, Journal of Hydrology, 327, pp.151-173, 2006.