

(49) メコン流域における水利用と微生物汚染

**Water Utilization and Microbial Contamination of Water Environment
in the Mekong Watershed**

三浦尚之*, 渡部徹*, 中村哲**, 大村達夫*

Takayuki MIURA*, Toru WATANABE*, Satoshi NAKAMURA**, Tatsuo OMURA*

ABSTRACT; Infectious diarrhea related to the polluted water environment, such as cholera and dysentery, is still a severe problem in developing countries. Mekong watershed is one of the regions suffering from outbreaks of waterborne infectious diarrhea. In order to take effective countermeasures against the waterborne infectious diarrhea in Mekong watershed, it is necessary to evaluate the risk of infection based on characteristics of water environment and its utilization. In this study, field surveys were carried out to investigate the water utilization and to analyze the microbial contamination of the water environment in Lao P.D.R, Cambodia and Vietnam. A total of 115 samples were collected from river water, canal water, rain water, well water, bottled water and tap water mainly used as the drinking water. As results, it was found that the samples were frequently contaminated with *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. These bacteria were detected even from the drinking water after boiling due to the cross-contamination with unsanitary containers. And what is worse, norovirus was also detected from some samples of drinking water at the concentration high enough to cause the infection.

KEY WORDS; Waterborne Diseases, Infectious Risk, Norovirus, Water Utilization, Mekong Watershed

1. はじめに

現在64億人である世界人口は人口増加率およそ1.2% (年間7600万人の割合) で今なお急速に増え続けており、水の需要がさらに高まることが予測される¹⁾。水問題は単に量の問題だけでなく質の問題でもあり、飲料水を含む生活用水として安全な水を利用できない人口は、世界人口の6分の1と言われている²⁾。汚染された水に起因する下痢症は、世界中で見られる疾病の1つで、全死因の4% (年間220万人)、身体機能異常の原因の5%を占める。特に発展途上国においては、下痢症の問題は深刻であり、例えば東南アジアでは、下痢症による死亡は全死因の8.5%にまで達する³⁾。また、下痢症による死亡の大部分は5歳未満の幼児や乳児であるが³⁾、メコン流域のラオス、カンボジアでは5歳未満児の死亡率が、それぞれ、14.1%、10.7%と東南アジアの中でも極めて高い状況にある¹⁾。

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、国によっては河川の管理状況は十分でなく、流域の住民からの尿尿や生活排水による汚染はメコン川が抱える問題の1つとなっている。コレラ、チフスなどを始めとする水系感染症の多くは、人や動物の糞便中の病原微生物により汚染された飲料水や生活用水を利用することで流行する。実際に、上述のように5歳未満児の死亡率の高いラオスやカンボジアでは、安全な生活用水を利用できる人の割合が、37%、30%と低い¹⁾。これら二国を含めて、メコン流域における水系感染症の感染リスクを低減し、持続的發展を実現するためには、流域の水環境や水利用の状況を把握し、その特徴を考慮したリスク評価にもとづく適切な対策を行う必要がある。

*東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University)

**国立国際医療センター研究所 (Research Institute, International Medical Center of Japan)

本研究では、メコン流域における水系感染症のリスク評価に必要な情報を収集するために、ラオスとカンボジア、ベトナムにおいて、飲料水の種類、処理方法、雨季と乾季による違い等に注目して、水利用の状況を調査した。また、河川水、用水路水、雨水、井戸水、水道水やボトル水などの微生物汚染状況の調査も行った。

2. 現地調査

2.1 調査地点

現地調査は、2004年3月から12月の間に、ラオスの4地点 (Vientiane, Paylom, Savannakhet, Khong) と、カンボジアの3地点 (Siem Reap, Kratie, Phnom Penh), そしてベトナムの6地点 (Tan Thanh, Cai Lay, My Tho, Vinh Long, Can Tho, Ho Chi Minh) において行われた (図1)。これらの調査地域は、モンスーン地域に属しており、季節は雨季と乾季に大きく区別される。調査を実施した3月と9月と12月はそれぞれ、乾季の終盤、雨季の終盤、そして乾季にあたる。

Ho Chi Minh市は厳密にはメコン流域に位置する都市ではないが、人口約600万人(2004年)⁴⁾でベトナム最大の都市であり、都市内の用水路 (生活排水路) の汚染状況が深刻という点でメコンデルタの都市域と共通していることから、比較対象としてサンプリングを行った。

また、本研究では、メコンデルタの5地点を、水利用の状況別に都市域 (Urban area) のMy Tho, Vinh Long, Can Tho, 非都市域 (Rural area) のTan Thanh, Cai Layとに区分した。

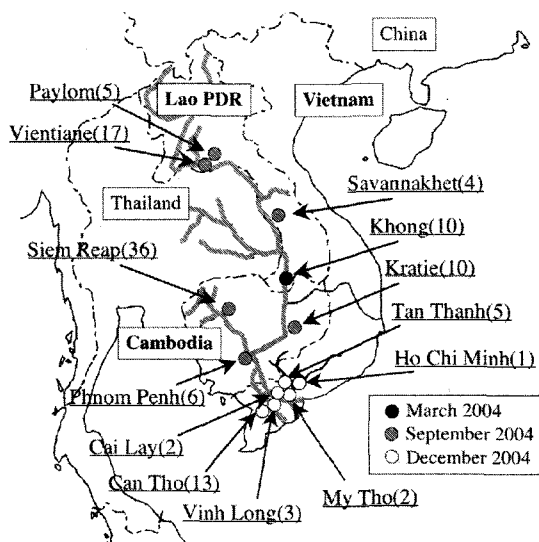


図1 調査地点 (括弧内の数字はサンプル数を表す)

2.2 調査方法

上記の調査地点において、飲料水の水源とその処理方法、雨季と乾季による水利用の違い等に注意しながら、水利用の状況を直接現地の住民や保健行政の専門家にインタビューした。インタビューは対面形式で行い、家族構成や収入に偏りが出ないように各調査地点あたり数〜十世帯を対象に行った。また、河川水、用水路水、雨水、井戸水、水道水、ボトル水等の水環境を対象に、微生物汚染状況を調査した。図1に示すように、1地点あたり1〜36サンプル、合計115サンプルを採水した (詳細は表2〜4を参照)。これらサンプルの採水には、テストパック (アズワン, Japan) を用いた (ボトル水だけはボトルに入れたまま持ち帰った)。河川水については、人のアクセスを考慮し、岸から採水した。

糞便由来の細菌汚染の指標として、大腸菌群と黄色ブドウ球菌 (*Staphylococcus aureus*) をそれぞれ、テストペーパー (Shibata, Japan) による培養法で検出した。また、大腸菌群よりも糞便汚染に関する指標性が高い大腸菌 (*Escherichia coli*) についても、特定酵素基質培地 colitagTM (ENTEST JAPAN) を用いたMPN法により、定量検出を行った。

一方、水環境からの病原ウイルス (ノロウイルス) の検出も試みた。サンプル50〜1000mL を直径47mmの陽電荷フィルター (AMF, Cuno Div., Meriden, USA) を用いてろ過した。ろ過には、滅菌済みのシリンジ (TERUMO, Japan) とフィルターホルダー (MILLIPORE, USA) を用いた。ろ過後のフィルターは、滅菌済みのサンプルバツ

グ (Fisher Scientific, USA) に入れ密封した後、暗条件かつ湿潤状態で輸送し、できるだけウイルスが不活化しないように注意した。実験室に持ち帰ったフィルターを炭酸緩衝液で洗浄し、ウイルスを誘出した⁹⁾。誘出液中のウイルスを、ポリエチレングリコールを用いた吸着・沈殿処理 (PEG沈) によって濃縮した。この濃縮液に含まれるノロウイルス遺伝子を、植木ら(2004)⁹⁾の方法に従い定量検出した。すなわち、逆転写反応により濃縮液中のウイルスRNAからcDNAを作成した後、ノロウイルス遺伝子のポリメラーゼ領域の一部からカプシド領域の一部にかけての領域を増幅するように設計したプライマーおよびプローブ⁹⁾を用いたReal-time PCR法により、このcDNAを定量検出した。それと同時に、濃縮液中のウイルス遺伝子のカプシド領域をPCR法とクローニングによって増幅させ、DNAシーケンサー (ABI PRISM310, Applied Biosystems, USA) を用いて、遺伝子配列 (243塩基) の解析を行った⁹⁾。

3. 結果および考察

3.1 水利用の状況

調査を行った各地域において飲料水として主に利用されている水源を表1にまとめた。

表1 各調査地点における飲料水源

Country	City or Village	Area	飲料水源*				
			河川水	雨水	井戸水	水道水**	ボトル水
Lao P.D.R.	Vientiane	Urban	×	×	×	×	○
	Paylom	Rural	×	×	○	×	○(Rich)
	Savannakhet	Rural	○(Dry)	○(Rainy)	○	×	×
	Khong	Rural	○	×	×	×	×
Cambodia	Siem Reap	Rural	○(Dry)	○(Rainy)	×	×	×
	Kratie	Rural	○(Dry)	○(Rainy)	×	×	×
	Phnom Penh	Urban	×	×	×	○	○
Vietnam	Tan Thanh, Cai Lay	Rural	○(Dry)	○(Rainy)	×	×	×
	My Tho, Vinh Long, Can Tho	Urban	×	×	×	○	○(Rich)

*: ○はインタビューした家庭で飲料水源として利用されていた水源, ×は利用されなかった水源である。()内の注釈の意味は次の通りである。Dry=乾季に利用, Rainy=雨季に利用, Rich=比較的裕福な家庭で利用

** : 浄水場で処理を受けた後、水道水として供給されている水を指す。

(1) 各調査地点における水利用

・Vientiane : ラオスの首都。人口65万人(2003年)⁷⁾で都市部には上水道が整備されているが、下水道は未整備。人々の水道水に対する信用度は低いために、一般に水道水は飲用されておらず、人々はボトル水を購入して飲んでいる。

・Paylom : Vientiane近郊の人口約1500人(1999年)⁸⁾の村落。上水道は整備されていない。比較的裕福な村落であり、多くの家庭では、飲料水としてボトル水を購入している。一部の貧しい家庭では、井戸水を飲用している。

・Savannakhet : ラオス中部のSavannakhet県にある村落。上水道は未整備。河川水または井戸水を生活に利用している。一部では、雨水も飲用されている。

・Khong : ラオス南部のChampasak県にある村落。上



図2 生活排水と交通のための水路 (Can Tho)

水道は未整備。乾季は煮沸した河川水を、雨季は雨水を飲んでいる。また、河川から遠い地域に住む人々は、井戸水を利用しており、これは1994年のJICAの調査報告⁹⁾と同様な傾向であった。

- ・ Phnom Penh : カンボジアの首都。人口約100万人(1998年)¹⁰⁾の都市。Vientianeと同様、都市部では上水道が整備され、下水道も一部普及している。飲料水はボトル水か水道水を煮沸したものを利用している。

- ・ Kratie : Phnom Penhからメコン川沿いに約200km上流にある都市で、人口約26万人(1998年)¹⁰⁾。調査を行った近郊の村落では上水道はなく、雨水や河川水が飲用されている。河川水については、ミョウバンを用いた簡単な凝集沈殿処理により浄化されている例もある。井戸も多数みられるが、飲用にはほとんど用いられていない。

- ・ Siem Reap : トンレサップ湖に面した地域。人口約70万人(1998年)¹⁰⁾。ここでも近郊の村落で調査を行ったが、Kratieと同様に雨水と河川水が飲用されている。

- ・ Ho Chi Minh : 前述の通り、人口約600万人(2004年)⁴⁾のベトナム最大の都市。中心部では下水道はあるが、処理場はまだ整備されていないため、ヘドロが堆積している用水路(生活排水路)がいくつかある。多くの人はボトル水を飲んでいる。

- ・ メコンデルタ都市域 : 河川を水源とした水道水が中心部では供給されている。人々は、ボトル水か水道水を煮沸したものを飲用している。郊外では、瓶に貯めた雨水や、井戸や用水路(図2)の水をアルミ系凝集剤で処理し、煮沸して飲んでいる。

- ・ メコンデルタ非都市域 : 上水道は未整備で、雨水を飲料水と食事に、井戸や用水路の水をそれ以外の用途に利用する。乾季には、雨季の間に水瓶に溜めた雨水(図3)を飲用するが、水瓶が空になると、ボトル水を購入して飲んだり、用水路(灌漑用水路)の水をミョウバンなどで凝集処理し、煮沸して飲用したりする。

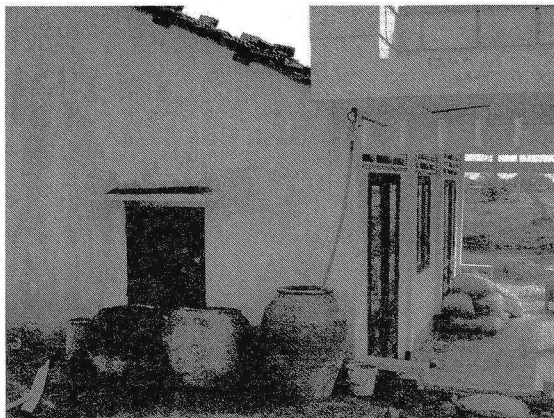


図3 雨水を溜める水瓶 (Tan Thanh, Sample V02)

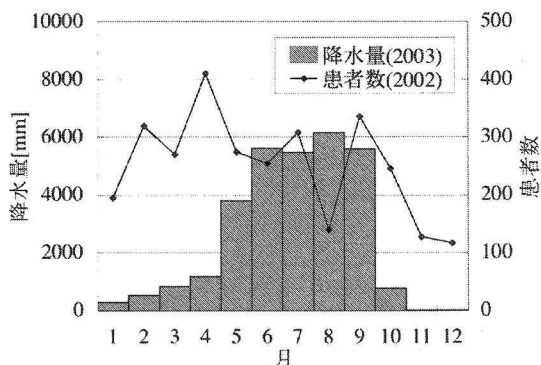


図4 ラオスにおける月別降水量と水系感染の疑いがある感染症患者数

(2) 雨季と乾季における水利用の違い

調査を行った都市域では、雨季と乾季で飲料水の種類に違いは見られなかった。

非都市域では、雨季は雨水への依存度が高いが、乾季は比較的裕福な家庭では、雨季の間に多数の大きな水瓶に集めた雨水を飲んだり、ボトル水を購入したりするため、井戸を持っていたとしても飲料水には利用していなかった。これは、中村ら(1997)¹¹⁾の調査報告と同様な傾向であった。貧しく大きな水瓶を持たない家庭では、いずれ雨水を使い果たしてしまい、雨水よりも水質の劣る河川水や用水路水、井戸水を利用ようになる。図4には、ラオスの月別の降水量(2003年)⁷⁾と水系感染の疑いがある感染症(コレラ、赤痢、チフス、およびA型肝炎)の患者数(2002年)¹²⁾の推移を示した。雨水の貯蔵量が少なくなる乾季の終盤において、上述の水利用の変化に対応して患者数が増加しているように見える。ただし、この1年分のデータのみでは確証を得るには十分でなく、今後同様のデータを蓄積していく必要がある。

3.2 水環境の細菌汚染

表2, 3, 4には、各調査地域において採水されたサンプルの詳細と大腸菌群、*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*の検出結果を示した。各地域での汚染状況について、以下に考察する。

(1) ラオスの水環境における微生物汚染

Vientianeを流れるメコン川 (Sample L11～L16) からは、常に*E.coli* (240～2400MPN/100mL) が検出された。Sample L11～L14からは、*S.aureus*も検出され、下水を含む都市排水による糞便汚染が見られた。Vientianeの浄水場では、大腸菌群数200CFU/mL以上の河川水 (Sample L17) を水源としていたが、急速ろ過方式により十分な浄水処理が行われており、塩素消毒後の処理水 (Sample L19) からは大腸菌群が検出されなかった。また、配水後の水道水 (給水栓水, Sample L20) からも大腸菌群は検出されず、配水中での再汚染も見られなかった。一方で、

表2 ラオスの種々な水環境における指標微生物検出結果

Sample No.	調査地点	種類	詳細	大腸菌群数 [CFU/mL]	<i>S. aureus</i> [CFU/mL]	<i>E. coli</i> [MPN/100mL]
L01	Khong	河川水	メコン川, Khong Tai村で採水	NM*	NM	NM
L02	Khong	河川水	メコン川, Kongkaeng村で採水	6	1	NM
L03	Khong	河川水	メコン川, Khon Thai村で採水	15	<1	NM
L04	Khong	飲料水	Thamakheb村, 河川水を煮沸したもの	39	<1	NM
L05	Khong	飲料水	Thamakheb村, 河川水を煮沸したもの	<1	<1	NM
L06	Khong	飲料水	Thakham村, 河川水を煮沸したもの	148	<1	NM
L07	Khong	河川水	メコン川, Khongphaphengの滝で採水	31	<1	NM
L08	Khong	水道水	ゲストハウスの水道水, 井戸水を汲み上げたもの	21	<1	NM
L09	Khong	ボトル水	井戸水を水源に製造	99	<1	NM
L10	Khong	井戸水	村役場の井戸, 飲用されるかは不明	NM	NM	NM
L11	Vientiane	河川水	メコン川, Chang島 (中州) で採水	198	4	>2.4x10 ³
L12	Vientiane	河川水	メコン川, Chang島 (中州) で採水	114	1	>2.4x10 ³
L13	Vientiane	河川水	メコン川, Chang島 (中州) で採水	82	10	460
L14	Vientiane	河川水	メコン川, Vientiane市の下流地点で採水	124	4	1100
L15	Vientiane	河川水	メコン川, Vientiane市内で採水	28	<1	240
L16	Vientiane	河川水	メコン川, Vientiane市内で採水	93	<1	>2.4x10 ³
L17	Vientiane	水道原水	急速ろ過方式の浄水場の原水 (河川水)	>200	<1	1100
L18	Vientiane	処理水	L18と同じ浄水場で塩素消毒前に採水	14	<1	43
L19	Vientiane	処理水	L18と同じ浄水場で塩素消毒後に採水	<1	<1	0
L20	Vientiane	水道水	L18と同じ浄水場からの給水, Vientiane市内の給水栓水	<1	<1	0
L21	Vientiane	ボトル水	原水は水道水で、活性炭、逆浸透膜、UVにより処理	20	<1	0
L22	Vientiane	ボトル水	L21と同じメーカーのもの	146	<1	0
L23	Vientiane	ボトル水	L21と同じメーカーのもの	149	<1	0
L24	Vientiane	井戸水	水道水が供給されないときにボトル水の水源として利用	64	<1	460
L25	Vientiane	ボトル水	ラオスで最も有名なブランドのボトル水	<1	<1	0
L26	Vientiane	灌漑用水	ごみ投棄場所付近の灌漑用水路の水	79	<1	460
L27	Vientiane	灌漑用水	ごみ投棄場所付近の灌漑用水路の水	180	14	240
L28	Paylom	ボトル水	家庭で普段飲用しているボトル水	<1	<1	0
L29	Paylom	ボトル水	家庭で普段飲用しているボトル水	167	<1	39
L30	Paylom	ボトル水	家庭で普段飲用しているボトル水	>200	45	9.2
L31	Paylom	ボトル水	家庭で普段飲用しているボトル水	>200	160	460
L32	Paylom	ボトル水	家庭で普段飲用しているボトル水	42	<1	3.6
L33	Paylom	井戸水	以前は飲用していた井戸水	39	<1	460
L34	Savannakhet	水道水	河川水を汲み上げたもの, 飲用時には煮沸	17	<1	39
L35	Savannakhet	井戸水	飲用されるかは不明	27	<1	0
L36	Savannakhet	水道水	河川水を汲み上げたもの, 飲用時には煮沸	>200	<1	43
L37	Savannakhet	井戸水	飲用されるかは不明	103	>200	>2.4x10 ³

*NM: Not Measured

表3 カンボジアの種々な水環境における指標微生物検出結果

Sample No.	調査地点	種類	詳細	大腸菌群数 [CFU/mL]	<i>S. aureus</i> [CFU/mL]	<i>E. coli</i>
C01	Siem Reap	河川水	Tonle Sap川	47	<1	-
C02	Siem Reap	河川水	Tonle Sap川	98	<1	+
C03	Siem Reap	河川水	Tonle Sap川	82	<1	-
C04	Siem Reap	河川水	Tonle Sap川	5	<1	-
C05	Siem Reap	河川水	Tonle Sap川	54	<1	+
C06	Siem Reap	河川水	Tonle Sap川	4	<1	-
C07	Siem Reap	河川水	Tonle Sap川の船着き場で採水	16	<1	-
C08	Siem Reap	雨水	通常煮沸して飲用される	73	<1	-
C09	Siem Reap	雨水	通常煮沸して飲用される	6	<1	-
C10	Siem Reap	井戸水	浅井戸で河川水 (Tonle Sap川) が混じっている	102	<1	-
C11	Siem Reap	河川水	Tonle Sap川、汚水処理タンクからの漏水が流入する河川	>200	47	+
C12	Siem Reap	飲料水	水源は不明	16	<1	NM*
C13	Siem Reap	飲料水	水源は不明	56	2	NM
C14	Siem Reap	飲料水	水源は不明	>200	>50	NM
C15	Siem Reap	飲料水	水源は不明	10	<1	NM
C16	Siem Reap	飲料水	水源は不明	>200	>120	NM
C17	Siem Reap	飲料水	水源は不明	69	<1	NM
C18	Siem Reap	飲料水	水源は不明	20	<1	NM
C19	Siem Reap	飲料水	水源は不明	83	<1	NM
C20	Siem Reap	飲料水	水源は不明	>200	>70	NM
C21	Siem Reap	飲料水	水源は不明	28	40	NM
C22	Siem Reap	飲料水	水源は不明	>200	<1	NM
C23	Siem Reap	飲料水	水源は不明	91	<1	NM
C24	Siem Reap	飲料水	水源は不明	171	>190	NM
C25	Siem Reap	飲料水	水源は不明	118	<1	NM
C26	Siem Reap	飲料水	水源は不明	66	<1	NM
C27	Siem Reap	飲料水	水源は不明	156	<1	NM
C28	Siem Reap	飲料水	水源は不明	103	<1	NM
C29	Siem Reap	飲料水	水源は不明	<1	<1	NM
C30	Siem Reap	飲料水	水源は不明	112	1	NM
C31	Siem Reap	飲料水	水源は不明	>200	<1	NM
C32	Siem Reap	井戸水	市内の井戸水、一般に飲用されない	33	<1	NM
C33	Siem Reap	井戸水	市内の井戸水、一般に飲用されない	57	<1	NM
C34	Siem Reap	井戸水	市内の井戸水、一般に飲用されない	<1	<1	NM
C35	Siem Reap	雨水	Angkor付近で採水	13	NM	NM
C36	Siem Reap	貯水池水	主に灌漑に利用	65	<1	NM
C37	Kratie	河川水	メコン川	88	10	+
C38	Kratie	河川水	メコン川	121	<1	+
C39	Kratie	河川水	メコン川	67	<1	+
C40	Kratie	水道水	ゲストハウスの水道水	1	<1	-
C41	Kratie	飲料水	アルミ系凝集剤 (ミョウバン) で処理した河川水	21	<1	-
C42	Kratie	飲料水	河川水と雨水を混合、凝集処理	66	<1	+
C43	Kratie	雨水	煮沸したもの、通常飲料水として利用	0	<1	-
C44	Kratie	井戸水	異臭のため飲用されない	75	<1	+
C45	Kratie	井戸水	異臭のため飲用されない	16	<1	+
C46	Kratie	井戸水	異臭のため飲用されない	49	<1	-
C47	Phnom Penh	水道水	煮沸していない水道水	<1	<1	-
C48	Phnom Penh	水道水	煮沸したもの、通常飲料水として利用	<1	<1	-
C49	Phnom Penh	河川水	Tonle Sap川	77	<1	+
C50	Phnom Penh	河川水	メコン川	93	<1	-
C51	Phnom Penh	河川水	メコン川	85	<1	+
C52	Phnom Penh	河川水	メコン川	111	<1	+

*NM: Not Measured

†: “+”は、サンプル10mL中に*E. coli*が検出されたことを示す。

表4 ベトナムの種々な水環境における指標微生物検出結果

Sample No.	調査地点	種類	詳細	大腸菌群数 [CFU/mL]	<i>S. aureus</i> [CFU/mL]	<i>E. coli</i> [MPN/100mL]
V01	Tan Thanh	水道水	井戸水を汲み上げたもの、通常飲用されない	<1	<1	0
V02	Tan Thanh	雨水	通常煮沸せずに飲用される	3	<1	0
V03	Tan Thanh	用水路水	農業用水路の水、乾季に飲用することもある	7	<1	0
V04	Tan Thanh	飲料水	雨水を煮沸したもの	71	<1	0
V05	Tan Thanh	用水路水	生活排水路、交通用水路を兼ねた水路	58	<1	4.3x10 ³
V06	Cai Lay	飲料水	家庭用浄水器の水、水道水を利用	83	<1	0
V07	Cai Lay	水道水	V06の浄水器に入る前の水道水	<1	<1	0
V08	Vinh Long	水道水	煮沸してから飲用	<1	<1	0
V09	Vinh Long	用水路水	生活排水路、交通用水路を兼ねた水路	186	<1	9.3x10 ³
V10	Vinh Long	河川水	浄水場の取水口で採水	84	<1	>2.4x10 ³
V11	Can Tho	ボトル水		<1	<1	0
V12	Can Tho	ボトル水		<1	<1	0
V13	Can Tho	用水路水	Floating market（水上市場）で採水	75	<1	360
V14	Can Tho	井戸水	飲用されない	<1	<1	0
V15	Can Tho	ボトル水	家庭で使用中のボトル水	<1	<1	0
V16	Can Tho	井戸水	雨季の間に溜めた雨水がなくなったら飲用	<1	<1	0
V17	Can Tho	雨水	煮沸せずに飲用	13	<1	9.2
V18	Can Tho	雨水	煮沸せずに飲用	14	<1	93
V19	Can Tho	処理水	急速ろ過方式の浄水場の塩素消毒後	<1	<1	0
V20	Can Tho	源水	急速ろ過方式の浄水場の取水する河川水	>200	<1	>2.4x10 ³
V21	Can Tho	ボトル水		<1	<1	0
V22	Can Tho	水道水	簡易フィルター前の水道水	1	<1	0
V23	Can Tho	水道水	簡易フィルター後の水道水	<1	<1	9.2
V24	My Tho	水道水	煮沸してから飲用	4	<1	0
V25	My Tho	氷	レストランで使用している氷	18	<1	23
V26	Ho Chi Minh	用水路水	Ho Chi Minhで汚染が激しい生活排水路	>2.0x10 ⁶	6	4.6x10 ⁶

一般に飲用されているボトル水（Sample L21～L23）からは、大腸菌群が検出され、ボトル水製造時の衛生管理に問題がある。このボトル水を製造しているメーカーでは、活性炭、逆浸透膜、UVと高度な処理を行っているにもかかわらず、製品のボトル水からは大腸菌群が検出された。2005年4月に現地で行った追加調査では、使い捨てタイプ（容積500mL～1L）のボトル水からは検出されない大腸菌群が、回収して洗浄後、再使用するタイプ（容積16～20L）のボトル水からは検出された。このことより、ボトル水の大腸菌による汚染は再利用されたボトルが汚染源である可能性が高く、回収したボトルの洗浄（常温の水道水による高压洗浄か職員がブラシにより手洗い）に問題がある。

Ban Paylomでは、ボトル水から高い濃度で大腸菌群が検出された（Sample L29～L32）。このうちSample L30とL31のボトル水からは、*S.aureus*と*E.coli*も検出された。この村落では、数年前まで、井戸水が主要な飲料水源として用いられていた。この結果に基づいて考察すると、以前のように井戸水を飲用する方が、ボトル水を飲用するよりも感染リスクが低いと言える。

Savannakhetでは、河川水を直接ポンプアップしたものを水道水としていた（Sample L34, L36）。後述するが、その水からはノロウイルスも検出された。また、Sample L37の井戸では、*S.aureus* (>200CFU/mL) と*E.coli* (>2400MPN/100mL) も高い濃度で検出されており、糞便汚染が深刻であった。

Khongでは、煮沸した河川水を飲用していたが、この水からは、河川水（Sample L01～L03）よりも高い濃度で大腸菌群が検出された（Sample L04～06）。煮沸後貯蔵している間に交叉汚染（cross-contamination）された可能性が高い。この飲料水からもノロウイルスが検出された。

(2) カンボジアの水環境における微生物汚染

Siem Reapにおいては、Sample C11の河川水からは、大腸菌群 ($>200\text{CFU/mL}$) と *S.aureus* (47CFU/mL) が周辺の河川水 (Sample C01~C07) よりも高い濃度で検出された。これは、汚水処理タンクからの漏水が原因であるが、漏水を起こしていたタンクには何も処置がされていなかった。また、住民が利用している飲料水 (Sample C12~C31) の大腸菌群数が、周辺の水環境の大腸菌群数よりも高かった。これも、Khongのケースと同様に、貯蔵中の交叉汚染が原因であろう。

Kratieの一部の地域では、河川水を簡易な凝集沈殿処理で処理した後に飲用されていたが (Sample C41, C42), 大腸菌群数がそれぞれ 21CFU/mL , 66CFU/mL で検出されており、その微生物除去効果は疑わしい。

Phnom Penhにおいては、Vientianeと同様に、水道水には大腸菌群が存在せず、浄水場における処理状況が良好である上、配水中での再汚染も見られなかった (Sample C47)。水道水をさらに煮沸してから飲むのが一般的であるため、飲料水の微生物汚染は良好な状況である。

カンボジアの井戸水 (Sample C32~34, 44~46) は、異臭 (主に金気臭さ) が原因で一般に飲用されていなかった。2001年のESCAP, UNICEF, WHOの専門家グループ会議¹³⁾では、カンボジアにおける地下水のヒ素汚染が報告されているため、井戸の水を飲料水として利用することは同様に避けるのが望ましい。

(3) ベトナムの水環境における微生物汚染

Tan Thanhのインタビューを行った家庭では、雨水を溜めて飲料水としていた。大人はこれを直接飲み (Sample V02)、子供は煮沸したものを飲むようにしていたが (Sample V04)、大腸菌群数を見ると、Sample V04は用水路 (Sample V03, V05) よりも高かった。煮沸後の水を貯蔵する容器が汚染されているなど、貯蔵中に交叉汚染が起こっている可能性が高い (図5)。

Cai LayにおいてもTan Thanhと同様に飲料水が汚染されていた。サンプリングを行った家庭では、水道水を家庭用浄水器に一時貯めて飲用していたが、その管理が不十分であるため、水道水 (Sample V07) からは検出されなかった大腸菌群が、この浄水器の水 (Sample V06) からは 83CFU/mL という河川水や用水路水と同等の濃度で検出された。

Can Thoにおいては、Vientianeと同様に、河川水を水源として急速ろ過方式による浄水処理を行い水道が供給されており、処理状況は良好で、水道水からは大腸菌群が検出されなかった (Sample V19)。Sample V17とV18の飲料水は、Can Tho郊外の村落の家庭で雨水を貯めたもので、住民が直接飲用しているものだが、この水からは *E.coli* (濃度: $93\text{MPN}/100\text{mL}$) が検出され、Tan Thanhのケースと同様に水瓶が使用中に糞便汚染されている可能性が非常に高かった。

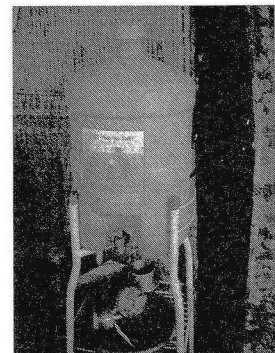


図5 飲料水用のサーバー
(Tan Thanh, Sample V04)

(4) 飲料水の感染リスク

表5には、政府機関が公表している統計データ¹²⁾から、Vientiane, Savannakhet, およびKhongがあるChanpasakにおけるコレラの罹患率を算出した結果を示した。先進国では、水道水起因の下痢症に関する許容リスクとして年間 10^{-4} の値が一般的に採用されているが¹⁴⁾、これと比較すると、Savannakhetを除く二地域でこの数値を上回っていた。表6には、各調査地点の主な飲料水源における大腸菌群数の平均値をそれぞれ示した。大腸菌群数には自然由来の細菌が含まれるため、その糞便汚染指標としての有効性は、近年議論の対象となっている。しかし、大腸菌群として検出された細菌が糞便由来であることを否定できない点、また水道水の塩素消毒や煮沸処理による病原細菌の不活化効果を把握する上では有効な指標と言える点から、本研究ではリスク評価の目安とした。つ

表5 ラオスの調査地域におけるコレラの罹患率と飲料水中のコレラ菌数の予測値

Country	City	A.人口[人] (2003年) ⁷⁾	B.患者数[人/年] (2002年) ¹²⁾	罹患率 (=B/A)	コレラ菌数の 予測値[個/mL]
Lao P.D.R.	Vientiane	650,600	280	4.3×10^{-4}	3.8×10^{-8}
	Savannakhet	811,400	9	1.1×10^{-5}	8.6×10^{-10}
	Chanpasak	622,400	92	1.5×10^{-4}	1.3×10^{-8}

表6 各調査地点における飲料水源の大腸菌群数の平均値

Country	City or Village	Area	大腸菌群数[CFU/mL]				
			河川水	雨水	井戸水	水道水†	ボトル水
Lao P.D.R.	Vientiane	Urban					79
	Paylom	Rural			39		122
	Savannakhet	Rural	109	NM*	65		
	Khong	Rural	17				
Cambodia	Siem Reap	Rural	63	31			
	Kratie	Rural	92	0			
	Phnom Penh	Urban				0	NM*
Vietnam	Tan Thanh, Cai Lay	Rural	33	3			
	My Tho, Vinh Long, Can Tho	Urban	84			1	0

*: Not measured

†: 浄水場で処理を受けた後、水道水として供給されている水を指す。

まり、飲料水中における大腸菌群数が高い場合に、糞便中の細菌が引き起こすコレラや赤痢などの水系感染症のリスクが高いと判断した。

よって、VientianeとPaylomで見られた製造時や購入後の衛生管理状態が不十分なボトル水（それぞれ79CFU/mL、122CFU/mL）に比較して、Khongの煮沸した河川水（17CFU/mL）やKratieやVietnam非都市域の雨水（0～3CFU/mL）、およびPhnom PenhやVietnam都市域の水道水（0～1CFU/mL）を利用する方が感染リスクは低いことが予想される（表6）。

コレラ菌の感染能力は株や型によらず一定で、感染源をすべて飲料水（1日の水摂取量を2L）と仮定し、表5のコレラの罹患率から（1）式のベータ分布感染確率モデルを用いて、飲料水中のコレラ菌の濃度を逆算した。また、このとき、人から人への感染症の伝播は無視した。

$$P(D) = 1 - \left[1 + \left(\frac{D}{\beta} \right) \right]^{-\alpha} \quad (1)$$

ここで、 $P(D)$: 1日の飲料水摂取によるコレラに感染する確率、 D : コレラの曝露量[個]、 α 、 β : パラメータ（ $\alpha=0.25$ 、 $\beta=16.2$ ）¹⁹⁾である。コレラの曝露量は、飲料水のコレラ菌濃度に1日の水摂取量（2L）を乗じて求められる。

その結果、ラオスにおける飲料水中のコレラ菌の濃度は、 10^{-10} から 10^{-8} 個/mLと求まった。現地調査によって検出されたラオスの飲料水における大腸菌群数は、 10^1 から 10^2 CFU/mLのオーダーであるため（表6）、飲料水中のコレラ菌数と大腸菌群数の比率は、 $1:10^9$ から $1:10^{12}$ と算出される。このようにコレラ菌は、大腸菌群に比べて非常に低い濃度で存在しているため、その検出は困難であるが、この比率を目安に大腸菌群数からコレラ菌数を把握することで、感染症リスクを大まかに評価することができる。ただし、ここで議論されるリスクは、上述の仮定に関する不確定要素や、発症しても医療機関を受診しない人があるなどのサーベイランスの不確かさを含んでいることから、リスクの参考値として考えるべきである。

3.3 水環境のウイルス汚染

(1) ウイルスの検出状況

表7には、表2, 3, 4に示したサンプル中でノロウイルスが検出されたサンプルについて、ウイルス濃度と大腸菌群、*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*の各濃度をまとめて示した。Khongにおいて採られた10種類のサンプルのうち2つ、そして、Kratie, Savannakhet, Ho Chi Minhで採られたサンプルのうちそれぞれ1つずつからノロウイルスが検出された。この5つのサンプルからは、糞便汚染の指標である大腸菌群や*E. coli*が毎回検出されていた。特にHo Chi Minh市の用水路水 (Sample V26) は、大腸菌群数と*E. coli*が最も高い濃度であった。

表7 ノロウイルスが検出されたサンプルの指標微生物検出結果

Sample No.	調査地点	水源	ろ過量 [mL]	Norovirus [copies/mL] GI type GII type	大腸菌群数 [CFU/mL]	<i>S. aureus</i> [CFU/mL]	<i>E. coli</i> [MPN/100mL]
L04	Khong	飲料水	1000	16	39	<1	NM*
L09	Khong	ボトル水	880	18	99	<1	NM
L34	Savannakhet	水道水	180	24	17	<1	39
C38	Kratie	河川水	210	0.12	121	<1	+
V26	Ho Chi Minh	用水路水	250	0.06	>2.0x10 ⁶	6	4.6x10 ⁶

*: Not measured

+: "+" は、サンプル10mL中に *E. coli* が検出されたことを示す。

Khongにおいて採られたSample L04は、河川水を煮沸して貯蔵していた飲料水（濃度：16copies/mL）であり、もう一つのL09は、観光客向けに販売されていたボトル水（濃度：18copies/mL）で、実際に飲用されている水であった。この2つのサンプルから検出されたノロウイルスの遺伝子配列は同一であり（Homology>99%）、GI系に分類される株であった。図6は、検出されたノロウイルス（Sample L03, L04, L09）遺伝子のカプシド領域の塩基配列をもとに描いた系統樹である。Sample L03からは、Real-time PCR法ではノロウイルスが検出されなかったが（表6）、PCRとクローニングの増幅後には検出された。シーケンスの結果から、Sample L03とL04、およびL09には、それぞれ2, 3株のノロウイルスが検出された。これらの相同性は非常に高く、すべての株が407Chiba株に近い相同性を示した。Sample L03とL04、およびL09は、それぞれKhong島周辺の別な村で採水されたものであることから、ラオス南部のKhong島周辺の水環境が広域で同じ株のノロウイルスによって汚染されていたことがわかった。

また、Savannakhetにおいて採られたSample L34は、地域の住民が飲用する河川水（濃度：24copies/mL）であり、こちらはGII系に分類される株であった。ノロウイルスの最小感染単位は10PCR-detectable unitsと言われており¹⁰⁾、これと比較すると、Sample L04とL09、そしてL34は高い濃度で汚染されていたことが分かる。

(2) ノロウイルスによる感染リスク

現在、信頼のできるノロウイルスの用量反応モデルは報告されていないが、参考として、煮沸した河川水（Sample L04）とボトル水（Sample L09）および水道水（Sample L34）が、今回検出されたノロウイルスと同じ濃度で、他の腸管系ウイルス（ポリオウイルス、ロタウイルス、A型肝炎ウイルス、アデノウイルス、エコーウイルス、コクサッキーウイルス）によって汚染されていたと仮定し、それらの用量反応モデル¹⁹⁾を用いて感染リスクを算出した。その結果、すべてのウイルスにおいてわずか200mLの摂取で感染確率が90%となった。ノロウイルスの感染能力がこれらのウイルスと同等であると仮定すると、煮沸した河川水（Sample L04）とボトル水（Sample L09）は、現地の人々や観光客に重大な健康被害を与える可能性があると言える。

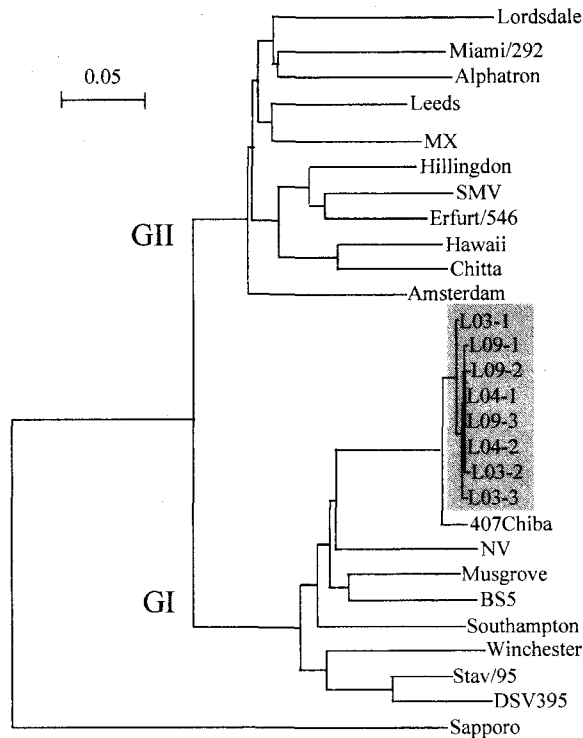


図6 ラオス南部の水環境から検出されたノロウイルス (Sample L03, L04, L09) のカプシド領域の塩基配列をもとに描いた遺伝子系統図 (Gen Bankのaccession numberは、以下の通りである。Lordsdale, X86557; Miami/292, AF414410; Alphantron, AF195847; MX, U22498; Leeds, AJ277608; SMV, U70059; Hillingdon, AJ277607; Erfurt/546, AF427118; Hawaii, U07611; Chitta, AB032758; Amsterdam, AF195848; 407Chiba, AB022679; NV, M87661; Musgrove, AJ277614; BS5, AF09397; Southampton, L07418; Winchester, AJ277609; Stav/95, AF145709; DSV395, U04469; Sapporo, U65427.)

4. 結論

本研究では、メコン流域のラオス、カンボジア、ベトナムにおいて、水利用の状況と水環境の微生物汚染の現状を明らかにした。以下に、結論を示す。

1. 都市域では、季節に関係なくボトル水や煮沸した水道水が一般に飲用されているが、非都市域においては、雨季と乾季、また地域によって飲料水の種類に違いが見られた。非都市域でも比較的裕福な家庭では、雨季に大きな水瓶に溜めた雨水を乾季に飲むことができるが、経済力のない家庭では、雨水を多く貯めることはできず、より水質の劣る河川水や用水路水、井戸水を飲用していた。
2. ラオスの都市域で飲用されているボトル水において、使い捨てタイプのボトル水からは大腸菌群が検出されなかったのに対して、再使用するタイプのボトル水からは検出され、容器からの交叉汚染を受けていることがわかった。このボトル水の大腸菌群数は、煮沸した河川水や一般に飲用されていない水道水よりも高かった。
3. ラオスの政府機関が公表している統計データから算出した水系感染症の罹患率をもとに、コレラ菌の感染能力は株や型によらず一定で、感染源をすべて飲料水であるという仮定のもとで飲料水中のコレラ菌数を予

測した。調査で得た飲料水の大腸菌群数と比較すると、飲料水中のコレラ菌数と大腸菌群数の比率は、 $1:10^9$ から $1:10^{12}$ であった。この比率を目安として、飲料水中の大腸菌群数からコレラ菌による感染リスクを大まかに評価することができる。

4. ラオスのKhongにおいて採水した煮沸後の河川水 (Sample L04) とボトル水 (Sample L09) , およびSavannakhetにおいて採られた水道水 (Sample L34) から、ノロウイルスが感染成立に十分な濃度で検出された。Sample L04とL09中のノロウイルスは同一の株であり、Khong周辺の水環境が同じ株のノロウイルスによって汚染されていたことがわかった。

謝辞

本研究を行うにあたり、ノロウイルスの検出に協力を頂いた宮城県保健環境センター微生物部の植木洋氏に深く謝意を表する。なお本研究は、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)により行われた。

参考文献

- 1) UNFPA: 世界人口白書 2004
- 2) WHO: Homepage: Water Sanitation and Health (http://www.who.int/water_sanitation_health/)
- 3) WHO: The World Health Report 2002. The Office of Publications, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2002
- 4) Ho Chi Minh City: Homepage: HCM City Web (<http://www.hochiminhcity.gov.vn/eng>)
- 5) 厚生省生活衛生局水道環境部監修: 上水試験方法, 日本水道協会, 1993
- 6) Ueki, Y., K. Akiyama, T. Watanabe and T. Omura: Genetic analysis of noroviruses taken from gastroenteritis patients, river water and oysters. *Wat. Sci. Tech.*, 50(1), 51-55, 2004
- 7) National Statistical Center, Committee for Planning and Cooperation, Lao.P.D.R.: Statistical Yearbook 2003
- 8) 中村哲: ラオス人民民主主義共和国ビエンチャン特別区村落における感染性下痢症の研究, 財団法人大山健康財団 年報, No.26, page 37-48, 2000
- 9) JICA / Ministry of Health, Lao.P.D.R.: The Study on Groundwater Development for Champasak and Saravan Provinces in Lao People's Democratic Republic, 1994
- 10) Mekong River Commission: Social Atlas of the Lower Mekong Basin, 2003
- 11) 中村圭三: メコンデルタの生活用水利用に関する実態調査結果: 田淵洋, 松波淳也編: 東南アジアの環境変化, 法政大学比較経済研究所, 法政大学出版局, page 37-48, 2002
- 12) National Center for Laboratory and Epidemiology, Lao.P.D.R.: Epidemiological Surveillance and Response to the Epidemics / Outbreak Unit, 2003
- 13) ESCAP-UNICEF-WHO Expert Group Meeting DV. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific; geology and health: solving the arsenic crisis in the Asia Pacific Region. ESCAP-UNICEF-WHO Expert Group Meeting, Bangkok; May 2-4 2001
- 14) Macler, B.A. and Regli, S: Use of microbial risk assessment in setting US drinking water standards. *International Journal of Food Microbiology* 18, 245-256, 1993
- 15) Haas, C. and J. N. S. Eisenberg: Risk assessment. In: *Water Quality: Guidelines, Standards and Health*. Edited by L. Fewtrell and J. Bartram. Published by IWA Publishing, London, UK. 161-183, 2001
- 16) Percival et al.: *Microbiology of Waterborne Diseases*. Elsevier Academic Press, San Diego, CA, USA, 2004