

## メコン流域における水と感染症3 カンボジアにおける洪水と感染症

The risk of waterborne infectious disease on flood in Cambodia

かざ ま そう  
風 間 聡  
So KAZAMA

### 要 旨

カンボジアでは、雨季に広い範囲で氾濫が生じるが、その地域の水系感染症の実態はよく理解されていない。そこで、洪水氾濫の数値シミュレーションに大腸菌輸送を付加し、病原菌の時空間分布の把握を行った。その動態と水系感染症の患者数との関係を考察し、感染リスクを求めた。その結果、1) 洪水規模の拡大に伴い、大腸菌群の分布範囲は拡大すること、2) 閉鎖的水域においては水位上昇ととも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こと、3) 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こと、が新しい知見として得られた。

### はじめに

世界では毎年2億5,000万人以上の水系感染症患者が報告され、そのうち1,000万人以上の人々が死亡している<sup>1)</sup>。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<sup>1)</sup>。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、他の年代よりも高い死亡率を示している。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。水道施設を持たない途上国では、汚染された地表水や地下水を摂取するため、水系感染症の感染リスクはさらに高い値になる。

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。この洪水氾濫は、地元住民にとって恵みの水であり、灌漑用水や水産資源の供給源となる(写真1)。一方、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。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・蔓延する問題も生じている。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%)<sup>2)</sup>、衛生面に関する基盤整備の必要性がいられている。

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さまざま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<sup>3)</sup>。しかしデータは離散的な



写真1 メコン川畔での生活

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。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。この問題を解決する方法の1つが数値モデルによるシミュレーションの利用である。数値モデルは、任意の条件による病原性細菌の変化を時空間分布で知ることができる。つまり、感染症リスクの高い地域を抽出することが可能である。

以上のことから、相澤らは、大腸菌が病原性細菌の指標になると考え、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<sup>4)</sup>。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が年によって異なり、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<sup>5)</sup>。この際、洪水氾濫の影響を受ける人口や期間、汚染レベルも変化するため、洪水規模による衛生面への影響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検討した。

## I. 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

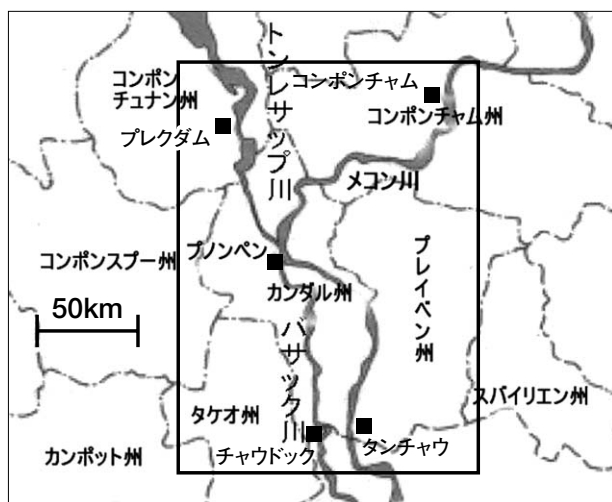


図1 評価対象地域(枠内)

soon気候であり、4～10月が雨季、11～3月が乾季である。また平均年間降水量は約1,600mm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くなっている。また他の近隣アジア諸国と比較してもその状況は劣る<sup>2)</sup>。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<sup>6)</sup>、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、湖からメコン河に流出するが、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3,000km<sup>2</sup>であるが、雨季になるとほぼ1万km<sup>2</sup>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。

計算には次の数値データを用いた。対象地域の標高に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(水中の浮遊砂の量)はメコン河委員会が編集したデータ<sup>7)</sup>を利用した。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<sup>8)</sup>より得た。空間データの解像度は1km × 1kmとした。

## II. 計算方法

### 1. 洪水氾濫計算

洪水氾濫計算には萩原ら<sup>9)</sup>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、河川からの氾濫水の流入には越流公式を用いた。対象領域の河道は、メコン河本川とトンレサップ川、バサック川としている。

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。基礎方程式は粗度を考慮した運動方程式と連

続式からなる。Dynamic Wave モデルを解くために、メコン河上流のコンボンチャム、下流のタンチャウ、バサク川のチャウドック、トンレサップ川のプレクダムの4地点の水位データを与える。

2次元不定流モデルは、氾濫源の水の移動を解くため水底の摩擦を考慮した運動方程式と連続式からなる。このモデルは、メコン河のように流れの変化が緩い場合には簡略できることが知られており、計算速度を上げることが可能である<sup>10)</sup>。氾濫源から供給された水が洪水期には拡大し、乾季には収縮していく様を表現する。

本研究の対象領域には、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の影響を受ける。コルマタージュによる氾濫原への流量は越流公式を用いて求める。これは水位の高い地域から低い地域に放流される現象を表現することができる。

## 2. 大腸菌群濃度計算

大腸菌群濃度計算は、大腸菌群の投入量および時間当たりの大腸菌群減少率を決定し、不定流モデルで得られる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。日投入量は次式で求められる。

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

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 (=  $2.0 \times 10^{10}$  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<sup>11)</sup> から  $5.0$  個/mL とした。

時間当たりの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、太陽光線が強く、表層と底層との水温差

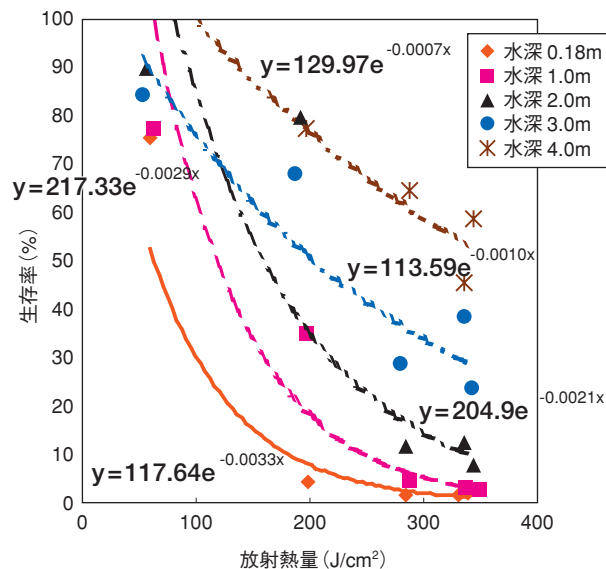


図2 照射熱量と大腸菌群生存率  
(Gameson らの結果を用いて再描写)

が大きくなる傾向にある<sup>1)</sup>。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)<sup>12)</sup> 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<sup>13)</sup>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次式のようなになる。

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

ここで  $S$ ：照射熱量 ( $J/cm^2/day$ )、 $S_{\max}$ ：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線形式で表している<sup>13)</sup>。SSは、メコン河委員会が観測しているメコン河のSSデータを入力データとして与えた。氾濫源のSS濃度は、大腸菌群濃度計算と同様に不定流式の流量フラックスデータによって大腸菌群の移流を求め、沈降をRubeyの実験式によって表現した。巻き上がりについては考慮しておらず、河川から離れるにしたがってSS濃度は減少する。

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<sup>8)</sup>。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1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すべ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ごとの年間の大腸菌群濃度の総和であり、次式で表される。

$$\bar{E} = \sum_1^{365} E$$

ここで、 $\bar{E}$ ：年間総濃度（個/mL/km<sup>2</sup>/年）、 $E$ ：大腸菌群濃度（個/mL/km<sup>2</sup>/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。

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い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

表1 州ごとの5歳未満児死亡率<sup>8)</sup>

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)
ブノンペン	86.8	49.7
プレイベン	7.5	151.3
カンダル	32.8	108.2

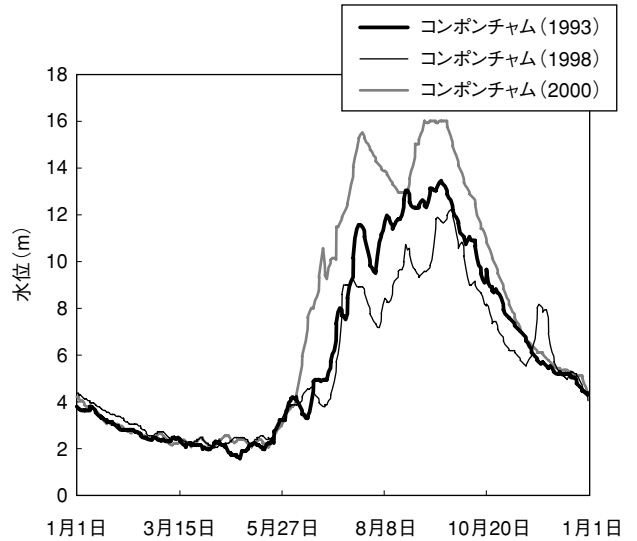


図3 コンボンチャムの各年の水位変化

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。

Ⅲ. 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を得たことが確かめられている<sup>9)</sup>。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できる。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。実測地点は洪水時には常に浸水する地域にあるため、水位などにおいて年ごとの違いは少なく、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。他の4点についても、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いえる。しかし、観測データの周辺地域

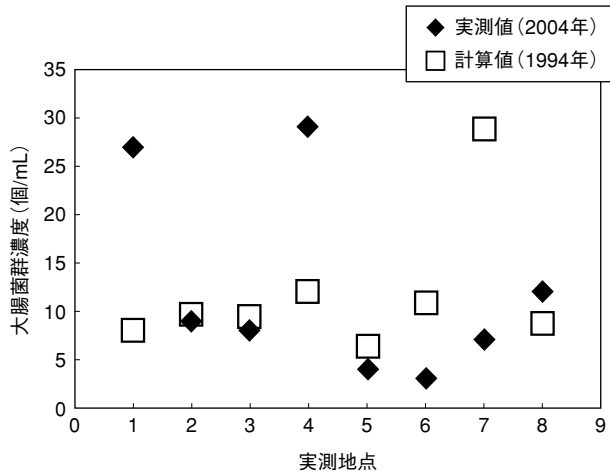


図4 実測値と計算値の比較

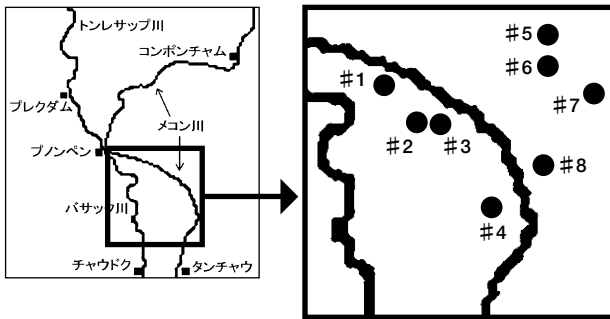


図5 実測地点

の代表性や、乾季の挙動再現性などの考察は今後必要である。実測データを加えさらに検証していく予定である。

2. 洪水規模による衛生面のリスク変動評価

州ごと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関関係が認められる。

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)と減少している地域(図8中四角枠内)が存在していることがわかる。図9に示す3州において、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)を図10に示した。3州の総和

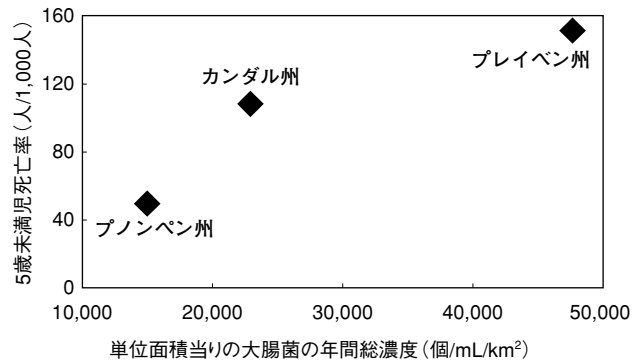


図6 州ごとの5歳未満児死亡率と大腸菌群年間総濃度

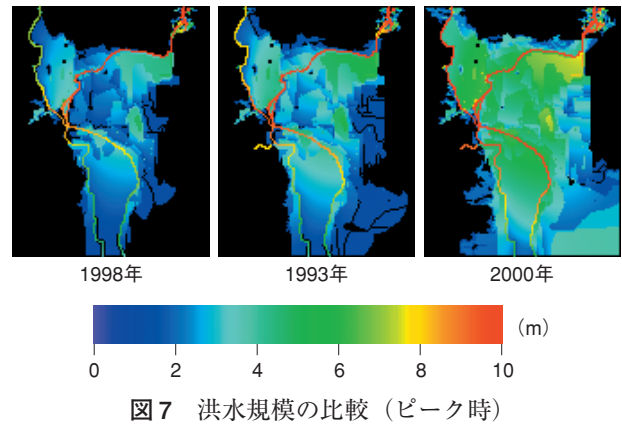


図7 洪水規模の比較 (ピーク時)

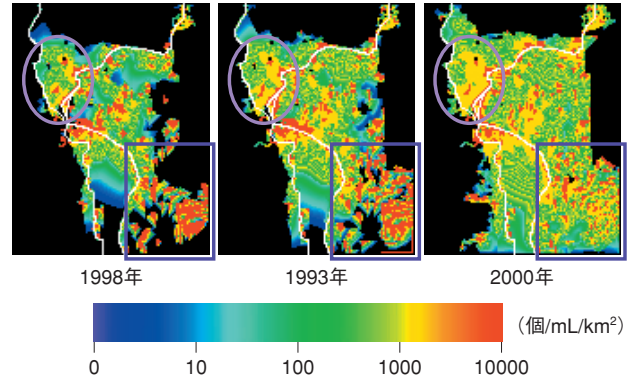


図8 洪水規模ごとの大腸菌群年間総濃度分布

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つの州すべ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からすべ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との間に相関性



図9 州配置図（白色部は河道）

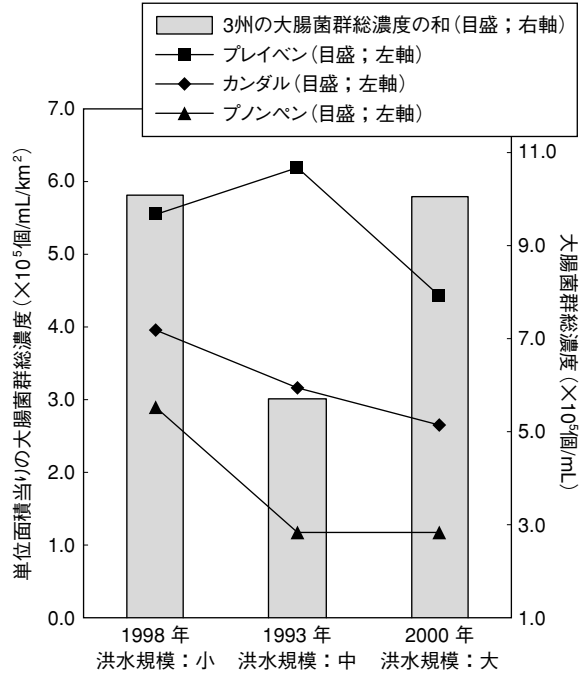


図10 州毎の洪水規模による大腸菌群総濃度の変化

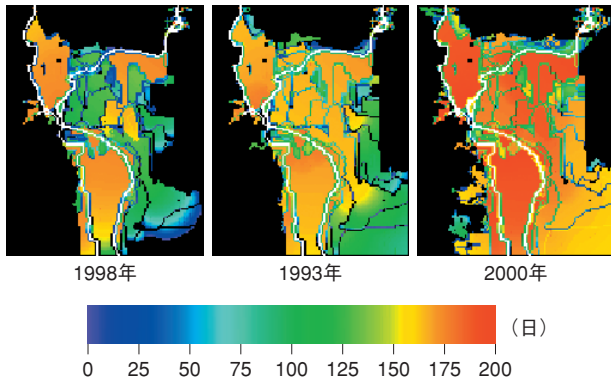


図11 洪水規模による浸水日数の変化

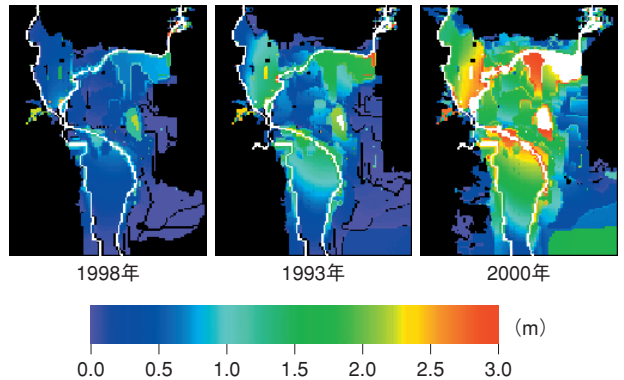


図12 洪水規模による平均水深の変化

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

は見られない。各州ごと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とも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・平均水位はとも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、中規模洪水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。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できる可能性を示している。

## おわりに

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。シミュレーションの結果を見ると、汚染源から下流方向に拡散していく様子が読み取れる。
- ・水が滞留する地域においては水位上昇とともに大腸菌群濃度は上昇し、流れがある地域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予定である。また、大腸菌群濃度の季節変動に関して解析を進め、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。数値シ

ミュレーションはリスクの時空間分布地図の作成に優れており、水資源計画や衛生対策、水道事業への貢献が可能である。

## 謝 辞

本研究は科学研究費（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ージメントシステムの構築」（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。なお、本文は水工学論文集50巻の原稿を修正・加筆したものである。

## 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*, **38**, 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症危険度評価, 環境工学研究論文集, vol.42, pp.443-450, 2005.
- 5) 土木学会水理委員会: メコン河洪水氾濫調査 2000年11月, 84, 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, **16** (6), 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*, **1**, 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, **21** (5), 449-457, 2001.