

メコン河における洪水規模による 水系感染症のリスク変動

The risk fluctuation of waterborne infectious disease on flood scales in the Mekong River

相澤 寿樹¹・風間 聡²・渡部 徹³・沢本 正樹⁴

Toshiki AIZAWA, So KAZAMA, Toru WATANABE and Masaki SAWAMOTO

¹ 学生員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

² 正会員 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

³ 正会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

⁴ フェロー 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

This study simulated coliform bacterium distribution using the hydraulic flood model with three different flood events around Phnom Penh in Cambodia and evaluated the risk fluctuation of waterborne infection disease. The results obtained are as follows; 1. The distributions of coliform bacteria increase depending on the flood scale. 2. The coliform bacteria concentrations increase with lower water levels in closed inundation area, on the other hand, the concentrations decrease on areas affected by flood. 3. Evaluating by per unit area, as the flood scales upsize, the risks of waterborne infections in each province decrease. But the hazardous areas of waterborne infection upsize evaluating by all inundation areas.

Key Words : flood simulation, mortality rate, coliform bacteria

1. はじめに

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いため、他の年代よりも死亡率が高い。水系感染症は主に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。カンボジアはプノンペン中心部を除いて上下水道の整備が遅れており、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、氾濫時にはそれらの水源が汚染され、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。

以上のことから、相澤らは洪水氾濫時の大腸菌群の移流計算モデルを構築し、得られた大腸菌群濃度の空間分布と5歳未満児死亡率との関係から洪水氾濫の持つ水系感染症の危険度を空間的に評価した⁴⁾。しかし、メコン河下流域では2000年に起こった大規模洪水氾濫のように洪水規模によって氾濫面積およびその水深が大きく変化し、浸水期間も異なる⁵⁾。このため洪水氾濫の影響を受ける人

口や期間、汚染レベルが変化するため、洪水規模による衛生面への影響力の違いが存在すると考えられる。

本研究は洪水氾濫時の大腸菌群移流計算モデルを、規模の違う 3 つの洪水に適用し、洪水氾濫規模による衛生面への影響の違いを明らかにすることを目的としている。

2. 対象領域

(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 140km×110km 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。また平均年間降水量は約 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²⁾。河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⁶⁾、灌漑、工業用水などの用途に対して問題なく、急速濾過すれば除去することが可能である。

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) 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(アメリカ地質調査所)の GTOPO30 を用い、河道の位置もこのデータから得た。各年の水位および SS はメコン河委員会が編集したデータ⁷⁾を用いた。カンボジア国内の人口分布および州境は JICA(国際協力機構)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(日本国際協力銀行)作成の報告書⁸⁾より得た。空間データの解像度は 1km×1km とした。

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。

a) 洪水計算

1 次元 Dynamic Wave モデルは本研究の対象領域のよう

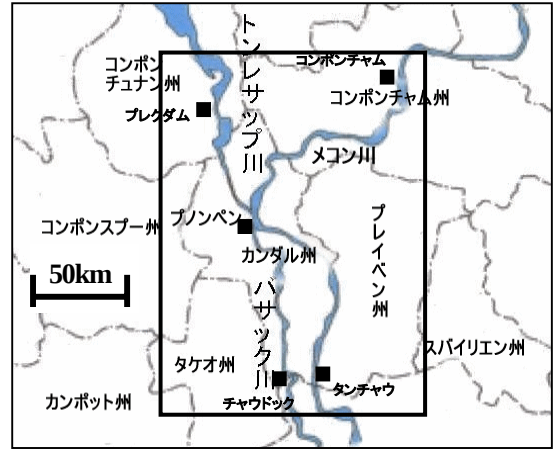


図-1 評価対象地域 (枠内)

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。

運動方程式

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

連続式

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

ここで、 A : 断面積(m²)、 Q : 流量(m³/s)、 q : 横流出量(m²/s)、 g : 重力加速度(m/s²)、 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出入量で、他の川からの流出入が該当する。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、バ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。

b) 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。

$$\text{運動方程式} \begin{cases} (\text{X方向}) \frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{xb}}{\rho} & (3) \\ (\text{Y方向}) \frac{\partial N}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{yb}}{\rho} & (4) \end{cases}$$

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

ここで、 h : 水深(m)、 M 、 N : X、Y方向の単位幅あたりの流量フラックス(m²/s)、 $M=uh$ 、 $N=vh$ 、 u 、 v : X、Y方向の流速(m/s)、 τ_{xb} 、 τ_{yb} : X、Y方向のせん断力、 ρ : 密度、 H : 水位(m)を表す。

本来、このモデルの運動方程式には移流項が含まれるが、メコン河のように流れの変化が緩い場合にはその影響は小さく¹⁰⁾、誤差が大きくないため省略した。

c) 越流計算

本研究の対象領域には、堤防の一部を開き、農業用水と

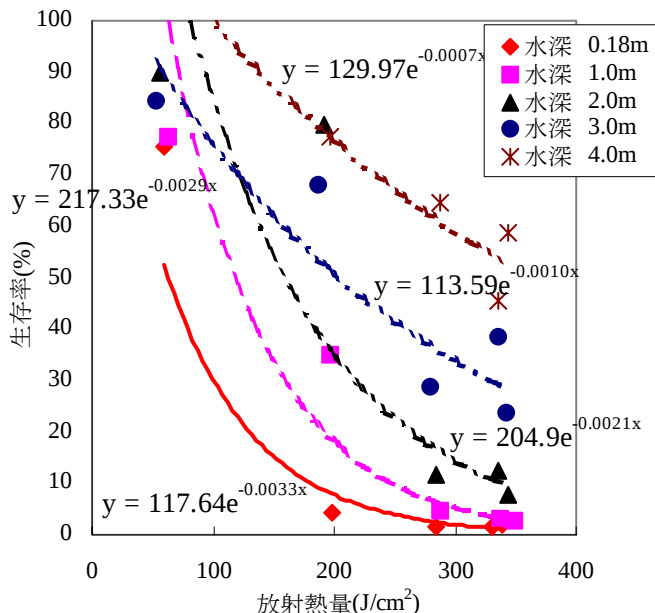


図-2 照射熱量と大腸菌群生存率
(Gameson らの結果を用いて再描写)

して洪水流の一部を氾濫原に引き入れるコルマタージュと呼ばれるものがある。このコルマタージュの存在により対象領域では毎年雨季に必ず洪水氾濫が生じ、その洪水規模は河川水位に影響を受ける。コルマタージュによる氾濫原への越流量は次の越流公式を用いて求める。

$$\text{完全越流} \quad Q = 0.35Bh_1\sqrt{2gh_1} \quad (6)$$

$$\text{もぐり越流} \quad Q = 0.91Bh_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (7)$$

ここで、 Q : 流量(m^3/s)、 B : コルマタージュ水路幅(=10m)、 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的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。投入箇所は大腸菌群の発生箇所である居住地とし、下水からの逆流は考慮しない。これは下水道普及箇所がプノンペンや郊外の都市域であり、浸水被害が小さいためである。

投入量は人口分布と州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¹¹⁾から 5.0 個/ml とした。

時間当たり的大腸菌群の生存率は、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

表-1 州毎の5歳未満児死亡率⁹⁾

州名	衛生施設の普及率(%、1999年)	5歳未満児死亡率(対1000出生、2000年)
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

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生存率との水深ごとの関係(図-2)¹²⁾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¹³⁾を用いた。照射熱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 : 照射熱量($\text{J}/\text{cm}^2/\text{day}$)、 $S_{\max}$: 全照射熱量($\text{J}/\text{cm}^2/\text{day}$)、 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¹³⁾。

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

ここで、 U : SS 濃度(mg/l) である。この U は大腸菌群濃度計算と同様に不定流式の流量フラックスを用い、河道での 1996 年の SS 濃度を境界条件として計算する。

(3) 危険度評価計算

本研究では 2000 年の 5 歳未満児の年間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。カンボジア国内において水系感染症等による下痢は幼児の主要な死亡原因である⁹⁾。表-1 に対象領域内に州全土が含まれている 3 つの州の 5 歳未満児死亡率を示す。

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/ km^2 /年)、 E : 大腸菌群濃度(個/ml/ km^2 /日) である。この値はメッシュ内の住人が接

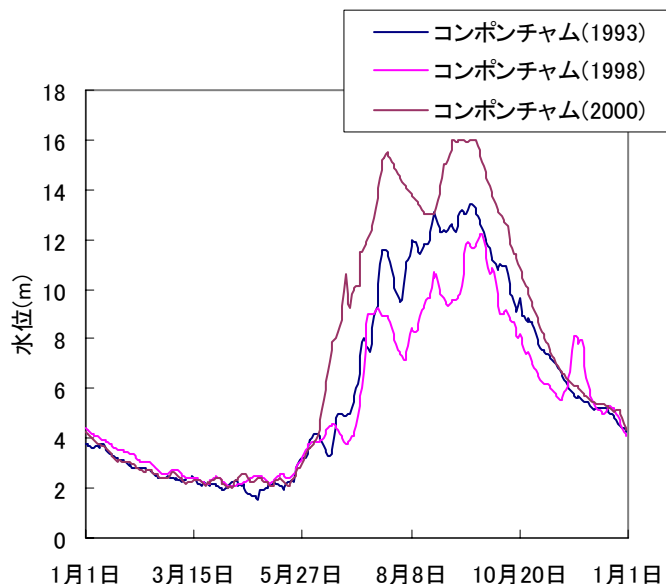


図-3 コンボンチャムの各年の水位変化

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。

(4) 洪水規模による衛生面のリスク変動評価

対象領域において相対的に比較して洪水規模の違う 3 つの洪水として 1993 年(洪水規模: 中), 1998 年(同: 小), 2000 年(同: 大)の 3 つの洪水を取り上げる。図-3 にコンボンチャムの各年の水位変化グラフを載せた。各年のコンボンチャム、タンチャウ、チャウドック、プレクダムの水位を境界条件として洪水氾濫計算、大腸菌群濃度計算、危険度評価計算を行い、洪水規模と大腸菌群の年間総濃度との関係から洪水規模の持つ衛生面への影響の特性を考察する。

4. 結果および考察

(1) 大腸菌群濃度計算

洪水氾濫計算の計算結果は洪水の水位、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⁹⁾。この計算では河川水位を境界条件として用いることで洪水氾濫を再現することが出来る。今回も河川水位以外の計算条件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。

図-4 は実測値と計算値を比較したものである。実測は洪水時であった 2004 年 10 月 23 日に領域内の 8 箇所で行い(図-5)、柴田科学株式会社製の大腸菌群試験紙を用いて 35℃, 24 時間培養により計測した。計算値には 2004 年の水位データが無いので比較的近いデータであると考えられる 1994 年のデータを用いた。実測地点は洪水期には常に浸水する地域にあるため、水位などにおいて年毎の違いは少なく、1994 年のデータを用いた計算結果と比較することが可能である。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

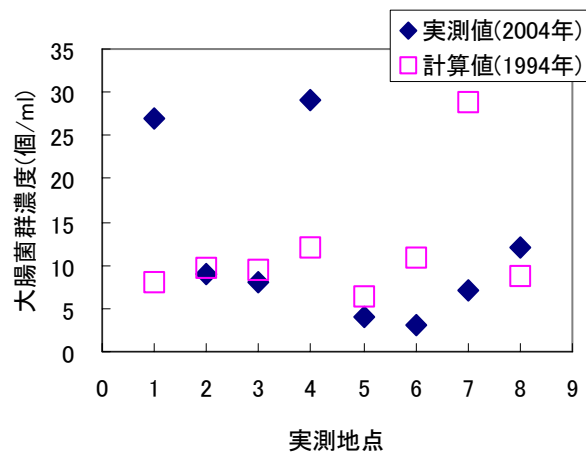


図-4 実測値と計算値の比較

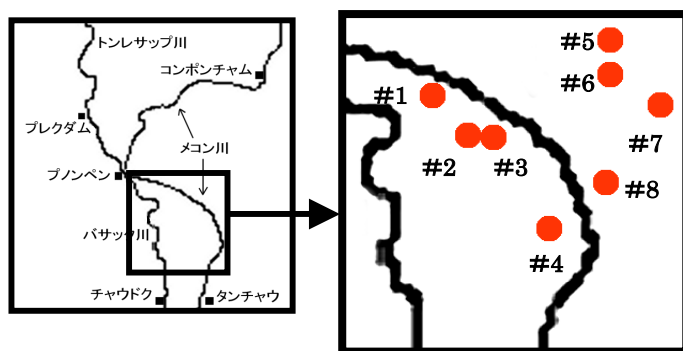


図-5 実測地点

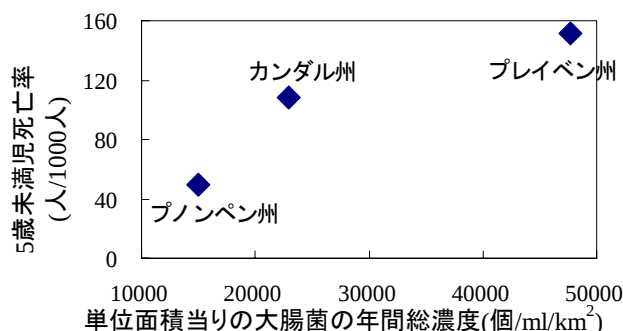


図-6 州毎の 5 歳未満児死亡率と大腸菌群年間総濃度

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は言えない。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。

(2) 洪水規模による衛生面のリスク変動評価

州毎の大腸菌群年間総濃度と 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、総濃度の増加に伴い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 は各洪水の規模の違いをピーク時の浸水面積および浸水深で比較したものである。図-8 は大腸菌群の年間総濃度分布を表したものである。2 つの図から洪水規模が大きくなるほど大腸菌群が分布する範囲が広がっていくことがわかる。また洪水規模の拡大により大腸菌群の総濃度が増加している地域(図-8 中楕円枠内)と減少して

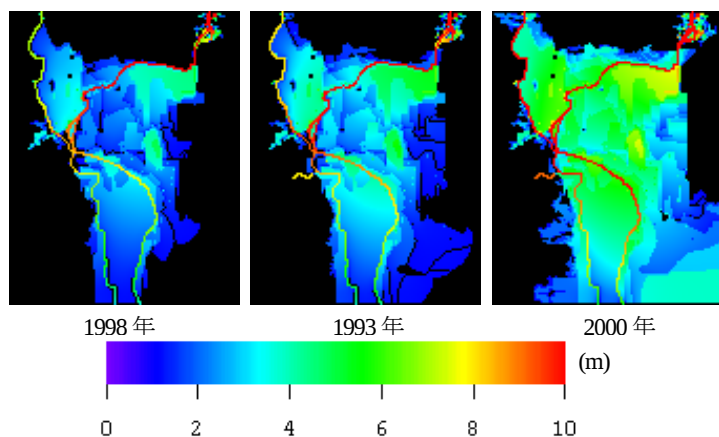


図-7 洪水規模の比較(ピーク時)

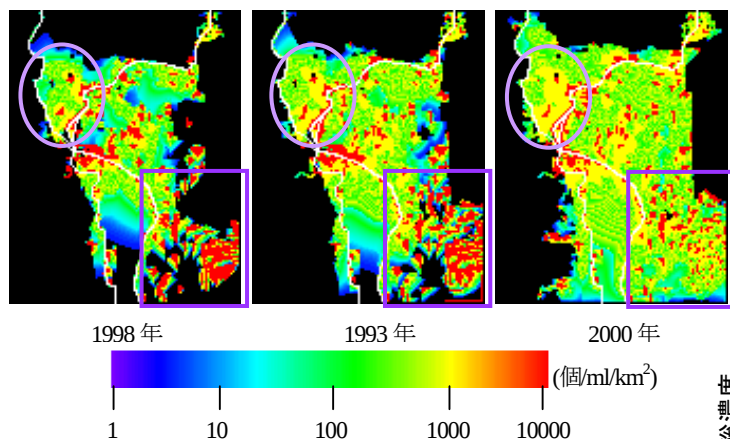


図-8 洪水規模ごとの大腸菌群年間総濃度分布

いる地域(図-8 中四角枠内)が存在していることがわかる。大腸菌群の年間総濃度(折れ線グラフ、目盛；左軸)と、3州の大腸菌群総濃度の和(棒グラフ、目盛；右軸)を示したものである。3州の総和は3州の氾濫域内の大腸菌群総濃度の和を表しており、3州の氾濫域全体での水系感染症の危険度を表していると考えられる。3つの州全てにおいて洪水規模による総濃度の違いがあり、それぞれ異なる変化をしている。また3州の総和は小規模と大規模でほぼ等しく、中規模では他の規模の6割程度という結果である。

図-11は浸水日数の変化を、図-12は平均水深を示したものである。図-11から全ての箇所において洪水の規模が大きくなるにつれて浸水日数は増加しており、浸水日数と大腸菌群総濃度(図-10)との間に相関性は見られない。各州毎の氾濫域と平均水深の変化は表-2のようになる。プレイベンにおいて中規模洪水では低水位の浸水域の増加に伴い総濃度が増加し、大規模洪水では全体の水位が大きく上昇したことにより濃度が低下したため総濃度も低下したと考えられる。カンダルでは洪水規模の拡大に伴い水位のみが上昇したため規模の拡大と共に総濃度が低下したと考えられる。プノンペンでは中規模洪水において水深および氾濫域が若干増加したために大腸菌群の貯留がなくなり、このために総濃度が低下したと考えられる。またプノンペンは大規模洪水でも浸水域・平均水

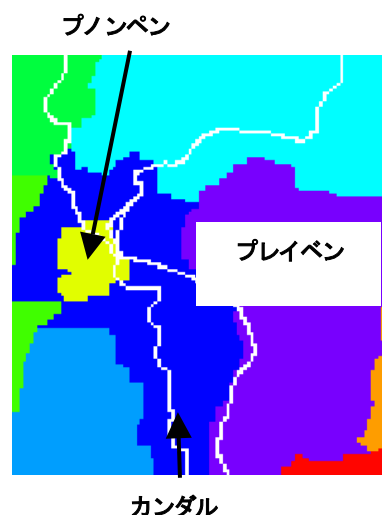


図-9 州配置図(白色部は河道)

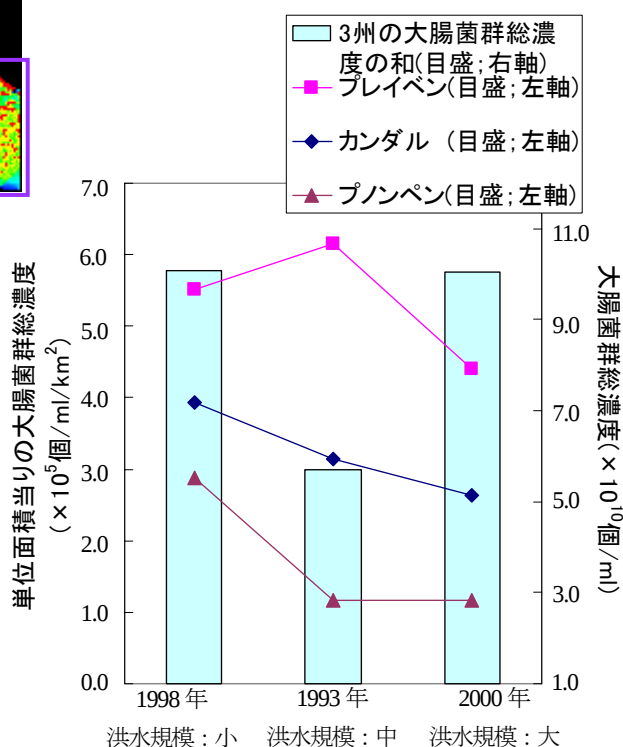


図-10 州毎の洪水規模による大腸菌群総濃度の変化

位は共に中規模洪水と変わらないため、総濃度もほぼ同じ値となった。

3州の総濃度和は、中規模での結果と比較すると小規模では狭い氾濫域内での高濃度となるために、大規模では氾濫域が大幅に拡大するために、それぞれ高い値となると考えられる。このことから、大規模洪水では氾濫面積の拡大により汚染された水と接触する人口数は増加することが考えられる。

以上をまとめると、単位面積当りの大腸菌群濃度の変化から氾濫域が拡大すると、プレイベンを除いて湛水地域の水系感染症のリスクは減少する。しかし、氾濫域全体の大腸菌群濃度の和は小規模洪水と大規模洪水は同じ程度であるので、大規模洪水では単位面積当りの大腸菌

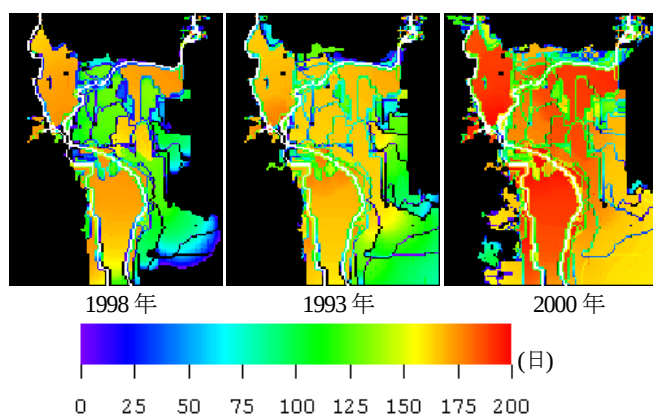


図-11 洪水規模による浸水日数の変化

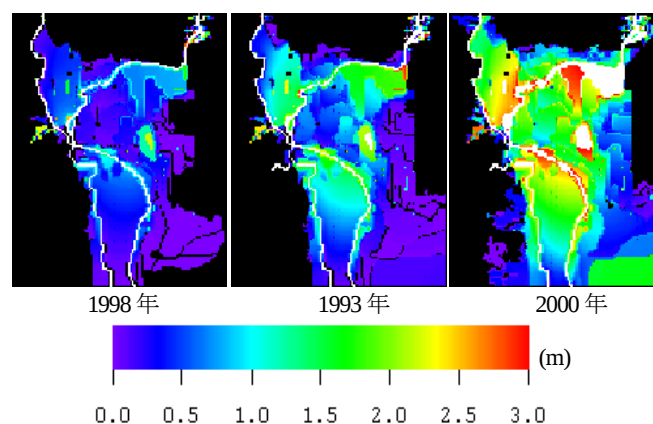


図-12 洪水規模による平均水深の変化

表-2 洪水規模による浸水状況の変化

州名	—	1998と1993 の比較	1993と2000 の比較
プレイベン	水深	微増	上昇
	氾濫域	増加	増加
カンダル	水深	上昇	上昇
	氾濫域	変化無し	微増
プノンペン	水深	上昇	上昇
	氾濫域	微増	変化なし

群濃度は低いが、感染危険地域が拡大すると考えられる。また、中規模洪水の大腸菌群濃度の和が低いことから、氾濫をある規模に制御することによって感染危険域を最小に出来る可能性を示している。

5. 結論

本研究において以下のような結論が得られた。

- ・洪水規模の拡大に伴い、大腸菌群の分布範囲は拡大する。
- ・閉鎖的水域においては水位上昇と共に大腸菌群濃度は上昇し、そうでない箇所においては減少していく傾向にある。
- ・氾濫域 3 州の水系感染症リスクは洪水規模の拡大に伴い減少する傾向にあるが、大規模洪水時は水系感染症の感染危険域が拡大する。

今後は、接触する濃度と感染率に関してさらに研究を進めることを考えている。また、大腸菌群濃度の季節変動に関して研究を進め、同時に地域住民の水の利用方法や摂取方法を考慮に入れたリスク評価モデルを構築し、包括的な水系感染症に関するリスク評価モデルを提案していくことを考えている。

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」(平成 15~18 年度、代表：大村達夫)から援助を受けた。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) 相澤寿樹, 風間聡, 渡部徹, 沢本正樹 : 水理氾濫モデルを用いたメコン河氾濫時の感染症感染危険度評価, 環境工学研究論文集, vol.42, 2005. (印刷中)
- 5) 土木学会水理委員会 : メコン河洪水氾濫調査 2000 年 11 月, 84pp., 2001.
- 6) 堀博, メコン河 開発と環境, 古今書院, 1996.
- 7) Mekong River Commission, LOWER MEKONG HYDROLOGIC YEARBOOK
- 8) 日本国際協力銀行, 貧困プロファイル カンボジア王国最終報告書, 2000.
- 9) 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.
- 10) 土木学会編, 水理公式集 平成 11 年版, 1999.
- 11) APFED 事務局, APEFD 最終報告書ゼロドラフト, 2003.
- 12) 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.
- 13) 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.

(2005.9.30 受付)