

メコン河中流域における 土砂動態について

STUDY ON SEDIMENT MOVEMENT IN THE MIDDLE MEKONG RIVER BASIN

鈴木 健司¹・風間 聡²・沢本 正樹³

Kenji SUZUKI, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 博士(工学) 東北大学大学院工学研究科環境科学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉04)

³フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

At first, we estimate the distribution of discharge using BTOP/MC model in the Middle Mekong river basin. Secondly, the amount of sedimentation runoff is calculated by Itakura and Kishi's equation with discharge data. These results can express the distribution of sedimentation movement, and can make the discussion. The region from Luang Prabang to Nong Khai tends to produce enormous amount of sedimentation, the area between Nong Khai and Mukdahan has a deposition tendency, and the basin between Mukdahan and Pakse flows much sediment. Two flood peaks have different sediment runoff phenomenon.

Key Words : BTOP/MC model, Itakura and Kishi's equation, deposit, erosion

1. はじめに

メコン河は世界で12番目に長く全長4,200 km, 流域面積795,500 km²を持つ国際河川である。チベット高原を源泉とし中国, ミャンマー, ラオス, タイ, カンボジア, ベトナムを通過し南シナ海に至る。これらの国は食料, 水, 輸送手段などをメコン河とその支流に依存している。毎年雨季には洪水が起こり大量の出水とともに, 大量の土砂が輸送される。熱帯モンスーン地域では乾季と雨季で極端に流れの形態が異なり土砂供給のメカニズムも日本とは大きく異なる。広大な流域では山岳部からの土砂流出が一部の平野部に堆積し下流まで到達しないことも考えられる。また, ラオスにおいて行われている焼き畑農業は裸地面積を増大させ土壌の侵食を加速させる一方, 支流に建設される堰は土砂を下流域まで到達させない¹⁾。このように土砂移動は複雑であり土砂の堆積・浸食地域を把握することは重要である。従来, 土砂に関する問題は, 山地・山麓部・扇状地部・平野部・河口部等のそれぞれの領域で対応されてきた。流域環境のさらなる高度管理が求められる中で, 土砂環境は領域毎にますます複雑化しているが, 一方で流域の総合的な土砂管理の重要性がとりあげられている。また, 土地利用の変化や砂防ダムの建設といった人間活動は, 土砂動態

を変化させ長期的に広い空間での流域環境も変化させる可能性がある。

そこで, 水文学の分野で研究の進められてきた分布型流出モデルに土砂の生産・堆積過程を組み込み, 分布型土砂流出モデルの構築を試みる。

流域規模の土砂動態予測手法に関してはいくつかの研究がなされてきた。例えば, 高橋ら²⁾は崖錘の影響を考慮した崩壊裸地斜面からの土砂供給と混合砂礫の輸送をモデル化し, 貯水池堆砂量の予測を行っている。また砂田ら³⁾は国土数値情報をもとに擬似河道を発生させ, 降雨と勾配の関数としての土砂生産と, その輸送過程を取り扱っている。しかし, これらの研究は, 対象河川本流の土砂流出量や河床変動といった内容に着目しており土砂流出分布については触れていない。佐山⁴⁾や名久井⁵⁾は分布図を作成しているが, 小さい流域を対象としており, それゆえ粒径も一定の仮定が利用できる。

本研究ではBTOPMODEL及びMuskingum-Cunge 流路追跡法による流出解析を大陸大河川のメコン河に対して行い, 板倉・岸の式から土砂流出量を算定する。その際, 粒径分布を摩擦速度から与えた。そして, 対象流域全体において土砂流出分布図を作成し熱帯モンスーン地域の土砂動態を論ずることを目的とする。

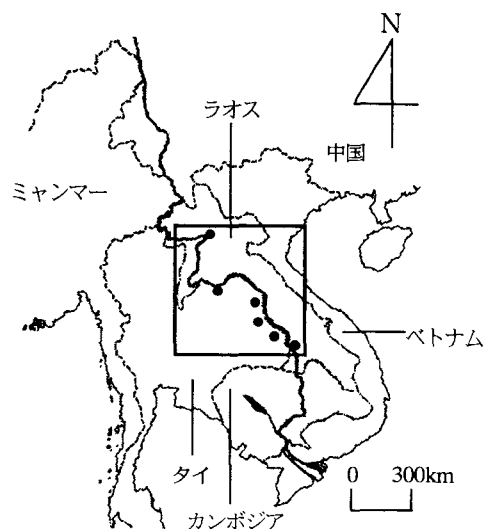


図 - 1 メコン河流域(上) 対象流域拡大図(下)

2. 対象流域およびデータセット

(1) 対象流域

対象流域は河口から2,010km上流のルアンプラバンからカンボジアとの国境付近のパクセまでのメコン河主流の1,140kmに沿った277,000km²の集水域である(図-1)。右岸がラオスであり、左岸がタイ国である。ラオス国内の大部分はベトナムとの国境を接するアンナン山脈であり、森林域に覆われた急峻地形である。アンナン山脈はメコン河流域において最も雨の多い地域の一つであり、年間3,000mm以上の降水をもたらす。一方で、対象流域のタイ国内は森林と草原を含む自然域と灌漑域がほとんどを占め、ほとんどがコラート高原と呼ばれる平地である。パクセの上流でチー川とムン川の2つの大きな支流がメコン河本流に合流する。この地域の降水量はメコン流域で最も少ない地域であり年間1,000mm程度である¹⁾。

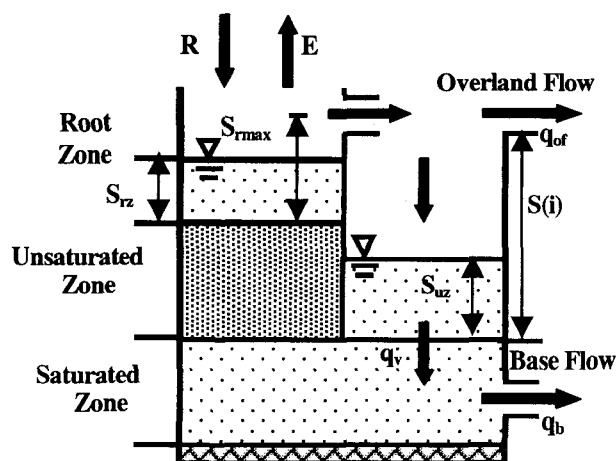


図 - 2 BTOPMODEL概念図

表 - 1 モデルパラメータ

Land Use	Parameter			
	$t_a(m^2h^{-1})$	$m(m)$	$S_{rmax}(m)$	Manning's n
Crops, Mixed Farming	50	0.03	0.0035	0.015
Short Grass	50	0.03	0.0045	0.025
Forest	70	0.04	0.0025	0.035
Irrigated Crops	40	0.01	0.0240	0.020
Semidesert	50	0.03	0.0020	0.015
Inland Water	50	0.03	0.0060	0.015
Shrubs	50	0.03	0.0030	0.050

なおMRC(Mekong River Commission)ではMRCに加盟していない中国とミャンマーの流域を上流域、それ以外 4 カ国の流域を下流域と分けているが、本研究ではラオス、タイ国内の流域をメコン河中流域と定義している。

(2) データセット

気象データ、流量データは、MRCが発行している Hydrologic Year Book⁶⁾に記載されているものを用いた。土地利用データは国際建設技術協会がCD-ROMにまとめたものを用いた。標高データはUSSG発行のGTOPO30のデータを用い、分解能 1kmが本研究の基本となっている。標高データは擬似河道網の作成と斜面勾配の決定、流域抜き出しのために用いた。砂の粒径はラオスの首都ビエンチャンの河岸で採取したものから決定した。

3. 流出解析

(1) 流出モデル

本研究では、Takeuchiら⁷⁾が開発したBTOP-MCモデルを改良した分布型流出モデル⁸⁾を採用する。BTOPモデルは図-2で示されるような構造をしており、土壤断面は根層、不飽和層、飽和層に分けられ、流出成分は表面流出と地下水流出より構成される。Takeuchiらは4つ

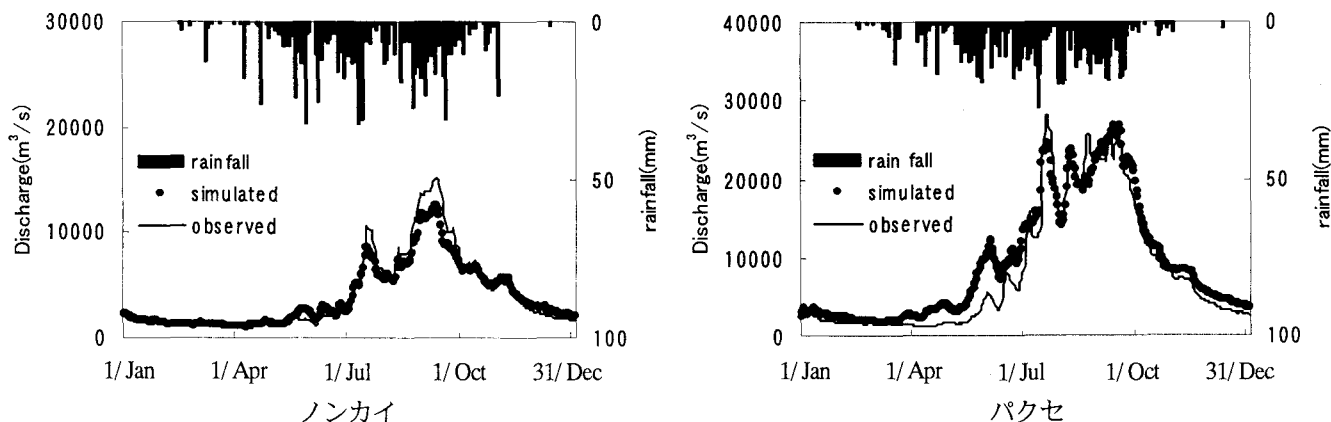


図-3 ハイドログラフの計算値・実測値

のパラメータをBlock毎に与える方法を用いているが、Nawarathna は土地利用に応じて与えている。ここで、4つのパラメータとは、飽和透水係数(t_0)、土壌水分逓減率(m)、根層貯留最大値(Sr_{max})、マニング係数(n)である。(表-2)。また河道の流れはMuskingum-Cungeの方法によって表現される。計算期間は1993年の1月1日から12月31日までに行う。

(2) 計算結果

ノンカイ(対象流域の上流域)、パクセ(対象流域の下流域)における流出量の実測値と計算値を図-3に示す。精度のよい結果が得られている。対象流域の中流域地点についても同様に流出量をよく再現できた。なお、ノンカイ、ナコンパノン、マクダハン、コンチェイン、パクセの5地点においてNash効率が80%を超える相関を得た。

この分布型流出解析により求めた流出量を用いて、土砂流出量を算定した。方法として分布型流出解析により求めた流出量から水深、川幅を決定し、それらを板倉・岸の式に用いた。

4. 土砂流出モデル

分布型流出モデルにより得た流出量を用いて土砂流出量を算出する。なお、本研究では、土砂流出量について浮遊砂のみを考慮するものとし板倉・岸の式⁹⁾を用いて土砂量を算出し検討、評価する。対象流域の全メッシュに疑河道網を作成しており、河道において板倉・岸の式を用いている。また土砂量の計算式は式(1)で表し、流速分布の式と濃度分布の式から導くことができる。速度分布式として式(2)を用い、濃度分布式として式(3)を使用した。

$$Q_s = B \int_b^h C \cdot u \, dy \quad (1)$$

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{y}{k_s} + \phi_1 \frac{y}{k_s} \right) \quad (2)$$

$$\frac{C}{C_b} = \left\{ \left(\frac{h-y}{h-b} \right)^{(1+\phi_2)} \left(\frac{b}{y} \right) \right\}^z \quad (3)$$

ここで Q_s : 土砂流出量, B : 川幅, u : 流速, u_* : 摩擦速度, κ : カルマン定数(≈ 0.4), b : 河床からとった濃度分布の基準点の高さ ($b=0.05h$), y : b から上方にとった距離, C : y における浮遊砂の堆積濃度, C_b : 浮遊砂の基準面濃度, $z = \omega_0 / \kappa u_*$, h : 水深とした。また、摩擦速度は矩形断面の等流状態を仮定し次式のようにした。

$$u_* = \sqrt{ghI} \quad (4)$$

ここで、 g : 重力加速度, I : 斜面勾配である。また、 $\phi_1 = \alpha \kappa s g k_s \omega_0 \bar{C} / u_*^3$, $\phi_2 = \alpha \kappa s g h \omega_0 \bar{C} / u_*^3$ であり、 $\alpha = 7.0$, $\bar{C}$ は C の断面平均値, s は砂の水中比重であり、 k_s は相当粗度である。相当粗度は粒径の2倍とした¹⁰⁾。なお、基準点濃度 C_b についても式(5)に示す板倉・岸の式を用いた。

$$C_b = K \left(\alpha \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{gd}{u_* \omega_0} \Omega - 1 \right) \quad (5)$$

ここで ρ_s : 粒子の密度, ρ : 流体の密度, d : 粒径, $\alpha = 0.14$, $K = 0.0018$ を使用した⁹⁾。粒径は掃流力や摩擦速度と密接な関係がある。粒径と最大流量時の摩擦速度の関係から山本¹¹⁾は関数をあてており、今回はそれを

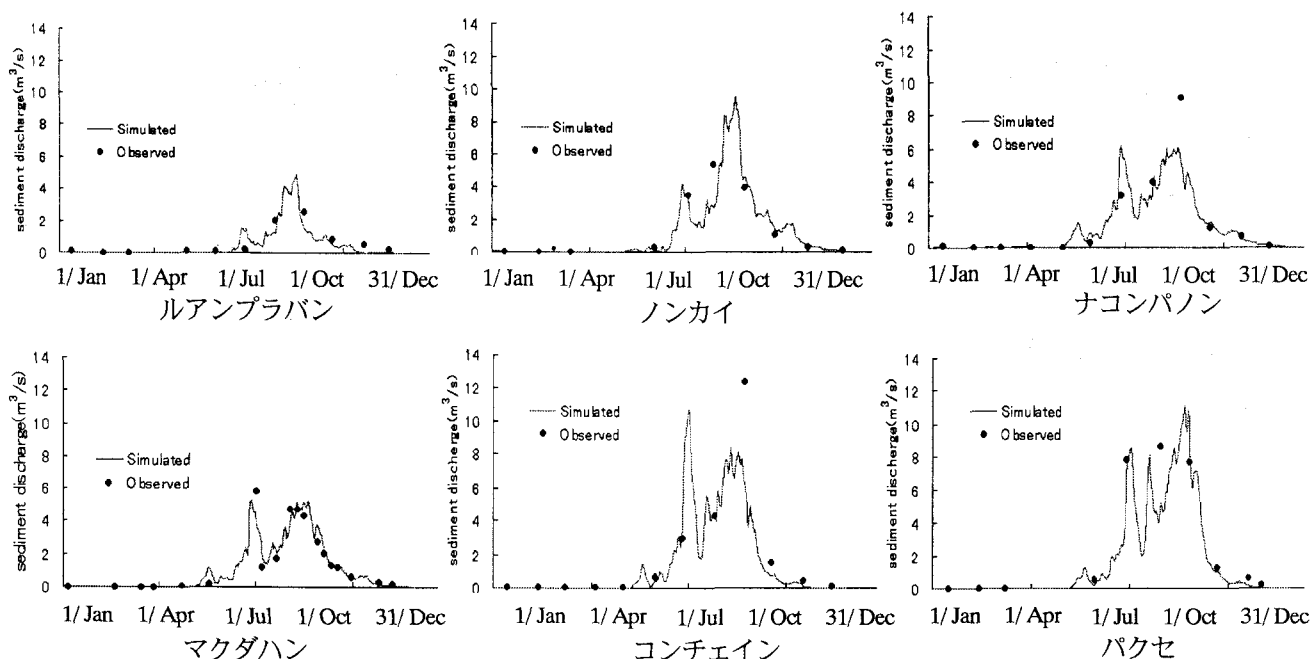


図-4 土砂流出量

用い、メッシュ毎に粒径を決定した。ピエンチャンで採取した砂の平均粒径は $150\mu\text{m}$ であり、粒径と最大流量時の摩擦速度の関係から決定したピエンチャンにおける平均粒径は $143.7\mu\text{m}$ であった。よって、粒径はこの方法で求めたメッシュ毎の値を用いた。また Ω は τ_* との関係から算出した¹²⁾。 τ_* は無次元せん断力であり、 $\tau_* = u_*^2 / sgd$ で求めた。 ω_0 は沈降速度であり、本研究ではRubeyの式から沈降速度を求めた。

5. 計算結果及び考察

6つの観測地点において、板倉・岸の式から求めた土砂流出量と、実測値の土砂流出量を比較した。しかし、土砂流出量の実測値はなく、土砂濃度の実測値しか存在しない。そこで、各メッシュの土砂濃度（実測値）とそのメッシュの流量（実測値）の積を実測値の土砂流出量とした(図-4)。

一部洪水時期に大きな差異は見られるが年間を通した連動はおおよそ再現できたとと言える。観測箇所全てにおいて、雨季には多量の土砂が流出するが、1月から5月の乾季にはほとんど流出しない。また、土砂流出のピークが7月と9月にそれぞれ存在していることが分かり、前半と後半の土砂流出の違いについて考察する。

メコン河本流における土砂流出量を図-5に示す。上側の図は7月(雨季前半)と9月(雨季後半)のピーク時における土砂流出量である。下側の図は3月(雨季前の乾季)における最小流出時の土砂流出量と11月(雨季後の乾季)における土砂流出量である。なお、雨季に土砂流出量が極めて $0\text{m}^3/\text{s}$ に近い値をとるメッシュがいくつかあ

ったが、それらは除いてプロットした。次に、板倉・岸の式より求めた土砂流出量の分布図を図-6に示す。これは、図-5と同日における分布図である。なお土砂流出量が $5.0 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ を超える部分は全て黒くなっている。

図-6の分布図を見ると雨季の前半と後半では土砂を多く流出させる場所が異なっている。前半はラオスのアンナン山脈、後半はタイ東北部のイサーン地方における丘陵で多く土砂が流出している。メコン河流域は熱帯モンスーンの影響を受けて、雨季の前半にアンナン山脈で雨が降り始まることが知られており、降水分布と同様の分布を表している。

図-5から雨季の前半後半のどちらもルアンプラバンからノンカイにかけて、土砂流出量は約1.5倍に増加している。分布図から、この地域ではさほど土砂が生産されていないように見てとれる。しかし、ルアンプラバンからノンカイにかけて流量も増加しており、このことから土砂濃度はさほど変化しないが土砂流出量としては増加すると言える。雨季前半より後半の土砂流出量の方が多い理由は熱帯モンスーンの影響を強く受け、イサーン地区から供給される土砂が原因である。

また図-5より雨季前半におけるピーク時の土砂は上流から下流に流れるにつれ徐々に増加しているのに対し、後半のピーク時には、ナコンパノンからマクダハンにかけて土砂流出量が減少している。雨季前半は分布図から分かるようにアンナン山脈から多量の土砂が流出しているため、メコン河本流には土砂が供給されている。一方、雨季後半ではアンナン山脈からの土砂供給が少なくこのことから土砂流出量が減少する。

図-5より、下流では土砂流出量が一気に増加している。これは、マクダハン-パクセ間において大きな支流が存

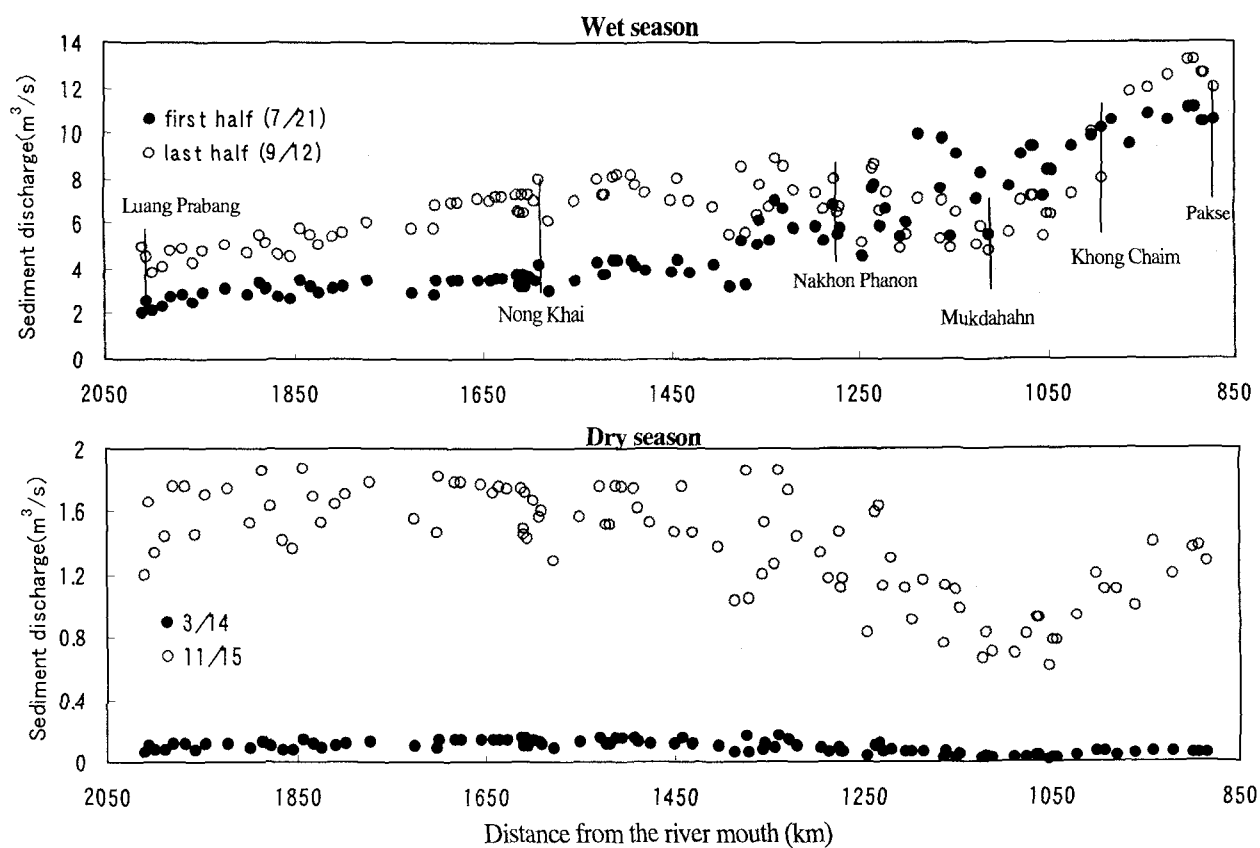


図-5 メコン河本流における土砂流出量

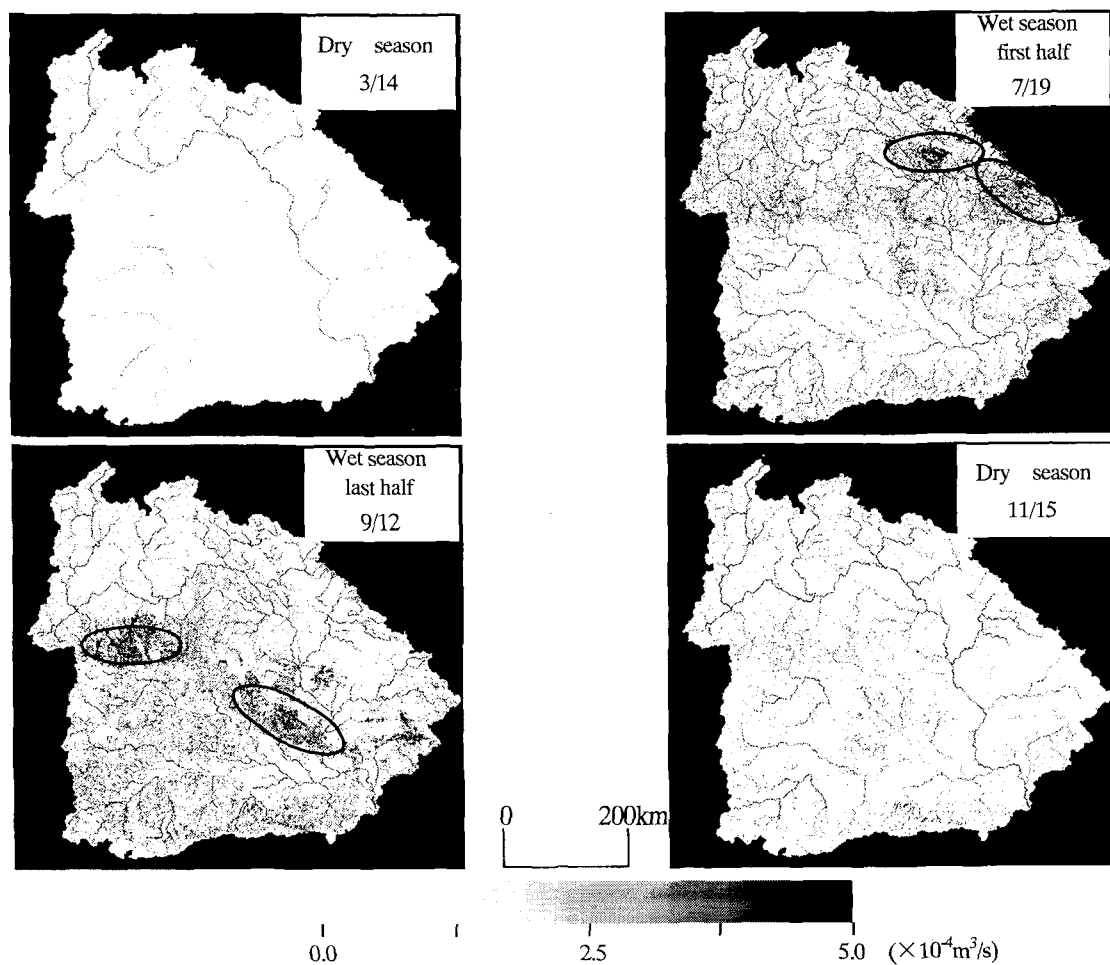


図-6 土砂流出量分布図

在し、それらが本流と合流し多量の水と共に多量の土砂を本流に輸送したためである。そして下流では2つの洪水の差はなく同様の土砂流出量になる。

乾季にも土砂は流出しているが雨季と比べると微量である。また、雨季と異なり下流ほど土砂が多く流れるという傾向は見られない。下流に行くほど河床勾配は緩やかになり、乾季における流速では土砂は流れない。ゆえに乾季の下流では土砂が堆積している。

6. まとめ

本研究では分布型流出モデルから得た流量を用いて、熱帯モンスーン地帯のメコン河流域を対象に、土砂流出量分布図を作成し以下のような結論が得られた。

＜雨季の前半＞

- ・ 降雨の分布と同様に、ラオスのアンナン山脈から多くの土砂が流出する。この地域は急峻で多く土砂が流出する。

＜雨季の後半＞

- ・ 雨の分布に従ってタイのイサーン地方から土砂流出がある。
- ・ ナコンパノンからマクダハンにかけては土砂流出量が減少する。

＜乾季＞

- ・ 雨季と異なり、下流では上流よりも土砂は流出していない。

以上をまとめるとナコンパノンからマクダハンにかけては河床勾配が緩やかになっており、土砂が堆積傾向にあると言える。下流では雨季の前半も後半も同じ土砂流出量であるがモンスーンに伴う雨域の変化に応じて土砂供給源が変化する様子が見てとれる。

今後はリモートセンシングを用いた焼畑土地の情報等を本モデルに組み込み人為的影響を議論すると共に局所的な土砂の堆積・侵食の状況を現地視察等によって、より深い考察を行いたい。

謝辞：科学研究費特別研究促進費（代表者：竹内邦良）の援助を受けた。また東北大学土木工学専攻環境水理学研究室の泉 典洋氏にメコン河に関するデータ提供、粒径分布において指示等を乞うた。また同水環境システム学研究室の常松直志氏、同地盤工学研究室の星悠紀氏、松谷明洋氏には砂の分析を行って頂いた。ここに併せて深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 堀 博：メコン河 開発と環境，古今書院，pp1-21, 268-285, 136, 1996.
- 2) 高橋 保，井上 素行，中川 一，里深好文：山岳地帯における土砂流出の予測，水工学論文集，第44巻，pp717-722, 2000.
- 3) 砂田 憲吾，小松 勝彦，小林 弘：流域全体の土砂動態モデルに関する基礎的検討，水工学論文集，第44巻，pp729-734, 2000.
- 4) 佐山 敬洋，寶馨：斜面侵食を対象とする分布型土砂流出モデル，土木工学論文集，II-62, pp1-9, 2003.
- 5) 名久井 孝史，清水 康行，Sanit Wongsatien, 岩井 聖：2次元数値解析を用いた鉏路湿原における土砂堆積と乾燥化現象の関連性に関する研究，河川技術論文集，第8巻，pp395-400, 2002.
- 6) Mekong River Commission : Lower Mekong Hydrologic yearbook 1993.
- 7) Takeuchi, K., A. Tianqi, and H. Ishidaira : Introduction of block-wise of TOPMODEL and Muskingum – Cunge method for hydro environmental simulation of large ungauged basin, Hydrological Science, Vol44, No4, pp633-646, 1999.
- 8) Nawarathna, NMNS B. Kazama, S. Sawamoto, M. Improvement of calibration procedure of the Block wise TOPMODEL with Muskingum-Cunge routing method using subbasins simulated results : Application to part of the lower Mekong river basin, Proc. 13th congress the APD/IAHR, Vol.1, pp540-545, 2002.
- 9) 板倉 忠興：土木試験所報告第83号，北海道開発局土木試験所，pp1-18, 1984.
- 10) 河村 三郎：土砂水理学 1，森北出版，pp269, 1982.
- 11) 山本 晃一：沖積河川学-堆積環境の視点から-，山海堂，35-36, 50-54, 1994.
- 12) 土木学会水理委員会：水理公式集平成11年度版，pp122-124, 1999.

(2003. 9. 30)