

灌漑と貯留施設を考慮した メコン河中流域の可能水資源量推定

POTENTIAL WATER RESOURCES ESTIMATION IN THE MIDDLE MEKONG RIVER REGION CONSIDERING IRRIGATION AND RESERVOIRS

風間聡¹・NMMS バンダラ ナワラトナ²・沢本正樹³
So KAZAMA, NMNS Bandara NAWARATHNA, Masaki SAWAMOTO

¹正会員 博士(工学) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区青葉山06)

²学生会員 工修 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻(同上)

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(同上)

Distributed TOP model was applied to the middle Mekong river basin divided into 5 sub-basins. The model parameters were estimated from land use data. The TOP model simulation remained regular deviation for observed data. The deviation was considered as storage effects such as reservoirs and irrigation. The regular variation was extracted as a storage model. The amplitude of the regular deviation was decided by catchment area. The storage model was substituted to TOP model and solved the regular deviation.

Water balance model with distributed T

OP model evaluated the distribution of potential water resources in the middle Mekong basin. As the results, east and west region of the middle Mekong have much water in wet season and poor water during one year, respectively. This potential water resource is used as one of indices to evaluate actual water resources.

Key Words : TOP model, distributed model, water balance, Laos, Thailand

1. はじめに

メコン河はインドシナ半島の6ヶ国を通過する国際河川である。その流域各国の政治的安定によって、多くの先進国が当地に大きな関心を持っており、援助や民間投資が急増している。特にラオス山岳域のダム開発は、灌漑と電力供給の目的で多くの計画がある。カンボジアも灌漑目的の貯水池開発が計画されており、近い将来、建設されることが予想されている。流域国は米を外貨獲得のための輸出品と考えているため、貯留施設の建設は悲願である。一方、環境に対する影響は甚大であり、タイのパクムンダムで見られるように、水産業への打撃と周辺の疫病蔓延を理由に、ゲートが解放された地点も見られる。

流域の開発計画を束ねるメコン委員会(MRC, Mekong River Committee)は、持続可能な開発のために流域開発計画(BDP, Basin Development Plan)と、水資源の適切な利用を図るため、水利用計画(WUP, Water Utilization Programme)を立ち上げた。WUPでは流域の

水文気象観測とデータ整備を行っている。将来的には、BDPと共に各国からの水利用のルール作りを目指している¹⁾。

こうした検討に水文モデルは不可欠であり、メコン河流域に多くの流出モデルが適用されている。HerathとYangがTOPモデルとGBモデルを用いてラオス国内の支流域において流出解析を行い²⁾、AoらはTOPモデルの定数をブロック毎に変化させて流出量を求める準分布型モデルで中流域の流出解析を行った³⁾。最近ではKiteが流域全域をSLURPモデルによって解析し、カンボジア国内の環境評価を行っている⁴⁾。解析の多くは既往のデータから流域の水文学的特徴を抽出し、流量を推定するものである。しかし、こうしたモデルは流域内の貯留施設、特に水田域と貯水池の評価に対して十分でなく、地域間の水資源量と需要量の関係を知る必要がある。この目的のため、分布型流出モデルに人工貯留効果の表現を組みこんだものは近年多く公表されている。しかし、広域にわたって放流パターンを扱うことは困難であり、未だ十分な結果を得ていない。本研究は土地利用を考慮した分布型流出モデル推定値の偏差性に着目して、メコン河の貯

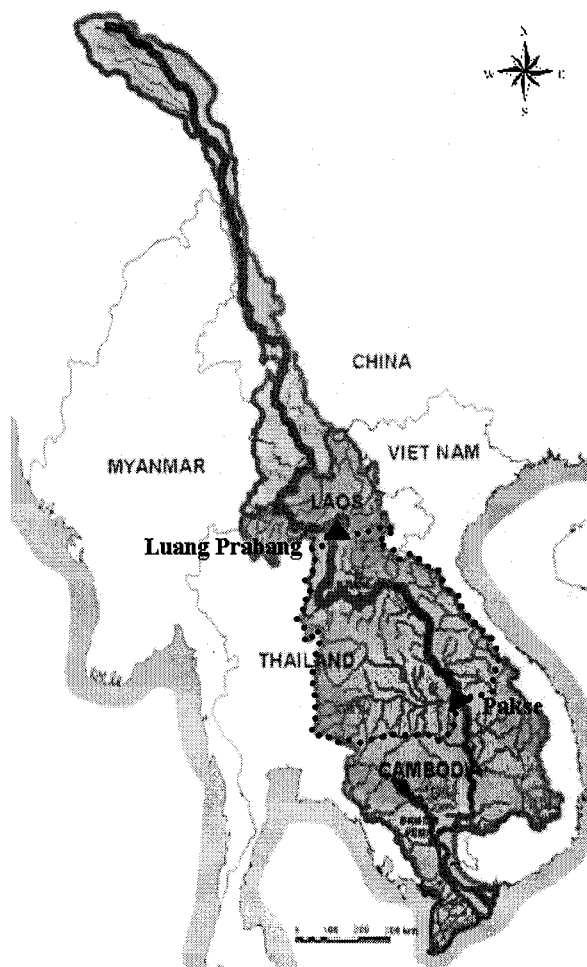


図-1 対象流域（メコン委員会）
ルアンプラバンからパクセまで。

留施設と灌漑地域の放流パターンを抽出し、水資源分布の推定を目的とする。分布型流出モデルによって水資源量分布が推定できれば、地域毎について将来の予測や環境評価への貢献が期待される。

2. データおよび流出モデル

(1) 対象流域

対象流域は、図-1の点線内で示された河口から2,010km上流のラオス首都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メコン河主流の1,140kmに沿った277,000km²の集水域である。左岸はラオス国であり、右岸はタイ国内となっている。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。ラオス国内には2つの主要なダムと中規模以下の幾つかのダムがあるが、支流において大きな貯水池は数多くない。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、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

表-1 各支流の土地利用区分

Land Use	Watershed Area (km ²)				
	Krong Chiam to Pakse	Mekong to Krong Chiam	Nakhon Phanom to Mekong	Nong Khai to Nakhon Phanom	Luang Prabang to Nong Khai
Crops, Mixed Farming	336	26	80	74	5
Short Grass	49	56	15	6	0
Forest	2346	2061	1610	4510	3118
Irrigated Crops	10477 (81.9%)	623	229	1842 (26.0%)	364
Semi-desert	43	9	0	5	0
Inland Water	167 (1.3%)	152	170	1437 (20.7%)	310
Shrubs	724	522	384	909	54

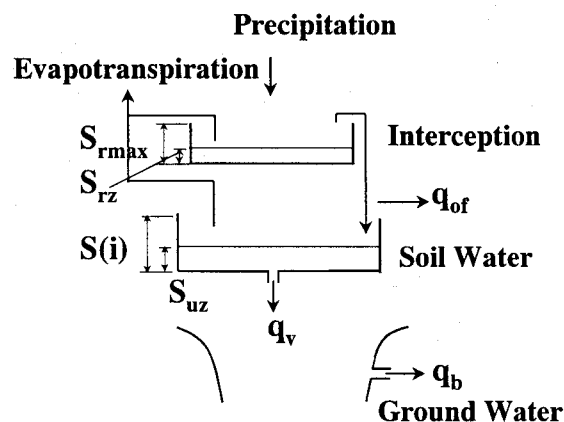


図-2 TOPモデルの構造

占め、ほとんどはコラート高原と呼ばれる平地である。チー川とムン川の二つの大きな支流が合流して、パクセの上流でメコン河と合流する。流域内の貯水池は大小数多くのものがあり、多くの支川が開発されている。降水量はメコン流域で最も少ない地域であり、年1,000mm程度である。この両国にまたがる対象流域を流出解析では5つに分けた。それぞれの特徴を表-1に示す。

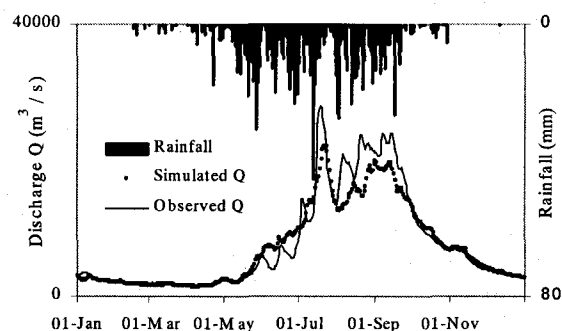
なお、MRCではMRCに加盟していない中国とミャンマーの流域を上流域、それ以外4ヶ国の流域を下流域と分けられているが、本研究では、ラオス、タイ内の流域をメコン河中流域と定義している。

(2) データセット

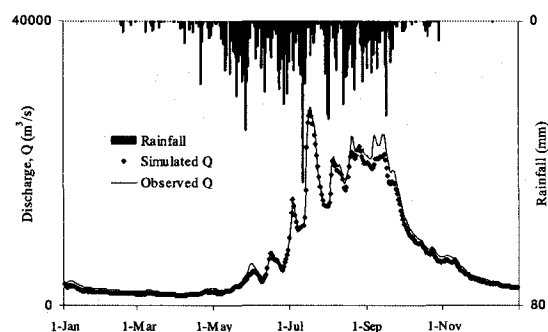
気象データとしてMRCが発行しているHydrologic Year Book⁵⁾に記載されているものを用いた。気象データを分布型で与える場合は、3点の内分補間を用いて作成した。流量データと土地利用データは国際建設技術協会がCD-ROMにまとめたものを用いた。標高データはUSGS発行のGTPO30のデータを用い、分解能1kmが本研究の基本となっている。標高データは擬似河道網の作成と流域抜き出しの為に用いられた。貯水池の位置については、建設省（現国土交通省）発行1,500,000分の1の地図⁶⁾を用いて判定した。

表-2 TOPモデルパラメータ

Land Use	Parameters			
	t_0 ($m^2 h^{-1}$)	m (m)	Sr_{max} (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



(a) 改良前推定結果



(b) 改良後推定結果

図-3 流出モデル推定結果

(3) 流出モデル

本研究では、Takeuchiら⁷⁾が開発したBTOP-MCモデルを分布型に拡張したモデルを採用する。TOPモデルは図-2で示されるような構造をしており、河道の流れはMuskingum - Cungeの方法によって表現される。

TakeuchiらはTOPモデルの5つのパラメータをBlock毎に与える方法を用いているが、本研究では各メッシュ毎にパラメータを変化させている。5つのうち4つのパラメータ、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 は土地利用に応じて与えている(表-2)。残る一つのパラメータ不飽和層貯留高 S_{wz} は、初期値を適当に与え、1年間の仮計算した後で得られる。

3. 貯留効果の抽出

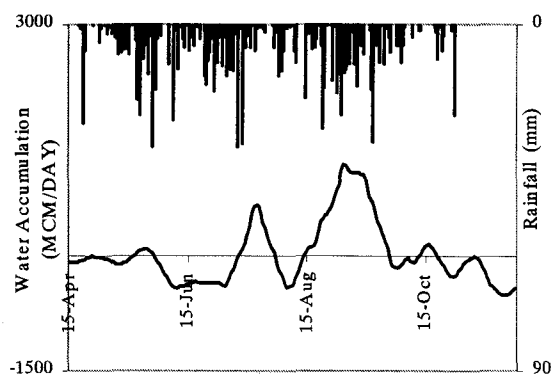


図-4 計算と実測の誤差のパターン

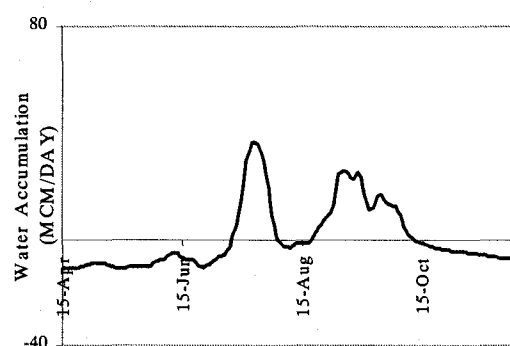


図-5 シリキットダムの放流量変化

(1) モデルの適用

流出モデルは対象流域内を5つの地域に分けて実行された。ルアンプラバンからノンカイの集水域34,000km²、ノンカイからナコンパノムまでの71,000km²、ナコンパノムからマクダハンの18,000km²、マクダハンからコンチャムの28,000km²、コンチャムからパクセまでの126,000km²に分けた。過去5年分を各流域で計算したところ、Nash係数がほとんど80%を超える相関を得た⁸⁾。

この計算の際、推定値と観測値の間で毎年同じ傾向の誤差が生じた。この誤差の収支が年間でおおよそ0になることから、貯留の効果であると仮定し、この誤差を表現する貯留モデルの提案を試みる。

(2) 貯水池の効果

タイ国内のほとんどと一部のラオスには大ダムが建設されており、貯留の効果が大きいと考えられる。図-3(a)にコンチャムの1993年の計算結果を示す。計算結果は雨季の初期に過大、最盛期に過小評価していることがわかる。差の大きさは違うが、この傾向はどの地点、どの年でも見られる。この差を年平均して抽出したのが図-4である。この差を貯留効果と考えると、7月期と雨季後期に貯留していることがわかる。近隣のチャオプラヤ川流域シリキットダムの貯留パターン(図-5)と比較すると似ていることがわかる。シリキットダムは、水力

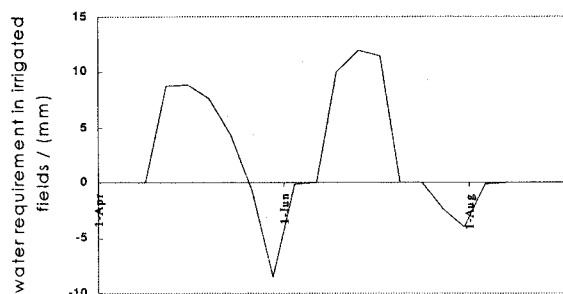


図-6 水田域の貯留量

発電と灌漑の両方の目的で建設された。7月から2度目の稲作が行われるため、このダムは放流しており灌漑目的のダムと同様なパターンをもつ。そこで貯水池の効果を式(1)のように図-4の変化を関数で与え、この振幅を土地利用データに応じて与えることとする。

$$q(t) = A \times x(t) \quad (1)$$

ここで、 q は貯留流量、 A は貯水池が抱える集水面積、 x は図-4で与えられる関数である。

(3) 灌漑域の効果

ダム等の大きな貯水池とは別に水田域の貯留効果も大規模水田域が広がるタイ東北部等では無視できない。そこで、水田域の貯留効果を図-6のように表現する。水田地域の画素毎の流出量にこの貯留効果を考慮する。このモデルは二期作を考えているが、後述する水収支計算において、湛水量が不足する場合は貯留なしとする。

(4) 貯留モデルの考察

貯留効果を分布型TOPモデルに加えることにより、定常的な誤差は解消し、Nash係数はほとんどが90%以上になり、推定式の精度向上が得られた(図-3(b))。この結果は分布型TOPモデルの推定誤差を貯留として、新たなモデルを組みこんだので当然と言える。シリキットダムの結果から定常的な誤差の大部分が貯留であると考えられ、本研究で示したモデルはある程度の表現が行えたと思う。しかし、貯水池の貯留パターンは各年の気象条件に左右されるため、本モデルによって毎年高い相関を得るとは言えない。特に灌漑目的の貯水池はこの影響が大きい。より極め細かい対応が可能なモデルにするには、毎年の気象条件と貯水池容量の検討も必要となり、これらは今後の課題である。

4. 可能水資源量分布推定

(1) 可能水資源の定義

上で求めた貯留の計算が現地と一致しているとする、各画素毎の水収支の残差が可能水利用量となり、これを

可能水資源量とする。この関係式を式(2)に示す。

$$W = P + I - O - E \quad (2)$$

ここで W は可能水資源量、 P は降水量、 I は流入量、 O は流出量、 E は蒸発散量である。可能水資源量は貯留量を含んでおり、放流期間には W から O への変換される。

ここで示す可能水資源量は、上流の状態が変化せず、下流の影響を無視したその地点での入手可能な量となる。水田域の湛水量はそのまま可能水資源量となる。実際には水質汚染や地下水の利用、維持流量の設定等で水資源量は変化する。

(2) 可能水資源分布

分布型TOPモデルと水収支式(2)を対象流域に適用して得られた2月、5月、8月、11月の可能水資源分布を図-7(a)~(d)に示す。

全ての図において河道沿いに水資源が豊富なことがわかる。これは河道に集水するため、河川から取水によって水利用の可能なことを示している。また、東側に位置するアンナン山脈西斜面は降水量の多いことから雨季に多く水資源量が存在している。これに比べて西のコラート高原では少ない水資源量となっている。しかし、貯水池が多く建設されているため、河道付近には乾季にもある程度の水資源量があり、貯留効果のあることがわかる。

2月には広い地域で水資源量が0mmになり、厳しい水環境を示している。雨季初期の5月と乾季初期の11月を比べると、アンナン山脈域では雨季初期の方が高い水資源量を持つが、コラート高原では乾季初期の方が高い水資源を持つ。山地での降雨応答が早いためと考え、斜面効果が現れている。ラオス政府はアンナン山脈内に多くのダム建設を計画しているが、水資源の見地からは有効な計画であるといえる。

コラート高原において支流から遠い平地部分は年間を通して、0mmに近い水資源量を示している。こうした地域は蒸発散が水資源量を卓越している地域である。現地は肥沃なタイ中央部のチャオプラヤ川流域と違い、生産性の低い地域として有名である。実際の生活では地下水の汲み上げや溜池を作ることでこうした問題に対応しているが、生産性の低い地域であることはこの図からもわかる。

(3) 水資源貢献分布

その地域を閉じた社会と考えた場合、流入量と流出量を考慮しない水資源量も考えられる。この量の年間値を水資源賦存量ともいうが、ここでは特に月間値であることと可能水資源量との比較から水資源貢献 C と定義し、次の式で表す。

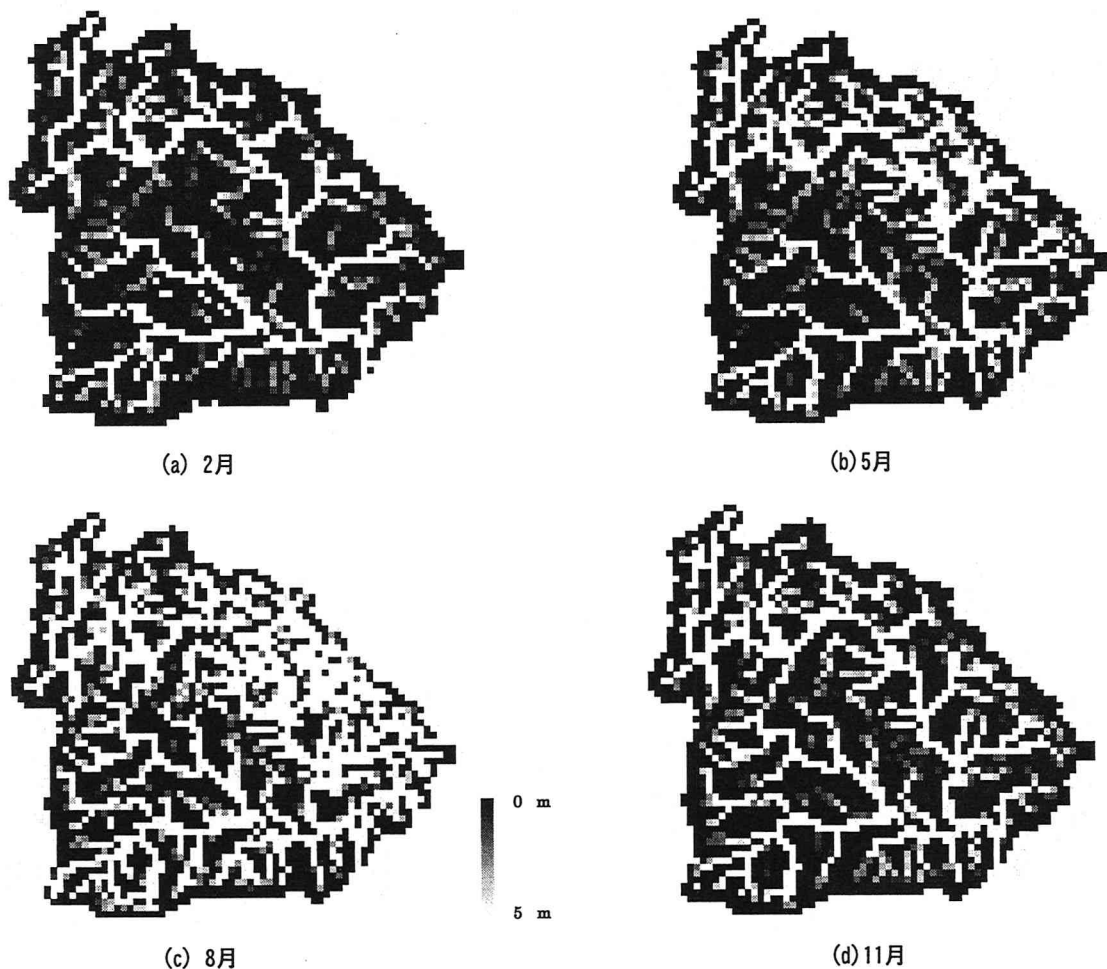


図-7 可能水資源量分布(m)

$$C = P - E \quad (3)$$

この2月、5月、8月、11月の分布を図-8(a)～(d)に示す。この図から2月と11月に降雨がないため、ほとんど天水による水資源が無いことがわかる。5月と8月は雨季のため天水により200mmから500mm程度の水資源が存在している。つまり河川からの流入がないと、乾季には渇水状態になることが理解される。これは集中水収支法によって水資源を解析した風間聡らの結果と一致する⁹⁾。この結果から対象地域は、上流からのわずかな水資源をかき集めた水によって下流での貯水や灌漑が可能であることがわかる。上流でのわずかな取水が下流に大きな影響を与える。こうした状況の中、メコン河の本流からコラート高原への導水計画¹⁰⁾が立てられ、下流国との政治問題が生じているが、こうした水資源解析によってその効果や弊害を理解することができる。

5. おわりに

本研究によってメコン河中流域を対象に以下のような結論が得られた。

- (1) 分布型TOPモデルにより精度よい流出予測が行えた。
- (2) 分布型TOPモデル推定値の定常的誤差を貯留効果と考えた貯留モデルを提案した。
- (3) 可能水資源量を提案し、水収支と改良分布型TOPモデルによって、その分布量を求めた。
- (4) 東地域のコラート高原と西地域のアンナン山脈における可能水資源量の違いが理解された。

本研究によって示した可能水資源量は実水資源量とは異なるものであるが、流域内の特徴を理解するには有効な指標であると考ええる。また、流出モデルによって時系列解析も可能であり、季節の比較ができる。

しかし、水資源は気象条件によって大きく左右されるものであり、渇水を論じるのであれば確率統計の議論が必要であろう。今後は土地利用や貯水池開発、気候変化に対して水資源量および下流への流出量がどのように変化するか評価を行う予定である。

謝辞：本研究の遂行に当り国土交通省の敖天其氏ならびに山梨大学の石平博助教授にBTOP-MCモデルの指示を乞うた。また、本研究は住友財団研究助成、科学研究費の若手B（代表者：風間聡）と特別推進費（代表者：竹内

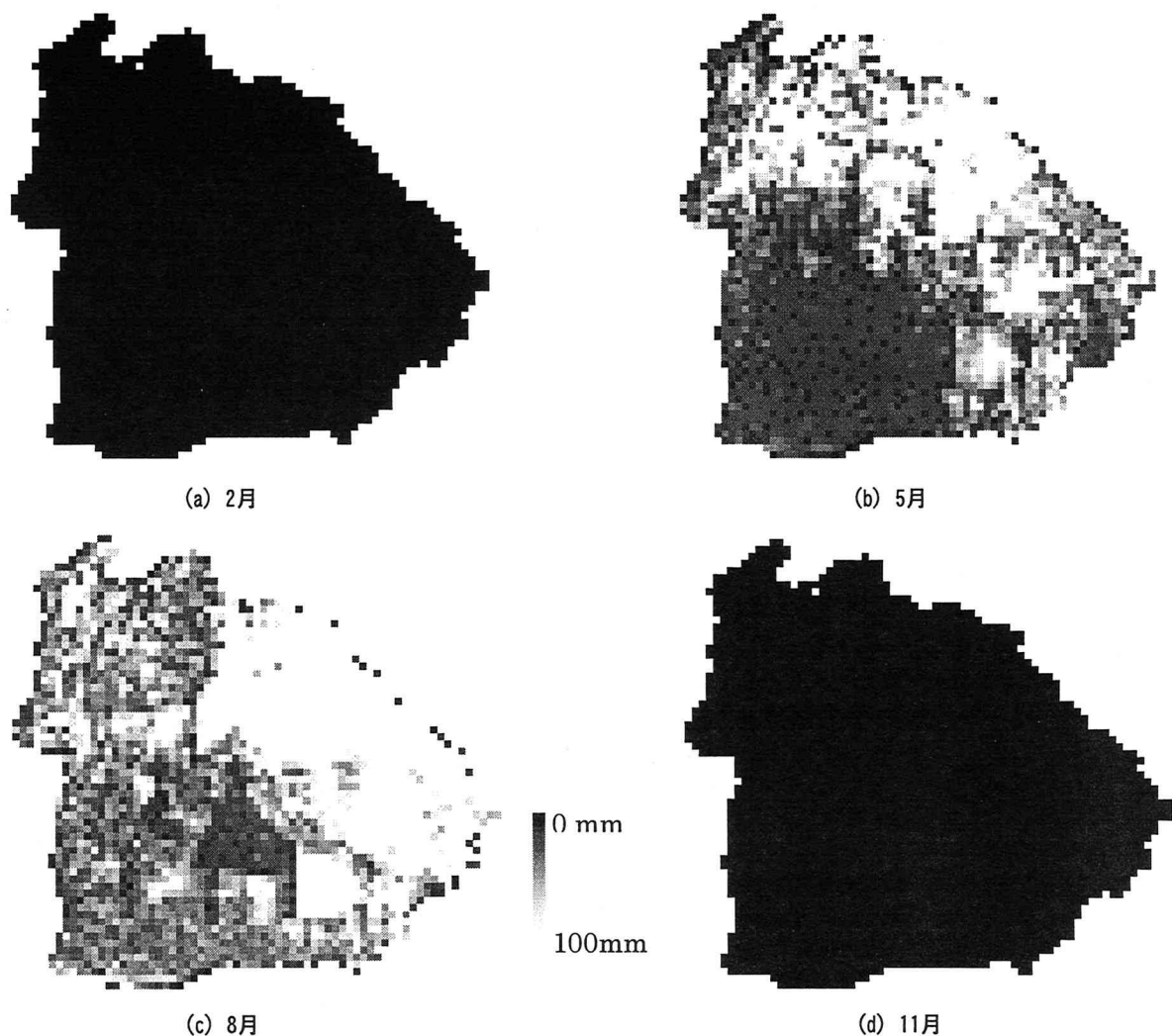


図-8 水資源貢献分布

邦良)の援助を受けた。併せて深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) MRC, *Annual Report 2000 and 2001*.
- 2) Herath, S. and D. Yang, Comparison of different Hydrological models in lower Mekong basin, *Mekong Basing Studies, INCEDE report*, 2000-4, pp.43-51, 2000.
- 3) Ao, T., H. Ishidaira and K. Takeuchi, Study of distributed runoff simulation model based on block type TOPMODEL and Muskingum - Cunge method, *水工学論文集*, 43巻, pp.7-12, 1999.
- 4) Kite G., Modelling the Mekong : hydrological simulation for environmental impact studies, *Journal of Hydrology*, 253, pp.1-13, 2001.
- 5) MRC, *Lower Mekong Hydrologic Yearbook*, 1980-1994.
- 6) 建設省, *Map of the Mekong basin and its surroundings*, 1998.
- 7) Takeuchi, K., A. Tianqi, and H. Ishidaira, Introduction of block-wise of TOPMODEL and Muskingum - Cunge method for hydrological-environmental simulation of large ungauged basins, *Hydrological Science*, Vol.44, No.4, pp.633-646, 1999.
- 8) Nawarathna, NMNS B., S. Kazama and M. Sawamoto, Improvement of calibration procedure of the block wise TOPMODEL with Muskingum - Cunge routing method using sub-basins simulated results: Application to part of the lower Mekong river basin, *Proc. 13th congress the APD/IAHR*, Vol.1, pp.540-545, 2002.
- 9) 風間聡, 沢本正樹, NMNS Bandara Nawarathna : メコン川流域の水資源評価に関する基礎的研究, *水工学論文集*, 第45巻, pp.19-24, 2001.
- 10) 掘博 : 持続可能な開発とは何かーメコン河を事例にー, *環境情報科学*, 26巻, 3号, pp.38-44, 1997.
- 11) 掘博 : メコン河流域開発と環境に関わる紛争とその解決について, *水文・水資源学会誌*, 11巻, 4号, pp.408-415, 1998.
- 12) Jeffrey, W.J., Comparing river basin development experiences in the Mississippi and the Mekong, *Water International*, IWRA, 24, 3, pp.196-203, 1999.

(2002. 9. 30受付)