

水理氾濫モデルを用いた 水系感染症患者数の季節変動解析

Analysis of seasonal variation in the patients of waterborne infectious diseases
by the hydraulic inundation simulation

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 evaluated the characteristics of seasonal variation of waterborne infection using the monthly outpatient numbers and numerical simulation for inundation with concentration of coliform bacteria in the lower Mekong River. The results obtained are as follows; 1. During the peak of the flood, the outpatient number of waterborne infectious diseases is at its maximum in some districts. 2. There are not relation between the level of coliform bacteria concentration calculated and the number of outpatients. The maximum concentration is about 10CFU/ml. 3. The number of patient of diarrheal except dysentery has more relation between inundation than the number of dysentery. 4. The waterborne infectious patients tend to increase because of the decrease of water level and inundation area in dry season, and increase of the inundation area in monsoon season.

Key Words : flood simulation, coliform bacteria., diarrhea, dysentery, Cambodia

1. はじめに

水系感染症とは水を介して細菌やウイルス、原虫が体内に侵入し増殖することで下痢や嘔吐、発熱などの症状を引き起こす感染症である。主に病原体に汚染された水を経口摂取することで感染し、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⁾。

また水系感染症は、洪水氾濫発生時に蔓延することが多々ある。1980年・2000年にスーダンとモザンビークで、1998年にはインドで洪水時に下痢性疾患の集団発生が報告されている²⁾。このように洪水氾濫と水系感染症は関係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Kuniiらはバングラデシュにおいて洪水時における住民の健康状態をアンケートを用いた調査から評価した³⁾。また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⁴⁾。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。そこで、洪水氾濫の時間・空間分布の連続シミュレーションの結果と実際の水系感染症の発生状況を組み合わせて総合的に洪水氾濫の持つ水系感染症への影響を評価することが切望されている。

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⁵⁾。その結果として洪水氾濫による水系感染症リスクの増加が示唆された。しかし、5歳未満児死亡率のデータは州ごとの年間におけるものしか存在しないため、氾濫域住民の水系感染症患者数の変動や、氾濫発生時である雨季と非氾濫時である乾季との比較による洪水氾濫と水系感染症の関係をより明確にすることは行われていない。そこで本研究では、カンボジアのコンポンチャム州における2000年の月毎の下痢症と赤痢の外来患者数と洪水氾濫計算および大腸菌群移流計算の結果を用いて、年間の氾濫域および非氾濫域の水系感染症患者の傾向を把握し、洪水氾濫と水系感染症との関係性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

洪水氾濫および大腸菌群の移流計算における計算対象領域(図-1)はメコン河下流沿いのプノンペンをほぼ中心とした140km×110kmである。領域内には主にプノンペン特別市の全域、カンダル州・プレイベン州のほぼ全域とコンポンチャム州の浸水域が含まれている。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、5月～11月が雨季、12月～4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、上下水道などのインフラストラクチャー整備率でプノンペンと他の都市域・農村部との格差は大きく広がっている⁶⁾。

(2) データセット

洪水氾濫計算および大腸菌群移流計算には以下のデータセットを用いた。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。水位および SS データとして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を JICA(国際協力機構)作成の地図データより、州毎の衛生施設(下水道, 浄化槽, ピット)普及率を 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。

またコンポンチャム州における 2000 年の下痢症・赤痢の外来患者数データをコンポンチャム州衛生局から得た。この 2 つの症例を合わせて本研究の水系感染症とする。コンポンチャム州の地図を図-2 に示す。コンポンチャム州はカンボジア南東部に位置し一部がベトナム国境と接している。また、カンボジア第 2 の都市コンポンチャム市を有し、人口は約 170 万人とカンボジア最大の州である。州衛生局は州を 10 の保健行政区域に分割して管理しており、今回のデータはこの行政区域ごとのものとなっている(図-2)。ただし、⑩の行政区域に関しては標高データおよび土地利用情報が無かったため、今回は⑩の区域を除いた 9 区域においての評価とした。

また計算領域内には各行政区域のうち①～③の区域のほぼ全域と⑦・⑨の区域の全域が含まれているが、④・⑤・⑧の区域はわずかしき含まれていない。また、⑥の区域は 5 割程度が含まれている。

3. 計算方法および結果

(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

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

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

ここで、A:断面積(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



図-1 計算対象地域(図中点線内)およびコンポンチャム州



図-2 コンポンチャム州

表-1 各行政区分名および計算領域が占める割合

No.	保健行政区分	計算領域占有率
①	Kampong Cham & Kampong Siem	75%
②	Prey Chhor & Kang Meas	90%
③	Cheung Prey & Batheay	90%
④	Chamka Leu & Steung Trang	10%
⑤	Krochma & Steung Trang	15%
⑥	Tbong Khmum & Krochma	50%
⑦	Orang Ov & Koh Sotin	100%
⑧	Ponhea Krek & Dmabe	10%
⑨	Srey Snathor & Kang Meas	100%
⑩	Memot	0%

当たりの横からの流入量で、他の川からの流入が該当する。境界条件には 2000 年のコンポンチャム(メコン河上流), タンチャウ(同下流), チャウドック(バサック川), プレクダム(トンレサップ川)の水位を用いた。

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。

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

$$(4)$$

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

ここで、 h :水深(m), M , N : x , 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 , 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⁹⁾、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、農業用水として洪水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、大腸菌群の負荷量及び時間当たり的大腸菌群生存率を決定し、不定流式の流量フラックスを用いて計算する。負荷地点は大腸菌群の発生箇所である居住地とし、浸水による汚水の下水道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。

負荷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。日負荷量は式(8)で求められる。

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

ここで、 C :大腸菌群負荷量(個/日), n :人口(人), c :一人が一日に排出する大腸菌群量(=2.0×10¹⁰ 個/人/日¹⁰⁾, s :衛生施設普及率(プノンペン市 86.8%, コンポンチャム州 29.8%, カンダル州 32.8%, プレイベン州 7.5%)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、太陽の照射熱量や他の微生物との関係性などによって決まる^{11, 12)}。しかし、熱帯地域は年間を通して気温が大きく変化せず、水温も常にほぼ一定である。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日光の強さと一日後の大腸菌群生存率との水深ごとの関係(図-3)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

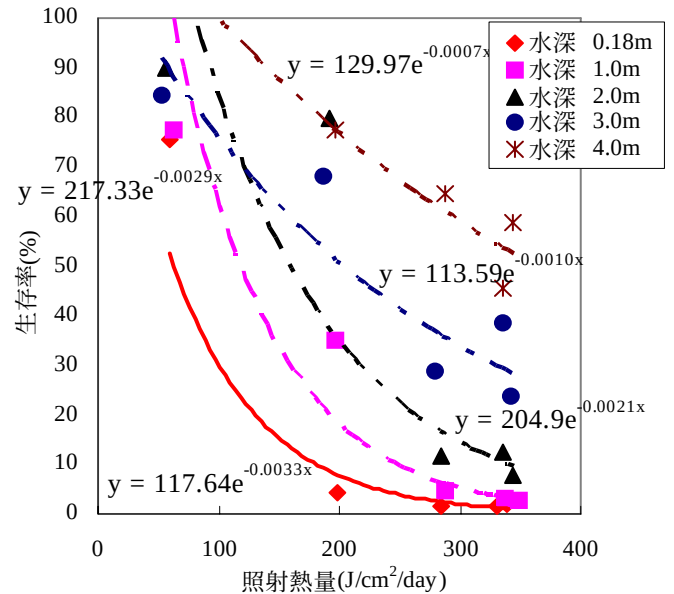


図-3 照射熱量と大腸菌群生存率(Gameson らの結果を用いて再描写)

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⁾。

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

ここで、 U :SS 濃度(mg/l) である。この U は垣内ら¹⁴⁾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) 計算結果

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⁸⁾。また、大腸菌群移流計算に関しては相澤らによって実測値と計算値の比較が行われており、氾濫時の大腸菌群濃度に関して良好な結果が得られた⁵⁾。今回の計算では同様の条件で計算しているため、実際の氾濫および氾濫時における大腸菌群の移流現象を再現していると考えられる。図-4 に洪水氾濫計算および大腸菌群移流計算の結果を載せる。

4. 考察

(1) 氾濫域の決定

コンポンチャム州における氾濫域は洪水氾濫計算の結果から決定する。ただし、計算対象領域外に位置する範囲に関しては 2000 年の氾濫時の衛星画像¹⁵⁾および JICA 作成の地図データより決定する。以下、浸水箇所の浸水時における水位を月間で平均化したものの平均水位、計算領域内での一日毎の浸水率を月間で平均化したものを浸水率とする。計算結果から①・③・⑦・⑨区域(表-1を参照)が平均水位のピーク値が 3m を超え(図-5)、氾濫する 7

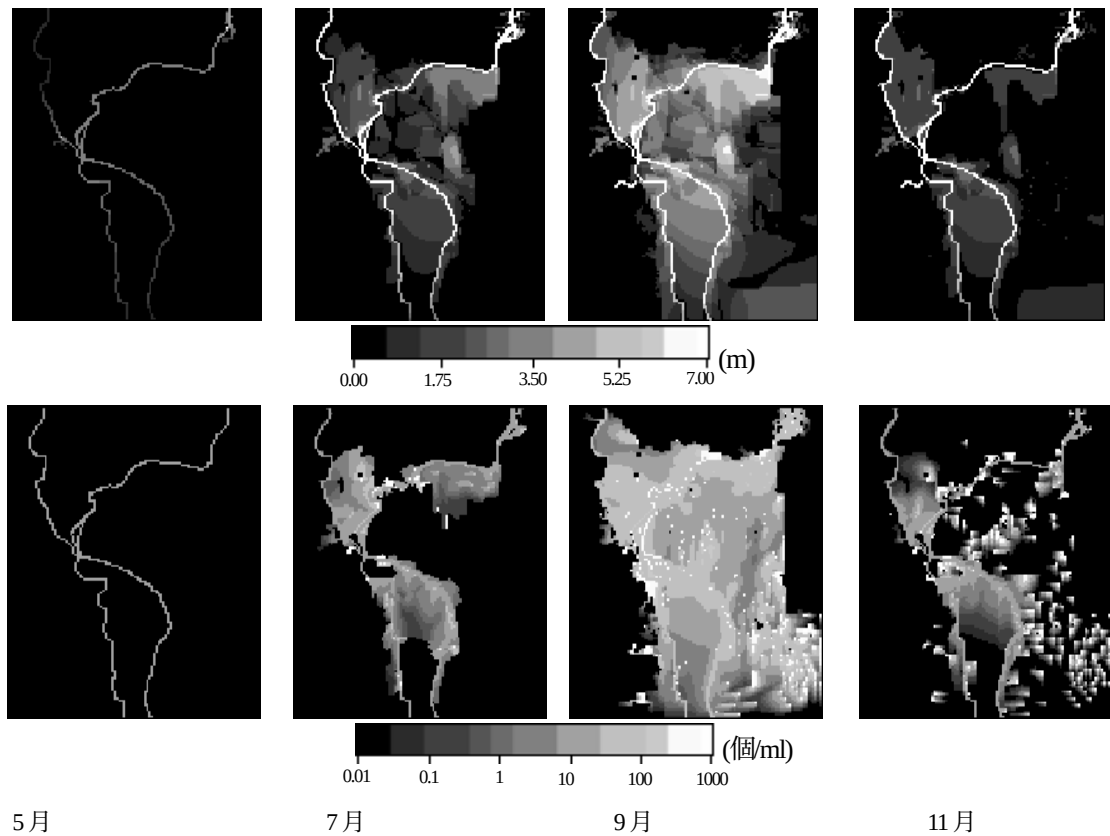


図-4 氾濫域と大腸菌群濃度の時間的・空間的变化
(上段：氾濫域 下段：大腸菌濃度)

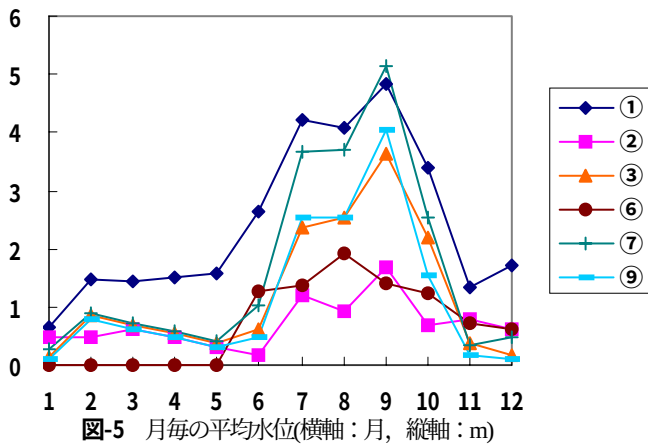


図-5 月毎の平均水位(横軸：月，縦軸：m)

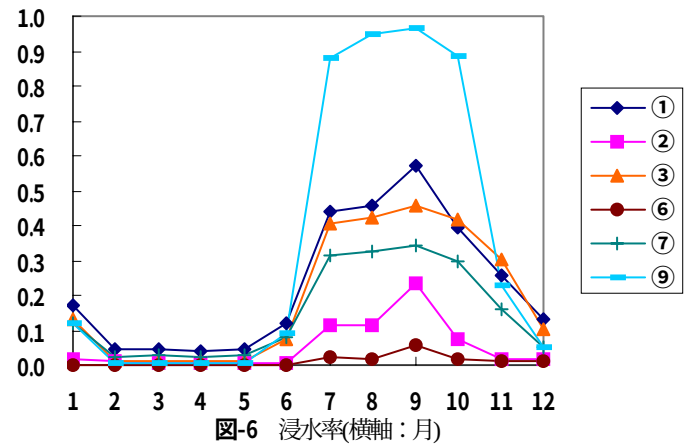


図-6 浸水率(横軸：月)

月から10月の間の浸水率が30%を越す(図-6)ことからこの4区域を氾濫域とし、②・⑥区域を非氾濫域とした。また、計算対象領域外の3区域に関しては⑤区域を氾濫域、④・⑧区域を非氾濫域とした。⑤区域はメコン河沿いに位置し、左岸側は大部分が浸水することがわかっている。④・⑧区域は標高が高く、区域内に大きな河川は流れていないこと、衛星画像において浸水が認められないため非氾濫域とした。

(2) 水系感染症と洪水氾濫の関係

a) 水系感染症の外来患者数の傾向

図-7～図-12 は行政区域毎の水系感染症全体と下痢症・赤痢それぞれの外来患者数を月平均値を1.00として正規化したグラフである。ここで正規化を行ったのは、

保健行政区画ごとの正確な人口数が不明であり罹患率の大小による評価が行えないこと、また洪水氾濫と感染症の関係性を考察するため患者数の月毎の推移を一律的に評価できるからである。

図-8において、非氾濫域の水系感染症外来患者数はほぼ±0.25の範囲内で推移している。このことから正規化した値が1.25を超えている場合、患者数はコンポンチャム州の通常値を越えていると言える。これより図-7において、氾濫域5区域のうち4区域で洪水氾濫がピークとなる8～10月に外来患者数が通常値を超えている。このとき、大腸菌群の計算値の大小と患者数のピーク値に相関性は特に無いが、大腸菌群が存在する面積は8～10月に最大となる。また、浸水域では10個/ml前後の値となり、人口密度の高い地域では100個/mlを越える。この

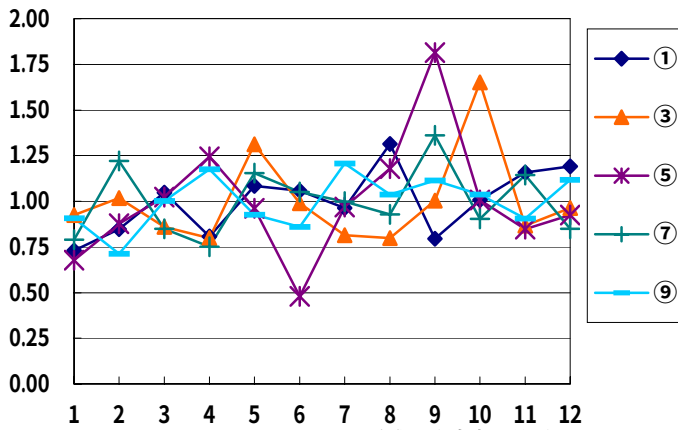


図-7 氾濫域における水系感染症患者数推移
(縦軸：患者数〔平均値で正規化〕，横軸：月)

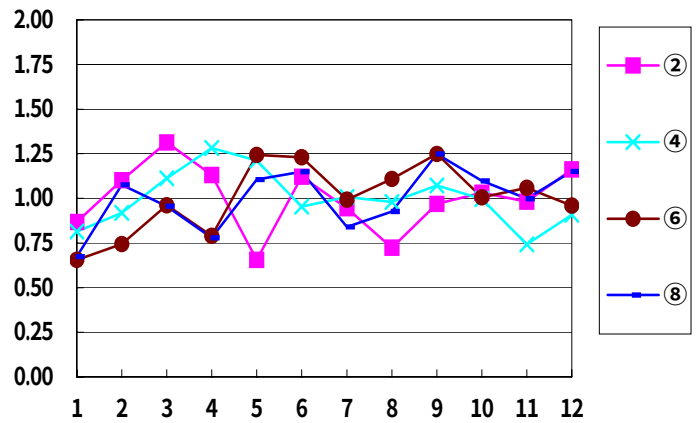


図-8 非氾濫域における水系感染症患者数推移
(縦軸：患者数〔平均値で正規化〕，横軸：月)

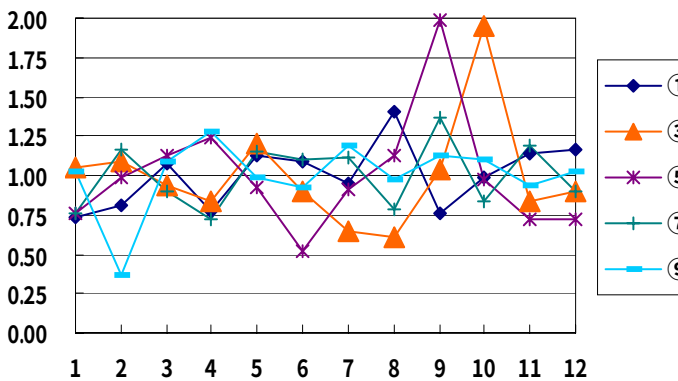


図-9 氾濫域における下痢症患者数推移
(縦軸：患者数〔平均値で正規化〕，横軸：月)

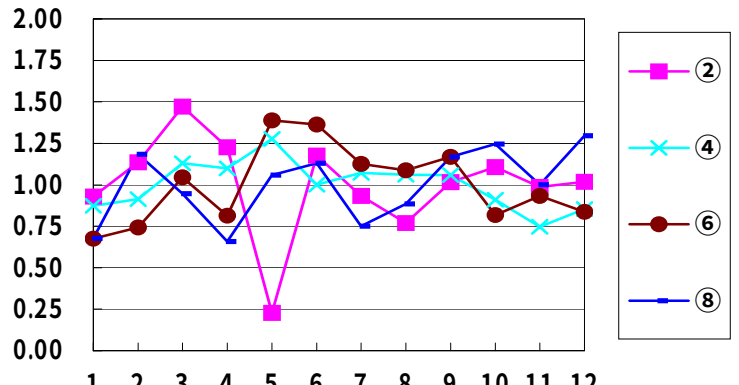


図-10 非氾濫域における下痢症患者数推移
(縦軸：患者数〔平均値で正規化〕，横軸：月)

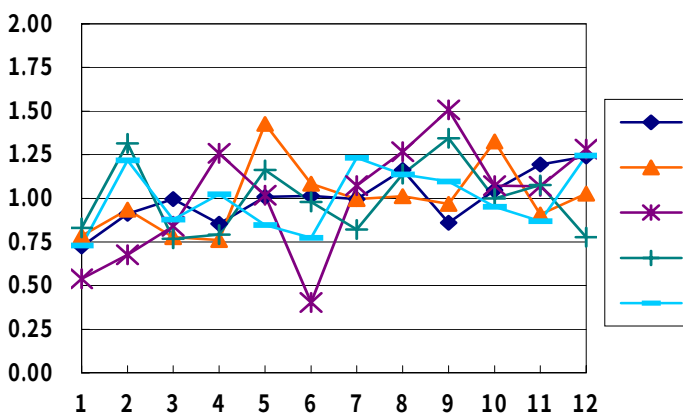


図-11 氾濫域における赤痢患者数推移
(縦軸：患者数〔平均値で正規化〕，横軸：月)

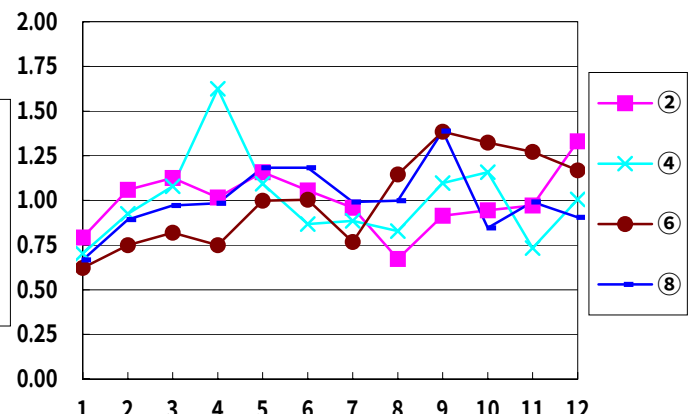


図-12 非氾濫域における赤痢患者数推移
(縦軸：患者数〔平均値で正規化〕，横軸：月)

ため洪水氾濫時は一定値以上の汚染された水によって浸水するため、水系感染症の危険性が高まると考えられる。

b) 下痢症と赤痢の外来患者数の傾向

次に下痢症患者数の推移(図-9・10)と赤痢菌患者数の推移(図-11・12)を比較する。下痢症患者数は氾濫域において8～10月という氾濫のピーク時に患者数が通常数を超える月が存在するが、赤痢においては氾濫の有無や時期によって患者数の大きな違いは無い。赤痢は感染力が強く、一般的に病原性大腸菌よりも少ない菌数で発症することが知られている¹⁶⁾。このことから上水道整備が不十分で日常生活において処理されていない水を利用するカンボジアでは、赤痢のように感染力が強い水系感染症は日常的に発生しており、洪水氾濫による影響は顕著では

ないと考えられる。

このことから、⑤区域において6月に下痢症・赤痢患者数共に著しい減少が認められるが、これは雨季に入り洪水氾濫が生じていない段階で住民が比較的清潔である雨水を飲料水として用いたと考えられる。しかし⑤区域が十分に計算領域に含まれていないことからさらに検討する必要がある。

c) 水系感染症の季節変動と洪水氾濫との関係

計算結果の大腸菌群数を月間で平均化したものの平均大腸菌群数、計算領域における一日毎の大腸菌群が存在した面積率を月間で平均化したものを大腸菌群汚染面積率とする。表-2に各計算値と患者数との相関係数の推移を示す。

表-2 各月毎の患者数と計算値の相関係数 ($r^2>0.571$ で相関有り)

	平均 水位(m)	浸水率	平均大腸菌 群数(個/ml)	大腸菌群 汚染面積率
1月	-0.770	-0.359	-0.305	-0.939
2月	-0.345	0.021	-0.534	0.107
3月	-0.015	-0.217	-0.311	-0.286
4月	-0.441	-0.733	0.155	-0.628
5月	0.199	0.408	0.036	0.312
6月	0.179	-0.461	-0.881	-0.409
7月	0.082	0.767	0.871	0.767
8月	0.777	0.456	-0.569	0.439
9月	0.303	-0.060	-0.212	-0.064
10月	-0.019	0.060	-0.223	0.054
11月	0.581	-0.154	0.612	0.322
12月	0.493	0.106	0.516	0.211

データは計算対象領域内に地区の 75%以上が含まれる①・②・③・⑦・⑨地区を対象とした。以下、患者数との間に相関が見られたものにおける考察を行う。

1 月において水位と大腸菌群汚染面積率に対して負の相関が見られる。これは過去の研究において乾季には水位および浸水面積の減少から大腸菌群が濃縮されリスクが増加することが示唆されており¹⁷⁾、このことが原因となり患者数の変化につながっていると考えられる。

氾濫期の 7 月においては浸水率、大腸菌群濃度および汚染面積に対して正の相関が見られる。7 月は氾濫が始まる月であり、氾濫域が拡大していくことで大腸菌群に汚染される範囲が広がることで水系感染症が広がっていくことによるものであると考えられる。

5. 結論

本研究から以下のような結論が得られた。

- ・洪水氾濫計算に基づいた氾濫域において、洪水ピーク期間に水系感染症患者数が通常よりも増加する地域が存在した。
- ・大腸菌群移流計算から得られた大腸菌群濃度の大小と患者数の大小に相関は認められない。しかし、患者数のピーク時には一定値以上の大腸菌群濃度が存在した。
- ・下痢症患者数は洪水氾濫との関係性が大きいのに対して、赤痢患者数は関係性が小さい。
- ・乾季には水位および浸水面積の減少から大腸菌群が濃縮され、また雨季には氾濫域の拡大により水系感染症患者が増加する。

今後は都市域と農村域との季節毎の水利用および取得方法の違いや生活様式などが水系感染症の感染リスクに及ぼす影響について研究を進めたいと考えている。また、症例ごとの感染リスクの違いを考慮して、包括的な水系感染症リスク評価モデルを構築したいと考えている。

謝辞：本研究は、カンボジア国立マラリアセンターの Duong Socheat 氏とコンボンチャム州衛生局の Nguon Sim An 氏から患者数データを提供していただいた。実測において国立国際医療センターの中村哲氏に様々な助言を頂いた。また RR2002 人・自然・地球共生プロジェクト(代表者：大村達夫)と科学研究費補助金(代表者：風間聡)によって行われた。ここに併せて深甚なる謝意を表します。

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) WHO, Weekly epidemiological record, No.3, pp. 21-28, 2005.
- 3) O. Kunii, S. Nakamura, R. abdur and S. Wakai : The impact on health and risk factors of the diarrhoea epidemics in the 1998 Bangladesh floods, *Public Health*, Vol. 116, pp. 68-74, 2002.
- 4) 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.
- 5) 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, pp. 443-449, 2005.
- 6) 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.
- 7) Mekong River Commission, LOWER MEKONG HYDROLOGIC YEARBOOK.
- 8) 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.
- 9) 土木学会編, 水理公式集 平成 11 年版, 1999.
- 10) 金子光美, 水の消毒, (財)日本環境整備教育センター, 1997.
- 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.
- 14) 垣内健吾, 風間聡, 沢本正樹 : 洪水規模の違いによる便益の地域差に関する研究～メコン河プノンペン周辺における事例～, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.469-474, 2004.
- 15) 土木学会水理委員会, メコン河洪水氾濫調査 2000 年 11 月, 2001.
- 16) 日本医師会監修, 感染症の診断・治療のガイドライン 2004, 2005.
- 17) 相澤寿樹, 風間聡, 渡部徹, 沢本正樹, メコン河下流域における乾季と雨季の大腸菌拡散, 平成 16 年度東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 858-859, 2006.

(2006.9.30 受付)