

3. メコン川の流水抵抗を踏まえた流量の推定

工藤 俊^{1*}・萬矢 敦啓¹・小関 博司¹・岩見 洋一¹・中津川 誠²

¹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室蘭工業大学大学院 工学研究科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

* E-mail: s-kudou@pwri.go.jp

本研究はメコン川を対象に、流水抵抗の分析とそれを踏まえた流量の推定を行うものである。メコン川では2011年にカンボジアの24州のうち18州が被災する甚大な洪水被害が発生した。洪水時の正確なピーク流量の把握は流域管理上重要であるが、一般的にH-Q式を用いて外挿により算出する流量は必ずしも正確ではなく、その一因は洪水中の粗度変化によるものと知られている。そこで本研究では、メコン河委員会事務局及び土木研究所がそれぞれ実施した流量観測結果を用いて流水抵抗の分析を行った。その上で洪水中の粗度変化を踏まえた流量の計算を実施し、粗度がLower Regimeに従う場合と、粗度が砂粒粗度のみの場合それぞれにおける流量を示すとともに、メコン河委員会によって推定される流量との比較を行った。

Key Words : *hydraulic resistance, micro-scale bed form, field observation, Mekong river*

1. はじめに

メコン川では2000年と2011年に大規模な洪水が発生した。カンボジアでは2000年洪水は過去70年で最大の被害をもたらしたとされており¹⁾、2011年洪水もそれ以来の大規模なものであった。2011年洪水は平年の約1.2倍から1.8倍の降水量²⁾によりもたらされた洪水であり、カンボジア24州のうち18州が被災³⁾するほど甚大な被害であった。このような洪水時に観測を実施し、水理量を把握した上でそれに適応できる対策を取っておくことは、将来発生すると思われる同等またはさらに大規模な洪水の被害を最小限に抑えるために重要である。2011年洪水の際は、メコン河委員会(MRC)によって最大氾濫域や河川水位などをまとめた報告書⁴⁾が作成された。また、メコン河委員会事務局(MRCS)は2009年の洪水期にカンボジア国内で多くの流量観測を実施し、水面勾配を考慮したH-Q式を作成した⁵⁾。一般的なH-Q式を用いる手法は水位から流量を簡便に推定できる手法であり、日本でも広く用いられている。しかしながら、水位が非常に高く外挿により流量値を得る場合はその値が必ずしも正確ではない場合もある。また、特に流量が大きい範囲では一つの観測地点で複数のH-Q式を使い分けている地点も存在する。こ

れらの理由の一つとして洪水中の粗度変化により流量が不連続に変化することが挙げられる。洪水中の粗度変化に関する研究として、小規模河床波に着目した研究が以下のように進められてきた。

Simons et al.⁶⁾は計測データから各河床形態とフルード数、摩擦損失係数などの水理量の関係を議論している。Engelund⁷⁾は無次元掃流力(以下、 τ_*)と無次元有効掃流力(以下、 τ_*')の間には一義的な関係があるとして $\tau_* - \tau_*'$ 関係を定式化した。岸・黒木⁸⁾はEngelundの理論を踏まえ、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係の説明変数として相対水深(R/d)を新たに導入して各河床形態における $\tau_* - \tau_*'$ 関係式を提案した。また、山本⁹⁾は流速係数と無次元掃流力とR/dの関係図を示しており、実験資料のない領域についても河床形態ごとに関係を推定したことが特徴的である。一方、数値解析を用いた研究として、例えば、山口ら¹⁰⁾、泉ら¹¹⁾は線形及び弱非線形安定解析を行い、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係の二価性の理論的説明を行った。さらに、実スケール河床波に関する研究としては柿沼ら¹²⁾による十勝川の千代田実験水路の実験的研究などが挙げられ、実河川を対象とした研究としては平井ら¹³⁾による昭和56年8月に石狩川で発生した洪水の観測データを分析した例や工藤¹⁴⁾らによる洪水中の浮子観測結果を用いて $\tau_* - \tau_*'$ 関係の理論から水位-

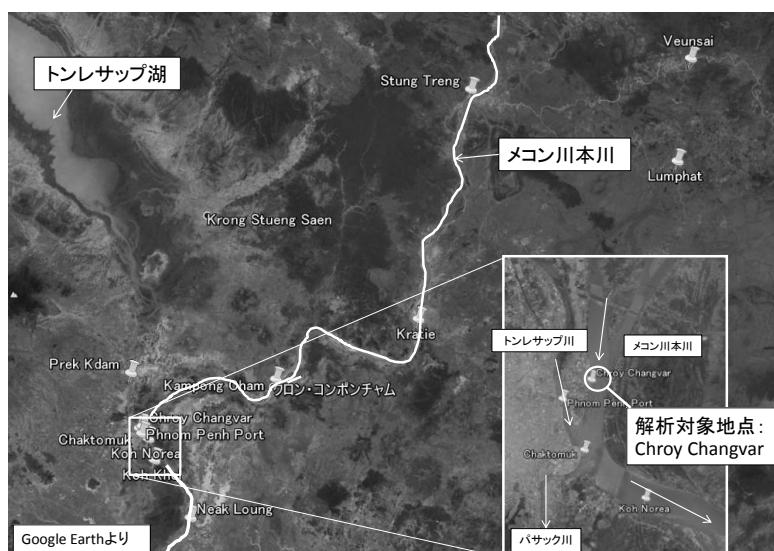


図-1 MRCS による流量観測地点と解析対象地点



図-2 土木研究所による観測の航路 (2014 年 10 月 13 日)

流量関係を検討した例がある。

本研究では、最初にMRCSと土木研究所がそれぞれADCP等を用いた流量観測で計測したデータを用いてメコン川の流水抵抗、すなわち $\tau_* - \tau_*'$ 関係を分析する。その上で $\tau_* - \tau_*'$ 関係を用いて洪水時の粗度変化を考慮した流量を推定して考察を行う。

2. 流量観測

(1) MRCSによる流量観測

2009年の洪水期にMRCSにより、図-1に示す12地点それぞれで1地点につき24回の流量観測が実施された。上流部の支川に位置するVeunsai, Lumphatではスクリー式流速計、上流部に位置するStung Treng, Kratie, Kampong Chamでは周波数600 kHzのAcoustic Doppler Current Profiler(ADCP)、残りの7地点では周波数500 kHzのAcoustic Doppler Profiler(ADP)が使用された。本研究では、トンレサップ川合流地点直上流のメコン川本川のChroy Changvarを解析対象とした。

(2) 土木研究所による流量観測

2013年12月（低水時）及び2014年10月（洪水期後半）にプノンペン周辺で周波数600 kHzのADCP (River Ray)を用いて流量観測を実施した。図-2に観測の航路の一例を示す。このような航路で観測を実施し、トンレサップ川合流地点直上流のメコン川本川の観測結果をChroy Changvar地点の観測結果として用いた。また、図-3にはその時の観測の様子を示す。低水時と洪水期後半に観測を実施したが、洪水期後半であっても水面は穏やかでデータを安定的に



図-3 ADCP 観測の様子

取得できた。なお、プノンペン周辺でのADCP観測については萬矢ら¹⁵⁾による報告に詳細が記されている。

3. 流水抵抗の分析

本研究では $\tau_* - \tau_*'$ 関係に着目した分析を行うが、 τ_* と τ_*' の間には以下の関係がある。

$$\tau_* = \tau_*' + \tau_*'' \quad (1)$$

ここで、 τ_*'' は τ_* のうちの形状抵抗分である。

(1)式は τ_* （全抵抗）は τ_*' （表面抵抗）と τ_*'' （形状抵抗）の重ね合わせであることを表す式であり、小規模河床波が発達して形状抵抗が増加すると、 τ_*'' が増加して τ_* に占める τ_*' の割合が減少するという関係にある。なお、図-4の点線は $\tau_*' = \tau_*$ を表す直線である。これは全抵抗が表面抵抗のみであ

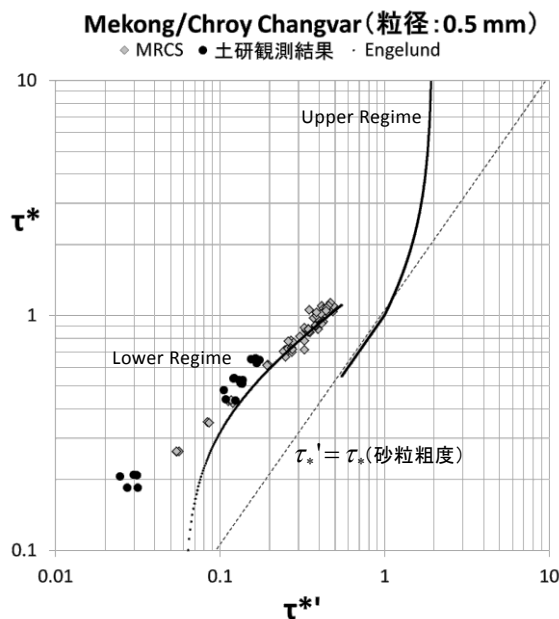


図-4 観測データを用いてプロットした τ_* - τ_*' 関係 (Chroy Changvar 地点)

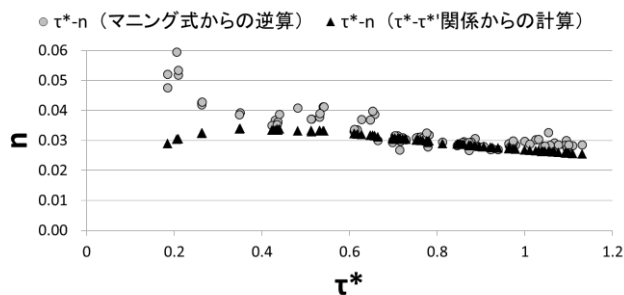


図-5 τ_* - τ_*' 関係を用いて計算された粗度と マニング式から逆算された粗度の比較

る、すなわち粗度が砂粒粗度のみであることを表す。Engelundは τ_* と τ_*' の間には一義的な関係があるとして両者の関係をプロットした上で、Lower Regime の以下の式を提案した⁷⁾。

$$\tau_*' = 0.06 + 0.4\tau_*^2 \quad (2)$$

Engelundによる τ_* - τ_*' 関係式の提案の後、岸・黒木により R/d を導入した τ_* - τ_*' 関係式が提案され、Engelundの τ_* - τ_*' 関係式に修正が加えられた。しかしながら、岸・黒木の τ_* - τ_*' 関係式は $R/d < 2,000$ の範囲について導かれたものである¹⁶⁾。今回の解析対象地点は大水深かつ小粒径であり、 R/d が 40,000 程度となり上記の範囲外となるため、本研究では Engelund の理論に従い(2)式を使用した。

Chroy Changvar を対象に τ_* - τ_*' 関係の分析を行う。竹林ら¹⁷⁾の河床材料調査によると、Chaktomuk 地点 (トンレサップ川合流地点直下流のメコン川本川) の平均粒径は 0.5 mm 程度であることから、Chroy Changvar を対象とした分析でも $d=0.5$ mm を用

いた。勾配は、Chaktomuk, Kampong Cham, Neak Loung の 3 地点の水位を線形近似してその傾きを水面勾配として使用した。水面勾配の算出にあたり Chroy Changvar の水位データを使用しない理由は、2009 年は連続データを取得できていないためである。また、次章で Chroy Changvar の流量の推定を行うが、その際の Chroy Changvar の水位は、Chroy Changvar と Chaktomuk の水位差を調べて両者の水位差がほとんど変化しないことを確認した上で、Chaktomuk の連続水位に水位差を加算して Chroy Changvar の連続水位とした。MRCS 及び土木研究所の観測データを用いて τ_* - τ_*' 関係をプロットしたものを図-4 に示す。ここで、図中の曲線は Engelund が示した τ_* - τ_*' 関係の曲線であり、プロットは河道が単断面であることを確認した上で断面平均のデータを用いた。MRCS のデータ、土木研究所のデータとともに同様の傾向を示しており、 τ_* 、 τ_*' が小さい領域では Engelund の曲線と観測データのプロットに差異が見られるものの、 τ_* が 0.4 以上になると曲線とプロットが良く整合する。また、前述の通り、対象地点の流況は穏やかで、2014 年 10 月の観測ではフルード数は 0.1 程度である。その一方で、水深はおおよそ 20 m 程度と大水深かつ粒径は 0.5 mm 程度であるので、 τ_* は 1.0 程度まで上昇する特徴がある。図-5 は、 τ_* - τ_*' 関係を用いて計算された粗度と、マニング式から逆算された粗度をそれぞれ τ_* - n 関係としてプロットしたものである。 τ_* - τ_*' 関係における結果と同様に τ_* が 0.4 以上になると両者が良く整合する。また、 τ_* が上昇するにつれて粗度が徐々に低下することがわかる。なお、 τ_* が 1.0 の時の小規模河床波の波高及び波長を推算した上で、力学法則から n を求めると、おおよそ 0.035 という結果になった。これは図-5 に示される n の値と概ね一致する結果になった。

4. 流量の推定

(1) 2009 年の観測結果を用いたケース

本章では Engelund の τ_* - τ_*' 関係式を用いて流量を推定する。具体的な流量算出手順は工藤ら¹⁴⁾を参照されたい。まず、2009 年に観測された水位、水面勾配、式(2)を用いて流量を推定した結果を図-6 に示す。図-6 によると、計算流量は観測流量を良好に再現できている。また、2009 年はピーク流量を逃さず観測できていることが読み取れる。次に、この時の水位-流量関係を図-7 に示す。■ が 2009 年の水位と計算流量の関係を表すが、当該地点の水位-流量

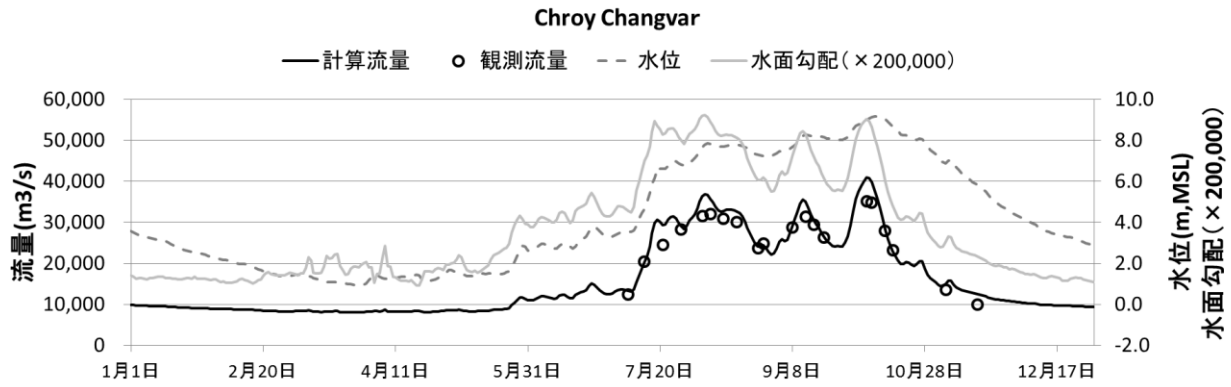


図-6 2009年の計算流量と観測流量の比較

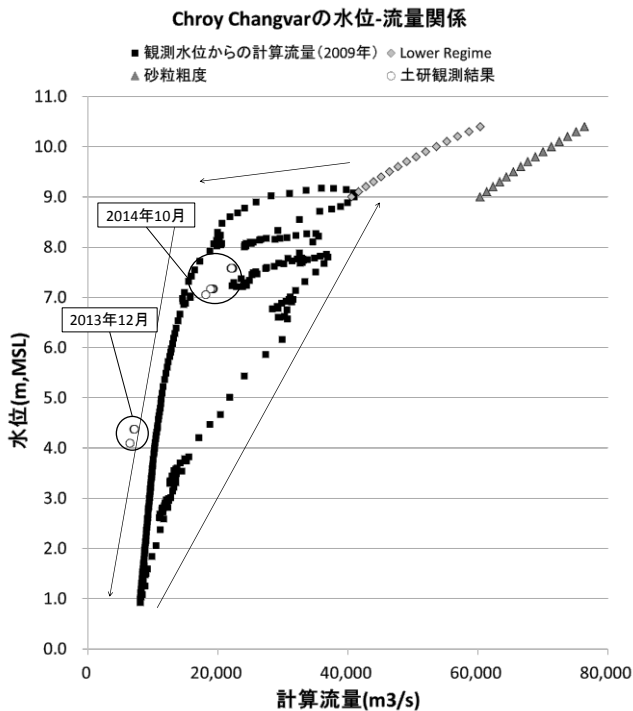


図-7 水位-流量関係（矢印は大まかな時系列変化を表す）

関係は反時計回りのループを描くことがわかる。このループは水面勾配の季節変動によるものであるが、このように水位-流量関係が大きくループを描く地点で、当該地点の水位のみからH-Q式を作成すると流量の推定精度が低下する。MRCSはこれに対応するために上流の水位データも合わせて使用し、水位差を説明変数に取り入れたH-Q式を作成した⁵⁾。○は土木研究所による2013年12月と2014年10月の観測結果のプロットである。2009年のプロット(■)と比較すると2013年12月は左側に、2014年10月は右側にずれている。水位-流量関係が年ごとに変化することは頻繁に発生し、河床高の変化などが原因として考えられる。

(2) $\tau_* - \tau_*'$ 関係を用いたピーク流量の試算

本節では水位が2009年のピークよりもさらに上昇した時の流量を試算する。すでに述べた通り2009年の観測データはその年のピークを捉えており、 τ_* の値が1.0程度まで上昇しているが、これよりも τ_* が大きな値となる場合に $\tau_* - \tau_*'$ 関係がどのような経路となるかは未知である。 τ_* の値がさらに上昇した時に、そのままLower Regimeに沿って粗度が徐々に低下するのか、Lower Regimeによらずに粗度が急激に低下するのかは、その時の水理条件において観測を実施して調べる必要がある。また、 τ_* が大きな値となることから粗度が急激に低下する可能性も考えられる一方で、フルード数のごく小さな値であることを考慮するとUpper Regimeに遷移することもまた現実的ではない。そのため本研究では、粗度が $\tau_* - \tau_*'$ 関係のLower Regimeを延長すると仮定した場合と、粗度が砂粒粗度（表面抵抗）のみの場合の2パターンの計算を行い流量値に幅を持たせた推定を行う。想定水位は2009年観測水位のピーク付近の9.0 m,MSLから2000年洪水のピーク水位の10.4 m,MSLまでであり、0.1 mずつ水位を増加させて流量を計算した。図-7に記されたそれぞれの結果を比較すると、2009年の計算流量とLower Regimeに従う時の推定流量が連続するのに対して、砂粒粗度のみの場合は流量が不連続に変化する。砂粒粗度のみの場合は、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係は図-4中の点線で表される $\tau_*' = \tau_*$ に従うことになり、観測結果のプロットと点線が不連続であることが流量の不連続な変化に繋がる。なお、このような現象は他の観測地点では実際に確認されている。日本国内のある観測地点で台風由来の洪水時に流量観測を実施した結果、105分間で水位の変化が無い様な状況で、流量が約6,500 m³/sから約7,900 m³/sへと急激に増加した。プノンペン周辺での2009年は水位が低くそのような水理条件にならなかったため、実際にどのような経路を辿るかは断定できないものの、それぞれの場合を想定し

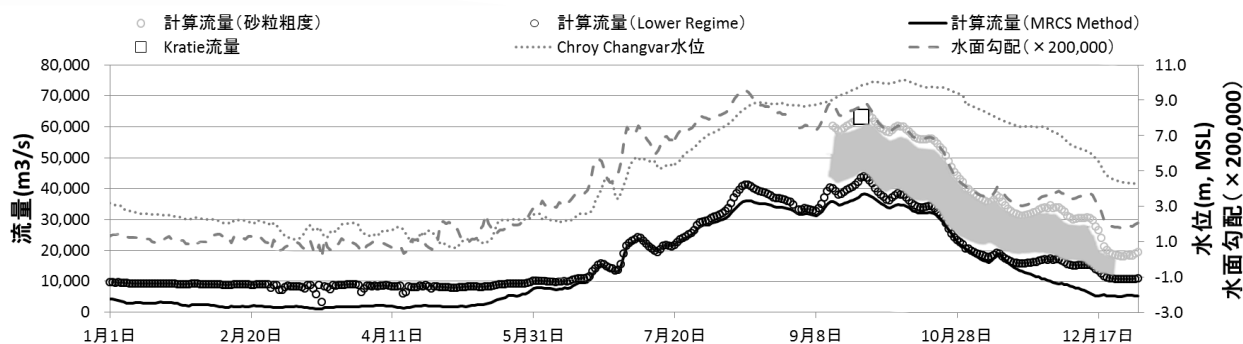


図-8 2011年の計算流量及び観測水位（Chroy Changvar 地点）

ておくことは重要である．今回の試算において水位が10.4 m,MSLの時の流量は，Lower Regimeに従う場合は60,401 m³/s，砂粒粗度の場合は76,427 m³/sとなった．

(3) 2011年の流量の推定

大規模な洪水被害をもたらした2011年の流量の推定を行う．観測水位及び水面勾配を用いて計算した流量を図-8に示す．ここでは三種類の流量が記されている．①粗度が $\tau_* - \tau_*'$ 関係のLower Regimeに従う場合の流量，②粗度が砂粒粗度のみとして計算した流量，③MRCSが示した，水位差を説明変数に導入したH-Q式⁵⁾で算出した流量である．なお，②の砂粒粗度で計算を行う始点を水位9.0 m, MSLとした．その理由は，2009年の観測水位のピークが約9.0 m,MSLであり，これ以下の水位ではLower Regimeに従うことが確認されたため，9.0 m, MSL以上の水位において幅を持たせた流量を推定するためである．また，水位がピーク後に9.0 m,MSL以下になる後も砂粒粗度の計算結果を示しているのは， $\tau_* - \tau_*'$ 関係の二価性を考慮するためである．つまり，洪水中に粗度に大きな変化がある場合， τ_* が上昇している時の粗度よりも， τ_* が低下している時の粗度の方が小さい．これを考慮するために水位の通減期にも砂粒粗度の計算結果を示した．

Lower Regimeを仮定した流量とMRCSが示したH-Q式を用いて算出した流量を比較すると，洪水期の流量はほぼ同じであることがわかる．H-Q式は2009年の観測データを用いて作成されたが，2009年は前節で述べた通り一年を通じてLower Regimeであった．すなわち，Lower Regimeしか経験していないデータから作成したH-Q式を用いたため，Lower Regimeを仮定した理論で計算した流量とほぼ一致する結果となった．一方で低水時では両者に差が見られる．原因の一つは，図-4の $\tau_* - \tau_*'$ 関係のプロットと理論の差異によるものであるが，これについては今後さ

らに分析を進める必要がある．図-8中の砂粒粗度の場合の計算流量では，ピーク付近で約60,000m³/sで推移し，その後通減して12月下旬には約20,000m³/sとなる結果になった．MRC⁴⁾によると，Chroy Changvarの上流に位置するKratieの2011年のピーク流量は9月24日の63,250 m³/sと推定されており（以下，推定流量），これを□で示す．推定流量は砂粒粗度の場合の流量と良く整合する結果になる一方で，Lower Regimeを仮定した計算結果と推定流量には差異が見られる結果になった．ここまでは河床の粗度変化に着目して議論である．次いで，当該地点は背水の影響を受ける地点であることに着目し，不等流の流れを考える．水面形方程式を流量について解くと次式を得る．

$$Q = B \sqrt{\frac{i_b - \frac{dh}{dx}}{\frac{n^2}{h^{10/3}} - \frac{dh}{dx} \frac{1}{gh^3}}} \quad (3)$$

上式に2011年9月24日の観測結果を入力し，不等流条件と等流条件 $\left(\frac{dh}{dx} = 0\right)$ の流量の比を計算すると約2.2倍となった．この結果は当該地点の解析において水面勾配を詳細に調べておく必要性を示している．

なお，メコン川流域ではKratieから下流域で氾濫が広がる特徴があるため，Chroy ChangvarとKratieの流量を単純に比較できないことには注意する必要がある．また，このKratieの流量はH-Q式の外挿から算出された値であるため，Kratieの流量はあくまで参考値である．

ここでは幅を持った流量値を示した．実際はピーク付近の粗度変化の度合いにより，この間（ハッチ部分）の流量値を推移すると推察されるが，さらに定量的な検討は2011年の規模の洪水で観測を実施し，水理現象としての粗度変化の度合いを議論していく必要がある．

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) MRCS及び土木研究所により実施された流量観測結果を用いて流水抵抗の評価を行った結果、今回の解析対象地点の $\tau_* - \tau_*'$ 関係は、特に洪水期のデータはEngelundの $\tau_* - \tau_*'$ 関係式と良く一致した。また、当該地点は大水深かつ小粒径であるため τ_* が1.0程度まで上昇するという特徴を有する。
- 2) Engelundによる $\tau_* - \tau_*'$ 関係を用いて2009年の流量を計算した結果、計算流量は洪水期の観測流量を良く再現できた。
- 3) $\tau_* - \tau_*'$ 関係の理論に従い、Lower Regimeと砂粒粗度それぞれの場合で流量を計算し、2009年の観測ピーク水位以上における想定流量を示した。
- 4) 2011年のピーク流量についても同様にLower Regimeと砂粒粗度それぞれの場合の流量を示した。また、砂粒粗度の場合はKratieの推定流量と整合する結果になった。ただし、今回対象としたChroy ChangvarとKratieの間では大規模な氾濫が起こるため両者の流量は直接比較できないことと、このKratieの流量はH-Q式の外挿により推定された値であることに注意する必要がある。

謝辞：本研究にあたり、メコン河委員会から貴重なデータをご提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Asian Disaster Reduction Center: Country Report 2002, http://www.adrc.asia/countryreport/KHM/KHMeng02/Cambodia_CR.htm
- 2) 気象庁：平成23年報道発表資料，<http://www.jma.go.jp/jma/press/1110/12a/world20111012.html>
- 3) United Nations in Cambodia: CAMBODIA – Flood Season Situation Report #8, 2011
- 4) Mekong River Commission: Flood Situation Report 2011, MRC Technical Paper, No.36, 2011
- 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) Simons, D. B. and Richardson, E.V.: Forms of bed roughness in alluvial channels, Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 87, No.3, pp. 87-105, 1961
- 7) Engelund, F.: Closure to “Hydraulic Resistance of Alluvial Streams,” Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, No. HY-4, pp. 287-296, 1967
- 8) 岸力，黒木幹男：移動床流れにおける河床形状と流体抵抗（I），北海道大学工学部研究報告，pp.1-23, 1972
- 9) 山本晃一：構造沖積河川学-その構造特性と動態-，山海堂，2004
- 10) 山口里実，泉典洋：デューン-平坦床遷移過程にみられる亜臨界分岐現象，土木学会論文集，No.740/II-64, pp.75-94, 2003
- 11) 泉典洋，山口里実：デューン-平坦床遷移再考，土木学会論文集 B，Vol.62 No.4, pp.360-375, 2006
- 12) 柿沼孝治，井上卓也，赤堀良介，武田淳史：千代田実験水路の移動床抵抗に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.69, No.4, I_1087-I_1092, 2013
- 13) 平井康幸，泉典洋，伊藤丹：昭和56年8月石狩川洪水における同時水位観測による河床抵抗の挙動特性の検討，河川技術論文集，第20巻，pp.235-240, 2014
- 14) 工藤俊，萬矢敦啓，小関博司，岩見洋一：現場のための新しい水位-流量関係の構築に向けた基礎的研究，河川流量観測の新時代，第5巻，pp.14-21, 2015
- 15) 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
- 16) 財団法人北海道河川防災研究センター編，河道設計論（案），1990
- 17) 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-トンレサップ川と対象として-，京都大学防災研究所年報 第52号 B，pp.637-645, 2009