

メコン川流域の水資源評価に関する 基礎的研究

BASIC STUDY ON THE EVALUATION OF WATER RESOURCES IN THE MEKONG RIVER BASIN

風間聡¹・沢本正樹²・NAWARATHNA, NMNS Bandara³
So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO and NMNS Bandara NAWARATHNA

¹正会員 博(工) 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒980-8579 仙台市青葉区青葉06)

²フェロー 工博 東北大学教授 同上

³学生会員 工修, 博士後期課程学生 同上

Water resources in the lower Mekong river basin as an international river, was evaluated using a conceptual analysis method based on water balance. GIS prepared data sets of elevation, land use and slope data to understand the ratio of land use in the area. A conceptual area was introduced for easy understanding. It was covered with only three categories, which are forest, urban and cultivated regions. Water balance equation involving rainfall, evapotranspiration, infiltration, storage and runoff was calculated for water demand for people. As the results, the number of drought months will increase as cultivated area will increase. Especially, serious seasons are dry season and the rice-planting season. It was also understood that population in the area would be limited by water supply for people. Japanese climate condition was also used to compare with the Mekong region. Although this model is simple, the obtained results show us the possibility of the future problems.

Key Words : GIS, water balance, drought problem, land use change

1. はじめに

近年, 温暖化と気候変化に伴う水資源問題が盛んに論じられており, 将来の水紛争も懸念されている。世界水フォーラムは, 人口増加に伴う灌漑面積の増加が水不足を起こす可能性を示し, 全ての人が一日40lの安全な水を利用できる権利をうたっている。しかし, この目標の達成が困難であるばかりでなく, 各地では深刻な水不足に悩まされている。水不足の問題は, 水資源管理が困難な国際河川において特に複雑であり, 国際機関による管理の必要性をフォーラムは示している¹⁾。

メコン川は, 流域面積約80万km², 河川長約4,200 kmの国際河川であり6カ国を流下する。ラオスとカンボジアの政治安定によって, 灌漑面積の拡大と電源開発が多く計画されており, 将来の水不足が危惧されている。特に最下流国ベトナムは, 上流国の開発を警戒しており, しばしば外交問題に発展している。外交問題は, メコン委員会(MRC: Mekong River Commission)の仲裁から政

治的解決が図られている²⁾。アジア開発銀行(ADB: Asian Development Bank)のメコン流域の開発計画を筆頭に各国の連携のない援助は, 流域基本計画の立案を困難にしている。

この地域への日本の援助は, 直接, 間接を含めると多額であり貢献度は大きい。これらの開発援助において, 総合的, 包括的な計画と評価が必須である。特に水源開発に関わる計画には, 流域全域を多方向から議論することが必要である。地域スケールから流域全域のスケールを評価するには, GISに支援された観測データベースが有効である。広域観測においてリモートセンシングは効果的であり, 多くの分野において実績がある。水文・気象データは, メコン委員会が下流4国(ベトナム, カンボジア, ラオス, タイ)の気象, 水文データを収集して公表している。これらのデータを有機的に用いることにより, 地域問題から流域問題という異なるスケールの問題を論じることが本研究の最終目的である。その結果は, メコン川基本計画, 総合計画案の策定に貢献できるだろう。本論文ではメコン川流域における水文現象の特徴を

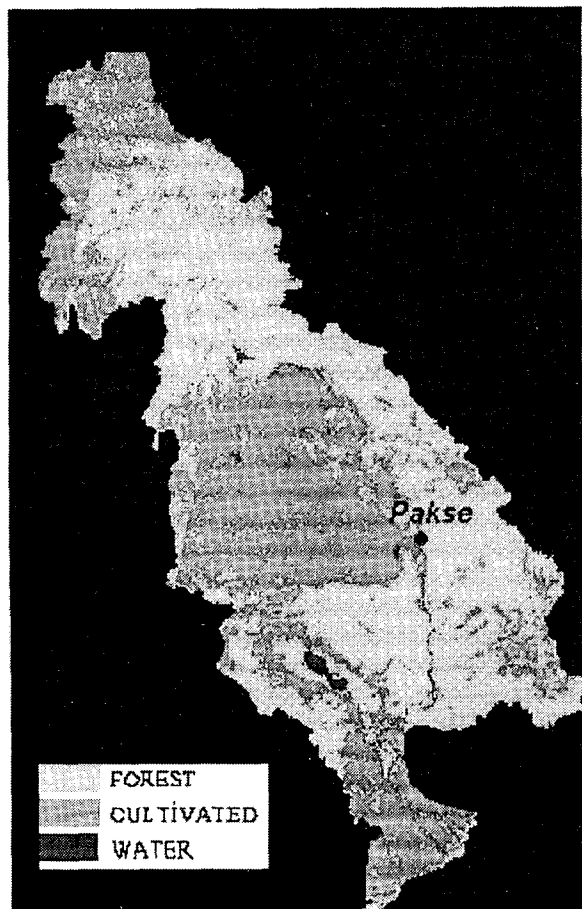


図-1 メコン流域土地利用

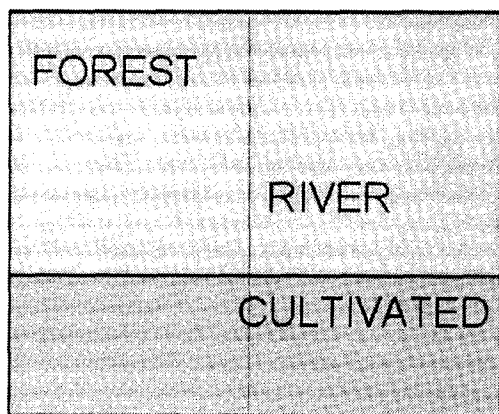


図-2 モデル流域の土地利用区分

述べ、地覆毎の水収支解析から流域流出量を計算し、水需要量との関係から渇水について考察し、将来の水資源の問題点を探った。

2. データセット

広域植生と地覆判定のための人工衛星データとして、NOAA衛星AVHRRを利用した。このデータは、1998年にアジア工科大学院リモートセンシングセンター(AIT, Asian Institute of Technology, ACROs, Asian Center

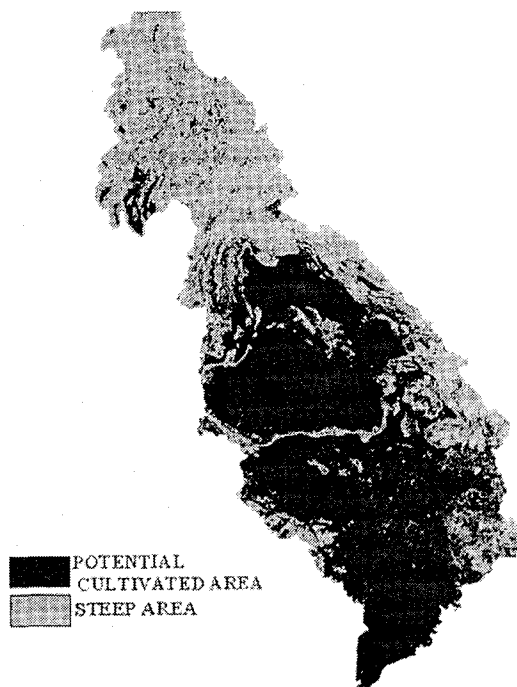


図-3 可能耕作地

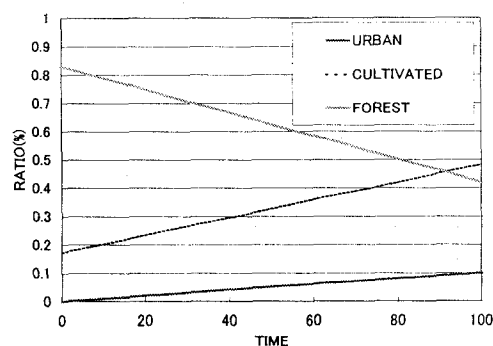


図-4 土地利用の変化

of Remote Sensing of Satellite) で受信、データベース化されたものである。このデータは土地利用の検定用に用いられた。気象、水文データは、MRCが出版している1993年の Year Book³⁾ のものを用いた。標高データはUSGS (アメリカ地質所) のGTOP30を用い流域のみの抽出を行った。土地利用分類は、国際建設協会報告書のデータを利用した⁴⁾。ここで得られる22種類の土地利用はUSGSが作成したものに基づいているが、実際の耕作地を判断するために、NOAA衛星の植生データを用いて、実耕作地とそれ以外を区別した。植生データはNOAA衛星AVHRRの分光反射の特性を用い、土地利用データの耕作地において植生が季節的に大きく異なる地域を実耕作地としている。

解析対象領域は下流域のみとした。上流域では十分なデータが取得できないためである。

3. 土地利用変化に伴う渇水

水不足を評価する場合、確率論的に水水量分布の偏差を推定し予測する方法があるが、ここでは物理過程を重視し、水収支を解くことから渇水の評価する。広域であることと、水水量の季節変動をとらえるため月単位による解析を行う。

(1) 試験流域

ここでは、流域の土地利用や貯水池操作の複雑性を排除した簡単なモデル流域を考える。モデル流域は正方形な単位面積で与えられ、メコン流域を考慮して上流域を森林域、下流側を耕作地帯とした(図-2)。また、都市域は耕作域内下流端で発達するものとする。河川は下流側の異なる土地利用に水を移流させる。

検証された1998年の土地利用区分データから水田域と穀物栽培域を含む耕作域は、メコン川下流面積に対して17%を占める。その他の地域は、森林域と森林、草地の混在域が占める。開発が進行するに従い耕作地の拡大が予想される。土地勾配の小さな地域は耕作地に転換できるものとし、標高データを用いて勾配から可能耕作面積を算出した。勾配は以下の式から得られる。

$$s = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1)$$

ここで、

$$a = \frac{1}{6D} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad b = \frac{1}{6D} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

a と b は、 3×3 ウィンドウオペレーターであり、各画素に対応して演算されスカラーで得られる。求める画素周囲 3×3 画素、合計9点のそれぞれの画素値とそれに対応するオペレーターの値の積を計算し、9つの積の和を求める。水平方向(東西方向)の勾配が a によって計算され、鉛直方向(南北方向)の勾配が b によって得られる。この平均が式(1)によって計算され求める画素の勾配が計算される。 D は画素間の距離である。勾配20m/km以下の緩勾配地域は、全域の58%であった。都市域は1%以下である(図-3)。

時間変化によるモデル流域の土地利用変化を仮定する。線形に耕作地17%が可能耕作面積58%まで増加したとし、それに伴い森林が42%減少するとし、都市域は最大10%まで耕作地内において増加するものとした(図-4)。ここで用いられている時間は概念的な時間であり、土地利用の変化に対応した時間である。発展の度合いは各国の事情によって違うため、特定の時間単位、例えば年を設定しない。

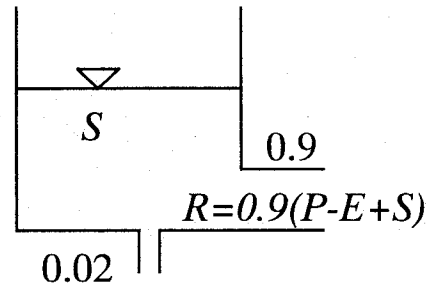


図-5 森林域のタンクモデル

(2) 水文過程

モデル流域降水量は流域中央のPakseのデータを用い、流域内に均一に降るものとした。

蒸発散に関して、耕作地については灌漑が行われているものとし、可能蒸発散に近いTada, et al.⁵⁾が得た結果である湛水時期の120mm/月を用いる。森林域ではKazama, et al.⁶⁾がタイとベトナムで得た月別の結果を用いた。都市域は遮断蒸発のみを考え10mm/月とした。ただし、降水量がこれを下回る際は、全雨量が蒸発するものとしている。

現在では耕作面積が水田面積を上回るが、灌漑域の拡大に伴って水田域が増加するものとし、耕作地は水田域が支配的と仮定する。水田域の貯留量は、雨季の前半、5月から100mmの湛水を考え、この値が水収支の計算上確保されない場合は、6月以降の流出量から補充される。湛水時期は5月から9月までとしている。都市域の貯留はないものとした。森林域は1段タンクで表現した(図-5)。有効降雨に対する流出率は0.9、浸透率は0.02である。有効降雨は降水量と蒸発散量との差とした。計算開始の1月は貯留高を0としている。

浸透に関して、水田域は湛水期に2mm、非湛水時期には、森林と同様に有効降雨の2%が浸透するものとしている。都市域での浸透は考慮しない。

流出量は、森林域以外については水収支によって計算される。流量が負になる場合は、水田域から補填されるものとして、最低流量として5mmが確保されるようになっている。この水田域の減少分は、次月以降の流量から再補充される。

これらの条件を表-1に示す。

(3) 水収支による渇水計算

森林域、耕作域、都市域の水収支は、

$$R = P + Q - E - I - \Delta S \quad (2)$$

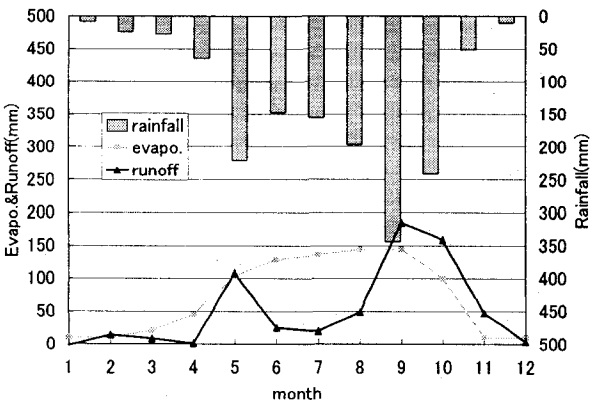
で与えられ、各量は前節で述べた値を用いる。ここで、 R は流出量、 P は降水、 Q は流入、 E は蒸発散、 I は浸透、 ΔS は貯留量である。森林域は最上流に位置するとして、流入は考慮されない。この式から時間変化に伴う土地利用変化毎のモデル流域流出量を計算する。図-6に時間0と80の結果を示す。両図に大きな変化は見られないが、

表-1 計算に用いた各土地利用の水文量

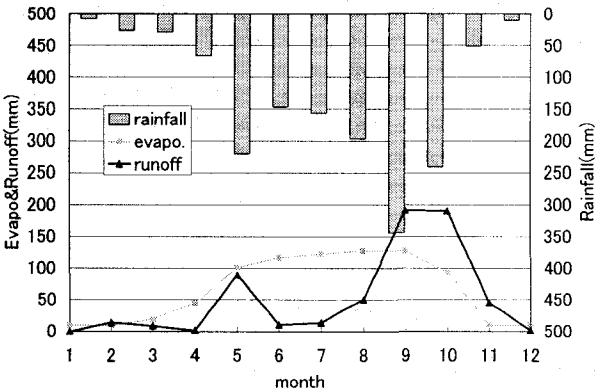
	森林	水田	都市
雨 P	一定. Pakse : MRC Hydrological Year Book, 1993. 東京 : 過去30年平均月降水量 (理科年表) .		
流出 R	1段タンクモデルによる 計算.	水収支	
浸透 I		湛水期 : 2mm 非湛水期 : 0mm	0mm
貯留 ΔS		湛水期 : 100mm 非湛水期 : 0mm	0mm
蒸発散 E	表-2	湛水期 : 120mm 非湛水期 : 森林相当	遮断蒸発10mm

表-2 蒸発散量(mm)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Pakse	10	10	20	30	100	130	140	150	150	100	10	10
Tokyo	10	10	30	60	80	100	120	120	90	50	30	10

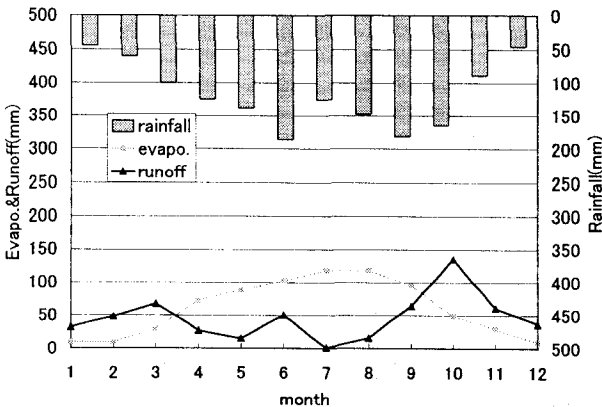


(a) メコン流域 時間0

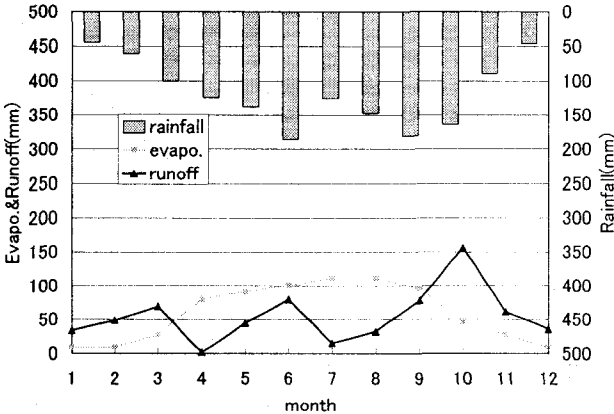


(b) メコン流域 時間80

図-6 土地利用変化に伴う流出量変化 (メコン)



(a) 東京 時間0



(b) 東京 時間80

図-7 土地利用変化に伴う流出量変化 (東京)

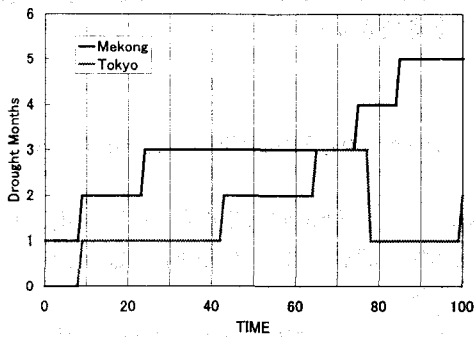


図-8 土地利用変化と渇水月数の関係

森林域が後退した時間80の方は夏期の蒸発散と6月、7月の流量の減少が見られる。これは、耕作地の増加に伴い湛水量が増加するからである。また、夏期では森林域の蒸発散が卓越し流量の減少が生じる。乾季には極端に少ない流量が見られる。田植え時期には水不足がみられ、耕作地の拡大後は5月にもその影響が及んでいる。同じ土地利用割合における東京の降水量、蒸発散量によって計算した結果を図-7に示す。この図からメコン地域の4月以降の流出変化は、降雨量の大きさが異なるにもかかわらず似ていることがわかる。また、気候状態の変化よりも、土地利用変化に伴う蒸発散と灌漑域の水利用が流出に大きく影響していることがわかる。この結果、適切な水需要と供給を満たすための流域内の貯留施設や水田の時間差湛水の有効性を示唆している。

比較水文の見地からは、4月の流出量の減少について日本は融雪水が大きな役割を果たすこと、夏季は共に水不足傾向が生じること、メコン流域は乾季の存在が慢性的な水不足が引き起こしていること等が興味深い。

水需要量は耕作地だけでなく、都市域の拡大によっても増える。都市用水需要高（生活必要水）は以下の式によって求めた。

$$Wd = Uw \times Pd \quad (3)$$

ここで、 Wd は単位面積当たりの生活必要水高(mm/km²/月)、 Uw は都市用水量で20m³/人/月、 Pd は都市人口密度で6,000人/km²を用いた。都市用水は昭和50年以降、日本において変化していないことから日本の値を用いている。都市人口密度は、シンガポールと香港の値がほとんど変わらないことから、両国の値を用いた。その結果、 Wd は120mm/月となる。

目標の水供給が出来ない需要過多の状況を渇水状態とみなす。ここでは、渇水は水需要量が流域流出量を超えた時に生じるとしている。つまり、最下流端において、 $R < Wd$ になった際に生じる。時間変化による土地利用変化に伴う渇水月数を図-8に示す。東京の結果も比較のため併記してある。メコン流域では、耕作地が増えるとともに渇水月が増加している。これは森林域からの基

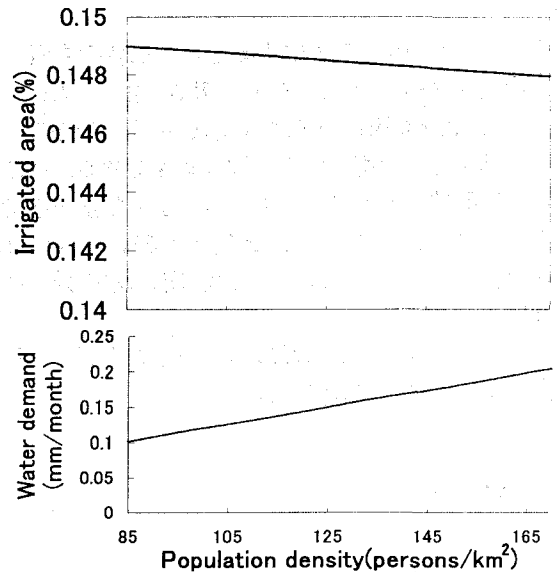


図-9 人口密度と灌漑面積

底流量の減少と湛水量の増加に伴うものである。時間0の状態、すなわち現在の状況は、年1回、田植え時期に渇水が生じているが、水田域の拡大は渇水月を5月以降に拡大する。東京の場合、都市域の拡大から蒸発量が減少するため渇水月の減少が見られる。メコン流域の気象条件は、水需要と供給のバランスが微妙であることを示している。ただし、市域の降水量は都市内で利用できるように計算しているので、実際の現象とは幾分異なる。

4. 灌漑面積と人口の関係

前節では主に土地利用の変化と渇水月数について述べた。しかし、はじめに述べたように一人一人に水がいきわたることが重要である。そこで、目標の一人一日40lを確保するには、どれだけの灌漑域が可能かを考察してみる。

月水需要量 Dw は、

$$Dw = Pd \times Dw_p \quad (4)$$

ここで、 Pd は人口密度、 Dw_p は個人水需要量で40lを用いる。人口密度はMRC公称の流域人口6,740万人、流域面積793,100km²から85人/km²を得た。これらの値を用いると Dw は、0.102mm/月が得られる。

最も渇水が生じる2月のデータを用いると、蒸発散は森林域と耕作地ともに同じ値を示し、水収支からモデル流域の流出量は15mmである。湛水水深を考慮して乾季の灌漑におおよそ100mm/月が必要とすると⁷⁾、灌漑面積率 Ai は、

$$Ai = (R - Dw)/100 \quad (5)$$

ここで、 R は15mm/月を、 D_w は上で得られた結果を用いた。

今、人口が2倍まで変化するとした場合の灌漑可能面積の変化を図-9に示す。メコン流域の場合、人口の増加に比して灌漑面積は鈍感な変化を示す。2倍の人口に至った場合でも同程度の灌漑地は確保できる。逆にわずかな灌漑面積の拡大は、一人当りの水供給量を極端に減少させることになる。ここでの計算では、15%の灌漑面積が最大であり、それ以上の拡大は灌漑水の効率利用が条件となる。

ラオスとカンボジアは灌漑面積の拡大を国策としており、将来の水供給が危惧される。

5. おわりに

本研究では簡単な土地利用の変化と水収支計算からメコン流域の水資源を定性評価した。カンボジアやラオスのような最貧国では、十分なデータが手に入らないため、多くの仮定を用いて評価を行った。しかし、本研究は幾つかの興味深い結果を示している。得られた知見は、以下の通り。

- (a) メコン下流域は平地が多く、開墾可能面積が大きいことが理解された。特にカンボジアでは国土のほとんどが耕作地になりうる。
- (b) 水田域や灌漑域が流出量に大きく寄与している。森林域による蒸発散よりも、灌漑による水利用が需要過多を引き起こす。
- (c) 灌漑地域の拡大は渇水月の増加を促し、その感度は大きく将来の水不足が懸念される。

今後、急速に開発が進むと考えられるメコン流域は、水資源、水文学の観点からも注視が必要であるといえる。カンボジアの国土数値情報の整備やカンボジアの気象データの整備、詳細な産業資料の収集が現在日本の援助で行われている。データの整備に従い、随時新しい過程を計算へ付加することは容易である。今後、貯水池等の人工貯留施設の効果や都市の発展モデル等を組み入れていき、より汎用性のあるものにしていく予定である。

謝辞：本研究の一部は、国際建設技術協会と国際協力事業団（JICA）の援助を受けた。また、アジア工科大学院

の本多潔助教授からNOAA衛星データの提供を受けた。ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 1) 河北新報, 2000年30億人が水不足, 平成11年10月25日1面, 1999.
- 2) 中山幹康: メコン川流域国による新協定の交渉過程における国連開発計画の役割, 水文・水資源学会誌, 11巻, 2号, pp.128-140, 1998.
- 3) Mekong River Commission(MRC), Lower Mekong Hydrological Yearbook, 478pp., 1993.
- 4) 建設省, (社)国際建設技術研究協会, 国際地理情報システムを用いたインフラ整備の総合的評価調査(1)報告書, 69pp., 1997.
- 5) Tada, T., S. Kazama and M. Sawamoto, Estimation of evapotranspiration distribution in Tohoku region, Int. Conf. on Water Resour. & Environment Resear. Towards the 21st Century, Vol.1, pp.627-634, 1996.
- 6) Kazama, S., G.B. Sahoo and P. Sriwaha, Estimation of evapotranspiration in tropic region using satellite data, Proc. Of Civil and Environmental Engineering Conf., Vol.5, Part I, pp.61-68, 1999.
- 7) Sahoo, G.B., Multi-criteria irrigation planning: Pphitsanulok Irrigation Project, Thailand. AIT Thesis, No. WM 97-3, AIT, 167pp., 1997.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Jeffrey, W.J., Comparing river basin development experiences in the Mississippi and the Mekong, Water International, IWRA, 24, 3, pp.196-203, 1999.
- 11) Nawarathna, NMNS Bandara and S. Kazama, Analysis of the relationship between water balance and basin characteristics, Water Resources Journal, ESCAP/UN, 202, pp.24-38, 1999.

(2000. 10. 2受付)