

(48) 水理氾濫モデルを用いたメコン河氾濫時の感染症危険度評価

RISK ASSESSMENT OF INFECTION IN THE MEKONG FLOOD
USING THE HYDRAULIC INUNDATION SIMULATION

相澤寿樹*, 風間聡**, 渡部徹***, 沢本正樹***

Toshiki AIZAWA*, So KAZAMA**, Toru WATANABE***, Masaki SAWAMOTO***

ABSTRACT ; Coliform distribution dynamics was simulated using the hydraulic flood model around Phnom Penh in Cambodia. The distribution was evaluated for the impact on human health investigated the relationship between coliform count and infant mortality rate spatially. The results obtained are as follows; The risk of infection is higher in the lower region with long inundation period. And, the risk depend on the relation among water level, inundation period and population.

KEYWORDS ; Mekong River, Waterborne Infectious Disease, Coliform Bacteria, Flood Simulation

1. 序論

世界では毎年2億5000万人以上の水系感染症患者が報告され、そのうち1000万人以上の人々が死亡している¹⁾。感染症例の約75%は熱帯地域から報告され、死者の約50%(480万人)は熱帯地域の5歳未満児である¹⁾。5歳未満児は、全年代のうち感染症に対する抵抗力が最も低いため、他の年代よりも死亡率が高い。水系感染症は病原体に汚染された水を経口摂取し感染する。従って、熱帯地域における水系感染症患者数の減少のために、水源の汚染レベルの把握及びそれに対応した上下水道の整備は重要である。

熱帯地域に位置するメコン河下流域は、毎年雨季になると洪水氾濫が生じる。特にカンボジアの首都プノンペン周辺は、広い範囲において浸水する。カンボジアは上下水道が普及しておらず、ほとんどの家庭は井戸や池、川などの表層水を水源として利用している。そのため、氾濫時に水系感染症が各地で発生・蔓延する。実際、カンボジアにおいて下痢症は有病率において2番目に高く(全人口の2%、5歳未満児の19%)²⁾、衛生面に関する基盤整備の必要性が言われている。

このように、洪水氾濫と住民の衛生状況は関係性を持つことが知られており、その関係性を確かめるために様々な研究が行われている。例えばMuirheadらは水位および濁度と大腸菌濃度との関係性について議論している³⁾。しかしデータは離散的な点におけるもので、時間的・空間的に連続な対象に対しての評価ではない。また対象となる地域が広域になればなるほど時間的・空間的に連続なデータを得るのに多大な労力が必要となる。このことから、病原菌の挙動を広域において時間・空間で連続的に分析しその結果から感染症の危険度を評価することは行われていない。

以上を踏まえ、本研究は洪水氾濫に伴う衛生面への影響の変化を時系列データとして分布的に解析するモデルを構築すること、そしてそのモデルを用いて、洪水が衛生面へ及ぼす影響の特性を明らかにすることを

*東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期

(Master Course Student at Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)

**東北大学大学院環境科学研究科(Graduate School of Environmental Studies, Tohoku Univ.)

***東北大学大学院工学研究科(Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)

目的としている。まずカンボジアのメコン河流域において 1994 年の洪水データを用いて洪水氾濫計算を行う。次にこの氾濫計算の結果において、日射照射熱量と大腸菌群残存率の関係をj用いて大腸菌群の移流計算を行ない、氾濫原の大腸菌群濃度の時空間分布を求める。最後にこの計算結果と死亡率の係係性を考えることにより、洪水氾濫における感染症の危険度を空間的に評価する。

2. 対象領域および計算方法

2. 1 対象領域

計算対象地域(図 1)はメコン河下流に位置するプノンペンを中心とした 110km×140km である。この流域は他のメコン河下流域と同様に熱帯モンスーン気候であり、4 月～10 月が雨季、11 月～3 月が乾季である。また年間平均降水量は約 1600mm である。カンボジアはプノンペンに人口が集中しているため、衛生指標およびインフラストラクチャー整備率でプノンペンと農村部との格差が大きい。また他の近隣アジア諸国と比較してもその状況は劣る(表 1)。川の水質は他の東南アジアの河川と同程度の汚染、濁度であり、急速濾過すれば除去することが可能である⁴⁾。

また、対象領域の北に位置するトンレサップ湖はトンレサップ川を通してメコン河の遊水地の役目を果たしている。乾季の間は湖からメコン河に向かって河は流れているが、雨季洪水期には流れの向きが逆になり、メコン河の一部の流量は湖に向かう。乾季のトンレサップ湖は面積約 3000km² であるが、雨季になるとほぼ 1 万 km² に拡大する。この湖の機能がメコン河下流域の水文現象を特徴づけている。メコン河はプノンペンでトンレサップ川と合流し、バサック川と分流している。

2. 2 データセット

各計算に以下のデータセットを用いた。対象地域の標高は USGS の GTOPO30 をj用い、河道の位置もこのデータから得た。川幅は、メコン河を 1200m、またトンレサップ川およびバサック川を 500m とした。河床標高については、コンボンチャムで -0.93m、プノンペンで -1.02m、タンチャウ、チャウドックで 0m、ブレクダムで 0.08m であることより、河床標高を線形に補間した。水位および SS はメコン河委員会が編集したデータを用いた。カンボジア国内の人口分布および県境は JICA 作成の地図データより、衛生施設(上・下水道、浄化槽、ピット)普及率および保健指標は JBIC 作成の報告書⁵⁾より得た。空間データの解像度は 1km×1km とした。

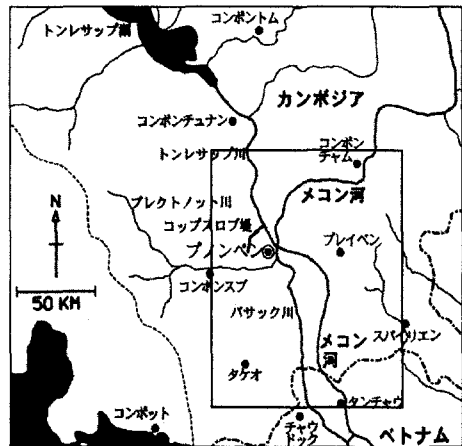


図 1 対象領域(図中の枠内)

表 1 カンボジアおよび各国の衛生指標およびインフラストラクチャー整備率²⁾

国名		幼児死亡率 (人/1000 人)	妊婦死亡率 (人/10 万人)	安全な水の 普及率(%)	衛生施設普及率 (%)
カンボジア	プノンペン	38	—	48.3	86.8
	農村部	96	—	1.8	13.3
	全国平均	93	437	6.4	22.1
中国		30	50	83.5	50.9
ミャンマー		69	—	—	—
ラオス		82	530	52.0	37.3
タイ		21	—	—	—
ベトナム		26	165	60.9	45.0

2. 3 計算方法

(1) 洪水氾濫計算

洪水氾濫計算には萩原ら⁹⁾と同様に河道には1次元 Dynamic Wave モデル, 氾濫原には2次元不定流モデルを用いた。

1) 洪水計算

1次元 Dynamic Wave モデルは本研究の対象領域のような河床勾配の小さい河川の洪水解析に適している。基礎方程式は次の運動方程式と連続式からなる。

$$\text{運動方程式} \quad \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} + S + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = 0 \quad (1)$$

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (2)$$

ここで, A : 断面積(m^2), Q : 流量(m^3/s), q : 横流出量(m^2/s), g : 重力加速度(m/s^2), v : 流速(m/s), S : 河床勾配, n : マニングの粗度係数, h : 水深(m)を表している。 q は単位幅当たりの横からの流入量で, 他の川からの流入や, 降雨が該当する。流出する場合は符号が逆になる。境界条件はメコン河上流はコンボンチャム, 下流はタンチャウ, パサック川はチャウドック, トンレサップ川はプレクダムの水位である。

2) 氾濫計算

二次元不定流モデルは, 次の運動方程式と連続式からなる。

$$\text{運動方程式} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{(X方向)} \quad \frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{xb}}{\rho} \\ \text{(Y方向)} \quad \frac{\partial N}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{yb}}{\rho} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$(4)$$

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

ここで, h : 水深(m), M : X方向の単位幅あたりの流量フラックス(m^2/s), N : Y方向の単位幅あたりの流量フラックス(m^2/s), $M=uh$, $N=vh$, u : X方向の流速(m/s), v : Y方向の流速(m/s), τ_{xb} : X方向のせん断力, τ_{yb} : Y方向のせん断力, ρ : 密度, H : 水位(m)を表す。

3) 越流計算

本研究の対象領域にはコルマタージュと呼ばれるこの地域の伝統的灌漑方法が行われている。これは堤防の一部を開き, 農業用水として洪水流の一部を氾濫原に引き入れるものである。氾濫原に越流する流量は次の越流公式を用いて求める。

$$\text{完全越流} \quad Q = 0.35 B h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (6)$$

$$\text{もぐり越流} \quad Q = 0.91 B h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (7)$$

ここで, Q : 流量(m^3/s), B : コルマタージュ水路幅($=10\text{m}$), h_1 : 越流水深(m), h_2 : 氾濫原の水深(m) である。

(2) 大腸菌群濃度計算

大腸菌群濃度計算は, 大腸菌群の投入量及び時間当たりの大腸菌群減少率を決定し, 不定流式の流量フラックスを用いて計算する。

投入量は人口分布と県毎の衛生施設普及率に合わせて決定する。日投入量は式(8)で求められる。

$$C = n \times c \times (1 - s/100) \quad (8)$$

ここで、 C ：大腸菌群投入量(個/日)、 n ：人口(人)、 c ：一人が一日に排出する大腸菌群量(= 2.0×10^{10} 個/人/日)、 s ：下水道普及率(%) である。また、河道の大腸菌群濃度はアジア太平洋環境開発フォーラムの報告書⁷⁾から 5.0 個/ml とした。

時間当たり的大腸菌群の残存率は、主に水温や時間、太陽の照射量や他の微生物との関係性などによって決まる。しかし、熱帯地域は年間を通して気温が大きく変化しない。そのため水温は常にほぼ一定である。また、太陽光線が強く、表層と底層との水温差が大きくなる傾向にある¹⁾。氾濫原における水深ごとの詳細な水温データが不明のため、対象領域で一律であると考えられる太陽の照射量を利用することを考える。そこで、日光の強さと大腸菌群残存率との水深ごとの関係(図 2)⁸⁾から求めた。また、濁度による日光への影響を考慮するために SS 濃度と水面での日光の反射率の関係式⁹⁾を用いた。照射量と反射率の関係を簡略化して考えると式(9)のようになる。

$$S = (1 - R/100)S_{\max} \quad (9)$$

ここで $S_{\max}$ ：全照射熱量($J/cm^2/day$)、 R ：反射率(%)である。沖らは、SS 濃度と反射率との関係を式(10)のように表している⁹⁾。

$$R = 0.0809 + 0.0146U \quad (10)$$

ここで、 U ：SS 濃度(mg/l) である。

(3) 危険度評価計算

本研究では 5 歳未満児(0 歳児を除く)の死亡率を水系感染症の感染危険度を表す指標として用いる。5 歳未満児は年齢別に見て水系感染症の感染危険度が最も高い。また、水系感染症等による下痢症は脱水症状を引き起こし、腸の収縮能力が発達していない幼児は死に至ることもある。実際にカンボジア国内においても下痢は幼児の主要な死亡原因である⁵⁾。表 2 に対象領域内に県全土が含まれている 3 つの県の 5 歳未満児死亡率を示す。

表 2 各県の 5 歳未満児死亡率

県名	衛生施設の普及率(%)	5 歳未満児死亡率(対 1000 出生)
プノンペン	86.8	49.7
プレイベン	7.5	151.3
カンダル	32.8	108.2

大腸菌群濃度を危険度評価に用いることを考える際、濃度の他にその濃度を持つ水との接触機会について

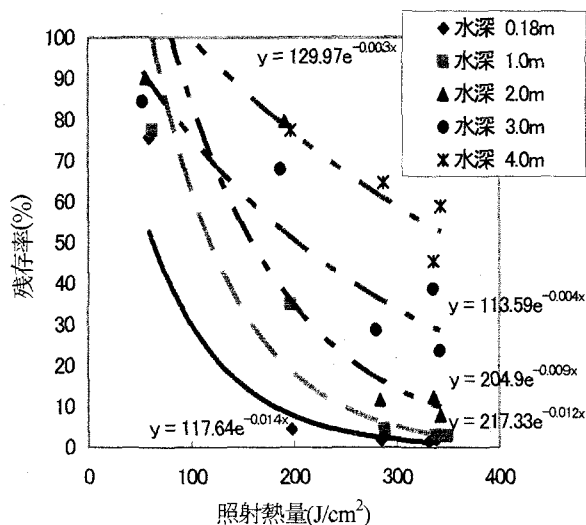


図 2 照射熱量と大腸菌群濃度
(Gameson らの結果を用いて再描写)

も考慮しなくてはならない。接触機会は浸水期間を考えることで代用できるが、濃度と浸水期間には相関性がない。また、危険度を評価するためには、計算を行った一年間の大腸菌群濃度を対象とした比較可能な値が必要である。ここでは年間総濃度を用いることを考える。

まず、仮定として対象領域内の全ての人は毎日同じ行動を取り、自分の居住区域が浸水している場合における水との接触機会は等しいとする。年間総濃度はメッシュ毎の一年間の大腸菌群濃度の総和であり、式(11)で表される。

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^{365} E \quad (11)$$

ここで、 $\bar{E}$ ：年間総濃度(個/ml/km²/年)、 E ：大腸菌群濃度(個/ml/km²/日)である。この値はメッシュ内の住人が接触する延べ濃度を表している。この値が大きいほど感染の危険が高いと考えられる。この値と5歳未満児死亡率とを比較し、二つの関係性により水系感染症の危険度を決定する。

3. 結果および考察

3. 1 洪水氾濫計算

洪水氾濫計算の計算結果は洪水水位、氾濫域共に萩原らによって良好な結果が得られたことが確かめられている。今回も計算条件等に大きな違いは無いので良好な結果であると考えられる。

3. 2 大腸菌群濃度の検討

図3は実測値と計算値を比較したものである。実測は2004年10月23日に領域内の8箇所で行い(図4)、簡易試験紙を用いた培養法で濃度を測定した。計算値は8箇所中4箇所において実測値とほぼ等しい値である。残りの4箇所もオーダーに大きな差は無い。実測データが少ないため、このモデルが大腸菌群の挙動を再現できているとまで言えない。そのため、実測データを加えさらに検証していく必要があるが、オーダー単位で変動する大腸菌群において良好な結果を得たと言える。

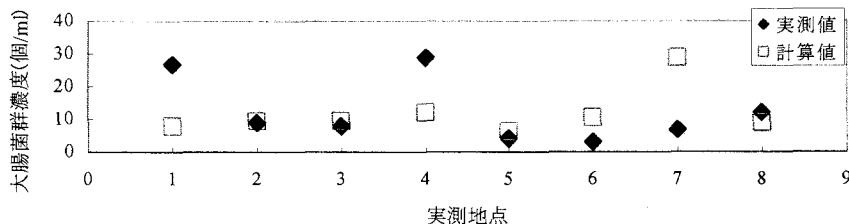


図3 大腸菌群濃度の実測値と計算値

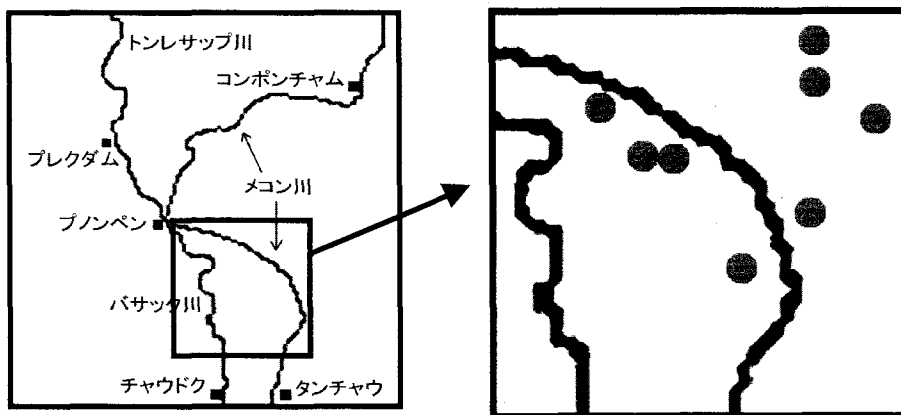


図4 実測箇所

図5に氾濫域と大腸菌群濃度の時間的・空間的变化を示した図を載せる。この図から氾濫域の拡大・収束に合わせて大腸菌群が分布している様子が分かる。

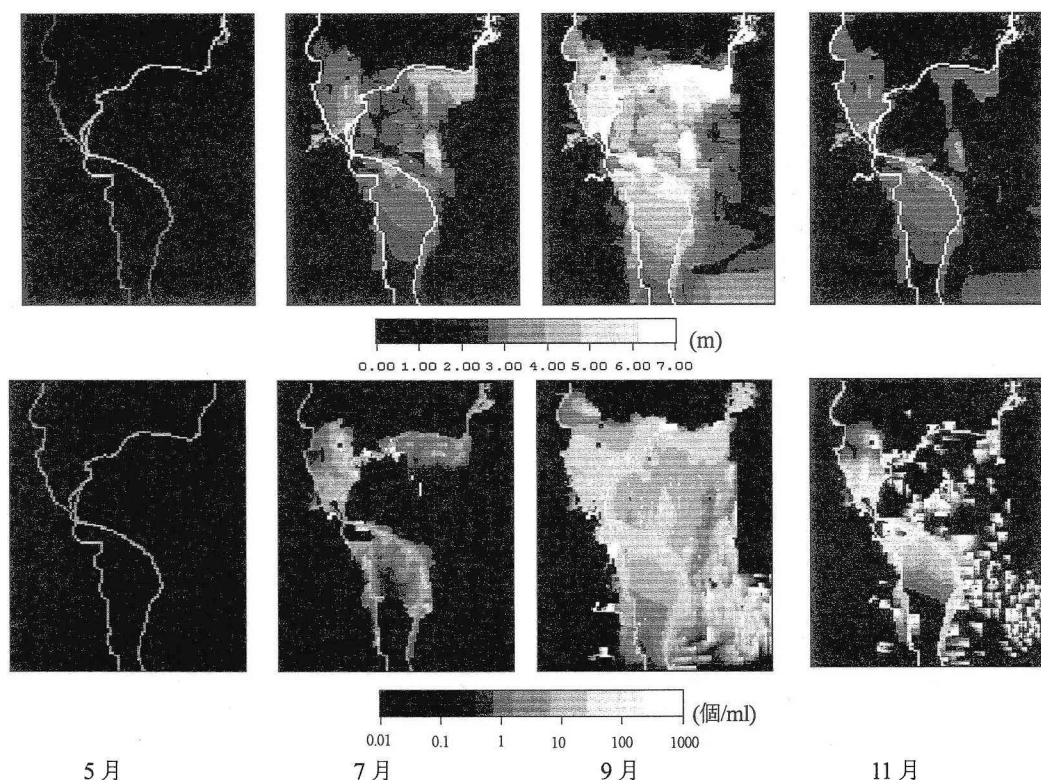


図5 氾濫域と大腸菌群濃度の時間的・空間的变化
(上段：氾濫域 下段：大腸菌群濃度)

3. 3 危険度評価

大腸菌群の年間総濃度と5歳未満児死亡率との相関図を図6に示す。この図において、総濃度の増加に伴って死亡率も増加していることから相互関係が認められる。

図7は大腸菌群年間総濃度の分布を表したものである。この図においてバサック川右岸域は高い危険度である。この一帯は、氾濫時に標高が高い地域とバサック川に挟まれた閉鎖性が高い水域になる。このため、病原微生物が他の地域よりも高濃度になる。このことから、この地域で感染症が発生すると蔓延しやすいと考えられる。また、図7と図8の浸水期間分布図と図9の浸水期間平均水深とを比較すると、互いの関係に一意的なものはない。このことから感染症の危険性は水位、浸水期間、地形的特性および人口分布が複雑に関係を及ぼし合って決定すると考えられる。

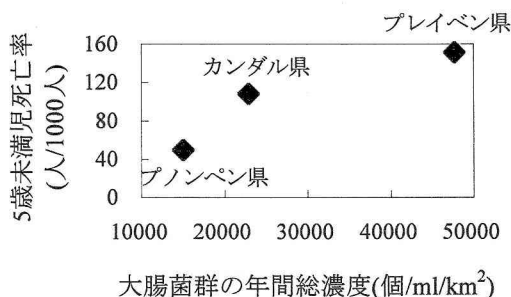


図6 県毎の5歳未満児死亡率と大腸菌群年間総濃度

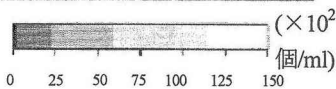
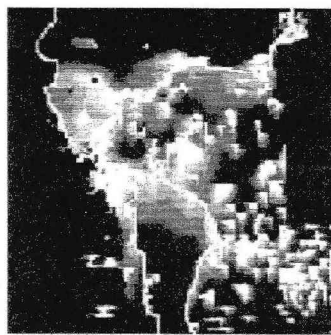


図7 大腸菌群年間総濃度分布

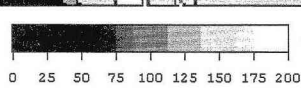
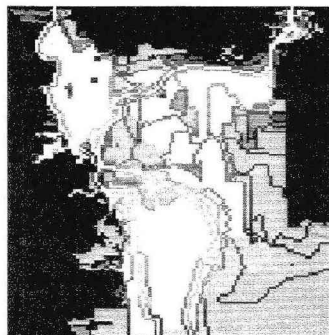


図8 浸水期間

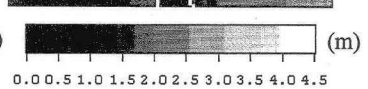
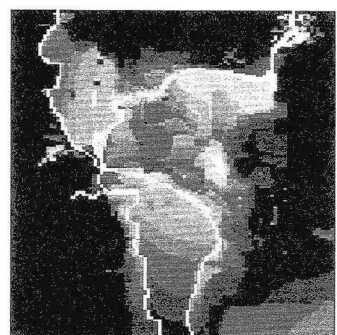


図9 平均水深

4. 結論

本研究では大腸菌群濃度と5歳未満児死亡率を用いることで水系感染症の感染危険度を分布的に表すことが出来た。その結果として以下の知見が得られた。

- (1) 地形的特性、特に閉鎖性によって感染危険度は高まる。
- (2) 感染症の危険性は水位、浸水期間、地形的特性および人口分布が複雑に関係を及ぼし合って決定する。

これらのことから、地形的特性に着目した治水事業を行なうこと、地域ごとの洪水氾濫時の状況に着目した下水道整備を行うことにより水性感染症のリスクを軽減できる。今後、住民の水の利用方法や上水道の持つ影響を考慮したモデルを構築することや、メッシュ内における大腸菌群の挙動と感染者数の計上により、さらに精度の高い危険度評価を行なうことが出来ると考えている。

謝辞

本研究は科学研究費若手B(代表者：風間聡)ならびに文部科学省人・自然・地球共生プロジェクト「アジア・モンスーン地域における水資源の安全性に関わるリスクマネジメントシステムの構築」(代表：大村達夫)の援助を受けた。ここに深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) Gordon A. McFeters 編, 金子光美 監訳, 飲料水の微生物学, 技報堂出版, 1992.
- 2) Country Health Information Profile 2004, WHO ホームページ. (<http://www.wpro.who.int/chips/default.asp>)
- 3) R. W. Muirhead, R. J. Davies-Colley, A. M. Donnison and J. W. Nagels : Faecal bacteria yields in artificial flood events: quantifying in-stream stores, *Water Research*, Vol.38, pp.1215-1224, 2004.
- 4) 堀博, メコン河 開発と環境, 古今書院, 1996.
- 5) 国際協力銀行, 貧困プロファイル カンボジア王国最終報告書, 2000.
- 6) 萩原照通, 風間聡, 沢本正樹: 洪水制御によるメコン河下流域の氾濫農業と地下水涵養への影響, 水文・水資源学会誌, Vol.16, No.6, pp.618-630, 2003.
- 7) APFED 事務局, APEFD 最終報告書ゼロドラフト, 2003.
- 8) A.L.H.Gameson and J.R.Saxon : Field studies on effect of daylight on mortality of coliform bacteria, *Water Research*, Vol.1, pp.279-295, 1967.
- 9) 沖一雄, 安岡善文, 田村正行: 高濃度水域における水質リモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.21, No.5, pp.449-457, 2001.