

# メコン流域における水と感染症 1

## メコン流域における水利用と感染症リスク

Water utilization and risk of infectious diseases in the Mekong watershed

わたなべ とおる み うら たか ゆき おお むら たつ お  
 渡部 徹：三浦尚之：大村達夫  
 Toru WATANABE Takayuki MIURA Tatsuo OMURA

### 要 旨

メコン流域では、今なお多くの人が安全な水にアクセスすることができず、不衛生な水の利用を原因とする感染症の流行が度々発生している。メコン流域における持続的発展を実現するためには、地域の水環境や水利用の特徴を考慮した水利用システムを構築することにより、感染症のリスクを低減することが不可欠である。本稿では、著者らの約4年間にわたる現地調査の経験をもとに、メコン流域における水利用の現状について概説するとともに、水利用に伴う感染症のリスクを評価した結果についても紹介する。

### はじめに

途上国では毎年180万人もの人が下痢症のために死亡し、そのうち約90%が汚染された水が原因であると報告されている<sup>1)</sup>。下痢症は世界中で見られる疾病の1つであるが、東南アジアでは下痢症による死亡が全死因の8.5%にまで達し、依然として被害が深刻な状況である。下痢症による死亡の90%は5歳未満の幼児や乳児であり<sup>1)</sup>、東南アジアのメコン流域に位置するラオスやカンボジアでは、8人に1人の子どもが5歳の誕生日を迎える前に命を落としている<sup>2)</sup>。この2国における水供給の整備状況に着目してみると、安全な水（水道水や雨水、ポンプが設置された井戸）を利用できる人口の割合は、それぞれ43%、34%と同じ流域のベトナム（73%）やタ

イ（85%）に比べても低い<sup>2)</sup>。安全な水供給へのアクセスの悪さは、下痢症に代表される水系感染症の原因の1つである。この水系感染症の高いリスクとそれに伴う5歳未満児の高い死亡率により、この地域の経済発展は停滞し、根強い貧困の問題に苦しめられている（図1）。貧困の問題は、リスク低減に必要な安全な水供給や満足な衛生設備等の社会基盤の整備の遅れを引き起こし、乳幼児の高い死亡率の直接的な原因となるだけでなく、子どもたちに十分な衛生教育を受けさせられないという間接的な要因としても感染症のリスク上昇につながっている。また貧困によって、衛生教育に限らず、子供たちが初等・高等教育を受ける機会を失うことで、経済発展に不可欠な人的資源の不足も招いている。この感染症の高いリスクと貧困、人的資源の不足の問題が複雑に絡み合っており、メコン流域の国々の持続的発展は制限されているのである（図1）。

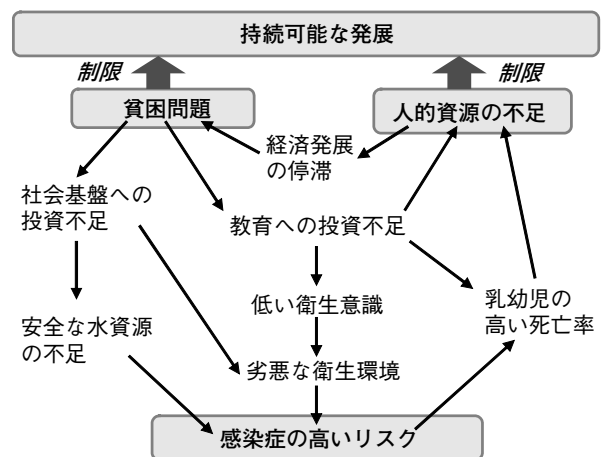


図1 途上国における持続的発展を妨げる感染症のリスク

水系感染症のリスクを効果的かつ効率的に低減し、メコン流域における持続可能な発展を実現するために、正確なリスク評価にもとづいた水・衛生問題に関する適切な対策が切望されている。メコン川は、水源のある中国から河口のベトナムまで合計6カ国を流れる国際河川であるが、各国の経済状況は一様でなく、国や地域の文化や伝統、習慣などによっても水利用の状況は大きく異なる。メコン流域における水系感染症のリスクを効果的に低減するためには、地域の水利用の特徴を考慮したリスク評価とその結果に裏付けられたリスク低減対策が必要である。

本稿では、メコン流域における水利用の現状と飲用水の汚染に関する現地調査の結果と、また、モデルを用いた解析により、リスク低減のために有効な対策について考察する。それにもとづいて構築した水系感染症のリスク評価モデルについて紹介する。

## 1. メコン流域における水利用

メコン流域において、安全な水を利用できる人口割合には大きな地域差があり、カンボジアのある県

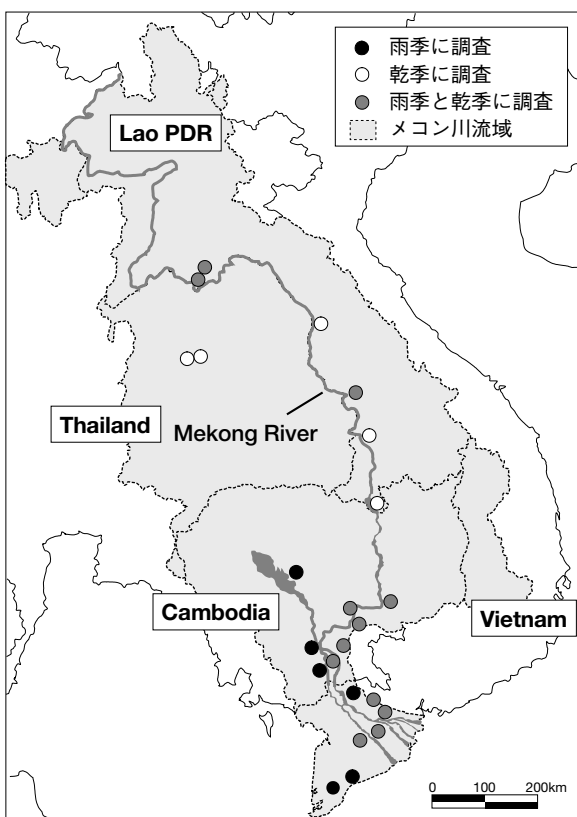


図2 調査地点の概要

ではわずか数%に過ぎないのに対して、タイではすでに99%に達している県もある<sup>3)</sup>。また、この地域はモンスーン気候帯に属しており、季節が雨季と乾季に大別される。著者らは、地域別かつ季節別の水利用の実態を明らかにするために、2003年から約4年間に渡り、4カ国23カ所(図2)における現地調査を行った<sup>4,5)</sup>。この調査により明らかとなった各地域における主要な飲用水源を表1に示す。

4カ国に共通して、都市域(ここでは、水道が整備されている地域と定義する)では、季節に関係なく水道水またはボトル水(図3(a))が飲用されていた。ただし、水道水使用料に比較してボトル水は高価なため、ラオス、カンボジアおよびベトナムにおけるボトル水の飲用は、一部の裕福な家庭に限られていた。

一方、タイを除く3カ国の農村域においては、河川に近い地域では河川水が、河川から遠い地域では井戸水がそれぞれ主要な飲用水源として利用されていた。ベトナムのメコンデルタにおいては、雨水の飲用も見られた。住民に対する聞き取り調査(N=94)の結果、月収が167千ドン/人(約10米ドル)を超える家庭で年間を通して雨水を飲用しており、その他の家庭では、ラオスやカンボジアの農村域と同様に、河川水または井戸水が利用されていた。

タイの農村域では、各家庭で雨水を貯める大きな水瓶(図3(b))を所有しており、(収入にかかわらず)年間を通して雨水が飲用されていた。

表1 メコン流域における主な飲用水源

地域*	飲用水源**	
	雨季	乾季
ラオス・カンボジア		
都市域	水道水・ボトル水	水道水・ボトル水
河川に近い農村域	河川水	河川水
河川から遠い農村域	井戸水	井戸水
ベトナム		
都市域	水道水・ボトル水	水道水・ボトル水
河川に近い農村域	河川水・雨水	河川水・雨水
河川から遠い農村域	井戸水・雨水	井戸水・雨水
タイ		
都市域	水道水・ボトル水	水道水・ボトル水
農村域	雨水	雨水

\* : 水道が整備されている地域を都市域とした

\*\* : 下線は一部の裕福な家庭に飲用されている水源



(a) ボトル水  
(ラオス・ビエンチャン市)



(b) 雨水を貯める水瓶  
(タイ・コンケン市)

図3 メコン流域の飲用水源

## II. 飲用水の微生物汚染<sup>4,5)</sup>

図2に示した調査地点では、住民が利用する水源の糞便汚染を明らかにするために、指標微生物として大腸菌群を試験紙を用いた培養法により定量検出した。また、一部のサンプルについては、より指標性の高い *E.coli* も特定酵素基質培地を用いて検出し、MPN法により定量した。紙面の都合上、詳しいデータは掲載しないが、興味のある方は文献<sup>4,5)</sup>を参考にされたい。

都市域で配水されている塩素消毒を施した水道水(後述する広域水道の水道水)からは、指標微生物はほとんど検出されなかった。しかし、浄水場から遠く管路網の末端に位置するある地域では、管路の不備により配水中に汚染を受けることで、水道水から大腸菌群が検出されることもあった。ボトル水の水質は概ね良好であったが、ビエンチャン市で販売されていたボトル水(20Lの容器入り)からは、未使用な状態であるにもかかわらず大腸菌群が検出された。ボトルの再利用の際に、洗浄が不十分であったことが主たる原因として疑われる。

農村域の住民が利用する河川水や井戸水、雨水については、ほとんどすべてのサンプルから大腸菌群が検出された。農村域ではトイレがない地域も多く、飲用水源として利用されている河川の岸で、排泄行為も行われているケースもしばしば見られる。そのため、河川水からは糞便由来の *E.coli* も頻繁に検出

された。

衛生意識の高い住民は飲用前に水を煮沸していたが、煮沸後の水からも指標微生物が検出されることも多かった。煮沸した水を貯蔵している間に不衛生な容器や人間の手を介して再汚染されたことが考えられる。また、一部の住民は、飲用水を処理するための簡易なる過装置を所有していたが、処理前後で指標微生物濃度に変化が認められないこともあった。

## III. GISを用いた水系感染症リスク評価<sup>6,7)</sup>

### 1. 水利用に関する仮定

前述のように、メコン流域の水利用(飲用水源)は、水供給システムや河川へのアクセス、そして経済状況によって決定されていた。水系感染症のリスク評価にあたっては、対象流域を1 kmメッシュに分割し、メッシュごとに飲用水源を決定した。

ラオス、カンボジアおよびベトナムについては、土地利用データから市街地と判別されたメッシュの飲用水源を水道水とした。ただし、メコン流域には、大きく2つの水供給システムがある。1つは、先進国と同様に急速ろ過方式で処理された水が供給される広域水道(図4(a))であり、もう1つは、深井戸からくみ上げた地下水を未処理で配水する集落水道(図4(b))である。モデルでは、現地で収集した上水道施設に関する資料をもとに市街地メッシュ



(a) 広域水道における浄水場  
(タイ・コンケン市)



(b) 集落水道における配水タンク  
(タイ・コンケン市)

図4 メコン流域で見られる水供給システム

の中で広域水道整備地域と集落水道整備地域を区別した。

ラオス、カンボジアおよびベトナムの農村域については、河道の位置データを用いて、河川が含まれるメッシュの飲用水源を河川水、河川が含まれないメッシュの水源を井戸水とした。ベトナムの農村域については、これに加えて雨水の利用も考慮した。ベトナムメコンデルタで雨水を飲用する人々の最低収入（167千ドン/人・月）は、経済指標の1つである貧困率を算出する際に用いられる貧困ライン（このラインより収入が少ない人の割合が貧困率である）とほぼ同等であった。このことから、収入が貧困ラインを上まわる人については雨水を飲用し、それ以外の人には河川水または井戸水を飲用しているものと仮定した。

タイでは水供給システムが広く行き渡っており、土地利用データで市街地と判別されるメッシュ以外にも水道が整備されている。また、ボトル水の飲用も一般的に行われている（表1）。したがって、タイでは、それぞれの県内で水道水、ボトル水および雨水を飲用している人の割合を県別の水道普及率のデータと、タイのコンケン県における飲用水源に関するインタビュー調査（N = 85）<sup>4)</sup>の結果をもとに、以下のルールで決定した。

- ・水道を利用できる人口（水道普及率に相当）のうち75%がボトル水を飲用し、他は水道水を飲用する。
- ・水道を利用できない農村域においては、すべての人が雨水を飲用する。

## 2. 微生物汚染に関する仮定

タイを除いた3カ国における各飲用水源の汚染状況は、ラオスの4県、カンボジアの6県、ベトナムの7県で行った調査（図2）の結果をもとに決定した。すなわち、各水源の大腸菌群数について季節別に県別の平均値を求め、これを被説明変数とし、県別の種々な統計値を説明変数とする重回帰分析を行った。その結果、統計的に有意な以下の回帰式を得た（ $p < 0.10$ ）。

### 【雨季の大腸菌群数】

$$\text{井戸水} : C = 0.93PD + 0.57WT - 1.4SN + 41 \quad (R^2 = 0.69)$$

$$\text{雨 水} : C = 0.36RR - 0.81PV - 0.31WT - 0.25SN + 49 \quad (R^2 = 0.74)$$

### 【乾季の大腸菌群数】

$$\text{井戸水} : C = 0.73WT - 0.57SN + 13 \quad (R^2 = 0.58)$$

$$\text{河川水} : C = 0.86PD + 20 \quad (R^2 = 0.70)$$

$$\text{雨 水} : C = -0.99PV + 172 \quad (R^2 = 0.98)$$

ここで、C：大腸菌群数 [CFU/mL]、PD：人口密度 [%]、RR：農村域の居住人口割合 [%]、PV：貧困率 [%]、WT：安全な水を利用できる人口割合 [%]、SN：満足な衛生設備を利用できる人口割合 [%] である。

調査を実施しなかった県における汚染状況は、上の回帰式を用いて推定した。一方、有意な回帰式が得られなかった水源、およびタイのすべての飲用水源では、大腸菌群数が季節や県にかかわらず一定として、調査結果の平均値をすべての県に用いた。

表2 飲用水中の *E.coli* 濃度の推定式

(式中の Y は *E.coli* の濃度 [MPN/100mL] を、  
X は大腸菌群数 [CFU/mL] を表す)

飲用水の種類	n	推定式	R <sup>2</sup>	p
広域水道の水道水	16	Y<0.01X	—	—
集落水道の水道水	10	Y=0.21X	0.56	0.005
雨水	11	Y=2.9X	0.76	<0.001
河川水	18	Y=4.0X	0.69	<0.001
井戸水	17	Y=3.8X	0.56	<0.001
ボトル水	25	Y=0.076X	0.34	0.002

リスク評価は、一般的な下痢症を引き起こす *E.coli* を対象とした。飲用水中の *E.coli* 濃度は、推定式 (表2)<sup>5)</sup> を用いて飲用水の大腸菌群数から推定した。以下に飲用水の大腸菌群数から *E.coli* による感染リスクを算出する手順を示す。

- ①表2に示した推定式を用いて、飲用水の大腸菌群数から *E.coli* の濃度を推定する。
- ②推定した *E.coli* 濃度に1日の飲水量を乗じることで、1日に摂取する *E.coli* の個数を求める。
- ③以下の用量・反応モデルを用いて、飲用水中の *E.coli* によって引き起こされる下痢症の年間感染リスクを算出する。

$$P(D) = 1 - \left( 1 + \frac{D}{1780000} \right)^{-0.178}$$

ここで、 $P(D)$  : 感染確率、 $D$  : 飲用水を介して摂取する *E.coli* の個数 [MPN] である。感染リスクは、毎日同じ *E.coli* 濃度の水を365日摂取し続けた場合の年間感染リスクとしてメッシュごとに算出した。

### 3. 飲用水起因下痢症の年間感染リスク

図5にメコン流域における下痢症の年間感染リスクを算出した結果を示した。都市域 (例: ラオスの首都ビエンチャン) においては、飲用水源である水道水から大腸菌群が検出されることはほとんどないため、感染リスクは低く  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  のオーダーであった。ここでいう感染リスク  $10^{-4}$  とは、1年間に、1万人のうち1人が、飲用水を介して *E.coli* に感染する確率に相当する。これに対し、人が高い密度で居住する都市近郊の農村域においては、感染リスクが極めて高い (0.1~1) ことが分かった。リスクが1のとき、そのメッシュの住民は、1年間に少なくとも1度は飲用水中の *E.coli* による下痢を発症する

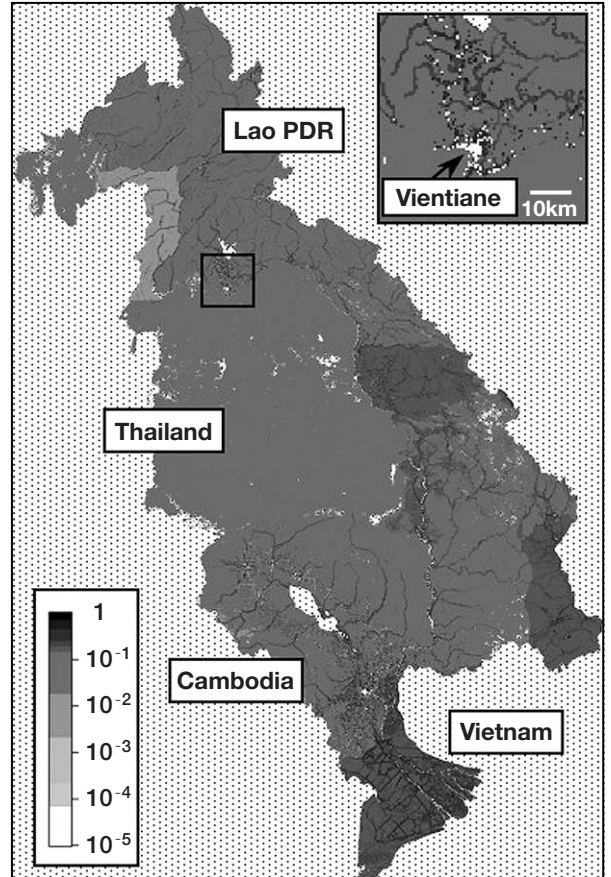


図5 飲用水起因下痢症の年間感染リスクの分布

ことが予想される。図5に示す評価結果から、対象流域における年間の下痢症発症件数は4カ国の合計でおよそ1200万件と見積もられた。

各国で県別に算出した下痢症の年間感染リスクと実際の罹患率についてそれぞれの対数値を比較したところ、ラオス、カンボジアおよびタイについては、有意な関係は得られなかった。ラオスとカンボジアにおいて報告されている下痢症の罹患率は、 $10^{-4} \sim 10^{-3}$  のオーダーであり、ベトナムやタイの罹患率 ( $10^{-2} \sim 0.1$ ) と比べて1~2オーダー低い。ラオスとカンボジアでは、疾病のサーベイランス体制がまだ十分でないために、実際の下痢症の発生状況が統計に反映されていない可能性がある。タイについては、流域に位置する県の水道普及率がすべての県において低く (10%以下)、水利用の状況が似通っていたことから、算出した感染リスクに県による差がほとんど現れず (図5)、実際の罹患率との間に相関関係は得られなかった。一方、ベトナムにおいては正の有意な相関関係が認められ ( $R=0.62$ ,  $p=0.06$ )、モデルの妥当性を示す1つの結果が得ら

れた<sup>8)</sup>。

#### 4. 水系感染症リスク低減シナリオの検討

##### (1) 浄水処理能力改善シナリオ

現在メコン流域の一部の都市域には、前述のように広域水道と集落水道の2種類の水供給システムが整備されている。しかし、広域水道であっても管理の状況は十分ではなく、まれに大腸菌群が検出されることもあった。また、雨季の集落水道水からは、平均して河川水よりも高い濃度で大腸菌群が検出された。途上国において、新たに広く水供給システムを整備することは、資金の面から現実的であるとは言い難い。そこで、既存の水道施設において設備の見直しと水質管理の徹底を行うことを想定し（対策後の大腸菌群数は検出限界の1CFU/mLとした）、リスク低減効果を評価した。その結果、4カ国の合計で下痢症の発生件数を年間でおよそ1,000件減少させることができると予測された。この数値は、流域全体での発生件数の0.01%にも満たない。農村域に居住する人口の割合が平均して80%<sup>5)</sup>を超えるメコン流域では、都市域におけるリスク低減対策による効果はあまり期待できない。

##### (2) 雨水飲用促進シナリオ

先に述べたようにタイの農村域では、年間を通して雨水が飲用されている。これまでの調査結果<sup>4,5)</sup>で雨水は一般に井戸水や河川水と比較して大腸菌群や*E.coli*の濃度が低いことが分かっており、雨水の飲用は水系感染症のリスク低減につながる。そこで、ラオス、カンボジアおよびベトナムの農村域においても、タイと同様に雨水を貯めるのに十分な大きさの水瓶を備え、井戸水や河川水を飲用水源としている人々が雨水を飲用するようになるというシナリオを想定し、3カ国における年間の下痢症患者数を算出した（雨水における大腸菌群数はタイ

の調査結果<sup>5)</sup>を使用)。その結果、雨水の普及を進めるにしたがって下痢症の発生件数は減少し、最大で現在の23%にまで発生件数を減少させることができると予測された。

### おわりに

本稿で紹介したリスク評価手法により、メコン流域における飲用水起因の下痢症の発生状況を大まかに再現することができた。その結果、流域全体での下痢症発生件数は、年間でおよそ1,200万件と推定された。また、農村域において雨水の飲用を啓蒙することが下痢症のリスク低減に有効であることが示唆された。この手法を用いることで、その他のリスク低減対策についても同様に評価することができる。

### 文 献

- 1) World Health Organization (2004). Water, Sanitation and Hygiene Links to Health, FACTS AND FIGURES. Nov. 2004 (available on the web)
- 2) UNFPA (2006). State of World Population 2006 (available on the web)
- 3) Mekong River Commission (2003). Social Atlas of the Lower Mekong Basin
- 4) 三浦尚之, 渡部徹, 中村哲, 大村達夫: メコン流域における水利用と微生物汚染, 環境工学研究論文集, 42: 451-462, 2005.
- 5) 渡部徹, 三浦尚之, 佐々木司, 中村哲, 大村達夫: メコン流域における水供給システムに着目した水系感染症のリスク評価, 環境工学研究論文集, 43: 245-254, 2006.
- 6) 渡部徹, 三浦尚之, 佐々木司, 大村達夫, 中村哲: GISを用いたメコン流域の水系感染症リスク評価, 第41回日本水環境学会年会講演集, 27, 2007.
- 7) 三浦尚之, 渡部徹, 中村哲, 大村達夫: 地理情報と統計資料にもとづくメコン流域における水系感染症リスク評価土木学会平成18年度東北支部技術研究発表会講演概要集, VII-62, 2007.
- 8) 三浦尚之: メコン流域における水利用と感染リスク, 東北大学修士論文, 2007.